#06 R&D B03

대공간건축물건설기술개발

2011

국토해양부 한국건설교통기술평가원

Land Transpot and Maritime R&D Report

첨단도시개발사업 최종보고서

#'06R&D / B03

대공간 건축물 건설기술개발

2011. 12

주관연구기관 / (주)CS구조엔지니어링

공동연구기관 / (재)한국건설품질연구원

경상대학교

세명대학교 산학협력단

세종대학교 산학협력단

영남대학교 산학협력단

전북대학교

경북대학교

(사)한국공간구조학회 부설기술연구소

한국기술교육대학교 산학협력단

(주)CS구조엔지니어링

위탁연구기관 / (주)타이가

협성대학교 산학협력단

(주)동성중공업

서울과학기술대학교 산학협력단

국 토 해 양 부

한국건설교통기술평가원

제 출 문

국토해양부장관(한국건설교통기술평가원장) 귀하

이 보고서를 "대공간 건축물 건설 기술 개발에 관한 연구"과제의 최종보고서로 제출합니다.

2011 . 12 . .

주관연구기관명 : (주)CS구조엔지니어링
주관연구책임자 : 김 종 수
협동연구기관명 : (재)한국건설품질연구원
협동연구책임자 : 이 성 민
협동연구기관명 : 세명대학교 산학협력단
협동연구책임자 : 김 승 덕
협동연구기관명 : 전북대학교
협동연구책임자 : 김 영 문

공동연구기관명 : 경상대학교
공동연구책임자 : 이 상 진
공동연구기관명 : 세종대학교 산학협력단
공동연구책임자 : 이 재 홍
공동연구기관명 : 영남대학교 산학협력단
공동연구책임자 : 강 주 원
공동연구기관명 : 경북대학교
공동연구책임자 : 김 철 환
공동연구기관명 : 전북대학교
공동연구책임자 : 정 대 업
공동연구기관명 : (사)한국공간구조학회 부설기술연구소
공동연구책임자 : 권 택 진
공동연구기관명 : 한국기술교육대학교 산학협력단
공동연구책임자 : 이 승 재

■ 주관연구기관 참여연구원((주)CS구조엔지니어링)

/ 수석연구원 김 종 수
/ 책임연구원 백 기 열
/ 선임연구원 박 형 석
/ 선임연구원 류 현 희
/ 선임연구원 이 희 수
/ 선임연구원 정 덕 환
/ 선임연구원 윤 세 한
/ 선임연구원 김 흥 수
/ 선임연구원 남 승 영
/ 선임연구원 박 명 현
/ 선임연구원 박 형 준
/ 선임연구원 하 창 우
외 18명

■ 협동연구기관 참여연구원((재)한국건설품질연구원)

/ 수석연구원 이 성 민
/ 수석연구원 서 삼 열
/ 수석연구원 이 기 학
/ 책임연구원 신 인 중
/ 책임연구원 장 명 호
/ 선임연구원 최 정 삼
/ 선임연구원 이 장 복
/ 선임연구원 박 유 복
/ 선임연구원 박 진 석
/ 선임연구원 안 승 환
/ 선임연구원 김 인 범
/ 선임연구원 박 종 인
/ 선임연구원 장 우 석
외 14명

■ 협동연구기관 참여연구원(세명대학교 산학협력단)

/ 수석연구원 김 승 덕
/ 선임연구원 김 승 철
/ 선임연구원 강 정 임
/ 선임연구원 방 만 호
/ 선임연구원 이 용 기
/ 선임연구원 조 병 욱
외 15명

■ 협동연구기관 참여연구원(전북대학교)

/ 수석연구원 김 영 문
/ 수석연구원 정 대 업
/ 수석연구원 윤 성 원

/ 책임연구원 유 기 표
/ 책임연구원 최 영 지
/ 선임연구원 홍 성 학
/ 선임연구원 장 안 식
외 11명

■ 공동연구기관 참여연구원(경상대학교)
/ 수석연구원 이 상 진
/ 수석연구원 김 호 수
/ 수석연구원 이 홍 우
/ 선임연구원 배 정 은
/ 선임연구원 박 영 호
/ 선임연구원 김 종
/ 선임연구원 김 경 민
외 13명

■ 공동연구기관 참여연구원(세종대학교 산학협력단)
/ 수석연구원 이 재 홍
/ 선임연구원 김 석 구
/ 선임연구원 정 석 재
/ 선임연구원 안 지 현
/ 선임연구원 우 성 우
/ 선임연구원 김 정 철
/ 선임연구원 임 승 진
외 11명

■ 공동연구기관 참여연구원(영남대학교 산학협력단)
/ 수석연구원 강 주 원
/ 수석연구원 김 기 철
/ 수석연구원 김 현 수
외 7명

■ 공동연구기관 참여연구원(경북대학교)
/ 수석연구원 김 철 환
/ 수석연구원 정 환 목
/ 선임연구원 이 홍 규
/ 선임연구원 이 희 선
/ 선임연구원 박 기 홍
/ 선임연구원 윤 창 현
/ 선임연구원 이 보 형
외 9명

■ 공동연구기관 참여연구원((사)한국공간구조학회 부설기술연구소)
/ 수석연구원 권 택 진

/ 수석연구원 이 수 곤
/ 수석연구원 정 명 채
/ 수석연구원 박 강 근
/ 수석연구원 김 재 열
/ 책임연구원 진 상 욱
/ 책임연구원 이 수 종
외 9명

■ 공동연구기관 참여연구원(한국기술교육대학교 산학협력단) / 수석연구원 이 승 재
/ 수석연구원 오 상 근
/ 책임연구원 손 수 덕
/ 선임연구원 김 종 식
/ 선임연구원 지 기 환
/ 선임연구원 김 종 국
/ 선임연구원 표 성 수
/ 선임연구원 이 금 석
외 19명

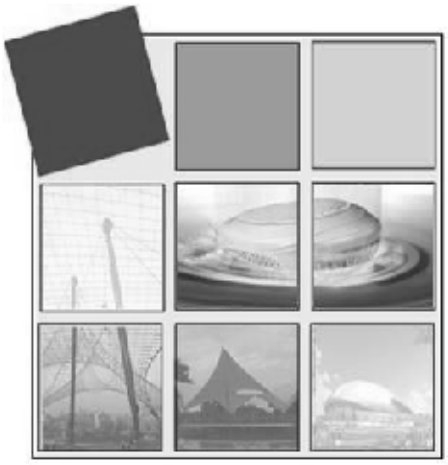
상기 참여연구원 수는 6차년도 연구개발계획서 기준으로 작성되었음.

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제고유번호</td><td>06건설핵심
B03</td><td>해 당 단 계
연 구 기 간</td><td>2006.09.29
2011.12.31</td><td>단 계 구 분</td><td>(1~6차년도)
/최종</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 사 업 명</td><td>중 사 업 명</td><td colspan="4">첨단도시개발사업</td></tr>
<tr><td>세부사업명</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 과 제 명</td><td>대 과 제 명</td><td colspan="4">대공간건축물 건설기술개발</td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td rowspan="2">주 관
연 구 책 임 자</td><td rowspan="2">김 종 수</td><td>해당단계
참 여
연구원수
(6 차 년 도)</td><td>총 : 198명</td><td>해당단계
연 구 비
(6 차 년 도)</td><td>정부:1,748,000천원
기업:821,000천원
계:2,569,000천원</td></tr>
<tr><td>총연구기간
참 여
연구원수</td><td>총 : 1,414명</td><td>총연구비</td><td>정부:13,196,000천원
기업:5,703,110천원
계:18,899,110천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소 속 부 서 명</td><td colspan="2">(주)CS구조엔지니어링</td><td>참여기업명</td><td colspan="2">두산건설(주) 외 22개 기관</td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="3">상대국명 : 일본</td><td colspan="2">상대국연구기관명 : 일본건축학회</td></tr>
<tr><td>위 탁 연 구</td><td colspan="5">연구기관명 : (주)타이가 외 3개 기관 연구책임자 :</td></tr>
<tr><td colspan="4">요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)</td><td>보고서면수</td><td>332</td></tr>
<tr><td colspan="6">- 본 연구단의 최종목표 : 대공간 건축물의 건설기술의 국산화 및 고도화 실현,
스팬 300m 이상 초대형 대공간 건축물 건설 실현,
전국적인 전문가 그룹과 중소기업을 주축으로 하는 관련기업들의 협력을 바탕으로 기반/핵심기술 개발,
국내기술의 자립과 국제적으로 특성화 가능한 건설아이템개발
침체된 국내건설시장의 활성화에 따른 고용창출
국제건설시장에서의 경쟁력확보
- 구조시스템 및 경제성 분석 : 대공간 구조시스템 개발, 접합부 해석 및 설계,
시스템의 경제성 분석
- 비선형해석 및 구조설계 기법 개발 : 정적, 동적 비선형해석, 구조시스템의 안정해석,
내진해석 및 설계
- 시공 및 친환경 설계기법 개발 : 대공간 구조 시공기법 개발,
친환경(열,빛,음) 대공간 설계, 내풍해석 및 설계
- 실용화 방안 연구 : Code 작성, 대공간 구조물 보수, 유지관리 지침서 작성,
Pilot Project</td></tr>
<tr><td rowspan="2">색 인 어
(각 5개 이상)</td><td>한 글</td><td colspan="4">대공간 구조물, 구조시스템, 비선형해석, 시공, 실용화</td></tr>
<tr><td>영 어</td><td colspan="4">Spatial Structure, Structural System, Nonlinear Analysis, Construction, Practical Use</td></tr>
</table>

가.

나.



요약문

목차

다.

1. 요 약 문

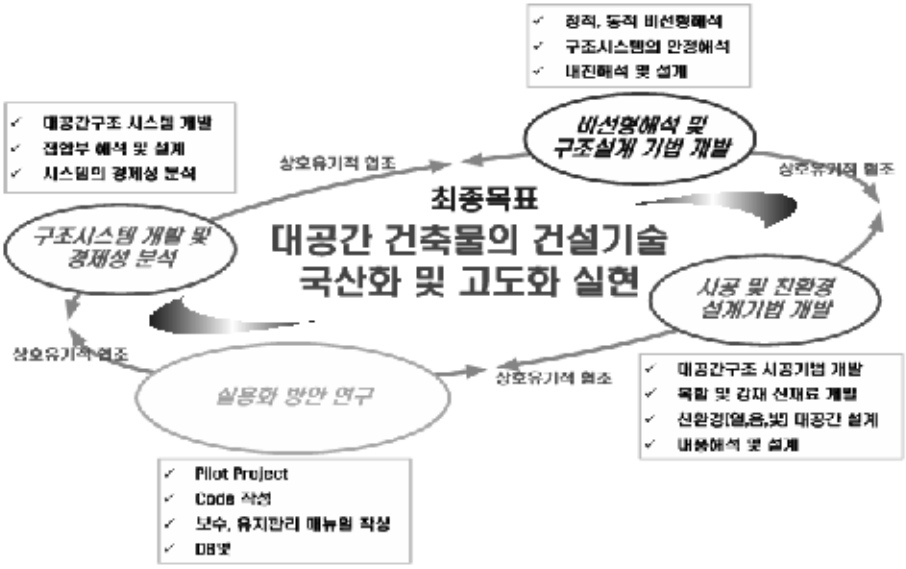
1) Ⅰ 제목

대공간 건축물 건설기술 개발
- 1세부 연구과제 : 구조시스템 개발 및 경제성 분석
- 2세부 연구과제 : 비선형 해석 및 구조설계 기법 개발
- 3세부 연구과제 : 시공 및 친환경설계 기법 개발
- 4세부 연구과제 : 실용화 방안 연구

2) Ⅱ 연구개발의 목적 및 필요성

3)

4)



본 연구단의 최종목표

본 연구단의 최종목표는 "대공간 건축물의 건설기술의 국산화 및 고도화 실현"이고, 세부내용은 "스팬 300m 이상 초대형 대공간 건축물 건설 실현"이며, "전국적인 전문가 그룹과 중소기업을 주축으로 하는 관련기업들의 협력을 바탕으로 기반/핵심기술 개발"이라는 슬로건 아래 국내기술의 자립과 국제적으로 특성화 가능한 건설아이템의 개발을 이루고자 하며, 결과적으로 침체된 국내건설시장의 활성화에 따른 고용창출과 3%에 머물러 있는 국제건설시장에서의 경쟁력확보로 이어지는 파급효과를 기대하고자 한다.
주어진 최종목표를 달성하기 위해 본 연구과제는 4개의 관련 분야로 세분화되며, 4개 분야 또는 관련 분야가 상호 유기적인 협력관계를 이루어 최종목표를 이루어 낼 것이다. 각 세부 과제는 ① 구조시스템 개발 및 경제성 분석, ② 비선형해석 및 구조설계 기법개발, ③ 시공 및 친환경 설계 기법개발, ④ 실용화 방안 연구로 이루어진다.

5)

■ 1세부-구조시스템 개발 및 경제성 분석

구조시스템은 그 특성에 따라 구조물을 안정화시키고, 힘의 흐름을 조절하는 방식이 다양하다. 구조시스템이 결정되면 설계와 시공에 미치는 영향이 지대하기 때문에, 구조시스템의 축소모델 실험을 통하여 대공간 건축물의 설계, 시공 시 고려해야 하는 측면을 확인한다. 또한, 이러한 일련의 연구를 통하여 최적의 구조시스템을 제안할 뿐만 아니라 Size, Shape, Topology 및 형태의 생성과 자동화 설계방안의 밑거름을 제공 하고자 한다.

접합부는 초대형 대공간 구조용으로 개발된 시스템에서 무엇보다도 중요한 부분이다. 구조물이 대형화되기 때문에 자연스레 접합부 부분이 많아질 수밖에 없고 매우 중요하기 때문에, 각 접합부별 특성을 감안한 구조적인 문제와 시공특성의 문제를 매끄럽게 해결하는 방안을 완성하고자 한다. 또한 접합부는 강성구조물과 연성구조물에 있어서 매우 다른 방식을 가지고 있으며, 강성구조물의 경우 접합의 내력이 미치는 영향과 연성구조물중 케이블의 연결이음이나 교체작업 등에서 오는 문제점, 막재의 웰딩, 세부 디테일들은 기업간 폐쇄적 기술에 해당되므로 구축된 DB를 통한 업계 기술의 상향 평준화를 도모할 필요가 있다.

경제성 분석은 공사비 개념 비용(Construction Cost)과 프로젝트 비용(Project Cost)으로 구분할 수 있으며, 공사비의 경우에는 구조비용(Structural Cost)과 서비스 비용(Service Cost)으로 나눌 수 있고, 서비스 비용에는 다양한 설비비(기계적, 전기적설비)의 내용 포함 된다. 이 분야에 대한 경제성분석의 틀은 매우 복잡하고 어렵기 때문에, 본 연구를 통하여 일반 실무자들이 설계/시공/유지하는 과정에서 가장 합리적인 안을 제시하고자 한다.

■ 3세부 "시공 및 친환경설계 기법 개발"

국민소득의 증가와 문화, 레져, 스포츠 등에 대한 관심증가로 대공간 구조물에 대한 요구가 꾸준히 증가 추세에 있다. 우리나라도 올림픽, 엑스포, 월드컵, 전시 관람회 등의 각종 국제 행사의 주최 및 여가선용, 레져, 스포츠, 산업 등 다양한 분야에서 대공간 구조물에 대한 수요가 계속 증가 추세에 있다. 하지만 우리나라의 대공간 구조물의 설계 및 시공 등에 있어 아직 걸음마 단계에 있으며, 자체 기술 축적 및 시공기술 등이 선진국들에 비해 경쟁력이 떨어지는 실정이다.

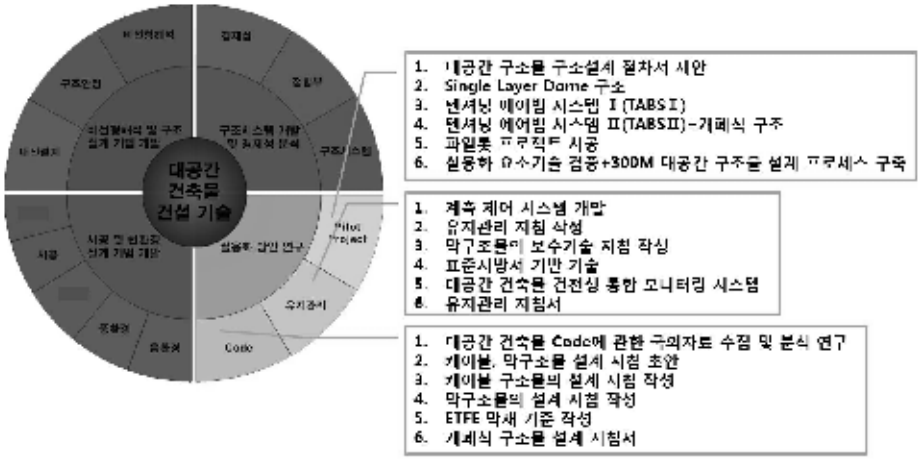
이에 대공간 구조물 전반에 대한 구조시스템, 기술 및 공법개발, 시공관리기법, 유지관리 등에 대한 체계적인 연구를 통해 국제 경쟁력 확보, 기술축적, 경제성, 안정성, 시공성, 구조물의 효율적 관리 등이 필요하다.

대공간 구조물의 Erection 공법 및 자동화 공법의 개발, 대공간 구조시스템 연성 막구조물의 장력측정 시공기술의 개발 및 장력측정 관리시스템을 개발하고, 대공간 구조물의 시공관리기술 등을 개발하여 국제 경쟁력 확보, 기술축적, 경제성, 안정성,

시공성, 구조물의 효율적 관리 등에 그 목적이 있다.

초대형 스팬을 갖는 건축물이 건설되기 위해서는 재료의 경량화와 그에 맞는 구조시스템의 개발 및 설계/시공 기법이 절실히 필요하다. 대공간 건축물의 환경 친화적 건축물의 실용화를 위한 세부요소기술(시공, 재료, 냉난방설비, 풍환경, 음환경)확보를 위하여 기술력의 개발과 활용에 있다. 개발된 기술력을 이용하여 국내 대공간 건축물 수요에 대비한다.

■ 4세부 "실용화 방안 연구"



설계지침서 막 및 케이블구조 등에 대한 합리적이고 기술적 문제점이 없는 설계지침을 마련하기 위해서 국내외의 문헌, 기준, 규격, 지침을 분석 정리하여 국내 실정에 맞는 지침서를 작성하며, 연구 결과물은 관련학회 및 관련 기관의 공인을 얻어 앞으로 건축될 실제 구조물 설계에 직접적으로 적용될 수 있도록 한다.

대공간 건축물의 실용화를 위한 방법으로 규정화된 지침서가 반드시 필요하다. 이는 연구단계에 머물러 있는 우리나라의 대공간 건축물의 핵심기술들이 실질적인 역할을 할 수 있게 하는 실용화의 기본단계이다. 현시점에서 살펴볼 때 일반 구조물 관련 규정들은 많은 연구와 지원 아래서 체계성을 가지고 있지만, 전문성을 가지는 구조물 특히 대공간 건축물의 규준들은 아직도 미흡한 상태이며 구축의 여부에 따라서 실용화에 막대한 영향을 미친다.

유지관리 측면에서는 대공간 건축물의 실용화 방안에 필수적인 모든 내용의 연구를 목표로 하고 있으며, 대변형에 따른 누수방지 부분 및 시방서 작성을 핵심요소 기술로 개발한다.

- 300M 초대공간 건축물의 유지관리 기술의 확립
- 무인로봇을 이용한 막구조물의 손상도 점검 시스템의 확립
- 막구조물의 상시 건전성 평가를 위한 광섬유센서를 사용한 첨단 계측기법 개발 및 막구조물의 상시 장력측정 시스템의 개발
- 초대형 막구조물 및 공기막 구조물의 유지보전 기술 지침 개발

- 초대형 막구조물의 대변형에 의한 누수방지 지침 작성
- 대공간 건축물의 무인 통합화 건전성 모니터링 시스템 구축
- Pilot Project 건전성 모니터링을 통한 시스템 검증

또한 300M 스팬의 대공간 건설기술 실현 가능성 및 적용된 핵심 요소기술의 실용화를 검증하기 위한 목적으로 1/10 스케일의 30M 스팬 파일롯 프로젝트를 천안 한국기술교육대학교에 건설하였으며, 프로젝트의 구축 및 경험을 통해 대공간 건축물에 대한 건설기술을 확보하고자 한다.

가) 가. 기술적 측면

2. 본 연구의 필요성을 기술적 측면에서 기술하면 다음과 같이 요약할 수 있다.

■ 1세부-구조시스템 개발 및 경제성 분석

- 대공간구조물 시스템(Spatial Structure System)에 관한 체계적 분석 및 정리가 가능하게 됨으로 합리적인 구조시스템의 선택이 가능
- 대공간구조물 시스템(Spatial Structure System) 설계 최적화 요소기술 자립
- 관련 설계 기술 표준화 및 정량적 데이터 축적
- 접합부 설계 기술 이전 및 케이블 접합부 개발에 의한 케이블 구조물의 국제 경쟁력 제고가 가능하다.
- 적절한 기술로 공기단축과 공사비 절감을 꾀할 수 있고, 신기술 및 특허출원으로 국내의 기술축적과 국제 경쟁력을 강화할 수 있다.
- 각종 특수 구조물에 대한 기술표준화 수립
- 파일럿 프로젝트 수행으로 대공간 건축물 설계 경험 및 능력 축적
- 대공간 구조물의 타당성 검토를 위한 기초 자료 확보
- 경제적인 구조 시스템 선정을 위한 기초 자료 확보
- 대공간 구조물의 기획 단계에서의 접근성 제고

■ 2세부 "비선형 해석 및 구조설계 기법 개발"

- 구조시스템은 특성에 따라 구조물을 안정화시키고, 힘의 흐름을 조절하는 방식이 다양하다. 구조시스템이 결정되면 설계와 시공에 미치는 영향이 지대하기 때문에 대공간 건축의 적절한 시스템에 관한 기술 축적은 필수적이다.
- 케이블-스트럿 구조물은 연성구조로써 해석하기 어려울 뿐만 아니라 해석 전, 반드시 형상해석 단계를 선행으로 수행하여야 한다. 형상해석이 수행 된 케이블-스트럿 구조물은 장스팬 지붕 구조로서 구현할 수 있고 이러한 구조물은 대변형에 따라서 구조물이 거동하므로 비선형 해석이 필수적이다.
- 쉘 구조는 주로 면내력으로 힘을 전달할 수 있게 한 구조시스템으로 매우 우수한 역학적 특성을 가지고 있으며, 어떤 하중 상태에서는 안정 상태에서 불안정 상태로, 또는 불안정 상태에서 안정 상태로 변화하므로, 불안정 현상으로 인한 파괴 메커니즘을 파악해야 한다. 쉘형 구조시스템의 구조불안정 문제를 해결하기 위한 기술적 개발이 필수적이다.
- 대공간 구조물의 구조설계능력은 타 구조물의 구조설계에 비해서 높은 레벨의 기술과 노하우를 필요로 한다. 이는 대공간을 형성하기 위한 구조시스템은 시스템의 특징에 따라 설계방법이 매우 다르기 때문이다. 따라서 이와 같은 구조물의 설계능력 및 시공능력의 성장은 수치해석기술 및 프로그램 분야의 발전으로 가능하게 되며, 타 기술 분야의 해석 및 시뮬레이션 영역에도 미치는 영향이 크다.
- 구조물의 안정성 확보에 대한 선진 구조해석기술 의존도를 줄이고 최첨단 기술을 요하는 대공간 관련 기술 보유로 국내 건설 산업의 국산화에 기여할 수 있다.
- 국내에서 대공간 구조물의 동적 응답을 평가하기 위한 정량적 기준이 명확하지 않으므로 동적 응답에 대한 평가 지수가 필요하며, 제어 요소에 따른 3차원 동적

해석에 의해 제어 성능을 평가하여 대공간 구조물의 효율적 제어 시스템을 제시할 필요가 있다. 이는 동적하중에 대한 손상을 예방하여 대공간 구조물의 수명을 연장할 수 있을 것이다.

- 공간구조의 형태에 따른 고유의 구조안정성 및 변형형상의 파악은 설계시 반드시 고려되어야 할 중요한 요소이다. 따라서, 대공간 구조물의 형태별 지진거동특성을 조사분석하여 공간구조물의 내진성능을 고려한 형태결정에 있어서 중요한 기술자료를 마련할 필요가 있다.
- 대공간 구조물의 내진설계에 있어서 직접적으로 지진하중을 받는 하부구조만의 강성 및 강도의 증가는 상부구조의 동적거동에 영향을 주게 된다. 따라서 상부의 지붕구조와 하부의 기둥 및 벽체에 상호간의 영향을 고려한 지진해석을 통하여 보다 합리적이고 경제적인 구조설계 기법의 적용이 요구된다.
- 대공간 구조물은 일반구조물과 다르게 지진하중과 같은 동적하중에 의하여 상부구조물의 진동이 매우 크게 발생한다. 이러한 구조적인 특성으로 인하여 일반적인 건축물의 진동제어 기법을 그대로 적용하는 것에는 한계가 있다. 이로 인해 보다 효율적인 내진성능향상과 대공간 구조물에 적용에 있어 적합성을 고려한 면진제진장치 및 진동제어시스템의 도입이 요구된다.

■ 3세부 "시공 및 친환경설계 기법 개발"

- 공사기간 절약.
- 시공성 및 경제성 확보.
- 시공관리 기술을 현장 실무자에게 전수
- 장경간 스팬을 가지는 대공간 구조물의 경우 바람에 의한 정확한 평가
- 대규모공간의 음향설계기술확보
- 대공간의 전기음향설계기술확보
- 대공간의 음향 컴퓨터시뮬레이션 기술확보
- 대공간의 음향평가기술확보

■ 4세부 "실용화 방안 연구"

- 막, 케이블, 쉘, 스페이스 프레임 등의 특수 구조물과 이에 소요되는 접합부 관련 설계기준 마련으로 대공간 건축물 품질 유지
- 각종 특수 구조물에 대한 합리적인 설계지침서 및 설계기준 수립
- 설계 및 시공 지침 활용으로 대공간 건축물 안전성 향상
- 대공간 구조물의 각 단위 기술에 대한 실용화 가능성 검증, 신뢰도 확보 및 그에 따른 추가 응용기술 확보를 위하여 실제 실용화 가능성이 높은 Pilot Project를 설계 및 제작할 필요가 있다.
- 대공간 구조물에 적용되는 개폐식 지붕구조 및 텐셔닝 에어빔 시스템과 같은 핵심 요소기술은 국내 자체 기반기술로서 아직 도입하기가 미흡하여 상기와 같은 Pilot Project 제작을 통하여 실제 구조물의 제작하는 과정에서 설계 기술 확보 및 정량적, 정성적인 적용성 검토 등을 통하여 핵심 요소기술에 대한 정립이 필요하다.

- Pilot Project 제작을 통해 대공간 구조물에 적용되는 설계 및 시공 기술을 축적함으로써 국내 자체 기반기술 개발의 국산화 및 고도화에 이바지 할 수 있다.

가) 나. 경제·산업적 측면

3. 본 연구의 필요성을 경제·산업적 측면에서 기술하면 다음과 같이 요약할 수 있다.

■ 1세부-구조시스템 개발 및 경제성 분석

- 국내 기술로 설계한 건축물의 관리를 가능하게 하여 비용절감 효과
- 우수한 설계 및 시공 능력 확보로 품질 및 생산성 향상

4. - 설계 및 시공 분야 전문 엔지니어 일자리 창출

- 국제건설시장에서 첨단 기술 및 시공 능력 보유한 선도 그룹 진입
- 현재 대공간 건축물 건설 시 기술 비용 중 30-40% 해외 기술 의존 및 기술 수입 비용 지출에 대한 관련 기술비용 대체 효과
- 축적된 기술로 해외시장에서의 경쟁력 확보
- 대공간구조물에 대한 접근성 제고로 건설 시장 확대
- 대형 구조물 건립의 타당성 분석, 프로젝트 건립 비용 조달 방안, 대형 구조물의 활용 방안 제시
- 건설 산업의 새로운 시장의 개척

■ 2세부 "비선형 해석 및 구조설계 기법 개발"

- 구조 해석 전 반드시 필요로 하는 형상 탐색 과정의 기술을 국산화하여 이러한 소프트웨어 산업 분야에서 국내 기술을 확보함으로써 관련 업계의 산업 성장에 기여할 수 있다.
- 대공간 구조물 중 강성계 이산화 시스템인 공간 프레임 구조물은 경제적이라는 장점과 함께 높은 강성을 가진 구조 시스템이다. 이런 구조시스템의 구조 안정성 향상을 통해 예측할 수 없는 구조불안정성을 미연에 방지하는 효과와 구조 메커니즘 규명을 통해 실무자의 구조 설계가 가능뿐만 아니라 대공간 구조물의 분야에서의 비용절감효과를 기대할 수 있다.
- Free form 케이블-스트럿 구조물과 같은 연성구조물은 휨모멘트에 저항하기 위하여 상당한 강성을 보유한 일반적인 강성 구조물과는 달리 부재가 압축과 인장요소 만으로 이루어져 모멘트가 발생하지 않기 때문에, 단면적을 최적화하는 동시에 질량을 줄일 수 있어서 비용 절감효과를 기대 할 수 있다.
- 공간구조물은 규모가 대규모인 경향이 있으며, 사용되는 기술 및 재료 또한 매우 다양함으로 국내건설지장의 활성화 및 고용창출이 가능해 질 전망이다. 더 나아가 동남아와 중국을 중심으로 대공간 구조물 시장이 형성되고 있는데, 여기에 잉여가치가 높은 구조설계 기술을 축척하여 우리 기술을 수출할 수 있는 준비를 하여야 한다.
- 국내외 대공간 구조물에 대한 동적실험 사례가 극히 드문 실정이므로, 해적적 연구결과에 대한 실험적 검증과 구조설계시에 적용가능한 실증적 자료가 미비하다. 따라서 축소모형의 진동대 실험을 통하여, 관련 실험 및 구조설계에 요구되는 기초자료를 마련함으로써 대공간 구조물의 설계와 관련한 국내기술자립도 향상시킬 수 있는 데이터베이스 구축이 필요하다.
- 구조안정성에 확보에 관한 기초자료로 활용하여 효율적인 구조설계 및 시공계

획을 통해 비용절감효과를 기대할 수 있다.

- 대공간 구조물의 구조적 특수성을 고려한 내진설계기법을 구조설계시 적용하여 보다 합리적인 설계를 유도하고 적절한 구조체 물량의 소요를 통한 경제적인 설계가 필요하다.
- 대공간 구조물의 내진설계를 위한 시뮬레이션 및 구조설계 기술을 확보함으로써, 현재 대공간 구조물의 구조설계와 관련된 국내 기술자립도를 향상시킬 수 있다. 또한 국외기술수입으로 인한 지나친 외화낭비를 극소화하여 소요 비용을 절감시킬 수 있다.
- 내진설계에서 부재의 강도를 증가시키는 방법은 초기 건설비용이 많이 든다. 반면에, 연성을 증가시켜 소성거동을 이용하는 방법에서는 구조물의 붕괴를 방지할 수 있으나 보수, 보강하기가 쉽지 않으며 또한 비구조재의 파괴 인해 보수비용이 많이 든다. 따라서 대공간 구조물의 동적응답 제어를 위한 제어 장치는 관련 기술의 특허 및 신기술 확보를 통해 기술 수익을 확보할 수 있다.

■ 3세부 "시공 및 친환경설계 기법 개발"
- 국내 수요 대비 대공간 구조물 시공관리 요소기술 축적.
- 국내 건설업체의 기술축적 기회제공.
- 해외시장에서 경쟁력 확보.
- 정확한 내풍안전성을 확보
- 내풍안정성이 확보
- 해외음향컨설팅비용 절감
- 건축 및 전기음향관련 전문인력양성
- 건축 및 전기음향관련 산업육성

■ 4세부 "실용화 방안 연구"
- 기술 수입에 의존하지 않고 국내 기술집약적 설계기술 보유로 관련 기술 비용 대체 효과 기대
- 지침서 활용을 통한 기술집약적 설계 기술 수요로 고부가가치 창출 및 이익 실현
- 국내 건설업체에 기술 축적의 기회를 제공하게 되며, 축적된 기술로 해외시장에서의 경쟁력 확보
- 아직 국내 자체 기반기술로는 연성구조물 등 복잡한 요소기술이 적용되는 대공간 구조물에 대한 설계 기술이 미비하여 상당한 설계비가 발생함이 사실이다. 따라서 300M 스팬의 Pilot Project의 SD 보고서를 작성하여 봄으로써 향후 대공간 구조물의 지침이 될 만한 설계 프로세스를 구축할 필요가 있다.
- 국내에는 대공간 구조물에 적용하는 핵심 요소기술에 대한 정립이 미비하여 해외 기술을 도입하는 과정에서 경제적으로 상당히 비효율적이라 할 수 있다. 따라서 실제

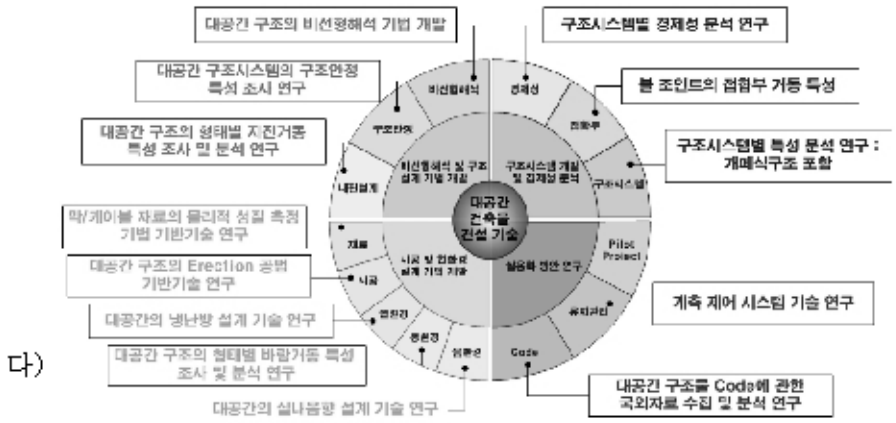
Pilot Project를 제작함으로써 핵심 요소기술을 국산화하여 이 비용을 절감할 필요가 있다.

- 적용된 핵심 요소기술들의 실용성을 준공 후 검증하여, 향후 건설될 수많은 대공간 구조물에도 실무자들이 쉽게 적용이 가능할 수 있도록 데이터베이스를 구축할 필요가 있다.
- 실제 30M 스팬의 Pilot Project인 한국기술교육대학교 HRD 홍보관을 제작함으로써 학교의 전시관으로 이용하고자 한다.

1) Ⅲ 연구개발내용

가) 가. 1차년도 연구기관별 세부연구내용

나)



다)

라)

(1) 세부	(2) 세부(3)(수행주체)	(4) 연구 목표	(5) 연구 내용 및 결과
(6) 1	(7) 1-1 세부(8)(한국예술종합학교)	▪ 구조시스템별 특성 분석 연구; 개폐식 구조 포함	(9) - 발전과정 및 관련 문헌조사 - 사례 수집과 특성 조사 - 특성 분석
	(10) 1-2 세부(11)(한국건설품질연구원)	▪ 볼 조인트 접합부 거동 특성 규명 및 상세 제안	(12) - 볼 조인트 접합부 상세 문헌조사 (13) - 비선형 유한요소해석을 통한 국부 거동 예측 (14) - 비선형 유한요소해석을 통한 영향인자 도출 (15) - 변수해석을 통한 최적형상 개발 (16) - 축소모형 구조성능 실험을 통한 접합부의 구조적 거동 규명 (17) - 볼 조인트 접합부 설계식 및 상세 제안
	(18) 1-3 세부(19)(대림대학)	▪ 구조시스템별 경제성 분석 연구	(20) - 경제성 평가 지표 선정 (21) - 구조시스템별 건축물 분석 (22) - 각 구조 시스템별 구조적 특성 분석

마)

(1) 세부	(2) 세부(3) (수행주체)	(4) 연구 목표	(5) 연구 내용 및 결과
(6) 2	(7) 2-1세부(8) (세종대학교)	▪ 대공간 구조의 비선형해석 기법 개발	- 공간 골조구조에 대한 비선형 수치해석 모델 연구 - 콘크리트 쉘, 금속계 쉘 등 쉘 구조에 대한 비선형 수치해석 모델 연구 - 막 구조, 케이블 구조 등 연성구조에 대한 비선형 수치해석 모델 연구
	(9) 2-2(10) (타이가)	▪ 대공간 구조시스템의 구조안정 특성 조사 연구	- 쉘의 형태별 구조불안정 특성 조사 연구 - 쉘의 하중 및 경계조건에 따른 불안정 특성 연구 - 쉘형 구조물의 초기 불완전에 따른 민감도 특성 연구 - 쉘형 구조물의 구조불안정 설계에의 적용성 조사 및 분석 연구
	(11) 2-3세부(12) (영남대학교)	▪ 대공간 구조의 형태별 지진거동 특성 조사 및 분석 연구	- 대공간 구조의 거시적 형상에 따른 지진거동 특성 - 대공간 구조의 세부 형상에 따른 지진거동 특성 - 대공간 구조의 구조시스템에 따른 지진거동 특성 - 대공간 구조의 형태에 따른 지진거동 특성의 계통적 분석 연구

2)

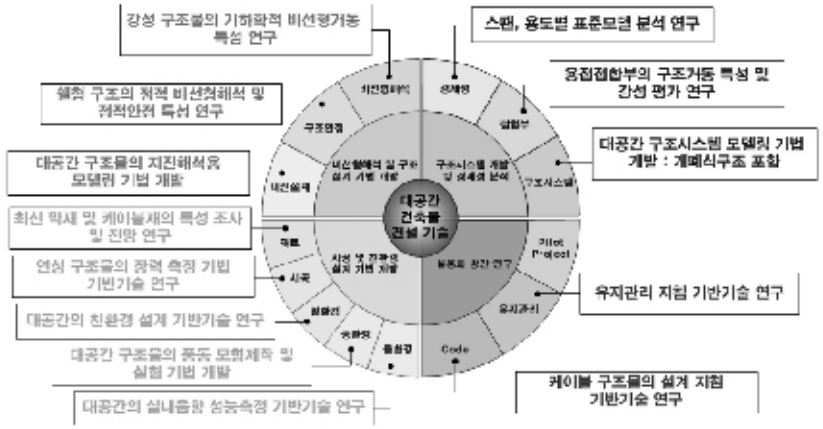
(1) 세부	(2) 세세부 (3) (수행주체)	(4) 연구 목표	(5) 연구 내용 및 결과
(6) 3	(7) 3-2세세부 (8) (두산산업개발(주))	▪ 대공간 구조의 Erection 공법 개발	- Erection 공법 국내외 기술동향 분석 - Erection 공법 국내외 사례조사 및 공법 적용 빈도 검토 - Erection 공법 가상 모델 개발 및 모형 제작 - Erection 공법 개발과 실무용 Erection 공법 선정 프로그램 및 매뉴얼 개발
	3-4세세부 (전북대학교)	▪ 대공간 구조의 형태별 바람거동 특성 조사 및 분석연구	- 관련 문헌 조사 - 막구조에 대한 바람에 의한 진동 특성 파악 - 붙안전 진동 특성 포함 - 막구조물에 대한 고유진동수와 감쇠율 해석 기법개발
		▪ 대공간의 실내음향설계기술 개발	- 용도별 음향가변화 방안의 선정을 위한 평가모델의 구축 - 음향가변화 방안의 적용을 위한 평가 모델의 제작 - 음향가변화 방안의 적용에 따른 물리적, 주관적 음향성능평가 - 최적음향설계방법 도출

3)

(9) 세부	(10) 세세부(11) (수행주체)	(12) 연 구 목표	(13) 연구 내용 및 결과
(14) 4	(15) 4-1 세세부(16) ((사)한국공간구조학회)	▪ code 분석	- 일본/중국 대공간 구조 관련 code 자료 수집 및 분석 - 유럽/미국 대공간 구조 관련 code 자료 수집 및 분석
	(17) 4-2 세세부(18) (한국기술교육대학교)	▪ 계측제어 시스템 기반 기술 개발	- 계측종류에 따른 항목별 프로세스 구축 - 계측시스템에 따른 계측 프로세스 구축 - 구조물의 이상거동 감지 프로세스 구축 - 구조물의 안정성 분석법 개발 - 실무 적용 및 시험 계측
	(19) 4-3 세세부(20) ((주)CS구조엔지니어링)	▪ Pilot Project 1 대공간 구조물 구조설계 절차서 제안	- 대공간 구조물 구조설계 절차서 생성 - 대공간 구조물 구조설계 평가 지표 작성 - Pilot Project 하부구조물 설계

가) 나. 2차년도 연구기관별 세부연구내용

나)



다)

라)

(1) 세부	(2) 세부(3) (수행주체)	(4) 연구개발내용	(5) 세부추진 계획 및 방법
(6) 1	(7) 1-1 세부(8) (한국예술종합학교)	▪ 대공간 구조시스템 모델링 기법 개발: 개폐식 구조 포함	(9) - 대공간구조의 모델링 적용사례조사 - 단계별 모델링의 체계적인 유형 분류 - 구조시스템별 모델링 기법 구축 - 재료별 모델링 기법 구축 - 기존 최적화 요소기술 및 적용성 분석 - 구조시스템 모델링을 위한 최적화 요소기술 개발 방향 제시
	(10) 1-2 세부(11) (한국건설품질연구원)	▪ 용접접합부 구조거동 특성 및 강성평가 연구	(12) - 용접접합부 상세 문헌 조사 (13) - 국부거동 예측 및 영향인자 도출을 위한 용접접합부의 비선형 유한요소 해석 (14) - 구조성능 실험을 통한 접합부의 강성평가 (15) - 용접접합부의 설계식 및 상세 제안
	(16) 1-3 세부(17) (대림대학)	▪ 스팬, 용도별 표준모델 분석연구	(18) - 대공간 구조물의 공간 특성 분석 (19) - 대공간 구조물의 구조 시스템별 스팬 특성 분석 (20) - 사례분석을 통한 표준모델 제안 (21) - 웹데이타베이스 구축

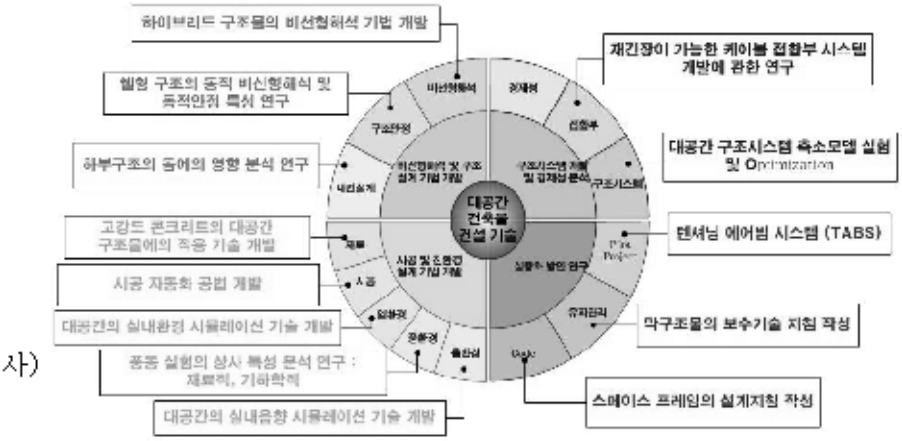
(22) 세부	(23) 세부(24) (수행주체)	(25) 연구목표	(26) 연구 내용 및 결과
(27) 2	(28) 2-1세부(29) (세종대학교)	▪ 이산계 강성 구조물의 기하학적 비선형 해석 기법 개발	- 스페이스트러스 및 프레임 해석 모델 개발 - Modified Riks 방법과 가속알고리즘을 결합한 비선형 해석 - 재료 비선형모델개발 및 해석 - 비탄성 비선형 모델개발 및 해석 - 동적해석 알고리즘 개발 - 비등방성 재료 스페이스프레임 해석모델 개발
	(30) 2-2세부(31) (타이가)	▪ 쉘형 구조물의 정적 비선형 해석 및 정적안정 특성 연구	- 쉘형 구조물의 구조불안정 관련자료 및 문헌조사 - 쉘형 구조물의 비선형 운동방정식과 쉘 요소의 정적 정식화 - 쉘형 구조물의 정적 불안정 검토용 안정해석 알고리즘 - 쉘형 구조물의 고유좌굴모드에 따른 초기불완전 적용모델 개발 - 쉘형 구조물의 정적 구조불안정 특성 조사 및 분석
	(32) 2-3세부(33) (영남대학교)	▪ 대공간 구조의 지진해석용 모델링 기법 개발	- 입력지진동-지반-공간구조에 대한 모델링 - 지진응답의 상호작용에 대한 모델링 - 공간구조에 적용가능한 등가정적해석의 모델링

(34) 세부	(35) 세세부(36) (수행주체)	(37) 연구목표	(38) 연구 내용 및 결과
(39) 3	(40) 3-2세세부(41) (두산산업개발(주))	▪ 연성구조물의 장력 측정 시공기술 개발	(42) - 막구조 장력측정기 모델개발 (43) - 막구조 2축장력시험기개발 (44) - 막구조 장력측정기 개발 (45) - 막구조 장력 시스템 개발
	3-4세세부 (전북대학교)	▪ 대공간 구조물의 풍동 모형제작 및 시험 기법 개발	- 대공간 구조물의 모형제작 방법 연구 - 막, 케이블 등 다양한 형태의 풍동모형 제작 사례조사와 제작 - 대공간 구조물의 풍동실험 기법 연구 - 대공간 구조시스템별 풍동실험 기법 조사 - 풍동실험 후 계측 데이터의 분석 기법 정립 - 진동 특성 분석용 축소 모형제작 - 진동에 취약한 구조시스템을 선정 - 진동에 특성을 분석할 수 있는 축소 모형제작 기법 연구 - 진동특성실험 실시 와 분석 기법 정립 - 축소 진동모형 계측 기법 연구
		▪ 대공간의 실내음향성능 측정기술개발	- 마이크 입력부 및 송신기의 선정 및 조합 - 4개의 송신기의 데이터를 입력 받는 수신기 제작 - 후처리 및 분석용 소프트웨어 제작 - 4가지 구성요소의 Integration 및 field test를 통해 성능평가 및 Bug Fixing을 통해 개발 완료

(46) 세부	(47) 세세부 (48) (수행주체)	(49) 연구목표	(50) 연구 내용 및 결과
(51) 4	(52) 4-1 세세부 (53) ((사)한국공간구조학회)	▪ 설계 지침서 작성	- 케이블구조 관련 국내 자료수집/분석 - 케이블구조물의 설계 지침 기반기술 연구 - 케이블구조 설계기준 및 해설 초안 작성
	(54) 4-2 세세부 (55) (한국기술교육대학교)	▪ 대변형을 고려한 제어계측 시스템 개발	- FBG센서를 이용한 계측 시스템 및 패키지 기법 개발 - 손상도 검증용 무인 로봇개발과 RFID센서를 사용한 막구조물의 모니터링 - 계측시스템의 정밀도 검증 및 유지관리 지침서 작성
	(56) 4-3 세세부 (57) ((주)CS구	▪ Pilot Project 2 Single Layer Dome 구조	- 선정된 프로젝트 대상으로 Space Frmae : Single Layer 구조 시스템 설계 - Single Layer의 구조 불안정현상 해결을 위한 구조해석 및 설계, 실험 병행

마) 다. 3차년도 연구기관별 세부연구내용

바)



사)

아)

(1) 세부	(2) 세부(3)(수행주체)	(4) 연구 목표	(5) 연구 내용 및 결과
(6) 1	(7) 1-1 세부(8)(경상대학교)	▪ 대공간 구조시스템 축소 모델실험 및 대공간 구조물의 Size/Shape/Optimization 기법	(9) - 구조시스템별 축소모델 실험의 특성 조사 (10) - 축소모델 실험의 적용 방식 분석 (11) - 축소모델 실험의 유형 분류 (12) - 축소모델 실험의 정식화 (13) - 대공간구조물의 구조시스템 분석 및 Case 구조물 선정 (14) - 크기/형상최적화를 위한 정식화 방안제시 (15) - 대공간 구조시스템의 크기/형상 최적화 (16) 기법에 대한 검증 및 case 실구조물 대안 (17) 시스템 제시
	(18) 1-2 세부(19)(재)한국건설품질연구원	▪ 재긴장이 가능한 케이블 접합부 시스템 개발	(20) - 케이블 접합부 상세 및 역학모델 사례조사 (21) - 전문가 자문을 통한 기술적 부분 보완 (22) - 접합부 시스템 상세설계 (23) - 안정성 예측 및 영향인자 도출을 위한 (24) 유한요소 해석 (25) - 시제품 모형을 통한 거동예측 (26) - 실험을 통한 시스템 성능 평가

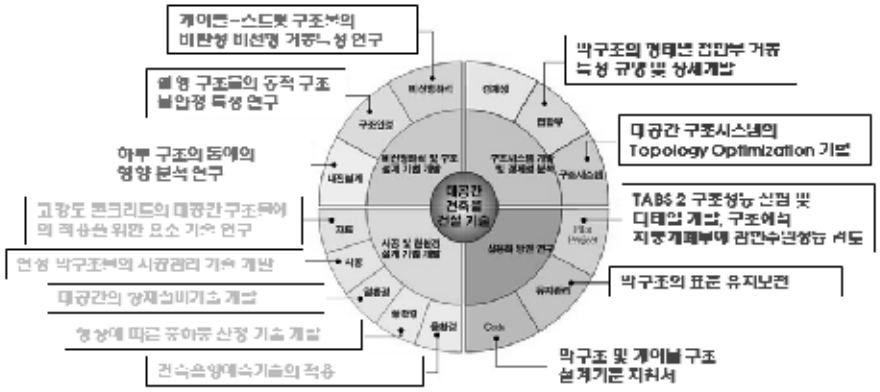
(27) 세부	(28) 세부(29) (수행주체)	(30) 연구목표	(31) 연구 내용 및 결과
(32) 2	(33) 2-1 세부(34) (세종대학교)	▪ 하이브리드 구조물의 비탄성 비선형 거동 연구	- 텐세그리티 및 언더텐션 구조의 모델링 기법 개발 - 텐세그리티 및 언더텐션 구조의 정적 비탄성 비선형 해석 - 텐세그리티 및 언더텐션 구조의 동적 비탄성 비선형 해석
	(35) 2-2 세부(36) (타이가)	▪ 쉘형 구조물의 동적 구조불안정 특성 연구	- 쉘형 구조불안정 관련 자료 및 문헌 조사 - 비선형 쉘 요소 동적 정식화 - 쉘형 구조물의 동적 불안정 검토용 알고리즘 개발 - 쉘형 구조물의 동적 구조불안정 특성 조사 및 분석
	(37) 2-3 세부(38) (영남대학교)	▪ 하부구조의 돔에의 영향분석 연구	- 공간구조물의 하부구조 영향 고찰을 위한 수치해석 - 공간구조물의 하부구조 영향 고찰을 위한 진동대 실험 - 케이블 장력 추정 실험을 통한 장력 추정식 보완

(39) 세부	(40) 세세부(41) (수행주체)	(42) 연 구 목표	(43) 연구 내용 및 결과
(44) 3	(45) 3-2세세부(46) (두산건설(주))	▪ 시공 자동화 공법 개발	(47) - 골조공사의 자동화 모델 개발 - Erection 시공자동화 모델 개발 - 골조공사의 자동화 공법 개발 - Erection 시공 자동화 공법을 개발하여 애니메이션 및 모형 제작·시연
	3-4세세부 (전북대학교)	▪ 풍동 실험의 상사 특성 분석 연구: 재료적, 기학학적	- 다양한 대공간 구조물에 대한 풍동실험모형 제작을 위한 상사법칙 연구 - 대공간 구조물의 풍진동 모형제작를 위한 상사법칙 연구 - 태양광 패널을 적용한 대공간 구조물의 구조성능 확보기술 - 태양광 패널 적용 대공간 구조물 사례조사 - 태양광 패널과 대공간 구조접합 상세기술 - 대공간 구조물 부위별 태양광 적용기술
		▪ 대공간의 실내음향 시뮬레이션 기술개발	- FDTD방법의 음파의 파동방정식에 적용하는 알고리즘 개발 - 열린공간 음향 시뮬레이션을 위한 흡수경계조건의 개발 - 흡음계수가 주어진 반사판에 대한 경계조건 개발 - 임의 위치에서의 임펄스 리스펀스 함수 계산 방법 개발

(48) 세부	(49) 세부(50) (수행주체)	(51) 연구목표	(52) 연구 내용 및 결과
(53) 4	(54) 4-1세부(55) ((사)한국공간구조학회)	▪ 설계 지침서 작성	- 스페이스 프레임 자료 수집 및 작성 - 케이블구조 설계기준 및 해설 작성완료 및 발간 - 막구조 설계 지침서 초안 작성
	(56) 4-2세부(57) (한국기술교육대학교)	▪ 막구조 건축물 보수기술 지침(안) 작성	- 케이블 장력측정 및 무인모니터링 기술 - 막재의 열화요인 및 진단 방법 개발 - 기핵/성장에 의한 막 열화성능의 진단 - 막소재의 진단결과 및 판정기준 검증
	(58) 4-3세부(59) ((주)CS구조엔지	▪ Pilot Project 3 텐셔닝 에어빔 시스템 I(TABSI)	- 공기막+텐셔닝 시스템 구조설계 - 공기막+텐셔닝 시스템 비선형 해석 - 공기막+텐셔닝 시스템 실험체 제작/실험 수행 - 실험결과 정리 및 분석/유관성 분석 - 공기막+텐셔닝 시스템에 대한 설계 - 요소기술 정리 및 보고서 작성

자) 라. 4차년도 연구기관별 세부연구내용

차)



카)

타)

(1) 세부	(2) 세부(3)(수행주체)	(4) 연구 목표	(5) 연구 내용 및 결과
(6) 1	(7) 1-1 세부(8)(경상대학교)	▪ 대공간 구조시스템 위상최적화기법 연구	(9) - 위상최적화기법 비교연구 (10) - 대공간구조시스템의 효율적인 (11) 위상최적화를 위한 재료모델 제시 (12) - 대공간 구조시스템의 위상최적화를 (13) 위한 정식화 제시 (14) - 구조성능 및 경제성을 중심으로 한 (15) 구조시스템의 최적위상 대안 평가 및 (16) 결과 제시
	(17) 1-2 세부(18)(재)한국건설품질연구원	▪ 막구조의 형태별 접합부 거동 특성 연구	- 유압식 케이블 재긴장 시스템의 최적화 - 케이블 장력 무선 모니터링 시스템 개발 - 휴대용 유압식 핸드펌프 모델 개발 - 파일롯 프로젝트의 지붕구조에 케이블 구조의 적용을 위한 개발된 재인장 접합소켓의 적용방안 제시 - 막재의 종류별 접합 기법 조사 - 막재의 지지 구조물과 접합 기법 조사 - 막 접합부의 파손사례 조사 - 막 접합부의 해석 및 분석 - 파일롯 프로젝트의 대안 ALT1, ALT2, ALT3에 대한 경제성 분석 및 타당성 제시

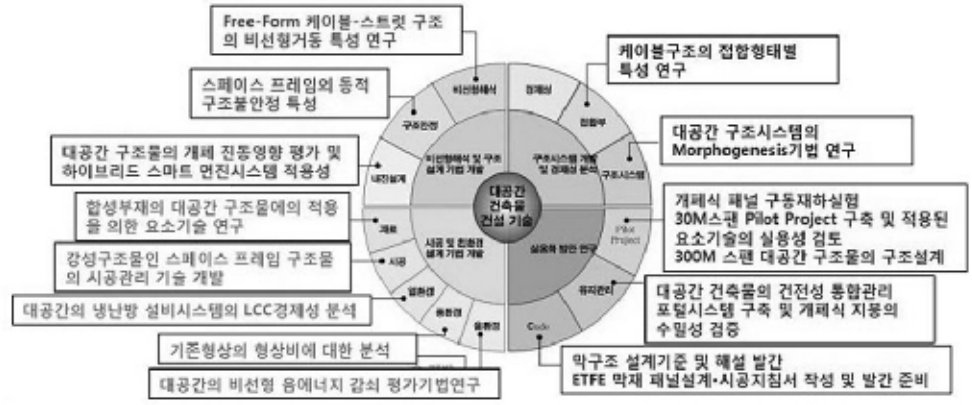
(19) 세부	(20) 세부(21) (수행주체)	(22) 연구목표	(23) 연구 내용 및 결과
(24) 2	(25) 2-1 세부(26) (세종대학교)	▪ 케이블-스트럿 구조물의 비탄성 비선형 거동 특성 연구	- 케이블-스트럿 구조의 모델링 기법 - 케이블-스트럿 구조의 형상해석 - 케이블-스트럿 구조의 비탄성 비선형 해석
	(27) 2-2 세부(28) (세명대학교)	▪ 스페이스 프레임의 정적 구조불안정 특성	- 스페이스 프레임의 정적 구조불안정 관련자료 및 문헌조사 - 비선형 선부재요소 정적 정식화 - 스페이스 프레임의 정적 구조불안정 검토용 알고리즘 개발 - 스페이스 프레임의 정적 구조불안정 특성 조사 및 분석
	(29) 2-3 세부(30) (영남대학교)	▪ 대공간 구조물의 진동제어 기법 및 시스템 개발	- 기초면진 및 지붕면진 기법의 효용성 검토 - 수동 및 준능동 제어장치의 대공간 구조물 적용방안 - 수동 및 준능동 제어장치의 진동제어성능 고찰 - 대공간 구조물 진동제어장치의 최적화 기법개발

(31) 세부	(32) 세세부(33) (수행주체)	(34) 연 구 목표	(35) 연구 내용 및 결과
(36) 3	(37) 3-2세세부(38) (경동대학교)	▪ 연성 막구조물의 시공관리 기술 개발	- 연성 막구조물의 요소시공기술 개발 - 연성 막구조물의 erection공법 모형 및 동영상물 제작 - 연성 막구조물의 시공지침서 개발
	3-4세세부 (전북대학교)	▪ 형상에 따른 풍하중 산정기술 개발	- 다양한 형상별 적용을 위한 대공간 구조물의 재료별 특성을 고려한 풍진동모형의 상사법칙에 대한 연구 - 풍동실험을 통한 풍진동 특성을 반영한 대공간 구조물의 지붕재 모형제작과 풍동실험을 통한 평가 모델 개발 - 태양광 패널을 이용한 대공간 구조설계 계획 - 태양광 패널이 적용된 해외 대공간 구조물의 상세 계획 설계 분석 - 태양광 패널이 적용된 돔 구조물의 구조적 특석 분석 - 태양광 패널이 적용된 국내 대공간 구조물의 기본 설계안 제시
		▪ 대공간의 음향설비 제어기술 개발	- 대공간에 적용 가능한 음향 증폭시스템의 종류 및 설치방법 연구 - 폐쇄형과 개폐형 공간에의 적용성 검토- 물리적 성능 및 적용성 검토 - 음향증폭시스템의 주관적인 평가 및 각 공간에 적절한 최적음향시스템 설계 안 제시

(39) 세부	(40) 세세부 (41) (수행주체)	(42) 연구목표	(43) 연구 내용 및 결과
(44) 4	(45) 4-1 세세부 (46) ((사)한국공간구조학회)	▪ 설계 지침서 작성	- 막구조 설계기준 및 해설 작성 - 막구조 설계기준 및 해설 발간 준비
	(47) 4-2 세세부 (48) (한국기술교육대학교)	▪ 대공간 구조물의 유지관리 및 보수기술 지침(안) 작성	- 막재료의 기핵실험, 화재실험 수행. - ETFE 막재를 중심으로, 기핵실험 전후의 내구성 테스트 실시 - ETFE 막재의 인장강도 특성 데이터를 확보하여 재료물성 검증 - 화재실험 결과, 난연성에 관한 데이터를 확보 및 구조물 반영 자료 도출
	(49) 4-3 세세부 (50) ((주)CS구조엔지니	▪ Pilot Project 4 텐셔닝 에어빔 시스템 Ⅱ(TABS Ⅱ)+Pilot Project 설계	- TABSⅡ 구조성능 실험 및 디테일 개발, 구조해석 - 30M Pilot Project 실시설계 - 300M 스팬 대공간 구조물 기본설계 (탄성설계) - Pilot Project 구축계획서 작성

파) 마. 5차년도 연구기관별 세부연구내용

하)



거)

너)

(1) 세부	(2) 세세부(3)(수행주체)	(4) 연구 목표	(5) 연구 내용 및 결과
(6) 1	(7) 1-1 세세부(8)(경상대학교)	▪ 대공간 구조시스템의 Morphogenesis기법 연구	(9) - Morphogenesis모델 분석 (10) - GA와 Morphogenesis의 연계를 (11) 통한 구조최적화 방안제시 (12) - 위상최적화기법과 Morphogenesis의 (13) 연계를 통한 구조최적화방안제시 (14) - FDM과 연계된 Morphogenesis
	(15) 1-2 세세부(16)(재)한국건설품질연구원	▪ 케이블 구조의 형태별 접합부 특성 연구	- 케이블 접합부의 사례분석 - 케이블 초기 긴장이 가능한 케이블 접합부 개발 - 케이블 네트구조의 장력특성 연구 - 원사가 다른 막재의 특성 연구

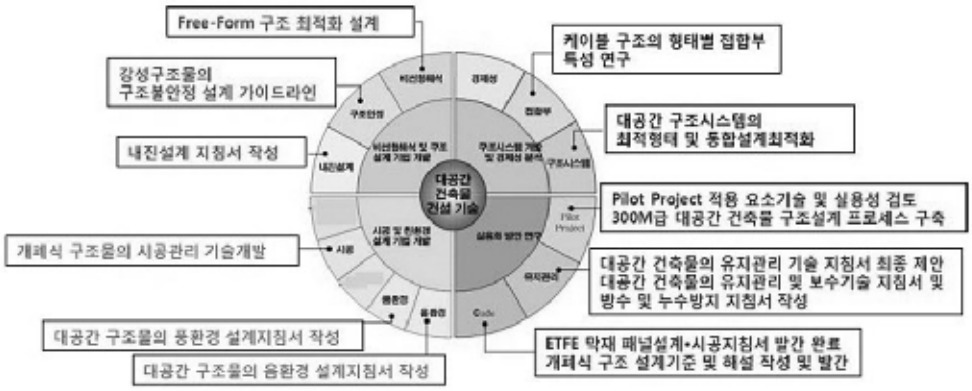
(17) 세부	(18) 세부(19) (수행주체)	(20) 연 구 목표	(21) 연구 내용 및 결과
(22) 2	(23) 2-1 세부(24) (세종대학교)	▪ Free form 케이블-스트럿 구조물의 비선형거동 특성연구	- 유전알고리즘을 이용한 트러스의 구조 최적화 - 하중법을 이용한 핀-조인트 구조물 해석 및 형상탐색 - Free from 케이블-스트럿 구조생성 - 내력밀도법을 이용한 불규칙적인 텐세그리티 구조물의 형상탐색
	(25) 2-2 세부(26) (세명대학교)	▪ 스페이스 프레임의 동적 구조불안정 특성 연구	- 스페이스 프레임의 동적 구조불안정 관련자료 및 문헌조사 - 비선형 선부재요소 동적 정식화 - 스페이스 프레임의 동적 구조불안정 검토용 알고리즘 개발 - 스페이스 프레임의 동적 구조불안정 특성 조사 및 분석
	(27) 2-3 세부(28) (영남대학교)	▪ 대공간 구조물의 개폐 진동영향 평가 및 하이브리드 스마트 면진시스템 적용성	- 지붕 개폐 및 지진 하중에 의한 파일럿 프로젝트 대상구조물의 진동영향 및 사용성 평가 - 스마트 진동제어장치 및 수동 면진장치를 복합적으로 활용한 하이브리드 스마트 면진시스템의 대공간 구조물에 적용 - 대공간구조물에 적용 가능한 하이브리드 스마트 면진시스템의 뉴로퍼지모델 및 적응형 스마트 제어 알고리즘 개발 - 대공간구조물에 대한 하이브리드 스마트 면진제어시스템의 진동제어 성능 및 안전성 평가

(29) 세부	(30) 세부 (31) (수행주체)	(32) 연구목표	(33) 연구 내용 및 결과
(34) 3	(35) 3-2세부 (36) (경동대학교)	▪ 강성 구조물의 시공관리 기술 개발	- 스페이스 프레임 구조시스템 분석 - 접합부 시공관리 기술 검토 - 접합부 시공상태 및 시공조건에 따른 안정성 검토 - Erection공법 기술 조사 및 요소기술개발 - 스페이스 프레임 구조물의 시공지침서 개발
	3-4세부 (전북대학교)	▪ 형상최적화를 위한 대공간구조물풍하중 감소기술연구	- 다양한 형상별 적용을 위한 대공간 구조물의 출입문의 개폐율에 따른 지붕재의 풍하중 특성에 대한 연구 - 풍동실험기법을 이용한 대공간구조물의 내압과 외압의 특성을 알아보기 위한 풍압실험제작과 풍동실험을 위한 평가 모델 개발 - 대공간 지붕의 디지털 미디어 시스템 구축 - 국내·외 활용된 디지털 미디어 사례분석 - 대공간 지붕에 적합한 3D스캐닝 영상처리 기술 및 콘텐츠 사례분석 - 대공간 지붕에 적합한 디지털미디어 하드웨어 연구
		▪ 대공간의 비선형 음에너지 감쇠 평가기법연구	- 기존방법(Bayesian method)의 해석방법 연구 - 평가모델구축 (시뮬레이션 및 축소모형 연구) - 청취평가 - TN의 가중치 개발

(37) 세부	(38) 세부(39) (수행주체)	(40) 연 구 목표	(41) 연구 내용 및 결과
(42) 4	(43) 4-1 세부(44) ((사)한국공간구조학회)	▪ 설계 지침서 작성	- 막구조 설계기준 및 해설 작성 완료 및 발간 - ETFE 막재 패널 시공에 대한 설계지침 작성 및 발간준비
	(45) 4-2 세부(46) (한국기술교육대학교)	▪ 무선모니터링 매뉴얼 및 방수, 누수방지 기술 개발	- 실시간 센서계측정보 가시화 기능 및 센서정보 관리 기능 개발 - 센서계측정보 통계 및 이력조회 기능 및 가시경보 모듈 개발 - 대공간 건축물 건전성 관리 PDA Interface 개발 - 무인관리시스템을 통한 대 공간 건축물의 유지관리 통합기능 제공
	(47) 4-3 세부(48) ((주)CS구조엔지니어링)	▪ Pilot Project 5 개폐식 패널 구동재하실험+Pilot Project 시공	- 개폐식 패널 구동 재하 실험 - Erection 실험데이터 분석 및 실험결과 고찰 - 30M 스팬 Pilot Project 시공 및 적용된 요소기술의 실용성 검토 - 300M 스팬 대공간 구조물의 구조설계 (Schematic Design)

더) 바. 6차년도 연구기관별 세부연구내용

러)



머)

버)

(1) 세부	(2) 세부(3)(수행주체)	(4) 연구 목표	(5) 연구 내용 및 결과
(6) 1	(7) 1-1 세부(8)(경상대학교)	▪ 대공간구조시스템의 최적형태 및 통합설계최적화	- FDM과 연계된 Morphogenesis (3D) - 최적형태 자동생성기법 연구 - ACO모델을 이용한 최적형태 생성기법 - 통합설계최적화기법
	(9) 1-2 세부(10)(재)한국건설품질연구원	▪ 케이블 장력조절시스템 실용화 연구	- 초기긴장 케이블 접합부 성능 및 용량의 최적화 및 실용화 연구 - 다중 동시 긴장을 위한 재긴장 시스템 연구 - 케이블 구조 접합부에 대한 실험 - 연성 구조(막 및 케이블 구조) 접합부 실험

(1) 세부	(2) 세부(3)(수행주체)	(4) 연구 목표	(5) 연구 내용 및 결과
(6) 2	(7) 2-1 세부(8)(세종대학교)	▪ 대공간 구조물의 비선형 해석 가이드라인	- 스페이스 트러스 해석 가이드라인 - 언더텐션 해석 가이드라인 - 텐세그리티 해석 가이드라인
	(9) 2-2 세부(10)(세명대학교)	▪ 구조불안정 설계 가이드라인	- 휨을 고려한 비선형 강성방정식의 정식화 - 휨을 고려한 스페이스 프레임의 구조불안정 검토용 비선형 프로그램 개발 - 휨에 의한 구조불안정 특성 조사 및 분석 - 돔형 구조물의 구조안정설계 가이드라인
	(11) 2-3 세부(12)(영남대학교)	▪ 내진설계 지침서 작성	- 대공간 구조물 내진설계 기준 및 지침서 자료 조사/분석 - 자료 분석을 통한 대공간구조물의 내진설계 지침서(안) 작성 - 대공간 구조물 내진설계 지침서에 따른 대공간구조물의 내진설계 사례

서)

(1) 세부	(2) 세세부 (3) (수행주체)	(4) 연구 목표	(5) 연구 내용 및 결과
(6) 3	(7) 3-2세세부 (8) (경북대학교)	▪ 개폐식 구조물의 시공관리 기술 개발	- 개폐식 구조시스템 분석 - 개폐식 구조시스템 별 시공성 검토 - 개폐식 구조물의 시공 지침서 개발
	3-4세세부 (전북대학교)	▪ 대공간 단면과 형상별 풍하중 및 풍진동 지침서	- 풍진동과 풍하중결과에 대한 위치별 풍동실험실시 - 대공간 구조물의 풍하중 및 풍응답 평가 지침서 작성 - 대공간 지붕의 인터렉티브 디지털 미디어 시스템 구축 - 국·내외 활용된 인터렉티브 디지털 미디 어 사례분석 - 구조물에 적합한 인터렉티브 디지털미디어 시스템 분석 및 대공간 지붕에 적합한 인터페이스 개발
		▪ 음환경 최적설계지침작성	- 적정음향계획 및 음향성능목표제시 - 단계별 도구의 활용방안 제시 - 음향적 결함에 대한 대응방안 제시

어)

(9) 세부	(10) 세세부(11) (수행주체)	(12) 연 구 목표	(13) 연구 내용 및 결과
(14) 4	(15) 4-1 세세부(16) ((사)한국공간구조학회)	▪ 설계 지침서 작성	- ETFE 막재 패널설계 및 시공지침서 발간 완료 - 개폐식 구조의 설계기준 및 해설 작성 및 발간
	(17) 4-2 세세부(18) (한국기술교육대학교)	▪ 대공간 건축물 통합유지관리 지침서 작성	- 막구조 건축물 유지관리 및 진단 지침 완료 및 통합 - 막체의 보수기술 지침 및 강제부재의 부수기술 지침 통합 작성 - 공기막구조의 설비 및 유지관리 지침 요약 및 통합 - 우수차단장치 및 수밀성능 유지관리 지침 정리 및 통합
	(19) 4-3 세세부(20) ((주)CS구조엔지니어링)	▪ Pilot Project 6 실용화 요소기술 검증+ 대공간 구조물 구조설계 프로세스 구축	- 실용화 요소기술 검증 에어빔 압력 상시 측정 케이블 장력 상시 모니터링 결과의 비교, 분석 에어빔 접합부 성능 실험 - 대공간 구조물 구조설계 프로세스 구축 - 텐셔닝 에어빔 시스템(TABS) 신기술 지정/신청

4) Ⅳ 연구개발결과의 활용계획

■ 1세부-구조시스템 개발 및 경제성 분석

- 구조시스템별 특성분석은 모든 설계 진행에 꼭 필요한 한 분야로 구조시스템의 다양한 접근 방법이 체계화 된다면 대공간 구조의 시스템을 효과적으로 선택하고 이를 적용할 수 있는 토대가 마련된다. 이를 설계현장에 도입하면 이 분야의 새로운 방향이 설정 될 수 있을 것으로 예측된다.
- 모델링 기법을 통하여 독자적인 대형 건축물의 형태미와 기술을 확보하고 새로운 가능성을 제기하기 위한 노하우 축적의 계기가 될 것이다. 실제 기본 설계 과정으로 이술이전이 가능하며 최소한의 시행착오로 시간과 경비를 절약할 수 있다.
- 축소 모델의 실험을 통하여 모든 기술적인 면을 고려하여 실용화를 꾀하며 구조 시스템의 개발과 새로운 디테일 개발 등에 축소 모델 실험을 적용하여 경쟁력 강화를 기대할 수 있다. 개폐식 구조의 활용으로 비상피난시설이나 우주구조물의 접이식 구조물에 대한 후속연구는 앞으로 지속적으로 필요하다.
- 설계최적화기법과 함께 Morphogenesis기법을 활용하면 공학적 접근법에 바탕을 둔 구조시스템에 디자인의 요소를 함께 고려할 수 있게 되어 개념 설계단계에서 다양한 구조시스템 대안을 확보할 수 있을 것으로 판단되며 이러한 프로세스가 설계과정에 활용 될 수 있을 것으로 예측한다. 또한 개념 설계단계에서 발생하는 시행착오에 의한 시간과 경비를 최대한 절약할 수 있다.
- 위상최적화기법은 통합설계최적화기법을 개발하는 핵심요소기술이며 이를 통하여 다양한 형태의 대공간 구조시스템을 효율적으로 개발하는 도구로 사용될 수 있을 것이다.
- 접합부 특성 연구에 관한 연구를 통해 막의 접합부 설계시 신뢰성을 제고가 가능하며 접합부 시험법 및 장치의 개발에 의한 신뢰성 있는 접합부 설계 반영이 실용화 될 것이다.
- 새로운 막 접합부의 개발에 따른 접합부 설계 기술 이전 및 케이블 접합부 개발에 의한 케이블 구조물의 국제 경쟁력 제고가 가능하다.
- 적절한 기술로 공기단축과 공사비 절감을 꾀할 수 있고, 신기술 및 특허출원으로 국내의 기술축적과 국제 경쟁력을 강화할 수 있다.

■ 2세부 "비선형 해석 및 구조설계 기법 개발"

- 형상탐색 기술을 Tensegrity 구조 설계 시스템에 실제로 반영하기 위한 기술력을 확보함으로써 케이블-스트럿 구조물의 실용화에 기여한다.
- 케이블-스트럿 구조물의 비탄성 비선형 해석 연구를 통해 케이블-스트럿 구조물의 설립을 위한 기술을 자립화 함으로써 미적인 공간 창출의 건설을 가능하게 할 것이다.
- 최적 설계 기법을 이용하여 대공간 및 지붕구조에 적용 시킬 수 있을 것이다.
- 쉘형 구조물의 붕괴 메커니즘 파악을 통해 구조안정성 향상 및 대공간 구조물의 국내 유입을 가속화
- 구조 형태에 따라 외부하중에 대한 구조 불안정 거동을 분석하여 구조설계 시에

반영함으로써 국내 대공간 구조물의 구조 설계 자립화 및 기술력 향상

- 대공간구조물의 구조안정에 관한 가이드라인 활용
- 대공간 구조물의 내진설계기법에 고성능화 및 성능에 기초한 내진설계 (Performance Based Seismic Design)기술의 확보
- 대공간 구조물의 내진설계에 대한 실무 엔지니어링 가이드라인 제공
- 면진장치 및 진동제어 장치 관련 제작 및 부품, 소재, 재료 업계와 협력을 통해 관련업계의 활성화를 도모할 수 있다.

■ 3세부 "시공 및 친환경설계 기법 개발"

- 학술지 및 세미나를 통해 Erection 공법에 대한 홍보.
- 연구결과의 현장 적용을 위해 산학협동 연구체계 구축
- 국내 대공간 건설 현장에 개발된 효율적 Erection 공법 및 jack-up 시스템 기술등을 적용하여 공비 절감, 공기 단축 및 작업의 효율성 확보.
- 대공간 음향설계의 체계화
- 발생가능한 음향적 결함요인의 사전 제어
- 측정 기법의 산업체 기술 이전을 통한 발전된 측정시스템 개발

■ 4세부 "실용화 방안 연구"

- 대공간 건축물 건설 관련 각종 특수구조물 설계기준의 국내 데이터베이스 구축
- 설계지침서 연구를 통해 관련 규준(법제화)를 마련하여 설계 및 시공에 활용
- 국내외 대공간 관련 code를 조사 분석을 통한 데이터를 구축하여 기술수요자에 소요기술 제공
- 상시 모니터링에 의한 대공간 구조물의 유지기반기술 확보 및 현장적용으로 인한 해당기업체 기술이전 가능성 제공
- 구조물 특성에 맞는 계측기법 기반기술 확보 및 광섬유 기반 제어계측 기기 개발과 파급효과 제공
- 유지관리분야의 특수구조물에 대한 지침서 제공으로 기존 대공간 구조물에 대한 보수 지침에 대한 효율성 제고와 비용절감을 위해 활용
- 연성구조물의 무인 측정 센서기반의 측정법을 이용한 효율적인 장력측정으로 안한 장수명 가능 구조물의 실현가능
- 원형강관의 접합을 위해 2차년도에 새로이 제안된 접합부의 경우 높은 강성과 내력을 가지고 있어 대공간 구조물의 지붕구조로 활용되며 원형강관을 이용한 단층 레이어 돔의 접합부에 적절한 사용이 가능하다.
- Pilot Project로서 제작된 한국기술교육대학교의 HRD 홍보관은 학교의 전시시설로 사용될 예정이며, 실제 적용된 핵심 요소기술(텐셔닝 에어빔 시스템, 유압식 재긴장 소켓, Erection 공법 및 개폐식 구동장치 등)의 실용성 검토를 통하여 건설기술 데이터 베이스 구축이 가능하여 실무자에게도 소요 기술 제공이 가능하다.
- 연구개발 기간 동안 작성된 300M 스팬 Pilot Project의 구조설계 보고서(SD Report)를 바탕으로 대공간 구조물의 구조설계 프로세스가 정립된다면, 향후 건설된 대공간 구조물들의 지침이 될 수 있으며 나아가 본 연구단의 최종목표인 국내 자체 기반기술 개발로 인한 국산화 및 고도화가 가능하다.

5) Ⅳ Pilot Project와의 연계성

관련 요소기술		주요 내용	해당세세부 및 연구책임자	주요 성과
소프트웨어	구조 시스템	Pilot Project 대안검토 및 최종안 선정	1-3 한국예술종합학교 (박선우)	- 개폐식 지붕구조 사례 - Pilot Project 대안 - Pilot Project 최종안
	위상 최적화	Pilot Project 킬아치의 위상최적화	1-1 경상대학교 (이상진)	- Pilot Project 킬아치의 Rise-Span비 - 부재크기 최적화
	구조 안정성	Pilot Project 구조안정성 검토	2-1 세종대학교 (이재홍) 2-2 세명대학교 (김승덕)	- 비선형 해석 기법 - Pilot Project 안정성 - 서남권 돔 야구장 안정성
	내진설계	Pilot Project 지진하중에 대한 안정성 검토	2-3 영남대학교 (강주원)	- Pilot Project 안정성 - 대공간 구조물 진동제어 기법
	풍하중 평가	Pilot Project 풍동실험	3-4 전북대학교 (김영문)	- Pilot Project 풍압계수
	친환경 설계기법	Pilot Project 음환경 평가	3-4 전북대학교 (정대업)	- Pilot Project 음압레벨 - 흡음대책
	지침서 작성	막 및 케이블 등 연성구조물에 대한 지침서 작성	4-1 한국공간구조학회 (권택진)	- 막구조 설계기준 및 해설 - 케이블구조 설계기준 및 해설
하드웨어	유지관리	유압식 재긴장 소켓 및 무선 모니터링	1-1 한국건설품질연구원 (이성민), 4-2 한국기술교육대학교 (이승재)	- 유압식 재긴장 소켓 - 무선모니터링 시스템 - 월별 케이블 및 막장력 변화 - Pilot Project 유지관리
	시공	가설공법 (Rotation-Up 공법)	3-2 경북대학교 (김철환)	- 대공간 erection 공법 (rotation-up 공법) 개발
	실용화 요소기술	텐셔닝 에어빔 시스템	4-3 CS구조엔지니어링 (김종수)	- 지붕경량화를 위한 텐셔닝 에어빔 시스템
		개폐식 지붕구조 및 누수방지	4-3 CS구조엔지니어링 (김종수) 4-2 한국기술교육대학교 (이승재)	- 지붕 개폐부 설계 - 지붕 개폐부 안전성 - 누수방지 시스템

5. SUMMARY

1) Ⅰ Title

Development of Construction Technology for Spatial Structures
- Structural system development and analysis on the construction cost
- Development of nonlinear analysis and structural design technology
- Development of Construction and environmentally sustainable design technology
- Research on applicable practical use of technology

2) Ⅱ Purpose and necessity of research and development

■ Structural system development and analysis on the construction cost

It is essential task for our nation to develop new advanced construction technology for spatial structures to accumulate our own advanced technology and this kind of R&D is necessarily required for us to be a advanced country in this field near future. The continuous development on the new construction technologies of spatial structures is also required to create new jobs and internationally competitive high-quality human resources in the field of spatial structure industry in Korea.

Joints are most important parts of spatial structures system. Since spatial structures systems are large structure, there are many import joints and therefor we want to make a solution that treat structural and constructural problem. Rigidity and ductility structures have very different joint. Rigidity structure type's joint force effect, ductility structure type's cable joint change problem, membrane welding and details are corporate closed technique, therefore we need to improve technical level using established database.

Economic analysis is divided by construction cost and project cost. Construction cost is divided by structural cost and service cost. Service cost is include variety equipment. Economic analysis of this area are very difficult and complicated, so we want to suggest most resonable way to working level design/construction/maintain through this research.

■ Development of Construction and environmentally sustainable design technology

In order to construct a building with super large spans, it is acutely necessary to reduce the weight of materials and to develop adequate structural

systems as well as design/construction methods. The key to the practical use of environment friendly spatial buildings is the development and application of essential technologies (construction, material, air conditioning and heating facilities, wind environment, acoustical environment, etc.). With these technologies, we may get ready for domestic demands for spatial buildings.

■ Research on applicable practical use of technology

At part 4, the purpose of research is to make practicable use of technology. The design standard or guideline for spatial structures as membrane, cable, ETFE and retractable structures are developed. The prepared guidelines referred to international standards of Japan, China, America etc., and are adjusted to the domestic actual condition. The research outcome will get the official recognition by relation association and relation agency, and then these could be applied directly in the actual structure plan.

In the maintenance aspect, we aim at studying all the contents essential for a plan to put a spatial structure to practical use, and developing the watertightness of large deformation and the preparation of specification as a core technology.

Along with the following purposes:

- Establishment of the maintenance technology of a 300M spatial structure,
- Establishment of the damage detection system using an unmanned robot,
- Development of a cutting-edge measuring method using an optical fiber sensor and development of a permanent tensile force measuring system of a beam-structure, in order for the health monitoring of a beam-structure,
- Development of the maintenance technology guidelines for a super-large beam-structure and an air beam structure,
- Preparation of watertightness guidelines for the large deformation of a super-large beam-structure,
- Establishment of an unmanned, integrated health monitoring system of a spatial structure,
- Verification of a system through Pilot Project health monitoring,

and, in order to verify the feasibility of a 300M-span space construction technology and the practical use of core technologies applied to the construction, we built a 30M span Pilot Project on the scale of 1 to 10 at Korea

University of Technology and Education in Cheonan, and tried to secure a construction technology for a spatial structure based on our experiences in engaging in projects.

가) A. Technology

■ Structural system development and analysis on the construction cost

- The choice of rational structure system becomes possible as spatial structure system is analyzed and organized systematically.
- The independence of design optimization technology of spatial structure system become possible.
- Standardization of related design technology and accumulation of quantitative data are accomplished.
- If structure system is decided, because effect that get layout and construction is immense, accumulation of technology about suitable system of spatial structure is essential. Design ability and development of construction ability for spatial construction are thought by development that numerical analysis and development of program field are worth doing is expected.
- Structure system are various to stabilize construction according to special quality, and way to control flowing of force. If structure system is decided, because effect that design and construction is immense, accumulation of technology about spatial structure is essential
- special connection's examination of spatial structure system is point research field connected with spatial structure systems. But, domestic research is less
- Independence of technology that welded connection DB construction and special connection is base to secure high-quality technology and improve outside technology competitive power.
- Specific data and research about proper construction cost assessment and choice of efficient structure system may become reference data for plan of construction between king post more than 300m, design, construction at early design step of spatial structures

■ Development of nonlinear analysis and structural design techniques

- Structure system are various to stabilize construction according to special quality, and way to control flowing of force. If structure system is decided, because effect that design and construction is immense, accumulation of technology about spatial structure is essential.
- Developed new form-finding algorithm for tensegrity and cable-strut structure.

Also inelastic nonlinear analysis of cable-strut structure is presented for various configuration.

- It has excellent mechanical properties in that a shell structure can transmit forces using in-plane stress only. But it passes from a stable to unstable state, however, or from an unstable to stable state, at a specific critical load. So we must understand that there is a buckling process or collapse mechanism due to this unstable phenomena.
- The structural design ability for large scale structure needs much higher level of technology and know-how than other structural design because design method for large scale structure has much different method of design in accordance with the characteristics of structural system to form large space. Therefore, development of design and construction ability for such a structure can be realized by development of numerical method and programming and largely affect to other technological analyses and simulation fields.
- Shell structure that is a structure to be able to transfer the force by a form of surface internal force has a very superior mechanical features and changes its condition from stable to unstable in a load or from unstable to stable so that it needs to recognize the fracture mechanism due to an unstable phenomenon. The development of technology to resolve this unstable issue of shell structural system is essentially needed.
- Due to the quantitized guideline for evaluating large scale structure domestically, the evaluation index for dynamic response is needed and it is needed to provide efficient control system for large scale structure by evaluating the control performance in the 3 dimensional dynamic analysis in accordance with control elements. This will help to prevent a damage by the dynamic load and extent the life of structure.
- According to the grasp structural stability of unique and the deformed shape in the form of the spatial structure is an important factor to be considered in design. Thus, the spatial structural seismic behavior characteristics by type of research the analysis of the spatial structures of seismic consideration in determining the form is necessary to arrange an important knowledge base.
- Seismic design of structures for seismic loads directly in infrastructure, only to receive an increase in stiffness and strength will affect the dynamic behavior in the upper part of the structure. Therefore, more rational and economical structural design is required through seismic analysis that is considered the influence of interaction between roof structure and lower structure as column and wall.

- Seismic responses of roof structures of large spatial structures are very large compared to general building structures. Because of this structural characteristic, vibration control systems for general building structures are limitedly applied to spatial structures. So, the introduction of seismic isolation and structural control systems is required for improved earthquake-resistant performance.

■ Development of Construction and environmentally sustainable design technology

- Develop and implement virtual models for structure erection methods
- Develop structure erection methods and make programs and manauls for selecting optimal erection methods
- Technical integrating of domestic building industry improvement and international competitive power rising
- It is important to develop construction guidelines or criteria about spatial structures for constructors in order to manage structures systematically.
- In case of long-span spatial structures, wind tunnel experiment is essential for evaluating the impact of the wind accurately.
- To secure architectural acoustic design technology for large span spaces
- To secure electro-acoustic design technology for large span spaces
- To secure acoustic computer simulation technology for large span spaces
- To secure evaluation technology for acoustic performance in large span spaces

■ Research on applicable practical use of technology

- Standards of membrane structures, cable structures and Design Guideline of ETFE and retractable structures to maintain good quality building for Spatial Structures
- Safety improvement of spatial structural system improved safety by design and construction guidelines
- In order to verify the feasibility of each unit technology for a spatial structure, in order to secure reliability, and in order to obtain relevant additional application technologies, it is necessary to design and produce a Pilot Project which has the high likelihood of the feasibility.
- Given the current domestic foundation technologies, it is too early to introduce some core technologies such as a retractable roof system applied to a spatial structure and tensioning air beam system. Therefore, it is necessary to use the Pilot Project aforementioned in order to establish core technologies by securing a design technology in the process of producing an actual structure and reviewing the quantitative and qualitative application.

- When accumulating the design and construction technologies applied to a spatial structure through the production of Pilot Project, we can contribute to localize and advance domestically developed foundation technologies.

나) B. Economy and Industry

■ Structural system development and analysis on the construction cost

- Keep away diversion of aboard company by independence techniques of spatial structures depending on outside the country four present and need expense reduce can also by domestic technology with preservation manage and get cost-cutting effect can .
- It is techniques effective propriety analysis of large construction, project building expense supply way, to presentation for practical use way (various events and in reply profit model production) and new industry appearance (yes, room skiing ground etc..) class of various form.
- Can prevent domestic market encroachment by advanced technology beforehand, and offer an opportunity of accumulation of technology in domestic building company. Can be connected by competitive power security in oversea market by accumulative technology.
- Present technique of spatial structures construction are depend on foreing country about 30~40%. This research will save dependent technique cost.
- Improve foreign market competitiveness through accumulated technique.
- Expansion of construction market through the improve approach possibility to the spatial structure.
- Suggest large structure construction validity, raise project funds and large structure utilization method.
- Pioneer a new construction industry market

■ Development of nonlinear analysis and structural design techniques

- The technology of the shape finding process where the structural analysis certainly requires is localized. The technology of the shape finding process can contribute to the industrial growth of the related industry by securing the domestic technique in the industrial field this software.
- Although the space frame structure has the advantage of light weight and high stiffness, it is obvious that an instability phenomenon at a specific critical load can occur. Due to this factor, the space frame sturcture must be prevented the structure instability phenomenon of being difficult to predict through the structure improving the stability of this structural system. In addition, the structure mechanism verifying which is understanding of instability behavior can be used to more economic design.
- Hard structures as the reinforced concrete or the steel structure generally

being used is necessary the member section possessing the suitable stiffness in order to resist in the bending moment. On other hand, the cable-strut structure is made of the compression and tensioning element without a moment. Therefore it can expect the cost reduction effect because the cable - strut structure optimizes the cross section and can reduce the mass at the same time.

- The special structure has a tendency to be large scale and helps the activation of domestic construction market and growth of employment because it uses variety technology and material. Furthermore, the market for large scale structure market is forming in the Southern-East Asia and China so that we need to prepare exporting our technology by accumulating the value added structural design technology.
- Domestically, an actual example which is able to be applied on the design and validation of analytic results because there rarely is the example of dynamic experiment for large scale structure. Thus, it needs to establish the database to improve the independence of technology which is related with large scale structure design by collecting the fundamental data that is required in the related experiment and design using the minimized shaking table experiment.
- Among large scale structure, special frame structure, a rigid discrete-time system is a structural system that is economic and has high strength. Through the improvement of structural stability such a system, it is possible to design by the charged personnel with the effect of prevention of unexpected unstability and to expect the cost saving effect in the field of large scale structure.
- Taking into account the spatial structural peculiarities of the structure seismic design techniques when designing the structure, induced by applying a more rational design and take the appropriate structure through the cost-effective design of quantities are required.
- Seismic design of spatial structures and structural design techniques for the simulation, by obtaining, associated with the structural design of the current spatial structure can improve the independence of domestic technology. In addition, the number of foreign technology due to minimized waste too much foreign currency can be spent to reduce costs.
- Seismic intensity in the member of ways to increase the initial construction is costly. On the other hand, by increasing the plastic behavior of ductile how to use, but the structures to prevent collapse of the maintenance and

reinforcement are also difficult to repair due to the destruction of non-structural material is costly. Therefore, Vibration response control systems for spatial structures can contribute to obtaining patents of related technologies and technology profits through acquisition of new technologies.

■ Development of Construction and environmentally sustainable design technology

- Study the characteristics and mechanical properties of new fabrics necessary for the construction of spatial structures, provide domestic construction companies with opportunities to accumulate technologies through testing the tension of cable materials, and reinforce competitiveness in overseas markets through more stable spatial structure technologies.
- Expectation of the domestic ripple effect by expanding international construction market
- It is needed to reduce construction costs, term of works and to have construction safety by developing construction management technology since the demand of spatial structure constructions will be increase.
- Secure accurate aerodynamic safety
- To reduce expenses for acoustic consulting from overseas
- To cultivate professional human resources for acoustics
- To bring up industries relevant to architectural acoustics and electro-acoustics

■ Research on applicable practical use of technology

- Substitution the technologies from abroad to developed one
- The realization of value-added technology-intensive design technology by through the utilization guidelines
- Provide the chance of technical accumulation to the domestic constructive enterprise and raise the competitive power to overseas market
-
- Domestically developed foundation technologies are not advanced enough to design a spatial structure like a tensile structure reflecting complicated core technologies that en considerable amount of design cost occurs. Accordingly, through the preparation of SD report of a 300M span Pilot Project, it is necessary to establish a design process, which can become guidelines for a spatial structure.
- The process of introducing overseas core technologies applied to a spatial structure due to the lack of relevant domestic technologies is considerably

inefficient in an economic way. Accordingly, it is necessary to localize the core technologies and reduce cost by producing an actual Pilot Project.

- In order to verify the feasibility of the applied core technologies after the completion of construction, and in order to allow relevant persons to easily apply the core technologies to many future spatial structures, it is required to establish a database.
- By building HRD promotion exhibition at Korea University of Technology and Education, which is an actual 30M span Pilot Project, we try to use the building as an exhibition of the university.

3)

4) Ⅲ Contents and scope of research and development

가) A. 1st year

(1) Part	(2) erformance agency	(3) Contents of research and development	(4) Detailed promotion plan and method
(5) 1	(6) –1 (7)	▪ Development of structure system and research of characteristic analysis.	(8) - Historic ancient temple of spatial structures. (9) - Structure system and systematic classification of structure form . (10) - Retractable type classification of reorganization structure . (11) - Collection of retractable structures examples and characteristic of spatial structures. (12) - Special quality grasping which follow structure form spatial structures and retractable form of roof .
	(13) –2	▪ A ball joint connection behavior characteristic searching examination and detailed suggestion	(14) - Ball joint detailed documents investigation (15) - A local behavior prediction through non-linear FEM analysis (16) - Take the influencail element through non-linear FEM analysis (17) - The most suitable figure development through variable analysis (18) - The structural behavior searching examination of the joint through a miniature structure performance experiment (19) - A ball joint design type and detailed suggestion
	(20) –3	▪ An economy analysis study according to the structure system	(21) - Cost of construction characteristic analysis and comparison according to each structure system (22) - Space structure Data Base construction

(23) Part	(24) Performance agency	(25) Contents of research and development	(26) Detailed promotion plan and method
(27) 2	(28)-1 (29) Sejong University)	▪ Nonlinear Analysis Method Development of Large Span Structures	- Research of Nonlinear Numerical Analysis Model about Space Frame Structures - Research of Nonlinear Numerical Analysis Model about Shell Structures - Research of Nonlinear Numerical Analysis Model about Non-Rigid Member Structures
	(30)-2 (31) Tiger)	▪ Structural stability characteristic of large scale structural system	- Survey of structural unstable feature per shell type - Survey of structural unstable feature per load and boundary condition of shell - Survey of sensitivity feature per initial unstable of shell structure - Survey of application of unstable design in the shell structure
	(32)-3 (33) Yeungnam University)	▪ Earthquake behavior characteristics investigation and investigation of spatial structural by type	- Seismic behavior characteristics according to the macroscopic shape by spatial structural - Seismic behavior characteristics according to the details shape by spatial structural - Seismic behavior characteristics according to the structural system by spatial structural - Seismic behavior characteristics according to the shape by spatial structural

(34) Part	(35) Performance agency	(36) Contents of research and development	(37) Detailed promotion plan and method
(38) 3	(39) -2 (40) Doosan Industrial Development Co)	▪ Develop methods for the erection of spatial structures	(41) - Survey representative methods for the erection of ordinary structures (42) - Survey methods for the erection of spatial structures in Korea and foreign countries (43) - Analyze methods for the erection of structures by structure system (44) - Analyze the characteristics, advantages and disadvantages of structure erection methods (45) - Design and implement 3 types of model (46) - Analyze construction period (47) - Analyze economic efficiency (48) - Analyze workability (49) - Develop efficient structure erection methods and develop a program for selecting optimal construction methods (50) - Make manuals
	3-4 (Chonbuk National University)	▪ Survey and analyze wind behavior characteristic according to the form of spatial structures	- Review relevant literature - Analyze the wind vibration characteristic of membrane structures including unsafe vibration characteristic - Develop methods for analyzing the natural frequency and damping factor of membrane structures
		▪ Development of acoustic design technology for large span spaces	- Establishing evaluation models for choosing variable acoustic control methods - Making evaluation models - Subjective and objective evaluation of models - Drawing out optimum acoustic design methods

(51) Part	(52) Performance agency	(53) Contents of research and development	(54) Detailed promotion plan and method
(55) 4	(56)-1 (57) Korean Association for Spatial Structures)	▪ Analysis on design code for large spatial structures	- Analysis of the large spatial structures for Japan and China - Analysis of the large spatial structures for Europe and USA-related code
	(58)-2 (59) Korea University of Technology and Education)	▪ Development of instrumentation control system-based technology	- Establishment of process of each item according to type of instrumentation - Establishment of measurement process according to instrumentation system, - Establishment of structure abnormal behavior detection process - Development of structure stability analysis method - Application to practical affairs and test measurement
	(60)-3 (61) CS Structural Engin	▪ Pilot Project 1 Proposal of structural design procedure of spatial structure	- Create structural design procedure of spatial structure - Create evaluation index of spatial structure - Design of Pilot Project

나) B. 2nd year

(1) Part	(2) erformance agency	(3) Contents of research and development	(4) Detailed promotion plan and method
(5) 1	(6)-1 (7)	▪ Development of sturucture system's modelding : inclusion of retractable structures	- Investigation of application for modeling spatial structure system - Systematic classification for modeling step by step spatial structure system - Suggest a modeling method according to structure system and structural material - Existing optimization techniques and application analysis - Suggest direction of optimization technique for modeling structure system
	(8)-2	▪ A welding joint structure behavior characteristic and a hardness evaluation study	- The investigation of welding joint details documents - Non-linear FEM analysis of the welding joint for the person derivation that is a local behavior prediction and influence - The stiffness evaluation of the joint through a structure performance experiment - A design type and the detailed suggestion of the welding joint
	(9)-3	▪ A standard model analysis study according to the use and span	- Cost of construction characteristic analysis according to each structure system and comparison - Spatial structural system Data Base construction

(10) Part	(11) Performance agency	(12) Contents of research and development	(13) Detailed promotion plan and method
(14) 2	(15) -1 (16) Sejong University)	▪ Develpment of Geometric Nonlinear Analysis Method for Discrete Stiffness Structures	- Development of Analysis Model for Space Truss and Space Frame - Nonlinear Analysis by Modified Riks Method with Accelerated Algorithm - Development and Analysis of Material Nonlinear Model - Development and Analysis of Inelastic Nonlinear Model - Development of Dynamic Analysis Algorithm - Development of Analysis Model for Anisotropic Material Space Frame
	(17) -2 (18) Tiger)	▪ Static nonlinear analysis and static stable feature of shell structure	- Survey the structural unstable data and document for shell structure - Non-linear dynamic equation and Static Formulation of shell structure - Safe analysis algorithm for review the static unstable for shell structure - Development of initial unstable model for the unique buckling mode of shell structure - Survey and analysis of static structural unstable of shell structure
	(19) -3 (20) Yeungnam University)	▪ Modeling techniques developed for seismic analysis by spatial structural	- Enter the support vibration - Ground-space model for the structure - Modeling of seismic response of interaction - Equivalent static analysis can be applied to the spatial structure of the model

(21) Part	(22) Performance agency	(23) Contents of research and development	(24) Detailed promotion plan and method
(25) 3	(26)-2 (27) Dosan Industrial Development Co)	▪ Development of tension measuring and control technologies for soft structures	(28) - Development of tension measuring methods (29) - Development of measurement data management programs (30) - Establishment of design guidelines (31) - Establishment of tension measuring methods and tension measuring management systems
	3-4 (Chonbuk National University)	▪ Development of wind tunnel models and test methods for spatial structures	▪ Study on spatial structure modeling methods - Case study on wind tunnel models of various forms including fabrics and cables ▪ Study on wind tunnel test methods for spatial structure - Investigation of wind tunnel test methods by the type of spatial structure - Establishment of the methods of data analysis after wind tunnel test ▪ Formulation of reduced models for vibration characteristic analysis- Selection of structural systems vulnerable to vibration - Study on reduced model formulation methods for vibration characteristic analysis ▪ Experiment on vibration characteristic and establishment of analysis methods - Study on reduced vibration model measuring methods
		▪ Development of room acoustic measurement technology	▪ Selection of a microphone input and a receiver ▪ Producing a receiver which takes inputs from 4 receivers ▪ Writing a software for analysis and

(32) Part	(33) Performance agency	(34) Contents of research and development	(35) Detailed promotion plan and method
(36) 4	(37)-1 (38) Korean Association for Spatial Structures)	▪ Development of the design Guideline	- Domestic and international data collection/analysis related to cable structures - Research of based technique design guidelines for cable structures - Drawing up the design standard and explanation of cable structures
	(39)-2 (40) Korea University of Technology and Education)	▪ Development of control instrumentation system considering large deformation	- Development of instrumentation system and package technique by using FBG sensor - Development of robot for inspecting damage and monitoring of membrane structure by using RFID sensor - Calibration of instrumentation system and preparation of maintenance guide book
	(41)-3 (42) CS Structural Engin	▪ Pilot Project 2 Single Layer Dome Structure	- Structural design of space frmae(single layer dome) - Experiment and analysis of single layer dome structure

다) C. 3rd year

(1) Part	(2) erformance agency	(3) Contents of research and development	(4) Detailed promotion plan and method
(5) 1	(6) –1 (7)	▪ Scale model test techniques and size/shape/optimization techniques of spacial structure	(8) - Investigate the character of reduced model experiment of structure system (9) - Analyze the application of reduced model experiment (10) - Classify a type of reduced model experiment (11) Formulate a reduced model experiment (12) - Analyze the structure system of spatial structure and select a case structure (13) - Suggest the size/shape optimization formulation (14) - Verify the size/shape optimization for spatial structure system and suggest the alternative structure system for practical structure
	(15) –2	▪ The cable joint system development that re-tension is possible	(16) - The cable joint details and structural model example investigation (17) - Technical partial supplement through an expert (18) -Joint system details design (19) - FEM analysis for the people derivation that is a safety prediction and influence (20) - A behavior prediction through a trial product model (21) - System performance evaluation through an experiment

(22) Part	(23) Performance agency	(24) Contents of research and development	(25) Detailed promotion plan and method
(26) 2	(27)-1 (28) Sejong University)	▪ Development of nonlinear analysis with hybrid-structures	- Development of modeling with tensegrity and undertension structures. - Inelastic nonlinear analysis of tensegrity and undertension structures. - Dynamic analysis of tensegrity and undertension structures.
	(29)-2 (30) Tiger)	▪ Characteristic of Dynamic instability for Shell-Typed structures	- Survey for dynamic instability of shell-typed structures - Dynamic formulation of EP shells - Development of computational program to examine dynamic instability - Investigation of dynamic instability of EP shells
	(31)-3 (32) Yeungnam University)	▪ A Research on Dome under the Influence of Lower Structure	- A Research on Dome under the Influence of Lower structure - Experiment on shaking table for the influence of lower structure on spatial structure. - Experiment for estimation of cable tension

(33) Part	(34) Performance agency	(35) Contents of research and development	(36) Detailed promotion plan and method
(37) 3	(38)-2 (39) Dosan E&C)	▪ Development of an automated construction method	(40) - Development of a framework automation model (41) - Develop an erection automation model (42) - Develop an automated framework method (43) - Develop an automated erection method, and make and demonstrate animations and models
	3-4 (Chonbuk National University)	▪ Analysis of the similarity characteristic of wind tunnel experiment: In terms of material and geometry	▪ Study on the law of similarity for building a wind tunnel experiment model for various spatial structures ▪ Study on the law of similarity for building a wind-induced vibration model for spatial structures ▪ Technologies for securing the structural performance of spatial structures using solar panels - Case study on spatial structures using solar panels - Detailed technologies for joining solar panels and spatial structures - Technologies for applying sunlight to parts of spatial structures
		▪ Development of computer simulation technology for the acoustics of large span spaces	- Developing an algorithm which gave a solution ot wave equation by applying the FDTD method - Developing boundary conditions which enables acoustic simulations of opened space - Developing boundary conditions for reflective surfaces with a certain absorption coefficeints - Developing a calculation method for an impluse response at a position in a room

(44) Part	(45) performance agency	(46) Contents of research and development	(47) Detailed promotion plan and method
(48) 4	(49)-1 (50) Korean Association for Spatial Structures)	▪ Development of the design Guideline	- Domestic and international data collection/analysis related to cable structures - Publish design guidelines for cable structures
	(51)-2 (52) Korea University of Technology and Education)	▪ Preparation of membrane structure building repair technology guide (draft)	- Cable tension measurement and unmanned monitoring technology - Development of membrane material deterioration causes and diagnosis method - Diagnosis of membrane deterioration performance due to nucleation/growth - Membrane material diagnosis results and judgment criteria verification
	(53)-3 (54) CS Structural En	▪ Pilot Project 3 Tesioning Air Beam SystemI (TABSI)	- Structural design of Tesioning Air Beam System - Nonlinear analysis of Tesioning Air Beam System - Experiment of Tesioning Air Beam

라) D. 4th year

(1) Part	(2) erformance agency	(3) Contents of research and development	(4) Detailed promotion plan and method
(5) 1	(6) -1	▪ Topology optimization technique	(7) - Topology optimization technique: comparative study (8) - Suggest Material modes for the topology optimization technique (9) - Suggest the topology optimization formulation (10) - Case study and pilot projet
	(11) -2	▪ Characteristic study according to the membrane structure joining form	- Optimization of the hydraulic systems re-tensioning cable - Development of wireless-monitoring systems that check cable tension - Development of portable hand pumps - Example analysis of the membrane structure joint - Dynamic behavior characteristic study of the membrane joint - Application plan to re-tensioning system in Pilot project

(1) Part	(2) performance agency	(3) Contents of research and development	(4) Detailed promotion plan and method
(5) 2	(6)-1 (7) Sejong University)	▪ Inelastic nonlinear behavior characteristic study of cable-strut structures	- Modeling method of cable-strut structures - Form finding of cable-strut structures - Inelastic nonlinear analysis of cable-strut structures
	(8)-2 (9) Semyung University)	▪ Study on the static instability characteristics of space frame structures	- Survey for static instability in space frame structures - Static FE equations considering geometric nonlinearity - Characteristics of static instability in simple discrete models - Characteristics of static instability for lattice domes
	(10)-3 (11) Yeungnam University)	▪ Development of vibration control system for spatial structures	- Investigation of base and roof seismic isolation method - Application of passive tuned mass damper to spatial structures - Study on vibration control of passive and semi-active control system - Development of optimization method about vibration control system for spatial structures

마)

(1) Part	(2) performance agency	(3) Contents of research and development	(4) Detailed promotion plan and method
(5) 3	(6)–2 (7) KyungDong University)	▪ The development of the core constructional technology of the soft flexible membrane structures	▪ A Study on the similarity law of wind induced vibration model in consideration of the material characteristic of spatial structures for application to various shapes ▪ Formulation of a roof material model for spatial structures reflecting the wind induced vibration characteristic through wind tunnel experiment, and development of an assessment model through wind tunnel experiment (8) – Development of the core constructional technology for the soft flexible membrane structures (9) – Production of the movie and the maquette for the erection method (10) – Development of the Guidelines for the construction of membrane structures
	3–4 (Chonbuk National University)	▪ Development of a method for estimating wind load according to shape	▪ Application planning of the spatial structure and stadium using PV(Photovoltaic) System – Construction design analysis of foreign spatial structure using solar panel – Analysis of dome structure using solar panel – Design concept of domestic spatial structure using solar panel
		▪ Development of control method for PA systems	– Survey of applicable PA systems to large span spaces – Applicability and performance of

		in large span spaces	PA systems - Subjective evaluation of PA systems and suggesting optimum design methods

바)

(11) Part	(12) performance agency	(13) Contents of research and development	(14) Detailed promotion plan and method
(15) 4	(16)-1 (17) Korean Association for Spatial Structures)	▪ Development of the design Guideline	- Drawing up of membrane structures design standard and explanation
	(18)-2 (19) Korea University of Technology and Education)	▪ Preparation of maintenance and repair technology guide (draft) of large space structure	- Fulfillment of membrane material nucleation test, fire test - Carrying out durability test before and after nucleation tests, laying emphasis on ETFE membrane material - Verification of material physical properties through obtaining tensile strength characteristics data of ETFE membrane material - Obtaining fire test results, data about fire retardancy and drawing data reflected in building.

		(20)-3 (21) CS Structural Engineering)	▪ Pilot Project 4 Tesioning Air Beam System Ⅱ (TABS Ⅱ)+ Structural Design of Pilot Project	- Experiment and numerical analysis of TABSⅡ - Construction document of 30M span Pilot Project - Schematic design of 300M span Pilot Project

사) E. 5th year

(1) Part	(2) erformance agency	(3) Contents of research and development	(4) Detailed promotion plan and method
(5) 1	(6)-1	▪ Morphogenesis (7) technique for spatial (8) structural system	(9) - Morphogenesis model: investigation (10) - Structural optimization process with morphogenesis and GA (11) - Structural optimization process with morphogenesis and topology optimization (12) - Morphogenesis associated with FDM
	(13)-2	▪ Characteristic study according to types of the cable structure connection	- Development of the cable connection providing the initial tension - Characteristic study according to the cable net-structure - Characteristic study according to types of the cable structure connection - Characteristic study according to the Membrane properties of different fibers

(14) Part	(15) Performance agency	(16) Contents of research and development	(17) Detailed promotion plan and method
(18) 2	(19)-1 (20) Sejong University)	▪ Inelastic nonlinear behavior characteristic study of cable-strut structures	- Modeling method of cable-strut structures - Form finding of cable-strut structures - Inelastic nonlinear analysis of cable-strut structures
	(21)-2 (22) Semyung University)	▪ Study on the Dynamic instability characteristics of space frame structures	- Survey for Dynamic instability in space frame structures - Dynamic FE equations considering geometric nonlinearity - Characteristics of Dynamic instability in simple discrete models - Characteristics of Dynamic instability for lattice domes
	(23)-3 (24) Yeungnam University)	▪ Evaluation of Vibration Effects for the retractable roof of Large Spatial Structures and Application of a hybrid smart base isolation system	- Evaluation of vibration effects and serviceability for large spatial structures with the retractable roof - Configuration of the smart base isolation system for large spatial structures - Development of neuro-fuzzy model and adaptive smart control algorithm - Vibration control performance and safety evaluation of hybrid smart base isolation system

(25) Part	(26) performance agency	(27) Contents of research and development	(28) Detailed promotion plan and method
(29) 3	(30)-2 (31) Kyungdong University)	▪ Development of construction management technology for the rigid structures	(32) - Survey general materials of a space frame (33) - Analysis of a space frame structure system (34) - Survey of constructability for space frames (35) - Development of construction management technology for space frame connections (36) - Stability analysis of a space frame according to construction state and construction condition of connections (37) - Survey and development of erection method for space frame (38) - Development of the construction guidelines for space frames
	3-4 (Chonbuk National University)	▪ Research on technologies for reducing wind load on spatial structures through shape optimization	▪ Research on the wind load characteristic of roof materials according to the open close ratio of the entrance door of spatial structures for the application of various shapes ▪ Setup of a wind pressure experiment system for examining the internal pressure and external pressure characteristics of spatial structures using the wind tunnel experiment technique, and development of an evaluation model for wind tunnel experiment ▪ To build a digital media system for large span roof structures

			- Case study of digital media applied at home and abroad - Analyses on 3D scanning image processing technology and relevant cases fit for large span roof structures - Study on digital media hardware appropriate for large span roof structures
		▪ Study on the evaluation of non-exponential sound decay	- Review on previous approaches including Bayesian method - Establishing an evaluation model (computer simulation and physical scale model study) - Listening experiments - Developing a weighting factor for TN

(39) Part	(40) erformance agency	(41) Contents of research and development	(42) Detailed promotion plan and method
(43) 4	(44)-1 (45) Korean Association for Spatial Structures)	▪ Development of the design Guideline	- Publication of design standard and explanation for membrane structures - Drawing up of design guidelines for ETFE membrane panel construction
	(46)-2 (47) Korea University of Technology and Education)	▪ Wireless monitoring manual and development of waterproof and water leakage prevention technology	- Development of real-time sensor measurement information visualization and sensor information management function - Development of sensor measurement information statistics and history search function and visual alarm module - Development of large space building soundness management PDA interface - Providing large space building maintenance integration function through unmanned management system
	(48)-3 (49) CS Structural E-	▪ Pilot Project 5 Experiment of Retractable Panel + Construction of	- Experiment of retractable panel - Experiment of erection method - Construction of 30M span Pilot Project and verification of component technology

아) F. 6th year

(1) Part	(2) erformance agency	(3) Contents of research and development	(4) Detailed promotion plan and method
(5) 1	(6)-1 (7)	▪ Optimal shape and integrated design optimization for spatial structure system	(8) - Morphogenesis associated with FDM (3D) (9) - Study for optimal shape autogeneration method (10) - Optimal shape generation method using ACO model (11) - Integrated design optimization method
	(12)-2	▪ Cable tension control system practical use study	- Initial strain cable joint performance and the optimization of the amount of medicine for usage and a practical use study - A re-tensioning system study for multiplex simultaneous strain - An experiment for the cable structure joint - Elasticity structure(Just and it is cable structure) A joint experiment

(1) Part	(2) erformance agency	(3) Contents of research and development	(4) Detailed promotion plan and method
(5) 2	(6)-1 (7) Sejong University)	▪ Nonlinear Analysis Guideline of Large Span Structures	- Analysis Guideline of Spacetruss - Analysis Guideline of Undertension - Analysis Guideline of Tensegrity
	(8)-2 (9) Semyung University)	▪ Guideline for structural unstable design	- Survey for Bending Moment in space frame structures - Bending Moment FE equations considering geometric nonlinearity - Characteristics of Bending Moment in simple discrete models - Edit guideline for Dome structural unstable design
	(10)-3 (11) Yeungnam University)	▪ Create Earthquake Resistant Design Guidelines	- Seismic design criteria and guidelines for spatial structural materials research / analysis - Create earthquake resistant design guidelines of spatial structural by data analysis - Spatial structural Design Guidelines case based on spatial structural Earthquake Resistant Design Guidelines

5)

(1) Part	(2) performance agency	(3) Contents of research and development	(4) Detailed promotion plan and method
(5) 3	(6)-2 (7) Kyungpook National University)	▪ Development of construction management technology for the Retractable Structures	(8) - Development of elemental technique for Management of retractable structures (9) - Analysis of a retractable structural systems (10) - Survey on feasibility of retractable structural system (11) - Development of construction guidelines for the retractable structures
	3-4 (Chonbuk National University)	▪ Section of large-span and according of shape wind load and design guidelines for wind vibration	▪ To build a Interactive digital Media system for large span roof structures- Case study of Interactive digital Media applied at home and abroad - Analyses on Interactive digital Media systems and development of interfaces relevant to large span roof structures
		▪ Developing design guidelines for acoustic design of large span spaces	- Suggesting acoustic design guidelines for optimum room acoustics - Suggesting a practical method of using design and evaltion tools developed by the present work - Ways of handling possible acoustic defects

6)

(12) Part	(13) erformance agency	(14) Contents of research and development	(15) Detailed promotion plan and method
(16) 4	(17)-1 (18) Korean Association for Spatial Structures)	▪ Development of the design Guideline	- Publication of ETFE membrane panel design and construction guidelines - Drawing up of design guide line and explanation of Retractable structures
	(19)-2 (20) Korea University of Technology and Education)	▪ Preparation of integrated maintenance guidebook for large space building	- Completion and integration of membrane structure building maintenance and diagnosis guide - Integrated preparation of membrane repair technology guide and steel material repair technology guide - Summary and integration of pneumatic membrane structure facilities and maintenance guide - Arrangement and integration of rainwater blocking equipment and watertight performance maintenance guide
	(21)-3 (22) CS Structural Engin	▪ Pilot Project 6 Verification of Component Technology + Establish of Structural Design Process for	- Verification of component technology Air-beam Tensile stress of cable and membrane - Establish of Structural Design Process for Spatial Structure - Application NET (Tensioning AAir

7) Ⅳ Practical use plan with research and development result

■ Structural system development and analysis on the construction cost

- Structure system different special quality analysis may act as milestone that select system of spatial structures effectively if various access method of structure system is systematized by all-important field in progress of all designs and establish direction in spot by establishing system that ready foundation that can apply this.

- Is going to secure form beauty and technology of individual large size building through modelling techniques and become opportunity of know-how storing accumulation to present new possibility. Transfer of technical know-how can save time and expense by minimum trial and error is possible by process of actuality basic design.

- Because considering all technological sides through reduction model's an experiment, can plan practicality and apply a reduction model experiment development of structure system and new detail development etc. and expect competitive power reinforcement. Succession research for unusualness evacuation equipment or hundred two meals a day construction of universe construction need forward continuously by practical use of reorganization structure.

- The present topology optimization technique can enormously reduce trial and error in structural design process of engineering practise and particularly can provide a scientific ways of design optimization process from the conceptual design process. Therefore it can considerably minimize the construction expenses from the beginning.

- The present morphogenesis technique can provides more freedom of choosing structural forms in engineering practise and particularly can provide a both aesthetic and scientific ways of design optimization process at the beginning of the conceptual design process. Therefore it can considerably minimize the design error and construction expenses.

- The topology optimization techniques can be used for not only finding structural system but also designing cross section of structural members.

- The morphogenesis techniques can be used for not only finding structural form but also embedding in the structural design process.

- At joint design of membrane through research about joint behavior research are possible reliable joint design reflection by development of joint examination mood and unit practical use change .

■ Development of nonlinear analysis and structural design technology

- Form-finding algorithm can be directly applied to any soft structures including tensegrity, cable-strut and cable nets.
- Truss structures can be effectively designed by structural optimization based on genetic algorithm.
- By using inelastic nonlinear procedure, any large-span structures can be effectively designed.
- Through the recognition of destruction mechanism of shell structure, accelerating the improvement of structural stability and incoming of large scale structure
- Independence of structure design of large scale structure and growing up the technology by analysis of structural unstable behavior in accordance with external load by structure and applying in structure design
- Use as the guideline for the structural stability of large scale structure
- Seismic design techniques of structures of based on the performance can be secure of seismic design technology.
- Guidelines for the seismic design of structures provides engineering practice.
- The industries related to device production, components, materials for seismic isolation and vibration control can be improved.

■ Development of Construction and environmentally sustainable design technology
- Systemization of acoustic design process for large span
- Prior control of possible acoustic defects
- Development of a measurement system by transferring measurement technique to relevant industrial companies developed through the present work
- Development of a computer simulation software by transferring simulation technique to relevant industrial companies developed through the present work

■ Research on applicable practical use of technology
- Domestic database construction of various spacial structures design standard related the spatial structures construction
- Design guidelines through research-related norms(legislation) designed to take

advantage in the design and construction

- Provide of required technology for consumer through the database building of code investigate related domestic and foreign spatial structures
- In the case of the new connection proposed for the connection of circular pipes in the second year of the project, the proposed connection has high stiffness and internal force so that it can be utilized for a spatial roof structure and can properly be used at the connection of single layered dome using circular pipes.
- The HRD promotion exhibition at Korea University of Technology and Education built as a Pilot Project is expected to be used as an exhibition facility of the university. And through the feasibility examination of core technologies applied to the structure (tensioning air beam system, hydraulic pulling socket, Erection engineering method, retractable driving device, etc.), it is possible to establish a database related to construction technology and provide the core technologies for relevant workers.
- If a structure design process of a spatial structure is established on the basis of the SD Report of the 300M span Pilot Project written during the research and development period, the design process can be the guidelines for the future construction of many spatial structures, and furthermore, the localization and advancement of domestically developed foundation technologies, which are the ultimate goal of our research group, will be able to be achieved.

목 차

요 약 문 ····· i

목 차 (국문) ····· lxxix

목 차 (영문) ····· lxxxii

제 1장 서론 ····· 1

1.1 연구개발 개요 및 목적 ····· 3
1.1.1 연구개발 개요 ····· 3
1.1.2 연구개발 목적 및 조직구성 ····· 5

1.2 연구개발의 필요성 및 기대효과 ····· 14
1.2.1 연구개발의 필요성 ····· 14
1.2.2 기대효과 ····· 27

1.3 연구내용 및 범위 ····· 35
1.3.1 연구목표 및 범위 ····· 35
1.3.2 연구의 내용 ····· 39

제 2장 국내외 기술개발 현황 ····· 63

2.1 국내·외 기술동향 ····· 65

2.2 국내·외 연구동향 ····· 68

제 3장 연구개발수행 내용 및 결과 ····· 75

3.1 구조시스템 개발 및 경제성 분석 ····· 77
3.1.1 구조시스템 ····· 78
3.1.2 접합부 ····· 84
3.1.3 경제성 분석 ····· 90

3.2 비선형해석 및 구조설계 기법 개발 ····· 95
3.2.1 비선형해석 ····· 96
3.2.2 구조안정 ····· 102
3.2.3 내진설계 ····· 108

3.3 시공 및 친환경설계 기법 개발 ····· 117
3.3.1 시공 ····· 119
3.3.2 풍환경 ····· 125
3.3.3 음환경 ····· 131

3.4 실용화 방안 연구 ····· 139
3.4.1 Code ····· 142
3.4.2 유지관리 ····· 148
3.4.3 Pilot Project ····· 154

3.5 결론 및 연구실적 ····· 163
3.5.1 과제별 결론 ····· 163
3.5.2 연구실적 ····· 178

제 4장 Pilot Project와의 연계성 ····· 221

4.1 Pilot Project 개요 ····· 223

4.2 소프트웨어 ····· 223
4.2.1 구조시스템 검토 ····· 225
4.2.2 킬아치의 위상최적화 기법 ····· 230
4.2.3 구조안정성 검토 ····· 234
4.2.4 지진하중에 대한 안정성 검토 ····· 238
4.2.5 풍동실험을 통한 풍압계수 산정 ····· 241
4.2.6 친환경 설계기법 ····· 247
4.2.7 연성구조물의 설계기준 및 유지관리 지침서 ····· 250

4.3 하드웨어 ····· 253
4.3.1 유압식 재긴장 소켓 및 무선모니터링 시스템 ····· 253

4.3.2 가설공법 ····· 262
4.3.3 텐셔닝 에어빔 시스템 ····· 267
4.3.4 개폐식 지붕구조 및 누수방지 ····· 271

4.4 Pilot Project 대상구조물 시공 ····· 274

제 5장 연구개발 목표 달성도 및 관련분야에의 기여도 ·····275

5.1 연구개발 목표의 연차별 달성도 ····· 277

5.2 연구결과의 전체 달성도 ····· 301

5.3 연구결과의 기여도 및 기대효과 ····· 305
5.3.1 국내외 시장개척 ····· 305
5.3.2 기술적 측면 ····· 307
5.3.3 경제, 산업적 측면 ····· 312

제 6장 연구개발결과의 활용성과 및 계획 ·····317

6.1 연구개발결과의 활용성과 ····· 319
6.1.1 서남권 돔 야구장 ····· 319
6.1.2 필리핀 아레나 ····· 324

6.2 연구개발결과의 활용계획 ····· 326

6.3 타 분야의 활용방안 ····· 332

제 7장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술 정보 ·····337

7.1 수집한 과학기술 정보 및 기술 동향 ····· 339

7.2 관련분야의 환경변화 ····· 345

CONTENTS

SUMMARY ····· **xxxix**

CONTENTS (Korean) ····· **lxxix**

CONTENTS (English) ····· **lxxxii**

Chapter 1. Introduction ····· **1**

1.1 Overview and objective of the R&D ····· 3
1.1.1 Overview of R&D ····· 3
1.1.2 Objective and composition of R&D ····· 5

1.2 Necessity and benefit of the R&D ····· 14
1.2.1 Necessity of the R&D ····· 14
1.2.2 Benefit of the R&D ····· 27

1.3 Contents and scope of the R&D ····· 35
1.3.1 Contents of the R&D ····· 35
1.3.2 Scope of the R&D ····· 39

Chapter 2. Domestic and foreign R&D trends ····· 63

2.1 Overview of construction technology trends ····· 65

2.2 Overview of research trends ····· 68

Chapter 3. The R&D progressing contents and results ··· 75

3.1 Structural system development and analysis on the construction cost ····· 77
3.1.1 Structural system ····· 78
3.1.2 Joint ····· 84

3.1.3 Analysis on the construction cost ····· 90

3.2 Development of nonlinear analysis and structural design technology ····· 95
3.2.1 Nonlinear analysis ····· 96
3.2.2 Structural Stability ····· 102
3.2.3 Seismic Design ····· 108

3.3 Development of Construction and environmentally sustainable design technology ····· 117
3.3.1 Construction ····· 119
3.3.2 Wind environment ····· 125
3.3.3 Acoustical environment ····· 131

3.4 Research on applicable practical use of technology ·· 139
3.4.1 Code ····· 142
3.4.2 Maintenance ····· 148
3.4.3 Pilot Project ····· 154

3.5 Results and performance of R&D ····· 163
3.5.1 Results of R&D ····· 163
3.5.2 Performance of R&D ····· 178

Chapter 4. Connectivity with the Pilot Project ·····221

4.1 Overview of Pilot Project ····· 223

4.2 Software ····· 223
4.2.1 Structural System ····· 225
4.2.2 Topology optimization method of keel arch ····· 230
4.2.3 Review on structural stability ····· 234
4.2.4 Seismic Design ····· 238
4.2.5 Estimation of wind load ····· 241
4.2.6 environmentally sustainable design technology ·· 247

4.2.7 Code and commentary of soft structure ····· 250

4.3 Hardware ····· 253
4.3.1 Hydraulic pulling jack and wireless monitoring system ····· 253
4.3.2 Erection method ····· 262
4.3.3 Tensioning air beam system ····· 267
4.3.4 retractable roof structure and waterproofing ····· 271

4.4 Construction of Pilot Project ····· 274

Chapter 5. Achievement and its contribution to the related fields ····· 275

5.1 Degree of the annual achievement ····· 277

5.2 Degree of the whole achievement ····· 301

5.3 Degree of the contribution ····· 305
5.3.1 Domestic and international markets ····· 305
5.3.2 Technical aspects ····· 307
5.3.3 Economy and industry aspects ····· 312

Chapter 6. Application plan and results of R&D ····317

6.1 Application results of ····· 319
6.1.1 Southwestern baseball stadium ····· 319
6.1.2 Philipine arena ····· 324

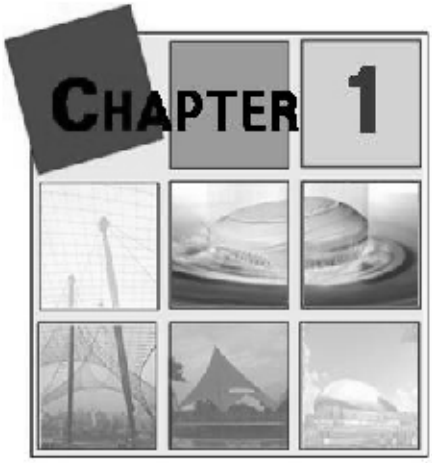
6.2 Application plan ····· 326

6.3 Application plan to other fields ····· 332

Chapter 7. Collected foreign technical information throughout R&D ····· 337

7.1 Collected scientific information and technical trends ··· 339

7.2 Changes in the related fields ····· 345



서 론

CHAPTER 1

가. 1.1. 연구개발 개요 및 목적

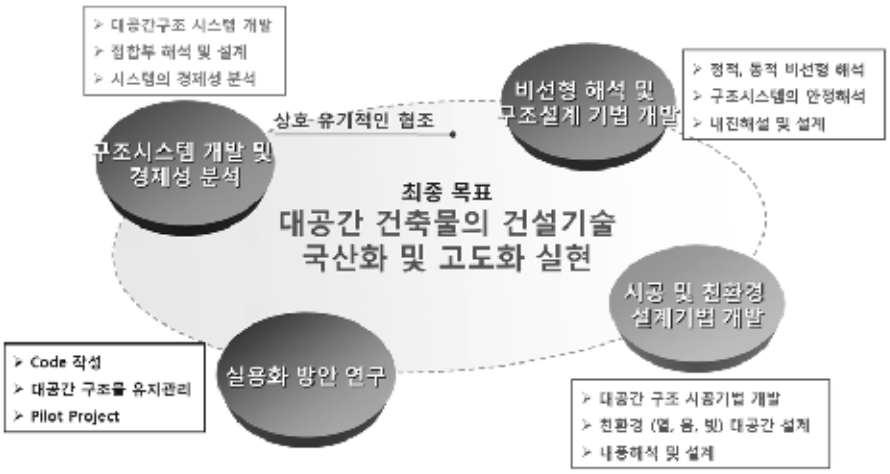
(1) 1.1.1. 연구개발 개요

▪ 초대형 구조물 분야의 기술력 확보의 필요성

"보다 넓게", "보다 환경 친화적으로" "상징성을 지닌 최첨단 기술", 근래 들어 건축물에 대한 인간의 욕망은 위의 요소로의 변화를 갈망하며 새로운 변화를 기대하고 있다. 건축물은 이제 단순히 인간의 거주 혹은 집회장소로서의 의미를 벗어나 인간생활 자체의 보다 나은 안락함과 차별성 있는 특별한 상징성을 갖고 싶어 한다. 이러한 변화는 첨단산업을 중심으로 하는 새로운 기술 집약 시대를 맞고 있으며, 여러 첨단산업들 중에서도 초대형 구조물 분야의 기술력 확보는 최근 더욱 더 중요한 과제로 대두되고 있다.

▪ 최첨단 분야의 기술개발의 절실한 필요성

여러 첨단산업들 중에서도 초대형 구조물 분야, 특히 대공간 건축물 분야의 신기술 개발은 21세기 우리 한국의 기술발전을 위해서는 필수적인 과제이다. 1980년대 중반까지는 건축토목 분야의 노동력 중심의 해외 수출이 우리 경제성장의 많은 부분을 차지하였으나, 그 후 임금상승 등 여러 가지 악조건으로 인하여 점차 국제경쟁력을 잃고 있다. 이러한 국제경쟁력 약화의 타개책 및 고용창출과 국내 고급인력 인프라구축에 대한 하나의 시발점으로 건축분야의 최첨단분야인 대공간 건축물의 기술개발이 절실히 요구된다.



연구단의 최종목표

▪ 최적 구조시스템의 설계 및 시공기법 개발의 필요성

대공간 건축물은 대중화된 강성구조를 포함해서 (공기)막구조, 케이블(네트)구조 혹은 복합구조에 이르기까지 적용 재료뿐 아니라, 구조시스템이 매우 다양하고 보편적이지 않은 경우가 많다. 이로 인해 상대적으로 특수 구조물로 분류되는 경우가 많고 아직도 공학적으로 해결해야 할 여러 문제점들을 남겨놓고 있다. 더구나 대공간 건축물은 구조시스템의 선택에 따라 공기와 공사비 등에 많은 영향을 끼칠 수 있다. 또한 형태, 재료, 부재배치 등의 조합에 의한 다양한 시스템이 제공될 수 있으므로, 건축계획 조건(환경과의 조화, 지붕의 조형, 규모)이나 프로젝트 제약조건(공기, 비용) 등에 따라 종합적으로 평가해서 그에 맞는 구조시스템의 개발 및 설계/시공 기법의 적용이 매우 중요하다.

▪ 재료의 경량화에 따른 설계 및 시공기법 개발의 필요성

초대형 스팬을 갖는 건축물이 건설되기 위해서는 우선 그림1-1에서와 같이 재료의 경량화와 그에 맞는 구조시스템의 개발 및 설계/시공 기법이 절실히 필요하다. 아래 그림은 대공간 건축물로 분류되는 구조물을 스팬에 따라 분류 한 것이며, 체육시설의 경우 250미터를 넘는 스팬을 갖는 기술은 선진국의 경우 보편화 되어 있으며, 국내의 기술로도 건설 할 수 있는 기술자립이 필요하다.

▪ 환경 친화적 건축물의 실용화 필요성

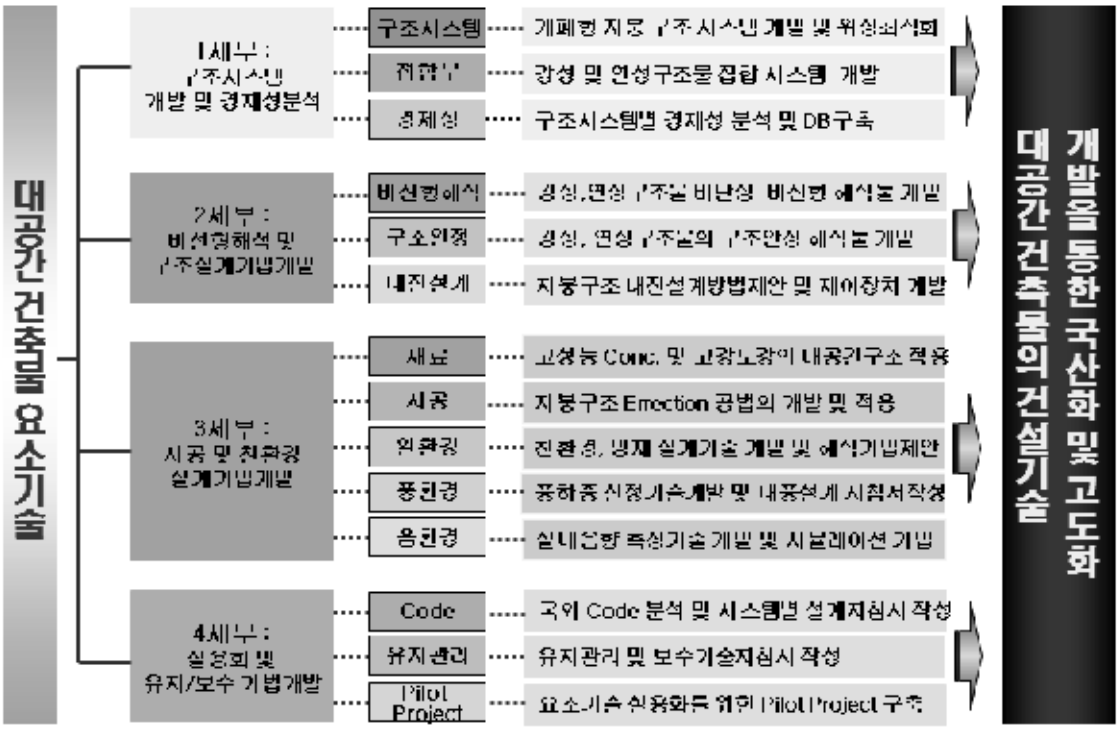
양적으로 팽창된 초대형 건축물은 보다 안락한 인간 삶의 질적 향상을 위해 친환경적인 설계가 가능해야 한다. 이를 위해 대공간구조물에 대한 공조, 조명, 환기 및 음향 등 실내 환경설계 전문기술을 개발하고자 한다. 아울러 이들을 법적, 행정적으로 지원해 줄 수 있으며 국내 여건을 충분히 고려한 각 분야별 설계 지침서를 작성을 하고자 한다.
최종적으로는 이러한 기술들을 성공적으로 개발하여 이미 해외에서 진행되고 있는 기술을 넘어 국제적 특성화가 될 수 있는 스팬 300미터 이상의 초대형 구조물 건설이 가능한 기술 개발을 하고자 한다.

(2) 1.1.2. 연구개발 목적 및 조직구성

본 연구단의 최종목표는 "대공간 건축물의 건설기술의 국산회 및 고도화 실현"이고, 세부내용은 "스팬 300m 이상 초대형 대공간 건축물 건설 실현"이며, "전국적인 전문가 그룹과 중소기업을 주축으로 하는 관련기업들의 협력을 바탕으로 기반/핵심기술 개발"이라는 슬로건 아래 국내기술의 자립과 국제적으로 특성화 가능한 건설아이템의 개발을 이루고자 하며, 결과적으로 침체된 국내건설시장의 활성화에 따른 고용창출과 3%에 머물러 있는 국제건설시장에서의 경쟁력확보로 이어지는 파급효과를 기대하고자 한다.

주어진 최종목표를 달성하기 위해 본 연구과제는 4개의 관련 분야로 세분화되며, 4개 분야 또는 관련 분야가 상호 유기적인 협력관계를 이루어 최종목표를 이루어 낼 것이다. 각 세부 과제는 ① 구조시스템 개발 및 경제성 분석, ② 비선형해석 및 구조설계 기법개발, ③ 시공 및 친환경 설계 기법개발, ④ 실용화 방안 연구로 이루어진다. 보다 구체적인 연구를 수행하고자 각 세부는 아래와 같이 세세부로 구성되어 있으며, 아래와 같은 과제 구성 체계를 바탕으로 각 세세부는 6차년도에 걸쳐 본 연구단의 최종목표를 달성하기 위하여 연구에 매진하였다.

(3)



■ 1세부-구조시스템 개발 및 경제성 분석

제1세부 과제 『구조시스템 개발 및 경제성 분석』

초대형 스팬의 대공간 건축물이 실현되기 위해서는 재료의 경량화에 따른 적절한 구조시스템 및 그에 적합한 접합부의 선정은 매우 중요하다. 구조시스템들은 강성구조를 포함해서 (공기)막구조, 케이블(네트)구조 혹은 복합구조에 이르기까지 매우 다양하고 보편적이지 않은 경우가 많다. 게다가 상대적으로 특수구조물로 분류되어 아직도 해결해야 할 여러 문제점들이 남아있고, 따라서 계획과 실제 사이에 미처 고려하지 못한 사항들이 존재할 수 있다. 또한 대공간 건축물의 구조시스템은 일단 결정되면 설계와 시공에 미치는 영향이 지대하기 때문에, 효율적 설계와 시공을 위해서 이와 연계된 구조시스템과 형태에 관한 분석이 수반되어야 한다. 특히 외관이나 지붕이 직접 대중의 눈에 띄게 되어서 구조체가 그대로 건축물이 되는 경우가 많아 구조시스템에 대한 차별적 접근 방법이 필요하며 높은 구조형식의 완성도를 필요로 한다. 그러나 현재 대공간 건축물에 대한 이해가 낮아 구조시스템의 선택이 반드시 합리성만으로 결정되지는 않는 현실이며 구조형식에 있어서도 개폐식등이 중요한 평가축이 되기도 한다. 따라서 대공간구조의 시스템을 효과적으로 선택, 적용하기 위한 토대를 마련하고, 그 체계를 수립하기 위한 공학적 접근에 의한 연구와 개발이 요구된다.

본 연구에서는 대공간 건축물의 구조시스템 분석, 모델링 기법 개발 및 모델의 실험 적용방식 파악 등을 통한 구조 확인, 최적형태 도출이라는 일련의 과정을 통해 시스템 효율성을 재고함과 동시에 강성 및 연성구조 시스템과 하이브리드 구조 시스템에서 필요로 하는 접합부의 형태해석과 설계에 적용할 수 있는 다양한 모듈의 접합부에 대한 연구를 통해 자원과 형태의 최적화에 기여하여 경제적이고 아름다운 건축물의 완성을 추구한다. 또한 시스템의 경제성 분석을 통해 대공간구조물의 설계 시 시스템 선택을 위한 참고 지표를 제공하고 실용화 입장에서 연구의 가치를 평가하고 최종적으로 포괄적인 경제성 분석을 통하여 사업화가 가능한 최적의 접합부를 개발하고자 한다.

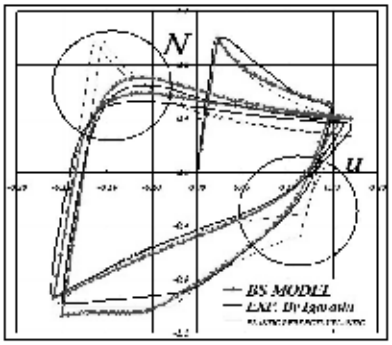
■ 2세부 "비선형해석 및 구조설계 기법 개발"

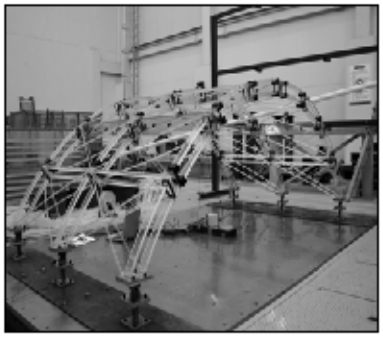
제2세부 과제 『비선형해석 및 구조설계 기법 개발』

비선형해석 기법은 대공간구조물이 형태저항구조로서 일반적인 골조와는 달리 부재에 대변형 혹은 유한변형을 동반하므로 정적, 동적해석에 관계없이 비선형해석이 요구된다. 이러한 비선형 문제를 해결할 수 있도록 기하학적 비선형 및 재료적 비선형 뿐 아니라 복합비선형해석 방법 등을 통해서 구조물의 거동을 미리 예측할 수 있는 알고리즘을 제공한다. 또한 이러한 해석메커니즘과 더불어 연성구조물의 형상 및 비선형 거동해석을 수반하는 시뮬레이션기법은 타 연구와 더불어 발전해야 양질의 결과를 얻을 수 있다.

구조적 안정 문제는 루마니아 부카레스크돔 사고예를 통해서 연구자들의 많은 관심을 유발한 것으로, 설계하중 약30%의 적설에 완공 후 17개월 만에 붕괴되었다. 이는 구조안정문제를 규명하지 않고는 대형인명피해사고를 유발하는 원인이 된다. 구조적 안정문제를 다루는 데 있어서 크게 정적 불안정 현상과 동적 불안정 현상의 문제로 생각할 수 있으며, 특히 동적 불안정의 문제는 아직도 많은 연구자들이 풀어야 할 난제로 연구가 활발히 진행되고 있고, 대공간구조물의 실현화에 필히 극복해야 할 과제이다.

내진설계는 대공간 건축물에서 지진동-지반-하부구조-상부구조(대공간구조)의 연성모델에 대한 모델링기법의 개발과 공간구조에 적용가능한 등가정적해석의 모델링이 필요하다. 내진과 연계하여 최근 선진국에서 시도된바 있는 면진기법을 적용한 대공간구조물의 거동을 분석한 면진시스템을 개발한다. 이들을 토대로 현행 내진설계기준에 부합되며 실무에 직접 도입될 수 있는 대공간구조물의 내진설계지침을 마련하고자한다.





■ 3세부 "시공 및 친환경설계 기법 개발"

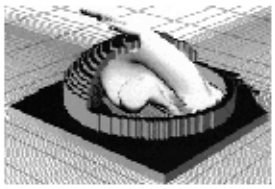
제3세부과제 『시공 및 친환경 설계기법 개발』

재료/시공은 일반적으로 사용되는 막, 케이블의 구조성능을 정확히 파악하기 위한 물리적 측정기법을 개발하여 직접 측정/분석할 뿐 아니라 초강도 신소재를 대공간구조에 응용할 수 있는 기법을 개발하고자 한다. 이들 소재들이 구조적 안정을 이루며 시공이 완료되기 위해서는 최적화된 erection 기법을 포함하여 시공해석 및 시공자동화기법개발을 하는 것이다.

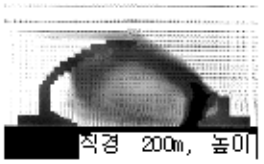


친환경설계는 한번에 많은 사람들이 모이는 대공간 건축물은 쾌적하고 안전한 설계가 되어야 할 뿐 아니라 환경적 친화요소의 개발과 재해에 대해서도 안전한 형태적 문제를 함께 해결해야 한다. 이를 위해, 환경분야를 **열환경**, 분야, **풍환경** 분야, **음환경** 분야로 나뉘어 환경친화적 요소와 재난 예방에 대한 관계를 포괄적으로 다루어 진정한 **친환경설계**를 구현한다.



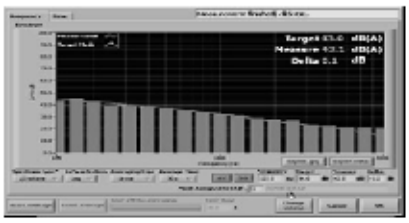


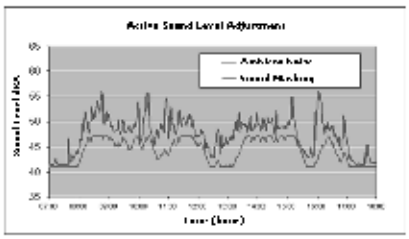
열환경에서는 냉난방 설계기술, 친환경설계기술, 실내환경 시뮬레이션 기술개발, 방재기술 개발 등을 목표로 하고 최적의 설계지침서를 작성하는 것이다.



풍환경에서는 대공간 건축물은 규모가 초대형이며 유연 구조물로 이루어진 경우가 많아 바람이 구조 자체에 끼치는 문제뿐 아니라 주위 구조물에 끼치는 영향도 중요한 요인이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 형태에 따른 바람의 특성을 친환경적 차원에서 적용방법 등을 모색하고, 감쇠율 해석기법개발, 진동모형에 대한 특성 등을 개발하는 것이다.

음환경에서 음향성능을 검토할 수 있는 시뮬레이션기술을 개발하여 전체음향계획과정을 체계화하고 요소기술의 각 단계별 적용방안을 수립하고 실내음향을 최적화할 수 있는 설계 지침서를 마련하고자 한다.



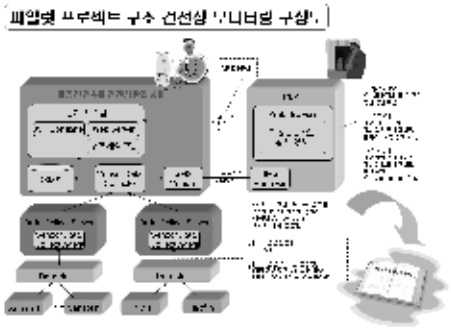


■ 4세부 "실용화 방안 연구"

제4세부과제 『실용화 및 유지, 보수기법 개발』

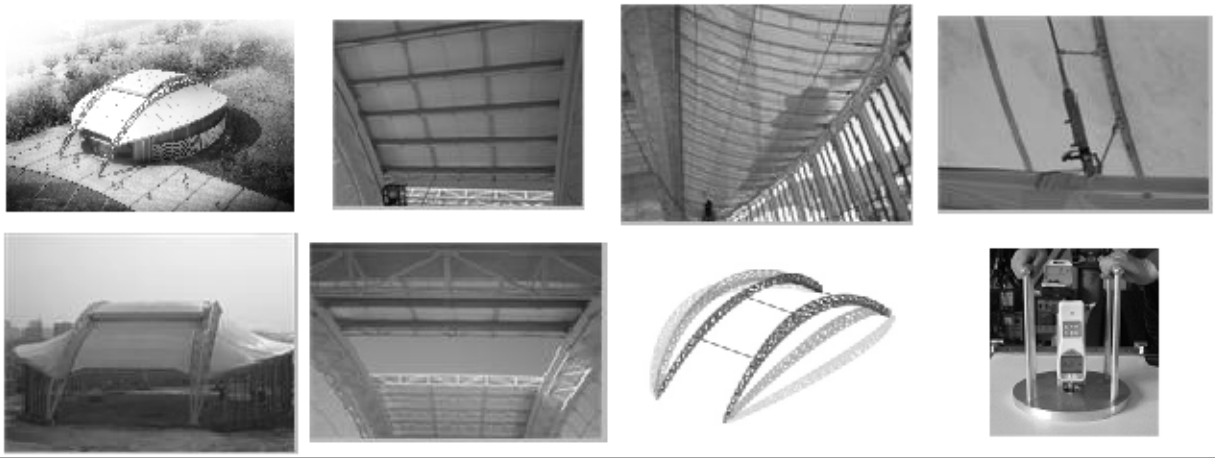


설계지침서 설계지침서 막 및 케이블 구조에 대한 합리적이고 기술적 문제점이 없는 설계 지침을 마련하기 위해서 국내외의 문헌, 기준, 규격, 지침 분석 정리하여 국내 실정에 맞는 지침서를 작성하며, 연구 결과물은 관련학회 및 관련 기관의 공인을 얻어 앞으로 건축될 실제 구조물 설계에 직접적으로 적용될 수 있도록 한다.



유지관리 대공간구조물이 완공 된 후 전체구조물에 대한 응력 및 변위를 추적하여 측정할 수 있는 계측제어 시스템을 개발한다. 각 구조시스템별 대변형에 의한 누수방지기법을 포함하는 유지관리 지침서, 보수기술 지침서, 표준시방서 작성을 목표로 한다.

Pilot Project 연구개발 1~2기 단계에서 도출된 대공간 건축물의 핵심요소기술 및 응용수준의 단위기술 개발결과를 이용하여 실용화 단계 연구를 진행하는 것이다. 실용화에서 무엇보다 중요한 각 단위기술에 대한 실용화 가능성 검증, 신뢰도 확보 및 그에 따른 추가 응용기술 확보 등이며 이를 가장 정확히 실현할 수 있는 있는 방법은 실제 실용화 가능성이 높은 Pilot Project를 선정하고 5, 6년차에 1/10 스케일 규모의 실제 구조물을 제작하여 적용성 검토 등을 통해 프로세스를 구축하고, 향후 대공간 구조물의 지침이 되어 국산화 및 고도화에 이바지 함을 목표로 한다.



■ 1세부-구조시스템 개발 및 경제성 분석

구조시스템은 그 특성에 따라 구조물을 안정화시키고, 힘의 흐름을 조절하는 방식이 다양하다. 구조시스템이 결정되면 설계와 시공에 미치는 영향이 지대하기 때문에, 구조시스템의 축소모델 실험을 통하여 대공간 건축물의 설계, 시공 시 고려해야 하는 측면을 확인한다. 또한, 이러한 일련의 연구를 통하여 최적의 구조시스템을 제안할 뿐만 아니라 Size, Shape, Topology 및 형태의 생성과 자동화 설계방안의 밑거름을 제공 하고자 한다.

접합부는 초대형 대공간 구조용으로 개발된 시스템에서 무엇보다도 중요한 부분이다. 구조물이 대형화되기 때문에 자연스레 접합부 부분이 많아질 수밖에 없고 매우 중요하기 때문에, 각 접합부별 특성을 감안한 구조적인 문제와 시공특성의 문제를 매끄럽게 해결하는 방안을 완성하고자 한다. 또한 접합부는 강성구조물과 연성구조물에 있어서 매우 다른 방식을 가지고 있으며, 강성구조물의 경우 접합의 내력이 미치는 영향과 연성구조물중 케이블의 연결이음이나 교체작업 등에서 오는 문제점, 막재의 웰딩, 세부 디테일들은 기업간 폐쇄적 기술에 해당되므로 구축된 DB를 통한 업계 기술의 상향 평준화를 도모할 필요가 있다.

경제성 분석은 공사비 개념 비용(Construction Cost)과 프로젝트 비용(Project Cost)으로 구분할 수 있으며, 공사비의 경우에는 구조비용(Structural Cost)과 서비스 비용(Service Cost)으로 나눌 수 있고, 서비스 비용에는 다양한 설비비(기계적, 전기적설비)의 내용 포함 된다. 이 분야에 대한 경제성분석의 틀은 매우 복잡하고 어렵기 때문에, 본 연구를 통하여 일반 실무자들이 설계/시공/유지하는 과정에서 가장 합리적인 안을 제시하고자 한다.

■ 2세부 "비선형해석 및 구조설계 기법 개발"

"대공간 건축물의 비선형해석 및 구조설계 기법 개발에 관한 연구"를 목표로 하고 있는 본 연구과제에서는 1. 비선형 해석, 2. 구조안정, 3. 내진설계 를 세부과제 내용으로 하고 있다.

각 세부과제별 핵심 기술 개발 범위는 기하학적 재료적 비선형 해석, 구조시스템의 정적, 동적 안정 해석, 내진해석 및 설계기법 개발로서 단계별 추진전략을 통해서 최종목표에 도달하는 것이다.

대공간구조로 분류되는 쉘 및 스페이스 프레임, 케이블 및 막구조물, 하이브리드 구조물 등의 비선형 해석과 구조설계와 관련되는 사항과 구조물의 불안정 거동 메커니즘을 규명하기 위한 해석기법과 알고리즘 등을 연구한다.

1. 비선형해석 기법으로는 강성구조물의 기하학적, 재료적 비선형해석, 연성구조물의 형상탐색 및 기하학적 비선형 해석 등이 포함된다.
2. 구조안정해석 기법으로는 쉘 및 스페이스 프레임의 정적, 동적 안정문제를 규명하고 해석기법으로서 극한좌굴, 분기좌굴 및 다분기 경로 탐색기법 등이 이 분야에 포함된다.
3. 내진설계에는 대공간 건축물의 동적거동 특성, 하부구조의 거동특성 영향, 제진, 면진구조시스템 연구 등을 포함한다.

■ 3세부 "시공 및 친환경설계 기법 개발"

- 시공 및 친환경 설계기법을 개발하기 위해서 시공, 재료 및 환경분야에 필수적인 모든 내용의 연구를 목표로 하고 있으며, 환경친화적 대공간 건축물을 설계하기 위해서 환경분야를 열환경, 풍환경, 빛환경으로 분류하여 형성한다.
- 대공간구조의 시공기법 개발에서는 상부구조의 Erection 계획, 연성구조물의 시공 Sequence 등 시스템에 따른 시공기법을 연구하며, 막 구조물의 재단도 작성 프로그램을 개발한다.
- 복합 및 강재 신재료 개발에서는 최신 대공간 설계에 필요한 신소재의 특성조사 및 적용성에 중점을 두고 있고,
- 친환경 대공간 설계에서는 열환경, 풍환경, 음환경이 최적, 최고 수준으로 확보될 수 있는 기법을 연구하고 환경친화적인 형상을 연구한다.

■ 4세부 "실용화 방안 연구"

대공간 건축물의 실용화를 위한 방법으로 Code 및 시방서의 규정화된 지침서가 반드시 필요하다. 이는 연구단계에 머물러 있는 우리나라의 대공간 건축물의 핵심기술들이 실질적인 역할을 할 수 있게 하는 실용화의 기본단계이다. 현 시점에서 살펴볼 때 일반

구조물 관련 규정들은 많은 연구와 지원 아래서 체계성을 가지고 있지만 전문성을 가지는 구조물 특히 대공간 건축물의 규준들은 아직도 미흡한 상태이며 구축의 여부에 따라서 실용화에 막대한 영향을 미친다.
국내의 대공간구조물에 대한 합리적이고 기술적 문제점이 없는 설계 지침을 마련하기 위해서는 선진국들의 Code를 정리 분석할 필요가 있다. 또한, 정리 분석된 연구 결과물을 관련 학회 및 관련 기관의 공인을 얻어 앞으로 건축될 실제 구조물설계에 직접적으로 적용될 수 있도록 한다.
유지관리 측면에서는 대공간 건축물의 실용화 방안에 필수적인 모든 내용의 연구를 목표로 하고 있으며, 대변형에 따른 누수방지 부분 및 시방서 작성을 핵심요소 기술로 개발한다.

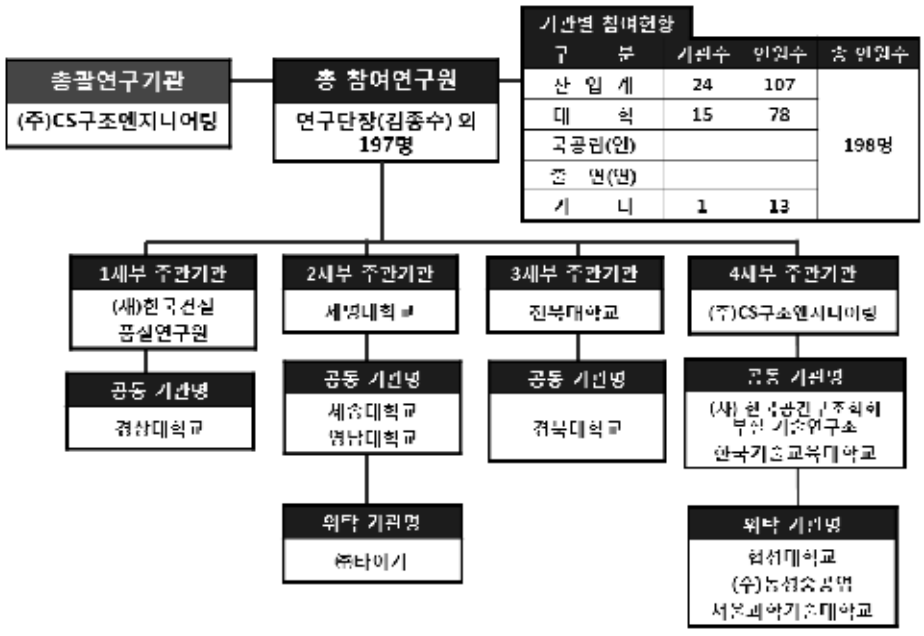
- 300M 초대공간 건축물의 유지관리 기술의 확립
- 무인로봇을 이용한 막구조물의 손상도 점검 시스템의 확립
- 막구조물의 상시 건전성 평가를 위한 광섬유센서를 사용한 첨단 계측기법 개발 및 막구조물의 상시 장력측정 시스템의 개발
- 초대형 막구조물 및 공기막 구조물의 유지보전 기술 지침 개발
- 초대형 막구조물의 대변형에 의한 누수방지 지침 작성
- 대공간 건축물의 무인 통합화 건전성 모니터링 시스템 구축
- Pilot Project 건전성 모니터링을 통한 시스템 검증

또한 300M 스팬의 대공간 건설기술 실현 가능성 및 적용된 핵심 요소기술의 실용화를 검증하기 위한 목적으로 1/10 스케일의 30M 스팬 파일롯 프로젝트를 천안 한국기술교육대학교에 건설하였으며, 프로젝트의 구축 및 경험을 통해 대공간 건축물에 대한 건설기술을 확보하고자 한다.

■ 연구단 구성 및 조직도

연구단을 구성하는 기관은 대공간 건축물 전문 연구진 및 전문업체 위주인 (주)CS구조엔지니어링, (재)한국건설품질연구원, 세명대학교 산학협력단, 전북대학교, (사)한국공간구조학회 외 10개 기관으로 구성되어 연구를 수행하였다. 또한 국제공동연구의 일환으로 일본건축학회를 연구수행 기관으로 포함하여 다양한 주제에 대하여 심도 깊은 연구가 가능하였다.





본 연구단 구성 및 조직도

나. 1.2. 연구개발의 필요성 및 기대효과

(1) 1.2.1. 연구개발의 필요성

1. 2002년 한일 월드컵 경기 이후, 국내에서는 돔 경기장과 같은 대공간 건축물에 대한 관심 및 수요가 급증하였다. 하지만 일본, 미국 등과 같은 선진국에 비해 국내의 대공간 건축물 설계 및 건설 사례는 극히 미비하여 대부분이 해외 기술에 의존하였다. 따라서 대공간 건축물 건설기술의 국산화 및 이를 통한 외화유출 방지를 위해서, 본 연구단은 2006년에 발족하여 2012년까지 6차년도에 걸친 연구를 수행하였다. 본 연구를 수행함에 있어 대공간 건축물 건설기술의 국산화를 위한 기술적 필요사항으로는 최적화된 구조시스템, 형태생성, 지붕구조의 초경량화, 환경친화적 구조물 설계 및 진보적인 수치해석 기술 적용 등이 있다. 이에 따라 대공간 구조시스템, 해석 및 시뮬레이션, 경량화 재료 적용, 방재 및 설비 기술 및 지붕구조 시공방법 등의 핵심 요소기술들과 각 세부의 중점실천과제가 도출되었다.

2.



본 연구단의 기술개발 필요성

3.

(1) 가. 기술적 측면

4. 본 연구의 필요성을 기술적 측면에서 기술하면 다음과 같이 요약할 수 있다.

■ 1세부-구조시스템 개발 및 경제성 분석

- 대공간구조물 시스템(Spatial Structure System)에 관한 체계적 분석 및 정리가 가능하게 된다. 또한, 연구결과를 토대로 목적에 맞는 합리적인 구조시스템의 선택이 가능하게 된다.

-구조시스템은 특성에 따라 구조물을 안정화시키고, 힘의 흐름을 조절하는 방식이 다양하다. 구조시스템이 결정되면 설계와 시공에 미치는 영향이 지대하기 때문에 대공간 건축의 적절한 시스템에 관한 기술 축적은 필수적이다.

-국내에 부족한 대공간구조시스템 설계 최적화 요소기술의 자립과 기술 축적이 필요하다.

-국내의 산-학연에 의한 대공간 건축의 고급기술 축적과 자립의 시기로 여겨지며, 이를 추진할 수 있는 역량에 대한 국가적 지원이 필수적이다.

- 최대내력 이후에도 변형 능력의 확보가 가능한 새로운 접합부 상세의 개발 필요

-대공간 구조물의 경우 초기 설계 단계에서 적정한 공사비 규모의 산정과 효율적인 구조시스템의 선정에 대한 구체적인 데이터 및 연구가 전무한 실정에서 본 연구는 300m 이상의 대공간 구조물의 기획, 설계, 시공을 위한 참고 자료가 될 것으로 사료된다.

- 대공간 구조물의 타당성 검토 및 경제적인 구조시스템 선정을 위한 기초 자료 확보

- 대공간 구조물의 기획 단계에서의 접근성 제고와 관련 설계 기술 표준화 및 정량적 데이터 축적

- 설계 초기단계에서 보다 효율적이고 합리적인 구조시스템의 선택을 위하여 기존의 대공간 구조물의 공사비를 분석하고, 구조시스템과 시공방법의 세밀한 검토에 의한 경제성 요인을 도출하여 경제적인 설계 가이드라인 확보

■ 2세부 "비선형해석 및 구조설계 기법 개발"

- 구조시스템은 특성에 따라 구조물을 안정화시키고, 힘의 흐름을 조절하는 방식이 다양하다. 구조시스템이 결정되면 설계와 시공에 미치는 영향이 지대하기 때문에 대공간 건축의 적절한 시스템에 관한 기술 축적은 필수적이다.
- 케이블-스트럿 구조물은 연성구조로써 해석하기 어려울 뿐만 아니라 해석 전, 반드시 형상해석 단계를 선행으로 수행하여야 한다. 형상해석이 수행 된 케이블-스트럿 구조물은 장스팬 지붕 구조로서 구현할 수 있고 이러한 구조물은 대변형에 따라서 구조물이 거동하므로 비선형 해석이 필수적이다.
- 비선형 해석 프로그램의 개발로 해외 구조 해석 프로그램에 대한 의존도를 줄이고 이 분야에 대한 국내 기술력을 확보함으로써 소프트웨어 산업의 국산화에 기여할 수 있다.
- Free form 케이블-스트럿 구조물은 연성구조물로써 강성 구조물과 달리 대변형을 동반함으로 구조적인 안정성 분석을 보다 합리적으로 수행 할 수 있는 비선형 해석이 요구된다.
- Free form 케이블-스트럿 구조물은 해석 전 자체 평형을 유지하기 위해 부재에 초기응력을 도입하는 형상탐색이라는 과정이 선행되어야 하는데 Free form 케이블-스트럿 구조물의 비선형 해석을 하기 위해서는 형상탐색의 과정이 필수적으로 요구되며 형상탐색 기술의 선진화로 인한 Free form 케이블-스트럿 구조물의 설계에 소요 되는 시간을 단축할 필요가 있다.
- 쉘 구조는 주로 면내력으로 힘을 전달할 수 있게 한 구조시스템으로 매우 우수한 역학적 특성을 가지고 있으며, 어떤 하중 상태에서는 안정 상태에서 불안정 상태로, 또는 불안정 상태에서 안정 상태로 변화하므로, 불안정 현상으로 인한 파괴 메커니즘을 파악해야 한다. 쉘형 구조시스템의 구조불안정 문제를 해결 하기 위한 기술적 개발이 필수적이다.
- 시기적인 관점에서 볼 때 지금 시점이 대공간 구조물의 고급기술 자립 시기로 가장 적절하다. 20세기 초에 미국에서 개발된 대공간 구조 기술이 20세기 후반에는 일본을 중심으로 세계 기술을 주도하고 있으나 일본의 장기적 불황과 맞물려 점차 한국이 차세대 주자가 될 분위기가 형성되고 있다. 따라서 이러한 시기를 놓치지 않게 국가적 지원이 절실히 필요한 실정이다.
- 대공간 구조물의 설계 및 시공 기술은 고급의 특수기술인데 반해, 기술개발 자체를 중소기업들이 중심이 되어 수행하고 있다. 따라서 자체적인 기술 축적이 어려운 형편이며, 국가적 지원이 절실히 필요하다.
- 대공간 구조물의 구조설계능력은 타 구조물의 구조설계에 비해서 높은 레벨의 기술과 노하우를 필요로 한다. 이는 대공간을 형성하기 위한 구조시스템은 시스템의 특징에 따라 설계방법이 매우 다르기 때문이다. 따라서 이와 같은 구조물의 설계능력 및 시공능력의 성장은 수치해석기술 및 프로그램 분야의 발전으로 가능하게 되며, 타 기술분야의 해석 및 시뮬레이션 영역에도 미치는 영향이 크다.
- 국내에서 대공간 구조물의 동적 응답을 평가하기 위한 정량적 기준이 명확하지 않으므로 동적 응답에 대한 평가 지수가 필요하며, 제어 요소에 따른 3차원 동적 해석에 의해 제어 성능을 평가하여 대공간 구조물의 효율적 제어 시스템을 제시할 필요가 있다. 이는 동적하중에 대한 손상을 예방하여 대공간 구조물의 수명을 연장할 수 있을 것이다.
- 공간구조의 형태에 따른 고유의 구조안정성 및 변형형상의 파악은 설계시 반드시 고려되어야

할 중요한 요소이다. 따라서, 대공간 구조물의 형태별 지진거동특성을 조사분석하여 공간구조물의 내진성능을 고려한 형태결정에 있어서 중요한 기술자료를 마련할 필요가 있다.

- 대공간 구조물의 내진설계에 있어서 직접적으로 지진하중을 받는 하부구조만의 강성 및 강도의 증가는 상부구조의 동적거동에 영향을 주게 된다. 따라서 상부의 지붕구조와 하부의 기둥 및 벽체에 상호간의 영향을 고려한 지진해석을 통하여 보다 합리적이고 경제적인 구조설계기법의 적용이 요구된다.
- 복합적이고 다양한 구조적 거동특성을 나타내는 대공간 구조물에 대한 구조시스템의 안전성 및 사용성을 확보하기 위해서는 진동발생 요인에 따른 구조물의 진동영향 평가가 필수적이다. 이러한 정확한 진동영향 평가는 대공간 구조물의 설계 및 시공의 합리성을 증가시킨다.
- 대공간 구조물은 일반구조물과 다르게 지진하중과 같은 동적하중에 의하여 상부구조물의 진동이 매우 크게 발생한다. 이러한 구조적인 특성으로 인하여 일반적인 건축물의 진동제어 기법을 그대로 적용하는 것에는 한계가 있다. 이로 인해 보다 효율적인 내진성능향상과 대공간 구조물의 진동제어를 위한 하이브리드 스마트 면진시스템의 적용에 있어 적합성을 고려한 면진제진장치 및 진동제어시스템의 도입이 요구된다.
- 대공간 구조물의 내진설계지침서는 내진성능의 향상을 주목적으로 하고 있다. 그러므로 대공간 구조물의 체계적인 설계 및 시공을 유도하여 내진성능기술의 발전을 가져올 수 있다.

■ 3세부 "시공 및 친환경설계 기법 개발"

- 대공간구조물 시스템(Spatial Structure System)에 관한 체계적 분석 및 정리가 가능하게 된다.
- 연구결과를 토대로 목적에 맞는 합리적인 구조시스템의 선택이 가능하게 되며, 구조시스템의 올바른 선택에 따른 경제적 이익은 타 구조물에 비하여 대단히 크다고 사료된다.
- 선진기술국과의 기술적 측면을 비교하여 볼 때 국내 기술은 아직 초보단계 상태이므로 향후 국내시장 수요 확대에 대비하여 선진기술국으로부터 국내시장 잠식을 방어하기 위해서는 기술개발이 필수적이다.
- 대공간 구조물의 Erection 등에 있어서 자동화 시공은 아직 그 사례가 거의 없으며, 현재까지 건설된 이 분야 구조물 규모가 소규모이기 때문에 국내에서는 기술적 측면에서 수동화 방법 또는 반자동화 방법에 의한 시공이 대부분이었다. 이러한 수동화 공법은 공기를 지연시키고 기능공의 안전성 확보에도 많은 어려움이 예상되므로 시공자동화에 의한 공기 단축과 안전성 확보가 절실히 요구되고 있다.
- 대공간 건축물의 폭발적인 수요에 대비하여 국제경쟁력을 갖춘 가장 효율적인 시공관리 기술을 개발하여 공비절약, 공기단축, 시공 안전성 등을 확보할 필요가 있다. 그리고 개발된 시공관리 기술을 정리하여 현장 실무자들이 시공관리 지침으로 삼을 수 있도록 시공관리 지침서 제작도 필요한 실정이다.
- 현재 국내에서 건설되고 있는 대부분의 대공간구조물은 정적특성만을 고려하는 풍압시험을 중심으로 이루어지고 있다. 그러나 대공간구조물의 파괴 양상은 대부분이 동적효과가 원인이지만 이에 대한 국내 연구는 매우 미약한 실정이다.
- 현재 국내와 해외에서 수행하고 있는 대공간 구조의 내풍평가의 대부분이 정적인 평가에 중심을 주고 있지만, 본 대공간 구조물의 내풍성능평가에서는 동적인 성능평가도 포함하고 있다. 이러한 동적성능 평가 기법은 해외에서도 일부 대학 연구소에서 연구가 진행 되고 있어 국제적인 기술력 확보에서 우위를 차지 할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 대공간 구조의 내풍 성능평가를 위한 모형 제작 기법을 개발하게 되면, 추후에 예상되는 다양하고 복잡한 형태의 대공간 구조물에 제작에도 직접 응용할 수 있을 것으로 판단된다
- 태양광은 작게는 가로 시설물에서 크게는 대공간 구조물까지 적용이 되고 있는데, 이중 대공간 구조의 태양광발전의 활용은 설치면적에 따라 그 효율성이 직접적으로 영향을 끼치기 때문에 효율 면에서 큰 장점을 가진다. 하지만 국내 태양광발전시스템 대공간 구조물에 적용된 사례는 및 연구가 부족한 실정이며, 해외의 경우 대공간 구조물인 스타디움에 태양광시설을 설치하는 사례가 증가하는데 비해 국내의 경우 경기장에 설치된 사례가 아직까지 없는 실정이다.

- 현재 우리나라는 일반 영상과 미디어 아트를 적용한 영상의 차이점에 대한 사용자의 인식과 다양한 사용자가 인식할 수 있는 인터페이스 및 콘텐츠 등이 미비한 현실이다.
- 대부분의 미디어 적용사례를 보면 공공공간의 경우 내·외부의 소규모 공간에 관객과 작품이 상호 작용할 수 있도록 도와주고 있으며, 일반건축물은 외벽이나 벽면에 LED, 프로젝터 등을 설치하여 정보전달과 광고를 위해 사용되고 있는 것을 볼 수 있다. 그러나 일반건축물 외피의 파사드와 공공공간건물의 소규모 공간에서의 인터렉티브 미디어의 표현과는 달리 대공간 구조물의 지붕에 인터렉티브 미디어를 적용한 연구에 관한 사례는 부족한 실정이다.
- 대공간의 건축음향설계기술 확보
- 대공간의 전기음향설계기술 확보
- 대공간의 음향시뮬레이션기술 확보
- 대공간음향의 측정 및 평가기술 확보

■ 4세부 "실용화 방안 연구"

- 국내에서는 막구조 건축물의 유지보수 지침 동해설, 막구조의 건축물막재료등의 기술기준 및 동해설, 막재료 탄성정수 시험방법, 막재료의 품질 및 성능 시험 방법, 케이블 구조 설계 지침 및 동 해설 등의 지침서 및 제반규정의 미비로 일본, 미국, 유럽의 Code 수집 및 정리 분석이 필요하다.
- 현재 국내에는 막과 케이블 구조물에 대한 법제화가 전혀 이루어지고 있지 않기 때문에, 일본, 중국, 말레이시아 등 여러 나라들과 국제공동연구를 통해 합리적이고 문제점이 없는 지침서가 필요하다.
- ETFE 막재 패널, 개폐식구조물 시공 시 요구되는 설계지침을 제시함으로서 체계적이고 고효율화된 시공기법을 제시할 수 있다.
- 막, 케이블, 쉘, 스페이스 프레임 등의 특수 구조물과 이에 소요되는 접합부 관련 설계기준 마련으로 대공간 건축물 품질 유지가 가능하다.
- 각종 특수 구조물에 대한 합리적인 설계지침서 및 설계기준을 국내 기술로 수립할 수 있으며 지침서의 활용으로 대공간 건축물 안전성 향상시킬 수 있다.
- 유지관리를 위한 계측시스템의 개발은 관련한 전후방 산업인 센서기술, 로봇기술, 정보통신기술 등과의 밀접한 관련으로 그 기술적 파급효과는 매우 지대하므로 개발이 반드시 필요하다.
- 순수한 국내기술로 개발된 광섬유 센서를 사용한 계측시스템은 우리의 독자적 기술로서 해외선진국의 기술을 능가하는 우수한 기술이며 해외선진국의 기술에 적극적으로 대응할 수 있는 기술이다.
- 지구온난화에 대비한 건축물의 장수명화 요구에 대응하는 기술로서 활용

가능하며, 유지관리 및 보수보강 기술을 활용한 기술의 시스템화는 기술인력 개발에 영향을 미칠 것이다.

- 대공간 구조물의 각 단위 기술에 대한 실용화 가능성 검증, 신뢰도 확보 및 그에 따른 추가 응용기술 확보를 위하여 실제 실용화 가능성이 높은 Pilot Project를 설계 및 제작할 필요가 있다.
- 대공간 구조물에 적용되는 개폐식 지붕구조 및 텐셔닝 에어빔 시스템과 같은 핵심 요소기술은 국내 자체 기반기술로서 아직 도입하기가 미흡하여 상기와 같은 Pilot Project 제작을 통하여 실제 구조물의 제작하는 과정에서 설계 기술 확보 및 정량적, 정성적인 적용성 검토 등을 통하여 핵심 요소기술에 대한 정립 및 실용성 검토를 통하여 건설기술 데이터 베이스를 구축하여 실무자(건설회사, 설계 및 엔지니어링)에게 소요 기술 제공할 필요가 있다.
- Pilot Project 제작을 통해 대공간 구조물에 적용되는 설계 및 시공 기술을 축적함으로써 국내 자체 기반기술 개발의 국산화 및 고도화에 이바지 할 수 있다.
- 현재 진행되고 있는 대공간 건축물 구조설계에 대한 인지도 조사를 위한 설문 및 현재 진행되고 있는 대공간 구조설계에 대한 절차 파악을 토대로 대공간 구조물 구조설계 절차서 제안 및 각각의 내용에 대한 평가지표가 필요하다.
- 대공간 구조물의 지붕구조로 활용이 가능한 단층 레티스 돔과 같은 시스템에 적절히 사용할 수 있는 높은 강성과 내력을 가지며, 시공성이 뛰어나 새로운 접합부의 개발이 필요하다.

(1) 나. 경제, 산업적 측면

5. 본 연구의 필요성을 경제, 산업적 측면에서 기술하면 다음과 같이 요약할 수 있다.

■ 1세부-구조시스템 개발 및 경제성 분석

- 대공간 건축의 수요가 증대하고 있는 중국과 동남아 등지에 국내 기술을 수출
- 대공간 건축은 설계와 시공기술에 따라 전체 공기나 공사비가 영향을 받을 수 있으므로 이를 최적화할 수 있는 기술 경쟁력 확보
- 대공간구조시스템의 설계최적화 기법을 통해 대공간 구조물 구조시스템의 개념설계 및 타당성분석 등에 효과적으로 사용될 수 있다.
- 대공간구조물에 대한 접근성 제고로 건설 시장 확대 및 건설 산업의 새로운 시장의 개척
- 국외 기술수입으로 인한 외화유출을 막고, 소요비용을 절감
- 향후 심각한 문제로 남아 있는 대공간 건축의 유지관리를 국내 기술로 가능하게 하여 비용절감 효과
- 기술 경쟁력 강화를 통한 신기술 및 특허출원 등으로 국제 대공간 건축시장에서 우위를 유지
- 대형 구조물 건립의 타당성 분석 및 프로젝트 건립 비용 조달 방안 제시
- 경제성 분석 기법 개발을 통하여 대형 구조물의 활용 방안 제시 및 다양한 형태의 새로운 산업 출현 등에서 효과적으로 사용

■ 2세부 "비선형해석 및 구조설계 기법 개발"

- 구조 해석 전 반드시 필요로 하는 형상 탐색 과정의 기술을 국산화하여 이러한 소프트웨어 산업 분야에서 국내 기술을 확보함으로써 관련 업계의 산업 성장에 기여 할 수 있다.
- 대공간 구조물 중 강성계 이산화 시스템인 공간 프레임 구조물은 경제적이라는 장점과 함께 높은 강성을 가진 구조 시스템이다. 이런 구조시스템의 구조 안정성 향상을 통해 예측할 수 없는 구조불안정성을 미연에 방지하는 효과와 구조 메커니즘 규명을 통해 실무자의 구조 설계가 가능뿐만 아니라 대공간 구조물의 분야에서의 비용절감효과를 기대할 수 있다.
- 철근 콘크리트 또는 철골구조와 같이 구조물에 일반적으로 사용되는 강성구조들은 휨모멘트에 저항하기 위하여 상당한 강성을 보유한 부재단면이 필요한 반면, 케이블-스트럿 구조물은 부재가 압축과 인장요소 만으로 이루어져 모멘트가 발생하지 않기 때문에, 단면적을 최적화하는 동시에 질량을 줄일 수 있어서 비용 절감효과를 기대 할 수 있다.
- Free form 케이블-스트럿 구조물과 같은 연성구조물은 휨모멘트에 저항하기 위하여 상당한 강성을 보유한 일반적인 강성 구조물과는 달리 부재가 압축과 인장요소 만으로 이루어져 모멘트가 발생하지 않기 때문에, 단면적을 최적화하는 동시에 질량을 줄일 수 있어서 비용 절감효과를 기대 할 수 있다.
- 구조시스템의 개발과 함께 신 디테일 개발도 대공간 구조물의 경쟁력 강화에 매우 중요하다. 따라서 새로운 디테일의 개발과 시뮬레이션 할 수 있는 기술을 개발하고, 이를 신기술 및 특허출원해 두어 보다 안정적 우위를 유지할 필요가 있다.

- 구조안정성에 확보에 관한 기초자료로 활용하여 효율적인 구조설계 및 시공계획을 통해 비용절감효과를 기대할 수 있다.
- 대공간 구조물의 설계나 시공단계 뿐만 아니라 사용 단계에서의 유지관리 기술 보유로 안전성 향상을 통해 구조물 수명을 연장케 하며, 관련 정보 DB화로 유지관리 비용을 절감할 수 있다.
- 공간구조물은 규모가 대규모인 경향이 있으며, 사용되는 기술 및 재료 또한 매우 다양함으로 국내건설지장의 활성화 및 고용창출이 가능해 질 전망이다. 더 나아가 동남아와 중국을 중심으로 대공간 구조물 시장이 형성되고 있는데, 여기에 잉여가치가 높은 구조설계 기술을 축척하여 우리 기술을 수출할 수 있는 준비를 하여야 한다.
- 국내 대공간 건축물 시공에 관한 요소기술 축적과 시공표준화를 구축할 수 있으며, 선진기술에 의한 국내시장 잠식을 미연에 방지할 수 있고, 나아가 국내 건설업체에 기술축적의 기회를 제공하게 되며, 축적된 기술로 해외시장에서의 경쟁력 확보로 이어질 수 있는 것이다.
- 향후 심각한 문제로 남아 있는 대공간 구조물의 유지관리를 미리 예측할 수 있는 시뮬레이션 기술을 개발하여 국내 기술로도 가능하게 함으로서 비용절감 효과 및 재해를 미연에 방지하는 효과를 극대화시킬 수 있다.
- 대공간 구조물의 구조적 특수성을 고려한 내진설계기법을 구조설계시 적용하여 보다 합리적인 설계를 유도하고 적절한 구조체 물량의 소요를 통한 경제적인 설계가 필요하다.
- 대공간 구조물의 내진설계를 위한 시뮬레이션 및 구조설계 기술을 확보함으로써, 현재 대공간 구조물의 구조설계와 관련된 국내 기술자립도를 향상시킬 수 있다. 또한 국외기술수입으로 인한 지나친 외화낭비를 극소화하여 소요 비용을 절감시킬 수 있다.
- 국내외 대공간 구조물에 대한 동적실험 사례가 극히 드문 실정이므로, 해적적 연구결과에 대한 실험적 검증과 구조설계시에 적용가능한 실증적 자료가 미비하다. 따라서 축소모형의 진동대 실험을 통하여, 관련 실험 및 구조설계에 요구되는 기초자료를 마련함으로써 대공간 구조물의 설계와 관련한 국내기술자립도 향상시킬 수 있는 데이터베이스 구축이 필요하다.
- 내진설계에서 부재의 강도를 증가시키는 방법은 초기 건설비용이 많이 든다. 반면에, 연성을 증가시켜 소성거동을 이용하는 방법에서는 구조물의 붕괴를 방지할 수 있으나 보수, 보강하기가 쉽지 않으며 또한 비구조재의 파괴로 인해 보수비용이 많이 든다. 따라서 대공간 구조물에 동적 응답 제어장치의 적용은 이러한 문제점들의 해결방안으로 제시될 수 있으며, 관련 기술의 특허 및 신기술 확보를 통해 기술 수익을 확보할 수 있다.
- 국내 실정에 맞는 대공간 구조물의 내진설계지침서를 통한 체계화 된 내진설계프로세스를 제공하므로써 실무 구조설계시 시간 및 비용을 절감할 수 있다. 이를 통하여 대공간 구조물의 구조설계에 대한 실무 엔지니어들의 접근을 용이하게 하므

로써, 관련분야 건설시장의 활성화를 도모할 필요가 있다.

■ 3세부 "시공 및 친환경설계 기법 개발"

- 대공간 건축물의 국내 수요증대를 감안할 때, 이 분야 기술개발을 통하여 국내 대공간 건축물 시공에 관한 요소기술 축적과 시공표준화를 구축할 수 있다.
- 선진기술에 의한 국내시장 잠식을 미연에 방지할 수 있고, 나아가 국내 건설업체에 기술 축적의 기회를 제공하게 되며, 축적된 기술로 해외시장에서의 경쟁력 확보로 이어질 수 있는 것이다.
- 대공간 건축의 설계시공기술을 확보하여 현재 국외사의 기술수입에 의존하고 있는 대공간 건축기술을 자립화 할 수 있다.
- 대공간 건축의 수요가 증대하고 있는 중국과 동남아 등지에 국내 기술을 수출할 수 있는 기회를 획득할 수 있다.
- 대공간 구조물에 효율적인 시공관리 기술을 적용함으로써 구조물의 시공 단가와 공기를 낮춤으로 인하여 레저분야, 프랜트분야, 우주항공 분야 등에 본 구조 형식을 도입함으로 국가적 차원에서의 경제 활성화를 가져올 수 있다.
- 최근 국내에서 다양한 형태의 특수구조물(경기장, 관람장, 전시장 등)들이 많이 건설되고 있으며, 이러한 대공간구조물의 경우 가벼운 재료적인 특성 때문에 바람에 의해 파괴가 많이 발생하고 있다. 특히 국내에서 발생하는 태풍에 의해 대공간구조물의 파괴 및 손상이 빈번하게 발생하고 있어 경제적, 사회적으로 많은 문제를 유발 시키고 있다.
- 현재 국내에는 많은 대공간 구조물 들이 건설되어 지고 있지만 이들은 막구조 형태와 트러스 구조 등으로 건설되어 사용되고 있다. 이들 구조물들 중에 일부 시설에서 태풍에 의한 많은 피해를 보고 있는 실정이다. 이를 복구하기 위해 많은 비용들이 들고 있다.
- 정확한 내풍안전성을 확보하기 위해서는 장스팬의 위치별 풍압력평가가 중요하므로 내압과 외압의 정확한 내풍안정성평가를 위한 풍동실험을 실시하게 되면 내풍안정성이 확보되면 공사비의 절감 등에 크게 기여할 것으로 판단된다.
- 최근 세계적으로 친환경 에너지는 사회 여러 분야에 많은 관심을 받고 있으며, 우리나라 역시 2007년부터 지식경제부는 공공기관의 태양광을 비롯한 신재생에너지 적용 의무화라는 법률을 제정하고 시행해왔다. 이를 위하여 실질적으로 가장 많이 사용된 친환경에너지 중 하나인 태양광은 설치가 간편하고 비교적 다른 에너지원에 비하여 설치제약이 적다는 점에서 주목받고 있다.
- 대공간 구조물에 미디어 아트 및 인터렉티브 미디어를 적용하여 건축물이 위치하고 있는 지역성이나 도시에 특징을 나타내 줄 수 있으며, 생활 문화의 공간

으로서 변화가 예상된다.

- 장기적으로 해외의 대공간 건립에 참여할 수 있는 기술적 토대 마련
- 해외음향컨설팅비용 절감
- 건축 및 전기음향관련 산업육성 및 전문인력양성
- 각종 체육 및 공연문화산업 등의 활성화

■ 4세부 "실용화 방안 연구"

- 국내 막과 케이블 구조물의 지침서를 개발하여 기술 수입에 의존하지 않고 설계 및 시공의 자립해야 한다. 그래서 기술수입으로 인한 외화유출 및 소요비용을 절감하여 국가 기술 경쟁력확보를 구축 할 것이다.
- 막구조 지침 및 해설의 발간은 기술 수입에 의존하지 않고 설계 및 시공에 자립의 표본 될 것이며 ETFE 관련 지침서도 개발하여 그 뒤를 이어갈 것이다. 따라서 관련 지침의 기술수입으로 인한 외화유출 및 소요비용을 절감할 수 있다.
- 막구조, 스페이스 프레임, 케이블 구조 등의 특수구조물의 지침서 활용을 통한 기술집약적 설계 기술 수요로 고부가가치 창출 및 이익 실현할 수 있다.
- 기술 수입에 의존하지 않고 국내 기술집약적 설계기술 보유로 관련 기술 비용 대체 효과를 기대할 수 있다.
- 국내 건설업체에 기술 축적의 기회를 제공하게 되며, 축적된 기술로 해외시장에서의 경쟁력 확보가 가능하다.
- 기존 건설된 막구조물의 계측시스템에 적용하기 위한 방안으로서, 많은 수요에 따른 광섬유센서 가격인하가 이루어지며, 전기저항식 센서에서 탈피한 건축물 분야의 광섬유센서 시대를 열 수 있을 것이다.
- 지구온난화 등과 같은 시대의 화두로 인해 건축물의 장수명화가 시대적으로 사회적으로 강력히 요구되는 있는 현재, 건축물의 장수명화는 건축물의 유지관리 기술 및 보수보강 기술에 달려 있다.
- 초대형 막을 이용한 대공간 건축물의 유지관리 기술은 사업화 가능하며, 현재 기존의 월드컵스타디움을 비롯하여 중소형 막구조물 등에도 적극적으로 이용될 수 있다.
- 지침서 작성을 통한 설계, 시공 사업비 최적화가 가능하며, 기술 수요자들의 최적화된 절차를 기준으로 협의를 통한 건설 사업비 최적화 구현이 가능하다.
- 아직 국내 자체 기반기술로는 연성구조물 등 복잡한 요소기술이 적용되는 대공간 구조물에 대한 설계 기술이 미비하여 상당한 설계비가 발생함이 사실이다. 따라서 300M 스팬의 Pilot Project의 SD 보고서를 작성하여 봄으로써 향후 대공간 구조물의 지침이 될 만한 설계 프로세스를 구축할 필요가 있다.
- 국내에는 대공간 구조물에 적용하는 핵심 요소기술에 대한 정립이 미비하여 해외

기술을 도입하는 과정에서 경제적으로 상당히 비효율적이라 할 수 있다. 따라서 실제 Pilot Project를 제작함으로써 핵심 요소기술을 국산화하여 이 비용을 절감할 필요가 있다.

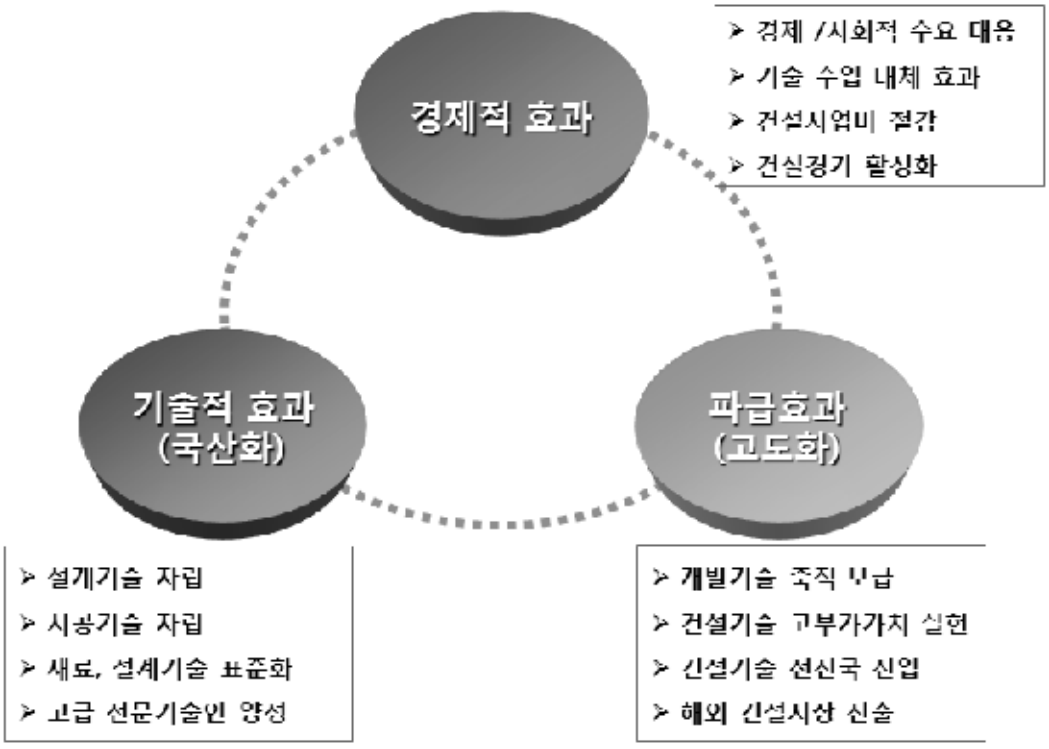
- 적용된 핵심 요소기술들의 실용성을 준공 후 검증하여, 향후 건설될 수많은 대공간 구조물에도 실무자들이 쉽게 적용이 가능할 수 있도록 데이터베이스를 구축할 필요가 있다.
- 실제 30M 스팬의 Pilot Project인 한국기술교육대학교 HRD 홍보관을 제작함으로써 학교의 전시관으로 이용하고자 한다.
- 대공간 지붕구조에 활용할 수 있으며, 시공성 및 경제성이 뛰어나 공사비 절감 및 타 산업분야에 적용 가능한 접합부 개발이 필요하다.

(1) 1.2.2 기대효과

6. 본 연구의 기대효과는 아래 그림과 같이 크게 기술적, 경제적 효과로 나누어 볼 수 있다. 연구 과제를 수행함으로서 기술적으로 설계 및 시공 기술 자립과 대공간 건축물에 적용되는 연성구조의 재료 및 설계기술 표준화, 고급 전문기술인 양성의 효과가 기대된다. 또한 경제적인 측면에서는 현재 국내의 경제, 사회적 수요에 대응이 가능하고 해외 기술에만 의존하던 기술 수입의 대체효과를 기대할 수 있다. 더불어 건설 사업비가 절감되고, 침체된 건설경기의 활성화가 기대된다. 이러한 기술적, 경제적 기대효과를 바탕으로 본 연구가 종료된 현재, 국내 대공간 건축물 건설 산업은 축적된 개발기술 보급, 고부가가치 창출 뿐만 아니라 해외 건설시장 진출을 통한 건설기술 선진국 진입이 가능하다.

7.

8.



본 연구의 기대효과

■ 1세부-구조시스템 개발 및 경제성 분석

1) 세세부	2) 연구과제명	3) 기대효과
4) 1-1	5) 구조시스템 개발	▪ 미래지향적인 구조시스템 설계 기술 자립 ▪ 각종 특수 구조물에 대한 기술표준화 수립 ▪ 파일럿 프로젝트 수행으로 대공간 건축물 설계 경험 및 능력 축적 ▪ 관련 기술 국내 보유로 일관된 설계-시공-유지관리 시스템 구축 시 요소기술 제공 가능 ▪ 경제 문화적 수준 향상에 대응하는 대공간 건축물 수요 증가 예상 ▪ 국내 보유로 관련 기술 비용 대체 효과 기대 ▪ 최적화된 구조시스템 선정과 설계로 건설 사업비 절감 ▪ 대공간 건축물 건설기술 국산화로 사업 추진 수월성 제고 ▪ 대공간 건축물 건설기술 확보로 향후 대공간 시장 진출 ▪ 설계 및 시공 분야 전문 엔지니어 일자리 창출 ▪ 기술집약적 설계 및 시공 기술 수요로 고부가가치 창출 및 이익 실현
6) 1-2	대공간 접합부 개발	▪ 접합부 설계 기술 이전 및 케이블 접합부 개발에 의한 케이블 구조물의 국제 경쟁력 제고가 가능하다. ▪ 적절한 기술로 공기단축과 공사비 절감을 꾀할 수 있고, 신기술 및 특허출원으로 국내의 기술축적과 국제 경쟁력을 강화할 수 있다. ▪ 각종 특수 구조물에 대한 기술표준화 수립 ▪ 파일럿 프로젝트 수행으로 대공간 건축물 설계 경험 및 능력 축적 ▪ 최첨단 기술을 요하는 대공간 건축 관련 기술 보유로 국내건설산업의 기술 집약도 향상 ▪ 국제건설시장에서 첨단 기술 및 시공 능력 보유한 선도 그룹 진입 ▪ 우수한 설계 및 시공 능력 확보로 품질 및 생산성 향상

		▪ 기술 수입 대체 효과 ▪ 현재 대공간 건축물 건설 시 기술 비용 중 30-40% 해외 기술 의존 및 기술 수입 비용 지출에 대한 관련 기술비용 대체 효과
7) 1-3	경제성 분석	▪ 경제성 평가 지표에 따른 대공간 구조물의 적용 분야 확대에 활용 ▪ 경제적인 대공간 구조물의 설계에 반영 ▪ 표준모델의 제시에 따른 대공간 구조물의 설계에 활용

가.

■ 2세부 "비선형해석 및 구조설계 기법 개발"

1) 세세부	2) 연구과제명	3) 기대효과
4) 2-1	▪ 대공간 구조의 비선형 해석기법 개발 ▪ 이산계 강성구조물의 비선형 해석기법 개발 ▪ 하이브리드 구조물의 비탄성 비선형 거동 연구 ▪ 케이블-스트럿 구조물의 비탄성 비선형 거동 연구 ▪ Free Form 케이블-스트럿 구조의 비선형 거동 특성 연구 ▪ 대공간 구조물의 비선형 해석 가이드라인	▪ 대공간 건축물 해석 분야에서 비선형 해석 관련 이론, 기술, 해석 프로그램 자체 보유 ▪ 강성 및 연성구조시스템, 하이브리드 시스템, RC 대공간 구조 등 대공간 건축 관련 특수 구조 시스템 설계 능력 보유 ▪ 기술 수입 대체 효과 - 기술 비용 중 30~40% 해외 기술 의존에 대한 효과 - 국내 보유로 관련 기술 비용 대체 효과 기대 ▪ 건설 경기 회복에 기여 대공간 건축물건설기술 국산화로 사업 추진 수월성 제고 ▪ 건설 기술 선진국 진입으로 국가 이미지 제고
5) 2-2	▪ 대공간 구조시스템의 구조안정 특성 ▪ 쉘형 구조물의 정적 구조불안정 특성	▪ 구조설계 및 시공시에 구조안정성에 확보에 관한 기초자료 제공 ▪ 기술교육 및 관련 상용프로그램

	▪ 쉘형 구조물의 동적 구조불안정 특성 ▪ 스페이스 프레임의 정적 구조불안정 특성 ▪ 스페이스 프레임의 동적 구조불안정 특성 ▪ 구조불안정 설계 가이드라인	개발을 통한 안정성 검토 방안 제시 ▪ 쉘형 구조물의 동적 구조불안정성의 주요 요인 규명 및 해석기법 개발 ▪ 쉘형 구조물의 정적, 동적 안정성 평가 기법의 개발 ▪ 스페이스 프레임 구조물의 동적 구조 불안정 해석 기법 개발 및 적용성 검토 ▪ 구조안정성 확보를 위한 최적구조설계로 안정성과 경제성의 확보 ▪ 관련 프로그램의 국산화를 통한 해외기술의존도 감소 ▪ 파일럿 프로젝트의 구조설계시 안정성 확보기술에 관한 연구
6) 2-3	▪ 대공간 구조의 형태별 지진거동 특성 조사 및 분석 연구 ▪ 대공간 구조물의 지진해석용 모델링 기법 개발 ▪ 하부구조의 돔에의 영향 분석 연구 ▪ 대공간구조물의 진동제어 기법 및 시스템 개발 (지진에너지 흡수용 구조모델 개발) ▪ 대공간 구조물의 개폐 진동영향 평가 및 하이브리드 스마트 면진시스템 적용성 ▪ 내진설계 지침서 작성	▪ 대공간 구조의 형상과 구조시스템에 대한 지진거동특성을 조사 분석함으로서 국내 실정에 적합한 설계적용 방법들을 마련할 수 있고, 내진 및 면진에 관한 체계적 연구가 가능 ▪ 지진동-지반-하부구조-상부구조(공간구조)의 연성모델에 대한 모델링기법의 개발과 공간구조에 적용가능한 등가정적해석의 모델링 가능 ▪ 대공간 구조물과 국내의 실정에 적합한 면진, 제진장치 개발이 가능 ▪ 대공간 구조물과 관련된 특수구조물의 방재 설계기술 확보 ▪ 대공간 구조물의 내진설계 지침서를 통한 관련 실무구조설계의 체계화 및 관련 분야에 고부가가치의 엔지니어링 기술 창출

■ 3세부 "시공 및 친환경설계 기법 개발"

7) 세세부	8) 연구과제명	9) 기대효과
10)3-2	▪ 시공분야	▪ 국내 기술 및 자본에 의한 대공간 구조 시스템의 설계 및 시공 ▪ 대공간 건축물의 국내 수요증대에 대비하여 대공간 건축물 시공에 관한 요소기술 축적과 시공표준화를 구축 ▪ 선진기술에 의한 국내시장 잠식을 미연에 방지 ▪ 국내 건설업체에 기술 축적의 기회를 제공하게 되며, 축적된 기술로 해외시장에서의 경쟁력 확보 ▪ 설계 및 시공 분야 전문 엔지니어 일자리 창출 ▪ 우수한 설계 및 시공 능력 확보로 품질 및 생산성 향상 ▪ 국제경쟁력을 갖춘 가장 효율적인 시공관리 기술을 개발하여 공비절약, 공기단축, 안전성 확보
11)3-4	▪ 풍환경분야	▪ 대공간 구조물의 측벽(출입문등) 개폐율에 따른 내압계수의 변화에 대해서 풍동심험을 이용한 정확하게 예측하게 되면 장경간형태의 지붕면에 작용하는 풍하중을 계산에 활용할 수 있으면 대공간 구조물과 같은 저층건물의 내압계수에도 활용을 할 수 있을 것으로 판단된다. ▪ 국내·외의 인터액티브 미디어가 적용된 도시 공간 사례분석을 바탕으로 대공간 구조물에 적합한 인터액티브 미디어 시스템을 연구를 통해 대공간 지붕 디지털 미디어 자료로 활용 될 수 있다.현재 풍하중기준에서 제안하고 있는 내압계수는 개폐율의 크기를 정의하고 있지 않고 부분개방, 완전개방과 밀폐 등 3종류에서 대해서 제안하고 있다. 부분개방의 크기를 개폐율로 정의하게 되면 저층건물의 내압계수 예측에도 충분히 활용할 수 있다. ▪ 인터액티브 미디어 아트는 지역문화의 커뮤니케이션 공간에 적용하여 지역문화의 활성화와 여가문화공간으로서 다양한 콘텐츠를 적용 할 수 있을 것이다.

나.

다.

■ 4세부 "실용화 방안 연구"

1) 세세부	2) 연구과제명	3) 기대효과
4) 4-1	▪ 막구조물 설계 지침서 작성	▪ 막구조물 설계 시 요구되는 설계지침과 각 분야별 시공 및 재료의 활용기법을 제시함으로써 체계화 및 고 효율화 ▪ 현장적용 및 산업체 기술이전: 대공간에 대한 합리적 막구조물 설계를 가능하게 하고, 효율성 제고를 통해 비용절감효과를 유도.
	▪ 케이블 구조물 설계 지침서 작성	▪ 케이블 구조물 설계 시 요구되는 설계지침과 각 분야별 시공 및 재료의 활용기법을 제시함으로써 체계화 및 고 효율화 ▪ 현장적용 및 산업체 기술이전: 대공간에 대한 합리적 케이블 구조물 설계를 가능하게 하고, 효율성 제고를 통해 비용절감효과를 유도.
	▪ 스페이스프레임 구조물 설계 지침서 작성	▪ 스페이스프레임 구조물 설계 시 요구되는 설계지침과 각 분야별 시공 및 재료의 활용기법을 제시함으로써 체계화 및 고 효율화 ▪ 현장적용 및 산업체 기술이전: 대공간에 대한 합리적 스페이스 프레임 구조물 설계를 가능케 하고, 효율성 제고를 통해 비용절감 효과 유도.
	▪ 개폐식 구조물 설계 지침서 작성	▪ 개폐식 구조물 설계 시 요구되는 설계지침과 각 분야별 시공 및 재료의 활용기법을 제시함으로써 체계화 및 고 효율화 ▪ 현장적용 및 산업체 기술이전: 대공간에 대한 합리적 개폐식 돔 구조물 설계를 가능하게 하고, 효율성제고를 통해 비용절감 효과를 유도.
5) 4-2	▪ 계측제어 시스템 기반기술 개발	▪ 최신 막재 및 케이블재의 역학적 특성 파악 및 관련기업체의 재료특성 기초데이터로 제공 가능 ▪ 시공현장의 올바른 검증자료로 제공
	▪ 대변형을 고려한 제어계측 시스템 개발	▪ 막/케이블 구조물의 효율적인 장력측정기법 적용과 기술력 향상

		▪ 막/케이블 구조물의 효율적인 장력측정기법을 지침화 및 신소재 해석 및 분석 기술 보유
	▪ 막구조 건축물 보수기술 지침(안)	▪ 기존 구조물에 대한 보수기술 지침서를 제공하여 유지관리 분야의 체계화 및 고 효율화 가능 ▪ 기존 대공간 구조물에 대한 보수 기술 지침서를 기업체에 제공 하여 효율성 제고를 통해 비용절감 효과를 유도
	▪ 대공간 구조물의 유지관리 및 보수기술 지침(안)	▪ 유지관리 지침 및 기법 개발로 사용 단계 안전성 및 유지관리 비용 절감 ▪ 국내 건설산업의 기술 집약도 향상 및 국제경쟁력 제고 ▪ 법/제도 개선 및 기준/지침에 의한 기술 표준화
	▪ 무선모니터링 매뉴얼 및 방수, 누수방지 기술 개발	▪ 장기모니터링에 의한 유지보수 기반 기술의 확보 ▪ 상시모니터링 현장적용에 따른 구조물 유지관리 및 누수 시스템 기반 기술
	▪ 대공간 건축물 통합유지관리 지침서	▪ 대공간 건축물 해석 및 설계기술 자립 ▪ 선진국 대비 높은 수준의 국내 대공간 건축물 설계 및 시공 기술 국산화 비율 제공 ▪ 재료 품질 및 시험 기준 마련으로 대공간 건축물의 품질 및 안전성 향상 ▪ 유지관리 지침 마련으로 유지관리업무의 전반적 품질 유지
6) 4-3	▪ Pilot Project	▪ Pilot Project 준비 및 시공을 통해 관련 요소기술의 검증 및 평가를 통한 실용화 가능성 검증, 신뢰도 확보 및 추가 응용기술 확보 ▪ Pilot Project 준공 후 모니터링 시스템을 통한 요소기술 검증 ▪ 건설 기술 데이터베이스 구축 및 실무자 (건설회사, 설계 및 엔지니어링)에 소요기술 제공 ▪ Pilot Project로서 제작된

		한국기술교육대학교의 HRD 홍보관은 학교의 전시시설로 사용 ▪ 작성된 300M 스팬 Pilot Project의 구조설계 보고서(SD Report)를 바탕으로 대공간 구조물의 구조설계 프로세스가 정립된다면, 향후 건설된 대공간 구조물들의 지침이 됨 ▪ 원형강관의 접합을 위해 새로이 제안된 접합부의 경우 높은 강성과 내력을 가지고 있어 대공간 구조물의 지붕구조로 활용 가능하며, 원형강관을 이용한 단층 레이어 돔의 접합부에 적절한 사용이 가능 ▪ 현재 진행되고 있는 대공간 건축물 구조설계에 대한 인지도 조사를 위한 설문 및 현재 진행되고 있는 대공간 구조설계에 대한 절차 파악을 토대로 대공간 구조물 구조설계 절차서 제안 및 각각의 내용에 대한 평가지표를 작성하여 품질을 확보할 수 있는 방안 형성 ▪ 이를 바탕으로 본 연구단의 최종목표인 국내 자체 기반기술 개발로 국산화 및 고도화를 가능케 함

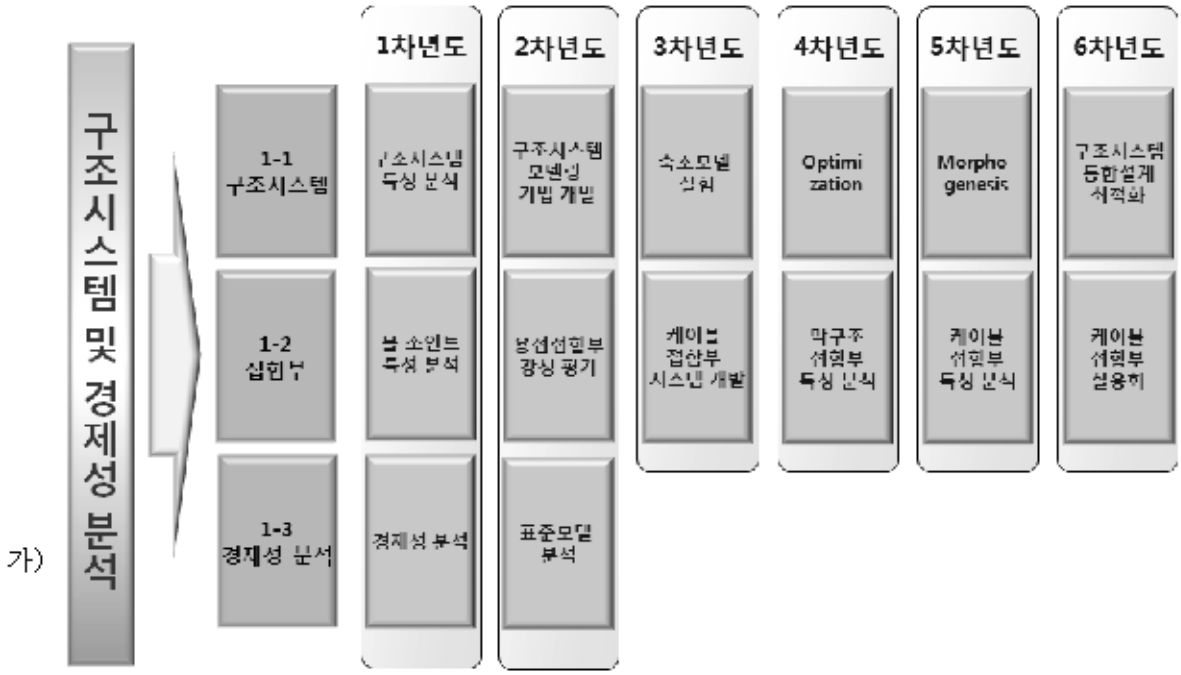
라.

(1) 1.3 연구내용 및 범위

(2) 1.3.1 연구목표 및 범위

(3) 가. 1세부

본 세부과제는 대공간구조 시스템의 실용화를 위한 핵심사항으로 첫째 대공간구조 시스템 개발에서는 강성/연성구조 시스템, 하이브리드(Hybrid) 시스템, 콘크리트 시스템의 개발을 위한 모든 기술이 포함되며, 축소모델을 이용한 실험, 특히 개폐식 구조 시스템의 사회적 요구에 따라 이 분야에 대한 연구가 병행되어야 할 것이다. 둘째 접합부 해석 및 설계에서는 각 시스템 특히 연성구조 시스템에서 필요로 하는 접합부의 해석 및 형태해석 그리고 설계에 적용할 수 있는 다양한 모듈의 접합부에 대한 연구가 수행된다. 셋째 대공간구조물의 최적화 문제로 형상, 위상 최적화 문제, Morphogenesis 기법 등이 포함되며, 마지막으로 시스템의 경제성 분석은 실용화 입장에서 연구의 가치를 평가하고 최종적으로 포괄적인 경제성 분석을 통하여 사업화가 가능한 최적의 접합부 개발을 목표로 하고 있다.



(4) 나. 2세부

대공간구조로 분류되는 쉘 및 스페이스 프레임, 케이블 및 막구조물, 하이브리드 구조물 등의 비선형 해석과 구조설계와 관련되는 사항과 구조물의 불안정 거동 메커니즘을 규명하기 위한 해석기법과 알고리즘 등을 연구한다.

1. 비선형해석 기법으로는 강성구조물의 기하학적, 재료적 비선형해석, 연성구조물의 형상탐색 및 기하학적 비선형 해석 등이 포함된다.
2. 구조안정해석 기법으로는 쉘 및 스페이스 프레임의 정적, 동적 안정문제를 규명하고 해석기법으로서 극한좌굴, 분기좌굴 및 다분기 경로 탐색기법 등이 이 분야에 포함된다.
3. 내진설계에는 대공간 건축물의 동적거동 특성, 하부구조의 거동특성 영향, 제진, 면진구조시스템 연구 등을 포함한다.

9.

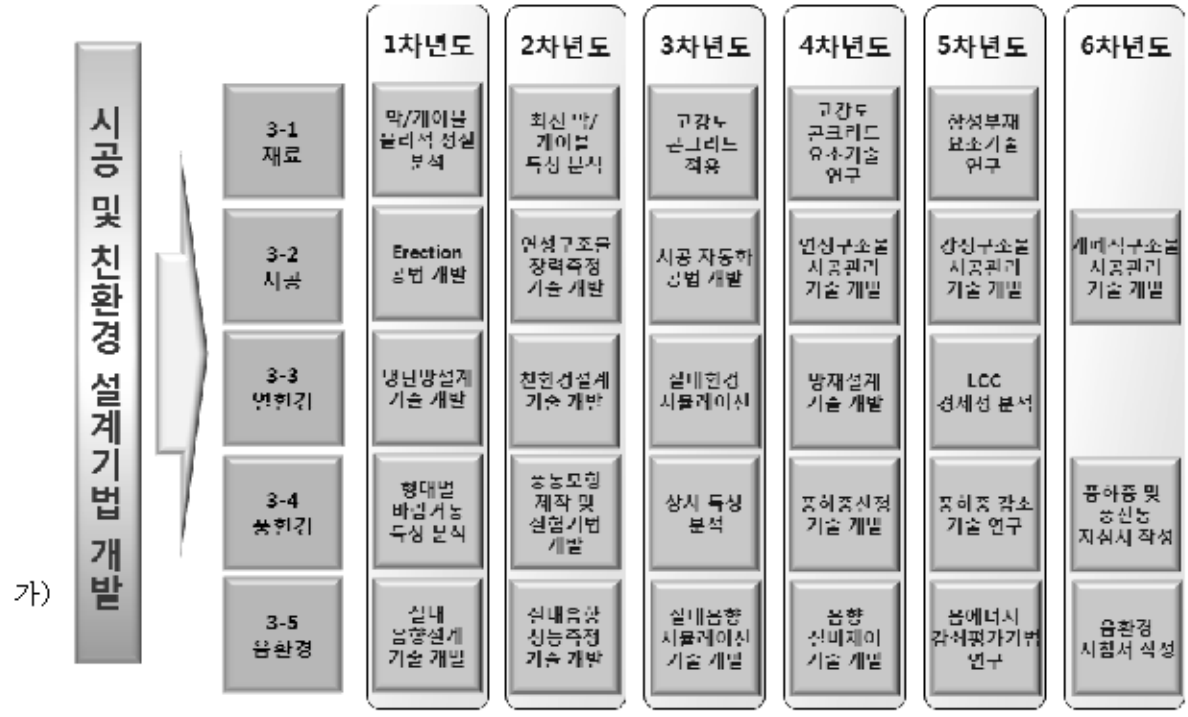


(1) 다. 3세부

이에 대공간 구조물 전반에 대한 구조시스템, 기술 및 공법개발, 시공관리기법, 유지관리 등에 대한 체계적인 연구를 통해 국제 경쟁력 확보, 기술축적, 경제성, 안정성, 시공성, 구조물의 효율적 관리 등에 대한 연구를 수행한다.

대공간 구조물의 Erection 공법 및 자동화 공법의 개발, 대공간 구조시스템 연성 막구조물의 장력측정 시공기술의 개발 및 장력측정 관리시스템을 개발하고, 대공간 구조물의 시공관리기술 등을 개발하여 국제 경쟁력 확보, 기술축적, 경제성, 안정성, 시공성, 구조물의 효율적 관리 등에 그 목적이 있다.

초대형 스팬을 갖는 건축물이 건설되기 위해서는 재료의 경량화와 그에 맞는 구조시스템의 개발 및 설계/시공 기법이 절실히 필요하다. 대공간 건축물의 환경 친화적 건축물의 실용화를 위한 세부요소기술(시공, 재료, 냉난방설비, 풍환경, 음환경)확보를 위하여 기술력의 개발과 활용에 있다.



(2) 라. 4세부

국내의 대공간구조물에 대한 합리적이고 기술적 문제점이 없는 설계 지침을 마련하기 위해서는 선진국들의 Code를 정리 분석할 필요가 있다. 또한, 정리 분석된 연구 결과물을 관련 학회 및 관련 기관의 공인을 얻어 앞으로 건축될 실제 구조물설계에 직접적으로 적용될 수 있도록 한다.

유지관리 측면에서는 대공간 건축물의 실용화 방안에 필수적인 모든 내용의 연구를 목표로 하고 있으며, 대변형에 따른 누수방지 부분 및 시방서 작성을 핵심요소 기술로 개발한다.

또한 300M 스팬의 대공간 건설기술 실현 가능성 및 적용된 핵심 요소기술의 실용화를 검증하기 위한 목적으로 1/10 스케일의 30M 스팬 파일롯 프로젝트를 천안 한국기술교육대학교에 건설하였으며, 프로젝트의 구축 및 경험을 통해 대공간 건축물에 대한 건설기술을 확보하고자 한다.

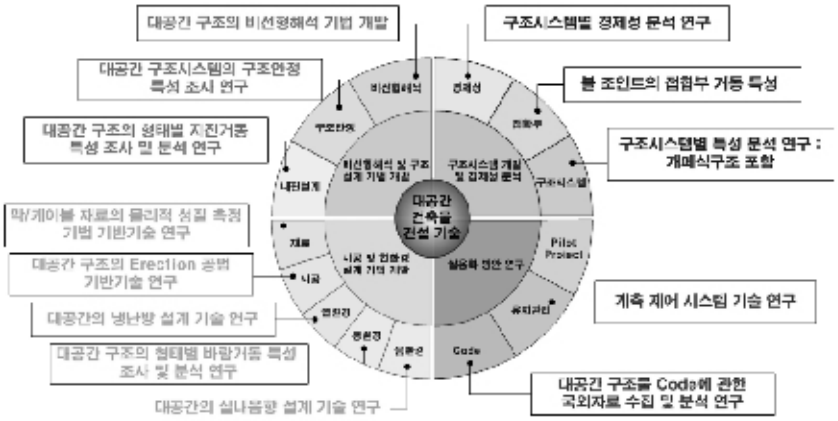


(3) 1.3.2 연구의 내용

연구과제인 대공간 건축물 건설기술개발 연구단의 연구기관별 세부연구내용 및 세부추진 일정을 각 연차별로 나타내면 다음과 같다.

(4) 가. 1차년도 연구내용 및 세부추진 일정

(가)



(나)

1) 세부	2) 세세부 3) (수행주체)	4) 연구개발 내용	5) 세부추진 계획 및 방법
6) 1	7) 1-1 세세부 8) (한국예술종합학교)	▪ 구조시스템별 특성 분석 연구: 개폐식 구조 포함	- 대공간 건축의 역사적 고찰 - 구조시스템 및 구조형식의 체계적 분류 - 개폐식 구조의 개폐유형 분류 - 대공간 건축개폐식구조 사례의 수집과 특성 조사 - 대공간 구조형식 및 지붕의 개폐형식에 따른 특성파악
	9) 1-2 세세부 10)(한국건설품질연구원)	▪ 볼 조인트 접합부 거동 특성 규명 및 상세 제안	11)- 볼 조인트 접합부 상세 문헌조사 12)- 비선형 유한용소해석을 통한 국부거동 예측 13)- 비선형 유한요소해석을 통한 영향인자 도출 14)- 변수해석을 통한 최적형상 개발 15)- 축소모형 구조성능 실험을 통한 접합부의 구조적 거동 규명 16)- 볼 조인트 접합부 설계식 및 상세 제안
	17)1-3 세세부 18)대림대학	▪ 구조시스템별 경제성 분석 연구	19)- 경제성 평가 지표 선정 20)- 구조시스템별 건축물 분석 21)- 각 구조 시스템별 구조적 특성 분석

22)세부	23)세부 24)(수행주체)	25)연구개발 내용	26)세부추진 계획 및 방법
27)2	28)2-1 세부 29)(세종대학교)	▪ 대공간 구조의 비선형해석 기법 개발	- 공간 골조구조에 대한 비선형 수치해석 모델 연구 - 콘크리트 쉘, 금속계 쉘 등 쉘 구조에 대한 비선형 수치해석 모델 연구 - 막 구조, 케이블 구조 등 연성구조에 대한 비선형 수치해석 모델 연구
	30)2-2 31)(타이가)	▪ 대공간 구조시스템의 구조안정 특성 조사 연구	- 쉘의 형태별 구조불안정 특성 조사 연구 - 쉘의 하중 및 경계조건에 따른 불안정 특성 연구 - 쉘형 구조물의 초기 불완전에 따른 민감도 특성 연구 - 쉘형 구조물의 구조불안정 설계에의 적용성 조사 및 분석 연구
	32)2-3 세부 33)(영남대학교)	▪ 대공간 구조의 형태별 지진거동 특성 조사 및 분석 연구	- 대공간 구조의 거시적 형상에 따른 지진거동 특성 - 대공간 구조의 세부 형상에 따른 지진거동 특성 - 대공간 구조의 구조시스템에 따른 지진거동 특성 - 대공간 구조의 형태에 따른 지진거동 특성의 계통적 분석 연구

가)

34)세부	35)세세부 36)(수행주체)	37)연구개발 내용	38)세부추진 계획 및 방법
39)3	40)3-2세세부 41)(두산산업개발(주))	▪ 대공간 구조의 Erection 공법 개발	- Erection 공법 국내외 기술동향 분석 - Erection 공법 국내외 사례조사 및 공법 적용 빈도 검토 - Erection 공법 가상 모델 개발 및 모형 제작 - Erection 공법 개발과 실무용 Erection 공법 선정 프로그램 및 매뉴얼 개발
	3-4세세부 (전북대학교)	(풍환경) ▪ 다양한 형태의 풍동모형제작을 위한 특성 연구 실시 ▪ 대공간 구조물의 진동특성 분석을 위한 장치개발 ▪ 진동모형에 대한 진동특성 실험기법 개발	- 국내외 문헌조사 - 케이블구조,막구조,스페이스 플레임 등 실제건물의 바람특성조사 - 대공간의 형태별 실제 동특성 조사 - 동특성 분석을 위한 해석방법 연구 - 대공간 구조물의 다양한 풍하중 및 풍응답 해석방법 고찰 - 대공간 형태별 풍하중과 풍응답 해석방법 연구
		(음환경) ▪ 대공간의 실내음향설계기술 개발	- 용도별 음향가변화 방안의 선정을 위한 평가모델의 구축 - 음향가변화 방안의 적용을 위한 평가모델의 제작 - 음향가변화 방안의 적용에 따른 물리적, 주관적 음향성능평가 - 최적음향설계방법 도출

가)

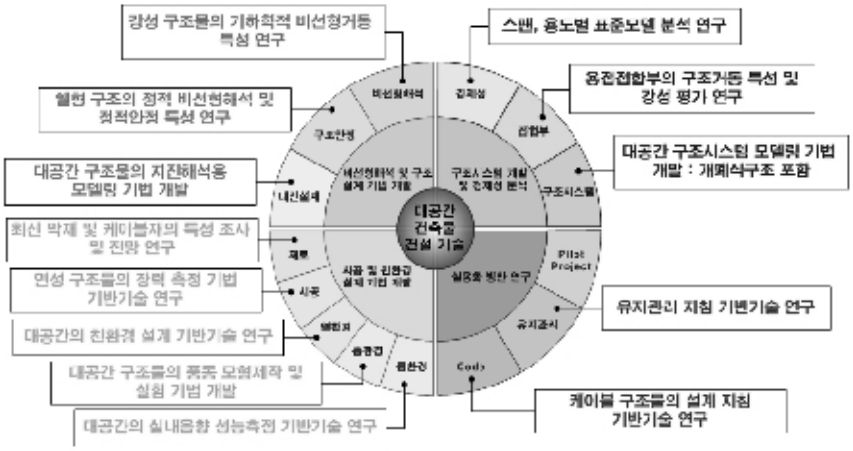
42)세부	43)세세부44)(수행주체)	45)연구개발내용	46)세부추진 계획 및 방법
47)4	48)4-1세세부49)((사)한국공간구조학회)	▪ code 분석	- 대공간 구조물 code 관한 국외자료 수집 및 분석 연구 - 일본 막구조 협회/건축학회 발간 문헌 조사 및 자료 수집 - 중국 대공간 관련 협회 발간 문헌 조사 및 자료 수집 - 유럽/미국 code 관련 문헌 조사 및 자료 수집 - 일본/중국 대공간 구조 관련 code 분석 - 유럽/미국 대공간 구조 관련 code 분석
	50)4-2세세부51)(한국기술교육대학교)	▪ 계측제어 시스템 기반 기술 개발	- 계측종류에 따른 항목별 프로세스 구축 - 계측시스템에 따른 계측 프로세스 구축 - 구조물의 이상거동 감지 프로세스 구축 - 구조물의 안정성 분석법 개발 - 실무 적용 및 시험 계측
	52)4-3세세부53)((	▪ Pilot Project 1 대공간 구조물 구조설계 절차서 제안	- 대공간 구조물 구조설계 절차서 생성 - 대공간 구조물 구조설계 평가 지표 작성 - Pilot Project 하부구조물 설계

	주)CS구조엔지니어링)		

가)

(5) 나. 2차년도 연구내용 및 세부추진 일정

(가)



(나)

1) 세부	2) 세부 3) (수행주체)	4) 연구개발 내용	5) 세부추진 계획 및 방법
6) 1	7) 1-1 세부 8) (한국예술종합학교)	▪ 구조시스템 모델링 기법개발 : 개폐식 구조 포함	9) - 대공간 구조의 모델링 적용 사례 조사 10)- 단계별 모델링의 체계적 유형 분류 11)- 구조시스템별 모델링 기법 구축 12)- 재료별 모델링 기법 구축 13)-기존 최적화 요소기술 및 적용성 분석 14)- 구조시스템 모델링을 위한 최저화 요소기술 개발방향 제시
	15)1-2 세부 16)(한국건설품질연구원)	▪ 용접접합부 구조거동특성 및 강성평가 연구	17)- 기존 접합부 문헌조사 및 분석 18)- 비선형 유한요소해석을 통한 국부거동 예측 및 영향인자 도출 19)- 접합부 성능평가를 위한 구조실험 20)- 개선된 용접접합부의 상세 제안
	21)1-3 세부 22)대림대학	▪ 스팬, 용도별 표준모델 분석연구	23)- 대공간 구조물의 공간 특성 분석 24)- 대공간 구조물의 구조 시스템별 스팬 특성 분석 25)- 사례분석을 통한 표준모델 제안 26)- 웹데이타베이스 구축

27)세부	28)세부 29)(수행주체)	30)연구개발 내용	31)세부추진 계획 및 방법
32)2	33)2-1 세부 34)(세종대학교)	▪ 이산계 강성 구조물의 기하학적 비선형 해석 기법 개발	- 스페이스트러스 및 프레임 해석 모델 개발 - Modified Riks 방법과 가속알고리즘을 결합한 비선형 해석 - 재료 비선형모델개발 및 해석 - 비탄성 비선형 모델개발 및 해석 - 동적해석 알고리즘 개발 - 비등방성 재료 스페이스프레임 해석모델 개발
	35)2-2 세부 36)(타이가)	▪ 쉘형 구조물의 정적 비선형 해석 및 정적안정 특성 연구	- 쉘형 구조물의 구조불안정 관련자료 및 문헌조사 - 쉘형 구조물의 비선형 운동방정식과 쉘 요소의 정적 정식화 - 쉘형 구조물의 정적 불안정 검토용 안정해석 알고리즘 - 쉘형 구조물의 고유좌굴모드에 따른 초기불완전 적용모델 개발 - 쉘형 구조물의 정적 구조불안정 특성 조사 및 분석
	37)2-3 세부 38)(영남대학교)	▪ 대공간 구조의 지진해석용 모델링 기법 개발	- 입력지진동-지반-공간구조에 대한 모델링 - 지진응답의 상호작용에 대한 모델링 - 공간구조에 적용가능한 등가정적해석의 모델링

가)

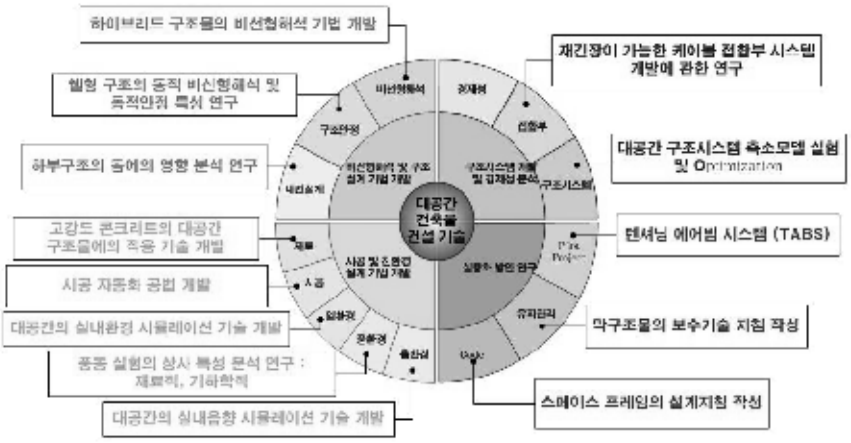
39)세부	40)세세부 41)(수행주체)	42)연구개발 내용	43)세부추진 계획 및 방법
44)3	45)3-2세세부 46)(두산건설(주))	▪ 시공 자동화 공법 개발	- 골조공사의 자동화 모델 개발 - Erection 시공자동화 모델 개발 - 골조공사의 자동화 공법 개발 - Erection 시공 자동화 공법을 개발하여 애니메이션 및 모형 제작·시연
	3-4세세부 (전북대학교)	(풍환경) ▪ 다양한 형태의 풍동모형제작을 위한 특성 연구 실시 ▪ 대공간 구조물의 진동특성 분석을 위한 장치개발 ▪ 진동모형에 대한 진동특성 실험기법 개'발	- 막,케이블,케이블등 다양한 형태의 풍동 모형제작 사례조사와 제작 - 대공간 구조시스템별 풍동실험 기법 조사 - 풍동실험 후 계측데이타의 분석 기법 정립 - 진동에 취한 구조시스템을 선정 - 진동에 특성을 분석할 수 있는 축소 모형 제작 기법 연구 - 축소 진동모형 계측 기법 연구 - 동특성(고유진동수,모우드 형상) 추출기법 연구
		(음환경) ▪ 대공간의 실내음향성능 측정기술개발	- 마이크 입력부 및 송신기의 선정 및 조합 - 4개의 송신기의 데이터를 입력 받는 수신기 제작 - 후처리 및 분석용 소프트웨어 제작 - 4가지 구성요소의 Integration 및 field test를 통해 성능평가 및 Bug Fixing을 통해 개발 완료

가)

	47)세부	48)세세부49)(수행주체)	50)연구개발내용	51)세부추진 계획 및 방법
가)	52)4	53)4-1세세부54)((사)한국공간구조학회)	▪ 설계 지침서 작성	- 케이블 구조 관련 국내 자료수집/분석 - 케이블 구조물의 설계 지침 기반기술 연구 - 케이블구조 설계기준 및 해설 초안 작성
		55)4-2세세부56)(한국기술교육대학교)	▪ 대변형을 고려한 제어계측 시스템 개발	- FBG센서를 이용한 계측 시스템 및 패키지 기법 개발 - 손상도 검증용 무인 로봇개발과 RFID센서를 사용한 막구조물의 모니터링 - 계측시스템의 정밀도 검증 및 유지관리 지침서 작성
		57)4-3세세부58)((주)CS구조엔지니어링)	▪ Pilot Project 2 Single Layer Dome 구조	- 선정된 프로젝트 대상으로 Space Frmae : Single Layer 구조 시스템 설계 - Single Layer의 구조 불안정현상 해결을 위한 구조해석 및 설계, 실험 병행 - 단층 래티스 돔 실험결과 분석

(6) 다. 3차년도 연구내용 및 세부추진 일정

(가)



(나)

(다)

1) 세부	2) 세세부 3) (수행주체)	4) 연구개발 내용	5) 세부추진 계획 및 방법
6) 1	7) 1-1 세세부 8) (경상대학교)	▪ 대공간 구조시스템 축소모델 실험 및 대공간구조물의 Size/Shape Optimization 기법	9) - 구조시스템별 축소모델 실험의 특성조사 10)- 축소모델 실험의 적용 방식 분석 11)- 축소모델 실험의 유형 분류 12)- 축소모델 실험의 정식화 13)- 크기/형상최적화를 위한 정식화 방안제시 14)- 대공간 구조시스템의 크기/형상 최적화 15)기법에 대한 검증
	16)1-2 세세부 17)(재)한국건설품질연구원	▪ 재긴장이 가능한 케이블 접합부 시스템 개발	18)- 케이블 접합부 상세 및 역학모델 사례조사 19)- 전문가 자문을 통한 기술적 부분 보완 20)- 접합부 시스템 상세설계 21)- 안정성 예측 및 영향인자 도출을 위한 22) 유한요소 해석 23)- 시제품 모형을 통한 거동예측 24)- 실험을 통한 시스템 성능 평가

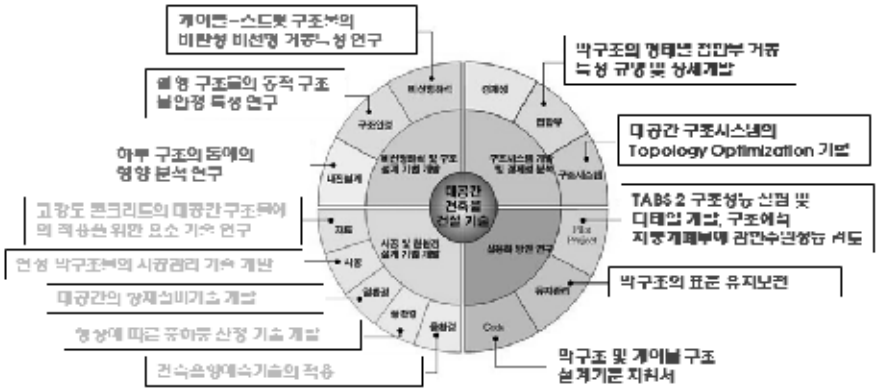
25)세부	26)세부 27)(수행주체)	28)연구개발 내용	29)세부추진 계획 및 방법
30)2	31)2-1세부 32)(세종대학교)	▪ 하이브리드 구조물의 비탄성 비선형 거동 연구	- 텐세그리티 및 언더텐션 구조의 모델링 기법 개발 - 텐세그리티 및 언더텐션 구조의 정적 비탄성 비선형 해석 - 텐세그리티 및 언더텐션 구조의 동적 비탄성 비선형 해석
	33)2-2세부 34)(타이가)	▪ 쉘형 구조물의 동적 구조불안정 특성 연구	- 쉘형 구조불안정 관련 자료 및 문헌 조사 - 비선형 쉘 요소 동적 정식화 - 쉘형 구조물의 동적 불안정 검토용 알고리즘 개발 - 쉘형 구조물의 동적 구조불안정 특성 조사 및 분석
	35)2-3세부 36)(영남대학교)	▪ 하부구조의 돔에의 영향분석 연구	- 아치, 배럴볼트, 돔형 공간구조물에 대한 하부구조의 영향고찰 - 하부구조를 고려한 공간구조물에 대한 정적지진해석 모델링기법 - 공간구조물의 하부구조 영향 고찰을 위한 진동대 실험 - 케이블 장력 추정 실험을 통한 장력 추정식 보완

37)세부	38)세세부39)(수행주체)	40)연구개발내용	41)세부추진 계획 및 방법
42)3	43)3-2세세부44)(두산건설(주))	▪ 시공 자동화 공법 개발	- 골조공사의 자동화 모델 개발 - Erection 시공자동화 모델 개발 - 골조공사의 자동화 공법 개발 - Erection 시공 자동화 공법을 개발하여 애니메이션 및 모형 제작·시연
	3-4세세부(전북대학교)	(풍환경) ▪ 다양한 대공간 구조물에 대한 풍동실험 모형 제작을 위한 상사법칙 연구 ▪ 대공간 구조물의 풍진동 모형제작를 위한 상사법칙 연구 ▪ 태양광 패널을 적용한 대공간구조물의 구조성능 확보기술	- 축소모형제작을 위한 재료 및 기하학적 연구 실시 - 재료별 특성 분석을 통하여 대공간 구조물의 축소모형 제작기법 확립 - 정적풍하중을 구하기 위한 풍동실험실시 - 풍하중 해석기법을 이용한 풍응답 분석 실시 - 막구조 시스템의 풍진동 특성을 반영한 모형제작 기법연구 - 태양광 패널 적용 대공간 구조물 사례조사 - 대공간 구조물의 부위별 태양광 적용기술 - 태양광패널과 대공간 구조 접합 상세기술
		45)(음환경) ▪ 대공간의 실내음향 시뮬레이션 기술개발	- FDTD방법의 음파의 파동방정식에 적용하는 알고리즘 개발 - 열린공간 음향 시뮬레이션을 위한 흡수경계조건의 개발 - 흡음계수가 주어진 반사판에 대한 경계조건 개발 - 임의 위치에서의 임펄스 리스펀스 함수 계산 방법 개발

46)세부	47)세세부48)(수행주체)	49)연구개발내용	50)세부추진 계획 및 방법
51)4	52)4-1세세부53)((사)한국공간구조학회)	▪ 설계 지침서 작성	- 스페이스 프레임 자료 수집 및 작성 - 케이블구조 설계기준 및 해설 작성완료 및 발간 - 막구조 설계 지침서 초안 작성
	54)4-2세세부55)(한국기술교육대학교)	▪ 막구조 건축물 보수기술 지침(안) 작성	- 케이블 장력측정 및 무인모니터링 기술 - 막재의 열화요인 및 진단 방법 개발 - 기핵/성장에 의한 막 열화성능의 진단 - 막소재의 진단결과 및 판정기준 검증
	56)4-3세세부57)((주)CS구조엔지니어링)	▪ Pilot Project 3 텐셔닝 에어빔 시스템 I (TABSI)	- 공기막+텐셔닝 시스템 구조설계 - 공기막+텐셔닝 시스템 비선형 해석 - 공기막+텐셔닝 시스템 실험체 제작/실험 수행 - 실험결과 정리 및 분석/유관성 분석 - 공기막+텐셔닝 시스템에 대한 설계 - 요소기술 정리 및 보고서 작성

(7) 라. 4차년도 연구내용 및 세부추진 일정

(가)



(나)

(다)

1) 세부	2) 세세부 3) (수행주체)	4) 연구개발 내용	5) 세부추진 계획 및 방법
6) 1	7) 1-1 세세부 8) (경상대학교)	▪ 대공간 구조시스템 위상최적화 기법 연구	9) - 위상최적화기법 비교연구 10)- 대공간구조시스템의 효율적인 11) 위상최적화를 위한 재료모델 제시 12)- 대공간 구조시스템의 위상최적화를 13) 위한 정식화 제시 14)- 구조성능 및 경제성을 중심으로 한 15) 구조시스템의 최적위상 대안 평가 및 16) 결과 제시
	17)1-2 세세부 18)(재)한국건설품질연구원	▪ 막구조의 형태별 접합부 거동 특성 연구	- 유압식 케이블 재긴장 시스템의 최적화 - 케이블 장력 무선 모니터링 시스템 개발 - 휴대용 유압식 핸드펌프 모델 개발 - 파일롯 프로젝트의 지붕구조에 케이블 구조의 적용을 위한 개발된 재인장 접합소켓의 적용방안 제시 - 막재의 종류별 접합 기법 조사 - 막재의 지지 구조물과 접합 기법 조사 - 막 접합부의 파손사례 조사 - 막 접합부의 해석 및 분석 - 파일롯 프로젝트의 대안 ALT1, ALT2, ALT3에 대한 경제성 분석 및 타당성 제시

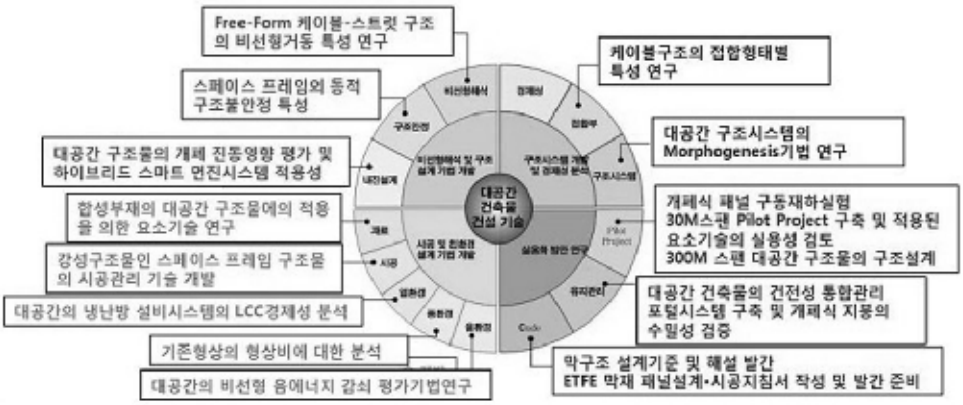
19)세부	20)세부21)(수행주체)	22)연구개발 내용	23)세부추진 계획 및 방법
24)2	25)2-1세부26)(세종대학교)	▪ 케이블-스트럿 구조물의 비탄성 비선형 거동 특성 연구	- 케이블-스트럿 구조의 모델링 기법 - 케이블-스트럿 구조의 형상해석 - 케이블-스트럿 구조의 비탄성 비선형 해석
	27)2-2세부28)(세명대학교)	▪ 스페이스 프레임의 정적 구조불안정 특성	- 스페이스 프레임의 정적 구조불안정 관련자료 및 문헌조사 - 비선형 선부재요소 정적 정식화 - 스페이스 프레임의 정적 구조불안정 검토용 알고리즘 개발 - 스페이스 프레임의 정적 구조불안정 특성 조사 및 분석
	29)2-3세부30)(영남대학교)	▪ 대공간 구조물의 진동제어 기법 및 시스템 개발	- 기초면진 및 지붕면진 기법의 효용성 검토 - 수동 및 준능동 제어장치의 대공간 구조물 적용방안 - 수동 및 준능동 제어장치의 진동제어성능 고찰 - 대공간 구조물 진동제어장치의 최적화 기법개발

31)세부	32)세세부33)(수행주체)	34)연구개발내용	35)세부추진 계획 및 방법
36)3	37)3-2세세부38)(경동대학교)	▪ 연성 막구조물의 시공관리 기술 개발	- 연성 막구조물의 요소시공기술 개발 - 연성 막구조물의 erection공법 모형 및 동영상물 제작 - 연성 막구조물의 시공지침서 개발
	3-4세세부 (전북대학교) 39)3-4세세부40)(전북대학교)	(풍환경) ▪ 다양한 형상을 갖는 막구조물의 풍하중평가 방법분석 ▪ 다양한 형상을 갖는 막구조물의 풍동 실험 실시 ▪ 태양광 패널을 이용한 대공간 구조설계 계획	- saddle형태의 막구조물 풍응답변위를 계측하여 분석하였다 - 하중의 크기별 위치별 풍응답변위계측 - 태양광 패널이 적용된 해외 대공간 구조물의 상세 계획설계안 분석 - 태양광 패널이 적용된 돔 구조물의 구조적 특징 분석 - 태양광 패널이 적용된 국내 대공간 구조물의 기본 계획설계안 제시
		(음환경) ▪ 대공간의 음향설비 제어기술 개발	- 대공간에 적용 가능한 음향 증폭시스템의 종류 및 설치방법 연구 - 폐쇄형과 개폐형 공간에의 적용성 검토 - 물리적 성능 및 적용성 검토 - 음향증폭시스템의 주관적인 평가 및 각 공간에 적절한 최적음향시스템 설계안 제시

41)세부	42)세세부43)(수행주체)	44)연구개발내용	45)세부추진 계획 및 방법
46)4	47)4-1세세부48)((사)한국공간구조학회)	▪ 설계 지침서 작성	- 막구조 설계기준 및 해설 작성 - 막구조 설계기준 및 해설 발간 준비
	49)4-2세세부50)(한국기술교육대학교)	▪ 대공간 구조물의 유지관리 및 보수기술 지침(안) 작성	- 막재료의 기핵실험, 화재실험 수행. - ETFE 막재를 중심으로, 기핵실험 전후의 내구성 테스트 실시 - ETFE 막재의 인장강도 특성 데이터를 확보하여 재료물성 검증 - 화재실험 결과, 난연성에 관한 데이터를 확보 및 구조물 반영 자료 도출
	51)4-3세세부52)((주)CS구조엔지니어	▪ Pilot Project 4 텐셔닝 에어빔 시스템 Ⅱ (TABS Ⅱ)+Pilot Project 설계	- TABSⅡ 구조성능 실험 및 디테일 개발, 구조해석 - 30M Pilot Project 실시설계 - 300M 스팬 대공간 구조물 기본설계 (탄성설계) - Pilot Project 구축계획서 작성

(8) 마. 5차년도 연구내용 및 세부추진 일정

(가)



(나)

(다)

1) 세부	2) 세부 3) (수행주체)	4) 연구개발 내용	5) 세부추진 계획 및 방법
6) 1	7) 1-1 세부 8) (경상대학교)	▪ 대공간 구조시스템의 morphogenesis기법연구	9) - Morphogenesis모델 분석 10)- GA와 morphogenesis의 연계를 11) 통한 구조최적화 방안제시 12)- 위상최적화기법과 morphogenesis의 13) 연계를 통한 구조최적화방안제시 14)- FDM과 연계된 morphogenesis
	15)1-2 세부 16)(재)한국건설품질연구원	▪ 케이블 구조의 형태별 접합부 특성 연구	- 케이블 접합부의 사례분석 - 케이블 초기 긴장이 가능한 케이블 접합부 개발 - 케이블 네트구조의 장력특성 연구 - 원사가 다른 막재의 특성 연구

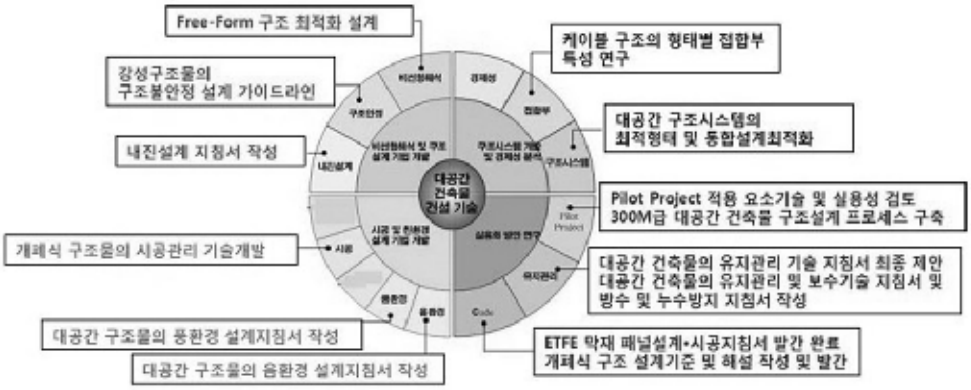
17)세부	18)세부19)(수행주체)	20)연구개발내용	21)세부추진 계획 및 방법
22)2	23)2-1세부24)(세종대학교)	▪ Free form 케이블-스트럿 구조물의 비선형거동 특성연구	- 유전알고리즘을 이용한 트러스의 구조최적화 - 하중법을 이용한 핀-조인트 구조물 해석 및 형상탐색 - Free from 케이블-스트럿 구조생성 - 내력밀도법을 이용한 불규칙적인 텐세그리티 구조물의 형상탐색
	25)2-2세부26)(세명대학교)	▪ 스페이스 프레임의 동적 구조불안정 특성 연구	- 스페이스 프레임의 동적 구조불안정 관련자료 및 문헌조사 - 비선형 선부재요소 동적 정식화 - 스페이스 프레임의 동적 구조불안정 검토용 알고리즘 개발 - 스페이스 프레임의 동적 구조불안정 특성 조사 및 분석
	27)2-3세부28)(영남대학교)	▪ 대공간 구조물의 개폐 진동영향 평가 및 하이브리드 스마트 면진시스템 적용성	- 지붕 개폐 및 지진 하중에 의한 파일럿 프로젝트 대상구조물의 진동영향 및 사용성 평가 - 스마트 진동제어장치 및 수동 면진장치를 복합적으로 활용한 하이브리드 스마트 면진시스템의 대공간 구조물에 적용 - 대공간구조물에 적용 가능한 하이브리드 스마트 면진시스템의 뉴로퍼지모델 및 적응형 스마트 제어 알고리즘 개발 - 대공간구조물에 대한 하이브리드 스마트 면진제어시스템의 진동제어 성능 및 안전성 평가

29)세부	30)세세부31)(수행주체)	32)연구개발내용	33)세부추진 계획 및 방법
34)3	10.3-2 세세부 11.(경동대학교)	▪ 강성 구조물의 시공관리 기술 개발	- 스페이스 프레임 구조시스템 분석 - 접합부 시공관리 기술 검토 - 접합부 시공상태 및 시공조건에 따른 안정성 검토 - Erection공법 기술 조사 및 요소기술개발 - 스페이스 프레임 구조물의 시공지침서 개발
	3-4세세부 (전북대학교)	(풍환경) ▪ 다양한 형상별 적용을 위한 대공간 구조물의 출입문의 개폐율에 따른 지붕재의 풍하중 특성에 대한 연구 ▪ 풍동실험기법을 이용한 공간구조물의 내압과 외압의 특성을 알아보기 위한 풍압실험제작과 풍동실험을 위한 평가 모델 개발 ▪ 태양광 패널을 이용한 대공간 구조설계계획	- 국내외 문헌조사 - 형태별 대공간 구조물의 출입문 개폐율에 따른 내압계수의 변동에 대해서 알수 있었다. - 대공간 구조물의 출입문 개폐율 특성에 대한 풍압계수 특성에 대해서 알수 있었다. - 대공간의 형상비에 따른 풍압계수의 특성에 대해서 알수 있었다. - 태양광 패널이 적용된 해외 대공간 구조물의 상세 계획설계안 분석 - 태양광 패널이 적용된 돔 구조물의 구조적 특징 분석 - 태양광 패널이 적용된 국내 대공간 구조물의 기본 계획설계안 제시
		(음환경) ▪ 대공간의 비선형 음에너지 감쇠 평가기법연구	- 기존방법(Bayesian method)의 해석방법연구 - 평가모델구축 (시뮬레이션 및 축소모형연구) - 청취평가 - TN의 가중치 개발

1) 세부	2) 세세부 3) (수행주체)	4) 연구개발 내용	5) 세부추진 계획 및 방법
6) 4	7) 4-1 세세부 8) ((사)한국공간구조학회)	▪ 설계 지침서 작성	- 막구조 설계기준 및 해설 작성 완료 및 발간 - ETFE 막재 패널 시공에 대한 설계지침 작성 및 발간준비
	9) 4-2 세세부 10)(한국기술교육대학교)	▪ 무선모니터링 매뉴얼 및 방수, 누수방지 기술 개발	- 실시간 센서계측정보 가시화 기능 및 센서정보 관리 기능 개발 - 센서계측정보 통계 및 이력조회 기능 및 가시경보 모듈 개발 - 대공간 건축물 건전성 관리 PDA Interface 개발 - 무인관리시스템을 통한 대 공간 건축물의 유지관리 통합기능 제공
	11)4-3 세세부 12)((주)CS구조엔지니어	▪ Pilot Project 5 개 폐식 패널 구동재하실험+Pilot Project 시공	- 개폐식 패널 구동 재하 실험 - Erection 실험데이터 분석 및 실험결과 고찰 - 30M 스팬 Pilot Project 시공 및 적용된 요소기술의 실용성 검토 - 300M 스팬 대공간 구조물의 구조설계 (Schematic Design)

(1) 바. 6차년도 연구내용 및 세부추진 일정

(가)



(나)

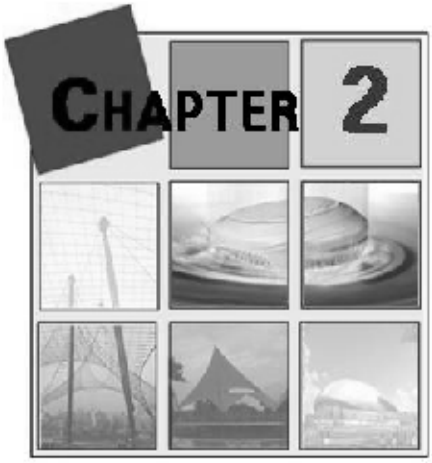
(다)

1) 세부	2) 세세부 3) (수행주체)	4) 연구개발 내용	5) 세부추진 계획 및 방법
6) 1	7) 1-1 세세부 8) (경상대학교)	▪ 대공간구조시스템의 최적형태 및 통합설계최적화 기법 연구	9) - FDM과 연계된 Morphogenesis(3D) 10)- 최적형태 자동생성기법 연구 11)- 최적형태 자동생성기법 연구 12)- 통합설계 최적화 기법
	13)1-2 세세부 14)(재)한국건설품질연구원	▪ 케이블 장력조절시스템 실용화 연구	- 초기긴장 케이블 접합부 성능 및 용량의 최적화 및 실용화 연구 - 다중 동시 긴장을 위한 재긴장 시스템 연구 - 케이블 구조 접합부에 대한 실험 - 연성 구조(막 및 케이블 구조) 접합부 실험

15)세부	16)세부17)(수행주체)	18)연구개발내용	19)세부추진 계획 및 방법
20)2	21)2-1세부22)(세종대학교)	▪ 대공간 구조물의 비선형 해석 가이드라인	- 스페이스 트러스 해석 가이드라인 - 언더텐션 해석 가이드라인 - 텐세그리티 해석 가이드라인
	23)2-2세부24)(세명대학교)	▪ 구조불안정 설계 가이드라인	- 휨을 고려한 비선형 강성방정식의 정식화 - 휨을 고려한 스페이스 프레임의 구조불안정 검토용 비선형 프로그램 개발 - 휨에 의한 구조불안정 특성 조사 및 분석 - 강성 구조물의 구조불안정 설계 가이드라인 작성
	25)2-3세부26)(영남대학교)	▪ 내진설계 지침서 작성	- 대공간 구조물 내진설계 기준 및 지침서 자료 조사/분석 - 자료 분석을 통한 대공간구조물의 내진설계 지침서(안) 작성 - 대공간 구조물 내진설계 지침서에 따른 대공간구조물의 내진설계 사례

27)세부	28)세세부 29)(수행주체)	30)연구개발 내용	31)세부추진 계획 및 방법
32)3	33)3-2세세부 34)(경북대학교)	▪ 개폐식 구조물의 시공관리 기술 개발	- 개폐식 구조시스템 분석 - 개폐식 구조시스템 별 시공성 검토 - 개폐식 구조물의 시공 지침서 개발
	3-4세세부 (전북대학교)	(풍환경) ▪ 대공간 단면과 형상별 풍하중 및 풍진동 지침서 작성 ▪ 대공간 지붕의 디지털 미디어 시스템 구축	- 대공간 구조물의 위치별 풍응답 저감을 위한 실험실시 - 다양한 형상별 풍진동을 위한 동적특성계측방법 지침서 작성 - 내풍안전설계를 위한 다양한 풍하중평가요소별 지침서 - 대공간 지붕의 인터렉티브 디지털 미디어 시스템 구축 - 국내·외 활용된 인터렉티브 디지털 미디어 사례분석 - 구조물에 적합한 인터렉티브 디지털미디어 시스템 분석 및 대공간 지붕에 적합한 인터페이스 개발
	35)3-4세세부 36)(전북대학교)	(음환경) ▪ 음환경 최적설계지침작성	- 적정음향계획 및 음향성능목표제시 - 단계별 도구의 활용방안 제시 - 음향적 결함에 대한 대응방안 제시

37)세부	38)세세부39)(수행주체)	40)연구개발내용	41)세부추진 계획 및 방법
42)4	43)4-1세세부44)((사)한국공간구조학회)	▪ 설계 지침서 작성	- ETFE 막재 패널설계 및 시공지침서 발간 완료 - 개폐식 구조의 설계기준 및 해설 작성 및 발간
	45)4-2세세부46)(한국기술교육대학교)	▪ 대공간 건축물 통합유지관리 지침서 작성	- 막구조 건축물 유지관리 및 진단 지침 완료 및 통합 - 막체의 보수기술 지침 및 강제부재의 부수기술 지침 통합 작성 - 공기막구조의 설비 및 유지관리 지침 요약 및 통합 - 우수차단장치 및 수밀성능 유지관리 지침 정리 및 통합
	47)4-3세세부48)((주)CS구조엔지니어	▪ Pilot Project 6 실용화 요소기술 검증+대공간 구조물 구조설계 프로세스 구축	- 실용화 요소기술 검증 에어빔 압력 상시 측정 케이블 장력 상시 모니터링 결과의 비교, 분석 에어빔 접합부 성능 실험 - 대공간 구조물 구조설계 프로세스 구축 - 텐셔닝 에어빔 시스템(TABS) 신기술 지정/신청



국내·외 기술개발 현황

CHAPTER 2

가. 2.1 국내외 기술동향

가) 표 2.1 국외현황 및 국내 수준

1) 세부산업 또는 2) 기술 내용		3) 국외 현황 4) (주요선진국 및 기업명)	5) 국내 기술 수준	
			6) 2006년 당시 7) (연구단 발족 당시)	8) 2011년 현재 9) (연구완료 시점)
10)1세부	11)구조시스템	- 일본 Takenaka Co, - 독일 Schleich - Bergman Co,	- 초기 계획단계의 기법 개발 미비 - 국외대비 20%	- 국외대비 60~80% 이상 - 연구결과 현장 보급 시 격차 감소
	12)접합부	- 일본 Takenaka Co, (접합부 설계 및 요소기술 세계최고 수준) - 독일 KOHC - (막구조 시공 및 연구에 최고 수준)	- 대공간 구조의 접합부 요소기술 미비 - 국외대비 20%	- 연구결과의 특허 등록 및 실용화 연구 진행 - 국외대비 70%
	13)2제성분석	- 미국, 일본 - ARUP	- 도입단계 (20%)	- 성숙단계 (70%)
14)2세부	15)비선형	- 중국 : 막구조 관련 코드 작성	- 선진국 대비 40%	- 선진국 대비 90%

	해석	및 코드화 - 일본 : 대공간 구조 관련 코드 완비, 케이블/ 막구조 관련 규준 및 유지관리 지침 마련	- 기술격차 7년 - 성숙단계	- 기술격차 2년 - 경쟁단계
	16)구조안정	- 대공간 구조물 기술 축척으로 미국->일본->한국 순으로 주도할 것으로 판단.	- 2003년 월드컵 경기 개최로 인해 10개의 경기장이 신축 되었지만 대부분 외국 기술력임.	- 최근 착공중에 있는 서남권 돔 야구장에 적용 하여 국내 기술력을 향상 시킴.
	17)시진설계	- 1990년대에 들어와 지간 200m 전후의 지붕 덮인 대공간 건축물 건립 - Erection 공법에 있어서 많은 Know-how를 가지고 있음	- 국내 : 스팬 200~300m의 지붕 덮인 대공간 건축물 시공사례가 거의 없음 - Erection 공	- 국내의 기술수준 : 선진국 대비 약 80% 정도 - 선진국과의 거의 같은 수준

			적사찾볼없 법용례아수음	

18)세부산업 또는 19)기술 내용		20)국외 현황 21)(주요선진국 및 기업명)	22)국내 기술 수준	
			23)2006년 당시 24)(연구단 발족 당시)	25)2011년 현재 26)(연구 완료 시점)
27)3세부	28)시공	29)- 일본 및 미국 30)- 다케다 건설 31)- 카지마 건설 32)- 토비시마 건설 33)- 클라크 건설 34)- 헌징거 건설	- 개념 정립의 단계	- 기업화 단계
	35)환경	- RWDI(캐나타) - CPP(미국) - 카지마건설(일본) - BLWT(캐나타)	- 선진국 대비 60%	- 선진국대비 90%
	36)환경	**37)건축음향 설계기술** - 미국, 영국, 일본 등이 주도하고 있으며 미국의 경우 Altec, Kirkgaard, Acentech 등, 영국의 경우 Arup, 그리고 일	- 대형돔 구장(300m 이상)의 경우 건축음향 설계경험이 전무하며, 연구 및 기술수	- 독자적인 건축음향 설계가 가능함.

		본의 경우 Nagata음향과 Takenaka 등의 전문 컨설팅업체들이 주도하고 있음	준은 연구의 초기단계임.	
		38)음향측정 시스템 - 덴마크의 B&K가 가장 앞선 기술의 갖고 있는 것으로 평가되며, 무선음향측정시스템의 경우 Norsonic 등의 대형업체와 기타 중소규모업체들이 있음	- 국내에는 무선측정시스템 뿐만 아니라 유선의 실내음향측정시스템을 개발한 사례가 없으며, 대부분 수입에 의존함.	- 본 연구과제 수행결과, 무선음향측정시스템 및 후처리용 소프트웨어의 개발을 통해 현재 시제품수준의 기술개발이 완료됨.
		39)컴퓨터시뮬레이션 - 덴마크, 스웨덴, 이탈리아 등의 유럽국가들이 가장 앞선 기술을 보유함. 관련업체로는 ODEON, Catt-Acoustics, Ramsette	- 연구수준의 ray-tracing model이 개발된 상태이며, 상용화가 가능한 실내음향시뮬	- FDTD에 의한 실내음향시뮬레이션 기술의 기반을 구축한 상태로서 후속연구가 뒷받침된다면 선진국수준의 기

		등이 있음.	레이션 프로그램은 전무함.	술확보가 가능함.

40)세부산업 또는 41)기술 내용		42)국외 현황 43)(주요선진국 및 기업명)	44)국내 기술 수준	
			45)2006년 당시 46)(연구단 발족 당시)	47)2011년 현재 48)(연구 완료 시점)
49)4세부	50)Code	- 일본 건축학회 - 일본막구조협회 - 중국 토목학회 - 중국 막구조협회 - 유럽 TENSI-Net	- 대공간 구조 관련 기준 및 설계가이드 전무하였음	- 케이블, 막구조 기준(안) - ETFE 설계가이드(안) - 개폐식구조 설계가이드(안) 등이 완성 되어 있음.
	51)유지관리	52)- 일본 건축학회 - 일본막구조협회	- 대공간 구조 관련 유지관리 및 계측시스템에 대한 설계가이드 전무하였음	- 통합 유지관리 지침서 작성(막구조 건축물 유지관리 및 진단 지침, 막체의 보수기술 지침, 제부재의 부수기술 지침, 공기막구조의 설비 및 유지관리 지침, 우수차단장치 및 수밀성능 유지관리 지침) - 상시무인센서유지관리 시스템 개발
	53)Pilot Project	- 공기막을 이용한 TABS에 대한 기술개발 및 적극 활용 (EMPA 등)	- 국내의 자체기반 기술로 막과 케이블 구조와	- 실제 Pilot Project를 국내 기술로 설계 및 시공함으

		- 막구조 및 케이블 구조 등 연성구조물에 관한 설계 및 시공 능력이 뛰어남 (Mark Marx, Strarch International, KOCH, Schlaich-Bergman) - 대공간 구조물 시공 능력이 뛰어남 (Dasei 건설, Takenaka Co., (주) 타이요코코	같은 연성구조물의 설계 및 시공 사례가 미비하였음 - 공기막 구조 중 TABS와 같은 이중막 구조에 대한 연구는 전무함 - 대공간 구조물에 적용되는 핵심 요소기술에 대한 정립이 되어 있지 않았음	로써 데이터 베이스를 구축하였으며 이를 실무자에게 제공 가능 - 개폐식 지붕구조, 가설공법, TABS 등 대공간 구조물에 적용되는 핵심 요소기술의 적용성을 검토함으로써 향후 대공간 구조물 건설 시 국내 기술로서 즉각 적용 가능

나. 2.2 국내외 연구동향

가) 표 2.2 국내외 연구동향

1)	2) 내 용
3) 1세부	4) 선진국의 경우 쉘 구조의 발전과 보급을 시작으로 연성 케이블과 막을 이용한 다양한 연성구조에 대한 탐구가 이루어져왔다. 또한 구조시스템의 경량화와 구조형식의 혼합으로 하이브리드구조가 시도되었으며 특히 기존의 모델지향적인 설계에서 컴퓨터를 이용한 수치 실험적 설계최적화에 바탕을 둔 구조시스템 설계플랫폼을 가지게 되었다. 국내에서도 구조시스템의 설계를 위해서 기하학적인 모델을 형성하고 해석과 최적화를 동시에 수행하는 통합설계최적화에 대한 연구를 진행되고 있으나 구조시스템 및 경제성 분석에 대한 연구가 부족하고 관련 데이터베이스 구축 또한 매우 미흡한 실정이다. 또한 일본, 독일 등의 우리 보다 앞선 기술을 보유한 국가에서는 접합부 설계 및 요소기술 연구가 활발히 진행되며 실험설비 또한 매우 우수하다. 하지만 국내의 경우 대공간 구조 특히 연성구조물인 케이블 및 막구조 접합부의 연구가 시작단계이며 발표되는 연구논문도 거의 없다.
5) 2세부	쉘형 구조물의 구조불안정에 대한 국외 연구동향을 살펴보면, 2001년에는 Th. Bulenda와 J. Knippers에 의해 초기형상의 불완전을 고려한 거동과 민감성이 연구되었고, 불안정 거동에 미치는 파라미터가 거론되었다. 한편 국내의 연구동향은 2004년에는 김승덕이 얕은 정현형 아치 구조물의 불안정 현상을 파악하기 위하여 비선형 방정식을 유도 분석하여 형상 파라미터 H의 변화에 따른 정적 해석을 하였다. 2006년에 문혜수, 안상길, 김승덕 등은 초기형상불완전 및 절점강성에 따른 좌굴하중 특성에 관한 연구가 이루어졌다. 2008년 김승덕이 스페이스 프레임 구조물의 하중 및 경계조건에 따른 불안정 거동과 2009년 라이즈 스팬 및 초기형상불완전성에 따른 분기좌굴 특성에 관한 연구가 이루어졌다. 쉘·공간구조에서는 실용적인 면진·제진기법의 연구가 비교적 많지 않지만, 형상기억합금, 압전소자나 전기점성유체(ER유체)등을 이용한 제진 기술연구 예로서 다음의 것들이 있다. 신쿠(新宮)등은 형상기억합금 용수철로서 가변강성에 의한 면진특성에 대한 실험적인 검토 및 효율적인 형상기억합금 구성과 가연·냉각방법에 대한 연구를 하였다. 아오키(青木)등은 형상기억합금을 센서와

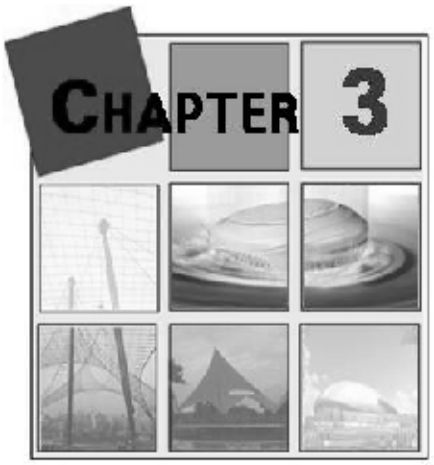
	액츄에이터로서 이용하여 경량구조물의 면진·제진을 가능하게 하는 시스템의 구축을 하여, 구조물의 진동제어에 대한 검토를 하였다. ValoorLł Tzou는 압전 세라믹스 액츄에이터를 이용하여서 진동제어를 행하여, 복수의 액츄에이터를 최적 배치하는 방법에 대해서도 검증하였다. 또한 카나하라(金原), 카게야마(影山)등은 광섬유 속도 센서를 재료 표면에 길게 붙이고, 압전 폴리머(PVDF) 필름을 액츄에이터로서 진동제어를 수행하여 진동제어의 효과를 검증하였다. 더욱이 R.L.Clark의 저서에서는 센서로서 압전 폴리머(PVDF)를, 액츄에이터로서 압전 세라믹스를 이용하여 진동제어의 효율성을 증명하였으며, 사쿠라이(桜井)등은 적층형 압전 쉘 요소에 의한 진동 제어 시뮬레이션을 수행하였다. 이 외에도 다양한 연구가 진행되고 있다.
6) 3세부	7) 일본의 경우 1978년에서부터 일본의 동경대학 생산기술연구소와 일본 환경청 국립공해연구소의 공동연구가 시작되면서 풍동을 이용한 돔형 야구경기장내의 풍속분포에 대한 연구가 진행되었다. 이러한 연구는 일반적으로 모형을 대상으로 하고 있다. 1980년대에 들어서 통풍을 이용한 돔경기장 내의 열환경 개선에 대한 연구가 진행되었다. 2000년도에는 동경대학 생산기술연구소와 日建設計와의 공동연구로 야마구치현에 건설될 돔경기장을 대상으로 통풍에 의한 자연 환기량과 실내 발열부하의 효과적 제어기술들이 개발되었다. 국내에서는 CFD를 이용하여 실내수영장, 경륜돔경기장 등의 환기성능 및 냉난방 공조방식의 검토가 이루어 졌다. 그러나 실제 현장실측 등이 부족하여 CFD 해석 결과에 대한 신빙성이 결여되어 있다. 현장실측은 아트리움 공간을 대상으로 몇몇이 이루어지는 실정이다. 8) 현재, 미국이나 유럽, 일본 등 선진국에서는 대공간구조물에 대한 많은 연구와 실험이 수행되었으며, 실제로 많은 대공간구조물이 건설되었다. 그러나 많은 연구가 수행되고 있음에도 대공간구조물에 대한 총체적 이론이 정립되어 있지 못하며, 부분적인 연구 성과에 대한 결과 보고서가 발표되고 있다. 대공간 구조물의 발전 단계를 볼 때 지금 세계적 수준은 '제 4세대 소프트지향형' 세대에 접어들었지만 현재 우리나라는 '제 2세대 하드지향형'에 머물고 있는 실정이며 그 구조물의 수적인 면에서도 미약한 수준이다. 결과적으로 외국에 기술을 의존할 수밖에 없으며, 앞에서 서술한 것처럼 수요가 급증하고 있지만 경제적으로 어려움을

	겪는 이 시점에서도 외화를 낭비할 수밖에 없는 실정이다. 대공간 구조물은 20세기 중반에 신재료 및 신기술의 개발과 함께 비약적인 발전을 시작했으며, 최근 대공간 구조물은 보다 환경 친화적 구조물로 발전하고 있다. 국내의 대규모 구조물은 거의 선진국의 기술진에 의해 설계 시공되고 있으며, 지금까지는 선진 기술을 모방하여 발전시켜 왔다. 향후 대공간 구조물의 수요는 점점 증가할 것으로 예상되며, 보다 안전하고 경제적인 대공간 구조물을 설계·시공 할 수 있는 국내의 독자적인 연구가 절실히 필요한 시점이다. 대공간 연성 막구조 관련 학회는 한국공간구조학회가 있으나, 막구조물의 시공관련 연구 활동은 매우 미미한 수준이다. 중소규모의 막구조물 시공노하우는 국내 막구조물 전문시공업체에서도 상당 수준 보유하고 있으나, 대공간 막구조의 국내 기술은 일본 등 선진국과 비교하여 그 기술 수준은 매우 낙후되어 있는 편이다. 그러나 전문기술을 보유한 중소기업의 국가적 차원의 육성이 필요한 이유는, 대기업의 대공간 막구조물 시공에 있어서 공정상 특수한 기술을 요구하는 부분들은 수직적 계열화된 전문 중소기업들의 핵심기술을 이용하기 때문이다. 즉, 외국기업체들의 기술 폐쇄성으로 인한 중소기업의 낮은 기술력은 대기업으로 하여금 외국의 기술의존도를 높이게 하고, 또 원천기술을 보유하는데 있어서 막대한 비용을 필요로 하는 까닭에 중소기업의 독자적 기술개발은 기대하기 힘들다. 국외의 경우 대공간 연성 막구조 관련 학회는 IASS가 있으며, 막구조물의 시공관련 연구 활동은 일본을 중심으로 활발하게 진행되고 있다. 대공간 구조물의 시공관련 연구활동은 아직 미미한 수준이지만, 국내 건축학회, 강구조학회, 전산구조학회, 공간구조학회 등에서 연구논문들이 발표되고 있으며, 국외에서는 IASS, ASCE, IJSS, AIJ 등에서 연구 성과물들이 발표되고 있다. 국내 시공관련 연구실적은 미진하며, 일본을 중심으로 활발히 진행되고 있다. 우리나라에서는 리송준, 이상현 등은 화재와 같은 비상사태 시 과밀공간에서 생기는 재실자간의 충돌, 짓밟음 등과 같은 대피장애 행동특성을 반영하는 비상사태 피난 시뮬레이터(EAS: Evacuation Agent Simulator)를 개발하여 건조물 내에서 과밀로 인한 대피장애를 예측함으로써 피난계획 수립의 기초자료를 제시하는 연구를 진행하였다. 장용준, 이창현, 박원희 등은 FLUENT 6.2와 EXODUS 프로그램을 사용하여 2003년 대구지하철 중앙역에서 화재사고로 인한 화재 유동 및 승객 피난시뮬레이션을 수행하여 총 사망자 수와 평균 피난 시간 및 피난 경로를 분석하는 연구를

	진행하였다. 윤명오, 송철호, 김태문 등은 지하공간에서 실시간으로 화재 및 피난자 윤입치를 파악하고 가변식 유도장치를 이용하여 신속하고 효율적인 피난을 가능하게 하는 실시간 피난유도여 신을 구상, 설계하고 이를 제작, 설치하여 시험하였다. 여 시점차 대중화되고 있는 유비쿼터스의 기법을 센서간의 연결과 실시간 입치감지에 도입하여 저렴하고 확장성 있는 여 신의 구현을 시도하는 연구를 진행하였다. 신성일, 서용희, 이창주 등은 건물에 적도장치를최신기술 및 여 신을 외국사례를 기준으로 소개하고 이를 바탕고 있겔물에서 화재시 직접되고 있피난자들을 유도할 수 있는 방안을 제시하였다. 사례연구를 통해 네트워크에 적도해본 결과 Quickest Path Algorithm은 링크의 용량시점차 대효율적인 분산유도와, 화재 피을 부여하여 경로상 화재에 의 시온도, 연기에 의해 링크 이용이 제한되는 경우에 있어서 해당링크를 피하거나 수요를 제한하여 실제 적용시 안전과 피난시간의 최소화에 관한 연구를 진행하였다. 김문형, 김종훈 등은 사례분석을 통하여 Simulex 모델의 피난개시시간이 전체피난시간에 미치는 영향을 분석하였으며 이를 통하여 적정피난시간 예측을 위한 바람직한 입력조건의 설정 근거를 제시하는 연구를 진행하였다. 이처럼 화재와 관련된 다양한 연구가 진행되고 있으나 다중이용시설, 의료시설, 영화관 등과 같은 시설에 연구가 집중되어 있다. 그러므로 대규모 경기장의 제연설계 및 피난 안전성에 대한 데이터 베이스 구축을 위한 연구가 필요하다고 판단된다 대공간 구조물의 풍공학에 대한 연구는 현재 대부분이 풍압력분포에 대한 연구를 중심으로 많은 연구가 진행되고 있는 실정이다. 풍진동과 풍응답에 대한 연구는 모형을 이용한 실험방법이 매우 복잡하고 어려워 대부분이 실험보다는 수치해석을 중심으로 분석을 하고 있어 실제거동에 대한 차이가 발생하고 있는 실정이다. 국외에서는 풍진동에 대한 연구는 80년대 이론적인 연구를 중심으로 90년도에 실험적인 연구가 부분적으로 이루어 지고 있는 실정이다. 국내에서는 아직도 이러한 연구가 체계적으로 이루어지고 있지 않아 본 연구과제를 통하여 많은 연구들이 진행이 되었다.. 친환경 건축에 관련하여 PV패널의 효율에 관한 연구가 진행되어 현재 기존의 패널의 효율성을 높이는 연구는 계속 진행되고 있으나, PV시스템을 건축물이나 구조물에 접목시키는 연구는 활성화 되고 있지 않고 있으며, 돔 구조물에 PV시스템 적용은 국내뿐 아니라 세계적으로도 현재까지 계획단계이다. 국내외 대공간에의 적용을 위한 전기음향 시스템의 적용 관련 학술적 연구는 그다지 많지 않으며 대부분 컨설팅 목적의

	단기적인 연구가 대부분이다. 이는 대공간의 적용기회가 많지 않기 때문이며, 응용 및 조절부분보다는 기계적 시스템의 개발과 관련한 연구들이 많이 수행되고 있다. 특히 가정용 멀티미디어 시스템의 보급이 활발해지면서 대부분의 연구들이 소형 전기음향시스템 부분에 많이 치중하고 있는 상황이다.
9) 4세부	10)대공간 관련 코드의 국제 표준화 및 해외경쟁력을 갖는 설계 기술력 확보와 더불어 국외 자문기관 및 공동연구를 통한 해외 대공간 관련 연구소 및 시공사와의 협력관계 구축을 시도하여 개발도상국으로의 진출 및 해외 시장으로의 기술수출의 장을 마련하고 있다. ETFE 막재는 섬유직포를 가지지 않기 때문에 종래의 막재료와 다른 재료특성을 가지고 있고, 또한 건축 재료로서의 취급에 대해서도 명확하지 않기 때문에 이 사용에 있어서는 막재에 대한 정확한 이해와 기술의 습득이 필요하다. 개발된 설계가이드 라인은 지붕 또는 외벽 등에 불소수지가 주 원료인 ETFE 막재를 패널재로서 사용하는 경우에 적용되는 것이다. ETFE 막재는 불소지수를 주원료로 한 막재이며 높은 투광성과 내후성을 가진다. 섬유직물에 4불화에틸렌수지나 염화비닐수지 등의 수지 재료를 코팅하고 있는 종래의 막재료와 비교하면, ETFE 막재는 섬유직물을 가지지 않기 때문에 재료강도는 작지만 경량으로 높은 투명성과 큰 신장성을 가지고 있다. ETFE(에틸렌·테트라 후로로 에틸렌 공중합체) 외에 F E P(테트라 후로로 에틸렌·헥사 후로로 프로필렌공중합체), P V d F(폴리 불화 비니리덴), P V F(폴리불화 비닐) 등이 있다. 국내 대공간 건축물의 유지보수 관련 기술은 아직 초기단계 수준이며, 상시계측보다는 사고 혹은 피해발생 후 대처하는 경우가 많다 그러나 대공간 건축물은 피해 혹은 사고가 주는 인적 물적 피해는 막대하며 사전에 방지하는 것만이 최우선책임이다 국내 건설업 여건상 수요가 많은 아파트 등과 같은 대단위 주거시설물에 대한 유지보수 혹은 리모델링과 관련한 기술은 수요 및 공급이 원활히 이루어지고 있으나 대공간 건축물은 건축물의 성격상 기술개발 및 산업수요가 작은 편이다. 추후 10년간 경제성장으로 인한 사회적 문화적 니즈로 인한 초경량 지붕형식의 돔형건축물 등의 대공간 건축물 시공이 활발히 이루어지리라 예상된다. 지붕의 경량화로 인한 태풍, 적설로 인한 피해가 발생하고 있으며, 특히 2010년 9월의 인천문학경기장의 태풍 곤파스로 인한 지붕막의 피해는 약 100억원의 재산손실로 이어졌으며, 2010년 12월의 미국 미네아폴리스 메트로돔의 경우 폭설로 인한 지붕막

	붕괴사고가 발생하였다. 이것은 지붕의 경량화에 동반하여 지붕막의 장력 및 케이블의 장력 등을 비롯한 막재의 손상 등의 유지관리 기술의 중요성이 새삼 강조되고 있다. 11)연성구조물인 공기막에 대한 연구는 연구단이 발족(2006년)하기 전부터 이미 국외에서는 활발히 이루어졌다. 주로 2004년 스위스의 R.H. Luchisinger, A. Pedretti, M. Pedretti, P. Steingruber 등에 의하여 공기막 중에서 이중막 구조인 TABS에 대한 연구가 이루어졌으며, 2003년부터 2005년까지 일본에서는 사용된 막재에 대한 재료실험 및 분석 등에 대한 연구가 활발히 진행되었으나 국내에서는 전무하였다. 하지만 연구단이 발족하고 초창기부터 2008년까지는 박강근, 윤성기, 서삼열, 이장복 등에 의하여 건축용 막재의 재료특성에 대한 연구가 활발히 진행되었으며, 2009년부터 연구단 종료시점까지 (주)CS구조 엔지니어링에서 TABS에 대한 구조성능 실험 등을 통하여 TABS에 대한 설계식 제안, 구조성능 파악, 해석모델 검증 등 국외의 연구 수준에 걸맞는 연구가 이루어졌으며 이에 따라 논문 게재 및 학술발표 활동을 활발히 진행하였다. 12)또한 대공간 건축물에 적용된 핵심 요소기술에 대한 연구는 학술발표 수준으로 진행되었으며, 현재 시공학회에 논문이 게재될 예정이다.



연구개발수행 내용 및 결과

CHAPTER 3

가. 3.1 구조시스템 및 경제성 분석

SUMMARY

대공간구조 시스템 개발에서는 강성/연성구조 시스템, 하이브리드(Hybrid) 시스템, 콘크리트 시스템의 개발을 위한 모든 기술이 포함되며, 축소모델을 이용한 실험, 특히 개폐식 구조 시스템의 사회적 요구에 따른 연구를 병행하며 대공간구조물의 최적화를 윙나 형상, 위상 최적화, Morphogenesis 기법 등을 포함하는 통합설계 최적화 연구를 수행하였다. 접합부 해석 및 설계에서는 여러 시스템 중 특히 연성구조 시스템에서 필요로 하는 접합부의 해석 및 형태해석 그리고 설계에 적용할 수 있는 다양한 모들의 접합부에 대한 연구를 수행하고 구조시스템의 경제성 분석은 실용화 입장에서 연구의 가치를 평가하고 최종적으로 포괄적인 경제성 분석을 통하여 대공간구조물의 기획에서 시공에 이르기까지 필요한 DB 구축을 실시하였다.

[1] 구조시스템

대공간구조시스템과 관련한 국내 건설기술의 향상을 위해 대공간구조의 시스템의 특성분석, 모델링 기법개발, 대공간구조시스템 및 크기/형상최적화기법 개발, 대공간 구조시스템의 위상최적화기법 개발, 대공간구조시스템의 Morphogenesis기법 개발, 대공간구조시스템의 최적형태 및 통합설계최적화에 관련한 연구를 수행하고 그 결과를 기술하였다.

[2] 접합부

구조물의 대형화에 따른 접합부의 증가와 구조시스템별 각 접합부별 특성을 감안한 구조적인 문제와 시공특성의 문제를 매끄럽게 해결하는 방안을 완성하고자 한다. 강성구조 및 연성구조의 각 시스템에 필요로 하는 다양한 모들의 접합부 설계 및 연구를 수행하고 접합부의 해석 및 실험을 통하여 실용화가 가능한 최적의 접합부개발을 목표로 연구를 수행하였다.

[3] 경제성 분석

1. 본 연구에서는 대공간구조물의 구조시스템과 스팬 및 용도에 따른 경제성에 평가에 관한 연구를 수행하고 대공간구조물의 데이터베이스 구축을 통해 향후 대공간구조물의 건설을 기획하는 단계에서 용이하게 접근할 수 있는 연구결과를 기술하였다. 국내에 건설된 월드컵 경기장을 포함하는 스타디움 구조물은 공사비 분석을 통한 경제성 평가를, 잔 세계의 구조물을 대상으로는 문헌분석을 통하여 구조시스템별 경제성 특성을 분석을 중심으로 진행하였다.

2.

나.

(1) 3.1.1 구조시스템

3. 가. 구조시스템별 특성 분석 연구

■ 대공간구조의 형태와 구성을 파악하기 위해 대공간 건축의 기본적인 개념과 전개과정을 역사적 흐름에 따라 구조재와 구조형식을 중심으로 파악하였다. 대공간 건축은 장스팬의 무주공간을 분할되지 않은 지붕구조로 덮고 있는 공간구조로 정의하였으며 이것은 기능과 사회적 여건 및 새로운 구조재의 도입에 따라 공간의 형태구성과 역학적 시스템이 변화되어 왔다. 건축물의 구조시스템은 신소재 및 신기술의 개발과 더불어 분화, 발전을 거듭해왔다. 구조형식의 전개과정은 그림1과 같다.

■ 대공간 구조물을 구조시스템 및 구조형식에 따라 분류하였다. 구조시스템은 공간과 형태를 구성하는 기본적인 하중지지체계로서 기하학적 거동과 구조재의 형태를 고려하여 분류기준을 마련할 수 있다. 구조형태에서 기인하는 주응력과 하중을 전달하는 체계에 따라 분류하면 표 1과 같이 나타낼 수 있다. 구조시스템에 변화를 가져오는 요인인 구조재의 성격과 구조형식을 체계화하고 특성을 고찰하였으며 개폐식 구조의 구조시스템의 분류는 전체 구조형식과 동일하거나 혹은 개폐부분만이 다른 형식으로 구성될 수 있다. 개폐식 구조는 개폐유형과 구동방식에 대해 고찰하였다.

■ 대공간 건축에 적용되고 있는 구조시스템의 양상을 파악하기 위하여 분류된 형식에 따라 100m이상의 스팬(개폐식 지붕구조는 100m미만 포함)의 건축사례를 수집하고 규모, 용도 등에 따른 분포도를 조사하였으며 결과는 표 2와 표 3에 나타나있는 것과 같다.

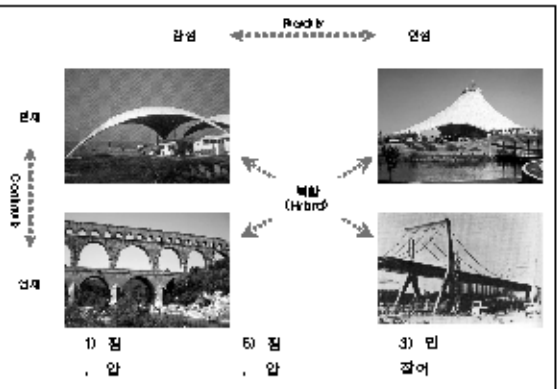


그림1. 구조형식의 전개

가) 표 1. 구조시스템의 분류체계 및 구조형식

7) 8) 구조 18)시스템	10)구조재의 형태		11)이산(선재)		12)면축(면재)	
	18)기하학적 감성		14)감성	15)면성	16)감성	17)면성
20)휨저항	21)휨		22)타렙	28)	24)	26)
28)형태 27)저항	28)인장		29)	80)케이블 구조	81)	82)막구조
	88)압축		84)아치	85)		86)
87)비틀 88)저항	89)복합	40)인장+압축	41)트러스	42)	48)	44)
			45)공간트러스			
	46)인장+압축+휨		47)단층래티스			
48)면 49)저항	50)인장+압축+전단		51)	52)	58)쉘	54)
	55)휨+압축				56)장판	
57)복합 58)저항	59)휨+인장		60)사장구조		61)	62)
	68)(휨		64)텐더 멤브			

	) + 압축 + 인장	

가) 표 8 개폐식 지붕의 개폐방식별 사례 분포

126개폐방식 / 125) 18 186사례	126합성 재료				181복개	182개폐	127개성 막재				128계
	180돔다이형						188돔형				
	187주행모터형	188주행이동	189회전모터형	140주직모터형			141주행	142회전	143공중	144복개	
145사례수	146) 8	147) 2	148) 5	149)	150) 0	151)	152)	153)	154) 0	155)	156) 8
157점도(%)	158) 7.71	159) 4.46	160) 8.07	161) .20	162) 2.05	163) .62	164) .28	165) .20	166) 2.05	167) .41	168) 00
	169) 1.44				170) 2.05	171) .62	172) 2.89				173) 00

4. 또한 개폐식 지붕구조를 선택할 경우에 고려할 사항들도 파악하였다. 이들 구조형식의 설계요 소 및 고려사항은 구조적 효율성을 변화시키면서 동시에 공간구성과 형태에 영향을 미치는 요 소를 의미하므로 다양한 형태와 공간을 가진 건축물을 설계하고자 할 때 응용할 수 있는 인자 가 될 것이다.

5.

6. 나. 대공간 구조시템 모델링 기법 개발 : 개폐식 구조 포함

■ 구조물의 모델링은 건축물의 계획단계부터 도입되어 각 과정의 피드백 관계를 형성하는 중요한 역할을 한다. 이러한 구조물의 모델링 기법은 모델링의 목적 및 정밀도와 대상 범위에 따라 크게 일반 모델링과 전문 모델링으로 구분할 수 있다. 구상(concept), 개량(develo-





pment), 전시/마감(presentation/finish) 모델링이 일반 모델링에 포함되고 구조/프레임(structure/framing), 단면(section), 상제/접합(detail/connection) 모델링이 전문 모델링에 포함된다. 분류된 모델링 기법이 적용된 사례는 그림 1에 제시한 것과 같다.

■ 대공간 건축물의 형태에 대한 이해와 조사, 특히 구조시스템을 전체 또는 국부적으로 파악하고 올바른 모델링기법을 구축하기 위해서는 적적한 모델 재료들을 선택하여 실제로 의도하는 구조시스템을 디자인하고 표현할 수 있어야 한다. 따라서 이를 위해 1차년도 연구에서 대공간 건축물에 적용빈도가 높은 것으로 조사된 구조형식(형태)인 케이블과 공기막구조(인장형태저항시스템), 공간트러스구조(벡터저항시스템) 및 언더텐션구조(복합저항시스템)의 모델링 기법을 그림 2와 같이 제시하였으며 구조형식의 세부적인 분류와 구조시스템의 모델링 제작과정은 2차년도 보고서에 자세하게 기술되어있다.

그리고 개폐식 구조의 모델링은 대상이 되는 대공간 건축물에 적합하고 합리적으로 작동할 수 있는 지붕의 형태와 개폐방식 및 지붕의 구동방식과 관련한 방안을 위한 수단으로 이용된다. 이 과정을 스터디를 통해 적절한 개폐방식을 선택할 수 있도록 구상모델과 구조/프레임 모델 단계로 진행된다. 본 연구에서는 지붕의 개폐방식과 구동방식에 따라 구상모델을 제작하여 제시하였다. 다음으로 구조/프레임 모델단계에서 개폐 조작의 관점에서의 개폐식 구조를 구현하기 위한 모델을 통해 고려해야하는 사항들과 그 과정을 기술하였다. 그림 3은 지붕개폐방식 중 하나인 수직/상하 오버랩 개폐지붕 모델링단계의 제작과정을 보여주고 있다. 이 모델링 단계의 제작과정에 대한 설명과 나머지 개폐방식에 따른 모델링 단계의 제작과정 그리고 이들 개폐방식이 적용되어 시공된 대공간 건축물에 대한 설명은 2차년도 보고서에 자세히 기술되어 있다.

■ 공간 구조물의 구조시스템을 개선하고 새로운 개념의 구조시스템을 제시 할 수 있는 가능성을 가진 최적화 요소기술을 분석하고 그 결과를 제시하였다. 본 연구에서는 설계최적화 요소기술 중 위상최적화기법, 유전알고리즘을 이용한 정적 탄성 상태에서의 돔 구조물의 크기최적화기법 그리고 수학적인 프로그래밍 기법을 이용한 돔 구조물의 크기최적화기법을 분석하고 설계최적화를 통하여 개선된 공간구조물의 후좌굴거동의 변화에 대해서도 분석하여 그 결과를 제시하였다.

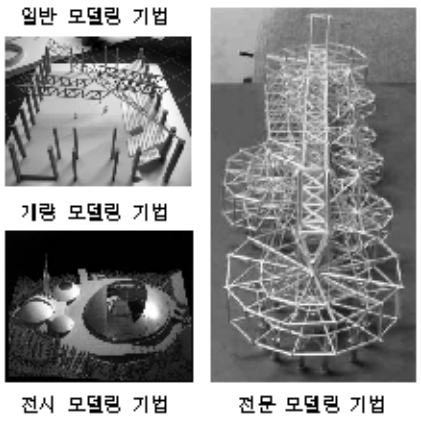


그림 1 모델링 기법의 분류

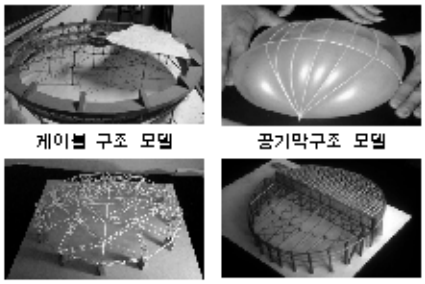


그림 2 모델링 기법 분류

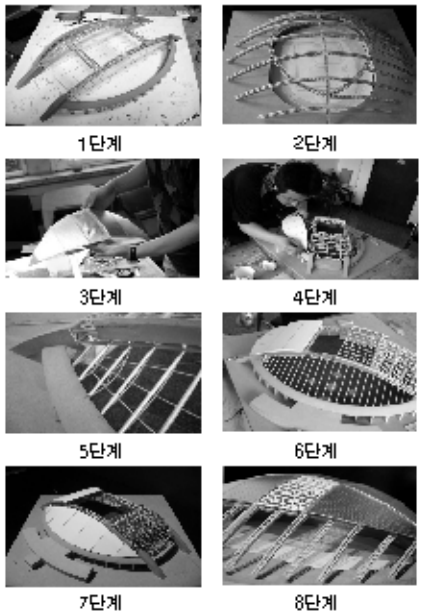


그림 3 수직/상하 오버랩 개폐지붕 모델링

7. 다. 대공간 구조시스템 축소모델실험 및 대공간 구조물의 Size/Shape Optimization 기법

■ 대공간 건축물의 형상탐색(디자인)과 이에 적합한 구조시스템에 대한 이해를 돕기 위한 수단일

뿐만 아니라 구조물의 거동이나 성능평가를 위해 적용되는 축소모델실험의 특성을 조사하고, 적용방식을 분석하였다. 조사된 특성을 바탕으로 축소모델실험을 분류하면 크게 네 가지로 나눌 수 있다. 첫째 concept/schematic 설계의 축소모델설험, 둘째 구조적 평가를 위한 축소모델실험, 셋째 개선 개발을 위한 축소모델실험, 넷째 실용화를 위한 축소모델실험으로 분류된다.

■ 축소모델실험의 적용방식은 대공간 구조물의 초기 위상단계에서 기본조건(용도와 규모 등)을 반영하여 대공간구조의 형태를 추정하는 형상탐색과 계획된 공간형태에 적합하고 효율적인 힘의 흐름이 가능한 구조시스템을 구성하고 이들 결과에 대한 분석/평가, 그리고 설계의 적합성을 검증하는 Design Mock-up 테스트와 구조물의 구현과 관련된 전반적인 사항을 검토하는 Working Mock-uo 테스트을 적용한다.

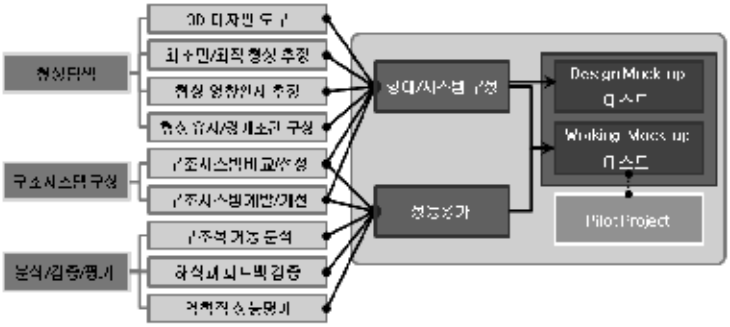
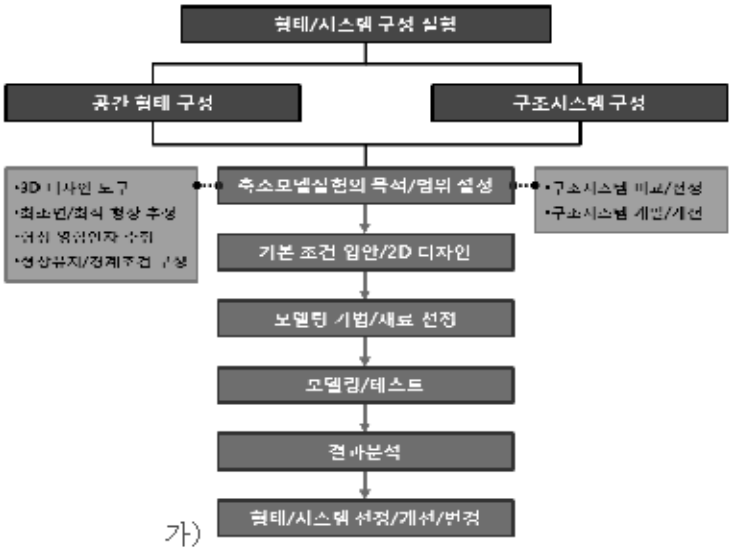


그림1. 축소모델 실험의 범주 설정

■ 앞에서 정의된 적용방식을 토대로 실험의 목적과 성격 그리고 실시단계 등에 따라 범주를 구분하였으며 그 결과는 그림 1과 같이 제시하였다. 이에 따라 분류된 세 유형은 축소모델실험은 형태/시스템 구성, 성능평가, Mock-up 테스트로 설정하였다.



가)

나) 그림2. 형태/시스템 디자인 실험 프로세스

■ 앞 절에서 분류된 세 가지 유형의 축소모델실험인 형태/시스템 구성실험, 성능평가 실험 그리고 Mock-up 테스트에 대하여 각각의 프로세스를 규정하여 제시하고 단계별 조건과 요구사항들을 기술하였다. 그리고 고려사항들에 대해 적절한 예를 통하여 설명하는 등 유형별로 축소모델실험의 적용에 필요한 사항들을 정식화하였다. 세 가지 유형 중 형태/시스템 구성실험 프로세스는 그림 2와 같다. 나머지 유형에 대한 내용은 3차년도 보고서에 자세히 기술되어있다..

■ 대공간 구조물의 크기/형상 최적화기법개발을 위하여 국내·외의 대형경기장 구조시스템 분석을 통해 약 50%이상을 차지하는 스페이스 프레임 구조시스템을 본 연구의 case 구조물로 선정하였다. 대공간 구조물의 자유 형태를 적절히 조절하기 위하여 CAGD 기법을 도입하여 곡면 스페이스 프레임 구조시스템의 형상을 효율적으로 조절할 수 있었다. 대공간 구조물의 크기/형상최적화를 위한 정식화 방안을 제시하고 이를 검증하였다. 정식화방안으로 유전알고리즘과 수학적 프로그래밍을 공간구조물의 설계최적화에 적용하였으며 그 결과를 정량적으로 제시하였다. 검증한 대공간 구조시스템의 크기/형상 최적화 기법을 case 실구조물에 적용하고 대안시스템을 제시하였으며 특히 구조설계에 대한 부재패턴의 최적분포를 계산하고 이를 실제 구조물설계의 정량적인 데이터로 이용하였다.

8. 라. 대공간 구조시스템의 위상최적화 기법

위상최적화 기법연구는 구조물의 개념설계에 대한 공학적 접근을 가능하게 하며 그 연구결과는 기존의 설계최적화기법을 통합하는 중요한 요소기술로 이용될 수 있다. 위상최적화의 이론적 개념을 대공간구조물에 적용하기 위해서는 먼저 위상최적화기법에 대한 정확한 이해와 적용 가능성에 대한 기초자료 마련해야 하고 더 나아가 요소기술에 대한 심층적인 연구가 필요하다. 따라서 본 연구개발은 위상최적화기법을 대공간구조물의 설계에 적용하기 위하여 필요한 이론적 체계와 적용범위 그리고 위상최적화 기법이 대공간구조물설계에 적용되었을 때의 문제점 등을 조사하고 위상최적화기법을 대공간구조물의 최적화에 적용했을 때 나타나는 결과를 기술하였다.

■ 먼저 위상최적화 기법에 대한 장단점을 비교하고 그 결과를 기술하였다. 위상최적화의 기본 개념은 그림 1에 도시한 바와 같이 구조물을 이루고 있는 물질을 재분배하여 구조물의 강성을 높이는 것이며 재료의 재분배를 위한 갱신기법의 특징을 분석한 결과는 표 1에 기술하였다.

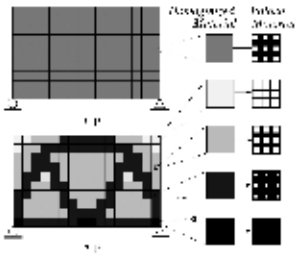


그림 1. 위상최적화 기념도

가) 표1. 위상최적화 갱신기법 특성비교

1) 갱신기법		2) 장점	3) 단점	4) 차원	5) 적용구조	6) 비고
7) 수학적 계획법		8) 범용성	9) 민감도 필요 10)설계변수 수 제한	11)1-3	12)연속체 구조	13)
14)최적경 기준법		15) 설계변수 No.	16)문제의 존적	17)1-3	18)연속체 구조	19)
20)전화 21)듀적 22)기법	23)KIII법	24) 적용성	25)해의 불안정성 (上)	26)2	27)연속체 구조	28)
	29)CATO	30) 적용성	31)해의 불안정성 (中)	32)2-3	33)연속체 구조	34)
35)셈문 36)학적 37)모사	38)GA	39) 학적 배경 없음	40)컴퓨터 리소스 필요	41)1-2	42)이산화 구조	43)hebirthing
	44)ACO	45) 학적 배경 없음	46)문제의 존적 47)컴퓨터 리소스 필요	48)1-2	49)이산화 구조	50)

■ 또한 효율적인 위상최적화를 수행하기 위해 요구되는 재료모델을 분석하였다. 재료모델은 크게 Rank 모델, 다항식 모델, SIMP 모델로 분류하였으며 재료모델의 특성 분석 결과는 표 2와 같다.

■ 이러한 분석을 통하여 대공간구조시스템의 위상최적화를 위한 정식화와 관련한 대공간구조시스템 위상최적화에 도입할 갱신기법으로 진화론적기법을 도입하였다. 특히 해의 불안전성을 보완한 CATO 기법을 도입하였고 재료모델로는 차원에 상관없이 적용성이 좋으며 범용성을 가지는 SIMP계열의 인공재료모델을 도입하였다. 정식화에 대한 내용은 4차년도 보고서에 자세히 기술하였다. 표 3은 정식화의 검증을 위한 한 가지 예제로써 쉘형 공간구조물의 최적위상을 나타내고 있다.

가) 표2. 재료모델의 특성 비교

51)차원	52)재료모델 기초	53)재료모델 심화 및 응용	54)재료모델 혼합 및 실용화
55)2D			

가) 표3. 쉘형 공간구조의 최적위상

61)최적화 조건		62)조합	63)최적위상
64)Point Load	65)		67)
			68)

10.마. 대공간 구조시스템의 Morphogenesis 기법

Morphogenesis기법연구는 구조물의 개념설계에 대한 공학적 접근과 더불어 디자인적 접근을 가능하게 하며 그 연구결과는 기존의 설계최적화기법과 연계하여 중요한 요소기술로 이용될 수 있다. 이러한 맥락에서 morphogenesis모델을 대공간구조물의 설계에 적용하기 위해서는 먼저 morphogenesis모델에 대한 정확한 이해와 적용가능성에 대한 기초자료를 마련한다. 따라서 본 연구개발은 morphogenesis모델을 대공간구조물의 설계 프로세스에 적용하기 위하여 필요한 이론적 체계와 대공간구조물에 적용할 수 있는 범위 그리고 이렇게 개발되는 morphogenesis기법이 대공간구조물설계에 적용되었을 때의 결과에 대해서 기술하였다. 본 연구는 네 가지의 주요항목에 대하여 연구를 수행하였고 그 결과를 기술하였다.

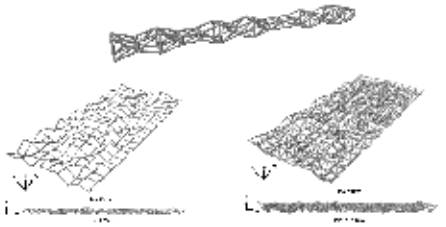
■ 첫 번째는 morphogenesis 모델에 대한 연구에 대한 것이다. 먼저 morphogenesis 기법은 생물학적 형태를 수학적 모델로 표현하기 위한 모델링 방법이며 생물학 분야에서 처음 시작되어 현재는 다양한 분야에서 연구되어지고 있다. 지금까지 형태형성에 대한 다양한 방법이 개발되어졌으며 대표적으로 세 가지로 나눌 수 있다. 그림1에 도시한 것처럼 공간을 유한개의 셀(Cell)로 나누어 셀 간의 국소적인 규칙에 따라 형태를 표현하는 Cellular Automata(CA) 모델, 초기문자열(Axiom)로부터 치환규칙의 반복적인 적용에 의하여 최종문자열이 생성됨으로써 형태를 표현하는 L-system 모델 그리고 한 개 이상의 물질이 공간상에 확산과 화학반응에 의해 형태를 형성하는 Reaction Diffusion system(RD) 모델이 있다. 이 세 가지 모델에 대한 내용은 5차년도 보고서에 자세히 기술하였다.



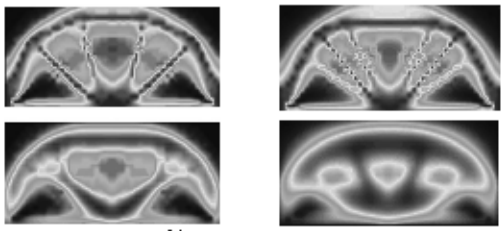
가) 그림1. Morphogenesis 모델: (좌) CA모델, (중) L-system 모델, (우) RD system 모델

■ 두 번째로 GA와 morphogenesis의 연계를 통한 구조최적화에 대한 내용이다. 그림2 에 도시된 것은 L-system의 문자열을 단위모듈로 가정하여 구조물의 형상결과를 나타내고 있다.

■ 세 번째로 위상최적화기법과 morphogenesis의 연계 통한 구조최적화에 대한 내용으로 CA를 무요소법을 바탕으로 한 위상최적화기법에 도입하였다. 그림3 은 트러스 구조물에 적용했을 때의 결과를 나타내고 있다. 이와 관련한 내용 및 프로세스는 5차년도 보고서에 자세히 기술하였다.

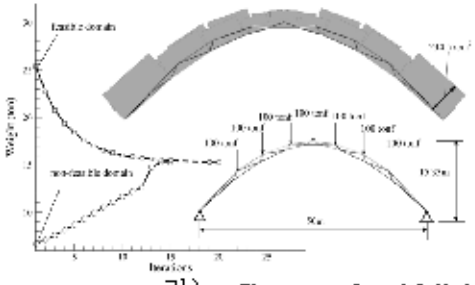


나) 그림2. GA와 L-system의 연계를 통한 형태생성

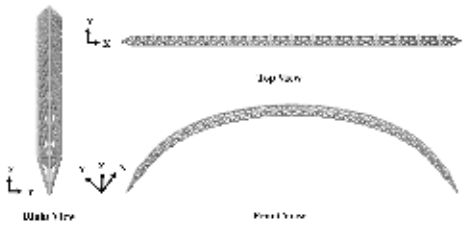


다) 그림3. 위상최적화와 CA의 연계를 통한 형태생성

■ 마지막으로 내력밀도법(FDM)과 연계된 morphogenesis에 대한 내용으로 이는 공학적인 접근법으로 분류하였다. FDM을 이용하여 아치형 트러스의 형상탐색을 수행하였다. 그림 4는 내력밀도법을 이용한 형상탐색을 거친 아치형 트러스의 크기최적화를 수행한 결과를 나타내고 있다. 또한 아치형 트러스의 최적형상을 찾는 또 다른 방법으로 L-system을 이용하여 그림5 와 같은 형상을 도출하였다.



라) 그림4. FDM을 이용하여 형상탐색을 거친 아치형트러스의 크기최적화 결과

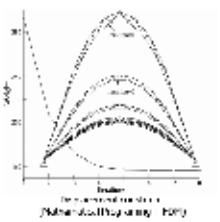


마) 그림5. L-system을 이용한 아치형트러스의 형상

11.바. 대공간 구조시스템의 최적형태 및 통합설계최적화

구조시스템 설계를 위한 기술 분야에서는 설계최적화 요소기술을 연계하는 통합설계최적화에 대한 방향성 제시와 실용화를 위한 기초설정이 반드시 필요하다. 이와 관련하여 국제적으로 활발히 연구가 시작되고 있는 통합설계최적화분야에 대한 연구를 수행하였다. 특히 최적형태 자동생성기법에 기하학적인 모델과 morphogenesis기법을 연계하는 것은 건축설계와 건축구조 분야에 대한 자연스러운 연계를 제공할 수 있고 선진국 형태의 개념설계방식을 구축하는데도 도움이 될 것으로 판단된다. 이러한 맥락에서 본 연구는 네 가지의 주요항목에 대하여 연구를 수행하였고 그 결과를 기술하였다.

■ FDM과 연계된 morphogenesis의 3차원 부분에 대한 내용으로 그림 1에 도시된 것처럼 내력밀도법과 수학적계획법을 연계한 형상조절기법을 개발하였으며 3차원 구조물에 도입했을 때 원하는 구조물을 자동반복해석으로 구할 수 있게 되었다. 그림 2는 3차원 아치트러스, 3차원케이블 넷 그리고 영국에 있는 대형박물관에 적용했을 때의 결과를 도시하고 있다.



가) 그림1. 수학적계획법과 내력밀도법 연계

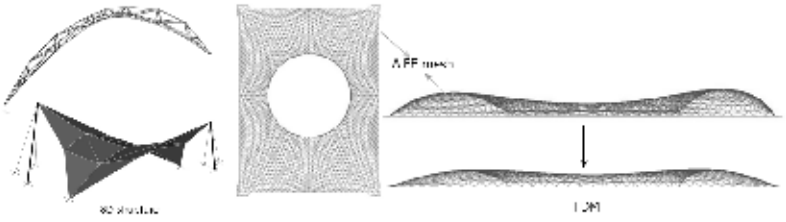
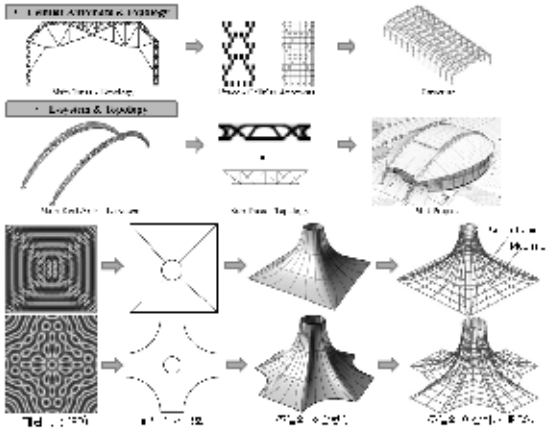


그림2. 적용 사례

■ 두 번째로 최적형태 자동생성기법에 대한 내용으로 그림 3은 CA와 L-system을 위상최적화와 연계해서 구조물의 최적형태를 찾는 과정을 보여주고 있으며 그림 4는 RD system을 이용하여 구조물의 초안을 형성하고 이렇게 형성된 구조물을 NURBS 함수를 이용하여 자유롭게 이산화된 구조물로 표현할 수 있는 일련의 과정을 나타내고 있다.



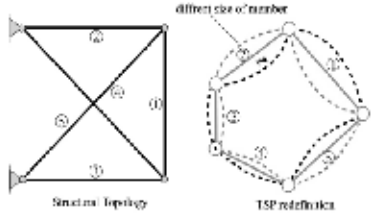
나)

다)

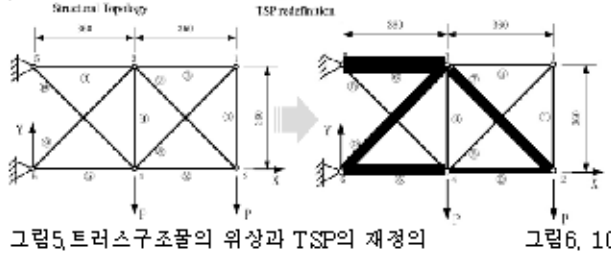
그림3. 최적형태 자동생성기법1

그림4. 최적형태 자동생성기법2

■ 세 번째로 ACO모델을 이용한 최적형태 생성기법에 대한 내용으로 그림 5는 트러스 구조물의 최적설계에 ACO알고리즘을 도입하여 TSP를 이용하기 위해서는 TSP문제를 재정의를 타나내고 있다. 자세한 내용은 6차년도 보고서에 기술하였다. 그림 6은 ACO모델을 이용한 최적형태 생성기법에 대한 성능을 검정하기위해 10-bar 트러스를 이용한 부재사이즈 크기 결과를 도시하고 있으며 이는 구조물의 최적형태를 결정하는 참고자료로 이용될 것으로 판단된다.



라)



마) 그림5,트러스구조물의 위상과 TSP의 재정의

그림6, 10-bar트러스와 부재사이즈 크기 결과

■ 마지막으로 통합설계최적화에 대한 내용으로 그림 7은 Pilot project 모델의 형태를 생성하기 위한 통합 최적화



(1) 3.1.2 접합부

(2) 가. 볼조인트 접합부 거동특성 연구

(가)볼조인트 접합부 개발

기존 메로 시스템의 접합부는 볼 조인트 접합부로서 접합부에 삽입되는 볼트는 고력볼트이며 일반 연강에 비해 연성이 훨씬 떨어진다. 특히 건축구조물에 사용되는 고력볼트는 나사부 유효단면적이 축부 단면적보다 작기 때문에 최대내력과 동시에 나사부에서 취성파단을 보인다. 또한 볼 조인트 접합부에서는 축부에 핀의 삽입을 위한 구멍이 존재하기 때문에, 응력집중으로 인한 취성파단의 가능성이 크다. 따라서 볼 조인트 접합부의 연성거동을 확보하고 현장에서의 시공오차흡수가 가능하도록 하며 볼트의 나사부 또는 핀부의 취성파단 없이 감소된 축부에서 소성변형능력을 확보하고 접합부의 인장내력저하를 최소화 하는 최적의 접합상세를 실험과 해석을 통해 제시하고자 하였다.

(나)수치해석

볼 조인트 접합부 볼트의 각 부분 면적비에 따른 응력분포 및 거동특성을 분석하기위해 수치해석을 수행하였다. 해석모델은 핀부(D_en)와 나사부(D)를 따로 모델링하였다. 나사부 모델의 시험체명은 축부(D_re)의 직경이며 해석결과는 축부의 단면이 감소할수록 응력분포가 나사부에서 축부로 이동하며 국부적인 응력집중 현상 없이 고른 응력분포를 보이는 것을 알 수 있다. 핀부 모델의 시험체명은 핀부-축부의 직경이며 핀부를 1mm 증가시키면 최대내력은 10% 상승하였다. 21-17과 23-17은 하중-변형 관계는 유사한 거동을 나타내고 항복내력 및 최대내력 또한 유사한 값을 나타내고 있으나, 항복내력 시 23-17이 21-17보다 핀부에서의 응력집중이 매우 완화됨을 알 수 있다.



(다)실험결과

볼 조인트 접합부의 에너지흡수요소인 변형에너지흡수형 고력볼트의 나사부 직경(thread Part : D), 핀부 직경(enlarged Pin-Part : D_en), 감소축부 직경(reduced Shank : D_re)에 따른 각 부분의 단면적비 및 파괴모드를 주요변수로 설정하여 실험을 실시하였으며 실험결과는 아래와 같다.

시험체명	파단모드	시험체명	파단모드	시험체명	파단모드	시험체명	파단모드
M20-20-20	핀부	M20-21-17	감소부	M24-24-24	핀부	M24-25-21	핀부(감소부)
M20-20-19	핀부	M20-21-16	감소부	M24-24-23	핀부	M24-25-20	감소부
M20-20-18	감소부(핀부)	M20-21-15	감소부	M24-24-22	핀부	M24-25-19	감소부
M20-20-17	감소부	M20-22-20	나사부	M24-24-21	핀부	M24-26-24	나사부
M20-20-16	감소부	M20-22-19	감소부(나사부)	M24-24-20	감소부	M24-26-23	나사부
M20-20-15	감소부	M20-22-18	감소부(나사부)	M24-24-19	감소부	M24-26-22	핀부(나사부)
M20-21-20	핀부(나사부)	M20-22-17	감소부	M24-25-24	핀부(나사부)	M24-26-21	감소부
M20-21-19	핀부(나사부)	M20-22-16	감소부	M24-25-23	핀부(나사부)	M24-26-20	감소부
M20-21-18	나사부	M20-22-15	감소부	M24-25-22	핀부(나사부)	M24-26-19	감소부
주1) M20-20-20는 D=20mm, Den=22mm, Dre=15mm인 실험체이다.							

해석결과와 실험결과를 비교할 때 해석 시 나사부의 내력이 실제보다 과소평가되는 경향이 있으며 축부 및 핀부의 단면을 조절함으로써 볼트의 연성거동을 유도할 수 있다. 본 시험결과로 볼 때 20-21-18과 24-26-21의 볼트가 가장 뛰어난 성능을 나타내었다.

파괴모드에 기초한 볼 조인트 접합부의 항복내력 및 최대내력 설계식을 다음과 같이 제안한다.

접합부 공칭 항복내력 $P_y = MIN({}_sP_y, {}_{b1}P_y, {}_{b2}P_y, {}_{b3}P_y)$

접합부 공칭 최대내력 $P_u = MIN({}_sP_u, {}_{b1}P_u, {}_{b2}P_u, {}_{b3}P_u)$

${}_sP_{y,u}$: 스트럿의 항복내력, 최대내력, ${}_{b1}P_{y,u}$: 볼트 감소축부 항복내력, 최대내력

${}_{b2}P_{y,u}$: 볼트 핀부 항복내력, 최대내력, ${}_{b3}P_{y,u}$: 볼트 나사부 항복내력, 최대내력

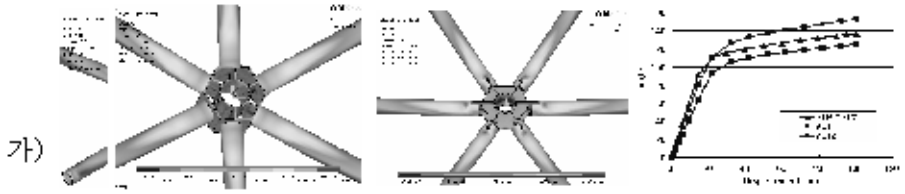
(3) 나. 용접 접합부 구조거동 특성 및 강성평가 연구

(가) 단층 래티스돔 용접접합부 상세 개발

대공간 구조시스템 중 단층 래티스 돔은 면내에 부재를 일정한 패턴으로 배치함으로써 형상을 구성하는 구조이다. 단층 래티스 돔에 적용되는 용접접합부 중 가장 널리 알려진 나고야돔에 적용된 접합부의 형상을 기반으로 하여 접합부 내력에 영향을 주는 요소인 내다이어프램, 외다이어프램, 가셋 플레이트와 삽입 플레이트를 적용하여 기존에 사용되는 용접 접합부에 비해 내력이 향상된 접합부의 형태를 제안하고 그 성능을 검증하기 위하여 해석 및 실험을 실시하여 제안된 접합부의 각각 변수가 접합부 구조성능에 미치는 영향을 알아보고자 하였다.

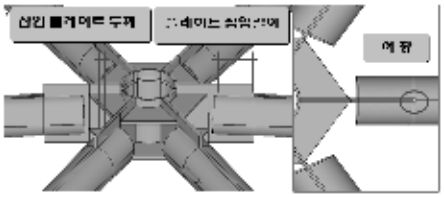
(나) 용접접합부 유한요소해석

제안된 용접접합부 형상은 접합부에 지관이 직접 용접되는 형상인 ALT1과 접합부 내부에 강관이 삽입되고 플레이트가 날개형으로 그 강관에 부착되어 플레이트가 지관에 삽입되며 삽입되는 플레이트의 좌굴을 방지하기 위해 스티프너를 아래, 위로 부착하는 형상인 ALT2 두 가지다.



가)

나) (a) 기존 접합부 형상 (b) 제안 접합부 ALT1 (c)제안 접합부 ALT2 (d)접합부 해석결과



ALT1은 고른 응력분포를 보였으나, 기존 접합부나 ALT2에 비해 초기강성이 부족하고 같은 변위 하의 최대하중도 낮은 것으로 나타났다. 반면, ALT2는 기존접합부와 거의 동일한 초기강성을 갖지만 같은 변위 하의 최대하중은 약 20kN 가량 높은 결과를 보였다. 구조적인 성능이 더 우수한 것으로 판단되는 ALT2 타입을 최종 제안 접합부로 결정하여 성능에 영향을 미칠 가능성이 있는 삽입플레이트 두께, 삽입되는 플레이트 길이, 플레이트와 지관이 맞닿는 끝부분의 여장 유무를 변수로 선택하였다.

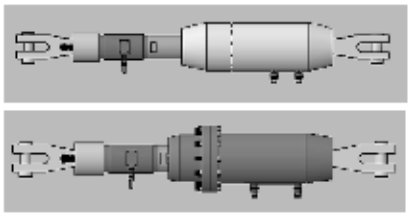
(다)실험결과

실험체는 크게 기존 접합부와 제안접합부 ALT1, ALT2 세 타입으로 나누어 제작하였다. 하중 및 구속조건은 축방향 변위만 허용하고 나머지 변위는 구속하여 슬라이딩 효과를 고려할 수 있도록 하고 100ton인 오일잭을 이용하여 실험체 중앙부 다이아프램 내의 강관에 재하 하였다.

1) TYPE	2) 주강관 3) (mm)	4) 지강관 5) (mm)	6) 삽입길이 7) (mm)	8) 플레이트두께 9) (mm)	10)여장유무	11)항복하중 12)(kN)	13)항복변위 14)(mm)	15)극한하중 16)(kN)	17)극한변위 18)(mm)
19)기존	20)Ø267.4×8	21)Ø101.6×3.2	22)-	23)-	24)X	25)88.05	26)14.51	27)121.21	28)68.67
29)ALT1	30)Ø139.8×4.5	31)Ø101.6×3.2	32)-	33)-	34)X	35)74.24	36)15.94	37)116.91	38)81.39
39)ALT2	40)Ø139.8×4.5	41)Ø101.6×3.2	42)50	43)9	44)X	45)85.05	46)17.08	47)117.36	48)47.24
			49)80	50)9	51)X	52)98.54	53)17.65	54)135.58	55)53.64
			56)100	57)6	58)X	59)88.32	60)15.51	61)117.21	62)32.65
			63)1	64)9	65)X	66)100	67)16.4	68)143	69)55.8

(5) 다. 재긴장이 가능한 케이블 접합부 시스템 개발 연구

(가) 재긴장이 가능한 케이블 접합부 개발



현재 케이블구조에서 일반적으로 사용되는 턴버클은 엔지니어가 요구하는 정확한 장력도입이 어려울 뿐만 아니라 대공간구조물에 적용되는 대구경 케이블에 적용하여 재긴장을 하기위해서는 유지관리 및 경제성, 안전성 측면에서 적절하지 않다. 이에 본 연구에서는 유압을 이용하는 재긴장 접합부를 개발하고 성능검증을 위해 해석 및 실험을 실시하였다.

(나) 유압식 재긴장 시스템의 작동원리

스트레이트 탑입과 플랜지 타입의 2가지 시스템의 재긴장 장치를 개발하였다. 아래그림의 (a)와 (b)에 나타난 스트레이트 타입과 플랜지 타입모두 시스템의 작동원리는 밸브를 통해 유압이 주입되면 고정된 piston rod(C)에 의해 tube(D)가 접합부 방향으로 이동하여 tube(D)의 앞부분에 연결된 케이블이 재긴장되었을 때 유압을 제거한 이후에도 케이블의 긴장상태가 유지될 수 있도록 lock nut(B) 와 lock cover(A)를 볼트 체결하는 방식으로 작동한다.

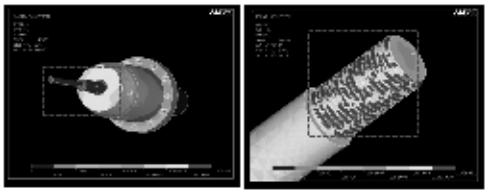


(a) Straight Type



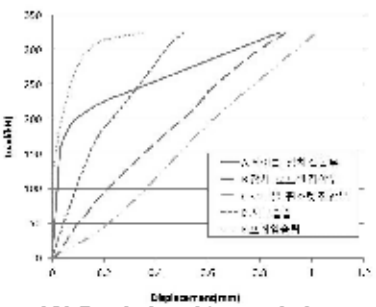
(b) Flange Type

(다) 유압식 재긴장 시스템의 유한요소해석



해석 시 실제변형이 발생할수 있는 케이블 및 볼팅 접합부의 변형과 응력분포를 분석하여 안전성을 검토하였다. 실험과 동일한 조건을 부여하기 위해 케이블도 5m로 함께 모델링 하였으며 케이블의 인장실험값과 일치 할 때까지 탄성계수를 변화하여 케이블의 실제 물성치를 확인하고 그 탄성계수를 경계조건으로 부여하여 해석을 실시하였다. 이는 케이블의 프리스트레싱 효과를 고려한것이라 볼수 있다. 해석결과 대부분의 변위는 케이블에서 발생하였으며 재긴장 시스템과 케이블의 볼팅 접합부에 응력이 집중되는 것을 확인하였다. 또한 재긴장 시스템의 스트로크의 길이를 100mm, 200mm, 300mm로 각각 모델링하여 해석한 결과 응력과 변위 분포는 비슷한 거동을 하는 것으로 조사되었고 최대응력과 최대변위는 큰 변화가 없는 것으로 확인되었다.

(라) 구조성능실험



본 실험의 목적은 케이블이 파단강도에 도달했을 때 나타나는 볼팅 접합 부분의 변형을 확인하고자 하였다. 케이블 파단강도까지 인장한 결과 대부분의 변위는 케이블에서 발생하였으며 재긴장 시스템의 각 접합부는 케이블이 파단강도에 도달할 때 까지 탄성거동을 하는 것으로 확인되었다. 실제 케이블이 시공될 때 케이블의 파단강도의 1/3수준으로 설계하는 것을 감안하면 볼트로 체결된 케이블과 시스템사이의 변위는 0.4mm 미만의 반응을 보였으며 또한 볼트 접합부의 최대변위량도 1mm 미만인 것으로 나타났다. 볼트 접합부 부분의 안전성을 확인하였으며 케이블인장장치 접합부에서의 변위량이 케이블 장력에 미치는 영향은 없다고 볼 수 있다.

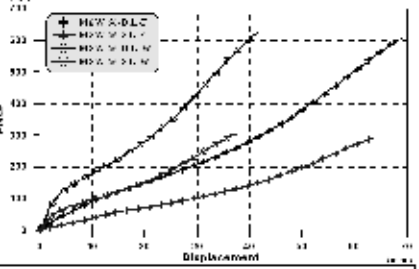
(6)

유압식 재긴장 시스템의 특징을 간략히 설명하면 유압잭에 의한 정확한 장력조절이 가능하고 추가적인 가설장비 없이 간편히 재긴장이 가능하며 기존방식에 비해 뛰어난 경제성, 안전성, 공기 및 인력단축 효과가 있으며 다중 케이블의 동시 긴장이 가능하여 케이블 네트 구조 시공에 유리하다. 또한 무선 장력측정 장치 및 기타 장비와 통합하여 지능형 케이블 통합 유지관리 시스템 구축이 가능하다.

(7) 라. 막구조의 접합 형태별 특성 연구

(가) 막 접합부의 역학적 거동 특성연구

막재와 막재의 접합부 인장특성을 확인하기 위하여 인장실험을 실시하였다. 실험은 스트립 법을 기준으로 실시하였으며 시험편은 모재시험편, 전용착시험편, 부분용착 시험편으로 구성하였다. 부분용착시험편은 일반적인 접합방식과 덧댐 방식을 모두 포함하였다. 시험편 제작 및 실험방법은 KS K 0521(2001)에 따라 실시하였다. 시험편은 PVC 계열인 PVF 막재를 사용하여 제작하였다. 실험결과 두장의 원단을 완전히 용착한 시편의 거동 특성을 살펴보면 파단시 늘어난 길이는 원단의 경우와 유사하지만 파단시 하중은 원단에 비교하여 2배정도 크게 나타나는 것을 확인 할 수 있었다. 용착 시험 결과와 막재 원단 결과를 비교해 놓은 그래프를 보면 명확하게 확인 할 수 있다. 앞에서 고찰한 접합부 파단 현상이 봉합면 전에서 발생하는 원인이라 할 수 있다. 부분 용착 시험편의 신장 특성을 비교해 보면 오른쪽 표와 같다. 신장에 대한 특성은 덧댐막 방식이 좀 더 자연스러운 것을 확인 할 수 있다. 덧댐막 방식에서 사용하는 덧댐막은 원단과 동일한 원사로 직조된 직포에 동일한 코팅재료로 만들고 다만 topping 처리만 수행하지 않은 막재이다. 덧댐용 막은 테이프 형태의 롤로 제공되기 때문에 원단이 방향성에 상관없이 한방향성만 있다. 덧댐막 방식에서 신축길이가 차이나는 것은 이것에 기인한 것으로 볼 수 있다.



		용착길이(단위:mm)					
		35mm		50mm		70mm	
		오버랩	덧댐막	오버랩	덧댐막	오버랩	덧댐막
Warp	1) 5 1.5 04	2) 4 1.1 49	3) 2 7.8 87	4) 4 2.0 90	5) 4 7.7 89	6) 4 5.9 34
	7) 4 4.2 50	8) 4 4.4 77	9) 3 3.7 86	10)4 3.9 88	11)5 1.4 86	12)4 4.3 52
	13)4 7.2 42	14)4 4.9 80	15)3 9.4 85	16)4 0.8 57	17)5 0.4 02	18)4 5.0 17
	19) 47. 665	**20) 43. 535**	**21) 33. 723**	**22) 42. 312**	**23) 49. 896**	**24) 45. 101**
Fill	25)6 1.0 27	26)7 0.9 29	27)6 3.8 80	28)6 6.5 87	29)6 3.8 43	30)5 9.7 50
	31)6 0.7 13	32)6 7.6 23	33)5 9.0 78	34)6 4.5 81	35)6 2.1 84	36)6 6.2 00
	37)6 1.3 83	38)6 7.0 03	39)6 8.3 84	40)5 9.7 13	41)5 9.9 80	42)6 1.3 11
	43) 61. 024	**44) 68. 518**	**45) 62. 114**	**46) 63. 627**	**47) 62. 009**	**48) 62. 420**

(나) 유압식 케이블 재긴장 시스템 최적화

재긴장 소켓의 용량에 따라 10ton, 20ton, 30ton, 40ton, 50ton, 100ton 의 모델을 3차에 걸쳐 최적화를 진행하였다. 최적화 설계는 로드(Rod) 두께를 기준으로 설계 한 것이 아니므로 안전율(Safety Factor)은 로드(Rod) 크기와는 무관하며 유압을 견딜 수 있는 유압실린더를 기준으로 기본설계를 진행 후 구조적의로 취약한 부분을 고려하여 설계하였다. 3차 최적화 결과 30ton 모델의 경우 플로토 모델보다 무게는 102kg줄어 31% 수준의 최적화가 진행되었으며 직경은 67mm가 줄어 62%수준의 최적화가 진행되었다. 직경의 경우는 내부 유압 범위와 유압 밸브 장착을 위한 최소 살 두께 확보 때문에 더 이상 소형화가 힘들다. 하지만 최적화 진행률의 비교를 위해 길이는 일정하게 두고 직경의 최적화만 실행하였으므로 튜브의 길이 및 직경 조정을 통해 케이블과 조화되는 보다 세장한 모델 설계도 가능하다.

Model	Capacity (tf)	Stroke (mm)	Rod tap	Size (mm)	Weight (kg)	Ratio of weight
Prototype	30	100	M90	ø179x764	149	
1차	30	200	M85	ø134x620	68	45% 수준
2차	30	200	M84	ø125x620	58	38% 수준
3차	30	200	M29	ø112x620	47	**31% 수준**



(다) 장력 무선 모니터링 시스템 개발

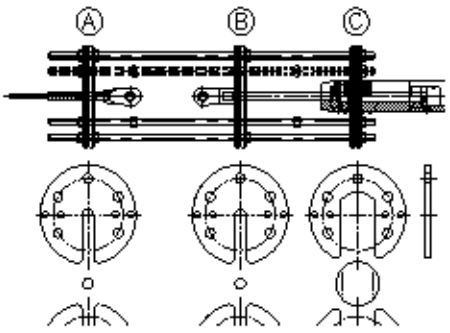
장력 무선모니터링 시스템은 무선 로드셀, 무선 데이터 수집 장치(데이터로거), 관리서버, 통합관제시스템, 문제 발생 시 관리자에게 자동 알림 및 실시간 관리 사이트에서 확인하는 시스템으로 구성되어 있다. 대공간 건축 구조물의 재긴장 유압실린더와 함께 설치된 무선 로드셀 (Wireless Loadcell)은 현재의 장력(인장하중)을 CDMA방식의 무선으로 관리서버에 실시간 저장하고 저장된 데이터는 프로그램에 의해 실시간 장력값으로 표현되고 상하한 범위를 설정하여 경고를 확인한다. 또한 풍향풍속, 가속도, 변위, 온습도 등 기상관측이나 구조물의 다른 물리적인 변형 계측도 가능하므로 통합유지관리가 가능한 시스템으로 확대할수 있다.

(라)Pilot Project에 재긴장 시스템 적용

벨리케이블은 양쪽 단부 모두에 재긴장 장치가 적용되어 6개를 설치하고 릿지케이블은 저면 연결부위에 설치하여 13개소를 설치하고 재긴장 시스템과 일체화된 무선장력측정장치를 8개소를 설치하는 것으로 계획하고 재긴장 장치 및 무선 로드셀의 설계를 수행하였다.

(9) 마. 케이블 구조의 접합 형태별 특성 연구

(가)초기긴장이 가능한 케이블 접합부 개발



케이블 설치 및 초기인장을 위해 여러 안전장비 및 가설장비를 수반하게 됨으로 시공비가 증가하게 된다. 기 개발된 유압식 재긴장 장치의 경우 용량과 최대 압력에 따라 스트로크 길이가 정해지게 되며 기 개발된 최적화 모델의 경우 최대 스트로크 길이가 300mm이다. 유압식 재긴장 소켓을 연결할 수 있는 초기긴장 장치 가설물을 설계하여 스트로크 길이 300mm에 초과하는 거리에서부터 케이블을 끌어 올 수 있도록 하였다. 이는 케이블 시공 시 추가적으로 발생하는 가설 장비들의 간접비를 줄이는데 효과적이며 가설장치의 해체 및 조립을 통하여 전용성을 증대하여 유압식 케이블접합부의 사용에 따른 시공성 및 경제성을 향상하도록 계획 하였다. 초기인장 장치의 작동원리는 피스톤 로드가 후퇴 할 시에는 A, B의 가이드 플레이트가 가이드 스터드 볼트를 구속하게 되어 가이드 스터드 볼트가 C 가이드플레이트 관통하므로 케이블이 인장이 된다. 재긴장 시스템의 스트로크 범위까지 인장이 되면 A, C 가이드 플레이트가 스터드 볼트를 구속하고 피스톤 로드의 전진 시 B 가이드 플레이트는 본래의 위치를 회복하게 된다. 이때 A, C가 구속되므로 케이블의 인장상태를 유지 할 수 있게 된다. 이와 같은 작동의 반복을 통해서 최종적으로 케이블과 케이블 인장장치의 피스톤 로드가 결합 할 수 있는 거리까지 초기 인장을 하도록 개발되었다.

(나)케이블 네트구조의 장력특성연구



Pilot Project에 적용되는 지붕구조의 벨리케이블과 릿지케이블의 네트구조를 실험실 여건에 맞추어 실험을 계획하였다. 실험의 계획은 네트 구조의 형상화를 위하여 벨리케이블 3개와 릿지케이블 1개를 지그에 고정하여 케이블의 장력 변화에 따른 벨리케이블과 릿지 케이블의 하중변화를 실험데이터와 해석결과를 비교하였다. 릿지 케이블의 장력을 0.15tonf에서 3.15tonf 까지 0.3tonf씩 유압식 재긴장 장치를 이용하여 증가하였을 때 각 케이블의 응력변화를 고찰하였고 기존 턴버클을 이용한 접합부 시스템과 비교하여 장력을 부여함에 있어 사용자의 편의성이 증대 되었는지 여부를 판단하기 위하여 진행 하였다. 릿지케이블의 장력이 변화 함에 따라 벨리 케이블의 장력이 일정한 크기로 변화 함을 확인 할 수 있고 지면 접합부와 가까이 위치한 Valley 1의 장력 변화가 가장 작고 벽면 접합부와 가까이 위치한 Valley3의 장력변화가 가장 크게 나탐을 확인 할 수 있었다. 릿지케이블의 장력 변화값이 일정한 크기로 증가함에 따라 벨리케이블의 장력 또한 일정함에 증가함을 확인하였다.

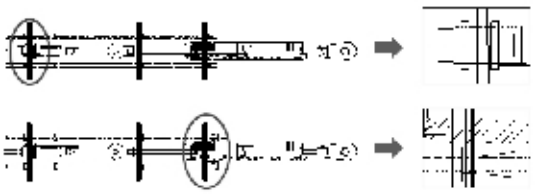
(다) 원사가 다른 막재의 특성연구

막재의 역학적 성질을 규정하는 원사의 굵기가 다른 막재의 특성을 파악하기 위하여 1축 인장강도 시험, 인열 강도 시험, 접힘 후 인장 강도 시험을 실시하였다. 시료는 크게 유리섬유 원사에 따라 EC3 계열과 EC6 계열로 구분할 수 있는데 시험을 통해 확인할 수 있는 특성은 다음과 같다. 인장강도와 인장신도의 특성을 살펴보면 비교적 얇은 원단에서는 EC3계열 막재나 EC6계열 막재의 인장 강도는 경사나 위사 모두 비슷하게 형성되지만 인장신도에 있어서 경사방향은 비슷하다고 할 수 있지만 위사방향은 EC3계열 막재가 30%이상 크게 형성되고 있다. 그러나 비교적 두꺼운 원단에서는 얇은 막재와는 다른 양상으로 나타나고 있다. EC6 계열 막재가 인장강도도 크고 인장신도에 있어서는 경사방향은 작고 위사방향은 크게 나타나고 있다. 인열강도 특성은 시험 방법에 따라 다른 양상으로 나타나고 있다. 트래피조이드법에 의해 측정된 결과에서는 EC6 계열 막재의 경우 경사방향과 위사방향 강도의 비가 EC3 계열 막재 보다 크게 형성되는 것으로 나타고 있다. 싱글인열법으로 측정한 결과에서는 원사와 상관없이 비슷한 양상으로 나타나고 있다. 접힘 인장강도의 경우는 유리섬유 원사가 손상된 경우를 가정하여 인장강도를 측정한 것이기 때문에 두 계열 막재 모두 비슷한 경향으로 강도가 감소하는 것으로 관찰되었다. 접힘에 의한 인장강도의 감소율은 기존의 연구와 비슷한 양상을 보였다.

(10)바. 케이블 장력조절시스템 실용화 연구

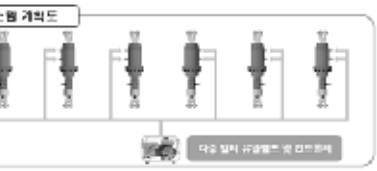
(가)초기긴장 케이블 접합부 최적화 및 실용화 연구

지난차년도에 수행된 초기긴장 케이블 접합부 실험에서의 결과를 통해 기 개발된 초기긴장 케이블 접합부의 최적화 및 실용화 연구를 수행하였다. 선 수행된 실험에서 접합부 시스템의 3개의 플레이트 중 케이블 부분의 플레이트가 단단히 고정되지 않아 케이블의 장력을 지지하는 가이드 스터드 볼트의 마모를 유발할 수 있는 상황이 발생하여 이를 수정하기 위한 방안으로 케이블의 단부를 플레이트가 단단히 고정될 수 있도록 수정하여 제작하였다. 초기긴장 케이블 접합부의 사용절차와 사용성을 향상시키기 위해 유압식 재긴장 장치에 고정되는 플레이트에 쐐기장치를 장착하여 케이블에 초기긴장을 가하는 절차를 간편하게 하고 작업시간을 단축시킬 수 있는 장치를 개발 하였다. 또한 첫 번째 수정안을 통해서 케이블의 장력을 지지하는 가이드 스터드 볼트의 마모를 충분히 방지하지 못할 경우를 대비해 플레이트와 가이드 스터드 볼트가 부딪히는 부분에 동와싱 처리를 하거나 사각 나사산을 가지는 가이드 스터드 볼트와 나사산캡을 이용하여 가이드 스터드 볼트의 마모를 방지할 수 있는 안을 제안하였다.



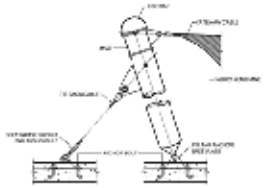
(나)초기긴장 케이블 접합부의 최적화 및 실용화 실험

초기긴장 케이블 접합부의 최적화와 실용화를 위한 개선 방안을 도입하여 지난차년도에 수행한 것과 유사한 실험을 수행하였다. 실험을 수행하면서 케이블의 장력을 지지하는 가이드 스터드 볼트들에 응력이 고르게 분배되지 않고 국부적으로 응력이 발생하여 초기긴장 케이블 접합부를 사용하는데 있어서 안전 및 사용에 문제가 발생될 수 있지를 확인하기 위해 각각의 가이드 스터드 볼트에 로드셀을 장착하여 국부적으로 응력이 집중되는지를 확인하였다. 또한 사용성 향상을 위해 스터드 볼트수와 쐐기 장착에 따른 안전성 및 사용성을 확인하였다. 실험결과 초기긴장 장치의 중심축인 케이블을 기준으로 케이블 위쪽 스터드 볼트가 전체하중의 10% 정도를 더 부담하는 것을 확인하였지만 이는 위쪽에 위치한 스터드 볼트의 직경을 크게 함으로써 상쇄가능할 것으로 확인되었다. 쐐기장착구 적용시 쐐기 유격에 의해 미세 장력조절은 어렵지만 근접치의 초기인장력 확보에는 문제가 없을것으로 생각되며 적용으로 사용성이 향상되며 하나의 플레이트 가아닌 모든 플레이트에 적용시 훨씬 뛰어난 시간단축 및 시공성을 확보가능할 것으로 사료된다.



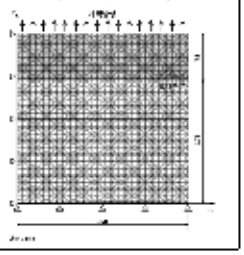
(다)다중동시 긴장시스템 연구

개발된 초기긴장 케이블 접합부의 시공성을 향상시키기 위해 하나의 펌프로 여러개의 초기긴장장치를 가동할 수 있는 다중동시 긴장시스템에 대한 연구를 수행하여 하나의 펌프로 최대 20개의 초기긴장 장치의 가동이 가능하고 개별 압력조절밸브 부착으로 각 장치마다 개별 압력조절이 가능하며 안전을 위해 압력스위치 부착으로 일정압력이상으로 압력상승시 다중펌프가 정지 되는 기능이 있는 다중동시 긴장시스템을 개발하였다.



(라) 연성구조물 접합부의 분석 연구

연성구조물의 접합부 형태는 막과 막, 막과 케이블, 케이블과 지지골조, 막과 지지골조 등 다양한 형태로 구성된다. 연성구조물이 가지고 있는 접합부의 문제점으로는 케이블에 의한 인장력의 전달 문제, 코너 접합부에의 문제점, 케이블 교차 접합부 마무리 등이 있다. 연성구조물의 접합부 특성을 파악하기 위해 클램핑 방법을 실험 변수로 하여 실험을 실시하였다. 단부 처리 기법에 따라 막재의 파단 형상이 다르게 나타나는 것을 확인하였다. 또한 실험체의 응력 패턴을 재료비선형 해석을 통해 분석하였다.



(11)3.1.3 경제성

(12)가. 구조시스템별 경제성 분석 연구

대공간구조물은 국민 생활수준의 향상과 함께 옥외에서 이루어지던 행위를 실내로 끌어들여 보다 쾌적한 생활을 영위하고자 하는 인간 욕망을 채워주는 건축물이다. 기둥 없는 넓은 공간을 만들기 위해서는 끊임없는 신재료 및 신기술의 개발을 통해 이루어 질 수 있다. 역학적 의미로는 힘의 합리적인 흐름을 이룰 수 있게 휨모멘트, 전단력, 비틀림 모멘트 등을 최소화하고, 축력을 전체 구조물에 과감히 도입하여야 보다 큰 대공간을 실현 할 수 있다.

대공간을 구성할 수 있는 구조시스템은 다양하다. 이러한 다양한 구조시스템 중에서 가장 적절한 형태의 구조시스템을 선택할 수 있는 도구가 매우 부족한 실정이다. 대공간을 형성할 수 있는 다양한 구조시스템에서 최적의 구조시스템을 하중저항 측면과 사용 재료의 측면에서 선택할 수 있는 자료의 구축 필요성이 절박한 실정이다.

300m 이상의 초대형 공간 구조물의 계획 및 설계 초기단계에서 보다 효율적이고 합리적인 구조시스템의 선택을 위하여 기존의 대공간 구조물의 공사비를 분석하여 경제적인 설계 가이드라인을 제공하는 것이 본 연구의 목적이다. 대공간 구조물의 경우 초기 설계 단계에서 적정한 공사비 규모의 산정과 효율적인 구조시스템의 선정에 대한 구체적인 데이터 및 연구가 전무한 실정에서 본 연구는 실무자에 효율적인 정보를 제공 할 수 있다고 판단되었다.

연구는 크게 3가지 주제를 가지고 진행 하였다. 연구 개발의 내용 및 범위는 다음과 같다.

- 공사비 분석에 의한 구조시스템별 경제성 분석연구
- 대공간 건축물의 구조설계 및 시공법에 있어서의 경제성 요인 분석 연구
- 건축재료에 의한 경제성 분석 연구
- 대공간 구조물의 기본 DB 구축

공사비 분석에 의한 구조시스템별 경제성 분석연구에서는 2002년 한일 월드컵 경기장과 최근에 건설된 대공간 건축물을 대상으로 각 구조시스템별 재료적 하중 저항 형태 분석, 공사비 구성 요소 분석, 대공간에 사용되는 구조시스템별 공사비 분석, 각 구조시스템별 공사비 특성비교, 구조시스템별 단위면적 당 분석, 구조시스템별 단위 席 당 분석을 수행하여 대공간 구조물의 초기 설계시 기획자나 설계자가 활용할 수 있는 기초 자료를 확보하고자 하였다.

대공간 건축물의 구조설계 및 시공법에 있어서의 경제성 요인 분석 연구에서는 대공간 구조물이 가지고 있는 특수성에 의하여 발생할 수 있는 비용의 증감 요인에 대하여 분석하였다. 기본적인 구조 형태, 입지 조건, 시공법, 접합부 형태 등이 비용 요인으로 작용할 수 있음을 확인 하였다.

건축재료에 의한 경제성 분석 연구에서는 현재 개발 되어 있는 건축 구조용 막재를 중심으로 개발 현황과 물성, 활용 현황 등을 분석하여 재료 선정시 활용할 수 있는 자료를 제공하고자 하였다.

연구 과정 중에서 획득한 다수의 대공간 구조물에 대한 정보를 데이터베이스화 하여 추후에 활용할 수 있는 기본 토대를 만들었다.

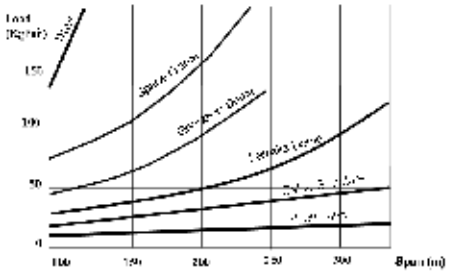
본 연구에서는 1년간 대공간구조물의 경제성 평가에 관하여 연구를 진행했다. 국내에 건설된 월드컵 경기장을 포함하는 스타디움 구조물은 공사비 분석을 통한 경제성 평가를, 전 세계의 구조물을 대상으로는 문헌분석을 통하여 구조시스템별 경제성 특성을 분석을 중심으로 진행하였다.

대공간 구조물의 기획 초기 단계에서 구조물 건립에 소요될 공사비의 규모를 예측하는 것은 많은 어려움이 따른다. 기획 초기단계에서 대공간을 구성할 수 있는 다양한 구조시스템의 구조적 특성과 아울러 경제적 특성의 분석은 효율적인 구조시스템의 도출과 프로젝트 전체 예산의 예측 및 프로젝트의 진행 여부를 판단하는데 매우 중요하다 할 수 있다.

현재 우리나라는 안산돔경기장을 필두로 여러 지방 자치단체에서 대공간구조물을 기획하거나 건설을 고려중이다. 본 연구결과가 대공간구조물의 건설에 활용되었으면 하는 바람이다.

(13)나. 스팬, 용도별 표준모델 분석 연구

건물 규모가 증가하면 힘의 크기가 증가하고 이것이 설계의 주요한 고려 사항이 될 뿐아니라 새로운 유형의 힘이 발생한다. 건물에서 규모의 영향은 보-스팬의 길이로 나타낼 수 있으며 일반적인 휨부재에서의 휨모멘트는 스팬길이의 제곱에 그리고 처짐은 스팬의 4제곱에 비례하여 휨응력이 설계를 좌우할 경우에는 스팬길이의 제곱으로 보의 춤을 증가 시켜야한다. 따라서, 50m, 100m를 넘는 장스팬구조물에서는 이러한 휨응력 지배구조시스템의 적용은 무리가 있으며, 건축물의 사용조건에 부합하면서 구조물의 변형을 제어하는 구조시스템 선택이 중요한 문제가 된다. 그림 1.2는 대공간구조물에서 가장 많이 채택하고 있는 구조시스템 별 자중의 관계를 나타내고 있다.



가) 그림 1 구조시스템에 의한 스팬-자중관계

대공간구조물의 용도는 그 적용 범위가 날로 증가하고 있다. 가장 보편적인 형태로는 스포츠시설물, 관람시설, 대형쇼핑몰에서부터 생태연구가 목적인 특수구조물도 등장하고 있다.

그러나, 대공간을 활용하는 건축물의 용도를 분류하고 그 용도에서 사용하고, 또는 앞으로 사용할 가능성이 있는 스팬에 가장 적절한 구조시스템의 모델제시와 관련된 연구는 매우 미흡한 실정이다.

이러한 스팬과 용도별 표준 구조시스템 모델제안에는 다양한 변수가 도입될 수 있다. 가장 경제적이면서도 건축물의 용도 즉, 사용성에 적합한 모델을 제시해야한다. 이것은 대공간 구조물의 저변 확대에도 매우 의미있는 연구가 될 뿐만 아니라 대공간 건축물의 설계 및 입안자들에게 매우 중요한 자료로 활용될 수 있다.

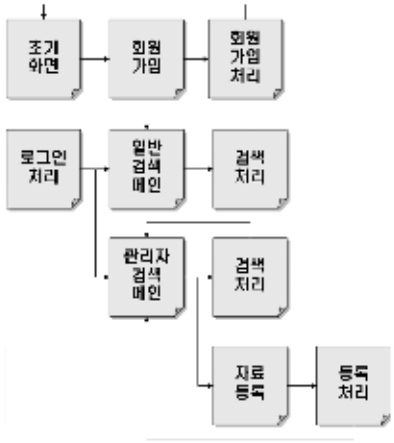
본 연구는 대공간 구조물의 용도별 특성 분석과 웹 데이터베이스 구축이라는 2가지 주제를 가지고 진행하였다.

대공간 구조물의 용도별 특성 분석에서는 대공간 구조체가 필요한 용도를 분류하고 소요공간을 분석하였다. 사례분석을 통하여 용도, 구조 시스템, 최대 스팬 등의 관계를 분석하였다. 또한 분석자료를 이용하여 용도별 표준(**하나의 용도와 스팬에 대하여 사용된 빈도수가 많고 적용성이 우수한 구조 시스템**)모델을 제안하였다. 구조물을 설계함에 있어서 표준이라는 것이 존재할 수 없겠지만 대공간구조물을 설계할 때 참고 자료로서의 역할은 충분할 것으로 본다.

대공간 구조물에 대한 웹데이터 베이스 구축은 전년도에 구축한 기본 데이터베이스의 활용성을 높이기 위해 수행하였다. 대공간구조물 건설을 위한 준비는 기존의 구조물에 대한 정보를 수집, 분석하는데서 부터 출발한다고 할 수 있다. 그러나 대공간구조물의 정보를 획득할 수 있는 효율적인 매체의 부재로 인하여 건설관련 종사자의 입장에서 어려움이 있는 것이 현재 우리 건설업계의 실정이다. 따라서 대공간구조물에 대한 체계적이고 통합적인 정보를 제공할 수 있는 매체의 구축, 특히 전문 정보를 지원하는 데이터베이스의 구축은 중요한 문제라고 사료된다. 기획부터 시공까지 대공간구조물에 대한 전반적인 정보의 교류를 활성화 하기위해서는 각 주체간의 독립적 데이터베이스를 기반으로 하는 개별적인 시스템 보다 정보 활용의 범위를 확대할 수 있는 웹 기반의 데이터베이스가 효율적이라고 판단된다.

대공간구조물 웹 데이터베이스는 국내, 국외의 주요 대공간구조물에 대한 건축 이력 및 건축정보에 대하여 웹 기반 검색을 지원하는 시스템으로서 국내/외 대공간구조물에 대한 전반적인 정보를 취합하고 이를 체계화하여 건축 분야의 대공간구조물에 관심을 갖고 있는 많은 사용자들에게 통합 검색 서비스를 제공하기 위한 것이다

본 웹 데이터베이스를 통하여 대공간구조물에 대한 정보를 일부 공유하여 국내의 대공간구조물에 대한 기술과 정보의 경쟁력을 키울 수 있으며, 유사 공사에 대한 정보 검색에 소요되는 시간과 비용을 절감할 수 있으며, 건설사, 학계 간의 정보 공유를 통해서 지속적인 파트너십을 고양할 수 있다.



나) 그림 2 웹 데이터 베이스의 구성도

가. 3.2 비선형해석 및 구조설계 기법 개발
나.

SUMMARY

[1] 비선형해석

대공간 구조는 형태저항구조로서, 기둥-보로 구성되는 일반 건축골조구조가 설계외력에 대해 휨 및 전단으로 저항되는 것에 반해, 내부에 기둥이 없는 공간을 내포하는 대공간 구조는 축력 및 면내단면력에 의한 저항이 대부분이다. 이러한 특성상 공간구조에는 일반적으로 장스팬이 사용 되는 경우가 많으며, 그 결과 부재에 발생하는 변형도가 작은 경우에도 큰 변형이 발생하는, 대변형 혹은 유한변형을 동반하게 된다. 이러한 점이 원인이 되어, 정적 및 동적해석에 있어 구조체의 기하형상의 변화에 기인되는 역학적 특성을 고려한 구조해석이 필요하게 된다. 또한, 전술한 바와 같이 대공간 구조의 경우, 단면력으로서 축력이 지배적이므로 부재의 국부적인 소성화에 따른 소성힌지의 발생 및 소성역의 진전 등을 고려한 부재레벨의 탄소성해석이 필요하게 된다. 또 일반 골조와 달리 대공간 구조의 경우 정적, 동적해석에 관계없이 비선형해석이 요구된다. 따라서 본 세세부에서는 이러한 대공간 구조물의 비선형해석을 위한 연구를 수행하였다.

[2] 구조안정

21세기로의 도약을 향해 우리들은 첨단산업을 중심으로 하는 기술집약 시대를 맞고 있으며, 여러 첨단산업들 중에서도 초대형 구조물 분야, 특히 대공간 구조물 분야의 기술력 확보는 최근 중요한 과제로 대두되고 있다. 이러한 대공간 구조물은 구조거동 특성상 주로 구조안정(structural stability) 문제가 설계의 중요한 기술력의 핵심이 되며, 이를 어떻게 해결할 것인가 하는 문제는 아직도 많은 연구자들 사이에서 난제로 남아 있다.

[3] 내진설계

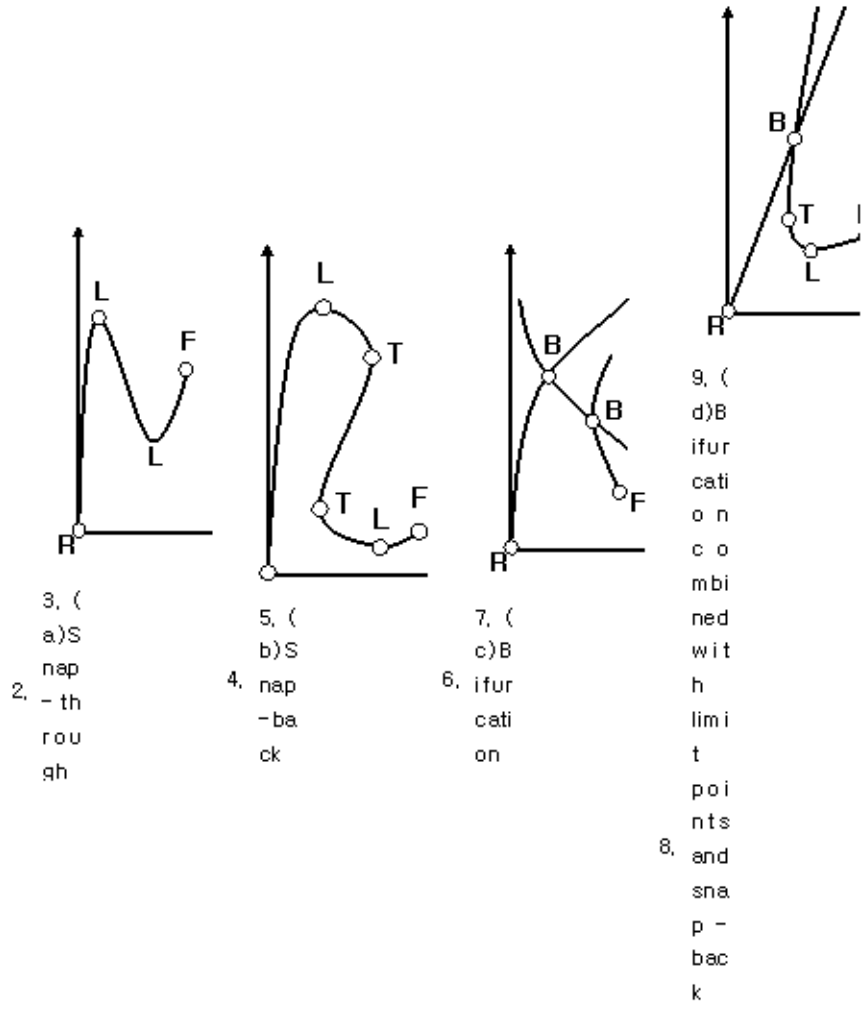
대공간 건축물에서 지진동-지반-하부구조-상부구조의 연성모델에 대한 모델링기법의 개발과 공간구조에 적용가능한 등가정적해석의 모델링이 필요하다. 내진설계와 연계하여 최근 선진국에서 시도된바 있는 면진기법을 적용한 대공간구조물의 거동을 분석하므로써 면진시스템의 적용성을 평가할 필요가 있다. 이러한 연구결과들을 토대로 현행 내진설계기준에 부합되며 실무에 직접 도입될 수 있는 대공간구조물의 내진설계 지침을 마련하고자하였다.

(1) 3.2.1 비선형해석

1. 가. 대공간 구조의 비선형해석 기법 개발

대공간 구조는 형태저항구조로서, 기둥-보로 구성되는 일반적인 건축골조구조가 설계외력에 대해 휨 및 전단으로 저항되는 것에 반해, 구조물의 내부에 기둥이 없는 공간을 내포하는 대공간 구조는 축력 및 면내단면력에 의해 저항되는 경우가 대부분이다. 이러한 특성상 공간구조에는 일반적으로 장스팬이 사용 되는 경우가 많으며, 그 결과 일반적인 골조와는 달리, 부재에 발생하는 변형도가 작은 경우에도 큰 변형이 발생하는, 즉 대변형 혹은 유한변형을 동반하게 된다. 이러한 점이 원인이 되어, 정적 및 동적해석에 있어 구조체의 기하형상의 변화에 기인되는 역학적 특성을 고려한 구조해석이 필요하게 된다. 또한, 전술한 바와 같이 대공간 구조의 경우, 단면력으로서 축력이 지배적이므로 부재의 국부적인 소성화에 따른 소성힌지의 발생 및 소성역의 진전 등을 고려한 부재레벨의 탄소성해석이 필요하게 된다. 일반적인 건축골조와는 달리 대공간 구조의 경우 정적, 동적해석에 관계없이 비선형해석이 요구된다는 것을 알 수 있다. 따라서 비선형 해석과제를 수행하기 위한 연구로 공간 골조구조, 쉘 구조 및 연성구조물의 비선형 수치해석 모델들에 대하여 조사 분석 및 개발의 연구범위를 설정하고 연구를 수행하였다.

대공간구조의 비선형해석시 가장 신뢰성 높고 안정적이며 효율적인 해석 알고리즘을 결정하기 위해 간단한 트러스 구조물을 대상으로 튐좌굴(Snap-through)과 분기형 좌굴(Bifurcation) 문제를 뉴튼-랩슨법(Newton-Raphson Method), 변위 증분법, 호장법(Arc-length method)으로 해석하여 각각의 기하학적 비선형 해석 기법의 효율성 및 적용성을 비교, 분석 하였다. 안정 구간에서는 각각의 기하학적 비선형 해석 기법들의 해가 안전하게 수렴하는것과 각 기법에 따라 결과가 서로 일치하는 것을 확인하였다. 튐좌굴 현상과 분기형 좌굴 현상 문제에 따라 각각의 기하학적 비선형 해석 기법의 효율성과 안정성은 차이점을 보였다. 그러므로 어떠한 해석 기법을 선택하느냐에 따라 정확도, 수렴성, 계산시간 등에 따라 각기 다른 장단점을 보여준다. 뉴튼-랩슨법은 비선형성이 약한 곳에서는 매우 빠르고 안정적인 해석결과를 주지만 불안정 경로에서는 기하 비선형성을 표현하는 데에는 부적절한 기법이다. 호장법은 불안정 경로까지 추적할 수 있지만 강성 매트릭스를 매번 갱신 해야 하므로 많은 시간이 소요되는 단점이 있다. 그러나 본 예제의 단순 모델에서는 뉴튼-랩슨법과 큰 차이를 보이지 않았다. 재료비선형을 고려하여 트러스구조의 비탄성 비선형 해석을 수행한 결과 안정적인 해석결과를 얻었다.



2, 3, (a)Snap-through

4, 5, (b)Snap-back

6, 7, (c)Bifurcation

8, 9, (d)Bifurcation combined with limit points and snap-back

10,그림 3.2.1 복잡한 비선형 응답 특성

이상과 같은 각 해석 결과로부터 다자유도의 복잡한 구조물의 해석에서는 비선형성이 약한 곳에서는 뉴튼-랩슨법을 비선형성이 강한 곳에서는 호장법을 사용하는 2가지 알고리즘을 병행하는 기법이 가장 효율적인 것으로 판단된다.

11.

12.나. 이산계 강성 구조물의 기하학적 비선형해석 기법 개발

기둥이 없는 공간을 내포하는 대공간 구조에는 일반적으로 장스팬이 사용 되는 경우가 많으며, 그 결과 부재에 대변형 혹은 유한변형을 동반하게 되어, 정적 및 동적해석에 있어 구조체의 기하형상의 변화에 기인되는 역학적 특성을 고려한 구조해석이 필요하게 된다. 본 연구에서는 이산계 강성 구조물인 스페이스 트러스 구조물의 기하학적 비선형해석 기법의 개발을 위하여 스페이스 트러스 구조, 스페이스 프레임 구조의 비선형 수치해석 모델들에 대하여 조사 분석 및 개발의 연구범위를 설정하고 연구를 수행하였다.

스페이스트러스 해석모델 개발에서 기하학적 비선형성 알고리즘에 대해 기술하기 위해 스페이스 트러스의 수식화방법 중의 하나인 전체 라그랑주 수식화와 수정된 라그랑주 수식화를 기술하였으며 각각의 변위장 및 변형률, 변분방정식, 구성방정식, 유한요소해석모델 그리고 좌표변환 방법을 기술하였다.

스페이스프레임 해석모델 개발에서 공간구조물의 해석모델에 대해 기술하기 위해 스페이스 프레임의 수식화방법 중의 하나인 고전 보 해석 모델과 전단 변형 보 모델을 기술하였으며 각각의 변위장 및 변형률, 변분방정식, 구성방정식, 유한요소해석모델 그리고 좌표변환 방법을 기술하였다.

구조체의 배열에 따른 변형에 따라 Co, C1, C3 로 구분시켰으며 Co은 초기 변형 없는 배열, C1은 지난 알고 있는 변형 배열, C2는 현재의 변형 배열로 정의한다. 또한 변위의 표현은 다음과 같다.

$$ {}^{1}_{0}u_i = {}^{1}x_i - {}^{0}x_i $$
$$ {}^{2}_{0}u_i = {}^{2}x_i - {}^{0}x_i $$

$$ u_i = {}^{n}_{0}u_i - {}^{1}_{C}u_i $$

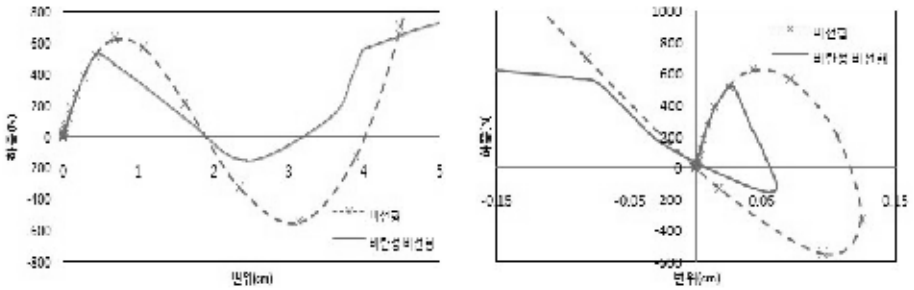
modified Riks 방법과 가속알고리즘을 결합한 비선형 해석에서 기하학적 비선형성 알고리즘에 대해 기술하기 위해 기하학적 비선형 해석알고리즘인 modified Riks 와 자동추적법을 기술하였으며 재료적 비선형성 알고리즘에 대해 기술하기 위해 재료적 비선형성의 필요성과 본 연구에 적용된 응력-변형률도를 기술하였다.

스페이스트러스 및 스페이스프레임 비탄성비선형 모델 개발 및 해석에서는 스페이스트러스 및 스페이스프레임의 개발된 모델에 대한 수치적 모델을 제시하고 해를 검증함으로서 수치적 모델의 결과를 비교 분석하였으며, 그 근원에 대하여 기술하였다.

스페이스트러스 및 스페이스프레임 동적해석에서 스페이스트러스 및 스페이스프레임의 개발된 모델에 대한 동적해석 모델을 제시하고 해를 검증함으로서 수치적 모델의 결과를 비교 분석하였으며, 그 근원에 대하여 기술하였다.

본 연구에서는 스페이스 트러스, 스페이스 프레임 해석모델의 개발을 위해 스페이스 트러스와 스페이스 프레임의 수식화 방법 중 전체라그랑주와 수정된 라그랑주, 고전 보 해석 모델과 전단 변형 보 모델을 기술하였으며, 각각의 변위장 및 변형률, 변분방정식, 구성방정식, 유한요소해석모델, 그리고 좌표변환 방법을 기술하였다. 또한 기하학적 비선형 해석알고리즘은 modified Riks와 자동추적법을 기술하였다. 또한 동적해석 모델을 포함한 수치적 모델을 제시, 해를 검증함으로서 결과를 비교 분석하였다.

13.



14.(a) 1번 절점 15.(b) 2번 절점

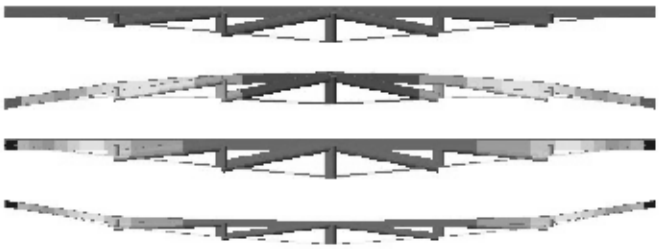
16.그림 3.2.2 스타 트러스의 하중-수직변위 곡선

17.다. 하이브리드 구조물의 비탄성 비선형 거동 연구

대공간 건축물의 발전은 강성시스템에서 연성시스템을 거쳐 하이브리드 시스템으로 진행되고 있다. 미국이나 유럽 등에서는 현재까지 대부분의 대공간 건축물은 강성구조시스템으로 건설되어 오고 있지만 연성구조시스템으로 변화되고 있고, 더욱이 하이브리드구조 시스템의 개발도 증가하고 있다. 이렇듯 최근 대공간 구조의 추세가 Tensegrity 나 Under Tension과 같은 하이브리드 구조시스템으로 변화 하고 있다. 따라서 본 연구에서는 보다 실용적인 하이브리드 구조시스템의 비선형 수치해석 모델들에 대하여 조사 분석 및 개발의 연구범위를 설정하고 연구를 수행하였다.

일반적인 상용프로그램에서 비선형해석을 수행할 경우, 모델링에 많은 시간이 소요되게 된다. 반면에 본 연구를 통해 개발된 프로그램의 경우, 부재 절점의 위치와, 각 부재의 연결 상태, 탄성계수, 부재 단면적을 입력하는 것으로 구조물의 비선형 처짐 및 부재응력을 계산할 수 있다.

언더텐션 케이블이 적용된 구조물의 경우에 프리텐션의 값이 증가할수록 구조물의 최대 처짐이 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 프리텐션의 값이 증가할수록 각 부재에 걸리는 부재응력이 증가하게 되며, 이는 부재의 크기 증가와 시공비, 기타 공사비에 영향을 미치는 만큼 이에 대한 고려가 필요할 것으로 사료된다. 연구를 통한 언더텐션 시스템의 거동 변화는 아래 그림과 같다.



18.그림 3.2.3 언더텐션 시스템의 거동 변화

실제 언더텐션 시스템이 적용된 경기도 성남시 판교택지개발지구에 시공된 공원 8호교에 각종 측정 장비를 설치하여 실제 구조물의 거동을 측정하고 이를 해석값과 비교함으로서 구조 해석 프로그램의 신뢰도를 검증하고자 하였다. 본 교량에서 측정된 값에 따르면, 상부 빔의 경우에는 마이더스의 해석값과 실제 구조물의 부재응력의 값이 일정 오차율을 유지하면서 나타나는 것을 볼 수 있었다. 특히 휨응력 만을 고려한 결과에 있어서는 큰 오차를 나타낸 반면, 기타 조건을 추가로 고려한 응력에서는 그 정확도가 높아지는 것을 볼 수 있었다. 이는 언더텐션 구조물을 해석함에 있어 휨 변형 이외에 많은 부분에 고려가 필요함을 나타내는 것이다.

텐세그러티 구조물의 특성상 자기응력 평형 모드를 구하기 위해서 정방형 행렬인 아닌 행렬을 풀어야 하는 난제가 발생한다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 고유치해석을 이용하여 자기평형 응력 모드를 결정하는 방법을 최초로 제시하였으며 이는 기존의 해석방법보다 훨씬 손쉽고 간단하게 자기응력 축력 벡터가 결정되어 효율적이며 그 값도 신뢰할 수 있다.

텐세그리티 구조물의 비선형 해석을 수행하기 위해 토탈 라그랑주와 수정 라그랑주를 수식화 하였으며, 각각의 변형률, 강성매트릭스, 유한요소해석모델에 대해서 기술하였다. 또한 휨, 인장, 압축력에 대한 4-STRUT 모델과 5-STRUT 모델을 비교 분석하였으며, 본 연구에서 수행되어진 방법의 결과는 기존 연구에서 제시되었던 결과들과 비교해 보았을 때, 더 정확한 값을 가지는 것으로 나타났다. 텐세그리티 구조물의 반응은 기하학적 강성을 띠는 것으로 관측되어졌으며, 압축력과 별도로 텐세그리티 구조물의 강성은 적용된 하중과 자기응력 진폭과 함께 증가하였다. 최대로 발생되는 휨의 경우, 텐세그리티 구조물의 휨강성은 미소변위와 같이 증가하는 것으로 나타났다. 최대 처짐에 대하여, 수정 라그랑주 공식이 토탈 라그랑주 공식 보다 더 정확한 해를 유추하는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 자체적으로 비선형 해석 프로그램을 개발하여 언더텐션 시스템의 비선형 해석을 수행하였으며, 본 프로그램을 통해 부재 절점의 위치와, 각 부재의 연결 상태, 탄성계수, 부재 단면적을 입력하는 것으로 구조물의 비선형 처짐 및 부재응력을 계산할 수 있으므로 본 프로그램을 사용할 경우 해석에 소요되는 시간을 단축시킬 수 있다. 또한 텐센그리티 구조물의 비선형해석 수행을 위해 토탈 라그랑주와 수정 라그랑주를 수식화 하였으며, 각각의 변형률, 강성매트릭스, 유한요소해석모델에 대해 기술하였으며 고유치해석을 이용한 자기평형 응력 모드를 결정하는 방법을 최초로 제시하였다.

19.라. 케이블-스트럿 구조물의 비탄성 비선형 거동 특성 연구

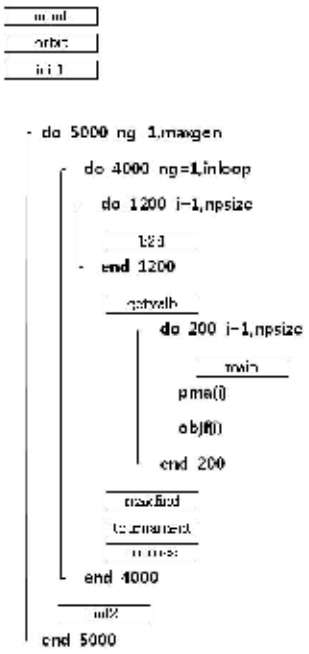
최근 대공간 구조의 추세가 Tensegrity, Under Tension과 같은 케이블-스트럿 구조시스템으로 변화하고 있다. 이에 본 연구에서는 보다 실용적인 케이블-스트럿 구조시스템에 대한 연구를 진행 하였다. 비선형 해석 과제를 수행하기 위한 연구로 Tensegrity, Under Tension과 같은 케이블-스트럿 구조시스템의 비선형 수치해석 모델들에 대하여 조사 분석 및 개발의 연구범위를 설정하고 연구를 수행하였다. 또한 구조물의 설계 시 최적 설계를 하기 위하여 마이크로 유전 알고리즘을 이용한 프로그램을 개발하였다.

본 연구에서는 최적화 기법인 마이크로 유전알고리즘(Micro Genetic Algorithm : μ-GA)을 이용하여 트러스 모델의 최적설계 프로그램을 개발하였으며 본 프로그램은 트러스 구조물의 다양한 형태에 대해 최적화시 모두 효율적인 결과를 보여 주었으며 10-bar 트러스, 언더텐션 시스템, 72-bar 트러스를 통해 그 결과를 입증하였다. 따라서 최적 설계를 바탕으로 최소의 물량을 가능케 하는 최적의 단면들을 찾아낼 수 있으므로 경제적이며 효율적인 설계가 가능하다. 언더텐션 시스템에서 하부케이블의 초기 인장력 증가는 물량을 절감하는데 효과적임을 입증하였다. 또한 KBC 2009 의 일반구조용 탄소강 강관의 표준치수를 이용한 최적화가 가능하였다. 그 결과 좌굴응력이 고려된 언더텐션 시스템의 최적설계가 가능하였으며 보다 실무에 적합한 최적설계가 가능하다.

케이블 및 텐세그리티 구조물에 대한 응력해석 방법은 정정 트러스의 경우 힘의 평형을 만족하는 평형 방정식의 개수와 미지력의 개수가 서로 일치하므로 기존의 B 행렬을 이용하여 정확한 형상해석을 수행할 수 있었으나 부정정 트러스의 경우 미지력의 개수가 주어진 평형 방정식의 개수 보다 많으므로 이에 대한 추가적인 평형 방적식을 고려한 응력해석 방법이 필요하다. 따라서 이러한 문제점을 고려하면서 보다 간단하게 형상해석을 수행할 수 있는 특이값 분해로 정식화된 새로운 응력법을 제안하였으며 제안된 방법을 통해 부정정 트러스 및 복잡한 케이블 돔에 대한 응력 해석 방법을 보다 간단하게 수행 할 수 있고 구조 부재 고유의 성질을 고려하여 설계 할 수 있으므로 기존의 방법보다 더 효율 적인 방법이 될 수 있다.

또한 본 연구에서는 현대에는 일률적 선형 건축의 대량생산과 대형화에서 벗어서 인간적인 비정형 건축물이 창출 되고 있다. 따라서 Rhino를 이용하여 Freeform 모델링을 위한 사례를 분석하고 Freeform 건축물에 Rhino를 적용하기 위한 문제를 해결해 나가기 위한 연구를 진행하였다. Rhino를 이용하여 모델링 된 Freeform은 아직은 국내에서 실현하기에는 기술적인 문제들이 많이 있다. 설계기술에서는 freeform건축물의 단면은 레벨에 따라 같은 형상이 하나도 없을 정도로 복잡하여, 설계-시공 상의 커뮤니케이션 오류를 방지하려면 통합설계, 변수설계 및 도면 자동생성기술 등이 필요하다. 그로 인해, 비정형건축물을 모델링하기 위해 수학적 곡면을 다룰 수 있는 Rhino를 적용하기 위해 연구가 이루어지고 있다. 또한 Rhino는 NURBS를 기반으로 하여 지오메트리와 다각형 메쉬를 와이어프레임 커브를 내보낼 수 있다. 그리고 어떤 파일로든 Export, Import가 가능하여 광범위한 작업의 확장성으로 인한 전산구조해석이 가능 할 것이다.

20.

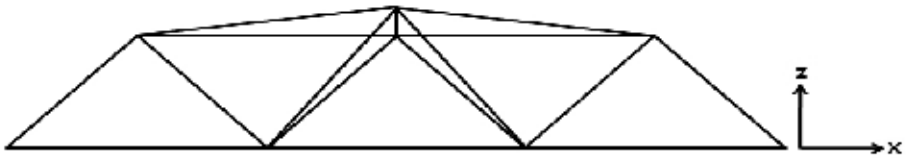


21.그림 3.2.4 개발된 프로그램의 흐름도

22.마. Free form 케이블-스트럿 구조물의 비선형거동 특성연구

케이블-스트럿 시스템의 개발은 선진국에서는 이미 많은 부분이 진행 되었으나 국내에서는 연구 및 실적이 선진국에 비해서 미비한 실적이다. 대중들의 다양한 사회 · 문화 활동의 증가와 월드컵 및 올림픽과 같은 국제 행사로 인해 대공간 건축물에 대한 관심이 증대되고 있다. 최근 국내에서는 불투명한 경기전망으로 인해 대공간 건축의 미래가 예측하기 힘든 상황이지만 경기 활성화에 따른 수요 증대에 대비한 기술 축적의 필요성은 꾸준히 제기 되고 있다. 현재까지 대부분의 건축물은 강성시스템으로 건설되어 오고 있지만 대공간 구조 시스템의 경향에 따라 연성구조시스템으로 변화되고 있으며, 케이블-스트럿을 이용한 대공간 시스템의 개발도 증가하고 있다. 본 연구에서는 실용적이며 강력한 케이블-스트럿 구조물의 시스템에 대한 연구를 진행하였다.

본 연구에서는 자체 개발한 마이크로 유전알고리즘(Micro Genetic Algorithm : μ-GA)을 이용한 트러스 모델의 최적설계 프로그램을 이용하여 다양한 트러스 예제를 선정하여 최적화를 수행하였으며, 프리텐션을 받는 트러스 구조물의 최적화를 수행하였다. 72-bar 트러스를 예제 모델로 선정하여 설계변수로 부재의 단면적 및 절점을 고려하였으며, 프리텐션을 변수를 추가하여 최적화를 수행하였으며 최적 형상의 입면도는 아래 그림과 같다.



24.그림 3.2.5 72-bar 트러스의 최적 형상의 입면도

텐세그리티 구조물의 비선형거동 특성 연구를 위하여, 텐서그리티 구조 시스템을 활용하기 위해 반드시 선행되어야 하는 형상탐색의 과정을 기존의 트러스 구조 해석에 국한되었던 하중법(Force method)을 이용한 새로운 형상 탐색법을 제안하였다. 하중법(Force Method)은 각 절점의 평형 방정식을 이용하여 트러스 및 핀-조인트 골조 시스템의 구조 해석에 주로 사용하는 구조 이론으로 1960년대까지 구조 분야에서 전반적으로 사용되었다. 하중법은 절점의 평형 방정식을 이용하여 해석을 수행하는 절점법을 기반으로 만든 이론으로써 절점의 변위를 이용하여 구조 해석을 수행하는 기존의 트러스 구조 해석법과 달리 기본 개념 및 해석 방법이 쉬우며 부재력을 바로 구할 수 있어 구조 엔지니어에게 있어 매우 효율적인 방법이다.

또한 내력밀도법을 이용하여 Free-form 형태의 텐세그리티 구조물의 형상탐색을 위한 연구를 수행하였으며 각 모듈의 형상해석 결과는 아래 표와 같다.

표 3.2.1 (5 × 1) 텐세그리티 그리드 구조물의 형상해석 결과

부 재	그 룹	모듈1 (kN)	모듈2 (kN)	모듈3 (kN)	모듈4 (kN)	모듈5 (kN)
1	하부케이블	3,889	3,753	3,723	3,679	3,719
2		6,87	6,517	6,552	6,559	6,963
3		3,7	7,253	6,875	6,913	6,913
4		7,253	6,875	6,913	6,913	3,705
5	상부케이블	5,173	4,639	4,681	4,639	5,18
6		5,158	5,04	5,053	5,04	5,18
7		5,129	4,639	4,681	4,639	5,18
8		5,25	5,084	5,095	5,084	5,18
9	대각케이블	5,262	5,084	5,095	5,084	5,18
10		4,95	4,459	4,488	4,671	5,18
11		5,158	4,639	4,681	4,639	5,18
12		5,233	5,158	5,312	5,296	5,477
13	스트럿	-9,063	-8,472	-8,514	-8,472	-9,041
14		-9,063	-8,472	-8,514	-8,472	-8,971
15		-9,063	-8,78	-8,776	-8,78	-8,971
16		-8,934	-8,034	-8,108	-8,034	-8,971

23.

25.바. 대공간 구조물의 비선형해석 가이드라인

대공간 구조는 일반적인 건축골조구조가 설계외력에 대해 휨 및 전단으로 저항되는 것에 반해, 축력 및 면내단면력에 의해 저항되는 경우가 대부분이다. 이러한 특성상 공간구조에는 일반적으로 장스팬이 사용 되는 경우가 많으며, 그 결과 부재에 발생하는 변형도가 작은 경우에도 큰 변형이 발생하는, 즉 대변형 혹은 유한변형을 동반하게 된다. 이러한 점이 원인이 되어, 정적 및 동적해석에 있어 구조체의 기하형상의 변화에 기인되는 역학적 특성을 고려한 구조해석이 필요하게 된다. 따라서 일반적인 건축골조와는 달리 대공간 구조의 경우 정적, 동적해석에 관계없이 비선형해석이 요구된다는 것을 알 수 있다. 이러한 요구에도 불구하고 현재 선진국형 고급핵심기술의 폐쇄된 장벽을 기업차원에서 극복하기 어려우며, 전문기술보유의 중소기업 중심의 기술의 기반이 부족하기 때문에 국내의 대공간 건축물의 국내기술자립이 어려운 상황이다. 따라서 비선형 해석 과제의 수행에 의하여 스페이스 트러스 해석 가이드라인과 기존의 대공간 건축물이 강성구조시스템으로 건설되었던 부분과 반하여 최근 대공간 구조시스템의 경향에 따라 연성 구조시스템으로 변화하며, 더욱이 하이브리드 구조 시스템의 개발이 증가함에 따라, 하이브리드 구조 시스템 중 언더텐션 구조 시스템과 텐세그리티 구조 시스템을 고려하여 언더텐션 해석 가이드라인, 텐세그리티 해석 가이드라인을 조사 분석 및 개발의 연구범위를 설정하고 연구를 수행하였다.

일반적으로 수치해석에 있어 비선형해석이란 기하학적 비선형 및 재료적 비선형, 또는 이 두 가지를 동시에 고려한 복합비선형해석을 들 수가 있다. 스페이스 트러스 기하학적 비선형과 재료적 비선형 중 일반적으로 기하학적 비선형이 지배적이며 그에 따른 해석 방법을 적용하여야 한다. 특별히 스페이스 트러스의 경우 여러 가지의 기하학적 비선형 해석 방법 중 Arc-Length Method가 유용하며 본 연구에서는 Star Dome 예제를 통하여 연구를 수행하였다. 또한 유전 알고리즘을 이용한 스페이스 트러스의 최적설계에 관한 연구를 통하여 구조물 최적화의 연구를 수행하였다.

언더텐션 구조 시스템은 빔에 적용되는 하중으로 인한 모멘트가 케이블에 작용하는 인장력에 의하여 부분 상쇄됨으로써 구조물의 처짐을 효과적으로 제어할 수 있는 구조 시스템이다. 언더텐션 시스템은 빔과 하부의 케이블, 그리고 빔과 케이블을 연결시켜 주는 중앙 스트럿으로 구성되어 있다. 이러한 언더텐션 구조 시스템은 케이블 부재에 프리텐션을 가해지도록 설계되어 있으며, 언더텐션 구조 시스템의 해석 과정에서는 프리텐션 값의 변화에 따른 비선형 거동의 관찰과 구조시스템을 이루고 있는 부재가 인장과 압축을 순차적으로 받는 특징을 고려하여 해석 및 설계되어야 한다. 이러한 언더텐션 구조 시스템의 해석 기법과 예제를 통하여 연구를 수행하였다.

텐세그리티 구조물은 길이가 짧은 압축 부재와 케이블로 이루어진 인장 부재로 인해 발생되는 압축력과 인장력이 구조물 전체에 분배되어 균형을 이루는 구조 시스템이다. 이러한 텐세그리티 구조물은 케이블에 압축력이 가하여지지 않도록 설계하는 것이 중요하며 이에 따라 일반 구조 시스템과 달리 구조 해석 이전에 형상탐색이 반드시 수행되어야 한다. 텐세그리티 해석을 위해 Force-Finding과 Form-Finding을 통한 텐세그리티 구조 시스템의 해석에 관하여 연구를 수행하였다.

이상의 연구 내용을 기반으로 스페이스 트러스, 언더텐션, 텐세그리티 구조물의 해석 가이드라인을 도모하였다.

26.


스페이스 트러스


언더텐션


텐세그리티

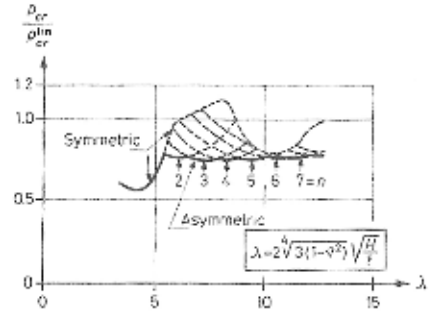
그림 3.2.6 대공간 구조물

(1) 3.2.2 구조안정

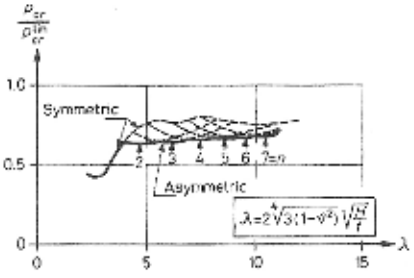
27.가. 대공간 구조시스템의 구조안정 특성 조사 연구

쉘 구조 원리를 이용한 대공간 구조물은 역학적 장점과 함께 이에 대응하는 구조불안정 문제를 극복하여야만 안전한 구조물의 구축을 실현할 수 있다. 구조물의 안전한 구축을 위한 많은 학자들의 노력에도 불구하고 크고 작은 무수한 사고들은 존재해 왔고, 구조 불안정 문제는 사고의 원인 분석과 규명에 있어서 매우 중요한 위치에 있다. 특히 쉘형 구조물은 초기 불완전성에 매우 민감한 구조물로서 다양한 연구결과들이 발표되고 있지만 아직도 불확실성만 존재하고 있는 실정이다.

28.



29.



30. (a) 고정경계 완전형상 31. (b) 힌지경계 완전형상

32. 그림 3.2.7 구형 캡의 축대칭 변형에서 분기된 비대칭 좌굴의 임계하중

(1) 대공간 구조물의 붕괴사례와 불안정현상의 판별 - 쉘형 구조물의 붕괴사례에 대해서 조사하여 원인을 간략하게 소개하였으며, 불안정 현상에 대한 이론적 판별과정을 고유벡터와 하중모드를 이용하여 설명하였다. 결론적으로 좌굴점의 분류는 극한점과 분기점으로 나뉘며, 다시 대칭분기와 비대칭 분기점으로 분류된다.

(2) 쉘형 구조물의 형태에 따른 구조불안정 특성 조사 - 기본적인 형태에 대해서 불안정 특성을 조사하였으며, 원통형, 원뿔형 및 구형 쉘을 대상으로 하였다. 구조물의 곡률이 상수인 까닭에 비교적 많은 연구가 선행되었지만 아직도 실험결과와 이론의 차이가 많으며, 원인으로는 초기불완전에 따른 민감성 때문이다.

(3) 쉘형 구조물의 하중 및 경계조건에 따른 불안정 특성 - 초기형상불완전성에 따른 민감성 외에도 하중모드의 불완전성이나 경계조건의 영향은 구조물의 임계하중을 더 낮게 하는 경향이 있으며, 단순 형태의 모델을 통해 하중비에 따른 구조물의 거동을 분석하였다. 또 자유 경계를 갖는 쉘의 비선형 불안정 거동의 특성을 조사 연구하였다.

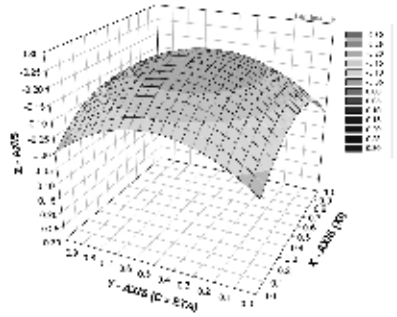
(4) 초기 불완전성에 대한 민감도 특성 분석 - 얕은 쉘의 분기거동은 비대칭 좌굴변형에 대한 문제로 대칭모드와 비대칭 모드에 따른 불안정 거동 분석이 필요하다. 또 민감한 구조물의 경우 초기 불완전 량의 증가는 좌굴현상의 진행을 가속시키는 원인이 된다. 이와 같은 특성을 얕은 아치 구조물과 공간 구조물을 대상으로 고유좌굴모드 및 불완전량에 따른 비선형 불안정 거동을 분석하였다.

(5) 구조불안정성을 고려한 구조설계 적용 및 방법에 대한 분석 - 돔형 및 공간 트러스형 대공간 구조물을 대상으로 좌굴모드 및 하중모드의 적용방법을 설명하였으며, 하중 변위 곡선의 변화에 따른 좌굴현상의 판단과 구조 불안정성의 분석 방법을 설명하였다.

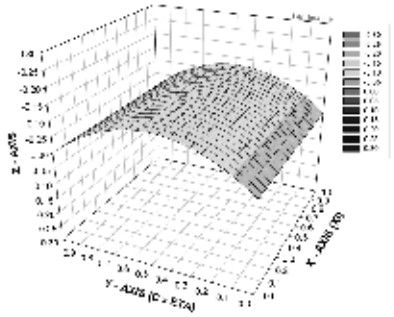
33.나. 쉘형 구조물의 정적 구조불안정 특성 연구

쉘 구조 원리를 이용한 대공간 구조물은 곡률에 의한 역학적 특성을 이용한 것으로서 역학적 효율성을 최대화한 합리적인 구조시스템이다. 그러나 이러한 역학적 장점과 함께 이에 대응하는 구조불안정 문제를 극복하여야만 안전한 구조물의 구축을 실현할 수 있다. 구조 불안정 문제는 빈번히 발생하는 대형구조물의 사고 원인 분석과 규명에 있어서 매우 중요한 위치에 있다. 특히 쉘형 구조물은 다양한 조건에 대하여 매우 민감한 구조물로서 많은 이론과 연구결과들이 발표되고 있지만 아직도 불확실성만 존재하고 있는 실정이다.

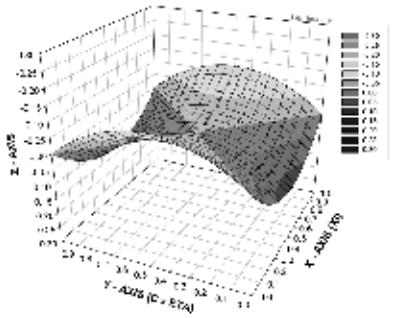
따라서 본 과제에서는 쉘/평판의 비선형 기초이론 및 문헌을 조사하고, 정적 불안정 거동의 판별 이론, 쉘형 구조물의 비선형 운동방정식의 유도 및 쉘/평판 요소의 강성행렬에 대한 비선형 이론을 소개한다. 또 쉘형 구조물의 요소에 따른 해의 수렴을 정적 응력-변형해석을 통해 고찰하고 고유치해석을 수행하여 고유좌굴모드 및 고유진동수를 살펴본다. 또 쉘형 구조물의 불안정성을 분석하기 위해서 비연성 거동을 하는 쉘과 연성거동을 하는 쉘에 대해 불안정 거동과 좌굴하중 특성을 증분단계별 행렬식과 고유치해석을 수행하고, 그 결과를 고찰한다.



(a) $\lambda > 0$: EP Shell



(b) $\lambda = 0$: 원통 Shell



(c) $\lambda < 0$: HP Shell

34. 그림 3.2.8 주곡률비 λ의 변화에 따른 쉘의 형상

구속의 경계조건(CASE-B)의 경우는 쉘의 깊이의 변화에 의한 등골곡선의 양상은 거의 같은 모양 이지만 비구속의 경계조건(CASE-A)의 경우는 매우 다르게 나타난다. 깊은 쉘 (λ_s=11.575)의 경우는 경계조건의 변화에 의한 등골곡선의 양상은 거의 같은 모양 이지만 얕은 쉘(λ_s=5.758)의 경우는 매우 다르게 나타난다. 하중레벨에 있어서 초기의 모드 차이 즉, 선형해석시의 제1모드와 제2모드의 간격은 대칭모드에서는 비구속의 경계조건의 경우는 비교적 가깝고, 구속의 경계조건의 경우는 비교적 멀다. 그러나 비대칭 모드의 경우에서는 비구속의 경계조건의 경우는 비교적 멀고, 구속의 경계조건의 경우는 비교적 가깝다. 대칭모드는 구속의 경계조건의 경우는 쉘의 깊이에는 관계없이 제2모드가 낮은 모드를 나타내고 있다. 그러나 비구속의 경계조건이 경우에서는 쉘이 얕은 경우는 제1모드가 낮은 모드, 깊어지면 제2모드가 낮은 모드가 된다. 비대칭모드의 제2모드 변화율은 쉘이 깊은 만큼 또는 구속의 경계조건이 될수록 커진다.

35.다. 쉘형 구조물의 동적 구조불안정 특성 연구

쉘 구조 원리를 이용한 대공간 구조물은 곡률에 의한 역학적 특성을 이용한 것으로서 역학적 효율성을 최대화한 합리적인 구조시스템이다. 그러나 이러한 역학적 장점과 함께 이에 대응하는 구조불안정 문제를 극복하여야만 안전한 구조물의 구축을 실현할 수 있다. 구조불안정 문제는 빈번히 발생하는 대형구조물의 사고 원인 분석과 규명에 있어서 매우 중요한 파괴 메커니즘이 된다. 특히 쉘형 구조물은 다양한 조건에 대하여 매우 민감한 구조물로서, 많은 이론과 연구결과들이 발표되고 있지만 아직도 불확실성만 존재하고 있는 실정이다.

따라서 본 과제에서는 쉘형 구조물의 동적 불안정성을 분석하기 위해서 주기성이 없는 스텝하중과 주기성을 가지고 있는 정현파 하중에 따른 불안정 거동과 좌굴하중 특성을 분석하여 고찰한다.

스텝 하중 하에 있어서의 동적좌굴은 CASE-A에서는 λs가 약 5부터 동적튐좌굴이, 7내지 8에서는 동적 분기좌굴이 발생하고, CASE-B에서는 λs가 3내지 4부터 동적 분기좌굴이 발생한다. 동적좌굴하중을 정적좌굴하중과 비교하면, λs가 6내지 8을 경계로 좌굴하중 레벨이 다르게 나타난다. 즉 스텝 하중의 경우에는 좌측이 정적좌굴하중의 75-85%, 우측이 50-60%가 된다. 위상곡면의 분석결과, 얕은 쉘의 Direct Snapping은 제 1모드와 제 2모드가 서로 간섭하며 카오스가 생성된다. 그러나 깊은 쉘의 Indirect Snapping은 제 2모드가 제 1모드에 영향을 주지 못하고 독자적으로 활동한다. 비선형변위응답을 Running Spectra 분석하여 탁월 진동수의 변화를 비교하면, 얕은 쉘에서는 제 1모드의 성분과 zero에서 파생한 성분과 교차하는 하중 레벨에서, 또 제 2모드의 성분과 제 1모드의 2배로부터 파생한 성분과 교차하는 하중 레벨에서 동적 튐좌굴이 발생한다. 깊은 쉘에서는 제 2모드의 성분과 제 1모드의 1/2배로부터 파생한 성분과 교차하는 하중 레벨에서 동적 분기좌굴이 발생한다.

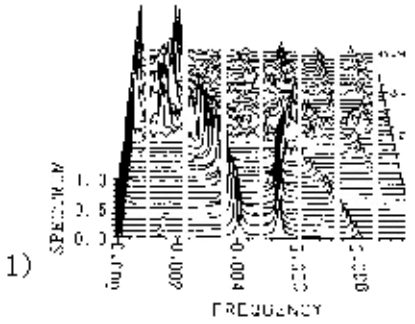


그림 3.2.9 얕은형상 쉘

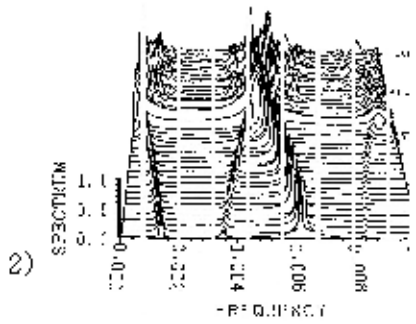


그림 3.2.10 깊은형상 쉘

주기성이 있는 정현파 하중에서의 동적좌굴은 α값에 크게 의존하고, 좌굴 하중 레벨은 전체적으로 낮다. 동적좌굴하중을 정적좌굴하중과 비교하면, λs가 6내지 8을 경계로 좌굴 하중 레벨이 다르게 나타난다. 즉 정현파 하중의 경우에는 좌측이 정적좌굴하중의 5-25%, 우측이 1-5%가 된다. 위상곡면의 분석결과, 얕은 쉘의 Direct Snapping은 제 1모드와 제 2모드가 서로 간섭하며, 카오스가 생성된다. 또한 깊은 쉘의 Indirect Snapping은 제 1모드의 공진현상을 제 2모드의 발생으로 억제시키는 현상이 나타난다. 정현파 하중의 α를 변화시키면, 동적 좌굴 하중의 변화는 얕은 쉘에서는 0.9 근방에서, 깊은 쉘에서는 1.0 근방에서 가장 낮다. 비선형변위응답을 Running Spectra 분석하여 탁월 진동수의 변화를 비교하면, 얕은 쉘에서는 super-harmonic resonance, 깊은 쉘에서는 sub-harmonic resonance 나타낸다.

37.라. 스페이스 프레임의 정적 구조불안정 특성 연구

스페이스 프레임 구조물에 있어서 정적안정 문제는 구조물 전체의 순간적 붕괴와 직접 연관되므로 이에 대한 검토를 소홀히 할 경우 인명 및 재산상의 막대한 손실을 가져올 수도 있다. 일반 구조물과는 달리 지간 200~300m 이상인 대공간 스페이스 프레임 구조물의 구조설계는 응력해석과 안정해석이 동시에 필요하다. 국내의 실무자들은 대공간 스페이스 프레임 구조물 설계 시 반드시 안정해석을 병행해야 한다는 것 자체도 인식을 못 하고 있다. 현재 전 세계적으로 스페이스 프레임 구조로 건설된 대공간 구조물의 규모는 경간 수십 미터에서부터 경간 300m 이상에 이르고 있다. 그 수도 계속 증가 추세에 있다.

스페이스 프레임의 구조안정 문제는 구조물의 여러 가지 조건에 따라 결정되며 매우 중요하다. 본 연구에서는 기하학적 형태에 따른 스페이스 프레임의 정적 구조불안정 특성을 알아보기 위해 2-자유 절점 구조물을 통해 스페이스 프레임의 붕괴 메커니즘을 파악하고, 기하학적 형태에 따라 Star Dome, Parallel Lamella Dome, 3 Way Grid Dome을 모델로 선택하여 하중조건 및 형상불완전량에 따른 불안정 거동 특성을 알아보았다.

공간구조물은 형태저항형 구조물이므로 형태에 따른 구조거동이 매우 민감함을 알 수 있었으며, 불안정 거동은 삼각형 모듈을 사용함으로써 분기좌굴에 매우 효율적임을 알 수 있었다. 또한, 분기경로를 알아보기 위해서 형상불완전성을 적용한 해석에서는 불완전량이 증가하거나 고유좌굴모드의 채택에 따라 변화폭이 커짐을 알 수 있으며, 1차 좌굴모드에서 가장 민감하게 반응하는 것을 알 수 있었다.

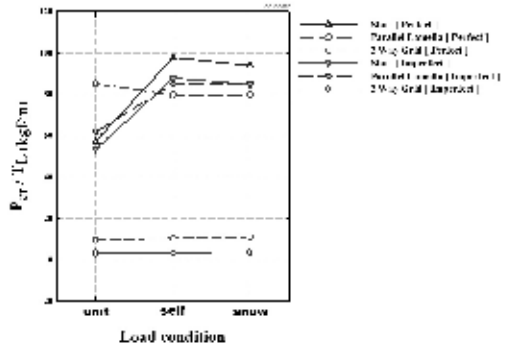


그림 3.2.11 돔형 구조물의 하중조건에 따른 비교 ($\mu = 0.1$)

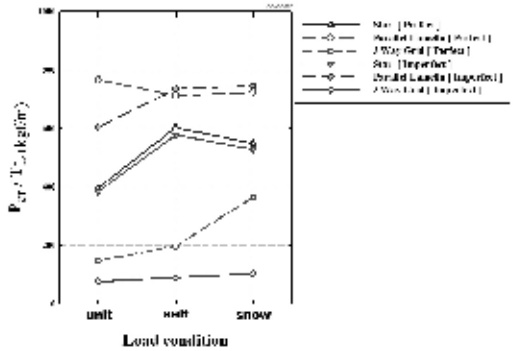


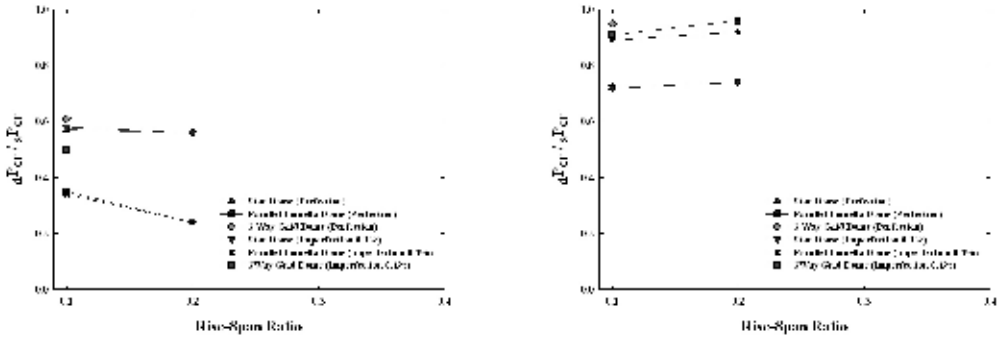
그림 3.2.12 돔형 구조물의 하중조건에 따른 비교 ($\mu = 0.2$)

Star Dome, Parallel Lamella Dome 및 3 Way Grid Dome 모두에서 국부좌굴(Dimple Buckling)이 주된 붕괴 메커니즘을 형성하는 것을 알 수 있었다. Star Dome 및 Parallel Lamella Dome의 좌굴능력이 3 Way Grid Dome보다 우수함을 알 수 있었다. Rise-Span Ratio가 높을수록 Star Dome 및 3 Way Grid Dome보다 Parallel Lamella Dome의 좌굴능력이 우수함을 알 수 있었다. 하중조건에 따른 비교 결과 Unit Load인 경우가 Self Load 및 Snow Load보다 좌굴능력이 불리함을 알 수 있었다. 불완전형상 해석 결과, Star Dome 및 Parallel Lamella Dome에 비해 3 Way Grid Dome이 매우 민감하게 반응함을 알 수 있었다.

39.마. 스페이스 프레임의 동적 구조불안정 특성 연구

강성계 이산화 시스템인 스페이스 트러스 구조물은 축력만을 전달하는 대공간 구조물로써, 경제적이라는 장점과 함께 구조불안정이란 중요한 문제를 해결해야한다. 구조불안정 문제의 중요한 특징은 초기조건에 매우 민감하게 반응한다는 것이다. 구조안정 문제는 외력이 정적으로 작용할 때의 정적불안정과 동적으로 작용할 때의 동적불안정 문제로 분류 할 수 있다. 정적불안정에서는 튐좌굴과 분기좌굴 등과 같은 불안정 거동이 나타나며, 동적불안정 문제에서는 튐좌굴(Snap-through)은 직접좌굴(Direct Snapping)에, 분기좌굴(Bifurcation)은 간접좌굴(Indirect Snapping)에 각각 대응한다. 이러한 불안정 현상으로 인한 파괴 매커니즘의 파악은 구조설계에서 매우 중요하다. 특히 외력이 동적일 경우, snapping 현상의 매커니즘에 관한 연구는 아직 초기적 단계에 있는 실정이다.

스페이스 프레임의 구조불안정 문제는 구조물의 여러 가지 초기조건에 따라 매우 민감하게 반응한다. 본 연구에서는 그리드 분할 방법에 따른 스페이스 프레임의 동적 구조불안정 특성을 조사하였다. 이를 위해 간단한 2-자유절점 구조물을 통해 스페이스 프레임의 붕괴 메커니즘을 먼저 파악하고, 일반적으로 많이 사용되는 Star Dome, Parallel Lamella Dome, 3 Way Grid Dome을 모델로 선택하여 Rise-Span(μ) 및 형상불완전에 따른 불안정 거동 특성을 알아보았다. 연구결과를 조사 분석하면 다음의 결론을 얻을 수 있다.



(a) 비감쇠 (b) 감쇠계수 (h=0.05)

그림 3.2.13 Rise-Span(μ)비에 따른 동적좌굴하중 비교

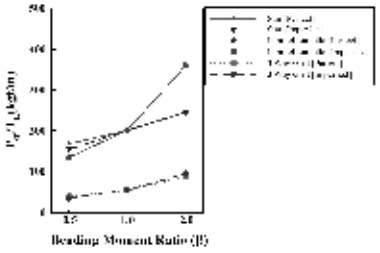
돔의 외력이 동적으로 작용하는 경우에는, 감쇠가 없으면 동적좌굴하중이 정적좌굴하중의 60% 이하로 낮아짐을 알 수 있다. 비감쇠가 적용된 경우, Parallel Lamella Dome보다 Star Dome이 정적좌굴하중에 대한 동적좌굴하중 효율이 더 높다. 또 Rise-Span(μ)비가 높아지면 좌굴능력이 약간 감소함을 알 수 있다. 감쇠가 적용된 경우, Star Dome보다 Parallel Lamella Dome이 정적좌굴하중에 대한 동적좌굴하중 효율이 더 높다. 또 Rise-Span(μ)비가 높아지면 좌굴능력이 약간 증대함을 알 수 있다. 전체적으로 비감쇠보다 감쇠를 도입한 경우에는 동적좌굴하중에 대한 효율이 높아짐을 알 수 있다.

공간구조물은 형태저항형 구조물이므로 그리드 분할 방법, Rise-Span(μ)비, 초기불완전량, 감쇠량 등에 따라 구조거동이 매우 민감함을 알 수 있었고, 특히 3 Way Grid Dome의 경우 Star Dome이나 Parallel Lamella Dome 보다 Rise-Span(μ)비의 증가에 따라 매우 불안정함을 보였다. 따라서 향후 휨을 고려한 구조불안정 거동에 관한 계속적인 연구 조사가 필요하다.

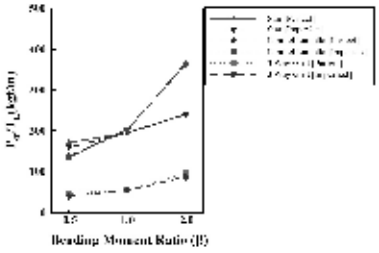
40.

41.바. 구조불안정 설계 가이드라인

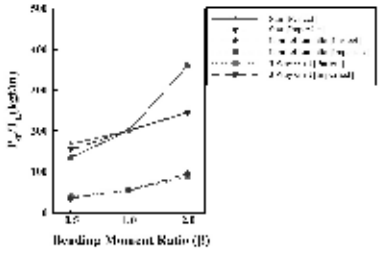
공간 프레임 구조물은 다른 대공간 구조 시스템과 같이 무지주의 대공간을 덮을 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그리고 공간 프레임 구조물은 구조적 성질이 동일한 등가 연속체로 치환하여도 비교적 정확한 해를 얻을 수 있다는 점에서 연속체 쉘 구조물의 형태로 생각되어질 수 있다. 이외에도 사용되는 각 부재는 선 부재들이므로 효율적이고, 경량이며, 공장제작이 가능하기 때문에 정확성도 기대할 수 있다.
페이스 프레임의 구조안정 문제는 구조물의 여러 가지 조건에 따라 결정되며 매우 중요하다. 본 연구에서는 기하학적 형태에 따른 스페이스 프레임의 정적 구조불안정 특성을 알아보기 위하여 기하학적 형태에 따라 Star Dome, Parallel Lamella Dome, 3 Way Grid Dome을 모델로 선택하여 휨 강성을 고려하여 하중조건 및 형상불완전량에 따른 불안정 거동 특성을 알아보았다.



43. (Unit)



44. (Self)



45.

46. (Snow)

47. 그림 3.2.14 돔형 구조물의 휨 강성비에 따른 비교

공간구조물은 형태저항형 구조물이므로 형태에 따른 구조거동이 매우 민감함을 알 수 있었으며, 불안정 거동은 삼각형 모듈을 사용함으로써 분기좌굴에 매우 효율적임을 알 수 있었다. 또한 휨 강성이 커짐에 따라서 좌굴능력이 상승 하는 것을 알 수 있었다.
좌굴 능력이 전반적으로 Parallel Lamella Dome, Star Dome, 3 Way Grid Dome 순으로 우수하다. Rise-Span Ratio가 높을수록 좌굴능력이 급격히 우수함을 알 수 있다. 휨강성비가 커지면 좌굴내력은 점진적으로 높아지며, Parallel Lamella Dome 구조물은 비교적 급격히 올라간다. 하중모드 변화에 따른 좌굴하중 내력의 변화는 크지 않으나 Parallel Lamella Dome 구조물의 경우가 비교적 안정적인 변화를 나타낸다.

돔형 구조물의 구조불안정설계 가이드라인
제1장 총칙
제2장 구조불안정
제3장 안전율

42.

(1) 3.2.3 내진설계

48.가. 대공간 구조의 형태별 지진거동 특성조사 및 분석 연구

공간구조는 일반 중층(重層)라멘구조와는 달리 다음과 같이 특유한 진동특성을 가진다. ①수평지진동에 의하여서도 상하진동이 발생하기 쉽다. ②스팬이 길어지면 진동의 고유주기가 다소 길어지고, 구조의 상하 진동주기가 상하지진동의 탁월고유주기대에 일치하게 되어 상하진동이 발생할 가능성이 있다. 이와 같은 진동특성의 차이는 공간구조가 가지는 형태적 특성에 그 원인이 있다고 할 수 있다. 공간구조의 형태는 거시적형상의 분류에 따라, 크게 아치, 배럴볼트, 돔형구조등으로 공간적 확장성을 고려해 나눌 수 있으며, 세부적형상인 개각, 겉보기 세장비, 단면형상으로 구분할 수도 있고, 네트워크형상 또는 밀도등의 구조시스템에 따라 분류해 볼 수도 있다.

1차년도 과제에서는 대공간의 형태별 지진거동 특성조사 및 분석연구를 수행하기 위하여, 거시적형상에 따른 지진거동특성, 세부형상에 따른 지진거동특성, 구조시스템에 따른 지진거동특성을 고찰하였다.

(1) 거시적형상에 따른 지진거동특성으로 대공간구조는 아치, 배럴볼트, 돔형구조의 순으로 공간확장성을 고려하여 나누어 볼 수 있으며, 아치의 진동성상을 대공간구조는 근본적으로 내포하고 있음을 알 수 있었다. 이에 아치를 시작으로 공간구조의 공간 확장에 응답특성을 계통적으로 분석·분류함으로서, 공간구조의 형태별 지진거동특성을 정리할 수 있었다.

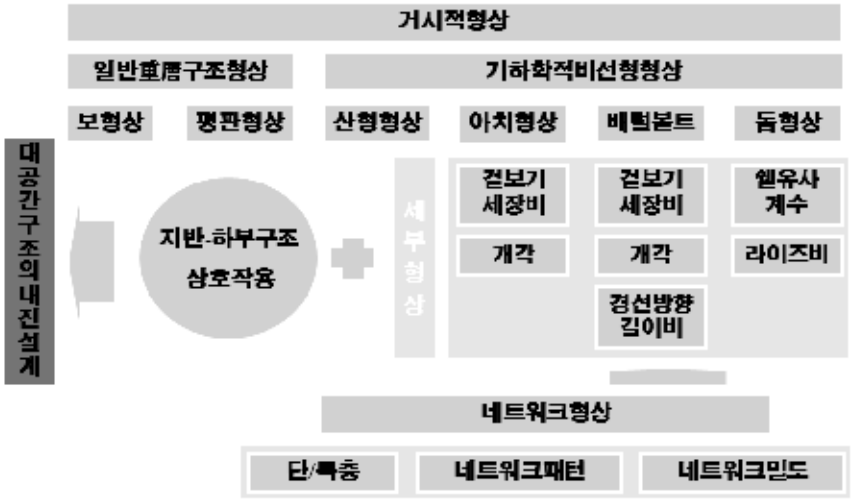


그림3.2.15 대공간 구조의 형태에 따른 지진거동 특성의 계통적 분석, 정리

(2) 세부형상에 따른 지진거동특성으로 공간구조의 지진응답은 개각에 의한 영향을 많이 받으며, 겉보기세장비에 의한 영향은 비교적 적음을 알 수 있었다. 또한, 변단면 아치에 대한 지진거동특성을 고찰함으로서, 단면변화에 대한 적절한 룰을 설정함으로서, 변단면 아치는 등단면 아치와 동일하게 취급할 수 있음을 알 수 있었다.

(3) 구조시스템에 따른 지진거동특성으로 네트워크 밀도가 커질수록 고차모드의 응답까지 지진동에 대하여 증폭됨을 보였다. 또 연속체치환법에 의한 편평쉘의 고유치해석을 수행하였다. 쉘근사해석에 의한 고유진동수는, FEM해석과 아주 잘 일치하고, 유도된 쉘근사식은 적은 변수를 가지는 단순·명쾌한 고유진동수의 평가식임을 나타내었다.

이를 바탕으로 2,3차년도 과제인 지반-하부구조 상호작용에 대한 영향을 고찰함으로서 대공간의 내진설계기법을 완성하고자 하였다.

49.나. 대공간 구조의 지진해석용 모델링 기법 개발

국·내외 내진설계기준에서 제시하는 설계스펙트럼은 내진설계기준의 변천과 함께 다르게 제시되어 왔다. 그 주된 원인으로서는 지반의 종류에 따른 지진파의 영향에 대한 연구가 발달된 결과라 할 수 있겠다. 일본의 고베지진의 피해보고에 있어, 구조물을 지지하는 지반특성이 구조물에 미친 피해에 대한 보고가 다수 있었다. 이에 본 연구에서는, 내진설계에 지반특성을 고려하는 지진해석 기법에 대하여 살펴보고, 지반특성이 공간구조물에 미치는 영향을 고찰하였다. 일본에서는 동적해석에 의한 설계를 기본으로 하고 있으나, 많은 구조기술자들이 Ai분포와 C0로부터 층전단력을 가정하는 방법 또는 Ds값을 설정하여 층전단력을 가정하는 방법에 의존하고 있다. 그러나, 이러한 층전단력의 가정에 의한 방법은 간편하기는 하지만, 라멘구조형식의 골조구조의 지진응답에서 얻어진 것으로, 공간구조에의 적용은 전혀 타당성을 갖추고 있지 않다. 이에 본 연구에서는, 공간구조에 적용가능한 등가정적지진해석의 모델을 제시하고 그 타당성을 검토하였다.

손상제어기법에 있어서는 대공간 구조의 손상제어 알고리즘을 제시하고 이에 대한 검증을 수행하였다. 또한 대공간 구조에서의 손상제어방법 및 알고리즘의 적용성에 대해 기술하였다. 개략적인 연구내용은 다음과 같다.

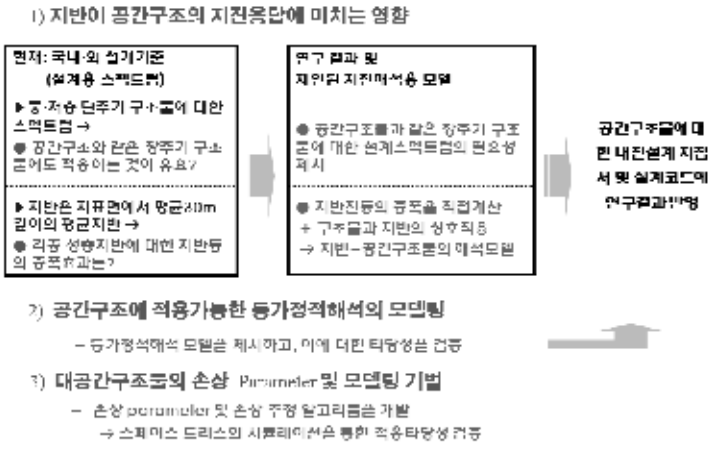


그림 3.2.16 대공간 구조의 지진해석용 모델링 기법 개발

대공간 구조물은 대체적으로 장주기성질을 띄며, 따라서 설계스펙트럼의 장주기부분에 많은 영향을 받게 된다. 파동방정식을 이용하여 지반에 의한 지진증폭의 영향을 직접적으로 계산하는 방법은 성층지반 및 비정형지반에 대하여서도 적용가능하다는 점에서 장점이 있었다.

공간구조물에 적용 가능한 정적지진하중평가법의 개념 및 정적설계식의 유도과정을 나타내고, 라이즈/스팬비가 서로 다른 지붕구조물을 대상으로 하여, 본 평가법에 의한 결과와 정적응답해석을 수행한 결과를 비교하며, 정적평가법의 타당성에 대하여 검토하였다. 현장계측 정보의 신뢰성 문제와 손상평가 기법의 실효성 문제에 착안하여 스페이스 프레임과 같은 대공간 구조물의 자유도 수를 최소화하고, 현장에서 신뢰성 있게 취득 가능한 진동정보를 바탕으로 동 구조물의 손상평가를 위한 방법론을 제시하였으며, 수치해석 예제를 통하여 동 방법론의 유효성을 검증하였다.

수치해석 결과, 제시된 손상평가 방법론은 구조물이 가정된 바와 같이 단순화 모델의 설정이 가능하고, 현장실험으로 통한 계측데이터의 신뢰성이 확보된다면 10%이내의 오차로 충분히 손상평가를 위한 방법론으로 사용 가능한 것으로 나타났다.

대공간구조물의 경우 손상 방지를 위해 강성을 증가시키는 방법은 매우 비효율 적이므로 경제적인 설계를 위해서는 감쇠기에 의한 제어가 요구된다. 고층건물의 경우 풍하중에 의한 진동을 저감시키기 위해 수동형의 일종인 질량감쇠기가 많이 사용되고 있으나, 향후 제어시스템의 개발방향은 대공간구조물의 특성 및 주요 진동원인 풍하중의 특성을 고려하여 MR 감쇠기 혹은 마찰감쇠기, 점성유체감쇠기(점탄성감쇠기) 의 반능동감쇠기에 확률론적(stochastic) 개념을 바탕으로 하여 신뢰성이 높은 제어알고리즘의 적용이 적절할 것으로 판단된다. 이에 대한 연구결과는 공간구조물에 대한 내진설계지침 등에 반영하고자 하였다.

50.다. 하부구조의 돔에의 영향분석 연구

대공간 구조물의 내진설계에 있어서 상부의 지붕구조와 하부의 기둥 및 벽체에 상호간의 영향을 고려한 지진해석을 통하여 보다 합리적이고 경제적인 구조설계 기법의 적용이 요구된다. 이에 대한 국내외 대공간 구조물의 동적특성에 관한 연구는 주로 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 방법으로 수행되므로 인해, 그 구조해석 결과에 대한 보다 실질적인 검증을 위해 실제 대공간 구조물의 기본적인 동적특성을 반영한 축소모형의 진동대 실험을 수행할 필요가 있다. 또한 대공간 구조물에서의 인장 케이블의 장력을 측정하는 방법에 있어서 기존에 제안된 장력추정 식들의 정확도에 대하여 평가하여 실용적인 방법론을 정립할 필요가 있고, 국내에서 대공간 구조물의 동적 응답을 평가하기 위한 정량적 기준이 명확하지 않으므로 동적 응답에 대한 평가 지수가 필요하며, 이는 동적하중에 대한 손상을 예방하여 대공간 구조물의 수명을 연장할 수 있을 것이다.

연구의 진행 방향은 먼저 상부구조와 하부구조를 각각 1절점계로 치환함으로서, 하부구조가 상부구조(돔)에 미치는 영향을 도식화한다. 그리고 아치구조를 상부구조로 하고, 이에 하부구조가 부착된 구조물을 가정하여, 수평입력시의 하부구조를 고려한 아치의 지진시 가속도응답분포특성을 고찰한다. 또한, 지상에 직접 건설되는 아치의 지진시 가속도응답분포특성과 비교에 의해 상부구조에 미치는 하부구조의 영향에 대해 고찰함으로서 지상에 건설되는 공간구조물에 대한 정적지진해석 모델링기법의 하부구조를 고려한 공간구조물에의 확장을 추구한다. 개략적인 연구내용은 다음과 같다.

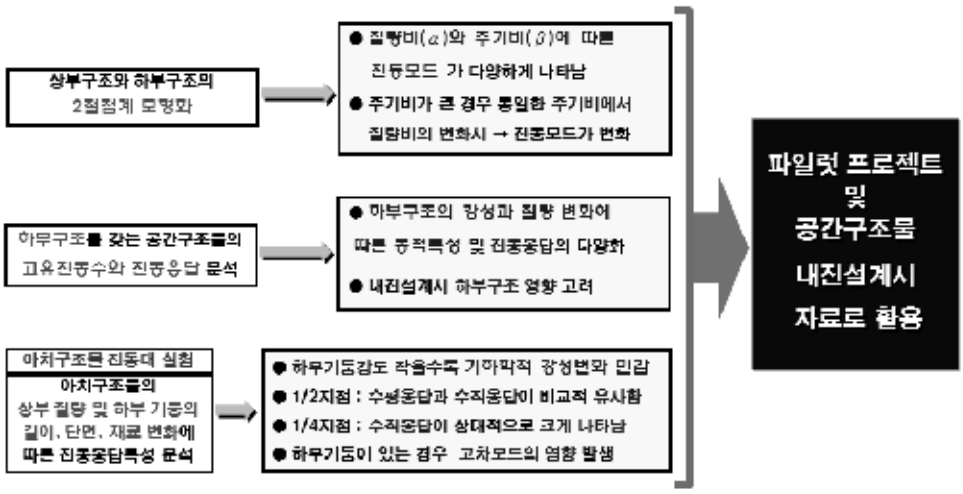


그림 3.2.17 상부구조에 대한 하부구조의 영향

공간구조물의 상부 지붕구조와 하부 기둥구조를 2절점계 모델로 하여 이 모델의 진동특성을 결정하는 파라메타를 질량비 α와 주기비 β로 나타내었다. 주기비 β가 큰 경우, 동일한 주기비를 갖고 있어도 질량비의 변화에 따라, 진동모드가 변화함을 알 수 있었다. 또한 하부구조를 가질 경우 전체구조물의 1차고유진동수는 저감되는 것을 알 수 있었으며, 주기비가 작아질수록 하부구조가 없는 상부구조만의 고유진동수에 가까워짐을 알 수 있었다. 실지진동 입력에 의한 상부구조의 연직가속도응답 최대치 (SHV,max)와 수평가속도응답 최대치(SHH,max)는 하부구조가 없는 상부구조만의 응답특성과 상당한 유사성을 보였다.

공간구조물의 진동대 실험에 있어서 기둥 단면 크기가 증가하거나 기둥의 길이가 감소하거나 또는 상부 지붕구조의 질량이 감소할수록 시험체의 고유주기가 감소하였고, 최대 가속도 응답이 발생하는 진동수는 증가하였다. 가속도 응답의 측정위치별로는 1/2지점에서는 수평방향 응답이 수직방향에 비해 크게 나타나고, 1/4지점에서는 수평방향과 수직방향의 응답이 비슷하게 나타났다. 그러나 1/4지점의 수직방향 응답에 있어서 지진에너지가 집중되는 진동수영역보다 높은 진동수영역에서 응답이 다소 크게 발생하였다. 이는 기둥이 없는 지붕구조만의 응답에서는 발생되지 않는 현상으로써, 고차모드의 영향으로 판단된다.

51.라. 대공간 구조물의 진동제어 기법 및 시스템 개발

지진 및 바람에 의한 대공간 구조물의 거동은 그 구조적인 특수성으로 인하여 일반 건축물과는 상이한 거동특성을 보이며, 기존의 내진구조시스템은 일반 건축물을 대상으로 한 것이기에 장스팬이나, 막구조 등과 같은 구조물에 적용에 있어서 그 적합성이 충분하지 못하다. 또한 내진설계에서 부재의 강도를 증가시키는 방법은 초기 건설비용이 많이 들며 규모가 큰 지진이 발생하였을 경우에는 구조물이 붕괴될 우려가 있다. 반면에 연성을 증가시켜 소성거동을 이용하는 방법에서는 구조물의 붕괴를 방지할 수 있으나 보수, 보강하기가 쉽지 않으며 또한 비구조재의 파괴로 인해 보수비용이 많이 든다. 대공간 구조물에 있어서 이런 문제들은 내진시스템의 적용에 한계로써 작용하게 된다. 이로 인해 보다 효율적인 내진성능향상과 대공간 구조물에 적용에 있어 적합성을 고려한 면진 및 제진구조시스템의 도입이 요구된다.

본 연구는 구조물의 면진기법으로 기초면진 기법과 최근 선진국에서 시도된바있는 중간층 면진 기법을 적용한 대공간 구조물의 거동을 분석하고 이를 바탕으로 면진 설계에 대한 지침서를 작성하고 면진 시스템을 개발하고자 한다. 그리고 상부구조물의 진동제어 있어서 수동 및 준능동 제어장치에 대한 대공간 구조물의 제어방법 및 제어성능을 분석하고 최적화 제어기법을 개발하고자 한다. 이런 결과를 이용하여 연구의 최종 단계에서는 대공간 구조물에 적용하기 위한 전용 진동제어 시스템을 개발하고자 한다. 연구에 대한 내용은 다음과 같다.

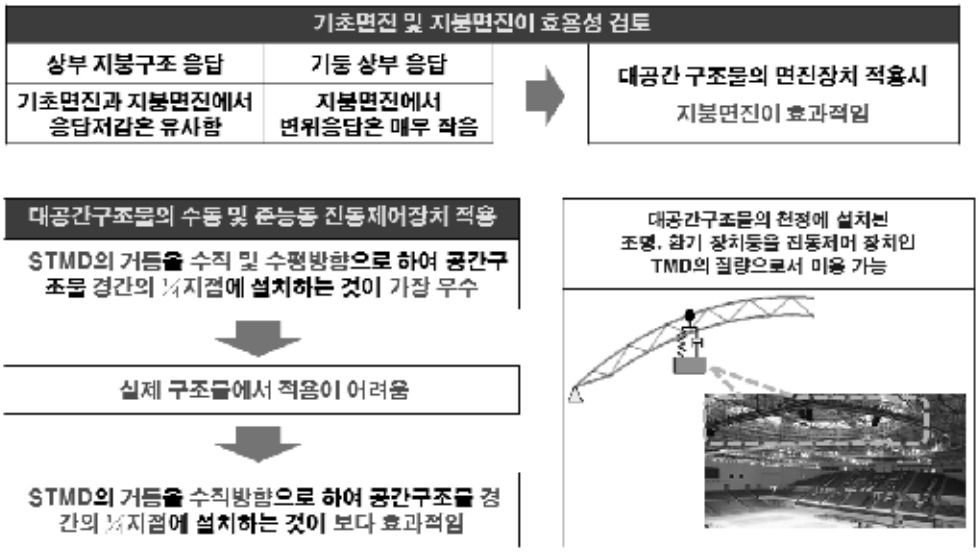


그림 3.2.18 면진장치와 수동 및 준능동 제어장치의 진동제어성능

대공간 구조물에 대한 기초면진과 지붕면진의 면진성능을 비교 검토하고, TMD 적용을 통하여 대공간 구조물의 진동제어 장치의 적용방법 및 제어성능을 종합적으로 분석하였다. 대공간 구조물의 면진장치 적용에 있어서 상부 지붕구조의 응답저감은 물론 하부 기둥구조의 응답저감을 위해서 지붕면진이 기초면진보다 효과적인 것으로 나타났다. 그리고 대공간 구조물의 진동제어에 있어서 TMD가 수직방향으로 움직이도록 공간구조물 경간의 1/4지점에 설치하는 것이 보다 실질적이며 효과적인 것으로 나타났다. 또한 수동 TMD보다 준능동 TMD(STMD)가 진동제어에 있어서 보다 효과적인 것을 확인할 수 있었다. 대공간 구조물에 조명, 환기 등을 목적으로 다양한 설비장치들이 천정에 설치되어야 하므로 이러한 설비장치를 진동제어 장치인 TMD의 질량으로 이용할 수 있을 것이다.

상부구조에 대한 하부구조의 영향을 분석한 결과를 통해 공간구조의 등가정적지진력 평가식을 작성할 수 있으며, 하부구조를 고려한 지진응답특성을 파일럿 프로젝트 및 공간구조물 내진설계에 적용할 수 있다.

52.마. 대공간 구조물의 개폐 진동영향 평가 및 하이브리드 스마트 면진시스템 적용성

대공간 구조물은 일반적인 라멘구조와 다른 구조적 및 형태적 특성을 가지고 있으며 그 중에 하나가 지붕구조의 개폐가 가능하다는 것이다. 지붕구조 개폐 시스템은 대공간 구조물의 장점을 잘 타나내고 있으며 대공간 구조물의 전천후 사용이 가능하도록 하였다. 중첩방식이나 수평이동방식에 의한 지붕구조의 움직임은 주행하중, 충격하중, 관성력 및 제동력과 같은 동적하중이 구조물에 가해질 수 있으므로 이에 대한 대공간 구조물의 진동해석이 필요할 것으로 사료된다. 또한, 용도 및 형태에 있어서 매우 다양한 대공간 구조물은 경기장, 전시장, 복합시설 및 집회시설로 사용되기 때문에 지진하중에 의하여 구조물에 피해가 발생한다면 매우 심각한 인명 피해가 예상된다. 따라서 대공간 구조물의 지진응답을 최소화하기 위한 제진 및 면진기술에 대한 연구가 필요하다.

본 연구는 파일럿 프로젝트 대상구조물의 사용성 평가를 위한 동적하중에 대한 진동영향 평가 및 대상구조물의 시공시 그 대책을 제안하고자 한다. 또한, 진동제어성능의 보다 효율적으로 향상시키기 위해 착안된 하이브리드 스마트 면진시스템의 대공간 구조물에 적용 방안 고찰을 통해 하이브리드 스마트 면진시스템의 적용에 있어서 대공간 구조물에 적합한 제어알고리즘을 개발하고자 한다. 연구에 대한 내용은 다음과 같다.

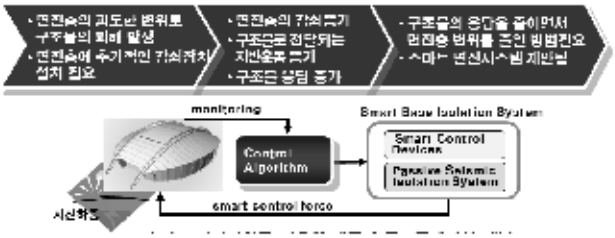


그림 3.2.19 스마트 면진장치를 이용한 대공간 구조물제어의 개념도

본 연구에서는 지붕구조의 개폐로 야기되는 이동하중에 대한 새로운 적용방안을 제안하고 이를 이용하여 개폐식 지붕의 개폐속도에 따른 대공간 구조물의 진동해석을 수행하였다. 또한 MR 감쇠기와 저감쇠 탄성베어링을 사용하여 스마트 면진시스템을 구성하였으며 최적설계된 LRB 면진시스템과 비교하여 진동제어성능을 검토하였다.

대공간 구조물 사용성을 평가하기 위해서 지붕구조의 개폐로 야기되는 이동하중에 대한 새로운 적용방안을 제안하고 이를 이용하여 개폐식 지붕의 개폐 속도에 따른 대공간 구조물의 진동해석을 수행하였다. 본 연구에서 제안된 등가이동하중은 지붕구조 개폐에 의한 대공간 구조물의 진동해석에 있어서 매우 용이하게 활용할 수 있다. 또한, 대공간 구조물의 동적응답을 저감시키기 위하여 하이브리드 스마트 면진시스템을 제안하였으며 본 연구에서 제안한 하이브리드 스마트 면진시스템을 적용하면 최적설계된 LRB 면진시스템에 비하여 면진층 변위 및 대공간 구조물의 동적응답을 대폭 줄일 수 있는 것을 확인하였다.



그림 3.2.20 다목적 유전자알고리즘을 이용한 퍼지제어기 최적화의 개요

53.바. 내진설계 지침서 작성

대공간 구조는 일반적인 중층구조(重層構造) 혹은 라멘구조와 구조적인 상이점이 존재하며, 이에 의거 구조설계시 그 역학적 특성의 차이를 고려한 설계가 요구되며, 한편으로는 일반적인 골조구조보다 한층 더 미학적인 설계가 요구된다. 공간구조는 형태저항구조라 불리기도 한다. 이는 기둥을 힘의 흐름에 대한 주축으로 생각하는 일반적인 건축골조구조물이 주요한 설계외력에 대하여 휨 및 전단에 의해 저항하는데 반하여, 공간구조는 축력 및 면내단면력에 의해 저항하기 때문이라 할 수 있다. 즉, 일반적인 공간구조의 형상은 힘을 그 형태에 따라 지지부에 합리적으로 흐르게 하도록 설계되어진다. 이러한 점은 공간구조가 일반적인 골조구조물과 크게 구별되는 특징으로서, 설계시 반드시 고려되어야 할 중요한 요소이다.

내진설계에 대한 세부적인 지침을 마련하기 위해서는 대공간 구조물의 내진설계에 대한 기존 연구와 더불어 보다 자세한 내진관련 연구가 수행되어야 한다. 또한 대공간 구조물에 각 종류별 내진성능 평가를 통하여 현재 2009년 개정된 내진설계기준에서 제시하는 여러 항목들에 대한 검토가 필요하다. 본 연구에서는 다음과 같은 과정을 통해 현행 내진설계기준에 부합되는 대공간 구조물의 내진설계지침을 마련하고자한다. 개략적인 연구내용은 다음과 같다.

지진에 있어서 환태평양 지진대 근처에 위치한 우리나라의 지진발생률은 증가하는 추세이고 내진설계에 대한 인식이 확신되고 있다. 1987년 내진설계기준 작성에 관한 연구가 시작된 이래로 2002년 월드컵경기의 개최에 이르기 까지 대공간 구조물의 건설이 증가하여 왔고, 현행(2009) 기준상에 <내진등급 I>에 해당하는 연면적이 5천 제곱미터 이상인 공연장, 집회장, 관람장, 전시장, 운동시설, 판매 및 영업시설 등이 대공간 구조물의 구조시스템을 이용하는 추세이다. 하지만 일반구조물들에 비해 대공간 구조물에 대한 내진설계기준의 세부적인 내용은 미흡하다고 볼 수 있다. 이로 인해 대공간 구조물의 특성상, 많은 인원을 수용하게 되고 지진으로 인한 피해 발생시에 큰 인명피해를 유발할 것을 예상되므로 보다 세부적인 내진설계에 대한 지침이 마련되어야만 한다. 따라서 본 연구에서는 기존 연구를 토대로 국내 KBC2009기준에 의거하여 공간구조물을 내진설계 하는 일련의 과정을 제안하였다.

내진설계 절차로서 지진구역, 지역계수, 지반의 분류 등에 따라서 설계스펙트럼 가속도를 결정하고 내진등급과 설계스펙트럼가속도, 건물형상 등에 따라 내진설계범주를 결정하게 된다. 그리고 나서 범주에 따른 해석을 하여 각각의 설계방법에 따른 지진설계를 하게 된다. 본 연구에서는 공간구조의 구조형식에 따른 내진설계 방법과 설계방법에 따른 하중조합을 제시하였다.

본 연구에서는 Pilot Project 예제 구조물을 선정하여 하중조합별 변위응답과 부재력을 분석하였다. 분석결과, 예제 구조물의 고유치해석을 통해 변위나 모드벡터가 크게 나타나는 지점의 부재력과 변위를 분석하는 것이 효과적이다. 공간구조물의 특성상 설계지진하중의 조합은 수평지진의 경우에 X,Y방향은 물론 45방향에 대한 고려를 하고 있으며 상하방향 지진에 대하여 고려하였다. 그리고 수평방향과 상하방향의 지진에 대하여 동시에 고려하여야 한다. 부재력 분석결과 하현재 하단지점부분에서 압축력이 최대이며, 상현재는 1/2지점에서 압축력의 최대값을 나타내는 것을 볼 수 있다. 설계시 최대 부재력을 기준으로 상현재와 하현재를 다르게 설계하는 것이 합리적일 것으로 판단된다. 시간이력해석의 응답을 가지고 부재설계한 경우 변위 및 부재력 모두 지진하중보다 풍하중에 지배적이나 유사시 피난시설로 활용하는 대공간구조물의 공공성으로 인하여 지진에 대한 검토가 요구된다.

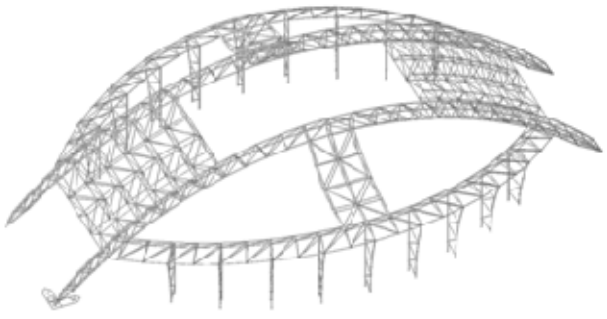


그림 3.2.21 Pilot Project 예제 구조물

가. 3.3 시공 및 친환경설계 기법 개발

SUMMARY

① 시공

본 연구에서는 대공간 구조물의 Erection 공법 개발과 시공 자동화 공법개발, 연성구조물의 장력측정 시공기술 및 시공관리 기술을 개발하고, 강성구조물의 시공관리 기술 및 개폐식 구조물의 시공관리 기술 개발을 목표로 한다.

먼저 대공간 구조물에 대한 국내외 기술 및 연구 동향을 파악하고, 문헌 및 현장조사를 통해 이론적 데이터 베이스를 구축하고 대공간 구조물의 Erection 공법 개발과 연성구조물의 막 장력측정 시공기술 및 관리시스템을 개발한다. 개발된 모델에 근거하여 장력측정기기의 시제품을 제작하여 시제품의 성능테스트를 위해 반복적인 장력 실험을 실시하고 얻어진 데이터를 근거로 실험식을 만들어 상용화를 위한 데이터를 얻는다. 개발 장력측정기기의 실무용 매뉴얼을 개발한다.

대공간 구조물의 골조설치 자동화 공법의 개발 및 Erection 자동화 공법을 개발하고, 개발된 골조설치 및 Erection 자동화 공법에 대한 모형을 제작한다.

또한 개발모델에 대한 시공자동화 공법 적용가능성을 수치해석을 통해 검토한다.

대공간 연성 막구조물의 시공 중 가장 중요한 Erection 공법을 개발하며, 골조막 구조는 Step-Up 공법, 현수막구조는 Rotation-Up 공법, 공기막 구조는 Hanging-Up 공법을 개발한다.

연성 막구조물의 시공 지침서를 제작하며, Pilot Project 대상구조물의 Erection 공법에 대한 기술 지원을 한다.

대공간 강성구조물 중 스페이스 프레임 구조시스템을 분석하고, 각 구조시스템의 시공성, 안정성, 경제성 등을 조사하고 분석한다. 대공간 구조물의 접합부 시공관리 기술을 검토하고, 스페이스 프레임 구조물 시공 지침서를 작성한다.

대공간 개폐식 구조물의 구조시스템을 분석하고, 대공간 개폐식 지붕형식 중 강성구조형식과 연성구조 형식 등 각 구조시스템의 시공성, 안정성, 경제성 등을 조사하고 분석한다. 또한 개폐식 구조물의 개폐형식에 따른 여러 가지 시스템들을 분석 및 검토 한다.

개폐식 구조물의 효율적 시공 및 유지관리를 위한 각각의 시공절차, 시공지침, 요소기술 등 시공관리 기술을 개발하고, 시공지침서를 제작한다.

② 풍환경

기둥이 없는 수백 미터의 대공간구조물, 가벼운 재료의 지붕 등은 모두 안전한 건설과 설계를 위해서는 동적거동에 대한 평가가 필요하다. 대부분의 경우 이론적인 해석이 어렵거나 해석적인 비용이 많이 들 경우에는 실험적 해석방법을 많이 사용하고 있다.이들 대공간 구조의 형태별 바람거동 특성 조사 및 분석를 위한 다양한 형태의 동적거동특성 분석에 대한 연구를 실시하기 위하여 1차년도에는 1) 대공간 막구조물에 대한 바람에 의한 진동특성 파악 분석 2) 캔틸레버형 막구조물의 고유진동수 측정 3) 막구조물의 손상에 의한 고유진동수 변화 특성 파악을 중심으로 연구를 실시하였다.

2차년도에는 대공간 구조물의 풍동 모형제작 및 실험 기법 개발 연구를 실시하기 위하여 1) 대공간 막구조물에 대한 모형제작과 2) 대공간 구조물의 고유치해석을 통한 고유진동수를 중심으로 연구를 실시하였다.

3차년도에는 대공간 구조물 풍동 실험의 상사 특성 분석 연구를 실시하기 위하여 1)풍동실험모형 제작을 위한 상사법칙 연구 2) 대공간 막구조물에 대한 풍진동 축소모형제작기법 연구 3)축소 모형에 대한 풍진동 실험을 중심으로 실시하였다. 4) 태양광 패널을

적용한 대공간 구조물의 구조성능 확보기술

4차년도에는 대공간 구조물 풍동 실험의 상사 특성 분석 연구를 실시하기 위하여 1)풍동실험모형 제작을 위한 상사법칙 연구 2) 대공간 막구조물에 대한 풍진동 축소모형제작기법 연구 3)축소 모형에 대한 풍진동 실험을 중심으로 실시하였다. 4) 태양광 패널을 이용한 대공간 구조설계계획

5차년도에는 대공간 구조물의 지붕형태에 따른 풍응답효과가 다양하게 나타나고 있는데 이러한 풍응답의 현상에 대한 저감효과에 대한 연구를 위한 외부의 형태(길이, 프리텐션의 크기)에 대한 다양한 연구를 진행하고자 한다. 이러한 자료는 기본설계단계에서부터 풍하중과 풍응답에 대한 평가가 가능하게 될 것으로 판단된다. 이상을 연구결과를 이용하여 6차년도에는 대공간 구조물의 성능평가 지침서를 만들고자 한다.

⑤ 음환경

본 연구는 대공간의 음향계획 시 설계로부터 최종 평가에 이르는 설계의 전 단계에 걸쳐서 활용 · 가능한 설계변수와 예측 및 실측평가 등에 필요한 도구를 개발하는 연구이다. 이를 위하여 1차 년도에는 대공간의 음향설계 시 대공간의 비선형적 음에너지 감쇠특성을 고려한 음향설계변수 및 설계방법이 개발되었으며 2차 년도에는 개발된 음향설계변수의 결과를 포함한 각종 음향설계변수의 적용에 따른 결과의 현장 측정이 무선계측시스템이 개발되었다. 3차 년도에는 음향설계과정에서 가장 많이 사용되는 컴퓨터시뮬레이션 개발이 이루어졌으며 기존접근방식과는 달리 음의 파동특성을 고려한 시뮬레이션 기법의 적용이 이루어졌다. 4차 년도에는 대규모 공간에서 활용이 불가피한 전기음향시스템의 적용 및 설계방법에 대한 연구가 수행되었으며 그 결과, 건축음향과 전기음향시스템의 특성을 동시에 고려한 설계방법이 제안되었다. 5차 년도에는 부분개방이 이루어지거나 또는 대규모의 공간을 형성하며 불규칙한 흡음면의 배치가 이루어지는 대공간에서의 비선형 음에너지 감쇠의 평가기법에 대한 연구가 수행되었으며, 그 결과 1차 년도에 제안된 설계변수의 구체화 및 실질적인 활용방안이 제시되었다. 마지막으로 6차 년도에는 본 연구의 전 수행과정에서 얻어진 연구결과를 토대로 초기음향설계에서부터 시공후 평가단계에 이르기까지 각 단계별 도구 및 설계기법의 적용방안과 설계목표 및 주안점 등을 중심으로 대공간의 음환경 최적설계지침서가 제시되었다.

나.

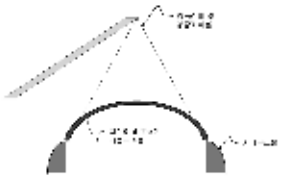
다.

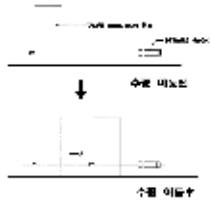
(1) 3.3.1 시공

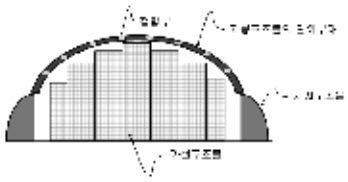
(2) 가. 1차년도 : 대공간 구조의 Erection 공법 개발

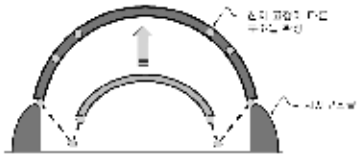
(3)

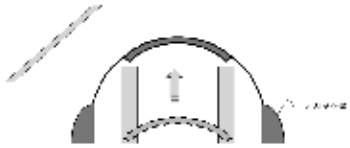
대공간 건축물 중 대규모 돔의 지붕프레임은, 공장에서 가공해서 수송 가능한 크기로 제작된 부재를, 트럭이나 선박 등으로 건설현장으로 반입, 현장에서 부재를 조립하여 큰 가구를 만든다. 이것은 다른 구조시스템의 건축물에서도 같으며, 이러한 현장에서의 시공을 Erection 이라 한다.
현재 일반적으로 알려져 있는 대공간 건축물의 Erection 공법은 강성구조물과 연성구조물로 크게 구분하여 생각 할 수 있다. 연성구조물로 분류되는 케이블구조는 장력도입 문제에 중점을 두고 골조 Erection 을 실시하며, 골조막 구조의 경우는 강성골조가 외력에 저항하며, 막은 비구조재로서 사용되므로 그 Erection 문제는 강성구조에 준하여 실시하면 될 것이다. 따라서 연성구조물의 Erection 문제는 막재 위에 설치하는 케이블과 막자체의 장력도입문제가 가장 중요한 분야이며, 막구조물 자체의 Erection 문제는 일반구조물의 Erection 기술 수준에서 크게 벗어나지 않는다.
그러나 강성구조물인 경우 Erection 공법은 Element 공법, Block 공법, Sliding 공법 그리고 Lift-up 공법 등 매우 다양한 공법이 있으며, 구조물의 규모, 공기, 현장여건 등에 따라서 적당한 공법이 도입되어져야 할 것이다.


Block 공법


Sliding 공법


Element 공법


Push - up 공법


Lift - up공법

대규모 돔과 같은 대공간 건축물의 일반적인 Erection 공법에는 벤트공법이 있다. 이 공법은 지상에서 어느 정도 크기로 가구를 조립하고 나서 트럭이나 크레인 등의 중기로 지붕 높이까지 들어올려, 이것을, 적당한 간격으로 배치된 높이 조정기구를 가진, 지보공을 사용하여 지지하고, Erection 도중의 안전을 확보해나가면서 조립이 실시된다.
대규모 돔의 건립에서 벤트공법을 채용하면 높고 넓은 가구를 많은 지보공으로 지지할 필요가 있고, 지보공만으로도 상당한 양의 가설자재가 되어, 그 결과, 가설코스트가 높아진다. 따라서 이 가설자재를 줄이기 위해서도, Block 공법, Lift-up공법, Push-up공법, Sliding공법 등의 특수기술이나 장비가 필요한 Erection공법이 검토된다. 또한, 비교적 경량한 시스템 트러스 등에서는, 지보공과 작업자를 위한 비계를 겸용하는 경우가 많고, 비계와의 관계로 총합비계공법, 이동비계공법으로 불리는 Erection공법이 검토된다. 어떤 공법을 채용하는가는, 구조물의 형상, 가구, 부지 등의 설계조건, 공기, 공비, 가설계획 등의 시공조건 및, 안전성을 고려하여 결정한다.
본 연구에서는 외국에서 적용된 대공간 건축물 Erection 공법 사례와 중소규모 공간구조에 적용된 국내 Erection 공법 사례 등을 조사·분석하여 현장여건에 맞는 안전하고 경제성을 확보한 효율적인 Erection 공법을 개발하는 것이며, 개략적인 연구내용은 다음과 같다.

1) Erection 공법 국내외 기술동향 분석
2) Erection 공법 국내외 사례조사 및 공법 적용 빈도 검토
3) Erection 공법 가상 모델 개발 및 모형 제작
4) Erection 공법 개발과 실무용 Erection 공법 선정 프로그램 및 매뉴얼 개발

(4) 나. 2차년도 : 연성 구조물의 장력 측정 기법 개발

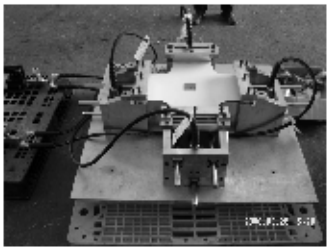
막구조는 재료의 경량화, 강성의 증가, 일반적인 재료로는 표현이 어려운 그 특유의 조형미, 자연채광의 활용으로 인환 환경친화성 그리고 짧은 공기 등 많은 장점을 가지고 있어 막 구조물의 건설이 계속 증가하고 있는 추세이다. 이 구조 시스템은 대규모 스타디움, 실내경기장, 대형공장, 박람회 관련시설, 해저구조물, 수상활주로, 우주항공기지, 산업시설물, 조형물 등 어떠한 구조물에도 응용이 가능하다고 할 만큼 그 적용 범위가 넓다. 건축분야 막구조물의 경우 보통 막을 단독으로 사용하는 경우 보다는 막과 케이블을 동시에 사용하는 경우가 대부분이다. 이들 막 구조물과 케이블 구조물은 주부재가 오직 인장내력만으로 구조형태를 지탱하고 외부하중에 저항하는 역학적 특성을 가지고 있다. 특히 막 구조물은 경량인 관계로 인하여 풍하중 등에 의해서는 상향의 변위가 발생하고, 눈하중 등에 의해서는 하향의 변위가 발생하여 불안정구조가 되기 쉽다.

따라서 막 구조는 연성의 막 재료에 초기 장력을 직접 공급함으로써 형태를 안정시키고 외부하중에 견디도록 설계하는 것이 일반적이다. 막면은 항상 장력이 작용하는 상태로 두어 풍압에 의한 펄럭임, 주름발생, 응력집중 그리고 반복응력에 의한 막 재의 강도 저하 등을 방지하여 구조물로써 안정된 형태를 유지할 수 있도록 해야 한다.

이처럼 연성구조물에서는 구조적 안정성을 확보하기 위해 장력관리는 필수적이라 할 수 있는데 이를 관리하기 위해 막 시공 후에는 설계 시 고려한 초기장력 값이 충분히 구조물에 도입되어 있는지에 대한 검증이 필수적이라 할 수 있다. 대공간 연성구조물의 경우 이와 같은 장력상태는 효율적인 장력측정을 통해 시공 시 뿐만 아니라 기존건물의 유지관리 측면에서도 상시로 유지되어야 한다.

건축분야 막 구조물에 있어서는 막의 초기장력 도입은 막면 부착 후 경계부분에 강제변위를 부여하는 방법, 부착시 막면에 장력을 넣으면서 부착하는 방법 등이 행해진다. 그러나 막면에 동일하게 장력이 도입되는 방법을 구조계획 단계에서 고려해야 하고, 동시에 막재료의 크리프 등에 의한 막면의 이완을 흡수하여 상시 장력상태로 하기 위한 장력재 도입장치나 방법 등을 계획해야 한다.

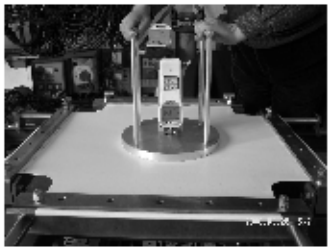
그리고 도입된 막의 장력을 측정하기 위해 여러 가지 방법이 소개되고 있다. 손으로 직접 눌러서 측정하는 경험적 방법에서부터 간단한 측정기기에 의한 직접법 및 특정 부위에 센서 등을 설치하여 측정하는 방법 등이 있으나 이들에 대한 방법의 타당성과 결과 검증에 대한 기준이 거의 없는 상태이므로, 막 구조물의 안전 확보를 위해 효율적인 장력측정기기 개발 및 측정방법과 그 활용방안 등에 대한 연구 필요성이 크게 대두되고 있는 실정이다.



가) 2축장력 시험기 (TTM200)



나) 2축장력 시험기 (TTM500)



다) 휴대용 측정기에 의한 막 장력 실험

1. 따라서 본 연구에서는 대공간 연성구조물 중에서도 주로 막구조를 대상으로 하며, 이 때 막구조의 효율적인 장력측정기기를 개발하여 현장에 적용할 수 있는 관리기법 및 시공기술을 개발하는 것이며, 개략적인 연구내용은 다음과 같다.
   1) 연성구조물의 장력측정 시공기술에 대한 검토
   2) 기존의 막 구조 장력측정 시공기술에 대한 특성 분석
   3) 효율적인 장력측정기기의 개발을 위한 장력측정기기 모델의 개발
   4) 장력측정기기 성능테스트를 위한 기자재의 조사 · 분석 · 구매 · 제작
   5) 장력측정기기의 시제품을 제작하여 상용화를 위한 데이터를 확보
   6) 장력측정 지침서의 개발

(1)

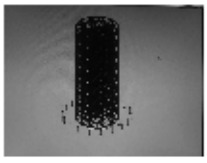
(2) 다. 3차년도 : 시공 자동화 공법 개발

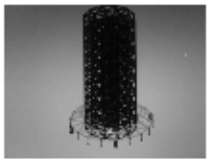
대공간 스페이스 프레임 구조물의 Erection 에 있어서 자동화 시공은 아직 그 사례가 거의 없으며, 현재까지 건설된 이 분야 구조물 규모가 소규모이었기 때문에 국내에서는 대부분 원시적인 수동화 방법 또는 반자동화 방법에 의한 시공이 대부분이었다.

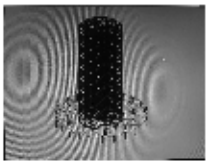
3. 국내의 경우 대공간 건축물 자동화 공법에 관한 연구는 전무하며, 해외의 경우는 건설사 연구소 또는 기술부서 소속 관련 연구원과 기술자들에 의해 대공간 시공 자동화 연구가 진행되고 있는 것으로 조사되었으며, 연구단을 구성하여 연구가 진행되는 사례는 본 조사에서는 찾아볼 수 없었다.

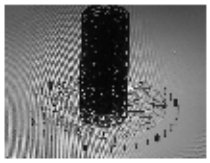
4. 한편, 실무에 적용한 국내의 대공간 건축물 시공 자동화 사례는 인천국제공항 아시아나 항공기 정비시설동 지붕설치 자동화 (슬라이딩 공법), 인천국제공항 항공기 정비시설 지붕설치 자동화(Lift-Up공법), 인천국제공항 교통센터 Grate Hall 지붕설치 일부 자동화(슬라이딩 공법)이 있었으며, 국외의 대표적 사례로는 오사카 돔 지붕설치 자동화 (Lift-Up공법), 세이부 돔 지붕설치 자동화(Lift-Up공법), 나고야 돔 지붕설치 자동화(Lift-Up공법), 나가노 피겨스케이트장 지붕설치 자동화(Lift-Up공법), 오사카 나미하야 돔 지붕설치 자동화(Push-Up 공법) 등이 있었으며, 이 외에도 지간 150m 이상의 대공간 건축물은 대부분 특수한 공법으로 자동화 시공하고자 한 사례가 많았다. 특히 가설재 시공 자동화 사례로는 3차원 대공간구조물 지붕 시공용 이동 비계 공법을 적용한 센다이 공항 여객 터미널 사례와, 후쿠오카 현립스포츠 센터에서 적용한 천정높이 변화에 대응 가능한 이동 비계 공법이 있었다.

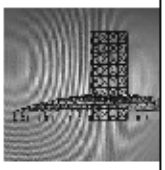
5. 직경 300m 이상의 대공간 건축물 건설에 즈음하여 더 이상 수동화 공법에 의한 시공으로는 시공단가, 공기 그리고 안전성 등에서 국제 경쟁력을 확보할 수가 없게 되었다. 규모가 큰 대공간 건축물일수록 공기와 공비를 대폭 절감할 수 있는 시공 자동화가 절실히 요구된다. 대공간 건축물의 경우 가설공사와 Erection 공사가 전 공정에 차지하는 비율이 크며, 이 부분의 시공자동화에 의해 공기 단축, 공비 절감, 그리고 안전사고 등을 예방하여 시공의 효율성을 극대화할 필요성이 있다.


중앙 서포터 설치

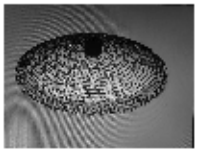

골조 1차 조립


1단계 골조 설치 후 인양


2단계 골조조립

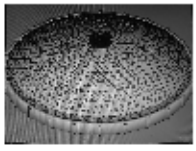

골조 인양 중

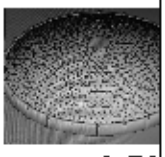
6.


지상 조립 완성


lift-up 직전 장면


lift-up 직후 지점 설치


중앙 서포터 제거 중


lift-up 후 중앙 서포터 제거

7. 본 연구에서는 지상에서 대공간 지붕 골조를 자동으로 설치한 후 지붕 골조를 최종 위치까지 자동으로 인양하는 공법을 개발하여 기존 공법에 비해 공사비용 절감, 공사기간 단축, 시공 안전성 확보를 도모할 수 있는 시공 자동화 공법을 개발하는 것으로 개략적인 연구내용은 다음과 같다.

1) 1) 골조공사의 자동화 모델 개발
2) Erection 시공자동화 모델 개발
3) 골조공사의 자동화 공법 개발
4) Erection 시공 자동화 공법을 개발하여 애니메이션 및 모형 제작 · 시연

2.


지상조립 전-1


지상조립 전-2


지상조립 후


lift-up 후-1


lift-up 후-2

(1) 라. 4차년도 : 연성 막구조물의 시공관리 기술 개발

대공간 구조물 중에서도 연성 막구조물의 비약적인 발전은 최근 우리들의 주목을 끌고 있다. 이러한 추세와 함께 연성 대공간 구조물의 건설이 전 세계적으로 급속히 늘어나고 있으며, 붕괴 사고 또한 늘고 있는 실정이다.

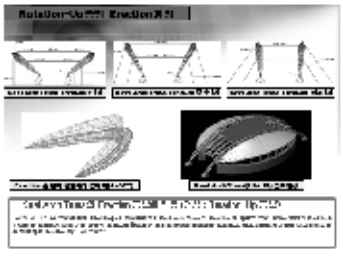
케이블이나 막과 같은 연성부재를 주 구조재로 사용하는 연성 구조물은 시공성, 경제성을 향상시킨 매우 합리적인 구조시스템이지만, 유연성이 높기 때문에 시공할 때 매우 고난도의 기술이 필요하다. 연성 구조물의 큰 유연성은 어느 한 부재의 장력을 변화시키면 나머지 부재의 장력 및 위치 좌표가 함께 변하게 되어 시공과정에서 많은 애로를 겪게 되며, 현장의 고공작업이 많아짐으로 인해 안전사고 등의 위험 요소가 늘어나게 된다.

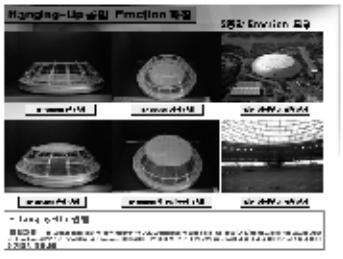
실 예로 서울 올림픽 공원 내에 건설된 올림픽 체조경기장이 1986년 준공당시 기울어진 마스터의 교정 작업을 하던 중 외부 대각케이블이 절단되어 이로 인해 인명피해가 발생했다. 경기장은 그 후 2001년 1월과 2월에 폭설로 인한 케이블 및 막재의 파손 사고가 발생하였으며, 보수보강 작업 중 중간 대각케이블을 교체하면서 준공당시의 사고와 유사한 인명피해사고가 또 발생하였다. 인명피해가 발생한 두 사고 모두가 무모한 시공방법이 원인이 된 것이며, 잘못된 시공관리로 인하여 위험요소와 사고가 존재하고 있다. 2010년 1월에도 안산 한국농어촌 공사 에어돔 연구동이 눈에 의해 붕괴되었으며, 그 외에도 시공 중 또는 시공관리 미숙으로 많은 붕괴사고가 일어나고 있다.

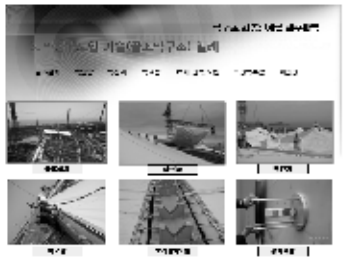
대공간 구조물의 역학적 특성을 재차 언급하지 않더라도 지간이 200~300m에 달하는 대공간 구조물의 경우 일반구조물과는 다른 시공법 및 시공관리 기법이 필요한 것은 두말할 필요도 없다. 그리고 대공간 구조형식에 따라서도 그 시공법이나 시공관리 기법이 전부 다를 수 밖에 없는 것이 3차원 자유형태를 지향하는 대공간 구조물의 특징이라 할 수 있다. 그리고 시공법 또는 그 관리 기술에 따라서 공비, 공기, 안전성 측면에서 엄청난 차이가 날수 있는 것이 3차원 대공간 건축물의 특징이라 할 수 있다.

산업화의 발전과 더불어 더욱더 각광을 받고 있는 연성 막 구조물은 골조막 구조, 현수막 구조, 공기막 구조로 크게 3종류로 분류할 수 있으며, 그 종류에 따라 시공법이나 시공관리 기법에 다소 차이가 있다.

앞으로 도래할 이 분야 건축물의 폭발적인 수요에 대비하여 국제경쟁력을 갖춘 가장 효율적인 시공관리 기술을 개발하여 공비절약, 공기단축, 시공 안전성 등을 확보할 필요가 있다. 그리고 개발된 시공관리 기술을 정리하여 현장 실무자들이 시공관리 지침으로 삼을 수 있도록 시공관리 지침서 제작도 필요한 실정이다.







8.

Rotation-Up 공법 개념도 Hanging-Up 공법 개념도 골조막 구조 장력도입 사례

따라서 본 연구에서는 연성 막구조물의 요소시공기술을 개발하고 효율적인 시공관리를 위해 시공관리지침서를 제작하는 것으로 개략적인 연구내용은 다음과 같다

1) 연성 막구조물의 요소시공기술 개발
2) 연성 막구조물의 erection공법 모형 및 동영상물 제작
3) 연성 막구조물의 시공지침서 개발

(1) 마. 5차년도 : 강성 구조물의 시공관리 기술 개발

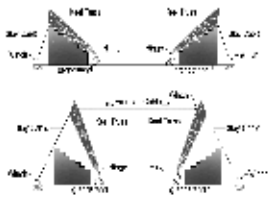
대공간 구조물 중에서도 스페이스 프레임의 비약적인 발전은 최근 우리들의 주목을 끌고 있다. 이러한 추세와 함께 강성 대공간 구조물의 건설은 세계적으로 급속히 늘어나고 있으며, 붕괴 사고 또한 늘고 있는 실정이다.

스페이스 프레임은 1940년 독일인 MAX MENGERING HAUSEN 박사가 창안한 파이프 구조건축법으로서 무한대의 공간이나 한정된 공간에서 표현하고자 하는 구조물을 점, 선 등을 이용하여 자연과 조화를 이루며 예술적이고 개성적, 시각적 아름다움을 가지도록 디자인한 3차원 형태의 구조물이다. 국내에 본격적으로 알려진 계기는 1993년 대전엑스포 세계박람회를 통해 전국적으로 소개가 되어 급속적인 적용이 시작 되었다. 스페이스 프레임은 선형의 부재들을 결합한 것으로, 힘의 흐름을 3차원적으로 전달시킬 수 있도록 구성된 구조시스템이다. 구성부재가 2차원적인 경우도 있으나, 거시적으로 볼 경우 스페이스 프레임은 평판 또는 곡면의 형태를 이룬다.

대공간 구조 중에서도 강관 등을 주 구조재로 사용하는 스페이스 프레임 구조는 강성 구조에 속하며 연성구조인 막구와 더불어 대공간 구조형식의 대표적 구조시스템이다. 그러나 스페이스 프레임 구조는 시공성, 경제성을 향상시킨 매우 합리적인 구조시스템이지만, 사용 부재가 경량이며, 세장하므로 좌굴 등의 영향으로 시공할 때 매우 고난도의 기술이 필요하다.

대공간 구조물의 경우 일반구조물과는 다른 시공법 및 시공관리 기법이 필요한 것은 두말할 필요도 없다. 그리고 대공간 구조형식에 따라서도 그 시공법이나 시공관리 기법이 전부 다를 수 밖에 없는 것이 3차원 자유형태를 지향하는 대공간 구조물의 특징이라 할 수 있다. 그리고 시공법 또는 그 관리 기술에 따라서 공비, 공기, 안전성 측면에서 엄청난 차이가 날수 있는 것이 3차원 대공간 건축물의 특징이라 할 수 있다. 앞으로 도래할 이 분야 건축물의 폭발적인 수요에 대비하여 국제경쟁력을 갖춘 가장 효율적인 시공관리 기술을 개발하여 공비절약, 공기단축, 안전성 확보를 할 필요가 있다. 그리고 개발된 시공관리 기술을 정리하여 현장 실무자들이 시공관리 지침으로 삼을 수 있도록 시공관리 지침서 제작도 필요한 실정이다.

현재 우리나라에는 지간 200~300m 강성 구조물의 시스템적인 시공관리 기술 전무하다. 국민소득의 향상으로 국내에도 대규모 대공간 구조물의 건립이 요구되고 있으나, 대형 공사 발주시 국내 설계 및 시공관리 기술 미흡으로 국제경쟁력을 갖춘 외국 건설사가 국내 수주 시장에 참여한다면 그 시장을 잠식당할 수밖에 없는 안타까운 실정에 놓여 있다.



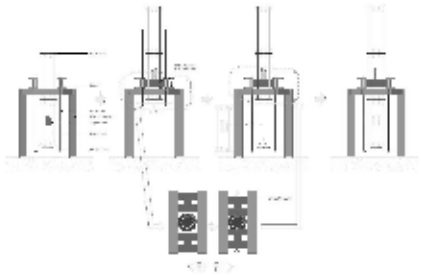
Rotation-up 공 법

따라서 대공간 구조물은 그 시공법 및 시공관리 기술에 따라서 공사비용, 공사기간, 시공 안전성 측면에서 일반구조물과는 비교가 되지 않을 정도의 엄청난 차이가 날수 있으므로 국제경쟁력을 갖춘 효율적 시공 관리 기술 개발은 반드시 필요하며 그 기술 개발이 매우 시급한 상황이다.

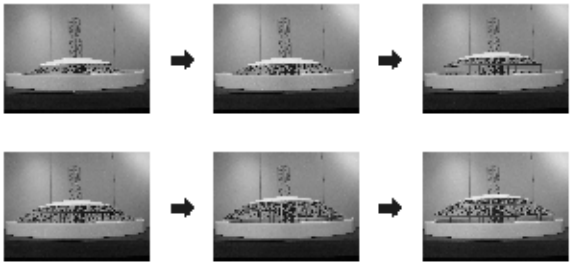
따라서 본 연구에서는 강성 구조물의 시공관리 기술을 개발하고 효율적인 시공관리를 위해 시공관리지침서를 제작하는 것으로 개략적인 연구내용은 다음과 같다

1) 스페이스 프레임 구조시스템 분석 및 시스템별 시공성 검토
2) 접합부 시공관리 기술 검토 및 개발 및 시공상태에 따른 구조해석
3) 스페이스 프레임의 Erection 공법 기술 개발
4) 스페이스 프레임 구조물 시공 지침서 개발

(2)



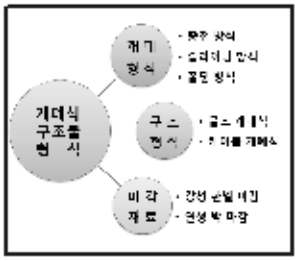
Jack-Up 시스템의 작동 원리



Jack-Up 시스템기술 적용실험

⑶ 바. 6차년도 : 개폐식 구조물의 시공관리 기술 개발

전 세계적으로 국민소득의 증가로 인해 문화수준의 향상, 레져, 스포츠 등에 대한 관심이 증가되면서 경간 200m ~300m 전후의 대공간 구조물에 대한 관심과 수요가 한층 높아졌다. 우리나라도 올림픽, 엑스포, 월드컵 등의 각종 국제 행사를 주체하고 문화, 여가, 스포츠, 산업화 등에서 대공간 구조물에 대한 수요가 계속 증가 되고 있는 실정이다. 대공간 구조물 중 개폐식 지붕을 갖는 구조물은 건설기술의 총집약체라고도 할 수 있다. 우리나라와 같이 4계절의 기후변화에 능동적으로 대처하고, 환기, 채광 등의 에너지 절감 및 친환경적 공간창출을 위해 대공간 개폐식 구조물의 수요가 증가하고 있다. 1961년 완성된 미국 피츠버그 오디트리움을 시작으로 미국, 일본, 유럽 등의 선진국을 중심으로 대공간 개폐식 구조물에 대한 연구 및 건설이 진행되고 있다. 기건설된 개폐식 구조물들은 구조형식에 따라 외기 환경에 따른 마감재의 파손 및 훼손, 누수, 유지관리 등의 많은 문제점들을 내포하고 있다. 개폐식 구조물은 구조형식, 지붕 개폐방법, 마감재료 등에 따라 여러 가지 형태로 구분할 수 있으며, 구조물의 시공법이나 시공관리 기법에 있어서도 매우 고난도의 기술을 필요로 한다. 또한, 시공법 및 관리기술에 따라서도 공사비, 공사기간, 구조물 안정성, 내구성, 건물 유지관리 등의 측면에서 많은 차이가 발생한다.



개폐식 구조물 형식 분류

최근 건축계의 화두는 친환경, 녹색성장, 에너지 절감형 건축에 있다. 현재 우리나라도 소득의 증대에 따른 문화생활의 향상과 더불어 공간의 대형화, 고층화가 진행되고 있다. 그중에서도 체육시설, 문화시설, 경기장 등의 지붕을 개폐식 구조로 하여 외부 환경에 능동적으로 대처할 수 있는 공간의 요구가 커지고 있다. 4계절의 기후 변화가 뚜렸한 우리나라의 대형 체육시설 및 경기장 등은 지붕이 오픈되어 있어서 1년 365일 시설물의 사용성 효율은 상당히 떨어지며, 우천, 강설, 외부기온에 따라 시설물의 사용은 상당히 제한적일 수밖에 없다.

또한, 우리나라는 대형 개폐식 구조물이 현재 존재하지 않기 때문에, 대공간 개폐식 구조물에 대한 시공관리 기술이 전무한 실정이며, 이에 국제 경쟁력을 갖춘 개폐식 구조물의 효율적인 시공관리 기술을 개발하여 공사비, 공기, 안정성 및 기술경쟁력을 확보할 필요가 있다.

본 연구에서는 대공간 지붕 개폐식 구조물을 대상으로 개폐식 구조시스템 분석, 시스템별 시공성 등의 시공관리 기술을 검토하고, 시공관리기술을 체계적으로 분류 검토하여 현장에서 적용 가능한 시공관리 지침서를 개발하는데 그 목적이 있으며, 개략적인 연구내용은 다음과 같다

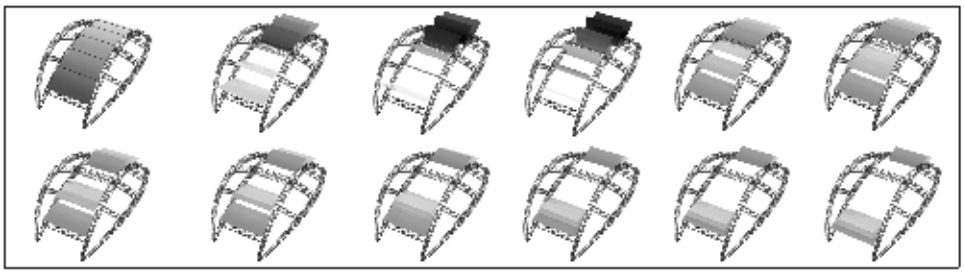
1) 개폐식 구조시스템 분석

가) 2) 개폐식 구조시스템 별 시공성 검토

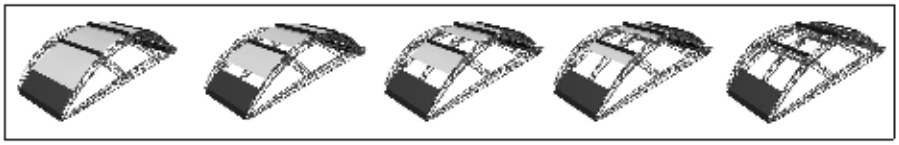
나) 3) 개폐식 구조물 모형개발

다) 4) 개폐식 구조물의 시공지침서 개발

9.



태양열 회전 슬라이딩 개폐식 지붕구조 시스템 개념도



연성 롤 개폐식 지붕구조 시스템 개념도

(1) 3.3.2 풍환경

가. 1차년도 : 대공간 구조의 형태별 바람거동 특성 조사 및 분석연구

1. 연구개요
본 연구는 곡선보 형태의 막구조물의 동적특징인 고유진동수를 규명함으로서 곡선보의 거동을 예측하고자 한다. 곡선보는 복잡한 기하학적 형상으로 인해 정확한 이론식을 유도하기가 어려우므로 이상적인 해석모델을 설정하여 기본방정식을 유도하였다. 또한, 곡선보의 임의의 지점을 가진하는 진동실험을 통해 모우드 해석법을 적용하여 고유진동수를 구하였다. 캔틸레버 곡선보의 동적인 해석을 통하여 이론값과 실험결과를 비교 검증함으로써 곡선보의 동적해석에 있어서 모우드 해석법의 타당성과 효율성을 입증한다.
2. 이론적 해석
본 연구의 실험모델인 곡선보는 자유단의 처짐이 2cm, 8cm인 두 가지 모델로서 캔 틸레버 곡선보의 이론식에 의한 고유진동수를 구하였다. 여기서, E는 탄성계수로서 690000kg/㎠, I_z는 단면계수로서 0.008822 cm^4, m은 단위길이당 질량으로 0.000002475$kg.s^2/cm^4$이다.
3. 유한요소해석(FEM)
곡선보에 대한 유한요소해석은 구조해석 프로그램인 SAP90을 사용하였다. 본 곡선보 모델의 경계조건은 한단은 고정단이고 타단은 자유단이며, 모델의 재질은 알루미늄이다. 직선보에서 고정단으로부터 수직거리(내부중심각)의 변화에 따른 고유진동수의 변화를 알아보기 위하여 캔틸레버 곡선보로서 고정단으로부터의 수직거리가 각각 2cm(δ=2cm), 8cm(δ=8cm)인 모델에 대한 폭과 길이에 대해 10*140인 1400개의 Shell요소로 mesh를 생성하여 유한요소해석을 수행하였다.
4. 모우드 해석
구조물의 각지점을 가진하여 입력에 대한 구조물의 진동응답을 구하여 동특성인 고유진동수를 얻기 위한 실험방법은 다음과 같다. 본 실험에서는 캔틸레버 곡선보 자유단부분에 한 개 속도계를 부착하고 여러 절점에 Impact Hammer로 충격가진을 하여 주파수 응답함수를 구하였다. 한단은 고정단이고, 타단은 자유단인 캔틸레버 곡선보의 고유진동수를 얻기위해 길이42cm, 너비 4cm, 두께 3mm인 알루미늄 모델의 자유단의 처짐이 각각 2cm, 8cm인 캔틸레버 곡선보를 제작하였다. 모우드 실험을 위한 보모델링은 보 전체길이에 대해 4cm 간격으로 9개의 지점을 모델링하였다. 임의의 한 지점에 가속도계를 부착시킨 후, 보의 모우드 형상을 잘 알 수 있는 자유단쪽의 지점을 충격햄머로 가진하여 그 응답을 얻을 수 있었다.



(a) 곡선보 δ=2cm (b) 곡선보 δ=8m

<그림 1> 곡선보의 모우드 실험방법



(a) 곡선보 δ=2cm의 입력신호 (b) 곡선보 δ=8m의 출력신호

<그림 2> 곡선보의 입력 및 출력신호

임펙트 해머을 이용한 캔틸레버 곡선보의 진동응답에서 출력으로부터 고유진동수를 구하였다. 실험에서 얻어진 곡선보의 고유진동수는 다음 <표 5>에 나타나 있다. 곡선보의 고유진동수에 있어서 자유단에서의 처짐 δ이 커질수록 고유진동수가 감소함을 알 수 있다. 이러한 고유진동수의 감소는 고유진동수 차수가 증가할수록 1차 고유진동수에서는 20%의 감소를 2차 고유진동수에서는 1% 3차 고유진동수에서는 0.3%로 감소하고 있었다.

나. 2차년도 :대공간 구조물의 풍동 모형제작 및 시험 기법 개발

1) 대공간 막구조물에 대한 모형제작

대공간 막구조물에 작용하는 설계용 풍하중을 산정하기 위하여 국내외에서 풍동실험한 풍압값을 이용한다. 측정된 평균풍압에 거스트 계수를 곱하는 방법과 최대풍압계수를 면에 대해서 평균하여 산정하는 방법이 주로 사용되고 있다. 하지만 막구조의 거스트 계수의 산정에 대한 이론연구와 실제 공정상의 연구는 지금까지 적절한 연구방법이 미비하다. 본 연구에서는 4가지(saddle형, point형, wave형 arch형) 막구조 기본형태를 가지고 풍동내 동적 횡 하중과 정적하중을 이용하여 막구조의 거스트 계수(Gust factor) 산출 방법을 제안하고 대공간 막구조의 강풍설계 시 거스트 계수 산정을 위한 한 방법을 제공하고자 한다.

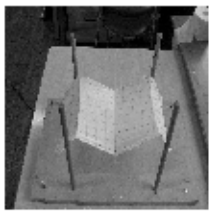
- 막구조물 종류



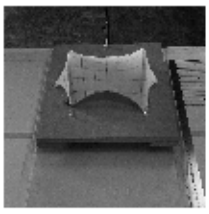
(a) Saddle형



(b) Point형



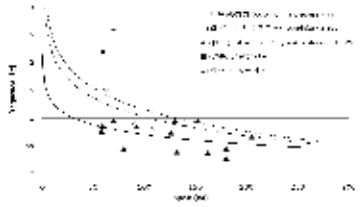
(c) Wave형



(d) Arch형

2) 대공간 구조물의 고유치해석을 통한 고유진동수 -

현재 고장도 재료의 사용과 시공기술의 발달로 대공간구조물의 지붕이 장스팬화 되고 있다. 지붕의 장스팬으로 인하여 고유진동수가 작아짐에 따라서 풍하중에 의한 동적응답의 영향이 증대되고 있다. 따라서 대공간구조물의 예비설계단계에서 고유진동수 값을 비교적 정확히 예측할 수 있다면 경제적인 대공간구조물의 설계가 가능할 것이다. 그러나 국내 대공간 구조물의 고유진동수에 대한 약산식에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 따라서 6개의 월드컵경기장 과 2006년에 개장한 광명돔까지 고유치해석 결과를 수집하여 고유진동수와 스팬을 비교하여 수식을 제안하였고, 이 결과를 일본의 대공간구조물의 계측치와 비교하였다.



각 경기장의 Span에 대한 고유진동수

국내 원형경기장의 스팬과 고유진동수를 일본의 연구와 비교하였다. 한국 공간구조물의 스팬에 대한 고유진동수는 일본의 구조물의 계측치와 해석치보다 작은 것을 알 수 있다. 따라서 해외의 제안식을 그대로 사용하는 것 보다는 향후에는 국내 공간구조물의 데이터를 더욱 축척하여 고유진동수에 영향을 미치는 Span/rise비 등의 다른 변수 등을 고려하는 종합적인 예측식의 개발이 필요하다고 생각된다.

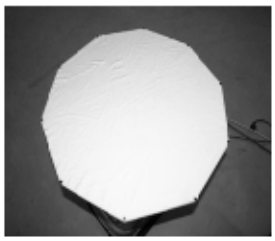
다. 3차년도 : 풍동 실험의 상사 특성 분석 연구: 재료적, 기학학적

- 풍동실험 모형 제작을 위한 상사법칙 연구 및 풍진동 실험

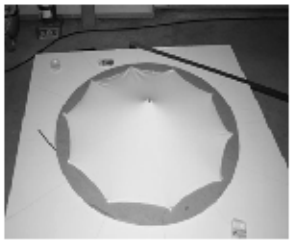
대공간 막구조물의 풍동 실험 상사법칙은 일반 건출물에 보다 더 어렵다. 실물과 모형에서 무차원량을 같게 한다고 생각하는 방식이 대단히 중요하다. 당연한 사실중에, 물리상태를 나타내는 방정식에 있어서는, 각 항의 단위는 전부 같지 않으면 안된다. 즉 모든 방정식은, 물리량을 나타내는 단위를 어떻게 가지고 있든지 성립하지 않으면 안된다. 그러므로, 방정식은 물리량의 단위와 무관계한, 즉 단위에 관계하지 않는 무차원의 정수 혹은 변수에 의해 기술할 수 있다. 따라서, 실험에 의해 얻어진 결과의 상호관계를 조사하는 데는, 물리량 그 자체가 아닌, 측정된 물리량으로부터 만들어진 무차원량을 조사하면 된다. 바꿔말하면, 예를 들어 측정한 개개의 물리량의 크기가 다를지라도 이들로부터 이루어지는 무차원량이 같다면, 같은 현상을 나타내는 것이 가능하다고 하는 것이다. 결국, 실물과 모형에서, 현상에 관계하는 물리량으로부터 만들어진 무차원량을 일치시키면, 모형실험에 있어서 실물과 상사인 현상을 재현하는 것이 가능하다고 말하는 것이다.

- 형태의 찾기 :

우선 사진 2a와 같이 정십변형 모양으로 폴리스판을 잘라낸다. 각 변의 길이는 35㎝이고 대각선의 길이는 76.8㎝이다. 폴리스판의 중심을 원형 MDF판 중심에 맞추고 면에 따라 그린다. 다음에 MDF판 중심에 높이를 조절할 수 있는 기둥을 설치한다. 그리고 정십변형 폴리스판 센터에 있는 기둥의 높이를 조절하면서 실험에 원하는 높이(H)까지 조절한다. 이와 같이 한 모형의 형태모습은 사진2b와 같이 나타낸다.

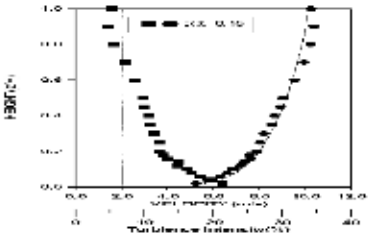


섬유재료

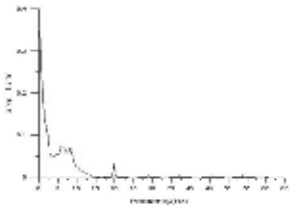


형태 모습

본 실험에서는 스파이어, 윌, 조도블럭을 사용하여 교외지역에 해당되는 지수계수 α=0.15를 구현하여 풍동 경계층 내에서 실험 실시했다. 사용된 풍속은 모형의 최상층 높이에서 측정된 0m/s-8m/s 범위에서 실시하였다. 측정된 모형의 고유진동수는 19.8Hz이고 변위의 Power spectral density는 아래그림과 같다.



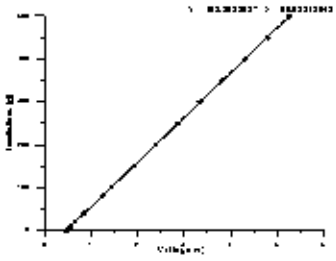
평균풍속과 난류강도의 수직분포



Power spectral density



loadcell의 Calibration 테스트

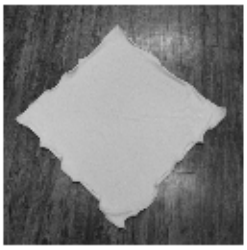


loadcell의 Calibration

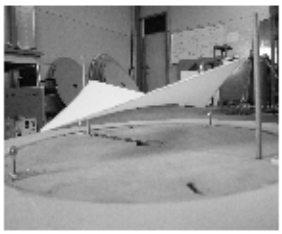
라. 4차년도 :형상에 따른 풍하중 산정기술 개발

- 대공간 막구조물에 대한 풍진동 축소모형제작 기법 연구
  - 형태의 찾기 :

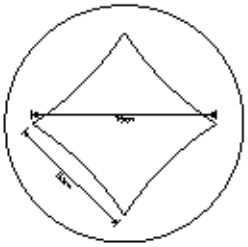
우선 폴리스판을 사면의 길이가 같은 정사각형 형태로 잘라내고 튜브와 낚시줄을 사용하여 아래사진과 같은 형태로 만든다. 각 변의 길이는 53cm이고 대각선의 길이는 75cm이다. 다음으로 MDF판 중심과 폴리스판 면의 중심점을 일치시키고 saddle형의 막구조물 형상을 예측하면서 조절한다. 이와 같이 한 모형의 형태모습은 아래 사진과 같이 나타낸다.



섬유재료



형태 모습

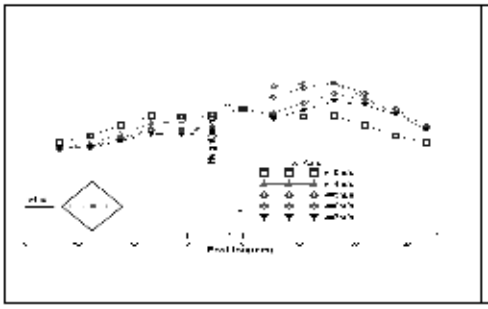


모형평면도

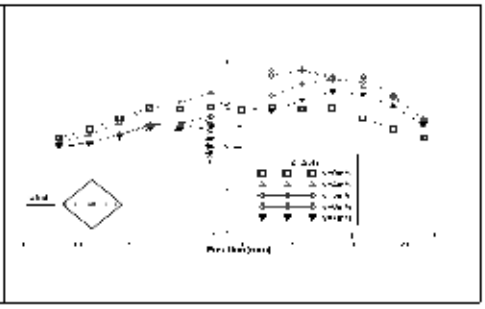


풍동내 설치된 모습

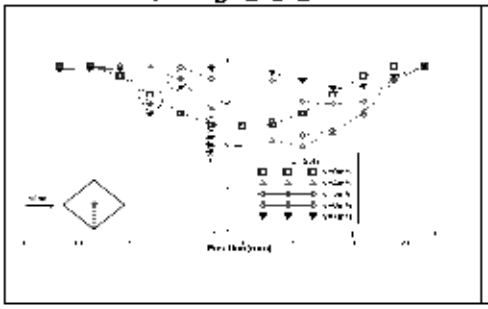
프리텐션을 줄 수 있는 X방향과 Y방향에 각각 2개의 낚시줄을 연결한 후 끝에 종이컵을 매달아서 하중을 준다. 첫 번째 실험에서는 하중을 Fv=400gf 주었고, 두 번째 실험에서는 하중을 Fv=500gf을 주어 실험을 실시하였다. 그리고 6개의 레이저 변위기를 MDF판 밑에 설치하여 X축에 대한 풍속의 변화 변위응답을 측정한다.



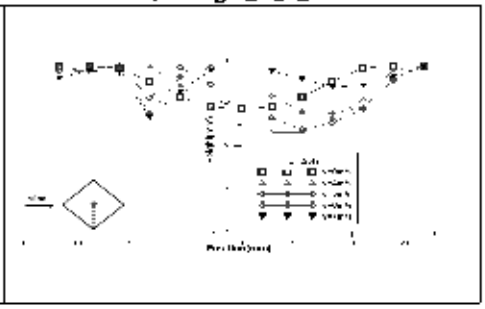
X축 400g 풍방향 0도



X축 500g 풍방향 0도



Y축 400g 풍방향 0도



Y축 500g 풍방향 0도

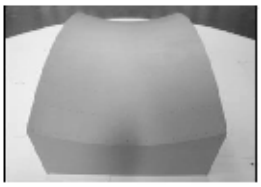
마. 5차년도 : 형상 최적화를 위한 대공간 구조물 풍하중 감소 기술연구

- [가] 대공간구조물의 지붕면의 형태별 풍압실험

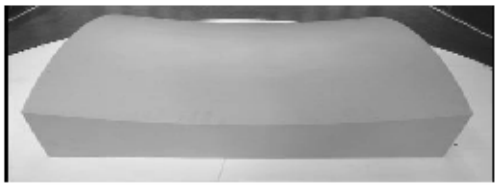
대공간 건축물 지붕면의 형태설계는 형성가능곡면이 전제가 되어야 하며, 계획상 요구되는 공간조건과 하중조건, 환경조건 등을 고려하여 응력과 변형의 정도에 따라서 최종적으로 구조적 적정형태를 찾게 된다. 대표적인 대공간 건축물인 대규모 경기장의 경우에는 테프론이라는 막재료를 사용하여 구조체를 감싸거나 덮는 형태로 많이 설계가 되며 이와 같은 구조적 형태는 그림 1과 같이 다양한 형태(Point형, Saddle형, Wave형, Arch형)로 표현된다.

이러한 형태들의 종합적인 형상이 쌍곡 포물선 안장형으로 표현되며, 이는 기존 대공간 건축물들의 지붕형상과 비교하면 기하학적인 구조형태임을 알 수 있다. 이 기하학적인 구조형태는 다른 구조형태들과 비교했을 때 공기역학적 특성에서 최적의 응답을 보이며, 케이블을 통한 응력변화의 분석을 통한 하중조건에서도 최적의 형상으로 평가되었다. 이에 대공간 건축물의 다양한 지붕형태 중 쌍곡 포물선 안장형이 최적설계의 구조라고 판단하였으며, 이를 실험모형으로 선정하였다.

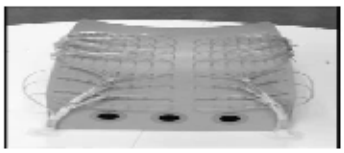
선정된 모형의 형상을 토대로 국내외 대규모 경기장 등 기존 대공간 건축물에 대한 논문과 각종 자료를 수집하였으며, 이를 통해 건축물의 형태로 가장 이상적이고, 안정적인 형태의 쌍곡 포물선 안장형의 기준을 확립하였다



외압



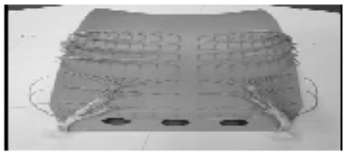
외압



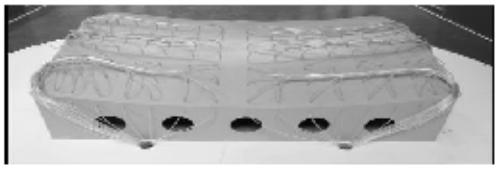
내압 개폐율 2.5%



내압 개폐율 2.5%



내압 개폐율 5%



내압 개폐율 5%

(a) Rectangular shape

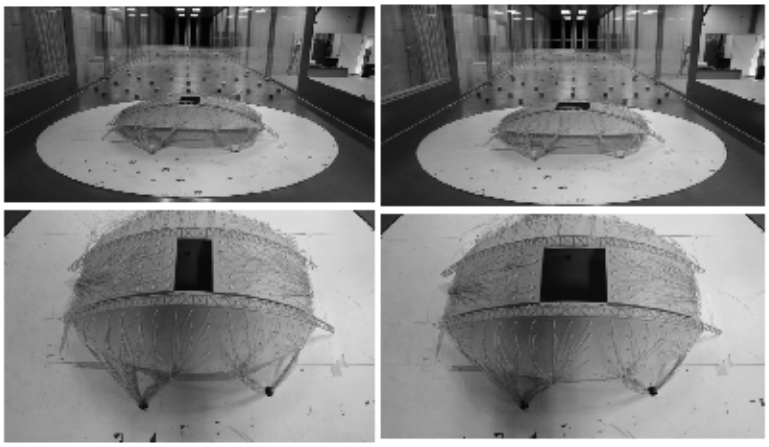
(b) Square shape

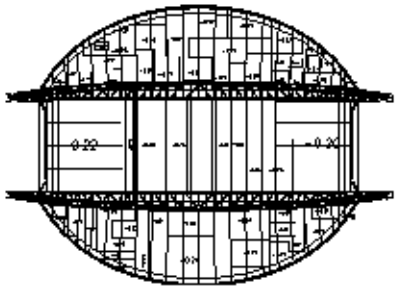
내압의 경우, 최대피크 풍압계수와 최소피크 풍압계수 모두 형태와 개폐율에 상관없이 풍압계수 분포가 중앙부를 기준으로 좌우대칭되는 양상을 보였으며, 이는 실험 확률변동 조건에 적용하여 보면 일정부분 서로 일치하는 결과임을 알 수 있다.그리고 지붕면 최대풍압계수와 최소풍압계수 분포는 지붕면의 양끝 지점에서 크게 나타났다가 중앙부로 갈수록 작아지고 다시 중앙부에 커지는 형상을 나타내었다. 실험 조건에 따라 조금씩의 차이는 있었지만 그림 3-34를 통해 확인해보면, 최대피크 풍압계수가 양끝단에서 0.55로 중앙부의 0.39보다 1.5배 정도 크게 나타났다. 다른 실조건의 경우에는 양끝단과 중앙부에서 서로 거의 비슷한 풍압계수 값이 나타나기도 했다. 최소피크 풍압계수는 양끝단에서 -0.62, 중앙부의 -0.72의 최소값 분포로 중앙부에서 1.2배 정도 더 작은 값의 풍압계수가 나타났다.

바. 6차년도 : 대공간 단면과 형상별 풍하중 및 풍진동 지침서

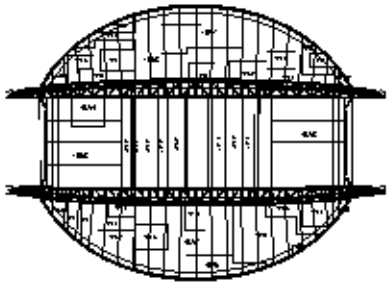
-가. 개폐형 대공간 구조물의 내압풍압계수특성

대공간 구조물 지붕의 개폐율(25%,50%)에 따른 내압풍압계수(평균풍압계수, 최대/최소 풍압계수, 변동풍압계수)를 구하고 이로부터 지붕에 작용하는 내압용 설계풍압계수을 평가하는데 목적이 있다.

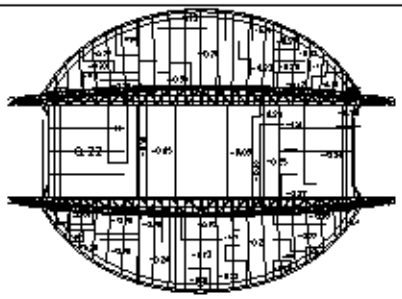




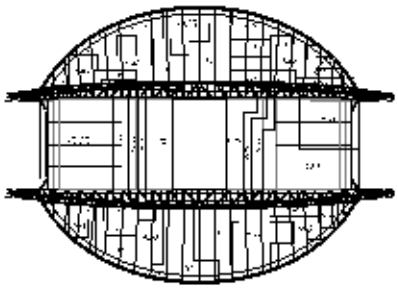
(a) 개폐율 25% 최대풍압계수분포



(b) 개폐율 25% 최소풍압계수분포



(c)개폐율 50% 최대풍압계수분포



(c)개폐율 50% 최소풍압계수분포

-나. 대공간 구조물의 풍환경 설계지침서

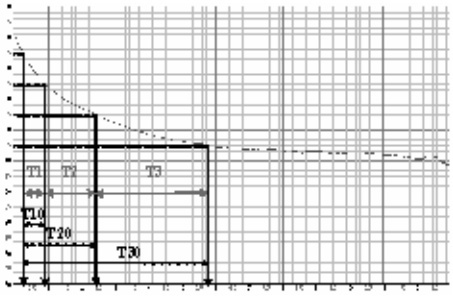
		1.8

합		
사각스케일		
프루드수		
레이놀드수		

(2) 3.3.3 음환경

(3) 가. 1차년도 : 대공간의 실내음향설계기술 개발

본 연구에서는 음향축소모형 실험을 통하여 확산음장과 자유음장의 음향적 연결에 따른 확산음장 내 음향특성의 변화를 검토하고 이를 토대로 향후 개폐식 공간의 음향계획 시 사용가능한 설계변수를 개발하였다. 기존의 평가방법인 잔향시간은 비선형적 감쇠구간에 대한 선형적 curve-fitting에 의해 실제 청감과는 거리가 먼 매우 긴 잔향시간이 도출되어 실질적인 효용성이 의심된다. 따라서 본 연구에서는 잔향음에너지의 감쇠구간에서 나타내는 비선형성을 효과적으로 반영하며 청감에 기초하는 개선된 잔향시간의 개념을 제안하였다. 10dB의 에너지 변화는 지각된 라우드니스 측면에서 소리크기의 2배 증감과 일치하는 것으로 알려져 있으며 본 연구에서는 잔향음에너지의 감쇠구간을 10dB 간격의 음에너지 감쇠에 의해 각각 초기(-5~-15dB), 중기(-15~-25dB) 그리고 후기(-25~-35dB)로 세분화하고 각 감쇠구간에 대해서 선형적 curve-fitting을 실시하여 구간별 잔향시간을 도출하였다(그림 3.3.5.66). 각 구간별 잔향시간은 감쇠구간에 따라 초기(T_1), 중기(T_2) 그리고 후기 잔향시간(T_3)으로 구분하였다.



가) 그림 3.3.5.1 Schroeder integration과 curve-fitting에 의한 잔향시간과 본 연구제안 T_M의 도출

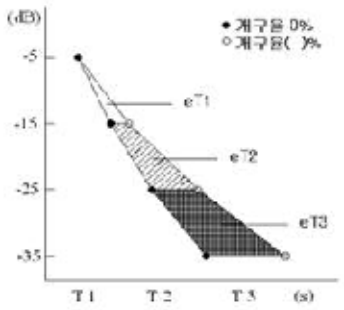


그림 3.3.5.2 개방에 따른 잔향변화량 도출

(4)

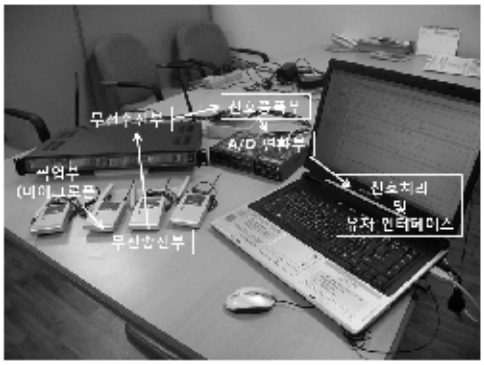
각 구간별 에너지 변화량은 다음 식에 의해서 산출할 수 있다.

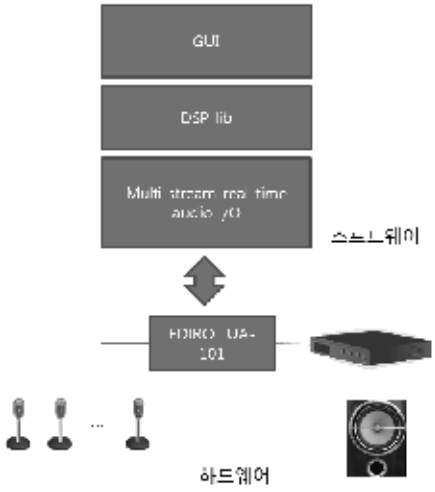
$$eT_1 = 10\log\left[\left|\int_{t_0}^{t_1}(f_0(t)-f_N(t))dt\right|\right] \qquad \text{(식 3.3.5.1)}$$

여기서, eT1: 개방에 따른 잔향변화 f0(t): 폐쇄상태의 초기감쇠함수
fN(t): N% 개방시의 초기감쇠함수

(5) 나. 2차년도 : 대공간의 실내음향성능 측정기술개발

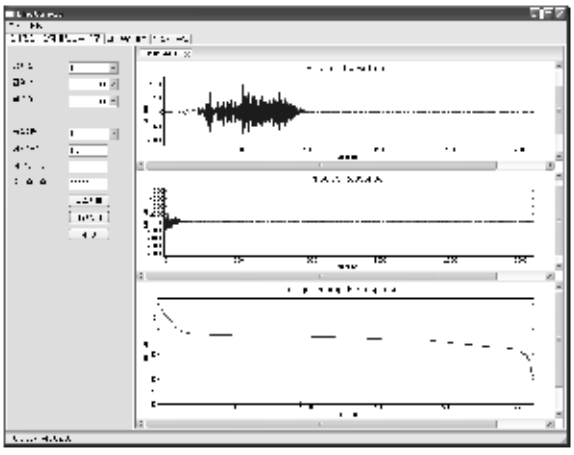
대공간의 경우 실제 스팬이 200m 이상으로 일반적인 실내음향 측정기술로는 해결하기 어려운 점들이 있다. 따라서 2차년도 연구의 두 번째 범위는 보편적인 측정용 시그널과 마이크로폰-분석기 사이의 거리 한계에 관한 기존 측정시스템의 한계를 벗어날 수 있는 대공간용 음향측정 시스템을 설계하고 시작품을 제작하였다. 또한 후처리 소프트웨어의 제작을 통하여 1차년도의 연구 결과 대공간에서의 중요한 음향파라메터로 제기된 초기감쇄시간(EDT)과 감쇠구간별 잔향시간(T_M), 그리고 음성명료도(D_{50}), 음악선명도(C_{80}) 값을 측정할 수 있는 대공간의 실내음향 성능 측정기술을 개발하였으며, 개발된 무선측정시스템 및 후처리소프트웨어는 시작품으로 제작하여 그 효과를 검증하였다.





가) 그림 3.3.5.3 측정기시스템의 구성

(6)



나) 그림 3.3.5.4 후처리 모듈에 의한 음향파라메타 산출

(7) 다. 3차년도 : 대공간의 실내음향시뮬레이션 기술개발

개폐형 공간의 경우, 기존의 예측방법에 의해서는 자유음장과의 커플링에 의한 음의 비선형적 감쇠를 정확하게 예측·평가할 수 없는 한계가 확인되고 있다. 본 연구에서는 음의 파동방정식을 직접 적용하여 해를 구하는 방법들 중 음향시뮬레이션에의 적용성이 뛰어난 것으로 판단되는 FDTD (finite difference time domain) 방법을 활용한 음향시뮬레이션 프로그램을 개발하였다. 본 연구의 결과는 음의 파동성을 가장 직접적으로 해석할 수 있으며 따라서 자유음장으로 일부가 개방되는 공간의 시뮬레이션 등에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 효율적인 프로그램의 활용을 위해서는, 공간의 규모가 커지는 경우 연산시간이 과다해지는 문제 등에 대한 추가적인 연구가 필요하며, 기존프로그램에서 사용되는 흡음율 및 음원의 지향성 데이터를 본 프로그램에서 그대로 사용할 수 없는 한계가 있다.

(9)



가) 그림 3.3.5.5 본 연구에서 개발된 프로그램의 소스일부

(8)

(가)

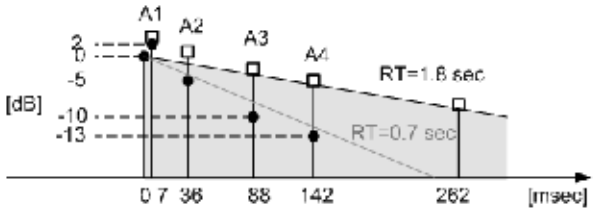


가) 그림 3.3.5.6 본 연구에서 사용된 연산용 컴퓨터

(10)라. 4차년도 : 대공간의 음향설비제어기술 개발

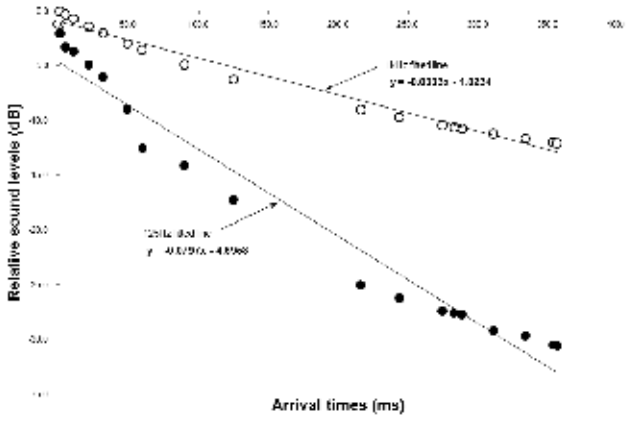
(11)

본 연구는 대공간의 음향성능 제고 및 품질유지를 위해서 필수적으로 고려되는 전기적인 증폭시스템 계획방법의 개발을 목적으로 하고 있으며, 대공간의 특성에 따라 고려되어야 하는 최적 음향시스템의 선정 및 적용방법을 위주로 하는 실용화 기술개발에 중점을 두고 있다. 이를 위하여 국내외 관련 대공간의 건축 및 전기음향의 적용사례를 분석하고 이를 데이터 베이스화 하였다. 또한 본 연구에서 개발한 스피커 잔향시간을 활용한 다양한 스피커 배치방식들을 실제 공간에 적용하고 분석하며 각 시스템별 주관적 명료도 및 선호도 평가를 실시하고 이를 토대로 해당공간에 적용 가능한 최적 스피커 배치방식과 효율적인 설계방법을 도출하고 제안하였다. 건축음향과 전기음향을 동시에 고려한 설계변수로서 스피커 잔향시간을 제안하였다. 스피커 잔향시간 (T_{spk})은 평가 대상이 되는 수음점에 각 스피커들로부터 도달하는 음에너지의 감쇠율로서 정의된다. 스피커 잔향시간의 산출을 위해서는 선정된 스피커의 지향패턴과 주파수별 음향출력 그리고 거리감쇠를 고려한 감쇠곡선을 그리고 이로부터 60dB 감쇠하는데 소요되는 시간을 계산함으로써 얻을 수 있다.



가) 그림 3.3.5.7 스피커 잔향의 개념

나)



다) 그림 3.3.5.8 17 개 스피커를 적용한 경우의 스피커 잔향산출 예

(12)마. 5차년도 : 대공간의 비선형 음에너지 감쇠 평가기법연구

(13)

본 연구에서는 대규모 공간 등 비확산음장에서 나타나는 비선형 음에너지 감쇠에 의한 잔향감을 정량화할 수 있는 설계파라메타를 개발하고 그 유효성을 검증하였다. 본 연구에서 제안한 비선형감쇠 평가지표인 T_N을 산출하여 청취실험을 통해 측정된 잔향감과 상관관계를 비교·분석한 결과, T_N은 잔향시간이 짧은 경우와 긴 경우 r^2 값이 각각 0.73264와 0.8211로써 매우 높은 상관관계를 나타내고 있어, 비선형감쇠가 나타나는 실에서 청취자들이 지각하는 잔향감을 잘 반영하고 있는 것으로 평가되었다. 반면, 가장 많이 사용되고 있는 잔향음향설계 지표인 잔향시간(T_{60})은 비선형감쇠에 의한 잔향감을 전혀 반영하지 못하는 것으로 분석되었다(r^2=0.03079 및 0.10392). 또한 음에너지 감쇠구간별 감쇠시간과 잔향감의 상관관계를 분석한 결과, 4초 미만의 비교적 짧은 잔향시간을 갖는 환경에서 발생하는 비선형감쇠의 경우 초기구간(-5~-15dB)에서의 음에너지 감쇠율이 청취자들이 지각하는 잔향감을 좌우(가중치, 0.923023908)하는 반면, 4초 이상의 긴 잔향시간을 갖는 환경의 경우, 중기구간(-15~-25dB)과 초기구간(-5~-15dB)에서의 감쇠율이 잔향감을 결정하는 가장 중요한 요인으로 분석되었다. 본 연구에서 최종적으로 제안한 대공간 비선형감쇠 예측 및 설계지표인 T_N은 다음과 같이 정의된다.

$$Rev = \alpha \times T_1 + \beta \times T_2 + \gamma \times T_3 + \delta \quad \text{(식 3.3.5.2)}$$

여기서, Rev: 잔향감, T_1: -5~-15dB 구간의 선형 감쇠율(sec),

T_2: -15~-25dB 구간의 선형 감쇠율(sec),

T_3: -25~-35dB 구간의 선형 감쇠율(sec)

α: T_1 구간의 weighting factor, β: T_2 구간의 weighting factor,

γ: T_3 구간의 weighting factor, δ: Y intercept

$$T_N = \alpha_N \times T_1 + \beta_N \times T_2 + \gamma_N \times T_3 \quad \text{(식 3.3.5.3)}$$

여기서, T_N: 비선형감쇠의 잔향시간 (sec)

α_N: T_1 구간의 weighting factor, β_N: T_2 구간의 weighting factor,

γ_N: T_3 구간의 weighting factor

(14)바. 6차년도 : 음환경 최적설계지침작성

본 연구에서는 체육경기를 포함하여 공연·행사의 용도로 활용되는 대공간의 음환경 설계 시 활용 가능한 건축음향, 전기음향, 소음제어 분야의 가이드라인을 제안하였다. 대공간은 체육시설 뿐만 아니라 공연과 각종 행사를 수용하기 위한 음환경 조성은 필수적이며 그에 따른 건축음향, 전기음향 및 소음제어 측면에서의 검토가 계획단계에서 완공 후 평가단계에 이르기까지 지속적으로 이루어져야 한다. 본 연구에서는 음향설계 프로세스를 크게 4개 단계(계획단계, 설계단계, 시공단계, 완공단계)로 구분하고 각 단계별로 고려해야 되는 필수적인 음향설계요소들과 그 내용 그리고 본 연구를 진행하면서 개발된 설계변수 및 도구들의 활용방법을 제시하였다. 대공간의 음향설계프로세스에 의거한 설계목표는 다음과 같다.

표 3.3.5.37 대규모 체육시설의 음향성능 목표

1) 음향성능지표	2) 목표성능범위	3) 검토항목
4) 잔향시간(초)	5) 만석 시 3 ~ 4, 공석 시 5~6	6) -공간규모, 형태, 7) -필요흡음력, 가용흡음범위 8) -천장 부가흡음구조
9) T_M(초)	10)7 ~ 11	
11)명료도(RASTI, 전기음향)	12)0.5 ~ 0.6	13)-공연레이아웃에 따른 음향시스템 계획 14)-필요흡음력 15)-전기음향시스템배치 계획 16)-시스템의 선정
17)실내소음도(NC)	18)NC40 ~ 45	19)-천장개방여부 20)-공조방식
21)음압레벨분포(dB, 전기음향)	22)10 ~ 11.4	23)-전기음향시스템배치계획 24)-시스템선정

가. 3.4 실용화 방안 연구

SUMMARY

① Code

1차년도 연구과제명 : 대공간 구조물 CODE에 관한 국외자료 수집 및 분석

선진국들이 공신력 있는 관련기관에서 인증하는 지침서 및 제반 규정을 가지고 엔지니어링을 실시하고 있는 것에 비해 국내에서는 아직 전무한 상태이므로, 우선 한국에 비해 매우 다양한 노하우와 경험을 가진 일본, 미국, 유럽의 code를 수집하여 정리하고 분석하였다.

2차년도 연구과제명 : 케이블구조 설계기준 및 해설 지침서 작성

케이블 구조에 대한 합리적이고 기술적 문제점이 없는 설계 지침을 마련하기 위해서 국내외의 문헌, 기준, 규격, 지침 분석 정리하여 국내 실정에 맞는 지침서를 작성하였다.

3차년도 연구과제명 : 스페이스 프레임의 설계지침 작성

스페이스 프레임 구조에 대한 합리적이고 기술적 문제점이 없는 설계 지침을 마련하기 위해서 국내외의 문헌, 기준, 규격, 지침 분석 정리하여 국내 실정에 맞는 지침서 초안를 작성하였다.

4차년도 연구과제명 : 막구조 설계기준 및 해설 작성

막구조에 대한 합리적이고 기술적 문제점이 없는 설계 지침을 마련하기 위해서 국내외의 문헌, 기준, 규격, 지침 분석 정리하여 국내 실정에 맞는 지침서를 작성하였다.

5차년도 연구과제명 : ETFE 막재 패널설계 및 시공지침서 작성

ETFE 막구조에 대한 합리적이고 기술적 문제점이 없는 설계 지침을 마련하기 위해서 국내외의 문헌, 기준, 규격, 지침 분석 정리하여 국내 실정에 맞는 지침서를 작성하였다.

6차년도 연구과제명 : 개폐식 구조물 설계지침 작성

개폐식 구조물의 합리적이고 기술적 문제점이 없는 설계 지침을 마련하기 위해서 국외의 문헌, 기준, 규격, 지침 등을 참고하여 분석하여 개폐식 구조물 설계지침을 작성하였다.

② 유지관리

1차년도 연구과제명 : 계측제어 시스템 기반기술 개발

상시 모니터링을 통하여 구조물 파손 등을 사전 예방하여야 하여야 하므로, 이를 위해 대공간 구조물의 계측 및 관리시스템의 활성/정착화를 위한 기본 자료인 계측기기, 계측방법, 분석 및 대처방안을 정립하기 위해서는 계측종류에 따른 항목별 프로세스, 계측시스템에 따른 계측 프로세스, 구조물의 이상거동 감지 프로세스 및 구조물의 안정성 분석법 등이 개발되었다.

2차년도 연구과제명 : 대변형을 고려한 제어계측 시스템 개발

적극적인 점검, 검사를 수행해서 성능의 저하를 미리 관찰하여 대책을 세우고 사고를 미연에 방지하는 예지보전 및 점검·검사·교체 등을 실시하여 사고를 일으키지 않는 예방보전이 필요하며, 본 연구에서는 FBG센서를 이용한 계측 시스템 및 패키지 기법과 손상도 검증용 무인 로봇개발과 RFID센서를 사용한 막구조물의 모니터링 및 계측시스템의 정밀도 검증 및 유지관리 지침서를 작성하였다.

3차년도 연구과제명 : 막구조 건축물 보수기술 지침(안)

막재의 유지관리 모니터링의 분석과 진단방법 및 판단은 정밀한 해석과 IT기술이 융합된 모니터링 방법의 개발이 필요하다. 이를 위해 케이블 장력측정 및 상시 무인모니터링 기

슬과 막재의 열화요인 및 열화진단 방법 개발 및 기핵/성장에 의한 막 열화성능의 진단 그리고 막 소재의 진단결과 분석 및 판정기준 검증을 위한 연구를 수행하였고 막구조물의 보수기술 지침(안)을 제안하였다.

4차년도 연구과제명 : 대공간 구조물의 유지관리 및 보수기술 지침(안)

광섬유 센서를 사용한 막구조물의 상시 계측시스템을 포함한 유지관리 기술은 세계 최초의 유지관리 시스템으로서, 막체와 강부재, 공기막구조 및 누수 부분으로 나누어 기술지침의 가이드라인을 작성한다. 유지보전 계획은 목표, 범위, 분류로 구성하고, 점검항목, 레벨, 방법 등을 명시함, 해외 보수기술 자료를 참고 국내 실정에 맞는 유지관리 지침(안)이 되도록 수정 보완하고, 막재료의 열화진단에 대해서, 기핵 및 화재실험을 수행하였다.

5차년도 연구과제명 : 무선모니터링 매뉴얼 및 방수, 누수방지 기술 개발

실시간 센서계측정보 가시화 기능 및 센서정보 관리 기능 과 센서계측정보 통계 및 이력조회 기능 및 가시경보 모듈 개발하였고, 대공간 건축물 건전성 관리 PDA Interface 및 시설물별 센서계측값 UI 그리고 SMS기능의 추가를 통한 위험통지 모듈을 개발하였다. 또한 도시성장 및 환경변화에 대응하는 확장성 있는 소프트웨어 아키텍쳐를 구현하였으며, 무인통합관리시스템을 통한 대 공간 건축물의 유지관리 통합기능 제공한다.

6차년도 연구과제명 : 대공간 건축물 통합유지관리 지침서

국내에 존재하지 않았던 대공간 건축물의 유지관리 기술의 확립과, 건전성 모니터링을 비롯한 친환경적 측면 및 유지관리보수기술 등을 집대성하여 대공간 건축물 유지관리 기술지침을 제안하며, 막구조 건축물 유지관리 및 진단 지침, 막체의 보수기술 지침, 강제부재의 부수기술 지침, 공기막구조의 설비 및 유지관리 지침 및 우수차단장치 및 수밀성능 유지관리 지침으로 구성하였다.

3 Pilot Project

실용화에서 무엇보다 각 요소 단위 기술에 대한 실용화 가능성 검증, 신뢰도 확보 및 그에 따른 추가 응용 기술 확보 등이 중요하게 되고, 이를 가장 정확히 실현할 수 있는 방법이 본 Pilot Project의 선정이라고 할 수 있다.

본 연구에서는 실용화 가능성이 높은 건축물의 1/10 축소 스케일인 30M Pilot Project를 제작하고, 그에 대한 설계 및 시공 기술을 확보하고자 한다. 또한 준공 후에는 한국기술교육대학교의 HRD 홍보관으로써 학교의 전시시설로 사용될 예정이며, 적용된 핵심 요소기술(텐셔닝 에어빔 시스템, 유압식 재긴장 소켓, Erection 공법 및 개폐식 구동장치 등)의 실용성 검토를 통하여 건설기술 데이터 베이스 구축이 가능하여 실무자에게도 소요기술 제공이 가능하다.

Pilot Project의 대상구조물 요소기술의 하나인 텐셔닝 에어빔 시스템(TABS)에 대한 개발 연구도 본 세세부에서 수행하였다. TABS는 대공간 건축물 지붕구조의 경량화를 위해 연성구조물인 공기막, 케이블과 프레임으로 구성된 경량 하이브리드 공기막 시스템으로 지붕구조 경량화뿐만 아니라 일반적인 골조 시스템보다 구조성능이 우수하고 경제성, 시공성 우수한 시스템인 텐셔닝 에어빔 시스템은 대공간 건축물의 지붕구조 이외에도 교량, 주택, 교통수단, 스포츠용품, 생활용품, 광고판 등에 적극 활용하여 미적인 아름다움 또한 구현할 수 있다. 이는 스위스의 엠파(EMPA)에서 "Tensairity" 라는 이름으로 처음 제안되어져 선행연구자들에 의해 설계식 및 구조성능에 관한 연구결과가 발표되었으나, 설계에 있어 중요한 변수인 압력 및 케이블 장력과 시스템 구조성능의 상관관계가 명확

치 않으므로 실제 건축물 적용에 있어서는 정성적, 정량적 자료가 불충분하다고 할 수 있다. 따라서 TABS에 대한 설계식과 정밀 해석모델을 개발, 검증하여 현장 적용을 가능케 하는 설계 및 시공 기술을 습득하여 국산화시켰다. 또한 상기와 같은 연구를 바탕으로 기존의 시스템에서는 몇가지 단점이 도출되었으며, 이를 해결하기 위한 새로운 텐셔닝 에어빔 시스템(TABS II, TABS III)을 개발하였다. 연구결과, 개발된 TABS는 기존의 장스팬을 구현하던 H형강 및 트러스보다 구조성능이 우수하고, 20M 스팬 이상에서는 경제적임을 확인하였다. 또한 실물대 실험을 통하여 실제 건축물에 적용시 시공성이 우수함을 검증하였으며, 이에 따라 Pilot Project 대상구조물에 적용하였다.

본 세세부에서는 연구단의 최종목표를 달성하고자 300M 스팬 Pilot Project의 구조설계 보고서(SD Report)를 작성하였다. 이 보고서를 통하여 대공간 구조물의 구조설계 프로세스가 정립된다면, 향후 건설된 대공간 구조물들의 지침이 될 수 있으며 나아가 본 연구단의 최종목표인 국내 자체 기반기술 개발로 인한 국산화 및 고도화가 가능하리라 사료된다.

나.

다.

(1) 3.4.1 Code

(2) 가. 대공간 구조물 CODE에 관한 국외자료 수집 및 분석

국내의 대공간 구조물들은 1988년 서울올림픽과 2002년 한일월드컵을 계기로 다수 건설되었다. 그 경기장들을 건설할 당시는 대공간구조물에 대한 관심도가 낮았을 뿐 아니라 국내의 기술 및 제반 여건이 열악하였기 때문에 외국의 엔지니어링 기술이 별다른 필터링 없이 도입되었다. 특히, 대공간구조물에 주로 이용되는 막 및 케이블에 대한 재료 및 설계에 대한 지침이 적절히 마련되지 않은 상태에서 그 분야의 절대 우위에 있는 외국 엔지니어들의 요구에 대해 국내 기준에 따른 세세한 점검이 불가능하였다. 서귀포 경기장 및 부산돔 파손의 예를 보더라도 뚜렷한 국내 설계지침이 없었기 때문에 사고에 대한 책임 소재를 설계를 담당했던 외국설계사에 따져보지도 못한 채 마무리 되는 상황이 벌어지고 있다. 일본의 경우, 이미 오래전부터 건교부장관이 주관하는 대공간구조물에 대한 지침이 일본 막구조협회 및 건축학회 차원에서 다양하게 마련되어 실무에 적용되고 있다. 국내에서도 기존의 대공간 건축물 뿐 아니라 앞으로 신축될 대공간구조물에 대한 정확한 설계를 위한 설계지침이 필요하다. 예를 들어 일본에서 대공간구조물에 대한 설계 및 관련 사항을 다루고 있는 대표적 지침서는 1) 막구조건축물의 유지보수 지침·동해설, 2) 막구조의 건축물·막재료등의 기술 기준 및 동해설, 3) 막재료 탄성정수시험방법, 4) 막재료의 품질 및 성능 시험 방법, 5) 케이블 구조 설계 지침 및 동해설이 있다. 중국의 경우 상하이시를 중심으로 지침서 작성이 활발하게 진행중이다.

이와 같이 선진국들이 공신력 있는 관련기관에서 인증하는 지침서 및 제반 규정을 가지고 엔지니어링을 실시하고 있는 것에 비해 국내에서는 아직 전무한 상태이므로, 우선 한국에 비해 매우 다양한 노하우와 경험을 가진 일본, 미국, 유럽의 code를 수집하여 정리하고 분석하고 국내 실정에 맞는 대공간건축물 관련 설계규준을 만들고자 하였다.

국내의 대공간구조물에 대한 합리적이고 기술적 문제점이 없는 설계 지침을 마련하기 위해 우선 선진국들의 code를 정리 분석하였다.

국내에서는 막구조건축물의 유지보수 지침·동해설, 막구조의 건축물·막재료 등의 기술기준 및 동해설, 막재료 탄성정수 시험방법, 막재료의 품질 및 성능 시험 방법, 케이블 구조 설계 지침 및 동해설 등의 지침서 및 제반규정 이 미비하므로 다양한 노하우와 경험을 가진 일본, 미국, 유럽, 중국의 Code수집 및 정리 분석을 하였다.

- 막구조에 대한 관련 지침서 분석(외국)
  · 기술적 지침 기준(구조물의 사용용도 및 규모에 따른 분류) 분석
  · 하중에 대한 기준지침/막재에 대한 기준지침
  · 막재료 탄성 정수 시험에 관한 지침 분석
  · 막재료 성능 실험 및 품질관리에 대한 기준 지침 분석
- 케이블구조 대한 관련 지침서 분석(외국)
  · 기계적 성질에 대한 기준 지침 분석
  · 구조해석 및 설계 관련 사항 분석
  · 케이블 디테일 관련 지침 분석
  · 기타 케이블구조 관련 제반 사항 및 적용사례 분석
- 막 및 케이블 구조에 적용할 국내 하중 기준 분석
- 현재 국내에서 사용하고 있는 막/케이블 구조 설계 지침 현황 파악

이와 같이, 국내외 대공간 구조관련 코드에 대한 자료를 수집하고 분석하였다. 이들 자료를 얻고 분석하기 위해 국제공동연구를 진행하였다. 국제 공동연구 진행에 의해 세계 각국의 코드에 대한 정보를 얻었으며, 특히 일본의 국제공동연구에 의해 지침서 작성에 대한 기초를 마련하였다.

(3)

(4) 나. 케이블구조 설계기준 및 해설 지침서 작성

케이블구조는 스포츠시설, 집회장, 전시장, 공장, 다목적 홀 등 대공간 구조를 형성하는 중요한 구조요소로써 광범위한 건축물에 이용되고 있으며, 대공간구조물 뿐 아니라, 수개 층으로 이루어진 바닥판 구조의 인장부재로도 사용되고 있다. 이러한 케이블구조는 미국의 Raleigh Arena를 시작으로 케이블네트구조, 케이블과 보로 이루어지는 케이블 거더 및 복합구조, 텐세그리티구조, 막과 케이블이 복합구조등으로 다양하게 발전되어 왔다. 이 케이블은 고강도이면서 유연한 케이블의 장점을 이용하고 또한 장력을 도입하여 케이블이 강성을 이용하여 사용되는 것이다.
현재까지는 대공간구조물에 주로 이용되는 케이블에 대한 재료 및 설계 지침이 적절히 마련되지 않은 상태에서 그 분야의 절대 우위에 있었던 외국 엔지니어들의 설계에 대해 국내 기준에 따른 세세한 점검이 불가능하였으며, 사고발생시 국내 설계지침에 의한 정확한 책임 소재를 추궁할 수 없는 상황이 벌어지고 있다.
이러한 필요성에 따라, 앞으로 국내에서도 케이블이 사용된 대공간구조물에 대한 수요는 증가할 것이 예상되므로, 현재 국내 건축기준 및 기타 관련 법규에서 상세히 다루지 못하고 있는 케이블 구조에 대해서 안전성과 기능의 확보라는 관점에서 설계지침서를 마련하였다.
우선, 케이블 구조에 대한 합리적이고 기술적 문제점이 없는 설계 지침을 마련하기 위해서 국내외의 문헌, 기준, 규격, 지침 등을 참고하여 분석하였으며, 분석된 내용을 국내 실정에 맞게 사용할 수 있도록 지침서를 작성하였다. 각 분야의 전문가들로 구성된 위원회는 워크샵 및 자문회의를 거쳐 케이블 구조 기준 및 해설집을 발간하였다. 최종적으로 분석 정리된 연구 결과물은 관련 학회 및 관련 기관의 공인을 얻어 앞으로 건축될 실제 구조물 설계에 직접적으로 적용될 수 있도록 하였다.

개략적인 연구내용은 다음과 같다.
(1) 케이블구조 관련 국내 자료 수집/분석
(2) 케이블구조 대한 국외 지침서 분석
- 케이블의 품질 및 종류에 대한 지침
- 기계적 성질에 대한 기준 지침(파단하중, 초기신장, 탄성계수, 크립, 선팽창계수등)
- 외부하중에 대한 기준지침
- 구조설계 관련 사항(허용인장응력, 초기장력, 변형, 해석시 기본가정등)
- 구조해석 관련 사항(해석상가정, 구조모델, 해석의 내용 방법, 초기형상해석 등)
- 케이블 디테일 관련 지침(단말부, 교차부, 굴곡부, 정착부)
- 케이블 재료 규격에 관련 지침
- 방재관련 규정
- 기타 케이블구조 관련 제반 사항 및 적용실례 분석
(3) 현재 사용되고 있는 국내 현장실무 안 정리/분석
(4) 합리적이고 기술적 문제점이 없는 최종 지침서 제출
(5) 케이블 구조 설계지침서 법제화 준비 위원회 구성

1. <케이블구조 설계기준/해설 목차>
2. 제1장 총칙
3. 제2장 구조계획
4. 제3장 케이블 재료
5. 제4장 하중
6. 제5장 구조설계
7. 제6장 구조해석
8. 제7장 접합부 상세설계
9. 제8장 지지구조



(1) 다. 스페이스 프레임의 설계지침 작성(안)

대공간 구조시스템의 하나인 스페이스 프레임 구조(Space Frame Structure)는 A.G Bell에 의해 건축 구조물에 적용되기 시작하여, 본격적으로 보급되기 시작한 것은 2차 세계대전 이후이다. 이 구조물은 ① 철근 콘크리트 구조물의 거푸집 사용 불가피 및 시공의 장기화에 따른 비합리적인 생산성, ② 판 및 쉘과 같은 연속체 구조물에 대한 해석이론의 확립, ③ 다양한 형태의 건축물 설계에 대한 기술적인 도전심, ④ 목조, 철골조에 의한 역학적 합리성 확보, ⑤ 공간 구조물에 대한 사회의 요구 등에 따라 급속하게 보급되기 시작했다.
역학적 관점에서 보면 스페이스 프레임 구조는 종횡의 부재가 3차원적으로 서로 연결되어 입체적으로 외부 힘에 저항하는 구조로서 높은 강성을 가진다. 따라서 일반 철골 구조, RC구조 또는 2차원 트러스 구조보다는 외력의 전달에 있어서 역학적 합리성을 가지므로 직경 약 200m-300m 이상 되는 대공간 구조물의 구조시스템으로 적당하다.
스페이스 프레임 구조는 종횡의 부재가 3차원적으로 서로 연결되어 입체적으로 외부 힘에 저항하는 구조로서 높은 강성을 가진다. 따라서 일반 철골 구조, RC구조 또는 2차원 트러스 구조보다는 외력의 전달에 있어서 역학적 합리성을 가지므로 직경 약 200m-300m 이상 되는 대공간 구조물의 구조시스템으로 적당하다. 특히 이 구조시스템이 개발되어 전 세계적으로 대공간 구조시스템의 하나로 널리 보급되고 있지만 아직 실무에서 참고할 만한 지침서다운 설계지침서가 없는 것이 현실이다. 따라서 이 분야에 후발로 뛰어 들었지만 선진기술력에 근접하거나 오히려 앞서가기 위해서는 기존의 선진기술을 잘 활용하고 필요한 요소기술은 자체 개발하여 국내 실정에 맞는 지침서를 개발하여 실무자들의 이 활용할 수 있도록 할 필요가 있다. 따라서 국외 스페이스 프레임 코드에 대한 자료를 수집하고 분석하였고 이들 자료를 얻고 분석하기 위해 국제공동연구를 진행하였다. 본 연구에서는 세계의 스페이스 프레임 구조에 관한 지침서를 확보하여 우리나라의 실정에 맞는 스페이스 프레임 구조의 초안 작성을 하였다.

개략적인 연구내용을 정리하면 다음과 같다.
(1) 관련 문헌 조사
(2) 설계디자인/구조계획에 관한 지침 개발
(3) 하중 및 기타 외력에 관한 지침 개발
(4) 재료 및 구조해석방법에 관한 지침 개발
(5) 자재 생산 및 시공에 관한 지침 개발
 - 부재 조립 및 도장 등에 관한 지침
 - 가설재 설치에 관한 지침
 - Erection 에 관한 지침
 - 시공관리에 관한 지침
(6) 유지관리에 관한 지침 개발
(7) 지침서 작성

또한, 3차년도에서는 현재 국내에는 막구조물와 같은 특수구조물에 대한 지침이 전혀 이루어지고 있지 않기 때문에, 우리보다 수십년 앞서있는 있는 일본과의 국제공동연구를 통해 연구의 성과를 높이기 위한 일환으로 진행하였다. 차년도 연구에서 진행할 막구조 설계지침서 작성 및 발간 준비를 위해 막구조에 관련된 국외 설계지침서를 분석하고 막구조의 설계지침서의 초안을 작성하였다.

(1) 막구조 관련 국내외 자료 수집/분석
(2) 막구조 대한 국외 지침서 분석
(3) 현재 사용되고 있는 국내 현장실무안 정리/분석

(2)

(3)

(4)

(5) 라. 막구조 설계기준 및 해설 작성

막 구조는 스포츠시설, 집회장, 전시장, 공장, 다목적 홀 등 대공간 구조를 형성하는 중요한 구조 요소로써 광범위한 건축물에 이용되고 있다. 이러한 막구조는 구조적 경량성, 시공성과 함께 전통적인 RC나 강구조로는 대체할 수 없는 이 점을 많이 지니고 있을 뿐 아니라, 밝고 넓은 실내 공간은 떠한 용도에도 최상의 실내 환경을 유지하며 이용될 수 있는 건축물이다.
국내에서도 대규모 스타디움을 위시해 다양한 분야에서 막구조물의 수요가 급격히 증가하고 있는 실정이다. 그러나 세계적으로 막구조물 관련 기술은 비약적인 발전을 거듭하고 있으나, 국내에서는 이에 대한 설계기준조차 없어서 많은 설계자 및 기술자들이 어려움을 겪어왔다. 전 세계적으로 대공간 구조시스템의 하나로 널리 보급되고 있지만 우리나라의 경우 아직 실무에서 참고할 만한 설계지침서가 없는 것이 현실이었다. 국내에서도 대규모 스타디움을 위해서 다양한 분야에서 막구조물의 수요가 급격히 증가하고 있는 실정이다. 따라서 이러한 필요에 따라, 막구조 관련 지침서는 일본막구조협회, 책임으로 지침서 작성이 진행되었으며, 중국의 경우 중국 건축 과학연구원 구조 연구소, 상해 건축설계 연구원, 중국 건축과학 연구원, 통지대학 등에서 책임을 갖고 지침서 작성진행 되었다. 이러한 자료들을 취합하여 막구조 설계 기준의 근간이 되는 기준안 보고서 작성을 완료하였다.
막 지침서는 각국의 기준안을 분석하여 우리나라 실정에 맞는 막 지침서 기준 및 해설 발간을 위하여 한국공간구조학회에서 위원회를 조직하여 4번의 워크샵과 원로 교수 자문 회의를 통하여 2010년 6월 발간하였다.
막구조에 대한 합리적이고 기술적 문제점이 없는 설계 지침을 마련하기 위해서 국내외의 문헌, 기준, 규격, 지침 분석 정리하여 국내 실정에 맞는 지침서를 작성하여, 연구 결과물은 관련학회 및 관련 기관의 공인을 얻어 앞으로 건축될 실제 구조물 설계에 직접적으로 적용 될 수 있도록 하였다.

개략적인 연구내용은 다음과 같다.
(1) 합리적이고 기술적 문제가 없는 최종 지침서 작성
(2) 막구조 설계기준 및 해설 지침서 발간
 - 기술적 기준 지침
 - 막 재료 기준 지침
 - 기타 케이블구조 관련 제반 사항 및 적용실례 분석
(3) 현재 사용되고 있는 국내 현장실무 안 정리/분석
(4) 합리적이고 기술적 문제점이 없는 최종 지침서 제출

10.<막구조 설계기준 및 해설 목차>
11.
12.제1장 총칙
13.제2장 하중
14.제3장 구조계획
15.제4장 막재
16.제5장 구조해석 및 설계
17.제6장 연결 정착부
18.제7장 제작 및 시공
19.제8장 검사 및 유지관리



(1) 마. ETFE 막재 패널설계 및 시공지침서 작성

불소수지막재의 일종인 ETFE 막재는 투명성, 내후성, 환경적합성이 우수하여 최근 폭 넓게 사용되어지고 있다. 더욱이, 유럽에서는 건축시설에도 많이 이용되어지고 있으며, 최근에는 2006년 독일 월드컵대회, 2008년 북경올림픽 스타디움, 수영장의 지붕과 외벽에도 사용되는 등 주목받고 있는 재료이다. 그러나 현재 국내에서는 건축물로서의 실적은 미미하며 일반구조물 또는 리조트 시설, 가설구조물 등의 보급에는 이르지 않은 것이 현실이다.
ETFE 막재는 섬유직포를 가지고 있지 않기 때문에 종래의 막재료와 다른 재료특성을 가지고 있고, 건축 재료로서의 취급에 대해서도 명확하지 않기 때문에 ETFE 막재사용에 있어서 정확한 이해와 기술의 습득이 필요하다.
따라서, ETFE 막재 패널 시공에 대한 설계지침을 통해 관련 재료와 설계 기술 기준 마련으로 대공간 건축물의 품질 및 안전성을 향상시킬 수 있다. 연구 결과물은 관련학회 및 관련 기관의 공인을 얻어 앞으로 건축될 실제 구조물 설계에 직접적으로 적용될 수 있는 국내용 지침서 발간이 가능하였다. 지침서를 통한 시설물 유지관리 회사 및 유지관리 관련 관공서, 리노베이션·리모델링 전문회사에 의해 보수설계에 반영될 것으로 전망된다. 실용화 연구에서 무엇보다 중요한 것은 각 단위기술에 대한 실용화 가능성 검증, 신뢰도 확보 및 그에 따른 추가 응용기술 확보 할 수 있다. 실제 적용시에 일어날 수 있는 안전상의 문제 등도 체크할 수 있어, 실제 적용시 일어날 수 있는 사고방지 역할을 할 수 있다. 실제 적용할 수 있는 대상 건축물을 선정하고, 대상 건축물에 대한 설계 및 시공, 하드웨어 개발 단계 등을 모두 실현해 봄으로서 실용화 단계에서 발생 할 수 있는 문제점 및 개선점을 사전에 파악하여 개선하고 발전 가능하다.
따라서, ETFE 막구조에 대한 합리적이고 기술적 문제점이 없는 설계 지침을 마련하기 위해서 국내외의 문헌, 기준, 규격, 지침 분석 정리하여 국내 실정에 맞는 지침서를 작성하였으며, 연구 결과물은 관련학회 및 관련 기관의 공인을 얻어 앞으로 건축될 실제 구조물 설계에 직접적으로 적용 될 수 있도록 책으로 발간하였다.
ETFE 막재 패널 시공에 대한 설계지침 자료를 수집하고 막재 패널 시공에 대한 설계지침 작성하고 발간하여 건축될 실제 구조물 설계에 직접적으로 적용 될 수 있도록 하였다.

개략적인 연구내용은 다음과 같다.
(1) ETFE 막구조 관련 국외 자료 수집/분석
(2) ETFE 막구조 관련 국외 지침서 분석
 - 개폐식 구조물의 설계 관련 사항
 - 개폐식 구조물의 구조해석 관련 사항
(3) 합리적이고 기술적 문제점이 없는 최종 지침서 제출

20.<ETFE 막재 패널설계 및 시공 지침서 목차>
21.
22.제1장 총칙
23.제2장 막재료의 품질 및 성능
24.제3장 설계
25.제4장 디테일
26.제5장 가압장치
27.제6장 제작 및 시공



(2)

가. 바. 개폐식 구조물 설계지침 작성

현재 개폐지붕을 가지는 건축물은 스포츠시설과 야외극장을 중심으로 세계적으로 많이 건설되고 있다. 규모는 지붕전체가 개폐하는 스타디움 규모로부터 지붕면의 일부가 개폐하는 소규모의 풀 등 여러 가지가 있다. 개폐지붕은 지금까지의 건축과 비교하면 여러 가지 이점을 가지고 있기 때문에 앞으로도 개폐지붕을 가지는 건축은 증가할 것이다.
개폐식구조 적용에 대한 설계지침에 대한 지침서가 아직 정립 되어 있지 않기 때문에 현재 많은 문제를 야기 시키고 있다. 이에 따라 설계 지침을 토대로 유지관리 기술에 대한 표준화가 가능하며, 지침서에 의한 유지관리가 가능하다.
개폐식 구조물의 합리적이고 기술적 문제점이 없는 설계 지침을 마련하기 위해서 국외의 문헌, 기준, 규격, 지침 등을 참고하여 분석하여 개폐식 구조물 설계지침을 작성하였다. 분석 정리된 내용을 국내 실정에 맞도록 하기 위해 현장 실무자들을 포함시켜 실무에 직접 사용될 수 있는 안을 마련하였다. 최종적으로 분석 정리된 연구 결과물은 관련학회 및 관련 기관의 공인을 얻어 앞으로 건축될 실제 구조물 설계에 직접적으로 적용될 수 있도록 한다.
따라서, 개폐식구조에 대한 합리적이고 기술적 문제점이 없는 설계 지침을 마련하기 위해서 국내외의 문헌, 기준, 규격, 지침 분석 정리하여 국내 실정에 맞는 지침서를 작성하였으며, 연구 결과물은 관련학회 및 관련 기관의 공인을 얻어 앞으로 건축될 실제 구조물 설계에 직접적으로 적용될 수 있도록 책으로 발간하여 건축될 실제 구조물 설계에 직접적으로 적용 될 수 있도록 하였다.
지침서는 지붕구조 특유의 구조상의 문제에 대해서 일본건축학회 : 개폐구조소위원회 (주사 이시이 카즈오) 및 국제 쉘 공간구조학회: IASS (International Association of Spatial Structures) WG on Retractable Roof Structures (개폐지붕구조부회 위원장 이시이 카즈오)에 의해 표시된 국내외의 개폐지붕구조설계에 준거하고 개폐지붕구조의 설계 및 안전확보의 측면에서 본 안내서는 정리되어 있다. 여기서는 개폐지붕을 가지는 막구조건축물을 실제로 설계한 안내서로서, 규모는 소규모의 범위에 머무르지 않고 일반적으로 고려하지 않으면 안 되는 점, 구조계산의 내용, 개폐기구부의 설계에 필요한 정보와 설계법을 나타내고 있다.

개략적인 연구내용은 다음과 같다.
(1) 개폐식 구조물 관련 국외 자료 수집/분석
(2) 개폐식 구조물 관련 국외 지침서 분석
 - 개폐식 구조물의 설계 관련 사항
 - 개폐식 구조물의 구조해석 관련 사항
(3) 합리적이고 기술적 문제점이 없는 최종 지침서 제출

28.<개폐식 구조물 설계지침 목차>
29.
30.제1장 총칙
31.제2장 구조설계
32.제3장 하중 및 외력
33.제4장 구조재료 및 허용력도
34.제5장 각부
35.제6장 구동 및 주행
36.제7장 개폐관리

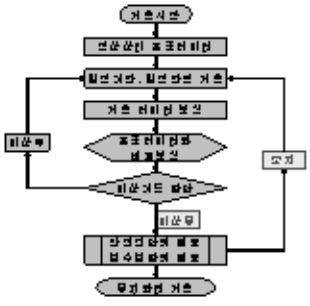
1) 

나.

(1) 3.4.2 유지관리

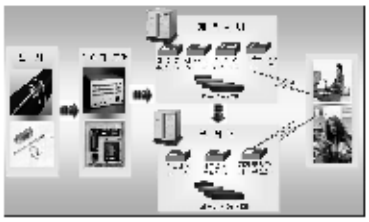
(2) 가. 계측제어 시스템 기반기술 개발

건축물의 고층화와 대형화에 따른 건축 시장의 추세에 따라 대형 공간과 시설이 필요하게 되었다. 장 스팬의 대형 건축물의 요구에 인장 구조물과 같은 대형 건축물의 수요가 늘어나게 되고 대형 건축물의 유지 보수 또한 하나의 큰 시장으로 부상하게 되었다. 장 스팬의 인장 구조물의 유지 보수를 위하여 구조물의 상시적인 모니터링은 필수 불가결하다. 많은 자본과 인력이 요구되는 대형 구조물은 파손시 막대한 자본이 들어감은 물론 큰 인명피해를 초래할 수 있다. 그러므로 상시 모니터링을 통하여 구조물 파손 등을 사전 예방하여야 한다. 즉 안전성과 사용성을 확보하고, 건물 손상을 사전에 예측 가능할 뿐만 아니라 정기 안전점검을 대체 가능한 방법으로서도 제시될 수 있다. 계측에 의한 관리 기법의 도입은 구조물을 시공할 때 설계값과 실제값의 비교, 분석을 통하여 정밀시공 및 안전시공을 할 수 있는 자료로 활용할 수 있을 뿐만 아니라, 시공 후에 구조물의 성능을 지속적으로 파악할 수 있는 장점이 있으므로 구조적 안전예방 및 유지관리 차원에서 대단히 유효할 것이다. 따라서 대공간 구조물의 계측 및 관리시스템의 활성/정착화를 위한 기본자료인 계측기기, 계측방법, 분석 및 대처방안을 정립하기 위해서는 다음의 연구를 수행해야 한다.



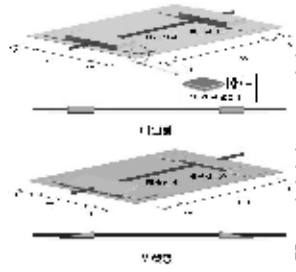
이상감지프로세스

- 계측종류에 따른 항목별 프로세스 구축
- 계측시스템에 따른 계측 프로세스 구축
- 구조물의 이상거동 감지 프로세스 구축
- 구조물의 안정성 분석법 개발
- 실무 적용 및 시험 계측



광섬유 계측시스템의 계측 프로세스

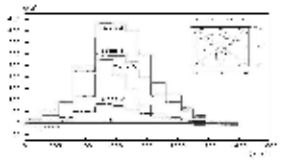
장 스팬의 인장 구조물 즉, 막 구조물을 상시 모니터링 하기 위하여 먼저 막 구조물의 요소별 계측을 하여 각 요소의 변형률을 계측하는 것이 중요하다. 변형률을 계측하기 위하여 FBG센서를 이용한 상시 계측을 제안한다. 많은 계측점과 상시적인 계측을 위하여 많은 계측점을 수용할 수 있을 뿐만 아니라 상시적인 계측이 가능한 FBG센서는 대형 막 구조물의 계측에 적합하다.



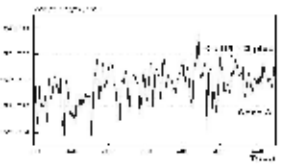
열융착 FBG센서

FBG센서가 막 구조물의 계측에 적합한지를 알아보기 위하여 막 구조물의 실험체를 가지고 외력 작용 시에 변형에 대하여 FBG센서의 상시적인 계측 실험을 하였고 매우 적합하다는 것을 도출하였다.

FBG센서를 이용한 막 구조물의 계측과 더불어 Building Inspection Robot을 이용한 구조물의 위험 요소에 대한 접근으로 보다 시스템적인 상시 계측을 연구하였다. 현재 이 프로젝트는 진행과정에 있으며, 약 80%이상의 진척율에 있다. 현재 로봇에 관한 연구는 의료용, 군사용, 재난구조용등 각 분야에서 활발히 개발 전개 되고 있다. 아직도 국내에서는 Mobile Robot의 연구에서는 성장기라고 할 수 있다. 점차 많은 사람들이 로봇에 많은 관심을 보이고 있으며, 공장에서 사용하던 단순한 형식의 로봇에서 외부환경에 따라 변화하고 생각하는 지능형 로봇으로 점차 관심이 모아지고 있다. 여러 시행과정을 통해 건축분야에서도 Mobile Robot의 많은 활용 방안을 모색하고, 그 가치를 증대 할 수 있을 것이라 기대해본다. FBG센서를 이용하여 막 구조물의 시공 시에 각 부재간의 균등한 응력 분포가 되었는지 계측이 가능하다. 막 구조물의 시공 시에 각 부재간의 균등한 응력 분포는 막 구조물의 시공에 매우 중요한 시공법이다. 이런 시공법을 정확히 하기 위하여 막 구조물에 FBG센서를 부착하여 시공하여 응력 분포를 계측하여 시공할 수 있다. 시공 후 유지 보수면에서도 상시 정확한 계측이 가능하기 때문에 막 구조물의 상시 모니터링에 매우 적합하며 Building Inspection Robot을 이용하여 무인 계측 시스템을 구동하여 보다 편리하고 안전한 상시 계측시스템을 구축 가능할 것이다.



시간-변형률 관계

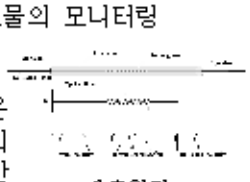


시간-파장 관계

(3) 나. 대변형을 고려한 제어계측 시스템 개발

구조물에 대한 유지관리의 목적은 1) 재해의 예방과 안전의 확보, 2) 쾌적하고 위생적인 환경의 유지, 3) 건물의 효용의 유지, 4) 총자원, 총에너지 및 보전비의 절감으로 생각해 볼 수 있으며, 종래의 보전은 낙수나 마감재의 박리가 있다든가 건물이 실용상의 지장이 생겨 실시하는 「사후보전」이 많았다. 그러나, 최근에는 적극적으로 점검, 검사를 수행해서 기능·성능의 저하를 미리 관찰하여 대책을 세우고 사고를 미연에 방지하는 「예지보전」, 계획적으로 점검·검사·교체 등을 실시하여 사고를 일으키지 않는 「예방보전」으로 진행되어 오고 있다. 이와 함께 어느 부위를 어떻게 점검·시험하고 판단할까 하는 것이 필연적으로 중요한 문제이다. 보전의 경우 기존의 기능·성능의 수준을 100% 또는 60%정도까지 만족하도록 할 것인지, 또는 시공시에 요구된 수준을 넘는 보전을 필요로 하는 것도 있다. 따라서 본 연구에서는 다음의 기술에 대해 연구하였다.

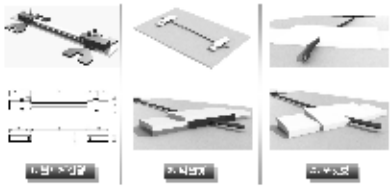
- FBG센서를 이용한 계측 시스템 및 패키지 기법 개발
- 손상도 검증용 무인 로봇개발과 RFID센서를 사용한 막구조물의 모니터링
- 계측시스템의 정밀도 검증 및 유지관리 지침서 작성



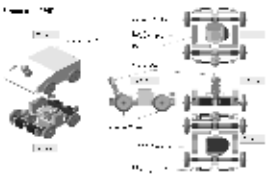
계측원리



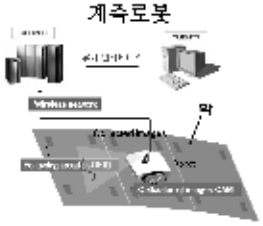
테스트 모델



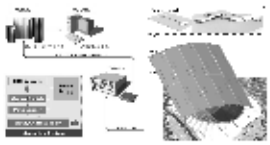
공간구조 건축물에 요구되는 기능 및 성능의 종류와 수준은 그 해당 건물의 용도에 따라 다르지만, 기본적으로는 건물 외부로부터 작용하는 모든 외력을 차단하고 건물 내의 거주공간을 확보하는 것이다. 한편, 막구조 건축물을 구성하는 재료·부재는 시간의 경과와 함께 변질이나 열화가 생기고, 결과적으로 당초에 요구된 기능 및 성능을 충족할 수 없게 된다. 현재의 사회·경제적인 배경에서 보면, 변질이나 열화가 생긴 건물은 적어도 당초에 요구된 기능 및 성능의 수준을 정밀한 보전계획으로 확보해 그 건물을 유효하게 사용하고자 한다. 막구조물에서 막체·강재는 건물로서의 요구기능과 성능 확보를 위해 극히 중요한 역할을 하고 있지만, 이들의 내구성은 무한하지 않다. FBG센서를 사용한 막구조물의 막장력 및 케이블 장력 측정용 계측시스템에 대해서 막재 및 케이블 부착용 패키지 기법의 개발로 인한 특허와 향상성은 다음과 같다. 우선, 전자기 파의 영향이 거의 없어 신뢰성 및 계측 정밀도 향상되며, 고유한 파장 값을 가져 초기 값 대비 누적 변형 측정이 가능하며, 하나의 시스템으로 화재감지(온도센서), 침입자감지, 토목구조물의 건전성감시 등의 여러 기능을 동시에 수행 가능하고, 고전압, 강자계 등의 특수한 환경에서도 사용 가능하다. 또한, 방폭 성능으로 석유·화학 등의 중요 플랜트 사용 가능하며, 측정길이를 임의로 설정할 수 있어 분포형 계측이 가능하고, 하나의 시스템으로 측정거리를 20Km 이상으로 연장 가능하다. 상시 모니터링을 위한 무인 로봇은 45°경사주행이 가능한 것으로 테스트를 통해 기술의 향상을 기대할 수 있었으며, 시스템의 네트워크는 계측데이터를 전송 및 분석하여 모니터링한다.



계측로봇

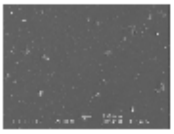


무인로봇 상시모니터링



상시모니터링 개념

막구조 건축물의 유지관리를 위한 막재의 손상 및 열화 진단에 있어서 전자주사현미경을 사용하여 결과를 분석함으로서 유지보전에 관한 기술의 경쟁력을 확보할 수 있다. 현재 유지보전에 관한 지침은 시공업체별 유지관리 지침서, 국외의 자료의 답습 또는 한국구조물진단유지관리공학회의 계측표준 시방서(안)가 있으나 특수구조물에 대해서는 전무하다. 미국 및 유럽에서는 유지관리 업체 별 지침서, 특히 일본의 경우, 특수 구조물에서 일반 건축물로 전환된 기술의 개발이 이루어졌다.



손상없음



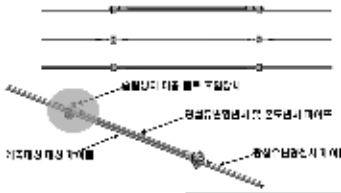
白亜化 확대

유지보전관리에 관한 지침은 목적, 범위, 용어와 보전목표, 범위, 보전의 역할, 보전계획의 작성 순서 등 및 점검대상 부위, 레벨, 방법 등이 필요하고, 정기점검 주기 등유지보전의 평가방법이 수립되어야 한다. 또한 손상도에 대해서는 1차(육안), 2차(육안), 3차(정밀장비)의 순으로 색도계, 광택계, 현미경 등의 정밀장비를 이용하여 손상도 별 1-5까지의 등급을 부여 계측가능범위를 설정한다.

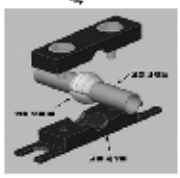
(4) 다. 막구조 건축물 보수기술 지침(안)

구조시스템이 개발되어 세계적으로 대공간 구조시스템이 널리 보급되고 있지만 아직 실무에서 참고할 만한 지침서다운 설계지침서가 없는 것이 현실이다. 이것은 후발로 뛰어들어 선진기술력에 근접하거나 오히려 앞서가기 위해서 즌 기존의 선진지술을 잘 활용하여 필요한 요소기술을 개발하는 것이 중요한 과제중 하나이다. 이와 같은 요소개발은 다음과 같은 기술에 근간한 핵심적인 기술을 습득하고 개발하는 것이 필요한 시점이며, 막재의 유지관리 모니터링의 분석과 진단방법 및 판단은 정밀한 해석과 IT기술이 융합된 모니터링 방법이 본 연구에서 진행되는 사항들이다.

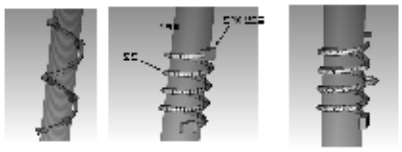
- 케이블 장력측정 및 상시 무인모니터링 기술
- 막재의 열화요인 및 열화진단 방법 개발
- 기핵 및 성장에 의한 막 열화성능의 진단
- 막 소재의 진단결과 분석 및 판정기준 검증



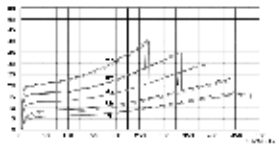




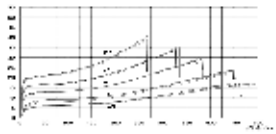
케이블 장력측정에 있어서 비가력식 측정방식은 케이블의 변형률을 이용한 장력계산을 위해서 실측시에 적용되며, 종래 가속도계를 이용한 진동수 간접 측정을 수행하여 측정 오차 발생하는 것을 이용하여 케이블의 변형률을 직접 측정하는 광섬유센서로서 이들의 개발과 도입은 광섬유센서를 이용한 상시 모니터링 기술을 통해 이용될 수 있다. 여기서, 비가력 및 비접촉식 광섬유 센서는 고감도, 고정도 확보와 장력측정용 광섬유센서와 온도센서 동시 설치하여 한 쌍의 광섬유 센서를 관으로 보호하여 케이블에 설치하고, 슬립방지를 위한 볼트를 사용한 이중조임 장치를 채결한다. 여기서, 볼트를 사용한 이중조임 장치를 이용하여 슬립을 방지한다.



케이블 건전성 모니터링의 무인시스템에 대한 구동방식으로는 3가지 타입 구동 메커니즘으로 제안할 수 있으며, 각각은 경사진 케이블의 안정적 모니터링을 위한 트위스트 휠 메커니즘(Twisting & wheel Mech.), 로프 메커니즘(Rope Mech.), 자벌레 타입 메커니즘(Inchworm Mech.) 이다. 트위스트 휠 메커니즘의 경우 상대각이 다른 링크기구를 사용하여 다양한 굵기의 케이블을 조이면서 케이블에 장착되어 있을 수 있으며 휠로 케이블을 따라서 주행하는 방법이고, 로프 메커니즘은 로프를 감아 케이블에 매달고, 전체 로프를 돌려줌으로서 상하 운동을 유발한다.



온도 의존성(JIS MD)

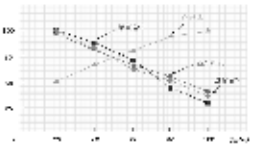


온도 의존성(JIS TD)



화재모의실험

막재의 열화요인 및 열화진단 방법 개발을 위해서는 막재의 표면, 코팅층, 코팅층과 섬유층의 열화요인별 분석 및 열화진단 방법이 개발되어야 하며, 열화진단 결과의 정량화 및 등급별 분류가 반드시 필요하다. 또한 기핵 및 성장에 의한 막 열화성능의 진단에서는 막 재료에 대한 인공적 극한환경 실험을 실시하여 기핵 및 성장에 따른 막재료의 열화성능 진단과 기핵 및 성장 후 막재료의 성능저하 현상 및 구조성능 검증하여야 하며, 막 소재의 진단결과 분석 및 판정기준 검증을 필요로 하므로, 진단결과의 주사현미경 분석 및 에너지분광 검출 분석, 막 소재의 열화정도 판정기준을 개발하여야 한다. 따라서 열화요인 및 열화단을 위해서 인장실험과 일축강도와 연신률의 차이에 대한 실험 및 ETFE 막재의 기계적 성능의 온도 의존성과 내후성 실험등이 실시되며, ETFE막재의 화재모의 실험은 용융점 275도씨 부근에서 말랑말랑 해지고 ETFE막재의 파단변형율을 넘어서면 구멍 발생하고, 파편은 하방으로 낙하하지 않고 상승후, 직화의 경우 발화하나 곧 소화. 및 일산화탄소, 불소화수소 등의 유해가스가 발생한다.



온도에 따른 결과



UTM(WL2100

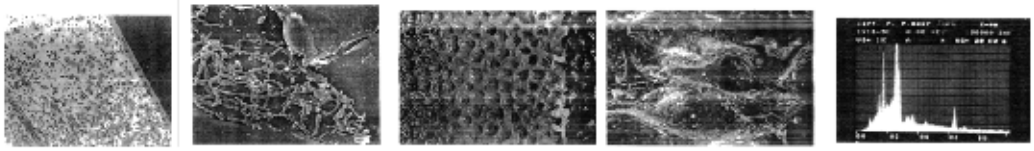
(5) 라. 대공간 구조물의 유지관리 및 보수기술 지침(안)

대공간 건축물의 유지관리 및 보수기술 지침(안)은 국내 최초로 시도되는 유지관리 관련한 기술을 집대성한 것으로서, 친환경성, 장수명화를 위해 필요한 기술이다. 유지관리 지침(안) 중, 막재에 관한 내용은 실재 건축물이 시공되었을 경우 각 시공사가 제공하는 관리 매뉴얼을 표준화할 뿐 아니라, 기존의 연구결과를 통합 실용화할 연구로 파일럿프로젝트에 적용 가능한 기술이다. 특히, 광섬유 센서를 사용한 막구조물의 상시 계측시스템을 포함한 유지관리 기술은 세계 최초의 유지관리 시스템으로서, 막체와 강부재, 공기막구조 및 누수 부분으로 나누어 기술지침의 가이드라인을 작성하는 연구로서 다음과 같은 내용을 포함한다.

- 유지보전 계획에 있어서, 목표, 범위, 분류로 구성고, 점검항목, 레벨, 방법 등을 명시함
- 해외 보수기술 자료를 참고 국내 실정에 맞는 유지관리 지침(안)이 되도록 수정 보완
- 막재료의 열화요인 및 열화진단에 대해서, 기핵실험, 화재실험 등을 수행.
- ETFE 막재를 중심으로, 기핵실험 전후의 내구성 테스트를 실시하여 실험데이터를 제공
- 국내생산이 되지 않는 ETFE 막재의 인장강도 특성 데이터를 확보하여 재료물성 검증
- 화재실험 결과, 난연성에 관한 데이터를 확보 및 구조물 실 설계시 반영 자료 도출

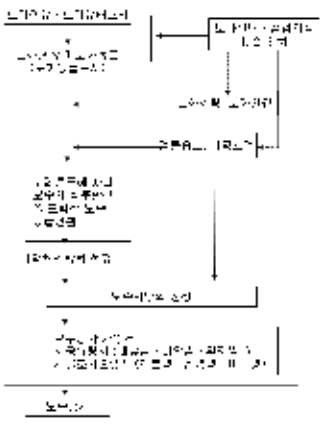
본 연구의 막구조 및 공기막구조물의 유지관리 지침(안)은 막구조 건축물 유지관리 및 진단지침(총칙, 유지보전 계획, 점검주기, 평가방법 및 해설), 막체의 보수기술 지침 (보수기술 지침 및 해설, 보수공법 선정, 보수 후 유지보전 계획), 막체의 보수기술 지침 - 강제부재의 보수기술 지침 및 해설, 강제부재의 보수공법 선정 및 공기막구조의 설비 및 유지관리 지침 (총칙, 공기막 구조의 설비, 유지관리, 참고자료)의 구성으로 나뉘어 연구가 진행될 예정이다.

막구조물의 유지 및 보수에 있어서 실질적인 구조재료의 오염도 평가를 위해서 정밀분석을 수행하며, 막재의 오염은 공기 중의 먼지(토사, 탄소입자)가 표면에 일단 부착된 후, 가소제 등의 액체성분에 미입성분이 스며들어, 그 확산에 의해 내부에 침투하여 수질오염이 되는 경우와, 접합부분의 막재 단부의 섬유가 오염을 내포한 물을 흡수하면 내면부터 오염되는 경우로 나뉘는 것을 분석하였다. 그 외에 벌레의 사해에 의한 오염도 있으며, 지붕 展張 시의 오염 부착상태의 SEM (주사형 전자현미경) 사진과 오염성분의 X선 해석 결과를 이용해 분석하였다.



벌레 곰팡이 白亜化 白亜化 X선 분포도

보전계획에 필요한 요건과 콩트를 항복별로 열거하면 1) 유지보전의 목적과 방침 : 목적과 특히 명기해야 할 목표, 기본방침(사후 · 예지 · 예방보전), 유지보전 항목의 설정(일상 · 정기 · 부정기) 2) 유지보전 행위 주체자의 설정(상정) : 건축기술로부터 본 행위주체자의 구분, 일반 사용자, 기술자, 유지관리 전문 업자 또는(기대할만한 보전 행위의 기술적 레벨) 3) 점검 · 검사개소 · 부위의 설정 : 유지보전 레벨에 대응 4) 점검 · 검사방침의 명시 : 눈으로 확인, 견본수첩, 청 타진, 점검 · 검사기구 · 기계, 일상점검, 정기, 부정기 5) 점검 · 검사주기의 설정 : 통상점검, 피재후의 점검(지진, 태풍 등) 결과의 기록 6) 점검 · 점검결과의 판단방법의 명시 : 열화, 고장현상별 판단 방법, 보수 요부 판단 방법, 전문 진단자에게 의뢰 요부, 보정 · 대여 · 보험조건과 열화, 고장현상의 관련 7) 보수 · 수선 · 교환의 지침 : 재료 · 부재 · 부위별 지침, 전문업자에게 의뢰 등과 같다. 일반 건물의 비구조 부재, 목조에서의 구조부재 등은, 보수 · 보강 외에 교환도 행해지고 있지만, 철재구조 부재로 되어있는 경우에는 일반적으로 교환에 의해 건물 전체의 연명을 측정하는 경우도 적지 않다. 따라서, 본 지침(안)과 다른 방침과의 상호관계를 그림과 같이 제시한다.



보수프로세스의 흐름도

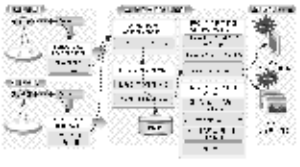
(6) 마. 무선모니터링 매뉴얼 및 방수, 누수방지 기술 개발

대공간 건축물은 지붕구조체를 비롯한 부속시설의 오염도, 손상 진단 및 평가, 구조진단, 보수, 보강을 비롯하여 일상적인 유지관리에 대한 기준과 지침이 미비함으로 인해 큰 재산상의 손실과 인명피해를 초래하기 때문에 (제주도 월드컵 경기장 태풍 피해, 인천문학경기장 태풍 피해, 미네아폴리스 메트로돔 폭설피해 등) 비교적 선진국에 비해 많은 기술적 격차를 보이고 있는 실정이다. 따라서, 대공간 건축물 건전성 상시모니터링을 위하여 웹기반의 무선 통합모니터링시스템을 구축하는 기술의 개발을 목표로 연구를 수행하였으며, 무인통합시스템을 구축하여 Whole in One 시스템으로서 대공간 건축물의 유지관리를 구현하자는 것이다. 이와 같은 모니터링 시스템은 한국시설물안전관리공단의 WISE 시스템과 일견 유사하나, 교량을 대상으로 하고 있어 적용에 무리가 있다. 대형 도시인프라 구조물의 모니터링 및 유지관리를 위한 시스템 개발은 국내에서도 관련연구가 활발한 편인데, 도시인프라 중 교량, 터널, 항만, 공항, 발전소, 댐 등이 이에 속한다. 이러한 경향은 본 연구의 기술 개발을 통해 보다 활용성 높고 확대된 개념의 대공간 구조물의 무인통합시스템을 구현하고 유지관리방안 및 방수누수에 있어서 직접적인 영향력을 미칠수 있는 기회를 제공하게 된다.

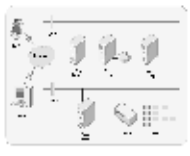
본 세부 과제에서는 대공간 건축물의 주요 부분인 막재와 강재부분에 대한 통합된 유지관리 지침 및 보수보강 기술지침서를 최종적 연구목표로 개발하여 왔으며, 현재 건축물의 장수명화 및 재사용은 시대적 화두로서 이것을 실현하기 위해서는 인간의 건강진단과 같은 상시모니터링이 필수적으로 요구되고 있다. 따라서 다음과 같은 기술의 개발을 위해서 연구를 진행하였다.

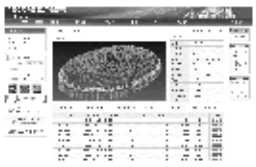
- 실시간 센서계측정보 가시화 기능 및 센서정보 관리 기능 개발
- 센서계측정보 통계 및 이력조회 기능 및 가시경보 모듈 개발
- 대공간 건축물 건전성 관리 PDA Interface 개발
- 관리대상 대공간 건축물의 시설물별 센서계측값 UI 개발 및 시설물 경보 UI 개발
- SMS기능의 추가를 통한 위험통지 모듈 개발
- 도시성장 및 환경변화에 대응하는 확장성 있는 소프트웨어 아키텍쳐를 구현
- 무인통합관리시스템을 통한 대 공간 건축물의 유지관리 통합기능 제공

대공간 건축물 건전성 상시 모니터링 포털 시스템은 광섬유센서를 사용하여 대공간 건축물의 현황 및 이벤트 발생시의 위험도를 모니터링 하며 운영 및 통계정IT으며 보를 제공을 목적으로 하였다. 여기서는 개발된 포털 시스템의 설계단계에서 설계과정 및 설계결과를 서술한다. 포털시스템의 구조 및 외부 인터페이스, 데이터 모델 등 기본 설계 내용을 포함한다. 개발된 포털 시스템은 전체 웹애플lication(이하 웹애플로 칭함), Sensor Data Collect Manager(이하 SDCM라 칭함), SDC Agent(이하 SDCA로 칭함)로 구성되어 있다. 웹애플과 SMS 매신져는 데이터베이스에 접속하여 데이터를 관리한다. SDCA는 광섬유센서로부터 신호가 입력되는 Dector(이하, 디텍터라 칭함)와 연결되어 센서로부터 계측된 값을 받아와 센서정보를 반영한 물리값을 SDCM으로 전송하고, SDCM은 이 데이터를 관리하여 DB에 저장한다. 웹애플은 DB의 데이터를 이용하여 사용자에게 서비스를 제공하게 된다. 아래의 그림은 전체시스템 흐름도를 나타낸다.


모니터링 개념도


시스템 구성도


하드웨어 구성도


포털 시스템

앞으로는 저비용 고효율 구조의 지능형 무인 실시간의 유비쿼터스 모니터링 체계로의 전환이 필요한 실정이다. 특히 우리나라는 세계 최고 수준의 초고속 정보통신 인프라(GIS, 초고속 통신인프라)를 구축하고 있어 사회기반시설 및 건축물의 유비쿼터스 관련기술 활용이 매우 유리한 여건에 있다. 유비쿼터스 컴퓨팅 환경은 모든 시설물에 대한 안전도와 노후 상태 등을 실시간으로 수집·전달 가능하게 함으로써, 시설물의 안전관리, 재해·재난 대응 분야에 혁신적인 기술발전을 선도할 것으로 예상된다.

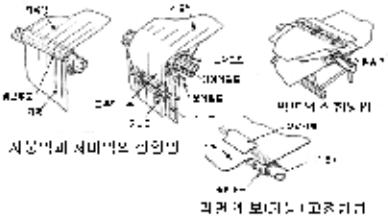
(7) 바. 대공간 건축물 통합유지관리 지침서

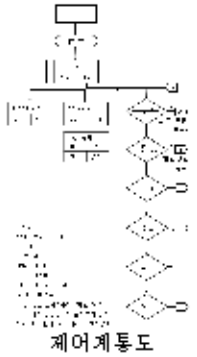
대공간 건축물의 유지관리를 위한 계측시스템의 개발은 관련한 전후방 산업인 센서기술, 로봇기술, 정보통신기술 등과 밀접한 관련이 있으며, 사업화 성공 후 기술적 수요가 폭증할 경우 그 기술적 파급효과는 지대하며, 특히 월드컵스타디움, 막구조물 등과 같이 대변형 발생이 빈번한 구조물의 유지관리 기술 개발이라는 관점에서 기술의 파급효과는 매우 크다. 또한 순수한 국내기술로 개발된 계측시스템 등은 해외선진국의 기술경쟁력을 높일 수 있는 방안이다. 따라서 본연구는 초대형 막구조물의 유지 및 보수 관련 기술의 집대성과 현장적용을 목표로 하였으며, 센서패기지 기술을 함께 개발하였다. 여기서, 국내에 존재하지 않았던 대공간 건축물의 유지관리 기술의 확립과, 건전성 모니터링을 비롯한 친환경적 측면 및 유지관리보수기술 등을 집대성하여 대공간 건축물 유지관리 기술 지침을 제안하며, 다음에 나열한 항목으로 통합유지관리 지침을 제시한다.

제1장. 막구조 건축물 유지관리 및 진단 지침
제2장 막체의 보수기술 지침
제3장 강제부재의 부수기술 지침
제4장 공기막구조의 설비 및 유지관리 지침
제5장 우수차단장치 및 수밀성능 유지관리 지침


막체의 열화도 판정 개요

연성구조물인 막구조 건축물 유지관리 및 진단 지침은 모두 4편으로 구성되며, 총칙, 유지보전 계획, 유지보전 및 점검주기 그리고 유지보전의 평가방법에 대해서 정리되어 있고, 막체의 열화진단 지침 및 해설과 강제부재에 대한 열화진단 지침에 대한 내용도 모두 포함되어 있다. 여기서 말하는 막체 및 강제부재의 의미는 보강벨트, 탈락방지용 핀기구, 로프류 및 실링고무, 커버고무 등 및 무처리 강재, 도장한 도장강재, 아연도금강재, 도료에 의한 도장 및 아연도금 강재 등을 대상으로 하며, 건축물의 유지관리 및 보전은, 그 건물의 내구 · 내용계획에서 결정지을 수 있다. 일반적으로 내구설계 전체적인 흐름은 건물 종별에 따라, 목표내용년한을 설정하고, 이에 합당한 재료, 부재, 방식시스템 선정, 용도 등에 따른 외력 등을 설계한다. 이 방법으로 부적합한 것이 있으면 부재, 시스템, 사양 등을 변경 수정한다. 그 후 시공/유지관리등급을 선정한 후 계획내용연수를 구한다.




제어계통도

건축 구조재료로 사용되는 막체의 보수기술에 관한 지침은 모두 3편으로 구성되며, 전체적으로 볼 때, 현장에서 보수하는 방법과 공장에서 보수하는 방법을 고려할 수 있으며, 통상 막체 등의 보수는 현장에서 실시되는 것이 많다. 그러나 막체 등을 현장에서 공장으로 옮겨 실시하는 경우에는 열화 정도가 크거나 발생 부위가 많을 때 고려되며, sealing 봉제의 보수의 경우나, 고주파용착에 의한 보수의 요구, 보수후 외관상 문제 야기시가 포함된다.

강제부재의 보수기술 지침에서는 강제부재의 보수기술 지침 및 해설과 강제 부재의 보수공법 선정에 관한 편만을 수록하고 있으며, 막과 같은 연성재료와는 달리 다른 건축물에서도 비교적 많이 언급되는 내용들이다. 보수대상 내, 소재가 강재로 이것을 도장에 의해 보수하는 것도 포함되며, 몸체 이외에 강제의 난간, 옥외계단 등에도 적용할 수 있도록, 배려하고 있다.


메트로 돔 폭설피해

공기막구조의 설비 및 유지관리 지침은 총칙, 공기막구조의 설비, 유지관리 및 참고자료로 모두 4편으로 구성하여 공기지지방식의 막에 대한 전반적인 계획과 유지 및 관리의 내용을 통합하였다. 여기서, 공기막구조의 설비 기본사항은 가압송풍설비의 기능, 성능 및 조작이 쉬워야 하며, 가압장치 및 내압장치제어의 신뢰성 및 정전 시에도 내압유지가 가능하여야 하는 설비조건 등이 있다. 또한 외적환경에 충분한 기능을 발휘하고, 내압컨트롤이 가능한 가압설비로 할 것과 외래노이즈에 있어서 제어장치가 오작동하지 않는 가압설비로 할 것 등의 조건을 제시하고 있다. 공기막구조 내에 설치한 각종 설비에 관해서는 가압에 의한 불편함이 생기지 않도록 할 것을 배려하고 있다.

마지막으로 우수차단장치 및 수밀성능 유지관리 지침은 모두 4편으로 구성되며, 총칙, 우수차단장치 계획, 막재료 수밀성능 평가 및 수밀성능 유지관리 점검 지침 등으로, 막재료의 수밀성능 평가방법과 점검 매뉴얼을 제안한다.

(8) 3.4.3 Pilot Project

(9) 가. 대공간 구조물 구조설계 절차서 제안

(가) 개념 설계(Concept Design)

구조 설계에서, 특히 대공간의 형성적인 측면에서 개념(Concept)이라는 말은 구조물의 형상에 대한 방향이라고 할 수 있다. 건축물의 용도, 역할, 주변 상황에 대한 분석들이 모두 이 속에 포함되어 있다. 설계자들은 이 개념을 완성하는 것이 설계의 최종 목표라고도 한다.

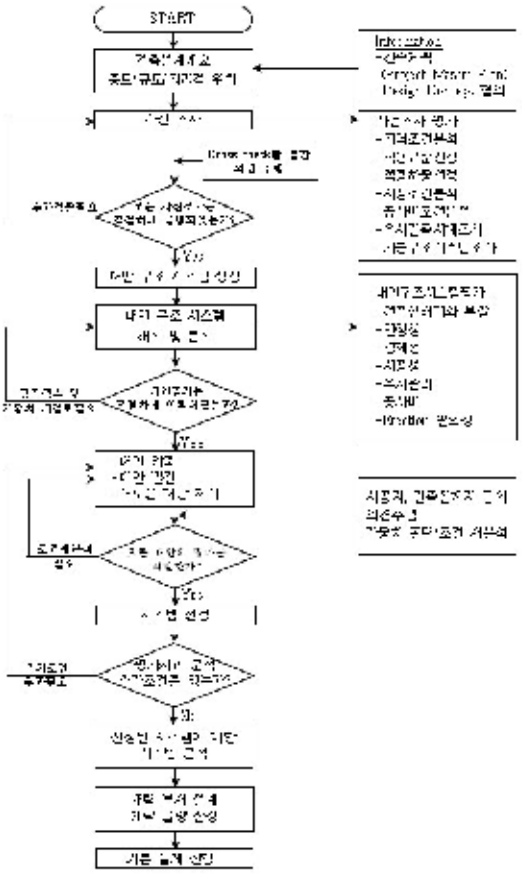
초기 개념 설계의 완성은 건축미의 바탕위에 경제성, 시공성, 공사기간의 예측을 통해 더욱 완성도가 커지게 된다. 구조 해석이나 모형 제작 등을 통해 위의 요소들을 관계자들(건축 설계자, 구조 설계자, 시공자 등)이 협의 및 분석을 통해 최적안을 만들기 위한 범위를 좁혀감이 개념 설계의 완성이라고 할 수 있다.

(나) 계획 설계(Schematic Design)

계획 설계는 개념 설계를 발전시키는 단계라고 할 수 있다. 계획 설계에서 주로 진행해야 하는 내용들이 전체 건축물의 기본 토대를 완성하는 것이라고 할 수 있다. 여러 가지 대안 비교 분석을 통한 구조 시스템의 결정, 적용 구조 재료 및 강도에 대한 확정, 주요 부재의 크기(Volume)의 결정과 설계, 개략 물량 산정까지를 계획 설계에서 진행한다. 또한 풍동실험의 실시에 대한 지원도 포함되어야 한다. 계획 설계에서는 건축물의 기본 골격을 완성하고, 시스템을 결정하는 단계로 정의할 수 있다.

(다) 기본 설계(Design Development) 및 실시 설계(Construction Documents)

기본 설계와 실시 설계에 대한 주요 업무 내용은 기존과 별반 다르지 않다. 다만, 실시 설계의 비중에 대해서는 크게 갈 것인지 기본설계의 비중을 크게 갈 것인지에 대해서는 추가 논의가 필요할 것이고, 본 연구의 방향과는 연계성이 없으므로 제외하기로 한다.



(라) 개념, 계획 설계를 위한 절차서

실무 종사자들의 설문에도 나타나 있는 바와 같이 설계 절차(Design Procedure)를 만드는 것에 대한 필요성은 인지되고 있는 현실이다. 설계 절차는 설계 오류의 최소화, 최적의 시스템 선정에 큰 역할을 할 것이다.

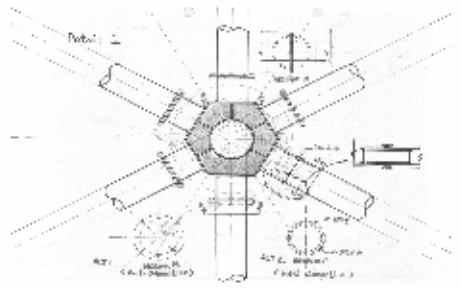
여기서는 개념 설계 단계와 계획 설계 단계에 대한 구조 설계 절차를 생성하고, 각각의 절차에 따른 합당한 근거를 만들기 위한 평가항목에 대한 내용을 제안한다. 물론 여기서의 제안이 대형 구조물 설계에 대한 전체를 지원하기란 무리일 것이고, 각각의 조건에 따라 추가되거나 삭제되는 항목이 있을 수 있을 것이다. 하지만, 초기 설계에서 이러한 단계는 실무에서 유용한 자료로 실무자들에게 도움을 줄 수 있을 것으로 기대한다. 또한 초기 설계의 최적 설계안 도출이라는 측면에서 자료의 취합 및 각 전문 관계자들의 협의 및 결론에도 역할을 할 수 있을 것이다. 그림에 나타난 대형 구조물 구조설계 절차서(Design Procedure)는 건축 구조 설계 실무자들을 위한 내용임을 밝혀둔다.

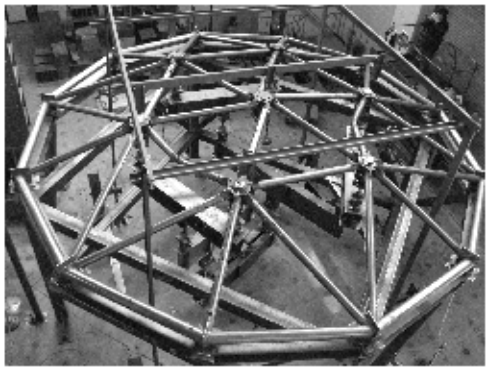
(11)나. Single Layer Dome 구조

Pilot Project의 2차년도에는 형태 저항형 구조물의 특징을 가장 잘 드러낼 수 있는 단층 레이어 돔을 선정하여 축소 스케일 모형실험을 진행하였다.

실험체의 크기 및 형상에 대한 부분은 현재 국내, 국제적으로 진행되었던 실험들에 관한 정보 수집을 진행하였고, 본 연구의 조건에 적합한 실험체와 실험 방법을 선정하여 진행하였다. 특히 시공성과 제작 편이성을 고려한 단층 레이어 돔에 적용 가능한 상세를 개발하여 연구단의 접합부 세세부와 연계하여 진행하였다. 그림은 초기 접합부 선정 대안 검토시 제안된 접합부 스케치 및 실제 사진이다. 본 연구 과제에는 새롭게 제안된 접합부를 가진 단층 레이어 돔의 비탄성 거동을 실험적으로 분석하였다. 구조적인 성능과 시공성을 모두 만족시키기 위해서 제안된 새로운 접합부를 적용하여 강관으로 구성된 스팬 7m의 축소 실험모델을 제작하였으며, 하중 전이장치를 이용하여 각 절점에 균일한 하중이 가력되는 정적 재하실험을 수행하였다. 최대 가력하중은 설계하중의 약 1.6배였으며, 일부 부재에서 압축 항복점을 넘어 비탄성 좌굴이 발생하였다. 좌굴 발생 이후에는 가력장치가 허용할 수 있는 변위까지 실험을 수행하였으며, 실험을 통해서 구해진 래티스 돔의 거동을 구조설계의 관점에서 분석하였다.







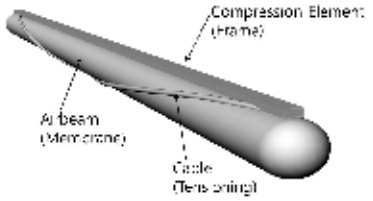
전체하중에 대한 정점 수직 변위 관계에서 시험체는 전체하중이 700kN에서 강성이 저하가 됨을 알 수 있다. 첫 번째 부재 좌굴은 전체 하중 1,120kN, 정점 변위 53 mm에서 발생하였고, 두 번째 부재 좌굴은 전체 하중 554kN, 정점 변위 169 mm에서 발생하였다. 실험결과와 해석결과와의 비교를 위하여 접합부의 절점은 강접합으로, 지점은 수평의 방사방향에 롤러로서 해석하였다. 비교 결과, 약 700kN까지 상당히 일치하는 결과를 얻을 수 있었다. 즉 위에 서술한 비교적 단순한 가정에 의한 해석으로도 본 시험체와 같은 접합부를 가진 단층 래티스 돔의 경우에는 충분하고 타당한 결과를 얻을 수 있는 것을 알 수 있었다. 하중 단계별로 실험결과와 해석결과를 비교한 결과, 700kN까지는 그 결과값의 차이가 크지 않으나, 1,000kN에서는 상당한 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 부재가 소성화로 접어들면서 단층 래티스 돔의 강성이 저하되는 현상을 명확히 보여주고 있다. 전체하중과 정점이 아닌, 그 주변 절점의 수직 변위 관계에서는 첫 번째 부재좌굴이 일어나기 전에 서로 거의 유사한 값을 나타내고 있음을 볼 수 있다. 이는 이 실험에서 의도한 대로 하중 전이 보가 하중 분배를 균등하게 잘 하였음을 나타낸다. 하중단계별 주변 절점의 변위(mm)를 살펴보면 첫 번째 부재 좌굴 전까지 주변 절점의 변위는 거의 유사한 것을 알 수 있다.

그러나 탄성해석만으로는 부재의 비탄성좌굴하중을 얻을 수 없어 비탄성좌굴해석과 같은 정밀해석에 대한 연구가 필요하다. 따라서 비선형 비탄성 해석결과, 트러스(88N)와 프레임(88N)의 좌굴하중 값은 비선형 해석과 같았으며 오차 또한 마찬가지로 실험 값(114N)과 29% 와 25%의 값을 보였다. 하지만 좌굴 이후의 거동에서 해석에 비해 개선되었으며 특히 프레임에서 확연하였다. 또한 아바쿠스의 기능을 이용한 트러스와 프레임의 항복응력 도달 전후의 변형도를 비교한 그림에서 부재좌굴을 고려하지 않은 트러스는 부재의 축력만을 받는 데에 비해 프레임은 국부좌굴로 인한 부재의 휨이 눈에 띄게 발생하였으며 비대칭적인 변형도를 보였다.

(13)다. 텐셔닝 에어빔 시스템 I(TABS I) + Pilot Project 기본 설계

(가) 텐셔닝 에어빔 시스템(TABS)

텐셔닝 에어빔 시스템(Tensioning Air Beam System: 이하 TABS)은 공기막, 케이블 및 프레임으로 구성된 하이브리드 시스템으로서 공기막 구조와 텐셔닝 구조를 결합한 시스템이다. 이 시스템은 경량인 동시에 공기막 구조의 재하성능을 크게 개선할 수 있는 시스템이며, 시공성 또한 뛰어난 점을 장점으로 들 수 있다. 이 시스템을 구성하는 기본 구조재인 공기막과 프레임부재 등, 개부재 각각의 성능을 극대화 시킬 수 있는 시스템으로, 구조적 측면 및 경제적 측면에서 매우 유리한 시스템이라고 할 수 있다. TABS는 그림에 나타낸 것과 같이 공기막과 압축재로 표현된 각형강관 부재, 공기막을 감싸는 케이블로 구성된다.



TABS 구조는 언더텐션(Under Tension) 트러스 보와 비교함으로서 보다 쉽게 이해할 수 있다. 두 구조는 유사한 요소로 구성되어 있지만 트러스의 수직재(Strut) 역할을 공기 막이 대체한다는 것과 공기막이 보의 길이방향으로 연속적으로 지지되어 하중에 저항하는 구조이다.

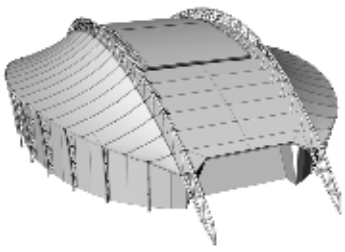


TABS의 재하능력은 공기막 보의 압력에 비례하며 실제 단부의 경계조건, 공기막 보와 케이블의 밀착정도 및 공기막 보의 압력정도에 따라 TABS의 구조성능은 다른 양상을 나타낼 것으로 사료되므로, 구조실험을 통한 사용성 평가가 필요할 것으로 판단된다. 따라서 TABS의 구조성능파악을 위해, 10m 스팬에 대한 구조실험을 실시하였다. 실험변수는 공기막 보의 압력으로서, 100, 200, 400, 600mbar의 압력에 대해 실험을 실시하였다. 압력 실험 결과, 가력점의 하중-변위관계에서 공기막 보의 압력이 증가함에 따라 초기강성 및 최대하중이 비례적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한 초기선형구간에서의 하중은 TABS를 구성하는 주요부재 각형강관과 공기막 보, 개개요소의 독립적인 구조성능을 선형결합 시킨 값과 유사하게 나타났으며, 최대하중의 경우, 각형강관과 공기막 보의 개개의 구조성능보다 TABS의 성능이 10배 이상 효율적인 것을 알 수 있다. 해당압력에 대한 하중-변위관계를 실험값을 정밀해석 결과와 비교한 결과, 200mabr 및 400mbar의 해석결과는 실험결과와 거동이 유사하게 나타나 해석모델의 유효성 또한 검증하였다. 실제 사용성 평가를 위해 차량재하실험을 실시하였다. 차량재하에 따른 TABS의 변형은 매우 미비한 것으로 나타났으며, 교량설치시간은 약 30분으로서 TABS의 우수한 시공성을 확인할 수 있었으며, 이러한 결과로부터 TABS는 구조적, 경제적으로 매우 유효한 구조시스템으로 판단된다.

(나) 30M Pilot Project 기본설계

본 연구단의 최종 목표는 300m 대공간 건축물 건설의 요소기술을 축적하고 그 내용을 확인하는데 있다. 이에 따라 1/10 수준의 축소 모형의 설계 및 시공을 통해 이러한 요소 기술의 확인과 실제 건물의 건축을 통한 시공가능성을 확인한다. 건축설계는 연구단 Pilot Project로서의 실험뿐만 아니라 실험 및 관측이 종료된 이후 실제 건축물로 전용될 수 있는 가능성을 염두에 두고 외부 형태의 심미적 측면과 내부 공간의 기능성을 함께 고려하여 진행하였다.

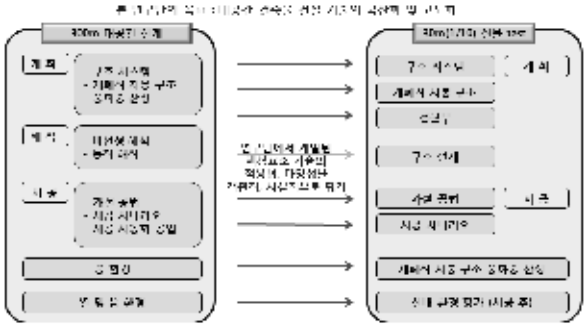




(15)라. Pilot Project 설계 + 텐셔닝 에어빔 시스템Ⅱ(TABSⅡ)

(가) Pilot Project 설계

Pilot Project는 본 연구단에서 도출된 연구 결과, 즉 대공간 구조물의 핵심 요소 기술 및 응용 수준의 단위기술 개발 결과를 이용하여 요소기술의 실용화 연구를 목적으로 한다. 핵심 요소 기술들을 1/10 축소 스케일 Pilot Project로 검증하기 위하여 아래 그림과 같은 프로세스를 활용하여 프로젝트를 진행하였다. 또한 Pilot Project로 선정된 건물은 본 연구가 완료된 이후 실제 건물로서 사용을 염두에 둔 설계이기 때문에 형태적 관점과 실용적 관점을 모두 고려하여 건축 계획을 실시하였다. 우선 국내 · 국외 유사 사례 분석을 통해 해안 설계 사무소, 1-2세세부 (박선우 교수), C.S구조엔지니어링 등 연구단의 협의를 통해 본 연구단의 핵심 요소 기술을 검증하기 위한 최적의 구조 시스템을 선정하였다. 최종 선정된 구조 시스템을 바탕으로 해안 건축 설계사무소에서 최종 건축 설계를 실시하였으며 C.S구조엔지니어링에서 구조물의 안전성 검토와 구조 설계를 실시하였다. 또한 1/10 축소 스케일 Pilot Project를 실제 시공하면서 Erection 공법과 케이블 재긴장 장치 등의 요소 기술을 검증 할 계획이며 준공 이후, 무선 모니터링, 막장력 측정 등의 요소 기술을 검증 할 계획이다.

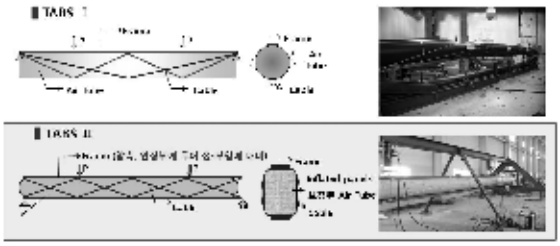






(나) 텐셔닝 에어빔 시스템Ⅱ(TABSⅡ)

3차년도 TABSⅠ의 실험 및 해석에 있어 과도한 연성거동을 하며, 사용성 확보를 위해 높은 공기압이 필요하며 풍하중과 같은 반복하중에 대한 구조성능이 취약하다는 결론이 도출되었다. 따라서 4차년도는 이와 같은 보완사항을 바탕으로 TABSⅠ을 개선하여 그림과 같은 TABSⅡ를 개발하였다. TABSⅡ는 기존의 압축부에 있던 각형강관 부재를 압축부, 인장부에 적용하였고 경계조건을 핀-핀지지에서 핀-롤러 단순지지로 변경하였으며 막 구조의 재료막 내부 가로방향에 섬유(yarn)로 보강하여 공기막 구조의 가로방향 강성을 확보함으로서 공기막 자체의 강성이 증가하고 낮은 공기압으로 높은 구조성능을 발휘하며, 풍하중과 같은 반복하중에 대응이 가능한 장점이 있다. 이 연구에서는 공기막의 압력과 케이블의 초기장력에 따른 TABSⅡ의 구조성능 파악을 목적으로, 다양한 압력조건과 초기장력 조건을 변수로 하여 TABSⅡ의 구조실험 및 해석을 실시하였다. 그 결과 개발된 시스템에 대한 구조적인 장점을 고찰하였다. 또한 3차년도에서 수행하였던TABSⅠ의 구조성능과 비교하여 TABSⅡ의 장점도 실험, 해석결과로부터 도출하였다. TABSⅠ과 TABSⅡ의 해석 결과를 아래의 그림과 같이 비교하면,개발된 시스템의 구조성능은 TABSⅠ보다 50%에서 100%정도 월등히 높음을 확인할 수 있다. 따라서 TABSⅠ의 보완사항을 개선하고자 개발된 시스템인 TABSⅡ는 구조성능이 보다 향상되었다는 결론을 도출할 수 있다.



(17)마. Pilot Project 시공

대공간 건축물의 핵심기술기반을 구축하기 위해서 크게 4가지 분야로(구조시스템 개발 및 경제성 분석, 실용화 방안 연구, 시공 및 친환경 설계 기법 개발, 비선형해석 및 구조설계기법 개발) 연구를 진행 중이며 각 연구 중점 사항들을 연계하여 최종적 성과물로 300m 스팬의 대공간 구조물 건설 기술 실현을 계획하고 있다. 그러나 본 연구단의 규모로서 300m 대공간 구조물을 실제 건설 한다는 것은 현실적으로 불가능 하다는 판단 하에 관련 요소기술의 개발 수준을 정량적, 사실적으로 평가 할 수 있는 Pilot Project 시스템을 도입하였다.

Pilot Project를 수행하는 과정에서 300m 스팬의 대공간 구조물을 1/10 스케일로 축소하여 실제 모델을 제작하고, 그 결과를 이용하여 타 세부 기관의 연구 결과를 실질적으로 평가할 계획이다. 1/10 축소 스케일 Pilot Project의 계획 및 시공을 진행하면서 본 연구단의 연구 결과들을 적용시켜 핵심 요소 기술의 적용성 및 타당성을 실 구조물에 구축함으로써 핵심 요소 기술을 객관적 사실적으로 평가 할 수 있다. 1/10 스케일 축소한 Pilot Project(스팬 30M)는 천안 한국기술교육대학교의 HRD 홍보관 신축공사로서 개요는 아래와 같다.

- 사업명 : 한국기술교육대학교 HRD 홍보관 신축공사
- 대상지 : 충남 천안시 동남구 병천면 충절로 1800
- 지역 / 지구 : 계획관리지역 (대학)
- 대지 면적 : 378,912m²
- 건축 면적 : 1,007.23m²
- 연면적 : 901.23m²
- 용　도 : 문화 및 집회시설 (전시장)
- 층수 / 높이 : 지상1층 / 12.55m
- 구조 형식 : 철골조
- 적용 기준 : 건축구조설계기준 (2005), 강구조한계상태설계기준 (1998)




또한 실험뿐만 아니라 실험 및 관측이 종료된 이후 실제 건축물로 전용될 수 있는 가능성을 염두에 두고 외부 형태의 심미적 측면과 내구 공간의 기능성을 함께 고려하여 진행하였다.

Pilot Project는 300m 경간 대공간 구조물의 건설기술 실현 가능성을 검증하기 위한 30m 경간의 실제 구조물 건축을 목적으로 하며, 이에 따른 설계전략은 구조시스템 선정을 포함한 구조설계방법, 시공방법 및 사후관리 등, 대공간 구조물 구축에 필요한 모든 요소기술을 포함시키는 것을 기본적인 전략으로 한다. 또한 실용성 및 특수성으로 표현될 수 있는 당 프로젝트의 요소기술 즉 연구단에서 Pilot Project에서 고려한 기본적인 전략과 적용한 핵심 요소기술은 다음과 같다.

○계획부문
- -구조시스템 : 킬아치(Keel Arch) 시스템
- -개폐식 지붕구조 : 킬아치 구조에 적합한 슬라이딩 방식
- -연성구조물 풍하중 산정 : 개폐식 지붕구조 및 막 구조에 대한 풍하중 산정

○해석부문
- -비선형해석 : 구조시스템 및 주요부재의 안정성을 위한 재료, 기하비선형 해석
- -동적해석 : 상부구조 및 하부구조의 질량비에 따른 구조물의 동적거동해석

○시공부문
- -가설공법 : 구조시스템에 따른 지붕구조의 가설공법
- -시공 중 해석 : 가설공법에 따른 시공 중 안정성 해석

○사후관리 및 실내 환경평가
- -풍환경, 열환경 및 음환경 평가 : 시공 후 실내 환경평가
- -케이블 및 막의 무선모니터링 : 시공 후 주요 구조체에 대한 헬스모니터링

○핵심 요소 기술
- -케이블 넷 구조: 막과 케이블 구조를 적극적으로 활용
- -텐셔닝 에어빔 시스템: 지붕구조 중, 개폐부의 경량화를 목적으로 적용
- -가설공법: 킬아치 시스템에 따른 리프트 업(Lift up)공법 적용 및 시공 중 안정해석
- -개폐식 구조 풍하중 실험: 연성구조물 및 개폐식 구조에 대한 풍하중 산정
- -유압식 재긴장 소켓 : 케이블의 시공 후, 장력측정 및 인장력의 재도입 가능

(18)바. 실용화 요소기술 검증

(가) 실용화 요소기술 검증

5차년도에 준공된 30M 스팬 Pilot Project 대상구조물의 안정성 검토 및 유지관리를 위하여 지붕구조에 적용된 연성구조물인 막과 케이블의 장력을 준공 후 상시로 측정하였다. 먼저 30M 스팬 Pilot Project 대상구조물인 한국기술교육대학교 HRD홍보관의 지붕구조에 적용된 막재의 막장력을 측정하기 위한 측정사진은 그림과 같다. 사용된 막재는 아래와 같은 특성을 가지는 SOLUS-1100이며, 온도에 민감한 재료이기 때문에 측정은 겨울인 2011년 1월과 여름인 7월에 측정하였다. 측정 결과, 측정값는 모두 안전치 이내에 들어옴으로서 겨울 및 태풍이 지나간 여름에도 모두 막장력 측면에서 안전하다고 할 수 있다.

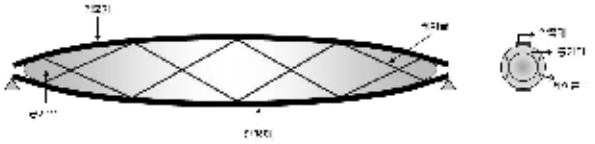


케이블에 도입된 장력은 시공 중이나 준공 후 발생하는 장력의 재분배에 따른 장력 분포도 안정성 확보를 위해 매우 중요하며, 사후 유지관리 차원에서 상시로 장력 측정을 수행하여야 한다. 따라서 장력에 대한 경보 알람 시 엔지니어가 필요한 장력을 간편하게 도입할 수 있는 유압식 재긴장 소켓 및 무선 모니터링 시스템을 아래 그림과 같이 Catenary Wing 부의 케이블에 적용하였다. 이는 장력 측정 및 정확한 조절이 가능하고, 기존 방법에 비해 뛰어난 시공성과 인력 및 시간 단축이 가능한 장점을 가지고 있다. 또한 데이터 저장 및 분석 프로그램을 통한 장력의 격년 변화 해석이 가능한 장점이 있다. 사용된 케이블은 구조용 Strand Rope 6XFi(25)+IWRC로서 밸리 케이블에는 ϕ25, 럿지 케이블에는 ϕ20 크기로 설계하였다. 케이블은 원칙적으로 인장력에만 저항하는 선형 탄성부재로 형상을 유지하기 위해 케이블의 초기장력 분포와 밀접한 관계가 있기 때문에 구조해석 및 시공 전에는 반드시 초기 형상해석을 수행하여야 한다. 초기형상 해석 결과, 밸리 케이블 대 럿지 케이블의 비가 4:1로 산정되어 시공 시 초기장력은 80kN, 20kN로 설정하였다. 또한 월별 케이블 장력 측정 결과, 모두 케이블의 장기 및 단기 허용 인장력 내에 들어옴으로써 안정성을 확인하였다. 측정된 케이블 장력은 밸리 케이블과 럿지 케이블은 9:1의 일정비율을 유지하며 분포함을 알 수 있다.



(나) 텐셔닝 에어빔 시스템Ⅲ(TABSⅢ)

6차년도에는 TABSⅡ와 시스템이 비슷하지만 공기막이 베흘림 형상 즉, 방추 형상인 TABSⅢ를 개발하였다. 이 시스템은 모멘트가 큰 중앙부에 단면 2차모멘트를 크게 하여 구조성능 면에서 효율적인 시스템이라 할 수 있다. 구조성능 실험 결과, 공기막 보의 압력 및 공기막의 중앙부 지름이 증가함에 따라 초기강성 및 최대하중이 비례적으로 증가함을 확인할 수 있다. 또한 시스템이 내력은 아래의 그림과 같이 각관의 좌굴이 발생하는 시점에서 발생하였다. 또한 해석 결과와 실험 결과를 비교하면 초기 강성 및 최대 하중이 유사한 거동을 보여 개발된 해석모델의 유효성을 입증하였으며, TABS에 대한 구조 설계시 즉각 적용이 가능하다. 또한 4차년도의 TABSⅡ와 TABSⅢ의 구조성능 비교 결과, 같은 조건에서 베흘림 형상의 TABSⅢ의 구조성능이 강성 면에서 공기압이 200mbar에서는 2배 이상, 공기압이 400mbar인 경우 3배 정도 월등히 뛰어남을 확인할 수 있다.



(다) 300M Pilot Project SD보고서 작성

연구단의 최종목표를 달성하고자 300M 스팬 Pilot Project의 구조설계 보고서(SD Report)를 작성하였다. 이 보고서를 통하여 대공간 구조물의 구조설계 프로세스가 정립된다면, 향후 건설된 대공간 구조물들의 지침이 될 수 있으며 나아가 본 연구단의 최종목표인 국내 자체 기반기술 개발로 인한 국산화 및 고도화가 가능하리라 사료된다. [보고서는 별첨자료 참고]



가. 3.4 실용화 방안 연구

SUMMARY

① Code

1차년도 연구과제명 : 대공간 구조물 CODE에 관한 국외자료 수집 및 분석

선진국들이 공신력 있는 관련기관에서 인증하는 지침서 및 제반 규정을 가지고 엔지니어링을 실시하고 있는 것에 비해 국내에서는 아직 전무한 상태이므로, 우선 한국에 비해 매우 다양한 노하우와 경험을 가진 일본, 미국, 유럽의 code를 수집하여 정리하고 분석하였다.

2차년도 연구과제명 : 케이블구조 설계기준 및 해설 지침서 작성

케이블 구조에 대한 합리적이고 기술적 문제점이 없는 설계 지침을 마련하기 위해서 국내외의 문헌, 기준, 규격, 지침 분석 정리하여 국내 실정에 맞는 지침서를 작성하였다.

3차년도 연구과제명 : 스페이스 프레임의 설계지침 작성

스페이스 프레임 구조에 대한 합리적이고 기술적 문제점이 없는 설계 지침을 마련하기 위해서 국내외의 문헌, 기준, 규격, 지침 분석 정리하여 국내 실정에 맞는 지침서 초안를 작성하였다.

4차년도 연구과제명 : 막구조 설계기준 및 해설 작성

막구조에 대한 합리적이고 기술적 문제점이 없는 설계 지침을 마련하기 위해서 국내외의 문헌, 기준, 규격, 지침 분석 정리하여 국내 실정에 맞는 지침서를 작성하였다.

5차년도 연구과제명 : ETFE 막재 패널설계 및 시공지침서 작성

ETFE 막구조에 대한 합리적이고 기술적 문제점이 없는 설계 지침을 마련하기 위해서 국내외의 문헌, 기준, 규격, 지침 분석 정리하여 국내 실정에 맞는 지침서를 작성하였다.

6차년도 연구과제명 : 개폐식 구조물 설계지침 작성

개폐식 구조물의 합리적이고 기술적 문제점이 없는 설계 지침을 마련하기 위해서 국외의 문헌, 기준, 규격, 지침 등을 참고하여 분석하여 개폐식 구조물 설계지침을 작성하였다.

② 유지관리

1차년도 연구과제명 : 계측제어 시스템 기반기술 개발

상시 모니터링을 통하여 구조물 파손 등을 사전 예방하여야 하여야 하므로, 이를 위해 대공간 구조물의 계측 및 관리시스템의 활성/정착화를 위한 기본 자료인 계측기기, 계측방법, 분석 및 대처방안을 정립하기 위해서는 계측종류에 따른 항목별 프로세스, 계측시스템에 따른 계측 프로세스, 구조물의 이상거동 감지 프로세스 및 구조물의 안정성 분석법 등이 개발되었다.

2차년도 연구과제명 : 대변형을 고려한 제어계측 시스템 개발

적극적인 점검, 검사를 수행해서 성능의 저하를 미리 관찰하여 대책을 세우고 사고를 미연에 방지하는 예지보전 및 점검·검사·교체 등을 실시하여 사고를 일으키지 않는 예방보전이 필요하며, 본 연구에서는 FBG센서를 이용한 계측 시스템 및 패키지 기법과 손상도 검증용 무인 로봇개발과 RFID센서를 사용한 막구조물의 모니터링 및 계측시스템의 정밀도 검증 및 유지관리 지침서를 작성하였다.

3차년도 연구과제명 : 막구조 건축물 보수기술 지침(안)

막재의 유지관리 모니터링의 분석과 진단방법 및 판단은 정밀한 해석과 IT기술이 융합된 모니터링 방법의 개발이 필요하다. 이를 위해 케이블 장력측정 및 상시 무인모니터링 기

슬과 막재의 열화요인 및 열화진단 방법 개발 및 기핵/성장에 의한 막 열화성능의 진단 그리고 막 소재의 진단결과 분석 및 판정기준 검증을 위한 연구를 수행하였고 막구조물의 보수기술 지침(안)을 제안하였다.

4차년도 연구과제명 : 대공간 구조물의 유지관리 및 보수기술 지침(안)

광섬유 센서를 사용한 막구조물의 상시 계측시스템을 포함한 유지관리 기술은 세계 최초의 유지관리 시스템으로서, 막체와 강부재, 공기막구조 및 누수 부분으로 나누어 기술지침의 가이드라인을 작성한다. 유지보전 계획은 목표, 범위, 분류로 구성하고, 점검항목, 레벨, 방법 등을 명시함, 해외 보수기술 자료를 참고 국내 실정에 맞는 유지관리 지침(안)이 되도록 수정 보완하고, 막재료의 열화진단에 대해서, 기핵 및 화재실험을 수행하였다.

5차년도 연구과제명 : 무선모니터링 매뉴얼 및 방수, 누수방지 기술 개발

실시간 센서계측정보 가시화 기능 및 센서정보 관리 기능 과 센서계측정보 통계 및 이력조회 기능 및 가시경보 모듈 개발하였고, 대공간 건축물 건전성 관리 PDA Interface 및 시설물별 센서계측값 UI 그리고 SMS기능의 추가를 통한 위험통지 모듈을 개발하였다. 또한 도시성장 및 환경변화에 대응하는 확장성 있는 소프트웨어 아키텍쳐를 구현하였으며, 무인통합관리시스템을 통한 대 공간 건축물의 유지관리 통합기능 제공한다.

6차년도 연구과제명 : 대공간 건축물 통합유지관리 지침서

국내에 존재하지 않았던 대공간 건축물의 유지관리 기술의 확립과, 건전성 모니터링을 비롯한 친환경적 측면 및 유지관리보수기술 등을 집대성하여 대공간 건축물 유지관리 기술지침을 제안하며, 막구조 건축물 유지관리 및 진단 지침, 막체의 보수기술 지침, 강제부재의 부수기술 지침, 공기막구조의 설비 및 유지관리 지침 및 우수차단장치 및 수밀성능 유지관리 지침으로 구성하였다.

3 Pilot Project

실용화에서 무엇보다 각 요소 단위 기술에 대한 실용화 가능성 검증, 신뢰도 확보 및 그에 따른 추가 응용 기술 확보 등이 중요하게 되고, 이를 가장 정확히 실현할 수 있는 방법이 본 Pilot Project의 선정이라고 할 수 있다.

본 연구에서는 실용화 가능성이 높은 건축물의 1/10 축소 스케일인 30M Pilot Project를 제작하고, 그에 대한 설계 및 시공 기술을 확보하고자 한다. 또한 준공 후에는 한국기술교육대학교의 HRD 홍보관으로써 학교의 전시시설로 사용될 예정이며, 적용된 핵심 요소기술(텐셔닝 에어빔 시스템, 유압식 재긴장 소켓, Erection 공법 및 개폐식 구동장치 등)의 실용성 검토를 통하여 건설기술 데이터 베이스 구축이 가능하여 실무자에게도 소요기술 제공이 가능하다.

Pilot Project의 대상구조물 요소기술의 하나인 텐셔닝 에어빔 시스템(TABS)에 대한 개발 연구도 본 세세부에서 수행하였다. TABS는 대공간 건축물 지붕구조의 경량화를 위해 연성구조물인 공기막, 케이블과 프레임으로 구성된 경량 하이브리드 공기막 시스템으로 지붕구조 경량화뿐만 아니라 일반적인 골조 시스템보다 구조성능이 우수하고 경제성, 시공성 우수한 시스템인 텐셔닝 에어빔 시스템은 대공간 건축물의 지붕구조 이외에도 교량, 주택, 교통수단, 스포츠용품, 생활용품, 광고판 등에 적극 활용하여 미적인 아름다움 또한 구현할 수 있다. 이는 스위스의 엠파(EMPA)에서 "Tensairity" 라는 이름으로 처음 제안되어져 선행연구자들에 의해 설계식 및 구조성능에 관한 연구결과가 발표되었으나, 설계에 있어 중요한 변수인 압력 및 케이블 장력과 시스템 구조성능의 상관관계가 명확

치 않으므로 실제 건축물 적용에 있어서는 정성적, 정량적 자료가 불충분하다고 할 수 있다. 따라서 TABS에 대한 설계식과 정밀 해석모델을 개발, 검증하여 현장 적용을 가능케 하는 설계 및 시공 기술을 습득하여 국산화시켰다. 또한 상기와 같은 연구를 바탕으로 기존의 시스템에서는 몇가지 단점이 도출되었으며, 이를 해결하기 위한 새로운 텐셔닝 에어빔 시스템(TABS II, TABS III)을 개발하였다. 연구결과, 개발된 TABS는 기존의 장스팬을 구현하던 H형강 및 트러스보다 구조성능이 우수하고, 20M 스팬 이상에서는 경제적임을 확인하였다. 또한 실물대 실험을 통하여 실제 건축물에 적용시 시공성이 우수함을 검증하였으며, 이에 따라 Pilot Project 대상구조물에 적용하였다.

본 세세부에서는 연구단의 최종목표를 달성하고자 300M 스팬 Pilot Project의 구조설계 보고서(SD Report)를 작성하였다. 이 보고서를 통하여 대공간 구조물의 구조설계 프로세스가 정립된다면, 향후 건설된 대공간 구조물들의 지침이 될 수 있으며 나아가 본 연구단의 최종목표인 국내 자체 기반기술 개발로 인한 국산화 및 고도화가 가능하리라 사료된다.

나.

다.

(1) 3.4.1 Code

(2) 가. 대공간 구조물 CODE에 관한 국외자료 수집 및 분석

국내의 대공간 구조물들은 1988년 서울올림픽과 2002년 한일월드컵을 계기로 다수 건설되었다. 그 경기장들을 건설할 당시는 대공간구조물에 대한 관심도가 낮았을 뿐 아니라 국내의 기술 및 제반 여건이 열악하였기 때문에 외국의 엔지니어링 기술이 별다른 필터링 없이 도입되었다. 특히, 대공간구조물에 주로 이용되는 막 및 케이블에 대한 재료 및 설계에 대한 지침이 적절히 마련되지 않은 상태에서 그 분야의 절대 우위에 있는 외국 엔지니어들의 요구에 대해 국내 기준에 따른 세세한 점검이 불가능하였다. 서귀포 경기장 및 부산돔 파손의 예를 보더라도 뚜렷한 국내 설계지침이 없었기 때문에 사고에 대한 책임 소재를 설계를 담당했던 외국설계사에 따져보지도 못한 채 마무리 되는 상황이 벌어지고 있다. 일본의 경우, 이미 오래전부터 건교부장관이 주관하는 대공간구조물에 대한 지침이 일본 막구조협회 및 건축학회 차원에서 다양하게 마련되어 실무에 적용되고 있다. 국내에서도 기존의 대공간 건축물 뿐 아니라 앞으로 신축될 대공간구조물에 대한 정확한 설계를 위한 설계지침이 필요하다. 예를 들어 일본에서 대공간구조물에 대한 설계 및 관련 사항을 다루고 있는 대표적 지침서는 1) 막구조건축물의 유지보수 지침·동해설, 2) 막구조의 건축물·막재료등의 기술 기준 및 동해설, 3) 막재료 탄성정수시험방법, 4) 막재료의 품질 및 성능 시험 방법, 5) 케이블 구조 설계 지침 및 동해설이 있다. 중국의 경우 상하이시를 중심으로 지침서 작성이 활발하게 진행중이다.

이와 같이 선진국들이 공신력 있는 관련기관에서 인증하는 지침서 및 제반 규정을 가지고 엔지니어링을 실시하고 있는 것에 비해 국내에서는 아직 전무한 상태이므로, 우선 한국에 비해 매우 다양한 노하우와 경험을 가진 일본, 미국, 유럽의 code를 수집하여 정리하고 분석하고 국내 실정에 맞는 대공간건축물 관련 설계규준을 만들고자 하였다.

국내의 대공간구조물에 대한 합리적이고 기술적 문제점이 없는 설계 지침을 마련하기 위해 우선 선진국들의 code를 정리 분석하였다.

국내에서는 막구조건축물의 유지보수 지침·동해설, 막구조의 건축물·막재료 등의 기술기준 및 동해설, 막재료 탄성정수 시험방법, 막재료의 품질 및 성능 시험 방법, 케이블 구조 설계 지침 및 동해설 등의 지침서 및 제반규정 이 미비하므로 다양한 노하우와 경험을 가진 일본, 미국, 유럽, 중국의 Code수집 및 정리 분석을 하였다.

- 막구조에 대한 관련 지침서 분석(외국)
  · 기술적 지침 기준(구조물의 사용용도 및 규모에 따른 분류) 분석
  · 하중에 대한 기준지침/막재에 대한 기준지침
  · 막재료 탄성 정수 시험에 관한 지침 분석
  · 막재료 성능 실험 및 품질관리에 대한 기준 지침 분석
- 케이블구조 대한 관련 지침서 분석(외국)
  · 기계적 성질에 대한 기준 지침 분석
  · 구조해석 및 설계 관련 사항 분석
  · 케이블 디테일 관련 지침 분석
  · 기타 케이블구조 관련 제반 사항 및 적용사례 분석
- 막 및 케이블 구조에 적용할 국내 하중 기준 분석
- 현재 국내에서 사용하고 있는 막/케이블 구조 설계 지침 현황 파악

이와 같이, 국내외 대공간 구조관련 코드에 대한 자료를 수집하고 분석하였다. 이들 자료를 얻고 분석하기 위해 국제공동연구를 진행하였다. 국제 공동연구 진행에 의해 세계 각국의 코드에 대한 정보를 얻었으며, 특히 일본의 국제공동연구에 의해 지침서 작성에 대한 기초를 마련하였다.

(3)

(4) 나. 케이블구조 설계기준 및 해설 지침서 작성

케이블구조는 스포츠시설, 집회장, 전시장, 공장, 다목적 홀 등 대공간 구조를 형성하는 중요한 구조요소로써 광범위한 건축물에 이용되고 있으며, 대공간구조물 뿐 아니라, 수개 층으로 이루어진 바닥판 구조의 인장부재로도 사용되고 있다. 이러한 케이블구조는 미국의 Raleigh Arena를 시작으로 케이블네트구조, 케이블과 보로 이루어지는 케이블 거더 및 복합구조, 텐세그리티구조, 막과 케이블이 복합구조등으로 다양하게 발전되어 왔다. 이 케이블은 고강도이면서 유연한 케이블의 장점을 이용하고 또한 장력을 도입하여 케이블이 강성을 이용하여 사용되는 것이다.
현재까지는 대공간구조물에 주로 이용되는 케이블에 대한 재료 및 설계 지침이 적절히 마련되지 않은 상태에서 그 분야의 절대 우위에 있었던 외국 엔지니어들의 설계에 대해 국내 기준에 따른 세세한 점검이 불가능하였으며, 사고발생시 국내 설계지침에 의한 정확한 책임 소재를 추궁할 수 없는 상황이 벌어지고 있다.
이러한 필요성에 따라, 앞으로 국내에서도 케이블이 사용된 대공간구조물에 대한 수요는 증가할 것이 예상되므로, 현재 국내 건축기준 및 기타 관련 법규에서 상세히 다루지 못하고 있는 케이블 구조에 대해서 안전성과 기능의 확보라는 관점에서 설계지침서를 마련하였다.
우선, 케이블 구조에 대한 합리적이고 기술적 문제점이 없는 설계 지침을 마련하기 위해서 국내외의 문헌, 기준, 규격, 지침 등을 참고하여 분석하였으며, 분석된 내용을 국내 실정에 맞게 사용할 수 있도록 지침서를 작성하였다. 각 분야의 전문가들로 구성된 위원회는 워크샵 및 자문회의를 거쳐 케이블 구조 기준 및 해설집을 발간하였다. 최종적으로 분석 정리된 연구 결과물은 관련 학회 및 관련 기관의 공인을 얻어 앞으로 건축될 실제 구조물 설계에 직접적으로 적용될 수 있도록 하였다.

개략적인 연구내용은 다음과 같다.
(1) 케이블구조 관련 국내 자료 수집/분석
(2) 케이블구조 대한 국외 지침서 분석
- 케이블의 품질 및 종류에 대한 지침
- 기계적 성질에 대한 기준 지침(파단하중, 초기신장, 탄성계수, 크립, 선팽창계수등)
- 외부하중에 대한 기준지침
- 구조설계 관련 사항(허용인장응력, 초기장력, 변형, 해석시 기본가정등)
- 구조해석 관련 사항(해석상가정, 구조모델, 해석의 내용 방법, 초기형상해석 등)
- 케이블 디테일 관련 지침(단말부, 교차부, 굴곡부, 정착부)
- 케이블 재료 규격에 관련 지침
- 방재관련 규정
- 기타 케이블구조 관련 제반 사항 및 적용실례 분석
(3) 현재 사용되고 있는 국내 현장실무 안 정리/분석
(4) 합리적이고 기술적 문제점이 없는 최종 지침서 제출
(5) 케이블 구조 설계지침서 법제화 준비 위원회 구성

1. <케이블구조 설계기준/해설 목차>
2. 제1장 총칙
3. 제2장 구조계획
4. 제3장 케이블 재료
5. 제4장 하중
6. 제5장 구조설계
7. 제6장 구조해석
8. 제7장 접합부 상세설계
9. 제8장 지지구조



(1) 다. 스페이스 프레임의 설계지침 작성(안)

대공간 구조시스템의 하나인 스페이스 프레임 구조(Space Frame Structure)는 A.G Bell에 의해 건축 구조물에 적용되기 시작하여, 본격적으로 보급되기 시작한 것은 2차 세계대전 이후이다. 이 구조물은 ① 철근 콘크리트 구조물의 거푸집 사용 불가피 및 시공의 장기화에 따른 비합리적인 생산성, ② 판 및 쉘과 같은 연속체 구조물에 대한 해석이론의 확립, ③ 다양한 형태의 건축물 설계에 대한 기술적인 도전심, ④ 목조, 철골조에 의한 역학적 합리성 확보, ⑤ 공간 구조물에 대한 사회의 요구 등에 따라 급속하게 보급되기 시작했다.
역학적 관점에서 보면 스페이스 프레임 구조는 종횡의 부재가 3차원적으로 서로 연결되어 입체적으로 외부 힘에 저항하는 구조로서 높은 강성을 가진다. 따라서 일반 철골 구조, RC구조 또는 2차원 트러스 구조보다는 외력의 전달에 있어서 역학적 합리성을 가지므로 직경 약 200m-300m 이상 되는 대공간 구조물의 구조시스템으로 적당하다.
스페이스 프레임 구조는 종횡의 부재가 3차원적으로 서로 연결되어 입체적으로 외부 힘에 저항하는 구조로서 높은 강성을 가진다. 따라서 일반 철골 구조, RC구조 또는 2차원 트러스 구조보다는 외력의 전달에 있어서 역학적 합리성을 가지므로 직경 약 200m-300m 이상 되는 대공간 구조물의 구조시스템으로 적당하다. 특히 이 구조시스템이 개발되어 전 세계적으로 대공간 구조시스템의 하나로 널리 보급되고 있지만 아직 실무에서 참고할 만한 지침서다운 설계지침서가 없는 것이 현실이다. 따라서 이 분야에 후발로 뛰어 들었지만 선진기술력에 근접하거나 오히려 앞서가기 위해서는 기존의 선진기술을 잘 활용하고 필요한 요소기술은 자체 개발하여 국내 실정에 맞는 지침서를 개발하여 실무자들의 이 활용할 수 있도록 할 필요가 있다. 따라서 국외 스페이스 프레임 코드에 대한 자료를 수집하고 분석하였고 이들 자료를 얻고 분석하기 위해 국제공동연구를 진행하였다. 본 연구에서는 세계의 스페이스 프레임 구조에 관한 지침서를 확보하여 우리나라의 실정에 맞는 스페이스 프레임 구조의 초안 작성을 하였다.

개략적인 연구내용을 정리하면 다음과 같다.
(1) 관련 문헌 조사
(2) 설계디자인/구조계획에 관한 지침 개발
(3) 하중 및 기타 외력에 관한 지침 개발
(4) 재료 및 구조해석방법에 관한 지침 개발
(5) 자재 생산 및 시공에 관한 지침 개발
 - 부재 조립 및 도장 등에 관한 지침
 - 가설재 설치에 관한 지침
 - Erection 에 관한 지침
 - 시공관리에 관한 지침
(6) 유지관리에 관한 지침 개발
(7) 지침서 작성

또한, 3차년도에서는 현재 국내에는 막구조물와 같은 특수구조물에 대한 지침이 전혀 이루어지고 있지 않기 때문에, 우리보다 수십년 앞서있는 있는 일본과의 국제공동연구를 통해 연구의 성과를 높이기 위한 일환으로 진행하였다. 차년도 연구에서 진행할 막구조 설계지침서 작성 및 발간 준비를 위해 막구조에 관련된 국외 설계지침서를 분석하고 막구조의 설계지침서의 초안을 작성하였다.

(1) 막구조 관련 국내외 자료 수집/분석
(2) 막구조 대한 국외 지침서 분석
(3) 현재 사용되고 있는 국내 현장실무안 정리/분석

(2)

(3)

(4)

(5) 라. 막구조 설계기준 및 해설 작성

막 구조는 스포츠시설, 집회장, 전시장, 공장, 다목적 홀 등 대공간 구조를 형성하는 중요한 구조 요소로써 광범위한 건축물에 이용되고 있다. 이러한 막구조는 구조적 경량성, 시공성과 함께 전통적인 RC나 강구조로는 대체할 수 없는 이 점을 많이 지니고 있을 뿐 아니라, 밝고 넓은 실내 공간은 떠한 용도에도 최상의 실내 환경을 유지하며 이용될 수 있는 건축물이다.
국내에서도 대규모 스타디움을 위시해 다양한 분야에서 막구조물의 수요가 급격히 증가하고 있는 실정이다. 그러나 세계적으로 막구조물 관련 기술은 비약적인 발전을 거듭하고 있으나, 국내에서는 이에 대한 설계기준조차 없어서 많은 설계자 및 기술자들이 어려움을 겪어왔다. 전 세계적으로 대공간 구조시스템의 하나로 널리 보급되고 있지만 우리나라의 경우 아직 실무에서 참고할 만한 설계지침서가 없는 것이 현실이었다. 국내에서도 대규모 스타디움을 위해서 다양한 분야에서 막구조물의 수요가 급격히 증가하고 있는 실정이다. 따라서 이러한 필요에 따라, 막구조 관련 지침서는 일본막구조협회, 책임으로 지침서 작성이 진행되었으며, 중국의 경우 중국 건축 과학연구원 구조 연구소, 상해 건축설계 연구원, 중국 건축과학 연구원, 통지대학 등에서 책임을 갖고 지침서 작성진행 되었다. 이러한 자료들을 취합하여 막구조 설계 기준의 근간이 되는 기준안 보고서 작성을 완료하였다.
막 지침서는 각국의 기준안을 분석하여 우리나라 실정에 맞는 막 지침서 기준 및 해설 발간을 위하여 한국공간구조학회에서 위원회를 조직하여 4번의 워크샵과 원로 교수 자문 회의를 통하여 2010년 6월 발간하였다.
막구조에 대한 합리적이고 기술적 문제점이 없는 설계 지침을 마련하기 위해서 국내외의 문헌, 기준, 규격, 지침 분석 정리하여 국내 실정에 맞는 지침서를 작성하여, 연구 결과물은 관련학회 및 관련 기관의 공인을 얻어 앞으로 건축될 실제 구조물 설계에 직접적으로 적용 될 수 있도록 하였다.

개략적인 연구내용은 다음과 같다.
(1) 합리적이고 기술적 문제가 없는 최종 지침서 작성
(2) 막구조 설계기준 및 해설 지침서 발간
 - 기술적 기준 지침
 - 막 재료 기준 지침
 - 기타 케이블구조 관련 제반 사항 및 적용실례 분석
(3) 현재 사용되고 있는 국내 현장실무 안 정리/분석
(4) 합리적이고 기술적 문제점이 없는 최종 지침서 제출

10.<막구조 설계기준 및 해설 목차>
11.
12.제1장 총칙
13.제2장 하중
14.제3장 구조계획
15.제4장 막재
16.제5장 구조해석 및 설계
17.제6장 연결 정착부
18.제7장 제작 및 시공
19.제8장 검사 및 유지관리



(1) 마. ETFE 막재 패널설계 및 시공지침서 작성

불소수지막재의 일종인 ETFE 막재는 투명성, 내후성, 환경적합성이 우수하여 최근 폭 넓게 사용되어지고 있다. 더욱이, 유럽에서는 건축시설에도 많이 이용되어지고 있으며, 최근에는 2006년 독일 월드컵대회, 2008년 북경올림픽 스타디움, 수영장의 지붕과 외벽에도 사용되는 등 주목받고 있는 재료이다. 그러나 현재 국내에서는 건축물로서의 실적은 미미하며 일반구조물 또는 리조트 시설, 가설구조물 등의 보급에는 이르지 않은 것이 현실이다.
ETFE 막재는 섬유직포를 가지고 있지 않기 때문에 종래의 막재료와 다른 재료특성을 가지고 있고, 건축 재료로서의 취급에 대해서도 명확하지 않기 때문에 ETFE 막재사용에 있어서 정확한 이해와 기술의 습득이 필요하다.
따라서, ETFE 막재 패널 시공에 대한 설계지침을 통해 관련 재료와 설계 기술 기준 마련으로 대공간 건축물의 품질 및 안전성을 향상시킬 수 있다. 연구 결과물은 관련학회 및 관련 기관의 공인을 얻어 앞으로 건축될 실제 구조물 설계에 직접적으로 적용될 수 있는 국내용 지침서 발간이 가능하였다. 지침서를 통한 시설물 유지관리 회사 및 유지관리 관련 관공서, 리노베이션·리모델링 전문회사에 의해 보수설계에 반영될 것으로 전망된다. 실용화 연구에서 무엇보다 중요한 것은 각 단위기술에 대한 실용화 가능성 검증, 신뢰도 확보 및 그에 따른 추가 응용기술 확보 할 수 있다. 실제 적용시에 일어날 수 있는 안전상의 문제 등도 체크할 수 있어, 실제 적용시 일어날 수 있는 사고방지 역할을 할 수 있다. 실제 적용할 수 있는 대상 건축물을 선정하고, 대상 건축물에 대한 설계 및 시공, 하드웨어 개발 단계 등을 모두 실현해 봄으로서 실용화 단계에서 발생 할 수 있는 문제점 및 개선점을 사전에 파악하여 개선하고 발전 가능하다.
따라서, ETFE 막구조에 대한 합리적이고 기술적 문제점이 없는 설계 지침을 마련하기 위해서 국내외의 문헌, 기준, 규격, 지침 분석 정리하여 국내 실정에 맞는 지침서를 작성하였으며, 연구 결과물은 관련학회 및 관련 기관의 공인을 얻어 앞으로 건축될 실제 구조물 설계에 직접적으로 적용 될 수 있도록 책으로 발간하였다.
ETFE 막재 패널 시공에 대한 설계지침 자료를 수집하고 막재 패널 시공에 대한 설계지침 작성하고 발간하여 건축될 실제 구조물 설계에 직접적으로 적용 될 수 있도록 하였다.

개략적인 연구내용은 다음과 같다.
(1) ETFE 막구조 관련 국외 자료 수집/분석
(2) ETFE 막구조 관련 국외 지침서 분석
 - 개폐식 구조물의 설계 관련 사항
 - 개폐식 구조물의 구조해석 관련 사항
(3) 합리적이고 기술적 문제점이 없는 최종 지침서 제출

20.<ETFE 막재 패널설계 및 시공 지침서 목차>
21.
22.제1장 총칙
23.제2장 막재료의 품질 및 성능
24.제3장 설계
25.제4장 디테일
26.제5장 가압장치
27.제6장 제작 및 시공



(2)

가. 바. 개폐식 구조물 설계지침 작성

현재 개폐지붕을 가지는 건축물은 스포츠시설과 야외극장을 중심으로 세계적으로 많이 건설되고 있다. 규모는 지붕전체가 개폐하는 스타디움 규모로부터 지붕면의 일부가 개폐하는 소규모의 풀 등 여러 가지가 있다. 개폐지붕은 지금까지의 건축과 비교하면 여러 가지 이점을 가지고 있기 때문에 앞으로도 개폐지붕을 가지는 건축은 증가할 것이다.
개폐식구조 적용에 대한 설계지침에 대한 지침서가 아직 정립 되어 있지 않기 때문에 현재 많은 문제를 야기 시키고 있다. 이에 따라 설계 지침을 토대로 유지관리 기술에 대한 표준화가 가능하며, 지침서에 의한 유지관리가 가능하다.
개폐식 구조물의 합리적이고 기술적 문제점이 없는 설계 지침을 마련하기 위해서 국외의 문헌, 기준, 규격, 지침 등을 참고하여 분석하여 개폐식 구조물 설계지침을 작성하였다. 분석 정리된 내용을 국내 실정에 맞도록 하기 위해 현장 실무자들을 포함시켜 실무에 직접 사용될 수 있는 안을 마련하였다. 최종적으로 분석 정리된 연구 결과물은 관련학회 및 관련 기관의 공인을 얻어 앞으로 건축될 실제 구조물 설계에 직접적으로 적용될 수 있도록 한다.
따라서, 개폐식구조에 대한 합리적이고 기술적 문제점이 없는 설계 지침을 마련하기 위해서 국내외의 문헌, 기준, 규격, 지침 분석 정리하여 국내 실정에 맞는 지침서를 작성하였으며, 연구 결과물은 관련학회 및 관련 기관의 공인을 얻어 앞으로 건축될 실제 구조물 설계에 직접적으로 적용될 수 있도록 책으로 발간하여 건축될 실제 구조물 설계에 직접적으로 적용 될 수 있도록 하였다.
지침서는 지붕구조 특유의 구조상의 문제에 대해서 일본건축학회 : 개폐구조소위원회 (주사 이시이 카즈오) 및 국제 쉘 공간구조학회: IASS (International Association of Spatial Structures) WG on Retractable Roof Structures (개폐지붕구조부회 위원장 이시이 카즈오)에 의해 표시된 국내외의 개폐지붕구조설계에 준거하고 개폐지붕구조의 설계 및 안전확보의 측면에서 본 안내서는 정리되어 있다. 여기서는 개폐지붕을 가지는 막구조건축물을 실제로 설계한 안내서로서, 규모는 소규모의 범위에 머무르지 않고 일반적으로 고려하지 않으면 안 되는 점, 구조계산의 내용, 개폐기구부의 설계에 필요한 정보와 설계법을 나타내고 있다.

개략적인 연구내용은 다음과 같다.
(1) 개폐식 구조물 관련 국외 자료 수집/분석
(2) 개폐식 구조물 관련 국외 지침서 분석
 - 개폐식 구조물의 설계 관련 사항
 - 개폐식 구조물의 구조해석 관련 사항
(3) 합리적이고 기술적 문제점이 없는 최종 지침서 제출

28.<개폐식 구조물 설계지침 목차>
29.
30.제1장 총칙
31.제2장 구조설계
32.제3장 하중 및 외력
33.제4장 구조재료 및 허용력도
34.제5장 각부
35.제6장 구동 및 주행
36.제7장 개폐관리

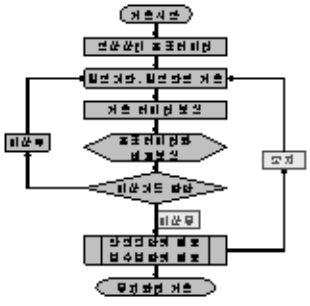
1) 

나.

(1) 3.4.2 유지관리

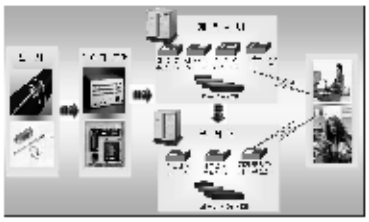
(2) 가. 계측제어 시스템 기반기술 개발

건축물의 고층화와 대형화에 따른 건축 시장의 추세에 따라 대형 공간과 시설이 필요하게 되었다. 장 스팬의 대형 건축물의 요구에 인장 구조물과 같은 대형 건축물의 수요가 늘어나게 되고 대형 건축물의 유지 보수 또한 하나의 큰 시장으로 부상하게 되었다. 장 스팬의 인장 구조물의 유지 보수를 위하여 구조물의 상시적인 모니터링은 필수 불가결하다. 많은 자본과 인력이 요구되는 대형 구조물은 파손시 막대한 자본이 들어감은 물론 큰 인명피해를 초래할 수 있다. 그러므로 상시 모니터링을 통하여 구조물 파손 등을 사전 예방하여야 한다. 즉 안전성과 사용성을 확보하고, 건물 손상을 사전에 예측 가능할 뿐만 아니라 정기 안전점검을 대체 가능한 방법으로서도 제시될 수 있다. 계측에 의한 관리 기법의 도입은 구조물을 시공할 때 설계값과 실제값의 비교, 분석을 통하여 정밀시공 및 안전시공을 할 수 있는 자료로 활용할 수 있을 뿐만 아니라, 시공 후에 구조물의 성능을 지속적으로 파악할 수 있는 장점이 있으므로 구조적 안전예방 및 유지관리 차원에서 대단히 유효할 것이다. 따라서 대공간 구조물의 계측 및 관리시스템의 활성/정착화를 위한 기본자료인 계측기기, 계측방법, 분석 및 대처방안을 정립하기 위해서는 다음의 연구를 수행해야 한다.



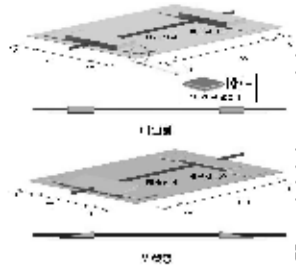
이상감지프로세스

- 계측종류에 따른 항목별 프로세스 구축
- 계측시스템에 따른 계측 프로세스 구축
- 구조물의 이상거동 감지 프로세스 구축
- 구조물의 안정성 분석법 개발
- 실무 적용 및 시험 계측



광섬유 계측시스템의 계측 프로세스

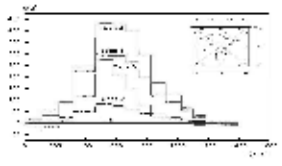
장 스팬의 인장 구조물 즉, 막 구조물을 상시 모니터링 하기 위하여 먼저 막 구조물의 요소별 계측을 하여 각 요소의 변형률을 계측하는 것이 중요하다. 변형률을 계측하기 위하여 FBG센서를 이용한 상시 계측을 제안한다. 많은 계측점과 상시적인 계측을 위하여 많은 계측점을 수용할 수 있을 뿐만 아니라 상시적인 계측이 가능한 FBG센서는 대형 막 구조물의 계측에 적합하다.



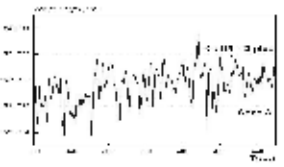
열융착 FBG센서

FBG센서가 막 구조물의 계측에 적합한지를 알아보기 위하여 막 구조물의 실험체를 가지고 외력 작용 시에 변형에 대하여 FBG센서의 상시적인 계측 실험을 하였고 매우 적합하다는 것을 도출하였다.

FBG센서를 이용한 막 구조물의 계측과 더불어 Building Inspection Robot을 이용한 구조물의 위험 요소에 대한 접근으로 보다 시스템적인 상시 계측을 연구하였다. 현재 이 프로젝트는 진행과정에 있으며, 약 80%이상의 진척율에 있다. 현재 로봇에 관한 연구는 의료용, 군사용, 재난구조용등 각 분야에서 활발히 개발 전개 되고 있다. 아직도 국내에서는 Mobile Robot의 연구에서는 성장기라고 할 수 있다. 점차 많은 사람들이 로봇에 많은 관심을 보이고 있으며, 공장에서 사용하던 단순한 형식의 로봇에서 외부환경에 따라 변화하고 생각하는 지능형 로봇으로 점차 관심이 모아지고 있다. 여러 시행과정을 통해 건축분야에서도 Mobile Robot의 많은 활용 방안을 모색하고, 그 가치를 증대 할 수 있을 것이라 기대해본다. FBG센서를 이용하여 막 구조물의 시공 시에 각 부재간의 균등한 응력 분포가 되었는지 계측이 가능하다. 막 구조물의 시공 시에 각 부재간의 균등한 응력 분포는 막 구조물의 시공에 매우 중요한 시공법이다. 이런 시공법을 정확히 하기 위하여 막 구조물에 FBG센서를 부착하여 시공하여 응력 분포를 계측하여 시공할 수 있다. 시공 후 유지 보수면에서도 상시 정확한 계측이 가능하기 때문에 막 구조물의 상시 모니터링에 매우 적합하며 Building Inspection Robot을 이용하여 무인 계측 시스템을 구동하여 보다 편리하고 안전한 상시 계측시스템을 구축 가능할 것이다.



시간-변형률 관계

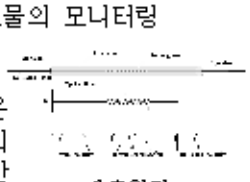


시간-파장 관계

(3) 나. 대변형을 고려한 제어계측 시스템 개발

구조물에 대한 유지관리의 목적은 1) 재해의 예방과 안전의 확보, 2) 쾌적하고 위생적인 환경의 유지, 3) 건물의 효용의 유지, 4) 총자원, 총에너지 및 보전비의 절감으로 생각해 볼 수 있으며, 종래의 보전은 낙수나 마감재의 박리가 있다든가 건물이 실용상의 지장이 생겨 실시하는 「사후보전」이 많았다. 그러나, 최근에는 적극적으로 점검, 검사를 수행해서 기능·성능의 저하를 미리 관찰하여 대책을 세우고 사고를 미연에 방지하는 「예지보전」, 계획적으로 점검·검사·교체 등을 실시하여 사고를 일으키지 않는 「예방보전」으로 진행되어 오고 있다. 이와 함께 어느 부위를 어떻게 점검·시험하고 판단할까 하는 것이 필연적으로 중요한 문제이다. 보전의 경우 기존의 기능·성능의 수준을 100% 또는 60%정도까지 만족하도록 할 것인지, 또는 시공시에 요구된 수준을 넘는 보전을 필요로 하는 것도 있다. 따라서 본 연구에서는 다음의 기술에 대해 연구하였다.

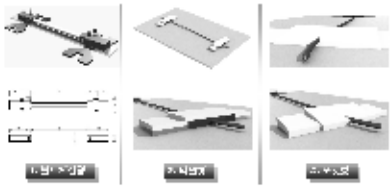
- FBG센서를 이용한 계측 시스템 및 패키지 기법 개발
- 손상도 검증용 무인 로봇개발과 RFID센서를 사용한 막구조물의 모니터링
- 계측시스템의 정밀도 검증 및 유지관리 지침서 작성



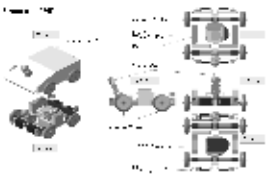
계측원리



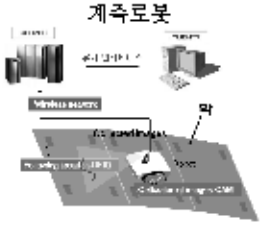
테스트 모델



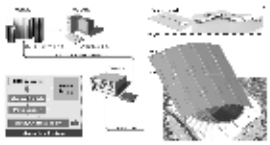
공간구조 건축물에 요구되는 기능 및 성능의 종류와 수준은 그 해당 건물의 용도에 따라 다르지만, 기본적으로는 건물 외부로부터 작용하는 모든 외력을 차단하고 건물 내의 거주공간을 확보하는 것이다. 한편, 막구조 건축물을 구성하는 재료·부재는 시간의 경과와 함께 변질이나 열화가 생기고, 결과적으로 당초에 요구된 기능 및 성능을 충족할 수 없게 된다. 현재의 사회·경제적인 배경에서 보면, 변질이나 열화가 생긴 건물은 적어도 당초에 요구된 기능 및 성능의 수준을 정밀한 보전계획으로 확보해 그 건물을 유효하게 사용하고자 한다. 막구조물에서 막체·강재는 건물로서의 요구기능과 성능 확보를 위해 극히 중요한 역할을 하고 있지만, 이들의 내구성은 무한하지 않다. FBG센서를 사용한 막구조물의 막장력 및 케이블 장력 측정용 계측시스템에 대해서 막재 및 케이블 부착용 패키지 기법의 개발로 인한 특허와 향상성은 다음과 같다. 우선, 전자기 파의 영향이 거의 없어 신뢰성 및 계측 정밀도 향상되며, 고유한 파장 값을 가져 초기 값 대비 누적 변형 측정이 가능하며, 하나의 시스템으로 화재감지(온도센서), 침입자감지, 토목구조물의 건전성감시 등의 여러 기능을 동시에 수행 가능하고, 고전압, 강자계 등의 특수한 환경에서도 사용 가능하다. 또한, 방폭 성능으로 석유·화학 등의 중요 플랜트 사용 가능하며, 측정길이를 임의로 설정할 수 있어 분포형 계측이 가능하고, 하나의 시스템으로 측정거리를 20Km 이상으로 연장 가능하다. 상시 모니터링을 위한 무인 로봇은 45°경사주행이 가능한 것으로 테스트를 통해 기술의 향상을 기대할 수 있었으며, 시스템의 네트워크는 계측데이터를 전송 및 분석하여 모니터링한다.



계측로봇

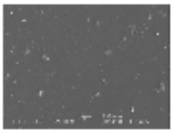


무인로봇 상시모니터링



상시모니터링 개념

막구조 건축물의 유지관리를 위한 막재의 손상 및 열화 진단에 있어서 전자주사현미경을 사용하여 결과를 분석함으로서 유지보전에 관한 기술의 경쟁력을 확보할 수 있다. 현재 유지보전에 관한 지침은 시공업체별 유지관리 지침서, 국외의 자료의 답습 또는 한국구조물진단유지관리공학회의 계측표준 시방서(안)가 있으나 특수구조물에 대해서는 전무하다. 미국 및 유럽에서는 유지관리 업체 별 지침서, 특히 일본의 경우, 특수 구조물에서 일반 건축물로 전환된 기술의 개발이 이루어졌다.



손상없음



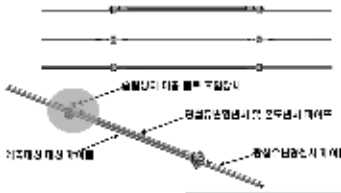
白亜化 확대

유지보전관리에 관한 지침은 목적, 범위, 용어와 보전목표, 범위, 보전의 역할, 보전계획의 작성 순서 등 및 점검대상 부위, 레벨, 방법 등이 필요하고, 정기점검 주기 등유지보전의 평가방법이 수립되어야 한다. 또한 손상도에 대해서는 1차(육안), 2차(육안), 3차(정밀장비)의 순으로 색도계, 광택계, 현미경 등의 정밀장비를 이용하여 손상도 별 1-5까지의 등급을 부여 계측가능범위를 설정한다.

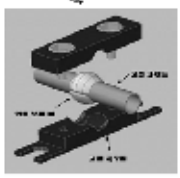
(4) 다. 막구조 건축물 보수기술 지침(안)

구조시스템이 개발되어 세계적으로 대공간 구조시스템이 널리 보급되고 있지만 아직 실무에서 참고할 만한 지침서다운 설계지침서가 없는 것이 현실이다. 이것은 후발로 뛰어들어 선진기술력에 근접하거나 오히려 앞서가기 위해서 즌 기존의 선진지술을 잘 활용하여 필요한 요소기술을 개발하는 것이 중요한 과제중 하나이다. 이와 같은 요소개발은 다음과 같은 기술에 근간한 핵심적인 기술을 습득하고 개발하는 것이 필요한 시점이며, 막재의 유지관리 모니터링의 분석과 진단방법 및 판단은 정밀한 해석과 IT기술이 융합된 모니터링 방법이 본 연구에서 진행되는 사항들이다.

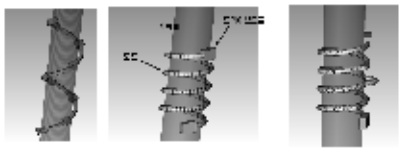
- 케이블 장력측정 및 상시 무인모니터링 기술
- 막재의 열화요인 및 열화진단 방법 개발
- 기핵 및 성장에 의한 막 열화성능의 진단
- 막 소재의 진단결과 분석 및 판정기준 검증



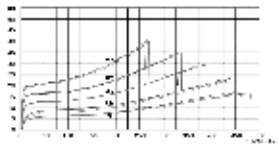




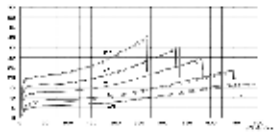
케이블 장력측정에 있어서 비가력식 측정방식은 케이블의 변형률을 이용한 장력계산을 위해서 실측시에 적용되며, 종래 가속도계를 이용한 진동수 간접 측정을 수행하여 측정 오차 발생하는 것을 이용하여 케이블의 변형률을 직접 측정하는 광섬유센서로서 이들의 개발과 도입은 광섬유센서를 이용한 상시 모니터링 기술을 통해 이용될 수 있다. 여기서, 비가력 및 비접촉식 광섬유 센서는 고감도, 고정도 확보와 장력측정용 광섬유센서와 온도센서 동시 설치하여 한 쌍의 광섬유 센서를 관으로 보호하여 케이블에 설치하고, 슬립방지를 위한 볼트를 사용한 이중조임 장치를 채결한다. 여기서, 볼트를 사용한 이중조임 장치를 이용하여 슬립을 방지한다.



케이블 건전성 모니터링의 무인시스템에 대한 구동방식으로는 3가지 타입 구동 메커니즘으로 제안할 수 있으며, 각각은 경사진 케이블의 안정적 모니터링을 위한 트위스트 휠 메커니즘(Twisting & wheel Mech.), 로프 메커니즘(Rope Mech.), 자벌레 타입 메커니즘(Inchworm Mech.) 이다. 트위스트 휠 메커니즘의 경우 상대각이 다른 링크기구를 사용하여 다양한 굵기의 케이블을 조이면서 케이블에 장착되어 있을 수 있으며 휠로 케이블을 따라서 주행하는 방법이고, 로프 메커니즘은 로프를 감아 케이블에 매달고, 전체 로프를 돌려줌으로서 상하 운동을 유발한다.



온도 의존성(JIS MD)

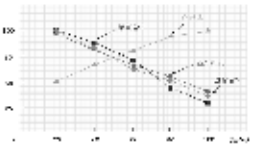


온도 의존성(JIS TD)



화재모의실험

막재의 열화요인 및 열화진단 방법 개발을 위해서는 막재의 표면, 코팅층, 코팅층과 섬유층의 열화요인별 분석 및 열화진단 방법이 개발되어야 하며, 열화진단 결과의 정량화 및 등급별 분류가 반드시 필요하다. 또한 기핵 및 성장에 의한 막 열화성능의 진단에서는 막 재료에 대한 인공적 극한환경 실험을 실시하여 기핵 및 성장에 따른 막재료의 열화성능 진단과 기핵 및 성장 후 막재료의 성능저하 현상 및 구조성능 검증하여야 하며, 막 소재의 진단결과 분석 및 판정기준 검증을 필요로 하므로, 진단결과의 주사현미경 분석 및 에너지분광 검출 분석, 막 소재의 열화정도 판정기준을 개발하여야 한다. 따라서 열화요인 및 열화단을 위해서 인장실험과 일축강도와 연신률의 차이에 대한 실험 및 ETFE 막재의 기계적 성능의 온도 의존성과 내후성 실험등이 실시되며, ETFE막재의 화재모의 실험은 용융점 275도씨 부근에서 말랑말랑 해지고 ETFE막재의 파단변형율을 넘어서면 구멍 발생하고, 파편은 하방으로 낙하하지 않고 상승후, 직화의 경우 발화하나 곧 소화. 및 일산화탄소, 불소화수소 등의 유해가스가 발생한다.



온도에 따른 결과



UTM(WL2100

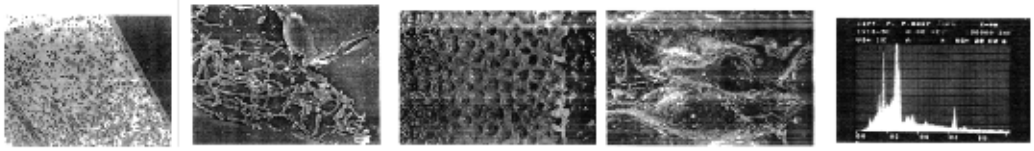
(5) 라. 대공간 구조물의 유지관리 및 보수기술 지침(안)

대공간 건축물의 유지관리 및 보수기술 지침(안)은 국내 최초로 시도되는 유지관리 관련한 기술을 집대성한 것으로서, 친환경성, 장수명화를 위해 필요한 기술이다. 유지관리 지침(안) 중, 막재에 관한 내용은 실재 건축물이 시공되었을 경우 각 시공사가 제공하는 관리 매뉴얼을 표준화할 뿐 아니라, 기존의 연구결과를 통합 실용화할 연구로 파일럿프로젝트에 적용 가능한 기술이다. 특히, 광섬유 센서를 사용한 막구조물의 상시 계측시스템을 포함한 유지관리 기술은 세계 최초의 유지관리 시스템으로서, 막체와 강부재, 공기막구조 및 누수 부분으로 나누어 기술지침의 가이드라인을 작성하는 연구로서 다음과 같은 내용을 포함한다.

- 유지보전 계획에 있어서, 목표, 범위, 분류로 구성고, 점검항목, 레벨, 방법 등을 명시함
- 해외 보수기술 자료를 참고 국내 실정에 맞는 유지관리 지침(안)이 되도록 수정 보완
- 막재료의 열화요인 및 열화진단에 대해서, 기핵실험, 화재실험 등을 수행.
- ETFE 막재를 중심으로, 기핵실험 전후의 내구성 테스트를 실시하여 실험데이터를 제공
- 국내생산이 되지 않는 ETFE 막재의 인장강도 특성 데이터를 확보하여 재료물성 검증
- 화재실험 결과, 난연성에 관한 데이터를 확보 및 구조물 실 설계시 반영 자료 도출

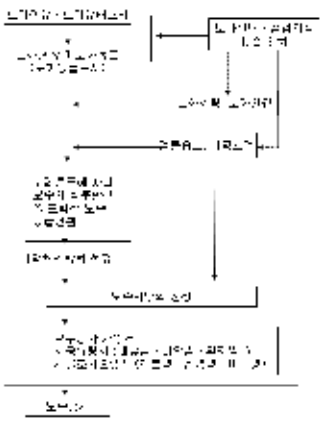
본 연구의 막구조 및 공기막구조물의 유지관리 지침(안)은 막구조 건축물 유지관리 및 진단지침(총칙, 유지보전 계획, 점검주기, 평가방법 및 해설), 막체의 보수기술 지침 (보수기술 지침 및 해설, 보수공법 선정, 보수 후 유지보전 계획), 막체의 보수기술 지침 - 강제부재의 보수기술 지침 및 해설, 강제부재의 보수공법 선정 및 공기막구조의 설비 및 유지관리 지침 (총칙, 공기막 구조의 설비, 유지관리, 참고자료)의 구성으로 나뉘어 연구가 진행될 예정이다.

막구조물의 유지 및 보수에 있어서 실질적인 구조재료의 오염도 평가를 위해서 정밀분석을 수행하며, 막재의 오염은 공기 중의 먼지(토사, 탄소입자)가 표면에 일단 부착된 후, 가소제 등의 액체성분에 미입성분이 스며들어, 그 확산에 의해 내부에 침투하여 수질오염이 되는 경우와, 접합부분의 막재 단부의 섬유가 오염을 내포한 물을 흡수하면 내면부터 오염되는 경우로 나뉘는 것을 분석하였다. 그 외에 벌레의 사해에 의한 오염도 있으며, 지붕 展張 시의 오염 부착상태의 SEM (주사형 전자현미경) 사진과 오염성분의 X선 해석 결과를 이용해 분석하였다.



벌레 곰팡이 白亜化 白亜化 X선 분포도

보전계획에 필요한 요건과 콩트를 항복별로 열거하면 1) 유지보전의 목적과 방침 : 목적과 특히 명기해야 할 목표, 기본방침(사후 · 예지 · 예방보전), 유지보전 항목의 설정(일상 · 정기 · 부정기) 2) 유지보전 행위 주체자의 설정(상정) : 건축기술로부터 본 행위주체자의 구분, 일반 사용자, 기술자, 유지관리 전문 업자 또는(기대할만한 보전 행위의 기술적 레벨) 3) 점검 · 검사개소 · 부위의 설정 : 유지보전 레벨에 대응 4) 점검 · 검사방침의 명시 : 눈으로 확인, 견본수첩, 청 타진, 점검 · 검사기구 · 기계, 일상점검, 정기, 부정기 5) 점검 · 검사주기의 설정 : 통상점검, 피재후의 점검(지진, 태풍 등) 결과의 기록 6) 점검 · 점검결과의 판단방법의 명시 : 열화, 고장현상별 판단 방법, 보수 요부 판단 방법, 전문 진단자에게 의뢰 요부, 보정 · 대여 · 보험조건과 열화, 고장현상의 관련 7) 보수 · 수선 · 교환의 지침 : 재료 · 부재 · 부위별 지침, 전문업자에게 의뢰 등과 같다. 일반 건물의 비구조 부재, 목조에서의 구조부재 등은, 보수 · 보강 외에 교환도 행해지고 있지만, 철재구조 부재로 되어있는 경우에는 일반적으로 교환에 의해 건물 전체의 연명을 측정하는 경우도 적지 않다. 따라서, 본 지침(안)과 다른 방침과의 상호관계를 그림과 같이 제시한다.



보수프로세스의 흐름도

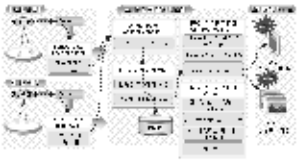
(6) 마. 무선모니터링 매뉴얼 및 방수, 누수방지 기술 개발

대공간 건축물은 지붕구조체를 비롯한 부속시설의 오염도, 손상 진단 및 평가, 구조진단, 보수, 보강을 비롯하여 일상적인 유지관리에 대한 기준과 지침이 미비함으로 인해 큰 재산상의 손실과 인명피해를 초래하기 때문에 (제주도 월드컵 경기장 태풍 피해, 인천문학경기장 태풍 피해, 미네아폴리스 메트로돔 폭설피해 등) 비교적 선진국에 비해 많은 기술적 격차를 보이고 있는 실정이다. 따라서, 대공간 건축물 건전성 상시모니터링을 위하여 웹기반의 무선 통합모니터링시스템을 구축하는 기술의 개발을 목표로 연구를 수행하였으며, 무인통합시스템을 구축하여 Whole in One 시스템으로서 대공간 건축물의 유지관리를 구현하자는 것이다. 이와 같은 모니터링 시스템은 한국시설물안전관리공단의 WISE 시스템과 일견 유사하나, 교량을 대상으로 하고 있어 적용에 무리가 있다. 대형 도시인프라 구조물의 모니터링 및 유지관리를 위한 시스템 개발은 국내에서도 관련연구가 활발한 편인데, 도시인프라 중 교량, 터널, 항만, 공항, 발전소, 댐 등이 이에 속한다. 이러한 경향은 본 연구의 기술 개발을 통해 보다 활용성 높고 확대된 개념의 대공간 구조물의 무인통합시스템을 구현하고 유지관리방안 및 방수누수에 있어서 직접적인 영향력을 미칠수 있는 기회를 제공하게 된다.

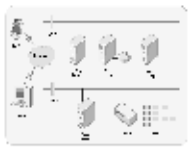
본 세부 과제에서는 대공간 건축물의 주요 부분인 막재와 강재부분에 대한 통합된 유지관리 지침 및 보수보강 기술지침서를 최종적 연구목표로 개발하여 왔으며, 현재 건축물의 장수명화 및 재사용은 시대적 화두로서 이것을 실현하기 위해서는 인간의 건강진단과 같은 상시모니터링이 필수적으로 요구되고 있다. 따라서 다음과 같은 기술의 개발을 위해서 연구를 진행하였다.

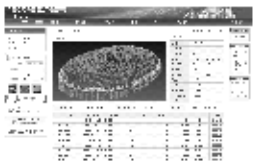
- 실시간 센서계측정보 가시화 기능 및 센서정보 관리 기능 개발
- 센서계측정보 통계 및 이력조회 기능 및 가시경보 모듈 개발
- 대공간 건축물 건전성 관리 PDA Interface 개발
- 관리대상 대공간 건축물의 시설물별 센서계측값 UI 개발 및 시설물 경보 UI 개발
- SMS기능의 추가를 통한 위험통지 모듈 개발
- 도시성장 및 환경변화에 대응하는 확장성 있는 소프트웨어 아키텍쳐를 구현
- 무인통합관리시스템을 통한 대 공간 건축물의 유지관리 통합기능 제공

대공간 건축물 건전성 상시 모니터링 포털 시스템은 광섬유센서를 사용하여 대공간 건축물의 현황 및 이벤트 발생시의 위험도를 모니터링 하며 운영 및 통계정IT으며 보를 제공을 목적으로 하였다. 여기서는 개발된 포털 시스템의 설계단계에서 설계과정 및 설계결과를 서술한다. 포털시스템의 구조 및 외부 인터페이스, 데이터 모델 등 기본 설계 내용을 포함한다. 개발된 포털 시스템은 전체 웹애플lication(이하 웹애플로 칭함), Sensor Data Collect Manager(이하 SDCM라 칭함), SDC Agent(이하 SDCA로 칭함)로 구성되어 있다. 웹애플과 SMS 매신져는 데이터베이스에 접속하여 데이터를 관리한다. SDCA는 광섬유센서로부터 신호가 입력되는 Dector(이하, 디텍터라 칭함)와 연결되어 센서로부터 계측된 값을 받아와 센서정보를 반영한 물리값을 SDCM으로 전송하고, SDCM은 이 데이터를 관리하여 DB에 저장한다. 웹애플은 DB의 데이터를 이용하여 사용자에게 서비스를 제공하게 된다. 아래의 그림은 전체시스템 흐름도를 나타낸다.


모니터링 개념도


시스템 구성도


하드웨어 구성도


포털 시스템

앞으로는 저비용 고효율 구조의 지능형 무인 실시간의 유비쿼터스 모니터링 체계로의 전환이 필요한 실정이다. 특히 우리나라는 세계 최고 수준의 초고속 정보통신 인프라(GIS, 초고속 통신인프라)를 구축하고 있어 사회기반시설 및 건축물의 유비쿼터스 관련기술 활용이 매우 유리한 여건에 있다. 유비쿼터스 컴퓨팅 환경은 모든 시설물에 대한 안전도와 노후 상태 등을 실시간으로 수집·전달 가능하게 함으로써, 시설물의 안전관리, 재해·재난 대응 분야에 혁신적인 기술발전을 선도할 것으로 예상된다.

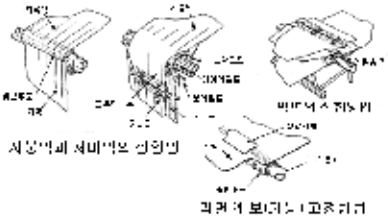
(7) 바. 대공간 건축물 통합유지관리 지침서

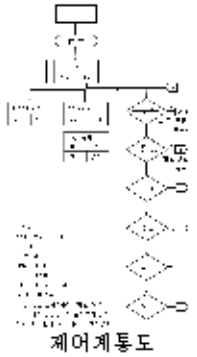
대공간 건축물의 유지관리를 위한 계측시스템의 개발은 관련한 전후방 산업인 센서기술, 로봇기술, 정보통신기술 등과 밀접한 관련이 있으며, 사업화 성공 후 기술적 수요가 폭증할 경우 그 기술적 파급효과는 지대하며, 특히 월드컵스타디움, 막구조물 등과 같이 대변형 발생이 빈번한 구조물의 유지관리 기술 개발이라는 관점에서 기술의 파급효과는 매우 크다. 또한 순수한 국내기술로 개발된 계측시스템 등은 해외선진국의 기술경쟁력을 높일 수 있는 방안이다. 따라서 본연구는 초대형 막구조물의 유지 및 보수 관련 기술의 집대성과 현장적용을 목표로 하였으며, 센서패기지 기술을 함께 개발하였다. 여기서, 국내에 존재하지 않았던 대공간 건축물의 유지관리 기술의 확립과, 건전성 모니터링을 비롯한 친환경적 측면 및 유지관리보수기술 등을 집대성하여 대공간 건축물 유지관리 기술 지침을 제안하며, 다음에 나열한 항목으로 통합유지관리 지침을 제시한다.

제1장. 막구조 건축물 유지관리 및 진단 지침
제2장 막체의 보수기술 지침
제3장 강제부재의 부수기술 지침
제4장 공기막구조의 설비 및 유지관리 지침
제5장 우수차단장치 및 수밀성능 유지관리 지침


막체의 열화도 판정 개요

연성구조물인 막구조 건축물 유지관리 및 진단 지침은 모두 4편으로 구성되며, 총칙, 유지보전 계획, 유지보전 및 점검주기 그리고 유지보전의 평가방법에 대해서 정리되어 있고, 막체의 열화진단 지침 및 해설과 강제부재에 대한 열화진단 지침에 대한 내용도 모두 포함되어 있다. 여기서 말하는 막체 및 강제부재의 의미는 보강벨트, 탈락방지용 핀기구, 로프류 및 실링고무, 커버고무 등 및 무처리 강재, 도장한 도장강재, 아연도금강재, 도료에 의한 도장 및 아연도금 강재 등을 대상으로 하며, 건축물의 유지관리 및 보전은, 그 건물의 내구 · 내용계획에서 결정지을 수 있다. 일반적으로 내구설계 전체적인 흐름은 건물 종별에 따라, 목표내용년한을 설정하고, 이에 합당한 재료, 부재, 방식시스템 선정, 용도 등에 따른 외력 등을 설계한다. 이 방법으로 부적합한 것이 있으면 부재, 시스템, 사양 등을 변경 수정한다. 그 후 시공/유지관리등급을 선정한 후 계획내용연수를 구한다.




제어계통도

건축 구조재료로 사용되는 막체의 보수기술에 관한 지침은 모두 3편으로 구성되며, 전체적으로 볼 때, 현장에서 보수하는 방법과 공장에서 보수하는 방법을 고려할 수 있으며, 통상 막체 등의 보수는 현장에서 실시되는 것이 많다. 그러나 막체 등을 현장에서 공장으로 옮겨 실시하는 경우에는 열화 정도가 크거나 발생 부위가 많을 때 고려되며, sealing 봉제의 보수의 경우나, 고주파용착에 의한 보수의 요구, 보수후 외관상 문제 야기시가 포함된다.

강제부재의 보수기술 지침에서는 강제부재의 보수기술 지침 및 해설과 강제 부재의 보수공법 선정에 관한 편만을 수록하고 있으며, 막과 같은 연성재료와는 달리 다른 건축물에서도 비교적 많이 언급되는 내용들이다. 보수대상 내, 소재가 강재로 이것을 도장에 의해 보수하는 것도 포함되며, 몸체 이외에 강제의 난간, 옥외계단 등에도 적용할 수 있도록, 배려하고 있다.


메트로 돔 폭설피해

공기막구조의 설비 및 유지관리 지침은 총칙, 공기막구조의 설비, 유지관리 및 참고자료로 모두 4편으로 구성하여 공기지지방식의 막에 대한 전반적인 계획과 유지 및 관리의 내용을 통합하였다. 여기서, 공기막구조의 설비 기본사항은 가압송풍설비의 기능, 성능 및 조작이 쉬워야 하며, 가압장치 및 내압장치제어의 신뢰성 및 정전 시에도 내압유지가 가능하여야 하는 설비조건 등이 있다. 또한 외적환경에 충분한 기능을 발휘하고, 내압컨트롤이 가능한 가압설비로 할 것과 외래노이즈에 있어서 제어장치가 오작동하지 않는 가압설비로 할 것 등의 조건을 제시하고 있다. 공기막구조 내에 설치한 각종 설비에 관해서는 가압에 의한 불편함이 생기지 않도록 할 것을 배려하고 있다.

마지막으로 우수차단장치 및 수밀성능 유지관리 지침은 모두 4편으로 구성되며, 총칙, 우수차단장치 계획, 막재료 수밀성능 평가 및 수밀성능 유지관리 점검 지침 등으로, 막재료의 수밀성능 평가방법과 점검 매뉴얼을 제안한다.

(8) 3.4.3 Pilot Project

(9) 가. 대공간 구조물 구조설계 절차서 제안

(가) 개념 설계(Concept Design)

구조 설계에서, 특히 대공간의 형성적인 측면에서 개념(Concept)이라는 말은 구조물의 형상에 대한 방향이라고 할 수 있다. 건축물의 용도, 역할, 주변 상황에 대한 분석들이 모두 이 속에 포함되어 있다. 설계자들은 이 개념을 완성하는 것이 설계의 최종 목표라고도 한다.

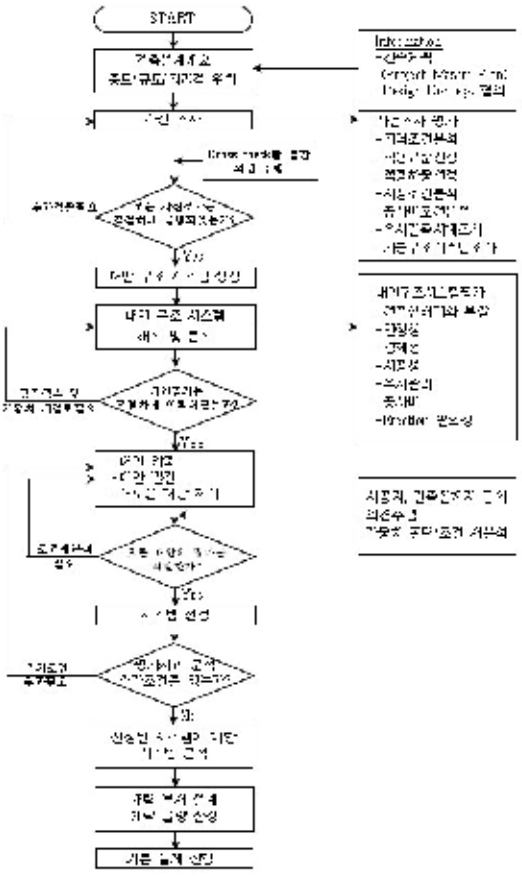
초기 개념 설계의 완성은 건축미의 바탕위에 경제성, 시공성, 공사기간의 예측을 통해 더욱 완성도가 커지게 된다. 구조 해석이나 모형 제작 등을 통해 위의 요소들을 관계자들(건축 설계자, 구조 설계자, 시공자 등)이 협의 및 분석을 통해 최적안을 만들기 위한 범위를 좁혀감이 개념 설계의 완성이라고 할 수 있다.

(나) 계획 설계(Schematic Design)

계획 설계는 개념 설계를 발전시키는 단계라고 할 수 있다. 계획 설계에서 주로 진행해야 하는 내용들이 전체 건축물의 기본 토대를 완성하는 것이라고 할 수 있다. 여러 가지 대안 비교 분석을 통한 구조 시스템의 결정, 적용 구조 재료 및 강도에 대한 확정, 주요 부재의 크기(Volume)의 결정과 설계, 개략 물량 산정까지를 계획 설계에서 진행한다. 또한 풍동실험의 실시에 대한 지원도 포함되어야 한다. 계획 설계에서는 건축물의 기본 골격을 완성하고, 시스템을 결정하는 단계로 정의할 수 있다.

(다) 기본 설계(Design Development) 및 실시 설계(Construction Documents)

기본 설계와 실시 설계에 대한 주요 업무 내용은 기존과 별반 다르지 않다. 다만, 실시 설계의 비중에 대해서는 크게 갈 것인지 기본설계의 비중을 크게 갈 것인지에 대해서는 추가 논의가 필요할 것이고, 본 연구의 방향과는 연계성이 없으므로 제외하기로 한다.



(라) 개념, 계획 설계를 위한 절차서

실무 종사자들의 설문에도 나타나 있는 바와 같이 설계 절차(Design Procedure)를 만드는 것에 대한 필요성은 인지되고 있는 현실이다. 설계 절차는 설계 오류의 최소화, 최적의 시스템 선정에 큰 역할을 할 것이다.

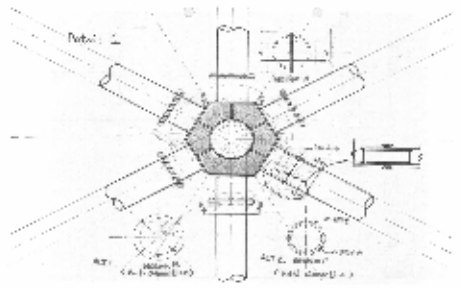
여기서는 개념 설계 단계와 계획 설계 단계에 대한 구조 설계 절차를 생성하고, 각각의 절차에 따른 합당한 근거를 만들기 위한 평가항목에 대한 내용을 제안한다. 물론 여기서의 제안이 대형 구조물 설계에 대한 전체를 지원하기란 무리일 것이고, 각각의 조건에 따라 추가되거나 삭제되는 항목이 있을 수 있을 것이다. 하지만, 초기 설계에서 이러한 단계는 실무에서 유용한 자료로 실무자들에게 도움을 줄 수 있을 것으로 기대한다. 또한 초기 설계의 최적 설계안 도출이라는 측면에서 자료의 취합 및 각 전문 관계자들의 협의 및 결론에도 역할을 할 수 있을 것이다. 그림에 나타난 대형 구조물 구조설계 절차서(Design Procedure)는 건축 구조 설계 실무자들을 위한 내용임을 밝혀둔다.

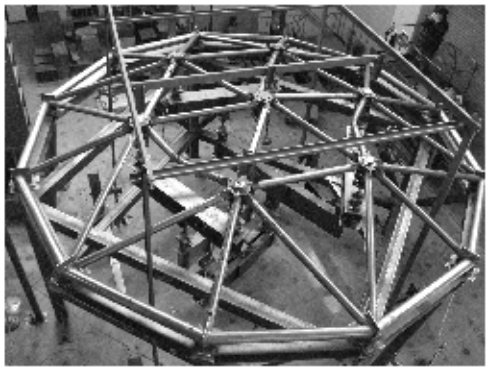
(11)나. Single Layer Dome 구조

Pilot Project의 2차년도에는 형태 저항형 구조물의 특징을 가장 잘 드러낼 수 있는 단층 레이어 돔을 선정하여 축소 스케일 모형실험을 진행하였다.

실험체의 크기 및 형상에 대한 부분은 현재 국내, 국제적으로 진행되었던 실험들에 관한 정보 수집을 진행하였고, 본 연구의 조건에 적합한 실험체와 실험 방법을 선정하여 진행하였다. 특히 시공성과 제작 편이성을 고려한 단층 레이어 돔에 적용 가능한 상세를 개발하여 연구단의 접합부 세세부와 연계하여 진행하였다. 그림은 초기 접합부 선정 대안 검토시 제안된 접합부 스케치 및 실제 사진이다. 본 연구 과제에는 새롭게 제안된 접합부를 가진 단층 레이어 돔의 비탄성 거동을 실험적으로 분석하였다. 구조적인 성능과 시공성을 모두 만족시키기 위해서 제안된 새로운 접합부를 적용하여 강관으로 구성된 스팬 7m의 축소 실험모델을 제작하였으며, 하중 전이장치를 이용하여 각 절점에 균일한 하중이 가력되는 정적 재하실험을 수행하였다. 최대 가력하중은 설계하중의 약 1.6배였으며, 일부 부재에서 압축 항복점을 넘어 비탄성 좌굴이 발생하였다. 좌굴 발생 이후에는 가력장치가 허용할 수 있는 변위까지 실험을 수행하였으며, 실험을 통해서 구해진 래티스 돔의 거동을 구조설계의 관점에서 분석하였다.







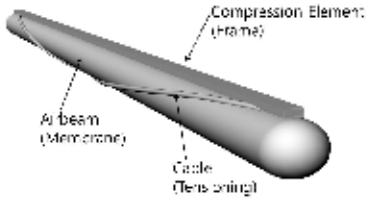
전체하중에 대한 정점 수직 변위 관계에서 시험체는 전체하중이 700kN에서 강성이 저하가 됨을 알 수 있다. 첫 번째 부재 좌굴은 전체 하중 1,120kN, 정점 변위 53 mm에서 발생하였고, 두 번째 부재 좌굴은 전체 하중 554kN, 정점 변위 169 mm에서 발생하였다. 실험결과와 해석결과와의 비교를 위하여 접합부의 절점은 강접합으로, 지점은 수평의 방사방향에 롤러로서 해석하였다. 비교 결과, 약 700kN까지 상당히 일치하는 결과를 얻을 수 있었다. 즉 위에 서술한 비교적 단순한 가정에 의한 해석으로도 본 시험체와 같은 접합부를 가진 단층 래티스 돔의 경우에는 충분하고 타당한 결과를 얻을 수 있는 것을 알 수 있었다. 하중 단계별로 실험결과와 해석결과를 비교한 결과, 700kN까지는 그 결과값의 차이가 크지 않으나, 1,000kN에서는 상당한 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 부재가 소성화로 접어들면서 단층 래티스 돔의 강성이 저하되는 현상을 명확히 보여주고 있다. 전체하중과 정점이 아닌, 그 주변 절점의 수직 변위 관계에서는 첫 번째 부재좌굴이 일어나기 전에 서로 거의 유사한 값을 나타내고 있음을 볼 수 있다. 이는 이 실험에서 의도한 대로 하중 전이 보가 하중 분배를 균등하게 잘 하였음을 나타낸다. 하중단계별 주변 절점의 변위(mm)를 살펴보면 첫 번째 부재 좌굴 전까지 주변 절점의 변위는 거의 유사한 것을 알 수 있다.

그러나 탄성해석만으로는 부재의 비탄성좌굴하중을 얻을 수 없어 비탄성좌굴해석과 같은 정밀해석에 대한 연구가 필요하다. 따라서 비선형 비탄성 해석결과, 트러스(88N)와 프레임(88N)의 좌굴하중 값은 비선형 해석과 같았으며 오차 또한 마찬가지로 실험 값(114N)과 29% 와 25%의 값을 보였다. 하지만 좌굴 이후의 거동에서 해석에 비해 개선되었으며 특히 프레임에서 확연하였다. 또한 아바쿠스의 기능을 이용한 트러스와 프레임의 항복응력 도달 전후의 변형도를 비교한 그림에서 부재좌굴을 고려하지 않은 트러스는 부재의 축력만을 받는 데에 비해 프레임은 국부좌굴로 인한 부재의 휨이 눈에 띄게 발생하였으며 비대칭적인 변형도를 보였다.

(13)다. 텐셔닝 에어빔 시스템 I(TABS I) + Pilot Project 기본 설계

(가) 텐셔닝 에어빔 시스템(TABS)

텐셔닝 에어빔 시스템(Tensioning Air Beam System: 이하 TABS)은 공기막, 케이블 및 프레임으로 구성된 하이브리드 시스템으로서 공기막 구조와 텐셔닝 구조를 결합한 시스템이다. 이 시스템은 경량인 동시에 공기막 구조의 재하성능을 크게 개선할 수 있는 시스템이며, 시공성 또한 뛰어난 점을 장점으로 들 수 있다. 이 시스템을 구성하는 기본 구조재인 공기막과 프레임부재 등, 개부재 각각의 성능을 극대화 시킬 수 있는 시스템으로, 구조적 측면 및 경제적 측면에서 매우 유리한 시스템이라고 할 수 있다. TABS는 그림에 나타낸 것과 같이 공기막과 압축재로 표현된 각형강관 부재, 공기막을 감싸는 케이블로 구성된다.



TABS 구조는 언더텐션(Under Tension) 트러스 보와 비교함으로서 보다 쉽게 이해할 수 있다. 두 구조는 유사한 요소로 구성되어 있지만 트러스의 수직재(Strut) 역할을 공기 막이 대체한다는 것과 공기막이 보의 길이방향으로 연속적으로 지지되어 하중에 저항하는 구조이다.

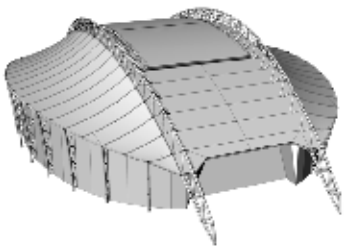


TABS의 재하능력은 공기막 보의 압력에 비례하며 실제 단부의 경계조건, 공기막 보와 케이블의 밀착정도 및 공기막 보의 압력정도에 따라 TABS의 구조성능은 다른 양상을 나타낼 것으로 사료되므로, 구조실험을 통한 사용성 평가가 필요할 것으로 판단된다. 따라서 TABS의 구조성능파악을 위해, 10m 스팬에 대한 구조실험을 실시하였다. 실험변수는 공기막 보의 압력으로서, 100, 200, 400, 600mbar의 압력에 대해 실험을 실시하였다. 압력 실험 결과, 가력점의 하중-변위관계에서 공기막 보의 압력이 증가함에 따라 초기강성 및 최대하중이 비례적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한 초기선형구간에서의 하중은 TABS를 구성하는 주요부재 각형강관과 공기막 보, 개개요소의 독립적인 구조성능을 선형결합 시킨 값과 유사하게 나타났으며, 최대하중의 경우, 각형강관과 공기막 보의 개개의 구조성능보다 TABS의 성능이 10배 이상 효율적인 것을 알 수 있다. 해당압력에 대한 하중-변위관계를 실험값을 정밀해석 결과와 비교한 결과, 200mabr 및 400mbar의 해석결과는 실험결과와 거동이 유사하게 나타나 해석모델의 유효성 또한 검증하였다. 실제 사용성 평가를 위해 차량재하실험을 실시하였다. 차량재하에 따른 TABS의 변형은 매우 미비한 것으로 나타났으며, 교량설치시간은 약 30분으로서 TABS의 우수한 시공성을 확인할 수 있었으며, 이러한 결과로부터 TABS는 구조적, 경제적으로 매우 유효한 구조시스템으로 판단된다.

(나) 30M Pilot Project 기본설계

본 연구단의 최종 목표는 300m 대공간 건축물 건설의 요소기술을 축적하고 그 내용을 확인하는데 있다. 이에 따라 1/10 수준의 축소 모형의 설계 및 시공을 통해 이러한 요소 기술의 확인과 실제 건물의 건축을 통한 시공가능성을 확인한다. 건축설계는 연구단 Pilot Project로서의 실험뿐만 아니라 실험 및 관측이 종료된 이후 실제 건축물로 전용될 수 있는 가능성을 염두에 두고 외부 형태의 심미적 측면과 내부 공간의 기능성을 함께 고려하여 진행하였다.

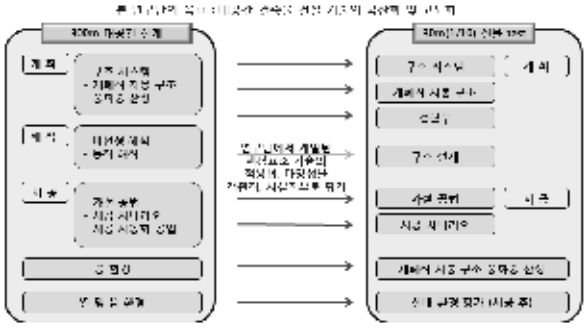




(15)라. Pilot Project 설계 + 텐셔닝 에어빔 시스템Ⅱ(TABSⅡ)

(가) Pilot Project 설계

Pilot Project는 본 연구단에서 도출된 연구 결과, 즉 대공간 구조물의 핵심 요소 기술 및 응용 수준의 단위기술 개발 결과를 이용하여 요소기술의 실용화 연구를 목적으로 한다. 핵심 요소 기술들을 1/10 축소 스케일 Pilot Project로 검증하기 위하여 아래 그림과 같은 프로세스를 활용하여 프로젝트를 진행하였다. 또한 Pilot Project로 선정된 건물은 본 연구가 완료된 이후 실제 건물로서 사용을 염두에 둔 설계이기 때문에 형태적 관점과 실용적 관점을 모두 고려하여 건축 계획을 실시하였다. 우선 국내 · 국외 유사 사례 분석을 통해 해안 설계 사무소, 1-2세세부 (박선우 교수), C.S구조엔지니어링 등 연구단의 협의를 통해 본 연구단의 핵심 요소 기술을 검증하기 위한 최적의 구조 시스템을 선정하였다. 최종 선정된 구조 시스템을 바탕으로 해안 건축 설계사무소에서 최종 건축 설계를 실시하였으며 C.S구조엔지니어링에서 구조물의 안전성 검토와 구조 설계를 실시하였다. 또한 1/10 축소 스케일 Pilot Project를 실제 시공하면서 Erection 공법과 케이블 재긴장 장치 등의 요소 기술을 검증 할 계획이며 준공 이후, 무선 모니터링, 막장력 측정 등의 요소 기술을 검증 할 계획이다.

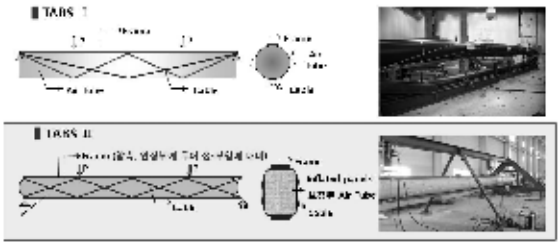






(나) 텐셔닝 에어빔 시스템Ⅱ(TABSⅡ)

3차년도 TABSⅠ의 실험 및 해석에 있어 과도한 연성거동을 하며, 사용성 확보를 위해 높은 공기압이 필요하며 풍하중과 같은 반복하중에 대한 구조성능이 취약하다는 결론이 도출되었다. 따라서 4차년도는 이와 같은 보완사항을 바탕으로 TABSⅠ을 개선하여 그림과 같은 TABSⅡ를 개발하였다. TABSⅡ는 기존의 압축부에 있던 각형강관 부재를 압축부, 인장부에 적용하였고 경계조건을 핀-핀지지에서 핀-롤러 단순지지로 변경하였으며 막 구조의 재료막 내부 가로방향에 섬유(yarn)로 보강하여 공기막 구조의 가로방향 강성을 확보함으로서 공기막 자체의 강성이 증가하고 낮은 공기압으로 높은 구조성능을 발휘하며, 풍하중과 같은 반복하중에 대응이 가능한 장점이 있다. 이 연구에서는 공기막의 압력과 케이블의 초기장력에 따른 TABSⅡ의 구조성능 파악을 목적으로, 다양한 압력조건과 초기장력 조건을 변수로 하여 TABSⅡ의 구조실험 및 해석을 실시하였다. 그 결과 개발된 시스템에 대한 구조적인 장점을 고찰하였다. 또한 3차년도에서 수행하였던TABSⅠ의 구조성능과 비교하여 TABSⅡ의 장점도 실험, 해석결과로부터 도출하였다. TABSⅠ과 TABSⅡ의 해석 결과를 아래의 그림과 같이 비교하면,개발된 시스템의 구조성능은 TABSⅠ보다 50%에서 100%정도 월등히 높음을 확인할 수 있다. 따라서 TABSⅠ의 보완사항을 개선하고자 개발된 시스템인 TABSⅡ는 구조성능이 보다 향상되었다는 결론을 도출할 수 있다.



(17)마. Pilot Project 시공

대공간 건축물의 핵심기술기반을 구축하기 위해서 크게 4가지 분야로(구조시스템 개발 및 경제성 분석, 실용화 방안 연구, 시공 및 친환경 설계 기법 개발, 비선형해석 및 구조설계기법 개발) 연구를 진행 중이며 각 연구 중점 사항들을 연계하여 최종적 성과물로 300m 스팬의 대공간 구조물 건설 기술 실현을 계획하고 있다. 그러나 본 연구단의 규모로서 300m 대공간 구조물을 실제 건설 한다는 것은 현실적으로 불가능 하다는 판단 하에 관련 요소기술의 개발 수준을 정량적, 사실적으로 평가 할 수 있는 Pilot Project 시스템을 도입하였다.

Pilot Project를 수행하는 과정에서 300m 스팬의 대공간 구조물을 1/10 스케일로 축소하여 실제 모델을 제작하고, 그 결과를 이용하여 타 세부 기관의 연구 결과를 실질적으로 평가할 계획이다. 1/10 축소 스케일 Pilot Project의 계획 및 시공을 진행하면서 본 연구단의 연구 결과들을 적용시켜 핵심 요소 기술의 적용성 및 타당성을 실 구조물에 구축함으로써 핵심 요소 기술을 객관적 사실적으로 평가 할 수 있다. 1/10 스케일 축소한 Pilot Project(스팬 30M)는 천안 한국기술교육대학교의 HRD 홍보관 신축공사로서 개요는 아래와 같다.

- 사업명 : 한국기술교육대학교 HRD 홍보관 신축공사
- 대상지 : 충남 천안시 동남구 병천면 충절로 1800
- 지역 / 지구 : 계획관리지역 (대학)
- 대지 면적 : 378,912m²
- 건축 면적 : 1,007.23m²
- 연면적 : 901.23m²
- 용　도 : 문화 및 집회시설 (전시장)
- 층수 / 높이 : 지상1층 / 12.55m
- 구조 형식 : 철골조
- 적용 기준 : 건축구조설계기준 (2005), 강구조한계상태설계기준 (1998)




또한 실험뿐만 아니라 실험 및 관측이 종료된 이후 실제 건축물로 전용될 수 있는 가능성을 염두에 두고 외부 형태의 심미적 측면과 내구 공간의 기능성을 함께 고려하여 진행하였다.

Pilot Project는 300m 경간 대공간 구조물의 건설기술 실현 가능성을 검증하기 위한 30m 경간의 실제 구조물 건축을 목적으로 하며, 이에 따른 설계전략은 구조시스템 선정을 포함한 구조설계방법, 시공방법 및 사후관리 등, 대공간 구조물 구축에 필요한 모든 요소기술을 포함시키는 것을 기본적인 전략으로 한다. 또한 실용성 및 특수성으로 표현될 수 있는 당 프로젝트의 요소기술 즉 연구단에서 Pilot Project에서 고려한 기본적인 전략과 적용한 핵심 요소기술은 다음과 같다.

○계획부문
- -구조시스템 : 킬아치(Keel Arch) 시스템
- -개폐식 지붕구조 : 킬아치 구조에 적합한 슬라이딩 방식
- -연성구조물 풍하중 산정 : 개폐식 지붕구조 및 막 구조에 대한 풍하중 산정

○해석부문
- -비선형해석 : 구조시스템 및 주요부재의 안정성을 위한 재료, 기하비선형 해석
- -동적해석 : 상부구조 및 하부구조의 질량비에 따른 구조물의 동적거동해석

○시공부문
- -가설공법 : 구조시스템에 따른 지붕구조의 가설공법
- -시공 중 해석 : 가설공법에 따른 시공 중 안정성 해석

○사후관리 및 실내 환경평가
- -풍환경, 열환경 및 음환경 평가 : 시공 후 실내 환경평가
- -케이블 및 막의 무선모니터링 : 시공 후 주요 구조체에 대한 헬스모니터링

○핵심 요소 기술
- -케이블 넷 구조: 막과 케이블 구조를 적극적으로 활용
- -텐셔닝 에어빔 시스템: 지붕구조 중, 개폐부의 경량화를 목적으로 적용
- -가설공법: 킬아치 시스템에 따른 리프트 업(Lift up)공법 적용 및 시공 중 안정해석
- -개폐식 구조 풍하중 실험: 연성구조물 및 개폐식 구조에 대한 풍하중 산정
- -유압식 재긴장 소켓 : 케이블의 시공 후, 장력측정 및 인장력의 재도입 가능

(18)바. 실용화 요소기술 검증

(가) 실용화 요소기술 검증

5차년도에 준공된 30M 스팬 Pilot Project 대상구조물의 안정성 검토 및 유지관리를 위하여 지붕구조에 적용된 연성구조물인 막과 케이블의 장력을 준공 후 상시로 측정하였다. 먼저 30M 스팬 Pilot Project 대상구조물인 한국기술교육대학교 HRD홍보관의 지붕구조에 적용된 막재의 막장력을 측정하기 위한 측정사진은 그림과 같다. 사용된 막재는 아래와 같은 특성을 가지는 SOLUS-1100이며, 온도에 민감한 재료이기 때문에 측정은 겨울인 2011년 1월과 여름인 7월에 측정하였다. 측정 결과, 측정값는 모두 안전치 이내에 들어옴으로서 겨울 및 태풍이 지나간 여름에도 모두 막장력 측면에서 안전하다고 할 수 있다.

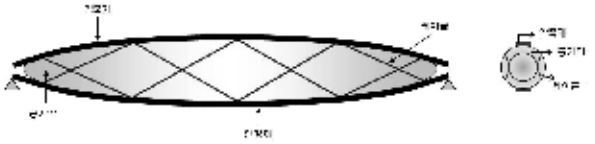


케이블에 도입된 장력은 시공 중이나 준공 후 발생하는 장력의 재분배에 따른 장력 분포도 안정성 확보를 위해 매우 중요하며, 사후 유지관리 차원에서 상시로 장력 측정을 수행하여야 한다. 따라서 장력에 대한 경보 알람 시 엔지니어가 필요한 장력을 간편하게 도입할 수 있는 유압식 재긴장 소켓 및 무선 모니터링 시스템을 아래 그림과 같이 Catenary Wing 부의 케이블에 적용하였다. 이는 장력 측정 및 정확한 조절이 가능하고, 기존 방법에 비해 뛰어난 시공성과 인력 및 시간 단축이 가능한 장점을 가지고 있다. 또한 데이터 저장 및 분석 프로그램을 통한 장력의 격년 변화 해석이 가능한 장점이 있다. 사용된 케이블은 구조용 Strand Rope 6XFi(25)+IWRC로서 밸리 케이블에는 ϕ25, 럿지 케이블에는 ϕ20 크기로 설계하였다. 케이블은 원칙적으로 인장력에만 저항하는 선형 탄성부재로 형상을 유지하기 위해 케이블의 초기장력 분포와 밀접한 관계가 있기 때문에 구조해석 및 시공 전에는 반드시 초기 형상해석을 수행하여야 한다. 초기형상 해석 결과, 밸리 케이블 대 럿지 케이블의 비가 4:1로 산정되어 시공 시 초기장력은 80kN, 20kN로 설정하였다. 또한 월별 케이블 장력 측정 결과, 모두 케이블의 장기 및 단기 허용 인장력 내에 들어옴으로써 안정성을 확인하였다. 측정된 케이블 장력은 밸리 케이블과 럿지 케이블은 9:1의 일정비율을 유지하며 분포함을 알 수 있다.



(나) 텐셔닝 에어빔 시스템Ⅲ(TABSⅢ)

6차년도에는 TABSⅡ와 시스템이 비슷하지만 공기막이 베흘림 형상 즉, 방추 형상인 TABSⅢ를 개발하였다. 이 시스템은 모멘트가 큰 중앙부에 단면 2차모멘트를 크게 하여 구조성능 면에서 효율적인 시스템이라 할 수 있다. 구조성능 실험 결과, 공기막 보의 압력 및 공기막의 중앙부 지름이 증가함에 따라 초기강성 및 최대하중이 비례적으로 증가함을 확인할 수 있다. 또한 시스템이 내력은 아래의 그림과 같이 각관의 좌굴이 발생하는 시점에서 발생하였다. 또한 해석 결과와 실험 결과를 비교하면 초기 강성 및 최대 하중이 유사한 거동을 보여 개발된 해석모델의 유효성을 입증하였으며, TABS에 대한 구조 설계시 즉각 적용이 가능하다. 또한 4차년도의 TABSⅡ와 TABSⅢ의 구조성능 비교 결과, 같은 조건에서 베흘림 형상의 TABSⅢ의 구조성능이 강성 면에서 공기압이 200mbar에서는 2배 이상, 공기압이 400mbar인 경우 3배 정도 월등히 뛰어남을 확인할 수 있다.



(다) 300M Pilot Project SD보고서 작성

연구단의 최종목표를 달성하고자 300M 스팬 Pilot Project의 구조설계 보고서(SD Report)를 작성하였다. 이 보고서를 통하여 대공간 구조물의 구조설계 프로세스가 정립된다면, 향후 건설된 대공간 구조물들의 지침이 될 수 있으며 나아가 본 연구단의 최종목표인 국내 자체 기반기술 개발로 인한 국산화 및 고도화가 가능하리라 사료된다. [보고서는 별첨자료 참고]



가. 3.5 결론 및 연구실적

(1) 3.5.1 과제별 결론

가) 표 3.1 과제별 결론

1) 세세부		2) 내 용
3) 1세부	4) 조시스템	5) 대공간구조물의 구조시스템에 대한 연구내용에 대한 결과를 통하여 연차별로 소결론을 기술하였다. 1차년도에는 개폐식 구조를 포함한 대공간 구조시스템별 특성 분석을 목표로 연구를 진행하였다. 구조재의 도입과 구조형식의 전개에 따른 대공간 건축의 변화양상을 역사적으로 고찰하였으며, 기본개념에 따라 구조시스템을 정의하고 구조형식별로 분류하였다. 또한 개폐식 구조에서 특유한 문제가 되는 개폐형식을 체계적으로 조사하고 그 결과를 제시하였다. 2차년도에는 구조물 전반적인 모델링 기법의 유형을 분류하고, 대공간 건축물의 설계에서 시공에 이르기까지 일관하는 합리성을 추구하는 방법으로서 모델링의 적용을 고려하였다. 이를 위해 1차년도 연구에서 대공간 건축물에 적절한 것으로 제안된 구조형식에 대한 모델 제작기법을 체계적으로 구축하였다. 대공간구조물의 구조시스템을 모델링하기 위한 원천기술 중의 하나인 구조최적화 요소기술을 확보하기 위한 장기적인 목적으로 구조최적화 연구 분야에서 선행된 최적화 이론과 수치해석기법을 분석하고 그 결과를 제시하였다. 3차년도에는 대공간 건축물의 구현과정에서 적용되고 있는 축소모델실험의 특성을 조사하고, 적용방식을 분석하였다. 또한 이를 기준으로 축소모델실험의 유형을 분류하였다. 축소모델실험 유형별로 실험에 필요한 사항들의 단계별 조건과 요구사항들을 정식화하였다. 또한 대공간 구조물의 크기/형상최적화 기법에 대한 연구를 위해 문헌조사를 통하여 대공간구조물의 구조시스템 분석하고 case 구조물 선정하였다. 대공간 구조물의 크기/형상최적화를 위한 정식화 방안으로 유전알고리즘과 수학적 프로그래밍기법을 분석하였으며 크기/형상 최적화 기법을 case 실구조물에 적용하고 대안을 제시하였다. 4차년도에는 대공간 구조물의 위상최적화기법을 개발하기 위하여 위상최적화의 검색기법, 효

		율적인 재료모델, 위상최적화 정식화 그리고 대공간구조물에 대한 위상최적화기법 적용사례 등을 연구하고 그 결과를 기술하였다. 또한 대공간구조시스템에 대한 위상최적화정식화를 제시하기 위하여 진화론적 기법인 제거법을 개선한 CATO알고리즘을 바탕으로 하는 3차원 위상최적화기법을 제시하였다. 제시된 CATO알고리즘을 바탕으로 한 위상최적화정식화는 대공간 구조물에 적용성이 뛰어나고 실용화가 쉬운 SIMP계열의 3차원 인공재료모델을 도입하였으며 위상최적화를 수행하기 위하여 8절점고체요소를 도입하였다. 종료조건은 네 가지를 도입하였으며 제시된 위상최적화의 정식화를 검증하기 위해 다양한 벤치마크 테스트를 수행하였다. 또한 본 연구를 통하여 제시된 위상최적화기법을 파일럿 프로젝트에 적용하여 아치형트러스의 형태를 제공하였고 다양한 대공간 구조물에 위상최적화를 적용하고 그 결과를 적용사례로 제공하였다. 5차년도에는 과학전반과 공학 분야에서 이용되고 있는 morphogenesis모델을 대공간 구조물의 설계최적화 프로세스에 도입하였다. 대공간구조물에 적용 가능한 morphogenesis모델과 최적화 요소기술을 선정하고 적용성이 우수한 morphogenesis모델을 최적화 요소기술과 연계하여 대공간구조물의 설계최적화를 수행하였다. 또한 파일롯 프로젝트와 연관된 1/6축소모델 아치형트러스를 형성하는데 내력밀도법과 morphogenesis모델을 각각 적용하였으며 이렇게 생성된 아치형 트러스에 크기최적화 알고리즘을 적용하여 부재크기를 결정하는 일련의 과정을 제시하였다. 또한 본 연구를 통하여 제시된 morphogenesis기법이 가까운 미래에 설계업무에 이용될 수 있도록 morphogenesis모델이 대공간구조물의 설계에 이용될 수 있는 사례를 제시하였다. 6차년도에는 현재 국제적으로 활발히 연구가 시작되고 있는 통합설계최적화분야에 대한 연구를 수행하였다. 먼저 FDM과 연계된 morphogenesis기법을 통한 최적형태 검색에 대한 연구를 완료하였으며 최적형태 자동생성기법에 대한 연구를 기하학적인 모델과 5차년도의 연구주제인 morphogenesis기법을 연계하여 수행하였다. 이

		는 건축설계와 건축구조 분야에 대한 자연스러운 연계를 제공할 수 있고 선진국 형태의 개념설계방식을 구축하는데도 도움이 될 것으로 판단된다. 또한 ACO모델을 이용하여 최적형태를 검색하는 기법에 대해 연구도 수행하였다. 마지막으로 4,5차년도에 진행하였던 위상최적화의 요소기술과 morphogenesis기법을 연계할 수 있는 통합설계 최적화에 대한 연구를 수행하였다. 또한 이를 바탕으로 공학엔지니어가 실무에서 참고할 수 있는 통합설계최적화에 대한 간단한 가이드라인을 제시하였다.
	6) 접합부	대공간 구조시스템의 접합부 개발을 목표로 1,2차년도는 강성구조 접합부인 볼조인트 접합부와 용접접합부를 연구하였으며 3차년도 부터는 연성구조 접합부인 케이블 접합부와 막접부를 연구하였다. 1차년도는 볼 조인트 접합부의 거동 특성 분석을 목표로 연구를 진행하였다. 에너지흡수형 볼트에 대한 유한요소해석 및 구조성능실험결과, M20 볼트는 핀부를 22mm로 하고 감소축부를 18mm이하로 설계하고, M24 볼트는 핀부를 26mm로 하고 감소축부를 22mm이하로 설계하면 내력 및 강성의 저하 없이 변형 능력의 극대화가 가능하였다. 향후 대구경 볼트와 볼의 제조관련 단조기술 확보가 필요한 것으로 판단된다. 2차년도는 단층래티스 돔의 용접 접합부의 거동 특성 분석을 목표로 용접 접합부의 사례조사를 통해 나고야돔을 플로토모델로 설정하고 비선형 유한요소해석을 통한 국부거동 예측 및 이를 통한 영향인자 도출 등의 변수해석을 통하여 최적형상 개발하였다. 그리고 축소모형 구조성능 실험을 통한 접합부의 구조적 거동을 규명하였으며 최종적으로 성능이 개선된 용접접합부를 제안하였다. 3차년도는 심각한 하중에 의해 케이블 구조물에서 발생되는 장력손실에 대하여 유압을 이용한 재긴장의 기능을 갖는 접합부 개발을 목표로 효과적으로 재긴장 할 수 있는 유압식 볼팅 접합부 시스템을 개발하였으며 개발된 케이블 접합부 시스템의 극한응력실험과 유한요소해석결과를 통해 안전성을 검토하였다. 개발된 접합부 유압잭에 의한 정확한 장력조절이 및 추가적인 가설장비 없이 간편한 재긴장이 가능하고 기존방식에 비해 경제성, 안정성, 공기 및 인력단축이 가능하다. 또한 유압을 제거하고 기구적으로 고정이 가능해 오일누수의 문제점을 해결하였다. 4차년도는 개발된 케이블 재긴장 접합부 최적화 연구를 통하여 기존 모델 대비 31%수준으로 경량화 하였다. 또한 재긴장 시스템과 연계한 무선모니터링 시스템을 개발하여 케이블 구조의 장력감시 및 경보알람이 가능하

		고 저장된 데이터의 분석을 통해 장력의 경년 변화 해석이 가능해짐으로 케이블 구조물의 통합 유지관리 시스템을 구축하였다. 그리고 막구조에서 접합부의 특성을 확인하기위하여 막구조에 존재하는 접합부를 유형별로 분석하였으며, 사례 분석을 통하여 현재 사용되고 있는 접합부 디테일과 사례를 분석하였으며, 접합부의 파손사례를 조사하였다. 또한 막면 접합부의 역학적 거동 특성을 분석하기 위하여 KS규준에 의거 인장 실험을 수행하여 막면의 두께가 변할 때의 거동 특성을 확인하였다. 5차년도에는 4차년도에 최적화 연구된 유압식 케이블 재긴장 시스템을 이용하여 케이블의 초기긴장이 가능한 케이블 접합부 개발에 대한 연구를 수행하였다. 개발된 초기기장이 가능한 접합부는 케이블 시공시 가설 장비를 최소화 시키고 장치의 해체 및 조립을 통해 시공성과 경제성이 향상된 접합부를 개발하였다. 또한 Pilot Project의 시공과 연계하여 케이블 네트 구조의 장력 특성 연구를 수행하였으며 실험을 통하여 케이블 네트 구조에서 각 케이블의 초기 장력의 변화와 케이블 연결부의 위치변화에 따른 케이블의 장력 분포를 고찰 하였다. 그리고 막재의 특성은 직포를 구성하는 원사의 차이에서 기인하는 경우가 많다. 본 연구에서는 β-yarn과 α-yarn으로 구성된 막재의 거동을 역학적 실험을 통하여 비교 분석하였다. 실험은 1축 인장강도, 인열강도, 접힌후 인장 강도를 실시하였다. 6차년도에서는 연성구조물의 접합부 형태는 막과 막, 막과 케이블, 케이블과 지지골조, 막과 지지골조 등 다양한 형태로 구성된다. 연성구조물이 가지고 있는 접합부의 문제점으로는 케이블에 의한 인장력의 전달 문제, 코너 접합부에의 문제점, 케이블 교차 접합부 마무리 등이 있다. 연성구조물의 접합부 특성을 파악하기 위해 클램핑 방법을 실험 변수로 하여 실험을 실시하였다. 단부 처리 기법에 따라 막재의 파단 형상이 다르게 나타나는 것을 확인하였다. 또한 실험체의 응력 패턴을 재료비선형 해석을 통해 분석하였다. 그리고 5차년도에 수행된 초기긴장 케이블 접합부 실험에서의 결과를 통해 기 개발된 초기긴장 케이블 접합부의 최적화 및 실용화 연구를 수행 하였다. 안전성 및 사용성 확인을 위해 초기긴장 장치의 가이드 스터드 볼트의 장력 분배를 확인하였으며 쐐기장착구 및 장치구성요서를 새롭게 제안하여 사용성을 개선하였다.
	7) 경제성 분석	8) 본 연구에서는 2년간 대공간구조물의 경제성 평가에 관하여 연구를 진행했다. 9) 대공간구조물은 국민 생활수준의 향상과 함께 옥외에서 이루어지던 행위를 실내로 끌어들여 보다 쾌적한 생활을 영위하고자 하는 인간 욕망을 채워

		주는 건축물이다. 기둥 없는 넓은 공간을 만들기 위해서는 끊임없는 신재료 및 신기술의 개발을 통해 이루어 질 수 있다. 역학적 의미로는 힘의 합리적인 흐름을 이룰 수 있게 휨모멘트, 전단력, 비틀림 모멘트 등을 최소화하고, 축력을 전체 구조물에 과감히 도입하여야 보다 큰 대공간을 실현 할 수 있다. 10)대공간 구조물의 기획 초기 단계에서 구조물 건립에 소요될 공사비의 규모를 예측하는 것은 많은 어려움이 따른다. 기획 초기단계에서 대공간을 구성할 수 있는 다양한 구조시스템의 구조적 특성과 아울러 경제적 특성의 분석은 효율적인 구조시스템의 도출과 프로젝트 전체 예산의 예측 및 프로젝트의 진행 여부를 판단하는데 매우 중요하다 할 수 있다. 11)본 연구에서는 대공간구조물의 경제성에 평가에 관한 연구와 대공간구조물의 데이터베이스 구축을 성공적으로 수행하였다. 이를 통해 향후 대공간구조물의 건설을 기획하는 단계에서 용이하게 접근할 수 있는 토대를 마련할 수 있게 되었다. 12)현재 우리나라는 안산돔경기장을 필두로 여러 지방 자치단체에서 대공간구조물을 기획하거나 건설을 고려중이다. 본 연구결과가 대공간구조물의 건설에 화용되었으면 하는 바람이다.

13)세세부		14)결 론
15)2세부	16)비선형해석	17) 대공간 구조는 [형태저항구조]로서, 기둥-보로 구성되는 일반적인 건축골조구조가 설계외력에 대해 휨 및 전단으로 저항되는 것에 반해, 구조물의 내부에 기둥이 없는 공간을 내포하는 대공간 구조는 축력 및 면내 단면력에 의해 저항되는 경우가 대부분이다. 이러한 특성상 공간구조에는 일반적으로 장스팬이 사용 되는 경우가 많으며, 그 결과 일반적인 골조와는 달리, 부재에 발생하는 변형도가 작은 경우에도 큰 변형이 발생하는, 즉 대변형 혹은 유한변형을 동반하게 된다. 전술한 바와 같이 대공간 구조의 경우, 단면력으로서 축력이 지배적이므로 부재의 국부적인 소성화에 따른 소성힌지의 발생 및 소성역의 진전 등을 고려한 부재레벨의 탄소성해석이 필요하게 된다. 또한 일반적인 건축골조와는 달리 대공간 구조의 경우 정적, 동적해석에 관계없이 비선형해석이 요구된다. 대공간 구조의 비선형해석은 수치해석 전반에 관한 폭넓은 지식과 구조물의 역학적 특성을 명확하게 이해해야만 정확한 해석결과를 얻을 수 있으므로, 이에 따른 비선형 수치해석에 관한 명확한 이론정립 및 프로그램 기법을 시급히 구축할 필요가 있다. 본 세세부과제는 비선형해석 기법으로 강성구조물의 기하학적 및 재료적 비선형해석, 연성구조물의 형상탐색을 중점적으로 연구하였다. 본 연구를 통하여 기초적인 비선형 해석법의 연구와 기하학적 재료적 비선형성을 규명할 수 있는 해석적 알고리즘을 개발하고 프로그래밍하였다. 또한 대공간 구조에서 가장 큰 위협으로 등장하는 정적 안정 및 동적 안정문제를 해결함으로서 세계 최초의 안정문제를 범용적으로 다룰 수 있는 프로그램을 개발하기 위한 초석을 설립하였다. 또한 스페이스 트러스와 언더텐션 시스템, 텐세그리티에 관하여 해당 구조물의 비선형 해석 기법을 수치해석예제 및 적용을 통하여 대공간 구조물의 비선형 해석을 수행 및 제시하였다.
	18)구조안정	장대 경간을 만들기 위해서는 형태저항형 구조시스템을 이용하여야 한다. 즉 일반적인 직선 부재의 축에 수직 방향인 하중이 가력되면 구조체가 휘어지며 휨모멘트와 전단력이 구조물 내부를 지배하게 되므로, 이를 적절히 저항할 수 있도록 구조체를 설계하여야 한다. 이때 휨모멘트 및 전단력에 대한 단면의 응력 분포는 균일하지 않으므로 부재 재료를 효율적으로 사용할

		수 없게 되어, 부재 단면의 크기가 기하급수적으로 늘어나게 되고, 또 이에 따른 자중의 증가로 인해 대경간 구조로는 부적합하게 된다. 이를 해결하기 위해서는 가능한 한 단면에 균일한 응력 분포를 나타내는 축력 부재를 최대한 많이 사용하여 힘의 전달 효율을 향상시켜야 한다. 즉 부재 형태에 초기 곡률을 주어 곡선부재로 치환하면 축력이 지배하는 구조시스템을 만들 수 있다. 이러한 원리를 이용한 아치 및 쉘 구조가 대경간 구조물에 많이 사용되며, 이는 형태저항형 구조체의 기본이 된다. 형태저항형 구조체는 면외방향의 하중에 대해 면내력으로 저항하는 구조시스템으로, 힘의 전달이 매우 효율적이라는 장점이 있으나, 이에 상응하는 치명적 단점인 구조불안정을 야기시킨다. 즉 얇고 가볍게 대공간을 만들 수 있으나, 이로 인해 구조체의 기하학적 형태에 따라 구조불안정 현상이 일어난다. 구조 부재의 불안정문제는, 대표적으로 기둥의 오일러 좌굴을 들 수 있다. 기둥의 좌굴은 좌굴 임계점 이후의 거동, 즉 좌굴후 거동이 안정현상을 나타내므로 구조 부재의 초기불완전량에 대해 좌굴점의 변화가 그리 크지 않다. 그러므로 현재의 구조기술로는 해석결과와 실험결과가 잘 맞고 있으며, 해석적 방법에 의해 구해진 좌굴하중을 구조설계에 직접 적용할 수 있는 실정이다. 그러나 압축응력을 받는 형태저항형 구조체는 좌굴후 거동도 불안정현상을 나타내므로 초기불완전량에 따라 매우 민감하게 반응한다.따라서 아직도 이론에 의한 좌굴하중과 실험에 의한 값이 많은 차이를 보여, 구조불안정 설계를 위한 체계적 기준을 적시하기는 어려운 실정이다. 그러므로 이 기준에서는 돔형 구조물의 구조안정 설계를 위한 정량적 제안 보다 구조검토를 위한 방안에 관해 제시한다.
	19) 진 설 계	본 연구를 통하여 대공간 구조의 형태에 따른 지진거동 특성과 지반-하부구조 상호작용에 대한 영향을 고찰 함으로서 대공간구조의 내진설계기법을 완성하고자 하였으며 공간구조물의 진동제어 기법 및 시스템 개발에 대한 연구를 통하여 파일럿 프로젝트 건설에 있어서 내진설계기술 및 진동제어시스템의 적용성을 검토하였다. 또한 대공간 구조물의 개폐 진동영향평가 및 하이브리드 스마트 면진 시스템 적용에 관하여 연구하여 내진설계 지침서 작성에 관한 기초자료로 활용하였다. 마지막으로 국내와 국외의 자료를 참고하여 공간구조의 일반적인 특성과 지진하중이 작용할때의 동적특성과 최근의 공간구조의 구조형식에 따른 내진설계 방법에 대하여 정리하면 다음과 같다.

		(1) 각 구조물은 그 용도와 시공할 지반상태를 감안하여 분류한 내진설계범주 중 하나에 속하게 되는데 공간구조의 경우 보통 연면적 5,000㎡이상인 공연장, 집회장, 관람장, 전시장, 운동시설, 판매 및 영업장으로 이용되므로 중요도(1)의 내진등급 'I'에 속한다. 또한 건물의 형상에 따라 적용 가능한 내진설계범주가 정해지기도 하는데 대부분의 대공간구조물은 수평비정형성과 수직 비정형성으로 인해 내진설계 범주 'D'에 속하게 된다. (2) 공간구조물은 내진설계범주 'C'의 높이 20m 이상 또는 6층 이상의 비정형구조물에 속하거나 내진설계범주 'D'에 해당하기 때문에 동적해석법을 사용하여 해석한다. (3) 공간구조물의 경우에는 수평방향의 100%의 지진하중과 직교하는 방향의 30%에 대한 절대값 중 최대값, 직교방향에 대한 제곱근(SRSS)조합, 45도방향, 수평방향과 수직방향의 동시고려등 가장 불리한 조합을 방생시키는 방법을 이용하여 지진하중을 조합한다. (4) 공간구조물의 고유한 특성으로 인해 개폐식지붕구조의 주행도중 지진시 미끄러짐 현상의 해석, 대공간구조의 대형현수물의 응답해석, 위상차해석등을 실시하여야 한다.

1) 세세부		2) 내 용
3) 3 세 부	4) ㅅ 공	5) - 국내외 사례조사를 통하여 대공간 구조의 Erection 공법에 대한 종류 및 그 특징을 알 수 있었다. 6) - 공법선정 기초 프로그램을 개발하였으며, 견학용 모형을 제작하였다 7) - 연성구조물 Erection 공법의 경우, 막 및 케이블의 장력측정기법이 차지하는 비중이 매우 크므로 장력측정기법 연구를 선행 또는 병행하면서 연성구조물의 Erection에 대한 공법을 검토할 필요성이 제시되었다. 8) - 막장력 측정기 개발 및 막의 물성치를 파악하기 위한 2축시험기의 개발이 매우 절실한 것을 알 수 있었으며, 막장력 측정기 개발을 위해서는 TTM500, 막의 물성치를 파악하기 위한 TTM200이란 2축시험기를 개발 시제품으로 제작하였다. 9) - 연성구조물의 장력도입 및 측정관리 시스템은 개발 장력측정기를 사용하면 일반구조물의 유지관리 개념과 동일하게 관리할 수 있으므로 휴대용 장력측정기기(PTMM)의 개발은 막구조 장력측정 시스템 그 자체임을 알 수 있었다. 10) - 수치해석에서 얻어진 자료를 토대로 지붕골조 작업 전 과정이 지상에서 수행되는 골조공사의 시공 자동화 공법을 개발하였다. 11) - 지상에 자동화 공법으로 조립된 골조를 인양하는 공법 개발이 골조자동화 공법과 연계되어 개발되었다. 12) - 대공간 연성 막구조물의 시공 시 가장 중요시되는 Erection 공법을 개발하였으며, 골조막 구조에서는 Step-Up 공법, 현수막구조는 Rotation-Up 공법, 공기막 구조는 Hanging-Up 공법을 개발 또는 그 적용법을 제시하였다. 13) - 연성 막구조물의 시공지침서를 제작하였다. 14) - 스페이스 프레임의 강성 구조물 시공시 가장 중요시되는 Erection 공법에 있어서 4차년도에 개발한 Step-Up 공법을 구체화하고, Jack-Up 시스템의 기술을 개발하였다. 15) - 스페이스 프레임 구조물 시공지침서를 제작하였다. - 개폐식 구조물의 구조시스템을 분석하고, 각 구조시스템의

		시공성, 내구성, 경제성 등을 검토하였다. - 강성 개폐식 구조물 중 태양열 회전 개폐식 지붕구조 시스템을 개발하고, 연성 개폐식 구조물에서 롤 형식의 개폐시스템을 개발하였다. - 개폐식 구조물 시공지침서를 제작하였다.
	16)풍환경	17)풍환경은 6년동안 대공간 구조물의 다양한 형태 변화와 따른 동적특성연구를 위하여 특허장치개발과 이를 이용한 다양한 재료별 동적특성에 대해서 연구를 진행하였다. 다음은 연차별 연구결과를 나타내고 있다. 18)<1차년도> 대공간 구조물의 풍진동 특성을 분석을 위한 기초실험을 위하여 3가지 방법으로 실험을 실시하였다. (1) 막구조물의 진동실험용 틀을 제작하여 대해서 진동실험을 실시하였다. 실험 결과 3차 고유진동수측정 하였으며 이론적인 해석은 FEM 해석을 통하여 10차 이상의 결과를 토출하여 상호 비교를 실시하여 실험결과의 신뢰성에 대해서 검토를 하였다. 실험결과 3차 고유진동수까지는 실험결과와 이론해석결과가 잘 일치하고 있었다. (2) 막 구조물의 휘어있는 특성을 고려한 휨부재의 진동특성에 대해서 알아 보기위하여 Curved 빔에 대한 모우드 해석을 실시하였다. 실험결과와 FEM해석결과도 잘 일치하고 있었다. (3) 막구조물의 풍진동에 의한 균열등에 대한 평가를 실시하기 위한 기초실험으로 PZT실험을 실시하였다. 막구조물의 손상위치를 찾기 위한 PZT를 이용한 실험방법에 대한 연구결과 PZT 실험에서 PZT의 특성을 이용한 실험모형의 고유진동수를 찾을 수 있었다. 이들 값을 이용하여 추후에 FEM해석과 손상위치에 따른 고유진동수의 변화 기법에 대해서 계속 연구할 예정이다. <2차년도> 동적 횡 하중과 정적하중을 이용한 막구조물의 거스트 계수를 산출하여 다음과 같은 연구결과를 얻었다. (1) 풍동내 막구조 모형에 대해 동적응답실험 을 통하여 막구조 동적응답모습을 확인하였다. 막구조재료 유연한 탄성재료 때문에 같은 형태의 모형이 풍속에 따라 진동수와 진폭이 다르다. (2) 풍속이 증가함에 따라 풍압이 증가하고, 이는 변형이 증가함을 유발한다. 변형이 증가함에 따라 막구조물의 진동수가 감소한다. 그래서 고유진동수를 풍동내 정확하게 관측 할 수 없었다. (3) 4가지 형태 막구조모형 동적실험을 통해서 Saddle

		형 모형은 동적하중에 대한 동적응답이 나머지 3가지 형태 막구조 모형 보다 훨씬 더 크게 보인다. (4) 동적하중과 정적하중을 이용한 Saddel형, Point형, Wave형, Arch형 4가지 기본의 형태의 막구조의 평균 거스트 계수는 1.4를 얻었다. <3차년도> 본 연구는 연성 막구조물 상사법칙에 맞춰 풍동실험 모형을 제작하였다. 그리고 노풍도 구분C (교외지역)에 해당되는 고도분포 지수계수 α=0.15를 구현하여 풍동 경계층 내에서 실험을 실시했다. 프리텐션과 풍속의 변화에 따른 모형의 풍진동에 대한 응답을 측정하여 실험결과를 분석하였다. 추후 현장실측과 풍동 수치시뮬레이션 (Numerical Simulation) 분석 수법에 대한 유효한 실험 데이터를 제공하여 비교적 깊게 의미가 있게 되길 바람이다. 실험에 대해 얻어진 결과는 아래와 같다. 1. 케이블 인장력이 0 부터 180 까지 갈수록 작아지고 180 부터 360 까지 갈수록 커진다. 그리고 풍속변화는 V=5m/s 일 경우보다 v=6m/s일 때 더 크게 나타난다. 그러므로 풍속이 증가될수록 케이블의 인장력 변화가 큼을 알 수 있다. 2. 동일한 프리텐션을 설치할 때 막구조물의 풍진동응답은 풍속이 커질수록 커진다. 3. 동일한 풍속의 경우에 막구조물의 풍진동응답은 프리텐션의 크기(막구조 형태 변화를 시키지 않을 때 이 범위내에 프리텐션의 크기)가 커질수록 작아진다. 4. 동일한 프리텐션과 풍속 일 때 우산형 현수막의 X축 앞부분(바람이 불어오는쪽)에 풍진동응답은 주로 하향의 압력으로 표현되고 나머지 부분의 풍진동응답은 주로 상향의 부력(浮力)으로 표현이 된다. <4차년도> 본 연구는 연성 막구조물 상사법칙에 맞춰 풍동실험 모형을 제작하였다. 그리고 노풍도구분 C (교외지역)에 해당되는 고도분포 지수계수 α=0.15를 구현하여 풍동 경계층 내에서 실험을 실시했다. (1) X축의 경우 풍속의 증가할수록 변위응답의 크기는 증가를 하고 있었지만 풍향각 0도의 경우는 바람이 불어오는 쪽 방향의 막구조물의 경우는 변위가 감소하고 있었으며 반대방향의 경우 풍속이 높은 6m/s-7m/s일 때 중앙에서 낮은 변위가 나타나고 있었다. Y축의 경우는 풍향각이 증가하면서 변위도 증가를 하고 있었지만 0도방향의 경우는 낮은 풍속인 4m/s일때 구조물의 중앙 좌우 변위값이 반대방향으로 나타나고 있고 있었다.

		(2) 프리텐션의 크기에 따른 변위응답의 변화에서는 프리텐션이 증가를 하면 변위응답은 감소를 하지 않고 오히려 증가를 하고 있었다. (3) 본 연구는 PV시스템을 적용한 대공간 구조물 및 적용기술에 관한연구로 국내외 대공간 구조물 및 스타디움의 적용 사례의 비교 분석을 통하여 국내 대공간 구조물에 PV시스템을 적용할 경우 국내 실정에 적합한 PV시스템을 제안하기 위함이다. 또한 현재까지 적용사례가 없는 돔 구조물에 대한 PV시스템 적용 기술 연구로 향후 돔 구조물 및 돔 스타디움에 PV시스템 적용 시 활용을 목적으로 하였다. 해외의 22건의 사례조사를 통하여, 스위스 및 독일을 비롯한 유럽 국가 위주로 PV시스템 적용이 많은 것으로 조사되었으며, 각각의 사례 분석을 통하여, 각기 다른 원인에 따라 적용되는 접합기술의 차이가 있음을 확인 하였다. 또한 돔 구조물의 경우 구조적인 원인과 방위 및 설치각의 차로인한 발전 효율의 차이로 일반 건축물과는 다른 PV시스템의 적용기술이 필요함을 확인하였다. 국내 대구 월드컵 경기장에 적합한 PV시스템으로 별도의 브라킷을 설치하지 않고 4개의 절점을 통하여 철골 프레임에 통합되는 후크 고정방식을 제안하였으며 레일 시스템은 지붕 통합형으로 제시하였다. <5차년도> 쌍곡 포물선 안장형 모형에 대해 풍향각, 변장비, 개폐율의 변화에 따라 각각 풍압실험을 실시하였다. 풍압실험을 통한 결론은 다음과 같다. 1. 풍향각의 변화에 따른 비교 건축물의 정면을 0°라고 가정하고 바람이 건축물에 작용할 때 외압은 0°, 90°, 180°, 270°와 같이 바람이 작용하는 면이 평평한 경우에는 큰 풍압계수값을 보이며, 45°, 135°, 225°, 315°와 같이 모서리 쪽의 경우에는 바람이 분산되어 작은 풍압계수값이 나타남을 확인할 수 있었으며, 내압은 0°, 180°와 같이 오목한 면에 바람이 작용할 때 큰 풍압계수값을 나타내며, 90°, 270°와 같이 볼록한 면에 바람이 작용할 때 작은 풍압계수 값을 나타냄을 확인할 수 있었다. 2. 변장비의 변화에 따른 비교 다른 조건이 동일하고 변장비가 다를 경우, 내압과 외압의 풍압계수 분포는 변장비가 1:2인 Rectangular Shape가 1:1인 Square Shape보다 전체적으로 큰 양상을 보였다. 즉 변장비가 커짐에 따라 대체적으로 최대·최소풍압계수의 분포도 커지는 경향을 확인할 수 있었다. 3. 개폐율의 변화에 따른 비교

		개폐율이 증가할수록 최소피크 풍압계수 값이 증가하였고, 개폐율이 감소할수록 최대피크 풍압계수 값이 증가하였다. 증가폭은 1.2배 정도였으며, 개폐율 변화에 따라 최대최소피크 풍압계수 값은 같은 양상을 보이지 않았다. 이를 통해 지붕면에 작용하는 풍압계수 값은 개폐율에 대해 서로 대칭되는 양상을 보임을 확인할 수 있었다. 4. 디지털 미디어 시스템이 적용된 건물 9개를 연구분석 대상물로 지정 인터페이스 요소, 공간에 표현되는 디스플레이의 유형, 사용자가 공간과 상호작용을 분석한 결과 미디어 파사드 사례 중 프로젝터를 이용하여 건물 외피를 캔버스 삼아 공간을 활성화시킨 사례의 기술을 바탕으로 대공간 구조물에 3D 맵핑 기술을 이용하여 구조물 외피와 일치하는 영상물을 제작하여 사용자의 참여를 통해 실제 공간과 영상을 매치 시켜 가상의 공간을 연출할 수 있는 가능성을 추출하였다.
	19)음환경	20)음환경 분야에서는 6차년에 걸친 연구를 통하여 대공간의 음향설계 및 평가와 관련한 기초기술을 확보하였으며, 이를 통하여 실제 300미터에 달하는 대공간의 설계초기단계에서 최종평가에 이르기까지 자체적으로 수행할 수 있는 능력을 갖추게 되었다. 1차년도연구와 이를 심화한 5차년도 연구를 통하여 음에너지의 비선형감쇠가 발생하는 대공간의 특성을 고려한 새로운 건축음향설계변수(TN)를 개발하여 제시한바 있으며, 이는 기존의 건축음향설계변수인 잔향시간을 대체한 보다 청감에 가까운 설계변수로서 음향설계의 정확도를 기하는데 기여할 것으로 기대된다. 또한 4차년도 연구에서는 대공간 전기음향설계 시 활용·가능한 스피커음원의 DB를 구축·제시하였으며, 설계초기단계에서 건축음향특성과 전기음향특성을 동시에 고려하여 잔향설계를 하는데 활용가능한 새로운 설계변수(Tspk)를 제안하였다. 3차년도 연구에서는 음향설계과정에서 많이 사용되는 기존의 컴퓨터 시뮬레이션 소프트웨어들이 개폐형공간을 대상으로 사용되는 경우, 적용성 및 정확도가 크게 저하되는 점을 고려하여 이를 보완할 수 있는 FDTD알고리즘을 개발하였으며, 그 활용성을 검증한 바 있다. 또한 대공간 건물의 완공후 또는 기존 대공간건물의 실내음향 평가 시 활용되는 기존의 측정시스템이 갖는 적용측면에서의 기술적 한계들(신호전송거리의 장거리화에 따른 관련 문제점)을 극

		복하기 위하여 2차년도 연구에서는 대공간에 적합한 음향측정시스템을 개발하였다. 개발된 측정시스템은 대공간의 특성을 고려하여 무선마이크와 수신시스템으로 구성되었으며, 고유의 신호처리 및 해석용 소프트웨어를 개발 이를 이용한 측정결과의 분석이 가능토록 하였다. 본 연구에서 개발된 소프트웨어에는 1차년도 연구를 통해 제안된 건축음향설계변수인 TN의 측정 및 평가를 가능토록 하여 대공간에서 발생하는 비선형 음에너지 감쇠에 따른 음향적 성능변화를 보다 정확하게 평가할 수 있도록 하였다. 최종적으로 6차년도 연구에서는 대공간의 음향설계초기단계에서부터 최종평가에 이르기까지 지침이 될 수 있는 내용들과 본 연구과정에서 개발된 도구의 활용방안들을 포함한 설계지침서를 제시함으로써 향후 대공간음향설계 과정에서 가이드라인으로서 활용될 수 있도록 하였다.

(2)

1) 세세부		2) 결 론
3) 4세부	4) Code	5) 국내의 대공간구조물에 대한 합리적이고 기술적 문제점이 없는 설계 지침을 마련하기 위해 우선 선진국들의 code에 관한 국외자료를 수집하고 정리 · 분석하였다.
		6) 앞으로 국내에서도 케이블이 사용된 대공간구조물에 대한 수요는 증가할 것이 예상되므로, 현재 국내 건축기준 및 기타 관련 법규에서 상세히 다루지 못하고 있는 케이블 구조에 대해서 안전성과 기능의 확보라는 관점에서 설계지침을 마련하였다.
		7) 스페이스 프레임 구조는 종횡의 부재가 3차원적으로 서로 연결되어 입체적으로 외부 힘에 저항하는 구조로서 높은 강성을 가지므로 스페이스 프레임 구조시스템이 개발되어 전 세계적으로 대공간 구조시스템의 하나로 널리 보급되고 있지만 아직 실무에서 참고할 만한 지침서다운 설계지침서가 없는 것이 현실이다. 따라서 본 연구에서는 세계의 스페이스 프레임 구조에 관한 지침서를 확보하여 분석한 후, 우리나라의 실정에 맞는 스페이스 프레임 구조의 초안을 작성을 하였다.
		8) 막구조에 대한 합리적이고 기술적 문제점이 없는 설계 지침을 마련하기 위해서 국내외의 문헌, 기준, 규격, 지침 분석 정리하여 국내 실정에 맞는 지침서를 작성하였으며, 연구 결과물은 관련학회 및 관련 기관의 공인을 얻어 앞으로 건축될 실제 구조물 설계에 직접적으로 적용 될 수 있도록 책으로 발간하였다.
		9) ETFE 막구조에 대한 합리적이고 기술적 문제점이 없는 설계 지침을 마련하기 위해서 국내외의 문헌, 기준, 규격, 지침 분석 정리하여 국내 실정에 맞는 지침서를 작성하였으며, 연구 결과물은 관련학회 및 관련 기관의 공인을 얻어 앞으로 건축될 실제 구조물 설계에 직접적으로 적용 될 수 있도록 책으로 발간하였다.
		10)개폐식 구조물의 합리적이고 기술적 문제점이 없는 설계 지침을 마련하기 위해서 국외의 문헌, 기준, 규격, 지침 등을 참고하여 분석하여 개폐식 구조물 설계지침을 작성하였다. 분석 정리된 내용을 국내 실정에 맞도록 하기 위해 현장 실무자들을

		포함시켜 실무에 직접 사용될 수 있는 안을 마련하였다.
		대공간 구조물의 계측 및 관리시스템의 활성/정착화를 위한 기본 자료인 계측기기, 계측방법, 분석 및 대처방안을 정립하였고, 계측종류에 따른 항목별 프로세스, 계측시스템에 따른 계측 프로세스, 구조물의 이상거동 감지 프로세스 및 구조물의 안정성 분석법 등을 개발하였다.
		능동적 검사를 수행해서 성능의 저하를 미리 관찰, 대책 마련하는 예지보전 및 점검·검사·교체 등의 예방보전에서는 FBG센서를 이용한 계측 시스템 및 패키지 기법과 손상도 검증용 무인 로봇개발과 RFID센서를 사용한 막구조물의 모니터링 기술을 연구하였고 계측시스템의 정밀도 검증 및 유지관리 지침서를 작성 하였다.
		케이블 장력측정 및 상시 무인모니터링 기술과 막재의 열화요인 및 열화진단 방법 개발 및 기핵/성장에 의한 막 열화성능의 진단 그리고 막 소재의 진단결과 분석 및 판정기준 검증을 위한 연구를 수행하였고 막구조물의 보수기술 지침(안)을 제안하였다.
	11)유지관리	광섬유 센서를 사용한 막구조물의 상시 계측시스템을 포함한 유지관리 기술과 막체와 강부재, 공기막구조 및 누수 부분으로 나누어 기술지침의 가이드라인을 작성하였다. 유지보전 계획에 대해서 목표, 범위, 분류로 구성하고, 점검항목, 레벨, 방법 등을 명시함, 해외 보수기술 자료를 참고 국내 실정에 맞는 유지관리 지침(안)이 되도록 수정 보완하였다.
		실시간 센서계측정보 가시화 기능 및 센서정보 관리 기능 과 센서계측정보 통계 및 이력조회 기능 및 가시경보 모듈 개발하였고, 대공간 건축물 건전성 관리 PDA Interface 및 시설물별 센서계측값 UI 그리고 SMS기능의 추가를 통한 위험통지 모듈을 개발하였다. 또한 환경변화에 대응하는 확장성 있는 소프트웨어 아키텍쳐를 구현하였으며, 무인관리시스템을 통한 유지관리 통합시스템을 개발하였다.
		국내에 존재하지 않았던 대공간 건축물의 유지관리 기술의 확립과, 건전성 모니터링을 비롯한 친환경적 측면 및 유지관리보수기술 등을 집대성하여 대공간 건축물 유지관리 기술 지침을 제안하였고, 막구조 건축물 유지관리 및 진단 지침, 막체의 보수기술 지침, 강제부재의 부수기술 지침, 공기막구조의 설비 및 유지관리 지침 및 우수차단장치 및 수밀성능 유지관리 지침으로 구성하였다.
	12)Pilot Pro	본 연구에서는 Pilot Project를 통하여 각 세세부에서 진행한 연구에 대하여 실용화가 가능한 부분에 대한 확인을 하였다. 이는 각 세세부 과제에서 진행되는 대공간 건축물의 핵심

		요소기술 및 응용 수준의 단위 기술 개발 결과를 이용하여 실용화 단계 연구를 진행하는 과정을 포함한다. 이를 위해서는 각 세세부 과제와의 수평적인 연계성이 무엇보다 필요하고, 각각의 세세부 과제의 실용화 검증을 수행해야 한다. Pilot Project를 통하여 연구 성과에 대한 확인이 가능하므로 그를 중심으로 각 세세부 간의 과제 연계성을 정의해 두고 그에 대한 협의와 확인이 가능한 상호 교류를 정의하였다. 각각의 연구 결과에 대한 상호 교류를 통해 전반적인 시스템에 대한 실용화 검증이 완료되는 것이다. 이를 검증하기 위해 본 연구에서는 300M 스팬의 1/10을 축소시킨 30M 스팬인 Pilot Project를 제작하였으며, 선정된 지붕 시스템을 바탕으로 한국과학기술대학교 HRD 홍보관 에 대한 설계 및 시공을 수행하였다. 그리고 이를 바탕으로 300M span Pilot Project의 실현 가능성을 검증하였다. 또한 본 세세부에서 수행하였던 텐셔닝 에어빔 시스템, 개폐식 지붕구조 뿐 아니라 유압식 재긴장 시스템, 무선모니터링
	ject	시스템, Rotation-Up에 의한 Keel Arch Erection공법, 풍하중 평가, 수밀성능 검토 등 핵심 요소기술의 검증을 수행하였으며, 이를 정립하였다. 상기의 핵심요소기술들을 바탕으로 30M 스팬 Pilot Project 대상구조물인 한국기술교육대학교 HRD 홍보관을 학교 전시시설로서 건설하였다. 본 프로젝트의 대상구조물의 준공 후에는 연구단이 종료한 시점에서부터 향후 5년간은 앞서 언급한 핵심 요소기술의 실용성을 검증하고자 한다. 또한 300M 스팬 Pilot Project의 구조설계 보고서(SD Report)를 작성하였으며 이를 바탕으로 향후 계획되어 있는 수많은 대공간 구조물 중에서도 연성구조물을 건설함에 있어 지침이 되고자 한다. 본 세세부의 Pilot Project를 통하여 대공간 건축물에 대한 건설기술을 한단계 발전시켰으며, 이를 데이터베이스화 시켜 실무자 (건설회사, 설계 및 엔지니어링)에게도 즉시 소요기술 제공이 가능케 하였으며, 나아가 본 연구단의 최종목표인 국내 자체 기반기술개발로 인한 국산화 및 고도화를 추구하고자 한다.

(3)

(4) 3.5.2 연구실적

1.

(1) 가. 특허

연번	특허명칭	출원 및 등록번호	출원 및 등록일	비고
1	조립용 볼트 및 이를 구비한 스페이스프레임	10-2008-0040857	2008.04.30	출원
2	케이블 인장 장치	10-2009-0041314	2009.05.12	출원
3	케이블 인장 장치	10-2009-0041315	2009.05.12	출원
4	조립용 볼트 및 이를 구비한 스페이스프레임	10-0953195	2010.02.10	등록
5	장력조절장치	10-2010-0035494	2010.04.16	출원
6	케이블 인장 장치	10-1052233	2011.07.21	등록
7	케이블 인장 장치	10-1052234	2011.07.21	등록
8	케이블의 초기인장 가이드 및 이를 포함한 케이블의 초기 인장 시스템 그리고 이를 이용한 케이블의 초기인장 방법	10-2011-0082425	2011.08.18	출원
9	막 장력 측정 장치	10-2008-0052799	2008.06.04	출원
10	대공간 구조물 지붕구조 설치 자동화 공법	10-2009-0042812	2009.05	출원
11	대공간 구조물 가설장치 및 가설공법	10-2010-0035643	2010.04.19	출원
12	막구조물의 고유진동수 측정장치	10-2008-0136622/ 10-0981865	2010.09.06	등록
13	실내음향측정시스템 및 방법	10-2008-0039866/ 10-0995120	2008.04.29./ 2010.11.11	등록
14	공간구조물에 대한 음향특성의 예측방법	10-2009-0040520	2009.05.09	출원
15	실내음향측정시스템 및 방법	10-0995120	2010.11.11	등록
16	고변형 성능 고력볼트	10-2006-0117113	2006.11.24	출원
17	PC보-기둥 접합에 있어서 접합성능을 개선한 하프형PC보의 구조와 이를 제작하는 방법 및 이를 이용한 접합부의 시공방법	10-2006-0125807	2006.12.11	출원
		10-0741248	2007.07.12	등록
18	노출형 주각부 구조 및 그 시공방법	10-2007-	2007.07.04	출원

		0067082		
		10-0869397	2008.11.12	등록
19	대공간 구조물의 상시 모니터링을 위한 광섬유 브래그 격자센서 (FBG) 의 부착장치 및 FBG를 부착하는 방법	10-2007-0112696	2007.11.06	출원
		10-1001104	2010.12.08	등록
20	절곡강판을 이용하여 댐 단부가 보강된 피씨 보	10-2008-0008382	2008.01.28	출원
		10-0974672	2010.08.02	등록
21	2차 브레이스를 구비한 제진용 댐퍼 및 그를 적용한 가새골조	10-2009-0028439	2009.04.02	출원
		등록결정	2011.11.29	등록
22	베이스플레이트 고정용 앵커볼트 및 그를 이용한 강재기둥과 기초 콘크리트의 접합부구조	10-2010-0045715	2010.05.15	출원
23	보이음부 강도및 시공성이 향상된 산형라멘	10-2010-0064133	2010.07.02	출원
24	파형 웨브가 구성된 지진하중 흡수장치를 이용한 칸막이 벽체의 시공방법	10-2011-0132203	2011.12.09	출원
25	슬릿형 웨브가구성된 지진하중 흡수장치를 이용한 칸막이 벽체의 시공방법	10-2011-0132204	2011.12.09	출원
26	칸막이 벽체 시공용 단위 모듈러 지진하중 흡수장치	10-2011-0132205	2011.12.09	출원
27	단위 모듈러 지진하중 흡수장치를 이용한 칸막이 벽체의 시공방법	10-2011-0132206	2011.12.09	출원
28	장스팬 텐셔닝 에어빔 시스템	10-2009-0033117	2009.04.16	출원
		10-1034610	2011.05.04	등록
29	텐셔닝 에어빔 시스템	10-2009-0033116	2009.04.16	출원
		10-1059900	2011.08.22	등록
30	대공간 구조물 가설장치 및 가설공법	10-2010-0035643	2010.04.19	출원
31	상하현재를 구비한 텐셔닝 에어빔 시스템	10-2010-0035883	2010.04.19	출원
		10-1073470	2011.10.07	등록
32	곡선형 상하현재를 구비한 텐셔닝 에어빔 시스템	10-2011-0101596	2011.10.06	출원

(2) 나. 기술실시계약

연번	기술실시계약명	실시기업	기술료 (백만원)	비고
1	유압식 케이블 재긴장 및 장력측정 시스템	(주)세일비앤시 한국하이드맥	69.6	
2	휴대용 막장력 측정기	(주)타이가	82.8	

(3)

(4)

(5)

(6)



유압식 케이블 재긴장 및 장력측정 시스템 기술이전

(7)

(8)



휴대용 막장력 측정기 기술이전

(9)

(10)다. 국내 학술지 게재 목록

연번	국내학술지명	논문명	게재년, 월
1	한국공간구조학회지	대공간구조물의 건설비용분석	2007.02
2	대한건축학회논문집	개별요소법을 이용한 조적식 석탑의 구조해석	2007.02
3	대한건축학회논문집	이중단열재 및 메탈웨브를 이용한 벽체용 거푸집시스템의 구조내력평가	2007.03
4	한국공간구조학회지	폴딩을 이용한 구조와 형태	2007.04
5	한국공간구조학회지	철골트러스 스타디움 구조물의 공사비 분석	2007.04
6	한국공간구조학회지	건축 설계 프로세스와 형상해석을 통한 막 구조물의 형상결정 방안에 관한 연구	2007.06
7	한국공간구조학회지	셀룰러빔의 웨브-포스트 좌굴강도	2007.06
8	한국공간구조학회지	Investigation and Numerical Analysis of Node Connectors in Free-Form Spatial Structures	2007.06
9	한국공간구조학회지	대공간구조물의 공사비 분석	2007.06
10	한국공간구조학회	비대칭 층을 가지는 인공재료모델을 이용한 일반 평판구조물의 위상최적화	2007.10
11	한국공간구조학회	스페이스프레임에 사용되는 에너지 흡수형 볼트의 인장성능연구	2007.12
12	한국공간구조학회	스페이스프레임의 볼조인트 접합부 파괴모드에 관한 실험적 연구	2007.12
13	한국공간구조학회논문집	지오데식 돔의 구조최적화에 대한 연구	2008.08
14	한국강구조학회지	단층 래티스 돔에 적용 가능한 용접 접합부의 휨실험을 통한 성능 평가	2008.10
15	대한건축학회논문집	부재분할 및 그룹화에 따른 지오데식돔의 최적대안 평가	2009.01
16	대한건축학회논문집	고차전단변형이론에 기저한 4절점 가변형률 판요소를 이용한 비대칭 적층판의 유한요소해석	2009.01
17	대한건축학회논문집	한국형 원전 격납건물 해석에 적합한 콘크리트 균열발생기준과 이를 이용한 콘크리트 패널의 비선형유한요소해석	2009.02
18	한국공간구조학회논문집	구조계획과 디테일에 관한 연구	2009.03
19	대한건축학회논문집	재생기법을 도입한 유전알고리듬을 이용한 돔 구조물의 크기최적화	2009.04
20	한국지진공학회지	볼팅 고정 채널 형강 보강재를 이용한 비좌굴 Knee Bracing System의 내진성능에 대한 실험	2009.04
21	Architectural Research	Three-dimensional Topology Optimization using the CATO Algorithm	2009.06
22	대한건축학회	무요소법을 이용한 평면구조물의 위상최적화에 대한 연구	2009.07
23	한국공간구조학회논문집	크기최적화 이후에 나타나는 공간구조물의 후좌굴 거동 변화에 대한 연구	2009.09
24	대한건축학회논문집	수학적 계획법을 이용한 복층 볼트시스템의 구조최적화 방안	2009.10
25	대한 건축학회	다양한 이력 접합부가 적용된 철골 모멘트저항골조의 내진성능평가에 대한 연구	2009.11
26	Architectural Research	The Effect of Rebirthing Technique on GA-based Size Optimization	2009.12

27	Architectural Research	Topology Optimization of Plane Structures uding Modal Strain Energy for Fundamental Frequency Maximization	2010.06
28	한국공간구조학회논문집	CAGD를 이용한 프리폼 이산화 공간구조물의 유한요소망 자동생성기법	2010.06
29	한국공간조학회지	원사가 다른 건축용 막재의 인장 특성 연구	2010.09
30	대한건축학회논문집	Morphgenesis 기법을 이용한 구조물의 패턴생성 및 최적대안 평가	2010.12
31	한국공간구조학회논문집	밀도법을 이용한 스페이스 트러스 구보물의 초기 형상 설계	2010.12
32	한국지진공학회	시간종속요소를 이용한 5층 RC건축물의 비좌굴가새 보강에 대한 내진거동	2010.12
33	대한건축학회논문집	내력밀도법을 포함하는 아치형 트러스의 통합설계최적화	2011.02
34	Architectural Research	Solution of Poisson Equation using Isogeometric Formulation	2011.03
35	한국공간구조학회지	재긴장과 무선 모니터링이 가능한 유압식 케이블 접합부시스템의 실험에 대한 연구	2011.06
36	대한건축학회논문집	개미군락최적화 알고리즘을 이용한 트러스구조물의 크기최적화	2011.08
37	Architectural Research	Free Vibration Analysis of Elastic Bars using Isogeometric Approach	2011.09
38	대한건축학회 논문집	CFRP로 보강된 철근콘크리트 보-기둥 접합부의 해석	2006.09
39	대한건축학회 논문집(구조계)	일반역행렬을 이용한 케이블 돔 형 구조물의 자기평형 응력 모드 해석방법	2006.10
40	한국공간구조학회지	재료비선형을 고려한 복합적층판의 진동해석	2006.12
41	대한건축학회 논문집(구조계)	중공슬래브 바닥판의 진동 및 충격음 특성에 관한 실험연구	2007.04
42	한국공간구조학회지	진동제어를 위한 준능동 TMD의 제어기법	2007.04
43	한국공간구조학회지	하부구조가 지붕구조의 지진응답에 미치는 영향에 관한 연구	2007.04
44	한국공간구조학회지	건축 설계프로세스와 형상해석을 통한 막 구조물의 형상결정 방안에 관한 연구	2007.04
45	대한건축학회 논문집(구조계)	목적함수로서 벡터 노름을 이용한 2차원 트러스구조의 최대강성 최적화문제	2007.05
46	한국공간구조학회지	비선형 형상탐색 기법에 따른 막구조물의 오차와 수렴성 평가에 관한 연구	2007.06
47	한국공간구조학회지	막 구조물의 삼각형 Re-mesh 패턴을 적용한 재단도 생성에 관한 연구	2007.06
48	한국지진공학회 논문집,	철근콘크리트 보-기둥 접합부의 비탄성 회전 능력에 대한 성능 평가	2007.10
49	한국공간구조학회지	수평·상하 지진을 받는 아치구조물에 대한 등가정적지진력 제안	2007.12
50	한국공간구조학회논문집	아치 트러스 및 공간 트러스 구조의 비탄성 비선형 거동해석	2008.02
51	한국공간구조학회지	면진 트러스-아치 구조물의 지진거동 분석	2008.04
52	한국공간구조학	쉘형 구조물의 최적곡면 탐색에 관한 연구	2008.04

	회지		
53	한국소음진동공학회논문집	철근콘크리트 실험체의 시스템 식별과 유한요소 모델 수정	2008.07
54	한국소음진동공학회논문집	철근콘크리트 실험체의 시스템 식별과 유한요소 모델 수정	2008.07
55	한국지진공학회논문집	반응수정계수와 주기의 영향에 대한 철골모멘트저항골조 건물의 내진성능평가	2008.10
56	대한건축학회논문집	고유치해석을 이용한 케이블 돔 구조물의 자기평형 응력 모드 해석	2008.10
57	한국공간구조학회지	아치구조물의 모의지진파 입력에 따른 지진응답특성에 관한 연구	2008.12
58	한국강구조학회논문집	채널 형강을 이용한 비좌굴 Knee Bracing System의 내진성능에 대한 실험적 연구	2009.02
59	한국공간구조학회지	지진하중에 대한 복층 배럴볼트 시스템의 동적거동에 대한 연구	2009.03
60	구조물진단학회지	손상평가 기법을 이용한 Hi-Form 접합부의 강성평가	2009.03
61	한국지진공학회논문집	개각이 다른 복층 배럴볼트 시스템의 지진거동에 대한 연구	2009.04
62	한국공간구조학회논문집	언더텐션 시스템이 적용된 구조물의 비탄성 비선형 거동 해석	2009.04
63	대한건축학회논문집	마이크로 유전 알고리즘을 이용한 언더텐션 구조물의 최적설계	2009.06
64	한국공간구조학회지	비선형 강성방정식을 이용한 스페이스 트러스의 분기좌굴 특성에 관한 연구	2009.06
65	한국공간구조학회지	접선 강성방정식과 비선형 강성방정식을 이용한 비선형해의 정확성 비교에 관한 연구	2009.06
66	대한건축학회논문집	언더텐션 시스템 보의 비선형 거동에 대한 연구	2009.10
67	구조물진단학회지	월드컵경기장 지지케이블의 장력추정을 위한 진동법의 적용성 평가	2009.11
68	한국공간구조학회논문집	호장법을 이용한 평면 트러스 구조의 비탄성 비선형 해석	2010.02
69	공간구조학회	하부기둥을 갖는 아치 구조물의 지진응답에 관한 연구	2010.03
70	한국공간구조학회지	스텝하중을 받는 얕은 EP쉘 구조물의 비선형 연속응답스펙트럼에 의한 불안정 특성	2010.03
71	한국공간구조학회지	정현파 하중을 받는 EP(Elliptic Paraboliodal)쉘 구조물의 동적 불안정 특성 분석	2010.03
72	한국공간구조학회지	접선 강성방정식과 비선형 강성방정식을 이용한 비선형 해의 정확성 비교에 관한 연구	2010.06
73	한국공간구조학회지	선재 요소를 이용한 막 구조물의 형상해석에 관한 연구	2010.06
74	한국공간구조학회지	원사가 다른 건축용 막재의 인장 특성 연구	2010.09
75	한국공간구조학회지	적층방법에 따른 복합적층판의 저속충격거동 조사	2010.12

76	한국공간구조학회지	서울 서남권 돔 야구장의 Snapping 검토에 관한 연구	2010.12
77	전산구조공학회	다목적유전자 알고리즘을 이용한 스마트 TMD의 퍼지제어	2011.02
78	한국공간구조학회지	개폐식 지붕구조의 움직임에 대한 공간구조물의 진동해석	2011.03
79	한국공간구조학회지	STEP 하중을 받는 래티스 돔 구조물의 동적 구조불안정 특성에 관한 연구	2012.03 (심사 통과 2011.12)
80	한국공간구조논문집	대공간 건축물 Erection 공법에 관한 사례 조사 연구	2007.04
81	한국공간구조논문집	단층 래티스 돔의 Erection 중 거동 및 좌굴 특성	2008.06
82	한국공간구조논문집	막구조물의 막장력 측정장치 개발에 관한 연구	2008.12
83	한국공간구조논문집	단층라멜라 돔의 시공 중 접합부 강성에 따른 좌굴특성	2011.06
84	한국공간구조학회지	모우드해석법을 이용한 캔틸레버 곡선보의 동적해석	2007.02
85	대한건축학회 논문집	고유진동수 변화에 따른 동조액체댐퍼의 특성	2007.04
86	한국공간구조학회지	고층건물 현장계측을 통한 거스트 계수 제안	2008.02
87	한국공간구조학회지	대공간 구조물의 고유진동수와 스팬의 상관관계	2008.05
88	한국공간구조학회지	국내외 PV 통합 프로젝트의 사례분석	2008.12
89	대한건축학회지	압력측정을 위한 튜브시스템에서 튜브탭관의 특성	2009.05
90	대한건축학회	Point형 막 구조물 모형에 대한 풍응답 연구	2009.11
91	한국공간구조학회지	실내공간의 부분적개방에 따른 음향특성변화1	2007.03
92	한국공간구조학회지	실내공간의 부분적개방에 따른 음향특성변화1	2007.05
93	한국공간구조학회지	음향적으로 결합된 공간의 잔향특성변화에 관한 연구	2008.06
94	한국공간구조학회지	음향적으로 결합된 공간의 잔향감에 관한 연구	2008.06
95	한국공간구조학회지	대공간 스피커 배치방식의 주관적 평가 연구	2010.09
96	2. 대한건축학회 3. 논문집	4. 일반역행렬을 이용한 케이블 돔 형 구조물의 자기평형 응력 모드 해석 방법	5. 2006.10
97	6. 대한건축학	8. 목적함수로서 벡터 노름을 이용한 2 차원 트러스구조의 최대강성 최적화	9. 2007.05

	회 7. 논 문집	문제	
98	한국공간구조학회논문집	텐세그리티 구조물 설계를 위한 다목적 최적화 기법에 관한 연구	2008.02
99	10. 한국공간구조학회논문집	11. 구조요소의 단면특성에 따른 와플슬래브의 동적특성 분석	12. 2008.03
100	한국공간구조학회논문집	화이트 노이즈 음파를 이용한 막구조물의 장력 측정장치 개발	2008.04
101	13. 한국풍공학회논문집	14. CFD 해석에 의한 산악지형의 풍속 할증 영향에 관한 연구	15. 2008.09
102	16. 한국공간구조학회논문집	17. 케이블-막구조물의 요소이동에 관한 연구	18. 2008.10
103	대한건축학회 논문집	ETFE 막재의 재료성능과 구조시스템에 관한 연구	2009.06
104	대한건축학회 논문집	인장 막 구조물에 발생하는 주름 해석 방법	2010.03
105	한국공간구조학회논문집	원사가 다른 건축물 막재의 인장 특성 연구	2010.09
106	한국공간구조학회	ETFE 막재에 대한 인장실험과 크리프 실험	2010.09
107	한국공간구조학회	온도변화에 따른 ETFE 막재의 재료특성 연구	2011.09
108	한국공간구조학회논문집	광섬유센서를 이용한 대공간 구조물의 상시 모니터링	19. 2007.06
109	한국공간구조학회논문집	광섬유 브래그 격자 센서를 이용한 텐서그리티 구조물의 변형 계측	20. 2008.12
110	한국공간구조학회논문집	붕괴모드 컨트롤형 철골조 시스템의 온라인 지진응답실험	2009.03
111	한국공간구조학회논문집	초대형막구조물 지붕용 ETFE 필름 막재의 인장특성	21. 2010.03
112	한국시공학회논문집	개폐식 대공간 막 구조물에서 지붕 맞댐부 우수차단 시스템의 수밀성 평가에 관한 연구	2010.06
113	한국공간구조학회논문집	막구조 건축물의 유지관리를 위한 표면 및 코팅층의 열화 진단	22. 2011.03
114	한국공간구조학회논문집	돔형 스페이스 프레임 구조물의 하중모드에 따른 분기점 특성에 관한 연구	23. 2011.03
115	한국강구조학회논문집	실변수 유전자 알고리즘을 이용한 사인형 주름 웨브 보의 최적구조설계	2011.10

116	한국강구조 학회지	반복하중을 받는 트러스 요소의 탄소성좌굴거동해석기법에 관한 연구	2008.06
117	대한건축학회 논문집	평면비대칭을 고려한 추가 감쇠기가 있는 시스템의 간략화된 지진응답해석	2008.12
118	대한건축학회 논문집	기하학적 비선형을 고려한 래티스돔 구조물의 동적 좌굴해석	2009.03
119	한국시공학회지	대폐식 대공간 막 구조물에서 지붕 맞댐부 우수차단 시스템의 수밀성 평가에 관한 연구	2010.06
120	대한건축학회 논문집	텐셔닝 에어빔 시스템의 구조성능에 관한 연구	2011.03
121	한국공간구조 학회지	재긴장과 무선모니터링이 가능한 유압식 케이블 접합부시스템의 실험에 대한 연구	2011.06

(1) 라. 국제 학술지 게재 목록

연번	국제학술지명	논문명	게재년, 월	SCI급 여부
1	Composites:Part B	Experimental study of RC beam-column joints strengthened using CFRP composites	2010	SCI(E)
2	Engineering Structures	Flexural-torsional behavior of thin-walled composite box beams using shear-deformable beam theory	2008.07	SCI
3	Engineering Structures	Flexural-torsional behavior of thin-walled composite box beams using shear-deformable beam theory	2008.07	SCI
4	Composite Structures	An analytical model for the flexural response of a fiber reinforced plastic deck using higher-order shear deformable plate theory	2008.10	SCI
5	The Structural Design of Tall and Special Buildings	Analytical Model for High-rise Wall Frame Structures with Outriggers	2008.11	SCI
6	Computers & Structures	Geometric nonlinear analysis of thin-walled composite box beams	2009.02	SCI
7	Thin-walled Structures	Buckling analysis of plates using two variable refined plate theory	2009.04	SCI
8	Composite Structures	On sixfold coupled vibrations of thin-walled composite box beams	2009.08	SCI
9	International journal of steel structures	Buckling and Post Buckling of Thin-walled Composite Columns with Intermediate-stiffened Open Cross-section Under Axial Compression	2009.09	SCI
10	Composite Structures	Free vibration of axially-loaded	2009.09	SCI

		thin-walled composite box beams		
11	International Journal of Mechanical Science	Flexural-torsional behavior of thin-walled composite space frames	2009.11	SCI
12	International Journal of Mechanical Science	Geometrically nonlinear theory of thin-walled composite box beams using shear-deformable beam theory	2010.01	SCI
13	International Journal of Mechanical Science	Geometrically nonlinear theory of thin-walled composite box beams using shear-deformable beam theory	2010.01	SCI
14	Composites: Part B	Experimental Study of RC beam-column joints strengthened using CFRP composites	2010.01	SCI
15	Computers and Structures	Advanced form finding of tensegrity structures	2010. 02	SCI
16	Structural Engineering and Mechanics	Fuzzy hubrid control of a wind-excited tall building	2010.10	SCI
17	Journal of Composites part B	Analytical Assessment and Modeling of RC Beam-Column Connections Strengthened with CFRP	2011.10	SCI
18	Journal of Composites part B	Analytical Assessment and Modeling of RC Beam-Column Connections Strengthened with CFRP	2011.10	SCI
19	24. The Structural Design of tall and special Buildings	25. AN ANALYTICAL MODEL FOR HIGH-RISE WALL-FRAME 26. STRUCTURES WITH OUTRIGGERS	27. 2 0 0 8. 1 0	SCI

(1) 마. 국내학술발표대회 목록

연번	국내학술지명	논문명	게재년, 월
1	대한건축학회 학술발표대회	부동탄성처짐을 고려한 덱크플레이트 일방향 슬래브의 근사 모멘트계수법	2006.10
2	대한건축학회 학술발표대회	불연속체 모델을 이용한 조적식 구조물의 구조해석	2006.10
3	대한건축학회 학술발표대회	동적 변위민감도를 고려한 RC구조물의 강성최적화 방안	2006.10
4	한국공간구조학회 학술발표대회	효율적 구조최적화를 위한 유전자 알고리즘의 개선	2007.05
5	한국전산구조공학회 학술발표대회	골조-전단벽 구조물의 횡변위제어를 위한 동적 민감도 해석	2007.04
6	한국공간구조학회 학술발표대회	개폐식구조의 적용유형에 관한 사례연구	2007.05
7	한국공간구조학회 학술발표대회	일산 웨스턴 돔 막 구조물의 구조모델링 및 형상해석을 통한 형상결정	2007.05
8	한국공간구조학회 학술발표대회	셀루러 빔의 경제성 평가	2007.05
9	한국공간구조학회 학술발표대회	동적 변위민감도해석을 이용한 고층 가새철골조의 거동특성평가	2007.05
10	한국공간구조학회 학술발표대회	조적식 석탑의 불연속체 구조모델링기법에 관한 연구	2007.05
11	한국콘크리트학회 학술발표대회	끼움링을 이용한 벽체용 이중단열 거푸집시스템의 구조성능평가	2007.05
12	한국공간구조학회 학술발표대회	28. 현수막 스타디움 구조물의 공사비 특성	29. 2007.05
13	한국공간구조학회 학술발표대회	30. 골조막 스타디움 구조물의 공사비 특성	31. 2007.05
14	한국공간구조학회 학술발표대회	32. 막구조를 이용한 경기장 구조물의 공사비 비교 분석	33. 2007.05
15	한국공간구조학회 학술발표대회	34. 철골 경기장 구조물의 건설비용 분석	35. 2007.05
16	한국공간구조학회 학술발표대회	36. 안성 국제 정구장의 구조설계 및 시공	37. 2007.05

17	대한건축학회 학술발표	유전 알고리즘을 이용한 지오데식돔의 설계 최적화	2007.10
18	구조물진단학회 가을 학술발표	스페이스프레임 볼트 접합부의 거동 특성	2007.11
19	공간구조학회 춘계 학술발표대회	단층 래티스돔의 용접접합부에 관한 실험연구	2008.05
20	한국공간구조학회 학술발표대회	외형에 따른 지붕 막구조물의 풍하중 영향 고찰	2008.05
21	한국공간구조학회 학술발표대회	대공간구조물 건설정보의 웹 데이터베이스 개발	2008.05
22	대한건축학회 추계학술발표회	민감도 해석기법을 이용한 지오데식 돔의 형상 및 크기 최적화 방안	2008.10
23	한국공간구조학회 춘계학술발표회	대공간을 위한 스포크 휠의 구조시스템	2009.05
24	한국공간구조학회 춘계학술발표회	복층 볼트 구조시스템의 형상생성 및 구조최적화	2009.05
25	한국공간구조학회 학술발표논문	재긴장이 가능한 케이블 접합부 시스템 개발에 대한 연구	2009.05
26	한국강조학회 학술발표논문	볼팅 고정용 비좌굴 Knee Brace의 내진성능에 대한 실험연구	2009.05
27	한국구조물진단구조공학회 학술발표논문	위상 최적화를 고려한 대공간 철골 트러스 구조물의 형상 결정 방안	2009.10
28	대한건축학회	채널형강으로 보강된 비좌굴 Knee Bracing System의 실험과 해석에 대한 연구	2009.10
29	대한건축학회	고장력 철근을 사용한 철근콘크리트 특수 모멘트 골조의 보-기둥 접합부 거동에 대한 실험적 연구	2009.10
30	대한건축학회	언더텐션 시스템이 적용된 거더의 구조적 성능에 대한 실험적 연구	2009.10
31	한국전산구조공학회 정기학술대회	개미군락최적화 알고리즘을 이용한 트러스 구조물의 설계최적화	2010.04
32	한국전산구조공학회 정기학술대회	통합설계최적화 과정에서 내력밀도법의 역할	2010.04
33	한국전산구조공학회 정기학술대회	통합설계최적화 기법을 이용한 아치형 트러스의 설계	2010.04
34	한국공간구조학회 춘계학술발표회	아치형 철골조 구조물의	2010.05

		초기 형상 결정 프로세스 연구	
35	한국구조물진단유지관리공학회 춘계학술발표대회	켄틸레버형 철골구조물의 초기 형상 설계를 위한 위상최적화 기법 연구	2010.05
36	한국공간구조학회 학술발표대회	막구조 접합부 인장특성에 관한 연구	2010.05
37	한국공간구조확회 학술발표대회	재긴장과 모니터링이 가능한 케이블 접합부 시스템 개발에 대한 연구	2010.05
38	한국강구조학회 학술대회	수직 비정형성을 가진 철골 특수모멘트골조 건물의 내진성능평가	2010.05
39	한국강구조학회 학술대회	케이블 장력의 재긴장과 모니터링이 가능한 케이블 접합부 시스템의 실험 연구	2010.06
40	대한건축학회 학술발표대회	구조물의 형태생성을 위한 Morphogenesis기법의 활용방안	2010.10
41	대한건축학회 학술발표대회	Celular Automata 모델을 이용한 리브돔 구조물의 패턴형성	2011.04
42	대한건축학회	고장력철근을 사용한 철근콘크리트 내부 보-기둥 접합부 내진성능에 댛나 실험적 연구	2011.04
43	한국공간구조학회 학술발표대회	A study on isogeometric analysis of thick beams	2011.05
44	한국공간구조학회 학술발표대회	A study on isogeometric analysis of thick plates	2011.05
45	한국공간구조학회	재긴장이 가능한 케이블 접합부의 현장적용	2011.05
46	한국공간구조학회	수직 비정형성을 포함한 철골 모멘트골조의 내진거동 연구	2011.05
47	한국강구조학회	수직 비정형성을 가진 철골 모멘트 건물의 성은신뢰도 평가	2011.06
48	한국강구조학회	취약성 등고선을 이용한 저층 철골 건물의 효율적인 보강 방법에 대한 연구	2011.06
49	한국강구조학회	초기 긴장이 가능한 케이블 접합부 시스템 개발에 대한 연구	2011.06
50	대학건축학회 추계학술발표대회	형상조절기법을 포함하는 내력밀도법에 관한 연구	2011.10

51	대학건축학회 추계학술발표대회	생물학적 알고리즘을 이용한 아치형 스페이스 프레임 구조물의 형태생성	2011.10
52	한국공간구조학회 국제심포지엄 및 춘계학술발표회	제천, 오창 폐기물 매립장 에어돔 구조설계 및 시공	2006.05
53	한국공간구조학회 국제심포지엄 및 춘계학술발표회	일산 웨스턴 돔 막 구조물의 구조모델링 및 형상해석을 통한 형상결정	2006.05
54	한국공간구조학회 국제심포지엄 및 춘계학술발표회	연성 구조물 전용 해석/설계 프로그램 NASSwin을 이용한 막 구조물의 구조설계	2006.05
55	2007년도 한국지진공학회 학술발표회	채널 형강을 이용한 비좌굴 가새의 내진 성능에 대한 실험 연구	2007.03
56	한국전산구조공학회 2007 정기 학술대회	바닥판 구조물의 진동제어를 위한 준능동 TMD의 적용	2007.04
57	한국공간구조학회 국제심포지엄 및 춘계학술발표회	라이즈비(Rise-ratio)에 따른 아치의 고유진동특성	2007.05
58	2008 춘계소음진동 학술대회	철근콘크리트 실험체의 시스템 식별과 유한요소모델수정	2008.04
59	2008년도 한국전산구조공학회 정기학술대회	납고무받침 면진장치와 마찰진자 면진장치에 의한 트러스-아치 구조물의 지진거동 비교	2008.04
60	한국 공간 구조 학회 학술발표 대회	Geometrically nonlinear analysis of thin-walled open-section composite beams	2008.05
61	한국강구조학회 학술발표대회	스페이스 트러스의 비탄성비선형 동적해석	2008.05
62	한국강구조학회 학술발표대회	부재요소에 따른 공간구조물의 비선형 해석	2008.05
63	2008 한국공간구조학회학술발표대회	저속충격을 받는 복합적층판의 두께 변화에 따른 충격거동 조사	2008.05
64	2008 한국공간구조학회학술발표대회	쉘형 스페이스 프레임 구조물의 하중 및 경계조건에 따른 불안정 거동에 관한 연구	2008.05
65	2008 한국공간구조학회 춘계학술발표회	장현보구조형식을 가지는 공간구조물의 정적지진하중 평가법에 관한 연구	2008.05
66	2008 한국공간구조학회 춘계학술발표회	납-고무면진장치가 적용된 트러스-아치 구조물의 지진거동 분석	2008.05

67	대한건축학회 학술발표대회	반응수정계수와 주기의 영향이 고려된 철골모멘트저항골조 건물의 내진성능평가에 관한 연구	2008.10
68	대한건축학회 학술발표대회	내진성능에 대한 채널 형강으로 보강된 Knee Bracing System의 실험적 평가	2008.10
69	2008 대한건축학회 학술발표대회	내진성능에 대한 채널 형강으로 보강된 비좌굴 Knee Bracing System의 실험적 평가	2008.10
70	2008 대한건축학회 학술발표대회	반응수정계수와 주기의 영향이 고려된 철골모멘트저항골조 건물의 내진성능평가에 관한 연구	2008.10
71	ISSS	Material Geometrically nonlinear analysis of tensegrity structures	2009.03
72	한국공간구조학회 학술발표대회	ADINA를 이용한 언더텐션 구조물 비선형 해석	2009.05
73	한국공간구조학회 학술발표대회	텐서그리티 구조의 실용화 연구	2009.05
74	한국강구조학회 학술발표대회	고유치문제로 정식화된 텐세그러티 구조물의 자기평형 응력 모드	2009.05
75	한국강구조학회 학술발표대회	마이크로 유전 알고리즘을 이용한 언더텐션 구조물의 최적설계	2009.05
76	한국공간구조학회	위상곡면 특성에 의한 얕은 EP쉘 구조물의 동적불안정 거동 분석	2009.05
77	한78국공간구조학회	스페이스 트러스구조물의 라이즈-스팬, 하중비 및 초기 형상불안정에 따른 분기좌굴 특성에 관한 연구	2009.05
78	한국공간구79조학회춘계 학술발표회	축소모형의 진동대 실험을 통한 아치구조의 지진응답에 관한 연구	2009.05
79	한국공간구조학회춘계 학술발표회	아치구조물의 하부구조에 따른 고유주기 특성에 관한 실험적 연구	2009.05
80	한국강구조학회 춘계학술발표	취약도 해석을 통한 다양한 접합부 이력모델이 고려된 철골 모멘트저항골조의 내진성능평가	2009.05

81	한국공간구조 춘계학술발표	복층 배럴볼트 시스템의 지진거동에 대한 연구	2009.05
82	한국콘크리트학회 2009년도 봄 학술 대회	진동법을 이용한 지지케이블의 장력추정	2009.05
83	대한건축학회 학술발표대회	텐서그리티형 케이블 돔의 형상에 따른 형상 탐색	2009.10
84	대한건축학회 학술발표대회	좌굴을 고려한 언더텐션 구조의 최적설계	2009.10
85	대한건축학회 학술발표대회	언더텐션 시스템 보의 비탄성 비선형 해석	2009.10
86	대한건축학회 학술발표대회	고유치문제로 정식화된 멀티 스테이지 텐세그러티 구조물의 자기평형 응력 모드 해석	2009.10
87	대한건축학회	스페이스 트러스의 강성 방정식을 이용한 비선형 해의 비교	2009.10
88	대한건축학회	기하학적 비선형을 고려한 얕은 스페이스 트러스 구조물의 동적좌굴 거동 분석	2009.10
89	대한건축학회 대구, 경북지회 학술발표대회	아치구조물의 하부기둥에 따른 지진응답에 관한 실험적 연구	2010.03
90	한국공간구조학회 학술발표대회	케이블 형상에 따른 언더텐션 보의 비탄성 비선형 해석	2010.05
91	한국공간구조학회 학술발표대회	텐세그리티 그리드 구조물의 비탄성 비선형 해석	2010.05
92	한국공간구조학회	래티스 돔 구조물의 정적 구조불안정 특성에 관한 연구	2010.05
93	한국공간구조학회	적층수에 따른 복합판의 저속충격거동 조사	2010.05
94	2010 한국공간 구조 학회 춘계학술발표회 논문집	준능동 감쇠기를 적용한 최상층 면진시스템의 수치해석적 연구	2010.05
95	한국강구조학회 학술발표대회	하중법을 이용한 텐서그리티 구조 해석	2010.06
96	한국강구조학회 학술발표대회	초기 인장력에 따른 텐세그리티형 케이블 돔 구조물의 거동	2010.06
97	한국강구조학회 학술발표대회	텐세그리티 그리드 구조물의 비탄성 비선형 해석	2010.06
98	2010 대한건축학회	풍동해석시 구조물의	2010.10

	추계학술발표대회 논문집	입력동하중의 최적간격	
99	대한건축학회 학술발표대회	초기인장력 크기에 따른 텐세그리티 그리드 구조물의 거동	2010.10
100	2011 한국지진공학회 학술발표대회 논문집	대공간구조물의 지진응답저감을 위한 스마트 면진시스템의 적용	2011.03
101	한국공간구조학회	래티스 돔 구조물의 동적 구조불안정 특성에 대한 연구	2011.05
102	한국공간구조학회	래티스 패턴에 의한 스페이스 프레임의 불안정 특성	2011.05
103	2011 대한건축학회 추계학술발표대회 논문집	대공간구조물에 관한 국내·외 내진설계 비교	2011.10
104	한국공간구조학회	막구조물 막장력 측정장치 개발에 관한 연구	2008.05
105	한국공간구조학회	단층래티스 돔의 구조적 특성과 안정성 검토	2010
106	한국강구조학회	킬트러스 대공간 구조물의 Erection 공법 개발 (Rotation-Up 공법 개요)	2011.06
107	한국강구조학회	Rotation-Up 공법에 의한 킬트러스 대공간 구조물의 Erection 실험에 관한 연구	2011.06
108	한국공간구조학회	아치형 하우스의 풍압분포에 관한 연구	2009.05
109	한국공간구조학회	우산형 현수막 탄성모형에 대한 풍동실험 연구	2009.05
110	대한건축학회 학술발표대회 논문집	우산형 현수막 탄성모형에 대한 풍진동 응답 연구	2009.10
111	한국공간구조학회	안장형 (saddle형) 막 구조물 모형에 대한 풍응답 연구	2010.05
112	대한건축학회 학술발표대회 논문집	태양열 집열판에 작용하는 풍압력 평가	2010.10
113	대한건축학회 학술발표대회 논문집	초고층 건물 최상층 유입구 형상 및 개수에 따른 풍력에너지 평가에 대한 연구	2011.10
114	대한건축학회 학술발표대회 논문집	국내 PV통합 프로젝트의 사례분석	2008.10
115	한국공간구조학회 춘계학술발표대회 논문집	대공간 구조물의 PV 시스템 비교분석	2009.05
116	대한건축학회 학술발표대회 논문집	강구조 스타디움의 PV 접합 시스템 분석	2009.10
117	한국공간구조학회 춘계학술발표회 논문집	Interactive Media를 적용한 대공간 구조물에 관한 연구	2010.05
118	한국음향학회 추계학술대회	FDTD를 이용한 임피던스 튜브 시뮬레이션	2008.11
119	한국음향학회 추계학술대회	coupled space에서 주관적	2008.11

		잔향감에 관한 연구	
120	한국음향학회 춘계학술대회	비선형 음에너지 감쇠패턴을 갖는 공간의 새로운 잔향시간 평가방법	2011.03
121	21st International Symposium for the 1st Architectures	UNIAXIAL TENSILE TEST OF ETFE FILM	2007.03
122	한국구조물진단학회 봄 학술발표	텐션그리티 돔 구조물의 자기평형 형상 결정 방법	2007.05
123	KASS Symposium	자기평형응력 모드 해석에 의한 텐세그리티형 돔구조물의 평형형상 결정 방법	2007.05
124	KASS Symposium	케이블 돔 구조물 설계를 위한 수치해석 방법	2008.05
125	한국건축시공학회 학술기술논문발표회	압전소자를 이용한 케이블의 손상평가	2008.11
126	한국건축시공학회 2008년도 추계 학술발표대회	압전소자를 이용한 케이블의 손상평가	2008.11
127	KASS Symposium	막 구조물에서의 주름 발생에 관한 연구	2009.05
128	KASS Symposium	인장 막 구조물의 주름발생에 관한 연구	2010.05
129	한국공간구조학회 2011 춘계학술발표회	ETFE 막재의 역학적 특성(I)	2011.05
130	한국공간구조학회 2011 춘계학술발표회	ETFE 막재의 역학적 특성(II)	2011.05
131	한국구조물진단학회 2007년 학술발표대회	광섬유 FBG센서를 이용한 대공간 구조물의 계측	2007.05
132	한국공간구조학회 2007년 춘계학술발표대회	FBG센서를 이용한 대공간 구조물의 변형계측	2007.05
133	한국강구조학회 2007년 춘계학술발표대회	FBG센서를 이용한 공기 막구조물의 상시계측	2007.06
134	한국건축시공학회 2010년도 춘계학술논문발표대회	개폐식 대공간 구조물에서 지붕 맞댐부 우수차단 시스템의 수밀성 평가에 관한 연구	2010.05
135	2011년 한국공간구조학회학술발표대회	셀룰러 빔의 좌굴 거동에 관한 해석적 연구	2011.05
136	한국공간구조학회 학술발표대회	Structural Design of Commercial "City7"	2009.05
137	한국공간구조학회 학술발표대회	텐셔닝 에어빔의 구조성능에 관한 연구	2009.05
138	한국전산구조 공학회 학술대회	텐셔닝 에어빔 시스템(TABS)의 휨실험 및 수치해석	2010.04
139	한국전산구조 공학회 학술대회	고유치해석에 근거한 텐세그러티 구조물의 형상탐색	2010.04
140	한국공간구조학회 학술발표대회	Inflated Panel을 사용한 텐셔닝 에어빔 시스템의 휨실험 및 수치해석	2010.05
141	대한건축학회 학술발표대회	건축용 막재의 인장강도 시험 하중재하실험	2010.10
142	대한건축학회 학술발표대회	건축용 막재의 인장강도 시험을 근거로 한 이중막 구조의 압력실험	2010.10
143	한국공간구조학회 학술발표대회	케이블 장력 모니터링을	2011.05

		통한 장력 분포에 관한 연구	
144	한국공간구조학회 학술발표대회	실제 대공간 구조물에 적용된 핵심 요소기술에 대한 소개	2011.05
145	한국강구조학회 학술발표대회	대공간 구조물에 적용 가능한 핵심 요소기술에 관한 연구	2011.06

(1) 바. 국제학술발표대회 목록

연번	국내학술지명	논문명	게재년, 월
1	IASS-APCS Symposium	Function and Development of Present Footbridge Design in Korea	2006.10
2	IASS-APCS Symposium	Nonlinear Constructional Analysis of Zeltin-Typed Cable Dome Structures Considering Geometrical Nonlinearity	2006.10
3	The 6th International Symposium on Architectural Interchanges in Asia,	Quantitative Lateral Drift Control of Shear Wall Outrigger System using Sensitivity Analysis	2006.10
4	IASS-APCS Symposium	The Static Unstable Characteristics of Tensegrity Cable Domes according to Loading Conditions	2006.10
5	38. 7 t h International Symposium on 21st Century Architecture	39. An analysis on the Construction cost of spatial structures - focusing on jeju world cup stadium	40. 2007. 03
6	41. 7 t h International Symposium on 21st Century Architecture	42. Nom-linear analysis of shell structures using a flat triangular shell element	43. 2007. 03
7	The 11th international conference on civil, structural and environmental engineering computing	A three-dimensional topology optimization technique considering both static and dynamic characteristics of the structures	2007.09
8	44. I A S S Symposium 2 0 0 7 , VENICE-ITALY	topology optimization techniques considering dynamic characteristics of plate and shell structures with the use of three-dimensional solid finite element technology based on CATO algorithm	2007.12
9	45. I A S S	46. Analysis on the	47. 2007.

	Symposium 2007, VENICE-ITALY	construction cost of spatial structures in korea	12
10	48. IASS Symposium 2007, VENICE-ITALY	49. Structural Design and construction of An-Seong international indoor tennis court	50. 2007. 12
11	IASS Symposium 2008, Mexico	Shape and size optimization technique considering both static and dynamic characteristics of shell structure	2008.10
12	IASS Symposium 2008, Mexico	Flexural rigidity of single-layer latticed domes with welded connection	2008.10
13	IASS Symposium 2009, Shanghai	Evolution of 2D Truss Structures using Topology Optimization Technique with Meshless Method	2009.09
14	CODE2009	Structural Optimization of Double-Layer Vault System according to Lattice Division and Member Grouping	2009.10
15	IASS Symposium 2010	Optimal Design of Spatial Steel Truss Structure using Topology Optimization of Unit Structural Model	2010.11
16	IASS Symposium 2010	Free vibraion analysis oflaminated composite plates using assumed strain plate FE based on higher order shear deformation theory	2010.11
17	IASS Symposium 2010	The safety assessment of containment shell building in Korea nuclear power plant	2010.11
18	IASS Symposium 2010	Experimental study of Cable Connection Systems With Re-tensioning and Wirekess Monitoring	2010.11
19	IASS Symposium 2010	A study on the characteristics of architectural membrane according to yarn	2010.11
20	ASEM11+	Isogeometric analysis of beam structures under free vibration condition	2011.09
21	IASS 2011	Advanced Topology Optimisation Technique with Meshless Method using Cellular Automata for Planar Structures	2011.09
22	IASS 2011	Minimizing the Self-weight Deflection	2011.09

		of Tensegrity Structures	
23	IASS 2011	Symmetry Adapted Analysis of the Hoberman Switch-Pitch Ball	2011.09
24	IASS 2006	NONLINEAR DYNAMIC INSTABILITY OF SHALLOW ARCHES BY RUNNING RESPONSE SPECTRUM CHARACTERISTICS	2006.12
25	IASS 2006	An Estimate for Convergence and Efficiency of Nonlinear Shape Analysis According to the Control Techniques	2006.12
26	IASS 2006	NONLINEAR CONSTRUCTIONAL ANALYSIS OF ZETLIN-TYPED CABLE DOME STRUCTURES CONSIDERING GEOMETRICAL NONLINEARITY	2006.12
27	IASS 2006	The Static Unstable Characteristics of Tensegrity Cable Domes According to Loading Conditions	2006.12
28	IASS 2006	A STUDY ON THE CUTTING PATTERN GENERATION OF MEMBRANE STRUCTURES AND LOSS RATIO OF FABRICS ACCORDING TO THE CURVATURE	2006.12
29	7th International Symposium on the 21st Century Architecture	THE DYNAMIC RESPONSE IN HIGER MODES OF SINGLE-LAYER LATTICED SPHERICAL SHELLS SUBJECTED TO SEISMIC MOTION	2007.03
30	Asian-Pacific Network of Centers for Earthquake Engineering Research(ANCER) Conference 2007	EVALUATION OF RESPONSE MODIFICATION FACTORS FOR STEEL MOMENT FRAME BUILDINGS SUBJECTED TO SEISMIC LOADS	2007.05
31	IASS2007 Venice Symposium	SEISMIC DEMAND AND CAPACITY EVALUATION OF SPATIAL STRUCTURES SUBJECTED TO EARTHQUAKE LOADINGS	2007.12
32	IASS 2007-VENICE	A STUDY ON THE DYNAMIC TRANSITENT RESPONSES OF COMPOSITE LAMINATED PLATES CONSIDERING INDENTATION	2007.12
33	IASS 2007-VENICE	A STUDY ON THE SMOOTHING PATTERN LINE FOR THE CUTTING PATTERN GENERATION OF MEMBRANE STRUCTURES	2007.12
34	IASS 2007-VENICE	A STUDY ON THE CUTTING PATTERN GENERATION OF	2007.12

		MEMBRANE STRUCTURES USING TRIANGULAR RE-MESH	
35	Engineering Structures	Flexural-torsional behavior of thin-walled composite box beams using shear-deformable beam theory	2008.07
36	IASS	Material and geometric nonlinear analysis of space trusses	2008.10
37	IASS	Analysis of thin-walled composite space frame	2008.10
38	Composite Structures	An analytical model for the flexural response of a fiber reinforced plastic deck using higher-order shear deformable plate theory	2008.10
39	The 14th World Conference on Earthquake Engineering	SEISMIC BEHAVIOR AND EVALUATION OF STEEL SMF BUILDINGS WITH VERTICAL IRREGULARITIES	2008.10
40	IASS-SLTE 2008 SIMPOSIUM	Seismic Evaluation of Double-Layer Barrel-Vault Arch Systems Subjected to Earthquake Loadings	2008.10
41	IASS	Development of Measuring System of Membrane Stress for Membrane Structures	2008.10
42	The Structural Design of Tall and Special Buildings	Analytical Model for High-rise Wall Frame Structures with Outriggers	2008.11
43	The Eleventh East Asian-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-11)	A HYBRID CONTROL ALGORITHM OF MR-TMD(SEMIACTIVE TMD) FOR FLOOR VIBRATION CONTROL	2008.11
44	Computers & Structures	Geometric nonlinear analysis of thin-walled composite box beams	2009.02
45	Thin-walled Structures	Buckling analysis of plates using two variable refined plate theory	2009.04
46	APCS	MATERIAL AND GEOMETRICALLY NONLINEAR ANALYSIS OF PIN-JOINTED	2009.05
47	APCS	FORM-FINDING OF TENSEGRITY STRUCTURES BASED ON EIGENVALUE	2009.05
48	APCS	A STUDY ON BIFURCATION BUCKLING OF SPACE TRUSSES BY VARIOUS RISE-SPAN RATIO AND LOAD RATIO	2009.05
49	APCS	ON THE CHARACTERISTIC OF	2009.05

		INDIRECT SNAPPING OF SHELL-LIKE STRUCTURES	
50	APCS 2009	A STUDY ON SEISMIC REPOSE OF ARCH STRUCTURE BY EXPERIMENT OF SCALE-DOWN MODEL ON SHAKING TABLE	2009.05
51	The 16th International Congress on Sound and Vibration	Hybrid model of floor structure with MR-TMD for floor vibration control	2009.07
52	Composite Structures	On sixfold coupled vibrations of thin-walled composite box beams	2009.08
53	IASS	Advanced Form-Finding for Cable Dome Structures.	2009.09
54	International journal of steel structures	Buckling and Post Buckling of Thin-walled Composite Columns with Intermediate-stiffened Open Cross-section Under Axial Compression	2009.09
55	Composite Structures	Free vibration of axially-loaded thin-walled composite box beams	2009.09
56	IASS	Comparison of nonlinear solutions between tangential stiffness equation and third order nonlilinear equation on bifuraction load of space trusses	2009.10
57	CODE 2009	Dynamic Instability Characteristics of E.P. Shell-typed Structures	2009.11
58	World Congress on Science, Engineering and Technology, 2009	Analysis of Dynamic Loads Induced by Spectator Movements in Stadium	2009.11
59	International Journal of Mechanical Science	Flexural-torsional behavior of thin-walled composite space frames	2009.11
60	International Journal of Mechanical Science	Geometrically nonlinear theory of thin-walled composite box beams using shear-deformable beam theory	2010.01
61	The 5th Civil Engineering Conference in Asian Region and Australasian Structural Engineering Conference 2010	Seismic Response Control of Arch Structures by Using Passive TMD	2010.08
62	IASS	Nonlinear Behavior of Under-tensional Beams	2010.11
63	IASS	Optimization of Pretensioned truss structures using Micro Genetic Algorithms	2010.11
64	IASS	Instability Characteristic of Space Frames with Various Networks	2010.11

65	IASS	Comparison of Dynamic Instability Behavior for Space frames with Various Networks	2010.11
66	IASS	Investigation of transient responses of composite plates under low-velocity impact load considering various thicknesses	2010.11
67	IASS	Overview on EXPO 2012 Yeosu in Korea	2010.11
68	CEBM 2011	Form-finding of Multi-stage Tensegrity Structures by Using SVD Force Method	2011.07
69	IASS	Instability of Bracing Reinforce Cable Domes	2011.09
70	IASS	Instability Characteristic of Space Frames by Lattice Pattern	2011.09
71	IASS Symposium	DEVELOPMENT OF MEASURING SYSTEM OF MEMBRANE STRESS FOR MEMBRANE STRUCTURE	2008.04
72	IASS Symposium	A study on buckling characteristics of single-layer lamella domes according to erection process	2010.09
73	IASS2010	건축음향을 고려한 대공간의 전기음향설계방법	2010.11
74	IASS Symposium	BUCKLING & BEHAVOUR OF THE SINGLE-LAYER LATTICED DOME IN ERECTION PROCESS	2007
75	IASS Symposium	Development of the Erection Method for Spatial Structures with Keel Trusses (Application of the Rotation-up Method)	2011.09
76	IASS Symposium 2007	DETERMINATION OF SELF-EQUILIBRIUM STRESS MODE OF CABLE-DOME STRUCTURES	2007.12
77	IASS-IACM 2008	Shell surface with curved fold lines inspired by paper folding art	2008.05
78	IASS Symposium 2009	Membrane structure in the form of Mobius strip	2009.10
79	IASS Symposium 2010	Shell surface with curve fold lines	2010.11
80	IASS Symposium 2010	The Comparative Test on Mechanical Properties of Architectural Membrane	2010.11
81	IASS-IACM 2008	Deformation Measurement of Scaled Tensegrity structure using Fiber optic sensor	2008.10
82	APCS 2009	A Study on Bifurcation buckling of Space trusses by various Rise-span ratio and Load ratio	2010.05
83	第10 回 日韓建築材料施工 Joint Symposium	Investigation on the Watertightness Properties of Rain-Block System on the Sliding-Roof Joint of Large-span membrane structures	2010.09

84	IASS Symposium 2010	Tensile strength tests on ETFE film for roof materials in Large menbrane structures	2010.11
85	IABSE-IASS Symposium 2011	Instability Characteristic of Space Frames by Lattice Pattern	2011.09
86	APCS	Structural Design of Commercial "City7"	2009.05
87	APCS	Experimental Study of Single-Layer Latticed Dome with the newly proposed joint sections	2009.05
88	IASS	Experimental and Numerical Study for Tensioning Air Beam Systems	2010.11
89	IASS	A Study on Component Technology Applicable of the Spatial Structure Pilot Project	2011.09

(가)

(1) 사. 산학연간 기술지원 목록

연번	구분	기술지원		
		행사명 (날짜)	내용	대상
1	기술상담	유신 건축 설계 회의 (2006.10.02.)	안성 국제 정구장 설계안 상담	유신건축
2	교육 훈련	정동건축 연수 프로그램 (2006.11.06)	대공간 구조의 특성에 관련한 강연회	(주)정동건축기술사 사무소
3	기술상담	설계회의 (2007.01.22)	대공간구조의 설계 기법 상담	(주) 아이스트
4	교육 훈련	(주)대동 MS 내부 연수 프로그램 (2007.01.29)	대공간 구조의 설계에 관련한 강연회	(주) 대동 MS
5	교육 훈련	(주) MK 엔지니어링 내부 교육 프로그램 (2007.03.19)	대공간구조의 설계 기법 강연회	주) MK 엔지니어링
6	교육 훈련	(주)한국구조물안전원 내부 세미나 (2007.05.17)	대공간구조물의 안전진단 요령	(주)한국구조물안전원
7	교육훈련	(주)한국시설안전연구원 내부세미나 (2007.05.04)	대공간구조물의 Failure Mode	(주)한국시설안전연구원
8	교육훈련	2009.12.10	대공간 구조시스템의 설계최적화 기술개발 관련한 연구성과 및 기술 이전 가능성 대한 세미나	전 직원
9	교육훈련	2011.02.18	1. 설계최적화의 기본개념과 테크닉에 대하여 설명.2. 설계최적화 기법을 실제 구조물에 적용할 때 고려해야 할 사항.3. 설계최적화 기법의 확장과 관련한 isogeometric analysis에 대한 사항.	전 직원
10	교육훈련	2011.03.11	1. 설계최적화의 기본개념과 테크닉에 대하여 설명.2. 설계최적화 기법을 실제 구조물에 적용할 때 고려해야 할 사항.3. 설계최적화 기법의 확장과 관련한 isogeometric analysis에 대한 상항.	전 직원
11	기술공개	대공간 구조물에 대한 지진해석 및 응답평가 (2007.03.23)	- 대공간구조물에 대한 개념 및 분류 - 대공간구조물의 지진해석	(주) TNI구조엔지니어링

			- 대공간구조물의 지진응답에 대한 평가	
12	기술공개	KBC2005 내진설계기준의 이론적 배경과 적용 (2007.05.12)	- 2005 건축구조설계기준(KBC2005) 내진설계기준을 담고 있는 지진하중부분의 내용 소개	(주) 플러스구조엔지니어링
13	현장기술지도	2007.06.09	인천 송도 컨벤션 센터 안정성 검토 지도	포스코 건설
14	교육훈련	2007.06.11	NASS 재단도 작성 교육	(주)타이가 (구조엔지니어)
15	기술 교육	대공간 구조물의 구조 설계 (2007.10.16)	- 대공간 구조물의 구조설계의 유의 사항 - 대공간 구조물의 구조설계 포인트 교육 - 대공간 구조물 전용 해석 프로그램 NASS의 사용법 교육	(주)다원구조안전기술사사무소
16	기술 교육	대공간 구조물의 구조 설계 (2007.10.16)	- 대공간 구조물의 구조설계의 유의 사항 - 대공간 구조물의 구조설계 포인트 교육 - 대공간 구조물 전용 해석 프로그램 NASS의 사용법 교육	(주)타이가
17	기술공개	한국지진공학회 제22회 기술강습회 (2008.01.29)	- 건축물의 최신 내진설계기술의 흐름	실무종사자 및 지진공학회 회원
18	교육훈련	(주)주원 엔지니어링 기술지원 (2009.09.17)	대공간 건축물의 설계	관련실무자
19	교육훈련	(주)타이가 기술지원 (2009.10.09)	NASSwin을 사용한 막구조물의 형상해석	관련실무자
20	교육훈련	아이스트 (2010.02.26)	강성구조물 구조시스템의 특성	관련실무자
21	기술상담	형상해석에 대한 분석및 연구방향 제시 (2010.04.12)	형상해석에 대한 분석및 연구방향 제시	사업단 및 세종대학교 연구원
22	기술상담	언더텐션 시스템 대공간 구조물에 적용에관한 연구방향 (2010.04.15)	언더텐션 시스템을 고려한 교량 및 대공간구조물의 성능 검토에 대한 자문 및 토론 언더텐션 시스템 시공시 적용될 수 있는 접합부 상세에 대한 자문 4차년도 연구결과에 대한 보완점 자문	연구단 및 세종대학교 연구원
23	교육훈련	스페이스 프레임 구조물의 정적 구조불안정 특성 이해(1)	스페이스 프레임의 구조적 특징과 적용 사례 설명을 통하여 이 구조물의 정적 구조불안정의 특성	(주) 타이가 (참여 연구원 및 기업체 직원)

		(2010.09.23)	을 이해하고 이에 관련된 해석 알고리즘의 진행과정을 설명	
24	교육훈련	스페이스 프레임 구조물의 정적 구조불안정 특성 이해(2) (2010.10.08)	다양한 패턴을 가진 스페이스 프레임 구조물의 특징을 설명하고 모델링에 따른 스페이스 프레임 구조물들의 정적 구조 불안정 해석 결과를 설명	(주) 타이가 (참여 연구원 및 기업체 직원)
25	교육훈련	스페이스 프레임 구조물의 동적 구조불안정 특성 이해(1) (2010.12.07)	스페이스 프레임구조물의 동적 구조불안정특성에 대한 과정을 파악 및 알고리즘의 진행과정을 설명	(주) 마크막스 (참여 연구원 및 기업체 직원)
26	교육훈련	스페이스 프레임 구조물의 동적 구조불안정 특성 이해(2) (2010.12.10)	스페이스 프레임 구조물의 동적 구조불안정 특성 이해를 위해 해석 모델의 모델링 과정 후 동적 구조불안정 해석과 결과에 대하여 설명	(주) 마크막스 (참여 연구원 및 기업체 직원)
27	교육훈련	스페이스 프레임 구조물의 정적 구조불안정 특성 이해 (2011.06.14)	스페이스 프레임 구조물의 구조적 특징을 비롯한 다양한 패턴의 돔 구조물들의 구조불안정 해석과정 및 결과에 대하여 설명	(주) 주원엔지니어링 (참여 연구원 및 기업체 직원)
28	교육훈련	스페이스 프레임 구조물의 동적 구조불안정 특성 이해 (2011.08.25)	- 스페이스 프레임 구조물의 적용 사례 설명 - 이산계 비선형 동적 안정해석을 위한 알고리즘의 진행 과정 설명 - 해석을 위한 모델링 과정 설명 - 스페이스 프레임 구조물의 동적 구조 불안정 해석 및 결과 설명	(주) 주원엔지니어링 (참여 연구원 및 기업체 직원)
29	교육훈련	휨을 고려한 스페이스 프레임 구조물의 구조불안정 특성 이해 (1) (2011.09.28)	- 스페이스 프레임 구조물의 구조적인 특징 설명 - 휨을 고려한 비선형 강성방정식의 정식화 과정 설명 - 휨을 고려한 스페이스 프레임의 구조불안정 검토용 비선형 프로그램 개발 과정 설명	(주) 타이가 (참여 연구원 및 기업체 직원)
30	교육훈련	휨을 고려한 스페이스 프레임 구조물의 구조불안정 특성 이해 (2)	- 휨문제를 고려한 Star Dome 구조물의 구조불안정 특성 - 휨문제를 고려한	(주) 타이가 (참여 연구원 및 기업체 직원)

		(2011.10.11)	Parallel Lamella Dome 구조물의 구조불안정 특성 - 휨문제를 고려한 Three Way Grid Dome 구조물의 구조불안정 특성	
31	교육훈련	강성구조물의 구조불안정 설계 가이드라인 (2011.11.18)	- 강성구조물의 구조적 특징 설명 - 스페이스 프레임 구조물의 정적 구조 불안정 해석 과정 및 결과 설명 - 스페이스 프레임 구조물의 동적 구조 불안정 해석 과정 및 결과 설명 - 강성구조물의 종류에 따른 각각의 설계 가이드라인 설명	(주) 타이가 (참여 연구원 및 기업체 직원)
32	교육훈련	강성구조물의 구조불안정 설계 가이드라인 (2011.11.22)	- 강성구조물의 구조적 특징 설명 - 스페이스 프레임 구조물의 정적 구조 불안정 해석 과정 및 결과 설명 - 스페이스 프레임 구조물의 동적 구조 불안정 해석 과정 및 결과 설명 - 강성구조물의 종류에 따른 각각의 설계 가이드라인 설명	(주) 주원엔지니어링 (참여 연구원 및 기업체 직원)
33	기술상담	대공간건축물 기술세미나	- 대공간 구조물의 내진설계법	대공간 건축물에 관심이 있는 기술진
34	교육훈련	서울 서남권 돔 야구장의 Snapping 검토	서울 서남권 돔 야구장에 대한 초기불안정량과 좌굴모드 하중조건을 변수로 하여 구조불안정 해석 및 Snapping 검토 결과 설명	일건건축사사무소
35	교육훈련	대공간 구조물의 지붕개폐에 대한 진동영향 평가 및 하이브리드 스마트 면진시스템 적용방법	- 지붕개폐식 대공간 구조물의 진동영향 및 사용성 평가 - 하이브리드 스마트 면진제어시스템의 대공간 구조물에의 적용	(주)티엔아이구조엔지니어링
36	교육훈련	대공간구조물의 국내외 내진설계	- 일본 대공간 구조물의 내진설계 - 국내 내진설계 KBC2009	(주)티엔아이구조엔지니어링
37	현장기술지원	대공간 구조물 시공 (2011. 09)	- 대공간 구조물 Erection 공법 - 대공간 구조물 시공시 고려사항	고려개발

			- Rotation-up 공법 소개	
38	기술상담	2007.01.10	막구조 설계방법	(주)지원이엔지
39	설계기준	2009.05.16	케이블 지침서 기준 및 해설 발간	구조실무자
40	설계기준	2010.05.29	막구조 설계기준 및 해설 발간	구조실무자
41	기술상담	2007.03.15	센서관련 에로기술 상담	(주) FBG Tech 연구원 및 관련 실무자
42	현장기술지도	2007.04.18	현장기술 지도	(주) FBG Tech 연구원 및 관련 실무자
43	기술상담	2007.03.06	일본나가오카조형대학 코키교수 강연	관련 연구자 및 구조실무자
44	기술상담	2008.05.28	Amadeo Benavent-Climent 교수 강연	관련 연구자 및 구조실무자
45	기술상담	2008.06.11	전남대 이강석교수 및 광운대 양원직 교수 기술자문	관련 연구자 및 구조실무자
46	기술상담	2008.08.22	마츠이시교수 초청강연	관련 연구자 및 구조실무자
47	기술상담	2010.11.14	일리노이 대학 Prof. Junho Song 초청강연	관련 연구자 및 구조실무자
48	기술상담	2010.12.23	자유형상유리구조물의 설계 및 시공	(주)동성중공업 기술연구소 연구원 및 구조실무자
49	기술상담	2011.01.29	대공간 구조물관련 시방서에 대한 전문가 회의	(주)동성중공업 기술연구소 연구원 및 구조실무자
50	기술상담	개폐식 구동장치 실험 (2010.05.27.)	개폐식 구동장치의 설치된 모터의 속도 및 RPM, 용량에 대한 회의 실험체를 30도 기울일 때 발생할 수 있는 문제 예측 및 해결책 제시	CS구조 기술연구소, (주)동아스트 직원, 기업체 연구원
51	기술상담	Pilot Project 적용 및 막 인장실험 및 설치계획 (2010.08.13.)	막 인장실험(1축, 2축) 실험결과 분석 실제 Pilot Project 설계계획	CS구조 엔지니어 및 연구원, 기업체 연구원
52	기술상담	막 재료 인장시험 테스트 결과와 물성데이터 산정에 대한 자문 (2010.09.28.)	막 재료 인장시험 결과 분석 자료에 대한 토의 인장시험 결과를 바탕으로 물성데이터 산정시 과정 및 주의점 숙지	CS구조 연구원, 기업체 연구원
53	기술상담	300M Pilot Project 구조설계에 대한 자문 (2010.10.01.)	300M Pilot Project 구조설계 일정 수립 30M Pilot Poject 구조설계와의 상사법칙 적용 가능성 판단	CS구조 엔지니어 및 연구원, 기업체 연구원
54	현장기술지도	케이블 네트 구조에 대한 자문 (2010.11.22.)	형상탐색 결과 검토 파일롯 프로젝트 시공시 유의점 숙지	CS구조 연구원, 시공 참여업체(동아스트, 타이가, 세일, 건품연) 직원

(2) 아. 국제공동연구 목록

연번	참여 국가	참여 기관명	기술개발 내용	참여형태
1	영국	University of Cambridge	textured shell을 구조와 재료의 중간스케일로 분석텐세그리티구조의 기본 역학적 성질에 대한 분석(반복대칭해석)	공동연구
2	51. 일본	52. 일본 건축학회	53. 케이블구조의 설계지침	54. 공동연구
3	55. 말레이시아	56. USM	57. 공간구조에 대한 설계지침	58. 공동연구
4	59. 일본	60. 히로시마대학	61. 공간구조물의 구조설계에 관한 조사연구	62. 공동연구
5	63. 일본	64. 동경대학교	65. Studies on design code for ETFE membrane	66. 공동연구
6	67. 일본	68. 일본 나가오카조형대학	69. 단축변형을 이용한 막구조물의 장력계산방법	70. 연구자문
7	71. 중국	72. 통지대학교	73. ETFE foil mechanical properties and cushion structures	74. 공동연구
8	75. 일본	76. 일본 건축학회	77. 한국에서의 공간구조물에 대한 설계지침자료 작성	78. 공동연구
9	79. 일본	80. 교토대학교	81. 공간구조물의 해석법에 관한 조사 및 해설	82. 공동연구
10	83. 일본	84. 나고야대학교	85. 공간구조물의 구조설계에 관한 조사연구	86. 공동연구
11	87. 일본	88. 일본 건축학회	89. 한국에서의 공간구조물에 대한 90. 설계지침자료 작	91. 공동연구

			설	

(가)

자. 시제품 제작 목록

연번	시제품(사업화)			
	명칭	이용분야	제품화 업체	출시(예정)일
1	Hanging Up 공법 모형	교육 및 견학		2010
2	Hanging Up 공법 동영상물	교육 및 견학		2010
3	JACK-UP시스템 공법 모형	교육 및 견학	위드온	2011.02
4	대공간 건축물 Lift-Up 공법 모형	교육 및 견학		2007.05
5	휴대용 막장력측정기(PTMM)	막장력측정		2008.03
6	간이 막장력측정기	막장력측정		2008.03
7	2축인장시험기(TTM500)	막망력측정기 개발위한 막인장 테스트		2008.03
8	2축인장시험기(TTM200)	막 인장 및 물성 테스트		2008.03
9	막장력측정(PTMM)	(주)타이가 현장	위드온	2011.11

차. 시제품, 신기술 현장 적용 목록

연번	현장적용 내용	
	적용현장명	시공기관
1	일산 웨스턴돔 구조물의 안정성 검토	(주) 타이가
2	판교 8호교 교량	코스피(주)
3	막장력측정(PTMM)	(주)타이가 현장
4	막장력측정 및 막 물성치 측정(TTM200)	(주)타이가 충주 공장
5	막장력측정(TTM500)	(주)타이가 충주 공장

(1) 카. 연구성과 홍보 실적 목록

연번	연구성과 홍보 내용	장소	일시	비고
1	연구 성과 발표회	부산대학교 밀양 캠퍼스	2007.03.09	발표회
2	Steel & Glass	한국스틸건축학교	2007.5.17	강연회
3	연구 성과 발표회	대림대학	2007.06.08	발표회
4	대공간 건축물의 사례 분석	건설회관	2007.6.28-29	강연회
5	현대 건설 강연회	현대건설	2007. 09. 04	강연회
6	안산 시청 강연회	안산시청	2007. 10. 09	강연회
7	KBC2009 철근콘크리트구조 및 강구조 주요 개정내용의 이론과 배경	마이다스아이티	2010.02.23	강연회
8	Truss contest를 통한 대공간구조 연구내용 및 결과 홍보	경상대학교	2011.11.26	
9	대공간 구조 설계의 포인트	건설회관	2007.6.28-29	
10	대공간 건축물의 형태별 지진거동특성	한국공간구조학회	2008.2	학술기사
11	재단도 기법에 관한 강의 및 토의	MakMax	2008.08.21	
12	면진구조물에 대한 해석법의 선정 및 면진장치의 대공간구조물 적용	한국공간구조학회	2008.09	학술기사
13	대공간 건축물의 사례와 경제성과 설계포인트에 관한 강의 및 토의	삼성 본사 5층 회의실	2008.11.12	
14	대공간 구조물의 내진 설계법	논현동 건설회관 3층 중 회의실	2008.11.28	기술세미나
15	연성 구조물의 설계프로세스에 관한 강의 및 토의	건설회관 3층 중회의실	2008.11.28	
16	MR 감쇠기에 대한 성능평가 실험	한국공간구조학회	2008.12	학술기사
17	2방향 중공슬래브의 진동성능 검토	한국공간구조	2010.03	학술기사

연번	연구성과 홍보 내용	장소	일시	비고
		학회		
18	구조물의 진동제어 시스템	한국공간구조학회	2010.06	학술기사
19	강재 건축물의 BIPV지지 시스템과 적용사례	한국강구조학회	2008.12	학술기사
20	대공간 구조물의 PV패널 시스템	한국공간구조학회	2009.03	학술기사
21	Interactive Media를 적용한 도시공간 사례	한국공간구조학회	2010.06	기술기사
22	텐셔닝 + 에어빔/특수구조 설계 사례 대공간 시공 사례	건설회관	2008.08.20	기술세미나
23	IASS 50주년 기념 심포지엄 참가기	한국공간구조학회지	2009.12.15	학술기사
24	한국기술교육대학교 HRD홍보관 기공식	천안 한기대 부지내	2009.12.18	기공식
25	대공간 연구단 및 Pilot Project 홍보	건설경제신문	2010.05.18	기술기사
26	대공간 연구단 및 Pilot Project 소개	한국전산구조공학회 학회지	2010.07.15	학술기사
27	Pilot Project 공개설명회	천안 한기대 부지내	2010.12.09	현장 설명회
28	사례를 통한 인장구조의 구조설계원리 및 유지관리법	강구조학회지	2010.12.15	학술기사
29	IASS2010 국제 심포지움을 다녀와서	강구조학회지	2011.02.15	학술기사
30	대형돔구장 건립의 필요성	한국공간구조학회지	2011.06.15	학술기사



(2)



한국기술교육대학교 HRD홍보관 기공식 (2009.12.18.)

(3)



(4)

한국기술교육대학교 HRD홍보관 공개설명회 (2010.12.09.)

(5) 타. 연구단 워크샵, 기술세미나

일시	행사명	장소	내용	비고
2007. 02. 09	제1회 국제세미나	건설회관 3층 대회의실	- "How structure can contribute to architecture", Dr. Mamoru Kawaguchi, Professor Emeritus, Hosei University - "On large-span architectural planning and design", Chul-Hee Kang, Associate Professor, Hong-Ik University - "Ensuring structural safety of membrane structures; Based on failures/damages of large scale membrane structures in Japan", Kazuo ISHII, Professor Emeritus, Yokohama National University	100명 (엔지니어 및 업계관련기관 전문가 포함)
2007. 05. 18	제2회 국제세미나	서울산업대학교 아름관	- "Smooth Shapes and Stable Grids" Prof. Dr.-Ing. Jan Knippers, professor at Stuttgart University - "Concepts and Mechanics of Large Structure Systems in Space" Dr. Natori Michihiro, professor emeritus of the Institute of Space and Astronautical Science (ISAS/JAXA) - "The current construction status of the Membrane Structures in Korea" Byung-wook Cho, vice president of Tiger Corporation	120명 (엔지니어 및 업계관련기관 전문가 포함)
2008. 04. 18	3회 국제세미나	건설회관 3층 중회의실	- "A computer-assisted wind load evaluation system for the design of cladding of Spatial Structures" Prof. Yasushi Uematsu, Tohoku Uni. - "Recent research works on design optimization Shell and Spatial Structures" Prof. Lee, Sang-jin, Gyeongsang National University - "Nature Inspired Shell Surface with Folds" Prof. KK Choong, University of Science Malaysia	60명 (엔지니어 및 업계관련기관 전문가 포함)
2008. 09. 26	4회 국제세미나	건설회관 3층 대회의실	- "Development of Membrane Structures in China" Dr. Lu Pinqi, Business Director of Marketing Dept. at Shanghai Taiyokogyo Corp. - "European Structural Designs and Applications of High-Tech Transparent Structures" Dipl.-Ing. Don-U Park, CEO at the Park Consulting Engineers, Stuttgart, Germany - "Multi Purpose Function of the Open Space" Prof. Kerl Yoo, Partner of iArc Inc. / professor at Kyunghee University - "Damage of Ceiling in Large Span Building at Recent Earthquakes" Prof. Motoyui Shojiro, Dept. of Built Engineering, Tokyo Institute of Technology	52명 (엔지니어 및 업계관련기관 전문가 포함)
2010. 10. 29	제5회 국제세미	건설회관 3층	- "Measure of Optimized Structural Design for Spatial Structures" Lee, Dong-woo, President of	47명 (엔지니어

	나	중회의실	I'ST Structural Engineering - "Design Concept of the Spatial Structures" Seo, Hae-cheon, President of Space Architectural Design Group - "Invitaion to Wooden Architectures" Dr. Nakata Katsuo, Chairman of the board at the Okamoto Taro Museum of Art Promotion Foundation in Japan	및 업계관련기관 전문가 포함)
2011. 08. 26	제6회 국제세미나	건설회관 3층 대회의실	- "颱風 一過後" 조성중 박사, 일건 건축사 사무소 - 막구조물의 풍진동 해석, 실험 및 모니터링 (Analysis, test and monitoring on wind-induced vibration of membrane structure) Professor Qi-Lin ZHANG, Tongji University, China - 2011년 3월 일본 동북 대지진 건축물 피해 (Damage to Building Structures by the Japan Earthquake 3.11,2011) Professor Kenichi KAWAGUCHI, University of Tokyo, Japan	50명 (엔지니어 및 업계관련기관 전문가 포함)
2007. 06. 28	제1회 기술세미나	건설회관 중회의실	- 국외 고급 기술자들을 매년 정기적으로 초정해 상호 기술 교류의 장을 마련코자 함. - 실무자들이 기술력 향상에 집중할 수 있도록 강의와 토론을 병행하여 진행 - 강 사 : Mr. Ban Shigeru 김승덕 교수 (세명대학교) 박선우 교수 (한국예술종합학교)	40명 (엔지니어 .업계관련 기관 전문가 및 학생포함)
2008. 08. 20	제2회 기술세미나	건설회관 3층 대회의실	- 텐셔닝+에어빔/특수구조 설계사례 김종수 대표/(주)CS구조엔지니어링 - 대공간 시공 사례 박유복 사장/(주)세일비앤시 -막구조 접합부의 사례 조병욱 부사장/(주)타이가 -접합부 향후 연구과제 서삼열 교수/대림대학 -대공간 접합부 실패 사례 이장복 박사/(주)동아스트	60명 (엔지니어 .업계관련 기관 전문가 및 학생포함)
2008. 11. 28	제3회 기술세미나	건설회관 3층 중회의실	- 연성구조물의 설계프로세스 김승덕 교수/세명대학교 - Membrane 건축의 계획과 사례 류춘수 대표/(주)이공건축 - 대공간구조물의 내진 설계법 정찬우 박사/ 경북대학교	87명 (엔지니어 .업계관련 기관 전문가 및 학생포함)
2009. 04. 03	제4회 기술세미나	건설회관 3층 중회의실	- Dome & Stadium Projects in Japan Dr. Kimihiko Mogami / Managing Director, Takenaka Corp. - 대공간 설비 및 친환경 설비계획 최동호 교수/대구가톨릭대학교 - Acoustical Designs in some Japanese Dome Stadiums Dr. Toshiyuki Okano / Takenaka R&D Institute	88명 (엔지니어 .업계관련 기관 전문가 및 학생포함)
2009. 11. 20	제5회 기술세미나	건설회관 3층 중회의실	- 대공간구조물의 유지관리 김대영 박사/ 대우건설 - 대공간구조의 비탄성 비선형 해석 이재홍 교수/세종대학교 - 음향성능예측 및 평가기법 정대업 교수/전북대	43명 (엔지니어 .업계관련 기관

			- 케이블 구조의 설계기준 및 해설 이승재 교수/한국기술교육대학교	전문가 및 학생포함)
2006. 11. 25-26	1차년도 1차 워크샵 및 성과발표회	도고 토비스 콘도미니엄	- 14개 세세부의 연구목표, 연구성과물 발표	60명 (14개 세세부 연구책임자 및 연구원 포함)
2007. 01. 19	1차년도 2차 워크샵 및 성과발표회	대공간 건축물 연구단 회의실	- 14개 세세부의 연구목표, 연구성과물 발표	40명 (14개 세세부 연구책임자 및 연구원 포함)
2007. 03. 17-18	1차년도 3차 워크샵 및 성과발표회	경주교육문화회관 대회의장	- 14개 세세부의 연구목표, 연구성과물 발표 - 4인의 외부 평가위원의 평가	80명 (14개 세세부 연구책임자 및 연구원 포함)
2007. 06. 18	1차년도 4차 워크샵 및 성과발표회	한국기술교육대학교 산학협력단 회의실	- 14개세세부의 연구목표, 연구성과물 발표 - 4인의 외부 평가위원의 평가 - 세세부별 Cross check - 성과지표 달성도 40% + 내.외부 평가결과 60% 반영	55명 (14개 세세부 연구책임자 및 연구원 포함)
2007. 10. 19-20	2차년도 1차 워크샵 및 성과발표회	변산반도 썬리츠 랜드	- 14개 세세부의 연구목표, 연구성과물 발표	65명 (14개 세세부 연구책임자 및 연구원 포함)
2008. 02. 16	2차년도 2차 워크샵 및 성과발표회	세종대학교 충무관 세미나실	- 14개세세부의 연구목표, 연구성과물 발표 - 4인의 외부 평가위원의 평가 - 세세부별 Cross check - 성과지표 달성도 40% + 내.외부 평가결과 60% 반영	65명 (14개 세세부 연구책임자 및 연구원 포함)
2008. 04. 05	2차년도 2차 워크샵 및 성과발표회	대공간 건축물 연구단 회의실	- 4개 세부의 연구목표, 연구성과물 발표 - 4인의 외부 평가위원의 평가	50명 (14개 세세부 연구책임자 및 연구원 포함)
2008. 08. 22	3차년도 1차 워크샵 및 성과발표회	건설회관 3층 중회의실	- 14개 세세부의 연구목표, 연구성과물 발표	14개 세세부 연구책임자 및 연구원 포함
2009. 02. 21-21	3차년도 2차 워크샵 및 성과발표회	오크밸리 세미나실	- 14개세세부의 연구목표, 연구성과물 발표 - 4인의 외부 평가위원의 평가 - 세세부별 Cross check	100명 (14개 세세부 연구책임자 및 연구원 포함)

2009. 04. 18-19	3차년도 3차 워크샵 및 성과발표회	청풍리조트 세미나실	- 14개세세부의 연구목표, 연구성과물 발표 - 4인의 외부 평가위원의 평가 - 세세부별 Cross check	81명 (14개 세세부 연구책임자 및 연구원 포함)
2009. 08. 21	4차년도 1차 워크샵 및 성과발표회	대공간 건축물 연구단 회의실	- 12개세세부의 연구목표, 연구성과물 발표	12개 세세부 연구책임자 및 연구원 포함
2010. 02. 18-19	4차년도 2차 워크샵 및 성과발표회	무주리조트 세미나실	- 12개세세부의 연구목표, 연구성과물 발표 - 4인의 외부 평가위원의 평가	102명 (12개 세세부 연구책임자 및 연구원 포함)
2010. 03. 26	4차년도 3차 워크샵 및 성과발표회	대공간 건축물 연구단 회의실	- 4개 세부의 연구목표, 연구성과 및 5차년도 연구계획 발표	12개 세세부 연구책임자 및 연구원 포함
2010. 06. 11	5차년도 1차 워크샵 및 성과발표회	대공간 건축물 연구단 회의실	- 12개세세부의 연구목표, 연구성과물 발표	12개 세세부 연구책임자 및 연구원 포함
2010. 12. 04	5차년도 2차 워크샵 및 성과발표회	곤지암리조트 세미나실	- 12개세세부의 연구목표, 연구성과물 발표 - 4인의 외부 평가위원의 평가	105명 (12개 세세부 연구책임자 및 연구원 포함)
2011. 02. 25	5차년도 2차 워크샵 및 성과발표회	한국기술교육대학교	- 4개 세부의 연구목표, 연구성과 및 6차년도 연구계획 발표	12개 세세부 연구책임자 및 연구원 포함
2011. 05. 20	6차년도 1차 워크샵 및 성과발표회	대공간 건축물 연구단 회의실	- 10개 세세부의 연구목표, 6차년도 연구계획 발표	10개 세세부 연구책임자 및 연구원 포함
2011. 09. 30	6차년도 2차 워크샵 및 성과발표회	곤지암리조트 세미나실	- 10개세세부의 연구목표, 연구성과물 발표 - 2인의 외부 평가위원의 평가	60명 (10개 세세부 연구책임자 및 연구원 포함)
2011. 12. 09	6차년도 3차 워크샵 및 성과발표회	한국공간구조학회 회의실	- 4개 세부의 1-6차년도 연구목표, 연구성과발표	10개 세세부 연구책임자 및 연구원 포함

(6)



(7)

제1회 대공간 건축물 국제세미나
(2007.02.09.)



제2회 대공간 건축물 국제세미나
(2007.05.18.~19.)

(8)



(9)

제3회 대공간 건축물 국제세미나
(2008.04.18.)



제4회 대공간 건축물 국제세미나
(2008.09.26.)

(10)



(11)

제5회 대공간 건축물 국제세미나
(2010.10.29.)



제6회 대공간 건축물 국제세미나
(2011.08.26.)

(12)



(13)

제1회 대공간 건축물 기술세미나
(2007.06.28.)



제2회 대공간 건축물 기술세미나
(2008.08.20.)

(14)



(15)

제3회 대공간 건축물 기술세미나
(2008.11.28.)



제4회 대공간 건축물 기술세미나
(2009.04.03.)
(16)



(17)
제5회 대공간 건축물 기술세미나
(2009.11.20.)
(18)



(19)
1차년도 제2차 워크샵
(2007.01.19.)



1차년도 제3차 워크샵
(2007.03.17.~18.)
(20)



(21)

2차년도 제1차 워크샵

(2007.10.19.~20.)



2차년도 제2차 워크샵

(2008.02.16.)

(22)



(23)

2차년도 제3차 워크샵

(2008.04.05.)



3차년도 제1차 워크샵
(2008.08.22.)



3차년도 제2차 워크샵
(2009.02.20.)



3차년도 제3차 워크샵
(2009.04.05.)

(24)



4차년도 제1차 워크샵
(2009.08.21.)



4차년도 제2차 워크샵
(2010.02.18.~19.)

(25)

(26)



(27)

5차년도 제2차 워크샵
(2010.12.04.)



5차년도 제3차 워크샵
(2011.02.25.)

(28)



(29)

6차년도 제2차 워크샵
(2011.09.30.)



6차년도 제3차 워크샵
(2011.12.09.)



Pilot Project 와의 연계성

CHAPTER 4

가. 4.1 Pilot Project 개요

Pilot Project는 본 연구단에서 도출된 연구 결과, 즉 대공간 구조물의 핵심 요소 기술 및 응용 수준의 단위기술 개발 결과를 이용하여 요소기술의 실용화 연구를 목적으로 한다. 실용화 연구에서 무엇보다 중요한 것은 각 핵심 요소 기술과 단위기술에 대한 실용화 가능성 검증, 신뢰도 확보 및 그에 따른 추가 응용 기술 확보 등이며 이를 가장 정확히 실현할 수 있는 방법은 실제 실용화 가능성이 높은 Pilot Project를 선정하여 실행하는 것이다. 이를 위해 본 연구단은 300m 스팬의 대공간 건축물을 1/10 스케일로 축소한 실제 건축물 건설을 계획하였으며, 프로젝트의 개요는 아래와 같다.

- 사업명 : 한국기술교육대학교 HRD 홍보관 신축공사
- 대상지 : 충남 천안시 동남구 병천면 충절로 1800
- 지역 / 지구 : 계획관리지역 (대학)
- 건축 면적 / 연면적 : 1,007.23m^2 / 901.23m^2
- 용 도 : 문화 및 집회시설 (전시장)
- 층수 / 높이 : 지상1층 / 12.55m
- 구조 형식 : 철골조

Pilot Project 대상구조물은 준공 후 학교 전시시설 즉, 사회적 기반이 되며, 구축을 통한 건설기술 데이터 베이스는 향후 대공간 건축물 프로젝트를 수행하는 실무자에게 제공이 가능하다. 이 외에도 대공간 건축물에 주로 적용되는 막, 케이블과 같은 연성구조물의 설계 및 시공 기술을 실제 적용하는 계기가 될 수 있다.

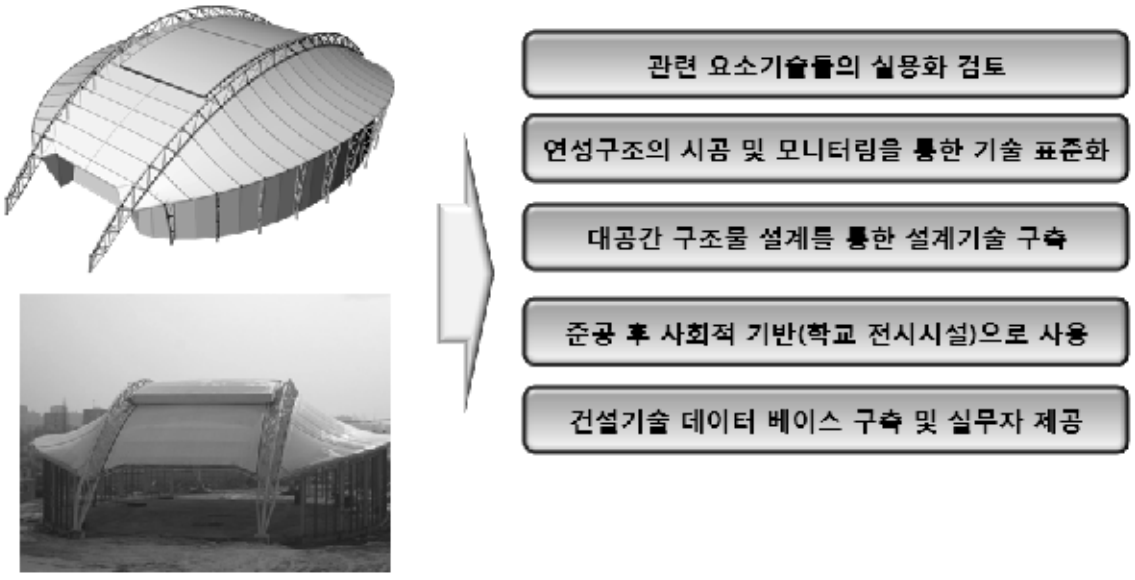


그림 4.1.1.1 Pilot Project 대상구조물 활용방안 및 기대효과

Pilot Project는 1/10 축소 스케일 대상구조물의 설계 및 시공뿐만 아니라 각 세세부에서 개발한 핵심 요소기술 적용을 통한 실용화 검증 연구도 중점적으로 수행하였다.

핵심 요소기술 중 소프트웨어적인 요소기술로는 킬아치의 위상최적화(1-1세세부, 경상대학교), 비선형 해석 및 불안정 판단(2-1세세부, 세종대학교, 2-2세세부, 세명대학교), 열, 풍, 음환경 등 친환경 설계기법 적용(3-3세세부, 대구가톨릭 대학교, 3-4세세부, 전북대학교) 및 연성구조물 설계기준 적용(4-1세세부, 한국공간구조학회) 등이 있다. 또한 하드웨어적인 요소로서는 유압식 재긴장 소켓 및 무선모니터링 시스템(1-2세세부, 건설품질연구원, 4-2세세부, 한국기술교육대학교), 가설공법(3-2세세부, 경북대학교), TABS 및 개폐식 지붕구조(4-3세세부, CS구조엔지니어링) 등이 있다.

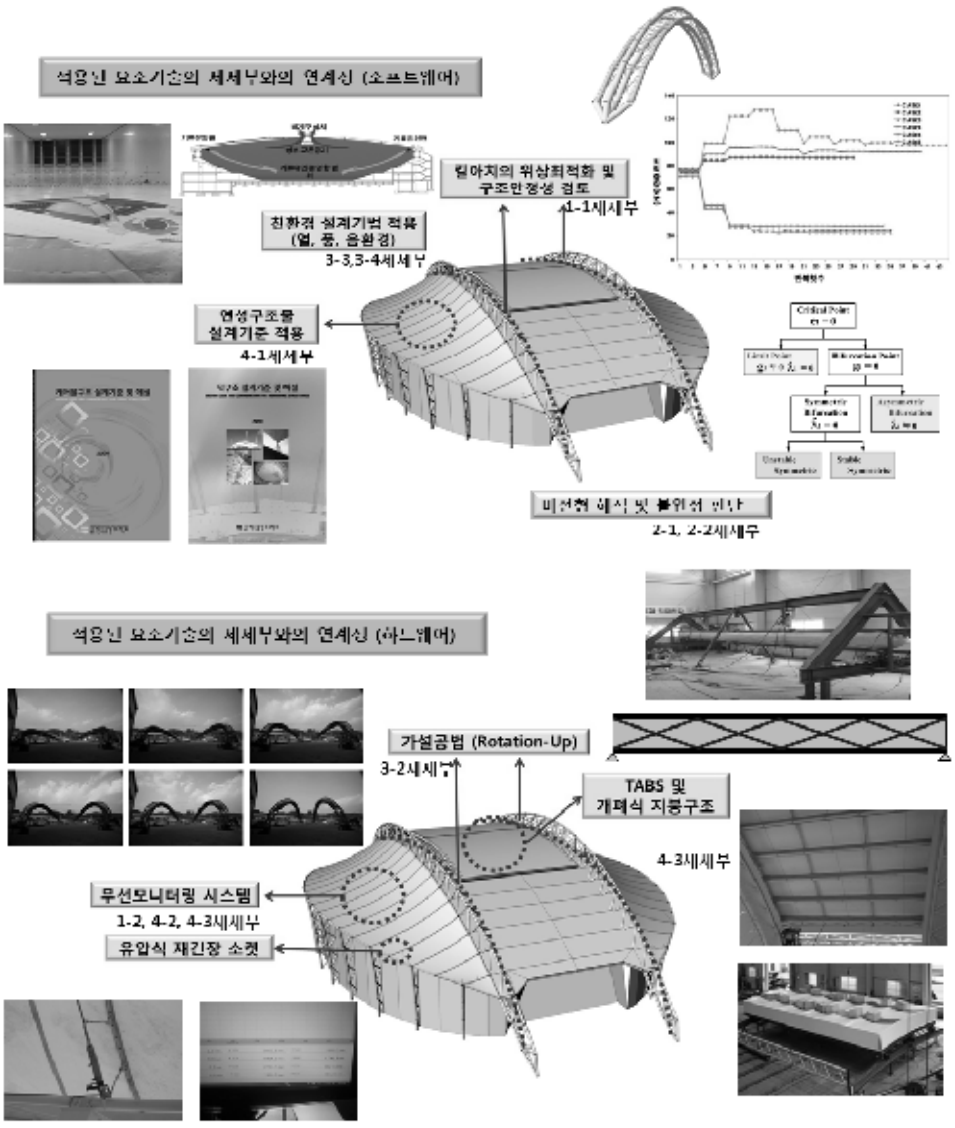
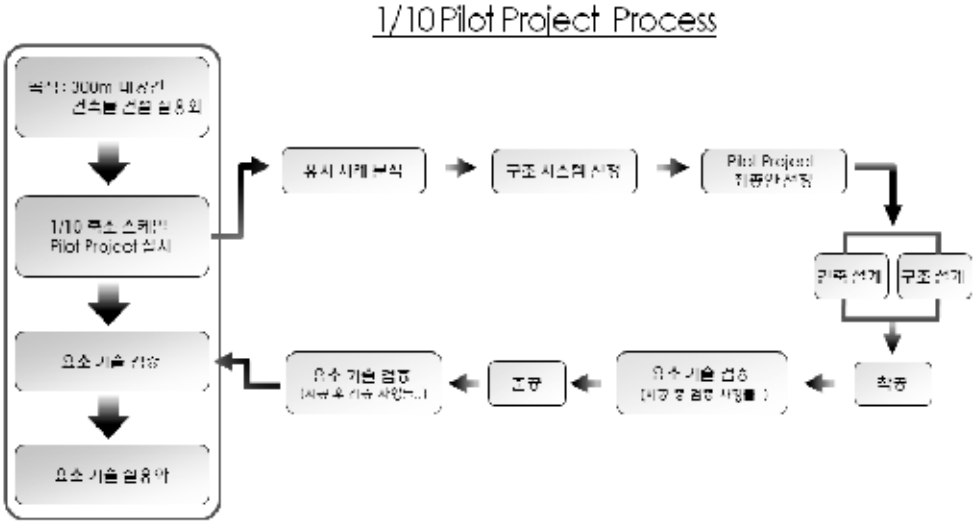


그림 4.1.1.2 Pilot Project 대상구조물에 적용된 요소기술

나. 4.2 소프트웨어

(1) 4.2.1 구조시스템 검토 (한국예술종합학교)

우선 국내 ·국외 유사 사례 분석을 통해 해안 설계 사무소, 1-2세세부 (박선우 교수), C.S구조엔지니어링 등 연구단의 협의를 통해 본 연구단의 핵심 요소 기술 (Air-beam, 막구조, 케이블, Erection 등)을 검증하기 위한 최적의 구조 시스템을 선정하였다. 최종 선정된 구조 시스템을 바탕으로 해안 건축 설계사무소에서 최종 건축 설계를 실시하였으며 C.S구조엔지니어링에서 구조물의 안전성 검토와 구조 설계를 실시하였다.

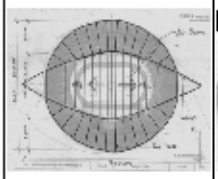
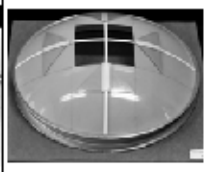
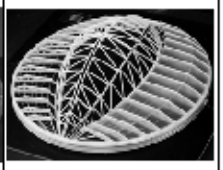
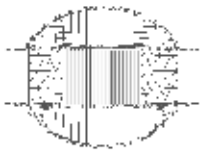
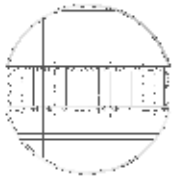
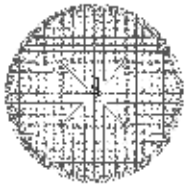
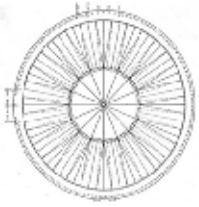
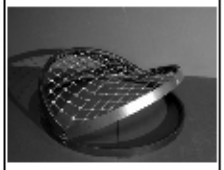
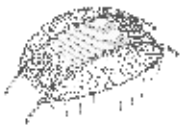
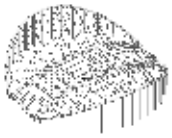
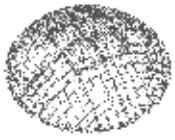
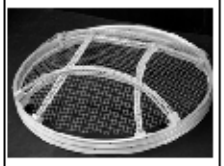
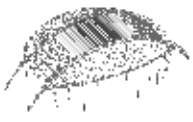
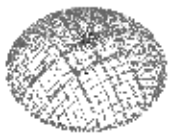
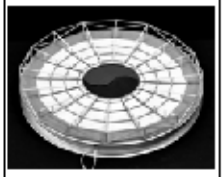


가) 그림 4.2.1.1 설계 프로세스

(가)

(나) 가. 시스템 비교 분석을 통한 대안 취합 선정

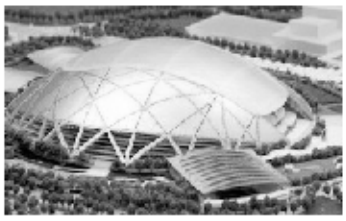
유사사례 분석 및 사전 연구를 통해 1-1세세부와 협의하여 연구 목적에 부합하는 시스템의 선정과 실용화 관점에서 요소 기술의 검증적인 측면, 그리고 건축 형상까지 고려하여 대안을 선택하여 상세 비교를 수행하였다. 첫 번째 대안으로 두 개의 Keel Arch를 이용한 개폐형 지붕을 선정하였고, 두 번째 대안으로 HP Shell 형상을 이용한 형상의 구현, 세번째 대안으로 구형의 절삭을 고려한 중앙부 개폐형 지붕을 선정하였으며, 마지막으로 2-1세세부의 연구과제였던 텐세그러티(케이블-스트럿 구조) 구조를 선정하였다. 네 가지의 대안은 아래와 같이 발전시켜 각각 구조 해석을 수행하였고, 그 결과로 물량 비교를 수행하였다. 또한 그를 근거로 시공성, 건축계획적인 측면, 그리고 연구 성과와의 연계성을 고려하여 비교 검토를 수행하였다.

구분	대안 1	대안 2	대안 3	대안 4 (아이디어, 평면)	기타 (아이디어)
아이디어 선택					
대안 발전 평면					
대안 발전 입체					
구조 해석 결과					

네 가지의 대안을 구조해석과 물량 검토, 시공성 검토, 건축미적인 표현, 그리고 연구단 성과와의 연계성까지 종합적으로 검토하였다.

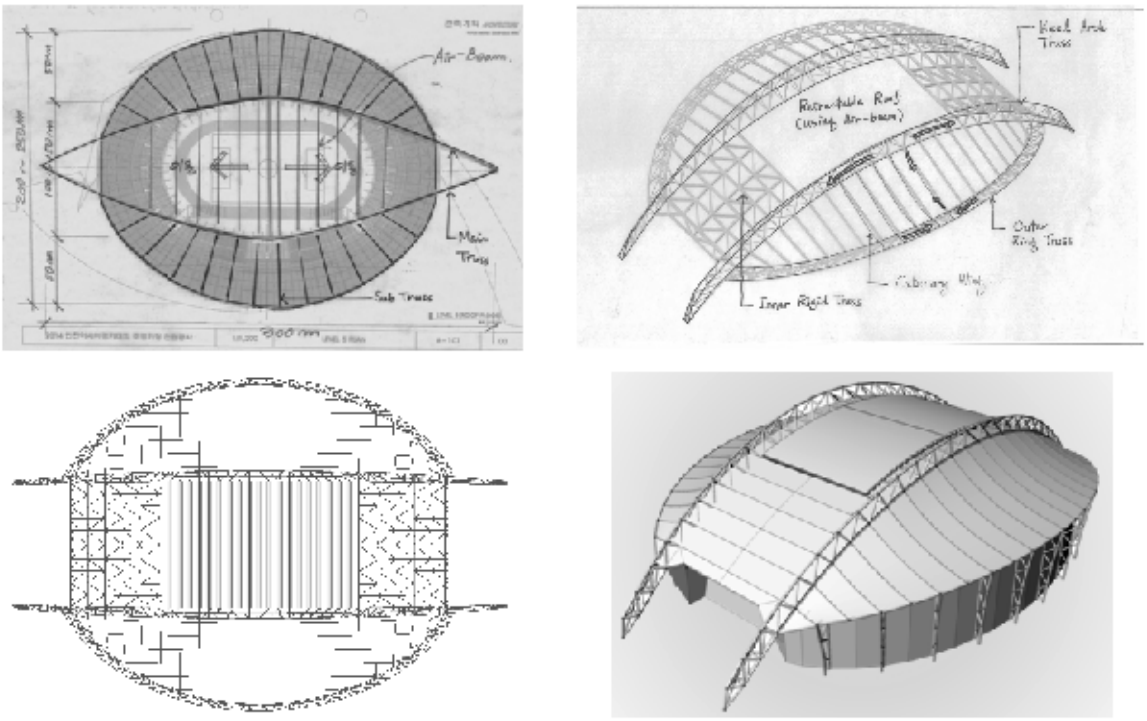
구분	대안 1	대안 2	대안 3	대안 4
개요	- 2개의 다이아몬드 형상의 Keel Arch Truss - Air-Beam을 이용한 개폐형 지붕 형성 - Keel Arch Truss 양쪽 현수 형상의 지붕 형성 - 현수 형상의 지붕에 상현재는 철골부재, 하현재는 케이블을 사용	- HP shell의 형상을 본뜸 - 중앙부 개폐형 지붕형성 - 단부 압축 Arch 형성 - 중앙 Keel Truss와 단부 압축 Arch를 케이블 연결 - 중앙부 아치의 높이보다 단부 압축 아치의 높이가 상대적으로 많이 높음	- 중앙부 양방향 3개의 Keel Arch로 형성 - 삼각형 형상의 개폐 지붕 - 개폐 지붕은 3개의 Keel Arch Truss에 지지되어 구동함 - 구형을 절삭한 형상으로 중앙부 높이가 가장 높음	- 경량구조인 케이블의 인장력과 스트럿의 압축력으로 형태를 구성 - 압축재 및 케이블은 축력만 지지하며, 압축재는 불연속적으로 존재 - 형태의 구성을 위해서는 형상탐색 과정이 필수적임
건축미의 표현	- Keel Arch Truss의 외부 노출을 통한 건축미 표현 - 현수 형상의 지붕에 케이블을 사용함으로써 내부에서의 개방감 극대화 - 막재를 사용하여 내부 밝기와 깔끔한 이미지	- 전반적으로 대안 1과 같은 이미지를 가짐 - 단, 중앙부 보다 단부가 많이 높아 내부 공간의 형성에 무리가 따름 - 단부 기둥의 높이가 많이 높음	- 내부에서 철골 트러스의 양이 많아 다소 복잡해 보임 - 구형의 형상을 절삭한 이미지로 건축적인 미를 구체화시키기 어려움	- 불연속적인 스트럿을 통한 건축미 표현 가능 - 하지만, 형상탐색 과정을 반드시 수반해야 하므로 상당한 형태적 제약이 뒤따름
경제성의 검토	- 지붕 개략 물량 산정 : 약 9,400 tonf (100%) - 면적당 일반적으로 적용되는 골조량과 유사한 결과를 보임	- 지붕 개략 물량 산정 : 약 8,800 tonf (93.6%) - 케이블을 적극적으로 적용하면 물량면에서는 가장 유리함. - 하지만, 케이블과 연결부의 단가를 적용할 경우 공사비 측면에서는 불리	- 지붕 개략 물량 산정 : 약 12,700 tonf (135%) - 철골 트러스의 적극 활용으로 물량면에서 가장 불리	- 경량 구조로서 케이블을 적극적으로 적용하면, 대안 2와 유사한 물량 감소 효과 - 하지만, 시공의 어려움 때문에, 인건비 상승과 공기 지연 등 경제적 측면에서 불리
연구과제로의 의의 분석	- 대공간 돔 구조에서 가장 실용적으로 사용 중이고, 건축미적 표현도 뛰어남 - 연구 성과인 Air-beam의 적극적인 사용 - 케이블 부재에 연구단 성과인 장력 측정 장치 적극 사용	- 케이블 돔의 형성은 실제 실현화에 어려움이 많을 것으로 예상함. - 내부 공간 사용적인 측면에서 중앙부가 단부보다 낮아 적용성 떨어짐	- 돔 형상의 일반적인 형상 면에서는 실용성을 가진 형상이지만, 물량 증가로 공사비 증가 문제 와 건축 형상적인 측면에서 적용성이 떨어짐 - 연구단 성과와의 연계성 측면에서 적용성 떨어짐	- 대안 2와 비슷하게 형태 구성의 어려움 때문에 실제 실현화에 어려움이 많을 것으로 예상함 - 2-1세세부 케이블-스트럿 연구와 1-2세세부 케이블 장력 모니터링 연구 등 연계성 측면에서 적용성 있음

또한 선정된 대안들에 대한 사례는 다음과 같다. 특히 본 프로젝트의 요소기술인 개폐식 구조가 적용된 대공간 돔 구조물 위주로 조사를 수행하였으며, 개폐식 지붕구조의 적용성을 판단하는 근거 자료로 활용하였다.

<table>
<tr><td></td><td>개폐식 구조가 적용된 사례</td></tr>
<tr><td>대안 1</td><td> 
아약스암스테르담 홈구장
 
Dallas Cowboy Stadium
 
오이타 빅 아이 스타디움
 
Singapore sports hub</td></tr>
<tr><td>대안 2</td><td> 
웨일즈 밀레니엄 구장
 
J리그 나고야 스타디움</td></tr>
<tr><td>대안 3</td><td> 
Sweden Arena
 
Astana Stadium</td></tr>
<tr><td>대안 4</td><td>  
프랑크푸르트 구장</td></tr>
</table>

나. 최종안 선정

네 가지의 대안을 구조해석과 물량 검토, 시공성 검토, 건축미적인 표현, 그리고 연구단 성과와의 연계성 및 개폐식 지붕구조의 적용성까지 종합적으로 검토하여, 대안 1, Keel Arch Truss를 이용한 개폐형 지붕을 선정하여 설계를 진행하기로 하였다. 특히 개폐형 지붕은 연구단 성과인 Air-beam을 적용하였고, 케이블의 사용으로 역시 연구단 성과인 장력 측정장치를 적용하였다. 또한 막구조를 사용함으로써 초경량 지붕의 형성을 유도하였다. 최종안은 다음 그림 4.2.1.2와 같다.



가) 그림 4.2.1.2 Pilot Project 최종안

(2) 4.2.2 킬아치의 위상최적화 기법 (경상대학교)

(가) 가. 지붕 형상 선정(Process)

· 대공간을 구성하기 위하여, 다음과 같은 Process를 통해 지붕 형상을 선정하였다.

STEP 1.	국내.외 유사 대공간 구조물 사례 조사
⬇	
STEP 2.	지붕 구조 시스템 대안 도출, 선정 및 발전
⬇	
STEP 3.	구조 최적안 도출(Rise-Span Ratio)
⬇	
STEP 4.	건축 계획(경기장) 반영
⬇	
STEP 5.	지붕 형상(최종안) 결정

가) 표 4.2.2.1 지붕 형상 선정 흐름도

(나) 나. 유사사례 분석

대공간을 형성하기 위하여 해외에서 완공 또는 진행중인 대공간 건축물의 사례를 분석하여, 적용 또는 참고 가능한 요소를 추출하였다.

아래 그림은 2010년 남아공 월드컵을 위해 건립된 축구 경기장으로 상부 개방형 경기장이지만, 400m에 달하는 장스팬 킬 아치에 매달리는 지붕을 구조시스템의 기본으로 채택하고 있어, 일반적인 아치가 아닌 장스팬 구조의 가능성을 보여주고 있다.

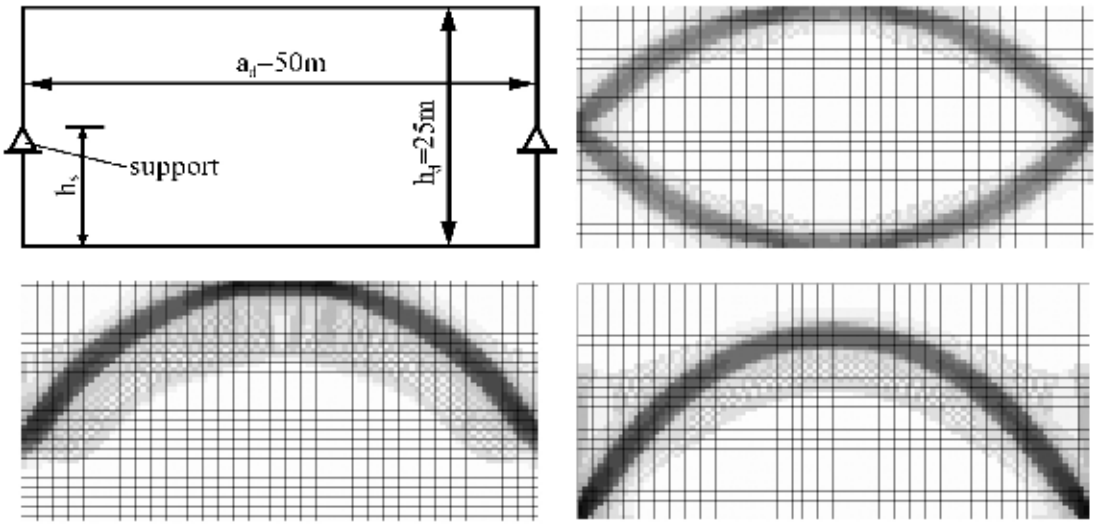


가) 그림 4.2.2.1. Moses Mabhida 경기장(시공 사진, 2010년 현재 완공됨)

(다) 다. Rise-Span비 결정

· 킬 트러스의 Rise-Span비를 결정하기 위해 본 연구를 통하여 개발된 위상최적화기법을 사용하였다. 위상최적화는 킬 트러스의 Span을 일정하게 두고 높이를 변화시키는 방

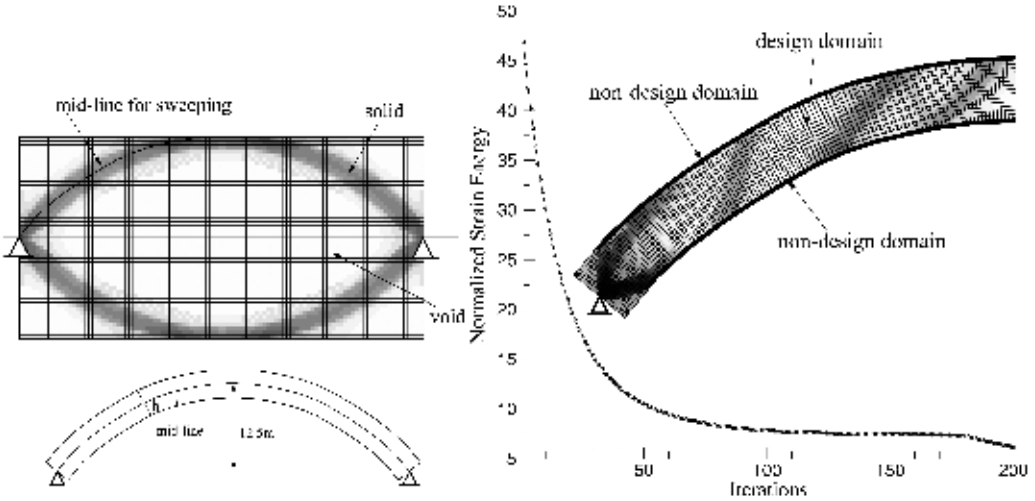
법으로 수행하였다. 따라서 아래 그림에 도시된 설계영역에 도시된 바와 같이 지점의 위치(h_s)을 변화하며 위상최적화를 수행하였다. 특히 Rise-Span비를 결정하기 위해 자중에 저항하는 최적위상을 도출하였다. 아래 그림에는 지점의 위치에 따른 최적위상의 변화를 도시하였으며 설계자는 형태결정에 이러한 위상최적화 결과를 이용할 수 있다.



가) 그림 4.2.2.2 (좌상) 설계영역 과 위상최적화결과 (우상) $h_s = 12.5m$, (좌하) $h_s = 6.25m$ (우하) $h_s = 0m$

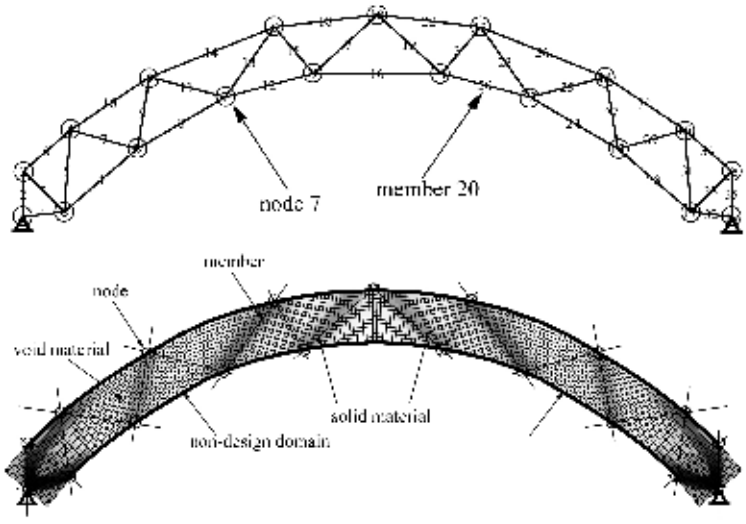
(라) 라. 지붕구조의 위상최적화 및 부재크기 최적화

· 킬 트러스의 세부형상을 결정하기 위하여 위상을 바탕으로 그림 3(우)와 같이 세부적인 위상최적화를 다시 수행하고 그 결과를 이용하여 킬 트러스 부재 패턴을 도출하게 된다.



가) 그림 4.2.2.3 (좌상)위상최적화결과 분석, (좌하) 세부위상최적화 설계영역, (우) 세부위상최적화결과

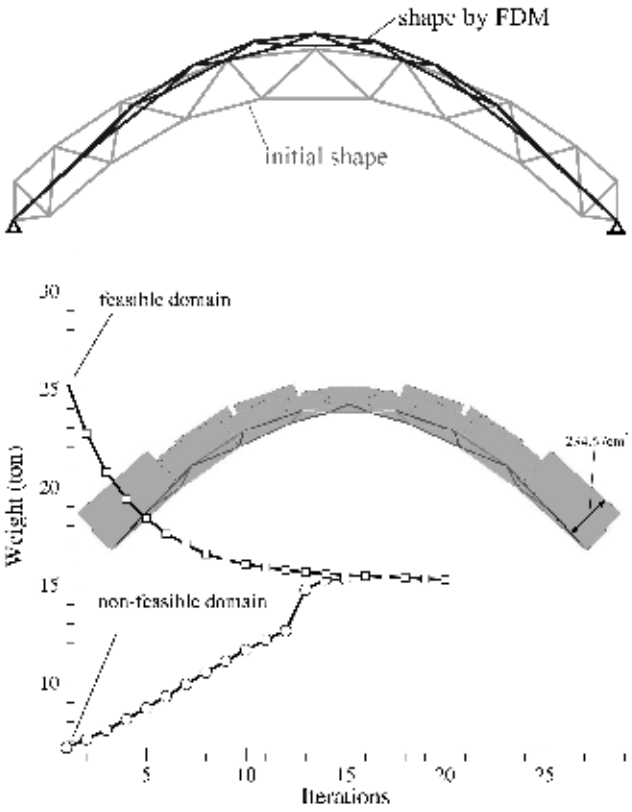
세부 위상최적화의 결과를 이용하여 결정된 부재의 위치는 아래 그림과 같다.



나) 그림 4.2.2.4 세부 위상최적화 결과를 이용한 부재 패턴 결정

부재의 위치가 정해지면 내력밀도법과 같은 형상탐색기법을 이용하여 킬 트러스의 형상을 최종결정할 수 있으며 결정된 형상은 크기최적화를 이용하여 그 부재사이즈를 결정하게 된다.

전술한 설계최적화기법과 디자인을 기저로 하는 Morphogenesis모델을 적용하게 되면 킬 트러스의 형상을 최종적으로 도출할 수 있게 되는데 아래 그림에는 두 가지의 케이스를 예로 들어 도시하였다.



다) 그림 4.2.2.5 내력밀도법에 의한 형상탐색 과 크기최적화 결과

(3) 4.2.3 구조안정성 검토 (세종대학교, 세명대학교)

본 연구는 서울 고척동 돔을 대상으로, 보다 경제적이고 안전한 건물을 만들 수 있게 상부 지붕 구조물의 구조안정성을 평가하여 설계에 반영하고자 한다. 이를 위해서는 기하학적 비선형해석이 필요하고, 국내에서 유일하게 Snapping 해석용으로 개발된 NASS 프로그램을 사용하여 불안정 거동을 평가한다.

(가) 가. 연구 내용

형태저항형 구조물인 쉘구조는 주로 면내력으로 힘을 전달할 수 있게 한 구조시스템이므로 매우 우수한 역학적 특성을 가지고 있으나, 어떤 하중 상태에서는 안정 상태에서 불안정 상태로, 또는 불안정 상태에서 안정 상태로 변화하므로, 구조불안정 현상으로 인한 파괴 메커니즘을 파악하고 이를 반영하는 것은 매우 중요하다. 쉘형 구조물의 구조불안정 문제를 다루기 위해서는 대변형 또는 유한변형 이론에 의해 구조거동의 특성을 고려해야 하고, 이는 비선형 문제에 귀착하게 된다.

강성 이산계 구조시스템인 쉘형 골조구조물은 하중이 어떤 임계값을 넘기면 안정 상태에서 불안정 현상, 즉 좌굴 현상을 나타내며 파괴된다. 이러한 파괴 메커니즘을 발생시키는 정적 구조거동의 특성으로는 튐좌굴(Snap-Through) 현상과 분기좌굴(Bifurcation) 현상을 대표적으로 들 수 있다. 보다 체계화하여 나타내면 좌굴 후의 거동에 따라 대칭분기, 비대칭분기 등으로 나눌 수 있고, 일반적으로 쉘형 구조물은 좌굴 후에도 불안정을 나타내므로 초기조건에 매우 민감하게 거동한다.

두께를 최소한으로 하여 대공간을 구축할 수 있는 특징을 가지는 쉘형 구조물의 구조불안정 거동은 초기조건에 매우 민감하게 반응하고, 초기 부정량에 따라 저항 내력이 급격히 떨어진다. 또한 구조거동의 특성은 주로 탄성 영역에서의 불안정 거동이 중요한 파괴 메커니즘이 된다.

구조불안정 문제는 그간 많은 연구자들에 의해 연구되어 왔으나, 쉘형 구조시스템에 관한 연구결과는 아직도 명쾌하게 정립되지 못하고 있다. 그 예로 이론적 연구와 실험적 연구의 결과들이 아직도 많은 차이를 보이고 있고, 스페이스 프레임과 같이 이산계 시스템에서는 더욱 심하여 설계식 조차 얻지 못하고 있는 실정이다. 그러므로 본 연구에서의 연구방법으로는, 연구내용의 특성상 이론적 접근 방법으로 비선형거동 특성의 범위를 기하학적 비선형 문제로 제한한다.

본 연구에서는 서울 고척동 돔의 지붕 골조의 구조안정성을 조사하여 안전한 구조설계를 할 수 있게 하고자 한다. 특히 초기조건에 매우 민감한 거동이 예상되므로 하중조건, 좌굴모드, 초기불완전량 등을 변수로 하여 불안정 거동을 조사하고, 안전 여부를 평가 한다. 단 부재좌굴 또는 국부좌굴 등은 본 연구과제의 연구범위에 고려치 않으며, 전체좌굴 현상에 한정한다.

(나) 나. 비선형 해석프로그램 NASS

본 프로젝트에서는 비선형 해석을 위한 프로그램으로 NASS(Nonlinear Analysis for Space Structures)를 이용한다. NASS는 Hybrid형 대공간 구조물 구조해석용으로, Shell Structures, Space Frame Structures, Membrane Structures, Space Cable Structures 및 이들의 복합 구조체인 Hybrid structures의 비선형 구조해석까지를 함께 다룰 수 있는 범용 해석프로그램을 목표로 하여 개발되고 있는 것이고, 다수의 논문으로 해의 검정은 되어 있다. NASS의 해석 기능은 그림 4.2.3.1 에서와 같고, 전체적 흐름도는 그림 4.2.3.2에서와 같다.

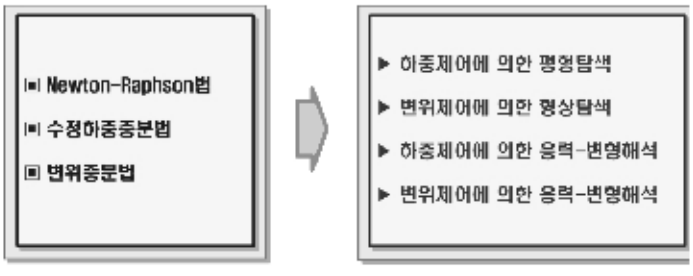


그림 4.2.3.1 NASS의 해석 기능

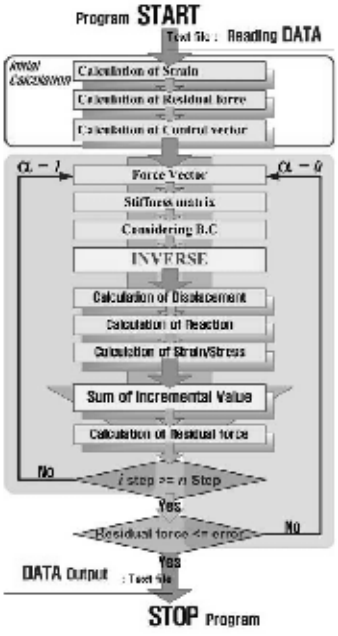
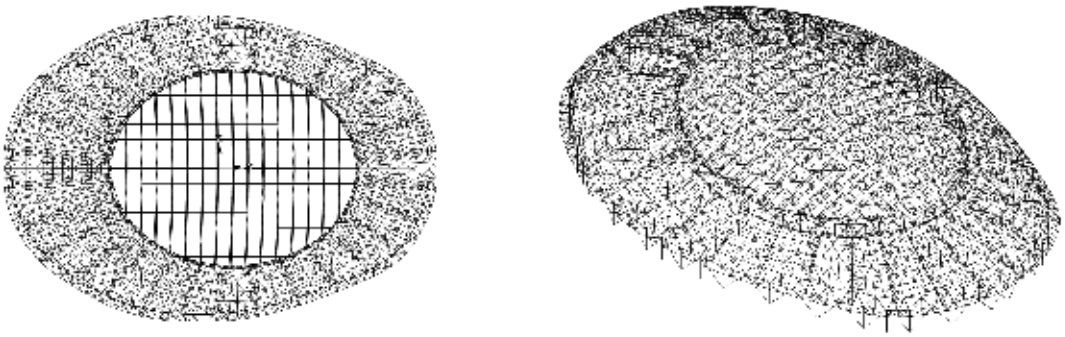


그림 4.2.3.2 NASS의 흐름도

여기서 $\alpha = 1$인 경우가 증분법(Incremental Method)에 의한 경로이고, $\alpha = 0$인 경우가 Newton-Raphson법에 의한 경로가 된다.

(다) 다. 구조물의 개요 및 하중

본 프로젝트의 야구장 지붕의 평면도와 입체도는 그림 4.2.3.3에서 보는 바와 같다. 밑변의 최장 저면 직경의 길이는 약 214m이며 짧은 방향으로는 약 157m 이다.



(a) 평면도 (b) 입체도

그림 4.2.3.3 서울 서남권 돔 야구장의 형상

(4)

구조물의 지붕에서 고려하는 설계하중은 고정하중(DL), 적재하중(LL), 적설하중(SL) 및 풍하중(WL)등이 있으며 다음과 같다.

1. 고정하중

Self-Weight x 1.1

마감하중 : Inner Ring 바깥쪽 Metal Cladding 부분 = 60kgf/m^2

Inner Ring 안쪽 막구조 부분 = 20kgf/m^2

2. 활하중 : 60kgf/m^2 (Inner Ring 안쪽 막구조 부분은 활하중 고려여부 검토 중)

3. 적설하중 : 약 40kgf/m^2

4. 풍하중 : 하중기준에 따라 산정한 하중 적용.

풍상면 = 141kgf/m^2

중앙부 = 140kgf/m^2

풍하면 = 79kgf/m^2

5. 온도하중 : 고려안됨

6. PreStress : Inner Ring에만 고려

구조 불안정 현상을 해석을 위해서 채택되는 하중모드는 적설하중이 등분포로 재하될 경우의 하중조합, x 방향에 대해서 편심이 작용하는 하중조합 그리고 y 방향에 대해서 편심이 작용하는 하중조합에 대한 Load Mode를 구성하여 해석을 수행하도록 한다.

(가) 라. 고 찰

본 보고서에서는 서울 서남권 돔 야구장의 상부 구조시스템을 대상으로 구조불안정 거동을 조사하였다. 비선형해석에 필요한 해석프로그램은 다년간의 연구 집적으로 개발되었고, 다수의 논문으로 그 결과를 발표하여 검증된 NASS를 이용하였다.

해석 대상 모델은 휨을 전달할 수 있게 구조설계된 것이므로, 시공시 휨 전달이 충분할 것으로 가정하여 본 해석을 수행하였다. 또 본 연구에서는 돔형 구조물의 전체좌굴에 한정하여 구조불안정 거동을 조사하였다.

기학학적 비선형해석을 통해 구조불안정을 조사한 결과를 2260번 절점을 중심으로 표 6.1에 나타내었고, 다음과 같이 분석할 수 있다.

(1) 불완전형상의 비선형해석 결과, 좌굴하중에 대한 설계하중비는 y축 편심하중이 작용하였을 때가 가장 불리함을 알 수 있었다. 즉, 다양한 조건의 모델들에서, y축 편심 적설하중이 작용될 때가 등분포 적설하중이 작용될 때 보다 더 낮은 좌굴하중을 나타내며, 이때의 설계하중은 임계하중의 약 13% 정도가 된다.

(2) 불완전성이 증가함에 따라 좌굴하중이 낮게 되며, 특히 1st Mode에서 불완전성이 커짐에 따라 좌굴하중의 변화가 크게 나타남을 알 수 있었다. 즉, 1st Mode의 불완전형상의 경우 0.1%의 불완전성에서 9% 이상, 0.2%의 불완전성에서 26% 이상 좌굴하중 값이 낮아진다. 또 3rd Mode의 불완전형상의 경우 0.1%의 불완전성에서 14% 이상, 0.2%의 불완전성에서 22% 이상 좌굴하중이 낮아진다.

따라서 Snapping에 관한 전체좌굴하중은 설계하중을 크게 상회하므로, 본 구조물은 전체좌굴에 관해 안정적임을 알 수 있었다.

(5) 4.2.4 지진하중에 대한 안정성 검토 (영남대학교)

(6) 본 연구에서는 지진 및 개폐식 지붕의 가동으로 야기되는 파일럿 프로젝트 대상구조물의 진동응답을 분석하고 이를 활용하여 대공간 구조물의 안전성 및 사용성을 평가하고자 한다. 또한 대공간구조물에 하이브리드 스마트 면진시스템(스마트 진동제어장치+수동 면진장치)을 적용하여 대공간 구조물의 적용성을 파악하고자 하였다.

(7) 대공간 구조물의 지진응답 제어를 위하여 MR 감쇠기와 저감쇠 탄성베어링으로 구성된 스마트 면진시스템을 제안하였고 이를 효율적으로 제어할 수 있는 퍼지제어알고리즘을 개발하였다. 면진시스템이 적용된 대공간 구조물의 지진응답 중 면진층 변위와 구조물 가속도는 서로 상충관계에 있으므로 두 응답을 동시에 적절하게 제어할 수 있는 시스템을 설계하기 위해서는 다목적 최적화기법이 필요하다.

(8)

(9)

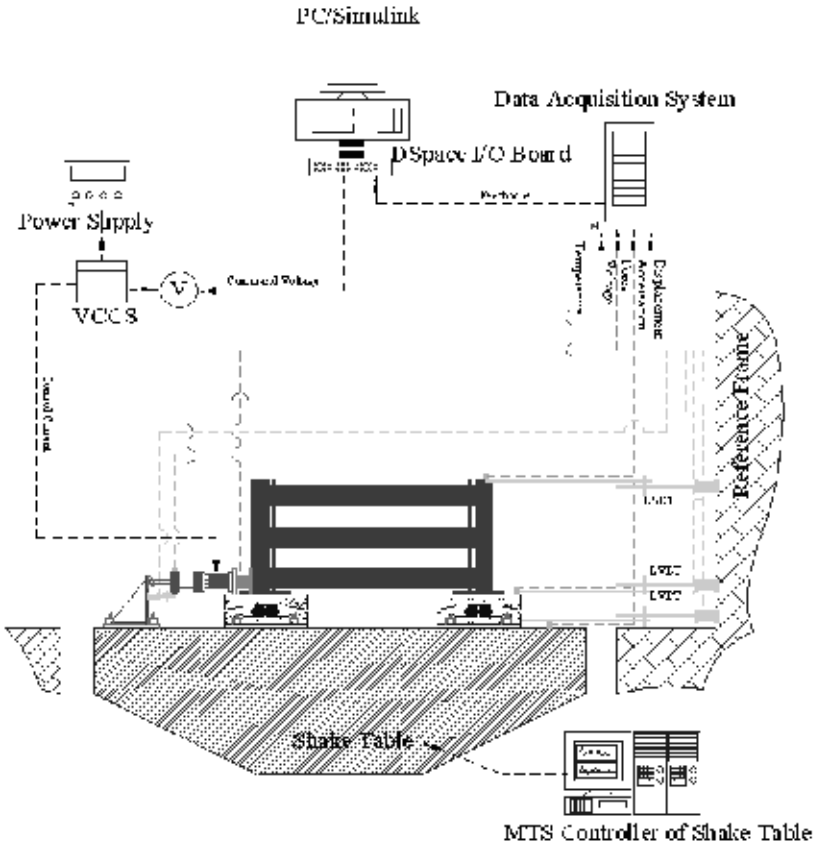


그림 4.2.4.1 스마트 면진장치의 구성

(10)

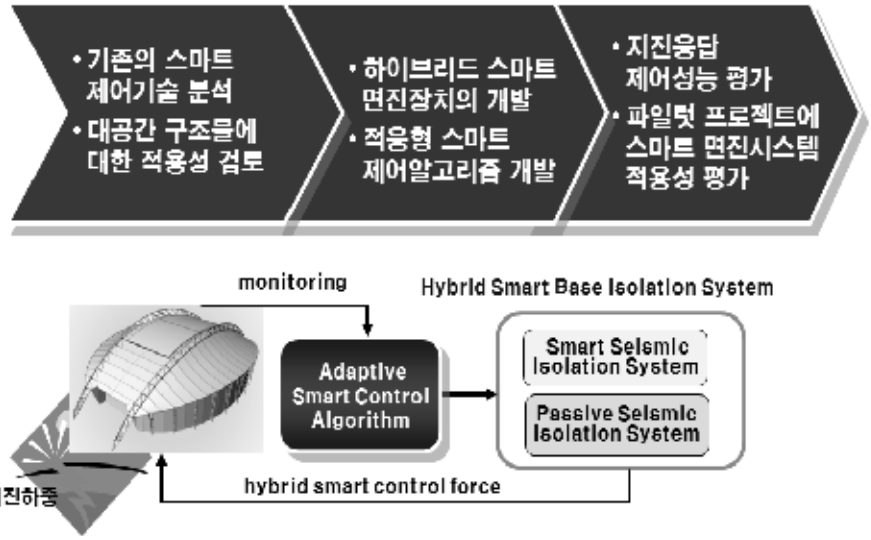


그림 4.2.4.2 스마트 면진장치를 이용한 대공간 구조물제어의 개념도

스마트 면진시스템은 퍼지제어알고리즘을 통해서 제어가 되며 퍼지제어알고리즘은 다목적 유전자 알고리즘을 통해서 최적화 된다. 대상구조물인 파일럿 프로젝트 구조물은 강성이 매우 커서 면진층의 변위와 면진된 구조물의 지붕층 변위가 거의 같기 때문에 본 연구에서는 면진층의 변위와 대공간구조물의 가속도 제어를 최적화의 목적함수로 사용하였다.

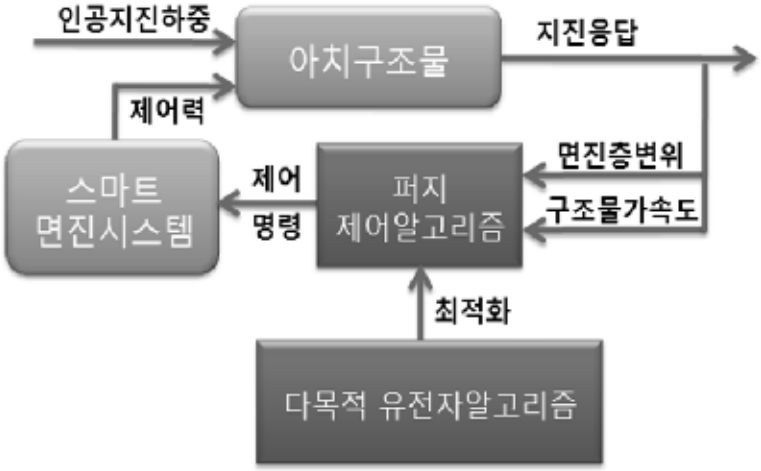


그림 4.2.4.3 유전자알고리즘을 이용한 퍼지제어기의 최적화

대공간 아치구조물과 인공지진하중을 대상으로 최적 설계된 LRB 면진시스템과 본 연구에서 제안한 스마트 면진시스템의 제어성능을 비교한 결과 면진층 변위와 구조물 가속도 모두 스마트 면진시스템이 더욱 효과적으로 줄일 수 있

음을 확인하였다. 일반적으로 고정지지된 아치구조물의 경우에는 지진하중에 대하여 수직방향 동적응답이 크게 발생하지만 스마트 면진시스템이 적용된 구조물의 경우에는 수직방향 지진응답이 작게 발생 하였다. 따라서 파일럿 프로젝트 대상구조물의 시공시 스마트 면진시스템이 적용된 아치구조물의 경우에는 일반 건축구조물과 마찬가지로 수평방향 지진응답의 저감을 주요한 제어 목표로 고려해야 할 것으로 판단된다.

(12) 사용한 예제 대공간 구조물은 한국기술교육대학교의 홍보관으로 대공간 건축물 건설기술개발 연구단의 8.26ton의 질량의 파일럿 프로젝트로 사용되고 있는 대공간 구조물로서 킬아치의 지점간 거리는 49m, 바닥에서 천장까지의 최고 높이는 24m, 지붕을 열고 닫을 수 있는 개폐식 지붕구조로서 개폐구간은 약 20m이다.

(13)



그림 4.2.4.4 킬아치 예제 구조물

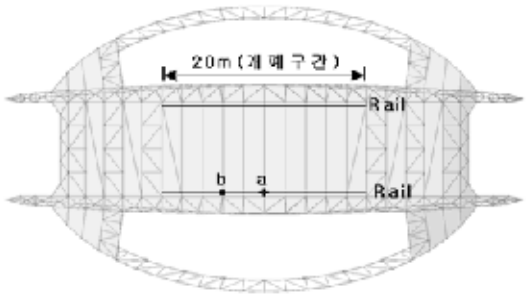


그림 4.2.4.5 예제 구조물 개폐구간

(14)

(15) 지붕구조물의 개폐로 야기되는 이동하중을 등가의 이동하중으로 치환하여 적용할 경우에 대공간 구조물의 효율적인 진동해석이 가능하다. 등가이동하중을 적용하는 방법은 등가연직하중만을 적용하는 방법과 등가연직하중과 등가모멘트하중을 동시에 적용하는 방법이 있을 수 있다. 전자의 경우에는 이동하중의 적용방법이 간단하나 후자의 경우와 비교하여 진동응답에 오차가 발생한다. 후자의 경우에는 비교적 정확한 진동응답을 얻을 수 있다. 본 연구에서의 등가이동하중의 적용으로 지붕구조물의 개폐로 야기되는 파일럿 프로젝트 대상구조물의 진동응답 분석을 통하여 지붕구조물의 개폐에 따른 사용성 평가가 가능하다.

(16)4.2.5 풍동실험을 통한 풍압계수 산정 (전북대학교)

(가) 가. 개요

대공간 Pilot 건물의 벽면과 지붕(Open형과 Close형)에 작용하는 풍압계수(평균 풍압계수, 최대/최소 풍압계수, 변동풍압계수)를 구하고 이로부터 벽면과 지붕에 작용하는 외장재 설계용 풍하중산정을 목적으로 한다

나. 설계풍속

한국과학기술대학교에 건설예정인 실험대상건물의 위치를 나타내고 있다. 지표면 조도를 결정하기 위해 실험 대상에 대한 풍상측에 대해서 45도의 영역 중 건축물 기준높이 H의 40배와 3km이내의 범위에 속하는 지표면의 상태 분석한 결과 저층 이상의 건물이 산재하고 있고 2009년 12월경에 실시한 CS구조설계담당자와 상의한 후에 실험대상 건물주변에 대한 지표면조도는 C($\alpha = 0.15$)로 하였다. 외장재 설계를 위한 설계풍속을 구한 결과는 아래와 같다. 그림 4.2.5.1은 풍동실험장치 내에 설치된 풍동실험 대상건물의 조감도와 풍압실험모형 및 주변모형을 나타내고 있다.

설계풍속 (U_d)

- 설계풍속 계산식

$V_e = V_0 \times K_{zr} \times K_{zt} \times I$ (기본풍속 : $V_0 = 35m/s$)

V_0 = 기본풍속, K_{zr} =지표면조도에 따른 풍속의 고도분포계수=$0.71Z^{\alpha}$

K_{zt} = 지형에 의한 풍속 할증계수(1.0), I= 중요도계수(1.0),

Z= 건축물의 높이, α =지표면조도계수

지표면 조도구분	계산식	풍속
B(0.22)	$V_e = 35 \times 0.71 \times 11.5^{0.15} \times 1$	$V_Z = 40.1m/s$

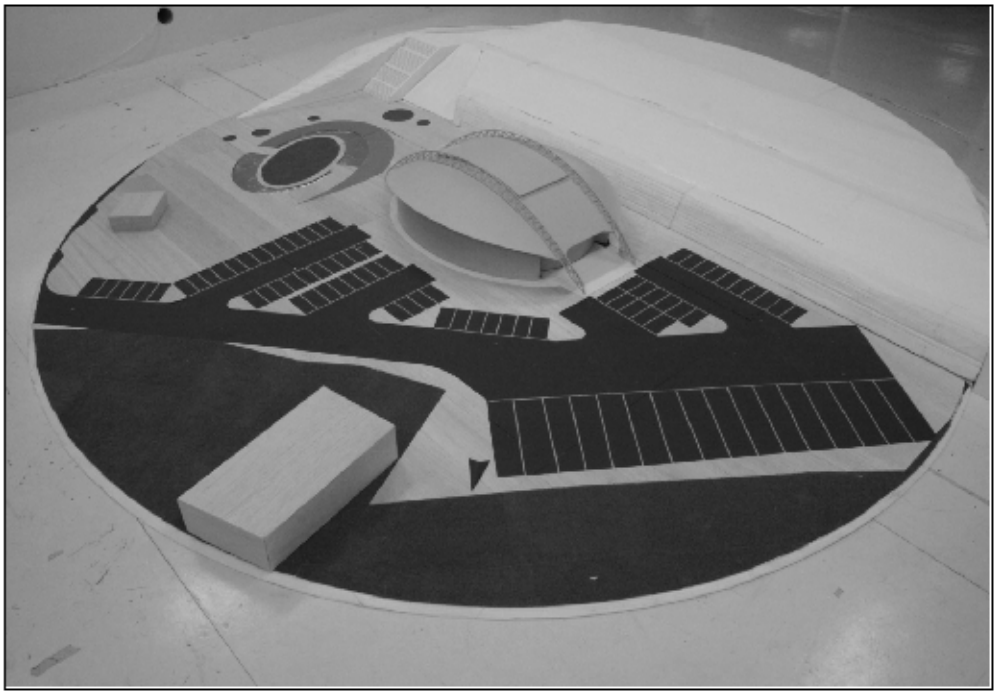


그림 4.2.5.1 풍동실험장치내에 설치된 풍동실험대상건물의 풍압모형

다. 풍압실험

풍압실험은 다점풍압계를 이용하여 대공간 Pilot 프로젝트의 천장이 Close될 경우와 천장이 Open되여 있을때로 나누어서 지붕에 작용하는 풍압을 계측하였다. 측압공은 Close형일때는 총 529개의 측압공을 Open되여 있을때는 외압과 내압 각각 240개씩 지붕을 설치하였다.

풍동실험용 풍속의 결정은 상사조건에 의해 결정되었으며, 지표면 조도 C ($\alpha = 0.15$)에서는 실험풍속 5.0m/s를 사용하였다. 실험풍속은 풍동내부에 피토관을 설치한 후 풍압계를 사용하여 모형높이에서 측정하였다.

표 4.2.5.1은 풍압실험에 대한 상사조건과 데이터 처리조건를 나타내고 있다. 풍압실험에 사용된 계측기기의 제원은 표 4.2.5.2와 같다. 측정에 사용된 측정모형은 모형 축척율이 1/400인 아크릴 모형을 사용하였다. 측정 풍향은 10° 간격으로 36개 방향에 대해서 반시계 방향으로 측정하였다.

표 4.2.5.1 풍압실험 상사조건과 데이터 처리조건 지표면 조도구분 C($\alpha = 0.15$)

모형scale	1/50		
풍속scale	1/8	설계풍속	풍동풍속
		40.1m/s	5.0m/s
시간scale	1/6.25		
Sampling Frequency	100Hz(0.01sec)		
Lowpass filter	50Hz		

표 4.2.5.2 계측기기 제원

측정기기명	NetScanner-9816
Full-Scale	± 254mmAg

라. 풍압실험결과분석

대공간 Pilot의 풍압모형에 설치된 측압공에서 구한 풍압계수(평균풍압계수, 최대/최소풍압계수, 변동풍압계수)로부터 외장재 설계용 풍하중을 구하였다. 그림 4.2.5.2는 Open형 지붕에 작용하는 풍압계수분포를 계산할때의 상향과 하향에 대한 정의를 나타내고 있다.

(1) 풍압계수분포

풍압실험에서 측정된 각 풍압은 무차원화되어 표기된다. 각각의 풍압계수는 아래의 식과 같이 정의된다.

평균 풍압계수 : $C_p = \overline{P}/q_H$

최대 풍압계수 : $C_{P_{max}} = P_{max}/q_H$

최소 풍압계수 : $C_{P_{min}} = P_{min}/q_H$

변동 풍압계수 : $C_{P_{rms}} = P_{rms}/q_H$

단 $\overline{P} = \frac{1}{N}\sum_{i=0}^{N} P_i$: 풍압력의 평균풍압

P_{max} : 풍압력의 최대치

P_{min} : 풍압력의 최소치

$q_H (= \frac{1}{2}\rho V_H^2)$: 모형의 지붕높이에서 속도압

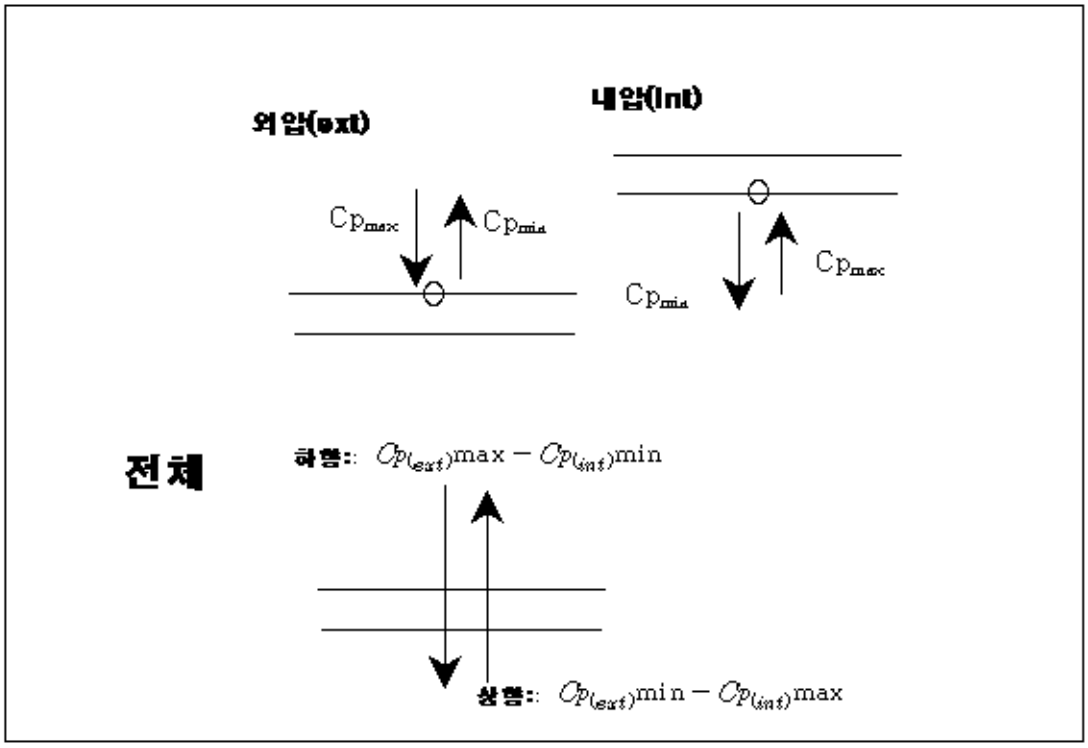
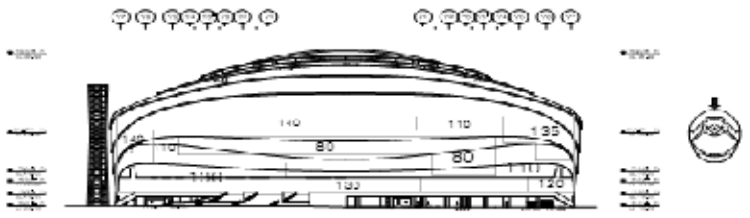
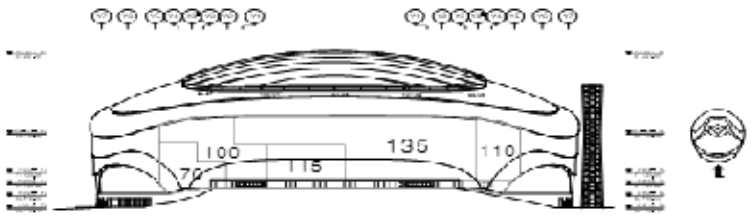


그림 4.2.5.2 지붕 구조물의 내압과 외압의 풍압방향에 대한 정의

측벽,지붕층에 설치되는 전동창 유리,지붕면에서 측정된 최대/최소의 풍하중 분포도는 아래 그림을 참고하여 외장재를 설계하면 될 것으로 판단된다.

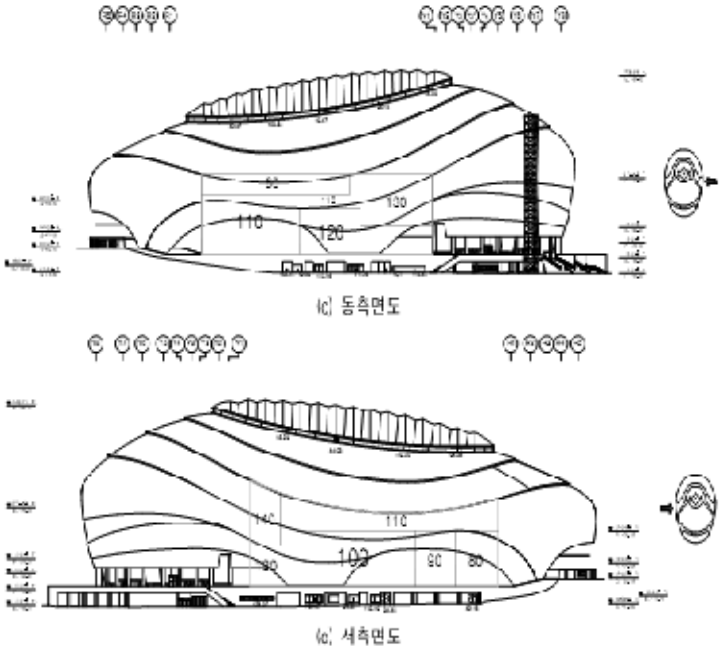


(a) 북측면도



(b) 남측면도

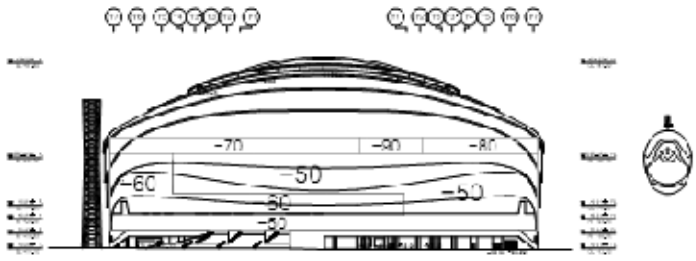
그림 4.2.5.3 최대 풍하중 분포도 (1) (단위 : kg/㎡)



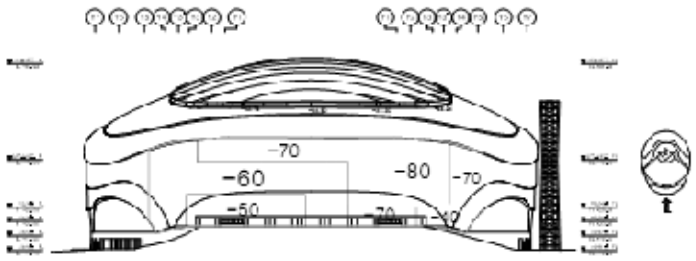
(c) 동측면도

(d) 서측면도

그림 4.2.5.3 최대 풍하중 분포도 (2) (단위 : kg/㎡)

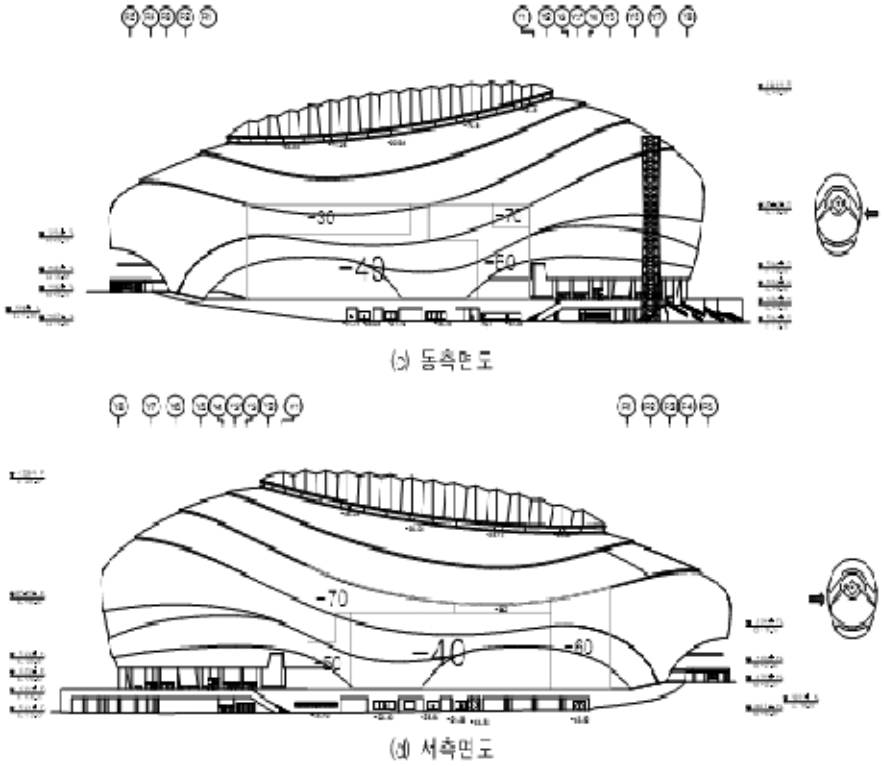


(a) 북측면도



(b) 남측면도

그림 4.2.5.4 최소 풍하중 분포도 (1) (단위 : kg/㎡)



(c) 동측면도

(d) 서측면도

그림 4.2.5.5 최소 풍하중 분포도 (2) (단위 : kg/㎡)

(17)4.2.6 친환경 설계기법 (전북대학교)

㈎ 가. 음환경

1. (1) 개요

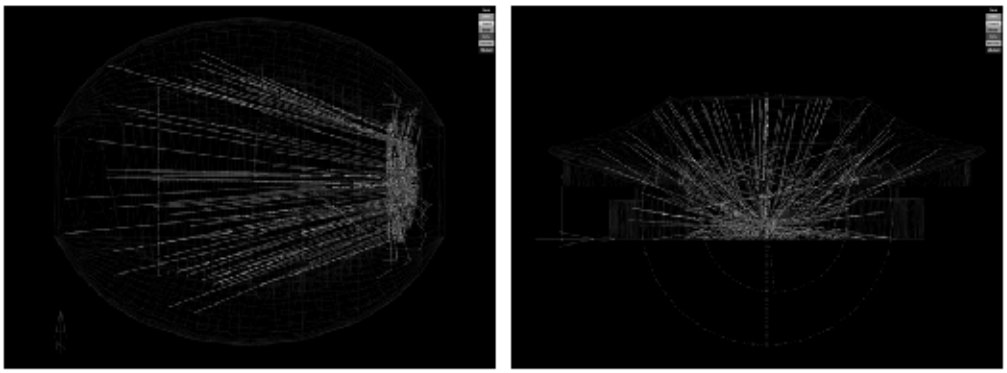
본 연구에서는 파일롯 프로젝트의 계획안을 대상으로 음선검토를 실시하여 평면 및 단면상의 각 부위별로 음향적 결함 (에코, 음의 집중 등)을 유발하는 면들을 검토하였다. 또한 3차원 시뮬레이션 모델을 구성하고 상용 실내음향예측 프로그램인 Catt-Acoustics V.8.0을 사용하여 실내음향성능을 예측 평가하였다. 실내음향성능은 잔향시간, 명료도, 그리고 음압레벨 등을 그 대상으로 하였다. 컴퓨터 시뮬레이션에 적용된 조건은 다음 표와 같다.

표 4.2.6.1 컴퓨터 시뮬레이션 조건

항목별	내용
온도(℃)	20
상대습도(%)	50
밀도(kg/㎥)	1.2
임피던스(kgs/㎡)	412
사용 음선 수	360,372
확산방법	Lambert model (1차 확산반사 고려)
암소음레벨 (dB,1/1옥타브밴드 중심주파수별)	45/ 38/ 32/ 28/ 25/ 23

2.

3.

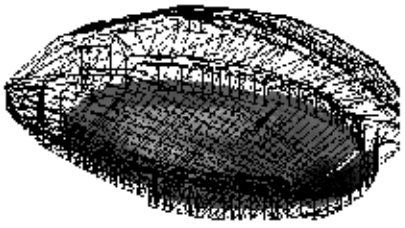
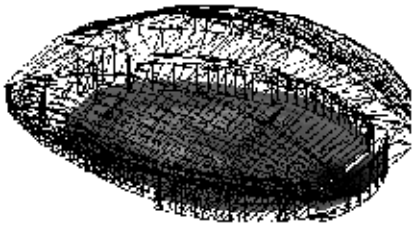
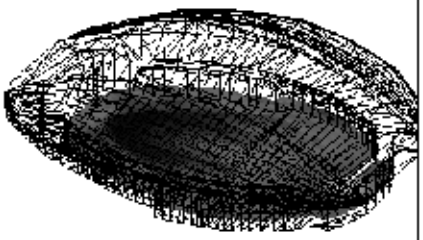
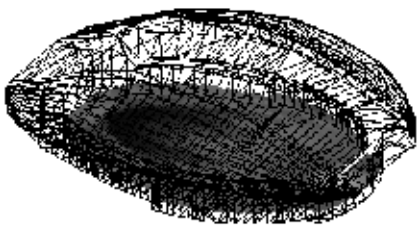
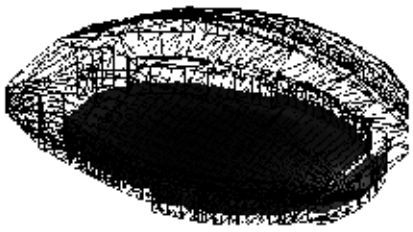
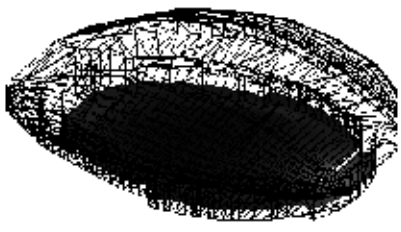


가) 그림 4.2.6.1 평면 및 단면 음선검토결과

4

(2) 평가결과 및 제언

대상공간의 평면 및 단면계획을 대상으로 음선검토를 수행한 결과 타원형의 평면계획으로 인해 긴 음선경로를 갖는 에코(long-path echo)의 유발 가능성이 확인되었다. 따라서 이를 제어하기 위해 가용한 벽면들에 대해 흡음 구조를 적용하는 것이 필요한 것으로 분석되었으며 전기음향음원의 경우, 객석면을 지향하는 초 지향성 스피커의 사용이 바람직하다. 단면 음선검토 결과, 큰 결함은 없을 것으로 판단되었다. 그러나 막구조의 특성상, 흡음력이 불충분하여 발생되는 에코의 가능성은 상존하며 이를 막기 위한 적절한 흡음대책이 요구된다.

잔향시간(500Hz)	잔향시간 (1kHz)
	
음성명료도 (D_{50}(%), 500Hz)	음성명료도 (D_{50}(%), overall)
	
음압레벨(500Hz, dB)	음압레벨(overall, dB)
	

건축음향성능 평가는 잔향시간(T_{30}), 언어명료도(D_{50}), 그리고 음압레벨 등의 평가지표를 활용하여 이루어졌으며, 이는 다음의 표와 같다. 평가결과, 잔향시간은 실내 위치별로 5-7초 범위의 긴 잔향시간을 나타내고 있어 흡음력의 보강과 더불어 효율적인 전기음향계획이 필요할 것으로 분석되었다. 명료도의 경우도 20-30% 범위로서 전기음향이 사용되지 않는 조건에서는 정확한 음성정보의 전달이 어려울 것으로 판단된다. 음압레벨의 경우도 전기음향이 고려되지 않은 조건에서는 충분한 음압의 확보가 어려울 것으로 분석되나, 음압의 분포는 비교적

각 지점에서 고르게 나타나고 있다. 본 평가에서는 전기음향설계안이 고려되지 않은 상태를 대상으로 건축음향만을 평가하였으며, 평가결과, 효율적인 전기음향 설계가 적용된다면, 음성정보의 전달을 위한 명료도와 음압레벨의 확보가 충분히 가능할 것으로 분석되었다.

(1) 4.2.7 연성구조물의 설계기준 및 유지관리 지침서 (한국공간구조학회, 협성대학교, 한국기술교육대학교)

막 및 케이블 등 대공간 구조에 대한 합리적이고 기술적 문제점이 없는 설계 지침을 마련하여 건축될 실제 구조물 설계에 직접적으로 적용될 수 있도록 한다.

파일럿 프로젝트와 관련하여 파일럿 프로젝트의 구조설계 및 시공 단계에서 적용되는 케이블과 막의 재료, 하중, 상세설계, 구조해석, 연결 정착부, 제작 및 시공 등 합리적이고 문제점 없는 지침 제공하고, 파일럿 프로젝트의 구조설계 및 시공 지침을 제공함으로써 지침서의 검증을 실시하고 초대형구조물의 실현화 방안을 도모한다. 또한, 추후 타 구조물의 적용시 실용화 자료 확보가 가능할 것이다.

설계기준 연구내용은 다음과 같다.

1차년도 연구과제명 : 대공간 구조물 CODE에 관한 국외자료 수집 및 분석

선진국들이 공신력 있는 관련기관에서 인증하는 지침서 및 제반 규정을 가지고 엔지니어링을 실시하고 있는 것에 비해 국내에서는 아직 전무한 상태이므로, 우선 한국에 비해 매우 다양한 노하우와 경험을 가진 일본, 미국, 유럽의 code를 수집하여 정리하고 분석하였다.

2차년도 연구과제명 : 케이블구조 설계기준 및 해설 지침서 작성

케이블 구조에 대한 합리적이고 기술적 문제점이 없는 설계 지침을 마련하기 위해서 국내외의 문헌, 기준, 규격, 지침 분석 정리하여 국내 실정에 맞는 지침서를 작성하였다.

3차년도 연구과제명 : 스페이스 프레임의 설계지침 작성

스페이스 프레임 구조에 대한 합리적이고 기술적 문제점이 없는 설계 지침을 마련하기 위해서 국내외의 문헌, 기준, 규격, 지침 분석 정리하여 국내 실정에 맞는 지침서 초안를 작성하였다.

4차년도 연구과제명 : 막구조 설계기준 및 해설 작성

막구조에 대한 합리적이고 기술적 문제점이 없는 설계 지침을 마련하기 위해서 국내외의 문헌, 기준, 규격, 지침 분석 정리하여 국내 실정에 맞는 지침서를 작성하였다.

5차년도 연구과제명 : ETFE 막재 패널설계 및 시공지침서 작성

ETFE 막구조에 대한 합리적이고 기술적 문제점이 없는 설계 지침을 마련하기 위해서 국내외의 문헌, 기준, 규격, 지침 분석 정리하여 국내 실정에 맞는 지침서를 작성하였다.

6차년도 연구과제명 : 개폐식 구조물 설계지침 작성

개폐식 구조물의 합리적이고 기술적 문제점이 없는 설계 지침을 마련하기 위해서 국외의 문헌, 기준, 규격, 지침 등을 참고하여 분석하여 개폐식 구조물 설계지침을 작성하였다.

연성구조물을 포함한 대공간 구조물의 유지관리 지침서 통합에 관한 연구로서 파일럿 프로젝트에 적용하기 위한 매 년차별 연구내용은 다음과 같다.

1차년도 연구과제명 : 계측제어 시스템 기반기술 개발

상시 모니터링을 통하여 구조물 파손 등을 사전 예방하여야 하여야 하므로, 이를 위해 대공간 구조물의 계측 및 관리시스템의 활성/정착화를 위한 기본 자료인 계

측기기, 계측방법, 분석 및 대처방안을 정립하기 위해서는 계측종류에 따른 항목별 프로세스, 계측시스템에 따른 계측 프로세스, 구조물의 이상거동 감지 프로세스 및 구조물의 안정성 분석법 등이 개발되었다.

2차년도 연구과제명 : 대변형을 고려한 제어계측 시스템 개발

적극적인 점검, 검사를 수행해서 성능의 저하를 미리 관찰하여 대책을 세우고 사고를 미연에 방지하는 예지보전 및 점검·검사·교체 등을 실시하여 사고를 일으키지 않는 예방보전이 필요하며, 본 연구에서는 FBG센서를 이용한 계측 시스템 및 패키지 기법과 손상도 검증용 무인 로봇개발과 RFID센서를 사용한 막구조물의 모니터링 및 계측시스템의 정밀도 검증 및 유지관리 지침서를 작성하였다.

3차년도 연구과제명 : 막구조 건축물 보수기술 지침(안)

막재의 유지관리 모니터링의 분석과 진단방법 및 판단은 정밀한 해석과 IT기술이 융합된 모니터링 방법의 개발이 필요하다. 이를 위해 케이블 장력측정 및 상시 무인모니터링 기술과 막재의 열화요인 및 열화진단 방법 개발 및 기헥/성장에 의한 막 열화성능의 진단 그리고 막 소재의 진단결과 분석 및 판정기준 검증을 위한 연구를 수행하였고 막구조물의 보수기술 지침(안)을 제안하였다.

4차년도 연구과제명 : 대공간 구조물의 유지관리 및 보수기술 지침(안)

광섬유 센서를 사용한 막구조물의 상시 계측시스템을 포함한 유지관리 기술은 세계 최초의 유지관리 시스템으로서, 막체와 강부재, 공기막구조 및 누수 부분으로 나누어 기술지침의 가이드라인을 작성한다. 유지보전 계획은 목표, 범위, 분류로 구성하고, 점검항목, 레벨, 방법 등을 명시함, 해외 보수기술 자료를 참고 국내실정에 맞는 유지관리 지침(안)이 되도록 수정 보완하고, 막재료의 열화진단에 대해서, 기헥 및 화재실험을 수행하였다.

5차년도 연구과제명 : 무선모니터링 매뉴얼 및 방수, 누수방지 기술 개발

실시간 센서계측정보 가시화 기능 및 센서정보 관리 기능 과 센서계측정보 통계 및 이력조회 기능 및 가시경보 모듈 개발하였고, 대공간 건축물 건전성 관리 PDA Interface 및 시설물별 센서계측값 UI 그리고 SMS기능의 추가를 통한 위험통지 모듈을 개발하였다. 또한 도시성장 및 환경변화에 대응하는 확장성 있는 소프트웨어 아키텍쳐를 구현하였으며, 무인통합관리시스템을 통한 대 공간 건축물의 유지관리 통합기능 제공한다.

6차년도 연구과제명 : 대공간 건축물 통합유지관리 지침서

국내에 존재하지 않았던 대공간 건축물의 유지관리 기술의 확립과, 건전성 모니

터링을 비롯한 친환경적 측면 및 유지관리보수기술 등을 집대성하여 대공간 건축물 유지관리 기술 지침을 제안하며, 막구조 건축물 유지관리 및 진단 지침, 막체의 보수기술 지침, 강제부재의 부수기술 지침, 공기막구조의 설비 및 유지관리 지침 및 우수차단장치 및 수밀성능 유지관리 지침으로 구성하였다.

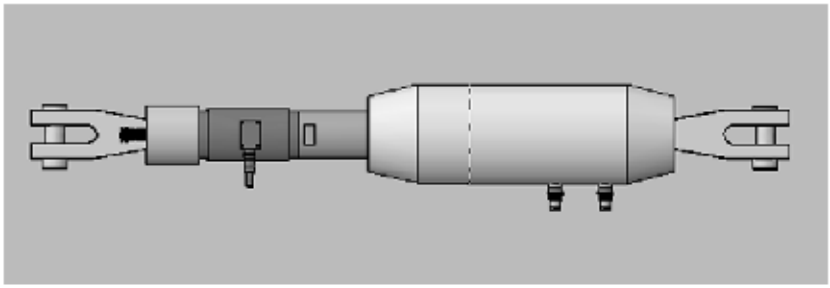
가. 4.3 하드웨어

(1) 4.3.1 유압식 재긴장 소켓 및 무선모니터링 시스템 (한국건설품질연구원, 한국기술교육대학교)

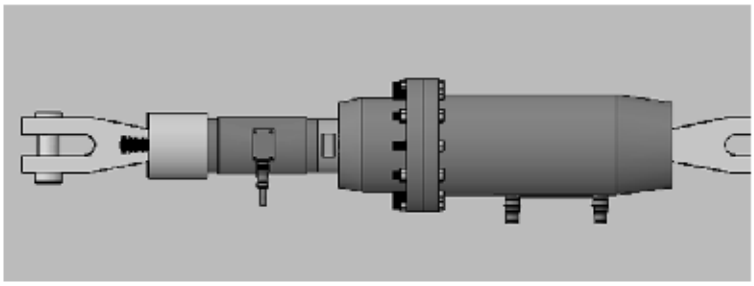
가. 케이블 유지관리 및 모니터링 기술

케이블 구조는 초기에는 불안정 하지만 케이블에 장력을 도입함에 따라 전체 구조시스템이 불안정에서 안정화되어, 구조적 특성을 발휘하는 시스템으로 케이블의 장력조절 및 제어는 구조물의 안정성에 있어 매우 중요한 요소라 할 수 있다. 일반구조물과 마찬가지로 인장구조물의 경우에도 사후 유지관리가 필요하며 일정 수명이 경과하면 보수보강이 요구된다. 특히 대공간 구조물의 초기 투자비용을 고려한다면 더욱 철저한 유지관리가 필요하며 전시, 집회, 관람 등 많은 인원을 수용하는 용도적 특성상 구조 손상으로 발생하는 사고는 대형인명사고로 이어질 수 있으므로 안정성에 큰 영향을 미치는 케이블 장력조절은 구조물의 유지관리에 있어 절대적으로 필요하다. 유지관리 측면에서 기존의 접합부에 사용되고 있는 턴버클을 이용한 방식은 초대형 구조물인 대공간 구조물에 사용되는 대구경 케이블에는 적합하지 않으며 재긴장을 수행하기 위해서는 많은 비용과 주변 조건의 존재하는 제약 때문에 재긴장이 불가능 할 수 있다. 또한 케이블의 인장력을 상시적으로 쉽게 측정할 수 있는 방법이 개발되지 않은 상태이고 스트레인게이지, 진동특정법 등의 방법들이 있지만 이에는 여러 전자장비를 동원해야 하는 번거로움, 초기값 관리의 어려움 등의 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 해결하고자 장력이 손실된 특정 케이블에 유압을 이용하여 손쉽게 장력을 부여 할 수 있는 유압식 재긴장 시스템과 무선 로드셀을 결합하여 인장재에 제공하는 인장력을 측정할 수 있도록 제안하였다.

케이블 시스템의 경우 자기 평형상태를 유지하기 때문에 장력이 손실된 특정 케이블은 재긴장을 하지 않으면 구조엔지니어가 요구한 하중보다 큰 하중이 다른 케이블에 전달되어 손상을 야기 할 수 있다. 하중에 의해 케이블구조물에서 발생되는 장력손실에 대하여 효과적으로 재긴장 할 수 있는 접합부 시스템이 필요하였으며, 기존의 케이블 접합부의 단점을 보완하여 유지관리 시 구조엔지니어가 요구한 장력을 간편하고 정확하게 케이블에 도입할 수 있도록 개발된 것이 유압식 재긴장 케이블 접합부 시스템이며 그림 4.3.1.1 와 같다.



가) (a) Straight Type



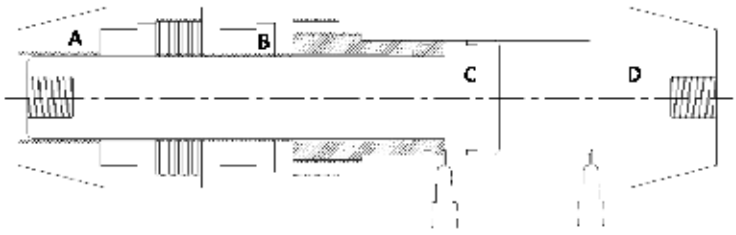
나)

다) (b) Flange Type

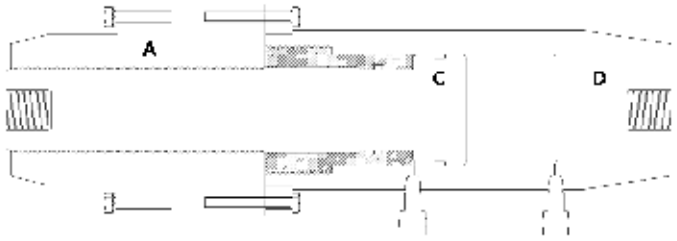
라) 그림 4.3.1.1 유압식 재긴장 시스템(Hydraulic Pulling Jack System)

개발된 시스템은 국내 자체 기술개발을 통해 설계된 시스템으로써 기존 수동 턴버클 방식이 아닌 유압잭에 의한 정확한 장력 조절이 가능하며 시공 후 압력을 제거 하여도 기구적으로 고정이 가능하다. 또한 케이블 재긴장 시 유압장치의 설치 문제점 개선으로 기존 방법에 비해 뛰어난 시공성과 인력 및 시간 단축이 가능하다.

그림 4.3.1.2(a) 에 나타난 스트레이트 타입 시스템의 작동원리는 밸브를 통해 유압이 주입되면 고정된 piston rod(C)에 의해 tube(D)가 접합부 방향으로 이동하여 tube(D)의 앞부분에 연결된 케이블이 재긴장되었을 때 유압을 제거한 이후에도 케이블의 긴장상태가 유지될 수 있도록 lock nut(B) 와 lock cover(A)를 볼트 체결한다. 그림 4.3.1.2(b)와 같이 플랜지 타입의 작동원리는 스트레이트 타입과 같다.



마) (a) Straight Type

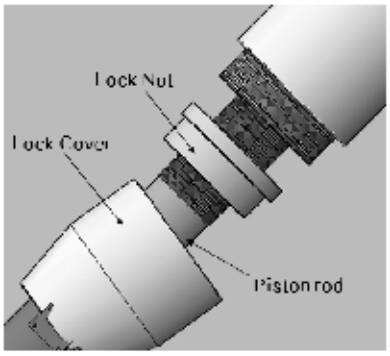


바) (b) Flange Type

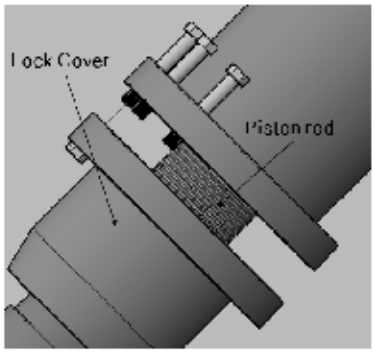
사) A: LockCover, B: LockNut, C: PistonLod, D: Tube

아) 그림 4.3.1.2 유압식 재긴장 시스템 단면도

스트레이트 타입의 경우 직선배치 된 케이블 및 소구경 케이블에 유리하며 대구경 케이블에 적용 시 케이블이 큰 하중을 부담하므로 케이블 재긴장을 위해서는 유압식 재긴장 시스템의 용량 또한 커지게 된다. 용량 증가에 따른 시스템의 중량이 커지므로 그림 4.3.1.3과 같이 tube와 lock cover의 나사체결시 발생할 수 있는 시공상의 어려움을 해결하기 위한 목적으로 스트레이트 타입을 개선한 플랜지 타입을 개발하였다.



자) (a) Straight Type 나사체결 상세



차) (b) Flange Type 나사체결 상세

카) 그림 4.3.1.3 유압식 재긴장 시스템 나사체결 상세

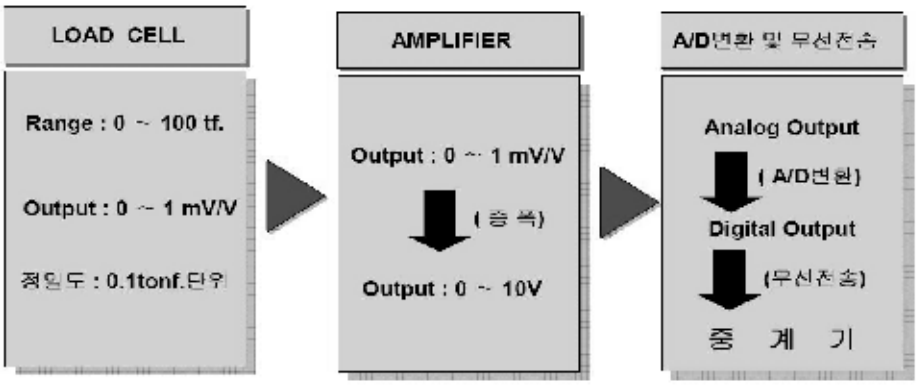
대공간 건축 구조물의 재긴장 유압식 재긴장 시스템과 함께 설치될 무선 로드셀(Wireless Loadcell)은 그림 4.3.1.4와 같다.



타) 그림 4.3.1.4 개발된 무선 로드셀 및 전송 안테나

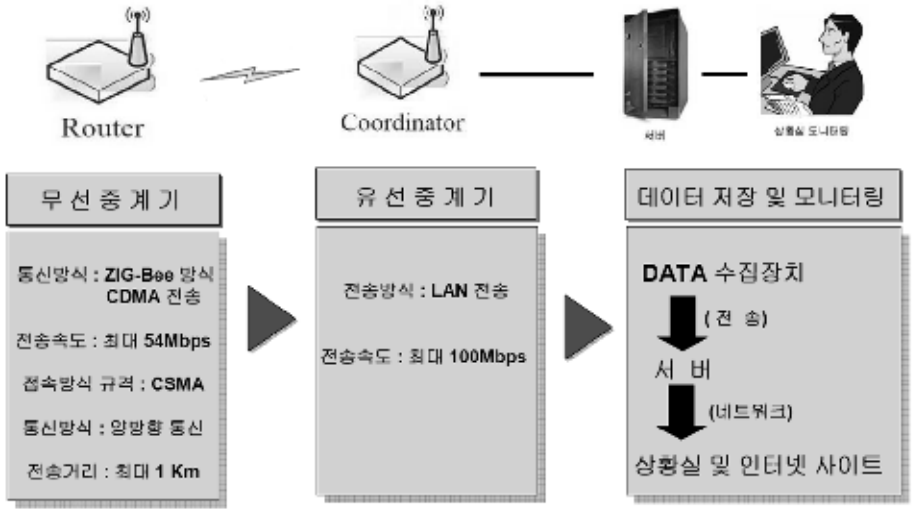
로드셀(Load cell)제작 과정에서 가장 중요한 사항은 감지부의 재료가 탄성비례한도(항복응력)가 크고, 가공성이 좋아야하며 탄성영역에서의 직선성이 좋고, 크리프(Creep), 히스테리시스(Hysteresis)가 작아야 한다. 또한, 내충격성, 내마모성, 내 부식성이 좋고 온도 보상회로를 내장하여 온도에 따른 전기적인 출력값의 변화가 작아야한다. 이러한 조건들이 충분히 만족되어야만 데이터의 신뢰성과 정확성을 확보할 수 있다. 특히, 케이블 장력 무선 모니터링 시스템에 있어서 핵심인 로드셀의 경우에는 장기간 야외에 노출되어 있는 상황이므로 방수성이 뛰어나야 하며, 케이블 장력 이외의 외부 환경적인 영향(지진, 태풍, 바람 등)에도 잘 견딜 수 있는 내구적인 설계가 이루어져야 한다.

무선 로드셀 (Wireless Loadcell)의 전기적 특성은 현재의 장력(인장하중)을 아날로그 출력(mV/V)으로 내 보내주고 무선 로드셀 내부에 설치된 무선 모듈에 의해 증폭기(Amplifier) 회로와 A/D변환 회로, 노이즈 필터회로 (Low & High pass Filter)를 거쳐 디지털 값(장력값)으로 변환한다. 이 변환된 디지털 값은 최대 1km까지 무선으로 데이터 수집장치에 전송되고, 데이터 수집장치는 LAN방식 혹은 CDMA방식의 무선으로 관리서버에 실시간 저장된다. 그림 4.3.1.5에 로드셀의 증폭 및 A/D 변환 후 무선전송 구성도를 나타내었다.



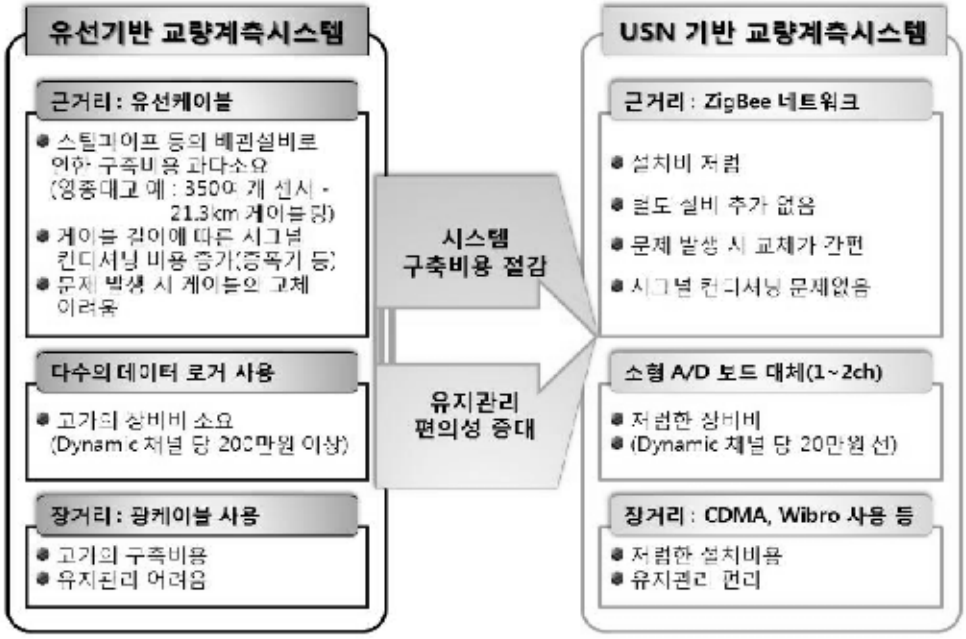
파) 그림 4.3.1.5 로드셀 증폭 및 A/D 변환 후 무선전송 구성도

데이터의 저장장치 구성도는 그림 4.3.1.5와 같으며 저장된 데이터는 프로그램에 의해 실시간 장력값으로 표현되고 상하한 범위를 설정하여 일정 이상 또는 이하의 값이 표시되면 바로 관리자에서 핸드폰 문자 등으로 경보 상황을 알려준다. 또한, 인터넷 사이트에 개설된 홈페이지를 통에 언제 어디서든 데이터를 모니터링 할 수 있는 시스템으로 구성되어 있다.



하) 그림 4.3.1.6 유무선 중계기 및 데이터 저장장치의 구성도

상하한값의 경보발령 (주의, 위험, 긴급 등 3단계)을 받은 관리자는 즉시 상황을 파악하고 현장에서 케이블을 재긴장 유압시스템을 이용 케이블 장력을 재긴장 하고, 재 긴장된 값은 바로 상황실 모니터 상이 장력값 변화로 확인 할 수 있다.

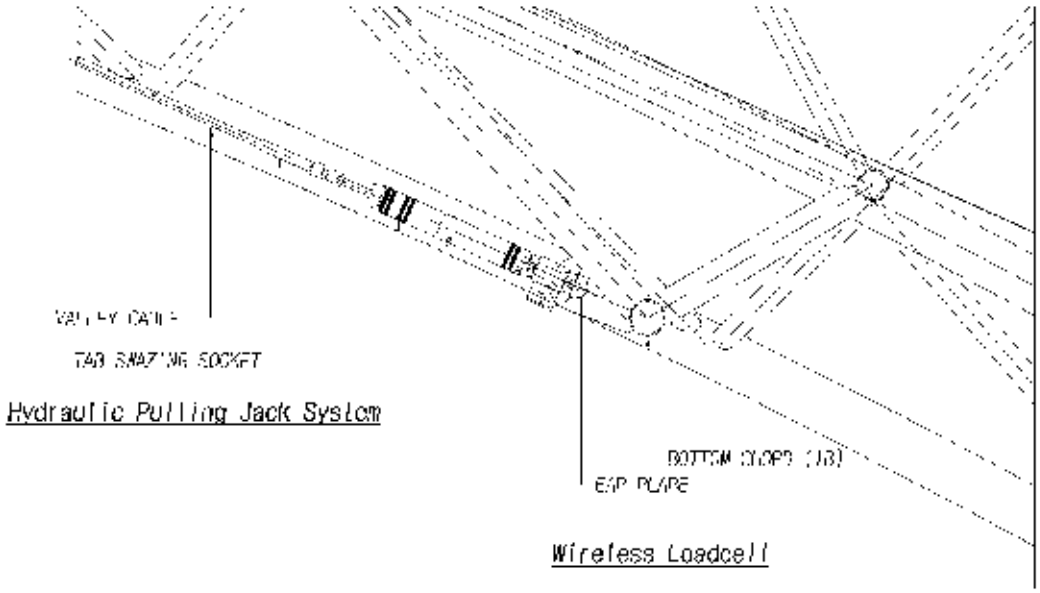


거) 그림 4.3.1.7 유선기반 -무선기반 계측 모니터링 시스템의 비교

실시간 모니터링 시스템을 통한 대공간 건축 구조물의 장력 관리 시스템은 즉각적인 상황파악, 대책마련, 문제해결이라는 3단계 관리 모니터링에 의해서 쉬고 빠른 해결이 가능하다. 또한, 그림 4.3.1.7과 같이 기존 사장교 등 유선 모니터링 방식에 비해 케이블 설치비용 및 유지관리 비용이 적게 들고, 시공간 제약을 받지 않으며, 데이터 수집장치 및 분석 프로그램을 저렴하게 구축 할 수 있다.

케이블 장력 무선 모니터링 시스템은 데이터의 신뢰성 과 정확성을 확보할 수 있고, 유선식에 비해서는 시스템 구축비용의 절감, 유지관리의 편의성의 증대라는 장점을 갖고 있다. 따라서 경제적인 측면이나 효율적인 측면에서 무선 IT기술을 접목한 장력 모니터링 시스템이 기존 시스템의 문제점을 해결 할 수 있는 좋은 대안이 될 수 있다.

케이블의 유압식 재긴장 시스템 및 무선 로드셀의 적용 위치는 케이블 단부 정착구에 설치되며 스팬 길이에 따라 케이블 양단부에 유압식 재긴장 시스템을 설치한다.



너) 그림 4.3.1.8 케이블 유압식 재긴장 시스템 및 무선모니터링 시스템 적용 상세도

유압식 재긴장 시스템 및 무선로드셀의 설치 상세는 그림 4.3.1.8과 같으며 시공 시 구조물에 장착하여 향후 케이블의 장력 유지관리 및 무선모니터링 시스템 구축에 활용하게 된다. 나아가 계측 센서의 추가 설치를 통해 장력뿐만 아니라 풍향풍속, 가속도, 변위, 온습도 등 기상관측이나 구조물의 다른 물리적인 변형 계측도 가능하며, 이를 통해 구조물의 전체적인 건전도 평가 및 통합 유지관리 시스템 구축이 가능하다.

나. 무선모니터링 시스템

대공간 건축물 건전성 상시 모니터링 포털 시스템은 광섬유센서를 사용하여 대공간 건축물의 현황 및 이벤트 발생시의 위험도를 모니터링 하며 운영 및 통계정IT으며 보를 제공을 목적으로 하였다. 여기서는 개발된 포털 시스템의 설계단계에서 설계과정 및 설계결과를 서술한다. 포털시스템의 구조 및 외부 인터페이스, 데이터 모델 등 기본 설계 내용을 포함한다. 개발된 포털 시스템은 전체 웹애플lication(이하 웹애플로 칭함), Sensor Data Collect Manager(이하 SDCM라 칭함), SDC Agent(이하 SDCA로 칭함)로 구성되어 있다. 웹애플과 SMS 매신져는 데이터베이스에 접속하여 데이터를 관리한다. SDCA는 광섬유센서로부터 신호가 입력되는 Dector(이하, 디텍터라 칭함)와 연결되어 센서로부터 계측된 값을 받아와 센서정보를 반영한 물리값을 SDCM으로 전송하고, SDCM은 이 데이터를 관리하여 DB에 저장한다. 웹애플은 DB의 데이터를 이용하여 사용자에게 서비스를 제공하게 된다. 아래의 그림은 전체시스템 흐름도를 나타낸다.

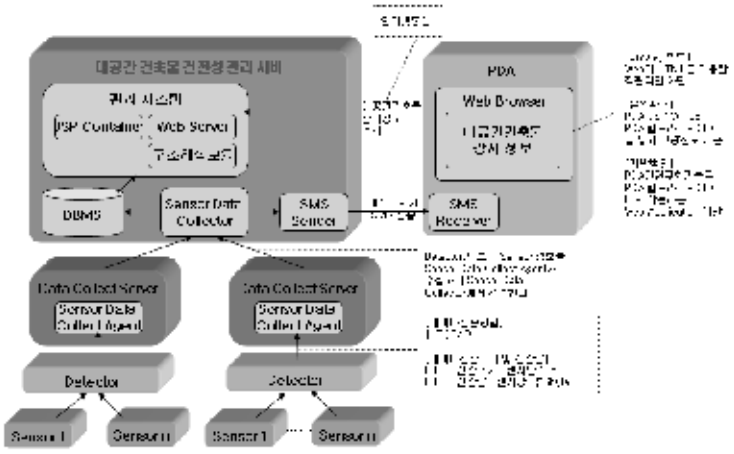


그림 4.3.1.9 웹에플 데이터베이스의 개념

휴대용 막장력 측정기와 함께 개발된 로봇 및 센서를 막 장력 측정에 적용하여 상시로 막의 장력 측정 가능하며, 신축 및 변형과 크리프 등의 재료적 거동에 대해서 상시모니터링 가능한 웹기반 포털시스템의 화면은 아래와 같고 통합유지보수가 가능하다. 또한 사용단계 유지관리 기술 확보로 안전성 향상과 파일럿 프로젝트에 연계하여 수명연장을 검증하고 데이터를 확인할 수 있을 것이다.

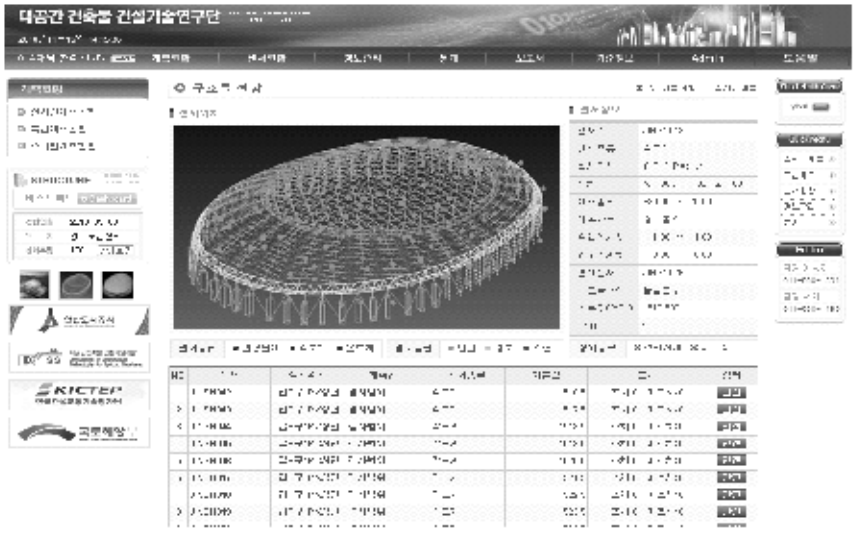


그림 4.3.1.10 Pilot Project에 적용된 포털 시스템 화면

5.

우천 시 발생하는 실제 구조물 개폐부의 수밀성능 검증 및 예측 불가능한 상황에 대비하여 해결방안에 대해서는 실물대 모형시험을 통해서 구조물의 수밀성능 평가를 확인하며, 우수 침입경로를 예측 확인할 수 있다. 또한 우수차단장치의 설계에 대해서 수밀성의 장기신뢰성, 장기신뢰등급 선정, 우수차단장치의 내구성 설정 및 오염방지, 층간변위 거동, 온도 변화 및 시공성등을 고려한 장치의 설계법을 개발하였다. 파일럿 프로젝트를 위해서 시공되기 전 설계단계에서 우수 차단장치에 대한 고려를 하였다. 여기서 개폐식 막 구조물의 지붕에서는 거동이 발생되는 지붕이 서로 간 맞닿는 부위에서 누수의 발생 가능성이 높다. 이를 방지하기 위해서는 우수차단장치를 설계단계에서부터 고려하여 결정하여야 한다. 또한, 구조물이 설치되는 지역의 강우량 정보 등 환경적 요소를 고려한 설계가 요구된다. 고려대상이 되는 차단 설비는 지붕 개폐 맞댐부위의 우수차단장치, 지붕 개폐 후면부위의 우수차단장치에 대한 고려와 성능평가가 수행되며, 시공후 상시 모니터링 시스템을 이용하여 문제를 해결한다.

(1) 4.3.2 가설공법 (경북대학교)

가. Rotation-Up 공법

대공간 구조물의 경우 무주공간 장대지붕을 일반구조물과 같은 방법으로 설치할 경우에는 가설재 비용 및 인건비의 과다와 안전상의 문제 등이 발생하기도 한다. 따라서 대공간 구조물의 설치에는 구조형식에 적합한 공법이 필요하다.

본 연구에서는 대공간 구조물 중에서 킬트러스로 구성된 대공간 구조물을 대상으로 구조체를 설치함에 있어서 안전성과 경제성이 확보되고 간편하게 설치할 수 있어 공기도 단축이 가능한 새로운 공법으로서 rotation-up 공법을 제안하여 공법의 유효성과 문제점을 규명하는 것을 그 목적으로 하고 있다.

본 공법은 대공간 건축물 건설기술개발 연구단의 Pilot 프로젝트의 대상구조물인 Keel Arch Truss에 적용하기 위하여 개발한 erection 공법으로 지점을 회전단으로 구성하여 골조를 양중케이블을 이용하여 당겨서 일으켜 세우는 공법이다.

Rotation-Up 공법의 개념은 그림 4.3.2.1에 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 본 공법은 가설재의 사용이 필요 없고, 고소에서의 작업이 없음으로 인해 시공 안전성과 공기단축 및 공사비의 절감이 예상된다.

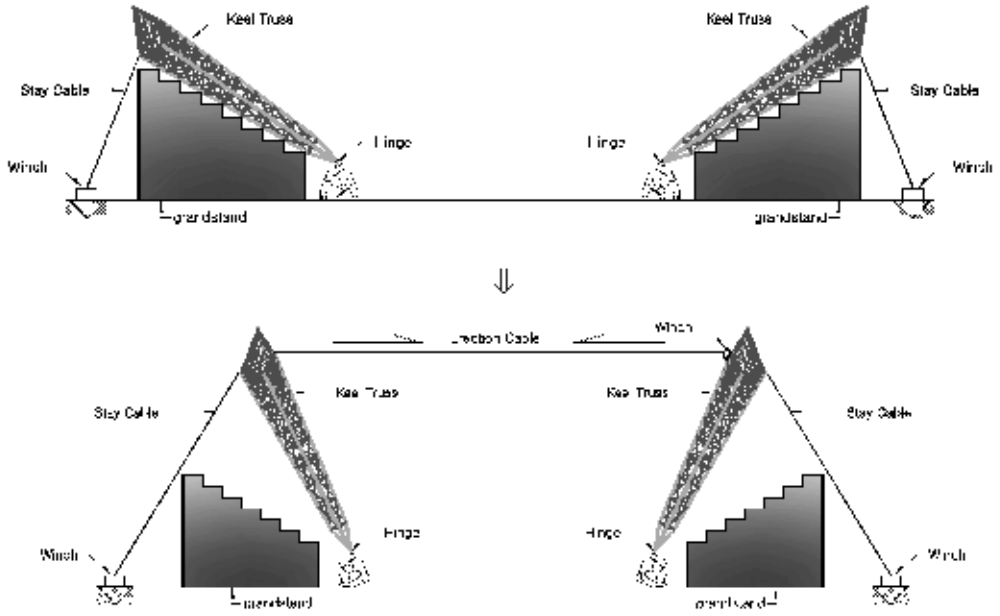
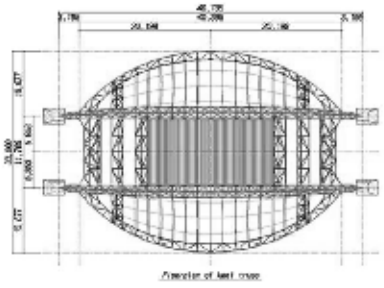


그림 4.3.2.1 Rotation-Up 공법 개념도

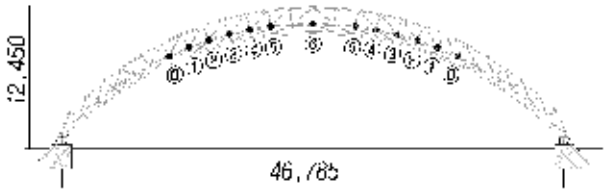
그림 4.3.2.1에서와 같이 주각이 힌지로 구성된 킬트러스 구조물을 지반 또는 미리 설치된 경기장 스탠드와 같은 구조물 위에서 조립하고, 윈치를 이용하여 구조체를 당겨서 일으켜 세워 소정의 위치에 설치 및 고정하는 공법이다. 또한 지반이나 구조물위에서 구조체를 조립하게 되므로 시공시의 오차가 거의 발생하지 않고 특히 설치를 위한 가설재가 불필요하며, 공기를 획기적으로 단축할 수 있는 장점이 있다.

나. 기본해석

해석대상 구조물 형상 및 주요부재 제원은 그림 4.3.2.2에 나타낸다. 그림 4.3.2.2에서와 같이 실험체는 저변이 46.785m이며, 높이는 12.45m, 아치로 이루어진 킬 트러스 골조로서 아치의 전체길이는 57.8m이다. 또한, 그림 중에 굵은 점으로 나타내는 것은 양중시 양중 케이블을 설치할 예상 위치를 나타내고 있으며, 기본적으로 양중 케이블을 ⑥번 위치에 1개를 설치한 경우와, ③,③ 위치에 2개를 설치한 경우, 그리고 ②⑥②위치에 3개를 설치한 경우를 대상으로 설치 위치의 적정성을 검토하였다.
해석에 사용된 S/W는 Midas-gen을 사용하였으며, 해석 조건은 아래와 같다.
재료강도 : SS400 (Fy= 235N/mm²), 하중조건(시공하중) : 1.2×트러스 자중



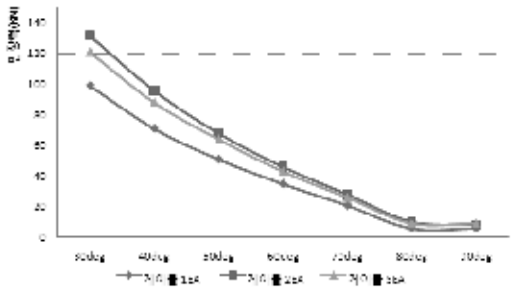
(a) 대상구조물의 평면도



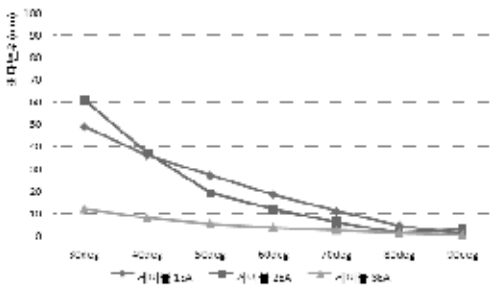
(b) 실험체 제원

그림 4.3.2.2 실험체 형상

해석방법은 30도 각도에 설치된 구조물을 대상으로 그림 4.3.2.2에 나타낸 지점에서 수평으로 당겨서 90도에 이르기까지 양중과정에 발생하는 인장력과 구조체의 변형을 해석하였으며, 얻어진 결과는 그림 4.3.2.3에 나타낸다.
그림 4.2.2.3 (a), (b)에서와 같이 케이블의 설치 위치에 따라 양중 케이블 전체에 작용하는 하중의 크기 및 최대 변위의 차이가 발생한다. 하중은 양중케이블을 하나만 설치하는 경우가 가장 최적의 값을 나타내고 있고, 구조체의 변위에서는 양중 케이블을 많이 설치할수록 작게 나타나고 있으며, 특히 일반 구조물의 허용처짐인 1/300이하로 변위가 발생하고 있어 변위에 의한 위해한 발생은 없는 것으로 사료된다.
따라서 구조물의 실험 시에는 양중시의 안정성 및 제어를 위해서 설치케이블은 2개가 가장 적합한 것으로 판단된다.



(a) 양중케이블 수에 따른 인장력 비교



(b) 구조체의 변위

그림 4.3.2.3 해석결과

다. Rotation-Up 공법 실험

그림 4.3.2.4에는 실험체 양중을 위한 양중 케이블 설치위치(점 T)를 나타낸다. 양중은 실험체 위에 설치된 윈치를 이용하여 2개의 킬 트러스를 맞당겨서 양중하였으며, 양중 케이블은 양중시 제어의 간편성과 구조체에 미치는 영향 등을 고려하여 2개소에 설치하였으며, 구조물의 안정을 위해 stay cable을 구조체 뒤쪽에 각 2개소씩 설치하였다. 또한, 양중 단계별 하중 상태를 확인하기 위해 양중 케이블의 단부에 100kN 용량의 로드셀을 설치하였으며, 또한 단계별 양중각도를 확인하기 위하여 킬 트러스 주각부에 각도계를 설치하였다. 데이터의 취득은 데이터 로거를 이용하여 실시간으로 취득 및 확인하여 양중의 속도 및 균형을 유지하였다.

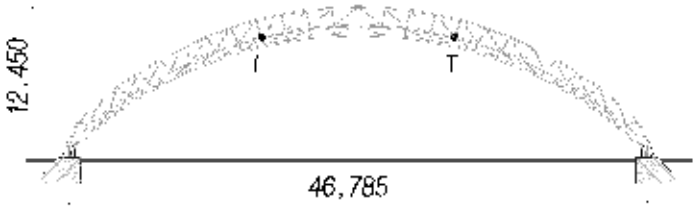


그림 4.3.2.4 구조물 입면 및 윈치 설치 위치

특히 양중에 이용한 윈치의 용량은 구조해석에서 65kN의 용량이 필요한 것으로 확인되었으나, 윈치의 무게 및 양중 속도의 제어를 위하여 그림 4.3.2.5에서와 같이 20kN 용량의 윈치를 도르래 원리를 이용하여 80kN의 용량을 가지도록 설치하였다.

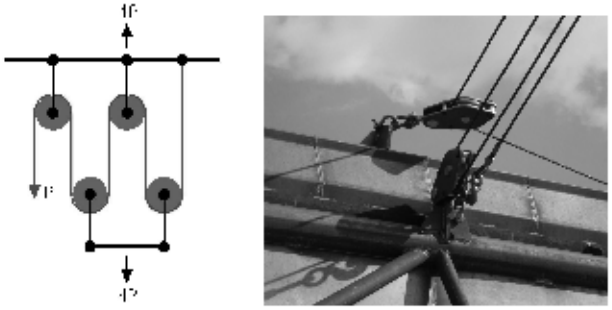


그림 4.3.2.5 도르래 설치개념 및 설치현황

라. Rotation-Up 공법 실험결과

(1) 양중의 진행

실험의 진행은 처음 30°의 위치에서 서서히 윈치를 작동시켜 실험체가 양쪽 트러스가 들려 올라가는 것을 확인하고 단계적으로 진행하였다. 또한, 양중을 위하여 설치된 2개의 양중윈치의 속도에 차이가 발생하여 편측의 윈치에 큰 하중이 작용하는 경우가 발생하였으며, 이때 양중 속도를 적절히 제어하여 하중의 불균형을 해소 하였으며, 전반적으

로 양중을 10°단위로 정지하여 양중 케이블의 하중 및 기타 전반적인 점검을 실시하며 실험을 진행하였다.

또한, 양중 시 2개의 킬트러스가 서로 균등하게 양중이 되지 않고 한쪽의 트러스만 일방적으로 양중되는 경우가 발생하였으며, 이를 킬 트러스 뒤쪽에 설치한 stay cable로 제어하면서 양중하였다.

실험은 예상대로 무리없이 진행되어 초기 설치위치에서 90°의 소요위치까지 양중에 1시간 전후의 시간이 소요되었다.

(2) 양중하중-각도 관계

양중 케이블의 작용하중과 양중 각도와의 관계는 그림 4.3.2.6에 나타낸다.

해석 시에는 초기 양중 하중이 62kN으로 나타나고 있으나, 구조물의 실험에서는 해석치보다 20kN이 높은 82kN에서 양중이 시작되었다. 이는 해석 시에 고려하지 못한 추가하중과 구조체에 작용하는 추력에 의한 주각 힌지부의 마찰하중에 의한 것으로 판단된다.

또한 실험결과에서 하중 값이 안정되지 않고 부분적으로 변동이 발생하는 것은 양중 시 작용하는 풍하중의 영향과 양중 속도를 제어 시에 발생하는 충격하중에 의한 것으로 판단된다.



그림 4.3.2.6 양중케이블 인장하중 및 실험체 실험상황

마. 결론

본 연구에서는 킬트러스의 대공간 구조물의 erection 공법으로 제안된 Rotation-Up 공법의 유효성을 확인하기 위한 실험이 진행되었으며, 전반적으로 특별한 문제점의 발생이 없어 안전하고, 간편하고 짧은 시간 안에 양중을 완료할 수 있어 본 공법이 킬트러스 대공간구조물의 erection에 매우 유효한 공법임을 확인하였다.

(2) 4.3.3 텐셔닝 에어빔 시스템

Pilot Project 대상 구조물의 개폐식 지붕구조는 개폐식 지붕 하부에 그림 4.3.3.1과 같이 3장에서 4-3세세부에서 연구를 수행한 텐셔닝 에어빔 시스템(Tensioning Air Beam System, 이하 TABS)을 적용하여 지붕 구조의 경량화를 도모하였다.

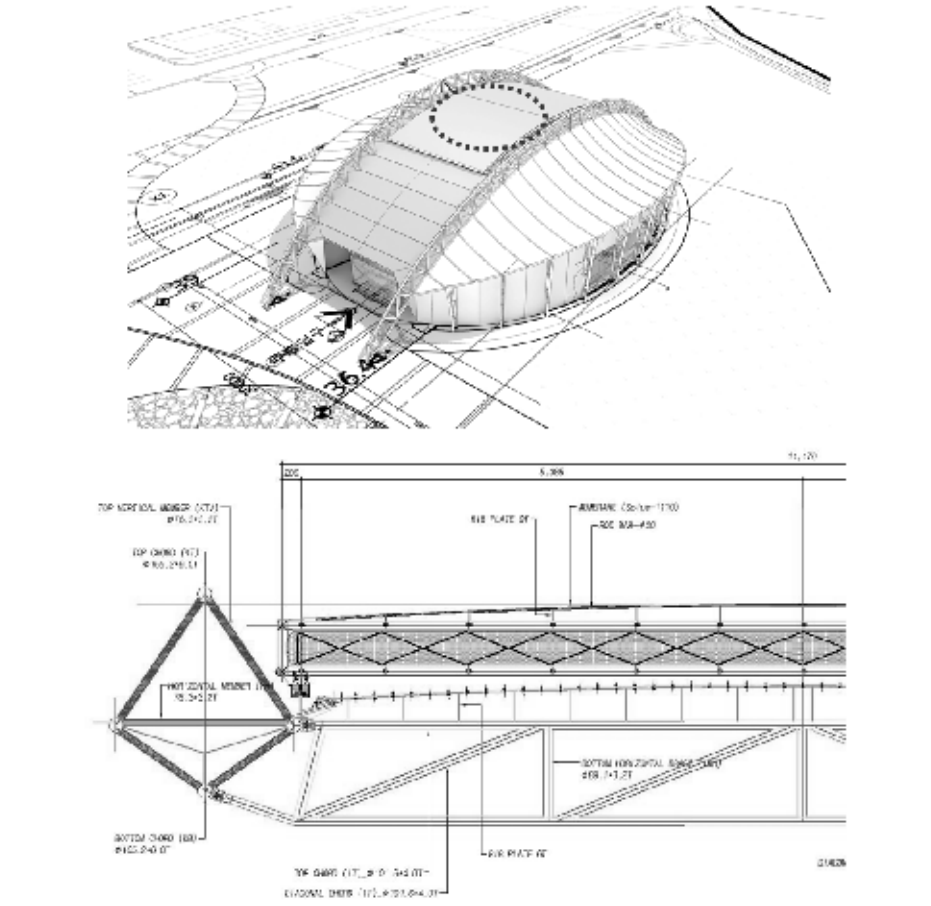


그림 4.3.3.1 Pilot Project에 적용된 TABS

TABS는 그림 4.3.3.2와 같이 인장구조물인 공기 막, 케이블과 프레임 등 이종재료를 사용하여 대공간 구조물 지붕구조에 적용에 가능한 하이브리드(Hybrid) 경량구조 시스템으로서 구조효율을 극대화할 수 있으며, 동시에 그림 4.3.3.3과 같이 구조성능, 경제성 및 시공성이 우수하면서도 아름다운 미관 표현이 가능하다.

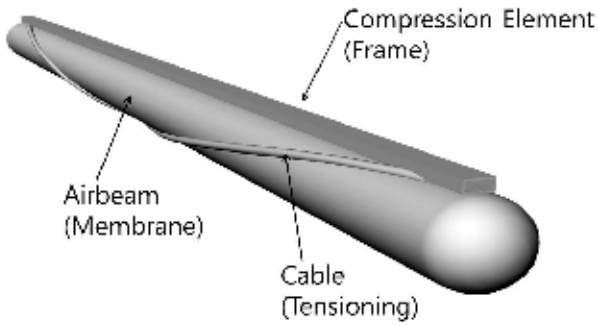
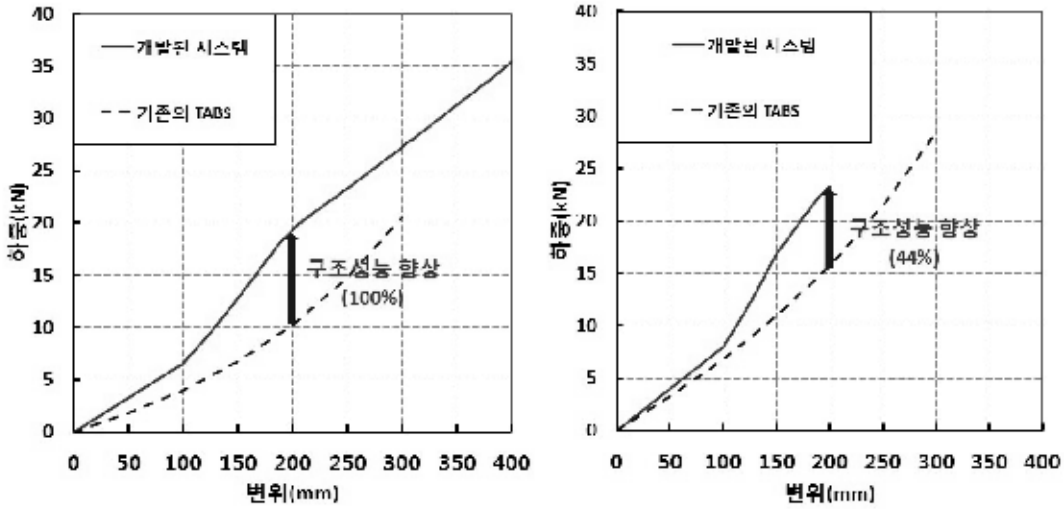


그림 4.3.3.2 TABS의 구성



그림 4.3.3.3 TABS의 장점

Pilot Project에 적용된 TABS는 기존의 TABS의 단점을 보완하여 4-3세세부에서 새롭게 제안한 TABSⅡ로서 이에 대한 내용은 3장에 자세히 나타나 있다. 개발된 시스템에 대한 실험 및 해석을 바탕으로 해석 모델에 대한 유효성을 검증하고 기존의 시스템과 비교한 그림이 그림 4.3.3.4에 자세히 나타나 있다. 경계조건을 동일하게 하여 해석 수행시 개발된 시스템의 구조성능은 TABSⅠ보다 50%에서 100%정도 월등히 높음을 확인할 수 있다. 따라서 TABSⅠ의 보완사항을 개선하여 Pilot Project에 적용한 TABSⅡ는 구조성능이 보다 향상되었다는 결론을 도출할 수 있다.



(a) 200mbar (b) 400mbar

그림 4.3.3.4. TABS I과 TABS II의 비교

TABS의 경제성 분석을 위해, 일반적으로 장스팬에 많이 사용되는 H형강, 각형강관, 경사재의 형상에 따른 춤 1m, 한 모듈이 2.5m X 1m인 플랫 트러스와 TABS를 비교하여 경제성 분석 결과, 그림 4.3.3.5와 같이 스팬 5m에서는 TABS 및 비교 대상 중 H형강 및 각형강관은 비슷한 물량이 소요되며, 플랫 트러스의 물량은 이의 1/5로써 경량 구조물인 TABS 보다 경제적이라 할 수 있다. 스팬이 증가하면서 H형강과 각형강관의 소요 물량은 플랫 트러스나 TABS에 비해 급격히 증가함을 확인할 수 있다. 또한 20m 스팬을 지나면서, 플랫 트러스와 TABS의 소요 물량 차이는 역전되어 TABS의 물량은 스팬이 20m인 경우, 플랫 트러스 (0.6958tonf)의 약 65.79% (0.4577tonf), 스팬 30m인 경우는 플랫 트러스 (5.7959tonf)의 약 16.07% (0.9316tonf)로써 20m 이상이 되는 구조물에 있어서는 플랫 트러스보다 경량 구조물인 TABS가 장스팬을 구현하는데 있어 경제적인 시스템이라 할 수 있다. 여기서 TABS는 연성구조물인 동시에 경량 지붕구조이므로 비교 대상인 H형강, 각형강관 및 플랫 트러스의 허용 처짐 제한을 $l/50$ (2%) 기준으로 하였으며, 이 기준일 때의 물량은 상용 구조해석 프로그램인 MIDAS/GEN을 이용하여 산정하였다. 비교 대상에 작용하는 등분포 하중 및 TABS의 성능에 의한 공기막의 반지름은 설계식으로부터 도출하였다. 또한0.49g/m인 케이블의 단위 길이당 중량은 1,300g/m^2인 공기막의 단위 면적당 중량에 비해 현저히 작은 값이므로 무시하였다.

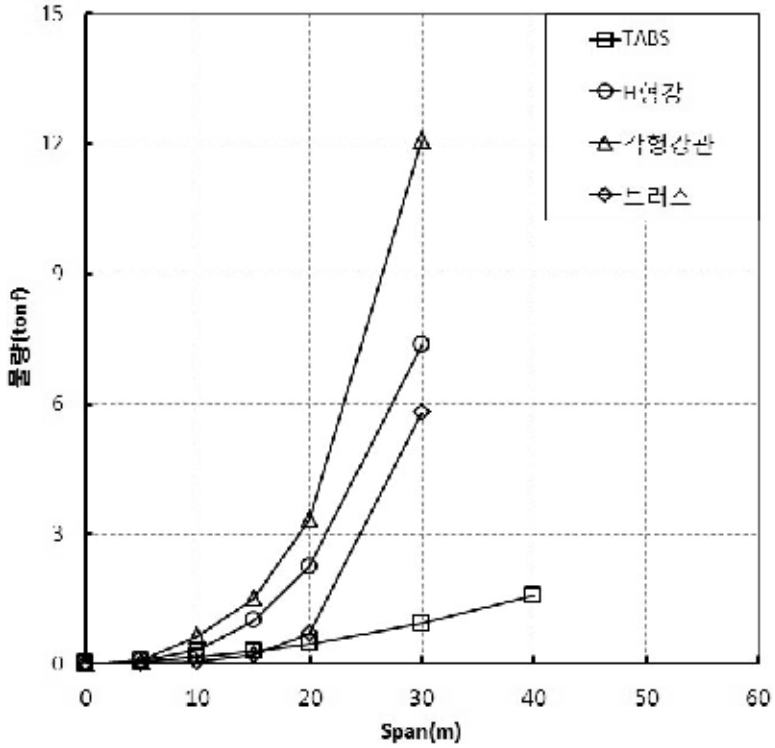


그림 4.3.3.5. TABS의 경제성 분석

Pilot Project에 적용 시 TABS의 공기압은 400mbar(=40kN/m^2)로서 공기 막에 작용하는 막장력은 역학적으로 계산시 Fill방향에서 최대 10kN/m^{2}이며, 이는 막재의 인장강도 시험을 바탕으로 산정된 단기 허용인장력 20kN/m^{2}의 50%로써 실제 Pilot Project에 적용시 안전하다고 판단된다.

또한, TABS에 대한 검증된 설계 식을 바탕으로 손쉽게 공기 막의 지름을 결정할 수 있도록 하였다.

(3) 4.3.4 개폐식 지붕구조 및 누수방지

Pilot Project 대상구조물의 지붕구조는 개폐식 지붕구조로서 전술한 바와 같이 두 개의 킬아치와 이너 리지드 링이 지지하고 있으며 적용 그림 및 사진은 그림 4.3.4.1과 같다. 개폐식 지붕구조의 하부는 전 절의 TABS가 그림과 같이 지지하고 있다.

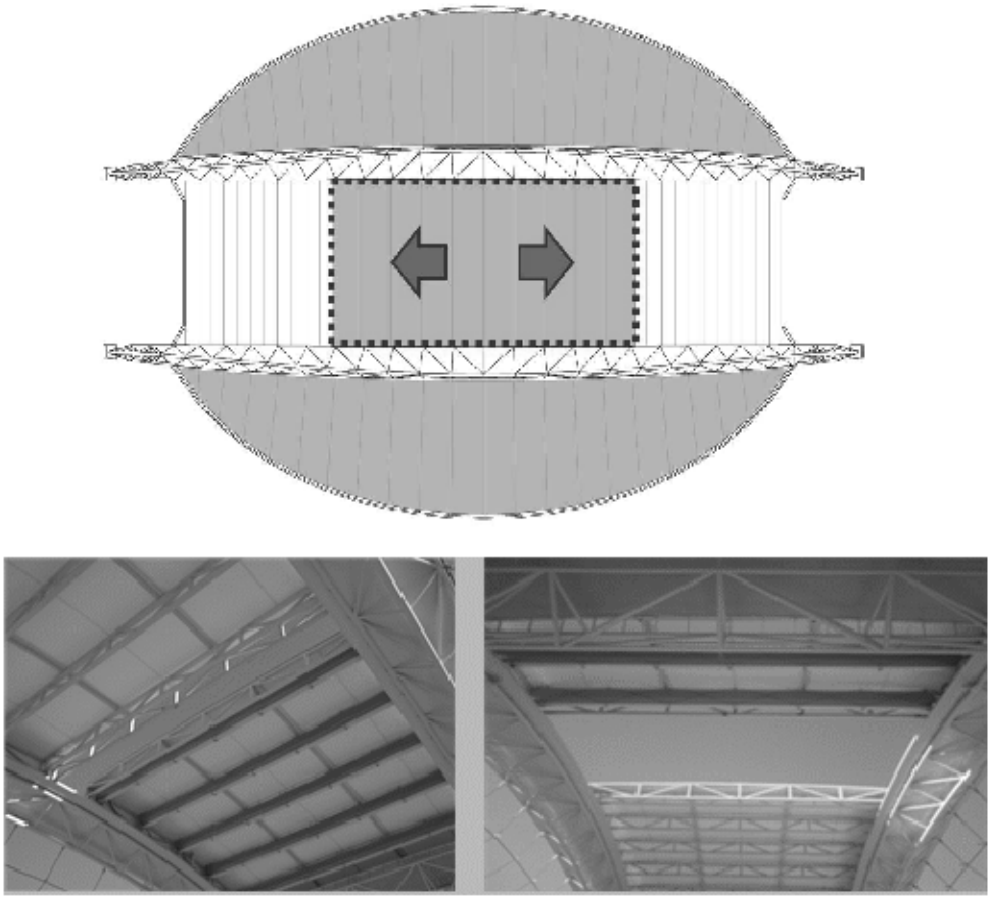


그림 4.3.4.1. Pilot Project에 적용된 개폐식 지붕구조

또한 개폐식 지붕구조는 막으로 덮여 있는 슬라이딩 방식으로 막구조에 직접적인 영향을 줄 수 있는 풍하중에 대해 그림 4.3.4.2와 같이 하중 재하 실험을 실시하였다. 하중 재하는 콘크리트 블록을 그림과 같이 재하하여 풍하중과 같은 등분포 효과를 기대할 수 있도록 하였다. 여기서 막 장력 측정은 휴대용 막 장력 측정기를 이용하였다.

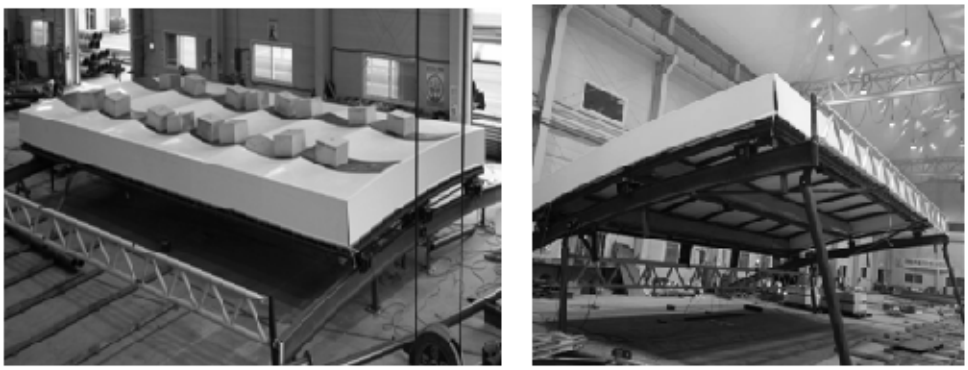


그림 4.3.4.2. 개폐식 지붕구조 재하실험

일반적으로 막 장력은 1축 인장 강도 시험에서 구해진 파단 강도의 25%를 단기 허용 인장력으로 한다. 휴대용 막 장력 측정기로 측정한 막 장력과 단기 허용 인장력과의 비교가 그림 4.2.4.3에 자세히 나타나 있다. 그림 4.3.4.3의 수치는 측정된 막 장력과 단기 허용 인장력과의 비율을 나타내고 있다. 최대 막 장력은 그래프에서도 확인할 수 있듯이 종사방향(Warp)은 단기 허용 인장력의 12%, 횡사방향(Fill)은 21%로서 안전하다고 판단된다.

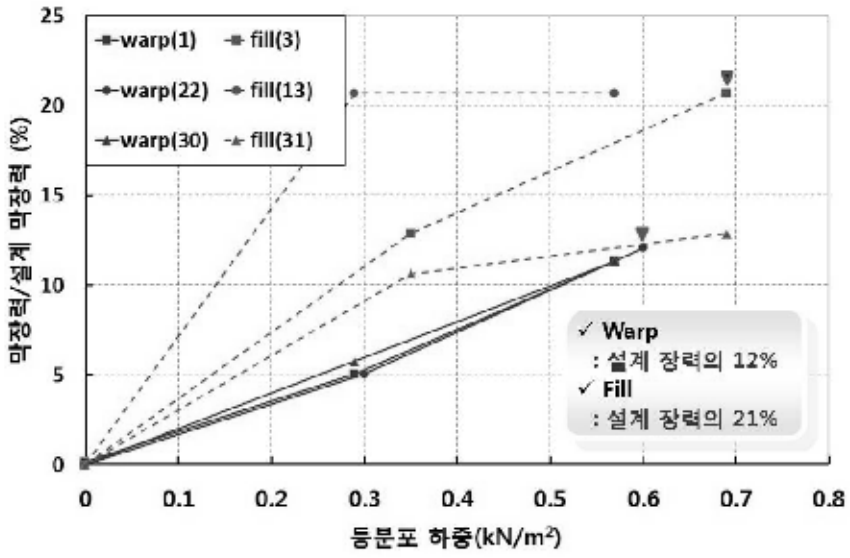


그림 4.3.4.3. 등분포 하중에 따른 막장력 대비 설계 막장력

또한 개폐식 지붕구조는 비, 바람을 동반한 환경 조건 하에서 누수의 위험이 상시 존재하므로, 이러한 누수 방지를 위한 디테일을 적용하여야 하며, 이에 대한

수밀 성능을 평가, 검토하여야 한다.

기존의 지붕 개폐형 대공간 막 구조물의 우수차단 디테일은 국내에서는 사례가 미비하며, 해외 특허로는 1987년과 1999년 미국에서 제안된 "Retractable Stadium Roof System with Rectangular Opening" 및 "Dome Roof Structure and Method of Designing and Constructing Same"이 있음을 확인하였다. 하지만 전자는 빗물이 바람에 의해 내부로 들이치는 현상에 대해서 수밀성을 확보할 수 없으며, 후자는 지붕 개폐시의 과정이 복잡하고 유지관리에 비용이 많은 소요되는 단점이 발견되었다. 따라서 Pilot Project의 대상구조물 개폐식 지붕구조의 누수방지를 위한 디테일은 그림 4.3.4.4와 같이 개발한 우수차단 시스템을 적용하였다.

이 누수 방지 시스템의 상부 강판 web는 수직방향으로부터의 우수를 차단하고, 수평방향으로부터의 우수 침입은 내부 앵글과 고무패드에 의해 차단하는 역할을 한다. 이 시스템에 대한 수밀성 성능 실험 결과, 기존의 시스템에 비해 상대적으로 내부로 유입되는 우수의 양을 감소시킬 수 있으며, 시공성 및 유지관리 측면에서도 유리함을 확인할 수 있었다.

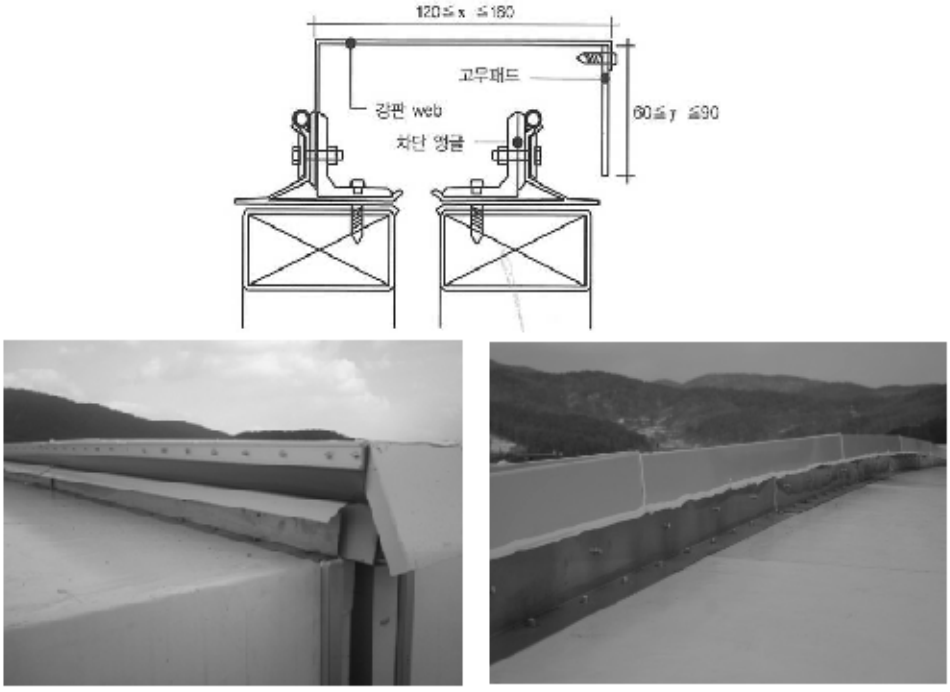


그림 4.3.4.4. 지붕구조 누수방지 시스템

가. 4.4 Pilot Project 대상구조물 시공

Pilot Project 대상구조물의 시공은 2009년 12월 18일 기공식을 시작으로 진행되었으며, 특히 지붕구조는 2010년 11월 15일 철골 트러스 반입을 시작으로 2011년 2월까지 총 12주차에 걸쳐 진행을 하였다. 2010년 12월 9일에는 현장 부지에서 직접 공개설명회를 개최하여 여러 관공서 및 대기업들이 모인 공개적인 자리에서 본 프로젝트를 소개하였다.

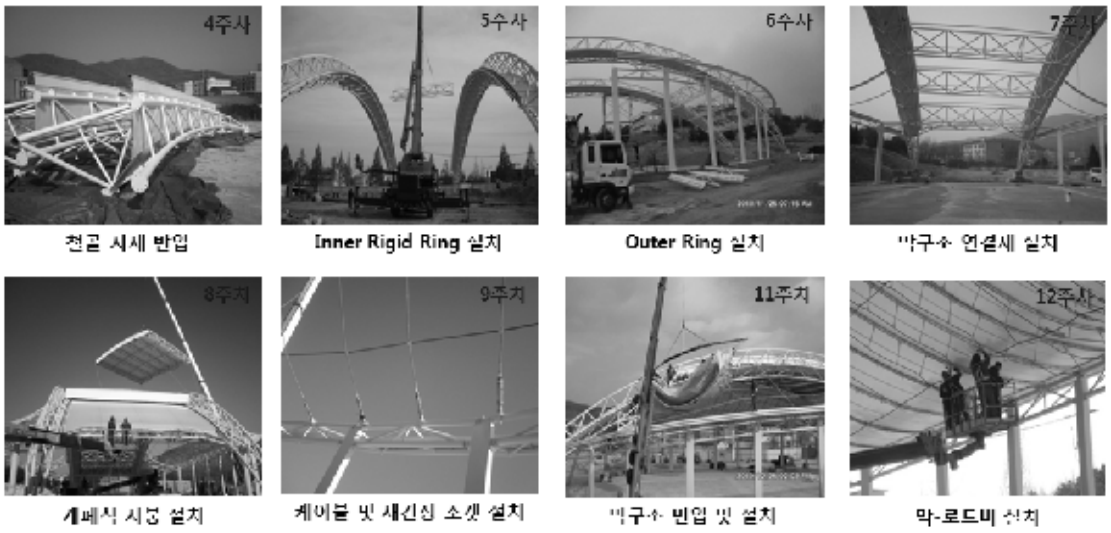
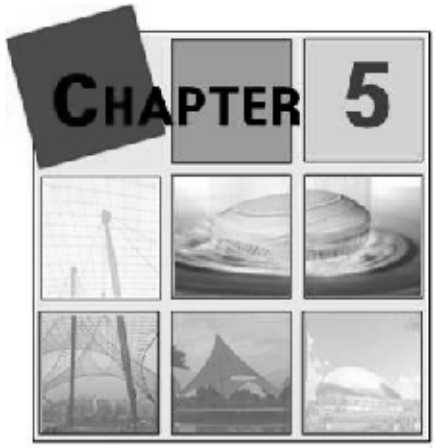


그림 4.4.1.1. Pilot Project 대상구조물 시공



그림 4.4.1.2. Pilot Project 대상구조물 기공식(왼쪽) 및 공개설명회(오른쪽)



연구개발목표 달성도 및 관련분야에의 기여도

CHAPTER 5

가. 5.1 연구개발 목표의 연차별 달성도

(1) 5.1.1 1차년도

1) 수행 2) 주체	3) 목 표	4) 내용	5) 달성도 6) (%)
7) 1-1세부 8) (한국예술종합학교)	9) ▪ 구조시스템별 특성분석 연구: 개폐식구조 포함	- 대공간 건축의 역사적 고찰 - 구조시스템 및 구조형식의 체계적 분류 - 개폐식 구조의 개폐유형 분류 - 대공간 건축개폐식구조 사례의 수집과 특성 조사 - 대공간 구조형식 및 지붕의 개폐형식 에 따른 특성파악	10)100%
11)1-2세부 12)(한국건설품질연구원)	13)▪ 볼조인트 접합부 거동 특성 연구	- 볼 조인트 접합부 상세 문헌조사 - 비선형 유한용소해석을 통한 국부거동 예측 - 비선형 유한요소해석을 통한 영향인자 도출 - 변수해석을 통한 최적형상 개발 - 축소모형 구조성능 실험을 통한 접합부의 구조적 거동 규명 - 볼 조인트 접합부 설계식 및 상세 제안	14)100%
15)1-3세부 16)(대림대학)	17)▪ 구조시스템별 경제성 분석	- 관련 문헌의 조사 - 경제성에 대한 정의 - 구조시스템별 분석 대상 건축물의 선정 - 구조시스템별 단위 면적(체적)당 분석 - 기타 요소에 대한 분석 - 각 구조시스템별 재료적, 하중 저항형태 등에 대한 분석 - 경제적 구조시스템 선택에 대한 데이터 제안	18)100%

가)

1) 수행 2) 주체	3) 목 표	4) 내용	5) 달성도 6) (%)
7) 2-1세부 8) (세종대학교)	■ 대공간 구조의 비선형해석 기법 개발	- 공간 골조구조에 대한 비선형 수치해석 모델 연구 - 크리트 쉘, 금속계 쉘 등 쉘 구조에 대한 비선형 수치해석 모델 연구 - 구조, 케이블 구조 등 연성구조에 대한 비선형 수치해석 모델 연구	9) 94%
10)2-2세부 11)(타이가)	■ 대공간 구조 시스템의 특성 조사 연구	- 쉘의 형태별 구조 불안정 특성 조사 연구 - 쉘의 하중 및 경계조건에 따른 불안정 특성 연구 - 쉘형 구조물의 초기 불완전에 따른 민감도 특성 연구 - 쉘형 구조물의 구조불안정 설계에의 적용성 조사 및 분석 연구	12)100%
(2) 13)2-3세부 14)(영남대학교)	■ 대공간 구조의 형태별 지진거동 특성 조사 및 분석 연구	- 대공간 구조의 거시적 형상에 따른 지진거동 특성 - 대공간 구조의 세부 형상에 따른 지진거동 특성 - 대공간 구조의 구조시스템에 따른 지진거동 특성 - 대공간 구조의 형태에 따른 지진거동 특성의 계통적 분석 연구	15)100%

1) 수행 2) 주체	3) 목 표	4) 내용	5) 달성도 6) (%)
7) 3-2세부 8) (두산산업개발(주))	9) ▪ 대공간 구조의 10) Erection 공법 개발	- Erection 공법 국내외 기술동향 분석 - Erection 공법 국내외 사례조사 및 공법 적용 빈도 검토 - Erection 공법 가상 모델 개발 및 모형 제작 - Erection 공법 개발과 실무용 Erection 공법 선정 프로그램 및 매뉴얼 개발	11)100%
3-4세세부 (전북대학교)	장치개발 12)▪ 다양한 형태의 13) 풍동모형제작을 위한 14) 특성 연구 실시 15)▪ 대공간 구조물의 16) 진동특성 분석을 위한 17)▪ 진동모형에 대한 18) 진동특성 실험기법 19) 개발	- 국내외 문헌조사 - 케이블구조,막구조,스페이스 플레임 등 실제건물의 바람특성조사 - 대공간의 형태별 실제 동특성 조사 - 동특성 분석을 위한 해석방법 연구 - 대공간 구조물의 다양한 풍하중 및 풍응 답 해석방법 고찰 - 대공간 형태별 풍하중과 풍응답 해석방법 연구	20)100%
(3)	21)▪ 대공간의 22) 음향설계기술 연구	23)- 용도별 음향가변화 방안의 선정 24) 을 위한 평가모델의 구축 25)- 음향가변화 방안의 적용을 위한 26) 평가 모델의 제작 27)- 음향가변화 방안의 적용에 따른	30)100%

	1) 수행 2) 주체	3) 목 표	4) 내용	5) 달성도 6) (%)
	7) 4-1세세부 8) ((사)한국공간구조학회)	▪ Code 분석	- 대공간 구조물 code 관한 국외자료 수집 및 분석 연구 - 일본 막구조 협회/건축학회 발간 문헌 조사 및 자료 수집 - 중국 대공간 관련 협회 발간 문헌 조사 및 자료 수집 - 유럽/미국 code 관련 문헌 조사 및 자료 수집 - 일본/중국 대공간 구조 관련 code 분석 - 유럽/미국 대공간 구조 관련 code 분석	9) 100 %
	10)4-2세세부 11)(한국기술교육대학교)	▪ 계측제어 시스템 기반 기술 개발	- 계측종류에 따른 항목별 프로세스 구축 - 계측시스템에 따른 계측 프로세스 구축 - 구조물의 이상거동 감지 프로세스 구축 - 구조물의 안정성 분석법 개발 - 실무 적용 및 시험 계측	12)100 %
(4)	13)4-3세세부 14)((주)CS구조엔지니어링)	▪ Pilot Project 1 대공간 구조물 구조설계 절차서 제안	- 대공간 구조물 구조설계 분석 및 구조 설계 절차서 작성 - 대공간 구조물 구조설계 평가 지표 작성 - Pilot Project 하부구조물 설계 및 각 세세부 연계성 정리	15)100 %

(5) 5.1.2 2차년도

1) 수행 2) 주체	3) 목 표	4) 내용	5) 달성도 6) (%)
7) 1-1세부 8) (한국예술종합학교)	9) ▪ 구조시스템 모델링 기법개발 : 개폐식 구조 포함	- 대공간 구조의 모델링 적용 사례 조사 - 단계별 모델링의 체계적 유형 분류 - 구조시스템별 모델링 기법 구축 - 재료별 모델링 기법 구축 - 기존 최적화 요소기술 및 적용성 분석 - 구조시스템 모델링을 위한 최저화 요소기술 개발방향 제시	10)100%
11)1-2세부 12)(한국건설품질연구원)	13)▪ 용접접합부 구조 거동 특성 및 강성평가 연구	- 용접접합부 상세 문헌 조사 - 국부거동 예측 및 영향인자 도출을 위한 용접접합부의 비선형 유한요소해석 - 구조성능 실험을 통한 접합부의 강성평가 - 용접접합부의 설계식 및 상세 제안	14)100%
15)1-3세부 16)(대림대학)	17)▪ 스팬, 용도별 표준모델 분석	- 문헌 조사 - 대공간 구조물의 용도 분류 및 특성조사 - 대공간 구조시스템별 스팬에 특성 분석 - 개폐식 구조물의 공사비 특성 분석 - 웹 데이터베이스 구축	18)100%

가)

19)수행 20)주체	21)목 표	22)내용	23)달성도 24)(%)
25)2-1세부 26)(세종대학교)	■ 이산계 강성 구조물의 기하학적 비선형 해석 기법 개발	- 스페이스트러스 해석모델 개발 - 스페이스프레임 해석모델 개발 - modified Riks 방법과 가속알고리즘을 결합한 비선형 해석 - 스페이스트러스 및 스페이스프레임 비탄성비선형 모델 개발 및 해석 - 스페이스트러스 및 스페이스프레임 동적해석	94%
27)2-2세부 28)(타이가)	29)■ 쉘형 구조물의 30) 정적 구조불안정 31) 특성 연구	- 쉘형 구조물의 구조불안정 관련자료 및 문헌조사 - 쉘형 구조물의 비선형 운동방정식과 쉘요소의 정적 정식화 - 쉘형 구조물의 정적 불안정 검토용 안정해석 알고리즘 - 쉘형 구조물의 고유좌굴모드에 따른 초기불완전 적용모델 개발 - 쉘형 구조물의 정적 구조불안정 특성 조사 및 분석	32)100%
33)2-3세부 34)(영남대학교)	■ 대공간 구조물의 지진해석용 모델링 기법 개발	- 입력지진동-지반-공간구조에 대한 모델링 - 지진응답의 상호작용에 대한 모델링 - 공간구조에 적용가능한 등가정적해석의 모델링	100%

가)

35)수행 36)주체	37)목 표	38)내용	39)달성도 40)(%)
41)3-2세부 42)(두산건설(주))	43)■ 연성구조물의 44) 장력측정 시공기술 45) 개발	46)- 막구조 장력측정기 모델개발 47)- 막구조 2축장력시험기개발 48)- 막구조 장력측정기 개발 49)- 막구조 장력 시스템 개발	50)100%
3-4세세부 (전북대학교)	51)■ 다양한 형태의 52) 풍동모형제작을 위한 53) 특성 연구 실시 54)■ 대공간 구조물의 55) 진동특성 분석을 56) 위한 장치개발 57)■ 진동모형에 대한 58) 진동특성 실험기법 59) 개'발	- 막,케이블,케이블등 다양한 형태의 풍동 모형제작 사례조사와 제작 - 대공간 구조시스템별 풍동실험 기법 조사 - 풍동실험후 계측데이타의 분석 기법 정립 - 진동에 취한 구조시스템을 선정 - 진동에 특성을 분석할 수 있는 축소 모형 제작 기법 연구 - 축소 진동모형 계측 기법 연구 - 동특성(고유진동수,모우드 형상) 추출기법 연구	60)100%
61)3-5세세부 62)(전북대학교)	63)■ 대공간의 64) 실내음향성능 65) 측정기술개발	- 마이크 입력부 및 송신기의 선정 및 조합 - 4개의 송신기의 데이터를 입력받는 수신기 제작 - 후처리 및 분석용 소프트웨어 제작 - 4가지 구성요소의 Integration 및 field test를 통해 성능평가 및 Bug Fixing을 통해 개발 완료	66)100%

가)

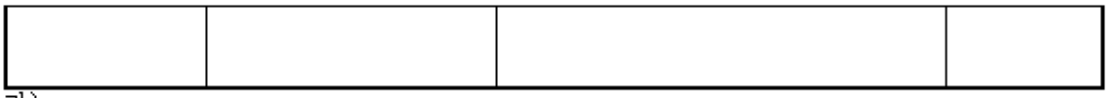
67)수행 68)주체	69)목 표	70)내용	71)달성도 72)(%)
73)4-1세세부 74)((사)한국공간구조학회)	▪ 설계 지침서 작성	- 케이블 구조 관련 국내 자료수집/분석 - 케이블 구조물의 설계 지침 기반 기술 연구 - 케이블구조 설계기준 및 해설 초안 작성	75)100%
76)4-2세세부 77)(한국기술교육대학교)	▪ 대변형을 고려한 제어계측 시스템 개발	- FBG센서를 이용한 계측 시스템 및 패키지 기법 개발 - 손상도 검증용 무인 로봇개발과 RFID센서를 사용한 막구조물의 모니터링 - 계측시스템의 정밀도 검증 및 유지관리 지침서 작성	78)100%
가) 79)4-3세세부 80)((주)CS구조엔지니어링)	▪ Pilot Project 2 Single Layer Dome 구조	- 단층 래티스 시스템 설계 - 단층 래티스 돔 실험체 제작 / 실험 수행 - 단층 래티스 돔 실험의 해석 및 실험에 대한 유관성 분석	81)100%

(6) 5.1.3 3차년도

1) 수행 2) 주체	3) 목 표	4) 내용	5) 달성도 6) (%)
7) 1-1세부 8) (한국예술종합학교)	9) ▪ 대공간 구조시스템 축소모델 실험 및 대공간구조물의 Size/Shape Optimization 기법	- 구조시스템별 축소모델 실험의 특성 조사 - 축소모델 실험의 적용 방식 분석 - 축소모델 실험의 유형 분류 - 축소모델 실험의 정식화 - 대공간구조물의 구조시스템 분석 및 Case 구조물 선정 - 크기/형상최적화를 위한 정식화 방안제시 - 대공간 구조시스템의 크기/형상 최적화 - 기법에 대한 검증 및 case 실구조물 대안 시스템 제시	10)100%
11)1-2세부 12)(한국건설품질연구원)	13)▪ 재긴장이 가능한 케이블 접합부 시스템 개발	- 케이블 접합부 상세 및 역학모델 사례조사 - 전문가 자문을 통한 기술적 부분 보완 - 접합부 시스템 상세설계 - 안정성 예측 및 영향인자 도출을 위한 - 유한요소 해석 - 시제품 모형을 통한 거동예측 - 실험을 통한 시스템 성능 평가	14)100%

가)

15)수행 16)주체	17)목 표	18)내용	19)달성도 20)(%)
21)2-1세부 22)(세종대학교)	■ 하이브리드 구조물의 비선형 해석 기법 개발	- 텐세그리티 구조의 모델링 기법 개발 - 언더텐션 구조의 모델링 기법 개발 - 텐세그리티 구조의 정적 비탄성 비선형 해석 - 언더텐션 구조의 정적 비탄성 비선형 해석 - 텐세그리티 구조의 동적 비탄성 비선형 해석 - 언더텐션 구조의 동적 비탄성 비선형 해석	23)100%
24)2-2세부 25)(타이가)	■ 쉘형 구조물의 동적 구조불안정 특성연구	- 쉘형 구조불안정 관련 자료 및 문헌 조사 - 비선형 쉘 요소 동적 정식화 - 쉘형 구조물의 동적 불안정 검토용 알고리즘 개발 - 쉘형 구조물의 동적 구조불안정 특성 조사 및 분석	26)100%
27)2-3세부 28)(영남대학교)	■ 하부구조의 돔에의 영향 분석 연구	- 공간구조물의 하부구조 영향 고찰을 위한 수치해석 - 공간구조물의 하부구조 영향 고찰을 위한 진동대 실험 - 케이블 장력 측정 실험을 통한 장력 추정식 보완	29)100%



가)

1) 수행 2) 주체	3) 목 표	4) 내용	5) 달성도 6) (%)
7) 3-2세부 8) (두산건설(주))	9) ▪ 시공자동화 공법 10) 개발	11)- 골조공사의 자동화 모델 개발 - Erection 시공자동화 모델 개발 - 골조공사의 자동화 공법 개발 - Erection 시공 자동화 공법을 개발하여 애니메이션 및 모형 제작·시연	12)100%
3-4세세부 (전북대학교)	13)▪ 다양한 대공간 구조물에 대한 풍동실험 모형 제작을 위한 상사법칙 연구 14)▪ 대공간 구조물의 풍진동 모형제작를 위한 상사법칙 연구 태양광 패널을 적용한 대공간 구조물의 구조성능 확보기술	- 축소모형제작을 위한 재료 및 기하학적 연구 실시 - 재료별 특성 분석을 통하여 대공간 구조물의 축소모형 제작기법 확립 - 정적풍하중을 구하기 위한 풍동실험실시 - 풍하중 해석기법을 이용한 풍응답 분석실시 - 막구조 시스템의 풍진동 특성을 반영한 모형제작 기법연구 - 태양광 패널 적용 대공간 구조물 사례조사 - 유럽, 아시아 등의 대공간 구조물들에 적용된 태양광 패널의 사례조사 및 분석 - 대공간 구조물의 부위별 태양광 적용기술 - 대공간 구조물의 차양, Void공간 등 다양한 공간에 태양광 패널이 적용된 부위 조사 - 대형경기장의 태양광 적용사례조사(독일의 적용사례 분석)	15)100%
(7)	16)▪ 대공간의 실내 음향시뮬레이션 기술개발	- FDTD방법의 음파의 파동방정식에 적용하는 알고리즘 개발 - 열린공간 음향 시뮬레이션을 위한 흡수경계조건의 개발 - 흡음계수가 주어진 반사판에 대한 경계조건 개발 - 임의 위치에서의 임펄스 리스펀스 함수 계산 방법 개발	17)100%

	1) 수행 2) 주체	3) 목 표	4) 내용	5) 달성도 6) (%)
	7) 4-1세세부 8) ((사)한국공간구조학회)	▪ 설계 지침서 작성	- 스페이스 프레임 자료 수집 및 작성 - 케이블구조 설계기준 및 해설 작성완료 및 발간 - 막구조 설계 지침서 초안 작성	9) 100 %
	10)4-2세세부 11)(한국기술교육대학교)	▪ 막구조 건축물 보수기술 지침(안)	- 케이블 장력측정 및 상시 무인모니터링 기술 - 막재의 열화요인 및 열화진단 방법 개발 - 기핵 및 성장에 의한 막 열화성능의 진단 - 막 소재의 진단결과 분석 및 판정기준 검증	12)100 %
(8)	13)4-3세세부 14)((주)CS구조엔지니어링)	▪ Pilot Project 3 텐셔닝 에어빔 시스템 I (TABS I)	- 공기막+텐셔닝 시스템 구조설계 - 공기막+텐셔닝 시스템 비선형 해석 - 공기막+텐셔닝 시스템 실험체 제작 / 실험 수행 - 실험결과 정리 및 분석 / 유관성 분석 - 공기막+텐셔닝 시스템에 대한 설계 요소기술 정리 및 보고서 작성 - 1/10 축소 실물 실험 (4차년도 Pilot Project 준비)	15)100 %

(9) 5.1.4 4차년도

1) 수행 2) 주체	3) 목 표	4) 내용	5) 달성도 6) (%)
7) 1-1세부 8) (경상대학교)	9) ▪ 대공간 구조시스템의 Topology Optimization기법	- Topology optimization 기법 비교 연구 - 대공간 구조시스템의 효율적인 위상 최적화를 위한 재료모델 제시 - 대공간 구조시스템의 위상최적화를 위한 정식화 제시 - 구조성능 및 경제성을 중심으로 한 구조시스템의 최적위상 대안평가 및 결과제시	10)100%
11)1-2세부 12)(한국건설품질연구원)	13)▪ 막구조의 형태별 접합부 거동 특성 연구	- 유압식 케이블 재긴장 시스템의 최적화 - 케이블 장력 무선 모니터링 시스템 개발 - 휴대용 유압식 핸드펌프 모델 개발 - 파일롯 프로젝트의 지붕구조에 케이블 구조의 적용을 위한 개발된 재인장 접합소켓의 적용방안 제시 - 막재의 종류별 접합 기법 조사 - 막재의 지지 구조물과 접합 기법 조사 - 막 접합부의 파손사례 조사 - 막 접합부의 해석 및 분석 - 파일롯 프로젝트의 대안 ALT1, ALT2, ALT3에 대한 경제성 분석 및 타당성 제시	14)100%

가)

15)수행 16)주체	17)목 표	18)내용	19)달성도 20)(%)
21)2-1세부 22)(세종대학교)	■ 케이블-스트럿 구조물의 비탄성 비선형 거동 특성 연구	- Evolutionary algorithm을 이용한 구조최적화 - 형상해석에 대한 분석 및 연구방향 제시 - 비선형 비탄성 거동 분석 및 연구방향 제시 - 텐세그리티 구조의 진보된 형상 해석 - Rhino를 이용한 free form 모델링	23)100%
24)2-2세부 25)(세명대학교)	■ 스페이스 프레임의 정적 구조불안정 특성 연구	- 스페이스 프레임의 정적 구조불안정 관련자료 및 문헌조사 - 비선형 선부재요소 정적 정식화 - 스페이스 프레임의 정적 구조불안정 검토용 알고리즘 개발 - 스페이스 프레임의 정적 구조불안정 특성 조사 및 분석	26)100%
가) 27)2-3세부 28)(영남대학교)	■ 대공간 구조물의 진동제어 기법 및 시스템 개발	- 기초면진 및 지붕면진 기법의 효용성 검토 - 수동 및 준능동 제어장치의 대공간 구조물 적용방안 - 수동 및 준능동 제어장치의 진동제어성능 고찰 - 대공간 구조물 진동제어장치의 최적화 기법개발	100%

29)수행 30)주체	31)목 표	32)내용	33)달성도 34)(%)
35)3-2세부 36)(경동대학교)	37)■ 연성 막구조물의 38) 시공관리 기술 개발	- 연성 막구조물의 요소시공기술 개발 - 연성 막구조물의 erection공법 모형 및 동영상물 제작 - 연성 막구조물의 시공지침서 개발	39)100%
3-4세세부 (전북대학교)	40)■ 다양한 형상을 갖는 41) 막구조물의 풍하 42) 중평가 방법분석 43)■ 다양한 형상을 갖는 44) 막구조물의 풍동 실험 실시 45)■ 태양광 패널을 46) 이용한 대공간 47) 구조설계 계획	- saddle형태의 막구조물 풍응답변위를 계측하여 분석 - 하중의 크기별 위치별 풍응답변위계측 - 태양광 패널이 적용된 해외 대공간 구조물의 상세 계획 설계한 사례 분석 - 해외 PV시스템이 설치된 22개의 대공간 구조물 및 스타디움의 사례 조사 - 해외 대공간 구조물 및 스타디움 중 스타데 스위스, 카오슝 스타디움, EWE ARENA의 상세 도면 분석 - 태양광 패널이 적용된 돔 구조물의 구조적 특성 분석 - 돔 구조물의 PV시스템 접합 가능부위에 따른 분류 - 돔 구조물에서 발생될 수 있는 사례를 시뮬레이션을 통해 3가지 음영 사례 분석 - 돔 구조물에서의 방위각 및 설치경사에 따른 에너지 효율 분석 및 도표 - 태양광 패널이 적용된 국내 대공간 구조물의 기본 설계안 제시 - 대구 월드컵 스타디움의 PV시스템 가상도 및 접합 디테일 작성	48)100%
가)	49)■ 대공간의 50) 음향설비제어기술 51) 개발	- 대공간에 적용 가능한 음향 증폭시스템의 종류 및 설치방법 연구 - 폐쇄형과 개폐형 공간에의 적용성 검토- 물리적 성능 및 적용성 검토 - 음향증폭시스템의 주관적인 평가 및 각 공간에 적절한 최적음향시스템 설계 안 제시	52)100%

	53)수행 54)주체	55)목 표	56)내용	57)달성도 58)(%)
	59)4-1세부 60)((사)한국공간구조학회)	▪ 설계 지침서 작성	- 막구조 설계기준 및 해설 작성 - 막구조 설계기준 및 해설 발간 준비	61)100%
	62)4-2세부 63)(한국기술교육대학교)	▪ 대공간 구조물의 유지관리 및 보수기술 지침(안)	- 유지보전 계획의 목표, 범위, 분류 및 점검항목, 레벨, 방법 등의 명시 - 막재료의 열화요인 및 열화진단에 대해서, 기핵실험, 화재실험 등을 수행. - ETFE 막재를 중심으로, 기핵실험 전후의 내구성 테스트를 실시하여 실험데이터를 제공 및 재료 물성치 검증 - 화재실험 결과, 난연성에 관한 데이터를 확보 및 구조물 실 설계시 반영 자료 도출	64)100%
가)	65)4-3세부 66)((주)CS구조엔지니어링)	▪ Pilot Project 4 텐셔닝 에어빔 시스템 Ⅱ (TABS Ⅱ)+Pilot Project 설계	- TABSⅡ 구조성능 실험 및 디테일 개발, 구조해석 - 30M Pilot Project 실시설계 - 300M 스팬 대공간 구조물 기본설계 (탄성설계) - Pilot Project 요소기술 적용성 검토 - Pilot Project 구축계획서 작성	67)100%

(10)5.1.5 5차년도

1) 수행 2) 주체	3) 목 표	4) 내용	5) 달성도 6) (%)
7) 1-1세부 8) (경상대학교)	9) ▪ 대공간 구조시스템의 Morphogenesis 기법	- Morphogenesis모델 연구 - Genetic Algorithm과 Morphogenesis의 연계를 통한 구조최적화기법 연구 - 위상최적화기법과 Morphogenesis의 연계를 통한 구조최적화기법 연구(2D) - FDM과 연계된 Morphogenesis (2D)	10)100%
11)1-2세부 12)(한국건설품질연구원)	13)▪ 케이블 구조의 형태별 접합부 특성 연구	- 케이블 접합부의 사례분석 - 케이블 초기 긴장이 가능한 케이블 접합부 개발 - 케이블 네트구조의 장력특성 연구 - 원사가 다른 막재의 특성 연구	14)100%

가)

15)수행 16)주체	17)목 표	18)내용	19)달성도 20)(%)
21)2-1세부 22)(세종대학교)	■ Free form 케이블-스트럿 구조의 비선형거동 특성 연구	- 유전 알고리즘을 이용한 트러스의 구조 최적화 - 하중법을 이용한 핀-조인트 구조물 해석 및 형상 탐색 - 하중법을 이용한 핀-조인트 구조물 해석 및 형상 탐색 - 하중법을 이용한 핀-조인트 구조물 해석 및 형상 탐색	23)100%
24)2-2세부 25)(세명대학교)	■ 스페이스 프레임의 동적 구조불안정 특성 연구	- 스페이스 프레임의 동적 구조불안정 관련자료 및 문헌조사 - 비선형 선부재요소 동적 정식화 - 스페이스 프레임의 동적 구조불안정 검토용 알고리즘 개발 - 스페이스 프레임의 동적 구조불안정 특성 조사 및 분석	26)100%
27)2-3세부 28)(영남대학교)	■ 대공간 구조물의 개폐 진동영향 평가 및 하이브리드 스마트 면진시스템 적용성	- 지붕 개폐 및 지진 하중에 의한 파일럿 프로젝트 대상구조물의 진동영향 및 사용성 평가 - 스마트 진동제어장치 및 수동 면진장치를 복합적으로 활용한 하이브리드 스마트 면진시스템의 대공간 구조물에 적용 - 대공간구조물에 적용 가능한 하이브리드 스마트 면진시스템의 뉴로퍼지모델 및 적응형 스마트 제어 알고리즘 개발 - 대공간구조물에 대한 하이브리드 스마트 면진제어시스템의 진동제어 성능 및 안전성 평가	100%

가)

29)수행 30)주체	31)목 표	32)내용	33)달성도 34)(%)
35)3-2세부 36)(경동대학교)	37)■ 강성 구조물의 시공관리 기술 개발	- 스페이스 프레임 구조시스템 분석 - 접합부 시공관리 기술 검토 - 접합부 시공상태 및 시공조건에 따른 안정성 검토 - Erection공법 기술 조사 및 요소기술개발 - 스페이스 프레임 구조물의 시공 지침서 개발	38)100%
3-4세세부 (전북대학교)	39)■ 다양한 형상별 적용을 위한 대공간 구조물의 출입문의 개폐율에 따른 지붕재의 풍하중 특성에 대한 연구 40)■ 풍동실험기법을 이용한 대공간구조물의 내압과 외압의 특성을 알아보기 위한 풍압실험제작과 풍동실험을 위한 평가 모델 개발 41)■ 태양광 패널을 이용한 대공간	- 국내외 문헌조사 - 형태별 대공간 구조물의 출입문 개폐율에 따른 내압계수의 변동 분석 - 대공간 구조물의 출입문 개폐율 특성에 대한 풍압계수 특성분석 - 대공간의 형상비에 따른 풍압계수의 특성연구 -국내·외 활용된 디지털 미디어 사례분석 - 국내 1개 및 국외 8개의 디지털 미디어 시스템이 활용된 건축물 사례조사 및 분석 - 대 지붕에 적합한 3D스캐닝 영상 처리 기술 및 콘텐츠 사례분석 - 소프트웨어를 이용한 인터렉티브 미디어 사례조사 및 분석 - 대공간 지붕에 적합한 디지털 미디어 하드웨어 조사 - 디지털 미디어 하드웨어 조사 및 분석	42)100%

가)

가)

45)수행 46)주체	47)목 표	48)내용	49)달성도 50)(%)
51)4-1세부 52)((사)한국공간구조학회)	▪ 설계 지침서 작성	- 막구조 설계기준 및 해설 작성 완료 및 발간 - ETFE 막재 패널 시공에 대한 설계지침 작성 및 발간준비	53)100%
54)4-2세부 55)(한국기술교육대학교)	▪ 무선모니터링 매뉴얼 및 방수, 누수방지 기술 개발	- 센서계측정보 가시화 기능 및 센서정보 관리 기능 개발 - 상시 센서 이력조회 기능 및 가시경보 모듈 개발 - 대공간 건축물 건전성 관리 PDA Interface 개발 - 환경변화 대응 가능한 소프트웨어 아키텍쳐를 구현 - 무인통합관리시스템을 통한 유지관리 통합기능 제공	56)100%
57)4-3세부 58)((주)CS구조엔지니어링)	▪ Pilot Project 5 개폐식 패널 구동재하실험+Pilot Project 시공	- 개폐식 패널 구동 재하 실험 - Erection 실험데이터 분석 및 실험결과 고찰 - 30M 스팬 Pilot Project 시공 및 적용된 요소기술의 실용성 검토 - 300M 스팬 대공간 구조물의 구조설계 (Schematic Design)	59)100%

(11)5.1.6 6차년도

1) 수행 2) 주체	3) 목 표	4) 내용	5) 달성도 6) (%)
7) 1-1세부 8) (경상대학교)	9) ▪ 대공간 구조시스템의 최적 형태 및 통합 설계최적화	- FDM과 연계된 Morphogenesis (3D) - 최적형태 자동생성기법 연구 - ACO모델을 이용한 최적형태 생성기법 - 통합설계최적화기법	10)100%
11)1-2세부 12)(한국건설품질연구원)	13)▪ 케이블 장력조절 시스템 실용화 연구	- 초기긴장 케이블 접합부 성능 및 용량의 최적화 및 실용화 연구 - 다중 동시 긴장을 위한 재긴장 시스템 연구 - 케이블 구조 접합부에 대한 실험 - 연성 구조(막 및 케이블 구조) 접합부 실험	14)100%

가)

1) 수행 2) 주체	3) 목 표	4) 내용	5) 달성도 6) (%)
7) 2-1세부 8) (세종대학교)	■ 대공간 구조물의 비선형 해석 가이드라인	- 스페이스 트러스 해석 가이드라인 - 언더텐션 해석 가이드라인 - 텐세그리티 해석 가이드라인	9) 100%
10)2-2세부 11)(세명대학교)	■ 구조 불안정 설계 가이드라인	- 휨을 고려한 비선형 강성방정식의 정식화 - 휨을 고려한 스페이스 프레임의 구조불안정 검토용 비선형 프로그램 개발 - 휨에 의한 구조불안정 특성 조사 분석 - 강성 구조물의 구조불안정 설계 가이드라인 작성	12)100%
13)2-3세부 14)(영남대학교)	■ 내진설계 지침서 작성	- 대공간 구조물 내진설계 기준 및 지침서 자료 조사/분석 - 자료 분석을 통한 대공간구조물의 내진설계 지침서(안) 작성 - 대공간 구조물 내진설계 지침서에 따른 대공간구조물의 내진설계 사례	15)30%

나.

1) 수행 2) 주체	3) 목 표	4) 내용	5) 달성도 6) (%)
7) 3-2세부 8) (경북대학교)	9) ▪ 개폐식 구조물의 10) 시공관리 기술 개발	- 개폐식 구조시스템 분석 - 개폐식 구조시스템 별 시공성 검토 - 개폐식 구조물의 시공 지침서 개발	11)100%
3-4세세부 (전북대학교)	12)▪ 대공간 단면과 13) 형상별 풍하중 및 14) 풍진동 지침서 작성 15)▪ 대공간 지붕의 16) 디지털 미디어 17) 시스템 구축	- 대공간 구조물의 위치별 풍응답 저감을 위한 실험실시 - 다양한 형상별 풍진동을 위한 동적특성계측방법 지침서 작성 - 내풍안전설계를 위한 다양한 풍하중평가요소별 지침서 - 대공간 지붕의 인터렉티브 디지털 미디어 시스템 구축 - 국내·외 활용된 인터렉티브 디지털 미디어 사례분석 - 구조물에 적합한 인터렉티브 디지털미디어 시스템 분석 및 대공간 지붕에 적합한 인터페이스 개발	18)100%
	19)▪ 음환경 20) 최적설계지침작성	- 적정음향계획 및 음향성능목표제시 - 단계별 도구의 활용방안 제시 - 음향적 결함에 대한 대응방안 제시	21)100%

다.

1) 수행 2) 주체	3) 목 표	4) 내용	5) 달성도 6) (%)
7) 4-1세세부 8) ((사)한국공간구조학회)	▪ 설계 지침서 작성	- ETFE 막재 패널설계 및 시공지침서 발간 완료 - 개폐식 구조의 설계기준 및 해설 작성 및 발간	9) 100 %
10)4-2세세부 11)(한국기술교육대학교)	▪ 대공간 건축물 통합유지관리 지침서	- 광섬유센서를 사용한 무선 모니터링 실시 및 기술검증 - 시방서 작성 및 대공간 건축물 누수 및 방수 지침서 제안 - 최종 대공간 건축물 통합유지관리 지침서 작성	12)100 %
라. 13)4-3세세부 14)((주)CS구조엔지니어링)	▪ Pilot Project 6 실용화 요소기술 검증+대공간 구조물 구조설계 프로세스 구축	- 실용화 요소기술 검증 에어빔 압력 상시 측정 케이블 장력 상시 모니터링 결과의 비교, 분석 에어빔 접합부 성능 실험 - 대공간 구조물 구조설계 프로세스 구축 - 텐셔닝 에어빔 시스템(TABS) 신기술 지정/신청	15)75 %

마. 5.2 연구결과의 전체 달성도

(1) 5.2.1 1세부

1) 세부	2) 연구과제명	3) 기술현황		
4) 1-1 세부	5) ▪ 연구과제명 기재	6)	7)	8)
		9) 20~30%	10)	11)
		12)60~80%		13)
			15)100%	
		17)	18)	19)
		20)	21)	22)
		23)선진국 기술 수준 (100%)		
		24)	25)	26)
27)1-2 세부	28)▪ 대공간 구조시스템 접합부 개발	29)	30)	31)
		32)20%	33)	34)
		35)70%		36)
		37)100%		
		38)	39)	40)
		41)	42)	43)
		44)선진국 기술 수준 (100%)		
		45)	46)	47)
48)1-3 세부	49)▪ 경제성 분석 연구	50)	51)	52)
		53)20%	54)	55)
		56)70%		57)
		58)100%		
		59)	60)	61)
		62)	63)	64)
		65)선진국 기술 수준 (100%)		
		66)	67)	68)

바.

69)	70)	71,72)	73)
74)	75)	76,77)	78)2006년 당시 (연구단 발족)
79)	80)	81,82)	83)
84)	85)	86,87)	88)2011년 현재 (연구 종료 시점)
89)	90)	91,92)	93)
94)	95)	96)	98)2020년 미래 (향후 10년 후)
99)	100)	10:102)	103)

사.

(1) 5.2.2 2세부

1) 세세부	2) 연구과제명	3) 기술현황
4) 2-1 세세부	5) ▪ 비선형 해석	6) 7) 8) 9) 10) 11) 12) 13) 14) 15) 16) 40% 17) 18) 19) 20) 21) 22) 23) 80% 24) 25) 26) 90% 27) 28) 29) 30) 31) 32) 33) 34) 35) 36) 37) 38) 39) 40) 41) 42) 43) 44) 45) 46) 47) 48) 선진국 기술 수준 (100%) 49) 50) 51) 52) 53) 54) 55) 56) 57) 58)
59) 2-2 세세부	60) ▪ 구조 안정	61) 62) 63) 64) 30% 65) 66) 67) 90% 68) 69) 130% 70) 71) 72) 73) 74) 75) 76) 선진국 기술 수준 (100%) 77) 78) 79)
80) 2-3 세세부	81) ▪ 내진설계	82) 83) 84) 85 86) 40% 87) 88) 89 90) 90% 91) 92 93) 120% 94) 95) 96) 97 98) 99) 100 10 102) 선진국 기술 수준 (100%) 104) 105) 106 10
108)	109)	11(111) 112)
113)	114)	11 116) 117) 2006년 당시 (연구단 발족)
118)	119)	12(121) 122)
123)	124)	12 126) 127) 2011년 현재 (연구 종료 시점)
128)	129)	13(131) 132)
133)	134)	13 137) 2020년 미래 (향후 10년 후)
138)	139)	14(141) 142)

아.

자.

(1) 5.2.3 3세부

1) 세부	2) 연구과제명	3) 기술현황		
4) 3-2세부	5) 시공 및 친환경 설계기법 개발	6)	7)	8)
		9) 30%	10)	11)
		12)	13)70%	14)
				17)100%
		18)	19)	20)
		21)	22)	23)
		24)선진국 기술 수준 (100%)		
		25)	26)	27)
28)3-4세부	29)풍환경 분야	30)	31)	32)
		33)50%	34)	35)
		36)	37)80%	38)
				41)100%
		42)	43)	44)
		45)	46)	47)
		48)선진국 기술 수준 (100%)		
		49)	50)	51)
52)3-4세부	53)대공간 음환경 설계기술	54)	55)	56)
		57)30%	58)	59)
		60)60%		61)
		62)100%		
		63)	64)	65)
		66)선진국 기술 수준 (100%)		
		67)	68)	69)

70)	71)	72;73)	74)
75)	76)	77;78)	79)2006년 당시 (연구단 발족)
80)	81)	82;83)	84)
85)	86)	87;88)	89)2011년 현재 (연구 종료 시점)
90)	91)	92;93)	94)
95)	96)	97;	99)2020년 미래 (향후 10년 후)
100)	101)	10;103)	104)

차.

카.

타.

(1) 5.2.4 4세부

1) 세부	2) 연구과제명	3) 기술현황		
4) 4-1 세부	5) ▪ 설계 지침서 작성	6)	7)	8)
		9) 30%	10)	11)
		12)70%		13)
		14)100%		
		15)	16)	17)
		18)	19)	20)
		21)선진국 기술 수준 (100%)		
		22)	23)	24)
25)4-2 세부	26)▪ 유지관리	27)	28)	29)
		30)30%	31)	32)
		33)80%		34)
		35)100%		
		36)	37)	38)
		39)	40)	41)
		42)선진국 기술 수준 (100%)		
		43)	44)	45)
46)4-3 세부	47)▪ Pilot Project	48)	49)	50)
		51)10%	52)	53)
		54)80%		55)
		56)100%		
		57)	58)	59)
		60)	61)	62)
		63)선진국 기술 수준 (100%)		
		64)	65)	66)

파.

67)	68)	69,70)	71)
72)	73)	74,75)	76)2006년 당시 (연구단 발족)
77)	78)	79,80)	81)
82)	83)	84,85)	86)2011년 현재 (연구 종료 시점)
87)	88)	89,90)	91)
92)	93)	94)	96)2020년 미래 (향후 10년 후)
97)	98)	99,100)	101)

하. 5.3 연구결과의 기여도 및 기대효과

(1) 5.3.1 국내외 시장개척

1. 2002년 한일 월드컵 구장 건설 당시, 건설기술 대부분이 해외 기술에 의존하였다. 따라서 막대한 국내자본이 해외로 유출되었으며, 이에 따라 대공간 건축물의 건설기술에 대한 연구개발의 필요성을 인식하게 되었고, 건설기술 국산화를 위하여 2006년 본 연구단이 발족하였다. 발족 당시, 대공간 건축물의 국내 수요는 아래와 같이 10년 이내 5,000억 이상을 예측하였으며, 연구단이 종료된 현재 2020년까지 현재 진행 중인 서남권 돔 야구장을 비롯하여 안산돔구장, 서울 돔 구장 Complex, 광주시 돔구장 및 대구시 돔구장 등 약 7조 이상의 수요가 예측된다. 본 연구단에서 6차년도에 걸쳐 수행한 연구는 선진기술을 국산화하고, 수입대체 효과가 기대되며, 국내시장을 활성화시켜 일자리를 창출하는 등 국내의 대규모 건설시장 개척에 이바지 한다고 할 수 있으며, 나아가 선진국과 경쟁 가능한 기술력은 해외 건설시장 특히, 2022년 카타르 월드컵 경기장과 같은 대규모 해외시장 개척도 가능하다고 판단된다.

2.

과제 착수시(2006년) 국내 대공간 건축물 수요예측

- ✓ 향후 10년간 돔구장 10개 건설 예상
- ✓ 1개구장 건설비용 5000억 *10 = 5조원
- ✓ 중소규모 대공간 구조 10년 이내 5,000억 이상

2002 월드컵 구장 건설시 막대한 국내자본 유출

2020년까지의 국내 대공간 건축물 예상 수요

2009	서남권 돔야구장	1,500억 / 15,000석	✓ 연구단 연구기관의 적극적 참여 구조설계, 안정성 검토, 환경영향 등
2012	안산돔 구장	3,500억 / 35,000석	✓ 신 도 ✓ 특수공사부분 협력업체 적 참여
2015	서울 돔구장 Complex	5,000억 / 40,000석	✓ 상 동 ✓ 신설년 세안, 인사리 1만 2천개 최초
2015	광주시 돔구장	32,000억 / 계획중	✓ 상 동
2015	대구시 돔구장	35,000억 / 계획중	✓ 상 동

연구단의 기술 개발

- ✓ 선진기술 국산화
- ✓ 수입대체 효과
- ✓ 국내시장 활성화
- ✓ 일자리 창출

(1)

- ✓ Big 3 Event (올림픽, 엑스포, 월드컵) 에 의한 대공간 해외건설시장의 수요
- ✓ 국내 대공간 건축물 실적을 바탕으로 한 해외시장진출 (ex. 필리핀 아레나)

국내 대공간 건축물 수요예측 및 경제성

3. 본 연구단은 대공간 건축물 국내외 시장을 개척하고자 6차년도에 걸쳐 연구단의 당초 목표를 100% 달성하였으며, 이에 따라 특허 40건, 신기술 3건 기술이전 2건이라는 사업화 성과를 이루었다. 이러한 우수한 성과를 바탕으로 본 연구단은 순수 국내의 기술로서 국내 대공간 프로젝트인 서남권 돔 야구장 뿐 아니라 해외 프로젝트인 필리핀 아레나를 수주하는 쾌거를 이룩하였다.

이를 발판삼아 향후 BIG 3(올림픽, 엑스포, 월드컵) 이벤트와 같은 대공간 건축물 프로젝트 해외 시장에서 미국, 일본 등과 같은 대공간 건축물 건설 선진국과 대등하게 경쟁이 가능하다고 판단된다.

4.



(1)

✓ **현재 연구단의 연구완성도는 당초 목표대비 100% 수준**
✓ **특히, 요소기술 실용화 검증을 위한** PILOT PROJECT**완료 및 사후평가 진행중**

국내 대공간 건축물 수요예측 및 경제성

(2)

(3) 5.3.2 기술적 측면

5. 본 연구의 기여도 및 기대효과를 기술적 측면에서 기술하면 다음과 같이 요약할 수 있다.

■ 1세부-구조시스템 개발 및 경제성 분석

- 미래지향적인 구조시스템 설계 기술 자립
- 각종 특수 구조물에 대한 기술표준화 수립
- 대공간구조물 시스템(Spatial Structure System)에 관한 체계적 분석 및 정리를 통하여 목적에 맞는 합리적인 구조시스템의 선택이 가능
- 파일럿 프로젝트 수행으로 대공간 건축물 설계 경험 및 능력 축적
- 최첨단 기술을 요하는 대공간 건축 관련 기술 보유로 국내건설산업의 기술 집약도 향상
- 관련 기술 국내 보유로 일관된 설계-시공-유지관리 시스템 구축 시 요소기술 제공 가능
- 접합부 설계 기술 이전 및 케이블 접합부 개발에 의한 케이블 구조물의 국제 경쟁력 제고가 가능
- 적절한 기술로 공기단축과 공사비 절감을 꾀할 수 있고, 신기술 및 특허출원으로 국내의 기술축적과 국제 경쟁력을 강화
- 대공간 구조물 관련 프로젝트의 경제성 평가에 대한 기본 자료 구축
- 대공간 구조물 관련 프로젝트의 활용할 수 있는 D/B 구축

■ 2세부 "비선형해석 및 구조설계 기법 개발"

- 구조시스템은 특성에 따라 구조물을 안정화시키고, 힘의 흐름을 조절하는 방식이 다양하다. 구조시스템이 결정되면 설계와 시공에 미치는 영향이 지대하기 때문에 대공간 건축의 적절한 시스템에 관한 기술 축적은 필수적이다. 본 연구를 통하여 대공간 시스템에 관한 기술을 확보할 수 있다.
- 케이블-스트럿 구조물은 연성구조로써 해석하기 어려울 뿐만 아니라 해석 전, 반드시 형상해석 단계를 선행으로 수행하여야 한다. 형상해석이 수행 된 케이블-스트럿 구조물은 장스팬 지붕 구조로서 구현할 수 있고 이러한 구조물은 대변형에 따라서 구조물이 거동하므로 비선형 해석이 필수적이다. 본 연구를 통하여 케이블-스트럿 구조물의 형상해석과 비선형 해석에 관한 기술을 확보할 수 있다.
- 비선형 해석 프로그램의 개발로 해외 구조 해석 프로그램에 대한 의존도를 줄이고 이 분야에 대한 국내 기술력을 확보함으로써 소프트웨어 산업의 국산화에 기여할 수 있다.
- Free form 케이블-스트럿 구조물은 연성구조물로써 강성 구조물과 달리 대변형을 동반함으로 구조적인 안정성 분석을 보다 합리적으로 수행 할 수 있는 비선형 해석이 요구된다. 본 연구를 통하여 이러한 연성구조물의 비선형 해석에 관한 기술을 확보할 수 있다.
- Free form 케이블-스트럿 구조물은 해석 전 자체 평형을 유지하기 위해 부재에 초기 응력을 도입하는 형상탐색이라는 과정이 선행되어야 하는데 Free form 케이블-스트

럿 구조물의 비선형 해석을 하기 위해서는 형상탐색의 과정이 필수적으로 요구되며 형상탐색 기술의 선진화로 인한 Free form 케이블-스트럿 구조물의 설계에 소요 되는 시간을 단축할 수 있다.

- 대공간 구조물의 설계 및 시공 기술은 고급의 특수기술이며, 건설기술의 개발을 통해 자체적인 기술 축적을 기대할 수 있다.
- 대공간 구조물의 설계능력은 높은 레벨의 기술과 노하우를 필요로 하며, 설계기술의 성장은 시뮬레이션 기술의 국제 경쟁력을 강화한다.
- 자력의 기술 자립과 이를 수행할 수 있는 인재 양성을 통해 미래형 구조물의 수요를 증대시키고 고용 증진의 효과가 있다.
- 대공간 구조물의 설계 및 시공 기술은 매우 고차원적 기술이며, 건설기술의 개발을 통해 자체적인 기술 축적을 기대할 수 있다.
- 선진국의 기술수준 변화에 따른 시기적인 관점에서 볼 때, 대공간 구조의 고급기술자립으로 한국이 국제무대의 차세대 주자가 될 전망이다.
- 대공간구조물의 내진설계 가이드라인를 활용한 관련된 내진설계 기술 개발의 활성화
- 파일럿 프로젝트 수행으로 대공간 건축물 설계 및 시공실무 경험 및 능력 축적
- 대공간구조물의 최적 진동제어를 통하여 구조설계 효율성 증대, 부재물량 절감, 사용성 증대
- 대공간 구조물에 면진 및 감쇠장치 설계 및 제작 기술의 국산화
- 국내외적으로 미개척 분야인 대공간구조물의 스마트 면진제어기술의 개발을 통하여 미래형 핵심기반기술 확보 및 원천기술 확보를 통한 기술경쟁력 강화

■ 3세부 "시공 및 친환경설계 기법 개발"

- 안전성 향상 및 체계적 유지관리
- 각종 대공간 구조물에 대한 설계지침서 및 설계기준 수립
- 대공간 건축물 설계 및 시공실무 경험 및 기술 축적
- 대공간 건축 관련 기술 보유로 국내 건설산업의 기술 집약도 향상
- 관련 기술 국내 보유로 일관된 설계-시공-유지관리 시스템 구축 가능
- 합리적이고 안정적인 구조 대공간 시스템의 개발
- 설계 및 시공 과정 시뮬레이션을 통한 효율적인 안전성 및 붕괴 과정 예상
- 향후 국내시장 수요 확대에 대비하여 선진기술국으로부터 이 분야 국내시장 잠식을 방어
- 대공간 구조물에 대한 정확한 내풍안전성 평가 기술보유
- 대공간 구조물의 다양한 형태 변화에 대한 풍동실험 모형 제작기술 보유
- 국내 대공간 구조물 및 스타디움에 PV패널 설치 시 해외의 사례 활용 및 기존 건축물에 PV시스템 연구를 통한 다양한 디자인 응용을 통하여 수려한 외관을 창출하는 데 기여
- 획일적인 건축물의 외피에 인터렉티브 미디어 아트를 적용하여 다양한 디자인의 창출에 기여 할 수 있다.

- 대공간의 음향설계 정확도 제고
- 대공간 건축음향설계기술 확보
- 대공간 전기음향설계기술 확보
- 무선음향측정기술 확보
- 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 음향성능 예측기술 확보

■ 4세부 "실용화 방안 연구"

- 국내에서는 막구조 건축물의 유지보수 지침 동해설, 막구조의 건축물막재료등의 기술기준 및 동해설, 막재료 탄성정수 시험방법, 막재료의 품질 및 성능 시험 방법, 케이블 구조 설계 지침 및 동 해설 등의 지침서 및 제반규정의 미비로 일본, 미국, 유럽의 Code 수집 및 정리 분석을 하였다.
- 현재 국내에는 막과 케이블 구조물에 대한 법제화가 전혀 이루어지고 있지 않기 때문에, 일본, 중국, 말레이시아 등 여러 나라들과 국제공동연구를 통해 합리적이고 문제점이 없는 지침서를 마련하였다.
- ETFE 막재 패널, 개폐식구조물 시공 시 요구되는 설계지침을 제시함으로서 체계적이고 고효율화된 시공기법을 제시하였다.
- 막, 케이블, 쉘, 스페이스 프레임 등의 특수 구조물과 이에 소요되는 접합부 관련 설계기준 마련으로 대공간 건축물 품질 유지가 가능하다.
- 각종 특수 구조물에 대한 합리적인 설계지침서 및 설계기준을 국내 기술로 수립할 수 있으며 지침서의 활용으로 대공간 건축물 안전성 향상시킬 수 있다.
- 유지관리를 위한 계측시스템의 개발은 관련한 전후방 산업인 센서기술, 로봇기술, 정보통신기술 등과의 밀접한 관련으로 그 기술적 파급효과는 지대함.
- 순수한 국내기술로 개발된 광섬유 센서를 사용한 계측시스템은 우리의 독자적 기술로서 해외선진국의 기술을 능가하는 우수한 기술이며 해외선진국의 기술이전 회피에 적극적으로 대응할 수 있는 기술임.
- 지구온난화에 대비한 건축물의 장수명화 요구에 대응하는 기술로서 활용 가능하며, 유지관리 및 보수보강 기술을 활용한 기술의 시스템화는 기술인력 개발에 영향을 미칠 것이다.
- 휴대용 막장력 측정기와 함께 개발된 로봇 및 센서를 막 장력 측정에 적용하여 상시로 막의 장력 측정 가능
- 우천 시 발생하는 실제 구조물 개폐부의 수밀성능 검증 및 예측 불가능한 상황에 대비하여 해결방안 제시.
- 막구조물의 보수기술 지침은 국외 기술자료를 참조하고, 최첨단 재료인 ETFE 막재에 대한 물성데이터를 확보
- 30M 스팬 및 300M Pilot Project 설계 및 시공을 수행하면서 기술을 축적하며,

대공간 구조물 설계 및 시공 프로세스 구축을 통한 설계기술 확보

- Pilot Project 준비 및 시공을 통해 관련 요소기술(텐셔닝 에어빔 시스템, 유압식 재긴장 소켓, 가설공법, 개폐식 구동장치 등)의 검증 및 평가를 통한 실용화 가능성 검증, 신뢰도 확보 및 추가 응용기술 확보할 수 있으며, 나아가 대공간 구조물 핵심기술의 국산화에 이바지
- Pilot Project 준공 후 향후 5년간 모니터링 시스템을 통한 요소기술 검증 후 이에 대한 데이터베이스 구축
- 대공간 구조물에 적용이 가능한 기술로 공기단축과 공사비 절감을 꾀할 수 있고, 신기술 및 특허출원으로 국내의 기술축적과 국제 경쟁력 강화
- 원형강관의 접합을 위해 새로이 제안된 접합부의 경우 높은 강성과 내력을 가지고 있어 대공간 구조물의 지붕구조로 활용 가능하며, 원형강관을 이용한 단층 레이어 돔의 접합부에 적절한 사용이 가능 및 국내 최초로 단층 래티스 돔 실험을 통한 비탄성 거동의 파악
- 현재 진행되고 있는 대공간 건축물 구조설계에 대한 인지도 조사를 위한 설문 및 현재 진행되고 있는 대공간 구조설계에 대한 절차 파악을 토대로 대공간 구조물 구조설계 절차서 제안 및 각각의 내용에 대한 평가지표를 작성하여 품질을 확보할 수 있는 방안 형성

(1) 5.3.3 경제·산업적 측면

6. 본 연구의 기여도 및 기대효과를 경제, 산업적 측면에서 기술하면 다음과 같이 요약할 수 있다.

■ 1세부-구조시스템 개발 및 경제성 분석

- 경제 문화적 수준 향상에 대응하는 대공간 건축물 수요 증가 예상
- 국내 보유로 관련 기술 비용 대체 효과 기대
- 최적화된 구조시스템 선정과 설계로 건설 사업비 절감
- 대공간 건축물 건설기술 국산화로 사업 추진 수월성 제고
- 대공간 건축물 건설기술 확보로 향후 대공간 시장 진출
- 설계 및 시공 분야 전문 엔지니어 일자리 창출
- 대공간 건축의 수요가 증대하고 있는 중국과 동남아 등지에 국내 기술을 수출
- 기술집약적 설계 및 시공 기술 수요로 고부가가치 창출 및 이익 실현
- 대공간 구조물 관련 프로젝트의 기본 설계시 외국 의존도 해소
- 대공간 구조물 건설시장의 활성화 기대
- 대형 구조물 건립의 타당성 분석 및 프로젝트 건립 비용 조달 방안 제시
- 경제성 분석 기법 개발을 통하여 대형 구조물의 활용 방안 제시 및 다양한 형태의 새로운 산업 출현 등에서 효과적으로 사용
- 대공간 건축은 설계와 시공기술에 따라 전체 공기나 공사비가 영향을 받을 수 있으므로 이를 최적화할 수 있는 기술 경쟁력 확보

■ 2세부 "비선형해석 및 구조설계 기법 개발"

- 구조 해석 전 반드시 필요로 하는 형상 탐색 과정의 기술을 국산화하여 이러한 소프트웨어 산업 분야에서 국내 기술을 확보함으로써 관련 업계의 산업 성장에 기여 할 수 있다.
- 대공간 구조물 중 강성계 이산화 시스템인 공간 프레임 구조물은 경제적이라는 장점과 함께 높은 강성을 가진 구조 시스템이다. 이런 구조시스템의 구조 안정성 향상을 통해 예측할 수 없는 구조불안정성을 미연에 방지하는 효과와 구조 메커니즘 규명을 통해 실무자의 구조 설계가 가능뿐만 아니라 대공간 구조물의 분야에서의 비용절감효과를 기대할 수 있다.
- 철근 콘크리트 또는 철골구조와 같이 구조물에 일반적으로 사용되는 강성구조들은 휨모멘트에 저항하기 위하여 상당한 강성을 보유한 부재단면이 필요한 반면, 케이블-스트럿 구조물은 부재가 압축과 인장요소 만으로 이루어져 모멘트가 발생하지 않기 때문에, 단면적을 최적화하는 동시에 질량을 줄일 수 있어서 비용 절감효과를 기대 할 수 있다.
- Free form 케이블-스트럿 구조물과 같은 연성구조물은 휨모멘트에 저항하기 위하여 상당한 강성을 보유한 일반적인 강성 구조물과는 달리 부재가 압축과 인장요소 만으로 이루어져 모멘트가 발생하지 않기 때문에, 단면적을 최적화하는 동시에 질량을 줄일 수 있어서 비용 절감효과를 기대 할 수 있다.
- 구조시스템의 개발과 함께 신 디테일 개발도 대공간 구조물의 경쟁력 강화에 매우 중

요하다. 따라서 새로운 디테일의 개발과 시뮬레이션 할 수 있는 기술을 개발하고, 이를 신기술 및 특허출원해 두어 보다 안정적 우위를 유지할 필요가 있다.
- 대공간 구조물의 유지관리를 미리 예측할 수 있는 시뮬레이션 기술을 개발하여 동남아와 중국을 중심으로 형성된 시장에 기술을 수출한다.
- 대공간 구조물의 설계'시공 기술을 확보하면, 현재 국외사의 기술에 의존하고 있는 대공간 기술을 국내 기술로 대체할 수 있다.
- 향후 심각한 문제로 남아 있는 대공간 구조물의 유지관리를 국내 기술로 가능하게 되어, 비용절감 효과는 극대화 되며 사고예방을 할 수 있다.
- 대공간 구조물의 손상을 미리 감지하여 막대한 비용이 소모되는 보수 보강 비용을 절약할 수 있다.
- 구조시스템과 함께 디테일의 개발도 국제 경쟁력 강화에 매우 중요하다. 따라서 새로운 디테일을 개발하고, 이를 신기술 및 특허출원할 수 있다.
- 대공간구조물의 지진에 대한 안전성 및 사용성 확보를 통한 건설시장의 활성화할 수 있다.
- 대공간구조물의 내진설계를 통한 관련 분야의 고부가가치의 엔지니어링 기술 창출할 수 있다.
- 국외 기술의존도가 높은 대공간구조물 및 특수구조물 분야의 해외기술 도입 미용절감 및 수입대체 효과를 낼 수 있다.
- 제진/면진 엔지니어링 기술의 국산화 및 수출을 통한 외화를 획득할 수 있다.
- 진동제어 관련 기술경쟁력 확보를 통한 국제 건설시장 진출할 수 있다.

■ 3세부 "시공 및 친환경설계 기법 개발"
- 국내 보유로 관련 기술 비용 대체 효과 기대
- 대공간 구조물 보급에 따른 기술력의 확보
- 선진기술에 의한 국내시장 잠식을 미연에 방지
- 건설 시장 확대로 건설경기 회복에 기여
- 기술 후진국에 신기술 전파로 인한 기술료 및 수주사업에 우위를 점할 수 있는 교두보를 확보
- 축적된 기술로 해외시장에서의 경쟁력 확보
- 장스팬 구조물에 대한 정확한 풍하중 평가 기법개발에 따른 내풍안정성 확보가 되어 공사비의 절감등에 기여할수 있음.
- 국내 PV시스템이 적용된 구조물활성화시 PV페널에서 생산되는 전력이외에 관광자원으로도 활용가능
- 단순한 구조물로 역할에서 벗어나 구조물과 사람이 서로 소통 공간으로 변화를 통한 문화·사회·경제적 파급효과를 기대 할 수 있다.
- 대공간 건축음향설계 시 해외 컨설팅업체에 대한 비용지출 절감
- 대공간 음환경 기술인력 양성
- 대공간 전기음향설계기술확보를 통한 해외컨설팅비용 절감
- 무선음향측정시스템 기술확보를 통한 수입대체효과

- 대공간음환경설계체계의 정립을 통해 설계과정의 효율화 및 경비절감
- 초기단계에서부터 체계적인 음환경설계를 통해 건립후의 유지보수 등 비용절감

■ 4세부 "실용화 방안 연구"

- 국내 막과 케이블 구조물의 지침서를 개발하여 기술 수입에 의존하지 않고 설계 및 시공의 자립해야 한다. 그래서 기술수입으로 인한 외화유출 및 소요비용을 절감하여 국가 기술 경쟁력확보를 구축 할 것이다.
- 막구조 지침 및 해설의 발간은 기술 수입에 의존하지 않고 설계 및 시공에 자립의 표본 될 것이며 ETFE 관련 지침서도 그 뒤를 이어갈 것이다. 따라서 관련 지침의 기술수입으로 인한 외화유출 및 소요비용을 절감할 수 있다.
- 막구조, 스페이스 프레임, 케이블 구조 등의 특수구조물의 지침서 활용을 통한 기술집약적 설계 기술 수요로 고부가가치 창출 및 이익 실현할 수 있다.
- 기술 수입에 의존하지 않고 국내 기술집약적 설계기술 보유로 관련 기술 비용 대체 효과를 기대할 수 있다.
- 국내 건설업체에 기술 축적의 기회를 제공하게 되며, 축적된 기술로 해외시장에서의 경쟁력 확보가 가능하다.
- 기존 건설된 막구조물의 계측시스템에 적용하기 위한 방안으로서, 많은 수요에 따른 광섬유센서 가격인하가 이루어지며, 전기저항식 센서에서 탈피한 건축물 분야의 광섬유센서 시대를 열 수 있을 것이다.
- 광섬유센서를 사용한 막구조물의 상시 계측시스템의 개발은 세계 최초로서, 계측시스템만으로도 미래원천기술 개발의 의미로서 그 의미가 크다고 할 수 있다.
- 지구온난화 등과 같은 시대의 화두로 인해 건축물의 장수명화가 시대적으로 사회적으로 강력히 요구되는 있는 현재, 건축물의 장수명화는 건축물의 유지관리 기술 및 보수보강 기술에 달려 있다.
- 초대형 막을 이용한 대공간 건축물의 유지관리 기술은 사업화 가능하며, 현재 기존의 월드컵스타디움을 비롯하여 중소형 막구조물 등에도 적극적으로 이용될 수 있다.
- 지침서 작성을 통한 설계, 시공 사업비 최적화가 가능하며, 기술 수요자들의 최적화된 절차를 기준으로 협의를 통한 건설 사업비 최적화 구현이 가능하다.
- 국내에는 대공간 구조물에 적용하는 핵심 요소기술에 대한 정립이 미비하여 해외 기술을 도입하는 과정에서 경제적으로 상당히 비효율적임. 따라서 실제 Pilot Project를 제작함으로써 핵심 요소기술을 국산화하여 비용 절감 가능
- Pilot Project를 위해 각 세부간의 협업을 통해서 제안된 접합부는 실험을 통해서 성능과 시공성의 우수성을 검증하였고, 대공간 구조물에 활용이 가능할 것이라 예상

- 대공간 구조물에 대한 건설 기술 데이터베이스 구축 및 실무자 (건설회사, 설계 및 엔지니어링)에 소요기술 제공 가능
- 30M 스팬의 Pilot Project로서 제작된 한국기술교육대학교의 HRD 홍보관은 학교의 전시시설로 사용
- 작성된 300M 스팬 Pilot Project의 구조설계 보고서(SD Report)를 바탕으로 대공간 구조물의 구조설계 프로세스가 정립된다면, 향후 강성, 연성 구조물이 적용된 대공간 구조물들의 지침이 됨
- Pilot Project를 통하여 본 연구단의 최종목표인 국내 자체 기반기술 개발로 국산화 및 고도화를 가능케
  함



연구개발결과의 활용성과 및 계획

CHAPTER 6

가. 6.1 연구개발결과의 활용성과

(1) 6.1.1 서남권 돔 야구장

본 연구단의 개발 기술이 실제 현장에 적용된 대표적인 국내 사례로는 현재 서울시 고척동에 공사가 진행 중인 서남권 돔 야구장이 있다. 서남권 돔 야구장은 총 공사비 1,050 중 지붕공사비만 500억에 달하는 프로젝트로서 본 연구단의 기술 즉, 순수 국내의 기술로 수행함으로서 수입대체 공사비가 무려 250억에 달하였다. 서남권 돔 야구장의 조감도 및 개요는 아래와 같다.



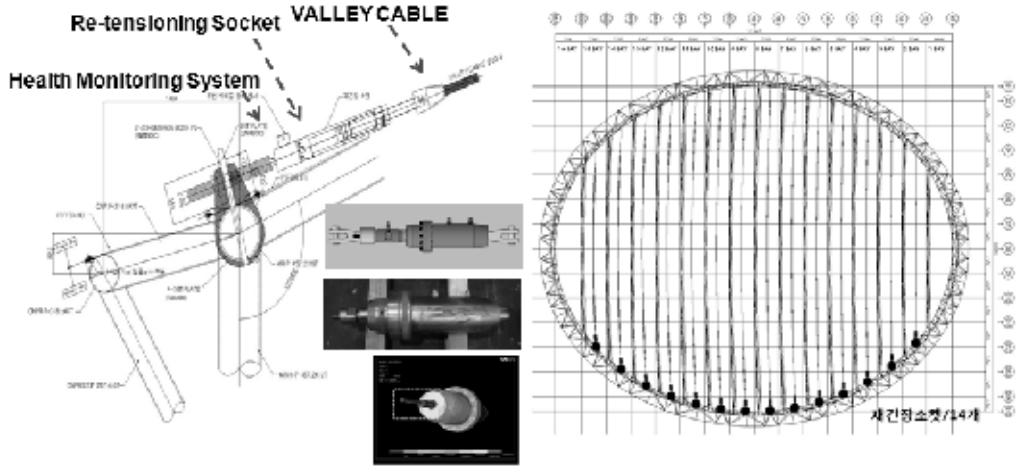
건물명 : 서남권 야구장
위치 : 서울특별시 구로구 고척동 63-6외 10필지 일부
용도 : 문화 및 집회시설 (관람장), 운동시설
연면적 : 62,443m²
규모 : 지하 2층, 지상 4층
지붕규모 : 157m x 215m
지붕구조시스템 : 막구조, 스페이스 프레임
주릭시스템 : Beam & Girder System
기초시스템 : 파일기초

서남권 돔 야구장의 조감도 및 개요

(2) 가. 유압식 재긴장 시스템 및 무선모니터링 시스템

서남권 돔 야구장 지붕구조 중앙부는 트러스와 벨리 케이블을 이용한 막구조로 경량화를 꾀하였다. 여기서 벨리 케이블 프리텐션 정확한 도입과, 시공 후 발생가능한 손상, 노후화, 피로현상 등에 의한 프리텐션 손실의 대비를 위하여 본 연구단에서 개발한 유압식 케이블 재긴장 시스템 및 모니터링 시스템을 도입하여 케이블 통합 관리 시스템을 구축하였고, 이를 통하여 시공 중의 안전 관리 뿐만 아니라 준공 후의 유지 관리 및 안정성을 확보하였다.

도입된 재긴장 소켓 및 케이블 장력 센서는 총 14개소로 설치된 모든 케이블을 관리한다. 무선 케이블 장력 센서는 케이블의 장력을 실시간 그래프로 표현/저장하며, 주의값 및 위험값을 설정하면 경보 기능을 가지고 있어 위험 상황에 미리 대처가 가능하도록 하였다. 또한 유압잭에 의하여 장력을 도입하므로 정확한 장력의 조절이 가능하며, 필요시 도입된 14개소의 케이블을 동시에 재긴장할 수 있다.

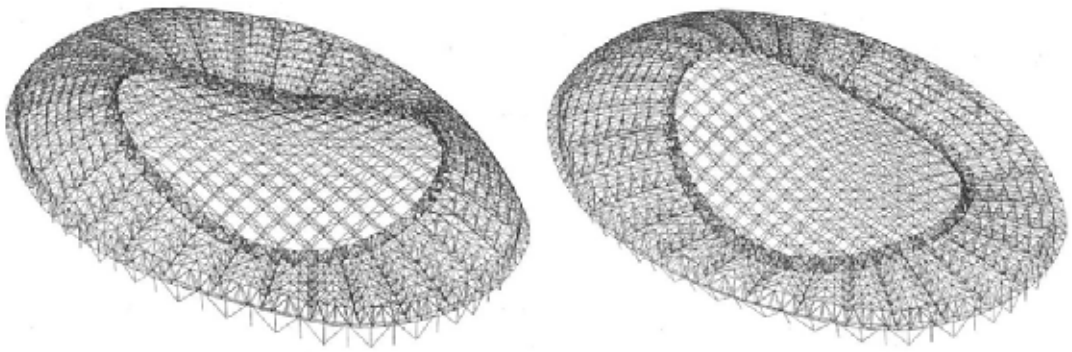


유압식 재긴장 시스템 및 적용범위

(3) 나. 구조 안정성 검토를 위한 비선형 해석

서남권 돔 야구장 지붕구조의 하중저항 메커니즘은 구조체의 곡률을 이용하여 면외로 작용하는 외력을 면내력으로 저항하도록 한 것으로 매우 효율적인 단면으로 대공간을 구성할 수 있다. 하지만 압축계 저항 시스템의 특성상 안정의 문제가 중요하게 대두 되고, 대변형에 대한 구조거동의 특성을 설계 시 고려해야 한다.

따라서 전체적인 형상의 비정형성과 특히, 외야쪽의 곡률이 작아지는 부분으로 인해 불안정 거동 특성을 파악하는 것이 중요한 문제로 인식되어, 비선형 해석용 프로그램인 NASS(Nonlinear Analysis for Space Structure)를 이용하여 구조물의 비선형해석을 아래와 같이 수행하였다. 비선형 해석 결과, Snapping에 관한 전체좌굴하중은 설계하중을 크게 상회하므로 본 구조물은 전체좌굴에 관해 안정적임을 확인하였다.



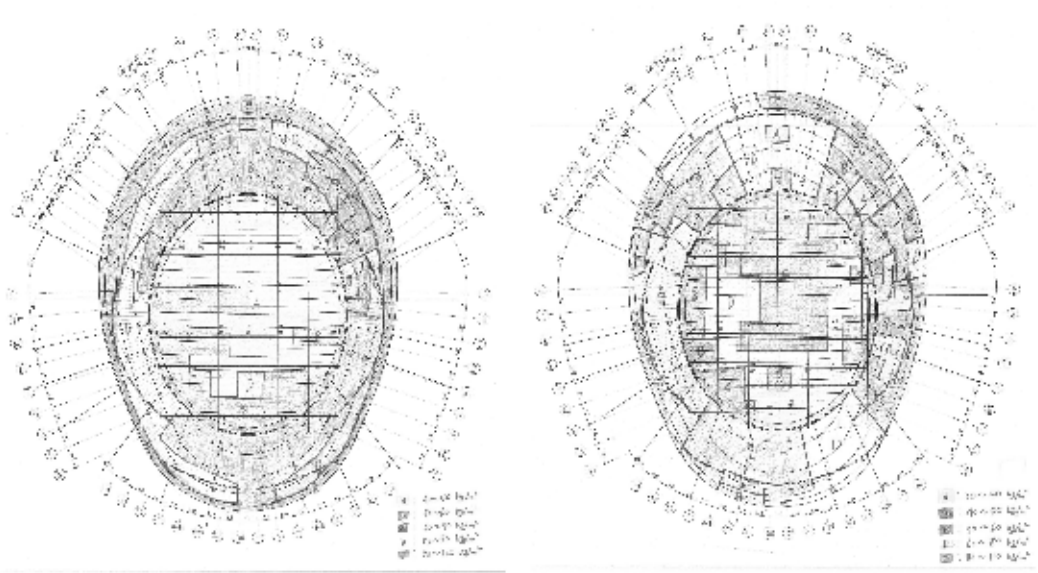
비선형 해석 결과 Mode Shape

(4) 다. 풍압계수 산정을 위한 풍동실험

기준에서 나타내는 풍하중은 정형화된 구조물을 전제로 하고 있어, 서남권 돔 야구장과 같이 정형화 되어 있지 않은 구조물에 대하여서는 적용하기 어렵다. 이에 건물의 벽면과 지붕에 작용하는 풍압계수(평균풍압계수, 최대/최소 풍압계수, 변동풍압계수)를 구하고 이로부터 벽면과 지붕에 작용하는 외장재 설계용 풍하중산정을 목적으로 아래와 같이 풍동실험을 실시하였다. 또한 풍동실험을 통하여 수령된 풍압에 설계자는 적절한 내, 외압계수를 적용하여 풍력을 치환하여 구조물에 반영하게 된다.



풍동실험 전경 및 모형

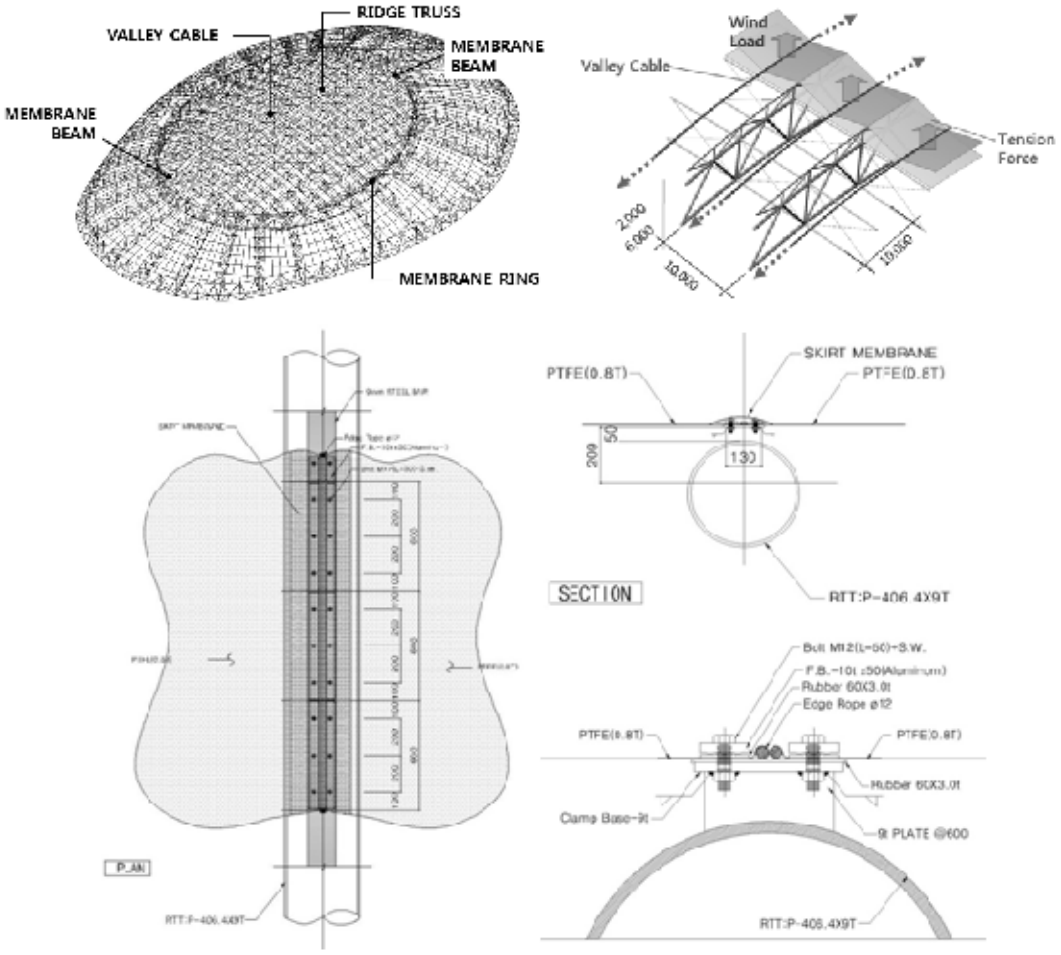


풍동실험 결과 분석

(5) 라. 연성구조물 (케이블, 막) 설계기준 적용

서남권 돔 야구장의 지붕구조(아래 그림) 중 Ridge Truss는 막이 직접 접합되는 부분으로 지붕형상에서 막부분의 형상을 유지시켜 주며, Valley Cable은 누름 케이블로 지붕형상에서 막부분의 골을 형성시키게 된다. 또한 Membrane Ring은 Ridge Truss와 Valley Cable이 접합되는 부분이다.

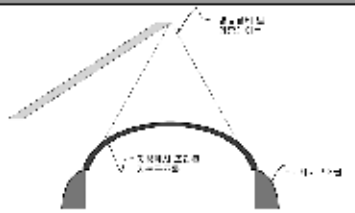
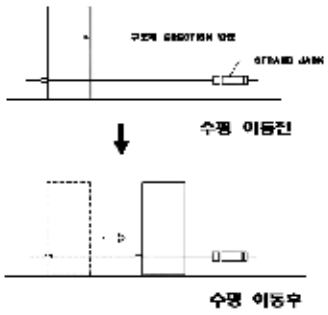
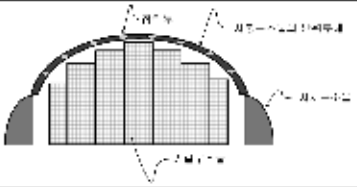
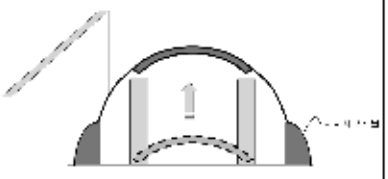
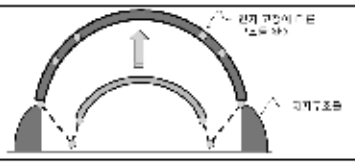
본 구조물에서 막은 Ridge Truss, Membrane Beam, Membrane Ring 등의 골조에 각각 정착되어지며 자세한 접합은 본 연구단에서 발간한 막구조 및 케이블구조 설계기준 및 해설을 적용하여 아래와 같은 형상으로 구성하였다.



서남권 돔 야구장 지붕 각부의 명칭 및 막, 케이블 접합

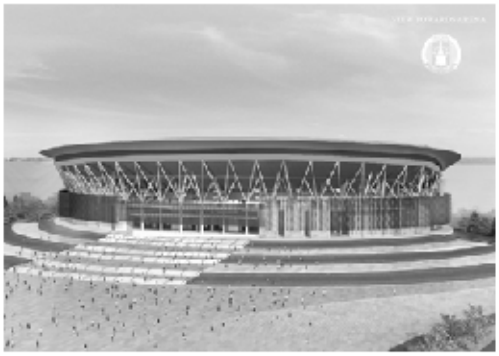
(6) 마. 가설공법 대안 검토

대공간 건축물은 기둥 없이 넓은 공간을 확보해야 되는 구조적 특성 때문에, 일반적인 구조시스템을 갖는 건축물보다도 철저하게 설계초기 단계부터 시공문제를 병행하여 검토해야만 추후 원활한 시공이 가능하다. 특히 가설공법에 따라서 공사비용 및 공사기간에 큰 차이를 나타낼 수 있고, 공사 진행사항에 따라서 가설 가능공법의 제약이 있을 수 가설공법에 대하 검토가 바람직하다고 볼 수 있다. 따라서 서남권 돔 야구장의 가설공법 검토시 본 연구단에서 제안한 여러 가지 대안을 비교, 분석하여 결정하였다.

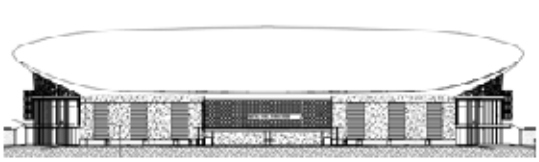
공법 유형	Erection도	특 성
Block 공법		- Space Frame 에 적용시 유리 - 설치소요시간의 손실 최소화 - 크레인 용량 산정 주의 - 양중 케이블 설치위치 선정
Sliding 공법		- 시공성 및 품질향상에 유리 - 골조/마감등의 반복작업 효과에 의한 공기 단축 - 가설재 및 장비투입의 감소로 원가절감 유리 - 고소 작업량의 감소로 안전성 확보에 유리
Element 공법		- 자재수송의 용이 - 특별한 기술과 장비가 불필요 - 고가 높아지면 가설 지지재 비용증가
Lift - up 공법		- 가설자재 및 중장비 사용의 절감 - 고소 작업량의 감소로 안전성 확보에 유리 - 지상에서 작업하므로 작업능률 및 시공성을 향상 - 공사 중 공법변경이 불리
Push - up 공법		- 구조물이 높을 경우 가설기둥에 다량의 자재필요 - 기둥의 각 연결부위 처리 곤란

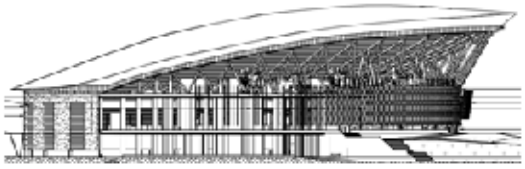
(7) 6.1.2 필리핀 아레나

본 연구단의 개발 기술이 실제 현장에 적용된 대표적인 국외 사례로는 필리핀의 필리핀 아레나 프로젝트가 있다. 그 개요 및 조감도는 아래와 같다. 필리핀 아레나의 구조설계는 본 연구단의 주관 연구기관인 (주)CS구조엔지니어링에서 수행하였으며, 고정 및 활하중에 대한 중력시스템과 지붕구조의 고유치 해석, 처짐 결과는 아래와 같다.

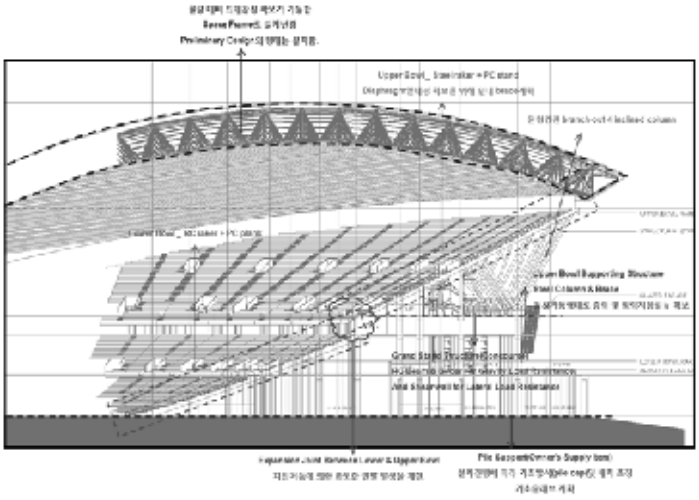


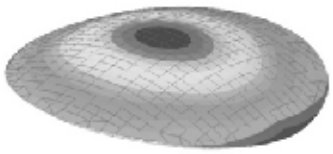
건물명 : Philippine Arena (필리핀 아레나)
위치 : Barangay Duhat, Bocaue, Bulancan
용도 : 종교집회장, 공연장, 스포츠 시설
규모 : 지하 1층, 지상 5층
시공규모 : 233m x 173m
지붕면적 : 50,000m²
지붕구조시스템 : 스페이스 프레임
기초시스템 : 파일기초





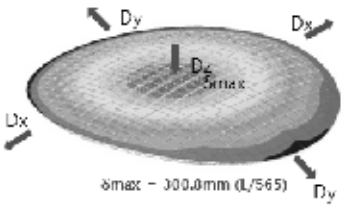
필리핀 아레나 조감도 및 개요





Z dir. Fundamental period : 0.664sec (MIDAS Z)

지붕구조 고유치 해석

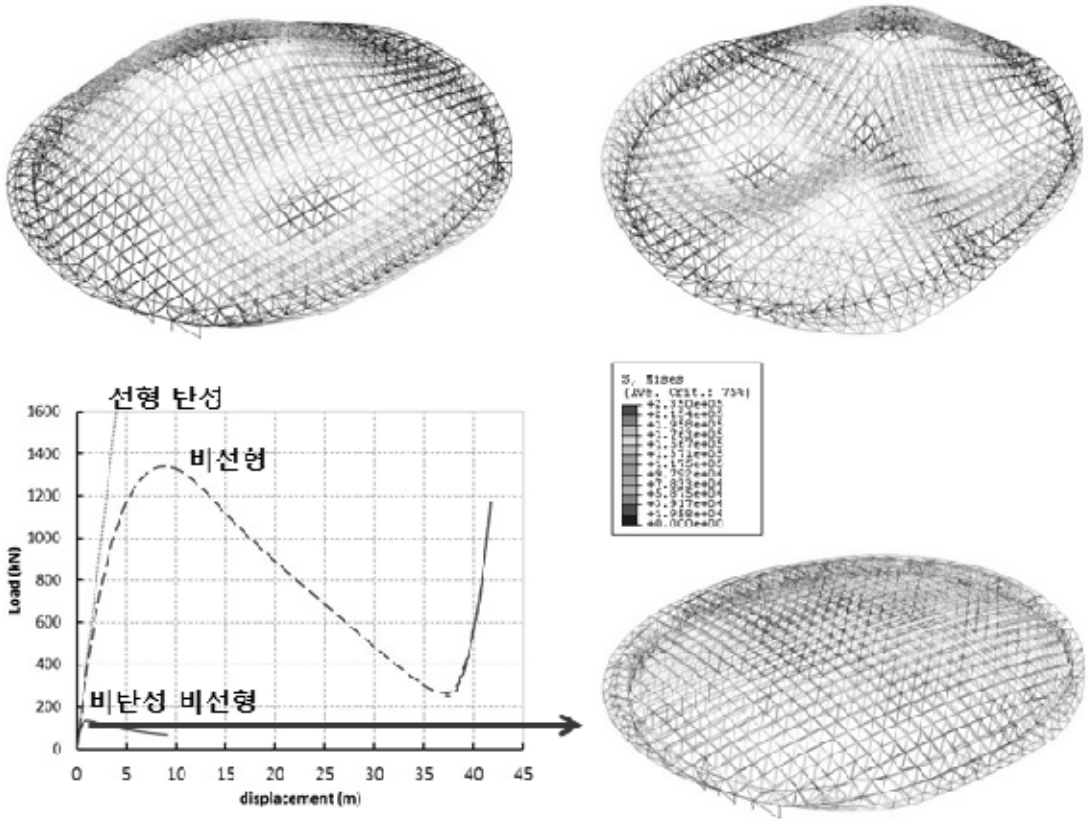


δmax = 300.0mm (L/565)

필리핀 아레나 구조설계

서남권 돔 야구장 지붕구조와 마찬가지로 필리핀 아레나 지붕구조는 구조체의 곡률을 이용하여 면외로 작용하는 외력을 면내력으로 저항하도록 한 것으로 매우 효율적인 단면으로 대공간을 구성할 수 있기 때문에 대변형에 대한 구조거동의 특성을 설계 시 고려해야 한다. 따라서 본 연구단에서는 비선형 해석용 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 구조물의 비선형 해석을 아래와 같이 수행하였다. 비선형 해석 결과, 서남권 돔 야구장

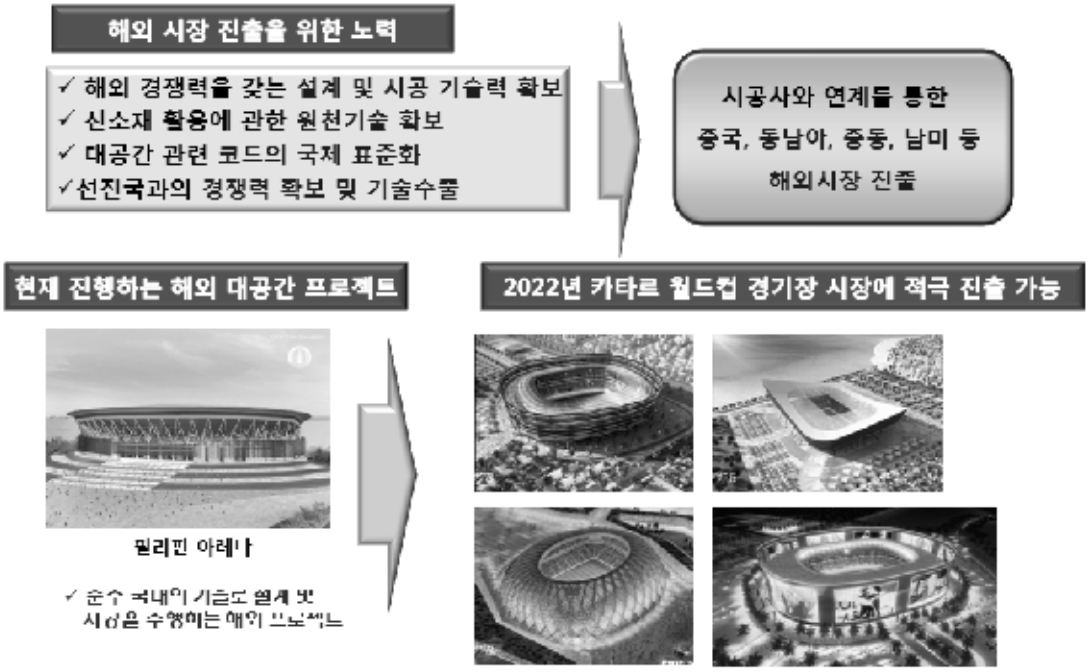
과 마찬가지로 고유치 해석과 비선형 비탄성 해석에 의한 전체 좌굴하중은 설계하중을 크게 상회하므로 본 구조물은 전체좌굴에 관해 안정적임을 확인하였다.



필리핀 아레나 지붕구조의 고유치 및 비선형 해석 결과

나. 6.2 연구개발결과의 활용계획

본 연구단에서 개발된 대공간 건축물 건설기술은 침체된 국내 건설경기의 타개책이며, 나아가 해외 시장 개척이 가능한 기술이다. 해외 시장에 진출하기 위한 본 연구단은 6차년도에 걸친 연구를 바탕으로 해외 경쟁력을 갖는 설계 및 시공 기술력과 신소재 활용에 관한 원천기술을 확보하였으며, 이에 따라 대규모 해외 건설시장에서 선진국과의 경쟁과 기술 수출이 가능한 수준까지 향상하였다고 할 수 있다. 특히, 무한한 발전가능성이 엿보이는 중국, 동남아, 중동, 남미 등에 진출이 가능하며, 본 연구단에서는 연구단이 종료된 이후에도 향후 꾸준한 노력을 바탕으로 2022년 카타르 월드컵 경기장 시장에서도 적극적으로 참여할 계획이다.



해외 시장 진출 전략

■ 1세부-구조시스템 개발 및 경제성 분석

구조시스템별 특성분석은 모든 설계 진행에 꼭 필요한 한 분야로 구조시스템의 다양한 접근 방법이 체계화 된다면 대공간 구조의 시스템을 효과적으로 선택하고 이를 적용할 수 있는 토대가 마련된다. 이를 설계현장에 도입하면 이 분야의 새로운 방향이 설정 될 수 있을 것으로 예측된다.

- 모델링 기법을 통하여 독자적인 대형 건축물의 형태미와 기술을 확보하고 새로운 가능성을 제기하기 위한 노하우 축적의 계기가 될 것이다. 실제 기본 설계 과정으로 이술이전이 가능하며 최소한의 시행착오로 시간과 경비를 절약할 수 있다.
- 축소 모델의 실험을 통하여 모든 기술적인 면을 고려하여 실용화를 꾀하며 구조 시스템의 개발과 새로운 디테일 개발 등에 축소 모델 실험을 적용하여 경쟁력 강화를 기대할 수 있다. 개폐식 구조의 활용으로 비상피난시설이나 우주구조물의 접이식 구조물에 대한 후속연구는 앞으로 지속적으로 필요하다.
- 설계최적화기법과 함께 Morphogenesis기법을 활용하면 공학적 접근법에 바탕을 둔 구조시스템에 디자인의 요소를 함께 고려할 수 있게 되어 개념 설계단계에서 다양한 구조시스템 대안을 확보할 수 있을 것으로 판단되며 이러한 프로세스가 설계과정에 활용 될 수 있을 것으로 예측한다. 또한 개념 설계단계에서 발생하는 시행착오에 의한 시간과 경비를 최대한 절약할 수 있다.
- 위상최적화기법은 통합설계최적화기법을 개발하는 핵심요소기술이며 이를 통하여 다양한 형태의 대공간 구조시스템을 효율적으로 개발하는 도구로 사용될 수 있을 것이다.
- 선진국에서 개발되는 최적화 핵심요소기술에 대응 할 수 있어 이를 활용하며 구조시스템 설계분야에 대한 국제 경쟁력 제고가 가능하다.
- 국외사에 의존하고 있는 설계최적화 기술을 국내 기술로 대체할 수 있어 이를 활용하면 수입대체 효과가 있다.
- 국제무대에서 형성되고 있는 대공간 건축시장에 국내기술에서 개발된 설계최적화 기술을 수출하여 앞으로 외화획득 및 고용창출을 기대할 수 있다.
- 접합부 특성에 관한 연구를 통해 접합부 설계 시 신뢰성 제고가 가능하며 접합부 시험법 및 장치의 개발에 의한 신뢰성 있는 접합부 설계 반영이 실용화 될 것이다.
- 적절한 기술로 공기단축과 공사비 절감을 꾀할 수 있고 신기술 및 특허출원으로 국내의 기술축적과 국제 경쟁력을 강화할 수 있다.
- 외국 기술의 의존도가 높은 대공간 건축의 설계 및 시공기술은 기술개발이 어려운 중소기업을 중심으로 이루어지고 있어서 기술축적이 어려운 실정이지만, 국가적 지원이 이루어지면 기술자립뿐 아니라 국제적 기술 경쟁력을 확보할 수 있다.
- 기술자립과 인재양성을 통해 미래형 건축의 수요를 증대시키고 고용증진 효과를 꾀할 수 있다.
- 국내기술진에 의한 대공간 건축의 유지관리로 비용절감이 가능하며, 발생할 수 있는 사고예방 등 상당한 인적 물적 손실비용을 감소할 수 있다.
- 세계무대에서 형성되고 있는 대공간 건축시장에 국내기술을 수출하여 외화획득 및 고용창출을 기대할 수 있다.
- 적절한 기술로 공기단축과 공사비 절감을 꾀할 수 있다.

- 경제성 평가 지표에 따른 대공간 구조물의 적용성 증가에 활용
- 경제적인 대공간 구조물의 설계 반영
- 표준 모델의 제시에 따른 대공간 구조물의 설계에 활용
- 대공간 프로젝트의 기본 설계시 활용
- 대공간 프로젝트의 타당성 검토에 활용
- 대공간구조물 설계할 때 경제적인 설계에 반영

■ 2세부 "비선형해석 및 구조설계 기법 개발"

- 마이크로 유전 알고리즘을 개발하여 해석시간의 감소 및 대형연산기의 필요성을 감소함과 동시에 최적화 과정을 효율적으로 진행하여 구조물 설계 시 효율성을 높일 수 있다.
- 특수 대공간 구조 시스템 중 텐세그리티 구조 시스템과 트러스 구조 시스템에 대한 형상 해석을 기존의 방법보다 간단한 방법으로 해석을 수행 할 수 있다.
- 유전 알고리즘에 기초한 구조 최적화 과정을 통하여 트러스 구조물에 적용하여 트러스 구조물의 효과적인 디자인 설계를 수행할 수 있도록 한다.
- 형상 해석 알고리즘을 개발하여 텐세그리티, 케이블-스트럿, 케이블 넷과 같은 연성 구조물에 적용하여 국내 대공간 기술력의 실용화에 이바지 한다.
- 구조해석 프로그램의 국산화 개발을 통해 국내 기술력을 확보하고 소프트웨어 산업의 성장에 기여한다.
- 구조설계 및 시공시에 구조안정성에 확보에 관한 기초자료로 활용 가능하며 기술교육 및 관련 상용프로그램 개발을 통한 안정성 검토 방안을 제시할 수 있다.
- 실용화 측면으로 볼 때, 구조안정성 확보를 위한 최적구조설계로 안정성과 경제성을 확보하며 관련 프로그램의 국산화를 통한 해외기술의존도를 감소시킬 수 있다.
- 스페이스 프레임 구조물의 정적 구조불안정성 해석기법은 스페이스 프레임 구조물의 동적 구조불안정에 적용에 관한 연구의 기틀이 될 수 있다. 또한 적용성 검토 및 보완에 관한 연구, 구조설계시 안정성 확보기술에 관한 연구의 기초자료로 활용 될 수 있다.
- 쉘형 구조물의 붕괴 메커니즘 파악을 통해 구조안정성 향상을 기대할 수 있으며, 대공간 구조물의 국내 유입을 가속화 시킬 수 있다.
- 구조 형태에 따라 외부하중에 대한 구조 불안정 거동을 분석하여 구조설계 시에 반영함으로써 국내 대공간 구조물의 구조 설계 자립화 및 기술력 향상을 기대할 수 있다.
- 대공간 구조물의 내진설계기법에 고성능화 및 성능에 기초한 내진설계 (Performance Based Seismic Design)기술의 확보
- 대공간 구조물의 내진설계에 대한 실무 엔지니어링 가이드라인 제공
- 대공간 구조물에 대한 진동영향 평가를 통해 대공간 구조물의 설계 및 시공의 합리성과 사용성을 향상시킬 수 있다.
- 대공간 구조물에 적용이 가능한 실용적인 스마트 구조제어 시스템 개발
- 면진장치 및 진동제어 장치 관련 제작 및 부품, 소재, 재료 업계와 협력을 통해

관련업계의 활성화를 도모
- 대공간 구조용 면진 및 제진 장치를 개발함으로서 새로운 건설시장의 창출 및 해외진출 기회를 획득할 수 있다.

■ 3세부 "시공 및 친환경설계 기법 개발"
- 학술지 및 세미나를 통해 개발된 시공자동화 공법, Erection 공법 등에 대한 홍보
- 연구결과의 현장 적용을 위해 산학협동 연구체계 구축
- 개발 기술의 국내외 현장 적용으로 공비절감, 공기단축, 시공 안전성을 확보
- 기술자립과 인재양성을 통해 미래형 건축의 수요를 증대시키고 고용증진 효과
- 개발된 기술을 특허 출원함으로 대공간 시공 분야의 선도적 기술국의 자리에 동참
- 풍동실험을 이용한 정확하게 예측하게 되면 장경간형태의 지붕면에 작용하는 풍하중을 계산에 활용할 수 있으면 대공간 구조물과 같은 저층건물의 내압계수에도 활용을 할 수 있을 것으로 판단된다.
- 현재 대공간 구조물에 대한 풍동실험 모형 제작을 위한 방법과 계측방법들이 많이 있지 않은 상태이므로 연구결과를 이용하여 다양한 모형제작기법에 활용이 가능하다.
- 해외의 PV시스템 적용사례 분석 및 설치 상세도를 통해 국내 대공간 구조물 및 스 타디움의 PV시스템 적용 시 활용 및 방위와 경사각에 따른 돔 구조물의 효율 연구는 돔 구조물의 PV시스템 적용에 활용
- 국내·외의 인터렉티브 미디어가 적용된 도시 공간 사례분석을 바탕으로 대공간 구조물에 적합한 인터렉티브 미디어 시스템을 연구를 통해 대공간 지붕 디지털 미디어 자료로 활용 될 수 있다.
- 측정기시스템 관련업체에의 기술 이전 및 공동개발에 의한 상품화
- 건축적 가변음향시스템의 개발에 본 연구결과 적용
- FDTD를 적용한 상용 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램 개발
- 대공간의 음향설계과정에 적극적으로 참여하여 연구결과를 적용.

■ 4세부 "실용화 방안 연구"
- 기술 수요자(건설회사, 설계 및 엔지니어링)에 소요 기술 제공
- 본 연구를 통해 대공간 관련 규준(법제화)을 마련하여 설계 및 시공에 활용
- 막, 케이블, 쉘, 스페이스 프레임 등의 특수 구조물과 이에 소요되는 접합부 관련 설계기준 마련으로 대공간 건축물 품질 유지
- 대형 공간 구조물 설계 시 기초 대안 분석에 대한 오류의 최소화와 최적의 시스템 선정에 대한 기준을 제공
- 미래에 전개 될 도시건축 또는 우주건축 건설 기술의 밑바탕 마련
- 원형강관의 접합을 위해 2차년도에 새로이 제안된 접합부의 경우 높은 강성과 내력을 가지고 있어 대공간 구조물의 지붕구조로 활용되며 원형강관을 이용한 단층 레이어 돔의 접합부에 적절한 사용이 가능하다.

- 대공간 구조물에 적용이 가능한 기술로 공기단축과 공사비 절감을 꾀할 수 있고, 신기술 및 특허출원으로 국내의 기술축적과 국제 경쟁력을 강화할 수 있다.
- 각 세부의 연구수행 내용을 바탕으로 Pilot Project를 수행하여 다른 연구에 피드백이 가능하다.
- Pilot Project로서 제작된 한국기술교육대학교의 HRD 홍보관은 학교의 전시시설로 사용될 예정이며, 실제 적용된 핵심 요소기술(텐셔닝 에어빔 시스템, 유압식 재긴장 소켓, Erection 공법 및 개폐식 구동장치 등)의 실용성 검토를 통하여 건설기술 데이터 베이스 구축이 가능하여 실무자에게도 소요 기술 제공이 가능하다.
- 향후 건설될 대공간 건축물 프로젝트의 타당성 검토에 활용이 가능하다.
- 연구개발 기간 동안 작성된 300M 스팬 Pilot Project의 구조설계 보고서(SD Report)를 바탕으로 대공간 구조물의 구조설계 프로세스가 정립된다면, 향후 건설된 대공간 구조물들의 지침이 될 수 있으며 나아가 본 연구단의 최종목표인 국내 자체 기반기술 개발로 인한 국산화 및 고도화가 가능하다.

다. 6.3 타 분야의 활용방안

■ 1세부-구조시스템 개발 및 경제성 분석

- 위상최적화기법을 통하여 도출된 최적 위상은 구조물에 가해지는 하중에 가장 적합한 형태를 나타내므로 건설에 사용되는 물량을 결정하는데 많은 도움이 될 것으로 판단된다.
- 위상최적화기법을 통하여 도출된 최적 위상을 전통적인 구조시스템 분류체계와 접목하면 복합 구조시스템의 개발이 가능하다.
- Morphogenesis기법을 통하여 도출된 구조물의 형태를 새로운 프리폼 구조를 창출할 수 있으며 이러한 기법은 고층건물의 형태를 결정하는 데에도 이용될 수 있을 것으로 판단된다.
- 위상최적화기법과 Morphogenesis기법을 설계최적화기법과 융합하여 통합설계최적화 시스템을 개발하는 것을 가속화 할 수 있다.
- 대공간 건설뿐만 아니라 그 이외의 건설 전 분야에 걸쳐 개발된 시스템을 활용할 수 있다.
- 접합부의 최적위상을 유추할 수 있어 최신의 접합부 개발에 활용될 수 있어 이 분야 산업의 활성화 및 기술발전을 기대할 수 있다.
- 전천후 경기장 등 대공간 건축물의 건설 확대로 각종 스포츠 활성화를 기대할 수 있다.
- 대공간 건설뿐만 아니라 그 이외의 건설 전 분야에 걸쳐 개발된 시스템을 활용할 수 있다.
- 도시경관 개선, 시설확충 등으로 공연 문화산업의 활성화를 기대할 수 있다.
- 초정밀 시공 및 공기단축 등에 관한 기술 개발로 건설산업의 선진화를 이룰 수 있다.
- 시공 방법에 따른 경비절감 효과에 의한 신공법 개발 활용할 수 있다.
- 각 구조 시스템의 경제성 분석에 의한 새로운 복합 구조물 개발이 가능하다.
- 특수강, 막재 등 신소재 산업의 활성화 및 기술발전을 기대할 수 있다.

■ 2세부 "비선형해석 및 구조설계 기법 개발"

- 케이블-스트럿 시스템은 케이블과 스트럿의 고도의 접합 기술이 요구됨에 따라 관련 업계의 기술 활성화를 도모 할 수 있다.
- 비정형 대공간 구조물은 해석프로그램에서 그 형상을 구현하기 어려움에 따라 파라메트릭 소프트웨어와 해석 프로그램간의 인터페이스를 구축함으로써 관련업계의 산업 성장에 이바지 할 수 있다.
- 미적인 공간을 창출함으로써 해외 관광객을 확보하여 관련 업계의 성장에 기여하고 올림픽과 같은 대형 이벤트를 유치하는데 있어서 선도적인 역할을 할 수 있을 것이다.
- 대공간 건축물에 사용되는 케이블의 정확한 장력 추정이 가능하며, 이러한 기술을 중소 기업에 전수하여 국내 기술력으로 케이블의 장력을 재긴장하는 평가 기준을 삼을 수 있다. 또한 케이블-트러스 구조물의 동적 응답을 최소화 할 수 있는 방안을 제시하므로, 국내 대공간 구조물의 보수 보강 기술력을 향상시키고, 새로운 기술 인력

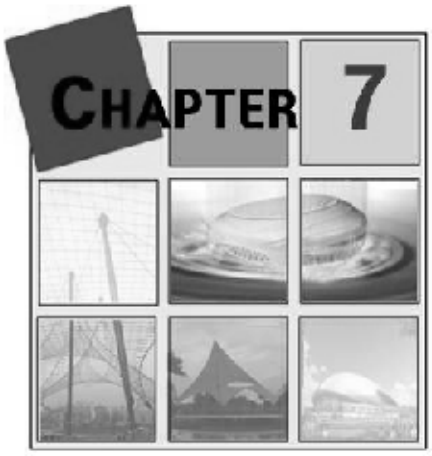
양성이 가능할 것으로 예상된다.
- 대공간 구조 시스템은 특수한 역학적 성능을 가진 재료가 요구됨으로 새로운 신소재 산업의 발전에 크게 기여 할 것이다.
- 대공간 구조 시스템은 외부의 환경에 영향을 받지 않는 공간을 창조함으로써 인류에게 핵이나 환경오염에 영향을 받지 않는 최적 환경을 만들어 줄 수 있는 기반을 제공한다.
- 특수강, 막재 등 신소재 산업의 활성화 및 기술발전을 꾀할 수 있으며, 전천후 경기장 등 대공간 건축의 확대로 스포츠 활성화를 기대할 수 있다.
- 스페이스 프레임 구조물의 불안정거동 파악은 대공간 구조물의 안정성 향상에 기여할 것이다. 이는 대공간 구조물 뿐 만 아니라 타 구조물 분야에서도 안정성 해석에 관한 기초자료로 활용이 가능하다.
- 스페이스 프레임 구조물의 불안정거동 파악은 소비자의 욕구를 충족시킬 수 있는 다양한 기하학적 설계의 기초자료가 되며, 안정성 향상을 충족시켜 줄 수 있는 관련기술 및 제조업체 등의 활성화를 가능하게 한다.
- 스페이스 프레임 구조물의 불안정거동 파악은 미래 구조물이나 우주 구조물의 기술적 자료로써 활용 가능하다.
- 면진 및 제진장치 관련 제작 및 부품, 소재, 재료 업계의 활성화
- 동적 특성을 측정하기 위한 계측기기, 계측장비 및 기법에 대한 기술 개발로 측정분야 하드웨어와 소프트웨어 분야 기술에 대한 발전 유도
- 대공간 구조물에 적합한 스마트 진동제어장치의 개발로 관련 기계 및 전자 부품의 연구와 개발을 활성화
- 대공간 건축물의 관련 엔지니어 및 연구자 배양 및 지원으로 기술 경쟁력 확보
- 대공간 건축물의 안전성 확보 및 사용성 증대를 위한 진동제어 방안 및 내진설계 기준 마련

■ 3세부 "시공 및 친환경설계 기법 개발"
- 대공간 구조물 건설을 통해 레저산업의 활성화를 유도
- 대공간 특수 건축물의 건립으로 관광 산업의 활성화
- 플랜트 산업, 군수산업, 우주항공산업 등의 발전을 위한 하드웨어 역할을 담당
- 현재 풍하중기준에서 제안하고 있는 내압계수는 개폐율의 크기를 정의하고 있지 않고 부분개방, 완전개방과 밀폐 등 3종류에서 대해서 제안하고 있다. 부분개방의 크기를 개폐율로 정의하게 되면 저층건물의 내압계수 예측에도 충분히 활용할 수 있다.
- 국내외 친환경에 대한 관심이 고조된 가운데 PV시스템이 적용된 건축물을 발전 뿐만 아니라 관광 자원으로 활용
- 인터렉티브 미디어 아트는 지역문화의 커뮤니케이션 공간에 적용하여 지역문화의 활성화와 여가문화공간으로서 다양한 콘텐츠를 적용 할 수 있을 것이다.
- 파동적 접근이 필요한 스튜디오 및 잔향실 등의 특수 공간 그리고 자동차 음향 등의 분야에 본 연구에서 개발한 시뮬레이션 기법의 적용가능함.

- 음향이 중요시되는 대부분 다중집회시설로의 연구결과 확대 적용 가능
- 비선형 음에너지 감쇠연구결과와 개발된 음향설계변수는 자연형 가변음향조절을 필요로 하는 모든 공간의 음향설계와 성능평가에 적용이 가능함
- 무선음향측정기술은 긴 케이블이 측정결과에 영향을 미치는 다양한 실험조건(실간 차음성능측정 등)에 확장 적용이 가능함.

■ 4세부 "실용화 방안 연구"

- 관련 고급 기술력을 이용한 설계 및 엔지니어링 등 해외시장 고부가가치 영역 점유율 향상
- 재료 및 소재 산업 확대로 해당 분야 전문업체 등장
- 설계 및 시공 분야 전문 엔지니어 일자리 창출
- 경제 성장에 따른 문화적 수요 상승에 국내 기술로 대응
- 대공간 건축물 건설기술 국산화로 사업 추진 수월성 제고
- 본 연구에서 개발된 핵심 요소기술은 대공간 구조물 뿐 아니라 미래 산업으로 불리는 플랜트 산업, 군수산업, 우주항공산업 등의 발전을 위한 하드웨어 역할을 담당할 수 있어 이들 산업을 전략산업화하고자 하는 국가전략에 부응하는 중요한 역할을 담당한다고 할 수 있다.
- 텐셔닝 에어빔 시스템(TABS)는 장스팬을 요구하는 대공간 구조물 뿐 아니라 주택, 교량, 우주 건축물 산업, 미관을 중시하는 야외 조명시설 등 여러 분야에서 널리 활용될 가능성이 있다.
- 지붕을 덮는 돔 형태의 Pilot Project를 수행하며 축적된 설계 및 시공 기술을 바탕으로 전천후 경기가 가능한 야구장, 축구장 등 대형 돔구장 사업에 활용되며, 나아가 외부 환경과 날씨에 영향을 받지 않는 인간 최적 시스템을 갖춘 소규모 도시 건설을 가능하게 한다.
- 슈퍼 대공간 구조시스템은 국가 이미지를 향상시키고 첨단 건설 분야의 발전에 크게 이바지함으로써 해외 건설 산업을 활성화시키고 건설 기술을 해외에 수출하는데 크게 기여한다.
- 대규모 돔구장 건설을 통해 레저산업의 활성화를 유도할 수 있으며, 막 구조 및 스페이스 프레임 구조시스템을 적용한 특수건축물의 건립으로 관광 산업의 활성화에 일조할 수 있다.



연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

CHAPTER 7

가. 7.1 과학기술 정보 및 기술 동향

■ 1세부-구조시스템 개발 및 경제성 분석

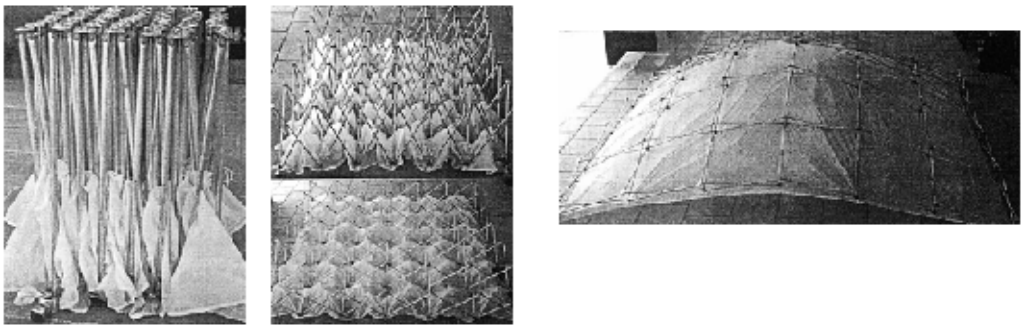
대공간구조물의 발전은 수치해석기법과 설계최적화의 역사와도 그 맥을 함께 하고 있다. 대공간구조물의 구조시스템에 대한 연구는 강성구조물에서 시작되어 연성구조물 특히 경량구조물의 개발로 이어지고 있다. 이러한 연구의 흐름은 새로운 건축재료의 개발 및 이용과도 밀접한 관계가 있으며 대공간 구조시스템의 연구가 재료적 연구에만 국한되지 않고 형태와 관련한 구조시스템의 역할과 단일 시스템이 아닌 복합구조시스템에 대한 연구로 지속되었다. 이러한 구조시스템에 대한 개발과 지속적인 연구는 구조물의 특성에 대한 정확한 이해를 위해 초기에는 모델을 통한 실험적 연구가 구조시스템을 개발하는데 주로 이용되었으며 이후에는 유한요소법과 같은 수치해석법의 개발로 실험적 접근법이 수치해석에 의한 접근법으로 대체되기 시작했다. 이후에 구조최적화에 대한 연구가 수치해석기법을 바탕으로 진행되어 현재 선진국의 설계최적화기술이 대공간 구조시스템을 결정하고 설계하는데 직접적으로 이용되고 또 이에 관련된 연구 분야가 매우 활성화되어 있다. 또한 최근에는 구조물의 해석에 동일한 기하학적 모델과 해석모델을 이용하는 등기하해석(Isogeometric analysis)이 점차 활발히 진행되고 있다. 이러한 기법은 막 구조물과 쉘 구조물과 같은 연속체로 건설되는 대공간구조물에 유용하게 이용될 것으로 판단된다. 선진국의 해석기술이 현재 유한요소법에서 등기하 유한요소해석으로 옮겨가고 있으며 우리나라도 이에 대한 심층적인 연구가 대공간 구조분야에서 꼭 필요한 것으로 판단된다.

■ 2세부 "비선형해석 및 구조설계 기법 개발"

대공간 구조시스템의 특허에 관해서 1980년대에는 돔 구조와 막 구조에 관련한 특허 출원이 주를 이루었다. Schweizerische는 돔 형 지붕의 프레임을 출원하였으며, 막구조와 관련된 기술은 tension structure co.에서 개발한 아치 지지막구조와 아치와 막의 시공법 등이 출원되었다. 1980년대 후반에는 오바야시구미가 출원한 개폐식 돔 지붕 및 그 구축방법이 있었으며, 1990년대에는 입체 트러스 접합방법에 관한 기술이 발표되었다. 최근의 대공간 구조물은 보다 환경친화적 구조물로 발전하고 있다. 그 방법의 하나로 필요에 따라 열고 닫을 수 있는 개폐식 구조물들이 속속 건설되고 있다. 맑은 날은 야외 공간이 되며, 우천시 또는 추운 겨울에는 실내에서 생활이 가능한 구조물들이 최근 우리의 주목을 받고 있다. 또 재료와 기술의 발달과 함께 보다 적극적인 대공간 구조물을 계획하기도 한다.

현재 21세기의 우주개발의 상업화 시대를 예상해 보면, 우주공간은 냉전시대의 종식과 함께, 군사적 이용가치보다 상업적 이용가치가 더욱 크게 될 것이며, 인간의 생활공간이 지구공간에서 우주공간으로 전개될 전망이다. 지금까지의 우주개발은 우주선 및 우주정거장 개발을 중심으로 주로 군사적으로 이용되어 왔다. 그러나 21세기에는 우주공간의 상업화와 함께, 우주공간에서의 삶의 질이 고려될 것이며, 이때 건축적인 기여는 매우 크게 될 것이다. 또 중력상태 하에서는 제작이 불가능한 여러 가지 제품들을 만들기 위하여 조립 및 해체가 간편한 막, 케이블, 트러스 등의 재료를 이용한 복합 전개구조물로 대형 우주플랜트 및 대형 우주정거장 건설 등에 응용할 수 있으며 보다 쾌적하고, 경제적이고, 안전성이 우수한 우주공간의 개발은 더 이상 미룰 수 없는 21세기의

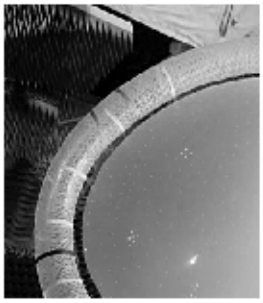
우리의 당면 과제가 되고 있다.



1. 그림 7.1.1 Deployable Structure

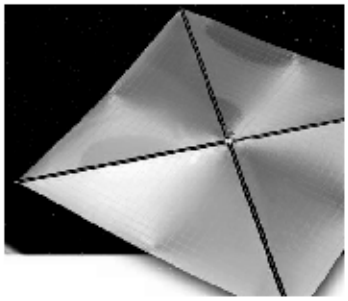
건설분야의 구조물 진동제어에 관한 기술은 빠르게 발전하고 있으며, 많은 연구자들의 관심이 되고 있다. 2005년 시미즈 건설기술 연구소에서는 물의 부력 원리를 활용하여 건물을 지탱하는 새로운 면진 구조 시스템인 파셜 플로트(Partial Float)를 개발하여 실제 건물에 적용하였다. 대지진 시 일반적인 면진 구조 시스템에 비해 30~50% 정도 응답 가속도를 저감할 수 있었다. 2008년 도쿄도 기요세시에 건설된 오바야시 건설의 기술 연구소는 진도 5의 모형 위에 세운 연필이 쓰러지지 않는 슈퍼 액티브 제진 '라퓨타2D'가 사용 되었다. 이 슈퍼 액티브 제진 '라퓨타2D'는 적층 고무에 의하여 유지된 본체를 센서와 컴퓨터에 의하여 제어하는 액추에이터로 지진력과 반대 방향으로 움직여 요동을 감쇠하는 구조로 건물의 요동을 지면의 1/30에서 1/50까지 절감한다. 21세기를 맞은 국외 선진국의 기술 수준은 단순한 대공간 구조물의 설계 시공의 범위를 넘어 우주 구조물에의 적용을 시도하고 있다. 우주 구조물 중 통신 위성은 대형 안테나를 장착하고 있으며 대형 안테나가 전개 시 구조물에 발생하는 충격과 회전관성을 줄이기 위하여 우주구조물에 면진장치를 이용한 진동제어 시스템이 적용된다.

가)



2. 그림 7.1.1 Inflatable Antenna

나)



3. 그림 7.1.2 Gossamer Inflatable Antenna

■ 3세부 "시공 및 친환경설계 기법 개발"

일본에서 가장 활발하게 대공간 구조물 연구를 수행하고 있는 대형 건설사는 태양공업사와 죽중공무점이다. 죽중공무점의 경우 일본에서 대공간 건축물 시공 실적을 가장 많이 보유한 건설사로 알려져 있다. 지간 1km 규모의 초대공간 건축물 건설을 계획하

여 현재 실시 설계 중인 것으로 알려져 있다.

또한 선진국의 경우 산업의 발전과 더불어 대공간 강성 구조물의 수요는 점점 증가하고 있다. 관련 분야 시공 실적도 증가하고 있어 이 분야 시장 전망은 매우 밝다고 할 수 있을 것이다. 현재 일본의 (주)태양공업은 미국에서 가장 수주실적이 좋았던 이 분야 산업체인 (주)버드에어를 인수 합병하여 그 규모가 대기업 수준이며, 일본이 전 세계시장을 거의 독점하고 있는 실정이다.

선진국의 경우 산업의 발전과 더불어 대공간 강성 구조물의 수요는 점점 증가하고 있다. 관련 분야 시공 실적도 증가하고 있어 이 분야 시장 전망은 매우 밝다고 할 수 있을 것이다. 현재 일본의 (주)태양공업은 미국에서 가장 수주실적이 좋았던 이 분야 산업체인 (주)버드에어를 인수 합병하여 그 규모가 대기업 수준이며, 일본이 전 세계시장을 거의 독점하고 있는 실정이다

일본의 경우 1978년에서부터 일본의 동경대학 생산기술연구소와 일본 환경청 국립공해연구소의 공동연구가 시작되면서 풍동을 이용한 돔평 야구경기장내의 풍속분포에 대한 연구가 진행되었다. 이러한 연구는 일반적으로 모형을 대상으로 하고 있다. 1980년대에 들어서는 통풍을 이용한 돔경기장 내의 열환경 개선에 대한 연구가 진행되었다. 2000년도에는 동경대학 생산기술연구소와 日建設計와의 공동연구로 야마구치현에 건설될 돔경기장을 대상으로 통풍에 의한 자연환기량과 실내발열부하의 효과적 제어기술들이 개발되었다. 국내에서는 CFD를 이용하여 실내수영장, 경륜돔경기장 등의 환기성능 및 냉난방 공조방식의 검토가 이루어 졌다. 그러나, 실제 현장실측 등이 부족하여 CFD 해석 결과에 대한 신빙성이 결여되어 있다. 현장실측은 아트리움 공간을 대상으로 몇몇이 이루어지는 실정이다.

대공간 건축물 분야에서 돔야구경기장에 수요가 계속증가를 하고 있다. 이러한 돔야구 경기장의 경우 특수한 막재를 사용하기 때문에 단순한 풍압실험으로 풍하중을 결정할수 있지만 풍진동에 대한 평가는 전무한 상태이다. 기술이 완성이 되면 충분한 경쟁력이 있는 기술이 될것으로 판단된다.

본 연구과제에서는 풍하중의 영향을 사전 평가해 볼 수 있는 풍응답 예측 시스템을 구축하고자 한다. 따라서 대공간 구조물에 대한 단계에서부터 풍응답을 사전에 예측하고, 풍하중의 영향이 적은 형태와 구조시스템을 제시할 수 있다.

건물의 파사드에 주로 적용되어진 미디어 아트를 현대 도시공간이 변화함에 따라 공간 및 구조물에 적극적으로 도입하여 그에 따른 상호작용 및 사용자의 시각, 청각, 촉각 등의 다감각적 경험의 유도 및 경험함으로써 변화하며 사용자에게 반응하게 되는 또 다른 상호작용을 제공하였다. 이런 디지털 미디어 기술의 발달로 인한 매체의 기술적인 기능성이 확장됨에 따라 서로 다른 요소들의 통합은 구조물의

조형 및 외피에 환경인지, 상호 연결, 상황인식, 반응 생성 등을 적용하여 더 이상 개체가 아닌 매개체로의 역할을 유도하고 있다.

건축음향분야에서는 시간과 비용측면에서의 장점으로 인하여 컴퓨터를 이용한 음향시뮬레이션의 활용이 선호되고 있다. 음향시뮬레이션 기법은 과거에는 음의 파동성을 직접해석하지 못하고 음선추적법 등의 단순화된 방법에 의해 근사치를 구하는 방법을 활용해 왔으며, 이는 컴퓨터의 연산능력과도 밀접한 관련이 있다. 최근에는 하드웨어기술의 발전과 더불어 음의 파동성을 직접적으로 해석할 수 있는 방법들이 개발되고 있다. 이는 영국의 Salford 대학과 일본의 동경대학 등을 중심으로 해서 이루어지고 있으며, 아직은 상용화가 되지 못한 연구개발 단계라고 할 수 있다. 이는 재료의 표면경계조건에 대한 기존의 정의방법이 잔향실법 흡음율에 의한 흡음계수에 의존하고 있기 때문이며 아직 새로운 정의방법의 제시나 표준화가 이루어지지 못하고 있는데 기인한다.

- 음향설계기술측면에서 공간의 다목적 활용을 위한 가변음향기술에 대한 수요가 증가하고 있다. 가변음향은 건축적방법과 전기음향시스템을 이용한 가변시스템들이 활용되고 있다. 또한 건축적 가변의 경우 음향설계 단계 및 평가단계에서 활용가능한 예측 및 평가지표의 개발연구가 활발하게 진행되고 있다. 전기음향시스템을 활용한 가변음장의 경우, 많은 시스템들이 개발되고 있고 현재 상용화단계이다. 대공간의 경우 공간의 규모로 인해 기존의 전송방식으로는 에너지 손실 및 신호대 잡음비의 악화를 피할 수 없다. 따라서 각 시스템간의 신호전송방식이 유선랜방식이나 무선통신방식을 활용하는 방향으로 전환되어 왔으며, 현재 외국의 경우에는 관련기술이 이미 상용화단계에 도달했다. 또한 음향계측 및 모니터링시스템의 경우에도 기술개발단계를 지나 상용화단계에 있다. 컴퓨터 시뮬레이션 기술은 기존 음선추적법의 정확도를 높이기 위한 개선들이 이루어지고 있으며, 각 음선에 위상정보를 부여하여 보다 실제상황에 가까운 예측결과를 얻고자 하는 연구들이 진행되고 있다. 또한 BEM 및 FDTD 등 소규모 시설(스튜디오, 자동차 등)에서 적용되던 파동적 시뮬레이션 기술들이 보다 규모가 큰 공간에 적용하기 위한 연구들이 진행되고 있다.

■ 4세부 "실용화 방안 연구"

일반 구조물과 마찬가지로 대공간 구조물의 경우에도 사후 유지관리가 필요하며 일정 수명이 경과하면 보수보강이 요구된다. 대공간구조의 경우 작용하는 응력과 변형이 상대적으로 크므로 보수 보강시 상당한 주의를 기울여야 하고 보수보강시 발생할 수 있는 구조적인 불안정 문제를 엔지니어링을 통하여 사전에 시뮬레이션할 필요가 있다. 구조물의 외부 환경 조건 및 하중 조건들이 불확실하기 때문에 이를 정량적으로 정확히 반영하는데 어려움이 있기 때문에 대공간 구조물의 관리 시스템의 활성화 및 정착화를 위한 기본자료, 계측방법등이 요구된다.

ETFE 막재는 섬유직포를 가지지 않기 때문에 종래의 막재료와 다른 재료특성을 가지고 있고, 또한 건축 재료로서의 취급에 대해서도 명확하지 않기 때문에 이 사용에

있어서는 막재에 대한 정확한 이해와 기술의 습득이 필요하다.
연구단 발족 당시(2006년)에 대공간 구조물에 대한 건설기술은 주로 해외의 기술에 의존하였다. 특히 막과 케이블과 같이 대공간 구조물의 지붕구조의 경량화를 위한 연성구조물의 시작은 1972년 Frei Otto에 의해 건설된 뮌헨 올림픽을 위한 Cable-Net 구조물이다. 이외에도 스위스 EMPA의 이중막 구조인 Tensairity, Mark Marx, Strarch International, KOCH, Schlaich-Bergman의 막구조 및 케이블 구조 등 연성구조물의 설계 및 시공능력, 일본의 대공간 구조물 시공능력 등이 있으며, 이러한 기술을 도입하는 과정에서 비용이 소요됨이 사실이었다.
하지만, 국내에서도 대공간 건축물 건설기술개발 연구단이 발족하면서부터 대공간 구조물에 대한 연구가 활발히 진행되었으며, 특히 Tensairity와 유사한 이중막 구조인 텐셔닝 에어빔 시스템(TABS)을 국산기술로 개발하기에 이르렀다. 또한 대공간 구조물의 설계 프로세스를 구축하였으며, 시공시 적용되는 핵심 요소기술(TABS, 유압식 재긴장 소켓, 개폐식 지붕구조, 가설공법 등)에 대한 데이터베이스를 구축하였으며, 이를 바탕으로 국내에서도 (주)CS구조엔지니어링, (주)동아스트, 대동MS, 코스피(주) 등 연성구조물의 설계 및 시공능력을 확보하였으며, 본 연구단에서는 국내의 기술로서 설계 및 시공을 수행한 Pilot Project를 구축하였다.

가. 7.2 관련분야의 환경변화

(1) 7.2.1 국내 환경

■ 1세부-구조시스템 개발 및 경제성 분석

국내의 구조시스템 설계에 대한 기술은 현재 대규모 대공간 건축물의 경우에는 선진국의 기술에 의존하고 기존에 개발되어 온 설계기술을 답습하고 있는 실정이었다. 따라서 우리나라의 대공간 구조시스템 설계기술이 선진화되기 위해서는 선진국이 보유하고 있는 기술에 대한 확보가 시급할 뿐만 아니라 선진국이 보유하고자 시도하는 기술이나 아직 개발되지 않은 미래기술에 대한 관심도 필요하다. 국내에서는 대공간 구조시스템에 대한 관심이 1988년 올림픽의 개최와 함께 시작되었고 중소규모의 공간구조물은 꾸준히 건설되고 있지만 대규모 구조물의 건설은 2002년 월드컵 이후 현저히 줄어든 상태이다. 설계최적화 기술을 바탕으로 하는 대공간 구조시스템의 설계기술은 대공간 건축의 규모 및 거동특성에 관계없이 적용할 수 있어 구조시스템 설계의 핵심이 되나 현재 그러한 기술력을 충분히 확보하지 못하고 있는 실정이다. 따라서 현재 선진국에서도 개발에 박차를 가하고 있는 설계최적화 요소기술들이 계속적으로 연구되고 그 범위가 확장되어 궁극적으로 통합된 설계기술로 발전되어야 선진국과 대등한 기술을 보유하고 더 나아가 선진국의 기술을 추월할 수 있을 것으로 판단된다. 최근 국내에서도 위상최적화기법과 같은 첨단의 설계최적화기법을 개발하고 기하학적 모델과 기존의 전통적인 설계최적화 기법과 통합하는 연구가 계속적으로 시도되고 있다. 이러한 연구는 특히 산학연의 협조 그리고 정부의 계속적인 지원이 필요한 실정이다.

가) 표 7.2.1.1 2011년 건설투자 전망

1) 구분	2) 2007년	5) 2006년			4) 2009년			5) 2010년			6) 2011년
	7) 연간	8) 상반기	9) 하반기	10)연간	11)상반기	12)하반기	13)연간	14)상반기	15)하반기	16)연간	17)연간
18)건설 19)투자	20)158,4	21)71,7	22)82,3	23)153,9	24)73,9	25)85,3	26)159,2	27)74,2	28)82,7	29)157,0	30)156,7
31)증감율	32)1,4	33)-1,4	34)-4,0	35)-2,8	36)3,2	37)3,6	38)3,4	39)0,4	40)-3,0	41)-1,4	42)-0,2

43)주: 2001년은 한국건설산업연구원 전망치

44)자료 : 한국은행, 『국민계정』, 각 년호

대공간구조물 관련 프로젝트는 대규모 자본이 투자되어야 하는 사업이므로 경제상황과 밀접한 연관이 있다. 건설산업연구원에서는 2011년 건설투자 전망을 전년 대비 0.2% 감소로 발표하고 있다. 그러나 프로스포츠 (프로야구)의 활성화로 노후화된 경기장(광주, 대구, 대전)의 신축이 발표되고 있으며, 2018년 평창 동계올림픽 유치로 수요가 발생할것으로 보여 대공간구조물의 시장에 대한 전망은 밝다.

■ 2세부 "비선형해석 및 구조설계 기법 개발"

국내의 현재 개발된 건축재료 및 시공기술로는 스팬 300m 정도의 규모가 구조물의

기능 및 경제성 등에서 그 한계로 생각되어지나 앞으로는 스팬 500m가 넘는 초대공간 건축물의 수요도 창출될 것이다. 또 대공간 건축물 분야에서 월드컵 경기장, 환경시설, 공장건축, 우주건축물과 같은 특수 건축물에 막재의 사용이 많이 증가하고 있고, 사무소, 주택, 야외시설 등의 일반 건축물에서도 외관이 화려한 디자인의 개발을 위해서 막재의 사용이 급격히 증가되고 있으며 이와 같은 국내의 환경변화는 국민소득의 증가와 더불어 더 많은 변화가 있을 것이다.

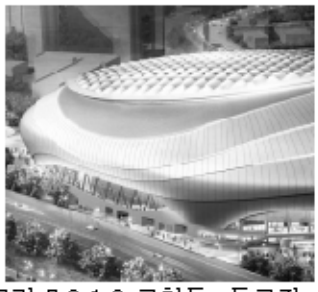
국민소득 1인당 2만불 시대에 접어들어 우리나라도 대공간 건축물의 수요가 크게 증가할 것으로 예상되며, 미래 유망산업으로 생각되는 해양, 우주 항공분야 중에서도 하드웨어에 속하는 것은 대공간 건축물과 밀접한 관계를 가지고 있다. 이 분야에 대한 정부의 적극적인 지원 정책에 따라 대공간 분야의 지원도 증가할 것이다. 따라서 수요에 능동적으로 대처하기 위하여 대공간 건축물의 요소기술인 효율적 erection 공법 개발은 국내 연구 환경 조성을 통하여 꾸준히 지속될 전망이다.

나)



4. 그림 7.2.1.1 대구 육상진흥센터 조감도

다)



5. 그림 7.2.1.2 고척동 돔구장 조감도

세계적인 경제난 속에서도 국내 경기 활성화와 국제적인 행사의 성공적인 유치를 위하여 많은 대공간 건축물의 수요증대가 예상된다. 2011대구세계육상선수권대회의 실내경기장으로 사용될 '육상진흥센터', 안산문화 복합 돔구장, 고척동 돔 구장 등이다. 국내의 현재 개발된 건축재료 및 시공기술로는 스팬 300m 정도의 규모가 구조물의 기능 및 경제성 등에서 그 한계로 생각되어지나 앞으로는 스팬 500m가 넘는 초대공간 건축물의 수요도 창출될 것이다. 이처럼 대공간 구조물 규모의 확장과 인식의 확대로 건설사례가 증가함에 따라 구조물에 대한 내풍 및 내진설계가 구조물의 안전성 확보차원에서 주요한 사안으로 대두되고 있다. 일반적인 건축물에 있어서 지진하중과 바람하중 등의 동적하중에 의해 진동이 유발되며, 이러한 진동은 구조적인 측면이나 환경적인 측면에서 여러 가지 문제점을 야기하고 있다. 또한 구조물내의 거주공간 사용시 발생할 수 있는 작은 진동이라 할지라도 장시간 노출될 경우에는 불안감을 주는 등의 생활환경에서의 심리적인 문제와 업무능력이 저하될 수 있는 문제가 발생하며 심할 경우에는 구조물의 사용성과 안전성에도 큰 영향을 미칠 수 있다. 또한 환경에 대한 인식의 변화로 쾌적한 생활추구의 욕구가 높아지면서 진동과 같은 문제들에 대한 민원이 급증하고 있는 실정이다. 따라서 대공간 구조물에 있어서도 바람이나 지진과 같은 다양한 진동원에 의하여 발생하는 진동에 대한 정확한 평가가 필요하며 이를 바탕으로 대공간 구조물의 안전성 및 사용성 확보가 요구되어진다.

■ 3세부 "시공 및 친환경설계 기법 개발"

현재 국내의 대공간 건축물 건설기술은 해외 기술의 움직임에 비하여 자체적 성장 및 기술축적이 부족한 채, 경제발전 과정과 국가적 이벤트에 따른 수요에 의해 이루어지고 있다. 특히 구조시스템과 관련한 설계(엔지니어링) 분야는 외국기술에 대한 의존도가 매우 높으며, 이들로부터의 기술이전은 제대로 수행되지 못하고 있는 실정이다. 또한 철골, SRC구조 및 스페이스 프레임구조 등에서는 상당 수준의 기술력을 보유하게 되었지만, 다른 대안 구조 및 공법에 대한 시도는 제한된 양상을 보이고 있다. 국민소득 1인당 2만불 시대에 접어들게 되면 우리나라도 대공간 구조물의 수요가 크게 증가할 것으로 예상되며, 미래 유망산업으로 생각되는 해양, 우주 항공분야 중에서도 하드웨어에 속하는 것은 대공간 건축물과 밀접한 관계를 가지고 있다. 이 분야에 대한 정부의 적극적인 지원 정책이 있으면 대공간 분야의 지원도 대폭 증가할 것이라 사료된다.

오늘날 대공간 건축물의 수요 증대에 대비하여 선진기술국에 의한 핵심적인 시공기술 분야의 시장 잠식을 사전에 예방할 수 있는 절호의 기회를 맞이하고 있다. 지금이 우리나라의 대공간 구조물 시공기술을 축적해야할 가장 적절한 시기라고 판단된다.

- 국내에서 건설되고 있는 대공간 구조물에 대해서 현재는 정적실험을 통한 내풍안정성만을 검토하고 있는 실정이다. 그러나 실제로 매년 발생하는 태풍등의 영향으로 인해 일부 경기장의 경우 지붕이 파손되는 경우가 많이 발생하고 있어 정적실험뿐만 아니라 동적실험에 의한 다양한 응답특성을 분석해야 한다고 판단된다.
- 국내 현황으로는 에너지 관리공단의 주도로 진행되고 있는 그린홈 100만호 보급사업이나 새로 신축되는 공공기관의 건물에 친환경적 요소를 적용해야 한다는 내용을 법 령으로 지정하는 등의 다양한 친환경 관련 산업을 진행하고 있다. 또한 현재 진행중인 돔구장의 건설에도 친환경적 요소를 접목시킬 계획을 발표하였다.
  - 2004년 서울 압구정동 갤러리아 백화점 외피에서 LED를 설치하여 환경에 의해 입력된 콘텐츠가 변화하는 것을 시작으로, 2006년 삼성화재, 역삼동 GS타워, 스타타워 등에 LED를 이용한 미디어 파사드가 설치되었다. 또한 2009년에 상암 DMC의 LG CNS 사옥에 미디어 보드를 설치를 하는 등 상삼 DMC지구의 디지털 미디어 스트리트에 설치되는 건물의 외벽에 미디어 보드를 설치를 의무화 시키는 등 도시 공산은점점 미디어화 되어가고 있다.

- 공항 대합실, 역사 등 대규모 시설에 있어서 음환경에 대한 고려가 보편화되고 있는 추세이다. 또한 체육관, 수영장 등 실내체육시설에 대해서도 기본적인 음환경 고려가 제한적이지만 초기설계단계에서부터 이루어지고 있다. 그러나 기술적인 부분에서는 실질적으로 건축을 담당하고 있는 시공업체 등이 보유한 전문 인력의 부족으로 인해 그 완성도와 품질 측면에서 선진국에 비해 여전히 낙후된 상황이다. 특히 외국의 경우, 대규모 체육공간에 대해서는 체육시설로서의 본래 용도외에 공연 등을 비롯한 다목적활용을 고려한 음향계획이 보편적으로 이루어지고 있는 반면, 국내에서는 이와 관련한 연구나 그 결과의 현장 적용측면에서 여전히 초보단계를 면치 못하고 있다. 또한 음향관련 기기 및 하드웨어들은 수입의존도가 아직도 매우 큰 상태이며, 야외환경에 준하는 체육시설의 내부마감용 흡음구조 등의 자재 분야에서의 연구 및 개발이 거의 이루어지지 않고 있다. 최근에는 많은 건축 및 전기음향관련 컨설팅업체들이 출현하고 있어 향후 수년 후 전망을 밝게 하고 있으나 이들 업체의 영세성과 전문성 결여는 여전히 우려할 수준이다.

■ 4세부 "실용화 방안 연구"

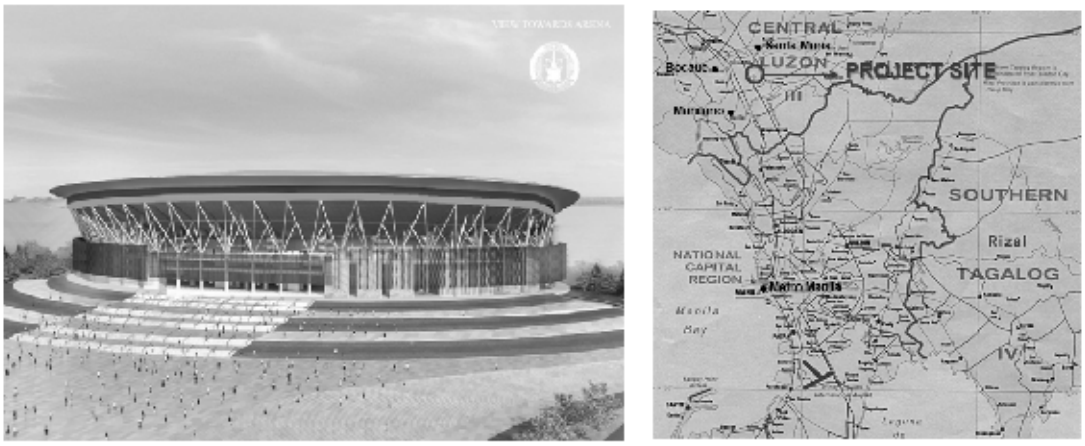
지자체에서는 주 5일제 근무제로 인한 생활 체육의 활성화를 위해 실내 체육관, 수영장, 정구장, 하키장, 사이클 경기장, 농구장 등 체육 시설의 건립을 확대해 나가고 있는 추세이다. 또한, 기존의 경기장이나 운동장에서는 수익성을 높이기 위하여 리모델링 등을 통하여 공연 시설 등을 부가하는 사례가 증가하고 있다. 따라서 대공간 구조물의 건축이 활발하게 진행됨에 따라 이에 맞는 규준과 지침이 절실히 요구되고 있다.

연구단 발족 당시 개발된 설계 및 시공 기술로는 300m 스팬 정도의 대공간 구조물은 기능 및 경제성 등에서 그 한계로 생각되어졌으며, 2002년 월드컵 경기장이 활발하게 건설될 당시 전주 월드컵 경기장을 제외하고는 해외 기술에 의존함이 사실이었다.

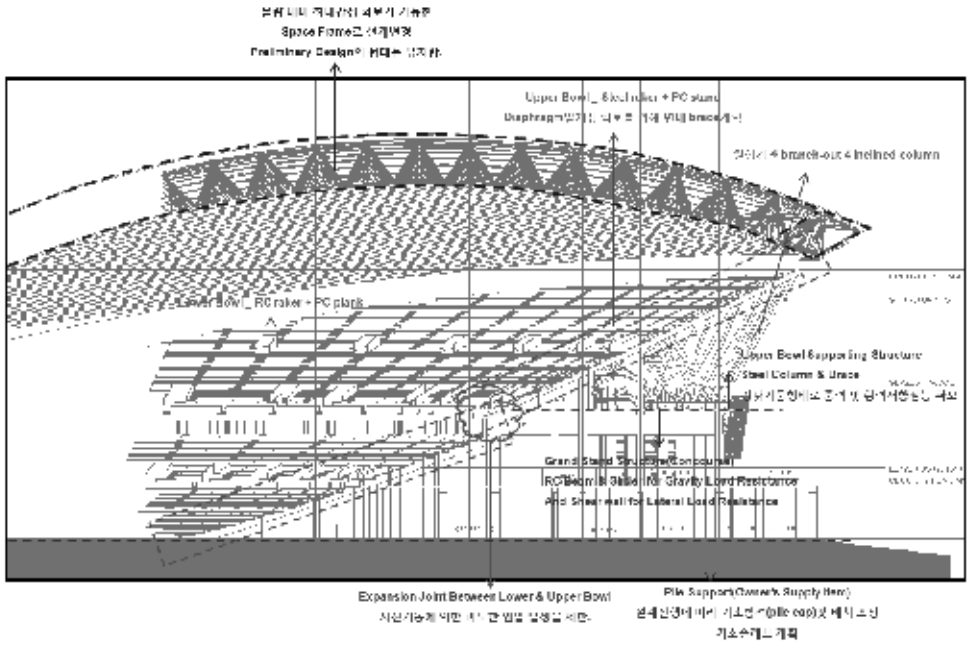
하지만 대공간 건축물 건설기술 개발 연구단이 발족하였고, 재료, 설계 및 시공 뿐 아니라 친환경 설계 기법까지 수많은 연구가 이루어졌으며, 이를 바탕으로 Pilot Project를 수행하였다. Pilot Project는 순수 국내 기술 즉 연구단의 기술로서 설계 및 시공을 진행하는 프로젝트로서, 진행하는 과정에서의 시행착오와 축적된 경험을 통하여 향후 계획되어 있는 500m 스팬이 넘는 초대공간 구조물에 대한 설계 및 시공을 국내의 고도화된 기술로 수행할 수 있으며, 나아가 해외에 수출할 수 있는 수준까지 이르렀다.

국내의 순수의 설계 및 시공 기술로 수행하고 있는 대공간 구조물 프로젝트인 국내의 서남권 돔 야구장 프로젝트 이외에, 현재 해외 시장에 진출해있는 대표적인 예로는 필리핀 마닐라의 "필리핀 아레나 프로젝트"가 있다. "필리핀 아레나"는 아래 그림과 같이 Barangay Duhat, Bocaue, Bulancan에 위치하며, Iglesia Ni Cristo의 2014년 7월 100주년 기념 행사를 위하여, 50,000 석 규모의 돔 지붕 구조의 아

레나로 계획되었다. 상기 구조물은 종교집회장, 공연장 및 스포트 시설로 사용될 예정이며, 타원형인 지붕의 장·단변 스팬은 각각 233m, 173m으로 세계에서 가장 큰 규모의 아레나 구조물이 될 것이다.



6. 그림 7.2.1.3 필리핀 아레나 프로젝트 조감도 및 부지



7. 그림 7.2.1.4 필리핀 아레나 프로젝트 중력시스템 (순수 국내의 기술)

(1) 7.2.2 국외 환경

■ 1세부-구조시스템 개발 및 경제성 분석

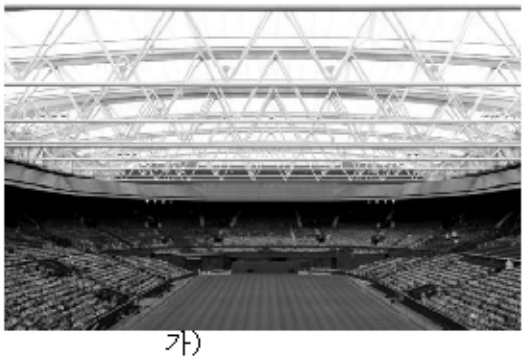
국외에서 대공간구조의 발전은 대공간구조의 건설기술에 대한 연구개발을 필요로 하는 사회적 수요와 매우 밀접한 관계를 가지고 있다. 러시아의 엔지니어 Vladmir Shukhov는 1887년 천구조(fabric structure)에서 생성되는 것과 같은 응력특성을 가지는 복곡률(double curvature)을 가지는 그리드 쉘을 건설한 바 있으며 그 후 Pier Luigi Nervis의 비행기 격납고와 같은 근대적인 대공간 건축의 실현을 통해 연속체 쉘 구조물의 발전과 보급이 이루어졌다. 또한 Frei Otto의 주도 하에 케이블과 막을 이용한 다양한 연성구조가 탐구되었다. 1970년대에 이르면서 스페이스 트러스(그리드 쉘)의 형태와 구성방식은 평면형상을 벗어나 매우 구체적이고 다양화되기 시작했다. 또한 구조시스템의 경량화와 더불어 구조형식의 혼합에 의한 하이브리드구조가 시도되었고 이 분야에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 특히 국외의 연구는 70년대 후반을 기점으로 컴퓨터를 이용하는 수치 실험적 설계최적화에 바탕을 둔 구조시스템 설계플랫폼을 가지게 하는데 결정적인 기여를 하게 된다. 그리고 세계적으로 대공간구조의 기술의 발전은 세계적인 행사에서 요구되는 대공간 구조물의 수요와 직접적으로 관련이 있다.

최근 구조시스템의 설계기술은 건축설계에서 구조설계 그리고 시공에 이르는 하나의 통합된 형태로 요구되고 있으며 이미 선진국은 이러한 연구개발을 진행하고 있는 상황이다. 최근에는 구조해석분야에서 등기하해석에 대한 연구가 점차적으로 진행되고 있으며 연속체 대공간구조물의 해석에 반드시 필요할 것으로 예상하고 있다.

■ 2세부 "비선형해석 및 구조설계 기법 개발"

대공간 구조물은 크게 쉘구조, 스페이스 프레임 구조, 막구조 그리고 케이블 구조로 분류되며 현재 여러 선진국에서는 이들 구조시스템을 이용하여 스팬 300m에 이르는 대공간 건축물을 건립하기에 이르렀다. 계속되는 국외 기술의 발전은 산업사회의 발전과 더불어 인간의 좀 더 높고, 좀 더 넓은 공간의 필요조건을 충족할 것이고, 자연적 재해로부터의 보호를 위한 공간으로 초대공간 건축물의 수요를 유발할 것이다.

더욱이 2010 남아공월드컵 개최 등 대규모 국제행사들이 대공간 건축의 수요증대를 견인하고 있고, 최근 중국과 동남아시아의 공간구조에 대한 수요 역시 증대하고 있는 편이다. 현재 장스팬 대공간 건축물에 사용하기위한 보다 고성능 품질을 가진 새로운 막재의 개발이 국외에서는 활발히 이루어지고 있다. 과거에는 폴리에스터 막재나 유리섬유 막재를 주로 사용하였으나 2008년 북경 올림픽 경기장 및 수영장에서는 햇빛 투과성이 좋고 균질하며 구조적 성능이 우수한 ETFE라는 새로운 막재를 개발하여 건축분야의 화려한 외관 및 야간 조명을 통한 새로운 건축 디자인 및 도시 분위기를 창출하고 있다. 또한 최근의 환경친화적인 트렌드를 대공간 구조물에 적용하고 있으며, 그 방법의 하나로 필요에 따라 열고 닫을 수 있는 개폐식 구조물을 들 수 있다. 맑은 날은 야외 공간이 되며, 우천시 또는 추운 겨울에는 실내에서 생활이 가능한 구조물들이 실용성과 언제나 다목적으로 이용할 수 있는 경제성 때문에 대부분 개폐식 구조물로 지어지고 있다.



가)

8. 그림 7.2.2.1 Wimbledon Tennis Stadium



나)

9. 그림 7.2.2.2 Fukuoka Yahoo Japan Dome

이로 인해 지붕구조의 개폐시 발생하는 진동의 저감을 위한 기술개발이 동시에 이루어지고 있으며, 그와 더불어 외부 동적하중에 대한 개폐식 지붕구조의 안전성 확보를 위한 연구도 함께 진행되어지고 있다.

최근 30여 년간 일본, 미국, 뉴질랜드 등을 중심으로 실험과 해석적인 연구를 바탕으로 다양한 면진장치가 개발되고 실무적용을 위한 설계지침 및 기준의 정립되고 있다. 특히, 일본의 경우 고베지진 이후 면진에 대한 효용성이 입증되어 2002년에 이르러서는 약 1,100여개의 건물에 면진장치를 적용할 만큼 장기적인 안목에서의 경제성과 내구성에 대하여 기존 내진설계가 갖는 한계에 대한 대안으로서 그 실효성을 인정받고 있다. 구조물의 진동제어에 관한 연구는 1980년대 중반 이후부터 스마트 구조물이라는 분야로 발전되어 왔다. 스마트 구조 기술을 적용할 때 기본적으로 고려하는 사항 중 하나는 기능성의 확장, 즉 구조물 본연의 임무인 하중지지라는 기능 외에 자기진단, 진동/소음 억제 등의 추가적인 기능을 수행할 수 있도록 변화시키는 것이며, 현재까지의 기술들이 통합된 형태의 다기능 스마트 구조 기술로 발전되어 가고 있다.

■ 3세부 "시공 및 친환경설계 기법 개발"

현재 여러 선진 국가에서는 대경간 대공간 구조시스템을 사용하여 지간 300m에 이르는 대공간 구조물을 건립한 바 있다. 산업사회의 발전과 더불어 우리 인간은 좀 더 높고, 좀 더 넓은 공간을 계속 지향할 것이며, 자연적으로 초고층구조물과 대공간 구조물의 수요를 유발할 것이다. 현재 개발된 시공기술로는 지간 300m 정도의 규모가 구조물의 기능 및 경제성 등에서 그 한계로 생각되어지나 앞으로는 지간 500m가 넘는 초 대공간 구조물의 수요도 창출될 것이며, 이것의 실현을 위해 시공기술의 개발이 필요하다.

고전적인 의미에서의 조적식 돔 등을 대공간 구조의 제 1세대라 한다면, 현대적인 의미에서의 대공간 구조는 제 2세대의 1972-1989년경이며, 이 시기에 투광성이 있는 개방적 공간에 대한 요구에 부응하여 참신한 조형미와 경쾌감을 주는 하드(hard) 지향형의 공기막 구조(pneumatic structure), 고정식 돔 등이 건립되었다.이 시기 애스토로 돔으로부터 시작한 북미의 돔은 철골조의 슈퍼돔, 콘크리트조의 킹돔을 경유하여 공기막 구조인 실버 돔에 다다른다. 어두운 공간밖에 제공할 수 없

었던 종래의 돔에 비해 밝은 공기막 구조는 북미의 주류가 되었으며, 이후 십수 년간은 돔이라 하면 공기막 구조를 연상하게 되었다. 일본에서도 1988년 도쿄돔을 시작으로 많은 공기막 구조물이 건립되었다. 대공간 구조의 제 3세대는 시기적으로 1990-1994년까지 해당된다. 이 시기는 대규모 고정 및 개폐식 지붕의 구조적 해결과 실내환경의 개선이라고 하는 하드와 소프트(soft)병용 지향적인 케이블 돔, 개폐식 돔 등이 건립되어 기상변화에 능동적으로 대처할 수 있는 전천후 공간의 확보와 개폐구조 그 자체가 이벤트가 되는 시기이기도 하다. 이 시기 대공간 건축물의 개성화 분위기는 북미에서도 많은 변화를 가져와 새로운 돔이 속속 건설되고 있다. 1990년 케이블 돔인 직경 207m의 선 코스트 돔이 플로리다주에 건립된 것을 시발로 1992년 235× 186의 타원형평면을 갖는 케이블 돔인 조지아 돔이 건립된다. 이 돔은 1996년 애틀란타 올림픽 스타디움으로 사용되었다. 1993년 건립된 텍사스주의 알라모 돔은 장방형 평면을 갖고 있으며, 사각 코너에 높이 95m의 마스트를 세워 지붕을 잡아당기고 있는 사장교 형식의 구조물이다. 일본의 경우 1993년 철골조 개폐식 돔인 후쿠호카 돔(Fukuoka dome), 1994년 골조막 개폐식 오션 돔(Ocean Dome)등에 이르기까지 수백 개의 돔이 건설되어 왔다. 대공간 구조의 제 4세대는 1995년 이후의 시기로, 이 시기는 다목적 다기능의 공간가변식 구조시스템과 양호한 휴먼환경의 창조가 주테마인 소프트지향의 시기이며, 공간을 자유로이 확장, 분할하고 다목적용도 예를 들면 멀티미디어의 중추기지로써의 기능을 수행할 수 있는 공간창출을 목표로 하고 있다. 1997년 완공된 나고야 돔과 오사카 돔은 제 4세대 대공간을 잘 보여주고 있다.

2004년 서울 압구정동 갤러리아 백화점 외피에서 LED를 설치하여 환경에 의해 입력된 콘텐츠가 변화하는 것을 시작으로, 2006년 삼성화재, 역삼동 GS타워, 스타타워 등에 LED를 이용한 미디어 파사드가 설치되었다. 또한 2009년에 상암 DMC의 LG CNS 사옥에 미디어 보드를 설치를 하는 등 상삼 DMC지구의 디지털미디어 스트리트에 설치되는 건물의 외벽에 미디어 보드를 설치를 의무화 시키는 등 도시 공산은 점점 미디어화 되어가고 있다.

10. 해외의 경우에는 공간의 특성을 고려한 음향설계를 통하여 용도에 따라서 공간의 음향적 특성을 가변적으로 조절함으로써 단일공간의 다목적 활용을 하고 있는 단계이다.

- 다중집회시설들의 규모가 점차 대형화되고 있으며, 공간의 활용방법도 과거의 단일용도활용방식에서 다목적 활용으로 보다 경제적인 운용 및 활용방안을 모색하고 있다. 건축 및 전기음향분야의 설계기술도 이와 같은 활용방안에 맞추어 발전되어 오고 있다. 음환경의 품질측면에서도 다양한 용도별 요구조건을 만족시켜 공간의 활용측면에서 상

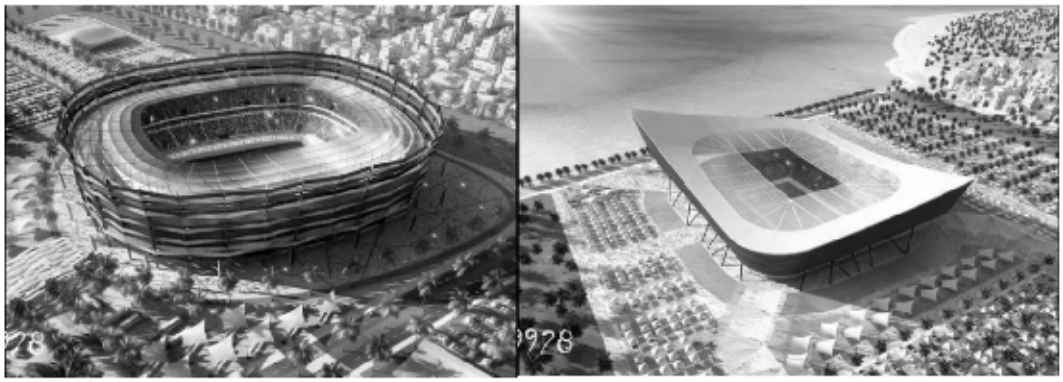
업적인 성공사례들도 많이 나타나고 있다. 전기음향 하드웨어 측면에서는 대공간의 특성을 고려하여, 무선을 활용한 PA 시스템들이 상용화되어 많은 시설에 적용되고 있다. 스피커 음원의 경우, 어레이 형태의 고지향성 스피커들의 개발이 활발하게 이루어지고 있다. 음향설계를 위한 컴퓨터 시뮬레이션 도구들의 경우, 기존의 음선추적법 기반위에 확산 또는 회절 등 음의 파동특성으로 인해 나타나는 현상들을 고려함으로써 예측의 정확도를 높이고자 하는 연구 및 그에 따른 프로그램의 개선들이 이루어지고 있다.

■ 4세부 "실용화 방안 연구"

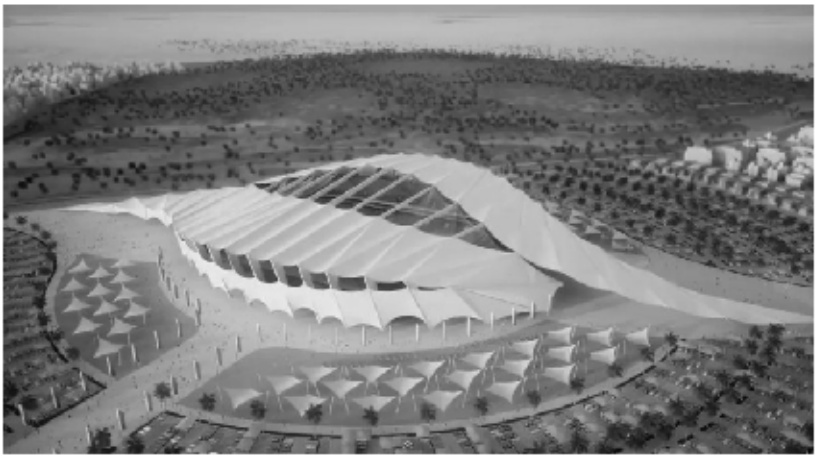
국외에서는 과거에서부터 대공간 구조물의 지붕구조의 경량화가 목적인 막 및 케이블에 대한 연구가 활발히 진행되었으며, 특히 스위스의 EMPA에서는 공기막을 이용한 Tensairity를 개발하여 교량, 주차장 지붕 및 주택에까지 적용하고 있다. 현재에도 건축물에 대한 적용성 판단에 대한 연구가 진행 중에 있다. 또한 독일의 Mark Marx, KOCH, Schlaich-Bergman에서는 연성구조물에 관한 설계 및 시공능력이 우수하며, 수많은 경기장 등의 프로젝트를 진행하였다. 일본에서도 이에 대한 연구가 활발히 진행되었으며 대공간 구조물에 대한 Erection을 비롯한 시공능력이 우수하여 1000m 스팬의 대공간 구조물 실시설계 단계를 진행하는 Dasei 건설, Takenaka Co, (주)타이요코코 등이 있다.

상기의 선진국에서는 이들 기술을 이용하여 300m 스팬 이상의 대공간 구조물의 건설하기에 이르렀다. 계속되는 국외기술의 발전은 산업사회의 발전과 더불어 인간을 좀더 높고, 넓은 공간 필요조건을 충족할 것이고, 자연적 재해로부터 보호를 위한 공간으로 초대공간 건축물의 수요를 유발할 것이다.

연구단이 종료된 현재, 국내의 대공간 건축물 건설기술 수준은 선진국과 경쟁이 가능할 정도로 국내의 기술이 성장하였다. 이는 최근 순수 국내의 기술로 수주한 "필리핀 아레나"의 사례에서 단편적으로 보여주고 있다. 특히 2022년 개최되는 카타르 월드컵은 아래와 같은 경기장의 수요가 급증함을 나타내며, 본 연구에서 개발된 국내의 기술을 바탕으로 충분히 선진국과 경쟁이 가능하리라 판단된다.




Al Bayt Stadium



주 의

1. 이 보고서는 국토해양부에서 시행한 첨단도시 개발사업사업의 연구보고서입니다.

2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토해양부에서 시행한 첨단도시 개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.

3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.