

시간영역에서 초대형 부유식 해양구조물에 대한 유탄성 응답 해석

이호영 · 신현경
울산대학교 수송시스템공학부

Hydroelastic Responses of a Very Large Floating Structure in Time Domain

HO-YOUNG LEE AND H. SHIN

School of Transportation Systems Engineering, University of Ulsan, Ulsan 680-749, Korea

KEY WORDS: Time domain 시간영역, Memory effect function 기억효과 함수, Newmark β method 뉴마크 베타 방법, Hydroelastic responses 유탄성 응답, FEM 유한요소법

ABSTRACT: This paper describes transient responses of a very large floating structure subjected to dynamic load induced by waves. A time domain method is applied to the hydroelastic problems for this purpose. The method is based on source-dipole and FEM scheme and on Newmark β method to pursuit time step process taking advantage of memory effect. The present procedure is carried out to analyze hydroelastic responses in regular waves and impact responses due to dropping aircraft.

1. 서 론

최근에 배럴식 해상 공항이 지반 침하가 지속되고 있는 상황에서 초대형 부유식 해양구조물은 대안으로 해상공항으로 이용될 가능성이 매우 크며 일본에서 길이 1km의 해상 구조물을 제작하여 실증실험을 수행하고 있다. 이런 형태의 구조물의 운동응답은 전적으로 유탄성 현상이며, 구조물이 커지면 운동해석을 하기 위해 요소수도 커지고 당연히 그로 인하여 운동의 자유도가 커진다. 지금까지 유탄성 문제를 해석하기 위해 많은 노력이 이루어졌지만 대부분 주파수 영역에서 해석되었다(구 등, 1998; 이와 신, 2000; 신 등, 2000; 이 등, 2000). 주파수 영역의 해석은 운동과 외력이 규칙적(sinusoidal)인 경우에 적용될 수 있으나, 충격력이 작용할 경우에는 적용하기 불편하다. 예를 들어 비행기가 해상 구조물위에 이착륙한다든지 혹은 충돌하는 경우처럼 충격력이 작용할 경우에 반드시 시간영역 해석법이 적용되어야 한다.

Endo 등은 비행기가 이착륙하는 경우에 대한 충격력에 대해 실험을 수행하고 동시에 수치해석법을 개발하였다(Endo, 1999). 그들의 방법은 압력분포법과 유한요소법을 사용하여 주파수 영역에서 부가질량, 감쇠계수와 파강제력을 계산하였고, 기억효과를 고려한 시간영역 해석을 하였다.

Ohmatsu는 구조물의 응답은 주파수 응답함수와 충격 응답함수의 곱(convolution) 적분으로부터 얻어진 시간영역 해석법을 사용하였다(Ohmatsu, 1999). 그는 비행기의 이착륙에 대한 충격력을 움직이는 물체로 치환하여 실험을 수행하였고 그의 해석법과 비교하여 정성적으로 일치하는 결과를 도출하였다.

본 논문은 규칙파중에서 초대형 부유식 해양구조물이 운동할 경우와 비행기가 구조물에 충돌할 경우에 대하여 기억효과

함수를 사용하여 계산하였다. 구조물은 수백개의 요소수로 분할하여 동유체력을 계산하였고, 시간영역에서 운동방정식의 자유도는 구조물의 요소수에 의해 정의되는 방법을 사용하였다. 기억효과 함수를 계산하기 위해 주파수 영역의 해석법을 사용하였고, 본 시간영역 해법을 주파수영역의 계산과 비교하여 유효성을 검토하였다(이와 신, 2000).

2. 해석방법

초대형 부유식 해양구조물의 시간영역 해석은 판요소로 서로 연결된 N 개의 부체의 조합으로 생각된다. 그런 부체에 대한 운동방정식은 부유체에 대한 6자유도 운동방정식을 확장하여 사용한다(Cummins, 1962). 이 방법에서 주파수 영역에서 동유체력은 곱 적분에 의해 고려되고, 유체력이 선형적으로 변한다는 가정이 필요하다.

좌표계는 구조물의 중앙에 원점을 위치시키고 x 축은 오른쪽으로 향하며 y 축은 상방으로 향하는 우수 좌표계를 사용하였다. 초대형 부유식 해양구조물은 다수의 부체로 구성된다라고 생각하면 구조물에 대한 운동방정식은 다음과 같다.

$$\sum_{j=1}^{3Nx \times Ny/4} [(M_{ij} + A_{ij}(\infty)) \dot{x}_j + \int_0^t R_{ij}(t-\tau) \dot{x}_j(\tau) d\tau + (C_{ij} + K_{ij})x_j(t)] = F_{wj}(t) + F_{ij}(t) \quad (i=1,2,\dots,3Nx \times Ny/4) \quad (1)$$

$$R_{ij}(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty B_{ij}(\omega) \cos(\omega t) d\omega \quad (2)$$

where, M ; mass matrix $A(\infty)$; added mass matrix
 B ; damping matrix C ; static restoring matrix
 K ; stiffness matrix

위에서 R_{ij} 은 기억효과 함수이고, F_w, F_H 는 1차 파강제력과 충격력을 나타낸다. (1)에서 N_x 와 N_y 는 부체의 x 방향과 y 방향으로 유체 요소의 수이다. N_x 와 N_y 앞에 3은 상하운동, 횡운동, 종운동을 나타내고, 1/4은 구조 요소수로 치환하기 위해 필요하다(이와 신, 2000). 방정식의 자유도의 수는 요소수에 의해 좌우되며 (1)에서 주파수 무한대에서 부가질량 계수 $A_{ij}(\infty)$ 는 다음과 같이 나타낸다.

$$A_{ij}(\infty) = A_{ij}(\omega_0) + \frac{1}{\omega_0} \int_0^\infty R_{ij}(t) \sin(\omega_0 t) dt \quad (3)$$

$A(\omega_0)$ 은 임의의 주파수 ω_0 에서 부가질량이다. 기억효과 함수를 계산하기 위해 부가질량과 감쇠계수의 값을 모든 주파수에 대해 계산되어야 하나 고 주파수에서는 계산이 실행될 수 없다. 그래서 본 논문은 감쇠계수가 0에 가까운 고 주파수까지 계산하고 나머지 부분은 0으로 치환하였다. 그러나 복원력이 없는 진후운동 등과 같은 감쇠계수는 정확성 있게 계산하여야 운동의 표류현상을 방지할 수 있다(이와 신, 2000).

식 (1)을 시간 전진시키기 위해 n 번째 시간 단계에서 운동 방정식은 다음과 같다.

$$\sum_{j=1}^{3N_x \times N_y / 4} [(M_{ij} + A_{ij}(\infty)) \dot{x}_j(t) + (C_{ij} + K_{ij})x_j(t)] = F_w(t) + F_H(t) - \sum_{j=1}^{3N_x \times N_y / 4} \sum_{p=0}^n R_{ij}(p) \dot{x}_j(n-p) \Delta t \quad (4)$$

(4)에서 운동방정식은 각 시간 단계에서 수치 적분 기법을 사용함으로 계산되며, 본 논문에서 아래와 같이 뉴마크-베타(Newmark- β)방법을 사용하였다(이와 신, 2000).

$$x^{n+1} = x^n + \dot{x}^n \Delta t + \frac{\Delta t^2}{4} [\ddot{x}^n + \ddot{x}^{n+1}] \quad (5)$$

$$\dot{x}^{n+1} = \dot{x}^n + \frac{\Delta t}{2} [\ddot{x}^n + \ddot{x}^{n+1}] \quad (6)$$

$$\ddot{x}^{n+1} = \frac{4}{\Delta t^2} x^{n+1} - \ddot{x}^n - \frac{4}{\Delta t^2} [x^n + \dot{x}^n \Delta t] \quad (7)$$

식 (5)~(7)을 정리하여 (4)에 대입하면 다음과 같은 관계식을 얻는다.

$$\sum_{j=1}^{3N_x \times N_y / 4} [(M_{ij} + A_{ij}(\infty)) (\frac{2}{\Delta t})^2 + (C_{ij} + K_{ij})] x_j^{n+1} = \sum_{j=1}^{3N_x \times N_y / 4} (M_{ij} + A_{ij}(\infty)) [(\frac{2}{\Delta t})^2 x_j^n + (\frac{4}{\Delta t}) \dot{x}_j^n + \ddot{x}_j^n] + F_w^{n+1} + F_H^{n+1} - \sum_{j=1}^{3N_x \times N_y / 4} \sum_{p=0}^n R_{ij}(p) \dot{x}_j(n-p) \Delta t \quad (8)$$

파강제력, F_w 은 주파수 영역에서 계산한 값을 이용하여 다음과 같이 계산하였다.

$$F_w(t) = \text{Re}[\zeta f_w(\omega) e^{i\omega t + \epsilon}] \quad (9)$$

$$f_w(\omega) = \rho (i\omega)^2 \int \int_{S_H} (\varphi_I + \varphi_D) n_i ds \quad (10)$$

$$\varphi_I = \frac{g}{\omega^2} \frac{\cosh k_0(z+h)}{\cosh k_0 h} e^{ik_0(x \cos \theta + y \sin \theta)} \quad (11)$$

where ζ ; wave amplitude ϵ ; phase angle of wave
 S_H ; body surface k_0 ; wave number

θ ; heading angle ω ; wave angular frequency

φ_I 와 φ_D 는 입사파 포텐셜 및 산란 포텐셜이다. (9)에서 불규칙파 상태에서 계산할 경우에는 각각의 주파수에서 전달함수를 더하기만 하면 된다.

3. 계산결과 및 고찰

본 계산에 사용된 모델은 MF-300으로 Table 1에 기본 제원을 나타내었다.

Table 1 Particulars of MF-300

L×B×D	300×60×2m
Draft	0.5m
Water depth	58.5m
EI	4.78×10 ⁸ kN-m ²

운동방정식 (8)의 해를 계산하기 위해 주파수 무한대에서 부가질량과 감쇠계수를 주파수 응답함수로 계산해야 한다. 본 논문은 저자들이 개발한 주파수 영역 계산 프로그램을 이용하여 동유체력 계수를 구하였다(이와 신, 2000).

본 계산은 유체력을 계산하기 위해 60×12 요소로 분할하였고, 구조물의 운동응답 계산은 30×6 요소로 분할하였다. 입사파 진폭은 균등하게 1m로 고정시켜 계산을 진행하였다.

부가질량 계수 및 조파 감쇠계수의 주파수 응답함수로서 얻어진 계산 결과를 Fig. 1, Fig. 2에서 나타내었다. 그림의 $B(i,j)$ 에서 i, j 는 절점 번호를 나타내고 즉 위치는 좌측 하단부이며, 원 주파수가 2.5가 넘으면 계산을 수행하지 않았다. 물론 요소수를 증가시키면 주파수를 크게 할 수 있고 계산정도는 향상된다. Fig. 2는 주파수 무한대에서 계산한 부가질량을 도시하였다. 그림으로부터 부가질량 값은 구조물 배수량의 9.5~10.5배 정도로 계산되었다.

Fig. 3은 좌측 하단부 요소 하나에 대한 상하동요, 횡동요 및 종동요 성분에 대해 시간 기억효과 함수를 도시하였고, 시간이 5 sec 이상 지나면 0으로 접근하는 모습을 보여주고 있다.

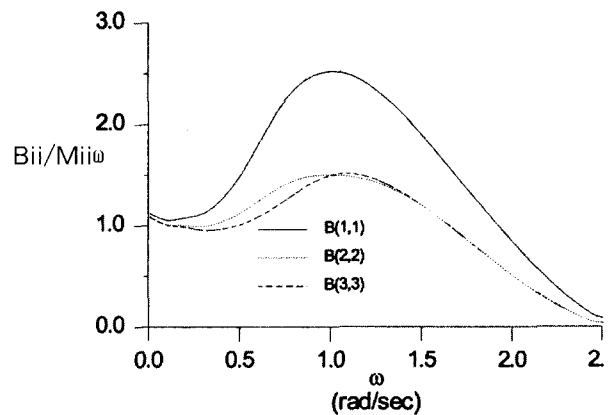


Fig. 1 Damping coefficients

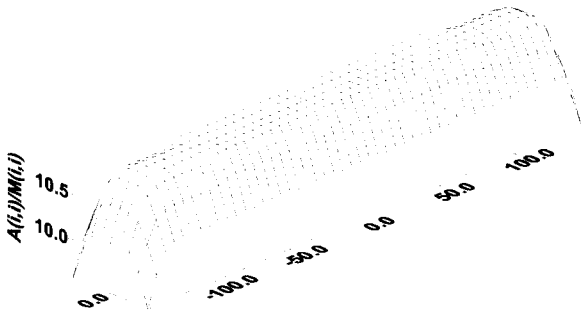


Fig. 2 Added mass coefficients ($A(\infty)$)

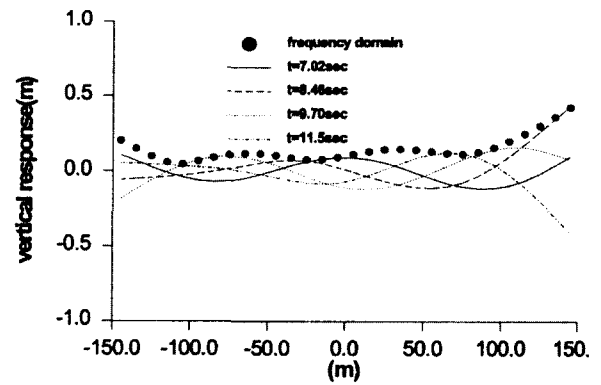


Fig. 4 Distribution of vertical displacement amplitude

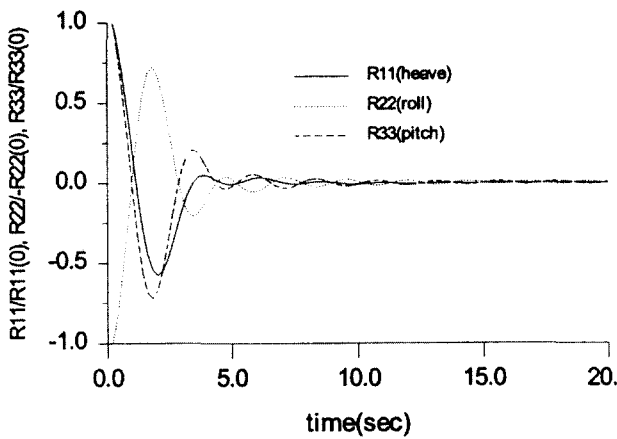


Fig. 3 Time configuration of memory function

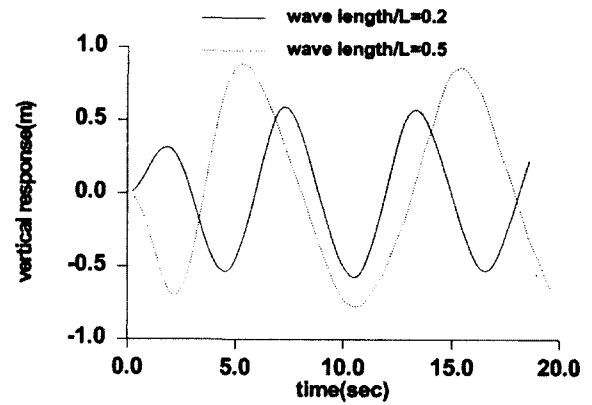
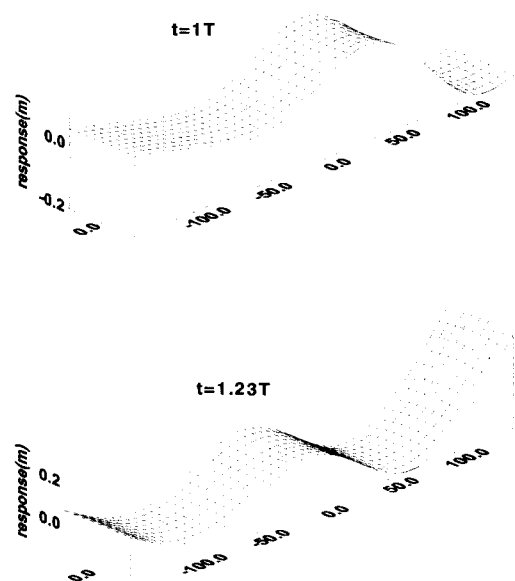


Fig. 5 Time configuration of vertical responses ($x=L/2$)

Fig. 4는 $\lambda/L=0.2$, 파입사각 0° 에서 구조물의 길이 방향으로 시간영역 계산 결과와 주파수 영역의 계산결과를 서로 비교하고 있다(이와 신, 2000). 여기에서 λ 는 수심이 무한대일 경우의 파장을 나타낸다. 그림으로부터 시간영역 계산 결과는 구조물의 2파장에 걸쳐서 운동하는 형태를 보여주고 있다. 또한 시간영역에서 결과가 주파수 영역의 결과와 잘 일치하고 있고 이로부터 본 계산이 유효함을 알 수 있다.

Fig. 5는 $\lambda/L=0.2, 0.5$ 파입사각 0° 에서 파 상측의 한 점 ($x=L/2$)에서 운동을 시간에 따라 도시하였다. 계산 결과로부터 운동 응답이 시간에 따라 규칙적으로 잘 도시되며, 1주기가 지나면 정상상태에 도달되는 것을 보여 주고 있다.

Fig. 6, Fig. 7은 $\lambda/L=0.2$, 파입사각 0° 에서 시간에 따른 운동과 굽힘 모우멘트를 3차원적으로 도시하였다. 그림은 1주기에서 2주기 사이의 구조물의 운동과 굽힘 모우멘트를 보여주고 있다. 굽힘 모우멘트 계산 결과도 주파수 영역의 결과와 일치하는 것을 확인하였다(이와 신, 2000).



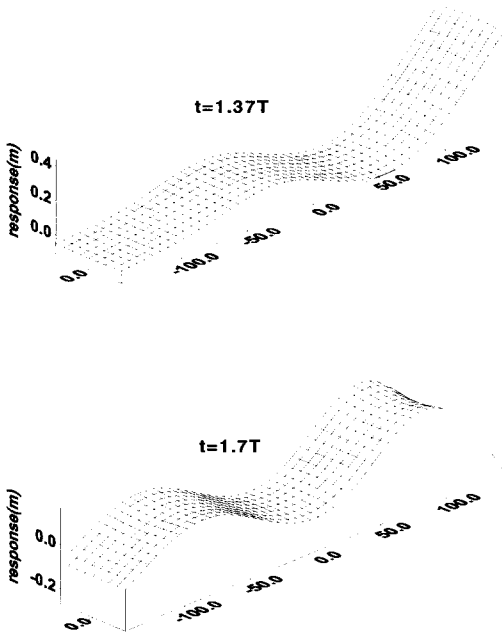


Fig. 6 Distribution of vertical displacement by waves

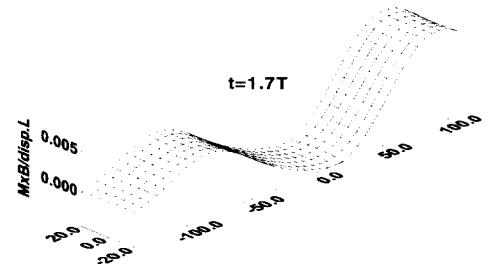
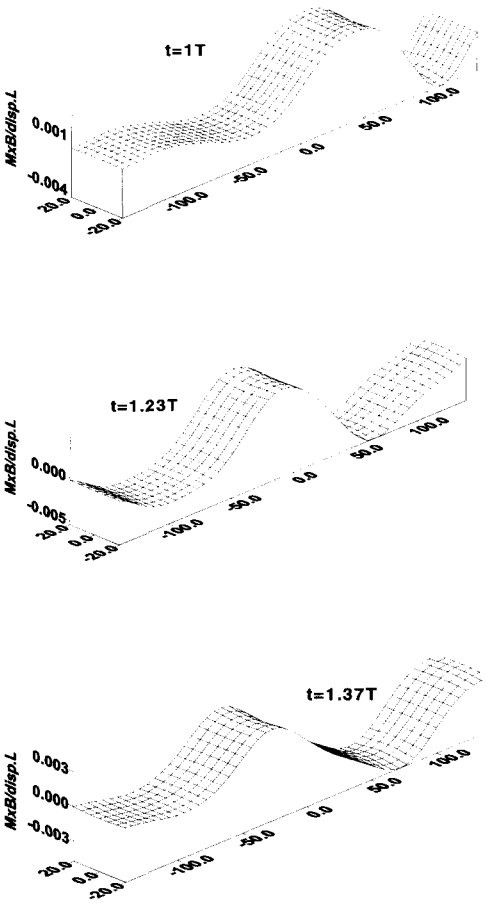


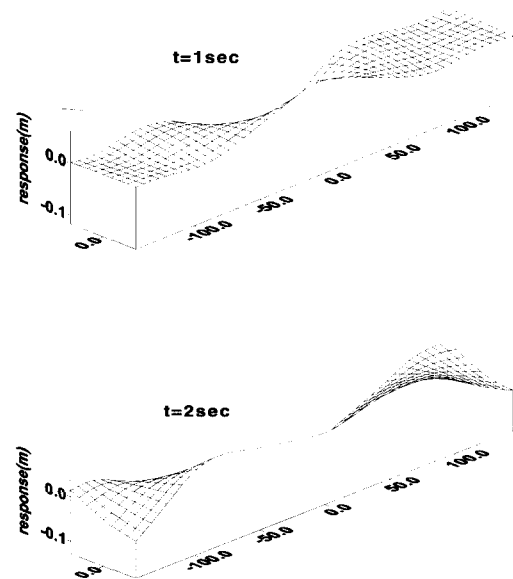
Fig. 7 Distribution of bending moment by waves

항공기의 충돌 문제를 계산하기 위해 초대형 부유식 해양구조물에 충돌하는 힘은 Table 2에 나타내었다(다카라다, 1995). 참고문헌의 공항 크기는 5km 이므로, 본 계산의 공항의 크기 (300m)에 맞게 충격력의 값을 척도비에 맞게 수정하였다.

Table 2 Conditions of aircraft collision

mass	3 tons
Δt	1 sec
Fz(heave)	255 tonf
Mx(roll)	7875 tonf-m
My(pitch)	0.477 tonf-m

Fig. 8, Fig. 9는 구조물의 중앙점($x=0, y=0$)에 충돌한 경우에 대해 운동응답과 굽힘 모우멘트를 시간에 따라 도시하였다. 비행기의 충돌은 0~1sec 동안에 Table 2에 제시된 값을 일정하게 주었다. 최대 운동 응답은 0.1m 정도이고 6초가 넘어도 구조물이 계속 운동하는 것으로 보아 충격력의 효과가 지속되기는 하나 운동 진폭과 굽힘 모우멘트는 서서히 줄어드는 것을 알 수 있다.



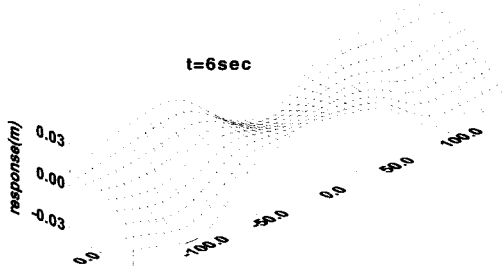
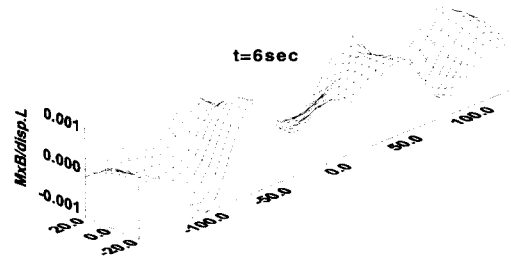
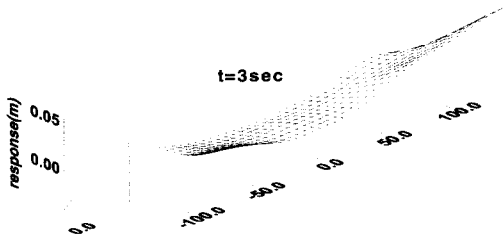
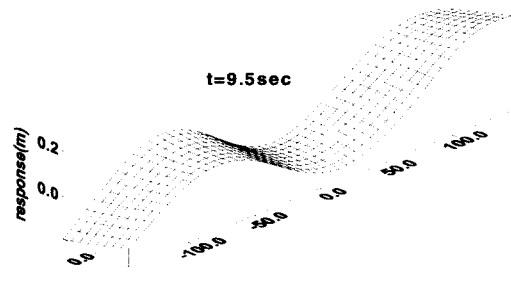
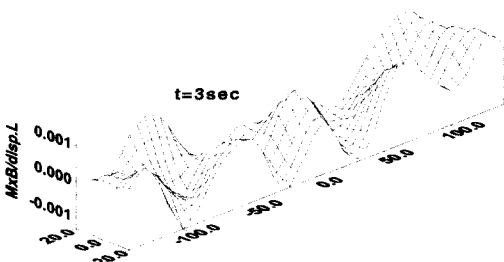
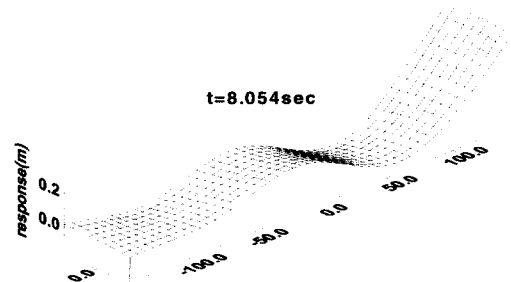
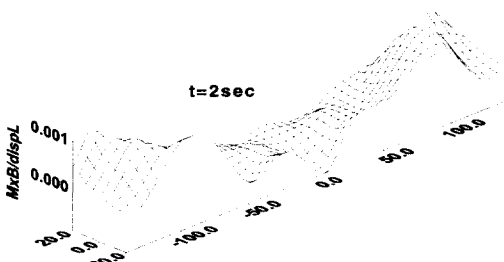
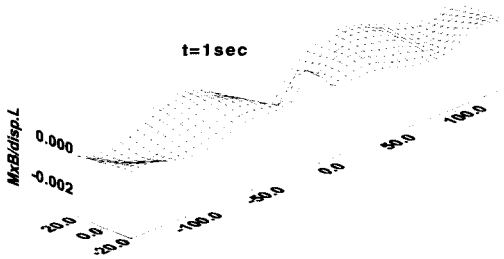


Fig. 9 Distribution of bending moment by aircraft collision

Fig. 10, Fig. 11은 $\lambda/L=0.2$, 파입사각 0° 에서 구조물이 운동하고 있을 때 항공기가 갑자기 충돌한 경우에 대해 운동응답과 굽힘 모우멘트를 시간에 따라 도시하였다. 초기상태에 구조물이 파도에 의해 대략 1주기 정도 운동하여 정상상태에 도달했을 때 항공기가 갑자기 충돌한 경우, 충돌 시간은 6~7sec 동안에 일정하게 힘이 작용한다고 하였다. 그림으로부터 항공기의 충돌에 의한 운동과 굽힘 모우멘트보다 파도에 의한 운동과 굽힘 모우멘트가 지배적인 것을 알 수 있다.

Fig. 8 Distribution of vertical displacement amplitude by aircraft collision



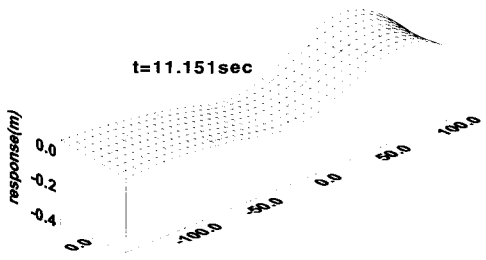


Fig. 10 Distribution of vertical displacement amplitude by wave and aircraft collision

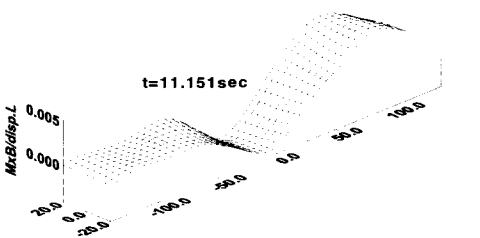
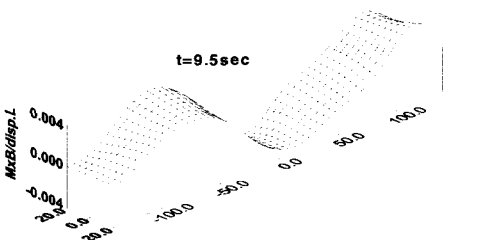
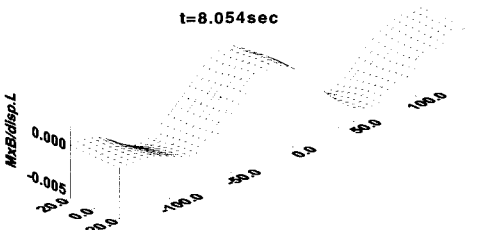
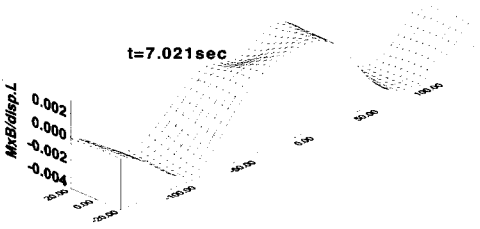


Fig. 11 Distribution of bending moment by wave and aircraft collision

4. 결 론

본 연구는 주파수 영역에서 소오스다이폴 분포법과 유한요소법을 사용하여 동유체력 계수를 계산하였다. 주파수 영역의 계산으로부터 기억효과 함수와 파강제력을 계산하고, 시간영역에서 초대형 부유식 해양구조물의 유탄성 응답을 해석하여 다음 결론을 도출하였다.

- (1) 시간영역의 해석으로 도출된 응답은 주파수 영역의 해와 정성적으로 일치하는 결과를 얻었다.
- (2) 항공기에 의한 충돌은 구조물의 운동을 크게 유지시키지 못하며, 파도에 의한 운동의 형태를 근본적으로 변화시키지 않음을 확인하였다.
- (3) 앞으로 시간영역에서 불규칙파 중의 운동해석과 비행기가 이착륙하는 문제를 계산할 예정이다.

참 고 문 헌

구자삼, 조효제, 김병현, 이창호(1998). “바이지식 초대형 부유 구조물의 유탄성 응답 해석”, 해양공학회지 제12권 제2호, pp 43~56.

다카라다 나오노스케(1995). “(초대형) 부유식 해양구조물에 대한 기술 평가의 일례”, 해양공간이용연구 프로그램 역, 울산대학교, pp 299.

신현경, 이호영, 신현수, 박인규(2000). “초대형 부유식 해양구조물에 대한 유탄성 응답에 대한 해석 방법”, 한국해양공학회지, 제14권 제2호, pp 19~27.

이호영, 신현경(2000). “천홀수 초대형 부유식 해양구조물에 대한 유탄성 해석”, 한국해양공학회지, 제14권 제2호, pp.53~59.

이호영, 신현경, 신현수, 박인규(2000). “압력분포법에 의한 초대형 부유식 해양구조물의 유탄성 해석”, 대한조선학회 논문집, 제37권 제4호(계재예정).

Cummins, W. E.(1962). “The Impulse Response Function and Ship Motions”, Schifftechnik Bd, pp 101~109.

Endo, H.(1999). “The behavior of an Air plane Taking off from a Landing on a VLFS in Rough Sea Condition”, VLFS'00, Hawaii, Vol.1m pp 212~219.

Ohmatsu, S.(1999). “Time Domain Analysis of Hydroelastic Behavior of VLFS”, J. of Soc. Nav. Archit. Japan, Vol. 184, pp 223~230.

2000년 4월 24일 원고 접수
 2000년 7월 28일 수정본 채택