



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](#)



碩士學位論文

有限要素法을 利用한 港灣에서의
多層流 流動解析

濟州大學校 大學院

土木海洋工學科

禹 周 京

2012年 2月



有限要素法을 이용한 港灣에서의 多層流 流動解析

指導教授 金 南 亨

禹 周 京

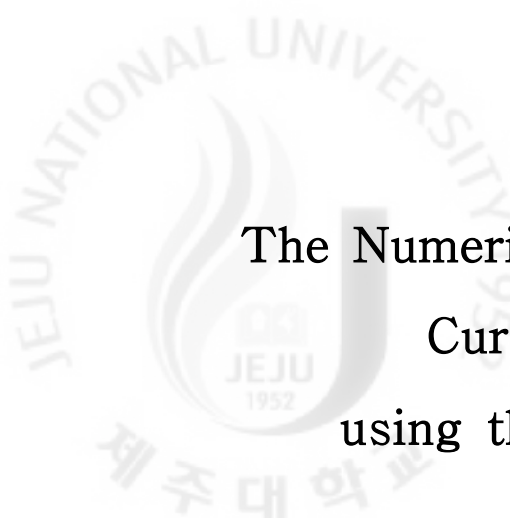
이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2012年 2月

審査委員長	印
委 員	印
委 員	印

濟州大學校 大學院

2012年 2月

The logo of Jeju National University is a circular emblem. It features a stylized flame or torch in the center, with the text 'JEJU NATIONAL UNIVERSITY' around the top and 'JEJU 1952' at the bottom. The Korean text '제주대학교' is also visible around the bottom edge of the circle.

The Numerical Analysis of Multiple Layers
Current in the Fishery Port
using the Finite Elements Methods

Ju-Kyung Woo

(Supervised by Professor Nam-Hyoung Kim)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for
the Degree of Master of Engineering

2012. 2

Department of Civil & Ocean Engineering
GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

List of Figures	iii
List of Tables	v
Summary	vi

I. 서 론 1

1. 연구배경	1
2. 연구목적	2
3. 논문의 구성	3

II. 수치모형의 기본방정식 4

1. 기본 방정식	4
2. 다층류 방정식	5
3. 경계조건	8
4. 유한요소법	9
4.1 유한요소 정식화	9
4.1.1 보간함수	9
4.2 유한요소 방정식	12

III. 수치모델의 검증 14

3.1 수치모델의 실험 조건	14
3.2 해수교환방과제가 설치된 주문진항의 3층류 유동해석	17

IV. 대기수로가 설치된 주문진항의 3층류 유동 해석 20

V. 다기수로가 설치된 주문진항의 다층류 유동 해석 27

VI. 결 론 34

VII. 참 고 문 헌 35

List of Figures

Fig. 1. Multiple Layers Model	7
Fig. 2. Boundary Condition	8
Fig. 3. Triangular Elements	9
Fig. 4. Boundary Condition	14
Fig. 5. Water Depth of Jumunjin Fishery Port	15
Fig. 6. Water Depth Partition of Jumunjin Fishery Port(3 Layers)	16
Fig. 7. Topographical Map of Jumunjin Fishery Port	16
Fig. 8. Finite Element Idealization of Jumunjin Fishery Port	17
Fig. 9. Velocity Vectors of Jumunjin Fishery Port with SEB.....	18
Fig. 10. Comparison of Observed Data and Present Method	19
Fig. 11. Finite Element Idealization of Jumunjin Fishery Port with Manifold Cannel.....	20
Fig. 12. Velocity Vectors of Jumunjin Fishery Port with Manifold Channel at Flood Tide	21
Fig. 13. Velocity Vectors of Jumunjin Fishery Port with Manifold Channel at Ebb Tide	22
Fig. 14. Calculated Current Ellipse at Point A and B	24
Fig. 15. Calculated Current at Point A	25
Fig. 16. Calculated Current at Point A	26
Fig. 17. Water Depth of Jumujin Fishery Port 5 Layers)	27
Fig. 18. Calculated Current Ellipse at Point A	28
Fig. 19. Calculated Current Ellipse at Point A	29
Fig. 20. Calculated Current at Point A	30
Fig. 21. Calculated Current at Point A	31
Fig. 22. Vertical Profile of Horizontal Velocity at Point A	32
Fig. 23. Vertical Profile of Horizontal Velocity at Point A	33



List of Tables

Table 1. The Results of Harmonic Analysis for Tidal Flow in Jumunjin Fishery Port(해양수산부, 1999)	15
Table 2. Comparison of Observed Data and Present Method	19




Summary

In the past, the fishery port was used to provide us with product which is related to sea but currently fishery port is realized that the port is not only area of production but also area of recreation. Recently, the concern about development of waterfront in fishery port and harbor have been increase, several harbor remodeling projects have been actively progressed all over the world. But, these development have the duplicity that create a comfortable waterfront and worsen a sea water quality in fishery port and harbor at the same time. For these developments in the waterfront, current analysis in the fishery port have to consider first.

Also, studies in the country is carried out numerical analysis with one-layer model but one-layer model has limit because it is not only ignored the velocity of vertical direction but also assumed equally density and viscosity from surface layer to bottom layer. Therefore, this study is carried out numerical analysis by using multiple layers model that is considered velocity of vertical direction. The results of numerical analysis on current multiple-layers are shown as variously visualized method and these improve numerical analysis about the current. The finite elements is used to do research and Jumunjin fishery port that established the SEB currently is choosen as the object of numerical analysis.

From these results, seawater circulation on the inside area was improved and it that is used with multiple-layers model has result of high accuracy than one-layer model.



1. 서 론

1. 연구배경

어항을 생산의 장으로만 생각하던 과거와는 달리 현재의 어항은 주민들에게 있어서는 생산의 장이며, 관광객들에게는 위락의 장이되었다. 또한, 무역의 발전으로 인해 국내·국제적으로 해상 교통이 발전하였고 앞으로도 지금보다 더욱 성장할 것으로 보여진다. 이러한 상황을 배경으로 세계 각국에서는 새로운 항만을 건설하려는 노력과 기존에 있던 항만을 리모델링 하려는 사업이 활발히 진행되고 있다. 그러나 이러한 워터프론트의 개발들을 위해서는 가장 기본적으로 항내에서의 유동해석을 할 필요성이 있다.

또한, 기존의 유동에 관한 국내 연구들은 대다수가 단층 모델을 가지고 수행되어왔다(Kim et al, 2007; 정과 최, 2011; 김과 윤, 2011; 서와 김, 2011). 이러한 연구들은 표층부터 저층까지의 유속을 동일하게 가정하였고, 연직방향으로의 유속은 고려하지 않았으므로 유동 해석에 있어서 한계가 있다. 따라서, 본 연구는 다층류 모델을 개발하여 제시하였으며, 표층부터 저면까지 다층으로 분할하여 각 층 사이에서 발생하는 연직방향으로의 유속분포를 고려하였다. 또한 밀도와 점성 등도 추가적으로 고려하여 수치해석을 수행하였다(Kawahara et al, 1982). 수치해석의 대상으로서 현재 해수교환방과제가 설치되어있는 주문진항을 선택하였고, 수치해석 기법으로는 유한요소법을 이용하였다(김, 1984). 본 연구를 통하여 얻어진 결과들은 알아보기 쉽게 여러 방법으로 가시화하여 나타내었으며, 유동해석에 있어서 좀 더 정확성을 향상시켰다.

2. 연구목적

최근들어, 생산의 장으로만 사용되어왔던 항만은 위락의 장으로 확대되어지고 있으며, 또한 무역의 발달로 중요한 교통수단으로 이용되어지고 있다. 이에따라 친환경적인 항만을 건설하고자 하는 노력이 국내·외적으로 활발히 진행되고 있으며, 이를 위하여 항만에서의 해수 수질은 중요한 과제로 떠오르고 있다. 그러나 이러한 항만에서의 개발들의 가장 기본은 개발하고자하는 항만에서의 유동을 해석하는 것이다. 따라서, 본 연구는 이러한 유동해석을 구체적이고 정확도 높게 알아보고자 기존에 많이 사용되었던 단층모델에 연직방향 파라메터를 추가하였고 표층부터 저층까지 층을 세분화하여 각 층에서의 평균유속으로 유동을 해석할 수 있도록 다층류 모델을 개발하여 더 정확도를 높힌 수치해석을 실시하였다.

3. 논문의 구성

본 논문에서는 우선 II장에서는 수치모형의 기본방정식으로서, 연속방정식과 운동방정식을 설명하였고, 유한요소의 정식화로서 유한요소의 해를 얻기 위하여 Galerkin method를 적용하였다. 다음으로 III장에서는 수치해석에 사용된 프로그램의 검증을 위하여 기존의 해수교환방파제가 설치된 주문진항의 관측데이터와 비교·검증 하여 나타내었다. IV장에서는 주문진항의 유동해석을 각각 3층류 유동해석과 5층류 유동해석으로 나누어 결과를 나타내었으며, 마지막으로 V장에서는 결론으로서 본 논문에서 얻어진 결과를 종합적으로 기술하였다.

II. 수치모형의 기본방정식

1. 기본 방정식

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x}u + \frac{\partial u}{\partial y}v + \frac{\partial u}{\partial z}w = fv - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial x}u + \frac{\partial v}{\partial y}v + \frac{\partial v}{\partial z}w = fv - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} + pg = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

여기서, P, f 는 압력, 코리올리의 parameter를 각각 나타낸다. 연직방향의 운동방정식에 대해서는 정수압분포의 가정이 적용되어 있다. 해수의 밀도 ρ 는 수평방향에 대해서 일정하다고 가정한다. 난류점성에 의한 전단응력은 $\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yy}, \tau_{yz}$ 에 나타낸다.

2. 다층류 방정식

좌표계를 Fig. 1에 나타낸다. 3차원 Navier-Stokes 방정식에 3층류 흐름을 적용하면, 각 층의 운동방정식은 아래의 식이 된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_i^{(k)}}{\partial t} + u_j^{(k)} u_{i,j}^{(k)} + \frac{1}{h^{(k)}} \left\{ (u_i w)^{(k-\frac{1}{2})} - (u_i w)^{(k+\frac{1}{2})} \right\} \\ + \frac{1}{\rho^{(k)}} P_{,i}^{(k)} - \frac{1}{(\rho^{(k)} h^{(k)})} \left\{ h^{(k)} (\tau_{ij,j}^{(k)}) + (\tau_i^{(k)} u - \tau_i^{(k)l}) \right\} = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, (k) 는 층의 수를 의미하며, $u_i^{(k)}$ 는 (k) 층의 평균유속성분을 나타내고 $h^{(k)}$ 는 층의 두께를 의미하며 다음과 같이 나타낸다.

$$h^{(k)} = L_{(k)} - L_{(k-1)} \quad (7)$$

제 (k) 번째 층의 수평유속을 $L_{(k-1)}$ 부터 $L_{(k)}$ 까지 적분하고 $h^{(k)}$ 로 나누면 각 층의 평균수평방향유속은 다음 식과 같이 된다.

$$u_i^{(k)} = \frac{1}{h^{(k)}} \int_{L_{(k-1)}}^{L_{(k)}} u_i dz \quad (8)$$

$P^{(k)}$ 는 다음 식으로 계산되는 압력이다.

$$P^{(K)} = \rho^{(1)} g \eta - \sum_{m=1}^{k-1} \rho^{(m)} g h^{(k)} - \rho^{(k)} g \left(z - \sum_{m=1}^{k-1} h^{(m)} \right) \quad (9)$$

$w^{(k)}$ 는 (k) 층에 대한 연직방향 유속을 나타내며 표층의 연속방정식은 식(2.3.5), 중층에서부터 저층까지에 대한 연속방정식은 식(10)에 나타낸다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \sum_{l=1}^b (h^{(l)} u_i^{(l)})_{,i} = 0 \quad (10)$$



$$w^{(k)} = - \sum_{l=k}^b (h^{(l)} u_i^{(l)})_{,i} \quad (11)$$

난류점성응력은 다음 식과 같이 정의된다.

$$\tau_{ij}^{(k)} = A_i^{(k)} (u_{i,j}^{(k)} + u_{j,i}^{(k)}) \quad (12)$$

여기서, $A_i^{(k)}$ 는 와동점성계수를 나타낸다. 표층에 대한 바람의 마찰력은 아래 식 (13)에 나타낸다.

$$\tau_i^{(1)u} = c^* \rho_a W W_i \quad (13)$$

여기서, c^* 는 항력계수, ρ_a 는 공기의 밀도, W 는 풍속의 절대치, W_i 는 풍속성분을 나타낸다. 중간층에 대해서는 아래의 마찰력을 고려한다.

$$\tau_i^{(k)u} = \frac{f_m}{2h^{(k)}} (\rho^{(k-1)} + \rho^{(k)}) (u_i^{(k-1)} - u_i^{(k)}) \Delta V^{(k)} \quad (14)$$

$$\tau_i^{(k)l} = \frac{f_m}{2h^{(k)}} (\rho^{(k)} + \rho^{(k+1)}) (u_i^{(k)} - u_i^{(k+1)}) \Delta V^{(k)} \quad (15)$$

여기서, f_m 은 계면의 마찰계수이고, 저면층에 대해서는 아래의 저면 마찰력을 고려한다.

$$\tau_i^{(b)l} = \frac{f_b}{h^b} \rho^{(b)} u_i^{(b)} (u_k^{(b)} u_k^{(b)})^{1/2} \quad (16)$$

여기서, f_b 는 해저마찰계수이다.

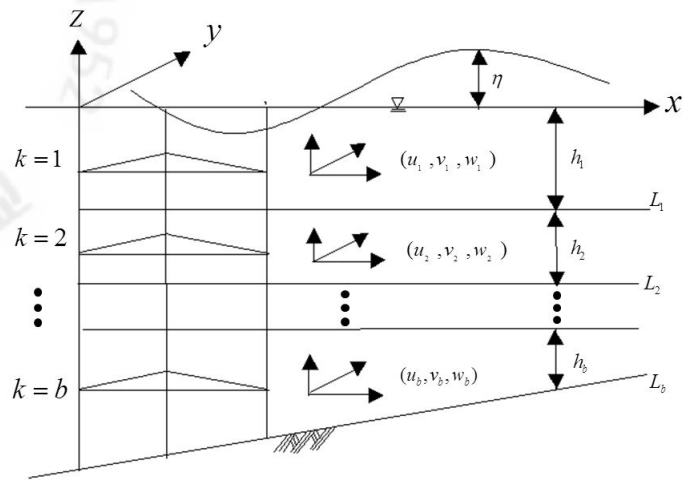


Fig. 1. Multiple Layers Model

3. 경계조건

Fig. 2와 같이 계산해역을 Ω 로 하고, 그 육지경계를 Γ_1 로 하면 육지경계에서의 경계조건을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_n = 0 \quad \text{on } \Gamma_1 \quad (17)$$

여기서, n 은 경계선에 대한 법선방향을 나타낸다. 해상경계 Γ_0 에서는 외해로부터 내습하는 파에 대한 수위와 유속을 부여하는 것으로 한다.

$$\begin{aligned} \eta &= \hat{\eta} \\ u &= \hat{u} \end{aligned} \quad (18)$$

여기서, $\hat{\eta}$ 와 \hat{u} 는 임의의 계산시각에 있어서의 평균조위 및 유속을 나타낸다. 초기조건으로는 다음과 같이 주어지는 것으로 한다.

$$\left. \begin{aligned} \eta &= 0 \\ u_i &= 0 \end{aligned} \right\} \text{ at } t=0 \quad (19)$$

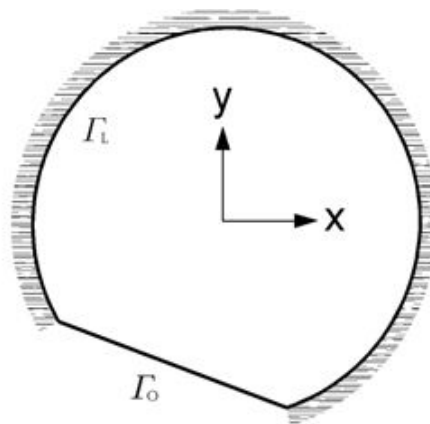


Fig. 2. Boundary Condition

4. 유한요소법

4.1 유한요소 정식화

4.1.1 보간함수

Fig. 3의 i 번째의 요소 e_i 에 주목하여, 그림과 같이 삼각형 요소를 선정한다. 삼각형의 꼭지점을 절점으로 택하여 반시계방향으로 각각 1, 2, 3으로 번호를 붙인다. 각 절점번호에 대응하는 좌표를 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$ 로 한다. 삼각형 e_i 상의 함수 $u_{ei}(x, y)$ 를 x 와 y 의 1차식으로 표현하여 다음과 같이 둔다.

$$u_{ei} = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y \quad (20)$$

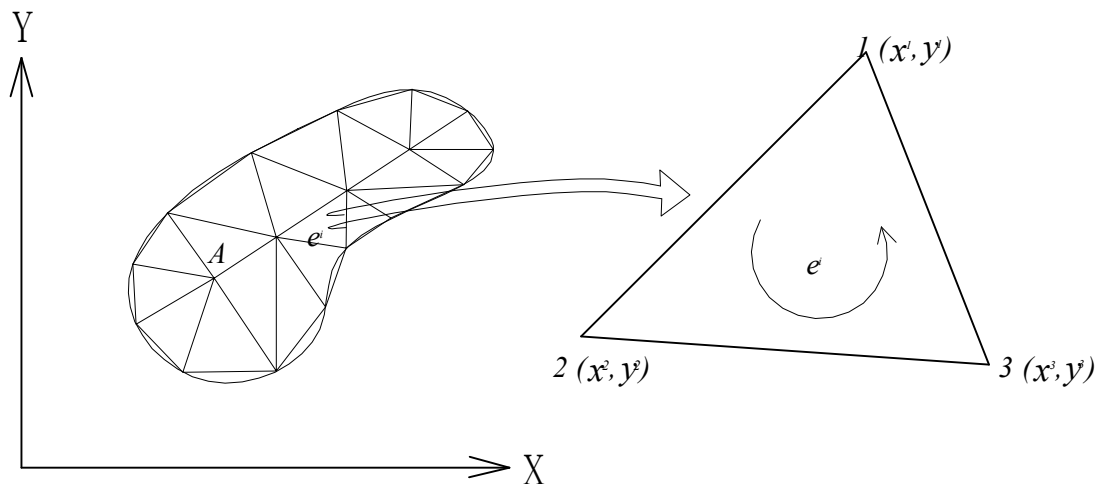


Fig. 3. Triangular Elements

여기서 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 는 각 요소마다 결정되는 계수이고, 다음과 같은 연립방정식으로부터 구한다.

$$\left. \begin{array}{l} \text{1절점} \\ \text{2절점} \\ \text{3절점} \end{array} \right\} \begin{array}{l} u_1 = \alpha_1 + \alpha_2 x_1 + \alpha_3 y_1 \\ u_2 = \alpha_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_3 y_2 \\ u_3 = \alpha_1 + \alpha_2 x_3 + \alpha_3 y_3 \end{array} \quad (21)$$

여기서 식(21)을 행렬을 이용하여 표시하면

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{pmatrix} \quad (22)$$

이 된다. $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 에 대하여 풀기 위해서, 행렬 $\begin{pmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{pmatrix}$ 의 역행렬을 구한다.

역행렬 ;

$$\begin{pmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{pmatrix}^{-1} = \frac{1}{2\Delta^e} \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{pmatrix} \quad (23)$$

여기서,

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= x_2y_3 - x_3y_2, & b_1 &= y_2 - y_3, & c_1 &= x_3 - x_2 \\ a_2 &= x_3y_1 - x_1y_3, & b_2 &= y_3 - y_1, & c_2 &= x_1 - x_3 \\ a_3 &= x_1y_2 - x_2y_1, & b_3 &= y_1 - y_2, & c_3 &= x_2 - x_1 \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

또 Δ^e 는 삼각형의 면적이다.

$$\Delta^e = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{vmatrix} \quad (25)$$

역행렬을 식 (22)의 양변에 곱하면, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 가 구해진다.

$$\begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{pmatrix} = \frac{1}{2\Delta^e} \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix} \quad (26)$$

이렇게 하여 얻어진 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 를 식 (21)에 대입하면, 삼각형 요소 e_i 상의 미지수는 다음과 같이 주어진다.

$$u_{e_i}(x,y) = \frac{1}{2\Delta^e}(a_1 + b_1x + c_1y)u_1 + \frac{1}{2\Delta^e}(a_2 + b_2x + c_2y)u_2 + \frac{1}{2\Delta^e}(a_3 + b_3x + c_3y)u_3 \quad (27)$$

위 식을 다음과 같이 고쳐쓴다.

$$u_{e_i}(x,y) = \phi_1(x,y)u_1 + \phi_2(x,y)u_2 + \phi_3(x,y)u_3 \quad (28)$$

여기서 보간함수는 다음과 같다.

$$\phi_i = \frac{1}{2\Delta^e}(a_i + b_ix + c_iy) \quad (i = 1, 2, 3) \quad (29)$$

보간함수 ϕ_i 는 좌표계에서 선형함수이고 영역 A 에서 각각의 3절점 삼각형 요소의 해를 근사화 하는데 사용된다.

4.2 다층류 유한요소 방정식

지배방정식에 대하여 공간방향 이산화를 하기 위해 유한요소기법을 적용하여 이산화 한다. 또한, 비선형 항이 포함되어져있기 때문에, Galerkin 법을 적용하고 이들의 식을 정리하면 다음과 같은 유한요소방정식을 얻을 수 있다.

$$M_{\alpha\beta} \dot{u}_{\beta i}^{(k)} + K_{\alpha\beta\gamma j} u_{\beta j}^{(k)} u_{\gamma i}^{(k)} + f \epsilon_{ij} M_{\alpha\beta} u_{\beta j}^{(k)} + N_{\alpha i \beta} p_{\beta}^{(k)} + \frac{A_l}{\rho^{(k)}} \cdot S_{\alpha i \beta j} u_{\beta j}^{(k)} - (T_{\alpha i}^{(k)u} - T_{\alpha i}^{(k)l}) - \Pi_{\alpha i}^{(k)} = 0 \quad (30)$$

표층에 대한 연속방정식은 다음과 같이 나타낸다.

$$M_{\alpha\beta} \dot{\eta}_{\beta} + \sum_{q=1}^b (h^{(q)} N_{\alpha i \beta} u_{\beta i}^{(q)}) = 0 \quad (31)$$

중층에서부터 저층까지의 연속방정식은 아래와 같다.

$$M_{\alpha\beta} w_{\beta}^{(k)} = - \sum_{l=k}^b (h^l N_{\alpha i \beta} u_{\beta i}^{(l)}) = 0 \quad (32)$$

여기서, 각 함수 매트릭스는 아래와 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} M_{\alpha\beta} &= \int_V (\Phi_{\alpha} \Phi_{\beta}) dV \\ K_{\alpha\beta\gamma j} &= \int_V (\Phi_{\alpha} \Phi_{\beta, j} \Phi_{\gamma}) dV \\ N_{\alpha i \beta} &= \int_V (\Phi_{\alpha} \Phi_{\beta, i}) dV \\ S_{\alpha i \beta j} &= \int_V (\Phi_{\alpha, i} \Phi_{\beta, j}) dV + \int_V (\Phi_{\alpha, k} \Phi_{\beta, k}) \delta_{i, j} dV \\ T_{\alpha i}^{(k)u} &= \int_V (\Phi_{\alpha} \tau_i^{(k)u}) dV \\ T_{\alpha i}^{(k)l} &= \int_V (\Phi_{\alpha} \tau_i^{(k)l}) dV \\ \Pi_{\alpha i}^{(k)} &= \int_V (\Phi_{\alpha} \{ (u_i w)^{(k-1/2)} - (u_i w)^{(k+1/2)} \}) dV \end{aligned} \quad (33)$$

전체영역으로 중합시킨 뒤의 연립방정식을 아래와 같이 나타낸다.

$$M_{\alpha\beta}\dot{V}_\beta + K_{\alpha\beta\gamma}V_\beta V_\gamma + S_{\alpha\beta}V_\beta + N_{\alpha\beta}p_\beta + F_\alpha = 0 \quad (34)$$

$$M_{\alpha\beta}\dot{Z}_\beta + E_{\alpha\beta}V_\beta = 0 \quad (35)$$

여기서, V_β , Z_β 는 수평방향의 유속성분, 수위상승량을 나타낸다.

시간방향의 이산화에 대해서는 2단계 양해법을 이용한다. 시간이산계의 유한요소 방정식은 아래와 같이 된다.

$$\overline{M}_{\alpha\beta}V_\beta^{n+1/2} = \overline{M}_{\alpha\beta}V_\beta^n - \frac{\Delta t}{2}(K_{\alpha\beta\gamma}V_\beta^n V_\gamma^n + N_{\alpha\beta}p_\beta^n + B_{\alpha\beta}V_\beta^n + F_\alpha^n) \quad (36)$$

$$\overline{M}_{\alpha\beta}Z_\beta^{n+1/2} = \widetilde{M}_{\alpha\beta}Z_\beta^n - \frac{\Delta t}{2}A_{\alpha\beta}V_\beta^n \quad (37)$$

$$\overline{M}_{\alpha\beta}V_\beta^{n+1} = \overline{M}_{\alpha\beta}V_\beta^n - \Delta t(K_{\alpha\beta\gamma}V_\beta^{n+1/2}V_\gamma^{n+1/2} + B_{\alpha\beta}V_\beta^n + F_\alpha^n) \quad (38)$$

$$\overline{M}_{\alpha\beta}Z_\beta^{n+1} = \widetilde{M}_{\alpha\beta}Z_\beta^n - \Delta tA_{\alpha\beta}V_\beta^{n+1/2} \quad (39)$$

$$\widetilde{M}_{\alpha\beta} = e\overline{M}_{\alpha\beta} + (1-e)M_{\alpha\beta} \quad (40)$$

III. 수치모델의 검증

3.1 수치모델의 실험 조건

수치모델의 해역으로서 현재 해수교환방과제가 설치되어 있는 강원도 주문진항을 선택하였고, 해수교환방과제가 설치되어 있는 주문진항 대해서 수치해석을 각각 수행하였다.

본 연구에 사용된 경계조건에 대해서는 Fig. 4에 나타내었다. Γ_L 은 육지경계로서 다음과 같이 주어진다.

$$u_n^{(k)} = 0 \quad \text{on } \Gamma_L \quad (41)$$

Γ_O 은 해상경계이며 다음의 식과 같이 주어진다.

$$\eta^{(k)} = \sum_{m=1}^{N_c} a_m^{(k)} \sin\left\{\frac{2\pi}{T_m^{(k)}}t - k_m^{(k)}\right\} \quad \text{on } \Gamma_O \quad (42)$$

여기서, N_c 는 입사파의 수, a_m 은 진폭, k_m 은 위상, T_m 은 M_2 , S_2 , K_1 , O_1 분조의 주기를 각각 나타낸다. 본 수치해석에 사용된 조석조화상수는 Table 1에 나타낸다. Γ_E 는 해수교환방과제서의 해수유입을 부여한 영역이다.

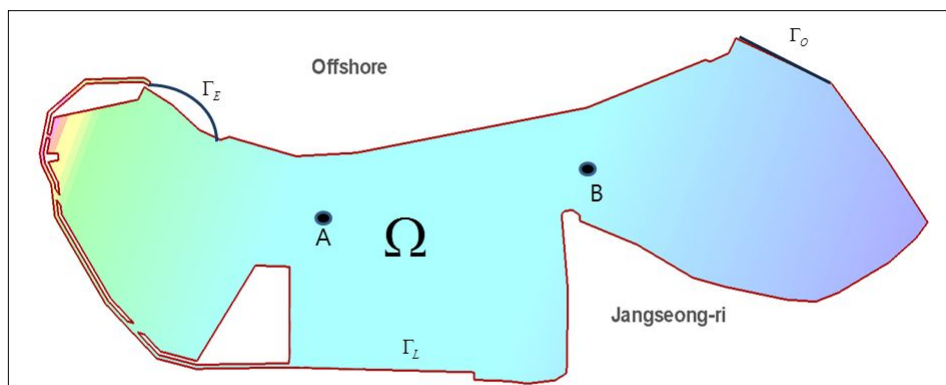


Fig. 4. Boundary Condition

해수교환방파제로부터 유입되는 파이프의 단면적은 $10.6m^2/s$ 이고, 도수파이프 내 관측유속인 $0.55m/s$ 의 유속을 부여하였다. 또한 외해로부터 항내에 미치는 영향을 고려하여 항 입구에서 $0.8\sim 0.14m/s$ 의 유속을 부여하고, 이를 통한 항 입구에서의 일정 유량의 유출을 제어하였다(동해지방해양수산청,2004;2005). 표층에는 바람에 마찰력을 고려하여 풍속을 $2.0m/s$, 풍향은 북풍(N)을 부여하였다.

주문진 항의 수심분포도를 Fig. 5에 나타내었으며, 전반적인 항내 수심이 $7.5m$ 미만인 것을 고려하여, 층의 경계면을 평균해수면으로부터 각각 $2.6m$, $5.4m$ 아래에 두어 층을 구분하였다. Fig. 6에는 주문진항의 3층 수심분할도를 나타내었으며, Fig. 7에는 해역의 해저지형을 나타내었다.

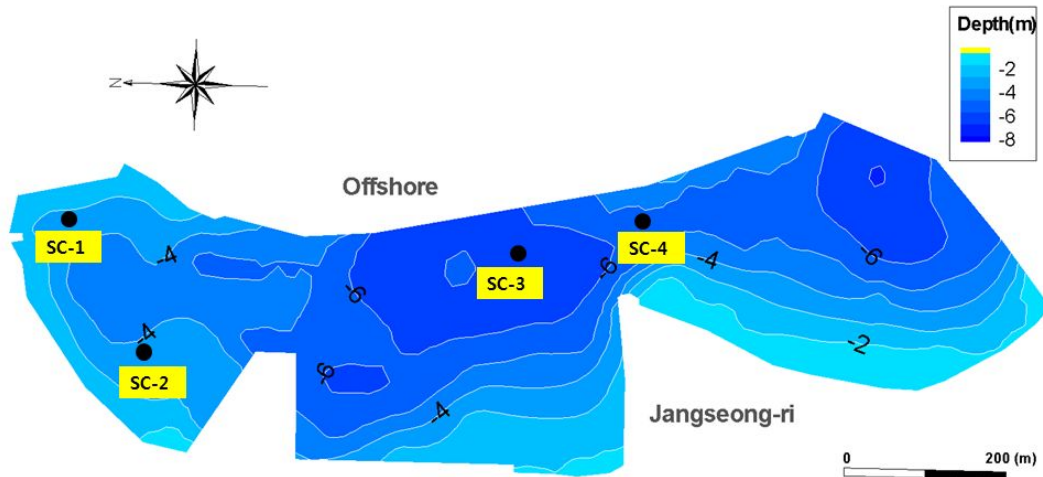


Fig. 5. Water Depth of Jumunjin Fishery Port

Table 1. The Results of Harmonic Analysis for Tidal Flow in Jumunjin Fishery Port(해양수산부, 1999)

N_c	Constituent	Amplitude $a_m(cm)$	Period $T_m(hour)$	Phase delay $K_m(degree)$
1	M_2	6.94	12.4206	91.486
2	S_2	1.79	12.0000	120.689
3	K_1	4.35	23.9344	1.367
4	O_1	4.70	25.8193	320.935

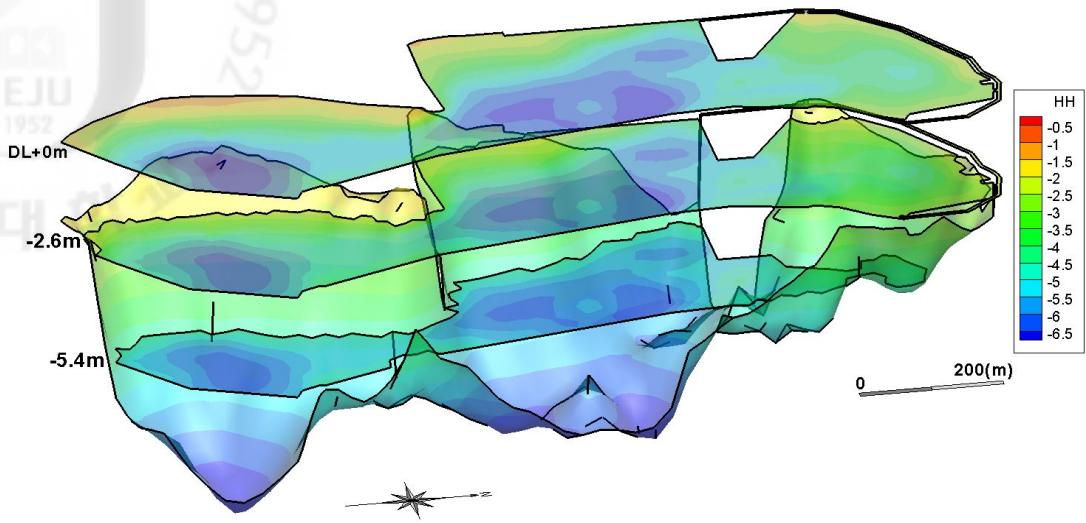


Fig. 6. Water Depth Partition of Jumunjin Fishery Port(3 Layers)

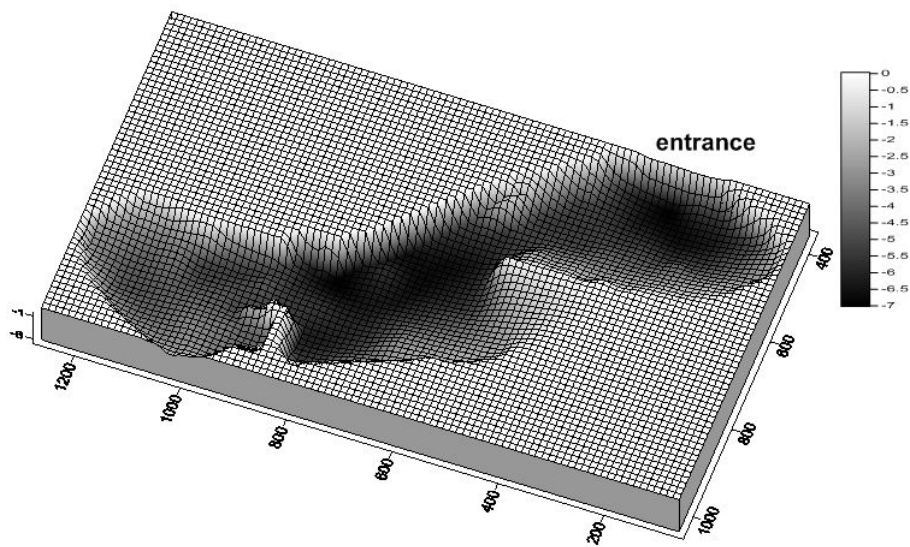
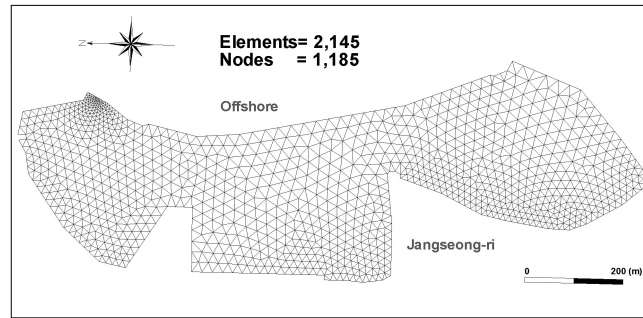


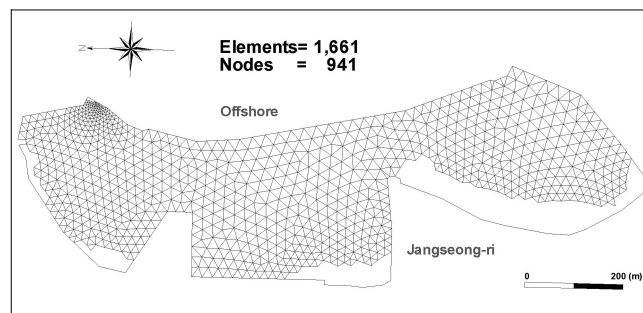
Fig. 7. Topographical Map of Jumunjin Fishery Port

3.2 해수교환방파제가 설치된 주문진항의 3층류 유동해석

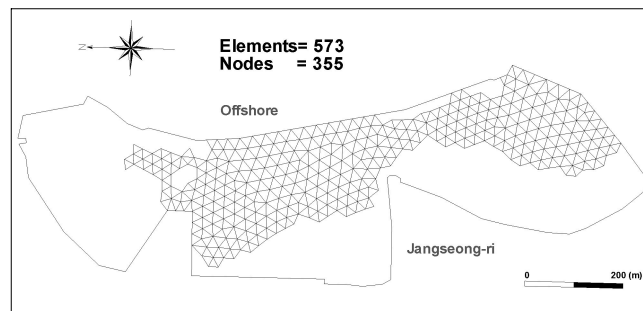
해수교환방파제가 설치된 주문진 항의 수치해석을 수행하였다. Fig. 8에는 표층, 중층, 저층의 요소분할도를 요소수와 절점수를 포함하여 나타내었다.



___<Upper Layer : 0m~2.6m>



<Intermediate Layer : 2.6m~5.4m>

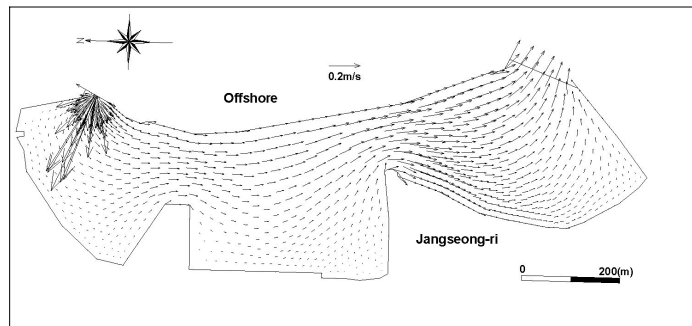


<Lower Layer : 5.4m~bottom>

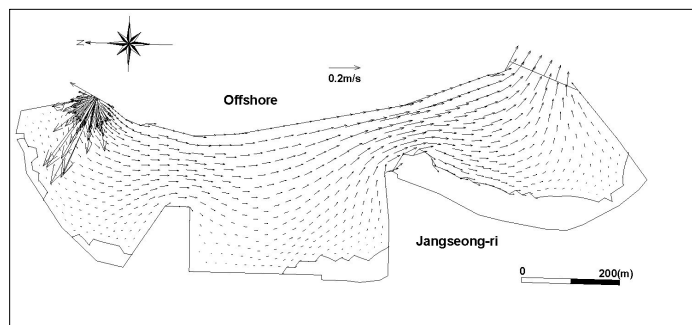
Fig. 8

Fig. 8. Finite Element Idealization of Jumunjin Fishery Port

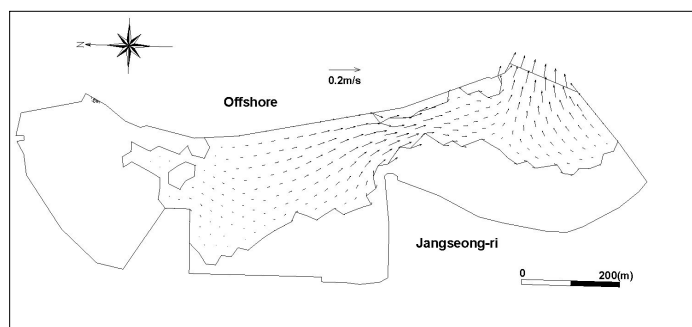
Fig. 9는 주문진 항의 유속분포도를 나타낸다. 동해안은 조석에 의한 영향이 적기 때문에, 해수교환방과제에 의해 해수가 유입되면 항 입구를 통하여 일방향의 해수순환이 일어나는 것을 알 수 있었다. 이는 해수교환방과제가 항내 안쪽 영역을 제외하면 고른 해수교환을 보인다는 것을 나타낸다.



<Upper Layer>



<Intermediate Layer>



<Lower Layer>

Fig. 9. Velocity Vectors of Jumunjin Fishery Port with SEB

3층류 수치모델의 정확성을 검증하기 위하여 Sea Tech R&D(2008)에 관측된 데이터와 수치모델 결과를 비교·검토하였다. 관측된 절점은 Fig. 5에 나타내었으며, 각 절점의 유속 값에 대하여 Table 2에 나타내었다. 수치해석 결과, 절점 SC-1과 SC-2에서는 수심이 내부경계의 높이 보다 낮기 때문에 중층과 저층의 유속은 얻을 수 없었으며, 각 절점의 관측데이터와 수치 모델의 비교 결과에 대한 그래프를 Fig. 10에 나타내었다. 비교한 결과, 대부분의 유속 값은 관측된 유속과 비교적 일치하였으며, SC-4의 유속 값은 관측된 유속보다 크게 나왔으나, 관측된 유속이 평균값으로써, 최대값과 최소값 범위안에 포함되어 있어 SC-4역시 관측 유속값과 일치함을 확인 할 수 있었다.

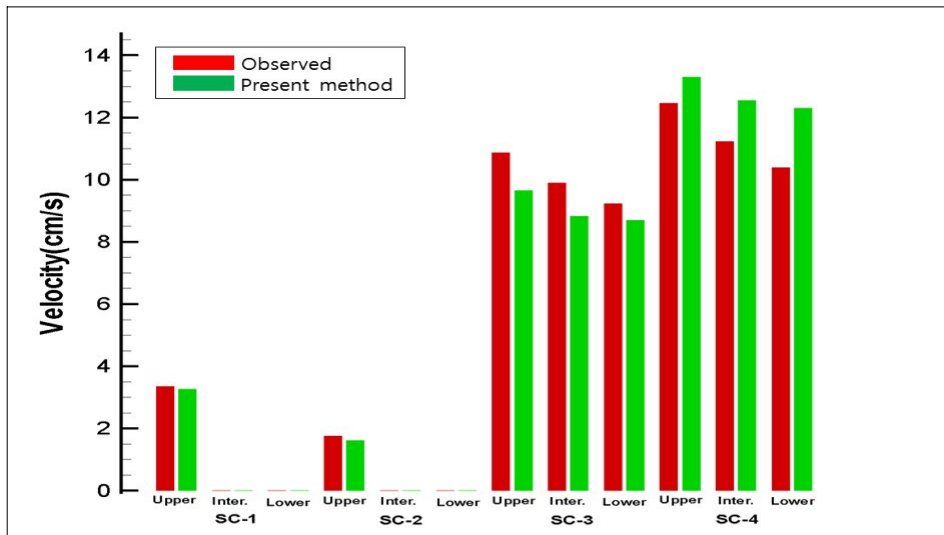


Fig. 10. Comparison of Observed Data and Present Method

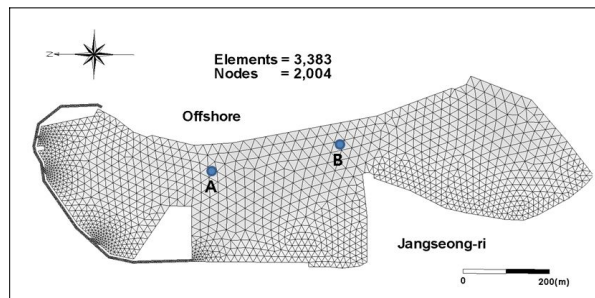
Table 2. Comparison of Observed Data and Present Method

Node	Observed (Average)			Present Method		
	Upper	Inter	Lower	Upper	Inter	Lower
SC-1	3.35	-	-	3.27	-	-
SC-2	1.76	-	-	1.61	-	-
SC-3	10.87	9.90	9.23	9.65	8.83	8.70
SC-4	12.46	11.23	10.39	13.3	12.54	12.3

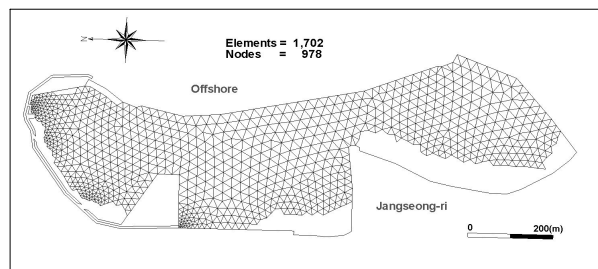
IV. 주문진항의 유동 해석

4.1 주문진항의 3층류 유동해석

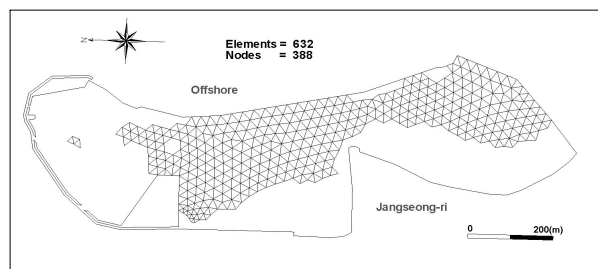
가상의 다기수로가 설치된 주문진 항의 수치해석을 수행하였다. Fig. 11에는 표층, 중층 그리고 저층의 요소분할도를 나타내었다. 각 층의 요소수와 절점수는 그림에 같이 나타내었다.



<Upper Layer : 0m~ 4.5m>

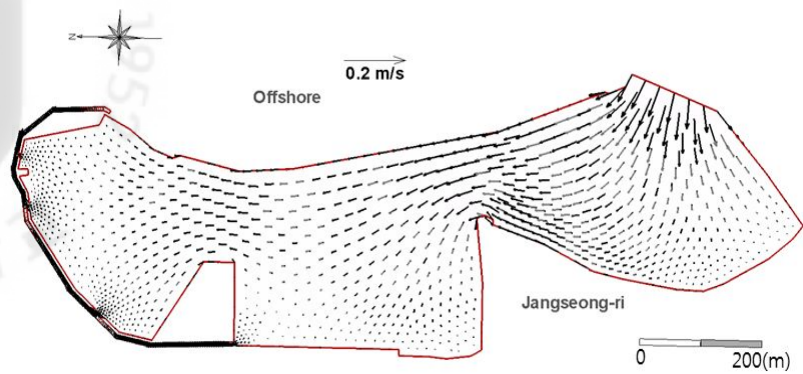


<Intermediate Layer : 4.5 m~6.0m>

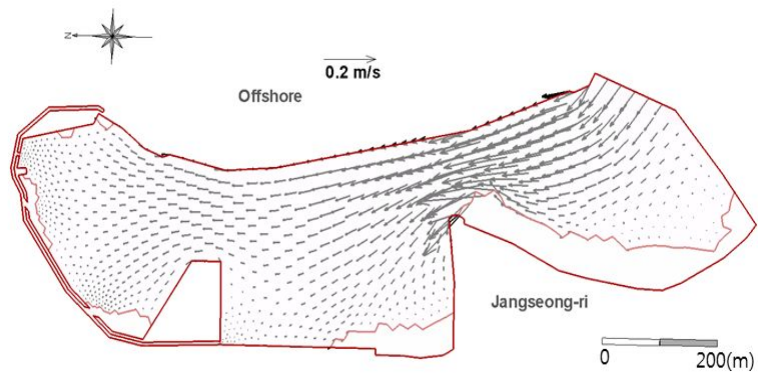


<Lower Layer : 6.0m~bottom>

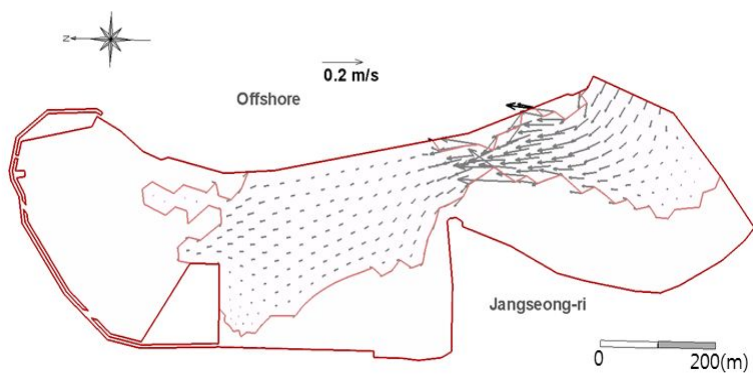
Fig. 11. Finite Element Idealization of Jumunjin Fishery Port with Manifold Cannel



<Upper Layer>

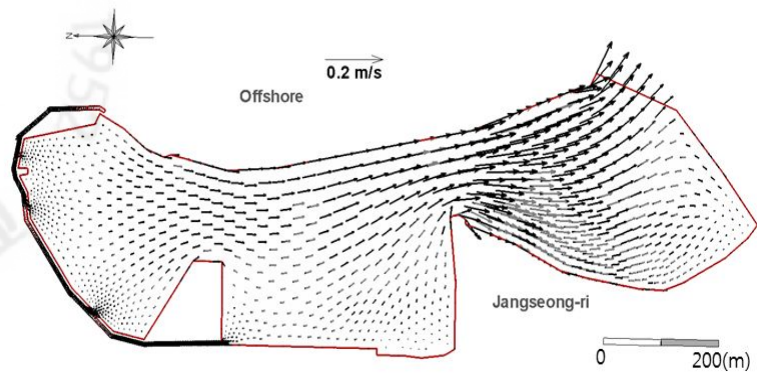


<Intermediate Layer>

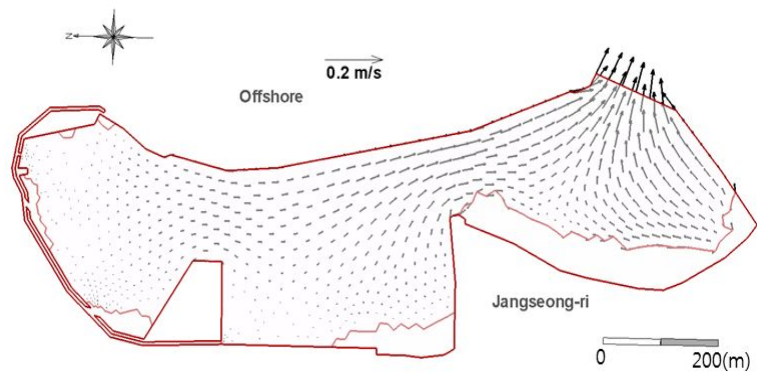


<Lower Layer>

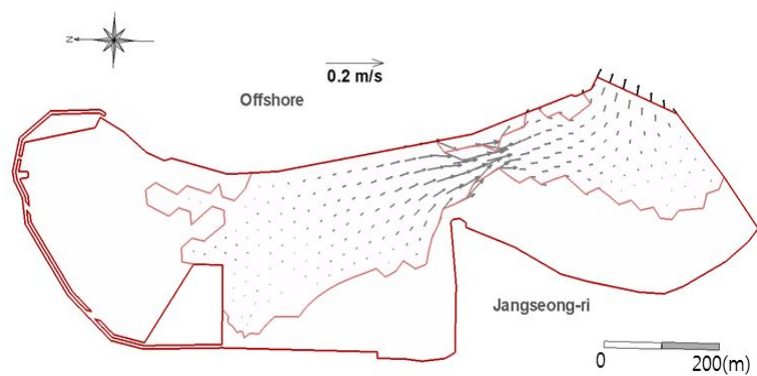
Fig. 12. Velocity Vectors of Jumunjin Fishery Port with Manifold Channel at Flood Tide



<Upper Layer>



<Intermediate Layer>



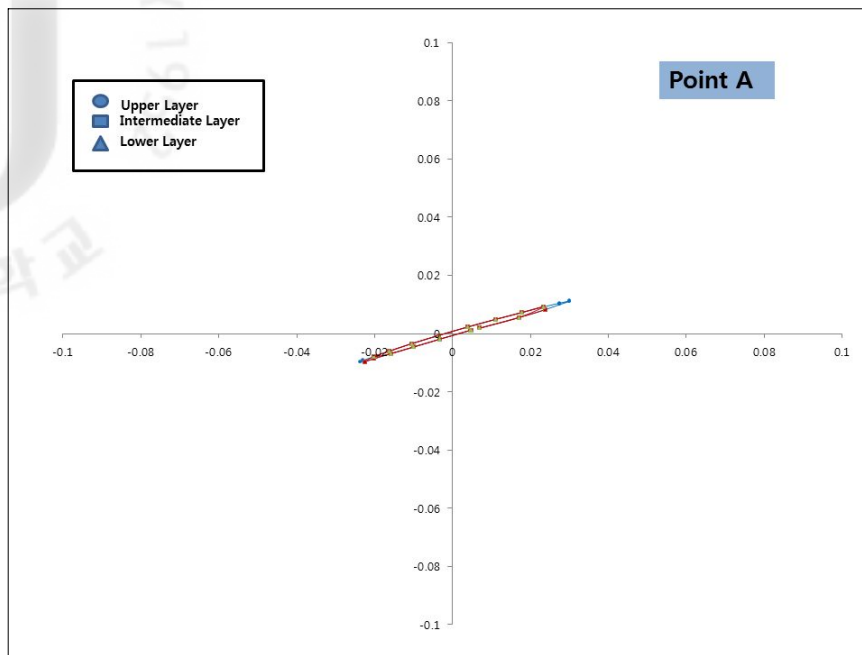
<Lower Layer>

Fig. 13. Velocity Vectors of Jumunjin Fishery Port with Manifold Channel at Ebb Tide

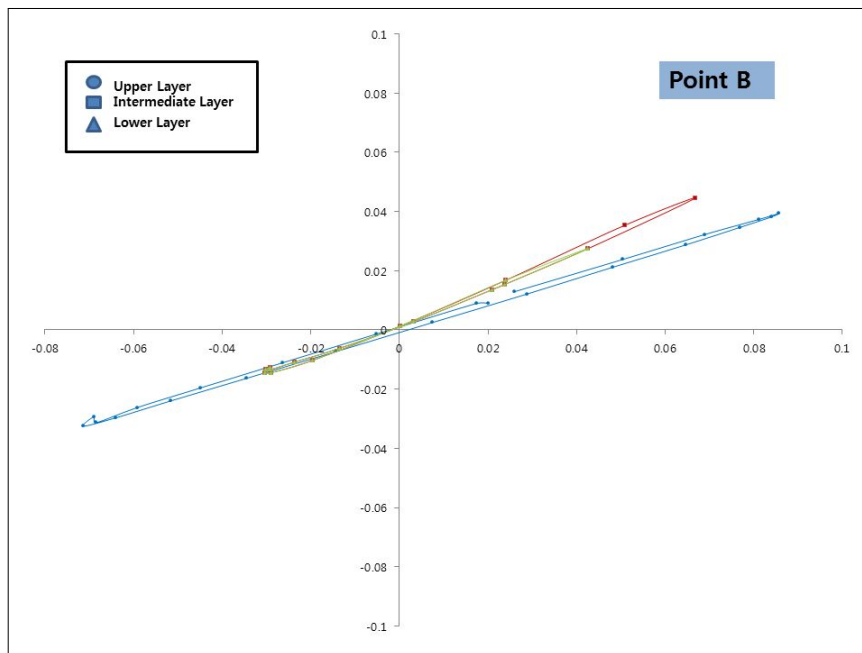
Fig. 11의 요소분할도에서 나타나듯이, 가상으로 설치한 다기수로는 폭이 5.3 m, 수심이 2.0m이며, 주문진 항의 형상을 따라 762.1m의 길이로 설정되었다. 다기수로 내의 손실수두를 줄이기 위하여 수로의 굴곡은 최소화 하였다. 기존의 해수교환방과제를 설치함에도 불구하고, 해수교환이 어려웠던 항내 영역에 최적의 유동 패턴을 일으키기 위해 세 개의 수중유출구를 각각 위치시키고 수치해석을 수행하였다. 수치해석 조건은 해수교환방과제와 동일하게 하였으며, 수치해석결과와 Fig. 12와 Fig. 13에 각각 창조류와 낙조류일 경우로 나누어 나타냈다.

Fig. 11의 표층에 나타낸 A, B점 에서의 유속을 가지고 Fig. 14에는 조류타원도를, Fig. 15와 Fig. 16에는 유향벡터도를 나타내었다. A점은 항내 영역이므로 흐름이 작아 유속 값이 적게 나왔으며, B점은 항 입구 부근으로 흐름이 매우 커서 유속 값이 크게 나왔다.

수치해석결과, 다기수로가 설치된 주문진항 내의 전반적인 유속은 0.1m/s미만으로 나왔으며, 최강 유속은 항 입구 부근에서 0.15m/s 내외로 나타났다. 이를 통하여 표층영역에서 출입구를 통해 해수가 유입되어 해수교환이 일어나고, 이러한 해수 유입이 연직방향에 대한 유속분포로 인해, 중층과 저층 영역까지도 영향을 끼치며 전반적으로 항내 전 영역에 대하여 해수 교환이 고르게 일어나는 것을 확인 할 수 있었다.

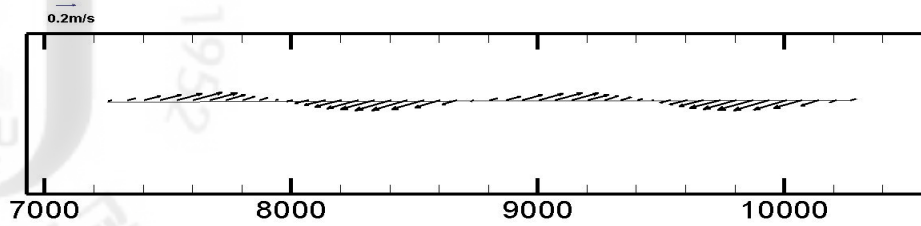


<Point A>

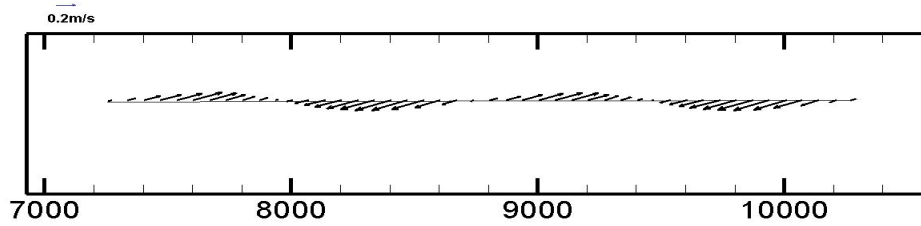


<Point B>

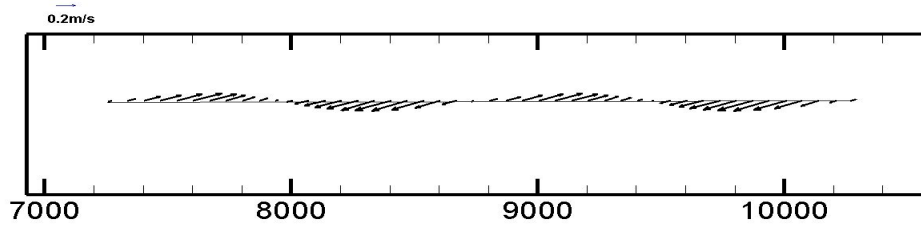
Fig. 14. Calculated Current Ellipse at Point A and B



<Upper Layer>



<Intermediate Layer>



<Lower Layer>

Fig. 15. Calculated Current at Point A

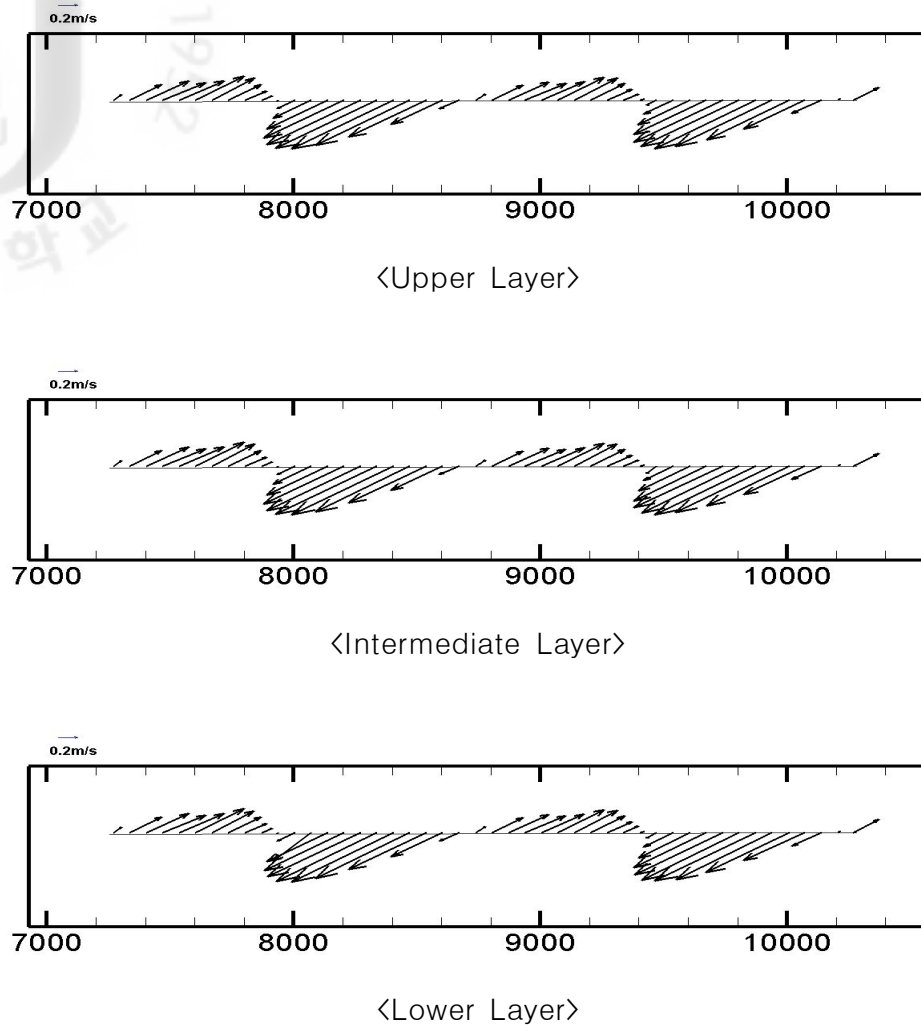


Fig. 16. Calculated Current at Point B

4.2. 주문진항의 5층류 유동해석

다층류 유동해석을 실시하기 위하여 수치모델을 5층으로 분할하여 수치해석을 수행하였다. Fig. 17에는 주문진항의 수심을 5층으로 분할하여 각 층의 수심과 같이 나타내었다.

Fig. 18과 Fig. 19는 Fig. 11의 표층의 나타낸 A, B점의 유속 값을 가지고 조류타원도를 나타내었으며, Fig. 20과 Fig. 21은 유향벡터도, Fig. 22와 Fig. 23에는 연직방향으로의 수평유속분포를 나타내었다. 특히, Fig. 22와 Fig. 23에는 3층류, 5층류 그리고 8층류로 나누어 비교함으로써 다층으로 분할할수록 더 높은 정확도의 유동 해석이 가능한 것을 확인 할 수 있었다.

수치해석 결과, 수심을 더 많은 층으로 나누어 수치해석을 실시한 경우가 유동 현상을 파악하는데 있어 좀 더 정확도가 높은 것을 알 수 있었다. 또한, 유속은 표층에서 제일 강하게 나오며 수심이 깊어질수록 약해지는 것을 알 수 있었다.

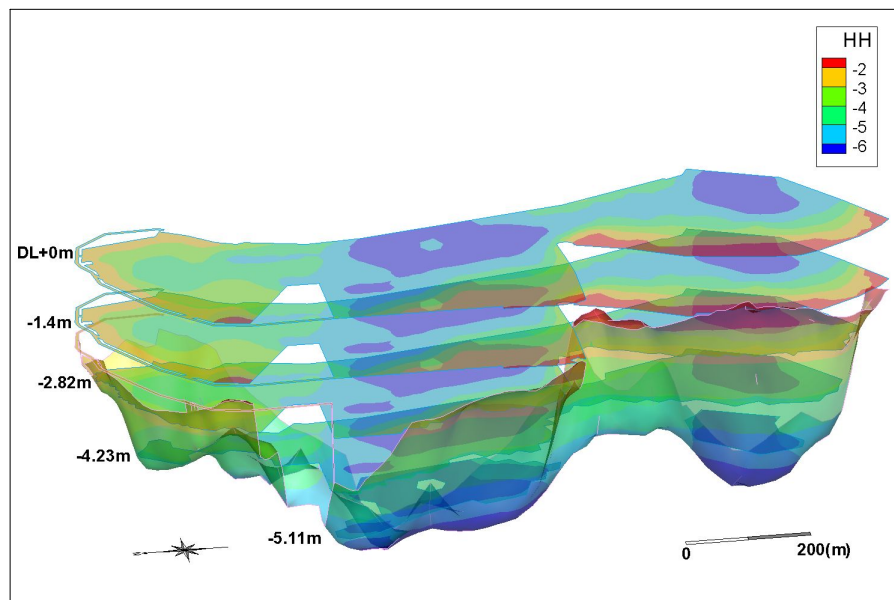
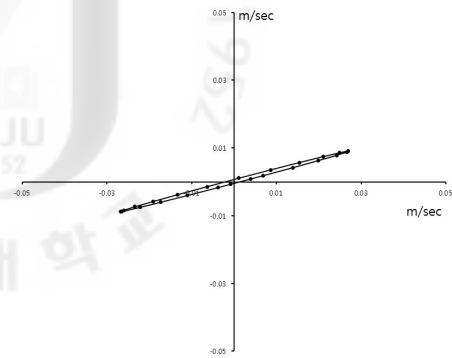
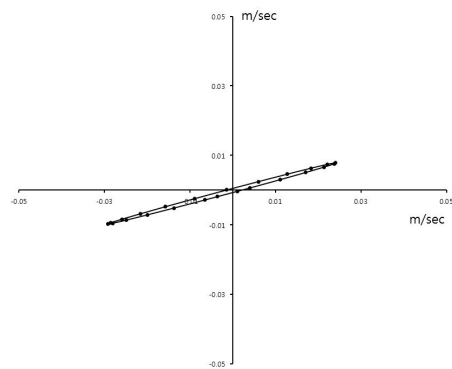


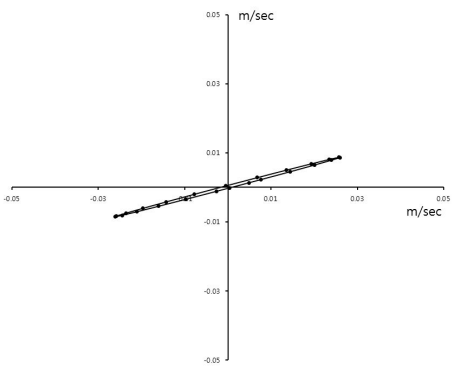
Fig. 17. Water Depth of Jumujin Fishery Port 5 Layers)



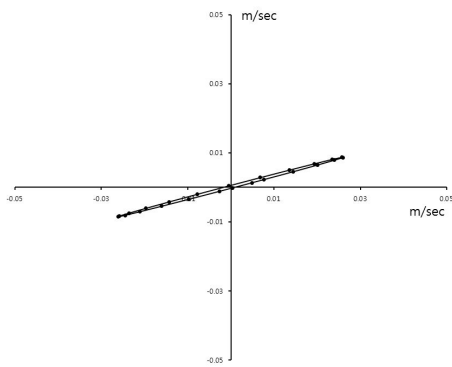
<1 Layer>



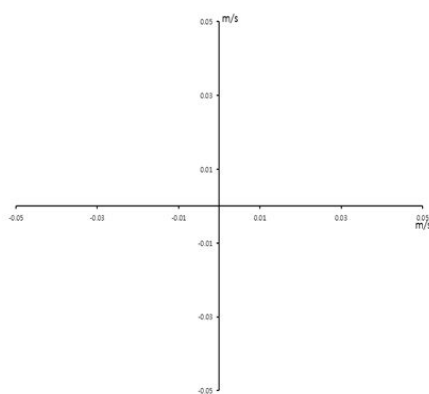
<2 Layer>



<3 Layer>

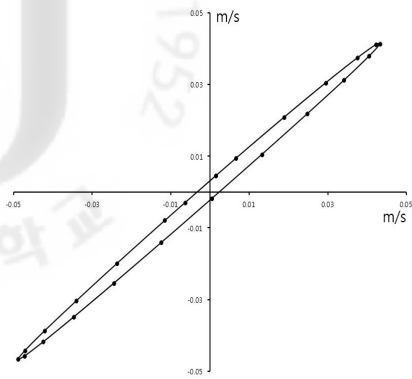


<4 Layer>

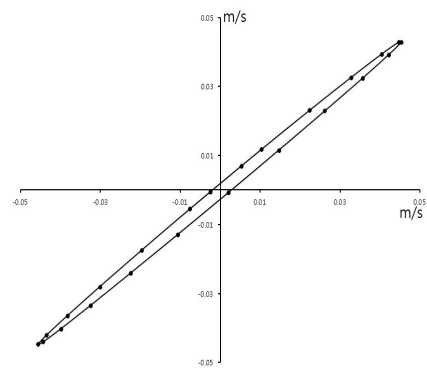


<5 Layer>

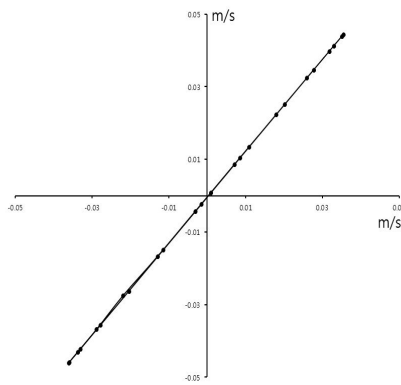
Fig. 18. Calculated Current Ellipse at Point A



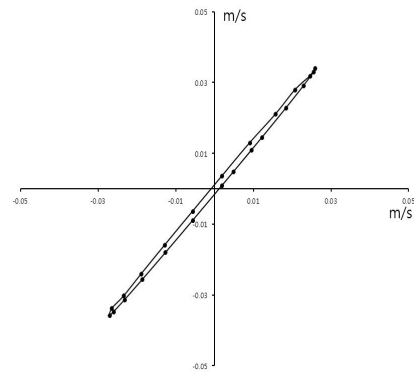
<1 Layer>



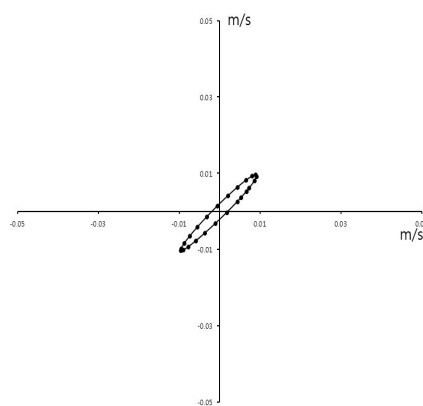
<2 Layer>



<3 Layer>

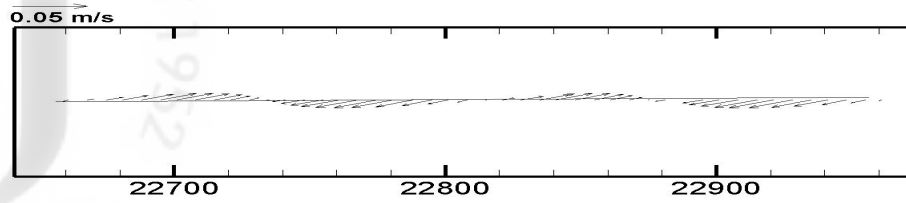


<4 Layer>

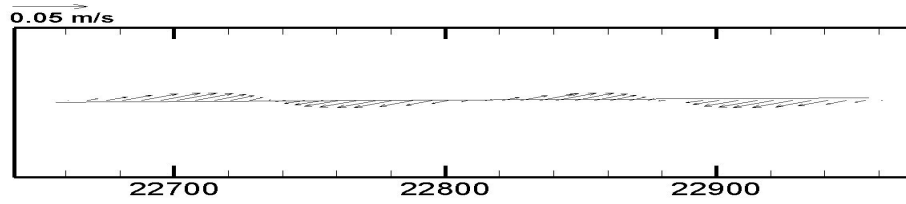


<5 Layer>

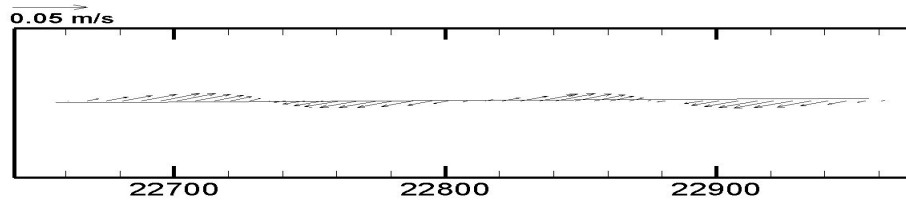
Fig. 19. Calculated Current Ellipse at Point B



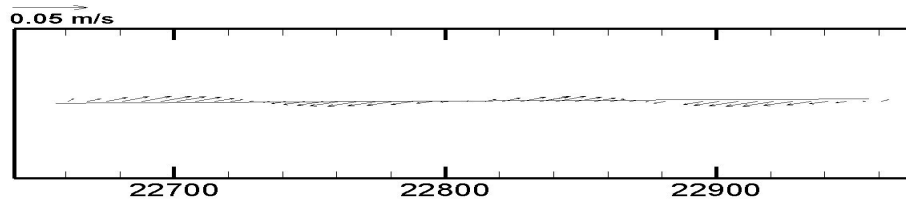
<1 Layer>



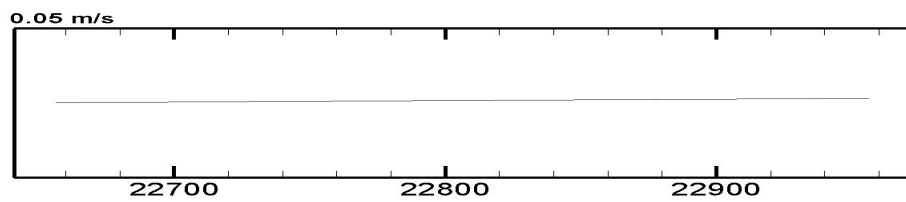
<2 Layer>



<3 Layer>

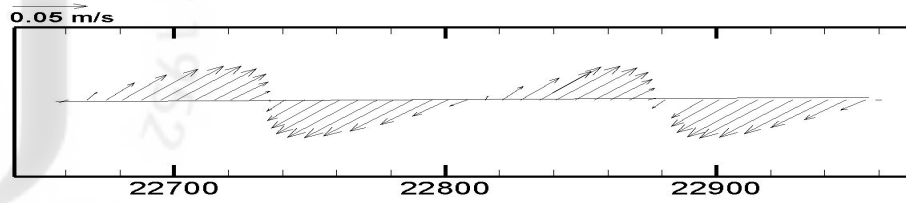


<4 Layer>

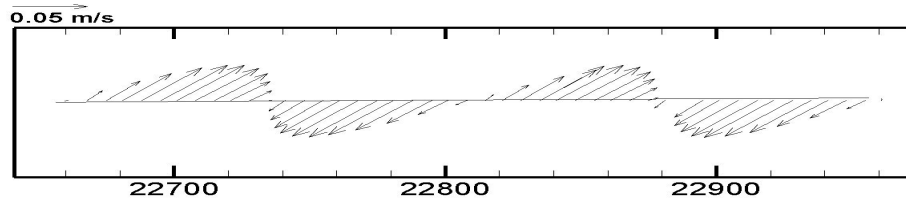


<5 Layer>

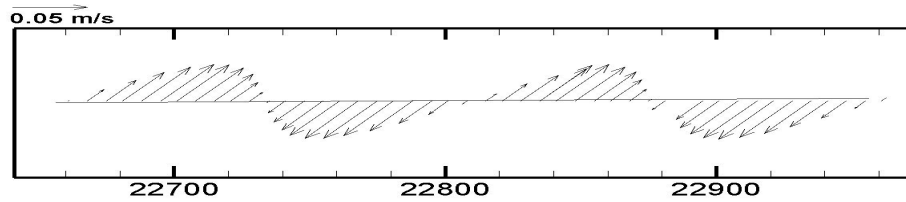
Fig. 20. Calculated Current at Point A



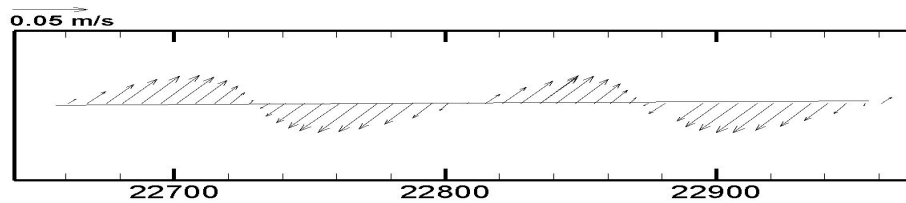
<1 Layer>



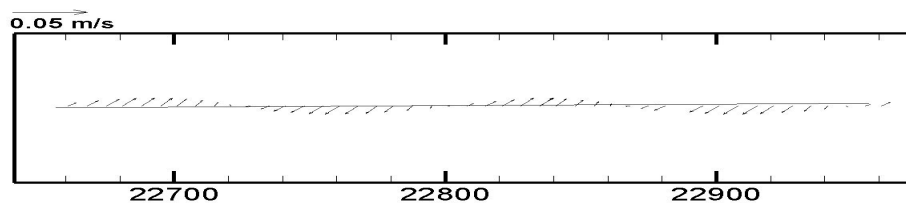
<2 Layer>



<3 Layer>

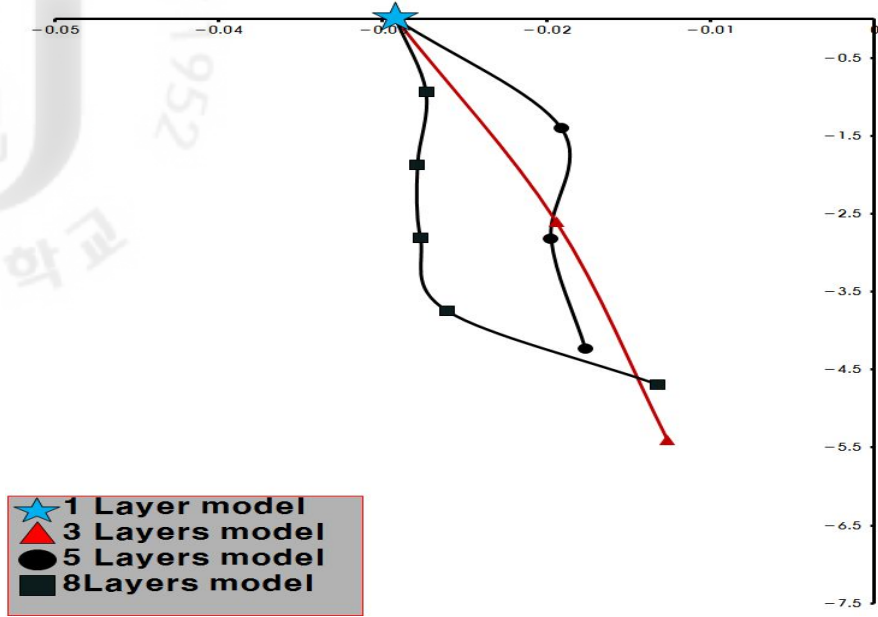


<4 Layer>

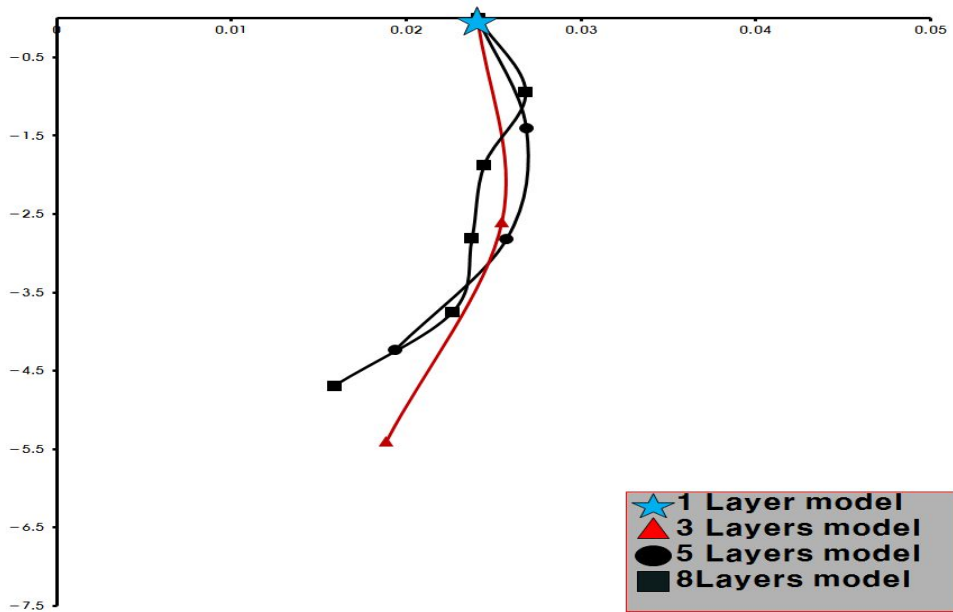


<5 Layer>

Fig. 21. Calculated Current at Point B

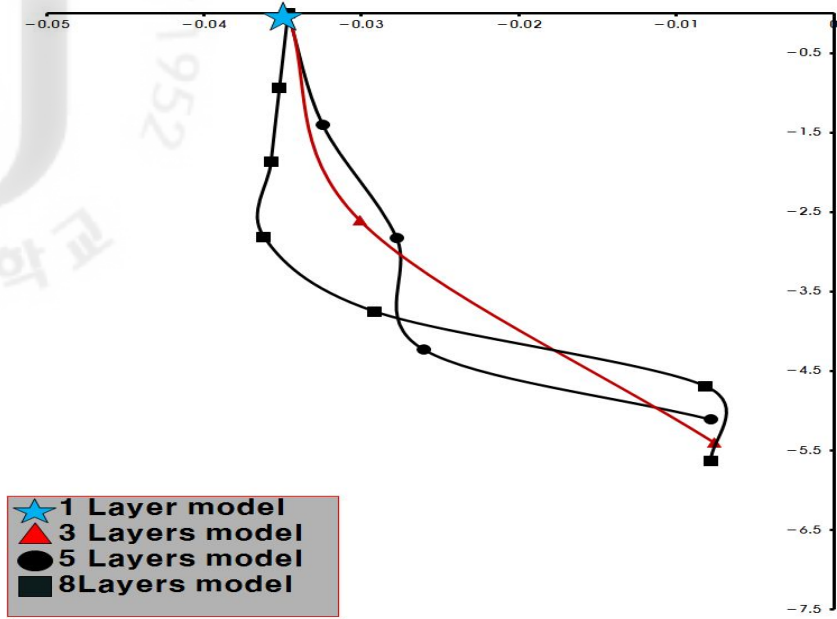


<Ebb Tide>

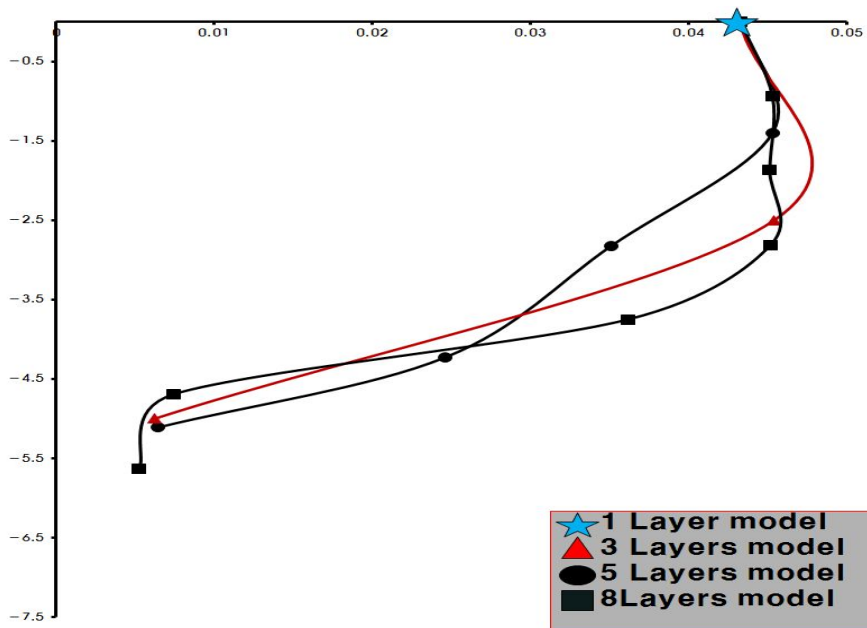


<Flood Tide>

Fig. 22. Vertical Profile of Horizontal Velocity at Point A



<Ebb Tide>



<Flood Tide>

Fig. 23. Vertical Profile of Horizontal Velocity at Point B

V. 결 론

유한요소법을 이용하여 다기수로가 설치된 주문진항의 다층류 유동 해석을 수행하였다. 다층류 모델에 연직유속에 대한 파라미터를 추가하고, 표층부터 저층까지의 밀도와 점성을 수심에 따라 고려하여 수치해석을 실시한 결과, 단층 모델을 사용했을 때 보다 다층류 수치모델을 사용한 결과 유동 현상을 파악하는 데 있어 좀 더 정확도가 높은 결과를 얻을 수 있었다.

앞으로 이러한 다층류 모델을 통해 구체적이고 정확성이 높은 유동해석이 이루어질 것으로 사료되어진다.

VI. 참고 문헌

- 김남형 역 (1995). 유한요소법유체해석, 원장출판사
- 김남형, 윤현철, 허영택(2010). 개별요소법을 이용한 삼각망 생성기법 개발, 한국해양학회지, 제34권, 제5호, pp.367-373.
- 김태운, 윤한삼(2011). 해수유동모델 검증을 위한 오차평가방법 비교 연구, 한국해양환경공학회지, 제14권, 제2호, pp.107-113.
- 서승원, 김현정(2011). 황해 및 북서태평양 확장해역 정밀 조석모의, 한국해양학회 논문집, 제23권, 제3호, pp.205-214.
- 정태성, 최종화(2011). EFDC해수유동무형의 계산시간 효율화, 한국해양환경공학회지, 제14권, 제2호, pp.121-129.
- 해양수산부(1999). 해수교환방과제의 실용화연구(Ⅱ), pp.73-85.
- 동해지방해양수산청(2004). 주문진항 해수교환시설 설치공사 사전모니터링 최종 보고서, pp.5-36.
- 동해지방해양수산청(2005). 주문진항 해수교환시설 준공 후 모니터링조사용역 2차분 최종보고서, pp.353-376.
- 주)SeaTech R&D(2008), 주문진항 해수교환시설 관련 해양조사보고서
- Kawahara, M., Hirano, H., Tsubota, K., and Inagaki, K. (1982). Selective lumping finite element method for shallow water flow. Int. J. Num. Meth. Fluids, Vol.2, pp.89-112.
- Kim, N.H., Park, J.H., and Kang, H.W. (2007). The numerical analysis of Jeju harbor flow considering effect of seasonal wind. J. of Korean Navigation and Port Research, Vol.31, No.9, pp.793-799.
- Kim, N.H., Lee, C.L., Ku, B.S., and Song, M.S. (2011). Numerical Analysis of Flow Pattern by Outflow Gates with Manifold Channel, Korea Society of Coastal and Ocean Eng., Vol.23, No.1, pp.43-49

감사의 글

2년이란 시간동안 항만연구실에서 대학원 생활을 하며 참 많은 것을 배웠습니다. 부족한게 많았던 저에게 항상 학문적인 지식을 지도편달 해주셔서 이렇게 논문을 완성 할수 있도록 해주시고, 대학원생 생활을 하며 한계에 부딪쳐 길을 잃어 갈때마다 앞에서 저를 이끌어주신 김남형 교수님께 제일 먼저 감사의 말씀을 전하고 싶습니다. 또한 바쁘신 와중에도 논문심사를 맡으셔서 조금이라도 좋은 논문이 될 수 있도록 도와주신 김상진 교수님과 허영택 박사님께도 진심을 담아 감사의 말씀을 전하고 싶습니다. 그리고 학부때부터 토목공학이라는 길로 제가 걸어갈 수 있도록 소중한 가르침을 주신 양성기 교수님, 이병걸 교수님, 박상진 교수님, 이동욱 교수님께도 감사의 말씀을 드립니다.

제가 지금까지 지내온 시간과 앞으로 지낼 많은 시간을 다 합쳐도 항만연구실에서 보낸 2년이라는 시간만큼 저에게 의미있는 시간이 있을까 하는 생각이 들 정도로 이 연구실에서의 시간은 저에게 매우 소중한합니다. 앞으로 나도 이렇게 살아가고 싶다고 느껴질 정도로 저에게 훌륭한 롤모델이 되어주신 김남형 교수님과 학문적인 고민이든 인생에 대한 고민이든 항상 제 고민들을 잘 들어주시며 용기와 자신감을 북돋워 주신 선배님들이 있었기에 제가 석사학위 과정을 무사히 마칠 수 있었습니다. 이렇게 글로나마 선배님들께 정말 감사하다고 말씀 드리고 싶습니다.

학부생활을 하며 눈이오는 교정에서 밤새 기사공부를 하며 서로 챙겨주었고, 대학원 생활을 하며 순간 순간 방황했던 저에게 자판기 커피 한잔을 뽑아주며 옆에서 든든하게 그리고 묵묵하게 저를 믿어주고 밀어주던 수민오빠, 연구실 제 뒷자리에서 공부하며 모르는 것을 물어봐도 귀찮아하지 않고 자기것인 마냥 끝까지 잘 가르쳐주고 힘들때마다 든든한 한마디를 해주며 힘을 준 정운오빠, 6년 가까이 친구지만 가족처럼 지내며 자기도 힘들지만 저를 먼저 챙겨주던 서리에게는 그동안 정말 미안하고 많이 고맙다는 말을 하고싶습니다. 그리고 처음 입학할 때부터 연구라는 것에 부담감을 느끼지 않도록 옆에서 정말 많이 도와준 창림오빠, 승현오빠, 그리고 제 정신적인 지주인 현철오빠에게도 감사의 말씀을 전

합니다. 학부동기이자 저희 뒤를 이어 연구실에서 부지런히 항만 연구를 시작하는 우성이와 명진이 그리고 학부생 막내 수환이에게도 열심히 하라는 격려와 함께 고맙다는 말을 전합니다.

대학원 생활을 하며 연구실은 다르지만 항상 학교에서 보면 말한마디라도 따뜻하게 해주시며 챙겨주신 승현오빠, 우열오빠, 명수오빠, 준호오빠, 원석오빠, 용석오빠, 정우오빠, 서정이, 석현오빠, 도한오빠에게도 감사하다고 말씀드리고 싶습니다.

그리고 저의 든든한 재산이자 2년동안 저에게 비타민이 되어주었던 우리 지수, 경하, 지연, 순영, 혜원, 슬기, 초롱, 은정, 정효, 은영이에게는 고맙다는 말과 우리 항상 미래에 대해 약속했던 것들 잊지말고 앞으로 더 서로 힘이 되어주자고 말하고 싶습니다.

바쁘다는 핑계로 자주 만나지 못하고 연락도 잘 드리지 못하지만 먼저 연락해 주시고 힘들때마다 밥 한끼 사준다면 저를 많이 챙겨준 유희언니, 인혜언니, 지향언니, 그리고 지혜언니와 경아언니, 순철오빠 정말 감사합니다.

마지막으로 저희 사랑하는 엄마와 아빠, 공부한다는 핑계로 옆에 있어주지도 못하고 항상 학교가 먼저였던 딸이지만 섭섭해 하지 않으시며 정말 하루도 빠짐 없이 저를 위해 새벽마다 기도하며 힘을 주신 저희 엄마와 표현은 서툴지만 가끔 저에게 수고한다, 축하한다는 말을 건네시며 제가 어떤 결정을 내리든 딸을 믿어주고 뒤에서 든든하게 응원해주시는 사랑하는 아빠께서는 앞으로 자랑스럽고 든든한 딸이 되겠다고 약속드리겠습니다. 저희 오빠에게도 그동안 많이 신경써줘서 고맙다고 전하고 싶고, 우리 할머니께서는 앞으로 정말 든든한 효녀가 되어드리겠습니다.

철없이 노는 것을 좋아하고 목적 없이 주어진 책에서 공부를 하며 학점만 따면 그만이라고 생각했던 학부를 지나 혼자 힘으로 하루하루 연구를 해나가며 많은 한계도 맞보고 회의감에 사로잡힌 적도 있었습니다. 그러나 그때마다 주위에 있던 사람들이 힘이 많이 되어주었고 그렇게 힘을 얻어 하루하루 최선을 다하다 보니 결국 졸업할 하게 된 것 같습니다. 앞으로도 “배움의 길은 끝이 없으며 노력하는 자를 이기는 자는 없다”라는 교수님의 말씀을 항상 마음판에 새기고 앞으로도 열심히 살아가는 우주경이 되겠습니다.

이제 학교를 떠나 사회생활에 첫발을 내딛게 되었습니다. 2년동안 배운 것들은 잊지 않고 머리와 가슴에 새기고 나가서 겸손하고 부지런하게 그리고 제 주위 모든 이들의 기대에 어긋나지 않는 사람이 되겠습니다.

앞으로는 제가 받은 이런 감사함을 갚을 줄 아는 사람이 되어 모두에게 보답하며 지내겠다고 약속드립니다. 마지막으로 모두의 앞날에 밝은 빛이 비추기를 진심으로 바랍니다.

2011년 12월

Jee.k.

발표논문 리스트

(1) 학회지 발표논문

- ① “다기수로가 설치된 주문진항의 다층류 유동 해석”, 한국대한토목학회논문집 (투고중)

(2) 학술 발표회 발표논문

- ① “유한요소법을 이용한 주문진항의 3층류 유동 해석”, 한국해양·해양공학회, 2010년도 한국해양과학기술협의회 공동학술대회 발표논문집, pp. 2957~2960, 2010년 06월.
- ② “다기수로가 설치된 주문진항의 3층류 유동 해석”, 대한토목학회, 2010년도 대한토목학회 정기학술대회 발표논문집, pp. 2294~2297, 2010년 10월.
- ③ “다기수로의 수중유출구에 의한 3층류 유동 패턴해석”, 한국해양·해양공학회, 2011년도 한국해양과학기술협의회 공동학술대회 발표논문집, pp. 2094~2097, 2011년 06월.
- ④ “다기수로가 설치된 주문진항의 다층류 유동 해석”, 대한토목학회, 2011년도 대한토목학회 정기학술대회 발표논문집, pp. 2821~2824, 2011년 10월.