

可變格子體系에 의한 沿岸構造物 周邊의 波浪變形模型 A Numerical Model for Wave Deformation around Coastal Structures in Variable Grids

이동수* · 김태인*

Dong Soo Lee* and Tae In Kim*

要 旨 : 非定常 緩傾斜방정식을 이용하여 연안구조물 주위의 파랑변형을 예측하기 위한 수치모형을 개발하였다. 碎波와 波反射를 보다 정확하게 해석하기 위하여 Izumiya and Horikawa(1984)의 에너지 방정식을 이용하여 쇄파에 의한 감쇠와 해저면 마찰을 해석하였으며, 격자간격의 제한을 받는 비정상 환경사방정식의 단점을 보완하기 위하여 可變 格子體系를 도입하였다. 본 모형에 의한 실험치를 이론치 및 기존의 수리실험 결과와 비교하여 모형의 재현성 및 가변 격자체계의 적용성을 확인하였고, 실제 해역에도 적용하였다.

Abstract □ A numerical shallow water wave deformation model to solve unsteady mild slope equation was developed. The energy equation of Izumiya and Horikawa(1984) for wave breaking and bottom friction was incorporated to estimate more realistically energy damping resulted from wave breaking and reflection. A numerical scheme for variable grid spacings was also introduced to complement the defect of unsteady mild slope equation limiting the grid spacings. This model was tested and compared with the existing analytic solutions and physical modelings, and applied to a practical situation.

1. 서 론

심해에서 진행하여 오는 파랑은 연안 구조물 주변에서 주로 반사와 회절에 의하여 변형되며, 특히 쇄파대에 위치한 구조물 주위에서는 복잡한 파랑변형 양상을 나타낸다. 따라서, 연안 구조물 설계 또는 구조물에 의한 해양환경 변화 평가시 주요 외력이 되는 파랑의 변형을 보다 정확하게 예측하기 위해서는 제반 파랑변형 요인을 고려한 수치모형의 개발이 요구된다.

연안역의 파랑변형을 산정하는 수치모형은 타원형 방정식의 형태로 해석하는 방법(Ebersole, 1985), 포물형 근사법으로 해석하는 방법(Radder, 1979; Lozano and Liu, 1980), 그리고 쌍곡형인 한 쌍의 선형 방정식을 해석하는 방법(Copeland, 1985)등 크게 세 가지로 구분할 수 있다. 타원형 방정식을 수치해석하는 경우는 격자간격의 제한을 받지 않기 때문에 넓은 범위의 해역을 취급하는데 효과적이나 구조물에

의한 반사를 반영할 수 없다는 단점이 있다. 포물형 근사법은 기억 용량을 과다히 요구치 않고 계산 속도가 빠르다는 장점이 있으나, 회절파를 정확히 해석할 수 없기 때문에 실제 해역에 적용하기에는 많은 제약이 따른다. 반면에 쌍곡형 방정식을 푸는 수치모형은 파랑의 제반 변형 요인을 거의 고려할 수 있으며, 특히 구조물에 의한 반사문제를 취급하기에 용이하기 때문에 구조물 배치에 따른 파랑변형 또는 항내 정온을 평가하는 데에 유용하게 이용될 수 있다. 최근에 해류의 간섭과 에너지 감쇠효과를 동시에 고려할 수 있는 쌍곡형 수치모형이 국내 해안에 적용되어 왔으나(Yoo, 1989; 광 등, 1990), 이 모형들은 파랑변형을 보다 실제현상과 유사하게 산정할 수 있는 장점에도 불구하고, 격자간격의 제약을 받으며 계산 시간이 과다하게 소요되는 문제점을 내포하고 있다.

본 연구에서는 Nishimura *et al.*(1983)의 쌍곡형 비정상 환경사방정식과 Watanabe and Maruyama

*(주)한국해양과학기술 (Korea Ocean Science and Engineering Corp., Seoul 140-190, Korea)

(1986)의 식을 근간으로 하여 수치모형을 개발하였다. 특히, 쇄파대 내측과 구조물 주위에서의 정확한 해석을 위하여 격자간격을 좁게 하는 동시에 전체 계산시간을 단축시킬 수 있도록 가변 격자체계로 개발하였다. 또한, Izumiya and Horikawa(1984)의 에너지 방정식을 이용하여 쇄파와 해저면 마찰에 의한 에너지 감쇠를 해석하였다. 수치모형의 타당성을 확인하기 위하여 임의의 장방향 수조에서 반사율과 파형의 시간 변화를 검토하고, 원형 천퇴 주위의 파랑변형을 계산하여 기존의 수치실험결과(伊藤·谷本, 1972)와 비교하였다. 에너지 감쇠에 따른 파랑변형 계산결과를 Watanabe and Maruyama(1986)의 실험결과와 비교하였으며, 구조물 주위의 파랑변형 계산결과를 Watanabe and Maruyama(1986) 및 Isobe(1986)의 실험결과와 비교, 고찰하였다. 또한, 본 모형을 영일만의 포항신항에 적용하여 현지 재현성을 검토하였다.

2. 기본방정식

유체의 연속방정식과 운동방정식으로부터 식 (1)과 같은 압력에 관한 Laplace식이 얻어진다.

$$\nabla^2 P + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

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

식 (1)에 연직방향 분포 함수를 곱하고 해저면부터 해수면까지 적분하면 식 (2)와 같다.

$$\int_{-h}^0 \left(\nabla^2 P + f \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \right) dz = 0 \quad (2)$$

$$\text{여기서, } f = \cosh(k(z+h))/\cosh(kh) \\ P/\rho g = -z + f(z)\eta(x,y,t)$$

이다. 해저면이 완경사인 조건으로부터 $|f^2 \nabla^2 \eta| \gg |\nabla^2 \eta|$ 라 가정하면 식 (2)로부터 쌍곡형 방정식 (3)이 얻어진다.

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} = \frac{\nabla(nC^2 \nabla \eta)}{n} \quad (3)$$

식 (3)은 식 (4)와 같이 1계 선형 연립방정식으로 나타낼 수 있다(Nishimura *et al.*, 1983).

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + C^2 \nabla \eta = 0 \\ \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{n} \nabla \cdot (nQ) = 0 \quad (4)$$

여기서, Q 는 선유량 벡터로서 다음과 같다.

$$Q_x = \int_{-h}^0 u dz, \quad Q_y = \int_{-h}^0 v dz$$

한편, Watanabe and Maruyama(1984)는 천수 변형을 보다 정확하게 표현하기 위하여 伊藤·谷本(1972)의 식에 수심 변화를 고려하여 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{C^2}{n} \nabla(n\eta) = 0 \\ \frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \cdot Q = 0 \quad (5)$$

본 수치모형에서 쇄파대 외해측에서는 식 (4)를 기본방정식으로, 그리고 쇄파대 내측에서는 식 (5)의 운동방정식에 에너지 감쇠항을 부가하여 기본방정식으로 사용한다. 식 (5)에 에너지 감쇠계수 f_d 를 추가하면 식 (6)과 같이 된다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{C^2}{n} \nabla(n\eta) + f_d Q = 0 \quad (6)$$

수면 변위를 $\eta = a(x,y)e^{is}$ 라 하면 식 (4)와 식 (6)로부터 다음 에너지 방정식 (7)이 유도된다.

$$\nabla \cdot (EC_g) = -f_m n E \quad (7)$$

본 모형에서는 Izumiya and Horikawa(1984)가 제안한 에너지 감쇠항을 다음과 같이 수정하여 사용한다.

$$f_d = \sqrt{2} C_f \sqrt{E} \frac{1}{\rho^{1/2} h^{3/2}} + \beta_0 \left(\frac{E}{\rho h g^2} - M_s^2 \right)^{1/2} \frac{\sqrt{E}}{\rho^{1/2} h^{3/2}} \quad (8)$$

$$\text{여기서, } \beta_0 = 1.8 \\ M_s^2 = 0.09 \\ C_f : \text{마찰계수} \\ \rho : \text{해수밀도} \\ E = 1/2 \rho g a^2$$

이다. 식 (8)의 우변 첫째 항은 해저면 마찰에 의한 에너지 감쇠를 나타내며, 두 번째 항은 쇄파에 의한

에너지 감쇠를 나타낸다.

3. 수치 계산

3.1 기본방정식의 차분화

기본방정식을 유한차분 양해법으로 차분화하며 반격자씩 엇갈린 staggered mesh에서 Watanabe and Maruyama(1986)의 방법으로 수치해석한다. 차분을 위한 격자체계는 Fig. 1에 제시되어 있으며 각 변량을 나타내는 기호는 식 (9)와 같이 쓸 수 있다.

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

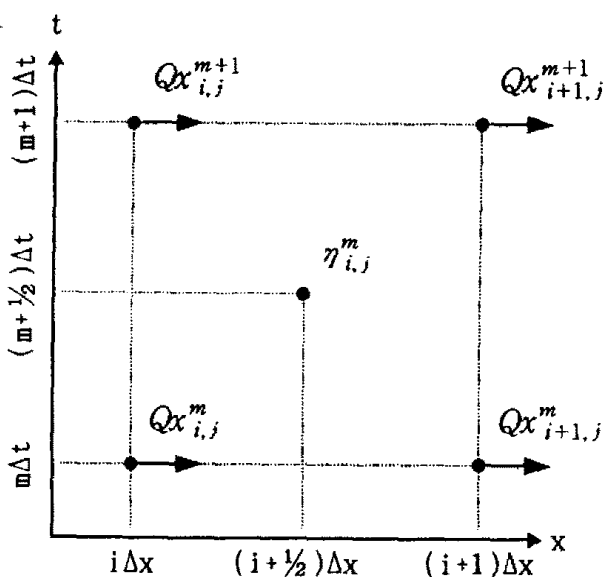
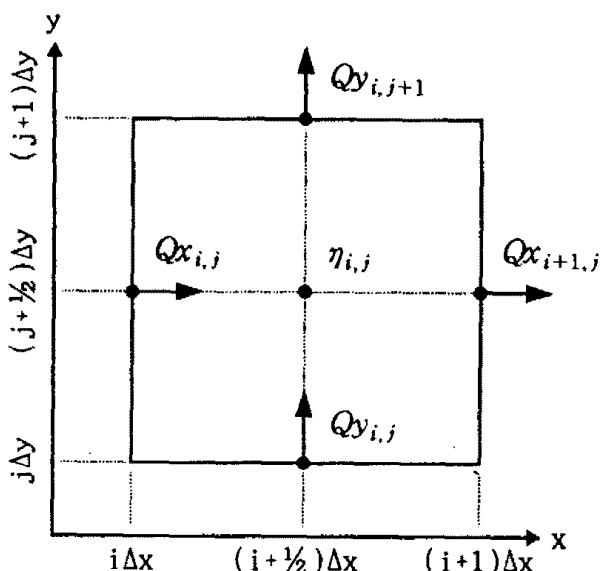


Fig. 1. The location of the model variables on the finite difference grid.

$$Q_{yij}^m = Q_y((i+1/2)\Delta x, j\Delta y, m\Delta t) \quad (9)$$

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

여기서, Δx 는 on-offshore 방향의 격자간격, Δy 는 longshore 방향의 격자간격, Δt 는 계산시간 간격이다. 식 (4)를 Fig. 1의 격자체계로 차분화하면 식 (10)과 같고, 쇄파대 내측에서의 식 (6)과 식 (5)의 연속방정식을 차분화하면 식 (11)과 같다.

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

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

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

$$- \frac{\Delta t}{\Delta y n_{ij}} (n_{yij+1} Q_{yij+1}^{m+1} - n_{yij} Q_{yij}^{m+1}) \quad (10)$$

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

$$- f_d Q'_x{}_{ij} \Delta t$$

$$Q_{yij}^{m+1} = Q_{yij}^m - \frac{\Delta t}{\Delta y} \frac{1}{n_{ij}} C_{yij}^2 (n_{yij} \eta_{i-1j}^m - n_{xi,j-1} \eta_{i,j-1}^m)$$

$$- f_d Q'_y{}_{ij} \Delta t$$

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

$$- \frac{\Delta t}{\Delta y} (Q_{yij+1}^{m+1} - Q_{yij}^{m+1}) \quad (11)$$

식 (11)에서 에너지 감쇠항의 Q'_x 과 Q'_y 은 한 시간 간격 전의 값을 사용한다. Δt 는 식 (12)와 같은 안정조건을 만족하여야 한다. 여기서, C_{max} 는 계산 영역내에서 최대 위상속도이고, Δx_{min} 과 Δy_{min} 은 각각 x 와 y 방향의 최소 격자간격이다.

$$\Delta t \leq \frac{1}{C_{max} \sqrt{\frac{1}{\Delta x_{min}} + \frac{1}{\Delta y_{min}}}} \quad (12)$$

3.2 초기 조건

계산 초기에 입사경계를 제외한 각 격자점의 수면 변위 η 및 선유량 Q_x 와 Q_y 는 모두 0으로 주어진다.

3.3 경계 조건

3.3.1 반사 경계

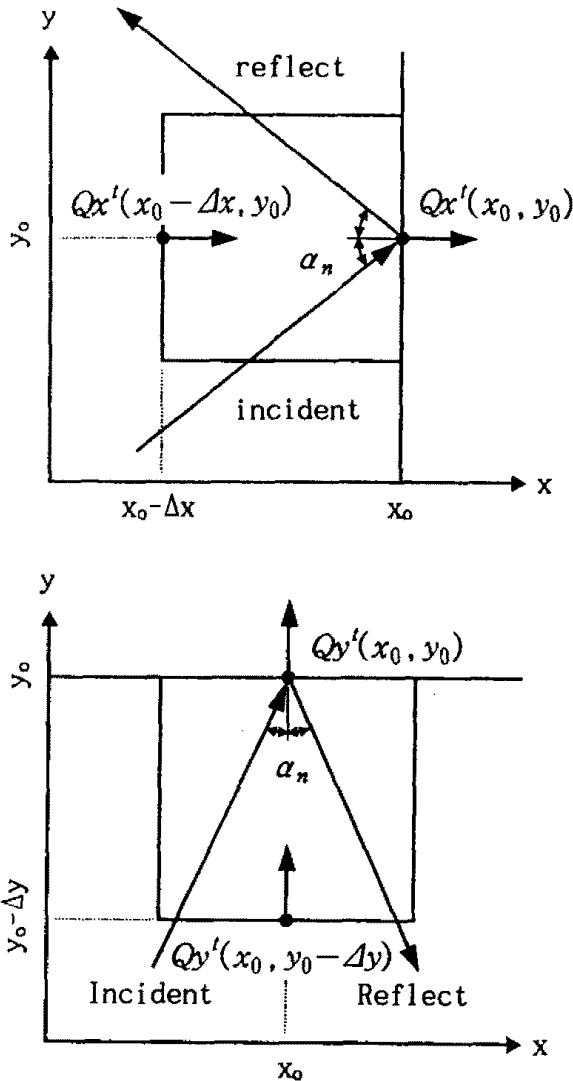


Fig. 2. Schematics of reflection boundaries.

파랑이 y 축에 평행한 반사경계로 진행할 때, 입사파와 반사파의 합성 선유량은 식 (13)과 같이 표현된다(Fig. 2).

$$\begin{aligned} Q_x'(x_0, y_0) &= Q_{xI}'(x_0, y_0) + Q_{xR}'(x_0, y_0) \\ Q_x'(x_0 - \Delta x, y_0) &= Q_{xI}'(x_0 - \Delta x, y_0) + Q_{xR}'(x_0 - \Delta x, y_0) \end{aligned} \quad (13)$$

경계점 (x_0, y_0) 의 선유량은 $(x_0 - \Delta x, y_0)$ 의 값으로부터 구할 수 있으며, 파가 $(x_0 - \Delta x, y_0)$ 부터 (x_0, y_0) 까지 도달하는데 걸리는 시간을 τ 라 하면 식 (14)가 성립한다.

$$Q_x'(x_0, y_0) = A Q_x'^{-\tau}(x_0 - \Delta x, y_0) \quad (14)$$

$$\text{여기서, } A = \frac{1-R}{\sqrt{1+R^2-2R\cos(2k\Delta x\cos\alpha_n)}}$$

$$\tan(\sigma\tau) = \frac{1+R}{1-R} \tan(k\Delta x\cos\alpha_n)$$

R : 반사율

이며, 완전 반사($R=1$)인 경우는 식 (14)의 우변이 0이 된다. 마찬가지로, x 축에 평행한 경계에서 합성 선유량은 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_y'(x_0, y_0) = B Q_y'^{-\tau}(x_0, y_0 - \Delta y) \quad (15)$$

$$\text{여기서, } B = \frac{1-R}{\sqrt{1+R^2-2R\cos(2k\Delta y\cos\alpha_n)}}$$

$$\tan(\sigma\tau) = \frac{1+R}{1-R} \tan(k\Delta y\cos\alpha_n)$$

이다.

3.3.2 투과 경계

모형의 측면경계와 같은 가상 경계면으로 파랑이 진행하는 경우에는 파랑이 이 경계면을 완전히 투과하는 것으로 처리한다. 이것은 반사경계에서 반사율이 0인 경우와 같으며 식 (14)와 (15)에서 $R=0$ 로 놓으면 다음과 같은 투과 경계조건을 얻을 수 있다.

$$Q_x'(x_0, y_0) = Q_x'^{-\tau}(x_0 - \Delta x, y_0), \quad \tau = \Delta x\cos(\alpha_n/C)$$

$$Q_y'(y_0, x_0) = Q_y'^{-\tau}(y_0, y_0 - \Delta y), \quad \tau = \Delta y\cos(\alpha_n/C) \quad (16)$$

3.3.3 입사 경계

입사경계에서는 입사파 뿐만 아니라 계산영역 내부로부터 외부로의 반사파도 함께 고려하여 다음과 같이 입사 선유량과 무반사 투과 선유량의 합으로 나타낸다(Fig. 3).

$$\begin{aligned} Q_x'(x_0, y_0) &= a_i C \cos\alpha_i \sin(kx_0 \cos\alpha_i + ky_0 \sin\alpha_i - \sigma t) \\ &\quad + Q_{xR}'(x_0 + \Delta x, y_0) \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} Q_{xR}'(x_0 + \Delta x, y_0) &= Q_x'(x_0 + \Delta x, y_0) - a_i C \cos\alpha_i \sin(k \\ &\quad (x_0 + \Delta x) \cos\alpha_i + ky_0 \sin\alpha_i - \sigma t) \end{aligned} \quad (18)$$

식 (18)에서 구한 선유량을 시간적으로 보간하여 식 (17)의 우변 두 번째 항을 구하면 입사경계의 선유량을 구할 수 있다. Spline법을 이용하여 지속시간 τ 에 관한 선유량을 보간함으로써 구조물 전면과 같이 불규칙한 중복 파랑장이 형성되는 해역에서도 보다 정확한 해를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

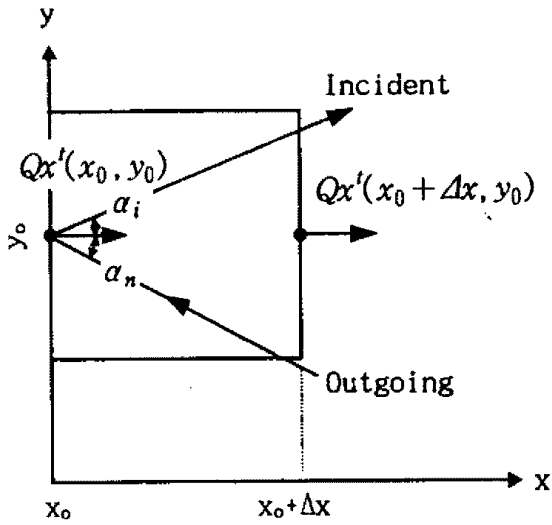


Fig. 3. Schematics of offshore open boundaries.

3.4 파고와 파향의 산정

파랑 한 주기 계산 종료시마다 각 격자점에서 계산된 수면 변위 η 와 선유량 Q_x, Q_y 를 이용하여 파고와 파향을 결정한다. 파고는 한 파랑주기간 수면 변위의 최대값 및 최소값의 차로 정의하며, 파향은 식 (19)와 같이 한 파랑주기간 최대 선유량 성분의 합성 벡터에 의하여 결정된다.

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{Q_{y \max}}{\sqrt{Q_{x \max}^2 + Q_{y \max}^2}} \right) \quad (19)$$

파향이 최대 선유량에 의하여 결정되므로 구조물 주위에서 반사 등에 의하여 형성되는 불규칙한 파랑장에서의 파향 계산이 가능할 것으로 판단된다.

4. 격자간격에 따른 모형의 계산오차

격자간격의 차이에 따른 모형의 계산 오차를 알아보기 위하여 저면 경사를 1/50로 가정하고 파고 2.0 cm, 주기 1.2초(파형경사 0.028)인 입사 파랑에 대한 계산을 수행하여 쇄파대 부근($h/L_0=0.025$)에서 해석해와 비교하였다. Table 1과 Fig. 4는 해석해와 실험치의 상대오차를 나타내는데 상대오차 Re는 다음과 같이 구해진다.

$$Re = \frac{|H_c' - k_s|}{k_s} \times 100$$

여기서, H_c' 는 모형에서 계산된 파고와 입사파고 H_0 의

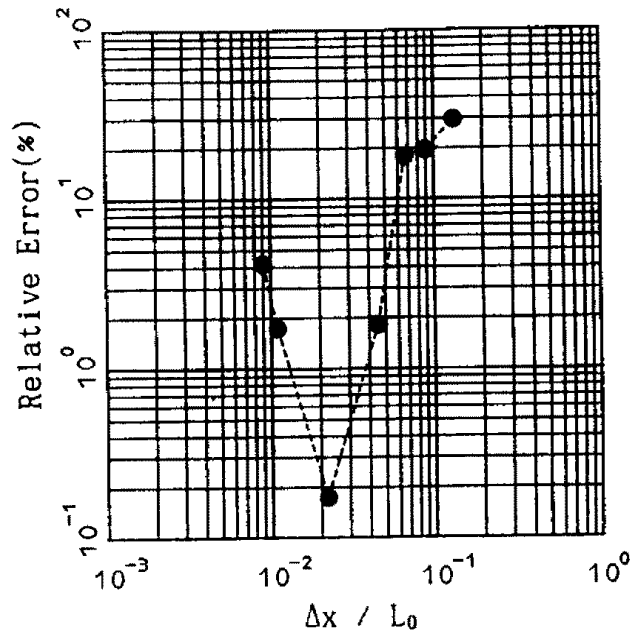


Fig. 4. Relative errors of numerical solutions for different grid spacings.

Table 1. Relative errors of numerical experiments to analytic solutions for different grid spacings

Case	Δx (cm)	$\Delta x/L_0$	Δt (sec)	H_c/H_0	Re (%)
1	2.0	0.009	0.01	1.216	4.110
2	2.5	0.011	0.01	1.188	1.712
3	5.0	0.022	0.03	1.170	0.171
4	10.0	0.045	0.05	1.189	1.798
5	15.0	0.067	0.08	1.378	17.979
6	20.0	0.089	0.10	1.395	19.435
7	30.0	0.134	0.20	1.513	29.538

비이며, k_s 는 천수계수로서 1.168이다.

격자간격이 작을수록 오차가 작아지나, 격자간격 ($\Delta x/L_0$)이 약 1/50 보다 더 작아지면 상대오차가 다시 증가하는 양상을 나타낸다. 따라서, 쇄파대와 같이 불규칙한 파동장에서 격자간격에 의한 오차를 2% 이내로 유지하기 위해서는 격자간격을 $0.01 \sim 0.05L_0$ 로 구성하여야 함을 알 수 있다.

5. 모형의 적용

수치모형의 타당성을 검토하기 위하여 Table 2에 제시된 7건의 실험을 수행하여 검토하였으며, 이 중 5건은 기존의 수리실험 조건과 동일하게 하여 그 결과를 비교하였다.

Table 2. Experiment conditions of the numerical model

		Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6	Case 7
		Circular Shoal		Rectangular Basin	Mild Slope	Coastal Structure		Pohang New Harbour
Previous Physical Model		伊藤·谷本(1972)		—	Watanabe & Maruyama (1986)		Isobe (1986)	—
Model Configuration	Domain Depth	3.2×2.4m 5-15 cm		330×120m 12m	6×3m 0-12 cm	6×3m 0-10 cm	9×9m 0-40 cm	5.8×4.8 km 10-20m
	Δx Δy	5 cm 5 cm	2.5-5 cm 2.5-5 cm	10m 10m	10 cm 10 cm	5-10 cm 5-10 cm	5 cm 5 cm	20m 20m
Incident Wave	H_0 (cm)	1.0		200.0	2.0	2.0	9.1	100.0
	T(sec)	0.51059		10.0	1.2	1.2	0.83	12.0
	θ_0 (°)	0.0		0.0	28.3	0.0	18.0	N45°E
Δt (sec)		0.02	0.01	0.5	0.05	0.035	0.02	0.8
Reflection coeff.		0.0		0.0 & 1.0	0.1	1.0	0.1-0.4	0.1-0.5
Friction coeff.		0.0		0.0	0.0 & 0.016	0.01	0.02	0.01

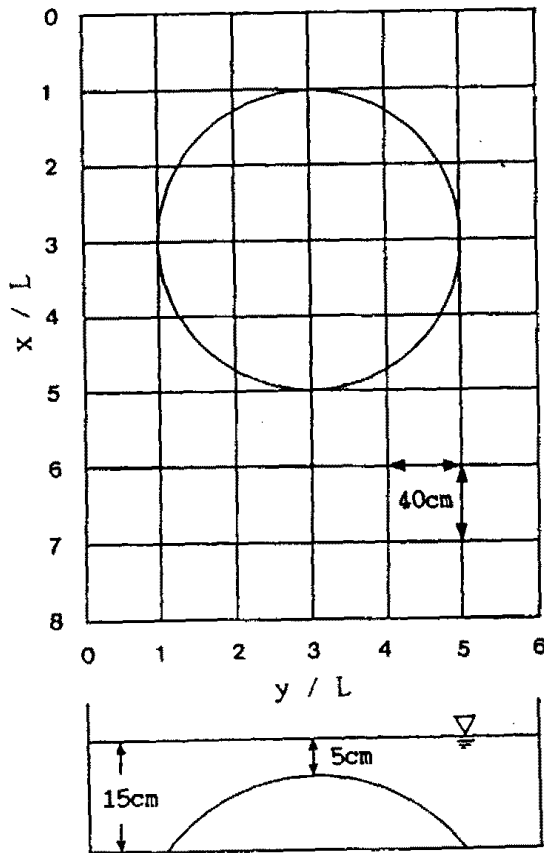


Fig. 5. Model configuration for circular shoal(Case 1 and 2).

5.1 원형 천퇴

수심에 따른 굴절과 회절이 일어나는 원형 천퇴

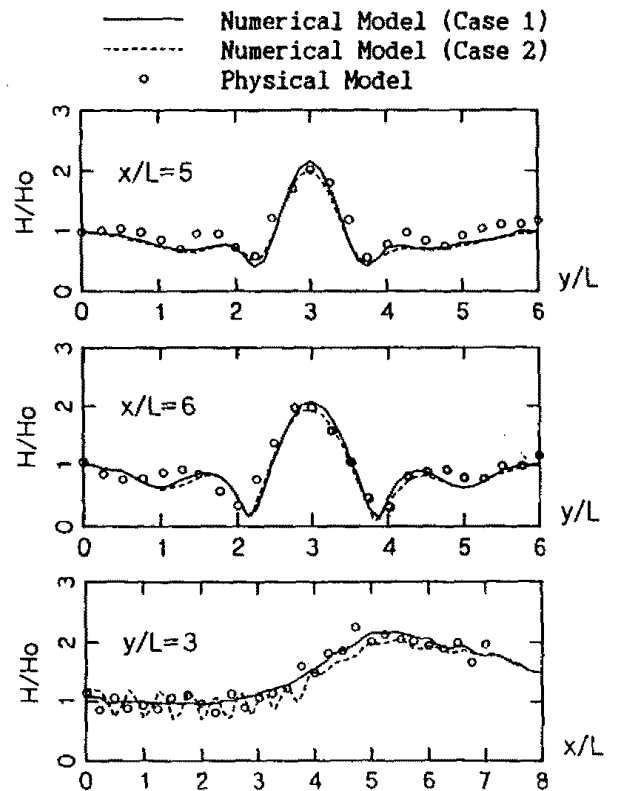


Fig. 6. Comparison of wave heights by the numerical and the physical modeling for circular shoal in two transverse and a longitudinal sections(Case 1 and 2).

주위의 파랑 변화 재현성을 검토하기 위하여 기존의 수조실험(伊藤·谷本, 1972)과 동일한 조건으로 수치

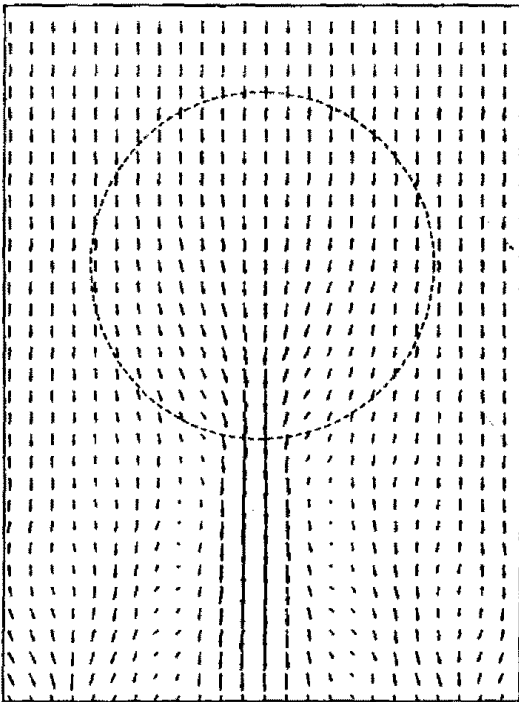


Fig. 7. Wave distribution by the numerical modeling for circular shoal(Case 1).

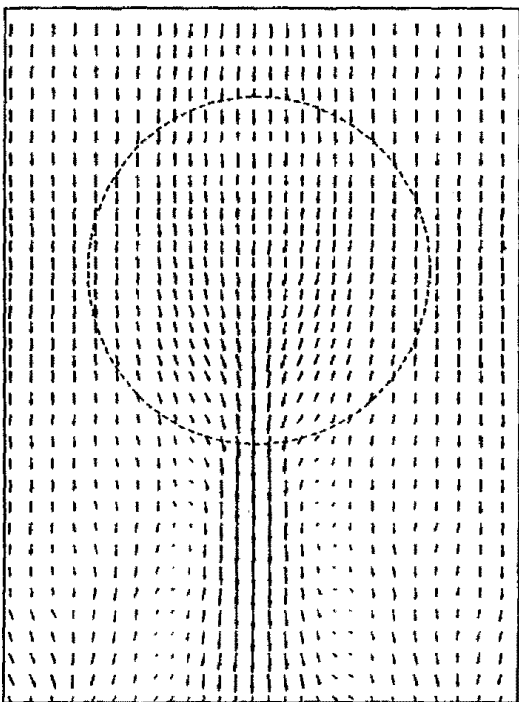


Fig. 8. Wave distribution by the numerical modeling for circular shoal(Case 2).

실험을 수행하였다(Fig. 5). Case 1은 $\Delta x = \Delta y = 5$ cm로서 한 파장에 8개의 격자가 포함되고 $\Delta t = 0.02$ 초로 계산하였다. Case 2는 $x/L = 2 \sim 4$ 와 $y/L = 2 \sim 4$ 구역의

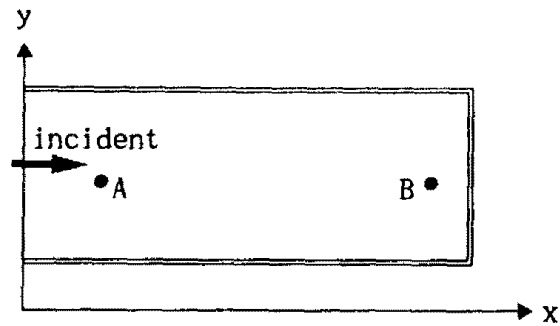


Fig. 9. Model configuration for rectangular basin(Case 3).

격자간격이 2.5 cm, 그리고 그 이외의 영역은 5 cm인 가변격자망으로 구성되어 $\Delta t = 0.01$ 초로 계산하였다.

천퇴 배후의 횡단면 $x/L = 5, x/L = 6$ 및 천퇴 중앙을 지나는 종단면 $y/L = 3$ 에서 수치실험 및 기존 수리실험에 의한 파고비 분포를 Fig. 6에 제시하였다. 두 횡단면에서는 Case 1과 2의 결과가 수리 실험결과와 거의 유사한 양상을 나타내며, 종단면에서는 Case 1과 2의 결과가 다소 차이를 나타낸다. 수리실험에서는 천퇴 전면에서 파고가 불규칙적으로 진동하는데, Case 1은 비교적 매끄러운 파고 분포를 나타내는 반면에 Case 2는 특히 진동폭에 있어서 수리실험과 유사한 경향을 나타낸다. 이러한 결과는 주로 격자간격의 축소에 기인하는 것으로 판단되며, 천퇴 전면에서 불규칙한 파고 분포가 나타나는 현상은 천퇴에 의한 수중반사효과에 의한 것으로 생각된다. Fig. 7과 8은 각각 Case 1과 2의 파랑벡터도인데 전술한 바와 같이 천퇴 전면에서 파고 분포의 차이가 뚜렷하게 나타난다.

5.2 장방형 수조

경계면에서 완전투과 또는 완전반사 조건일 경우의 수면 변위를 산정하여 Fig. 9에 제시된 바와 같은 수심 12m의 직사각형 수조에 대하여 수치실험을 하였다. 반사율이 0인 완전투과 조건일 경우 거리가 290m인 A에서 B까지 파랑이 전달되는 시간이 약 29초로서 파랑이 정확하게 전파되고 있으며, 파고도 계속 동일한 값을 나타낸다(Fig. 10). 반사율이 1인 완전반사 조건일 경우에도 A에서 B까지 파랑의 전파시간은 완전투과 조건일 경우와 동일하며, B에서 반사된 파랑이 다시 A로 전달되는 시간부터 서서히 입사파고의 2배로 수면변위가 일어나는데 이는 무반사 입사경계 처리의 적합성을 확인시켜 준다.

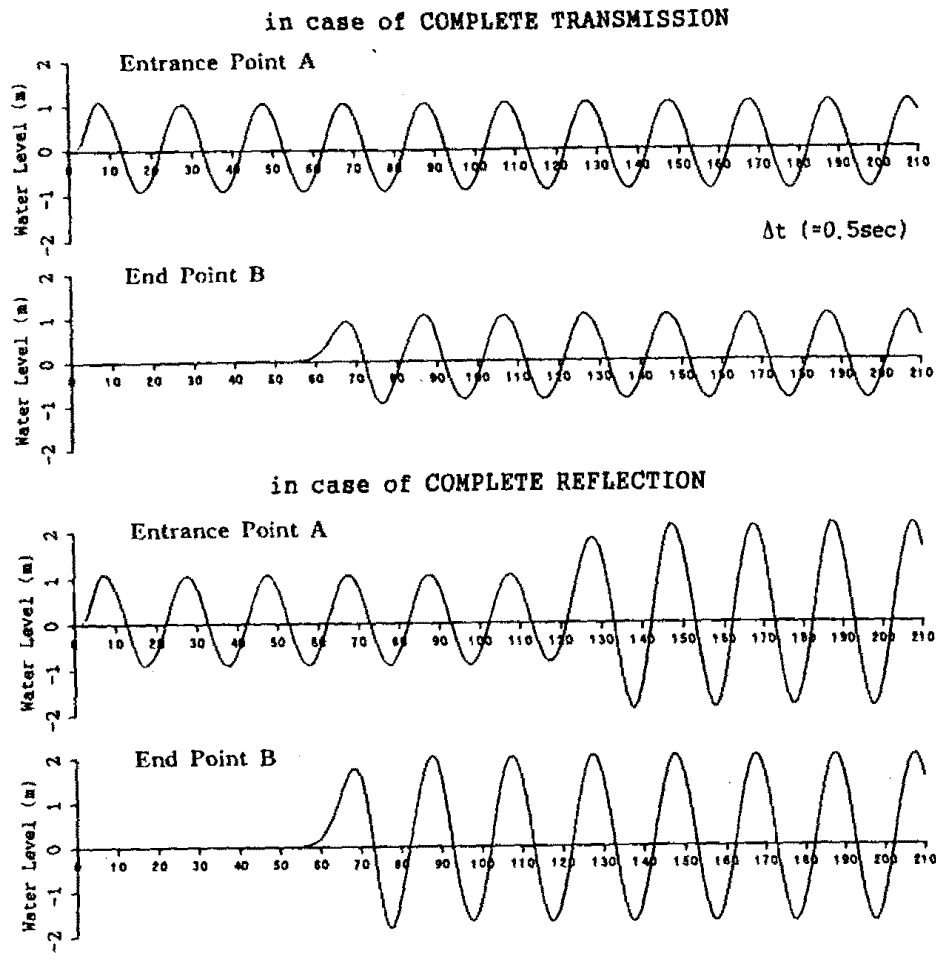


Fig. 10. Time-series of surface elevation at the entrance and the closed end in case of complete transmission and complete reflection(Case 3).

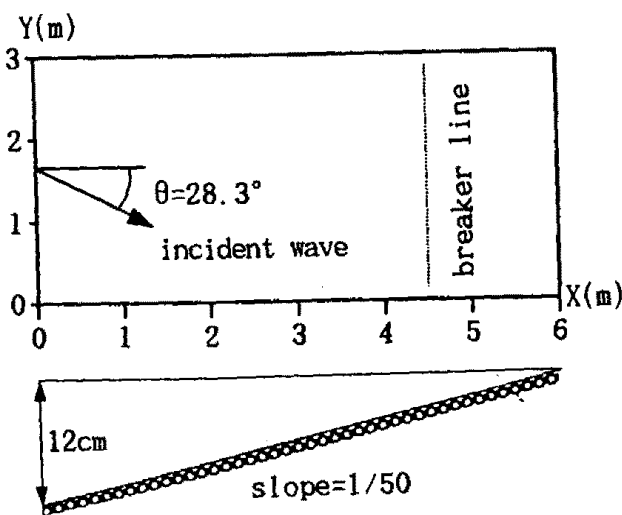


Fig. 11. Model configuration for uniform mild slope(Case 4).

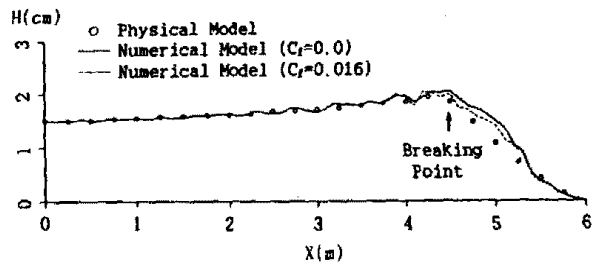


Fig. 12. Wave heights by the numerical and the physical modeling for uniform mild slope in a longitudinal section of $y=1.5m$ (Case 4).

5.3 쇄파 변형

Watanabe and Maruyama(1986)의 환경사 구조설

험과 동일한 조건하에서 쇄파대에서의 파고 분포에 대하여 실험하였다(Fig. 11). 실험결과는 Fig. 12에 제시되어 있는데 여기서 실선은 저면마찰계수(C_f)가 0.0, 점선은 0.016인 경우이다. 수치실험치는 수치실험치와 전반적으로 거의 유사한 양상을 보이지만, 쇄파대 내측에서 수치실험치가 약간 높게 나타난다. 또한, 쇄파 직후 저면 마찰에 의한 에너지 감소가 현저함을

알 수 있다.

5.4 연안 구조물

기존의 수리실험결과가 있는 이안제(Watanabe and Maruyama, 1986) 및 방파제(Isobe, 1986)에 대하여 수리실험과 동일한 조건으로 수치실험하여 그 결과를

비교하였다.

먼저 이안제 모형 배치와 구역별 격자간격은 Fig. 13 과 같다. Fig. 14는 이안제와 직각방향으로 $y=2m, 3m, 4m$ 의 세 단면, 그리고 이안제와 평행한 $x=2m$ (이안제 전면), $2m$ (이안제 후면), $3m$ 의 세 단면에서 수조 및 수치실험 결과를 제시한 것이다. 이안제의 전면과 후면에서는 수치 및 수조 실험결과가 유사한 경향을 보이고 있으나 쇄파대 부근에서는 다소 차이를 나타낸다. 이것은 수치모형의 격자간격이 $\Delta x/L_0=0.022$ 로 한 파장당 격자수가 충분하도록 구성하였으나 쇄파대 부근에서 파장이 짧아지므로 한 파장당 약 14개의 격자만이 포함되기 때문인 것으로 여겨진다. Watanabe and Maruyama(1986)는 쇄파대 부근에서 한 파장당 20~40개의 격자가 필요하다고 지적한 바 있고, 전술한 모형의 격자간격에 따른 계산오차의 검토에서도 쇄파대와 같이 불규칙한 파동장에서는 한 파장당 20개 이상의 격자가 포함되어야 함을 확인한 바 있다.

방파제 실험장치는 Fig. 15와 같다. 구조물 내부의 단면 B-B'에서 수조실험과 수치실험의 파고 분포는 비교적 잘 일치하고 있으나, 단면의 중앙에서 수치 실험치가 다소 높게 나타나는데 이것은 수조실험에서는 구조물이 쇄파대에 위치하여 발생하는 흐름과

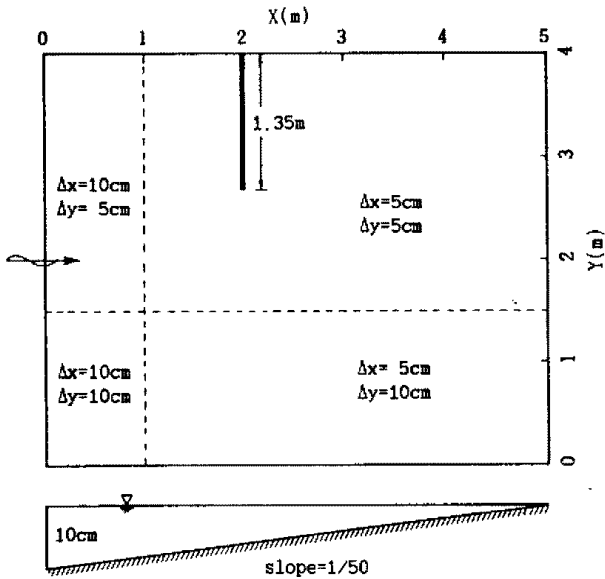


Fig. 13. Model configuration for detached breakwater(Case 5).

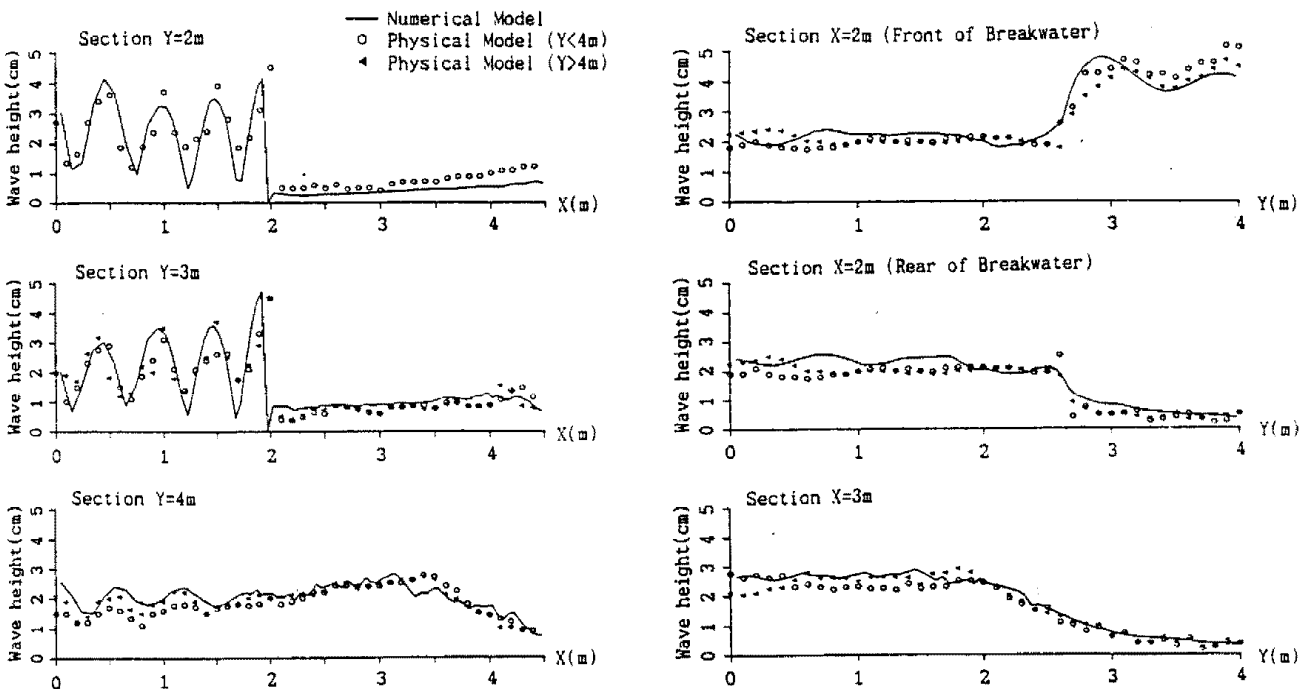


Fig. 14. Wave heights by the numerical and the physical modeling for detached breakwater in three longitudinal and three transverse sections(Case 5).

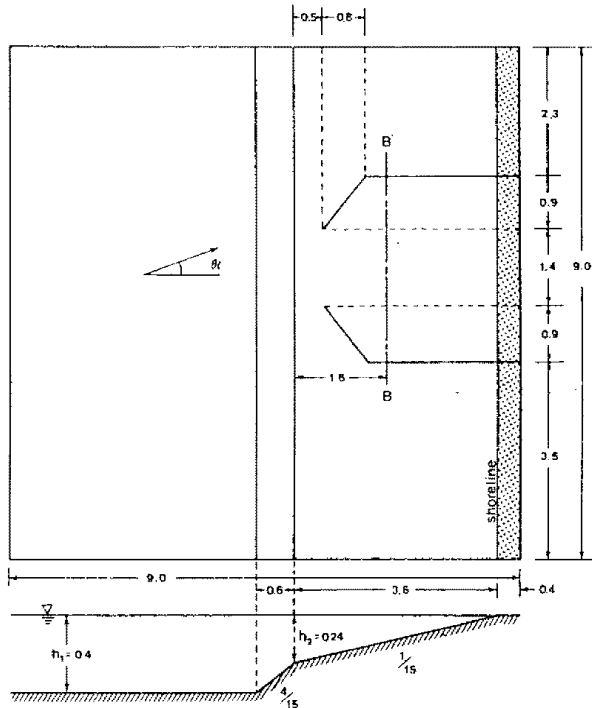


Fig. 15. Model configuration for symmetrical breakwaters (Case 6).

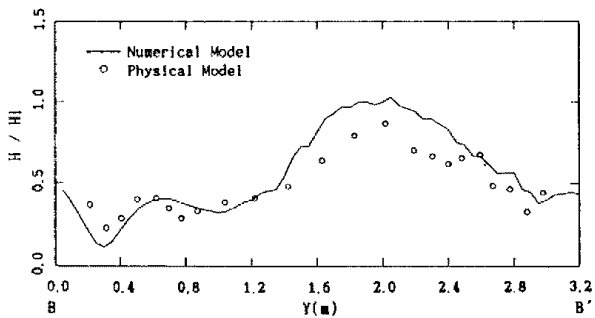


Fig. 16. Wave heights by the numerical and the physical modeling for symmetrical break-waters in the section B-B'(Case 6).

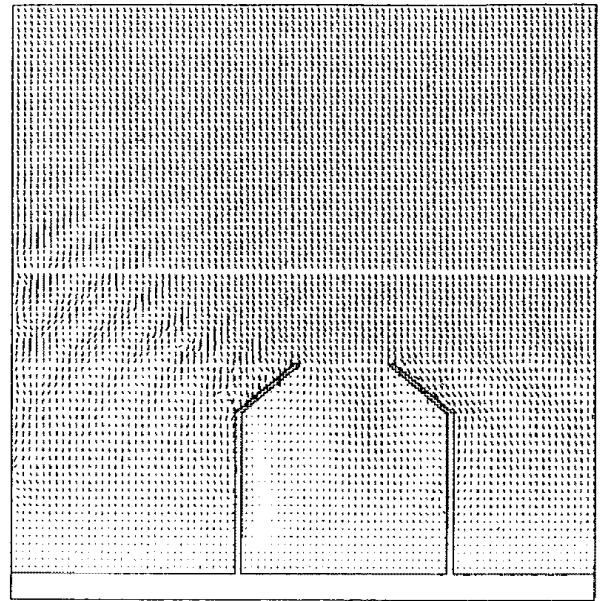


Fig. 17. Wave distribution by the numerical modeling for symmetric breakwaters(Case 6).

관련이 있는 것으로 생각된다(Fig. 16). Fig. 17은 수치실험에 의한 파랑백타도이다.

5.5 현지 항만 적용

동해안의 영일만에 위치한 포항신항에 대하여 임의의 입사파 재원을 사용하여 본 수치모형을 적용하였다. 포항신항은 북방파제와 동방파제에 의하여 파랑의 항내 침입을 차단하고 있으며 항내에는 2기의 파제체가 있다. 신항 전면의 수심은 10~20m로서 대체로 해안선에 평행하게 발달해있고 항입구에는 계획수심 20m의 진입항로가 형성되어 있다.

모형에서는 항만 구조물의 형태에 따라 0.1~0.4의 반사율을 적용하였고, 동방파제 남쪽 해역과 형산강

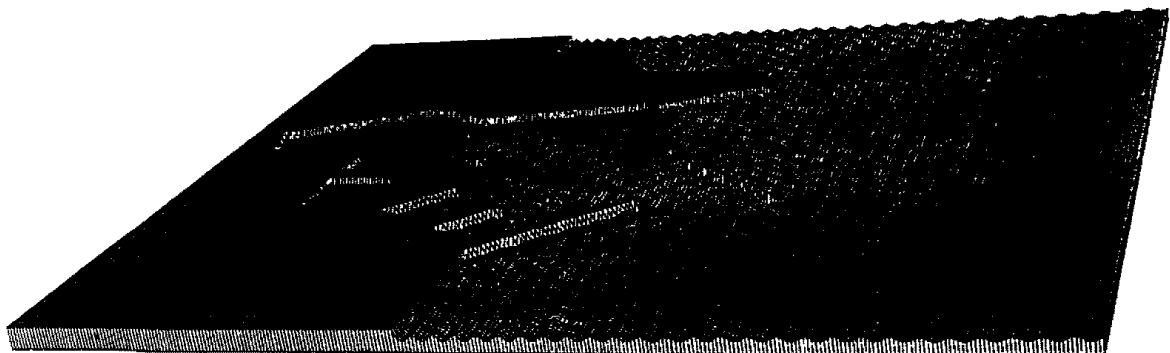


Fig. 18. Perspective of wave propagation by the numerical modeling(Case 7).

학구부는 완전투과경계로 설정하였으며, 양 측면을 가상경계로 구성하여 총 40 파랑주기(480초)동안 실험하였다. 관측자료의 부족으로 정확한 검증에는 난점이 있으나, 항내와 방파제 선면 및 모형 경계역에서의 파향, 파고 분포를 검토해 볼 때 매우 타당한 결과로 판단되며 기존의 수치실험 결과와도 유사한 양상을 나타낸다(건설부, 1987; 포항종합제철주식회사, 1992). Fig. 18은 파랑의 전파양상을 3차원적으로 나타낸 것이다.

6. 결 론

쌍곡형 비정상 환경사방정식을 유한차분 양해법으로 수치해석하여 연안구조물 주위 해역의 파랑장을 보다 정확하게 산정할 수 있는 수치모형을 개발하였다. 이 모형은 쇄파전과 쇄파후에 각기 다른 기본방정식을 적용한다. 쇄파전에는 Nishimura *et al.*(1983)이 제안한 방정식을 사용하며, 쇄파후에는 Watanabe and Maruyama(1984)가 제안한 방정식을 기본으로 하고 Izumiya and Horikawa(1984)의 에너지 감쇠계수 산정식을 수정하여 기본방정식에 추가하였다. 또한, 쇄파대 내측과 구조물 주위에서의 불규칙한 파랑장을 정확하게 해석하기 위하여 격자간격을 좁게 하는 동시에 전체 계산시간을 단축할 수 있는 가변 격자체계를 구성할 수 있도록 하였다.

개발된 모형은 원형 천퇴, 환경사, 이안제, 방파제 등 기존의 수조실험 결과가 있는 여러 형태의 해저 및 구조물 배치 상황에 대하여, 그리고 기존의 수치실험 결과가 있는 포항신항에 적용하고 그 결과를 비교하였으며, 입사, 반사, 투과 경계면의 처리에 대하여도 그 타당성을 확인하였다. 한편, 환경사 지형에서 임의의 입사파에 대한 수치실험을 수행하고 그

결과를 해석해와 비교하여 쇄파대와 같이 불규칙한 파동장에서 격자간격에 따른 오차를 2% 이내로 유지하기 위해서는 한 파장에 20~100개의 격자가 포함되도록 격자간격을 설정하여야 함을 밝혔다.

참고문헌

- 건설부, 1987. 포항신항 파랑조사 및 모델실험보고서.
 포항종합제철주식회사, 1992. 포항제철소 제4투기장조성 수치모형실험보고서.
 郭文秀, 洪吉杓, 片宗根, 1990. 時間依存 緩傾斜方程式을 이용한 港内 波高分布 計算, 韓國海岸·海洋工學會誌, 2(1), 18-27.
 伊藤喜行, 谷本勝利, 1972. 波向線交叉領域での 波の屈折 數値波動解析法の應用(2), 第 19回 海講論文集, 325-329.
 Berkhoff, J.C.W., 1972. Computation of combined refraction-diffraction, *Proc. 13th Coastal Eng. Conf.*, 471-490.
 Copeland, G.J.M., 1985. A practical alternative to the mild slope equation, *Coastal Eng.*, 9, 125-149.
 Isobe, M., 1986. A parabolic refraction-diffraction equation in the ray-front coordinate system, *Proc. 20th Int. Conf. Coastal Eng.*, 306-317.
 Izumiya, T. and Horikawa, K., 1984. Wave energy equation applicable in and outside the surf zone, *Coastal Eng. in Japan*, 27, 119-137.
 Lozano, C.J. and Liu, P.L.-F., 1980. Refraction-diffraction model for linear surface water waves, *J. Fluid Mech.*, 101, 705-720.
 Nishimura, H., Maruyama, K. and Hiraguchi, H., 1983. Wave analysis by direct numerical integration, *Proc. 30th Japanese Conf. on Coastal Eng.*, 123-127.
 Radder, A.C., 1979. On the parabolic equation method for water-wave propagation, *J. Fluid Mech.*, 95, 159-176.
 Yoo, D., 1989. Numerical modelling of wave-induced currents in a breakwaters situation, *Int. J. Numerical Methods in Eng.*, 27, 21-35.
 Watanabe, A. and Maruyama, K., 1986. Numerical modeling of nearshore wave field under combined refraction, diffraction and breaking, *Coastal Eng. in Japan*, 29, 19-39.