

## 전하만의 단주기 파랑응답에 관한 수치해석

김종욱\*

### 1. 서론

외해에서 여러 요인으로 발생한 파가 항만에 접근하면 일부는 연안을 따라 흡수 또는 반사되고 일부는 항만의 방파제를 따라 회절하여 항내로 들어오게 된다. 항내로 입사한 장주기파는 항내의 정상파의 주기와 일치할 경우 공진 현상이 발생하여 작은 입사파에도 큰 반응이 나타날 수 있고 단주기파는 다중 반사 등으로 인해 항만의 특정 지점에서 파고가 증폭될 수 있어서 정박된 선박의 파괴, 부두손상, 하역 등에 지장을 초래할 수 있다. 따라서 항내의 파랑응답을 일정수준 이하로 유지하는 것은 정박된 선박의 안전을 위하여 필수적인 것이다.

본 연구는 울산 현대중공업 내에 있는 전하만을 대상으로 단주기파에 대한 항내 파랑응답을 수치적으로 계산하여 해석한 것으로, 계산에 사용된 지배방정식은 심해에서 천해로 수심이 천천히 변화하는 해저지형에 대한 불규칙 파랑전파 모사가 가능한 Madsen 등(1992)의 Boussinesq 방정식을 토대로 하였다. 전하만 주변해역에서 출현빈도가 높은 주기 6~7sec, 유의파고 1m인 JONSWAP스펙트럼의 일방향 불규칙파를 대상으로 전하만 북방파제 앞바다의 매립 전과 매립 후(현 상태), 그리고 새로운 방파제를 추가한 경우에 대한 항내 각 영역에서의 파랑응답을 계산하여 항내 파고를 감소시킬 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

### 2. 본론

#### (1) 이론적 배경

Peregrine(1967)에 의해 임의 수심에서의 Boussinesq 방정식이 처음으로 제시된 후, Abbott 등(1978)이 방정식을 수심 평균된 속도 항으로 표현하여 단주기파의 파랑변형 해석에 적용을 시도하였다. 그 후 Abbott 등(1984)은 수심 적분된 속도 항으로 표현하여 수심감소 효과를 고려하였다. Boussinesq 방정식의 평면 파랑 장에서의 적용은 Madsen and Sorensen(1990) 등에 의해서 검토되었으나, 파랑의 반사 및 회절 등을 고려하지 않았다.

기존의 Boussinesq 방정식은 기본적으로 장파방정식이므로 심해조건에서는 파의 분산성을 정확히 나타내지 못하여 적용성에 한계가 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 Madsen 등(1991)은 Boussinesq 방정식에 분산 보정계수를 도입하여 심해역과 천해역에서의 분산성을 하나의 형태로 표현할 수 있는 Boussinesq 방정식을 제안하였으나 수심의 모든 공간적 미분을 무시함으로써 변화하는 지형에 대한 적용이 불가능하였다. 그 후, Madsen 등(1992)이 수심의 미분항을 포함함으로써 변화하는 지형에도 적용 가능한 새로운 형태의 Boussinesq 방정식을 제안하였다.

#### (2) 지배방정식

본 연구에서는 Madsen 등(1992)이 제시한 Boussinesq 방정식을 기초로 한 단주기파에 대한 항내 파랑응답 해석 프로그램인 MIKE21 BW module[DHI, 1996]을 사용하여 수치해석을 수행하였으며 2차원 Boussinesq 방정식은 다음과 같다.

\* (주)현대중공업 선박해양연구소 해양산업연구실(Ocean Industry Research Department, Maritime Research Institute, Hyundai Heavy Industries Co., Ltd., Ulsan, 682-792, Korea)

연속방정식

$$S_t + P_x + Q_y = 0 \quad (1)$$

운동방정식

$$P_t + \left(\frac{P^2}{d}\right)_x + \left(\frac{PQ}{d}\right)_y + gdS_x + \Psi_1 = 0 \quad (2)$$

$$Q_t + \left(\frac{Q^2}{d}\right)_y + \left(\frac{PQ}{d}\right)_x + gdS_y + \Psi_2 = 0 \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \Psi_1 = & -(B + \frac{1}{3})h^2(P_{xxt} + Q_{xyt}) - Bgh^2(S_{xxx} + S_{xyy}) \\ & - hh_x(\frac{1}{3}P_{xt} + \frac{1}{6}Q_{yt} + 2BghS_{xx} + BghS_{yy}) - hh_y(\frac{1}{6}Q_{xt} + BghS_{xy}) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \Psi_2 = & -(B + \frac{1}{3})h^2(Q_{yyt} + P_{xyt}) - Bgh^2(S_{yyy} + S_{xxy}) \\ & - hh_y(\frac{1}{3}Q_{yt} + \frac{1}{6}P_{xt} + 2BghS_{yy} + BghS_{xx}) - hh_x(\frac{1}{6}P_{yt} + BghS_{xy}) \end{aligned} \quad (5)$$

첨자  $x, y, t$ : 공간 및 시간에 관한 미분

$d$ : 전체수심(total water depth)

$h$ : 정수심(still water depth)

$S$ : 수면고(surface elevation)

$P, Q$ : 수심 적분된 속도성분(depth-integrated velocity components)

$\Psi_1, \Psi_2$ : Boussinesq 항

$B$ : 선형분산계수(linear dispersion factor)

이 방정식은 선형분산특성이 고려되어 천해역 및 심해역에서도 적용 가능하며, 심해로부터 천해로 들어오는 규칙파 및 불규칙파의 전파 모사가 가능하다. 그리고, 외해로부터 전파해 오는 파에 대한 방파제 등에 의한 투수성 및 해저면에서의 마찰을 고려하여 다음과 같은 투수성 및 저면마찰항을 지배 방정식에 포함하였다[Madsen 등, 1983].

연속방정식 :

$$nS_t + P_x + Q_y = 0 \quad (6)$$

x-운동방정식 :

$$\begin{aligned} nP_t + \left(\frac{P^2}{d}\right)_x + \left(\frac{PQ}{d}\right)_y + n^2gdS_x + n^2P \left[ \alpha + \beta \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{d} \right] \\ + \frac{gP\sqrt{P^2 + Q^2}}{C^2d^2} + \Psi_1 = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \Psi_1 = & -(B + \frac{1}{3})h^2(P_{xxt} + Q_{xyt}) - nBgh^2(S_{xxx} + S_{xyy}) \\ & - hh_x(\frac{1}{3}P_{xt} + \frac{1}{6}Q_{yt} + nBgh(2S_{xx} + S_{yy})) - hh_y(\frac{1}{6}Q_{xt} + nBghS_{xy}) \end{aligned} \quad (8)$$

$\alpha$ : 층류 마찰손실

$\beta$ : 난류 마찰손실

$C$ : Chezy 저항 수 ( $m^{1/2}/s$ )

$n$ : 투수율 (=1 in open water)

### (3) 전하만 파랑응답 수치모델

전하만은 Fig.1에서와 같이 만내 평균 수심은 약 10m이며 항내수역은 약 429,750  $m^2$  정도이다. 기존에는 사석방파제가 북쪽과 남쪽으로 각각 200m, 70m씩 축조되어 있었으나 현재는 북방파제쪽 앞 바다를 매립(43,000평)한 상태이다. 방파제의 외해 쪽에는 테트라포드가 설치되어 있으며 항내의 안벽은 대부분 연직안벽이다. 대상해역의 수심도는 해도 No.119A을 사용하여 계산격자망을 구성하였는데, E방향파의 경우 550×350 (격자크기=4m)의 격자망으로, E+30° (북동쪽에서 파가 매립면을 따라 들어올 때)방향파의 경우 격자망이 파방향과 직각이 되도록 시계반대 방향으로 30° 회전하여 430×320의 격자망으로 구성하였다.

입사파 조건은 전하만 주변해역에서 비교적 출현빈도가 높은 6~7초의 peak주기, 유의파고 1m인 일방향 불규칙파(JONSWAP 스펙트럼)를 대상으로 하였으며, 파의 굴절 및 회절, 구조물에서의 반사를 고려하였다. 수치계산은 ADI알고리즘을 사용하였고 정방형 격자 계에서 시간-중앙차분 음해법을 사용하여 미분방정식들을 이산화하였다.

항내 안벽은 완전 반사, 외곽방파제는 30%, 매립 전의 해변에 대해서는 10%의 반사율을 적용하였으며(SPM, 1984), 해저면의 마찰은 무시하였다. 계산시간을 줄이기 위해서 항내로 전파하는 파에 영향을 주지 않을 것으로 예상되는 영역에 대해서는 인위적으로 육지화하였고, 외해경계는 모델영역의 바깥쪽으로 전파하는 파에너지를 흡수하는 역할을 부여하기 위해서 Lasen and Dancy(1983)의 스폰지층 기법을 사용하였다.

### (4) 계산결과 및 해석

전하만을 대상으로 매립 전과 매립 후, 매립면에 새로운 방파제를 추가한 경우에 대해서 각 파향별 유의파고 1m, peak주기 6.7sec에 대한 항내파랑 응답을 계산하여 비교, 검토하였다. Table 1에 파향 및 주기별로 항내 각 영역에서의 평균파고를 나타내었다. 그리고 계산 결과 중 대표적인 한 예(E방향,  $H_s=1m$ ,  $T_p=7sec$ )를 대상으로 매립 전과 매립 후, 방파제 추가한 경우의 각각에 대한 계산 지속시간이 20분 경과했을 때의 항내로 들어오는 파의 순간 전파상황도를 Fig. 2에 나타내었고, 지속시간 10분~20분 간의 입사파에 대한 파랑교란 계수(상대 파고비)를 Fig. 3에 나타내었다.

Table 1에서 보는 바와 같이, 전반적으로 입사파의 주기가 긴 경우에 항내 파고분포 값이 증가하는 경향을 보이고 있지만, 매립전과 후의 파고분포 값간에는 큰 차이를 보이지 않고, 값의 차이가 있다 하더라도 약 5cm이하의 파고변화를 보여주고 있다.

#### (1) E+0° 방향파

동쪽에서 파가 전파해 올 때, 주기가 증가함에 따라 항내 각 영역에서의 파고는 증가하는 경향이 있으며, 주기 6sec인 경우에는 매립전과 후의 값 차이는 보이지 않지만 주기 7sec인 경우에는 매립 후가 매립 전보다 11안벽에서 약간의 파고증가(약 5cm 이하) 효과를 가져왔으며 매립 전과 후 모두 0.55m 이상의 분포를 보였다. 그러나 매립면에 방파제를 추가 설치했을 경우에는 항내 전 영역이 0.45m 이하의 파고분포를 보여 항내 파고감소 효과가 커짐을 알 수 있다.

#### (2) E+30° 방향파

매립면에 나란히 파가 항내로 전파해 올 경우에도 E+0° 방향파와 마찬가지로 주기가 증가함에 따라 항내 각 영역에서의 파고는 증가하는 경향을 보이며 11안벽에서 상대적으로 높은 파고분포를 보인다. 주기 6, 7sec 모두의 경우 11안벽에서만 약간의 파고증가 효과가 있을 뿐 매립 전과 후간의 파고분포는 거의 같게 나타났다. 특히, 11안벽에서는 매립 전과 후 모두 주기 6, 7sec에 대해서 0.55m이상의 파고분포 현상을 보이고 있으나 방파제를 추가했을 경우에는 11안벽 뿐만 아니라 항내 전 영역에서 0.15m이하의 파고분포를 보여 항내 파고감소 효과가 상당히 커짐을 알 수 있다.

### 3. 결 론

현대중공업내에 있는 전하만의 단주기파에 대한 항내 파랑응답을 수치모형실험을 통해 해석하여 보았다. 유의파고 1m, peak주기 6~7sec의 일방향 불규칙파(JONSWAP 스펙트럼)를 입사파 조건으로 계산된 전하만 내에서의 파랑응답 해석에서 전반적으로 매립전과 후의 파고증가 효과는 그다지 크지 않았으나 상대적으로 소형선박이 정박되는 11안벽은  $E$  및  $E+30^\circ$  방향파의 경우 모두 다소 큰 파고분포를 나타내었다. 매립면에 Fig.1과 같이 방파제를 추가할 경우에 주어진 입사파 조건하의  $E$  및  $E+30^\circ$  방향파에 대해서 항내의 파고감소 효과가 상당히 커짐을 알 수 있었으며, 전하만의 항만기능을 증대시킴과 동시에 연간 작업가능 일수를 충분히 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

### 4. 참고문헌

- Abott, M.B., Petersen, H.M. and Skovagaard, O., 1978. On the numerical modelling of short waves in shallow water, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 16, pp. 173~203.
- Abbott, M.B., McCowan, A.D. and Warren, I.R., 1984. Accuracy of short wave numerical models, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 110, pp.1287~1301.
- DHI, 1996. MIKE21 BW module : User guide and Reference Manual.
- Larsen, J. and Dancy, H., 1983. Open boundaries in short wave simulation - a new approach. *Coastal Eng.*, 7, pp. 285~297.
- Madsen, P.A. and Warren, I.R., 1983. Performance of a short wave numerical model, *Coastal Engineering*, Vol. 8, pp. 73~93.
- Madsen, P.A., Murray, R. and Sorensen, O.R., 1991. A new form of the boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics(Part 1), *Coastal Engineering*, Vol. 15, pp. 371~388.
- Madsen, P.A., and Sorensen, O.R., 1992. A new form of the boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics, Part 2. A slowly-varying bathymetry, *Coastal Engineering*, Vol. 18, pp.183~204.
- Peregrine, D.H., 1967. Long waves on a beach, *J. Fluid Mech.*, 27(4), pp. 815~827.
- Shore Protection Manual, 1984. U.S. Army Coastal Engineering Research Center.
- 울산지방해운항만청, 1985. 해상파랑관측보고서(주전 파랑관측기록).

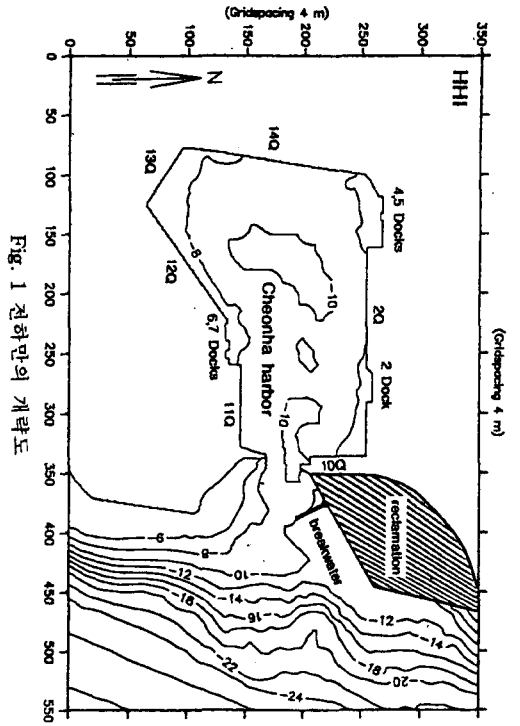


Fig. 1 전하만의 개략도

Table 1 항내 각 영역에서의 평균파고(임사파고  $H_g = 1m$ )

과 방 항	E (E +0°)				NE (E +30°)						
	6sec		7sec		6sec		7sec				
주기( $T_p$ )	X	○	□	X	○	□	X	○	□		
예림유무	X	○	□	X	○	□	X	○	□		
11Q	0.40	0.40	0.35	0.45	0.35	0.30	0.15	0.35	0.20	0.10	
6,7 Docks	0.35	0.35	0.30	0.35	0.30	0.30	0.10	0.35	0.35	0.10	
12Q	0.40	0.40	0.35	0.45	0.30	0.30	0.10	0.40	0.40	0.10	
13Q	0.30	0.30	0.25	0.30	0.25	0.25	0.10	0.40	0.40	0.10	
14Q	0.45	0.45	0.30	0.40	0.30	0.30	0.10	0.40	0.40	0.10	
4.5 Docks	0.35	0.35	0.25	0.40	0.35	0.25	0.25	0.10	0.30	0.30	0.10
2Q	0.30	0.30	0.20	0.45	0.30	0.20	0.20	0.10	0.35	0.35	0.10
2 Dock	0.25	0.25	0.20	0.35	0.25	0.20	0.10	0.25	0.25	0.10	
10Q	0.20	0.20	0.15	0.30	0.30	0.20	0.20	0.10	0.30	0.30	0.10

X : 예림전    ○ : 예림후    □ : 방파제 추가

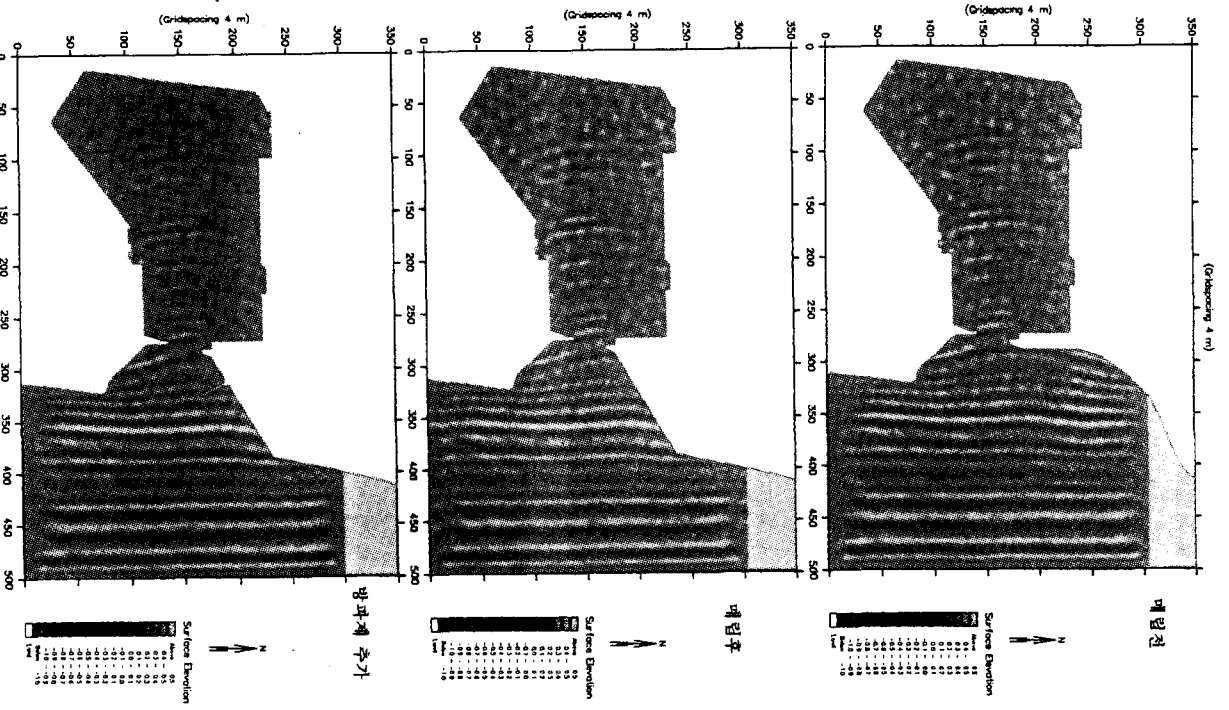


Fig. 2 파의 전파 상황도 [ E방향,  $H_g = 1m$ ,  $T_p = 7sec$  ]

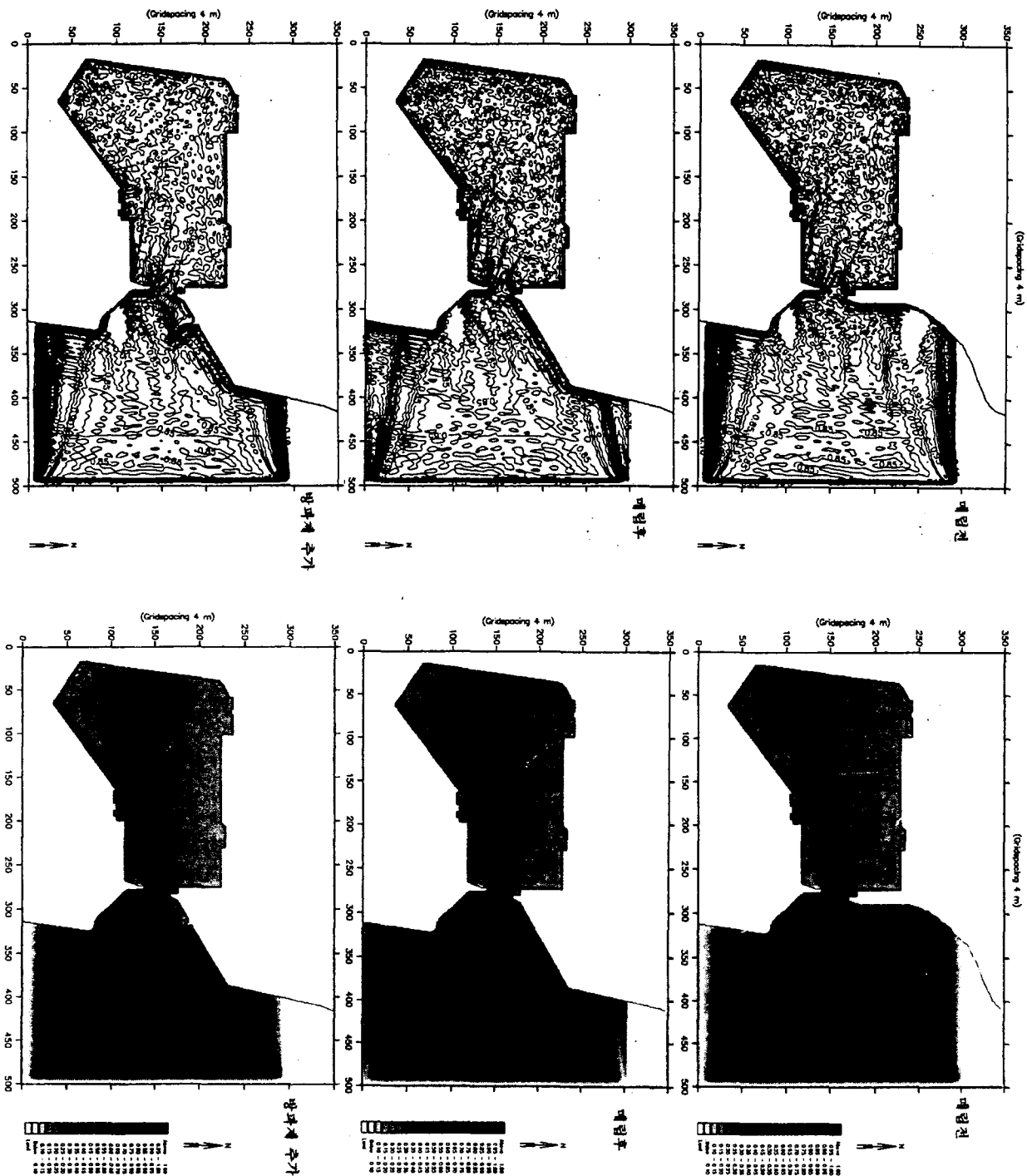


Fig. 3 항내 파랑교란계수 [E파향,  $H_s = 1m$ ,  $T_s = 7sec$ ]