



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 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.

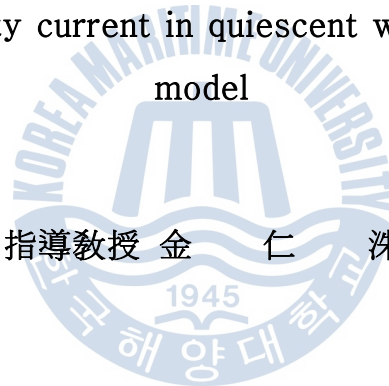
[Disclaimer](#) 

工學博士 學位論文

3차원 CFD모델을 이용한 정체수역의 밀도확산

Diffusion of density current in quiescent water using 3D CFD
model

指導教授 金 仁 洙



2014年 2月

韓國海洋大學校 大學院

土 木 環 境 工 學 科

李 國 鎮

本 論文을 李國鎭의 工學博士 學位論文으로 認准함.

委員長 工學博士 宋 永 彩 (印)

委 員 工學博士 金 仁 洙 (印)

委 員 理學博士 高 星 澈 (印)

委 員 工學博士 張 在 秀 (印)

委 員 工學博士 尹 程 煥 (印)

2013年 12月 13일

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Tables	iv
List of Figures	v
Abstract	vii

1. 서론	1
2. 이론적 배경	4
2.1 호소	4
2.1.1 호소의 정의	4
2.1.2 국내 호소 현황	4
2.2 수계 성층	5
2.2.1 성층현상의 정의 및 특징	5
2.2.2 성층현상의 계절적 특성	5
2.2.3 성층화 메커니즘	6
2.3 밀도류	9
2.3.1 밀도류의 정의	9
2.3.2 밀도류의 구조	10
2.3.3 밀도류의 특성	11
2.4 EFDC	11
2.4.1 EFDC의 개요	11
2.4.2 기본방정식	13

2.4.3 수치해법	13
2.5 CFD	13
2.5.1 CFD의 기본이론	13
2.6 물 순환장치 운영에 따른 수질개선 효과	18
2.6.1 용존산소 농도 증가	18
2.6.2 조류의 성장제어	18
2.6.3 영양염류농도	19
2.6.4 조류의 종조성에 미치는 영향	19
3. 본론	21
3.1 설계조건	21
3.1.1 밀도류 확산 원리	21
3.1.2 PIV 이용한 토출구유동 해석	22
3.1.3 실증현장 개요	27
3.1.4 생태독성 평가	27
3.1.4.1 현장 오염/배출원 부하량	27
3.1.4.2 생태독성평가	30
3.2 CFD 밀도류 확산 모델	32
3.2.1 밀도류확산장치 운전에 따른 DO 예측기법 개발	32
3.2.1.1 기존 DO 모델링 기법 분석	32
3.2.1.2 CFD를 이용한 DO 예측기법	34
3.2.2 밀도류확산장치 운전변수에 의한 고풍저수지 수질변화해석 및 검증	34
3.3 실증실험	54
3.3.1 실증 실험장치	54
3.3.1.1 밀도류 확산장치	55
3.3.1.2 전력 및 제어 시스템	56
3.3.1.3 부력체	58
3.3.1.4 리프트	60
3.3.1.5 조립	61

3.3.2 실증현장 조사 및 방법	65
3.3.3 현장조사	67
3.4 구축 모델과 조사결과의 비교	69
 4. 결론	 72
 참고문헌	 73



List of Tables

Table 1 Status of man-made dams, lakes and marshes	5
Table 2 Summary of test bed	7
Table 3 Contamination sources of test bed(Pollutant loads)	8
Table 4 Contamination sources of test bed(Discharge loads)	9
Table 5 Specification of density current generator	55
Table 6 Power consumption and electric power supply	75
Table 7 Ballast tank size	9
Table 8 Specification of pontoon	9
Table 9 Specification of lift	6
Table 10 Analytical items and instruments	76
Table 11 Operating time to density current generator	76

List of Figures

Fig. 1 Water resource in korea	1
Fig. 2 Morphological classification of density current	9
Fig. 3 Underflow density currents	11
Fig. 4 Structure of EFDC model	21
Fig. 5 Structure of the EFDC water quality model	21
Fig. 6 Definition of control volume used in CFD calculation	41
Fig. 7 Components of 3D meshes	61
Fig. 8 Density current flow	2
Fig. 9 DPSS laser and cylindrical lens	32
Fig. 10 Generated laser sheet	3
Fig. 11 CCD camera used in this study	42
Fig. 12 Photograph of scaled DCG model and water tank	52
Fig. 13 Velocity vectors and U velocity component contour measured by PIV	61
Fig. 14 Mesh of density current diffusion in test bed	53
Fig. 15 Change of iso-surface in hourly variation	73
Fig. 16 Change of temperature in hourly variation	93
Fig. 17 Change of dye in hourly variation	11
Fig. 18 Observation direction	2
Fig. 19 Velocity distribution of temperature difference in top and bottom(case1)	31
Fig. 20 Velocity distribution of temperature difference in top and bottom(case2)	41
Fig. 21 Temperature distribution of temperature difference in top and bottom(case1)	61
Fig. 22 Temperature distribution of temperature difference in top and bottom(case2)	71

List of Figures

Fig. 23 Dye distribution of temperature difference in top and bottom(case1)	8
Fig. 24 Dye distribution of temperature difference in top and bottom(case2)	9
Fig. 25 Dye distribution of hourly variation to density current generator	51
Fig. 26 DO distribution of hourly variation to density current generator	52
Fig. 27 The result of CFD velocity contour when the temperature gradient is not existed	3
Fig. 28 The result of CFD velocity vector when the temperature gradient is not existed	4
Fig. 29 Density current generator body	6
Fig. 30 Operating system of power	7
Fig. 31 Ballast tank sectional view	8
Fig. 32 Pontoon	1
Fig. 33 Solar panel	2
Fig. 34 Lift	3
Fig. 35 Density current generator plant	4
Fig. 36 Test bed density pattern	5
Fig. 37 Test bed sampling point	6
Fig. 38 The transition of DO in test bed (Density current generator operation before-and-after)	8
Fig. 39 The transition of DO and temperature in test bed	9
Fig. 40 Outlet mesh and analysis of turbulence	07

Diffusion of density current in quiescent water using 3D CFD model

LEE, GUK JIN

Department of Civil and Environmental Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University



Abstract

The total amount of water resources in Korea is 1,240 hundred million tons.

Among the total amount, we use 337 hundred million tons(27%) from lakes, marshes, rivers and underground water. In Korea, there are less natural lakes and marshes because of igneous rock areas. Moreover, we have rainy season in summer so the precipitation is not equal at all seasons. We have to make man-made lakes and marshes because of these problems.

So, 18,787 man-made dams, lakes and marshes were built for secure our water resources. These man-made lakes and marshes are vulnerable to

self-purification and can make quiescent water. These phenomenon can occur increment of detention period, thermocline and eutrophication. Also, internal water circulation is not progressed actively when the quiescent water is made. We need to find solutions for Anaerobic condition which can make internal hypoxia level. Because anaerobic condition can aggravate the water quality. Especially, density layers are happen at some storage facilities such as 35 hundred million tons in 79 dams, 32 hundred million tons in 112 reservoirs, 13 hundred million tons in 16 dammed pool irrigations.

This study use a principle for spread of density layer which are mixed surface layer and bottom layer. We selected the Test Bed which can happen density layers in lakes and marshes. And we built 3-dimensional CFD spread model using density current generator which can circulate 100 thousand tons water a day. That water amount is $\frac{1}{50}$ of mean low flow of stagnant lakes and marshes. We built the Plant and operated in practice and research the change from water circulation in lakes and marshes DO and temperature. We analyze the spread performance and calculated using CFD model. To plan the density current generator, we have to know amount of surface layer inflow, amount of bottom layer inflow and amount of discharge water. We can get these basic data from CFD analysis directly or indirectly.

Through CFD interpretation, we confirm 1–2cm level flow is headed along the density layer in lakes and marshes which has temperature gradient. We checked the time which the density layer has influenced on the lakes and marshes when we operate the density current generator in Test Bed. We knew the time which surface layer's water temperature is same as bottom layer's water temperature using the density current generator. That was occurred during 12–24 hours. In CFD model, it takes 2 hours to finish the whole hydrologic cycle since the density current generator is operated. It has 22 hours differences in reality.

It seems to be that the parameter which turbulent flow and hydraulic and

hydrologic in Test Bed is not considered in CFD model.

We have checked the similarity between actual hydrologic cycle by the density current and result of CFD model . Also we can verify the accuracy and credibility.

Finally, this CFD model will be the basic theory for treat of thermocline cause of quiescent water.



KEY WORDS: CFD model, Thermocline(Density layer), Density current generator, Temperature gradient, DO

제 1 장 서 론

우리나라 연간 수자원 총량은 1,240억톤으로, 이중 337억톤(27%)을 댐(호소), 하천, 지하수를 통해 확보하여, 농업용수 160억톤, 생활용수 76억톤, 유지용수 75억톤, 공업용수 26억톤 등으로 Fig. 1과 같이 활용하고 있다. 90년대 초까지는 인구증가와 산업발달로 생활용수와 공업용수가 증가하였으나, 그 이후부터는 일정 수준의 비율을 유지하고 있다(1).

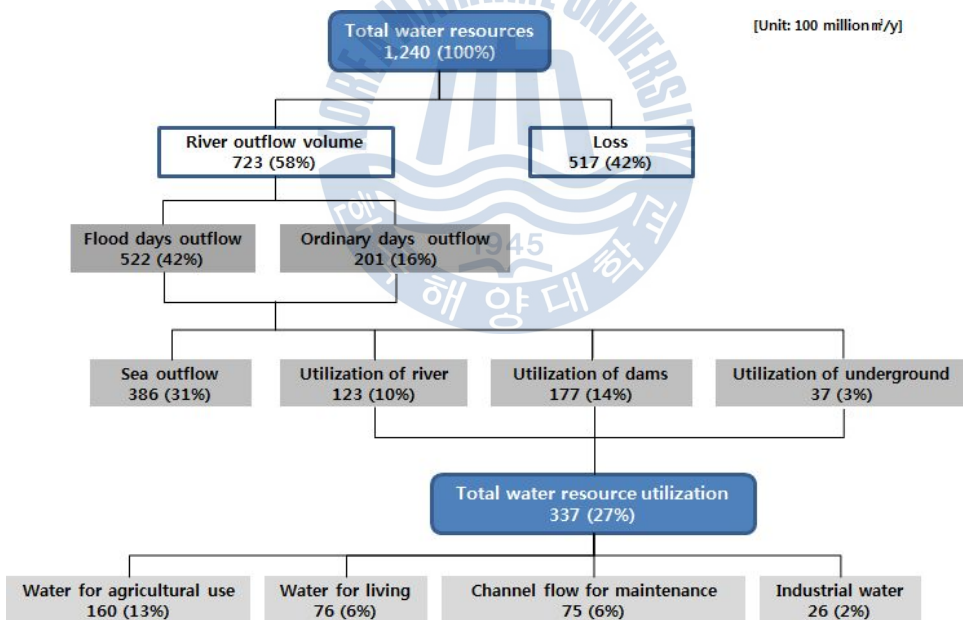


Fig. 1 Water resource in Korea

(<http://blog.naver.com/charlesz86/140189644610>)

우리나라는 화성암 지형이 많아 자연발생 호소가 적으며, 강우가 한시기에 집중되기 때문에 수자원 확보를 위해 인공적으로 물을 가두는 인공호소 조성이 불

가피하였다. 현재 댐과 저수지를 포함하여 인공호소는 총 18,787개가 조성되었는데(9)(10), 이렇게 조성된 인공호소는 자연정화 기능이 취약하며, 정체수역이 형성되기 때문에 수괴의 체류시간이 증가하여 성층현상이 발생하고, 부영양화 등의 다양한 환경문제가 야기되기 쉽다. 즉 정체수역이 형성되어 성층이 되면, 내부순환이 잘 안되어 저수지 내부에 빈산소층이 형성되고 혐기화가 진행되어 수질이 악화되기 때문에 이에 대한 대책이 필요하다(9).

실제로 이들 인공호소 중 댐 79개소의 35억톤, 저수지 112개소의 32억톤을 포함하여 4대강 16개소 13억톤 등 총 80억톤의 저장시설에서는 성층(밀도층) 현상이 발생하고 있다. 이를 해소하기 위해 수자원공사 및 농어촌 공사에서는 에어레이터, 기계식 각종 물 순환장치 등을 이용해 수류를 발생시켜 표층과 심층을 교란하거나 인위적으로 순환하여 밀도층을 파괴 또는 해소하는 물 순환식 수치모형을 개발하고 있으며, 이를 통해 시범적으로 시설을 설치 운용하고 있다. 그러나 국내 호소는 그 모양이 복잡하고 합류부의 폭이 넓어 주 흐름방향과 그 외 지역간의 체류시간과 유속 등 수체 거동이 매우 상이하기 때문에 2차원 또는 준 3차원의 수치해석 모형을 통해 정밀한 해석이 어렵다. 특히 호소의 유속이 매우 낮아 확산이송과 혼합등 물질의 전달과 반응 특성이 다르고, 기상, 수리수문, 지형, 성층화 조건에 영향을 받기 때문에 공간적인 거동특성을 고려한 Full-3차원 수치모형을 해야 할 필요성이 있다. 최근 EFDC(Environmental Fluid Dynamics Code)의 수리동역학 모델로 수체의 유동을 예측하고는 있으나, 앞서 언급한 문제들을 해결하기 위한 합리적인 방법으로 병렬컴퓨팅을 이용한 CFD 해석 및 성능검증이 타당할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 정체되어 밀도층을 형성한 수역을 대상으로 물 순환장치의 3차원 CFD 확산 모델을 구축하고, 실제 동일한 장치를 현장에 설치, 가동함으로써 호소에서 일어나는 여러 가지 영향인자들의 변화를 조사하였다. 또한 이를 토대로 구축된 CFD 밀도확산 예측 모델과 실측조사를 비교 검토하여, 밀도층을 형성한 정체수역에 물 순환을 발생시키고, 호소 수질변화에 영향을 미칠 수 있는 수질개선 기술로써 적용할 수 있는 3차원 CFD를 이용한 밀도확산 모델을 제시하였다.

본 연구에서 구축한 CFD 밀도류 확산모델은 정체되어 성층이 발생한 호소의 광역 물 순환을 통해 효율적인 수자원 관리를 하기 위한 기본모델로 이용할 수

있으며 항구를 포함하여 복잡한 해안선으로 야기된 모든 폐쇄된 연안 해역의 수질환경개선과 4대강 사업으로 조성된 인공호소의 녹조방지에 기여할 것으로 기대된다.



제 2 장 이론적 배경

2.1 호소

2.1.1 호소의 정의(21)

호소는 원칙적으로 바다와 직접 연결되지 않은 지표의 와지에 위치하는 정수괴의 총칭으로 대부분 담수로 되어 있지만 사해처럼 염수로 되어 있는 곳도 있다. 또한 해안지역에서는 좁은 유·출입의 수로를 갖고 있어 기수역과 같이 담수와 염수가 혼합되어 있는 곳도 있다. 호소는 배수구를 갖고 있지만 전체적으로 폐쇄구역이기에 주위로부터 독립하여 물의 지학, 물리, 화학, 생물학적 현상이 일어나 독자적 생태계를 유지한다.

‘호’는 내륙의 요지에 물이 고인 정수괴로서 중앙부가 5~6m이상의 수심을 유지하는 곳을 의미한다. ‘소’는 호보다 수심이 낮아 5m 이내로 보통 1~3m가 대부분이다.

호소는 인공호소, 해안선 작용에 의한 호소, 운석에 의한 호소, 화산작용에 의한 호소, 용식작용에 의한 호소, 하천작용에 의한 호소로 구분하며, 우리나라는 18,797개의 호소가 있다.

2.1.2 국내 호소 현황

우리나라의 경우 화성암 지형이 많아서 자연호소가 적으며, 강우가 한시기에 집중되는 등의 문제로 인공적으로 물을 가두는 인공호소 조성이 불가피하였다. Table 1은 국내 호소현황을 종합 정리하였다.

Table 1 Status of man-made dams, lakes and marshes

Section	Reservoir		Dams				Total
	Reservoir	Estuary	Multipurpose	Hydroelectric	Industrial/ Agriculture	Irrigation	
sites	17,573	10	16	21	63	1,114	18,797

2.2 수계 성층(10)

2.2.1 성층현상의 정의 및 특징

성층현상이란 수온(기타 염분 등)의 변화에 따라 물의 밀도가 변하여 호소 내에 깊이에 따른 밀도층이 형성되는 현상으로 규모가 큰 호소나 저수지에서는 여름철에 수면과 바닥의 온도차가 15℃ 정도 이상으로 큰 차이가 나기도 한다.

호소 상층부에는 온도가 높고 밀도가 낮은 표층이, 호소의 바닥 부분에는 온도가 낮으며 밀도가 높은 심층이 존재하고, 표층과 심층 사이에 중간층이 존재한다. 표층과 심층은 깊이에 따라 온도의 분포가 일정하나 중간층에서는 온도가 급격히 변화한다.

2.2.2 성층현상의 계절적 특성

봄의 경우 표층의 얼음이 녹으면서 수온이 높아지기 시작하여 4℃가 되면 최대 밀도를 가짐으로서 표층의 물이 아래로 이동하게 되고 상대적으로 심층이 표층으로 이동하게 된다. 이를 물의 전도현상이라고 한다. 즉 봄철의 호소 수온은 수심에 따라 일정하며, 미약한 바람에 의해서도 수직방향으로 혼합이 일어나게 된다.

여름철의 경우 표층의 수온이 급격히 증가하고 밀도는 감소하게 된다. 표층은 낮은 밀도, 심층은 높은 밀도의 물을 갖게 되어 무게중심이 하강하는 안정 상태를 이루게 된다. 여름의 성층현상은 겨울보다도 더 강력한 데 단지 몇℃의 수온

차이만으로는 혼합이 발생하지 않는다. 여름철의 수온분포 중 표층과 심층 사이에 수온약층이 존재한다. 이 층은 통상 1m당 1℃ 이상의 수온차이를 가지게 된다.

가을의 경우 표층의 수온은 점차 감소되기 시작하며, 대신 밀도는 점차 증대되기 시작한다. 표층의 수온이 심층의 수온과 비슷해지면 호수 물은 약한 바람에 의해서도 완전히 혼합되며, 이 과정은 단 몇 시간 만에 발생되어지는데 이를 전도현상이라고 한다.

2.2.3 성층화 메커니즘

성층화는 온도차에 의해서 밀도가 낮은 따뜻한 표층이 수온이 낮아 상대적으로 밀도가 큰 심층위에 안정적으로 층을 이루고 있는 것을 말한다. 이들 두층은 대단히 안정되어 있기 때문에 어느 정도 세기 이하의 바람영향은 거의 받지 않는다. 지구물리학에서 유체는 전형적으로 서로 다른 밀도차에 의해서 각기 다른 질량을 갖게 되고, 지구 중력 작용에 의해 이들 각기 다른 밀도를 갖는 유체들은 수직적인 층을 형성하게 된다. 이들 수직 층 내에서 유체요소들은 밀도차에 의해서 서로 다른 위치에너지를 보유하면서 평형을 이루게 된다. 그러나 일련의 외부자극에 의해 이러한 평형은 간섭을 받게 되어 무거운 유체가 상승하기도 하고 가벼운 유체가 하강하기도 한다. 유체가 수평방향의 외력이 없고 단지 성층만이 순수하게 수직방향으로 발달되어있는 정적 평형상태에 놓여있다고 가정할 때, 무거운 유체 입자가 가벼운 유체 밑에 놓여 있으면 안정된 상태에 있다고 할 수 있으나, 무거운 유체가 가벼운 유체 위에 놓이게 되면 유체는 불안정하게 된다.

이러한 현상을 증명하기 위해, 기준면에서 일정 높이(z)에 있는 유체입자의 밀도가 $\rho(z)$, 이 유체 입자가 이동해서 더 높은 지점($z+h$)에 있을 때 이 입자의 주변밀도는 $\rho(z+h)$ 가 된다. 이 경우 유체가 비압축성이고 약간의 압력 변화에도 불구하고 이동유체입자의 밀도가 이동전의 밀도를 유지한다면 새로운 이동지점에서의 부력은 $g[\rho(z+h)-\rho(z)]V$ 와 같이 쓸 수 있다. 여기서 V 를 입자의 체적이라고 할 때, 유체요소가 상승하면 부력은 양(+)의 값을 갖게 된다. 이것을 Newton's law를 적용하면 식 1과 같다.

$$\rho(z)V \frac{d^2h}{dt^2} = g[\rho(z+h) - \rho(z)]V \quad (1)$$

지구물리학적 유체는 일반적으로 약한 성층을 띄고 있기 때문에 밀도변화는 기준밀도 또는 평균밀도에 비해서 크게 차이가 없으므로 식 1 좌변의 $\rho(z)$ 는 기준밀도 ρ_0 로 대치 할 수 있다. 우측항의 밀도변화를 추정하기 위한 Taylor 전개를 위해 식 2와 같이 놓을 수 있다.

$$\rho(z+h) - \rho(z) \cong \frac{d\rho}{dz} h \quad (2)$$

다시 식 1을 V로 나누면 식 3과 같다.

$$\frac{d^2h}{dt^2} - \frac{g}{\rho_0} \frac{d\rho}{dz} h = 0 \quad (3)$$

식 3에서 볼 수 있듯이 계수($-\frac{g}{\rho_0} \frac{d\rho}{dz}$)는 음(-)의 값이나 양(+)의 값을 갖는다. 만일 양(+)의 값을 갖는다는 것은 $dp/dz < 0$ 이 된다는 것을 의미한다. 무거운 밀도를 갖는 유체가 가벼운 밀도를 갖는 유체 밑에 위치). 이것을 N^2 값으로 정의하면 식 4와 같다.

$$N^2 = -\frac{g}{\rho_0} \frac{d\rho}{dz} = \epsilon' g, \quad N = \sqrt{\epsilon' g} \text{ (1/sec)} \quad (4)$$

식4의 방정식 해는 주파수 N의 진동특성을 갖는다. 물리적으로 N이라고 하는 것은 주변보다 무거운 유체입자가 상승했을 때 중력에 의해 다시 하강할 때 수직방향의 속도가 생기고 원래의 위치에 도달했을 때 유체입자의 관성에 의해 더 낮은 곳으로 움직이게 되어 결국 밀도가 더 큰 유체에 둘러싸이게 된다. 이때 유체입자는 다시 부력이 작용해서 상승하게 된다. 결국 유체입자는 평형에 이를 때까지 진동을 하게 된다는 것을 의미한다. 이와 같이 N이라는 특성값은 진동 주파수를 의미하며 "Stratification frequency"라고도 불린다. 이 특성 값은 성층화된 수체의 유체흐름특성을 판단하고 결정하는 아주 중요한 매개변수가 된다. 만일 식3의 계수가 음(-)의 값을 갖는다면 ($dp/dz > 0$, 무거운 밀도를 갖는 유체가 가벼운 밀도를 갖는 유체 위에 위치), 이 해는 지수적으로 증가해서 수체는 불안정하

게 된다. 즉, 성층화된 유체가 외부의 자극을 받으면 초기반응을 시작하기 위한 압력파가 만들어지고, 이러한 흐름은 유체에 변위를 일으켜 부력이 작용할 수 있도록 한다.

일반적인 환경에서의 성층화는 선형적으로 이루어지지 않고 대부분 다층선형 형태를 보인다. 이러한 비선형성층에서의 Equivalent linear stratification은 실제의 위치에너지와 선형성층에서의 위치 에너지를 비교함으로써 유도해낼 수 있다. 단위 면적당의 위치 에너지는 다음과 같이 주어진다.

$$PE = \int_0^H \rho(z)gzdz \quad (5)$$

선형성층인 경우 높이 z 에서의 위치에너지는 다음과 같이 주어지고

$$\rho(z) = \rho_B + \frac{\Delta\rho(z)}{\Delta z} \quad (6)$$

식 6을 식 5에 대입하고 적분하면 아래와 같은 식을 얻을 수 있다.

$$PE = \frac{1}{2}\rho_B g H^2 + \frac{1}{3} \left(g \frac{\Delta\rho(z)}{\Delta z} \right) H^3 = PE_A \quad (7)$$

식 4를 식 7에 대입하고 정리하면 N_E 를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$N_E = \left(\frac{\frac{1}{2}\rho_B g H^2 - PE_A}{\frac{1}{3}\rho_B H^3} \right)^{1/2} \quad (8)$$

여기서, N : 성층 주파수 (Stratification frequency)

g : 중력가속도

ρ_0 : 기준밀도

z : 수심

H : 전체 수심

PE_A : 위치에너지

ρ_B : 바닥에서의 밀도

2.3 밀도류(10)(11)(12)

2.3.1 밀도류의 정의

유체의 흐름에서 밀도의 차이는 온도, 용질의 농도, 유체 중의 부유물질 등에 의해 발생한다. 이러한 밀도의 차이로 발생하는 음(-)의 부력, 혹은 양(+)의 부력에 의한 흐름을 일컬어 밀도류라 한다. 밀도류의 예로는 부유사 밀도류, 저온수의 유입으로 인한 밀도류, 하구에서 발생하는 염수의 유입, 토석류, 침전지에서의 부유사 이동 등이 있다.

Fig. 2은 유입류(ρ_{in})와 주변수체의 밀도(ρ) 차이에 따라 밀도류의 종류를 분류한 것이다. Fig. 2의(a)와 같이 유입류가 바닥에서 흐르게 되고, 이를 하층 밀도류라 한다. Fig. 2의(b)의 경우처럼 주변유체가 밀도의 차이에 의해 성층이 이루어졌을 때 유입류의 밀도와 동일한 층에서 흐름이 발생하는 경우는 중간 밀도류라 한다. 그리고 Fig. 2(c)는 유입류의 밀도가 주변 유체의 밀도보다 작아 양(+)의 부력이 발생하여 주변유체 상부로 흐름이 발생하는 경우로서 상층 밀도류라 한다.

밀도류는 유입조건에 따라 연속흐름과 불연속흐름으로 나눈어진다. 연속흐름은 유입부에서 지속적으로 밀도류가 공급되는 흐름을 의미하며, 불연속흐름은 유입부에서 일시적으로 밀도류가 공급되는 흐름이다. 또한 밀도류가 유입부에서 방출되면서 운동량의 영향을 받아 흐를 때 이를 jet이라고 하며, 유입부의 영향이 없이 자체의 부력흐름들에 의해 하류로 진행할 때 부력류라고 한다.

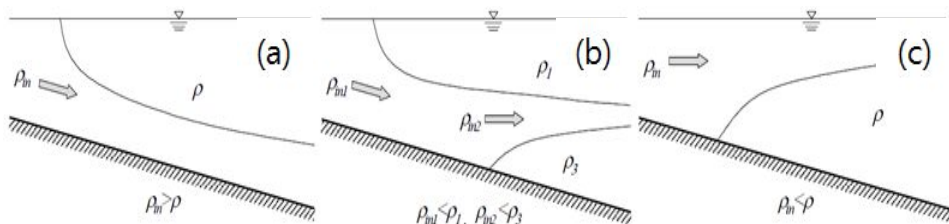


Fig. 2 Morphological classification of density current

(a): Under density flow, (b) Middle density flow, (c) Upper density flow

2.3.2 밀도류의 구조

주변수역과 밀도가 다른 유체는 방류된 후 선단을 형성하며 하류로 흘러간다. 따라서 밀도류는 주변수역을 해쳐 나가는 선단부와 뒤에서 쫓아오는 몸체부로 이루어진다. 성층류가 몸체부에 해당하는 흐름이라고 본다면 밀도류는 성층류를 포함하는 포괄적인 개념의 용어라고 할 수 있다.

Fig. 3은 하층 밀도류의 개략도이다. Fig. 3의 영역 1은 유입류의 침강이 일어나기 전의 상태로 단일층의 흐름을 적용하여 수리특성을 해석할 수 있다. 영역 2는 유입류와 주변수체가 분리되는 영역으로 바닥밀도류가 시작되는 구간이다. 이 영역에서는 주변수체와 유입류의 밀도차에 의해 발생하는 압력과 유입류의 운동량이 평형을 이루다가, 계속 유입되는 유입류에 의해 평형이 깨지면서 자유수면으로부터 주변수체와 유입류가 분리된다. 이 때 주변수체와 유입류의 분리가 시작되는 지점을 침강점이라고 하는데, 이는 곧 하천류의 끝점이자 밀도류의 시작점이라 할 수 있다. 유입류가 침강점을 지나면 주변수체와 유입류의 이중층이 존재하고, 경계면에서 두 흐름의 혼합과 밀도류의 회석 등이 작용이 발생한다. 영역 3은 주변수체와 밀도류의 밀도차에 의해 바닥을 따라 흐름이 진행되는 부분이다. 이 부분에서는 주변수체가 유입되고 하상으로부터 유사가 유입되거나 유입류 내의 유사입자가 퇴적되기도 한다. 영역 4는 밀도류의 선단부로서 복잡한 수리학적 특성을 나타낸다.

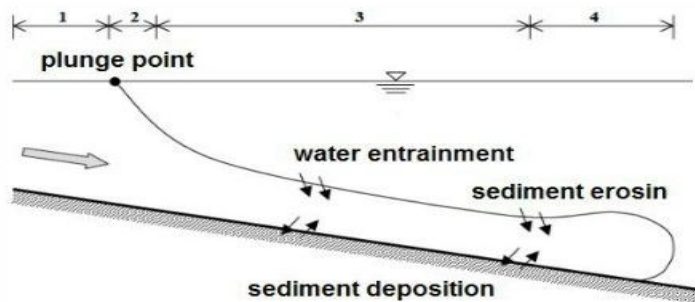


Fig. 3 Underflow density currents

2.3.3 밀도류의 특성

밀도류와 주변수체의 경계부에서는 유속 차이로 인해 자유 전단층이 형성되며, 이는 Kelvin-Helmholtz 불안정을 발생시키는 원인이 된다. Kelvin-Helmholtz 불안정은 소용돌이를 발생시키고, 이는 주변수체의 유입에 영향을 미친다.

밀도류의 선단부는 매우 복잡하고 불안정한 구조를 갖는다. 밀도류의 선단부에서 발생하는 불안정에는 크게 Bbills와 Lobes and clefts가 있다. 주변수체와의 속도차에 의한 전단력으로 밀도류가 선단부를 타고 말려 올라가는 듯한 형상의 소용돌이를 Bbills라 한다. 또한, 바닥면의 영향에 의한 선단부의 복잡한 형상을 Lobes and clefts라 한다. 주변수체와 밀도류 사이에 뚜렷한 경계를 형성한다.

밀도류의 몸체부는 선단부보다 비교적 안정된 흐름으로 부력과 하상의 마찰력, 상층유체와의 경계면에 작용하는 전단력이 균형을 이루며 흘러가게 된다. 이때, 부력은 성층류를 가속시켜 불안정하게 하는 한편, 유체층 사이의 성층화를 강화하여 주변수체의 유입을 감소시켜 성층류를 안정시키는 상반된 역할을 한다.

2.4 EFDC(17)

2.4.1 EFDC의 개요

EFDC는 강, 호수, 습지, 하구, 저수지, 연안해역 등을 포함한 수계에 널리 이용 가능한 3차원 모델로서, 수체의 3차원 흐름과 질량이송, 수질의 모의와 같은 일반적인 목적을 위한 모델이다. EFDC는 Virginia 해양연구소에서 처음 개발되었으며, 현재 U.S.EPA와 Tetra Tech, Inc.의 지원을 받아 지속적으로 유지, 관리 및 향상되고 있다.

EFDC모델은 Hydrodynamics, Water Quality, Sediment Transport, Toxics 등 4개의 모듈로 구성되어 있으며, Fig. 4와 같이 Hydrodynamics 모듈의 구동 결과인 수심, 유속, 흐름, 혼합 등의 자료들은 Water Quality, Sediment Transport, Toxics를 위한 입력 자료로 사용된다.

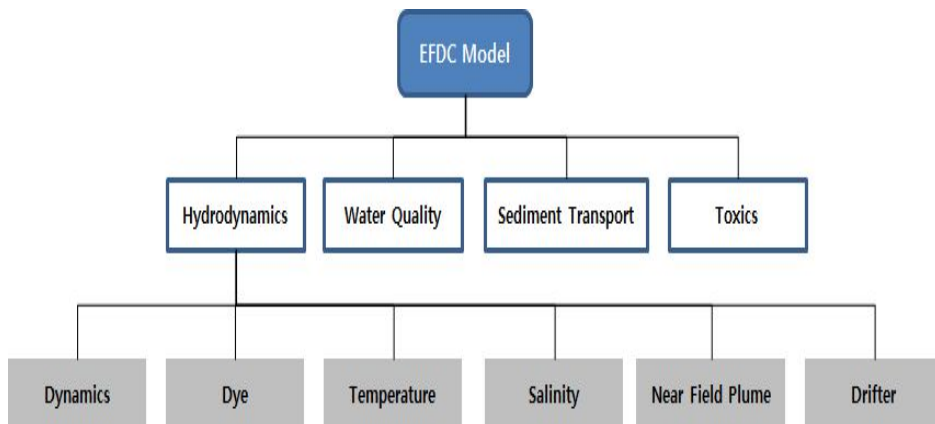


Fig. 4 Structure of EFDC model

수동역학 모델 부분은 수온과 염분이 함께 고려된 3차원 방정식을 기본으로 한다. 기본적인 물리적 구조는 Princeton Ocean Model이나 U.S.ACE의 CH3D-WES 모델 및 TRIM 모델과 유사하나, 조간대 등에서 수체의 유동현상이나 파향의 영향 등을 고려할 수 있다는 차이를 가진다.

수질모델은 CE-QUAL-ICM 수질 모델을 기본 근간으로 하고 있다. 수온, 염분을 비롯한 용존산소, 식물성 조류, 탄소, 질소, 인, 규소 순환계 등을 포함하는 Fig. 5와 같이 총 22개의 상태변수를 모의할 수 있다.

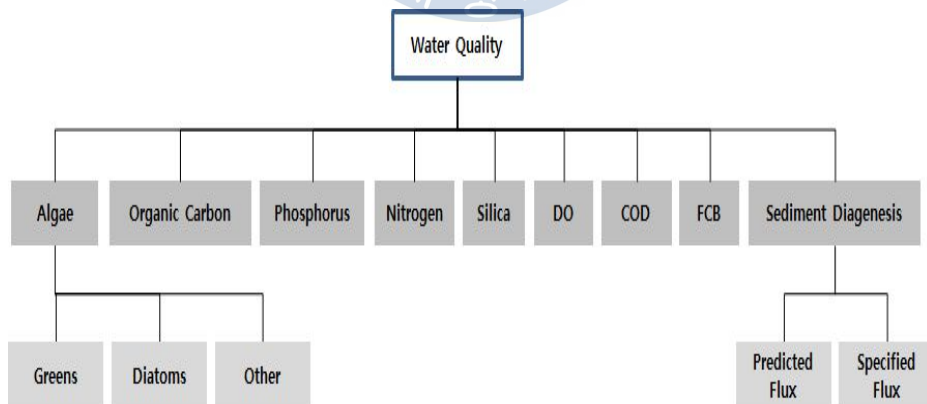


Fig. 5 Structure of the EFDC water quality model

EFDC 모델은 현재까지 수많은 해역 및 호소에 적용되어 왔으며, 국내에서는 시화호와 경기만, 새만금호 등에 활용되고 있다.

2.4.2 기본방정식

EFDC 모델은 연속방정식과 운동방정식, 열·염 보존 방정식 그리고 퇴적물을 포함한 물질 보존 방정식들로 구성되어 있으며, 열·염 보존 방정식은 밀도차에 의한 경압력에 의하여 운동방정식과 연계되어 있다.

2.4.3 수치해법

기본방정식의 수치해법은 유한차분법과 질량 및 부피의 보존을 위한 유한체적법을 사용하여 표현한다. 운동방정식에서는 Coriolis force항과 Curvature항은 2차 정확도를 가지는 에너지 보존기법을 사용하며, 외부모드 계산 시 수평방향으로, 내부모드 계산 시 수직방향으로 음해법을 적용하여 계산효율이 높다. 시간 미분항은 2차 정확도를 갖는 Three-time-level, Leap-frog 기법 및 반음해법을 적용하였으며, Three-time-level 기법의 적용 시 발생하는 Time step splitting을 억제하기 위하여 Two-time-level의 Trapezoidal step을 첨가하는 Trapezoidal leap-frog 기법을 사용한다.

질량보존방정식의 이류항을 전방차분법으로 해석하면 안정적인 결과를 내며 음의 농도가 발생하지 않는다는 장점을 가지나, 수치적인 확산이 과다하게 발생하며 공간적으로 1차의 낮은 정확도를 갖는다는 단점을 가진다. 반면에 중앙차분법으로 해석하게 되면 2차의 정확도를 가지나, 농도구배가 큰 해역에서 불안정한 결과를 나타내어 음의 농도가 발생할 수 있다는 단점을 가진다.

2.5 CFD

2.5.1 CFD 기본이론(20)

일반 유체 유동을 기술하기 위한 방정식으로 Navier-stokes 방정식이 사용되는데, Navier-stokes 방정식의 해석해(Analytical solution)는 단지 이상적인 조건을 가진 간단한 유동인 경우에만 구할 수 있다. 따라서 복잡한 실제 유동에 대한 해

를 얻기 위해서는 수치 해석적 방법이 사용되는데, 수치 해석적 방법이란 지배방정식을 대수방정식으로 변환한 후 컴퓨터를 이용한 계산을 통하여 해를 구하는 방법이다.

지배방정식의 이산화를 위해서는 해석영역을 유한한 제어체적(Finite control volume)으로 나누는, 즉 격자계(Grid system)를 구성하는 과정이 필요하다. 지배방정식은 각각의 제어 체적에 대해 적분되며, 각 물리량(질량, 운동량, 에너지 등)은 제어체적 내에서 보존법칙을 만족해야 한다.

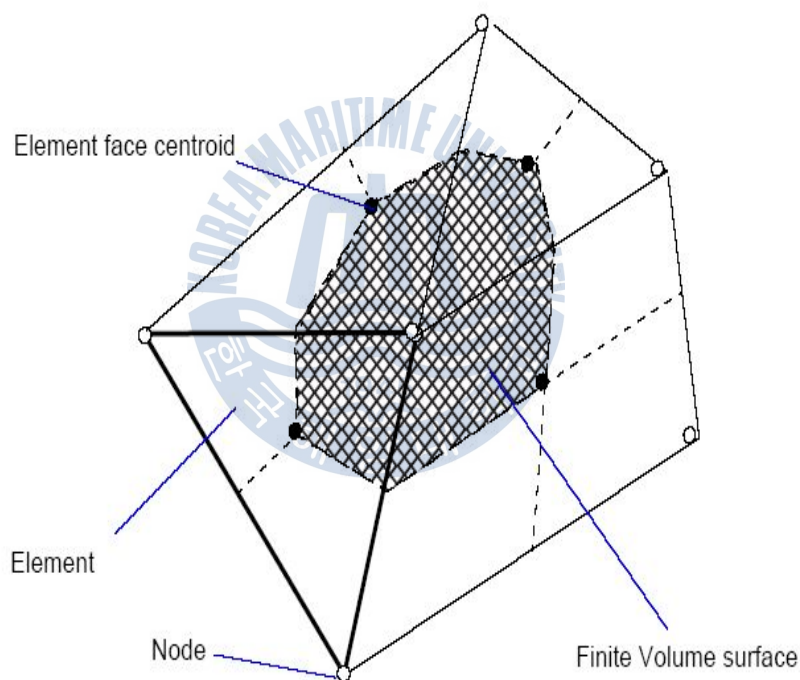


Fig. 6 Definition of control volume used in CFD calculation

단위 깊이를 가진 전형적인 검사체적을 Fig. 6에 나타내었다. 여기서 음영으로 표현한 부분은 검사체적을 나타낸다. 각각의 노드(Node)는 검사체적을 구성하는 여러 개의 면들로 둘러 싸여 있으며, 모든 변수 값과 유체 물성치는 이 노드에 저장된다.

직교 좌표계에 대해 질량, 운동량 그리고 스칼라 량 보존방정식의 시간 평균된 형태는 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) + S_{u_i} \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \phi) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_{eff} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) \right) + S_{\phi} \quad (11)$$

이 방정식들은 제어체적에 걸쳐 적분되며, 체적적분(Volume integral)을 면적분(Surface integral)으로 변환시키기 위해 가우스 발산이론(Gauss divergence theorem)이 적용된다. 제어 체적은 시간에 따라 변하지 않으므로, 시간 미분항은 제한체적에 대한 적분식 밖에 위치할 수 있고, 그 결과 적분식은 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho dV + \frac{\partial}{\partial x_j} \int_S \rho u_j dn_j = 0 \quad (12)$$

$$V \left(\frac{\rho - \rho^0}{\Delta t} \right) + \sum (\rho U_j \Delta n_j)_{ip} = 0 \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_V \rho u_i dV + \int_S (\rho u_j u_i) dn_j = \\ - \int P dn_j + \int \mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) dn_j + \int S_{u_i} dV \end{aligned} \quad (14)$$

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \phi dV + \int_S \rho u_j \phi dn_j = \int_S \Gamma_{eff} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) dn_j + \int_V S_{\phi} dV \quad (15)$$

여기서 V 와 S 는 각각 적분체적과 면적을 나타낸다. 그리고 dn_j 는 제어체적을 구성하는 표면에서 바깥쪽으로 향하는 법선 벡터의 미소 직교좌표 성분이다. 면적적분은 유속(Flux)에 대한 적분이며, 체적 적분은 제어체적 내의 축적항(Accumulation), 또는 소스항(Source)을 나타낸다.

제어체적이 변하는 경우에 대한, 지배방정식의 변화를 아래에 나타내었다. 이 경우, 연속적인 방정식들을 수치적으로 해석하는 처음 단계는 이산함수를 사용하여 방정식을 근사화 시키는 것이다. Fig. 7에 나타난 독립된 격자에 대해 표면 유속은 연속적인 방정식을 이산화 형태로 변환하는 과정에서 각 적분점에서 서로 다르게 표현되는데, ip 으로 표시되는 적분점은 삼차원의 유한체적을 둘러싼 각 표면의 중심에 위치한다.

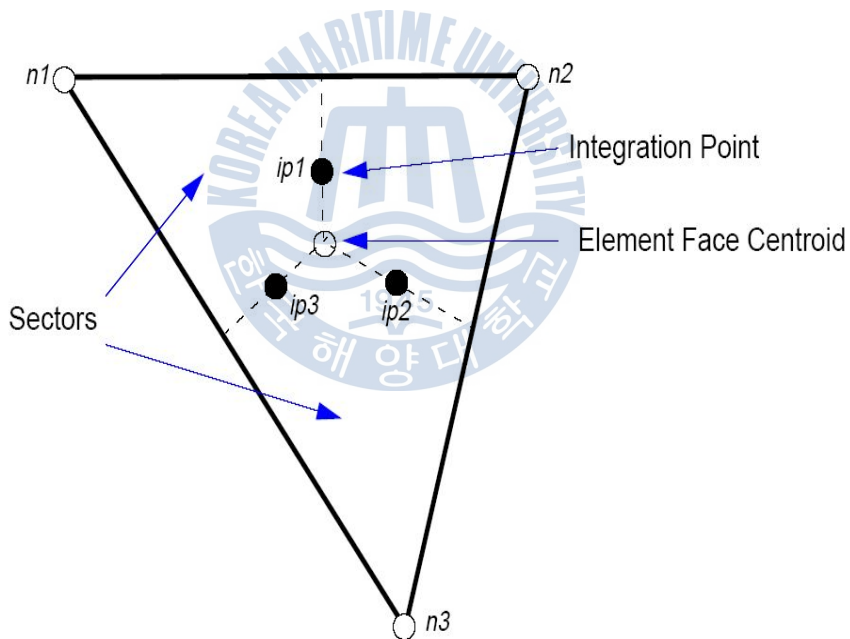


Fig. 7 Components of 3D meshes

결과적으로, 적분 방정식의 이산화 형태는 다음과 같다.

$$\rho V \left(\frac{\rho - \rho^0}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} (\rho U_j \Delta n_j)_{ip} = 0 \quad (16)$$

$$\rho V \left(\frac{U_i - U_i^0}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} \dot{m}_{ip}(U_i)_{ip} = \sum_{ip} (P \Delta n_i)_{ip} \left(\mu_{eff} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \Delta n_j \right) + \overline{S_{U_i}} V \quad (17)$$

$$\rho V \left(\frac{\phi - \phi^0}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} \dot{m}_{ip}(U_i)_{ip} = \sum_{ip} \left(\Gamma_{eff} \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \Delta n_j \right)_{ip} + \overline{S_\phi} V \quad (18)$$

$$V \left(\frac{\rho U_i - \rho^0 U_i^0}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} \dot{m}_{ip}(U_i)_{ip} = \sum_{ip} (P \Delta n_i)_{ip} \sum_{ip} \left(\mu_{eff} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \Delta n_j \right) + \overline{S_{U_i}} V \quad (19)$$

$$V \left(\frac{\rho \phi - \rho^0 \phi^0}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} \dot{m}_{ip} \phi_{ip} = \sum_{ip} \left(\Gamma_{eff} \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \Delta n_j \right)_{ip} + \overline{S_\phi} V \quad (20)$$

여기서 V 는 제어 체적, 첨자 ip 는 적분점, 합(Summation)은 유한체적 내의 모든 적분점에 대한 합, n_j 는 표면을 통해 나가는 서로 다른 표면 벡터, t 는 시간간격을 나타낸다. 비록 Second order scheme이 아래에 언급된 바와 같이 가능하지만, 이 방정식에는 First order backward euler scheme이 사용되었다. 상첨자 0는 전 시간단계에서의 값을 의미한다. 제어 체적 면을 지나 는 질량은 $\dot{m}_{ip}$ 로 나타내었고 다음과 같다.

$$\dot{m} = (\rho U_j \Delta n_j)_{ip}^0 \quad (21)$$

2.6 물 순환장치 운영에 따른 수질개선 효과(8)

2.6.1 용존산소 농도 증가

호소의 상하층 혼합은 호소 내에 산소공급과 식물성 플랑크톤의 성장을 제어 하려는 목적으로 사용될 수 있다. 호수내부에 성층현상이 형성된 경우 수표면을 통해 전달된 용존산소는 심층수로 전달되지 않으며 심층수의 용존산소 고갈 문제는 더욱 심각해 질 수 있다. 수중에 용존산소가 고갈되는 경우 환원조건이 형성되어, 철, 망간 등의 농도가 증가하고 황화수소 등의 발생으로 인하여 냄새 문제가 발생할 수 있다. 또한 댐 방류수의 낮은 용존산소 농도는 하류의 생태계에 악영향을 미칠 수 있으며 호수 내부의 어족의 생태에도 문제를 야기할 수 있다.

호수의 인공순환에 의해서 기대되는 가장 큰 효과는 호수전체에 걸쳐 산소의 농도를 증가시킬 수 있다는 점이다. 그러나 인공순환에 의하여 전달된 공기에 의한 산소공급 효과는 산소의 용해속도가 매우 낮기 때문에 그다지 크지 않다고 보며 이 방법에서 발생하는 산소전달 효과는 주로 대기와 접촉하여 다량의 용존 산소를 포함하는 표면수가 심층으로 이동하여 혼합되어 희석효과를 가져오기 때문으로 알려져 있다.

2.6.2 조류의 성장제어

인공순환에 의한 조류의 성장은 조류를 수층 전체에 재 분포 시킬 수 있을 정도로 충분한 에너지를 공급할 수 있는 경우에 효과적인 것으로 알려져 있다. 이러한 경우, 조류는 광합성에 필요한 태양에너지의 사용에 제한을 받게 된다. Lorenzen and Mitchell(1973, 1975)의 연구 결과에 의하면 조류의 성장을 제한하는 데는 인공순환장치에 의한 수체의 순환 깊이가 가장 중요한 요소인 것으로 지적되고 있다. 이때, 조류의 성장을 제한할 수 있는 정도의 순환 깊이를 한계수심 이라고 하는데, 수표면의 태양에너지와, 조도계수, 보상심도 등을 고려하여 결정할 수 있다. 미국 New Hampshire의 Kezar호수(표면적 $7.2 \times 10^5 \text{m}^2$, 최대수심 10m, 평균수심 3m)의 경우 인공순환장치의 설치로, 호수의 혼합 깊이가 2m에서 6m로 증가하였으며 조류가 단위면적당 질량으로 약 38% 가량 감소되었다고 보고된 바 있다.

2.6.3 영양염류농도

인공순환에 의한 용존산소의 증가로 호수바닥이 산화조건을 형성할 경우 철 이온은 3가로 산화되어, $\text{FePO}_4(\text{S})$ 또는 $\text{Fe}(\text{OH})_3(\text{S})$ 형태로 퇴적물 내에 머무르게 된다. 이와 반대로 혐기성이 되어 호수바닥에 환원조건이 형성되는 경우, 2가의 철 이온은 용해되어 인산염과 분리되므로, 용존성 인이 수중으로 용출되는 효과를 가져 온다. 그러나 경우에 따라서 철 이온이 수중의 인 농도에 결정적으로 영향을 미치지 않을 수 있는데, 철/인 의 비율이 매우 낮거나 경도가 매우 높은 경우에는 Ca 농도가 인의 용해정도에 큰 영향을 미치게 된다. 이러한 경우, 용출율은 유기물의 호기성 산화 정도에 따라 크게 영향을 받는다고 보고된 바 있으며 이러한 경우에 있어서 퇴적물과 수중의 계면의 수온이 증가함에 따라 용출률이 증가할 수도 있다. 특히, 퇴적물에 유기물 함량이 많고 함수율이 높고 응집성향이 강한 경우에는 약하게 결합되어 있는 인성분이 다량 존재할 수도 있는데, 이러한 경우에도 인의 용출은 인공순환에 의해 증가할 수 있다. 또한 인공순환에 의한 물리적인 이동에 의하여 인의 용출이 증가될 수도 있다. 이러한 인공순환에 의한 부작용현상은, 성층현상이 잘 발달되지 않고, 호수의 수심이 비교적 낮고, 부영양화 된 호수일수록 심각하게 나타날 수 있다. 또한 인공순환에 의하여 인 농도가 호수 전체적으로 감소하였다고 하더라도, 유광층에서 조류의 성장에 필요한 인 농도는 증가될 수도 있다는 연구결과도 보고되고 있다. 따라서 산소의 공급에 의해 인 농도가 확실히 감소된다고 볼 수 있기 전에는, 인공순환에 의한 성층파괴를 야기 시키지 않는 것이 좋을 수도 있다.

2.6.4 조류의 종조성에 미치는 영향

호수의 인공순환에 의해서 호수내부에 존재하는 조류의 우점종이 변화할 수 있다. 이러한 현상 중 녹조현상을 나타내는 남조류로 부터 규조류 또는 녹조류로 이동하는 것이 가장 중요하다고 볼 수 있다. 이러한 변화의 주요한 원인으로서 아래의 이유를 들 수 있다.

첫째, CO_2 와 pH의 변화,

둘째, 부유성 조류의 분포의 변화,

셋째, 동물성 플랑크톤에 의한 섭취 등

호수의 순환에 의하여 pH 가 감소될 경우, 남조류 이외의 조류의 생장에 유리할 수도 있다. 남조류는 또한 특유의 공기 주머니를 이용하여 수중에서 태양에너지, pH, CO₂, 그리고 영양염류의 농도에 따라 수직으로 이동할 수 있는데, 인공 순환에 의하여 침강성이 두드러지는 조류인 규조류가 표층수에 머물 수 있는 기간이 길어짐에 따라, 남조류의 생장에 유리했던 호수의 조건이 약화될 수도 있다. 또한 호수 수심에 따라 산소농도가 증가함으로써, 광량이 적은 수심에까지 동물성 플랑크톤의 서식범위가 확대되어 육안으로 포식하는 물고기로부터 동물성 플랑크톤이 도피할 수 있는 범위가 확장됨으로써, 동물성 플랑크톤이 선호하는 조류의 농도가 전반적으로 감소할 수도 있다. 그러나 인공순환에 의하여 표층의 영양염류의 농도가 증가할 경우, 남조류의 성장을 더욱 촉진할 수도 있다.



제 3 장 본론

3.1 설계조건

3.1.1 밀도류 확산 원리

Fig. 8은 균일 밀도의 유체와 밀도층을 형성한 유체에서 일어나는 확산을 확인한 것으로, 균일 밀도의 유체에 외부에서 동일한 균일 밀도의 유체가 유입될 경우, 전체 확산이 일어나며 진행되는 것을 확인할 수 있었다. 밀도층을 형성한 유체에서는 자신과 동일한 밀도층을 찾아 이동한 후 그 층에서만 확산이 일어난다(6)(22)(23).

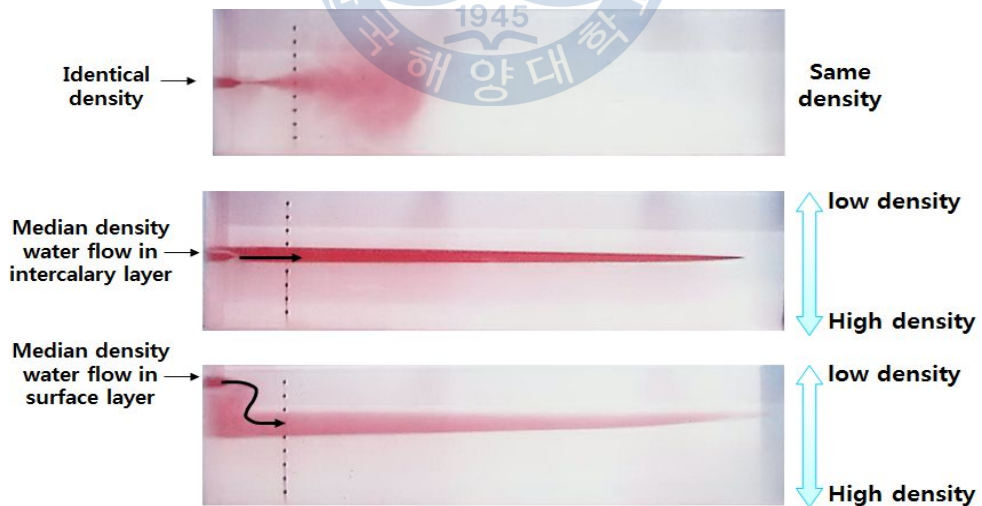


Fig. 8 Experiment hypothesis of density current flow

이러한 점을 착안하여 정체수역에 밀도확산을 위해 표층수와 저층수를 혼합하여 성층에 토출하는 기법을 산정하였다. 특정 밀도의 물이 형성 되어 이 특정 밀도를 기준으로 높고 낮은 밀도 층이 구별되어져 그 사이로 혼합된 물이 흐르도록하기 위하여 밀도류확산장치의 임펠러의 회전에 의하여 흡입·혼합하여 중층 토출부를 통해 확산하도록 하였다(24)(25)(26).

3.1.2 PIV 이용한 토출구유동 해석(20)

CFD해석은 경우 초대형 모델의 실제 계산이 가능하지만 정확도가 실험에 비해 떨어지는 것이 현실이다. 본 연구에서는 PIV(Particle Image Velocimetry) 속도장 측정기법을 이용하여 축소 밀도류확산장치 모형으로 속도장을 측정하였다. 상사법칙을 적용하여 실제 밀도류확산장치와 유사한 유체역학적 특성을 갖는 조건하에서 축소 모형실험을 수행하였다.

Fig. 9와 Fig. 10은 본 연구에 사용된 레이저 조명장치의 사진이다. 레이저는 카메라와 동기장치를 통해 연결된다. Fig. 11은 본 연구에 사용된 카메라를 촬영한 사진이다. 본 연구에서는 두 장의 연속된 영상에서 속도를 추출하는 Cross-correlation방식 PIV를 사용하였다. Cross-correlation방식 PIV에서는 두 영상 사이의 시간간격의 설정이 매우 중요하다. 본 연구에 사용된 PIV용 카메라는 특별히 고안된 Double-exposure 기능을 탑재하여 두 영상 사이의 간격을 수 μ s미만으로 설정할 수 있기 때문에 빠른 유동의 속도측정이 가능한 장점이 있다.

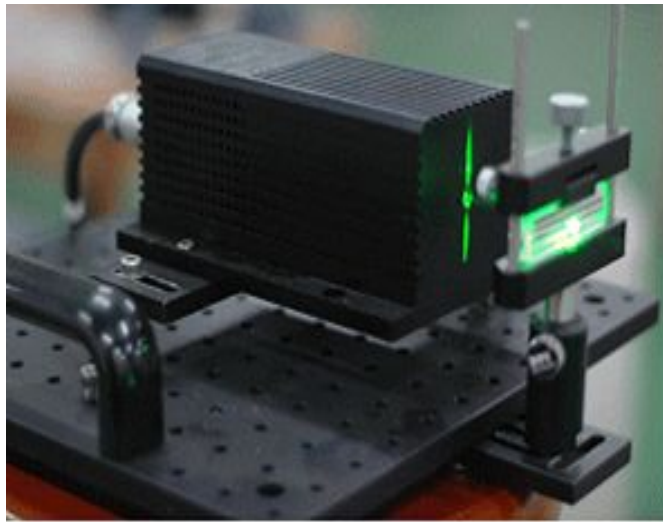


Fig. 9 Diode-pumped solid-state laser and cylindrical lens
PIV(Particle Image Velocimetry) analysis equipment



Fig. 10 Generated laser sheet
PIV(Particle Image Velocimetry) analysis equipment

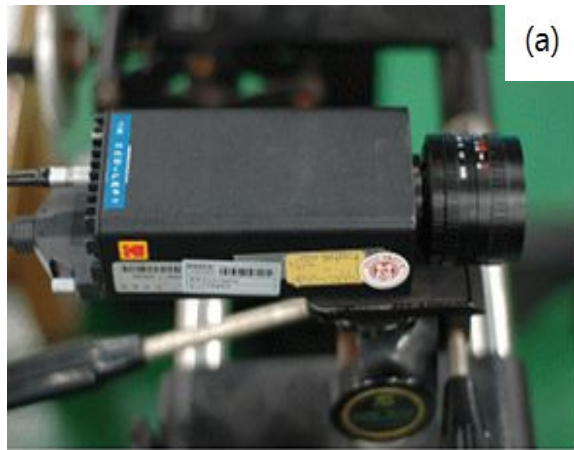


Fig. 11 Charge-coupled device camera used in this study

(a) Top view, (b) Front view

PIV(Particle Image Velocimetry) analysis equipment

Fig. 12는 밀도류확산을 위한 축소모델과 수조의 사진이다. 실험모델의 수조의 크기는 가로, 세로, 높이가 동일하게 1m로 제작되었다. PIV 실험은 60 RPM 조건에서 수행되었다.

Fig. 13은 속도벡터와 속도성분U의 윤곽(Contour)을 동시에 표현한 결과이다. 측정결과 좌측으로 유동이 진행함에 따라 유동이 상하로 진동하고 있음을 관찰할 수 있다. 또한 유동이 진행함에 따라 제트의 폭이 점차 증가하고 있으며, 제트 중앙의 속도는 점차 감소하고 있음을 알 수 있다. 나타낸 결과는 유동이 약간 상부로 향하고 있으나 시간에 따라 상하로 크게 변화하는 결과들을 관찰할 수 있었다.

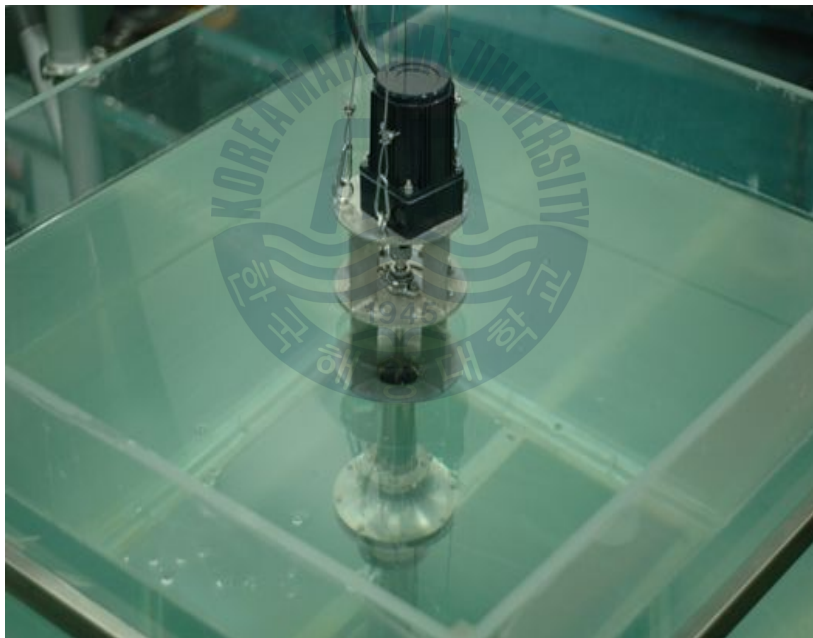


Fig. 12 Photograph of scaled density current generator model and water tank

Density current generator model size: 1/10

Water tank size(width, length, height): 1,000mm×1,000mm×1,000mm

Operating condition: 60rpm

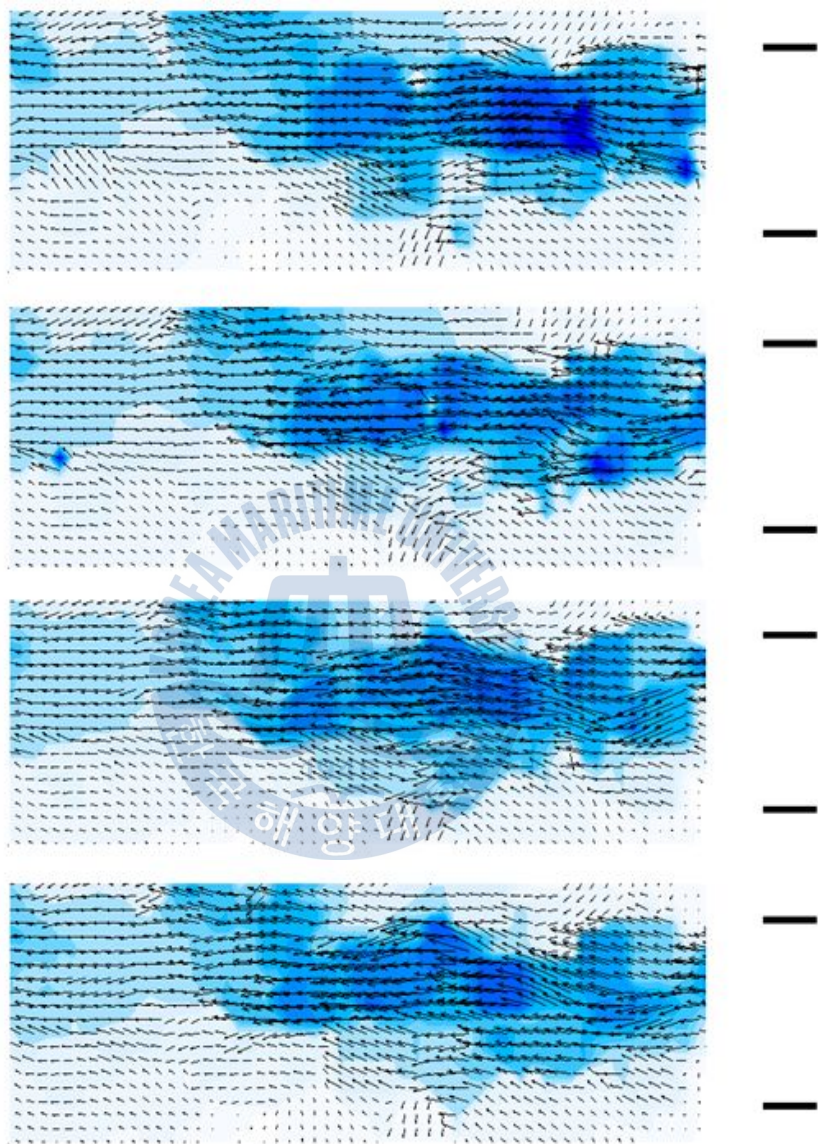


Fig. 13 Velocity vectors and 'U' velocity component contour measured by particle image velocimetry
 Outlet: turbulent flow(top and bottom)

3.1.3 실증현장 개요(7)

현장적용 실증현장 호소의 선정은 오염과 부영양화상태가 되어 수질개선이 필요한 호소를 대상으로 하였다. Table 2와 같이 실증현장 호소 선정의 주체는 한국농어촌공사 서산지사의 고풍저수지로 평균 수심 13m이상, 총 저수량 8백만톤의 중소규모의 저수지로 인공적으로 조성된 곳을 선정하였다.

Table 2 Summary of test bed

Area(ha)	1,476	Benefit area(ha)	1,293.8
Total volume(*1000ton)	8,360	Dead storage(*1000ton)	538.2
Basin area(ha)	2,590	Dike range(m)	6.0
Average depth(m)	13.0	Maximum depth(m)	29.0
Dike length(m)	227	Dike height(m)	33

Location: korea, chung cheongnam-do, seosan-si, unsanmyeon, go pung-ri

3.1.4 생태독성 평가

3.1.4.1 현장 오염/배출원 부하량

대상호소인 실증현장은 전체적으로 해발고도 EL.[m] 100~300 내외의 저산성 산지들이 곳곳에 분포되어 완사면 및 구릉지로 둘러싸여 있다. 고풍저수지 유역면적은 31.465km²로 곳곳에 소규모 평야가 조성되어 있다. 고풍저수지 유역은 4개 지역으로 구분하였다. 오염원으로 생활계, 축산계, 토지계가 대부분으로 산업계는 전무한 실정으로 파악되었으며, 이에 따른 발생/오염 부하량 현황을 Table 3~4에 나타내었다.

Table 3 Contamination sources of test bed(Pollutant loads)

unit: [kg/d]

Pollution load	Life	Stockbreeding	Industry	Farming	Land	Landfill	Total
BOD							
Yonghyeon-ri	18.185	18.480	0	0	43.355	0	80.02
Gopung-ri	12.754	301.745	0	0	19.862	0	334.361
Wonpyeong-ri	11.934	203.512	0	0	26.226	0	241.672
Wau-ri	10.987	198.622	0	0	16.958	0	226.567
Total	53.86	722.359	0	0	106.401	0	882.62
T-N							
Yonghyeon-ri	5.000	4.088	0	0	41.923	0	51.011
Gopung-ri	3.507	75.379	0	0	16.900	0	95.786
Wonpyeong-ri	3.281	52.885	0	0	21.678	0	77.844
Wau-ri	3.021	45.475	0	0	14.629	0	63.125
Total	14.809	177.827	0	0	95.13	0	287.766
T-P							
Yonghyeon-ri	0.543	1.264	0	0	2.961	0	4.768
Gopung-ri	0.381	32.049	0	0	1.176	0	33.606
Wonpyeong-ri	0.356	21.024	0	0	1.570	0	22.95
Wau-ri	0.328	14.471	0	0	1.054	0	15.853
Total	1.608	68.808	0	0	6.761	0	77.177

Table 4 Contamination sources of test bed(Discharge loads)

unit: [kg/d]

Pollution load	Life	Stockbreeding	Industry	Farming	Land	Landfill	Total
Yonghyeon-ri	4.148	1.663	0	0	43.355	0	49.166
Gopung-ri	1.346	27.833	0	0	19.862	0	49.041
BOD Wonpyeong-ri	4.052	18.823	0	0	26.226	0	49.101
Wau-ri	4.339	17.876	0	0	14.629	0	36.844
Total	13.885	66.195	0	0	104.072	0	184.152
Yonghyeon-ri	4.432	0.981	0	0	41.923	0	47.336
Gopung-ri	3.109	18.334	0	0	16.900	0	38.343
T-N Wonpyeong-ri	2.705	12.875	0	0	21.678	0	37.258
Wau-ri	2.623	10.914	0	0	14.629	0	28.166
Total	12.869	43.104	0	0	95.13	0	151.103
Yonghyeon-ri	0.447	0.095	0	0	2.961	0	3.503
Gopung-ri	0.314	2.425	0	0	1.176	0	3.915
T-P Wonpyeong-ri	0.293	1.593	0	0	1.570	0	3.456
Wau-ri	0.270	1.085	0	0	1.054	0	2.409
Total	1.324	5.198	0	0	6.761	0	13.283

3.1.4.2 생태독성평가

생태독성 시험은 표층수와 저층수의 혼합비율을 달리하여 물벼룩의 생존율과 활동력의 변화를 측정하여 난해하고 복잡한 수생환경에 대한 유해성을 확인하였다. 물벼룩이 단기간 노출되어 유해한 영향이 나타나는 급성독성은 반수영향농도(EC: Effective Concentration)로서 표현되거나, 시험 생물체 물벼룩의 유영저해가 나타나는 농도, 대조군에 비해 시험군의 50% 감소농도 등으로 표현된다.

시험법은 수서무척추동물인 물벼룩을 이용하여 시료의 급성독성을 평가하는 방법으로 수질오염공정시험기준으로 실시하였다. 시험법의 원리는 물벼룩은 시료내의 독성물질에 의해 영향을 받을 수 있으며 그 영향에 의해 유영성을 잃게 되는데, 시료를 여러 비율로 희석한 시험 수에 물벼룩을 넣고 24시간 동안 관찰하여 물벼룩의 50%가 유영저해를 일으키는 시료농도 EC_{50} 에서의 시험수중 시료의 함유율을 결정하고 단위 환산에 의해 생태독성 값(TU: Toxic Unit)을 계산한다. 생태독성 값은 단위시험기간 시험생물의 50%가 유영저해를 일으키는 농도(시험 수 중 시료 함유율%)인 EC_{50} 을 $100/EC_{50}$ 으로 환산한 값을 말한다. 단, 100% 시료에서 물벼룩의 0~10%에 영향이 있을 경우에는 TU를 0으로 하고, 물벼룩의 10~49%에 영향이 있을 경우에는 $0.02 \times$ 영향 받은 퍼센트로 TU를 계산한다. 물벼룩의 유영저해 정도는 시험용기를 조용히 움직여 준 후, 약 15초 후에 관찰하여 일부기관의 움직임을 관찰 하였다.

시험에 사용된 시료는 실증현장 밀도류확산장치 설치지점에서 이루어졌으며, 시료의 취수는 1m, 5m, 9m, 12m, 15m, 18m를 수심별 취수하여 물벼룩 독성실험에 이용하였다. 시료의 희석 비는 대조군(희석수), 100%, 50%, 25%, 12.5%, 6.25%로 하여 시험기간 중 시험용액을 교환하지 않는 지수식 실험을 하였다. 한 농도 당 최소 20개체 이상의 시험생물을 사용하며, 이때 4개 이상의 반복구를 설정하였다. 시험용액의 양은 1개체당 2mL 이상으로 하였으며, 독성시험 전과 후에 수온, 수소이온농도, 용존산소, 잔류염소, 총 용존성 고형물질을 측정하였다. 다른 시험 방법의 조건은 수질오염 공정시험법 제 49항의 물벼룩을 이용한 급성 독성 시험법에 의하여 실시하였다. 물벼룩 독성 실험 1차 결과를 분석한 후 TU값이 특이하게 나타난 수심 층인 15m, 18m를 저층수로 표현하여 표층수인 1m와 희석하여 2차 시험을 하였다. 희석배율은 1:1(표층수:저층수), 2:1, 3:1로 사용하였으며, 저층수는 15m와 18m로 모든 시험방법은 1차 시험과 동일한 방법으로 실시하였다. 기초자료 조사 방법은 pH는 pH측정기

(HM-20P, TOA), 용존산소량은 DO측정기(DO-31P, TOA), 잔류염소측정은 염소측정기(HI 93701, HANNA instruments)로 사용하였다.

수심별, 희석별 시료의 기초자료 실험은 수질오염공정시험기준으로 각 농도별 온도, 수소이온농도, 용존산소, 잔류염소량, 총 용존성 고형물질에 대하여 실시하였다. 기초 실험 결과 특이사항은 1차 기초 자료 조사에 의하면 수심 15m와 18m 100% 시료에서 용존산소와 수소이온농도의 수치가 타 시료에 비해 현저히 낮게 나타난 것으로 관찰되었다. 2차 실험은 표층수(1m)와 저층수(15m, 18m)를 희석하여 1:1, 2:1, 3:1배율로 실험한 기초자료에서는 용존산소와 수소이온농도의 값은 상대적으로 높게 측정되었으며, 표층수와 저층수 혼합 희석일 경우는 원수 보다는 생태학적 수질이 향상되는 것으로 관측되었다.

시료별 물벼룩 독성시험 결과는 1m, 5m, 9m, 12m 지점 시료에서의 물벼룩 유영저해에 따른 TU는 0으로 나타났으나, 15m, 18m의 원수에서는 각각 0.7TU 값으로 산정되었다. 100% 원수 이외의 농도에서는 TU값은 0으로 나타났다. 시험 결과에 따른 TU값과 기초자료 분석에 의하면 15m 와 18m 원수 TU값의 영향은 기초자료에서 보듯이 용존산소와 수소이온농도에 영향을 미친 것으로 관찰되었다. 물벼룩 2차 시험 결과 희석배율 3:1(표층수 : 저층수)의 배율에서는 TU값이 0이었으며, 2:1 배율에서는 TU값은 15m와 18m, 100% 희석배율에서 각각 0.1 TU 값으로 분석 되었다. 1:1 실험에서는 15m, 100% 희석 배율에서 0.2TU로 18m, 100% 희석 배율에서 0.3TU 값이 측정되었다.

물벼룩 독성시험 결과를 분석하면 물벼룩 독성에 직접적인 영향을 미친 인자는 상대적으로 낮은 수소이온농도와 용존산소에 의한 독성이 있었을 것으로 판단된다. 낮은 수소이온농도의 영향은 저수지 저니층에서 여러 가지 물질의 자연적 분해에 의한 산성도일 가능성이 클 것이며, 농어촌 공사에서 실시된 지속적 저수지 수질분석 자료에 의하면 축산폐수에 의한 부영양화인 수계임을 감안한다면 낮은 수소이온농도가 독성에 영향을 미치는 인자임을 예측 할 수 있다. 또한 낮은 용존산소의 영향은 생물학적 독성에 직접 영향을 주는 인자로 인식되는바, 자연적 부식성 산에 의한 산성화와 축산폐수 유입에 의한 빈 산소층등의 영향이 직접적인 원인일 것으로 판단된다. 이 후 현장 밀도류확산장치 적용 시 필요한 기초 자료로서의 활용 측면에서는 밀도류 혼합 시 표층수와 저층수의 혼합비율은 3:1로서의 수계 생물학적 독성에는 영향이 없는 것으로 나타났다.

3.2 CFD 밀도류 확산 모델

본 연구에서는 CFD를 이용하여 정체수역 밀도류확산에 따른 수질변화 중 가장 중요한 인자로 판단되는 DO의 전달 및 확산 현상을 예측할 수 있는 기법을 개발하고 이를 이용하여 실증현장의 DO 확산을 예측하였다. 밀도류확산 기법을 적용할 경우 밀도층을 확산시키고, 교란시킴과 동시에 상대적으로 넓은 범위까지 유동이 확산되는 특징을 확인할 수 있었다.

3.2.1 밀도류확산장치 운전에 따른 DO 예측기법 개발

3.2.1.1 기존 DO 모델링 기법 분석

호소 표층과 저층의 온도차에 의한 밀도차를 이용하여 물 순환을 통해 개선될 것으로 기대되는 수질변화는 DO이다. 기존의 수질모델링 프로그램들을 분석하여 계산 알고리즘을 파악하고 기존의 프로그램으로 예측이 불가능하였던 호소의 밀도류 확산에 의한 DO변화 예측에 적용하였다.

현재 호소의 DO 예측에 가장 널리 사용되고 있는 수질모델링 프로그램 중의 하나는 비정상상태 수질모델 WASP와 정상상태 수질모델 QUAL2E 프로그램이다. WASP모델은 하천 및 저수지의 수질 모의가 가능한 모델링 프로그램으로 1980년대 후반부터 지속적으로 발전하여 현재 WASP7.5 버전까지 배포되고 있다. WASP는 하천 또는 호소의 수리 및 수질을 모의할 수 있는 모델로써 미국 환경부에서 DiToro와 Winfield 등에 의하여 최초로 개발되었다. 이후 Ambrose 등에 의하여 WASP4로 발전하였으며, 1993년에는 DOS 기반의 프로그램인 WASP5가 만들어 졌다. 2001년에는 윈도우를 기반으로 하는 WASP6로 발전되었으며 2004년 기존의 기능을 대폭 보완하고 3차원수리모델과 연계 사용이 가능한 WASP7이 발표되었다. WASP는 $\text{NH}_3\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$, Chl-a , CBOD(1), CBOD(2), CBOD(3), DO, Organic-N, Organic-P, Detritus, Benthic Algae, Salinity 등을 모의할 수 있다. 현재 국내에서도 EFDC 프로그램과 연계하여 활발히 사용 중이다. 식 22는 WASP에서 사용되는 DO 계산식으로, 다른 변수들과의 관계에 의해 DO의 생성 및 소멸과 주변으로의 대류 및 확산에 의해 모사되고 있다.



(22)

QUAL2E는 하천 수질 모의에 광범위하게 사용되는 있는 모델로 흐름방향으로 1차원인 정상상태의 수질을 모의할 수 있다. F.D.Masch and Associates와 Texas Water Development Board가 개발한 QUAL-I에 기반을 두고 있으며 1972년에 Water Resources Engineers, Inc는 미국환경부(USEPA)의 지원으로 QUAL-I를 수정하고 확장시켜서 QUAL-II를 개발하였고, Enhanced QUAL-II또는 간단히 QUAL2E 모델은 1987년 Brown and Barnwell에 의해서 개발 되었다. 이것은 현재 Georgia 주의 Athens에 있는 EPA 수질 모델링 센터에서 관리되고 있다. 또한, 사용자의 편의를 위해서 Windows용 WinQUAL이 발표된바 있다. QUAL2E모델에서 모의 가능한 수질항목은 DO, BOD, 온도, 클로로필-a로 표시되는 조류, 유기질소, 암모니아성 질소, 아질산성 질소, 질산성 질소, 유기인, 용존성 인, 대장균, 반응성 물질, 비반응성 물질이다. QUAL2E는 하천을 동일한 지형과 수리특성을 가진 구간으로 구분하고 각 구간은 같은 길이로 이루어진 계산 요소들의 연결로 세분화된다. 각 구간의 내부에서는 하상의 경사, 하천의 종단면적 그리고 마찰계수 등을 포함한 각 소구간의 수리학적 또는 지형학적 특성과 BOD 분해율, 저층의 용출율, 조류의 침강속도 등을 포함한 화학적 분해속도 등이 일정하다고 가정되어 있다. 식 23은 QUAL2E의 DO예측식이다. 이 또한 DO의 다른 환경변수들과의 연계에 의한 생성 및 소멸, 대류, 확산으로 요약할 수 있다.

(23)

3.2.1.2 CFD를 이용한 DO 예측기법

위에 간단하게 살펴본 기존의 DO 예측기법은 다음과 같은 스칼라 수송방정식과 동일한 형태이며, 정확한 확산계수와 생성 및 소멸항을 기존의 실험식들을 이용하여 입력할 경우 수질모델링 프로그램들과 동일한 결과를 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_{eff} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) \right) + S_\phi \quad (24)$$

고온의 표층유입구와 저온의 저층유입구로부터 유체를 흡입하여 중앙의 유출부에서 유체를 확산시키는 밀도류확산장치 유동을 기존의 EFDC등의 수리모델 프로그램으로는 정확하게 모사하는 것이 어려울 것으로 판단된다. 특히 깊이 방향의 급격한 온도구배를 충분한 모사하는 것은 어려움이 따르며, 밀도류확산장치의 해석과정에서 내부의 임펠러를 정확하게 모델링하여 고폭저수지와 같은 큰 영역의 계산구간 내에서 해석을 진행하는 것은 불가능하다. CFD 계산에서도 실제 밀도류확산장치 내부의 임펠러를 직접 고려하여 계산을 수행하기도 하지만 각 계산 스텝마다 상하유입구의 유량, 온도, 밀도 등의 모든 조건을 고려하여 유출부의 조건을 실시간으로 재설정하는 과정이 실제 저수지의 넓은 구간을 해석하기 위해서는 반드시 필요하다. 이러한 일련의 과정들은 기존의 수리모델로는 처리가 불가능한 것으로 판단되며, 본 연구에서는 CFD를 이용한 밀도류확산장치에 의한 유체거동을 해석하고 DO의 대류와 확산현상을 CFD 내에서 모델링하였다.

3.2.2 밀도류확산장치 운전변수에 의한 고폭저수지 수질변화해석 및 검증

Fig. 14에 밀도류확산장치에 의한 수질변화 해석을 위해 사용된 3차원 메쉬를 나타내었다. 고폭저수지의 등고선을 오토캐드 파일로 불러온 다음 이를 3차원 형상으로 변환하는 과정을 수행하였다. 본 연구에서 얻을 수 있는 고폭저수지의 등고선은 0.5m 간격의 정보를 가지고 있지만, CFD 해석의 수월성을 고려하여 깊이 방향으로 5단계의 깊이별 형상만을 반영하여 저수지의 형상을 단순화 하였다. 밀도류확산장치 상하유입구의 유입 유량비를 3:1로 선정하였다.

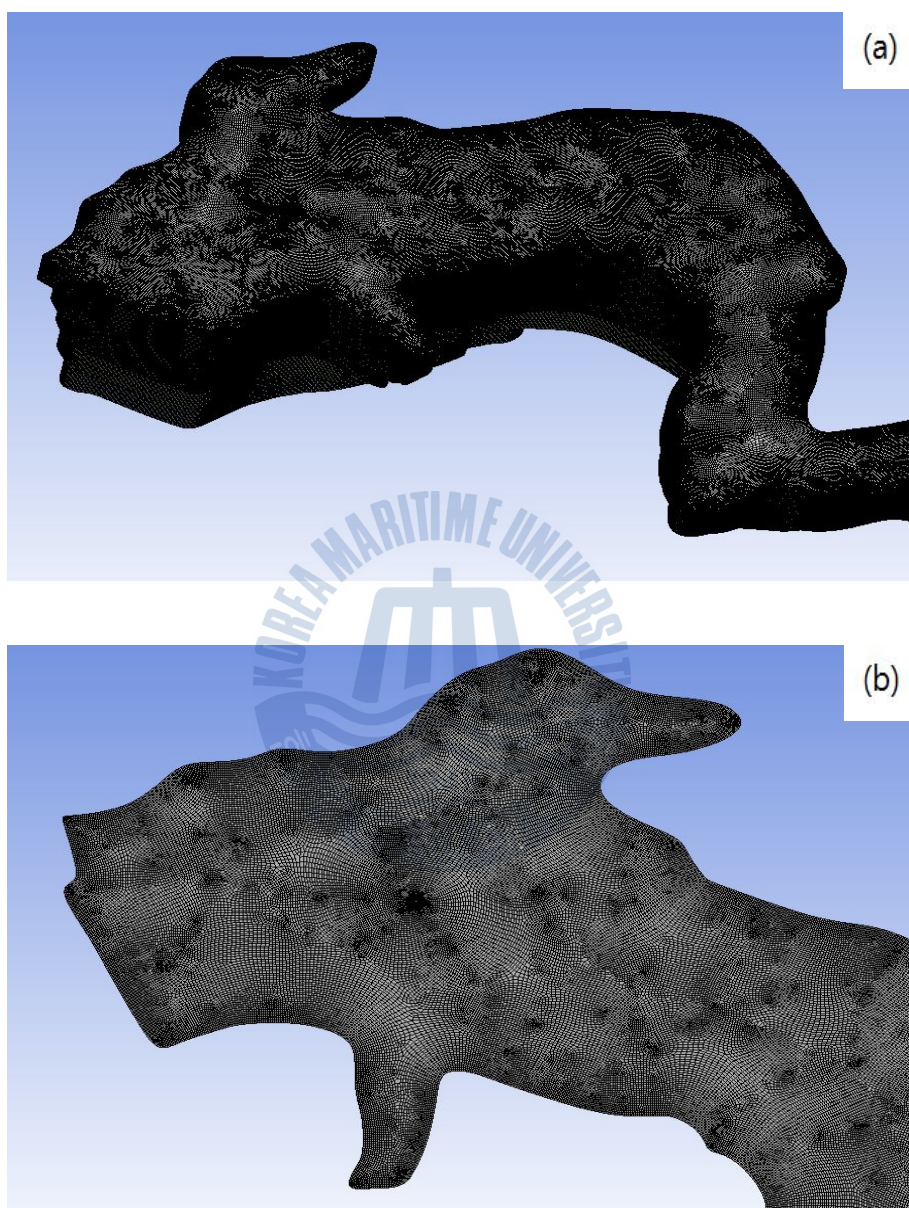


Fig. 14 Mesh of density current diffusion in test bed

(a) Depth mesh of test bed

(b) Surface mesh of test bed

Fig. 15는 속도의 크기가 1~2cm/s인 3차원 Iso-surface의 변화를 10분 간격으로 나타낸 결과로 밀도류확산장치에 의해 유동이 확산되는 현상을 정성적으로 파악할 수 있다. 해석결과 40분이 경과한 후, 밀도류확산장치에서 분출된 유동은 설치된 가장 수심이 깊은 영역에서부터 반경 200m정도의 영역까지 원형으로 확산되고 있음을 볼 수 있다.



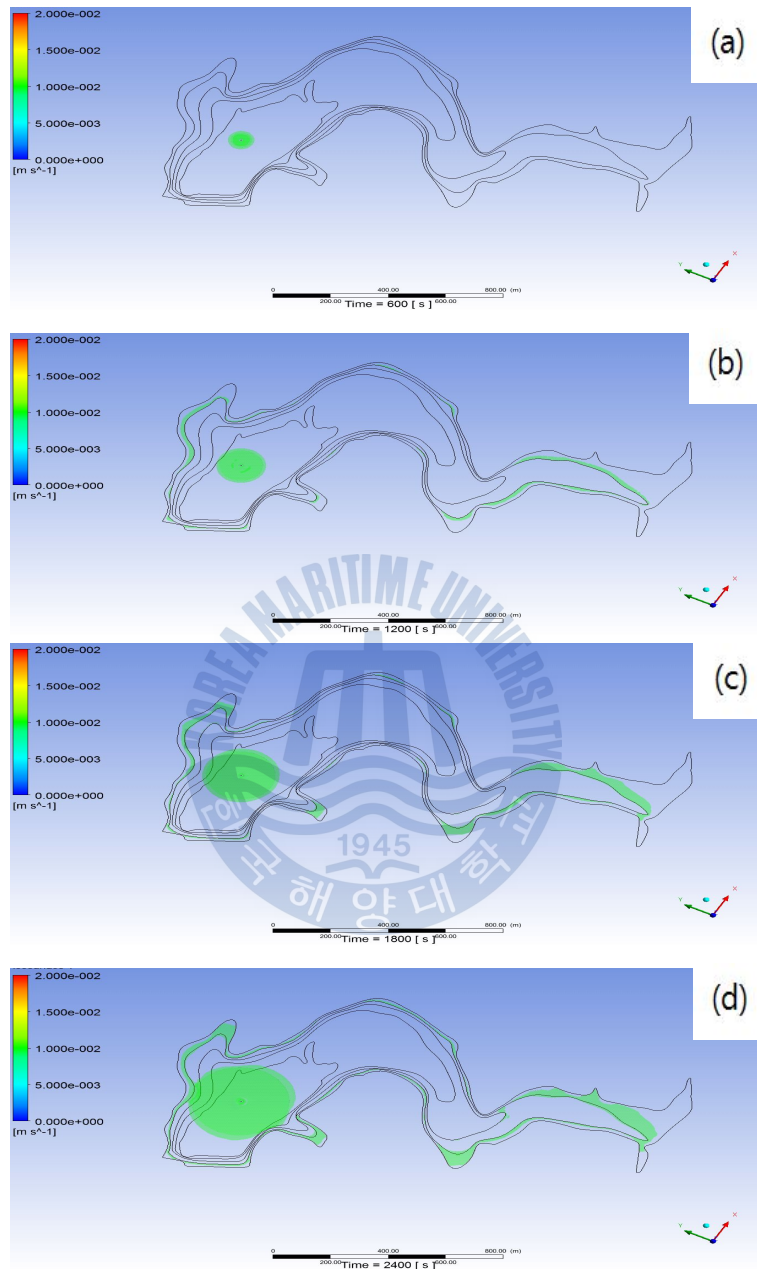


Fig. 15 Change of iso-surface in hourly variation

Model setup: discharge rate 100,000 ton/d, Velocity 0.02m/s)

Executing time change (a) 10min (b) 20min (c) 30min (d) 40min

Fig. 16은 밀도류확산장치 가동에 따른 시간별 온도분포 변화결과를 나타내고 있다. 해석결과 이상적인 경우 매우 빠른 시간 내에 온도분포의 변화를 관찰할 수 있음을 확인하였다



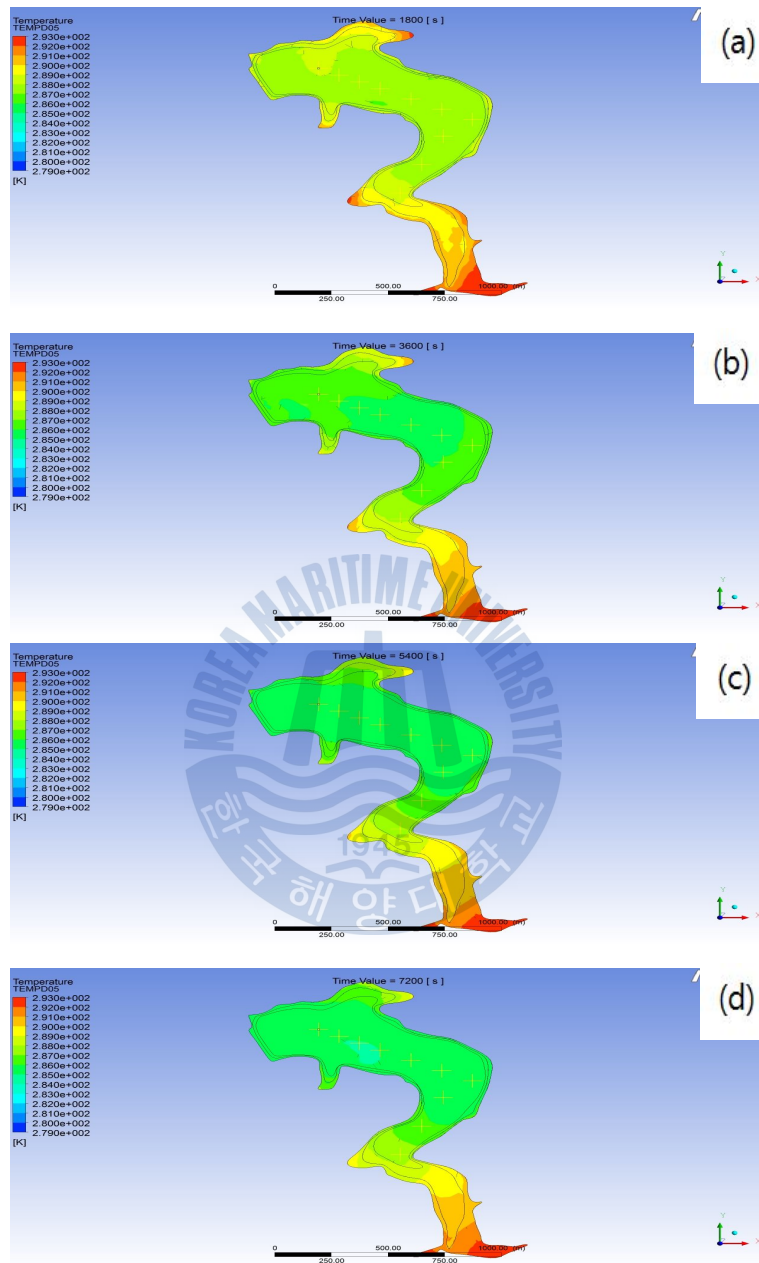


Fig. 16 Change of temperature in hourly variation

Model setup: discharge rate 100,000 ton/d, depth 5m

Executing time change (a) 30min (b) 60min (c) 90min (d) 120min

Fig. 17은 밀도류확산장치 가동에 따른 염료의 전달을 계산한 결과로 온도에 비해 느리게 진행함을 알 수 있다. DO 또한 염료와 유사한 방법으로 계산되었기 때문에 DO의 대류현상 또한 온도와 속도성분에 비해 매우 느리게 진행될 수 있음을 암시한다.



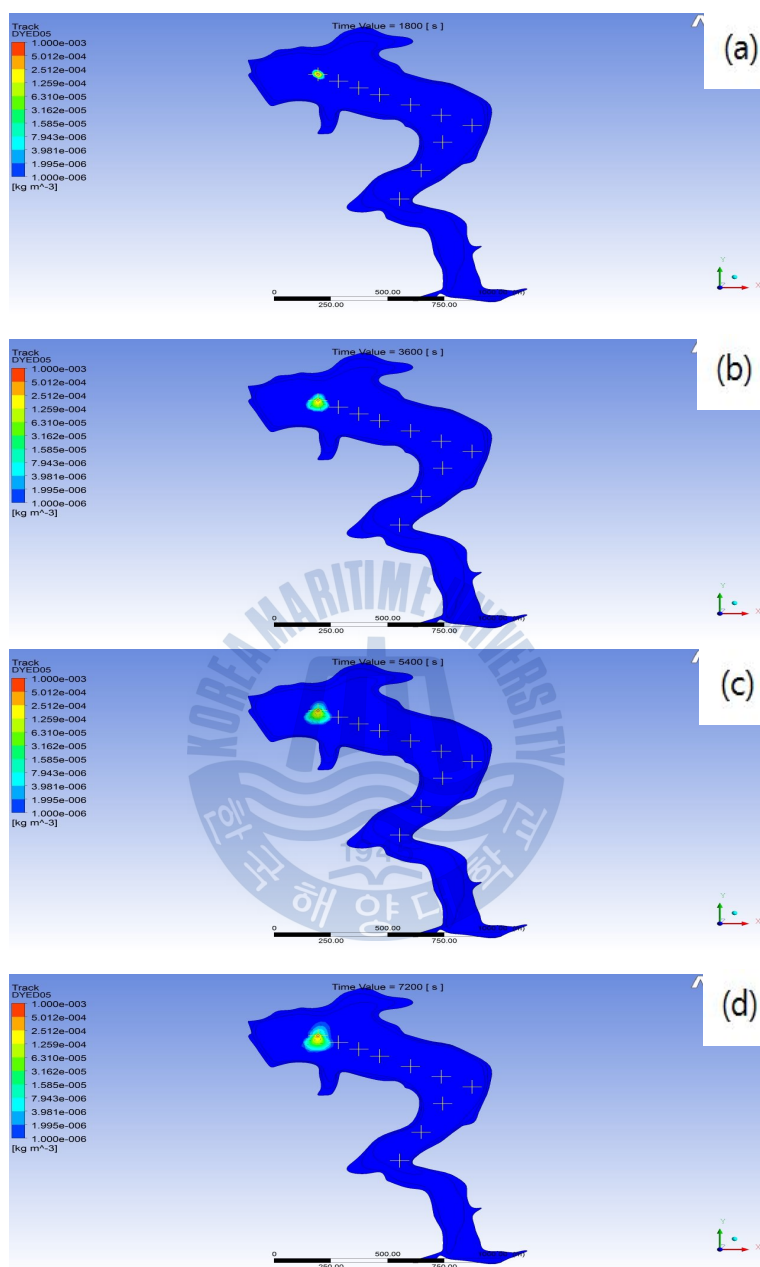


Fig. 17 Change of Dye in hourly variation

Model setup: discharge rate 100,000 ton/d, depth 5m

Executing time change (a) 30min (b) 60min (c) 90min (d) 120min

Fig. 18은 측면측정방향과 측정단면의 위치를 나타낸 그림이다. y축 방향에서 관찰할 때 실제 실증실험 과정에서 모니터링 되는 위치 중 밀도류확산장치 근처의 측정지점을 결과에 동시에 표현하여, 실측결과와 비교가 용이하도록 하였다.

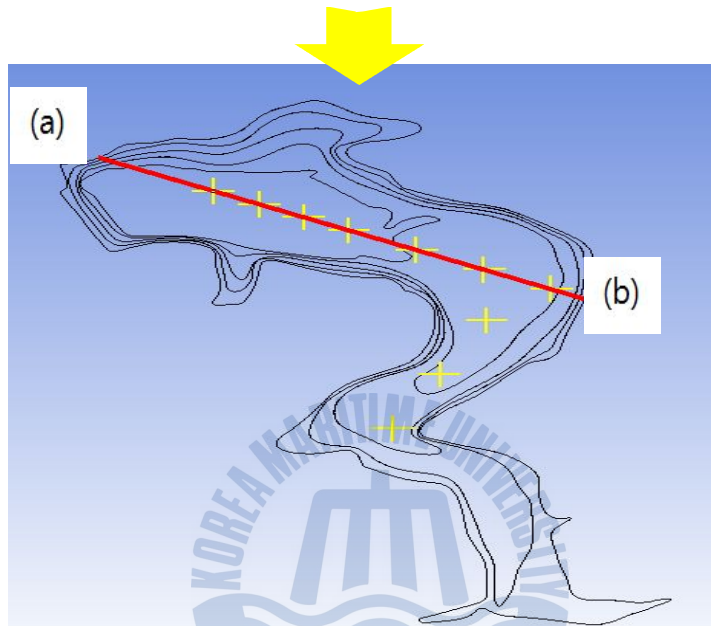


Fig. 18 CFD observation direction in test bed
Observing point: red line (a)~(b)

Fig. 19~24는 저수지 상하부의 온도차 변화에 따른 속도, 온도, 염료의 분포변화를 비교한 결과이다. 밀도류확산장치는 저수지 상하부의 온도차에 의해 발생하는 밀도차를 이용하여 원거리까지 유동을 발생시키기 위하여 고안된 장치이다. 이러한 특성은 저수지 상하부의 온도차이가 증가하여 밀도차가 클 경우, 더욱 장점을 발휘하게 된다.

Fig. 19와 20의 속도분포변화에 따르면 온도차가 증가함에 따라 저수지 내부에 활발한 유동이 발생하고 있음을 확인할 수 있다. 온도차가 크지 않은 $TH=10^{\circ}C$, $TL=8^{\circ}C$ 조건에서는 유동의 발생이 매우 제한적임을 확인할 수 있다. 반면 $TH=20^{\circ}C$, $TL=8^{\circ}C$ 및 $TH=30^{\circ}C$, $TL=8^{\circ}C$ 조건에서는 밀도류확산장치에 의한 유동의 전달이 활발하게 이루어짐을 확인할 수 있다.

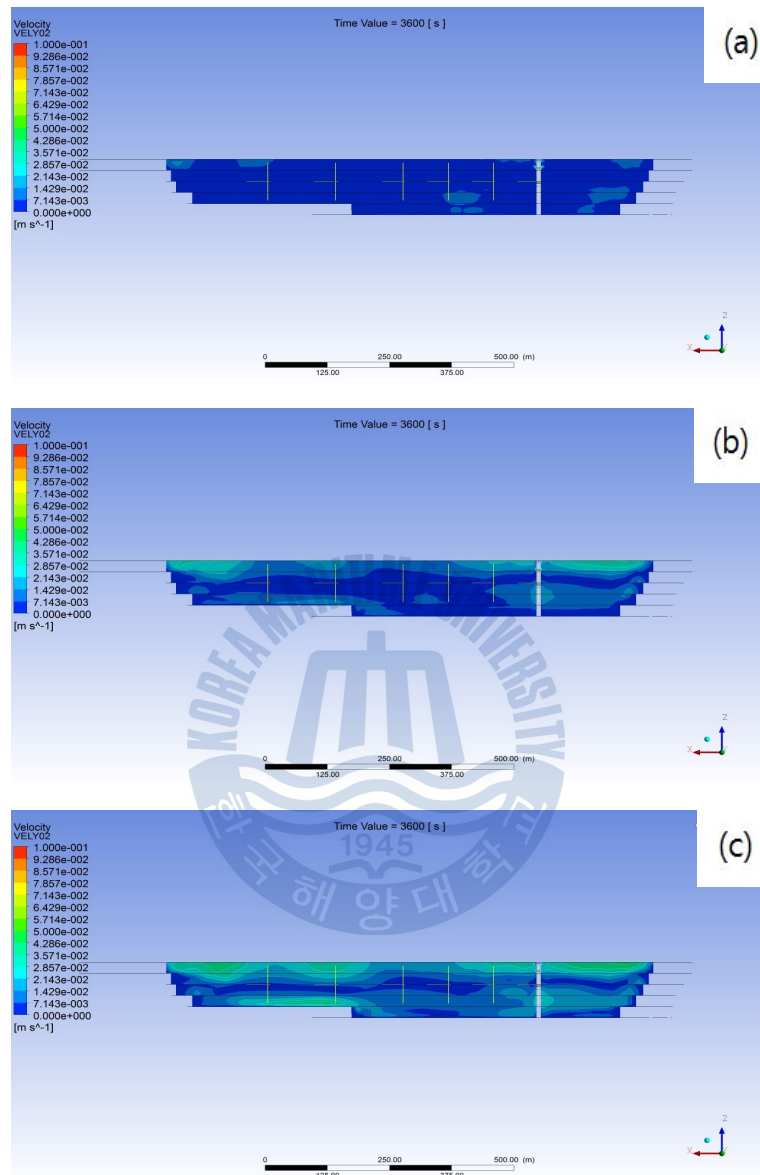


Fig. 19 Velocity distribution of temperature difference in top and bottom(case1)

Model setup: discharge rate 100,000 ton/d, time 60min

Temperature (a) TH=10°C, TL=8°C

(b) TH=20°C, TL=8°C

(c) TH=30°C, TL=8°C

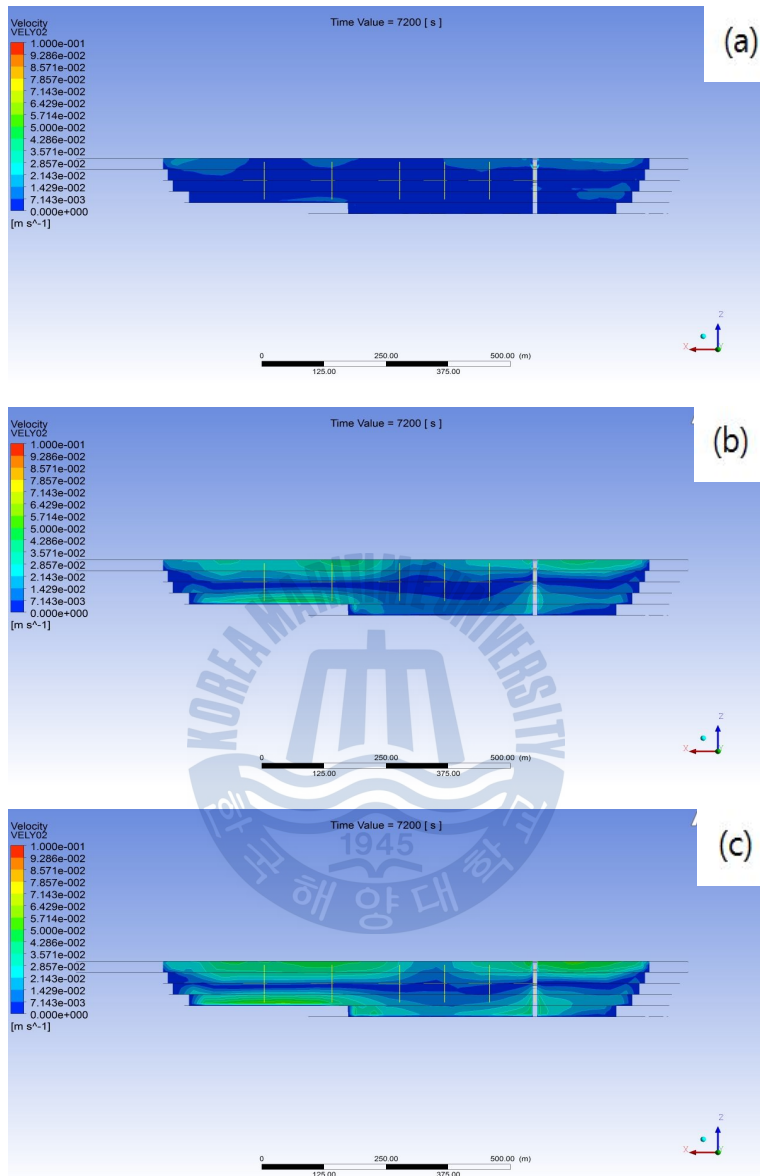


Fig. 20 Velocity distribution of temperature difference in top and bottom(case2)

Model setup: discharge rate 100,000 ton/d, time 120min

Temperature (a) TH=10°C, TL=8°C

(b) TH=20°C, TL=8°C

(c) TH=30°C, TL=8°C

Fig. 21과 22의 온도분포 결과에서도 $TH=10^{\circ}\text{C}$, $TL=8^{\circ}\text{C}$ 조건에서는 밀도층이 60분 이후에도 유지되고 있는 반면, $TH=20^{\circ}\text{C}$, $TL=8^{\circ}\text{C}$ 및 $TH=20^{\circ}\text{C}$, $TL=8^{\circ}\text{C}$ 조건에서는 보다 짧은 시간에 밀도층이 제거되고 있음을 관찰할 수 있다.

Fig. 23과 24의 염료분포 변화 결과는 온도 및 속도 결과에 비해 차이가 미미하기는 하지만 상하부 온도차가 증가함에 염료의 확산이 증대되는 현상을 발견할 수 있다. 특히 60분 결과에서는 우열을 정하기 어려운 반면, 120분 결과에서는 확연히 온도차가 큰 $TH=30^{\circ}\text{C}$, $TL=8^{\circ}\text{C}$ 조건에서 멀리 확산이 진행되고 있음을 확인할 수 있다.



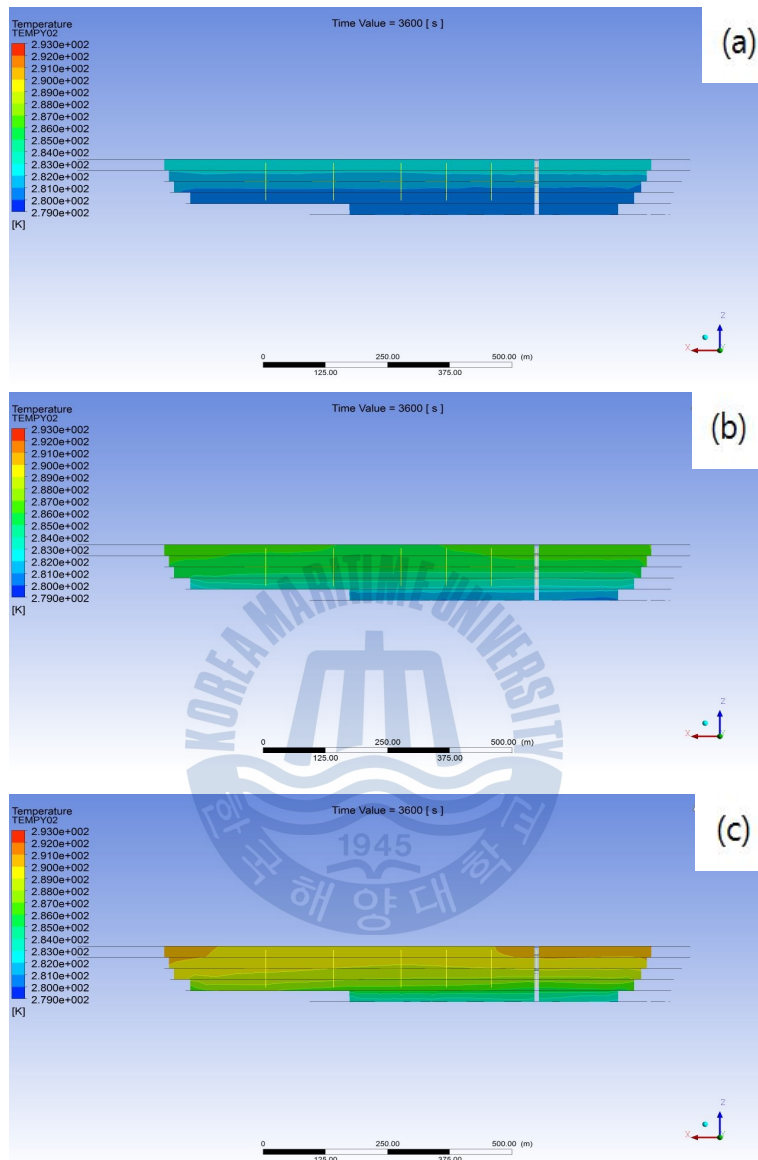


Fig. 21 Temperature distribution of temperature difference in top and bottom(case1)

Model setup: discharge rate 100,000 ton/d, time 60min

Temperature (a) TH=10°C, TL=8°C

(b) TH=20°C, TL=8°C

(c) TH=30°C, TL=8°C

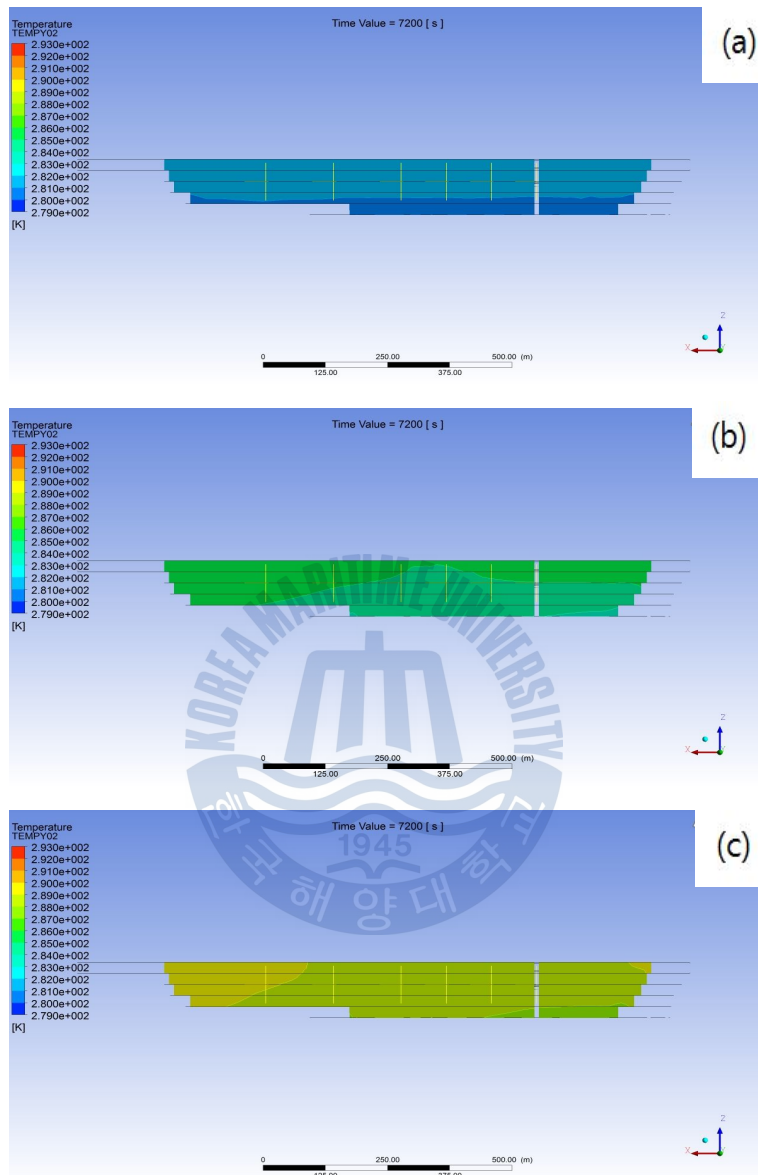


Fig. 22 Temperature distribution of temperature difference in top and bottom(case2)

Model setup: discharge rate 100,000 ton/d, time 120min

Temperature (a) TH=10℃, TL=8℃

(b) TH=20℃, TL=8℃

(c) TH=30℃, TL=8℃

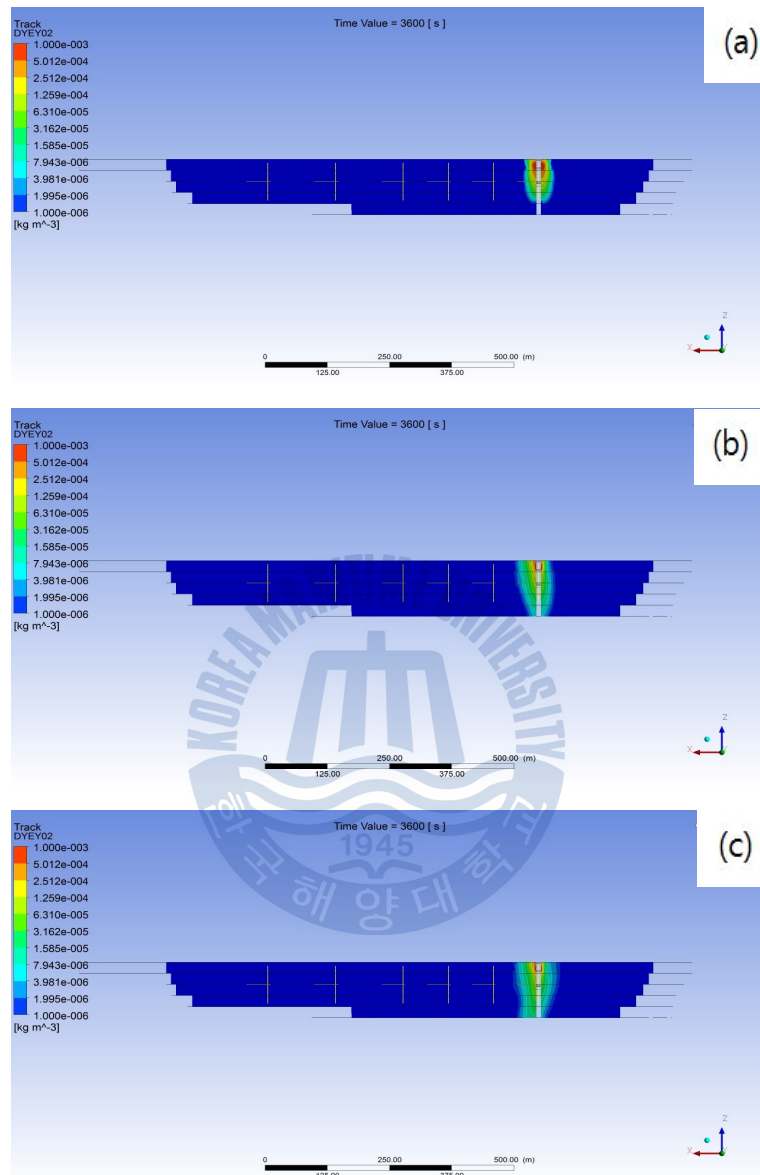


Fig. 23 Dye distribution of temperature difference in top and bottom(case1)

Model setup: discharge rate 100,000 ton/d, time 60min

Temperature (a) TH=10°C, TL=8°C

(b) TH=20°C, TL=8°C

(c) TH=30°C, TL=8°C

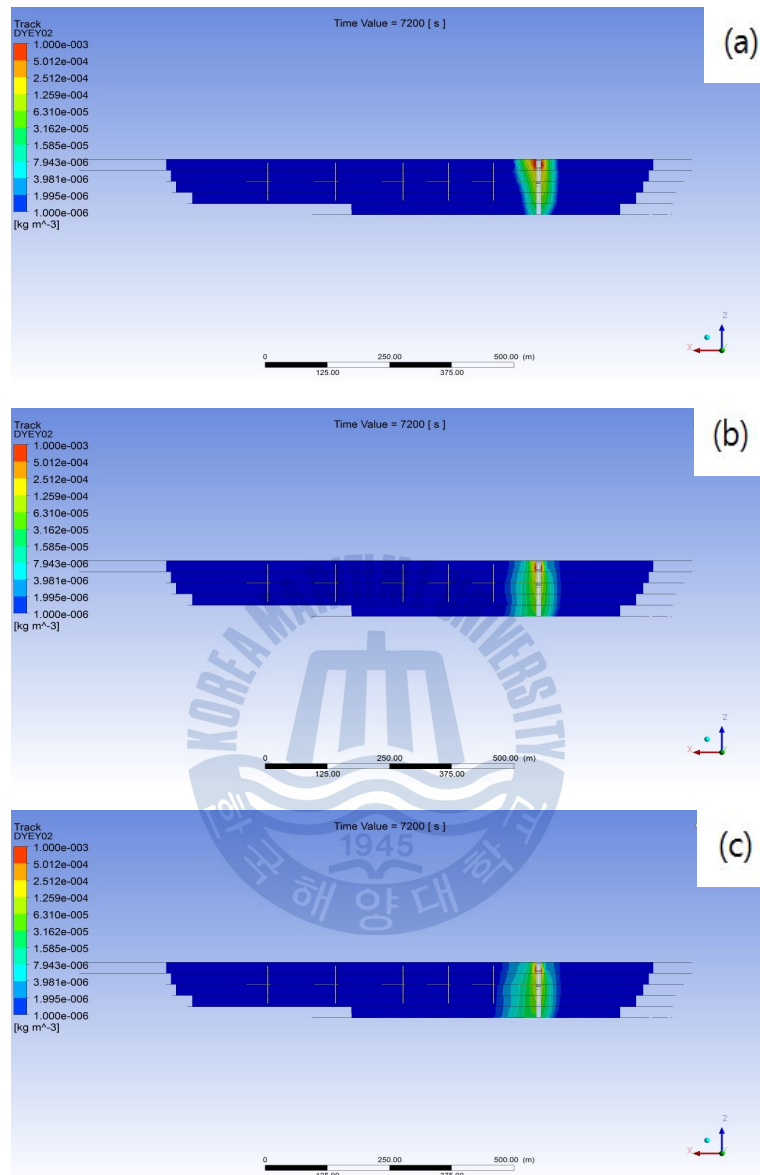


Fig. 24 Dye distribution of temperature difference in top and bottom(case2)

Model setup: discharge rate 100,000 ton/d, time 120min

Temperature (a) TH=10°C, TL=8°C

(b) TH=20°C, TL=8°C

(c) TH=30°C, TL=8°C

Fig. 25와 26은 밀도류확산장치 가동에 따른 저수지 내부의 DO 확산현상을 모델링한 결과이다. 밀도류확산장치 운전에 의한 DO의 대류 및 확산 현상에 초점을 맞추었기 때문에 일반적인 수질모델링에서 고려되는 생성 및 소멸항은 고려하지 않았다. 해석 결과, 염료전달과 유사하게 DO의 대류현상은 매우 느리게 발생하고 있음을 확인할 수 있다. 반면, 상대적으로 느린 대류 및 확산속도에도 불구하고 밀도류확산장치 운전을 통해 저수지 내부의 DO 확산이 촉진됨을 확인할 수 있다. 변수와 추가와 각 변수들 간의 연결을 통해 3차원 유동해석과 수질모델링 가능성을 확인 시켜주는 중요한 결과로 판단된다.



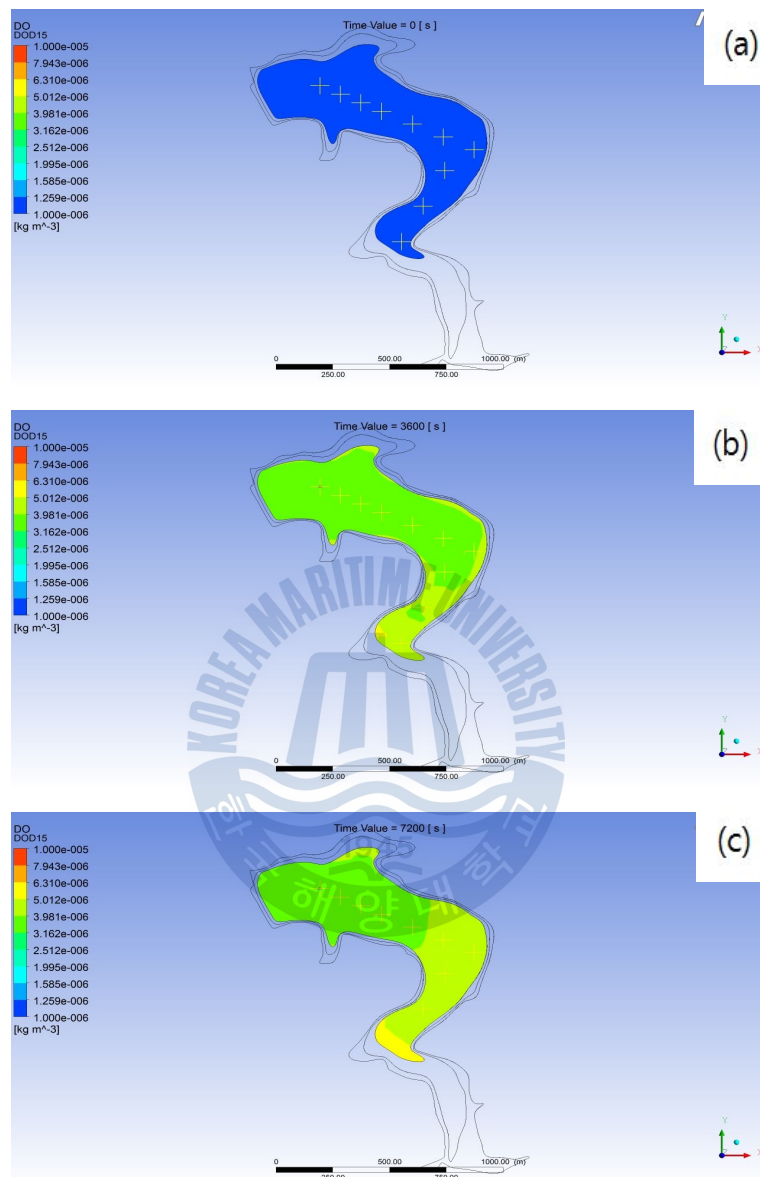


Fig. 25 Dye distribution of hourly variation to density current generator

Model setup: discharge rate 100,000 ton/d, depth 15m

Time: (a) 0min (b) 60min (c) 120min

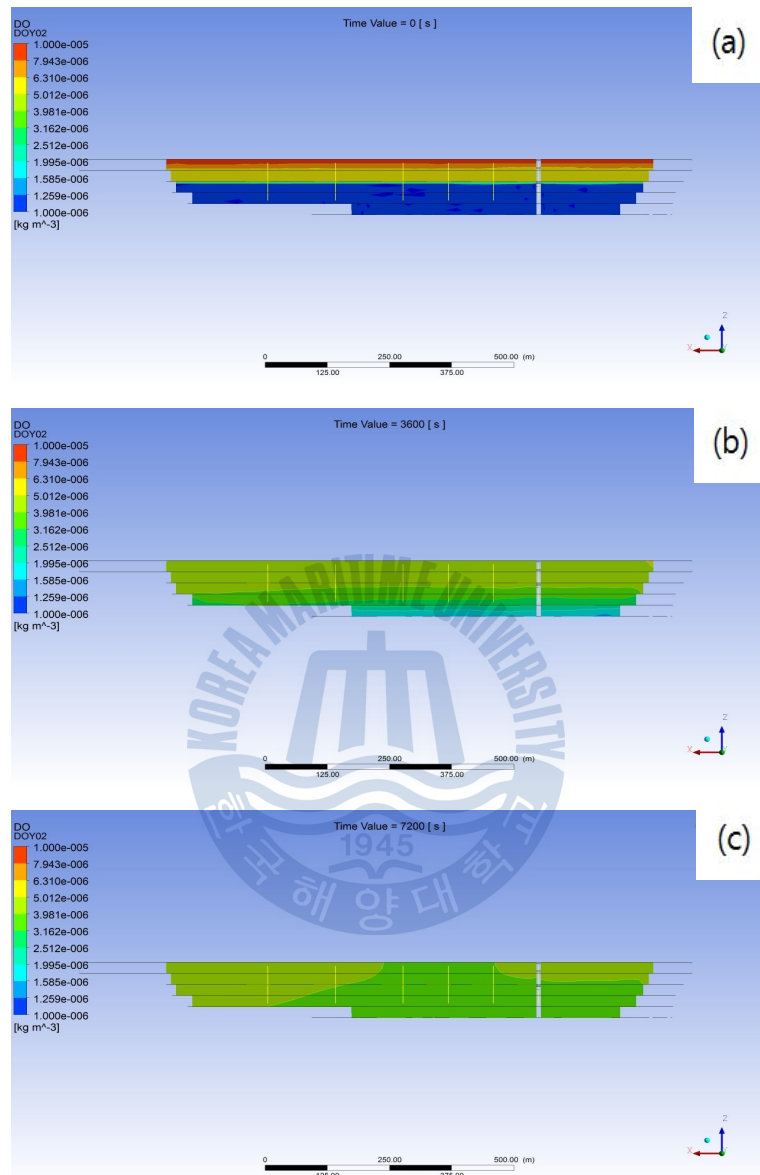


Fig. 26 DO distribution of hourly variation to density current generator

Model setup: discharge rate 100,000 ton/d

Time: (a) 0min (b) 60min (c) 120min

호소 내 밀도층이 존재하지 않는 경우, 밀도류확산에 의한 유동 확산이 효과적으로 발생하는 지를 확인하였다. 깊이방향의 온도차가 존재하지 않는 조건에서 토출유량 밀도차가 고려하는 모델과 동일한 조건으로 유동해석을 수행하였다. Fig. 27은 온도구배가 존재하지 않는 경우, 토출구의 분사가 1시간이 경과한 이후의 속도장 결과를 나타내고 있다. 밀도류확산장치 근처의 약 반경 30m 이하의 구간에서만 활발한 혼합이 발생하고 있으며, 더 이상 유동이 주변으로 확산이 진행하고 있지 않음을 확인할 수 있다.



Fig. 27 The result of CFD velocity contour when the temperature gradient is not existed

Model setup: discharge rate 100,000 ton/d

Mixing ratio = 1 : 1

Fig. 28은 위와 동일한 케이스의 속도벡터 결과를 나타내고 있다. 중앙의 유출부에서 분사된 유동은 약 4~5m 정도 수평하게 진행하다, 수표면에 위치한 밀도류확산장치 상부흡입구의 영향으로 인해 상부로 방향을 전환한 후, 수표면을 따라 다시 밀도류확산장치 방향으로 유동방향이 전환되어 더 이상 주변으로 진행하지 못하고 있다. 수표면에서 일부의 유동은 밀도류확산장치 방향으로 방향을 전환하지 못하고 하류방향으로 진행하고 있지만, 약 20m 근처에서 밀도류확산장치 상하부의 흡입구의 영향에 의해 하부로 하강하여 시계방향의 큰 와류를 생성하고 있다.

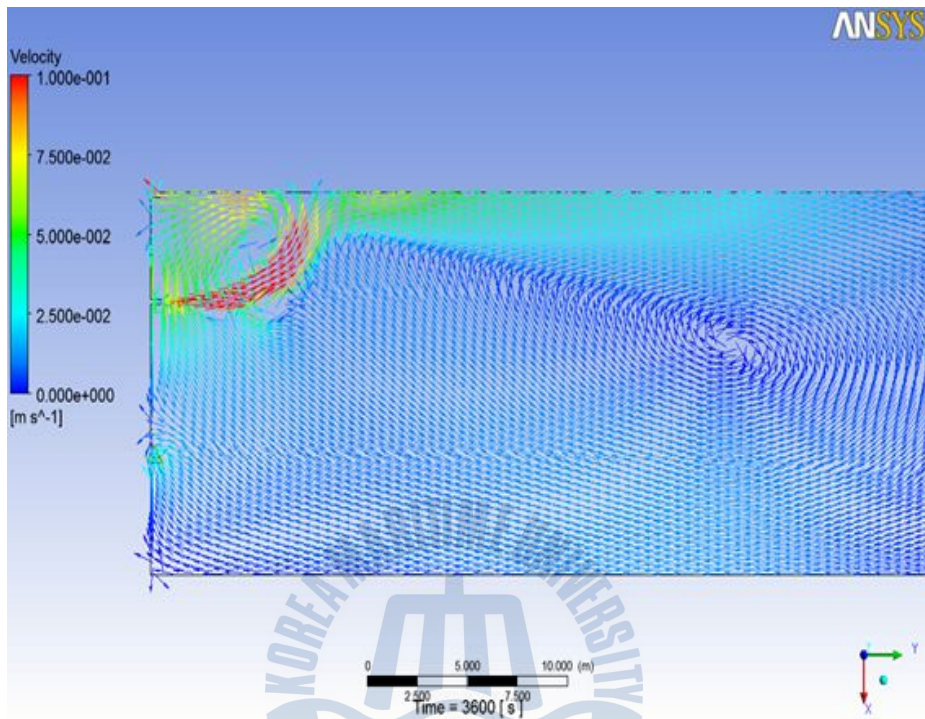


Fig. 28 The result of CFD velocity vector when the temperature gradient is not existed

Model setup: discharge rate 100,000 ton/d

Mixing ratio = 1 : 1

3.3 실증실험

3.3.1 실증 실험장치

본 연구에 적용할 실증현장 내의 밀도류확산장치는 전체 저수량의 1/50 이상을 매일 순환시킬 수 있는 용량으로 설계되었으며[10], 호소환경에 견딜 수 있는 부력체, 갈수기를 대비한 시설을 상승 또는 하강할 수 있는 리프트, 계류설비, 동력 및 제어설비 등 4가지로 구성하였다.

3.3.1.1 밀도류확산장치

밀도류확산장치 실증현장의 저수량 6,200,000~8,700,000m³으로 성층 생성이 가장 활발한 하절기인 약 3개월 동안에 전체 호수의 물을 완전 순환시키려면 최소 7~8만톤/일 이상이 필요하며, 성층이 나타난 수심은 9월에 3~5m, 10월에 5~7m로 나타므로 토출구 수심은 4~6m 계절에 따라 변하므로 약 5m로 정하여 리프트 설비와 연동하여 1m이내에서 조절이 가능하도록 제작하였다. 혼합비는 생태독성평가에 의해 표층수와 저층수 혼합비를 3:1로 하였다. 수위변동에도 능동적으로 대처 할 수 있도록 하부 흡입관을 3단 수축식으로 설계하였다. Table 4에 본 연구 장치 규격을 표시하였다.

Table 5 Specification of density current generator

Section	Specification
Weight	5.5Ton
Mixing ratio	Surface(3): Bottom layer(1)
Discharge location	5m
Material	SS400
Painting	AFS
Riser pipe	Max. 9m Min. 4m
Motor	Power control: ~ 5kWh
Discharge rate	~13,000 ton/d

Fig. 29은 하부흡관 확장과 수축시의 모습과 임펠러 회전에 의하여 토출구 주위에서 발생하는 난류를 방지하기 위한 목적으로 스윙어댑터가 부착하였다. 저층 흡입부 바닥에는 원반형 플레이트를 설치함으로써 바닥의 전이가 수직 상승하지 않도록 하였으며, 측면에서 수평으로 흡입되도록 유도하였다.

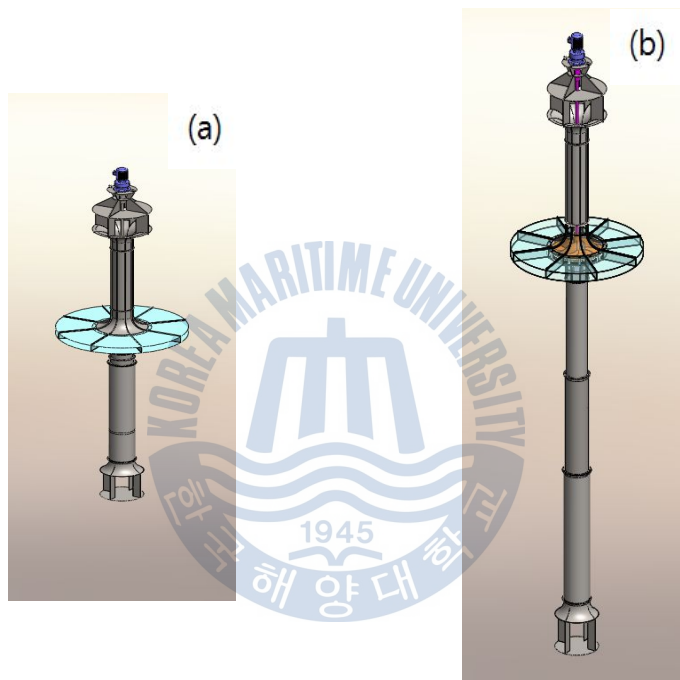


Fig. 29 Density current generator body

(a) Pipe contraction (b) Pipe expansion

Pipe length 5m×3set

Applicable depth: 10~20m

3.3.1.2 전력 및 제어 시스템

본 설비 가동에 필요한 부하전원은 교반임펠러 구동을 위해 필요한 모터, 리프트, 부속설비 등 3가지로 구분하였다. 본 설비의 유지보수 또는 점검을 위한 경

우를 제외하고, 모터의 구동전원 이외에는 전원이 필요치 않는다. 이에, 상시소요 전원을 공급하기 위한 설비와 유지보수, 점검 등에 소요되는 전원을 공급하기 위한 전력 설비로 이원화하였다. Fig. 30은 본 설비 구동을 위한 독립전원시스템을 나타내었으며, Table 5는 예상소요전원과 공급전원을 구분하여 나타낸 것이다.

Table. 6 Power consumption and electric power supply

Section	Power	Produce power	Preference items
Motor	~5kW	—	Inverter speed control system
Lift	~18.65kW	—	Solar Concentrating
Solar power/ control	~1kW	~12kW	Stationary type 6kW, Suntracking 6kW, Storage battery
Diesel generator	~0.5kW	20~24kW	

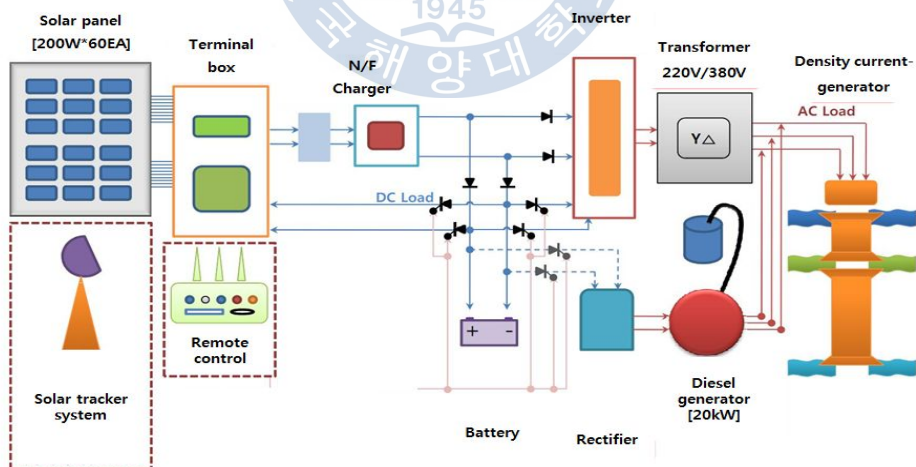


Fig. 30 Power supply system of test plant

Electric power supply: solar panel → battery charge → inverter → motor drive

3.3.1.3 부력체

부력체는 밀도류확산장치의 성능을 지지하는데 필요한 수장구조체로 태풍 등 외부환경변화에 안전한 2중 발라스트의 방탄구조로 한국선급의 수상안전승인을 득할 수 있도록 설계하였다.

부력조절을 위한 발라스트 탱크(Leg)는 부력체에 부착 조립되며, 부착위치 및 각도는 물 흐름을 고려하여 Fig. 31의 단면구조를 갖도록 설계하였다.

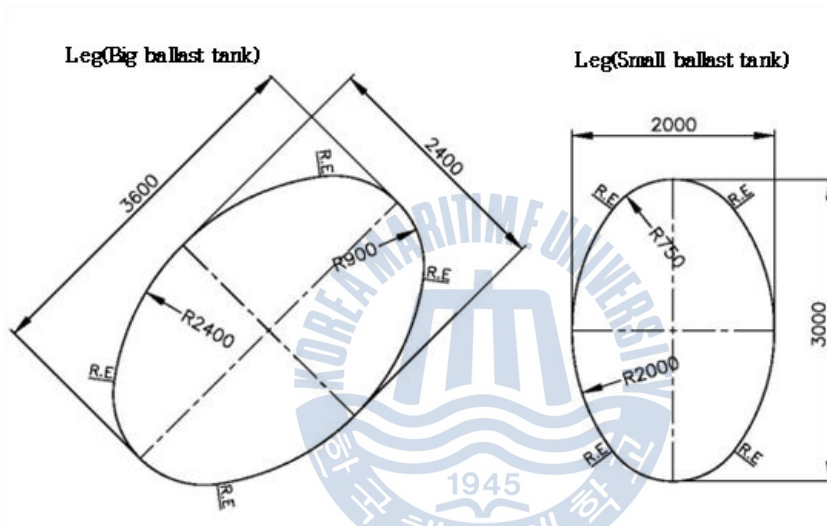


Fig. 31 Ballast tank sectional view

Big ballast tank 4set, Small ballast tank 4set, Total 8set

Form: Streamlined form

Buoyancy: ≒ 100Ton

Table 6은 부력체에 부착되는 발라스트 탱크 각각의 크기, Table 7은 계산된 배수량을 포함한 규격을 나타낸 것이다.

Table 7 Ballast tank size

Section	Leg(large)	Leg(small)
Major axis length[mm]	3,600	3,000
Shorten axis length[mm]	2,400	2,000
Surface[m²]	6,755	4,691
Circumference[mmmm]	9,516	7,930

Big ballast tank 4set, Small ballast tank 4set, Total 8set

Form: Streamlined form

Buoyancy: ≒ 100Ton

Table 8 Specification of pontoon

Section	Specification
Type	Ballast Tank
Size	12m×12m (Unit Size 4m×8m)
Total displacement	99ton
Unit amount	4Units
Unit weight	10ton
Total weight(4 Unit)	41ton
Material	SS400
Painting	AFS

3.3.1.4 리프트

리프트는 실증현장의 갈수기 때 수위 하강시 수축파이프 등을 부력체 상부로 부상시켜 본 설비의 손괘 방지와 계절에 따른 온도 구배층의 위치변화에 따라 토출구의 위치를 조정하여 효율을 증가 시켜줄 목적으로 설치하였다.

Table 9 Specification of lift

Section	Specification
Load capacity	7.5ton
Min' height	1,600mm
Stroke	8,100mm
Power	3phase*380V
Operate power	110V
Table size	6,400W * 4,500L MM
Hyd' cylinder	Ø200 - 2EA MM
Lifting time	270 sec
Hyd' power unit	15HP * 4P * 20.4 L/min

3.3.1.5 조립

본 실험장치 설계에서는 솔리드웍스 프로그램 어셈블리 모드를 활용하여 3D로 각 구성품을 조립하였다. 구성품을 설계함에 있어 재질 등의 물성치를 직접 입력하여 제작 될 구성품의 하중 및 응력 분포를 분석하였고, 시뮬레이션을 통해 구성품의 간섭을 최소화 하여 설비의 제작 기간을 최소화하였다.

Fig. 32(a)은 발라스트 탱크와 판자재로 구성된 전체 부력체 중 하나인 단위 조립체의 형상을 나타내고 있으며, Fig. 32(b)은 단위 조립체의 단면을 나타내었다. Fig. 32(c)은 Fig. 32(a)의 단위 조립체 4개로 구성된 전체 부력체 조립형상을 나타내고 있다.

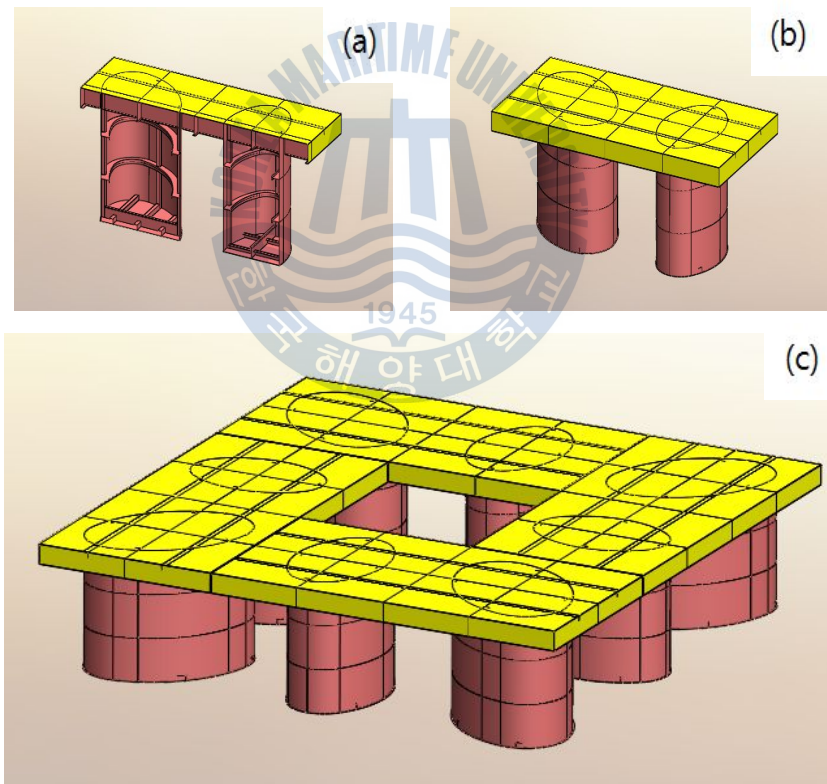


Fig. 32 Pontoon

(a) Unit assembly diagram (b) Cross sectional diagram (c) Ass'y

Fig. 33(a)는 리프트 상단에 설치할 고정식 태양광 패널이며, Fig 33(b)은 부력체의 측면에 설치하려는 추적식 태양광 패널의 조립도이다. Fig 33(c)는 부력체 위에 설치하려는 태양광 발전 설비의 전체를 나타내었다.

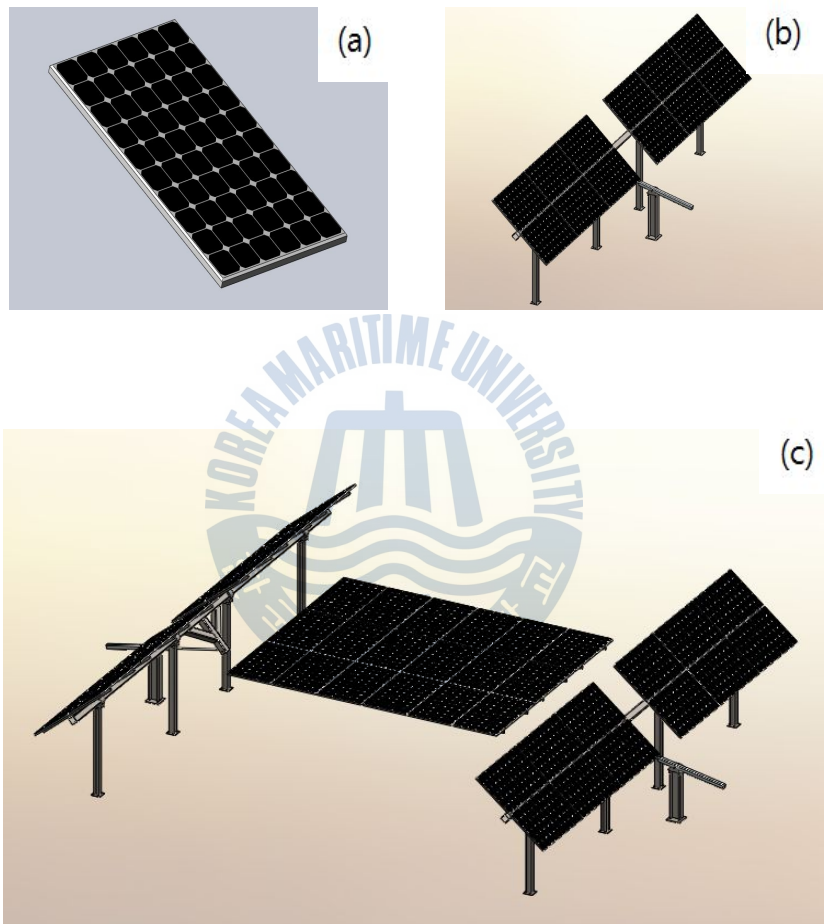


Fig. 33 Solar panel

(a) Stationary type (b) Suntracking type (c) Ass'y

Fig 34(a)와 Fig 34(b)는 밀도류확산장치의 유지보수시 또는 수중 토출부위치를 조절하기 위한 작업시 사용하기 위한 Lift이며, 하강/상승시의 단위조립도 모습을 나타내고 있다.

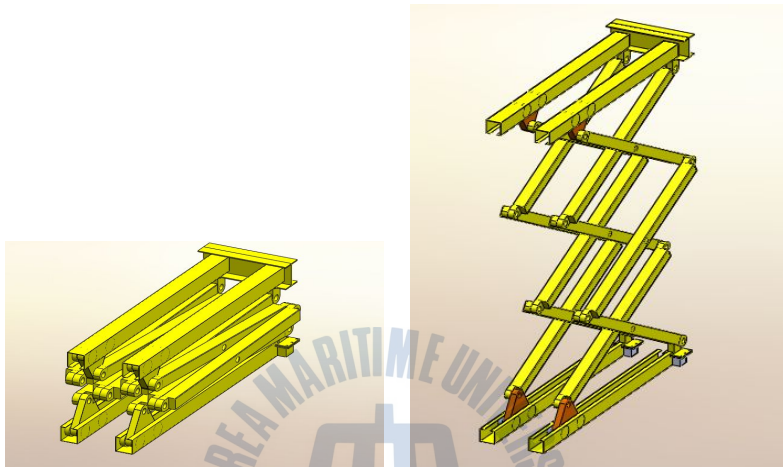


Fig. 34 Lift

Function: rising(lowering) to density current generator

Capacity: weight 7.5ton, height 8m

Fig. 35(a)와 Fig. 35(b)는 밀도류확산장치의 전체 조립도 이미지 및 실제 제작 모습을 나타내었다.

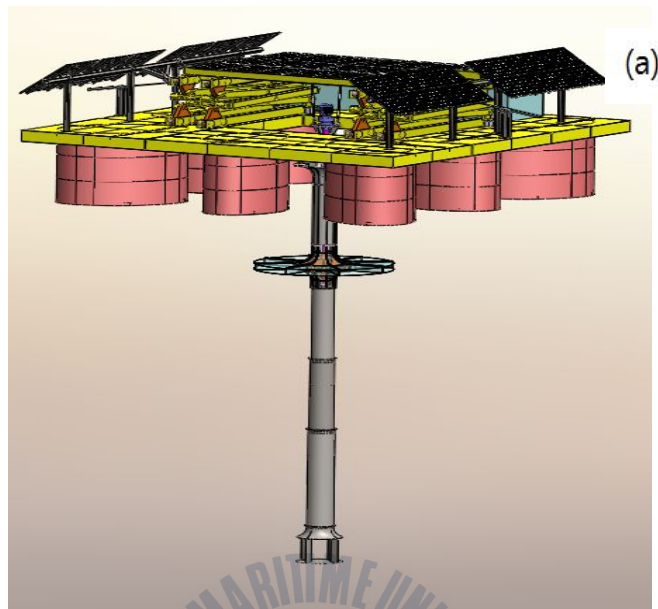


Fig. 35 Density current generator plant

(a) Solidworks CAD program 3D image (b) Density current diffusion plant

3.3.2 실증현장 조사 및 방법

실증현장의 밀도층이 나타난 수심의 깊이는 Fig. 36과 같이 9월에 3~5m, 10월에 5~10m, 11월에 9~12m로 나타났다. 수온이 낮아짐에 따라 밀도층 형성 구간의 수심이 3m에서 12m로 증가하였으며 12월 수온이 5℃ 일 때 전도현상이 발생하였다. 전도현상에 의해 밀도층의 구분이 없어졌으며, 이에 따라 DO도 같은 특징을 보였다. 동절기 이후 3월 수온이 낮아 전도현상이 지속되었으나, 4월 수온이 상승함에 따라 12~14m로 밀도층이 발생하였다.

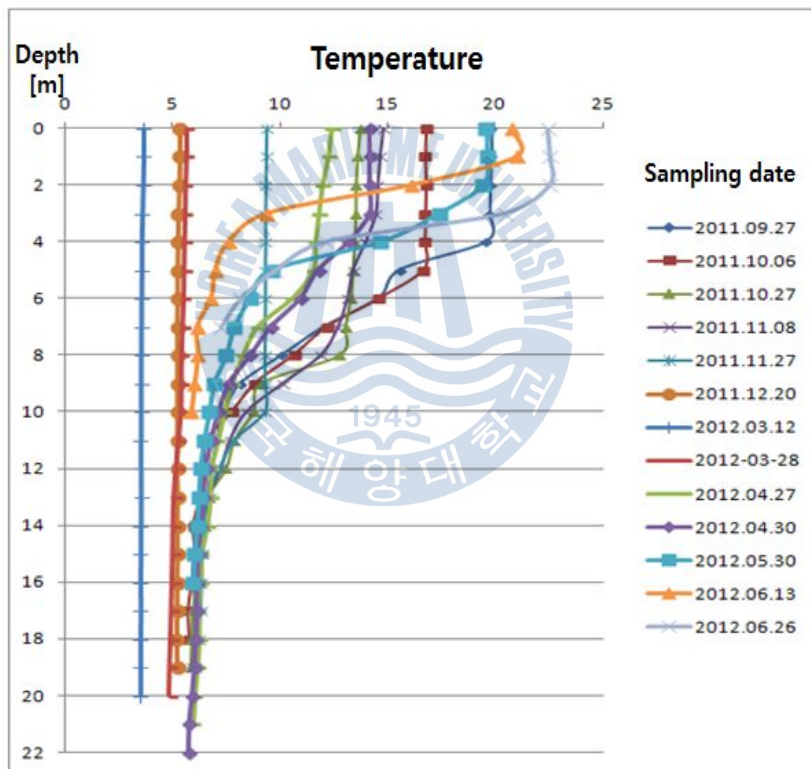


Fig. 36 Density pattern of test bed

Thermocline range: 3m~12m seasonal variation characteristic

Temperature range: 4~23℃

본 연구의 실증현장으로 선정된 호수의 특성의 데이터베이스 구축을 위한 대상호수의 특성 조사는 2011년 9월부터 2013년 8월까지 월 2회 이상 Fig. 37과 같이 좌표를 L1 ~ L13으로 선정하고, 정밀측정 및 특성조사를 진행하였다. 밀도류확산장치는 2012년 9월에 설치하였고, 이를 기준으로 가동전과 가동후로 구분하여 조사하였다.



Fig. 37 Sampling point of test bed

100m Sampling interval: L1 ~ L3, L11 ~ L13(green line)

150m Sampling interval: L4~L7(bule line)

200m Sampling interval: L8~L10(brown line)

수질분석항목은 현장 기기분석을 통해 DO, 수온, 탁도, 투명도(표층) 등을 수심 1m 간격으로 측정하였으며, 분석 장비는 Table 10에 표시하였다.

Table 10 Analytical items and instruments

Analysis items	Analysis equipment	Method of analysis
Temperature		
DO	U-52	
Turbidity		Field measured value
pH		
Transparency	Secchi Disc	
Chl-a	Spectrophotometer	absorption photometry
SS	AR2140	GF/C

Measurement method: clearance of one metre(depth of water), 13 point

3.3.3 현장조사

‘12년 7월~8월 가뭄으로 실증현장의 가동 전 수질조사가 불가능 하였다. 이에 가동 전 기간을 ‘12년 3월~6월, 가동 후 기간을 ‘13년 3월~6월로 Table 11과 같이 시기별 밀도층이 발생하는 것을 확인하며, 간헐 운전을 하였다. Fig. 38은 밀도류확산장치 가동 전과 후의 수계 DO 평균변화를 모식화 하였다. 밀도층이 발생하기 시작하는 4월을 기점으로 밀도류확산장치를 간헐적인 가동한 것이 수계 성층화를 완화시키고 빈산소층 영역이 해소되었음을 확인되었다. 실증현장 전반에 물 순환이 발생하고 있는 것을 확인할 수 있었다.

Table 11 Operating time to density current generator(2013)

Section	April	May	June	Total
Operating days	5	9	12	26
Total operating time	24	20	88	132

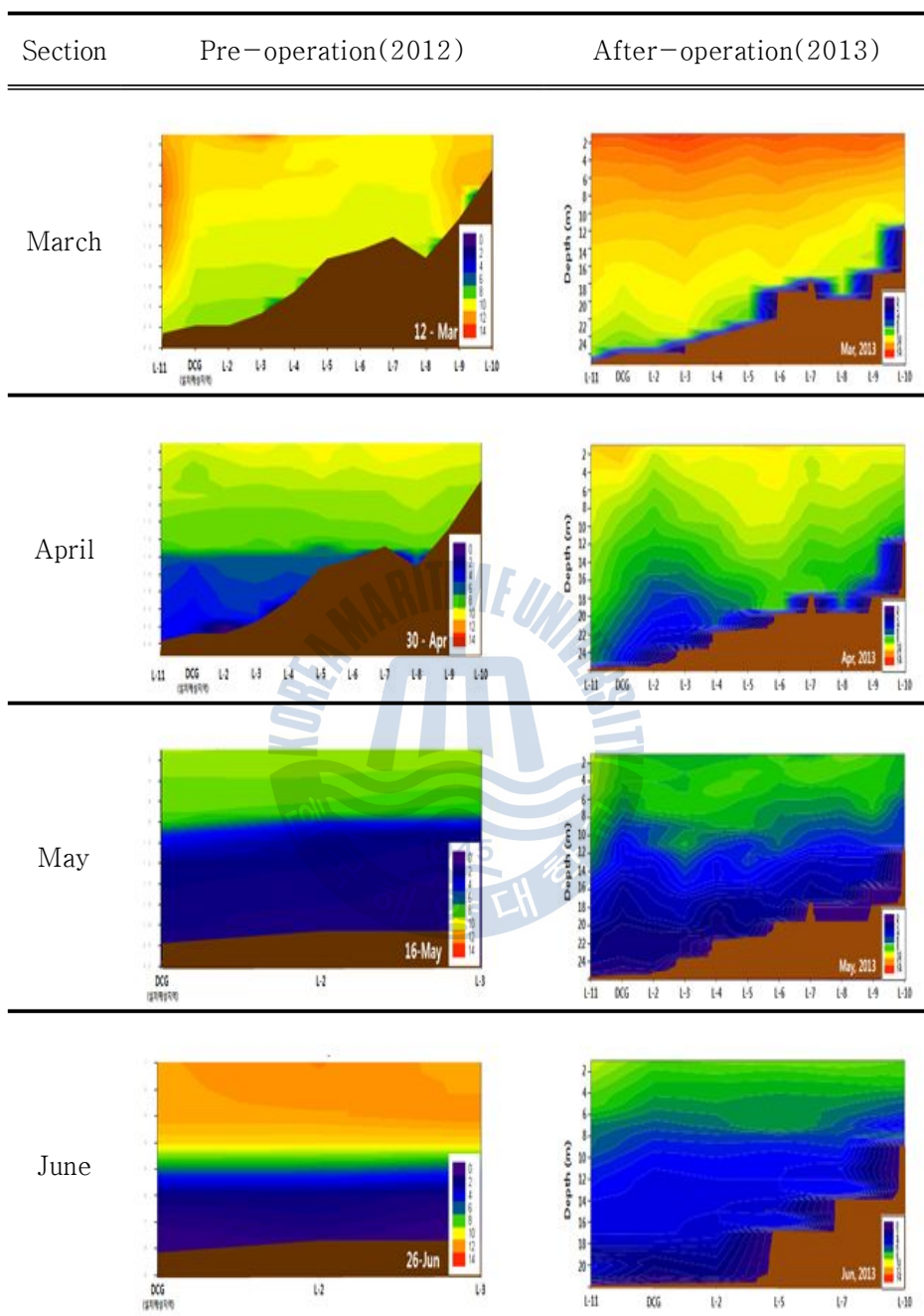


Fig. 38 The transition of DO in test bed

Density current generator operation before-and-after

3.4 구축 모델과 조사결과의 비교

본 연구에서는 CFD를 이용하여 밀도류확산장치의 정상 및 비정상상태 계산을 수행하여 밀도류 확산 성능을 해석하였다. 밀도류확산장치 설계를 위해 반드시 필요로 하는 표층수 유입유량, 심층수 유입유량, 토출 유량 등의 기본 데이터들을 CFD 해석을 통해 직·간접적으로 파악할 수 있었다. CFD 해석을 통해 온도 구배가 존재하는 호소의 경우 밀도류확산에 의해 1~2cm/s 단위의 유동이 밀도층을 따라 진행하고 있음을 확인하였다.

실증현장에서는 밀도류확산장치를 가동하고 호소 전반에 영향을 미치는 시간을 실측하여 확인하였다. Fig. 39와 같이 표층, 중층, 저층의 DO와 수온이 일치하는 시점이 12~24시간이 사이에서 나타남을 알 수 있었다.

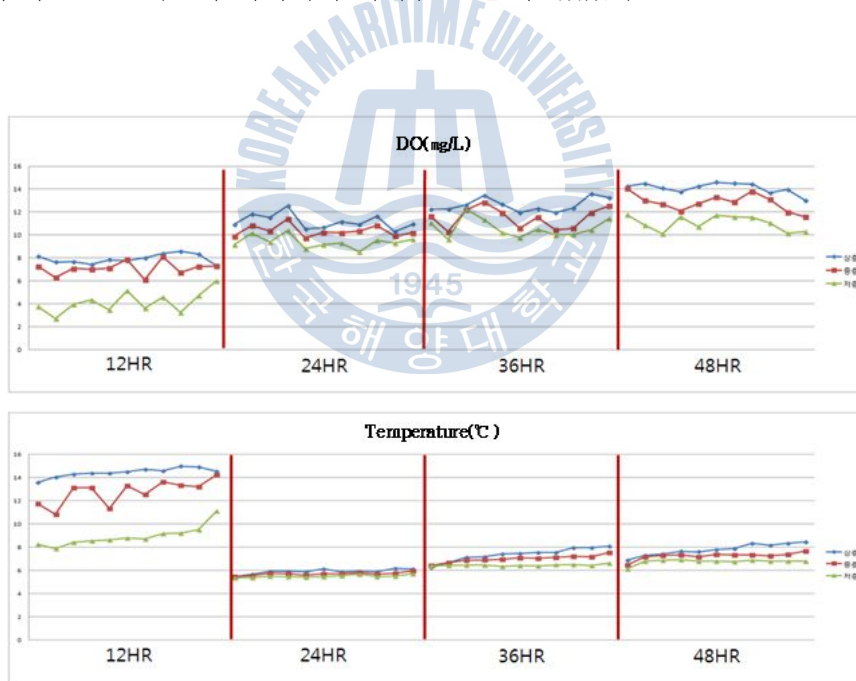


Fig. 39 The transition of DO and temperature in test bed
(a) DO, (b) Temperature

Condition: density current flow of 100,000ton(1day)

Data measurement time: 1set 12h * 4set

CFD 모델에서는 Fig. 26과 같이 밀도류확산장치 가동 후 전체 물 순환까지 실 증현장 기준에서 약 2시간이 걸리는 것으로 나타나, 실제 측정한 결과와 최대 22 시간의 차이를 보이고 있음을 알 수 있었다. 이는 CFD 모델에서 매개변수로 고려되지 않은 Fig. 40과 같이 토출구 난류에 의한 밀도류 확산력의 감소, 호소와 관련된 수리수문(방류, 호소 내 유입성분, 풍향·풍속 등)이라고 판단된다[1].

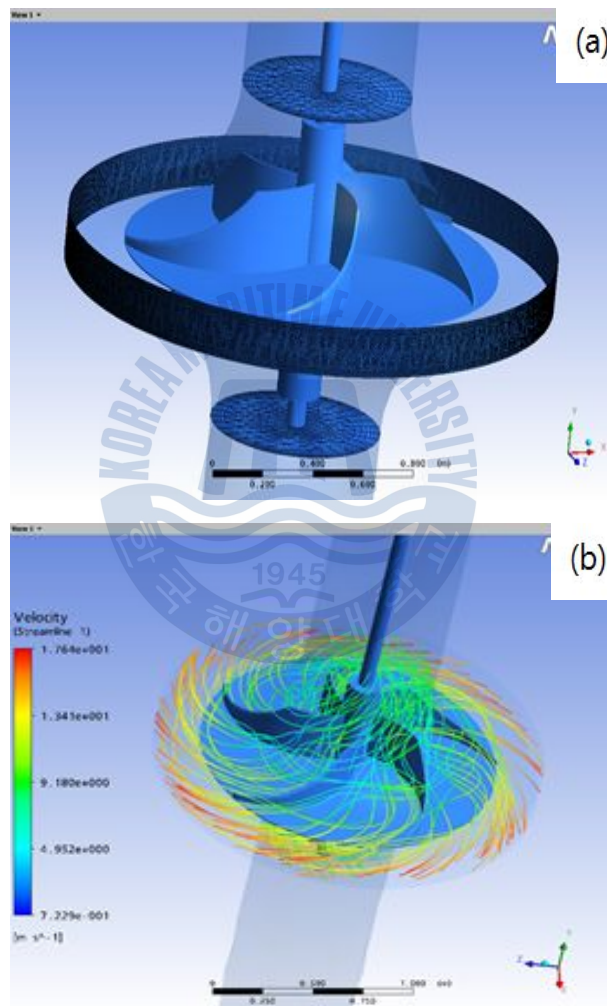


Fig. 40 Outlet mesh and analysis of turbulence
(a) Outlet mesh (b) Outlet turbulent flow

CFD 해석과 실증현장 측정결과 비교에서 밀도류 광역 확산에 대한 시간차가 발생하였으나, 본 연구에서 구축한 밀도류 확산의 CFD 모델은 실측자료와 비교하여 그 해석결과는 유사성을 확인하고, 신뢰도 검증이 가능하였다.



제 4 장 결 론

인공호소의 표층과 저층혼합으로 밀도류를 생성하여 밀도층에 확산시킴으로써 호소의 상하 물 순환을 원활하게 유도하기 위한 장치로, 평균 저수량의 1/50 규모인 1일 약 10만톤의 물 순환이 가능한 프로펠러식 밀도류 확산장치를 정제된 호소 중 밀도층이 발생하는 실증현장에 설치하여 실험한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 실제 플랜트를 설치, 가동하고 DO, 온도구배 등의 경시변화를 조사하였으며 이를 기반으로 3차원 CFD 확산 모델을 구축하였다. CFD 모델에서 밀도류확산장치의 정상 및 비정상상태 계산을 수행하여 밀도류 확산 성능을 해석하였으며, 밀도류 확산장치 설계를 위해 필수적인 표층수 및 심층수 유입유량, 토출 유량 등의 기본 데이터들을 CFD 해석을 통해 직·간접적으로 파악할 수 있었다.
2. CFD 해석을 통해 밀도구배가 존재하는 호소의 경우 밀도류확산에 의해 1~2cm/s 단위의 유동이 밀도층을 따라 진행하고 있음을 확인하였다.
3. CFD 밀도류 확산모델을 검증하기 위하여 실증실험의 밀도류 확산장치 가동이후 호소 전반에 영향을 미치는 시간을 측정한 결과 표층, 중층, 저층의 DO와 수온이 일치하는 시점이 12~24시간 사이에서 나타남을 확인할 수 있었으며, 구축된 CFD 밀도류확산 모델 해석과 유사성을 확인하여 신뢰도를 검증할 수 있었다.

본 논문은 환경부/한국환경산업기술원 미래유망 녹색환경기술 산업화 촉진사업의 연구입니다.

참고 문헌

- (1) 건설교통부, 2006. 수자원장기종합계획(2006~2020).
- (2) 권문혁, 2002. 밀도류 거동의 특성 해석. 석사학위논문. 한양대학교
- (3) 권순국, 1990. 담수호의 수질예측 및 부영양화 방지에 관한 연구. 대한토목학회논문집 10(4), pp.159~171.
- (4) 김종구의 1인, 2007. 군산지역 저수지의 수질특성 및 부영양화 평가. 한국환경과학회지, 16(3), pp.357~369.
- (5) 김형철외 4인, 2007. 인공습지 내 개방수역 조성에 따른 처리효율분석. 대한상하수도학회, PP.97.
- (6) 나카시마프로펠러주식회사, 2009. 신나라가와댐 밀도류확산장치에 의한 수질 개선효과.
- (7) 물환경정보시스템 (<http://water.nier.go.kr>)
- (8) 서동일외 3인, 2004. 연초호의 인공순환 장치 운영에 의한 수질 개선 효과분석. 상하수도학회지, pp.357~385.
- (9) 안재순외 2인, 2012. 물순환장치 가동에 따른 농업용저수지의 3차원 이송확산 모의에 관한 연구. 한국산학기술학회논문지, 13(7), pp.3275~3284.
- (10) 양종운, 2011. 물순환장치 가동에 따른 밀도류 발생이 호소수 거동에 미치는 영향. 석사학위논문. 한서대학교
- (11) 양종운외 10인, 2011. 밀도류 확산에 의한 물순환이 호소에 미치는 영향. 한국물환경학회, 대한상하수도학회 춘계 공동학술연구발표회논문집.
- (12) 양종운외 11인, 2011. 호수에 DCG 적용시 수질거동에 관한 연구. 한국도시환경학회, 11(1), pp.49~55.

- (13) 윤정환외 7인, 2010. CFD를 이용한 조류제거장치 유동특성 연구. 상하수도학회발표.
- (14) 윤정환외 7인, 2010. CFD를 이용한 밀도류확산장치 유동특성 연구. 한국물환경공학회
- (15) 이혜은, 2010. $k-\varepsilon$ 모형을 이용한 연속 및 불연속 유입 밀도류의 수치모의. 석사학위논문. 연세대학교.
- (16) 임동균, 2000. 층류상태 밀도류의 수치모의. 석사학위논문. 연세대학교
- (17) 전나정, 2011. HSPF-EFDC의 적용을 통한 새만금 유역의 수질모의. 석사학위논문. 건국대학교.
- (18) 한영성, 2011. 인공순환에 의한 저수지 수질관리. 석사학위논문. 공주대학교.
- (19) 한국수자원공사, 1993. 물순환 시스템 설계 및 운영기술의 표준화 1993~1995.
- (20) 환경시설관리공사, 2009. CFD 및 PIV를 이용한 조류제거장치 유동해석.
- (21) 환경시설관리공사, 2010. DCG를 이용한 정체수역 물순환장치 시범사업 평가.
- (22) Kazuyuki Ouchi외 3인, 1998. 밀도류확산장치의 개발연구. 일본선박학회논문집, 제183호.
- (23) Kenichi Fukuda외 3인, 2010. Evaluation of effectiveness from long-distance water circulation-Density Current Generator. The 5th Asia-Pacific Workshop on Marine Hydrodynamics-APHydro.
- (24) Ouchi, K., Yamatogi, T., Kobayashi, K., Nakamura, M., 1998. Density current generator—a new concept machine for agitating and upwelling stratified water. Proc. Ocean Community Conf., Marine Tech. Soc., Baltimore, USA, 1, pp.129~136.
- (25) Koji Otsuka외 4인, 2007. 고카쇼만에 관한 밀도류 확산장치의 환경수복효과. 일본선박해양공학회논문집, 6.
- (26) Masaji Watanabe외 1인, 2004. 실험과 계측에 기초한 밀도류확산장치의 효과

에 관한 고찰. 오까야마대학 환경이공학부 연구보고서, 9(1), pp.59~64.

- (27) Toru, S., Kenzo, T., Takuro, Y., Yoshihiro, T.. 2006. Numerical and hydraulic simulations of the effect of density current generator in a semi-enclosed tidal bay. Coastal Engineering, 53, pp.49~64.
- (28) Toshio Yamatigo 외 1인, 2004. The Density Current Generator for TAKUMI. 일본선박학회연구회논문집, 4호.
- (29) 大塚耕司 외 5人, 2007. 密度流拡散装置による 藻場修復に關実地調査する実地調査. 日本船舶海洋工学講演会論文集.
- (30) 齊藤周外 3人, 2005. 水質浄化装置による諫早湾貧酸素水塊低減の数値シミュレーション. 沿岸域学会誌, 18(2), pp.13~24.

