

# 아치구조물의 모의지진파 입력에 따른 지진응답특성에 관한 연구

## A Study on the Seismic Response of Arch Structures Using Artificial Earthquake Ground Motions

정 찬 우\*  
Jung, Chan-Woo

박 성 무\*\*  
Park, Sung-Moo

강 주 원\*\*\*  
Kang, Joo-Won

### 요 약

대부분의 대공간구조물은 극장, 스타디움, 체육관 등 공공성을 가지게 되어 내진안전성에 있어서 중요성이 많이 인식되고 있다. 그러나 구조형식 및 형상에 관하여 다양성을 가지고 있는 대공간구조물이 동적하중인 지진하중을 받을 때 나타나는 구조물의 거동은 파악하기 힘들다. 본 논문에서는 대공간구조의 주 구조요소인 아치구조물에 대하여 고유진동모드를 검토하였고, 모의지진파를 입력하여 지진거동특성을 분석한 결과로서 아치구조물은 설계가속도스펙트럼의 크기보다 장주기 성분에 더 많은 영향을 받는다는 것을 파악하였다.

### Abstract

Seismic safety is more important for large spatial structure such as theaters, stadiums, gymnasiums since these structure are public goods. It is, however, difficult to understand behavior taking place when large spatial structure which has variety of structural system and shape receives seismic load. On this study, the natural vibration mode of arch structure which is main structural element of the large spatial structure, is checked. And then, when the artificial earthquake ground motion is applied to arch structure, it is more affective by long period component than magnitude of design acceleration spectrum.

키워드 : 대공간구조, 아치, 모의지진파, 지진응답특성

Keywords : Large spatial structure, Arch, Artificial ground motion, Seismic response

## 1. 서 론

대공간구조물은 다양한 규모와 형상을 가지므로, 많은 경험을 축적하고 있는 일반적인 라멘 구조물과는 구조특성이 매우 다르고 경험적으로 예측할 수 없는 요소가 많이 존재한다. 구조형식 및 형상에 관하여 다양성을 가지고 있는 대공간구조물이 동적하중인 지진하중을 받을 때 나타나는 구조물의 거동 특성을 파악하기는 더욱 힘들다. 일반적으로 고

층 주택과 상업 빌딩에 비하여 공간구조물은 경량이기 때문에 내진성에 관한 걱정이 적다고 하지만, 대부분의 공간구조물이 체육관, 강당, 홀 등 공공성을 가지게 되어 내진안전성에 관해서 중요성이 많이 인식되고 있는 실정이며, 지진의 발생으로 전파되는 지진동은 여러 영향 인자에 의해 그 특성이 변화된다. 그러므로 하나의 지진동 파형으로 구조물의 동적응답을 평가하는 것은 곤란하다.

본 논문에서는 설계용 스펙트럼에 적합한 모의지진파를 작성하고 수치해석에 의하여 대공간구조의 대표적인 모델인 아치구조물에 대하여 고유진동모드를 확인하고, 각 기준별 설계가속도스펙트럼을 이용하여 국내·외의 기준에 따른 모의지진파의 입력

\* 정희원 · 경북대학교 박사후과정, 공학박사

\*\* 정희원 · 영남대학교 건축학부 교수, 공학박사

\*\*\* 교신저자, 정희원 · 영남대학교 건축학부 부교수, 공학박사

Tel: 053-810-2429 Fax: 053-810-4625

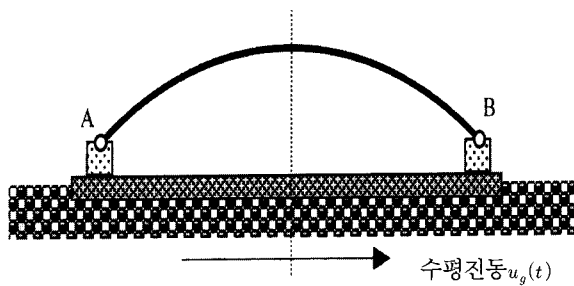
E-mail: kangj@ynu.ac.kr

을 통하여 지진응답특성을 확인하고자 한다.

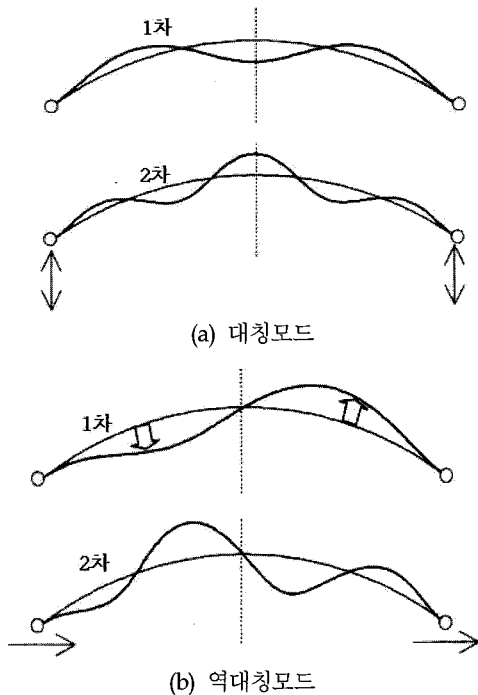
## 2. 대공간구조물의 지진응답특성에 관한 이론적 고찰

### 2.1 아치 형상의 공간구조

<그림 1>과 같이 좌우의 기초가 강한 지중보로 연결된 아치를 생각하여 보자. 아치의 고유모드를 구하면 상하진동에 반응하는 대칭 모드<그림 2(a)>와 수평지진동에 반응하는 역대칭 모드<그림 2(b)>가 구해진다. 아치에서는 모드 고유주기가 어느 정도 접근해 있기 때문에, 수평지진동에서는 역대칭 모드의 복수개정도(複數個程度), 상하진동에서는



<그림 1> 좌우 기초가 강한 지중보로 결합되어 있는 대칭형 아치



<그림 2> 아치구조물의 모드형상

대칭모드의 복수개정도가 탁월할 경우가 많다. 따라서 정적인 지진외력을 산정하기 위해서는, 모드의 특징을 파악해서 지진외력을 추정할 필요가 있다<sup>1)</sup>.

### 2.2 국내·외 내진설계기준

우리나라 건축구조설계기준(KBC2005)의 지진하중편을 살펴보면 대공간구조물의 경우는 내진등급 '특'등급 또는 'I'로 분류될 수 있으며, 이에 따라 중요도 계수가 결정된다. 대공간구조물의 경우, 건물형상에 따라 평면 비정형성의 면의 어긋남 혹은 비평행 시스템으로 분류되어 내진설계범주 'D'에 속하게 되어 동적해석법을 수행하여야 한다. 동적해석법을 수행하는 경우 응답스펙트럼 해석법, 선형 시간이력해석법 또는 비선형 시간이력해석법 중 한 가지 방법을 선택할 수 있다.

일본의 기준을 살펴보면 일반적인 구조물의 경우 건축기준법 제6조 1항에 정해진 확인신청으로, 제18조의 규정에 따라 계획통지를 건축주사에게 제출하여 확인으로 대신하고 있다. 대규모 공간구조의 경우는 시행령 81조 2에는 높이가 60m를 초과하는 건축물로 분류되어 건설대신이 인정하는 구조계산을 수행해야 된다. 대공간 구조에서의 하부구조의 정적설계에서는 1차설계로서 설계용 지진력에 대하여 허용응력도 설계를 행하고, 2차 설계로서 보수수평내력의 확인을 행하고 있다.

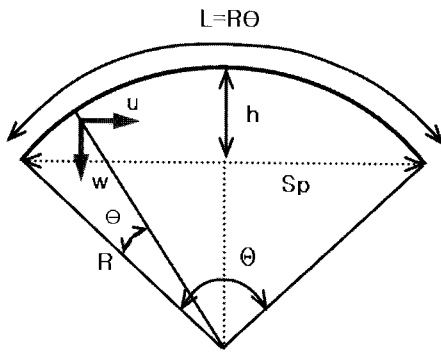
### 2.4 해석방법

비감쇠자유진동방정식을 이용하여 유한요소법에 의한 고유치해석을 행하고, 아치구조물을 일반적인 보요소로 이산화하여 유한요소법에 의해 정식화하여 보요소에서의 선형 강성 매트릭스를 유도한다.

$$[M]\{\ddot{U}\} + [K]\{U\} = \{0\} \tag{2(1)}$$

지붕구조의 경우, 적재하중이 지붕의 주 구조부재의 하중에 비하여 충분히 큰 경우에는 보요소의 양단 절점에서의 하중을 절점의 지배면적에 대해 고려하여 집중질량매트릭스로 구한다.

본 해석에서는 뉴마크 β 법(Newmark-β Method)



〈그림 3〉 해석모델

을 사용하여 평균 가속도법에 해당하는  $\beta = 1/4$ , 시간  $\Delta t$ 는  $1/500(\text{sec})$ 이지만 실제로는 샘플링 시간  $1/1000(\text{sec})$ 을 풀 스케일로 환산하면, 이것보다도 크게 되기 때문에 3차 스플라인(spline)곡선을 이용하여 보간하였다.

### 3. 수치해석

#### 3.1 해석모델

본 연구에 사용된 해석모델은 아치구조물로 <그림 3>에 나타내었다. 그림 중  $\theta$ 는 개각,  $R$ 은 아치의 곡률 반지름을 나타내고, 원호의 길이  $L$ 는  $R\theta$ 가 된다.  $Sp$ 는 저면직경,  $h$ 는 라이즈를 나타낸다. 또한, 아치의  $x$ 방향 변위를  $u$ 로  $y$ 방향 변위를  $w$ 로 나타낸다.

본 논문에서는 아치의 저면직경을 800cm, 겹보기 세장비  $\lambda = L/i$ 을 200으로 두고 아치방향으로 20개로 분할하였다. 각 개각에 따라 아치의 단면과 단위 길이당 질량을 이용하여 1차 고유진동수  $f_1$ 이 2.0이 되도록 설정하였다. 아치의 개각  $\theta$ 는  $30^\circ \sim 180^\circ$  까지  $30^\circ$  간격으로 설정한다.

〈표 1〉 사용 부재 제원 및 4차까지의 고유진동수

모델	$\theta$ (deg)	Sp (cm)	h (cm)	$l/Sp$	I (cm)	$\rho$ (kg/cm)	f1 (Hz)	$M_1$	f2 (Hz)	$M_2$	f3 (Hz)	$M_3$	f4 (Hz)	$M_4$
r200s030f2	30	800	52.7	0.07	4.05	1.85	2.00	A	2.70	S	4.30	S	6.53	A
r200s060f2	60	800	107.2	0.13	4.19	1.61	2.00	A	3.55	S	6.61	S	6.67	A
r200s090f2	90	800	165.7	0.21	4.44	1.29	2.00	A	3.76	S	6.91	A	9.20	S
r200s120f2	120	800	230.9	0.29	4.84	0.94	2.00	A	3.95	S	7.24	A	10.48	S
r200s150f2	150	800	306.9	0.38	5.42	0.63	2.00	A	4.16	S	7.66	A	11.42	S
r200s180f2	180	800	400	0.5	6.28	0.39	2.00	A	4.39	S	8.16	A	12.43	S

#### 3.2 아치의 고유진동특성

<표 1>에서  $M_n$ 은 n차모드로 모드의 분류를 나타낸다. 분류기호 A, S는 각각 비대칭 모드, 대칭 모드를 나타낸다. 여기서 비대칭의 1차 모드 및 2차 모드, 대칭의 1차 모드 및 2차 모드로 분류하고 있다. 아치의 고유진동모드분포의 특징은 수평성분의 경우  $\theta$ 가 클수록 모드의 교대가 급격하게 발생하고, 수직성분의 경우  $\theta$ 가 작을수록 모드의 교대가 급격하게 발생하는 것이다. 이러한 고유진동모드는 같은 형태의 모드에서 개각이 변화에 상관없이 동일한 형상을 가진다.

#### 3.3 모의지진파

실제지진동은 아니지만 인공적으로 작성한 실제지진동에 대체될 수 있는 지진동을 모의지진동(simulated earthquake motion)이라고 부른다. 우리나라와 미국 중부와 같이 지진이 많지 않거나 지진기록이 없는 곳에서는 비슷한 지반환경에서 발생한 지진기록을 보정하여 사용하거나 목표 응답스펙트럼에 상응하는 인공지진을 발생시켜 동적해석에 사용할 수밖에 없다. KBC 2005 기준에서도 지반운동 시간이력자료를 사용할 수 없다면 적절한 인공시간이력을 사용하여 부족분을 보충할 수 있도록 제시하고 있다.

모의지진파의 작성으로는 가장 많이 이용되는 방법의 한 예로서, 식 (2)처럼 파워스펙트럼 특성  $S(w)$ 를 가진 정상확률 과정의 견본함수  $z(t)$ 와 지진동의 비정상성을 나타내는 확정함수 또는 포락함수(envelope function)  $g(t)$ 에 의해 지진가속도 파형을 나타내는 방법에 관하여 고려한다.

$$\ddot{y}_0(t) = g(t) \cdot z(t) \tag{2}$$

비정상성을 보이는 함수  $g(t)$ 에 관해서는 여러 제안식이 있다.  $e$  함수를 이용한 예로는 다음과 같은 것이 있다.

$$g(t) = t^c / t_1^c \tag{3}$$

$$g(t) = \exp(-b(t-t_2)) \tag{4}$$

작성하려고하는 모의지진동의 가속도이력을 분산치  $x_m$  ( $m=0, 1, 2, \dots, N-1$ )으로 표현하면,  $N$ 은 등간격의 분산치 데이터의 수, 지진동의 지속시간을  $T_d$ 라고 하면, 분산치는 시간간격

$$\Delta t = T_d / N \tag{5}$$

분산치 데이터에 대한 복수 푸리에계수를  $C_k$  ( $k=0, 1, 2, \dots, N-1$ )으로 두면,  $C_k$ 는  $x_m$ 의 푸리에변환에 의해 다음과 같이 구해진다.

$$C_k = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x_m e^{-i(2\pi km/N)} \tag{6}$$

$$(k=0, 1, 2, \dots, N-1)$$

여기서  $k$ 는 식 (5)에 의해,  $x_m$ 을 성분파로 분해시켰을 때의 차수이며,  $k$ 차 성분의 진동주기는 다음과 같이 표시된다.

$$T_k = \frac{T_d}{k} \tag{7}$$

$$(k=0, 1, 2, \dots, N/2)$$

유한 푸리에계수  $A_k, B_k$  그리고  $C_k$ 는 다음과 같은 관계가 있다.

$$C_k = \frac{A_k - iB_k}{2} \tag{8}$$

$$(k=0, 1, 2, \dots, N-1)$$

$C_k$ 의 공역복소수를  $C_k^*$ 로 표시하면, 다음의 관계가 성립한다.

$$C_{N-k} = C_k^* \tag{9}$$

$$(k=1, 2, \dots, N/2-1)$$

$k$ 차 성분파의 진폭을  $X_k$  ( $k=1, 2, \dots, N/2-1$ )로 두면, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_k = X_k \cos \phi_k \tag{10}$$

$$B_k = X_k \sin \phi_k \tag{11}$$

여기서  $\phi_k$  ( $k=1, 2, \dots, N/2$ )은, 각성분파의 위상으로서,  $\phi_{N/2} = 0$ 이다. 푸리에스펙트럼을  $F_k$  ( $k=1, 2, \dots, N/2$ )으로 표현하면,  $F_k$ 는  $X_k$ 에 지속시간의 1/2를 곱한 값과 같다.

$$F_k = X_k \frac{R_d}{2} \tag{13}$$

식 (13)을 다음과 같이 바꿔 쓸 수 있다.

$$\frac{1}{2} X_k = \frac{F_k}{T_d} \tag{14}$$

식 (14)에 의해 식 (10)은 다음과 같이 나타낸다.

$$C_k = \frac{F_k}{T_d} (\cos \phi_k + i \sin \phi_k) \tag{15}$$

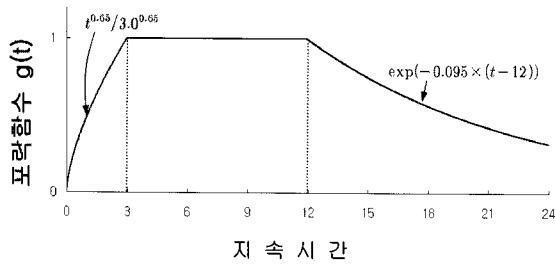
모의지진동이 가져야 될 성질로서 푸리에진폭스펙트럼  $F_k$ 와, 위상각  $\phi_k$ 를 정할 수가 있으면 식 (15)에 의해 복소푸리에계수  $C_k$ 가 정해지고 푸리에역변환을 하면 모의지진동의 가속도력  $x_m$  ( $m=0, 1, 2, \dots, N-1$ )이 구해진다.

포락함수는 각 지진파의 특성으로 상이하지만 한반도지진의 일반적 특성을 고려하기 위해서 <표 2>의 상수값을 사용하였다.

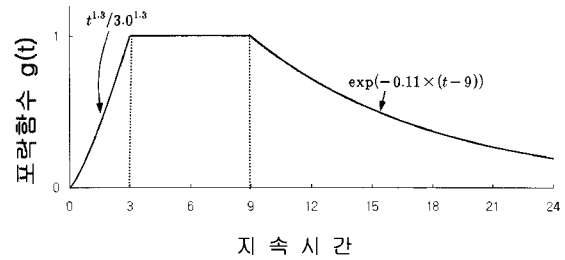
모의지진파의 유효지속시간은 김원배의 “구조물의 동적해석을 위한 한반도의 인공지진파작성”에

<표 2> 모의지진파 포락함수의 상수와 지속시간

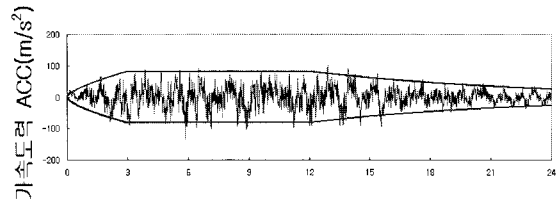
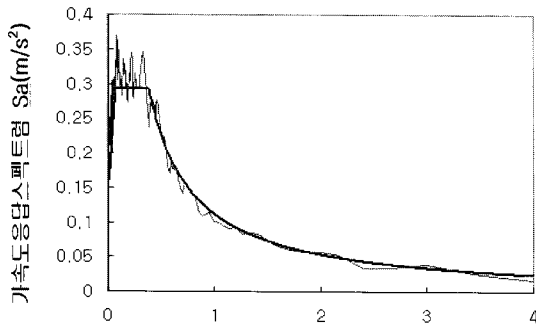
포락함수	b	t <sub>1</sub>	c	t <sub>2</sub>
형태 I (진앙지와 관측지가 비교적 가까운 경우)	0.095	3	0.65	12
형태 II (진앙지와 관측지가 먼 경우)	0.110	3	1.30	9



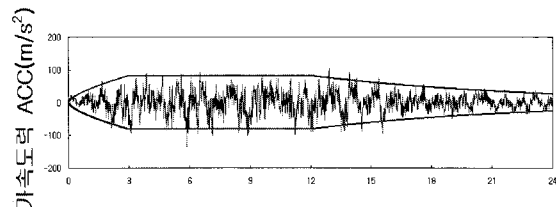
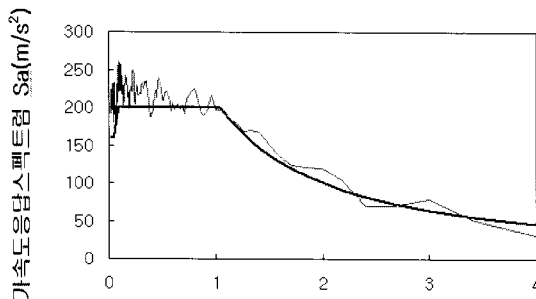
<그림 4> 형태 I의 포락함수



<그림 5> 형태 II의 포락함수



<그림 6> KBC 2005 기준의 가속도응답스펙트럼 및 시간이력그래프 (레벨10,  $S_A$ )



<그림 7> 일본 도로교 시방서 기준의 가속도응답스펙트럼 및 시간이력그래프 (레벨10, 1종 지반)

의해 한반도에서 관측된 속도시간이력곡선의 분석에 의한 결과로는 지진동 시간이 1분 이상으로 보고, 과거 한반도에서 규모  $M=7.0$  이상의 지진이 발생하였던 사실을 감안하여 24초로 계산하였다.<sup>3)</sup> 목표가속도응답스펙트럼 및 시간이력그래프로는 지반 조건은 견고한 지반으로 KBC 2005 규정의 경우 지반분류  $S_A$ , 일본도로교 시방서 기준의 경우 1종 지반을 선택하였다. 최대 설계가속도스펙트럼 값은 지역계수를 약 1.0으로 하는 표준형 지진으로 가정하여,  $250\sim 300\text{cm/sec}^2$ 으로 하였다. <그림 6>과 <그림 7>은 그에 대한 시간이력그래프이다.

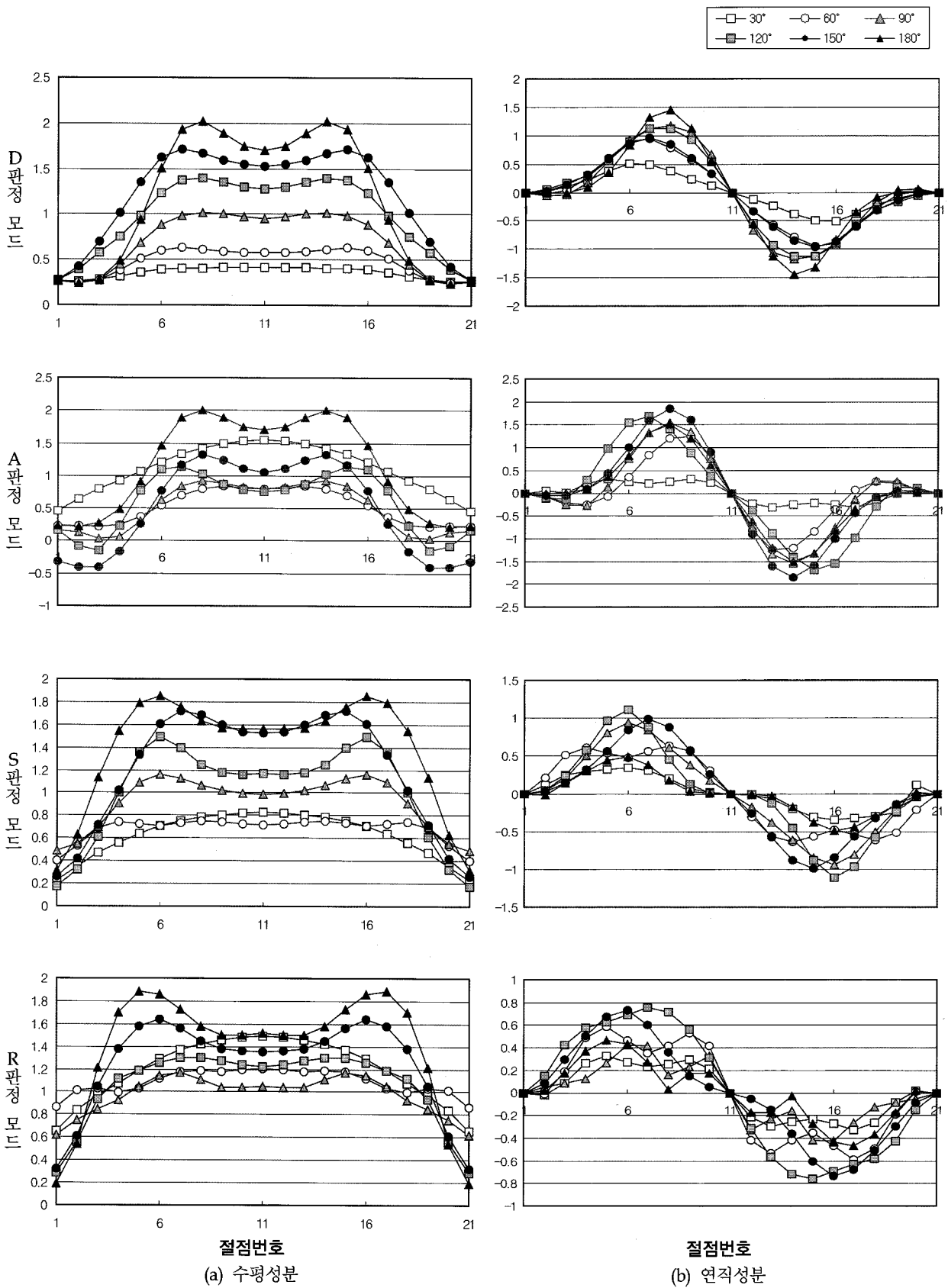
### 3.3 수치해석 결과

<그림 8>과 <그림 9>을 통해 모의지진파 입력에

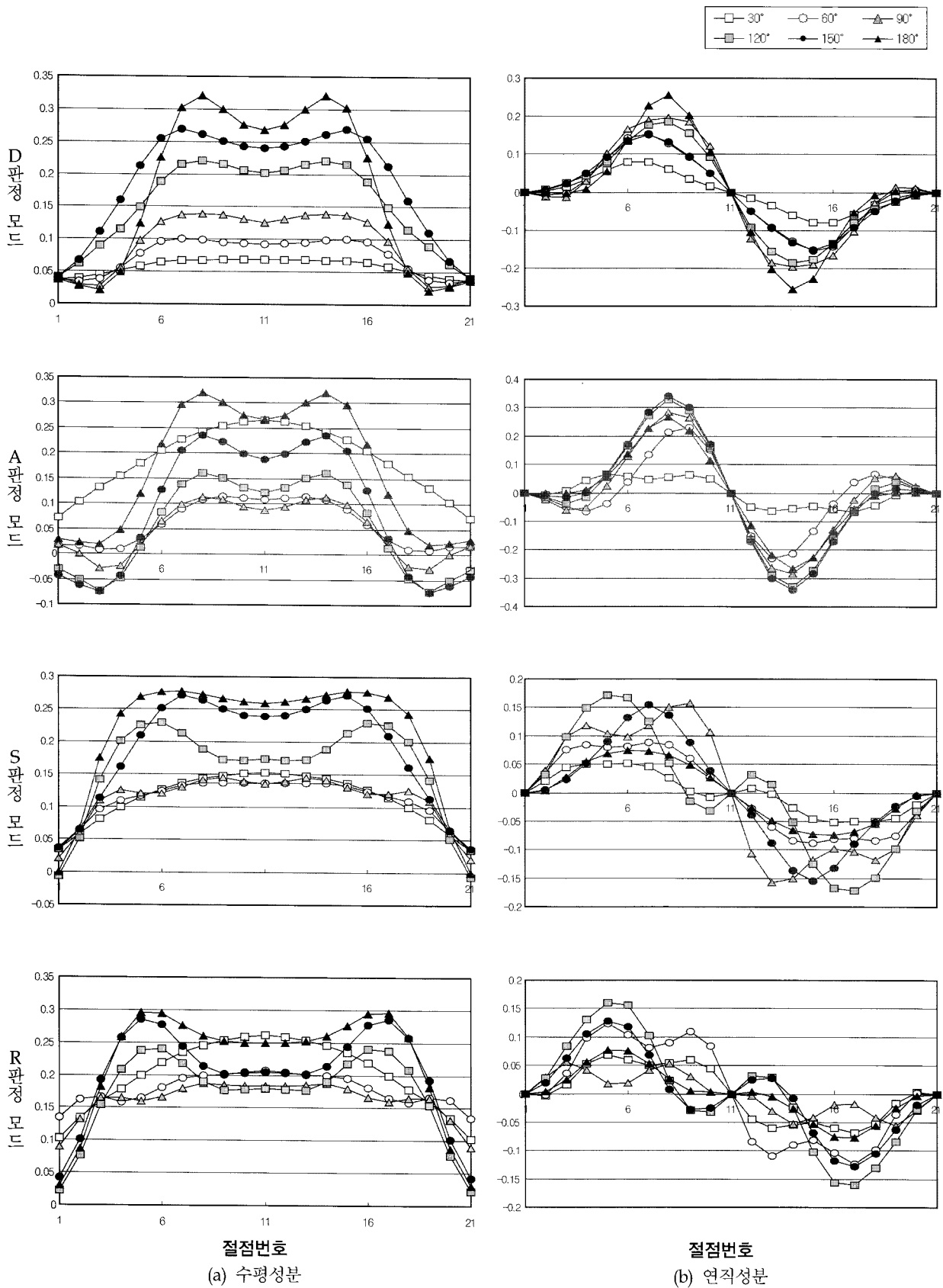
따른 아치구조물의 지진동 응답특성을 특정시각에서의 수평방향과 연직방향 모드를 비교한다. 순간가속도 응답분포를 추출하는 시각의 판단 조건으로서 4종류 (D판정: 변위벡터가 최대가 되는 시각에서의 모드, A판정: 절대가속도 응답벡터가 최대가 되는 시각에서의 모드, S판정: 응력이 최대가 되는 시각에서의 모드, R판정: 입력방향 반력이 최대가 되는 시각에서의 모드)의 판단조건을 적용하고, 판단조건에 따른 응답분포 차이의 유무를 고찰한다.

## 4. 결론

본 논문에서는 수치해석에 의하여 아치구조물의 고유진동모드를 확인하고, 아치구조물에 대하여 각 기준별 설계가속도스펙트럼을 이용한 모의지진파의



〈그림 8〉 아치의 모의지진파 입력에 의한 KBC 2005 기준(레벨10,  $s_4$ )의 수평, 수직성분 모드



〈그림 9〉 아치의 모의지진파 입력에 의한 일본 도로교 시방서 기준(레벨10, 1층 지반)의 수평, 수직성분 모드

입력을 통하여 지진응답특성을 확인하였다. 지진동의 위상은 난수로 하고, 유효지속시간은 24초로한 포락함수를 사용하였으며, 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (1) 대공간구조인 아치, 배럴볼트, 돔이 공통적으로 내포하고 있는 아치구조물의 FEM해석에 따른 고유진동모드를 확인하였다. 수평성분의 경우  $\theta$ 가 클수록 모드의 교대가 급격하게 발생하고, 수직성분의 경우  $\theta$ 가 작을수록 모드의 교대가 급격하게 발생한다. 고유진동모드는 같은 형태의 모드에서 개각이 변화에 상관없이 동일한 형상을 가진다. 비대칭 1차모드 및 대칭 1차모드에서는  $\theta$ 가 커질수록 수평변위성분의 진폭이 증가하고 연직변위성분이 진폭이 감소하는 경향을 보인다.
- (2) 아치구조물에 대하여 모의지진파를 입력하여 시간이력해석을 수행하여 구조물의 지진응답특성의 경향을 확인하였다. 설계응답스펙트럼에서 단주기 성분이 많은 KBC 2005의 레벨 10의 견고한지반과 장주기 성분이 많은 일본도로교 시방서의 레벨 10 표준형지진의 견고한 지반을 비교하면, 최대 설계응답스펙트럼의 크기가 일본 도로교 시방서가 KBC 2005의 40%정도임에도 불구하고, 지진거동특성은 KBC 2005의 211%인 것을 알 수 있다. 이는 공간구조물이 고층구조물과 같이 골조구조물에 비하여 장주기를 갖기 때문으로 해석된다. 또한 공간구조물의 경우 최대 설계가속도스펙트럼의 크기보다 장주기 성분에 더 많은 영향을 받는 것을 알 수 있다.

### 감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업의 연구비 지원(과제번호#06 건설핵심 B03)에 의해 수행되었습니다.

### 참고문헌

1. 日本建築学会, 「空間構造の動的舉動と耐震設計」, 2006.3.
2. 정재경, 한상환, 이리형, “설계응답스펙트럼을 고려한 인공지진파의 발생에 관한 연구”, 한국전산구조공학회 1999년 봄 학술발표회 논문집 pp.145-150(6), 1999.
3. 김원배, “구조물의 동적해석을 위한 한반도의 인공지진파 작성”, 고려대학교 박사학위논문, 1988.2
4. 김진만, “인공지진파 생성기법”, 한국지진공학회 2004년도 Workshop 발표집, 2004.
5. 전대한 강호근, “설계용 스펙트럼에 적합한 인공지진파의 작성과 응답특성의 분석”, 대한건축학회논문집 구조계 22권 5호 (통권 211호) 2006.5.
6. 정찬우, 정환목, “아치구조물에 대한 지진동의 수평·상하 동시입력에 대한 가속도 응답특성”, 한국셀공간구조학회 춘계학술발표회 논문집, pp.239-245, 2006.5
7. 이은숙, 정찬우, 강주원, “라이즈비(Rise-ratio)에 따른 아치의 고유진동 특성” 한국셀공간구조학회 춘계 학술발표회 논문집, 통권 제4호, pp238-243, 2007.5.
8. 加藤史郎, 向山洋一, “植木隆司, 高ライズ単層ラチスドームの地震応答性状”, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 442号, 1992.12.
9. 加藤史郎, 向山洋一, “低ライズの単層ラチスドームの地震応答性状”, 日本建築学会構造系論文集, 第 488号, pp.87-96, 1996.10.
10. 加藤史郎, 小西克尚, “ラチスドームのPush-over analysisに基づく地震応答堆定に関する一考察(1次モードが支配的な空間構造物に対する検討)”, 日本建築学会構造系論文集, 第 561号, pp.89-96, 2002.11.
11. 전대한, 박학길, 김용부, “건축구조물의 지진응답 해석용 모의지진동에 관한 연구”, 대한건축학회 논문집, 제8권 11호, pp.111-120, 1992.11.

접수일자 : 2008년 10월 8일

심사완료일자 : 2008년 11월 3일

게재확정일자 : 2008년 11월 6일