

폰툰형 부체구조물과 몰수평판에 작용하는 라디에이션 유체력에 관한 연구 : 몰수평판에 의한 유체력 간섭 영향

† 이상민*

*군산대학교 해양생산학·동태기계시스템공학부 교수

Study on the Radiation Forces on a Pontoon Type Floating Structure and Submerged Plate : Hydrodynamic Interaction Effect by Submerged Plate

† Sang-Min Lee*

*Dept. of Marine Science and Production, Kunsan National University, Kunsan 573-701, Korea

요약 : 초대형 부체구조물은 파랑중 유탄성 변형이 심하게 발생하기 때문에 수평식 몰수평판과 같은 파랑에너지 흡수장치의 부가적인 개발이 요구된다. 본 연구에서는 몰수평판에 의해 야기되는 유체력 간섭현상이 폰툰형 부체구조물에 작용하는 라디에이션 유체력에 어떠한 영향을 미치는지 수치적인 해석을 통하여 그 특성을 파악하고자 한다. 폰툰형 부체구조물과 몰수평판의 상하운동에 의해 발생하는 라디에이션 유체력을 계산하기 위해 고정격자계와 이동격자계로 구성되는 중합격자법을 토대로 한 수치계산법을 개발한다. 또한 쇄파현상과 같은 비선형성이 강한 자유표면 문제를 해결하기 위하여 유한차분법을 적용하여 시뮬레이션을 실시하고 그 결과를 실험데이터와 비교함으로써 수치계산법의 신뢰성을 확인한다. 몰수평판에 의해 발생하는 유체력 간섭 영향의 특성을 분석하여 부체구조물의 파랑중 유탄성 변형에 미치는 그 효과에 대하여 논의한다.

핵심용어 : 폰툰형 부체구조물, 몰수평판, 라디에이션 유체력, 중합격자, 유한차분법

Abstract : Hydroelastic deformation of pontoon type floating structure in waves is critical in structural design. Therefore, it is necessary to develop additional technology that make to dissipate the wave energy as the submerged horizontal plate. In this study, we investigate the characteristics of hydrodynamic interaction effect by the submerged plate affecting to the radiation forces on a pontoon type floating structure using numerical analysis. We have developed the numerical method based on the composite grid system that consists of moving and fixed grid to compute the radiation forces due to the heaving motion of pontoon type floating structure and submerged plate. The numerical simulations based on the finite difference method are carried out to solve the fully nonlinear free surface involving the breaking waves and compared with the experimental data to confirm the reliability of the numerical method. Then, we discuss the interaction effects on the hydrodynamic forces that could influence on the hydroelastic response of floating structure.

Key words : Pontoon type floating structure, Submerged plate, Radiation force, Composite grid, Finite difference method

1. 서론

해상공항, 부유식 마린아와 같은 해양공간을 적극적으로 활용할 수 있는 폰툰형 대형 부체구조물에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있다(Yoshida, 2003). 이러한 초대형 부체구조물은 파랑중 유탄성 변형이 심하게 발생하기 때문에 수평식 몰수평판과 같은 파랑에너지 흡수장치의 부가적인 개발이 요구된다(Takaki et al., 2001). Ikoma et al.(2002)은 유탄성 변형을 감소시키기 위해서 에어챔버가 부착된 수직식 몰수평판에 관한 연구를 실시하였다. Takaki et al.(2002)은 수평식 몰수평판에 의한 파랑강제력 감소효과에 대한 연구를 실시하여 몰수평판이 폰툰형 초대형 부체구조물에 작용하는 파랑강제력을 감소시키는데 효과가 있음을 확인했다. 또한 몰수평판 단독으로

수중에서 강제 상하운동에 의해 발생하는 라디에이션 유체력에 관한 특성이 조사되었다. 그러나 몰수평판과 폰툰형 초대형 부체구조물은 상갑판이 상호 연결되어 있으며, 파랑중 상하운동에 의해 야기되는 상호 유체력 간섭영향에 대한 연구를 통해 부유체의 운동특성을 파악하여야만 부유식 방파제 시스템의 구조물 설계에 적용이 가능해 진다.

본 연구에서는 폰툰형 부체구조물과 몰수평판에 작용하는 라디에이션 유체력 중 몰수평판에 의해 야기되는 유체력 간섭 현상이 부체구조물에 작용하는 라디에이션 유체력에 어떠한 영향을 미치는지 수치적인 해석을 통하여 그 특성을 파악하고자 한다. 폰툰형 부체구조물과 몰수평판의 상하운동에 의해 발생하는 라디에이션 유체력을 계산하기 위해 고정격자계와 이동격자계로 구성되는 중합격자법을 토대로 한 수치계산법

† 교신저자 : 이상민(정회원), smlee@kunsan.ac.kr, 063)469-1814

을 본 연구를 통하여 개발한다. 기하학적으로 복잡한 형상의 해상구조물에 미치는 유체력을 정확히 구현하기 위하여 유체 속에서 상하운동을 하는 물체에는 이동격자계를 적용하고, 이동격자계 주위와 전체 계산영역에는 고정격자계를 적용한 중합격자계를 이용하여 시뮬레이션을 실시한다. 또한 쇄파현상과 같은 비선형성이 강한 자유표면 문제를 해결하기 위하여 유한차분법인 MAC법을 적용하여 수치계산을 실시하고 그 결과를 실험데이터와 비교함으로써 수치계산법의 신뢰성을 확인하고, 물수평판에 의해 발생하는 유체력 간섭 영향의 특성을 분석하여 부체구조물의 파랑중 유탄성 변형에 미치는 효과에 대하여 논의 한다.

2. 수치 시뮬레이션

2.1 지배방정식 및 경계조건

MAC법을 기본 알고리즘으로 한 유한차분법을 이용하여 폰툰형 부체구조물과 물수평판에 작용하는 라디에이션 유체력 계산을 위한 시뮬레이션을 실시하였다. 2차원, 비압축성, 점성 유체를 대상으로 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식을 지배방정식으로 사용하며 아래와 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial \phi}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\partial \phi}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + g \quad (3)$$

여기서 u, w 는 각각 x, z 축에 대한 속도성분이며 ϕ 는 유체 밀도로 나누어준 압력, ν 는 동점성 계수를 의미한다. 전체적인 수치계산은 TUMMAC-Vwv의 모델을 따르고 있으며(Lee and Miyata, 1990), 시간차분은 2차 Adams-Bashforth법을, 대류항은 3차 상류차분을, 확산항은 2차 중심차분을 각각 사용하였다. 수저 및 유출경계조건은 zero-normal gradient 조건을 사용하였으며 물체 표면에는 no-flux, no-slip 조건을 부과하였다. 그리고 라디에이션 유체력을 계산하기 위해 강제 상하운동을 하는 물체 및 이와 함께 이동하는 이동격자계는 아래와 같이 주기적인 상하 진동을 하게 된다. 또한 이동격자계에서는 위의 지배방정식의 대류항에 격자의 이동속도가 포함되어 계산된다(Demirdzic and Peric, 1990).

$$z(t) = z_a \sin \omega t \quad (4)$$

2.2 수치계산조건

수치 시뮬레이션을 위한 기본적인 모델의 제원 및 배치도는 Fig. 1과 같다. 실물 크기의 1/50을 대상으로 하였으며 물수평판에 의한 부체구조물에 작용하는 유체력 변화를 조사하기 위해 물수평판이 풍상측에 부착된 경우(case 1)와 물수평판이 없는 경우(case 2)로 구분하여 수치계산을 실시하였다. 본 연구는 부체구조물에 작용하는 라디에이션 유체력 계산을 목적으로 하고 있기 때문에 부체 끝단만 상하운동을 하고 물수평판 및 부체의 풍하측 구조물은 해상에 고정되어 있는 상태에서 시뮬레이션을 실시한다. 물수평판의 물수심도는 40mm, 부유체의 흘수는 40mm, 폰툰형 부체 끝단의 강제 상하운동 진폭은 10, 20, 30mm로 하였으며, 물수평판의 중심으로부터 3m 떨어진 곳에 파고계를 설치하여 부유체의 상하운동에 의하여

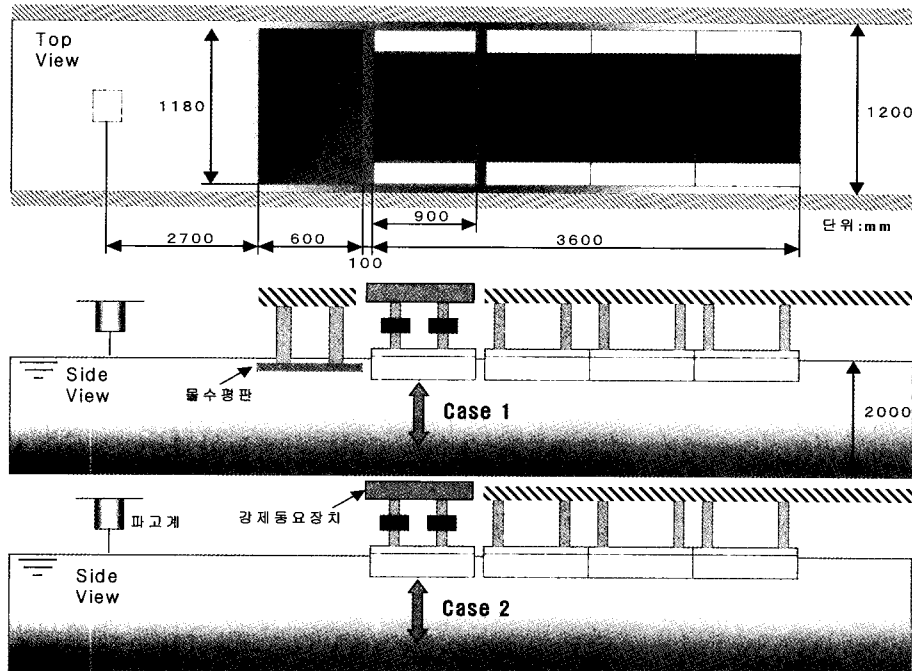


Fig. 1 Test setup for the radiation force test

발생되는 발산파의 파고를 측정하도록 하였다.

3. 수치해석 결과 및 토의

앞에서 설명한 수치계산 조건을 토대로 하여 시뮬레이션을 실행 하였다. Fig. 2는 부유체 끝단의 운동진폭 10mm, 운동주기 0.8sec.의 계산조건으로 상하운동하는 모습을 나타내고 있다. 물체와 이동격자가 함께 상하운동을 하고 있으며, 이러한 상하동요로 인해 변화하는 자유표면과 유체영역의 속도 벡터를 구현하고 있다. 시뮬레이션 결과에서 보여 지는 바와 같이 부체의 상하운동에 의해 발생하는 파가 물수평판에 부딪히며 쇄파되어 외부로 전파되어가는 현상을 실험결과와 비교했을 때 매우 잘 표현해 내고 있음을 확인 할 수 있다.

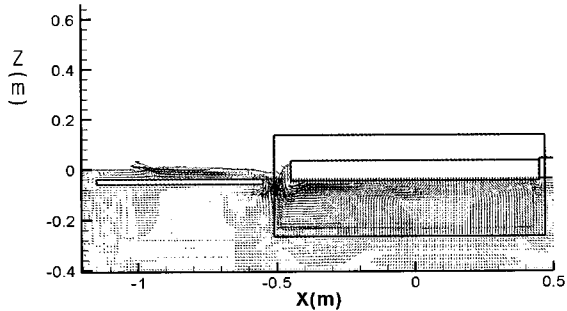


Fig. 2 Velocity vector field for $z_a=10\text{mm}$, $T=0.8\text{sec}$.

Fig. 3과 Fig. 4는 물수평판이 부착된 경우(case 1)의 발산파 진폭과 상하동요하는 부체 끝단에 작용하는 유체력에 대한 실험 데이터와 계산결과를 보여주고 있다. 실험값은 푸리에 해석을 통한 고차 성분을 함께 나타내고 있으며 발산파 및 상하유체력 모두 각각 무차원화 된 값을 표시하고 있다. 먼저 Fig. 3의 발산파 성분을 분석해 보면 2, 3차의 고차 성분이 크게 작용하고 있음을 확인할 수 있다. 이것은 부체 끝단 부분의 상하동요에 의해 발생된 파가 물수평판에 부딪혀 쇄파현상을 일으키며 발산됨으로서 비선형효과가 되어 외부로 전파되어 가고 있음을 시뮬레이션을 통해 이해 할 수 있다.

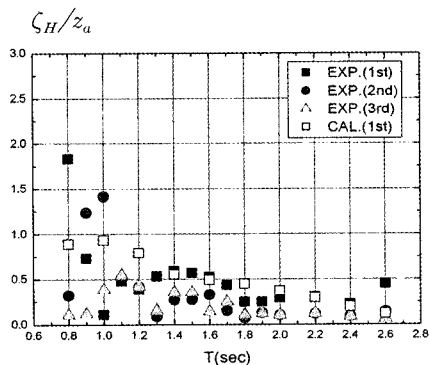


Fig. 3 Radiation wave amplitude for case 1

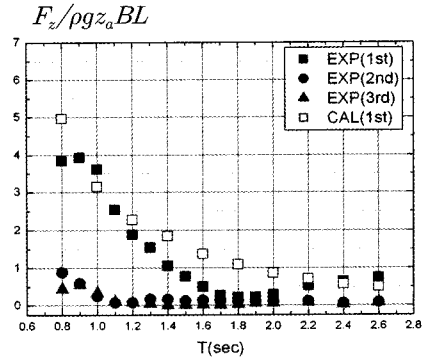


Fig. 4 Heave force on float for case 1

Fig. 4는 부체 끝단의 상하 라디에이션 유체력을 나타내고 있다. 수치계산 결과는 실험 데이터와 비교적 잘 일치하고 있는 모습을 보여주고 있으며, 비선형 요소가 적게 작용하고 있음을 확인 할 수 있다.

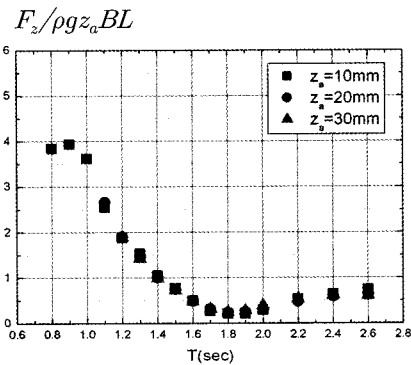


Fig. 5 Comparison of heave force on float for $z_a=10\text{mm}$, 20mm and 30mm for case 1

Fig. 5는 부체 끝단 부분의 동요진폭을 달리 했을 경우, 즉 상하운동 진폭이 10, 20, 30mm인 경우의 상하 라디에이션 유체력을 보여 주고 있다. Fig. 4와 Fig. 5에서 확인할 수 있는 바와 같이 부체에 작용하는 유체력은 라디에이션파와는 다르게 선형적인 요소로서 부유체에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6~Fig. 8은 물수평판의 영향이 없는 경우(case 2)의 발산파 진폭 및 부유체에 작용하는 상하유체력에 대한 수치계산 결과를 보여주고 있다. 발산파 성분은 1차 성분이 지배적이며 물수평판이 부착된 경우보다 전반적으로 큰 값을 지니고 있음을 알 수 있다. 이것은 부유체의 상하진동으로 인하여 발생한 파가 물수평판 상부를 지나면서 소파현상이 발생하여 파의 진폭이 감소된 채 외부로 전파되고 있는 것으로 이해 할 수 있다. 풍상측 주위에 다른 구조물이 없는 단순한 부유체 상하운동은 선형적인 유체력의 영향을 받고 있음을 Fig. 7과 Fig. 8을 통해서 확인할 수 있다.

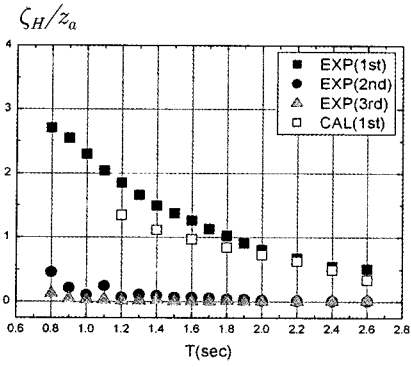


Fig. 6 Radiation wave amplitude for case 2

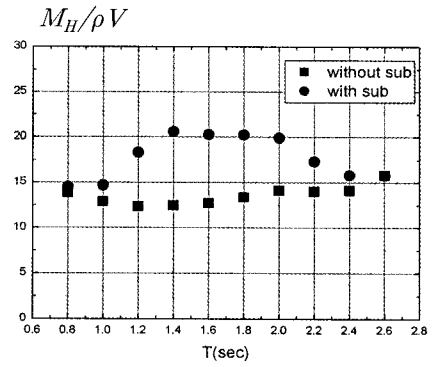


Fig. 10 Comparison of added mass on float without/with submerged plate

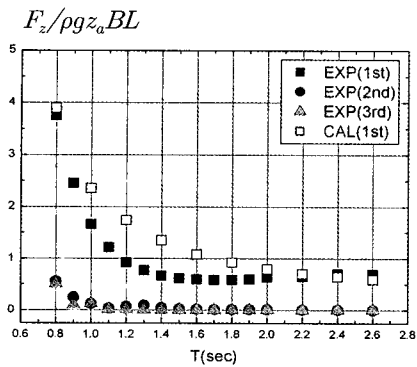


Fig. 7 Heave force on float for case 2

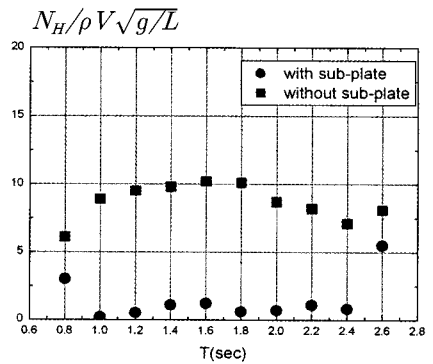


Fig. 11 Comparison of wave making damping force on float without/with submerged plate

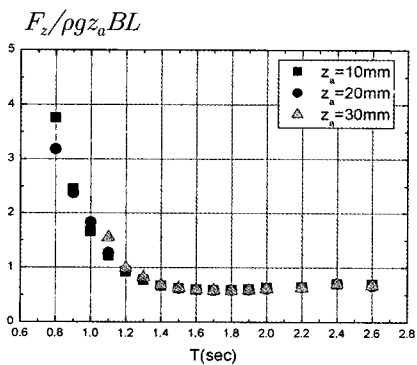


Fig. 8 Comparison of heave force on float for $z_a=10$ mm, 20mm and 30mm for case 2

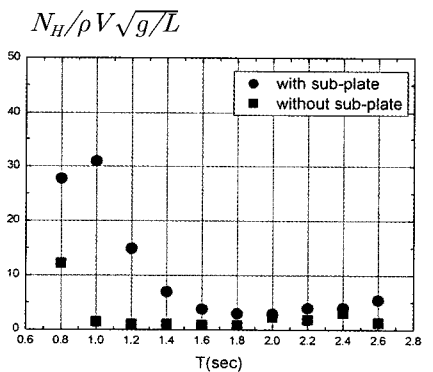


Fig. 12 Comparison of viscous damping force on float without/with submerged plate

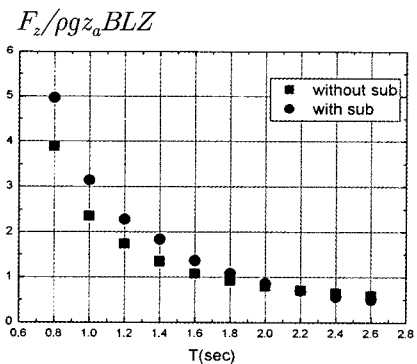


Fig. 9 Comparison of heave force on float without/with submerged plate

Fig. 9~Fig. 12는 각각 부유체에 작용하는 상하유체력, 부가질량, 조파감쇄력, 점성감쇄력에 대하여 물수평판의 유무에 따른 영향력을 상호 비교하고 있다. 강제 상하동요에 의한 폰톤형 부체구조물에 작용하는 전체 유체력은 주기가 짧은 영역에서 물수평판의 영향에 의해 증가하고 있음을 알 수 있으며 (Fig. 9), 이것은 점성감쇄력의 증가로 인해 발생하는 원인이라고 추정할 수 있다(Fig. 12).

중간 진동주기 영역에서는 전반적으로 물수평판의 영향으로 부가질량이 증가하고 있으나(Fig. 10), 조파감쇄력은 물수

평판이 없는 경우 발산과 진폭의 상승으로 인해 물수평판이 있는 경우보다도 더욱 커지는 경향을 나타내고 있다(Fig. 11). 이 두가지 요소(부가질량과 조파감쇄력)가 서로 상쇄되어 진동주기가 짧은 영역이외에서는 전체적인 유체력에 큰 변화를 가져오지 않는다고 추정된다.

4. 결 론

파랑에너지 흡수장치로서 개발된 물수평판과 폰툰형 부유체에 작용하는 라디에이션 유체력 특성을 파악하기 위해서 종합적자법을 적용하여 시뮬레이션을 실시하였다. 계산 결과는 실험 데이터와 전반적으로 잘 일치하고 있음을 확인하였으며, 본 수치계산법을 통하여 비선형 유체력 현상의 문제해결에 매우 유효하게 사용할 수 있을 것으로 생각된다. 부가질량 및 감쇄력으로 구성되는 부유체의 라디에이션 유체력은 강제 상하운동의 주기가 짧은 단주기 영역에서 물수평판의 영향에 의해 증가하고 있음을 확인 할 수 있었다. 이것은 폰툰형 부체 구조물의 파랑중 운동 응답 진폭을 작아지게 하여 결과적으로는 부체 구조물의 유탄성 변형을 감소시키는 효과가 있다고 예상할 수 있다.

본 연구를 통해서 물수평판에 의한 유체력 간섭 영향에 대하여 비교·분석함으로써 폰툰형 부체구조물의 파랑중 변형을 최소화 시킬수 있는 최적의 부유식 방파제 시스템의 구축에 기여할 수 있는 해석 데이터의 제공이 가능하리라 예상된다. 또한 복잡한 형상을 지닌 해상구조물에 미치는 비선형 유체력의 계산에 본 연구에서 개발된 수치계산법이 활용된다면 해상에서의 부유체의 동적거동에 대한 시뮬레이션 실행이 가능하게 되어 파랑중 해상구조물의 안정성 평가에도 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

향후에는 폰툰형 부유체에 의하여 물수평판에 작용하는 유체력에 어떠한 변화가 나타나는지에 대한 원인을 파악하여 두 물체사이의 종합적인 유체력 간섭 영향을 검토하기 위한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2006년도 군산대학교 신입교수 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참 고 문 헌

- [1] Demirdzic, I. and Peric, M.(1990), "Finite Volume Method for Prediction of Fluid Flow in Arbitrarily Shaped Domains with Moving Boundaries", *Int. J. of Numerical Methods in Fluids*, Vol.10, pp.771-790.
- [2] Ikoma, T., Maeda, H., Masuda, K., Rheem, C. K., and Arita, M.(2002) "Effect of Submerged Vertical Plates and Air Chamber Units in Hydroelastic Response Reductions", *Proc. 12th ISOPE*, pp.547-552
- [3] Lee, Y. G., Miyata, H.(1990), "A Finite-Difference Simulation Method for 2D Flows about Bodies of Arbitrary Configuration", *J. of Society of Naval Architects of Japan*, Vol.167, pp.1-8.
- [4] Takaki, M., Fujikudo, M., Higo, Y., Hamada, K., Kobayashi, M., Nakagawa, H., Morishita, S., Audo, K., and Tanigami, H. (2001), "A New Type VLFS Using Submerged Plate ; SUB-PLATE VLFS-Part1. Basic Concept of Systems", *Proc. 20th OMAE*, OMAE-01-0517 (CD-Rom).
- [5] Takaki, M., Imai, Y., and Lee, S. M.(2002), "Reduction Effect of a Submerged-Plate toward Wave Exciting Forces Acting on a Very Large Floating Structure", *Proc. 12th ISOPE*, pp.391-398.
- [6] Yoshida, K.(2003), "A Brief Review of Recent Activities on VLFS in Japan", *Proc. Int. Symposium on Ocean Space Utilization Technology*, pp.25-32.

원고접수일 : 2007년 4월 6일

원고채택일 : 2007년 10월 15일