

초대형 부유식 해상공항의 파도에 의한 진동응답특성 해석

이 현 업* · 전 영 기** · 신 현 경***
(96년 7월 30일 접수)

Analysis of Wave Induced Vibration of a Typical Very Large Floating-Type Offshore Airport Platform

Hyun-Yup Lee* · Young-Ki Jeon** · Hyun-Kyung Shin***

Key Words : Very Large Floating-type Offshore Structures(초대형 부유식 해양구조물), Offshore Airports(해상공항), Wave Induced Vibration(파도유기진동), Vibration Analysis(진동해석), Modal Analysis(모달해석)

Abstract

The vibration due to progressive ocean waves is analyzed for a typical footing-type offshore airport platform. The platform is modelled as a spring-supported Euler beam and buoyancy change due to wave is considered as excitation force, under the assumption that the wave propagates without distortion by the structure. The results show that the natural frequencies of this structure are distributed very closely and are little affected by boundary conditions and that the response characteristics due to ocean waves are quite different according to the wave frequency. In this study, the wave frequencies are divided into three regions; the resonance region at which the response is governed by the resonance between the natural mode at the wave frequency and the corresponding modal component of the wave excitation force, the bending governed region at which the response is governed by the bending stiffness, and the spring(buoyancy) governed region at which the response is governed by the spring constant and therefore is same as the incident wave form.

1. 서론

최근 환경보호 및 심해개발 등의 이유로 부유식 해양구조물에 대한 관심이 높아지고 있으며, 특히

육지면적이 부족한 우리나라나 일본에서는 초대형 부유식 해양구조물에 대한 관심 또한 높다. 최근 일본에서는 마린플로트 추진기구, 메가플로트 기술연구조합 등을 구성하여 부유식 해상공항과 같

* 홍익대학교 조선해양공학과
** 한국선급
*** 울산대학교 조선 및 해양공학과

은 초대형 해양구조물의 개발에 대해 활발한 연구를 수행하고 있다. 그러나, 아직 실제로 제작한 경험은 전혀 없다.

본 연구는 한국과학기술처의 특정연구사업으로 개발 중인 footing-type의 부유식 해상공항¹⁾에 대해, Fig. 1 과 같이 초기치수가 결정된 상태에서 그 진동특성을 파악하고자 수행되었다. 초대형 부유식 해상공항에 대해서는 아직 제작 경험이 전혀 없으므로, 적합한 진동해석 기법의 개발이 필요하며 진동에 대한 검토가 초기설계 때 부터 반영되어야 한다. 이에 관한 연구로는 일본에서 발표된 논문²⁾들은 있으나, 국제적인 학술지에 발표된 논문은 별로 없는 실정이다.

본 연구에서는, Fig. 1의 5Km X 1Km 부유식 해상공항에 대해 균일분포스프링으로 지지된 균일한 Euler보로 모델링하여 고유진동해석과 파도에 의한 진동응답해석을 수행하였다. 파도에 의한 기진력으로는 파도가 구조물에 의해 변형없이 진행된다고 가정하고, 부력변화에 의한 기진력만을 고려하여 주파수응답 특성을 검토하였다. 이 기진력은 진행하는 분포하중인데, 2.2절에 이 하중을 두 개

의 standing wave의 합으로 표현한 후 모달해석을 통하여 강제진동해석을 하는 기법을 설명하였다.

일반적으로 경계조건은 고유진동수를 결정하는 중요한 요인이 된다. 그러나, 3.2절에서 설명하듯이 본 해상공항의 경우 경계조건에 의한 영향이 그다지 크지 않다. 따라서, 본 연구에서는 경계조건을 가장 간단한 양단 단순지지로 하여 계산을 수행하였고 그 결과에 대해 검토하였다.

2. 이론적 모델 및 진동해석

2.1 고유진동해석

정수 중에서 해양구조물이 상하진동을 하게되면 상하변위에 비례하는 부력의 변동을 받게 된다. 본 연구에서는 이 영향을 스프링으로 모델링하였고, 구조물은 오일러 보로 모델링하였다. 즉, Fig. 1의 해상공항에 대해 Fig. 2와 같이 스프링으로 지지된 Euler보로 모델링하였으며, 이에 대한 운동방정식은 다음과 같이 표현된다³⁾.

$$m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + K y = 0 \quad (1)$$

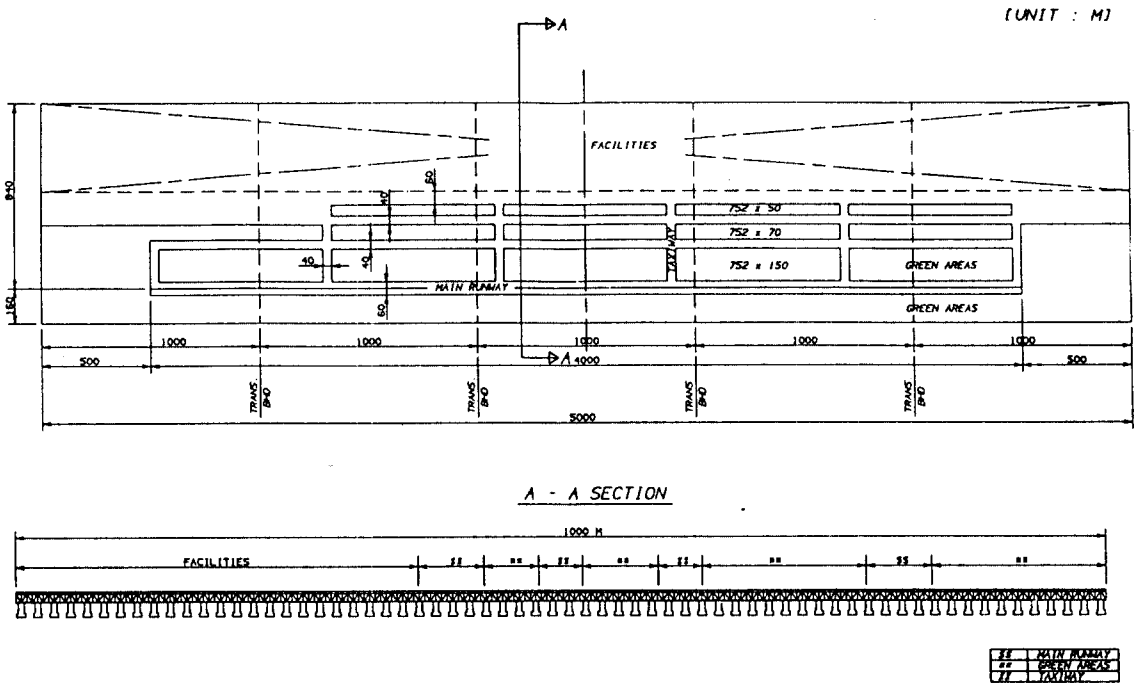


Fig. 1 Schematic Diagram of the Very Large Floating-type Offshore Airport

$$m = m_s + m_a \quad (2)$$

m_s : 단위길이당 구조물 질량

m_a : 단위길이당 부가질량

y : 보 중심선의 상하방향 변위

E : Young's Modulus

I : 단면의 면적 2차 모멘트

K : 부력에 의한 단위길이당 스프링 상수

이 식의 해(자유진동형)를

$$y = X(x) e^{i\omega t} \quad (3)$$

로 가정하여 식(1)에 대입한 후 경계조건을 대입하여 특성치 문제(Eigen-value problem)를 풀어서, 다음과 같은 고유진동모드(X_n)와 고유진동수(ω_n)를 결정한다.

$$X_n = C_1 \cos \alpha_n x + C_2 \sin \alpha_n x + C_3 \cosh \alpha_n x + C_4 \sinh \alpha_n x \quad (4)$$

$$\omega_n^2 = \frac{K + EI\alpha_n^4}{m} \quad (5)$$

여기서 α_n 은 경계조건과 물성치에 의해 결정되는 특성치다.

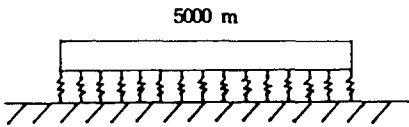


Fig. 2 The Simplified Analytical Model

2.2 강제진동해석

해양구조물에 파도가 입사되면 부력의 변동은 수면의 변위(η)와 구조물의 변위의 차에 비례하게 된다. 따라서, regular wave가 구조물의 길이 방향으로 입사될 때 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + c \frac{\partial y}{\partial t} + EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + K(y - \eta) = 0 \quad (6)$$

$$\eta = H \sin(kx - \omega t) \quad (7)$$

$$m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + c \frac{\partial y}{\partial t} + EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + Ky =$$

$$\text{Real}[KH \sin kx e^{i\omega t}] + \text{Imag}[-KH \cos kx e^{i\omega t}] \quad (8)$$

여기서, c 는 운동에 의한 감쇠계수이고, H , k , ω 는 각각 파도의 진폭, wave number, 주파수이다. 식(8)의 우변은 진행파를 삼각함수로 전개하여 두개의 standig wave 형태로 분해한 것인데, 각 항에 대한 해는 일반적인 모달해석⁴⁾를 이용하여 구할 수 있다. 식(8)의 해는 다음과 같이 각 항에 대한 해를 합함으로서 구한다.

$$y(x, t) = y_1(x, t) + y_2(x, t) \quad (9)$$

첫 항에 대한 해 y_1 과 둘째항에 대한 해 y_2 는 다음 식과 같이 식(4)의 고유진동모드의 합으로 표현된다.

$$y_1 = \sum_{n=1}^{\infty} \text{Real} [\phi_{1,n} X_n e^{i\omega t}] \quad (10)$$

$$y_2 = \sum_{n=1}^{\infty} \text{Imag} [\phi_{2,n} X_n e^{i\omega t}] \quad (11)$$

$$\phi_{1,n} = \frac{KH \int_0^l \sin kx X_n dx}{m(\omega_n^2 - \omega^2 + 2i\zeta_n \omega_n \omega) \int_0^l X_n^2 dx} \quad (12)$$

$$\phi_{2,n} = \frac{KH \int_0^l \cos kx X_n dx}{m(\omega_n^2 - \omega^2 + 2i\zeta_n \omega_n \omega) \int_0^l X_n^2 dx} \quad (13)$$

여기서, ζ_n 은 n 번째 모드의 임계감쇠에 대한 감쇠비이고, l 은 보의 길이이다.

3. 양단 단순지지의 경우에 대한 계산 결과 및 고찰

일반적으로 경계조건은 고유진동수를 결정하는 중요한 요인이 된다. 그러나, 3.2절에서 설명하듯이 본 해상공항의 경우 경계조건에 의한 영향이 그다지 크지 않다. 따라서, 본 연구에서는 경계조

건을 가장 간단한 양단 단순지지로 하여 계산을 수행하였고 그 결과에 대해 검토하였다. 3.3절에서는 파도가 해상공항의 길이 방향으로 입사될 때, 파도가 구조물에 의해 변형없이 진행된다고 가정하고 부력변화에 의한 기진력만을 고려하여 구조물의 진동응답특성을 검토하였다.

3.1 입력자료

Fig. 1의 해상공항에 대한 입력자료를 Table 1에 정리하였다. 총중량, 수선면적, 단면의 면적2차모멘트는 참고문헌¹⁾의 결과를 사용하였다.

Table 1 The Principal Dimensions and Input Parameters

E	2.07×10^{11} N/m ²
ρ	1,025 Kg/m ³
Length	5,000 m
Bredth	1,000 m
Depth	10 m
Total Weight	5.96×10^9 Kgf
Waterline Area	4.67×10^5 m ²
m_s	1.20×10^6 Kg/m
m_a	6.83×10^5 Kg/m
EI (Bendig Stiffness)	5.88×10^{14} Nm ²
K	9.38×10^5 N/m ²

부력에 의한 스프링상수(K)는 다음과 같이 수선면적(A_w)으로부터 구하였다.

$$K = \frac{\rho g A_w}{l} \quad (14)$$

여기서 ρ 는 해수의 밀도이며, l 은 보의 길이이다.

구조물의 단위길이당 질량은 총중량을 길이로 나눈 값이며, 해상공항의 상하운동에 의한 부가질량은 6.5m-홀수 10초-주기에 대해 한국선급의 소오스 분포기법 전산프로그램을 이용하여 구한 결

과이다. 상하운동에 의한 부가질량은 일반적으로 주파수의 함수가 되는데, 본 해상공항 경우 주기를 1초 부터 20초 까지 변화 시키면서 계산하여 본 결과 모두 4% 이내의 차이를 보였다. 따라서 본 연구에서는 주파수에 따른 부가질량의 변화를 무시하고 일정한 값을 사용하였다.

3.2 고유진동해석 및 고찰

균일 분포 스프링 위의 양단 단순지지된 균일 오일러 보에 대한 고유진동모드와 고유진동수는 다음과 같다³⁾.

$$X_n = \sin \frac{n\pi x}{l} \quad (15)$$

$$\omega_n^2 = \frac{K}{m} \left(1 + \frac{n^4 \pi^4 EI}{Kl^4} \right) \quad (16)$$

계산결과로서, 차수에 따른 상하고유진동수를 Fig. 3에 나타냈다. 1차 고유진동수는 0.113Hz 이며, 5,6차까지는 고유진동수의 변화가 거의 없다. 이것은 본 해상공항의 길이가 깊이에 비해 매우 길어서 절수가 낮은 진동에서는 구조물의 굽힘에 의한 탄성력이 작으므로, 부력에 의한 탄성력에 비해 무시될 수 있기 때문이다. 즉, 식(16) 우변의 두째 항이 무시될 수 있기 때문이다. 그러나, 그 이상의 고차진동에서는 고유진동수도 높아지는데, 이것은 절수가 커질수록 굽힘에 의한 탄성력은 커지므로 그 영향이 나타나기 때문이다.

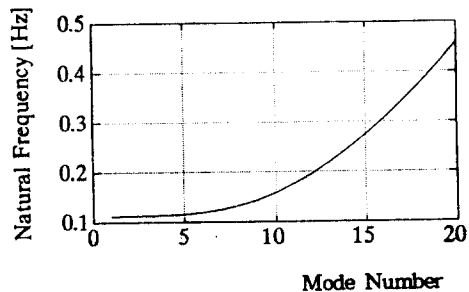


Fig. 3 Natural Frequencies

일반적으로 경계조건은 저차 고유진동수에 큰

영향을 미치고, 고차일수록 경계조건의 영향은 작아진다. 그러나 본 해상공항의 저차진동에서는 부력에 의한 탄성력이 지배적이므로 보의 경계조건에 의한 영향은 작게 된다. 즉 본 해상공항의 경우 경계조건을 달리 하더라도, 고유진동수의 변화는 미미하게 된다. 따라서, 본 연구에서는 해석이 가장 손쉬운 양단 단순지지에 대해 해석을 수행하였다.

3.3 강제진동해석 및 고찰

3.2절의 고유진동모드와 고유진동수를 이용하면, 파도에 의한 응답, 식(8)의 해는 다음과 같이 표현된다.

$$y(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \phi_n \sin \frac{n\pi x}{l} \quad (17)$$

$$\phi_n = \text{Real}[\phi_{1,n} e^{i\omega t}] + \text{Imag}[\phi_{2,n} e^{i\omega t}] \quad (18)$$

여기서, ϕ_n 은 식(12),(13)로부터 결정되는데, 그 결과는 다음과 같다.

$$\phi_n = \frac{2KH}{ml} \left[\frac{\sin\left(\frac{kl+n\pi}{2}\right) \cos\left(\frac{kl+n\pi}{2} - \omega t + \theta_n\right)}{k+n\pi/l \sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + 2\xi_n \omega_n \omega}} - \frac{\sin\left(\frac{kl-n\pi}{2}\right) \cos\left(\frac{kl-n\pi}{2} - \omega t + \theta_n\right)}{k-n\pi/l \sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + 2\xi_n \omega_n \omega}} \right] \quad (19)$$

$$\theta_n = \tan^{-1} \frac{2\xi_n \omega_n \omega}{\omega_n^2 - \omega^2} \quad (20)$$

심해에서 파도의 주파수와 wave number와의 관계는 다음과 같다.

$$k = \frac{\omega^2}{g} \quad (21)$$

또한, 파도가 해상공항의 길이 방향으로 입사될 때 구조물의 응답은 파도와 같은 주파수와 wave number를 갖는다고 가정하여, 관성력과 굽힘력의 크기를 스프링력에 대한 상대적 크기를 Fig. 4에 나타내었다. 스프링력과 굽힘력은 0.04Hz에서 같아지며, 스프링력과 관성력은 3.2절에서 설명하였

듯이 1차 고유진동수인 0.113Hz에서 같아진다. 본 연구에서는 주파수영역을 0.04Hz와 0.113Hz를 기준으로 세 구간으로 나누어 고찰하여 보았다.

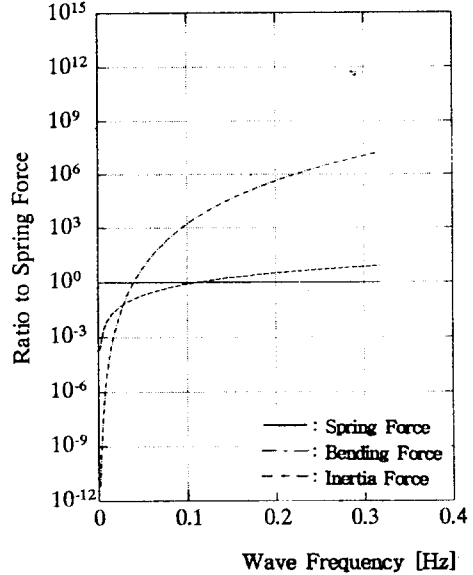


Fig. 4 Relative Magnitudes of the Terms in Equation (8)

3.3.1 부력이 지배적인 영역

Fig. 4에서 스프링력과 굽힘력이 같아지는 0.04Hz 보다 낮은 주파수의 파도에 대해서는, 스프링력이 지배적이 된다. 즉, 주기가 25초 보다 긴 파도에 대해서는 식(8)은 근사적으로 다음과 같이 표현된다.

$$K y = KH \sin(kx - \omega t) \quad (22)$$

예로써 0.02Hz의 1m 진폭의 파도에 대하여, 주기를 4등분하여 각각의 시간에서 식(17)의 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 진동파형은 파도의 모양을

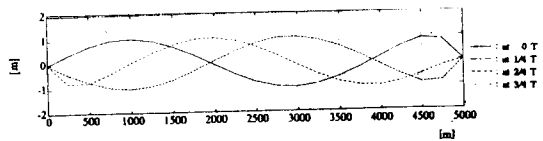


Fig. 5 Response due to 0.02Hz Wave(H=1m, 1% damping)

따라 비슷하게 진행하는데 양단근처에서 변형됨을 볼 수 있다. 이 식의 해는 양단에서의 경계조건을 만족시켜야 하므로, 양단근처에서만 파도의 파형과 달라지고, 중앙부에서는 비슷하게 된다.

3.3.2 굽힘력이 지배적인 영역

Fig. 4에서 스프링력과 굽힘력이 같아지는 0.04Hz 파 스프링력과 관성력이 같아지는 0.113Hz 사이에서는 굽힘력이 지배적이 된다. 즉, 주기가 25초에서 9초 사이의 파도에 대해서는 식(8)은 근사적으로 다음과 같이 표현된다.

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = KH \sin(kx - \omega t) \quad (23)$$

예로써 0.0796Hz의 1m 진폭의 파도에 대하여, 주기를 4등분하여 각각의 시간에서 식(17)의 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 응답은 파도의 파형을 따라 비슷하게 진행하는데, 양단근처에서 변형됨을 볼 수 있다. 또한 경계조건의 영향이 적은 중앙부에서의 진폭은 0.0038m로 KH/EIk^4 에 근사한 결과를 준다.

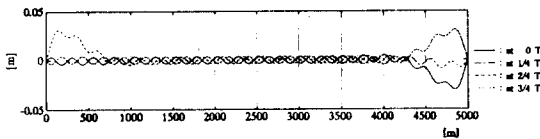


Fig. 6 Response due to 0.0796Hz Wave(H=1m, 1% damping)

3.3.3 동적 영역

3.2절에서 설명하였듯이 고유진동수들은 매우 좁은 간격으로 분포된다. 따라서, Fig. 4에서 스프링력과 관성력이 같아지는 0.113Hz(1차 고유진동수) 근처나 그 이상의 주파수를 갖는 파도에 의한 응답은 공진모드가 지배적으로 된다. 즉 응답의 주성분은 파도의 파형보다는, 파도의 주파수에 해당하는 공진모드이다. 이 경우 감쇠가 응답의 크기를 결정하게 된다.

예로써 0.1667Hz(주기 6초)의 1m 진폭의 파도에 대하여 1% 감쇠비를 주고, 주기를 4등분하여 각각

의 시간에서 식(17)의 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 앞의 두 경우와는 달리, 응답은 파도의 파형과는 전혀 다르다. 즉 10차와 11차의 고유진동수가 각각 0.15833Hz와 0.17555Hz인데 이들 모드가 응답의 주성분이 된다.

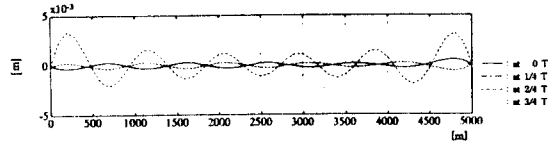


Fig. 7 Response due to 0.1667Hz Wave(H=1m, 1% damping)

파도가 해상공항의 길이 방향으로 입사되는 경우에는, 파도의 주파수에 해당하는 공진모드와 파도의 파형과는 큰 차이가 난다. 예를 들면 0.1667Hz의 파도는 10차와 11차 진동과 공진을 일으키는데, 이 파도의 파장은 56m로 10차진동의 파장(1000m)이나 11차 진동의 파장(909m)과는 큰 차이가 난다. 따라서 파도의 파형 중 공진모드에 해당하는 모달 성분(식(12),(13)의 분자)의 크기가 작으므로, 공진모드가 응답의 주성분이기는 하지만 큰 응답이 유발되지는 않는다.

4. 결 론

본 연구에서는 footing type의 초대형 부유식 해상공항에 대해, 분포스프링으로 지지된 Euler-보로 모델링하여 파도에 의한 부력변화에 따른 진동해석을 수행하였다. 해석결과는 다음과 같다.

본 해상공항은 초대형이기 때문에, 굽힘력은 상당한 고차가 되기 전에는 부력 변화를 나타내는 스프링력보다 상대적으로 작다. 따라서, 경계조건이 고유진동수에 미치는 영향은 크지 않으며, 또한 그 차수까지의 고유진동수는 질량과 스프링 상수에 의해 결정되며 별 변화가 없다. 따라서, 진동특성을 결정하는 가장 중요한 설계인자는 스프링 상수를 결정하는 수선면적이다

본 해상공항의 경우, 파도의 주파수가 구조물의

기본고유진동수인 0.113Hz 이하에서는 응답이 부력에 의해 지배되는 영역과 굽힘력에 의해 지배되는 영역으로 나눌 수 있다. 파도의 주파수가 기본고유진동수보다 높을 경우에는 공진을 피할 수 없게 되는데, 파도가 구조물의 길이 방향으로 입사되는 경우에는 파도의 주파수에 의해 공진되는 모드의 파장이 파도의 파장보다 매우 작으므로 공진되는 모달성분이 크지는 않다.

파도가 해상공항의 길이 방향과 각도를 갖고 입사될 때에는, 1차원 보 해석으로는 해석이 곤란하며 적어도 2차원 판 해석이 요구된다. 본 연구에서는 보의 경계조건을 양단 단순지지로 처리하였으며, 또한 파도가 구조물에 의해 변형없이 진행된다 가정하에 부력변화에 의한 기진력만 고려하였다. 추후 상세한 구조해석모델로 계류시스템을 포함한 경계조건과 보다 현실적인 유체력에 대한 해석이 필요하다.

후 기

본 연구는 한국과학기술처에서 시행한 특정연구개발사업중 '96 국제공동연구사업(울산대학교와 일본선박기술연구소)의 연구결과이다.

참고문헌

- 1) 울산대학교, "부유식 해양구조물에 관한 연구-2 차년도 보고서", 과학기술처 연구보고서, 1995
- 2) Suzuki, H. and Yoshida K., "A consideration on the Dynamic Behavior and the Structural Design of Large Scale Floating Structures", 일본조선학회지, 제178호, 1995
- 3) 이량, 김극천, 이낙주, 차종희 역, "공업진동학", 동명사, 1975
- 4) Meirovitch, L., "Analytical Method in Vibrations", Macmillan & Co., 1967