

## 소파제-초대형 부유식 해상구조물 운동 및 소파효율 해석

홍도천<sup>†\*</sup>, 홍사영<sup>\*\*</sup>

충남대 첨단수송체연구소\*  
한국해양연구원 해양시스템안전연구소\*\*

Motion and Wave Elevation Analyses for Floating Breakwaters and a VLFS

Do Chun Hong<sup>†\*</sup> and Sa Young Hong<sup>\*\*</sup>

Center for Advanced Transportation Vehicles, Chungnam National University\*  
Ocean Development System Lab., KRISO, KORDI\*\*

### Abstract

Waveheight attenuation efficiencies of floating breakwaters in water of finite depth for a VLFS are studied numerically in accordance with the two body radiation-diffraction problem. Four different forms of the breaker are tested with a solid VLFS. The radiation-diffraction wave elevations between the breakwater and the VLFS are predicted directly instead of the far-field transmission-reflection coefficients of the breakwater.

※Keywords: Radiation-diffraction problem in water of finite depth (유한수심 방사-산란파 문제), Wave elevation between two floating bodies (2 부유물체간 파고 해석).

### 1. 서론

소파제 배후에 초대형 해상구조물이 있는 경우 유한수심 2차원 방사-산란파 선형 포텐셜 이론에 근거한 2개 부유물체 운동계산에 의하여 2 부유체 사이의 wave-field 해석이 가능하다. 부유식 소파제의 단독성능만 해석할 경우에는 far-field 해석에 근거한 소파제의 투과효율과 반사효율만 추정하면 되었으나 부유식 소파제 배후에 초대형 해

상구조물이 있는 경우에는 2 물체 사이에 있는 해역에 공진현상이 발생하므로 이를 예측함과 동시에 소파효율을 추정해야 하므로 near-field wave 해석이 요구된다.

### 2. 문제의 정식화

Fig. 1에 보인바와 같이 균일한 수심  $h$  인 해역에서  $y=0$  면을 정수면과 일치시킨 오른손 직각 좌표계  $(x, y)$  에서 양의  $x$  방향으로 진행하는 입사파 중에 2개의 물체가 수평방향으로 DS만큼 떨어져서 서로 독립적인 계류시스템에 의하여 각각의 평균위치를 기준으로 운동하고 있다. 비점성

접수일: 2003년 12월 6일, 승인일: 2004년 4월 1일

† 주저자, E-mail: mmedchong@kornet.net

Tel: 042-868-7588

유체, 비회전성 유동을 가정하면 속도포텐셜  $\phi = \text{Re}\{\Psi e^{-i\omega t}\}$ 는 입사파 포텐셜  $\Psi_0$ 와 물체1 (BW) 및 물체2 (VLFS)에 의한 산란파 및 방사파 포텐셜의 합이다.  $\Psi_0$ 는 다음식으로 주어진다.

$$\Psi_0 = -\frac{a_0\omega}{m_0} \frac{\cosh m_0(y+h)}{\sinh m_0 h} e^{im_0 x} \quad (1)$$

$$m_0 \tanh m_0 h = k_0, \quad k_0 = \frac{\omega^2}{g} \quad (2)$$

위에서  $m_0$ 는 유한수심에서의 파수이다.

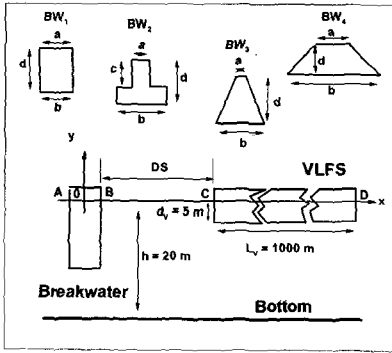


Fig. 1 Definition sketch

물체1 및 물체2의 접수면을 각각  $C_1$  및  $C_2$ 라 하면 산란파 포텐셜  $\Psi_D$ 의 접수면상 경계조건은

$$\frac{\partial \Psi_D}{\partial n_0} = \frac{a_0\omega}{\sinh m_0} [i n_x \cosh m_0(y+1) + n_y \sinh m_0(y+1)] \text{ on } C_1 \cup C_2 \quad (3)$$

방사파 포텐셜을 구하는 문제는 물체1이 운동하고 물체2는 정지상태인 경우에 대한 경계치 문제와 물체2가 운동하고 물체1은 정지상태인 경우에 대한 경계치 문제인 2개의 경계치 문제를 연립하여 풀어서 물체1 및 물체2의 운동에 기인한 방사파 포텐셜  $\Psi_R^1$  및  $\Psi_R^2$ 를 구한다(Lemsele 1979).  $\Psi_R^l (l=1,2)$ 은 각 물체운동의 복소 진폭  $a_k (k=1,2,3; l=1,2)$ 와 각각의 운동에 관련된 단위 포텐셜  $\psi_k^l (k=1,2,3; l=1,2)$ 의 곱의

합으로 표시할 수 있다.

$$\Psi_R^l = -i\omega \sum_{k=1}^3 a_k^l \psi_k^l; \quad l=1,2 \quad (4)$$

물체  $m$ 의 운동에 의한 방사파 포텐셜  $\psi_k^l (k=1,2,3; l=1,2)$ 의  $C_m (m=1,2)$ 상 경계조건은

$$\frac{\partial \psi_k^l}{\partial n_0} = \delta_m^l N_k^l, \text{ for } k=1,2,3 \text{ on } C_m, m=1,2 \quad (5)$$

여기서  $\delta_m^l$ 은 krockner delta이고  $N_k^l$ 는 다음과 같은 접수면에서의 generalized normal 성분이다.

$$N_k^l = \vec{e}_k \cdot \vec{n}_0, \text{ for } k=1,2 \text{ on } C_l, l=1,2 \quad (6)$$

$$N_3^l = (\vec{e}_3 \times \overrightarrow{OC_P}) \cdot \vec{n}_0, P \text{ on } C_l, l=1,2 \quad (7)$$

### 3. 적분방정식

지배방정식과 자유표면, 해저면 및 무한원방 경계조건을 만족시키는 Kelvin 형 Green 함수  $G(P,M)$ 를 사용한다 (Clément 1979). 산란파 포텐셜  $C_m (m=1,2)$ 상 값은 다음과 같은 Green 적분방정식의 해로부터 구해진다.

$$\begin{aligned} \frac{\Psi_D}{2} + \int_{C_1 \cup C_2} \Psi_D \frac{\partial G(P,M)}{\partial n_M} dl \\ = \int_{C_1 \cup C_2} \frac{\partial \Psi_D}{\partial n_M} G(P,M) dl, P \text{ on } C_1 \cup C_2 \end{aligned} \quad (8)$$

한편 방사파 포텐셜  $\psi_k^l (k=1,2,3; l=1,2)$ 은 아래식으로 구하여진다.

$$\begin{aligned} \frac{\psi_k^l(P)}{2} + \int_{C_1 \cup C_2} \psi_k^l(M) \frac{\partial G(P,M)}{\partial n_M} dl \\ = \int_{C_1 \cup C_2} \frac{\partial \psi_k^l}{\partial n_0} G(P,M) dl, P \text{ on } C_1 \cup C_2 \end{aligned} \quad (9)$$

for  $k=1,2,3; l=1,2$

한편 소파제, 특히 VLFS가 넓은 수신면을 가지

므로 적분방정식에 도입된 Kelvin 형 Green 함수로 인한 특이파수 현상을 제거하려면 (8) 및 (9)식에 각각(10) 및 (11)식이 추가된 over-determined 형태의 improved Green integral equation을 사용하여야 한다(Hong 1987, Hong/ Lee 1999). 그렇지 않을 경우 2 물체간 자유표면의 물리적 공진에 수학적 특이파수 공진현상이 더하여져 해석이 불가능하게 된다.

$$\int_{C_1 \cup C_2} \Psi_D \frac{\partial G(P, M)}{\partial n_M} dl = \int_{C_1 \cup C_2} \frac{\partial \Psi_D}{\partial n_M} G(P, M) dl, P \text{ on } W_1 \cup W_2 \quad (10)$$

$$\int_{C_1 \cup C_2} \phi_k^l(M) \frac{\partial G(P, M)}{\partial n_M} dl = \int_{C_1 \cup C_2} \frac{\partial \phi_k^l}{\partial n_0} G(P, M) dl, P \text{ on } W_1 \cup W_2$$

for  $k=1, 2, 3 ; l=1, 2$  (11)

여기서  $W_1$  및  $W_2$  는 각각 물체1 및 물체2의 수선면이다. 적분 방정식 (8),(10) 및 (9),(11)은 각각 적절한 이산화에 의하여 선형 대수방정식으로 변환되어 쉽게 풀릴 수 있다(Lemsele 1979).

4.2 부유물체 운동방정식

2개 물체의 복소 운동진폭  $a_k^l (k=1, 2, 3 ; l=1, 2)$  는 다음과 같은 주파수 영역 연립 운동방정식의 해로 얻어진다.

$$\sum_{k=1}^3 \left\{ \frac{M_s^1}{\rho h^2} I_{jk}^1 + [CM_{jk}^{11} + i(CA_{jk}^{11} + B_{jk}^{1'})] - \frac{R_{jk}^1}{k_0 h} - K_{jk}^{1'} \right\} \cdot a_k^1 + \sum_{k=1}^3 [CM_{jk}^{12} + iCA_{jk}^{12}] \cdot a_k^2 = -CF_j^1, j=1, 2, 3 \quad (12)$$

$$\sum_{k=1}^3 [CM_{jk}^{21} + iCA_{jk}^{21}] \cdot a_k^1 + \sum_{k=1}^3 \left\{ \frac{M_s^2}{\rho h^2} I_{jk}^2 + [CM_{jk}^{22} + i(CA_{jk}^{22} + B_{jk}^{2'})] - \frac{R_{jk}^2}{k_0 h} - K_{jk}^{2'} \right\} \cdot a_k^2 = -CF_j^2, j=1, 2, 3 \quad (13)$$

여기서  $I_{jk}^l, R_{jk}^l, B_{jk}^{l'}$  및  $K_{jk}^{l'}$  는 각각 물체1 및 물체2에 대한 관성계수, 복원력계수, 계류 감쇄계수 및 계류 복원력계수이다. 파 기진력 계수  $CF_j^l$  는

$$CF_j^l = \frac{-i}{a_0 \omega h^2} \int_{C_l} \Psi_D n_j dl, j=1, 2, 3; l=1, 2 \quad (14)$$

부가 질량계수  $CM_{jk}^{lm}$  와 파 감쇄계수  $CA_{jk}^{lm}$  는

$$CM_{jk}^{lm} + CA_{jk}^{lm} = -\frac{1}{h^2} \int_{C_l} \phi_k^m n_j dl, j=1, 2, 3; k=1, 2, 3; l=1, 2, m=1, 2 \quad (15)$$

적분방정식과 운동방정식의 해로부터 포텐셜 값을 구할 수 있고 이로부터 BW 및 VLFS의 전,후에서의 파고를 계산할 수 있다.

5. 계산결과 및 토론

Fig. 1에 보인 바와 같은 BW<sub>1</sub>, BW<sub>2</sub>, BW<sub>3</sub> 및 BW<sub>4</sub>의 소파제를 수치모델로 채택하였다. BW와 VLFS간의 거리 DS는 50, 100, 150m의 3가지를 다루었다. BW 및 VLFS의 전후면을 각각 A,B 및 C,D로 표시하였다. VLFS는 강체로 가정하였고 출수 5m, 길이 1000m, 무게중심 y=0, 횡요관성반경 300m이다. BW의 주요재원은 아래 표와 같고 계산은  $0 < K = \omega^2 h/g < 4$  에 걸쳐 수행되었다.

	중심 y값 (m)	부심 y값 (m)	횡요 관성 반경 (m)	a (m)	b (m)	d (m)	c (m)
BW <sub>1</sub>	-8	-7.5	12	30	30	15	-
BW <sub>2</sub>	-10	-9.5	12	10	30	15	10
BW <sub>3</sub>	-9	-8.7	12	10	30	15	-
BW <sub>4</sub>	-8	-5.5	12	20	40	10	-

Fig. 2-Fig. 6에 DS=50 m인 경우 계류되지 않은 부유상태의 BW의 운동진폭, BW 및 VLFS 전방의 파 진폭을 나타내었다. VLFS의 운동은 미소하여 본 논문에 소개하지 않았으나 참고문헌에 표시하였다(홍도천 2003). 계류되지 않은 부유식 BW인 경우 소파효과가 거의 없다는 당연한 결과를 보여준다. Fig. 7, Fig. 8에 BW가 고정된 경우의 파 진폭을 나타내었다. BW2 및 BW3의 소파효과의 소파효과가 큰 것으로 나타났다. Fig. 9-Fig. 14에 고정된 BW 2 및 3에 의한 A,B,C,D 4곳의 파 진폭이 DS=50, 100, 150 m인 경우에 대하여 각각 표시되었다.

6. 결론

Fig. 2-Fig. 6에 DS=50 m인 경우 계류되지 않은 부유상태의 BW의 운동진폭, BW 및 VLFS 전방의 파 진폭을 나타내었다. VLFS의 운동은 미소하여 본 논문에 소개하지 않았으나 참고문헌에 표시하였다(홍도천 2003). 계류되지 않은 부유식 BW인 경우 소파효과가 거의 없다는 당연한 결과를 보여준다. Fig. 7, Fig. 8에 BW가 고정된 경우의 파 진폭을 나타내었다. BW2 및 BW3의 소파효과의 소파효과가 큰 것으로 나타났다. Fig. 9-Fig. 14에 고정된 BW 2 및 3에 의한 A,B,C,D 4곳의 파 진폭이 DS=50, 100, 150 m인 경우에 대하여 각각 표시되었다.

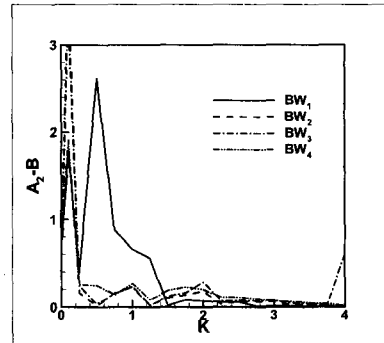


Fig. 3 Heave amplitude ratios of floating BWs, DS=50m

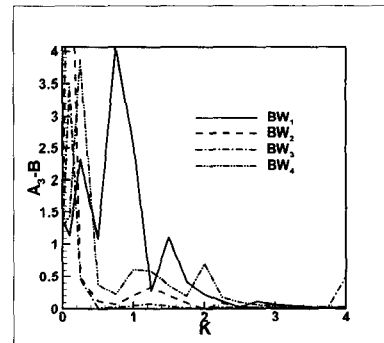


Fig. 4 Roll amplitude ratios of floating BWs for DS=50m

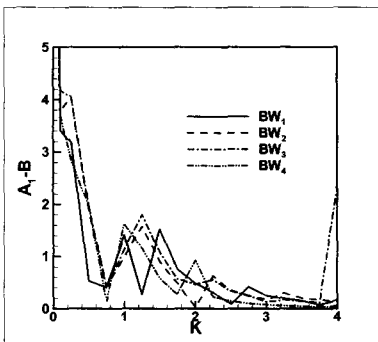


Fig. 2 Sway amplitude ratios of floating BWs, DS=50m

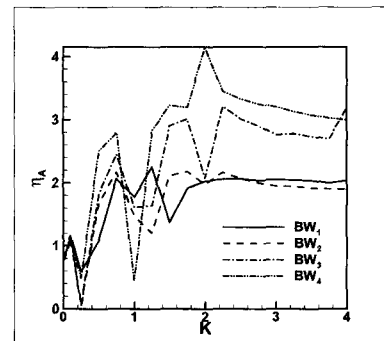


Fig. 5 Wave amplitude ratios of floating BWs at A for DS=50m

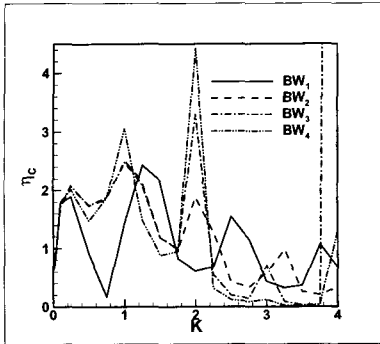


Fig. 6 Wave amplitude ratios of floating BWs at C for DS=50m

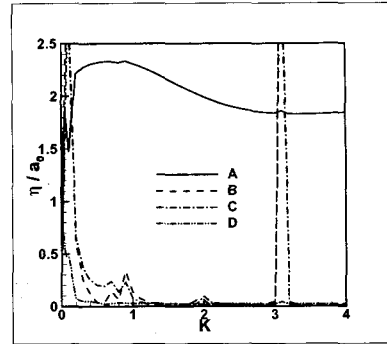


Fig. 9 Wave amplitude ratios of fixed BW2 for DS=50m

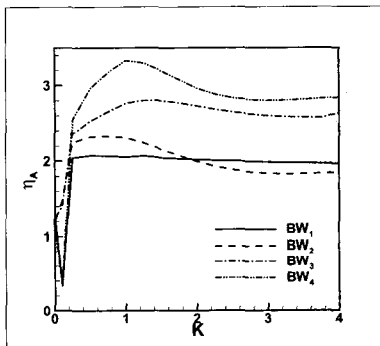


Fig. 7 Wave amplitude ratios of fixed BWs at A for DS=50m

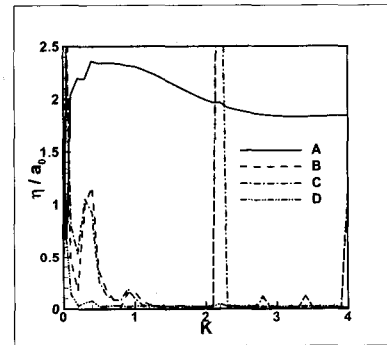


Fig. 10 Wave amplitude ratios of fixed BW2 for DS=100m

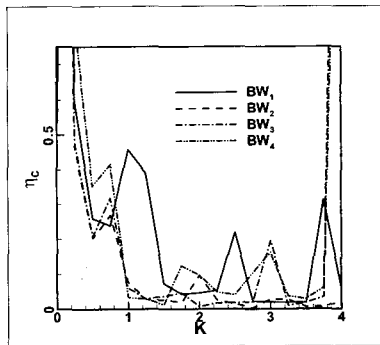


Fig. 8 Wave amplitude ratios of fixed BWs at C for DS=50m

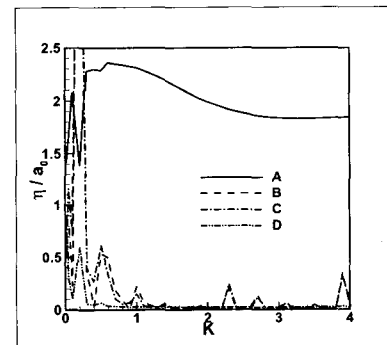


Fig. 11 Wave amplitude ratios of fixed BW2 for DS=150m

후 기

본 논문은 해양수산부가 지원하는 초대형 부유식 해상구조물 기술 개발과제 중 방파제 기본성능 연구결과와 일부임을 밝힙니다.

참 고 문 헌

- 홍도천, 2003, "방파제 기본성능연구-초대형 부유식 해상구조물 기술 개발," 충남대 첨단수송체연구소 보고서
- Hong, D.C., 1987, "On the Improved Green Integral Equation applied to the Water-Wave Radiation-Diffraction Problem," Journal of SNA of Korea, vol. 24, no.1, pp. 1-8.
- Hong, D.C. and Lee, C.S., 1999, "A B-Spline Higher Order Panel Method Applied to the Radiation Wave Problem for a 2-D Body Oscillating on the Free Surface," Journal of Ship and Ocean Technology, Vol.3, No. 4, pp. 1-14.
- Clément, A., 1979, "Contribution à l'étude théorique et expérimentale des mouvement de corps flottant induit par une houle régulière en profondeur finie uniforme," Thèse de Docteur-Ingénieur, l'ENSM de Nantes, France
- Lemsele, P., 1979, "Oscillations de plusieurs corps liés mécaniquement et soumis à l'action de la houle," Rapport de DEA, ENSM de Nantes

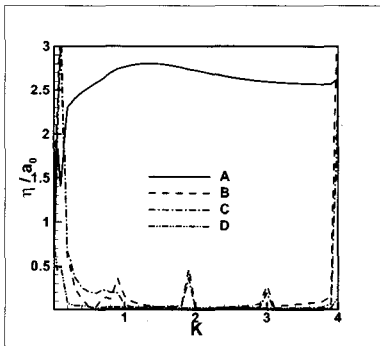


Fig. 12 Wave amplitude ratios of fixed BW<sub>3</sub> for DS=50m

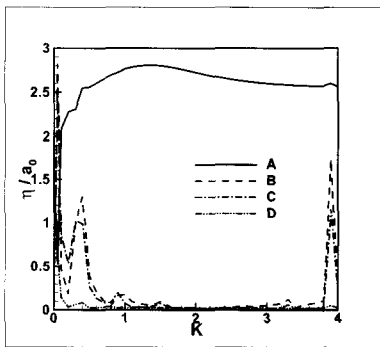


Fig. 13 Wave amplitude ratios of fixed BW<sub>3</sub> for DS=100m

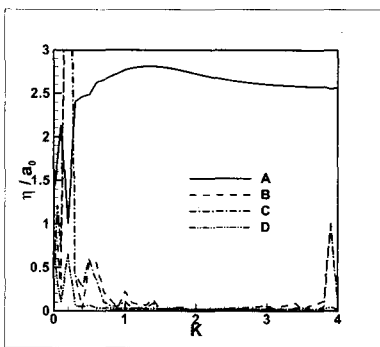


Fig. 14 Wave amplitude ratios of fixed BW<sub>3</sub> for DS=150m



< 홍도천 > < 홍사영 >