

해수순환 방파제를 고려한 폰툰형 구조물의 유탄성응답 해석

홍사영^{†*}, 최윤락^{**}, 홍석원^{*}

한국해양연구원 해양시스템안전연구소^{*} 울산대학교 수송시스템공학부^{**}

Analysis of Hydroelastic Response of a Pontoon-type Structure Considering Effect of Wave Breaker with Underwater Opening

S.Y. Hong^{*}, Y.R. Choi^{**} and S.W. Hong^{*}

Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, KORDI^{*}
Transportation Systems Engineering, Ulsan University^{**}

Abstract

Ocean space utilization using VLFS(Very Large Floating Structures) can provide environmental impact free space by allowing sea water flow freely through the floating structure. Use of Pontoon type VLFS for that purpose needs employment of breakwaters for reduction of wave effects.

Therefore, in order to maximize advantage of environmental impact free structure, the breakwater should be the one that can allow water flow freely through it, too.

In this paper hydroelastic response of a pontoon type structure is analyzed considering breakwaters which allow water flow through its opening at bottom of the breakwaters. Mode superposition technique is used for solving equation of flexible body while interactions between the pontoon and breakwaters is considered based on generalized mode concept. Bi-quadratic nine node higher-order boundary element method is adopted for more accurate numerical treatment near sharp edged body shape. Performance of various combinations of breakwaters is investigated.

※Keywords: Very Large Floating Structure(초대형 부유식 해상구조물), Hydroelasticity(유탄성해석), breakerwater(방파제), Higher-order boundary element method(고차경계요소법)

1. 서론

매립방법에 의한 해상공간 조성에 비해 부유식

접수일: 2003년 8월 7일, 승인일: 2003년 9월 17일

† 주저자, E-mail: sayhong@kriso.re.kr

Tel: 042-868-7521

구조물이 갖는 장점은 구조물 주위의 해수유동을 자유롭게 함으로써 주변 환경에 대한 영향을 최소화하는 것이다. 폰툰형 구조물은 주위 파도영향을 저감시킬 필요가 있는데 이를 위한 방파제는 경제성 면에서나 환경친화적 면에서 해수순환형이 되어야 할 것이다.

방파제 역할을 하면서 해수순환을 용이하게 하

는 가장 단순한 형태의 방파제는 해저면에 착저되는 방파제 하부를 개방시킴으로써 가능하다. 이러한 하부 개방형 방파제를 설계하기 위해서는 하부가 개방된 방파제 구조물의 위치, 개방의 정도, 개방의 정도가 다른 방파제의 조합 등을 생각할 수 있을 것이다.

폰툰형 구조물의 방파제 효과는 방파제와 구조물간의 상호간섭 효과를 해석함으로써 가능하며 지금까지의 연구는 주로 전통적인 형태의 방파제를 고려하였고 해석방법으로는 방파제의 내부 영역과 외부영역을 나눈 후 속도포텐셜 접속법을 이용한 방법이 채택되었다(이호영외, 2001, Nagata et. al. 1999, Ohmatsu, 1999).

한편 Ohmatsu et al.(2001), Maeda et al.(2001), Takaki et al.(2001)은 각각 파력발전 겸용 방파제, 구조물 일체식 진동수주형 방파제, 몰수판을 이용한 부유식 방파제 등 다양한 개념의 방파제에 대한 연구를 수행하였다.

본 논문에서는 해수순환이 가능하도록 방파제의 하부가 개방된 방파제의 영향을 고려하여 폰툰형 구조물의 유탄성응답을 해석하였다. 두 구조물간의 유체역학적 상호간섭과 폰툰형 구조물의 유탄성응답을 고려하기 위해 일반화 모드 기법을 확장하여 적용하였다. 수치해법으로는 폰툰형 구조물과 같이 넓고 얇으며 모서리가 날카로운 형상을 가진 물체와 안벽과 같이 주변 물체에 의한 유체역학적 상호작용 고려시 특히 수렴성이 우수한 고차경계요소법을 사용하였다(홍사영/최항순,1995, Choi et al, 2000). 부유식 방파제나 고정식이라도 해수유동을 허용한 방파제의 경우는 일반적인 방파제에 비해 소파 효율이 떨어지므로 본 연구에서는 방파제의 배치, 개방 정도, 파주기에 따른 해수순환형 방파제의 효과를 검토하였다. 수치계산에서는 하부가 개방된 고정식 방파제의 경우를 살펴 보았다.

2. 일반화 모드법의 확장

부유식 방파제를 상정할 때 방파제 역할을 하게 되는 부유구조물은 고정식 방파제와는 달리 하나의 방파제 구조물보다는 여러 개의 모듈이 전후

좌우로 배치되는 것이 효율적일 것으로 예상되며 최적의 설계를 위해서는 배치되는 위치에 따라 모듈 구조물의 형상과 크기가 달라질 수 있을 것이다. 이렇게 복잡하게 배치된 여러 개의 구조물에 의한 동유체역학적 상호작용을 엄밀하게 고려할 수 있도록 여러 개로 표현된 구조물을 하나의 적분방정식으로 통합하고 각 구조물의 거동은 독립적인 경계조건을 부과하여 구해진 해(解)로부터 유체압력을 구하고 각 구조물 별로 적분함으로써 다물체 상호작용이 고려된 동유체력을 구할 수 있다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

<경계적분방정식>

$$C(\vec{x})\phi(\vec{x}) = - \sum_{j=1}^{NB} \int_{S_{bj}} \{ \phi(\vec{\xi})G_n(\vec{x}, \vec{\xi})_{(1)} - \phi_n(\vec{\xi})G(\vec{x}, \vec{\xi}) \} dS$$

<경계조건 부과>

$$C(\vec{x})\phi(\vec{x}) + \sum_{j=1}^{NB} \int_{S_{bj}} \phi(\vec{\xi})G_n(\vec{x}, \vec{\xi})dS \quad (2) \\ = \sum_{j=1}^{NB} \int_{S_{bj}} \phi_n(\vec{\xi})G(\vec{x}, \vec{\xi})dS$$

식에서 NB는 물체의 수이며 S_{bj}는 j 번째 물체의 침수면을 나타낸다. 밀침자 n은 점수면의 수직 방향에 대한 편미분을 의미한다.

확장된 일반화 모드기법에서는 단독 물체의 유탄성응답 해석에서 전체 속도포텐셜을 각 모드의 복소 진폭과 대응되는 모드 포텐셜의 곱의 합으로 표시한 것과 같이 다물체의 상호간섭영향을 다음과 같이 고려한다. 1 번 물체의 첫 번째 모드(0차 모드)부터 NB 번 물체의 k 차 일반화 모드까지 순차적으로 모드를 정의한다. 즉 각 물체에 동일하게 Nb+1 차 일반화 모드를 부여하고 1 번 물체의 첫 번째 모드가 0차 모드이므로 하면 j 번째 물체의 k 번째 모드는 전체 일반화 모드에서 m(m=(j-1)*(Nb+1)+k+1)차 모드가 된다. 경계조건으로는 j 번째 물체에 대해 m 차 방향여현(directional cosine)을 경계조건으로 부과하고 나머지 물체에 대해서는 고정 물체 경계조건(zero flux condition)을 다음과 같이 부과한다.

$$C(\vec{x})\phi_m(\vec{x}) + \sum_{j=1}^{NB} \int_{S_{bj}} \phi(\vec{\xi})G_n(\vec{x}, \vec{\xi})dS \quad (3)$$

$$= \int_{S_{bj}} n_m(\vec{\xi})G(\vec{x}, \vec{\xi})dS$$

$$n_m = \vec{S}_m(\vec{x}) \cdot \vec{n}, \quad \vec{x} \in S_{bj} \quad (4)$$

n_m 는 m 번째 모드에 의한 방향여현이며 $\vec{S}_m(\vec{x})$ 는 m 번째 모드를 나타내는 형상함수 벡터이고 \vec{n} 은 물체 표면에서의 방향여현 벡터이다. 이와 같은 방법으로 각 일반화 모드에 대한 속도포텐셜이 구해지면 각 모드의 속도포텐셜로부터 각 물체와 모드에 대한 압력을 구하여 전체 일반화 모드의 방향여현을 곱하여 각 물체에 대해 따로 적분함으로써 각 물체와 모드별 상호간섭이 고려된 동유체력 계수를 구하게 된다. 이후부터의 과정은 단독 물체에 대한 유탄성응답 해석과 동일하게 취급되며 각 물체에 대해 독립적인 계류시스템이 적용되는 경우 이에 대한 연성 계류 복원력이 운동방정식에 첨가된다.

다음과 같은 일반화 모드의 특수한 예로 6자유도 강체운동을 생각하면 NB 개의 물체에 대해 총 $6 \times NB$ 개의 일반화 모드가 사용되는 것이며 NB 개의 물체 중 1개 물체만 N 개의 일반화 모드가 허용되고 나머지 물체는 고정되었다고 생각하면 총 N 개의 일반화 모드가 사용된 것이다.

방파제와 부유 구조물의 동유체역학적 상호간섭 특성은 안벽에 계류된 배를 해석한 것(최윤락 등, 1994)과 유사할 것이며 이와 같이 근접한 구조물의 수치해석에 있어 정밀도는 고차경계요소법을 사용할 때 크게 향상되는 것이 알려져 있다(Hong et al. 1999). 본 논문의 수치계산에서는 9절점 고차경계요소를 사용하였으며 폰툰형 구조물의 유탄성 거동 해석을 위해서는 모드중첩법을 사용하였다. 수치해석에 대한 자세한 내용은 홍사영 등(2000), Choi et al.(2000), Hong et al.(2001)에 나타나 있으며 Hong(1987)의 방법에 따라 특이파수를 제거하였다.

3. 수치 해석 및 고찰

부유식 구조물을 이용한 방파제나 하부가 개방

된 고정식 방파제의 경우는 개방된 공간을 통한 파도의 유입효과가 있고 그 효과는 구조물의 크기, 개방의 정도와 파장과의 관계에 의해 결정된다. 본 연구에서는 하부가 개방된 방파제에 의한 유탄성 응답 특성을 살펴보기 위해 다음의 조건에 대한 일련의 계산을 수행하였다. 계산 대상 구조물은 일본의 메가플로트 프로젝트의 제1단계 실증 구조물(길이 300m, 폭 60m, 흘수 0.5m)을 택하였으며 수심(h)은 58.5m로 하였다. 방파제는 직립벽 형상으로 길이 400m, 폭 5m이며 깊이와 설치 위치를 변화시켜 가며 계산을 수행하였다.

구조물에 가장 가까운 방파제 거리는 측벽 기준 20m로 하였으며 Table 1에 나타난 방파제의 여러 가지 조합에 대한 계산을 수행하였다. 구조물과 방파제의 배치는 Fig. 1에 나타내었으며 계산된 조건은 다음과 같다.

Table 1 Characteristics of breakwaters

break-water	height (h ₁)	bottom location	Remarks
BW1	30m	-30m	piercing
BW2	22.5m	-22.5m	piercing
BW3	15m	-15m	piercing
BW2U	22.5	-30m	submerged
BW3U	15m	-30m	submerged

Table 2 Calculation conditions

Symbol	Wavebreaker	distance
1wbk	BW1	-
1wbki	BW2	20m
2wbk	BW1+BW2	20m
2wbkk	BW1+BW1	20m
2wbkkk	BW1+BW1	40m
2wbki	BW2+BW1	20m
2wbku	BW1+BW2U	20m
3wbk	BW1+BW2+BW3	20m
3wbku	BW1+BW2U+BW3U	20m

*: distance between breakwaters

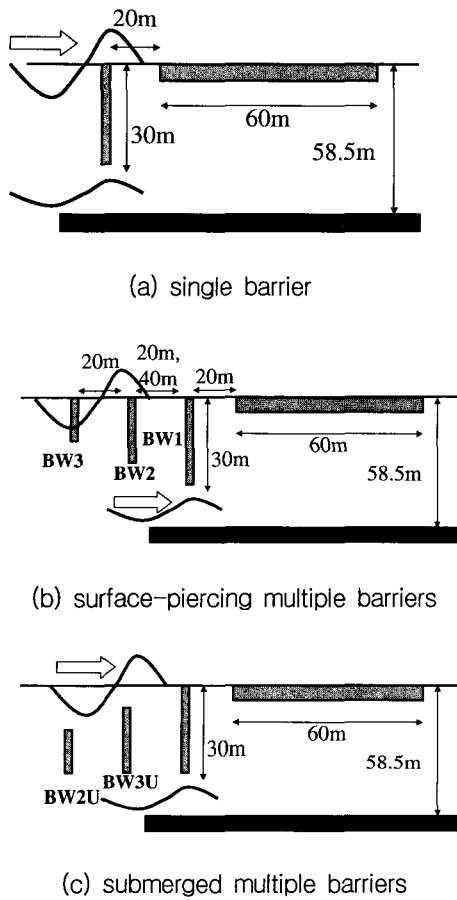


Fig. 1 Arrangement of breakwaters

Fig. 2a에는 파장비($\lambda/L=0.2$)일 때 1wbk 조건에 대한 유탄성응답 특성변화를 방파제가 없는 경우와 비교하여 나타내었다. 그림에서 음영이 짙은 경우가 응답수준이 높은 것이고 음영이 밝을수록 응답수준이 감소하는 것을 나타낸다. 파장비 0.2에서는 방파제 하부가 개방되었더라도 파입자의 운동이 방파제의 개방부까지 거의 미치지 못하므로 방파제로 인한 응답감소가 뚜렷이 나타나는 것을 볼수 있다. Fig. 2b에는 같은 조건에서의 결과를 구조물의 중심과 좌우현에서 길이방향 유탄성응답 변화를 비교하여 나타낸 것이다.

하부가 개방된 방파제의 경우에는 개방정도에 따른 방파제의 효율을 3차원 효과를 무시하고

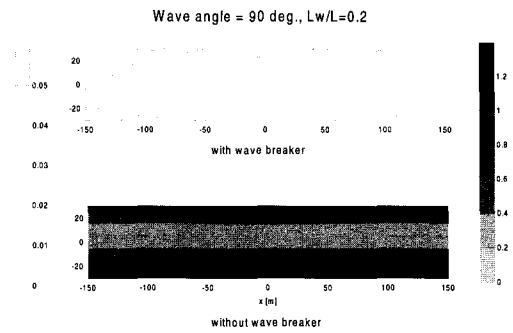


Fig.2a Comparison of hydroelastic response contour(w/ and w/o breakwater, $\lambda/L=0.2$)

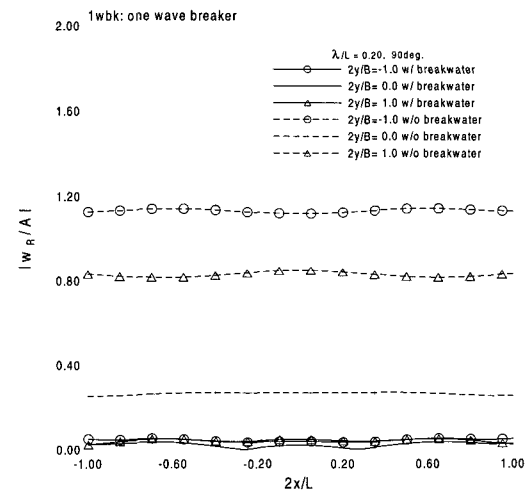


Fig.2b Comparison of hydroelastic responses(w/ and w/o breakwater, $\lambda/L=0.1$)

blockage 개념에서 추정할 수 있는데 Fig. 3에는 개방정도가 다른 두 경우에 대한 방파제의 효과를 방파제가 없는 경우에 대한 응답의 비를 구조물 중앙과 좌우현에서의 값에 대해 평균을 취하여 나타내었으며 Fig. 4에는 방파제를 2차원으로 가정하여 투과 계수(Bw)를 계산하여 나타내었다.

$$Bw = \sqrt{1 - (f(h_1)/f(0))^2}, \quad (5)$$

$$f(y) = \int_{-h}^y \cosh k(z+h) dz$$

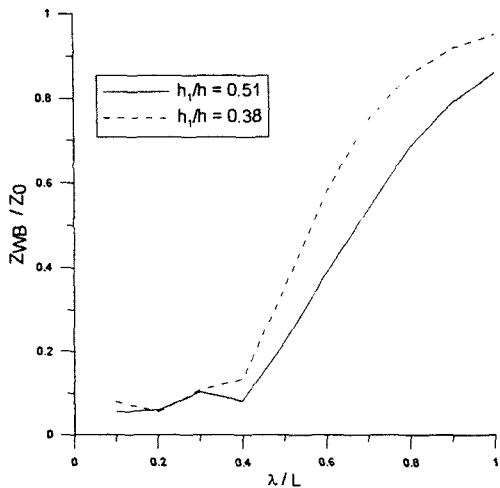


Fig. 3 Comparison of response reduction ratio due to change of breakwater opening

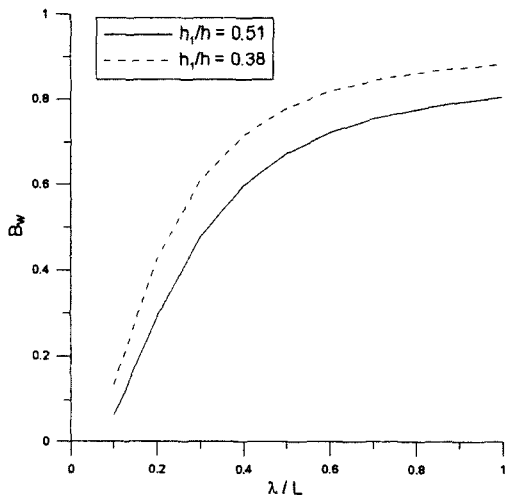


Fig. 4 Approximation of wave transparency due to change of breakwater opening

방파제가 없는 경우에 대한 응답비로 살펴보면 수심에 대한 차단비율(h_1/h)을 약 50%(0.51)와 40(0.38)% 하였을 때의 유탄성 응답 감소효과는 파장비 0.3까지는 큰 차이를 보이지 않으나 그 이후에는 차단비를 높인 경우 응답감소효과가 향상되는 것을 볼 수 있으며 그 향상의 정도는 2차원으로 근사한 투과계수의 비보다 높은 것으로 나타났다. 이는 투과계수 근사에서 바닥의 효과를 체

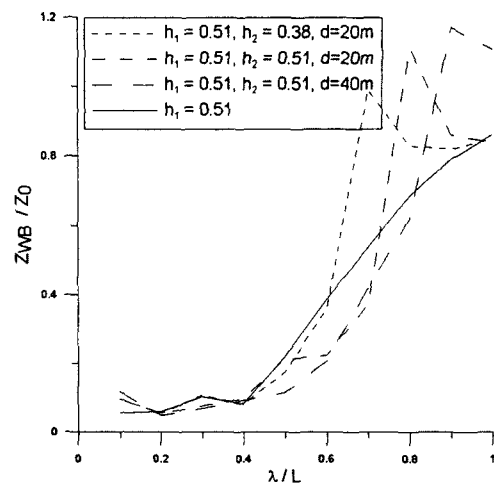


Fig. 5 Comparison of response reduction ratio due to change of opening and distance between two breakwaters

계적으로 반영시키지 못한 이유로 생각된다.

Fig. 5에서는 2개의 방파제 형태와 위치를 바꾸면서 유탄성응답의 감소효과를 살펴보았다. 그림에서 실선은 방파제가 하나만 있는 경우이고(1wbk) 점선의 간격이 넓어지면서 추가된 방파제의 깊이가 증가하고 두 방파제간의 거리가 증간된 경우를 나타낸다(2bk, 2wbkk, 2wbkkk).

파 입사방향으로 추가된 방파제의 깊이가 기존 방파제보다 낮은 경우는 추가된 방파제로 인한 효과가 거의 없음을 보여주고 있으며 추가된 방파제의 깊이가 기존의 것과 동일한 경우 파장비 0.5~0.7 구간에서 응답감소효과가 개선되는 것으로 나타났다. 방파제간의 거리를 2배(40m)로 증가시킨 경우 방파제효과 개선구간이 다소 넓어지는 것을 볼 수 있다. 방파제가 2개로 늘어나면서 방파제 1개인 경우보다 오히려 유탄성 응답이 증가하는 파장비가 존재하는 것을 볼 수 있는데 이는 두 방파제로 인해 형성된 공간에 갇혀진 물의 Helmholtz 공진이 발생한 결과로 생각된다. 갇혀진 물의 양이 증가하면서 공진주기도 증가하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 6에는 개방비를 달리한 3개의 방파제를 일렬로 설치한 경우의 특성을 나타내었다. 방파제 2개인 경우와 마찬가지로 추가된 방파제로 인한 개

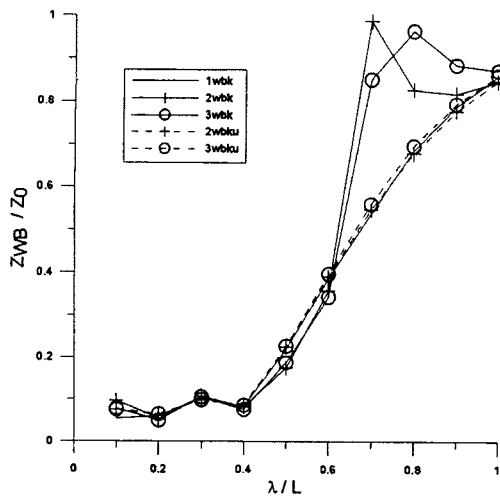


Fig. 6 Comparison of response reduction ratio due to three breakwaters(surface-piercing and submerged)

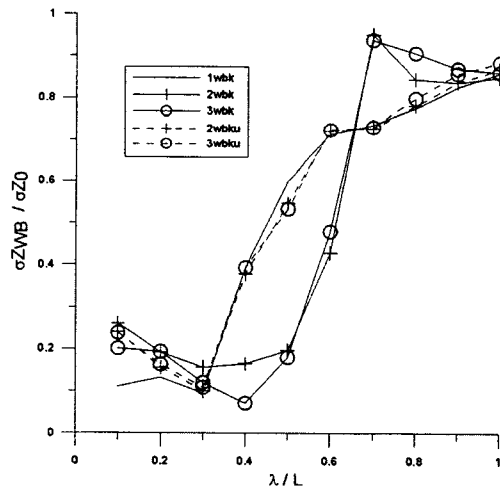


Fig. 7 Comparison of reduction of transverse variation due to three breakwaters(surface-piercing and submerged)

선효과는 미미하며 방파제 사이에 갇힌 물로 인한 내부 공진효과가 나타남을 볼 수 있다. 특히 추가된 방파제가 물 속에 잠긴 경우는 단독 방파제에 비해 개선 효과가 전혀 없음을 볼 수 있으며 그 경우에는 공진현상 또한 나타나지 않고 있다.

Fig. 7에는 방파제의 효과를 구조물 중앙과 좌우현의 응답 차이감소관점에서 살펴보았다. 그림에서 종축은 방파제 설치시 파 입사방향 구조물 응답의 평균치와 중앙, 좌우현에서 응답의 표준편차를 방파제가 없는 경우의 표준편차로 나눈 값을 Fig. 6과 같은 조건에 대해 나타내었다. Fig. 7에서는 파장비 0.6까지 방파제 차이에 따른 응답감소효과는 큰 차이가 없었으나 수면을 관통하는 방파제가 추가된 경우 좌우현 간의 응답차이는 줄어드는 것을 알 수 있으며 이는 추가된 수면 관통 방파제는 전체적인 응답 수준 감소에는 기여하지 않으나 고차모드의 기진력을 감소시키는 역할을 하는 것으로 보인다.

4. 결론

확장된 일반화 모드 기법을 적용하고 고차경계요소법을 사용하여 다물체의 유탄성응답 해석이 가능한 프로그램을 개발하였다. 하부가 개방된 방파제의 효과를 구조물의 유탄성 응답 감소효과 면에서 살펴보았다. 수치계산 결과를 바탕으로 내린 결론은 다음과 같다.

1. 하부가 수심의 50% 개방된 방파제를 사용하여 유탄성응답 수준을 파장비 0.5까지 70% 이상 감소시킬 수 있다.
2. 동일한 개방비를 갖는 방파제를 직렬로 배치한 경우 소파 효과를 향상시킬 수 있다.
3. 개방비가 다른 여러 개의 방파제를 직렬로 배치하는 경우 방파제의 성능은 개방비가 가장 작은 방파제의 성능과 차이가 없으며 직립형태의 몰수된 방파제는 부가적인 효과가 없다.
4. 수면을 관통하는 방파제를 직렬로 배치하는 경우 고차모드 응답의 감소효과가 뚜렷하다.

후 기

본 연구는 해양수산부가 지원한 "초대형 부유식 해상구조물 기술개발" 연구결과의 일부임을 밝힙니다.

참 고 문 헌

- 이호영, 신현경, 임춘규, 김외현, 강점문, 윤면철 2001 "방파제를 고려한 초대형 부유식 해양 구조물의 응답," 대한조선학회논문집, 제38권 제2호, pp. 26-32
- 최윤락, 최항순, 신현수, 염덕준, 1994 "안벽에 계류된 선박의 운동응답 해석," 대한조선학회추계연구발표회, pp. 238-243
- 홍사영외 2000 "초대형 부유식 해상구조물 기술 개발," 한국해양연구원 보고서
- 홍사영, 최윤락, 홍석원 2001 "출수 영향을 고려한 폰툰형 초대형 구조물의 유탄성 응답해석," 대한조선학회논문집 제39권 4호, pp32-41
- Hong, D.C. 1987 "On the Improved Green integral equation applied to the Water-wave radiation-diffraction problem," Journal of SNAK Vol. 24 No.1, pp1-8
- Hong, S.Y., Choi, Y.R., Kim, D.J. and Kim, M.H. 1999 "Responses of a Barge-mounted platform in waves and current", Journal of ISOPE Vol.9 No.4, pp283-292
- Maeda, H., Rheem, C.-K., Washio, Y., Osawa, H., Nagata, Y., Ikoma, T., Fujita, N., Arita, M. 2001 "Reduction effects of hydroelastic responses on a very large floating structure with wave energy absorption devices using OWC system", Proc. of 20th OMAE conference, OMAE01/OSU-5013, Rio de Janeiro, Brazil.
- Ohmatsu, S., Kato, S., Namba, Y., Maeda, K., Kobayashi, M., Nakagawa, H. 2001 "Study on floating breakwater for eco-float mooring system", Proc. of 20th OMAE conference, OMAE01-5012, Rio de Janeiro, Brazil.
- Takaki, M., Fujikubo, M., Higo, Y., Hamada, K., Kobayashi, M., Nakagawa, H., Morishita, S., Ando, K., Tanigami, A. 2001 "A new type VLFS using submerged plates: Sub-plate VLFS ---Part 1 Basic concept of system---" Proc. of 20th OMAE conference, OMAE2001/OSU-5017, Rio de Janeiro, Brazil.
- Nagata, S. et al. 1999 "Wave-induced motion of an elastic floating plate in a sea with breakwater", Proc. of the 3rd VLFS, Hawaii, Vol. I, pp114-122.
- Ohmatsu, S. 1999 "Numerical calculation method of hydroelastic response of pontoon-type VLFS close to a breakwater", Proc. of the 3rd VLFS, Hawaii, Vol. II, pp805-811.



< 홍 사 영 >



< 최 윤 락 >



< 홍 석 원 >