

碩士學位論文

海水交換防波堤가 設置된  
港灣에서의 波高分布解析

The logo of Jeju National University is a large, faint watermark in the background. It features a stylized 'J' shape with blue, green, and purple waves. Inside the 'J' is a book icon and the text 'JEJU 1952'. The words 'JEJU NATIONAL UNIVERSITY 1952' are written in a circular path around the logo, and '제주대학교' is written in Korean below it.

濟州大學校 大學院

土木海洋工學科

尹 現 澈

2010 年 2 月

# 海水交換防波堤가 設置된 港灣에서의 波高分布解析

指導教授 金 南 亨

尹 現 澈

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2010年 2月

濟州大學校 大學院

2010年 2月

# The Analysis of Wave Height Distribution in the Harbor with Seawater-Exchange Breakwater

Hyeon-Cheol Yun

(Supervised by Professor Nam-Hyeong Kim)

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

2010. 2

Department of Civil & Ocean Engineering  
GRADUATE SCHOOL  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

# 목 차

List of Figures .....	iii
List of Tables .....	v
Summary .....	vi
<b>I. 서 론</b> .....	1
1. 연구 배경 .....	1
2. 연구 목적 .....	3
3. 논문의 구성 .....	4
<b>II. 수치모형의 기본방정식</b> .....	5
1. 기본 방정식 .....	5
2. 부분흡수 경계조건 .....	8
3. 해저면 마찰 .....	10
4. 외해영역에서의 해석해 .....	16
5. 범함수의 유도 .....	19
<b>III. 유한요소 정식화</b> .....	26
1. 유한요소법의 개요 .....	26
2. 근사와 보간함수 .....	27
3. 수치계산의 최적화 .....	30
3.1 수심에 따른 격자최적화 기법 .....	30
3.2 개별요소법을 이용한 삼각망 생성기법 .....	31
3.3 밴드폭 최적화 기법 .....	32

IV. 파고분포해석 및 검증 .....	33
1. 비선형 모형항만 .....	33
2. 주문진항의 항내파고분포해석 .....	36
2.1 해수교환방파제가 설치된 주문진항의 항내파고분포 해석 .....	39
2.2 다기수로가 설치된 주문진항의 항내파고분포 해석 .....	48
V. 결 론 .....	54
VI. 참고문헌 .....	56



## List of Figures

Fig. 1. Definition sketch of a coastal harbor .....	6
Fig. 2. Typical boundary and interior elements .....	27
Fig. 3. Modeled domain of Berkhoff et al.(1982) .....	34
Fig. 4. Comparison of relative wave height distribution in shoal .....	35
Fig. 5. Jumunjin Fishery Port(JFP) .....	38
Fig. 6. Water depth diagram for JFP .....	41
Fig. 7. Finite element mesh for JFP .....	41
Fig. 8. Computed relative wave height for JFP .....	42
Fig. 9. Computed relative wave height for JFP with seawater-exchange breakwater(Case-1) .....	42
Fig. 10. Computed relative wave height for JFP with seawater-exchange breakwater(Case-2) .....	43
Fig. 11. Computed relative wave height for JFP with seawater-exchange breakwater(Case-3) .....	43
Fig. 12. Three dimensional wave profiles for JFP .....	44
Fig. 13. Three dimensional wave profiles for JFP with seawater-exchange breakwater(Case-1) .....	44
Fig. 14. Three dimensional wave profiles for JFP with seawater-exchange breakwater(Case-2) .....	45
Fig. 15. Three dimensional wave profiles for JFP with seawater-exchange breakwater(Case-3) .....	45
Fig. 16. Water particle velocity profiles for JFP .....	46
Fig. 17. Water particle velocity profiles for JFP with seawater-exchange breakwater(Case-1) .....	46
Fig. 18. Water particle velocity profiles for JFP with	

seawater-exchange breakwater(Case-2) .....	47
Fig. 19. Water particle velocity profiles for JFP with seawater-exchange breakwater(Case-3) .....	47
Fig. 20. Finite element mesh for JFP with manifold channels .....	49
Fig. 21. Computed relative wave height for JFP with manifold channels(Case-1) .....	49
Fig. 22. Computed relative wave height for JFP with manifold channels(Case-2) .....	50
Fig. 23. Computed relative wave height for JFP with manifold channels(Case-3) .....	50
Fig. 24. Three dimensional wave profiles for JFP with manifold channels(Case-1) .....	51
Fig. 25. Three dimensional wave profiles for JFP with manifold channels(Case-2) .....	51
Fig. 26. Three dimensional wave profiles for JFP with manifold channels(Case-3) .....	52
Fig. 27. Water particle velocity profiles for JFP with manifold channels(Case-1) .....	52
Fig. 28. Water particle velocity profiles for JFP with manifold channels(Case-2) .....	53
Fig. 29. Water particle velocity profiles for JFP with manifold channels(Case-3) .....	53

## List of Tables

Table 1. Incident wave conditions ..... 37



## Summary

Recently, a study of seawater-exchange breakwater is carried out by many researchers in Korea in order to promote circulation of seawater in a harbor. Although the seawater in the harbor efficiently circulates by inflow of the seawater through the seawater-exchange breakwater, calmness in the harbor can be unsettled by the inflow of an amount of seawater via that. Before the seawater-exchange breakwater is installed, it is important that wave height distribution about this area should be exactly analyzed so as to estimate the calmness in the harbor.

This study is carried out numerical analysis to calculate wave height distribution about Jumunjin fishery port installed seawater-exchange breakwater at the Gangwon-do in South Korea. Mild-slope equation added to bottom friction by Chen and Mei(1974) is used as basic equation of this numerical model. To consider nonlinear wave, nonlinear dispersion relation by Kirby and Dalrymple(1986) was used in terms of dispersion relation of the basic equation. Numerical model is shown inside using finite element and outside using a series of value of eigenfunction, they were finally in the virtual border to find value. When numerical calculation is carried out, because band width and element division considered water depth by pretreatment technique was minimized, the required time for calculation and computer storage capacity are decreased.

In order to verify the developed numerical model, the results of this numerical model were compared with the experimental data by Berkhoff et al.(1982) and the results of the numerical model by Panchang et al.(1998). As a result, it is shown that the results considering nonlinear wave are more exact for wave analysis than those not considering nonlinear wave. This model is applied on

Jumunjin fishery port installed the seawater-exchange breakwater, and wave height distributions in the harbor are calculated. From the results of the numerical analysis, when the abnormal waves are intruded through the seawater-exchange breakwater, wave height distributions in the harbor are highly computed. Therefore, in order to get wave height low in the harbor, it is considered that the facility with the ability to protect the inflow of abnormal waves is needed. In addition, it is demonstrated that the case of Jumunjin fishery port installed manifold channels is better than the case of that installed seawater-exchange breakwater.



# 1. 서 론

## 1. 연구배경

최근에 항만개발은 시대의 흐름과 함께 항만 고유기능인 물류처리 기능외에 환경문제가 크게 대두됨에 따라 친수공간을 확보함으로써 다양한 형태의 해양위락 및 관광기능을 겸한 질적인 부분에서의 향상성이 요구되어지고 있고, 환경친화적 항만 즉, “Eco-Port”를 건설하려는 노력이 세계적으로 확대되고 있다. 환경친화적 항만은 자연과 조화를 이루어 생물이 살기 좋고, 자연 환경을 창조함으로써 인간에게 쾌적함을 주고 환경 부하가 적고 환경 관리가 잘된 항만이라 할 수 있다. 그로 인해 우리나라도 항만 및 어항 확충 수요가 날로 증가됨에 따라 항만이나 어항의 개발이 세계에서 가장 활발하게 진행되고 있다.

항만이나 어항의 개발계획에 있어서 방파제는 항만을 구성하는 요소 중 가장 대표적인 요소이다. 그러한 방파제의 주목적은 외해로부터 내습하는 파랑을 차단하여 항내를 정온한 수역으로 확보함으로써 선박의 안전한 정박지를 제공하고 어민의 안전과 생활터전을 보호하는데에 있다. 하지만 이렇게 조성된 항내 정온수역은 항입구를 제외한 항내에서 해수순환기능이 크게 저하되어 항내 수질 오염의 주원인이 되고 있는 실정이다.

그래서 항만의 쾌적한 생활공간을 확보하며 어민 소득의 향상을 위해서 공학적인 관점에서 항만 및 어항을 개발할 때 수질환경을 보전할 수 있는 새로운 형식의 구조물에 관한 기술개발이 필요하다. 이러한 기술개발의 일환으로 외해수를 유입시켜 항내 수질오염을 개선하기 위하여 고안된 해수교환방파제는 방파제의 소파기능에 통수성을 추가한 것으로 해수의 항내 유입을 원활하게 하면서도 외해로부터 내습하는 파랑을 효과적으로 제어할 수 있는 기능을 가져야 한다.

주문진항은 항 주위의 시설에 의한 생활오폐수가 유입되면 항의 길이가 길고 폭이 좁아 해수순환의 어려움이 있어 항내 수질이 오염되어 항내의 해수를 순환시키기 위하여 해수교환방파제가 설치되었다. 해수교환방파제는 유입수의 항내

유출이 방파제의 기부측에 위치하여 유선이 주로 항입구쪽으로 바로 형성되기 때문에 항내의 해수순환에 한계가 있다. 그러나 다기수로는 해수유입시설로부터 안벽을 따라 수로를 건설하여 항내의 최종 유출구를 항내 안쪽 수역에 배치함으로써 항내의 해수순환효과를 증대시킬 수 있는 장점을 가진다. 그러나 주문진항에 이상 파랑 내습시, 해수교환방파제를 통해 다량의 해수유입이 발생할 우려가 예상됨에 따라 항내 정온도에 좋지 않은 영향이 발생할 가능성이 있기 때문에 해수교환방파제를 통해 내습하는 이상 파랑의 유입시 항내과고분포에 따른 정온도의 변화에 대한 영향과 다기수로를 설치하였을 때의 항내 과고분포를 파악하는 것이 필요하다.



## 2. 연구목적

항내의 정온도가 유리하기 위해서는 유입수가 항내의 수면을 크게 교란시키지 않는 구조 형식을 택해야 한다. 항만은 정온한 수면을 필요로 하므로 해수교환방과제를 통해 해수와 함께 파가 많이 투과되지 않아야 한다. 해수교환방과제를 통하여 항내로 유입된 해수는 항내 깊숙한 수역까지 도달할 수도 있으나 대부분은 해수교환방과제의 해수 유입부와 항의 입구를 연결하는 짧은 유선을 통해 항외로 배출된다. 해수교환방과제의 단면의 형상과 설치위치는 유입수가 항내의 깊숙한 구역까지 도달하게 해야 하며 항내 정온도에 문제가 없어야 한다.

현재 우리나라에서는 아직 다기수로가 설치된 항만이나 어항은 없다. 다기수로란 해수유입시설로부터 안벽을 따라 수로를 건설하여 항내의 최종유출구를 항내 안쪽 수역에 배치함으로써 항내의 해수순환 효과를 증대시킬 수 있는 장점을 가진다. 따라서, 본 연구의 목적은 해수교환방과제가 설치되어 있는 주문진항에 다기수로라고 하는 새로운 개념의 시설을 설치하여 항내 파고분포를 수치모의 하고 그 결과를 비교·분석하는데 있다. 이를 위해 해수교환방과제를 설치했을 때와 다기수로를 설치했을 때의 월류제를 통하여 항외에서 항내로 유입되는 해수의 유속과 유입량을 상정하여 항내의 해수교환이 원활히 이루어질 때 다기수로를 설치한 해수교환방과제의 해수유입이 항내 정온도에 미치는 영향을 비교, 분석하기 위해 수치모의를 하고자 한다.

특히, 주문진항에 이상 파랑의 내습시, 해수교환방과제와 다기수로가 설치된 경우 해수유입에 의한 항내파고분포 수치모의 결과들을 검토함으로써 다기수로가 해수교환방과제 보다 항내 정온도에 유리함을 입증하고, 항내·외의 해수를 자유롭게 순환시켜 깨끗한 수질환경을 조성할 수 있으며, 선박의 안전한 항내 정박지를 제공하고자 한다.

### 3. 논문의 구성

본 논문에서는 우선 II장에서 수치모형의 기본방정식을 유도하기 위하여 부분 흡수 경계조건과 해지면 마찰을 고려하고 외해영역에서의 해석을 한 후에 범함수를 유도하여 기술하였다.

III장에서는 유한요소 정식화로써 근사와 보간 함수에 대해 기술하였고, 수치계산의 최적화 작업으로써 자동요소 분할법, 개별요소법을 이용한 삼각망 생성기법과 밴드폭 최소화 기법에 대해 기술하였다.

IV장에서는 과고분포해석 및 검증으로써 먼저 비선형모형항만에 대한 상대과고를 계산 및 비교하고 이러한 검증이 이루어진 후에 해수교환방과제 및 대기수로가 설치되어 있는 주문진항에 대한 과고분포해석을 한다.

마지막으로 V장에서는 결론으로서 본 논문에서 얻어진 결론들을 종합적으로 서술하였다.

## II. 수치모형의 기본방정식

### 1. 기본 방정식

대상유체는 비점성, 비압축성이고 비회전류라고 가정하였을 때 완만한 해저경사면 위를 전파하는 미소진폭파에 대한 파동장은 다음 식으로 표현할 수 있다 (Berkhoff, 1972).

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla \Phi) + \frac{C_g}{C} \sigma^2 \Phi = 0 \quad (1)$$

여기서,

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} i + \frac{\partial}{\partial y} j$$

$C_g$  : 군속도

$C$  : 파속

$h(x, y)$  : 수심

$\sigma$  : 각 주파수

$\Phi(x, y, t)$  : 2차원 복소 포텐셜 함수

를 나타내며 군속도  $C_g$ 와 파속  $C$ 는 각각 다음 식과 같다.

$$C_g = \frac{C}{2} \left( 1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \quad (2)$$

$$C^2 = \frac{g}{k} \tanh kh \quad (3)$$

여기서,  $k$ 는 파수를 나타낸다.

Fig. 1에서는 직교좌표계  $(x, y, z)$ 와 원통좌표계  $(r, \theta, z)$ 를 함께 사용하였다. 방파제와 해안선의 경계에서의 에너지 손실을 무시한다면 경계에서의 수직방향의 유속성분은 다음 식과 같이 영(0)이 된다.

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0 \quad (4)$$

여기서,  $n$ 은 영역  $A$ 에서 밖으로 향하는 단위 수직벡터이다.

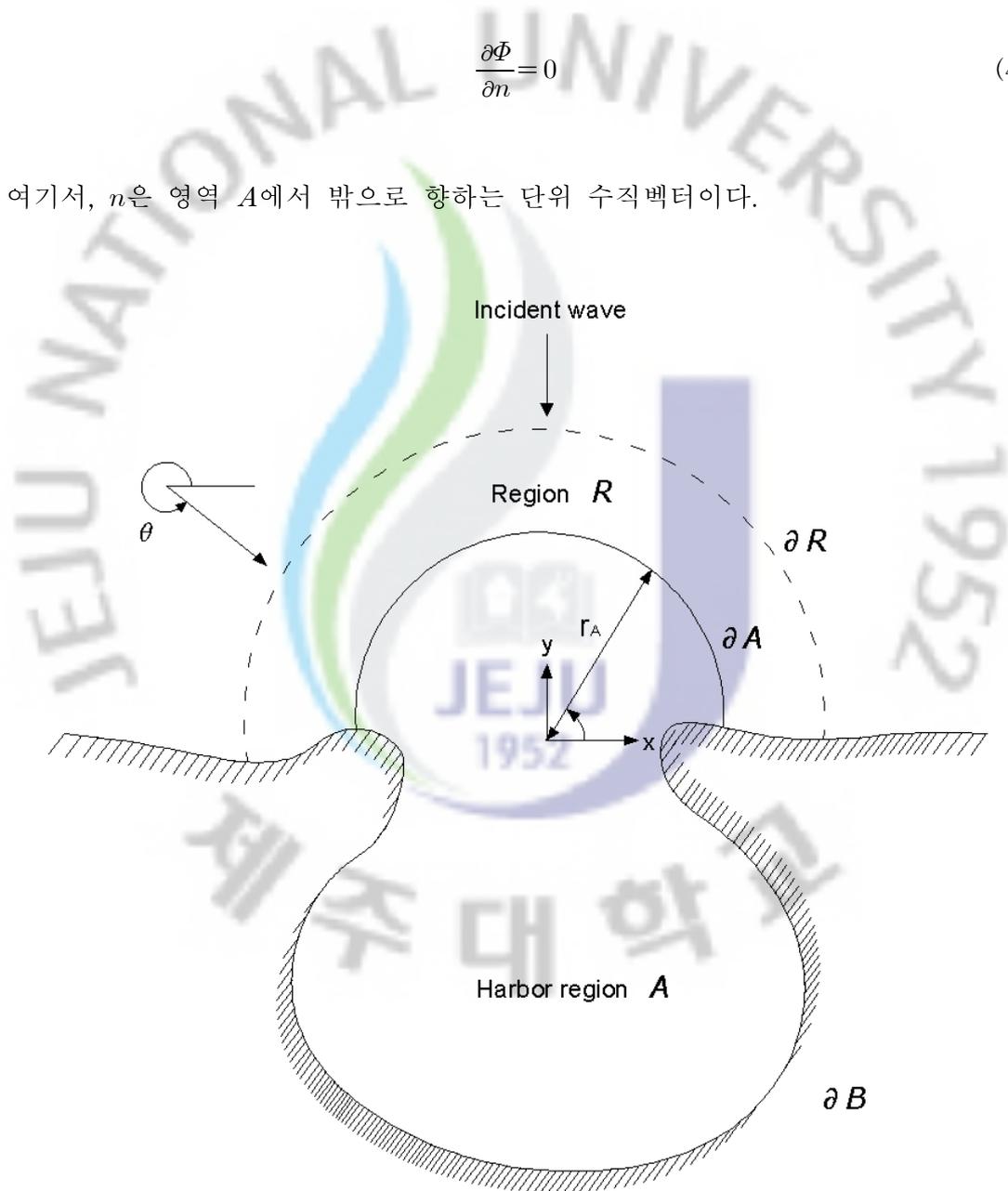


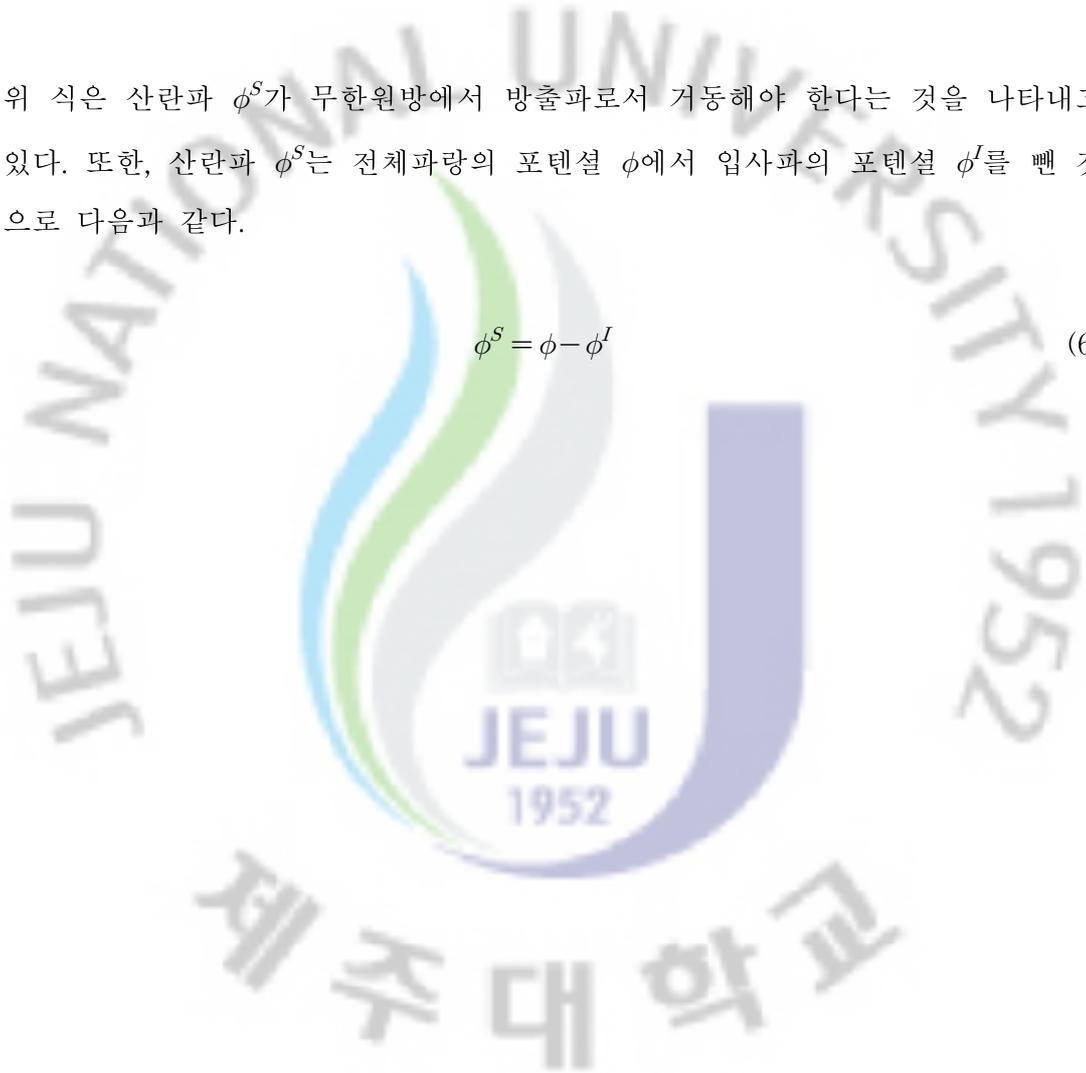
Fig. 1. Definition sketch of a coastal harbor

이제 유체영역을 모든 수평방향으로 무한원방까지 확장하는 것으로 가정할 때 무한원방에서는 어떠한 개방 경계조건을 부과해야 한다. 본 연구에서 사용한 방사조건은 Sommerfeld(1896) 방사조건 특수한 경우로 다음과 같다.

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \sqrt{r} \left( \frac{\partial}{\partial r} - ik \right) \phi^S = 0 \quad (5)$$

위 식은 산란파  $\phi^S$ 가 무한원방에서 방출파로서 거동해야 한다는 것을 나타내고 있다. 또한, 산란파  $\phi^S$ 는 전체파랑의 포텐셜  $\phi$ 에서 입사파의 포텐셜  $\phi^I$ 를 뺀 것으로 다음과 같다.

$$\phi^S = \phi - \phi^I \quad (6)$$



## 2. 부분흡수 경계조건

방파제, 해안선 등은 일반적으로 파랑 에너지를 전부 흡수하거나 반사시키지 못한다. 부분흡수 경계조건을 고려하지 않고 완전반사로 가정한 경우는 자연 상태에서나 수리모형에서의 값보다 큰 값을 나타낸다. 특히, 공진주파수에서의 진폭은 더욱 과장된다. 따라서 경계에서의 부분흡수 경계조건이 필요하고, 이는 일반적으로 복소수인 반사계수에 의해 표현되며 Mei와 Chen(1975), Berkhoff(1975), Chen(1984, 1986, 1990)등이 사용한 바 있다. 본 연구에서 사용한 부분흡수 경계조건은 이들이 사용한 것과 동일한 것으로 하였다.

긴 직선형태의 해안선에 입사하는 천해파에 대해서 복소수 반사계수  $K_r$ 을 구할 수 있다. 이 반사계수는 일반적으로 파랑의 주파수와 진폭, 해안선이나 방파제의 형태 및 공극율의 함수이다.  $x$ 방향으로 전파하는 파가 해안선에 대해 수직으로 입사하는 것으로 하면 입사파와 반사파를 합한 전체 파랑은 다음 식으로 주어진다.

$$\phi e^{-i\sigma t} = -\frac{iga_o}{\sigma} (e^{ikx} + K_r e^{-ikx}) e^{-i\sigma t} \quad (7)$$

그리고 표면에 대한 수직경사는 다음과 같다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} e^{-i\sigma t} = \frac{\partial \phi}{\partial x} e^{-i\sigma t} = \frac{ga_o k}{\sigma} (e^{ikx} - K_r e^{-ikx}) e^{-i\sigma t} \quad (8)$$

위의 식들로부터 해안선이나 방파제 등의 고체 경계면에서는 다음 식이 성립한다.

$$\phi = -\frac{iga_o}{\sigma} (1 + K_r) \quad (9)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = \frac{ga_0 k}{\sigma} (1 - K_r) \quad (10)$$

위의 식을 연립하여 정리하면 다음식이 된다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = \alpha \phi \quad \text{at} \quad x=0 \quad (11)$$

여기서,  $\alpha = ik \frac{1 - K_r}{1 + K_r}$  이다.

긴 소파성 방파제를 가진 항만에서는 음향학에서 임피던스조건이라고 부르고 있는 조건을 경계조건으로 취급할 수 있으며, 완전반사의 경우 다음식이 된다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad \text{at} \quad x=0 \quad (12)$$

### 3. 해저면 마찰

부분흡수 경계조건과 마찬가지로 해저면에서의 마찰에 의해 파의 에너지 감소가 이루어진다. 이는 파랑의 진폭의 감소를 의미한다. 이러한 감소는 항만의 공진주파수에서 가장 민감하게 나타나며, 이는 물 입자의 속도와 전단응력이 그 지점에서 가장 크기 때문이다.

해저면 마찰을 고려하기 위해서 해저면에서의 전단응력은 같은 장소에서의 포텐셜 이론에 의한 물입자의 속도에 비례하는 것으로 가정하였다. 그리고 운동량 방정식에서  $x$  및  $y$ 방향의 전단응력의 변화율이  $z$ 방향에 비해 작고,  $z$ 방향의 전단응력의 변화율은 중력에 비해 작다고 가정하면, 연속방정식과 저면 마찰력을 포함한 운동량 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \quad (14)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \quad (15)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g \quad (16)$$

여기서,  $\tau_{zx}, \tau_{zy}$ 는 전단응력,  $(U, V, W)$ 는  $x, y, z$ 방향의 유속성분,  $p$ 는 압력,  $g$ 는 중력가속도, 그리고  $\rho$ 는 유체밀도를 나타낸다.

자유수면에서의 역학적 경계조건 및 운동학적 경계조건은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = W \quad \text{at} \quad z = 0 \quad (17)$$

$$p = 0 \quad \text{at} \quad z = 0 \quad (18)$$

여기서,  $\zeta$ 는 자유수면 변위이다.

포텐셜함수  $\Phi$ 는 선형화 된 Bernoulli 방정식을 만족시키는 것으로 정의하면 다음과 같다.

$$\frac{p}{\rho} + gz = -\frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (19)$$

위의 식을  $x, y$ 에 대하여 미분하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial t} \quad (20)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial y} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y \partial t} \quad (21)$$

수심이 변화하는 완만한 해저면상을 전파하는 주기성 미소진폭파에 대한 수심에 관한 함수는 다음과 같은 함수로 정의할 수 있다.

$$f = \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \quad (22)$$

파랑이 각 주파수  $\sigma$ 를 가지고 시간에 대해 선형적인 것으로 가정하면 다음과 같이 시간과 공간의 함수로 분리할 수 있다.

$$U(x, y, z, t) = fu(x, y)e^{-i\sigma t} \quad (23)$$

$$V(x, y, z, t) = fv(x, y)e^{-i\sigma t} \quad (24)$$

$$W(x, y, z, t) = w(x, y, z)e^{-i\sigma t} \quad (25)$$

$$\Phi(x, y, z, t) = f\phi(x, y, t)e^{-i\sigma t} \quad (26)$$

$$\zeta(x, y, t) = \eta(x, y)e^{-i\sigma t} \quad (27)$$

해저면 전단응력을 표시하는 방법으로 Heaps(1969)와 같이 해저면 전단응력이 해저면에서의 수평유속에 선형적으로 비례하는 것으로 단순화시켜 다음과 같은 식이 된다.

$$\tau_{zx} = -\epsilon\rho U \Big|_{z=-h} = \frac{\epsilon\rho u}{\cosh kh} e^{-i\sigma t} \quad (28)$$

$$\tau_{zy} = -\epsilon\rho V \Big|_{z=-h} = \frac{\epsilon\rho v}{\cosh kh} e^{-i\sigma t} \quad (29)$$

여기서,  $\epsilon(x, y)$ 은 일반적으로  $U, V$ 로부터 공간적 다양성과 위상차를 나타내는 복소공간 마찰계수이다.

식(20), (21)을 식(14), (15)에 대입하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\tau_{zx}}{\partial z} \quad (30)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y \partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\tau_{zy}}{\partial z} \quad (31)$$

식(23), (24), (25), (26), (27)과 식(28), (29)를 식(30), (31)에 대입하고, 수심에 대하여 적분하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$u \int f = \frac{\partial \phi}{\partial x} \int f + \frac{\epsilon u}{i\sigma \cosh kh} \quad (32)$$

$$v \int f = \frac{\partial \phi}{\partial y} \int f + \frac{\epsilon v}{i\sigma \cosh kh} \quad (33)$$

여기서,  $\int f = \int_{-h}^0 f dz = \frac{\tanh kh}{k}$  이다.

위의 식을 정리하면 다음과 같이 된다.

$$u = \lambda \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (34)$$

$$v = \lambda \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad (35)$$

$$\text{여기서, } \lambda = \frac{1}{1 + \frac{ik\epsilon}{\sigma \sinh kh}} \text{ 이다.} \quad (36)$$

마찰계수  $\epsilon$ 는 Chen(1984)이 전단응력의 선형화된 형태로 무차원 공간 해저면 마찰계수  $\beta$ 를 도입하여 다음과 같은 식으로 제시하였다.

$$\epsilon = \beta(\nu\sigma)^{\frac{1}{2}} e^{-i\frac{\pi}{4}} \quad (37)$$

여기서,  $\nu$ 는 동점성계수이다. 해저면 마찰의 위상차  $\left(-\frac{\pi}{4}\right)$ 를 항  $\gamma$ 로 치환한다. 그

리고 경험치로서 속도 축척  $\frac{\sigma a_o}{kh}$ 에 의하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon = \beta \frac{\sigma a_o}{kh} e^{i\gamma} \quad (38)$$

따라서, 계수  $\epsilon$ 을 식(36)에 대입하면  $\lambda$ 는 다음 식이 된다.

$$\lambda = \frac{1}{1 + \frac{i\beta a_o}{h \sinh kh} e^{i\gamma}} \quad (39)$$

따라서 식(23), (24)는 식(34), (35)에 의해 다음과 같은 식을 얻는다.

$$U(x, y, z, t) = \lambda f \frac{\partial \phi}{\partial x} e^{-i\omega t} \quad (40)$$

$$V(x, y, z, t) = \lambda f \frac{\partial \phi}{\partial y} e^{-i\omega t} \quad (41)$$

그리고 식(19)를  $z$ 에 대해 미분하고, 식(16)과 식(26)을 연립하여 정리하면 다음식이 유도된다.

$$W(z, y, z, t) = f \frac{\partial \phi}{\partial z} e^{-i\omega t} \quad (42)$$

위의 식(40), (41), (42)들을 식(13)에 대입하여 정리하면 최종적으로 다음 식을 얻게 된다.

$$\nabla \cdot (\lambda \nabla f \phi) + \frac{\partial^2 f \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (43)$$

그리고, 분산방정식은 다음과 같이 나타낸다.

$$\sigma^2 = gk \tanh kh \quad (44)$$

식(44)를 대신하여 파랑의 비선형성을 고려하기 위하여 다음과 같은 비선형 분산관계식(Kirby and Dalrymple, 1986)을 사용할 수 있다.

$$\sigma^2 = gk [1 + (ka)^2 F_1 \tanh^5 kh] \tanh \{kh + ka F_2\} \quad (45)$$

여기서,

$$F_1 = \frac{\cosh(4kh) - 2 \tanh^2(kh)}{8 \sinh(kh)}$$

$$F_2 = \left( \frac{kh}{\sinh} \right)^4$$

식(43)을 수심에 대해 적분하고 비선형 분산관계인 식(45)를 도입하면 다음과 같은 식이 구해진다.

$$\nabla \cdot (\lambda C C_g \nabla \phi) + \frac{C_g}{C} \sigma^2 \phi = 0 \quad (46)$$

위의 식(46)은 파랑의 비선형성과 마찰력을 포함한 환경사 방정식이다.

#### 4. 외해영역에서의 해석해

직교좌표계에서 입사파가 일직선 해안에 진입할 때 입사파의 포텐셜은 Jacobi-Anger 전개에 의하여 다음과 같이 급수해로 주어진다.

$$\begin{aligned}\phi^I &= -\frac{iga_o}{\sigma} e^{ikr \cos(\theta - \theta^I)} \\ &= -\frac{iga_o}{\sigma} \sum_{n=0}^{\infty} \epsilon_n i^n J_n(kr) \cos n(\theta - \theta^I) \\ &= -\frac{iga_o}{\sigma} \sum_{n=0}^{\infty} \epsilon_n i^n J_n(kr) (\cos n\theta^I \cos n\theta + \sin n\theta^I \sin n\theta)\end{aligned}\quad (47)$$

여기서,  $\epsilon_n$ 은 Newman 계수( $\epsilon_n = 1 : n=0$ ;  $\epsilon_n = 2 : n=1, 2, 3, \dots$ )이다.

직선 해안선의 경우에는 다음과 같이 표현할 수 있는 반사파  $\phi^R$ 이 존재한다.

$$\begin{aligned}\phi^R &= -\frac{iga_o}{\sigma} K_r e^{ikr \cos(\theta + \theta^I)} \\ &= -\frac{iga_o}{\sigma} K_r \sum_{n=0}^{\infty} \epsilon_n i^n J_n(kr) \cos n(\theta + \theta^I) \\ &= -\frac{iga_o}{\sigma} K_r \sum_{n=0}^{\infty} \epsilon_n i^n J_n(K_r) (\cos n\theta^I \cos n\theta - \sin n\theta^I \sin n\theta)\end{aligned}\quad (48)$$

입사파와 반사파의 합은 다음 식으로 제시될 수 있다.

$$\phi^I + \phi^R = -\frac{iga_o}{\sigma} \left( e^{ikr \cos(\theta - \theta^I)} + K_r e^{ikr \cos(\theta + \theta^I)} \right)\quad (49)$$

식(47)과 (48)을 식(49)에 대입하면 다음식을 얻는다.

$$\phi^I + \phi^R = -\frac{iga_o}{\sigma} \left[ (1+K) \sum_{n=0}^{\infty} \epsilon_n i^n J_n(kr) \cos n\theta^I \cos n\theta \right. \\ \left. + (1-K_r) \sum_{n=0}^{\infty} \epsilon_n i^n J_n(kr) \sin n\theta^I \sin n\theta \right] \quad (50)$$

외해 영역  $R$ 에서의 수심  $h$ 가 일정한 것으로 가정 하였으므로 다음의 Helmholtz 방정식을 이용할 수가 있다.

$$\nabla^2 \phi + k^2 \phi = 0 \quad (51)$$

원통좌표계에서 Helmholtz 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \theta^2} + k^2 \phi = 0 \quad (52)$$

위 Helmholtz 방정식의 일반해는 다음과 같다.

$$\Theta(\theta) = \begin{cases} \cos n\theta \\ \sin n\theta \end{cases} \quad (53)$$

$$R(r) = \begin{cases} H_n^{(1)}(kr) \\ H_n^{(2)}(kr) \end{cases} \quad (54)$$

여기서,  $H_n^{(1)}(kr)$ 과  $H_n^{(2)}(kr)$ 은 각각 제 1종과 제 2종의  $n$ 차 Hankel 함수로써 다음 식으로 표시된다.

$$H_n^{(1)}(kr) = J_n(kr) + i Y_n(kr) \quad (55)$$

$$H_n^{(2)}(kr) = J_n(kr) - i Y_n(kr) \quad (56)$$

여기서,  $Y_n(kr)$ 은 제 2종 Bessel 함수이다.

식(55), (56)에서  $n$ 이 고정되고  $|kr| \rightarrow \infty$ 일 때 Hankel 함수를 점근 전개하면 다음 근사식을 얻는다.

$$H_n^{(1)}(kr) = \left(\frac{2}{\pi kr}\right)^{\frac{1}{2}} e^{i\left(kr - \frac{n\pi}{2} - \frac{\pi}{4}\right)}, \quad 0 < \theta < \pi \quad (57)$$

$$H_n^{(2)}(kr) = \left(\frac{2}{\pi kr}\right)^{\frac{1}{2}} e^{-i\left(kr - \frac{n\pi}{2} - \frac{\pi}{4}\right)}, \quad -\pi < \theta < 0 \quad (58)$$

따라서, 무한영역  $R$ 은 반원형태이므로  $H_n^{(2)}(kr)$ 은 제외되어야 한다.

수심을 일정하게 가정한 무한영역  $R$ 에서의 해저면 마찰에 의한 영향을 무시하면, 복소변수를 가진 Hankel 함수의 계산을 피할 수 있을 뿐만 아니라 입사파도 쉽게 입사시킬 수 있다. 원해역에서의 산란파에 대한 해석하는 다음과 같다.

$$\phi^S = -\frac{iga_o}{\sigma} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{H_n(kr)}{H_n kr_A} (\alpha_n \cos n\theta + \beta_n \sin n\theta) \quad (59)$$

여기서,  $\alpha_n = 0, 1, 2, \dots (n = 1, 2, \dots), \beta_n = 0, 1, 2, \dots (n = 1, 2, \dots)$ 로서 결정되어야 할 상수이고,  $r_A$ 는 Fig. 1에 나타낸 것처럼 근해역  $A$ 의 반경이다. 반무한 원해역에서 산란파가 직선 해안선에 완전반사를 가정하면, 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$\phi^S = -\frac{iga_o}{\sigma} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{H_n(kr)}{H_n(kr_A)} \alpha_n \cos n\theta \quad (60)$$

## 5. 범함수의 유도

Fig. 1에서 근해역  $A$ 는 유한요소 근사를,  $\partial A$ 와 연결된 원해역  $R$ 과의 접합조건이 만족되도록 적절한 범함수를 갖는 변분원리에 의하여 경계치 문제를 직접 푸는 대신에 관련된 범함수  $F(\phi)$ 가 가지는 등가문제( $\delta F=0$ )를 만족시키는 조건으로 전환하여 풀 수 있다. 이러한 문제에 대한 범함수는 복소 변분  $\delta\phi$ 에 의해 지배방정식을 가중적분하고 Green의 제 1정리와 발산정리를 도입하여 경계조건을 선적분 또는 면적분에 대입함으로써 유도될 수 있다.

영역  $R$ 은  $\partial A$ 외측의 모든 원해영역을 포함한다. 편의상 경계  $\partial A$ 는 반원을 선택하였고 수심이 이들을 가로질러서 연속적이며, 영역  $R$ 에서는 수심이 일정한 것으로 한다. 그리고 경계  $\partial B$ 가 육지 경계면을 나타낼 때 경계값 문제는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla \cdot (\lambda C C_g \nabla \phi) + \frac{C_g}{C} \sigma^2 \phi = 0 \quad \text{in } A, R \quad (61)$$

$$\phi_R = \phi_A \quad \text{on } \partial A \quad (62)$$

$$\left( \lambda C C_g \frac{\partial \phi}{\partial n_A} \right)_R = \left( \lambda C C_g \frac{\partial \phi}{\partial n_A} \right)_A \quad \text{on } \partial A \quad (63)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad \text{on } \partial B \quad (64)$$

여기서, 아래첨자  $A, R$ 은 각각 영역  $A, R$ 에서의 값을 나타내며,  $\vec{n}_n$ 은 영역  $A$ 에서 외향인 단위수직벡터이다. 이하에서는 모든 면적적분에서 면적요소에 대한 기호  $dA$ 와 모든 선적분에서 선 요소에 대한 기호  $dL$ 을 생략하기로 한다.

$$\begin{aligned}
\delta F(\phi) = & - \iint_A \left( \nabla \cdot (\lambda C C_g \nabla \phi) + \frac{C_g}{C} \sigma^2 \phi \right) \delta \phi \\
& + \int_{\partial B} \lambda C C_g \frac{\partial \phi_A}{\partial n_A} \delta \phi_A \\
& + \int_{\partial A} \left( \left( \lambda C C_g \frac{\partial \phi}{\partial n_A} \right)_A - \left( \lambda C C_g \frac{\partial \phi}{\partial n_A} \right)_R \right) \delta \phi_A \\
& + \int_{\partial A} \lambda C C_g (\phi_R - \phi_A) \frac{\partial \delta \phi_R}{\partial n_A} = 0
\end{aligned} \tag{65}$$

이는 임의의  $\delta\phi$ (즉,  $\delta\phi_A$ 와  $\delta\phi_R$ )에 대해  $\delta F$ 가 0이 됨을 나타낸다. 여기서 식(61)이 영역  $A$ 에서 Euler 방정식이고, 식(63), (64)는 자연 경계조건임을 의미하는 형태로 기술되었다. 적분 앞의 부호는 식(65)의 좌변이  $\delta\{ \}$ 로 변형될 수 있도록 적절히 선택하였다.

한편, 다음과 같이  $\phi_R$ 이 식(61)과 방사조건을 각각 만족하는 것으로 가정한다.

$$\nabla \cdot (\lambda C C_g \nabla \phi_R) + \frac{C_g}{C} \sigma^2 \phi_R = 0 \quad \text{in } R \tag{66}$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} (r)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{\partial}{\partial r} - ik \right) \phi_R^S = 0 \quad \text{along } \partial R \tag{67}$$

위의 식(66)과 (67)의 변분을 취함으로써  $F$ 를 찾으려면 다음과 같다.

$$\iint_R (\phi - \phi^I) \left( \nabla \cdot (\lambda C C_g \nabla \delta(\phi - \phi^I)) + \frac{C_g}{C} \sigma^2 \delta(\phi - \phi^I) \right) = 0 \tag{68}$$

$$- \int_{\partial R} \lambda C C_g (\phi - \phi^I) \left( \frac{\partial \delta(\phi - \phi^I)}{\partial n_R} - ik \delta(\phi - \phi^I) \right) = 0 \tag{69}$$

여기서,  $\phi^I$ 는 입사파 포텐셜이므로  $\delta\phi^I = 0$ 이고, 산란파 포텐셜  $\phi^S = \phi - \phi^I$ 임에 주의해야 한다. 식(68)과 (69)를 식(65)에 더하면 다음 식을 얻는다.

$$\begin{aligned}
\delta F(\phi) = & - \iint_A \left( \nabla \cdot (\lambda CC_g \nabla \phi) + \frac{C_g}{C} \sigma^2 \phi \right) \delta \phi \\
& + \iint_R (\phi - \phi') \left( \nabla \cdot (\lambda CC_g \nabla \delta(\phi - \phi')) + \frac{C_g}{C} \sigma^2 \delta(\phi - \phi') \right) \\
& + \int_{\partial B} \lambda CC_g \frac{\partial \phi_A}{\partial n_A} \delta \phi_A \\
& + \int_{\partial A} \left( \left( \lambda CC_g \frac{\partial \phi}{\partial n_A} \right)_A - \left( \lambda CC_g \frac{\partial \phi}{\partial n_A} \right)_R \right) \delta \phi_A \\
& + \int_{\partial A} \lambda CC_g (\phi_R - \phi_A) \frac{\partial \delta \phi_R}{\partial n_A} \\
& - \int_{\partial R} \lambda CC_g (\phi - \phi') \left( \frac{\partial \delta(\phi - \phi')}{\partial n_R} - ik \delta(\phi - \phi') \right) = 0
\end{aligned} \tag{70}$$

발산정리를 적용하면 다음 식들을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
\delta \iint_{A'} \frac{1}{2} \lambda CC_g (\nabla \phi)^2 & = \iint_{A'} \lambda CC_g \nabla \phi \cdot \nabla \delta \phi \\
& = \iint_{A'} [\nabla \cdot (\lambda CC_g \delta \phi \nabla \phi) - \delta \phi \nabla \cdot (\lambda CC_g \nabla \phi)] \\
& = - \iint_{A'} \delta \phi \nabla \cdot (\lambda CC_g \nabla \phi) + \int_{\partial A'} \delta \phi \lambda CC_g \frac{\partial \phi}{\partial n} \\
& = \iint_{A'} [\nabla \cdot (\lambda CC_g \phi \nabla \delta \phi) - \phi \nabla \cdot (\lambda CC_g \nabla \delta \phi)] \\
& = - \iint_{A'} \phi \nabla \cdot (\lambda CC_g \nabla \delta \phi) + \int_{\partial A'} \phi \lambda CC_g \frac{\partial \delta \phi}{\partial n}
\end{aligned} \tag{71}$$

여기서,  $A'$ 은 경계로서  $\partial A'$ 를, 그리고 외향 수직단위벡터로  $\bar{n}$ 을 가지는 임의의 영역이다. 따라서,  $A'$ 에 대한 면적적분은 식(71)과 같이 2개의 다른 형태로 나타낼 수가 있다.

그리고 식(71)을 영역  $A$ 와  $R$ 상의 면적적분에 대해 적용한다. 그러면, 다음 식들이 구해진다.

$$\begin{aligned}
& - \iint_A \left( \nabla \cdot (\lambda CC_g \nabla \phi) + \frac{C_g}{C} \sigma^2 \phi \right) \delta \phi + \int_{\partial A + \partial B} \lambda CC_g \frac{\partial \phi_A}{\partial n_A} \delta \phi_A \\
& = \delta \iint_A \frac{1}{2} \left( \lambda CC_g (\nabla \phi)^2 - \frac{C_g}{C} \sigma^2 \phi^2 \right)
\end{aligned} \tag{72}$$

$$\begin{aligned}
& \iint_R (\theta - \theta^I) \left( \nabla \cdot (\lambda CC_g \nabla \delta(\phi - \phi^I)) + \frac{C_g}{C} \sigma^2 \delta(\phi - \phi^I) \right) \\
& - \int_{\partial R + \partial A} \lambda CC_g \frac{\partial(\phi_R - \phi^I)}{\partial n_R} \delta(\phi_R - \phi^I) + \int_{\partial R} ik\lambda CC_g \delta(\phi - \phi^I)^2 \\
& = -\delta \iint_R \frac{1}{2} \left( \lambda CC_g [\nabla \cdot (\phi - \phi^I)]^2 - \frac{C_g}{C} \sigma^2 (\phi - \phi^I)^2 \right) \\
& + \int_{\partial R} ik\lambda CC_g \delta(\phi - \phi^I)^2
\end{aligned} \tag{73}$$

위의 식(72), (73)과 아래의 사실들을 이용하면

$$\frac{\partial}{\partial n_A} = \frac{\partial}{\partial n_R} \quad \text{along } \partial A \tag{74}$$

$$\frac{\partial}{\partial n_A} = \frac{\partial}{\partial n_B} \quad \text{along } \partial B \tag{75}$$

식(70)으로부터 다음 식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
\delta F(\phi) & = \delta \iint_A \frac{1}{2} \left( \lambda CC_g (\nabla \phi)^2 - \frac{C_g}{C} \sigma^2 \phi^2 \right) \\
& - \delta \iint_R \frac{1}{2} \left( \lambda CC_g [\nabla \cdot (\phi - \phi^I)]^2 - \frac{C_g}{C} \sigma^2 (\phi - \phi^I)^2 \right) \\
& - \delta \int_{\partial A} \lambda CC_g (\phi - \phi^I) \frac{\partial \phi_R}{\partial n_A} \\
& - \delta \int_{\partial R} \frac{ik\lambda CC_g}{2} (\phi - \phi^I)^2
\end{aligned} \tag{76}$$

식(76)을 구하는 데는  $\delta \phi^I = 0$ 이 이용되었다. 식(76)으로부터 범함수  $F$ 는 다음

과 같다.

$$\begin{aligned}
 \delta F(\phi) = & \iint_A \frac{1}{2} \left( \lambda C C_g (\nabla \phi)^2 - \frac{C_g}{C} \sigma^2 \phi^2 \right) \\
 & - \iint_R \frac{1}{2} \left( \lambda C C_g [\nabla \cdot (\phi - \phi^I)]^2 - \frac{C_g}{C} \sigma^2 (\phi - \phi^I)^2 \right) \\
 & - \int_{\partial A} \lambda C C_g (\phi_A - \phi^I) \frac{\partial \phi_R}{\partial n_A} \\
 & + \int_{\partial R} \frac{i k \lambda C C_g}{2} (\phi_R - \phi^I)^2
 \end{aligned} \tag{77}$$

식(77)의 제 2항에 Green의 제 1정리를 적용하면 다음식이 나타내어진다.

$$\begin{aligned}
 & \iint_R \frac{1}{2} \left( \lambda C C_g [\nabla \cdot (\phi - \phi^I)]^2 - \frac{C_g}{C} \sigma^2 (\phi - \phi^I)^2 \right) \\
 & = \int_{\partial A + \partial R} \frac{1}{2} \lambda C C_g (\phi_R - \phi^I) \frac{\partial (\phi_R - \phi^I)}{\partial n_R}
 \end{aligned} \tag{78}$$

식(78)을 식(77)에 대입하고 방사조건에 대한 식(69)을 사용하면 범함수를 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \delta F(\phi) = & \iint_A \frac{1}{2} \left( \lambda C C_g (\nabla \phi)^2 - \frac{C_g}{C} \sigma^2 \phi^2 \right) \\
 & + \iint_{\partial A} \lambda C C_g \left( \frac{1}{2} (\phi_R - \phi^I) - (\phi_A - \phi^I) \right) \frac{\partial \phi_R}{\partial n_A} \\
 & - \int_{\partial A} \frac{1}{2} \lambda C C_g (\phi_R - \phi^I) \frac{\partial \phi^I}{\partial n_A}
 \end{aligned} \tag{79}$$

또는 상기 식의 좌변 제 2항과 제 3항을 정리하면 동일하게 다음 식을 얻는다.

$$\begin{aligned}
\delta F(\phi) = & \iint_A \frac{1}{2} \left( \lambda C C_g (\nabla \phi)^2 - \frac{C_g}{C} \sigma^2 \phi^2 \right) & (80) \\
& + \iint_{\partial A} \frac{1}{2} \lambda C C_g (\phi_R - \phi^I) \frac{\partial(\phi_R - \phi^I)}{\partial n_A} \\
& - \int_{\partial A} \lambda C C_g \phi_A \frac{\partial(\phi_R - \phi^I)}{\partial n_A} \\
& - \int_{\partial A} \lambda C C_g \phi_A \frac{\partial \phi^I}{\partial n_A} \\
& + \int_{\partial A} \lambda C C_g \phi^I \frac{\partial(\phi_R - \phi^I)}{\partial n_A} \\
& + \int_{\partial A} \lambda C C_g \phi^I \frac{\partial \phi^I}{\partial n_A}
\end{aligned}$$

모든 적분들이  $A$ 의 내부 혹은  $\partial A$ 를 연하여 산정되는 점이 강조되며, 따라서 변분원리는 국부적인 원리이다. 변분 수식화에서 경계면에서의 에너지 흡수를 설명하기 위해서는 다음과 같은 항이 포함되어야 한다.

$$- \int_{\partial B} \frac{1}{2} C C_g \alpha \phi^2 \quad (81)$$

따라서 최종적인 범함수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
F(\phi) = & \iint_A \frac{1}{2} \left( \lambda C C_g (\nabla \phi)^2 - \frac{C_g}{C} \sigma^2 \phi^2 \right) & I_1 \\
& + \iint_{\partial A} \frac{1}{2} \lambda C C_g (\phi_R - \phi^I) \frac{\partial(\phi_R - \phi^I)}{\partial n_A} & I_2 \\
& - \int_{\partial B} \frac{1}{2} C C_g \alpha \phi^2 & I_3 \\
& - \int_{\partial A} \lambda C C_g \phi_A \frac{\partial(\phi_R - \phi^I)}{\partial n_A} & I_4 \\
& - \int_{\partial A} \lambda C C_g \phi_A \frac{\partial \phi^I}{\partial n_A} & I_5
\end{aligned} \quad (82)$$

$$+ \int_{\partial A} \lambda C C_g \phi^I \frac{\partial(\phi_R - \phi^I)}{\partial n_A} \quad I_6$$

$$+ \int_{\partial A} \lambda C C_g \phi^I \frac{\partial \phi^I}{\partial n_A} \quad I_7$$

차후 영역  $A$ 는 유한요소로 세분되게 된다. 각 요소내의 근사해가 미지절점 포텐셜로 이루어진 보간함수에 의해 구해지게 된다. 반면, 영역  $R$ 에서는 파랑 포텐셜이 미지계수에 의해 해석적으로 구해지게 된다.



### III. 유한요소 정식화

#### 1. 유한요소법의 개요

유한요소법이란 영역을 요소라 부르는 유한한 크기를 갖는 도형의 집합으로 치환하여, 미분 방정식의 근사해를 얻는 수치계산법의 일종이다. 대상영역이 1차원이라면 유한 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 근사모델은 연립 대수 방정식으로 되어 있고, 이것을 풀어서 미분 방정식으로 주어진 경계치 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. 1에서의 영역  $R$ 에서는 급수해를 가진 계수형 요소를 선택한다. 이제 영역  $A$ 를 3개의 절점을 가진 미소삼각형 요소로 분할한다. Fig. 2의  $e$ 번째 요소에 삼각형 요소를 선정한다. 삼각형의 꼭지점을 절점으로 택하여 반시계방향으로 각각  $\phi_1^e$ ,  $\phi_2^e$ ,  $\phi_3^e$ 으로 번호를 부여한다. 각 절점번호에 대응하는 좌표를  $(x_1^e, y_1^e)$ ,  $(x_2^e, y_2^e)$ ,  $(x_3^e, y_3^e)$ 로 한다. 삼각형  $e$ 상의 함수  $\phi_i^e$ 를  $x$ 와  $y$ 의 1차식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\phi_i^e = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y \quad (83)$$

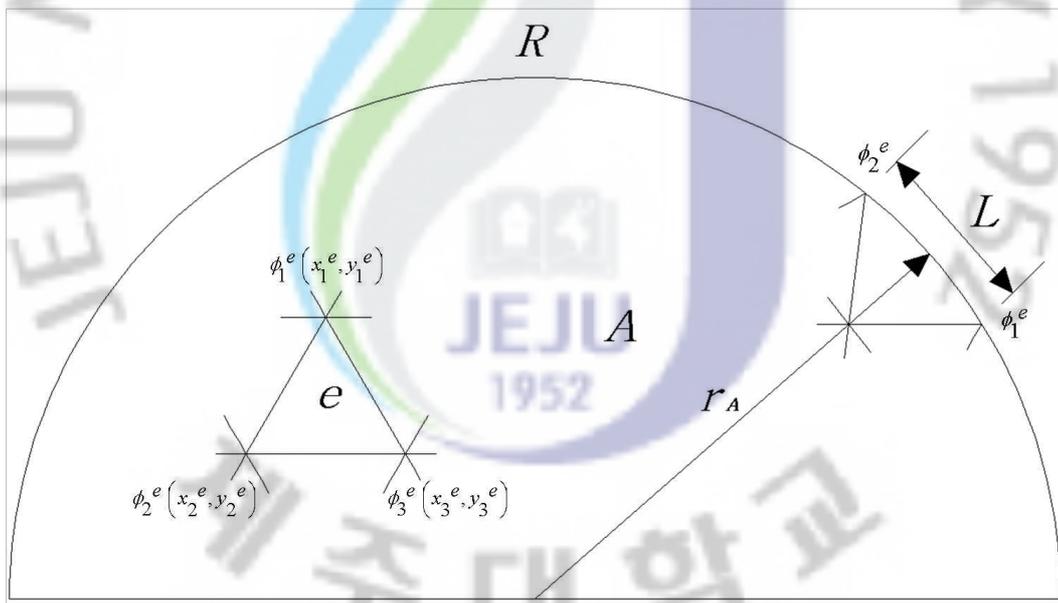


Fig. 2. Typical boundary and interior elements

여기서,  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 는 각 요소마다 결정되는 계수이고, 각 절점마다의 연립방정식을 행렬로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{vmatrix} \phi_1^e \\ \phi_2^e \\ \phi_3^e \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & x_1^e & y_1^e \\ 1 & x_2^e & y_2^e \\ 1 & x_3^e & y_3^e \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{vmatrix} \quad (84)$$

여기서,  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 에 대하여 풀기 위해서 행렬  $\begin{vmatrix} 1 & x_1^e & y_1^e \\ 1 & x_2^e & y_2^e \\ 1 & x_3^e & y_3^e \end{vmatrix}$ 의 역행렬을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{vmatrix} 1 & x_1^e & y_1^e \\ 1 & x_2^e & y_2^e \\ 1 & x_3^e & y_3^e \end{vmatrix}^{-1} = \frac{1}{2\Delta^e} \begin{vmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{vmatrix} \quad (85)$$

여기서,

$$\begin{aligned} a_1 &= x_2^e y_3^e - x_3^e y_2^e & b_1 &= y_2^e - y_3^e & c_1 &= x_3^e - x_2^e \\ a_2 &= x_3^e y_1^e - x_1^e y_3^e & b_2 &= y_3^e - y_1^e & c_2 &= x_1^e - x_3^e \\ a_3 &= x_1^e y_2^e - x_2^e y_1^e & b_3 &= y_1^e - y_2^e & c_3 &= x_2^e - x_1^e \end{aligned} \quad (86)$$

또,  $\Delta^e$ 는 삼각형의 면적이다.

$$\Delta^e = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & x_1^e & y_1^e \\ 1 & x_2^e & y_2^e \\ 1 & x_3^e & y_3^e \end{vmatrix} \quad (87)$$

역행렬을 식(84)의 양변에 곱하면, 다음과 같이  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 가 구해진다.

$$\begin{vmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{vmatrix} = \frac{1}{2\Delta^e} \begin{vmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \phi_1^e \\ \phi_2^e \\ \phi_3^e \end{vmatrix} \quad (88)$$

위의 식(88)에서 얻어진  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 를 식(82)에 대입하면, 삼각형 요소  $e$ 상의 미지수는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \phi^e &= \frac{1}{2\Delta^e}(a_1 + b_1x + c_1y)\phi_1^e \\ &+ \frac{1}{2\Delta^e}(a_2 + b_2x + c_2y)\phi_2^e \\ &+ \frac{1}{2\Delta^e}(a_3 + b_3x + c_3y)\phi_3^e \end{aligned} \quad (89)$$

식(89)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi^e = N_1\phi_1^e + N_2\phi_2^e + N_3\phi_3^e \quad (90)$$

여기서, 보간함수는 다음과 같다.

$$N_i^e = \frac{(a_i + b_ix + c_iy)}{2\Delta^e} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (91)$$

위의 식들에서  $(x_i^e, y_i^e)$ 는 Fig. 2에서의 요소의 절점  $i$ 의 좌표이다. 보간함수  $N_i^e$ 는 좌표계에서 선형함수이고 영역  $A$ 에서 각각의 3절점 삼각형 요소의 해를 근사화 하는데 사용된다.

### 3. 수치계산의 최적화

#### 3.1 수심에 따른 격자최적화 기법

본 연구에서 전처리 기법으로 사용한 자동요소생성기법(김 등, 2000)을 사용하여 유한요소망을 생성하는 경우 상대적인 크기의 요소분할이 가능하다. 즉, 입력 절점의 개수에 의해 분할밀도를 다르게 할 수 있다. 그러나 이러한 분할은 수심에 따른 정확한 분할이 이루어지지 않고, 과도한 분할을 생성시킬 우려가 있다. 이러한 문제로 인하여 본 연구에서는 각 절점에서의 수심을 이용하여 그 절점에서의 파장을 계산한 후 사용자가 입력한 분할개수 만큼 분할이 이루어 졌는지 확인한 후 만족할 때까지 분할과 결합을 병행하여 최적의 요소크기로 분할이 이루어지도록 계량하였다. 이로써, 불필요한 요소분할이 최소화 되었고, 이에 따라 계산용량과 계산속도가 현저히 개선되었다.

### 3.2 개별요소법을 이용한 삼각망 생성기법

수치해석을 수행할 경우 해석영역의 특성에 따라 적절히 요소를 배치하여 모의하는 것이 필요하다. 해석영역을 삼각형 격자망으로 분할할 경우 격자의 형태는 정삼각형에 가깝게 하여 계산의 정확도를 높이고 대상영역에 분할된 격자의 총 개수를 최소화 함으로서 계산 수행시간을 단축시킬 수 있도록 적절한 크기의 요소를 배치할 필요가 있다. 최근까지 수치모의를 위한 최적의 삼각망 작성기법에 대해 국내 및 국외의 수많은 연구자들에 의해 많은 연구가 수행되었다(김 등, 2000; 정과 김, 2001a, b; Shimada, 1993; Shimada and Gossard, 1998).

기존의 자동요소법은 우수한 격자 품질을 얻거나 수심지형이 복잡한 해안에서 수심을 보간하는데 매우 어려운 점이 있다. 이런 부분을 보완하기 위하여 개발한 입자를 이용한 격자 생성방법은 외부경계와 내부절점들을 절점이 아닌 입자간의 반발력과 인장력을 통한 spring and dashpot system과 같은 개념을 적용하여 절점위치를 제어하여 보다 좋은 질의 격자를 얻을 수 있다. 그리고 수심에 따른 차등분할이 가능하며 Laplace보간을 함으로써 보다 우수한 삼각형 격자 품질과 수심이 실제지형에 가깝게 표현될 수 있는 장점을 가지고 있다.

그래서, 개별요소법을 이용하여 수심에 따른 절점 배치를 선행하고, Delaunay 삼각기법을 이용하여 절점을 연결하여 삼각형 격자를 생성한 후에 Laplace 보간을 수행하고 최종적으로 얻어진 격자망에 지형을 보간함으로써 대상영역의 형상과 지형을 고려한 삼각형 자동생성 기법을 개발하였다.

### 3.3 밴드폭 최적화 기법

본 연구에서 전처리 기법으로 사용한 자동요소생성기법(김 등, 2000)은 Delaunay 삼각분할법을 기본으로 한다. 이 분할법을 사용하여 유한요소망을 생성하는 경우 요소와 절점번호가 불규칙하게 배열되므로 이로부터 얻어지는 강성행렬은 밴드폭이 매우 큰 희소행렬이 되므로 이를 실제해석에 사용하는 것은 비효율적이다. 따라서 이러한 요소망은 밴드폭 최소화 기법을 사용하여 밴드폭을 최소한으로 줄여야 한다.

본 연구에서는 현재 널리 쓰이고 있는 Reverse-Cuthill Mckee의 방법을 사용하였다. 이 방법에서는 사용자가 요소망 구성시 사용한 가장자리를 시작절점으로 하며, 밴드폭을 최적화시켜 얻은 결과는 기존에 부여된 절점번호 자체를 처음부터 재배열한다. 이렇게 재배열된 후의 강성행렬의 밴드폭은 상당히 작게 나타났고, 이로 인해 수치계산용량 및 계산시간이 현저하게 단축되었다.

## IV. 파고분포해석 및 검증

파고분포해석에 대한 타당성을 검증하기 위하여 비선형 모형항만에 대해 본 수치모형에 의한 계산값과 다른 연구자들의 계산값 및 실험값과 비교를 하였다. 그 결과, 파랑의 비선형성을 고려한 모형이 선형만을 고려한 모형보다 다른 연구자들의 실험결과 및 수치해석결과와 잘 일치하여 본 모형의 타당성이 검증되었고 이를 토대로 본 수치해석모형을 이용하여 주문진항에 대하여 계산하였다.

### 1. 비선형 모형항만

본 연구에서 비선형성을 고려한 수치모형을 검증하기 위하여 천뢰 위로 전달되는 파를 대상으로 Berkhoff et al.(1982)이 사용한 실험모형과 동일한 조건으로 수치모의를 수행하였다.

이 모형은 완만한 저면경사와 중앙에 설치된 천뢰로 인해 파랑의 비선형성이 강하게 나타나는 현상을 보이게 된다. Fig. 3에 실험모형의 형상과 재원을 나타낸다. 입사파의 주기와 진폭은 각각 1sec와 0.232m이고 경계조건으로 양측면에 대해서는 완전반사조건, 그리고 파의 전파방향 끝단에서는 완전 흡수조건을 적용하였다. 저면마찰계수는 0.0으로 전 구간에 대해 동일하게 적용하였다. 유한요소는 52,403개의 절점과 104,709개의 요소 한 파장당 10개 이상의 요소를 포함하도록 분할하였다.

Fig. 4에서 보여지는 바와 같이 세로축은 증폭비이고, 가로축은 해석범위내의 수평단면의 거리이다. Fig. 3에서 나타내는 것과 같이 세 가지 비교단면인 Line A-A', Line B-B', Line C-C' 단면에 대한 선형해석결과는 Berkhoff et al.(1982)의 실험결과에 비하여 재현성이 다소 낮게 나타나고 있지만, 비선형성을 고려한 해석결과는 실험결과 및 Panchang et al.(1998)에 의해 수행된 수치해석 결과와 일치하고 있음을 알 수 있다.

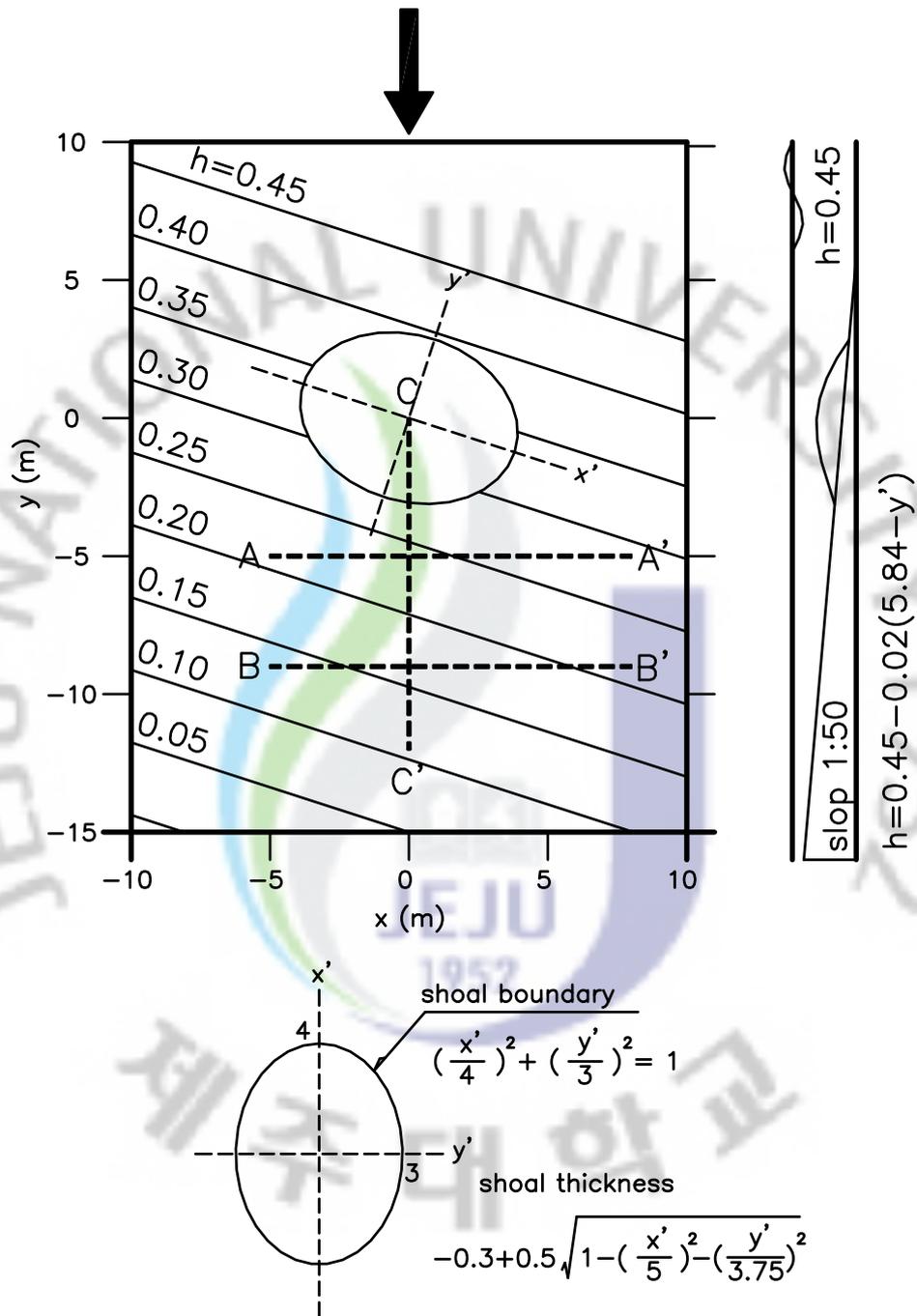


Fig. 3. Modeled domain of Berkhoff et al.(1982)

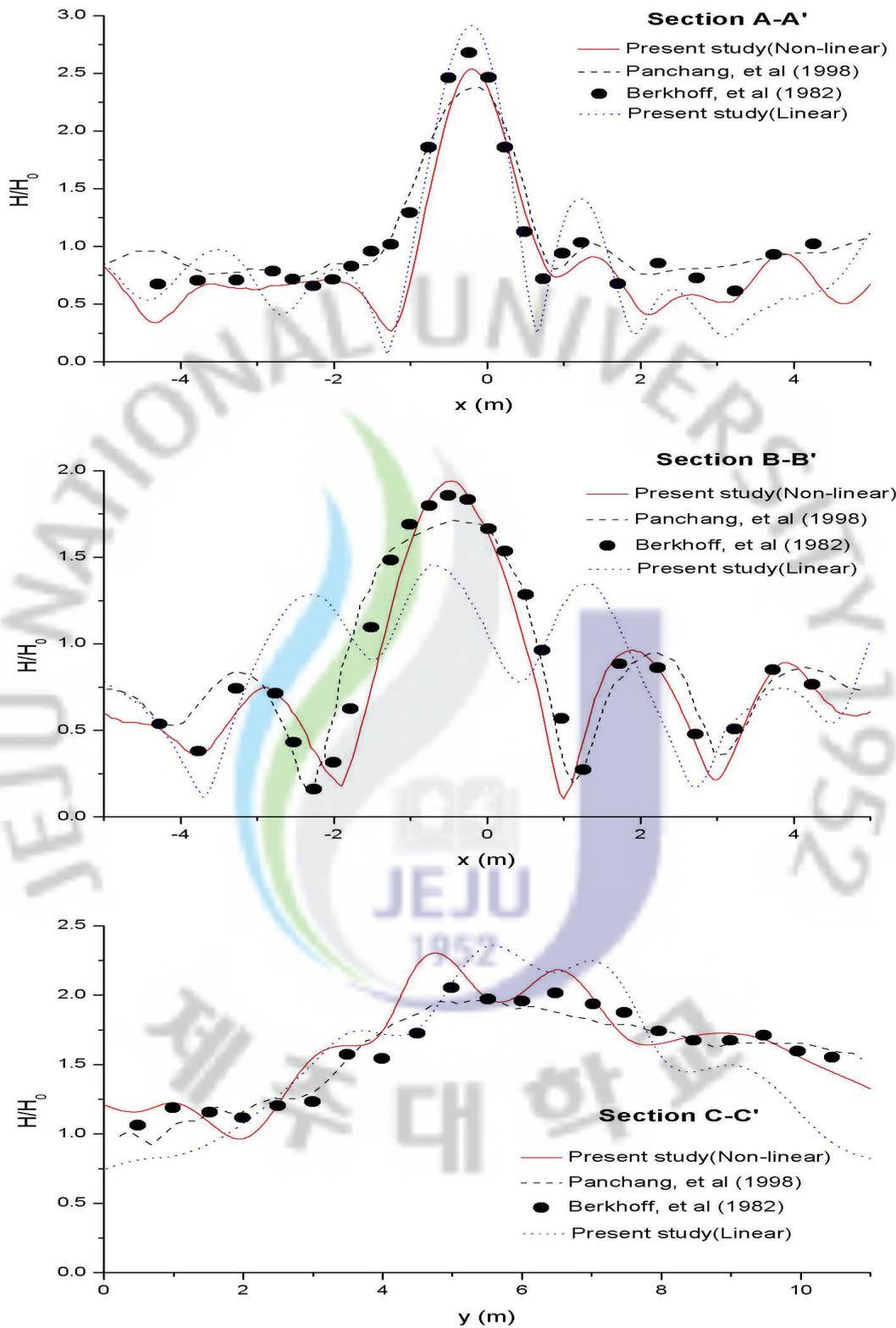


Fig. 4. Comparison of relative wave height distribution in shoal

## 2. 주문진항의 항내과고분포해석

방파제란 1차적으로 파력을 차단함으로써 항내의 정온성 확보에 중점을 두고 설계, 시공되기 때문에 방파제로 둘러싸인 수역은 정온성은 확보되지만, 폐쇄성이 강하게 되어 수질악화가 문제시 되고 있다. 이와 같이 폐쇄성 수역의 수질개선을 목적으로 해수교환기능을 가지는 해수교환방파제에 대한 항만 공사가 증가하고 있다. 현재 해수교환방파제가 설치되어 있는 대표적인 항만은 우리나라의 동해에 위치한 주문진항이다(Fig. 5). 주문진항은 항 주위의 시설에 의한 생활오폐수가 유입되면 항의 길이가 길고 폭이 좁아 해수순환의 어려움이 있어 항내 수질이 오염되어 항내의 해수를 순환시키기 위하여 해수교환방파제가 설치되었다.

해수교환방파제의 주목적은 파랑을 차폐하는 방파기능이고, 부가적으로 요구되는 것이 해수의 순환기능이다. 주문진항은 Fig. 6에서 보여지는 바와 같이 항내의 수심은 2~7m로 비교적 완만하고 얇다. 방파제의 길이는 920m이고, 항내의 수면적은 1,290,000m<sup>3</sup>이다.

우리나라에는 아직 다기수로가 설치된 항만이나 어항은 없다. 기존의 해수교환방파제는 유입수의 항내 유출이 방파제의 기부측에 위치하여 유선이 주로 항입구쪽으로 바로 형성되기 때문에 항내의 해수순환에 한계가 있다. 그러나 다기수로는 해수유입시설로부터 안벽을 따라 수로를 건설하여 항내의 최종 유출구를 항내 안쪽 수역에 배치함으로써 항내의 해수순환 효과를 증대시킬 수 있는 장점을 가진다.

현재 해수교환방파제가 설치되어 항내 정온성이 확보되어 있는 주문진항은 이상 파랑 내습시 해수교환방파제를 통한 다량의 해수유입이 발생함으로써 항내 정온도에 좋지 않은 영향이 발생할 가능성이 있다. 그러므로 해수교환방파제가 설치되어 있는 주문진항의 과고분포를 해석하고, 주문진항에 다기수로를 설치하였을 때의 항내 과고분포를 해석하여 비교해 보았다.

주문진항에 입사파와 해수교환방파제를 통해 유입되는 해수로 인한 복합적인

항내 파고분포를 예측하기 위하여 Fig. 7과 같이 삼각형 유한요소로 분할하였다. 최적의 분할이 이루어 질 수 있도록 항내의 제일 얇은 물양장 부근의 수심이 2m와 항외의 수심이 11m인 것을 고려하여 수심이 얇은 부분은 격자간격이 작은 소분할이 되도록 하고 수심이 상대적으로 깊은 부분은 격자 간격이 큰 대분할이 되도록 차등분할을 실시하였다. 분할된 유한요소의 요소수는 26,239개, 절점수는 13,487이다. 요소의 분할은 Kim과 Hur(2002 b)는 통상 파랑 해석에서 파장당 요소비는 약 12 이상이 바람직하다는 조건을 만족하도록 분할하였다.

해수교환시설을 통한 유입유량은  $3.5 \sim 5.8m^3/s$ (동해지방해양수산청, 2005)이고, 반사계수는 직립구조인 경우에 0.9, 자연 상태 그대로인 경우에 0.2, 그리고, 소파 구조인 경우에 0.4로 하였고(김 등, 2004), 그리고, 저면마찰계수는 0.02(김, 2002)로 하였다. 본 연구에서는 해수교환방파제와 대기수로를 통한 이상 파랑 유입시에 대하여 Table. 1에서 보여지는 바와 같이 3가지 경우에 대하여 항내파고분포를 수치계산하였다.

Table. 1 Incident wave conditions

	Wave height(m)	Period(sec)	Direction( $\theta$ )	Flux( $m^3/s$ )
Case-1	8.1	14	NE	4.66
Case-2	8.1	14	NE	14.10
Case-3	8.1	14	NE	28.20

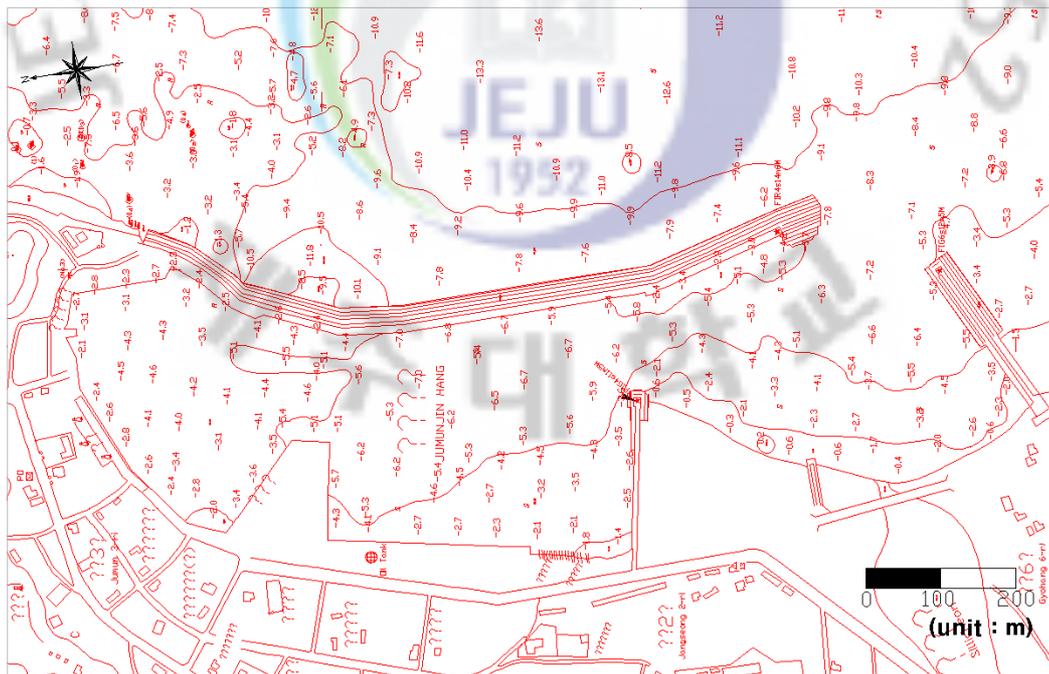


Fig. 5. Jumunjin Fishery Port(JFP)

## 2.1 해수교환방파제가 설치된 주문진항의 항내파고분포해석

항만의 정온도는 대상부두에서 하역한계파고를 넘는 항내파고의 출현율을 100%에서 제외한 값이다. 하역한계파고는 안벽의 설비나 이용목적, 선박의 제원과 파의 주기, 파향 등에 의해서 정하므로 일률적으로 정할 수가 없다. 그러나 대략 유의파고값으로  $0.5m \sim 1.0m$  정도를 참고값으로 하여 사용할 수도 있다(해양수산부, 1999).

해수교환방파제가 없는 경우와 Table 1의 각 Case들에 대하여 수치해석한 결과를 Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10, Fig. 11에 항내파고분포를 나타내었다.

Fig. 8에 보여지는 바와 같이 해수교환방파제가 없는 경우 외해에서 침입한 파랑으로 인해 항내 안쪽의 물양장 부근에서  $0.1m$  정도의 파고들이 존재하므로 항내의 정온이 잘 유지됨을 알 수 있다. 그러나 Fig. 9에 보여지는 바와 같이 해수교환방파제가 설치된 경우, 해수교환방파제를 통하여 유입되는 외해수의 영향으로 인해 해수교환방파제가 설치되지 않은 경우보다 항내 안쪽의 물양장 부근에 존재하지 않았던 다소 높은 파고들이 발생되고 파고분포의 영역이 확장되는 것을 알 수 있다.

그리고, Fig. 10에 보여지는 바와 같이 해수교환방파제를 통하여 유입되는 외해수가 증가하면, Case-1의 경우의 계산 결과보다  $0.2m \sim 0.4m$  정도의 더 높은 파고분포로 인하여 항내의 정온이 불안해지기 시작하는 것을 알 수 있고, Fig. 11에 Case-3 경우의 계산 결과에서 알 수 있듯이 항내 여러 부근에서  $0.5m$  이상의 파고들이 발생하기 때문에 어항으로써의 기능, 즉, 선박의 입·출항이나 정박에 영향을 미쳐 어항으로써의 기능을 상실하고 항내 정온이 다소 악화되는 것을 알 수 있다. 이는 이상 파랑 내습시 해수교환방파제를 통해 유입되는 유량이 증가하고 이로 인하여 항내의 유출구 주변의 유속이 증가하기 때문으로 판단된다.

해수교환방파제가 없는 경우 계산되어진 3차원 파형을 Fig. 12에 나타내었으며, 해수교환방파제가 설치된 경우, Table 1의 각각의 Case들에 대하여 계산된 3차원 파형을 Fig. 13, Fig. 14, Fig. 15에 나타내었다. Fig. 12에 보여지는 바와 같이 침입한 파랑의 진행방향과 회절 및 굴절현상들이 잘 나타나 있기 때문에 육안으로도 쉽게 파의 진행 상황을 파악할 수 있고, Fig. 13, Fig. 14, Fig. 15에서

보여지는 바와 같이 해수교환방과제를 통해 유입되는 외해수의 유량증가로 인하여 항내의 과형이 눈에 띄게 변화하는 것을 알 수 있다.

그리고, 해수교환방과제가 없는 경우 물입자 벡터도를 Fig. 16에 나타내었으며, 해수교환방과제가 설치된 경우, Table 1에 각각의 Case들에 대하여 계산된 물입자 벡터도를 Fig. 17, Fig. 18, Fig. 19에 나타내었다. 물입자 벡터도들에서 과의 과의 배와 절 부분을 포함하여 물입자의 거동에 대해 잘 나타내고 있다.





Fig. 6. Water depth diagram for JFP



Fig. 7. Finite element mesh for JFP



Fig. 8. Computed relative wave height for JFP



Fig. 9. Computed relative wave height for JFP with seawater-exchange breakwater(Case-1)



Fig. 10. Computed relative wave height for JFP with seawater-exchange breakwater (Case-2)



Fig. 11. Computed relative wave height for JFP with seawater-exchange breakwater (Case-3)



Fig. 12. Three dimensional wave profiles for JFP



Fig. 13. Three dimensional wave profiles for JFP with seawater-exchange breakwater(Case-1)



Fig. 14. Three dimensional wave profiles for JFP with seawater-exchange breakwater(Case-2)



Fig. 15. Three dimensional wave profiles for JFP with seawater-exchange breakwater(Case-3)

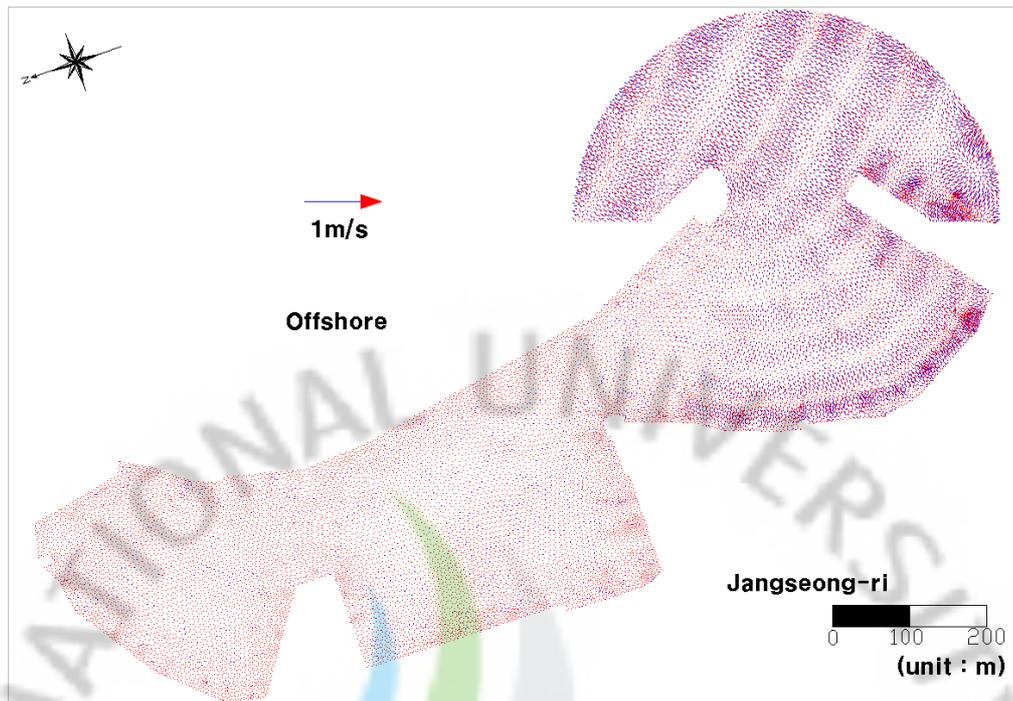


Fig. 16. Water particle velocity profiles for JFP

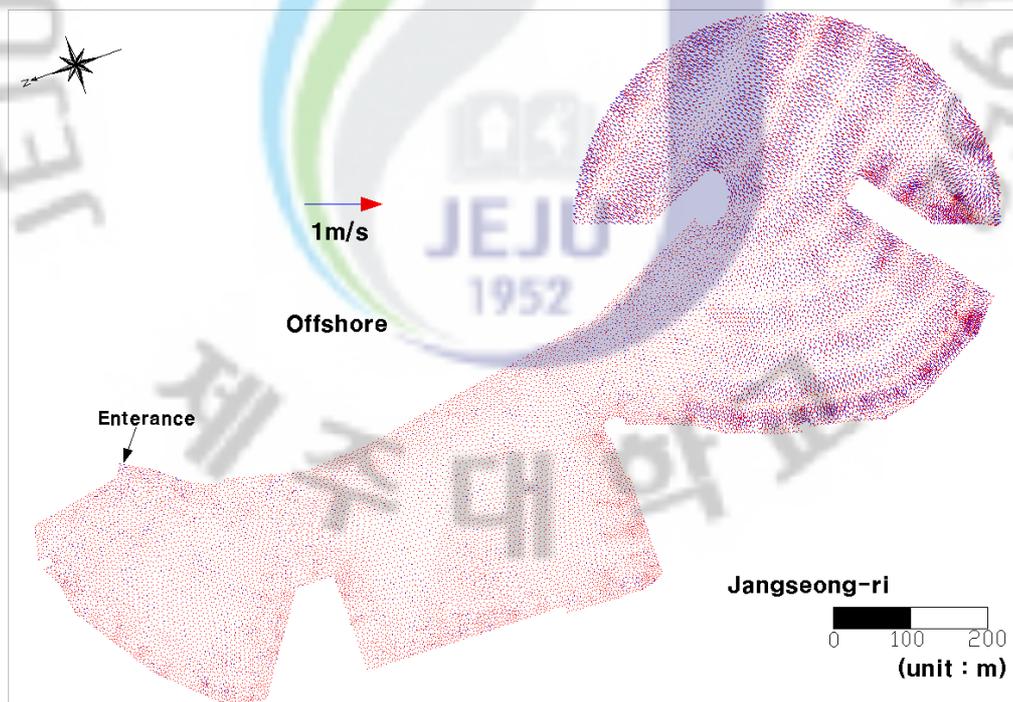


Fig. 17. Water particle velocity profiles for JFP with water-exchange breakwater(Case-1)

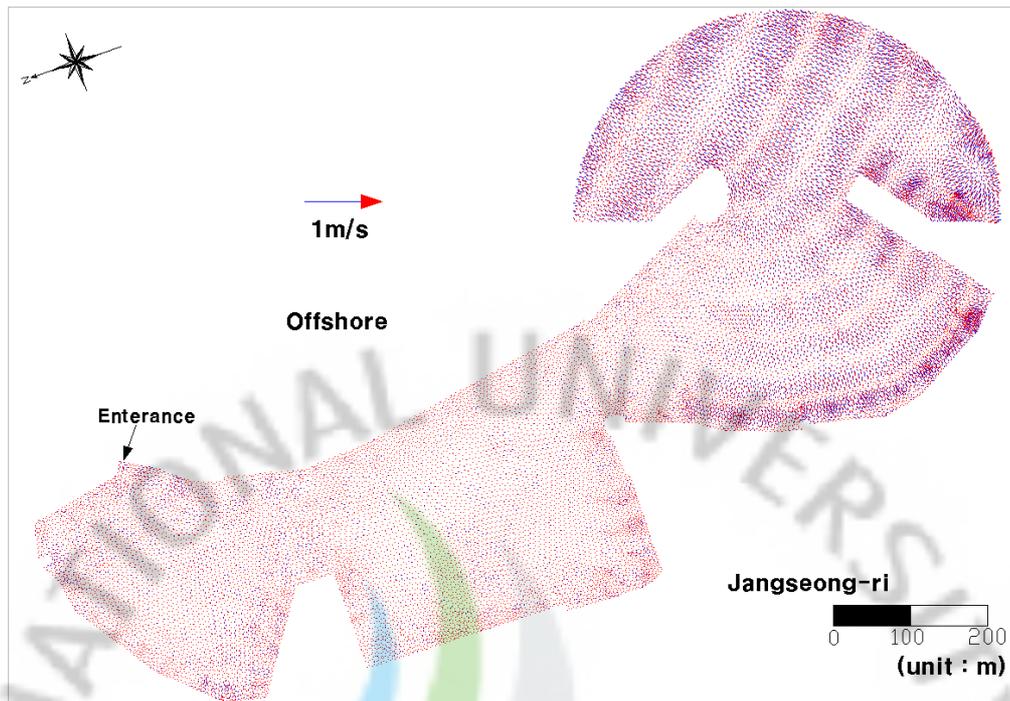


Fig. 18. Water particle velocity profiles for JFP with seawater-exchange breakwater(Case-2)

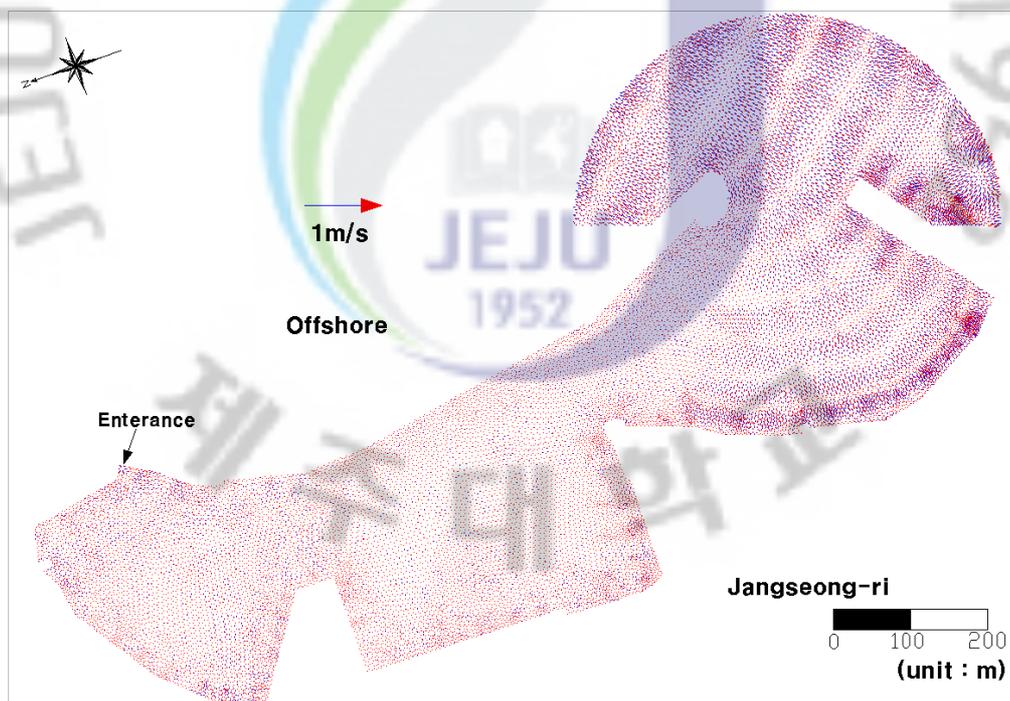


Fig. 19. Water particle velocity profiles for JFP with seawater-exchange breakwater(Case-3)

## 2.2 다기수로가 설치된 주문항의 항내파고분포해석

주문진항에 다기수로가 설치되어 있는 경우 해수교환방파제가 설치된 경우와 동일한 조건인 Table 1에서의 3 Case에 대하여 Fig. 20에 보여지는 유한요소를 가지고 계산되어진 항내파고분포를 Fig. 21, Fig. 22, Fig. 23에 나타내었다.

Fig. 21, Fig. 22, Fig. 23에서 알 수 있듯이 다기수로가 설치된 경우가 해수교환방파제가 설치된 경우보다 이상 파랑에 의한 해수유입에 의해 항내의 파고분포가 낮게 형성되어 정온도에는 큰 영향을 미치지 못하는 것을 알 수 있다. 그 원인은 해수교환방파제인 경우에는 해수의 유입이 집중적인 반면, 다기수로인 경우에는 해수 유입이 분산되는 것으로 판단되어진다.

그리고, 다기수로가 설치된 경우 Table 1의 3 Case에 대하여 계산되어진 3차원 파형을 각각 Fig. 24, Fig. 25, Fig. 26에 나타내었다. Fig. 24, Fig. 25, Fig. 26에서 보여지는 바와 같이 해수교환방파제의 경우와 마찬가지로 침입한 파랑의 진행방향과 회절 및 굴절현상들이 잘 나타나 있기 때문에 육안으로도 쉽게 파의 진행 상황을 파악할 수 있다.

그리고, 다기수로가 설치된 경우, Table 1에 각각의 Case들에 대하여 계산된 물입자 벡터도를 Fig. 27, Fig. 28, Fig. 29에 나타내었다. 물입자 벡터도들에서 파의 배와 절 부분을 포함하여 물입자의 거동에 대해 잘 나타내고 있다.

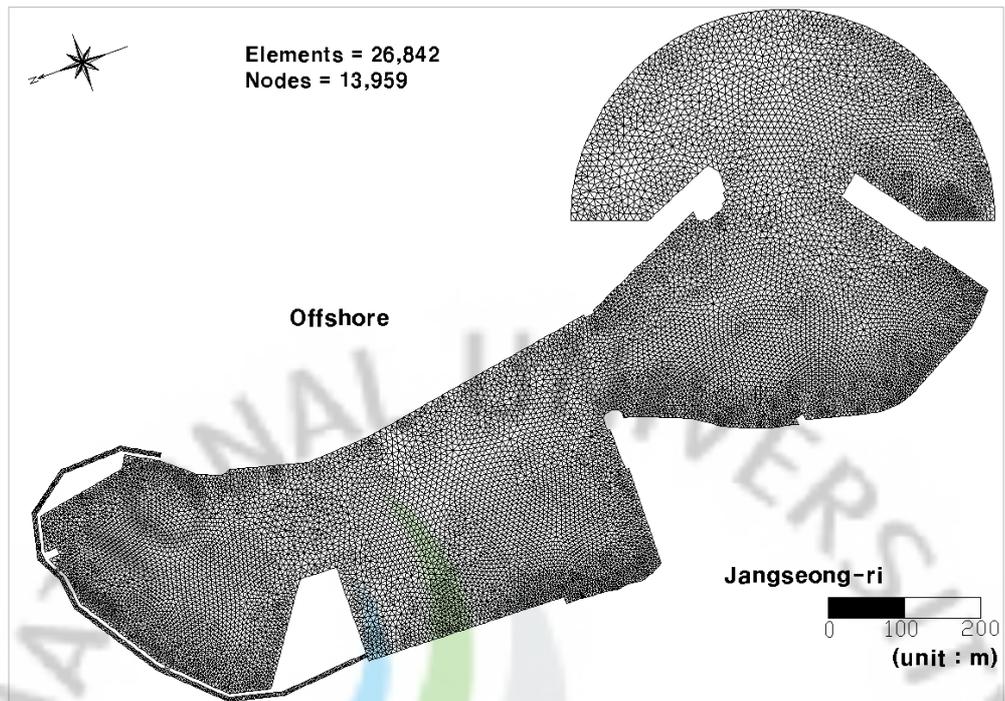


Fig. 20. Finite element mesh for JFP with manifold channels



Fig. 21. Computed relative wave height for JFP with manifold channels(Case-1)



Fig. 22. Computed relative wave height for JFP with manifold channels(Case-2)



Fig. 23. Computed relative wave height for JFP with manifold channels(Case-3)



Fig. 24. Three dimensional wave profiles for JFP with manifold channels(Case-1)



Fig. 25. Three dimensional wave profiles for JFP with manifold channels(Case-2)



Fig. 26. Three dimensional wave profiles for JFP with manifold channels(Case-3)

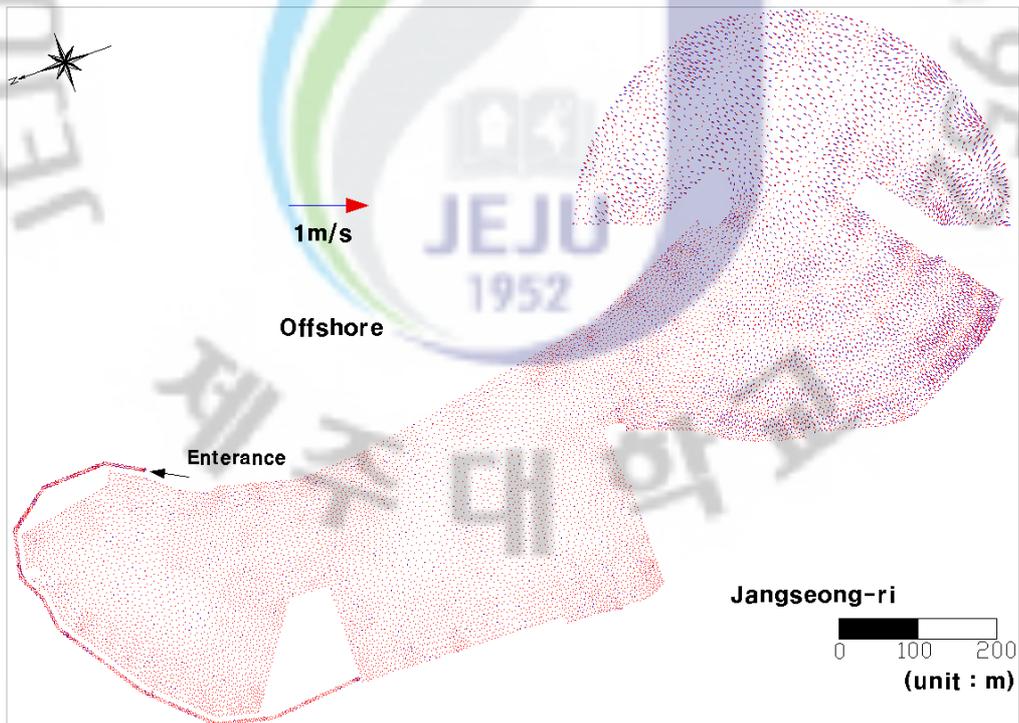


Fig. 27. Water particle velocity profiles for JFP with manifold channels(Case-1)

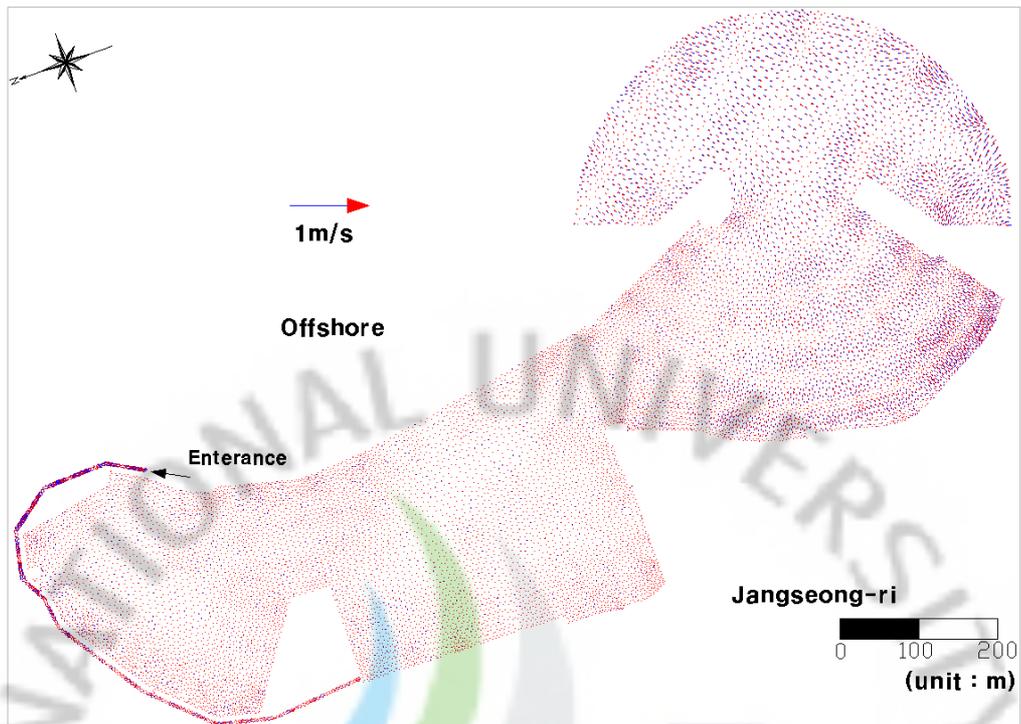


Fig. 28. Water particle velocity profiles for JFP with manifold channels(Case-2)

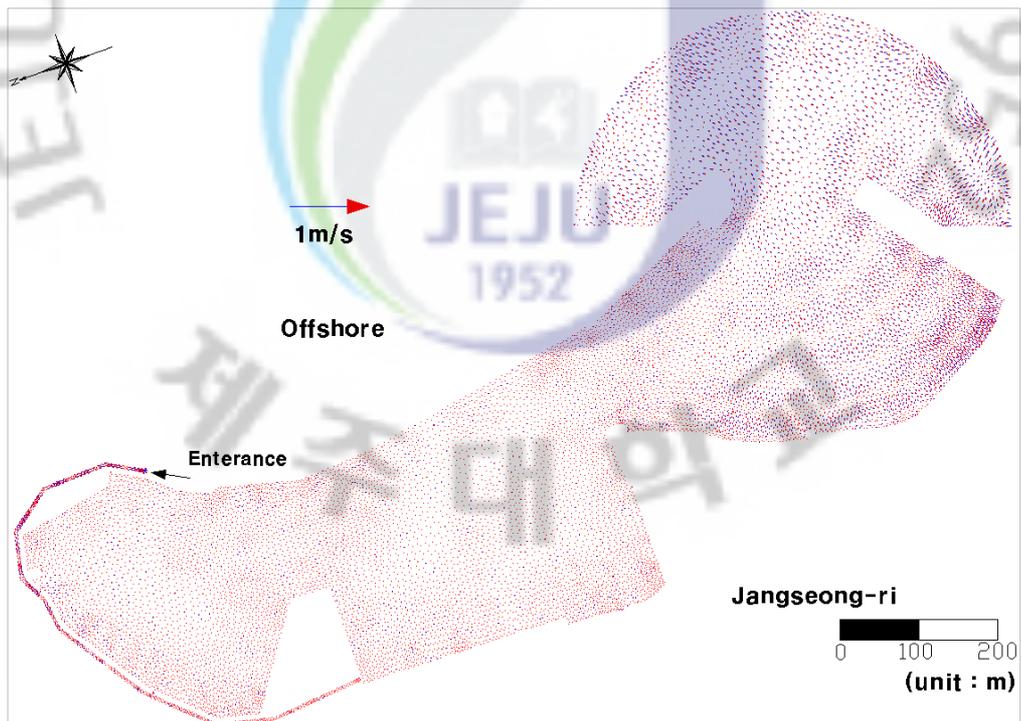


Fig. 29. Water particle velocity profiles for JFP with manifold channels(Case-3)

## V. 결 론

기존의 항내 파고분포해석에 대한 수치모의는 항입구로 입사하는 파랑에 대해서만 연구가 되어왔다. 그래서 해수교환방파제나 다기수로가 설치되어 있는 항만에서 항입구와 항입구외에 다른 구역에서 입사되는 파랑에 대한 복합적인 항내 파고분포해석에 단점을 지니고 있다.

본 연구에서는 이러한 단점을 보완하여 해수교환방파제가 설치된 항만에서의 파고분포해석에 대해 수치모의를 수행하여 그 결과들을 확인하였고, 실제항만에 대한 적용 가능 여부를 살펴보았다. 본 수치모의 결과를 요약 정리하면 다음과 같다.

- (1) 수치모형의 타당성을 검증하기 위하여 본 수치모형의 결과와 Berkhoff et al.(1982)의 실험결과 및 Panchang et al.(1998)의 수치해석결과를 비교하였다. 비교 결과, 비선형해석의 경우가 선형해석의 경우보다 실험결과와 더 일치하는 것을 알 수 있었다. 그 결과, 본 수치모형의 타당성이 검증되었다.
- (2) 해수교환방파제가 설치되어 있는 주문진항을 대상으로 적용한 결과, 이상 파랑에 의해 다량의 해수가 항내로 유입되는 경우에 항내의 파고분포가 높게 형성됨으로써 항내 정온도가 악화될 우려가 있는 것을 알 수 있었다.
- (3) 이상 파랑에 의해 해수가 유입되는 경우에 해수교환방파제에 이상파랑 유입을 차단하는 시설이 필요한 것으로 판단된다.
- (4) 다기수로가 설치되어 있는 주문진항을 대상으로 적용한 결과, 이상 파랑에 의해 다량의 해수가 항내로 유입되는 경우 해수교환방파제보다 항내의 파고분포가 다소 낮게 형성되어 항내 정온도에는 큰 영향을 미치지 못하는 것을 알 수 있었다.
- (5) 주문진항에 해수교환방파제가 설치된 경우에는 해수의 유입이 집중적인 반면, 다기수로인 경우에는 해수의 유입이 분산되는 것으로 판단된다.
- (6) 주문진항에 해수교환방파제가 설치된 경우보다 다기수로를 설치하는 것이 항내의 정온을 유지하는데 더 유리하다는 것을 입증하였다.

(7) 이러한 검증과 해석을 바탕으로 본 연구에서 사용되어진 수치모형은 실제의 항만이나 어항 등에 항내 해수 순환을 촉진시키기 위하여 해수교환방과제를 설치하기 전 항내의 파고분포를 예측하는 데에 활용도가 높을 것으로 사료된다.



## VI. 참고문헌

- 김남형 역 (1995). 유한요소법유체해석, 원창출판사
- 김남형 역 (2002). 수치유체해석, 원기술
- 김남형 역 (2002). 해안공학, 청문각
- 김남형 · 박구용 · 조일형 역 (2004). 해안파동, 구미서관
- 김남형 · 박제선 역 (1996). 유한요소법, 원창출판사
- 김남형 · 허영택 (2000). 유한요소법에 의한 항만 정온도의 수치모의, 한국해양공학회, 제16권 1호, pp. 22-26.
- 김남형 · 양정필 · 박상길 (2000). 수심을 고려한 천해역에서의 자동요소 생성법, 한국항만학회, 제14권 제1호, pp. 97-105.
- 김영재 (1999). 복합요소법을 이용한 감천항의 부진동 해석, 석사학위논문, 동아대학교.
- 박우선 · 전인식 · 정원무 (1994). Infinite Element for the Analysis of Harbor Resonances, 한국해안 · 해양공학회지, 제6권 제2호, pp. 139-149.
- 서승남 · 연영진 (1994). Galerkin 유한요소법에 의한 항내 정온도 모형, 한국해안 · 해양공학회지, 제6권 제4호, pp. 439-451.
- 이철응 · 이길성 (1994). 항만 및 해안공학과군에 따른 장주기파와 항만의 진동, 대한토목학회 논문집, 제14권 제3호, pp. 607-618.
- 정순완 · 김승조 (2001 a). 버블패킹방법을 이용한 2차원 자동격자 생성 및 재구성 알고리즘 개발(I), 대한기계학회논문집, A권, 제25권 제6호, pp. 1004-1014.
- 정순완 · 김승조 (2001 b). 버블패킹방법을 이용한 2차원 자동격자 생성 및 재구성 알고리즘 개발(II), 대한기계학회논문집, A권, 제25권 제12호, pp. 1926-1932.
- 정원무 (1991). 복합요소법에 의한 항내 파랑 침입 · 변형 연구, 석사학위논문, 명지대학교.
- 정원무 · 편종근 · 정신태 · 정경태 (1992). 복합요소법을 이용한 항내 파랑 응답 수치해석, 한국해안 · 해양공학회지, 제4권 제1호, pp. 34-44.
- 정원무 · 박우선 (1996). 항만공진에 대한 복합요소 수치모형의 민감도 분석, 한국

- 해안 · 해양공학회지, 제8권 제2호, pp. 174-184.
- 정원무 · 이길성 · 박우선 · 정경태 (1998). 항입구 손실과 저면 마찰을 고려한 항만 부진동 유한요소 모형, 해양연구, 제20권 제3호, pp. 285-306.
- 허명규 · 이중우 (2001). 공진 방파제를 이용한 항만 부진동의 저감, 한국항만학회, 제15권 제2호, pp. 191-200.
- 허영택 (2002). 유한요소기법을 이용한 항만정온도의 수치해석, 석사학위논문, 제주대학교
- 동해지방해양수산청 (2005). 주문진항 해수교환시설 준공 후 모니터링조사용역 2차분 최종보고서, pp. 375-376.
- 해양수산부 (1999). 항만 및 어항 설계기준, 상권, pp. 115-119.
- Berkhoff, J.C.W. (1972). Computation of combined refraction-diffraction, Proc. 13th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, pp. 471-490.
- Berkhoff, J.C.W. (1975). Linear wave propagation problems and the finite element method, Finite Elements in Fluids, Vol. 1, edited by R. H. Gallagher, et al., London, pp. 251-280.
- Chen, H.S. (1984). Hybrid element modelling of harbor resonance, 4th International Conference on Applied Numerical Modelling, pp. 312-316.
- Chen, H.S. (1986). Effects of bottom friction and boundary absorption on water wave scattering, Applied Ocean Research, Vol. 8, No. 2, pp. 99-104.
- Chen, H.S. (1990). Infinite elements for water wave radiation and scattering, Intern. J. for Numerical Methods for Fluids, Vol. 11, pp. 555-569.
- Chen, H.S. and Houston, J.R. (1987). Calculation of water oscillation in coastal harbor: HARBS and HARBD user's manual, Instruction Report CERC-87-2, U.S Army Corps of Engineers, Waterway Experiment Station, 31 pp.
- Chen, H.S. and Mei, C.C. (1974). Oscillations and wave forces on an offshore harbor, Report 190, R.M. Parsons Lab. for Water Resourced and Hydrodynamics, MIT, Cambridge, MA.
- Houston, J.R. (1981). Combined refraction and diffraction of short waves using the finite element method, Applied Ocean Reseach, Vol. 3, No. 4, pp.

163-170.

- Heaps, N.S. (1969). A two-dimensional numerical model. Royal Society of London, Philosophical Transactions, Series A, 265, 1160, pp. 93-137.
- Ippen, A.T. and Goda, Y. (1963). Wave induced oscillations in harbor: The solution for a rectangular harbor connected to the open sea, Report 59, Hydrodynamics Laboratory, MIT, 90 pp.
- Kim, N.H. and Hur, Y.T. (2003 a). Calmness analysis of Jeju Harbor by Finite Element Technique, Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 17, No. 1, pp. 16-20.
- Kim, N.H. and Hur, Y.T. (2003 b). Computation of Non-Linear Wave Height Distribution in Seogwipo Harbor Using Finite Element Method, KCORE, Vol. 17, No. 6, pp. 32-37.
- Kirby, J.T. and Dalrymple, R.A. (1986). An approximate model for nonlinear dispersion in monochromatic wave propagation models, Coastal Engineering, Vol. 9, pp. 545-561.
- Lee, J.J. (1969). Wave induced oscillations in harbors of arbitrary shape, Report KH\_R\_20, W. M. KECK Lab. of hydrodynamics and Water Resources, California Institute of Technology, Terminal Island, CA, 256 pp.
- Mei, C.C. (1975). Hybrid-element method for water wave, Proceeding of Symposium on Modeling Techniques, San Fransisco.
- Panchang, V.G. and Z, Dermirbilek (1998). CGWAVE: A Coastal Surface Water Wave Model of the Mild Slope Equation Technical Report CHL-98-xx, U.S.Army Corps of Engineers.
- Sommerfeld, A. (1896). The theory of deffraction, Optics Lectures on Theoretical Physics, Vol. VI, Academic Press.
- Shimada, K. (1993). Physically-Based Mesh Generation: Automated Triangulation of Surface and Volumes via Bubble Packing, Ph.D. Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, U.S.A.
- Shimada, K. and Gossard, D.C. (1998). Automatic triangular mesh generation

of trimmed parametric surfaces for finite element analysis, Computer Aided Geometric Design, Vol. 15, No. 3, pp. 199-222.



## 감사의 글

먼저 부족한 부분이 많았던 저에게 학문적 지식을 끊임없이 지도편달 해주시고 본 논문을 순조롭게 완성할 수 있도록 지도해주신 김남형 교수님께 깊은 감사의 말씀을 드리며 또한 바쁘신 와중에서도 논문심사를 맡으셔서 세심한 지도를 해주신 김상진 교수님과 연구실 선배이자 한국수자원공사 선임연구원으로 계신 허영택 박사님께도 진심으로 감사의 말씀을 드립니다. 그리고 학부와 석사 학위 과정 중 토목공학에 눈을 뜰 수 있도록 가르침을 주신 양성기 교수님, 남정만 교수님, 이병걸 교수님, 박상렬 교수님, 이동욱 교수님께도 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

해안항만공학 연구실에서 2년간의 석사과정 기간은 저에게 있어서 학부 4년간의 시간보다 더 중요한 시간이었습니다. 학문적으로 많은 것을 배울 수 있었고 또 내가 알지 못했던 것들에 대해 김남형 교수님, 그리고 선배님들께서 많은 조언을 해주셨기 때문에 대학원 생활을 무사히 끝마칠 수 있었던 것 같습니다. 그리고 제가 깊은 공부를 할 수 있도록 옆에서 격려와 배려를 해 주시고 많은 도움을 주신 모든 분들께 이 논문을 빌어 감사의 말씀을 전하고 싶습니다.

처음 학부 때 해안항만공학 연구실에 들어와서 석사과정을 지내는 동안 공부나 집안 사정으로 힘들어 할 때 옆에서 위로해주고 기쁠 때는 자신의 일처럼 기뻐해주고 여러 가지로 도움을 주었던 승현형과 친구인 창림이에게 고맙다는 말을 전합니다. 그리고, 제가 연구를 진행하는데 많은 도움을 주시고 교수님과 같이 제가 큰 꿈을 꾸는데 희망과 용기를 주신 허영택 박사님, 양순보 박사님, 박민수 박사님, 이제 미국으로 유학을 떠나는 경보형, 그리고 제가 연구실에 들어왔을 때 든든하고 믿음직한 모습을 보여준 형식이형, 동경공업대에서 박사학위 과정인 향혜, 유학 준비중인 지원에게도 감사의 말을 전합니다. 그리고 연구실에서 학부생활을 하다가 올 해 석사과정에 입학하는 정운, 수민, 주경, 서리에게도 앞날에 밝은 미래만 있기를 기원합니다.

대학원 생활을 하면서 연구실을 다르지만 서로 격려하고 도움을 준 태건형, 창

선, 영민, 정우, 용현, 그리고 학부때 공부를 같이 하며 좋은 추억을 만들 수 있게 해준 현국이형, 은영누나, 준우, 용민, 종선, 재훈, 지현, 동섭, 승선, 기석, 석찬, 형주, 순빈, 영돈, 행석에게도 정말 고맙다는 말을 전하고 싶습니다.

자주 만나지는 못하지만, 때론 친형제처럼 항상 옆에서 걱정해주고, 힘들 때마다 격려해 준 나의 사랑스런 28년지기 친구인 세옹이, 용국이와 제수씨에게도 이 논문으로나마 고맙다는 말을 전합니다. 그리고 공부하면서 운동을 못나가도 항상 넓은 마음으로 이해해주고 삶에 대한 조언 아끼지 않았던 <이어도족구단> 단장님이 하 운동을 같이 하는 모든 분들께도 감사의 말씀을 전하고 싶습니다.

제가 석사논문을 완성하기까지 지금의 나를 있게 해주신 분들이 계십니다. 지금은 저의 곁에 안 계셔서 마음이 많이 아프고 아쉽지만, 항상 “하면된다”, “아버지 어머니 걱정말고 공부 열심히 해” 이런 말씀을 자주해주시다 올해 초 암 투병중 먼저 하늘나라로 가신 사랑하는 아버지, 그리고 건강도 많이 안좋으신데 “여자는 약하지만 어머니는 강하다”고 하신 사랑하는 어머니께 다시 한번 사랑하고 고맙다는 말씀을 전하고 싶습니다. 그리고 부모님께 진 빚을 평생을 두고 갚겠다고 약속드립니다. 저에게 동기부여를 해주고 언제나 동생이 하겠다고 하면 무엇이든지 도와주겠다는 사랑하는 우리누나와 매형께도 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 그리고 요새 들어 재롱이 부쩍 늘어난 우리조카 희주가 항상 건강하길 기원합니다.

석사과정 2년동안 저에게는 많은 일들이 있었고 또 많은 것을 느끼게 한 시간들이었습니다. 이 시간들을 디딤돌 삼아 더 나은 미래가 다가올 것이라고 믿고, 저에게 많은 도움을 주시고 격려를 해주신 분들이 많았기에 사회에 나가서도 그 분들 기대에 어긋나지 않게 항상 부지런히 노력하여 내가 받았던 도움들을 다시 되돌려 줄 수 있는 제가 되겠습니다.

2009년 12월

Chul's.

## 발표논문 리스트

### (1) 학회지 발표논문

- ① “해수교환방과제가 설치된 주문진항에서의 파고분포 해석”, 한국항해항만학회(심사중).
- ② “개별요소법을 이용한 삼각망 생성기법 개발”, 대한토목학회(심사중).

### (2) 학술 발표회 발표논문

- ① “다기수로가 설치된 어항에서의 항내 정온도 동정”, 한국해안·해양공학회, 2008년도 한국해양과학기술협의회 공동학술대회 발표논문집, pp. 2556~2559, 2008년 5월.
- ② “비선형을 고려한 주문진항의 항내 정온도 해석”, 한국항해항만학회, 2008년 추계학술대회논문집, pp. 143~144, 2008년 12월.
- ③ “다기수로를 가진 주문진항의 비선형 항내 정온도 해석”, 한국해안·해양공학회, 2009년도 한국해양과학기술협의회 공동학술대회 발표논문집, pp. 2448~2451, 2009년 5월.
- ④ “개별요소법을 이용한 삼각망 생성기법 개발”, 대한토목학회, 2009년도 대한토목학회 정기학술대회 발표논문집, pp. 1498~1501, 2009년 10월.