

파랑하중을 받는 부유식 구조물의 동적거동에 대한 주파수영역 해석 Frequency Domain Analysis for Dynamic Response of Floating Structures Subject to Wave Loading

권장섭* · 백인열** · 박정일*** · 장승필****

Jang Sub Kwon*, In Yeol Paik**, Jung Il Park*** and Sung Pil Chang****

요 지 : 부유체 및 부유식 교량과 같은 부유식 구조물이 파랑하중에 대하여 나타내는 동적거동을 주파수영역에서 구하는 연구를 수행하였다. 먼저, 부분적으로 유체에 잠겨 파랑하중의 작용을 받는 부유체에 대하여, 이의 강체운동과 관련된 동유체력계수인 부가질량, 감쇠 및 파강제력을 선형포텐셜이론과 경계요소법을 이용하여 주파수영역에서 산정한다. 다음으로, 부유식 교량과 같이 앞에서 구한 부유체로 지지되며 유한요소법을 이용하여 모델링되는 부유식 구조물에 대하여, 이의 동적거동에 관한 운동방정식을 수립한다. 동유체력계수들이 주파수 의존적 성질을 가지므로 해석은 주파수영역에서 수행한다. 적용 예제로서 반구와 같은 부유체를 이용하여 해석결과를 문헌과 비교 검증한 후, 부유식 교량을 지지하는 폰툰형 부유체에 대한 동유체력계수들을 구하고, 이를 이용하여 설계 파랑하중을 받는 부유식 교량의 동적 거동해석을 수행한다. 해석 예제를 주파수영역에서 해석한 결과 입사파 스펙트럼의 피크 주파수와 교량의 고유진동수가 가까워 응답이 증폭될 소지가 있었으나 주파수 의존적인 파강제력의 피크가 벗어난 영향으로 응답이 증폭되지 않음을 알 수 있다.

핵심용어 : 파랑하중, 부유체, 부유식교량, 주파수영역 해석, 선형 포텐셜이론, 경계요소법

Abstract : Dynamic response of floating structures such as floating body and floating bridges subject to wave load is to be calculated in frequency domain. Added mass coefficient, damping coefficient and wave exciting force are obtained numerically from frequency domain formulation of linear potential theory and boundary element method for a floating body which is partially submerged into water and subjected to wave force. Next, the equation of motion for the dynamic behavior of a floating structure which is supported by the floating bodies and modeled with finite elements is written in frequency domain. After a hemisphere is analyzed and compared with the published references as examples of floating bodies, the hydrodynamic coefficients for a pontoon type floating body which supports a floating bridge are determined. The dynamic response of the floating bridge subject to design wave load can be solved using the coefficients obtained for the pontoons and the results are plotted in the frequency domain. It can be seen from the example analysis that, although the peak frequency of the incoming wave spectrum is near the natural frequency of the bridge, the response of the bridge is not amplified due to the effect that the peak frequency of wave exciting force is away from the natural frequency of the bridge.

Keywords : wave load, floating body, floating bridge, frequency domain analysis, linear potential theory, boundary element method

*특허청 건설기술심사담당관실(Corresponding author: Jang Sub Kwon, Civil Eng. & Architecture Exam. Div., Korean Intellectual Property Office, Daejeon 302-701, Korea. triad5@paran.com)

**경원대학교 토목환경공학과(Department of Civil and Environmental Engineering, Kyungwon University, Songnam, Kyunggi-Do 461-701, Korea)

***서울대학교 지구환경시스템공학부(School of Civil, Urban & Geosystem Engineering, Seoul National University)

****서울대학교 지구환경시스템공학부(School of Civil, Urban & Geosystem Engineering, Seoul National University)

1. 서 론

부유식 구조물은 강이나 호수, 해안에서 깊은 수심, 연약한 지반 등으로 인하여 고정식 구조물을 설치하기가 곤란한 곳에 설치되어 육상에서와 같은 구조물의 기능을 발휘할 수 있는 구조형식이다. 대표적인 부유식 구조물로는 부유식 교량(floating bridge)을 들 수 있으며, 또한, 각종 공장을 그 위에 건설하여 해상에 띄워 가동하는 대형 플랫폼(Barge Mounted Platform, BMP), 해저 지하자원 발굴을 위한 인장각 플랫폼(Tension Leg Platform, TLP) 등을 꼽을 수 있다.

부유식 구조물은 주로 콘크리트나 강재로 만들어진 대형 부유체(floating body, pontoon)를 중심으로 하고 부유체의 막대한 부력과 보조 케이블, 부유체를 연결하는 상부구조의 강성 등을 이용하여 부유체에 작용하는 고정하중과 활하중을 지탱하는 구조로 되어 있다. 부유체에 작용하는 환경하중으로는 파랑하중, 풍하중, 차량하중, 지진하중 등이 있으며, 본 논문에서는 이 중 부유체에 작용하는 가장 주된 하중인 파랑하중이 작용하는 경우에 대한 부유식 구조물의 동적해석을 수행하였으며, 구조물의 예로는 부유체, 케이블 및 상부구조를 복합하여 이루어진 부유식 교량을 선택하였다. 부유식 구조물의 동적응답을 구하는 해석에는 시간영역해석과 주파수영역해석이 있으나, 부유체를 둘러싼 유체로부터 추가되는 동유체력계수들이 주파수 의존성이 있으므로 이를 반영하기 위해서는 주파수영역해석이 용이하다.

부유체의 동수역학적 해석에 관한 연구문헌을 살펴보면, Newman(1985)은 3차원 일정경계요소법(constant panel method)을 사용하여 부유체의 부가질량, 감쇠계수, 선형 파강제력 등의 동유체력을 계산하였고 이를 이용하여 선형 운동 응답을 추정하였다. 일정경계요소법은 각 요소에서 물리량이 일정하다는 가정으로 인해 요소 사이에 불연속성이 발생하며 정확한 해를 얻기 위해서는 많은 요소와 이에 따른 방대한 계산이 요구된다. Liu and Kim(1991)과 Chang et al.(1992)은 다양한 부유체에 대한 동유체력 계산을 수행하여 일정경계요소법에 비해 고차경계요소법(higher order boundary element method)이 정확하고 효율적인 방법임을 확인하였다.

부유식 교량에 대한 연구를 살펴보면, 노르웨이 피요르드의 섬을 연결하는 교량에 대하여 Loken et al.(1990)은 콘크리트 폰툰과 아치형의 강재 트러스로 구성된 부유식 교량에 대한 축소 모형실험과 선형해석을 수행하였으며, Vabø

et al.(1990)은 고정하중, 차량하중, 파랑하중, 풍하중 등에 대하여 한계상태별로 하중의 상대적인 효과를 비교하였다. 미국 워싱턴 주의 호수를 가로지르는 부유식 교량에 대하여 Luft(1981)은 일정한 동유체력계수를 이용한 해석을 수행하였다.

본 연구의 목적은 부유체 및 탄성거동을 하는 상부구조로 이루어져 복잡한 동적특성을 보이는 부유식 구조물의 파랑하중에 대한 동적거동을 알아보는 것이다. 이를 위하여 설계 파랑하중을 받는 부유식 교량의 주파수영역 동적응답 해석을 수행하였다. 이때, 부유체의 강체운동과 관련된 동유체력계수인 부가질량, 감쇠 및 파강제력은 선형포텐셜이론과 경계요소법을 이용하여 산정하였으며, 부유식 교량의 상부구조와 지지 케이블은 각각 공간빔대 요소와 탄성 현수케이블 요소를 이용하여 모델링하였고, 폰툰의 강체운동으로 부력변화는 집중스프링으로 모델링하였다. 그리고, 본 연구의 부유식 구조물 해석 프로그램이 설계 및 시공의 기본 작업에 용이하게 적용될 수 있도록 입력과 출력을 그래픽으로 표현하는 전·후처리 프로그램을 개발하였다.

2. 주파수 영역 해석

2.1 부유체에 관한 지배방정식

크기가 큰 부유체에 작용하는 파력과 운동에 대한 동수역학 문제는 주로 선형 포텐셜 이론으로 다룬다(Beauchamp et al., 1981). Fig. 1에 부유체의 좌표계를 나타내었다. 파와 부유체의 운동의 크기가 부유체의 크기에 비하여 작다고 가정되기 때문에 수면과 잠긴 면에서의 경계 조건이 선형화될 수 있고, 반면에 유체는 비점성, 비압축성이며 유동

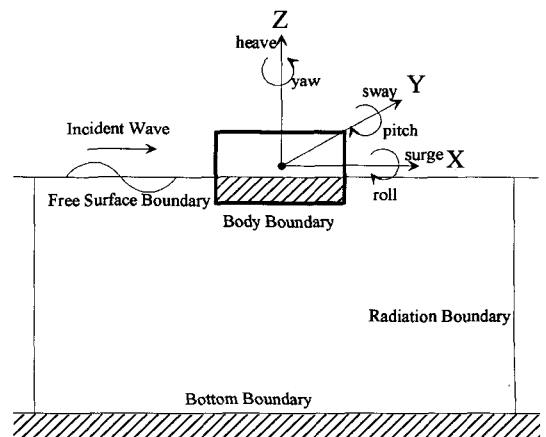


Fig. 1. Coordinate system for floating body.

은 비회전성으로서 식 (1)과 같은 속도 포텐셜 함수가 존재하고(Newmann, 1986) 부유체의 운동은 식 (2)와 같이 표현할 수 있으며, 포텐셜 함수는 식 (3)과 같이 표현하면 편리하다. 식 (4)는 입사파의 속도포텐셜이다.

$$\Phi(x, y, z, t) = \phi(x, y, z)e^{-i\omega t} \quad (1)$$

$$X_j = \zeta_j e^{-i\omega t} \quad (2)$$

$$\phi = -i\omega \sum_{j=0}^7 \phi_j \zeta_j \quad (3)$$

$$\phi_0 = \frac{1}{v} \frac{\cosh k(z+d)}{\cosh kd} e^{ik(x\cos\alpha + y\sin\alpha)} \quad (4)$$

여기서, ϕ_0 와 ϕ_7 는 각각 입사파와(incident wave) 산란파의(diffraction wave) 속도 포텐셜, ζ_0 와 ζ_7 는 입사파와 산란파의 진폭, ζ_j 는 j 모드 방향의 부유체 운동의 진폭($j=1, \dots, 6$), ϕ_j 는 j 모드 방향의 방사 포텐셜이고(radiation potential), ω 는 각주파수, $v = \omega^2/g$, g 는 중력가속도, α 는 파의 입사각, $i = \sqrt{-1}$, d 는 수심, k 는 파수(wave number)이다.

속도 포텐셜은 다음과 같은 라플라스 식을 만족해야 한다.

$$\nabla^2 \phi_j = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \phi_j = 0 \quad (5)$$

그리고, 부유체의 동수역학 문제는 식 (5)와 아래의 경계조건, 즉, 선형화된 자유표면 경계조건, 해저면 경계조건과 부유체의 잠긴 면에서의 경계조건 그리고 부유체로부터 먼 거리에서 빠져나가는 파를 규정하는 방사조건을 만족해야 한다.

$$\left\{ \begin{array}{l} -\omega^2 \phi_j + g \frac{\partial \phi_j}{\partial z} = 0, \text{ at } z = 0 \\ \frac{\partial \phi_j}{\partial z} = 0, \text{ at } z = -d \\ \frac{\partial \phi_0}{\partial n} + \frac{\partial \phi_7}{\partial n} = 0 \text{ (산란파 문제) 또는 } \frac{\partial \phi_j}{\partial n} = n_j \text{ (방사파문제),} \\ \text{at body surface} \\ \lim_{R \rightarrow \infty} \sqrt{R} \left(\frac{\partial \phi_j}{\partial n} - ik\phi_j \right) = 0 \end{array} \right. \quad (6)$$

여기서, n 에 대한 미분은 부유체 표면에서 유체 중으로 향하는 법선방향 미분, n_j 는 좌표축에 평행한 단위 속도운동에 의한 부유체 표면에서의 운동속도의 법선방향 성분

($j = 1, 2, 3$) 및 각 축 둘레의 단위 각속도 운동에 의한 부유체 표면에서의 운동속도의 법선방향 성분($j = 4, 5, 6$), R 은 원점으로부터의 수평방향 거리, $k \tanh(kd) - v = 0$ 이다.

2.2 부유체에 대한 경계요소법 적용

위의 식 (5)와 식 (6)으로 주어진 선형 경계치 문제를 본 연구에서는 Green정리로부터 유도된 경계적분식을 이용하여 해석하였다. 속도 포텐셜 ϕ_j 에 관한 해를 구함에 있어 유체 영역은 부유 구조물의 잠긴 면을 완전히 포함시키는 가상적인 경계 S_R 에 의하여 두 영역으로 나뉜다. S_R 내부 영역에서는 포텐셜 ϕ 는 일반적인 경계 적분식에서 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$4\pi C \phi_j(\vec{\zeta}) = \int_{\partial\Omega} \phi_j(\vec{x}) \frac{\partial G(\vec{\zeta}, \vec{x})}{\partial n} dS + \int_{\partial\Omega} G(\vec{\zeta}, \vec{x}) \frac{\partial \phi_j(\vec{\zeta})}{\partial n} dS \quad (7)$$

$j = 1, \dots, 7$

여기서, $C = \int_{\partial\Omega} \frac{\partial G}{\partial n} dS$, $\vec{\zeta} = (\xi, \eta, \zeta)$ 는 소스포인트, $\vec{x} = (x, y, z)$ 는 필드포인트이다.

식 (6)의 경계조건 중 자유수면, 해저면과 무한에서 경계조건을 만족하는 식 (8a) 및 (8b)의 Green함수를 사용하면 식 (7)의 경계적분식은 폰톤의 수면 아래 잠긴 면에서의 적분만 수행하면 된다. 식 (9)의 R' 의 값이 작은 경우에는 식 (8a)의 적분형 Green함수를 사용하고 식 (9)의 R' 의 값이 큰 경우에는 식 (8b)의 급수형 Green함수를 사용한다.

$$G = \frac{1}{r} + \frac{1}{r'} + pv \int_0^\infty \frac{2(\mu+v)e^{\mu d} \cosh(\mu(\zeta+d)) \cosh(\mu(z+d)) J_0(\mu R') d\mu}{\mu \sinh(\mu d) - v \cosh(\mu d)} + i \frac{2\pi(k^2 - v^2) \cosh(k(\zeta+d)) \cosh(k(z+d)) J_0(kR')}{k^2 d - v^2 d + v} \quad (8a)$$

$$G = \frac{2\pi(v^2 - k^2) \cosh(k(\zeta+d)) \cosh(k(z+d))}{k^2 d - v^2 d + v} \{ Y_0(kR') - iJ_0(kR') \} + \sum_{j=1}^\infty \frac{4(\mu_j^2 - v^2) \cosh(\mu_j(\zeta+d)) \cosh(\mu_j(z+d)) K_0(\mu_j R')}{\mu_j^2 d + v^2 d - v} \quad (8b)$$

여기서, J_0 는 제1종 0차 Bessel함수이며, Y_0 는 제2종 0차 Bessel함수이며, K_0 는 수정된 제2종 0차 Bessel함수이며, pv 는 Cauchy의 주치적분을 의미하며, $\mu_j \tan(\mu_j d)$

$+v=0$, r , r' 및 R' 은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} r &= \sqrt{(\xi-x)^2 + (\eta-y)^2 + (\zeta-z)^2} \\ r' &= \sqrt{(\xi-x)^2 + (\eta-y)^2 + (\zeta+2d+z)^2} \\ R' &= \sqrt{(\xi-x)^2 + (\eta-y)^2} \end{aligned} \quad (9)$$

식 (7)에 주어진 경계적분식을 고차경계요소로 이산화하여 속도 포텐셜을 구했다. 본 연구에서 사용한 고차경계요소는 기하형상함수와 포텐셜 분포형상함수가 같은 등매개 변수 8절점 사각형 요소와 6절점 삼각형 요소이므로, 해양 수리동역학 문제와 선체 수리동역학 문제에서 기존의 일정 평면요소에 비해 물리량의 변화를 잘 모델링할 수 있으며 같은 정확도의 모델링에서 훨씬 적은 수의 요소와 절점이 필요할 뿐이다. Green함수 G 와 미분값 $\partial G/\partial n$ 에 포함된 $1/r$ 과 $1/r^2$ 의 특이성은 극좌표변환에 의해서 소거될 수 있다. 본 논문에 사용한 고차경계요소에 관한 자세한 내용은 Chang et al.(1992)에 나타나 있으므로 이에 대신하고 본 논문에서는 지면 제약 상 실지 않았다.

2.3 부유체에 관한 동유체력계수 산정

속도포텐셜이 구해지면 폰톤에 작용하는 압력은 선형화된 Bernoulli 방정식에 의해 다음과 같이 구해질 수 있다.

$$p(x,y,z,t) = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} = \rho \omega^2 \sum_{j=0}^7 \phi_j \zeta_j e^{-i\omega t} \quad (10)$$

동유체력은 선형화된 압력을 부유체의 잠긴면에서 적분하여 다음과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned} F_k &= -\iint_{S_\omega} p n_k dS \\ &= -\rho \omega^2 \sum_{j=0}^7 \zeta_j e^{-i\omega t} \iint_{S_\omega} \phi_j n_k dS \quad (k=1,2,\dots,6) \end{aligned} \quad (11)$$

위 식으로부터 가속도와 같은 위상을 갖는 부가질량과 속도와 같은 위상을 갖는 감쇠계수를 다음과 같이 정의한다.

$$a_{kj} = -\rho Re[\iint_{S_\omega} \phi_j n_k dS] \quad (12)$$

$$b_{kj} = -\rho \omega Im[\iint_{S_\omega} \phi_j n_k dS] \quad (13)$$

여기서, a_{kj} 는 부가질량, b_{kj} 는 감쇠계수, $Re[]$ 는 실수성분, $Im[]$ 는 허수성분 그리고 $k,j=1,2,\dots,6$ 이다.

식 (11)로부터 입사파와 산란파에 의한 유체력의 합인 파 강제력은(wave exciting force) 다음과 같이 정의된다.

$$E_k = \rho \omega^2 e^{-i\omega t} \iint_{S_\omega} (\zeta_0 \phi_0 + \zeta_7 \phi_7) n_k dS \quad (k=1,2,\dots,6) \quad (14)$$

위에서 정의한 계수들을 이용하여 부유체의 운동방정식을 표현한다.

$$\sum_{j=1}^6 [(A_{kj} + a_{kj})\ddot{X}_j(t) + (B_{kj} + b_{kj})\dot{X}_j(t) + k_{kj}X_j(t)] = E_k(t) \quad (15)$$

여기서, $\{X\}$, $\{\dot{X}\}$, $\{\ddot{X}\}$ 는 각각 부유체의 변위, 속도, 가속도벡터, A_{kj} 는 부유체의 질량행렬, B_{kj} 는 부유체의 감쇠행렬, k_{kj} 는 부유체의 유체정역학적 복원력행렬을 나타낸다.

2.4 부유식 구조물에 관한 운동방정식

앞에서 부유체에 대하여 정의한 계수들을 이용하여 부유체를 포함하는 Fig. 2와 같은 부유식 구조물 전체에 대한 운동방정식을 표현하면 다음과 같다.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F(t) \quad (16)$$

여기서, M , C , K 는 각각 질량, 감쇠 및 강성행렬이며, \ddot{x} , \dot{x} , x 는 각각 가속도, 속도 및 변위 벡터이고, $F(t)$ 는 하중 벡터이다. 선형문제에 대하여 이 식은 복소수를 이용하여 주파수영역의 식으로 표현할 수 있다. 즉, 하중 항이 주파수 ω 인 조화함수로 표현할 수 있다면, 이에 대한 구조물의 응답도 조화함수로 표현된다.

$$\begin{aligned} x(t) &= X(\omega)e^{-i\omega t} \\ F(t) &= F(\omega)e^{-i\omega t} \end{aligned} \quad (17)$$

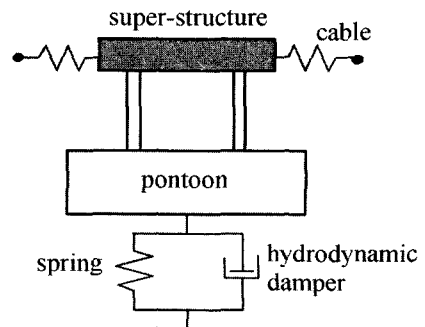


Fig. 2. Schematic model of floating structure on floating pontoon.

식 (17)을 식 (16)에 대입하면, 운동방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$[(K - M\omega^2) - iC\omega]X(\omega) = F(\omega) \quad (18)$$

그러므로 해는 다음과 같다.

$$X(\omega) = [(K - M\omega^2) - i(C\omega)]^{-1} F(\omega) \quad (19)$$

전달함수(transfer function) 개념을 도입하면 구조물의 응답은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$X(\omega) = H(\omega)F(\omega) \quad (20)$$

여기서 전달함수 행렬 $H(\omega)$ 는 다음과 같다.

$$H(\omega) = [(K - M\omega^2) - i(C\omega)]^{-1} \quad (21)$$

3. 해석 예제

부유체와 부유식구조물의 해석을 위하여 본 연구에서 개발한 프로그램을 이용하여 수행한 해석의 결과를 이 장에 실었다. 해석에 사용된 대상은 부유체 두가지와 부유식구조물 한가지이다.

먼저 부유체의 동유체력계수의 산정에 관한 정확성을 검증하기 위하여 참고문헌과 같은 예제를 사용하여 그 결과를 비교하였다. 사용된 첫 번째 부유체 예제로는 반구(hemisphere)로서, 각각 부가질량계수 및 감쇠계수와 파장제력의 해석결과를 비교하였다. 두 번째 부유체로서 유선형 폰툰(pontoon)에 대한 동유체력계수를 구하였으며, 마지막으로 이 폰툰 위에 설치된 부유식 구조물 예제에 대한 동적거동 해석을 수행하였다. 여기서 사용된 예제는 부유식 구조물의 대표적인 형식의 하나인 부유식 교량으로서, 교량의 하부기초를 이루는 폰툰의 동유체력계수들의 주파수 의존성과 교량의 고유진동의 주파수가 교량의 동적응답에 미치는 영향에 주안점을 두고 해석을 수행하였다.

3.1 반구

먼저 부유체의 부가질량계수와 감쇠계수의 계산 값에 대한 정확성을 검증하기 위하여 반구를 대상으로 한 Hulme (1982)의 해석해와 비교하였다. 반구는 수학적 표현이 비교적 간단하여 해석해가 존재하는데 Hulme는 multi-pole 전개해법을 이용하여 구하였다. 예제에 사용된 반구의 반지름은 100 m이며 자유로이 운동하는 상태이다. 본 연구에서 개발한 고차경계요소를 이용하여 요소수 100 개와 절점

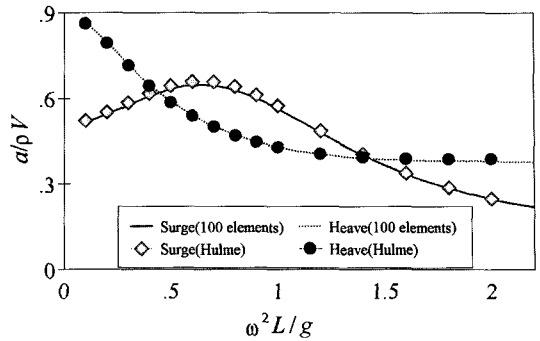


Fig. 3. Added mass coefficient for hemisphere.

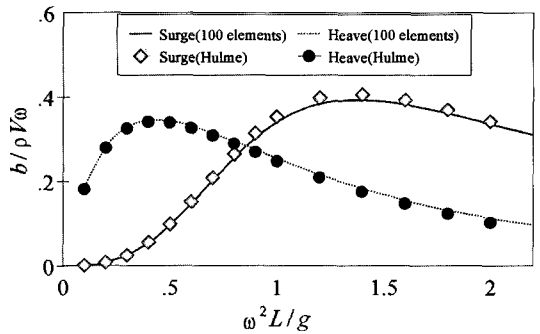


Fig. 4. Radiation damping coefficient for hemisphere.

수 301개로 수치해석을 수행하였다. Fig. 3에는 부가질량계수를 Fig. 4에는 감쇠계수를 각각 부유체에 관하여 수평방향(surge)과 수직방향(heave) 성분을 도시하였으며, 이들 그림에서 비교되는 바와 같이 결과가 Hulme의 해석해와 잘 일치함을 알 수 있으며, 또한 이들 계수 값들이 주파수에 따라 변하는 값임을 알 수 있다. 수치해석시 부가질량과 감쇠계수는 식 (12)와 (13)에서 보는 바와 같이 방사포텐셜을 적분한 결과이며, Fig. 3과 4에서 부가질량 및 감쇠계수는 각각 주파수 ω , 물의 밀도 ρ , 반구의 부피 V , 반구의 반지름 L , 중력가속도 g 를 이용하여 무차원화 된 값이다. 한편,

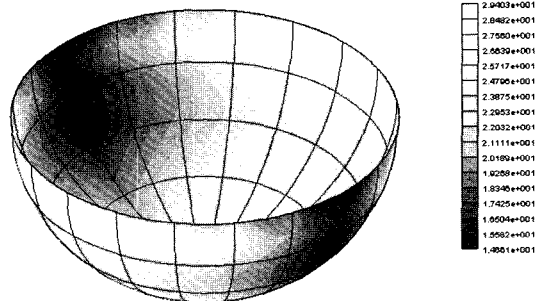


Fig. 5. Pressure distribution for hemisphere.

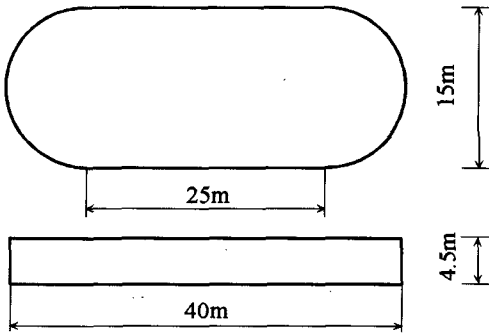


Fig. 6. Example pontoon.

Fig. 5에는 본 연구에서 개발한 전·후처리 프로그램을 이용하여 입사파에 의해 반구에 가해지는 최대압력 분포를 등고선으로 도시한 예로서 압력이 큰 부분이 밝게 나타나게 된다. 이 그림은 입사파가 x축과 45도 각도를 이루면서 진행하는 경우이며, 주파수가 0.297 rad/s(주기 21.2초)인 단위진폭 파에 대한 예이다.

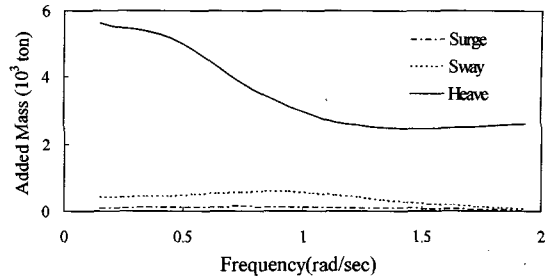
3.2 폰툰

세 번째 부유체 적용 예제로서 Fig. 6과 같은 폰툰에 대하여 본 연구에서 개발한 해석 시스템을 이용하여 동수역학 해석을 수행하였다. 이 폰툰은 3.3절 부유식 교량의 하부구조를 이루는 부유식 기초(floating foundation)로 사용되며, 제원은 Table 1에 나타나있다.

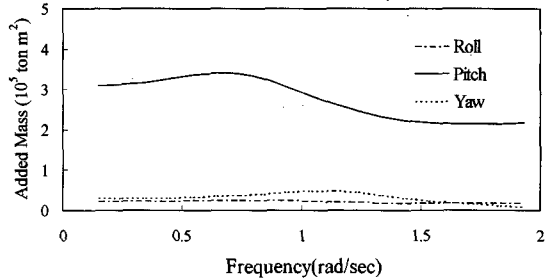
폰툰은 229개의 절점과 72개의 고차경계요소로 모델링하였다. 입사파의 진행방향은 폰툰의 길이 방향이다. 해석 주파수 범위는 0.15-2.03 rad/s(주기 3.10-41.9초)로 하였으며, 수심은 100m로 한다. 폰툰에 대하여 각 자유도별로 계산된 부가질량계수, 감쇠계수와 파강제력을 각각 Fig. 7, 8, 9에 도시하였고, 폰툰의 압력분포를 Fig. 10에 도시하였다. 여기서, 폰툰과 반구의 부가질량과 감쇠계수에 대한 해석결과를 비교 분석하여 보면, 폰툰에 대한 Fig. 7(a), 8(a)와 반구에 대한 Fig. 3, 4에서 볼 수 있는 것처럼 폰툰의 경우

Table 1. Dimensions of pontoon

Description	Value
Width (m)	15
Length (m)	40
Height (m)	4.5
Draft (m)	2.25
Mass (t)	248.4
Inertia mass in roll ($t \cdot m^2$)	5104
Inertia mass in pitch ($t \cdot m^2$)	28913
Inertia mass in yaw ($t \cdot m^2$)	32943

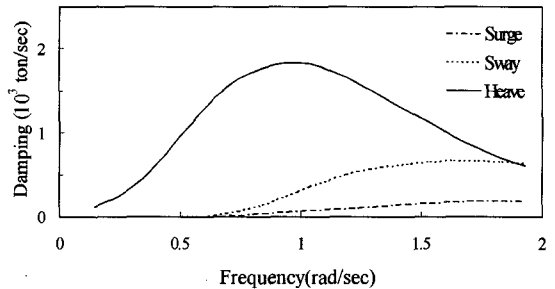


(a)

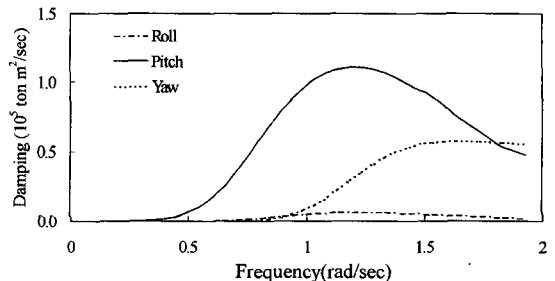


(b)

Fig. 7. Added mass coefficient of pontoon: (a) surge, sway and heave, (b) roll, pitch and yaw.



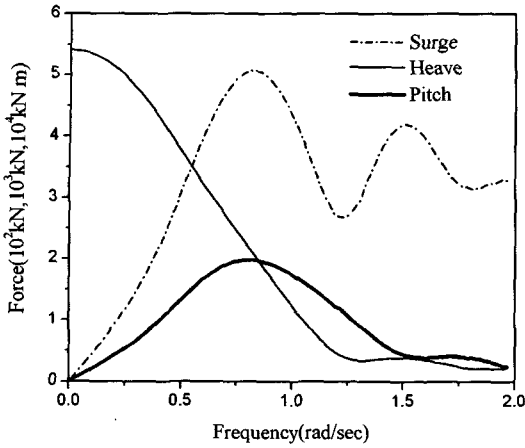
(a)



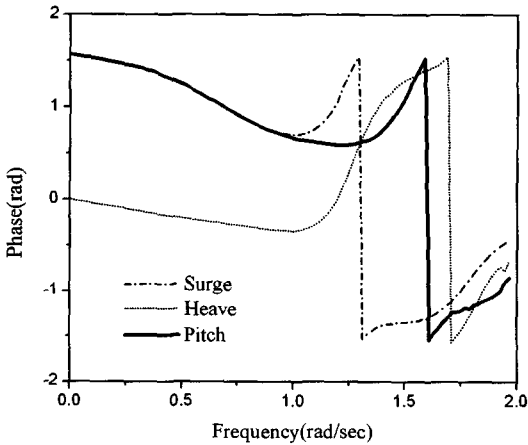
(b)

Fig. 8. Radiation damping coefficient of pontoon: (a) surge, sway and heave, (b) roll, pitch and yaw.

에는 반구의 경우보다 수직방향(heave)의 값들이 수평방향(surge)보다 훨씬 크게 되는 것을 알 수 있다. 이는 폰툰의 형상으로 수직방향 운동이 수평방향 운동보다 유체를 더욱



(a)



(b)

Fig. 9. Wave exciting force on pontoon: (a) amplitude and (b) phase.

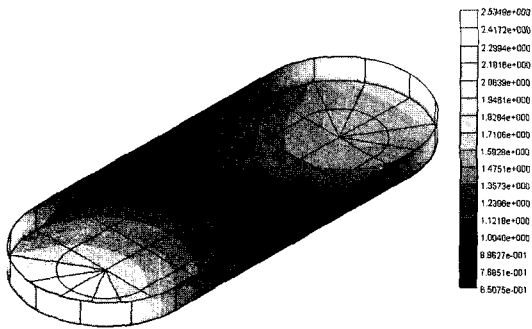


Fig. 10. Pressure distribution of pontoon.

교란시켰기 때문이다. 또한, 폰툰에 대한 Fig. 9(a)에서 볼 수 있는 것처럼 폰툰의 경우에는 밀면적이 넓고 수면에서 비교적 가까우므로 수직방향의 파강제력이 상당히 큰 것을

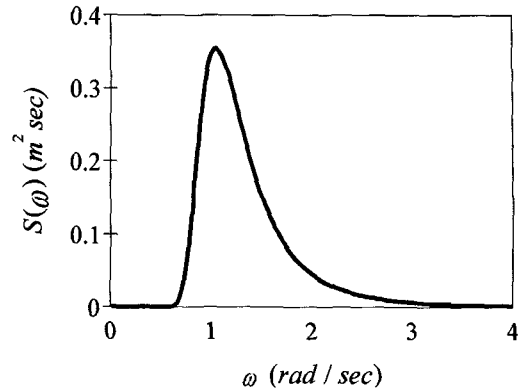


Fig. 11. JONSWAP wave spectrum.

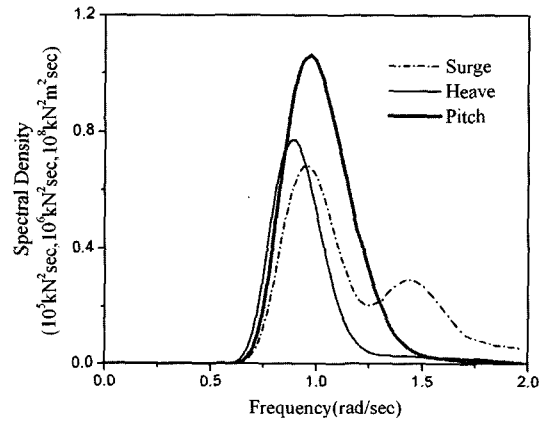


Fig. 12. Wave exciting force on pontoon due to JONSWAP wave.

알 수 있다.

다음으로는 불규칙파에 대한 대표적인 설계스펙트럼의 하나인 JONSWAP 스펙트럼을 입사파로 선택하여 폰툰에 작용되는 파력을 구하였다. 해양파 스펙트럼은 Fig. 11과 같이 유의파고(significant wave height) 2.04 m와 피크주파수 1.05 rad/s(피크주기 5.98초)로 하였다. 폰툰에 대하여 해석된 파력스펙트럼을 Fig. 12에 도시하였다. 입사파에 의하여 폰툰에 작용하는 파력스펙트럼인 Fig. 12는 Fig. 11과 Fig. 9로부터 구해진다. 파력의 수평성분(Surge)과 수평회전성분(Pitch)을 보면 Fig. 11의 입사파 스펙트럼의 피크주파수 부근에서 파력의 피크가 발생하며, 수평성분(Surge)은 Fig. 9의 파강제력 수평성분(Surge)과 유사하게 두 번의 피크가 있음을 알 수 있다. 또한, 수직방향의 파력 스펙트럼을 보면 Fig. 11의 입사파 스펙트럼과 같은 형상으로 하나의 피크주파수를 가지며 Fig. 9의 파강제력이 감소하는 경향을 보이는 것에 영향을 받아 파강제력의 피크주파수가 입사파의 피크주파수보다 작아졌음을 알 수 있다.

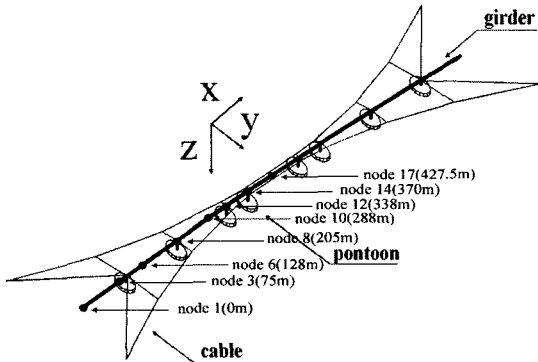


Fig. 13. Floating bridge with discrete pontoons supported by lateral cable system.

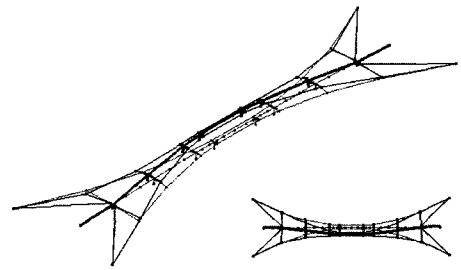
3.3 부유식 교량

앞 절에서 해석한 Fig. 6과 같은 폰톤 8 개에 의하여 지지되는 Fig. 13과 같은 부유식 교량이 파랑하중을 받는 경우에 대하여 응답해석을 주파수영역에서 수행하였다. 이 교량은 노르웨이 Bergsoy 피요르드의 섬을 연결하는 프로젝트에 제안되었던 교량형식으로(Hammarstroem, 1990; Chalmers U., 1988), 길이 855 m, 수심 100 m이고, 포물선 형태의 프리텐션 케이블로 수평 지지되며 폰톤의 부력에 의해 수직 지지되는 강 연속교이다. 교량에 대한 상세한 제원과 구조해석에 사용된 케이블 및 뼈대요소에 대한 내용은 백인열 등(2002)과 현대건설 기술연구소(1997)에 나타나 있으므로 이에 대신하고 본 논문에서는 지면 제약 상 신지 않았다.

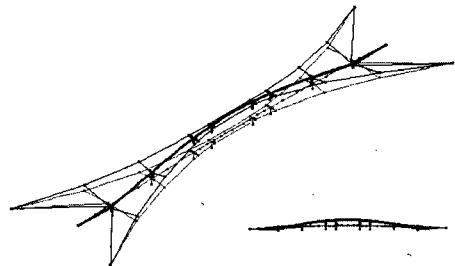
교량에 대한 고유진동해석 결과 Fig. 14와 같이 수평, 수직 및 비틀림에 대한 진동모드 형상을 구할 수 있는데, Fig. 14(a)와 같은 수평모드 형상에 해당하는 고유주파수(natural frequency)는 0.588 rad/s(고유주기 10.7초)이며, Fig. 14(b)의 수직모드 형상에 해당하는 고유주파수는 1.20 rad/s(고유주기 5.24초)이고, Fig. 14(c)의 비틀림모드 형상에 해당하는 고유주파수는 1.31 rad/s(고유주기 4.80초)이다.

교량이 Fig. 11과 같은 JONSWAP 설계파를 입사파로 하는 파랑하중을 받는 경우에 대한 진동해석을 수행한 후 얻은 교량 중앙점의 가속도 스펙트럼을 Fig. 15에 도시하였다. 해석결과의 정확성을 검토하기 위하여 시간영역해석을 수행한 결과(백인열 등, 2002)와 함께 비교하여 도시하였으며, 두 결과가 잘 일치함을 알 수 있다.

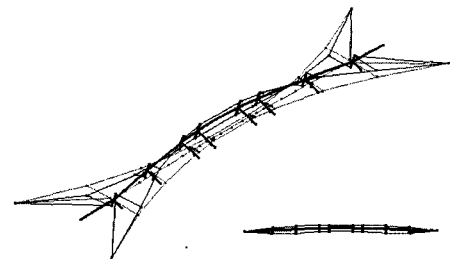
Fig. 11의 입사파 스펙트럼과 Fig. 15(a)의 수평방향 교량 응답 스펙트럼을 비교하여 보면, 입사파의 에너지가 몰려 있는 피크주파수가 1.05 rad/s(피크주기 5.98초)이어서 교량



(a) horizontal mode $\omega_n = 0.588 \text{ rad/sec}$



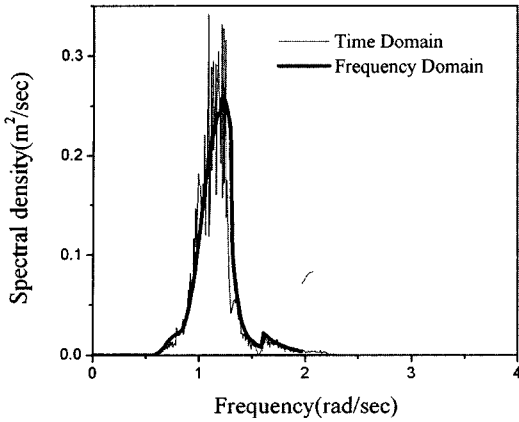
(b) vertical mode $\omega_n = 1.20 \text{ rad/sec}$



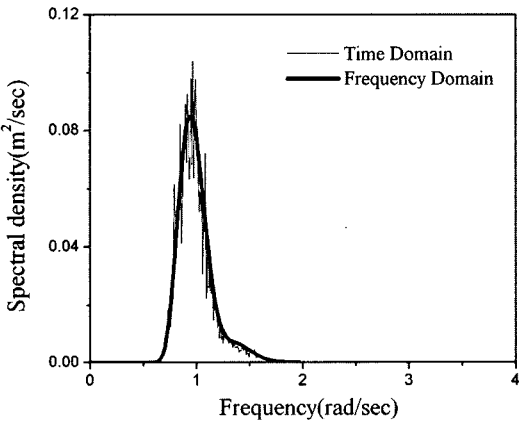
(c) torsional mode $\omega_n = 1.31 \text{ rad/sec}$

Fig. 14. Natural vibration mode shape of floating bridge (undamped).

의 비틀림 고유주파수인 1.31 rad/s(고유주기 4.80초)에서 수평 응답이 증폭될 가능성이 있으나, 해석결과 가속도응답 스펙트럼을 보면 동하중의 성분(Surge)의 피크주파수 0.975 rad/s(주기 6.44초)와 교량의 비틀림 고유주파수인 1.31 rad/s(고유주기 4.80초)의 중간정도인 주파수 1.21 rad/s(주기 5.19초)에서 피크가 나타나고 고유진동수에서는 증폭되지 않았다. 이 이유는 Fig. 12에서 보는 바와 같이 폰톤에 작용하는 동하중은 입사파에 폰톤의 형상에 좌우되는 하중계수가 곱하여져서 수평방향 성분(Surge)의 피크주파수는 교량의 고유주파수로부터 좀 더 멀어지게 되었으나, 폰톤의 수평방향의 방사감쇠계수가 비교적 작기 때문에 고유진동에 의한 증폭의 영향이 어느 정도는 있는 것으로 판단된다. 그



(a) Horizontal acceleration

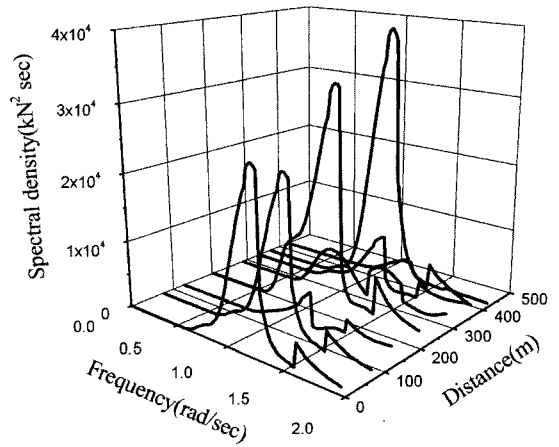


(b) Vertical acceleration

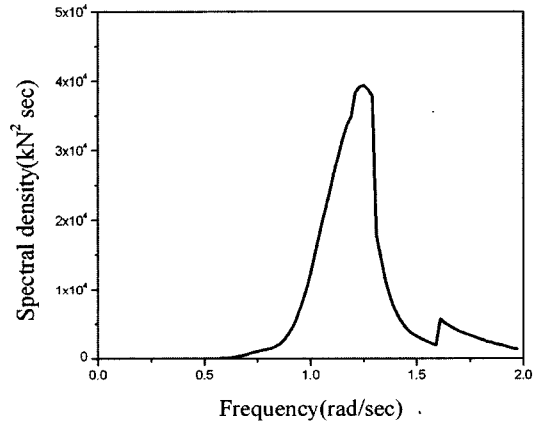
Fig. 15. Acceleration spectrum at the midspan of floating bridge.

리고, 수평방향 가속도응답 스펙트럼을 보면 주파수 1.29 rad/s(주기 4.87초)에서 급격히 응답이 감소하는 것을 볼 수 있는데, 이것은 Fig. 9(b)의 파강제력의 위상에서 보는 바와 같이 교량의 수평변위에 영향을 미치게 되는 수평성분(Surge)과 수평회전성분(Pitch)이 거의 동일한 위상을 보이다가 1.29 rad/s(주기 4.87초)에서 수평성분(Surge)의 위상이 급격히 변해 수평회전성분(Pitch)의 위상과 약 π rad/s 만큼 차이가 발생하게 되어 파강제력의 수평성분(Surge)과 수평회전성분(Pitch)이 서로 반대방향으로 교량에 작용하기 때문이다.

Fig. 11의 입사파 스펙트럼과 Fig. 15(b)의 수직방향 교량응답 스펙트럼을 비교하여 보면, 입사파의 에너지가 몰려 있는 피크주파수가 1.05 rad/s(피크주기 5.98초)이어서 교량의 수직 고유주파수인 1.20 rad/s(고유주기 5.24초)와 가까워 수직 응답이 증폭될 소지가 있으나, 해석결과 가속



(a)



(b)

Fig. 16. Horizontal shear force: (a) at whole span (b) at node 14(370 m) of floating bridge.

도응답 스펙트럼을 보면 주파수 0.955 rad/s(주기 6.58초)에서 피크가 나타나고 고유진동수에서는 증폭되지 않았다. 이 이유는 Fig. 12에서 보는 바와 같이 폰톤에 작용하는 동하중은 입사파에 폰톤의 형상에 좌우되는 하중계수가 곱하여져서 수직방향 성분(Heave)의 피크주파수는 0.896 rad/s(주기 7.01초)가 되어 교량의 고유주파수로부터 좀 더 멀어지게 되어 증폭이 일어나지 않았고, 또한 폰톤의 수직방향의 방사감쇠계수가 비교적 크기 때문에 고유진동에 의한 증폭의 영향이 크지 않은 것으로 판단된다.

Fig. 16에는 교량의 수평방향 전단력을 교대로부터 중앙점 방향으로의 거리에 따라 나타내었고(Fig. 13의 절점 1, 3, 6, 8, 10, 12, 14, 17에서의 해석결과), 파력이 교량에 대칭으로 작용하기 때문에 교량의 나머지 절반 부분은 표시

를 생략하였다. Fig. 16(a)를 보면 수평방향 전단력은 교대 및 수평케이블에 의하여 수평방향으로 지지되는 절점에서 큰 값을 보이며, 이것은 일반적인 교량의 지점부에서 전단력이 크게 발생하는 것과 같이 수평케이블에 의한 수평지 지력이 지점과 같은 역할을 하여 나타난 것으로 사료된다. Fig. 16(b)에는 수평방향 전단력이 최대가 나오는 절점 14(370 m 지점)의 값을 도시하였는데, 수평방향 전단력은 교량의 비틀 고유주파수인 1.31 rad/s(고유주기 4.80초)와 근접한 1.25 rad/s(주기 5.03초)에서 피크를 보여 1.21 rad/s(주기 5.19초)에서 피크를 보인 수평방향 가속도응답과는 조금 상이하였고, 수평방향 가속도응답 스펙트럼에서와 같이 주파수 1.29 rad/s(주기 4.87초)에서 급격히 응답이 감소하는 것을 볼 수 있으며, 또한 주파수 1.61 rad/s(주기 3.90초)에서 작은 피크가 나타나는 데 이것은 Fig. 9(b)의 파장계

력의 위상에서 보는 바와 같이 1.29 rad/s(주기 4.87초)에서 부터 서로 상반되게 작용하던 수평성분(Surge)과 수평회전 성분(Pitch)이 주파수 1.61 rad/s(주기 3.90초)에서 수평회전 성분(Pitch)의 위상이 급격히 변해 수평성분(Surge)의 위상과 비슷해져서 서로 같은 방향으로 교량에 작용하기 때문이다.

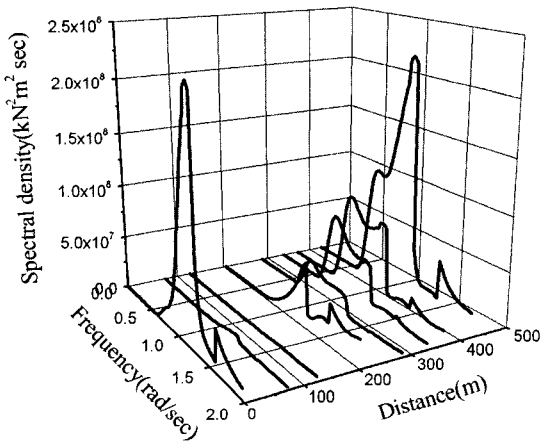
Fig. 17에는 교량의 수평방향 휨모멘트를 교대로부터 중앙점 방향으로의 거리에 따라 나타내었다. Fig. 17(a)를 보면 교대 및 중앙점에서 큰 값을 보이며, 이것은 일반적인 교량에서 곡률이 큰 고정단 지점과 중앙점에서 휨모멘트가 크게 발생하는 것과 같은 이유라고 판단된다. Fig. 17(b)에는 수평방향 휨모멘트의 최대값이 발생하는 중앙 절점(425 m)의 값을 도시하였는데, 수평방향 휨모멘트는 Fig. 16(b) 수평방향 전단력과 비슷한 경향을 나타내어 1.25rad/s(주기 5.03초)에서 피크를 보이며 주파수 1.61 rad/s(주기 3.90초)에서 작은 피크가 나타났다.

4. 결 론

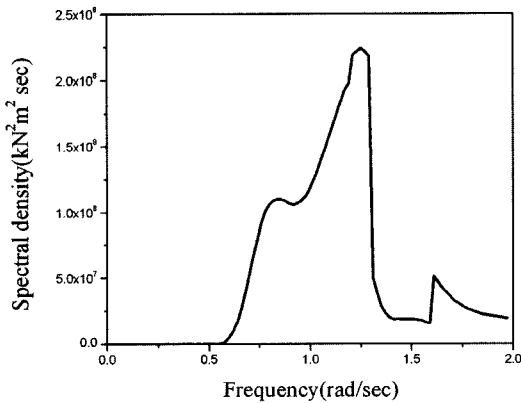
본 연구에서는 주파수에 따라 주어지는 설계 파고 스펙트럼이 입사파로 가해질 때 부유식 구조물의 응답 스펙트럼을 구할 수 있는 주파수영역 해석 프로그램 및 이 해석 프로그램이 설계 및 시공의 기본 작업에 용이하게 적용될 수 있도록 입력과 출력을 그래픽으로 표현하는 전·후처리 프로그램을 구축하여, 부유체 및 상부구조로 구성된 대표적인 부유식 구조물인 부유식 교량의 파랑하중에 대한 주파수영역 동적해석을 수행하였다. 여기서, 부유체의 강체운동과 관련된 동유체력계수인 부가질량, 감쇠 및 파강제력은 선형포텐셜이론과 경계요소법을 이용하여 산정하였으며, 부유식 교량의 상부구조와 지지 케이블은 각각 공간뼈대 요소와 탄성 현수케이블 요소를 이용하여 모델링하였다.

해석 예제를 이용하여 프로그램을 검증하고 몇 가지 해석 결과를 도시하였다. 수중에 잠긴 부유체의 형상에 따라 동유체력계수의 크기가 수평, 수직방향에 따라 크게 다른 것을 예제들을 비교하여 알 수 있으며, 본 연구에서 개발한 프로그램을 이용하면 사용목적에 적절한 부유체의 동유체력계수를 갖는 부유체의 형상을 결정하는데 도움이 된다.

부유식 교량의 가속도 스펙트럼 해석결과를 검토하여 보면, 입사파의 에너지가 피크인 주파수와 고유진동수가 가까워 변위가 증폭될 소지가 있으나 증폭되지 않았고, 입사파의 에너지가 피크인 주파수와 교량 응답의 피크 주파수가 다소 달라짐을 볼 수 있었다. 그 이유로는 부유체의 형



(a)



(b)

Fig. 17. Horizontal bending moment: (a) at whole span (b) at midspan of floating bridge.

상에 따라 결정되는 파강제력이 주파수별로 값이 변동하여 분포함을 해석 결과 그림으로부터 확인할 수 있고, 따라서 이 파강제력을 입사파 스펙트럼에 곱하여 나오는 파강제력 스펙트럼의 피크가 입사파의 피크와 달라졌기 때문임을 알 수 있다. 또한 주파수 영역해석을 수행하면 계산 과정이 간결하고 피크주파수대를 비교할 수 있으므로 에너지의 분포 등을 분석할 수 있는 장점이 있다. 주파수 영역의 해석 방법을 개발하여 보다 복잡한 문제나 비선형 영역에까지 확장할 수 있는 연구가 앞으로 필요하다고 사료된다.

감사의 글

이 연구는 현대건설기술연구소와 서울대학교 지진공학연구센터의 지원 하에 수행된 연구 결과의 일부로서, 연구지원에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- 백인열, 권장섭, 이원표, 장승필 (2002). 이산 폰툰형 부유식 교량의 동적 해석. *대한토목학회논문집*, 22(2-A), 327-336.
- 현대건설 기술연구소 (1997). 부유식 구조물 해석 시스템 개발. 94STR08.
- Beauchamp, C. and Brocard, D. (1981). Dynamic response of floating bridge to wave forces. SCE/EMD Specialty Conference on Dynamic Response of Structures, Atlanta, Ga.
- Chalmers University (1988). Dynamic simulation of floating bridge. Report 88(6), Department of Structural Mechanics Chalmers University of Technology, Sweden.
- Chang, S.P., Park, J.I. and Kim, J.K. (1992). A dynamic anal-

ysis of tension leg platform using the general curved boundary element. Proceedings of the Second International Offshore and Polar Engineering Conference, San Francisco, USA, 1, 228-234.

- Hammarstroem, L. and Forsvall, A. (1990). GVA pontoon bridge concept. Second Symposium on Strait Crossings, Trondheim, Norway.
- Hulme, A. (1982). The wave forces acting on a floating hemisphere undergoing forced periodic oscillations. *Journal of Fluid Mechanics*, 121, 443-463.
- Liu, Y.H. and Kim, C.H. (1991). Comparison of higher order boundary element and panel methods for hydrodynamic loadings. *Journal of Offshore and Polar Engineering*, 1(1), 8-17.
- Loeken, A., Oftedal, R. and Aarsnes, J. (1990). Aspects of hydrodynamic loading and response in design of floating bridges. Second Symposium on Strait Crossings, Trondheim, Norway.
- Luft, R. (1981). Analysis of floating bridges. The Hood Canal Bridge, ASCE/EMD Specialty Conference on Dynamic Response of Structures, Atlanta, Ga.
- Newman, J.N. (1985). Distributions of sources and normal dipoles over a quadrilateral panel. Report MA 02139, MIT.
- Newman J.N. (1986). *Marine Hydrodynamics*. The MIT Press.
- Vabö, P., Loen, A., Leira, B. and Remseth, S. (1990). Feasibility of a semi-submersible floating bridge. Second Symposium on Strait Crossings, Trondheim, Norway.

Received May 4, 2004

Accepted June 15, 2005