## 工學碩士 學位論文

# PIV에 의한 밸브가 있는 배관내 아이스슬러리의 유동현상 및 압력강하 특성에 관한 실험적 연구

A PIV Visual Study on the Fluid Characteristics and Pressure Drop of the Ice Slurry Flow in a Horizontal Circular Tube fitted with Valve

指導教授 吳 喆

2006年 2月

韓國海洋大學校 大學院

機關시스템工學科

孫龍吉

- 主審 金 京 根 印
- 副審 尹 錫 勳 印

## 副審 吳 喆 印

## 2006年 1月 9日

## 韓國海洋大學校 大學院

## 機關시스템工學科孫龍吉

Abstract ·····	v	
사용기호	vii	

제 ]	장사	론	1
1.1	연구의	배경	1
1.2	종래의	연구와 목적	3

제 2 장 실험장치 및 실험방법
2.1 PIV 시스템의 구성5
2.1.1 조명 및 추적 입자
2.1.2 영상 입력 및 저장 장치
2.2 균일 유입 속도 확인8
2.3 실험장치10
2.4 실험방법 및 실험범위16

제 3 장 실험결과 및 고찰	•19
3.1 VOR%에 따른 유동 특성	•• 19
3.2 유속에 따른 유동 특성	· 40
3.3 IPF 변화에 따른 유동 특성	·53

3.4 압력강하 특성6	0
제 4 장 결 론6	;9
참 고 문 헌	0
감사의 글7;	3

## An experimental study on ice slurry fluid characteristics and pressure drop characteristics in along a horizontal circular tube with valve by PIV

### KIL-YONG, SON

Department of Marine Engineering System Graduate School of Korea Maritime University

### Abstract

Recently, the government introduced the thermal storage system for the reduction of the electric power load. Ice storage system have become popular because they can relieve a significant portion of the peak demand of electricity during the daytime of summer.

Specially, attention is being given to dynamic type ice making technology because it overcomes a decreasing of the melting performance and an increasing of the thermal resistance on the ice layer in static type ice making technology. Thus the dynamic type ice making system has more excellent characteristics than static type as follows : ice making and melting, follow of load and transport of thermal etc. But there are several problems to be solved for direct transportation such as fluid characteristics of two-phase(solid and liquid) flow, decreasing of fraction in pipeline and development of surfactant. The fundamental research on the flowing characteristics for aspects of ice slurry particles is necessary. Some researchers, such as that on horizontal pipes, vertical pipes and various pipes, have been carried out, but closer examination is urgent.

This study experimented to understand the effect of transporting ice slurry through in pipe with valve. And at this experiment it used ethylene glycol-water solution and a concentration is 20wt%. The experimental apparatus was constructed of ice slurry generation tank, turbo flow meter, manometers for differential pressure measuring, PIV system for flow pattern measuring, illumination and along a horizontal circular tube with valve as test section. The experiments were carried out under various conditions, with velocity of fluid at the entry ranging from 0.5 to 1.5 m/s and concentration of IPF is 20%, 30%. Also valve open rate is 50%, 75%, 100%. 사용기호

## Alphabet

IPF	: 얼음의 체적 분율	[%]
$\triangle P$	: 압력강하	[kPa]
U	: 유속	[m/s]
VOR	: Valve Open Rate	[%]

## Greeks symbol

ρ	: 밀도	$[kg/m^3]$
'		8

## Subscript

- L : 수용액
- m : 평균
- s : 아이스슬러리
- i : 얼음

### 제1장서론

#### 1.1 연구의 배경

유한한 에너지 자원과 점차로 심각해져 가는 지구의 환경문제를 생각해 볼 때 에너지 절약과 효율적인 사용이 요구되고 있다. 특히, 최근 지구 온난 화 문제나 여름철 주야간의 전력 수요 격차가 커지는 문제 등이 대두되면서 산업 전반에 걸쳐 환경보전에 효과적이고 에너지를 효율적으로 이용할 수 있는 기술 개발이 이루어지고 있다.

빙축열 시스템도 이러한 시대적인 조류에 편승하여 주목 받고 있으며, 근 래 우리나라에서도 중·대형 건물에 가스식·축냉식 설비 설치가 의무화 되 고 있기도 하다.<sup>[1]~[3]</sup>

최근 관심을 모으고 있는 아이스슬러리형 빙축열 시스템은, 제빙기를 이 용하여 물 또는 수용액에 수십 µm에서 수 mm정도의 작은 얼음 입자가 섞인 아이스슬러리를 연속적으로 제빙하고, 이를 축열조에 저장하였다가 이용하 는 방식의 빙축열 시스템이다. 이 방식은 제빙과정에서 두꺼운 얼음층이 형 성되지 않아 제빙효율이 높으며, 얼음 입자가 작아 부하 대응 능력이 우수 하다는 장점을 가지고 있다.<sup>[4]~[5]</sup> 또한 필요한 경우 아이스슬러리를 일반 배 관을 통하여 직접 수송할 수 있는데, 이 경우 단위 유량당 냉열수송량이 커 서 건물의 냉방은 물론 지역 냉난방 시스템, 그리고 각종 산업용 냉각 시스 템에 효과적으로 활용될 수 있다.<sup>[6]</sup> 물 또는 수용액에 미세한 얼음입자가 섞 인 아이스슬러리는 해빙속도가 빠르기 때문에 부하추종성이 우수하며, 특히 배관을 통해 직접 수송할 경우 단위 유량당 냉열수송량이 커서 각종 냉방· 냉각시스템에 효과적으로 활용할 수 있는 우수한 2차 냉매로 알려져 있다.<sup>[1]</sup> 또한 아이스슬러리를 수송매체로 이용한 냉열시스템에서는 냉수의 경우에 비해 높은 열 수송능력을 가지고 있으며, 슬러리를 이용하여 최종 공급 온

- 1 -

도를 낮춤으로써 저온 공조가 가능하기 때문에 에너지 절약에도 효과적이 다. 뿐만 아니라 아이스슬러리는 얼음에서 물로의 사연화시 발생하는 융해 잠열과 융해 후의 현열도 이용할 수 있기 때문에 시스템의 냉열 수송밀도를 높여 배관 구경의 축소, 설비의 소형화, 설비비의 절감을 도모할 수 있으며, 유량이나 관경의 감소로 열 손실 및 수송 동력의 절감 또한 도모된다.<sup>[7]</sup>

그러나 아이스슬러리의 수송을 이용한 냉방설비로는 국내에서는 아직 실 용화 되지 않은 실정이다. 국외의 경우에는 일본, 캐나다, 미국 등지에서 점 차적으로 증가하고 있는 실정이다.<sup>[8]~[9]</sup> 이와 같이 아이스슬러리를 배관을 통해서 직접 수송하고자 할 때는 해결해야 할 문제점이 많이 있으나, 그중 가장 기본적인 것은 관내 밀폐 없이 아이스슬러리를 안정적으로 수송하는 문제로 관내에서 슬러리가 미치는 영향에 대해 완전히 파악하지 못하고 있 기 때문에, 관내 유동 슬러리의 IPF를 높일 수 없는 등 해결해야 할 많은 문제를 안고 있는 실정이다. 또한 아이스슬러리는 물 또는 수용액에 작은 얼음 입자가 섞인 고액 2상류이므로, 배관 내 압력강하 등 아이스슬러리의 유동 특성을 조사하는 것이 필요하다. 고액 2상류에 대한 연구는 주로 액상 보다 무거운 고상의 입자가 섞인 CWM(coal-water mixture)과 같은 슬러리 에 대해 이루어져 왔으며, 아이스슬러리에 대한 연구는 상대적으로 부족한 실정이다.<sup>[10]</sup>

따라서 아이스슬러리를 일반 배관을 통해 직접 수송할 경우에는 얼음입자 가 응집하여 배관을 밀폐시키는 현상이 발생하지 않도록 하는 것이 중요하 며, 이외에 배관 내 압력강하 등 유동특성과 열전달 특성에 관한 실험적 연 구가 더욱 필요한 것으로 알려져 있다.

따라서 본 연구에서는 배관 내 밸브의 개폐 정도에 따른 밸브 주변에서의 아이스슬러리의 유동 특성 및 압력강하 특성을 비교 관찰하여 배관을 통한 아이스슬러리 유동 시 밀폐 현상을 줄이기 위한 기초 자료를 찾고자 하였 다.

- 2 -

#### 1.2 종래의 연구와 목적

최근 아이스슬러리에 대한 관심이 높아지면서 우리나라뿐만 아니라 해외 에서도 아이스슬러리에 대한 연구는 계속 수행되어 오고 있으며 아이스슬러 리의 유동특성에 대한 연구는 유동형태의 관찰과 함께 배관 내 압력강하 특 성을 분석하는 것으로, 1980년대 중반부터 관련된 연구가 본격적으로 수행 되어 왔다.

아이스슬러리를 냉각매체로 활용하기 위해서는 아이스슬러리의 유동이 규 명되어야 한다. 유동특성에 관한 연구는 주로 소구경 배관 내에서의 아이스 슬러리가 서로 응집하지 않고 안정적으로 흐르는지 여부와, 압력강하 특성 이 단상유동인 경우와 어떻게 다른지를 살펴보는 것으로, 국내외에서 관련 된 많은 연구가 수행되고 있다. 또한 이러한 아이스슬러리에 대한 열전달 특성에 대해서도 몇몇 연구가 발표되고 있다.

지금까지 주로 연구되고 있는 내용으로는 수평관내에서의 유동 특성으로 써 Shirakashi et al.<sup>[11]-[12]</sup>은 눈의 이송을 위한 실용적인 연구를 통해 설수 (snow-water) 2상류의 유동형태와 압력강하특성을 조사한바 있으며, Thkahashi ea al.<sup>[13]</sup>은 수평관에서 아이스슬러리의 유동 및 압력강하 특성과 속도분포를 실험적으로 알아보았다. 또한 Knodel et al.<sup>[14]</sup> 등은 수평관에서 아이스슬러리 유동 시 압력손실은 점차 감소하여 IPF 8~10%에서는 플러그 흐름이 된다고 보고하였고, 이<sup>[6]~[15]</sup> 등은 수직 상승관 및 수직 하향관에서 의 유동상태를 관찰하였는데 수직 하향관에서는 비교적 안정적이었으나 수 직 상승관에서는 불안정하였으며, 또한 유량이 적고 IPF가 낮은 경우에 유 동이 불안정하다고 보고하였다. 또 Masashi et al<sup>[16]</sup> 은 각종 배관 형상에 의한 각형의 아이스슬러리를 수송함에 있어 오리피스부에서는 물과 비교하 여 압력손실이 전반적으로 커진다고 하였으나, 확관부에서는 거의 물과 비 슷하고, 축소부에서는 평균유속의 증대가 폐색의 위험요소가 된다고 보고하 였다. 그리고 Park et al. <sup>[17]-[20]</sup>은 직관과 수평 및 수직 분기관, 그리고 곡 관부에서의 아이스슬러리 유동에 따른 영향을 보고하였다. 그리고 김<sup>[21]</sup> 등 은 다양한 각도의 경사관에 대해 실험하였다. 이 밖에도 아이스슬러리의 열 전달 특성에 관한 연구가 진행되고 있다. 이러한 연구들에는 Inaba et al.<sup>[22]</sup> 은 이중관식 열교환기 내에서 저 유량(< 600kg/m<sup>2</sup>s)인 경우의 아이스슬러 리 융해거동과 열전달량에 대한 실험적 연구를 수행하였고, 새로운<sup>[23]</sup> 다이 나믹형 제빙법에 의해 유동하는 수용액에 의한 냉각관내 연속 제빙을 제안 했고, 시험 유체로는 폴리글리콜 수용액을 사용하여 다양한 시험부내 평균 유속, 수용액 농도 및 시험부 벽면 온도에 의한 관내 제빙특성에 관하여 실 험적으로 검토 하였다. 또한 Kawanami et al.<sup>[24]</sup> 등은 슬러리아이스를 운송 시에 융해 열전달 거동에 대해 기초 자료를 얻는 것을 목적으로 상하부에 가열면이 있는 수평구형탱크를 시험 유로로써 이용하여 슬러리아이스의 응 해 열전달 거동을 실험적으로 다루었다. 그리고 이<sup>[25]</sup>등은 소구경 배관을 갖 는 이중관식 열교환기에서 상용화된 제빙기를 통해 제빙된 아이스슬러리의 열전달 특성을 실험적으로 살펴보았다.

이와 같이 지금까지의 대부분의 연구는 수평관, 수직관, 경사관, 곡관부 등과 같이 배관내에서 아이스슬러리의 유동특성에 관한 연구와 아직은 미흡 하지만 아이스슬러리의 열전달 특성에 관한 연구가 대부분이며, 밸브나 혹 은 돌출부가 있는 배관에서의 아이스슬러리의 유동특성에 대한 연구는 매우 부족한 실정이다.

따라서 본 연구는 평균유속 및 밸브 개폐율(VOR% : Valve Open Rate %), 공급 IPF를 변화시킴에 따라 밸브가 있는 배관 내에서 밸브 주변에서 의 아이스슬러리 유동을 PIV 계측 장비를 이용하여 관찰하고 이에 따른 압 력강하 특성 및 IPF 변화에 대해 정리하였다. 이는 아이스슬러리 수송시스 템의 설계 시 중요한 기초 자료가 될 것이라 생각된다.

### 제 2 장 실험장치 및 실험방법

#### 2.1 PIV 시스템의 구성

2.1.1 조명 및 추적 입자

PIV 계측장치는 대상 유동장에 입자를 고르게 분포시키고 레이저 등의 강한 2차원의 광원을 계측 단면을 조사하여 가시화하고 촬영된 영상에 대해 디지털 영상 정보처리기법 등을 이용하여 전유동장에 걸친 속도 벡터를 얻 는 기법이다. 그러나 본 실험에서는 에칠렌글리콜수용액(이하 EG라 한다)을 펌프에 의해 순환시켰을 때 EG 수용액과 아이스슬러리의 구분이 잘 되지 않아 수용액 안에 청록색과 적색의 색소를 혼합, 주입하여 PIV 계측장비로 아이스슬러리를 촬영하였다. 우선 영상처리를 위해서는 계측단면으로의 적 당한 조명의 공급이 절대적으로 필요하다. 즉, 넓은 해석영역을 가지는 유동 장에서 깨끗한 영상을 확보하기 위해서는 광원이 필요하며, 나아가 이 조명 은 2차원의 시트 라이트(sheet light)를 제공하여야 한다. 이 실험에서는 이 를 위하여 정밀한 PIV 시스템이 채택되었으며, 광원으로는 밸브 전 후방에 할로겐 Illuminator를 광원으로써 실험부에 조사하였다.

PIV는 유동장에 분포된 입자의 미소시간 간격의 영상을 컴퓨터로 분석하 여 속도벡터에 대한 데이터를 얻는 방법이므로 사용되는 입자의 선별기준은 유체와 입자운동사이의 차이를 최소화, 또는 없애기 위해서 유동 입자의 유 체역학적 특성을 고려하는 것이 필요하다. 일반적으로 추적 입자는 가시성 이 좋아야 하고 입자와 유체와의 밀도차가 적어 유동장에 잘 추종하기 위해 서 작을수록 좋으나, 입자 직경은 빛의 산란에 의한 입자 영상을 고속도 카 메라 (CCD : Charge-Coupled Device) 등으로 취득할 수 있을 정도로 어느 정도 이상의 크기를 가져야 한다. 그러므로 입자 직경의 결정에 대한 어느 정도의 시행착오가 필요하며 본 실험에서는 먼저 물과 비중이 비슷한 1.02 전후의 비중을 갖는 PVC(Poly Vinyl Chloride)입자를 사용하여 균일 유입 속도를 확인 하였고, 이후 아이스슬러리를 이용한 실험을 행하였다.

2.1.2 영상입력 및 저장장치

최근의 PIV 속도장 측정시스템은 사진 필름대신에 CCD 카메라를 이용 하여 유동의 입자 영상을 획득하는 추세로 나아가고 있다. CCD는 전하결합 소자 혹은 고체찰상소자로 불리며, 렌즈를 통해 들어온 빛 에너지를 전기 적인 신호(0과 1의 디지털 데이터)로 변화하는 집적회로가 내장된 이미지 센서이다.

최근 전자 이미지 분야로의 발전이 급속히 발달하여 높은 공간 분해능을 갖는 고해상도 CCD 카메라가 상품화되고 있으며, 기록을 하면서 바로 이미 지를 확인 후 피드백 하는 기능상의 장점도 가지고 있다. 이에 본 실험에서 는 512(H)×480(V)의 해상도를 가지는 CCD(Photron, Fastcam-PCI R2) 카 메라를 설치하여 영상을 획득하였으며, 획득된 영상은 Grabber Board(PCI Board)를 통하여 디지털 신호화 되어 CPU 1.60k의 주 처리 컴퓨터에 저장 하였다. Fig. 2.1에 획득한 영상 중 실제 실험의 처리에 사용된 영역을 표시 하고 있다.



Fig. 2.1 PIV measurement configuration

#### 2.2 균일 유입 속도 확인

배관내 유체유동 특성을 파악하기 위한 실험은 배관 입구에서의 균일한 유입이 보장되어야 하며 이러한 균일 유입이 보장되지 않으면 실험의 결과 에 있어서 신뢰성이 떨어지게 된다. 이에 본 실험에서는 배관 내 밸브를 100% 개방 한 후, 배관 입구구간의 영향을 최소화하고 균일 유입을 확보하 기 위해 다공판의 형태를 달리 하여 여러 번의 시행착오를 거친 후 자체 제 작한 다공판(120×120mm)을 배관 입구에 부착하여 Fig.2.2와 같은 결과를 얻 을 수 있었으며, 그림은 배관 내 밸브를 100% 개방하였을 때에 대한 속도 프로파일을 나타내고 있다. 이 결과는 관내에 유입되는 유체의 흐름이 정상 적인 관내의 흐름을 나타내고, 아이스슬러리가 밸브 개도에 따른 유동 변화 를 특성을 파악하는데 중요한 결과이다. 한편 균일 유입 속도 확인에 사용 된 유체는 순수한 물을 사용하였고, 그림에서와 같이 배관 내의 상·하부 면에서는 벽면 전단력에 의한 영향이 미치고 있는 것을 볼 수 있다.



(a)  $U_m$ =0.5 m/s



(b)  $U_m$ =1.0 m/s



(c)  $U_m$ =1.5 m/s

Fig. 2.2 Profile approaching flow

#### 2.3 실험장치

Fig. 2.3과 Fig. 2.4, Fig. 2.5, Fig. 2.6은 밸브가 있는 배관 내에서 밸브 개 폐 정도에 따른 아이스슬러리의 유동 특성 및 압력강하 특성을 관찰하기 위 한 실험장치의 전체 계통도와 밸브의 개폐 정도에 따른 사진 및 실험 장치 의 전경 사진을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 실험장치는 크게 일정한 IPF와 유량으로 아이스슬러리를 순환시키기 위한 순환부, 일정양의 아이스 슬러리를 제조하기위한 브라인 순환부, 압력강하 특성을 측정하기 위한 측 정부, 측정한 값을 가시화시키기 위한 가시부로 구성된다.

먼저 시험부(Test Section)는 밸브를 기준으로 좌우 길이 500mm, 내경 40 mm, 두께 5mm의 원통형 용기로 내부 유동장을 가시화하기에 적합한 투명 아 크릴로 제작하였고, 밸브는 5K-40 게이트 밸브를 설치하였다.

아이스슬러리는 수평으로 설치된 원관 내부에 연속으로 순환 시켰으며, 아이스슬러리를 가시화하기 위해 수조(약 300ℓ)에 청록색과 적색의 색소를 혼합하여 작동 유체 속에 고루 분포 될 수 있도록 하였다.

브라인 순환부는 냉동기를 가동하여 브라인의 온도(-25℃)를 일정하게 유 지 한 뒤, 수조의 한 쪽 면에 ¢13㎜의 동관(길이 13m)을 원형 벤딩하여 삽 입 후 동관에 -25℃의 브라인이 흐르도록 하여 작동유체를 냉각하였다. 냉 각된 동관 외부에 부착된 얼음을 끝이 부드러운 솔을 이용하여 때내어 수조 안에 저장하였으며, 저장된 얼음을 막대를 이용하여 인위적으로 저어 주면 서 아이스슬러리 형태로 만들었다. 브라인 순환부는 미리 정한 IPF가 얻어 지면 그 작동을 중단하였으며, 실험 중 외부로의 열손실에 의해 아이스슬러 리의 IPF는 점차 감소하였는데, 이때는 브라인 순환부를 가동 및 중지 시켜 시험부내 IPF가 ±0.5% 이내로 유지되도록 하였다. 한편 아이스슬러리의 제 조 및 저장부에서 얻어진 아이스슬러리가 서로 결합하여 반대편 수조에 유 입되지 않는 현상을 없애고자 계속해서 인위적으로 긴 막대를 이용하여 교 반 시켰다.

아이스슬러리를 제조 및 저장하는 수조의 구조는 15mm의 아크릴 판을 수 조의 한 가운데에 설치하여 칸막이 역할을 하도록 하였으며, 한 쪽 면에는 원형 벤딩된 동관을 삽입하여 아이스슬러리를 제조 및 저장 되도록 하였으 며, 시험부를 통과하고 나온 출구측이 아이스슬러리의 제조 및 저장부에 연 결되도록 하여 수용액과 아이스슬러리의 밀도 차와 수조 용량에 의해 자연 스럽게 반대편 수조에 유입되도록 설계하였다.

실험은 먼저 일정양의 아이스슬러리가 제조 되었다고 판단이 되면 순환 펌프를 작동 시켜 순환 시킨 아이스슬러리가 자연스럽게 유입되도록 하면서 질량유량계로 밀도를 측정하여 정해진 IPF가 얻어졌을 때 실험을 시작 하 였으며, PIV 측정 장비를 이용해 정해진 밸브 개도 및 평균유속에 대해 먼 저 밸브 전방을 그리고 동일한 조건에서 밸브 후방을 5분 간격으로 총 20분 간 촬영 하였으며, 압력강하의 특성을 파악하기 위하여 각각의 정해진 조건 에 대해 정밀 차압계에 의해 압력을 측정하였다.



- ① TEST SECTION
- ③ HEAT EXCHANGER
- 5 DIGITAL FLOW METER
- ⑦ POWER SUPPLY
- 9 CCD CAMERA
- ① DATA LOGGER

- ② ICE SLURRY TANK
- ④ BRINE TANK
- 6 LASER
  - (8) LASER CONTROL BOX
  - ① PERSONAL COMPUTER
  - 12 THERMOCOUPLES

### Fig. 2.3 Schematic of experimental apparatus



## (a) VOR 50%



(b) VOR 75%



(c) VOR 100%

## Fig 2.4 Valve appearance



Fig. 2.5 Photograph of test section



Fig. 2.6 Photograph of experimental apparatus

#### 2.4 실험방법 및 실험범위

본 실험에서는 밸브가 있는 배관 내에서 밸브 개폐 정도에 따른 아이스슬 러리의 유동 특성 및 압력강하 특성을 비교 검토하기 위하여 PIV 시스템에 의한 유체 유동 특성을 관찰 비교 검토하였다. 실험조건으로 유체의 평균유 속을 0.5m/s, 1.0m/s, 1.5m/s로, IPF의 변화를 20%, 30%, VOR%를 50%, 75%, 100%로 하여 일정한 EG수용액 농도 20wt%에서의 유체 유동 특성, 압력강하 특성을 비교 검토하였다. 실험조건은 표 2.1과 같다.

실험에 사용한 작동유체는 EG 수용액(20wt%)을 사용하였으며, EG 수용 액 농도 측정은 아타고 브라인 농도계(BR-1<sub>E</sub>)를 사용하여 농도를 측정하였 다.

실험은 300ℓ의 용량을 갖는 수조에 칸막이를 설치하여 한쪽 면에는 동관 (13mm, 13m)을 원형 벤딩하여 삽입 한 후 -25℃로 냉각된 브라인이 흐르도 록 하여 동관 외부에 부착된 얼음을 이탈시켜 아이스슬러리를 제조하였고, 생성된 아이스슬러리는 수용액과의 밀도 차에 의해 반대편 수조에 유입되도 록 하였다. 0.23m<sup>2</sup>/min의 용량을 갖는 순환 펌프에 의해 실험 회로에 유입된 아이스슬러리는 질량 유량계로 유입되고, 유입된 아이스슬러리의 유량과 밀 도는 질량 유량계를 이용하여 실시간으로 측정하였으며, 측정된 밀도  $\rho_s$ 는 다음 식에 의하여 IPF로 변환되었다.<sup>[6]</sup>

$$IPF = \frac{\rho_L - \rho_s}{\rho_L - \rho_i} \tag{1}$$

여기서 ρ<sub>L</sub>은 20% EG 수용액의 빙점(-10℃)에서의 밀도로서 1,025kg/m<sup>3</sup>, ρ<sub>i</sub>는 얼음의 밀도인 917kg/m<sup>3</sup>, 그리고 ρ<sub>s</sub>는 질량유량계로 측정된 아이스슬러 리의 밀도이다. 실험 회로의 압력강하(차압) 측정은 실험 회로의 끝단에 정 밀 차압계를 설치하여, 동일한 조건하에서 아이스슬러리가 없는 흐름에 대 해 압력을 측정한 후 아이스슬러리 유동 시와 비교 하여 차압을 측정 비교 하였다. 또한 균일한 크기의 아이스슬러리를 순환시키고 시험부 입구영향을 최소화하기 위하여 자체 제작한 다공판을 입구부에 설치하였다. 순환 펌프 를 작동 시켜 아이스슬러리가 실험 회로에 유입되는 순간부터 밀도 및 평균 유속을 확인, PIV 측정 장비를 이용하여 유체 유동 특성을 계측하였으며, 동시에 정밀 차압계로 압력을 측정하였다. PIV 시스템에 의해 측정된 결과 는 주처리 컴퓨터에 저장되도록 하였으며, 균일 유입 속도를 확인하기 위해 서는 CATUS 3.2에 의해 해석되었다.

한편 실험에 이용된 아이스슬러리는 불규칙한 크기의 얼음입자 주위를 수 용액이 둘러싸고 있는 형태를 취하고 있으며, 이와 같이 수용액으로부터 제 빙된 아이스슬러리는, 물과 얼음 입자로 된 아이스슬러리에 비해, 제빙 시 또는 상호간의 결합에 의해 입자크기가 커지는 것이 억제되며 유동성도 향 상되는 것으로 알려져 있다.<sup>[4]</sup>

이<sup>[10]</sup> 등은 실험 중 촬영한 총 300여개의 아이스슬러리 입자 크기를 40배 율 실제 현미경을 이용해 측정한 결과 실험에 사용된 아이스슬러리는 평균 0.27mm 크기의 얼음입자를 포함하고 있는 것으로 확인 되었으며, 본 실험에 사용된 얼음 입자의 크기 또한 0.27mm 전후로 생각되어진다.

## Table 2.1 An experimental condition

Condition	Range
IPF(%)	20, 30
U <sub>m</sub> (m/s)	0.5, 1.0, 1.5
VOR(5%)	50, 75, 100
Solution Concentration(%)	20

## 제 3 장 실험결과 및 고찰

#### 3.1 VOR%에 따른 유동 특성

Fig. 3.1 ~ Fig. 3.2는 VOR 50%일 때의 유동 특성을 밸브를 기준으 로 입구와 출구로 나누어 개략적으로 나타낸 그림이다. Fig. 3.1에서 보면 알 수 있듯이 배관 내 유체의 분포는 상부는 아이스슬러리, 중간부에는 아 이스슬러리와 수용액이 공존하고, 하단부에는 수용액만이 흐르는 경우라 할 수 있다. 아이스슬러리는 밸브 전방에 점차적으로 흐르면서 일반적인 배관 내에서의 흐름을 보이다 아이스슬러리와 수용액의 밀도 차에 의해 점차 아 이스슬러리는 부유하게 되고 부유된 아이스슬러리는 밸브 후방에서 정체 영 역을 형성하게 된다. 이 정체영역은 일종의 장애물로 작용하여 그림에서와 같이 그 영역을 점차 확대해 나가는 것을 볼 수 있다. 이때 부유하려는 아 이스슬러리는 배관 내 중심부에서의 최대평균유속에 의해 마치 이젝터 디퓨 져(Eiector Diffuser)의 원리와 같은 현상이 발생하는 것을 볼 수 있다. 반면 배관의 하단부는 수용액이 일반 배관에서처럼 흐르는 것을 확인 할 수 있었 다. Fig. 3.2에서 보면 알 수 있듯이 밸브 후방에서 재순환 영역이 발생하는 것을 알 수 있다. 이 재순환 영역에서도 전방에서의 유체유동 특성과 마찬 가지로 배관 내 수류측으로 돌아가는 것을 확인 할 수 있었으며, 밸브로부 터 멀어질수록 점차 흐름이 안정되어 2상 유동형태를 띠는 것을 알 수 있 다.

Fig. 3.3 ~ Fig. 3.4는 VOR 75%일 때의 유동 특성을 밸브를 기준으로 입구와 출구로 나누어 개략적으로 그린 그림이다. Fig. 3.3 ~ Fig. 3.4에서 보면 알 수 있듯이 VOR 50%에서의 유체 분포와 같으며 그 흐름 또한 비 슷한 현상을 보이고 있다. 일종의 장애물로 작용하는 정체영역의 범위는 VOR 50%와 비교해서 많이 작아졌음을 알 수 있다. 이것은 VOR%가 증가 함에 따른 영향이며, 밸브 후방에서의 재순환 영역 또한 VOR 50%와 비교 했을 때 그 크기가 상당량 감소했음을 알 수 있으며 IPF의 증가에 따른 영 향 또한 VOR 50%에서와 비슷한 형태를 띠고 있음을 알 수 있다.

Fig. 3.5 ~ Fig. 3.6은 VOR 100%일 때의 유동 특성을 밸브를 기준으로 입구와 출구로 나누어 개략적으로 그린 그림이다. Fig. 3.5 ~ Fig. 3.6에서 보면 알 수 있듯이 배관 내 유체의 분포는 상부는 아이스슬러리, 중간부에 는 아이스슬러리와 수용액이 공존하고, 하단부에는 수용액만이 흐르는 경우 라 할 수 있다. 아이스슬러리는 밸브 전방에 점차적으로 흐르면서 일반적인 배관 내에서의 흐름을 보이다 아이스슬러리와 수용액의 밀도 차에 의해 점 차 아이스슬러리는 부유하게 되고 상단 벽면에서의 평균유속은 점차 감소하 는 것을 관찰 할 수 있었다. 이것은 부유된 아이스슬러리간의 결합력에 의 해 하단부의 수용액 보다 상부 벽면에서의 마찰력이 증가하기 때문이라 생 각된다. 그러나 이러한 마찰력의 증가가 VOR 50%, 75%와 비교해서 밸브 전방에서의 정체 영역이 형성되지는 않았다. 이러한 흐름은 밸브 후방에서 도 비슷한 형태를 띠고 있었으며, 재순환 영역은 발생하지 않았다.

Fig. 3.7 ~ Fig. 3.18은 각각의 평균유속과 IPF 변화에 따른 유동 특성을 VOR %에 대해 입구와 출구로 나누어 나타내고 있는 사진이다. 사진에서 보면 알 수 있듯이 VOR 50%일 때 밸브에 의해 유로가 차단된 배관 상단 부에 얼음 입자가 모여 구름과 같은 하나의 괴(cluster)를 형성하면서 넓은 영역에 걸쳐 부유되어 되어 있는 상태임을 볼 수 있다. 이것은 하나의 정체 영역으로 작용하고 있으며 이로 인해 이 부분에서는 평균유속 또한 작아지 는 것을 알 수 있었으며, 상대적으로 배관 하단부에서는 수용액만이 흐르는 것을 알 수 있었. 한편 출구에서는 밸브 후방에서의 재순환 영역이 발생하 는 것을 볼 수 있었다. 또한 이 영역에서의 아이스슬러리는 배관의 수류측 의 최대 평균유속에 의해 되돌아오면서 배관의 수류측에 혼입되었으며, 후 방으로 갈수록 이러한 현상은 크게 줄어들어, 밸브 전방에 도달하기 전까지 흐름과 유사한 흐름을 보여 주었다. 또한 IPF가 증가할수록 정체영역 및 재 순환영역의 범위는 더 커지고 위에서 언급한 현상들이 대해서 더욱더 뚜렷 하게 관찰되었다.

또한 VOR 75%에서는 사진에서 보면 알 수 있듯이 VOR 50%와 비교해 서 배관 상단부에 괴(cluster)의 형성 범위와 양이 많이 줄어드는 것을 알 수 있다. 이것은 배관 내 장애물 작용을 하는 밸브의 개도가 증가하면서 상 대적으로 넓은 면적을 통과하기 때문에 관 벽에 작용하는 마찰력이 상대적 으로 감소하는 원인에 기인한다고 생각된다. 나아가 이러한 현상은 압력강 하에도 많은 영향을 끼치는 원인이라 할 수 있다.

VOR 100%일 때는 사진에서 보면 알 수 있듯이 배관 상단부에 구름 모 양의 괴(cluster)는 형성 되지 않았으나 얼음 입자와 수용액이 분리되어 흐 르는 2상 유동의 형태를 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 밀도 차에 의한 흐름이라 볼 수 있으며, 밸브 전 후방에서의 정체영역 및 재순환 영역 이 압력강하에 큰 영향을 끼친다는 것을 알 수 있다. 한편 IPF가 증가할수 록 2상 유동 형태가 더욱 확실하게 관찰 되는 것을 알 수 있었다.



Fig. 3.1 Schematic of flow pattern at VOR 50% (Entry)



Fig. 3.2 Schematic of flow pattern at VOR 50% (Exit)



Fig. 3.3 Schematic of flow pattern at VOR 75% (Entry)



Fig. 3.4 Schematic of flow pattern at VOR 75% (Exit)



Fig. 3.5 Schematic of flow pattern at VOR 100% (Entry)



Fig. 3.6 Schematic of flow pattern at VOR 100% (Exit)



## (a) VOR 50%







(c) VOR 100%





(a) VOR 50%



(b) VOR 75%



(c) VOR 100%






#### (b) VOR 75%



(c) VOR 100%







(b) VOR 75%



(c) VOR 100%







(b) VOR 75%



(c) VOR 100%







(b) VOR 75%



(c) VOR 100%







#### (b) VOR 75%



(c) VOR 100%





(a) VOR 50%



(b) VOR 75%



(c) VOR 100%







(b) VOR 75%



(c) VOR 100%







(b) VOR 75%



(c) VOR 100%











(c) VOR 100%







#### (b) VOR 75%



(c) VOR 100%



#### 3.2 평균유속에 따른 유동 특성

Fig. 3.19 ~ Fig. 3.30은 각각의 IPF 변화 및 VOR%에 대한 유동 특성을 평균유속의 변화에 따라 입구와 출구로 나누어 나타낸 사진이다. 사진에서 보면 알 수 있듯이 동일한 VOR %에 대해 평균유속이 느릴수록 밸브 전방 에서의 구름모양의 괴(cluster)가 넓은 영역에 걸쳐 분포 되어 있는 것을 알 수 있으며, 이 괴(cluster)는 배관 상부에 부유하여 하부의 수류측과 확실하 게 분리되어 이동하는 이상유동의 한 형태인 부유유동형태를 볼 수 있다. 또한 평균유속이 빠를수록 밸브 전방에서 아이스슬러리의 부유층이 다소 감 소하는 것을 알 수 있는데 이것은 앞에서 언급한 디퓨져 이젝터(Diffuser Ejector)의 원리처럼 배관 상부에 있던 아이스슬러리가 평균유속이 증가하 면서 배관중심부의 수류측으로 이동함에 따른 영향이라 할 수 있다.

한편 밸브 후방에서는 평균유속이 증가할수록 배관 상단부에 부유되어 있 던 재순환 영역으로부터 얼음 입자가 점차 수류측으로 분산되고, 결국 얼음 입자가 배관 내를 가득 채우는 균질 유동형태를 보여 주었다. 이때 얼음 입 자는 배관 전단면에 걸쳐 거의 균일한 분포를 갖고 있었으며, 2상 유동 형 태를 띠다가 점차 밸브 후방으로부터 멀어질수록 평균유속이 느린 경우를 제외하고는 얼음 입자가 수용액 내에 고르게 분포하려는 경향을 띠게 되어 마치 하나의 유체처럼 유동(단상유동)하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 유동특성이 압력강하에 많은 영향을 주는 인자라 생각된다.



(a)  $U_m=0.5 m/s$ 



(b)  $U_m$ =1.0 m/s



(c)  $U_m$ =1.5 m/s





(a)  $U_m=0.5 m/s$ 



(b)  $U_m$ =1.0 m/s



(c)  $U_m$ =1.5 m/s

### Fig. 3.20 Flow pattern VOR 50% at IPF20% (Exit)



(a)  $U_m$ =0.5 m/s



(b)  $U_m$ =1.0 m/s



(c)  $U_m$ =1.5 m/s

# Fig. 3.21 Flow pattern VOR 75% at IPF20% (Entry)



(a)  $U_m=0.5 m/s$ 



(b)  $U_m$ =1.0 m/s



(c)  $U_m$ =1.5 m/s

### Fig. 3.22 Flow pattern VOR 75% at IPF20% (Exit)



### (a) $U_m=0.5 m/s$



(b)  $U_m$ =1.0 m/s



(c)  $U_m$ =1.5 m/s

# Fig. 3.23 Flow pattern VOR 100% at IPF20% (Entry)



(a)  $U_m=0.5 m/s$ 



(b)  $U_m$ =1.0 m/s



(c)  $U_m$ =1.5 m/s

### Fig. 3.24 Flow pattern VOR 100% at IPF20% (Exit)



# (a) $U_m$ =0.5 m/s



(b)  $U_m$ =1.0 m/s



(c)  $U_m$ =1.5 m/s

# Fig. 3.25 Flow pattern VOR 50% at IPF30% (Entry)



(a)  $U_m=0.5 m/s$ 



(b)  $U_m$ =1.0 m/s



(c)  $U_m$ =1.5 m/s

### Fig. 3.26 Flow pattern VOR 50% at IPF30% (Exit)



# (a) $U_m$ =0.5 m/s



(b)  $U_m$ =1.0 m/s



(c)  $U_m$ =1.5 m/s

# Fig. 3.27 Flow pattern VOR 75% at IPF30% (Entry)



(a)  $U_m=0.5 m/s$ 



(b)  $U_m$ =1.0 m/s



(c)  $U_m$ =1.5 m/s

### Fig. 3.28 Flow pattern VOR 75% at IPF30% (Exit)



(a)  $U_m$ =0.5 m/s



(b)  $U_m$ =1.0 m/s



(c)  $U_m$ =1.5 m/s

# Fig. 3.29 Flow pattern VOR 100% at IPF30% (Entry)



(a)  $U_m=0.5 m/s$ 



(b)  $U_m$ =1.0 m/s



(c)  $U_m$ =1.5 m/s



#### 3.3 IPF 변화에 따른 유동 특성

Fig. 3.31 ~ Fig. 3.36는 평균유속 및 VOR %에 대해 IPF의 변화에 따른 유동 특성을 입구와 출구로 나누어 나타낸 사진이다. 사진에서 보면 알 수 있듯이 밸브 전방에서는 동일한 VOR %에 대해 IPF가 감소할수록 괴 (cluster)는 배관 상부에 부유하여 수류의 평균유속보다 약간 작은 속도로 이동하는 것을 확인할 수 있었고, 이때 배관 내 상부의 아이스슬러리 cluster는 하부의 수류측과 확실하게 분리되어 이동함으로써 고액이상류의 한 유동형태인 부유유동형태가 명확히 나타나고 있다. 이때 아이스슬러리 입자는 수류측에 충분히 분산되지 못한 상태이기 때문에, cluster 하단부에 서 아이스슬러리 입자의 진행방향으로의 회전운동이 확인되었다. 이것은 앞 에서 설명한 바와 같이 배관 내 최대 평균유속에 의해 마치 이젝터 디퓨져 (Ejector Diffuser)의 원리와 같은 현상이라 할 수 있다. 그러나 IPF가 증가 함수록 배관 내 얼음 입자의 양이 많아져 고루 분포하는 것을 확인 할 수 있고, 이로 인해 밸브 전방에서의 괴(cluster)가 넓어지는 것을 확인 할 수 있었으며, VOR %가 증가할수록 배관내 장애물 역할을 하는 밸브의 단면적 이 감소하여 상대적으로 넓은 면적을 통과하기 때문에 그 괴(cluster) 영역 이 점차 감소하는 것을 알 수 있다.

한편 밸브 후방에서는 IPF가 증가할수록 동일한 VOR% 및 평균유속에 대해 재순환 영역의 범위가 증가하는 것을 알 수 있으며, VOR%가 감소할 수록 평균유속이 증가할수록 그 영역은 감소하는 것을 알 수 있다. 이러한 유동특성은 IPF가 증가할수록 더욱 더 선명하게 나타남을 알 수 있다.



(a)  $U_m \mbox{=} 0.5$  m/s, IPF 20%



(b)  $U_m \mbox{=} 0.5 \mbox{ m/s, IPF } 30\%$ 



(c)  $U_m \mbox{=} 1.0$  m/s, IPF 20%



(d)  $U_m$ =1.0 m/s, IPF 30%



(e)  $U_m \mbox{=} 1.5$  m/s, IPF 20%



(f)  $U_m$ =1.5 m/s, IPF 30%

Fig. 3.31 Flow pattern IPF % at VOR 50% (Entry)



(a)  $U_m$ =0.5 m/s, IPF 20%



(b)  $U_m$ =0.5 m/s, IPF 30%



(c)  $U_m$ =1.0 m/s, IPF 20%



(d)  $U_m$ =1.0 m/s, IPF 30%



(e)  $U_m \mbox{=} 1.5$  m/s, IPF 20%



(f) Um=1.5 m/s, IPF 30%

Fig. 3.32 Flow pattern IPF % at VOR 50% (Exit)



(a)  $U_m \mbox{=} 0.5$  m/s, IPF 20%



(b)  $U_{\rm m}\text{=}0.5~\text{m/s, IPF}$  30%



(c)  $U_m \mbox{=} 1.0$  m/s, IPF 20%



(d)  $U_m$ =1.0 m/s, IPF 30%



(e)  $U_m$ =1.5 m/s, IPF 20%



(f)  $U_m$ =1.5 m/s, IPF 30%

Fig. 3.33 Flow pattern IPF % at VOR 75% (Entry)



(a)  $U_m$ =0.5 m/s, IPF 20%



(b)  $U_m$ =0.5 m/s, IPF 30%



(c)  $U_m \mbox{=} 1.0$  m/s, IPF 20%



(d)  $U_m$ =1.0 m/s, IPF 30%



(e)  $U_m \mbox{=} 1.5$  m/s, IPF 20%



(f)  $U_m$ =1.5 m/s, IPF 30%

Fig. 3.34 Flow pattern IPF % at VOR 75% (Exit)



(a)  $U_m \mbox{=} 0.5$  m/s, IPF 20%



(b)  $U_{\rm m}\text{=}0.5~\text{m/s, IPF}$  30%



(c)  $U_m \mbox{=} 1.0$  m/s, IPF 20%



(d)  $U_m$ =1.0 m/s, IPF 30%



(e)  $U_m \mbox{=} 1.5$  m/s, IPF 20%



(f) Um=1.5 m/s, IPF 30%

Fig. 3.35 Flow pattern IPF % at VOR 100% (Entry)



(a)  $U_m$ =0.5 m/s, IPF 20%



(b)  $U_m$ =0.5 m/s, IPF 30%



(c)  $U_m \mbox{=} 1.0$  m/s, IPF 20%



(d)  $U_m$ =1.0 m/s, IPF 30%



(e)  $U_m \mbox{=} 1.5$  m/s, IPF 20%



(f)  $U_m \mbox{=} 1.5~m/s,~\rm IPF~30\%$ 

Fig. 3.36 Flow pattern IPF % at VOR 100% (Exit)

#### 3.5 압력강하 특성

Fig. 3.37 및 Fig. 3.38은 각각의 IPF에 대해 VOR %에 따른 압력강하를 그래프로 나타낸 것이다. 평균유속이 증가할수록 VOR %가 감소할수록 압 력강하가 크게 증가하는 것을 알 수 있으며, 또한 IPF가 증가할수록 커지는 것을 알 수 있다. 이것은 VOR %가 감소할수록 아이스슬러리가 상대적으로 좁은 유로를 통과하게 되고 밸브 전방에서의 정체영역이 넓게 나타나게 되 어 배관 상단부에서의 아이스슬러리에 의한 점성 마찰력이 증가하기 때문이 며, 밸브 후방에서의 재순환 영역의 확대가 입구부에서의 압력강하를 가져 왔다고 생각된다. 또한 IPF가 증가할수록 배관 내 흐르는 아이스슬러리의 양이 많아져 앞에서 설명한 바와 같이 밸브 전방에서의 정체영역 및 밸브 후방에서의 재순환 영역의 증가가 그 원인이라 할 수 있겠다.

Fig. 3.39 및 Fig. 3.40은 배관 내 아이스슬러리가 흐르지 않는 경우에 대 해 압력강하가 가장 크게 일어났을 때인 IPF가 0이고 VOR 50%일 때 압력 강화와 각각의 IPF에 대해 평균유속에 따른 압력강하를 비교하여 그래프로 나타낸 것이다. 평균유속이 증가할수록 IPF가 증가할수록 압력강하가 크게 일어나는 것을 알 수 있으며, IPF가 0일 때와 비교했을 때 그 증가폭 또한 커짐을 알 수 있다. 이것은 평균유속이 증가할수록 밸브 주변을 지나는 평 균 유속이 증가하기 때문이라 생각되며, 밸브 전 후방에서의 정체영역 및 재순환 영역에 의한 영향이라 할 수 있다. 또한 IPF의 증가로 배관 내 흐르 는 얼음의 양이 증가하기 때문이라 생각된다.

이러한 결과는 김<sup>[26]</sup>등의 실험 결과와는 다른 결과를 얻을 수 있었다. 다 시 말해 평균유속이 느릴수록 부유층 및 재순환 영역에서의 영향이 평균유 속이 증가할수록 앞에서 언급한 관 상부의 부유층 및 재순환 영역의 아이스 슬러리 입자가 관 중심으로 이동하여 관 벽과의 마찰을 감소시켜 압력강하 가가 감소한다는 결과를 볼 수 있었지만, 본 실험에서의 결과적으로 봤을 때 이러한 부유층 및 재순환 영역의 영향 보다는 평균유속에 대한 영향이 크게 나타남을 알 수 있었다. 이러한 실험 결과는 여타의 실험 결과와는 상 반된 결과로써 각각의 실험 조건 및 실험 환경(기온, 운전시간 등)에 따른 차이에 의해서 생겨난 현상이라 생각되며, 덧붙여 아이스슬러리 유동특성에 관한 실험에 대해 정확한 결과를 예측하기 위해서는 이러한 시스템을 사용 하고자 하는 장소의 환경과 동일한 조건을 형성하는 것 또한 정확한 결과를 도출 시킬 수 있는 하나의 중요한 인자라고 생각된다.

Fig. 3.41 ~ Fig. 3.43은 각각의 평균유속과 VOR %에 대해 IPF의 변화 에 따른 압력강하 특성을 그래프로 나타낸 것이다. 동일한 VOR %에 대해 서 평균유속이 증가할수록 IPF가 증가할수록 압력강하가 크게 증가하는 것 을 알 수 있으며, VOR %가 감소할수록 그 증가 폭이 커지는 것을 알 수 있다. 이것은 IPF가 증가함에 따라 배관내 흐르는 얼음 입자의 양이 많아져 밸브 전 후방에서의 정체영역 및 재순환 영역의 증가가 커져 배관 벽면에서 의 점성 마찰저항의 증가 때문이라 생각된다.



Fig. 3.37 Effect of VOR % at IPF 20%



Fig. 3.38 Effect of VOR % at IPF 30%



Fig. 3.39 Effect of Mean Velocity at IPF 20%



Fig. 3.40 Effect of Mean Velocity at IPF 30%


Fig. 3.41 Effect of IPF% at VOR 50%



Fig. 3.42 Effect of IPF% at VOR 75%



Fig. 3.43 Effect of IPF% at VOR 100%

## 제 4 장 결론

EG 20% 수용액을 이용하여 만들어진 아이스슬러리를 내경 40mm의 밸브 가 있는 아크릴 배관으로 직접 수송하면서 유동형태와 압력강하 특성을 살 펴보았다. 다양한 실험조건에 의해 실험을 수행한 결과 본 실험 범위 내에 서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) VOR %가 감소할수록 평균유속이 증가할수록 압력강하가 크게 일어난다.

(2) VOR %가 감소할수록 평균유속이 감소할수록 밸브 전방에서의 아이스슬러리의 정체현상이 가장 크게 발생한다.

(3) 평균유속이 감소할수록 IPF가 증가할수록 얼음입자가 배관 상단부에 모여 유동하는 부유 유동이 발생된다.

(3) 평균유속 및 IPF가 증가할수록 얼음입자가 배관 전단면에 고르게 분포 하여 유동하는 균질 유동 형태이다.

(4) 전체적인 본 실험 범위 내에서는 관내 밀폐가 일어나지 않으나 정체현상은 발생하지 않는다.

## 참 고 문 헌

(1) Lee, D. W., "Cold heat transportation using ice slurry", The Magazine of the SAREK", vol. 30, No. 12, pp. 8~14. 2001.

(2) Park, K. W., "Current status of research and new development on ice heat storage system technology", Magazine Korean Refrig. Air Cond. Tech. Associa., vol. 15, No. 4, pp. 119~131, 1998.

(3) Yanagihara, R., "Evalvation of ice storage system", Japan Association of Refrig., vol. 73, No. 884, pp. 58~63, 1998.

(4) Inaba, H and Lee, D. W., "Study on the critical conditions of ice formation for continuous ice making system in a cooling pipe", 3rd KSME-JSME Thermal Engineering Conference, pp. I223~I238, 1996.

(5) Lee, D. W., "Ice slurry type storage system and utilization", The Magazine of the SAREK", vol. 30, No. 6, pp. 21~26. 2001.

(6) 이동원, 윤찬일, 윤응상, "소구경 배관내 아이스슬러리의 유동현상 및 압
력강하 특성에 관한 실험적 연구(2)", 대한설비공학회 논문집 제14권 제5호,
pp. 391~397, 2002.

(7) 김규목, 박기원, 권일욱, "다양한 각도의 곡관 내에서 아이스슬러리의 유동에 따른 영향", 대한설비공학회 논문집 제16권 제2호, pp.142~149, 2004.

(8) Park, S. Y., "Cooling technology using ice slurry", Magazine Korea Refrig. Air Cond. Tech. Asso., vol. 15, No. 5, pp. 89~96, 1992.

(9) Lee, D. W., "Ice slurry type ice thermal storage system and its application", Mag. Soc. Air-Cond. and Refrig. Eng. Korea, vol. 30, No. 6, pp.  $21 \sim 26$ , 2001.

(10) 이동원, 윤찬일, 윤응상, "소구경 배관내 아이스슬러리의 유동현상 및

압력강하 특성에 관한 실험적 연구(1)", 대한설비공학회 논문집 제14권 제5 호, pp. 385~390, 2002.

(11) Shirakashi, M., Kawakami, I., Sato, S., and Wakiya, S., "On hydraulic conveying of snow(I. Pressure losses in straight circular pipes)", Japanese Journal of Snow and Ice, vol. 45, No. 1, pp.  $33 \sim 39$ , 1983.

(12) Shirakashi, M., Sato, K., Sato, S., Koshio, A., Umemura, T., and Wakiya, S., "Hydraulic conveying of snow(N. Flow pattern of snow/water mixture in straight pipes)", Japanese Journal of Snow and Ice, vol. 46, No. 4, pp. 163~170, 1984

(13) Takahashi, H., Masuyama, T., and Kawashima, T., "Experimental study on flow characteristics of ice-water slurries in horizontal pipe", Japanese Journal of Resources · Material, vol. 108, No. 5, pp. 357~363. 1992.

(14) Knodel er al., "Ice-water slurry flow in a circular pipe", Heat Mass Trans., vol. 15, pp. 239~245., 1988.

(15) Lee, D. W., Yoon, C. I., Yoon, E. S., and Joo, M. C., "Experimental syudy on flow and pressure drop of ice slurry for various pipes", Fifth IIR workshop on Ice Slurries, 2002.

(16) Masashi et al., "Fundamental study on transportation system using ice/water(part 4 characteristics of ice/water mixture transportation with various shape of pipeline", Proc. SHASE, pp. 1121~1124.

(17) Choi, H. W., and Park, K. W., "Experimental study on ice slurry flowing pressuer loss in straight tube", Journal Refrig. Air Cond. Eng., vol. 21, No. 6, pp.  $47 \sim 54$ , 2002.

(18) Park. K. W., Choi, H. W., Roh, G. S., and Jung, J. C., "Experimental

- 71 -

study on transformation of IPF and pressure drop in branches with ice slurry", Journal Korea So. Mar. Eng., vol. 27, No. 6, pp. 272~279. 2003. (19) Park. K. W., and Kim, K. M., "Experimental study on transformation of IPF and pressure drop in vertical branches with ice slurry", Journal Refrig. Air Cond. Eng., vol. 22, No. 2, pp. 51~58, 2003.

(20) Kim, K. M., Park. K. W., Jung, J. C., and Roh, G. S., "Flowing characteristics of ice-slurry in elbows with various angle", Pro. SAREK 2003 summer annual Conf., pp. 1285~1290.

(21) 김규목, 박기원, "경사관내에서 아이스슬러리의 유동특성", 대한설비공 학회 2003 동계 학술 발표대회 논문집, pp. 507~512.

(22) Inaba, H., Horibe, A., Ozaki, K. and Yokota, M., "Study of cold energy release characteristics of flowing ice water slurry in a pipe", Trans. of the JSRAE, vol. 14, No. 3, pp.  $265 \sim 276$ . 1997.

(23) Inaba, H., Horibe, A., Ozaki, K., and Miura, H., "流動水溶液になる冷却管內製氷特性", 第35回日本伝熱ツンポジウム講演論文集, F123, pp. 223~
 224. 1998.

(24) Kwanami, T., Fukusako, S., and Yamada, M., "水平矩形流路内を流れるスラッシュアイスの採冷熱特性", 第35回日本伝熱ツンポジウム講演論文集,
 F124, pp. 227~228. 1998.

(25) 이동원, 장호원, 임효묵, 윤덕원, "아이스슬러리의 열전달 특성에 관한 실험적 연구", 대한설비공학회 2002 하계 학술발표대회 논문집, pp. 358~
363.

(26) 김규목, 박기원, 정재천, 노건상, "다양한 각도를 가진 곡관내에서의 아이스슬러리 유동특성", 대한설비공학회 2003 하계 학술발표대회 논문집, pp.
1285~1290.