

동하중에 대한 거대 부유식 구조물의 유탄성 응답 Hydroelastic Response of Very Large Floating Structure under Dynamic Loadings

최항순¹ · 이동환¹ · 조경남¹ · 홍사영² · 최윤락²

Hang S. Choi¹, Dong H. Lee¹, Kyung N. Jo¹, Sa Y. Hong², and Yoon R. Choi²

1. 서 론

해상공항, 해상항만, 해상물류기지, 해상전시관, 해양도시 등 여러 가지 목적의 해양공간 활용을 위하여 거대 부유식 구조물에 대한 검토가 활발히 진행되고 있다. 예를 들어 일본에서는 조선소와 제철사가 「메가 플로트 연구조합」을 결성하여 해상공항으로 활용할 목적으로 요코스카 앞바다에 길이 300m, 폭 60m, 두께 2m인 매트형 구조물을 제작 설치하여 연구를 수행하였고, 이어서 길이가 1,200m에 달하는 2단계 실험 모델을 건조하여 경비행기의 이착륙 실험이 수행된 바 있다.

이러한 거대 부유식 구조물은 그 기능을 적절히 수행하기 위해서는 충분한 공간이 필요하다. 예를 들어 상술한 해상공항의 경우 점보 여객기의 이착륙에 필요한 활주로의 길이는 약 3km로 이에 따른 부대시설까지 고려하면 그 규모가 대략 4km가 됨을 알 수 있다. 종전에 주로 사용해오던 강체동역학은 이러한 거대 부유체에 적용하기에 적절하지 못함은 자명하다. 왜냐하면 구조물의 길이에 대한 두께의 비가 1/100 이하여서 구조물의 강성이 크게 줄어들어 구조물의 저차 고유진동수가 입사파의 진동수에 가까워져 국부 진동응답이 매우 크기 때문이다.

거대 부유체와 관련된 연구는 Ando(1983) 등에 의해서 부유식 공항에 대한 개념이 제시되면서 활발하게 수행되기 시작하였다. 이러한 거대 부유체 연구에서 가장 중요한 요소는 유체와 구조의 상호작용에 대한 올바른 규명이라 할 수 있다. 이에 대한 몇 가지 연

구의 예를 살펴보면, Lee & Webster(1994)는 포텐셜 이론을 이용하여 국부진동에 의한 교란을 직접 평가하는 방법을 제시하였고, 윤재돈(1996)은 그 방법이 거대 부유식 구조물의 유탄성 해석에 적절한 방법임을 밝혔으며, 이호영 등(2000)은 모드중첩법과 압력분포법을 사용하여 이 문제에 접근하였다. 한편 심인환 등(1999)은 거대 부유체의 사파중 거동에서 전단 변형의 영향을 포함시켜 고찰하였다.

이상의 연구는 구조물의 운동응답을 주파수영역에서 구하고자 하였으나, 항공기가 이착륙하는 경우에는 집중하중이 이동하고 파랑 하중과 같이 일정한 주기로 작용하지 않기 때문에 시간 영역에서의 해석이 필요하다. 이에 대하여 Yeung & Kim(1998)은 무한히 긴 판 구조물에 작용하는 집중하중에 대한 해석을 푸리에 변환을 사용하여 해석하였다. 이후 Kashiwagi(1999)는 앞에서 언급한 1단계 메가플로트에 대하여 시간 영역 그린 함수적분법을 사용하여 이에 대한 연구를 시도하였다. 또한 그는(2000) 시간 기억 함수를 이용한 그린 함수적분법을 이용한 해석을 전개하였다. 본 연구에서는 기본적으로는 Kashiwagi(2000)의 해법에 따라 시간영역해석을 수행하였으나 고차경계법을 이용하여 동유체력을 보다 엄밀하게 계산하였으며, 길이방향의 모드 수를 9개까지 포함시켜 보다 엄밀하게 변형을 기술하고자 하였다. 계산 예로 일본 SRI에서 수행한 1단계 메가 플로트 실험 모델을 택하여 실험치와 비교하였다.

2. 과도응답 운동방정식

¹ 서울대학교 조선해양공학과 (Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea)

² 한국해양연구원 해양시스템안전연구소 (Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, Taejon 305-343, Korea)

시간 영역 해석법은 시간 함수로 표시된 그린함수를 이용하여 계산하는 직접법과 주파수 영역에서 계산된 결과를 푸리에 변환을 통하여 구하는 간접법으로 나눌 수 있다. 직접법은 엄청나게 많은 계산시간과 자유 수면 근처에서 해가 수렴되지 않고 발산하는 어려움을 지니고 있다. 반면에 주파수 해법은 오랫동안 선박유체역학 분야에서 취급하여 왔으므로 그 해나 방법의 특성이 잘 알려져 있다는 장점이 있다.

구조물이 설치되는 해역에서 파고와 파 기울기가 비교적 작아 비선형성이 강하지 않다는 가정 하에 거대 부유식 구조물에 작용하는 하중을 계산하기 위하여 속도 포텐셜, $\Phi(x, y, z, t)$ 을 도입한다. 이 속도 포텐셜은 라프라스 방정식과 적절한 경계조건을 만족하여야 한다. 수식전개에 사용한 좌표계를 Fig.1에 도시하였다. 조화운동을 가정하면 속도 포텐셜은 다음과 같이 기술된다.

$$\Phi = \text{Re}[\phi e^{i\omega t}] \quad (1)$$

그린의 제2 정리를 이용하면 속도 포텐셜은 적분 방정식의 해로 구할 수 있다.

$$\alpha\phi + \iint_{S_b} \frac{\partial G}{\partial n} \phi dS = \iint_{S_b} G \frac{\partial \phi}{\partial n} dS \quad (2)$$

위의 방정식은 특이주파수를 제외한 주파수 영역에서 해가 존재하므로 연산자 H 를 도입하여 다음과 같이 간단히 표기하였다. 여기서 H 를 편의상 실수부와 허수부로 나누었다.

$$\phi = H\phi_n, \quad H = H_R - \frac{H_I}{\omega} i \quad (3)$$

지배방정식과 경계조건을 만족하는 속도 포텐셜을 구하면 유체장에서의 속도와 가속도는 포텐셜의 정의로부터 구할 수 있다. 또한 베르누이 방정식으로부터 유동장내 임의의 위치에 작용하는 유체압력을 구할 수 있는데, 그 유체력은 다음에 전개될 판 방정식의 외력으로 작용한다. 본 논문에서는 수치해의 정확도를 높이면서 계산시간을 효율적으로 줄일 수 있는 고차경계요소법을 택하였다(Choi, *et al.*, 2000).

평판의 수직 변위와 관련하여 물체표면에서의 수직 방향 경계조건은 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\partial w}{\partial t} \quad \text{on } z=0 \quad (4)$$

여기서 w 는 구조물의 수직 변위를 뜻한다.

평판의 운동 방정식을 기술하기 위하여 모든 물리량은 밀도 ρ , 중력가속도 g , 그리고 구조물 길이의 반인 $L/2$ 로 무차원화 시켰다. 무차원화된 평판의 운동방정식은 다음과 같다.

$$m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + DV^4 w = -p + p_E \quad (5)$$

여기서 m 은 단위 면적당 질량을 나타내며, D 는 평판의

굽힘 강성이다. 평판에 작용하는 하중은 유체력과 외력으로 나누었다. 여기서 유체력은 동유체력과 유체정압의 합으로 기술할 수 있다.

$$p = -\frac{\partial \Phi}{\partial t} + w \quad (6)$$

식(3)에 표시한 속도 포텐셜과 평판의 운동 방정식(5)를 결합하기 위하여 평판의 운동 또한 조화운동으로 가정한다.

$$w(x, y, t) = W(x, y) e^{i\omega t} \quad (7)$$

이에 따라 식(5)를 다시 정리하면 다음과 같은 평판의 조화운동 방정식을 구할 수 있다.

$$-m\omega^2 W + DV^4 W = -i\omega\phi + W + P_E \quad (8)$$

여기서 물체 경계조건($\frac{\partial \phi}{\partial z} = i\omega W$)을 고려하여 식(3)의 속도 포텐셜을 식(8)에 대입하면 평판의 변위와 관련된 방정식을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} -m\omega^2 W + DV^4 W &= \omega^2 H W + W + P_E \\ &= \omega^2 H_R W - i\omega H_I W + W + P_E \end{aligned} \quad (9)$$

윗식을 통하여 H 의 실수부와 허수부는 각각 부가질량과 감쇠계수라는 물리적 의미를 가짐을 알 수 있다. 식(9)를 푸리에 역변환함으로써 평판의 과도응답에 대한 운동방정식을 구할 수 있다. 본 연구에서는 고유함수 전개법을 이용하여 시간기역함수를 도입한다.

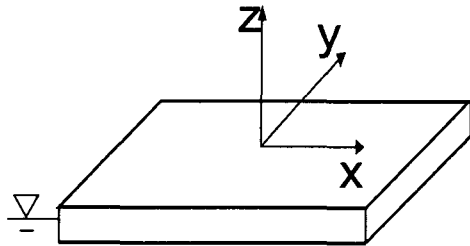


Fig. 1. Coordinates system

3. 고유함수 전개법

구조물의 동적응답은 모드 중첩법으로

$$w(x, y, t) = \sum_j u_j(t) w_j(x, y) \quad (10)$$

와 같이 표시할 수 있다. 모드함수의 특성인 x-y 방향에 대한 직교성을 가정하여

$$w_j(x, y) = v_m(x) v_n(y) \quad (11)$$

로 세분하여 표시할 수 있다(이동연, 최향순, 1998). 여기서 x 방향 모드 함수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
v_0(x) &= \frac{1}{2} \\
v_1(x) &= \frac{\sqrt{3}}{2} x \\
v_{2m}(x) &= \frac{1}{2} \left(\frac{\cos k_{2m} x}{\cos k_{2m}} + \frac{\cosh k_{2m} x}{\cosh k_{2m}} \right) \\
v_{2m+1}(x) &= \frac{1}{2} \left(\frac{\sin k_{2m+1} x}{\sin k_{2m+1}} + \frac{\sinh k_{2m+1} x}{\sinh k_{2m+1}} \right)
\end{aligned} \quad (12)$$

윗 식에 나타난 파수 k_m 은 아래에 제시한 특성방정식을 만족시키는 양의 근들이다.

$$(-1)^m \tan k_m + \tanh k_m = 0 \quad (13)$$

이 식으로부터 0차 모드는 상하 수직운동을, 1차 모드는 피치운동을 그리고 2차모드 이상은 탄성운동을 의미한다. 한편 y방향 모드함수는 위에 표시한 x 방향 함수와 유사하게 표시된다.

조화 운동을 가정하면 식(10)은 다음과 같이 기술된다.

$$W(x, y, \omega) = \sum_j U_j(\omega) w_j(x, y) \quad (14)$$

식(14)를 식(9)에 대입하여 다시 정리하면

$$\begin{aligned}
-m\omega^2 w_j U_j + D\nabla^4 w_j U_j \\
= \omega^2 H_R w_j U_j - i\omega H_I w_j U_j + w_j U_j + P_E
\end{aligned} \quad (15)$$

와 같다. .

고유함수 w_j 를 곱해서 평판 면적에 대하여 적분을 수행하면 부가질량과 감쇠계수 등을 포함한 운동방정식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
-\omega^2 (M_{jj} + A_j) U_j + i\omega B_j U_j \\
+ (DS_{jj} + C_{jj}) U_j = P_{Ej}
\end{aligned} \quad (16)$$

여기서 각 행렬은 다음과 같이 정의된다.

$$M_{jj} = \iint m w_j w_j dS \quad (17)$$

$$A_j = \iint H_R w_j w_j dS \quad (18)$$

$$B_j = \iint H_I w_j w_j dS \quad (19)$$

$$S_{jj} = \iint \nabla^4 w_j w_j dS \quad (20)$$

$$C_{jj} = \iint c_j w_j w_j dS \quad (21)$$

특히 S_{jj} 는 평판 끝단에서 굽힘응력과 전단응력이 영이라는 조건을 부가하기 위하여 부분적분을 수행한다 (Kashiwagi, 2000).

$$\begin{aligned}
S_{jj} &= \iint_{S_H} \nabla^2 w_j \nabla^2 w_j dx dy \\
&- (1-\nu) \iint_{S_H} \left\{ \frac{\partial^2 w_j}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w_j}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_j}{\partial y^2} \frac{\partial^2 w_j}{\partial x^2} \right. \\
&\left. - 2 \frac{\partial^2 w_j}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 w_j}{\partial x \partial y} \right\} dx dy
\end{aligned} \quad (22)$$

식(16)은 전통적인 부유체 강체 운동 방정식과 동일한

형태를 가진다. 이 식을 푸리에 역변환하면 시간 기억함수를 포함한 과도응답 운동 방정식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
[M_{jj} + A_j(\infty)] \ddot{u}_j(t) + \int_{-\infty}^t K_{jj}(t-\tau) \dot{u}_j(\tau) d\tau \\
+ (DS_{jj} + C_{jj}) \dot{u}_j(t) = p_{Ej}(t)
\end{aligned} \quad (23)$$

한편 시간 기억함수는 잘 알려져 있는 바와 같이 높은 주파수영역에서 그 거동이 비교적 확실하게 알려진 파 감쇠함수를 푸리에 역변환하여 구하는 방법이 보다 합리적이다. 무한대 주파수에서의 부가질량은 따로 구할 필요 없이 시간기억함수를 다시 푸리에 변환하여 무한대 주파수에서의 부가질량을 계산한다.

$$\begin{aligned}
K_{jj}(t) &= \frac{2}{\pi} \int_0^\infty B_{jj}(\omega) \cos \omega t d\omega \\
&= -\frac{2}{\pi} \int_0^\infty \omega [A_j(\omega) - A_j(\infty)] \sin \omega t d\omega
\end{aligned} \quad (24)$$

식(23)의 시간적분 방법으로는 FDM으로 4차의 Runge-Kutta법을 사용한다. 이 식을 풀어서 구한 각 모드의 변위 $u_j(t)$ 를 모드 중첩식 (10)에 대입함으로써 구조물의 수직 변위 $w(x, y, t)$ 를 구할 수 있다.

4. 계산결과

위에서 전개한 문제의 해를 얻기 위하여 적절한 수치해법을 사용하여야 한다. 본 논문에서는 이미 언급한 바와 같이 유체동역학 방정식은 그린함수법을 이용한 고차패널법을 그리고 평판의 과도응답은 모드중첩법을 시간적분하여 구하였다.

계산대상 구조물은 Ohmatsu(1998)가 수행한 실험결과와 비교하기 위하여 메가플로트 연구조합이 실험역에 설치하여 실험한 매트형 구조물을 약 1/30 축소한 모델을 택하였다. 모델은 알루미늄 하니컴판을 사용하였으며, 부력을 보강하기 위해 40 mm 두께의 폴리에틸렌 (polyethylene) 판을 바닥에 부착시켰다.

이산화 방정식의 시간간격은 구조물에서 진동이 전파되는 속도가 $c = \sqrt{E/\rho}$ 이므로 시간 간격을 0.002 초로 택하여 계산을 수행하였으며, 모드는 길이 방향으로 9개 폭 방향으로 3개를 택하여 모두 27개를 고려하였다.

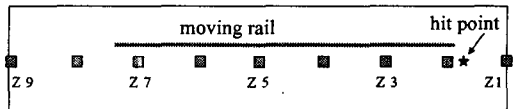


Fig. 2. Measuring points

일본 선박연구소(SRI)에서는 상기한 모델에 대하여 집중하중을 충격적으로 가하는 실험 그리고 집중하중

을 정속으로 일정 거리를 움직이는 실험 등의 동적 실험을 수행하였다. 본 논문에서는 이 두가지 실험을 수치적으로 모사하여 그 결과를 실험치와 비교하였다.

이들 계산에 필요한 시간기억함수의 계산 결과를 Fig.3에 도시하였다. 이 그림에서 가로축은 $\sqrt{L/2g}$ 로 무차원화시킨 시간이며, 세로축은 $\rho g(L/2)^2$ 로 무차원화시킨 시간기억함수의 값이다. 한편 괄호안의 숫자는 x-y 방향에 대한 모드의 차수를 나타내는 데, 예를 들어 모드(0,0)은 전체 구조물이 강체로 상하운동하는 경우에 해당하며, 모드(1,1)은 x축으로 피치운동을 하면서 동시에 y축으로 롤운동을 하는 경우에 해당한다. 그림에 나타나 있듯이 모든 모드에서 시간기억함수는 초기에는 큰 값을 갖지만 시간이 지남에 따라 급격하게 줄어들어 무차원 시간 3(실제시간 2초에 해당) 후에는 실질적으로 사라짐을 알 수 있다. 보통 선박에서는 시간기억함수가 대략 30초 후에 사라지는 현상에 비하여 무척 빠르게 감소함을 알 수 있다.

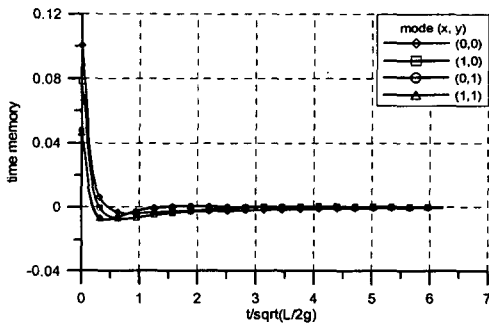


Fig. 3. Time-memory function for leading modes

첫 번째 실험은 구조물의 오른쪽 끝단에서 1.36875m 안으로 들어 온 중앙선에 20Kgf 하중을 순간적으로 떨어뜨린 다음 중앙선의 각 점에서 변위를 시간에 따라 측정한 것이다. 측정위치를 Fig.2에 Z1부터 Z9까지 표시하였는데, 충격하중의 위치는 그림에 표시한 바와 같이 Z2의 오른쪽으로 15cm 떨어진 지점이다. 일본선박연구소는 이 위치에서 충격으로 인한 수직 가속도를 측정하였다. 실험결과에 의하면 충격을 가한지 0.1초까지는 응답이 없다가 0.1초 후부터 가속도가 0.05초 사이에 급격히 증가하여 0.15초 후에는 3.5g까지 증가함을 보이고 있다. 0.2초 후에는 가속도가 0으로 변했다가 다시 조금 증가한 후 대략 0.32초 후부터 정적상태(1.0g)에 이른다.

각 지점에서의 시간에 따른 변위는 Fig.4에 도시하였다. 이 그림에서는 실험치와 비교하기 위하여 모든 변수를 다시 차원화 시켰다. 모든 측정점에서 과도

응답에 대한 계산치가 실험치와 잘 일치하고 있다. 그러나 측정점 Z1과 Z2에서 계산치의 정상상태 응답이 실험치 보다 조금 작은 값을 주고 있는데, 이는 계산에 사용한 구조강성이 실험모델의 강성과 조금 다르다는 것을 시사하나 그 차이를 정확하게 파악할 수는 없었다. 한편 충격하중으로 인한 고차의 구조진동을 보이고 있다. 계산치는 실험결과와는 달리 1.5초 이후에도 구조진동이 지속되고 있는데, 이는 구조감쇠를 포함하지 않았기 때문으로 추정된다(Ohmatsu,1998).

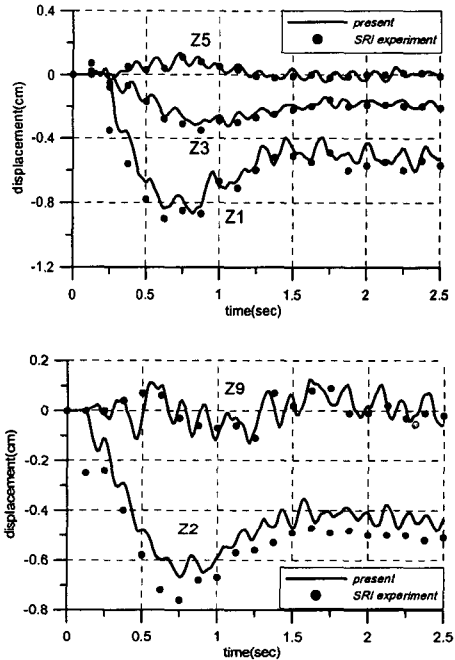


Fig. 4. Vertical displacement (weight drop test)

두번째 경우는 항공기가 착륙하여 활주로를 달리는 경우를 근사적으로 묘사하는 실험으로 6.91Kgf의 하중을 중심선에서 폭방향으로 0.18m 떨어진 위치에 설치된 레일을 따라 0.61 m/sec의 등속으로 움직이는 실험이다. 시작 위치는 선미에서 1.828m이다. 즉 Z7에서 선미 쪽으로 0.61m되는 지점이다. 다만 실험자료에서는 초기의 가속과 이동이 끝날 때의 감속에 대한 언급이 없어 본 계산에서는 매우 짧은 시간에 급속히 일어나는 경우로 가정하였다. Fig.5에서 볼 수 있듯이 계산치는 대체로 실험결과와 일치된 결과를 보이고 있다. 이 경우에는 충격시험과는 달리 고차의 구조진동이 나타나지 않았다.

Fig.6은 이 경우 각 모드의 기여도를 보이고 있는데, 앞서의 충격하중의 경우와는 달리 (0,0)모드의 기여도가

나타나지 않는다. 이는 하중이 시간에 따라 길이 방향으로 옮겨가기 때문에 길이방향으로 변화를 나타내는 모드들의 기여도가 뚜렷하다. 특히 길이방향으로 W형 변형에 대응하는 모드인 (4,0)도 하중이동에 의한 구조변형에 크게 기여하고 있음을 알 수 있다.

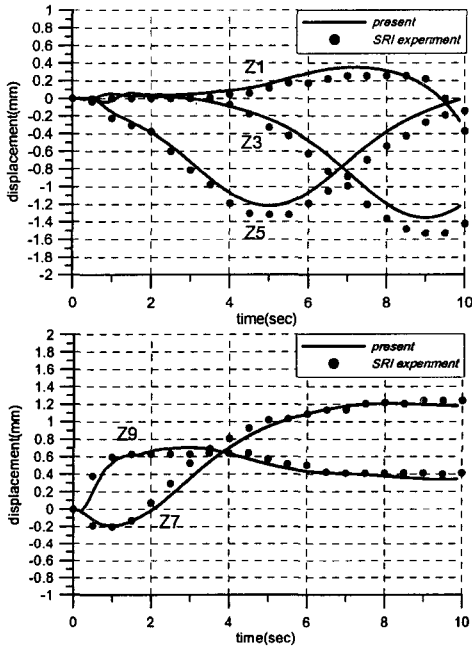


Fig. 5. Vertical displacement (moving load test)

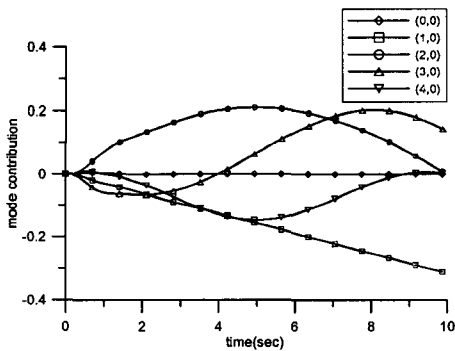


Fig. 6. Mode contribution in moving load test

5. 결 론

이상의 연구로부터 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

□ 고차경계요소법을 이용하여 동유체력을 효율적으로 구할 수 있었다.

□ 동유체감쇠력을 푸리에 변화시켜 시간기억함수를 엄밀하게 계산할 수 있었는데, 시간기억함수는 모든 모드에서 대략 3초 후에 소멸된다.

□ 모드중첩법으로 거대부유구조물의 유탄성응답을 효율적으로 기술할 수 있는데, 모드는 최소한 W형 변형까지를 포함시켜야 한다.

□ 하중의 충격적 작용 그리고 이동에 대한 계산결과는 실험치와 잘 일치하였다.

사 사

본 연구는 해양수산부가 지원한 “초대형 부유식 해상 구조물 기술개발”사업의 일원으로 수행되었으며, 이 자리를 빌어 감사의 뜻을 표한다.

참고문헌

- 심인환,윤재돈,최항순, 1999, “사파중에 놓인 거대 부유체의 응답에 대한 유탄성 해석”, 대한조선학회지, 제 36권3호
- 윤재돈, 1996 “거대 부유식 해양구조물의 유탄성 거동에 대한 기초연구”, 서울대학교 공학석사 학위논문.
- 이동연,최항순, 1998, “유탄성을 고려한 탱크내 슬로싱에 대한 연구”, 대한조선학회지, 제34권4호.
- 이호영,신현경,신현수,박인규, 2000, “압력분포법에 의한 초대형 부유식 해양구조물의 유탄성 해석”, 대한조선학회지, 제37권4호.
- Ando,S., Ohkawa,Y., & Ueno,I., 1983, "Feasibility Study of a Floating Airport," Report of Ship Research Institute, Japan, Supplement No.4.
- Choi,Y.R.,Hong,S.Y. & Choi,H.S. 2000, "An Analysis of Second-order Wave Forces on Floating Bodies by Using a HOBEM", *J. Ocean Engineering* Vol.28.
- Kashiwagi,M, 1999, "A time-domain Green function method for transient problems of a pontoon-type VLFS", 3rd VLFS, Vol.1, pp.97-104.
- Kashiwagi,M, 2000, "A time-domain Calculation Method for Transient Elastic Responses of a Pontoon-type VLFS", *J. of Marine Science and Technology*, Vol. 5, pp.89-100.
- Lee, S.W. & Webster, W.C., 1994, "A Preliminary to the Design of a Hydroelastic Model of a Floating Airport", *Hydroelasticity in Marine Technology*, Trondheim, pp. 351-362.
- Ohmatsu, S., 1998, "Numerical Calculation of Hydroelastic Behavior of VLFS in Time Domain", *Hydroelasticity in Marine Technology*, Fukuoka, pp.89-97.
- Yeung, R.W. & Kim, J.W., 1998, "Structural Drag and Deformation of a Moving Load on a Floating Plate", *Hydroelasticity in Marine Technology*, pp.77-80.