

## 항내 항주파 계산을 위한 수치모의 Numerical Simulation of the Ship-Induced Waves inside Harbor

이화영<sup>1</sup> · 권세영<sup>1</sup> · 오병철<sup>2</sup> · 전인식<sup>1</sup>

Hwa Young Lee<sup>1</sup>, Se Young Kwon<sup>1</sup>, Byung Cheol Oh<sup>2</sup>, and In Sik Chun<sup>1</sup>

### 1. 서 론

일반적으로 완경사를 가지는 자연해빈은 항내 파랑 에너지를 감쇄시켜 항만의 정온도를 유지시키는 중요한 역할을 한다. 그러나 계속되는 항만 개발로 자연해빈이 인공적인 호안이나 안벽 등으로 급속하게 대체되어 가고 있는 실정이다. 특히, 구조물 제작 및 설치의 용이성과 공사기간 및 비용의 절감이라는 측면에서 항만 개발이 직립식 구조물 건설에 집중되며 정온수역의 관리 차원에서 문제를 야기 시키고 있다. 이러한 환경조건의 변화로 항내 정온도 산정에 항주파가 미치는 영향이 커지고 있다. 따라서 향후 건설되는 항만시설은 항주파에 의한 정온도 저하 및 선체 동요의 관점에서 심도 있게 검토되어야 할 필요성이 있다고 판단된다.

조선 공학 분야에서 사용해 오던 기존의 항주파 수치모델은 단일 수심에 단순한 개방해역 조건을 전제로 적용하였다. 본 연구에서는 항주파를 해석할 영역의 환경 조건을 다양화하여 기존의 모델에서 불가능하였던 굴절과 회절 그리고 천수변형 등의 3차원 파랑전파 모형을 구현할 수 있는 보다 개선된 수치 모델을 제시하였다. 나아가 현장관측을 통해 모델의 타당성을 검증하였고 복잡한 수심 변화와 임의 경계를 가지는 항내에서 발생이 예상되는 항주파를 예측하였다.

### 2. 항주파의 특성

#### 2.1 항주파의 발생구조

배가 파도를 만들어내는 메카니즘을 처음 설명한 사람은 Kelvin이라고 알려져 있다. Kelvin은 선박을 수면 위에서 똑바로 진행하는 단일 압력점으로 치환하였고, 선박에 의해 발생하는 항주파는 단일 압력점으로부터 생겨 나오는 파 들이 조합되어 특정한 파형이 형성되는 것으로 생각하였다. 이 파형은 압력점으로부터 퍼져 나가는 발산파(diverging wave) 계열과 그 점을 뒤따르는 가로파(transverse wave) 계열로 이루어지며, 전체적인 파형은 Fig. 1에 보인 바와 같이 압력점으로부터 시작하여 그 점의 진행방향의 양쪽으로 각각  $19^{\circ}28'$ 의 각을 이루는 두 직선 사이에 포함된다. 중심선에 연하여 압력점을 뒤따르는 연속적인 가로의 파정(wave crest)의 높이는 뒤로 갈수록 낮아진다. 또한, 가로파는 중심선으로부터 멀어짐에 따라 뒤로 굽어 지게 되고, 중심선의 양쪽 첨점(cusp)에서 발산파와 만나게 된다. 이들 꼭지점은 이 계에서 가장 높은 점이 된다. 이들 꼭지점의 높이는 압력점으로부터 멀어짐에 따라 가로파가 줄어드는 것보다 느리게 줄어들게 되므로 압력점으로부터 멀어짐에 따라 발산파가 더욱 두드러지게 된다. 이러한 파형을 Kelvin 파형이라 부른다.

1 건국대학교 토목공학과 (Corresponding Author : Hwa Young Lee, Department of Civil Engineering, Konkuk University, 1 Hwayang-dong, Kwangjin-ku, Seoul 143-701, Korea, wave6691@hotmail.com)

2 한국해양연구원 연안·항만공학 연구본부 (Coastal and Harbor Engineering Laboratory, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan, Seoul 425-600, Korea)

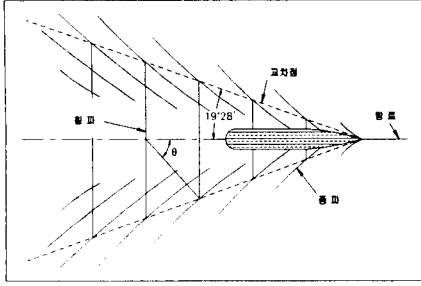


Fig. 1. Kelvin 파형 시스템.

## 2.2 항주파의 천수영향

수심  $d$ 에서 선박이 속력  $V_s$ 로 항행할 때 발산파의 진행방향과 항행선이 이루는 각도  $\theta$ 는  $F_r = V_s/\sqrt{gd} \leq 1$ 의 조건에서,

$$\theta = 35.27[1 - e^{12(F_r - 1)}] \quad (1)$$

의 관계를 보인다(Weggel and Sorensen, 1986).

수심  $d$ 에서 물에서의 항주파 주기  $T$ 는 다음 식과 같은 분산관계식을 풀어 결정할 수 있다.

$$C = \frac{gT}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{CT} \quad (2)$$

여기서,  $C$ 는 항주파 파속을 의미하며 선박속도  $V_s$ 와 그리고 발산파와 항적선과의 각도  $\theta$ 를 이용하여 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$C = V_s \cos \theta \quad (3)$$

호안 또는 안벽에 전파되어 정온도에 영향을 미치는 파 성분은 발산파이며 일반적으로 Fig. 2와 같은 시간변화를 보이고(Sorensen, 1993) 항주파의 예측은 발산파의 주기와 최대파고  $H_{max}$ 에 대한 것이다.

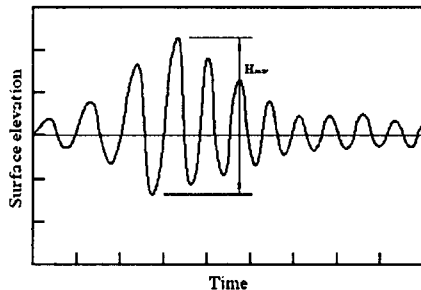


Fig. 2. 항주파 파형의 시간변화.

## 2.3 항주파 결정을 위한 경험식

항주파고의 계산을 위한 뚜렷한 계산식은 현재 정립되어 있지 않다. 여기에서는 일본에서 제시된 일본항만설계기준 식을 이용하였다. 이 식은 발산파와 가로파(transverse waves)가 존재하는  $F_r = V_s/\sqrt{gd} < 0.7$  영역의 조건에서 유효하다.

거리  $x$ 에서의 최대 항주파고  $H_{max}$ 는

$$H_{max} = H_o \left(\frac{100}{x}\right)^{1/3} \left(\frac{V_s}{V_E}\right)^3 \quad (4)$$

와 같다. 여기서,

$V_E$  = 만재시 항의 항행속도(knot)

$$H_o = \left(\frac{L_s}{100}\right)^{1/3} \sqrt{\frac{E_{HPW}}{2.2L_s V_E}}$$

$L_s$  : 선박의 길이(m)

$$E_{HPW} = E_{HP} - E_{HPF}$$

$$E_{HP} = 0.65 S_{HPM}$$

$$E_{HPF} = \frac{1}{1470} \rho S V_o^3 C_f$$

$$V_o = 0.514 V_E$$

$$S = 2.5 \sqrt{\nabla L_s}$$

$$C_f = \frac{0.075}{\left(\log \frac{V_o L_s}{\nu} - 2\right)^2}$$

$S_{HPM}$  = 연속최대축마력

$\nabla$  = 선박의 배수량 ( $m^3$ )

## 3. 항주파 수치모델

항주파 수치모델은 Fig. 3와 같은 좌표계를 사용하며 파랑전파의 좌표계는  $(x, y)$ , 선박의 좌표계는  $(x', y')$ 로 나타낸다.

Dingeman(2000)은 파수  $k$ 와 각주파수  $\omega$ 의 변조를 다소 허용하는 일종의 불규칙파의 전파방정식을 다음과 같이 제시하였다.

$$g \frac{\partial k}{\partial t} = (\omega^2 - k^2 c c_g) \phi - \nabla \cdot (c c_g \nabla \phi) \quad (5)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = -g\zeta \quad (6)$$

여기서의  $\phi$ 는 수면에서의 속도포텐셜로서 임의 위치에서의 포텐셜  $\phi$ 를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi(x, y, z, t) = F(z)\phi(x, y, t) \quad (7)$$

여기서,  $F(z) = \frac{\cosh[k(z+h)]}{\cosh(kh)}$  이다.

1개의 절점 내에서  $c$ 와  $c_g$ 가 일정하다고 가정하면 식 (5)에서의  $\nabla \cdot (cc_g \nabla \phi)$ 는

$$cc_g(\nabla \cdot \nabla \phi) = cc_g\left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2}\right) \quad (8)$$

와 같이 나타낼 수 있다.

식 (5), 식 (6)을 유한차분식으로 나타내면,

$$g(\zeta_{i,j}^{n+1} - \zeta_{i,j}^n) = (\omega^2 - k^2 cc_g)_{i,j} \phi_{i,j} \Delta t - (cc_g \nabla \cdot \nabla \phi)_{i,j} \Delta t \quad (9)$$

$$\phi_{i,j}^{n+1} - \phi_{i,j}^n = -g\zeta \Delta t \quad (10)$$

와 같다.

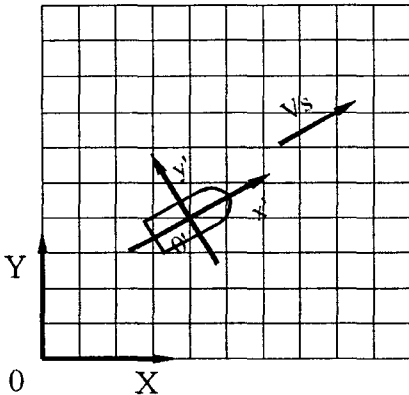


Fig. 3. SHIPWAVE 좌표.

Fig. 3와 같이 선박이  $V_s$ 의 속력으로 이동 할 때, Newman(1977)은 세장선체역학에 대한 점근적 속법을 전개하여 선박주변의 내부해를 다음과 같이 이차원 source (sink) 형태의 포텐셜로 제시하였다.

$$\phi = -\frac{1}{2\pi} \left(\frac{dS}{dx'}\right) V_s \log\left(\frac{r}{l}\right) \quad (11)$$

여기서,  $dS/dx'$ 은 선박단면적의 길이방향의 변화,  $r$ 은  $y'$ 축 방향 이격거리,  $l$ 은 선박길이를 나타낸다.

선체의 형태를 중심선의 길이  $L_s$ , 중심에서의 폭  $B$ , 흘수  $H$ 인 Wigley form으로 가정한다. 즉,

$$y' = \pm \frac{1}{2} B \left[1 - \left(\frac{2x'}{L_s}\right)^2\right] \left[1 - \left(\frac{z'}{H}\right)^2\right] \quad (12)$$

선박의 단면적은

$$S(x') = S_0 \left[1 - \left(\frac{2x'}{L_s}\right)^2\right] \quad (13)$$

과 같다. 여기서,  $S_0 = (2/3)BH$  이고 식(13)에서

$$\frac{dS}{dx'} = -\frac{8S_0 x'}{L_s^2} \quad (14)$$

선박의 전반부는  $dS/dx' < 0$ , 후반부는  $dS/dx' > 0$ 이며 각각 강도(strength)  $|(dS/dx') V_s|$  인 source와 sink의 역할을 한다.

파랑전파모델에서의 포텐셜은 식 (7)을 따르며 선박인근 수면에서의 포텐셜 및 이계도함수는 다음과 같다.

$$\phi = -\frac{1}{2\pi} \left(\frac{dS'}{dx'}\right) V_s \frac{k}{\tanh kd} \int_{-h}^0 \log(\sqrt{z'^2 + y'^2}) dz \quad (15)$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x'^2} = 0 \quad (16)$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial y'^2} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{dS}{dx'}\right) V_s \frac{k}{\tanh kd} (D - 2y'E) \quad (17)$$

여기서,

$$D = \frac{1}{y'} \tan\left(\frac{d}{y'}\right) \quad (18)$$

$$E = \frac{d}{2 y'^2 (y'^2 + d^2)} + \frac{1}{2 y'^3} \tan\left(\frac{d}{y'}\right) \quad (19)$$

임의 곡선항로 갖는 선박의 항적선은 다음과 같이 추적할 수 있다. 최초 좌표  $(x_0, y_0)$ 에서 시작하여 매 시간 당 선박중심의 좌표를

$$\{x_s(t), y_s(t)\} = (x_0, y_0), (x_1, y_1), (x_2, y_2) \dots (x_i, y_i) \dots (x_N, y_N) \quad (20)$$

라 할 때,  $i$ 번째 점까지의 거리  $S_i$ , 그 점에서의 방향  $\alpha_i$ 는 다음과 같다.

$$S_i = \sum_{k=0}^i \sqrt{(x_k - x_{k-1})^2 + (y_k - y_{k-1})^2} \quad (21)$$

$$\tan(\alpha_i) = \frac{y_i - y_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} \quad (22)$$

따라서,  $i$ 번째 점에 도달하는데 소요되는 시간은

$$t_i = \frac{S_i}{U_s} \quad (23)$$

이며, 선박의 좌표  $(x_s, y_s)$ 와 방향  $\alpha$ 를 다음과 같이 시간  $t$ 의 함수형태로 나타낼 수 있다.

$$x_s = x(t) \quad (24)$$

$$y_s = y(t) \quad (25)$$

$$\alpha_s = \alpha(t) \quad (26)$$

$(x_s, y_s)$ 와  $\alpha_s$ 를 가지고 파랑좌표계에 의한 절점을 선박좌표계에 의한 절점으로 변환한다. 즉,

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x - x_s \\ y - y_s \end{pmatrix} \quad (27)$$

식 (15), 식 (16), 식 (17)을 이용하여 선박주

변절점 ( $0.2 \leq r \leq 1.5$ )에서의  $\partial^2 \phi / \partial x'^2 + \partial^2 \phi / \partial y'^2$ ,  $\phi$ 를 결정한다. 이들 값들은 스칼라량이므로 별도의 좌표변환 없이 파랑좌표계 계산인 식 (9), 식 (10)에 그대로 사용할 수 있다.

#### 4. 수치 모델의 검증

항주파 모델을 검증하기 위하여 현장관측을 수행하였다. 검증대상 선박은 5 ton 어선이 사용하였고 현장관측은 Fig. 4에 도시된 바와 같이 광양항 내 묘도 좌측지역에서 2003년 3월 18일-19일에 실시하였다. 관측은 관측장비 설치지점에서 항적선까지의 이격거리와 선속을 변화시켜 가며 진행하였다. Table 1은 관측제원을 도시한 것이다.

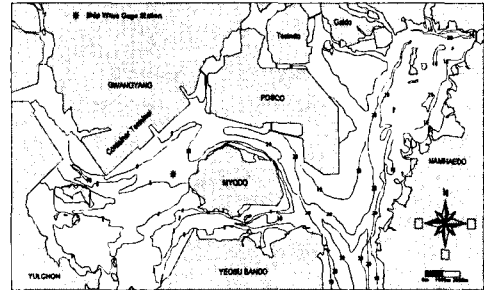


Fig. 4. 항주파 현장관측 지점.

Table 1. 항주파 검증을 위한 현장관측 제원

No.	이격거리 $L_p$ (m)	합속 $V_s$ (knots)	수심 $d$ (m)	관측주기 $T_m$ (sec)	계산주기 $T_s$ (sec)
1	24	11	6.7	3.3	3.0
2	21	11	6.7	3.6	3.0
3	58	11	6.7	3.6	3.0
4	122	12.5	10.8	4.1	3.4
5	11	12.5	10.8	4.0	3.4
6	137	12.5	10.8	3.8	3.4
7	7	12.5	10.8	4.0	3.4
8	110	12.5	10.8	3.4	3.4

관측센서와 선박간의 이격거리 ( $L_p$ )의 변화에 따른 최대파고 ( $H_{max}$ )의 변화를 수치 계산하여 그 결과를 현장관측 결과 그리고 경험식의 계산치와 비교분석 하였다. Fig. 5와 Fig. 6은 수심  $d=10.8$  m,  $d=6.7$  m에 대한 결과를 비교 도시한 것이다.

Fig. 5와 Fig. 6에서 보이듯이 수치모델 계산결과는 현장관측 및 경험식의 결과와 비교적 잘 일치하고 있다. 이 결과는 전장 10 m의 경선박 선박에 대한 것으로 계산 선박의 크기가 커진다면 최대파고도 따라서 증가할 것으로 판단된다.

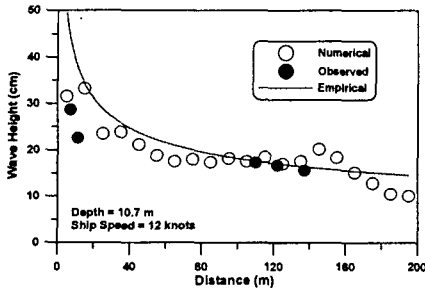


Fig. 5. 이격거리에 따른 최대파고의 변화(수심 = 10.8 m).

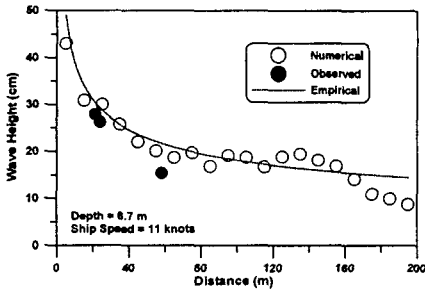


Fig. 6. 이격거리에 따른 최대파고의 변화(수심 = 6.7 m).

## 5. 수치 모델의 적용

### 5.1 수치모델의 계산조건

앞서 검증한 항주파 수치모델을 이용하여 광양항 내 안벽 근처에서 발생이 예상되는 항주파를 예측 분석하였다. 광양항 컨테이너 터미널의 경우 대형선박이 안벽의 근거리에서 아주 낮은 속도로 예인되기 때문에 대형선박으로 인한 항주파는 큰 문제가 없을 것으로 사료된다. 그러나 부두에 정박해 있는 대형선박에 tugboat나 경비함 등의 중, 소형 선박이 운항하면서 만드는 항주파의 영향은 고려되어야 한다.

분석은 유한수심 해역에서 안벽에서 200 m 떨어진 항로를 항행하는 길이 38 ton급 tugboat을 선속 6, 8, 10, 12, 14 knots로 변화 시켜가며 발

생되는 안벽근처의 파계를 분석하였다. 수심은 광양항의 삭망평균만조위 3.78 m를 더하여 전 항로 19.78 m으로 균일 적용하였고, 안벽은 불투과 무공간벽(완전반사)으로 간주하였다.

### 5.2 계산결과

선속이 낮아 depth Froude 수( $= V_s/\sqrt{gH}$ )가 1.0보다 작아 발산파와 가로파가 모두 존재하는 파계에 속하며, 직선항로와 곡선항로의 항주파를 도시한 Fig. 7과 Fig. 8에서도 발산파와 가로파가 비교적 잘 재현되어 있다. 또한 Fig. 7과 Fig. 8을 보면 안벽에서의 단봉파(short crest wave)을 확인할 수 있으며 이는 안벽 전면에서는 파 반사로 인하여 순수진행 파보다 파고가 크게 나올 수 있음을 의미한다.

Fig. 9와 Fig. 10은 선속 8 knots, 14 knots로 직선 운행하는 선박의 항주파의 수위변화 시계열을 도시한 것이다.

Fig. 11은 직선항로에 대하여 선속의 변화에 따른 파고변화를 경험식(일본항만설계기준)의 결과와 함께 도시한 것이다. 경험식은 안벽에서의 반사효과가 전혀 포함되지 않은 순수 진행파의 파고를 나타내는 것으로서 선속의 증가에 따라 파고가 단조 증가하는 성향을 보이며 반사효과가 포함된 수치모델 계산결과는 전반적으로 경험식의 결과를 상회하는 것으로 나타났다. 파고가 다소 불규칙한 것은 안벽전면에 형성되는 단봉파 파봉파 파고 측점위치의 상대적인 위치의 차이 때문에 발생하는 것으로 판단된다.

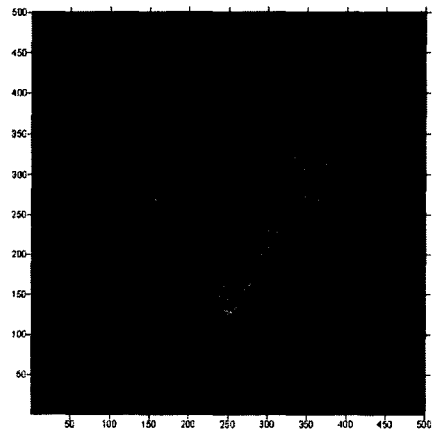


Fig. 7. 직선항로에서의 항주파 ( $V_s=10$  knots,  $L_p=200$  m).

## 6. 결 론

본 연구에서는 과거 조선공학 분야에서 이용되어 온 항주파 수치해석이 일정수심의 개방해역조건에서의 항주파만을 대상으로 한 반면, 본 연구에서는 임의 연안역 및 항만에서 발생하는 항주파의 굴절, 회절 및 천수변형 등을 복합적으로 모의 할 수 있는 새로운 수치모델을 제시하였다.

본 수치모델을 검증하기 위하여 광양항 내에 발생하는 항주파를 관측하였으며 수치모델 결과를 관측결과 및 경험식의 계산치와 비교한 결과 이들은 매우 양호한 일치를 보였다. 본 수치모델은 곡선항로를 수용할 수 있는 기능을 가지고 있으며 건설 예정에 있는 광양항 컨테이너 안벽전면에서의 직선 및 곡선 항로의 항주파를 계산하여 본 수치 모델의 적용성을 예시하였다.

항주파의 돌연성은 선박을 포함한 항만시설의 훼손과 하역효율의 저하를 일으킨다. 따라서 이후 본 모델을 항만 정온도 계산시 항주파 영향 평가에 효과적으로 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 해양수산부 지원하여 수행된 “항만 시설 개선을 통한 가동율 제고방안 연구용역” 사업의 결과 중 일부를 발췌하여 수록한 것임을 밝히며 연구수행을 위한 한국해양연구소의 지원에 감사사를 드립니다.

## 참고문헌

- Dingemans, M.W., 2000. *Water wave propagation over uneven bottoms, Part I - Linear wave propagation*, World Scientific, pp. 248-256.
- Newman, J.N., 1977. *Marine Hydrodynamics*, The MIT Press, pp. 328-338.
- Sorensen, R.M. and Weggel, J.R., 1986. Development of ship wave design information, *Coastal Engineering Conference*, ASCE.
- Sorensen, R.M. 1993. *Basic Wave Mechanics for Coastal and Ocean Engineers*, Wiley Interscience.

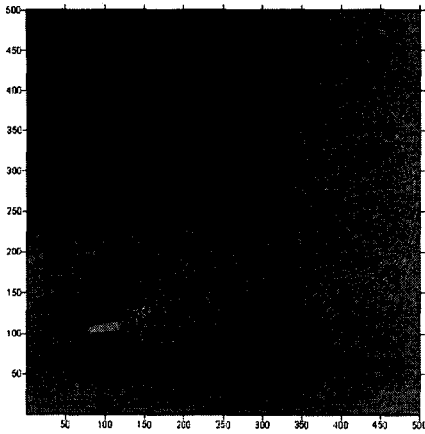


Fig. 8. 곡선항로에서의 항주파  
( $V_s=10$  knots,  $L_b=200$  m).

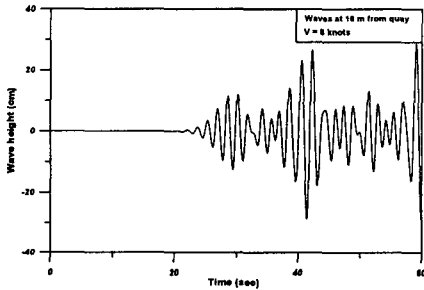


Fig. 9. 항주파형 시계열 ( $V_s=8$  knots).

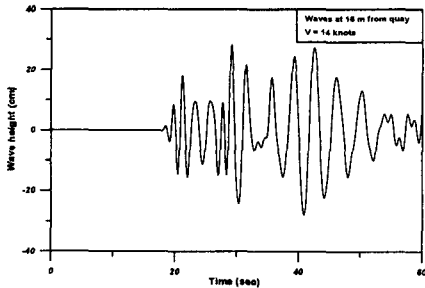


Fig. 10. 항주파형 시계열 ( $V_s=16$  knots).

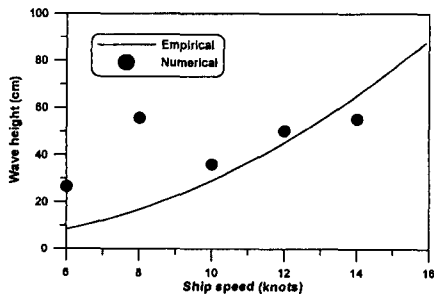


Fig. 11. 선박 속도 따른 안벽전면에서의 파고변화.