

몰수평판에 작용하는 Radiation 유체력에 관한 연구

이상민* · 공길영** · 김철승***

*한국해양대학교 강사, **한국해양대학교 운항시스템공학부 교수, ***목포해양대학교 해상운송시스템학부 교수

A Study on the Radiation Forces Acting on a Submerged-Plate

Sang-Min Lee* · Gil-Young Kong** · Chol-Seong Kim***

*,**Dept. of Ship Operation Systems Engineering, Korea Maritime University, Pusan 606-791, Korea

***Div. of Maritime Transportation System, Mokpo National Maritime University, Mokpo 530-729, Korea

요약 : 라디에이션(radiation) 문제를 해결하기 위해서 중합격자법을 개발하였다. 중합격자계는 이동격자계와 고정격자계로 이루어져 있으며, 이동격자계는 운동하는 물체에 적용되어 운동하는 물체와 동시에 이동된다. 이러한 수치계산법은 자유표면 부근에서 운동하는 몰수평판에 작용하는 라디에이션 유체력을 계산하는데 응용되었다. 현재의 수치계산법에 의한 결과는 실험값 및 선형포텐셜 이론에 의한 결과와 상호 비교하였으며, 수치계산의 신뢰성을 확인하였다. 그리고, 몰수평판에 작용하는 비선형 점성감쇄효과에 대하여 평가하였다.

핵심용어 : 중합격자, 몰수평판, radiation 유체력, 점성감쇄력, 자유표면영향

Abstract : We have developed a composite grid method for the solution of the radiation problem. We divide the domain into two different grids; one is a moving grid system and the other is a fixed grid system. This numerical method is applied to calculation of the radiation forces generated by the submerged plate oscillating near a free surface. The experimental data are compared with the numerical ones obtained by the present method and a linear potential theory. As a result, we can confirm the accuracy of the present method. Finally, we have evaluated the effect of nonlinear and viscous damping on the hydrodynamic forces acting on the submerged plate.

Key Words : Composite grid method, Submerged-plate, Radiation force, Viscous damping force, Free surface effect

1. 서 론

초대형부체구조물(Very Large Floating Structure, VLFS)의 유탄성 응답에 관한 많은 연구가 진행되어 왔으며, 그중 탄성변형을 줄이기 위한 방파제를 제안하는 연구도 있었다. Takaki의 연구그룹에서는 VLFS의 장점을 이용하기 위한 부유식 방파제 시스템을 제안 하고 있다(Takaki et al., 2001). VLFS로 부터 5m의 간격을 유지하면서 상부갑판이 연결된 수평평판을 몰수평판이라 하며, 파강제력의 감소에 큰 효과가 있음을 확인하고 있다(Takaki et al., 2002).

몰수체가 자유표면 근처에서 진동할 때 물체에 미치는 부가질량과 감쇄계수는 운동주기에 따라 비선형 자유표면 효과가 크게 작용하게 된다(Chung, 1977). 또한 물체의 몰수심도가 얇을 때에는 물체의 운동진폭이 작음에도 불구하고 물체 주위의 유체 운동은 비선형이 된다.

본 연구의 목적은 자유표면 근처에서 진동하는 몰수평판 근처의 유체입자의 비선형 운동과 몰수평판에 작용하는 radiation 유체력을 추정하는 것이다. Radiation 문제의 경우

움직이는 물체와 자유표면의 상대운동을 취급하기가 어렵기 때문에, 이동격자계와 고정격자계로 분리되는 중합격자계를 개발하였다. 이러한 방법의 장점은 복잡한 형상을 보다 쉽게 취급할 수 있으며 움직이는 물체에 대해서 이동격자계를 사용할 수 있다는 것이다.

Radiation 유체력의 특성을 조사하기 위해서 각각 다른 몰수심도와 운동진폭으로서 강제동요실험을 실시하였다. 본 수치계산의 결과를 실험결과와 선형포텐셜 이론에 의한 계산결과와 비교·검토를 행하였다. 또한 몰수평판에 작용하는 유체력에 미치는 비선형 자유표면 효과와 점성감쇄력에 대해서 논의한다.

2. 중합격자 시스템

2.1 중합격자법

중합격자는 서로 다른 두가지 격자계로 구성된다. 첫 번째는 이동 격자계로서 움직이는 물체에 적용되어 물체와 함께 이동하는 물체고정 격자계이며, 다른 한가지 격자계는 이동 격자계 주위 및 전체 계산 영역을 구성하고 있는 공간고정

* 대표저자 : 이상민(정회원), oasyslee@hanmail.net 051)410-4868

** 종신회원, gykong@hhu.ac.kr 051)410-4273

*** 종신회원, cskimu@mail.mmu.ac.kr 061)240-7307

격자계이다. 유체흐름의 정보는 한 곳의 격자계로 부터 다른 격자계로 내삽에 의해서 전달된다. 중합격자 시스템과 이 시스템이 오버랩되는 부분을 확대하여 나타내면 Fig.1과 같다.

보(속도, 압력)를 상호 전송할 때 사용된다. 매 time step 후에 오버랩 부분이 바뀌게 되며 모든 격자점에 대한 flagging 이 새로이 행해 진다. 오버랩 부분에서의 경계조건은 다른

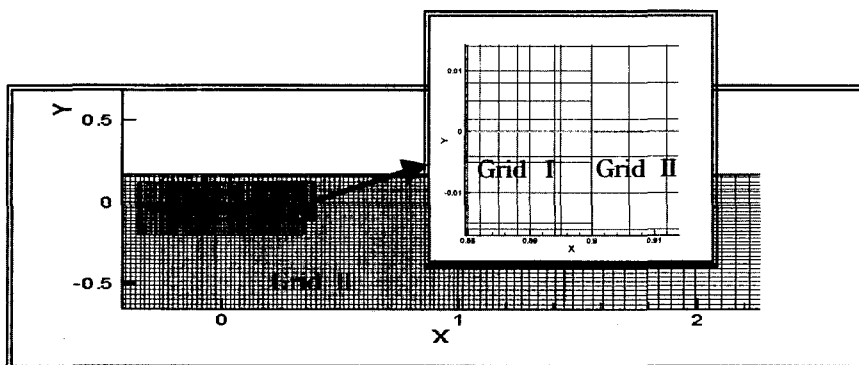


Fig. 1 Overlapping grid system

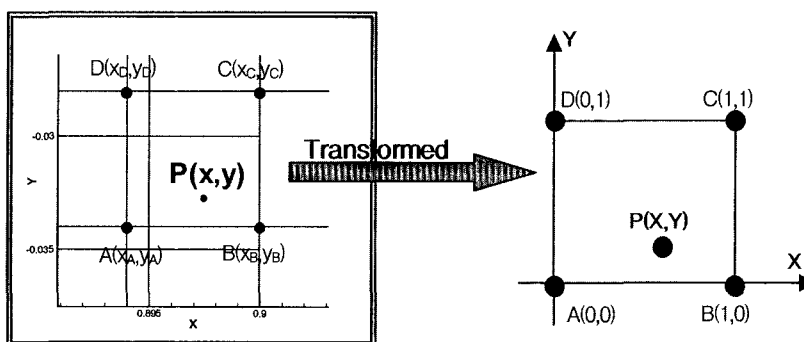


Fig. 2 Transformation of physical coordinate for Newton-Raphson interpolation

압력은 전체 유동장에서 수렴조건을 만족할 때까지 각 격자계에서 순차적으로 계산이 되며, 이때 경계조건은 다른 격자계로부터 내삽되어진 정보를 이용한다. 운동량 방정식은 각 격자계에서 서로 독립적으로 해결된다. Poisson 방정식을 풀어서 압력을 얻게 되며, 이때 오버랩 영역에서의 내부경계조건은 Dirichlet조건을 이용하게 된다. Schwarz는 오버랩 영역에서의 Dirichlet문제를 해결하기 위해서 상호교환법을 제안하였으며 Hinatsu와 Ferziger(1991)에 의해 검증되었다. 본 연구에서는 중합격자계의 압력방정식을 해결하기 위해서 Schwarz 반복법을 사용하였다. Schwarz 반복법의 알고리즘은 다음과 같다.

- 1) 내부경계조건을 이용하여 grid- I의 압력을 계산한다.
- 2) grid-II를 위한 내부경계조건은 grid- I으로부터 내삽하여 얻어진다.
- 3) 내부경계조건을 이용하여 grid-II의 압력을 계산한다.
- 4) grid- I을 위한 내부경계조건은 grid- II로부터 내삽하여 갱신한다.
- 5) 1)~4)번을 전체 압력장이 수렴할 때까지 반복한다.

2.2 내삽법

Newton-Raphson 내삽법이 서로 다른 격자계에서 유동정

격자계로 부터의 내삽에 의하여 결정된다.

내삽되어지는 데이터는 다음과 같이 표현된다.

$$\phi = (1-X)(1-Y)\phi_A + X(1-Y)\phi_B + XY\phi_C + (1-X)Y\phi_D \quad (1)$$

여기서 $\phi_A, \phi_B, \phi_C, \phi_D$ 는 각 셀의 꼭지점에서의 유동데이터이며, (X, Y) 는 아래 방정식에 의해 얻어지는 내삽점의 좌표축 위치이다.

$$x = (1-X)(1-Y)x_A + X(1-Y)x_B + XYx_C + (1-X)Yx_D \quad (2)$$

$$y = (1-X)(1-Y)y_A + X(1-Y)y_B + XYy_C + (1-X)Yy_D \quad (3)$$

여기서 (x, y) 는 내삽되는 점의 물리적 좌표점이다.

Fig.2는 Newton-Raphson 내삽법을 사용하기 위한 물리적 좌표의 변환을 나타내고 있다.

3. 수치계산

본 연구에서 사용되는 지배방정식은 2차원, 비압축성, 점성유체를 위한 Navier-Stokes 방정식과 연속방정식이다.

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \nabla \cdot (U - V)U = -\frac{\nabla P}{\rho} + \nu \nabla^2 U - g \quad (5)$$

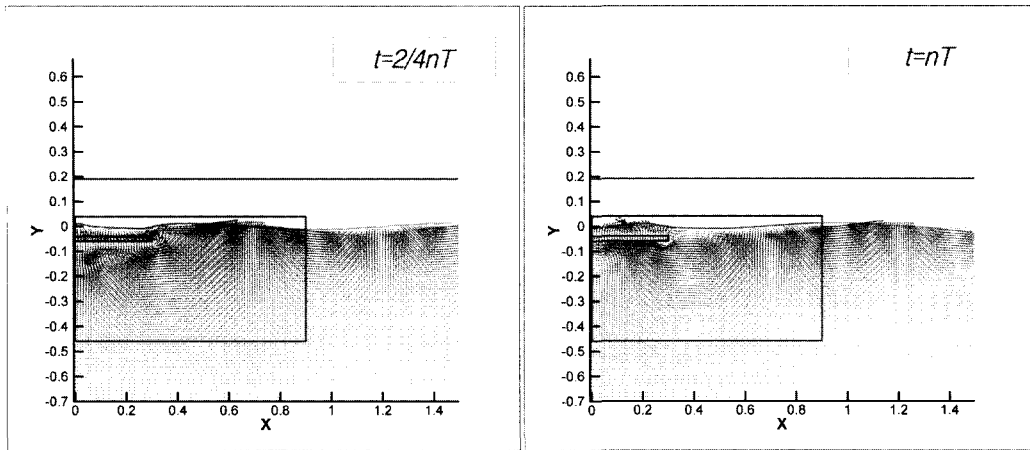
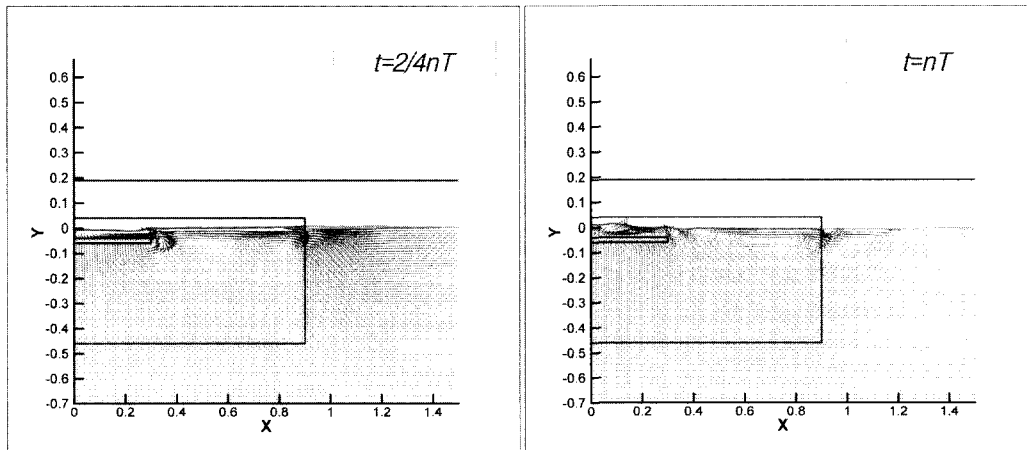


Fig. 5 Time sequences of velocity vector field for $T=0.8\text{sec}$, $d=40\text{mm}$, $z_a=10\text{mm}$



여기서 ρ 는 유체밀도, U 는 유체속도벡터, V 는 이동격자 속도, P 는 압력, ν 는 동점성계수이다. 고정격자 시스템과 비교하여 다른점은 이동격자속도 V 가 대류항에 포함되어 있는 것이다(Demirdzic and Peric, 1990). 고정격자계에서는 이동격자속도 V 가 영의 값이 되어 계산된다. 수치계산 흐름은 SGS 난류모델을 사용하고 있는 TUMMAC-V_{WV}의 방법과 유사하다(Lee et al., 1990).

압력은 전체 유체장에서 Schwarz 반복법을 사용하여 동시에 포아송방정식을 해결함으로써 얻어지고, 시간차분을 위해서는 2차 Adams-Bashforth법을, 이류항은 3차 상류차분을, 확산항은 2차 중심차분법을 각각 사용하였다. 속도 및 압력을 위한 수저 및 유출경계조건은 zero-normal gradient 조건이 주어진다. 계산영역은 축대칭 조건을 이용하여 전체 영역의 우측만 계산하였다.

물체와 이동격자는 식 (6)과 같이 주기적 운동을 하게 된다.

$$z(t) = z_a \sin(\omega t) \quad (6)$$

여기서 z_a 는 진동진폭이 된다. 물체 표면에는 no-flux, no-slip 조건이 아래와 같이 부과된다.

$$u = 0 ; w = z_a \omega \cos(\omega t) \quad (7)$$

4. 중합격자법의 응용

4.1 단일격자법과의 비교

길이(L) = 100mm, 심도(d) = 50mm, 진폭(z_a) = 5mm, 주기(T) = 1.0sec의 운동특성을 지닌 정사각형 모델을 이용하여 단일격자계와 중합격자계의 수치계산 결과를 비교하였다. 단일격자계와의 비교는 Schwarz반복법 및 Newton-Raphson내삽법을 검증하기 위한 것으로서, 실제 물체는 움직이지 않고 물체표면에서의 경계조건만 새로이 부여한 것이다. Fig.3과 Fig.4는 압력분포와 속도벡터결과를 단일격자계와 중합격자계에 대해서 각각 나타내고 있다. 그림에서 보여지는 바와 같이 두가지 방법에 의한 수치계산 결과는 서로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그러나 자유표면 부근에서 물체가 실제 운동을 할 경우, 단일격자계를 이용해서 비선형적인 자유표면 유체운동과 진동하는 물체를 모두 표현하기에는 어려움이 많다. 따라서 진동하는 물체에 이동격자계를 적용시켜서 비선형 유체운동을 계산할 수 있는 중합격자법을 토대로 하여, 수면부근에서 진동하고 있는 물수평면에 미치는 라디에이션 유체력을 구하기 위한 수치계산에 적용하였다.

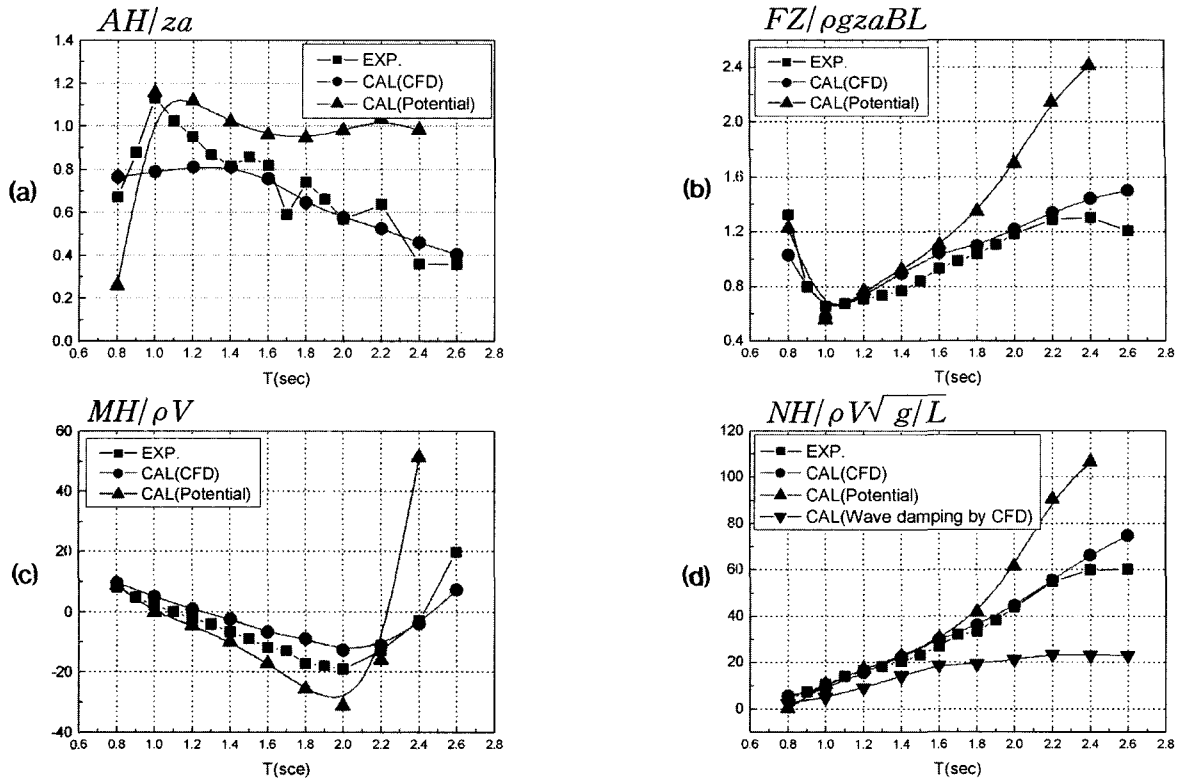


Fig. 7 Comparison of (a)radiation wave amplitude, (b)heave radiation force, (c)added mass and (d)damping force coefficient with experiment for $d=40\text{mm}$, $z_a=10\text{mm}$

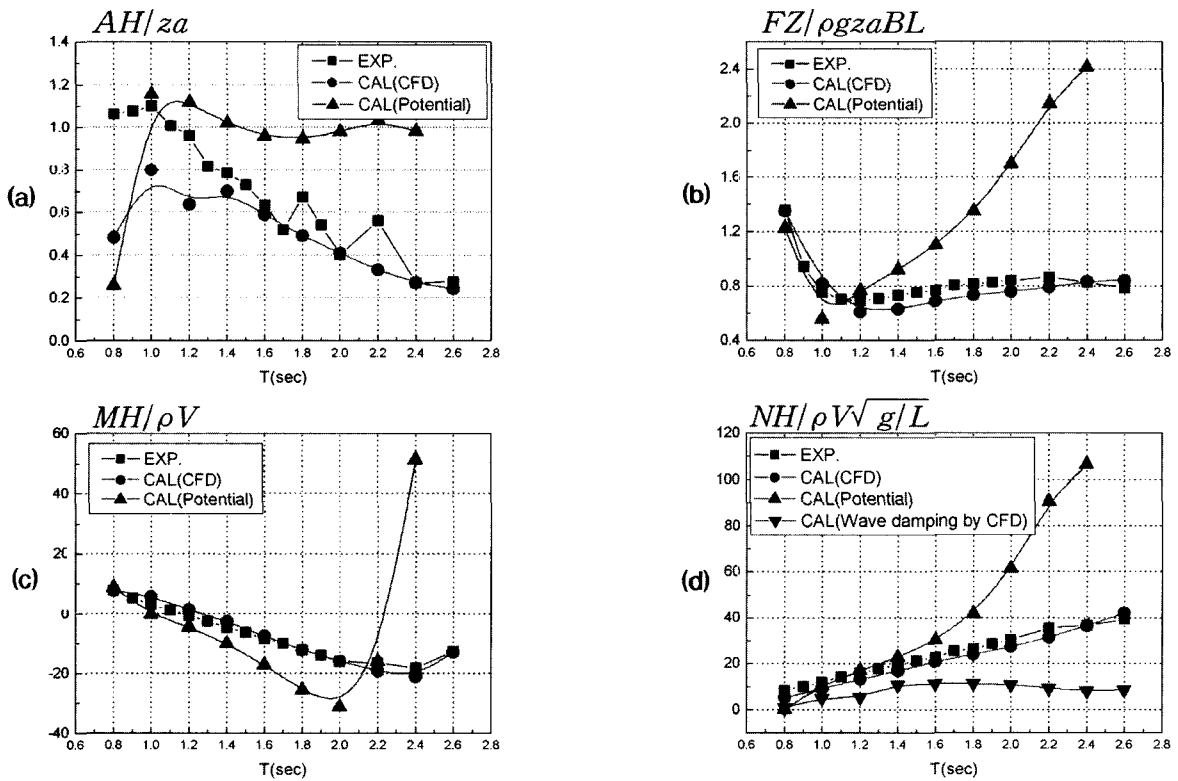


Fig. 8 Comparison of (a)radiation wave amplitude, (b)heave radiation force, (c)added mass and (d)damping force coefficient with experiment for $d=40\text{mm}$, $z_a=30\text{mm}$

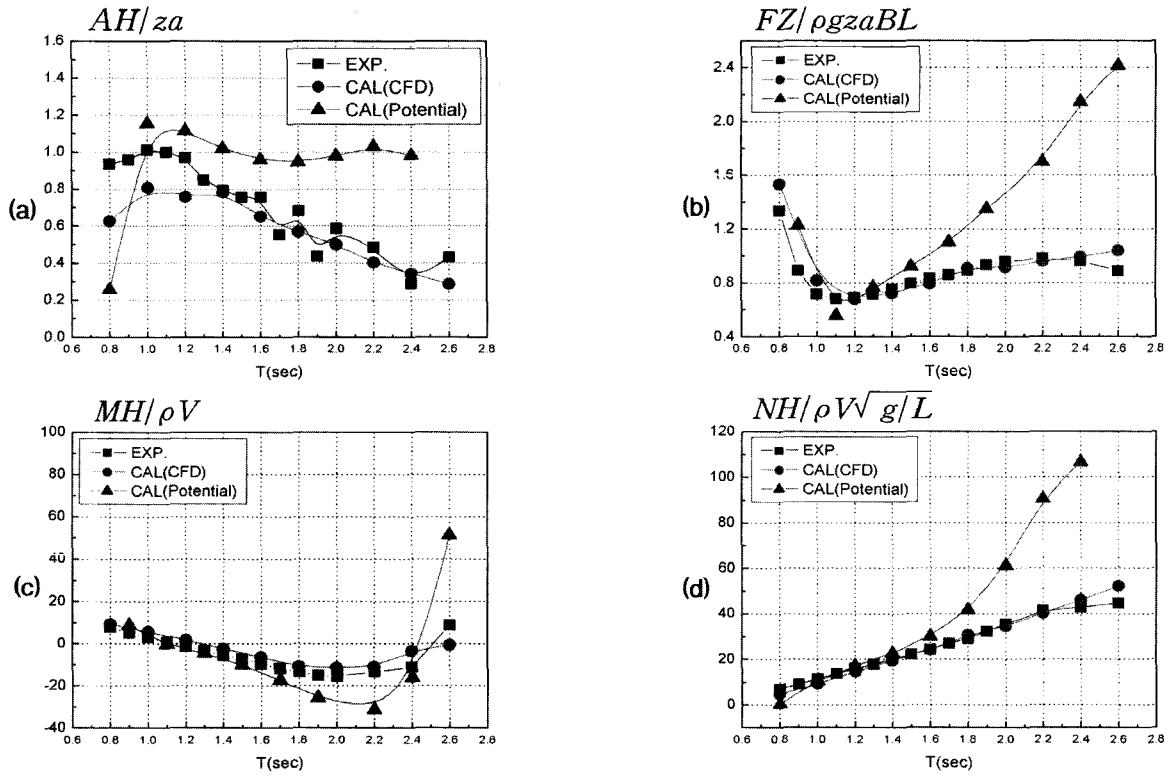


Fig. 9 Comparison of (a) radiation wave amplitude, (b) heave radiation force, (c) added mass and (d) damping force coefficient with experiment for $d=40\text{mm}$, $z_a=20\text{mm}$

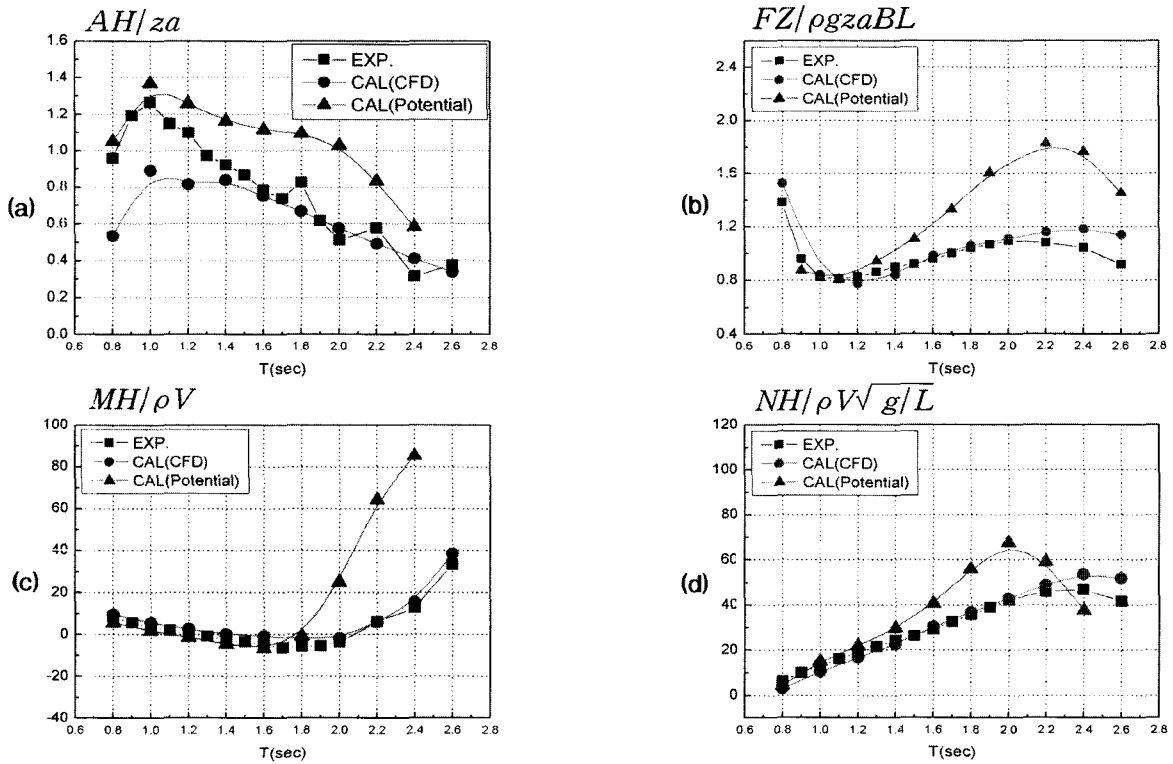


Fig. 9 Comparison of (a) radiation wave amplitude, (b) heave radiation force, (c) added mass and (d) damping force coefficient with experiment for $d=40\text{mm}$, $z_a=20\text{mm}$

4.2 결과 및 고찰

라디에이션 유체력 특성을 조사하기 위해서 각기 다른 물수심도, 운동진폭 및 운동주기로서 강제동요 실험을 2차원 수조탱크에서 실시하였다. 라디에이션 파고는 모델 중심으로 부터 5m 떨어진 곳에서 servo식 파고계에 의해서 측정하였으며, 모델은 1/50 스케일의 모델을 이용하였다. 실험 및 수치계산은 심도 $d = 20, 40, 60\text{mm}$, 진폭 $z_a = 10, 20, 30\text{mm}$, 운동주기 $T = 0.8 \sim 2.6\text{sec}$ 의 범위에서 실시 하였다. 상하운동에 따르는 라디에이션 유체력을 측정하여 푸리에 해석을 한 1차 성분만을 본 연구에서 사용한다.

Fig.5과 Fig.6은 각각 단주기($T = 0.8\text{sec}$)와 장주기($T = 2.2\text{sec}$) 운동에 대한 속도벡터의 변화를 보여주고 있다. 여기서 내부격자는 물수평판과 함께 상하운동을 지속하고 있다. 또한 nT 는 물수평판이 운동을 시작하는 초기 위치에서의 출발위상을 의미한다. 이동 격자계(내부격자)의 자유수면과 고정격자계의 자유수면이 상호 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. Fig.5를 보면 물수평판 끝단에서 유입되는 유체는 물수평판 상부에서 쇄파되어 외부로 전파되고 있는 것을 관측 할 수 있다. 단주기 운동(Fig.5)에서는 와동(vortex)의 발생 및 전달을 볼 수 없지만 장주기 운동(Fig.6)에서는 물수평판의 끝단에서 와가 발생하여 외부경계로 전달되고 있음을 확인할 수 있다. 공간적인 와동의 생성은 진동주파수에 의존하고, 유체력 요소에 있어서 와동은 와도의 모멘트와 관련이 있으며, 이러한 와동의 힘은 진동하고 있는 물체의 진동주기에 의해 변화하게 된다(Ananthakrishnan, 1997). 즉, 장주기 운동에서는 이러한 와동의 발생 및 전달이 물수평판에 작용하는 유체력에 영향을 미치고 있음을 추정할 수 있다.

Fig.7과 Fig.8는 무차원화된 라디에이션 파진폭(A_H), 상하요 라디에이션 유체력(F_Z), 부가질량(M_H), 감쇄계수(N_H)를 같은 심도에서의 각각 다른 운동진폭($z_a = 10\text{mm}$ 와 30mm)에 대한 결과를 표시하고 있다. 점성효과를 조사하기 위해서 선형포텐셜 이론 결과와도 비교를 하고 있다. 포텐셜계산은 특이점 분포법을 이용하여 실시하였다. 중합격자법을 이용한 본 수치계산 결과는 실험결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 반면에 포텐셜 이론에 의한 계산결과는 단주기 운동영역에서는 실험값과 잘 일치하나 장주기 운동영역에서는 실험값 및 CFD결과와 일치하지 않음을 보여주고 있다. 이러한 원인은 장주기 영역에서의 와동의 발생 및 전달에 기인하는 것으로 추정된다. Fig.7과 Fig.8의 그림(d)의 기호중 ●는 CFD, 즉, 중합격자법에 의해 계산되어진 전체감쇄력이 되며, ▼는 중합격자법에 의해 얻어진 조파감쇄력 값을 의미한다. 따라서 ●의 값과 ▼의 값의 차이는 점성감쇄력의 크기를 의미하게 된다. 이 그림에서 보면, 감쇄력 요소중 점성감쇄력은 조파감쇄력보다도 장주기 운동영역에서 더욱 크게 작용하고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과로부터, 유체력에 미치는 점성의 효과는 장주기 운동 영역에서 중요한 역할을 하고 있음을 확인할 수 있다.

다음으로 부가질량에 관한 결과를 관찰하여 보면, 운동주기의 중간 영역에서 음의 부가질량이 발생하고 있는 것을 알 수 있다.

Fig.9와 Fig.10은 무차원화된 라디에이션 파진폭(A_H), 상하요 라디에이션 유체력(F_Z), 부가질량(M_H), 감쇄계수(N_H)를 같은 운동 진폭에서의 각각 다른 심도($d = 40\text{mm}$ 와 60mm)에 대한 결과를 표시하고 있다. 선형포텐셜 이론에 의한 계산결과는 물수 심도가 얇아 질수록($d=40\text{mm}$) 실험값과의 차이가 더욱 커짐을 알 수 있다. 이것은 물수체가 자유표면에 가까워 질수록 비선형 자유표면의 영향이 점차 커지고 있음을 의미한다고 할 수 있다. 얇은 심도에서는 음의 부가질량이 보다 크게 발생하고, 자유표면 아래를 따라 전파되는 불규칙적인 와동으로 인한 비선형 점성효과가 크게 작용하고 있음이 판명되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 자유표면 근처에서 진동하는 물수평판에 작용하는 유체력을 계산하기 위해서 중합격자계를 이용한 수치계산법을 개발하였다. 이 방법을 이용하여 라디에이션 유체력을 구하기 위해서 수치계산을 행하였다. 수치계산 결과는 실험값과 잘 일치함을 보여 주었으며, 본 방법의 타당성 및 유효성을 검증하였다. 실험 및 수치계산을 통하여 음의 부가질량의 발생을 관찰할 수 있었으며, 선형 포텐셜 이론과 비교함으로써 점성의 영향도 평가 할 수 있었다. 유체력에 미치는 점성의 효과는 장주기 운동에 크게 영향을 주며 물수심도 및 운동주기와 깊은 관계가 있음을 알 수 있었다. 본 수치계산은 상하 운동에만 적용하였으나, 전후·좌우운동 또는 연성운동에 대하여도 확장이 가능한 유용한 방법이라고 판단 된다. 따라서 본 중합격자법은 비선형성이 강한 자유표면 부근에서 운동하는 해양구조물 또는 선박의 유체력 계산에 활용 가능하리라 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] Ananthakrishnan, P. (1997), "Three-Dimensional Wave-Body Interactions in a Viscous Fluid: Heave Oscillation of a Submerged Vertical Cylinder", *Proc. 7th ISOPE*, Honolulu, Vol.III, pp.672-679.
- [2] Chung, J. S. (1977), "Forces on Submerged Cylinders Oscillating near a Free Surface", *J. of Hydronautics*, Vol. 11, No.3, pp.100-106.
- [3] 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.
- [4] Hinatsu, M. and Ferziger, J. H. (1991), "Numerical

- Computation of Unsteady Incompressible Flow in Complex Geometry Using a Composite Multigrid Technique", *Int. J. of Numerical Methods in Fluids*, Vol.13, pp.971-997.
- [5] Lee, Y. G. and 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.
- [6] Takaki, M., Fujikubo, M., Higo, Y., Hamada, K., Kobayashi, M., Nakagawa, H., Morishita, S., Ando, K. and Tanigami, A. (2001), "A New Type VLFS Using Submerged Plates : SUB-PLATE VLFS—Part1 Basic Concept of System", *Proc. 20th OMAE*, Rio de Janeiro, OMAE-01-5017.
- [7] Takaki, M., Imai Y., Lee, S. M., Shibata, S. and Chiba, S. (2002), "Effect of a Submerged-Plate on Hydrodynamic Forces Acting on a Very Large Floating Structure", *Trans. of West-Japan Society of Naval Architects*, No.103, pp.195-204.

원고접수일 : 2003년 9월 30일
원고채택일 : 2004년 2월 5일