

하부구조가 지붕구조의 지진응답에 미치는 영향에 관한 연구

A Study on the Influence of a supporting structure on the Seismic Response of a Roof Structure

정 찬 우*
Jung, Chan-Woo

강 주 원**
Kang, Joo-Won

요 약

대공간구조물은 쉘, 스페이스프레임, 막등의 지붕구조와 이를 지지하는 RC조등의 지지구조로 이루어져 있다. 이에, 단순화를 위해서 지붕구조를 상부구조라 부르고, 지지구조를 하부구조라고 한다. 본 논문에서는 하부구조가 상부구조의 지진응답에 미치는 영향을 고찰함을 그 목적으로 하고 이를 위한 기초적인 연구를 수행하였다. 상부구조와 하부구조를 각각 고유의 진동특성을 가지고 있는 단자유도계로 보고 그 각각의 독립구조물이 연결되어 하나의 2질점계 구조물을 형성한다고 가정하였다. 상부구조물이 1질점계 단독으로 존재할 때의 지진응답과 2 질점계의 상부구조로서 존재할 경우의 지진응답을 비교함으로써 그 영향을 고찰할 수 있었다. 본 논문에서는, 상부구조와 하부구조의 질량비 및 주기비가 하부구조가 상부구조에 미치는 영향을 고려할 때 중요한 설계변수가 됨을 나타내었다.

Abstract

Large spatial structures consist of roof structure and its supporting structure. Authors simply call the supporting structure "lower parts" and roof structure "upper parts". To study the influence of an lower part on the seismic response of the upper part of a structure, as a first step, authors substitute the upper part and the lower part of the structure to a single degree of freedom system individually, and set up a new 2 DOF structural model connected by them. It is clarified that the mass ratio and the period ratio of an upper part to a lower part are important parameters to find the amplification or reduction of the seismic response of an upper part.

키워드 : 하부구조, 질량율, 주기율, 2자유도계, 공간구조

Keywords : Understructure, Mass Ratio, Period Ratio, Two Degree of Freedom, Spatial Structure

1. 서 론

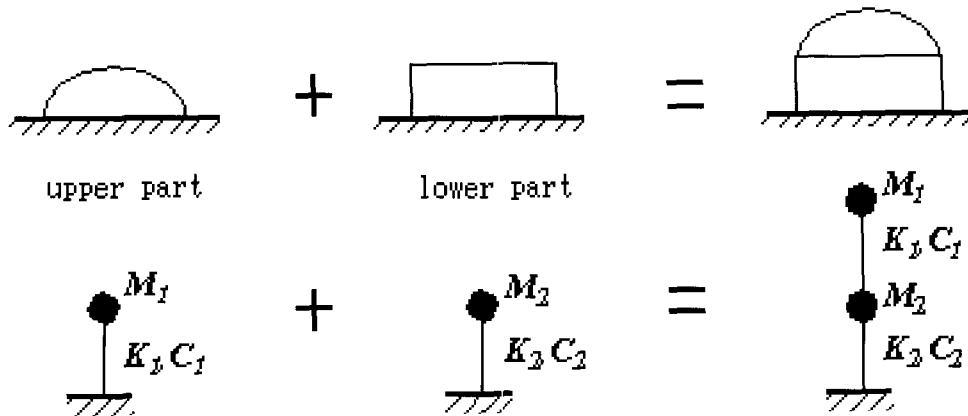
쉘공간구조의 지진응답에 관한 최근의 연구에 있어서, 쉘공간구조를 지지하는 지지구조가 쉘공간구조의 수평지진에 대한 지진응답에 대해 어떤 영향을 미칠까 하는 것이 주목받고 있다. 상하지진동의 입력에 관해서도 면진장치를 도입한 경우 또는 충격적인 상하지진동의 입력의 경우에는 중요한 문제가

가 될 가능성도 있다. 본 논문에서 취급하려고 하는 단순화된 모델에서는 입력방향이 수평인가 수직인가하는 제약은 특별히 없다. 즉 문제를 수평으로도 상하로도 볼 수 있다는 뜻이다. 그러나, 여기서는 수평지진력을 연상하면서 고찰한다.

본 논문에서는 단순화를 위해서 쉘공간구조를 상부구조라 부르고, 지지구조를 하부구조라고 부르기 로 한다. 상부구조와 하부구조는 각각 고유의 진동특성을 가지고 있는 독립체로 보고 그 각각의 독립체가 연결되어 하나의 구조물을 형성한다고 가정한다. 각각 독립적으로 질량, 감쇠성능, 강성이 주어지고, 특별히 정해진 진동수(예를 들면 상부구조의 1차고유진

* 정회원, 경북대학교 건설공학부 BK 박사후과정, 공학박사
E-mail : kujou1029@hanmail.net

** 정회원, 영남대학교 공과대학 건축학부 부교수, 공학박사
Tel : 053-810-2429 Fax : 053-810-4625
E-mail : kangji@ynu.ac.kr



(그림 1) 해석모델

동수)에서의 응답을 주목하기로 한다. 이상의 가정에 의해 상실될 현상으로서, 상부구조와 하부구조의 연결부에서의 변형, 공간적 위상의 어긋남, 상부구조에 있어서의 근접하는 복수의 고유진동수에서의 공진현상 그리고, 상부구조의 수평지진력에 대한 연직방향응답 등 대단히 중요한 현상들을 예로 들 수가 있다. 그러나, 본 논문에서는 이러한 복잡한 현상들에 대해서는 잠시 눈을 돌리고, 연결된 구조로서의 기본적인 응답특성으로부터, 수평입력시의 상부구조의 응답에 대한 하부구조의 영향을 고찰해 보고자 한다.

2. 해석모델

상기가정에 근거해 <그림 1>에 나타난 것과 같이 상부구조와 하부구조는 각각 1질점계로 치환되어, 연결된 구조는 2개의 1질점계를 직렬로 연결한 2질점계로서 표현되어진다. 단순화를 위해 전단변형계를 채용하였다. 연결에 동반되어지는 질량의 증가분에 대해서는 미리 하부구조의 질량에 포함되어져 있는 것으로 한다.

3. 진동방정식

3.1 1질점계의 진동방정식

<그림 2>에서 보여지는 것과 같이 각 1질점계에 대해 입력 y_0 질점의 상대변위 y_i 질량 M_i 감쇠정수 C_i 강성 K_i 질점에 작용하는 관성력을 $-M_i(\ddot{y}_i + \ddot{y}_0)$ 감쇠력을 $C_i\dot{y}_i$ 복원력을 $K_i y_i$ 으로 두면, 진동방정식은

힘의 적합조건에 따라 다음 식으로 주어진다. 단 기호 $\dot{}$ 는 시간미분, 첨자 i 는 1이 상부구조, 2가 하부구조임을 나타낸다.

$$M_i \ddot{y}_i + C_i \dot{y}_i + K_i y_i = -M_i \ddot{y}_0 \quad (1)$$

여기에, 고유원진동수 ω_i , 고유주기 T_i 감쇠정수 h_i 를 다음과 같이 정의한다.

$$\omega_i^2 = \frac{K_i}{M_i}, T_i = \frac{2\pi}{\omega_i}, C_i = \frac{2h_i}{\omega_i} K_i = 2h_i \omega_i M_i \quad (2)$$

식(1)은 다음과 같이 표시된다.

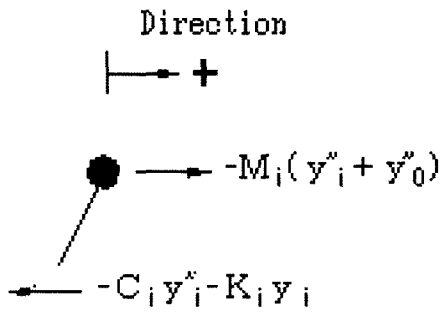
$$\ddot{y}_i + 2h_i \omega_i \dot{y}_i + \omega_i^2 y_i = -\ddot{y}_0 \quad (3)$$

3.2 2질점계의 진동방정식

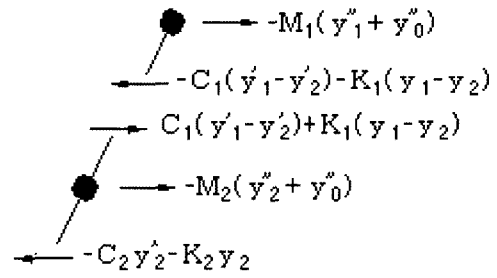
3.2.1 상대변위에 의한 표현

<그림 3>에 표시되어진 것과 같이, 본 논문에서 취급하는 2질점계는 각각 진동특성이 주어져있는 상부구조와 하부구조를 연결한 것으로 한다. 지반동 y_0 에 대한 각 질점의 상대변위를 y_i 으로 한다. 진동방정식은 질점1 또는 질점2에 작용하는 힘의 적합조건에 의해 각각 다음 식으로 주어진다.

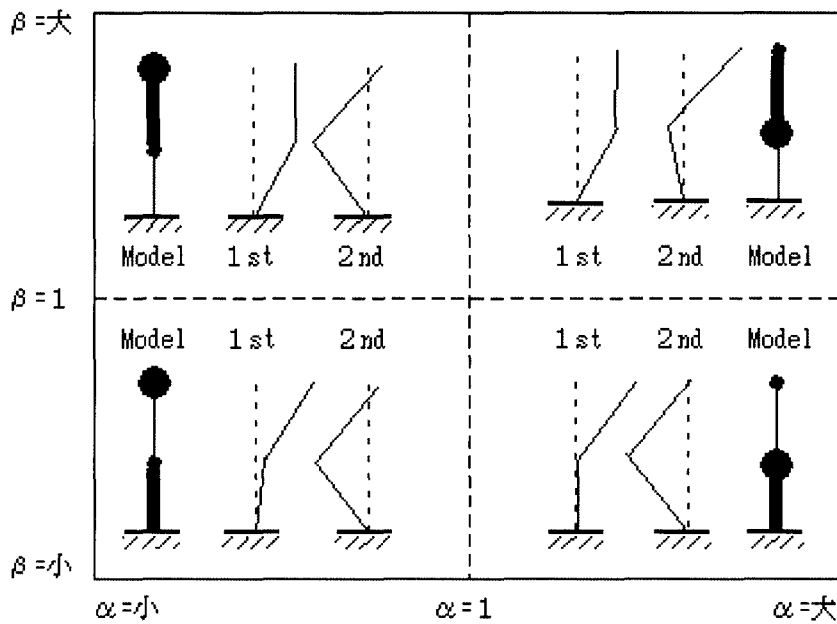
$$\begin{aligned} M_1 \ddot{y}_1 + C_1(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) + K_1(y_1 - y_2) &= -M_1 \ddot{y}_0 \\ M_2 \ddot{y}_2 - C_1(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) & \\ + C_2 \dot{y}_2 - K_1(y_1 - y_2) + K_2 y_2 &= -M_2 \ddot{y}_0 \end{aligned} \quad (4)$$



〈그림 2〉 1질점계의 동적인 힘의 평형



〈그림 3〉 2질점계의 동적인 힘의 평형



〈그림 4〉 α, β 공간에 있어서의 2질점계모델과 고유진동모드특징

따라서,

$$\begin{aligned} M_1 \ddot{y}_1 + C_1 \dot{y}_1 - C_1 \dot{y}_2 + K_1 y_1 - K_1 y_2 &= -M_1 \ddot{y}_0 \\ M_2 \ddot{y}_2 - C_1 \dot{y}_1 + (C_1 + C_2) \dot{y}_2 \\ - K_1 y_1 + (K_1 + K_2) y_2 &= -M_2 \ddot{y}_0 \end{aligned} \quad (5)$$

또한 행렬()와 벡터[]를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$(M)[\ddot{y}] + (C)[\dot{y}] + (K)[y] = -(M)[1]\ddot{y}_0 \quad (6)$$

여기서, (M) , (C) , (K) 는 각각 질량메트릭스, 감쇠메트릭스, 강성메트릭스로 불려, 식(4)와 식(5)에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$(M) = \begin{pmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_2 \end{pmatrix}, \quad (C) = \begin{pmatrix} C_1 & -C_1 \\ -C_1 & C_1 + C_2 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

$$(K) = \begin{pmatrix} K_1 & -K_1 \\ -K_1 & K_1 + K_2 \end{pmatrix}$$

이러한 매트릭스는 식(2)에서 정의된 파라메타를 이용하여 다음과 같이 나타낸다.

$$(M) = M_1 \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \alpha \end{pmatrix}, \quad (C) = 2h_1 \omega_1 M_1 \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -1 & \frac{\alpha h_2}{\beta h_1} \end{pmatrix}, \quad (8)$$

$$(K) = \omega_1^2 M_1 \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 + \gamma \end{pmatrix}$$

여기에서, α 는 질량비, β 는 주기비, γ 는 강성비로서 다음과 같이 정의된다.

$$\alpha = \frac{M_2}{M_1}, \beta = \frac{T_2}{T_1}, \gamma = \frac{K_2}{K_1} = \frac{\alpha}{\beta^2} \quad (9)$$

1질점계에서는 h_i 와 ω_i 만으로 계의 진동특성이 결정된다. 거기에 반해 2질점계에서는, (8)식의 표현의 의하면 h_1, h_2 와 ω_1 을 비롯해, α, β 와 γ 의 셋중 어느 2개가 파라메타로서 필요하다. 제1절에서 단순화를 위해 2질점계를 취급한다고 말했지만, 실은 그렇게해도 여전히 복잡한 문제임에는 틀림없다. 본 논문에서는 α 와 β 를 2질점계의 파라메타로 설정했다.

<그림 4>는, α, β 공간에 있어서의 2질점계모델의 개략적인 형상과 특징적인 고유진동모델을 표시한 그림이다. 그림중의 모델그림에서 붉은 강성을 표시하고, 굵은 것은 강성이 큰것을 의미한다. 또한 등근원은 질량을 표시하며 원의 직경이 크것이 질량이 크음을 의미한다. α 와 β 에 의해 구조의 모습은 크게 변화하며, 고유진동모드 또한 변화한다.

3.2.2 층간변위에 의한 표현

전항의 상대변위에 의한 표현에서는 상부구조의 변형을 이미지하기 어려운 이유로 층간변위 x_i 를 이용하여 표현하면 식(5)으로부터 다음의 표현이 가능하다.

$$x_1 = y_1 - y_2, \quad x_2 = y_2, \quad x_0 = y_0 \quad (10)$$

$$\begin{aligned} M_1(\ddot{x}_0 + \ddot{x}_2 + \ddot{x}_1) + C_1\dot{x}_1 + K_1x_1 + 0 \\ M_2(\ddot{x}_0 + \ddot{x}_2) - C_1\dot{x}_1 + C_2\dot{x}_2 - K_1x_1 + K_2x_2 = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

(11)식의 제1식은 $(\ddot{x}_0 + \ddot{x}_2)$ 를 입력으로 하는 1자유도계 x_i 의 진동방정식처럼 보인다. 그러나 x_2 는 응답변위이므로, x_0 와 동일한 입력의 일종으로 취급하는 것은 불가능하다. 이러한 점은 1자유도계와 본질적으로 틀린점이다. 그러나, 특정한 시각에서 복원력 K_1x_1 이 최대가 될 때의 관성력항 $M_1(\ddot{x}_0 + \ddot{x}_2 + \ddot{x}_1)$ 은 감쇠력이 충분이 작다고 하면, x_1 를 발생시키는 외력으로서 간주하는 것이 가능할 것으로 기대된다.

3.3 감쇠메트릭스에 관하여

3.3.1 비례감쇠

본 논문에서는 2질점계를 진동특성이 주어져있는 상부구조와 하부구조를 연결한 것으로 생각해, 식(8)과 같은 감쇠메트릭스를 유도하였다. 한편, 먼저 2질점계가 있는 것으로 하는 입장에서 보면 질량메트릭스와 강성메트릭스는 변화가 없으나 감쇠메트릭스는 나중에 정의되는 경우가 있다. 이 경우, 자주 이용되어지는 감쇠메트릭스는 비례감쇠형으로 불러 다음과 같은 것 들이 있다.

(a) 질량비례형감쇠

$$(C) = a_M(M), \quad a_M = 2h_{C1}\omega_{C1}, \quad h_G = h_{C1} \frac{\omega_{C1}}{\omega_G} \quad (12)$$

(b) 강성비례형감쇠

$$(C) = a_K(K), \quad a_K = \frac{2h_{C1}}{\omega_{C1}}, \quad h_G = h_{C1} \frac{\omega_G}{\omega_{C1}} \quad (13)$$

(c) 레일리 감쇠

$$\begin{aligned} (C) &= a_M(M) + a_K(K), \\ a_M &= \frac{2\omega_{C1}\omega_{C2}(h_{C1}\omega_{C2} - h_{C2}\omega_{C1})}{(\omega_{C2}^2 - \omega_{C1}^2)}, \\ a_K &= \frac{2(h_{C2}\omega_{C2} - h_{C1}\omega_{C1})}{(\omega_{C2}^2 - \omega_{C1}^2)} \end{aligned} \quad (14)$$

여기에서, ω_{Cj} 는 2질점계의 감쇠가 없는 경우를 가정했을 때 구해지는 j 차의 원고유진동수, h_{Cj} 는 j 차 고유진동모드의 감쇠정수이다. 비례감쇠에서 감쇠정수는 각 고유진동모드별로 구해진다. 질량비례형 및 강성비례형에서는 1차고유진동모드의 감쇠정수 h_{C1} 을, 레일리 형에서는 1차와 2차의 감쇠정수 h_{C1}, h_{C2} 를 설정할 필요가 있다.

비례감쇠에서는 감쇠가 없는 경우를 가정해 구해지는 고유원진동수 및 고유진동모드가 둘 다 실수이며, 또한, 감쇠가 있는것을 가정해 구해지는 고유진동수 및 고유진동모드도 둘 다 실수이고, 양자의 고유모드는 동일하다. 감쇠가 있는 경우의 고유진동수 $\omega_{Cj,D}$ 는 다음식과 같이 감쇠가 없는 경우의 고유진동수에 비해 작게된다.

$$\omega_{Cj,D} = \sqrt{1 - h_{Cj}^2} \omega_{Cj} \quad (15)$$

3.3.2 비비례감쇠

상부구조와 하부구조는 원래는 별개의 구조이고, 각각 고유의 진동특성, 응답특성이 존재하는 것으로 생각할 경우에는, 각부분에 감쇠가 정의되게 되므로, 계전체로서의 감쇠를 구하여 보면, 그 결과는 비비례감쇠가 된다.

비비례감쇠에서는, 감쇠가 있는 것으로 가정하여 구해진 고유진동수 및 고유진동모드가 일반적으로 공역복소수가 되고, 어떤 고유진동모드에서의 자유진동을 고려해보아도 상부구조와 하부구조의 진동에 위상차를 가지는 감쇠진동이 된다.

편연적으로 비비례감쇠가 되는 예로서는, 최근의 해석에서 늘어나고 있는 면진 혹은 제진장치를 도입한 구조의 응답해석 또는 건물과 지반의 연성을 고려한 응답해석이 있다.

3.3.3 감쇠메트릭스의 가정

식(8)에서 주어진 감쇠는 명확히 비감쇠이지만, 본 논문에서는 레일리형의 비례감쇠를 가정하기로 한다. 1차 혹은 2차의 고유진동모드에 대한 감쇠정수 h_{C1} , h_{C2} 를 0.02로 가정한다.

이와 같은 가정은 상부구조와 하부구조의 진동특성의 관계에 따라 너무 안이한 가정이 될수도 있다. 예를 들면 식(8)에 있어서 감쇠메트릭스와 강성메트릭스를 비교하면 다음의 특별한 조건을 만족하는 경우에 있어서만 식(13)의 강성비례형의 비례감쇠가 되는 것을 알 수 있다.

$$\frac{h_1}{h_2} = \beta, \quad h_1 = \frac{\omega_1}{\omega_{C1}} h_{C1} = \frac{h_{C1}}{\beta} \quad (16)$$

이와 같이 비례감쇠와 비비례감쇠에 있어서 각층에 설정되는 감쇠정수에 큰 차이가 발생할 수 있는 것을 주의할 필요가 있다.

4. 2질점계의 진동특성

감쇠없는 자유진동문제는 다음의 식에서 보여지

는 고유치문제가 된다.

$$(M)[\ddot{y}] + (K)[y] = [0] \quad (17)$$

2질점계의 고유진동수 ω_{Cj} 는 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{pmatrix} \omega_{C1} \\ \omega_{C2} \end{pmatrix} = \left[\frac{(1+\alpha)\beta^2 + \alpha \pm \{[(1+\alpha)\beta^2 + \alpha]^2 - 4\alpha^2\beta^2\}^{\frac{1}{2}}}{2\alpha\beta^2} \right]^{\frac{1}{2}} \omega_1 \quad (18)$$

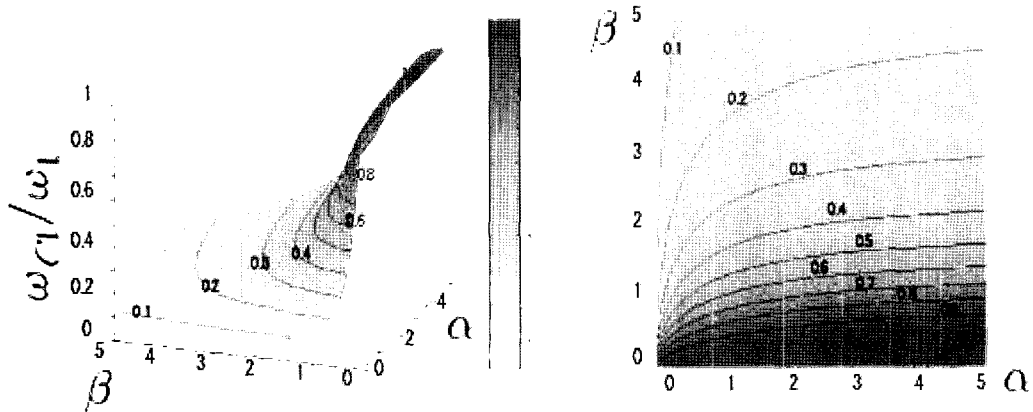
위식에 의거해,

$$\omega_{C2} = \frac{\omega_1^2}{\beta \omega_{C1}} \quad (19)$$

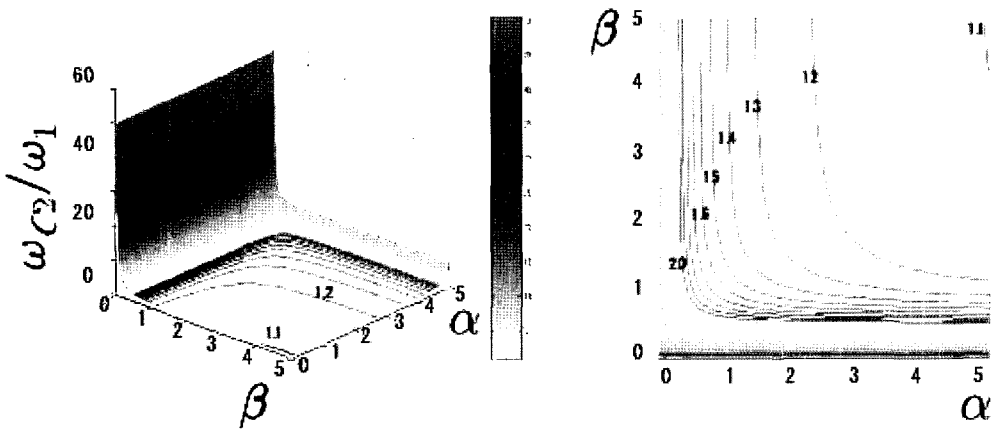
그러나, α 와 β 의 대단히 복잡한 함수가 되므로, 손계산으로 진동특성을 고찰하는것은 어려움이 있다. 아래의, 계산결과는 α , β 공간에 있어서의 진동 및 응답의 분포특성으로서 3D 그리고, 2D표시를 이용해서 나타내었다.

<그림 5, 6, 7>은 α , β 공간에 있어서의 2질점계 모델의 ω_{C1}/ω_1 , ω_{C2}/ω_1 , ω_{C1}/ω_{C2} 의 분포를 보여준다. 이상의 그림에 의해 다음과 같은 진동특성을 알 수 있다.

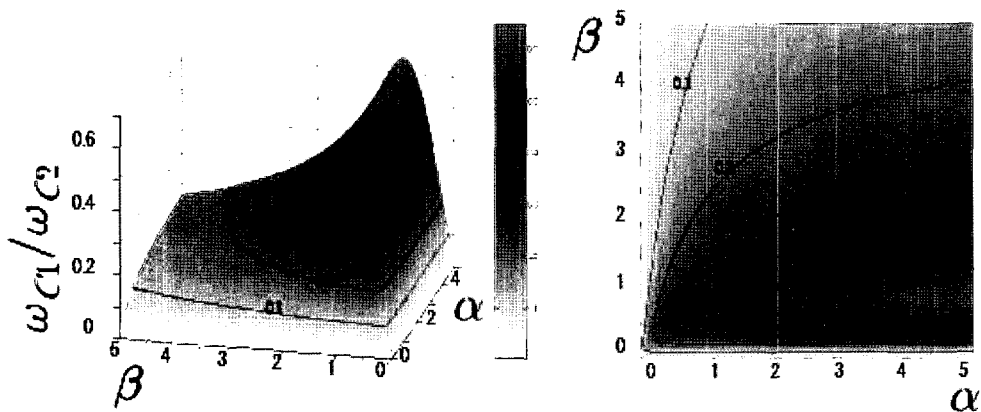
- (1) <그림 5>로부터, $\beta=0$ 에서, $\omega_{C1} = \omega_1$ 동시에 $\omega_{C2} = \infty$ 이다. 한편 β 가 커지고 α 가 작아질 때, ω_{C1} 은 감소함을 알 수 있다. <그림 4>로부터 이러한 (α , β)의 영역은 하부구조에 면진장치를 도입한 경우에 해당함을 알 수 있다.
- (2) <그림 6>로부터, $\beta=0$ 또는 $\alpha=0$ 에서 $\omega_{C2} = \infty$ 가 된다. 한편, β 가 커지고 α 가 커질 때 영역에서 ω_{C2} 는 단순감소하고 ω_1 에 근접함을 알 수 있다. 이때, ω_{C1} 은 0에 가까워진다.
- (3) <그림 7>로부터, $\omega_{C1}/\omega_{C2} \leq 1$ 임을 알 수 있다. 특히, β 가 1에 가까워지고 α 가 ∞ 에 가까워질 때 최대치로서 $\omega_{C2} = \omega_{C1}$ 이 되는 것을 알 수 있다. 이러한 (α , β)의 영역은, 상부구조에 TMD를 도입한 경우에 상당한다. <그림 7>에서, ω_{C2}/ω_{C1} 이 아니라 ω_{C1}/ω_{C2}



〈그림 5〉 α, β공간에 있어서의 ω_{C1}/ω_1 분포



〈그림 6〉 α, β공간에 있어서의 ω_{C2}/ω_1 분포



〈그림 7〉 α, β공간에 있어서의 ω_{C1}/ω_{C2} 분포

를 택한 이유는 후에 기술할 응답특성과의 유사성을 쉽게 보여주기 위함이다.

- (4) 상부구조가 셸공간구조인 경우의 (α , β)의 영역은 어떻게 되는가에 대해서는 필자는 특별

히 정보를 가지고 있지는 않지만, 예를 들어 α , β 둘 모두 0.5~3.0이라면, 2질점계의 고유진동수와 고유진동모드가 크게 변화하는 영역에 있게 됨을 알 수 있다.

5. 정현파입력에 대한 응답특성

5.1 1자유도계

여기에서는 상부구조가 직접입력을 받아 응답하는 경우의 응답특성치를 이용하여, 하부구조를 연결해서 2자유도계가 된 경우의 상부구조의 응답특성치를 정리하고 고찰한다. 진동방정식은 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\ddot{y}_1 + 2k_1\omega_1\dot{y}_1 + \omega_1^2 y_1 = -\omega_0^2 a_0 \sin\omega_0 t \quad (20)$$

여기에서, a_0 는 입력의 변위진폭, ω_0 는 입력의 원진동수, t 는 시간을 나타낸다. 감쇠정수에 대해서는 $k_1=0.02$ 로 가정한다.

입력진동수의 고유진동수에 대한 비 ω_0/ω_1 에 대하여, 변위응답배율 및 절대가속도 응답배율을 계산하고, 공진곡선을 구해, 최대치를 각각 $y_{1\max}$, $a_{1\max}$ 로 둔다. $y_{1\max}$, $a_{1\max}$ 의 근사치는 각각에 대해 $1/2k_1$ 으로서 주어진다. 즉, 최대응답배율은 약 25배가 된다. 또한 $y_{1\max}$ 와 $a_{1\max}$ 가 얻어지는 진동수비에 대해서는 감쇠의 영향에 의해 차는 있지만, 그차는 아주 작으므로 무시가능한 범위이다.

5.2 2자유도계

계산의 순서는 다음과 같다.

1. 파라메타 α 와 β 를 설정한다.
2. 상부구조의 응답의 변화를 주목하는 입장에서부터, 입력진동수 ω_0 와 상부구조단독의 경우의 고유진동수 ω_1 에 대한 진동수비 ω_0/ω_1 을 정의하고, ω_0/ω_1 에 대하여, 정상해를 계산한다. 계산은 적당한 초기값을 주어 시각력 응답계산으로 한다.
3. 각 절점에 대하여, 층간변위응답배율, 가속도응답배율을 구한다.
4. 상부구조의 응답의 변화를 주목하는 입장에서부터 다음의 파라메타를 정의한다.

$$X_1 = \frac{\text{상부구조의 층간변위응답배율}}{y_{1\max}}$$

$$A_1 = \frac{\text{상부구조의 절대가속도응답배율}}{a_{1\max}}$$

$$A_2 = \frac{\text{하부구조의 절대가속도응답배율}}{a_{1\max}}$$

여기에서, 이러한 파라메타를 응답배율로 부르기로 한다. 단, $y_{1\max}$, $a_{1\max}$ 는 상부구조가 단독으로 존재할 경우의 변위응답배율, 가속도응답배율의 최대치를 나타냄에 유의한다.

5. X_1 , A_1 및 A_2 와 ω_0/ω_1 의 관계를 각각 공진곡선으로서 구한다.
6. 각 공진곡선에서 구해진 최대치를 $X_{1\max}$, $A_{1\max}$ 및 $A_{2\max}$ 라 한다.

하부구조의 가속도응답배율 A_2 는, 어떤 ω_0/ω_1 에 대하여, 상부구조의 가속도응답배율 A_1 이 얻어진 시각에서의 값이지만, 각 절점위치에서의 응답간에 위상차가 없다는 사실로부터, A_2 를 A_1 과 연관성없이 구한다고해도 동일한 값이 구해진다. 또한 A_2 는 A_1 과의 부호관계를 포함해서 구해지므로, 절대치로서의 진폭으로서 구해지는 통상의 공진곡선과는 틀리게 절점1과 절점2의 관성력의 방향이 연상가능하도록 되어있다. 1차고유진동모드의 공진에 주목하여, 상부구조의 층간변위응답배율 X_1 의 결정시각으로부터 $A_{1\max}$, $A_{2\max}$ 를 구했다고 하더라도 위에서 언급한 내용과 동일한 이유로 동일한 결과치를 보여준다.

<그림 8>은 α , β 공간에 있어서의 정현파입력에 대한 상부구조의 최대가속도응답배율 $A_{1\max}$ 의 분포를 보여준다. <그림 9>는 α , β 공간에 있어서의 정현파 입력에 대한 하부구조의 최대가속도응답배율 $A_{2\max}$ 의 분포를 보여준다. <그림 10>은 <그림 8>과 <그림 9>에 있어서의 $\alpha=3$ 에서 자른 수직단면에 있어서의 β 와 $A_{1\max}$ 및 $A_{2\max}$ 의 관계를 보여준다. 이러한 그림에 의하여, 정현파입력에 의한 2절점계의 다음과 같은 응답특성을 고찰가능하다.

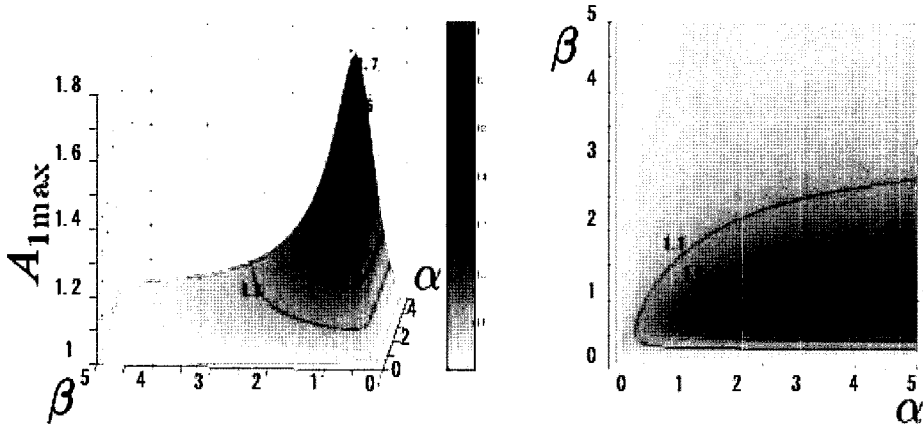
- (1) <그림 8>로부터, $A_{1\max}$ 분포는 $\beta=0$ 또는 $\alpha=0$ 에서 최소값이 되고, $\beta=1$ 동시에 $\alpha=\infty$ 에

서 최대값이 됨을 알수있다. <그림 10>에서 보이는 것과 같이 A_{1max} 분포는 하나의 α 에 대하여 하나의 최대값을 가진다.

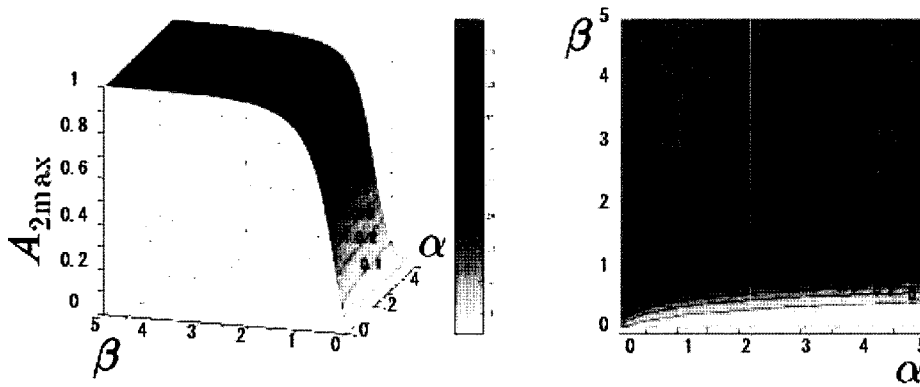
- (2) <그림 8>로부터, A_{1max} 분포의 봉우리에 해당하는 위치에서의 A_{1max} 의 값은, $(\alpha, \beta)=(3, 0.8)$ 에서 약1.5, $(\alpha, \beta)=(1.5, 0.75)$ 에서 약 1.3,

$(\alpha, \beta)=(1, 0.6)$ 에서 약 1.2, $(\alpha, \beta)=(0.5, 0.4)$ 에서 약1.1의 값을 가짐을 알수있다. 즉 이러한 (α, β) 의 범위에서는 하부구조에 의한 상부구조의 응답이 한층 더 증폭되어지는 경향이 보여진다.

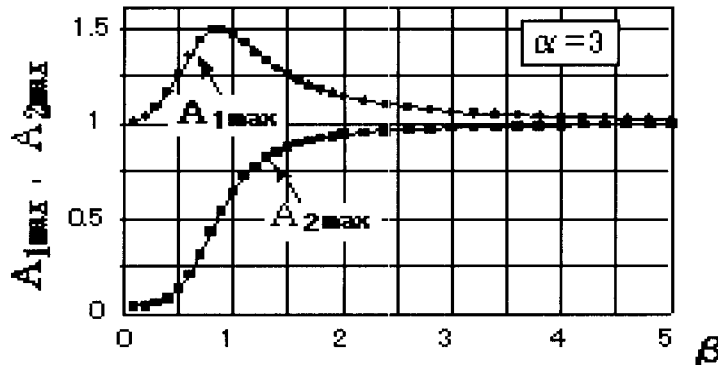
- (3) <그림 9>과 <그림 10>으로부터, A_{2max} 의 분포는, $\beta=0$ 에서 최소치0가 되고, $\alpha=0$ 동시에



<그림 8> α, β 공간에 있어서의 정현파입력에 대한 A_{1max} 분포



<그림 9> α, β 공간에 있어서의 정현파입력에 대한 A_{2max} 분포

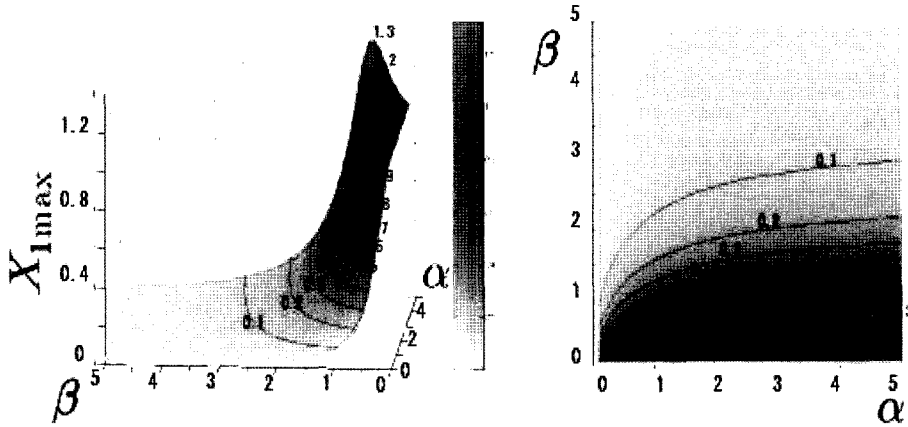


<그림 10> $\alpha=3$ 에 있어서의 A_{1max}, A_{2max} 와 β 의 관계

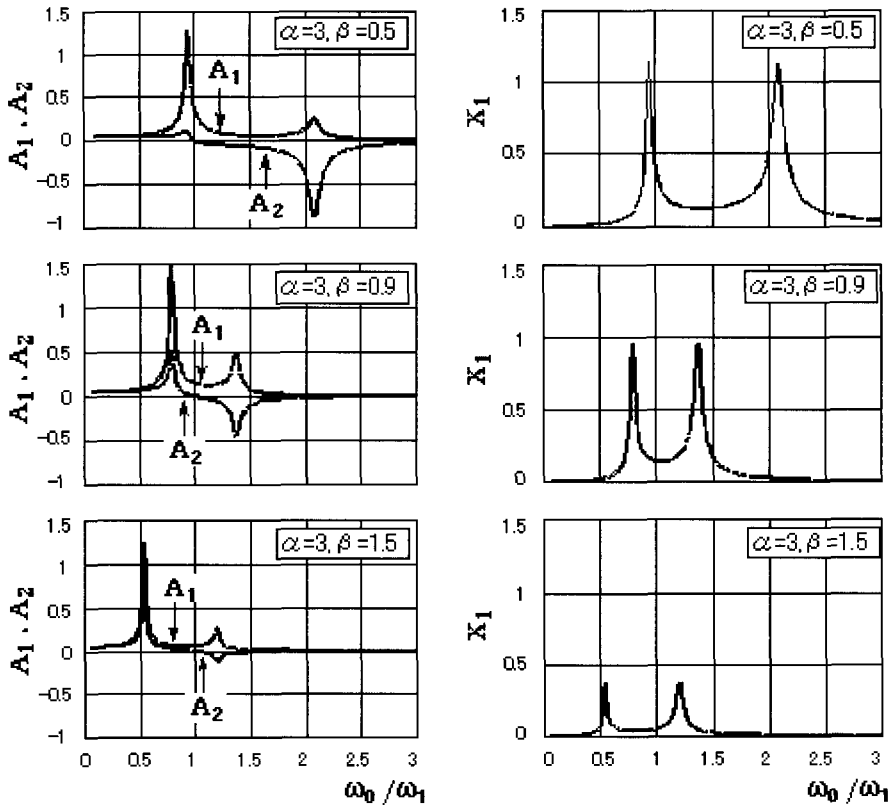
$\beta = \infty$ 에서 최대치1이 되는 단순증가의 분포를 보여줄 수 있다.

- (4) <그림 9>로부터, A_{2max} 의 값은, (2)에서 예시한 (α, β)를 포함한 범위에서는 반대로 작게 되는 것을 알 수 있다.
- (5) A_{1max} 분포는 <그림 5>의 ω_{c1}/ω_1 분포와 취하는 값은 다르지만 닮은 분포경향을 보여주고 있다.

<그림 11>은, α, β 공간에 있어서 정현파입력에 대한 상부구조의 최대층간변위응답배율 X_{1max} 의 분포를 보여준다. X_{1max} 분포는, $\beta=0$ 에서 1, $\alpha=0$ 에서 0, 하나의 α 에 대하여 하나의 최대값을 가진다. 이 최대값을 가지는 β 의 값은 A_{1max} 에 비해 약간 작게 되지만, 이것은 응답모드가(α, β)에 의해 변화하는 것에 원인이 있다.



<그림 11> α, β 공간에 있어서의 정현파입력에 대한 X_{1max} 분포



<그림 12> $\alpha=3$ 에 있어서의 A_{1max}, A_{2max} 와 β 의 관계

<그림 12>는, <그림 10>에 보여진 $\alpha=3$ 인 경우에 대해서, β 을 0.5, 0.9, 1.5로 둔 경우의 X_1 , A_1 및 A_2 와 ω_0/ω_1 의 관계를 각각 공진곡선으로서 표현한 것이다. 위에서 언급한것과 같이 A_2 는 A_1 을 정 방향으로 두었을 경우의 부호의 관계를 포함해서 보여주고 있다. <그림 12>로부터 다음의 응답특성을 알수가 있다.

- (1) $\beta=0.9$ 는 $A_{1\max}$ 분포의 봉우리에 해당하므로, $A_{1\max}$ 의 값은, $\beta=0.9$ 에서 크고, $\beta=0.5$ 와 $\beta=1.5$ 에서는 작은 값을 보여준다. $A_{1\max}$ 와 동일 시각에 구해진 $A_{2\max}$ 는 β 가 클수록 큰 값을 보여준다.
- (2) 2차고유진동모드가 공진되는 진동수비 $\omega_0/\omega_1 \approx \omega_{C2}/\omega_1$ 에 있어서의 A_1 의 최대값을 $A_{1\max2}$, A_2 의 절대치로서의 최대값을 $A_{2\max2}$ 로 정의한다. $A_{1\max2}$ 는 $A_{1\max}$ 에 비해 값은 작지만, β 에 의한 변화의 의미로서, $A_{1\max}$ 와 동일한 경향을 가진다. 한편, $A_{2\max2}$ 는, β 에 의한 변화의 의미로서, $A_{2\max}$ 와 반대의 경향을 보여준다. 즉, $A_{2\max2}$ 는 β 의 감소함수가 된다.
- (3) 2차고유진동모드가 공진되는 진동수비 $\omega_0/\omega_1 \approx \omega_{C2}/\omega_1$ 에 있어서의 X_1 의 최대값을 $X_{1\max2}$ 라 정의한다. <그림 12>에서 $X_{1\max} = X_{1\max2}$ 이다. 이것은 레일리 감쇠의 가정에 있어서, $h_{C1} = h_{C2} (=0.02)$ 로 설정했기 때문이다. 즉, 만약 강성비레감쇠를 가정했다고 하면 $h_{C1} < h_{C2}$ 이고, $X_{1\max} > X_{1\max2}$ 가 될것은 명확하다.
- (4) $X_{1\max} = X_{1\max2}$ 인 관계와, $A_{1\max}$ 와 $A_{2\max}$ 의 관계 및 $A_{1\max2}$ 와 $A_{2\max2}$ 의 관계를 연결시켜 생각하기 어렵다. 여기서, 새로 말하자면 [층간가속도응답배율] (A_1-A_2)를 정의하여, (A_1-A_2)의 공진곡선을 그려보면, 실은 X_1 의 공진곡선과 동일하게 되는 것을 알수가 있다. 그런데, <그림 8>에서부터 <그림 12>까지는 공진시의 결과이므로, 모드분해해서 고유진동모드로서의 진동에 의한 응답배율을 구한것과 동일한 것이 된다.

6. 지진파입력에 대한 응답특성

정현파 입력에서는, 어떤 독립된 입력진동수비 ω_0/ω_1 를 고려했다. 한편, 지진입력에서는, 하나의 지진파내에, 수많은 진동수성분이 틀린 강도와 틀린 위상을 가지고 혼잡되어있다. 따라서, 응답의 진동수도 어떤 특정한 강도와 특성한 위상을 가진 폭 넓은 진동수성분이 혼잡되어 나타나지만, 그중에서도 1차 고유진동모드와 2차고유진동수모드가 지진파입력의 진동수특성에 반응하여 시간적위상을 가지면서 공진하게 된다. 이와 같이, 정현파입력의 경우와 지진파입력의 경우에는 응답특성의 의미에서 아주 큰 차이점이 있으므로, 양자에 의한 응답의 대응관계를 고찰해 보는 것의 중요한 의미를 찾을 수 있다.

지진응답해석을 행하는 데에 있어, 구조의 동특성을 미리 지정해둘 필요가 있다. 여기에서는, 상부구조의 고유진동수 T_1 을 0.5초와 1초의 두 종류로 두고, h_{C1} 을 0.02로, h_{C2} 를 0.02와 0.05의 두 종류로 설정했다. 사용된 지진파는 일본건축센터가 제안한 모의지진동 BCJL1 WAA 1파를 사용했다. 여기에서는 $T_1=0.5$ 초, $h_{C1} = h_{C2} = 0.02$ 의 결과를 보여준다.

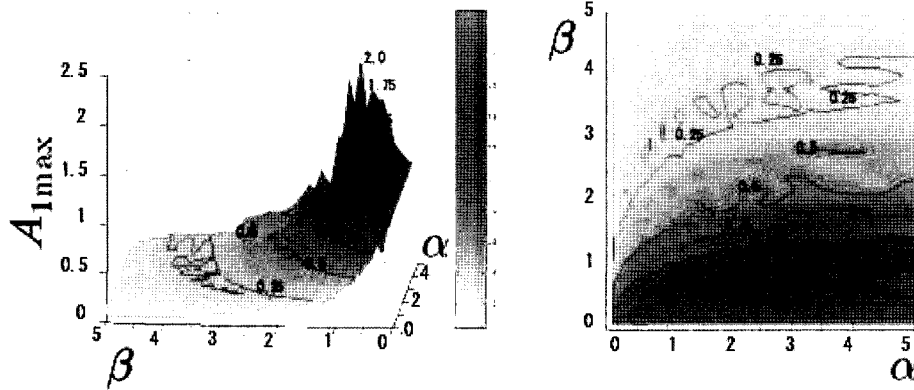
<그림 13>은 α , β 공간에 있어서의 지진파입력에 대한 상부구조의 최대절대가속도응답배율 $A_{1\max}$ 의 분포를 보여준다. <그림 14>는 α , β 공간에 있어서의 지진파입력에 대한 상부구조의 최대변위응답배율 $X_{1\max}$ 의 분포를 보여준다. <그림 15>는 α , β 공간에 있어서의 지진파입력에 대한 상부구조의 최대층간가속도응답배율 $|A_1-A_2|_{\max}$ 의 분포를 보여준다. 여기에서 $A_{1\max}$, $X_{1\max}$ 와 $|A_1-A_2|_{\max}$ 는, 각각 정현파 입력의 경우에 이용한 기호와는 의미가 다르다. 그러나, 응답특성의 상호관계를 고찰하는 입장에서는 유효하다고 할수있다. <그림 13>, <그림 14>와 <그림 15>로부터 다음과 같은 응답특성을 찾아볼수 있다.

- (1) <그림 14>의 $X_{1\max}$ 분포는, <그림 15>의 $|A_1-A_2|_{\max}$ 가 아닌, <그림 13>의 $A_{1\max}$ 분포와 아주 닮은 모습을 보인다.
- (2) $|A_1-A_2|_{\max}$ 는, $X_{1\max}$ 분포에 비해서, $\beta \leq 1$ 인 영역에서 좀 더 큰 값을 보여주는 α 의 영역이 넓게 존재하고, $\beta > 1$ 인 영역에서는 반대로

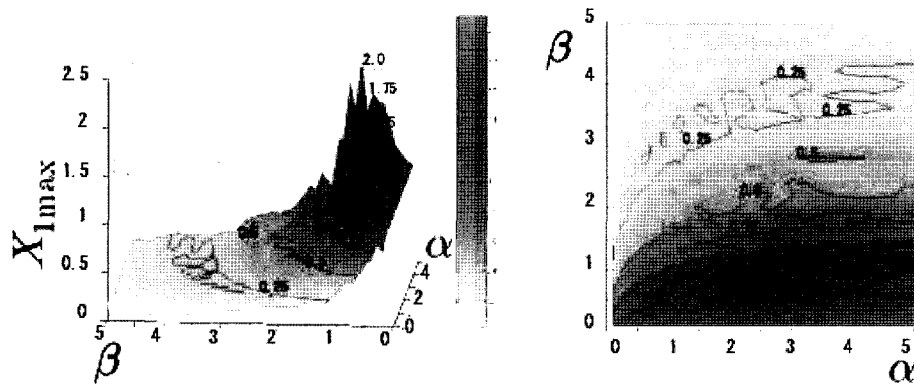
급격히 값이 작아지는 경향을 보여준다.

- (3) (1)과 같은 경향의 보존성을 고찰하기 위해, $T_1=0.5$ 초이고 $h_{C1}=0.02$, $h_{C2}=0.1$ 의 경우와 $T_1=1$ 초이고 $h_{C1}=h_{C2}=0.02$ 인 경우에 대해서 해석한 결과, 두 경우 모두 X_{1max} 분포와 A_{1max} 분포가 아주 닮은 모습을 보이는 것을 확인하였다.

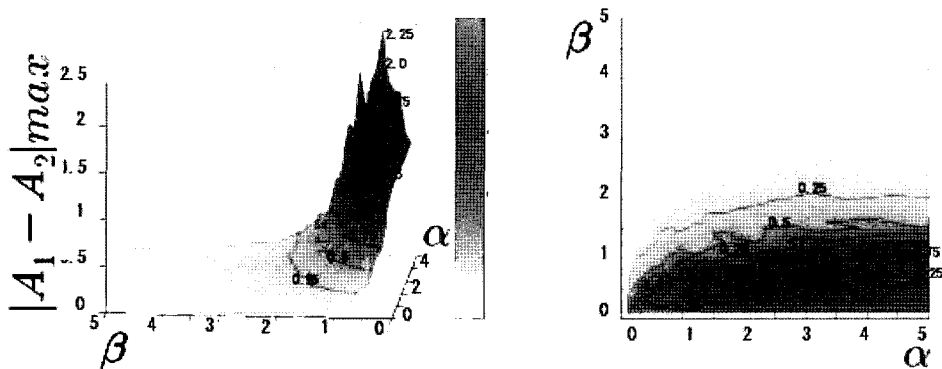
- (4) 상기(1)의 성질은, 정현파입력의 경우의 결과와 아주 상이하지만, 이점에 대해서는 전 절에서 논한 것과 같이 하중조건의 차이에서 오는 결과로 고려된다.
- (5) A_{1max} 분포를 <그림 8>에 비교해보면, 봉우리가 존재한다고 하는 큰 특징에 있어는 공통된 점을 보인다. 그러나, $\alpha=0$, $\beta=0$ 등에서의



<그림 13> α , β 공간에 있어서의 BCJL1입력에 대한 A_{1max} 분포



<그림 14> α , β 공간에 있어서의 BCJL1입력에 대한 X_{1max} 분포



<그림 15> $\alpha=3$ 에 있어서의 BCJL1입력에 대한 $|A_1-A_2|_{max}$ 분포

특성치에 차이점이 존재하고, 봉우리부근의 값은 <그림 8>에 비해 큰 값을 보여준다.

- (6) A_{1max} 에 있어서, $\beta \leq 1.5$ 에서 $A_{1max} \geq 1$ 이 되는 영역이 존재하고, α 가 클수록 큰 값을 보여준다. 본 논문의 계산영역에 범위 안에서, $\beta = 1$ 그리고 $\alpha > 4.5$ 일때, $A_{1max} \geq 2$ 를 보여준다. 한편, $\beta > 1.5$ 에서는, $A_{1max} < 1$ 이 되고, 하부구조를 가지게 됨으로 인해 상부구조의 응답은 직접 지진력을 받는 경우보다 오히려 감소되는 영역이 있음을 보여준다.

7. 결 론

필자는 쉘공간구조가 하부구조에 의해 지지되는 모델을 상정해, 하부구조가 상부구조에 미치는 영향을 고찰하기 위한 전단계로서, 상부구조와 하부구조를 각각 1질점계로 치환하여 연결된 2질점계 모델을 이용하여, 수평입력시의 상부구조에 대한 하부구조의 영향을 고찰하였다. 그 결과, 질량비와 주기비의 공간에서 상부구조의 응답이 증폭되는 영역과 오히려 감소되는 영역이 존재함을 확인할수가 있었다. 또한, 변형과 외력의 대응관계를 검토할수가 있었다. 본 논문의 내용이 하부구조가 상부구조의 지진응답에 미치는 영향을 검토하는 하나의 시점이 되기를 기대한다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 첨단도시개발사업의 연구

비 지원(과제번호#06 R&D B03)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 柴田明德, 最新 耐震構造解析, 森北出版株式会社, 1981
2. R.I Skinner, An Introduction to Seismic Isolation, WILEY, 1993
3. 空間の耐震設計と設計例, 日本建築学会, 丸善株式会社, 2001.1.15
4. 空間構造の数値解析ガイドライン2001, 日本建築学会, 丸善株式会社, 2001.5.20
5. Chanwoo Jung, Motohiko Yamada, Bunji Ishikawa(2000) " Influence of Site Response Effect and Soil-Structure Interaction on the Dynamic Response of Single-Layer Latticed Spherical Shell", Sixth Asian Pacific Conference on Shell and Spatial Structures, Seoul, Korea, pp141-148
6. Motohiko Yamada, Chanwoo jung, Bunji Ishikawa(1999) "Dynamic Response of a Single-Layer Latticed Spherical Shell Subjected to Spatially Varying Seismic Motion, Asia-Pacific Vibration Conference'99 Singapole, pp862-867
7. Dynamic Behavior and Seismic Design of Spatial Structures, 日本建築学会, 丸善株式会社, 2006.3.10