



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학박사 학위논문

동결농축법을 이용한 폐수처리의 동결거동 및
상용화 시스템 에너지 효율 향상에 관한 연구

A Study on Freezing Behavior in Waste Water Treatment
Using Freeze Concentration and Energy Efficiency
Improvement of Commercial System



한국해양대학교 대학원

기관시스템공학과

김정식

본 논문을 김정식의 공학박사 학위논문으로 인준함.

위원장	공학박사	윤	석	훈	(인)
위	원	공학박사	이	철	재
위	원	공학박사	이	영	호
위	원	공학박사	김	명	환
위	원	공학박사	오	철	(인)

2013년 6월 19일

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Tables	v
List of Figures	ix
Abstract	xii
사용기호	xv
 제 1 장 서 론	 1
1.1 연구의 배경	1
1.2 종래의 연구	11
 제 2 장 수직원관에서 폐수 동결농축에 관한 실험 및 해석	 23
2.1 실험개요	23
2.2 실험장치 및 실험방법	24
2.2.1 실험장치	24
2.2.2 실험방법	28
2.3 염화나트륨수용액 대상 실험결과 및 고찰	30
2.3.1 냉각면 온도에 따른 영향	30
2.3.2 기포 분사방법에 따른 영향	34
2.4 중금속 수용액 대상 실험결과 및 고찰	38
2.4.1 냉각면 온도 및 기포 분사에 따른 영향	38
2.4.2 초기빙층 두께에 따른 영향	42
2.5 동결농축과정의 열교환 모델	46
2.5.1 동결층 성장의 이론적 단순모델	46
2.5.2 이론적 단순모델에서 동결량 및 열량	48
2.5.3 실험결과 동결량 및 열분석	51
2.5.4 동결농축과정의 열교환 모델 구성 및 검증	57
2.6 소결론	61

제 3 장 동결농축폐수처리시스템의 설계	63
3.1 시스템의 구성 및 운전	63
3.1.1 시스템 구성	63
3.1.2 시스템 운전	67
3.2 시스템 해석을 위한 설계 조건	69
3.2.1 기본 설계 데이터	69
3.2.2 주요 설계	72
3.3 시스템 설계에 필요한 열량 계산	76
 제 4 장 동결농축폐수처리시스템의 해석 및 검토	 81
4.1 HYSYS 프로그램의 시스템 해석 조건	82
4.1.1 시스템 해석 적용 상태방정식	83
4.1.2 시스템 주요 Unit Operation 해석 이론	85
4.2 완속운전 및 급속운전시스템 해석	91
4.2.1 시스템 설계부하 및 냉브라인 순환량 계산	93
4.2.2 HYSYS를 이용한 폐수농축처리과정의 시스템 해석	95
4.2.3 기타 펌프의 소요 동력 계산	107
4.2.4 완속운전 및 급속운전시스템 해석 결과	111
4.3 설계처리량에 따른 시스템 해석	114
4.3.1 시스템 설계부하 및 냉브라인 순환량 계산	114
4.3.2 HYSYS를 이용한 폐수농축처리과정의 시스템 해석	116
4.3.3 기타 펌프의 소요 동력 계산	119
4.3.4 설계처리량에 따른 시스템 해석 결과	127
4.4 운전처리량 변화에 따른 시스템 해석	131
4.4.1 운전시간 계산	132
4.4.2 소비전력량 계산	138
4.5 소결론	144

제 5 장 동결농축폐수처리시스템 경제성 분석	147
5.1 경제성 분석을 위한 조건	147
5.2 설계 조건에 따른 시스템 효율 분석	150
5.2.1 완속운전 및 급속운전시스템 에너지 효율 및 일일처리량	150
5.2.2 설계처리량에 따른 시스템의 에너지 효율 및 일일처리량	154
5.2.3 운전처리량에 따른 시스템의 에너지 효율 및 일일처리량	160
5.3 폐수처리방법에 따른 경제성 비교	167
5.3.1 증발농축처리법의 처리비용	167
5.3.2 동결농축폐수처리시스템의 운전비용 및 위탁처리비용	170
5.3.3 폐수처리방법별 처리비용	171
5.4 열회수를 통한 냉난방 적용 시 시스템 효율 분석	174
5.4.1 냉방 적용 시 시스템 효율	174
5.4.2 난방 적용 시 시스템 효율	176
5.4.3 냉난방 모두 적용 시 시스템 효율	177
5.5 동결농축폐수처리시스템의 최종 경제성 분석	178
5.5.1 폐수처리비용의 경제성	178
5.5.2 열회수를 통한 냉난방 적용 시 경제성	179
5.5.3 동결농축폐수처리시스템의 종합적 경제성	181
5.6 소결론	182
 제 6 장 결론	 185
 참고문헌	 189
 부록	 193

감사의 글

List of Tables

Table 1. 1 Per capita water resources by country	2
Table 1. 2 Water quality index by country	2
Table 2. 1 Experimental condition(NaCl)	29
Table 2. 2 Experimental condition(Pb, Cr)	29
Table 2. 3 Condition of simplified model calculation	49
Table 2. 4 Heat and ice amount of simplified model calculation	50
Table 2. 5 Heat and ice amount of test result	51
Table 2. 6 Plane wall condition	53
Table 2. 7 Cylindrical pipe condition	54
Table 2. 8 Heat loss at freeze concentration	55
Table 2. 9 Heat capacity of simplified model and test result	55
Table 2.10 Modeling of freeze concentration process	58
Table 2.11 Condition of brain and heat exchanger	59
Table 2.12 Outlet Condition at each modeling case	59
Table 2.13 Process stream condition at each modeling case	60
Table 2.14 Thickness and salinity of frozen layer at each cooling wall temperature(NaCl aqueous solution)	61
Table 2.15 Thickness and salinity of frozen layer at bubble flow method(1.8 wt% NaCl aqueous solution)	61
Table 2.16 Thickness and Pb & Cr content of frozen layer at flow method(Pb & Cr aqueous solution)	62
Table 2.17 Pb & Cr content of frozen layer at ice-lining thickness (Pb & Cr aqueous solution)	62
Table 3. 1 Basic design data of waste-water FC treatment system	71

Table 3. 2	Number of cooling tube and amount of ice-lining at design capacity	73
Table 3. 3	Operation condition of refrigeration system	75
Table 3. 4	Operation procedure of waste-water FC treatment system ..	75
Table 3. 5	Freezing heat of ice-lining(Q_{if}) at non-precooling	77
Table 3. 6	Freezing heat of ice-lining(Q_{ilf}) at precooling	78
Table 3. 7	Freezing heat of waste-water treatment(Q_{wuf})	79
Table 3. 8	Cooling heat of injection air at design capacity(Q_{ir})	80
Table 4. 1	Design heat capacity and cold brain flow rate	94
Table 4. 2	Operation condition of refrigeration cycle	100
Table 4. 3	Condition of warm brain cooling pipe system	100
Table 4. 4	Condition of cold brain circulation pipe system	101
Table 4. 5	Process stream condition at non-precooling system	103
Table 4. 6	Process stream condition at precooling system	105
Table 4. 7	Condition of short-term operation pump	109
Table 4. 8	Process stream condition of short-term operation pump	110
Table 4. 9	Electric power consumption for the application of precooling	111
Table 4.10	Operation time of precooling and non-precooling system ...	113
Table 4.11	Design heat capacity and cold brain flow rate	115
Table 4.12	System parameters for modeling of waste-water FC process	117
Table 4.13	Injection air flow of waste-water FC system	117
Table 4.14	Result of waste-water FC system analysis	118
Table 4.15	Condition of fresh water discharge pump	120
Table 4.16	Process stream condition of fresh water discharge pump ...	121
Table 4.17	Condition of waste-water discharge pump	123
Table 4.18	Process stream condition of waste-water discharge pump ..	124

Table 4.19	Condition of warm brain supply pump	125
Table 4.20	Process stream condition of warm brain supply pump	126
Table 4.21	Electric power consumption of system at design capacity ..	128
Table 4.22	Operation time at design capacity	129
Table 4.23	Amount and thickness of ice layer per cooling tube	131
Table 4.24	Fresh water temperature after precooling	133
Table 4.25	Freezing time of ice-lining(ρ)	134
Table 4.26	Operation time of concentrated waste-water discharge pump	135
Table 4.27	Operation time at operation treatment capacity	136
Table 4.28	Electric power consumption of refrigerator at operation treatment capacity	138
Table 4.29	Electric power consumption of short-term operation pump at operation treatment capacity	140
Table 4.30	Power consumption of system at operation treatment capacity	142
Table 4.31	Power consumption and operation time for the application of precooling	144
Table 4.32	Power consumption and operation time at design treatment capacity	144
Table 4.33	Power consumption and operation time at operation treatment capacity	145
Table 5. 1	Rate of electric power consumption for the application of precooling	151
Table 5. 2	Daily treatment capacity of waste-water FC system	153
Table 5. 3	Rate of electric power consumption at design treatment capacity	155
Table 5. 4	Consumption of evaporator heat in waste-water FC treatment process	156

Table 5. 5	Daily treatment capacity at design capacity	158
Table 5. 6	Rate of electric power consumption at operation treatment capacity	161
Table 5. 7	Daily treatment capacity at operation treatment capacity ..	164
Table 5. 8	Heat capacity of evaporative concentration treatment	168
Table 5. 9	Cost of evaporative concentration at heat source	169
Table 5.10	Cost of freeze concentration and entrustment treatment ...	170
Table 5.11	Cost comparison of waste-water treatment method at evaporative concentration using electricity	171
Table 5.12	Cost comparison of waste-water treatment method at evaporative concentration using diesel oil	172
Table 5.13	Cost comparison of waste-water treatment method at evaporative concentration using LNG	172
Table 5.14	Daily electricity cost of waste-water FC treatment system ..	179
Table 5.15	Mean charge in summer season for air-conditioning	180
Table 5.16	Mean charge in winter season for heating	180
Table 5.17	Cost reduction of HVAC in work place	180
Table 5.18	Total economy benefit of waste-water FC system	181
Table 5.19	Rate of electric power consumption and daily treatment capacity for the application of precooling	182
Table 5.20	Rate of electric power consumption and daily treatment capacity at design treatment capacity	182
Table 5.21	Rate of electric power consumption and daily treatment capacity at operation treatment capacity	183
Table 6.1	Salinity of frozen layer at cooling wall temperature	185
Table 6.2	Pb & Cr content of frozen layer at ice-lining thickness	186

List of Figures

Fig. 1. 1	Current state of waste-water discharge	4
Fig. 1. 2	Current state of waste-water discharge company	4
Fig. 1. 3	Current state of waste-water treatment method	5
Fig. 1. 4	Multi-stage freeze concentration(FC) system (GEA)	8
Fig. 1. 5	Waste-water FC system with incineration(GEA)	8
Fig. 1. 6	Model of ice layer growth at PFC	9
Fig. 1. 7	Model of water freezing behavior	13
Fig. 1. 8	Pilot plant for ice crystallization of Wakisaka et. al.	16
Fig. 1. 9	Tubular ice system for PFC	17
Fig. 1.10	Structure of a concentric SSHE	19
Fig. 1.11	Single tube FBHE of Habib and Farid	19
Fig. 1.12	Schematic diagram of falling film waste-water FC system	20
Fig. 2. 1	Schematic diagram of experimental apparatus	25
Fig. 2. 2	Detail of test section	26
Fig. 2. 3	Photograph of experimental apparatus	27
Fig. 2. 4	Photograph of frozen layer at S=1.8 wt%	31
Fig. 2. 5	Photograph of frozen layer at S=3.6 wt%	31
Fig. 2. 6	Thickness of frozen layer at S=1.8 wt%	32
Fig. 2. 7	Thickness of frozen layer at S=3.6 wt%	32
Fig. 2. 8	Salt content of frozen layer	33
Fig. 2. 9	Salt content of concentrated aqueous solution	33
Fig. 2.10	Photograph of frozen layer at S=1.8 wt%, $T_w = -2\text{ }^{\circ}\text{C}$	35
Fig. 2.11	Photograph of frozen layer at S=1.8 wt%, $T_w = -7\text{ }^{\circ}\text{C}$	35
Fig. 2.12	Photograph of frozen layer at S=1.8 wt%, $T_w = -12\text{ }^{\circ}\text{C}$	36

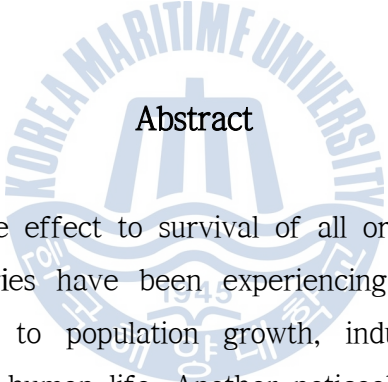
Fig. 2.13 Thickness of frozen layer at $F_{\text{wall}}=15$ L/min, $F_{\text{ring}}=15$ L/min, $F_{\text{ring}}=30$ L/min	36
Fig. 2.14 Salt content of frozen layer	37
Fig. 2.15 Salt content of concentrated aqueous solution	37
Fig. 2.16 Photograph of frozen layer at not flow field(F_{non})	39
Fig. 2.17 Photograph of frozen layer at $F_{\text{ring}}=5$ L/min	39
Fig. 2.18 Thickness of frozen layer at $F_{\text{ring}}=5$ L/min	40
Fig. 2.19 Thickness of frozen layer at F_{non} , $F_{\text{ring}}=5$ L/min	40
Fig. 2.20 Pb content of frozen layer	41
Fig. 2.21 Cr content of frozen layer	41
Fig. 2.22 Photograph of frozen layer at $l_{\text{th}}=1$ mm	43
Fig. 2.23 Photograph of frozen layer at $l_{\text{th}}=5$ mm	43
Fig. 2.24 Pb content of frozen layer	44
Fig. 2.25 Cr content of frozen layer	44
Fig. 2.26 Pb content of concentrated aqueous solution	45
Fig. 2.27 Cr content of concentrated aqueous solution	45
Fig. 2.28 Growth model of frozen layer	46
Fig. 2.29 Progress model of frozen layer	47
Fig. 2.30 Ice layer along vertical cooling tube at simplified model	49
Fig. 2.31 Test section insulated by polyethylene mat	52
Fig. 2.32 Conduction heat transfer through two-layer plane wall	53
Fig. 2.33 Conduction heat transfer through two-layer composite cylinder	54
Fig. 2.34 Heat analysis of freeze concentration process	56
Fig. 3. 1 Waste-water FC system process	64
Fig. 3. 2 Waste-water treatment process in the factory	68
Fig. 3. 3 Ice layer along cooling tube	74

Fig. 3. 4 Ice-lining freezing procedure	76
Fig. 3. 5 Waste-water freeze concentration procedure	78
Fig. 4. 1 Operation procedure of precooling and non-precooling system ...	92
Fig. 4. 2 Modeling of waste-water FC treatment system without fresh water cooler	96
Fig. 4. 3 Modeling of waste-water FC treatment system with fresh water cooler	97
Fig. 4. 4 Two-stage compression refrigeration system with intercooler ...	98
Fig. 4. 5 Two-stage compression refrigeration cycle with intercooler	98
Fig. 4. 6 Modeling of short-term operation pump	109
Fig. 4. 7 Modeling of fresh water discharge pump	120
Fig. 4. 8 Modeling of waste-water discharge pump	123
Fig. 4. 9 Modeling of warm brain supply pump	125
Fig. 4.10 Power consumption at design capacity	130
Fig. 4.11 Power consumption ratio of compressor with FC system	130
Fig. 4.12 System operation time at operation treatment capacity	137
Fig. 4.13 Power consumption of one batch operation and freeze concentration process	143
Fig. 5. 1 Installation diagram of waste-water FC system in factory	147
Fig. 5. 2 Energy efficiency of waste-water FC treatment system at design capacity	157
Fig. 5. 3 One batch and daily treatment capacity	159
Fig. 5. 4 Rate of electric power consumption at operation capacity ...	162
Fig. 5. 5 Rate of electric power consumption at operation condition ...	165
Fig. 5. 6 Daily treatment capacity at operation condition	166
Fig. 5. 7 Treatment cost at waste-water treatment method	173

A Study on Freezing Behavior in Waste Water Treatment Using Freeze Concentration and Energy Efficiency Improvement of Commercial System

Kim, Jung Sik

Department of Marine Engineering System
Graduate School of Korea Maritime University



Abstract

Water has a decisive effect to survival of all organisms including human being. But many countries have been experiencing a water shortage with more deterioration due to population growth, industrial development and improving the quality of human life. Another noticeable water problem which threatens the mankind is water pollution. Industrial development gave rise to waste-water containing harmful contaminants that caused severe environmental pollution. Water pollution inflicts a fatal effect on not only mankind but also an organism. Various techniques of waste-water management have developed continuously and applied to treat pollutants contained in waste-water. But most methods were suitable for a large quantity of waste-water.

Recently, waste-water treatment system is developed in small and middle size to get more economic advantage. Freeze concentration method based in the fact that pollutions can be separated and concentrated as non-frozen liquids when ice crystals are formed under the freezing point, is very useful

to waste water treatment system of small and middle size. Freeze concentration system which can re-use purified water and cold energy obtained from ice has high thermodynamic efficiency and low energy consumption.

First, this study was progressed on the freezing behavior along the vertical tube in relation to freeze concentration method. The experiment was conducted on the freezing behavior of waste-water by cooling wall temperature, air-bubble flow method, ice-lining thickness in NaCl aqueous solution and the representative heavy metal aqueous solution containing Pb and Cr during the freeze concentration process.

The fundamental experiment was performed to investigate freezing behavior of NaCl aqueous solution along the vertical cooled circular tube for parameters such as cooling wall temperature and air-bubble injection method. In the experiment on heavy metal aqueous solution, Pb and Cr concentration of frozen layer and concentrated solution was compared at the effect of parameters such as cooling wall temperature, flow field effect and the ice-lining thickness. The following experimental factors were applied such as cooling wall temperature: $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$, direct air-bubble injection method and ice-lining thickness: 1 mm and 5 mm.

As the result of experiment, a decrease in the cooling wall temperature brought the high growth rate of ice front and more solute was involved in frozen layer. The method to inject directly air-bubble on ice-liquid interface through the ring shape nozzle gave higher purity of ice than indirect method. Ice-lining in 5 mm thickness resulted in frozen layer with higher purity than 1 mm thickness.

Also, the freeze concentration waste-water system which was designed as the small and medium sized capacity was analyzed about the rate of electric power consumption and the daily treatment capacity to suggest the direction of the system development. The virtual system possible to commercialize was

composited and the design data was calculated to analyze energy efficiency and daily productivity with HYSYS simulation. At first, the power consumption and operation time of the system with fresh water pre-cooler or without it was calculated by computer modeling and analysis. Subsequently, the change of design and operation treatment capacity was applied to the system with fresh water cooler.

The cost effectiveness of the freeze concentration system was analyzed with operation power consumption based on computer-aided analysis. Economical efficiency of the system for commercialization was studied at the point of energy recovery to utilize heat source of purified ice and condenser for air conditioning and to re-use water fusing ice.

As the result, the rate of electric power consumption was higher as 0.6 Wh/kg but daily treatment capacity increased in quantity as 19 % in the system with fresh water pre-cooler. As design treatment capacity increased, the rate of electric power consumption was lower and daily treatment capacity was larger in quantity.

The operation cost of the freeze concentration system was lower up to 9.3 ~ 12.1 times in comparison with the evaporative concentration using electricity method and was lower up to 31.9 ~ 41.5 times in comparison with entrustment treatment.

As the energy recovery system, cooling efficiency was 1.12 and heating efficiency was 2.99 when ice thermal storage and condenser heat was fully utilized by air conditioning unit. At the comprehensive economic efficiency, cost saving was 32.5 times greater than operation cost in summer and 28.7 times in winter.

Keywords: Daily treatment capacity 일일처리량; Economic efficiency 경제성; Freeze concentration 동결농축; Freezing behavior 동결거동; Waste-water treatment 폐수처리

사 용 기 호

Alphabet

	: 열전달면적	[m ²]
i_r	: 공기비열	[kJ/kgK]
c_b	: 브라인비열	[kJ/kgK]
c_w	: 청수비열	[kJ/kgK]
D	: 두께	[m]
E	: 엔트로피	
F	: 유량	[kg/h]
F_1	: 입구 흐름의 몰유량	[kgmole/h]
F_{air}	: 공기냉각용 냉브라인 유량	[kg/h]
F_{design}	: 냉브라인 총유량	[kg/h]
F_{fwpc}	: 청수냉각용 냉브라인 유량	[kg/h]
F_{liq}	: 액체 용적유량	[m ³ /h]
F_{mass}	: 질량유량	[kg/h]
F_{mol}	: 몰유량	[kgmole/h]
F_{non}	: 비유동장	
F_{ring}	: 링 노즐 직접분사	
F_t	: 대수평균온도차 보정계수(LMTD correction factor)	
F_{wall}	: 벽면 간접분사	
F_{wdf}	: 설계 농축폐수 배출펌프 유량	[kg/h]
F_{wwt}	: 폐수동결농축처리용 냉브라인 유량	[kg/h]
G	: 길이	[m]
H	: 엔탈피	
I_{th}	: 초기빙층 두께(Ice-lining thickness)	[mm]

	: 유체 질량유량	[kg/h]
M_{ir}	: 공기분사량	[kg]
M_{dcph}	: 설계 폐수처리량	[kg/min]
M_{design}	: 설계처리량	[kg]
M_{fw}	: 청수량	[kg]
M_{lining}	: 초기빙층 착빙량	[kg]
M_r	: 운전처리량	[kg]
M_{rcw}	: 농축 잔류폐수량	[kg]
M_s	: 셸측 유체 유량(Shell fluid flow rate)	
M_t	: 튜브측 유체 유량(Tube fluid flow rate)	
M_{tube}	: 제빙관당 제빙량	[kg]
MW	: 기체분자량	
	: 체적지수(Volume exponent)	
N_{tube}	: 제빙관 수	[ea]
P	: 압력	[kPa]
P_1	: 입구 흐름의 압력	[kPa]
P_2	: 출구 흐름의 압력	[kPa]
P_{ab}	: 기포 분사펌프	
P_c	: 응축압력	[kPa]
P_{cb}	: 냉브라인 펌프	
P_e	: 증발압력	[kPa]
P_{fd}	: 청수 배수펌프	
P_{fs}	: 청수 급수펌프	
P_{in}	: 펌프 입구 압력	[kPa]
P_m	: 중간압력	[kPa]
P_{out}	: 펌프 출구 압력	[kPa]
P_{ws}	: 폐수 공급펌프	

P_{wd}	: 농축폐수 배출펌프	
P_{wb}	: 온브라인 펌프	
WR	: 펌프 실동력	[kW]
PWR_{cbp}	: 냉브라인 펌프 소비전력량	[kWh]
PWR_{dcbp}	: 설계처리량 냉브라인 펌프 소비동력	[kW]
PWR_{diap}	: 설계처리량 기포 분사펌프 소비동력	[kW]
PWR_{dref}	: 설계처리량 냉동기 소비동력	[kW]
PWR_{dwbp}	: 설계처리량 온브라인 펌프 소비동력	[kW]
PWR_{dwdp}	: 설계처리량 농축폐수 배출펌프 소비동력	[kW]
PWR_i	: 펌프 이상동력	[kW]
PWR_{iap}	: 기포 분사펌프 소비전력량	[kWh]
PWR_{in}	: 시스템 소비전력량	[kWh]
PWR_{ref}	: 냉동기 소비전력량	[kWh]
PWR_{wbp}	: 온브라인 펌프 소비전력량	[kWh]
PWR_{wdp}	: 농축폐수 배출펌프 소비전력량	[kWh]
Q	: 튜브에서 셀로의 열전달	
Q_{air}	: 분사공기 냉각열량	[kJ]
Q_c	: 일일 생산 냉열	[kJ]
Q_c	: 수용액에서 경계면 유입열량	[kJ]
Q_{cooler}	: 냉각기 용량	[kJ/h]
Q_{dcpc}	: 청수 시간당 설계예냉열량	[kJ/h]
Q_{design}	: 시스템 설계부하	[kJ/h]
Q_{ec}	: 증발농축 열량	[kJ]
Q_{elh}	: 증발잠열	[kJ]
Q_{eva}	: 증발기 용량	[kJ/h]
Q_{fsc}	: 동결수용액 동결점 냉각열량	[kJ]

Q_{wc}	: 청수 냉각열량	[kJ]
Q_{fww}	: 폐수 동결온도 냉각열량	[kJ]
Q_{fwpc}	: 청수 예냉열량	[kJ]
Q_{fwf}	: 동결청수 동결점 냉각열량	[kJ]
Q_h	: 일일 생산 온열	[kJ]
Q_{heater}	: 가열기 용량	[kJ/h]
Q_i	: 얼음의 냉열	[kJ]
Q_{ic}	: 동결층 냉각열량	[kJ]
Q_{ilf}	: 초기빙층 착빙열량	[kJ]
Q_{in}	: 일일 사용열량	[kJ]
Q_{leak}	: 열유입	[kJ]
Q_{loss}	: 열손실	[kJ]
l	: 잠열	[J/kg]
Q_{lh}	: 동결 총잠열	[kJ]
Q_{swc}	: 수용액 냉각열량	[kJ]
Q_{test}	: 실험 동결열량	[kJ]
Q_{th}	: 이론 단순모델 동결열량	[kJ]
Q_{tl}	: 총손실열량	[kJ]
Q_w	: 용해된 물의 냉열	[kJ]
Q_{wvc}	: 폐수 냉각열량	[kJ]
Q_{wvf}	: 폐수 동결농축열량	[kJ]
Q_{wvh}	: 폐수 가열열량	[kJ]
Q_h	: 열유량	[kJ/h]
R	: 이상기체상수	
R_{fc}	: 동결농축 열량비	
S	: 염분 농도	[wt%]

	: 온도	[°C]
T_{wct}	: 청수 냉각온도	[°C]
T_{fw}	: 청수 온도	[°C]
T_w	: 냉각면 온도	[°C]
TC_{out}	: 폐수 처리량	[kg]
T_M	: 대수평균온도차	[°C]
U	: 열관류율	[W/m ² °C]
V	: 셸 또는 튜브 체유량(Volume shell or tube holdup)	
V_i	: 동결층 부피	[m ³]
V_{lining}	: 제빙관당 초기빙층 부피	[m ³]
V_{tube}	: 제빙관당 얼음 부피	[m ³]
W	: 압축기 단열압축 및 폴리트로픽 동력	[kW]
Z	: 압축계수(Compressibility factor)	

Greek

α_w	: 물의 열전달계수	[W/m ² K]
η_a	: 압축기 단열효율	[%]
η_c	: 시스템 냉방효율	
η_e	: 소비전력량비	[kWh/kg]
η_{ec}	: 증발농축처리시스템 열효율	[%]
η_h	: 시스템 난방효율	
η_p	: 압축기 폴리트로픽 효율	[%]
θ_f	: 물의 상변화 온도	[°C]
θ_p	: 냉각면 온도	[°C]
θ_s	: 동결층 온도	[°C]
θ_w	: 물 온도	[°C]

	: 등엔트로피 지수(Isentropic exponent)	
λ	: 열전도율	[W/mK]
λ	: 얼음 열전도율	[W/mK]
λ_w	: 물 열전도	[W/mK]
ρ	: 밀도	[kg/m ³]
ρ_1	: 입구 흐름의 밀도	[kg/m ³]
ρ_{air}	: 공기밀도	[kg/m ³]
ρ_i	: 얼음밀도	[kg/m ³]
ρ_{liq}	: 액체밀도	[kg/m ³]
τ	: 시간	[s]
τ_{cud}	: 농축된 잔류폐수 배출시간	[min]
τ_{fe}	: 처리량별 동결농축처리시간	[min]
τ_{il}	: 초기빙층 착빙시간	[min]
τ_{op}	: 펌프 운전시간	[min]
τ_{ref}	: 냉동기 운전시간	[min]
w	: 편심계수(Acentric factor)	

Abbreviation

F	: Correction factor
CFC	: Chlorofluorocarbon
CMP	: Compressor
COP	: Coefficient of Performance
ECS	: Evaporative Concentration System
EER	: Energy Efficiency Ratio
ET	: Entrustment Treatment

Eva	: Evaporator
FC	: Freeze Concentration
FCS	: Freeze Concentration System
FEMP	: Federal Energy Management Program
HCFC	: Hydrochlorofluorocarbon
HFC	: Hydrofluorocarbon
IM	: Ice-Maker
LMTD	: Log Mean Temperature Difference
LNG	: Liquified Natural Gas
PAI	: Population Action International
PFC	: Progressive Freeze Concentration
PMMA	: Polymethylmethacrylate
PR EOS	: Peng-Robinson Equation Of State
Press	: Pressure
SFC	: Suspension Freeze Concentration
SSHE	: Scraped Surface Heat Exchanger
Temp	: Temperature
VF	: Vapor Fraction
VOCs	: Volatile Organic Compounds

제 1 장 서 론

1.1 연구의 배경

지구상의 존재하는 물은 총량이 13억 8천 6백만 km^3 로 추정되며, 이중 염수가 97.5 % 차지하며 담수는 3천 5백여만 km^3 로 전체 물의 2.5 %에 불과하다. 이 중에 지하수를 제외하면 인간이 사용할 수 있는 담수호의 물 또는 하천수는 약 9만 km^3 에 불과하여 담수 중에서도 약 0.26 %에 불과하다. 물은 지구상의 생물들과 인간에게 있어 생명을 유지하기 위한 필수 요소로 다양한 형태로 이용되고 있다. 그러나 인구의 증가와 산업의 발달로 물과 관련된 많은 문제들이 발생하고 있는데, 특히 물 부족의 문제는 2025년이 되면 전 세계 인구 72억 내지 83억 중에 물 부족 내지 물 기근 국가의 인구는 24억 내지 32억 정도가 될 것이라고 예측하고 있다^[1].

Table 1.1과 Table 1.2의 국가별 수자원 현황에서 우리나라는 국민 1인당 연간 재생 가능한 수자원량은 180개국(지역) 중에서 146위를 기록하고 있으며, 지하수를 포함한 민물의 수량과 수질, 하수처리기준, 오염규제관련 법규 등을 종합적으로 고려한 수질 지수를 살펴보면 122개 국가 중에 8위를 차지해 수질은 상대적으로 양호하나 수자원의 양은 절대적으로 부족한 것으로 나타났다^[2]. 국제인구행동연구소(PAI : Population Action International)는 1인당 사용 가능한 물의 양이 1,000 m^3 미만이면 물 기근국가, 1,700 m^3 미만인 경우 물 부족국가, 1,700 m^3 이상이면 물 풍요국가로 분류한다. 우리나라는 활용 가능한 수자원의 양은 630억 m^3 이지만, 이를 국민 1인당 환산하면 1,452 m^3 에 불과하여 물 부족 국가군에 속한다^[3].

Table 1.1 Per capita water resources by country^[2]

No	Country name	Per capita water resources (m ³ /person)
1	Greenland	10,767,857
2	Alaska (USA)	1,563,168
4	Iceland	609,319
6	Suriname	292,566
7	Congo	275,679
11	Canada	94,353
12	New Zealand	86,554
13	Norway	85,478
63	USA	10,837
104	France	3,439
106	Japan	3,383
127	UK	2,465
128	China	2,259
133	India	1,880
134	Germany	1,878
146	South Korea	1,491

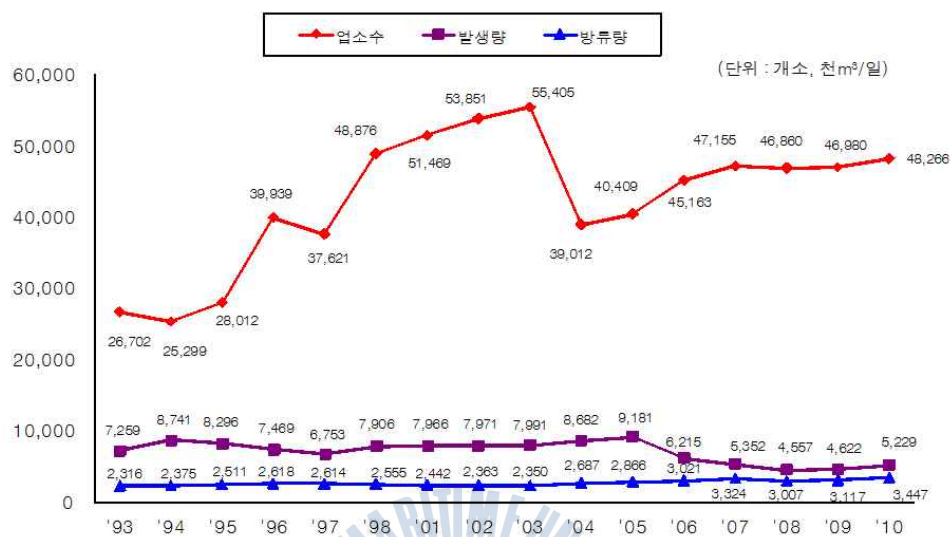
Table 1.2 Water quality index by country^[2]

No	Country name	Water quality index
1	Finland	1.85
4	UK	1.42
5	Japan	1.32
6	Norway	1.31
7	Russia	1.30
8	South Korea	1.27
9	Sweden	1.19
10	France	1.19
12	USA	1.04
18	Austria	0.85

우리나라를 포함하여 세계적인 물과 관련된 문제는 그 원인과 형태가 다양하지만 주로 수자원의 부족과 유효 이용의 문제로부터 파생되는 것으로 물의 이용과 연관된 부분을 새로운 수처리 기술의 개발과제로 인식할 필요가 있다^[4]. 수처리 기술의 대상이 되는 수질오염의 오염물질은 배출형태에 따라 점오염원(point source)과 비점오염원(non-point source)으로 대별되는데 그 중 산업폐수는 일정한 배출경로를 갖는 점오염원으로 주로 제품의 제조, 수리, 세척 등 제조업시설에서 배출되며, 이러한 산업폐수를 배출하는 시설을 폐수배출시설이라 한다. 산업폐수는 산업공정폐수 또는 공장폐수만을 말하기도 하는데 이는 제조업 시설에서 배출되는 폐수의 오염농도가 높고 오염부하량이 크기 때문이다. 정의하기는 어렵지만 산업체에서 발생하는 산업폐수는 고농도 폐수로 간주된다.

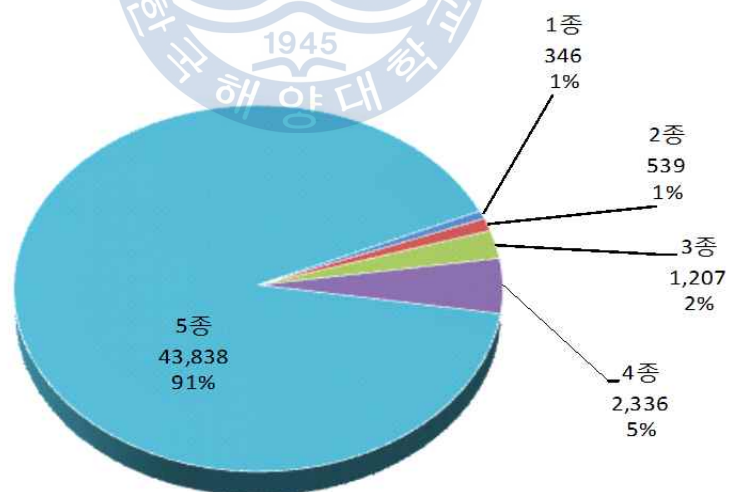
Fig. 1.1은 국내 폐수배출업소 및 폐수량 변화추이로, 국내 폐수배출시설은 48,266개소(2010년말 기준)가 있으며, 여기서 발생하는 산업폐수는 하루 5,229천톤에 이르며, 주로 폐수종말처리시설 또는 개별공장의 자체 오염방지시설로 처리되고 있다. Fig. 1.2는 폐수 배출규모별 업체수를 나타낸 것으로 국내 산업폐수의 발생 업소 중 사진처리시설, 도금시설 등 소규모 사업장은 2010년 기준으로 전체 폐수배출사업장의 91 %를 차지하고 있으나 폐수 배출량은 7.1 %에 불과한 것으로 분석되고 있어 개별 배출규모로 볼 때 영세성을 면치 못하는 것으로 나타나고 있다^[5].

정부에서는 폐수배출시설을 설치하고자 하는 사업장은 설치허가를 받거나 설치신고를 해야 하며 배출시설로부터 배출되는 수질오염물질이 배출허용기준 이하로 배출되게 하기 위한 수질오염방지시설을 설치하도록 하고 있다. 일부 폐수배출량이 적은 사업장이나 수질오염방지시설 설치를 면제받은 사업장은 발생된 폐수를 전문처리업체에 위탁하여 처리할 수 있는 폐수처리업체도를 운영하여 기업의 경쟁력을 강화하고 배출되는 폐수를 효율적으로 관리하고 있다^[6]. 폐수를 처리하는 수질오염방지시설에는 물리적 처리시설, 생물학적 처리시설, 화학적 처리시설로 크게 구분되며 주요 처리현황은 Fig. 1.3과 같다.



출처 : 환경부 “공장폐수의 발생과 처리”

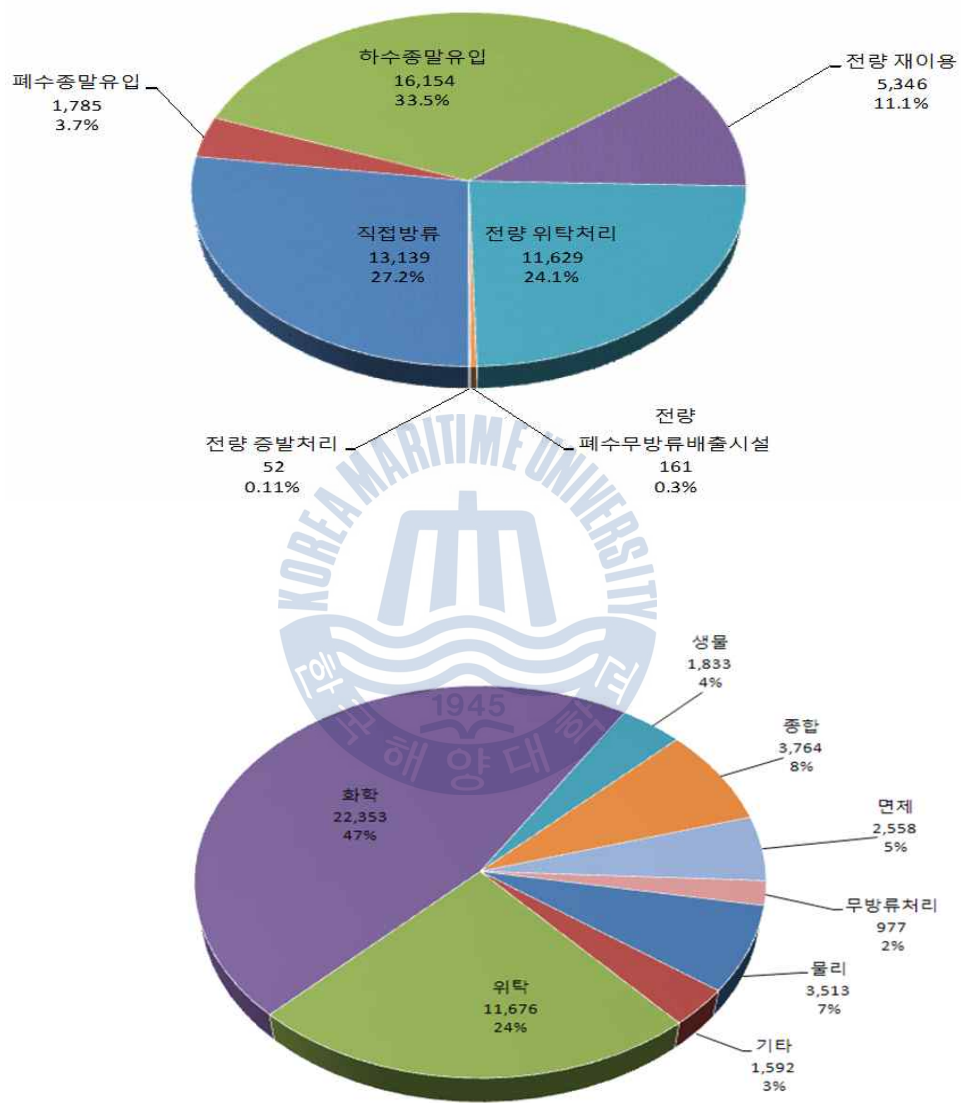
Fig. 1.1 Current state of waste-water discharge^[5]



단위 : 개소

출처 : 환경부 “공장폐수의 발생과 처리”

Fig. 1.2 Current state of waste-water discharge company^[5]



출처 : 환경부 “공장폐수의 발생과 처리”

Fig. 1.3 Current state of waste-water treatment method^[5]

Fig 1.3의 폐수처리형태별 현황을 살펴보면 하수종말처리장으로 유입될 수 없는 폐수는 대부분 전량 위탁처리를 하고 있으며 일부 증발처리법 및 폐수무방류배출시설을 설치하여 기준치 이하로 처리 후 배출하고 있다.

폐수를 배출하는 사업장에서 폐수를 자체 처리하는 경우 사용되는 처리법은 증발농축법, 액상소각법, 분리막 공정, 전기투석법등의 기술이 사용되고 있으나 90 % 이상의 업체가 증발농축법과 액상소각법을 주로 사용하고 있다. 그러나 전량 위탁처리를 하는 경우에는 지속적인 위탁처리비용이 발생하고, 증발농축법은 물의 증발잠열이 동결잠열에 비해 상대적으로 커 에너지의 소모가 높은 단점과 설치면적이 많이 소요되는 단점 등이 있다. 최근에는 진공상태의 저온 운전을 통해 증발농축 시키거나, 직분사 방법으로 열효율을 높이는 등의 노력이 시도되고 있다^[7].

현재 산업폐수의 처리에 주로 이용되는 증발농축법에 비해 동결농축법은 빙점이하의 수온에서 순수한 얼음결정이 생성되는 동안에 함유된 유·무기 오염물질이 동결되지 않는 액체로 분리 농축되는 원리를 이용하는 새로운 형태의 폐수처리기술이다. 물은 냉각될 때 순수한 빙결정구조를 생성한다. 수용액에 불순물이 함유된 경우에도 동결을 하면 물은 순수한 결정으로 동결되며 불순물을 동결계면 밖으로 배제시키게 된다. 동결농축은 수용액을 동결 온도로 냉각시킬 때 석출되는 빙결정이 용질을 함유하지 않으므로 수용액중의 용질 농도만 증가하는 이른바 고체-액체간의 상변화를 이용한 농축법이다^[8].

종래에 동결농축 기술의 상용화는 식품분야에서 선 진행하여 발전하고 있다. 식품분야에서는 과즙, 와인 등의 액상 식품을 수분의 동결 추출을 통해 농축하게 되는데 대상이 주로 고농도이며 미소한 빙결정을 생성하여 성장시킨 후 분리, 세정을 거치게 된다. 식품분야에서 동결농축법이 활용되는 주된 이유는 증발법에 비해 에너지 효율이 높고, 미생물의 오염, 용질의 열화, 휘발성 방향성분의 손실 없이 액상제품 고유 특성을 그대로 유지하는 장점을 갖기 때문이다. Fig. 1.4는 2단의 결정생성기(crystallizer)와 세정부(wash column)를 갖는 동결농축시스템이다. 현재의 농축은 일단계 또는 다단계의 설비를 이용하고 있으며, 다단계농축인 경우는 낮은 에너지 소비와 높은 생산 속도를 가지

고 있어 농축율을 증가시킬 수 있다^[9].

동결농축폐수처리시스템의 상용화는 동결농축기술을 근간으로 실용화가 연구되고 있다. 외국의 사례를 살펴보면 기존의 식품 동결농축기술을 응용하여 위험한 휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOCs)을 포함하는 폐수를 안전하며, 경제적, 친환경적인 방법으로 처리하여야 하는 화학플랜트 분야에 이용되고 있다. Fig. 1.5는 식품분야에 이용되는 방법과 유사하게 결정생성기에서 결정을 생성, 성장 시킨 후 세정부에서 세정하여 용질을 포함하지 않은 얼음을 추출 후 농축액을 소각기로 최종 처리하는 상용화된 동결농축폐수처리시스템의 예이다^[10]. 그러나 종래 식품분야에서 사용되는 결정화법(crystallization)의 동결농축시스템은 고농도 용액을 대상으로 한 것이며, 작은 빙결정을 생성하여 그것을 성장 분리한 후에 표면을 추출하는 방법으로는 장시간이 소요되고 재사용할 수 있을 정도의 순도 높은 얼음을 추출하기 곤란한 것으로 알려져 있어, 중소형패키지로는 상용화가 시도되고 있지는 않다^[11].

최근에는 동결층을 성장시켜 큰 결정을 만들어 폐수를 농축하고 동결된 얼음의 냉열을 공기조화에 활용하는 전진동결농축법(Progressive Freezing Concentration, PFC)을 개선 적용하는 방법이 연구되고 있다. 전진동결농축법은 열교환기 표면에 단일 빙층을 형성, 동결층을 성장시키는 방법으로 물의 상변화에 의해 얼음이 생성될 때, 전열 방향으로 1차원적으로 진행되는 동결 계면으로부터 용질 성분이 분리되어 농축되는 현상을 이용하는 농축방법이다. Fig. 1.6은 전진동결농축법의 동결층 성장 모델이다^[12]. 전진동결농축법은 결정화 방법에 비해 시스템이 간단해지며 쉽게 원하는 크기의 얼음으로 추출 가능한 장점을 가지고 있어 중소규모의 폐수처리 및 재이용 기술에 응용성이 뛰어난 것으로 알려지고 있다^[13].

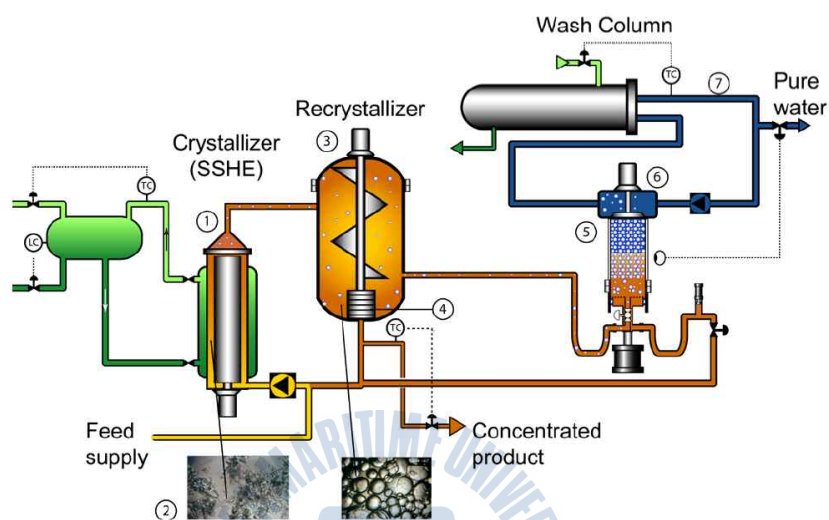


Fig. 1.4 Multi-stage freeze concentration(FC) system(GEA)^[9]

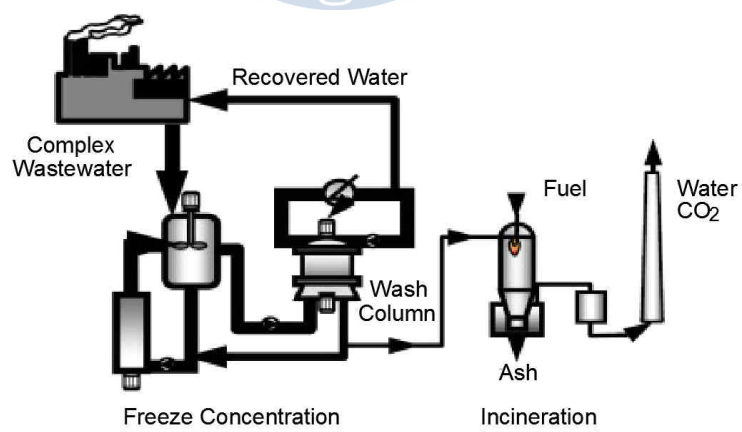


Fig. 1.5 Waste-water FC system with incineration(GEA)^[10]

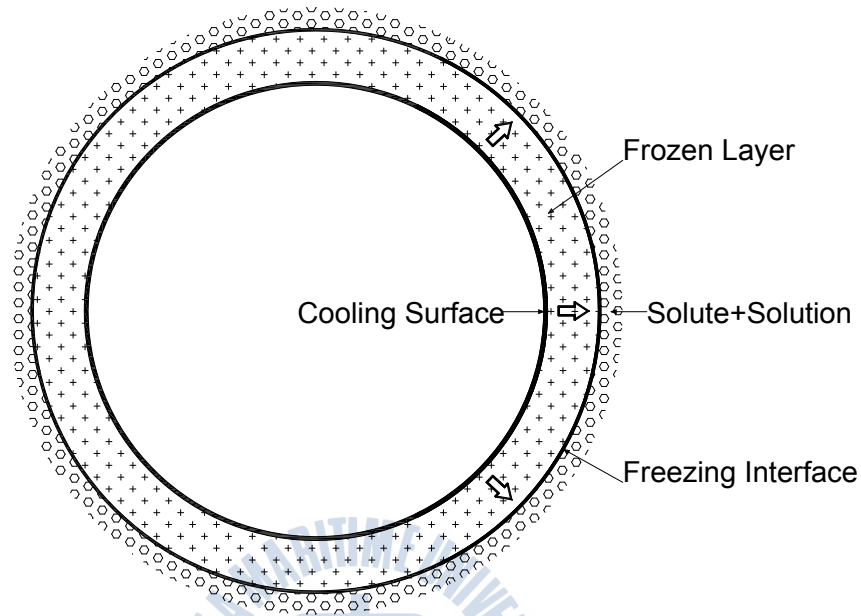


Fig. 1.6 Model of ice layer growth at PFC

전진동결농축법을 이용한 중소규모의 동결농축폐수처리시스템은 폐수의 처리효율 향상과 더불어 재생 가능한 열원 회수를 목적으로 추출된 얼음을 축빙 탱크에 저장하여 냉열원으로 활용하고 용해된 물은 공업용수로 재이용한 가능하도록 개발되고 있다. 이러한 중소규모의 배출시설에 동결농축폐수처리시스템을 활용할 경우 다음과 같은 장점이 있다.

일반적으로 중소규모의 산업폐수 처리에 이용되는 증발법 보다는 동결에 필요한 잠열이 작아 에너지 소비측면에서 유리한 점을 가지고 있다. 또, 동결된 얼음을 추출하여 해빙할 때 얻을 수 있는 냉열을 여름에는 냉방의 열원으로 이용 가능하며, 냉동기의 응축열은 난방으로 이용하여 열의 회수율을 높일 수 있다. 냉열을 회수한 용해된 물은 공업용수로 재활용하므로 물 부족을 대응하여 물의 재이용율을 높일 수도 있다. 그리고 동결농축법은 저온에서 폐수를 처리하기 때문에 악취, 이차생성물에 따른 환경오염을 방지할 수 있으며, 함유된 용질을 재이용할 수 있는 장점 등이 있다.

또한, 동결농축폐수처리시스템은 냉열의 재활용 측면에서 근래 중소형화가

추진되어 중소규모의 사업장이나 가정에 보급되고 있는 빙축열시스템과 유사한 특성을 가지고 있다. 폐수를 처리하면서 발생하는 생성물, 즉 얼음을 축빙 탱크에 보관하였다가 냉방부하가 필요한 경우 재이용 가능하므로 빙축열시스템이 갖는 전력부하평준화에 대한 기여도도 기대할 수 있는 장점을 가지고 있다.

본 연구에서는 국내 산업폐수의 주요 배출 규모인 중소규모의 폐수배출업체에서 직접 운영이 용이한 전진동결농축법에 근간한 폐수처리시스템의 개발에 대해 연구하였다. 폐수를 동결 처리하는 것을 목적으로 폐수중의 순수한 물과 폐수 농축액을 분리하는 가장 효과적인 방법을 알아보기 위해 냉각면 온도, 기포 분사의 영향, 과냉각을 방지하기 위한 초기빙층의 두께가 동결층의 증감 속 농도에 미치는 영향을 실험적으로 검토하였다.

그리고 실험 결과를 반영하여 상용화 가능한 시스템을 대상으로, 동결처리에 필요한 열량을 중심으로 설계데이터를 계산하고, 해석프로그램을 활용하여 시스템 운전의 에너지 효율을 시뮬레이션 하였다. 경제적 시스템 설계안을 제시하고자, 완속운전시스템과 급속운전시스템을 비교하고 또, 설계처리량 및 운전처리량 변화에 따른 특성을 각각 분석하였다. 프로그램을 활용한 해석을 통해 각 시스템 별 운전에 요구되는 소비전력량을 구하여 시스템 효율을 분석하고, 일일처리량을 계산하여 상호 비교를 통해 유리한 시스템 개발 방향을 제시하고자 하였다. 경제적인 측면에서도 현재 중소규모의 폐수처리에 주로 이용되고 있는 증발농축법과 위탁처리방식에 비해 동결농축법이 갖는 비용측면의 우수성과 용수의 재이용, 냉열과 온열에너지의 회수가 가능한 환경친화형 유틸리티로써의 경제성을 검토하여 최종적으로 동결농축폐수처리시스템의 개발과 상용화에 활용하고자 하였다.

1.2 종래의 연구

지금까지 동결농축법을 이용하여 폐수를 처리하고자 하는 많은 연구와 노력이 이어져 오고 있다. 역사적으로 동결농축은 해수로 만들어진 얼음을 녹였을 때 얻어진 물이 담수라고 보고한 덴마크 의사 Thomas Bartholinus(1616-1680)에 의해 발견되었으며, 1930년대 후반 냉동과정이 가능해지면서 바닷물로부터 담수를 얻는데 동결농축을 이용하고자하는 관심이 다시 부각 되었다.

동결농축법은 수용액내 물이 동결되어 얼음으로 결정화되면 농축된 잔류 수용액이 남고 생성된 얼음의 결정은 매우 고순도가 되는 원리를 이용한 것으로, 동결과정 중 얼음의 결정격자 크기가 작아 용질이 얼음 내 포함되지 못하므로 수용액으로부터 물 성분을 분리할 수 있는 방법이다. 동결농축법은 증발농축법에 비해 상대적으로 에너지 소비가 적고, 가열을 하지 않기 때문에 대부분의 휘발 성분이 농축된 잔류 수용액에 그대로 남아있어 휘발성유기화합물을 포함한 수용액을 농축하는데도 비교적 안전하며, 위험한 오염물질이 포함된 산업폐수를 처리하는데도 좋은 선택이 된다. 또한 동결농축은 폐수의 양을 현격히 감소시켜서 폐수처리 비용을 줄일 수 있다. 원래 양의 25 % 로 용존 성분을 동결농축은 약 80 % 까지 농축할 수 있다고 기록되어 있다^[14].

이런 장점을 가지고 있는 동결농축기술은 유기화합물을 농축하기 위한 분석화학분야에서 연구가 이루어졌으며, 1961년 Shapiro J.는 실험을 통해 유기화합물을 농축하는 방법에 처음으로 적용하였으며 Kobayashi S.와 Lee G. F.는 1964년에 로다민 비(rhodamine B)와 염화나트륨에 대해 실험하였다. 그러나 가장 주목할 만한 연구는 Baker R. A.에 의해 수행되었다. 분석기기의 효율을 높이기 위해 미량 유기화합물인 알코올, 페놀, 산을 농축하는 사전분석법으로 동결농축법을 사용하였다. 1972년 Mallevialed J.는 수돗물에서 측정정밀도를 향상시키기 위해 동결농축을 이용하였으며, Islam S.과 Hemond H. F.는 1991년 수돗물 내의 용해성 화합물의 농축을 시도하여 회수율이 Baker의 연구보다 작은 것을 발견하였다^[15].

동결농축법을 폐수의 처리에 이용하고자하는 연구들을 정리해보면, 오염물

질의 종류에 대해서 Kammerer와 Lee^[16]는 동결농축법을 이용하여 혼합액으로부터 미량의 글리신, 글리코스, 시트르산, 페닐알라닌을 회수하는 실험에서 오염물질의 농도가 높을수록 분리효율이 감소한다고 발표하였다. Powell과 Barduhn^[17]은 동결농축법에서 오염물질의 분자량이 더 큰 물질은 분자량이 작은 물질보다 분리하는 데 어려운 것으로 보고하였다. 또한, 동결농축은 용해성 화합물을 분리하는데 아주 유용한 것으로 보이는 반면 비용해성 화합물의 처리는 더 어려운 점이 있다. Halde^[18]는 슬러지를 대상으로 하는 실험에서 불순물의 혼합물, 크기, 저장 능력과 같은 많은 실험적 요소가 결과에 영향을 미치며, 얼음의 진행속도보다 오염물 입자의 확산이 늦어 불순물이 고체 내에 포획된다고 보고하였다.

일반적으로는 액체를 저온환경 하에서 응고점이하로 냉각하는 경우 응고점에서 동결하지 않고 과냉각된 후 시간의 경과와 함께 과냉각도가 증가하다가 빙핵이 생성되며 얼음이 성장하게 된다. 이때 형성되는 수지상의 얼음(dendritic ice)에 석출되는 고농도의 용질이 몰입되어 초기 동결 빙층의 용질 농도가 상승하는 현상이 발생한다^[19]. Fig. 1.7은 냉각면의 온도를 빙점이하로 유지하였을 때 시간경과에 따른 동결거동을 나타낸 것이다. 초기 과냉각에 의한 수지상 얼음의 영향을 배제하기 위한 연구로, Shirai 등^[20]은 냉각면 표면에 얇은 두께의 얼음층을 피복하는 경우 얼음 표면이 매끄럽게 되어 과냉각에 의한 초기 냉각에서 오염물질을 배제할 수 있어 처리효율이 높다고 보고하였다. Ling Liu 등^[21]은 전진동결농축법에서 동결초기 수용액의 과냉각으로 인한 용질의 포집으로 분리효율이 저하되는 것을 방지하기 위하여, 물리적인 방법인 냉각면에 타공을 내는 경우 구멍 내에서 물 분자의 빙핵 형성에 더 높은 기회가 수용액의 초기 과냉각을 방지하는 결과를 나타낸다고 보고하고 있다.

열과 물질전달을 촉진하기 위해 폐수를 섞는 동작 즉 유동을 가하는 연구에는 교반기를 이용하는 방법과 공기를 분사하는 방법에 대한 실험이 진행되어 왔다. 교반의 강도에 대해서 Baker^[22]는 폐수가 무기염류를 많이 포함하는 경우 연구된 교반강도 범위이상에서 최고 효율을 나타내며 무기 염류가 거의 없는 탈이온수와 같은 성상에서는 교반강도가 오염물 회수율에 별다른 영향을 미치지 않는다고 발표하였다.

Ling Liu^[23]은 전진동결농축법에서 모델 액상식품에 대하여 얼음과 수용액 간 용질의 분배계수가 동결층의 성장속도 및 교반속도와 갖는 관계를 실험하여, 동결층의 전진속도가 작고 더 강한 교반이 우수한 분리효율을 나타낸다고 발표하였다. 교반법 중 기포분사법(bubble-flow)을 적용하는 방법은 교반기나 순환펌프를 이용하는 방법보다 에너지 소모가 작은 장점이 있다. Shirai 등^[24]은 냉각관에 기포를 분사하는 방법에 대해 처리효율을 실험하였다.

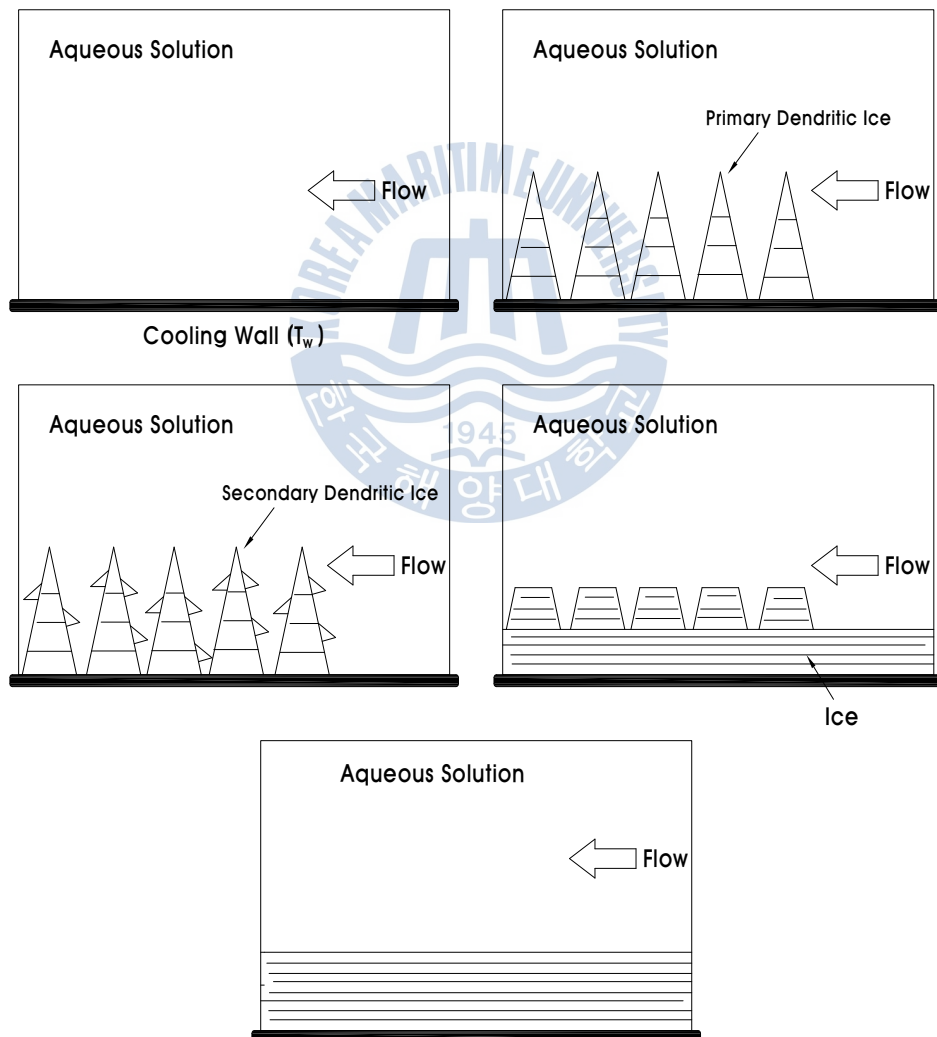


Fig. 1.7 Model of water freezing behavior

얼음의 성장속도와 동결계면에서의 용질 배제속도와의 관계는 순수한 얼음을 얻는데 중요한 인자로 작용한다고 종래의 연구는 보고하고 있다. 동결계면의 속도와 관련하여서는 Vesillind^[25]은 낮은 동결온도에서 동결시간이 길고 동결속도가 느릴 때 분리효율이 높았다고 보고하고 있다. Bae^[12]는 농축효과와 동결계면 구조와의 관계를 동결조건과 관련지어 검토하였으며 동결계면의 진행속도가 완만하거나 물질 이동속도가 빠른 경우에 동결계면의 면적이 작은 평활한 계면구조가 형성되고 동결계면 속으로 포함되는 용질의 양이 감소하여 양호한 동결농축효과를 얻을 수 있으며, 이와 반대로 보다 큰 면적을 지니는 복잡한 동결계면이 형성되는 조건하에서는 용질성분이 진행되는 동결계면에 포착되어 농축효과가 저하된다고 보고하였다.

기존 연구에 의하면 동결농축법은 폐수 내 존재하는 각종 오염물질 종류의 영향보다는 동결초기에 발생하는 과냉각현상, 유동의 조건, 오염물질의 포함농도, 동결속도 등의 인자에 의해 오염물질의 처리효율이 영향을 받는 것으로 생각된다^[13].

지금까지 살펴 본 동결농축법을 이용한 폐수처리에 대한 연구에도 불구하고 동결농축법의 장점을 활용한 폐수처리장치의 상용화는 널리 보급되어 있지 않다. 현재까지 진행되어온 동결농축법의 상용화를 위한 연구는 크게 부유식동결농축(Suspension Freeze Concentration, SFC)과 전진동결농축 두 가지의 방법이 시도되고 있다. SFC에서는 얼음 결정이 농축된 수용액인 모액에 부유하는 형태이다. 반면 PFC는 얼음결정이 하나의 동결층으로 냉각면 위에 형성된다. SFC 방식의 동결농축과정은 얼음결정을 농축액으로부터 분리시키고 빙 결정의 표면을 세정하는 세정부(wash column)가 장착된 필터시스템이 설치된다. 그러나 PFC는 농축액으로부터 별도의 얼음을 분리하기 위한 단위 운전이 필요하지 않고, 빙성장을 위한 빙핵 생산용 표면긁기열교환기(Scraped Surface Heat Exchanger, SSHE)를 사용하지 않아도 되는 등 구성이 간단해지는 장점을 가지고 있다. 그러나 PFC 동결농축이 SFC 방법보다 더 나은 해결책이라고 보고되고는 있으나 생산성이 여전히 SFC보다 낮아 동결층이 형성되는 제빙부에 대해 가장 매력적인 설계를 찾기 위한 연구와 고효율과 고생산성을 가져오기 위한 많은 종류의 설계가 연구되어 오고 있다^[14].

동결농축법의 상업화를 위한 연구를 요약하면, Avco Systems Division은 1970년대 초반 동결농축법을 이용한 산업폐수 처리장치를 만들어 “Crystalex”라 하였다. 이 시스템은 폐수와 냉매간의 접촉을 통해 냉매의 증발로 물이 동결되며, 얼음과 농축액의 혼합은 세정부(wash column)에서 분리되었다. 이런 공정에 기반을 둔 동결농축시스템은 염수를 처리하는데 적용되어 물과 염화나트륨이 석출하는 공정온도(eutectic point)에서 작동하였다^[26].

1986년 Partyka는 기상, 액상, 고상이 평형상태에 있는 물의 삼중점에서 작동하는 장치를 선보였다. 산업폐수를 성공적으로 처리하여 금속은 0.1 ppm이하로 감소하였고, 색과 용존고형물총량, 계면활성제, 기름, 인, 염화물, 유기물을 처리하였다. 처리용량은 하루 3.8 m³/day 미만이었다.

1989년 EPRI는 회분식(batch process)에 대한 특허를 취득하였다. 주로 우유나 과일쥬스 농축의 식품산업에 이용되었고, 폐수에 대해서는 한정된 실험이 이루어졌다. 이 시스템의 운전과정은 첫 냉각단계를 통과하면 작은 얼음결정이 형성되고, 두 번째는 전통적인 결정화 장치로 얼음이 성장하도록 하여, 슬러리 아이스와 잔류 수용액이 분리단계로 주입되는 방식이다. 시스템은 Niro Process(Netherlands)에 의해 상용화 되었다. 식품산업에서 사용된 경험에 의하면 플랜트의 처리용량이 10~50,000 kg/h였다. 또, 시스템의 동결농축과정을 이용하여 소각기 전단에서 폐수의 양을 줄이면 폐수를 전체 소각하는 것 보다 75 %의 에너지를 절감할 수 있다고 보고하고 있다^[15].

전진동결농축법의 상용화를 위한 연구는 2001년 Wakisaka 등^[27]에 의해 시도되었다. Fig. 1.8과 같이 사각 기둥의 환상 동결층을 생성하는 동결폐수처리장치를 실험규모로 제작하였다. 실험은 실제 폐수를 대신하여 글루코오스 수용액을 사용하여 얼음의 생산성, 빙핵종(ice seeding), 수용액의 농도, 유속과 같은 동작 조건의 효과를 실험하였다. 한 배치(batch) 운전시간 70분에 제빙기의 단위면적당 얼음의 생산성은 578.6 kg/m²이었으며, 동결폐수처리 후 1.4배 농축된 수용액을 얻을 수 있었다. 빙핵종이 빙결정 성장동안 용질의 제거를 위해 중요하게 작용하였으며 고농축 수용액에서는 얼음 내에 용질의 포함이 발생하였지만 유속이 증가할수록 그 효과가 감소하였다.



Osato miyawaki 등^[28]은 Fig. 1.9와 같이 관으로 설계된 전진동결농축시스템에 대한 연구를 하였다. 냉매를 외측에서 공급하고 내측에 원관형 동결층을 형성시키는 방법으로 큰 냉각면적을 갖고 생산성이 높아 전진동결농축의 규모 확대를 위한 방법으로 효과적일 것으로 보인다. 이 방법에서는 농도분극모델(concentration polarization model)에서 이론적으로 예상된 것보다 낮은 얼음 성장속도와 높은 폐수 순환속도가 낮은 분리효율을 나타내었다. 분리효율은 초기 용질의 농도에 의존적이었으며 높은 농도가 용질의 분리상수가 크게 나타났다. 원관시스템은 커피의 추출, 토마토 주스, 자당 수용액을 좋은 수득율과 높은 농축율로 매우 효과적으로 농축하였으며 동결농축의 상용화를 위해 높은 가능성을 나타내었다.

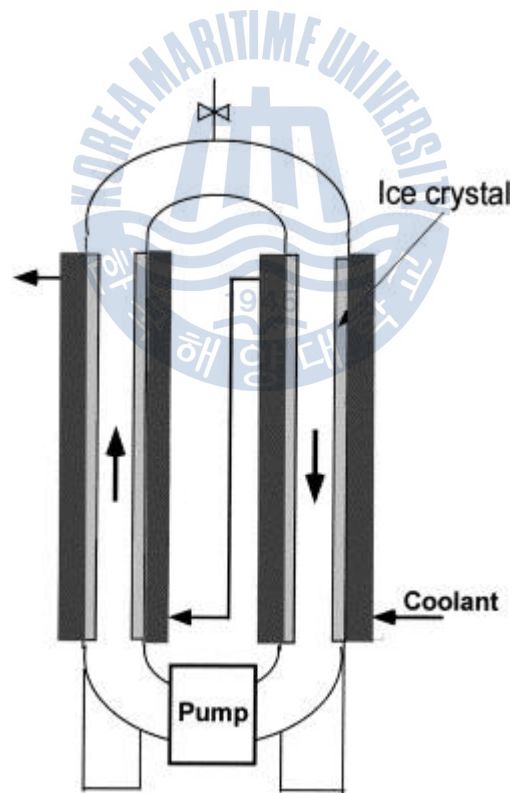


Fig. 1.9 Tubular ice system for PFC^[28]

비용절감의 효과를 높이기 위한 측면에서도 다양한 접근법이 연구되고 있는데, Habib와 Farid^[29]는 2006년의 최근 연구에서 Fig. 1.10의 표면증기열교환기를 대체하여 Fig. 1.11과 같이 순환유동층 열교환기(Fluidized Bed Heat Exchanger, FBHE)를 이용하였다. 얼음의 제거를 위해 스테인레스 스틸(stainless steel) 입자를 사용한 이 프로세서의 가능성을 실험하기 위해 실험실 규모의 수직형 순환유동층 열교환기가 설계되어 오클랜드대학에 설치되었다. 실험은 염화나트륨의 농도와 운전의 안전성에 관련된 베드 공극률의 영향을 확인하기 위해 염화나트륨 수용액을 대상으로 실시되었다. 실험한 파라미터의 범위에서 수용액을 동결농축할 수 있는 장비의 동작안정성은 염화나트륨 농도가 증가할수록 베드의 공극률이 감소할수록 향상되었다. 장기간에 걸쳐 실시된 실험을 통해 안정된 실험조건의 범위 내에서 FBHE 방식이 SSHE 보다 비용 절감효과가 더 뛰어나게 염화나트륨수용액을 동결농축할 수 있다고 보고하고 있다.

M. Jusoh 등^[30]은 연구에서 나선 구조의 동관 결정화 챔버(helical structured copper crystallization chamber)를 설계, 제작하여 실험을 통해 시스템의 성능에 영향을 미치는 운전조건에 대해 연구하였으며 유속이 빠를수록 분리효율이 높았고 1,000 ml/min에서 가장 높은 분리효율을 나타내었다. 냉매온도로는 -6 °C의 온도가 가장 높은 분리효율을 나타내었다고 보고하고 있다.

국내에서 Song^[31]은 소규모의 축산폐수를 동결농축법을 이용하여 처리하는 무방류 기술에 관하여 연구하였다. 회분식 실험을 통하여 회석배수, 동결시간, 동결온도, 교반강도와 같은 동결조건에 따른 용해성 유기물, 부유성 고형물 및 영양염류의 제거효율을 극대화하기 위한 최적 운전조건을 도출하였다.

(주)제오텍환경^[7]에서는 환경부의 지원을 받아 동결농축법을 이용한 악성폐수처리의 실용화에 대한 연구를 한 것으로 확인된다. 동결계면에서의 확산과 대류에 의한 물질전달율을 높이기 위한 노력으로 강하경막(falling film)식 반응기를 도출하여 상용화 규모의 플랜트를 제작하고, 장기 실험을 수행하였다. 그 결과 염분의 처리효율은 60 ~ 80 % 까지 처리되고 분리된 얼음량도 비교적 원활히 생산되는 것으로 평가되었다.

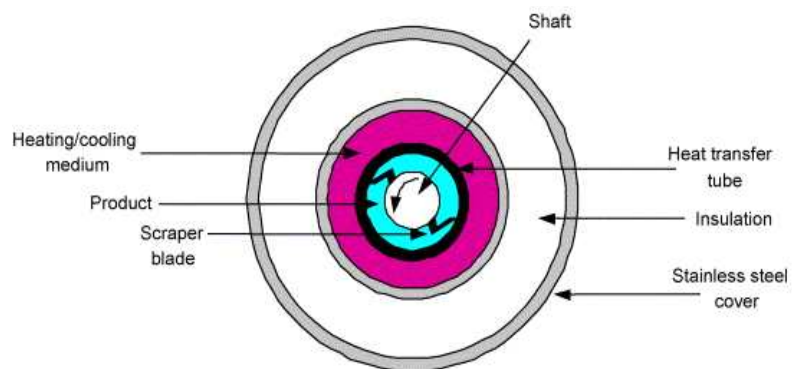


Fig. 1.10 Structure of a concentric SSHE^[29]

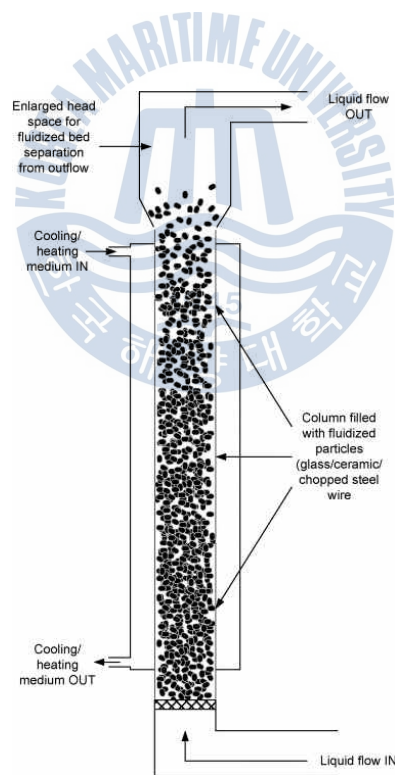


Fig. 1.11 Single tube FBHE of Habib and Farid^[29]

동결농축폐수처리시스템의 현장 적용 사례를 살펴보면 일본의 (주)마에가와 제작소(前川製作所)에서 1998년 공장에 설치한 예를 보고하고 있으며, 신니혼 공조(新日本空調)(주)에서는 자사가 보유하고 있는 유하액막식 빙축열장치를 기반으로 Fig. 1.12와 같이 야간 전력을 이용하여 폐수를 동결농축하고 주간에 냉열을 활용하는 시스템을 저농도의 폐수에 적용한 사례를 보고하고 있다.^[32] 국내에서는 (주)제오텍환경이 시스템을 개발한 실적은 있으나 적용 사례가 없는 것으로 조사되었다. 또한 기존의 주야간전력부하 평준화를 위해 저렴한 심야전력을 활용한 시스템에서 나아가 도시가스를 이용한 코제너레이션시스템(co-generation system)의 가스터빈에서 배출되는 배기열로 흡수식냉동기를 운전하여 동결농축폐수처리시스템에 활용하는 연구가 일본에서 진행되었다. 그러나 국내에서는 가스터빈의 국산화가 미흡하여 코제너레이션시스템의 도입에 어려움을 겪고 있어 이에 대한 연구는 추후 과제로 진행되어야 할 것이다.^[33] 이와 같이 실제 적용사례를 살펴 본 결과 주요 연구 내용들이 개발제품의 수처리 효과와 수처리 비용 및 냉열이용에 관한 간략한 경제성 분석에 대한 것으로, 실제 현장 적용에 대한 제빙 및 융해열을 이용한 냉난방시스템의 구체적인 사례에 대한 연구 내용이 없으며, 단순히 적용 가능성만을 제시하고 있는 실정이다.

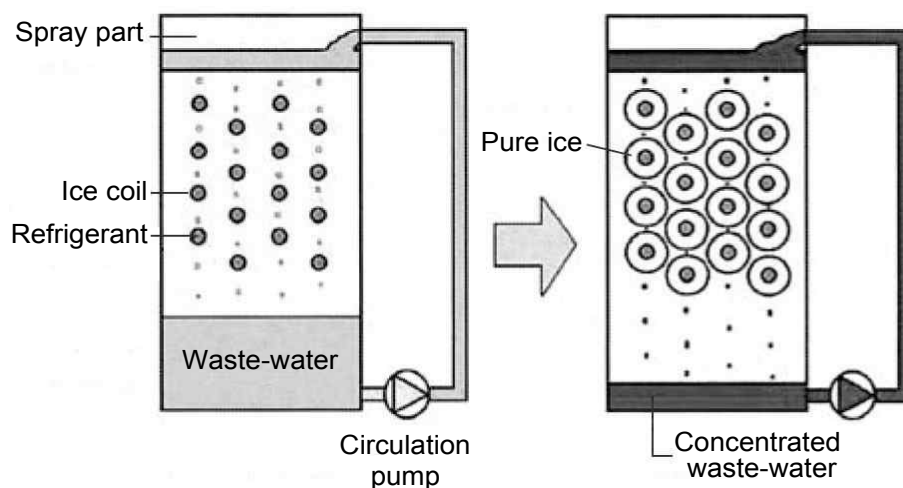


Fig. 1.12 Schematic diagram of falling film waste-water FC system^[32]

이상과 같이 지금까지 진행된 동결농축에 관련한 기존 연구를 살펴보면, 동결농축과정에서 생성되는 재활용 가능한 깨끗한 얼음으로부터 오염물질을 배제하여 잔류 수용액에 농축시키는 분리효율과 관련된 영향 인자는 동결층의 성장속도, 오염물질의 농도, 폐수의 유동 조건, 초기 과냉각 현상 제어 등으로 정리할 수 있었다.

본 연구에서는 기존 연구를 바탕으로 국내 산업폐수의 배출규모에 적합한 중소형 동결농축폐수처리시스템을 개발하기 위한 자료를 얻고자 하였다. 실험은 수직원판에서 동결층의 성장속도와 직접 연관된 냉각면 온도의 영향에 대한 실험을 실시하여 기존 연구와 비교하였다. 오염물질의 농도에 대해서는 염화나트륨수용액을 대상으로 농도의 변화에 따른 분리효율을 실험하여 기초 자료로 활용하였다.

수용액에 가해지는 유동에 대해서는 기포를 분사하는 방법을 적용하여 분사 위치와 유량에 따라 동결계면의 오염물질을 포함한 고농도층의 분산효과를 실험하였고, 초기 과냉각 방지를 위해서 초기 순수한 얼음층을 형성하는 방법을 적용하고 두께에 따른 분리효율을 실험적으로 확인하였다. 실험을 통해 얻어진 결과는 최종적으로 전진동결농축법의 상용화 시스템을 개발하는데 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

또, 기존 연구에서는 전진동결농축법을 이용한 폐수처리시스템에 대한 구체적인 에너지 효율 및 경제성 관련 분석 자료가 미미하고, 에너지 효율의 측면을 고려한 고효율 시스템 설계에 대한 연구가 부족한 것으로 보인다. 이에 전진동결농축법을 이용한 폐수처리시스템 구성에 있어 에너지 효율 및 생산성 향상과 관련되어 설계에 반영할 수 있는 자료를 얻고자, 동결처리에 필요한 열량을 중심으로 설계데이터를 계산하고, 해석프로그램을 활용하여 시스템 운전의 에너지 효율을 시뮬레이션 하였다. 이를 통해 시스템 구성에 있어 경제적인 설계안을 제시하고, 증발농축법과 위탁처리방식에 비해 동결농축법이 갖는 비용 측면의 우수성과 냉온열, 용수 활용 등 회수 가능한 에너지의 재활용을 통한 친환경유틸리티로서의 종합적인 경제성을 검토하여 시스템의 개발과 상용화에 활용하고자 하였다.



제 2 장 수직원판에서 폐수 동결농축에 관한 실험 및 해석

2.1 실험개요

동결농축법은 빙점이하의 수온에서 순수한 얼음결정이 생성되는 동안에 폐수에 함유된 유·무기 물질이 동결되지 않는 액체로 분리 농축되는 원리를 이용한 것이다. 이론적으로는 상대적으로 작은 물 분자의 동결과정에서는 용질을 결정으로부터 배제하려는 영향에 따라 순수한 빙이 성장하게 된다. 그러나 실제로는 용질의 농도, 냉각면의 온도, 동결계면의 진행속도 등 다양한 조건에 따라 용질이 빙층 내에 포함되어 분리효율이 떨어지게 된다.

동결농축법에서 분리효율과 관련된 주요 인자로는 동결계면의 진행속도가 농축효과에 크게 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 전열방향으로 1차원적인 동결층이 성장되는 전진동결농축에서는 수용액과 얼음간의 분리효율이 고액경계면에서의 물질전달율과 얼음의 성장속도에 의해 지배받는다고 알려져 있다^[34].

또한, 액체를 응고점이하로 냉각하는 경우 응고점에서 동결하지 않고 과냉각된 후 시간의 경과와 함께 과냉각도가 증가하다가 빙핵이 생성되며 얼음이 성장하게 되는데 이때 형성되는 수지상의 얼음에 석출되는 고농도의 용질이 몰입되어 초기 동결 빙층의 용질 농도가 상승하는 현상이 발생한다^[35].

본 연구에서는 냉각면의 온도 변화에 따른 분리효율과 동결계면의 속도, 물질전달율을 조절할 수 있는 기포분사의 방법, 과냉각방지 초기빙층의 두께에 따른 결과를 관찰하였다. 실험은 향후 해수담수화를 위한 응용을 고려하여 염화나트륨수용액을 이용하여 기초 실험을 실시하고, 우수한 분리효율을 갖는 기포분사방법으로 대표적인 산업폐수 성분인 Pb, Cr 수용액을 임의 조성 후 본 실험을 실시하였다.

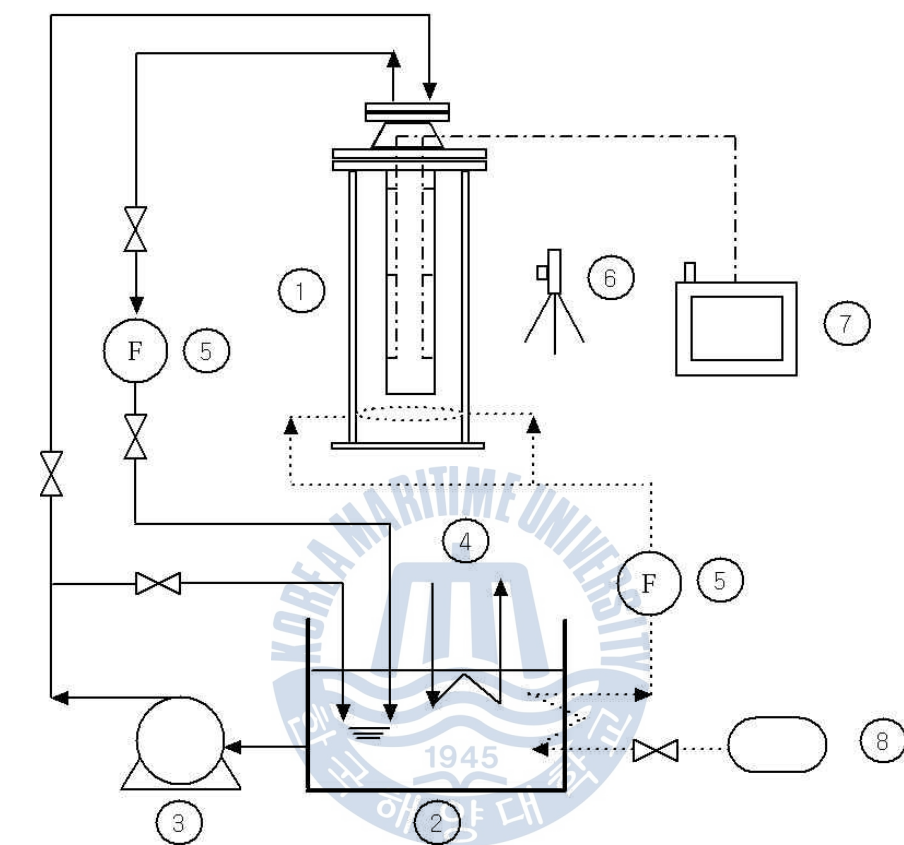
2.2 실험장치 및 실험방법

2.2.1 실험장치

Fig. 2.1은 실험장치의 전체 계통도이다. 실험장치는 동결이 진행되는 실험부(test section), 냉각면을 소정의 온도로 일정하게 유지하기 위한 브라인 순환부, 수용액에 기포를 가하기 위해 일정한 온도로 조절된 공기를 분사하는 기포 분사장치, 동결 냉각면 및 수용액의 온도를 측정하기 위한 온도 측정 장치와 동결층 두께를 가시화하기 위한 가시화 장치로 구성되어 있다.

실험부 ①은 가시화가 가능하도록 내경 200 mm, 길이 400 mm, 두께 5 mm의 투명 아크릴 재질의 원통으로 제작하였고, 중앙에 내경 100 mm, 길이 300 mm, 두께 2.5 mm의 원형 동관을 수직으로 설치하였다. 동관 내에는 노즐을 설치하여 냉각면에 균등하게 브라인을 분사하여 냉각면의 온도를 일정하게 유지하도록 하였다. 냉각면 온도는 동관의 양쪽 표면에 6개의 열전대(K type)를 설치하고 열전대로부터 측정된 온도는 데이터처리장치(DR-230)에 기록하였다. Fig. 2.2는 실험부의 상세도 이다.

실험부의 수직원관 표면을 냉각시키는 냉매로는 소정의 온도로 조절된 브라인(에틸렌글리콜 40 % 수용액)을 사용하였고 브라인 탱크 ②에서 순환 펌프 ③을 이용 수직원관의 내측면의 온도가 균일하게 되도록 노즐을 통하여 분사하였다. 기포의 분사는 공기압축기 ⑧에 의해 공급된 공기를 냉각기를 거쳐 소정의 온도로 조절한 후 유량계를 통하여 일정 유량으로 공급하였으며, 공급 방식으로 아크릴 원통의 벽면에서 네 방향으로 분사하는 방법과 환모양의 고리형 노즐을 수직원관 하부에 설치하여 냉각면에 직접 분사하는 방법을 사용하였다. Fig. 2.3는 본 실험장치의 전경 사진이다.



- | | |
|--------------------|-------------------------|
| ① Test section | ⑤ Flow-meter |
| ② Brine tank | ⑥ Digital camera |
| ③ Circulation pump | ⑦ Temperature recorder |
| ④ Refrigerator | ⑧ Air compressor |
| ———— Brine line | ----- Thermocouple wire |
| ----- Air line | |

Fig. 2.1 Schematic diagram of experimental apparatus

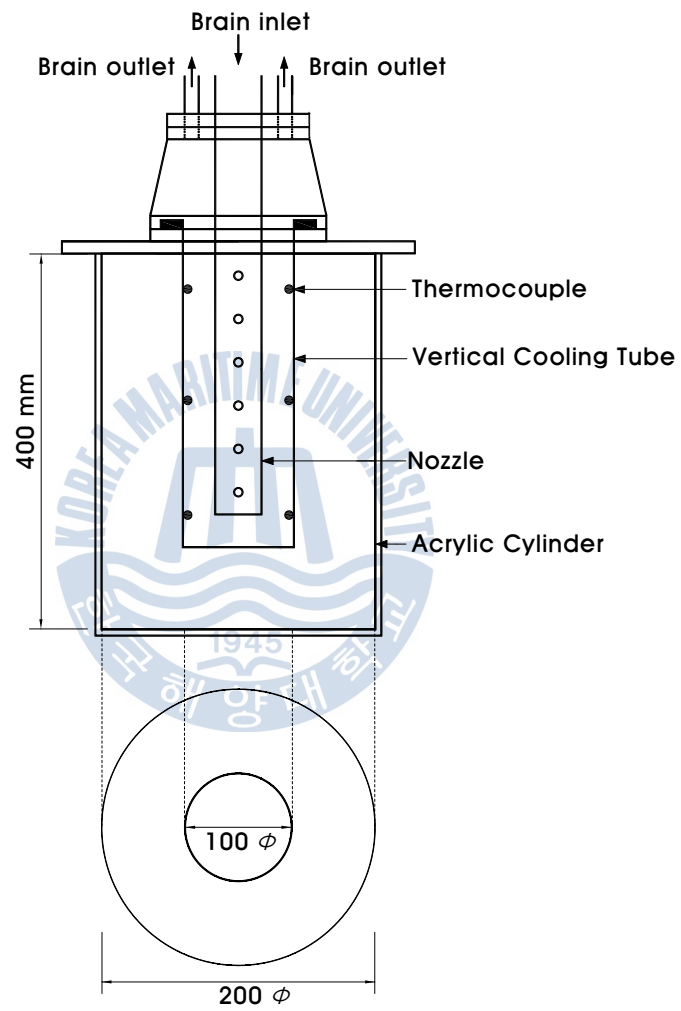


Fig. 2.2 Detail of test section



Fig. 2.3 Photograph of experimental apparatus

2.2.2 실험방법

실험은 염화나트륨수용액을 이용하여 염분농도 및 냉각면의 온도변화, 기포 분사를 통한 유동영향에 대한 기초 실험과 대표적인 중금속인 Pb, Cr 수용액을 이용한 본 실험으로 나누어 실시하였다.

실험은 먼저 냉동기를 작동시켜 각부의 온도를 시험조건에 맞게 유지시키고 수용액 초기온도를 5 ℃로 일정하게 냉각하여 실험부에 공급한 후 브라인 펌프를 가동하여 냉각면에 브라인을 공급하는 시점을 각 실험의 시작으로 하였다. 실험 시작 후 매 30분마다 동결층의 형상과 두께를 측정하고 가시화 하였으며, 120분이 경과한 시간을 정상상태로 하여 종료 후 이를 가시화하고 동결층과 잔류 농축수용액의 농도를 측정하였다. 염화나트륨의 농도는 디지털 염분계(Salt refractometer ES-421)를, 중금속 농도는 LAMOTTE Colorimeter를 각각 이용하여 측정하였다.

기초 실험에서는 1.8 wt% 및 3.6 wt% 염화나트륨수용액을 이용하여 냉각면 온도, 기포 분사방법의 영향을 실험하여 분리효율이 높은 기포 분사방법을 선택 후 본 실험에 적용하였다. 본 실험에서는 Pb 2.2 ppm, Cr 0.07 ppm 중금속 수용액에 대하여 냉각면 온도, 기포 분사 유동, 과냉각을 방지하기위한 용질을 포함하지 않은 초기빙층 두께의 영향을 실험하였다. Table 3.1과 Table 3.2는 기초 및 본 실험의 조건을 나타내었다.

냉각면의 온도는 동결농축처리장치의 일반적인 사용온도로 연구되는 -2 ℃, -7 ℃, -12 ℃로 변화시켜 실험을 수행하였으며, 기포 분사방법은 원통벽면에서 유입하는 간접분사방식과 원관의 수직하면에서 환모양의 노즐을 통해 동결계면에 직접 분사하는 경우를 나누어 실험하였다. 중금속 수용액에 대해서는 기포가 분사되는 유동 상태에서의 냉각면의 온도에 따른 영향을 고찰 후 기포가 분사되지 않은 비 유동 상태의 실험결과와 비교하였다. 추가적으로 초기빙층 두께의 영향을 관찰하기 위해 각각 1 mm, 5 mm의 초기빙층을 실험 시작 전 착빙시켜 결과를 관찰하였다. 초기빙층이 5 mm이고 냉각면 온도가 -2 ℃일 때는 동결층이 성장하지 못하여 -15 ℃의 온도 조건을 추가하여 실험의 신뢰성을 높였다.

Table 2.1 Experimental condition(NaCl)

Salinity(S)	Cooling wall Temperature(T_w)	Bubble flow method
1.8 wt%	-2 °C	Injection from wall(F_{wall}) = 15 L/min
	-7 °C	Ring nozzle(F_{ring}) = 15 L/min
3.6 wt%	-12 °C	Ring nozzle(F_{ring}) = 30 L/min

Table 2.2 Experimental condition(Pb, Cr)

Ice-Lining thickness(l_{th})	Flow method	Cooling wall temperature(T_w)
1 mm	Not flow field(F_{non})	-2 °C -7 °C
5 mm	Ring flow field(F_{ring}) = 5L/min	-12 °C -15 °C

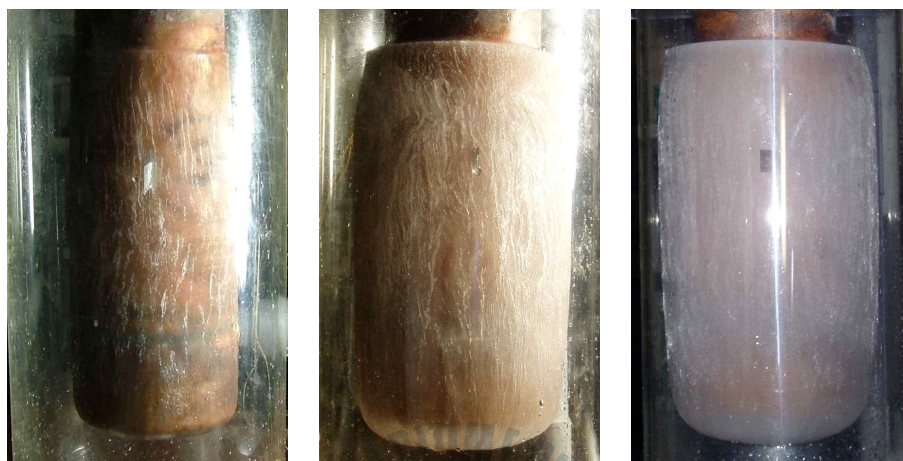
2.3 염화나트륨수용액 대상 실험결과 및 고찰

2.3.1 냉각면 온도에 따른 영향

Fig. 2.4과 Fig. 2.5는 수용액 염분농도 1.8 wt%와 3.6 wt%에서 기포를 분사하지 않고 동결을 시작하여 120분간 실험을 실시한 후 동결층을 가시화한 사진이다. 그림에서 냉각면의 온도가 낮을수록 동결층의 성장 두께가 두꺼워지는 것을 알 수 있다.

Fig. 2.6과 Fig. 2.7은 각각 염분농도(S) 1.8 wt%와 3.6 wt% 수용액에 대해 수직원관의 냉각면 온도(T_w)를 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 변화시켰을 때 동결층의 성장을 나타낸 그래프이다. 냉각면 온도가 낮을수록 동결층이 두꺼워지는 것을 알 수 있으며 이는 냉각면과 동결계면 사이의 열낙차가 증가할수록 냉각면에서 동결계면으로의 열유속이 커지고 그에 따라 동결량도 증가하기 때문이다. 냉각 초기에 수직원관 주위의 수용액이 과냉각상태로 존재하다가 과냉각이 해소되면서 동결층이 생성되는데 냉각면 온도가 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 인 경우에는 1.8 wt% 수용액은 과냉각 해소 시간이 지연되고 3.6 wt% 수용액에서는 과냉각이 해소되지 못해 동결층이 형성되지 못하였다.

Fig. 2.8 및 Fig. 2.9는 실험 종료 후 동결층 내와 농축수용액의 염분농도를 측정한 것으로 냉각면의 온도가 낮을수록 동결층의 염분농도는 높아지고 수용액의 염분농도는 낮아지는 것을 알 수 있다. 이는 냉각면의 온도가 낮을수록 동결층의 성장속도가 빨라 동결계면의 고액공존층에서 용질이 배제효과가 일어나기 전에 얼음결정에 포섭되기 때문으로 얼음의 성장속도의 조절이 분리효율의 중요한 제어 요소임을 알 수 있다. 또 1.8 wt% 수용액의 동결층 염분농도가 낮은 결과는 용질의 농도가 낮을수록 분리효율이 높다는 기존연구와 일치한 결과를 보이고 있다^[16]. 결과적으로 냉각면의 온도는 처리효율과 비례적이며 처리량인 얼음의 제빙량과는 상반되는 관계가 성립되는 것을 확인할 수 있었다.



(a) $T_w = -2\text{ }^{\circ}\text{C}$

(b) $T_w = -7\text{ }^{\circ}\text{C}$

(c) $T_w = -12\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 2.4 Photograph of frozen layer at $S=1.8\text{ wt\%}$



(a) $T_w = -2\text{ }^{\circ}\text{C}$

(b) $T_w = -7\text{ }^{\circ}\text{C}$

(c) $T_w = -12\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 2.5 Photograph of frozen layer at $S=3.6\text{ wt\%}$

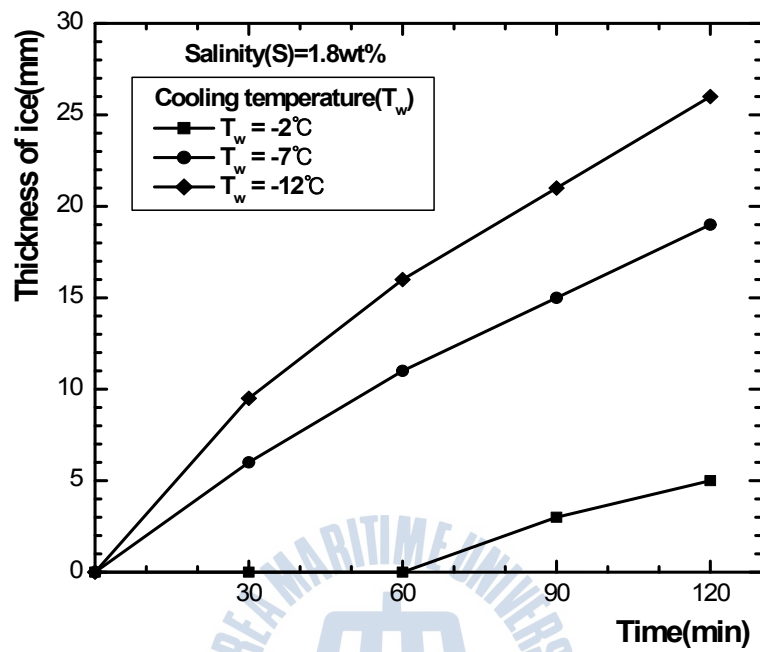


Fig. 2.6 Thickness of frozen layer at $S=1.8$ wt%

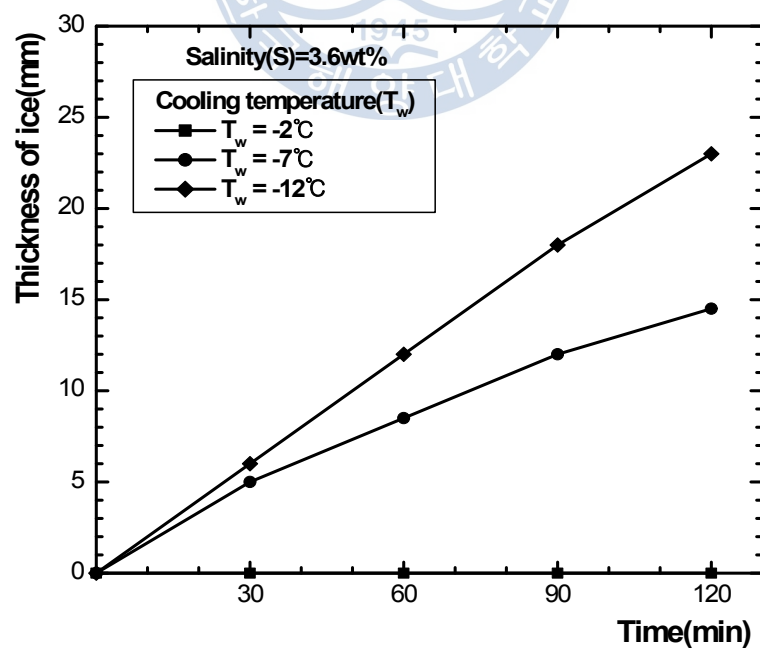


Fig. 2.7 Thickness of frozen layer at $S=3.6$ wt%

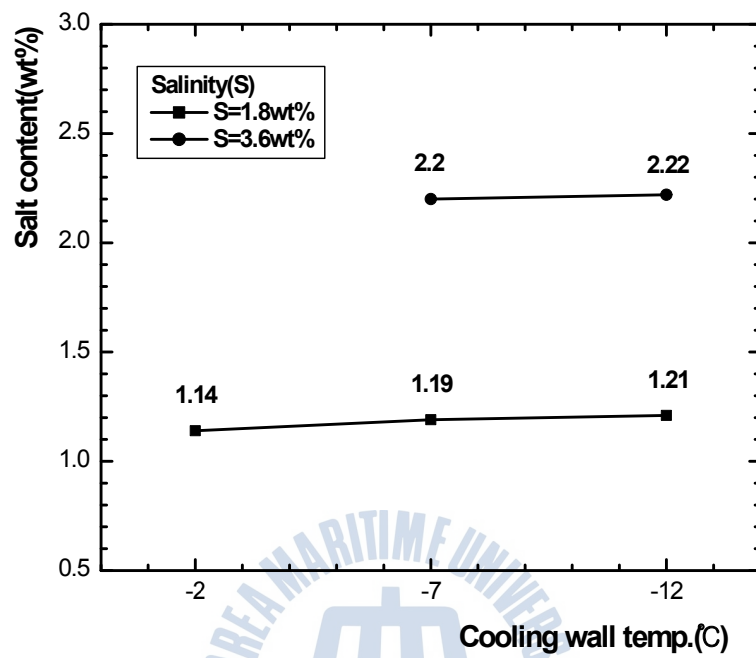


Fig. 2.8 Salt content of frozen layer

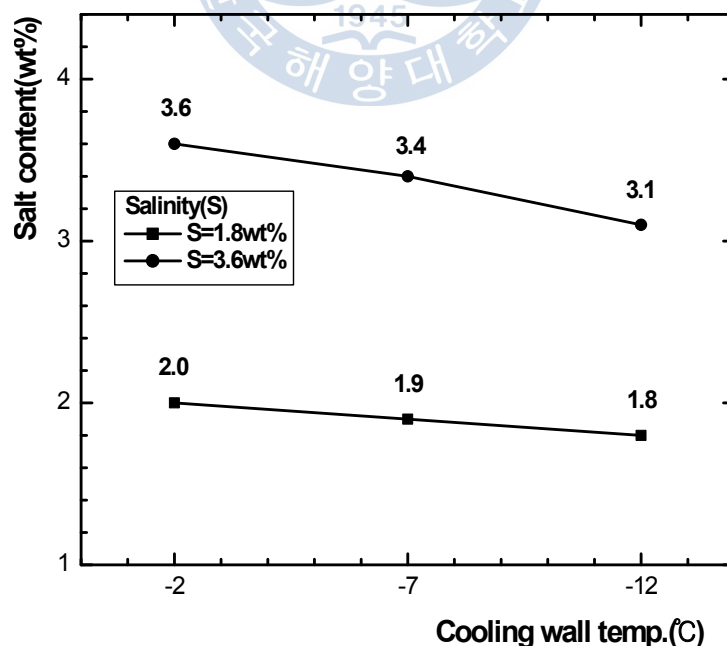


Fig. 2.9 Salt content of concentrated aqueous solution

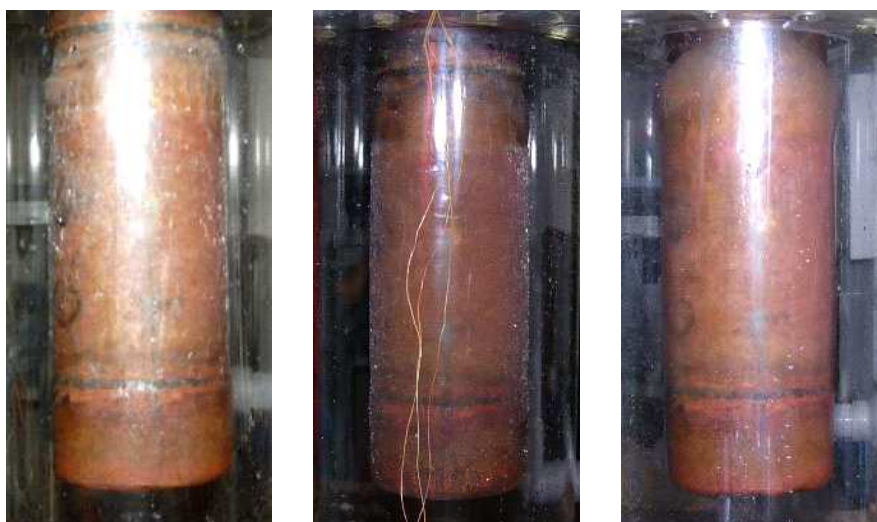
2.3.2 기포 분사방법에 따른 영향

기포 분사방법에 따른 영향을 실험하기 위해 농도 1.8 wt% 염화나트륨수용액에 각각의 냉각면 온도에 대해 원통벽을 통해 기포를 간접 분사하는 방법(F_{wall})과 환모양의 분사 노즐을 통하여 동결계면에 직접 분사하는 방법(F_{ring})을 비교 실험하였고 추가적으로 분사량을 늘려 환모양의 분사 노즐로 냉각면에 직접 분사하였다.

Fig. 2.10에서 Fig. 2.12는 염화나트륨 1.8 wt% 수용액에 각각의 방법으로 기포를 분사하여 실험한 후 동결층의 형성을 가시화한 사진이다. Fig. 2.13은 각 냉각온도와 기포 분사방법에 따른 동결층 성장 변화를 나타낸 것으로 냉각온도가 낮을수록 동결층이 발달되고, 동결계면에 공기를 직접 분사하는 방법이 간접적으로 분사하는 방법보다 동결층이 얇은 것을 알 수 있다. 이는 직접 분사되는 기포가 동결계면에서의 열전달을 방해하는 절연체 역할을 하기 때문이며, 분사되는 기포의 양이 증가함에 따라 동결층이 얇아지는 것은 열 저항의 증가와 유속 증가에 따른 대류 열전달촉진이 증가하기 때문이다.

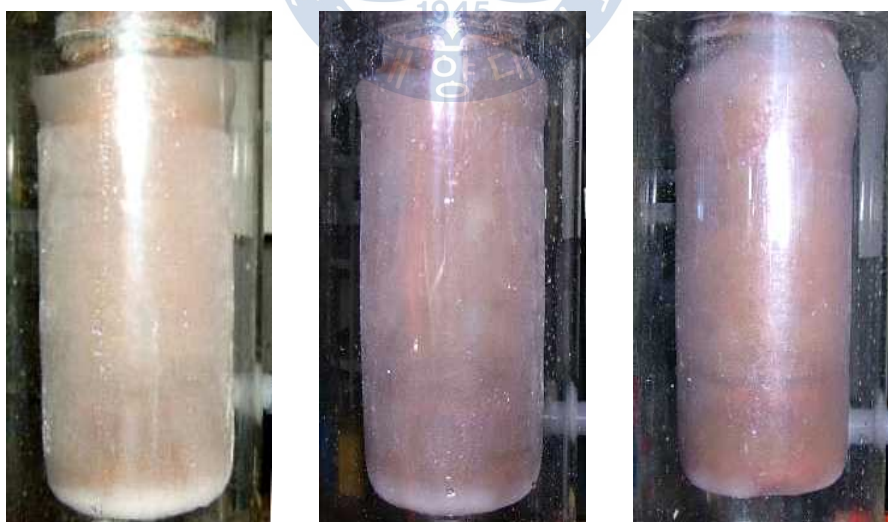
Fig. 2.14는 각각의 냉각면 온도에서 기포 분사방법에 따른 동결층의 염분 농도를 나타내는 것으로 냉각면 온도와 관계없이 환모양 노즐을 통해 냉각면에 직접 분사하는 방식이 동결층 내의 염화나트륨 농도가 낮은 것을 알 수 있다. 이는 유입되는 공기의 절연효과로 동결층의 성장속도가 늦어져 염분이 충분히 수용액으로 배제될 수 있는 시간을 제공하며, 동시에 기포가 직접 동결계면에 작용하여 석출된 염분을 수용액으로 확산시켜 동결계면에서의 용질의 밀도를 저감시키기 때문으로 생각된다. 기포의 분사량이 증가하면 절연효과의 증대와 동결계면에 존재하는 고농도 농축액의 확산 속도가 빨라져 동결층에 내포되는 염분량은 더욱 감소하게 된다.

Fig. 2.15는 잔류 농축수용액의 염분농도를 비교한 것으로 직접 분사하는 방법이 간접 분사보다 동결층에서 수용액으로 용질을 배제하는 효과가 높아져 잔류 수용액내의 염분농도가 높아지며, 기포 분사량이 많을수록 이러한 경향은 두드러진다. 이로써 기포를 분사하여 처리효율을 높이는 방법에서는 간접 분사 방식 보다는 동결계면에 직접 분사하는 방법이 효과적이며, 분사량에 비례적으로 처리효율의 향상을 확인할 수 있었다.



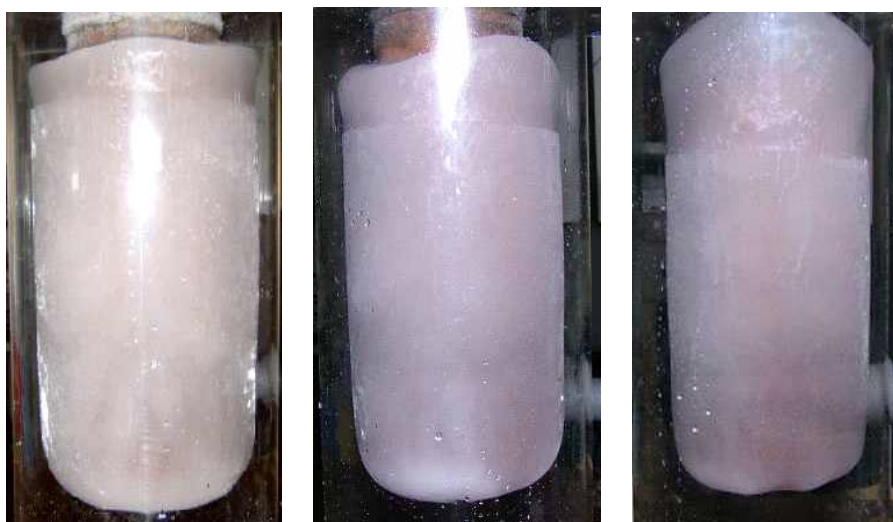
(a) $F_{\text{wall}}=15$ L/min (b) $F_{\text{ring}}=15$ L/min (c) $F_{\text{ring}}=30$ L/min

Fig. 2.10 Photograph of frozen layer at $S=1.8$ wt%, $T_w=-2$ °C



(a) $F_{\text{wall}}=15$ L/min (b) $F_{\text{ring}}=15$ L/min (c) $F_{\text{ring}}=30$ L/min

Fig. 2.11 Photograph of frozen layer at $S=1.8$ wt%, $T_w=-7$ °C



(a) $F_{\text{wall}}=15$ L/min (b) $F_{\text{ring}}=15$ L/min (c) $F_{\text{ring}}=30$ L/min

Fig. 2.12 Photograph of frozen layer at $S=1.8$ wt%, $T_w=-12$ °C

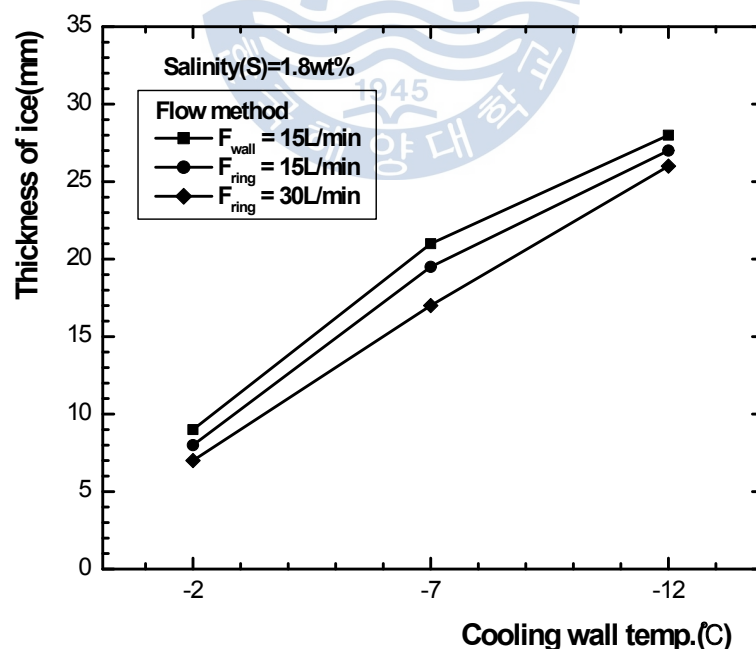


Fig. 2.13 Thickness of frozen layer at $F_{\text{wall}} = 15$ L/min,
 $F_{\text{ring}}=15$ L/min, $F_{\text{ring}}=30$ L/min

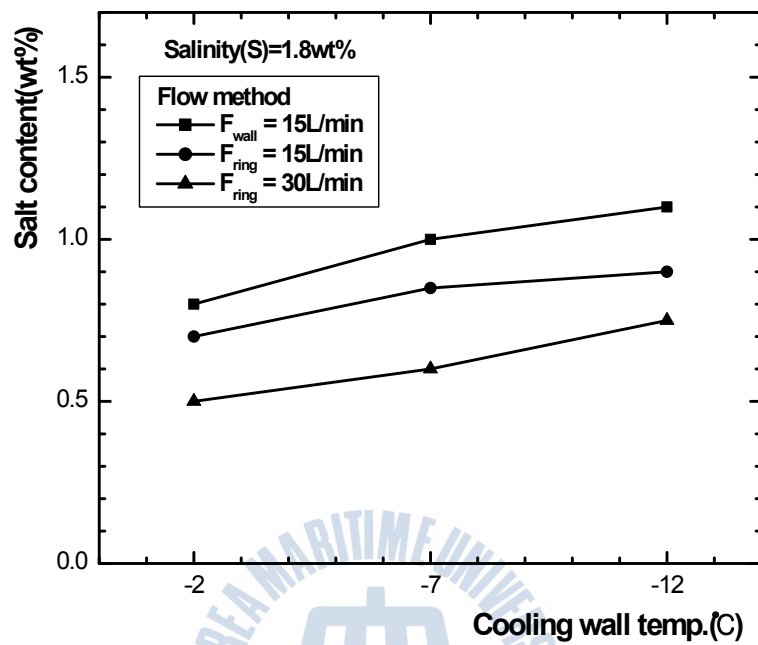


Fig. 2.14 Salt content of frozen layer

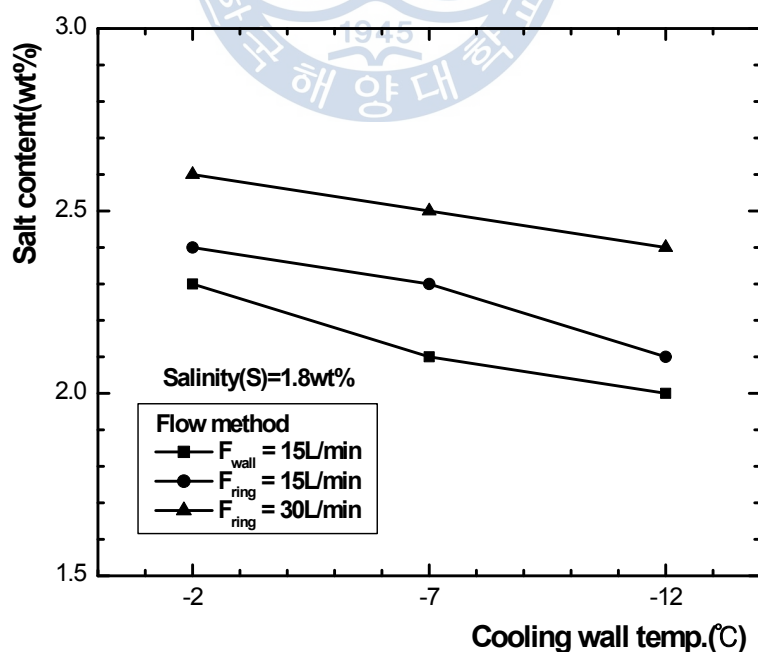


Fig. 2.15 Salt content of concentrated aqueous solution

2.4 중금속 수용액 대상 실험결과 및 고찰

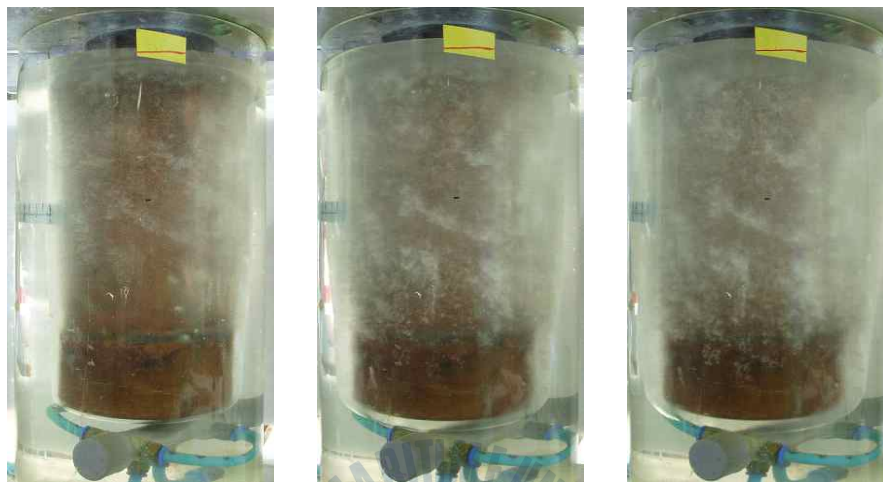
2.4.1 냉각면 온도 및 기포 분사에 따른 영향

본 실험에서는 과냉각 현상으로 인해 동결 초기에 오염물질이 초기 동결층에 포섭되는 것을 방지하기 위해 용질을 포함하지 않은 수용액을 이용 일정한 두께로 초기빙층 1 mm를 형성하고 냉각면의 온도와 유동의 효과를 실험하였다. 기포의 분사는 기초 실험에서 용질의 분리 효율이 높은 수직원관 하부에서 환모양의 노즐로 동결계면에 직접 분사하는 방식을 선택하였으며, 이때의 유량은 5 L/min로 공급량을 조절하였다.

Fig. 2.16은 기포를 분사하지 않은 비유동장에서 초기빙층 1 mm로 동결을 시작하여 실험 종료 후 동결층을 가시화한 사진이며, Fig. 2.17은 동일한 조건에서 기포를 분사하여 실험한 결과의 가시화 사진이다.

Fig. 2.18은 기포분사유량 5 L/min일 경우 냉각온도에 따른 동결층의 성장과정을 나타낸다. 시간의 경과에 따라 동결층이 성장하며, 냉각온도가 낮을수록 더 두껍게 발달함을 알 수 있다. 이는 냉각온도가 낮을수록 냉각면과 동결계면 사이의 열낙차가 커져 열유속이 증가하기 때문이다. Fig. 2.19는 기포분사 유무에 따른 동결거동을 나타낸다. 냉각온도가 낮을수록 동결층이 두껍게 형성되며, 기포분사를 하였을 경우가 동결층이 얇게 형성됨을 알 수 있다. 이는 가해진 기포가 동결계면과 수용액의 접촉을 방해하는 절연체 역할을 하므로 동결계면에서 수용액으로의 열전달이 작아져 동결층의 성장이 감소하는 것으로 생각된다.

Fig. 2.20과 Fig. 2.21은 냉각온도와 기포분사 유동에 따른 동결층의 Pb, Cr 농도의 변화를 나타낸 것으로, 냉각온도가 높아질수록 얼음속의 중금속 농도가 저감됨을 알 수 있다. 이는 냉각온도가 높을수록 동결층의 성장률이 둔화되고 동결에 의해 석출된 중금속이 동결계면 밖으로 배제될 수 있는 시간이 증대되기 때문이다. 또, 기포 분사를 가하였을 때 동결층 내 중금속의 농도가 낮아지는 것을 알 수 있는데 이는 기포의 유동이 동결층의 성장속도를 늦추어 중금속이 석출될 수 있는 시간을 증대시켜 좁과 동시에 기포가 직접 동결계면에 작용하여 석출된 용질을 주위의 수용액으로 확산시키기 때문이다



(a) $T_w = -2\text{ }^{\circ}\text{C}$

(b) $T_w = -7\text{ }^{\circ}\text{C}$

(c) $T_w = -12\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 2.16 Photograph of frozen layer at not flow field(F_{non})



(a) $T_w = -2\text{ }^{\circ}\text{C}$

(b) $T_w = -7\text{ }^{\circ}\text{C}$

(c) $T_w = -12\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 2.17 Photograph of frozen layer at $F_{\text{ring}} = 5\text{ L/min}$

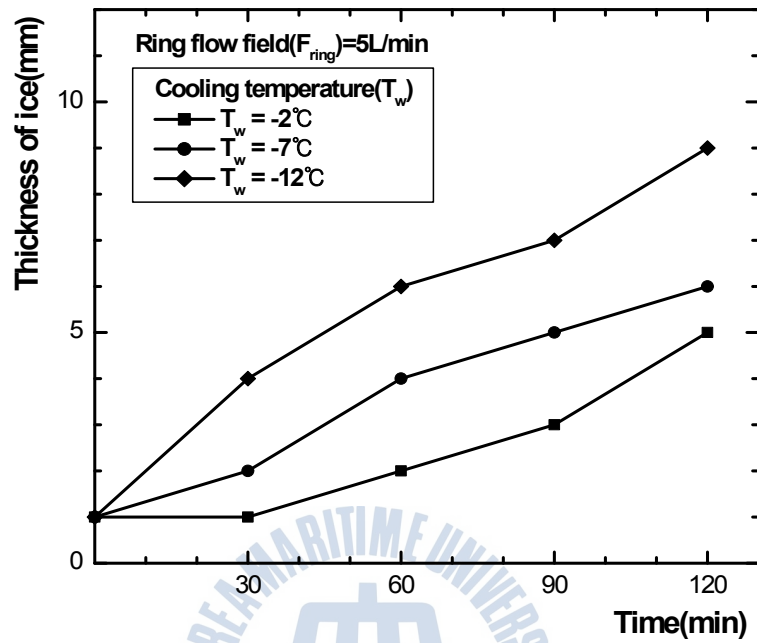


Fig. 2.18 Thickness of frozen layer at $F_{ring}=5$ L/min

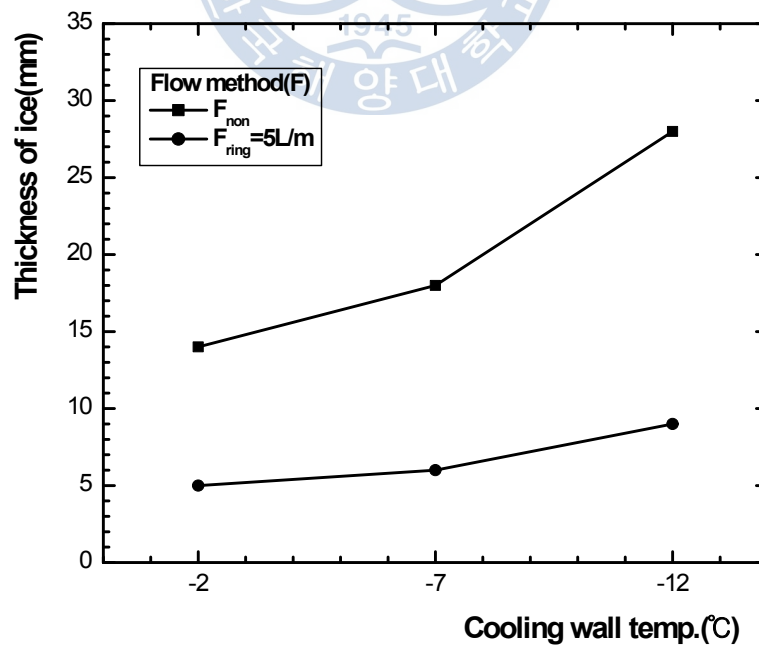


Fig. 2.19 Thickness of frozen layer at F_{non} , $F_{ring}=5$ L/min

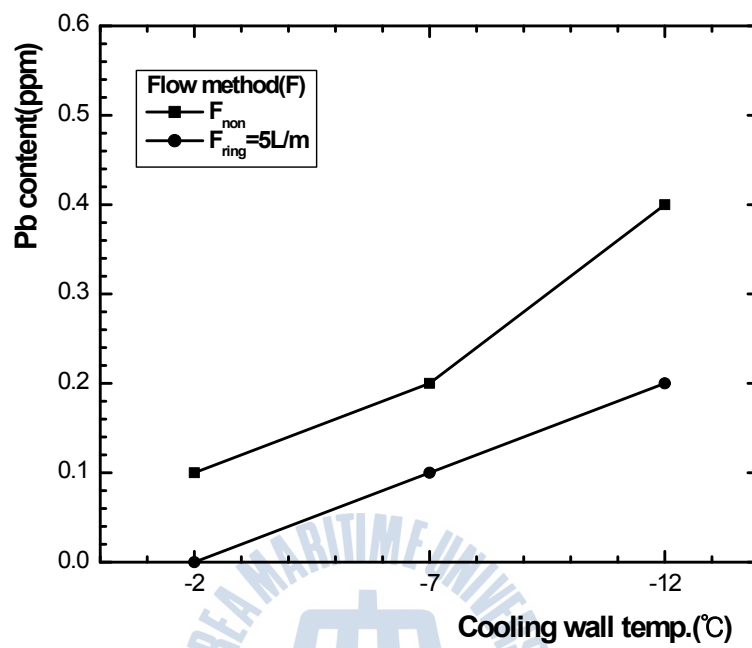


Fig. 2.20 Pb content of frozen layer

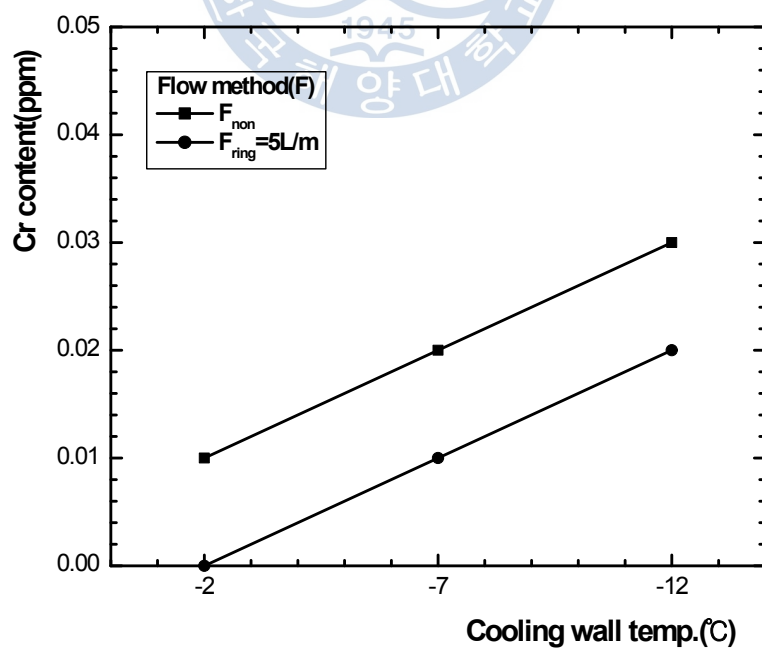


Fig. 2.21 Cr content of frozen layer

2.4.2 초기빙층 두께에 따른 영향

동결과정 초기에 발생하는 과냉각에 의한 수지상의 얼음에 불순물이 포함되는 것을 방지하여 폐수의 처리효율을 높이기 위한 방법으로 청수로 얇은 얼음을 냉각면에 미리 착빙하는 방법이 연구되고 있다. 본 연구에서는 초기빙층의 두께에 따른 영향을 평가하기 위해 초기빙층 두께 1 mm와 5 mm 각각에 대하여 냉각면의 온도를 변화시켜 실험을 하였다.

Fig. 2.22와 Fig. 2.23은 유동이 주어진 조건($F_{ring}=5$ L/min)하에서 각각의 냉각면 온도에서 초기빙층 두께에 따른 동결층의 성장을 실험 종료 후 가시화 한 사진이다. Fig. 2.24와 Fig. 2.25는 초기빙층의 두께별 최종 생성 동결층에 포함된 Pb와 Cr의 농도 변화를 나타내고 있다. 동결층 내 포함된 중금속 농도는 1 mm보다 5 mm일 때 더 낮은 수치를 나타내는데 이는 열저항의 증가로 동결층의 성장속도가 느려져 용질을 충분히 동결계면 밖으로 배제하고, 초기 순수한 얼음의 두께가 두꺼워질수록 동일한 동결량에서의 초기빙층이 차지하는 비율이 높아지기 때문으로 고찰된다. 또, 초기빙층이 5 mm일 경우 냉각면 온도 -7°C , -12°C 에서는 동결층 내 두 중금속이 모두 검출되지 않는 이상적인 분리가 이루어지고 있음을 알 수 있는데 이는 과냉각의 해소와 동결층 성장 속도의 저하로 빙층에서 오염물질이 완전히 배제되는 것으로 추정된다. 5 mm의 경우 냉각면 온도 -2°C 에서는 동결층이 형성되지 못하여 실험의 정확도를 높이기 위해 -15°C 를 추가 실험하였다. -15°C 에서는 동결층의 성장이 빨라져 오염물질이 포섭되는 것을 알 수 있다.

Fig. 2.26과 Fig. 2.27은 잔류 농축액 속에 포함된 Pb와 Cr의 농도 변화를 나타내고 있다. 잔류 농축수용액에 포함된 중금속의 농도는 Pb와 Cr이 동일한 양상을 보이고 있으며, 냉각면 온도 -2°C 와 -7°C 에서는 중금속의 농도가 초기 동결층 5 mm보다 1 mm가 높게 측정되는데 이는 초기빙층 5 mm에서 보다 1 mm에서 동결층의 발달이 우수하여 중금속이 일부 동결층으로 몰입되더라도 많은 양의 물이 동결되므로 수용액의 중금속 농도가 높아지기 때문으로 생각된다. 냉각면 온도 -12°C 와 -15°C 에서는 5 mm에서도 동결층의 형성이 발달되고, 동결층에서 중금속이 배제되면서 원통 내 잔류 수용액의 중금속 농도가 급격히 상승하는 것을 알 수 있다.



(a) $T_w = -2\text{ }^{\circ}\text{C}$

(b) $T_w = -7\text{ }^{\circ}\text{C}$

(c) $T_w = -12\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 2.22 Photograph of frozen layer at $I_{th} = 1\text{ mm}$



(a) $T_w = -7\text{ }^{\circ}\text{C}$

(a) $T_w = -12\text{ }^{\circ}\text{C}$

(a) $T_w = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 2.23 Photograph of frozen layer at $I_{th} = 5\text{ mm}$

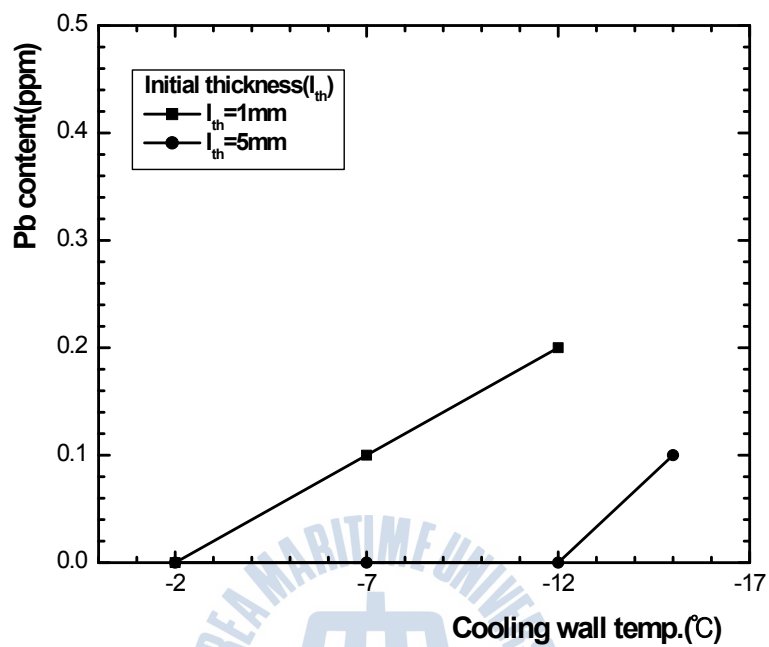


Fig. 2.24 Pb content of frozen layer

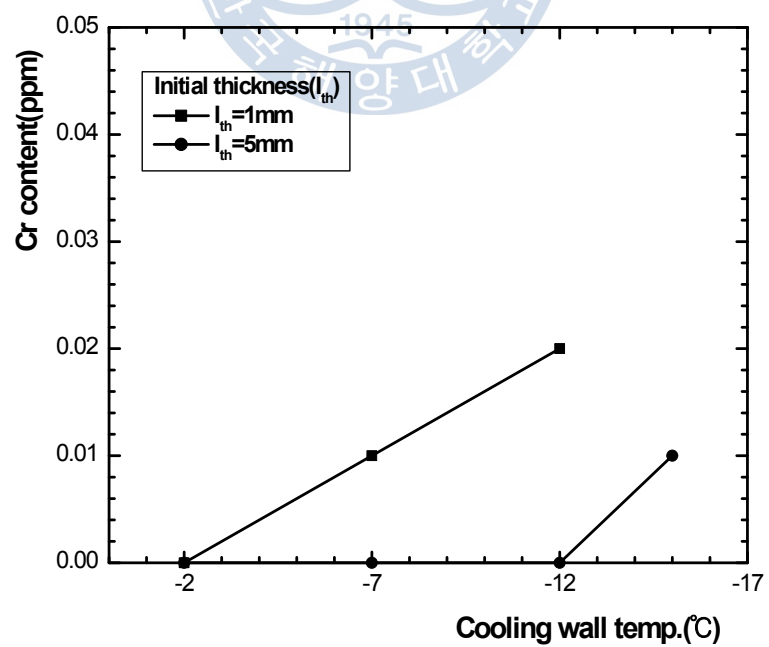


Fig. 2.25 Cr content of frozen layer

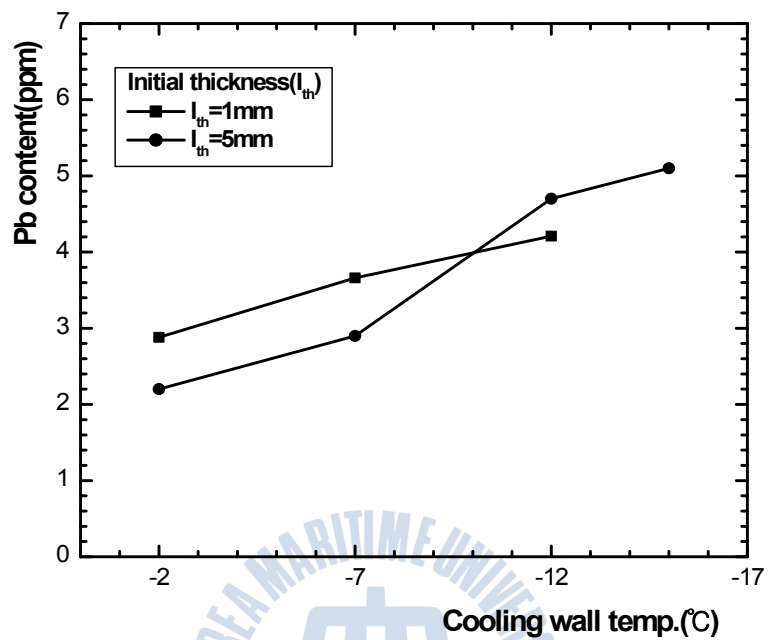


Fig. 2.26 Pb content of concentrated aqueous solution

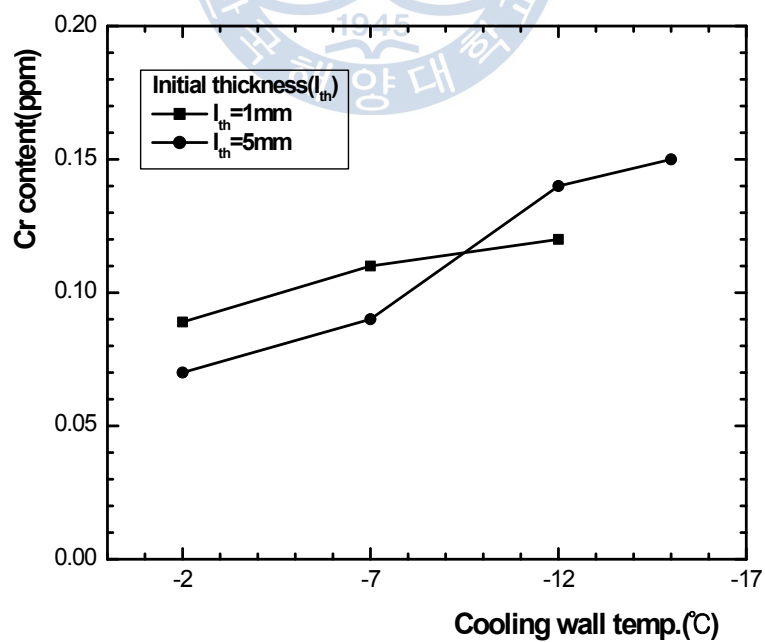


Fig. 2.27 Cr content of concentrated aqueous solution

2.5 동결농축과정의 열교환 모델

폐수의 동결농축과정을 물질전달을 고려하지 않은 전열현상으로 단순화하여 이론 모델을 이용하여 냉각면 온도에 따른 동결층의 두께와 소요 열량을 계산하였다. 또, 이론 모델과 동일한 냉각면 온도 조건으로 실험된 동결층의 성장 두께와 열수지를 분석하여 이론 모델과 비교하므로 열수지분석의 타당성을 검증하였다.

검증된 실험의 열수지 분석내용을 기준으로 상용프로그램인 HYSYS를 이용하여 열교환기 형태의 회로를 구성하고, 총열량 또는 각 사용열량으로 등가 열회로를 모델링하여 표현 가능여부를 비교 검증하였다. 실험부의 유입 열량을 실제 동결에 이용되는 잠열과 냉각열 및 외부손실을 포함한 총손실로 구분하여 단순한 열교환 모델로 표현하므로, 다음의 상용 동결농축폐수처리시스템의 시스템 해석 및 효율 검토에 활용하고자 하였다.

2.5.1 동결층 성장의 이론적 단순모델^[36]

물의 동결현상은 이동하는 경계면에서 발열을 동반하면서 액상이 고상으로 변하는 전열현상으로 보아도 된다. 즉 고액계면에서 물은 잠열을 방출하여 얼음으로 변한다. 얼음의 동결기구는 Fig. 2.28과 같다.

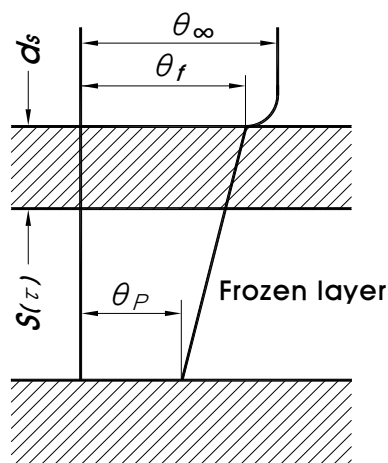


Fig. 2.28 Growth model of frozen layer^[36]

이때 동결계면이 진행하기 위해서는 경계면에서 동결층 쪽으로 열전도에 의해 이동하는 열량은 물 쪽에서 이면에 이동하는 열량 보다 언제나 커야한다. 이 양자의 차에 상당하는 잠열량을 경계면의 물 쪽에서부터 빼앗으며 동결계면은 진행하게 된다. 열의 흐름을 y방향 일차원으로 하면 경계면에서 다음 식 (2.1)이 성립된다.

$$q_l \frac{ds}{d\tau} = \lambda_i \left(\frac{\partial \theta_s}{\partial y} \right)_{y=s} - q_c \quad (2.1)$$

여기서, ρ_i 는 얼음의 밀도, q_l 은 잠열량, λ_i 는 얼음의 열전도율, θ_s 는 동결층의 온도, τ 는 시간이다.

물 쪽에서부터 경계면에 들어가는 열량 q_c 는 식 (2.2)와 같다.

$$q_c = \alpha_w (\theta_\infty - \theta_f) = \lambda_w \left(\frac{\partial \theta_w}{\partial y} \right)_{y=s} \quad (2.2)$$

여기서, α_w 는 물 쪽의 열전달계수, λ_w 는 물의 열전도율, θ_w 는 물의 온도이다.

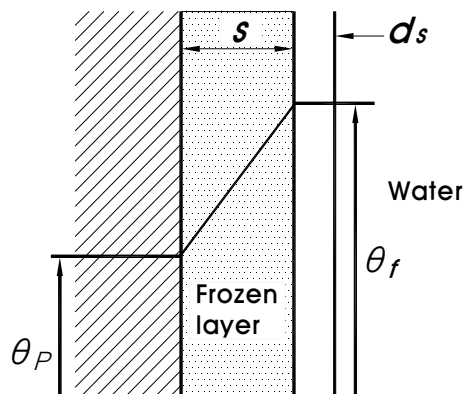


Fig. 2.29 Progress model of frozen layer^[36]

Fig. 2.29는 가장 단순한 모델로 계면의 진행 속도를 나타낸 것으로 계면에서의 열이동은 얼음층의 열전도만 있고 물 쪽으로부터의 열이동은 없다고 본 것이다. 따라서 계면에서의 열평형은 다음 식 (2.3)으로 표시된다.

$$q_i \frac{ds}{d\tau} = \lambda_i \left(\frac{\theta_f - \theta_p}{s} \right) \quad (2.3)$$

여기서, θ_f 는 물의 상변화 온도, θ_p 는 냉각면의 온도이다.

= 0 일 때 $s = 0$ 이라고 생각하면 식 (2.4)이다.

$$s = \frac{2\lambda_i(\theta_f - \theta_p)}{\rho_i q_i} \tau \quad (2.4)$$

여기서, 계면의 이동속도가 비교적 느리며 순간순간의 계면의 위치에 대한 온도 분포는 계면이 정지하고 있다고 생각할 때의 정상온도분포와 거의 같다고 가정하고 있다.

2.5.2 이론적 단순모델에서 동결량 및 열량

실험장치의 실험부 내부를 유동이 주어지지 않은 정지층이고 열의 흐름이 1차원이라 가정하면 단순모델을 통해 이론적 동결층의 성장 두께를 예측 할 수 있다. 식 (2.4)에서와 같이 동결계면에서의 열이동은 얼음층의 열전도만 있고 수용액으로부터의 열이동이 없다고 가정하여 주어진 냉각면의 온도에서 동결층의 두께를 계산하였다. 수용액은 1.8 wt%의 염화나트륨수용액을 냉각면 온도 $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서 동결하는 것으로 하였다. 다음 Table 2.3은 온도 조건 및 사용된 물성치를 나타내었다. 식 (2.4)에서 이론적 단순모델에 따라 성장하는 동결층의 두께는 17.9 mm이고 실험부의 수직원관에 Fig 2.30과 같이 착빙된다고 가정할 수 있다.

Table 2.3 Condition of simplified model calculation^{[36][37]}

Aqueous solution	(°C)	θ_f (°C)	λ_i (W/mK)	ρ_i (kg/m ³)	q_l (J/kg)	τ (s)
1.8 wt% NaCl aqueous solution	-7	0.99	2.29	917.789	336,000	3,600

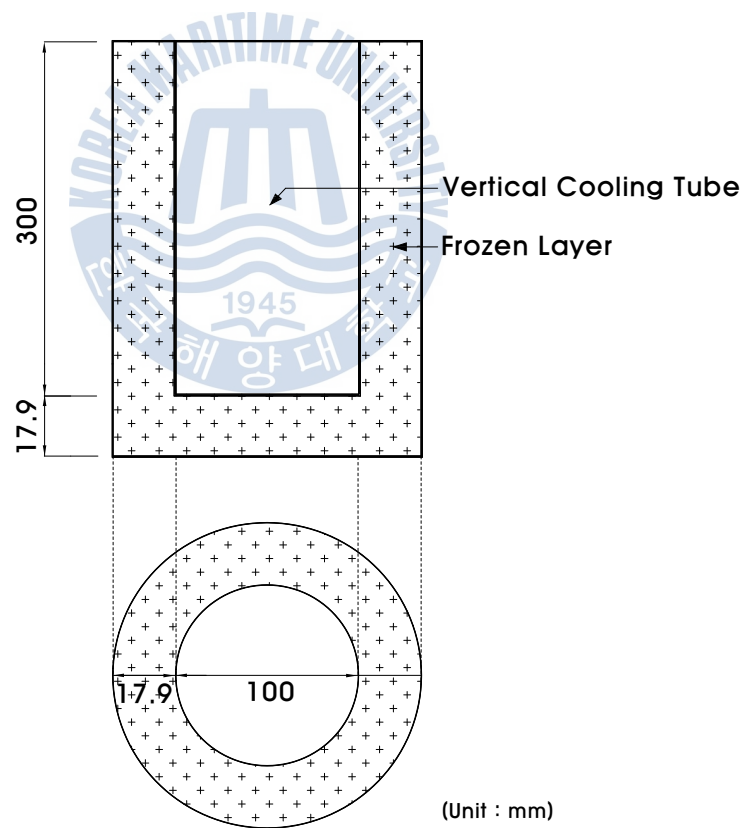


Fig. 2.30 Ice layer along vertical cooling tube at simplified model

Fig. 2.30과 같이 실험부 수직원관에 동결되었을 때 얼음의 양()은 다음 식 (2.5)로 구할 수 있다.

$$V_i \times \rho_i \quad (2.5)$$

여기서, V_i 수직원관에 부착된 얼음의 부피이다.

이론 단순모델의 동결층 형성에 필요한 열량(Q_{th})은 단순모델이 수용액으로 부터의 열 이동이 없으므로 상변화만을 고려하여 식 (2.6)에서 구하였으며 계산결과를 Table 2.4로 정리하였다.

$$Q_{th} = W_i \times q_i \quad (2.6)$$

Table 2.4 Heat and ice amount of simplified model calculation

Ice volume $V_i(\text{m}^3)$	Ice amount $W_i(\text{kg})$	Freezing heat $Q_{th}(\text{kJ})$
2.365×10^{-3}	2.17	724.01

2.5.3 실험결과 동결량 및 열분석

실제 실험장치의 냉각면과 수용액간의 열전달은 동결잠열을 빼앗는 이론적 현상만 발생하는 것이 아니라, 수용액으로부터의 열전달로 수용액의 온도를 냉각하며, 일부는 온도차에 의해 외부로 유실되기도 한다.

따라서 실험부에서 동결과정이 진행되며 사용되는 총열량(Q_{est})은 다음 식 (2.7)로 나타낼 수 있다.

$$Q_{est} = Q_{swc} + Q_{fsc} + Q_{lh} + Q_{loss} \quad (2.7)$$

여기서, Q_{swc} 는 수용액의 냉각열량, Q_{fsc} 는 동결되는 수용액의 동결점 온도 냉각열량, Q_{lh} 는 동결잠열, Q_{loss} 는 외부 유실열량이다.

$$Q_{swc} = \text{수용액유입량} \times \text{비열}(4.0612 \text{ kJ/kgK}) \times (\text{유입온도} - \text{배출온도})$$

$$Q_{fsc} = \text{동결량} \times \text{비열} \times (\text{배출온도} - \text{동결온도})$$

$$Q_{lh} = \text{동결량} \times \text{동결잠열}(333.6042 \text{ kJ/kg})$$

실험부에 유입되는 수용액은 5 °C 의 1.8 wt% 염화나트륨수용액으로 -7 °C 냉각면 온도로 1시간 동안 동결농축 하였다. 이때 성장하는 동결층의 두께는 11 mm이고, 농축수용액의 배출 온도는 0 °C 로 측정되었다. 실험 결과에 따라 수용액의 냉각열과 잠열량을 계산하면 Table 2.5와 같다.

Table 2.5 Heat and ice amount of test result

Ice volume $V_i(\text{m}^3)$	Ice amount $W_i(\text{kg})$	$Q_{swc}(\text{kJ})$	$Q_{fsc}(\text{kJ})$	$Q_{lh}(\text{kJ})$
1.341×10^{-3}	1.23	204.34	5	410.67

실험장치의 실험부는 아크릴원통으로 제작하였고, 동결과정에서 외부로의 열 유실을 최소화하기 위해 5 mm의 폴리에틸렌 매트로 감싸 단열 처리하였다. 동결과정에서 농축되는 수용액의 온도는 0 ℃이며 외부 주위의 온도는 11 ℃이다. 이때 실험 중 발생하는 외부와의 온도차에 의한 열전달을 계산하기 위해 실험부를 Fig. 2.31과 같이 나타내었다.

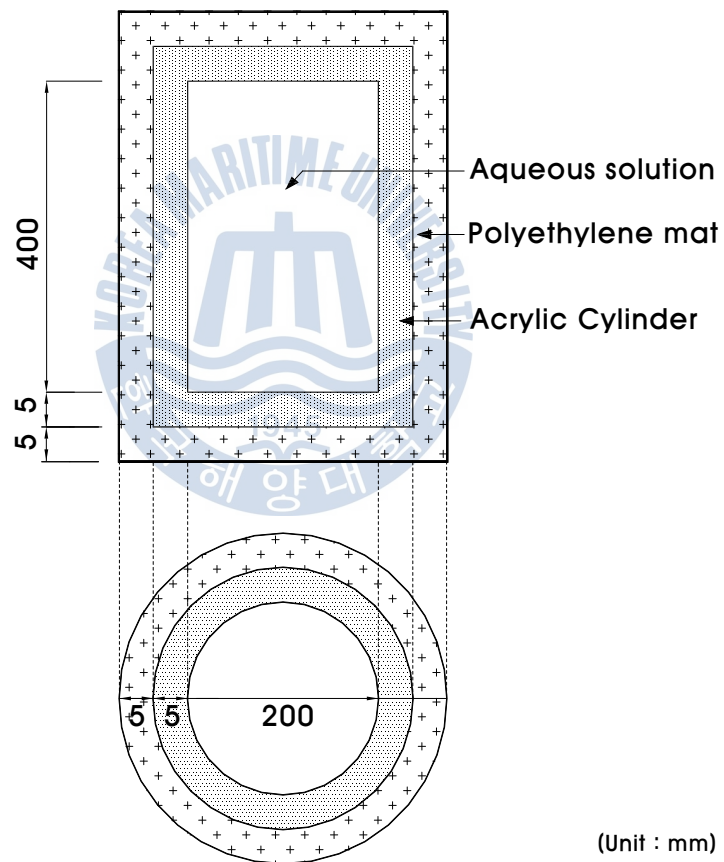


Fig. 2.31 Test section insulated by polyethylene mat

열손실을 정상상태에서 수용액과 주위온도의 차에 의한 열전도만을 고려하면 실험부는 아크릴(PMMA)과 단열매트로 구성된 다층 구조로 생각할 수 있다. 측면은 원통형 다층구조로, 위아래 면은 다층 평면벽으로 각각 간주할 수 있다. 이때 접촉면에서 발생하는 열접촉 저항(thermal contact resistance)은 무시하고 완전 접촉이라고 가정하면, 상하의 바닥과 뚜껑 부분은 평면 벽 구조로 열전도만을 고려하면 열전달을 Fig. 2.32로 나타낼 수 있으며 그 때 이동하는 열량은 식 (2.8)에서 구할 수 있다. 식의 변수 값은 Table 2.6과 같다.

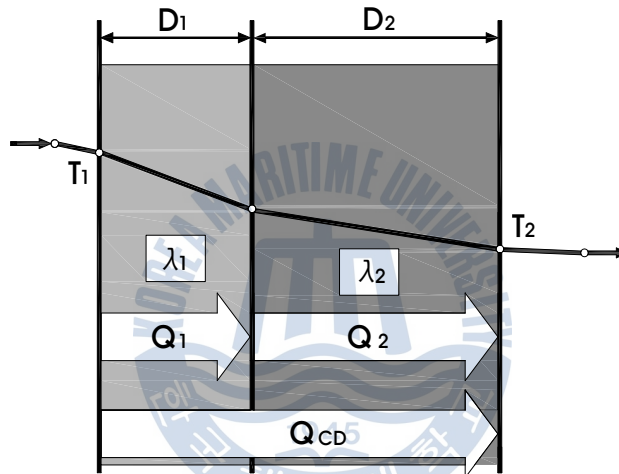


Fig. 2.32 Conduction heat transfer through two-layer plane wall

$$Q = \frac{A(T_1 - T_2)}{\sum_{i=1}^n \frac{D_i}{\lambda_i}} \quad (3.8)$$

여기서, A 는 면적, D 는 두께, λ 는 열전도율이다.

Table 2.6 Plane wall condition

$A(\text{m}^2)$	$D_1(\text{m})$	$D_2(\text{m})$	$T_1(^{\circ}\text{C})$	$T_2(^{\circ}\text{C})$
0.0628	0.005	0.005	0	11

실험부의 벽면은 원통벽면으로 열전도만을 고려하면 열전달을 Fig. 2.33으로 나타낼 수 있으며 이때 이동하는 열량은 식 (2.9)에서 구할 수 있다. 식의 변수 값은 Table 2.7과 같다. 각 재료의 열전도율과 계산 결과는 Table 2.8로 정리하였다.

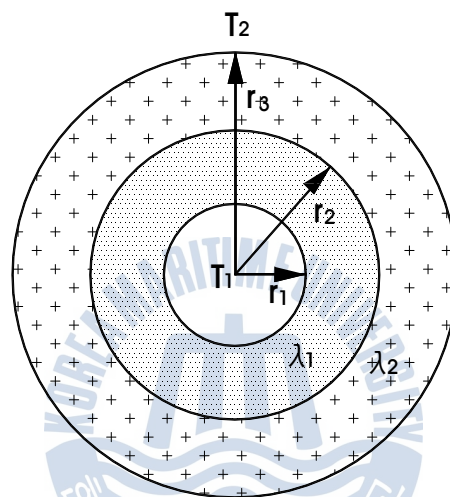


Fig. 2.33 Conduction heat transfer through two-layer composite cylinder

$$Q = \frac{2\pi G(T_1 - T_2)}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i \ln \frac{r_{i+1}}{r_i}}} \quad (2.9)$$

여기서, G 는 원관의 길이이다.

Table 2.7 Cylindrical pipe condition

$G(m)$	$r_1(m)$	$r_2(m)$	$r_3(m)$	$T_1(^{\circ}C)$	$T_2(^{\circ}C)$
0.4	0.1	0.105	0.11	0	11

Table 2.8 Heat loss at freeze concentration^[37]

Thermal conductivity()(W/mK)		Q_{loss} (kJ)
Acryl(PMMA)(λ_1)	Polyethylene mat(λ_2)	
0.21	0.04	88.02

실험장치에서 수용액이 -7 ℃ 냉각면으로부터 냉각되어 11 mm의 동결층을 형성하기 위해 사용되는 열 수지를 분석하여 이론적으로 제시한 단순모델에서의 사용열량과의 차이를 Table 2.9로 정리하여 나타내었다.

Table 2.9 Heat capacity of simplified model and test result

Test result(kJ)					Simplified model(kJ)	Difference (%)
w_c	Q_{fsc}	Q_{lh}	Q_{loss}	Total	Q_{th}	
204.34	5	410.67	88.02	708.03	724.01	2.21

이론의 단순모델식에 따르면 냉각면과 동결계면의 열이동은 동결 잠열을 빼앗는 열만 존재하므로 냉각면의 총열량은 생성되는 얼음의 양에 해당하는 잠열로 구할 수 있다. 그러나 실제 동결과정에서는 수용액으로 부터의 열전달과 외부열의 침입을 고려하여 총열량을 구하여야 한다. 그 결과 Table 2.9와 같이 이론 모델의 열량과 실험에서의 열량을 분석한 결과 실험장치에서 생성된 동결층 얼음량에 따른 잠열량 및 손실열량의 합이 이론 모델보다 2.21 % 정도 작게 나타났다. 이는 실험부의 연결관 등 현장 조건에서 발생하는 기타 열손실로 생각된다. 열량 분석의 결과 이론 열량과 실험 열량이 유사하므로 실제 실험 조건에서 각 열량의 내용과 사용량이 타당하다고 할 수 있다.

실험의 동결농축과정 총열량 중 동결층의 제빙에 소요되는 순수한 잠열량을 제외한 수용액의 냉각열량과 외부 유실 열량을 총손실열량(Q_{tl})로 정의하면, 실험에 사용된 총열량을 나타내는 식 (2.7)은 다음 식 (2.9)로 단순화 할 수 있다.

$$Q_{est} = Q_{lh} + Q_{tl} \quad (2.9)$$

여기서, Q_{est} 는 실험 동결농축 총열량, Q_{tl} 는 총손실열량이다.

$$Q_{tl} = Q_{swc} + Q_{fsc} + Q_{loss}$$

동결농축과정을 열전달 과정만을 고려하여 식 (2.9)와 같이 표현할 수 있고, 수용액의 냉각에 쓰인 열량과 외부 유실 열량을 총손실열량으로 정의한다면, 유효하게 이용된 열은 순수하게 상변화에 이용된 잠열이라고 할 수 있다. 따라서 유효열량을 총동결잠열로 정의하고 이를 바탕으로 시스템에 입력되는 에너지를 측정하여 시스템의 효율을 판단할 수 있을 것으로 생각된다. Fig. 2.34는 동결과정에 사용되는 열량의 구성과 총열량을 유효열량과 총손실열로 표현한 그림이다.

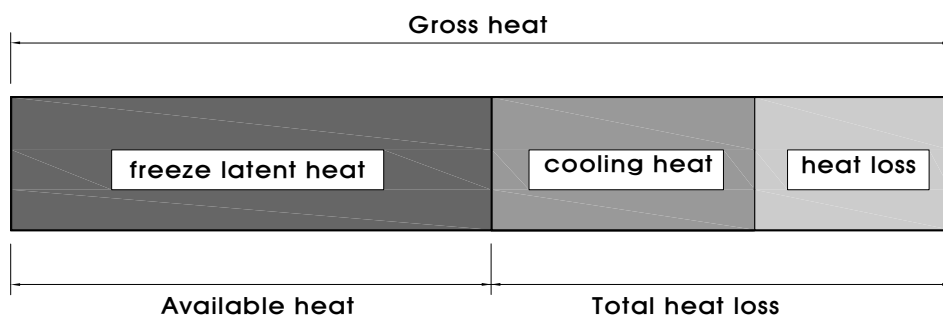


Fig. 2.34 Heat analysis of freeze concentration process

2.5.4 동결농축과정의 열교환 모델 구성 및 검증

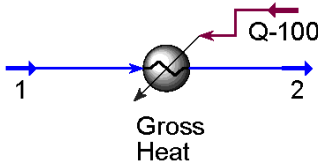
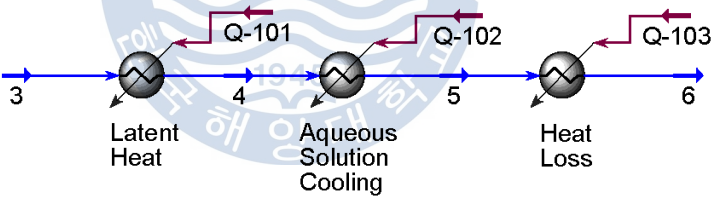
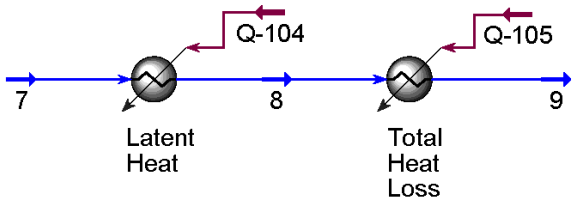
실험부의 동결농축과정에 필요한 실제적인 열은 수용액의 냉각, 상변화, 외부 열손실로 구분할 수 있으며, 이를 더 단순화하기 위해 상변화 총잠열과 총손실열량으로 정의하여 식 (2.9)로 나타내었다. 동결농축과정이 진행되는 실험부는 저온의 브라인과 수용액간의 온도차에 의해 전열현상이 발생하는 열교환기의 일종으로 볼 수 있다. 동결농축과정에서 폐수내의 오염물질을 동결층에서 배제 시키는 분리효율에 관여하는 물질전달을 고려하지 않고 열의 이동만을 생각한다면, 실험부를 열교환기로 표현가능하고 동결농축과정에서 전열현상으로 이동하는 총열량을 열교환기의 용량으로 표현할 수 있을 것이다.

여기서는 상용프로그램인 HYSYS를 이용하여 우선 동결농축과정에 필요한 총열량을 용량으로 갖는 열교환기를 모델링하였다. 또, 동결농축과정에서 열의 사용 내용에 따라 각각의 전열현상을 열교환기로 표현하고 그 차이를 비교하여, 추후 상용화 시스템의 해석에서 동결농축과정의 열량을 상변화를 포함한 동결에 직접 소요되는 열량과 폐수의 냉각 및 외부 유실을 포함하는 총손실로 표현 가능한지를 알아보았다.

동결농축과정에서 진행되는 열교환 과정을 HYSYS 상에서 다음의 Table 2.10과 같이 세 가지 경우로 모델링하였다. case 1은 총열량으로 표현되는 모델이며, case 2는 총열량을 동결잠열, 수용액 냉각열량, 외부로의 열손실로 표현하였다. case 3은 이를 단순화하여 동결잠열과 총열손실로 표현한 것이다.

해석 조건은 아래의 Table 2.11과 같이 동일한 유체의 입력 조건에서 출구 측이 갖는 물성과 특성 값을 비교하였다. 이때 냉각면의 온도가 -7°C 이므로 주어진 브라인의 온도를 -7°C 로 정하고 열교환기의 압력 손실은 없는 것으로 가정하였다.

Table 2.10 Modeling of freeze concentration process

	Gross Heat($_{est}$)
case 1	
case 2	Latent Heat(Q_{lh}), Aqueous Solution Cooling(Q_{swc} Q_{fsc}), Heat Loss(Q_{loss}) 
case 3	Latent Heat(Q_{lh}), Total Heat Loss(Q_{tl}) 

해석 결과, 각 case의 출구 측 브라인 특성 값은 Table 2.12와 같이 동일하였다. 결과적으로 동결농축과정에 필요한 총열량을 각각의 동결잠열, 수용액 냉각열, 외부 손실열량으로 나누어 등가열량회로로 구성하여도 출구 측의 유체 특성이 같고, 수용액 냉각열량과 외부 손실열량을 총손실열량으로 표현하는 회로에서도 같은 출구 유체의 특성을 확인하였다. 해석한 각 프로세스 속성 값은 Table 2.13과 같다.

이를 통해 실험부에서 일어나는 동결농축과정을 열교환기로 모델링할 경우, 각각의 전열과정을 해당 열량의 열교환기로 HYSYS상에서 표현 가능한 것을 알 수 있었다. 동결농축과정을 열교환기로 표현 가능하므로 추후 에너지 소모량을 구하기 위한 시스템 모델링과 해석에 유용하게 이용할 수 있으며, 총열량 중 상변화의 잠열만을 유효열량으로 정의하였으므로 HYSYS상에 잠열을 교환하는 열교환기의 용량을 유효열량으로 보고 시스템의 효율을 측정할 수 도 있을 것이다.

Table 2.11 Condition of brain and heat exchanger

Brain	Ethylene glycol($C_2H_6O_2$) 40% aqueous solution	
	Inlet temp.	-7 °C
	Flow rate	0.23 m ³ /min
	Pressure	120 kPa
Heat exchanger	ΔP	0 kPa

Table 2.12 Outlet condition at each modeling case

Outlet condition	Case 1	Case 2	Case 3
Temp.(°C)	-6.984	-6.984	-6.984
Press.(kPa)	120	120	120
Molar Flow(kgmole/h)	424.7	424.7	424.7

Table 2.13 Process stream condition at each modeling case

Name	1	2	3	4
V.F.	0	0	0	0
T(°C)	-7	-6.984	-7	-6.991
P(kPa)	120	120	120	120
F _{Mol} (kg mole/h)	424.7	424.7	424.7	424.7
F _{mass} (kg/h)	1.514e+004	1.514e+004	1.514e+004	1.514e+004
F _{Liq} (m ³ /h)	14.09	14.09	14.09	14.09
Q _h (kJ/h)	-1.511e+008	-1.511e+008	-1.511e+008	-1.511e+008

Name	5	6	7	8
V.F.	0	0	0	0
T(°C)	-6.986	-6.984	-7	-6.991
P(kPa)	120	120	120	120
F _{Mol} (kg mole/h)	424.7	424.7	424.7	424.7
F _{mass} (kg/h)	1.514e+004	1.514e+004	1.514e+004	1.514e+004
F _{Liq} (m ³ /h)	14.09	14.09	14.09	14.09
Q _h (kJ/h)	-1.511e+008	-1.511e+008	-1.511e+008	-1.511e+008

Name	9	-	-	-
V.F.	0	-	-	-
T(°C)	-6.984	-	-	-
P(kPa)	120	-	-	-
F _{Mol} (kg mole/h)	424.7	-	-	-
F _{mass} (kg/h)	1.514e+004	-	-	-
F _{Liq} (m ³ /h)	14.09	-	-	-
Q _h (kJ/h)	-1.511e+008	-	-	-

2.6 소결론

본장의 실험연구에서는 동결농축폐수처리장치의 제빙관에서 일어나는 동결 거동에 관한 자료를 확보하고자 냉각면의 온도변화, 기포 분사방법, 과냉각방지 초기빙층의 두께에 따른 결과를 관찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 냉각면 온도가 낮을수록 온도구배가 커지고 열유속이 증가하여 동결층은 두껍게 발달하나 동결층 내의 염분농도는 증가하며, 수용액의 농도가 높을수록 생성되는 동결층의 두께는 얇고, 동결층 내 염분의 농도는 높다.

Table 2.14 Thickness and salinity of frozen layer at each cooling wall temperature (NaCl aqueous solution)

Cooling wall Temp.	1.8 wt% aqueous solution		3.6 wt% aqueous solution	
	Thickness(mm)	Salinity(wt%)	Thickness(mm)	Salinity(wt%)
-2 °C	5	1.14	-	-
-7 °C	19	1.19	14.5	2.2
-12 °C	26	1.21	23.0	2.22

- (2) 기포 분사방법에서는 동결계면에 직접 분사하는 방법이 간접 분사보다 동결층의 두께가 얇고 동결층 내 염분농도는 낮다. 또, 기포 분사량이 증가할수록 동결층 두께는 얇아지고 염분농도는 감소한다.

Table 2.15 Thickness and salinity of frozen layer at bubble flow method (1.8 wt% NaCl aqueous solution)

Cooling wall Temp.	Salinity of frozen layer(wt%)		
	Indirect method (F _{wall} =15 L/min)	Direct method	
		F _{ring} =15 L/min	F _{ring} =30 L/min
-2 °C	0.8	0.7	0.5
-7 °C	1.0	0.85	0.6
-12 °C	1.1	0.9	0.75

(3) 직접 분사법을 통한 유동장과 정지상태의 비유동장에서는 유동장 조건에서 동결층 두께가 얇고 동결층 내 Pb와 Cr의 농도가 낮아진다.

Table 2.16 Thickness and Pb & Cr content of frozen layer at flow method (Pb & Cr aqueous solution)

Cooling wall Temp.	Not flow field(F_{non})			Ring flow field ($F_{\text{ring}}=5$ L/min)		
	Thickness (mm)	content(ppm)		Thickness (mm)	content(ppm)	
		Pb	Cr		Pb	Cr
-2 °C	14	0.1	0.01	5	0.0	0.0
-7 °C	18	0.2	0.02	6	0.1	0.01
-12 °C	28	0.4	0.03	9	0.2	0.02

(4) 초기빙층의 두께가 두꺼울수록 동결층 내 Pb와 Cr의 농도는 낮아진다.

Table 2.17 Pb & Cr content of frozen layer at ice-lining thickness (Pb & Cr aqueous solution)

Cooling wall Temp.	Ice-lining thickness(1mm)		Ice-lining thickness(5mm)	
	Pb(ppm)	Cr(ppm)	Pb(ppm)	Cr(ppm)
-2 °C	0.0	0.0	-	-
-7 °C	0.1	0.01	0.0	0.0
-12 °C	0.2	0.02	0.0	0.0
-15 °C	-	-	0.1	0.01

(5) 동결농축과정에 필요한 총열량을 각각 동결잠열, 수용액 냉각열, 외부 손실열로 또는 동결잠열과 총손실열로 나누어 등가열량회로를 구성하여도 HYSYS상 출구 유체의 특성은 같다.

제 3 장 동결농축폐수처리시스템의 설계

3.1 시스템의 구성 및 운전

3.1.1 시스템 구성

동결농축법을 근간으로 하는 폐수처리시스템의 상용화를 위한 연구를 외국의 사례에서 살펴보면, 휘발성유기화합물(VOCs)을 포함하는 위험한 폐수를 처리하기 위해 일부 화학플랜트 분야에서 부유식동결농축법(SFC)이 이용되고 있다. 그러나 종래 부유식동결농축법은 운전시간이 길고, 시스템이 복잡하며, 순도 높은 얼음을 추출하기 곤란한 단점을 가지고 있다. 이에 비해 전진동결농축법(PFC)은 시스템이 간단해지며, 원하는 크기의 얼음으로 추출 가능한 장점을 가지고 있어 중소규모의 패키지형 폐수처리장치에 응용성이 뛰어나다.

본 장에서는 전진동결농축법을 기반으로 국내 중소규모의 폐수배출업체에서 직접 운영이 가능한 시스템을 구성하고, 시스템의 효율과 경제성을 검토하기 위해 수행될 프로그램 해석에 필요한 설계 데이터를 구하였다. 시스템은 중소규모의 폐수 배출시설에 적용하기 위해 지금까지 연구가 진행되어온 대표적 시스템을 바탕으로 상세 프로세서를 Fig 3.1과 같이 구성하였다^{[7][38]}.

시스템은 공급된 폐수가 동결농축 되는 제빙기를 포함한 폐수처리부(제빙부), 폐수처리부에서 일어나는 제빙과 탈빙과정에 필요한 열량을 공급하는 브라인이 순환하는 냉·온브라인 순환부, 제빙기의 전열면을 동결 온도이하로 냉각하는 냉브라인을 설계 온도까지 냉각시키는 열원 공급 장치인 냉동부, 청수와 폐수의 공급 및 배출을 위한 각종 이송 펌프와 사용 전후의 청수, 폐수를 보관하기 위한 탱크들로 구성된다.

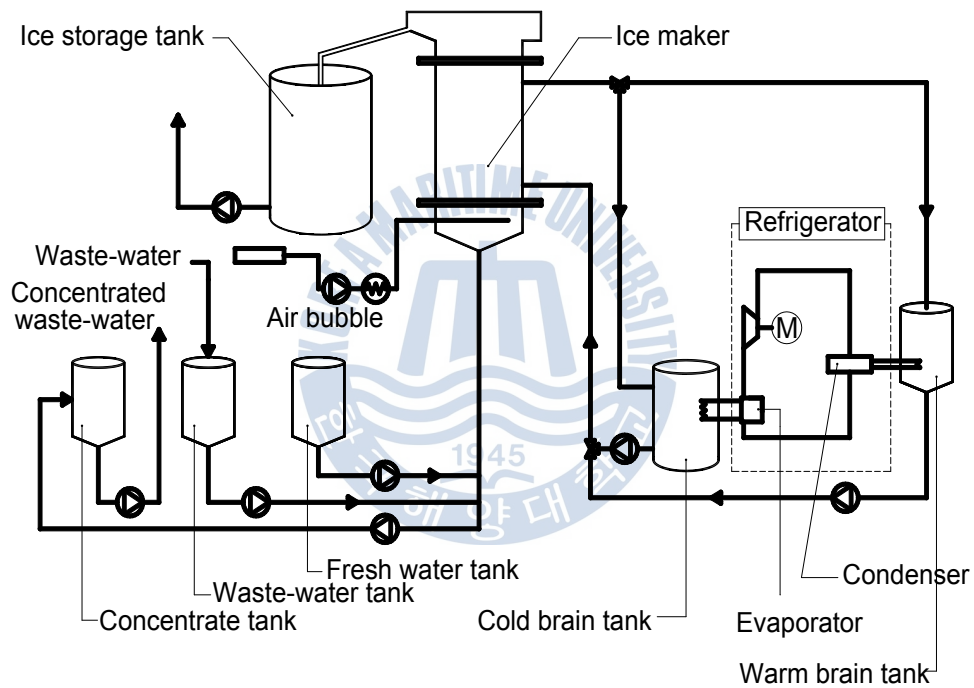


Fig. 3.1 Waste-water FC system process^[38]

시스템의 특징으로는 기존에 연구된 내용들을 반영하여, 오염물질의 분리 효율을 높이기 위해 동결속도의 개선, 과냉각해소 방안 및 동결계면의 고농도 오염물질 확산 방법이 적용되었다. 일반적으로 완만한 동결이 이루어 질 때 분리효율이 높아지므로 종래에는 얼음의 성장속도가 2 ~ 3 mm/h 정도였으나 이 시스템에서는 15 mm/h에서도 목표하는 분리가 가능한 것으로 보고되었다. 또, 동결 초기 과냉각으로 인한 용질의 물입을 최대한 배제하기 위해 냉각면에 맑은 물을 이용하여 얇은 얼음(ice-lining)을 착빙한 후 폐수를 동결해 과냉각 에너지를 흡수하도록 하였다. 얼음의 성장과 함께 동결계면에는 빙층으로부터 배제되는 오염물질이 다량 분포하여 농도가 높아진다. 이때 오염물질의 수용액내 확산 속도보다 동결층의 성장속도가 빠르면 분리효율이 떨어지므로, 교반을 통해 빠르게 확산시키는데 주로 펌프나 교반기(agitator)가 연구되어 왔다. 그러나 이 시스템에서는 펌프나 교반기를 사용하지 않고 에너지 소모가 적은 기포를 분사하여 유동을 가해 교반하고 있다^[38]. 시스템은 에너지 효율을 높이기 위한 방법으로 열손실을 최소화할 수 있도록 증발기와 응축기를 탱크 내장형으로 구성하고, 탈빙과정에서는 일반 제빙기에 사용하는 핫가스 방식을 대신하여 응축기의 온열을 축열한 온브라인을 순환하는 시스템을 채택하였다.

냉동부는 일반적인 압축식 냉동기의 구성과 동일한 압축기, 응축기, 팽창밸브, 증발기 등으로 구성되어있다. 저압의 냉매 가스가 압축기로 흡입되어 고압 가스로 압축된 후 응축기로 보내지는데 특이한 것은 응축기 발열량을 온브라인으로 회수할 수 있도록 온브라인 탱크 내에 응축기를 설치한 것으로, 열손실을 최소화하고 구조를 간단히 할 수 있다. 이는 회수된 온열을 다시 탈빙 과정에 활용하여 에너지 효율을 높이기 위한 방법이다. 응축기를 통과한 고압의 액냉매는 팽창밸브와 증발기를 지나며 주위로부터 흡열 작용을 통해 저압의 가스 냉매로 상변화하며 주위 온도를 냉각시키게 된다. 시스템에서는 증발기를 냉브라인 저장탱크 내에 설치하여 냉브라인과 열교환을 쉽게 했으며, 구조를 단순화하고 열손실을 최소화 하였다.

브라인순환부는 폐수를 동결온도 이하로 냉각시키기 위해 냉동부로부터 설계온도로 조절된 냉브라인을 제빙기에 순환시키는 냉브라인 순환라인과 동결농축과정이 종료되면 제빙관에 착빙된 얼음을 분리하는 탈빙과정에서 이용되는 온브라인 순환부로 구성된다. 온브라인은 냉동기의 응축기로부터 온열을 회수하여 고온으로 가열된 후 제빙부에 공급되어 제빙관과 동결층의 접촉면을 가열하게 된다. 이때 접촉면이 용해되어 착빙된 얼음이 자연스럽게 분리되도록 하였다. 브라인순환부는 냉브라인 탱크, 온브라인 탱크, 각 순환펌프들로 구성하였다.

폐수처리부는 실제 공급된 폐수를 빙점이하로 냉각하여 냉각면에 동결층을 형성, 성장시키는 시스템의 핵심장치로 제빙관이 설치되어 브라인과 폐수 용액간의 열교환이 이루어진다. 제빙관의 형태로는 주로 원관과 각관의 형태가 사용되며 제빙관에서 동결층의 성장방향은 관내부와 관외부 성장방식이 주로 연구되어오고 있다. 여기서는 2장의 실험에서 검토한 원관형의 제빙관 외부에 얼음이 성장하는 방식을 채택하였다.

폐수처리부의 제빙관에는 보다 순수한 얼음을 추출하고자 분리효율을 높일 수 있는 기포를 분사하도록 하였다. 기포를 분사하는 방법은 실험을 통해 분리효과가 더 우수한 것으로 확인된 동결계면 직접분사법을 선택하여 동결속도의 조절과 동결계면에서의 고농도 폐수를 확산시키도록 하였다. 기포는 폐수 내에 분사되기 전에 충분히 냉각하여 열손실을 최소화하도록 하였다. 기포분사법을 선택한 이유는 처리대상이 되는 수용액에 유동을 가하기 위한 방법으로 주로 교반기(agitator)를 사용하는 방법과 펌프로 관내를 순환시키는 방법이 연구되어 왔으나 기포분사법의 경우, 펌프나 교반기에 비해 사용하는 에너지의 양이 적고 구조가 간단해지는 장점이 있어 이를 적용하였다.

3.1.2 시스템 운전

동결농축폐수처리시스템의 폐수를 냉각하는 방식에는 냉동기의 냉매를 직접 팽창시켜서 폐수를 냉각하는 직접냉각방식과 냉동기의 냉매로 1차 브라인을 냉각시키고, 냉각된 브라인을 제빙기에 순환시켜 동결하는 간접냉각방식이 연구되었다. 직접냉각방식은 냉동기의 냉매를 직접 팽창 증발시키므로 열교환기의 구조에 따라 냉각효율에 영향을 미치는데 일반적으로 미세 열교환기 또는 수평형 열교환기에 적합하다. 수직형 열교환기의 경우 액 냉매가 하부에 고여 증발하므로 상하의 열 교환 차가 발생한다. 동결농축폐수처리시스템의 제빙기는 주로 수직형 열교환기 형태로서 상하단의 냉열 온도차가 크고 하단부의 과냉각이 유발되어 적용에 한계가 있다. 그러나 브라인을 이용하는 간접냉각방식은 냉동기의 1차 냉매와 브라인을 미세열교환기에서 열교환을 유도하여 냉각된 브라인으로 피 냉각물을 냉각, 동결하는 방식이다. 브라인 냉동방식은 피냉각물을 냉각하는 열교환기의 구조에 큰 영향을 받지 않고 만액 상태에서 열교환이 일어나므로 일정하고 지속적인 열교환 효율을 얻을 수 있다. 따라서 수직형 열교환기 형태의 제빙기를 갖는 동결농축폐수처리시스템에서는 브라인을 이용한 간접냉동방식이 적합하다고 할 수 있다^[7]. 본 연구에서는 기존의 연구에서 대부분 이용되고, 2장의 실험에서 사용되었던 간접냉매인 에틸렌글리콜 수용액을 브라인으로 사용하였다. 브라인은 브라인 탱크 안에 설치된 냉동기의 증발기로 냉각되어 제빙기로 공급되는 간접냉각방식으로 운전하도록 적용하였다.

Fig. 3.2는 산업체에서 폐수가 발생하여 동결농축폐수처리시스템으로 처리되는 순서도이다. 폐수배출시설로부터 발생하는 폐수는 폐수탱크로 이송 집결된다. 처리할 폐수가 저장탱크로 유입되면 동결폐수농축처리시스템이 본격적으로 가동되는데 운전 순서는 다음과 같다.

청수탱크에서 펌프를 이용해 청수를 폐수처리부의 제빙기로 유입하여 동결 초기에 과냉각 현상에 의한 수지상의 빙층에 오염물질의 매립을 막기 위해, 과냉각 방지용 초기빙층을 착빙시킨다. 소정의 두께로 용질이 포함되지 않은

순수한 청수 빙층이 형성되면 청수를 탱크로 돌려보내고 폐수를 폐수공급펌프로 제빙기에 유입하여 냉각 및 동결농축과정을 진행한다. 폐수의 동결농축처리가 완료되면 농축된 폐수는 농축액탱크로 배출한다. 착빙된 얼음은 제빙관에 온브라인을 유입하여 얼음과 제빙관 접촉부위를 녹여서 박리시킨다. 탈빙된 얼음은 적당한 크기로 썰빙한 후 축빙탱크로 보내 빙축열로 이용하게 되며 이때 용해된 물은 다시 재사용된다. 잔류 농축폐수는 후처리를 통해 마지막으로 처리된다. 시스템 운전 중 청수 및 폐수의 급배수, 탈빙용 온브라인 순환동작은 펌프가 짧은 시간 작동하는 단기운전(short-term operation) 과정이며, 과냉각 방지용 초기빙층의 착빙과 실제 폐수의 동결농축과정에서는 냉동부와 브라인 순환부, 폐수처리부가 동시에 운전되어 전 시스템이 연속운전을 하게 된다.



Fig. 3.2 Waste-water treatment process in the factory

3.2 시스템 해석을 위한 설계 조건

시스템 설계 조건에서는 동결농축폐수처리시스템의 열 및 에너지에 관한 시스템 해석에 필요한 데이터를 확보하기 위해 기본 설계 데이터, 제빙기 설계 요소, 냉동기 및 운전시간에 대한 조건들을 정하였다.

3.2.1 기본 설계 데이터

구성된 시스템과 운전에 따른 시스템의 에너지 효율을 검토하기 위해 프로그램을 활용하여 시스템을 해석하게 되는데 이때 필요한 시스템의 기본 설계 조건들을 자세히 정할 필요가 있어, 다음과 같이 기본 설계 데이터를 정의하였다.

폐수탱크에 저장된 폐수 중 일회 처리 가능한 양의 폐수가 폐수처리부에 유입되는데 유입량은 250 kg/batch 규모로 정하였다. 유입된 폐수 중 동결을 통해 처리되는 양 즉 제빙량은 설계처리량에 따라 결정되어야 할 것이다.

냉브라인의 온도는 폐수의 오염물질로 인한 빙점강하 현상을 충분히 고려하여 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 선정하였다. 순수한 물의 경우에 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서 얼음이 어는 것이 아니라, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 이하의 온도에서 과냉각되어 빙핵이 형성된 후 얼음이 얼기 시작하며, 그 때 물의 온도가 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 이하가 되는 과냉각 현상이 발생한다. 오염물질이 포함된 폐수의 경우에는 과냉각도가 더 심해져 더 낮은 온도로 과냉각이 이루어져야한다. 조사에 의하면 염화나트륨의 경우 1몰랄농도(molal concentration)당 $3.72\text{ }^{\circ}\text{C}$ 빙점강하가 일어나며 유입폐수농도 10,000 ppm을 10배 농축할 경우 빙점강하는 $6.35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에 이른다. 또한, 폐수동결 시 실제 어는점은 이론 빙점보다 더 낮아진다. 위의 빙점 강하 현상을 고려할 때 염화나트륨 10,000 ppm(1 %) 용액을 10배 농축 시 최소제빙온도는 $-15.35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 는 되어야 하며 제빙량이 제대로 산출되기 위해서는 $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 정도의 강하가 더 필요하다. 실제 폐수에 다른 이온 성분이 많이 포함되어 있을 경우 빙점의 강하는 더욱 심화될 것으로 사료된다. 여기서는 이를 충분히 고려하여 공급되는 냉브라인의 온도를 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 공급하여 $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$ 배출되도록 하였다^[7].

브라인은 에틸렌글리콜($C_2H_6O_2$) 50 % 수용액을 사용하였다. 에틸렌글리콜의 함유량이 45 % 이상이 되면 동결점의 온도가 $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$ 이하가 된다. 시스템에서는 사용하는 온도 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 보다 충분히 낮은 동결점을 갖는 에틸렌글리콜 50 % 수용액을 간접 냉매로 선택하였다.

유입되는 폐수 온도는 산업체의 폐수배출시설에서 상온 조건($15\text{ }^{\circ}\text{C}$) 보다 높은 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 유입되어 동결농축처리과정을 거쳐 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 배출되고, 이때 형성되는 동결층의 온도는 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 가정하였다. 폐수의 비열은 폐수의 오염물질의 종류, 농도 등에 따라 다양하나 여기서는 청수와 같다고 가정하였다.

온브라인은 냉동기의 응축기 냉각열을 축열하여 탈빙과정에서 사용하도록 설계되어 있어, 충분한 온도로 가열되도록 온도를 설정하였다. 설정온도를 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 정한 것은 탈빙과정에서 냉각면과 얼음 접촉면의 온도 구배를 크게 하여 신속한 용해가 유도되도록 하는 이유와 추후 난방열원으로 활용하기 위한 열매체로써 필요 온도를 충족하기 위한 두 가지 목적을 가지고 있다. 온브라인은 냉브라인과 교체 운전되므로 농도의 변화를 방지하기 위해 동일한 에틸렌글리콜 50 % 수용액을 사용하였다.

기포의 분사는 제빙관에 형성된 동결층 각각에 직접 분사하는 방법을 적용하였으며, 이때 유입 외기의 온도를 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 라 하고 공기냉각기(air cooler)를 통해 폐수의 배출온도와 같은 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 냉각하여 시스템의 열손실을 최소화하였다. 각 제빙관에 분사되는 기포 분사량은 관당 5 L/min 을 공급하는 것으로 하였다.

또, 동결초기에 발생하는 과냉각현상에 의한 분리효율 저하를 최소화하기 위해, 시스템에서는 폐수를 동결농축처리하기 전에 청수를 이용하여 얇은 막을 형성하는 방법을 적용하였다. 이 얇은 초기빙층(ice-lining)은 제빙관에 1 mm 로 착빙되어 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 온도로 냉각된다. 폐수의 동결농축과정에서는 초기빙층에 추가적으로 얼음층이 착빙된 후 15 mm 두께의 동결층으로 성장하는 과정을 거쳐 오염물질이 잔류 폐수에 농축된다. 시스템의 기본 설계 데이터를 정리하면 Table 3.1과 같다.

Table 3.1 Basic design data of waste-water FC treatment system

Waste-water inflow		250 kg/batch
Treatment capacity (Ice amount)		Design capacity
Ice	Specific heat	2.0934 kJ/kgK
	Temperature	-10 °C
	Thickness	15 mm
Waste-water	Inflow temp.	25 °C
	Discharge temp.	1 °C
	Specific heat	4.1868 kJ/kgK
Cold brain	Supply temp.	-20 °C
	Return temp.	-17 °C
Warm brain	Supply temp.	50 °C
	Return temp.	45 °C
Injection air	Supply temp.	25 °C
	Cooling temp.	1 °C
	Injection rate	5 L/min (per cooling tube)
Brain	Ethylene glycol(C ₂ H ₆ O ₂) aqueous solution	
	Concentration	50 %
	Specific heat	2.9308 kJ/kgK
	Specific gravity	1.085
Ice-lining	Thickness	1 mm
	Temperature	-10 °C

3.2.2 주요 설계

(1) 폐수처리부의 제빙기 설계

폐수처리부에서 폐수 중 물을 분리하여 동결층을 형성하는 제빙기는 각관 또는 원관 등의 형태를 이용하여 내측 또는 외측에 착빙을 유도하는 방식이 사용된다. 본 설계에서는 원관의 외측에 동결층이 형성되도록 브라인 냉매가 원관 내부에 흐르는 구조를 가정하였다. 폐수처리부의 제빙기에 원통 다관의 제빙관이 설치되고 동결층이 원관 외부에 착빙되어 성장하는 형태를 기준으로, 설계에서 정한 처리량 즉 제빙량을 생산할 수 있도록 원관의 수를 계산하였다.

제빙관의 제빙 유효치수는 외경 100 mm × 길이 1,500 mm 관을 사용하는 것으로 하였으며 이때 동결층의 두께는 초기빙층을 제외하고 상용화가 가능하다고 제안된 두께인 15 mm가 성장하는 것으로 하였다. Fig. 3.3은 1회 운전 후 제빙관에 착빙되는 얼음의 두께를 나타낸 것이다.

제빙기에 설치된 제빙관의 수(n_{ube})는 설계처리량(M_{design})을 한 개의 제빙관에서 착빙되는 얼음의 양(M_{tube})으로 나누어 계산하며 식은 (3.1)과 같다.

$$n_{ube} = \frac{M_{design}}{M_{tube}} \quad (3.1)$$

시스템의 1회 운전에서 제빙관 한 개에 성장하는 제빙량(M_{tube})은 Fig. 3.3에서 초기빙층을 제외하고 착빙되는 얼음의 부피에 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 얼음의 밀도를 곱하여 계산하며 식은 (3.2)와 같다.

$$M_{tube} = V_{tube} \times \rho_i \quad (3.2)$$

여기서, V_{tube} 는 제빙관 한 개에 착빙되는 얼음의 부피, ρ_i 는 얼음 밀도 918.11 kg/m^3 이다.

동결 초기에 과냉각으로 발생하는 수지상의 빙층에 오염물질이 몰입되는 것을 방지하기 위해 폐수를 동결농축하기 전 제빙관에 청수로 얇은 초기빙층을 착빙한다. 초기빙층은 Fig. 3.3과 같이 1 mm로 형성되도록 하였다. 초기빙층의 착빙량(M_{ling})은 다음 식 (3.3)에서 구하였다.

$$M_{ling} = N_{tube} \times V_{ling} \times \rho_i \quad (3.3)$$

여기서, V_{ling} 제빙관 한 개에 착빙되는 초기빙층의 부피이다.

식 (3.1)에서 (3.3)으로 각각의 설계처리량에 따른 폐수처리부 제빙기에 설치되는 제빙관의 개수와 초기빙층의 착빙량은 Table 3.2와 같다.

Table 3.2 Number of cooling tube and amount of ice-lining at design capacity

Treatment capacity (kg)	M_{tube} (kg)	$V_{ling} \times \rho_i$ (kg)	N_{tube} (ea)	M_{ling} (kg)
125	7.783	0.444	16.06	7.13
150			19.27	8.56
175			22.49	9.99
200			25.70	11.41
225			28.91	12.84

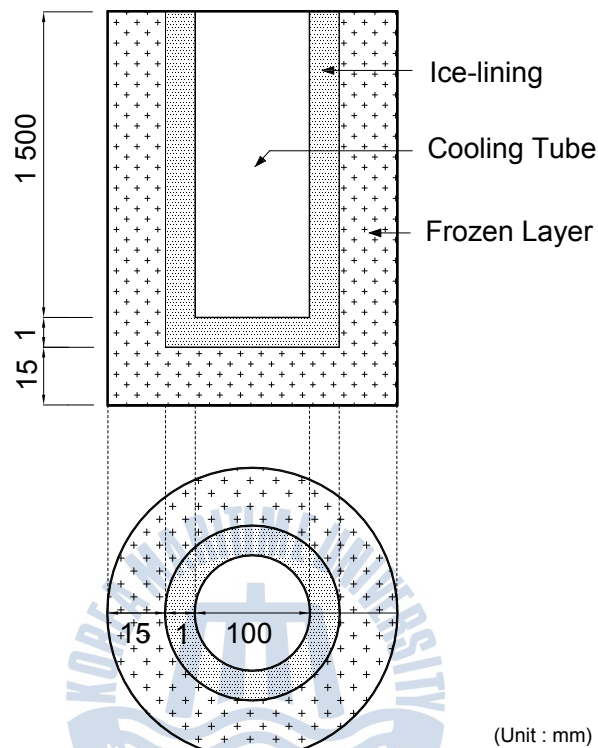


Fig. 3.3 Ice layer along cooling tube

(2) 냉동기의 운전조건

시스템에서 요구되는 냉동용량이 중소형이므로 적용된 냉동기는 압축식 냉동기를 선정하였고, 냉매는 오존층 파괴물질로 알려진 CFC(chlorofluorocarbon)나 HCFC(hydrochlorofluorocarbon) 계열을 배제하고 신냉매인 HFC(Hydrofluorocarbon) 계열 중에서 자동차 에어컨, 가정용 냉장고에 널리 사용되고 있는 R-134a를 사용하도록 하였다. 냉매의 증발온도는 일반적으로 냉동사이클에서 냉각시키려는 물체의 온도보다 낮은 온도로 보통 그 온도차가 5 ~ 13 ℃가 되어야 한다. 여기서는 냉각 대상인 냉브라인의 온도가 -20 ℃로 설정되어 이보다 낮은 온도인 -30 ℃를 증발온도로 정하였다. 응축온도는 응축기에서 배출되는 온열을 난방열로 충분히 이용할 수 있도록 60 ℃이상의 고온 냉매를 40 ℃로 냉각하여 응축하도록 하였다. 냉동기 운전조건은 Table 3.3과 같다.

Table 3.3 Operation condition of refrigeration system

Refrigerant	R-134a
Evaporating temperature	-30 °C
Condensing temperature	40 °C

(3) 시스템 운전 절차

시스템은 운전 시작 전 냉동기를 기동하여 냉브라인탱크(cold brain tank)의 브라인을 소정의 온도로 조절하게 된다. 냉브라인이 사용 온도로 냉각되면 시스템의 운전이 시작된다.

청수탱크(fresh water tank)로부터 제빙기에 청수를 공급하여 초기빙층을 착빙 후 남은 청수는 다시 청수탱크로 배출한다. 초기빙층 착빙운전이 완료되면 처리할 원 폐수를 유입 후 초기빙층에 동결층을 성장시켜 폐수를 농축 처리하게 된다. 폐수 처리과정이 완료되면, 잔류 농축폐수는 농축액탱크로 배출하고 온브라인을 제빙관에 순환시켜 생성된 얼음을 탈빙하게 된다. Table 3.4는 각 운전과정에 필요한 소요시간을 정한 것이다. 초기빙층 착빙시간은 시스템의 운전방식과 설계처리량에 따라 결정된다.

Table 3.4 Operation procedure of waste-water FC treatment system

Fresh water supply	2 min
Ice-lining making	-
Fresh water discharge	2 min
Waste-water supply	2 min
Waste-water FC	60 min
Waste-water discharge	1 min
De-ice	3 min

3.3 시스템 설계에 필요한 열량 계산

(1) 초기빙층 착빙열량

초기빙층을 착빙하기 위해 25 ℃의 깨끗한 청수를 제빙기에 유입하고 냉브라인을 순환시켜 1 mm 두께의 동결층을 성장시키는데 소요되는 열량을 계산한다. 이때 배출되는 청수의 온도는 1 ℃로 가정하였고, 동결층의 온도는 -10 ℃까지 냉각된다. 동결층의 온도는 폐수처리과정에서 추가적으로 성장하는 동결층이 갖는 온도 조건과 동일하다. 다음 Fig. 3.4는 초기빙층 착빙과정을 나타낸 것이다.

초기빙층을 착빙하는데 필요한 열량은 크게 25 ℃의 청수를 1 ℃로 낮추는 청수냉각열량(Q_{wf}), 착빙되는 양 만큼의 청수가 동결온도로 냉각되는 열량(Q_{fh}), 동결온도로 냉각된 청수가 얼음으로 상변화 하는데 필요한 총잠열(Q_{ic}), 동결된 얼음이 -10 ℃까지 냉각되는 열량(Q_{ic})이 제거되어야 한다. 초기빙층 착빙에 필요한 총열량(Q_{ilf})은 다음 식 (3.4)에서 계산하였다. 이때 설계처리량에 따라 초기빙층의 착빙량이 Table 3.2와 같이 달라, 설계처리량별 초기빙층 착빙열량을 Table 3.5와 같이 계산하였다.



Fig. 3.4 Ice-lining freezing procedure

$$Q_{lf} = Q_{fwc} + Q_{fwf} + Q_{lh} + Q_{ic} \quad (3.4)$$

여기서,

$$Q_{fwc} = \text{유입량} \times \text{비열}(4.1868 \text{ kJ/kgK}) \times (\text{유입온도} - \text{배출온도})$$

$$Q_{fwf} = M_{\text{lining}} \times \text{비열} \times (\text{배출온도} - \text{동결온도}(0 \text{ } ^\circ\text{C}))$$

$$Q_{lh} = M_{\text{lining}} \times \text{동결잠열}(333.6042 \text{ kJ/kg})$$

$$Q_{ic} = M_{\text{lining}} \times \text{얼음비열}(2.0934 \text{ kJ/kgK}) \times (0 - \text{얼음온도})$$

Table 3.5 Freezing heat of ice-lining(Q_{ilf}) at non-precooling

Treatment capacity (kg)	Q_{fwc} (kJ)	Q_{fwf} (kJ)	$Q_{lh} + Q_{ic}$ (kJ)	Q_{ilf} (kJ)
125	25,120.8	29.85	2,527.86	27,678.51
150	25,120.8	35.84	3,034.84	28,191.48
175	25,120.8	41.83	3,541.66	28,704.29
200	25,120.8	47.77	4,045.29	29,213.86
225	25,120.8	53.76	4,552.27	29,726.83

시스템 구성 조건에서 검토될 운전시간 단축을 목적으로 폐수가 제빙부에서 동결농축 되는 동안 초기빙층용 청수를 미리 설계 온도 5 °C로 예냉하여 공급하는 경우 초기빙층 착빙에 필요한 열량을 Table 3.6과 같이 계산하였다. 이때 청수는 25 °C에서 5 °C로 미리 냉각하여 제빙기에 공급하는 것으로 하였다.

Table 3.6 Freezing heat of ice-lining(Q_{df}) at precooling

Treatment capacity (kg)	wc (kJ)	Q_{fwf} (kJ)	$Q_{lh} + Q_{ic}$ (kJ)	Q_{df} (kJ)
125	4,186.8	29.85	2,527.86	6,744.51
150	4,186.8	35.84	3,034.84	7,257.48
175	4,186.8	41.83	3,541.66	7,770.29
200	4,186.8	47.77	4,045.29	8,279.86
225	4,186.8	53.76	4,552.27	8,792.83

(2) 설계처리량별 동결농축처리 열량

폐수의 동결농축처리는 25 ℃의 폐수를 제빙부에 공급하고 냉브라인을 순환시켜서 동결계면의 폐수를 빙점이하로 냉각하여 이미 형성된 초기빙층 위에 15 mm 두께로 동결층을 형성하는 과정이다. 이때 오염물질은 잔류 농축액으로 배제된다. 폐수 농축처리과정의 소요시간은 60분으로, 폐수는 1 ℃, 동결층은 -10 ℃까지 냉각된다. 다음 Fig. 3.5는 폐수처리부의 제빙기에 유입되는 폐수의 동결농축 처리과정이다.

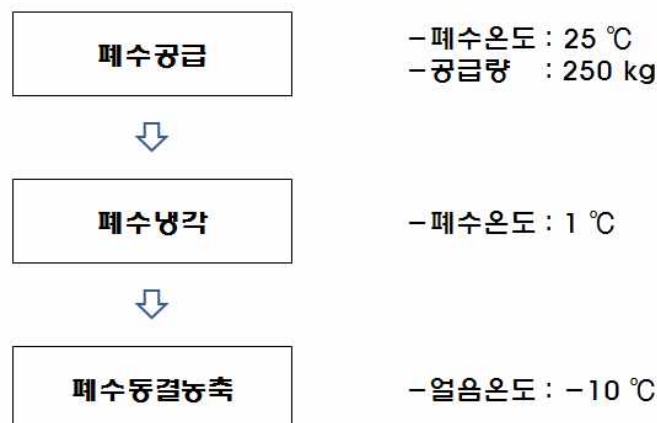


Fig. 3.5 Waste-water freeze concentration procedure

폐수를 동결농축 하는데 필요한 열량은 25 ℃의 폐수를 1 ℃ 온도로 냉각하는 폐수냉각열량(Q_{wvc}), 동결되는 얼음 양 만큼의 폐수가 동결온도로 냉각되는 열량(Q_{fww}), 동결온도로 냉각된 폐수가 얼음으로 상변화를 하는데 필요한 총잠열(Q_{lh}), 동결층의 얼음을 -10 ℃까지 냉각하는데 필요한 열량(Q_{ic})이 제거되어야 한다. 폐수를 동결농축처리하는 과정에서 필요한 총열량(Q_{wvf})은 다음 식 (3.5)에서 계산하였으며 각 설계처리량별 폐수 동결농축열량은 Table 3.7과 같다. 폐수의 비열은 종류에 따라 다르나 여기서는 청수와 같다고 가정하였다.

$$Q_{wvf} = Q_{wvc} + Q_{fww} + Q_{lh} + Q_{ic} \quad (3.5)$$

여기서,

$$Q_{wvc} = \text{유입량} \times \text{비열}(4.1868 \text{ kJ/kgK}) \times (\text{유입온도} - \text{배출온도})$$

$$Q_{fww} = M_{design} \times \text{비열} \times (\text{배출온도} - \text{동결온도}(0 \text{ } ^\circ\text{C}))$$

$$Q_{lh} = M_{design} \times \text{동결잠열}(333.6042 \text{ kJ/kg})$$

$$Q_{ic} = M_{design} \times \text{얼음비열}(2.0934 \text{ kJ/kgK}) \times (0 - \text{얼음온도})$$

Table 3.7 Freezing heat of waste-water treatment(Q_{wvf})

Treatment capacity (kg)	Q_{wvc} (kJ)	Q_{fww} (kJ)	$Q_{lh} + Q_{ic}$ (kJ)	Q_{wvf} (kJ)
125	25,120.8	523.35	44,317.28	69,961.43
150	25,120.8	628.02	53,180.73	78,929.55
175	25,120.8	732.69	62,044.19	87,897.68
200	25,120.8	837.36	70,907.64	96,865.80
225	25,120.8	942.03	79,771.10	105,833.93

(3) 기포 분사량 및 기포 냉각열량

동결과정 중 동결계면 주위에는 동결층 밖으로 배제된 오염물질이 농축되어 고농도의 수용액 층이 형성된다. 이로 인해 동결층에 오염물질이 포획될 확률이 높아져 결국 시스템의 처리효율이 낮아진다. 이를 방지하기 위해 동결계면에 직접 충격력과 수용액에 유동을 가하여 계면의 고농도 오염물질을 확산시키고, 적절한 속도로 동결층의 성장을 조절하기 위해 기포를 분사하는 방법을 적용하였다. 기포는 각 제빙관 주위에 5 L/min의 유량으로 폐수 동결농축과정 60분 동안 연속하여 분사하게 된다. 이때 분사된 기포로 인한 열손실을 최소화하기 위해 공기분사펌프 출구온도 35 ℃에서 소정의 온도인 1 ℃로 공기를 냉각시켜 분사하는 것으로 하였다. 이때 기포분사 공기를 냉각하기 위한 총열량(Q_{air})은 식 (3.6)에서 계산하였으며 설계처리량에 따른 분사공기 유량과 냉각열량은 Table 3.8과 같다.

$$Q_{air} = c_{air} \times M_{air} \times \Delta T \quad (3.6)$$

여기서, c_{air} 는 공기의 비열 1.0048 kJ/kgK이다. 기포분사량(kg) M_{air} 는

$$M_{air} = \rho_{air} \times N_{tube} \times \frac{\text{당분사량}(L/min) \times \text{분사시간}(min)}{1,000}$$

여기서, ρ_{air} 는 공기의 밀도 1.184 kg/m³이다.

Table 3.8 Cooling heat of injection air at design capacity(Q_{air})

Treatment capacity (kg)	N_{tube} (ea)	M_{air} (kg)	Q_{air} (kJ)
125	16.06	5.70	194.73
150	19.27	6.84	233.67
175	22.49	7.99	272.64
200	25.70	9.13	311.92
225	28.91	10.27	350.85

제 4 장 동결농축폐수처리시스템의 해석 및 검토

동결농축법을 이용한 폐수처리시스템에 대해 3장에서 열량을 중심으로 계산한 설계데이터를 바탕으로, 상용프로그램인 HYSYS를 이용하여 시스템 효율을 시뮬레이션 하였다. HYSYS는 공정해석 프로그램으로 화학공정 중 액상으로 제품화하는 단계에 설치되는 프로판 냉동시스템은 물론 LNG 냉각시스템의 해석에도 널리 이용되는 프로그램이다. 동결농축폐수처리시스템의 열원인 냉동시스템을 해석하고 각 중 펌프의 운전에 따른 시스템에서 소비되는 동력을 구하는데 본 프로그램을 이용하였다.

시뮬레이션은 상용화를 위해 각 시스템 별 운전에서 요구되는 동력과 일일 처리할 수 있는 폐수량을 구하여, 에너지 효율이 우수하고 일일처리량 즉 생산성이 높은 시스템 구성에 관한 설계안을 제시하고자, 다음과 같이 실시하였다.

우선, 시스템의 일회(batch)운전시간을 단축하기 위해 초기빙층용 청수를 미리 냉각하는 경우와 냉각하지 않는 경우를 각각 급속운전시스템(precooling system)과 완속운전시스템(non-precooling system)이라하고, 해석을 통해 회당 소비전력량 및 운전시간을 비교 분석하였다. 또, 설계처리량에 따른 시스템의 회당 소비전력량과 운전시간을 분석하여, 시스템 개발에 있어 목표가 되는 적절한 설계처리량에 대한 방향을 제시하고자 하였다. 추가적으로 시스템이 최초 설계된 처리량과 다른 양으로 폐수처리운전을 할 때도 위와 같이 분석하여 참고자료로 활용하고자 하였다. 그리고 해석을 통해 얻어진 결과는 다음 장에서 시스템의 경제성을 검토하기 위한 자료로 활용하였다.

4.1 HYSYS 프로그램의 시스템 해석 조건

시스템 시뮬레이션은 Aspen HYSYS 7.3v로 수행하였다. Aspen HYSYS 프로그램은 석유·화학분야에서 공정을 설계하고 시뮬레이션을 통해 검증하는 상용프로그램이다. 가스 프로세서, 정제, 화학분야의 플랜트 설계에 주로 이용되며, 실제 LNG FPSO 등 해양플랜트의 Topside 공정 프로세스 설계에도 해당 프로그램이 이용되고 있다.

동결농축처리시스템은 전체적으로 냉동부와 브라인순환부, 폐수처리부로 구성되어 있지만, 운전에서의 열효율과 관련된 가장 큰 영향은 냉동부에 있게 된다. Aspen HYSYS 프로그램은 냉동사이클의 해석에도 적용되는데 이는 천연가스 공정, 석유정제, 석유화학, 화학산업과 관련된 프로세서에 냉동시스템이 설치되기 때문이다. 공정 중 발생하는 가스상의 탄화수소를 상업용으로 판매 가능한 액체상태의 제품으로 생산하여야 하므로 이때 냉동시스템은 생산된 가스를 냉각하여 액화시킨다. HYSYS는 공정 중에 필요한 프로판 냉동시스템은 물론 LNG 냉각시스템의 해석에도 널리 이용되고 있다.

이미 R-134a를 이용하는 압축식 냉동시스템에 대해서는 실제 실험용 장비에서의 실험조건에 대한 결과 값과 HYSYS를 이용한 시뮬레이션 결과를 비교하여 검증한 결과가 허용 오차 범위 내에 들어오는 것으로 확인되었다^[39].

동결농축과정이 진행되는 동안 폐수처리부의 제빙기를 열교환기의 형태로 모사해서 출입열량을 가하면 전체 시스템이 운전되는 조건을 해석할 수 있고, 주요 구성부인 냉동부의 시뮬레이션이 가능하므로 본 프로그램의 적용이 타당할 것으로 판단하였다. 물론 상용프로그램이므로 시스템 조건에 따라 오차가 발생할 수 있으나, 시스템 모델을 가능한 단순화 시켰으며 참고 문헌 연구를 통해 물성 값의 정확성을 높여 계산 값을 정의하므로 오차를 최소화하였다.

일부 단기운전을 하는 펌프의 경우에는 각각의 단기운전 조건에 대해 펌프를 모델링하고, 해석하여, 최종적으로 시스템이 폐수를 처리하기 위한 전체 운전과정에서 필요한 소비전력량 및 시간을 분석하였다.

4.1.1 시스템 해석 적용 상태방정식

시스템 해석에 적용된 모델식(property package)은 냉동시스템에 널리 이용되는 Peng-Robinson 상태방정식(PR EOS)을 적용하였으며, 상태방정식은 다음 식 (4.1)과 (4.2)로 정의된다^[40].

$$\frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V(V+b)+b(V-b)} \quad (4.1)$$

$$Z - (1-B)Z^2 + (A-2B-3B^2)Z - (AB-B^2-B^3) = 0 \quad (4.2)$$

여기서,

$$A = \frac{aP}{(RT)^2}$$

$$B = \frac{bP}{RT}$$

$$b = 0.077796 \frac{RT_c}{P_c}$$

$$a = 0.457235 \frac{(RT_c)^2}{P} [1 + m(1 - T_r)]^2$$

$$T_r = \frac{T}{T_c}$$

$$m = 0.37464 + 1.54226w - 0.26992w^2$$

여기서, acentric factor > 0.49 일 경우에는,

$$m = 0.379642 + [1.48503 - (0.164423 - 1.016666w)w]w$$

P = Pressure

R = Ideal gas constant

T = Temperature



Compressibility factor

w = Acentric factor

첨자(subscript) :

= Variable at the critical point

$_r$ = Variable at the reduced point

PR EOS에서 엔탈피와 엔트로피의 값을 얻기 위해 적용된 계산방법은 다음 식 (4.3) 및 (4.4)와 같다.

$$\frac{H-H^D}{RT} = Z-1 - \frac{1}{2} \frac{a}{bRT} \left(a - T \frac{da}{dT} \right) \ln \left[\frac{V+(\sqrt{2}+1)b}{V+(\sqrt{2}-1)b} \right] \quad (4.3)$$

$$\frac{E-E_o^D}{R} = \ln(Z-B) - \ln \frac{P}{P_o} - \frac{A}{2\sqrt{2}bRT} \left(\frac{T}{a} \frac{da}{dT} \right) \ln \left[\frac{V+(\sqrt{2}+1)b}{V+(\sqrt{2}-1)b} \right] \quad (4.4)$$

여기서,

H = Enthalpy

E = Entropy

첨자(subscript) :

HD = Ideal gas

$_o$ = Reference state

4.1.2 시스템 주요 Unit Operation 해석 이론

(1) 압축기(compressor)

압축기의 운전효율은 실제 압축과정에서의 동력과 단열압축에서 동력의 비율로 나타낸다. 단열압축 및 폴리트로픽(polytropic) 동력()는 다음 식 (4.5)로 얻어진다.

$$W = F (MW) \left(\frac{n}{n-1} \right) CF \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \times \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \quad (4.5)$$

여기서,

n = Volume exponent

F = Correction factor

P = Pressure of the inlet stream

P_2 = Pressure of the outlet stream

ρ_1 = Density of the inlet stream

F_1 = Molar flow rate of the inlet stream

MW = Molecular weight of the gas

체적지수(volume component) n 은 등엔트로피 출력과 폴리트로픽 출력에 대해 각각 다음 식 (4.6) 및 (4.7)과 같이 정의 된다.

$$n = \frac{\ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right)}{\ln \left(\frac{\rho'_2}{\rho_1} \right)} \quad (4.6)$$

여기서, ρ'_2 는 입구 엔트로피에 상응하는 출구유체의 밀도

$$= \frac{\ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)}{\ln\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)} \quad (4.7)$$

여기서, ρ_2 는 출구유체의 밀도

보정계수(correction factor)는 다음 식 (4.8)로 계산된다.

$$CF = \frac{h'_2 - h_1}{\left(\frac{n}{n-1}\right)\left(\frac{P_2}{\rho'_2} - \frac{P_1}{\rho_1}\right)} \quad (4.8)$$

여기서, h_1 은 입구유체 엔탈피에 상응하는 출구유체 엔탈피, h'_2 는 입구유체의 엔탈피

압축기의 효율을 나타내는 단열효율(η_a)과 폴리트로픽효율(η_p)은 다음 식 (4.9)와 (4.10)로 계산된다.

$$\eta_a = \frac{Work\ Required_{(ideal)}}{Work\ Required_{(actual)}} = \frac{(H_{out} - H_{in})_{(ideal)}}{(H_{out} - H_{in})_{(actual)}} \quad (4.9)$$

$$\eta_p = \frac{\left[\left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1\right] \times \left[\left(\frac{n}{n-1}\right) \times \left(\frac{k-1}{k}\right)\right]}{\left[\left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1\right]} \times \eta_a \quad (4.10)$$

여기서 ,

H = Mass enthalpy

ρ = Mass density

n = Polytropic exponent

k = Isentropic exponent

(2) 가열기 및 냉각기

HYSYS에서 가열기(heater)와 냉각기(cooler)는 기기의 상태보다는 공정 흐름(process stream)에서 가열과 냉각에 요구되는 에너지를 계산하는데 유리하다. 입구로 주어진 유체는 출구 측 조건으로 가열되거나 냉각되는데 이때 입출구 차이만큼 엔탈피를 흡수하거나 배출하게 된다. 폐수동결농축처리시스템의 경우 사용되는 가열기와 냉각기는 모두 브라인탱크에 내장되어 열교환이 이루어지므로 열 손실을 최소화할 수 있고 시스템 구성을 간단히 할 수 있다. 시스템의 해석에서도 기기의 상태 보다는 열에너지의 입출에 중점을 두고 계산하였다. 가열기와 냉각기의 기본 모델에 적용되는 식은 다음 (4.11)과 (4.12)이다.

$$H_n - H_{out}) - Q_{cooler} = \rho \frac{d(VH_{out})}{dt} \quad (4.11)$$

$$M(H_{in} - H_{out}) + Q_{cooler} = \rho \frac{d(VH_{out})}{dt} \quad (4.12)$$

여기서,

M = Process fluid flow rate

ρ = Density

H = Enthalpy

Q_{heater} = Heater duty

Q_{cooler} = Cooler duty

V = Volume shell or tube holdup

(3) 열교환기

열교환기의 계산은 고온과 저온 유체의 에너지 밸런스에 기초하며, 일반적으로 고온의 유체가 저온의 유체에 열교환기 용량만큼의 열량을 공급하게 된다. 열정산(heat balance)식은 다음 식 (4.13)과 같다.

$$lance Error = [M_{old}(H_{out} - H_{in})_{cold} - Q_{leak}] - [M_{hot}(H_{out} - H_{in})_{hot} - Q_{loss}] \quad (4.13)$$

여기서,

M = Fluid mass flow rate

H = Enthalpy

Q_{leak} = Heat leak

Q_{loss} = Heat loss

열교환기를 통해서 전달되는 총열전달량(heat exchange duty)은 총열전달계수, 열교환기의 전열면적, 대수평균온도차(Log Mean Temperature Difference, LMTD)에 의해 다음 식 (4.14)로 나타낼 수 있다.

$$Q = UA\Delta T_M F_t \quad (4.14)$$

여기서,

U = Overall heat transfer coefficient

A = Surface area available for heat transfer

ΔT_{TM} = Log mean temperature difference

F_t = LMTD correction factor

일반적으로, 기본 모델 열교환기에 적용되는 식은 다음과 같다.

$$H_{in} - H_{out})_{shell} - Q_{loss} + Q = \rho \frac{d(VH_{out})_{shell}}{dt} \quad (4.15)$$

튜브(tube) 측은,

$$M_t(H_{in} - H_{out})_{tube} - Q = \rho \frac{d(VH_{out})_{tube}}{dt} \quad (4.16)$$

여기서,

M_s = Shell fluid flow rate

M_t = Tube fluid flow rate

ρ = Density

H = Enthalpy

Q_{loss} = Heat loss

Q = Heat transfer from the tube side to the shell side

V = Volume shell or tube holdup

(4) 펌프

펌프는 입구 측 유체에 압력을 증가시켜 이송하기 위해 사용된다. 펌프의 작동은 압축기의 작동과 유사하나 비압축성 유체에 적용된다. 펌프의 이상적인 동력(ideal power, WR)은 다음 식 (4.17)의 표준펌프 방정식에 근거하여 계산한다.

$$WR = \frac{(P_{out} - P_{in}) \times F}{\rho_{liq}} \quad (4.17)$$

여기서,

P_{out} = Pump outlet pressure

P_{in} = Pump inlet pressure

F = Flow rate

ρ_{liq} = Liquid density

펌프의 실동력(actual power, PWR_a)은 펌프의 효율식 (4.18)에서 정의된다.

$$\eta(\%) = \frac{PWR_i}{PWR_a} \times 100\% \quad (4.18)$$

식 (4.17)과 (4.18)에서 펌프 운전에 필요한 실동력은 다음 식 (4.19)로 나타낼 수 있다.

$$PWR_a = \frac{(P_{out} - P_{in}) \times F \times 100\%}{\rho_{liq} \times \eta(\%)} \quad (4.19)$$

실동력은 또한 입출구 유체의 열유량(heat flow) 차와 같다. 펌프의 효율이 100 % 보다 작은 경우 초과 에너지는 출구의 유체 온도를 상승시키게 된다.

4.2 완속운전 및 급속운전시스템 해석

동결농축폐수처리시스템의 운전은 청수의 공급에서 시작하여 폐수를 농축처리하고 마지막 동결층을 탈빙하는 과정까지가 한 회(batch)로 진행된다. 시스템이 한 회 운전하는 시간을 최소화 하면 하루에 처리할 수 있는 폐수의 양이 증가하여 폐수배출시설에 적용할 수 있는 사용범위가 확대된다. 시스템 설계 운전시간 중 감소 효과를 기대할 수 있는 과정은 초기빙층 착빙시간을 최소화하는 것이다. 폐수를 직접 동결농축처리하는 과정에 소요되는 시간은 순도 높은 물을 추출하는 분리도 즉 처리효율에 가장 중요한 요소인 동결층 성장속도에 영향을 미치므로 앞으로 추가 연구를 통해 단축하여야 할 부분이다. 기타 다른 과정들은 짧은 시간 단기적으로 진행되는 과정으로 실제 시간을 최소화하기 어려운 부분이다.

본 연구에서는 시스템 설계조건에 따라 폐수를 직접 동결농축처리하는 과정을 60분으로 정하였다. 이외의 기타 과정에서 필요한 시간 중 절감효과가 기대되는 초기빙층 착빙시간을 줄여 운전시간을 단축하는 방안으로, 폐수를 제빙부에서 농축 처리하는 동안 초기빙층용 청수를 탱크 내에서 미리 냉각하는 시스템에 대해서 적용을 검토하였다. 초기빙층용 청수를 미리 냉각하게 되면 제빙기에서 청수를 냉각하는 시간이 단축되고, 결국 초기빙층 착빙과정에 필요한 시간의 감소를 기대할 수 있기 때문이다. 따라서 청수를 예냉하는 장치인 청수냉각기를 갖는 시스템과 그렇지 못한 시스템을 각각 급속운전시스템(precooling system) 및 완속운전시스템(non-precooling system)이라고 칭하고 3장에서 정한 시스템의 설계조건에 따라 HYSYS 프로그램을 이용하여 시스템을 해석하였다. 시스템 해석 결과를 바탕으로 회당 소비전력량과 운전시간을 상호 비교하여 더 나은 시스템을 제안하고자 하였다. 완속운전시스템과 급속운전시스템의 운전절차는 Fig 4.1과 같다.



(a) Non-precooling system

(b) Precooling system

Fig. 4.1 Operation procedure of precooling and non-precooling system

4.2.1 시스템 설계 부하 및 냉브라인 순환량 계산

상용화가 가능한 유입 폐수의 70 %를 처리하는 용량을 설계처리량으로 정하고, 운전 과정 중 시간이 가장 긴 폐수 동결농축처리과정에서 시스템이 100 % 부하로 운전되도록 설계부하를 결정하였다. 폐수가 동결농축처리되는 과정에서 기포가 냉각되어 분사되므로, 제빙기로 유입된 폐수 중 70 % 양까지 처리하는 동결농축폐수처리시스템의 설계부하(Q_{design})는 완속운전시스템의 경우는 폐수 동결농축처리에 필요한 열량(Q_{wvf})과 분사공기 냉각열량(Q_{air})을 더한 값이 설계부하가 된다. 급속운전시스템에서는 여기에 폐수를 처리하는 중에 초기빙층용 청수를 예냉하기 위해 추가적으로 25 ℃ 청수를 5 ℃ 까지 미리 냉각하는 청수예냉열량(Q_{fwpc})을 더한 값이 설계부하가 된다.

설계부하를 완속운전시스템의 경우는 식 (4.20)에서,

$$Q_{design} = Q_{wvf} + Q_{air} \quad (4.20)$$

급속운전의 경우는 식 (4.21)에서 계산하였다.

$$Q_{design} = Q_{wvf} + Q_{air} + Q_{fwpc} \quad (4.21)$$

여기서, Q_{fwpc} 는 청수의 예냉열량(kJ/h)

$$Q_{fwpc} = \text{청수량} \times \text{비열} \times (\text{청수온도} - 5 \text{ }^{\circ}\text{C})$$

설계부하를 결정한 후 각 시스템에 필요한 냉열을 공급하기 위한 냉브라인 순환량을 계산하였다. 냉브라인의 사용 온도는 기본 설계데이터에서 제시한 바와 같이 냉브라인탱크에서 -20 ℃로 공급되어, -17 ℃로 회수되도록 정하였으며, 급속운전시스템의 청수 예냉은 폐수의 동결농축과정동안 병행하도록 설계하였다. 냉브라인 순환량은 완속운전시스템의 경우는 식 (4.22)에서 계산하고,

$$F_{design} = F_{wwt} + F_{air} \quad (4.22)$$

여기서, F_{design} 는 브라인 총 유량(kg/h), F_{wwt} 는 폐수동결농축처리 브라인 유량(kg/h), F_{air} 는 분사공기 냉각 브라인 유량(kg/h)

$$F_{wwt} = \frac{Q_{wwt}}{c_b \times \Delta T}$$

$$F_{air} = \frac{Q_{air}}{c_b \times \Delta T}$$

여기서, ΔT 는 브라인 입출구 온도차, 브라인의 비열 c_b 는 2.9308 kJ/kgK 이다.

급속운전시스템의 경우는 식 (4.23)에서 계산하였다.

$$F_{design} = F_{wwt} + F_{air} + F_{fwpc} \quad (4.23)$$

여기서, F_{fwpc} 는 청수 예냉용 브라인 유량(kg/h)

$$F_{fwpc} = \frac{Q_{fwpc}}{c_b \times \Delta T}$$

식 (4.22)와 (4.23)에서 계산한 냉브라인 순환량을 Table 4.1에 정리하였다.

Table 4.1 Design heat capacity and cold brain flow rate

System	Design heat capacity (kJ/h)				Cold brain flow (kg/h)			
	Q_{wwf}	Q_{air}	Q_{fwpc}	Q_{design}	F_{wwt}	F_{air}	F_{fwpc}	F_{design}
Non-precooling	87,897.68	272.64	-	88,170.32	9,997.14	31		10,028.15
Precooling	87,897.68	272.64	20,934	109,104.32	9,997.14	31	2380.96	12,409.10

4.2.2 HYSYS를 이용한 폐수농축처리과정의 시스템 해석

완속운전시스템과 급속운전시스템을 각각 Fig. 4.2 및 4.3과 같이 모델링하였다. 모델링은 전체 운전과정 중 폐수를 동결농축처리하는 과정에 대한 운전 모델이다. 여기서는 급속 및 완속운전시스템이 폐수를 직접 동결농축처리하는 과정에서 설계의 100 % 부하로 운전 중인 동결농축폐수처리시스템을 상용 공정모사 프로그램인 HYSYS로 모델링하고 해석을 통해 구성 기기의 소비동력을 구하였다. 시스템은 냉동사이클로 구성된 냉동부, 냉브라인 순환회로, 냉각과 동결과정으로 표현된 폐수처리부의 제빙기, 그리고 공기냉각기, 청수냉각기 등의 구성요소로 모델링 하였다. 실제 시스템에서는 제빙기, 탱크, 배관 및 밸브 등에서 열손실이 발생할 수 있으나, 직접 열교환이 이뤄지는 가열기, 냉각기는 탱크 내에 설치되므로 열손실을 최소화 할 수 있다. 시스템 해석에서는 충분한 단열작업을 실시하였던 가정 하에 이와 같은 열손실을 무시하였다.

(1) 냉동부의 냉동사이클 구성

냉동부는 크게 냉동사이클과 응축기 냉각회로로 구성된다. 시스템에 적용된 냉동사이클은 다단압축 냉동사이클로 중간냉각기(intercooler)를 갖는 2단압축 1단 팽창식 냉동기를 적용하였다. 냉각 온도가 매우 낮은 경우 냉매도 낮은 온도에서 증발하여야 하는데, 낮은 온도에서 증발이 일어나기 위해서는 증발 압력을 낮게 해야 한다. 그러나 증발 압력을 낮게 하면 압력비가 현저하게 증대하여 체적효율이 감소하고 냉동능력이 떨어질 뿐만 아니라, 압축효율도 감소하여 결국 소요동력이 증가한다. 그 결과 성적계수가 현저하게 낮아진다. 또 압축기로부터의 배출가스 온도가 높아져서 압축기 윤활유의 질이 떨어지는 등 나쁜 영향이 나타나게 된다. 이것을 방지하기 위해서 압축과정을 다단으로 나누어 실시하게 된다^[36]. 설계 시스템은 증발온도가 -30 ℃로 낮기 때문에 단단 압축식 냉동기보다는 다단압축방식이 유리하다. 여기서는 선박용 냉동기에 이용되고 있는 2단압축 1단팽창방식의 냉동장치를 적용하였으며, Fig. 4.4와 Fig. 4.5는 냉동장치의 개략도와 냉동사이클을 표시한 것이다.

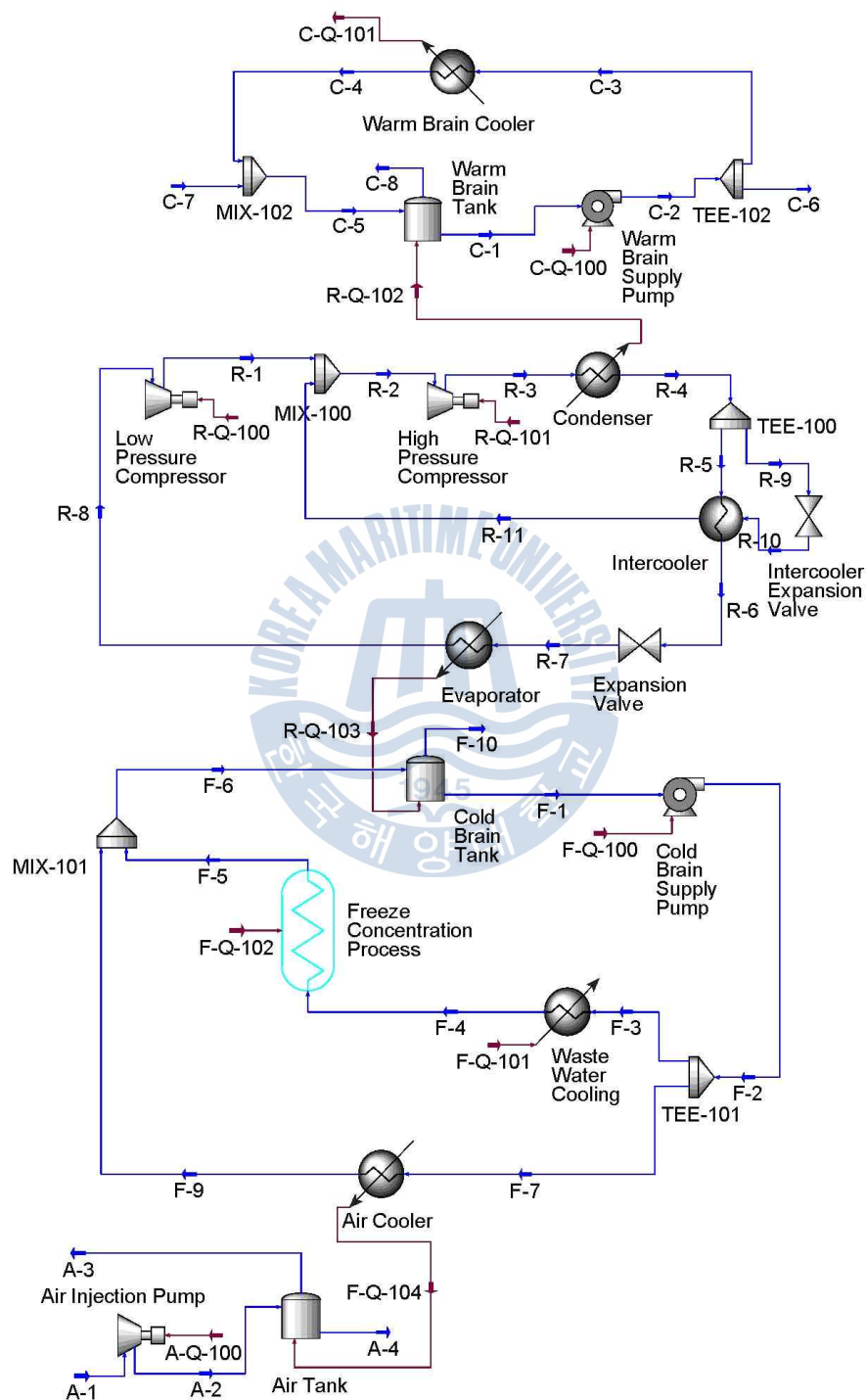


Fig. 4.2 Modeling of waste-water FC treatment system without fresh water cooler

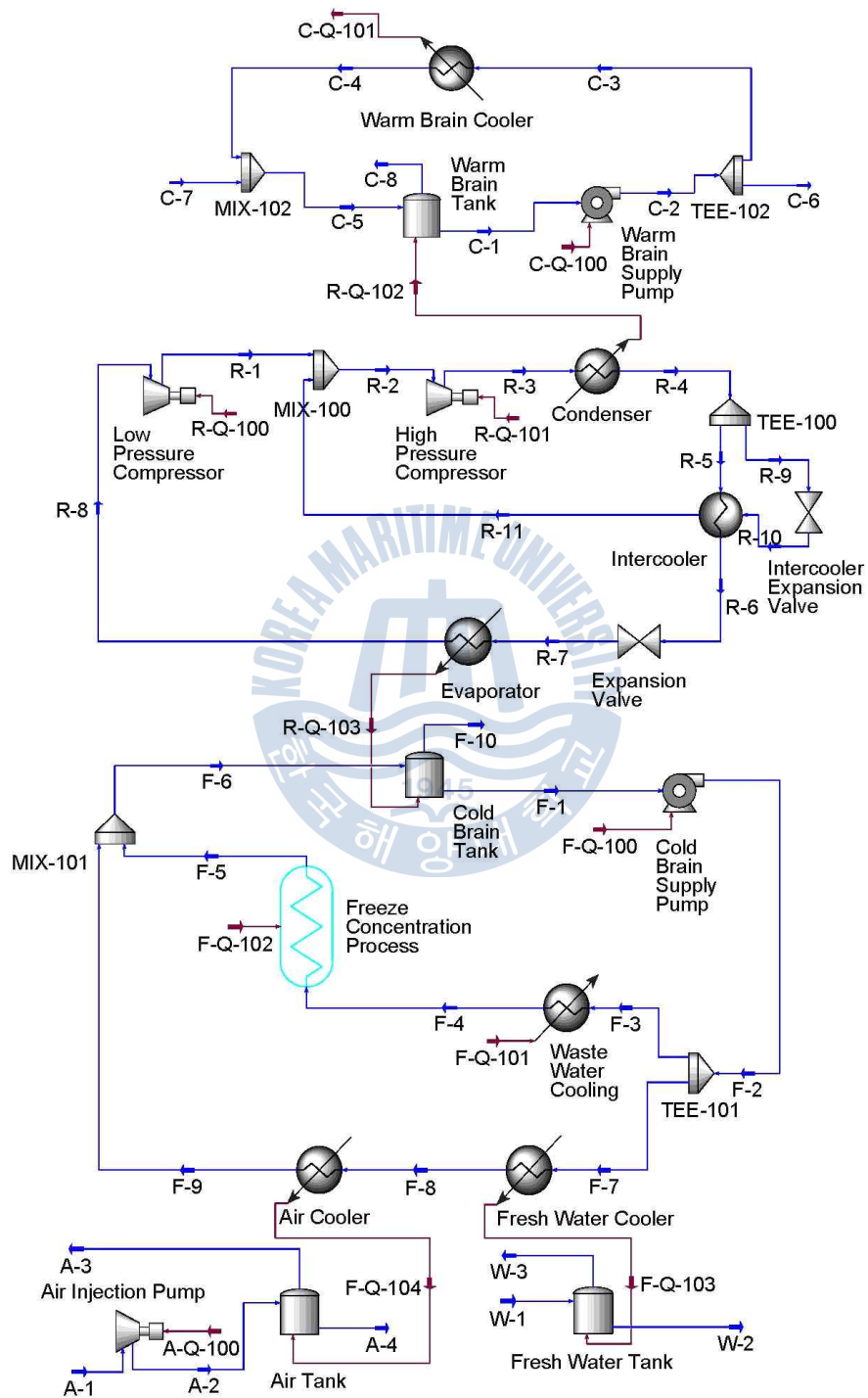


Fig. 4.3 Modeling of waste-water FC treatment system with fresh water cooler

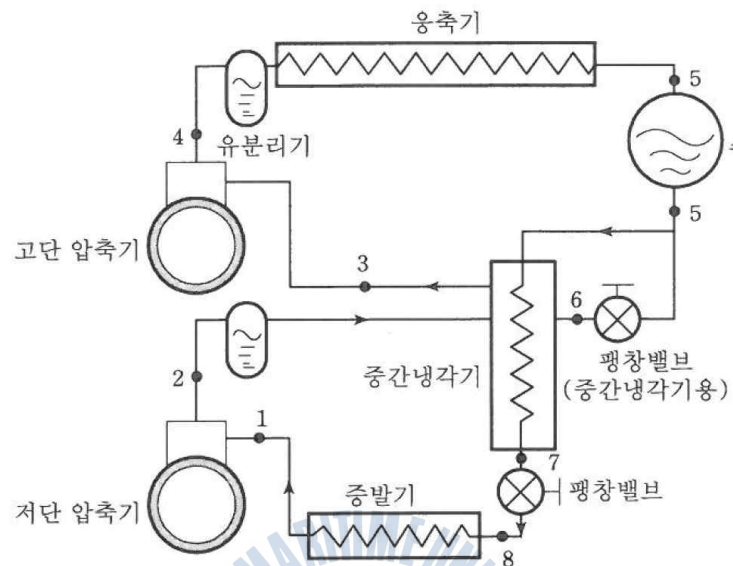


Fig. 4.4 Two-stage compression refrigeration system with intercooler^[41]

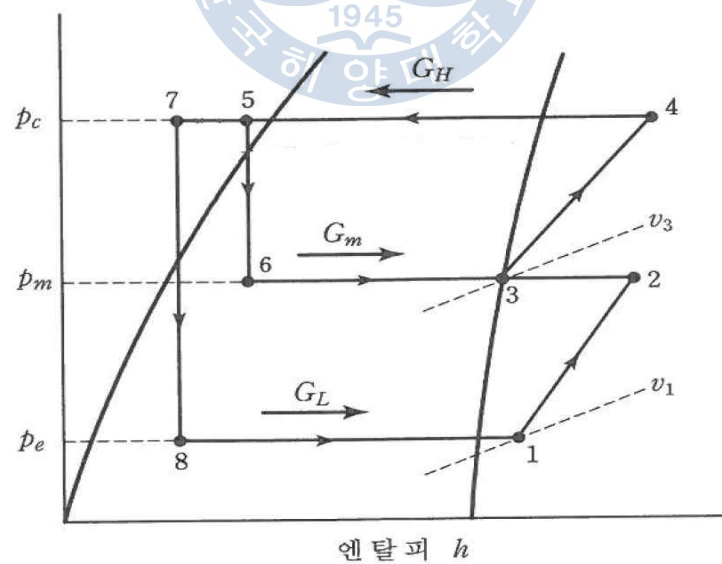


Fig. 4.5 Two-stage compression refrigeration cycle with intercooler^[41]

고압 쪽 압축기로부터 배출된 냉매 가스는 응축기에서 액화되며 중간냉각기를 지나 과냉각되면서 증발용 팽창 밸브로 가게 된다. 증발기에서 증발한 냉매는 저압 쪽 압축기에 흡입되며 중간압력까지 과열 압축된다. 이 과열 증기는 중간냉각기에서 저온액 냉매와 혼합하면서 냉각되어 고압 쪽 압축기에 흡입된다. 두 압축기에서는 동력을 절약하기 위해서 고·저압 쪽의 압력비가 거의 같도록 중간압력()을 식 (4.24)로 설정하였다.

$$(P_e \times P_c)^{1/2} \quad (4.24)$$

여기서, P_e 는 응축압력, P_c 는 증발압력이다.

냉동기의 사용 냉매는 R-134a를 적용하였으며, 동일한 조건에서 두 시스템 간 에너지 소모량을 비교하기 위해 냉동기가 갖는 효율인 성적계수(Coefficient Of Performance, COP)를 2.14로 동일하게 유지하였다. 냉매는 증발기 출구에서 건도(vapor fraction, VF)를 1로, 응축기 출구에서 건도를 0으로 각각 정하였다. 또, 중간냉각기를 거친 냉매는 5 °C 까지 과냉각 되도록 해 냉동장치의 효율을 좋게 했다. 상세 해석조건은 Table. 4.2와 같다.

냉동 시스템에서 응축기는 온브라인 탱크 내부에 설치하여 온열을 온브라인으로 회수하도록 하였고, 온브라인은 설계조건인 냉브라인과 동일한 에틸렌글리콜 50 % 수용액을 사용하여 냉브라인과 교환 운전될 때 관내 잔류 브라인으로 인한 농도변화를 방지하였다. 탱크 내장형 응축기는 온열을 회수하는데 손실을 최소화할 수 있고, 난방부하에 연동시켜 온열을 조절하여 공급할 수 있어 유리한 점이 있다. 온브라인에 응축기 열이 축열되어 50 °C 까지 온도가 상승하면 온브라인 냉각기(warm brain cooler)로 순환시켜 45 °C 까지 냉각하도록 하였다. 온브라인을 50 °C 까지 축열하는 이유는 추후 온열을 활용하는데 있어서 열 매체의 온도가 적어도 50 °C 이상이어야 온수, 급탕에 이용 가능하기 때문이다^[42]. 또한 높은 온도로 가열된 온브라인은 폐수의 동결농축과정이 완료된 후 냉브라인과 교체 순환되어 제빙관과 접촉하고 있는 초기빙층을 융해시켜, 제빙관으로부터 얼음을 분리하는 열원으로도 활용된다. 응축기 냉각 열이 축열된 온브라인을 냉각 시키는 회로의 해석 조건은 Table 4.3과 같다.

Table 4.2 Operation condition of refrigeration cycle

Refrigeration cycle	Two-stage compression refrigeration cycle with intercooler		
Refrigerant	R-134a		
Refrigerant temperature		Outlet temp. (°C)	V.F.
	Condenser	40	0
	Evaporator	-30	1
	Intercooler	5	-
Intermediate Pressure	293.9 kPa		
Refrigerant flow rate	Non-precooling system		684.9 kg/h
	Precooling system		852.7 kg/h
Condenser	Installed in warm brain tank		
	Pressure loss		0 kPa
Evaporator	Installed in cold brain tank		
	Pressure loss		0 kPa
Compressor	Adiabatic efficiency		75 %

Table 4.3 Condition of warm brain cooling pipe system

Brain	Ethylene glycol 50 % aqueous solution		
	Tank	Outlet temperature	50 °C
		Inlet temperature	45 °C
Warm brain supply pump	ΔP		100 kPa
	Adiabatic efficiency		75 %

(2) 냉브라인 순환부

냉브라인 순환부는 증발기가 내장된 냉브라인 탱크, 냉브라인 펌프(cold brain supply pump, P_{cb}), 공기냉각기(air cooler)와 급속운전시스템의 경우 추가적으로 청수냉각기(fresh water cooler)가 설치된다. 냉브라인은 에틸렌글리콜 50 % 수용액을 사용하였는데, 사용온도보다 동결점이 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 충분히 낮아 이를 선정하였다. 냉브라인은 탱크에서 증발기에 의해 사용온도인 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 까지 냉각되어, 냉브라인 펌프로 폐수처리부의 제빙기와 공기냉각기 및 청수냉각기에 공급된다. 시스템 해석에서 냉브라인 순환부의 열손실은 제외하였다. Table 4.4는 냉브라인 순환부의 해석 조건이다.

Table 4.4 Condition of cold brain circulation pipe system

Brain	Ethylene glycol 50 % aqueous solution		
	Flow rate	Non-precooling system	10,030 kg/h
		Precooling system	12,410 kg/h
	Tank	Outlet temperature	$-20\text{ }^{\circ}\text{C}$
Cold brain supply pump		ΔP	100 kPa
		Adiabatic efficiency	75 %
Air cooler		Pressure loss	0 kPa
		Inlet temperature	$25\text{ }^{\circ}\text{C}$
		Outlet temperature	$1\text{ }^{\circ}\text{C}$
		Flow rate	8.18 kg/h
Fresh water cooler		Pressure loss	0 kPa
		Inlet temperature	$25\text{ }^{\circ}\text{C}$
		Outlet temperature	$5\text{ }^{\circ}\text{C}$
		Flow rate	250 kg/h

(3) 폐수처리부

폐수처리부는 원래 저온의 냉매와 고온의 폐수 간 온도차에 의해 전열현상이 발생하는 열교환기의 일종이다. 폐수처리부의 제빙기에 유입된 폐수는 냉매와 열교환으로 동결계면에서 빙점이하로 과냉각되어진 후 어느 온도에서 과냉각이 해소되어 동결층이 성장하기 시작한다. 본 연구에서는 동결농축과정을 폐수냉각과정과 동결농축과정-폐수 상변화 및 동결층의 추가 냉각-으로 단순화하였으며 각 단계별로 필요한 열량을 계산하였다. 시스템 해석에서는 동결농축과정의 등가 열회로를 적용하여 폐수냉각과정과 폐수상변화 및 동결층냉각과정, 이 두 과정으로 구분하여 모사하였다. 폐수 냉각열은 동결농축 전의 손실 현열이며, 잠열과 동결층 냉각열은 실제 동결농축에 이용되는 제빙처리열로 구분할 수 있다. 열교환기로 표현되는 두 과정에서 외부 열손실은 없는 것으로 가정하였고, 가상의 열교환기 압력손실을 0 kPa로 정하여 해석하였다.

(4) 기포분사 냉각회로

기포분사용 공기는 공기 냉각회로에서 배출 폐수와 같은 온도로 냉각 후 공급한다. 기포분사 냉각회로는 공기분사펌프(air injection pump)와 공기탱크(air tank)로 구성되며 25 ℃ 공기가 펌프를 통해 냉각기로 공급되고 공기냉각기에서 냉브라인과 열교환으로 1 ℃까지 냉각되도록 하였다. 시스템에서 사용하는 공기 유량은 8.18 kg/h이다.

(5) 청수 냉각

급속운전시스템에서 폐수의 동결농축과정과 병행하여 진행되는 청수의 냉각은 청수냉각기를 청수탱크(fresh water tank) 내부에 설치하여 열 손실을 최소화하도록 하였다. 25 ℃의 청수를 5 ℃로 미리 냉각하는데 필요한 열량이 공급되도록 계산하여 청수냉각기의 해석에 반영하였다.

위의 조건들로 해석한 시스템 각 프로세스 속성 값과 해석 결과는 완속운전 및 급속운전 각 시스템에 대해 각각 Table 4.5 및 Table 4.6과 같다.

Table 4.5 Process stream condition at non-precooling system

Name	A-1	A-2	A-3	C-1
V.F.	1	1	1	0
T(°C)	25	35.15	1	50
P(kPa)	110	120	120	110
F _{mol} (kgmole/h)	0.276	0.276	0.276	223.9
F _{mass} (kg/h)	7.99	7.99	7.99	8964
F _{Liq} (m ³ /h)	9.084e-003	9.084e-003	9.084e-003	8.275
Q _h (kJ/h)	-2.505	77.82	-192.7	-8.199e+007

Name	C-3	C-4	F-1	F-2
V.F.	0	0	0	0
T(°C)	50.01	45	-20	-20
P(kPa)	210	210	110	210
F _{mol} (kgmole/h)	223.9	223.9	250.4	250.4
F _{mass} (kg/h)	8964	8964	1.003e+004	1.003e+004
F _{Liq} (m ³ /h)	8.275	8.275	9.258	9.258
Q _h (kJ/h)	-8.199e+007	-8.212e+007	-9.370e+007	-9.370e+007

Name	F-3	F-4	F-5	F-6
V.F.	0	0	0	0
T(°C)	-20	-19.04	-16.74	-16.74
P(kPa)	210	210	210	210
F _{mol} (kgmole/h)	249.7	249.7	249.7	250.4
F _{mass} (kg/h)	9997	9997	9997	1.003e+004
F _{Liq} (m ³ /h)	9.229	9.229	9.229	9.258
Q _h (kJ/h)	-9.341e+007	-9.338e+007	-9.332e+007	-9.361e+007

Name	F-7	F-9	R-1	R-2
V.F.	0	0	1	1
T(°C)	-20	-16.76	15.99	5.231
P(kPa)	210	210	293.9	293.9
F _{mol} (kgmole/h)	0.7742	0.7742	5.013	6.713
F _{mass} (kg/h)	31	31	511.5	684.9
F _{Liq} (m ³ /h)	2.862e-002	2.862e-002	0.4120	0.5516
Q _h (kJ/h)	-2.896e+005	-2.894e+005	-4.497e+006	-6.028e+006

Name	R-3	R-4	R-5	R-6
V.F.	1	0	0	0
T(°C)	56.51	35	35	5
P(kPa)	1018	1018	1018	1018
F _{mol} (kgmole/h)	6.713	6.713	5.013	5.013
F _{mass} (kg/h)	684.9	684.9	511.5	511.5
F _{Liq} (m ³ /h)	0.5516	0.5516	0.4120	0.4120
Q _h (kJ/h)	-6.003e+006	-6.134e+006	-4.581e+006	-4.603e+006

Name	R-7	R-8	R-9	R-11
V.F.	0.2069	1	0	0.887
T(°C)	-30	-30	35	0.1221
P(kPa)	84.83	84.83	1018	293.9
F _{mol} (kgmole/h)	5.013	5.013	1.699	1.699
F _{mass} (kg/h)	511.5	511.5	173.4	173.4
F _{Liq} (m ³ /h)	0.4120	0.4120	0.1396	0.1396
Q _h (kJ/h)	-4.603e+006	-4.514e+006	-1.553e+006	-1.531e+006

Table 4.6 Process stream condition at precooling system

Name	A-1	A-2	A-3	C-1
V.F.	1	1	1	0
T(°C)	25	35.15	1	50
P(kPa)	110	120	120	110
F _{mol} (kgmole/h)	0.276	0.276	0.276	278.7
F _{mass} (kg/h)	7.99	7.99	7.99	1.116e+004
F _{Liq} (m ³ /h)	9.084e-003	9.084e-003	9.084e-003	10.30
Q _h (kJ/h)	-2.505	77.82	-192.7	-1.021+008

Name	C-3	C-4	F-1	F-2
V.F.	0	0	0	0
T(°C)	50.01	45	-20	-20
P(kPa)	210	210	110	210
F _{mol} (kgmole/h)	278.7	278.7	309.9	309.9
F _{mass} (kg/h)	1.116e+004	1.116e+004	1.241e+004	1.241e+004
F _{Liq} (m ³ /h)	10.30	10.30	11.46	11.46
Q _h (kJ/h)	-1.021+008	-1.022+008	-1.159e+008	-1.159e+008

Name	F-3	F-5	F-6	F-7
V.F.	0	0	0	0
T(°C)	-20	-16.74	-16.72	-20
P(kPa)	210	210	210	210
F _{mol} (kgmole/h)	249.7	249.7	309.9	60.24
F _{mass} (kg/h)	9997	9997	1.241e+004	2412
F _{Liq} (m ³ /h)	9.229	9.229	11.46	2.227
Q _h (kJ/h)	-9.341e+007	-9.332e+007	-1.158e+008	-2.254e+007

Name	R-1	R-2	R-3	R-4
V.F.	1	1	1	0
T(°C)	15.99	5.209	56.49	35
P(kPa)	293.9	293.9	1018	1018
F _{mol} (kgmole/h)	6.241	8.357	8.357	8.357
F _{mass} (kg/h)	636.7	852.7	852.7	852.7
F _{Liq} (m ³ /h)	0.5128	0.6867	0.6867	0.6867
Q _h (kJ/h)	-5.598e+006	-7.504e+006	-7.474e+006	-7.637e+006

Name	R-5	R-6	R-7	R-8
V.F.	0	0	0.2069	1
T(°C)	35	5	-30	-30
P(kPa)	1018	1018	84.83	84.83
F _{mol} (kgmole/h)	6.241	6.241	6.241	6.241
F _{mass} (kg/h)	636.7	636.7	636.7	636.7
F _{Liq} (m ³ /h)	0.5128	0.5128	0.5128	0.5128
Q _h (kJ/h)	-5.703e+006	-5.730e+006	-5.730e+006	-5.619e+006

Name	R-9	R-11	W-1	W-2
V.F.	0	0.8869	0	0
T(°C)	35	0.1240	25	5
P(kPa)	1018	293.9	110	110
F _{mol} (kgmole/h)	2.117	2.117	13.88	13.88
F _{mass} (kg/h)	216	216	250	250
F _{Liq} (m ³ /h)	0.1739	0.1739	0.2505	0.2505
Q _h (kJ/h)	-1.934e+006	-1.906e+006	-3.972e+006	-3.994e+006

4.2.3 기타 펌프의 소비동력 계산

시스템은 초기빙층의 착빙과 폐수 동결농축처리과정 이외의 운전과정에서는 대부분 펌프들의 단기운전이 이루어진다. 시스템에서 짧은 시간 운전하는 펌프는 청수 급수펌프, 청수 배수펌프, 폐수 공급펌프, 농축폐수 배출펌프, 탈빙을 위한 온브라인 펌프가 해당된다. 이들 펌프는 1분에서 3분 사이의 짧은 시간동안 사용되지만 시스템 전체의 효율에 영향을 미치므로 HYSYS로 별도 모델링하여 소비동력을 구하였다. 단기운전 하는 펌프들은 시스템과 상관없이 완속운전시스템 및 급속운전시스템 모두에서 같은 조건으로 운전하며 이때 소비되는 동력도 동일하다.

(1) 청수 급수펌프(fresh water supply pump, P_{fs})

청수 급수펌프는 초기빙층 착빙을 위해 청수를 청수탱크에서 제빙기에 공급하는 펌프로 2분간 운전한다. Table 4.7은 청수 급수펌프의 소비동력을 계산하기 위한 해석 조건이며 Fig 4.6과 같이 모델링하여 해석하였다. Table 4.8은 프로세서의 속성 값 및 해석 결과를 나타낸 것이다.

(2) 청수 배수펌프(fresh water discharge pump, P_{fd})

청수가 제빙기에 공급된 후 초기빙층이 착빙되고 나면 나머지 청수는 배출된다. 이때 초기빙층의 착빙 두께를 1 mm 정하였으므로 각 원관에 착빙된 얼음량을 제외한 청수를 배출하게 된다. 유입수 250 kg을 70 %(175 kg) 설계처리량으로 운전하는 경우, Table 3.2에서 초기빙층량이 약 10 kg이므로 배출되는 청수의 양은 240 kg이다. 청수의 배출 시간을 시스템 설계상 2분으로 정하였으므로 청수 배수펌프의 유량은 분당 120 kg/min이 된다. Table 4.7은 청수 배수펌프의 소비동력을 계산하기 위한 해석 조건이며 Fig 4.6과 같이 모델링하여 해석하였다. Table 4.8은 프로세서의 속성 값 및 해석 결과를 나타낸 것이다.

(3) 폐수 공급펌프(waste-water supply pump, P_{ws})

초기빙층이 착빙되고 사용된 청수가 배출되면 실제 처리대상이 되는 원 폐수가 제빙기에 유입된다. 폐수 공급펌프는 폐수탱크로부터 폐수를 이송하여 제빙기에 공급하는 역할을 한다. 실제 공장에서 발생하는 산업용 폐수는 그 성상이 다양하고 밀도 또한 서로 다르다. 펌프의 동력을 계산하는데 있어 유체가 갖는 밀도는 중요한 요소이나, 여기서는 일반 청수로 가정하고 펌프의 동력을 계산하였다. 제빙기에 공급되는 폐수의 공급량은 250 kg이며, 운전절차상 폐수 유입은 2분간 진행된다. Table 4.7은 폐수 공급펌프의 소비동력을 계산하기 위한 해석 조건이며 Fig 4.6과 같이 모델링하여 해석하였다. Table 4.8은 프로세서의 속성 값 및 해석 결과를 나타낸 것이다.

(4) 농축폐수 배출펌프(waste-water discharge pump, P_{wd})

공급된 폐수는 1차적으로 동결점까지 냉각되고, 이후 동결층이 성장하게 된다. 이때 동결계면에서 배제된 오염물질은 잔류 폐수로 농축된다. 따라서 오염물질의 종류와 농축율에 따라 잔류 농축폐수의 밀도도 달라진다. 그러나 여기서는 청수와 동일한 밀도로 가정하여 해석하였다. 잔류 폐수량은 유입량 250 kg에서 설계 처리량 175 kg을 제외한 양으로 배출 시간은 1 분이며 분당 배출량은 75 kg/min이 된다. Table 4.7은 농축폐수 배출펌프의 소비동력을 계산하기 위한 해석 조건이며 Fig 4.6과 같이 모델링하여 해석하였다. Table 4.8은 프로세서의 속성 값 및 해석 결과를 나타낸 것이다.

(5) 탈빙 운전 시 온브라인 공급펌프(warm brain supply pump, P_{wb})

폐수를 동결농축하여 생성된 얼음은 농축폐수를 배출한 후 온브라인을 제빙관에 유입하여 접촉면을 가열 용해시켜 제거한다. 가열은 냉동기의 응축기 냉각열을 온브라인에 축열하여 온브라인 펌프로 제공하는 과정으로 진행된다. 온브라인 펌프는 온브라인 탱크 내에 축열된 열을 냉각하기 위해 사용되는 순환펌프를 겸용으로 사용하도록 설계되어 있다. 따라서 탈빙 동작의 온브라인 펌프 소비전력량은 폐수동결농축과정에서 온브라인 냉각을 위해 운전하는 소비동력을 기준으로 탈빙 시간인 3분에 소비되는 전력량을 계산하여 반영하였다.

Table 4.7 Condition of short-term operation pump

Pump	Flow temperature (°C)	Flow rate (kg/min)	Operation time (min)
P_{fs}	25	125	2
P_{fd}	1	120	2
P_{ws}	25	125	2
P_{wd}	1	75	1

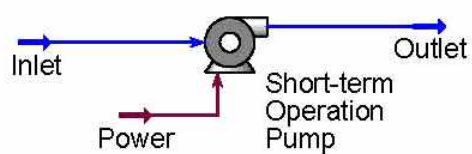


Fig. 4.6 Modeling of short-term operation pump

Table 4.8 Process stream condition of short-term operation pump

Name	Fresh water supply pump(P_{fs})		Fresh water discharge pump(P_{fd})	
	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet
V.F.	0	0	0	0
T($^{\circ}\text{C}$)	25	25.01	1	1.008
P(kPa)	110	210	110	210
F_{mol} (kgmole/h)	416.3	416.3	399.7	399.7
F_{mass} (kg/h)	7500	7500	7200	7200
F_{Li} (m^3/h)	7.515	7.515	7.215	7.215
Q_h (kJ/h)	-1.192e+008	-1.192e+008	-1.151e+008	-1.151e+008

Name	Waste-water supply pump(P_{ws})		Waste-water discharge pump(P_{wd})	
	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet
V.F.	0	0	0	0
T($^{\circ}\text{C}$)	25	25.01	1	1.008
P(kPa)	110	210	110	210
F_{mol} (kgmole/h)	416.3	416.3	249.8	249.8
F_{mass} (kg/h)	7500	7500	4500	4500
F_{Li} (m^3/h)	7.515	7.515	4.509	4.509
Q_h (kJ/h)	-1.192e+008	-1.192e+008	-7.196e+007	-7.196e+007

4.2.4 완속운전과 급속운전시스템 해석 결과

(1) 소비전력량 분석

HYSYS 해석결과 시스템을 구성하고 있는 각 기기별 소비동력을 기준으로 소비전력량을 계산하여 Table 4.9에 정리하였다.

Table 4.9 Electric power consumption for the application of precooling

System	Power consumption(kWh)										
	IL*	CMP		P _{cb}	P _{wb}	P _{ab}	P _{fs}	P _{fd}	P _{ws}	P _{wd}	Total
		Low	High								
Non-Precooling	3.968	4.770	6.782	0.329	0.324	0.022	0.009	0.009	0.009	0.003	16.225
Precooling	1.080	5.938	8.443	0.407	0.403	0.022	0.009	0.009	0.009	0.003	16.323

* IL : Electric power consumption of making ice-lining

두 시스템 간 소비전력량의 차이는 0.098 kWh로 매우 작다는 것을 알 수 있었다. 작은 차이이나 완속운전시스템이 급속운전시스템에 비해 소비전력량이 작은 것은 설계부하가 큰 급속운전시스템에서 냉브라인과 온브라인 유량이 상대적으로 커져 펌프의 일이 증가하기 때문이다. 실제 플랜트에서 발생하는 외기 조건과의 온도차에 의한 배관, 밸브 및 탱크의 단열손실, 펌프, 밸브의 압력손실, 열교환기의 효율 등을 고려하지 않은 결과지만 동일 조건 하에서는 두 운전시스템 간 에너지 소모량의 차는 거의 같다고 볼 수 있다. 또한, Table 4.9에서 운전조건과 상관없이 압축기의 소비전력량이 전체에서 차지하는 비중이 약 95 % 이상으로 냉동기의 성능계수가 시스템의 효율을 지배하는 것으로 확인되었다. 따라서 실제 시스템을 설계할 때 효율이 높은 냉동기의 선정이 매우 중요한 것을 알 수 있었다.

(2) 운전시간 분석

시스템이 처리 가능한 양 즉 처리량은 폐수배출업체가 처리시설을 선정하는 중요한 선택 기준 중에 하나로 주로 일일처리량을 기준으로 한다. 처리 효율이 같다면 동일한 양의 폐수를 빠르게 처리할수록 처리횟수가 많아지고 처리할 수 있는 일일 폐수의 양도 증가하여 유리한 조건을 갖게 된다. 따라서 완속운전시스템과 급속운전시스템의 회당 운전시간을 계산하여 Table 4.10에 정리하였다.

전체 운전시간 중 가장 큰 부분은 폐수농축처리 시간이다. 폐수의 농축처리 시간은 폐수 내 오염물질의 처리효율과 직접적인 관련인자로 이에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 시스템 해석에서는 처리효율과 관련된 폐수농축처리 시간을 60분으로 동일하게 적용하였다. 이 시간은 동결층의 성장속도와 연관되어 있고, 동결농축 시간이 변하게 되면 근본적인 오염물질 처리능력에 영향을 줄 수 있어 해당 시간을 현재 연구되는 상용시스템의 시간에 근접하게 정한 것이다. 폐수농축에 소요되는 시간을 제외하고 다른 과정들은 동일하므로 가장 중요한 영향인자는 초기빙층의 착빙에 소요되는 시간이 된다. 초기빙층 착빙에 소요되는 시간(t_i)(min)은 초기빙층 착빙에 필요한 열량(Q_{ilf})(kJ)과 시스템 설계부하(Q_{design})(kJ/h)에 따라 다음 식 (4.25)로 구할 수 있다.

계산 결과 Table 4.10에서 급속운전시스템의 경우 과냉각 방지용 초기빙층의 착빙에 소요되는 시간이 완속운전시스템 대비 약 22 % 까지 줄어드는 결과로 나타났으며, 이로 인해 전체 운전시간이 약 17 % 감소하는 효과를 얻었다.

$$t_i = \frac{Q_{ilf} \times 60}{Q_{design}} \quad (4.25)$$

Table 4.10 Operation time of precooling and non-precooling system

Treatment procedure	Non-Precooling (min)	Precooling (min)
Fresh water supply	2	2
Ice-lining making	19.5	4.3
Fresh water discharge	2	2
Waste-water supply	2	2
Waste-water FC	60	60
Waste-water discharge	1	1
De-ice	3	3
Total	89.5	74.3

4.3 설계처리량에 따른 시스템 해석

처리량이란 시스템에서 폐수처리부의 제빙기에 유입된 폐수 중 순수한 물을 얼마만큼 추출하고 오염물질을 농축액으로 배제시킬 수 있는지를 나타낸 것으로 가장 대표적 중소규모의 산업폐수처리 방법인 감압증발농축장치는 90 % 이상을 처리하는 것으로 알려져 있다. 현재는 고효율로 더 많은 양을 처리하기 위해 진공증발법, 수증연소방식 등이 개발되고 있다. 동결농축처리장치의 경우 통상 70 ~ 80 %가 처리 가능한 것으로 보고되고 있다^[11]. 동결농축처리시스템의 농축율 향상은 추가적으로 연구가 필요한 부분이며, 여기서는 농축율의 변화 즉 처리량에 따른 시스템 효율을 분석하여 향후 농축율 향상의 연구 방향을 제시하고자 하였다.

설계처리량은 유입된 폐수를 50 ~ 90 % 양까지 처리하는 용량을 각각 검토하였으며, 해석에 적용된 모델은 회당 운전시간이 상대적으로 짧고, 일일처리량이 큰 급속운전시스템을 적용하였다. 이미 구성된 해석 모델에 설계처리량이 변경되므로 반영할 변수들을 입력하여 시스템을 해석하였다.

4.3.1 시스템 설계부하 및 냉브라인 순환량 계산

설계부하는 운전시간이 가장 길며, 사용 부하가 최대인 폐수 동결농축처리 과정에서 설계부하 100 %로 운전하도록 하였다. 이때 동결계면에 형성되는 고농도의 폐수를 확산시키기 위해 분사되는 기포도 소정의 온도로 냉각되고, 폐수가 동결농축처리 되는 동안 초기빙층 착빙에 사용할 청수도 사전에 냉각된다. 따라서 설계부하($esign$)는 폐수의 동결농축처리에 필요한 열량(Q_{wvf}), 청수 예냉열량(Q_{fwpc}), 분사공기 냉각열량(Q_{air})을 더한 값으로 식 (4.21)에서 구할 수 있다.

냉브라인량도 설계부하에 따라 달라져 시스템에 필요한 순환량을 부하에 맞게 계산하였다. 냉브라인의 사용온도는 기본 설계데이터에서 제시한 바와 같이 냉브라인 탱크에서 -20 °C로 공급되어, -17 °C로 회수되도록 정하였으며, 식 (4.23)에서 각각 계산하였다. 처리량에 따른 설계부하 및 냉브라인 순환량은 Table 4.11과 같다.

Table 4.11 Design heat capacity and cold brain flow rate

Treatment capacity (%)	Design heat capacity (kJ/h)				Cold brain flow (kg/h)			
	wf	Q_{air}	Q_{fwpc}	Q_{design}	F_{wvt}	F_{air}	F_{fwpc}	F_{design}
50	69,961.43	194.73	20,934	91,090.16	7,957.14	22.15	2,380.95	10,360.24
60	78,929.55	233.67	20,934	100,097.22	8,977.14	26.58	2,380.95	11,384.67
70	87,897.68	272.64	20,934	109,104.32	9,997.14	31.01	2,380.95	12,409.10
80	96,865.80	311.92	20,934	118,111.72	11,017.14	35.48	2,380.95	13,433.57
90	105,833.93	350.85	20,934	127,118.78	12,037.14	39.91	2,380.95	14,458.0

4.3.2 HYSYS를 이용한 폐수농축처리과정의 시스템 해석

처리량에 따라 계산된 시스템 설계부하의 100 %로 운전 중인 동결농축처리 과정을 상용프로그램인 HYSYS로 해석하여 각 구성 기기의 소비동력을 구하였다. 시스템은 급속운전시스템인 Fig 4.3과 동일하게 모델링하였으며 각 구성부의 해석 조건은 4.2.2와 같이 적용하였다. 냉동부의 냉동기 성적계수는 처리량과 상관없이 2.14로 동일하게 유지시키고, 시스템에서 발생할 수 있는 열손실은 무시하고 해석하였다. 설계처리량의 변화에 따라 시스템 해석에 적용된 변수들은 Table 4.12로 정리하였다.

처리량이 증가하면 부하가 상승하고 냉동기의 용량과 냉브라인 순환량이 동반하여 상승한다. 또한, 동일한 두께의 동결층 15 mm에서 많은 양의 얼음을 제빙하기 위해서는 제빙관의 수가 증가하여야 한다. 설계처리량에 따른 제빙관의 개수는 Table 3.2와 같다. 제빙관의 수가 증가하면 따라서 오염물질의 분리 효율을 높이기 위해 동결계면에 분사하는 공기의 양도 증가한다. 분사펌프에 의해 공급되는 공기의 양은 관 하나에 공급되는 유량에 제빙관의 개수를 곱하여 계산하며 그 결과 Table 4.13과 같다. 또, 폐수처리부의 제빙기에서는 처리량이 증가할수록 동결되는 얼음의 양이 많아져 처리될 폐수를 빙점까지 냉각하는 열량과 동결잠열, 동결층의 냉각열량이 모두 증가한다.

설계처리량에 따른 시스템의 운전과정 중 폐수를 직접 동결농축처리하는 과정의 모델링 및 해석에 대한 각 프로세서의 속성 값은 별도의 부록에 첨부하였으며 해석 결과로 얻어진 각 기기의 소비동력 및 열에 관련된 데이터는 Table 4.14로 정리하였다.

Table 4.12 System parameters for modeling of waste-water FC process

Treatment capacity (%)	Refrigerant flow(kg/h)	Waste-water cooling*(kW)	FC process** (kW)	Cold brain flow(kg/h)	Air flow (kg/h)
50	712.7	7.119	12.30	10,360.24	5.70
60	782.6	7.148	14.76	11,384.67	6.84
70	852.7	7.177	17.22	12,409.10	7.99
80	922.5	7.206	19.68	13,433.57	9.13
90	992.5	7.235	22.14	14,458.0	10.27

* $Q_{wc} = Q_{fwc}$

** $Q_{lh} + Q_{ic}$

Table 4.13 Injection air flow of waste-water FC system

Treatment capacity(%)	Number of cooling tube(ea)	Air flow rate (L/min)
50	16.06	80.30
60	19.27	96.35
70	22.49	112.35
80	25.70	128.50
90	28.91	144.55

Table 4.14 Result of waste-water FC system analysis

Treatment capacity (%)	Refrigerator			IM(kW)		Pump		
	Eva (kW)	CMP(kW)				P _{cb} (kW)	P _{wb} (kW)	P _{ab} (kW)
		Low	High	h	Q_{ic}			
50	25.77	4.963	7.057	12.30	7.119	0.340	0.321	0.016
60	28.30	5.450	7.750	14.76	7.148	0.373	0.353	0.019
70	30.83	5.938	8.443	17.22	7.177	0.407	0.384	0.022
80	33.36	6.425	9.135	19.68	7.206	0.440	0.416	0.025
90	35.89	6.912	9.828	22.14	7.235	0.474	0.447	0.029

4.3.3 기타 펌프의 소비동력 계산

폐수의 동결농축처리과정에서는 운전되지 않고 전후의 운전과정에서 짧은 시간 작동하는 펌프의 소비동력은 HYSYS로 별도 모델링하고 해석하였다. 시스템에서 단기운전 하는 펌프에는 청수 급수펌프, 청수 배수펌프, 폐수 공급펌프, 농축폐수 배출펌프, 탈빙과정에서 운전되는 온브라인 펌프가 있다. 이들 펌프는 1분에서 3분 이하의 짧은 시간동안 사용하지만 시스템 전체의 효율에 영향을 미치므로 HYSYS상에서 소비동력을 계산하였다. 청수 급수펌프, 폐수 공급펌프는 설계유입량이 250 kg으로 일정하고 4.2.3과 같은 조건으로 운전되어, 소비동력을 구하기 위한 별도의 해석이 필요하지 않다.

그러나 초기빙층이 착빙되고 배출되는 청수의 경우, 제빙관의 개수가 달라 초기빙층이 착빙된 후 잔류 청수의 양도 달라진다. 따라서 청수 배수펌프의 소비동력도 각각 다르다. 또, 설계처리량에 따라 농축된 잔류 폐수의 양이 변하므로 이를 배출하기 위한 폐수 배출펌프의 소비동력도 별도로 구하였다. 온브라인 펌프는 냉동부 온브라인 냉각회로의 펌프와 공용으로 사용하고 있어 응축기의 열량에 따라 펌프 용량이 설계되므로 펌프 유량을 기준으로 소비동력을 구하였다.

(1) 청수 배수펌프

청수가 제빙부에 공급되고 초기빙층이 착빙되면 나머지 잔류 청수는 배출된다. 이때 초기빙층의 두께를 1 mm 정하였으므로 각 제빙관에 착빙된 얼음의 양을 제외한 청수를 배출하게 된다. 제빙관의 수는 처리량 증가에 따라 Table 3.2와 같이 증가하므로 초기빙층에 착빙되는 상변화를 겪는 청수의 양도 증가하게 된다. 결국 초기빙층 형성 후 배수되는 청수의 양은 설계량이 증가할수록 감소하게 되며, 그 양은 공급량 250 kg에서 초기빙층량을 제외한 양이 된다. 청수의 배출 시간을 시스템 설계상 2분으로 정하였으므로 배수 유량에 따른 청수 배수펌프의 소비동력을 계산하였다. Table 4.15는 청수 배수펌프의 소비동력을 계산하기 위한 해석 조건이며 Fig 4.7과 같이 모델링하여 해석하였다. Table 4.16은 프로세서의 속성 값 및 해석 결과를 나타낸 것이다.

Table 4.15 Condition of fresh water discharge pump

Flow temperature (°C)	1	
Operation time (min)	2	
Flow rate	Treatment capacity (%)	Discharge flow rate (kg/min)
	50	121.4
	60	120.7
	70	120.0
	80	119.3
	90	118.6

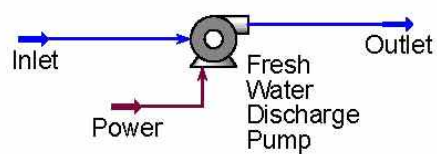


Fig. 4.7 Modeling of fresh water discharge pump

Table 4.16 Process stream condition of fresh water discharge pump

Name	Design capacity(50 %)		Design capacity(60 %)	
	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet
V.F.	0	0	0	0
T(°C)	1	1	1	1
P(kPa)	110	210	110	210
F _{mol} (kgmole/h)	404.3	404.3	402	402
F _{mass} (kg/h)	7284	7284	7242	7242
F _{Liq} (m ³ /h)	7.299	7.299	7.257	7.257
Q _h (kJ/h)	-1.165e+008	-1.165e+008	-1.158e+008	-1.158e+008

Name	Design capacity(70 %)		Design capacity(80 %)	
	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet
V.F.	0	0	0	0
T(°C)	1	1	1	1
P(kPa)	110	210	110	210
F _{mol} (kgmole/h)	399.7	399.7	397.3	397.3
F _{mass} (kg/h)	7200	7200	7158	7158
F _{Liq} (m ³ /h)	7.215	7.215	7.172	7.172
Q _h (kJ/h)	-1.151e+008	-1.151e+008	-1.145e+008	-1.145e+008

Name	Design capacity(90 %)			
	Inlet	Outlet		
V.F.	0	0		
T(°C)	1	1		
P(kPa)	110	210		
F _{mol} (kgmole/h)	395	395		
F _{mass} (kg/h)	7116	7116		
F _{Liq} (m ³ /h)	7.130	7.130		
Q _h (kJ/h)	-1.138e+008	-1.138e+008		

(2) 농축폐수 배출펌프

농축폐수 배출펌프는 제빙기 내에 잔류 농축액을 배출시키는 펌프로 설계처리량이 클수록 처리 후 잔류 농축폐수의 양은 작아진다. 농축폐수 배출펌프의 유량은 폐수 공급량 250 kg에서 제빙되는 처리량을 뺀 나머지가 배출되며 배출시간은 1분으로 정하였다. 오염물질의 종류와 잔류 농도에 따라 농축폐수의 밀도는 변화되는데 여기서는 청수와 동일한 밀도로 가정하여 해석하였다. Table 4.17은 농축폐수 배출펌프의 소비동력을 계산하기 위한 해석 조건이며 Fig 4.8과 같이 모델링하여 해석하였다. Table 4.18은 프로세서의 속성 값 및 해석 결과를 나타낸 것이다.

(3) 탈빙 운전 시 온브라인 펌프

온브라인 펌프는 응축기 온열을 회수하여 고온으로 가열된 온브라인을 냉각 회로에 순환시켜 설정온도로 냉각하기 위해 사용되는 펌프로 응축기의 용량에 따라 펌프 유량 크기가 결정된다. 온브라인 펌프는 이와 병행하여 탈빙과정에서 제빙관에 온열을 전달하는 역할을 담당하는데 이때는 단기운전을 하게 된다. 처리량에 따라 설계부하가 달라져 냉동부 응축기의 용량이 변하고, 따라서 온브라인 펌프의 유량도 달라진다. 유량이 다른 펌프가 각 설계처리량의 시스템에 설치되므로 비록 탈빙과정이 단기운전이라도 펌프의 소비동력으로 인해 시스템 효율에 영향을 주기 때문에 별도의 계산이 필요하다. Table 4.19는 온브라인 펌프의 소비동력을 계산하기 위한 해석 조건이며 Fig 4.9와 같이 모델링하여 해석하였다. Table 4.20은 프로세서의 속성 값 및 해석 결과를 나타낸 것이다.

Table 4.17 Condition of waste-water discharge pump

Flow temperature (°C)	1	
Operation time (min)	1	
Flow rate	Treatment capacity (%)	Discharge flow rate (kg/min)
	50	125
	60	100
	70	75
	80	50
	90	25

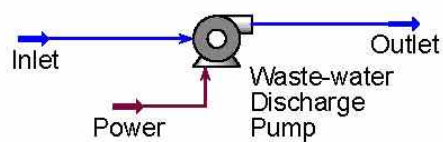


Fig. 4.8 Modeling of waste-water discharge pump

Table 4.18 Process stream condition of waste-water discharge pump

Name	Design capacity(50 %)		Design capacity(60 %)	
	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet
V.F.	0	0	0	0
T(°C)	1	1.008	1	1.008
P(kPa)	110	210	110	110
F _{mol} (kgmole/h)	416.3	416.3	333.1	333.1
F _{mass} (kg/h)	7500	7500	6000	6000
F _{Li_q} (m ³ /h)	7.515	7.515	6.012	6.012
Q _h (kJ/h)	-1.199e+008	-1.199e+008	-9.595e+008	-9.595e+008

Name	Design capacity(70 %)		Design capacity(80 %)	
	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet
V.F.	0	0	0	0
T(°C)	1	1.008	1	1.008
P(kPa)	110	210	110	210
F _{mol} (kgmole/h)	249.8	249.8	166.5	166.5
F _{mass} (kg/h)	4500	4500	3000	3000
F _{Li_q} (m ³ /h)	4.509	4.509	3.006	3.006
Q _h (kJ/h)	-7.196e+007	-7.196e+007	-4.797e+007	-4.797e+007

Name	Design capacity(90 %)			
	Inlet	Outlet		
V.F.	0	0		
T(°C)	1	1.008		
P(kPa)	110	210		
F _{mol} (kgmole/h)	83.26	83.26		
F _{mass} (kg/h)	1500	1500		
F _{Li_q} (m ³ /h)	1.503	1.503		
Q _h (kJ/h)	-2.399e+007	-2.399e+007		

Table 4.19 Condition of warm brain supply pump

Warm brain	50 % Ethylene glycol aqueous solution	
Flow temperature (°C)	50	
Operation time (min)	3	
Flow rate	Treatment capacity (%)	Discharge flow rate (kg/min)
	50	155.45
	60	170.66
	70	186.0
	80	201.16
	90	216.50

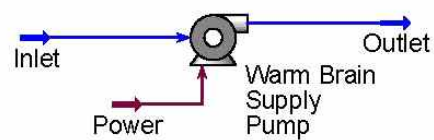


Fig. 4.9 Modeling of warm brain supply pump

Table 4.20 Process stream condition of warm brain supply pump

Name	Design capacity(50 %)		Design capacity(60 %)	
	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet
V.F.	0	0	0	0
T(°C)	50	50.01	50	50.01
P(kPa)	110	210	110	210
F _{mol} (kgmole/h)	334.0	334.0	366.7	366.7
F _{mass} (kg/h)	9327	9327	1.024e+004	1.024e+004
F _{Li_q} (m ³ /h)	8.872	8.872	9.74	9.74
Q _h (kJ/h)	-1.072e+008	-1.072e+008	-1.177e+008	-1.177e+008

Name	Design capacity(70 %)		Design capacity(80 %)	
	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet
V.F.	0	0	0	0
T(°C)	50	50.01	50	50.01
P(kPa)	110	210	110	210
F _{mol} (kgmole/h)	399.6	399.6	432.2	432.2
F _{mass} (kg/h)	1.116e+004	1.116e+004	1.207e+004	1.207e+004
F _{Li_q} (m ³ /h)	10.62	10.62	11.48	11.48
Q _h (kJ/h)	-1.282e+008	-1.282e+008	-1.387e+008	-1.387e+008

Name	Design capacity(90 %)			
	Inlet	Outlet		
V.F.	0	0		
T(°C)	50	50.01		
P(kPa)	110	210		
F _{mol} (kgmole/h)	324.4	324.4		
F _{mass} (kg/h)	1.299e+004	1.299e+004		
F _{Li_q} (m ³ /h)	11.99	11.99		
Q _h (kJ/h)	-1.188e+008	-1.188e+008		

4.3.4 설계처리량에 따른 시스템 해석 결과

(1) 소비전력량 분석

설계처리량에 따른 HYSYS 해석결과 시스템을 구성하고 있는 각 기기별 소비동력을 기준으로 계산한 소비전력량과 폐수처리부 제빙기의 용량을 Table 4.21에 정리하였다.

Fig. 4.10은 시스템 설계처리량에 따른 사용 에너지인 소비전력량과 동결잠열 및 동결층 냉각열의 합 즉, 제빙처리용량(Q_{ic})의 변화를 나타낸 그래프로 설계처리량이 증가할수록 소비전력량과 제빙처리용량이 상승하는 경향을 나타내고 있다. 이는 설계처리량이 커질수록 시스템 부하가 증가하여 소모에너지가 많아지며, 처리되는 양 즉, 생성되는 얼음의 양 또한 많아지기 때문이다. 특히, 처리량이 많아질수록 에너지 소모량의 증가보다 제빙처리용량의 증가폭이 더 큰 것으로 나타나, 추후 검토될 시스템 효율에도 영향을 미칠 것으로 보인다. 결과적으로 소비전력량의 증가보다 추출되는 얼음의 증가분이 더 많아 설계처리량이 큰 시스템의 효율이 더 높을 것으로 예측된다. Fig 4.11은 냉동기의 소비전력량이 전체 시스템에서 차지하는 비율을 나타낸 그래프로 시스템 총 소비전력량 중 94 % 이상을 차지하고 있어 시스템의 효율을 지배하는 것으로 나타났다.

(2) 운전시간 분석

설계처리량 각각의 시스템 운전시간을 계산하여 Table 4.22에 정리하였다. 폐수 내 오염물질의 처리효율과 관련된 동결농축과정의 소요시간은 60분으로 동일하게 운전하도록 하였고 초기빙층 착빙시간은 식 (4.25)에서 계산하였다. 처리량에 따라 초기빙층의 착빙량이 증가하여도 운전시간이 거의 같은 이유는 시스템의 설계부하가 동반 상승하여 더 많은 양의 초기빙층을 빠르게 착빙시킬 수 있기 때문으로 생각된다. 결국 처리량에 따라 설계부하가 연동되어 증가하므로 시스템 회당 운전시간이 같아진 것으로 볼 수 있다.

Table 4.21 Electric power consumption of system at design capacity

Treatment capacity (%)	IM (kW)		Power consumption(kWh)										
			IL	CMP		P _{cb}	P _{wb}	P _{ab}	P _{fs}	P _{fd}	P _{ws}	P _{wd}	Total
	<i>h</i>	<i>Q_{ic}</i>		<i>Q_{wvc}</i> + <i>Q_{fwc}</i>	Low								
50	12.30	7.119	0.939	4.963	7.057	0.340	0.337	0.016	0.009	0.009	0.009	0.005	13.684
60	14.76	7.148	1.010	5.450	7.750	0.373	0.370	0.019	0.009	0.009	0.009	0.004	15.003
70	17.22	7.177	1.080	5.938	8.443	0.407	0.403	0.022	0.009	0.009	0.009	0.003	16.323
80	19.68	7.206	1.151	6.425	9.135	0.440	0.436	0.025	0.009	0.009	0.009	0.002	17.641
90	22.14	7.235	1.222	6.912	9.828	0.474	0.470	0.029	0.009	0.009	0.009	0.001	18.963

Table 4.22 Operation time at design capacity

(unit : min)

Treatment procedure	Design capacity (%)				
	50	60	70	80	90
Fresh water supply	2	2	2	2	2
Ice-lining making	4.4	4.4	4.3	4.2	4.2
Fresh water discharge	2	2	2	2	2
Waste-water supply	2	2	2	2	2
Waste-water FC	60	60	60	60	60
Waste-water discharge	1	1	1	1	1
De-ice	3	3	3	3	3
Total	74.4	74.4	74.3	74.2	74.2

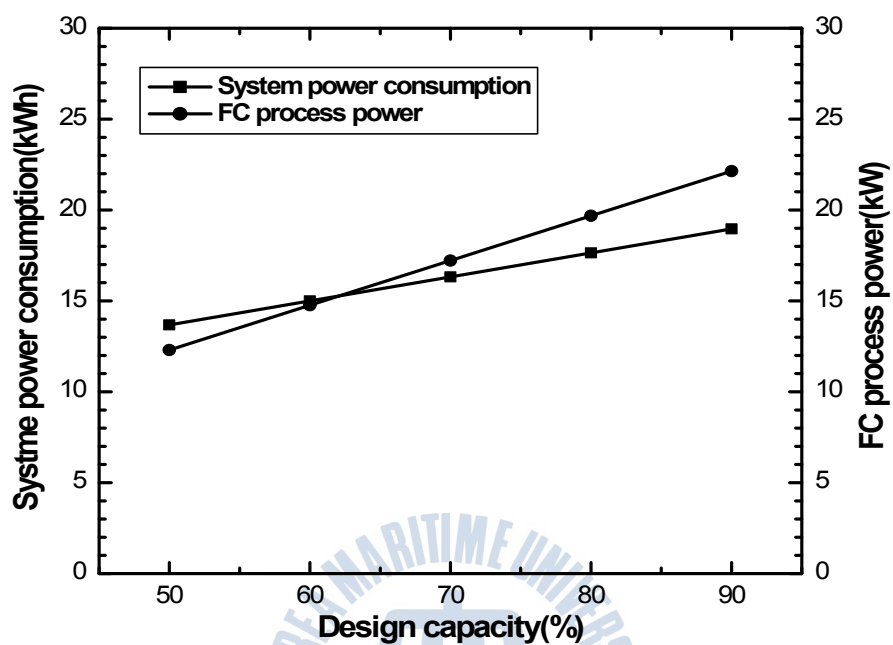


Fig. 4.10 Power consumption at design capacity

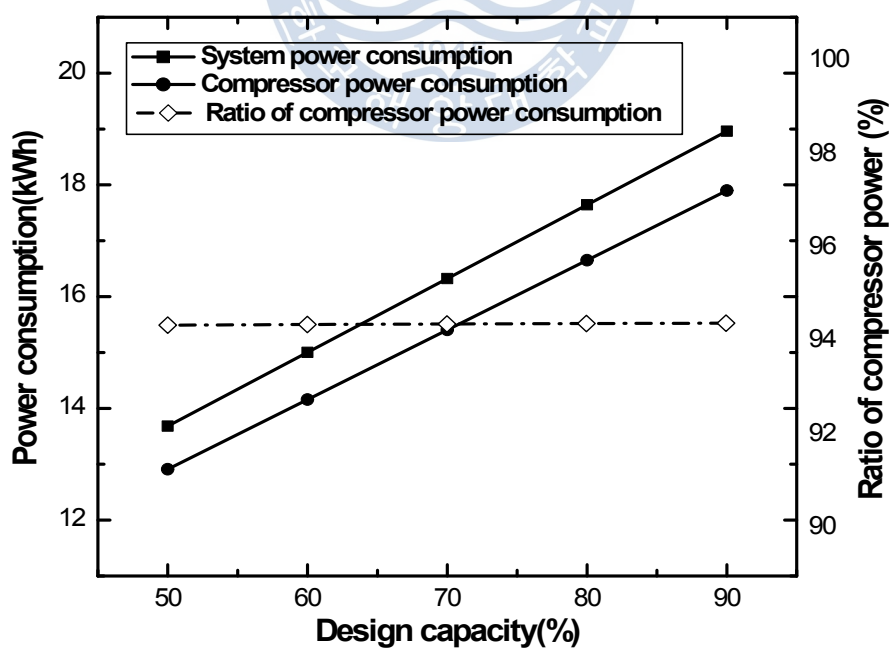


Fig. 4.11 Power consumption ratio of compressor with FC system

4.4 운전처리량 변화에 따른 시스템 해석

시스템이 설계처리량으로 운전하지 않고 실제 운전에서 처리량이 변화될 때 시스템 구성기기의 소비동력과 회당 운전시간을 계산하였다. 기준이 되는 설계 처리량은 유입 폐수량 250 kg의 70 %를 처리하는 용량으로 시스템을 구성하고, 각 50 %에서 90 %까지 운전처리량이 변화될 때 시스템의 소비동력을 분석하였다. 시스템은 일일처리량이 보다 많은 급속운전시스템을 선정했으며, 모든 시스템의 구성 및 계산은 4.2와 같은 조건을 적용하였다.

다만, Table 3.2와 같이 처리량에 따라 제빙관의 개수를 증감하여 설계하지만, 여기서는 제빙관의 개수를 70 % 설계 기준으로 고정하고, 동결층의 성장 두께를 조정하여 처리하도록 하였다. 실제 동결층의 성장과정에서는 이미 착빙된 얼음이 냉각면에서 폐수로의 열전달을 방해하는 저항으로 작용하여 시간의 경과에 따라 동결층의 성장속도가 둔화된다. 경과 시간별 동결층의 성장속도는 냉각면의 온도, 동결층의 두께, 수용액의 성상에 따라 복잡하게 결정되므로 이를 반영하기는 쉽지 않다. 여기서는 동결층의 성장속도가 전 과정에서 동일하다고 가정하고, 각 처리량별 필요한 부하를 계산하여 70 % 처리량의 설계부하로 나누어 단순하게 운전시간을 계산하였다. 다음 Table 4.23은 운전처리량별 각 제빙관에 착빙되는 얼음의 양과 동결층의 두께를 계산한 결과이다.

Table 4.23 Amount and thickness of ice layer per cooling tube

Inflow rate (kg)	Treatment capacity(kg)	Cooling tube (ea)	Amount (kg)	Thickness (mm)
250	125	22.49	5.56	11.4
	150		6.67	13.3
	175		7.78	15.2
	200		8.89	17.0
	225		10.0	18.8

4.4.1 운전시간 계산

250 kg 유입 폐수 중 70 %의 양 까지 처리할 수 있는 능력을 갖춘 시스템에서 설계부하와 다른 처리량으로 운전하는 경우, 정해진 시스템 운전과정에 소요시간을 계산하였다. 이때 시스템은 설계부하의 100 %로 운전하고 있다고 가정하고, 모든 운전상태와 조건은 설계처리량으로 운전될 때와 같다고 하였다. 시간에 따른 동결층의 성장속도가 얼음의 저항과 상관없이 일정하다고 가정하였으므로 시간 당 동결되는 제빙량도 일정하게 된다. 이때 각 시스템 운전절차에 소요되는 시간을 먼저 계산하였다.

(1) 폐수 동결농축처리과정 운전시간

처리량과 상관없이 시간당 폐수 동결농축과정에서 발생하는 제빙량은 기준 설계치인 70% 처리량과 동일하므로 각 운전처리량에 따른 동결농축시간(t_c)은 식 (4.26)로 계산되며, 결과는 Table 4.24와 같다.

$$t_c = \frac{M_r}{d_{cph}} \quad (4.26)$$

여기서, t_c 은 운전처리량(kg), $M_{d_{cph}}$ 은 시간당 설계폐수처리량(kg/min)이다.

(2) 초기빙층 착빙시간

초기빙층을 착빙하는 청수는 폐수가 본격적으로 동결농축처리되는 동안 미리 냉각되어 초기빙층 제빙시간을 최소화하도록 되어있다. 하지만 폐수의 처리시간이 운전처리량에 따라 변화되어 청수를 예냉할 수 있는 시간도 달라진다. 따라서 청수를 냉각하기 위해 가해지는 전체 열량도 차이가 발생한다. 각각의 경우에 가용할 수 있는 청수 냉각열량은 70 % 설계처리량 즉, 기준 시스템의 청수 예냉열량에 각각의 경우에 운전되는 폐수 동결농축시간을 곱하여 계산한다. 결과적으로 예냉시간의 변화는 공급되는 열량의 변화를 수반하게

되며 냉각된 청수는 기준 온도인 5 ℃ 보다 높거나 낮은 온도가 된다. 이때 운전처리량별 청수의 예냉 온도(T_{fwt})는 다음 식 (4.27)로 계산되며 Table 4.24 와 같다. 표에서 90 % 운전처리량으로 운전하는 경우는 이미 0 ℃ 이하로 냉각되는 것을 알 수 있다.

$$T_{fwt} = T_{fw} - \left(\frac{Q_{fwpc}}{c_w \times M_{fw}} \right) \quad (4.27)$$

여기서, T_{fw} 는 청수의 온도, c_w 는 청수비열, M_{fw} 는 청수량이다.

$$Q_{fwpc} = Q_{dpc} \times \left(\frac{\tau_{fc}}{60} \right)$$

여기서, Q_{dpc} 는 청수의 시간당 설계예냉열량(kJ/h)이다.

Table 4.24 Fresh water temperature after precooling

Treatment capacity (%)	FC time(τ_{fc}) (min)	Pre-cooling heat(Q_{fwpc})(kJ)	Temperature(T_{fwt}) (℃)
50	42.86	14,953.87	10.71
60	51.43	17,943.91	7.86
70*	60.0	20,934.0	5.0
80	68.57	23,924.09	2.14
90	77.14	26,914.13	-0.71

* Design capacity

Table 4.24에서와 같이 제빙기에 유입되는 청수의 온도가 운전처리량에 따라 달라 초기빙층 착빙에 필요한 열량을 식 (3.4)에 따라 계산하였다. 이때 초기빙층 착빙에 가해지는 시스템 열량은 70% 설계처리량 시스템과 동일하며, 제빙 시 냉브라인 펌프에서 공급되는 모든 브라인이 제빙관에 공급된다. 즉 시스템의 전체 설계부하가 모두 초기빙층 착빙에 쓰이므로 초기빙층에 필요한 열량을 계산 후 시스템의 설계부하로 나누면 초기빙층 착빙시간(τ_{il})을 계산할 수 있으며 다음 식 (4.28)로 나타낼 수 있다. 계산 결과는 Table 4.25에 나타내었다.

$$\tau_{il} = \frac{Q_{ilf} \times 60}{Q_{design}} \quad (4.28)$$

여기서, Q_{design} 은 시스템 설계부하로 109,104.32 kJ/h이다.

Table 4.25 Freezing time of ice-lining(τ_{il})

Treatment capacity (%)	Heat of Ice-lining making(kJ)				Time(τ_{il}) (min)
	Q_{fwc}	Q_{fwf}	$Q_{lh} + Q_{ic}$	Total	
50	10,163.46	41.83	3,541.82	13,747.11	7.56
60	7,180.36	41.83	3,541.82	10,764.01	5.92
70	4,186.80	41.83	3,541.82	7,770.45	4.27
80	1,193.24	41.83	3,541.82	4,776.89	2.63
90	0.0	0.0	3,526.92	3,526.92	1.94

(3) 농축폐수의 배출시간

폐수의 동결농축처리과정이 종료되면 잔류 농축폐수를 배출하게 된다. 이때 70 % 설계처리량에서 발생하는 배출용량에 맞게 펌프가 설치되어 있어 배출 용량의 변화에 따라 배출시간이 다소 달라진다. 따라서 식 (4.29)로 농축폐수 배출시간(τ_{wd})을 계산하여 결과를 Table 4.26에 정리하였다

$$\tau_{wd} = \frac{M_{rcw}}{F_{wdf}} \quad (4.29)$$

여기서, M_{rcw} 는 농축 잔류 폐수량, F_{wdf} 는 설계 농축폐수 배출펌프의 유량으로 75 kg/min이다.

Table 4.26 Operation time of concentrated waste-water discharge pump

Treatment capacity (%)	Concentrated residual quantity(M_{rcw})(kg)	Discharge time(τ_{cwd}) (min)
50	125	1.67
60	100	1.33
70	75	1.0
80	50	0.67
90	25	0.33

(4) 운전시간 분석

시스템의 운전절차 중 초기빙층의 착빙 및 폐수의 동결농축처리과정, 폐수 배출의 시간은 변경되지만 청수공급, 청수배출, 폐수공급, 탈빙과정은 운전처리량과 상관없이 일정하다. Table 4.27은 운전처리량별 시스템 운전시간을 정리한 것으로 Fig 4.12에서와 같이 설계 기준 70 %에서 약 75분 운전되며 처리량이 작을수록 시간은 짧아지고, 처리량이 많을수록 운전시간이 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 이는 동결층의 성장속도가 처리량에 따른 동결층 두께의 변화에도 동일하다는 가정하의 결과이며 실제로는 동결층의 성장속도가 시간의 경과에 따라 감소하므로 처리량이 증가할수록 해당 처리시간은 Table 4.27 보다 더 증가할 것으로 예상된다.

Table 4.27 Operation time at operation treatment capacity

(unit : min)

Treatment procedure	Operation treatment capacity (%)				
	50	60	70	80	90
Fresh water supply	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Ice-lining making	7.6	5.9	4.3	2.6	1.9
Fresh water discharge	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Waste-water supply	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Waste-water FC	42.9	51.4	60	68.6	77.1
Waste-water discharge	1.7	1.3	1.0	0.7	0.3
De-ice	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
Total	61.2	67.6	74.3	80.9	88.3

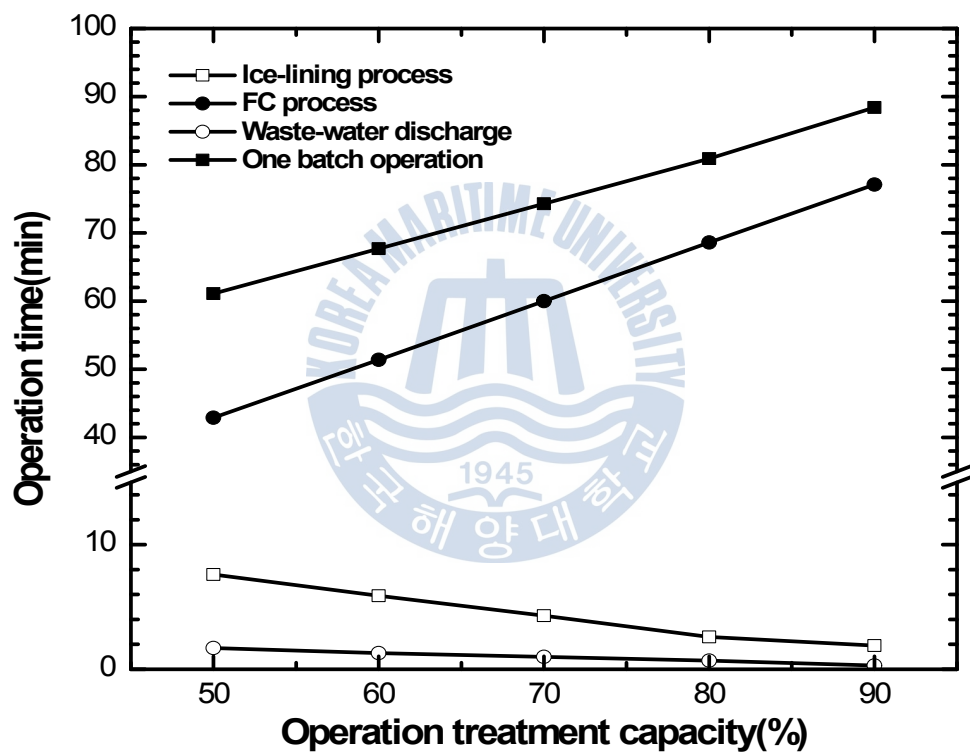


Fig. 4.12 System operation time at operation treatment capacity

4.4.2 소비전력량 계산

(1) 냉동기 운전시간 및 소비전력량

냉동기는 초기빙층 제빙과 폐수 동결농축과정 동안 운전된다. 모든 운전에서 냉동기가 100 % 부하 조건으로 운전한다고 가정할 때 각각의 운전처리량에 따른 냉동기 소비전력량(PWR_{ref})은 다음 식 (4.30)로 계산하며, 결과는 Table 4.28과 같다.

$$PWR_{ref} = \frac{\tau_{ref} \times PWR_{dref}}{60} \quad (4.30)$$

여기서, τ_{ref} 는 냉동기 운전시간(min), PWR_{dref} 은 설계처리량 운전 시 냉동기 소비동력으로 14.38 kW이다.

Table 4.28 Electric power consumption of refrigerator at operation treatment capacity

Treatment capacity (%)	Ice-lining making		FC process		Total	
	Time (min)	Power (kWh)	Time (min)	Power (kWh)	Time (min)	Power (kWh)
50	7.56	1.81	42.86	10.27	50.42	12.08
60	5.92	1.42	51.43	12.33	57.35	13.74
70	4.27	1.02	60.0	14.38	64.27	15.40
80	2.63	0.63	68.57	16.43	71.20	17.06
90	1.94	0.46	77.14	18.49	79.08	18.95

(2) 기타 펌프의 소비전력량 계산

단기운전 하는 펌프들 중 청수 급수펌프, 청수 배수펌프, 폐수 급수펌프는 운전처리량과 상관없이 70 % 설계처리량 운전과 같이 일정하다. 잔류 농축폐수 배출펌프는 잔류 폐수의 양에 따라 운전시간이 다소 변화되며, 폐수의 동결농축처리과정 동안 작동되는 기포 분사펌프, 온브라인 및 냉브라인 펌프는 운전시간이 변경되어 소비전력량을 별도로 계산하여야 한다. 아래의 식 (4.31)에서 (4.34)는 각 펌프의 소비전력량을 구하는 식이며, Table 4.29는 운전처리량의 변화에 따른 각 펌프의 소비전력량을 계산한 값이다.

$$WR_{dp} = \frac{\tau_{op} \times PWR_{dwdp}}{60} \quad (4.31)$$

여기서, τ_{op} 는 펌프 운전시간(min), PWR_{wdp} 는 농축폐수 배출펌프 소비전력량, PWR_{dwdp} 는 설계처리량 농축폐수 배출펌프의 소비동력 0.1626 kW이다.

$$PWR_{iap} = \frac{\tau_{op} \times PWR_{diap}}{60} \quad (4.32)$$

여기서, PWR_{iap} 는 기포 분사펌프 소비전력량, PWR_{diap} 는 설계처리량 기포 분사펌프의 소비동력 0.0221 kW이다.

$$PWR_{wbp} = \frac{\tau_{op} \times PWR_{dwbp}}{60} \quad (4.33)$$

여기서, PWR_{wbp} 는 온브라인 펌프 소비전력량, PWR_{dwbp} 는 설계처리량 온브라인 펌프의 소비동력 0.3842 kW이다. τ_{op} 는 펌프 운전시간으로 초기빙층 착빙 시간(τ_{il}), 폐수 동결농축시간(τ_{fc}), 탈빙운전 시간의 총합계 시간이다.

$$WR_{bp} = \frac{\tau_{op} \times PWR_{dcbp}}{60} \quad (4.34)$$

여기서, PWR_{cbp} 는 냉브라인 펌프 소비전력량, PWR_{dcbp} 는 설계처리량의 냉브라인 펌프 소비동력 0.4066 kW이다. τ_{op} 는 펌프 운전시간으로 초기빙층 착빙시간(τ_{il}), 폐수 동결농축시간(τ_{fc})의 합계 시간이다.

Table 4.29 Electric power consumption of short-term operation pump at operation treatment capacity

Pump		Treatment capacity (%)				
		50	60	70	80	90
P_{wd}	Time(min)	1.67	1.33	1.0	0.67	0.33
	Power(kWh)	0.005	0.004	0.003	0.002	0.001
P_{ab}	Time(min)	42.86	51.43	60.0	68.57	77.14
	Power(kWh)	0.016	0.019	0.022	0.025	0.028
P_{wb}	Time(min)	53.42	60.35	67.24	74.20	82.08
	Power(kWh)	0.342	0.386	0.431	0.475	0.526
P_{cb}	Time(min)	50.42	57.35	64.24	71.20	79.08
	Power(kWh)	0.342	0.389	0.435	0.482	0.536

(3) 운전 소비전력량 분석

운전처리량의 변화에 따라 시스템을 구성하고 있는 각 기기별 소비전력량과 폐수처리부 제빙기의 용량을 폐수 냉각용량과 동결농축용량으로 구분하여 Table 4. 30과 같이 정리하였다.

Fig. 4.13은 운전처리량에 따라 사용 에너지 즉, 소비전력량과 동결잠열 및 동결층 냉각열을 합한 동결농축용량의 변화를 나타낸 것이다. 처리량이 커질수록 시스템의 부하가 커져 소비전력량이 증가하고, 동시에 동결량의 증가로 동결농축용량도 동반 상승하는 경향을 알 수 있다. 소비전력량이 증가하는 이유는 운전처리량이 커질수록 요구되는 부하가 증가하나 설계부하가 고정되어 있어 운전시간이 길어져 이에 따라 소모되는 전력량도 증가하기 때문이다. 또한, 처리량 증가에 따라 생성되는 얼음 또한 많아져 동결농축용량 즉 제빙용량도 증가한다.

Fig. 4.13에서 운전처리량이 많아질수록 소비되는 전력의 증가량 보다 동결농축에 사용되는 동결농축용량의 증가폭이 더 큰 것을 알 수 있다. 이는 결과적으로 소비전력량의 증가보다 처리되는 양 즉 추출되는 얼음의 증가분이 더 많기 때문이며, 결국 처리량이 증가할수록 전체 시스템 효율이 더 높아 질 것으로 예측된다.

Table 4.30 Power consumption of system at operation treatment capacity

Treatment capacity (%)	IM (kW)		Power consumption(kWh)									
			CMP		P _{cb}	P _{wb}	P _{ab}	P _{fs}	P _{fd}	P _{ws}	P _{wd}	Total
	IL	FC										
50	12.30	7.119	1.813	10.271	0.342	0.342	0.016	0.009	0.009	0.009	0.005	12.816
60	14.76	7.148	1.418	12.327	0.389	0.386	0.019	0.009	0.009	0.009	0.004	14.570
70	17.22	7.180	1.024	14.381	0.435	0.431	0.022	0.009	0.009	0.009	0.003	16.323
80	19.68	7.206	0.630	16.435	0.482	0.475	0.025	0.009	0.009	0.009	0.002	18.076
90	22.14	7.235	0.465	18.490	0.536	0.526	0.028	0.009	0.009	0.009	0.001	20.073

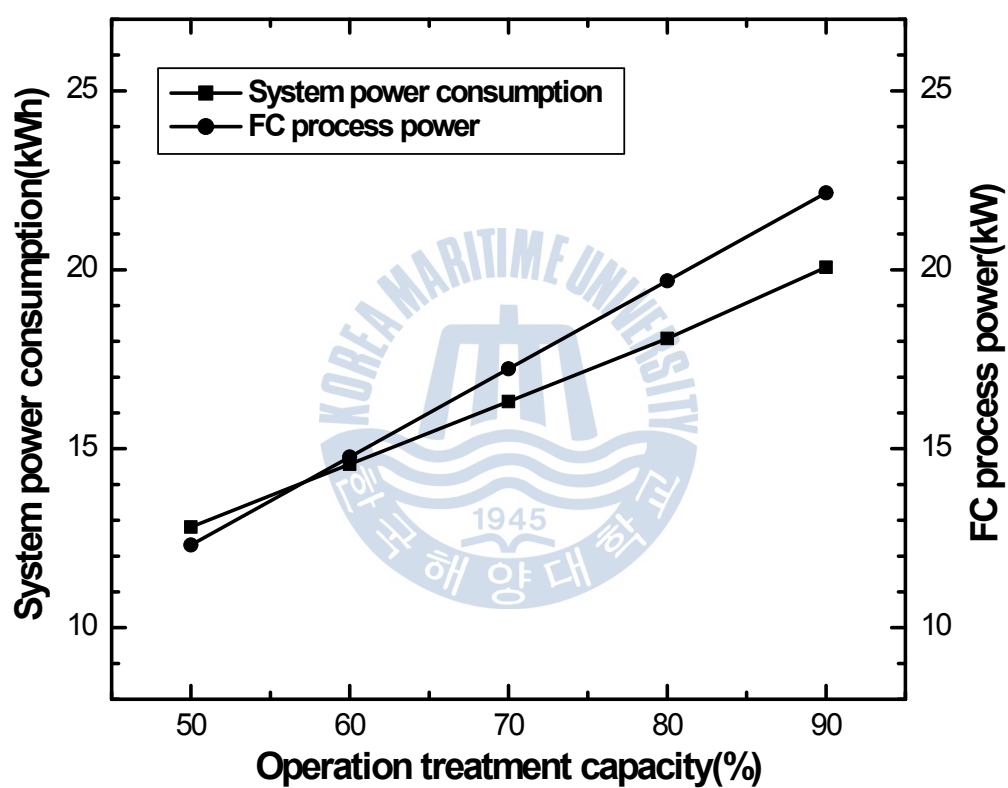


Fig. 4.13 Power consumption of one batch operation and freeze concentration process

4.5 소결론

동결농축폐수처리장치의 상용화를 위해 에너지 소비가 적고 중소규모의 폐수배출시설에 유리한 시스템을 설계하고자, 해석 프로그램을 이용하여 시스템의 소비전력량과 운전시간을 계산하여 비교한 결과 각 시스템에 대해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 초기빙층을 형성하기 위해 공급하는 청수를 미리 예냉하는 청수냉각기를 갖는 급속운전시스템이 완전운전시스템에 비하여 소비전력량이 0.098 kWh 크지만 회당처리시간을 약 15분 정도 절감할 수 있다.

Table 4.31 Power consumption and operation time for the application of precooling

System	Power consumption (kWh)	Operation time (min)
Non-precooling	16.225	89.5
Precooling	16.323	74.3

- (2) 시스템의 설계처리량이 증가할수록 시스템의 부하가 커져서 소비전력량은 증가하나, 회당처리시간은 거의 같다.

Table 4.32 Power consumption and operation time at design treatment capacity

Treatment capacity (%)	Power consumption (kWh)	Operation time (min)
50	13.684	74.4
60	15.003	74.4
70	16.323	74.3
80	17.641	74.2
90	18.963	74.2

(3) 운전처리량이 설계처리량과 달리 운전될 때 처리량이 증가할수록 회당 처리시간이 길어져 시스템의 소비전력량도 증가한다.

Table 4.33 Power consumption and operation time at operation treatment capacity

Treatment capacity (%)	Power consumption (kWh)	Operation time (min)
50	12.816	61.2
60	14.570	67.6
70	16.323	74.3
80	18.076	80.9
90	20.073	88.3

(4) 시스템의 종류나 설계처리량과는 상관없이 압축기의 소비전력량이 차지하는 비중이 상대적으로 커서(전체 소비전력량의 95 % 이상) 냉동기의 성능계수가 시스템의 효율을 크게 지배하는 것으로 나타났다.



제 5 장 동결농축폐수처리시스템 경제성 분석

5.1 경제성 분석을 위한 조건

동결농축폐수처리시스템은 동결농축의 원리를 이용하여 공장, 사업소, 공동주택, 또는 호텔로부터 배출되는 폐수를 농축처리하고, 얼음으로 추출된 물 결정을 축열하여 용해 잠열을 냉열로서 냉방공조에 유용하게 이용한 후 사업소 내에서 용수, 또는 세정수로 재이용함으로써 물의 절약과 빙축열에 의한 전력 부하 평준화를 통하여 열에너지를 유효하게 이용할 수 있는 환경친화형 유틸리티이다. Fig. 5.1은 동결농축폐수처리시스템의 열에너지 회수와 물의 재사용과 관련된 기본적인 개념도이다^[11].

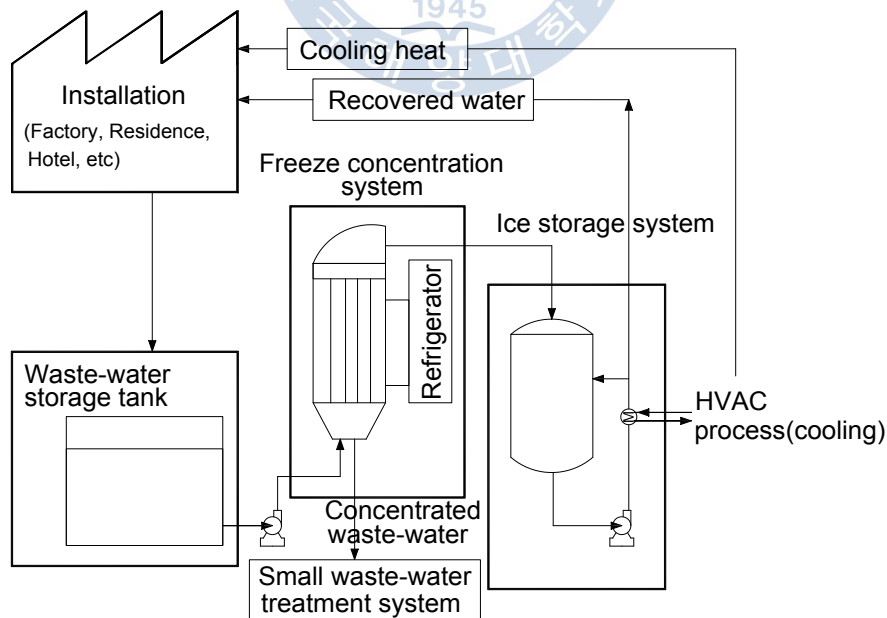


Fig. 5.1 Installation diagram of waste-water FC system in factory^[11]

사업소 내 동결농축폐수처리장치의 선택과 관련된 주요 고려사항은 크게 세 가지 정도로 첫째 폐수처리 장치로서의 중요한 기능인 분리효율이다. 분리효율이 우수해야 추출된 얼음을 산업 및 생활용수로 활용할 수 있기 때문이다. 이론적으로는 폐수 내 물 분자는 다른 분자에 비해 작기 때문에 동결층이 성장할 때 물 분자 이외의 오염물질이 동결계면 밖으로 배제되어 순수한 얼음과 농축액으로 분리되게 되며, 제빙된 청정한 얼음은 용해과정을 거쳐 용수로써 재활용되는데, 실제로는 동결계면의 성장속도, 폐수의 농도 등 변수에 영향을 받아 분리효율이 달라진다. 둘째로는 시스템의 처리량 즉 생산성이다. 생산성은 시스템 설치 초기비용을 좌우하게 된다. 생산성 향상을 위해서 전진동결농축법에서는 동결층의 성장속도의 조절이 중요한 요소로 작용한다. 성장속도가 빠를수록 많은 양을 처리할 수 있으며 시스템의 처리량이 증가하고, 초기투자비용을 절감할 수 있다. 그러나 연구결과들을 보면 동결층의 성장속도는 분리효율과 상반되는 관계를 갖고 있어 적절한 선택이 필요하다. 마지막으로 시스템의 에너지 효율을 높이는 것이다. 시스템 효율을 높일수록 소요되는 에너지를 최소화 할 수 있으며, 투입되는 에너지 대비 더 많은 처리량을 확보할 수 있어 장비의 운영에 효과적이다^[43].

위의 세 가지 주요 고려사항 중 분리효율은 폐수처리 장치로써 가장 기본적인 성능으로 검토되어야 하며, 오염물질을 순도 높게 분리할 수 있어야 폐수처리 장치로 이용 가능하게 된다. 처리량과 시스템이 갖는 에너지 효율은 폐수발생 시설을 보유한 사업소에서 선택할 중요한 고려사항으로 이는 경제적인 시스템 운영의 주요 검토 요소가 된다.

여기서는 4장의 해석을 바탕으로 각 시스템의 에너지 효율을 분석하고, 현재 중소규모의 폐수처리에 주로 이용되는 방법과 운전비용을 비교하였다. 또, 사용 가능한 열원 회수 및 용수 재활용의 측면에서도 시스템의 경제성을 분석하였다. 일반적으로 경제성을 검토하기 위해서는 장비비, 건축공사비, 설치공사비, 수전설비, 지원금, 세제 혜택 등을 고려해야 하며, 기기와 설비는 수명이 한정되어 있으므로 수명 및 유지보수를 위한 기본전력, 에너지 비용, 공간사용료, 인건비, 보험료, 수선비등 유지관리비도 검토된다^[44]. 그러나 폐수동결농축

처리장치는 아직 상용화가 널리 보급되어지지 않은 상황이어서 위의 비용을 계산하여 경제성을 분석하기는 어려운 상황이다. 따라서 본 연구에서는 시스템 간 경제성을 개발과 선정에 중요한 항목으로 설명된 생산성과 시스템의 효율을 비교 분석하는 것으로 하였다. 이를 통해 사업소 내 오염물질배출시설의 처리기준이 일일발생량이므로 이에 상응하는 동결농축폐수처리장치의 일일처리량과 시스템별 해석 결과를 바탕으로 에너지 효율을 비교하여 우수한 조건의 시스템 설계안을 제시하고자 하였다. 타 시스템과의 비교에서는 국내 중소규모의 폐수 배출시설에 주로 사용되는 증발농축처리법 및 전문업체 위탁폐수처리법 각각의 경우에 대해 처리비용의 측면에서 비교, 분석하여 시스템의 우수성을 검증하였다.

또, Fig. 5.1과 같이 시스템에서 활용 가능한 열원과 융해된 물의 재사용은 에너지 재이용과 환경친화형 유틸리티로써의 경제성을 높이는 방안으로 기본적으로 추출된 얼음을 탱크에 축빙하여 필요한 냉방부하에 대응하도록 하고 있다. 따라서 시스템 선택 시 사업소의 냉각 필요량을 검토하여 버려지는 열을 최소화 하여야 한다. 여기에 시스템 냉동부의 응축기에서 발생하는 고온의 열을 회수하여 겨울철의 난방 및 급탕에 이용하면 시스템의 열효율이 더욱 향상되며 사업소의 공기조화 비용도 절감된다. 그리고 처리된 얼음이 융해된 물은 공업용수, 생활용수로 재사용 할 수 있다. 동결농축폐수처리시스템의 종합적 경제성 검토에서는 폐수처리장치로서의 경제성에 냉난방시스템 연계 및 용수의 재사용 까지를 포함하여, 사용된 전력 요금대비 얻어지는 폐수처리 절감비용과 공기조화 냉온열 및 용수 재활용 효과를 금액으로 환산하여 비교하므로 최종 동결농축폐수처리시스템의 경제적 효과를 제시하고자 하였다.

5.2 설계 조건에 따른 시스템 효율 분석

5.2.1 완속운전 및 급속운전시스템의 에너지 효율 및 일일처리량

4.2의 운전시스템 해석 결과에 따른 각 기기별 소비동력을 계산하여 처리량에 대한 전력 소비량으로 시스템의 에너지 효율을 계산하였다. 또, 폐수배출시설의 배출기준이 되는 일일배출량에 따라 처리시스템의 용량을 선정하므로 시스템의 회당 운전시간을 기준으로 일일 처리횟수 및 처리량을 계산하여 비교 분석하였다.

(1) 에너지 효율 분석

동결농축폐수처리시스템은 폐수 중 순수한 물을 추출하여 얼음의 형태로 제빙하게 된다. 결국 폐수처리부 제빙관에 착빙된 얼음양 만큼이 실제 폐수의 처리량이 된다. 따라서 폐수를 처리하는 운전에서 소비되는 전력과 얼음의 형태로 제빙 후 추출되는 처리수와 관계에서 시스템이 갖는 에너지 효율을 살펴볼 수 있다.

시스템은 최종적으로 처리된 물이 얼음의 형태로 추출된다는 점에서 얼음을 생산하기 위한 제빙기와 유사성을 가지고 있다. 미연방에너지관리프로그램(Federal Energy Management Program, FEMP)에서는 상업용으로 판매되는 제빙기에 대한 에너지 효율과 관련하여서 기기 종별로 45.3 kg(=100 lbs)당 생산시의 소비전력량을 기준치로 하고 있다^[45].

FEMP에서 제빙기의 에너지 효율을 평가하는 기준을 응용하여 동결농축폐수처리시스템의 에너지 효율을 폐수 처리량에 대한 운전에서 사용되는 소비전력량의 비(rate of electric power consumption,)로 나타내고 이를 시스템의 에너지 효율을 비교하는 기준으로 활용하였다. 식 (5.1)은 소비전력량비를 나타낸 것이다.

$$= \frac{PWR_{in}}{C_{out}} \quad (5.1)$$

여기서, η_e 는 소비전력량비(kWh/kg), C_{out} 는 폐수 처리량, PWR_{in} 는 소비전력량이다.

시스템의 설계량을 처리하여 제빙하는데 사용되는 소비전력은 냉동부의 압축기 및 기타 펌프 소비동력의 합이다. 여기서 시스템이 처리할 수 있는 설계처리량이 175 kg/batch이며, 시스템 소비전력량 및 소비전력량비는 Table 5.1 과 같다.

Table 5.1 Rate of electric power consumption for the application of precooling

Item	TC _{out} (kg)	PWR _{in} (kWh)										η_e (kWh/kg)
		IL*	CMP	P _{cb}	P _{wb}	P _{ab}	P _{fs}	P _{fd}	P _{ws}	P _{wd}	total	
Non-Precooling	175	3.98	11.55	0.33	0.32	0.02	0.01	0.01	0.01	0.003	16.23	0.0927
Precooling	175	1.08	14.38	0.41	0.40	0.02	0.01	0.01	0.01	0.003	16.32	0.0933

* IL : Electric power consumption of making ice-lining

Table 5.1에서 두 시스템의 소비전력량비의 차는 0.6 Wh/kg으로, 작은 차이이나 완속운전시스템이 급속운전시스템에 비해 단위 처리량에 대한 전력소비량이 작은 것은, 시스템 설계 부하가 큰 급속운전시스템에서 냉브라인과 온브라인 유량이 상대적으로 증가하여, 펌프의 일이 소폭 증가하기 때문이다. 그러나 운전조건과 상관없이 동결농축폐수처리시스템의 전체 소비전력량에서 냉동

부의 압축기가 차지하는 비중이 약 95% 이상으로 냉동기의 성능계수가 시스템의 효율을 크게 지배하는 것으로 나타나 실제 설계에 있어서는 냉동기의 선정이 매우 중요한 것을 알 수 있다. 결국 시스템 전체 효율의 차이가 미미한 것은 시스템 효율의 지배력이 월등한 냉동기의 성적계수가 두 시스템에서 2.14로 동일하다고 가정하였기 때문이다. 위의 해석 결과는 실제 플랜트에서 발생하는 외기 조건과의 온도차에 의한 배관, 밸브 및 탱크의 단열손실, 펌프, 밸브의 압력손실, 열교환기의 효율 등을 고려하지 않은 결과지만 동일 조건 하에서는 두 운전시스템의 효율은 거의 같다고 볼 수 있을 것이다.

(2) 회당 운전시간에 따른 일일 폐수처리량의 비교

동결농축폐수처리시스템의 처리능력은 폐수배출업체가 시스템을 선정하는 중요한 선택 기준 중에 하나이다. 업체는 폐수배출설비에서 발생하는 폐수의량을 기준으로 설치해야할 폐수처리설비를 결정하게 된다. 처리시설의 분리효율 즉, 처리효율이 같다면 동일한 양의 폐수를 빠르게 처리하면, 일일 처리횟수가 많아져 전체 폐수처리량도 증가한다. 급속운전시스템의 경우 과냉각 방지용 초기빙층 착빙에 소요되는 시간이 완속운전시스템에 대비 약 22 % 까지 줄어들어 운전시간을 15분 정도 절감할 수 있었다. 이 결과를 바탕으로 두 시스템 간 일일 폐수처리량을 비교하면 Table 5.2와 같다.

급속운전시스템으로 설계하는 경우가 완속운전시스템 보다 일일 운전횟수가 3회 더 증가하고 일일 폐수처리량이 약 119 %로 많아져 525 kg의 폐수를 더 처리할 수 있게 된다. Table 5.1의 처리량 즉 제빙량 당 소비전력의 차가 크지 않으므로 급속운전시스템으로 설계하는 경우 더 많은 양의 폐수를 효율적으로 처리할 수 있게 된다. 비록 급속운전시스템이 설계부하의 증가로 냉동기 및 냉온브라인 펌프용량이 커져 초기 시설 투자비가 다소 상승할 수 있으나, 운전시간을 절약할 수 있고, 폐수 배출량이 보다 큰 배출시설에 설치가 가능하여 폐수배출시설에 대한 시스템 활용도가 완속운전시스템에 비해 더 광범위한 것으로 판단할 수 있다.

Table 5.2 Daily treatment capacity of waste-water FC system

Item	Non-Precooling	Precooling
Inflow of waste-water(kg)	250	250
Treatment capacity(kg)	175	175
Operation time(min)	90	75
Number of daily operation (times)	16	19
Daily treatment capacity(kg)	2,800	3,325
Daily electric power consumption(kWh)	259.60	310.14
Rate of electric power consumption(kWh/kg)	0.0927	0.0933

5.2.2 설계처리량에 따른 시스템의 에너지 효율 및 일일처리량

4.3의 동결농축처리시스템 설계처리량이 달라질 때 시스템 해석결과를 분석하여 각 기기별 소비전력을 계산하고 처리량에 대한 운전 소비전력량의 비로 에너지 효율을 구하였다. 또, 폐수배출시설의 배출기준이 되는 일일배출량에 따라 처리시스템의 용량이 선정되므로 시스템의 회당 운전시간을 기준으로 일일 처리횟수 및 처리량을 비교 분석하였다.

(1) 에너지 효율분석

해석 결과로 얻은 시스템 각 구성 기기들의 소비전력량과 식 (5.1)에 따라 처리량 즉 제빙량에 대한 소비전력량비를 구하여 Table 5.3에 정리하였다.

Table 5.4는 폐수가 제빙기 내에서 동결농축처리되는 과정의 해석 결과 증발기 흡수열(Q_{va})의 사용내역을 분석한 것으로, 냉브라인으로 전달된 냉열 중 동결농축과정 즉 제빙과정에 직접 관련된 동결잠열(Q_{lh}) 및 동결층 냉각열량(Q_{ic})으로 활용되는 비율(R_{fc})이 처리량과 비례적으로 증가하는 것을 알 수 있다.

Fig. 5.2는 설계처리량의 변화에 따른 소비전력량비()와 증발기 열량 중 동결잠열 및 동결층 냉각에 사용된 열량 비(R_{fc})를 나타낸 것으로, 처리량이 커질수록 소비전력량비는 작아지고 폐수의 직접 동결에 사용되는 열량 비는 상승하는 경향을 알 수 있다. 이는 설계처리량이 커질수록 시스템 부하가 증가하여 소모에너지가 늘어나지만, 동결량의 증가폭이 크고, 냉동기에서 공급되는 열이 상변화의 잠열과 동결층 냉각열로 이용되는 비율이 상승하여 소비전력량비가 작아지는 것으로 분석되었다. 결론적으로 설계처리량이 클수록 생산되는 얼음의 양이 많고, 처리량 즉 제빙량과 관련된 동결잠열 및 동결층의 냉각열량의 이용률이 높아져 시스템이 갖는 에너지 효율이 향상되는 것으로 나타났다. 여기서도 처리량과 상관없이 전체 소비전력량 중 냉동부의 압축기가 차지하는 비중이 약 95 %로 냉동기의 성적계수가 시스템의 효율을 크게 지배 하는 것으로 나타났다.

Table 5.3 Rate of electric power consumption at design treatment capacity

Design capacity (%)	TC _{out} (kg)	PWR _{in} (kWh)										(kWh/kg)
		IL*	CMP	P _{cb}	P _{wb}	P _{ab}	P _{fs}	P _{fd}	P _{ws}	P _{wd}	total	
50	125	0.939	12.020	0.340	0.337	0.016	0.009	0.009	0.009	0.005	13.684	0.109
60	150	1.010	13.2	0.373	0.370	0.019	0.009	0.009	0.009	0.004	15.003	0.1
70	175	1.080	14.381	0.407	0.403	0.022	0.009	0.009	0.009	0.003	16.323	0.093
80	200	1.151	15.560	0.440	0.436	0.025	0.009	0.009	0.009	0.002	17.641	0.088
90	225	1.222	16.740	0.474	0.470	0.029	0.009	0.009	0.009	0.001	18.963	0.084

* IL : Electric power consumption of making ice-lining

Table 5.4 Consumption of evaporator heat in waste-water FC treatment process

Design capacity (%)	Q_{va} (kJ/h)	Heat flow(kJ/h)				R_{im}^* (%)	
		Q_{lh}	Q_{ic}	$Q_{wvc} + Q_{fvc}$	Q_{fwpc}		Q_{air}
50	92,770	44,290		25,630	21,580	193.0	47.7
60	101,900	53,150		25,730	21,580	231.6	52.2
70	111,000	62,000		25,840	21,580	270.5	55.9
80	120,100	70,860		25,940	21,580	309.1	59.0
90	129,200	79,720		26,050	21,580	347.7	61.7

* R_{im} : Rate of heat used to make and cool frozen layer in evaporator capacity

$$R_{im} = \frac{Q_{lh} + Q_{ic}}{Q_{eva}}$$

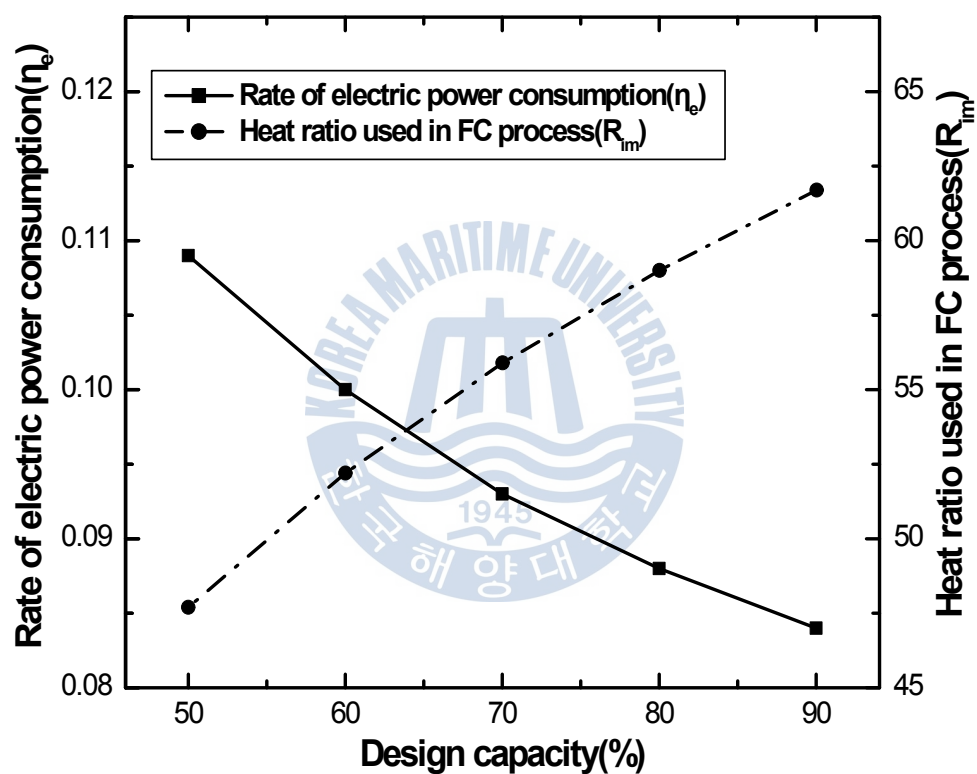


Fig. 5.2 Energy efficiency of waste-water FC treatment system at design capacity

(2) 설계처리량에 따른 일일 폐수처리량의 비교

Table 4.22는 설계처리량별 각 시스템이 일회 폐수를 처리하는데 소요되는 시간을 계산한 것으로 설계 용량에 따라 큰 차이가 없이 약 75분으로 거의 동일한 것으로 나타났다. 처리시간이 동일해 각 시스템이 일일 운전하는 횟수도 같아지므로 일일처리량은 Table 5.5와 같이 설계처리량이 클수록 많아진다. Fig 5.3은 설계처리량별 일일처리량을 나타내고 있으며 회당 처리량이 큰 조건이 일일처리량도 많은 것을 알 수 있다.

Table 5.5 Daily treatment capacity at design capacity

Item	Design capacity (%)				
	50	60	70	80	90
Inflow of waste-water(kg)	250	250	250	250	250
Treatment capacity(kg)	125	150	175	200	225
Operation time(min)	75	75	75	75	75
Number of daily treatment (times)	19	19	19	19	19
Daily treatment capacity(kg)	2,375	2,850	3,325	3,800	4,275
Daily electric Power consumption(kWh)	260.0	285.06	310.14	335.18	360.30
Rate of electric power consumption(kWh/kg)	0.109	0.1	0.093	0.088	0.084

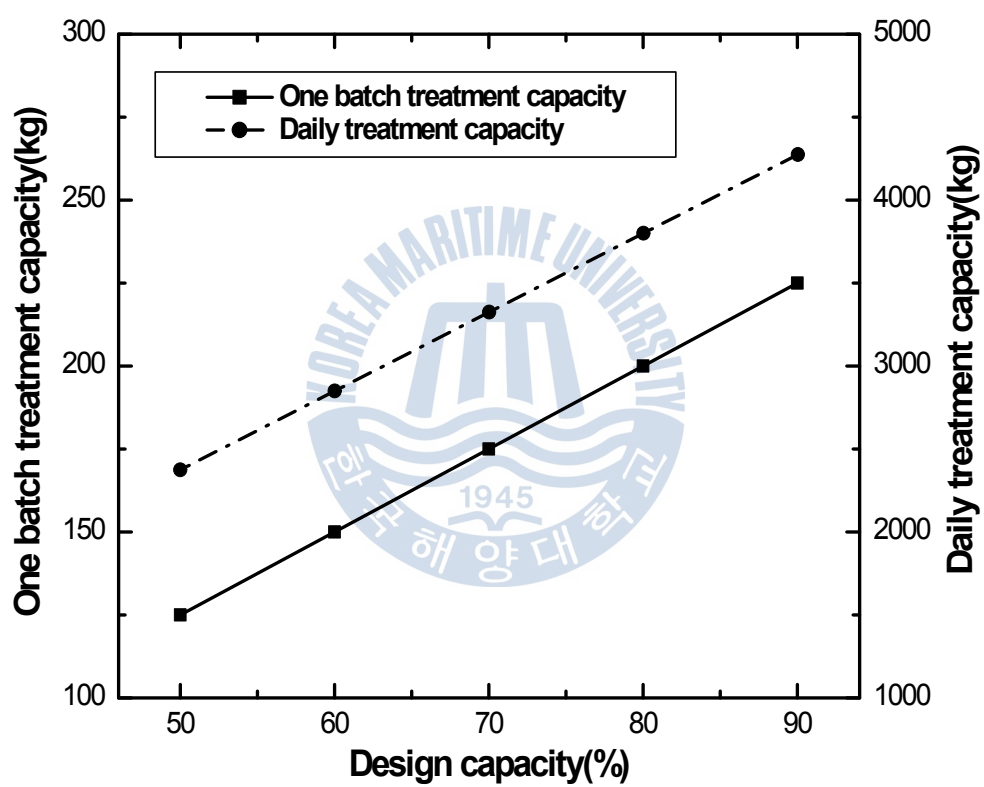


Fig. 5.3 One batch and daily treatment capacity

5.2.3 운전처리량에 따른 시스템 효율 및 일일처리량

동결농축처리시스템이 4.4와 같이 설계처리량과 달리 실제 운전에서 처리량이 변할 때 시스템 해석결과를 분석하여 각 기기별 소비동력을 계산하고, 처리량과 운전 소비전력량과의 비로 에너지 효율을 구하였다. 또, 폐수배출시설의 배출기준이 되는 일일배출량에 따라 처리시스템의 용량이 선정되므로 시스템의 회당 운전시간을 기준으로 일일 처리횟수 및 처리량을 비교 분석하였다.

(1) 에너지 효율분석

계산결과 얻어진 시스템 구성 기기들의 소비전력량과 식 (5.1)에 따라 소비전력량비()를 구하여 Table 5.6에 정리하였다.

Fig. 5.4는 운전처리량을 기준으로 소비전력량비를 나타낸 것으로 설계 기준인 70 % 처리량 보다 많게 운전하는 경우 소비전력량비가 감소하고 있다. 이는 시스템이 소비하는 동력의 증가보다 처리되는 폐수량 증가분이 더 크기 때문이다. 운전처리량이 커질수록 시스템의 운전시간도 증가하여 사용되는 에너지 즉, 소비전력량도 증가하지만 생산되는 동결량의 증가폭이 커져서 결국 시스템 효율이 상승하는 것으로 생각된다.

실제 시스템에서는 동결층이 성장할수록 얼음의 열저항 증가로 냉각면과 폐수간의 동결계면에서 열전달이 작아져 시간의 경과에 따라 동결층의 성장속도가 감소한다. 설계 보다 처리량이 증가하게 되면 본 연구에서 가정한 동결속도가 같다는 조건에서 해석된 시간보다 폐수를 동결농축 처리하는데 더 많은 시간을 필요로 할 것이다. 따라서 소비되는 전력도 더 커질 것이고 시스템 효율은 계산된 값보다 감소하게 된다. 그러나 동결층의 성장속도가 동일하다고 가정한 경우에는 폐수의 동결처리량을 설계보다 많게 운전할수록 시스템 효율을 높게 유지할 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 폐수의 처리용량 즉 유입된 원 폐수의 처리량을 높이는 것이 시스템 효율을 향상시키는 중요한 요인임을 알 수 있다.

Table 5.6 Rate of electric power consumption at operation treatment capacity

Treatment capacity (%)	TC _{out} (kg)	PWR _{in} (kWh)									(kWh/kg)
		CMP	P _{cb}	P _{wb}	P _{ab}	P _{fs}	P _{fd}	P _{ws}	P _{wd}	total	
50	125	12.084	0.342	0.342	0.016	0.009	0.009	0.009	0.005	12.816	0.103
60	150	13.745	0.389	0.386	0.019	0.009	0.009	0.009	0.004	14.570	0.097
70	175	15.405	0.435	0.431	0.022	0.009	0.009	0.009	0.003	16.323	0.093
80	200	17.065	0.482	0.475	0.025	0.009	0.009	0.009	0.002	18.076	0.090
90	225	18.955	0.536	0.526	0.028	0.009	0.009	0.009	0.001	20.073	0.089

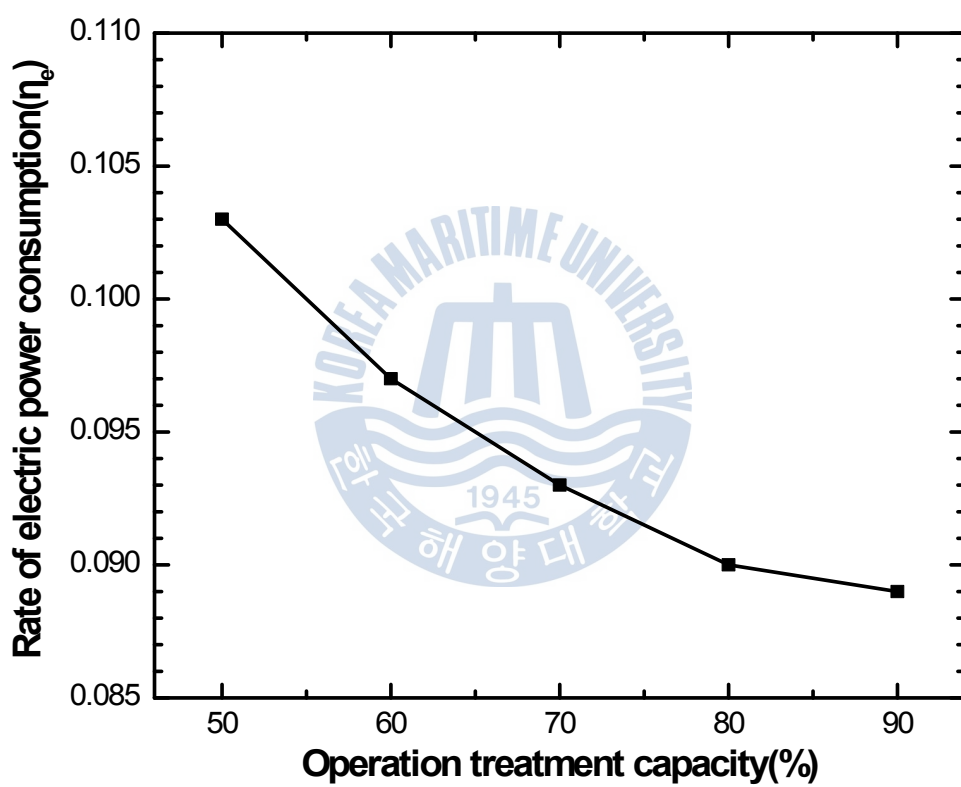


Fig. 5.4 Rate of electric power consumption at operation capacity

(2) 회당 운전시간에 따른 일일 폐수처리량의 비교

시스템의 운전시간은 70 % 설계처리량에서 75분 운전하도록 설계하였다. 따라서 운전처리량이 작을수록 시스템의 운전시간은 짧아지고, 처리량이 많을수록 운전시간이 증가한다. 운전처리량별 회당 운전시간은 Table 4.27과 같다.

Table 5.7은 운전시간을 기준으로 운전처리량별 일일처리량을 나타낸 것이다. 실제 장치가 처리하는 양이 설계 보다 많아질수록 회당 처리 시간은 증가하나, 일일처리량에 있어서는 더 많은 양이 처리되는 상반된 결과를 볼 수 있다. 결국 회당 처리량이 높은 운전이 일일 처리횟수는 감소하여도 전체 일일 처리량에 있어서는 유리한 것으로 나타났다. 그러나 이는 동결층의 성장속도가 폐수를 처리하는 과정에서 동결층의 두께 변화와 상관없이 일정하다는 가정하의 결과이며, 실제로는 동결층의 성장속도가 두께의 증가와 함께 시간의 경과에 따라 감소하므로 처리량이 증가할수록 즉 동결층의 두께를 두껍게 성장시킬수록 회당 처리시간이 Table 4.27 보다 더 증가할 것으로 예상된다. 따라서 실제 운전에서는 처리량이 증가할수록 시스템이 처리할 수 있는 일일처리량도 본 연구에서 계산된 값보다는 작을 것으로 예상된다.

다음 Fig. 5.5 및 Fig. 5.6은 설계처리량에 따라 운전하는 경우와, 실제 70% 설계처리량과 달리 운전처리량이 변할 경우의 소비전력량비 및 일일처리량을 비교한 그래프이다. 시스템이 설계처리량 보다 작은 처리량으로 운전하는 경우 같은 설계처리량을 갖는 시스템 보다 소비전력량비가 낮아 에너지 효율을 높게 유지할 수 있으며, 일일처리량에 있어서는 유리한 것으로 나타났다. 그러나 실제 설계보다 작은 처리량으로 운전하게 되면 시스템의 냉동기가 부분부하로 운전하게 되어 성적계수가 낮아지게 된다. 동결농축폐수처리시스템에서 냉동기 소비전력이 큰 비중을 차지하고 있고 시스템의 효율이 냉동기의 성적계수에 큰 영향을 받고 있어 실제 부분부하로 운전하게 되면 시스템의 효율은 크게 낮아질 것으로 예상된다. 여기서는 냉동기의 성적계수가 부분부하에서도 같다는 가정하의 결과를 나타낸 것이다.

Table 5.7 Daily treatment capacity at operation treatment capacity

Item	operation treatment capacity (%)				
	50	60	70	80	90
Inflow of waste-water(kg)	250	250	250	250	250
Treatment capacity(kg)	125	150	175	200	225
Operation time(min)	61.2	67.6	74.3	80.9	88.3
Number of daily treatment (times)	23.5	21.3	19.4	17.8	16.3
Daily treatment capacity(kg)	2,938	3,195	3,395	3,560	3,668
Daily electric Power consumption(kWh)	301.18	310.34	316.67	321.75	327.19
Rate of electric power consumption(kWh/kg)	0.103	0.097	0.093	0.090	0.089

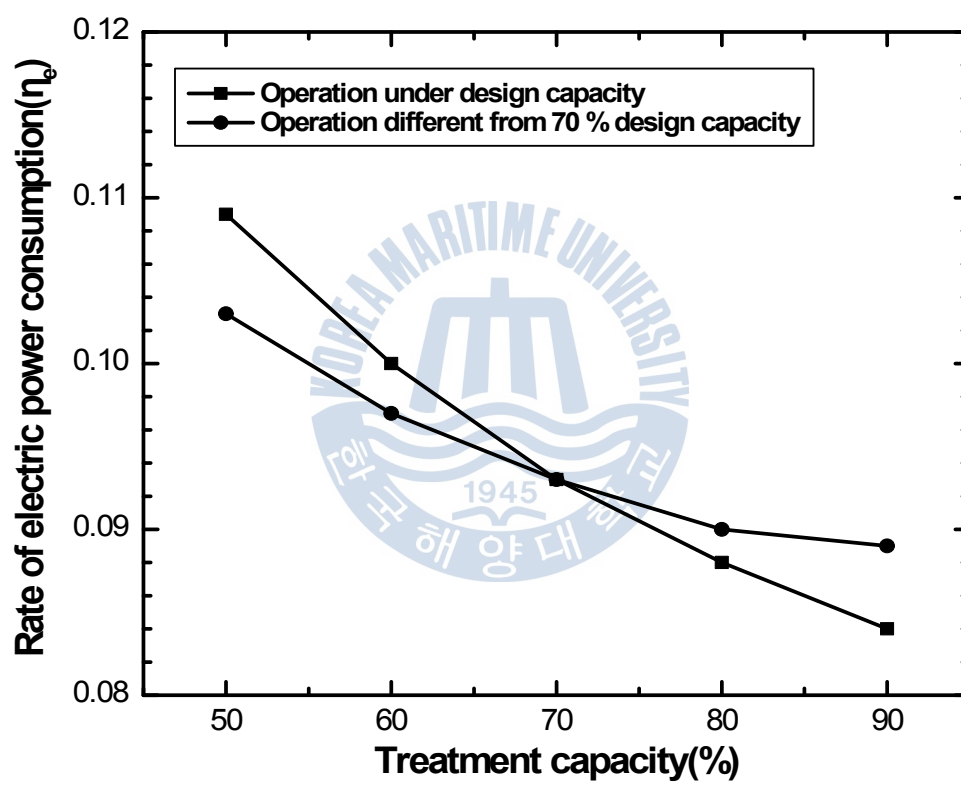


Fig. 5.5 Rate of electric power consumption at operation condition

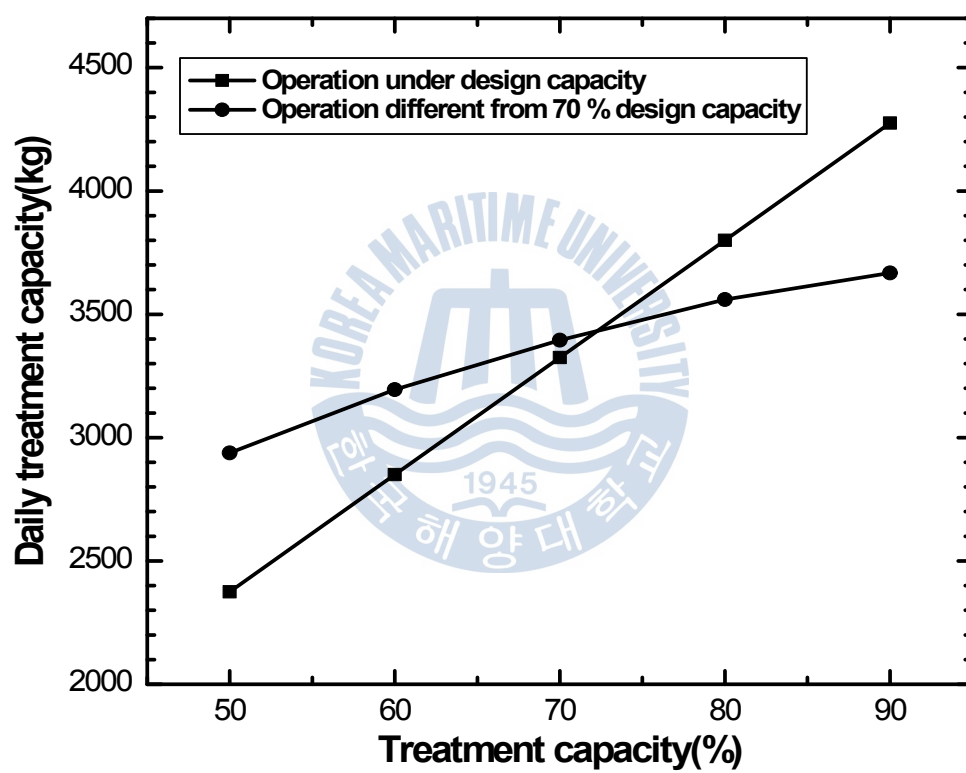


Fig. 5.6 Daily treatment capacity at operation condition

5.3 폐수처리방법에 따른 경제성 비교

동결농축폐수처리시스템의 경제성을 타 처리방식과 비교 검토하기 위해, 국내 중소규모의 폐수배출시설에서 자체 처리하는 경우 가장 많이 이용하고 있는 증발농축처리법을 선정하여 사용 열원 별로 운전비용을 계산하였다. 또, 자체처리하지 않는 경우 대다수의 업체가 폐수를 전문처리기관에 위탁처리하고 있어 위탁수수료를 조사하고, 동결농축폐수처리시스템 운전비용과 비교하였다.

5.3.1 증발농축폐수처리법의 처리비용

증발농축처리는 폐수를 가열하여 증발온도에서 폐수 내 물을 증발시켜 잔류 오염물질을 농축액으로 분리 배출하는 처리방법으로 원수를 가열하기 위한 열원이 필요하다. 이때 동결농축폐수처리시스템과 동일한 원수를 증발농축 하는데 필요한 열량은 25 ℃의 폐수를 증발온도 100 ℃로 가열하는 폐수가열열량 (Q_{wh}) 및 가열된 폐수가 증기로 상변화 하는데 필요한 총 잠열(Q_{elh})이 주어 져야 한다. 폐수를 증발농축처리하는 과정에서 필요한 총열량(Q_{ec})은 다음 식 (5.2)에서 계산하였으며 각 처리량별 총열량은 Table 5.8과 같다. 이때 증발농 축처리장치는 대기압에서 증발하며 열효율(η_{ec})은 70 %라고 가정하였다. 또, 증기의 과열도와 증발과정의 감압조건은 고려하지 않았으며, 폐수의 비열은 동결농축폐수처리시스템의 해석과 같이 물의 비열을 반영하였다.

$$Q_{ec} = \frac{Q_{wh} + Q_{elh}}{\eta_{ec}} \quad (5.2)$$

여기서,

$$Q_{wh} = \text{폐수처리량} \times \text{폐수비열}(4.1868 \text{ kJ/kgK}) \times (\text{증발온도} - \text{폐수온도})$$

$$Q_{elh} = \text{폐수처리량} \times \text{증발잠열}(2,255.8478 \text{ kJ/kg})$$

Table 5.8 Heat capacity of evaporative concentration treatment

Treatment capacity (kg)	w_h (kJ)	Q_{elh} (kJ)	Q_{ec} (kJ)
125	39,251.25	281,980.98	458,903.17
150	47,101.50	338,377.18	550,683.82
175	54,951.75	394,773.37	642,464.46
200	62,802.0	451,169.57	734,245.10
225	70,652.25	507,565.76	826,025.75

Table 5.8의 처리량별 필요한 열량을 기준으로 증발농축처리에 이용되는 열원 종류별 증발농축 처리비용을 계산하여 Table 5.9에 정리하였다. 사용 열원으로는 가장 많이 이용되고 있는 전기, 경유, 도시가스(Liquified Natural Gas, LNG)를 선정하였다. 각 사용 열원에서 얻을 수 있는 열량에 대한 환산 기준은 에너지기본법 시행규칙에서 정한 순발열량(net calorific value)을 참조하였다. 순발열량은 연료의 연소과정에서 발생하는 수증기의 잠열을 포함한 총발열량에서 수증기의 잠열을 제외한 발열량을 말한다.

열원의 단위 비용은 전기요금의 경우 2012년 한국전력공사의 심야전력요금^[46]을 적용했으며, 경유와 도시가스의 가격은 각각 2012년 10월 한국석유공사 대리점 가격^[47]과 부산도시가스요금^[48]을 기준으로 하였다.

Table 5.9 Cost of evaporative concentration at heat source

Item	Electricity		Diesel oil		LNG	
Net calorific value	3,600.65 kJ/kWh		35,378.46 kJ/L		39,983.94 kJ/m ³	
Cost on unit	42.9 ₩/kWh		1680.77 ₩/L		837.31 ₩/m ³	
Treatment capacity (kg)	Amount (kWh)	Total cost (₩)	Amount (L)	Total cost (₩)	Amount (m ³)	Total cost (₩)
125	127.5	5,468	13.0	21,802	11.5	9,610
150	152.9	6,561	15.6	26,162	13.8	11,532
175	178.4	7,655	18.2	30,522	16.1	13,454
200	203.9	8,748	20.8	34,883	18.4	15,376
225	229.4	9,842	23.3	39,243	20.7	17,298

5.3.2 동결농축폐수처리시스템의 운전비용 및 위탁처리비용

동결농축폐수처리시스템의 운전비용을 산정하기 위한 시스템의 소비전력은 Table 4.21의 설계처리량에 대한 시스템의 해석결과에서 얻어진 전력량을 기준으로 하였다. 위탁 처리하는 경우의 비용은 한국산업수처리협회에서 공고한 폐수처리수수료표^[49] 중 일반 중금속 기준 150,000 원/m³을 적용하였다.

다음 Table 5.10은 각 처리량별 동결농축폐수처리시스템의 사용 전력에 대한 전기료와 산업폐수를 전문으로 처리하는 위탁처리업체에 위탁하는 경우의 비용을 산정한 표이다. 전기료는 2012년 한국전력공사의 심야전력요금^[46]을 기준으로 운전 소비전력에 대한 전기료를 계산하였다.

Table 5.10 Cost of freeze concentration and entrustment treatment

Treatment capacity (kg)	FC treatment system		Entrustment treatment (₩)
	Power consumption (kWh)	Cost(₩)	
125	13.684	587.04	18,750
150	15.003	643.63	22,500
175	16.323	700.26	26,250
200	17.641	756.80	30,000
225	18.963	813.51	33,750

5.3.3 폐수처리방법별 처리비용

동결농축폐수처리시스템의 경제성을 검토하기 위해 증발농축처리법의 사용 열원별 처리비용과 위탁처리비용을 비교하였다. Table 5.11에서 5.13은 각각의 처리비용을 비교한 표로 증발농축처리에 열원으로 전기를 사용하는 경우 동결농축처리비용의 9.3 ~ 12.1 배, 경유의 경우는 37.1 ~ 48.2 배, 도시가스의 경우는 16.4 ~ 21.3 배로 매우 많은 운전비용이 필요한 것으로 나타났다. 또, 전문 업체에 위탁 처리하는 경우에도 31.9 ~ 41.5 배의 높은 비용이 발생하였다. 비교 결과, 동결농축폐수처리시스템의 운전비용이 증발농축법이나 위탁처리방법 보다 비용 면에서 큰 장점을 갖는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 처리량이 많아질수록 뚜렷하게 나타났다. 이는 5.2에서 살펴본 것과 같이 동결농축폐수처리시스템이 설계처리량 증가와 비례하여 시스템 효율이 향상되고 소비전력량이 작아지기 때문이다.

Table 5.11 Cost comparison of waste-water treatment method at evaporative concentration using electricity

Treatment capacity (kg)	FCS(A) (₩)	ECS(B) (₩)	ET(C) (₩)	B/A	C/A
125	587.04	5,467.61	18,750	9.3	31.9
150	643.63	6,561.13	22,500	10.2	35.0
175	700.26	7,654.66	26,250	10.9	37.5
200	756.80	8,748.18	30,000	11.6	39.6
225	813.51	9,841.70	33,750	12.1	41.5

FCS : Freeze Concentration System

ECS : Evaporative Concentration System

ET : Entrustment Treatment

Table 5.12 Cost comparison of waste-water treatment method at evaporative concentration using diesel oil

Treatment capacity (kg)	FCS(A) (₩)	ECS(B) (₩)	ET(C) (₩)	B/A	C/A
50	587.04	21,801.7	18,750	37.1	31.9
60	643.63	26,162.04	22,500	40.6	35.0
70	700.26	30,522.39	26,250	43.6	37.5
80	756.80	34,882.73	30,000	46.1	39.6
90	813.51	39,243.07	33,750	48.2	41.5

Table 5.13 Cost comparison of waste-water treatment method at evaporative concentration using LNG

Treatment capacity (kg)	FCS(A) (₩)	ECS(B) (₩)	ET(C) (₩)	B/A	C/A
50	587.04	9,609.96	18,750	16.4	31.9
60	643.63	11,531.96	22,500	17.9	35.0
70	700.26	13,453.95	26,250	19.2	37.5
80	756.80	15,375.94	30,000	20.3	39.6
90	813.51	17,297.94	33,750	21.3	41.5

Fig. 5.7은 열원별로 증발농축처리, 위탁처리 및 동결농축처리의 비용을 나타낸 그래프로 경유를 이용하는 증발농축처리가 가장 높은 운전비가 소모되고, 다음으로는 전문 처리기관에 위탁 처리하는 경우인 것으로 나타났다. 증발농축처리에서 사용 단가가 가장 낮은 전기를 사용하는 경우가 운전비가 가장 저렴하나 동결농축법을 이용한 경우에 비해서는 높게 나타났다. 따라서 동결농축법이 증발농축법과 위탁처리에 비해 매우 경제적인 것을 알 수 있다.

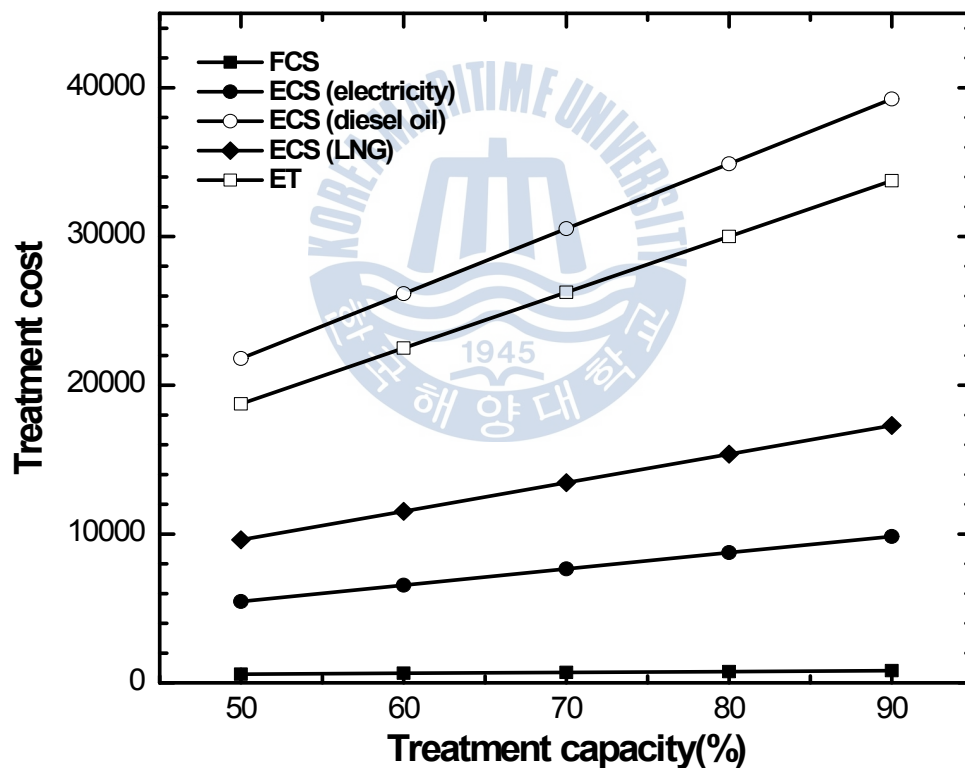


Fig. 5.7 Treatment cost at waste-water treatment method

5.4 열회수를 통한 냉난방 적용 시 시스템 효율 분석

에너지를 재사용하는 환경친화형 유틸리티로써의 경제성을 높이기 위해 처리된 얼음을 탱크에 축빙하여 냉방부하에 이용하고, 냉동기 응축기에서 발생하는 고온의 열을 회수하여 급탕 및 난방에 이용할 경우 예상되는 시스템의 열효율을 분석하였다. 시스템은 일일처리량 즉, 제빙량에서 우수한 급속운전시스템을 70% 설계처리량으로 정격 운전하는 조건으로 정하였다. 시스템의 효율을 사용되는 입력에너지에 대한 얻어지는 이용 가능한 냉열 및 온열로 정의하여 공기조화장치와 연계된 냉난방시스템으로서 효율을 검토하였다.

5.4.1 냉방 적용 시 시스템 효율

냉방에 적용되는 열원은 폐수를 동결농축처리하는 과정에서 얻어지는 얼음이다. 생산된 얼음을 탈빙 및 쇄빙하여 축빙탱크에 저장하는 형태로 빙축열시스템과 유사한 구조이며, 최근에는 비슷한 규모로 중소형 빙축열의 보급이 확대되고 있다. 일반적으로 빙축열 방식의 경우 공급냉수 온도가 5 ~ 7 °C 까지 사용되고 있다^[50]. 동결농축처리장치에서 생성되는 얼음이 -10 °C 이고 용해되어 5 °C 까지 이용된다면 시스템 일일처리량, 즉 일일제빙량에서 얻을 수 있는 냉열()은 얼음의 냉열(Q_i), 총 용해잠열(Q_{lh}) 및 용해된 물의 냉열(Q_w)의 합으로 다음 식 (5.3)으로 나타낼 수 있으며, 계산결과 1,248,445.14 kJ을 얻을 수 있었다.

$$Q_i + Q_{lh} + Q_w \quad (5.3)$$

여기서,

$$Q_i = \text{일일처리량} \times \text{얼음비열}(2.0934 \text{ kJ/kgK}) \times (0 - \text{얼음온도})$$

$$Q_{lh} = \text{일일처리량} \times \text{용해잠열}(333.6042 \text{ kJ/kgK})$$

$$Q_w = \text{일일처리량} \times \text{물비열}(4.1868 \text{ kJ/kgK}) \times (\text{물사용온도} - 0)$$

시스템의 일일 사용전력량은 Table 4.9의 급속운전시스템 운전 소비전력량에 일일 운전횟수인 19회를 곱하여 계산하였으며 그 결과 310.14 kWh를 사용하며 열량으로 환산하면 1,116,704.97 kJ을 사용하는 것으로 나타났다.

일반적으로 냉동공조분야에서 냉난방기의 성능을 평가하는 방법으로 에너지 효율을 표시하는 단위인 에너지 효율비(Energy Efficiency Ratio, EER)와 성능계수(COP)를 사용하고 있으며, EER은 식 (5.4)로 나타낸다. 성능계수와 에너지 효율비는 단위의 차이를 제외하고는 근본적인 의미는 동일하다^{[51][52]}.

$$ER = \frac{\text{냉방능력}(kJ/h)}{\text{비전력}(W)} \quad (5.4)$$

냉방시스템으로 동결폐수농축처리장치의 냉방효율()을 성능계수와 식 (5.4) 에너지 효율비를 고려하여 일일 사용되는 입력 열량에 대한 일일 얻어지는 이용 가능한 냉방열로 정의하면 식 (5.5)로 나타낼 수 있다.

$$\eta = \frac{Q_c}{Q_{in}} \quad (5.5)$$

여기서, Q_c 는 일일처리량에서 얻을 수 있는 냉열, Q_{in} 은 일일 사용열량이다.

$$Q_c = 1,248,445.14 \text{ kJ}$$

$$Q_{in} = 1,116,704.97 \text{ kJ}$$

계산 결과 동결폐수농축처리시스템의 냉방효율은 약 1.12로 낮게 나타났다. 이는 공급되는 열량 중 많은 양이 초기빙층 제빙 시 청수 냉각과 폐수 처리과정에서 폐수를 동결온도까지 냉각하는데 이용되고 있고 또, 일부는 단기운전하는 펌프 동력으로 이용되기 때문이다. 결국 실제 냉방에 이용 가능한 냉열로 회수되는 열음의 제빙에 사용되는 열량이 작아지기 때문이다.

5.4.2 난방 적용 시 시스템 효율

난방에 적용되는 열원은 냉동부의 응축기에서 얻어진다. 응축기를 온브라인 탱크 내부에 설치하여 응축기로부터 전달되는 열로 온브라인을 가열하여 축열하는 방식이다. 탱크 내장형 응축기는 온열을 회수하는데 손실을 최소화할 수 있으며, 난방부하에 연동되어 온열을 조절, 공급할 수 있어 유리한 점이 있다.

온브라인은 탱크에서 50 ℃까지 가열된 후 온브라인냉각기(warm brain cooler)에서 난방 열매체와 열교환 후 45 ℃ 까지 냉각되는 것으로 하였다. 이때 회수되는 열량은 Fig 4.3 모델링의 해석결과 164,248.16 kJ/h로 계산되었다. 일회 운전 시 냉동부가 작동하는 과정은 초기빙층 제빙과 폐수 농축 본 처리 과정으로 회당 냉동부의 운전시간은 64.3분을 운전하게 된다. 따라서 일일 운전횟수 19회에 이용 가능한 난방열량은 3,344,366.44 kJ이 된다. 시스템의 일일 사용 전력량은 Table 4.9의 급속운전시스템 회당 운전 소비전력량에 일일 운전횟수인 19회를 곱하여 계산하였으며 그 결과 310.14 kWh로 열량으로 환산하면 1,116,704.97 kJ을 사용하는 것으로 나타났다.

동결농축폐수처리시스템의 난방효율()을 위의 식 (5.5)를 고려하여 일일 사용되는 입력에너지에 대한 일일 얻어지는 이용 가능한 난방열로 정의하면 식 (5.6)으로 나타낼 수 있다.

$$\eta = \frac{Q_h}{Q_{in}} \quad (5.6)$$

여기서, Q_h 는 일일 운전에서 얻을 수 있는 난방열,

$$Q_h = 3,344,366.44 \text{ kJ}$$

$$Q_{in} = 1,116,704.97 \text{ kJ}$$

계산 결과 동결폐수농축처리시스템의 난방효율은 약 2.99로 계산되어, 난방 효율보다 높은 것을 알 수 있었다. 이는 발생하는 온열이 모두 난방에 이용되기 때문으로 판단된다.

5.4.3 냉난방 모두 적용 시 시스템 효율

동결농축폐수처리시스템의 냉온열을 모두 이용하는 경우는 여름철의 냉방공조와 작업자들의 샤워 및 기타 온수 등의 급탕부하로써 활용하는 경우를 가정할 수 있다. 필요한 경우 추가적인 급탕가열기의 설치도 고려할 수 있으나 50 ℃ 정도의 급탕 온도를 이용할 경우에는 응축기의 온열을 그대로 사용할 수 있다. 이때 공장 및 사무실 등 사업소 내 냉방공조와 급탕, 온수 등으로 냉온열이 모두 이용될 경우 시스템의 냉난방효율을 다음 식 (5.7)로 정의하여 계산하였다.

$$\eta_{in} = \frac{Q_c + Q_h}{Q_{in}} \quad (5.7)$$

계산 결과 운전에서 발생하는 모든 냉온열을 냉방과 급탕, 온수 등으로 전부 활용할 경우 시스템의 입력 열량과 이용 가능한 열량을 비교한 시스템 효율은 4.11로 상승하였다.

5.5 동결농축폐수처리시스템의 최종 경제성 분석

동결농축폐수처리시스템의 최종 경제성 분석에는 폐수배출시설과 연계하여 사업소 내에서 폐수를 직접 처리하는 경우와 전문 처리업소에 위탁 처리하는 경우를 비교하여 얻어지는 비용 절감 효과와 냉난방열을 모두 이용할 때의 공기조화 비용, 원수를 처리 후 추출된 깨끗한 얼음을 녹여 용수로 재이용하는 측면을 모두 고려하여 분석하였다.

5.5.1 폐수처리비용의 경제성

폐수처리비용은 동결농축폐수처리시스템을 사업소 내 설치하여 폐수를 직접 처리할 때 드는 운전비용과 위탁처리수수료를 검토하여 비용 절감 효과를 분석하였다.

유입되는 폐수 250 kg 중 70 % 양까지를 처리하게 되면 폐수 처리량 즉 제빙량은 175 kg이다. 해석 결과 일일 19회의 운전이 가능하므로 이는 폐수 배출시설에서 일일 배출되는 폐수량 4,750 kg 중 3,325 kg을 처리할 수 있는 규모이다. 시스템이 일일 운전하는 24시간 중 사용 전력의 단가가 심야와 주간에 따라 달라진다.

따라서 주야간 24시간 운전을 심야와 주간으로 구분하여 사용전력요금을 계산한 결과는 다음 Table 5.14와 같다. 심야시간은 23시부터 익일 9시 까지이며, 단가는 심야전력(을) II를 기준으로 하였다^[46].

전문 처리업체에 위탁 처리하는 비용을 일반 중금속 기준인 150,000 원/m³을 적용하면 처리량 3,325 kg을 처리하는 비용은 498,750원이 소요된다. 따라서 동결농축폐수처리를 이용하여 폐수를 직접 처리하는 방법이 위탁처리 하는 경우 보다 478,083.4원의 비용을 절감할 수 있는 것으로 나타났다.

Table 5.14 Daily electricity cost of waste-water FC treatment system

Item	Operation times	Power(kWh)	Cost(₩)	
			Unit cost (₩/kWh)	Amount (₩)
Midnight operation	8	130.58	42.9	5,602.1
Daytime operation	11	179.55	83.9	15,064.5
합계	19	310.20	-	20,666.6

5.5.2 열회수를 통한 냉난방 적용 시 경제성

동결농축폐수처리시스템에서 재활용 가능한 열의 냉열과 응축기의 온열을 회수하여 여름철에는 냉방과 급탕 및 온수로 활용하고 겨울철에는 사업소의 난방으로 활용할 경우에 공기조화 장치의 운전을 최소화 할 수 있다. 이때 얻어지는 냉열과 온열을 공기조화에 사용되는 전력으로 환산하여 경제성을 분석하였다.

산업용 전력의 경우 계절별, 사용 시간대별 요금 책정기준이 달라 일일 근무시간의 평균 전력요금을 적용하였다. 일일 근무시간은 출근시간인 오전 9시부터 퇴근시간인 오후 6시 까지 일일 9시간을 기준으로 하였다. 중소기업의 80 ~ 90 % 정도가 사용전압 3.3 ~ 66 kV 범위 내이고 월 사용시간이 200 ~ 500 시간 정도로 조사되어 한국전력공사 전력요금 구분 중 산업용전력(을) 고압A 선택Ⅱ의 요금제를 적용하였다. 7월 ~ 8월인 하절기의 평균전력요금의 중간부하, 최대부하의 기준시간에 따라 평균요금을 계산하면 Table 5.15와 같다. 동절기는 11월 ~ 2월에 해당하며 시간 당 평균요금은 Table 5.16과 같다^[46].

계절별로 냉난방에 이용 가능한 재활용 열을 전력으로 환산하여 이를 Table 5.15와 5.16의 시간당 평균요금을 적용하여 일일 회수 가능한 공기조화 비용 절감액을 구하여 Table 5.17에 나타내었다. 결국 사업소의 공기조화를 동결폐수농축처리시스템의 냉열과 온열을 회수하여 재활용하면 그 비용을 크게 절감할 수 있는 것으로 나타났다.

Table 5.15 Mean charge in summer season for air-conditioning

Criteria	Unit cost (₩/kWh)	Working hour(h)		Daily cost (₩)	Mean cost per hour(₩)
		AM	PM		
Intermediate load	106.9	2	2	427.6	151.51
Maximum load	187.2	1	4	936.0	
Total		9		1,363.6	

Table 5.16 Mean charge in winter season for heating

Criteria	Unit cost (₩/kWh)	Working hour(h)		Daily cost (₩)	Mean cost per hour(₩)
		AM	PM		
Intermediate load	105.1	1	5	630.6	123.5
Maximum load	160.3	2	1	480.9	
Total		9		1,111.5	

Table 5.17 Cost reduction of HVAC in work place

Item		Heat (kJ)	Power* (kWh)	Cost (₩)
Summer season	Air conditioning	1,248,445.14	346.73	52,533.06
	Hot water	3,344,366.44	928.82	140,725.52
	Total	4,592,811.58	1,275.55	193,258.58
Winter season	Heating	3,344,366.44	928.82	114,709.27

*1kWh = 3,600.648 kJ

5.5.3 동결농축폐수처리시스템의 종합적 경제성

동결농축폐수처리시스템의 종합적 경제성은 폐수배출시설로부터 발생하는 폐수를 사업소 내 설치된 처리시스템을 이용하여 사내에서 직접 처리할 때 얻어지는 처리비용 절감액과 생산되는 얼음의 냉열 및 응축기의 온열을 냉난방에 활용하고, 냉열을 회수하고 남은 융해된 물을 용수로 재사용할 때 얻어지는 경제적 이익을 종합적으로 분석하였다.

용수를 재활용하므로 얻어지는 경제적 이득은 일일처리량 즉 일일제빙량을 공업 및 생활용수로 활용 할 때 톤당 수돗물 원수의 가격을 한국수자원공사 수돗물 원수 기준가격인 223 원/㎥을 적용하여 구하였다^[53]. 일일 얻을 수 있는 용수의 양이 3,325 kg으로 이를 금액으로 환산하면 741.5원이 된다.

Table 5.18은 70 % 설계처리량을 갖는 시스템의 일일 운전비용과 종합적 경제성을 분석한 표이다. 시스템의 경제적 가치를 운전비용 대비 얻어지는 경제적 효과로 나타내면, 계절별로 하절기는 32.5배, 동절기는 28.7배의 경제적 이익을 얻을 수 있는 것을 알 수 있다.

Table 5.18 Total economy benefit of waste-water FC system

Item	Operation cost(A) (₩)	Cost effectiveness(B) (₩)				B/A
		TC ¹⁾	HR ²⁾	WR ³⁾	Total	
Summer season	20,666.6	478,083.4	193,258.6	741.5	672,083.5	32.5
Winter season	20,666.6	478,083.4	114,709.3	741.5	593,534.2	28.7

TC¹⁾ : Treatment Cost

HR²⁾ : Heat Recovery

WR³⁾ : Water Reuse

5.6 소결론

동결농축폐수처리장치의 각 시스템별 에너지 효율 및 일일처리량을 비교하고, 타 처리방법과 비용분석, 열에너지회수 및 용수재활용 측면을 고려한 시스템의 경제성을 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 청수냉각기를 갖는 급속운전시스템이 완전운전시스템에 비해 소비전력량비가 0.6 Wh/kg 정도 높지만, 회당운전시간을 15분 정도 절감할 수 있어 일일처리량이 약 19 % 증가한다.

Table 5.19 Rate of electric power consumption and daily treatment capacity for the application of precooling

System	Rate of electric power consumption(kWh/kg)	Daily treatment capacity(kg)
Non-Precooling	0.0927	2,800
Precooling	0.0933	3,325

- (2) 설계처리량이 증가할수록 시스템의 부하가 커져 소비전력량은 증가하지만, 냉동기에서 공급되는 열이 상변화의 잠열과 동결층의 냉각열로 이용되는 비율이 상승하여 소비전력량비가 작아지며, 일일처리량은 증가한다.

Table 5.20 Rate of electric power consumption and daily treatment capacity at design treatment capacity

Treatment capacity (%)	Rate of electric power consumption(kWh/kg)	Daily treatment capacity(kg)
50	0.109	2,375
60	0.1	2,850
70	0.093	3,325
80	0.088	3,800
90	0.084	4,275

(3) 운전처리량이 증가할수록 소비전력량비가 작아지며, 일일처리량은 증가하지만, 운전처리량이 설계처리량보다 크게 운전하는 경우 설계처리량으로 운전하는 시스템 보다 소비전력량비가 증가하고 일일처리량은 감소하는 것으로 나타났다.

Table 5.21 Rate of electric power consumption and daily treatment capacity at operation treatment capacity

Treatment capacity (%)	Rate of electric power consumption(kWh/kg)	Daily treatment capacity(kg)
50	0.103	2,938
60	0.097	3,195
70	0.093	3,395
80	0.090	3,560
90	0.089	3,668

(4) 동결농축법 처리비용은 전기를 사용하는 증발농축 처리비용의 8.3 % ~ 10.7 %, 위탁처리비용의 2.4 % ~ 3.1 %로 매우 저렴한 것으로 나타났다.

(5) 열에너지를 회수하여 공기조화에 이용할 경우 시스템이 갖는 냉방효율은 1.12, 난방효율은 2.99, 냉난방을 모두 적용 시에는 4.11로 나타났다.

(6) 최종 경제성 분석 결과 투입되는 운전비용 대비 하계에는 32.5배, 동계에는 28.7배의 경제적 이익을 얻을 수 있었다.



제 6 장 결 론

본 연구에서는 동결농축법을 이용하여 중·소형 규모의 폐수처리장치를 개발하고자, 우선 폐수 중의 순수한 물을 분리하는 효과적인 방법을 실험적으로 연구하였다. 실험은 수직원관으로 설치된 제빙관에서의 동결거동에 대한 기초 자료를 확보하고자 냉각면의 온도 변화, 기포분사의 방법 및 과냉각방지 초기 빙층의 두께에 따른 영향을 염화나트륨수용액과 중금속수용액을 대상으로 관찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 냉각면 온도가 낮아질수록 동결계면의 온도 구배에 따른 열유속 증가로 동결층은 두껍게 발달하나, 용질이 동결층 밖으로 배제될 수 있는 충분한 시간이 제공되지 않아 동결층 내 염분의 농도는 높아진다.

Table 6.1 Salinity of frozen layer at cooling wall temperature

Cooling wall temp.	Salinity(wt%)	
	1.8 wt% aqueous solution	3.6 wt% aqueous solution
-2 °C	1.14	-
-7 °C	1.19	2.20
-12 °C	1.21	2.22

- (2) 기포 분사방법은 동결계면에 간접 분사하는 것보다 직접 분사하는 방법이 동결층의 성장속도를 저하시키고, 동결계면에 형성되는 고농도 수용액의 확산을 촉진시켜 동결층의 용질 농도가 더 낮은 얼음을 얻을 수 있었다. 또, 정지상태 보다는 기포 분사 유동이 주어졌을 때 동결층 용질 농도가 더 낮았다.

(3) 1 mm와 5 mm 초기빙층에서 두께가 두꺼울수록 동결층의 Pb 와 Cr 농도가 낮았다. 이는 동결 초기 과냉각 현상의 해소와 열저항 증가로 동결층의 성장속도가 작아져 용질이 충분히 동결층 밖으로 배제되는 결과로 생각된다.

Table 6.2 Pb & Cr content of frozen layer at ice-lining thickness

Cooling wall temp.	Pb(ppm)		Cr(ppm)	
	1 mm	5 mm	1 mm	5 mm
-2 °C	0.0	-	0.0	-
-7 °C	0.1	0.0	0.01	0.0
-12 °C	0.2	0.0	0.02	0.0
-15 °C	-	0.1	-	0.01

또, 동결농축폐수처리장치의 상용화를 위해 에너지 소비가 적고 중소규모의 폐수배출시설에 유리한 시스템을 설계하고, 해석 프로그램을 이용 소비전력을 계산하여 에너지 효율과 일일처리량을 비교하였다. 해석 결과를 바탕으로 다른 방법과 처리비용을 비교하고, 열에너지회수 및 용수재활용 측면을 고려한 시스템의 경제성을 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 청수냉각기를 갖는 급속운전시스템이 완속운전시스템에 비해 소비전력량비가 0.6 Wh/kg 정도로 조금 높지만, 운전시간을 15분 정도 절감할 수 있어 일일처리량은 약 19 % 증가하였다.

(2) 설계처리량이 50 % ~ 90 %로 증가할수록 시스템의 부하가 커져 소비전력량은 증가하지만, 냉동기에서 공급되는 열이 상변화의 잠열과 동결층의 냉각열로 이용되는 비율이 47.7 % ~ 61.7 %로 상승하여 소비전력량비가 0.109 kWh/kg ~ 0.084 kWh/kg로 작아지고, 일일처리량도 회당처리량 증가에 따라 2,375 kg ~ 4,275 kg으로 증가하였다.

(3) 운전처리량이 시스템의 설계처리량보다 크게 운전되는 경우 소비전력량비가 설계처리량 운전보다 커지고 일일처리량은 작아지는 것으로 나타났다.

(4) 시스템의 종류나 설계처리량과 상관없이 압축기의 소비전력이 차지하는 비중이 전체 소비전력의 95 % 이상으로 냉동기의 성적계수가 시스템의 효율을 크게 지배하는 것으로 나타나 효율이 높은 냉동기의 선정이 매우 중요한 것으로 나타났다.

(5) 폐수를 처리하는 방법에 따른 비용분석에서는 동결농축법이 전기를 사용하는 증발농축 처리비용의 8.3 % ~ 10.7 %, 위탁처리비용의 2.4 % ~ 3.1 %로 매우 저렴하여 처리비용에서 경쟁력을 확인할 수 있었다.

(6) 동결농축폐수처리시스템으로 폐수를 처리하는 과정에서 얻어지는 열에너지를 회수하여 공기조화에 이용할 경우, 시스템이 갖는 냉방효율은 1.12, 난방효율은 2.99로 나타났으며, 냉난방을 모두 적용 시에는 시스템의 효율이 4.11로 높게 나타났다.

(7) 최종 경제성 분석에는 폐수전문위탁업체에 의뢰하는 경우에 대한 비용절감효과와 냉난방열의 회수, 용해된 얼음의 용수 재활용을 모두 고려하여 분석한 결과 투입되는 운전비용 대비 하계에는 32.5배, 동계에는 28.7배의 경제적 이익을 얻을 수 있었다.



참 고 문 헌

- [1] 오종민, 2008. 물 부족 문제에 직면한 우리나라 물 교육 현황에 관한 연구, 석사학위논문, 서울: 경희대학교.
- [2] 건설교통부, 한국수자원공사, 2007. 물과 미래, 대전: 한국수자원공사.
- [3] 남궁은, 2005. 우리나라의 물 부족 현황과 대응방향 [Online] (updated 2005. 11. 17) Available at: <http://www.unep.or.kr> [Accessed 2013. 4. 1].
- [4] 김종오, 2010. 미래 유망 녹색 환경 기술: 수처리 기술을 중심으로, 한국방재학회지, 10(1), pp.6-10.
- [5] 환경부, 2012. 공장폐수의 발생과 처리, 세종: 환경부.
- [6] 환경부, 2006. 폐수처리업의 저장시설 및 처리시설 설치·관리 세부기준 마련, 세종: 환경부.
- [7] (주)제오택환경, 2005. 악성폐수에 처리를 위한 동결농축 기술개발 및 실용화, 세종: 환경부.
- [8] 공재열, 1985. 동결농축의 개선을 위한 기초적 연구, J. Korean Soc. Food Nutr. 14(4) pp.353-358.
- [9] GEA, *Freeze Concentration - Break barriers in liquid processing*, Netherlands: GEA.
- [10] GEA, 2008. *Melt crystallization & wash column separation*, Netherlands: GEA.
- [11] 坂下 茂, 2000. 축열식 냉동장치를 이용한 환경공조형유틸리티, 월간 화공 기술, pp.44-48.
- [12] 배승권, 1995. Progressive Freezing에 의한 동결 농축법에 있어서의 농축 효과에 미치는 동결조건의 영향, 한국영양식량학회지, 24(6), pp.984-989.
- [13] 정하덕, 2005. 악성폐수 처리를 위한 강하경막동결농축 기술의 성능에 미치는 영향인자, 석사학위논문, 부산: 한국해양대학교.
- [14] Maurizo A Strangio, 2009. *Recent Advances in Technologies*, InTech, pp.587-599.

- [15] Lorain, O., Thiebaud P., Badorc, E., Aurelle, Y., 2001. Potential of freezing in wastewater treatment: soluble pollutant applications, *Water Research*, 35(2), pp.541-547.
- [16] Kannerer, P. A., Lee, G. F., 1969. Freeze concentration of organic compounds in dilute aqueous solution, *Environ. Sci. Technol.*, 3(3), pp.276-278.
- [17] Powell, R. L., Barduhan, A. J., 1965. Separation of dissolved solids from wastewater by eutectic freezing, Presented A. I., Ch. E., National Meeting, Houston, Texas, Feb. 7-11.
- [18] Halde R., 1980. Concentration of impurities by progressive freezing, *Water Research*, 14(6), pp.575-580.
- [19] Oh, C., 1999. Freezing phenomenon and application in cold environment, *Korean Society of Marine Engineering*, 23(3), pp.275-283.
- [20] Shirai, Y., Wakisaka, M., Miyawaki, O., Sakashita, S., 1998. Conditions of producing an ice layer with high purity for freeze wastewater treatment, *Journal of Food Engineering*, 38(3), PP.297-308.
- [21] Liu, L., Fujii, T., Hayakawa, K., Miyawaki, O., 1998. Prevention of initial supercooling in progressive freeze-concentration, *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, 62(12), pp.2467-2469.
- [22] Baker, R. A., 1967. Trace organic contaminant concentration by freezing —II: Inorganic aqueous solutions, *Water Research*, 1(2), pp.97-113.
- [23] Liu, L., Miyawaki, O., Nakamura K., 1997. Progressive freeze concentration of model liquid food, *Food Sci. Technol. Int. Tikyo*, 3(4), pp.348-352.
- [24] Shirai, Y., Wakisaka, M., Miyawaki, O., Sakashita, S., 1999. Effect of seed ice on formation of tube ice with high purity for a freeze wastewater treatment system with a bubble-flow circulator, *Water Research*, 33(5), PP.1325-1329.
- [25] Vesilin, P. A., Martel, C. J., 1990. Freezing of Water and Wastewater Sludges, *J. Environ. Eng.*, 116(5), pp.854-862.

- [26] Stepakoff, G., Siegelman, D., 1973. Application of a eutectic freezing system to industrial waste water recycling, *Industrial Waste Water Reuse Conference Environmental section*, American Institute of Chemical Engineers, Washington, D.C., Avco Systems Division.
- [27] Wakisaka, M., Shirai, Y., Sakashita, S., 2001. Ice crystallization in a pilot-scale freeze wastewater treatment system, *Chemical Engineering and Processing*, 40(3), pp.201-208.
- [28] Miyawaki, O., Liu, L., Shirai, Y., Sakashita, S., Kagitani, K., 2004. Tubular ice system for scale-up of progressive freeze-concentration, *Journal of Food Engineering*, 69(1), pp.107-113.
- [29] Habib, B., Farid, M., 2006. Heat transfer and operating conditions for freeze concentration in a liquid-solid fluidized bed heat exchanger, *Chemical Engineering and Processing*, 45(8), pp.698-710.
- [30] Jusoh, M., Yunus, R. M., Abu Hassan M.A., 2009. Performance investigation on a new design for progressive freeze concentration system, *Journal of Applied Sciences*, 9(17), pp.3171-3175.
- [31] 송영채, 1999. 동결농축법을 이용한 소규모 축산폐수 무방류 기술에 관한 연구, 서울: 한국과학재단.
- [32] 新日本空調, 2008. 流下液膜式凍結濃縮装置[FREECIS], 冷凍空調設備, 2008年4月15日号, pp.8-13.
- [33] 福里豊, 吉井隆裕, 伊藤伸治, 瀬尾敦子, 鈴木秀彦, 星野行宏, 荒川和則, 2005. 上水 スラッジ新凍結濃縮法, 衛生工學シンポジウム論文集, 13, pp.203-206.
- [34] Pradistsuwana C., Theprugsa P., Osato Miyawaki O., 2003. Measurement of limiting partition coefficient in progressive freeze concentration, *Food Sci. Technol.* 9(2) pp.190-192.
- [35] 福迫尚一郎, 稻葉英男, 1996. 低溫環境下の傳熱現象とその應用, 養賢堂: Japan.
- [36] 서정택, 이용화, 1993. 냉동공조공학, 형설출판사: 서울.

- [37] 일본열물성학회, 2008. *신편열물성핸드북*, 양현당: 일본.
- [38] Hiroshi Sato, 1999. Water treatment technology using freezing separation method, *Refrigeration*, 74(857), pp.32-36.
- [39] 송영욱, 2012. *선박폐열 및 해수온도차를 이용한 ORC 발전시스템에 의한 선박 열효율 향상에 관한 연구*, 박사학위논문, 부산: 한국해양대학교, pp.48-54.
- [40] Aspen Technology, 2011. *Aspen HYSYS Simulation Basis guide*, pp.A1-A95.
- [41] 윤정인, 김재돌, 2002. *냉동 및 공기조화*, 문운당: 서울.
- [42] 임효목, 권일욱, 2010. 빙축열을 이용한 복합열원 히트펌프는 가능한가, *대한설비공학회 설비저널*, 39(6), pp.33-40.
- [43] 변상수, 2010. *동결폐수농축처리시스템의 응용을 위한 동결층 용해거동에 관한 연구*, 석사학위논문, 부산: 한국해양대학교.
- [44] 임현우, 김영일, 정광섭, 2011. 대용량 공조 적용에 대한 빙축열 시스템과 흡수식 냉온수기의 경제성 분석, *대한설비공학회 하계학술발표대회 논문집*, pp.615-620.
- [45] 산업자원부, 2006. *효율관리 제도개선 및 국제표준화 연구를 통한 고효율 기기 보급기반 구축에 관한 연구*, 경기: 산업자원부, pp.141-142.
- [46] 한국전력공사, 2012. *전기요금(종합)*, 서울: 한국전력공사.
- [47] 한국석유공사, *대리점 유가*[Online] (Updated 2012. 10) Available at: <http://www.knoc.co.kr> [Accessed 2012. 10].
- [48] 부산도시가스, 2012. *도시가스 용도별 소비자 요금*, 부산: (주)부산도시가스.
- [49] 한국산업수처리협회, 2004. *폐수처리수수료표*, 서울: 한국산업수처리협회.
- [50] 염한길, 박병규, 고득용, 1999. 빙축열을 이용한 저온공조시스템 운전 특성 연구, *공기조화 · 냉동공학*, 11(3), pp.301-312.
- [51] 이홍원, 문정호, 배영돈, 박종철, 1999. 에어컨 냉방기간 에너지 효율 산출을 위한 실험적 연구, *공기조화 · 냉동공학*, 4(3), pp.204-215.
- [52] 손병후, 조정식, 신현준, 안형준, 임성균, 2003. 수직 밀폐형 지열원 열펌프 시스템의 성능 평가, *대한설비공학회 2003공계학술발표대회 논문집*, pp.56-61.
- [53] 한국수자원공사, 2013. *수돗물요금단가표*, 대전: 한국수자원공사.

부록. HYSYS 해석 결과의 프로세서 속성 값

Table 1 Waste-water FC system without fresh water pre-cooler

		KOREA MARITIME UNIVERSITY Burlington, MA USA		Case Name: 원속온전시스템설계_최종HSC		
				Unit Set: SI		
				Date/Time: Thu Apr 18 13:57:38 2013		
Workbook: Case (Main)						
Material Streams						
				Fluid Pkg		All
Name	A-1	A-2	A-3	A-4	C-1	
Vapour Fraction	1.0000	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	
Temperature (C)	25.00 *	35.15	1.000 *	1.000	50.00 *	
Pressure (kPa)	110.0 *	120.0 *	120.0	120.0	110.0 *	
Molar Flow (kgmole/h)	0.2760	0.2760	0.2760	0.0000	223.9	
Mass Flow (kg/h)	7.990 *	7.990	7.990	0.0000	8964	
Liquid Volume Flow (m3/h)	9.084e-003	9.084e-003	9.084e-003	0.0000	8.275	
Heat Flow (kJ/h)	-2.505	77.82	-192.7	0.0000	-8.199e+007	
Name	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6	
Vapour Fraction	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
Temperature (C)	50.01	50.01	45.00 *	45.00 *	50.01	
Pressure (kPa)	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	
Molar Flow (kgmole/h)	223.9	223.9	223.9	223.9	0.0000	
Mass Flow (kg/h)	8964	8964	8964	8964	0.0000 *	
Liquid Volume Flow (m3/h)	8.275	8.275	8.275	8.275	0.0000	
Heat Flow (kJ/h)	-8.199e+007	-8.199e+007	-8.212e+007	-8.212e+007	0.0000	
Name	C-7	C-8	F-1	F-2	F-3	
Vapour Fraction	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
Temperature (C)	45.00 *	50.00	-20.00 *	-20.00	-20.00 *	
Pressure (kPa)	210.0 *	110.0	110.0 *	210.0	210.0 *	
Molar Flow (kgmole/h)	0.0000	0.0000	250.4	250.4	249.7	
Mass Flow (kg/h)	0.0000 *	0.0000	1.003e+004	1.003e+004	9997 *	
Liquid Volume Flow (m3/h)	0.0000	0.0000	9.258	9.258	9.229	
Heat Flow (kJ/h)	0.0000	0.0000	-9.370e+007	-9.370e+007	-9.341e+007	
Name	F-4	F-5	F-6	F-7	F-8	
Vapour Fraction	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
Temperature (C)	-19.04	-16.74	-16.74	-20.00	-16.76	
Pressure (kPa)	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	
Molar Flow (kgmole/h)	249.7	249.7	250.4	0.7742	0.7742	
Mass Flow (kg/h)	9997	9997	1.003e+004	31.00 *	31.00	
Liquid Volume Flow (m3/h)	9.229	9.229	9.258	2.862e-002	2.862e-002	
Heat Flow (kJ/h)	-9.338e+007	-9.332e+007	-9.361e+007	-2.896e+005	-2.894e+005	
Name	F-10	R-1	R-2	R-3	R-4	
Vapour Fraction	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.0000 *	
Temperature (C)	-20.00	15.99	5.231	56.51	35.00 *	
Pressure (kPa)	110.0	293.9 *	293.9	1018	1018	
Molar Flow (kgmole/h)	0.0000	5.013	8.713	8.713	8.713	
Mass Flow (kg/h)	0.0000	511.5	684.9 *	684.9	684.9	
Liquid Volume Flow (m3/h)	0.0000	0.4120	0.5516	0.5516	0.5516	
Heat Flow (kJ/h)	0.0000	-4.497e+006	-6.028e+006	-6.003e+006	-6.134e+006	
Name	R-5	R-6	R-7	R-8	R-9	
Vapour Fraction	0.0000	0.0000 *	0.2089	1.0000 *	0.0000	
Temperature (C)	35.00	5.000 *	-30.00	-30.00 *	35.00	
Pressure (kPa)	1018	1018 *	84.83	84.83	1018	
Molar Flow (kgmole/h)	5.013	5.013	5.013	5.013	1.899	
Mass Flow (kg/h)	511.5	511.5	511.5	511.5	173.4	
Liquid Volume Flow (m3/h)	0.4120	0.4120	0.4120	0.4120	0.1396	
Heat Flow (kJ/h)	-4.581e+006	-4.603e+006	-4.603e+006	-4.514e+006	-1.553e+006	
Name	R-10	R-11				
Vapour Fraction	0.2495	0.8870				
Temperature (C)	0.1232	0.1221				
Pressure (kPa)	293.9	293.9 *				
Molar Flow (kgmole/h)	1.899	1.899				
Mass Flow (kg/h)	173.4	173.4				
Liquid Volume Flow (m3/h)	0.1396	0.1396				
Heat Flow (kJ/h)	-1.553e+006	-1.531e+006				
Aspen Technology Inc. Aspen HYSYS Version 7.3 (25.0.0.7336) Page 1 of 1						
Licensed to: KOREA MARITIME UNIVERSITY * Specified by user.						

Table 2 Waste-water FC system with fresh water pre-cooler

<

aspentech

KOREA MARITIME UNIVERSITY
Burlington, MA
USA

Case Name:금속연전시 스텝설계_최종 HSC

Unit Set:SI

Date/Time:Thu Apr 18 13:59:29 2013

Workbook: Case (Main) (continued)

Material Streams (continued)

Fluid Pkg:All

Name	W-3				
Vapour Fraction	1.0000				
Temperature (C)	5.000				
Pressure (kPa)	110.0				
Molar Flow (kgmole/h)	0.0000				
Mass Flow (kg/h)	0.0000				
Liquid Volume Flow (m3/h)	0.0000				
Heat Flow (kJ/h)	0.0000				

Aspen Technology Inc.

Aspen HYSYS Version 7.3 (25.0.0.7336)

Page 2 of 2

Licensed to: KOREA MARITIME UNIVERSITY

* Specified by user.

Table 3 Short-term operation pump in waste-water FC system

Table 4 Waste-water FC system (Design capacity 50 %)

 KOREA MARITIME UNIVERSITY Burlington, MA USA		Case Name: 금속연전시 시스템설계_농축물 50%_최종.HSC				
		Unit Set: SI				
		Date/Time: Thu Apr 18 14:02:46 2013				
Workbook: Case (Main)						
Material Streams						
Fluid Pkg: All						
Name	A-1	A-2	A-3	A-4	C-1	
Vapour Fraction	1.0000	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	
Temperature (C)	25.00 *	35.15	1.000 *	1.000	50.00	
Pressure (kPa)	110.0 *	120.0 *	120.0	120.0	110.0	
Molar Flow (kgmole/h)	0.1969	0.1969	0.1969	0.0000	232.9	
Mass Flow (kg/h)	5.700 *	5.700	5.700	0.0000	9327	
Liquid Volume Flow (m3/h)	6.480e-003	6.480e-003	6.480e-003	0.0000	8.611	
Heat Flow (kJ/h)	-1.787	55.52	-137.5	0.0000	-8.531e+007	
Name	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6	
Vapour Fraction	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
Temperature (C)	50.01	50.01	45.00 *	45.00 *	50.01	
Pressure (kPa)	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	
Molar Flow (kgmole/h)	232.9	232.9	232.9	232.9	0.0000	
Mass Flow (kg/h)	9327	9327	9327	9327	0.0000	
Liquid Volume Flow (m3/h)	8.611	8.611	8.611	8.611	0.0000	
Heat Flow (kJ/h)	-8.531e+007	-8.531e+007	-8.545e+007	-8.545e+007	0.0000	
Name	C-7	C-8	F-1	F-2	F-3	
Vapour Fraction	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
Temperature (C)	45.00 *	50.00	-20.00 *	-20.00	-20.00	
Pressure (kPa)	210.0 *	110.0	110.0 *	210.0	210.0	
Molar Flow (kgmole/h)	0.0000	0.0000	258.7	258.7	198.7	
Mass Flow (kg/h)	0.0000 *	0.0000	1.036e+004	1.036e+004	7957	
Liquid Volume Flow (m3/h)	0.0000	0.0000	9.564	9.564	7.346	
Heat Flow (kJ/h)	0.0000	0.0000	-9.680e+007	-9.680e+007	-7.435e+007	
Name	F-4	F-5	F-6	F-7	F-8	
Vapour Fraction	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
Temperature (C)	-16.60	-16.74	-16.72	-20.00	-16.67	
Pressure (kPa)	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	
Molar Flow (kgmole/h)	198.7	198.7	258.7	60.01	60.01	
Mass Flow (kg/h)	7957	7957	1.036e+004	2403 *	2403	
Liquid Volume Flow (m3/h)	7.346	7.346	9.564	2.218	2.218	
Heat Flow (kJ/h)	-7.432e+007	-7.428e+007	-9.871e+007	-2.245e+007	-2.243e+007	
Name	F-9	F-10	R-1	R-2	R-3	
Vapour Fraction	0.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	
Temperature (C)	-16.64	-20.00	15.99	5.222	56.50	
Pressure (kPa)	210.0	110.0	293.9 *	293.9	1018	
Molar Flow (kgmole/h)	60.01	0.0000	5.217	6.985	6.985	
Mass Flow (kg/h)	2403	0.0000	532.2	712.7 *	712.7	
Liquid Volume Flow (m3/h)	2.218	0.0000	0.4287	0.5740	0.5740	
Heat Flow (kJ/h)	-2.243e+007	0.0000	-4.679e+006	-6.272e+006	-6.247e+006	
Name	R-4	R-5	R-6	R-7	R-8	
Vapour Fraction	0.0000 *	0.0000	0.0000 *	0.2069	1.0000	
Temperature (C)	35.00 *	35.00	5.000 *	-30.00	-30.00	
Pressure (kPa)	1018	1018	1018 *	84.83	84.83	
Molar Flow (kgmole/h)	6.985	5.217	5.217	5.217	5.217	
Mass Flow (kg/h)	712.7	532.2	532.2	532.2	532.2	
Liquid Volume Flow (m3/h)	0.5740	0.4287	0.4287	0.4287	0.4287	
Heat Flow (kJ/h)	-6.383e+006	-4.767e+006	-4.790e+006	-4.790e+006	-4.697e+006	
Name	R-9	R-10	R-11	W-1	W-2	
Vapour Fraction	0.0000	0.2495	0.8868	0.0000	0.0000	
Temperature (C)	35.00	0.1232	0.1248	25.00 *	5.000	
Pressure (kPa)	1018	293.9	293.9 *	110.0 *	110.0	
Molar Flow (kgmole/h)	1.789	1.789	1.789	13.88	13.88	
Mass Flow (kg/h)	180.5	180.5	180.5	250.0 *	250.0	
Liquid Volume Flow (m3/h)	0.1453	0.1453	0.1453	0.2505	0.2505	
Heat Flow (kJ/h)	-1.616e+006	-1.616e+006	-1.593e+006	-3.972e+006	-3.994e+006	
Aspen Technology Inc. Aspen HYSYS Version 7.3 (25.0.0.7336) Page 1 of 2						
Licensed to: KOREA MARITIME UNIVERSITY			* Specified by user.			

aspentech

KOREA MARITIME UNIVERSITY
Burlington, MA
USA

Case Name:금속운전시 시스템설계_농축율 50%_최종 HSC

Unit Set:SI

Date/Time:Thu Apr 18 14:02:48 2013

Workbook: Case (Main) (continued)

Material Streams (continued)

Fluid Pkg:All

Name	W-3				
Vapour Fraction	1.0000				
Temperature (C)	5.000				
Pressure (kPa)	110.0				
Molar Flow (kgmole/h)	0.0000				
Mass Flow (kg/h)	0.0000				
Liquid Volume Flow (m3/h)	0.0000				
Heat Flow (kJ/h)	0.0000				



Aspen Technology Inc.

Aspen HYSYS Version 7.3 (25.0.0.7336)

Page 2 of 2

Licensed to: KOREA MARITIME UNIVERSITY

* Specified by user.

Table 5 Waste-water FC system (Design capacity 60 %)

aspentech

KOREA MARITIME UNIVERSITY

Burlington, MA

USA

Case Name:금속연전시스템설계_농축물 60% 회중 HSC

Unit Set:SI

Date/Time:Thu Apr 18 14:04:35 2013

Workbook: Case (Main)

Material Streams							Fluid Pkg	All
Name	A-1	A-2	A-3	A-4	C-1			
Vapour Fraction	1.0000	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000			0.0000
Temperature (C)	25.00 *	35.15	1.000 *	1.000	50.00 *			50.00 *
Pressure (kPa)	110.0 *	120.0 *	120.0	120.0	110.0 *			110.0 *
Molar Flow (kgmole/h)	0.2363	0.2363	0.2363	0.0000	255.8			255.8
Mass Flow (kg/h)	6.840 *	6.840	6.840	0.0000	1.024e+004			1.024e+004
Liquid Volume Flow (m3/h)	7.776e-003	7.776e-003	7.776e-003	0.0000	9.456			9.456
Heat Flow (kJ/h)	-2.145	66.62	-165.0	0.0000	-9.389e+007			-9.389e+007
Name	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6			
Vapour Fraction	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000			0.0000
Temperature (C)	50.01	50.01	45.00 *	45.00 *	50.01			50.01
Pressure (kPa)	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0			210.0
Molar Flow (kgmole/h)	255.8	255.8	255.8	255.8	0.0000			0.0000
Mass Flow (kg/h)	1.024e+004	1.024e+004	1.024e+004	1.024e+004	0.0000 *			0.0000 *
Liquid Volume Flow (m3/h)	9.456	9.456	9.456	9.456	0.0000			0.0000
Heat Flow (kJ/h)	-9.388e+007	-9.388e+007	-9.384e+007	-9.384e+007	0.0000			0.0000
Name	C-7	C-8	F-1	F-2	F-3			
Vapour Fraction	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000			0.0000
Temperature (C)	45.00 *	50.00	-20.00 *	-20.00	-20.00 *			-20.00 *
Pressure (kPa)	210.0 *	110.0	110.0 *	210.0	210.0 *			210.0 *
Molar Flow (kgmole/h)	0.0000	0.0000	284.3	284.3	224.2			224.2
Mass Flow (kg/h)	0.0000 *	0.0000	1.138e+004	1.138e+004	8977 *			8977 *
Liquid Volume Flow (m3/h)	0.0000	0.0000	10.51	10.51	8.288			8.288
Heat Flow (kJ/h)	0.0000	0.0000	-1.064e+008	-1.064e+008	-8.388e+007			-8.388e+007
Name	F-4	F-5	F-6	F-7	F-8			
Vapour Fraction	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000			0.0000
Temperature (C)	-18.94	-16.74	-16.72	-20.00	-16.68			-16.68
Pressure (kPa)	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0			210.0
Molar Flow (kgmole/h)	224.2	224.2	284.3	60.11	60.11			60.11
Mass Flow (kg/h)	8977	8977	1.138e+004	2407 *	2407			2407
Liquid Volume Flow (m3/h)	8.288	8.288	10.51	2.222	2.222			2.222
Heat Flow (kJ/h)	-8.385e+007	-8.380e+007	-1.063e+008	-2.249e+007	-2.247e+007			-2.247e+007
Name	F-9	F-10	R-1	R-2	R-3			
Vapour Fraction	0.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000			1.0000
Temperature (C)	-16.64	-20.00	15.99	5.238	56.52			56.52
Pressure (kPa)	210.0	110.0	293.9 *	293.9	1018			1018
Molar Flow (kgmole/h)	60.11	0.0000	5.729	7.670	7.670			7.670
Mass Flow (kg/h)	2407	0.0000	584.5	782.6 *	782.6			782.6
Liquid Volume Flow (m3/h)	2.222	0.0000	0.4707	0.6303	0.6303			0.6303
Heat Flow (kJ/h)	-2.247e+007	0.0000	-5.139e+006	-6.888e+006	-6.880e+006			-6.880e+006
Name	R-4	R-5	R-6	R-7	R-8			
Vapour Fraction	0.0000 *	0.0000	0.0000 *	0.2069	1.0000 *			1.0000 *
Temperature (C)	35.00 *	35.00	5.000 *	-30.00	-30.00 *			-30.00 *
Pressure (kPa)	1018	1018	1018 *	84.83	84.83			84.83
Molar Flow (kgmole/h)	7.670	5.729	5.729	5.729	5.729			5.729
Mass Flow (kg/h)	782.6	584.5	584.5	584.5	584.5			584.5
Liquid Volume Flow (m3/h)	0.6303	0.4707	0.4707	0.4707	0.4707			0.4707
Heat Flow (kJ/h)	-7.009e+006	-5.235e+006	-5.260e+006	-5.260e+006	-5.159e+006			-5.159e+006
Name	R-9	R-10	R-11	W-1	W-2			
Vapour Fraction	0.0000	0.2485	0.8871	0.0000	0.0000			0.0000
Temperature (C)	35.00	0.1232	0.1219	25.00 *	5.000 *			5.000 *
Pressure (kPa)	1018	293.9	293.9 *	110.0 *	110.0			110.0
Molar Flow (kgmole/h)	1.942	1.942	1.942	13.88	13.88			13.88
Mass Flow (kg/h)	198.1	198.1	198.1	250.0 *	250.0			250.0
Liquid Volume Flow (m3/h)	0.1596	0.1596	0.1596	0.2505	0.2505			0.2505
Heat Flow (kJ/h)	-1.774e+006	-1.774e+006	-1.749e+006	-3.972e+006	-3.994e+006			-3.994e+006

Aspen Technology Inc.

Aspen HYSYS Version 7.3 (25.0.0.7336)

Page 1 of 2

Licensed to: KOREA MARITIME UNIVERSITY

* Specified by user.

aspentech

KOREA MARITIME UNIVERSITY
Burlington, MA
USA

Case Name:금속연전시 스템설계_농축율 60%_최종 HSC

Unit Set:SI

Date/Time:Thu Apr 18 14:04:35 2013

Workbook: Case (Main) (continued)

Material Streams (continued)

Fluid Pkg:All

Name	W-3				
Vapour Fraction	1.0000				
Temperature (C)	5.000				
Pressure (kPa)	110.0				
Molar Flow (kgmole/h)	0.0000				
Mass Flow (kg/h)	0.0000				
Liquid Volume Flow (m3/h)	0.0000				
Heat Flow (kJ/h)	0.0000				

KOREA MARITIME UNIVERSITY

1945

대한해양대학교

Aspen Technology Inc.

Aspen HYSYS Version 7.3 (25.0.0.7336)

Page 2 of 2

Licensed to: KOREA MARITIME UNIVERSITY

* Specified by user.

Table 6 Waste-water FC system (Design capacity 70 %)

1	 KOREA MARITIME UNIVERSITY Burlington, MA USA		Case Name: 금속연전시 시스템 설계_농축물 70%_최종 HSC				
2			Unit Set: SI				
3			Date/Time: Thu Apr 18 14:06:29 2013				
4							
5							
6							
7							
8							
9	Workbook: Case (Main)						
10							
11	Material Streams						Fluid Pkg: All
12	Name	A-1	A-2	A-3	A-4	C-1	
13	Vapour Fraction	1.0000	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	
14	Temperature (C)	25.00 *	35.15	1.000 *	1.000	50.00 *	
15	Pressure (kPa)	110.0 *	120.0 *	120.0	120.0	110.0 *	
16	Molar Flow (kgmole/h)	0.2760	0.2760	0.2760	0.0000	278.7	
17	Mass Flow (kg/h)	7.990 *	7.990	7.990	0.0000	1.116e+004	
18	Liquid Volume Flow (m3/h)	9.084e-003	9.084e-003	9.084e-003	0.0000	10.30	
19	Heat Flow (kJ/h)	-2.505	77.82	-192.7	0.0000	-1.021e+008	
20	Name	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6	
21	Vapour Fraction	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
22	Temperature (C)	50.01	50.01	45.00 *	45.00 *	50.01	
23	Pressure (kPa)	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	
24	Molar Flow (kgmole/h)	278.7	278.7	278.7	278.7	0.0000	
25	Mass Flow (kg/h)	1.116e+004	1.116e+004	1.116e+004	1.116e+004	0.0000 *	
26	Liquid Volume Flow (m3/h)	10.30	10.30	10.30	10.30	0.0000	
27	Heat Flow (kJ/h)	-1.021e+008	-1.021e+008	-1.022e+008	-1.022e+008	0.0000	
28	Name	C-7	C-8	F-1	F-2	F-3	
29	Vapour Fraction	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
30	Temperature (C)	45.00 *	50.00	-20.00 *	-20.00	-20.00 *	
31	Pressure (kPa)	210.0 *	110.0	110.0 *	210.0	210.0 *	
32	Molar Flow (kgmole/h)	0.0000	0.0000	309.9	309.9	249.7	
33	Mass Flow (kg/h)	0.0000 *	0.0000	1.241e+004	1.241e+004	9997 *	
34	Liquid Volume Flow (m3/h)	0.0000	0.0000	11.46	11.46	9.229	
35	Heat Flow (kJ/h)	0.0000	0.0000	-1.159e+008	-1.159e+008	-9.341e+007	
36	Name	F-4	F-5	F-6	F-7	F-8	
37	Vapour Fraction	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
38	Temperature (C)	-18.04	-18.74	-16.72	-20.00	-16.68	
39	Pressure (kPa)	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	
40	Molar Flow (kgmole/h)	249.7	249.7	309.9	60.24	60.24	
41	Mass Flow (kg/h)	9997	9997	1.241e+004	2412 *	2412	
42	Liquid Volume Flow (m3/h)	9.229	9.229	11.46	2.227	2.227	
43	Heat Flow (kJ/h)	-9.338e+007	-9.332e+007	-1.159e+008	-2.254e+007	-2.251e+007	
44	Name	F-9	F-10	R-1	R-2	R-3	
45	Vapour Fraction	0.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	
46	Temperature (C)	-16.64	-20.00	15.98	5.209	56.49	
47	Pressure (kPa)	210.0	110.0	293.9 *	293.9	1018	
48	Molar Flow (kgmole/h)	60.24	0.0000	6.241	8.357	8.357	
49	Mass Flow (kg/h)	2412	0.0000	636.7	852.7 *	852.7	
50	Liquid Volume Flow (m3/h)	2.227	0.0000	0.5128	0.6867	0.6867	
51	Heat Flow (kJ/h)	-2.251e+007	0.0000	-5.598e+006	-7.504e+006	-7.474e+006	
52	Name	R-4	R-5	R-6	R-7	R-8	
53	Vapour Fraction	0.0000 *	0.0000	0.0000 *	0.2069	1.0000 *	
54	Temperature (C)	35.00 *	35.00	5.000 *	-30.00	-30.00 *	
55	Pressure (kPa)	1018	1018	1018 *	84.83	84.83	
56	Molar Flow (kgmole/h)	8.357	6.241	6.241	6.241	6.241	
57	Mass Flow (kg/h)	852.7	636.7	636.7	636.7	636.7	
58	Liquid Volume Flow (m3/h)	0.6867	0.5128	0.5128	0.5128	0.5128	
59	Heat Flow (kJ/h)	-7.637e+006	-5.703e+006	-5.730e+006	-5.730e+006	-5.619e+006	
60	Name	R-9	R-10	R-11	W-1	W-2	
61	Vapour Fraction	0.0000	0.2495	0.8867	0.0000	0.0000	
62	Temperature (C)	35.00	0.1232	0.1240	25.00 *	5.000 *	
63	Pressure (kPa)	1018	293.9	293.9 *	110.0 *	110.0	
64	Molar Flow (kgmole/h)	2.117	2.117	2.117	13.88	13.88	
65	Mass Flow (kg/h)	216.0	216.0	216.0	250.0 *	250.0	
66	Liquid Volume Flow (m3/h)	0.1739	0.1739	0.1739	0.2505	0.2505	
67	Heat Flow (kJ/h)	-1.934e+006	-1.934e+006	-1.906e+006	-3.972e+006	-3.994e+006	
68							
69	Aspen Technology Inc.		Aspen HYSYS Version 7.3 (25.0.0.7336)			Page 1 of 2	
	Licensed to: KOREA MARITIME UNIVERSITY					* Specified by user.	

aspentech

KOREA MARITIME UNIVERSITY
Burlington, MA
USA

Case Name:금속운전시 시스템설계_농축율 70%_최종 HSC

Unit Set:SI

Date/Time:Thu Apr 18 14:06:29 2013

Workbook: Case (Main) (continued)

Material Streams (continued)

Fluid Pkg:

All

Name	W-3				
Vapour Fraction	1.0000				
Temperature (C)	5.000				
Pressure (kPa)	110.0				
Molar Flow (kgmole/h)	0.0000				
Mass Flow (kg/h)	0.0000				
Liquid Volume Flow (m3/h)	0.0000				
Heat Flow (kJ/h)	0.0000				

KOREA MARITIME UNIVERSITY

1945

해양대학교

Aspen Technology Inc.

Aspen HYSYS Version 7.3 (25.0.0.7336)

Page 2 of 2

Licensed to: KOREA MARITIME UNIVERSITY

* Specified by user

Licensed to: KOREA MARITIME UNIVERSITY

* Specified by user.

Table 7 Waste-water FC system (Design capacity 80 %)

1	 KOREA MARITIME UNIVERSITY Burlington, MA USA		Case Name: 금속유전시스템설계_농축물 80% 최종 HSC				
2			Unit Set: SI				
3			Date/Time: Thu Apr 18 14:07:47 2013				
4							
5							
6							
7							
8	Workbook: Case (Main)						
9							
10	Material Streams				Fluid Pkg:	All	
11	Name	A-1	A-2	A-3	A-4	C-1	
12	Vapour Fraction	1.0000	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	
13	Temperature (C)	25.00 *	35.15	1.000 *	1.000	50.00 *	
14	Pressure (kPa)	110.0 *	120.0 *	120.0	120.0	110.0 *	
15	Molar Flow (kgmole/h)	0.3154	0.3154	0.3154	0.0000	301.5	
16	Mass Flow (kg/h)	9.130 *	9.130	9.130	0.0000	1.207e+004	
17	Liquid Volume Flow (m3/h)	1.038e-002	1.038e-002	1.038e-002	0.0000	11.15	
18	Heat Flow (kJ/h)	-2.863	88.92	-220.2	0.0000	-1.104e+008	
19	Name	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6	
20	Vapour Fraction	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
21	Temperature (C)	50.01	50.01	45.00 *	45.00 *	50.01	
22	Pressure (kPa)	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	
23	Molar Flow (kgmole/h)	301.5	301.5	301.5	301.5	0.0000	
24	Mass Flow (kg/h)	1.207e+004	1.207e+004	1.207e+004	1.207e+004	0.0000 *	
25	Liquid Volume Flow (m3/h)	11.15	11.15	11.15	11.15	0.0000	
26	Heat Flow (kJ/h)	-1.104e+008	-1.104e+008	-1.106e+008	-1.106e+008	0.0000	
27	Name	C-7	C-8	F-1	F-2	F-3	
28	Vapour Fraction	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
29	Temperature (C)	45.00 *	50.00	-20.00 *	-20.00	-20.00 *	
30	Pressure (kPa)	210.0 *	110.0	110.0 *	210.0	210.0 *	
31	Molar Flow (kgmole/h)	0.0000	0.0000	335.5	335.5	275.1	
32	Mass Flow (kg/h)	0.0000 *	0.0000	1.343e+004	1.343e+004	1.102e+004 *	
33	Liquid Volume Flow (m3/h)	0.0000	0.0000	12.40	12.40	10.17	
34	Heat Flow (kJ/h)	0.0000	0.0000	-1.255e+008	-1.255e+008	-1.029e+008	
35	Name	F-4	F-5	F-6	F-7	F-8	
36	Vapour Fraction	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
37	Temperature (C)	-19.13	-16.74	-16.72	-20.00	-16.69	
38	Pressure (kPa)	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	
39	Molar Flow (kgmole/h)	275.1	275.1	335.5	60.35	60.35	
40	Mass Flow (kg/h)	1.102e+004	1.102e+004	1.343e+004	2416 *	2416	
41	Liquid Volume Flow (m3/h)	10.17	10.17	12.40	2.231	2.231	
42	Heat Flow (kJ/h)	-1.029e+008	-1.028e+008	-1.254e+008	-2.258e+007	-2.258e+007	
43	Name	F-9	F-10	R-1	R-2	R-3	
44	Vapour Fraction	0.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	
45	Temperature (C)	-16.64	-20.00	15.99	5.244	56.52	
46	Pressure (kPa)	210.0	110.0	293.9 *	293.9	1018	
47	Molar Flow (kgmole/h)	60.35	0.0000	6.753	9.042	9.042	
48	Mass Flow (kg/h)	2416	0.0000	689.0	922.5 *	922.5	
49	Liquid Volume Flow (m3/h)	2.231	0.0000	0.5549	0.7430	0.7430	
50	Heat Flow (kJ/h)	-2.258e+007	0.0000	-6.057e+006	-8.119e+006	-8.086e+006	
51	Name	R-4	R-5	R-6	R-7	R-8	
52	Vapour Fraction	0.0000 *	0.0000	0.0000 *	0.2089	1.0000 *	
53	Temperature (C)	35.00 *	35.00	5.000 *	-30.00	-30.00 *	
54	Pressure (kPa)	1018	1018	1018 *	84.83	84.83	
55	Molar Flow (kgmole/h)	9.042	6.753	6.753	6.753	6.753	
56	Mass Flow (kg/h)	922.5	689.0	689.0	689.0	689.0	
57	Liquid Volume Flow (m3/h)	0.7430	0.5549	0.5549	0.5549	0.5549	
58	Heat Flow (kJ/h)	-8.262e+006	-6.171e+006	-6.201e+006	-6.201e+006	-6.081e+006	
59	Name	R-9	R-10	R-11	W-1	W-2	
60	Vapour Fraction	0.0000	0.2495	0.8871	0.0000	0.0000	
61	Temperature (C)	35.00	0.1232	0.1231	25.00 *	5.000 *	
62	Pressure (kPa)	1018	293.9	293.9 *	110.0 *	110.0	
63	Molar Flow (kgmole/h)	2.289	2.289	2.289	13.88	13.88	
64	Mass Flow (kg/h)	233.5	233.5	233.5	250.0 *	250.0	
65	Liquid Volume Flow (m3/h)	0.1881	0.1881	0.1881	0.2505	0.2505	
66	Heat Flow (kJ/h)	-2.091e+006	-2.091e+006	-2.061e+006	-3.972e+006	-3.994e+006	
67							
68							
69	Aspen Technology Inc.		Aspen HYSYS Version 7.3 (25.0.0.7336)			Page 1 of 2	
	Licensed to: KOREA MARITIME UNIVERSITY		* Specified by user.				

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

24

25

26

27

28

29

30

31

32

33

34

35

36

37

38

39

40

41

42

43

44

45

46

47

48

49

50

51

52

53

54

55

56

57

58

59

60

61

62

63

64

65

66

67

68

69

Licensed to: KOREA MARITIME UNIVERSITY

* Specified by user...

Table 8 Waste-water FC system (Design capacity 90 %)

1	 KOREA MARITIME UNIVERSITY Burlington, MA USA		Case Name: 금속연진시 시스템 설계_농축율 90%_최종 HSC				
2			Unit Set: SI				
3			Date/Time: Thu Apr 18 14:09:05 2013				
4							
5	Workbook: Case (Main)						
6							
7							
8							
9							
10	Material Streams				Fluid Pkg:	All	
11	Name	A-1	A-2	A-3	A-4	C-1	
12	Vapour Fraction	1.0000	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	
13	Temperature (C)	25.00 *	35.15	1.000 *	1.000	50.00	
14	Pressure (kPa)	110.0 *	120.0 *	120.0	120.0	110.0	
15	Molar Flow (kgmole/h)	0.3547	0.3547	0.3547	0.0000	324.4	
16	Mass Flow (kg/h)	10.27 *	10.27	10.27	0.0000	1.299e+004	
17	Liquid Volume Flow (m3/h)	1.168e-002	1.168e-002	1.168e-002	0.0000	11.99	
18	Heat Flow (kJ/h)	-3.220	100.0	-247.7	0.0000	-1.188e+008	
19	Name	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6	
20	Vapour Fraction	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
21	Temperature (C)	50.01	50.01	45.00 *	45.00 *	50.01	
22	Pressure (kPa)	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	
23	Molar Flow (kgmole/h)	324.4	324.4	324.4	324.4	0.0000	
24	Mass Flow (kg/h)	1.299e+004	1.299e+004	1.299e+004	1.299e+004	0.0000	
25	Liquid Volume Flow (m3/h)	11.99	11.99	11.99	11.99	0.0000	
26	Heat Flow (kJ/h)	-1.188e+008	-1.188e+008	-1.190e+008	-1.190e+008	0.0000	
27	Name	C-7	C-8	F-1	F-2	F-3	
28	Vapour Fraction	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
29	Temperature (C)	45.00 *	50.00	-20.00 *	-20.00	-20.00	
30	Pressure (kPa)	210.0 *	110.0	110.0 *	210.0	210.0	
31	Molar Flow (kgmole/h)	0.0000	0.0000	361.1	361.1	300.6	
32	Mass Flow (kg/h)	0.0000 *	0.0000	1.448e+004	1.448e+004	1.204e+004	
33	Liquid Volume Flow (m3/h)	0.0000	0.0000	13.35	13.35	11.11	
34	Heat Flow (kJ/h)	0.0000	0.0000	-1.351e+008	-1.351e+008	-1.125e+008	
35	Name	F-4	F-5	F-6	F-7	F-8	
36	Vapour Fraction	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
37	Temperature (C)	-19.20	-16.74	-16.72	-20.00	-16.69	
38	Pressure (kPa)	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	
39	Molar Flow (kgmole/h)	300.6	300.6	361.1	60.46	60.46	
40	Mass Flow (kg/h)	1.204e+004	1.204e+004	1.448e+004	2421 *	2421	
41	Liquid Volume Flow (m3/h)	11.11	11.11	13.35	2.235	2.235	
42	Heat Flow (kJ/h)	-1.124e+008	-1.124e+008	-1.350e+008	-2.262e+007	-2.260e+007	
43	Name	F-9	F-10	R-1	R-2	R-3	
44	Vapour Fraction	0.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	
45	Temperature (C)	-16.64	-20.00	15.99	5.237	56.52	
46	Pressure (kPa)	210.0	110.0	293.9 *	293.9	1018	
47	Molar Flow (kgmole/h)	60.46	0.0000	7.265	9.728	9.728	
48	Mass Flow (kg/h)	2421	0.0000	741.3	992.5 *	992.5	
49	Liquid Volume Flow (m3/h)	2.235	0.0000	0.5970	0.7993	0.7993	
50	Heat Flow (kJ/h)	-2.260e+007	0.0000	-6.517e+006	-8.735e+006	-8.699e+006	
51	Name	R-4	R-5	R-6	R-7	R-8	
52	Vapour Fraction	0.0000 *	0.0000	0.0000 *	0.2089	1.0000	
53	Temperature (C)	35.00 *	35.00	5.000 *	-30.00	-30.00	
54	Pressure (kPa)	1018	1018	1018 *	84.83	84.83	
55	Molar Flow (kgmole/h)	9.728	7.265	7.265	7.265	7.265	
56	Mass Flow (kg/h)	992.5	741.3	741.3	741.3	741.3	
57	Liquid Volume Flow (m3/h)	0.7993	0.5970	0.5970	0.5970	0.5970	
58	Heat Flow (kJ/h)	-8.889e+006	-6.839e+006	-6.671e+006	-6.671e+006	-6.542e+006	
59	Name	R-9	R-10	R-11	W-1	W-2	
60	Vapour Fraction	0.0000	0.2495	0.8870	0.0000	0.0000	
61	Temperature (C)	35.00	0.1232	0.1226	25.00 *	5.000	
62	Pressure (kPa)	1018	293.9	293.9 *	110.0 *	110.0	
63	Molar Flow (kgmole/h)	2.463	2.463	2.463	13.88	13.88	
64	Mass Flow (kg/h)	251.2	251.2	251.2	250.0 *	250.0	
65	Liquid Volume Flow (m3/h)	0.2023	0.2023	0.2023	0.2505	0.2505	
66	Heat Flow (kJ/h)	-2.250e+006	-2.250e+006	-2.218e+006	-3.972e+006	-3.994e+006	
67							
68							
69	Aspen Technology Inc.		Aspen HYSYS Version 7.3 (25.0.0.7336)			Page 1 of 2	
	Licensed to: KOREA MARITIME UNIVERSITY					* Specified by user.	

aspentech

KOREA MARITIME UNIVERSITY
Burlington, MA
USA

Case Name:

금속안전시스템설계_동해물 90%_최종 HSC

Unit Set:

SI

Date/Time:

Thu Apr 18 14:09:05 2013

Workbook: Case (Main) (continued)

Material Streams (continued)

Fluid Pkg:

All

Name	W-3				
Vapour Fraction	1.0000				
Temperature (C)	5.000				
Pressure (kPa)	110.0				
Molar Flow (kgmole/h)	0.0000				
Mass Flow (kg/h)	0.0000				
Liquid Volume Flow (m3/h)	0.0000				
Heat Flow (kJ/h)	0.0000				

KOREA MARITIME UNIVERSITY

1945

대한해양대학교

Aspen Technology Inc.

Aspen HYSYS Version 7.3 (25.0.0.7336)

Page 2 of 2

Licensed to: KOREA MARITIME UNIVERSITY

* Specified by user.

Table 9 Fresh water supply pump in accordance with design capacity

aspen^{tech}

KOREA MARITIME UNIVERSIT

Burlington, MA

USA

Case Name:

청수배수펌 프 hsc

Unit Set:

SI

Date/Time:

Sat Feb 23 21:07:52 2013

Workbook: Case (Main)

Material Streams

Fluid Pkg:

All

Name	1	2	3	4	5
Vapour Fraction	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Temperature (C)	1.000 *	1.008	1.000 *	1.008	1.000
Pressure (kPa)	110.0 *	210.0	110.0 *	210.0	110.0
Molar Flow (kgmole/h)	404.3	404.3	402.0	402.0	399.7
Mass Flow (kg/h)	7284 *	7284	7242 *	7242	7200
Liquid Volume Flow (m3/h)	7.299	7.299	7.257	7.257	7.215
Heat Flow (kJ/h)	-1.165e+008	-1.165e+008	-1.159e+008	-1.159e+008	-1.151e+008

Name	6	7	8	9	10
Vapour Fraction	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Temperature (C)	1.008	1.000 *	1.008	1.000 *	1.008
Pressure (kPa)	210.0	110.0 *	210.0	110.0 *	210.0
Molar Flow (kgmole/h)	399.7	397.3	397.3	395.0	395.0
Mass Flow (kg/h)	7200	7158 *	7158	7116 *	7116
Liquid Volume Flow (m3/h)	7.215	7.172	7.172	7.130	7.130
Heat Flow (kJ/h)	-1.151e+008	-1.145e+008	-1.145e+008	-1.138e+008	-1.138e+008

Energy Streams

Fluid Pkg:

All

Name	Q-104	Q-101	Q-102	Q-103	Q-105
Heat Flow (kJ/h)	931.0	947.4	941.9	936.5	925.5

Aspen Technology Inc.

Aspen HYSYS Version 7.3 (25.0.0.7336)

Page 1 of 1

Licensed to: KOREA MARITIME UNIVERSIT

* Specified by user

Table 10 Waste-water discharge pump in accordance with design capacity

aspen^{tech}

KOREA MARITIME UNIVERSITY

Burlington, MA

USA

Case Name:폐수배출펌프 hsc

Unit Set:SI

Date/Time:Sat Feb 23 21:18:20 2013

Workbook: Case (Main)

Material Streams

Fluid Pkg:

All

Name	7	8	3	4	1
Vapour Fraction	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Temperature (C)	1.000 *	1.008	1.000 *	1.008	1.000
Pressure (kPa)	110.0 *	210.0	110.0 *	210.0	110.0
Molar Flow (kgmole/h)	166.5	166.5	333.1	333.1	416.3
Mass Flow (kg/h)	3000 *	3000	6000 *	6000	7500
Liquid Volume Flow (m3/h)	3.006	3.006	6.012	6.012	7.515
Heat Flow (kJ/h)	-4.797e+007	-4.797e+007	-9.595e+007	-9.595e+007	-1.199e+008

2

5

6

10

9

Name	2	5	6	10	9
Vapour Fraction	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Temperature (C)	1.008	1.000 *	1.008	1.008	1.000
Pressure (kPa)	210.0	110.0 *	210.0	210.0	110.0
Molar Flow (kgmole/h)	416.3	249.8	249.8	83.26	83.26
Mass Flow (kg/h)	7500	4500 *	4500	1500	1500
Liquid Volume Flow (m3/h)	7.515	4.509	4.509	1.503	1.503
Heat Flow (kJ/h)	-1.199e+008	-7.196e+007	-7.196e+007	-2.399e+007	-2.399e+007

Energy Streams

Fluid Pkg:

All

Name	Q-104	Q-101	Q-102	Q-103	Q-105
Heat Flow (kJ/h)	390.2	975.5	780.4	585.3	195.1

Aspen Technology Inc.

Aspen HYSYS Version 7.3 (25.0.0.7336)

Page 1 of 1

* Specified by user.

Table 11 Warm brain supply pump in accordance with design capacity