

사파중에 놓인 거대 부유체의 응답에 대한 유탄성 해석

심인환*, 윤재돈*, 최항순**

An Analysis of the Hydroelastic Response of Large Floating Structures in Oblique Waves

by

In H. Sim*, Jae D. Yoon* and Hang S. Choi**

요 약

본 논문에서는 거대 부유체의 유체-구조 상호작용에 대한 보다 엄밀한 해석법을 전개하여 사파중에 놓인 구조물의 유탄성 거동에서 전단변형의 영향을 고찰하였다. 구조 해석 방법으로는 Mindlin 판 이론에 바탕을 둔 유한요소법을 사용하였으며, 유체장은 일정패널법을 이용한 그린함수법을 적용하였다. 유탄성 해석의 검증을 위해 선수파의 경우에 Yago & Endo가 수행한 Mega Float 모델의 실험결과와 비교하였는데, 전반적인 거동은 비교적 잘 일치하나 양단에서의 변위는 약간의 차이를 보였다. 유체-구조간의 상호작용에 기인하는 방사압력이 파 강제압력보다 국부적으로 큼을 보였으며, 계류계에 의하여 응답이 크게 줄어들 수 있음을 확인하였다. 또한 상기한 때가 프로트의 경우 사파중에서 전체 변형중 전단변형이 차지하는 비중은 대략 4% 정도임을 밝혔다.

Abstract

In this paper, the fluid-structure interaction of large floating structures has been rigorously analyzed and the shear effect on the structural deformation has been investigated in oblique waves. A constant panel method(CPM) based on the Green function method is implemented for computing the hydrodynamic pressure, while a

접수일자 : 1999년 4월 22일, 재접수일자 : 1999년 6월 11일

* 정회원, 대우중공업

** 정회원, 서울대학교 조선해양공학과

finite element method(FEM) is applied for the structural response based on the Mindlin plate theory with including shear deformation. In order to validate the method, we compared numerical results with experimental ones of Mega Float carried out by Yago & Endo in head waves. General behavior shows good agreement but the local displacement at the ends is slightly different. The numerical results show that the radiation pressure due to the fluid-structure interaction is locally larger than that of wave excitation and mooring devices greatly reduce the response. It is observed that the shear effects among the total deformation constitutes about 4 % in the case of Mega Float in oblique waves.

1. 서론

우리 나라와 같이 국토가 좁고 인구가 많은 나라에서는 육상의 공간이 부족하여 해양 공간을 개발해야 하는 필요성이 점점 더 높아지고 있다. 남한의 면적은 99,291 km²이나 200해리 경제수역(Exclusively Economic Zone, EEZ)은 447,000 km²로 국토 면적의 약 4.5배를 차지한다. 한편 섬나라인 이웃 일본의 경우 EEZ가 4,510,000 km²로 일본 국토의 약 12배나 된다. 이렇게 광활한 해양공간에 대한 개발가능성은 자명하다. 특히 쾌적한 삶을 요구하는 현대사회의 구성원들은 그러한 생활에 필수적인 오염물질을 배출하는 시설물, 폭발물이나 유류등을 저장하는 위험한 시설물, 또는 소음이나 악취를 유발하는 혐오시설이 생활 공간으로부터 멀리 떨어져 있기를 원한다. 이러한 현상은 전 세계적으로 해안에 위치한 대도시 주변에서 나타나고 있다.

해안공간을 확보하는 방법으로 지금까지는 연근해역을 매립하는 방법이 주로 채택되어 왔으나, 생태계가 파괴되는 등 환경오염이 가중되고, 공기가 길고, 매립에 필요한 골재가 부족하고, 또한 이렇게 매립된 구조물의 지반이 침하하는 등 많은 문제점이 드러나고 있다. 더우기 현재의 여건으로는 수심 2-30미터가 매립공법의 경제적 한계로 알려져 있어 연근해역 개발을 계속 매립법에 의존하기는 어려운 실정이다. 반면에 부유식 구조물은 자연환경의 파괴가 비교적 적고, 짧은 시간내에 설치할 수 있으며, 자연재해의 영향을 덜 받는다는 등 많은 장점이 있어 새로운 대안으로 대두되고 있다. 부유식 다리, 원유저장시설 등이 그

예이다. 이 외에도 여러 가지 목적으로 부유식 구조물이 건설되었거나 연구중에 있으나[1], 그 중에서도 부유식 공항에 대한 연구가 가장 활발하다. 지금은 매립식으로 건설되었지만 일본 관서 국제공항을 부유식으로 건설하는 안에 대한 타당성 연구가 1979년부터 1980년까지 수행된 바 있다. 앞으로 이 공항의 활주로를 확장할 경우 부유식으로 건설해야 한다는 주장이 강하게 제기되고 있었음은 주지의 사실이다. 또한 오키나와 미군 공군기지를 부유식 공항으로 건설하여 이전하는 계획이 깊숙히 검토되고 있는 것으로 알려져 있다. 실제로 메가 포트 연구조합이 학계와 기업체로 구성되어 요코스카에 길이 300m, 폭 60m, 두께 2m의 실험모델을 설치하여 활용에 대비한 각종 실험이 계속되고 있으며, 길이가 1Km인 제2단계 메가 포트의 건조가 착수되었다. 한편 미국에서는 군사목적으로 MOB (Mobile Offshore Base)라는 반잠수식 모듈을 여러개 연결시킨 형태의 이동식 공군기지를 1992년부터 연구하고 있다. 우리 나라에서도 비록 개념 설계 단계이지만 울릉도에 중형 항공기가 이착륙할 수 있는 부유식 공항에 대한 타당성 연구를 하였다.

이러한 부유식 공항이 그 기능을 발휘하기 위해서는 구조물이 거대해질 수밖에 없다. 예를 들어 점보 여객기가 이착륙에 필요한 활주로는 약 3km정도로, 이에 따른 부대시설까지 고려하면 그 규모가 수 km에 이르름을 알 수 있다. 이러한 구조물은 지금까지 건조해 본 경험이 없기 때문에 새로운 많은 공학문제들을 야기시킨다. 예를 들어 투입해역의 환경하중하에서 기능을 정상적으로 발

휘하도록 설계과정에서 구조물의 운동응답을 엄밀하게 분석하여야 한다. 그러나 지금까지 부유식 구조물에 적용해 왔던 강체동역학은 이러한 거대 부유체에 그대로 적용할 수 없다. 즉, 일반적으로 부유식 구조물은 입사파에 의하여 강제운동 및 국부진동을 하고, 이러한 구조물의 운동은 다시 유체장을 교란하여 교란된 유동은 구조물에 추가적인 하중을 가하게 된다. 구조물의 규모가 거대해지면 구조물의 강성이 상대적으로 줄어들어 고유진동수가 입사파 진동수 범위로 가까워진다. 그에 따라 국부진동응답이 매우 커져 구조물의 운동해석에서 강제운동뿐 아니라 국부진동응답을 반드시 포함시켜야 한다. 이는 유체와 구조물간의 상호작용을 보다 엄밀하게 고려해야 함을 의미한다.

유체와 구조물의 상호작용을 고려하여 구조물의 운동 및 탄성 응답을 해석하는 유탄성(hydroelasticity) 분야의 대표적인 연구로는 Bishop & Price(2)가 수행한 부가질량과 감쇠를 고려한 선박의 진동응답해석을 들 수 있다. 거대 부유체와 관련된 연구는 Ando등(3)이 부유식 공항에 대한 개념을 제시하면서 활발하게 전개되었으며, 이러한 거대 부유체에 대한 연구의 핵심문제는 유체-구조 상호작용에 대한 올바른 규명이라 할 수 있다. Ertekin등(4)은 확장된 모리슨방정식으로 유체력을 구하고 유한요소법으로 구조물을 해석하였다. 이상의 연구외에도 많은 연구자들이 다양한 방법으로 거대 부유식 구조물의 유탄성 응답에 대한 해석법을 제시하고 있다(5,6). 이러한 기존의 유탄성 연구는 주로 강체의 부가질량과 감쇠력의 개념으로 유체-구조간의 상호작용을 평가하였다(7). 이 방법은 구조물의 운동이 거의 강제운동이거나, 또는 교란된 유체장이 2차원에 가까울 때 유용하게 쓸 수 있다. 그러나 부유식 공항과 같은 거대 구조물의 경우에는 구조물의 운동이 강제운동으로 볼 수 없을 만큼 국부진동의 영향이 크고, 또한 구조물의 진동응답에 의한 유체장의 교란이 3차원적이므로 이를 기존의 방법대로 접근할 수 없다. 이에 대하여 Lee & Webster(8)는 포텐셜이론을 이용하여

국부진동응답에 의한 교란을 직접 평가하는 방법을 제시하였고, 윤과 최(9)는 그 방법이 거대 부유식 구조물의 유탄성 해석에 적절함을 밝혔다.

지금까지의 연구는 주로 부유체의 길이방향으로 입사하는 선수미파에 대하여 전단변형을 무시한 보이론이나 얇은 판이론에 바탕하여 구조물의 진동응답을 해석해 왔다. 그러나 1996년 11월 일본 선박연구소가 주관한 메가 포트에 관한 워크샵에서 거대 부유체의 사파중 거동에 대한 연구의 필요성이 제기되었다. 본 논문은 이러한 배경에서 거대 부유체의 사파중 거동을 규명하고자 유체-구조간의 상호작용을 보다 엄밀하게 해석하였으며, 또한 전단변형의 영향을 고려하였다.

2. 문제의 정식화

부유식 해상공항의 하부구조는 푸팅형과 바지형으로 나눌 수 있다. 거대한 상자 모양을 가진 바지형의 경우는 푸팅형보다 하중이 집중되지 않아 안정되고, 유지 보수가 쉽다는 장점을 지니고 있다. 일본에서 수행되고 있는 메가 포트 실험 모델도 이러한 맥락에서 바지형이므로, 본 논문에서는 바지형 구조물을 대상구조물로 택하였다.

거대 부유체의 유탄성 해석을 위해 응답이 선형이며, 정상 조화 상태라는 가정하에 구조물에 가해지는 유체력은 포텐셜 이론에 근거하여 구하며, 구조물의 응답은 전단변형을 고려한 Mindlin 판이론을 이용하여 추정한다.

2.1 선형 유체동역학 방정식

전술한 바와 같이 하중은 선형 포텐셜이론을 이용하여 계산한다. 즉, 유체의 비점성과 비압축성 및 유동의 비회전성에 대한 가정하에 속도 포텐셜 $\phi(x, y, z, t)$ 을 도입하여 유동을 해석하는 데, 선형성에 입각하여 속도 포텐셜을 입사파포텐셜 ϕ_I , 산란포텐셜 ϕ_D 그리고 방사포텐셜 ϕ_R 의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\phi = \phi_I + \phi_D + \phi_R \quad (1)$$

이 속도 포텐셜은 라플라스 방정식의 해로서

$$\nabla^2 \Phi = 0, \tag{2}$$

아래와 같은 선형 자유표면 경계조건, 물체표면 경계조건, 바닥 경계조건, 방사조건을 만족하여야 한다.

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \quad \text{자유수면} \tag{3}$$

$$\frac{\partial \Phi_D}{\partial n} = - \frac{\partial \Phi_I}{\partial n} \quad \text{물체표면} \tag{4}$$

$$\frac{\partial \Phi_R}{\partial n} = \vec{V} \cdot \vec{n} \quad \text{물체표면} \tag{5}$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \quad \text{해저면} \tag{6}$$

방사조건

여기서 \vec{n} 은 물체표면에 수직한 단위 벡터를 의미하고, \vec{V} 는 부유체의 속도 벡터이다.

위의 경계조건을 만족하는 속도 포텐셜을 구하면 유체장의 속도를 구할 수 있으며, 베르누이 방정식으로 부터 다음과 같이 선형유체동압을 구할 수 있다.

$$P(x, y, z, t) = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} \tag{7}$$

2.2 전단변형을 고려한 Mindlin 판 방정식

본 논문에서 다루는 구조물의 형상을 생각하면 이를 판구조로 모델링 할 수 있다. 해상공항은 전술한 바와 같이 그 치수가 대략 길이 4~5 km, 폭 1~2 km로 매우 크나, 두께는 불과 수십 미터로 얇은 판의 형상을 지닌다. 따라서 Kirchhoff-Love의 판이론이 지금까지 주로 사용되어 왔지만, 구조물에 가해지는 외력에 따라서는 이 이론에서 고려하지 않는 전단력에 의한 변형의 영향을 무시할 수 없어, 여기서는 등방성과 균일성을 가정하되 Mindlin 판 이론을 이용하여 응답을 고찰한다. 지배방정식은 다음과 같이 잘 알려져 있다[10].

$$D \left(\frac{\partial^2 \theta_x}{\partial x^2} + \frac{1-\nu}{2} \frac{\partial^2 \theta_x}{\partial y^2} + \frac{1+\nu}{2} \frac{\partial^2 \theta_y}{\partial x \partial y} \right) - x^2 G d \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \theta_x \right) = \frac{\rho_s d^3}{12} \frac{\partial^2 \theta_x}{\partial t^2}, \tag{8}$$

$$D \left(\frac{1+\nu}{2} \frac{\partial^2 \theta_x}{\partial x \partial y} + \frac{1-\nu}{2} \frac{\partial^2 \theta_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta_y}{\partial y^2} \right) - x^2 G d \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \theta_y \right) = \frac{\rho_s d^3}{12} \frac{\partial^2 \theta_y}{\partial t^2}, \tag{9}$$

$$x^2 G d \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial \theta_x}{\partial x} + \frac{\partial \theta_y}{\partial y} \right) + P = \rho_s d \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}, \tag{10}$$

여기서 $D = \frac{E d^3}{12(1-\nu^2)}$ 는 판의 굽힘강성이고,

$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ 는 전단계수, x^2 은 전단 수정계수

(shear correction factor)로 사각형 단면에 대해서는 5/6가 쓰인다.

한편 w, θ_x, θ_y 는 각각 수직방향 변위와 x 축, y 축에 대한 회전각으로 Fig.1에 도시하였다.

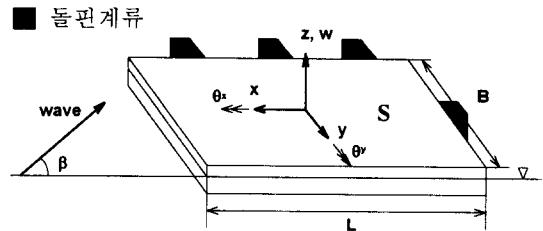


Fig.1 Definition Sketch

3. 수치 해법

위에 기술한 유체동역학 문제는 그린함수법에 근거한 일정패널법을 사용하고, 판 방정식은 유한요소법을 이용하여 해를 구한다.

3.1 일정패널법을 이용한 그린함수법

그린함수법에 의한 적분방정식을 수치적으로 구현하기 위해서는 물체표면을 여러 개의 요소로 분할하여야 한다. 본 논문에서는 편의상 일정패널법을 사용하였다. 이 방법에서는 각 패널위에서

물리량과 기하학적 모양이 일정하다고 가정하기 때문에 각 요소 사이에 불연속성이 생기는 단점을 지니고 있으나, 계산의 편의성 때문에 널리 쓰이고 있다. 이 절에서는 이에 대한 유도과정을 간략히 기술한다.

우선 아래와 같은 입사파 포텐셜을 사용한다.

$$\phi_I = -i \frac{gA}{\omega} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} e^{i(kx \cos \beta + ky \sin \beta - \omega t)} \quad (11)$$

산란포텐셜은 다음과 같이 그린함수의 물체표면에 대한 적분으로 표현된다.

$$\phi_D = \int_B Q(\vec{\xi}) G(\vec{x}, \vec{\xi}) ds \quad (12)$$

여기서 G 는 $\vec{\xi}$ 에 놓인 단위 크기의 특이점에 의한 유체장내 위치 \vec{x} 에서의 포텐셜로 경계조건 (3)과 (6) 그리고 방사조건을 만족시킨다.

산란파에 대한 물체표면 경계조건(식 4)을 적용하고, 일정패널요소로 이산화시키면 다음과 같은 행렬식을 얻을 수 있다.

$$B_{kl} Q_l = - \left\{ \frac{\partial \phi_I}{\partial n} \right\}_{(x_k, y_k, z_k)} \quad (13)$$

$$B_{kl} = \int_{\Delta S} \frac{\partial G(\vec{x}_k, \vec{\xi}_l)}{\partial n} dS$$

여기서 벡터 Q_l 은 각 패널요소 도심 (collocation point)에서 특이점의 강도를 의미한다.

윗 식으로부터 특이점의 강도를 구하여 다음과 같이 산란 포텐셜을 얻는다.

$$\phi_{Dm} = H_{mk} \left\{ \frac{\partial \phi_I}{\partial n} \right\}_k \quad (14)$$

$$H_{mk} = \left\{ - \int_{\Delta S} G(\vec{x}_m, \vec{\xi}_k) dS \right\} B^{-1}$$

한편 방사포텐셜은 산란포텐셜과 같은 방법으로 그린함수의 적분으로 나타낸다.

$$\phi_R = \int_B Q(\vec{\xi}) G(\vec{x}, \vec{\xi}) ds \quad (15)$$

여기에 방사포텐셜에 관한 물체표면 경계조건식 (5)을 적용하여 산란포텐셜과 비슷한 방식으로 식

을 전개하면 다음과 같이 방사포텐셜을 얻는다.

$$\phi_{Rm} = -H_{mk} (\vec{V} \cdot \vec{n})_k \quad (16)$$

물체의 운동을 정상 조화운동으로 가정하면, 그 진동수는 입사파의 진동수 ω 와 같고, 속도를 진동수와 변위의 곱으로 나타낼 수 있다. 판 구조물은 병진 변위로 w 만 갖고 있으므로 식(16)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi_{Rm} = i\omega H_{mk} w_k e^{-i\omega t} \quad (17)$$

이렇게 구해진 각 포텐셜을 모두 합하면 전체포텐셜을 얻는다.

$$\phi_m = \left\{ \phi_{I_m} + H_{mk} \left(\frac{\partial \phi_I}{\partial n} \right)_k + i\omega H_{mk} w_k \right\} e^{-i\omega t} \quad (18)$$

유체에 의해 구조물의 m 번째 요소에 작용하는 동압은 윗 식을 식(7)에 대입하여 구하는 데, 여기에 구조물의 변위로 인하여 발생하는 부력의 변화를 포함시키면 압력에 대한 최종식을 얻는다.

$$P_m = P_m^E + P_m^R + P_m^S = \left[i\rho\omega \left\{ \phi_{I_m} + H_{mk} \left(\frac{\partial \phi_I}{\partial n} \right)_k \right\} - \rho\omega^2 H_{mk} w_k - \rho g w_m \right] e^{-i\omega t} \quad (19)$$

입사파포텐셜과 산란포텐셜에 의한 압력을 합한 파 강제압력(P^E)은 구조물의 변위와 관계없이 구조물의 기하학적인 형상과 파의 특성에 의하여 결정된다. 이에 반해 방사압력(P^R)은 구조물의 변위에 비례하는 양으로 표현되어 있다. 즉, 구조물의 운동과 구조 응답을 구하기 위하여 방사압력을 알아야 하는 데, 그 방사압력을 구하기 위하여는 구조물의 운동과 구조 응답을 알아야 한다는 상호 연성을 나타내며, 유체-구조의 상호작용이 방사포텐셜에 의한 압력 향으로 나타남을 의미한다. 따라서 방사포텐셜에 의한 압력의 처리가 유탄성을 고려한 구조물의 운동응답을 해석하는 데에 가장 중요한 부분이라 할 수 있다. 일반적인 유탄성 연구에서는 앞에서 언급한 바와 같이 구조

물을 강체로 가정하여 구한 방사포텐셜로부터 구한 동유체력을 부가질량과 감쇠력으로 치환하여 유체-구조간 상호작용을 간접적으로 고려한다. 그러나 거대 부유식 구조물의 경우에는 강체가 아닌 유연체의 진동이어서 이와 같은 방법이 적절하지 못하다.

3.2 유한요소법

구조물의 진동방정식은 감쇠력을 무시하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$M\dot{u} + Ku = R \tag{20}$$

여기서 M, K, R 은 각각 질량 매트릭스, 강성 매트릭스와 하중 벡터를 나타내고, u 는 절점 변위벡터이다.

이러한 매트릭스와 벡터는 각각 요소 질량, 요소 강성 매트릭스와 요소 하중 벡터의 합으로 이루어진다. 본 논문에서는 전단변형을 고려한 요소와 전단변형이 고려되지 않는 요소 한가지를 택하여 계산하였다. 편의상 이들을 각각 Mindlin 요소와 MZC 요소로 칭하였다. MZC 요소의 이름은 개발자 이름 Melosh, Zienkiewicz, Cheung을 따서 붙여졌으며, 전단변형의 영향을 고려하지 않는 Kirchhoff-Love의 판이론을 바탕으로 개발된 비교적 잘 알려진 요소이다[11]. 그러나 여기서는 지면관계상 전단 변형이 고려되는 가장 일반적인 Mindlin 요소에 대한 식만을 전개하였다. 요소 질량, 요소 강성 매트릭스와 요소 하중 벡터는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$M_E = \int_V \rho_s N^T N dV, \tag{21}$$

$$K_E = \int_V B^T C B dV, \tag{22}$$

$$R_E = \int_A N^T P dA, \tag{23}$$

여기서 N 은 변위 형상 매트릭스, B 는 변형률-변위 변환 매트릭스, C 는 탄성 매트릭스를 나타내며, dV, dA 는 각각 요소내의 체적분, 면적분을 나타낸다[12].

본 논문에서 사용한 Mindlin 요소와 MZC 요소는 모두 4-절점 요소이므로 M_E, K_E 는 각각 12×12 의 매트릭스이며, R_E 는 12×1 의 벡터이다.

앞에서 일정패널법으로 구한 동유체력(식 19)을 진동방정식(식 20)에 대입하여 유탄성을 고려한 진동방정식을 얻을 수 있다. 그러나 일정패널법에서 사용하는 요소와 유한요소법에서 사용하는 요소가 서로 다르기 때문에 유체력을 바로 구조 유한요소의 하중으로 적용할 수가 없다. 이를 해결하기 위해 일정패널의 요소와 구조요소를 다르게 분할하였다. 즉, 일정패널의 도심에 구조요소의 절점을 대응시키는 방법으로 요소를 분할하였다(Fig.2 참조).

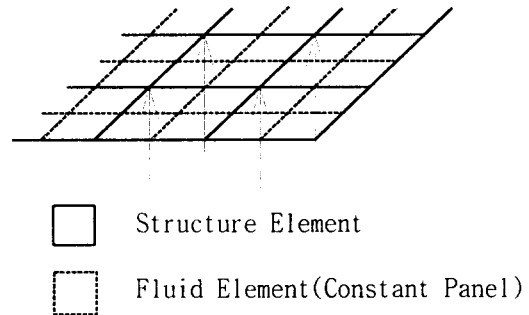


Fig. 2 Structural and Fluid Elements

하중은 유한요소의 등가 절점하중으로 치환하였다. 특히 부유체의 운동에 관련되는 방사압력과 유체정압 항은 요소의 변위벡터 u_E 가 명시적으로 나타나도록 표현하였다. 즉, 방사압력에 의한 등가 절점 하중은 미지변위를 포함하는 절점하중으로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$R_E^R = -\rho\omega^2 \int_A N^T N H dA u_E \tag{24}$$

유체 정압에 의한 등가 절점하중은 같은 방식으로 표시한다.

$$R_E^S = -\rho g \int_A N^T N dA u_E \tag{25}$$

이제 정상 조화상태를 가정하고 미지변위 u_E

를 포함하는 항을 좌변으로 모으면, 선형 대수 방정식을 얻을 수 있다.

4. 계산 결과 및 토론

본격적인 계산에 앞서 단순 지지된 판이 등분포 하중을 받는 경우에 대한 계산을 수행하여 해석해와 비교함으로써 해의 유효성과 Shear Locking 현상이 나타나지 않음을 확인하였다. 또한 전단 변형이 고려되지 않는 MZC요소로 계산한 결과를 Mindlin요소의 결과와 비교하여 전단변형의 효과를 살펴볼 수 있다.

4.1 수치모델

수치계산의 유효성을 검증하기 위하여 Yago & Endo[13]의 실험에서 택한 모델을 택하였다. 이 모델은 메가 플로트 연구 조합이 실험역에 설치하여 실험중인 구조물의 약 1/30 모델로 주요 제원을 Table 1에 정리하였다. 이 모델은 알루미늄 하니컴판을 사용하였으며, 부력을 보강하기 위해 40mm 두께의 폴리에틸렌 판을 바닥에 부착시켰다. Yago & Endo의 계산결과는 전단변형을 고려하지 않았을 뿐만 아니라 폭방향의 변화를 무시하여 2차원으로 해석하였다. 따라서 사파에 대한 결과는 직접 비교할 수 없었다.

Table 1 Particulars of Mega Float

	Yago	Mega Float
Scale Ratio	1/30.77	1/1
Length L (m)	9.75	300.0
Breadth B (m)	1.90	60.0
Depth d (m)	0.0545	2.0
Draft T (m)	0.0166	0.5
Bending Rigidity EI ($kgf \cdot m^2$)	1.788×10^3	4.87×10^{10}
Water Depth h (m)	1.9	8.0

4.2 입사파 방향의 영향

지면관계상 $\lambda_\infty/L=0.5$ 인 파가 0도와 45도로 입사하는 경우만을 논하기로 한다. 파는 구조물의 좌측에서 입사하며, 입사각에 대한 정의는 Fig.1에 나타나 있다. 위에서 인용한 Yago & Endo의 실험에서 파장을 무한수심에 대응하는 값으로 표시하였기 때문에 여기서도 무한수심으로 환산하여 λ_∞ 로 표시하였으며, L 은 부유체의 길이이다. $\lambda_\infty/L=0.5$ 인 경우는 판의 길이 방향으로 2개의 파장이 전파하는 경우이다. Fig.3에서 가로축은 판의 길이방향 위치를 판길이의 반으로 나눈 무차원화된 값을 나타내고 있으며, 세로축은 단위 진폭의 입사파에 대한 판의 수직 변위를 나타낸다. 우선 입사각이 0도인 경우를 살펴보면 전단응력이 없기 때문에 Mindlin요소와 MZC요소의 결과는 당연히 같아야 하는데, 수치계산 결과는 이를 잘 반영하고 있다. 이들은 Yago & Endo의 실험 결과와 대체로 잘 일치하고 있으나, 선수($x=-1.0$) 부근에서 뚜렷한 차이를 보이고 있다. 한편 입사각이 45도인 경우는 Fig.4에 도시한 바와 같이 전반적으로 변위가 크게 증가하며, 길이방향으로의 변화가 심하게 나타난다. 이는 입사파가 구조물에 대하여 각을 지니고 있으므로 구조물의 길이방향과 폭방향에 관하여 파 진동수 성분을 나누어 생각할 수 있는데, 길이방향의 파 진동수가 실제로 입사하는 파 진동수보다 작아지는 효과로 구조물의 길이와 파장이 보다 가까워져 구조물의 응답이 커지는 것으로 해석할 수 있다.

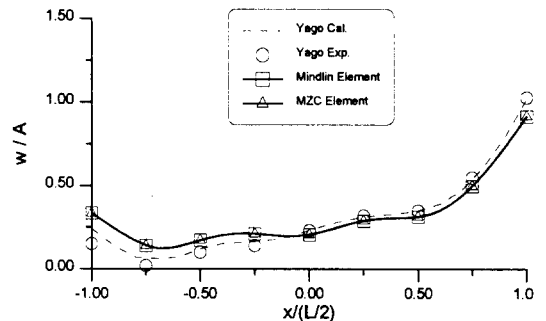


Fig. 3 Amplitude of vertical displacement for $\lambda_\infty/L=0.5$, $\beta=0^\circ$

4.3 계류계의 영향

실제 메가 프로트 모델은 길이방향으로 1개, 폭방향으로 3개의 돌핀 계류계를 사용하고 있으나, Yago & Endo의 실험 및 계산에서는 이러한 돌핀 계류계에 대한 영향을 고려하지 않았다. 본 논문에서는 계류계의 영향을 살피기 위하여 실험역에서 실험중인 메가 프로트의 계류계를 경계조건으로 고려하여 해석하였다. 이를 위하여 계류계가 있는 부분의 절점에서 수직 변위는 풀어주되 회전 변위를 구속시키는 방법으로 계류계를 구현하였다. 계산결과를 Fig.4에 제시하였다. 계류계의 영향으로 전반적인 응답의 감소가 나타난다. 특히 그림의 우측 끝(x=1.0)에 위치한 계류계의 영향으로 이 위치에서의 응답이 대폭 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

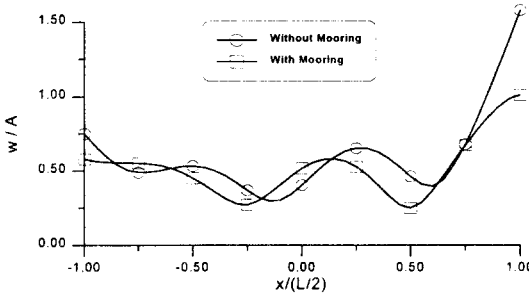
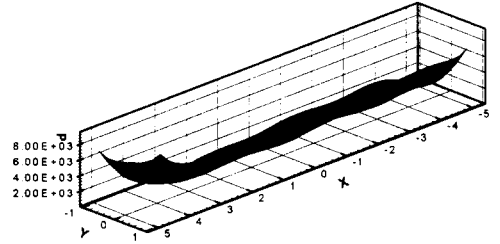


Fig. 4 Influence of Dolphin Mooring on Vertical Displacement for $\lambda_{\infty}/L=0.5, \beta=45^\circ$

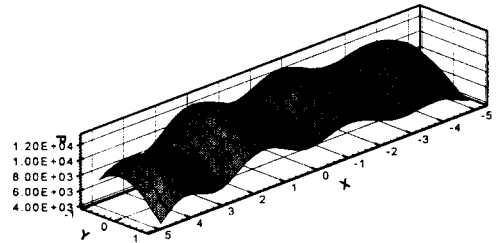
4.4 유체-구조 상호작용의 영향

앞에서 논의한 바와 같이 유체-구조간의 상호작용은 방사압력항으로 나타난다. 방사압력은 유탄성해석의 결과에 따른 변위를 식(19)에 대입하여 얻을 수 있다. 상호작용의 크기를 추정하기 위하여 방사압력을 파 강제압력과 비교하였다. 편의상 앞에서 인용한 경우인 입사각 45도 그리고 $\lambda_{\infty}/L=0.5$ 인 경우에 대해 계산예를, 즉 단위 입사파에 의한 응답에 대응하는 동압을 Fig.5에 도시하였다. 이 그림에서 방사압력이 파 강제압력보다 국부적으로 더 크게 나타나고 있으며, 이

로부터 유체-구조 상호작용의 영향이 거대한 부유식 구조물에서는 중요한 역할을 한다고 추론할 수 있다.



(a) Wave Exciting Pressure



(b) Radiation Pressure

Fig. 5 Comparison of Wave Exciting and Radiation Pressures

4.5 전단변형의 영향

전단변형의 영향을 고찰하기 위하여 Mindlin 요소와 MZC 요소에 의한 결과를 비교하였다. 여기서 전단변형의 영향은 아래와 같이 정의하였다

$$ShearEffect = \left| \frac{W_{Mindlin\ Element} - W_{MZC\ Element}}{W_{MZC\ Element}} \right| \quad (26)$$

파가 길이 방향으로 입사하는 경우에는 폭 방향의 변화가 거의 없으므로 전단변형의 영향이 거의 나타나지 않고, 특정 위상에서 국부적으로 차이를 보이나 절대값은 거의 비슷하다. 높은 파 진동수에서 상대적으로 큰 영향을 주는 것은 전단력은 하중이 상하로 교차하는 부분에서 큰 값을 가지기 때문인 것으로 이해된다.

사파중에 놓인 구조물은 선수미파에 놓인 경우보다 하중의 부호 변화가 심하여 전단변형의 영향이 더 크게 나타난다. 입사각과 파진동수에 따른 영향을 알아보기 위해 여러 가지 경우에 대한 계산을 수행하였다. 전단변형의 영향을 전체 구조물에 걸친 평균을 구하여 Fig.6에 나타내었다. 입사각과 진동수에 따라서 약 4%까지 전단변형이 차지하고 있음을 확인하였다.

전단변형의 영향이 비교적 잘 나타나는 경우의 전단변형 분포를 Fig.7에 나타내었다. 선수파의 경우와 마찬가지로 특정 위상에서 영향이 더 큼을 확인할 수 있다. 국부적으로는 전단변형이 굽힘변형보다 큰 부분이 있으나, 그러나 전체 변형은 작다.

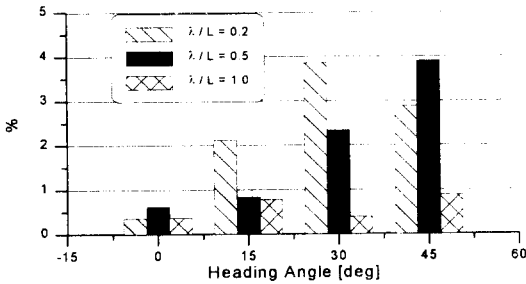
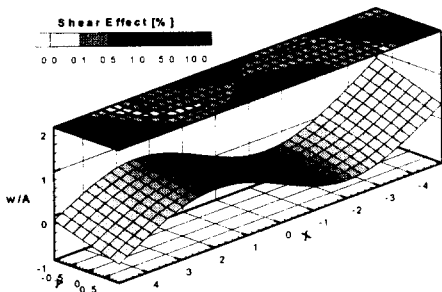
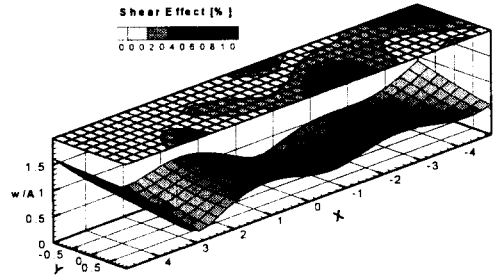


Fig.6 Shear Effects depending on Heading Angle and Wave Length



(a) Snapshot



(b) Absolute Value

Fig. 7 Local Shear Effect for $\lambda_{\infty}/L=0.5, \beta=45^\circ$

5. 결 론

이상의 결과로 부터 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

전단변형을 고려한 Mindlin 판이론을 이용하여 거대 부유체의 유탄성 해석을 수행하였으며, 수치결과는 선수파의 경우 Yago & Endo가 수행한 실험결과와 비교적 잘 일치함을 확인할 수 있다. 유체-구조의 상호작용에 기여하는 방사압력이 파 강제압력보다 국부적으로 큼을 보였는데, 이는 거대 부유체에 대하여 유체-구조 상호작용에 대한 고려가 있어야 함을 의미한다. 계류계에 의해서 응답이 전반적으로 줄어드는 것을 확인할 수 있었으며, 따라서 적절한 계류계의 설계가 실제적으로 매우 중요함을 확인하였다. 끝으로 사파중에 놓인 거대 부유체의 전체 변형중 전단변형이 차지하는 비중은 최대 4% 정도이다.

앞으로의 연구과제로는 여러 가지 계류계에 대한 고려와 방파제를 포함한 전체 시스템에 대한 해석과 다양한 형태의 구조물에 대한 해석이 필요할 것으로 보인다.

참고문헌

- [1] 정태영, 김성환, 홍석원, 정정훈, "해상 소각/담수화 복합플랜트 개념설계", 대한조선학회 추계

- 학술대회, pp. 179-184, 1997.
- [2] Bishop, R.E.D. & Price, W.C., *Hydroelasticity of Ships*, Cambridge University Press, 1979.
- [3] Ando, S., Ohkawa, Y., & Ueno, I., "Feasibility Study of a Floating Airport", Report of Ship Research Institute, Japan, Supplement No.4, 1983.
- [4] Ertekin, R. C., Wang, S. Q., & Riggs, H. R., "Hydroelastic Response of a Floating Runway", Proceedings of International Conference on Hydroelasticity in Marine Technology, Trondheim / Norway, pp. 389-400, 1994.
- [5] 구자삼, 조효제, 김경태, "다방향 불규칙파중의 초대형 해양구조물의 동적 응답해석", 대한조선학회 논문집, 제34권, 제2호, 1997.
- [6] 신현수, 염덕준, "초대형 부유식 해양구조물의 탄성 거동에 관한 실험적 연구", 대한조선학회 추계학술대회, pp.86-91, 1995.
- [7] 이동연, 최항순, "유탄성을 고려한 탱크내 슬로싱에 대한 연구", 대한조선학회 논문집, 제35권, 제4호, 1998.
- [8] Lee, S. W. & Webster, W. C., "A Preliminary to the Design of a Hydroelastic Model of a Floating Airport", Proceedings of International Conference on Hydroelasticity in Marine Technology, Trondheim / Norway, pp. 351-362, 1994.
- [9] 윤재돈, 최항순, "거대 부유식 해양구조물의 유탄성 거동에 대한 기초연구", 대한조선학회 춘계학술대회, pp 125-128, 1996.
- [10] Mindlin, R. D., "Influence of Rotatory Inertia and Shear on Flexural Motions of Isotropic, Elastic Plates", Journal of Applied Mechanics, 1951.
- [11] Reismann, H. & Pawlik, P. S., *Elasticity-Theory and Applications*, John Wiley & Sons, 1980.
- [12] Bathe, K. J., *Finite Element Procedures*, Prentice-Hall, 1996.
- [13] Yago, K. & Endo, H., "Model Experiment and Numerical Calculation of the Hydroelastic Behavior of Matlike VLFS", Proceedings of the International Workshop on Very Large Floating Structures, 1996.