

국내외 장스팬 구조물의 고유진동수 비교

Comparison of Natural Frequency of Domestic and Foreign Long-spaned Structure

윤성원*
Yoon, Sung-Won

박용**
Park, Yong

요약

최근의 대공간구조물은 장스팬화 됨은 물론이고 경량화되면서 면의 방향의 강성이 매우 작아지고 있다. 이로 인하여 공력불안정 진동의 발생 여부는 물론이고 연성구조물의 판단시에도 고유진동수의 정확한 산정이 필요하다. 그러나 국내외 대공간구조물의 고유진동수 제안식에 대한 연구는 매우 미흡한 실정이다. 따라서 국내의 7개 공간구조물의 고유치해석에서 얻은 근사식을 일본건축학회 고유치해석에 근거한 2가지 제안식과 일본의 28개 공간구조물의 계측치에서 얻은 고유진동수 근사식을 비교하였다. 지붕의 고유진동수는 스패가 증가함에 따라서 작아지는 경향을 확인하였다. 국내의 고유진동수 값은 전반적으로 일본의 공간구조물의 해석과 계측에 근거한 고유진동수보다 동일한 스패에서 작은 경향을 보임을 알 수 있었다. 따라서 국내 공간구조물의 지붕은 일본의 경우보다 비교적 연성구조물인 것을 확인할 수 있다.

Abstract

As a recent spatial structure have become long-spaned and light, stiffness of out-plane is reduced significantly. Due to this, it is necessary to calculate natural frequency correctly to check if structure is flexible or vortex-induced vibration is occurred. However, formula of frequency in domestic and foreign spatial structure has not been performed deeply. In this study, approximated formula obtained by eigenvalue analysis of seven domestic spatial structure is compared with two suggestions based on Japanese standard and formula by measurement of 28 spatial structure in Japan. Natural frequency of roof has a tendency to be reduced as the span of structure increases. Natural frequency of domestic structure is generally less than that of analysis and measurement of spatial structure in Japan. Therefore, it is confirm that roof of domestic spatial structure is relatively rather flexible than that of Japan.

키워드 : 대공간구조, 고유진동수, 스패, 진동계측

Keywords : Spatial Structure, Natural Frequency, Span, Vibration Measurement

1. 서론

최근의 대공간구조물은 장스팬화됨은 물론이고 서스펜션시스템, 공기막구조등을 사용하면서 일반적으로 경량화되면서 면외방향의 강성이 매우 작아지고 있다. 이로 인하여 어느 풍속 영역에서는 공력 부감쇠 효과에 의하여 역대칭모드의 공력불안정진동이 발생한다. 풍동실험^{1),2)} 결과에 의하면 무차원풍속이 1이 되면 공력불안정진동이 발생하기 시작한다. 이 무차

원풍속의 산정시에 지붕의 역대칭모드의 고유진동수에 대한 정확한 산정이 필요하다.

또한 대공간지붕의 구조골조용 풍하중은 가스트 영향계수법에 의하여 산정한다. 이 때에 지붕면의 진동 응답은 무차원진동수의 값에 따라서 1.5 미만의 경우에는 지붕이 비교적 연성 거동을 하여 공진효과를 무시할 수 없게 된다. 이때에도 지붕의 1차 고유진동수의 정확한 산정이 필요하다.³⁾

이와같이 지붕의 고유진동수는 설계단계에서 지붕의 동적해석시 매우 중요한 패러미터임에도 불구하고 대공간구조물의 고유진동수 식에 대한 연구는 매우 미흡한 실정이다. 그 이유는 최근의 대공간구조물

* 정희원 · 서울산업대학교 건축학부 부교수, 공학박사
TEL : 02-970-6587 Fax : 02-979-6587
E-Mail : swyoon@snut.ac.kr

** 학생회원 · 서울산업대학교 대학원 건축학과 석사과정

은 스펀이 장스팬화됨에 따라 구조시스템이 다양해지고 고유진동수에 영향을 미치는 지점의 구속조건, 스펀/라이즈비, 마감재의 종류가 구조물마다 서로 달라서 정량적인 고유진동수 식의 제안이 어려운 현실이기 때문이다.

따라서 국내 6개 월드컵경기장과 1개 경륜장의 대공간구조물의 고유치해석 결과를 수집하여 고유진동수를 스펀의 함수로 표현하였고, 이 결과를 일본건축학회의 해석치와 비교하였다. 아울러 일본건축학회에서 수집한 28개의 진동계측치에 대한 고유진동수 제안식과 비교함으로써, 국내 대공간구조물의 내풍설계시 기본 데이터로서 활용되고자 하였다.

2. 국내공간구조물의 개요4)

2.1 국내 경기장의 구조시스템

(1) 울산월드컵경기장

울산월드컵경기장의 구조시스템은 철골트러스와 인장케이블의 조합에 의한 백스테이(Back Stay)지지 방식이다. 건물 전면부에는 "스"자 형태의 마스트(Mast)를 세우고 지붕 트러스 중앙부에 연결된 고강도 강봉(Hightension Rod Bar)을 마스트기둥 상단부에 지지, 백스테이를 이용해 지붕트러스의 하중을 주각부로 전달시켰다.

이러한 구조로 인해 건물 후면부인 남측에는 수직 하중만 부담하는 편구조이며, 지붕트러스는 서로 X자형 수평가새로 연결되어 강한 격막작용을 하며, 수평 변형을 건물 양측 구조벽에 전달시키는 역할을 한다.⁵⁾

(2) 전주월드컵경기장

전주 월드컵경기장의 구조시스템은 4개의 모서리에서 연속되는 링 트러스와 브랜치 빔(Branch Beam), 그리고 바닥지지 케이블(Floor Stay Cable)에 의하여 묶여 있는 시스템이다. 경기장 스탠드 네 모서리의 활용도가 적은 공간을 이용하여 큰 마스트를 세우고 지붕 트러스를 매달게 함으로써, 내부에 효율이 좋은 공간이 형성 되었다. 지붕전체가 하나의 칸막이벽으로 거동할 수 있도록 하는 것이 지붕의 안정성을 확보하는데 아주 중요하므로, 메인트러스를 원

형강관과 인장로드(Tension rod)로 보강하였다. 지붕가새로 사용된 인장로드 역시 인장재로서 케이블과 마찬가지로 초기장력을 도입하여 모든 하중조합에 대하여 구조적으로 거동할 수 있도록 계획하였다. 마스트의 주각부는 기초에 과도한 모멘트를 전달하지 않고 시공에도 유리하도록 어느 방향으로든 회전이 가능한 힌지로 계획하였다.⁶⁾

(3) 대전 월드컵경기장

대전 월드컵경기장의 주요부재 구조시스템은 메인 캔틸레버 거더(Main Cantilever Girder)와 이를 하부에서 지지하고 있는 경사재(Front Support) 및 수직재(Main Column), 그리고 수직재 뒤쪽에 설치된 백스테이 트러스 부재들로 구성 되어있다. 지붕구조의 하중구간이 짧고 지붕골조의 단순한 캔틸레버구조로 구성되었기 때문에 주요지붕부재의 각 부재들은 그 중요도를 고려하여 충분한 여유를 확보할 수 있도록 이중시스템으로 설계하였다. 각각의 주요부재 사이를 가로지르는 횡방향 연결트러스를 설치하여 주요부재 상호간의 불균형 거동을 최대한 억제할 수 있도록 하였고, 수평가새는 지붕 면내 강성을 확보하는데 사용되었다.⁷⁾

(4) 부산아시아드 주경기장

부산아시아드 주경기장의 구조시스템은 국내유일의 타원형 개구부를 갖는 인장케이블과 테프론 코팅막에 의한 타원형 개구부를 가진 반구형 돔 구조이다. 국내 유일의 인장케이블 돔 형태의 지붕구조로 강재의 사용을 최소화하는 첨단공법을 적용하였고 지붕 마감재로 테프론 막을 사용하여 지붕구조를 경량화하고 자연채광을 가능하게 설계하였다. 또한 상하부 케이블과 방사성의 케이블이 인장력으로 지붕하중을 지지하고 수직부재로 지붕의 형상을 유지하고 상하부 케이블이 압축력으로 연결되어 안정된 지붕구조를 형성하며, 지붕은 아치와 방사상의 케이블로 전달되며 다시 경사기둥 및 수직기둥을 통해 기초로 전달한다. 또한 타원형 개구부를 설치하여 채광 및 구조적 안정성을 확보할 수 있는 특징을 갖는다.⁸⁾

(5) 서울 2002 월드컵경기장

서울 2002 월드컵경기장의 구조시스템은 16개의 마스트에 지지되는 방사형 강관 트러스의 구조형태로 지붕캐노피의 외각 끝부분과 경기장 측 전단부에 링 트러스를 설치하여 지붕을 일체로 묶여진 일체거동의 구조적인 역할을 이용한 시스템이다. 마스트 형태는 1000~1800mm의 변단면 강관단일 부대로 회전 가능한 지점조건이며 마스트를 제외한 모든 지붕 캐노피는 입체 삼각형 트러스로 계획하였으며, 지붕막 구조 재료는 난연성 및 반영구적인 테프론유리섬유(PTFE)로 사용하였다. 지붕 캐노피는 인장부재인 지지케이블에 의해 마스트에 지지된다. 후면의 지지케이블은 지붕 캐노피에 의해 횡력을 저항하게 한다.⁹⁾

(6) 제주월드컵경기장

제주월드컵경기장의 구조시스템은 전면의 전방트러스와 후면의 후방트러스를 잇는 방사형 트러스(Radial Truss)의 지붕구조를 후면의 마스트에 케이블로 매단 철골트러스+케이블+막구조 시스템이다. 스탠드 구조와 완전히 분리하여 2개 구조의 횡 방향력 및 축 방향력에 의한 거동차이로 인한 이상응력발생을 최소화 하였다. 지붕의 각부 구조로는 지붕구조를 지지하는 가장 주요한 부재인 마스트 구조를 포함한 전방 트러스, 후방 트러스, 방사트러스, 연결트러

스, 전방 빔 트러스 타이 백 케이블을 이용하여 구조 시스템을 형성하였다.¹⁰⁾

(7) 광명돔(경륜경기장)

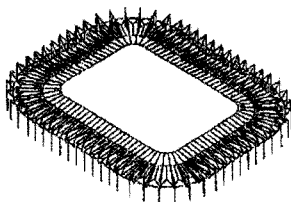
광명돔의 구조시스템은 외부하중에 대해 내부 압축링 트러스와 방사형으로 형성된 플로우 트러스(Flow Truss), 그리고 플로우 셸(Flow shell)의 반력으로 저항하고, 이렇게 외부로 펼쳐나가는 하중에 대해 인장 링 트러스가 지지하여 돔을 형성하는 트러스의 강성으로 전체지붕이 지지되는 시스템이다. 이 시스템은 인장 링 트러스를 수직방향으로만 지지시키고 수평방향에 대해서는 인장 링 트러스가 가지는 강성에 의한 변위를 허용한다. 이 시스템을 통하여 온도변화가 구조물에 끼치는 영향을 최소화 할 수 있었다. 전체지붕은 방사형 플로우 트러스를 주 구조체로 하는 타원형상으로 구성되어 있다.¹¹⁾

2.2 구조해석

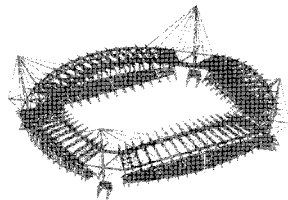
7개 구조물에 대한 고유치해석 결과는 <표2>와 같으며 각 경기장의 구조해석 모델링의 개요는 다음과 같다.

(1) 울산월드컵경기장

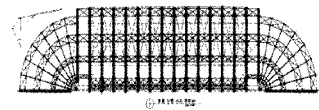
지붕구조물에 대한 구조해석은 국내 상용화 프로그램인 Midas를 사용하였으며, 2,3층으로 구성되는



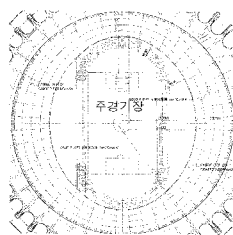
울산월드컵경기장



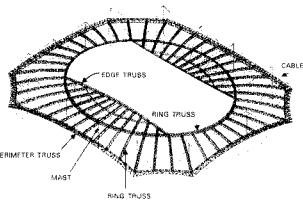
제주월드컵경기장



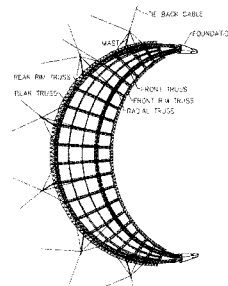
대전 월드컵경기장



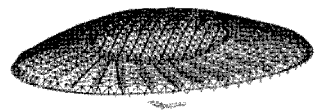
부산아시아드 주경기장



상암 월드컵경기장



제주 월드컵경기장



광명돔

<그림 1> 국내 대공간구조물의 지붕형태^{5)~11)}

지붕전체 입체모델에 대한 고유치해석을 하였다. 건물전체의 동적 거동으로 최대 경사각 1/79에 대해 검토하였으며, 정점에서 발생하는 휨은 0.29tm, 사용하고 있는 부재가 $Z=219\text{cm}^3$ 이므로 $s=0.132\text{t}/\text{cm}^2$ 으로 장방향의 부재 자체 및 접합부에는 특별한 문제가 발생하지 않았다.⁵⁾

(2) 전주월드컵경기장

지붕구조물에 대한 구조해석은 Midas-Gen이 사용되었다. 지붕을 구성하고 있는 트러스의 상세 모델링으로 메인트러스, 링트러스, 외부테두리트러스(Perimeter Truss)등의 정확한 기하학적 구성을 통해 부재설계에 이용되었다. 마스트 하부의 지점이동에 의한 영향을 고려하기 위하여 마스트 하부의 구조물까지 모델에 포함시켜서 해석하였다.⁶⁾

(3) 대전월드컵경기장

지붕구조물에 대한 구조해석에는 하부구조물(스탠드부분)을 포함한 3-D 실사 모델이 사용되었다. 부재 단면의 최적화를 위해 지붕 메인부재의 캔틸레버 거더 및 지지대는 변단면 부재를 설계와 해석 모델에 등가강성을 가지는 부등 단면 보 부재(Non-prismatic Beam Element)로 고려하였다. 지붕판넬 개폐에 따른 이동하중 조건은 판넬이 열릴 경우와 닫힐 경우의 두가지 조건에 대해 검토하였다.⁷⁾

(4) 부산아시아드 주 경기장

지붕구조 해석에는 STAAD III을 사용하였으며, 두단계로 나누어 해석을 하였다. 처음은 상부압축력의 작용전 단계 구조체의 자중 및 기둥상단의 압축력 자

〈표 1〉 일본 계층건물의 개요

No.	명 칭	지붕의 구조형식	최대 스팬(m)	마감재	No.	명 칭	지붕의 구조형식	최대 스팬(m)	마감재
1	나고야 국제 전시동	입체트러스	134	ALC	15	대성건설(주) 교육훈련센터	텐션 그리드돔	11	막
2	서일본 종합 전시동	현수구조	51	PC판	16	키타큐슈 미디어 돔	입체 트러스구조	145	금속
3	건설성 건축연구소	평행현 트러스	30	콘크리트	17	우지노 초등학교 체육관	원통 단층레티스	18	금속
4	오키나와 컨벤션센터 전시동	철골 아치구조	60	콘크리트	18	북해도시 초등학교 체육관	원통 단층레티스	18	금속
5	스좌 세계 총본산본전	철골 트러스구조	54	PC판	19	高岡法科大学 대학원강당	장현장선 구조	24	금속
6	요코하마 아레나	입체트러스 구조	130	ALC	20	후쿠이현 설립 공룡 박물관내 공룡돔	입체트러스 구조	55	금속
7	사카타시 국제 기념 체육관	장현장선 구조	53	금속	21	토야마현 종합 운동 공원내 옥내 그라운드	아치 원통돔	78	막
8	그린돔	장현장선 구조	122	금속	22	하지시 수족관	단층레티스	60	금속
9	간사이 국제공항 여객 터미널 빌딩	철골트러스 구조	83	금속	23	와세다 실업체육관	시스템트러스	36	없음
10	히카리가오카 돔	케이블보강 단층트러스구조	35	금속	24	스즈오카 스타디움	캔틸레버 트러스	40	막
11	나가노 올림픽 기념 아레나 모형실험	현수구조	20	합판	25	롯데기 청사 옥상돔	장현인장 트러스	13	막
12	나가노 올림픽 기념 아레나	현수구조	80	금속	26	오가사야마 종합공원 메인 아레나	장현장선구조	94	금속
13	코마츠 돔	입체트러스 킥트러스	145	막	27	일본 공학스포츠 홀 출입구	원형 단층레티스	8	금속
14	삿포로 커뮤니티 돔	입체트러스	120	막	28	오카야마 돔	격자그리드	114	막

중을 적용하고, 강재압축링은 단지 하중으로만 적용하였으며, 두 번째로는 상부 압축링이 완료된 단계 지붕 하중 및 모든 하중을 적용하였다. 여기서 압축링은 기둥 상단부를 연결하며 압축링의 역할을 수행한다.⁸⁾

(5) 서울 2002 월드컵경기장

지붕구조 해석에는 Midas-Gen을 사용하였으며, 지붕의 각 절점 및 부재는 Adina 데이터 이용하였고, 지붕트러스는 등가단일재로 변환하여 Adina해석 결과치와 근사한 결과를 얻기 위해 부재비중/탄성계수 수정하였다. 이 후 지붕반력/Mode Shape의 값이 Adina 결과치와 유사함 확인하였으며, 이를 Midas 동적해석에 적용하여 100차 모드까지 고려하며 실행하였다.⁹⁾

(6) 제주월드컵경기장

지붕구조 해석은 기본적인 해석, 동적해석 및 설계는 LARSA를 이용하고, 기본적인 설계결과로부터, 등분포의 풍하중을 재하한 1/2모델을 MCM으로 해석하였으며, 트러스와 케이블의 적정 사이즈는 MCM으로 결정하였다. 2단계 설계의 결과를 이용하여 불균등 풍하중을 재하한 본 모델을 BLD3D를 이용하여 최종해석을 하였다. BLD3D로 규준에 대하여 각 부재들을 점검하였다.¹⁰⁾

(7) 광명동(경륜경기장)

지붕구조 해석에는 ANSYS가 사용되었으며 지붕 트러스의 각 부재는 보(Beam)요소로 구성되었다. 풍압의 입력을 위하여 압력전달 매개체인 면(Surface) 요소를 사용하였다. 면 요소는 강성과 질량이 거의 0에 가깝도록 모델링 하였으며 삼각형 형태로 지붕면 내 절점에 연결되었다.¹¹⁾

3. 일본 공간구조물의 개요

〈표1〉 일본 철골조 공간구조물의 개요이다. 스패는 11m~145m에 분포하고 있다. 전체 28개동의 구조시스템은 트러스구조 42.8%, 래티스구조 17.8%, 장현보 14.2%, 현수구조 10.7%, 기타구조 14.5%로 구성되어 있다. 마감재는 금속 46.4%, 막 25%, ALC

7.1%, PC판 7.1%, 기타 14.4%로 구성되어 있다.

4. 고유진동수 분석

4.1 국내 해석치

〈표2〉에 국내 공간구조물의 고유진동수와 스패를 정리하였다. 스패는 92.4m~205.4m에 분포하고 있다. 적용 스패는 지붕구조가 실제로 지지되는 지점과 지점 사이의 거리를 기준으로 하되, 광명돔과 같이 타원형의 두방향 지붕골조의 경우는 단변의 거리를 기준으로 하였다.

고유진동수를 스패으로 표현하면 식 (1)과 같으며, 상관계수 값이 가장 큰 식을 적용하였고 R2은 0.467이다.

$$f = -0.39 \ln(L) + 2.646 \quad (1)$$

여기서 f = 고유진동수(Hz)

L = 스패(m)

〈표 2〉 국내 공간구조물의 고유진동수와 스패

경기장명	지붕의 구조시스템	고유진동수 (Hz)	스패 (m)
울산 월드컵	철골트러스+백스테이 케이블 (Back Stay Cable)+ 금속판	0.84	92.4
전주 월드컵	철골트러스+마스트+현수 케이블+패널(Panel)	0.957	130
대전 월드컵	철골 캔틸레버 거더+백스테이 시스템+패널	0.702	126
부산 아시아드	케이블 트러스+막	0.453	180
상암 월드컵	철골 트러스+케이블+막	0.368	162
제주 월드컵	철골 트러스+케이블+막	0.664	205.4
광명동	철골 플로우 트러서(Flow Truss)	0.745	180

4.2 해외 제안식

(2) 식과 (3)식은 일본건축학회 [건축물 하중지침]³⁾에서 제안한 고유치해석 도표에서 각 스패에 대응하는 고유진동수 값을 읽어드려서 작성한 식이다. 이를 각각 양단단순지지보와 주변단순지지판으로 가

정한 경우이다. 또한 공간구조물의 높이는 10m ~ 30m, 스패는 10m ~ 180m를 대상으로 하였으며, 이때 보의 휨강성은 자중에 의한 최대 처짐은 스패의 1/300로 설정하였다.

(4)식은 일본 28동의 진동계측에서 얻은 고유진동수 식이다.¹²⁾ 계측된 데이터는 건물이 건설중이거나 준공직후가 대부분이다. 그러나 준공후 몇 년이 경과된 후에 계측된 것도 있다. 진동계측방법은 정상가진, 랜덤진동, 및 자유진동 방법을 사용하였다. 정상진동은 가진기에 의한 방법을 사용하였다. 랜덤 진동의 경우는 상시진동, 풍응답, 지진응답 등에서 얻은 결과이다. 자유진동은 로프절단, 모래주머니낙하, 인력가진, 가진기 등을 사용하였다.

$$f = -0.57 \ln(L) + 3.776 \quad (2)$$

$$f = -0.49 \ln(L) + 3.309 \quad (3)$$

$$f = \frac{1}{0.007L} \quad (4)$$

여기서 f = 고유진동수(Hz)

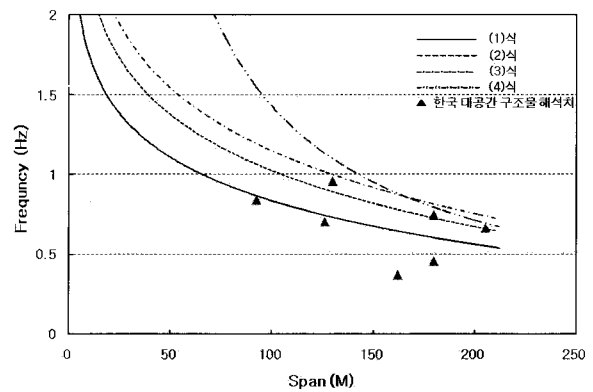
L = 스패(m)

4.3 제안식 비교

〈그림2〉는 국내 7개의 공간구조물의 고유치 해석 결과를 일본의 제안식과 비교한 것이다. 국내 7개 공간구조물의 고유진동수는 스패가 증가함에 따라 전반적으로 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 전주 월드컵 경기장만을 제외하면 전반적으로 국내의 공간구조물의 고유진동수는 일본의 해석과 계측에 근거한 제안식보다 동일한 스패에서 작은 경향을 보이고 있다. 일본의 계측치에서 얻은 고유진동수는 고유치 해석 결과보다 전반적으로 큰 것을 알 수 있다. 또한 국내의 공간구조물의 지붕은 일본의 경우보다 비교적 연성구조물인 것을 확인할 수 있었다.

5. 결론

국내 7개 공간구조물의 고유치 해석 결과를 일본 건축학회 제안식과 일본의 28개 공간구조물의 계측치에서 얻은 고유진동수 근사식을 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.



〈그림 11〉 1층 외곽기둥의 축력 시간이력

1. 지붕의 고유진동수는 스패가 증가함에 따라서 작아지는 경향을 확인하였다. 국내의 고유진동수 값은 전반적으로 일본의 공간구조물의 해석과 계측에 근거한 고유진동수보다 동일한 스패에서 작은 경향을 보이고 있다. 따라서 국내 공간구조물의 지붕은 일본의 경우보다 비교적 연성구조물인 것을 확인할 수 있다.
2. 일본의 계측치와 해석치에서 얻은 고유진동수를 상호 비교하면 계측치의 고유진동수가 해석치 값보다 전반적으로 큰 것을 알 수 있다.

참고문헌

1. A. Miyaki, T. Yoshimura, M. Makino, "Separated shear layer instability and vortex excitation of bluff bodies with elongated cross section", 일본풍공학회지, 제37호, 1988년 10월
2. Y. Uematsu, K. Uchiyama, "Wind-induced dynamic behavior of suspended roofs", the technology reports of the Tohoku University, 제47권, 제2호, 1982년 12월
3. 일본건축학회, "건축물 하중지침 · 동해설", 1993, pp288~299
4. 윤성원, 박용, "대공간 구조물의 고유진동수와 스패의 상관관계", 공간구조학회 춘계학술 발표대회 논문집, 2008.5, pp 155~158
5. 이종규, "울산 월드컵 경기장", 한국강구조학회지, v.12 n.4, 2000. 12, pp 87~112
6. (주)C·S구조엔지니어링 편저, "전주 월드컵경기장 구조설계", 태림문화사, 2000. 02, pp 9~72
7. 김석균, "대전 월드컵 경기장", 한국강구조학회지,

- v.12 n.4, 2000. 12, pp 28~35
8. 전봉수, 이재혁, "부산종합운동장 주경기장구조설계", 한국강구조학회지, v.12 n.4, 2000. 12, pp 36~46
9. 김상식, "서울 2002 월드컵 경기장 구조해석 및 구조설계", 한국강구조학회 학술발표대회 설계사례집, 2002. 06, pp 29~33
10. 전봉수, 공도환, "제주 월드컵 경기장 구조 설계", 한국강구조학회지, v.12 n.4, 2000. 12, pp 134~148
11. 김종수, 김용남, 신창훈, "광명시 경륜돔 경기장의 구조설계", 한국강구조학회지, v.15 n.3, 2003. 09, pp 70~81
12. 일본건축학회, "Damping and Response Control of Shell and Spatial Structures", 2008, pp223~308

접수일자 : 2009년 1월 19일

심사완료일자 : 2009년 2월 27일

게재확정일자 : 2009년 3월 7일