

碩士學位論文

季節風을 考慮한 濟州港 海水流動의 有限要素解析



濟州大學校 大學院

土木海洋工學科

朴 址 訓

2005年 12月

季節風을 考慮한 濟州港 海水流動의 有限要素解析

指導教授 金 南 亨

朴 址 訓

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함



朴址訓의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長	이 병진
委 員	김 남亨
委 員	김 상진



濟州大學校 大學院

2005年 12月

The Finite Element Analysis of Tidal Current in Jeju Harbor Considering Seasonal Winds

Ji-Hun Park

(Supervised by Professor Nam-Hyeong Kim)

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

Department of Civil & Ocean Engineering

GRADUATE SCHOOL

CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

목 차	i
List of Figures	ii
List of Tables	iv
Summary	v
I. 서 론	1
1. 연구배경	1
2. 연구목적	2
3. 논문의 구성	3
II. 이론적 배경	4
1. 조석	4
2. 조석의 조화분석	5
3. 바람	8
III. 유한요소해석	11
1. 기본방정식	11
2. 경계조건	13
3. 유한요소 정식화	15
1) 유한요소법의 개요	15
2) 근사와 보간함수	15
3) 유한요소 이산화	18
IV. 수치해석 결과 및 고찰	24
1. 계절풍의 고려하지 않은 제주항의 해수유동해석	24
2. 계절풍을 고려한 제주항의 해수유동해석	34
V. 결론	46
VI. 참고문헌	47

List of Figures

Fig. 1. Diagram of tide generating force(A. Defant, 1961)	7
Fig. 2. Vertical cross section of the sea	12
Fig. 3. Schematic description of bonudary conditions	14
Fig. 4. Triangular element	16
Fig. 5. Comparison of observed, M_2 constituent and calculated tidal elevation in Jeju harbor	26
Fig. 6. 3-D Topographical map of Jeju harbor	28
Fig. 7. Water depth of Jeju harbor	29
Fig. 8. Finite element idealization of Jeju harbor	29
Fig. 9. Velocity vectors in Jeju harbor without seasonal wind (Above : High tide, Below : Ebb tide)	30
Fig. 10. Velocity vectors in Jeju harbor without seasonal wind (Above : Low tide, Below : Flood tide)	31
Fig. 11. Calculated current at nodal point C, D, and E in Fig. 8	32
Fig. 12. Calculated current ellipse at nodal point C, E and D in Fig. 8	33
Fig. 13. Velocity vectors in Jeju harbor with seasonal wind (NW, 5.3m/s) (Above : High tide, Below : Ebb tide)	36
Fig. 14. Velocity vectors in Jeju harbor with seasonal wind (NW, 5.3m/s) (Above : Low tide, Below : Flood tide)	37
Fig. 15. Velocity vectors in Jeju harbor with seasonal wind (SE, 3.4m/s) (Above : High tide, Below : Ebb tide)	38
Fig. 16. Velocity vectors in Jeju harbor with seasonal wind (SE, 3.4m/s) (Above : Low tide, Below : Flood tide)	39
Fig. 17. Comparison Calculated current at nodal point C in Fig. 8	40

Fig. 18. Comparison Calculated current at nodal point D in Fig. 8	41
Fig. 19. Comparison Calculated current at nodal point E in Fig. 8	42
Fig. 20. Calculated current ellipse at nodal point C in Fig. 8	43
Fig. 21. Calculated current ellipse at nodal point D in Fig. 8	44
Fig. 22. Calculated current ellipse at nodal point E in Fig. 8	45



List of Tables

Table 1. Important tidal constituent	6
Table 2. Beaufort scale	8
Table 3. The results of harmonic analysis for tide at Jeju harbor	25
Table 4. Comparison Result of other papers method in flood tide	26
Table 5. The comparison of velocity vectors with wind stress and without wind stress in nodal points C, D, E, and F (Flood tide)	35



Summary

It is a very important matter to know a tidal circulation in shallow water region. A finite element method, one of the numerical analysis techniques, is used to analyze a tidal circulation in shallow water region. Galerkin method is applied for a spatial discretization, and two-step explicit method that is good to deal with a number of unknown factors and unsteady flow is applied.

Two-dimensional tide model including wind stress term is used to investigate the effect of seasonal winds about tidal circulation. A numerical analysis is carried out both the case considering the effect of seasonal winds and the reverse cases. The results of the numerical analysis are divided into low tide, high tide, ebb tide, and flood tide, and then is presented using a graphic technique. With the northwest wind and the southeast wind that predominate in winter and summer in Jeju Harbor, A numerical analysis is computed about the effect of seasonal winds on all over the harbor.

The results of the numerical analysis with seasonal winds about Jeju harbor are shown that the flow field in the harbor reacted sensitively to the seasonal winds. In the case considering the effect of seasonal winds, the velocity vector is became larger than without wind in general and the eddy currents are formed partly. Inside of Jeju Harbor, especially, counterclockwise eddy currents are formed by the flow of Sanji stream. It could be concluded that the case considering the effect of seasonal winds is a useful and efficient method in analyzing the actual tidal circulation.

I. 서론

1. 연구 배경

조석은 천체운동에 의해 유기되는 주기적인 운동이다. 그러나, 조석이 천해역으로 밀려옴에 따라 관성과 해수표면의 조건에 의한 영향, 해저면의 마찰력, Coriolis의 힘(편향력) 등, 2차원적인 외력에 의해 매우 복잡한 흐름을 나타낸다. 천해역에서 해수유동의 해석에 폭넓게 이용되고 있는 수치해석모델로서는 유한차분법과 유한요소법으로 대별할 수 있다. 각각의 방법은 장단점이 있으나 불규칙한 지형과 수심을 용이하게 표현할 수 있는 유한요소법이 보다 현실적인 기법이라고 말할 수 있겠다.

본 연구에서는 (김과 양, 1993; 김과 Kawahara, 1994; 김, 1995) 등에 의해 이용된 천해장파방정식을 사용했으며, 해석수법으로는 시간방향에 대해서 Two-step explicit method로 이산화 하였으며, 공간방향에 대해서는 Galerkin method로 이산화 하였다. 본 연구에서는 제주항 안쪽 산지천의 유속을 고려하였으며, 우리나라에서 동계와 하계에 우세한 계절풍인 북서풍과 남동풍을 대상으로 계절풍의 영향을 고려한 제주항에서의 전반적인 해수유동을 살펴보았다. 12월, 1월, 2월이 평균값(NW, 5.3m/s)과 6월, 7월, 8월의 평균값(SE, 3.4m/s)을 각각 동계와 하계의 계절풍으로 보고, 이 때의 풍속값과 풍향(해양수산부, 1998)을 사용하여 제주항 유동장을 파악하고자 하였다.

2. 연구 목적

실제해역에 조석의 수치모형을 적용함에 있어서 연안에서 보다 상세한 조류해석을 위해서는 지형과 수심을 용이하게 표현할 수 있는 유한요소모형의 적용이 필수적이다.

해수유동에 미치는 바람의 영향을 파악하기 위하여 wind stress 항을 포함하였으며, 또한 하천에서 유입되는 유속을 고려한 2차원 조류해석모델을 사용하였다. 일반적으로 해양표층의 유속은 풍속의 약 3%정도에 해당하는 크기로 반응한다고 알려져 있으나, 실제 이러한 비율은 일정하지 않으며 해역이나 해상상태에 따라 다르게 나타난다. 따라서, 수치해석모델에서는 일정시간을 평균한 바람이 지속적으로 부는 경우를 가정하게 되는데, 이는 실제해양에서 바람이 부는 현상과는 많이 다르다. 그러나, 계절풍이 탁월한 우리나라는 동계에 북서풍, 하계에는 남동풍이 뚜렷하게 나타나므로, wind stress항에 계절풍을 고려하여 모델화 하였다.

조류해석모델에 계절풍이 해수유동에 미칠 수 있는 영향과 산지천에서 유입되는 유속을 고려한 본 해석모델을 사용하여 제주항의 해수유동을 해석하는 것이 실제의 현상을 나타낼 수 있는 적합한 방법이라고 생각된다. 그러므로 본 연구는 계절풍이 조류에 미치는 영향을 파악함으로써, 연안역에서 계절풍에 의해 변동할 수 있는 해수유동을 보다 명확하게 이해할 수 있는 좋은 기초 자료가 될 것으로 사료된다.

3. 논문의 구성

본 논문에서는 우선 II장에서는 기본적인 이론적 배경을 설명하였고, III장에서는 수치모형의 기본방정식으로서, 연속식과 해면의 상하 운동에 의해서 생기는 흐름의 운동방정식을 유도하였고, 유한요소의 정식화로서 유한요소의 해를 얻기 위하여 Galerkin method를 적용하였다. 다음으로 IV장에서는 수치해석 결과 및 고찰로서 제주함에 대한 해수유동해석에 계절풍의 영향을 고려하지 않은 경우와 계절풍의 영향을 고려한 경우를 비교하였다. 또 동계와 하계로 나누어 계절풍의 영향을 수치해석 하였다. 마지막으로 V장에서는 결론으로서 본 논문에서 얻어진 결과를 종합적으로 기술하였다.



II. 이론적 배경

1. 조석

파랑은 바람으로부터 받은 에너지를 물입자의 이동은 없이 수면의 상하 위치 변동으로 에너지만 전달하고 그 자리에 있다고 보지만 조석은 실지로 물이 흐르는 것을 의미한다. 좀더 구체적으로 이야기하면 해수면은 천체끼리 서로 작용하는 인력과 지구의 자전과 공전에 의한 원심력, 그리고 기압의 변동과 바람 때문에 계속해서 수면변동을 일으키고 커다란 흐름이 발생하게 되는데 이것을 조석(tide)이라고 한다.

해수면은 하루에 한 번 또는 두 번, 규칙적인 오르내림을 반복하고 있으며, 이 현상을 조석(tide)이라 한다. 해면이 극대가 된 상태를 고조(高潮) 또는 만조(high tide), 극소가 된 상태를 저조(低潮) 또는 간조(low tide)라 한다. 저조로부터 고조까지의 기간을 밀물(flood tide), 고조로부터 저조까지의 기간을 썰물(ebb tide)이라 한다. 또 계속되는 고조와 저조의 해면 높이의 차를 조차(tidal range)라 한다.

고조와 저조가 하루에 두 번씩 있는 경우를 1일 2회조(semi-diurnal tide) 한 번밖에 없는 경우를 1일 1회조(diurnal tide)라 한다. 1일 2회조에 있어서 각각 2회조의 평균 주기는 높이가 다른 경우에, 이것을 일조 부등(diurnal inequality)라 한다. 1일 1회조의 평균 주기는 약 24시간 50분이고, 1일 2회조의 평균 주기는 약 12시간 25분이다.

조석은 주로 달과 태양이 지구상의 물체에 미치는 인력에 기인하는 것이다. 먼저 지구와 달의 계(系)에 주목해 보자. Fig. 1에 나타난 것과 같이, 지구는 공전하고 있기 때문에, 지구상의 어느 장소에서도 같은 원심력(centrifugal force)이 작용하고 있다. 한편, 달로부터 구심력(attractive force)을 받는데, 이것은 지구상의 장소에 따라 그 크기와 그 방향이 다르다. 이들 두 힘의 벡터의 합이 기조력(tide generating force)이 된다.

2. 조석의 조화분석

기조력은 각 천체와 지구상의 각 지점과의 상대적인 위치에 의해서 변화하므로, 실제로는 달과 태양을 생각하는 대신에, 천구(天球)가 적도 위를 일정한 거리를 유지하며, 또 일정한 주기로 운행하는 몇 개의 가상의 천체를 생각하며, 이들에 의해서 각각 규칙적인 많은 조석으로 분해하는 것을 조화분석(harmonic analysis)이라 하고, 각각의 조석을 분조(constituent of tide)라 한다.

이 분조의 수는 소소한 힘까지 합친다면 여러 개가 있을 수 있으나 대표적인 기조력인 4가지가 지배적이며, 해당지역에서 오랫동안 측정한 조위실측값으로부터 이 4가지 기조력인 4분조를 알아 놓는다면, 이것으로 해당지역의 예상되는 조위 시간을 계산해 낼 수 있다. 이 4분조는 1일 1회 생길 때는 영어대문자에 1자를 첨자하고 2회 생길 때는 2자를 첨자하며 S는 Sun을 M은 Moon을 의미한다.

천체의 운동으로 인한 인력작용의 크기는 독립적으로 이루어지지 않고 서로 복합되어 결과적으로 나타나게 되며, 이것을 지구에서 바라보는 관점에서 해석하게 된다. 분조 중의 중요한 것을 Table 1에 나타냈다. 실용적으로 가장 중요한 것은 반일주조인 M_2, S_2 와 일주조인 K_1, O_1 의 4분조이다.

지구, 달, 태양이 거의 직선상에 있는 경우 즉, 그믐(New moon)과 보름(Full moon)때 달과 태양의 인력합이 가장 커 기조력이 가장 강하게 작용함으로서 조위가 가장 높게(이때 대조차 ; M_2+S_2) 또는 낮게 나타나 조위차가 크고, 태양과 지구는 같은 직선상에 있으나 달은 이 직선과 직각 방향으로 있는 상현(First quarter moon), 하현(Last quarter moon)달 때는 인력이 한쪽으로 집중되지 않고 분산되어 기조력이 가장 약하게 작용함으로서 조위차가 적게(이때를 소조차 ; M_2-S_2) 나타날 것이다. 그러나 실제로는 해수의 관성현상 때문에 바로 그믐, 보름, 상현, 하현달 때 나타나지 않고 그로부터 1~3일 후에 나타나게 되는 것이다.

Table 1. Important tidal constituent

기 호	분조의 명칭	주기(시간)
반일주조		
M_2	주태음반일주조	12.42
S_2	주태양반일주조	12.00
N_2	주태음타원조	12.66
K_2	일월합성반일주조	11.97
일주조		
K_1	일월합성일주조	23.93
O_1	주태음일주조	25.82
P_1	주태양일주조	24.07
Q_1	주태음타원조	26.87
S_1	기상일주조	24.00
배조		
M_4	태음1/4일주조	6.21
S_4	태양1/4일주조	6.00
M_6	태음1/6일주조	4.14
복합조		
MS_4	$(M_2 + S_2)$	6.01
$2MS_2$	$(M_4 - S_2)$	12.87
$2MN_2$	$(M_4 - N_2)$	12.19
$2SM_2$	$(S_4 - M_2)$	11.61

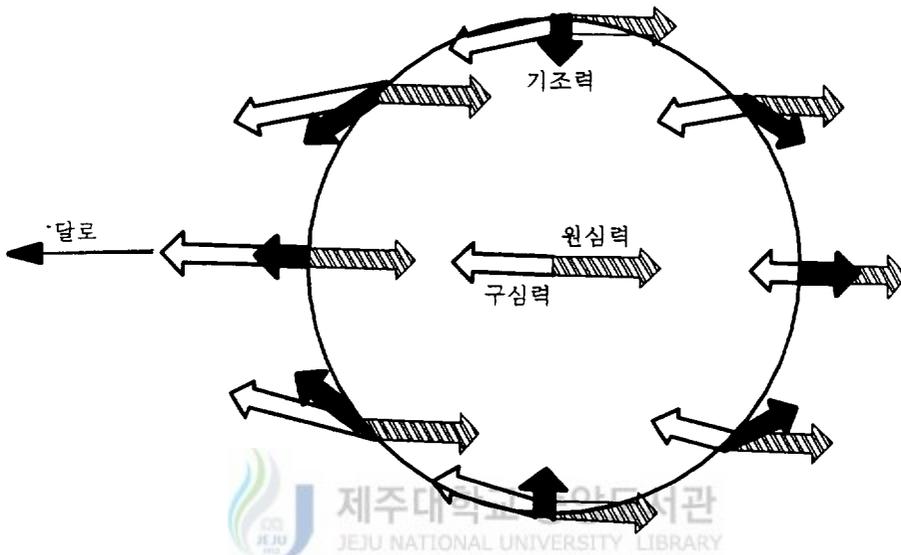


Fig. 1. Diagram of tide generating force(A. Defant, 1961)

3. 바람

바람은 방향과 속도를 가진 벡터양이다. 풍향은 바람이 부는 방향을 말하고, 진북을 기준으로 하여 보통 16방향에 의해 나타낸다. 풍속이 0.2m/s 이하일 때의 풍향은 정온으로 한다. 풍속은 보통 m/s로 나타내지만, Kn(노트) 혹은 풍속의 강도를 목측으로 구하기 위하여 바람 등급표를 이용하는 일도 있다. Table 2는 0~12까지의 풍력등급표를 나타낸다.

풍속은 높이에 따라 다르기 때문에, 관측 측정 상호의 비교를 하기 위하여 풍속계의 설치 높이를 가능한 일정하게 할 필요가 있다. 기상관측에서는 평탄한 지형에서의 높이 10m(해상에서는 해면 위 10m)의 풍향 풍속을 측정하는 것이 표준으로 되어 있다.

Table 2. Beaufort scale

등급	바람이름	풍속(m/s)	파고(m)	해면상태
0	고요(Calm)	00.0~0.2	0(최대 0)	연기가 수직으로 올라감. 거울면 같이 평온함.
1	실바람(Light air)	0.3~1.5	0.1(최대0.1)	풍향계가 작동하지는 않으나 연기가 흐르는 것으로 풍향 관측 가능. 고기비늘 같은 작은 물결이 일고 있으나 거품은 생기지 않음.
2	날실바람(Light breeze)	1.6~3.3	0.2(최대0.3)	바람이 안면에 감촉됨. 나뭇잎이 흔들리고 풍향계가 정상적으로 작동됨.잔 물결이 좀 더 현저해졌으나 물결끝이 부서지지 않고 거울모양임.
3	산들바람(Gentle breeze)	3.4~5.4	0.6(최대1.0)	나뭇잎과 가지가 흔들리고 깃발이 가볍게 날림. 해면에 작은 파도가 커지고 물결끝이 부서지기 시작하며 흰거품도 생기기 시작함.

4	건들바람(Moderate breeze)	5.5~7.9	1.0(최대1.5)	먼지가 일고 종이조각이 날리며 작은 가지가 흔들림. 파도는 낮으나 파장은 길어지고 백파가 상당히 많아짐.
5	흔들바람(Fresh breeze)	8.0~10.7	2.0(최대2.5)	작은 나무 전체가 흔들리고 호수에 물결이 일어남. 파는 중 정도의 것이 한층 더 뚜렷해지고 파장이 길어짐. 백파가 많아짐.
6	된바람(Strong breeze)	10.8~13.8	3.0(최대4.0)	큰 나무가지가 흔들리고 전선이 울고 우산받기가 곤란함.파가 점점 커지기 시작하고 흰파도가 전 해면을 덮고 물보라가 일어남.
7	센바람(Moderate gale)	13.9~17.1	4.0(최대5.5)	나무전체가 흔들리고 바람을 안고 걸기가 어려움.큰 파도가 부서지며 물보라와 함께 흰물거품이 바람에 날려 떠내려감.
8	큰바람(Fresh gale)	17.2~20.7	5.5(최대7.5)	작은 나무가지가 꺾이고 바람을 안고 걸을 수 없음대파의 약간 작은 것이 파장이 길어지고 파두는 바람에 부서져 물보라로 훑날림.
9	큰센바람(Strong gale)	20.8~24.4	7.0(최대10.0)	굴뚝이 넘어지고 기와가 벗겨지는 등 가옥에 작은 피해가 있음대파, 짙은 물거품이 풍하로 흘러며 파두가 말리며 부서지고 물보라로 인한 시정이 악화됨.
10	노대바람(Whole gale)	24.5~28.4	9.0(최대12.5)	나무가 뿌리채 뽑히고 건물에 큰 피해가 일어남.파도는 굉장히 높아지고 백색의 큰 물거품은 해면전체를 희게 덮고, 시정 극히 불량함.
11	왕바람(Violent storm)	28.5~32.6	11.5(최대16.0)	굉장한 피해가 일어남(매우 드문 현상)산과 같은 큰파도로 해면은 물거품으로 덮히고 시정은 더욱 악화됨.
12	쌩쓸바람(Hurricane, Typhoon)	32.7 이상	14.0 이상	해상전체가 물거품과 물보라로 덮히고 해면은 물보라 때문에 보이지 않고 시정은 심히 악화됨.

<p>보퍼트 풍력 등급 설명 (BEAUFORT SCALE OF WIND FORCE)</p>	<p>위 표에서 육상상태는 등급 11까지, 해면 상태는 등급 12까지만 간략히 해설하였다. 그 이상의 바람은 목측(目測)으로 구별할 수 없기 때문이다. 따라서 해상에서 목측에 의한 풍력 등급 13이상은 기록하지 않고 풍력등급 12로 간주한다.</p>
<p>풍속단위 설명</p>	<p>풍속의 표준단위는 m/sec이나, 노트(knot), mile/hour, km/hour 등도 사용하고 있다. $1\text{m/sec} = 3.6\text{km/hour} = 1.924\text{knot} = 2.2369\text{mile/hour}$, 여기서는 편의상 m/sec를 사용했다.</p>



Ⅲ. 유한요소해석

1. 기본방정식

비압축성 3차원 유체의 천해역에서 천해장파방정식을 유도해 보자. Fig. 2에서와 같이 X축과 Y축을 정수면 내에서 수평 직각방향으로 잡고, Z축을 연직방향으로 잡는다. 이때, 평균 수심을 나타내는 것으로써 $h(x, y)$, 정수면으로부터 측정된 수면변위를 $\eta(x, y, t)$ 로 나타낸다. 연속의 방정식은 다음과 같이 나타낸다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial (uH)}{\partial x} + \frac{\partial (vH)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

여기서 $H = h + \eta$ 이고, u, v 는 X, Y방향의 유속이다.

수심방향에서의 가속도는 무시할 정도로 작고, 정수압을 가정하면, 운동방정식을 다음과 같이 유도할 수 있다(Pinder and Gray, 1977).

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} - fv = v_l \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \\ + \frac{KW^2}{H} \cos\psi - \frac{gu \sqrt{u^2 + v^2}}{Hc^2} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} + fu = v_l \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \\ + \frac{KW^2}{H} \sin\psi - \frac{gv \sqrt{u^2 + v^2}}{Hc^2} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, $f = 2\omega \sin\phi$ ($\omega = 7.292 \times 10^{-5} \text{ (rad/sec)}$, $\phi = \text{위도(rad)}$)로 주어지는 Coriolis parameter이다. g 는 중력가속도($= 9.80621 \text{ m/sec}^2$), v_l 은 와동점성계수, c

는 해저마찰에 대한 Chezy의 계수($= 1/n h^{1/6}$, n 은 Manning의 조도계수), K 는 수면에 부는 바람에 의하여 발생하는 표면력의 무차원계수, W 는 수면으로부터 $10m$ 높이에서의 바람의 속도(m/s), ψ 는 바람의 방향이 X 축(동방향)과 이룬 각(rad)이다. 본 계산에서는 K 의 값은 Pinder and Gray(1977)의 식을 기준으로 다음과 같이 하였다.

$$K = \begin{cases} 1.0 \times 10^{-3} & (W \leq 5m) \\ 1.5 \times 10^{-3} & (5m < W \leq 15m) \\ 2.0 \times 10^{-3} & (15m < W \leq 20m) \end{cases} \quad (4)$$

본 계산에서는 산지천에서 유입되는 유량의 유속을 관측하여 $20.0cm/s$ 의 값을 사용하였다.

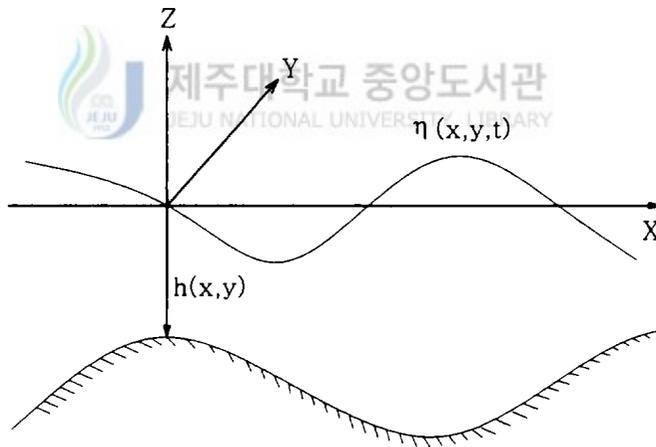


Fig. 2. Vertical cross section of the sea

2. 경계조건

Fig. 2와 같이 계산해역을 Ω 로하고, 그 육지 경계를 Γ_1 로 하며 육지 경계에서의 경계조건을 다음과 같이 고려한다.

$$V_n = 0 \quad (x, y \in \Gamma_1) \quad (5)$$

여기서, V_n 은 경계선에 대한 법선 방향의 유속이다.

해상경계 Γ_2 에서는 강제 수위를 부여한다.

$$\eta = \eta_B \quad (x, y \in \Gamma_2) \quad (6)$$

여기서, η_B 는 임의의 계산시각에 있어서 평균조위를 나타낸다.

초기조건은 일반적으로 정해지지 않기 때문에, 계산개시 때에는 영역 Ω 내에서 $t = 0$ 일때 $\eta = 0, u = v = 0$ 으로 놓는다.

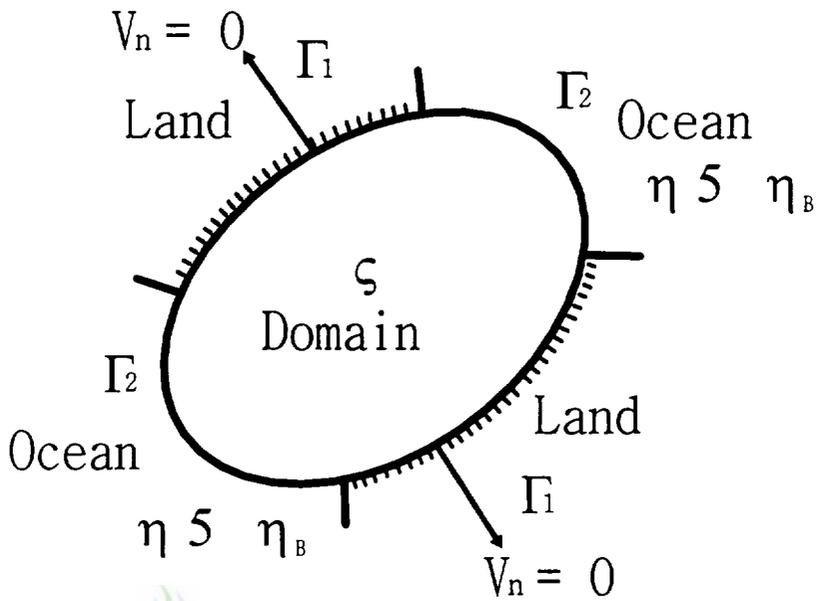


Fig. 3. Schematic description of boundary conditions

3. 유한요소 정식화

1) 유한요소법의 개요

유한요소법이란 영역을 요소라 부르는 유한한 크기를 갖는 도형의 집합으로 치환하여, 미분방정식의 근사해를 얻는 수치계산법의 일종이다. 대상영역이 1차원이라면 유한한 길이의 선 요소, 2차원이라면 유한 크기의 3각형 요소로 영역을 치환한 후 개개의 요소 내에서 미분 다항식에 의해서 해의 근사가 이루어진다. 각 요소 내에서의 근사가 완성되면 개개의 요소를 서로 연결하여 전체의 근사 모델을 작성한다. 이 근사 모델은 연립 대수방정식으로 되어 있고, 이것을 풀어서 미분방정식으로 주어진 경계값 문제의 근사해를 구할 수 있다. 또한 유한요소법의 이용기술의 특징은 정식화로부터 프로그래밍까지의 순서가 풀어야 할 문제에 관계없이 일관되어 있다는 것이다. 실제로 푸는 방정식은 연립 방정식의 형태를 하고 있기 때문에 이해하기 쉽고, 프로그램의 작성도 간단하다. 이 때문에 비교적 범용성이 높은 프로그램의 작성이 가능하고, 흐름 해석의 Package화도 가능하게 된다.

2) 근사와 보간함수

Fig. 4의 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.

$$u_{ei} = \alpha_1 + \alpha_2x + \alpha_3y \quad (7)$$

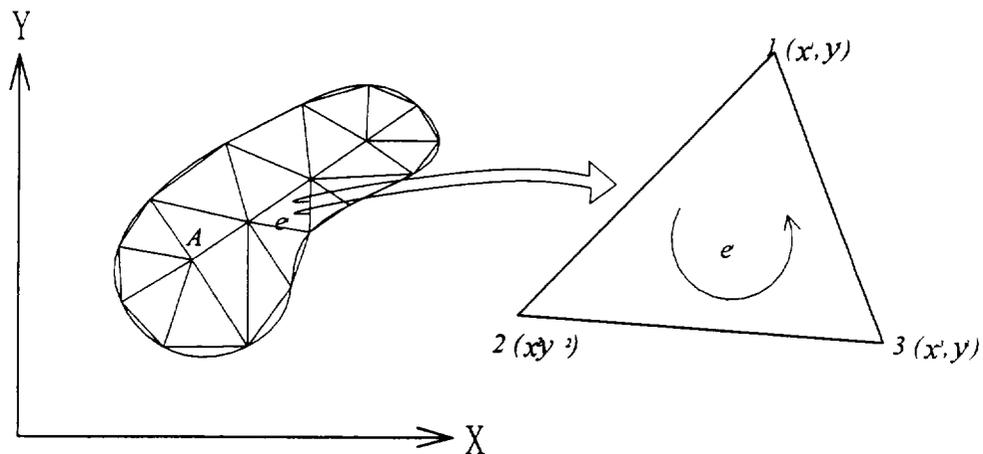


Fig. 4. Triangular element

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



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

$$\left. \begin{array}{l}
 \text{1절점} \quad u_1 = \alpha_1 + \alpha_2 x_1 + \alpha_3 y_1 \\
 \text{2절점} \quad u_2 = \alpha_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_3 y_2 \\
 \text{3절점} \quad u_3 = \alpha_1 + \alpha_2 x_3 + \alpha_3 y_3
 \end{array} \right\} \quad (8)$$

여기서 식(8)을 행렬을 이용하여 표시하면

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{pmatrix} \quad (9)$$

이 된다. $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 에 대하여 풀기 위해서

$$\text{행렬} : \begin{pmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{pmatrix}$$

의 역행렬을 구한다.

$$\text{역행렬} : \begin{pmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{pmatrix}^{-1} = \frac{1}{2\Delta^e} \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{pmatrix} \quad (10)$$

여기서,

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= x_2y_3 - x_3y_2, & b_1 &= y_2 - y_3, & c_1 &= x_3 - x_2 \\ a_2 &= x_3y_1 - x_1y_2, & b_2 &= y_3 - y_1, & c_2 &= x_1 - x_3 \\ a_3 &= x_1y_2 - x_2y_1, & b_3 &= y_1 - y_2, & c_3 &= x_2 - x_1 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

또 Δ^e 는 삼각형의 면적이다.

$$\Delta^e = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{vmatrix} \quad (12)$$

역행렬을 식 (9)의 양변에 곱하면, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 가 구해진다.

$$\begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{pmatrix} = \frac{1}{2\Delta^e} \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix} \quad (13)$$

이렇게 하여 얻어진 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 를 식 (8)에 대입하면, 삼각형 요소 e_i 상의 미지수는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned}
 u_{ei}(x, y) = & \frac{1}{2\Delta^e} (a_1 + b_1x + c_1y)u_1 + \frac{1}{2\Delta^e} (a_2 + b_2x + c_2y)u_2 \\
 & + \frac{1}{2\Delta^e} (a_3 + b_3x + c_3y)u_3
 \end{aligned} \tag{14}$$

위 식을 다음과 같이 고쳐쓴다.

$$u_{ei}(x, y) = \phi_1(x, y)u_1 + \phi_2(x, y)u_2 + \phi_3(x, y)u_3 \tag{15}$$

여기서 보간함수는 다음과 같다.

$$\phi_i = \frac{1}{2\Delta^e} (a_i + b_i x + c_i y) \quad (i = 1, 2, 3) \tag{16}$$

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

3) 유한요소 이산화



천해장파방정식(1), (2), (3)을 시간에 대하여 이산화 하기 전에 공간방향으로 유한 요소기법을 적용하여 이산화 한다. 또, 천해장파방정식(1), (2), (3)은 비선형 항이 포함되어져 있기 때문에, 유한요소의 해를 얻기 위하여 Galerkin method를 적용한다. Galerkin method는 가중잔차함수를 미지의 형상함수와 똑같이 취한다. 여기서 가중잔차함수는 경계위에서는 값이 0이지만, 그 밖의 영역에서는 임의의 값을 취한다. 여기서 가중잔차함수 u^*, v^*, η^* 를 각각 식(1), (2), (3)에 곱하여 해석영역 Ω 에 대하여 적분하면, 다음의 방정식이 주어진다.

$$\begin{aligned}
 & \int_{\Omega} \eta^* \frac{\partial u}{\partial t} d\Omega + \int_{\Omega} \eta^* \frac{\partial (uH)}{\partial x} d\Omega \\
 & + \int_{\Omega} \eta^* v \frac{\partial (vH)}{\partial y} d\Omega = 0
 \end{aligned} \tag{17}$$

$$\left. \begin{aligned}
 & \int_{\Omega} u^* \frac{\partial u}{\partial t} d\Omega + \int_{\Omega} u^* u \frac{\partial v}{\partial x} d\Omega + \int_{\Omega} u^* v \frac{\partial v}{\partial y} d\Omega \\
 & \quad + g \int_{\Omega} u^* \frac{\partial \eta}{\partial y} d\Omega - \int_{\Omega} u^* f v d\Omega \\
 & + \int_{\Omega} u^* \frac{g v \sqrt{u^2 + v^2}}{H^2} d\Omega - \int_{\Omega} u^* \frac{K W^2}{H} \cos \psi d\Omega \\
 & \quad - \int_{\Omega} u^* v_l \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) d\Omega = 0
 \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

$$\left. \begin{aligned}
 & \int_{\Omega} v^* \frac{\partial u}{\partial t} d\Omega + \int_{\Omega} v^* u \frac{\partial v}{\partial x} d\Omega + \int_{\Omega} v^* v \frac{\partial v}{\partial y} d\Omega \\
 & \quad + g \int_{\Omega} v^* \frac{\partial \eta}{\partial y} d\Omega + \int_{\Omega} v^* f u d\Omega \\
 & + \int_{\Omega} v^* \frac{g v \sqrt{u^2 + v^2}}{H^2} d\Omega - \int_{\Omega} v^* \frac{K W^2}{H} \sin \psi d\Omega \\
 & \quad - \int_{\Omega} v^* v_l \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) d\Omega = 0
 \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

유한요소법으로 식(17), (18), (19)를 이산화 할 때에, 해석영역의 형상으로서 여러 가지 형상이 고려되지만, 일반적으로 잘 이용되고 있는 삼각형 요소를 이용한다. 유한요소내의 임의의 위치에 대한 미지의 유속 u, v 와 미지의 조위 η 의 값은 삼각형의 정점의 값을 이용하여 다음과 같이 1차식으로 근사된다.

$$\left. \begin{aligned}
 u &= \sum_{\alpha=1}^3 \phi_{\alpha} u_{\alpha}, \quad u^* = \sum_{\alpha=1}^3 \phi_{\alpha} u_{\alpha}^* \\
 v &= \sum_{\alpha=1}^3 \phi_{\alpha} v_{\alpha}, \quad v^* = \sum_{\alpha=1}^3 \phi_{\alpha} v_{\alpha}^* \\
 \eta &= \sum_{\alpha=1}^3 \phi_{\alpha} \eta_{\alpha}, \quad \eta^* = \sum_{\alpha=1}^3 \phi_{\alpha} \eta_{\alpha}^*
 \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

여기서, ϕ 는 유속 및 조위의 분포상황을 각 요소 내에서 근사하는 보간함수이고,

보간함수의 형상은,

$$\phi_\alpha = \frac{1}{2\Delta^e} (a_\alpha + b_\alpha x + c_\alpha y) \quad (\alpha = 1, 2, 3) \quad (21)$$

여기서, Δ^e 는 요소 e 의 삼각형면적이다. 식(17), (18), (19)에 식(20)을 대입하고, $u_\alpha^*, v_\alpha^*, \eta_\alpha^*$ ($\alpha = 1, 2, 3$)가 임의의 값인 것을 고려하면, 다음과 같은 요소방정식이 얻어진다.

$$\sum_{\beta=1}^3 M_{\alpha\beta} \dot{\eta}_\beta + \sum_{\beta,\gamma=1}^3 X_{\alpha\beta\gamma} u_\beta H_\gamma + \sum_{\beta,\gamma=1}^3 Y_{\alpha\beta\gamma} v_\beta H_\gamma = 0 \quad (22)$$

$$\left. \begin{aligned} & \sum_{\beta=1}^3 M_{\alpha\beta} \dot{u}_\beta + \sum_{\beta,\gamma=1}^3 X_{\alpha\beta\gamma} u_\beta u_\gamma + \sum_{\beta,\gamma=1}^3 Y_{\alpha\beta\gamma} v_\beta u_\gamma + \sum_{\beta=1}^3 A_{\alpha\beta} \eta_\beta \\ & - \sum_{\alpha,\beta=1}^3 L_{\alpha\beta} v_\beta + \sum_{\alpha,\beta=1}^3 I_{\alpha\beta} u_\beta + \sum_{\alpha,\beta=1}^3 N_{\alpha\beta} u_\beta - \left[\frac{KW^2}{H} \cos\psi \right]^e \frac{\Delta^e}{3} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

$$\left. \begin{aligned} & \sum_{\beta=1}^3 M_{\alpha\beta} \dot{v}_\beta + \sum_{\beta,\gamma=1}^3 X_{\alpha\beta\gamma} u_\beta v_\gamma + \sum_{\beta,\gamma=1}^3 Y_{\alpha\beta\gamma} v_\beta v_\gamma + \sum_{\beta=1}^3 B_{\alpha\beta} \eta_\beta \\ & + \sum_{\alpha,\beta=1}^3 L_{\alpha\beta} u_\beta + \sum_{\alpha,\beta=1}^3 I_{\alpha\beta} v_\beta + \sum_{\alpha,\beta=1}^3 N_{\alpha\beta} v_\beta - \left[\frac{KW^2}{H} \sin\psi \right]^e \frac{\Delta^e}{3} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

여기서, $\dot{u}_\beta = \frac{\partial u_\beta}{\partial t}$, $\dot{v}_\beta = \frac{\partial v_\beta}{\partial t}$, $\dot{\eta}_\beta = \frac{\partial \eta_\beta}{\partial t}$ 이고,

식(22), (23), (24)에 나타난 계수는 다음과 같다.

$$\left. \begin{aligned}
M_{\alpha\beta} &= \int_{\Omega} \phi_{\alpha}\phi_{\beta}d\Omega = \frac{\Delta}{12} (1 + \delta_{\alpha\beta}) \\
A_{\alpha\beta} &= g \int_{\Omega} \phi_{\alpha} \frac{\partial\phi_{\beta}}{\partial x} d\Omega = g \frac{b_{\beta}}{6} \\
X_{\alpha\beta\gamma} &= \int_{\Omega} \phi_{\alpha}\phi_{\beta} \frac{\partial\phi_{\gamma}}{\partial x} d\Omega = \frac{b_{\gamma}}{24} (1 + \delta_{\alpha\beta}) \\
B_{\alpha\beta} &= g \int_{\Omega} \phi_{\alpha} \frac{\partial\phi_{\beta}}{\partial y} d\Omega = g \frac{c_{\beta}}{6} \\
Y_{\alpha\beta\gamma} &= \int_{\Omega} \phi_{\alpha}\phi_{\beta} \frac{\partial\phi_{\gamma}}{\partial y} d\Omega = \frac{c_{\gamma}}{24} (1 + \delta_{\alpha\beta}) \\
L_{\alpha\beta} &= f \int_{\Omega} \phi_{\alpha}\phi_{\beta}d\Omega = f \frac{\Delta}{12} (1 + \delta_{\alpha\beta}) \\
I_{\alpha\beta} &= \frac{g}{H^2} \int_{\Omega} \phi_{\alpha}\phi_{\beta} \sqrt{u_{\beta}^2 + v_{\beta}^2} d\Omega \\
&= \frac{g}{H^2} \frac{\Delta}{12} (1 + \delta_{\alpha\beta}) \sqrt{u_{\beta}^2 + v_{\beta}^2} \\
N_{\alpha\beta} &= v_1 \left(\frac{\partial\phi_{\alpha}}{\partial x} \frac{\partial\phi_{\beta}}{\partial x} + \frac{\partial\phi_{\alpha}}{\partial y} \frac{\partial\phi_{\beta}}{\partial y} \right) d\Omega = v_1 \Delta \\
&\left\{ \left[\begin{array}{ccc}
(b_1b_1 + c_1c_1) & (b_1b_2 + c_1c_2) & (b_1b_3 + c_1c_3) \\
(b_2b_1 + c_2c_1) & (b_2b_2 + c_2c_2) & (b_2b_3 + c_2c_3) \\
(b_3b_1 + c_3c_1) & (b_3b_2 + c_3c_2) & (b_3b_3 + c_3c_3)
\end{array} \right] \right\}
\end{aligned} \right\} \quad (25)$$

여기서, $\delta_{\alpha\beta}$ 는 Kronecker의 Delta이며, $\alpha = \beta$ 일 때에는 1이고, $\alpha \neq \beta$ 일 때는 0의 값을 갖는다.

식(22), (23), (24)를 모든 요소에 관하여 더하면, 다음과 같은 전체 방정식이 얻어진다.

$$[M] \{\eta\} + [XH] \{u\} + [YH] \{v\} = 0 \quad (26)$$

$$\begin{aligned}
[M] \{u\} + [Xu] \{u\} + [Yu] \{v\} + [A] \{\eta\} \\
- [L] \{v\} + [I + M] \{u\} = 0
\end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned}
[M] \{v\} + [Xv] \{u\} + [Yv] \{v\} + [B] \{\eta\} \\
+ [L] \{u\} + [I + M] \{v\} = 0
\end{aligned} \quad (28)$$

또, 식(26), (27), (28)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[Z] \{\dot{K}\} + [T] \{K\} = 0 \quad (29)$$

여기서,

$$\left. \begin{aligned} [Z] &= \begin{bmatrix} M & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 \\ 0 & 0 & M \end{bmatrix} & \{\dot{K}\} &= \begin{Bmatrix} \dot{\eta} \\ \dot{u} \\ \dot{v} \end{Bmatrix} \\ [T] &= \begin{bmatrix} XH & YH & 0 \\ Xu + I + N & Yu - L & A \\ Xv + L & Yv + I + N & B \end{bmatrix} & \{K\} &= \begin{Bmatrix} u \\ v \\ \eta \end{Bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

이다. $\{K\}$ 는 전 절점에 대한 유속과 조위를 나타내는 벡터이고, $[Z], [T]$ 는 각각 유한요소에서 계산된 계수를 조합한 것에 의해 얻어진 행렬이다. 전체방정식(29)는 시간에 관한 미분을 포함하고 있다.

유한요소법에 의해 공간방향으로 이산화한 식(29)을 시간방향으로 이산화 한다. 식(29)는 시간 미분을 포함하는 항이 있으므로 2단계 양해법을 이용하여 이산화 한다. 2단계 양해법은 축차시간 적분법이다. 시간 스텝 n 과 $n+1$ 의 사이에 $n+1/2$ 의 중간단계의 스텝을 설정하는 것에 의해, 다음과 같이 주어진다.

$$K^{n+1/2} = K^n + \frac{\Delta t}{2} \frac{dK^n}{dt} \quad (31)$$

$$K^{n+1} = K^n + \Delta t \frac{dK^{n+1/2}}{dt} \quad (32)$$

식(29)에 2단계 양해법의 식(31), (32)를 대입하면, 아래와 같은 관계가 얻어진다.

$$[Z] \{K^{n+1/2}\} = [Z] \{K^n\} - \frac{\Delta t}{2} [T] \{K^n\} \quad (33)$$

$$[Z] \{K^{n+1}\} = [Z] \{K^n\} - \Delta t [T] \{K^{n+1/2}\} \quad (34)$$

윗 식의 좌변의 행렬 $[Z]$ 의 역행렬을 계산해야 하기 때문에, 식(33), (34)는 완전

한 양해법이 아니다. 따라서, 좌변의 계수행렬을 집중화하면, 다음의 알고리즘이 얻어진다.

$$[\bar{Z}] \{K^{n+1/2}\} = [\bar{Z}] \{K^n\} - \frac{\Delta t}{2} [T] \{K^n\} \quad (35)$$

$$[\bar{Z}] \{K^{n+1}\} = [\bar{Z}] \{K^n\} - \Delta t [T] \{K^{n+1/2}\} \quad (36)$$

여기서 $[\bar{Z}]$ 은 집중행렬이고, 다음과 같다.

$$[\bar{Z}] = \begin{bmatrix} \bar{m} & 0 & 0 \\ 0 & \bar{m} & 0 \\ 0 & 0 & \bar{m} \end{bmatrix}, \quad \bar{m} = \frac{\Delta}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (37)$$

$$[\bar{Z}] = e[\bar{Z}] + (1-e)[Z]$$

여기서, e 는 Lumping parameter로 불리며, 본 계산에서는 e 를 0.90으로 하였다. 식(35), (36)을 전체의 영역에서 경계조건을 주어 계산을 하면, 각 절점에서 유속과 조위를 구할 수가 있다.

IV. 수치해석 결과 및 고찰

1. 계절풍을 고려하지 않은 제주항의 해수유동해석

제주항은 제주도 북쪽에 자리 잡고 있으며, 연간하역능력 2,135,000ton, 동시접안능력 24척, 최대접안능력 20,000ton인 제주도의 관문항이다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 제주항은 돌출항으로 동서로 1.5km, 남북1.8km이며, Fig. 7에 나타난 수심을 보면 항내의 수심은 2~12m이고, 항내의 수면적은 $790,000m^2$ 이다. 천해장파의 유한요소방정식(35), (36)을 이용하여, 제주항의 유동장을 수치해석 하였다. Fig. 8은 제주항의 해석영역을 삼각형의 유한요소로 분할하였다. 최적의 분할이 이루어 질 수 있도록 수심을 고려하여, 수심이 얇은 부분은 격자간격이 작은 분할, 수심이 상대적으로 깊은 부분은 격자간격이 큰 분할이 되도록 차등 분할을 실시하였다. 분할된 유한요소의 절점 수는 1,437개, 요소 수는 2,582개이다.

수치해석의 초기조건으로서, 산지천으로부터 유입유속은 20cm/s로 주었으며, 나머지 전 절점에 있어서 유속은 0으로 가정하였다. 해면은 조위의 변동이 전혀 없는 정수면으로 가정하는 cold start의 조건을 주었다. 경계조건으로서는 연안경계에 대한 법선방향의 유속을 0으로 하였고, 해수면은 수로국에서 관측한 결과를 근거로 하여 Table 3과 같이 M_2, S_2, K_1 및 O_1 분조의 진폭과 지각을 합성한 조위로 제주항 입구(A-B)에 다음과 같은 입력분조를 주었다.

Table 3. The results of harmonic analysis for tide at Jeju harbor(NORI, 1993)

No.	Constituent	Amplitude a_m (cm)	Period T_m (hour)	Phase delay k_m (deg.)
1	M_2	69.7	12.42	303.5
2	S_2	29.5	12.00	324.1
3	K_1	23	25.82	210.2
4	O_1	16.8	23.93	189.2

$$\eta = \sum_{m=1}^4 a_m \sin\left(\frac{2\pi}{T_m} \Delta t - k_m\right) \quad (38)$$

여기서, a_m 은 진폭, k_m 은 위상, T_m 은 M_2, S_2, K_1, O_1 분조의 주기, t 는 시간이다.

Δt 는 다음의 CFL조건을 만족하는 $\Delta t = 0.2sec$ 로 주었다.

$$\frac{\Delta t}{\Delta x} \leq \frac{\sqrt{2} - \frac{e}{\sqrt{3}}}{3} \cdot \frac{1}{\sqrt{gh}} \quad (39)$$

여기서, Δx 는 유한요소의 최소길이이다.

식(38)을 사용하여 계산한 계산값, 조석곡선(해양수산부, 2003)과 M_2 분조를 사용한 값을 비교하여 Fig. 5에 나타냈다. 실측한 조석곡선과 비교하면, M_2 분조보다 4분조를 사용한 본 계산값의 경우가 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있다.

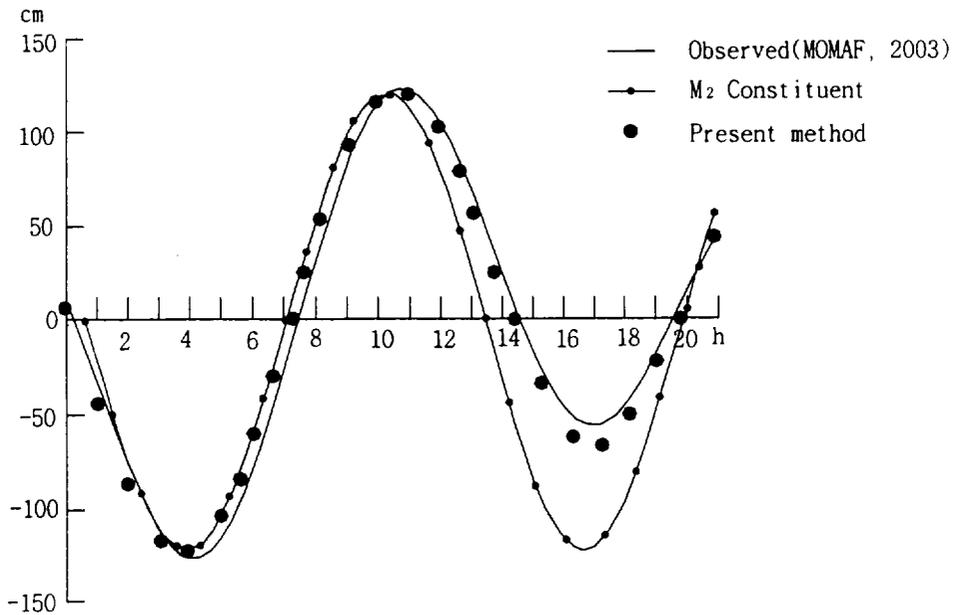


Fig. 5. Comparison of observed, M_2 constituent and calculated tidal elevation in Jeju harbor

수치모델의 적용성을 검토하기 위하여 Fig. 8에 표시된 점 C, D, E, 와 F 지점의 계산값을 다른 연구자들의 연구와 비교한 결과를 Table 4에 나타내었다.

Table 4. Comparison Result of other papers with present method in flood tide

Case	The author of a paper	Velocity of flow(cm/sec)			
		C point	D point	E point	F point
1	Yang and Choi(1999)	19	20	15	16
2	Cho and Lee(2000)	17	22	11	9
3	Kim(1995)	12	20	5	6
4	해양과환경연구소(2002)	항내의 유속 10m/sec 미만			
5	Present Method	9.04	7.79	2.42	1.75

- 1: Alec사의 직독식 전자유속계로 측정
- 2: 3차원 유한차분법 이용, M_2 분조 사용
- 3: 유한요소법, M_2 분조 사용
- 4: 용역보고서, M_2, S_2 분조 사용
- 5: 유한요소법, 4분조(M_2, S_2, K_1, O_1) 사용

식(38)에서 주어진 조위로 수치계산을 했을 때, 제주항에 대한 유동의 수치해석 결과를 특정 시간인 저조, 창조, 고조, 낙조 때를 선정하여 Fig. 9과 Fig. 10에 유향과 유속을 도시하였다. 계절풍의 영향을 고려하지 않은 Fig. 9(above)과 Fig. 10(above)은 최강창조, 낙조시에는 유속벡터의 방향이 반대로 나타나지만 유속벡터의 크기는 산지천의 영향으로 최강낙조시에 조금 크게 나타나는 경향을 보인다. 제주항 안쪽의 산지천의 흐름이 유동현상에 영향을 미치고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 11은 Fig. 8의 절점 C, D, E 에서 계산된 유속과 유향을 나타내고 있다. Fig. 12는 Fig. 8의 절점 C, D, E에서 조류타원을 도시한 것이다. Fig. 11과 Fig. 12의 결과를 보면 Fig. 8에 표시된 항 입구 점 C와 중간지점 D에서는 속도가 큰 만큼 물입자의 움직임이 크게 나타나며, 항 안쪽 E에서는 물입자의 움직임이 작게 나타나고 있음을 알 수 있다.



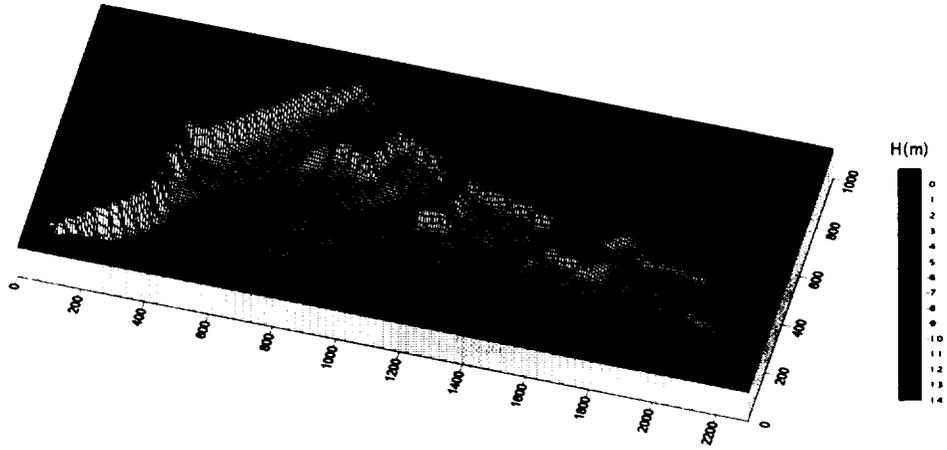


Fig. 6. 3-D Topographical map of Jeju harbor

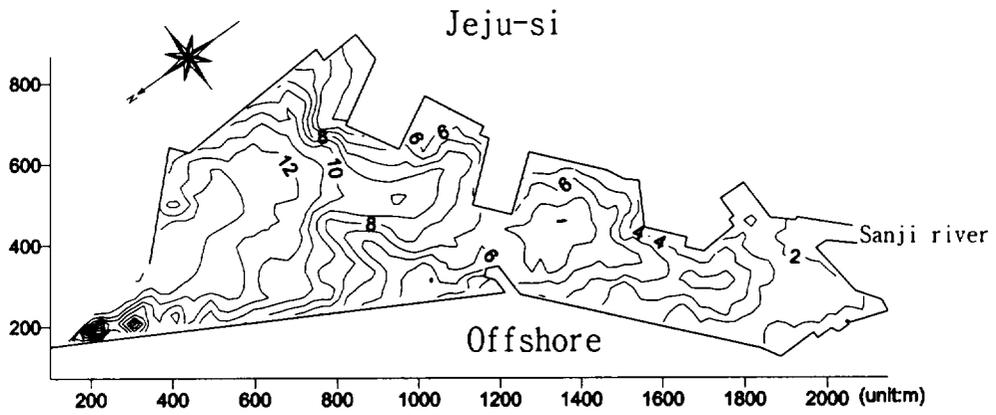


Fig. 7. Water depth of Jeju harbor

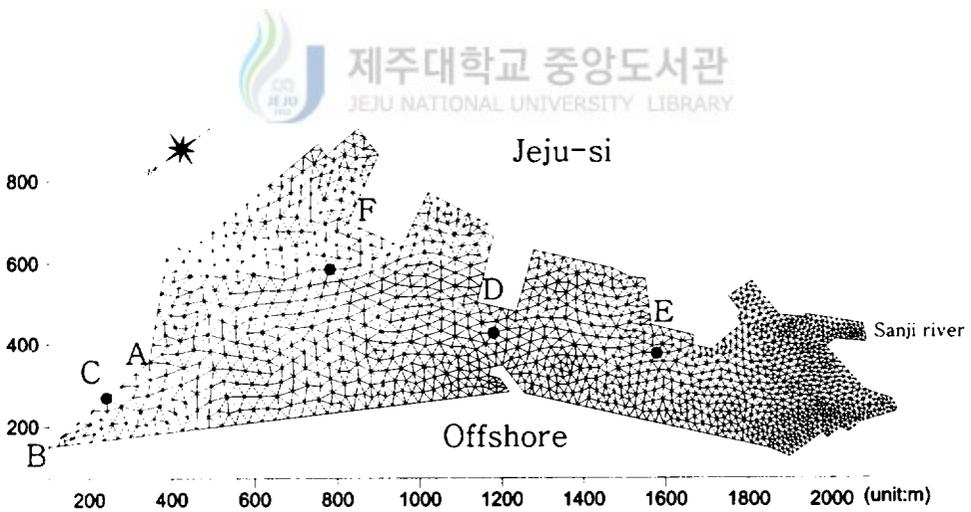


Fig. 8. Finite element idealization of Jeju harbor

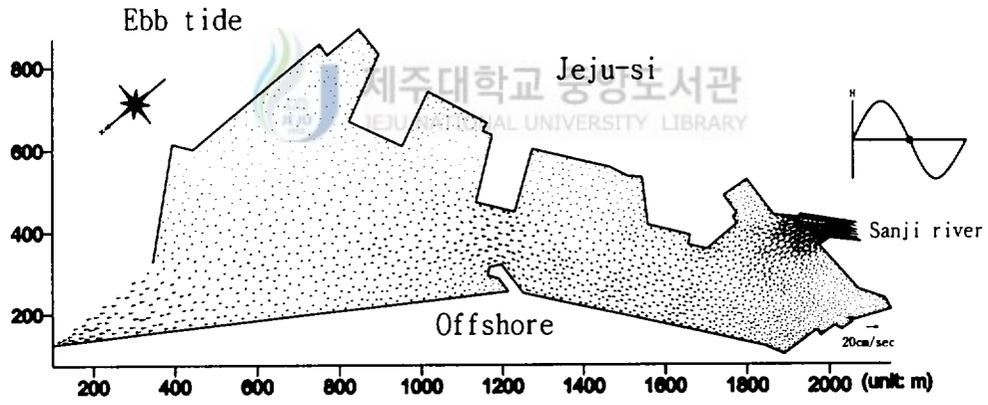
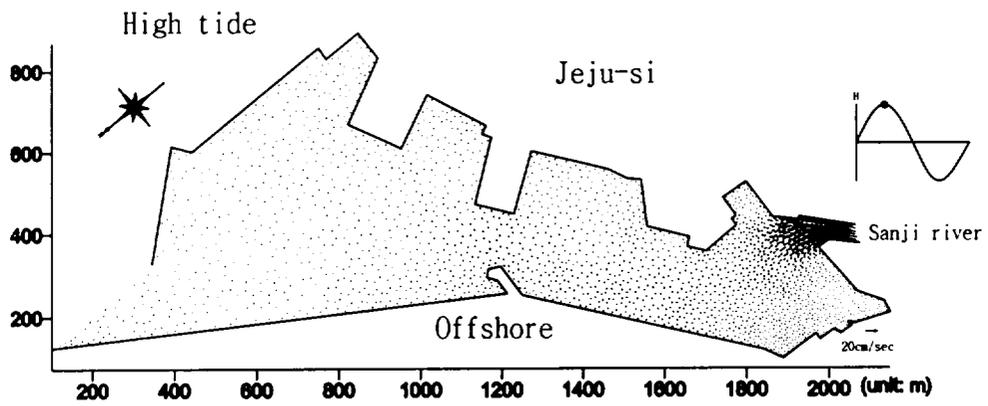


Fig. 9. Velocity vectors in Jeju harbor without seasonal wind
 (Above : High tide, Below : Ebb tide)

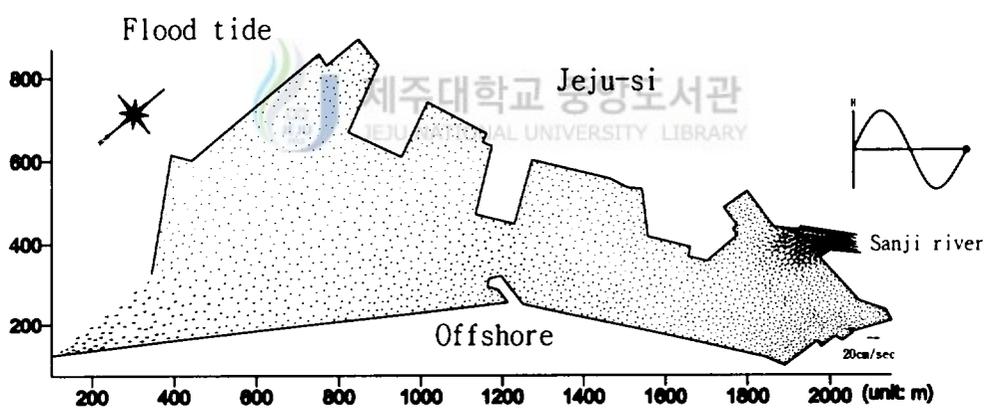
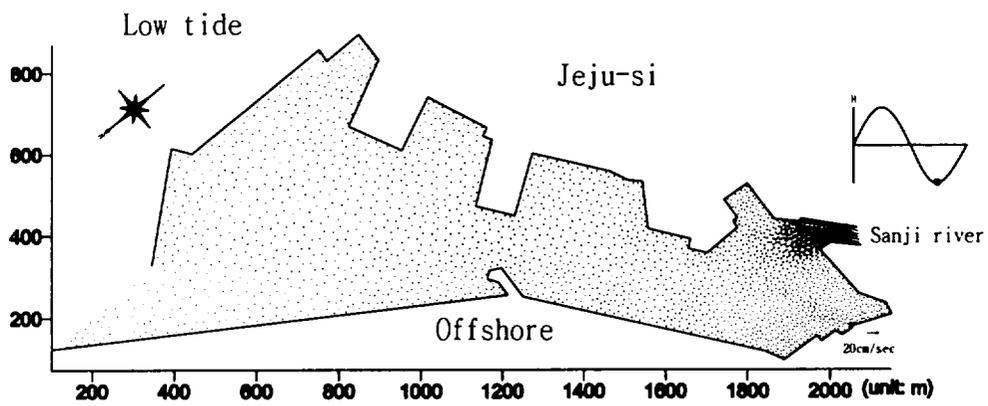
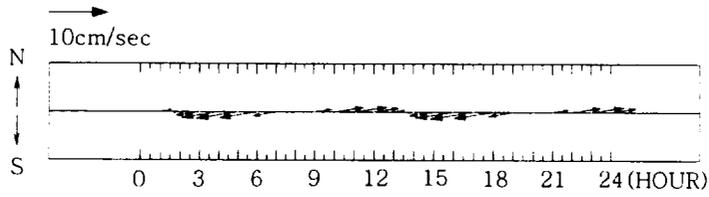
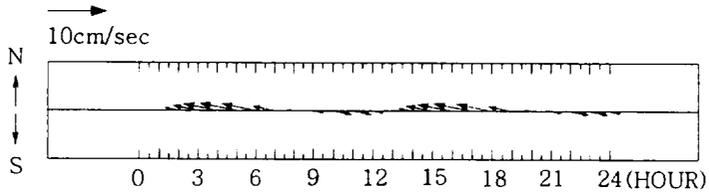


Fig. 10. Velocity vectors in Jeju harbor without seasonal wind
 (Above : Low tide, Below : Flood tide)



(a) Point C

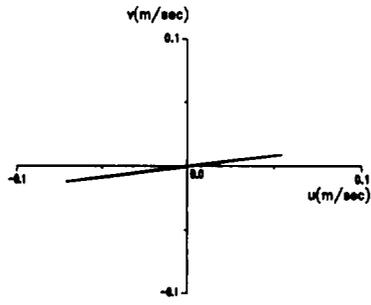


(b) Point D

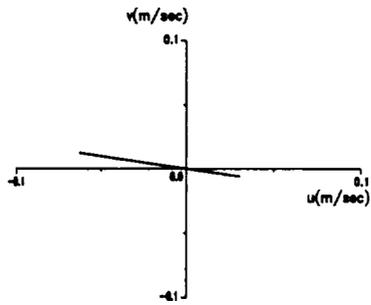


(c) Point E

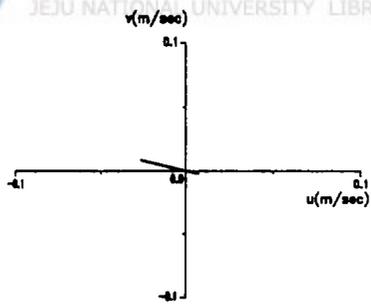
Fig. 11. Calculated current at nodal point C, D, and E in Fig. 8



(a) Point C



(b) Point D



(c) Point E


 제주대학교 중앙도서관
 JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 12. Calculated current ellipse at nodal point C, D and E in Fig. 8

2. 계절풍을 고려한 제주항의 해수유동해석

바람은 계절적, 지역적으로 변동하므로 우리나라에서 동계와 하계에 우세한 계절풍인 북서풍과 남동풍을 대상으로 바람의 영향을 고려하였으며, 제주항에서 우세한 풍향을 파악하기 위해 1961년 ~ 1990년까지 30년간 제주항에서 관측한 바람자료를 이용하였다(한국해양환경도, 1998).

Fig. 13과 Fig. 14는 동계계절풍을 고려한 경우로서 12월, 1월, 2월에 탁월한 NW방향의 영향을 고려한 경우이며, Fig. 15와 Fig. 16은 하계계절풍을 고려한 경우로서 6월, 7월, 8월에 탁월한 SE방향을 이용하여 수치해석 한 결과이다(해양수산부, 1998).

동계에 탁월한 계절풍 NW방향은 평균풍속 5.3m/s의 값을 이용하여 수치계산하였다. Fig. 13의 고조시에는 제주항 안쪽에 조금 강한 반시계 방향의 와류가 형성된다. Fig. 14의 저조시에는 산지천에서 내려오는 물과 만나는 부분에서 조금 조금 강한 반시계 방향의 와류가 형성되고, 항 입구부와 중앙부분에 반시계 방향의 와류와 시계 방향의 와류가 형성되는 것을 알 수 있다. 특히 최강창조, 낙조시에는 항만 안쪽에 반시계 방향의 와류가 형성되는 경향을 보이며, 부분적으로 미세한 와류가 형성되는 경향도 알 수 있다.

하계에는 탁월한 계절풍 SE방향과 평균풍속 3.4m/s의 값을 이용하여 수치계산하였다. Fig. 15와 Fig. 16은 전반적으로 Fig. 13, Fig. 14와 비교해 볼 때 제주항 안쪽에서의 와류의 방향이 시계방향의 와류가 형성되며, 유속의 크기는 조금 작게 나타난다. 이것은 계절풍의 방향이 반대이고 평균풍속값이 작기 때문이다. Table 5는 Fig. 8에 표시된 점 C, D, E, F에서의 유속크기를 계절풍을 고려하지 않은 경우와 계절풍을 고려한 경우를 나타내었다. 계절풍의 영향을 고려하지 않은 Fig. 9, Fig. 10의 경우와 비교해 볼 때 계절풍의 영향을 고려한 Fig. 13, Fig. 14와 Fig. 15, Fig. 16의 유속이 전반적으로 큰 것을 알 수 있으며, 바람의 평균

풍속이 커짐에 따라 유속도 커지는 것을 알 수 있었다.

Fig. 17, Fig. 18, Fig. 19는 각각 Fig. 8의 절점 C, D, E에서 계절풍을 고려하지 않은 경우와 동계와 하계의 계절풍을 고려한 경우를 계산하여 유속과 유향을 비교하여 나타내고 있다.

Fig. 20, Fig. 21, Fig. 22는 조류타원을 도시한 것으로 Fig. 8에 표시된 점 C, 점D와 점 E에서의 물입자의 움직임을 나타내고 있다. 산지천의 흐름과 계절풍의 영향으로 유속이 한 방향으로 변화하여 조류타원의 위치에 변화가 발생하였고, 계절풍의 평균풍속이 클수록 타원이 크게 형성되는 것을 알 수 있었다.

Table 5. The comparison of velocity vectors with wind stress and without wind stress in nodal points C, D, E and F (Flood tide)

Case	Wind Direction	Wind Speed (m/sec)	velocity vector(cm/sec)			
			C	D	E	F
1	without wind	without wind	6.42	6.21	2.61	1.25
2	SE	3.4	6.54	6.25	3.27	1.34
3	NW	5.3	6.91	6.28	4.57	1.72

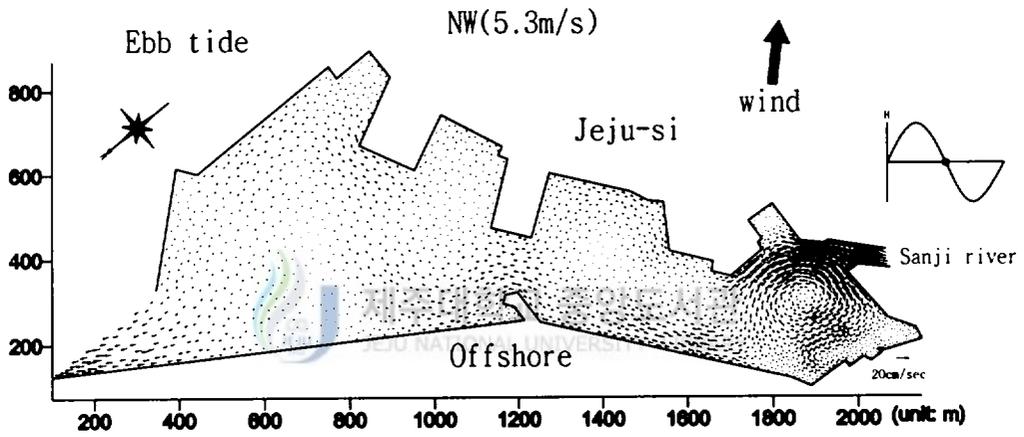
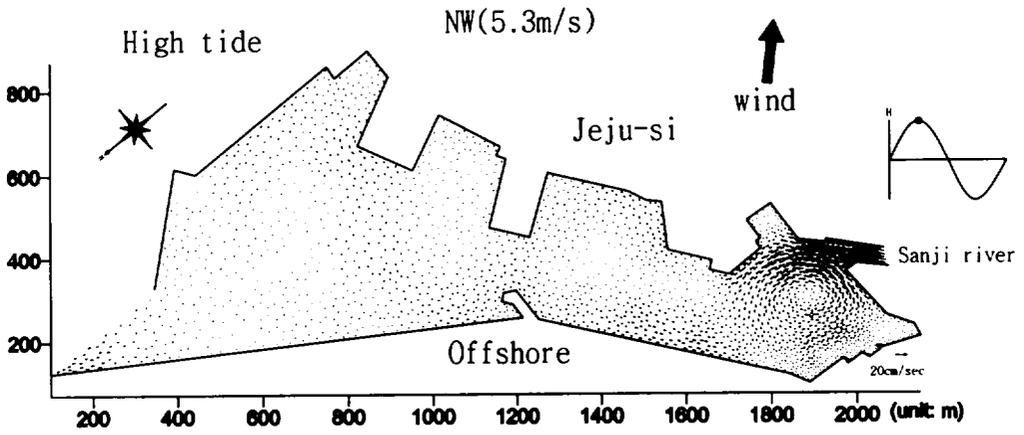


Fig. 13. Velocity vectors in Jeju harbor with seasonal wind(NW, 5.3m/s)
 (Above : High tide, Below : Ebb tide)

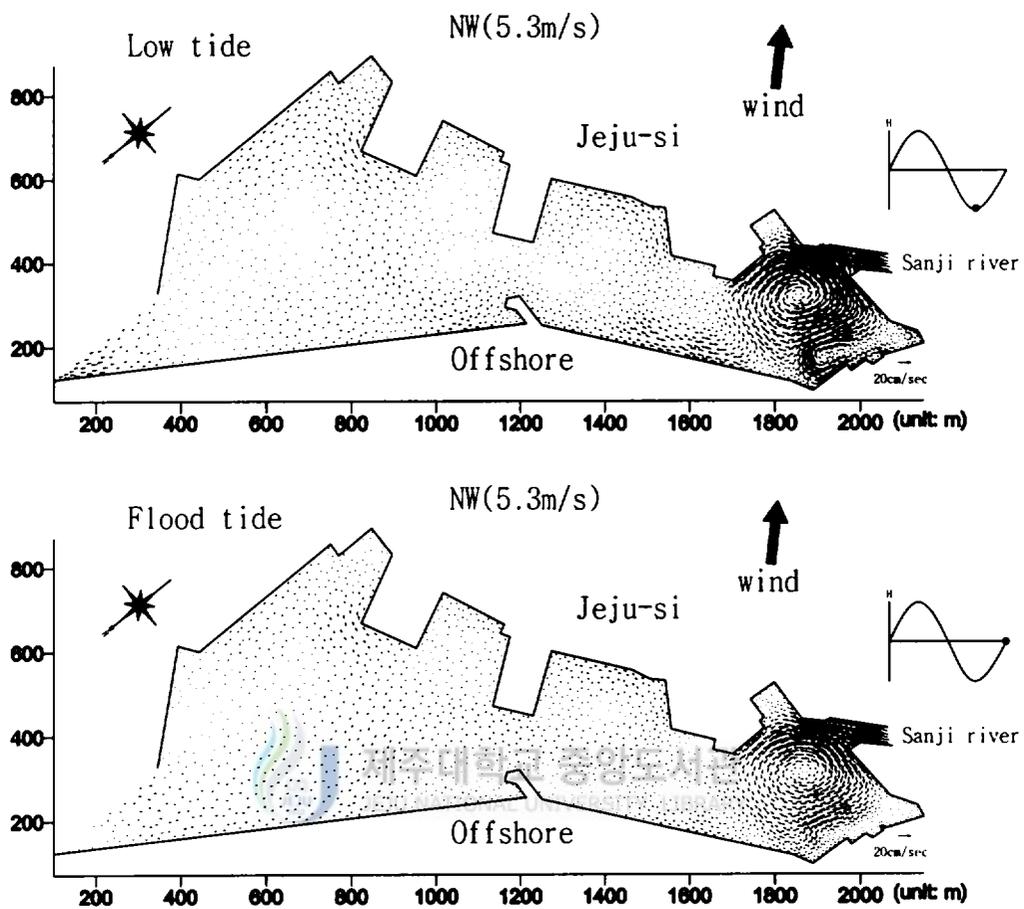


Fig. 14. Velocity vectors in Jeju harbor with seasonal wind(NW, 5.3m/s)
 (Above : Low tide, Below : Flood tide)

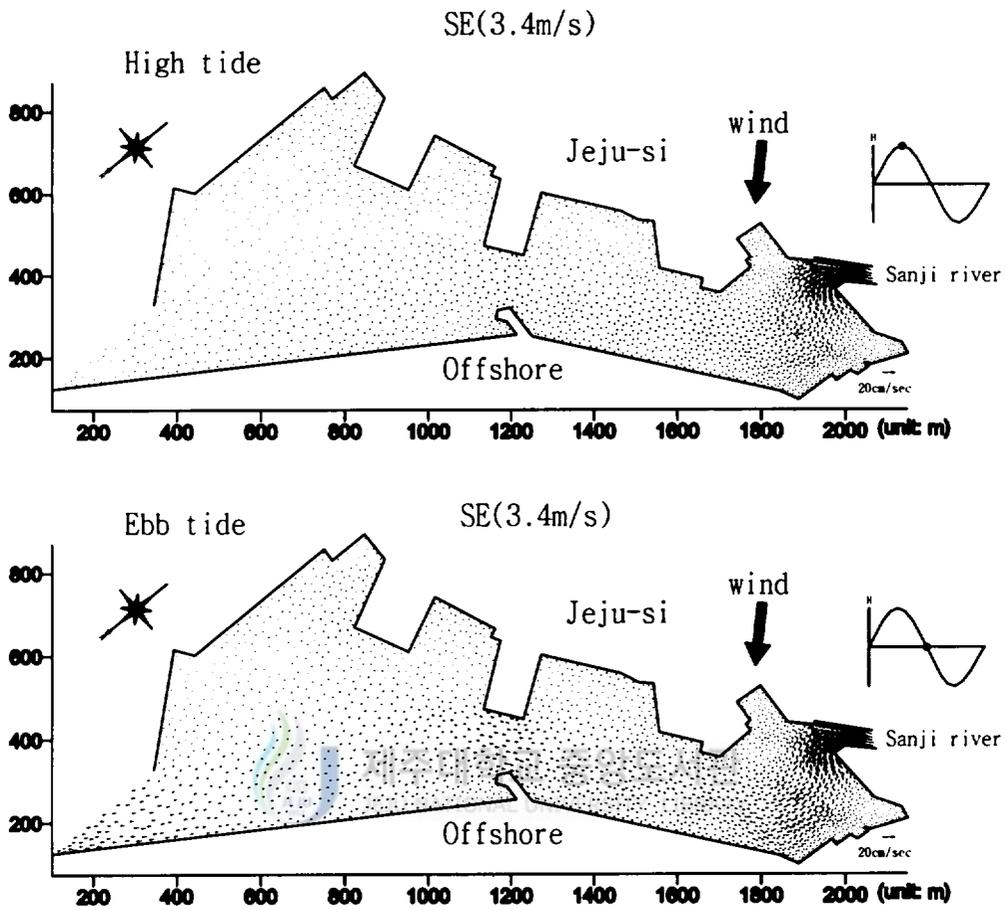


Fig. 15. Velocity vectors in Jeju harbor with seasonal wind(SE, 3.4m/s)
 (Above : High tide, Below : Ebb tide)

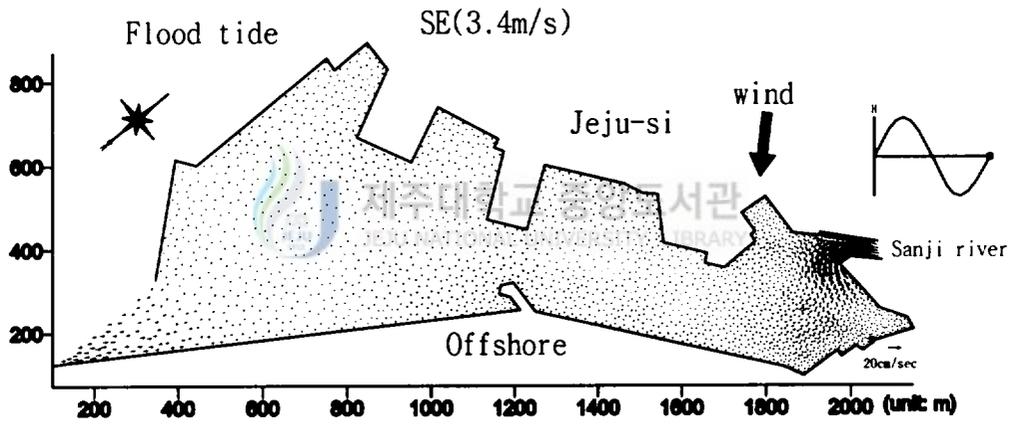
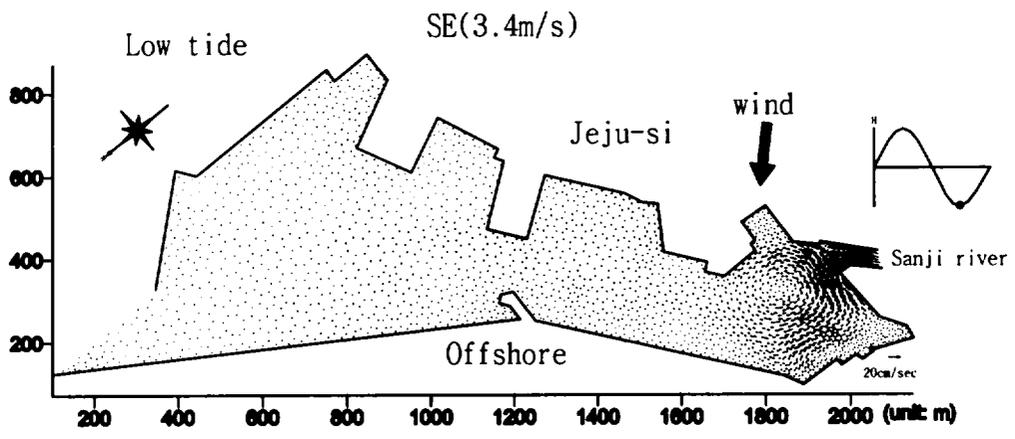
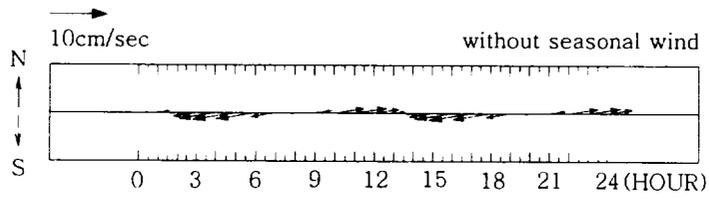
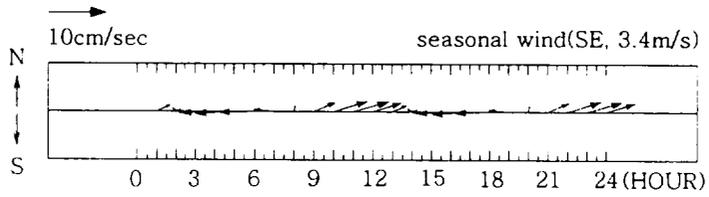


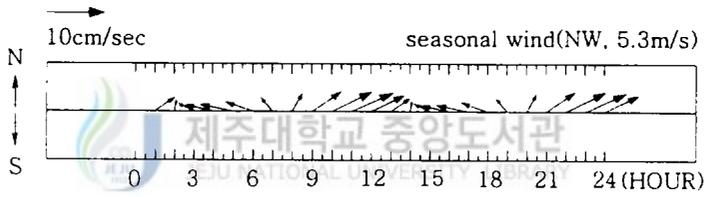
Fig. 16. Velocity vectors in Jeju harbor with seasonal wind(SE, 3.4m/s)
 (Above : Low tide, Below : Flood tide)



(a) Point C

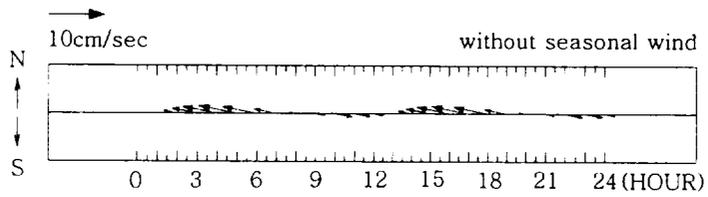


(b) Point C

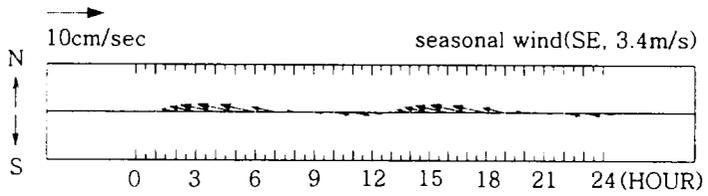


(c) Point C

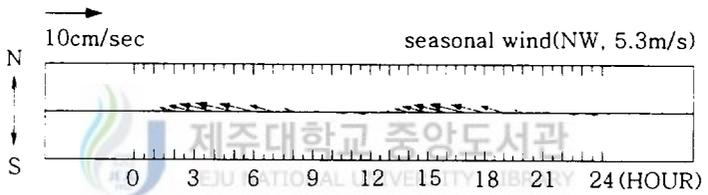
Fig. 17. Comparison Calculated current at nodal point C in Fig. 8



(a) Point D

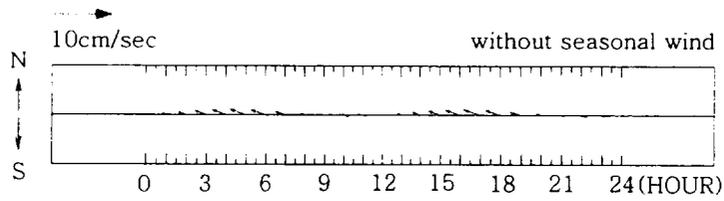


(b) Point D

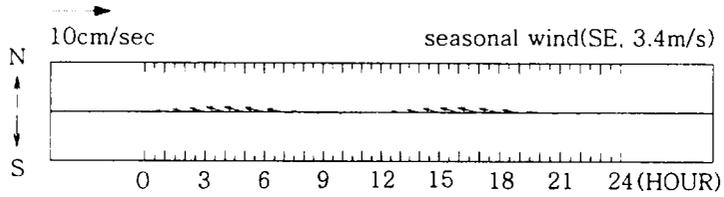


(c) Point D

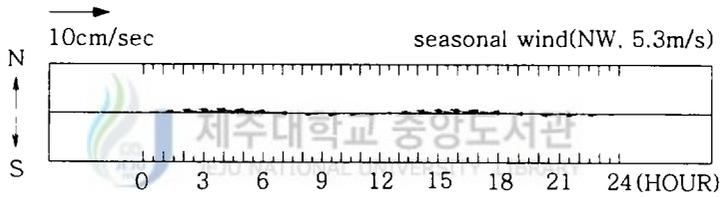
Fig. 18. Comparison Calculated current at nodal point D in Fig. 8



(a) Point E

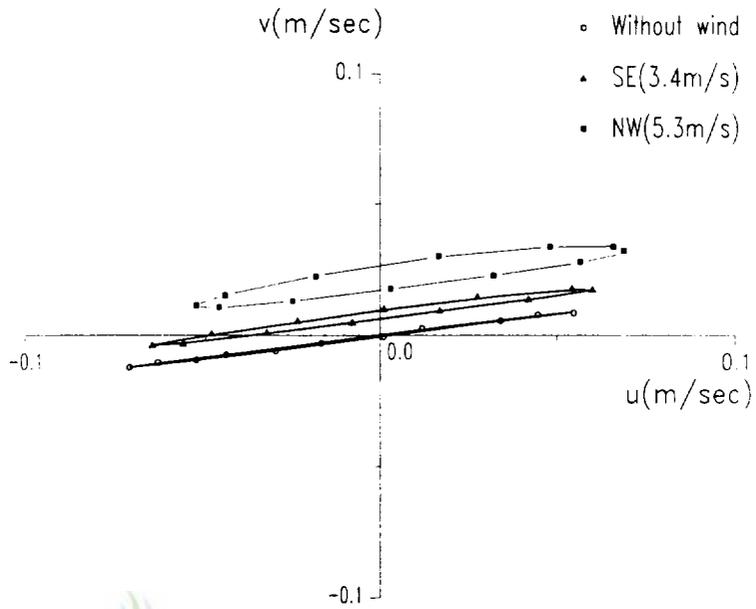


(b) Point E



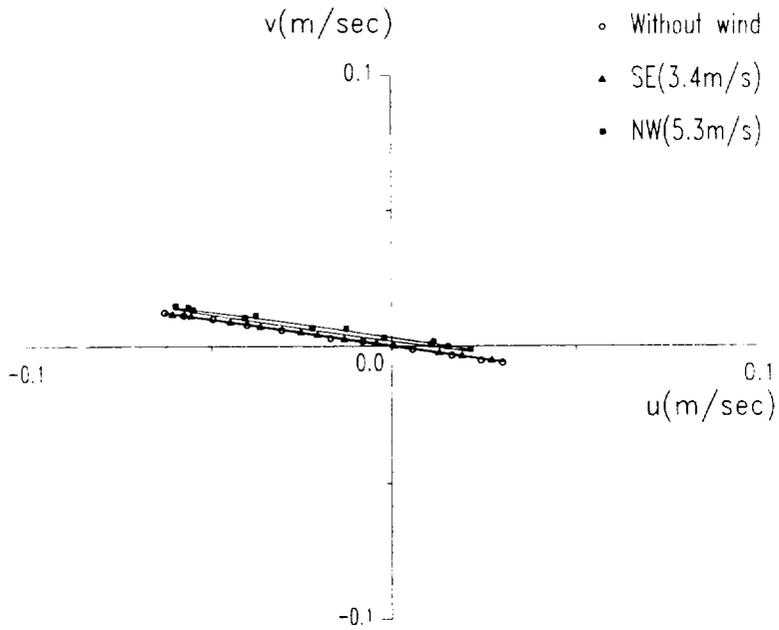
(c) Point E

Fig. 19. Comparison Calculated current at nodal point E in Fig. 8



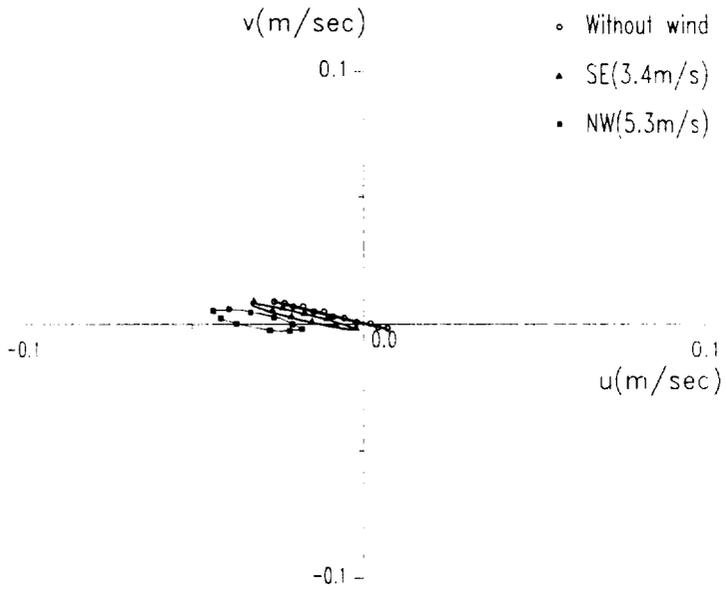

 제주대학교 중앙도서관
 (d) Point C
 JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 20. Calculated current ellipse at nodal point C in Fig. 8



(b) Point D
 제주대학교 중앙도서관
 JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 21. Calculated current ellipse at nodal point D in Fig. 8



(c) Point E
 제주대학교 중앙도서관
 JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 22. Calculated current ellipse at nodal point E in Fig. 8

V. 결 론

유체의 유동에 관한 수치해석은 비단 토목공학 분야만이 아니라, 많은 이공학 분야에서 널리 행해지고 있다. 컴퓨터의 성능향상과 전산유체역학의 발달로 인하여 실제로는 관찰하기 힘들거나 직접적인 실험을 하기 어려운 자연 현상도 해석 및 예측이 가능하게 되었다.

본 연구는 연안역에서 해수유동의 수치시뮬레이션을 행할 때 계절풍과 하천에서 유입되는 유속을 고려하여 제주항의 해수유동을 해석하였다. 수치해석결과로부터 계절풍에 대해 항내의 해수유동장이 민감하게 반응하는 것을 알 수 있었고, 계절풍이 강할수록 유속이 전반적으로 커지며, 제주항 안쪽에서는 산지천의 유속과 계절풍의 영향으로 동계에는 반시계 방향의 와류가 형성되며, 하계에는 시계 방향의 와류가 형성되는 경향을 알 수 있었다. 이것은 풍향과 풍속에 따라서 유향과 유속이 변동한다는 것을 또한 알 수 있었다. 앞으로의 연안역에서 해수유동의 해석을 할 때에는 하천의 흐름과 계절에 따른 계절풍의 영향을 고려하는 모델이 해수유동해석에 있어서 보다 실제적이고, 효율적인 수법으로 결론지을 수 있겠다.

앞으로 현지관측 등을 통하여 수집된 자료에 기초하여, 수심에 따라 차등화 된 유속을 이용한 수치해석모델의 개량이 향후 연구과제 이겠다.

VII. 참고문헌

- 김남형역. 1992, 해안공학, 청문각, 415 pp.
- 김남형역. 1995, 유한요소시스템입문, 원장출판사, 166 pp.
- 김남형역. 1995, 유한요소법유체해석, 원장출판사, 268 pp.
- 김남형 · 박계선 공역. 1996, 유한요소법, 원장출판사, 273 pp.
- 김남형 · 김영수 공역. 1998, 해양구조물과 기초, 원기술, 429 pp.
- 김남형역. 2002, 수치유체역학, 원기술, pp. 143-170.
- 김남형 · 박구용 · 조일형 공역. 2004, 해안파동, 구미서관, 1095 pp.
- 김남형. 1995, 2단계 양해 유한요소스킵에 의한 천해흐름의 해석, 대한토목학회논문집, 제15권, pp.1669-1677.
- 김남형 · 양성기. 1993, 유한요소법에 의한 조석류의 수치해석, 제주대학교논문집, 제36권(자연), pp. 223-230.
- 김남형 · Mustuto Kawahara. 1994, 유한요소법에 의한 제주항의 유동해석. 제주대학교논문집, 제38권(자연), pp. 335-342.
- 김남형 · 박지훈. 2003, 이동경계조건을 고려한 유동해석기법, 제주대학교 첨단기술연구소 논문집, 제14권, 제1호, pp. 83-91.
- 김남형 · 박지훈. 2003, 이동경계조건을 고려한 제주항 유동해석, 한국항해항만학회, 제17권, 제5호, pp. 539-546.
- 이용기 저. 2005, 항만의 이해와 시설계획, 청동거울, pp. 86-88
- 박성은 · 조규대 · 홍철훈 · 김동선 · 조광우. 1999, 가막만의 해수유동에 미치는 바람의 영향, 한국수산학회, 제32권, 제5호, pp. 674-679.
- 서승원 · 박원경. 1996, 조간대 모의를 위한 2차원 유한요소 해석, 한국해안 · 해양공학회지, 제8권, 제1호, pp. 103-113.
- 수로국. 1993. 수로기술연보.
- 양성기 · 최찬문. 1999. 제주항의 해양수리학적 특성. 제주대 해양연구논문집, 제23권, pp. 9-21.
- 정태성 · 김창식. 1992, 이동경계를 고려한 유한요소 천수유동모형, 한국해안 · 해양공학회지, 제4권, 제3호, pp. 146-155.
- 허영택. 2002, 유한요소기법을 이용한 항만 정온도의 수치해석, 제주대학교 석사학위논문, 53 pp.
- 안도경 · 이중우. 2002, 신항만부지에서의 유동 및 수질에 관한 유한요소해석, 한국항해항만학회지, 제26권, 제1호, pp. 137-145.

- 조은일 · 이병결. 2000, 3차원 수치모델을 이용한 제주항내 유속분포 특성(Ⅱ), 제주대학교 해양연구논문집, 제24권, pp. 99-107.
- 신문섭 · 배기성 · 김남형. 2001, 새만금 간척전 · 후 금강 하구의 퇴적 과정에 관한 연구, 한국지반환경공학회 논문집, 제2권, 제3호, pp. 5-15.
- 안희수 · 오임상. 1995, 유한요소법에 의한 금강하구역의 조석 및 금강유입의 수치실험, 한국지구과학회, 제16권, 제4호, pp. 299-308.
- 제주대학교 해양과환경연구소. 2002, 제주의항개발에 따른 어업피해조사 조사용역 최종보고서(제1권), pp. 45
- 해양수산부 국립해양조사원. 2003, 제주도 동부 조류도, 22 pp.
- 해양수산부 국립해양조사원. 1998, 한국해양환경도, 45 pp.
- 해양수산부 국립해양조사원. 2003, 한국연안조석표, 284 pp.
- Defiant, A. 1961, Physical Oceanography, Vols. I and II, Pergamon press.
- Kawahara M. and Umetsu T. 1986. Finite Element Method for Moving Boundary Problems in River Flow, Int. J.for Num. Meth. in Fluids, Vol.6, pp. 365-389.
- Kawahara M. and Umetsu T. 1988. Tow-step explicit finite element method for the spill-way flow using moving boundary technique, Computer Modelling in Ocean Engineering, pp. 597-608.
- Pinder, G. F. and Gray, W. G. 1977, Finite Element Simulation in Surface and Subsurface Hydrology, 295 pp.

감사의 글

먼저 부족한 점이 많았던 저에게 논문을 끝까지 마칠 수 있도록 가르침을 주시고, 끊임없는 격려와 조언을 주신 지도교수 김남형 교수님에게 진심으로 깊은 감사를 드립니다. 그리고, 바쁘신 와중에도 논문을 심사를 맡아 세심하게 검토하고 지적하여 주신 이병걸 교수님, 김상진 교수님께도 진심으로 감사를 드립니다.

대학원을 마치는 동안 많은 가르침을 주신 양성기 교수님, 남정만 교수님, 박상렬 교수님께도 깊은 감사를 드립니다.

논문이 완성되기까지 항상 같이하면서 격려와 힘을 주었던 영택, 현우, 순보에게도 고마운 마음을 드립니다. 그리고 대학원 생활을 같이 하면서 격려를 해주었던 창훈, 영웅, 태우, 현수, 동일, 용철, 승희, 건, 영범, 덕철, 그리고 영임에게도 앞으로 좋은 미래가 펼쳐지길 기원 합니다.

끝으로 공부를 끝까지 할 수 있도록 항상 나를 믿고, 묵묵히 지켜보시면서 많은 용기를 주셨던 아버지, 그리고 많은 뒷바라지를 해주신 어머니 그리고 언제나 힘이 되어주었던 동생들 모두에게 이 논문으로써나마 고마운 마음을 전합니다.

2005 년 12월

발표논문 리스트

(1) 학회지 발표논문

- ①. “이동경계조건을 고려한 유동해석기법”, 제주대학교 공과대학 첨단기술 연구소논문집, 제14권 제1호, 2003년 6월 pp. 83~91.
- ②. “이동경계를 고려한 제주항 유동해석”, 한국항해항만학회, 제27권 제5호, 2003년 12월 pp. 539-546.
- ③. “바람의 영향을 고려한 제주항의 유동해석”, 제주대학교 해양과환경연구 논문집, 제17권, 2003년 12월.

(2) 학술 발표회 발표논문

- ①. “바람의 영향을 고려한 제주항유동의 유한요소해석”, 대한토목학회, 2003년도 학술발표회, pp. 4960-4964.
- ②. “계절풍의 영향을 고려한 제주항의 유동해석”, 한국해양환경공학회, 2003년도 추계학술대회, pp 147~152, 2003.
- ③. “계절풍의 영향을 고려한 제주항의 유동해석”, 제2회 대학원생 학술발표회 발표요약집, 제주대학, pp 120~124, 2003.