

파랑변형 모형의 예측에 관한 연구

옥 치 율* · 민 일 규**

(95년 5월 30일 접수)

A Study on the Prediction of Wave Deformation Model

Chi-Yul Ok* · Ill-Kyu Min**

Key Words : nearshore zone(연안역), wave deformation model(파랑변형모형), wave height(파고), wave direction(파향), reflection(반사), radiation stress(기류력), turbulent model(난류모형)

Abstract

The necessity of development of the Nearshore zone greatly emphasis in recent years. In the wave deformation model, we can get the wave height and wave direction using the hyperbolic mild slope equation considered the reflection wave.

Radiation Stress the driving force of flow was calculated by the Watanabe and Maruyama who proposed on the partial standing wave.

In the surf zone, applying the Izumiya and Horikawa's turbulent model considered the bottom friction and energy dissipation, we compared and examined with the Numerical model and Hydraulic test result of Watanabe and Maruyama.

This model results obtained for Jin-ha Beach agreed well with the Numerical results. This model is expected so helpful to solve the prediction of the wave deformation problems in the development of the Nearshore zone in the future.

I. 서 론

연안역에서 해저토사를 움직이게 하는 외력으로는 파랑, 파랑에 의해 발생하는 해빈류, 조류, 바람 및 하구유출류 등을 들 수 있다. 일반적으로 가장 큰 영향력을 미치는 것은 파랑이다. 이와 같은 토사의 이동은 해저지형을 변화시키는데 일반적인

자연해빈에서는 대개 계절에 따라 변화하며 연간의 표사 수지를 놓고 보면 평형상태를 이루고 따라서 해저지형도 안정상태를 유지하는 경우가 많다.

최근 우리나라는 경제성장에 따라 연안역에서의 임해공업단지의 조성, 공업항의 건설, 연안 간척사업 및 인공섬 건설 등과 같은 효과적인 연안역 개발의 필요성이 강조되어 왔고 다른 한편으로

* 밀양산업대학교 토목공학과 교수

** 동아대학교 해양자원연구소 특별연구원

스포츠, 레크리에이션이나 관광자원으로서 해변의 역할에 대한 인식이 높아지고 있다.

이러한 문제를 감안 할 때 연안지역은 해안환경보전의 측면에서 다루어져야 하므로 주변환경 변화의 영향을 사전에 정량적으로 예측하기 위하여 우선 그 첫번째 과제가 파랑변형을 정확히 예측하여야 한다.

여기서 사용한 파랑 변형의 계산은 굴절, 회절 및 반사까지도 고려할 수 있는 타원형 환경사 방정식을 선유량과 수면변위로 나타내는 선형방정식으로 유도한 Watanabe와 Maruyama¹⁾의 쌍곡선형 환경사 방정식을 사용하고 쇄파대내에서는 Izumiya와 Horikawa²⁾의 난류 모형을 도입하여 저면마찰에 의한 에너지 감쇠항을 정식화하였다. 그리고 구조물에서의 임의 반사율 경계는 Tanimoto와 Kobune³⁾가 제안한 수치 파동 해석법을 사용하고 무반사성 입사경계는 Watanabe와 Maruyama의 투과 경계 조건을 사용하여 구조물이 존재하는 중복 파랑장에서 수치 및 수리 실험 결과와 비교하여 파랑계산에 대한 수치모형을 수립하는데 목적이 있으며 그 수립한 모형의 타당성을 검증한 후 현지 해안에 적용하여 타당성을 검증하기로 한다.

II. 기본 방정식

파랑변형 모델은 Berkhoff⁴⁾의 타원형 방정식과 같은 형태로 해석하는 방법과 Radder⁵⁾ 그리고 Lozano-Liu⁶⁾ 등과 같은 포물형 근사법에 의한 방법 및 Copeland⁷⁾, Maruyama와 Kajima⁸⁾의 쌍곡선 형태로 된 한쌍의 선형방정식 등으로 해석하는 방법이 있다.

본 연구에서 파랑장 계산은 굴절, 회절 및 반사까지도 고려할 수 있으며 쇄파대내에서 쇄파에 의한 에너지 감쇠를 표시하는 항을 기본식에 부가한 Maruyama와 Kajima의 쌍곡선형 환경사 방정식을 사용하였다.

2.1 기초 방정식의 유도

Booij⁹⁾는 파랑이 흐름과의 공존시 생기는 굴절 효과까지 포함하고 방정식의 해가 비정상이거나

비조화된 조건에서 다음과 같은 쌍곡선형 환경사 방정식을 다음 식(2.1)과 같이 유도하였다.

$$\frac{D^2\phi}{Dt^2} + (\nabla \cdot \vec{u}) \frac{d\phi}{dt} + \left\{ \frac{d}{dt} (\nabla \cdot \vec{u}) \phi - \nabla \cdot (CC_g \nabla \phi) \right\} + (\sigma^2 - CC_g k^2) \phi = 0 \quad (2.1)$$

여기서

$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla$, $\vec{u} = (u, v)$, $\phi(x, y, t)$ 는 평균해수면에서 속도포텐셜, C =파속, C_g =군속도, σ =각주파수, k =파수이다.

식(2.1)에서 흐름의 효과를 무시하면 식(2.2)가 된다.

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} - \nabla \cdot (CC_g \nabla \phi) + (\sigma^2 - CC_g k^2) \phi = 0 \quad (2.2)$$

만약 방정식의 해가 정상이고 조화상태라고 가정하면 식(2.3)이 성립한다.

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = -\sigma^2 \phi \quad (2.3)$$

ϕ 와 η 와의 관계를 식(2.4)로 나타낼 수 있다.

$$\eta = \frac{i\sigma}{g} \phi^{-i\sigma t} \quad (2.4)$$

식(2.3)과 식(2.4)을 식(2.2)에 대입하면 Berkhoff가 환경사 영역에서 유도한 식이 된다.

전술한 바와 같이 Berkhoff의 환경사방정식은 파의 에너지 보존법칙을 잘 표현함을 알 수 있고, 흐름의 효과를 무시한 Booij의 환경사방정식은 방정식의 해가 정상이고 조화상태인 경우 Berkhoff의 환경사방정식과 같으므로 속도포텐셜에 대한 식(2.2)를 선유량과 수면변위에 대한 방정식으로 변형할 수 있다.

국소적으로 일정수심에서 미소진폭파 이론을 가정하면 수평유속 $\vec{u} = (u, v)$ 와 속도포텐셜 $\phi(x, y, z, t)$ 사이에 다음 식(2.5)의 관계가 성립한다.

$$\vec{u} = \nabla \phi = \nabla \phi f(z) \quad (2.5)$$

여기서 복소수 속도포텐셜(complex velocity potential) $\phi(x, y, z, t) = \phi(x, y, t) f(z)$ 이고, $f(z)$ 는 연직분포형을 나타내는 다음 식(2.6)으로 주어진다.

$$f(z) = \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \quad (2.6)$$

식(2.6)에서 선유량벡터 \vec{Q} 는 다음과 같이 정의하였다.

$$\vec{Q} = \int_{-h}^0 \nabla \phi dz = \int_{-h}^0 \vec{u} dz \quad (2.7)$$

식(2.7)에 식(2.5)을 대입하고 정리하면 식(2.8)이 된다.

$$\begin{aligned} \vec{Q} &= \int_{-h}^0 \nabla \phi \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} dz \\ &= \nabla \phi \frac{\sinh k(z+h)}{k \cosh kh} \Big|_{-h}^0 \\ &= \nabla \phi \frac{1}{k} \tanh kh \\ &= \nabla \phi \frac{\sigma^2}{gk^2} = C^2 \nabla \phi / g \end{aligned} \quad (2.8)$$

만약 방정식의 해가 정상이고 조화상태라면 이 식을 식(2.8)에 대입하여 시간 t 에 관하여 미분하면 다음 식(2.9)이 된다.

$$\frac{\partial \vec{Q}}{\partial t} = \frac{C^2}{g} (-i\sigma) \nabla \phi \quad (2.9)$$

여기서 식(2.4)에 gradient를 취하면 식(2.10)으로 되고

$$\nabla \eta = \frac{i\sigma}{g} \nabla \phi \quad (2.10)$$

이 식을 식(2.9)에다 대입하면 식(2.1)에 대응하는 식(2.11)을 구할 수 있다.

$$\frac{\partial \vec{Q}}{\partial t} + C^2 \nabla \eta = 0 \quad (2.11)$$

한편, 식(2.9)를 시간 t 에 대해 미분하면 식(2.12)가 된다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{i\sigma}{g} \frac{\partial \phi}{\partial t} = i \frac{\sigma}{g} (-i\sigma) \phi = \frac{\sigma^2}{g} \phi$$

$$\text{즉, } \phi = \frac{g}{\sigma^2} \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad (2.12)$$

식(2.12)에다 식(2.3)을 적용하면 식(2.13)이 된다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -\frac{1}{g} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \quad (2.13)$$

그리고 식(2.8), 식(2.12)와 식(2.13)을 식(2.2)에 대입하면 식(2.14)를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} -g \frac{\partial \eta}{\partial t} - \nabla \cdot (CC_g \frac{g\vec{Q}}{C^2}) + \\ (\sigma^2 - k^2 CC_g) \frac{g}{\sigma^2} \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \\ \nabla \cdot (\frac{C_g}{C} \vec{Q}) + \frac{C_g}{C} \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \end{aligned} \quad (2.14)$$

$$\text{즉, } \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{n} \nabla \cdot (n \vec{Q}) = 0 \quad (2.15)$$

$$n = \frac{1}{2} (1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh}) \text{ 이다.}$$

식(2.11)과 식(2.15)는 Maruyama와 Kajima가 발표한 쌍곡선형 환경사방정식이다.

2.2 쇄파감쇠의 모형화

종래 대부분의 파랑계산모형은 쇄파기준 뿐만 아니라 쇄파대에서의 파고 역시 그 지점의 수심에 대응하는 쇄파 한계파고와 같다고 생각하여 보편적으로 식(2.16)이 가장 많이 사용되어 왔다.

$$H_b = 0.78 h_b \quad (2.16)$$

여기서 H_b 는 쇄파파고, h_b 는 쇄파수심이다.

이러한 근사식은 쇄파대내에서 한계파고가 실제 파고보다 높게 나올뿐만 아니라 복잡한 저면형상을 가진 파랑장에서는 적용할 수 없다.

그래서 식(2.17)과 같은 에너지 보존법칙을 이용한 쇄파대에서 파고를 예측하는 일반적인 모형을 생각할 수 있다.

$$\nabla \cdot (EC_g) = -\phi_d \quad (2.17)$$

여기서 ϕ_d 는 단위시간, 단위면적당 에너지 손실

을 나타내는 에너지 감쇠함수, E 는 파랑에너지 ($= \rho g H^2 / 8$)이고, C_g 는 군속도이다.

여기서 Izumiya와 Horikawa는 난류이론을 적용하여 Φ_d 를 다음과 같은 식(2.18)을 제안하였다.

$$\Phi_d = \sqrt{2} C_f^* \frac{E^{3/2}}{\rho^{1/2} h^{3/2}} + \beta_o \left(\frac{E}{\rho g h^2} - M_{*s}^2 \right)^{1/2} \frac{E^{3/2}}{\rho^{1/2} h^{3/2}} \quad (2.18)$$

여기서 C_f^* = 마찰계수
 ρ = 해수밀도

$$E = \frac{1}{2} \rho g a^2$$

$$\beta_o = 1.80$$

M_{*s} = 파 재생시의 값 (=0.009)

그러나 일반적인 중복상태의 파랑장에는 그들을 직접 적용하는 것이 어렵기 때문에 식(2.11)의 운동방정식에 식(2.18)을 이용하여 쇄파 감쇠항을 다음과 같이 추가한다.

$$\frac{\partial \vec{Q}}{\partial t} + C^2 \nabla \eta + f_D \vec{Q} = 0 \quad (2.19a)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{n} \nabla \cdot (n \vec{Q}) = 0 \quad (2.19b)$$

여기서, f_D 는 에너지 감쇠계수이고 쇄파대 외에는 $f_D=0$ 으로 한다.

윗 식에서 첫번째항의 선유량 \vec{Q} 를 소거하면 식(2.20)이 얻어진다.

$$\nabla \cdot (nC^2 \nabla \eta) + n\sigma^2 \eta + \nabla \cdot (nf_D \vec{Q}) = 0 \quad (2.20)$$

한편, \vec{u} 를 일정 수심에서 미소진폭파의 유속으로 가정하고 정수면 ($z=0$)에서의 수평유속 \vec{u}_o 를 소거하면 식(2.21)의 관계가 성립된다.

$$\vec{Q} = C \eta \quad (2.21)$$

이 관계식을 식(2.20)에 대입하면 다음식이 얻어진다.

$$\nabla \cdot (nC^2 \nabla \eta) + n\sigma^2 \eta + \nabla \cdot (nf_D C \eta) = 0 \quad (2.22)$$

윗 식의 η 를 식(2.4)의 형태로 가정하여 허수부로부터 다음과 같은 에너지방정식을 얻을 수 있다.

$$\nabla \cdot (E \vec{C}_g) = -n f_D E \quad (2.23)$$

여기서 Izumiya의 에너지방정식은 식(2.24)로 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (E C_{gi}) = -\sqrt{2} C_f^* \frac{E^{3/2}}{\rho^{1/2} h^{3/2}} - \beta_o \left(\frac{E}{\rho g h^2} - M_{*s}^2 \right)^{1/2} \frac{E^{3/2}}{\rho^{1/2} h^{3/2}} \quad (2.24)$$

여기서, $i = 1, 2$

식(2.24)를 식(2.23)에 대입하면 식(2.25)와 같다.

$$f_D = \sqrt{2} C_f^* \sqrt{E} \frac{1}{\rho^{1/2} h^{3/2}} + \beta_o \left(\frac{E}{\rho g h^2} - M_{*s}^2 \right)^{1/2} \sqrt{E} \frac{1}{\rho^{1/2} h^{3/2}} \quad (2.25)$$

식(2.25)의 우변 첫째항은 저면마찰에 대한 에너지 감쇠를 나타내며 두번째항은 쇄파에 의한 에너지 감쇠를 표현하고 있다.

또한 라디에이션 응력항은 Watanabe와 Maruyama가 제안한 중복파에 대한 식을 사용하였다.

$$\frac{1}{\rho g} S_{xx} = \frac{Q_x^2}{4C^2} \left(1 + \frac{2kD}{\sinh 2kD} \right) + \frac{\hat{\eta}^2}{4} \frac{2kD}{\sinh 2kD} + \Gamma \quad (2.26a)$$

$$\frac{1}{\rho g} S_{yy} = \frac{Q_y^2}{4C^2} \left(1 + \frac{2kD}{\sinh 2kD} \right) + \frac{\hat{\eta}^2}{4} \frac{2kD}{\sinh 2kD} + \Gamma \quad (2.26b)$$

$$\frac{1}{\rho g} S_{xy} = \frac{1}{\rho g} S_{yx} = \frac{Q_x Q_y}{4C^2} \left(1 + \frac{2kD}{\sinh 2kD} \right) \cos(\epsilon_x - \epsilon_y) \quad (2.26c)$$

여기서

$$\Gamma = \frac{1}{8\sigma} \left[\frac{\partial}{\partial X} \{ \hat{\eta} \hat{Q}_x \sin(\epsilon_\eta - \epsilon_x) \} + \frac{\partial}{\partial Y} \{ \hat{\eta} \hat{Q}_y \sin(\epsilon_\eta - \epsilon_y) \} \right]$$

$\hat{\eta}$ = 수위진폭

\hat{Q}_x, \hat{Q}_y = 선유량 진폭

$\epsilon_\eta, \epsilon_x, \epsilon_y$ = 위상각

III. 수치계산법

반사파가 존재하는 중첩된 파랑장에 적합한 식은 타원형 환경사방정식과 쌍곡선형 환경사방정식이나 타원형 환경사방정식은 파장의 10배 이내 되는 영역에서만 실용적으로 적용이 가능하므로 Watanabe와 Maruyama의 쌍곡선형 환경사방정식을 사용하여 수치계산하였다.

쌍곡선형 환경사방정식을 공간 차분간격을 Δx , Δy 로 시간 차분간격을 Δt 로 표현한 유한차분식으로 바꿔 놓는다. 우선 쇄파전의 기본식을 사용해 파고를 구한 후, 쇄파후에 대해서는 감쇠항 $f_D Q$ 를 기본식에 부가하고 쇄파대내의 계산을 행하여 파고를 구한 다음 전체 영역에 대한 파향을 구하는 것으로 한다.

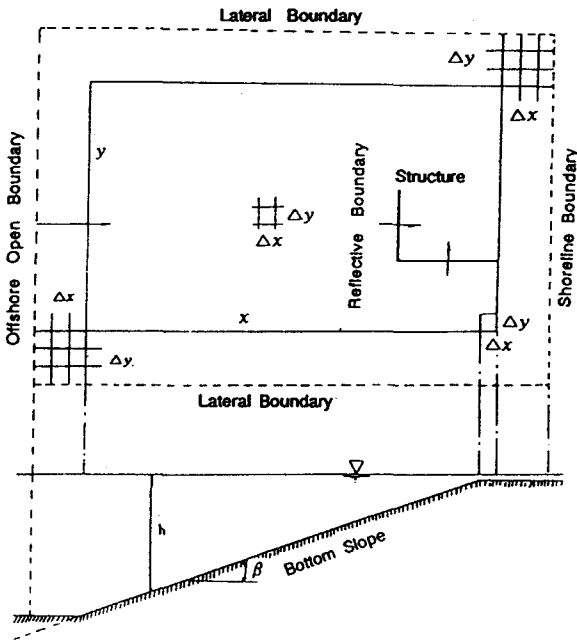


Fig. 3-1 Calculation Area with Attached Dummy Area used for Setting of Boundary Condition (Maruyama and Kajima, 1985)

다음으로 계산영역 및 구조물의 구체적인 설정 방법은 그 예로 Fig. 3-1에 나타낸다. 좌표축은 그림에서처럼 x 축을 심해로부터 해안방향, y 축을 연안방향으로 한다. 필요로 하는 계산영역의 주위

에 경계조건의 취급을 용이하게 하기 위하여 일정 수심의 dummy영역을 접속한다.

이 확대한 계산영역의 주위 4변을 각각 심해경계, 해안선경계 및 측방경계로 하고 영역내의 방파제 등을 구조물경계로 한다.

해안선경계는 쇄파로 인하여 감쇠된 파가 해안선에 반사되지 않기 위해 투과성 경계로 하고, 심해경계는 구조물로 인한 반사파를 투과시키기 위해 무반사성 입사경계로 한다.

3.1 기본방정식의 차분화

x, y 공간의 차분간격을 $\Delta x, \Delta y$ 시간 차분간격을 Δt 로 하고 계산점의 위치는 Fig. 3-2와 같이 staggered격자망을 사용하였으며 유한차분식은 양해법의 일종인 leap-frog법으로 차분하였다.

변수의 첨자 i, j 는 공간의, 첨자 m 은 시간의 차분점을 의미하며 다음과 같다.

$$Q_{xij}^m = Q_x [i \Delta x, (j+1/2) \Delta y, m \Delta t]$$

$$Q_{yij}^m = Q_y [(i+1/2) \Delta x, j \Delta y, m \Delta t] \quad (3.1)$$

$$\eta_{ij}^m = \eta [(i+1/2) \Delta x, (j+1/2) \Delta y, (m+1/2) \Delta t]$$

기본방정식(2.11), (2.15)를 차분식으로 표현하면 식(3.2)와 같다.

$$Q_{xij}^{m+1} = Q_{xij}^m - \frac{\Delta t}{\Delta x} (C_{xij})^2 (\eta_{ij}^m - \eta_{i-1j}^m)$$

$$Q_{yij}^{m+1} = Q_{yij}^m - \frac{\Delta t}{\Delta y} (C_{yij})^2 (\eta_{ij}^m - \eta_{ij}^{m-1}) \quad (3.2)$$

$$\eta_{ij}^{m+1} = \eta_{ij}^m - \frac{\Delta t}{\Delta x} \frac{1}{n_{ij}} (n_{xi+1j} Q_{xi+1j}^{m+1} - n_{xij} Q_{xij}^{m+1})$$

$$- \frac{\Delta t}{\Delta y} \frac{1}{n_{ij}} (n_{yij+1} Q_{yij+1}^{m+1} - n_{yij} Q_{yij}^{m+1})$$

여기서 C_{xij}, n_{xij} 및 C_{yij}, n_{yij} 는 각각 선류량 Q_{xij}, Q_{yij} 의 계산점의 위치에 대한 파속 C 와 $n (= C_g/C)$ 의 값으로 한다. 또 n_{ij} 는 η_{ij} 의 계산점 위치에 대한 n 의 값으로 한다.

3.2 초기조건 및 경계조건

초기조건으로는 정수상태를 가정하고 전계산영역을 0으로 하는 cold start방식을 사용하였다.

$$\eta_{ij}^m = Q_{xij}^m = Q_{yij}^m = 0 \quad (m=1) \quad (3.3)$$

경계조건으로는 심해부분에서 파랑을 생성시켜주는 무반사성 입사경계, 구조물등에 의하여 반사되는 임의의 반사율 경계, 그리고 경계를 향하는 파를 그대로 통과시키기 위한 투과경계등이 있으며 본 계산에 사용된 경계조건은 Fig. 3-2~Fig. 3-4이다.

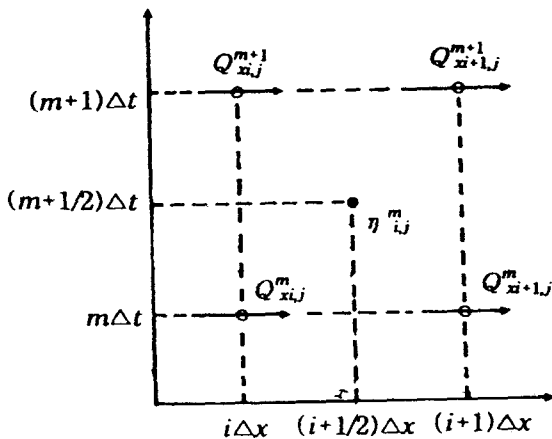
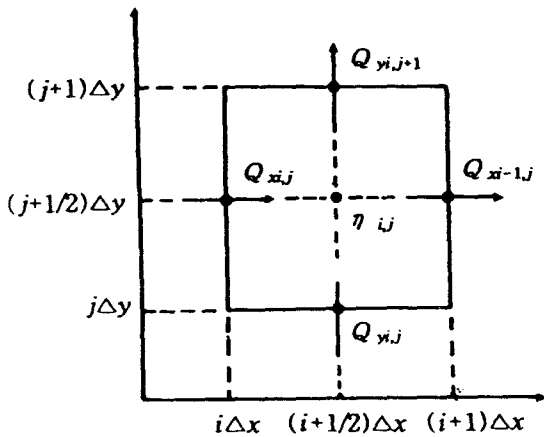


Fig. 3-2 Staggered Mesh Scheme (Horikawa, 1988)

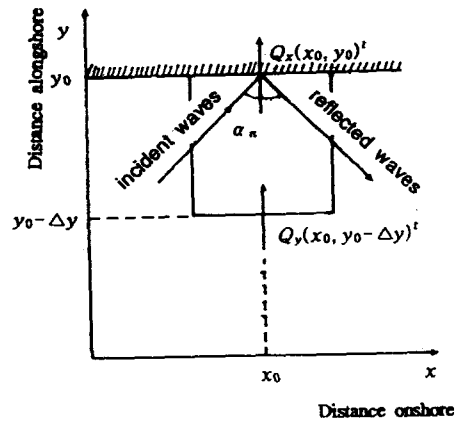
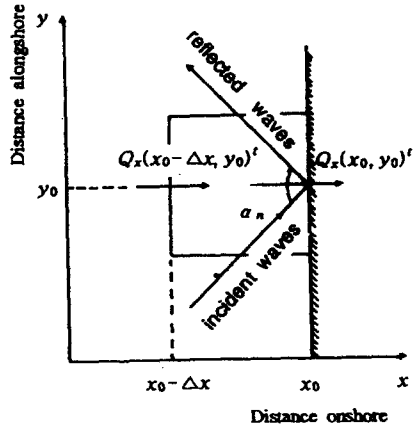


Fig. 3-3 Boundary with Arbitrary Reflectivity (Horikawa, 1988)

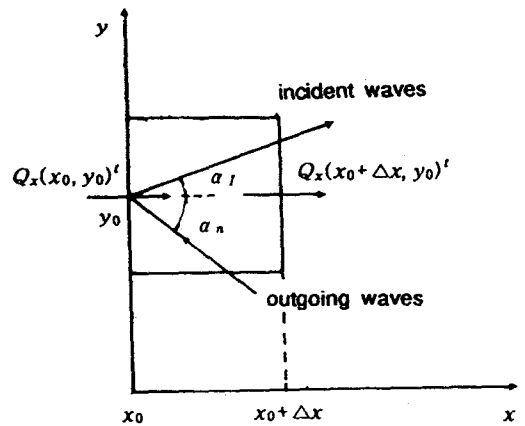


Fig. 3-4 Offshore Open Boundary (Horikawa 1988)

3.3 파고 및 파향의 산정

파랑 일주기 계산종료마다 계산된 수면변위 η 와 선유량 Q_x, Q_y 를 이용하여 각 격자점에서 파고 및 파향을 결정하는 것으로 하였다.

수면변위 최대값과 최소값으로 다음과 같이 파고를 결정한다.

$$\eta = (2 \frac{\bar{\eta}^2}{\eta^2})^{1/2}$$

$$\eta = \frac{1}{2} (|\eta_{\max}| + |\eta_{\min}|) \quad (3.4)$$

여기서 η_{\max} 는 일파랑 주기중 수면변위의 최대값이며 η_{\min} 은 일파랑 주기중 수면변위의 최소값이다. 파랑의 진행방향은 계산된 일파랑주기 동안의 최대 선유량 성분의 합 vector에 의해 결정될 수 있을 것으로 생각하여 다음과 같이 산정한다.

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{Q_{y\max}}{\sqrt{Q_{x\max}^2 + Q_{y\max}^2}} \right) \quad (3.5)$$

최대 선유량에 의하여 파랑의 진행방향이 결정되므로 반사구조물 주위에서와 같은 중복파랑장에서의 파향계산이 가능할 것으로 생각된다.

IV. 모형의 적용 결과

4.1 이안제에 대한 적용조건

구조물에 의한 반사파가 존재하는 중첩된 파랑장을 해석하기 위하여 본 파랑변형 모형을 해저경사는 1/50이고, $x = 2m$ 지점에 수심 6cm의 위치에 길이 2.67m의 이안제가 해안선과 평행하게 설치된 평면수조에 적용하였으며 수조의 형태는 Fig. 4-1과 같다.

입사파에 대한 실험조건은 심해파고 2.0cm, 주기 1.2sec의 규칙파가 해안선에 직각으로 입사하는 조건이다.

파의 계산은 모형현상의 대칭성을 고려하여 이안제를 중심으로 통과하는 on-offshore 방향의 직선을 가상경계로 하는 절반 영역에 대해서만 생각한다.

대칭축에 대한 측방경계 및 이안제에서는 완전반사의 조건을 주고, 그 이외의 경계는 투과경계로

하였다. 또한 계산 격자의 간격은 계산기의 용량, 계산 시간 및 계산의 정확도 등을 고려하여 $\Delta x = \Delta y = 5cm$ 로 결정하였으며 격자 체계는 100×80 이다.

4.2 계산 결과

Berkhoff의 환경사방정식으로 부터 천수변형, 굴절, 회절 및 반사까지도 고려할 수 있는 쌍곡선형 환경사방정식을 유도하고 쇄파대 주변에서는 Izumiya와 Horikawa의 난류모형을 도입하여 저면마찰 및 쇄파에 의한 에너지 감쇠를 고려하였으며 수치계산은 양해법의 일종인 leap-frog법으로 해석하여 수리실험 및 수치실험결과와 비교한 결과 다음과 같다.

x 축방향 파고 계산치의 결과를 나타낸 것이 Fig. 4-2이다. Fig. 4-2에 의하면 이안제 전면의 파고 분포가 Watanabe와 Maruyama의 실험결과보다 다소 크게 나타나고 있으며 이것은 무반사성 입사경계에서 반사파를 완전히 투과 시키지 못한 결과라고 생각된다. 또한 Watanabe와 Maruyama의 수치계산 결과와 비교해 보면 전반적으로 본 모형의 파고가 크게 나타나는 이유는 Maruyama와 Kajima는 선유량 Q_x, Q_y 의 시간변화를 중복파랑장의 경우 타원 궤도를 형성하므로 선유량 타원의 장축방향을 주파향으로 결정하였으나 본 계산에서는 파향을 타원궤도가 아닌 직선 방향으로 계산된 결과라고 생각된다. y 축 방향 파고 계산치의 결과를 나타낸 것이 Fig. 4-3이다. Fig. 4-3에 의하면 구조물 전면 영역에서는 구조물로 인한 반사파 때문에 파고의 크기가 각 지점별로 차이가 있으나 배후 영역에서는 구조물로 인한 회절의 영향을 받아 파고가 작게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 구조물의 영향을 받지 않는 영역에서는 천수변형효과를 뚜렷하게 볼 수 있다. $Y = 2m$ 지점에서 쇄파후의 경우를 보면 Watanabe와 Maruyama의 수치계산 결과치와 비교하면 본 계산결과치가 수리실험의 결과치와 거의 일치하고 있다. 이러한 이유는 Watanabe와 Maruyama는 파고의 값을 근사적으로 나타내는 Mizuguchi의 와동점성모형을 사용하였고 본 계산에서는 쇄파대내에서 저면 마찰에 대

한 에너지 감쇠 및 쇄파에 의한 에너지 감쇠를 나타내는 Izumiya와 Horikawa의 난류모형을 사용한 결과 쇄파대내에서는 Izumiya와 Horikawa의 난류모형이 Mizuguchi의 와동점성모형보다 타당한 결과를 얻었다.

Fig. 4-4은 Watanabe의 무반사성 입사경계를 사용하여 구한 파고, 파향 벡터도이며 구조물 전면은 반사파의 영향으로 인하여 파랑이 복잡한 형태로 나타나고 구조물 배후지역에서의 최절효과를 볼 수 있다.

Fig. 4-5은 Fig. 4-4의 결과치를 입체적으로 나타낸 파랑 전파도이다.

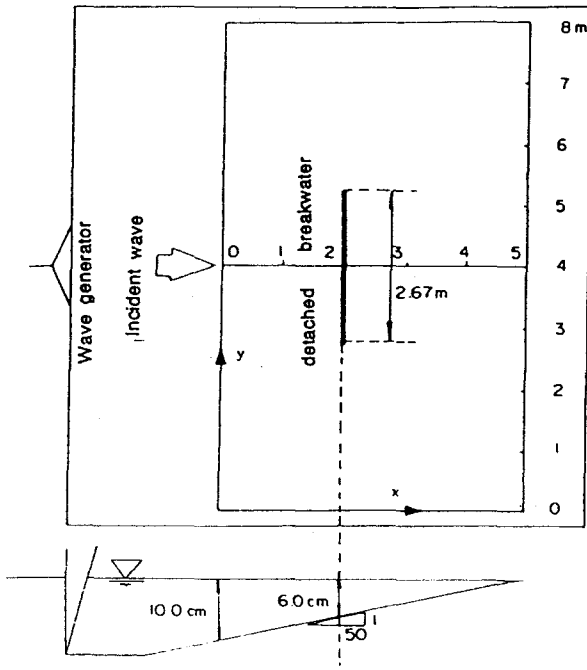


Fig. 4-1 Experimental Setup and Coordinates (Watanabe and Maruyama, 1985)

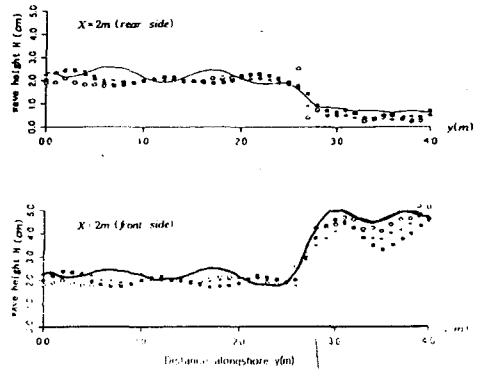
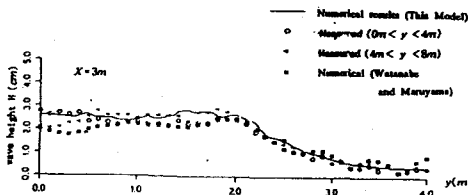


Fig. 4-2 Alongshore Distribution of Wave Height with Watanabe's Offshore Open Boundary Condition

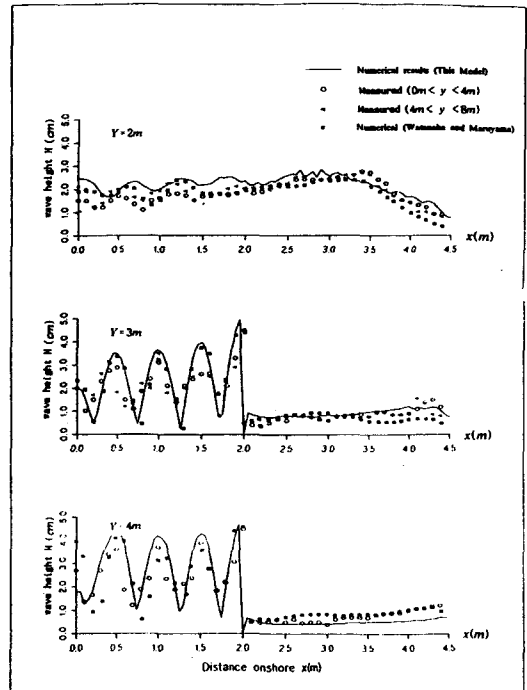


Fig. 4-3 Cross-shore Distribution of Wave Height with Watanabe's Offshore Open Boundary Condition

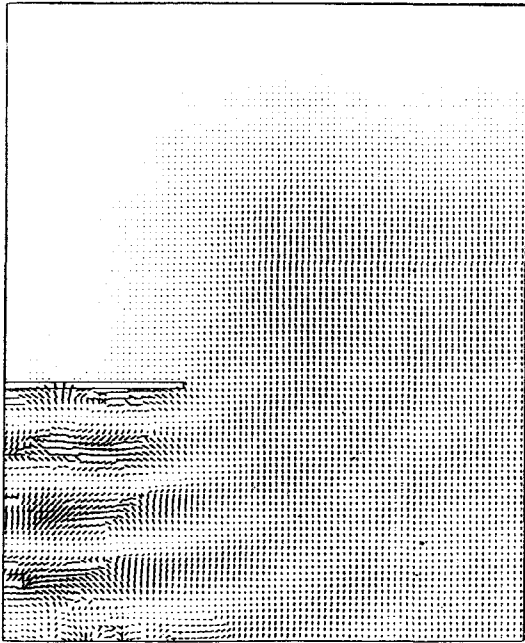


Fig. 4-4 Computed Wave Height and Wave Direction around a Detached Breakwater

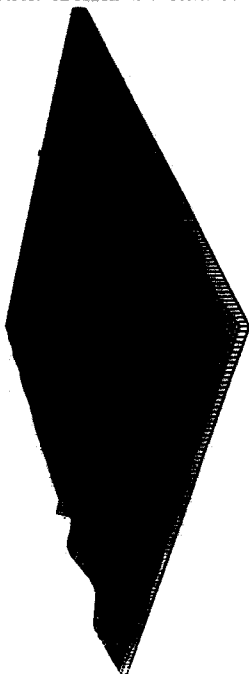


Fig. 4-5 3-D Wave Propagation around a Detached Breakwater

V. 현지 해안 적용 및 고찰

본 연구의 대상해안은 경남 울산군 서생면 진하리에 위치한 진하해수욕장이다. 본 해안은 울산시 울산면과 울산군 서생면의 경계를 이루는 회야강 하구가 있으며 거리로는 서생면 소재지에서 약 7km 북방에 위치하고 있다. 모래사장 길이 약 1000m, 폭이 약 30m에 달하고 있다. 그리고 육지로부터 160m 떨어진 거리에 거북등 모양의 조그만 섬 명선도가 있어 울산군민, 울산시민의 주요한 휴식처이다. 그런데 1973년 현대자동차 부지조성 때립시 명선도 좌측 해안의 막대한 준설로 인해 해수욕장의 침식현상은 시작되었다. 또한 1979년 진하리 토지 구획 정리 사업시 해변부에 직립호안을 설치하여 침식이 가중되었으며 진하해수욕장의 주표사 공급원인 회야강에 1987년 울산시 상수도 및 공업용수 확보를 위하여 회야댐이 건설되어 해마다 해안폭이 줄어들고 해변경사가 급해지고 있는 실정이다. 또한 진하해수욕장은 아주 오래전부터 명선도 우측 해수욕장에서 침식된 모래의 일부가 명선도와 육지 돌출부를 통과하여 좌측 해안에 쌓였다가 시간이 경과함에 따라 하구부를 폐색시키는 결과를 초래하고 있다. 현재와 같이 중기가 발전되기 전에는 주민들이 직접 바다에 들어가 어선이 출·입할 수 있도록 모래를 정리하였으며 87년 이후부터는 하구부에 퇴적된 모래를 준설하여 해수욕장 sandy by pass 하고 있다.

본 해역의 파랑 특성은 일반적으로 계절풍에 기인하여 발생 하는데 동절에는 북으로부터, 하절에는 남으로부터 진행에 오는 파랑이 탁월하다.

대상해역의 사빈형상 및 해저 수심을 측정하기 위하여 육상측량과 해상측량을 실시 하였다. 육상측량은 각 육상 측정 50m마다 level측량을 행하여 사빈 단면을 측정하였으며 해상측량의 수심은 음향측심기(ECHO-SOUND)를 이용하였으며, 위치결정은 광파측정기(GTS-30)로 결정하였다.

5.1 계산 조건

일반적으로 표사의 이동양상은 태풍과 함께 고 파랑이 내습하는 경우는 일시적인 것이고 주로 해

저지형을 지속적으로 변화시키는 파랑은 평상시에 해빈이 도달하는 파랑이다. 이러한 관점에서 볼 때 표사이동의 주된 원인인 파랑을 수치실험을 통하여 예측하는데 필요한 정보는 대상해역에 출현빈도가 많으면서 쇄파대에서 해빈류를 강하게 발생시키는 파랑이다.

본 계산 대상영역에 대한 Case별 파랑입력 자료는 해역이 위치하고 있는 온산, 울산 근해의 파랑 특성을 검토하기 위하여 울산지방 해운항만청 자료¹⁰⁾를 사용하였으며 그 결과를 분석한 실험 Case는 Table 5-1과 같다.

Table 5-1 Numerical Experiment Case

Case No.	Wave Height (m)	Wave Period (sec)	Wave Direction	Remarks
C-1	0.7	7.0	E	Ordinary wave
C-2	2.0	10.0	ESE	H _m
C-3	1.52	8.0	ENE	H _m

5.2 현지적용 결과 및 고찰

파랑변형 모델의 수립후 모델의 타당성을 검증하기 위하여 현지대상해안에 적용한 결과 다음과 같다.

파랑장 계산의 격자간격은 $\Delta x = \Delta y = 10\text{m}$ 이며 격자체계는 240×220 으로 구성되었으며 차분간격은 $t = 0.2\text{sec}$ 로 하고 $C_f = 0.02$ 로 결정하였다. 모형에 사용된 반사율은 Goda가 제안한 식을 이용하여 명선도와 같은 섬들은 0.15, 그 외 해안선 경계에서는 0.1로 하였다.

현지해안의 수심도는 Fig. 5-1과 같다.

Table 5-1의 각 Case별에 대한 입사조건에 대해 파랑장을 계산한 결과인 파향, 파고 벡터도는 Fig. 5-2~Fig. 5-4이다. 그리고 파향 결과에서 벡터도의 크기는 파고비이고 해안선 부근의 ●는 쇄파선을 나타낸다.

E계의 파랑이 탁월한 경우 진하해수욕장 전면 해역에 있는 천퇴때문에 에너지의 집중 현상이 일

어나 파고가 증가되는 현상은 모든 Case에 대해서 일어난다.

이러한 현상은 해안선 2m수심까지 전파되어 쇄파를 경험한 후 해안선에 도달됨을 볼 수 있다. 명선도쪽으로 전파되는 파랑은 명선도 전면에서 쇄파된다. 이러한 파는 명선도로 인하여 회절되며 명선도 배후에서는 정온한 상태를 유지한다.

ESE계의 파랑이 입사하는 경우 외해에서 진하해수욕장을 바라볼 때 진하해수욕장의 좌측부분은 파고비가 작게 나타남을 볼 수 있다. 명선도 전면 천퇴역의 얕은 수심으로 인한 파고 변화의 영향은 진하해수욕장 우측부분으로 전파됨을 알 수 있다.

ENE계의 파랑이 입사하는 경우 진하해수욕장 중심부로 전파하는 파랑은 해안으로 접근할수록 천수효과에 의해서 파고가 증가하며, 진하해수욕장 전면해역의 천퇴부근에서는 입사파에 비하여 파고가 1.5배 가까이 증가되나 그 증폭된 파랑이 해안까지 도달하지 않고 점차 감소하는 경향을 나타낸다.

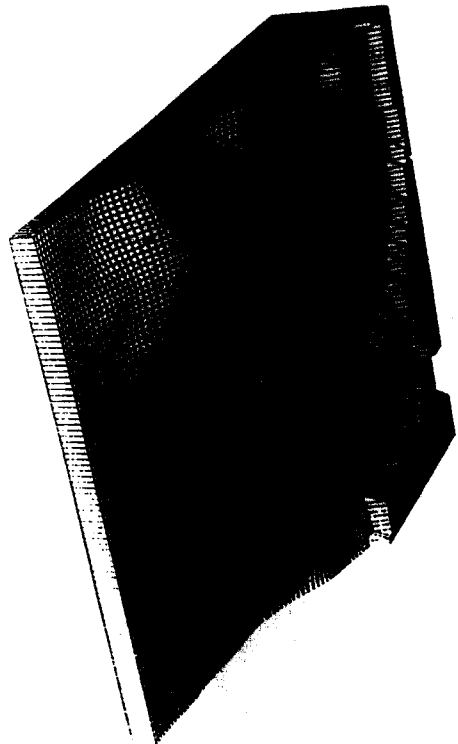


Fig. 5-1 Bottom Topography in the Jin-ha Sea

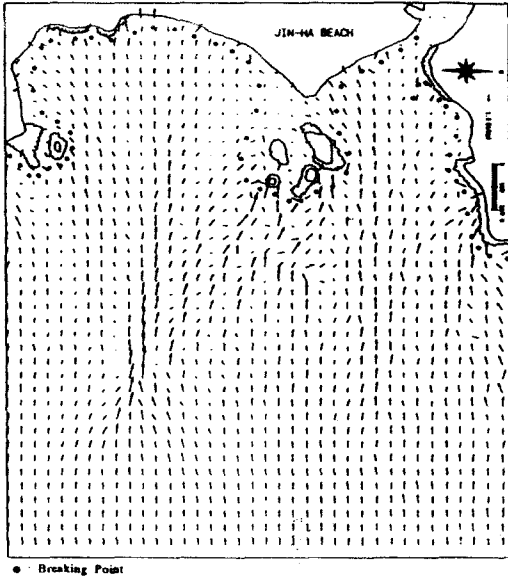


Fig. 5-2 Distribution of Wave angles and Heights
($H_0=0.7\text{m}$, $T=7.0\text{sec}$, Wave Direction=E,
Case-1)

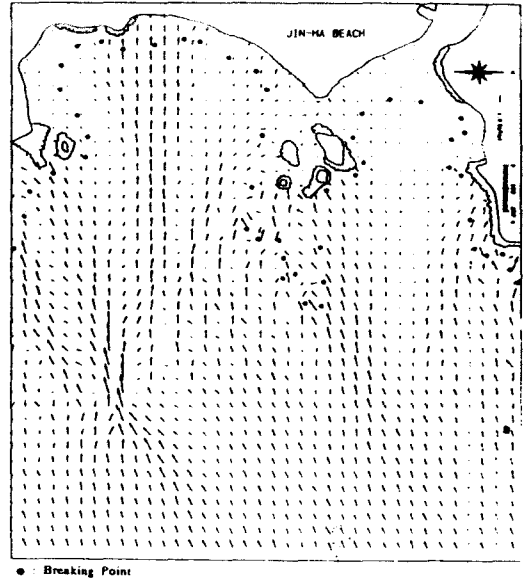


Fig. 5-4 Distribution of Wave angles and Heights
($H_0=1.52\text{m}$, $T=8.0\text{sec}$, Wave Direction=
ENE, Case-3)

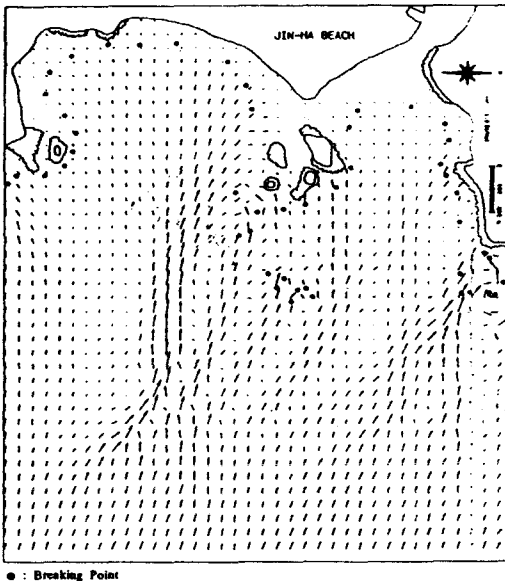


Fig. 5-3 Distribution of Wave angles and Heights
($H_0=2.0\text{m}$, $T=10.0\text{sec}$, Wave Direction=
ESE, Case-2)

VI. 결 론

파랑 변형 모형은 반사파를 고려할 수 있는 시간의존 환경사 방정식을 사용하여 파고, 파향을 산정하고 흐름의 기동력인 라디에이션응력항은 Watanabe와 Maruyama가 제안한 중복파에 대한 식에 의하여 산정하였으며 쇄파대 주변에서 에너지 감쇠항은 저면마찰 및 쇄파에 의한 Izumiya와 Horikawa의 난류모형을 도입하여 정식화하였다. 본 모형을 이안제가 설치된 Watanabe와 Maruyama의 수리실험 결과와 비교하였으며, 쇄파대 주변에서는 와동점성모형을 사용한 Watanabe와 Maruyama의 계산 결과보다 난류모형을 사용하여 계산한 값이 쇄파대내에서의 파고감쇠를 더욱 잘 나타내었다.

현지해안 적용결과 천뢰가 있으며 섬들이 존재하는 복잡한 해역에서도 파랑 특성이 잘 나타나고 있다.

본 연구는 장래 연안역 개발에 따른 매립, 방파제등과 같은 구조물이 건설될 경우 파랑 변형 예측

이나 해빈지형변화를 예측하는데 상당히 유용하리라고 판단된다.

후 기

본 연구는 밀양산업대학교 기성희 학술연구지원비 지원으로 연구되었으며 원고정리를 도와준 대학원생 박홍준군에게 고마움을 전합니다.

참고문헌

- 1) Watanabe A. and Maruyama K., "Numerical modeling of nearshore wave field under combined refraction, diffraction and breaking", Coastal Eng. in Japan, Vol. 29 : 19~39, 1986.
- 2) Izumiya T. and K. Horikawa, "A New Model for Wave Energy Equation inside and outside the Surf Zone", Proc. 30th Japanese Conf. on Coastal Eng., JSCE, pp.15-19(in Japanese), 1983.
- 3) Tanimoto K. and K. Kobune, "Computation of Waves in a Harbor Basin by a Numerical Wave Analysis Method", Proc. 22nd Japanese Conf. on Coastal Eng., JSCE, pp. 249~253 (in Japanese), 1975.
- 4) Berkhoff, J.C.W., Mathamerical Models for Simple Harmonic Linear Water waves-wave Refraction and Diffraction, Delft Hyd. Lab., No. 163, 1976.
- 5) Radder, A.C., "On the parabolic equation method for water-wave propagation", J Fluid Mech., Vol. 95 pp. 159~176, 1979.
- 6) Lozano C. and P.L.F Liu, "Refraction Diffraction Model for Linear Surface Water Waves", J. of Fluid Mech., Vol.101., Part4, pp.705~720, 1980.29) Lozano C. and P.L.F Liu, "Refraction Diffraction Model for Linear Surface Water Waves", J. of Fluid Mech., Vol.101., Part4, pp. 705~720, 1980.
- 7) Copeland G.J.M., "A Practical Alternative to the Mild Slope Wave Equation", Coastal Eng., Vol.9, pp. 125~149, 1985a.
- 8) Maruyama, K. and R. Kajima., "Two Dimensional Wave Calculation Method Base on Unsteady Mild Slope Equation", Electric Central Res. Inst. No.384041 (in Japanese), 1985.
- 9) Booij N., "Gravity Waves on Water with Non-Uniform Depth and Current", Rep. 81-1, Dept. Civil Eng., Delftb University of Techology, 1981.
- 10) 울산지방해운항만청, "해상파랑관측보고서-주전, 온산 파랑관측기록", 1985~1993년도.