

시간영역에서 초대형 부유식 해양구조물에 대한 유탄성 운동해석

이호영 · 신현경
울산대학교 수송시스템공학부

Hydroelastic Responses of a Very Large Floating Structure in Time Domain

HO-YOUNG LEE AND HYUNKYUONG 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, 류막 베타 방법, Hydroelastic responses 유탄성운동, FEM 유한요소법

ABSTRACT: This paper is transient motions of a very large floating structure subjected to dynamic load induced by wave. A time domain method is applied to the hydroelasticity 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 the memory effect. The present method is applied to hydroelastic response analysis in regular waves and impact responses due to dropping aircraft.

1. 서 론

최근에 초대형 부유식 해양구조물은 해상 공항으로 이용될 가능성이 매우 크며 일본에서 길이 1km의 구조물을 제작하여 실증실험을 행하고 있다. 구조물의 운동 응답은 전적으로 유탄성 현상이며, 구조물이 커지면 운동해석을 하기 위해 요소수도 커지고 당연히 그로 인하여 운동의 자유도가 커진다. 지금까지 유탄성 문제를 해석하기 위해 많은 노력이 이루어 졌지만, 대부분 주파수 영역에서 해석되었다. 주파수 영역의 해석은 운동과 외력이 규칙적(sinusoidal)인 경우에 적용할 수 있으나, 충격력이 작용할 경우에는 적용하기 어렵다. 예를 들어 비행기가 구조물 위에 이착륙한다든지 혹은 충돌하는 경우처럼 충격력이 작용할 경우에 반드시 시간영역 해석법이 적용되어야 한다.

Endo 등은 비행기가 이착륙하는 경우에 대하여 충격력에 대해 실험을 행하고 동시에 수치 해석을 하였다(Endo and Yago, 1999). 그들의 해석 방법은 압력분포법과 유한요소법을 사용하여 주파수 영역에서 부가질량, 감쇠계수와 파 강제력을 계산하고, 충격 응답함수를 이용한 시간영역 해석을 하였다.

Ohmatsu는 구조물의 응답은 주파수 응답함수와 충격 응답함수의 곱(convolution) 적분으로부터 얻어진 시간 영역 해석법을 사용하였다(Ohmatsu, 1999). 그는 수직 충격력을 움직이는 물체의 실험결과와 비교하여 그의 해석법이 유효함을 입증하였다.

본 논문은 규칙파중에서 초대형 해양구조물이 운동할 경우와 비행기가 구조물에 충돌할 경우에 대하여 기억효과 함수를 사용하여 계산하였다. 구조물은 수백개의 요소수로 나누어서 동

유체력을 계산하였고, 시간영역에서 운동방정식의 자유도는 구조물의 요소 수에 의해 정의되는 방법을 사용하였다. 기억효과 함수를 계산하기 위해 주파수 영역의 해석법을 사용하였고, 본 시간 영역 해법을 주파수 영역의 계산과 비교하여 유효성을 검토하였다(신과 이,1996).

2. 해석방법

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

초대형 부유식 해양구조물은 다수의 부체로 구성된다고 생각하면 구조물에 대한 운동 방정식은 다음과 같다.

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

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

where, M ; mass matrix, A ; added mass matrix
 B ; damping matrix, C ; static restoring matrix
 K ; stiffness matrix

위에서 R_{ij} 은 기억효과 함수이고, F_{wi}, F_{fi} 는 1차 파 강제력과

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 및 종운동을 나타내고, 1/4은 구조 요소수로 치환하기 위해 필요하다(신과 이, 1999). 방정식의 자유도 수는 요소 수에 의해 좌우된다. (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 합수를 계산하기 위해 부가질량과 감쇠계수의 값은 모든 주파수에 대해 계산되어야 하나 고주파수에서는 계산이 실행 될 수 없다. 그래서 본 논문은 감쇠계수와 부가질량이 0에 가까운 고주파수까지 계산하고 나머지 부분은 0으로 치환하였다.

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

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

(4)에서 운동방정식은 각 시간 단계에서 수치 적분 기법을 사용함으로 계산되며, 본 논문에서 아래와 같이 뉴마크-베타(Newmark- β) 방법을 사용하였다(Bathe, 1982).

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

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

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

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

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

과 강제력, F_{wi} 은 주파수 영역에서 계산한 값을 이용하여 다음과 같이 계산하였다.

$$F_{wi}(t) = \text{Re}[\zeta f_{wi}(\omega) e^{i\omega t - \varepsilon}] \quad (9)$$

$$f_{wi}(\omega) = \rho (i\omega)^2 \iint_{S_u} (\varphi_I + \varphi_D) n_i ds \quad (10)$$

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

ζ ; wave amplitude, ε ; phase angle
 S ; body surface k_0 ; wave number
 θ ; heading angle ω ; wave angular frequency

φ_I 와 φ_D 는 입사파 포텐셜 및 산란 포텐셜이다. (5)에서 불규칙파 상태에서 계산할 경우에는 각각의 주파수의 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

운동 방정식 (8)의 해를 계산하기 위해 주파수 무한대에서 부가질량과 감쇠계수를 주파수 응답함수로 계산해야 한다. 본 논문은 저자들이 개발한 주파수 영역 계산 프로그램을 이용하여 유체력 계수를 구하였다(신과 이, 1999).

본 계산은 유체력을 계산하기 위해 60×12 요소로 분할하고, 구조물의 운동응답 계산은 30×6 요소로 분할하였다. 입사 파고는 균등하게 1m 로 고정시켜 계산을 진행하였다.

부가질량 계수 및 조파 감쇠계수의 주파수응답함수로서 얻어진 계산 결과를 Fig.1, Fig.2에서 나타내었다. 그림의 B(i,j)에서 i, j는 절점 번호를 나타내고, 원 주파수가 2.5가 넘으면 계산을 행하지 않았다. 물론 요소 수를 많게 하면 주파수를 크게 할 수 있고, 계산 정도는 향상된다. Fig.2는 주파수 무한대에서 부가질량 계수를 도시하였다. 그림으로부터 부가질량 값은 구조물 배수량의 0.86배로 계산되었다.

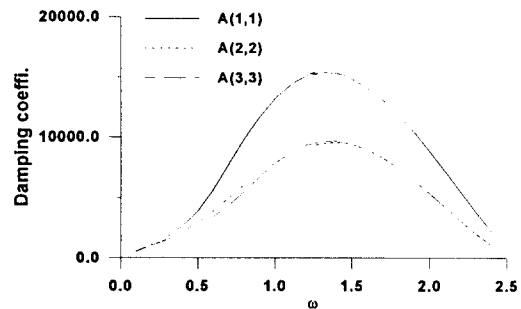


Fig. 1 Damping coefficient

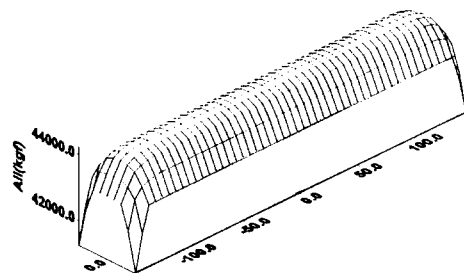


Fig. 2 Added mass coefficient(A(∞))

Fig.3은 $\lambda/L=0.2$, 파입사각 0°에서 구조물의 길이 방향으로 시

간영역 계산결과와 주파수영역의 계산결과를 서로 비교하고 있다(신과 이, 1999). 그림으로부터 알 수 있듯이 시간영역과 주파수 영역의 계산결과가 모두 3절 진동의 형태를 보여주고 있다. 또한 시간영역에서 결과가 파하측 부근을 제외하고 주파수 영역의 결과와 잘 일치하고 있고, 이로부터 본 계산이 유효함을 알 수 있다.

Fig.4은 $\lambda/L=0.2$, 파입사각 0° 에서 시간에 따른 운동을 3차원적으로 도시하였다. 그림은 2주기에서 3주기 사이의 구조물의 운동을 보여주고 있다.

Fig.5는 $\lambda/L=0.2, 0.5$ 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.

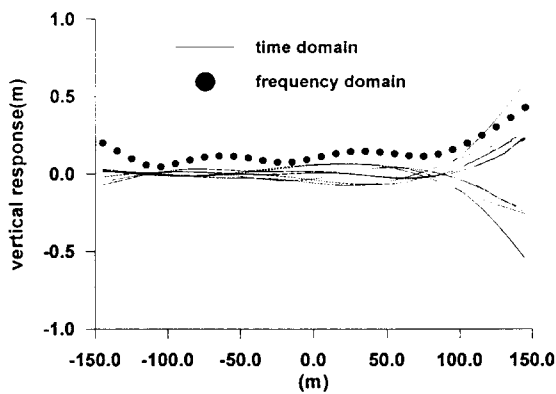


Fig. 3 Distribution of vertical displacement amplitude

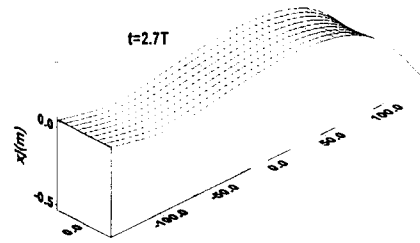
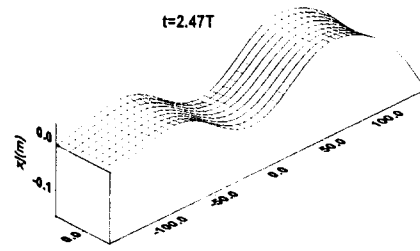
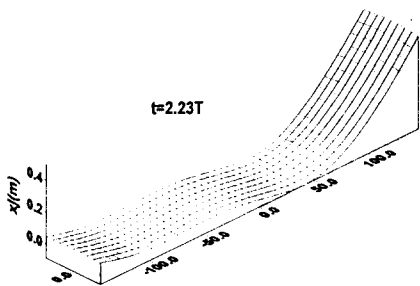
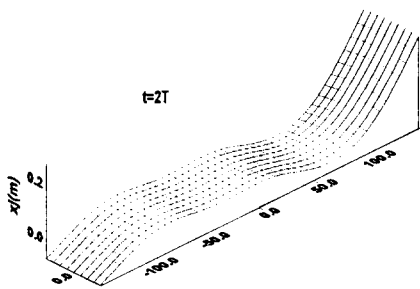


Fig. 4 Distribution of vertical displacement by waves

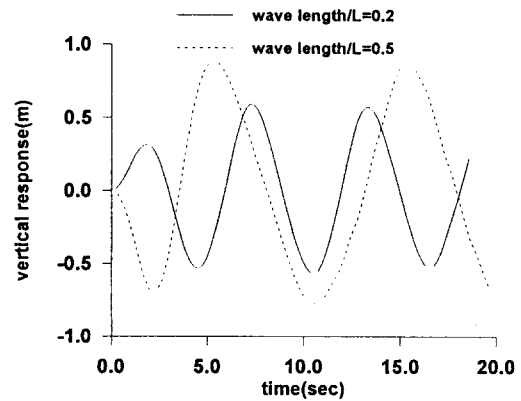


Fig. 5 Time configuration of vertical responses($x=L/2$)

항공기의 충돌 문제를 계산하기 위해 초대형 부유식 해양구조물에 충돌하는 힘은 Table 2에 나타내었다(다카라다 나오노스케, 1995). 참고 문헌의 공항 크기는 5km이므로, 본 계산의 공항의 크기(300m)에 맞게 충격력의 값을 척도 비에 맞게 수정하였다.

Table 2 Conditions of aircraft collision

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

Fig.6은 항공기가 구조물의 중앙 점($x=0, y=0$)에 충돌한 경우

에 대해 운동응답을 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 계속 지속되는 것을 알 수 있다.

초기상태에 구조물이 파도에 의해 대략 1주기 정도 운동하여 정상상태에 도달했을 때 항공기가 갑자기 충돌할 경우, 충돌시간은 6~7sec동안에 일정하게 작용한다고 하였다. 그림으로부터 항공기의 충돌에 의한 운동보다 파도에 의한 운동이 지배적인 것을 알 수 있다.

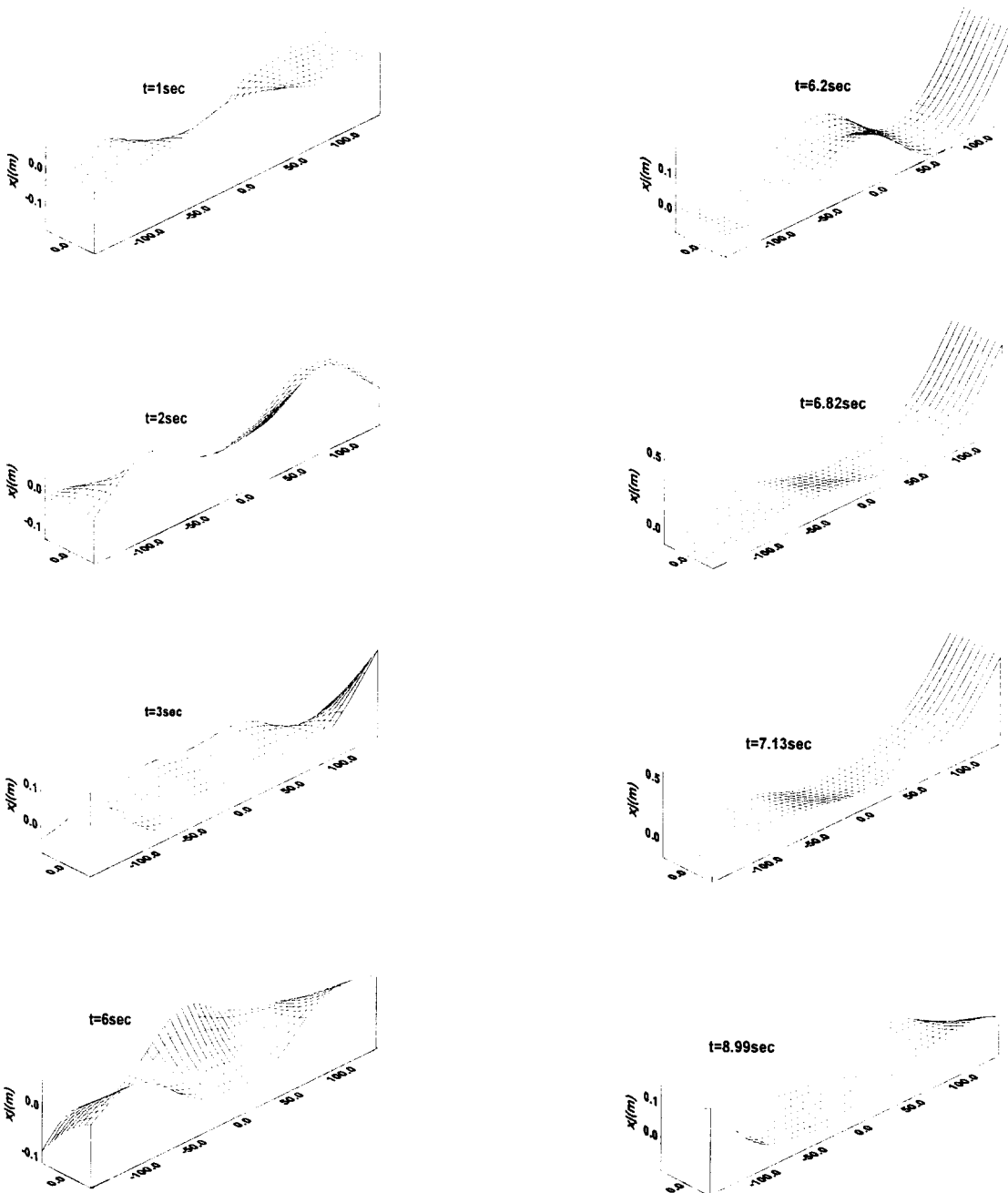


Fig. 6 Distribution of vertical displacement amplitude by airplane collision

Fig.7, Fig.8은 $\lambda/L=0.2$, 파 입사각 0° 에서 구조물이 운동하고 있을 때 항공기가 갑자기 충돌할 경우에 대해 운동응답과 굽힘 모우멘트를 시간에 따라 도시하였다.

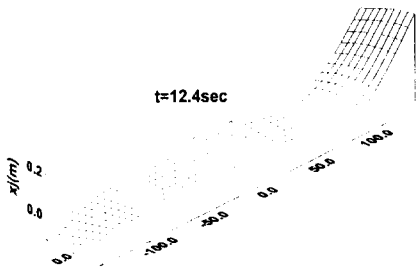


Fig. 7 Distribution of vertical displacement amplitude by waves and airplane collision

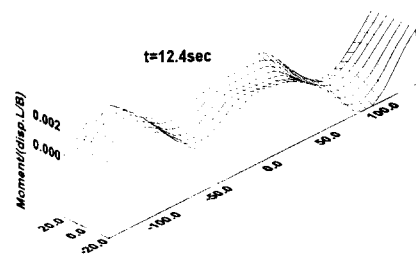
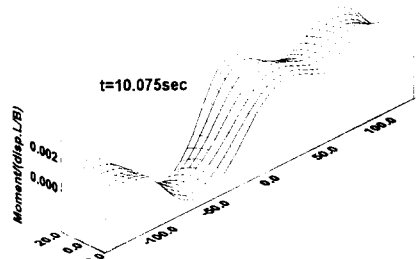
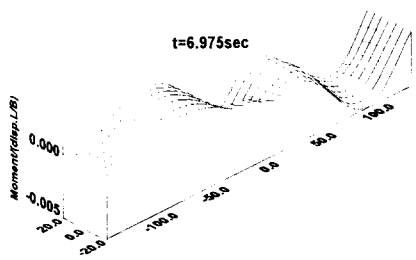


Fig. 8 Distribution of bending moment by waves and airplane collision

4. 결 론

본 연구는 주파수 영역에서 소오스-다이폴 분포법과 유한요소법을 사용하여 유체력을 계산하였다. 주파수 영역의 계산으로부터 기역효과함수를 계산하고, 시간영역에서 초대형 부유식 해양구조물의 유탄성 응답을 해석하여 다음 결론을 도출하였

다.

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

참 고 문 헌

다카라다 나오노스케(1995). "(초대형) 부유식 해양구조물에 대한 기술 평가의 일례", OSURP역.

신현경, 이호영(1999). "초대형 부유식 해양구조물에 대한 유탄성 해석", 한국해양공학회 추계연구발표회, 한국해양대학교.

Bathe, K.J.(1982). "Finite Element Procedures in Engineering Analysis", Prentice-Hall.

Cummins, WE(1962). "The Impulse Response Function and Ship Motions", Schifftechnik Bd, pp 101~109.

Endo, H.(1999). "The Behavior of an Airplane Taking Off from and Landing on a VLFS in Rough Sea Condition", VLFS'99, Hawaii, Vol.I, pp 212~219.

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