주 의 사 항

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통연구기획사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구 결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.

14CHUD C061979-03

최종보고서

비정형 구조물의 태양광 발전 효율 극대화를 위한 솔라패널 최적배치 프로그램 개발

2015. 01

국토교통부
국토교통과학기술진흥원

국토교통기술촉진연구사업 14CHUD-C061979-03

비정형 구조물의 태양광 발전 효율 극대화를 위한 솔라패널 최적배치 프로그램 개발 최종보고서

2015. 02

주관연구기관 / 한국기술교육대학교 산학협력단
공동연구기관 / (주)레나소프트웨어

Infrastructure
R&D Report

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제출문

국토교통과학기술진흥장관 귀하

이 보고서를 "비정형 구조물의 태양광 발전 효율 극대화를 위한 솔라패널 최적 배치 프로그램 개발" 과제의 보고서로 제출합니다.

2015. 2.

주관연구기관명 : 한국기술교육대학교 산학협력단
주관연구책임자 : 이승재
연 구 원 : 하준홍
연 구 원 : 이청호
연 구 원 : 손수덕
연 구 원 : 유미나
연 구 원 : 홍종록
연 구 원 : 안수홍
연 구 원 : 곽의신
연 구 원 : 조혜원
연 구 원 : 이돈우
연 구 원 : 김 원
연 구 원 : 오영택

공동연구기관명 : ㈜레나소프트웨어
주관연구책임자 : 권병천
연 구 원 : 심진웅
연 구 원 : 박아름
연 구 원 : 장동한
연 구 원 : 홍길석
연 구 원 : 김애란

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제고유번호</td><td>14CHUD-C061979-03</td><td>해 당 단 계
연 구 기 간</td><td colspan="2">2012.4.10~
2015.2.9</td><td>단 계 구 분</td><td>1,2,3/3</td></tr>
<tr><td>연 구 사 업 명</td><td colspan="6">국토교통기술촉진연구사업</td></tr>
<tr><td rowspan="3">연 구 과 제 명</td><td>최상위
과제명</td><td colspan="5">비정형 구조물의 태양광 발전 효율 극대화를 위한
솔라패널 최적배치 프로그램 개발</td></tr>
<tr><td rowspan="2">단위과제명</td><td colspan="5">주관: 비정형 구조물의 태양광 발전 효율 극대화를
위한 솔라패널 최적배치 프로그램 개발</td></tr>
<tr><td colspan="5">공동: 비정형 곡면 패널설계 프로그램 개발</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 책 임 자</td><td rowspan="2">이 승 재</td><td>해당단계
참 여
연구원수</td><td>총 : 18명
내부 : 12명
외부 : 6명</td><td>해당
단계
연구비</td><td colspan="2">정부 : 270,000천원
기업 : 100,000천원
계 : 370,000천원</td></tr>
<tr><td>총연구기간
참 여
연구원수</td><td>총 : 50명
내부 : 32명
외부 : 18명</td><td>총
연구비</td><td colspan="2">정부 : 670,000천원
기업 : 235,000천원
계 : 905,000천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소 속 부 서 명</td><td colspan="2">주관: 한국기술교육대학교
산학협력단
공동: ㈜레나소프트웨어</td><td>참여기업명</td><td colspan="3">㈜레나소프트웨어</td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="3">상대국명 : 해당없음</td><td colspan="3">상대국연구기관명 : 해당없음</td></tr>
<tr><td colspan="5">요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)</td><td>보고서면수</td><td>280</td></tr>
<tr><td colspan="7">▪ 비정형 솔라패널 최적배치 설계프로세스 및 프로그램 개발
- 최적삼각형 그리드 생성을 위한 메타 휴리스틱 탐색기법 및 측지선 연구
- 자유곡면의 메쉬스무딩을 위한 보정알고리즘 개발 및 프로그래밍
- 곡면지붕의 친환경 외피구조와 효율분석 및 태양광 발전설비 설치모듈
- 격자그리드 구조물의 비선형 구조해석과 불안정성 해석기법 개발
▪ 정20면체기반 모듈러 돔 테스트베드 시험설계와 설계도서 개발
- 시험조형물 대상모델의 형상모델링과 설계용 GUI 프로그램 개발
- 모듈러 돔의 구조모델링과 비선형 불안정거동 및 임계좌굴하중 분석
- 절점 및 부재 모듈화와 설계를 위한 평면계획 및 확장모형 개발
▪ 테스트베드 시험조형물의 제작/시공과정 모듈화 및 성능테스트
- 절점 모듈화를 위한 시험조형물 상세설계도면 개발 및 형상시뮬레이션
- 돔형 공간의 에너지성능특성 및 시뮬레이션 기초데이터 작성
- MICD 모델의 제작 및 설치 지침 및 내진성능 테스트</td></tr>
<tr><td rowspan="2">색 인 어
(각 5개 이상)</td><td>한 글</td><td colspan="5">비정형 구조, 솔라패널, 녹색에너지, 최적화, 설계 플랫폼</td></tr>
<tr><td>영 어</td><td colspan="5">Freeform structures, Solar panel, Green energy, Optimization, Design platform</td></tr>
</table>

요 약 문

Ⅰ. 제목

비정형 구조물의 태양광 발전 효율 극대화를 위한 솔라패널 최적배치 프로그램 개발

Ⅱ. 연구개발과제 개요(목적, 필요성, 범위 등을 기술)

국가과학기술발전의 제시된 비전에 의해 다양한 분야에서는 미래지향적 R&D사업과 연구가 진행되고 있다. 특히, 2013년 기준 1인당 약 2.5만 달러의 GDP를 기록하고 있는 지금의 기술발전에 있어서 발전방향과 미래를 향한 비전의 장은 환경/에너지 부문의 건설 분야 발전 전략 핵심은 인간과 자연이 상생하는 인프라 건설이 가장 중요하고, 친환경·자원절약형 건축기술의 개발은 매우 시급하다. 저탄소 녹색성장의 정책아래 친환경 건축기술은 대부분 설비부문과 환경부문의 문제가 주를 이루며, 실질적인 구조물의 설계와 계획은 환경적 설계가 가능한 공간과 환경을 제공하는데 치중하였을 뿐이었다. 그러나 가까운 일본의 경우에도 구체적인 건축구조시스템과의 환경적 측면의 시스템 원형 개발은 쉽게 진행되지 못하였으며, 그 원인은 역학적 바탕을 둔 환경적 접근의 체계적인 제시가 없기 때문이다. 본 과제는 비정형 구조물의 태양에너지 활용 방안으로 삼각형 솔라패널의 효율적인 적용기법과 구조안정설계 통합시스템에 관한 연구로서 “비정형 구조물의 태양광 발전 효율 극대화를 위한 솔라패널 최적배치 프로그램 개발”을 최종목표로 연구개발을 수행하였다.

Ⅲ. 연구개발 수행내용 및 결과(연구수행과정, 연구수행결과 등을 기술)

최종연구목표의 결과물에 대해서 본 과제는 원천기술 아이디어 기술정립과 원천핵심 세부기술을 유닛화하기 위한 목표로서 아래와 같이 두 가지로 나누어 추진하였다.

주요 연구목표 Ⅰ - 비정형 곡면 솔라패널 설계 플랫폼
비정형 곡면의 최적 삼각 그리드 네트워크를 설계할 수 있는 통합 플랫폼을 개발하는 것으로서, 삼각형 솔라패널의 적용이 가능한 설계와 격자 구조물의 안정성을 고려한 비선형 통합 해석을 통하여 효율을 극대화 한다.

주요 연구목표 Ⅱ - 최적배치방안 검토 및 조형물
정형곡면을 기준으로 한 시험조형물의 설계와 제작 및 테스트를 통해서 에너지 효율 극대

화를 위한 방안을 검토하고 시스템을 개발하여 평하는 것을 목표로 하고 있다. 구조물의 최적설계에 대한 기법의 적용성과 테스트를 통한 시공성, 내구성 및 다양한 특성을 조형물을 통해서 검토한다. 또한 표준 모형과 실험을 통한 성능검증 등의 기초자료를 제시함과 더불어 다수의 특허 획득으로 연구 개발의 상용화 기반을 마련한다.

Ⅳ. 최종 연구성과 및 적용실적

주요연구목표를 달성하기 위해서 수행된 연구의 핵심성과물은 비정형 솔라패널 최적배치 설계프로세스, 테스트베드 시험설계 및 시험조형물의 개발 및 분석이다. 설계프로세스 핵심성과물에 대한 연구내용은 최적삼각형 그리드 탐색방법, 메쉬 스무딩 보정알고리즘, 태양광 설치모듈, 격자 그리드 불안정 해석 및 자유곡면 형상설계 프로그램이며, 시험조형물 핵심성과물에 대해서는 정20면체기반 형상모델링, GUI 시스템, 구조모델링, 비선형구조설계, 모듈화 계획/설계 및 설치/시공을 위한 설계지침서 등을 연구하였다.

핵심성과명: 비정형 솔라패널 최적배치 설계프로세스 (설계프로그램)
비정형 곡면 지붕 구조물의 삼각형 격자패턴과 솔라패널 배치를 위한 설계프로그램과 격자형 지붕구조물의 비선형구조해석을 수행할 수 있는 통합 플랫폼의 개발. 삼각형 그리드에 대한 메쉬생성, 최소표준편차의 삼각형 그리드 탐색기법 및 비선형해석 등의 기능을 수행할 수 있는 연구 성과물이다.

핵심성과명: 테스트베드 시험설계 (설계기법)
솔라패널 지붕구조물을 위한 시범조형물의 설계기법으로서, 돔 구조물을 대상으로 최소편차의 삼각형으로 구성된 설계와 안정해석 및 모듈화를 통한 설계도서, 제작도서가 작성되며, 설계를 위한 GUI 시스템이 개발된 연구 성과물이다.

핵심성과명: 테스트베드 시험조형물 (조형물)
솔라패널 지붕구조물을 위한 시범조형물의 제작으로서, 모듈화된 설계도서와 절점의 상세설계도서 및 시뮬레이션 결과와 동적특성을 고찰하기 위한 실험을 통하여 적용성과 효율성을 연구한 성과물이다.

Ⅴ. 연구목표 달성 및 효과

연구목표 달성에 대한 핵심성과물인 비정형 솔라패널 최적배치 설계프로그램과 테스트베드 시험설계 및 시험조형물에 대한 학술적 및 기술적 연구내용 목록은 다음과 같다.

○ 비정형 솔라패널 최적배치 설계프로세스 (설계프로그램)

최적삼각형 그리드의 메타 휴리스틱 탐색방법
삼각형 메쉬 분할을 위한 측지선 탐색기법
자유곡면의 메쉬스무딩을 위한 보정알고리즘
곡면지붕의 친환경 외피구조와 에너지효율분석
건축물의 태양광 발전설비와 설치모듈
격자그리드 구조물의 비선형 구조해석과 불안정성
자유곡면과 삼각형 그리드 형상설계 프로그램

○ 정20면체기반 모듈러 돔 테스트베드 시험설계 (설계기법)
시험조형물 대상모델(MICD 모델)의 형상모델링
초기형상 모델링 및 해석/설계용 GUI 시스템
MICD 모델의 구조모델링과 불안정모드 분석
MICD 모델의 비선형 불안정거동 및 임계좌굴하중
MICD 모델의 모듈화 평면계획과 확장설계모형

○ 테스트베드 시험조형물 (조형물)
절점 모듈화를 위한 시험조형물 상세설계 분석
시험조형물 설계도면 및 형상시뮬레이션 검토
돔형 공간의 에너지성능특성 및 시뮬레이션
MICD 모델의 제작 및 설치 지침
MICD 모델의 내진성능 테스트

Ⅵ. 연구성과 활용계획

비정형 곡면구조물의 형상모듈화를 통한 최적화 설계 : 곡면구조물의 최소표준편차 그리드의 형성으로 인한 모듈화 부재와 절점을 설계할 수 있으므로 향후 곡면구조물의 실시설계에서 생산부재의 최적화된 모듈을 제시할 수 있다. 또한 절점의 모듈을 간소화함으로서 시공성 향상과 비용절감이 가능한 설계가 가능하다.

대체 에너지 활용장치의 개발로 인한 저탄소 구조물 설계활용 : 솔라 에너지 활용이 가능한 곡면구조 설계에 활용할 수 있으며, 최적의 곡면효율을 위한 격자그리드를 제공할 수 있다. 주택과 같은 소규모 공간에도 적용가능하다.

조형물관련 특허출원 및 등록 등의 지적 재산권 확대 : 절점모듈화 관련된 다수의 특허 등으로 지적 재산권이 확대됨으로 인해 기술의 확산이 가능하게 한다.

표준 모델의 제시로 인한 최적화된 비정형 곡면의 구현 : 정형의 곡면구조물에 대한 표준모델의 연구성과는 다양한 평면의 주거와 응용가능한 건축구조물에 확장되어 설계가 가능하며, 다양한 확장을 통해서 활용범위를 확대할 수 있다. 임시 주거물로도 설계가 가능함으로 자연재해로 인한 재난지역의 임시구조물에 활용가능하다.

SUMMARY

Future oriented R&D researches are progressing in the various fields according to the vision for the national science & technology development. Especially, the core strategies for the development of the construction sector in environment/energy department are the coexistence of man and nature, and the development of the eco-friendly, resource-saving construction technology. Under the policy of "low-carbon green growth," eco-friendly construction technology has mostly focused on the matters of equipment and environment, and tried at most to offer the space and the environment for environmental design when designing and planning the real structure. However, in the case of the adjacent nation, Japan, the concrete development of the system archetype which combines construction structure system and environment has not been easily proceeded, and this is because there has been any systemic suggestion of an environmental approach based on dynamics.

This research is on the effective applications of triangular solar-panel as a solar energy application plan of freeform structure and the integrating system with construction stability. This carries out the research and the development to make a program of arranging solar-panels for energy efficacy optimization in the structure; carries out the research on the freeform facade structure high energy consumption rate. The specific research goals and their contents are as follows.

The development of the atypical curve solar-panel construction planform: to develop the integral platform to make it possible to design the atypically-curved optimal triangular grid, and to develop the interpretation program considering stability and the design method applying triangular solar-panel.

Examination of the optimal arrangement way and the manufacture of experimental fabrication: to examine the way to maximize the energy efficiency through the design, manufacturing and the experimental fabrication test based on typical curve, to develop the modularized system and to make mobile structures.

The core accomplishments of the study carried out to achieve its major goals are the optimal arrangement design process of the atypical solar-panel, test bed experimental design, and the development and the analysis of the experimental sculpture. The contents of the research for the major accomplishments of the design process are the exploration

methods of optimal triangle grid, mash smoothing revising algorism, solar-panel constructing module, the unstable interpretation on the grid, and the free-curve visual design program. As for the major outputs of the experimental fabrication researches, visual modeling based on icosahedron, GUI system, structural modeling, non-lineal structure design, planned design of modularization, and the guide to the design for establishment/setting have been proceeded.

As for the utilization of the development research task, the output of optimal arrangement design program can be applied to optimal designing through visual modularization of freeform structures, and to house designing with alternative energy through the design of triangle sola-panel. Intellectual property right such as patent or registration concerning developed experimental fabrication provides the opportunity to utilize the simple modular system.

CONTENTS

[REPORT DOCUMENT] ····· i
[REPORT SUMMARY TABLE] ····· ii
[SUMMARY(Korean)] ····· iii
[SUMMARY(English)] ····· iv
[CONTENTS(English)] ····· v
[CONTENTS(Korean)] ····· vi

Chapter 1. R&D projects outline ····· 1
Paragraph 1. Purpose and need of R&D ····· 1
Paragraph 2. Domestic and international technology development condition of related area ····· 5
Paragraph 3. Position a result of research in the related fields ····· 8

Chapter 2. R&D performance contents and result ····· 11
Paragraph 1. Research performance strategy and methodology ····· 11
Paragraph 2. Research performance process and contents ····· 17
Paragraph 3. Research performance result and verification ····· 254

Chapter 3. Final research result and application result ····· 258
Paragraph 1. Optimal arrangement design process of the freeform solar-panel structures ····· 258
Paragraph 2. Test-bed: Design test(Design technique) ····· 259
Paragraph 3. Test-bed: Modeling test(Fabrication) ····· 260
Paragraph 4. Detailed description for each key performance ····· 261

Chapter 4. R&D goal achievement and effect ····· 267
Paragraph 1. R&D final goal achievement ····· 267

Paragraph 2. Descriptive effect analysis on R&D result ····· 270
Paragraph 3. Economic effect analysis on R&D result ····· 271
Paragraph 4. Political effect analysis on R&D result ····· 271

Chapter 5. Utilization of R&D result and
need for additional research ····· 273
Paragraph 1. Research and future application plan ····· 273
Paragraph 2. Need for additional research ····· 275

[REFERENCE] ····· 276
[APPENDIX] ····· 281

목 차

[제 출 문] ····· i
[보고서 요약서] ····· ii
[요 약 문] ····· iii
[SUMMARY] ····· iv
[CONTENTS] ····· v
[목 차] ····· vi

1장. 연구개발과제 개요 ····· 1
1절. 연구개발의 목적 및 필요성 ····· 1
1. 연구개발의 목적 ····· 1
2. 연구개발의 필요성 ····· 2
2절. 관련분야의 국내외 기술개발 현황 ····· 5
1. 국내기술 및 산업동향 ····· 5
2. 국외기술 및 산업동향 ····· 5
3. 정부지원정책 현황 ····· 6
3절. 연구개발결과의 관련분야 위치 ····· 8
1. 연구개발과제의 시기성 ····· 8
2. 연구개발과제의 차별성 ····· 9
3. 타 산업 및 연계협력 가능성 ····· 10

2장. 연구개발 수행 내용 및 결과 ····· 11
1절. 연구수행 전략 및 방법론 ····· 11
1 연구개발 최종목표 ····· 11
2 연구개발 추진전략 ····· 14
3 핵심연구개발 성과 ····· 16
2절. 연구수행과정 및 내용 ····· 17
1 최적삼각형 그리드의 메타 휴리스틱 탐색방법 ····· 18
2 삼각형 메쉬 분할을 위한 측지선 탐색기법 ····· 46
3 자유곡면의 메쉬스무딩을 위한 보정알고리즘 ····· 51
4 곡면지붕의 친환경 외피구조와 실내기후조절 시스템 ····· 58
5 건축물의 태양광 발전과 곡면지붕 태양 에너지 분석모델 ····· 71

6 격자그리드 구조물의 비선형 구조해석과 불안정성 ····· 101
7 솔라패널 삼각격자곡면 형상설계 프로그램 ····· 123
8 시험조형물 대상모델(MICD 모델)의 형상모델링 ····· 149
9 초기형상 모델링 및 해석/설계용 GUI 시스템 ····· 158
10 MICD 모델의 구조모델링과 불안정모드 분석 ····· 165
11 MICD 모델의 비선형 불안정거동 및 임계좌굴하중 ····· 173
12 MICD 모델의 모듈화 평면계획과 확장설계모형 ····· 186
13 절점 모듈화를 위한 시험조형물 상세설계 분석 ····· 197
14 시험조형물 설계도면 및 형상시뮬레이션 검토 ····· 203
15 돔형 공간의 에너지성능특성 및 시뮬레이션 ····· 215
16 MICD 모델의 제작 및 설치 지침 ····· 240
17 MICD 모델의 내진성능 테스트 ····· 249
3절. 연구수행결과 및 결과검증 ····· 254
1. 연구수행 내용 및 결과 ····· 254
2. 목표성과 및 성과검증방법 ····· 255

3장. 최종 연구성과 및 적용실적 ····· 258
1절. 비정형 솔라패널 최적배치 설계프로세스 ····· 258
2절. 테스트베드 시험설계(설계기법) ····· 259
3절. 테스트베드 시험조형물(조형물) ····· 260
4절. 핵심성과의 연구성과물 목록 ····· 261

4장. 연구목표 달성 및 효과 ····· 267
1절. 연구개발 최종목표 달성도 ····· 267
2절. 연구개발성과의 기술적 효과분석 ····· 270
3절. 연구개발성과의 경제적 효과분석 ····· 271
4절. 연구개발성과의 정책적 효과분석 ····· 271

5장. 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성 ····· 273
1절. 연구성과 향후 활용방안 ····· 273
2절. 추가연구 필요성 ····· 275

[참고문헌] ····· 276
[부 록] ····· 281

제1장 연구개발과제 개요

1절. 연구개발의 목적 및 필요성기술의 정의 및 필요성

1. 연구개발의 목적

국가과학기술발전의 제시된 비전에 의해 다양한 분야에서는 미래지향적 고부가가치 R&D 사업이 진행되고 있다. 특히, 2013년 기준 1인당 약 2.5만 달러의 GDP를 기록하고 있는 지금, 기술발전에 있어서 발전방향과 미래를 향한 비전의 성장이 축척되어 확장될 시기이다. 이와 같은 비전의 환경/에너지 부문과 건설 산업 분야의 발전 전략 핵심은 인간과 자연이 상생하는 인프라 건설이 가장 중요하고, 친환경·자원절약형 건축기술의 개발이 매우 시급한 실정이다. 건설 산업 분야의 친환경·자원절약형 건축기술은 저탄소 녹색성장의 정책아래에서 대부분 설비부문과 환경부문의 문제로 다루어 졌으며, 실질적인 구조물의 설계와 계획은 환경적 설계가 가능한 공간과 환경을 제공하는데 치중하였을 뿐이었다. 그러나 가까운 일본의 경우에도 구체적인 건축구조시스템과의 환경적 측면의 시스템 원형 개발은 쉽게 진행되지 못하였으며, 그 원인은 역학적 바탕을 둔 환경적 접근의 체계적인 제시가 없기 때문이다.

이와 더불어 그린에너지 정책의 대체 에너지 기술 해결문제와 더불어 건축 공학 및 기술적 접근을 포함한 IT융합 기술의 접목은 많은 분야에서 미래지향적인 예측가능 시스템을 구축하는 프로세스를 의미한다. 태양열 에너지에 대한 연구와의 파생되는 연구 부산물들의 융복합을 통해 새로운 기술 분야를 창출할 수 있으며, 또한 핵심 기술 중점적 사업을 주도해 나가기 위한 정부의 정책적 받침과 더불어 태양열 에너지 관련연구와 IT 기반 비정형구조물의 복합된 구조안정성 확보는 이제까지의 다른 연구에서는 볼 수 없는 시의성 있는 연구주제라 할 수 있다. 국내의 그린에너지 정책에 부합하여 에너지 소모가 심한 비정형 파사드 구조물의 에너지 효율 대책과 안정성 문제에 관한 연구는 이러한 의미에서 매우 중요한 연구과제 중 하나로 인식되고 있다. 또한, 건설 정보 DB의 활용은 침체일로의 건설시장에 새로운 시장을 구축할 것이다. 비정형 구조물의 태양열 에너지의 활용도에 대한 형태적 관점과 구조물의 역학적 관점을 모두 고려한 설계 기술과 IT기술 융합관련 연구·개발은 현재의 문제점들을 매우 합리적으로 해결할 수 있는 방안중의 하나가 된다.

본 과제에서는 비정형 구조물의 재상에너지 활용 방안으로 비정형 구조체 솔라패널을 최적으로 적용할 수 있는 기법과 설계 시스템 구축에 관한 연구로서 “비정형 구조물의 태양광 발전 효율 극대화를 위한 솔라패널 최적배치 프로그램 개발”을 최종목표로 연구개발을 수행하였으며, 에너지 소모가 매우 높은 비정형 파사드 구조물에 대해 중점적으로 연구를 수행한다. 비정형 곡면과 곡면을 형성하는 삼각형 솔라패치 구조모델링 연구에 대한 목표는 곡면구조물의 효율을 극대화하기 위한 최적배치와 격자모듈을 위한 프로그램을 개발하는 것이다. 파라메트릭 디자인의 설계개념을 이용한 곡면의 메쉬 및 삼각패치 분할과 솔라 에너지의 활용을 위한 본 과제는 곡면 외피 구조의 매우 유용한 설계 프로세스를 구축할 수 있으며, 안정성 및 에너지 효율을 모두 만족하도록 설계메커니즘이 구현된다.

2. 연구개발의 필요성

○ 비정형 구조시스템의 관점에서:

친환경·자원절약형 건축기술은 녹색에너지를 이용하는 기술과 접목된 구조시스템의 중요성을 그다지 고려하지 않는다. 그러나 비정형 구조물 대상의 솔라패널은 주로 외장재의 면적을 통해 필요전력과 에너지를 얻을 수 있으며, 형태적 관점의 시스템 개발과 구조안정성의 관계는 매우 중요해 진다. 최근 구조물의 형태에 대한 다양한 연구와 비정형 구조물을 실현하려는 범세계적 건축설계기술의 동향은 매우 흥미로운 결과를 얻고 있으며, 본 과제는 프리-폼 구조물의 형성과 에너지 절약의 문제를 동시에 접근해 볼 수 있는 중요한 요소를 가지고 있다.



그림 1.1.2.1 비정형 구조물과 그리드 표면

○ 비정형 유리구조물의 에너지 효율의 관점에서:

기능적인 측면에서 볼 때 비정형 유리 구조물은 검증 되어야 할 요소가 많이 남아 있다. 그중 유리 외장재를 통한 열투과율의 관리는 전체 건물의 에너지 효율을 극대화하는데 필수적인 요소이다. 현재 사용되고 있는 유리재료는 짧은 주기를 갖는 태양광선을 복층유리 혹은 복층접합유리 사이의 필름을 통해 태양광선을 반사하거나 긴 주기를 갖는 복사열로 치환되지 않게 설계하고 있다. 그럼에도 불구하고 복사열의 내부 유입으로 엄청난 양의 냉방비용이 필요하게 되며, 수명 또한 제한적이다. 이러한 현상은 지붕재가 수직인 파사드 구조물에서 더욱 두드러지게 나타나며, 대응책이 절실히 필요함. 따라서 재생에너지 비정형 유리 구조물의 연구 개발은 비정형 구조물의 설계와 시공에 대한 세계시장에서 국가 건설기술의 경쟁력을 확보할 수 있다.

○ 학문 및 기술적 측면에서 바라보는 비정형 곡면 형성:

비정형 구조물의 곡면을 위한 메쉬 생성 기술은 초창기 CAGD의 개념에서 출발해 지금은 다양한 방법들과 해석의 질을 높이고 있으며, 등기하 해석법으로의 발달로 역학적 문제에 많

이 접근하였다. 그러나 곡면과 곡면상의 그리드의 문제는 매우 까다로운 형태를 제공하며, 면과 선의 문제에 대한 치환조건에 대한 연구 개발은 공학적 문제와 수학적 문제를 동시에 접근해야 하는 부분이다. 이것은 다각형의 기준에 대한 정의와 이들의 실현은 수학적 차원에서의 문제에서 공학적 차원의 문제를 해결하는 실질적인 기술은 학제간 융합의 기술로서의 중요성도 함께 가지게 될 것임.

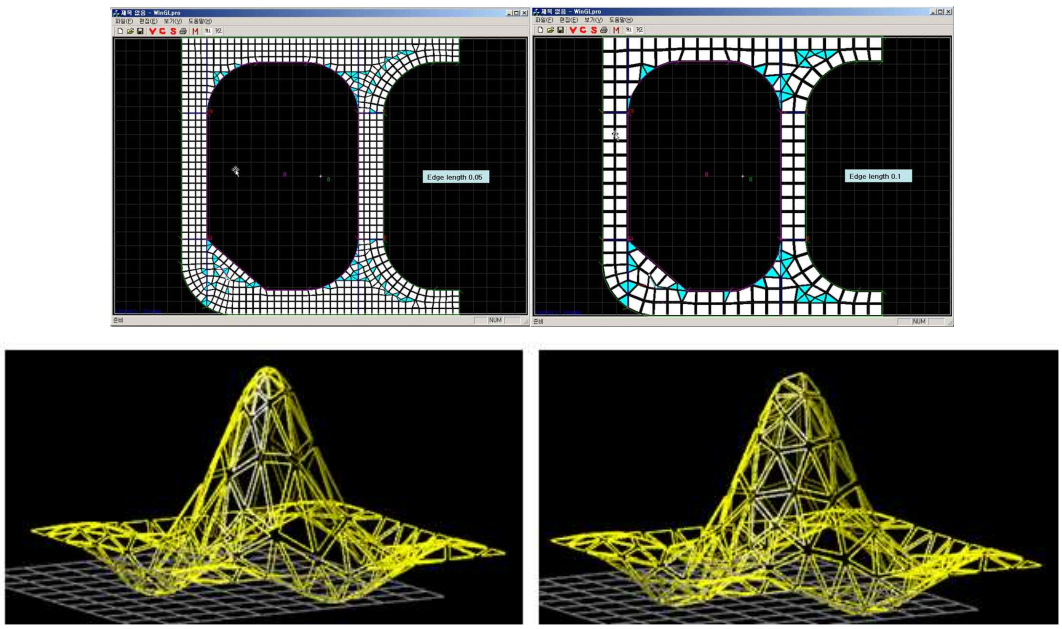


그림 1.1.2.2 메쉬 생성과 공학적 결과물

○ 통합 설계에 대한 미래 지향적 패러다임에 부합하여:

미래의 IT 융합 건축설계기술은 정보의 가치를 높이기 위한 요소에 부여되는 4차원 데이터의 가치는 생각 이상으로 많은 장점과 적용을 가능케 한다. 그러나 건축의 경우 단일제품 가격이 다른 산업에 비해 매우 높고 하나의 표준설계에 대한 생산품이 한 건물에 국한되는 특성으로 도입되기 매우 힘들다. 그러나 비정형 건축물을 선호하는 까닭은 디자인적 가치가 다른 분야들에서 보다 상대적으로 매우 크기 때문에, 이들의 메쉬에 대한 연구와 더불어 표준 모델의 정의를 통한 설계 통합화와 비정형 구조물의 플랫폼형 시스템 개발은 현재의 설계 패러다임에 매우 부합된다.

○ 그린에너지 정책과 부합되어:

지붕구조의 재활용이라 볼 수 있는 비정형 구조물 솔라패널은 에너지 절약형 저탄소 그린정책에 매우 부합되는 과제로 시기성이 높다. 과거 아치나 쉘 형상은 역학적으로 우수한 형상으로 규명되었으며, 편평한 부재에서 발생되는 역학적 문제의 곡률을 이용한 해결은 구조형상의 변화만을 시도하는 구조적 아이디어이므로 부피의 변화보다 형상의 변화가 더 커지게 마련이고, 이로 인해 솔라 에너지의 활용은 자연스럽게 높아지게 될 것이다. 이와 같은 특질의 문제를 보다 더 그린에너지의 효율을 최대화 할 수 없을까 하는 것이 본과제의 특징이며, 매우 중요한 문제이다.

○ 경제·산업적 측면:

구조물들의 벽이나 기둥 구조체의 기능적 개선은 경제적 산업적 측면에서 볼 때 새로운 장이 열릴 수 있다. 최근 정부에서는 구조체 재활용 측면에서 사회적·경제적 비용 낭비의 심각성을 인식하고 그린에너지 장려책을 적극 모색하고 있다. 또한 신축건물 설계 시 에너지 절약형 구조에 대비하여 설계하도록 하는 문제도 연구하고 있다. 이것은 산업 전반에 걸쳐 시급히 요구되고 있으며, 태양에너지의 활용으로 인한 대체 에너지 효과는 곧 이산화탄소 배출량의 감소로 이어지는 녹색성장을 이루고자 하는 직접적인 결과를 얻을 것이다.

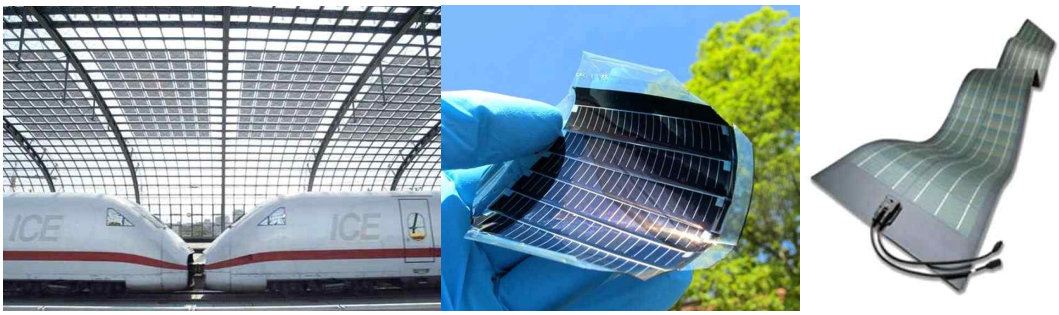


그림 1.1.2.3 다양한 태양열 집열판

○ 사회·문화적 측면:

세계는 지금 환경위기와 자원위기에 동시에 직면해 있으며, 인류의 생존을 위협받고 있다. 지금과 같이 에너지 다소비 체제가 지속될 경우 세계가 치러야 할 경제적 손실은 막대할 것이며, 가격상승 가속화는 계속될 것이다. 선진국들은 이미 자원의 효율적·환경 친화적 이용에 국력을 집중하고 있으며, 녹색성장은 이제 개개의 국가적 문제를 넘어선 범세계적 인류의 이슈를 함께 지닌 사회·문화적 측면에서의 공감대를 형성하고 있다. 이와 같은 패러다임에 입각한 저탄소 녹색성장은 재료적 측면보다 아이디어 측면의 기술 융합이 보다 경제적이다. 따라서 태양열 에너지의 건축산업에의 활용은 융복합 기술에 대한 문화적 이해도를 높일 수 있을 것이며, 지금의 과제는 현 시점의 녹색성장의 패러다임에 부합된 시의성을 가지게 됨은 분명하다.

2절. 관련분야의 국내외 기술개발 현황

1. 국내기술 및 산업동향

국내 연구 인프라의 경우 건축구조물과 비정형 구조물과 에너지 관련 연구자의 학계 연구진은 그리 많지 않으며, 형상에 관한 연구는 대공간 구조물관련 연구자들을 제외하고는 희소성이 높다. 특히, 안정 문제나 태양열 에너지의 적용에 관한 연구 또는 구조물의 동적 안정성 특성과 설계를 고려한 연구 및 이들 모두를 다룰 수 있는 연구 인프라는 국내에서는 미비한 실정임.

건물 통합형 친환경 또는 BIPV(건물통합형 태양광발전) 시스템에 관한 연구가 많이 진행되었지만, 주로 태양광 발전시스템에 관한 솔라패널의 효율을 높이기 위한 부품의 개발 및 태양광 발전장치 기술이 주를 이룬다.

국내에서는 친환경에너지 정책 등의 기술과 산업동향에서 신재생에너지 기술의 건축응용 및 보급을 위해 태양광 10만호 보급사업, 태양열 난방지원사업, 그린빌리지사업, 지역에너지사업 등 각종 제도적 행정적지원 사업을 벌여왔다. 또한 건축 시장에 가장 큰 영향을 미친 공공기관 신재생 의무화제도는 2004년 3월부터 시행되었으며, 연면적 3,000 ㎡ 이상의 신축 공공 건축물에 대해 건축 공사비의 5% 이상을 신재생에너지설비에 설치토록 의무화하였다.

2. 국외기술 및 산업동향

국내와 유사하게 국외의 연구도 모두 각각의 경우에 대한 주제를 다루고 있으나 세가치 측면 모두를 고려한 연구자들은 찾아 볼 수 없으며, 그 이유는 역학적 및 형태학적 설계 기술력과 에너지 관련 연구의 접목은 매우 까다로운 메커니즘이 형성되므로 아이디어성 과제에 대한 연구 인프라의 적절한 구성 없이는 연구개발이 곤란하기 때문이다.

여러 가지 측면에서 건물의 의장적 요소에 큰 비중을 둘 수밖에 없는 상황을 고려할 때 신재생에너지 시스템의 건물적용 보급을 저하시키는 근본적 요인으로 외형적 요건을 들 수 있으며, 아무리 좋은 성능을 가진 시스템이라 할지라도 건물과의 조화가 우선시 되지 않으면 건축 시장에 수용되기 힘든 경우가 많아지게 되었다. 이러한 이유로 시스템의 통합에 대한 의장적 효과를 높일 수 있는 방법이 많이 연구되고 있다.

건물외피를 이용한 발전시스템의 적용은 세계적으로도 많은 관심을 보이고 있다. 윤종호(2014)에 따르면 최근 전문 시장예측기관으로부터 활발하게 발간되기 시작한 BIPV 시장예측 전망 보고서를 통해서도 입증되고 있는 BIPV 시장의 향후 잠재 규모는 2017년에 전체 태양광시장의 9.0%까지 성장할 것으로 예측한다. 현재 세계 PV시장의 규모가 2012년 기준 32 G에서 2017년 64 G로 성장할 것으로 예측하고 있으며, 이에 따라 BIPV 시장의 규모는 2012년 기준 0.4 G 규모에서 2017년 5.8 G로 매우 큰 시장 확대가 일어날 것으로 보고 있다.

자유형상 건축 구조물의 설계에 대한 파라메트릭 디자인이나 설계기법 및 다양한 IFC(Industry Foundation Class)기반의 형상가시화에 대한 인터페이스 개발이나 특허에 대한 동향을 살펴볼 수 있고, 재생에너지의 건축물 적용을 위한 분야의 연구 개발도 있다.

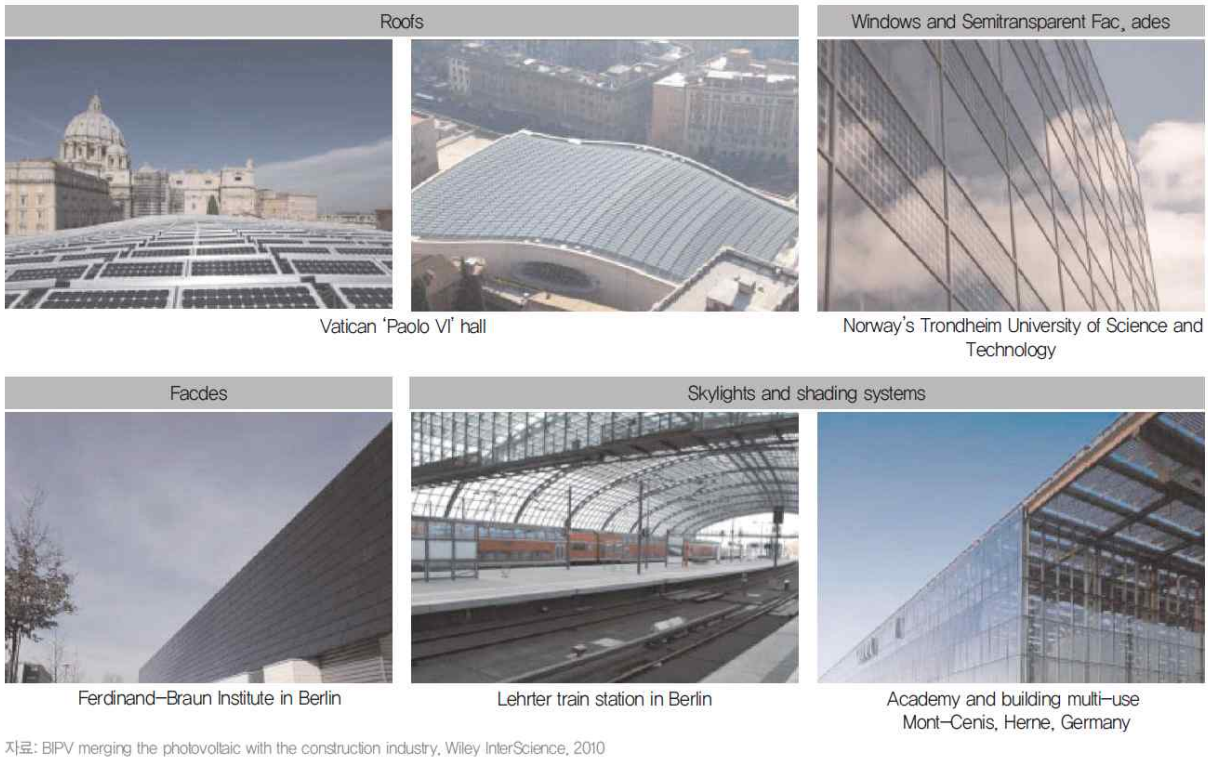


그림 1.2.2.1 BIPV 적용 사례

3. 정부지원정책 현황

가. 관련정책 법규 및 지원제도

건설기술/건축문화선진화위원회는 품격 높은 생활공간에 대한 국민의 기대에 부응하여야 하는 혁신과제의 수행에 있어서 기존의 새로운 건축물로서의 품격상승보다 국가 경제적 차원에서의 리모델링의 관점에서 볼 때 본 과제는 환경 문화적 관점에서 부합됨

정부의 국가기술지도(National Technology Road Map)의 환경/에너지 프론티어 진흥 부문 로드 맵뿐 아니라 녹색에너지, 대체에너지의 활용은 정책적 측면에서 볼 때 정부 정책 사업에 부합됨.

환경친화적 요인에 대해서 정부의 공공기관이 신축하는 연면적 3천제곱미터 이상의 건축물에 대해 건축공사비의 5%이상을 신,재생에너지설비에 설치토록 의무화하고 있다.(아래그림 참조)

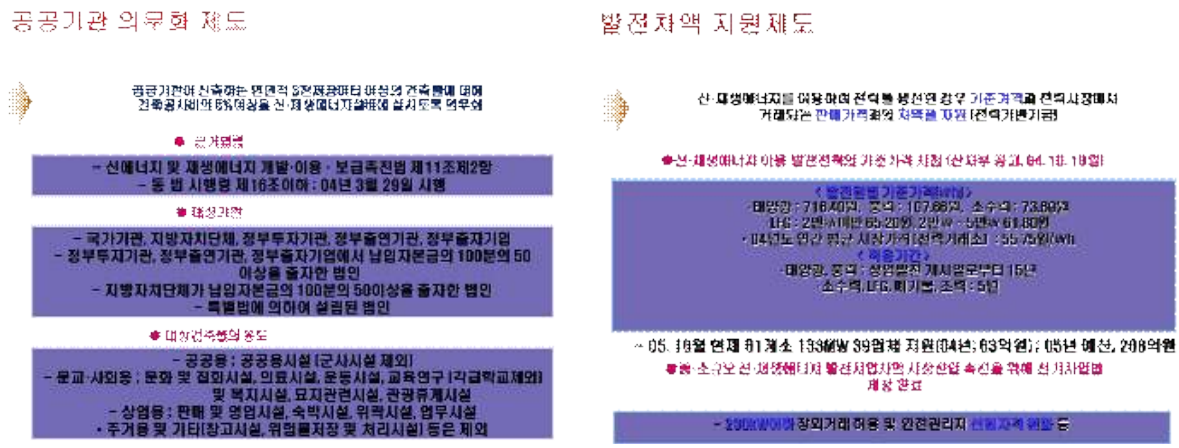


그림 1.2.3.1 관련제도 및 법령

나. 정부지원 정책사업 종류와 현황

많은 정부지원 정책사업이 현재 저탄소 녹색성장의 물결에 합류하여 인류의 미래에 대한 환경과 조화를 꿈꾸며, 이에 대한 정책과 연구 과제들은 친환경·재료절감형 건축산업에 관련한 연구로드맵에 따라 진행됨

국토해양부의 건설기술혁신사업들 중 하나는 친환경과 더불어 경제성이 강조되는 구조물의 장수명화에 관한 연구들과 성능개선 및 내진성능의 향상에 대한 주제가 복합되어 나타나며, 이와 유사한 여러 연구과제가 제안 및 진행되고 있다.

지구 온난화에 대한 정부의 궁극적 해결책에 대한 일반적인 방침은 국내 환경조건 및 사회적 이슈가 동시에 만족되는 연구의 주제들 가운데서 우선적으로 다루어졌으며, 환경 및 녹색정책 등에 중점적인 가치를 두고 문제들을 형성한다. 또한, 친환경재료의 권장 사용 및 요소기술개발은 녹색정책의 저탄소국가로 가기위한 일차적인 영향이 고려되는 방안이다.

친환경재료의 권장 사용 및 요소기술개발로 인한 기술력 향상은 경제적 산물의 연구결과물들과 부합되어 재료절감형 연구가 도출되며, 이것은 녹색정책의 저탄소국가로 가기 위한 일차적인 영향이 고려되는 방안임

3절. 연구개발결과의 관련분야 위치

1. 연구개발과제의 시기성

정부지원 정책 사업이 현재 저탄소 녹색성장의 물결에 합류하여 인류의 미래에 대한 환경과 조화를 꿈꾸고 있으며, 이에 대한 정책에 부합한 연구과제인 그린 에너지 활용도를 극대화 한 비정형 구조물 구조안정 설계 방안과, IT기술과 융합된 설계 플랫폼 개발관련 연구는 국내외 관련 상황과 미루어 매우 시기적절한 연구이다. 또한 비정형 파사드 구조물의 낮은 에너지 효율에 대한 대책이 필요하며, 복사열로 인한 냉방부하의 솔라패널 대처 방안은 아이디어 측면에서 매우 높고, 이를 적용하기 위해서는 형태적 역학적 고려를 모두 하여야만 국가 기술경쟁력 향상과 저탄소 그린성장의 목적에 부합한 결과를 얻을 수 있을 것이다.



그림 1.3.1.1 돔형 솔라패널적용 구조물의 설치형상 개념도

제안연구과제의 원천기술 아이디어는 설계 및 시공을 위한 유닛제품과 정형일 경우 적용방법 및 관련법규와 최적 표준 모델의 개발이 필요하고, 국내 최초로 비정형 솔라패널의 최적패치의 특화된 연구 분야를 구축할 수 있다.

요소기술의 세분화로 관련 산업에 대한 시장성 확보와 독자적 아이디어를 통한 기술개발이 필요하며, 제안된 연구주제의 사회적 필요성 분석결과는 다음과 같다.

- 아치 및 구형쉘 해석관련 연구인프라 보유
- 비정형 구조물에 대한 건축기술자의 수요 증가

- 그린에너지관련 친환경 구조시스템의 니즈 증가
- 비정형 구조시스템에 대한 연구인력 수급 어려움
- 비정형 유리 구조물의 설계/시공에 관한 기술 부족
- 신기술, 신공법 개발에 대한 건설업계의 전통적 보수성
- 친환경, 녹색성장관련 연구과제의 지속적인 투자계획
- 비정형 구조물에 대한 건축기술자의 수요 증가
- 원천기술 확보에 대한 아이디어 중심과제의 중요성 인식
- 학제간 공동연구의 부족으로 전문분야의 협업체제
- 비정형 유리건축물에 대한 신소재 개발 및 경쟁력 부족
- 유럽, 일본, 미국 등 주요 선진국들의 빠른 핵심기술개발

2. 연구개발과제의 차별성

- 비정형 구조물을 이용한 솔라패치 최적패널 시스템 개발의 연구과제와 유사한 연구는 없으나, 각각의 명제에 대한 연구는 다양한 범위에서 제공되고 있다.

- NTIS의 웹상에서 검색어 “비정형 건물 통합형 솔라패널”의 입력에서 나타난 과제는 한건도 없었으며,“건물 통합형 태양광 발전 시스템”의 검색어에서 2건의 과제가 나타났으며, BIPV 태양광 시스템의 개발에 관한 최적시스템기법 및 성능평가모델에 관한 연구에 대한 과제이었다.

- 검색어“비정형 건축구조″에 대해서도 유한요소해석과의 연계를 위한 과제나 시공성을 고려한 BIM 설계 최적화 및 외피시스템의 구축을 위한 시공모델에 대한 과제였다.

- 또한,“비정형 건축물”검색의 경우 14건의 다양한 과제가 검색되었다. 이중 많은 부분이 파라메트릭 디자인에 관련 연구와 모델링 및 BIM데이터의 변환시스템의 연구였으며, 에너지 절감에 관련된 연구는 구조 부재의 제작 및 설치에 대한 재료적 절감이었으며, 곡면 형태 에너지 효율의 직접적인 영향에 대한 분석과 연구개발과제는 찾을 수 없었다.

- 지금까지의 비정형 구조물의 연구는 파라메트릭 디자인과 BIM에 대한 연구가 주를 이루었으며, 형태적 및 구조안정 측면이 고려된 에너지 절감형 비정형 곡면 연구로 차별화 하며, 이를 실현하기 위해 효율적 솔라패널 최적패치모듈의 제안과 파라메트릭 설계방법의 연계를 연구하도록 하며, 재생에너지에 대한 설계 플랫폼을 구축하여 실용화하도록 한다.

3. 타 산업 및 연계협력 가능성

- 비정형 곡면구조물은 기존 구조물과는 달리 매우 복잡한 기하학적 형상에 대한 고난이도 설계 및 관리시스템을 필요로 하므로 IT융합의 기술 및 연구개발 결과물들이 급속히 발전하고 있다. 따라서 비정형 구조물의 태양에너지를 이용한 환경 친화적 연구와 기술개발의 시도는 다른 신재생 에너지의 활용에 도전적인 기술로서 다양한 산업분야에 보완적이며 도전적인 기술개발 및 시장 확대에 기여할 수 있을 것임.

- 기존의 일반적인 지붕시스템 구성방법의 기본적인 성능을 학보하면서도 보다 진보적이고 발전적으로 기술을 발전시킨 차원 높은 아이디어로서 곡면 지붕구조의 다양한 기술적 문제점들을 해결하기 위한 방안들과 연계하여 발전적인 연구를 도모할 수 있음.

- 연구결과를 기본으로 하여 환경 친화적 형태생성에 관한 연구로의 진행을 예상할 수 있으며, 종래의 구조물은 고정된 구조물이었으나, 전개 가능한 구조물과 같은 형상변화 및 역학특성 변화 등을 포함하는 가변성 구조물로의 발전을 생각할 필요가 있다. 이와 같이 가변성 구조에 대한 여러 가지 응용성을 고려해 볼 때, 지적적응구조물로서, 이를 위한 전기, 통신, 기계, 항공, 우주 분야와의 연계 협력이 가능 함.

제2장 연구개발 수행내용 및 결과

1절. 연구수행 전략 및 방법론

1. 연구개발 최종목표

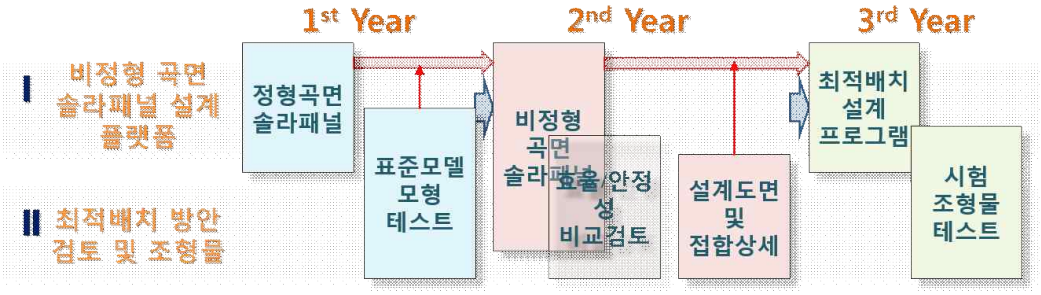
본 과제는 비정형 구조물의 재상에너지 활용 방안으로 비정형 곡면 구조물에 솔라패널을 적용하기 위한 기법과 플랫폼형 설계 시스템에 관한 연구로서 “비정형 구조물의 태양광 발전 효율 극대화를 위한 솔라패널 최적배치 프로그램 개발”을 최종목표로 연구개발을 수행하며, 에너지 소모가 매우 높은 비정형 파사드 구조물뿐 아니라 지오데직 돔에 적용하여 정형화된 시스템의 개발에 대해서 중점적으로 연구를 수행한다.



비정형 곡면과 곡면을 형성하는 삼각형 솔라패치 구조모델링 연구에 대한 목표는 정형 곡면구조를 대상으로 연구를 수행하고, 비정형 파사드 구조물로 곡면의 차수를 확장해서 연구수행한다. 또한 이들의 시스템의 구축과 축소모형 및 이에 대한 상용화를 위해 적용방법에 대해 문제점을 고찰하도록 하며, 다음 그림과 같은 추진체계로 최종목표에 도달한다.

가. 주요연구목표

최종연구목표의 결과물에 대해서 본 과제는 원천기술 아이디어 기술정립과 원천핵심 세부기술을 유닛화하기 위한 목표로서 아래와 같이 두 가지로 나누어 추진한다.



- 주요 연구목표 Ⅰ - 비정형 곡면 솔라패널 설계 플랫폼

비정형 곡면의 최적 삼각 그리드 네트워크를 설계할 수 있는 통합 플랫폼을 개발하는 것으로서, 삼각형 솔라패널의 적용이 가능한 설계와 격자 구조물의 안정성을 고려한 비선형 통합 해석을 통하여 효율을 극대화 한다.

- 주요 연구목표 Ⅱ - 최적배치방안 검토 및 조형물

정형곡면을 기준으로 한 시험조형물의 설계와 제작 및 테스트를 통해서 에너지 효율 극대화를 위한 방안을 검토하고 시스템을 개발하여 평하는 것을 목표로 하고 있다. 구조물의 최적설계에 대한 기법의 적용성과 테스트를 통한 시공성, 내구성 및 다양한 특성을 조형물을 통해서 검토한다. 또한 표준 모형과 실험을 통한 성능검증 등의 기초자료를 제시함과 더불어 다수의 특허 획득으로 연구 개발의 상용화 기반을 마련한다.

주요 연구목표를 달성하기 위해서 3단계로 나누어 연구가 진행된다. 기본모듈의 연구와 성능테스트를 통한 원천핵심기술의 획득 및 파생기술의 생성을 위한 설계법과 고안장치 등을 개발하는 순서로 연구를 진행한다.

나. 최종목표의 성격과 설정근거

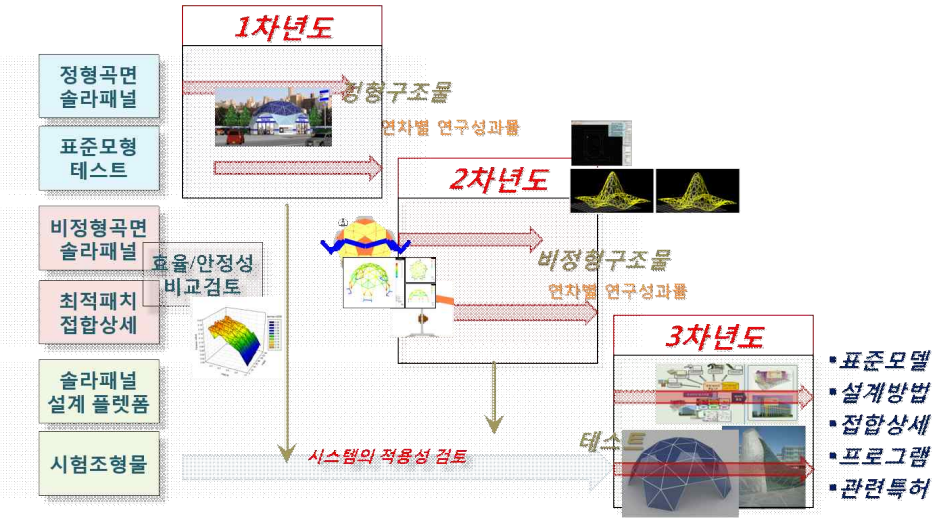
최종연구목표의 성격은 솔라패널을 이용한 비정형 곡면구조물의 최적패치모듈의 설계 및 개발로 보다 진보된 개념의 비정형 구조물 설계가 가능하며, 국내 비정형 구조물의 기술을 차별화 할 수 있다. 또한 솔라패널의 효율 및 구조의 가시화된 통합 DB를 구축함으로서 기술의 업그레이드가 가능하며, 특화된 기술을 보유할 수 있다.

비정형 곡면(특히 에너지 손실이 심한 파사드 곡면구조물)를 형성하기 위한 설계는 안정성이 고려된 구조체 형성과, 에너지 효율을 높이기 위한 형태생성의 기술 개발이 매우 절실하다. 따라서 에너지 문제해결을 위한 솔라패널의 적용에 있어서 실용화를 위해 상세접합부 개발 목표를 설정하였다.

파라메트릭 디자인의 설계개념을 이용한 곡면의 메쉬 및 삼각패치 분할은 매우 유용한 설

계 프로세스를 구축할 수 있으며, 안정성 및 에너지 효율을 모두 만족하도록 설계메커니즘이 구현되어야 한다. 따라서 본 과제의 기술개발은 차별화된 태양열 에너지 활용 자유 곡면 설계 시스템의 실용적 기술을 구축하게 되는 목표를 설정하였다.

다. 연차별 세부추진계획 및 방법



각 년차별 연구수행에 대한 목표와 방법은 다음과 같다.

○ 1년차 연구목표: 정형 및 비정형 곡면구조의 솔라패널 삼각패치
1) 정형 곡면의 형성방법과 기본 모델링 데이터 구조 정립
2) 정형 곡면에 따른 에너지 효율성 검토
3) 단위 솔라패널 구성요소의 설계기본도면 및 단위모형 제작

○ 2년차 연구목표: 비정형 곡면구조에 관한 연구 개발
1) 비정형 곡면의 최대 에너지 효율 메쉬 검토
2) 비정형 곡면에 따른 에너지 효율성 검토 및 안정성 검토
3) 솔라패널 삼각패치의 상세접합 및 단위 모듈개발
4) 최적 삼각패치 곡면형성 프로그램 작성

○ 3년차 연구목표: 플랫폼형 구조 안정 설계 시스템 구축
1) 곡면구조 형상정보 및 3D가시화 프로그램 개발
2) 효율성 및 안정성 검토를 위한 인터페이스 개발
3) 곡면형상 및 솔라패널 통합 DB 구축 및 설계 플랫폼 개발
4) 시험조형물 제적, 설치 및 결과분석

2. 연구개발 추진전략

가. 연구개발 추진체계

구 분	주관(위탁)연구기관	협동(위탁)연구기관	참여기업
1차년도	한국기술교육대학교	(주)레나소프트웨어	
2차년도	한국기술교육대학교	(주)레나소프트웨어	
3차년도	한국기술교육대학교	(주)레나소프트웨어	

나. 연구개발 추진계획 및 방법

(1) 연차별 연구내용 및 추진계획

연차	연구내용	세부추진 계획 및 방법	수행 기간	해당 기관
1차년도	▪정형 곡면의 솔라패널 모델링 및 검토	▪정형곡면의 구조모델링을 위한 기초데이터 작성 프로그램 개발 ▪돔 및 아치형태의 그리드 형성에 따른 에너지 효율 검토	10개월	(주)레나소프트웨어
	▪정형 곡면 표준모델 개발 및 검토	▪유닛 결합에 따른 정형 구조물의 축소모형 제작 ▪기초 모델링과 축소모형과의 제작과정의 문제점 및 차이점 검토	10개월	한국기술교육대학교
2차년도	▪비정형 곡면 솔라패널 모델링 및 검토	▪솔라패널 효율성을 고려한 최적곡면 탐색기법 정립 및 프로그래밍 ▪자유곡면에 따른 메쉬생성과 그리드 패턴 형성방법 정립 ▪패널의 최적 에너지 효율 배치 방안 작성 및 안정성 검토	12개월	(주)레나소프트웨어
	▪테스트베드 구조물 설계	▪테스트베드 구조물의 곡면설계 및 분석 ▪솔라패널 최적배치 및 시뮬레이션	12개월	한국기술교육대학교

		▪테스트베드 설계도면의 검토 및 보완		
3차년도	▪비정형 구조 솔라패널 설계플랫폼 개발	▪솔라패널 비정형 구조물의 3D 모델링 및 형상정보 프로그래밍 ▪비정형 그리드 구조물의 에너지 효율성 평가 및 안정해석 인터페이스 프로그래밍 ▪개발 프로그램의 설계검증 및 분석	12개월	(주)레나소프트웨어
	▪테스트베드 구조물 시공	▪테스트베드 구조물의 부재제작 ▪곡면 형성에 대한 완성도 검증 ▪에너지 효율 및 시공에 따른 문제점 검토 ▪테스트베드 조형물 에너지효율 및 경제성 검증	12개월	한국기술교육대학교

나. 연구추진 역량

주관연구기관의 주요연구 및 사업화 실적

구 분	연 구 내 용	지 원 기 관
주요업적	- 내진요소개발(브레이스, 강재댐퍼, SMA)	일본문부과학성
	- 프리캐스트요소를 사용한 구조시스템연구	일본문부과학성
	- 주각부의 탄소성응력해석	카지마장학재단
	- 극저항복점 강재댐퍼 제안	일본문부과학성
	- 프리캐스트 보-기붕접합부 개발	일본문부과학성
	- 반곡점 이동을 고려한 주각부 탄소성해석 프로그램 개발	일본문부과학성
	- 등가선형해석법에 의한 다자유도 탄소성철골구조물의 내진성능	한국학술진흥재단
	- PC 보-기둥 접합부의 제작 및 요구성능 개선을 위한 접합요소의 개발	중소기업청
	- 장수명화 되고 재사용 및 재활용이 가능한 철골구조 시스템 개발	건설교통부
	- 강구조 접합부의 내진성능 개선을 위한 메카니컬 패스너의 개발	중소기업청
	- 장수명화 되고 재사용 및 재활용이 가능한 철골구조 시스템 개발	국토해양부
	- 천안시 지역주민 및 청소년을 위한 한기대 과학기술진흥사업	한국과학문화재단
	- 천안시 생활과학교실 운영지원 사업	한국과학문화재단
	- 천안지역 YSC 멘토링센터 운영지원 사업	한국과학문화재단
	- 충남첨단과학축전 지원사업	충청남도
	- 강구조 노출형 주각부의 혁신적 모델의 제안	중소기업청
	- 장수명화 되고 재사용 및 재활용이 가능한 철골구조 시스템 개발	국토해양부
	- 초대형 막구조물의 건전성 모니터링 기술개발	한국학술진흥재단
	- 강진시발생하는 산업플랜트 건축물의 비틀림 진동에 관한 연구	한국연구재단
	- 강재댐퍼를부착한 철골조의 지진응답 특성에 관한 연구	한국연구재단
	- 비선형 적합법을 사용한 형태불안정 구조물의 최적 형상제어 기법	한국연구재단

3. 핵심연구개발 성과물

연번	핵심성과명	핵심성과 설명	성과유형※	성과달성 책임	해당연차
1	비정형 솔라패널 최적배치 설계 프로세스 (설계프로그램)	비정형 곡면 지붕구조물의 최적솔라패널 배치를 위한 설계 프로그램	소프트웨어	한국기술교육대학교, 레나소프트웨어	1-3차년도 '12.04 ~'15.02 (2년 10개월)
2	테스트베드 시험설계 (설계기법)	솔라패널 지붕 구조물의 설계 및 시공을 위한 시범 조형물의 설계기법	공법/기법	한국기술교육대학교, 레나소프트웨어	2차년도 '13.02 ~'14.02 (1년 1개월)
3	테스트베드 시험조형물 (조형물)	솔라패널 지붕 구조물의 설계 및 시공을 위한 시험조형물	장치/장비	한국기술교육대학교, 레나소프트웨어	3차년도 '14.03 ~'15.02 (1년 10개월)

2절. 연구수행과정 및 내용

핵심성과명: 비정형 솔라패널 최적배치 설계프로세스 (설계프로그램)

정의: 비정형 곡면 지붕 구조물의 삼각형 격자패턴과 솔라패널 배치를 위한 설계프로그램과 격자형 지붕구조물의 비선형구조해석을 수행할 수 있는 통합 플랫폼의 개발. 삼각형 그리드에 대한 메쉬생성, 최소표준편차의 삼각형 그리드 탐색기법 및 비선형해석 등의 기능을 수행할 수 있는 연구 성과물이며, 연구내용은 다음과 같다.

1 최적삼각형 그리드의 메타 휴리스틱 탐색방법
2 삼각형 메쉬 분할을 위한 측지선 탐색기법
3 자유곡면의 메쉬스무딩을 위한 보정알고리즘
4 곡면지붕의 친환경 외피구조와 에너지효율분석
5 건축물의 태양광 발전설비와 설치모듈
6 격자그리드 구조물의 비선형 구조해석과 불안정성
7 자유곡면과 삼각형 그리드 형상설계 프로그램

핵심성과명: 테스트베드 시험설계 (설계기법)

정의: 솔라패널 지붕구조물을 위한 시범조형물의 설계기법으로서, 돔 구조물을 대상으로 최소편차의 삼각형으로 구성된 설계와 안정해석 및 모듈화를 통한 설계도서, 제작도서가 작성되며, 설계를 위한 GUI 시스템이 개발된 연구 성과물이다. 연구내용은 다음과 같다.

8 시험조형물 대상모델(MICD 모델)의 형상모델링
9 초기형상 모델링 및 해석/설계용 GUI 시스템
10 MICD 모델의 구조모델링과 불안정모드 분석
11 MICD 모델의 비선형 불안정거동 및 임계좌굴하중
12 MICD 모델의 모듈화 평면계획과 확장설계모형

핵심성과명: 테스트베드 시험조형물 (조형물)

정의: 솔라패널 지붕구조물을 위한 시범조형물의 제작으로서, 모듈화된 설계도서와 절점의 상세설계도서 및 시뮬레이션 결과와 동적특성을 고찰하기 위한 실험을 통하여 적용성과 효율성을 연구한 성과물이며, 연구내용은 다음과 같다.

13 절점 모듈화를 위한 시험조형물 상세설계 분석
14 시험조형물 설계도면 및 형상시뮬레이션 검토
15 돔형 공간의 에너지성능특성 및 시뮬레이션
16 MICD 모델의 제작 및 설치 지침
17 MICD 모델의 내진성능 테스트

1. 최적삼각형 그리드의 메타 휴리스틱 탐색방법

삼각형 네트워크 돔은 삼각형을 기반으로 한 정형화된 곡면 돔이며, 경기장 지붕과 같은 대공간구조물에 많이 적용되어 왔다. 또한 많은 비정형 외피 구조물들도 그림 2.2.1.1과 같이 삼각형 네트워크 구조를 많이 이용하게 되었다. 이렇게 삼각형 패턴이 많이 이용되는 이유 중하나는 기하학적인 원인으로서 곡면을 형성할 수 있는 최소의 다각형 단위가 삼각형이기 때문이다. 단층의 네트워크 곡면을 형성하는데서 다른 다각형 도형보다 삼각형은 곡면을 표현하기에 효율적이며, 컴퓨터 그래픽 분야에서도 삼각형 메쉬의 생성과 분할을 매우 중요하게 다루고 있다.

일반적으로 격자 돔은 연속체 쉘 원리를 이용하여 비교적 적은 자중으로 공간을 형성할 수 있으나 역학적인 장점에도 불구하고 구조불안정 문제를 해결해야만 안정한 구조물로 설계가 가능하고, 격자에 따른 균일한 힘의 저항능력은 매우 중요한 설계요인이 되기도 한다. 단층의 네트워크 돔은 역학적 조건에서 많이 다루어진 불안정성의 문제는 기하학적 형상의 조건이 아니라 부재 내부의 내력과 불안정이라는 문제에 매우 많은 관심을 두고 연구가 진행되어 왔다. 각각의 격자 부재를 동일한 간격으로 분할하여 격자패턴을 결정하는 삼각형 네트워크 돔의 설계는 높이와 직경에 따라서 결정되는 형상의 특성으로 인해 완전한 정삼각형으로 구성할 수 없으므로 비교적 최소의 편차를 가지는 곡면으로 모델링하게 된다.



그림 2.2.1.1 자유형상 구조물의 삼각형 메쉬 곡면

자유형상 구조물에서도 쉘의 역학적 특성의 고려와 균일한 네트워크의 모델링은 매우 중요하며, 그 이유는 가장 얇고 넓게 공간의 표면을 덮어야 할 뿐 아니라 구조적인 안정성을 확보해야하기 때문이다. 특히, 공간의 규모가 비교적 크고 얇게 구조물을 설계해야 하는 경우는 곡률에 의한 힘의 저항이 반드시 필요하다. 이것은 구조 안정성 문제에서 단층 곡면이 복층의 경우와 비교해 매우 복잡한 붕괴 메커니즘을 가지고 있으며, 삼각 그리드의 좋은 배열들은 구조물의 내력을 골고루 분포할 수 있게 한다. 결론적으로 삼각그리드의 형성에 대해서 규칙적인 배열이나 정삼각형에 가까운 삼각형 구조들은 제작과 시공뿐만 아니라 구조안

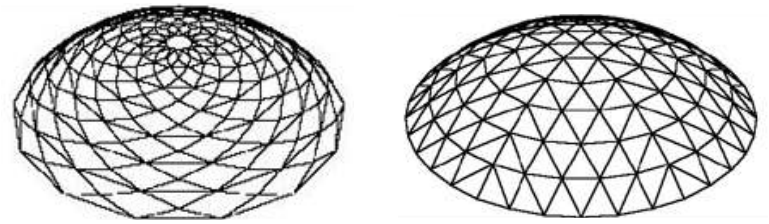
정성 측면에서도 매우 유용하다.

공간상의 곡면에서 네트워크 패턴을 어떻게 설계해야만 좋을 것인가는 실무 설계의 입장에서 매우 중요한 한 부분을 차지하게 되며, 최소의 허용편차로 설계된 격자부재는 곡면을 효율적으로 배치하게 해 준다. 특히 돔형 구조물의 네트워크 패턴의 모델링은 자유형상 곡면의 네트워크 패턴 모델링에서 일정한 곡률을 부여하는 것과 동일하며, 임의의 곡률을 가진 곡면의 정삼각형기반 네트워크 모델링을 위해서는 각각의 분할된 삼각형의 면적과 격자 길이의 편차가 최소가 되어야 한다. 궁극적으로 이와 같은 네트워크 패턴의 설계는 전역최적화 기법을 도입한 최적문제를 풀어야만 최적의 설계가 가능하다.

1970년대 이후 자연현상에 기초한 알고리즘의 개발은 컴퓨터의 발달로 실무 응용이 가능하게 되었다. 매개변수의 기울기를 이용하여 목적함수의 값을 줄여나가는 기법은 해에 빠르게 수렴하는 장점을 갖지만 국소 최솟값(local minimization)에 수렴하는 단점을 갖게 되었다. 이러한 문제를 해결하기 위해 병렬 탐색기법을 적용하여 우수한 매개변수 값이 다른 벡터들의 국지해 범위를 벗어나게 함으로써 전역해를 얻는 연구가 진행되었고, 유전자알고리즘(Genetic Algorithm)이 그 대표적인 예이다. 다른 방법에 비해 문제 해결을 위한 복잡한 수학과정이 없이 전역탐색을 수행하는데 매우 효과적이었다. 그러나 유전자알고리즘은 컴퓨터를 이용한 수렴시간이 매우 느린 단점을 갖으며 설계자의 관점에서 비효율적이다. 이를 극복하기 위해 1995년 Ken Price와 Rainer Storn에 의해 개발된 차분진화(Differential Evolution) 알고리즘은 유전자알고리즘과 유사한 연산과정을 갖으며 파라메타수가 적고 수학적 연산이 간단하여 수렴시간이 빠른 장점을 갖게 되었다. 이와 같은 메타 휴리스틱 알고리즘의 개발은 다양한 생물학적 특성이나 자연현상에서부터 방법을 모색하게 되었으며, 최근 악기의 음을 조율하는 과정을 모방하여 도시의 관망연결문제를 해결한 화음탐색(Harmony search)법도 등장하였다.본 절에서는 돔형 모델을 대상으로 정삼각형 기반 곡면을 모델링하는 방법을 제안하고, 차분진화법과 화음탐색법 등의 메타 휴리스틱 탐색방법을 이용한 그리드 모델링 설계프로그램을 설명하도록 한다. 우선, 정삼각형 기반 곡면 모델링을 위해 최적화 수리모형을 제안하고, 목적함수로는 삼각형 면적과 길이의 표준편차를 이용하도록 한다. 설계변수로 채택되는 절점의 조절좌표는 구조물의 형상을 유지하기 위한 경계조건을 이용하여 설계변수의 영역을 제한하여 해석을 수행하도록 한다. 적용대상 구조물은 해의 결과를 검증하기 위해서 삼각형으로 구성된 평판을 이용하며, 라이즈-스팬 비가 다른 네트워크 돔을 채택하여 결과형상을 고찰하도록 한다.

가. 돔형 구조물의 곡면 방정식과 그리드 패턴

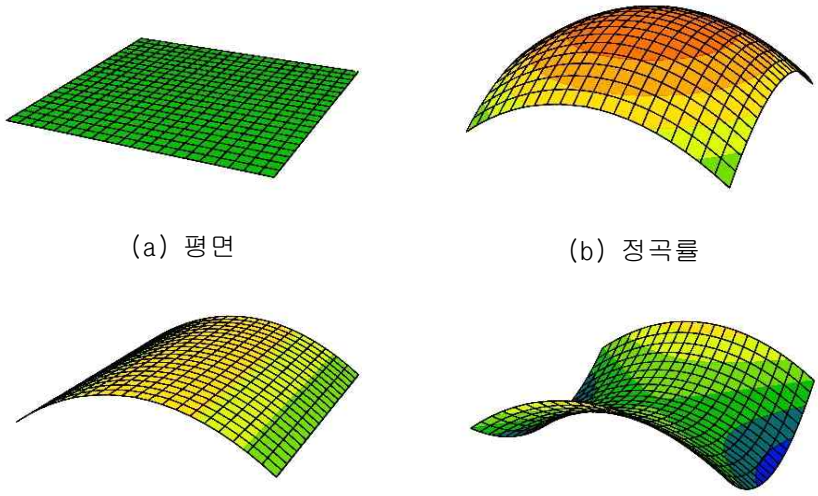
단층의 3방향 그리드 패턴이나 라멜라 격자 패턴 등의 삼각형 메쉬를 기반으로 한 돔은 스타디움과 같은 대공간구조물에 많이 적용되어 왔으며, 최근 자유형상 구조물의 외피구조에도 많이 응용되고 있다. 그 이유 중에서 기하학적인 요인은 곡면을 형성할 수 있는 최소의 다각형 단위가 삼각형이며, 평면을 이용한 단층 곡면의 형성은 사각형이나 오각형의 도형으로는 불가능하기 때문이다. 컴퓨터 그래픽 분야에서도 이와 같은 특성은 잘 활용되어져 자유형상 구조물을 형성하는데 있어서 삼각형 메쉬의 곡면은 매우 중요하게 다루어진다.



(a) (b)

그림 2.2.1.2 다양한 삼각형 네트워크 돔

일반적으로 돔과 같이 수학적으로 정의되기 쉬운 곡면의 경우 이들의 분류를 주로 가우스 곡률로 많이 설명되어 졌으며, 정, 부, 영곡률의 세 가지로 분류되는 형태는 아래 그림과 같이 표현할 수 있으며, 돔의 경우 일정한 정곡률 곡면에 해당된다. 그러나 수학적으로 표현하기 힘든 다양한 자유형상 곡면은 스플라인이나 NURB곡면 또는 서브디비젼을 이용하여 분할하고 표현하기 시작하였으며, 곡면의 형태를 자유스럽게 나타낼 수 있다.



(a) 평면 (b) 정곡률

(c) 영곡률 (d) 부곡률

그림 2.2.1.3 가우스 곡률과 형상

그림 2.2.1.3의 가우스 곡률의 형상에 대한 정형적인 포물선 함수를 구현할 경우 다음과 같이 정의할 수 있다. 포물선 곡면을 표현할 수 있는 기준 곡면을 $z = z(x, y)$ 에 대해서, 쉘의 x, y 방향의 주 곡률 반경을 Rx, Ry 로 하여 식(2.2.1.1) 곡률에 관한 다음 식을 정의한다.

$$\frac{1}{R_x} = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2}, \quad \frac{1}{R_y} = \frac{\partial^2 z}{\partial y^2}, \quad \frac{1}{R_{xy}} = \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} \tag{2.2.1.1}$$

여기서 쉘의 기준면 z(x, y)를 데카르트 좌표계에서 2차식으로 근사하여 경계 좌표값을 정의하면, 다음과 같다.

$$z = a_o x(x-a)+b_o y(y-b) \qquad (2.2.1.2)$$

식(2.2.1.2)로부터, $\frac{1}{R_x}=2a_o$, $\frac{1}{R_y}=2b_o$ 라 정의하면, 얕은 쉘의 형상은 다음과 같다.

$$z(x,y) = \frac{x(x-a)}{2Rx}+\frac{y(y-b)}{2Ry} \qquad (2.2.1.3)$$

위 식에 있어 x, y 방향의 곡률을 주 곡률로 하는 곡률 좌표계를 이용하면, 주곡률비 $\lambda = R_x/R_y$ 를 이용하여 그림 2.2.1.3의 정곡률, 영곡률 및 부곡률의 형상을 구할 수 있으며, 부호에 따라 형상은 각각 EP쉘(정곡률), 원통쉘(영곡률), HP쉘(부곡률)로 나타난다.

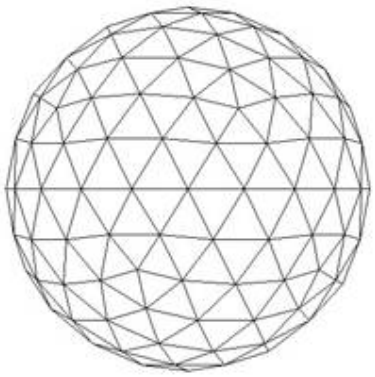


그림 2.2.1.4 지오데직 돔

정곡률로 분류할 수 있는 지오데직 돔의 경우 플라토닉 입체나 아르키메디언 입체의 하나로 부터 정의될 수 있다. 이것은 정20면체 정삼각형 플라토닉 입체에서 한 정 삼각형 면을 따라 삼각형으로 분할하여 나눌 수 있으며, 이를 반복 분할하거나 중심으로부터 일정한 곡률을 유지할 수 있도록 모양을 형성할 수 있다. 이 과정의 모든 입체면에 대해서 다양한 시도를 할 수 있으며, 새로운 형태의 지오데직 돔을 구현할 수 있다. 지오데식 구조는 구면에 가까운 다면체를 그 기원으로 하고 있기 때문에 역학적 장점을 가지게 될 뿐 아니라 주어진 공간을 덮는 가장 효율적인 방법이며, 삼각형 구조의 안정성을 보장 받을 수 있다. 그러나 자유형상의 구조물은 정형화하기가 매우 힘들다.

자유형상 구조물의 경우에도 쉘의 역학적 장점을 이용해야만 하는데 그 이유는 가장 쉽게 공간의 표면을 덮어야 할 뿐 아니라 구조적인 안정성을 확보 해야만 한다. 특히, 공간의 규모가 클 경우나 비교적 얇게 구조체를 구성해야 하는 경우는 곡률에 의한 힘의 저항이 반드시 필요하다. 구조 안정성에 대해서는 단층의 곡면이 복측의 경우와 비교해 매우 복잡한 붕괴 메커니즘을 가지게 되며, 삼각 그리드의 좋은 배열들은 구조물의 내력을 골고루 분포할 수 있게 한다. 따라서 삼각 그리드의 형성에 대해서 규칙적인 배열이나 정삼각형에 가까운 삼각형 구조들은 제작과 시공뿐만 아니라 구조안정성의 측면에서도 매우 유용하다.

나. 차분진화(Differential Evolution) 알고리즘

메타 휴리스틱 분야에서 많은 신뢰를 얻고 있는 차분진화알고리즘은 목적 함수들의 미분이 가능하지 않더라도 미분가능의 요구사항을 충족하기 위한 광범위한 클래스 객체의 개념을 이용한 확률적 병렬 직접 탐색 방법으로 설계되었다. 차분진화법의 연산은 각각의 세대에서 새로운 개체의 설계벡터는 랜덤하게 선택된 벡터들의 조합으로부터 생성된다. 외부로부터 정의된 하나의 설계벡터는 이미 정의된 벡터와 혼합되고 재구성(recombination)된다. 이때 구성된 벡터들은 시행벡터(trial vector)라 불린다. 시행벡터는 목적함수 값이 감소되는 경우에 대해서 다음세대로의 세대교체가 허용되고 선택(selection) 된다. 이와 같은 세대의 교체가 계속 반복되며, 최소의 목적함수 값의 개체만이 계속 선택되어지는 과정을 반복하여 수렴하게 된다. 이상의 과정을 가상코드로 정의하면 그림 2.2.1.5와 같고 알고리즘의 연산과정 및 플로 차트는 그림 2.2.1.6과 같다.

```
Initialize DATA
Generate    POPULATION

DE LOOP

   DIFFERENTIAL OPERATION
      Stratigy 1 :  DE/rand/1
      Stratigy 2 :  DE/best/1
      Stratigy 3 :  DE/current-to-best/1
      Stratigy 4 :  DE/best/2
      Stratigy 5 :  ...
   CROSSOVER OPERATION
   CHECK the population
   EVALUATE  the INDIVIDUAL
   REPLACE   OLD VECTOR
   iter = iter+1

END LOOP

OUTPUT DATA
```

그림 2.2.1.5 차분진화법의 가상탐색코드

두 개의 기본 차분진화의 변분 연산자 수행과정을 설명하면 다음 식과 같다. 첫 번째 차분진화 연산자는 돌연변이이고, 구체적으로, 각각의 개체에 의해서 새로운 세대의 객체(mutant vector)가 다음의 식에 의해서 생성된다. 여기서 g는 현재 세대를 의미한다.

DE/rand/1 $$v_{i,g} = y_{r0,g} + F \cdot (x_{r1,g} - x_{r2,g}) \quad (2.2.1.4a)$$

DE/best/1 $$v_{i,g} = x_{best,g} + F \cdot (x_{r1,g} - x_{r2,g}) \quad (2.2.1.4b)$$

DE/current-to-best/1 $$v_{i,g} = x_{i,g} + F_{cr} \cdot (x_{best,g} - x_{i,g}) + F_{\cdot} (x_{r1,g} - x_{r2,g}) \quad (2.2.1.4c)$$

DE/best/2 $$v_{i,g} = x_{best,g} + F \cdot (x_{r1,g} - x_{r2,g}) + F \cdot (x_{r3,g} - x_{r4,g}) \quad (2.2.1.4d)$$

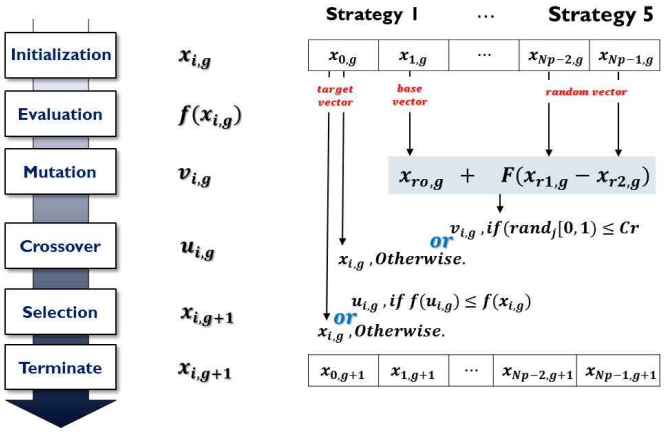


그림 2.2.1.6 Classic DE의 연산과정

$x_{best,g}$는 이전 세대의 최고 개체이다. F, F_{cr}는 파라메타로 검색 프로세스의 침체를 피하기 위하여 두개의 개체사이의 차분을 조절하는 돌연변이 상수라 불린다. 위의 식을 정리하면 위의 두 번째 식은 유전자 알고리즘의 교배와 유사하며, 첫 번째 식에서 파생된다. 나머지 세 개의 연산자는 첫 번째와 두 번째 연산자의 조합으로 구할 수 있다. 이와 같은 관계에서 확률 τ_{μ}로 돌연변이를 수행이 되며, $(1-\tau_{\mu})$를 이용하여 결정하게 된다.

재조합을 위한 교배 연산자는 이후 추가로 돌연변이 개체의 다양성을 높이기 위해 적용할 수 있다. 교배확률변수 (Cr_x)를 이용하여 새로운 세대의 개체는 이전 개체와 조합되며 이를 대상 객체라고 부른다. 특히 돌연변이 개체의 각 구성요소에 대해 우리는 0과 1사이의 무작위 변수 r을 선택할 수 있으며, 재조합된 상수를 비교하여 구성요소를 선택하거나 시행벡터의 일부 요소가 구성요소가 된다. 마지막으로 시행벡터는 목적함수나 적합도가 좋은 쪽으로 허용이 된다. 계속되는 반복연산에서 국소최적해로의 수렴을 방지하기 위해서 여러 가지 돌연변이 방법들이 이용된다.

다. 정삼각형 메쉬 그리드 형성을 위한 최적화 수리모형

등각의 삼분할 네트워크 평면의 도형은 모두 정삼각형이 되며, 동일한 간격의 정삼각형으로 구성된다. 그러나 돔의 경우 곡률을 가지고 있기 때문에 정삼각형으로 구성된 삼분할 그리드 돔의 구현은 불가능하다. 돔의 경우 역학적 특성에서 등가의 면내 강성을 형성하기 위해서는 정삼각형에 가까운 분할이 유리하며, 등각의 분할이 아니더라도 삼각형의 형태는 유사한 크기와 길이를 가지는 경우가 곡면을 표현하고 제작하기에 유리하다. 특히 곡면이 매우 급격한 변화를 하더라도 제작과 시공을 위해서는 형상이 비교적 유사한 모듈의 삼각형 구조로 대체될 필요성이 있다. 따라서 일정한 삼각형이 유지되는 그리드의 형성은 삼각형 메쉬를 이용하여 구조물을 표현하여야 하며, 본 절에서는 정삼각형을 기준으로 최소의 길이표준편차를 가진 삼각형의 격자 분포를 형성하고자 한다.

하나의 정삼각형은 내부의 각이 동일하며, 세변의 길이가 같다. 이와 같은 정삼각형이 연결되어 모인 집합의 경우는 이들의 표준편차가 최소가 된다. 즉, 정삼각형으로 연결된 곡면

의 경우는 삼각형의 면적($\boldsymbol{a}$)이 일정하므로 표준편자(STD($\boldsymbol{a}$))가 최소가 된다. 또한, 삼각형 세변의 각각의 길이($\boldsymbol{l}_i$)에 대한 표준편차(STD($\boldsymbol{l}_i$)))도 최소가 되어야만 하며, 평면의 경우는 그 값이 0이 된다. 곡률에 따라서 최소 표준편차를 가지는 곡면은 정삼각형에 근접하는 곡면으로 구성될 것이다. 따라서 각각의 표준편차들의 합이 최소가 되어야만 하는 특성을 이용하여 최적화 수리모형을 제안하기로 하며, 표준편차로 표현된 함수는 식 2.2.1.5와 같이 표현할 수 있다.

$$f(\boldsymbol{a},\boldsymbol{l}) = \mathrm{STD}(\boldsymbol{a}) + \sum_{i=1}^{nrod} \mathrm{STD}(\boldsymbol{l}_i) \qquad (2.2.1.5)$$

여기서, $\boldsymbol{a} = \{a_1, a_2, \cdots, a_{ntri}\}^T$, ntri=삼각형 요소수; $\boldsymbol{l}_i = \{l_i^1, l_i^2, l_i^3\}^T \; i = 1,...,nrod$, nrod=격자부재의 수; STD() : 표준편차. 삼각형의 면적 $\boldsymbol{a}$과 길이 $\boldsymbol{l}_i$의 경우 격자구조물의 절점 연결정보에 의해서 계산할 수 있으며, 곡면위의 절점좌표 $\boldsymbol{X} = \{\boldsymbol{X}_1, \boldsymbol{X}_2, \cdots, \boldsymbol{X}_{nnod}\}^T$ 는 식 2.2.1.5의 변수로 정의할 수 있다. 우선, 격자구조물의 임의의 단계에서의 초기형상 좌표를 $\boldsymbol{X}^i$로 정의하고, 모든 절점은 설계하고자 하는 곡면 상에 존재한다고 가정하자. 초기형상에서 절점이 곡면을 따라 이동된 변화량을 $\delta\boldsymbol{X}^i$라 하면 절점의 변화에 따른 표준편차의 변화로 함수를 정의할 수 있으며, 이를 목적함수로 정의하면 식 2.2.1.6과 같이 표현할 수 있다.

$$\text{Objective } f^i(\delta\boldsymbol{X}^i) = \mathrm{STD}(\boldsymbol{a}(\boldsymbol{X}^i + \delta\boldsymbol{X}^i)) + \sum_{j=1}^{nrod} \mathrm{STD}(\boldsymbol{l}_j(\boldsymbol{X}^i + \delta\boldsymbol{X}^i)) \qquad (2.2.1.6)$$

위 식에서 첨자는 각 단계에서 초기좌표와 최소표준편차를 위한 변화량으로 설명할 수 있으며, $\boldsymbol{X}^i + \delta\boldsymbol{X}^i$ 는 다음단계의 초기형상 $\boldsymbol{X}^{i+1}$로 치환된다.

설계변수의 경계제약조건을 위해서는 다음과 같은 조건을 설정한다. 최소의 표준편차를 가지는 곡면을 찾기 위해서 임의의 단계에서 곡면의 위상이 변화하지 않을 조건을 이용하기로 한다. 초기 설정된 절점좌표에서 $\delta\boldsymbol{X}^i$ 만큼 변화하였을 때에도 곡면의 삼각형 격자 위상이 변화하지 않을 경계조건중 하나는 그림 2.2.1.7과 같다.

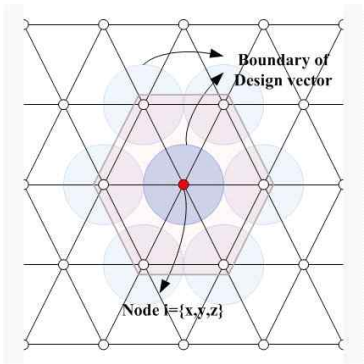


그림 2.2.1.7 절점과 설계변수벡터의 영역

그림 2.2.1.7에서 알 수 있듯이 각 절점에서 일차 연결된 절점간 거리의 이분점을 넘어서지 않는 경우는 격자의 위상이 바뀌지 않으며, 이와 같은 조건을 설계변수의 경계조건으로 이용하도록 하며, 최적화 수리모델의 경계제약조건이 된다.

$$\text{Subject to } \delta \boldsymbol{X}^i_{\min} \leqq \delta \boldsymbol{X}^i \leqq \delta \boldsymbol{X}^i_{\max} \tag{2.2.1.7}$$

위 식의 경우 평면에서의 삼각형 메쉬의 문제는 설계변수의 구성이 3차원 공간에서 한 차수 줄어든 곡면 위의 2차원 문제로 형성할 수 있으며, 원주좌표계를 이용하여 표현할 경우 매우 편리하게 사용할 수 있다. 이것은 곡면의 3차원 위상이 곡면 위의 두 성분 값만 정의되면 나머지 성분은 곡면 함수에 의해서 결정할 수 있다. 앞서 설명한 바와 같이 설계변수의 경계영역은 삼각형 요소의 위상이 바뀌지 않는 범위 내부로 결정하므로 모든 요소들이 설계변수벡터의 경계 내부에서는 원래의 곡면에 대한 삼각형 메쉬의 위상은 변화하지 않는다. 따라서 구하여진 삼각형 네트워크는 원 형상을 위배하지 않는 범위에서 최소의 편차를 가지는 삼각형으로 구성되며, 이와 같은 조건은 어떠한 곡면에서도 동일한 조건이 된다.

삼각형 요소를 이용한 절점좌표의 변환을 설명하면 다음과 같다. 먼저 그림 2.2.1.8와 같은 전체요소좌표계와 국소좌표계의 절점의 좌표를 $\boldsymbol{X}_i$, $\boldsymbol{X}_j$, $\boldsymbol{X}_k$ 및 $\boldsymbol{x}_i$, $\boldsymbol{x}_j$, $\boldsymbol{x}_k$라 할 때, 국소좌표계에서의 단위 기저는 식 2.2.1.8와 같다. 여기서$\boldsymbol{a},\boldsymbol{b}$는 국소좌표계의 기저이며 $\boldsymbol{a}=\{a_1 a_2 a_3\}=\boldsymbol{X}_\mathrm{j}-\boldsymbol{X}_\mathrm{i}$, $\boldsymbol{b}=\{b_1 b_2 b_3\}=\boldsymbol{X}_\mathrm{k}-\boldsymbol{X}_\mathrm{i}$ 의 성분을 가진다.

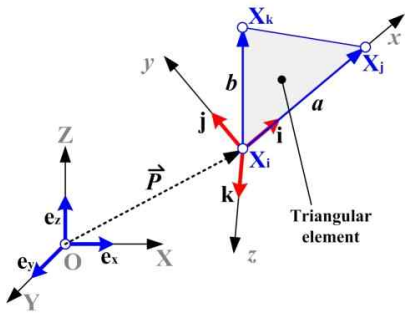


그림 2.2.1.8 전체요소좌표계 및 국소좌표계

$$\boldsymbol{i}=\frac{\boldsymbol{a}}{|\boldsymbol{a}|},\ \boldsymbol{j}=\boldsymbol{k}\times\boldsymbol{i},\ \boldsymbol{k}=\frac{\boldsymbol{a}\times\boldsymbol{b}}{|\boldsymbol{a}\times\boldsymbol{b}|} \tag{2.2.1.8}$$

위 식을 이용하여,$\boldsymbol{a},\boldsymbol{b},\boldsymbol{a}\times\boldsymbol{b}$ 벡터를 계산하면 다음과 같다.

$$\boldsymbol{a}=(X_j-X_i)\boldsymbol{e}_{\boldsymbol{X}}+(Y_j-Y_i)\boldsymbol{e}_{\boldsymbol{Y}}+(Z_j-Z_i)\boldsymbol{e}_{\boldsymbol{Z}} \tag{2.2.1.9a}$$

$$\boldsymbol{b}=(X_k-X_i)\boldsymbol{e}_{\boldsymbol{X}}+(Y_k-Y_i)\boldsymbol{e}_{\boldsymbol{Y}}+(Z_k-Z_i)\boldsymbol{e}_{\boldsymbol{Z}} \tag{2.2.1.9b}$$

$$\boldsymbol{a}\times\boldsymbol{b}=\begin{vmatrix} \boldsymbol{e}_X & \boldsymbol{e}_Y & \boldsymbol{e}_Z \\ X_j-X_i & Y_j-Y_i & Z_j-Z_i \\ X_k-X_i & Y_k-Y_i & Z_k-Z_i \end{vmatrix}=\delta_X\boldsymbol{e}_X+\delta_Y\boldsymbol{e}_Y+\delta_Z\boldsymbol{e}_Z \tag{2.2.1.9c}$$

여기서, $\delta_X = a_2 b_3 - b_2 a_3$, $\delta_Y = a_3 b_1 - b_3 a_1$, $\delta_Z = a_1 b_2 - b_1 a_2$.

위 식의 각 단위 벡터들의 값을 구하고, 전체 좌표계의 기저벡터 $\boldsymbol{e}_X, \boldsymbol{e}_Y, \boldsymbol{e}_Z$에 대한 값으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} \boldsymbol{i} \\ \boldsymbol{j} \\ \boldsymbol{k} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_x \lambda_y \lambda_z \\ \mu_x \mu_y \mu_z \\ \nu_x \nu_y \nu_z \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \boldsymbol{e}_X \\ \boldsymbol{e}_Y \\ \boldsymbol{e}_Z \end{Bmatrix} \tag{2.2.1.10}$$

여기서,

$$\lambda_x = \frac{a_1}{l_{ij}},\ \lambda_y = \frac{a_2}{l_{ij}},\ \lambda_z = \frac{a_3}{l_{ij}}$$

$$\mu_x = \lambda_z \nu_y - \lambda_y \nu_z\ ,\ \mu_y = \lambda_x \nu_z - \lambda_z \nu_x\ ,\ \mu_z = \lambda_y \nu_x - \lambda_x \nu_y$$

$$\nu_x = \frac{\delta_X^2}{\Delta},\ \nu_y = \frac{\delta_Y^2}{\Delta},\ \nu_z = \frac{\delta_Z^2}{\Delta}$$

$$l_{ij} = \sqrt{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2}\ \ ,\ \ \Delta = \sqrt{\delta_X^2 + \delta_Y^2 + \delta_Z^2}$$

여기서, 위 식은 두 좌표계간의 변환을 의미하므로, 이를 이용하여 각 절점의 정보를 요소 좌표시스템으로 변환할 수 있다. 또한 삼각형의 면적과 경계선의 길이에 대한 표준편차는 국소좌표계로 변환된 좌표 $\boldsymbol{x}_i$, $\boldsymbol{x}_j$, $\boldsymbol{x}_k$를 이용하면 쉽게 계산된다.

라. 차분진화(Differential Evolution) 기법을 이용한 삼각형 메쉬 곡면

최소화 문제의 해를 구하기 위해서 메타 휴리스틱 분야에서 많은 신뢰를 얻고 있는 차분진화(Differential Evolution) 알고리즘(이하 DE 라 한다.)을 이용하도록 한다. 속도와 성능의 증명에서 분산연산구조를 활용하는데 많은 방법론이 제시되어 왔으며, 비교적 적은 데이터를 이용하여 국소 및 전역 최적해를 동시에 발견하는 기법들도 제시되고 있다. 진화 알고리즘들은 선택 연산자의 기본적인 진화 연산과정과 광범위한 탐색 연산자들로 구성되며, 주로 돌연변위와 재조합이 주를 이룬다. 선택 연산자의 경우는 적자생존이 기본개념이며, 재구성과 돌연변이는 확률적으로 효율적인 탐사를 제공하도록 개체를 움직이게 한다. 비록 생물학자의 관점에서 단순할지라도 이 알고리즘들은 견고하고 강력한 검색 메카니즘들을 제공하게 되며 강력한 최적화 문제의 툴을 충분히 소화해 낼 수 있다. Storn과 Price에 의해 제안된 DE 기법은 목적 함수들의 미분이 가능하지 않더라도 미분가능의 요구사항을 충족하기 위한 광범위한 클래스 객체의 개념을 이용한 확률적 병렬 직접 탐색 방법으로 설계되었다.

DE의 연산은 각각의 세대에서 새로운 개체의 설계벡터는 랜덤하게 선택된 벡터들의 조합으로부터 생성된다. 외부로부터 정의된 하나의 설계벡터는 이미 정의된 벡터와 혼합되고 재구성(recombination)된다. 이때 구성된 벡터들은 시행벡터(trial vector)라 불린다. 시행벡터는 목적함수 값이 감소되는 경우에 대해서 다음세대로의 세대교체가 허용되고 선택된다.

두 개의 기본 DE의 변분 연산자의 수행과정을 설명하면 다음과 같다. 첫 번째는 돌연변이

이고, 구체적으로, 각각의 개체 $x_{g,}^{i} i = 1, 2, \ldots, NP$ 에 의해서 새로운 세대의 객체 v_{g+1}^{i} (mutant vector)가 다음의 식에 의해서 생성된다. 여기서 g는 현재 세대, NP는 세대의 개체 수이다. 여기서, x_{g}^{best}는 이전 세대의 최고 개체이다, 즉 μ>0 은 파라메타로 검색 프로세스의 침체를 피하기 위하여 두개의 개체사이의 차분을 조절하는 돌연변이 상수라 불린다. 이들을 정리하면 유전자 알고리즘의 교배와 유사하다. 다른 연산자들은 이상의 두 조합으로 구성할 수 있다. 이와 같은 상태의 관계에서 확률 τ_{μ}로 돌연변이를 수행이 되며, $(1-\tau_{\mu})$를 이용하여 결정하게 된다. 재조합 연산자는 이후 추가로 돌연변이 개체의 다양성을 높이기 위해 적용되기도 하며, 이를 위해 새로운 세대의 개체는 이전 개체와 조합되며 이를 대상 객체라고 부른다. 특히 돌연변이 개체의 각 구성요소에 대해 우리는 0과 1사이의 무작위 변수 r을 선택할 수 있으며, 재조합된 상수 ρ 를 비교하여 구성요소를 선택하거나 시행벡터의 일부 요소가 구성요소가 된다. 마지막으로 시행벡터는 목적함수나 적합도가 좋은 쪽으로 허용이 된다. 계속되는 반복연산에서 국소최적해로의 수렴을 방지하기 위해서 여러 가지 돌연변이 방법들이 이용된다.

이상의 차분진화에 대한 삼각 그리드 모델링을 위해 제안한 수리모형을 여러 단계에 걸쳐 수행하여 해를 구할 수 있게 하며, 각 단계에서 초기좌표와 절점의 변화량으로 구성되는 최적화 수리모델의 최적해를 구하기 위해서 앞장에서 소개한 병렬직접탐색기법이 적용된 한다. 전역 최적해를 탐색하기 위한 각 단계의 차분진화알고리즘은 아래 그림에서 설명된 바와 같이 각 스텝 내에서 탐색하도록 구현하였으며, 단계별 해석을 수행하여 전역해를 구하도록 한다. 여기서 스텝의 증가에 따라 초기좌표와 경계조건은 매번 모델의 기하학적 정보를 이용하여 계산하며, 제안된 프로세스의 플로 차트(flow chart)는 아래와 같다.

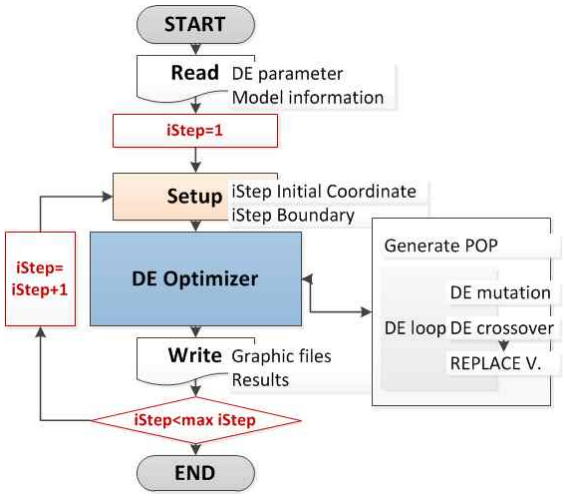


그림 2.2.1.9 프로그램의 흐름도

마. 평면 삼각형 구조의 정해와 DE 탐색결과의 비교

x,y평면에서의 정삼각형을 구현하기 위한 예제로 그림 2.2.1.10을 채택하도록 한다. 목적함수와 제약조건 및 설계변수의 구성은 앞 절에서 설명한 바와 같다. 예제는 모두 28개의 절점

과 63개의 격자부재 및 36개의 삼각형 요소로 구성되어 있다. 그림에서 보는 바와 같이 삼각형 격자 평면의 내부 절점은 왜곡되어 있으며, 절점좌표는 다음 표 2.2.1.1과 같다. 평면에 관한 문제이므로 표에서 나타난 z방향 좌표는 모두 0.0이며, 평면의 직각방향 요소는 고려하지 않기로 한다.

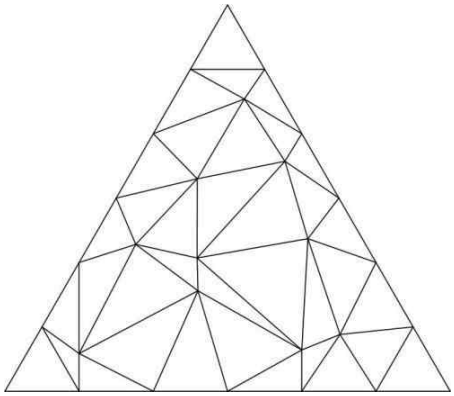


그림 2.2.1.10 평면 삼각형 예제의 절점과 형상

표 2.2.1.1 평면 삼각형 예제의 절점좌표

절점	X-coor	Y-coor	Z-coor	절점	X-coor	Y-coor	Z-coor
1	0.0	0.0	0.0	15	1.762	1.975	0.0
2	1.0	0.0	0.0	16	2.589	1.792	0.0
3	2.0	0.0	0.0	17	4.082	2.052	0.0
4	3.0	0.0	0.0	18	5.0	1.732	0.0
5	4.0	0.0	0.0	19	1.5	2.598	0.0
6	5.0	0.0	0.0	20	2.591	2.857	0.0
7	6.0	0.0	0.0	21	3.773	3.093	0.0
8	0.5	0.866	0.0	22	4.5	2.598	0.0
9	1.0	0.507	0.0	23	2.0	3.464	0.0
10	2.601	1.351	0.0	24	3.226	3.930	0.0
11	4.0	0.555	0.0	25	4.0	3.464	0.0
12	4.515	0.764	0.0	26	2.5	4.330	0.0
13	5.5	0.866	0.0	27	3.5	4.330	0.0
14	1.0	1.732	0.0	28	3.0	5.196	0.0

그림과 같은 36개 삼각형 면적의 총합은 표 2.2.1.2에 나타난 바와 같이 $15.589m^2$이며, 요소의 평균면적은 $0.433m^2$이다. 여기서 삼각형 면적에서 편차는 $0.227m^2$로 나타났다. 삼각형의 세변의 길이에 대한 평균은 $0.246m^2$이며, 편차는 $0.151m^2$로 매우 불규칙하며, 내부의 삼각형들은 모두 왜곡된 형상을 이루고 있다. 격자 요소의 초기조건도 이에 상응하는 값을 가진다. 격자의 길이 총 합은 $65.688m$이며, 평균길이는 $0.105m$이다. 다음 표에서 알 수 있듯이 길이는 $1m$일 때가 정삼각형의 조건을 만족한다. 삼각형의 길이편차도 $0.31458m$로 매우 큰 값으로 나타났다.

해석에 대해서 정삼각형을 이루기 위한 삼각형 면적의 표준편차와 각 길이에 대한 표준편차의 최소화를 한 형상을 구하도록 한다. 여기서 연산자는 DE/current-to-best/1을 이용하며, 확률변수는 돌연변이 상수 $F=0.8$, $F_{cr}\in[0,1]$, 교배확률 $Cr_x=0.5$를 채택하였다. 해석스텝을 4회로 가정하였고, 매 단계마다 이전단계의 최종형상이 초기형상으로 초기화 된다.

표 2.2.1.2. 평면 삼각형 예제의 초기형상정보 (단위: m)

Initial data		
삼각형 메쉬	면적합계	0.15589E+02
	면적평균	0.43301E+00
	면적표준편차	0.22689E+00
	길이편차합계	0.88409E+01
	길이편차평균	0.24558E+00
	길이표준편차	0.15094E+00
격자 부재	총길이	0.65688E+02
	평균길이	0.10427E+01
	표준편차	0.31451E+00

이상의 조건에서 해석된 결과를 그림 2.2.1.11 및 그림 2.2.1.12에 나타내었다. 우선 그림 2.2.1.11의 해석결과에 따른 목적함수의 수렴과정에 대해서 살펴보도록 한다. 그림에서 보는 바와 같이 스텝과 스텝 사이에서 목적함수 값이 급작스런 증가는 네트워크 돔의 좌표를 초기화함에 따라 나타나는 결과이다. 모든 단계에서 증가하여 다시 수렴하는 과정을 반복하여 수렴하게 되며, 매 스텝의 구간마다 일정한 값에 수렴한다. 또한 스텝의 진행에 따라 수렴하는 값도 점차 낮아지고 있음을 알 수 있다. 또한 일정한 변화 이후 각 스텝에서의 변화가 동일한 결과를 나타내고 있으며, 본 예제의 경우 스텝 3과 스텝 4의 구간에서는 거의 유사한 결과를 나타내고 있다.

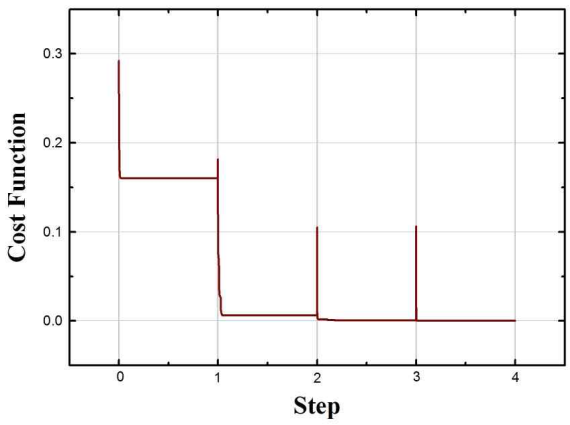
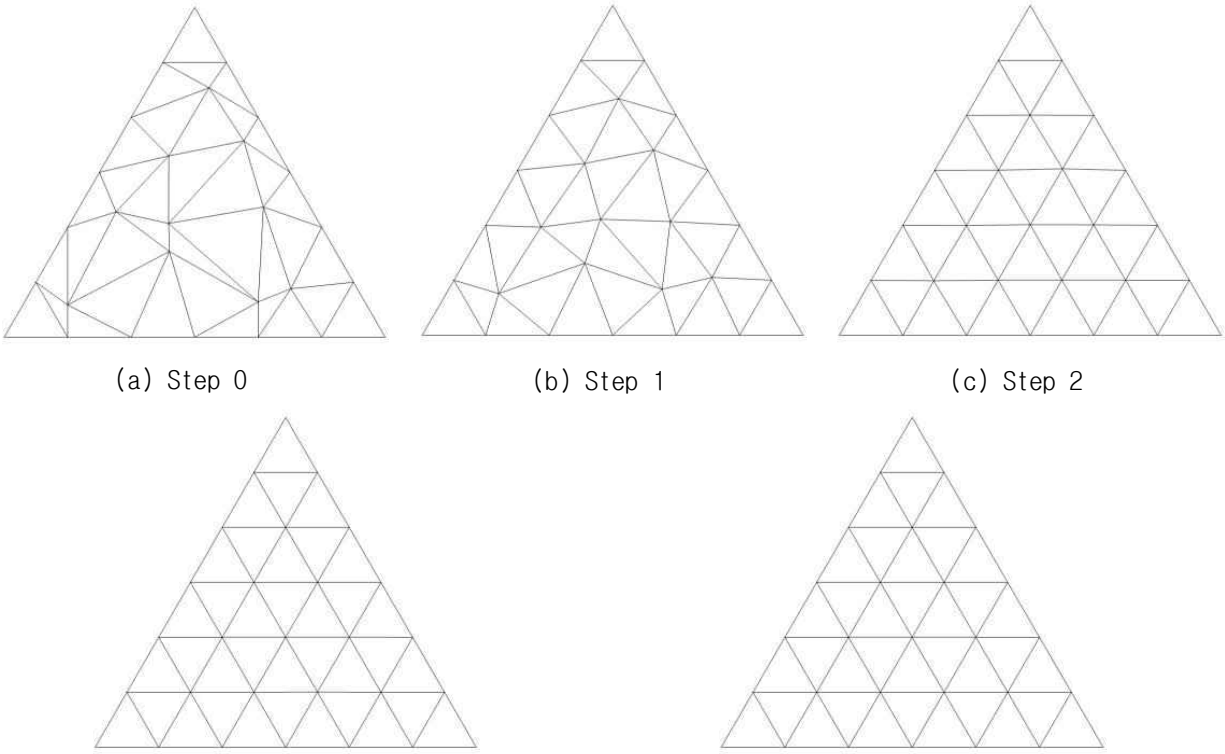


그림 2.2.1.11 스텝의 증가에 따른 목적함수 값의 수렴과정

스텝이 진행됨에 따라 돔의 격자 형상이 정삼각형에 가까운 값으로 수렴되는 것은 그림 2.2.1.12를 통해서 관찰할 수 있다. 초기 스텝의 매우 불규칙한 형상의 삼각형들은 해석이 진

행됨에 따라 점차 정삼각형의 형상으로 나타나고 있으며, 그림 2.2.1.12 (d)와 (e)의 스텝에서는 변화가 거의 없다. 그림 2.2.1.11의 결과에서 보는 바와 같이 그림 2.2.1.12에서도 거의 변화가 없이 스텝의 증가에 따라 0의 값으로 수렴한다.



(a) Step 0 (b) Step 1 (c) Step 2

(d) Step 3 (e) Step 4

그림 2.2.1.12 평면 삼각형 예제의 절점과 형상

표 2.2.1.3. 평면 삼각형 예제의 계산결과 (단위: m)

	Step	0	1	2	3	4
삼각형메쉬	면적합계	0.15589E+02	0.15589E+02	0.15589E+02	0.15589E+02	0.15589E+02
	면적평균	0.43301E+00	0.43301E+00	0.43301E+00	0.43301E+00	0.43301E+00
	면적표준편차	0.22689E+00	0.98259E-01	0.37397E-02	0.38015E-03	0.66556E-04
	길이편차합계	0.88409E+01	0.48543E+01	0.17516E+00	0.13752E-01	0.34783E-02
	길이편차평균	0.24558E+00	0.13484E+00	0.48654E-02	0.38200E-03	0.96619E-04
	길이표준편차	0.15094E+00	0.79894E-01	0.40365E-02	0.47033E-03	0.65950E-04
격자부재	총길이	0.65688E+02	0.63941E+02	0.63002E+02	0.63000E+02	0.63000E+02
	평균길이	0.10427E+01	0.10149E+01	0.10000E+01	0.10000E+01	0.10000E+01
	표준편차	0.31451E+00	0.16028E+00	0.62180E-02	0.61074E-03	0.11397E-03

각 단계의 삼각형 메쉬의 면적, 평균, 편차 및 격자부재의 길이, 평균, 편차에 대한 결과를 표 2.2.1.3에 나타내었다. 각각의 표준편차는 삼각형 면적의 경우 표준편차가 0.000067의 값에 수렴하였으며, 삼각형 세 변에 대한 길이의 표준편차의 평균도 0.000097로 매우 작은 오차로 나타났다. 또한 각각의 삼각형에 대한 세변의 표준편차의 격자를 이루는 선 부재의 경우 길이의 평균이 모두 1.0의 값으로 나타났으며, 길이의 표준편차도 각 스텝마다 감소하여 스텝수가 4에서는 0.00011의 값에 수렴하였다. 매 스텝마다 모든 표준편차들은 모두 0에 가까운 값으로 나타났으며, 스텝의 증가에 따라 감소하는 경향을 보이고 있다. 이상의 결과에서 볼 때, 제안된 정삼각형 기반의 삼각형 메쉬 형상 최적화 알고리즘은 평면 삼각형 모델에서 잘 적용되고 있으며, 해석 스텝의 증가에 따라 최소의 편차를 가지는 곡면을 구할 수 있다.

바. 반구형 돔 곡면의 삼각 격자 형성을 위한 모델링과 DE해석결과

평면 삼각형 메쉬의 예제와는 달리 공간상의 삼각형 패턴에서 완전한 정삼각형은 더 이상 유지할 수는 없다. 그 이유는 삼각형 곡면으로의 형성에서 정삼각형으로 모든 곡면을 표현할 수 없기 때문이다. 그러나 삼각형의 각 모서리 길이의 표준편차를 최소화함으로서 가장 근접한 곡면을 형성하는 절점들을 구성할 수 있다. 본 연구에서는 정형곡면에 대한 삼각형 패턴에 대해서 다루며, 비정형 곡면은 추후 연구년도에서 다루도록 한다. 돔형 곡면에서의 좌표를 정의하기 위해서 돔의 저면반경 L과 높이 H로 구성되는 구형 곡면을 고려하기로 한다. 우선, 형상파라메타는 $\mu = H/2L$ 로 정의하고, 구면 내의 한 점을 공간상에서 표현하기 위해서 식 2.2.1.11을 이용하기로 한다.

$$z_0(x,y) = r\cos\theta \qquad (2.2.1.11)$$

여기서,

$$r = \frac{L}{\sin\theta_\mu}$$

$$\sin\theta_\mu = 2\ \arctan\left(\frac{H}{L}\right) = 2\ \arctan(2\mu)$$

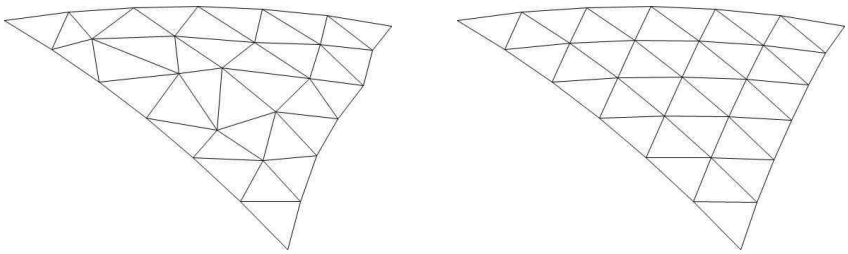
식 2.2.2.5의 경우는 구의 중심이 (0,0,0)일 경우이므로, 높이 H와의 관계를 이용하여 다음과 같이 z(x,y) 좌표를 결정할 수 있다.

$$z(x,y) = z_0(x,y) - r - H \qquad (2.2.1.12)$$

식 2.2.1.12를 돔형 곡면의 z 좌표계로 정의하고, 모델의 입력 데이터는 L과 H와의 격자 패턴으로 계산할 수 있다. 해석대상예제를 형상파라메타 μ에 따른 3가지 모델에 대해서 다루도록 한다. 따라서 대상 모델은 길이 L=6m, μ= 0.1, 0.2, 0.3일 때로 가정한다. 해석대상모델 모두 정삼각형만으로는 원하는 곡률의 곡면을 형성할 수 없지만 최소의 편차를 가지는 정삼

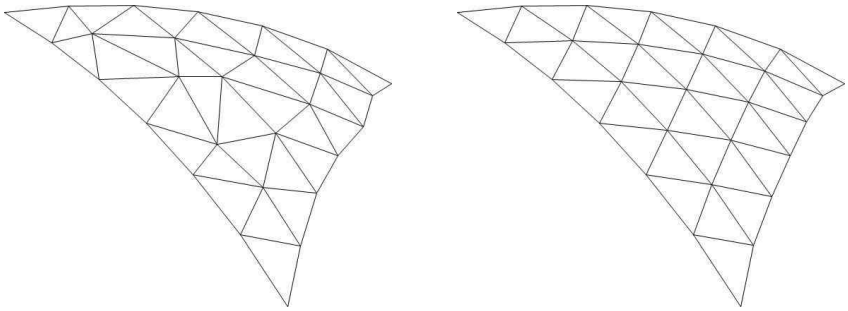
각형 곡면을 형성하고자 한다.

해석대상모델의 초기형상은 다음 그림과 같다. 해석을 위해 가정된 차분진화알고리즘의 연산자와 스텝 및 확률변수 값 등은 평면 삼각형 모델과 동일한 값을 이용하도록 한다. 매 스텝마다 이전스텝의 최종형상이 초기형상으로 초기화하여 해석을 수행하며, 전체적인 과정 모두 평면 삼각형 예제와 동일하다. 삼각형 네트워크 돔은 일반적으로 여섯 개로 분할 된 대칭모델이므로 다음에 나오는 그림들의 (a)와 같이 한쪽 면만을 대상으로 해석을 수행하도록 한다.



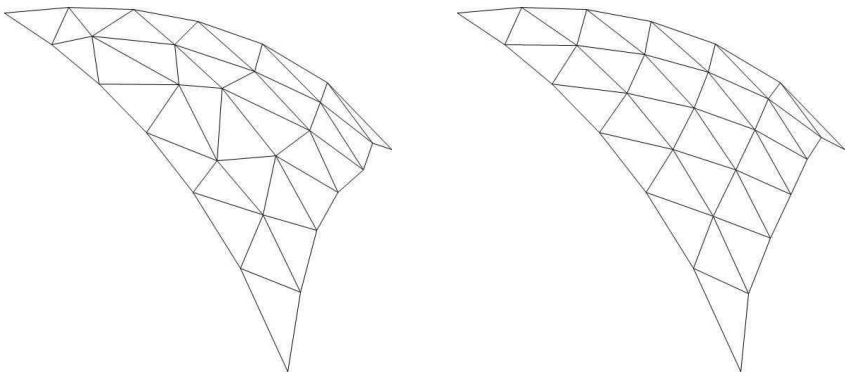
(a) Initial shape (b) Result

그림 2.2.1.13 삼각형 그리드 돔 예제의 계산결과 ($\mu = 0.1$; H=1.2; L=6)



(a) Initial shape (b) Result

그림 2.2.1.14 삼각형 그리드 돔 예제의 계산결과 ($\mu = 0.2$; H=1.2; L=6)



(a) Initial shape (b) Result

그림 2.2.1.15 삼각형 그리드 돔 예제의 계산결과 ($\mu = 0.3$; H=1.2; L=6)

표 2.2.1.4. 삼각형 네트워크 돔 예제의 계산결과 (단위: m)

μ		Step	0	1	2	3	4
0.1	삼각형 메쉬	면적합계	0.15925E+02	0.16042E+02	0.16002E+02	0.15996E+02	0.15994E+02
		면적평균	0.44236E+00	0.44560E+00	0.44449E+00	0.44433E+00	0.44428E+00
		면적표준편차	0.91342E-01	0.71898E-02	0.44657E-02	0.43415E-02	0.43465E-02
		길이편차합계	0.44926E+01	0.55891E+00	0.41254E+00	0.40770E+00	0.40710E+00
		길이편차평균	0.12480E+00	0.15525E-01	0.11460E-01	0.11325E-01	0.11308E-01
		길이표준편차	0.78104E-01	0.11227E-01	0.73021E-02	0.73806E-02	0.73677E-02
	격자부재	총길이	0.64594E+02	0.63976E+02	0.63900E+02	0.63890E+02	0.63887E+02
		평균길이	0.10253E+01	0.10155E+01	0.10143E+01	0.10141E+01	0.10141E+01
		표준편차	0.15039E+00	0.18994E-01	0.14324E-01	0.14254E-01	0.14252E-01
0.2	삼각형 메쉬	면적합계	0.17334E+02	0.17096E+02	0.17139E+02	0.17156E+02	0.17156E+02
		면적평균	0.48151E+00	0.47490E+00	0.47608E+00	0.47656E+00	0.47656E+00
		면적표준편차	0.94785E-01	0.20268E-01	0.16984E-01	0.16885E-01	0.16886E-01
		길이편차합계	0.49854E+01	0.15809E+01	0.15795E+01	0.15893E+01	0.15893E+01
		길이편차평균	0.13848E+00	0.43913E-01	0.43874E-01	0.44146E-01	0.44146E-01
		길이표준편차	0.79514E-01	0.32288E-01	0.31531E-01	0.31338E-01	0.31337E-01
	격자부재	총길이	0.67659E+02	0.66431E+02	0.66501E+02	0.66529E+02	0.66529E+02
		평균길이	0.10740E+01	0.10545E+01	0.10556E+01	0.10560E+01	0.10560E+01
		표준편차	0.16137E+00	0.59943E-01	0.58355E-01	0.58325E-01	0.58325E-01
0.3	삼각형 메쉬	면적합계	0.19352E+02	0.18846E+02	0.18943E+02	0.18981E+02	0.18981E+02
		면적평균	0.53756E+00	0.52350E+00	0.52619E+00	0.52726E+00	0.52726E+00
		면적표준편차	0.11164E+00	0.41161E-01	0.34802E-01	0.34006E-01	0.34006E-01
		길이편차합계	0.64047E+01	0.34016E+01	0.34799E+01	0.35048E+01	0.35048E+01
		길이편차평균	0.17791E+00	0.94488E-01	0.96663E-01	0.97355E-01	0.97355E-01
		길이표준편차	0.84204E-01	0.78089E-01	0.75613E-01	0.75825E-01	0.75825E-01
	격자부재	총길이	0.72346E+02	0.70817E+02	0.70982E+02	0.71049E+02	0.71049E+02
		평균길이	0.11483E+01	0.11241E+01	0.11267E+01	0.11278E+01	0.11278E+01
		표준편차	0.20882E+00	0.14041E+00	0.13803E+00	0.13792E+00	0.13792E+00

이상의 조건으로 계산한 결과는 그림 2.2.1.13-2.2.1.15의 (b)와 같은 최종형상을 얻을 수 있었다. 그림에서 보는 바와 같이 삼각형의 패턴이 매우 고른 모양을 보이고 있으며, 라이즈 스팬비가 클수록 경계부에서의 삼각형 형상이 다르게 나타나는 것을 결과형상을 통해서 알 수 있다.

또한 표 2.2.1.4의 스텝에 따라 계산된 표준편차와 면적 및 평균값들을 통해서 볼 때, 초기의 입력데이터에 의한 형상에 비해서 매우 균일한 삼각형 메쉬가 구현된 것임을 잘 알 수 있다. 이상과 같은 삼각형 네트워크 돔의 모델에 대해서 정삼각형으로 구현할 수 있는 네트

워크 모델을 다루어본 결과 삼각형 네트워크를 형성하는 격자의 단위부재 길이 및 길이의 표준편차가 매우 작은 균일한 길이의 메쉬를 구할 수 있었으며, 정삼각형의 분포를 이루고 있다. 평판 삼각형 격자 뿐 아니라 곡면 돔의 경우에서도 매우 만족할 만한 결과를 얻었다. 또한 해석결과에서 돔의 라이즈-스팬 비가 낮을수록 정삼각형의 형상이 더 뚜렷해지는데 이것은 돔의 곡률변화에 따라 나타나는 결과로 판단된다.

삼각형 기반 곡면 구조물의 모듈을 일정하게 유지하기 위한 기법은 구조 역학적 측면에서도 기하학적 측면에서도 모두 필요하다. 특히, 실무에서 등간격의 정렬된 삼각형으로 구성하고자 할 때 정확한 좌표와 부재의 길이는 매우 유용한 정보가 되며, 균일한 부재로 구성되는 격자 곡면 구조물은 이와 같은 정삼각형 기반 곡면 모델링 기법을 이용하는 것이 필요하다. 본 연구에서 차분진화알고리즘을 이용하여 정삼각형 기반의 메쉬 곡면을 구하는 방법에 대해서 삼각형 평판 예제와 라이즈 스팬비가 다른 네트워크 돔 예제를 이용하여 결과를 검증한 결과, 삼각형 평판 예제의 경우는 정삼각형 패턴과 일치하는 형상과 절점을 구할 수 있었다. 네트워크 돔 모델의 결과도 균일한 배열의 최소길이편차에 수렴한 삼각형 메쉬 형상을 얻었다. 또한 라이즈-스팬비가 감소함에 따라 목적함수의 값도 따라서 감소했으며, 이와 같은 결과는 정삼각형 곡면이 곡률이 클수록 표현하기 힘든 일반적인 사항을 반영하고 있다. 해석대상모델의 결과에서 볼 때 본 연구에서 제안된 최적화 수리모형과 차분진화알고리즘을 적용한 프로그램은 삼각형 네트워크 돔의 균일한 삼각형 모델링에 적합한 결과를 보였다.

사. 화음탐색 알고리즘(Harmony Search Algorithm)과 탐색 연산자

일반적으로 메타 휴리스틱 알고리즘을 이용한 최적화문제는 연속, 개별 또는 조합, 변분과 같은 몇 가지 그룹으로 분류되며, 문제의 제약조건 존재나 부재에 따라 결정된다. 이러한 분류는 그들이 문제의 제약조건을 규정하기 시작할 때부터 매우 중요하게 여겨지며, 다양한 종류의 기술은 다양한 종류의 최적화 문제를 다루기 위해서 나타나기 시작했다. 넓은 의미에서, 이들 기술은 정확하고 근사적인 값을 갖는 알고리즘으로 구분할 수 으며, 이러한 branch&bound 및 동적프로그램과 같은 정확한 알고리즘은 제한된 시간에 최적의 해를 찾는 것을 보장한다. 그러나 NP-hard 범주에 속하는 최적화문제에 대한 정확한 방법은 실용적인 목적의 응용프로그램에 대한 지수 증가적인 계산시간을 필요로 하게 되므로 지난 40년간 정확한 방법이 제공되어져 왔음에도 불구하고 최상의 답을 보장해주지 않았으며, 이로 인해 메타 휴리스틱 알고리즘의 발전은 문제의 해결을 가능하게 했다.

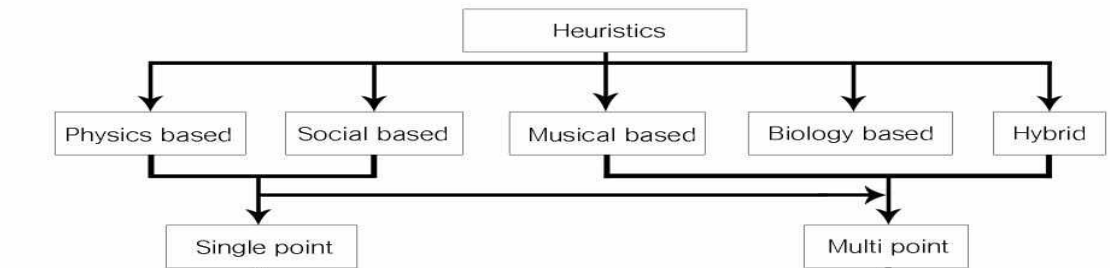


그림 2.2.1.16 휴리스틱 방법의 모델링 분류

메타 휴리스틱 알고리즘은 최적화문제에 만족하는 결과를 도출하는 가장 정확한 알고리즘으로 잘 알려져 있지만 매우 저조한 최적해의 결과나 차원수가 증가할 때 발생하는 컴퓨터의 혼잡성 등은 상당한 문제점이 되었다. 많은 메타휴리스틱 알고리즘들은 그림 2.2.1.16에서 분류한 바와 같이 주로 다양한 생물학적 혹은 자연적 현상 등을 모델링하여 최적해를 구하기 위해 모델링되었으며, 유전자 알고리즘이 대표적이라 할 수 있다. 그 외에도 차분진화 알고리즘, 양자탐색알고리즘 등의 다양한 방법이 시도되었다. 이중 다른 탐색 알고리즘과는 달리 악기의 조율과정을 모델링한 화음탐색법은 최근 개발된 알고리즘으로서 2000년에 JW Geem에 의해 처음 제안된 메타휴리스틱 알고리즘이다. 기존의 최적화 기법에 비해 최적해 탐색에 있어 우수한 결과를 나타내는 것으로 알려져 있으며, 국내를 중심으로 연구가 진행중인 최적화 기법이다. 화음탐색법은 김종우(각주삽입)에 의해 처음 제안된 발견적 탐색법이다. 대부분의 발견적 탐색법이 자연현상의 관찰을 통해 만들어 졌지만, 화음탐색알고리즘은 화음이라는 인공적인 형상에서 영감을 얻어 만들어진 알고리즘이다.

화음탐색알고리즘은 적절한 시간에 해 공간에서 빠르게 영역을 식별하는 것이 장점이지만 수치 응용 프로그램에 대한 로컬 검색을 수행하는 문제가 발생한다. 화음탐색알고리즘의 미세조정 특성을 개선하기 위해 조정특성과 화음탐색의 수렴속도를 높이는 새로운 기술을 가지는 개선된 화음탐색알고리즘을 사용한다. 화음탐색알고리즘은 기존의 최적화 기법보다 더 적은 수학적 요구사항을 부과하고 결정변수의 초기 값 설정을 필요로 하지 않으며, 확률적 무작위 검색을 사용하기 때문에 유도체 정보 또한 불필요하다는 장점을 가지고 있다. 화음탐색 알고리즘은 앞서 설명한 대로 음악의 즉흥연주와 화음조절에서 영감을 받은 것으로서 다양한 분야의 전문가들, 특히 최적화 문제를 해결하려는 사람들이 많은 관심을 가져온 해법으로 파라메타 설정의 측면에서의 개선과 다른 메타휴리스틱 알고리즘과 컴포넌트 혼성화의 관점에서 해석이 매우 진보적임을 설명하였다. 이것은 유전자알고리즘의 building block theory의 약점을 극복하게 해주며, 새로운 벡터를 생성해낸다. 이러한 사항들이 알고리즘의 융통성(flexibility)을 증가시키고, 더 나은 해결책을 생성한다. 그러나 화음탐색법은 해답을 적정시간에 찾아내는 높은 성능을 갖고 있으나, 국소최적점이 다수가 존재할 경우 문제가 발생한다.

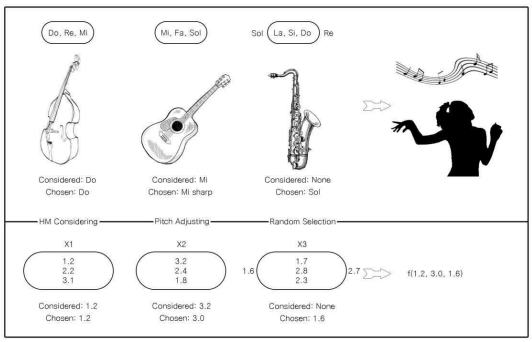


그림 2.2.1.17 화음탐색알고리즘의 아이디어와 모델링

화음탐색 알고리즘의 기본적인 아이디어는 아름다운 사운드가 반복적인 연습과 세미한 조율을 통해서 이루어지듯이 객관적인 목표치 역시 반복과정과 이 과정에서의 랜덤하게 찾아

낸 음원과 미세한 조절방법이 적용되어 값이 향상된다는 것에서 출발한다. 그림 2.2.1.17에서 보는바와 같이 각각의 악기에서 각각의 음원이 발생하고, 이 음원을 변수 X_1, X_2그리고 X_3에 대응시킨다. 이때의 각 성분에 대해서 정의된 것을 기억해 두고 $X_1 = \{1.2, 2.2, 3.1\}$ $X_2 = \{3.2, 2.4, 1.8\}$ $X_3 = \{1.7, 2.8, 2.3\}$ 로 표현하여 새로운 미세한 조정과 랜덤 값을 통해서 새로운 음원을 창출하여 평가하고, 기존의 화음보다 낫다면, 새로운 하모니는 유지된다. 이 과정을 반복하는 것이 화음탐색법의 알고리즘 아이디어이다.

화음탐색알고리즘은 여러 악기에서 나오는 소리들이 불협화음에서 점차 잘 어울리는 화음으로 찾아가는 반복계산을 참고하여 개발되었고, 단계 1. 매개변수 초기화 -> 단계 2. HM 초기화 -> 단계 3. HMCR 연산, PAR 연산 -> 단계 4. HM 갱신 -> 단계 5. 탐색중지 결정의 단계로 진행된다. 여기서, 화음탐색의 저장공간 HM(harmony memory)은 HMS(harmony memory size)의 크기만큼 저장된다. 화음조절을 위한 음원의 추출도 HMCR(harmony momory considering rate)의 비율에 의해서 결정되며, 미세한 조절을 위한 PAR(pitch adjusting rate) 확률변수도 매우 중요한 변수로 제공된다.

HM은 이제까지 경험했던 화음 중에서 제일 좋았다고 생각되는 화음들을 모은 집합이고, 이 HM은 유전자알고리즘의 유전자 풀과 유사하다. 우선 설계변수의 초기화는 다음식과 같이 정의할 수 있다.

$$x_{i,j} = x_j^{\min} + r_j \times (x_j^{\max} - x_j^{\min}) \tag{2.2.1.13}$$

초기화 된 HM는 다음과 같이 HMS의 크기만큼 임의로 생성되며, 적합도 평가를 수행한 후 그 값을 포함하여 행렬로 저장하여도 된다.

$$HM = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \cdots\cdots & x_{1,N-1} & x_{1,N} & \vdots & f(x_{1,:}) \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \cdots\cdots & x_{2,N-1} & x_{2,N} & \vdots & f(x_{2,:}) \\ \cdots & \cdots & \cdots\cdots & \cdots & \cdots & \vdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots\cdots & \cdots & \cdots & \vdots & \cdots \\ x_{HMS-1,1} & x_{HMS-1,2} & \cdots\cdots & x_{HMS-1,N-1} & x_{HMS-1,N} & \vdots & f(x_{HMS-1,:}) \\ x_{HMS,1} & x_{HMS,2} & \cdots\cdots & x_{HMS,N-1} & x_{HMS,N} & \vdots & f(x_{HMS,:}) \end{bmatrix} \tag{2.2.1.14}$$

HMCR은 HM에 기억된 기록 값에서 하나의 값을 선택하는 비율이고 (1-HMCR)은 값의 가능범주로부터 무작위로 선택된 하나의 값에 대한 비율이 된다. 이러한 랜덤 변수를 이용하여 메모리 풀에서의 변수를 이용할지 전역탐색을 할지를 결정하게 된다.

$$x'_i \leftarrow \begin{cases} x'_i \in \{x_i^1, x_i^2, \ldots, x_i^{HMS}\} & with\ probability\ HMCR \\ x'_i \in X_i & with\ probability\ (1 - HMCR) \end{cases} \tag{2.2.1.15}$$

피치의 조절은 PAR에 따라서 결정되며, 다음과 같다. 여기서 피치조절을 위한 음 조율의 폭과 연산은 다음과 같이 계산할 수 있으며, 세미한 조절은 세대수에 따라 변할 수 있다.

$$\text{Pitch adjusting decision for } x'_i \leftarrow \begin{cases} Yes & with\ probability\ PAR \\ No & with\ probability\ (1-PAR) \end{cases} \quad (2.2.1.16)$$

$$x'_i \leftarrow x'_i \pm rand() * bw \quad (2.2.1.17)$$

여기서, bw : 임의의 거리 대역폭

새로운 화음벡터인 $x' = (x'_1, x'_2, ..., x'_N)$는 세 가지 규칙에 따라 생성된다 : (1) 메모리 고려, (2) 음높이 조정, (3) 임의 선택. 새로운 화음을 생성하는 것을 즉흥(improvisation)이라고 한다. 그 기억을 고려했을 때 새로운 벡터에 대한 첫 번째 결정변수(x'_1)의 값은 지정된 HM 범위인($x'^1_1 - x'^{HMS}_1$)의 값들 중 선택되어진다. 다른 결정변수들($x'_2, x'_3, ..., x'_N$) 또한 같은 방식으로 선택된다. 0과 1사이에서 변화하는 HMCR은 HM에 기억된 기록 값에서 하나의 값을 선택하는 비율이고 (1-HMCR)은 값의 가능범주로부터 무작위로 선택된 하나의 값에 대한 비율이다. 예를 들어, HMCR=0.85는 화음탐색알고리즘이 저장된 기록 값의 85% 확률을 가지는 HM 또는 100~85%의 확률을 가지는 전체 가능한 범위로부터 결정변수 값을 선택한다는 것을 의미한다. 메모리 고려사항에 의해 얻어진 모근 구성요소는 음높이를 조정할지 여부를 결정하기 위해 검사된다. 만약 새로운 화음벡터가 HM안에서 가장 좋지 않은 화음보다 개선된 새로운 화음 벡터가 목적함수의 측면에서 결정된다면, 새로운 화음은 HM에 포함되고 가장 좋지 않은 화음은 HM에서 제외된다. 탐색중지의 기준이 되는 최대적합도의 변화가 적정수준을 만족되면 계산이 종료되고, 그렇지 않으면 다시 처음의 화음선택과정을 반복하게 된다. 이와 같은 과정을 가상코드로 나타내면 다음과 같다.

```
Initialization : HM, HMS, HMCR, x
while (not_termination)
   for j = 1:dim do
      if (r<HMCR)
         x[i,j] from HM
         if (r<PAR)
            if (r<0.5)
               x[i, j] = x[i, j] - r*bw
            else
               x[i, j] = x[i, j] + r4*bw
            end if
         else
            x[i, j] = x ∈ Φ  (Φ = Value set)
         end if
      else (random selection)
            x[i, j] = x ∈ Φ  (Φ = Value Set)
      end if
   end do
   if x[i, :] violates problem constraints
      Handle constraints
   end if
   fitness_x[i] = evaluate_fitness (x[i, :])
   update_memory (x[i, :]), fitness_x[i])
end while
```

그림 2.2.1.18 화음탐색알고리즘의 가상코드

HMCR과 PAR는 각각 전역 및 로컬 국소 탐색에서 개선책을 찾는데 영향을 준다. 화음탐색 알고리즘의 PAR과 bw는 최적화 된 솔루션 벡터의 미세한 조정을 위한 측면에서 매우 중요한 매개 변수이며, 최적해의 알고리즘의 수렴 속도를 조정하는데 매우 유용하게 사용된다. 기존의 화음탐색알고리즘은 초기화 단계에서 PAR과 bw 값을 결정하면 다시 변경할 수 없고, 알고리즘이 최적의 값을 찾을 때까지 반복하는 횟수가 늘어나는 최대의 단점을 가지며, 큰 bw 값을 포함한 작은 PAR값이 설정된 알고리즘에서 성능저하의 원인이 될 수 있다. 또한, 마지막 세대에서 작은 bw 값은 솔루션 벡터의 미세조정을 증가시키지만 초기세대에서의 bw는 솔루션 벡터의 다양성을 증가시키는 알고리즘을 적용하기 위해 더 큰 값을 가지는 게 좋다. 더 나아가 작은 bw값을 포함한 큰 PAR값은 일반적으로 최적의 솔루션 벡터 수렴 알고리즘의 마지막 세대에서 최고의 솔루션의 개선을 유도한다.

화음탐색알고리즘과 개선된 화음탐색알고리즘의 가장 큰 차이점은 PAR과 bw를 결정하는 방식이다. 화음탐색알고리즘의 성능을 향상시키고 고정된 PAR과 bw의 값을 수정할 수 있기 위해 개선된 화음탐색알고리즘은 즉흥 단계에서 다양한 PAR과 bw의 값을 사용한다. 즉 다음 식에서 나타내는 것과 같이 PAR과 bw 값은 세대수에 따라서 다양하게 변하는 방법을 이용하는 것이다.

$$PAR(gn) = PAR_{\min} + \frac{(PAR_{\max} - PAR_{\min})}{NI} \times gn, \tag{2.2.1.18}$$

여기서,

PAR : 각 세대를 위한 음높이 조정 속도

$PAR_{\min}$: 최소 음높이 조정 속도

$PAR_{\max}$: 최대 음높이 조정 속도

NI : 솔루션 벡터 세대 수

gn : 세대수

$$bw(gn) = bw_{\max}\exp(c \bullet gn), \tag{2.2.1.19}$$

$$c = \frac{Lm(\frac{bw_{\min}}{bw_{\max}})}{NI},$$

여기서,

$bw(gn)$: 각 세대 대역폭

$bw_{\min}$: 최소 대역폭

$bw_{\max}$: 최대 대역폭

이와 같이 기존의 화음탐색 알고리즘에서 확률파라메타의 동적 변화를 주는 영향은 전역해를 찾는 과정의 속도와 지역탐색과 전역탐색의 조화로운 균형을 예상할 수 있다. 그러나 각각의 파라메타가 주는 영향과 최적의 파라메타가 무엇인지는 문제의 형성과 모델링에 따라 다르게 나타날 수 있으며, 목적함수가 주는 특성에 따라 결정되어진다.

아. 화음탐색법을 이용한 삼각그리드 모델링의 최적 확률변수

화음탐색 알고리즘을 이용한 삼각그리드 모델링의 최적곡면을 얻는 방법은 차분진화 알고리즘에서 소개한 것과 유사하지만 확률변수의 최적값은 서로 다르게 된다. 국소최적에 문제점을 해결하기 위해 시도되는 여러 메타 휴리스틱 방법에서도 마찬가지이지만 확률변수의 결정은 매우 중요하다. 차분진화의 경우도 연산자의 선택에 따라 알고리즘의 속도와 해의 정밀도는 달라지며, 확률파라메타에 따른 해의 수렴정도를 판단하여 적용하여야 한다. 화음탐색 알고리즘의 경우 화음메모리의 크기인 HMS와 설계변수를 화음메모리의 경험을 바탕으로 설정할지 아니면 전역탐색을 할지에 따라서 결정되는 HMCR 그리고 미세한 설계변수의 조정을 위한 피치조절변수 PAR의 결정이 매우 중요하다. 그리고 다른 메타 휴리스틱 알고리즘에서도 언급되었듯이 반복되는 세대교체로 수렴되는 최대반복계산횟수(itermax)가 중요한 파라메타가 된다.

본 절에서는 이와 같은 파라메타의 변화에 따른 최적해의 분포를 살펴보기로 한다. 우선, 사용되는 파라메타에서 최대반복횟수 itermax를 각각 1000, 1500, 2000, 3000, 5000, 7500, 10000, 15000으로 채택하고, HMS의 값은 5-50으로 5씩 증가한 값을 이용한다. HMCR의 경우도 마찬가지로 0.0-1.0까지 변화시키기로 한다. PAR의 경우는 변화가 가능한 값을 채택하는 개선된 화음탐색방법을 이용하기로 하며, 본 예제에서는 기본값을 이용하기로 한다. 적용되는 대상모델은 2.1.5절에서 설명되어진 삼각형 네트워크 돔 모델을 사용하기로 하며, 링의 수를 하나 더 늘여서 모델을 구성하도록 하였다.

해석결과 그림 2.2.1.19에서 그림 2.2.1.26에서 보는 그래프와 같다. 각각의 해석결과에서 살펴 볼 수 있듯이 HMCR의 영향이 가장 크며, 1에 가까울수록 값은 더욱 좋아지는 것을 알 수 있다. 그러나 기존의 문헌에서 발표되어진 바에 따르면, 1.0의 경우 국소해의 존재에 대한 탐색방법의 조화가 깨어질 수 있으며, 가장 빈번하게 사용되어진 경우는 0.9와 0.99의 경우가 가장 많이 소개되고 있다.

HMS의 경우 모든 HMCR의 범위와 itermax의 경우에서 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 특히 더 큰 값으로 갈 경우 해의 정밀도는 오히려 낮게 나타나며, 이것은 유전자 알고리즘에서와는 조금 다른 특징을 보이고 있다.

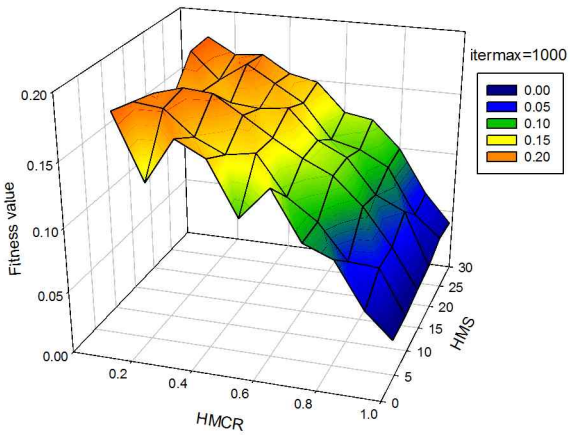


그림 2.2.1.19 해석결과 (itermax=1000)

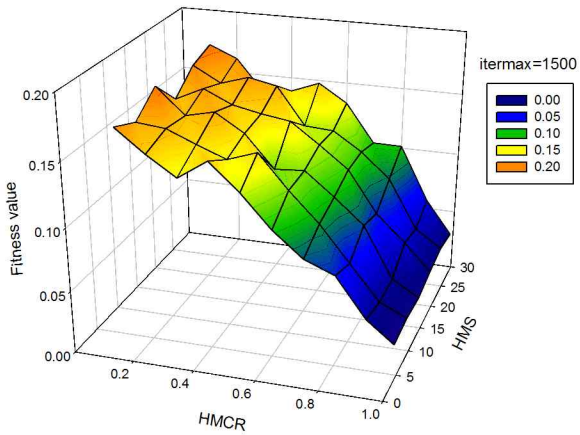


그림 2.2.1.20 해석결과 (itermax=1500)

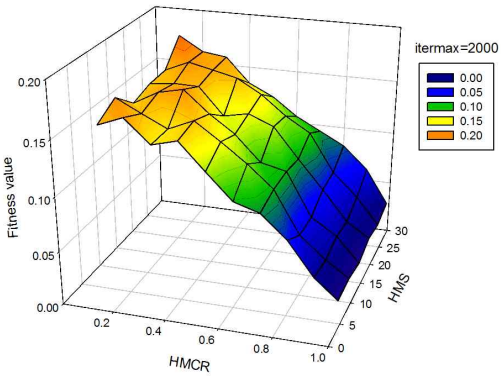


그림 2.2.1.21 해석결과
(itermax=2000)

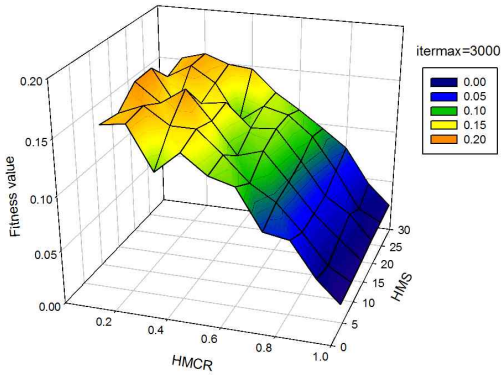


그림 2.2.1.22 해석결과
(itermax=3000)

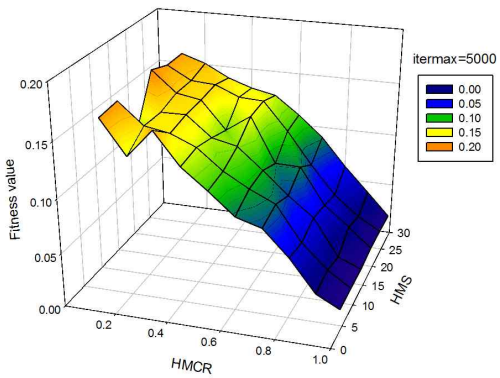


그림 2.2.1.23 해석결과
(itermax=5000)

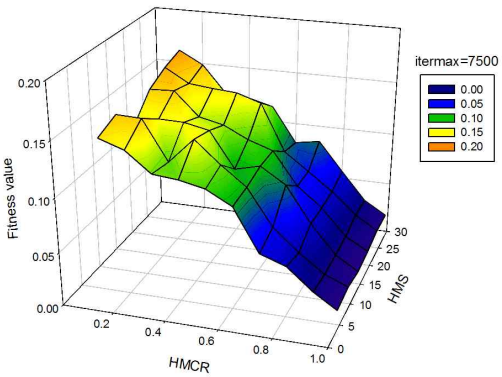


그림 2.2.1.24 해석결과
(itermax=7500)

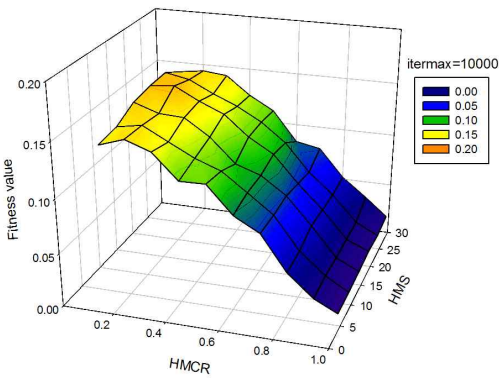


그림 2.2.1.25 해석결과
(itermax=10000)

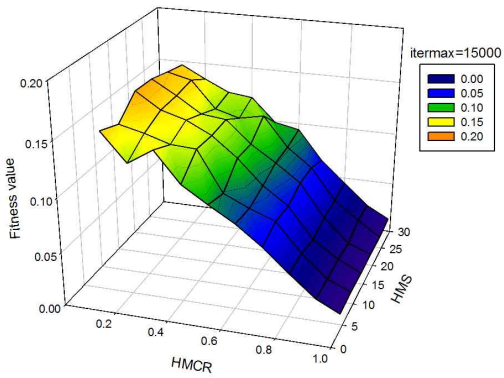


그림 2.2.1.26 해석결과
(itermax=15000)

해석결과에 대한 적합도와 각각의 경우에 대한 적합도 계산횟수에 대해서 표 2.2.1.5에서 표 2.2.1.14에 HMCR값에 따라 나타내었다. 각각의 표에서 볼 때 각각의 경우에서 HMS의 증가가 주는 영향은 크지 않다. 또한 계산횟수에 대한 증가도 크지 않다. 사용되어진 PAR 확률변수의 경우 0.1에서 0.9사이에서 변화하는 값이며, 이때의 최적해의 속도에 대해서는 본

절에서는 다루지 않도록 한다. 또한 밴드폭을 나타내는 bw변수의 경우도 최소 0.0001에서 최대 0.05까지 변화하는 값을 가지게 된다. 이러한 밴드폭의 변화는 지역탐색에서의 영향을 줄 수 있고, 값의 정밀도가 높아질 수 있다. 해석결과의 표에서 볼 때, 화음메모리의 크기의 경우 큰 영향을 주지 않지만 일부 구간에서는 나빠지는 경향도 보이고 있다. 일반적으로 저장메모리 크기의 경우는 5-10의 변수를 사용하는 경우도 있지만 EHS의 경우 30개의 메모리 크기를 가지는 경우가 적합한 방법으로 제시되기도 한다. 문제의 형성과 연산자의 변경은 확률변수의 영향력도 달라지게되고, 최적파라메타의 영역도 변화하게 된다. 모든 경우에서 HMCR은 1에 가까울수록 좋은 결과를 보이고 있으며, 이것은 지역탐색과 전역탐색의 조화를 위해서 반드시 1보다 작아야한다. 그러나 너무 작은 값은 전역해의 공간탐색에 시간을 허비할 뿐 실질적인 이득은 없을 수 있다. 이러한 결과들은 그래프와 표를 통해서 알 수 있으며, 다른 파라메타와 유사하게 문제에 따라 최적의 값이 약간씩은 다르다.

표 2.2.1.5 삼각형 네트워크 돔 예제의 계산결과 적합도 및 적합도 계산횟수 (HMCR=0.1)

Itermax \ HMS		5	10	15	20	25	30
1000	fitness	0.17660E+00	0.17125E+00	0.16576E+00	0.15177E+00	0.17658E+00	0.17570E+00
	nfeval	1005	1010	1015	1020	1025	1030
1500	fitness	0.16476E+00	0.15557E+00	0.17113E+00	0.15064E+00	0.16497E+00	0.17123E+00
	nfeval	1505	1510	1515	1520	1525	1530
2000	fitness	0.15163E+00	0.16268E+00	0.14507E+00	0.15064E+00	0.15183E+00	0.17423E+00
	nfeval	2005	2010	2015	2020	2025	2030
3000	fitness	0.15095E+00	0.14781E+00	0.16383E+00	0.16452E+00	0.14463E+00	0.15132E+00
	nfeval	3005	3010	3015	3020	3025	3030
5000	fitness	0.15962E+00	0.16148E+00	0.11952E+00	0.16556E+00	0.15868E+00	0.15872E+00
	nfeval	5005	5010	5015	5020	5025	5030
7500	fitness	0.14117E+00	0.14856E+00	0.12544E+00	0.14649E+00	0.15548E+00	0.16093E+00
	nfeval	7505	7510	7515	7520	7525	7530
10000	fitness	0.13591E+00	0.13842E+00	0.14776E+00	0.15071E+00	0.15152E+00	0.14073E+00
	nfeval	10005	10010	10015	10020	10025	10030
15000	fitness	0.14746E+00	0.13984E+00	0.15722E+00	0.15619E+00	0.15105E+00	0.14658E+00
	nfeval	15005	15010	15015	15020	15025	15030

표 2.2.1.6 삼각형 네트워크 돔 예제의 계산결과 적합도 및 적합도 계산횟수 (HMCR=0.2)

Itermax \ HMS		5	10	15	20	25	30
1000	fitness	0.12560E+00	0.16850E+00	0.17215E+00	0.15729E+00	0.15499E+00	0.16491E+00
	nfeval	1005	1010	1015	1020	1025	1030
1500	fitness	0.14715E+00	0.15321E+00	0.15057E+00	0.15974E+00	0.15246E+00	0.16160E+00
	nfeval	1505	1510	1515	1520	1525	1530
2000	fitness	0.16056E+00	0.15098E+00	0.15734E+00	0.15337E+00	0.16167E+00	0.16069E+00
	nfeval	2005	2010	2015	2020	2025	2030
3000	fitness	0.15441E+00	0.15717E+00	0.14671E+00	0.13148E+00	0.15745E+00	0.15773E+00
	nfeval	3005	3010	3015	3020	3025	3030
5000	fitness	0.12855E+00	0.14184E+00	0.14102E+00	0.14629E+00	0.14607E+00	0.15118E+00
	nfeval	5005	5010	5015	5020	5025	5030
7500	fitness	0.13328E+00	0.14766E+00	0.13396E+00	0.14749E+00	0.14227E+00	0.14876E+00
	nfeval	7505	7510	7515	7520	7525	7530
10000	fitness	0.14354E+00	0.14237E+00	0.13989E+00	0.15299E+00	0.14696E+00	0.14386E+00
	nfeval	10005	10010	10015	10020	10025	10030
15000	fitness	0.12168E+00	0.13426E+00	0.14218E+00	0.14286E+00	0.14554E+00	0.13468E+00
	nfeval	15005	15010	15015	15020	15025	15030

표 2.2.1.7 삼각형 네트워크 돔 예제의 계산결과 적합도 및 적합도 계산횟수 (HMCR=0.3)

Itermax \ HMS		5	10	15	20	25	30
1000	fitness	0.16122E+00	0.14926E+00	0.17013E+00	0.15089E+00	0.17029E+00	0.16716E+00
	nfeval	1005	1010	1015	1020	1025	1030
1500	fitness	0.13207E+00	0.14365E+00	0.15576E+00	0.14916E+00	0.15947E+00	0.13474E+00
	nfeval	1505	1510	1515	1520	1525	1530
2000	fitness	0.13979E+00	0.13982E+00	0.16235E+00	0.15283E+00	0.15642E+00	0.15753E+00
	nfeval	2005	2010	2015	2020	2025	2030
3000	fitness	0.11490E+00	0.14190E+00	0.16193E+00	0.13609E+00	0.14318E+00	0.14961E+00
	nfeval	3005	3010	3015	3020	3025	3030
5000	fitness	0.15400E+00	0.13778E+00	0.14137E+00	0.14217E+00	0.14448E+00	0.13920E+00
	nfeval	5005	5010	5015	5020	5025	5030
7500	fitness	0.11500E+00	0.11082E+00	0.13340E+00	0.12541E+00	0.13975E+00	0.12250E+00
	nfeval	7505	7510	7515	7520	7525	7530
10000	fitness	0.13533E+00	0.13010E+00	0.13861E+00	0.14107E+00	0.13561E+00	0.14137E+00
	nfeval	10005	10010	10015	10020	10025	10030
15000	fitness	0.13623E+00	0.12694E+00	0.13547E+00	0.12803E+00	0.12009E+00	0.12384E+00
	nfeval	15005	15010	15015	15020	15025	15030

표 2.2.1.8 삼각형 네트워크 돔 예제의 계산결과 적합도 및 적합도 계산횟수 (HMCR=0.4)

Itermax \ HMS		5	10	15	20	25	30
1000	fitness	0.14920E+00	0.13839E+00	0.15567E+00	0.14856E+00	0.15669E+00	0.15340E+00
	nfeval	1005	1010	1015	1020	1025	1030
1500	fitness	0.14750E+00	0.13473E+00	0.14152E+00	0.14435E+00	0.15474E+00	0.13879E+00
	nfeval	1505	1510	1515	1520	1525	1530
2000	fitness	0.14595E+00	0.14984E+00	0.14272E+00	0.12774E+00	0.15098E+00	0.13427E+00
	nfeval	2005	2010	2015	2020	2025	2030
3000	fitness	0.13493E+00	0.14166E+00	0.13546E+00	0.13948E+00	0.10890E+00	0.14732E+00
	nfeval	3005	3010	3015	3020	3025	3030
5000	fitness	0.12520E+00	0.12785E+00	0.12271E+00	0.11617E+00	0.13479E+00	0.13148E+00
	nfeval	5005	5010	5015	5020	5025	5030
7500	fitness	0.11282E+00	0.13431E+00	0.12855E+00	0.12012E+00	0.13802E+00	0.12048E+00
	nfeval	7505	7510	7515	7520	7525	7530
10000	fitness	0.11250E+00	0.11810E+00	0.12335E+00	0.13125E+00	0.12596E+00	0.12427E+00
	nfeval	10005	10010	10015	10020	10025	10030
15000	fitness	0.10870E+00	0.12552E+00	0.12384E+00	0.12529E+00	0.11345E+00	0.12099E+00
	nfeval	15005	15010	15015	15020	15025	15030

표 2.2.1.9 삼각형 네트워크 돔 예제의 계산결과 적합도 및 적합도 계산횟수 (HMCR=0.5)

Itermax \ HMS		5	10	15	20	25	30
1000	fitness	0.10715E+00	0.14230E+00	0.14067E+00	0.15144E+00	0.14313E+00	0.14851E+00
	nfeval	1005	1010	1015	1020	1025	1030
1500	fitness	0.12667E+00	0.14273E+00	0.11583E+00	0.14083E+00	0.12429E+00	0.14758E+00
	nfeval	1505	1510	1515	1520	1525	1530
2000	fitness	0.12207E+00	0.13387E+00	0.12674E+00	0.13241E+00	0.13794E+00	0.12313E+00
	nfeval	2005	2010	2015	2020	2025	2030
3000	fitness	0.11748E+00	0.12121E+00	0.10611E+00	0.11802E+00	0.12567E+00	0.12641E+00
	nfeval	3005	3010	3015	3020	3025	3030
5000	fitness	0.10687E+00	0.10927E+00	0.11747E+00	0.13174E+00	0.13355E+00	0.12659E+00
	nfeval	5005	5010	5015	5020	5025	5030
7500	fitness	0.10777E+00	0.11408E+00	0.95161E-01	0.10889E+00	0.13054E+00	0.11441E+00
	nfeval	7505	7510	7515	7520	7525	7530
10000	fitness	0.11294E+00	0.10937E+00	0.10129E+00	0.11229E+00	0.11320E+00	0.11135E+00
	nfeval	10005	10010	10015	10020	10025	10030
15000	fitness	0.93670E-01	0.87927E-01	0.10558E+00	0.10461E+00	0.11818E+00	0.98566E-01
	nfeval	15005	15010	15015	15020	15025	15030

표 2.2.1.10 삼각형 네트워크 돔 예제의 계산결과 적합도 및 적합도 계산횟수 (HMCR=0.6)

Itermax \ HMS		5	10	15	20	25	30
1000	fitness	0.13308E+00	0.11140E+00	0.12718E+00	0.12802E+00	0.11546E+00	0.12546E+00
	nfeval	1005	1010	1015	1020	1025	1030
1500	fitness	0.10142E+00	0.11641E+00	0.11759E+00	0.12429E+00	0.12267E+00	0.13306E+00
	nfeval	1505	1510	1515	1520	1525	1530
2000	fitness	0.98832E-01	0.11692E+00	0.10349E+00	0.12286E+00	0.11976E+00	0.10624E+00
	nfeval	2005	2010	2015	2020	2025	2030
3000	fitness	0.11088E+00	0.98598E-01	0.11324E+00	0.11991E+00	0.11972E+00	0.11169E+00
	nfeval	3005	3010	3015	3020	3025	3030
5000	fitness	0.86846E-01	0.95981E-01	0.97881E-01	0.89747E-01	0.10701E+00	0.10959E+00
	nfeval	5005	5010	5015	5020	5025	5030
7500	fitness	0.95098E-01	0.96663E-01	0.10106E+00	0.10094E+00	0.85783E-01	0.80774E-01
	nfeval	7505	7510	7515	7520	7525	7530
10000	fitness	0.88062E-01	0.92558E-01	0.93204E-01	0.98519E-01	0.95470E-01	0.82911E-01
	nfeval	10005	10010	10015	10020	10025	10030
15000	fitness	0.79652E-01	0.77140E-01	0.82492E-01	0.89321E-01	0.90081E-01	0.93810E-01
	nfeval	15005	15010	15015	15020	15025	15030

표 2.2.1.11 삼각형 네트워크 돔 예제의 계산결과 적합도 및 적합도 계산횟수 (HMCR=0.7)

Itermax \ HMS		5	10	15	20	25	30
1000	fitness	0.94566E-01	0.94813E-01	0.11613E+00	0.11665E+00	0.10955E+00	0.12154E+00
	nfeval	1005	1010	1015	1020	1025	1030
1500	fitness	0.82140E-01	0.93198E-01	0.99156E-01	0.10674E+00	0.10764E+00	0.10176E+00
	nfeval	1505	1510	1515	1520	1525	1530
2000	fitness	0.91578E-01	0.96910E-01	0.98026E-01	0.94878E-01	0.10577E+00	0.94076E-01
	nfeval	2005	2010	2015	2020	2025	2030
3000	fitness	0.73746E-01	0.83887E-01	0.87174E-01	0.92078E-01	0.10140E+00	0.95573E-01
	nfeval	3005	3010	3015	3020	3025	3030
5000	fitness	0.79839E-01	0.85133E-01	0.77095E-01	0.89174E-01	0.76564E-01	0.89809E-01
	nfeval	5005	5010	5015	5020	5025	5030
7500	fitness	0.55773E-01	0.62848E-01	0.86143E-01	0.69783E-01	0.68841E-01	0.84601E-01
	nfeval	7505	7510	7515	7520	7525	7530
10000	fitness	0.75164E-01	0.75061E-01	0.76925E-01	0.72941E-01	0.69182E-01	0.78305E-01
	nfeval	10005	10010	10015	10020	10025	10030
15000	fitness	0.61864E-01	0.68145E-01	0.66130E-01	0.72561E-01	0.72583E-01	0.65292E-01
	nfeval	15005	15010	15015	15020	15025	15030

표 2.2.1.12 삼각형 네트워크 돔 예제의 계산결과 적합도 및 적합도 계산횟수 (HMCR=0.8)

Itermax \ HMS		5	10	15	20	25	30
1000	fitness	0.84896E-01	0.66467E-01	0.94514E-01	0.89055E-01	0.97301E-01	0.99305E-01
	nfeval	1005	1010	1015	1020	1025	1030
1500	fitness	0.72599E-01	0.64913E-01	0.79124E-01	0.73410E-01	0.87348E-01	0.10137E+00
	nfeval	1505	1510	1515	1520	1525	1530
2000	fitness	0.70617E-01	0.57836E-01	0.57670E-01	0.68230E-01	0.69939E-01	0.81896E-01
	nfeval	2005	2010	2015	2020	2025	2030
3000	fitness	0.69618E-01	0.59516E-01	0.60139E-01	0.61496E-01	0.70625E-01	0.78689E-01
	nfeval	3005	3010	3015	3020	3025	3030
5000	fitness	0.56195E-01	0.52567E-01	0.59085E-01	0.54913E-01	0.49185E-01	0.63011E-01
	nfeval	5005	5010	5015	5020	5025	5030
7500	fitness	0.47433E-01	0.42125E-01	0.52533E-01	0.51210E-01	0.51479E-01	0.56765E-01
	nfeval	7505	7510	7515	7520	7525	7530
10000	fitness	0.42612E-01	0.44545E-01	0.51399E-01	0.50428E-01	0.49076E-01	0.51839E-01
	nfeval	10005	10010	10015	10020	10025	10030
15000	fitness	0.40766E-01	0.41374E-01	0.36823E-01	0.41339E-01	0.42584E-01	0.44588E-01
	nfeval	15005	15010	15015	15020	15025	15030

표 2.2.1.13 삼각형 네트워크 돔 예제의 계산결과 적합도 및 적합도 계산횟수 (HMCR=0.9)

Itermax \ HMS		5	10	15	20	25	30
1000	fitness	0.48184E-01	0.64757E-01	0.64666E-01	0.77803E-01	0.60016E-01	0.63062E-01
	nfeval	1005	1010	1015	1020	1025	1030
1500	fitness	0.41384E-01	0.36853E-01	0.37971E-01	0.51580E-01	0.47577E-01	0.56811E-01
	nfeval	1505	1510	1515	1520	1525	1530
2000	fitness	0.39855E-01	0.37718E-01	0.42480E-01	0.39750E-01	0.47840E-01	0.60578E-01
	nfeval	2005	2010	2015	2020	2025	2030
3000	fitness	0.37415E-01	0.31268E-01	0.39084E-01	0.46171E-01	0.34871E-01	0.44911E-01
	nfeval	3005	3010	3015	3020	3025	3030
5000	fitness	0.26427E-01	0.29990E-01	0.24266E-01	0.36396E-01	0.30151E-01	0.38987E-01
	nfeval	5005	5010	5015	5020	5025	5030
7500	fitness	0.27437E-01	0.24873E-01	0.25155E-01	0.25831E-01	0.30785E-01	0.29650E-01
	nfeval	7505	7510	7515	7520	7525	7530
10000	fitness	0.22023E-01	0.24456E-01	0.23457E-01	0.24063E-01	0.24235E-01	0.33844E-01
	nfeval	10005	10010	10015	10020	10025	10030
15000	fitness	0.20872E-01	0.20270E-01	0.21064E-01	0.19005E-01	0.25276E-01	0.24103E-01
	nfeval	15005	15010	15015	15020	15025	15030

표 2.2.1.14 삼각형 네트워크 돔 예제의 계산결과 적합도 및 적합도 계산횟수 (HMCR=0.99)

Itermax \ HMS		5	10	15	20	25	30
1000	fitness	0.28074E-01	0.28499E-01	0.32059E-01	0.34536E-01	0.42118E-01	0.39410E-01
	nfeval	1005	1010	1015	1020	1025	1030
1500	fitness	0.24588E-01	0.26846E-01	0.25219E-01	0.29804E-01	0.33036E-01	0.29494E-01
	nfeval	1505	1510	1515	1520	1525	1530
2000	fitness	0.21716E-01	0.23127E-01	0.19186E-01	0.25932E-01	0.22605E-01	0.28251E-01
	nfeval	2005	2010	2015	2020	2025	2030
3000	fitness	0.17151E-01	0.18378E-01	0.20373E-01	0.22935E-01	0.23993E-01	0.25269E-01
	nfeval	3005	3010	3015	3020	3025	3030
5000	fitness	0.15170E-01	0.15524E-01	0.15426E-01	0.17990E-01	0.18010E-01	0.17058E-01
	nfeval	5005	5010	5015	5020	5025	5030
7500	fitness	0.13448E-01	0.15932E-01	0.12000E-01	0.13809E-01	0.17344E-01	0.16869E-01
	nfeval	7505	7510	7515	7520	7525	7530
10000	fitness	0.11238E-01	0.11695E-01	0.13014E-01	0.14914E-01	0.13468E-01	0.16496E-01
	nfeval	10005	10010	10015	10020	10025	10030
15000	fitness	0.10098E-01	0.11187E-01	0.10438E-01	0.10962E-01	0.10523E-01	0.12766E-01
	nfeval	15005	15010	15015	15020	15025	15030

지금까지의 결과에서 HMS의 결과는 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 이를 더 정확하게 알아보기 위해서 앞서 설명된 모델에서 최대반복횟수의 차이를 가장 크게 한 모델로 itermax를 500과 20000의 값을 채택하여 비교하도록 한다. 또한 HMS의 수를 60까지 증가시켜 해석을 수행하도록 한다. 해석결과로 나타난 그림 2.2.1.27과 그림 2.2.1.28은 이상의 경우를 대변하고 있다. 여기서 최대반복횟수가 500인경우는 HMS의 증가가 오히려 높은 적합도 값의 결과를 보이고 있는 반면, 최대반복횟수가 큰 모델의 경우는 큰 변동이 없다. 또한 전체적인 변화에서도 영향을 미치지 않는다. 해석과정에서 계산되는 전체 적합도함수의 계산횟수는 속도와 연관이 있으나 화음메모리의 크기의 증가가 최대반복횟수에 비해 현저히 작을 경우는 이 또한 영향이 작아진다.

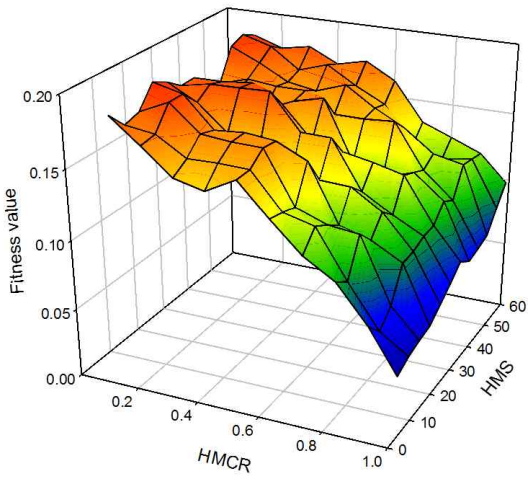


그림 2.2.1.27 해석결과 (itermax=500; HMS=60)

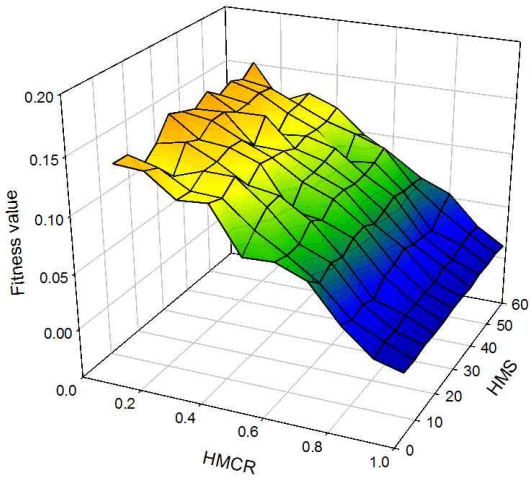


그림 2.2.1.28 해석결과 (itermax=20000; HMS=60)

위의 결과에 대해서 최대반복횟수를 2000과 20000의 경우로 확장해서 생각해 보기로 한다. 여기서 사용되는 화음메모리의 경우도 5-140까지 변화한 모델로 적용하였으며, 해석결과를 그림 2.2.1.29 및 그림 2.2.1.30에 나타내었다. 이전의 예제와 동일한 결과를 얻을 수 있으며, 전체적인 변화 또한 유사하다. 이상의 결과에서 살펴볼 수 있듯이 화음메모리의 크기는 일정 이상이 지나면 큰 효과가 없을 뿐 아니라 해석상의 반복횟수의 증가도 비교적 미미하다. 그러나 HMCR의 크기는 1의 값에 가까울수록 유리하며, 해석의 결과에 대해서 정도 높은 결과를 얻을 수 있다. 여기서 주의해야 할 것은 그 값이 1일 경우 해석과정에서 국소 최적해를 벗어날 수 있는 연산을 수행하지 않는다는 것이며, 본 논문에서 사용된 값은 0.99의 값을 이용하였다. 즉 1%의 확률로 전역탐색을 수행한 것이다.

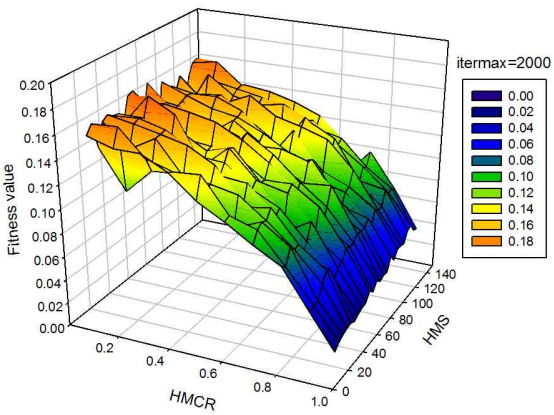


그림 2.2.1.29 해석결과 (itermax=2000; HMS=140)

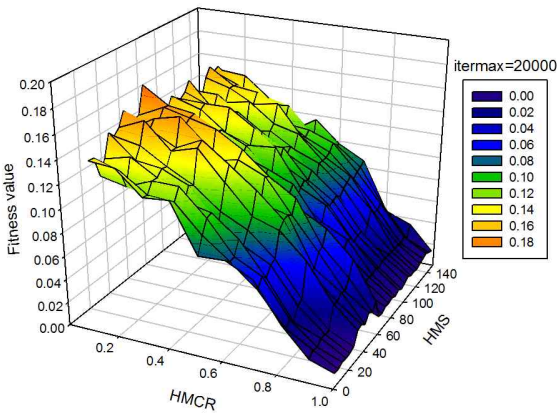


그림 2.2.1.30 해석결과 (itermax=20000; HMS=140)

2. 삼각형 메쉬 분할을 위한 측지선 탐색기법

곡면상의 삼각형 메쉬의 경우 매우 조악한 삼각형으로 메쉬가 형성되거나 측지선과 같은 단거리 경로를 이용한 재분할 과정이 필요하게 된다. 이때 사용되는 측지선은 그 특성 상 곡면 위에서는 곡선이지만 접선 면에서는 직선이 되며, 그림 2.2.2.1과 같은 경계선과의 여각이 같은 조건을 이용하여 탐색하게 된다. 그러나 접선 면에 관한 조건을 이용할 경우 곡면의 함수 표현이 매우 어렵거나 계산이 힘든 어려움과 여각에 따른 반복법은 많은 반복계산과정이 필요로 하게 되므로 2차원으로 펼쳐진 서브플랜을 이용하여 탐색하는 새로운 개념이 필요하다.

본 절에서 제안하는 삼각형 곡면상의 측지선은 그 측지선이 지나는 요소의 경계면에서의 여각이 같고, 그 역도 성립한다는 것이다. 따라서 곡면을 형성하는 삼각형 메쉬에서 평면으로 펼치기 위한 요소의 서브플랜을 형성하고 변환하여 계산한다.

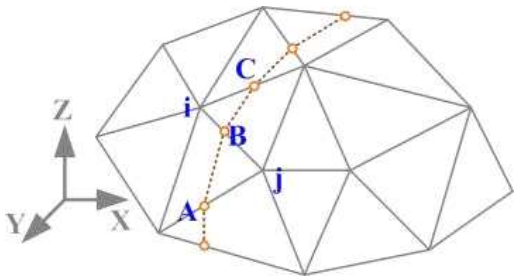


그림 2.2.2.1 삼각형 메쉬로 형성된 곡면과 곡면위의 측지선

전체 요소 집합에서 평면으로 펼쳐질 수 있는 서브플랜의 형성조건 중 가장 최소단위는 연속된 두 개의 삼각형 요소집합이다. 즉 연결된 두 요소는 하나의 요소를 기준으로 다른 요소를 회전 및 이동하여 2차원상의 좌표로 변환할 수 있다. 이것은 또한 여러 요소로 연결된다 하더라도 평면 공간으로의 변환은 동일하게 적용할 수 있으며, 전체 좌표 시스템에서의 값과 요소의 연결에 대한 기하학적 조건만으로 변환이 가능하다. 또한 요소의 연결 관계를 적절하게 제거할 경우 전체 곡면을 하나의 평면 공간으로도 나열할 수 있다.

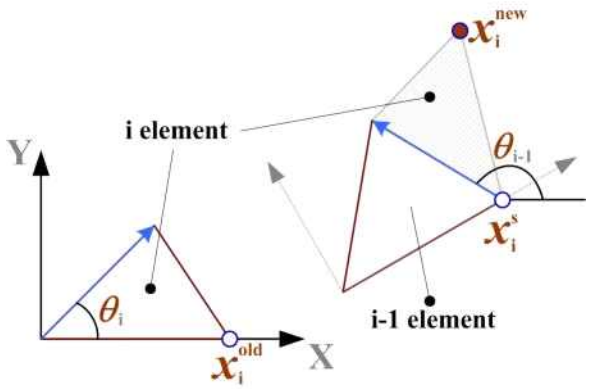


그림 2.2.2.2 추출된 요소들의 서브플랜 형성을 위한 좌표변환

그림 2.2.2.2와 같이 평면으로 변환된 각 요소들의 절점은 3차원 공간의 연결 정보를 기준으로 서브플랜 내에서 2차 변환을 수행할 필요가 있으며, 이것을 이용하여 요소 연결의 위치를 평면상에서 재현할 수 있다. 즉, 식 2.2.2.1과 같이 i-1번째 연결요소를 기준으로 i번째 요소를 변환하여 새로운 절점정보를 구성할 수 있음을 의미한다. 여기서, T_θ는 위 그림에서 보는 바와 같이 두 요소의 인접 면에 대한 차이 각 θ의 변환행렬이고, x_i^s는 기준을 의미한다.

$$x_i^{\neq w} = T_\theta \; x_i^{old} + x_{i-1}^s \qquad (2.2.2.1)$$

위의 좌표변환행렬을 이용하면 요소좌표계와 전체좌표계간의 좌표 값을 변환할 수 있다. 즉, 3차원 절점좌표를 2차원의 요소에 대한 값으로 재 표현할 수 있다.

요소들로 이루어지는 하나의 평면을 구성하기 위해서는 한 요소와 다른 한 요소간의 상대적인 2차원 좌표 값이 필요하다. 이때 평면상의 하나의 요소가 다른 하나의 요소와 경계면에서 만날 때 경계면 외의 한 절점 값을 알기 위해서는 요소가 접하는 면의 각도와 이동거리를 구하여야 한다. 따라서 한 요소를 기준으로 다른 한 요소에 대한 상대좌표를 고려하면 아래 그림과 같이 표현할 수 있다. 그림에서 두 요소가 접하는 면의 기준 되는 요소 경계면을 벡터a_1, 인접요소의 접하는 면을 벡터a_2라 하면, 경계면 상에 존재하지 않는 점k_2가 기준이 되는 요소의 좌표계에서 놓여질 수 있는 좌표는 식 2.2.2.2와 같다.

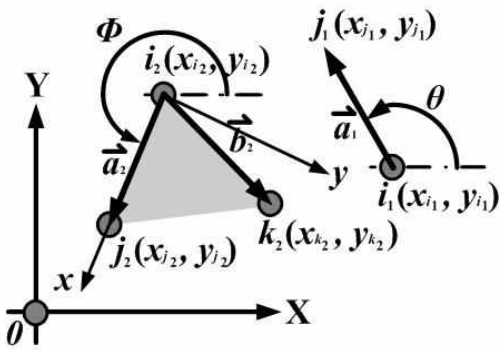


그림 2.2.2.3 인접한 요소의 좌표와 경계벡터

$$\begin{Bmatrix} x_m \\ y_m \end{Bmatrix} = \begin{vmatrix} T_1 & T_2 \\ -T_2 & T_1 \end{vmatrix} \begin{Bmatrix} x_m - x_k \\ y_m - y_k \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} x_i \\ y_i \end{Bmatrix} \qquad (2.2.2.2)$$

여기서, $a = \cos\theta\cos\Phi = \dfrac{(x_j - x_i)(x_l - x_k)}{l^2}$

$$b = \sin\theta\sin\Phi = \frac{(y_j - y_i)(y_l - y_k)}{l^2}$$

$$c = \cos\theta\sin\Phi = \frac{(x_j - x_i)(y_l - y_k)}{l^2}$$

$$d = \sin\theta\cos\Phi = \frac{(y_j - y_i)(x_l - x_k)}{l^2}$$

요소들의 연결조건에 따라 평면을 형성할 수 있다는 것은 요소들 간의 적절한 분리를 통해서 펼칠 수 있다는 것을 의미한다. 둘 이상의 요소로 연결된 집합을 전체 평면의 한 부분집합인 서브플랜으로 구성할 수 있고, 서브플랜 내부의 두 점을 잇는 직선이 평면 내부에 존재 한다면 그 직선은 곡면 상의 서브플랜 요소집합 내에서 그림 2.2.2.1에서 설명되는 측지선의 조건 즉, 여각이 같다는 조건을 모두 만족한다. 이것은 그림에서 서브플랜 P_i와 P_j에서의 Line 1, 2, 3의 상태로 설명할 수 있다. 우선 Line 2의 경우는 서브플랜 내부에 모두 포함되므로 곡면 상에서의 측지선이 될 조건을 만족하며, Line 1의 경우는 두 서브플랜의 연결 경계면을 지나므로 측지조건을 만족하는 서브플랜은 두 서브플랜의 조합을 통해서 구할 수 있다. 그러나 Line 3의 경우는 측지선이 될 조건은 두 서브플랜 만으로는 알 수 없으며, 점선으로 연결되는 구간에서 Line 1과 2에서 나타난 조건을 가지는 서브플랜이 없는 경우는 측지선이 될 수 없다.

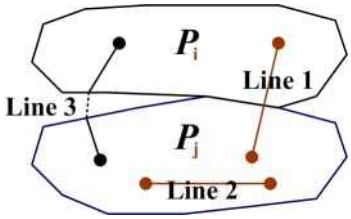


그림 2.2.2.4 삼각형 메쉬로 형성된 곡면과 측지선

연결면의 선택에 따라서 분할된 직선은 Line 2와 같이 직선의 형태를 취할 수 있다. 따라서 평면 요소로 구성된 곡면에 존재하는 측지선은 평면의 조합이나 연결면의 조정을 통하여 Line 1이나 2와 같은 상태의 측지선을 가지는 평면을 얻을 수 있다. 그러므로 측지선을 찾는 문제는 곧 구하고자 하는 측지선이 Line 1이나 2와 같은 상태의 평면을 구성하는 문제가 되며, 평면에 분할되지 않고 하나의 직선으로 나타나는 측지선은 요소의 상대적인 절점좌표 값을 이용하여 공간상의 위치정보를 얻을 수 있다.

메쉬로 모델링 되는 구조물은 절점과 요소로 형상을 이루고, 각 요소는 전체 절점 중에서 모델링 과정에서 형상함수에 따라 가정되는 필요한 수의 절점들을 서로 공유하면서 연결된다. 즉 한 절점에 하나 이상의 요소들이 연결되어 있다. 예를 들면, 곡면을 구성하는 요소 중 삼각형요소로 이루어지는 곡면은 형상을 구성하는 전체 절점 중에서 세 개의 절점으로 연결되어지는 평면요소공간이다. 이와 같은 평면으로 이루어진 곡면의 요소들을 전개도의 형식으로 하나의 평면공간에 옮긴다면 요소들 간의 공유되는 절점 중 일부는 평면공간에서 동일한 값을 가지지 못한 채로 연결 될 수도 있다. 즉 그림 2.2.2.5와 같이 육면체의 전체 전개도를 작성할 경우 요소들이 공유하는 절점의 일부는 반드시 평면상에서는 다른 값을 가져야만 한다.(그림 2.2.2.5 : Node i, k) 또 육면체 중 몇 개의 면만을 평면에 옮긴다면 면들의 연결 속성에 따라서 공간상의 한 점이 평면상의 한 점으로 나타날 수 있고, 두 점으로도 나타날 수도 있다.

그러나 평면상에 존재하는 점들에 대해 요소와의 관계는 명확하고, 절대적인 값의 변화는 없다. 이는 좌표변환을 통한 요소의 공간 변환에 대해서 연결절점들의 절대공간의 속성 즉, 전체좌표계에서의 형상절점좌표는 변하지 않기 때문이다. 따라서 형상을 이루는데 사용되는 요소 내의 임의의 한 점은 절대공간의 요소정보에 대한 속성을 부여하면 어느 공간으로 변

환이 되더라고 전체공간에 대한 속성을 계속 유지할 수 있다. 따라서 공간상의 요소 경계면 위의 임의의 점은 요소 절점에 대한 정보를 이용하여 비율로 표현함으로서 어느 공간에서도 절대공간의 값을 얻을 수 있다. 이때 비율로 표현되는 절점좌표를 상대좌표라 정의한다. 또한 공유절점이 전개평면상에서 서로 다른 좌표값을 가지더라도 공유절점의 조건 즉 절대공간의 속성이 같다는 것을 이용하여 판별 할 수 있다.

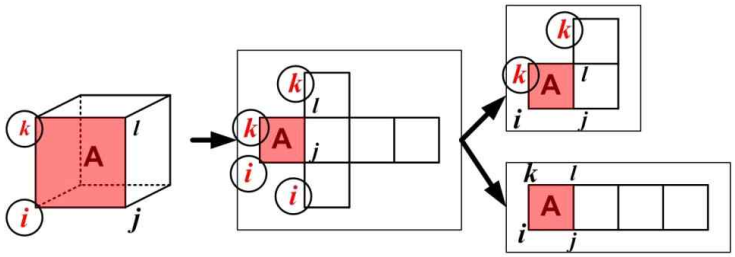


그림 2.2.2.5 육면체와 육면체의 평면전개도

그러므로 곡면 위를 지나는 측지선은 그림 2.2.2.6의 조건을 검토함으로 판단할 수 있고, 서브플랜과 곡면과의 상대 비율을 이용하여 3차원 좌표로 치환할 수 있다. 그림 2.2.2.6에서의 측지선에 대한 판단여부는 식 2.2.2.3의 관계로 알 수 있다. 즉, 식 2.2.2.3의 관계에서 Y축의 좌표값의 부호를 검토함으로서 측지선을 포함하고 있는지 없는지를 쉽게 판단할 수 있다.

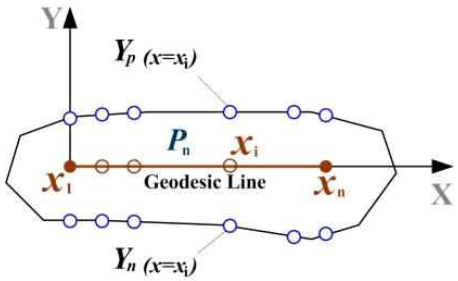
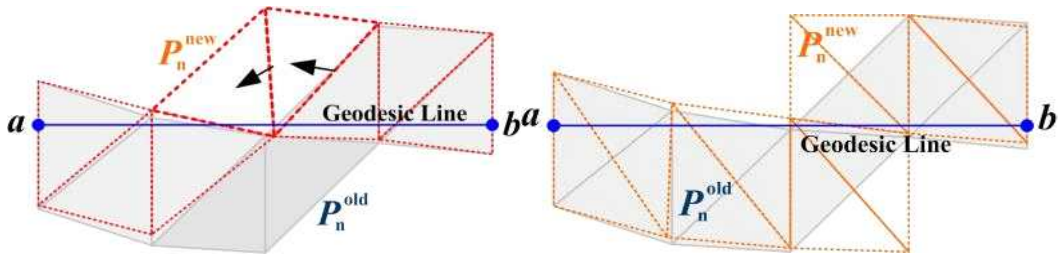


그림 2.2.2.6 서브플랜 내부의 측지선과 경계상의 절점

$$Y_p(x_i) \geq 0 \text{ and } Y_n(x_i) \leq 0 \ (i=1,2,\ldots,n) \qquad (2.2.2.3)$$

측지선을 포함한 서브플랜은 쉽게 구성하고, 정의할 수 있는 형태도 있지만 그렇지 않은 경우도 있다. 요소의 연결면을 따라 형성되는 측지선의 경우나 곡면의 곡률이 복잡한 경우 시행착오를 통하지 않고는 한 번에 구성하기 쉽지 않다. 그러나 초기 서브플랜의 형성에 대해서는 비교적 쉽게 형성된다. 우선, 두 점을 잇는 측지선을 구하기 위한 서브플랜은 처음과 끝점을 포함하는 요소와 두 요소 사이의 연결 관계를 고려하여 일련의 요소들을 추출하여 설정하지만 그림 2.2.2.7(a)와 같이 서브플랜 P_n^{old}의 경우 측지선 서브플랜의 조건을 만족하지 못한다. 하지만 추출된 요소에서 측지선이 통과하지 않는 요소들은 측지선이 요소의 경계면과 만나는 일련의 요소들의 집합으로 재배열하여 형성할 수 있으며, 그림과 같이 P_n^{new}는 측지선을 포함하는 영역까지 반복하여 구성한다. 추출 요소의 치환으로 재구성된 수정-서브

플랜은 간단한 반복과 식 2.2.2.3의 검토로 측지선의 여부를 결정할 수 있으며, 단지 기하학적 조건만 요구하며, 연산은 매우 단순하다.



(a) 추출요소들의 재구성 (b) 메쉬의 재배치

그림 2.2.2.7 서브플랜을 구성하는 요소와 메쉬의 재구성

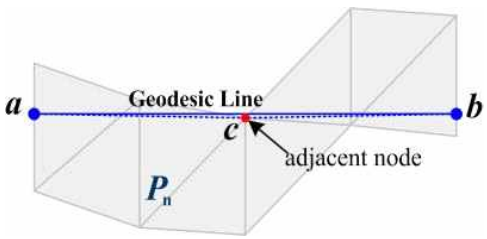


그림 65

그림 2.2.2.8 인접절점(adjacent node)를 이용한 근사측지선 분할

요소들의 재구성을 통한 수정-서브플랜에서 요소 경계면에 매우 근접한 측지선은 식 2.2.2.3의 검토조건을 만족하기 힘든 경우도 있다. 그 이유는 삼각형 요소로 구성된 곡면은 엄밀하게 평면 요소를 이용한 곡면으로서 구간별 평면인 곡면이므로 측지선을 따라 형성되는 접선면을 정확하게 서브플랜으로 구현할 수 없기 때문이다. 그러나 삼각형 요소의 초기 형상은 절점에서의 평형을 이루기 위한 해석상의 요구조건이므로 삼각형 메쉬의 재배열은 형상해석을 통해서 원래의 곡면과는 약간 다른 형상의 위치정보를 제공할 수 있다. 따라서 그림2.2.2.7(b)와 같이 초기형상해석에서의 서브플랜 $\boldsymbol{P}_n^{old}$에 대해서 요소의 매쉬에 대한 방향성의 재조정을 통한 $\boldsymbol{P}_n^{new}$의 평면을 구할 수 있다. 이와 같은 메쉬의 방향성 조정을 통한 수정-서브플랜은 요소 경계선에 근접한 측지선의 탐색에 매우 유용한 정보를 제공한다. 이것은 또한 수정-서브플랜들의 구성은 여각의 조건을 이용한 반복계산에 비해서 직관적으로 더 정확한 값을 제공한다. 그 이유는 서브플랜내의 각 요소의 삼각형 형상과 면적은 공간상의 곡면에서의 요소와 동일하기 때문이다.

수정-서브플랜의 구성방법에서 만약 그림 2.2.2.8과 같이 매우 인접한 절점이 있을 경우 식 2.2.2.3의 조건은 허용오차를 고려할 수 도 있다. 즉, 두 개의 측지선으로 분할하는 것으로 하나의 측지선에 대한 근사측지선이 된다. 따라서 조건을 검토하는 과정에서 비록 조건이 만족하지 않더라도 절점이 허용오차에 대해서 만족할 경우 두 측지선의 조합으로 하나의 측지선을 대신할 수 있으며, 두 점을 잇는 허용할 수 있는 범위의 가장 가까운 경로가 된다.

3. 자유곡면의 메쉬스무딩을 위한 보정알고리즘

가. 배경

삼각형 기반의 비정형 자유곡면 구조물은 그 형상의 특이함으로 인하여 구조적으로 취약할 뿐만 아니라, 무수히 많은 부재를 이용하는 구조물로써 그 설계와, 시공이 매우 까다로워서, 매우 높은 설계 시공 비용을 필요 하게 된다. 설계자가 디자인한 자유곡면을 실제 설계에 이용하기 위하여 최대한 균일한 사이즈의 부재를 이용하여 자동 3각화 설계가 필수적이다. 이번 2차 년도 연구의 본 챕터 에서는 입력된 자유곡면에 대해서 공차를 고려한 균일한 크기의 삼각형 메쉬를 생성하는 알고리즘을 개발 하고 격자 구조물을 자동 생성 프로그램 개발을 하도록 한다.



그림 2.2.3.1 삼각 메쉬 기반 구조물

나. 연구의 목적과 범위

본 연구의 목적은 설계가 까다로운 비정형 자유곡면 구조물을 쉽게 설계하고 , 설계된 구조물의 시뮬레이션을 쉽게 수행 할 수 있도록 구조해석에 사용되는 삼각 메쉬를 공차를 고려하여 균일한 크기의 격자 구조물과 삼각형 구조물의 자동 설계알고리즘과 프로그램을 개발 하는 것이다.

삼각 메쉬를 만드는 다양한 방법을 비교 검토하고 Delaunay Triangulation 방법을 이용하여 자유곡면에 대한 삼각화를 수행한후 본 연구의 목적에 맞도록 각각의 삼각형이 최대한 균일한 사이즈가 되도록 비정형 자유곡면상에서 Mesh Smoothing Algorithm을 개발 하였다.

다. 삼각메쉬 알고리즘에 관한 연구 현황

삼각형을 만들어 내는 방법은1934년 boris delaunay 에 의해 고안된 2차원 기반의 delaunay triangulation method 가 고안 되어 일반적으로 2차원 삼각 메쉬 알고리즘에 이용되어 지고 있으며 3차원 메쉬 생성 방법에tj는 2차원 들로네 삼각화 방법을 3차원으로 확장하고 직교 점을 가중치로 적용한안 regular triangulation 방법이 일반적으로 알려져 있다. Regular triangulation 방법은 가중치 적용 들로네 삼각방법으로 알려줘 3차원 공간에서 점의 결정에 있어 가중치를 고려하여 삼각화를 수행한다.

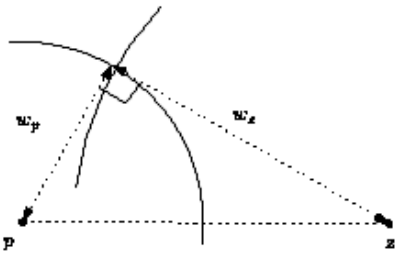


그림 2.2.3.2 Regular triangulation weight factor

라. 삼각메쉬 알고리즘에 관한 연구 현황

현재 출시되고 있는 대부분의 메쉬 생성 프로그램들은 laplacian smoothing을 기본적으로 탑재 하여 N회의 반복을 통하여 균일한 메쉬형상을 얻어 내고 있다. 라플라시안 스무딩은 한 노드위치를 경계노드의 평균점으로 이동하는데 원본 삼각형의 왜곡을 최소화 하고 적은 연산량으로 인해 빠른 성능을 보인다.

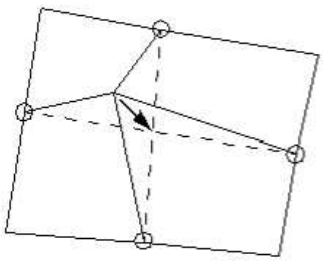


그림 2.2.3.3 Laplacian smoothing

일반적으로 사용되는 또다른 방법으로 Centroidal smoothing 방법이 있으며 centroidal method 는 한 노드를 포함하는 경계 요소의 중점으로부터 각 요소의 면적등을 weight factor 로 적용하는 방법으로써 일반전인 laplacian smoothing 방법보다 성능이 느리지만 균일한 크기의 메쉬를 얻을 수 있다.

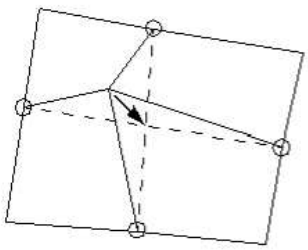


그림 2.2.3.4 Centroidal smoothing

위의 두 방법들은 일정한 횟수를 반복 횟수 한계로 지정하게 되는데 메쉬의 품질이 최우

선인 경우 각각의 반복에서 노드의 이동거리가 최소한의 거리가 될 때까지 지속적인 반복을 수행 할 수 있다.

마. 연구 및 구현 수행 과정

본 절에서는 자유곡면(Non-Uniform Rational B-spline)에 3차원 삼각화메쉬를 수행 하여 균일한 크기의 삼각형을 얻오낸다. 자유곡면의 UV기반의 좌표계에 2차원 삼각 메쉬를 수행하여 그 결과를 3차원 좌표계로 이동하여 3차원 삼각화 메쉬 결과를 생성하고, 자유곡면의 곡률과 거리 및 uv 좌표계에서의 거리를 가중치로 고려하여 3차원 Mesh Smoothing Method 를 제안 한다. 그림 2.2.3.5 는 제안된 메쉬 생성 알고리즘과 메쉬 스무딩 과정을 내타낸다.

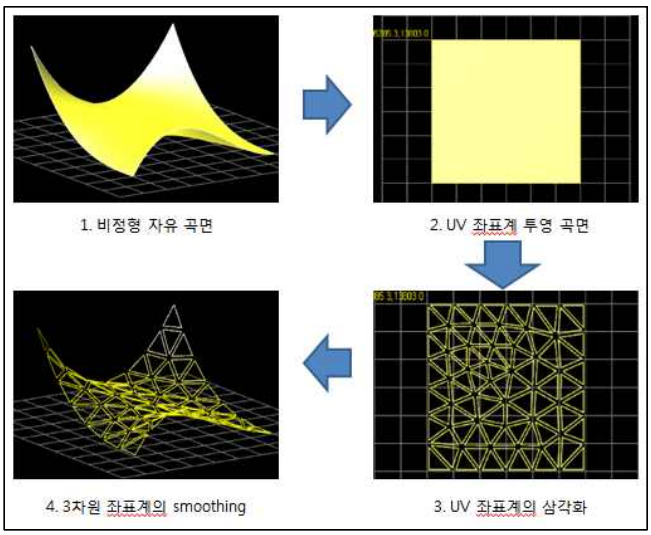


그림 2.2.3.5 비정형 자유곡면의 3차원 삼각 메쉬 과정

바. 비정형 자유곡면의 표현

비정형 자유 곡면의 설계를 위하여 본 연구에서는 NURBS(Non Uniform Rational B Spline) 지오메트리 표현 방법을 자유곡면을 표현하는 수학적인 재현 방법중 하나이며, 2차원의 간단한 선분 원 호 곡선부터, 매우 복작합 3차원 유기적 형태의 곡면이나 덩어리 까지 매우 정확하게 표현할 수 있으며, 그 편집 또한 매우 용이하다. 이러한 특성으로 인해 Nurbs는 선박, 자동차분야를 비롯하여 복잡한 곡면 형상을 표현하는 영역에서 다양한 방식이르 사용 되어 지고 있다. 분야등 복잡한 곡면 형상을 표현 하는데 있어 다양한 분야에서 사용되어진다.

사. Voronoi Diagrams & Delaunay triangulation

비정형 자유 곡면의 삼각화를 위해서 연구 에서는 delaunay triangulation method를 이용

한다 delaunay triangulation method 는 2차원 공간의 삼각화 알고리즘 이므로 자유곡면은 uv 좌표계로 투영된 2차원 공간으로에서 삼각화를 진행 하게 된다. 삼각화는 원본의 비정형 자유곡면의 경계 영역에 메쉬의 시드가 되는 Hard Point를 생성한다. 면 내부에 대해서는 자유곡면 면적을 이용하여 2차원 공간 내부에 위치하는 점의 개수를 구한후 임의좌표에 필요한 점을 생성한다. 이 임이로 생서된 점과 경계점을 이용하여 Voronoi diagrams을 작성하여 영역을 분할하고 각다이어그램의 원점을 연결하는 delaunay triangulation을 수행하여 2차원공간에 삼각화를 수행 하도록 한다. 아래의 그림 2.2.3.6 은 Vorinoi diagrams 의 제작 과정을 표현하고 있다. 각점은 기하면에 임의로 설정된 점들이며 다이어그램이 경계를 이루는 각 에지들은 한점과 인접점을 연결한 선분을 90도 각도로 2등분하는 선이며 각각의 선들의 연결을 이용하여 역역을 결절 한다.

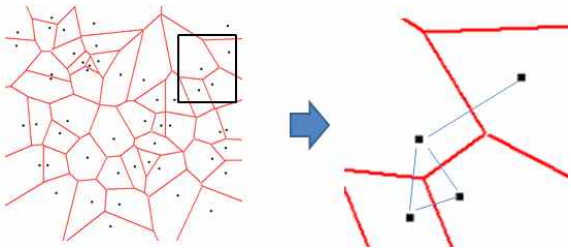


그림 2.2.3.6 Voronoi diagrams

이렇게 생성된 다이어그램의 영역에서 각 중심에 새로운 점을 생성하고 새로이 생성된 점들에 대해서 delaunay triangulation method를 수행 하여 삼각화 메쉬 세트를 구할 수 있다. 그림 2.2.3.7 은 delaunay triangulatio method를 이용한 삼각 메쉬 세트를 구하는 예이다.

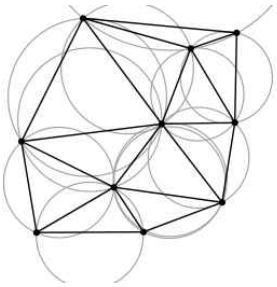


그림 2.2.3.7 Delaunay Triangulation

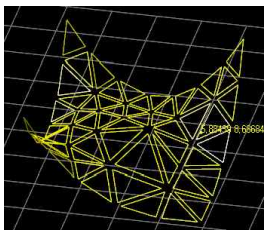


그림 2.2.3.8 2차원 삼각형의 3차원 공간으로의 투영

이렇게 구해짐 삼각메쉬는 UV 좌표계의 2차원 삼각메쉬 이르모 각 삼각형의 2차원 좌표로부터 원본 지오메트리의 3차원 좌표로 투영을 하게 되면 그림 2.2.3.8 과 같은 결과를 얻을 수 있다. 그림 2.2.3.8은 스무딩 되지 않은 원본 삼각화 형상이다.

아. 자유 곡면에서의 삼각형 Smoothing

자유곡면의 삼각화 과정은 기본적으로 2차원 좌표계인 UV좌표계 내에서 삼각화가 이루어지므로 2차원 좌표에서 smoothing 을 수행한후 3차원 좌표로 투영을하면 일반적으로 우수

한 품질의 메쉬 결과를 얻을 수 있다. 하지만 특정 지오메트리의 경우 uv 좌표계와 실제 좌표간의 차이가 특정 범위에서 현격하게 차이 나는 경우가 있는데 그러한 경우 특정 왜곡 지점에서 매우 품질이 낮은 메쉬 결과를 나타나게 된다. 그림 2.2.3.9의 솟아오르는 지점의 지오메트리의 UV 좌표와 실제 좌표의 비율이 다른 지점보다 현격하게 차이가 나게 되어 그림과 같이 균일하지 못한 삼각형이 발생 하게 된다.

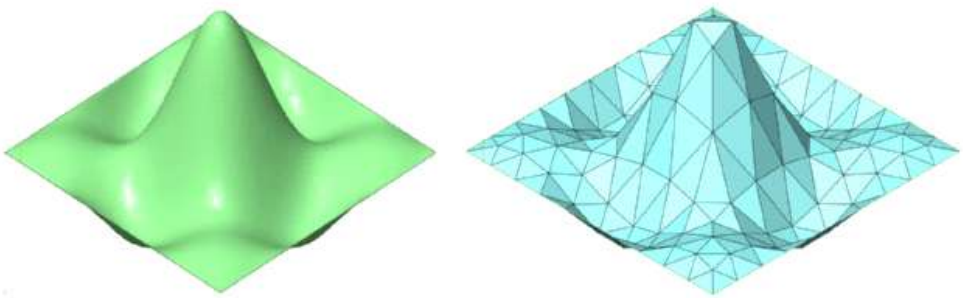


그림 2.2.3.9 2차원 Smoothing의 3차원 자유 곡면 적용 사례

이러한 문제를 해결하기 위해서는 2차원 UV 좌표 상에서 메쉬 Smoothing을 진행할 때 실제 곡면의 형상과 거리를 반영하면 되는데 일반적으로 사용되는 기존의 laplacian smoothing 이나 centroid smoothing 에서는 3차원 공간에서의 영향을 반영 할 수 없다. 본 연구에서는 3차원 지오메트리의 영향을 고려한 3차원 Smoothing 방법을 제안 한다. 그림 2.2.3.10은 laplacian smoothing 과 본 연구에서 고안한 알고리즘의 차이점이다.

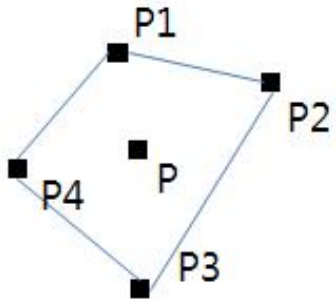


그림 2.2.3.10 삼각 메쉬 내부의 조절 절점과 경계절점

위의 그림 2.2.3.10 에 대해서 점 P의 위치는 laplacian smoothing 이 적용될 때 수식 $P = \frac{1}{N}\sum_{i=0}^{i=N} Pi$ 으로 정의 된다. 개선된 3차원 Smoothing Algorithm 에서는 점 P의 새로운 위치는 $P = \frac{1}{\sum_{i=0}^{i=N} \omega i}\sum_{i=0}^{i=N} Pi \cdot \omega i$ 이러한 수식으로 표현 되며, 위의 그림 2.2.3.10의 점 P가 UV좌표계의 점으로 가정 하고 각각의 Pi 에 대응하는 3차원 좌표계의 점 pi 가 존재 할 때 $\omega i = \frac{|p(i-1)-P(i+1)|}{|P(i-1)-P(i+1)|}$ 로 정의 된다. 그림 2.2.3.11은 개선된 smoothing algorithm을 구현한 구현 코드 이다.

```
for( k=0 ; k< niter ; k++)
 {
  for( int i=0 ; i<nodes.size() ; i++ )
  {
    int moveN = i;

    if( freenodeindecise.find(moveN) != freenodeindecise.end() )
      continue;

    vector<unsigned int> edges = pointEdges[moveN];

    Vector3 vacc(0,0,0);
    double  weightacc=0;

    for( int j =0 ; j<edges.size() ; j++)
    {
      int n1 = (edges[j] & 0xffff0000) >> 16;
      int n2 = (edges[j] & 0x0000ffff);

      Vector3 v(uvs[moveN].GetX() ,uvs[moveN].GetY() ,0 );
      Vector3 v1( uvs[n1].GetX() ,uvs[n1].GetY() ,0 );
      Vector3 v2( uvs[n2].GetX() ,uvs[n2].GetY() ,0 );

      double vlen1 = (v1-v).length();
      double vlen2 = (v2-v).length();

      Vector3 p ( nodes[moveN].GetX() , nodes[moveN].GetY() , nodes[moveN].GetZ() );
      Vector3 p1( nodes[n1].GetX() , nodes[n1].GetY() , nodes[n1].GetZ() );
      Vector3 p2( nodes[n2].GetX() , nodes[n2].GetY() , nodes[n2].GetZ() );

      double plen1 = (p1-p).length();
      double plen2 = (p2-p).length();

      double rlen = ((p1-p2).length());
       double weight1 = (v1-v2).length()*2*plen1/vlen1;
       double weight2 = (v1-v2).length()*2*plen2/vlen2;
      vacc = vacc + v1*weight1;
      vacc = vacc + v2*weight2;
      weightacc += (weight1 + weight2);

    }

    vacc = vacc/weightacc;

    gp_Pnt pt = S->Value(vacc.x, vacc.y);
    int r=0;

    uvs[moveN].Set(moveN+1, vacc.x, vacc.y);
    nodes[moveN].Set(moveN+1, pt.X() , pt.Y(), pt.Z());
  }
 }
```

그림 2.2.3.11 제안된 메쉬 스무딩 알고리즘 구현코드

자. 구현 결과

아래의 실험에서는 왜곡이 심하게 일어나는 지오메트리에 대해서 반복횟수 10회를 적용하여 laplacian smoothing 과 개선된3차원 메쉬 smoothing algorithm 의 결과를 비교하였다. 메쉬 사이즈1 반복횟수 10회로 라플라시안 스무딩과 개선된 smoothing 알고리즘을 적용 하였다. 그림 2.2.3.12 에서는 동일한 모델에 대한 결과의 화면을 비교 하였으며, 표 2.2.3.1 에서는 각각의 알고리즘에 적용된 결과의 면적 평균과 면적을 표준편차를 비교 하는 표이며, 표 2.2.3.2는 각 메쉬를 구성하는 에지의 길이의 평균과 길이의 표준 편차를 나타낸다. 마지막으로 그림 2.2.3.13은 다양한 비정형 자유곡면에 대해서 개선된 알고리즘이 적용된 삼각화 결과의 이미지이다.

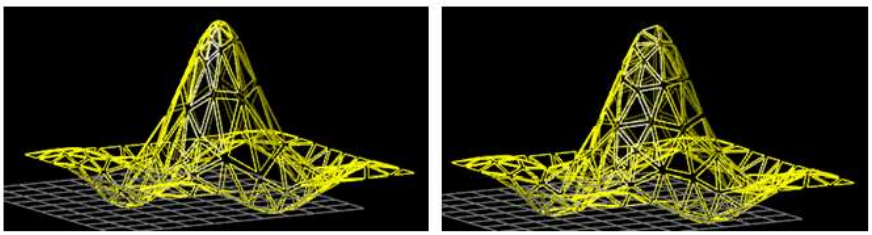


그림 2.2.3.12 laplacian smoothing과 3차원 smoothing 결과 비교

표 2.2.3.1 삼각형 면적 기반 균일도 평가

	면적 평균	면적 표준편차
Laplacian Smoothing	0.565491	0.191592
3D Smoothing	0.562128	0.136177

표 2.2.3.2 구성모서리 길이의 균일도 평가

	길이 평균	길이 표준편차
Laplacian Smoothing	1.192455	0.36227
3D Smoothing	1.158175	0.21817

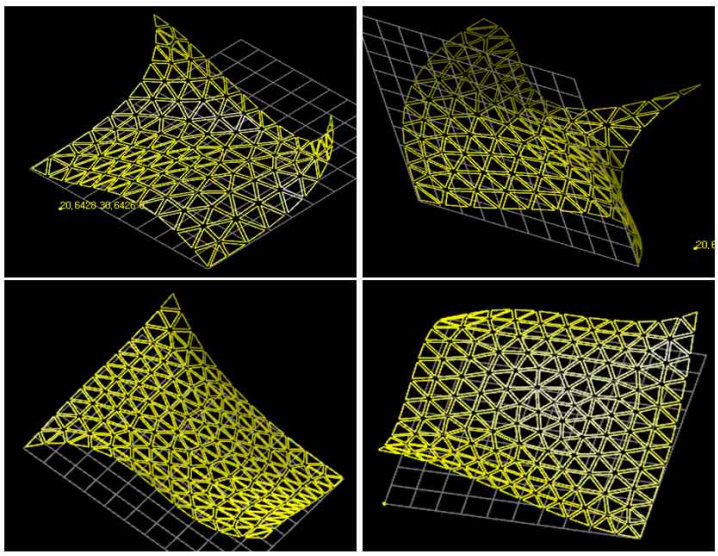


그림 2.2.3.13 다양한 비정형 곡면에서의 메쉬 결과

차. 결론

본 연구에서는 비정형 곡면의 삼각 패널을 설계하는 과정을 자동화하기 위하여 Delaunay Trianglulation을 이용한 nurbs 자유곡면의 삼각화 방법과 3차원 smoothing 에 관한 연구를 수행하였다. 곡면의 실제 좌표계와 uv 좌표계와의 비율의 차이를 weight facetor 로 이용하는 새로운 메쉬 smoothing 방법을 연구 하고 적용하여 균일한 크기의 에지를 갖는 삼각메쉬를 생성하였다. 알고리즘의 성능 평가를 위하여 다양한 예제에 알고리즘을 적용하여 결과 메쉬의 면적의 균일도와 에지길이의 균일도가 기존의 laplacian smoothing 과 비교 하여 월등히 개선된 결과가 보이는 것을 확인하였다.

4. 곡면지붕의 친환경 외피구조와 실내기후조절 시스템

가. 친환경 건축물 외피의 정의 및 구성요소

문화, 경제, 시공 기술 및 에너지 부분의 변화에도 불구하고 건축의 주된 기능은 여전히 안전하고 편안한 피난처(Shelter)의 제공에 있다. 건축물의 궁극적 목표는 강렬한 태양광선이나 극심한 외기 기온의 변화 등과 같은 외부 환경의 변화로부터 실내의 거주자들을 보호하는데 있다. 건축물의 외피는 건축물 내부 사용자들의 요구들을 수용해야 하는 장치이고 외부 환경과 내부 환경의 관계를 고려하여 두 공간의 매개체로서 기능하는 개념으로 해석할수 있다. 즉, 건축물의 외피는 내부와 외부를 분리시키는 동시에 연결해야 하는 장치라 할 수 있다. 사전적으로 외피란 '내부 볼륨을 감싸는 건물의 외부 부분'을 일컫는 용어이다. 비, 바람, 눈 등 외부의 자연 조건에 대응하기 위한 요구와 안전, 보안 등 인위적인 요구에 의해 결정되는 건물의 외피는 외부 환경으로부터 보호 기능과 더불어 내부 공간과 외부 환경 사이에 균형 유지 기능을 갖추어야 한다. 이러한 점과 더불어 건물의 외피는 기능과 그 특성을 구성하는 요소로 이루어지기 때문에 건물의 스킨(Skin)이라고도 할수 있다. 또한 이것은 구조적 역할을 병행할 수도 있는데, 이런 경우, 풍 하중, 적설 하중, 건물 하중, 그리고 해당 지역의 구조적 요구 사항을 충족할 수 있도록 디자인되어야 한다.

인간이 혹독한 자연 환경으로부터 신체를 보호하는 3가지 요소가 있는데, 피부, 의복, 건물 외피이다. 건축 계획 각론에서 외피는 외부와의 열교환이 이루어진다고 생각되는 난방이나 냉방되는 공간을 둘러싸는 건축 요소를 말한다. 물리적으로 벽체, 지붕, 바닥, 개구부를 의미하는데, 바닥과 개구부는 지붕과 벽체에 부수되는 속성상 건축물의 외피는 벽체와 지붕이 대표적인 건축적 장치이다. 표 2.2.4.1은 외피와 관련된 유사 개념을 정의한 표로서 과거에는 형태적이고 물리적인 건축의 구성 요소로서 파사드의 개념이 사용되었으나 최근에 환경 문제와 건축의 관계가 부각되면서 생물체의 개념인 외피(Skin)가 부각되었다. 파사드외에도 공통적으로 패브릭(Fabric)과 엔빌로프(Envelope)는 무생물에 쓰이는 개념으로 살아 숨쉬는 개념과는 거리가 있다.

표 2.2.4.1 외피의 사전적 정의

Skin	피부, 살갗, 표피, 외장, 껍질	생물체
Facade	건축물의 정면, 외관, 입면	무생물체
Envelope	봉투, 싸게, 덮게, 씌우개	
Fabric	편물, 직물, 천, 덮게	

지난 십 수 년 동안 친환경 빌딩에 대한 다양한 논의 있었고 상당한 성과를 획득하였는데, 아직도 초기의 재료적 측면에서 판단한 자기 조정 능력 및 대응력과 관련된 디자인 개념으로 해석되고 있다. 친환경 건축에 관한 일반적인 인식은 건축에 종속되는 자동화 시스템과 같은 건물 관리 시스템에 관련된 사항이었다. 물론, 건축물의 관리와 제어에 관련된 측면에서 중요하고 핵심적인 항목이지만 친환경 외피에 관련된 연구는 더욱 광범위하고 새로운 프로그램을 요구한다. 친환경 외피는 친환경 건축의 주요한 구성 항목이다. 실내 공간을 에워

싸는 표피의 기능을 수행하고 빛 환경, 열 환경, 음 환경, 환기 및 공기 환경 등을 포함한 실내 환경을 제어하고 관리하는 측면을 의미한다. 오늘날 다수의 건축물들이 진보된 테크놀로지를 도입하고 있지만 환경 친화형 친환경 기술을 진정한 의미에서 수용하는 경우는 소수인 상황이다. 진정한 의미에서 친환경 외피는 쾌적한 실내 환경과 효율적인 에너지 사용을 위하여 다양한 외부 환경 변화에 인간의 생체적인 조직처럼 학습 능력을 갖추고 자체 조정 및 대응이 가능해야 한다. 항상 그러한 것은 아니지만 전체 건축물의 환경에 대한 대응과 관련이 된다. 이러한 경우는 인간의 피부가 반응하는 것처럼 생체적인 개념을 의미한다. 친환경 외피는 다양한 정의를 가지고 있지만 공통적인 정의는 다양한 외부 환경의 변화를 인식할 수 있고 인식된 정보를 바탕으로 건축 장치들이 자체적으로 조정 및 배열이 되어 반응할 수 있으며, 주변 환경과의 상관 관계를 형성하며 미디어 정보 기술을 포함한 테크놀로지를 기반으로 외부에 표현이 가능한 첨단 미래형 외피로서 지붕과 파사드에 설치되는 장치라고 할수 있다. 이러한 장치들로 인하여 친환경 건축의 공통 목표인 환경 친화성, 경제성, 효율성, 쾌적성, 기능성, 신뢰성 그리고 안전성을 획득하는데 기여할 수 있다.

▶ 친환경 외피의 계획요소

(1) 에너지 발전 시스템

화석 에너지 사용량을 감소시키고 지구 환경 부하를 감소시키기 위하여 자연에 존재하는 에너지의 사용을 고려한 장치의 도입이 환경 친화형 인텔리전트 외피 디자인에서 필수적인 요소라 할수 있다. 자연 에너지는 태양 에너지와 바람 에너지, 조수 간만의 차이를 이용한 에너지, 이외에도 지열이나 바이오 매스 등을 이용하는 방법이 있지만 가장 대표적으로 활용 가능한 에너지는 태양력과 풍력을 이용하는 방식이다. 재료 선정과 태양을 향한 건축물의 배치와 평면 구성, 식재 계획을 감안한 지붕과 파사드 디자인은 건축물을 유지, 운영하기 위한 동력을 자연으로부터 획득하기 위한 기본적인 고려사항이다. 이러한 요소들은 지역의 기후와 일사량, 강후량과 같은 자연 환경적인 요소와 발전 방식과 재료의 선택과 같은 물리적인 장치의 도입으로 효율이 결정된다.

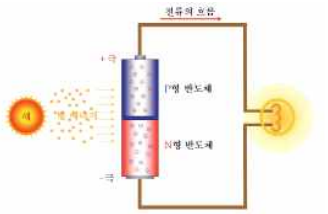


그림 2.2.4.1 태양 전지의 기본 원리

태양력 발전 시스템의 구성은 일반적으로 시스템의 이용처, 부하의 종류, 시스템의 크기, 입지 조건 등에 따라 다르지만 기본 구성은 다음과 같다. 태양 전지 어레이는 태양 전지 소자를 직렬과 병렬로 연결하여 직접 전력을 발생시킨다. 그러므로 직류 부하인 경우에는 변환 장치를 도입하여 가장 효율적인 전압으로 출력측에 축전지를 연결하여 사용하며 교류 부하인 경우에도 변환 장치를 도입하여 사용하고 필요에 따라 축전지를 접속하여 사용하기도 한다. 보통, 일사 조건과 부하, 사용 시간이 다르고, 일사량 역시 시간과 지역에 따라 차이가

있으므로 발전된 전력을 수용하여 저장할 수 있는 축전지를 보유하는 것이 일반적이다.

에너지 발전 시스템과 관련된 개념 요소는 자연 에너지의 활용 측면에서 자연과 연계된 천연 에너지의 도입으로 지구 환경을 보존하고 재생 가능한 에너지 사용 측면에서 계획 요소를 도출할 수 있고 외피의 기능적 측면에서 에너지 획득과 관련된 측면에서 계획 요소를 도출할 수 있다.

국내 환경 친화형 인증 기준에서 에너지 소비량과 대체 에너지 이용에 관련된 측면에서 계획 요소를 도출할 수 있고 지능형 건축물 인증 기준에서 역시 에너지 절약형 건축 계획에 관한 부분에서 에너지 발전 시스템의 도입이 필요하다는 것을 제시해주고 있다. 저에너지형 건축물의 도입에서 필수적인 요소가 자연에 존재하는 무한한 에너지를 건축에 적극 도입하여 에너지 부하를 감소시키고 환경 부하를 최소로 하는 방안이 필요하다는 것을 나타낸다.

표 2.2.4.2 에너지 발전 시스템 요소별 관련성

개념요소	외피기능	통합형 계획요소
자연 에너지 활용	에너지 획득	에너지 발전 시스템

(2) 태양 광선 조절 시스템

태양광선은 태양으로부터 발산되는 빛과 열을 의미하는 것으로 광선의 실내 유입은 거주자의 쾌적도를 증진시키는 측면과 인공조명 에너지 사용량을 감소시킬 수 있는 측면에서 중요한 의미를 가진다. 그러나 과도한 광선의 유입은 실내 온도 상승으로 냉방 에너지 소비를 증가시키는 단점을 가짐으로 적절한 광선의 조절을 통하여 실내 공간의 쾌적도를 증진시키는 방안을 고려하여야 한다.

일조의 유입을 통한 자연 채광은 자연 광원을 활용하여 실내 공간의 일정 밝기를 확보하여 거주자 생활의 만족도를 향상시킬 수 있다. 이러한 광선을 직사 일광과 천공광으로 구분되며 천공광은 다시 청공광과 담천광으로 구성된다. 직사 일광은 태양으로부터 방사되어 지구에 도달하는 빛 중에서 대기층을 투과하여 지표면에 직접 도달하는 빛을 의미한다. 그리고 대기층과 구름에서 확산, 투과, 반사되어 지표면에 도달하는 빛을 천공광이라 한다. 직사 일광과 천공광을 주광이라 하며 천공광은 하늘이 맑을 때 청천공과 흐릴 때의 담천공으로 구분된다. 이러한 주광을 건축 설계에 직접 이용하기 위하여 주광율을 이용하여 정량화시킨 자료를 계획의 지표로 하여 설계를 진행한다.

일사 차폐 계획은 외부 차양을 설치하여 태양 광선의 유입을 차단하는 방법이 가장 일반적이지만, 차양 장치의 설치가 불가능할 경우에는 열선 흡수 유리, 반사 유리 등의 특수 유리를 사용하여 일사 투과를 감소시키고 블라인드와 같은 내부 차양 장치를 이용하는 방법도 있다. 유리는 종류에 따라 일사 투과율이 결정되는데, 투명 유리는 90%, 열선 흡수 유리는 80%, 반사 유리는 50% 정도의 일사를 투과한다. 로우이(Low-E) 유리는 가시광선 성분의 일사는 투명 유리와 유사하게 흡수하고 복사열은 차단하는 성능을 보유하고 있고, 일조는 유입하고 일사는 차단할 수 있는 이중적 장점을 가지는 유리이다. 또, 건물 외피의 마감을 밝은 색으로 하여 도달되는 일사가 흡수되지 않고 반사될 수 있도록 계획하는 방법도 있으며 식재 계획이나 파골라 등을 설치하여 일사를 차단하기도 한다.

태양광선 조절 시스템과 관련된 개념 요소는 효율적인 에너지 관리에 해당하는 항목으로서 외피의 기능에 따르면 일사와 일조에 관한 대응에 관한 내용이다. 국내 친환경 인증 기준에 따른 항목으로는 조명 에너지 사용량의 감소를 평가 항목으로 설정되어 있고 지능형 인증 기준에 따르면 일사 차폐 시설과 일조 차례 시설로 세분하여 명시하고 있다. 이러한 각 항목을 종합하여 통합형 계획 요소로서 태양광선 조절에 관한 항목을 도출할 수 있다.

표 2.2.4.3 태양광선 조절 시스템 요소별 관련성

개념요소	외피기능	통합형 계획요소
효율적 에너지 관리	일사, 일조	태양 광선 조절 시스템

(3) 실내 기후 조절 시스템

실내 공간의 기후를 조절하는 방안은 주로 열적 성능에 관련된 측면과 환기에 관련된 측면이 주요한 고려 사항이다. 열적 성능의 적정한 균형을 유지하여 냉방 에너지와 난방 에너지의 감소를 줄여 에너지 부하량을 감소시킬 수 있으며 환기 역시 신선한 공기와 오염된 공기의 신속한 교환을 도모하여 실내 공기질을 향상시키고 자연 환기 방식을 유도하여 에너지 부하량 감소에 기여할 수 있도록 하는 것이 중요하다. 난방 부하는 실의 난방 기준 온도와 외기와의 온도 차이에 의하여 구조체 및 환기에 의하여 손실되는 열량, 즉 실내 기온을 난방 기준 온도로 유지하기 위하여 요구되는 에너지양이라 할 수 있다. 난방 부하는 구조체를 통한 열손실량과 환기에 의한 열손실량의 총합으로 구성된다. 냉방 부하는 냉방 기준 온도와 외기와 의 온도 차이에 의하여 구조체 및 환기에 의하여 획득 열과 일사에 의한 획득열, 인체 발생열, 조명 기구 발생열, 실내 기기 발생열과 같은 내부 발생열의 총합으로서 냉방 기준 온도를 유지하기 위하여 제거해야 할 에너지양이라 할 수 있다. 열적 균형 상태를 유지하기 위해서는 실내와 실외의 온도 차이를 감소시키는 것이 가장 중요한 사항인데 일반적으로 단열 성능에 따라 기류의 이동을 최소화할수 있다. 기밀한 단열을 함으로서 습기와 결로 발생을 억제할 수 있으므로 단열 처리에 대한 신중한 계획이 요구된다. 열류 차단을 위한 단열은 재료에 따라 저항형 단열, 반사형 단열, 용량형 단열로 구성된다. 저항형 단열재는 유리섬유, 스티로폼, 폴리우레탄과 같은 다공질 또는 섬유질의 재료로서 열전도율을 낮추며 현재 사용되고 있는 대부분의 단열재에 해당하며 열전달을 억제하는 성능이 우수하다. 반사형 단열재는 복사의 형태로 열류의 이동이 형성되는 곳에 유리하며 방사율과 흡수율이 낮은 알루미늄 시트, 알루미늄 호일과 같은 광택성 금속판 박을 주로 사용한다. 용량형 단열재는 주로 중량 구조체의 큰 용량열을 이용하는 단열 방식으로 콘크리트 벽체나 일정 정도 이상의 폭을 가지는 흙벽처럼 열전달을 지연시키는 성질이 뛰어나다. 실내 기후 조절 시스템과 관련된 개념 요소는 효율적 에너지 관리에 해당하고 외피의 기능과 관련해서는 단열과 환기 작용과 연관성을 가진다. 국내 친환경 건축물 인증 기준과 관련해서는 에너지 소비와 에너지 절약적 항목과 관계되며 지능형 건축물 인증기준과는 외벽 단열 성능과 돔(Dome) 및 선큰 가든과 관련성이 있다. 이러한 항목을 종합하여 통합형 계획 요소를 도출할 수 있다.

표 2.2.4.4 실내기후 조절 시스템 요소별 관련성

개념요소	외피기능	통합형 계획요소
효율적 에너지 관리	단열, 환기	실내 기후 조절 시스템

나. 친환경 건축물 외피의 표현요소와 적용현황

(1) 친환경 건축물 외피 디자인의 표현 요소

자연 에너지만으로 충분히 건물의 필요 에너지를 충족하지 못할 경우 에너지 발전 설비들을 이용하기도 한다. 이러한 설비 장치들은 부착되는 방식에 따라 건물의 파사드나 지붕의 일부분으로 계획되는 일체형과 별도의 지지대와 구조물로 형성되는 부착형으로 구분할 수 있다. 건물의 벽체 또는 지붕에 설치됨으로써 건물 외피 구성 요소의 역할과 기능을 수행하고 디자인 요소로 작용한다.

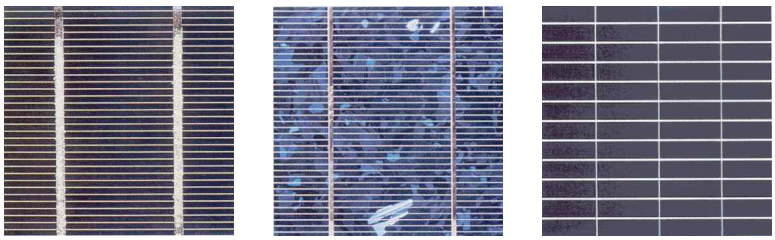
지붕에 설치되는 방식은 주로 건축물 표면적에 비하여 지붕 면적이 큰 건물에 적합한 방식으로 PV 타일, PV 슬레이트, PV 쉉글, PV 금속판 등이 있는데, 시공 방법에 있어서 전체 지붕 공사와 병행하여 연속 설치가 가능하고 부분적으로 설치될 경우에는 재료의 속성을 고려하여 일체감을 높일수 있도록 설치하는 것이 중요하다. 파사드에 설치되는 방식은 유리로 마감된 커튼월에 설치하는 것과 일조의 유입과 조망에 방해되지 않도록 스팬드럴에 설치하는 하는 방법이 있다. 지붕 설치 방식에 비하여 상대적으로 방수와 하중에 대한 영향을 적게 받음으로 외장 재료를 대체하여 마감이 이루어짐으로 재료비 절감 차원에서 이중적 이점을 가지게 된다.

부착형 PV 모듈은 거치대와 패널의 형상으로 인하여 시각적 디자인상 고려가 필요한 부분인데, 건물 통합형 태양 에너지 발전(Building Intergrated Photovoltaics) 방식은 건물의 지붕과 파사드에 일체형으로 설치하여 외피 마감재로서 기능을 수행하는 동시에 에너지를 생산하는 다기능 시스템으로 미관상 부착형에 비하여 유리한 측면이 있다. 비록, 태양 각도를 고려하여 경사형으로 설치되는 경우에 비하여 에너지 효율은 상대적으로 떨어지는 단점이 있지만 도심의 중고층형 건축물에 적용이 용이하고 디자인상 유리한 측면이 있다. 전체 파사드의 재료와 색상 및 배열을 고려하여 적합한 시각적 효과를 창출할 수 있는 적용 방법의 제안을 통하여 향후 더욱 발전 가능성이 높은 시스템이다.

가동 여부에 따라 태양의 이동 경로를 분석하여 집열판이 이동하는 추적형과 최적의 각도로 고착되어 있는 고정형으로 구분할 수 있다. 이밖에, 창문형 집열 패널을 설치하여 태양에너지를 열에너지로 변환시켜 건축물 내부의 열저장 장치로 가열된 공기를 전달하기도 한다. 집열기와 축열조 사이에 가열된 공기는 실내 공기와 구분되고 에너지 파이프를 통하여 축열조로 전달된다. 이러한 방식으로 주간에는 축열하고 야간에는 난방을 위한 방열을 하여 난방 에너지의 10% 이상을 절약할 수 있다.

이러한 에너지 발전 시스템에 요구되는 집열장치와 지지 구조 디자인은 건축물 외부 디자인에 중요한 요소로 작용하며 전체 공사비에 핵심적인 영향을 줄 수 있다. 최근에는 기술 개발에 따른 성과로 효율 향상과 단가 하락에 따라 보급이 확대되는 추세라서 향후 에너지 발전 시스템의 도입이 보편화될 것으로 예상할 수 있다. 현재 건축물에 적용되고 있는 PV 모듈

은 그림 2.4.3에서 제시한 3가지 종류가 일반적으로 사용되고 있는데 에너지 변화 효율과 가격 면에서 차이를 보이면서 양산화되고 있다. 변화 효율에 따라 6%-15%까지 에너지를 생산할 수 있으며 효율이 높을수록 가격은 고가이고, 최근에는 비결정 박막형으로 생산되어 건물 외피에 통합형으로 부착된 형태로 생산되고 있어 미적 효과를 증진시키는데 기여하고 있다.



(a) 단결정 (b) 다결정 c) 비결정

그림 2.2.4.2 PV (photovoitaic cell) 모듈의 종류

이외에도 무한한 청정 에너지원인 공기의 운동 에너지를 이용하여 풍력 터빈을 통하여 전기를 발생시키는 시스템이 있다. 이를 위해선 적당한 바람이 부는 부지의 조건과 충분한 여유 공간을 확보한 후, 윈드 터빈을 설치해야 하는데, 설치 위치에 따라 진동 및 소음 등에 의한 구조체의 피해가 없도록 지붕 상부에 별도의 지지대를 설치함으로써 건물 외피 디자인에 영향을 줄수 있다. 비록, 풍력 발전은 다른 방법보다 적은 면적이 소요되고 환경에 미치는 영향이 거의 없으나 시각적인 장애와 소음 발생, 에너지 발생량이 소량이라는 문제점을 가지고 있어 건축물 자체에 적용되기에는 현실적으로 무리가 있다. 자연 에너지를 이용하여 건축물의 동력원을 확보하는 방식은 아직은 태양 에너지를 활용하는 방식이 일반적이고 대부분의 경우로 나타났다.

표 2.2.4.5 에너지 발전 시스템 계획 요소

계 획 요 소	표 현 요 소		표 현 내 용
에너지 발 전 시스템	설치위치	파사드	·태양 고도, 최적 입사각 고려 ·향과 주변 건물과의 관계 검토 ·음영 처리 계획 수립
		지 붕	
	설치방식	일체형	· 일체형 PV모듈, 분리형 PV모듈 · 설계초기 계획시 최적 상황을 고려
		부착형	
	가동여부	고정형	· 별도의 기계적 장치 요구 · 구동 모터, 기어 장착형 캐터필터
		추적형	

(2) 친환경 건축물 외피 디자인의 적용 현황

건물 통합형 태양 에너지 발전은 정교한 기술을 요구하고 상대적으로 고가의 장치이기에 실제 적용 빈도수는 낮게 나타나지만 고층형 건물에서는 도입 가능성이 지붕에 설치하는 경우보다 다수로 나타나고 있다. 특히, 외부에서 보이는 미관상 지붕 설치에 비하여 유리하며 기술 개발에 따라 저가의 PV 모듈이 양산되고 있어 앞으로 적용 방안에 대한 세부적 연구를 바탕으로 도입 가능성이 높은 방식으로 판단된다. 부착형 방식은 주로 소규모 건축물에서 다수로 나타났고 통합형 방식은 건축물의 표면적에 비하여 수직면이 많은 중규모 이상의 건축물에서 우세한 빈도를 나타내었다. 특히, 파사드에 설치하는 경우는 대부분 통합형 방식을

채택하고 있는데, 일조와 조망의 문제를 해결하기 위하여 불투명한 PV 모듈은 스팬드럴에 장치하고 투명한 PV 모듈은 커튼월에 설치하여 일사 광선의 직접 유입으로 인한 현휘 현상과 실내 온도 상승을 방지하는 효과와 동시에 에너지 생산이라는 이중적 기능을 수행하고 있다. 특히, 돔(Dome) 상부의 천창에 박막형 PV 모듈을 설치하여 직사광선의 실내 유입을 차단하고 적절한 실내 조도를 유지하는 것이 가능하며 별도의 차양 장치를 설치하지 않아 재료비 절감 차원에서 경제적인 측면에서 이점이 있는 것으로 나타났다. 가동 여부에 따른 특성은 건축물의 디자인 및 비용 문제와 기술적인 측면에서 추적형에 비하여 고정형의 빈도가 높게 나타나는 것으로 판단된다. 기술 발전에도 불구하고 아직 가동형 방식인 태양 추적형 장치의 실현은 일반화되지 못하여 실험용 건축물에만 적용되고 있는 상황으로 향후 관련 기술의 연구와 개발에 따라 다양한 적용 범위를 가질 것으로 예상된다.

다. 친환경 건축물 외피디자인의 표현방법과 태양광선 조절시스템

(1) 외피 디자인의 표현 방법

태양열 발전 시스템은 설치 위치에 따라 지붕과 파사드로 구분할 수 있고, 설치 방식에 따라 부착형과 통합형으로 구분할 수 있다. 또, 가동 여부에 따라 고정형과 추적형으로 구성된다. 빈도수가 우세한 경우는 지붕에 부착형이나 통합형으로 설치하고 고정형 방식을 채택한 경우였다. 건축 계획에 적용 가능한 특성들을 바탕으로 적용 기법들을 항목에 따라 서술하면 아래와 같다.

지붕 설치 방식에 있어서 최선의 여건은 경사 지붕에 설치하는 것이지만 평지붕일 경우에는 태양의 고도와 입사 각도를 고려하여 별도의 지지대와 구조물이 필요하게 된다. 지붕 형태를 남측 방향으로 향한 톱니 형태로 하여 PV 모듈들을 설치하고 부분적으로 고측장을 형성하여 일조 유입에 있어서 직사광선을 피하면서 자연 채광을 유도하는 방법으로, 이러한 디자인은 입사각 형성에 유리하고 비, 바람, 눈 등의 영향을 줄일 수 있는 장점이 있다.

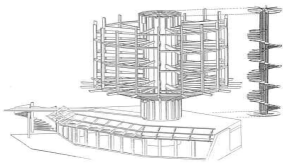


그림 2.2.4.3 Heliotrop 구조도



그림 2.2.4.4 Brundtland Center 톱니형 지붕

외피 디자인의 표현 방법은 지붕형과 파사드형으로 구분되는데, 지붕 설치 방식은 형태에 따라 경사형, 평판형, 돔(Dome)형, 캐노피형으로 구분 가능하고 파사드 설치 방식은 커튼월형, 발코니형, 차양형으로 구분할 수 있다. 주로 지붕에 사용되는 경사형은 단면형과 톱니형으로 표현되고 있고, 파사드는 부착 위치에 따라 벽면 부착, 커튼월 부착, 스팬드럴 부착, 차양 부착 방식으로 세분된다.

(2) 친환경 건축물 외피의 태양 광선 조절 시스템

(가) 친환경 건축물 외피의 태양 광선 조절 시스템의 요소

태양 광선의 실내 공간으로의 유입과 차단에 관련한 사항은 일정 밝기 이상을 실내 공간에 확보하려는 일조 문제와 난방 및 냉방 에너지와 관련된 일사 문제로 구분할 수 있다. 태양 에너지의 실내 유입은 대부분 창을 통하여 이루어지므로 적절한 일조의 유입과 일사의 차단은 조명 에너지와 냉난방 에너지 부하를 감소시키는데 필수적인 중요 요소이다. 차양은 태양 광선을 직접 반사하기에 가장 효과적인데, 효율을 높이기 위하여 방위, 크기, 각도 등의 상세한 데이터를 바탕으로 적절한 형태를 결정해야 한다. 설치 위치에 따라 상부 천창에 사용되는 지붕형과 파사드에 설치되는 경우로 구분되고, 설치 방식에 따라 외부형, 이중 외피 내 삽입형, 실내형으로 구분할 수 있다.

태양 광선의 일차적 차단이 가능한 외부형이 가장 효율적이고, 실내에 설치되는 루버나 블라인드는 유리면 뒤쪽에 이차적인 차단막으로서 형태가 자유롭고 관리가 용이한 측면이 있지만 에너지 절약 측면에서 외부 차양보다 효율이 떨어지는 것이 단점이다. 이중 외피의 중공 층에 설치되는 삽입형은 외부형에 비하여 유지, 관리가 용이하고 차단 효과도 양호하며 다양한 디자인이 가능하여 다기능의 차양 장치로 활용될 수 있다.



(a) 외부 차양 (b) 이중외피 내 차양 (c) 내부 차양

그림 2.2.4.5 차양 장치의 설치 방식

가장 효율적인 차양은 건물 외부에 설치하여 일사를 조절하는 장치로서 가동 여부에 따라 고정형, 회전형, 추적형으로 분류할수 있다. 고정형은 지역의 태양 궤도와 고도를 감안하여 최적의 각도로 차양 장치를 설치함으로 태양 광선의 유입을 차단하지만 획일적이고 변화에 대한 효율이 떨어지는 단점을 가지고, 추적형은 태양의 위치를 센서를 통하여 감지하고 중앙 컴퓨터에서 인식된 정보를 바탕으로 차양 장치의 움직임을 조정하는 방식이다. 효율은 가장 높지만 고가의 설치비용으로 아직 일반화되지 못하고 연구, 실험 시설에 부분적으로 적용된 경우이다. 회전형은 고정형과 추적형의 장점을 취합하여 상대적으로 저가의 설치비로 태양 광선의 실내 유입을 차단하여 쾌적한 실내 환경을 조성하는 것이 가능하다. 회전하는 방식은 수평 회전과 수직 회전이 있고 자동 및 수동 조작이 동시에 가능한 것이 대부분이다.

기계적 보조 장치를 이용하는 기술로는 전자 제어 모터를 이용한 자동 루버 시스템의 사용을 통해 건물 안이나 표면에 대한 태양열 취득을 조절하거나, 루버의 배치나 조작으로 벽면에 닿는 일사량을 제어하여 공조 설비 부하를 최소한으로 줄일 수 있게 하는 방법이 있다. 또한, 옥외에 설치한 차양, 루버 등을 가동시킴으로써 자동적으로 열 취득을 조절하는 방법, 또는 태양 각도를 감시하는 조절 차양 장치를 이용하여 실내 공간과 바닥으로 입사하는 태양광을 조절하는 방법 등이 있다. 계절별, 시간별 태양 고도와 각도에 반응하여 자동으로 감응하는 추적형 선반, 광선반, 반사형 선반 등의 장치가 최적의 위치에 자동적으로 배열되어 태양 광선을 실내로 유입한다. 이러한 자동 장치들은 실외 일조량과 실내 조명도를 지능형 센서를 통하여 판단하여 적정하게 작동한다.

인공 에너지 감소를 위하여 실내 공간으로 태양 광선을 유입하여 항상 쾌적한 실내 환경을 조성하여 거주자의 만족도를 높여주는 일조 유입 장치는 반사형 루버가 대표적인데, 빛을 실의 천정부 중앙이나 후미에 오도록 빛을 재반사 하기 위하여 사용하며, 가동 여부에 따라 고정형과 가동형으로 구분된다. 창에 입사되는 태양광을 실내 천장 면으로 반사시켜 자연 채광을 실 안쪽 부분까지 깊숙히 도입시키는 방법으로 측창의 외부나 내부에 알루미늄이나 은도금 금속과 같은 반사율이 높은 재질을 사용하며 외부의 주광을 측창을 통하여 실내에 유입시켜서 실내 공간의 적정 조도를 확보하고 인공조명으로 사용되는 에너지를 절감하는 장치이다. 특별히 고려되어야 할 부분은 광 선반 부분을 광학적 반사율이 크고, 경사 각도를 알맞게 하여 실 깊숙한 부분까지 자연 채광을 도달시키는 것이 중요하다.

표 2.2.4.6 친환경 건축물 외피의 태양 광선 조절 시스템의 계획 요소

계 획 요 소	표 현 요 소		표 현 내 용
태양광선 조절 시스템	설치위치	파사드	·벽체형과 천정형으로 구분 ·태양 고도와 입사 각도 고려
		지 붕	
	설치방식	내부형	·반사재질(유리,거울,알루미늄) 사용 ·반사약품으로 코팅처리 ·효율상 외부형, 삽입형, 내부형 순서 ·우천시 관리 방안 고려
		삽입형	
		외부형	
	가동여부	고정형	·태양 추적형 루버(Sun Tracking type) ·회전식 루버(Rotate Type) ·전동 블라인드, 커튼 ·유지, 관리방안 감안
		회전형	
		추적형	

(나) 친환경 건축물 외피의 태양광선 조절 시스템 표현 방법

앞에서 사례들을 통하여 살펴본 결과 설치 위치에 따라 지붕과 파사드, 설치 방식에 따라 내부형, 삽입형, 외부형으로 구분 가능하고 가동 여부에 따라 고정형, 회전형, 추적형으로 구성된다. 사용 빈도는 파사드, 외부형, 회전형의 빈도가 가장 우세하였다. 계절에 따른 태양광선의 유입량을 감응 센서를 통해 인지하여 90%이상의 직사광선을 차단하도록 자동으로 수평 회전하면서 작동된다.



(a) Swimming Pool (b) Glaxo Welcome House (c) Design Office for Gartner

그림 2.2.4.6 수평형 태양광선 조절 장치



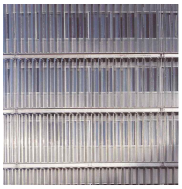
(a) 일조 유입시 형태 (b) 일사 차단시 형태

그림 2.2.4.7 Gotz Headquarters 수평형 차양 장치

중공층을 형성하는 전면형 이중 외피를 도입하여 열적 완충 공간으로 작용하며 자동으로 조절되는 외기의 유입과 배출로 열적 성능을 향상시키고 있다. 중공층에 삽입형으로 설치된 블라인드는 한쪽 면은 검은색으로 코팅되어 있고 반대 면은 흰색으로 코팅 처리되어 있어 일사를 차단할 경우는 흰색 면이 외부로 회전하여 반사시키고 일조를 유입할 때에는 반대쪽으로 회전한 후 검은색이 외부로 향하게 하여 빛을 흡수하여 열적 균형을 유지하도록 설계되어 있다.

빨강색과 오렌지색의 수직형 차양 장치의 다양한 조합을 통하여 저 에너지형 건축을 구현하면서 외피의 화려한 디자인 효과를 부여하고 있다. 각각의 차양 장치는 핀 고정 방식으로 설치되어 있고 필요에 따라 개별적으로 작동 가능하여 개폐에 따른 파사드의 형상이 변화 가능하다.


(a) Phoenix Central Library


(b) University Institute Paris

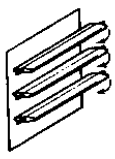
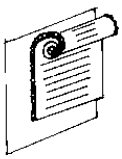
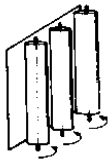
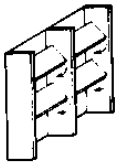

(c) GSW Headquarters

그림 2.2.4.8 수직형 태양 광선 조절 장치

설치 위치와 설치 방식, 가동 여부에 따라 다양한 경우가 나타나는데, 적용 가능한 기법들로서 설치되는 형태상 장축 방향을 기준으로 수평형, 수직형, 격자형, 자유형으로 구분되고 가동 여부에 따라 고정형과 회전형으로 구분되는데, 회전형은 다시 수평 회전, 수직 회전, 슬라이딩 회전으로 소분류가 가능하다.

수평형의 사용 경우가 가장 다수로서 이는 방위에 관계없이 가장 효율적인 차단 기능을 수행하고 경우에 따라서 광선반의 기능과 겸용해서 사용하는 것이 가능한 다기능의 차양 장치이기 때문이다. 더구나, 다른 형태에 비하여 외부를 향한 조망 확보 측면에서도 가장 우수하기에 다른 장치에 비하여 사용된 경우가 다수로 나타났다. 격자형은 태양 광선의 차단 효과는 가장 우수하지만 조망 확보 측면에서는 가장 불리한 형태로 일사 유입을 완벽하게 차단해야 하는 용도의 시설에 적용 가능한 형태이다. 이러한 차양 장치는 외부에서 보이는 시각적 측면을 감안하여 파사드 전체 디자인 효과를 높일 수 있는데, 대표적인 방법으로 색상에 의한 방법과 조명에 의한 방법이 있다.

표 2.2.4.7 차양 장치의 회전 방식

구 분	수 평 형		수 직 형	격 자 형
회전방식				
	수평회전	슬라이딩회전	수직회전	수평회전

라. 친환경 건축물 외피의 실내 기후 조절 시스템

(1) 이중 외피

건물의 외피는 외부 기후 조건으로부터 실내를 쾌적하게 유지시켜 주는 보호막 기능과 외부 기후의 여과 장치로서의 기능을 한다. 쾌적한 실내를 유지하기 위한 환기 방식에 있어서 이중 외피 시스템은 여러 복합적인 장점을 가진 환경 친화형 파사드의 대표적인 장치로서 다양한 활용 가능성을 내포하고 있다.

건물에 두개의 외피를 설치하여 완충 공간을 만들고 이에 대한 적절한 제어를 통하여 외부의 환경에 적극 대응할 수 있는 능동적인 스킨 개념의 외피를 형성시킨 것이다. 이중으로 구성된 커튼월 사이에 위치한 중공층을 열적 완충 공간으로 활용하면서 하부와 상부에 개구부를 통한 기류의 흐름에 따라 환기가 이루어지도록 한 방식이다. 원활한 환기를 위하여 전동형 팬과 송풍기를 하부에 배치하기도 하고 실외와 실내를 향한 전동창을 두어 개폐의 정도를 조절하기도 한다.

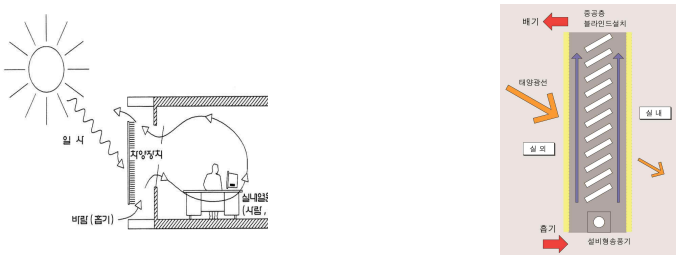
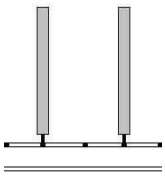
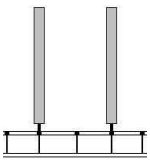
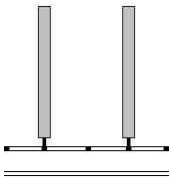
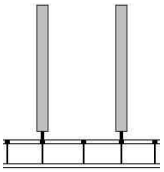
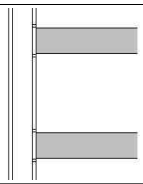
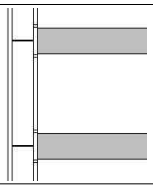
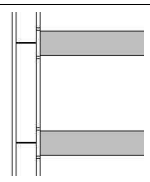
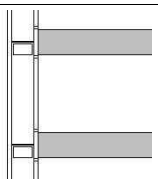


그림 2.2.4.9 이중 외피 개념도

표 2.2.4.8 이중 외피 시스템 적용 형식

구 분	전 면 형 (Whole Type)	박 스 형 (Box Type)	복 도 형 (Corridor Type)	샤 프 트 형 (Shapt-Box Type)
평 면				
단 면				
특 징	수평, 수직구획 없음	수평, 수직 구획	각층별 환기	박스형, 굴뚝 조합

겨울에는 중공층 내부의 온도가 상승하여 실내 열기가 유출되는 것을 막아주고 여름에는 상하의 개구부를 열어서 하부로 유입된 신선한 공기가 상부 개구부로 흐름을 유도하여 중공층의 일사 에너지를 신속하게 배출시켜 난방 에너지를 감소시킨다. 또, 디자인 측면에서도 다양한 장치를 삽입함으로 미적 효과를 더욱 증가시킬수 있는 가능성을 내포하고 있고 에너지 보존 측면에서 주로 통풍용 개폐형 천창과 전동식 환기창과 병행하여 사용할 때 성능이 더욱 배가된다. 이중 외피는 하부 창을 통하여 외부의 공기가 유입되고 중공층 내부에서 기

압 차이에 의하여 공기의 흐름은 상승되고 상부 창을 통하여 배출되는데, 이러한 효과를 이용하는 운영 방식에 따라 자연적인 대류 현상을 이용하는 자연형과 송풍용 팬이나 댐퍼 등을 활용하여 원활한 환기가 가능하게 하는 기계형으로 구분할수 있다. 또, 이중 외피는 그 형식에 따라 일반적으로 평면과 단면 형태에 따라 전면형(Whole Type), 박스형(Box Type), 복도형(Corridor Type), 그리고, 샤프트형(Shapt-Box Type)으로 구분할수 있다.

(2) 돔(Dome)

환경 친화적 건축에서 에너지의 재생 가능성 문제와 함께 에너지의 효율적인 보존, 관리 문제는 동시에 고려해야 하는 주요 사항이다. 난방과 냉방을 위해 기계 장치들을 활용하여 에너지 소비량을 최소화 시키는 것은 보존, 관리 측면에서 주요한 사항이다. 태양 에너지를 통해 실내 공간을 난방하거나 온수를 확보하는 방법은 단독으로 사용되는 경우보다 자동화된 장치들과 병행하여 사용하는 경우가 다수이다.

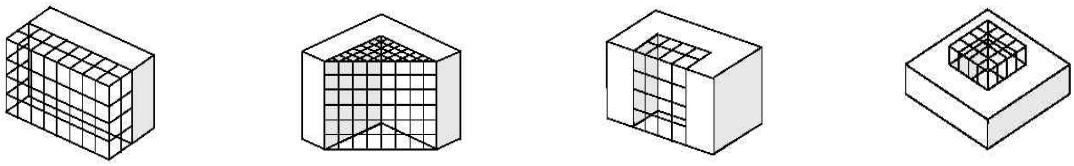
돔(Dome)이 지니는 가장 기본적인 기능은 돔(Dome)을 통하여 주 건물의 환경을 조절함으로써 에너지를 절약하고 쾌적한 환경을 조성하는 것이다. 난방을 위한 열 에너지 유입에 가장 유리한 장치이지만 냉방과 환기 문제를 고려해야 쾌적한 실내 기후를 유지할수 있기에 계획 초기 단계부터 기계적 설비 방식과 통합하여 연계된 시스템으로 접근하여야 한다. 지하수를 이용하거나 야간 통풍 방식을 활용하여 주간에 가열되었던 건축물의 온도를 떨어뜨려 온도 상승을 방지하는 것으로 자동으로 개폐가 가능한 통풍용 지붕을 돔(Dome) 상부에 도입하여 에너지 보존과 환기 문제를 동시에 해결할수 있다.

돔(Dome)내의 열 환경에 가장 큰 영향을 미치는 것은 온실 효과와 굴뚝 효과이다. 온실 효과는 짧은 파장인 열선이 유리를 투과하여 돔(Dome) 내부의 표면을 따뜻하게 만드는 데에서 생긴다. 따라서 태양열은 실내에 집열되어 겨울에는 돔(Dome)내의 난방에 도움이 되며, 여름에는 이와 반대로 냉방부하를 증가시키는 요인이 된다. 굴뚝 효과는 돔(Dome) 공간 내의 고도차에 의한 압력 작용의 차이로 인해 발생하게 된다.

특히 대형 내부 공간의 상부 천장을 자동형 개폐식으로 하고 하부에 바람의 이동을 가속시키는 댐퍼를 설치하여 쾌적한 실내공간을 유지할수 있도록 한다. 오염된 공기와 신선한 공기의 주기적 교환을 위한 환기 문제는 이용자 측면에서 필수적인 요인으로 자동 개폐형 창호, 통풍형 지붕, 송풍기 등과 같은 장치가 기후의 변화에 반응하여 자동적으로 작동한다. 또한 돔(Dome)은 계절에 따른 온도 분포가 차이가 나게 되므로 계절에 따라 적절한 환기 조절이 필요하고 평면 길이와 형태에 따라 자연광이 충분히 미치지 못하는 부분을 위해 돔(Dome) 내부의 인공 조명의 보완이 요구된다. 또, 난방형 돔과 냉방형 돔의 구분에 따라 건물의 성격과 환기 조건이 다르게 결정되어 디자인 되어야 한다.

주 건물과 돔(Dome)이 접합하는 형식은 1면 접합에 4면 접합까지 4가지로 분류할수 있는데, 건축물 난방 효과에 있어서는 밀폐된 형태인 4면 접합이 열적 완충 공간으로 작용하여 가장 효율적인 것으로 나타나 적용 빈도가 높았고, 고층, 대형 건축물일수록 4면 접합 빈도가 높게 나타났다. 돔(Dome)은 온실 효과를 방지하고 환기를 원활하게 하기 위해서 창문의 위치가 중요한데, 대류 현상에 의한 자연 환기 효과를 극대화시키기 위하여 지붕에 천창을 형성하는 비율이 높게 나타났다. 그리고 천창의 작동 방식은 자동형 천창을 설치하여 실내

온도와 습도에 따라 자동 반응하여 개폐가 가능하거나 수동형과 병행하여 사용하는 경우도 다수로 나타났다.



(a) 1면 접합 (b) 2면 접합 (c) 3면 접합 (d) 4면 접합

그림 2.2.4.10 돔(Dome)의 접합 형식별 분류

표 2.2.4.9 돔(Dome) 계획 요소

계 획 요 소	표 현 요 소		표 현 내 용
돔(Dome)	접합형식	1면접합	·부착형 온실 ·실내 정원 도입 ·간이 연못 조성 ·열적 완충공간 ·온실효과 방지 대책 수립
		2면접합	
		3면접합	
		4면접합	
	개폐위치	파사드	·상부 개폐형 천장 ·대류현상을 이용한 환기 발생
		지 붕	
	개폐형식	수동형	·실내온도 감지 센서 ·전동형 연결 장치 활용
		전동형	

5. 건축물의 태양광 발전과 곡면지붕 태양 에너지 분석모델

가. 개요

인류가 그동안 전적으로 의존하여 온 화석에너지는 이제 고갈이라는 현실적인 문제에 직면하고 있을 뿐 아니라 온실가스에 의한 지구온난화와 그로 인한 기상이변 그리고 환경오염으로 인류의 생존은 중대한 위협에 처해 있다. 환경 친화적이고 재생 가능한 에너지를 개발하고 사용하는 것은 인류의 생존을 위한 필수사항이 되었으며 전 세계의 주요 국가들은 국제 기후변화협약에 대응하며 환경문제를 해결하기 위하여 대체에너지 및 신재생에너지 개발과 보급에 주력하고 있다.

낮은 변환효율 높은 설치비용 및 일사량에 의존하는 불규칙함 등으로 인해 특수한 목적에 주로 사용되어 왔던 태양광발전은 계통연계기술의 발달에 힘입어 상용발전이 가능하게 되었고 세계 주요 국가들의 관심과 정책적인 배려에 의해 주요 전략산업으로 성장하고 있다 태양광은 지속적일 뿐 아니라 무제한으로 얻을 수 있는 무공해 천연에너지라는 점에서 풍력과 함께 가장 확실한 신재생에너지의 대안이 될 수 있으며 세계기후변화협약에 대응할 수 있는 기대되는 에너지원으로 부상하고 있다.

태양광발전 및 설비에 대한 원리와 기술을 소개하고 태양광발전소 건설에 소요되는 공사비 수준과 설비 보급을 지원하는 정책 및 기준을 검토하며 상업용 대형발전소 설계에 고려하여야 하는 기술적인 사항과 실제 설계에서의 적용사례를 소개하고자 한다.

나. 태양전지의 특성

(1) 방사 조도 특성

태양전지에 방사되는 조도가 변화하면 그 강도에 비례해 발생전압과 전류가 변화한다 태양광의 방사조도는 태양전지의 설치 방향이나 설치 각도에 의해 변화되기 때문에 태양전지가 최적으로 동작할 수 있도록 설치상태 및 배치가 고려되어야 한다.

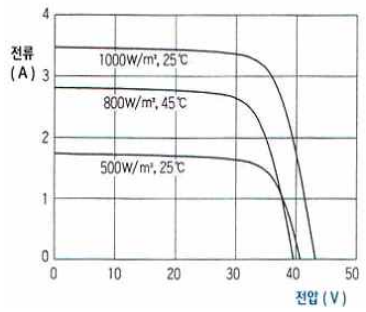


그림 2.2.5.1 방사조도와 전압 전류와의 관계

(2) 전압과 전류 특성

태양전지의 전압은 그 태양전지의 제조상의 특성에 의하여 결정되는 고유의 값으로 이 값에 따라 태양전지의 출력은 그림 2.2.5.2와 같이 발생하는 전압과 전류의 상관관계에 의해 결

정된다. 즉 태양전지의 출력은 그리고 원점을 잇는 면적(그림의 회색부분)으로 나타낼 수 있으며 태양전지를 효율적으로 사용하기 위해서는 색깔부분의 면적이 최대가 되는 동작전압 와 동작전류를 설정해야 한다. 이렇게 태양전지의 출력이 최고가 되는 동작점을 최적 동작점이라 하고 이때의 출력을 최대 출력 전압을 최적 동작 전압 전류를 최적 동작 전류라고 한다.

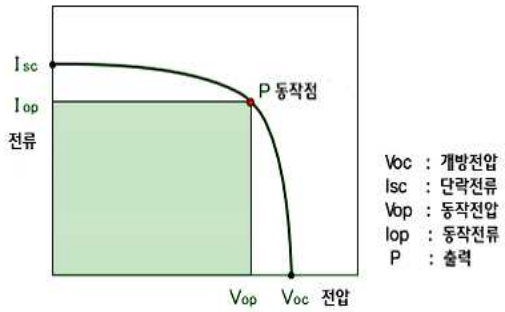


그림 2.2.5.2 태양전지 전압과 전류의 상관관계

(3) 온도특성

태양전지는 외부 기온이나 일조에 의해 자체의 온도가 상승하면 발전 전압이 내려가는 특성을 갖고 있으며 그 저하율은 태양전지의 물성에 따라 다르지만 결정계에서는 ℃온도가 상승할 때 약 0.4% 저하한다 따라서 태양전지는 방열이 잘 될 수 있도록 설치해야 한다.

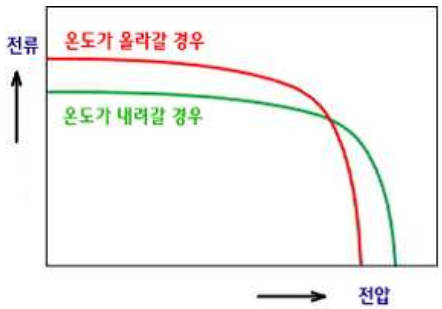


그림 2.2.5.3 태양전지의 온도특성

다. 인버터

인버터는 태양전지에서 발생하는 직류의 전기를 우리가 사용하는 교류로 변환시켜주는 장치이며 태양광발전에서 중요한 역할을 하고 있다. 관련업계의 꾸준한 연구개발로 현재는 소형 전자동 인버터를 대량으로 생산할 수 있게 되었고, 그 결과 개인이 손쉽게 태양광발전설비를 소유할 수 있게 되었다.

태양광발전설비 강국인 독일과 일본의 대부분의 태양광발전설비는 일반주택 지붕에 설치된 수 kW급의 소규모 설비이지만 이들 설비는 전력망에 접속된 소형의 인버터를 통해 발전된 전기를 전력회사에 손쉽게 판매하고 있다. 이처럼 지금의 폭발적인 태양광발전설비의 증가는 인버터의 개발덕택이라고 할 수 있을 정도로 태양광산업에서 인버터가 차지하는 비중은 대단히 중요하다.



그림 2.2.5.4 실내 외 인버터 설치

(1) 인버터의 종류

일반 주택용 인버터는 수 kW의 용량이지만 대형 상업용 발전소에 사용되는 것은 수 십 kW ~ 수백kW의 용량을 갖는 등 용도와 목적에 따라 다양한 크기의 인버터가 제작되고 있다 더욱이 이들 인버터는 단독 사용은 물론 태양전지 설비용량에 맞추어 여러 대를 병렬로 조합하여 사용할 수 있기 때문에 용량에서 오는 제약은 거의 없다고 할 수 있다. 인버터는 방식에 따라 여러 종류가 있으며 크게 다음표와 같이 분류할 수 있다.

표 2.2.5.1 인버터의 종류 및 특징

방 식	종 류	특 징
Communication 방식	자려식	역률조정 가능
	타려식	역률조정 불가
출력제어방식	전압제어형	자립운전 가능 과전류 및 고장전류 억제에 불리
	전류제어형	과전류 및 고장전류 억제에 유리 자립운전 불리
부하측 절연방식	상용주파수절연방식	내뇌성 및 노이즈커트특성이 우수 중량과 부피가 크다
	고주파절연방식	소형경량화 가능 회로가 복잡
	Transformerless	소형경량 저가격 및 고 신뢰성 상용전원과 절연되지 않음에 따른 위험성

(2) 인버터의 주요기능

인버터는 직류를 교류로 변환하는 기능 외에 다음과 같은 주요 기능을 수행함으로써 태양광발전설비를 전력망에 접속을 가능하게 한다.

- 태양광출력에 따른 자동운전 자동정지 및 최대전력추종제어
- 태양광발전설비와 전력망 과의 병렬운전을 위한 주파수 전압 위상제어
- 발전출력의 품질 전압변동 고조파 의 제어
- 전력망 이상 발생시 단독운전방지

- 태양광발전설비 및 인버터 자체고장진단 및 이상 발생시 자동정지

(3) 단독운전 방지대책

계통연계운전 전력망과 접속하여 생산된 전력을 송전하는 운전을 하는 태양광발전설비에서는 전력망에 정전이 발생하였을 경우 태양광발전설비를 신속하게 계통에서 분리하는 것이 대단히 중요하다 만약 정전이 되었을 때에도 태양광발전설비가 계통에서 분리되지 않으면 정전된 전력망에 지속적으로 전력을 공급함으로써 감전 사고의 위험이 있을 뿐 아니라 전력망이 복구될 때 비동기접속전압 주파수 및 위상이 일치하지 않는것 으로 인한 기기손상 및 차적인 고장이 생길 수 있기때문이다. 태양광발전설비의 용량이 대용량이거나 선로에 접속된 부하와 비슷한 조건에서는 전력망이 정전되어도 태양광발전설비가 부하에 전력을 지속적으로 공급할 수 있기 때문에 이러한 단독운전은 감지가 쉽지 않다 따라서 많은 인버터를 생산 업체들은 보다 확실한 감지방법을 찾아내도록 노력하고 있으며 의 성능 향상에 힘입어 과거에는 구현할 수 없었던 다양한 단독운전방지방법 모색이 가능하게 되었다 그 결과 근래에 시판되는 대부분의 인버터는 신뢰할 수준의 단독운전방지대책을 구비하고 있는 것으로 알려져 있다.

인버터는 수동적방식과 능동적방식이 적용되고 있는데 전자는 연계운전에서 단독운전으로 이행시의 전압파형 및 위상 등의 변화를 감지하여 인버터를 정지시키는 방식을 말하며 후자는 연계운전시에는 영향을 주지 않고 단독운전시에만 이상이 나타날 수 있는 변동요인을 항상 인버터에 인위적으로 주고 인버터가 이것을 감지하여 정지시키는 방식을 말한다. 단독운전을 방지하기 위하여 적용되고 있는 방법들을 요약하면 다음 표와 같다.

표 2.2.5.2 인버터 단독운전 방지 검출방법

인버터 기능의 수동적 이용	• 전압검출 • 최력검출
인버터 기능의 능동적 이용	• 변화 측정 • 특정 주파수에서의 변화 감지 • 변위 감지 • 편차 감지 • 변위의 감지 • 변위의 감지 • 급등 감지
전력계통과 협조	• 전력선 반송 통신을 이용한 보호협조 • 삽입에 의한 감지능력 확대 • 데이터 통신제어

라. 태양광발전의 형태와 계통연계

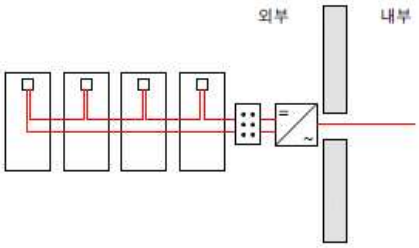
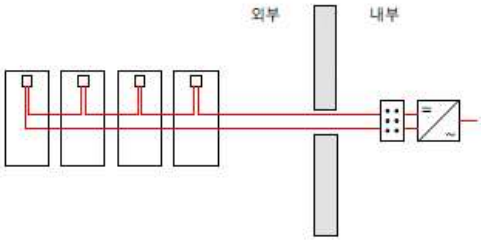
태양광발전시스템은 크게 전력회사의 전력망과 연계되지 않고 단독으로 운전되는 독립형과 전력망과 항상 병렬 운전되는 계통연계형으로 분류된다.

(1) 독립형

독립형은 전력회사의 전기를 공급받을 수 없는 도서지방 깊은 산속 또는 사막과 같은 특

수한 장소에 적합한 설비로서 전력공급에 중단이 없도록 축전지 및 비상발전기와 함께 설치한다 부속설비가 많아 설비 가격이 상당히 비싸며 충방전이 계속되는 운전특성상 년마다 한 번씩 축전지 전체를 교체하여야 하므로 유지보수비가 대단히 비싼 편이다 독립형은 전력망에 접속할 수 없는 섬이나 특수지역 또는 특수한 목적에만 사용될 뿐 일반화되어 있지 않다.

표 2.2.5.3 독립형 인버터에 의한 모듈제어

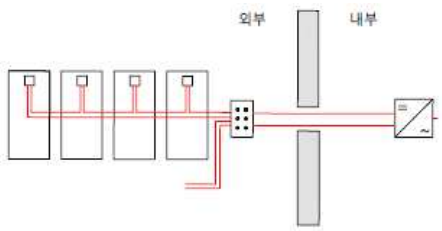
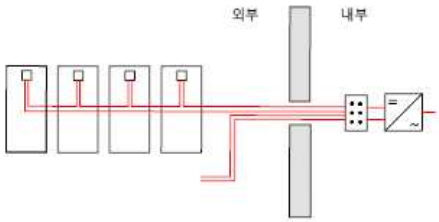
외부에 설치된 인버터	내부에 설치된 인버터
	
· 지면으로부터 최소 1m이상 이격 · 통풍이 안 되면 과열로 고장과 화재의 원인이 되므로 제품에 뚫려있는 환기구가 막히지 않도록 한다. · 평지붕에 적합	· 인버터의 상부와 하부에 최소 20cm이상의 공간을 확보하여 충분한 통풍 · 경사지붕에 적합

(2) 계통연계형

계통연계형은 전력망과 병렬운전되는 태양광발전설비로서 발전된 전력은 전량 전력회사에 판매한다. 계통연계형은 태양광발전이 적합하지 않은 시기 야간 흐린 날 에도 발전량 저하를 고려할 필요가 없고 설비가 간단하다 우리나라에서 도서지역을 제외하고 설치되는 태양광발전설비는 계통연계형이다.

독립형 태양발전설비를 제외한 모든 태양발전설비는 전력망과 연계하여 전력판매를 목적으로 하고 있다 이렇게 전력망에 연계되어 전력 판매를 목적으로 하고 있는 분산형전원은 설비 용량에 따라 전력망에 영향을 주지 않도록 연계방식에 제약을 받으며 우리나라에서는 분산형전원의 계통연계에 대하여 표 의 기준을 적용하고 있다.

표 2.2.5.4 계통연계형 인버터에 의한 모듈제어

외부에 설치된 인버터	내부에 설치된 인버터
	
평지붕에 적합	일체형 지붕과 입면에 적합

마. 태양광발전소의 설계

계통연계형 태양광발전소의 설계는 일반적으로 그림과 같은 순서로 진행된다.

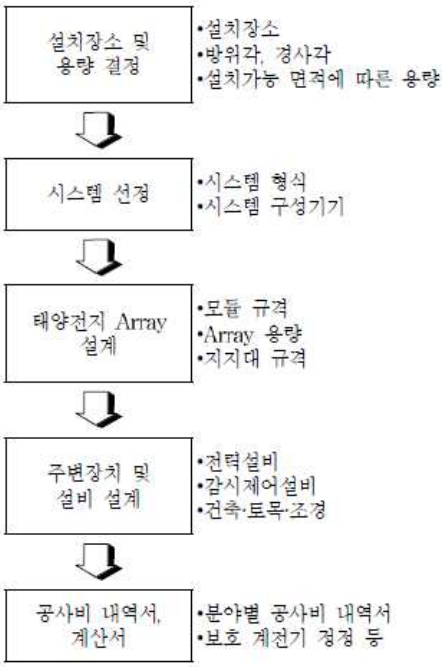


그림 2.2.5.5 태양광발전소의 설계순서

(1) 태양광발전설비 설치에 고려하여야 할 사항

(가) 일사량

일사량은 지표면에 도달하는 태양광선에 직각으로 놓은 1㎠의 넓이에 1분 동안의 태양에서 오는 빛의 복사로 정의되며 하루 중의 일사량은 태양 고도가 가장 높은 때인 남중시에 최대이고, 년 중에는 하지경이 최대가 된다.

우리나라는 1,200 ~ 1,500W/㎡정도로서 비교적 높은 일사량을 보이고 있어 태양광 에너지의 활용에 있어서 유리한 조건을 가지고 있다 현재 기상청에서 국내에 일사량 기기를 설치하여 계측 중인 지역은 개로서 일반적으로 년간 측정데이터의 평균값을 태양광발전설비설치 타당성검토를 위한 기초 자료로 사용한다.

(나) 국내 지역별 설계기본풍속 기준

태양광모듈은 모듈지지대에 설치되며 이 모듈지지대의 구조계산을 위해 적용되는 기본풍속은 건축물의 구조기준 등에 관한 규칙 제 7조 제 2항의 규정에 따라 적용한다.

(2) 태양광발전설비 설치조건 분석

동일한 태양전지면적으로 높은 출력을 얻기 위해서는 태양전지의 표면을 가능한 한 최장의 일조시간에 노출될 수 있도록 하여야 한다 일사량은설치장소의 위도와 계절에 따른 태양궤적변화 그리고 지역날씨에 의해 커다란 편차를 보이므로 그 지역의 특성에 상응한 설치조건을 적용시켜야 한다.

(가) 방향성 및 설치경사각도

연간 태양궤적에 비추어 볼 때 지구 북반구에서의 태양전지설치방향은 남향으로 하여야 하는 것은 자명한 일이고 이에 더하여 태양전지표면에 태양광이 가능한 한 직각에 가깝게 비치도록 하여야 태양광선의 밀도가 커져 최대의 에너지양을 얻을 수 있다.

지축이 약 23.5도 기울어져 자전과 공전을 하는 지구의 특성상 태양의 고도가 매일 달라져 태양전지 수평면에 조사되는 입사각도가 변하며 우리나라의 경우 위도 기준으로 할 때 태양광의 입사각도는 하지 정오에 약 76° 동지 정오에 약 30° 범위에서 연간 태양의 고도가 변하게 된다.

항상 태양광선의 입사각을 전지표면에 직각으로 유지할 수 있는 태양광추적형발전설비는 이러한태양고도의 변화가 문제가 되지 않지만 고정식 발전설비는 특정지역에서의 최적설치각도와 방향파악을 위하여 해당지역에서 측정된 다년간의 일사량자료의 분석이 선행되어야 한다.

(나) 그림자 방지

발전을 위한 태양광전지는 다수의 태양전지를 직병렬 접속하여 사용하며 이중 전부 또는 어느 일부에 그림자가 드리워져 직사광선이 방해를 받으면 마치 배관 내 일부분에 병목현상이 발생하는 것과 같이 해당 태양광전지 전체의 에너지획득에 악영향을 미치게 된다.

그림자는 인접건물 인근의 식재 등 장애물에 의한 것과 건물에 설치할 경우 건물 자체에 의한 요소 그리고 태양전지모듈 상호간 배치에 의해 생성되는 것으로 구분된다.

건물 장애물 및 태양전지모듈 간격에 의한 그림자는 쉽게 인지할 수 있는 것으로 배치를 조정하거나 간격을 조정하여 쉽게 해결할 수 있다 지나치기 쉬운 것은 조경 또는 녹화에 의한 식재로서 태양광발전설비의 수명 년 이상 을 고려할 때 설치당시에는 영향을 미치지 않더라도 식물의 성장에 의해 추후 발전에 큰 영향을 받을 수 있으므로 식생의 성장속도 역시 신중하게 고려되어야 한다.

따라서 태양전지모듈에 음영이 생기지 않도록 입지를 선정하고 배치하여야 하고 계절로 보아 그림자 길이가 가장 긴 겨울에 영향이 없으면 일년 내내 그림자에 대한 영향은 없다고 볼 수 있다. 근래에는 컴퓨터를 이용한 시뮬레이션 프로그램의 발달로 각 계절별 또는 하루 중 시간별 음영분석이 가능하므로 실제 설계에서는 이것을 이용한다.

(다) 태양전지모듈의 온도상승과 변환효율

태양전지는 전기를 발전하는 과정에서 자체적으로 발생하는 열과 주변대기의 상태에 따라 온도가 상승하게 되어 실제적 변환효율은 더 낮아지게된다. 결정질 태양전지의 경우 모듈의 자체온도가 1℃ 상승하면 변환효율은 약 0.4% 정도 떨어지는 것으로 알려져 있으므로 최상의 변환효율을 얻기 위해서는 설치된 모듈온도가 상승하더라도 자체냉각효과를 가질 수 있는 설치방법을 강구하여야 한다.

사막과 같은 극단적인 환경이 아니라면 넓은 지면에 설치되는 태양광설비에는 별도의 냉각대책을 고려할 필요가 없으나 건축물의 외벽에 태양광모듈을 설치하는 경우 건축분야와 방열 대책을 협의할 필요가 있다.

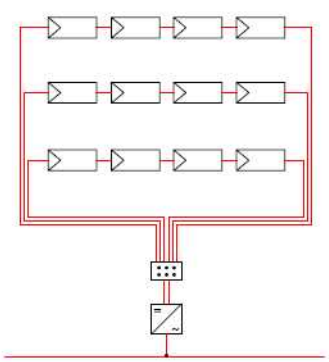
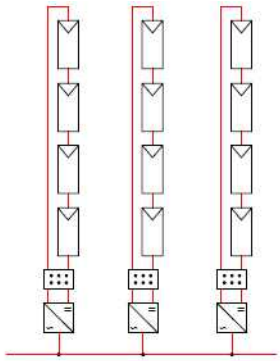
(3) 감시제어설비

규모가 비교적 큰 태양광발전설비의 경우 일반적으로 설비 운전상태 감시 원격제어 측정 및 기록유지를 위하여 감시제어설비를 갖추도록 하며 발전소의 부속설비로 운용되고 있을 경우 기존 중앙제어실에서 원격으로 감시제어를 할 수 있도록 을 이용한 통신망을 구축하기도 한다.

감시제어설비는 컴퓨터 및 부속설비 통신관련 설비 등과 관련 소프트웨어로 구성하는 것이 일반적이며 다음과 같은 기능들을 수행한다.

- 전력설비의 개폐 및 상태표시 차단기 변압기 등
- 발전전압 전류 발전량 부하량 일사량 및 온도 측정
- 시간대 주간별 월별 정기적 자료 기록 및 유지
- 상태감시 및 경보

표 2.2.5.5 계통연계형 인버터에 의한 모듈제어

중앙식 인버터	어레이 인버터
	
- 방위각과 경사각이 같을 경우 - 유지관리가 용이 - 높은 효율 - 가격장점	- 방위각과 경사각이 다를 경우 - 추가설치 가능 - 음영에 의한 피해 감소

바. 태양광 발전 설치기준

(1) 태양전지판

(가) 모듈

신·재생에너지센터에서 인증한 태양전지모듈을 사용하여야 한다. 단, 건물일체형태양광시스템의 경우 인증모델과 유사한 형태(태양전지의 종류와 크기가 동일한 형태)의 모듈을 사용할 수 있으며, 이 경우 용량이 다른 모듈에 대해 신·재생에너지설비 인증에 관한 규정상의 발전 성능 시험 결과가 포함된 시험성적서를 제출하여야 한다. 기타 인증대상설비가 아닌 경우에는 제39조의 분야별위원회의 심의를 거쳐 신·재생에너지 센터소장이 인정하는 경우 사용할 수 있다.

(나) 설치용량

사업계획서 상에 제시된 설계용량 이상이어야 하며, 설치용량은 설계용량의 3%를 초과하

지 않아야 한다. 단, 그린홈 100만호 보급사업으로 보급되는 일반주택 계통연계형의 경우는 상계거래가 가능한 범위내의 용량으로 설치하여야 한다.

(다) 방위각

그림자의 영향을 받지 않는 곳에 정남향 설치를 원칙으로 하되, 건축물의 디자인 등에 부합되도록 현장여건에 따라 설치 할 수 있다.

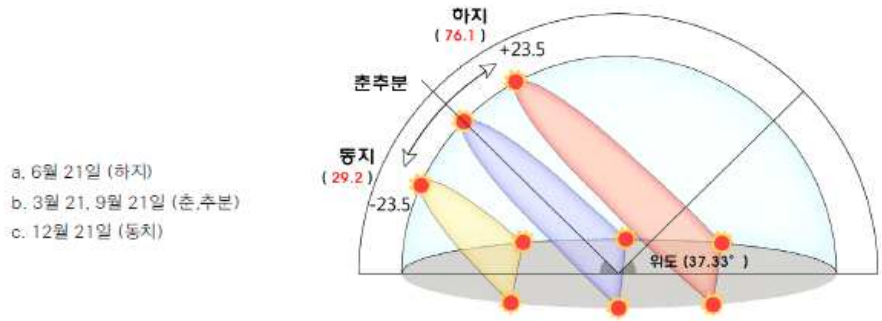


그림 2.2.5.6 계절별 태양고도

(라) 경사각

현장여건에 따라 조정하여 설치할 수 있다.

(마) 음영

일사량을 저해하는 장애물(전기줄, 피뢰침, 안테나 등 경미한 경우 제외)로 인한 음영이 1일 5시간 발생하지 않아야 한다.

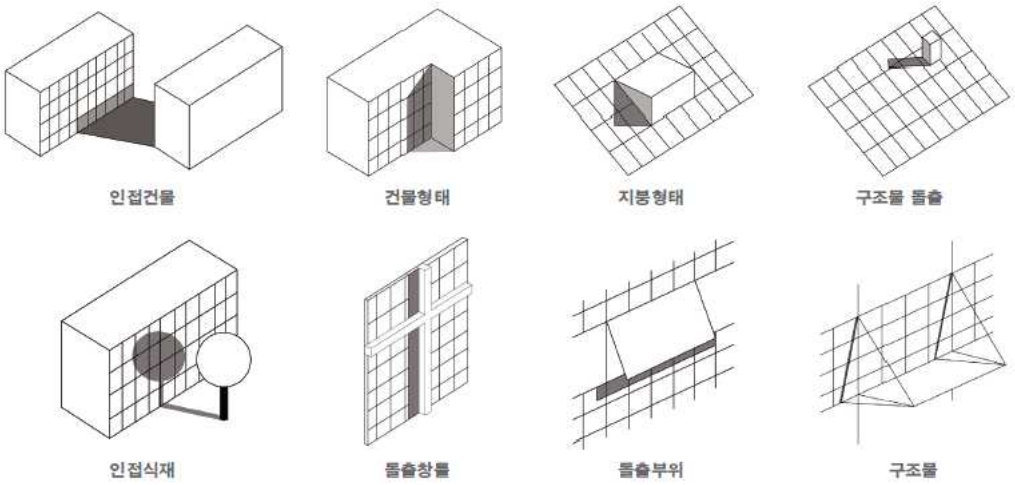


그림 2.2.5.7 설치장소에 따른 그늘

(2) 지지대 및 부속자재

(가) 설치상태

바람, 적설하중 및 구조하중에 견딜 수 있도록 설치하여야 한다. 건축물의 방수등에 문제가 없도록 설치하여야 하며 모든 볼트조립은 헐거움이 없이 단단히 조립하여야 한다. 단, 모듈지지대의 고정 볼트에는 스프링 워셔로 체결한다.

(나) 지지대, 연결부, 기초(용접부위 포함)

태양전지판 지지대 제작시 형강류 및 기초지지대에 포함된 철판부위는 용융아연도금처리 또는 동등이상의 녹방지 처리를 하여야 하며, 절단가공 및 용접부위는 방식처리를 하여야 한다.

(다) 체결용 볼트, 너트, 와셔(볼트캡 포함)

용융아연도금처리 또는 동등이상의 녹방지 처리를 하여야 하며 기초콘크리트 앵커 볼트부분은 볼트캡을 착용하여야 하며, 모든 체결부위는 볼트규격에 맞는 너트 및 와셔를 삽입, 체결하여야 한다.

(3) 전기배선 및 접속함

(가) 연결전선

태양전지에서 옥내에 이르는 배선에 쓰이는 전선을 모듈전용선 또는 TFR-CV 선을 사용하여야 하며, 전선이 지면을 통과하는 경우에는 피복에 손상이 발생되지 않게 별도의 조치를 취해야 한다.

(나) 커넥터(접속 배선함)

태양전지판의 프레임을 부착할 경우에는 흔들림이 없도록 고정되어야 한다.

태양전지판 결선 시에 접속 배선함 구멍에 맞추어 압착단자를 사용하여 견고하게 전선을 연결해야 하며, 접속 배선함 연결부위는 일체형 전용 커넥터를 사용한다.

(다) 태양전지판 배선

태양전지판 배선은 바람에 흔들림이 없도록 Cable Tie 등으로 단단히 고정하여야 하며 태양전지판의 출력배선은 군별·극성별로 확인할 수 있도록 표시하여야 한다.

(라) 태양전지판 직,병렬상태

태양전지 각 직렬군은 동일한 단락전류를 가진 모듈로 구성하여야 하며 1대의 인버터에 연결된 태양전지 직렬군이 2병렬 이상일 경우에는 각 직렬군의 출력 전압이 동일하게 형성되도록 배열하여야 한다.

(마) 역전류방지다이오드

1대의 인버터에 연결된 태양전지 직렬군이 2병렬 이상일 경우에는 각 직렬군에 역전류 방지다이오드를 별도의 접속함에 설치하여야 하며, 접속함은 발생하는 열을 외부에 방출할 수 있도록 환기구 또는 방열판 등을 갖추어야 한다. 용량은 모듈단락전류의 2배 이상이어야 하며 현장에서 확인할 수 있도록 표시하여야 한다.

(바) 접속반

접속반의 각 회로에서 휴즈가 단락되어 전류차가 발생할 경우 LED조명등 표시 등의 경보

장치를 설치하여야 한다.

(사) 접지공사

전기설비기술기준에 따라 지중접지를 하여야 하며, 낙뢰의 우려가 있는 건축물 또는 높이 20미터 이상의 건축물에는 건축물의 설비기준 등에 관한 규칙 제20조(피뢰설비)에 적합하게 피뢰설비를 설치하여야 한다.

(아) 전압강하

태양전지판에서 인버터입력단간 및 인버터출력단과 계통연계점간의 전압강하는 각 3%를 초과하여서는 아니된다. 단, 전선길이가 60m를 초과할 경우에는 아래표에 따라 시공할 수 있다. 전압강하 계산서(또는 측정치)를 설치확인 신청시에 제출하여야 한다.

(자) 전기공사

전기안전기준에 의한 사용전점검 또는 사용전검사에 하자가 없도록 시설을 준공하여야 한다.

사. 태양광 발전 유형 및 적용형태

(1) 태양광 유형 분류

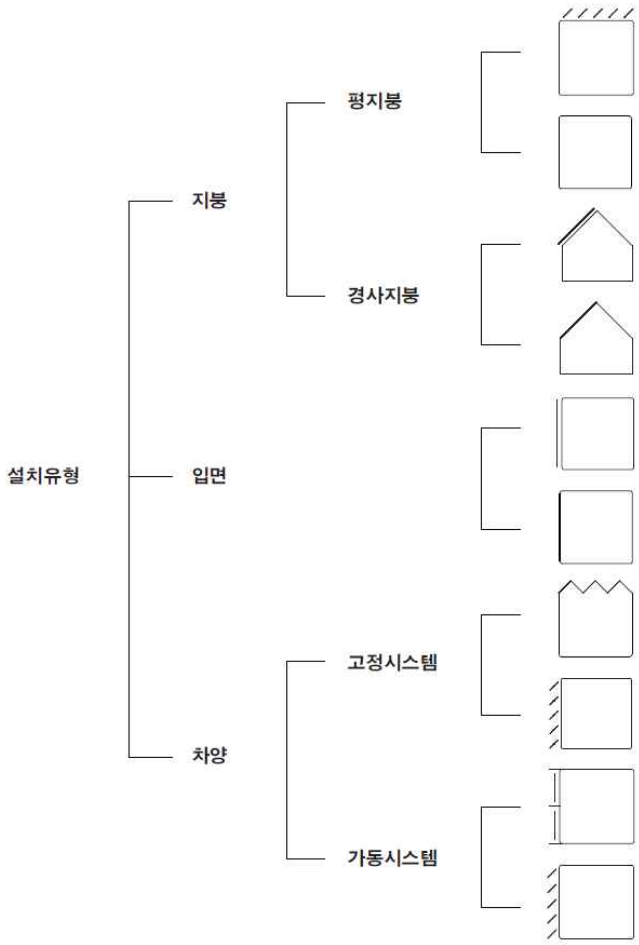


그림 2.2.5.8 태양광 유형 분류

(2) 태양광 적용 형태

(가) 경사지붕형

- 최적의 경사각을 지닌 남향의 경사지붕은 태양전지를 설치하기에 이상적이고 유럽의 주택에서 가장 많이 이용되는 장소이다.

PV-기술 특성상 일체화를 위해 다음과 같이 특별한 지붕이 적절하다.

·가능한 크고, 균일하며, 평평하고, 남향을 향한 경사진 지붕

·PV-모듈의 최대 출력을 가져올 수 있는 지붕 경사각(20°-40°)

·지붕형태에 의해 부분적으로나 전체적으로 그림자가 생기지 않을 것 (예:돌출 부위)

·PV-발전부가 설치되는 장소에 굴뚝, 환기구 및 환기배관, 안테나 기둥, 지붕창 등과 같은 구조물에 대해 그늘이지지 않을 것

- 통풍이 잘 되는 구조의 지붕에 태양전지를 설치하면 PV-모듈의 온도가 상승하는 것을 어느 정도 방지해 주기 때문에 좋다. 그러나 단열성능이 뛰어난 구조의 지붕에는 통풍효과가 없으므로 결정질 PV-모듈 보다는 비정질 PV-모듈을 설치하는 것이 좋다.



그림 2.2.5.9 다양한 경사지붕과 통합된 태양전지



그림 2.2.5.10 경사지붕에 접합된 태양전지

(나) 경사지붕에서 일체형 방안(금속절판, 기와)

태양광시설을 추가적으로 설치하기 위해서는 추가시설의 하중을 분산시킬 필요가 있다. 또한 가로대 등을 설치할 때 충격이나 하중에 의해 지붕이 파손되지 않도록 완충재를 사용하는 등의 주의가 필요하다.

이 조립시스템의 장점은 다음과 같다.

- 표준모듈의 사용이 가능하므로 가격이 저렴하다.
- PV-발전부의 후면 통풍이 가능하여 전기 생산이 효율적이다.

(다) 모듈의 고정방법

- 모듈의 설치 및 제거는 1장 단위로 이루어지도록 한다.
- 작업의 용이성을 위해 윗면에서 모듈을 고정하는 방법을 권장한다.
- 태양전지의 온도상승을 억제하기 위해 모듈과 지붕면의 사이에 공간
이 요구된다.
- 모듈의 지지점은 하중의 균형을 고려하여 1:3:1의 포인트로 한다.

① 지지쇠 설치

지지쇠 설치를 위하여 지붕면의 슬레이트 또는 기와를 제거한 후 방수시트를 부착하고, 건물의 구조부에 지지쇠를 설치한다. 지지쇠 설치를 마친 후 다시 슬레이트 및 기와를 설치한다.

② 결합용 고정쇠의 설치

건물의 구조부에 직접적으로 지지쇠를 설치하지 못할 경우 와이어 등을 이용하여 구조부와 연결을 통하여 태양전지 모듈을 지지할 수 있도록 한다. 지지쇠 및 고정쇠의 설치 시 지붕면에 대한 접촉부는 하중을 분산시켜 지붕재료를 파손시키지 않도록 하며, 가대의 지붕재료 접촉부에는 실리콘, 고무, 수폰지 등 완충재를 설치한다. 또한 지붕의 빗물 흐름을 방해하지 않도록 지붕면과의 사이에 공간을 둔다.

표 2.2.5.6 경사지붕 조립방법

표준형 조립	가로 모듈의 표준형 조립	십자조립
		

(라) 평지붕형

- 평지붕은 태양광발전에 매우 적절한 장소이다. 대부분 평지붕은 사용되지 않고, 마감처리가 잘 되어있어 그림자가 지지 않는 공간을 제공하고 있다. 따라서 이 장소는 추가적 용도로 사용되기에 적합하다. 여기서 PV-발전부는 설치방향과 관계하여 어떠한 제한도 받지 않으므로 전력생산을 위한 최적의 배치가 가능하다.
- 평지붕에 PV-모듈을 설치할 때, 설치위치, 배치 및 적절한 PV-통합형식에 영향을 미치는 요소는 다음과 같다.

·견딜 수 있는 하중

·지붕의 구성(통풍이 되는/안 되는 구조, 녹화지붕 등)

·지붕의 용도(디딜 수 있는/없는, 체류공간의 사용용도 등)
·PV-통합화의 시점(신축 또는 기존)
·그림자에 의한 방해 요인(안테나, 환기용 개구부, 인접 건물 등)

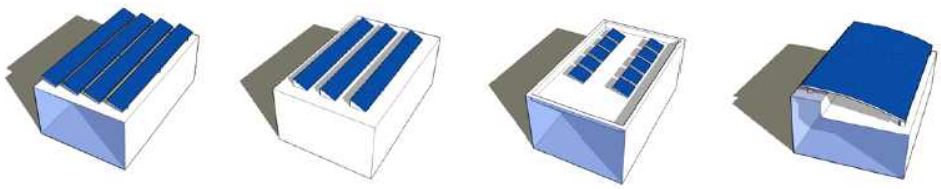


그림 2.2.5.11 평지붕 위에 다양한 거치대

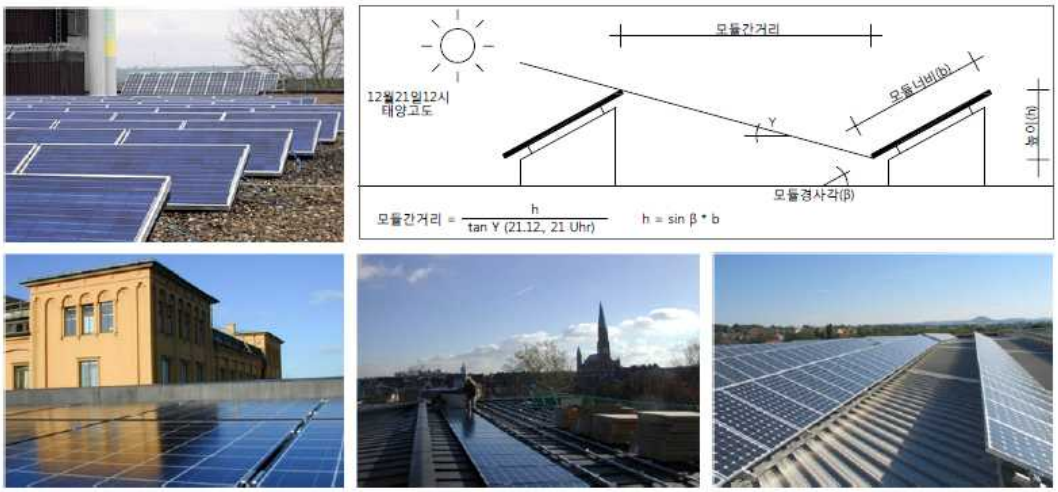


그림 2.2.5.12 거치형 태양전지 사례

평지붕에 PV를 통합하는 기술은 다음형태로 구분할 수 있다.
·하부바닥 고정방식의 PV시공
·비고정방식의 PV시공
·녹화 평지붕에 PV 시공
·PV-지붕 박막재

(마) 거치형에서 풍하중·적설하중을 고려한 구조설계

진행과정 : 일반적으로 옥상에 설치하는 태양광전지판 구조설계는 우선 고정하중(PV모듈 및 프레임)에 대한 자료를 건축설계사무소에 제공하여 구조검토가 진행된다. 그 진행순서는 다음과 같다.

① 태양광전지판과 철골 자체중량 산출

② 풍하중과 적설하중에 대한 저항값 선정

③ 태양광전지판과 구조체의 접합시 철골의 경우 허용응력설계법이나 한계상태설계법에 의해 계산하거나 RC의 경우 한계상태설계법이나 극한강도설계법에 의해 계산하여서 내력을

만족

④ 풍하중에 의한 처짐 검토

⑤ 구조체의 수평하중이 기둥으로 전달되면서 발생하는 좌굴 검토

⑥ 축력에 의해 베이스플레이트의 크기와 앙커의 깊이, 크기 산출

- 전지판 설치가대 공사

① 기본구조의 검토

모듈의 외형치수와 층수/열수의 배열, 설치가능 범위, 설치장소의 형상 및 구조, 작업성 등을 고려하여 가대의 기본구조와 높이를 검토한다.

② 하중의 계산

태양전지 모듈 및 가대에 가해지는 하중을 설치장소의 기상조건이나 배치방식 등에 의해 계산한다.

·풍압하중 = 풍압계수×설계용 속도압(N/㎡)×수직풍 면적(㎡)

·설계용 속도압 = 기준속도압(N/㎡)×높이보정계수×용도계수×환경계수

·기준 속도압 = 1/2×공기밀도(N·s²/m⁴)×(설계용 기준풍속(㎧))²

·높이 보정계수 = (어레이의 지상높이/기준 지상높이)1/8

③ 부재선정과 기초의 설계

기초를 필요로 하는 어레이의 경우는 설치면에 가해지는 가대의 하중을 계산, 기초를 설계하고 시방을 명확히 한다. 그리고 기초를 포함한 하중이 건물 강도를 상회하지 않다는 것을 확인하여야한다.

④ 구조적 설계 포인트

가대의 기본구조는 가대의 조립, 모듈의 가대에의 설치 및 모듈간 배선 등 각 작업을 용이하게 할 수 있는 구조로 하여야 한다 .

- 경사지붕용 가대

모듈의 가대 고정은 모듈의 앞쪽 또는 옆쪽에서 고정하여야한다. 그러나 측면에서 고정할 경우에는 이웃한 모듈과의 간격을 10cm이상으로 확보할 필요가 있기 때문에 한정된 지붕면적을 효율적 으로 이용할 수 없다. 따라서 대부분 모듈 위쪽에서 고정하는 방법을 사용한다.

연간 일사량이 최대가 되는 경사각도는 통상 설치장소의 위도보다 약간 작은 값이 된다. 한편 어레이에 가해지는 풍압하중은 어레이면이 지붕면에 평행인 상태에서 가장 작고, 약간의 경사를 주

는 것만으로 급격하게 증가하며, 가대 부재의 대형화 및 건물의 하중 증가로 이어진다. 이 때문에 어레이면을 지붕면에 평행으로 하는 것이 종합적으로 최적이라고 할 수 있다.

모듈의 높이는 모듈 뒷면의 공기대류에 영향을 미치는 공기속도에 영향을 미친다. 공기속도가 빠를수록 태양전지의 온도는 저하되고, 효율이 좋지만, 10cm이상 높게 하여도 효과는 더 이상 커지지 않으므로 10cm 정도로 하는 것이 바람직하다.

(바) 거치형 태양광발전시스템 설치종류

① 하부바닥 고정방식의 PV시공

PV-발전부의 가대를 지붕 위에 고정시키거나 또는 지붕의 하부 구조물에 포인트 형식으로 고정, 고정포인트 주위의 모든 층(단열, 방수 등)은 해당공사의 시방규정을 지키도록 한다.

② 비고정방식의 PV 시공

태양전지 모듈을 가대와 결합시킨 PV-발전부는 평지붕위에서 원하는 곳에 설치할 수 있다.

이 시공방식의 PV-모듈은 자중으로 풍압에 견디고 또 자세를 유지한다. 이 방식에서는 시설물을 고정시키기 위해 지붕을 뚫을 필요가 없다. 밸런스를 잡기 위해 종종 지붕에 자갈을 깔거나 콘크리트 블록을 사용하기도 한다. 이 방식은 특별한 조립장비 없이 모듈을 설치할 수 있는 이점이 있다.

③ PV-지붕 박막제

이 시공기술은 일반 플라스틱-필름에 태양전지 모듈을 접착하여 하나의 완성된 건축자재처럼 PV-모듈이 제공된다. 건물 방수층과 PV-모듈이 하나로 결합되어 있다.

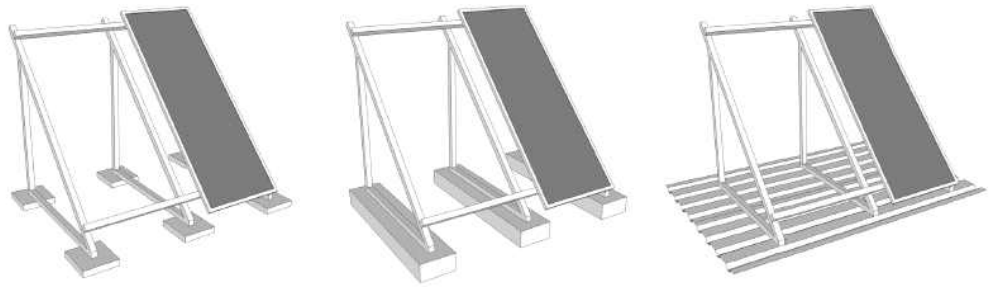


그림 2.2.5.13 평지붕 위 가대 표준 설치방법

(사) 비정형

① 구조적 유의사항

전형적인 유리와는 달리 PV-유리 파사드는 일사를 흡수하여 심하게 가열되고 파사드에 열적 부하로 작용하여 고정장치에 더욱 많은 부담을 줄 수 있다. 그래서 고정과정에서 상이한 건축자재의 서로 다른 열팽창에 대하여 고려하고 이를 위한 충분한 여유공간을 미연에 확보해야 한다.

정역학적으로 하중을 받는 유리 고정장치와 이에 속하는 유리를 제외하고, 어떠한 경우라도 PV-모듈에 물리적 하중이 가해져서는 안된다.

② 모듈방식

- G2G(Glass To Glass)

전면과 배면 기판이 모두 유리로 구성된 투과형 BIPV-모듈창호나 커튼월에서 주로 비전(vision)부위에 설치

- G2T(Glass To Tedlar)

전면은 유리와 배면은 불투명한 Tedlar로 구성된 국내기성형, (불투명) PV-모듈

- 스팬드럴부위에 설치하거나 외벽마감재 대신 사용

- 모듈 뒤판이 불투명하여 배선 및 부품이 보이지 않지만 벽체와 일체식으로 공사가 마무

리 되면 시공 후 확인 및 보수작업에 어려움 발생

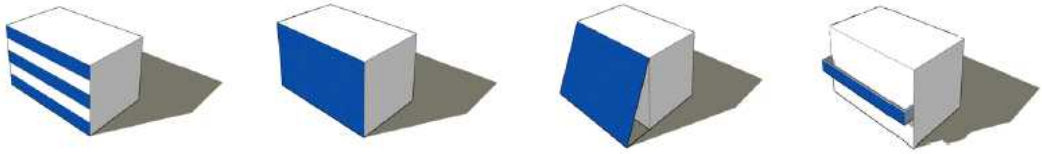


그림 2.2.5.14 다양한 입면에 통합된 태양전지



그림 2.2.5.15 입면에 설치된 다양한 태양전지 사례

(아) 고정차양형

차양시스템은 여름의 과도한 일사로부터 사람과 건물을 보호해 주는 역할을 한다. 또한 현휘에 대한 보호, 자연광의 모듈화, 건물외피의 냉각 등과 같은 장점을 갖고 있다. 이 시스템은 일반적으로 파사드에 장착되어 있는 콘솔(까치발로 버틴 선반)에 고정된다. 그리고 콘솔에 전달된 하중

은 파사드 구조가 받는다.

- 파사드 전면에 PV-모듈 전력생산량이 가장 많은 경사각을 갖고 있다.
- 차양의 깊이와 투명한 정도에 따라 건물 실내에 비치는 자연광이 다양해진다.
- 결정질 PV-모듈은 전지의 조밀도에 따라 강한 빛과 그림자대비를 이룬다. 이 때문에 작업의 방해를 줄 수 있어 빛을 확산시키는 박막층모듈구성이나 반투명성 박막모듈을 사용할 수 있다.
- 파사드에 설치되는 PV-차양은 파사드와 간격을 두어 더운 공기가 위쪽으로 상승하여 건물외피에 냉각효과가 생기도록 한다. 반대로 파사드와 PV-차양의 간격이 없어 차양 아래에 더운 공기가 정체하지 않도록 유의 해야한다.

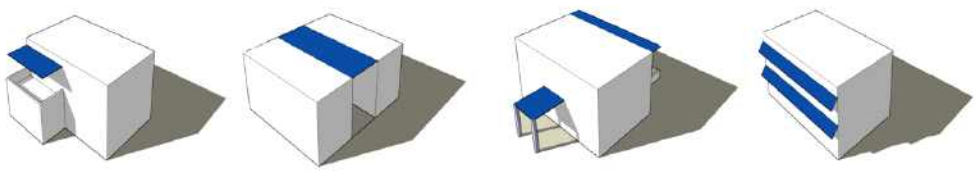


그림 2.2.5.16 다양한 차양에 설체된 태양전지

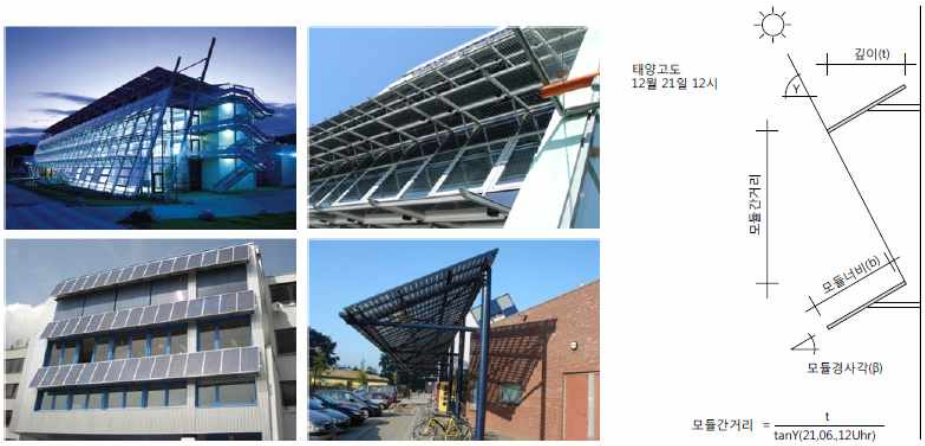


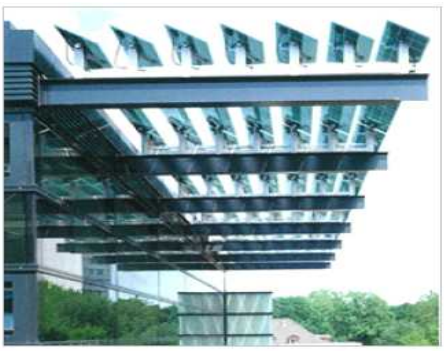
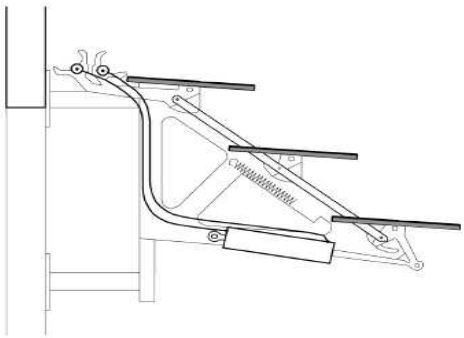
그림 2.2.5.17 다양한 차양에 설치된 태양전지 사례

(자) 가동차양형

건물에 통합된 가변형 PV-차양시스템은 수평축을 따라 위/아래로 또는 수직축을 따라 좌/우로 태양방위와 고도에 따라 PV-모듈의 방위각이나 경사각을 조절할 수 있다.

이 시스템은 개별 창호의 상부내지 건물 전체를 위한 차양기능을 수행하고 전기모터를 설치하여 자동으로 동작 할 수 있도록한다. 모터는 일간 및 연간 변동하는 시뮬레이션하여 태양전력생산이 최대가 되도록 한다. 그러나 이것은 구름이 낀 하늘이나 실제 일광상황, 그리고 사용자의 개인적 요구를 고려하지 못한다는 단점이 있다. 또한 차양장치로써 역할에서 PV-모듈이 현휘 방지기능을 만족시키지 못하는 경우도 발생한다.

표 2.2.5.7 다양한 차양에 설치된 태양전지 사례

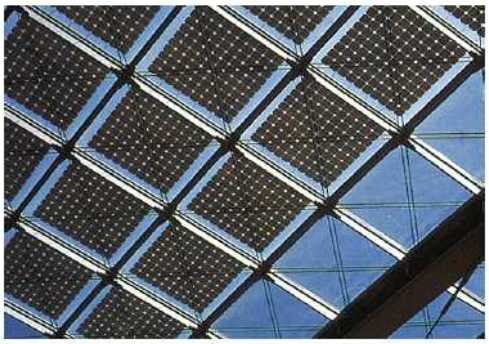
	
유압 가동 차양시스템	가동차양시스템의 개념도
	

(차) 아트리움 지붕 및 천창

수직 파사드에 비해 천창은 PV-이용 면에서 일사조건이 많이 이롭다. 남향으로 천창이 경사져 있다면 더욱 좋다. 전형적으로 아트리움, 온실, 외기로부터 피할 수 있도록 제공되는 지하철 입구 또는 건물 로비공간에 많이 적용된다.

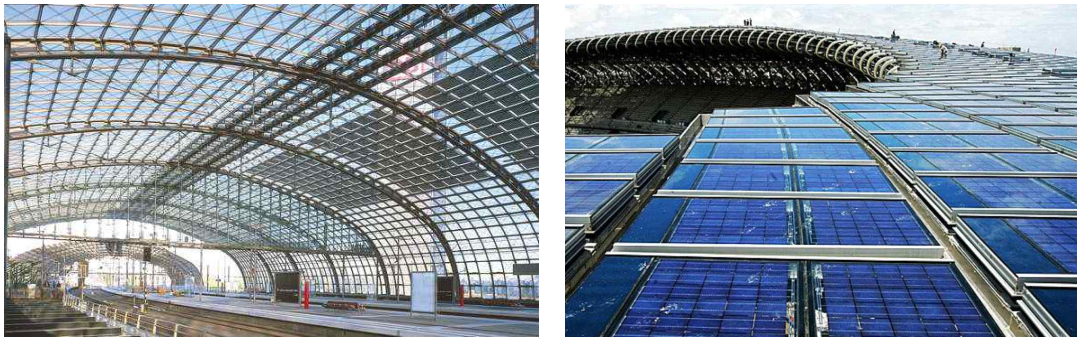
- 머리 윗부분에 설치되는 PV-판유리는 이중유리-모듈구조로 설치
- 건물 내부 쪽에 위치하는 유리는 강화접합유리를 사용
- 단열유리가 적용된 PV-천창유리에 대해서는 붕괴방지를 위해 접합안전유리로 사용
- 빗물의 배수가 용이하도록 하며 오염물이 쌓이는 것을 방지하기 위해 구배가 진 구조물을 사용
- 계획단계에서 상부유리의 청소 가능성에 대한 방법 수립 (60°이하이면 태양전지에 오염물이 쌓일 수 있음)

표 2.2.5.8 아트리움 지붕 및 천창의 PV

	
교육아카데미. 파리	중앙철도역, 베를린

아. 비정형 곡면구조 솔라 에너지 모니터링 가상모델

건축물에 설치되는 태양광 발전 시스템은 다양한 재료로 개발되고 있다. 현재 연성 막 구조물과 같은 곡면 구조물에도 응용이 가능해 졌으며, 에너지 효율도 새로운 재료와 제작방식 등에 의해서 향상되고 잇다. 지붕에 설치되는 PV 타일이나 PV 금속판 등과 같은 평면재료를 외부 보형물에 설치하는 방법과 더불어 부착이 가능한 PV 모듈을 이용해 건물일체형 BIPV시스템으로 이용하기도 한다. 곡면의 적용사례에 대해서는 대표적으로 베를린의 Lehrter Station과 대만의 world games stadium에 적용된 사례를 볼 수 있다.(그림 2.2.5.18) 이와 같은 곡면구조에 적용사례는 계속되는 재료와 제품의 개발로 곡면구조 태양광 발전 시스템으로의 상용화 가능성은 더 넓어지게 될 것이다. 특히 근래에 적용된 삼각형 PV 모듈과 더불어 여러 도형으로의 개발과 유연한 구조에 적용 가능하도록 구부려서 설치할 수 있는 재료들도 많이 등장하고 있다. 그림 2.2.5.19와 같이 단일 방향으로 곡면을 형성할 수 있는 재료들도 등장하고 있으며, 과거 효율문제로 인해 개발되기 힘들었던 문제들은 재료의 발달로 인해 많이 해결되었다.



(a) Lehrter Station, Berlin (b) World Games Stadium, Taiwan

그림 2.2.5.18 곡면 지붕구조물 PV 모듈 적용사례

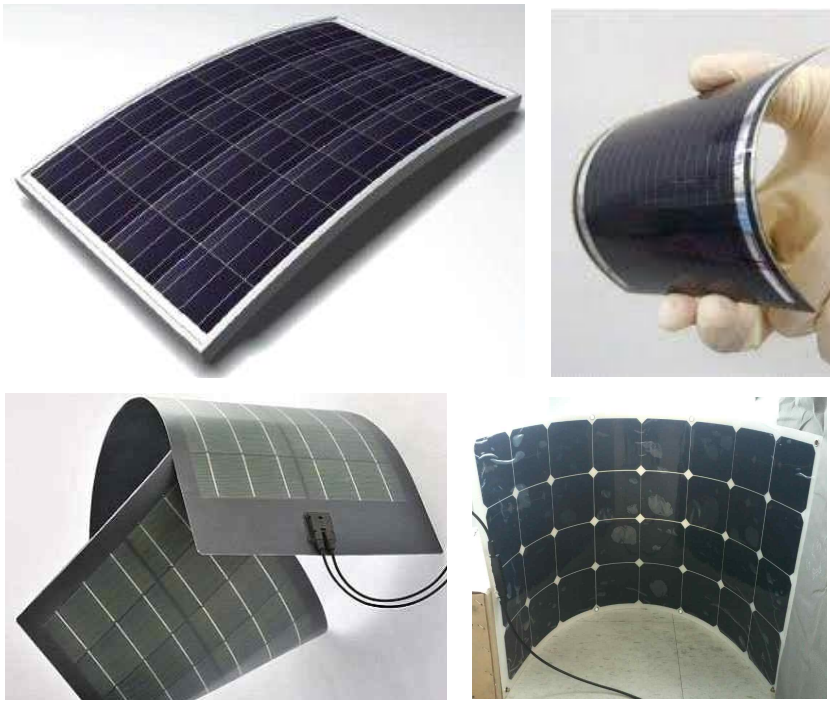


그림 2.2.5.19 곡면형 PV 모듈

비정형 곡면 유리구조물에서 태양전지를 이용한 에너지활용을 위해서 곡률을 표현할 수 있는 재료의 사용에 대해서 곡면의 효율을 측정하기 위해서는 많은 변수가 있으며, 이러한 구조물의 적용에서 곡면의 효율을 측정하기 위한 장치의 필요성이 제기됨에 따라 실제 설계곡면의 효율을 검증하기 위한 축소모형과 측정모델을 제시하여 설계에 반영할 수 있는 자료를 구할 수 있도록 한다. 우선, 축소모형의 형태에 따른 태양에너지의 활용을 알아보기 위한 모델로 단일곡률곡면을 가지는 모델의 경우에 대해서 그림 3과 같은 모형을 이용하도록 제안한다. 곡면형이 가능한 PV 모듈을 이용하며, 다양한 곡률에 대해서 파형을 이용하여 제작 설치한다. 축소모형의 경우 대기환경에 따른 모든 변수를 반영할 수 없지만 비교적 근사하게 곡면을 표현하여 설계 전에 곡면의 결정에 반영할 수 있도록 한다. 이를 이용해서 곡면의 효율과 위치에 대한 간접적인 태양 에너지를 측정하는 것은 부하를 이용하여 축전할 수 있으나 실시간 측정

모니터링을 이용해서 실제 발생되는 태양전지의 전력량을 관찰할 수 있다. 단일 모듈에 대해서는 단일방향으로 휘어지는 PV 모듈을 기준으로 형상을 모델링 하였으며, 그림 2.2.5.20에서 보는바와 같다.

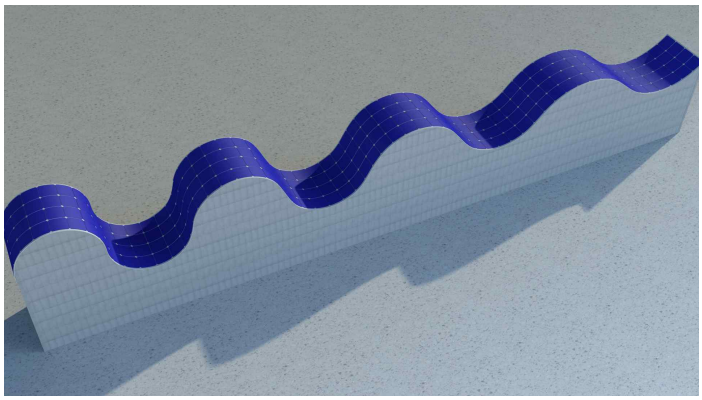


그림 2.2.5.20 단일방향 곡면 솔라패널 모델의 모니터링 축소모형

비정형 곡면을 표현하기 위해서 제시되는 축소모형은 그림 2.2.5.21과 같고, 사각형 PV 모듈을 이용해서 곡면이 형성된다. 사각 PV 모델의 높이와 각도의 계산은 설계에서 결정된 곡면을 반영할 수 있는 모델로 변형이 가능하도록 제작되며, 각각의 PV 모듈은 하나의 셀로 구성되므로 전체 에너지는 각각 생산되는 전력량을 기준으로 평가하는 방법을 이용하는 것이 바람직하다. 축소모형에 대한 단일 셀에서의 에너지 생산량 측정은 실제 구조물에서 적용되는 태양광 발전시스템의 축전량이나 효율을 대변하기에는 매우 큰 오차를 가지고 있더라도 각 형상별 서로간의 차이를 검증하는 것은 가능할 것이다. 각각의 셀에서 발생되는 량을 실시간으로 측정하기 위해서는 모든 사각 PV 모듈에 전력량을 측정해야 비교적 정확한 값을 얻을 수 있다. 이것은 규모가 클수록 축소모형의 설치비용이 높아짐으로 순간 전력생산량을 실시간 모니터링이 필요하다. 이에 대한 해결방안으로 한 셀에서 발생하는 순간전력량을 일정한 간격으로 측정하는 감지기 회로를 이용하도록 하며, 회로도는 그림 2.2.5.22와 같다.

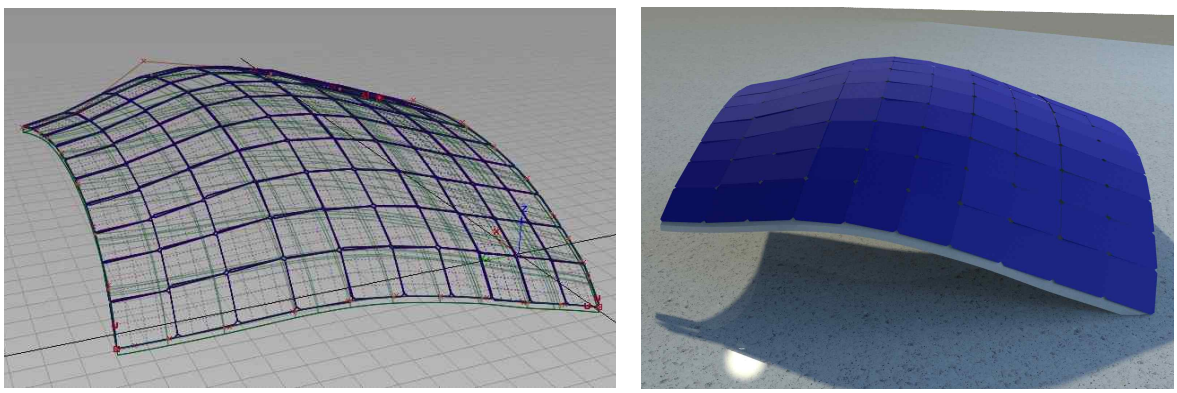


그림 2.2.5.21 비정형 곡면 솔라패널 모델의 모니터링 축소모형

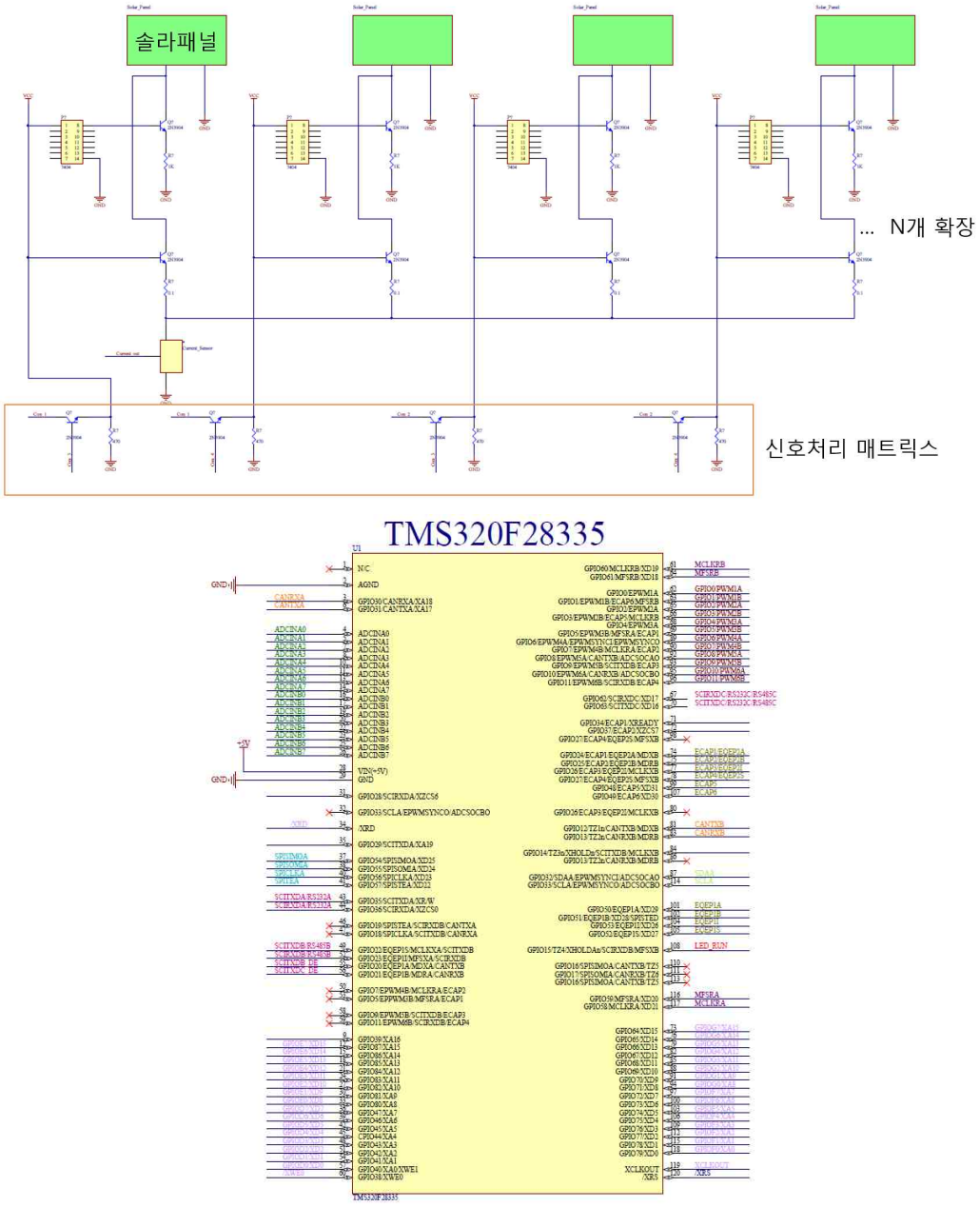


그림 2.2.5.22 모니터링 축소모형에 대한 에너지 측정용 감지기 회로도

곡률을 가지는 곡면 태양전지 모듈의 축소모형 및 비정형 곡면의 가상축소모형에 대해서 측정을 위한 그림 2.2.5.22의 회로도는 실시간으로 모니터링이 가능하도록 소프트웨어를 개발하고 비정형 구조물의 설계단계에서 검토가 가능하게 하도록 한다.

이와 같은 비정형 곡면 가상 태양 에너지 분석용 축소모형의 제작된 결과는 그림 2.2.5.23과 같고, 실시간 측정모델의 감지 회로도에 의해서 제작된 장치는 실시간 전송된 데이터를 바탕으로 순간 전력발생량을 그림 9와 같이 모니터링 할 수 있게 한다.

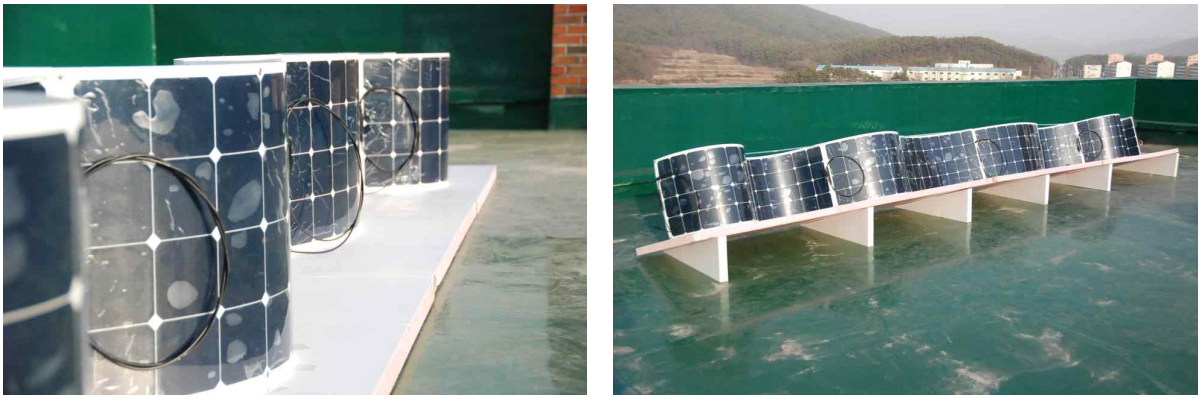


그림 2.2.5.23 곡면 태양전지 모듈로 구성된 솔라 에너지 측정용 축소모델

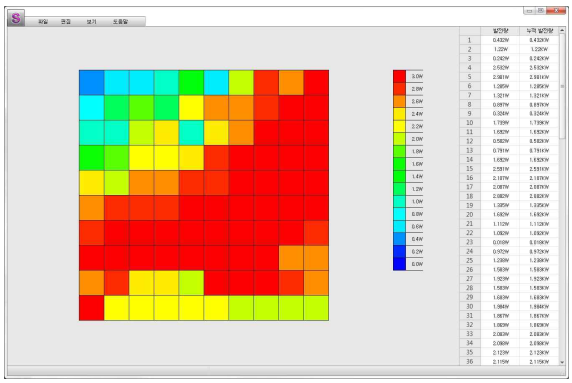


그림 2.2.5.24 모니터링용 프로그램 출력화면

자. 태양광 발전시스템의 에너지 가상 측정 모델링

건물 일체형 태양광 발전시스템의 경우 건물의 외피구조의 형태에 따라 태양광으로부터 오는 에너지를 축척하고 전환하여 사용할 수 있다. 사각형 구조의 유리외벽으로 시공되어지는 구조물의 경우 벽면에 강화유리로 일체화된 부착 시스템을 이용하기도 하지만 태양으로부터 오는 에너지를 최대로 얻기 위해서 각도에 따른 효율을 분석하여 건물의 방향과 이들을 모두 고려하여 설치하게 된다. 일반적으로 PV 시스템(Photovoltaic system)으로 불리는 태양광 발전 시스템은 태양광을 전기에너지로 변환하는 장치 전반을 총칭한다. PV 시스템은 태양으로부터 오는 에너지원을 전기에너지로 바꾸는 것이기 때문에 근본적으로 태양이 지구 대기권에 도달한 에너지와 대기노정을 통해 소실된 에너지만이 태양전지에 영향을 주어 전기를 생산해 준다. 따라서 시스템이 설치될 위치와 건물의 방향 그리고 태양전지 모듈의 각도는 큰 영향을 준다. 특히 산란광선으로 부터의 영향은 건물의 방위보다 경사가 더 큰 영향을 미친다.

본 절에서는 PV 모듈에 도달하게 될 일사량 산정에 대한 일반적인 사항과 본 연구에서 사용하게 되는 일사량관련 모델링에 대해서 설명하도록 한다. 모듈의 위치와 방위 및 기울기에 따른 일사량을 계산하여 최적 솔라패널 곡면을 결정하는데 적용하도록 한다.

㉠ 태양광 에너지와 태양의 위치

수소의 핵융합 반응에 의한 태양 중심부의 방대한 에너지는 우주공간에 방사되어 지구 대기원에 도달하며, 도달된 에너지는 대기를 투과하여 관찰점에 도달하게 된다. 태양과 지구의 거리는 약 1억 5000만 km 떨어진 위치이며, 대기권에 도달한 위치는 지표에서 약 80 km인 지구 대기상단이다. 이때의 태양 에너지는 1353W/m^2 로 관찰점의 위치에 따라 달라지는 대기노정을 투과하여 도달하게 된다. 태양에너지는 지표에 도달하는 전 태양에너지를 지구의 단면으로 적분한 총 일사량은 지구상의 관찰점에서의 위치와 환경조건에 따라 달라지며, 대기의 영향을 받지 않는 대기 외에서의 일사를 태양정수(G_{sc}=1350W/m^2)로 정의되어진다. 태양과 지구의 대기권 밖의 일사량 변화에 대해서는 태양정수와 지구의 공전으로 연중일(n)에 따라 달라지며 다음 식에 의해서 대기권 밖에서의 태양복사밀도(G_o)를 얻을 수 있다.

$$G_o = G_{sc}\left\{1+0.033\cos\left(\frac{2\pi n}{365}[^\circ]\right)\right\} \tag{2.2.5.1}$$

태양광선이 대기권을 통과하여 관찰점에 도착하기까지의 영향은 지구자전축이 기울어진 까닭에 지구의 공전 각(B)은 달라진다. 지표면의 특정 위치에 작용하는 태양광은 기울어진 자전축과 공전의 영향으로 시시각각 달라지며, 이처럼 태양의 각은 태양 위치에 따라 달라진다. 지구가 1년에 걸쳐 태양주위를 공전하는데 지구를 관측자로 보고 천구에서의 태양 위치경로를 계산할 때 지구 공전 각으로 표현하여 태양광의 영향을 계산하는 것이 편리하다. 이때 지구 공전 각도는 다음에 의해서 계산할 수 있다. 여기서 n: day, h: hour 이다.

$$B = \frac{360}{365}\left(n-81+\frac{hour-12}{24}\right) \tag{2.2.5.2}$$

지구가 자전축을 기점으로 회전함으로 인해서 태양의 움직임은 지구를 중심으로 겉보기 움직임으로 관찰할 필요가 있다. 태양광의 직달성분에 대한 계산에서 태양을 중심으로 지구의 각도를 표현하는 것보다 이와는 반대로 태양이 지구를 중심으로 회전하는 모델의 계산이 보다 직관적이고 유리하다. 태양의 겉보기 움직임은 태양광의 입사 및 태양전지의 흡수면의 기울기의 계산으로 표면의 출력밀도를 계산할 수 있기 때문에 지구상의 특정위치를 표현하는데 필요한 위도, 경도 및 표준시간과 관찰점과의 관계를 정의하여야만 계산식을 얻을 수 있다. 태양의 시간(solar time)을 계산하기 위한 지표로 표준시간(GMT)를 들 수 있으며 이것은 그리니치 표준시이다. 관찰점의 태양시간(LT)과 정오의 지방시간(LST) 및 지방표준시간 자오선($LSTM$)은 다음 식에 의해 구할 수 있다.

$$LSTM = 15^\circ \Delta T_{GMT} \tag{2.2.5.3}$$

$$EoT = 9.87\sin 2B - 7.53\cos B - 1.5\sin B \tag{2.2.5.4}$$

$$TC = 4(L - LSTM) + EoT \tag{2.2.5.5}$$

$$LST = LT + \frac{TC}{60} \tag{2.2.5.6}$$

$$\omega = 15^\circ (LST - 12) \tag{2.2.5.7}$$

지구의 자전에 따른 천구상의 각도를 앎으로 인해서 태양의 연중 경사각(δ) 즉, 태양 천체의 적위를 계산할 수 있다. 태양의 적위는 최댓값은 지구 자전축의 경사각과 같아서 하지일 때 23.45°로 최대이고, 동지일 때 -23.45°로 최소이며 춘분과 추분에는 0°가 된다. 이와 같은 관계를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\delta = \sin^{-1}\{\sin(23.45^\circ)\sin B\} = \sin^{-1}\{0.397949\sin B\} \approx 23.45^\circ \sin B \tag{2.2.5.8}$$

태양의 고도각(α)과 천정각(ζ)은 태양의 위치를 나타내는 지표이며, 고도각은 지평면에 대한 태양의 각도, 천정각은 지표에 수직인 축에 대한 각도를 의미한다. 따라서 태양의 고도각은 일출시간에 0°, 정오에는 최대가 된다. 최대 고도각은 태양 경사각과 특정지역의 위도에 따라 달라지며, 최대 고도각과 태양 천정각은 다음과 같은 관계를 이루게 된다. 여기서 ϕ는 관찰점의 위도를 의미한다.

$$\zeta = \phi - \delta \tag{2.2.5.9}$$

$$\alpha \begin{cases} = 90^\circ - \zeta & \text{(the northern hemisphere)} \\ = 90^\circ + \zeta & \text{(the southern hemisphere)} \end{cases} \tag{2.2.5.10}$$

위의 공식을 대신하는 보다 정밀한 공식은 다음과 같다.

$$\alpha = \sin^{-1}(\sin\delta\sin\phi + \cos\delta\cos\phi\cos\omega) \tag{2.2.5.11}$$

태양의 방위각은 지금까지 소개된 관계식과 이들을 이용해서 계산할 수 있다. 여기서 관련된 방위의 기준은 북쪽이 0°이며, 동쪽 시계방향으로 각도가 증가한다.

$$\gamma_s = \cos^{-1}\left(\frac{\sin\delta\cos\phi - \cos\delta\sin\phi\cos\omega}{\cos\alpha}\right) \tag{2.2.5.12}$$

대기질량(AM)은 빛이 지구에 도달하는데 이르는 거리에 관계된 것으로서 태양 천정 각이 0°일 때를 기준으로 얼마나 줄어드는지를 알 수 있게 하는 관계식으로서 천정 각 방향여현의 역수에 해당된다. 이러한 관계식을 이용한 태양의 직달 일사강도(I_D)에 대한 관계식은 태양복사밀도(G_o)와 대기노정을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있으며, 전 일조강도(I_G)는 10% 정

도 크게 나타난다.

$$I_D = 1353 \cdot 0.7^{(AM^{0.678})} \tag{2.2.5.13}$$

$$I_G = 1.1 \cdot I_D \tag{2.2.5.14}$$

이상의 식들을 이용해서 대기노정에 의한 관찰점에 도달하는 경사진 면의 일조량을 계산할 수 있으며, 이들의 태양 위치에 대한 법선벡터와 태양전지의 법선벡터 내적을 이용하여 직달 일사량을 예측할 수 있다. 각각에 대한 태양위치와 일사량 관련 변수들에 대해서 다음 표에 나타내었다.

표 2.2.5.9 태양광선 및 태양위치계산을 위한 변수 리스트

Notation	Unit	Explanation
G_o	[W/m^2]	Solar Intensity (Sunlight Intensity) (대기권 밖에서의 태양 복사밀도)
G_{sc}	[W/m^2]	Solar Constant (태양 상수) 1370 W/m^2
GMT	[hour]	Greenwich Mean Time (그리니치 표준시)
LT	[hour]	Local Time (지방 시각)
ΔT_{GMT}	[hour]	Time difference between GMT and LT (표준시차) $\Delta T_{GMT} = LT - GMT$
$LSTM$	[°]	Local Standard Time Meridian (지방 표준 시간 자오선) $LSTM = 15° \cdot \Delta T_{GMT}$
EoT		Equation of Time (시각 방정식)
TC		Time Correction Factor (시각 보정 계수)
LST	[hour]	Local Solar Time (지방 태양시)
n (or d)	[day]	n-th day of year (연중일 또는 통산일: 1월 1일 n=1, 12월 31일 n=365)
ω (or HRA)	[°]	Hour Angle (시간각도)
ω_{ew}	[°]	Hour Angle at due East/West (태양의 정동/정서 일 때의 Hour Angle)
δ	[°]	Declination angle (경사각: 태양 천체의 적위, 편각)
ϕ	[°]	Latitude (위도)
λ (or L)	[°]	Longitude (경도)
β	[°]	PV declination angle (PV 경사각 - 바닥에서 기울어진 각도)
γ	[°]	PV azimuth angle (PV 방위각 - 정남향에서 기울어진 각도) West+ East-

γ_s	[°]	Solar azimuth angle (태양 방위각 - 정남향에서 기울어진 각도) West+ East-
γ_s'	[°]	Solar azimuth angle (가상 태양 방위각)
θ	[°]	경사면에 대한 태양광선의 입사각
θ_z	[°]	PV 경사각이 0도 일 때의 입사각
B	[°]	Revolution angle of Earth (지구 공전 각)
α	[°]	Elevation (or Altitude) angle (고도(또는 위도)각)
ζ	[°]	Zenith angle (천정각) $\zeta = \phi - \delta$
AM		Air Mass (대기질량 또는 대기노정) $AM = \frac{1}{\cos\zeta}$
I_D	[W/m^2]	Direct beam intensity of solar (태양광 직달 일사)
I_G	[W/m^2]	Global Irradiance of solar (태양광 전 일조강도)

㉡ 태양전지의 특성과 효율

PV 발전 및 모듈에 관한 전기적 특성에 대한 사항은 태양전지의 성능에 크게 의존하게 된다. 태양전지는 기본적으로 p-n 접합 반도체의 특성을 나타내고 있으며, 태양에너지가 입사되면 광기전력효과에 의해 광전류(I_L)가 발생하게 되며, 병렬 및 직렬연결에 따라서 저항 등 여러 가지를 고려한 최대출력은 다음과 같은 식으로 나타난다.

$$P_{\max} = V_{MP} \cdot I_{MP} = V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF \tag{2.2.5.15}$$

여기서 FF는 곡선인자(fill factor)이며, 최대출력을 이용하여 태양전지의 전력 변환 효율을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$FF = \frac{V_{MP} \cdot I_{MP}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \tag{2.2.5.16}$$

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{\text{in}}} = \frac{V_{MP} \cdot I_{MP}}{P_{\text{in}}} = FF \cdot \frac{V_{oc} \cdot I_{sc}}{P_{\text{in}}} \tag{2.2.5.17}$$

잔류의 표현에 있어서 직렬저항과 병렬저항 및 이들의 복합된 직렬병렬저항모델로 크게 나뉘며, 다음과 같은 식으로 설명된다.

$$I = I_L - I_0 \cdot \exp\left[\frac{V + I \cdot R_S}{n V_T}\right] \quad \text{(직렬저항)} \tag{2.2.5.18}$$

$$I = I_L - I_0 \cdot \exp\left[\frac{V}{n V_T}\right] - \frac{V}{R_{SH}} \quad \text{(병렬저항)} \tag{2.2.5.19}$$

$$I = I_L - I_0 \cdot \exp\left[\frac{V + I \cdot R_S}{n V_T}\right] - \frac{V + I \cdot R_S}{R_{SH}} \quad \text{(직렬병렬저항)} \tag{2.2.5.20}$$

위의 관계식을 이용해서 최대출력에 대한 값들과 효율들로 태양전지의 에너지 발생량을 계산할 수 있으며, 일사량에 따라 그리고 전지의 방향에 따라 축척되는 전기에너지가 영향을 받게 된다. 표 2.2.5.10은 태양전지 모델에서 나타나는 전기적 특성의 변수들을 나타내었다.

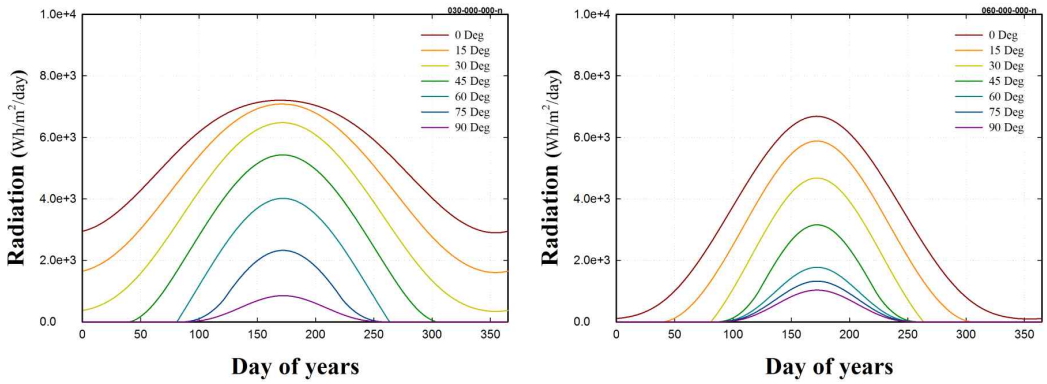
표 2.2.5.10 태양광 발전시스템 관련 용어 리스트

Notation	Unit	Explanation
MPP		Maximum Power Point (최대 전력점)
$MPPT$		Maximum Power Point Tracking (최대 전력 추종)
R_{char}	[ohmcm^2]	Characteristic Resistance (특성 저항)
R_{load}	[ohmcm^2]	Load Resistance (특성 저항)
R_S	[ohmcm^2]	Series Resistance (직렬 저항)
R_{SH}	[ohmcm^2]	Shunt Resistance (병렬 저항)
V_{oc}	[V]	Open Circuit Voltage (개방전압)
V_{oc}^T	[V]	Open Circuit Voltage considering T_{Voc} (온도계수를 고려한 개방전압)
V_{MP}	[V]	Maximum Power Voltage (최대 전력전압)
$V_T = \frac{kT}{q}$	[V]	Thermal Voltage (열 전압)
k	[J/K]	Boltzmann's constant (볼츠만 상수; $1.3806488(13)\times10^{-23}$)
q	[C]	Magnitude of the electrical charge (전하량; $1.602176565(35)\times10^{-19}$)
I_{sc}	[A]	Short Circuit Current (단락전류)
I_{sc}^T	[A]	Short Circuit Current considering T_{Isc} (온도계수를 고려한 단락전류)
I_{MP}	[A]	Maximum Power Current (최대 전력전류)
I_0	[A]	Dark Saturation Current (암 포화 전류)
I_L	[A]	Light generated Current (광 생성 전류)
P	[W]	Power (전력; 일률)
$P_{\max}$	[W_p]	Peak Power (최대전력)
P_{in}	[W_p]	Peak Power (최대전력)
FF		Fill Factor (곡선인자)
η		Efficiency (변환효율)
T	[K]	Absolute Temperature (절대온도; -273.15℃)
T_{Voc}	[V/℃]	Absolute Temperature Coefficient of V_{oc} (개방전압 온도계수)

T_{Isc}	[A/℃]	Absolute Temperature Coefficient of I_{sc} (단락전류 온도계수)
T_{ref}	[K]	Reference Temperature (참고온도)
T_{amb}	[K]	Ambient Temperature (주변온도)
G	[W/m^2]	Solar Irradiance (일사강도; 일률)
H	[J/m^2]	Solar Irradiation (일사량; 일량)
n		Ideality factor 'n-factor' (이상 계수; 1과 2 사이의 수. 전류 감소하면 증가) (재결합(Recombination)에 따른 영향. 간단한 재결합 1, 재결합이 크면 2를 도입할 수 있음)

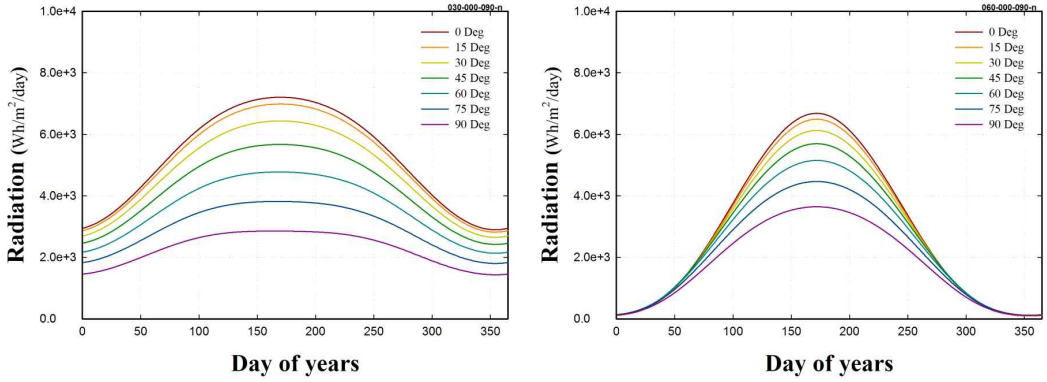
㉢ 관찰점의 위도, 경도, 태양전지의 방위 및 위도에 따른 변화추이

태양의 위치와 태양전지의 위치에 따른 연중일사량의 변화에 대해서 그림으로 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 연중 일에 따라 변화하는 양상은 위도별로 사계절에 따라 다르게 나타난다. 그림에서 보는 바와 같이 태양 전지의 방위각이 0°일 경우 경사각의 변화에 따라 감소하는 결과가 나타나며, 이것은 90°에서도 같은 경향이다. 그러나 감소되는 비율은 0°가 더 크게 나타난다. 이 결과는 태양전지의 방향이 북쪽을 향하면서 세워지는 경우가 가장 불리하게 나타나는 것을 의미하고 동쪽 방향의 전지가 더 유리하게 나타난 결과이다. 그러나 180°의 경우는 경사각이 클 경우 더 큰 값을 나타내며, 계절에 따라 다르게 나타난다. 종합적인 결과에서는 남향의 계절에 적절한 각도변화를 주는 것이 가장 유리한 에너지 효율을 얻을 수 있을 것이다. 이 결과 분석은 일반적인 태양의 직달일사량 만을 고려한 것이므로 정확한 태양광 발전량을 측정하는 것은 아니다. 그러나 환경에 따라 기후, 온도, 지형 등의 특성에 따라 일사량의 모델을 제시하는 연구결과에 따라 여러 가지 형태로 제안되므로 다양한 경우를 고려해야하며, 단지 설계단계에서 경사각과 방위각에 대한 평가 분석으로 적절한 곡면을 얻을 수 있다. 본 연구에서 고려되어지는 경사면에 영향을 주는 일사량의 모델은 직달 일사량과 산란광 및 반사광을 모두 고려하는 모델을 이용하도록 한다.



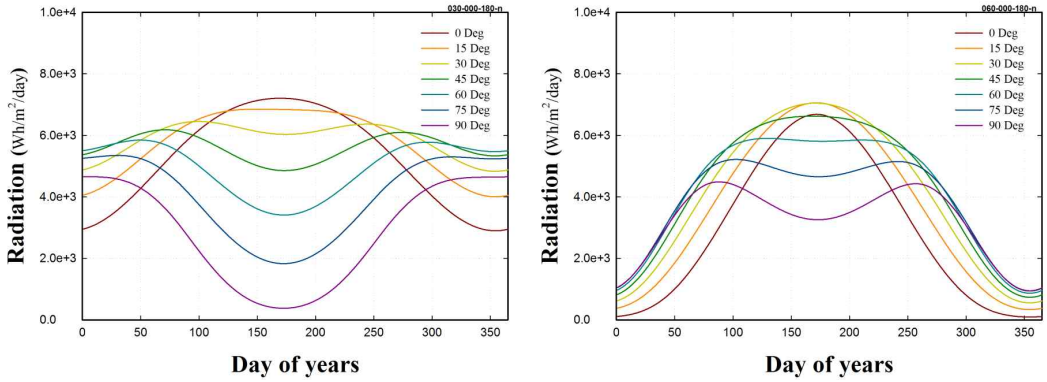
(a) ϕ=30° (b) ϕ=60°

그림 2.2.5.25 경사면에 작용하는 연간 직달 일사량 변화 (λ=0°)



(a) ϕ=30˚ (b) ϕ=60˚

그림 2.2.5.26 경사면에 작용하는 연간 직달 일사량 변화 (ϕ=20,40,60˚ and λ=90˚)



(a) ϕ=30˚ (b) ϕ=60˚

그림 2.2.5.27 경사면에 작용하는 연간 직달 일사량 변화 (ϕ=30˚,60˚ and λ=180˚)

6. 격자그리드 구조물의 비선형 구조해석과 불안정성

격자형 돔의 불안정 현상은 부재좌굴과 절점좌굴 및 전체좌굴이며, 구조체가 복잡할수록 이들의 연성작용에 의해 불안정 거동을 한다. 곡률을 가진 단층의 격자 프레임의 경우는 외적인 여러 가지 요인에 의해 그 불안정 현상이 복잡하지만, 단순화한 모델에서는 비교적 거동이 뚜렷하다. 이중 전체좌굴은 구조체의 거동에 있어서 뜀좌굴의 형태와 분기거동의 발생유무에 따라서 좌굴내력이 크게 달라지며, 초기조건에 매우 민감하다. 본 절에서는 이러한 현상의 규명과 단일 압축부재의 오일러좌굴과의 특성을 부재의 강성과 형상의 강성에 대해서 고찰하도록 한다. 이를 위해서 비선형 보요소의 정식화와 불안정 현상의 판별 및 평형경로의 판별방법에 대해서 설명하고 해석을 수행하도록 한다.

가. 비선형 보요소의 접선강성행렬과 불안정 해석

기하학적 비선형성을 고려한 보요소의 접선강성행렬을 구하기 위해서 변위함수를 식 2.2.6.1과 같이 가정하며, 각 절점의 변위는 회전변위가 포함된 $\boldsymbol{d}_i = \{u_i\ v_i\ w_i\ \theta_{xi}\ \theta_{yi}\ \theta_{zi}\}^T$로 가정한다. 여기서, 요소좌표계와 전체좌표계는 각각 $(x,y,z),(X,Y,Z)$로 나타내며, 절점의 하중벡터 $\boldsymbol{f}_i$는 절점변위에 대응하는 값으로 구성된다. 식 2.2.6.1의 형상함수는 축변위 $u(x)$와 St. Venant's 비틀림 변위 $\phi(x)$는 라그랑주 함수를 이용하였고, 부재축의 직각방향변위 $v(x)$ 및 $w(x)$는 에르미트 함수를 이용한다.

$$\boldsymbol{u}(x) = \begin{Bmatrix} u(x) \\ v(x) \\ w(x) \\ \phi(x) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \boldsymbol{N}_1^T \\ \boldsymbol{N}_2^T \\ \boldsymbol{N}_3^T \\ \boldsymbol{N}_4^T \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \boldsymbol{d}_i \\ \cdots \\ \boldsymbol{d}_j \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \boldsymbol{N}_1^T \\ \boldsymbol{N}_2^T \\ \boldsymbol{N}_3^T \\ \boldsymbol{N}_4^T \end{Bmatrix} \boldsymbol{d} \tag{2.2.6.1}$$

기하학적 비선형성을 고려하기 위해서 변형-변위 관계식을 다음과 같이 정의하도록 하며, 식에서 $(\cdots,x)$는 x에 관한 편미분을 의미한다.

$$\epsilon = u_{,x} - yv_{,xx} - zw_{,xx} + \frac{1}{2}\left\{u_{,x}^2 + v_{,x}^2 + w_{,x}^2\right\} \tag{2.2.6.2}$$

$$= \left(\boldsymbol{N}_0^{*T} + \boldsymbol{N}_b^{*T} + \frac{1}{2}\boldsymbol{N}_N^{*T}\right)\boldsymbol{d}$$

여기서,

$$\boldsymbol{N}_0^{*T} = \boldsymbol{N}_{1,x}^T$$

$$\boldsymbol{N}_b^{*T} = -y\boldsymbol{N}_{2,xx}^T - z\boldsymbol{N}_{3,xx}^T = -y\boldsymbol{N}_{by}^T - z\boldsymbol{N}_{bz}^T$$

$$\boldsymbol{N}_0^{*T} = \sum_{i=1}^{3} \boldsymbol{d}^T \boldsymbol{N}_{i,x} \boldsymbol{N}_{i,x}^T = \sum_{i=1}^{3} \boldsymbol{d}^T \boldsymbol{N}_i^*$$

응력-변위 관계식을 탄성영역에서 정의하고, 탄성계수 E를 이용하여 표현하면 다음과 같다.

$$\sigma = E\epsilon = E\left(\boldsymbol{N}_0^{*T} + \boldsymbol{N}_b^{*T} + \frac{1}{2}\boldsymbol{N}_N^{*T}\right)\boldsymbol{d} \tag{2.2.6.3}$$

전단응력과 변형도 관계식은 식 2.2.6.4-2.2.6.5와 같고, 식에서 r과 $G = E/2(1+\nu)$는 각각 단면 반지름과 탄성전단계수이다.

$$\gamma = r\phi_{,x} = r\boldsymbol{N}_{4,x}^T\boldsymbol{d} = r\boldsymbol{N}_t^{*T}\boldsymbol{d} \tag{2.2.6.4}$$

$$\tau = G\gamma = Gr\boldsymbol{N}_t^{*T}\boldsymbol{d} \tag{2.2.6.5}$$

증분구간의 하중, 변위, 응력 및 변형을 각각 $\Delta\boldsymbol{f}$, $\Delta\boldsymbol{d}$, $\Delta\boldsymbol{\sigma}$, $\Delta\boldsymbol{\tau}$라 정의하고, 가상일의 원리를 이용하여 비선형 강성방정식을 구하면 다음과 같다.

$$\delta\Delta\boldsymbol{d}^T(\boldsymbol{f}+\Delta\boldsymbol{f}) = \int_V \{(\delta\Delta\epsilon)^T(\boldsymbol{\sigma}+\Delta\boldsymbol{\sigma}) + (\delta\Delta\gamma)^T(\tau+\Delta\tau)\}dV \tag{2.2.6.6}$$

위 식에서 $\Delta\boldsymbol{\sigma}$, $\Delta\tau$, $(\delta\Delta\epsilon)^T$ 및 $(\delta\Delta\tau)^T$을 식 2.2.6.2-2.2.6.5를 이용하여 구하면 다음과 같다.

$$\Delta\boldsymbol{\sigma} = E\left(\boldsymbol{N}_0^{*T} + \boldsymbol{N}_b^{*T} + \boldsymbol{N}_N^{*T} + \frac{1}{2}\Delta\boldsymbol{N}_N^{*T}\right)\Delta\boldsymbol{d} \tag{2.2.6.7}$$

$$(\delta\Delta\boldsymbol{\epsilon})^T = \delta\Delta\boldsymbol{d}^T\left(\boldsymbol{N}_0^* + \boldsymbol{N}_b^* + \boldsymbol{N}_N^* + \Delta\boldsymbol{N}_N^*\right) \tag{2.2.6.8}$$

$$\Delta\boldsymbol{\tau} = G\boldsymbol{N}_t^{*T}\Delta\boldsymbol{d} \tag{2.2.6.9}$$

$$(\delta\Delta\boldsymbol{\tau})^T = \delta\Delta\boldsymbol{d}^T\boldsymbol{N}_t^* \tag{2.2.6.10}$$

여기서,

$$\Delta\boldsymbol{N}_N^{*T} = \sum_{i=1}^{3} \Delta\boldsymbol{d}^T\boldsymbol{N}_i^*$$

식 2.2.6.3, 2.2.6.5, 2.2.6.7-2.2.6.10을 이용하여 식 2.2.6.6에 대입하고 $\Delta\boldsymbol{d}$에 관한 고차항을 소거하면 증분형 강성방정식을 구할 수 있으며, 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta\boldsymbol{f} - \Delta\boldsymbol{r} = (\boldsymbol{k}_E + \boldsymbol{k}_G)\Delta\boldsymbol{d} \tag{2.2.6.11}$$

여기서,

$$\boldsymbol{k}_E = EA\int \boldsymbol{N}_0^*\boldsymbol{N}_0^{*T}dx + EI_z\int \boldsymbol{N}_{by}^*\boldsymbol{N}_{by}^{*T}dx + EI_y\int \boldsymbol{N}_{bz}^*\boldsymbol{N}_{bz}^{*T}dx + GI_p\int \boldsymbol{N}_t^*\boldsymbol{N}_t^{*T}dx$$

$$\boldsymbol{k}_G = EA\int \sum_{i=1}^{3}\boldsymbol{N}_i^*\left(\boldsymbol{N}_0^{*T}+\frac{1}{2}\boldsymbol{N}_N^{*T}\right)\boldsymbol{d}dx + EA\int \left(\boldsymbol{N}_0^*\boldsymbol{N}_N^{*T}+\boldsymbol{N}_N^*\boldsymbol{N}_0^{*T}+\boldsymbol{N}_N^*\boldsymbol{N}_N^{*T}\right)dx$$

$$\boldsymbol{r} = EA\int \left(\boldsymbol{N}_0^*+\boldsymbol{N}_N^*\right)\left(\boldsymbol{N}_0^{*T}+\frac{1}{2}\boldsymbol{N}_N^{*T}\right)\boldsymbol{d}dx + EI_z\int \boldsymbol{N}_{by}^*\boldsymbol{N}_{by}^{*T}\boldsymbol{d}dx + EI_y\int \boldsymbol{N}_{bz}^*\boldsymbol{N}_{bz}^{*T}\boldsymbol{d}dx$$

식 2.2.6.7의 $\boldsymbol{k}_E$와 $\boldsymbol{k}_G$는 각각 탄성 및 기하강성행렬, $\Delta\boldsymbol{r}$은 현재구간에서 고차항의 소거로 인해 발생되는 불평형력이며, 본 논문에서는 강성행렬의 2차항은 고려하지 않는다. 전체좌표계에서의 절점에 대한 하중, 변위 및 불평형력을 각각 $\Delta\boldsymbol{F},\Delta\boldsymbol{D},\Delta\boldsymbol{R}$라 하고, 좌표변환행렬 $\boldsymbol{T}$를 이용하면 다음과 같이 비선형 보요소의 접선강성행렬을 구할 수 있다.

$$\Delta\boldsymbol{F}-\Delta\boldsymbol{R} = \boldsymbol{T}^T(\boldsymbol{k}_E+\boldsymbol{k}_G)\boldsymbol{T}\Delta\boldsymbol{d} = \boldsymbol{K}\,\Delta\boldsymbol{D} \qquad (2.2.6.12)$$

비선형 평형궤도의 불안정점은 각 증분구간에서의 접선강성행렬과 고유치를 이용하여 임계점을 구분할 수 있으며, 가장 일반적이고 많이 이용하는 방법이다. 접선강성행렬 $\boldsymbol{K}$는 보존계에서 대칭행렬이고, 서로 직교하는 변환행렬이 존재하므로 대각화가 가능하다. $\boldsymbol{K}$의 n개의 고유치 c_i에 대응하는 정규고유벡터를 $\boldsymbol{v}_i$라 할 때, $\boldsymbol{v}_i$을 열벡터로 하는 직교행렬 $\boldsymbol{V}$를 이용하여 변위벡터를 변환하고, 최소고유치에 해당하는 고유벡터 $\boldsymbol{v}_1^T$를 곱하면 다음과 같다.

$$\boldsymbol{v}_1^T\boldsymbol{K}\;\boldsymbol{V}\dot{\boldsymbol{u}} + \boldsymbol{v}_1^T\boldsymbol{f}\;\dot{\lambda} = \boldsymbol{0} \qquad (2.2.6.13)$$

여기서, λ는 하중파라메타이다. 위 식에서 특이점은 $|\boldsymbol{K}|$가 0이므로 좌변의 첫 번째 항은 소거되므로 임계점은 두 번째 항에서 다음식과 같은 두 조건으로 구분된다.

$$\boldsymbol{v}_1^T\boldsymbol{f} \neq 0\,,\ \dot{\lambda} = 0 \qquad (2.2.6.14)$$

$$\boldsymbol{v}_1^T\boldsymbol{f} = 0 \qquad (2.2.6.15)$$

여기서, $\boldsymbol{v}_1 \bullet \boldsymbol{f}$는 최소 고유치 c_1에 대응하는 고유벡터 $\boldsymbol{v}_1$와 하중모드 $\boldsymbol{f}$간의 내적을 말하며, 0일 경우는 서로 직교함을 의미한다. 따라서 전자는 극한점을 의미하고, 후자는 분기점을 의미한다. 또한 분기점에서 $\dot{\lambda} = 0$일 때가 대칭분기, $\dot{\lambda} \neq 0$ 일 때가 비대칭 분기점으로 세분할 수 있다.

나. 단순모델을 이용한 해석결과의 검증 및 비교

해석결과의 검증을 위해서 Toggle Frame 예제를 이용하여 비교하도록 한다. 예제의 형상

은 그림2.6.1에서 보는 것과 같이 높이가 0.343 in이며, 양단은 고정되어 있다. 예제의 물성치는 1976년 발표된 Wood와 Zienkiewicz의 문헌에서 제시된 값을 이용한다. 부재의 단면은 장방형으로 가로0.753 in, 세로0.243 in 이다. 또한 탄성계수는$10.3 \times 10^6\ lb/in^2$ 이며, 하중은 중앙 절점에서 수직방향 집중력 P가 작용한다.

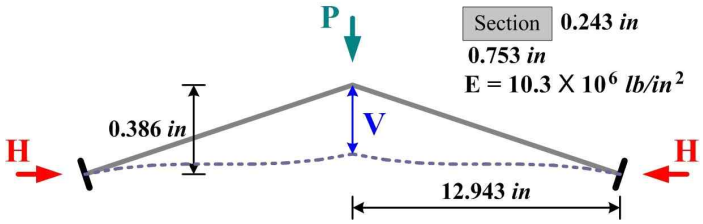
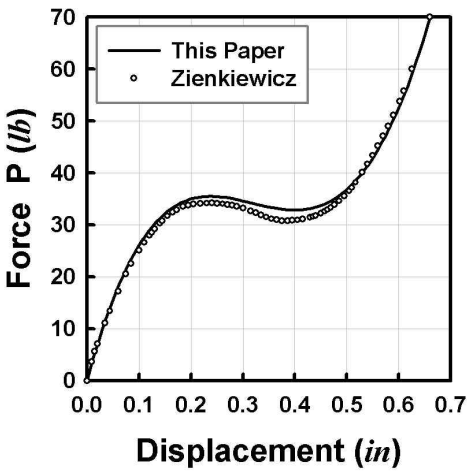
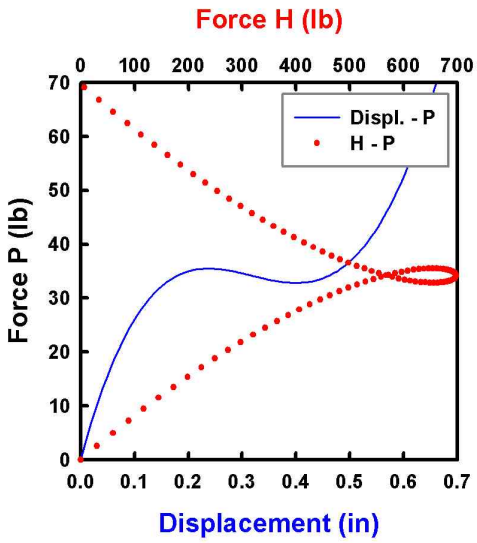


그림 2.2.6.1 William's Toggle Frame 예제의 형상

해석결과 중앙절점의 수직변위의 변화를 그림 2.2.6.2에 나타내었으며, 문헌에 나타난 곡선과 비교적 잘 일치한다. 비선형 해석을 통하여 구한 중앙부 절점의 수직변위와 이에 대응하는 지지점의 수평반력(H)은 그림 2.2.6.2(b)에서와 같은 변화를 하며, 수평반력의 증가는 극한점을 기준으로 집중하중(P)의 감소와 서로 엇갈리게 변화한다. 예제에서 각각의 부재를 분할하여 해석하였을 경우의 변화는 그림 2.2.6.3에 나타난 것과 같다. 그림에서 볼 때, 임계하중은 요소가 4등분 이상이 되면 값이 수렴되어 나타나는 것을 알 수 있다.



(a) 비교



(b) 하중-변위 곡선

그림 2.2.6.2 William's Toggle Frame의 해석결과

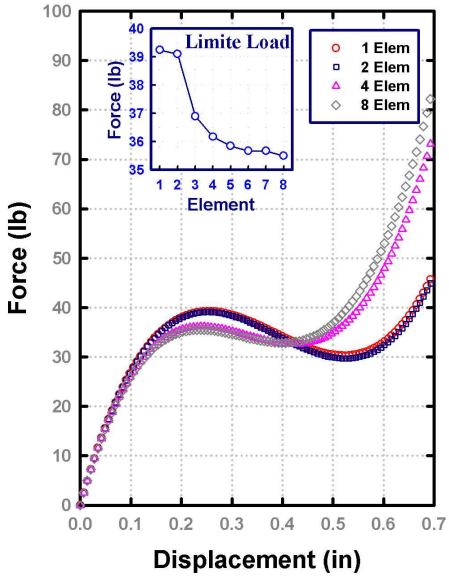


그림 2.2.6.3 요소수에 따른 해석결과 (William's Toggle Frame)

다. 불안정 거동에 따른 뜀좌굴 및 분기좌굴 특성

평형경로의 임계점에 대한 불안정 거동의 분류에 따른 뜀좌굴 현상과 분기거동을 본 절에서 설명하도록 한다. 대상 예제는 그림 2.2.6.4와 같이 2개의 자유절점과 8개의 경계절점으로 구성되며, 세 개의 a부재와 여덟 개의 나머지 부재로 연결되어져 모두 열한 개의 부재로 구성된다. 하중은 1번과 2번 절점에 연직방향의 집중력이 작용하며, 구조물은 높이 H=1m, 짧은 쪽 밑면 반지름을 L=5m이다. 부재의 탄성계수는 210 GPa로 모든 부재가 동일하다. 해석모델의 두 모델은 모두 동일한 단면적 $11.2cm^2$ 을 가질 때(모델 A)와, a부재를 제외한 나머지 부재가 a부재의 1/10에 해당하는 단면적을 적용하는 두 가지 모델(모델 B)로 나누어 해석을 한다.

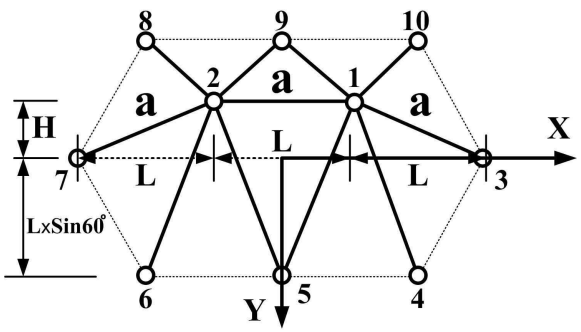
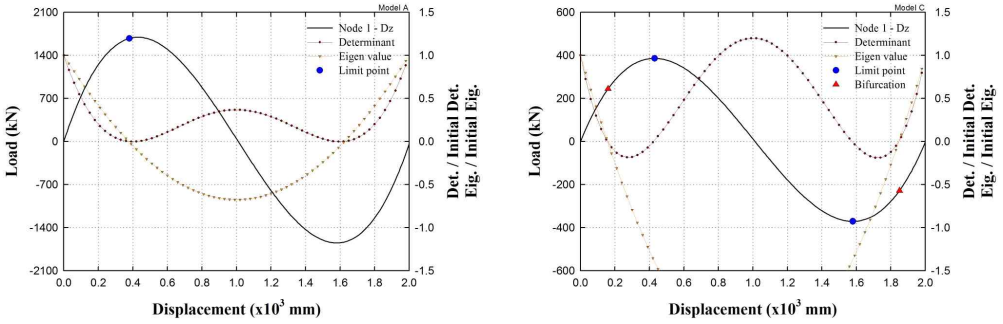


그림 2.2.6.4 2-자유절점 공간구조물의 형상

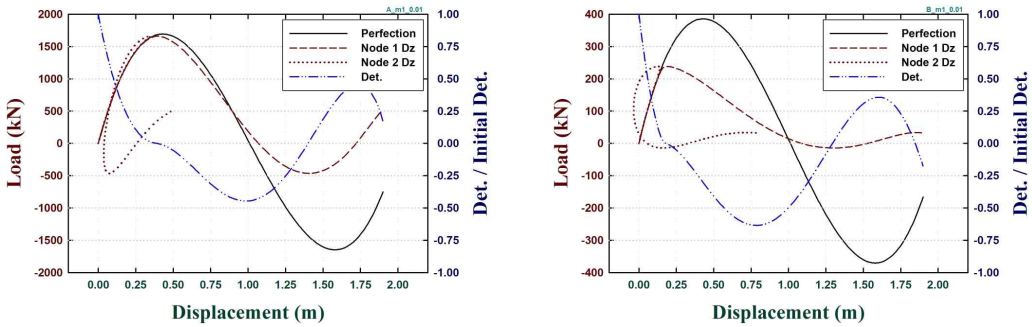
초기형상에 대한 불완전성에 대해서 고려하지 않고 해석을 수행한 결과 그림 2.2.4.5와 같은 결과를 얻을 수 있다. 그림에서 나타나는 곡선들은 하중-변위 평형곡선, 행렬식 및 고유치 곡선이며, 평형경로상의 도형은 특이점을 의미한다. 모델 A에서는 행렬식의 특이점

(singular point)이 하중-변위 곡선 상의 첫 번째 극한점에서 나타낸다. 따라서 모델 A는 하중-변위 곡선의 극한점 부근에서 불안정 거동을 나타내며, 이는 뜀좌굴 현상에 의해 불안정 거동임을 알 수 있다. 즉, 모델 A는 첫 번째 극한점이 임계점이 되며, 이때의 하중-변위 곡선상의 하중레벨이 임계값이 되었을 때가 구조물의 좌굴하중 레벨이 된다. 그러나 모델 B의 해석결과는 특이점이 첫 번째 극한점 이전에 나타나고 있으며, 뜀좌굴 이전에 분기현상을 예측할 수 있다. 따라서 특이점들을 차례로 분석하면 첫 번째 분기점, 첫 번째 극한점, 두 번째 극한점, 두 번째 분기점으로 나타난다.



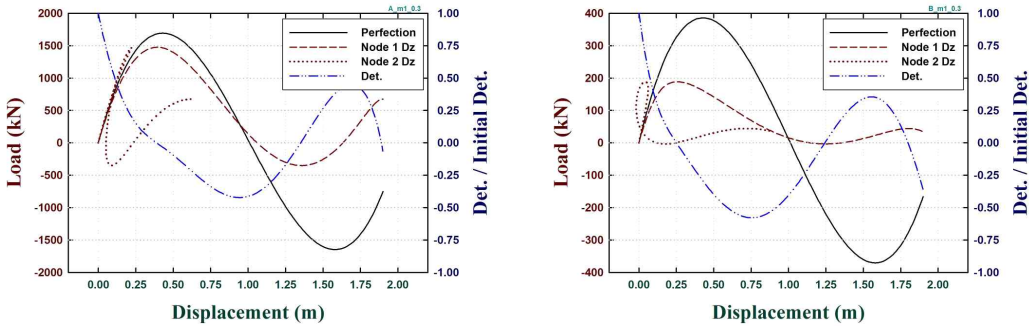
(a) 모델 A (b) 모델 B

그림 2.2.6.5 완전형상의 비선형 불안정 해석결과와 임계점



(a) 모델 A (b) 모델 B

그림 2.2.6.6 초기불완전형상모델의 뜀좌굴과 분기현상 (초기불완전량 0.01%)



(a) 모델 A (b) 모델 B

그림 2.2.6.7 초기불완전형상모델의 뜀좌굴과 분기현상 (초기불완전량 0.3%)

초기형상의 불완전을 고려하기 위해서 초기접선강성행렬에 대한 고유치와 고유좌굴모드를 계산하여 적용하기로 한다. 채택되어지는 좌굴모드는 주 경로상의 분기경로로의 변환을 알아볼 수 있으며, 형상 불완전 량의 증가에 따른 민감성을 살펴볼 수 있다. 불완전 량은 2L의 값을 기준으로 미소한 값이 적용된다. 그림 2.2.6.6은 1차 고유모드의 초기형상 불완전 량이 0.01%일 때의 해석결과이다. 그림에서의 실선은 완전형상의 결과이며, 이점쇄선을 이용하여 매 증분에서 얻어지는 행렬식과 변위와의 관계를 함께 나타내었다. 모델 A에서 두 절점은 완전형상의 극한점에서 서로 다른 방향으로의 거동하며, 이때 접선강성행렬은 특이점을 나타내고 있다. 또한 행렬식 곡선도 완전형상과는 다른 양상을 보인다. 불완전 량의 증가에 대하여도 절점의 비대칭적 거동의 발생은 완전형상 모델의 극한점에서 점점 더 멀어짐을 관찰할 수 있다. 그러나 모델 B의 두 절점은 극한점이 아니라 분기점에서 분기거동을 하며, 이때 접선강성행렬은 특이점이 나타나며 불완전형상의 극한점이전의 특이점은 발생하지 않는다. 또한 모델 A와 마찬가지로 행렬식 곡선도 완전형상과는 다른 양상을 보인다. 그림 2.2.6.7에서 보는 바와 같이 불완전 량의 증가에 대하여도 절점의 비대칭 거동은 완전형상의 극한점에서 점점 더 격차가 발생한다.

완전형상이건 불완전형상이건 간에 모든 경우에서 나타난 유사한 두 가지 패턴은 자유절점의 움직임과 민감성에 있다. 즉, 두 절점이 대칭 이동하는 패턴이거나 임계점에서 비대칭 거동을 하는 패턴이다. 완전형상이나 불완전성에 기인한 분기거동이 나타나지 않는 경우는 전자의 거동을 하며, 형상 불완전성에 기인한 분기거동은 모두 후자의 패턴으로 나타난다. 만일 2-자유절점의 해석모델에서 단면적이 같은 부재로만 구성된 X-Z평면을 해석공간으로 한정하는 경우, 평형행렬의 비신장 메커니즘 기저 $U_m = \{0.2,\ 1.0,\ 0.2,\ -1.0\}^T$ 는 1개의 벡터를 가지게 되며, 형상은 그림 2.2.6.8과 같고 1차 고유모드와 유사하다. 그러므로 모델의 일차 모드와 비신장 메커니즘 기저의 내적을 살펴보면, 모델 B가 기저벡터와의 내적이 더 크게 나타난다.

표 2.2.6.1 2-자유절점 모델의 비신장 메커니즘 기저와 고유벡터

절점		기저 U_m	고유모드 (모델 A) $\mathbf{v}_1$	고유모드 (모델 B) $\mathbf{v}_1$
1	x	0.2	0.1098	0.185
	y	-	0.0	0.0
	z	1.0	1.0	1.0
2	x	0.2	0.1098	0.185
	y	-	0.0	0.0
	z	-1.0	-1.0	-1.0
$U_m \cdot \mathbf{v}_1$		-	2.0439	2.074

라. 부재강성에 따른 좌굴특성과 유효좌굴길이 변화

육각뿔 모델은 단층 격자 돔의 기본 프레임 모듈 중 하나이며, 그림 2.2.6.8과 같이 여섯

개의 부재로 구성된다. 부재좌굴과 절점좌굴의 불안정 현상을 예상할 수 있으며, 부재의 휨강성에 따라 두 좌굴의 우선순위가 결정된다. 대상 모델은 1번 절점에 연직방향으로 작용하는 집중력은 경계절점을 통해서 힘이 전달되며, 부재의 단면은 요소 내에서 일정하다. 단면적과 탄성계수는 2-자유절점 모델과 동일하고, 라이즈-스팬 비($\mu = H/2L$)를 0.5에서 2.5까지 0.5씩 증가한 모델을 대상으로 해석을 수행한다. 핀절점 모델에서 부재좌굴을 고려하지 않을 때의 전체좌굴에 대한 하중레벨은 μ가 증가할수록 증가하지만 구조물 높이(H)의 약 43.5%에서 임계점이 나타나는 것으로 연구된 바 있다.

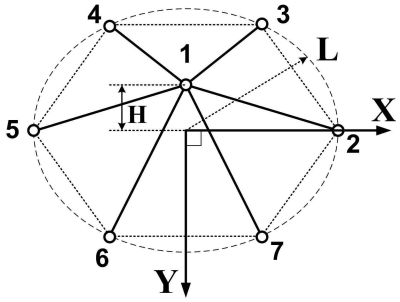


그림 2.2.6.8 육각뿔 모델의 형상

절점강성을 고려한 부재좌굴과 전체좌굴과의 관계를 알아보기 위해 부재 강성을 핀접합 모델의 좌굴내력을 기준으로 무차원화한 단면이차모멘트를 이용한다. 즉, 핀접합 모델의 뜀좌굴이 발생할 때의 부재 최대내력을 좌굴내력($N_{cr} = \pi^2 EI/l^2$)으로 정하고, 이를 환산하여 얻은 값을 기본 단면이차모멘트 I_0로 선정하였으며, 이 값을 기준으로 단면휨강성비 β를 곱하여 해석모델의 좌굴특성을 고찰하여 부재좌굴과 전체좌굴사이의 관계를 고찰한다. 해석결과는 표 2.2.6.2과 그림 2.2.6.9에 나타난 바와 같고, 부재좌굴이 발생하는 경우 환산된 유효좌굴길이계수는 μ값의 증가에 따라 동일한 β값에서는 감소한다. μ값에 대한 좌굴길이계수의 변화폭은 μ=0.25일 때 0.014로 최대 변화폭을 나타내고 있다.

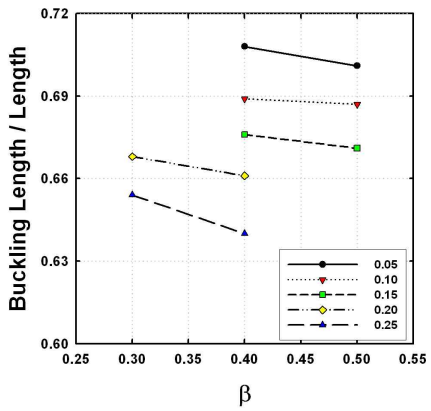
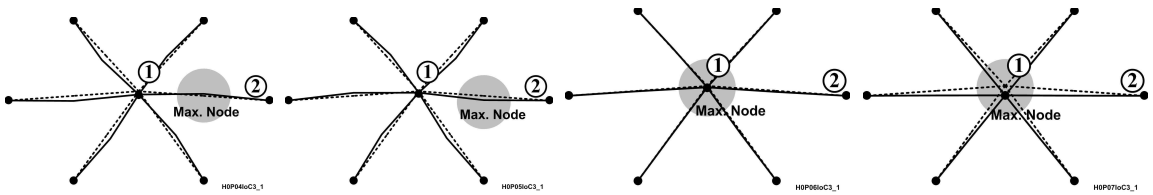


그림 2.2.6.9 육각뿔 모델의 휨강성비에 따른 유효좌굴길이계수

표 2.2.6.2 육각뿔 모델의 휨강성 비β 에 따른 좌굴형태와 유효좌굴길이계수

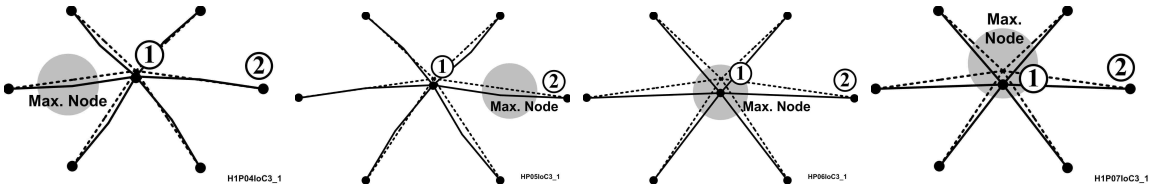
μ	β	유효좌굴길이계수	좌굴형태	μ	β	유효좌굴길이계수	좌굴형태
0.05	0.4	0.708	부재좌굴	0.10	0.4	0.689	부재좌굴
	0.5	0.701	부재좌굴		0.5	0.687	부재좌굴
	0.6	·	절점좌굴		0.6	·	절점좌굴
	0.7	·	절점좌굴		0.7	·	절점좌굴
	0.8	·	절점좌굴		0.8	·	절점좌굴
0.15	0.4	0.676	부재좌굴	0.20	0.3	0.668	부재좌굴
	0.5	0.671	부재좌굴		0.4	0.661	부재좌굴
	0.6	·	절점좌굴		0.5	·	절점좌굴
	0.7	·	절점좌굴		0.6	·	절점좌굴
	0.8	·	절점좌굴		0.7	·	절점좌굴
0.25	0.3	0.654	부재좌굴				
	0.4	0.640	부재좌굴				
	0.5	·	절점좌굴				
	0.6	·	절점좌굴				
	0.7	·	절점좌굴				

그림 2.2.6.10에서 그림 2.2.6.14는 임계점에서의 좌굴형상을 나타낸 것이며, μ=0.05는 β=0.5 이하에서 부재좌굴이 그리고 β=0.6 이상은 전체좌굴이 발생했다. μ=0.1과 μ=0.15도 μ=0.05와 마찬가지로 β가 0.5와 0.6에서 같은 현상이 나타났으며, μ=0.2와 μ=0.25에서는 β가 0.4와 0.5에서 불안정 현상이 나뉘어 졌다. 이것은 단순한 모델에서 나타난 부재좌굴과 전체좌굴사이의 경계이다. 부재좌굴이 일어나는 모델에서는 극한점 이전에 특이점이 발생하며, β값의 증가에 따라 불안정점은 극한점에 접근한다. 그러나 절점좌굴이 발생하는 구간에서는 더 이상 극한점 이전의 특이점은 발생하지 않는다. 좌굴하중의 변화도 β값의 증가에 따라 증가한다. 이것은 단면 휨강성 비에 따라서도 부재좌굴과 전체좌굴이 구분되는 것을 의미한다. 또한 높은 μ에서 부재좌굴이, 낮은 μ에서는 전체좌굴의 영향이 크다. 이때의 좌굴길이 계수는 β에 상관없이 비교적 일률적이며, μ가 높을수록 유효좌굴길이계수는 낮아지고, 채택된 모델에서 유효좌굴길이계수의 범위는 0.64에서 0.71사이의 값으로 나타났다. 이것은 단일 압축부재의 유효좌굴길이에 비해서 큰 값이며, 양단 힌지보다는 낮다.



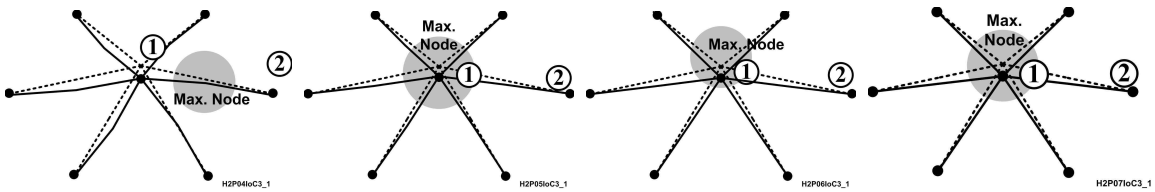
(a) β=0.4 (b) β=0.5 (c) β=0.6 (d) β=0.7

그림 2.2.6.10 육각뿔 모델의 휨강성비에 따른 좌굴특성 (μ=0.05)



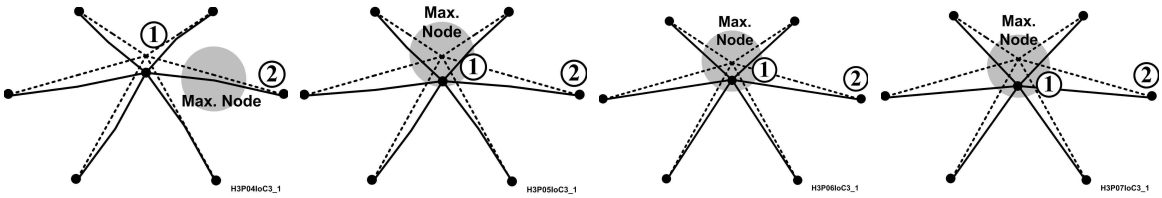
(a) β=0.4 (b) β=0.5 (c) β=0.6 (d) β=0.7

그림 2.2.6.11 육각뿔 모델의 휨강성비에 따른 좌굴특성 (μ=0.1)



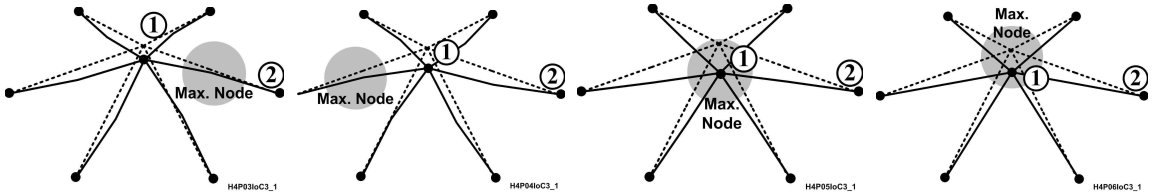
(a) β=0.4 (b) β=0.5 (c) β=0.6 (d) β=0.7

그림 2.2.6.12 육각뿔 모델의 휨강성비에 따른 좌굴특성 (μ=0.15)



(a) β=0.4 (b) β=0.5 (c) β=0.6 (d) β=0.7

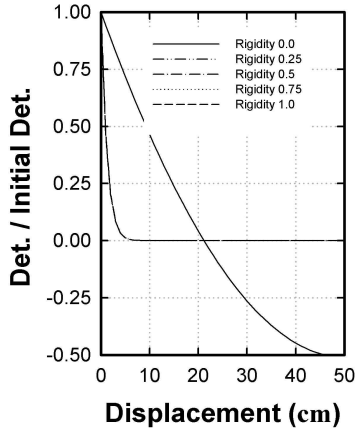
그림 2.2.6.13 육각뿔 모델의 휨강성비에 따른 좌굴특성 (μ=0.2)



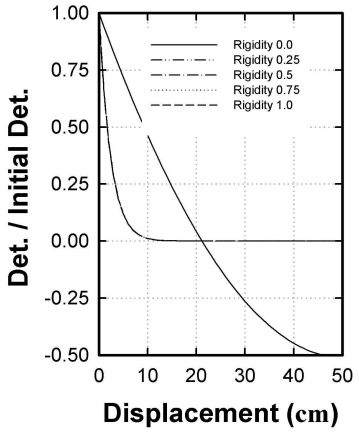
(a) β=0.3 (b) β=0.4 (c) β=0.5 (d) β=0.6

그림 2.2.6.14 육각뿔 모델의 휨강성비에 따른 좌굴특성 (μ=0.25)

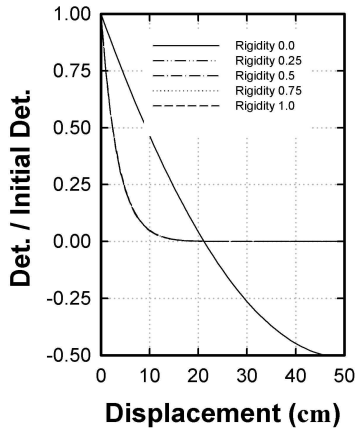
육각뿔 모델의 좌굴하중 특성에 대해서 하중-변위 곡선상의 강성행렬의 변화에 대해서 다음 그림에 나타내었다. 휨강성비 β에 따른 절점 강성의 변화에 대해서 특이점의 변화를 알아보기 위한 그림으로 라이즈-스팬 비에 따라서 결과를 그래프로 나타내었다. 각각의 라이즈-스팬비는 앞서 다루었던 것과 마찬가지로 0.05에서 0.25까지 0.05씩 증가한 모델이며, 단면 강성비는 0.5, 1.0, 1.5, 2.0의 값을 적용하였다. 그림에서 나타난 바와 같이 단면강성비의 증가에 따라 강접합에 가까운 강성행렬의 변화가 나타나며, 절점강성이 큰 경우에서 임계점은 늦게 나타난다.



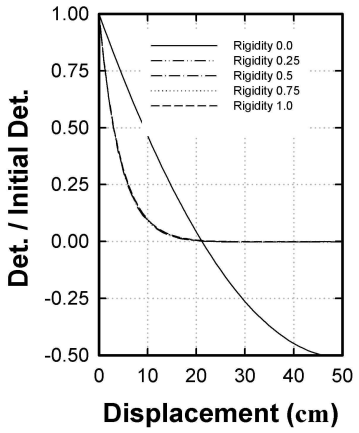
(a) 0.5 Io



(b) 1.0 Io

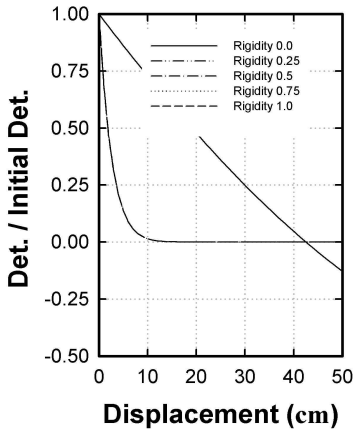


(c) 1.5 Io

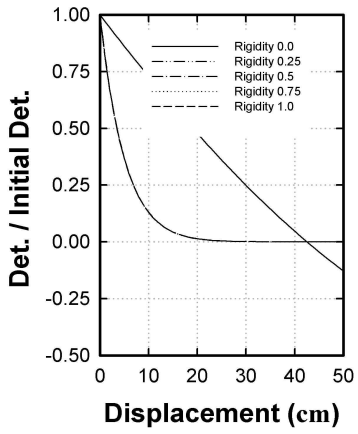


(d) 2.0 Io

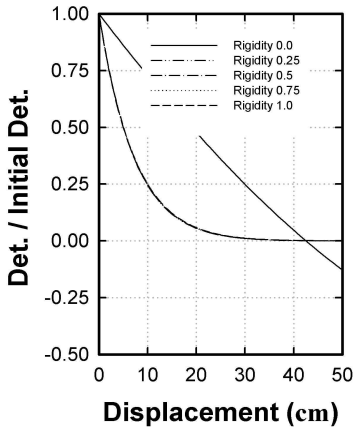
그림 2.2.6.15 육각뿔 모델의 행렬식-변위 곡선 (μ=0.05)



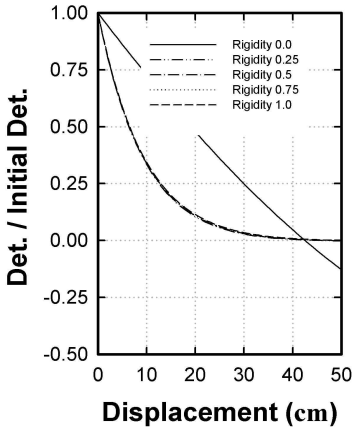
(a) 0.5 Io



(b) 1.0 Io

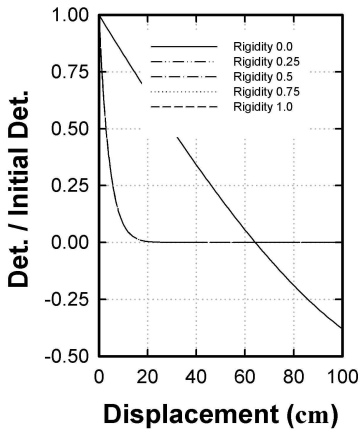


(c) 1.5 Io

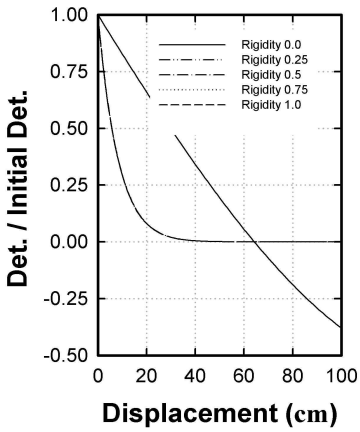


(d) 2.0 Io

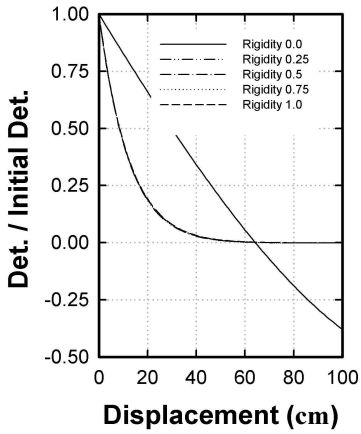
그림 2.2.6.16 육각뿔 모델의 행렬식-변위 곡선 (μ=0.10)



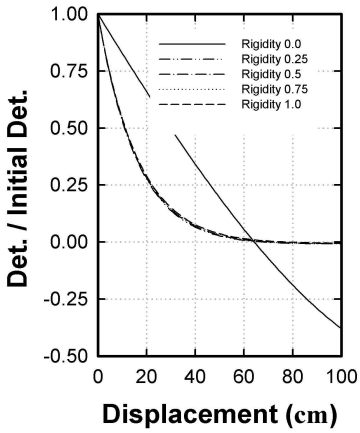
(a) 0.5 Io



(b) 1.0 Io

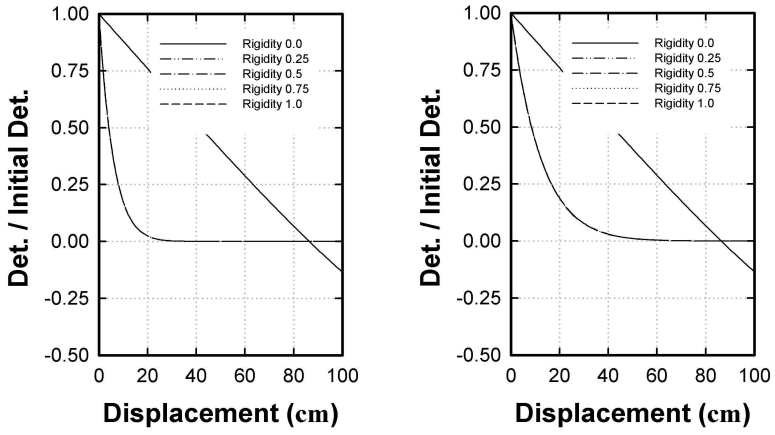


(c) 1.5 Io

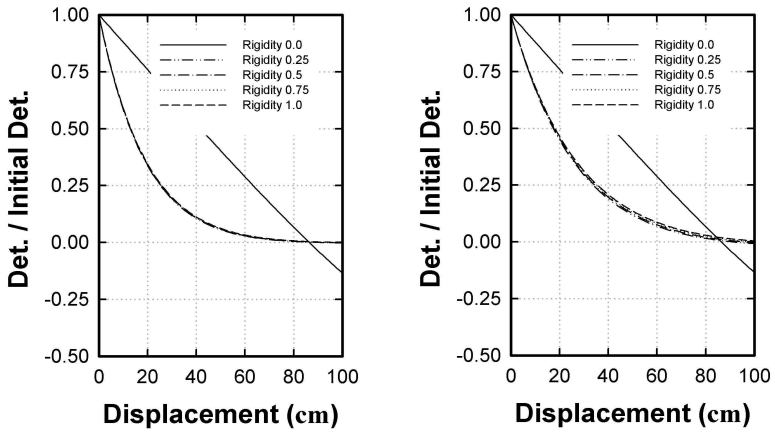


(d) 2.0 Io

그림 2.2.6.17 육각뿔 모델의 행렬식-변위 곡선 (μ=0.15)

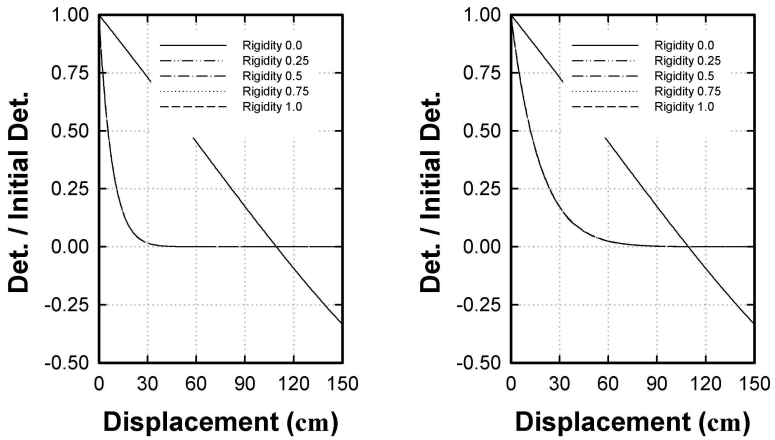


(a) 0.5 Io (b) 1.0 Io

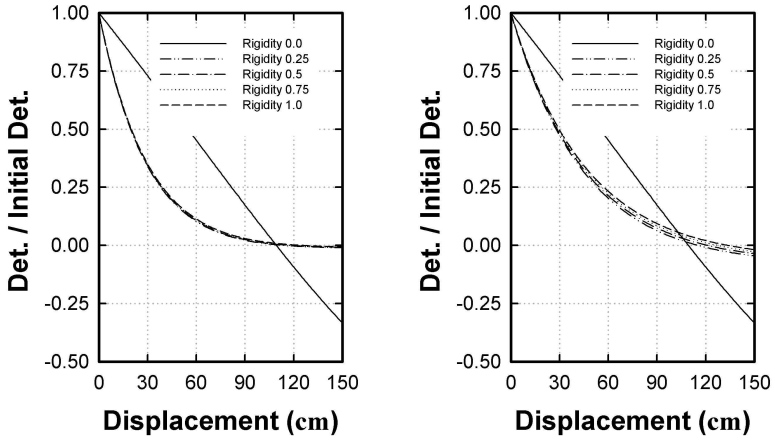


(c) 1.5 Io (d) 2.0 Io

그림 2.2.6.18 육각뿔 모델의 행렬식-변위 곡선 (μ=0.20)



(a) 0.5 Io (b) 1.0 Io



(c) 1.5 Io (d) 2.0 Io

그림 2.2.6.19 육각뿔 모델의 행렬식-변위 곡선 (μ=0.25)

해석대상 모델의 임계점의 특성을 위해서 그림 2.2.6.20에서 그림 2.2.6.24에 평형궤도와 함께 특이점을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 부재좌굴이 일어나는 모델에서는 극한점 이전에 특이점이 발생하며, β값의 증가에 따라 불안정점은 극한점에 접근한다. 그러나 절점좌굴이 발생하는 구간에서는 더 이상 극한점 이전의 특이점은 발생하지 않는다. 좌굴하중의 변화도 β값의 증가에 따라 증가한다.

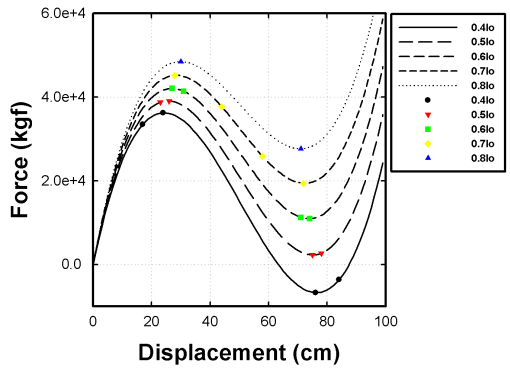


그림 2.2.6.20 β에 따른 육각뿔 모델의 임계점과 평형곡선 (μ=0.05)

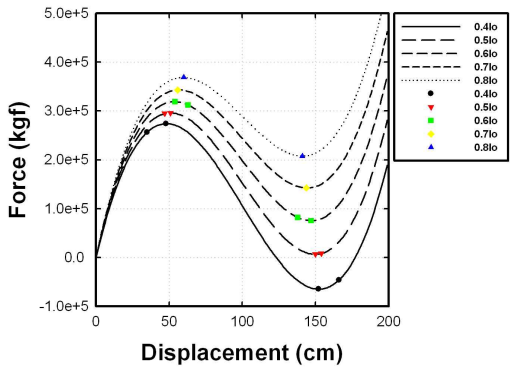


그림 2.2.6.21 β에 따른 육각뿔 모델의 임계점과 평형곡선 (μ=0.1)

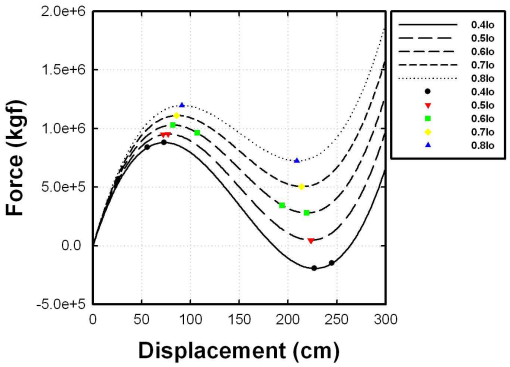


그림 2.2.6.22 β에 따른 육각뿔 모델의 임계점과 평형곡선 (μ=0.15)

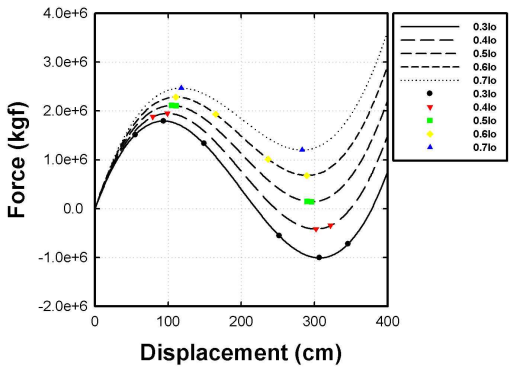


그림 2.2.6.23 β에 따른 육각뿔 모델의 임계점과 평형곡선 (μ=0.2)

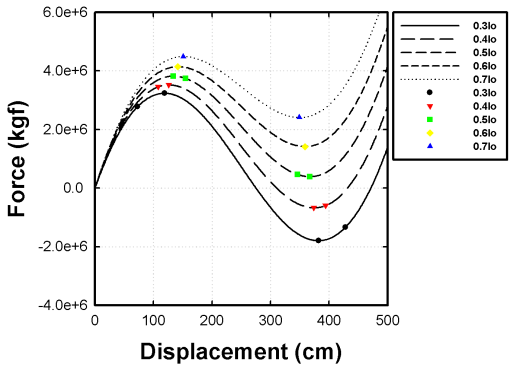


그림 2.2.6.24 β에 따른 육각뿔 모델의 임계점과 평형곡선 (μ=0.25)

단면 휨강성을 고려한 결과의 부재좌굴과 전체좌굴 변화현상은 β에 따라서 구분되어졌다. 이는 높은 μ에서 부재좌굴이, 낮은 μ에서는 전체좌굴의 영향이 크다는 것을 보여준다. 이때의 좌굴길이 계수는 β에 상관없이 비교적 일률적이다. 그러나 μ가 높을수록 유효좌굴길이계수는 낮아지며, 채택된 모델에서 유효좌굴길이계수의 범위는 0.64에서 0.71사이의 값으로 나타났다.

단일 자유절점을 가지는 육각뿔 모델에서 확장된 스타돔의 경우를 살펴보도록 한다. 형상은 그림 2.2.6.25에서 보는바와 같이 13개의 절점과 24개의 부재로 이루어지며, 하중은 1~7번 절점에 연직방향 집중력이 작용된다. 형상변수는 밑면 반경 L, 높이 H, 내부 육각뿔 유닛은

각각 $L1$과 $H1$ 이며, 해석을 위한 기초자료는 표 2.2.6.3과 같다.

육각뿔 모델과 같이 핀절점 스타돔이 임계점에 도달했을 때를 기준으로 구한 기본단면이차모멘트 I_0 를 이용하기로 하며, $L1$링의 내부부재, $L1$링 부재 및 $L1$링 외부부재의 부재좌굴에 대해서 살펴본다. 또한 채택된 모델의 경계절점이 힌지로 구성된 모델(BCP)과 고정단으로 구성된 모델(BCF)로 나누어 불안정 거동을 살펴보도록 한다.

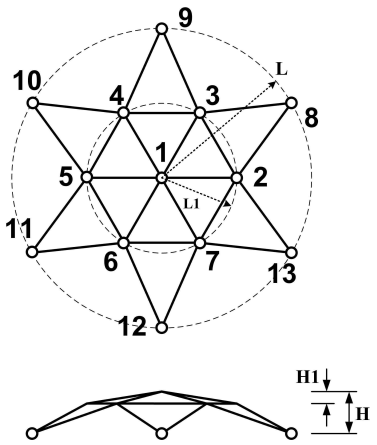
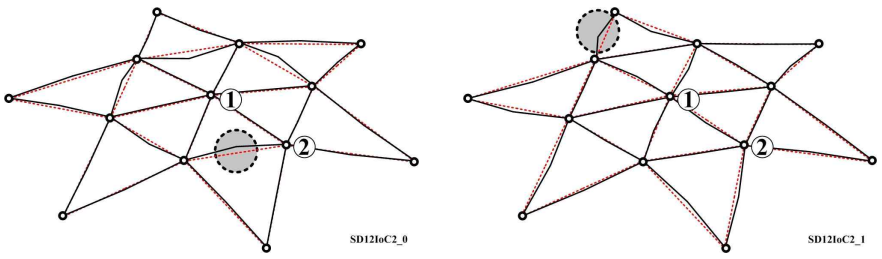


그림 2.2.6.25 스타돔 모델의 형상

표 2.2.6.3 스타돔 모델의 초기입력 데이터

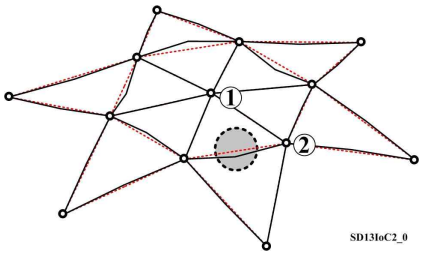
L (㎝)	$L1$ (㎝)	H (㎝)	$H1$ (㎝)	μ =H/2L	A (㎠)
500	250	102.16	82.16	0.10216	11.2

절점좌굴과 부재좌굴의 변화에 대해서 그림 2.2.6.26-2.2.6.29에 나타내었다. 그림 2.2.6.26-2.2.6.27은 BCP 모델의 좌굴현상에 대한 결과이며, 그림 2.2.6.28-2.2.6.29은 BCF 모델의 좌굴현상에 대한 결과이다. 부재좌굴이 발생하는 단면 휨강성비는 BCP 모델의 경우 β =1.2이하이며, 이때 부재좌굴의 경우 경계절점에 연결된 부재에서 발생하였다. BCF 모델은 β=0.7이하에서 부재좌굴이 발생하였고, 부재좌굴의 경우 경계절점에 연결된 부재에서 발생하였다. 이와 같은 결과는 육각뿔 모델에서 나타난 바와 같이 부재좌굴과 절점좌굴사이의 경계가 나타나며, 절점이 많을수록 복잡한 거동에 의해 좌굴현상이 발생한다.

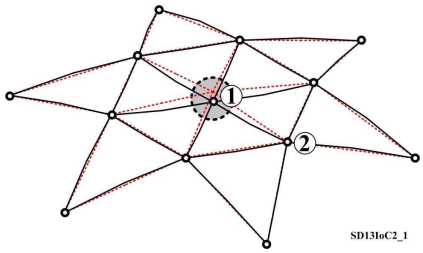


(a) 좌굴모드 (b) 좌굴현상

그림 2.2.6.26 다자유절점 공간구조물의 좌굴경로 (BCP, β=1.2)

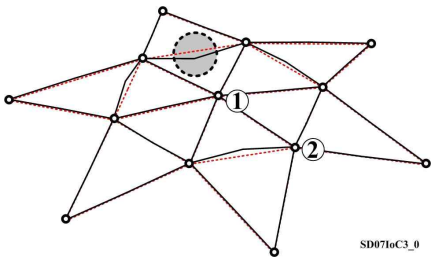


(a) 좌굴모드

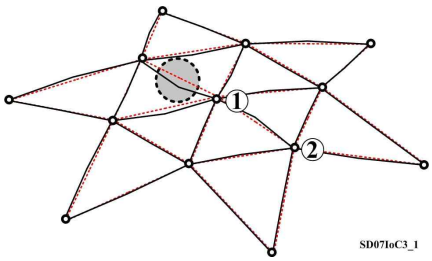


(b) 좌굴현상

그림 2.2.6.27 다자유절점 공간구조물의 좌굴경로 (BCP, β=1.3)

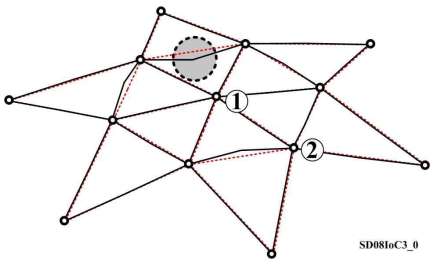


(a) 좌굴모드

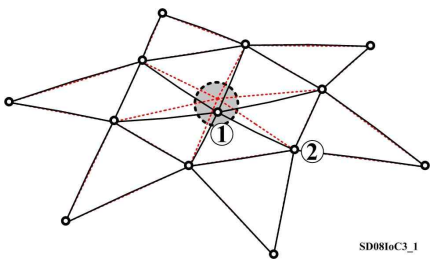


(b) 좌굴현상

그림 2.2.6.28 다자유절점 공간구조물의 좌굴경로 (BCF, β=0.7)



(a) 좌굴모드



(b) 좌굴현상

그림 2.2.6.29 다자유절점 공간구조물의 좌굴경로 (BCF, β=0.8)

표 2.2.6.4 스타돔 모델의 휨강성 비 β 에 따른 좌굴형태와 유효좌굴길이계수

	β	유효좌굴길이계수	좌굴형태		β	유효좌굴길이계수	좌굴형태
BCP 모델	0.6	1.194	부재좌굴	BCF 모델	0.1	0.829	부재좌굴
	0.7	1.192	부재좌굴		0.2	0.838	부재좌굴
	0.8	1.194	부재좌굴		0.3	0.848	부재좌굴
	0.9	1.185	부재좌굴		0.4	0.846	부재좌굴
	1.0	1.180	부재좌굴		0.5	0.834	부재좌굴
	1.1	1.185	부재좌굴		0.6	0.829	부재좌굴
	1.2	1.192	부재좌굴		0.7	0.818	부재좌굴
	1.3	-	절점좌굴		0.8	-	절점좌굴
	1.4	-	절점좌굴		0.9	-	절점좌굴
	1.5	-	절점좌굴		1.0	-	절점좌굴

표 2.2.6.4는 스타돔 모델의 좌굴의 종류와 부재좌굴이 발생하는 경우에 대한 압축재의 유효좌굴길이계수를 계산하여 나타내었다. BCP 모델의 경우는 유효좌굴길이계수가 약 1.19이며, 단일 압축부재의 양단핀조건의 계수보다 높은 값을 나타내고 있다. BCF 모델의 경우는 약 0.83이며, 단일 압축부재의 양단고정일 때의 계수보다도 높은 값을 가진다. 또한 육각뿔

모델에서 나타난 0.64-0.71보다 더 큰 값을 가진다. 경계조건이 힌지로 구성된 경우는 양단 힌지 단일 압축재의 유효좌굴길이보다 길게 나타나며, 고정단으로 구성된 경우는 육각뿔 모델보다 크게 나타나지만 유사한 결과로 판단된다.

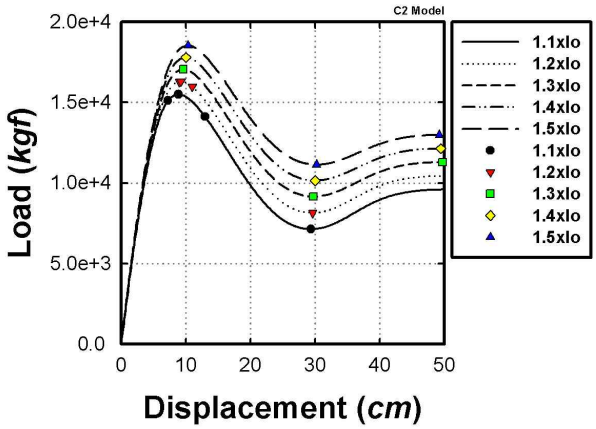


그림 2.2.6.30 β에 따른 스타돔 모델의 임계점과 평형곡선 (BCP model)

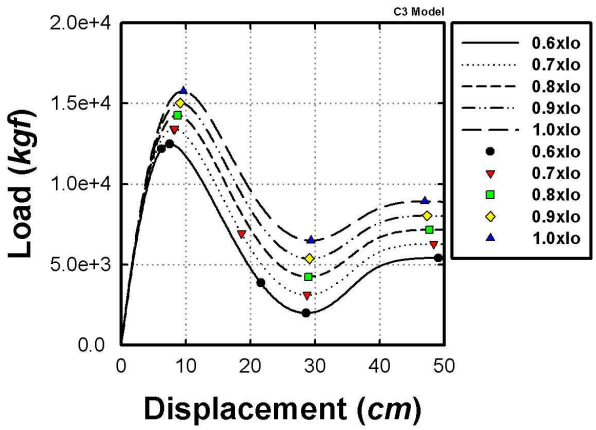


그림 2.2.6.31 β에 따른 스타돔 모델의 임계점과 평형곡선 (BCF model)

비선형 평형경로에서 이러한 결과의 특징을 살펴보면, 부재좌굴이 발생하는 경우에는 특이점이 극한점 이전에 나타나며, 절점좌굴이 나타나는 경우에는 극한점이 임계점이 된다. 따라서 부재의 강성이 증가할수록 절점좌굴이 우세하며, 낮을수록 부재좌굴의 영향이 크다. 또한 부재좌굴이 발생하는 경우는 평형곡선의 극한점에 도달하기 이전에 분기점에서 불안정 거동을 예상할 수 있다. 핀절점 스타돔 모델의 불안정 현상에서도 절점좌굴과 전체좌굴의 관계는 임계점 이전의 분기점의 존재유무와 상관관계가 있으며, 서로 다른 형태의 좌굴의 발생가능성에 대해서 접선강성행렬의 고유치해석과 특이점의 관찰은 특정한 좌굴의 발생을 예상할 수 있다.

마. 링형 돔 구조물의 좌굴하중과 분기현상

라이즈-스팬 비 μ(=H/2L)에 따른 공간 트러스 모델의 좌굴하중과 하중레벨의 특성에 대해서 다루기 위해서 2링 스타 돔 모델과 하나의 링을 더 추가한 그림 2.2.6.32의 3링 스타 돔

공간 트러스 구조물을 고려하기로 한다. 부재의 재원은 모두 동일하며, 기하학적 형상의 변화에 대해서는 절점이 모두 구면에 위치하며, 분할된 링은 구면에서의 등각으로 분할된다.

라이즈-스팬 비 μ=H/2L와 더불어 2링 스타 돔 모델에 대해서 하중 파라메타 즉, 정점에 해당되는 1번 절점과 2-7번 절점인 링 절점간의 하중 비($R_L = P_r/P_c$)로 정의된 하중 파라메타를 이용하여 분기 특성을 분석한다. 여기서, 라이즈 스팬 비 μ는 값이 작을수록 얕은 구조물이 된다. 또한, P_c와 P_r은 각각 가운데 절점과 링 절점의 수직하중이며, R_L이 1을 초과하는 경우는 링 절점 하중이 큰 경우이고, 미만의 경우는 가운데 절점하중이 큰 경우이다.

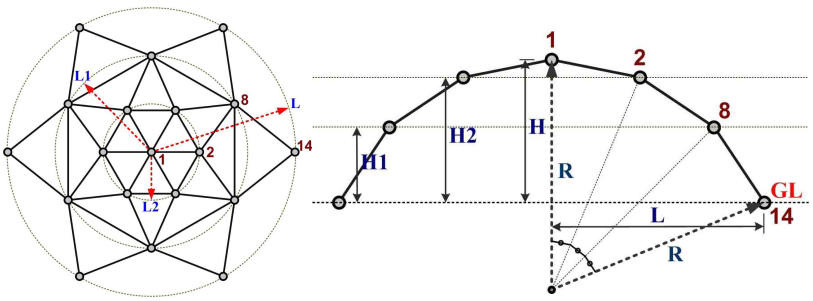
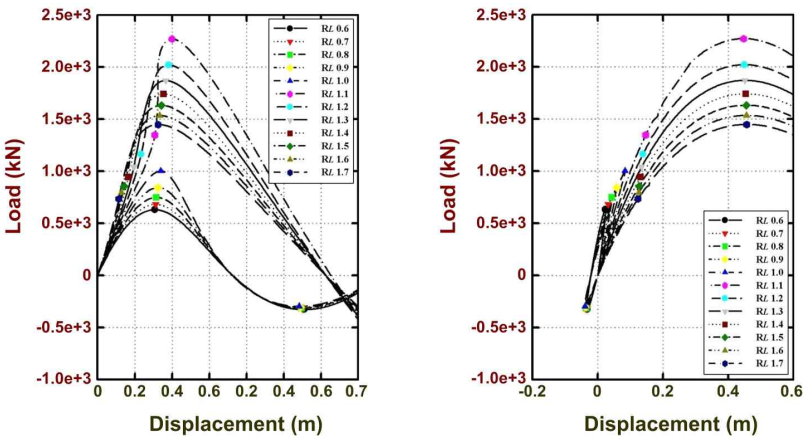


그림 2.2.6.32 3링 돔 모델

그림 2.2.6.33는 $\mu = 0.15$일 때의 하중-변위곡선이며, 그림의 (a)와 (b)는 각각 가운데 절점인 1번과 링 절점인 2번에 해당하는 수직변위이다. 여기서 곡선상의 다각형 점들은 임계점을 나타내고, 분기점은 극한점 이전에 나타나는 점들이다. 이 모델은 하중 파라메타 $R_L \leq 1.0$에서는 모두 분기점이 발생하지 않았고, 가운데 절점과 링 절점은 극한점 이후 진행방향이 반대가 되었다. 그러나 $R_L \geq 1.1$의 경우는 두 절점모두 극한점 이전에 분기점이 존재하며, 극한점 이후의 두 절점의 진행방향은 동일하다. 이것은 구조물의 불안정 현상이 전체좌굴의 발생을 의미하며, 분기점에서의 거동은 절점좌굴로 이어질 것이다. 또한, 분기점이 발생하지 않은 모델에서와는 달리 링 절점에서의 절점 좌굴 현상이 나타날 것으로 예상된다.



(a) Node 1-Dz (b) Node 2-Dz

그림 2.2.6.33 스타 돔 모델의 하중-변위 곡선 (μ=0.15)

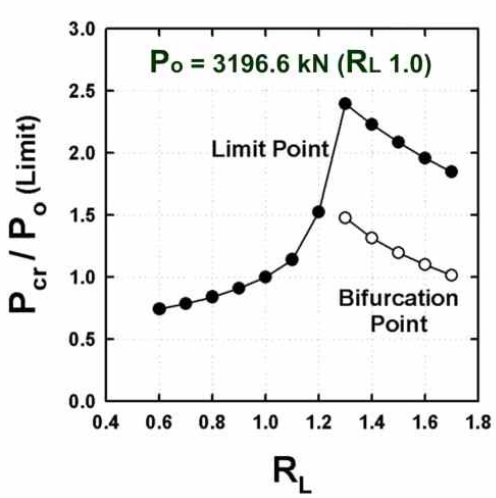


그림 2.2.6.34 스타 돔의 극한점에 대한
분기점 하중레벨 비(μ=0.25)

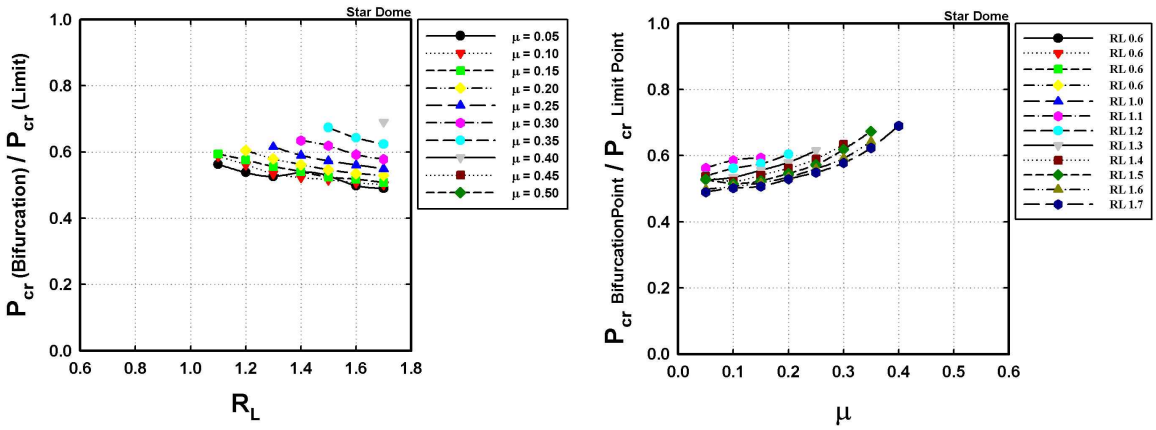


그림 2.2.6.35 스타돔 모델의 극한하중에 대한 분기하중 레벨 비율

분기점이 발생하는 R_L의 경계점은 그림 2.2.6.34에서 보는 것과 같이 나타나고, 그림에서 보는 바와 같이 $\mu=0.4$에서는 R_L=1.7에서만 분기점이 나타났다. 또한 $\mu=0.45$ 를 넘는 모델에서는 나타나지 않았다. 즉, 분기점은 μ가 클수록, 그리고 R_L이 낮을수록 발생이 억제될 것이다. 이것은 형상이 높을수록 전체좌굴보다는 국부좌굴이 발생할 위험성이 높아질 것이며, 가운데 절점 좌굴에 의해서 전체적인 불안정 현상으로 진행될 것이다. 또한, 링 절점의 하중이 가운데 하중보다 상대적으로 작으면 작을수록 절점좌굴이 발생할 것이고, 분기점을 포함하고 있는 전체좌굴이 발생하는 R_L에서는 초기 형상불완전성에 따라 분기거동이 나타날 것으로 예상된다. 분기좌굴의 발생 영역에 대해서 좌굴하중은 극한점의 하중레벨과 비교해서 약 50-70%의 값으로 나타났다.(그림 2.2.6.35)

3링 스타돔 모델의 물성치 및 조건은 2링 스타 돔 모델과 동일하다. 여기서 다루게 될 하중 파라메타는 정점의 하중 및 첫 번째 링의 하중 두 번째 링의 하중을 각각 1:1:2의 비율을 채택하여 각 라이즈-스팬 비에 따라 좌굴하중의 특성을 살펴보도록 한다. 여기서 채택한 하

중비율은 절점에 할당되는 구면의 표면적 비에 비교적 유사한 값으로 정의된 것이다.

3링 스타 돔 모델에서도 극한점 이전에 분기점이 발생하였으며, 분기점에 대한 하중레벨은 다음 그림에서 보는 바와 같이 극한점의 하중레벨과 비교해서 약 80-90%의 범위로 나타났다. 또한 라이즈-스팬 비 μ의 증가에 따라 극한점과 분기점의 하중레벨도 또한 증가하였다. 이와 같은 결과는 스타 돔 예제와 유사한 결과이며, 두 모델 모두 하중 모드에 따른 영향도 클 것으로 생각된다.

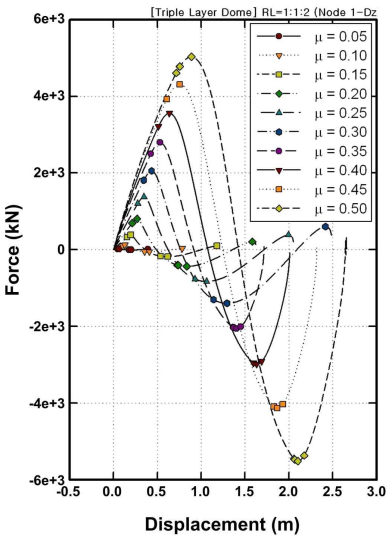


그림 2.2.6.36 3링 모델의 하중변위 곡선 (1-Dz)

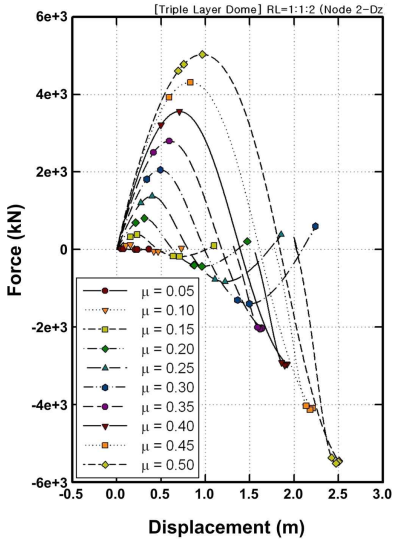


그림 2.2.6.37 3링 모델의 하중변위 곡선 (2-Dz)

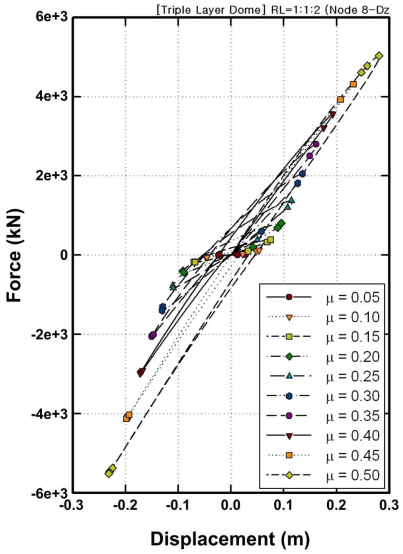


그림 2.2.6.38 3링 모델의 하중변위 곡선 (8-Dz)

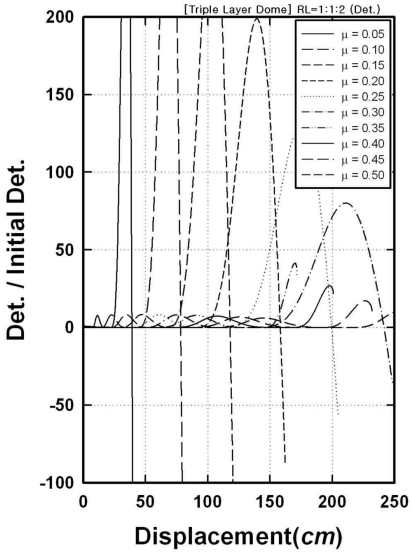


그림 2.2.6.39 3링 돔 모델의 행렬식 곡선

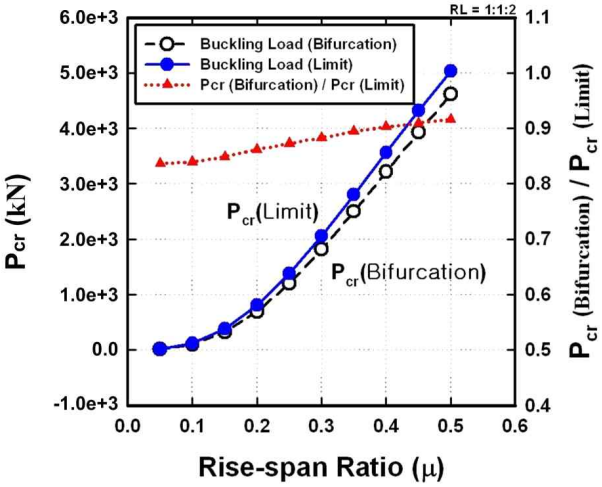


그림 2.2.6.40 3링 돔 모델의 좌굴하중 레벨 및 분기하중 비율

형상 불완전성에 민감한 공간 트러스의 비선형 거동은 주로 임계점에서 분기경로로 거동을 한다. 이것은 국부절점과 전체좌굴 사이를 관찰함으로서 설명되어질 수 있지만, 좌굴특징을 분리해서 설명하기는 쉽지 않고, 특히 부재가 많은 공간 구조물의 경우는 결정적인 영향을 정의하기가 힘들다. 따라서 본 연구는 초기 형상 불완전을 고려한 공간 트러스의 임계점과 분기거동 및 좌굴하중 특성을 비교적 잘 규명하기 위한 해석적 연구를 수행하였다. 평형경로 상의 분기점 및 고유모드에 따른 분기거동에 대해서 접선강성행렬의 행렬식과 고유치 해석을 수행하였으며, 임계점과 외력에 대한 좌굴하중 레벨을 구하였다. 고유모드에 따른 경로의 분기와, 절점좌굴 및 전체좌굴과의 비교적 명확한 현상의 고찰을 위해 2개의 자유절점 모델을 이용하였으며, 스타 돔(2링) 모델 및 3링 돔 모델과 같이 링의 수를 늘려서 정점에서의 절점과 전체 구조물 사이에서의 분기점 발생 여부를 관찰하였다. 임계점에서 동적 뜀좌굴이 발생하는 2-자유절점 모델의 형상불완전성에 따른 민감함은 고유모드에 따라 분기거동을 하였으며, 좌굴하중은 불완전 량의 증가에 따라 감소하는 결과를 얻었다. 해석모델에서 나타난 두 가지 좌굴패턴은 자유절점의 움직임과 민감성에 따라 결정되었고, 분기점이 있거나 없거나 간에 비선형 불안정 거동은 비대칭 고유모드가 가장 큰 영향을 주었다. 특히, 극한점 이전에 절점좌굴로 인한 분기거동을 살펴보기 위한 스타 돔 모델의 해석결과에서는 형상 높이가 높을수록 전체좌굴보다는 정점의 국부좌굴이 우세하고, 하중 파라메타 값이 클수록 평형경로 상에서 분기점을 수반하는 전체좌굴이 발생하였다. 또한, 좌굴하중은 스타 돔의 경우 극한점 하중레벨의 약 50-70%에 달하였고, 3링 모델의 경우는 구조물의 좌굴하중레벨이 평형경로의 극한값에 대해 약 80-90%의 범위에 해당된다. 마지막으로 본 논문의 좌굴거동해석은 기존문헌과 비교하여 만족할 만한 결과를 얻었으며, 공간 트러스의 분기거동 및 좌굴하중을 얻을 수 있으므로 실제 구조물에 적용하여 안정된 구조설계를 할 수 있다.

7. 솔라패널 삼각 격자 곡면 형상설계 프로그램

가. 개발 프로그램의 목적, 범위 및 개념도

비정형 곡면과 삼각형 그리드 형상설계 프로그램은 본 과제에서 진행하는 그리드 형상 구조물을 보다 유연하게 설계할 수 있도록 하나의 완벽한 설계 프로그램을 개발하는데 그 목적이 있다. 본 설계 프로그램은 2차원 기하도형에서부터 3차원의 비정형 곡면까지 설계자가 자유롭게 설계할 수 있도록 프로그램을 개발하고, 설계된 곡면은 격자구조물을 자동으로 생성할 수 있다. 생성된 격자구조물의 구조안정성에 대해서도 역학적 해석 모듈을 제공하여 외력에 대한 구조물의 평형상태를 설계자가 쉽게 알 수 있도록 구성한다. 또한 태양광 전지의 최적곡면과 배치가 가능하도록 발전량 시뮬레이션 모듈을 제공하여 설계된 곡면에 대한 에너지 효율의 정도를 판단하고 분석할 수 있는 툴을 제공하여 곡면을 보다 효율적으로 조절하게 한다.

㉠ 개발 프로그램의 목적과 개념도

아래 그램에서 보는 바와 같은 프로그램의 전체 개념도는 1)기초 프레임워크인 QT기반 GUI, 2)가시효과를 높이기 위한 프로그램 단위모듈, 3)기하학적 정보 데이터베이스 및 일사량관련 데이터베이스 모듈, 4)해석 단위별 프로그램 모듈 (Mesh 및 3D Smoothing, 에너지 효율 시뮬레이션, 구조해석 계산모듈), 5)데이터 변환 모듈로 구성된다. 본 프로그램 개발에 사용된 Opencascade의 기본 표준 지오메트리 포맷인 B-rep 형식을 기본적으로 지원하며 일반 캐드 프로그램과의 데이터 호환을 위하여, STEP, IGES등을 지원 하는 모듈을 지오메트리 커널에 추가하여 효율성을 높였다.

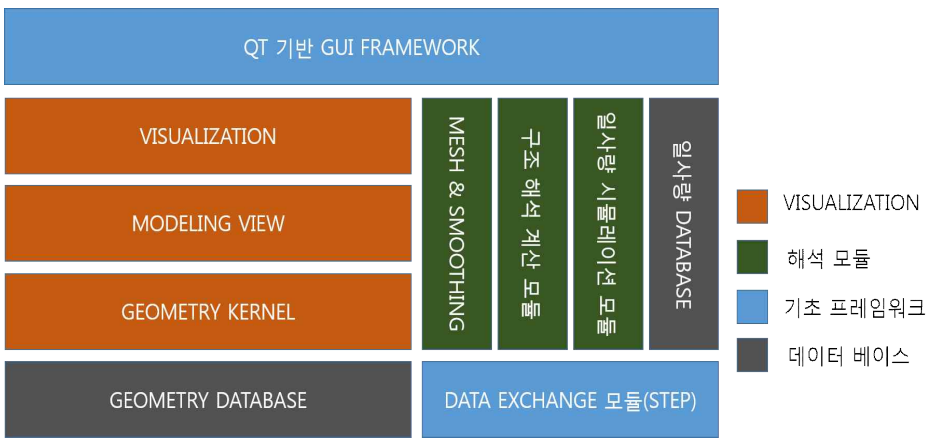


그림 2.2.7.1 비정형 곡면 솔라패널 최적배치 프로그램의 구성

㉡ 데이터 가시화용 프로그램 레이아웃

비정형 구조물의 설계를 위한 프로그램의 레이아웃을 기초단계에서부터 곡면의 3차원 상태를 동시에 표현하여 작업할 수 있도록 개념도에 맞게 구성하였으며, 아래 그램에서 보는

바와 같이 화면상에 나타난 레이아웃을 기반으로 메뉴가 구성된다. 일차원 및 이차원 도형의 직관적인 접근이 가능하도록 메뉴를 구성하도록 하였다. 외부 데이터 변환 모듈이 있기 때문에 타 프로그램의 데이터를 쉽게 화면에서 볼 수 있다. 각 기능에 대한 해석용 모듈에서는 텍스트 기반 데이터를 이용하여 외부에서도 접근이 가능한 모듈로 개발하도록 한다.

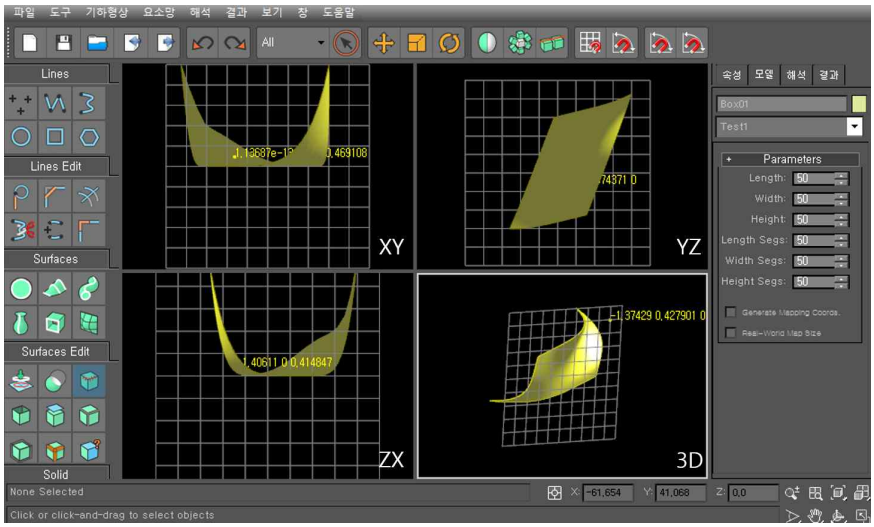


그림 2.2.7.2 비정형 곡면 솔라패널 최적배치 프로그램의 GUI 레이아웃

나. 비정형 곡면 설계 프로그램의 효율 및 특징

비정형 곡면 설계용 개발 프로그램의 특징은 1)QT기반 기본 플랫폼, 2)B-spline과 NURBS를 이용한 곡면형성, 3)들로네의 삼각격자 분할 및 3D smoothing기법, 4)쿼터뷰방식과 직관적인 아이콘 메뉴, 5)외부 해석용 프로그램 제공(솔라패널 에너지 시뮬레이션 모듈, 구조해석모듈) 등이며, 기존의 프로그램의 개발과정에 비해서 비교적 가성비가 높다.

㉠ GUI 용 라이브러리의 특징과 장점.

QT 플랫폼 : 본 프로그램의 기반인 QT는 cross-platform 어플리케이션 ui 플랫폼으로 c++기반의 GUI 라이브러리 이다. 리눅스의 KDE개발을 위해 만들어 졌다. 비정형 곡면 프로그램은 현재는 윈도우 기반의 어플리케이션으로 개발 되어 있지만, 간단한 컴파일 모드 변경으로 리눅스 및 OSX 버전의 프로그램으로 쉽게 컴파일 될 수 있다.

OpenGL : 본 프로그매의 시각화(그래픽)파트는 opengl 기반으로 하드웨어 가속을 통한 고성능 3d 그래픽 이 가능하다. OpenGL(Open Graphics Library, 오픈지엘)은 1992년 실리콘 그래픽스사에서 만든 2차원 및 3차원 그래픽스 표준 API 규격으로, 프로그래밍 언어 간 플랫폼 간의 교차 응용 프로그래밍을 지원한다. 이 API는 약 250여개 가량의 함수 호출을 이용하여 단순한 기하도형에서부터 복잡한 삼차원 장면을 생성할 수 있다. OpenGL은 현재

CAD, 가상현실, 정보시각화, 비행 시뮬레이션 등의 분야에서 활용되고 있다. 또한 컴퓨터 게임 분야에서도 널리 활용되고 있으며, 마이크로소프트사의 Direct3D와 함께 컴퓨터 그래픽 세계를 양분하고 있다. Direct3D와는 달리, 표준안이 여러 관련 업체의 토론과 제안으로 이루어지기에 리눅스 또는 맥OSX에 대한 지원도 가능하다.현재 비영리 기술 컨소시엄인 크로노스 그룹에 의하여 관리되고 있다.

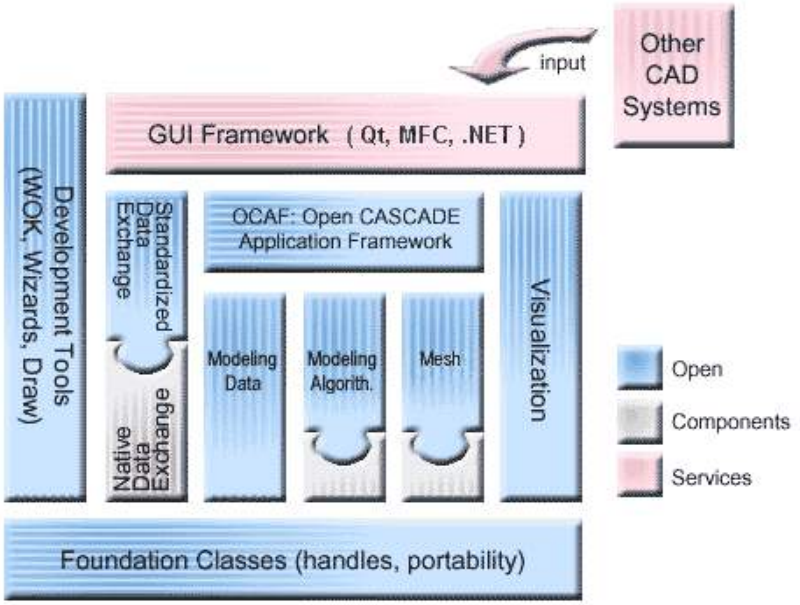


그림 2.2.7.3 OpenCascade의 구조

OpenCascade : 오픈캐스케이드는 3D 캐드 프로그램을 개발할 수 있는 오픈소스 기반의 지오메트리 처리 라이브러리 이다. 다양한 CAD/CAM/CAE 프로그램에서 사용되고 있으며 수치해석 시뮬레이션 프로그램에도 다양하게 이용되어 지고 있다. 오픈캐스캐이드는 크로스 플랫폼을 지원한다. 오픈캐스캐이드는 오픈 소스(LGPL) 기반으로 손쉽게 커스터마이징하여 지오메트리 처리 프로그램을 개발하는데 이용 할 수 있지만, 많은 기능을 포함하고 있어 로딩 속도가 느리고 최적화 되지 않은 영역에 대하여 전체적으로 최신의 캐드프로그램보다 속도가 느린편이다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 구현이 어려운 지오메트리 커널부분 및 데이터교환(STEP,IGES)모듈을 선택적으로 로딩하여 사용하였으며, 그 외의 프레임워크 및 내부 자료 구조는 직접 개발하여 빠른 로딩이 가능하도록 프로그램을 구현 하였다.

㉡ 곡면 설계에서 적용된 기법의 장점

B-spline curve : 는 본 프로그램에서 커브를 그리는데 사용되어진 지오메트리 함수 이다. B-스플라인 곡선 (B-spline curve)은 주어진 여러 개의 점에서 정의되는 부드러운 곡선이다. 각 구간별로 별도의 다항식으로 표현되기 때문에 일부의 제어점을 변경해도 전체 곡선에는 영향을 미치지 않는 성질이 있다. 베지어 곡선과 함께 컴퓨터 그래픽 분야에서 널리 이용된다. B-spline은 Basis spline의 약어로서, 기본적으로 곡선은 제어점을 통과하지 않는다.

제어점을 $\mathbf{P}_i$라 하면, n차의 B-spline곡선은 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{S}(t)=\sum_{i=0}^{m-n-2}\mathbf{P}_i b_{i,n}(t)\ ,\ t\in[t_n,t_{m-n-1}] \quad \text{(D1)}$$

여기서 t_i는 마디(knot)라고 불리는 m개의 실수이다.

$$t_0 \le t_1 \le \cdots \le t_{m-1} \quad \text{(D2)}$$

또한, $b_{i,n}$은 B-스플라인 기저함수(B-spline basis function)이고、de Boor Cox의 점화식에 의해 다음과 같이 정의된다.

$$b_{j,n}(t):=\frac{t-t_j}{t_{j+n}-t_j}b_{j,n-1}(t)+\frac{t_{j+n+1}-t}{t_{j+n+1}-t_{j+1}}b_{j+1,n-1}(t)\ ,\ j=0,\ldots,m-n-2 \quad \text{(D3)}$$

NURBS 곡면 : 넙스(NURBS)란 비균일 유리 B-스플라인(Non-Uniform Rational B-spline)의 약자로서 3차원 기하체를 수학적으로 재현하는 방식 중 하나이다. 2차원의 간단한 선분 원, 호, 곡선부터 매우 복잡한 3차원의 유기적 형태의 곡면이나 덩어리까지 매우 정확하게 표현할 수 있으며 그 편집이 무척 쉽다. 이러한 유연성과 정밀성 때문에 넙스는 그림, 애니메이션이나 곡면의 물체를 생산하는 산업에 까지 다양한 영역에서 사용된다.

넙스 곡면은 차수(degree), 컨트롤 포인트(control points), 매듭(knots), 그리고 계산방식(evaluation rule)에 의하여 제어된다.

차수는 양수인 정수로써 일반적으로 1차,2차,3차, 5차가 사용된다. 넙스로 그려진 원의 경우 2차이며, 대부분의 자유형상곡면은 3차 혹은 5차 이다. 넙스 커브의 위수(order) 또한 양의 정수이며 이것은 차수에 1을 더한 것과 같다. 결과적으로 그 차수는 위수에서 1을 뺀 것과 같다. 한 곡선이 있을 때 이것의 차수를 변경하면, 그 선분의 형태는 변하게 된다.

넙스 곡선은 곡선의 차수에 1을 더한 수 이상의 (degree +1) '컨트롤 포인트'를 가진다. NURBS 곡선의 형태를 바꿀 수 있는 가장 쉬운 방법은 바로 이 컨트롤 포인트들을 움직임으로써 곡면의 형상을 쉽게 변경이 가능하다. 각각의 컨트롤 포인트들은 weight factor를 포함 하여 곡면에 미치는 영향을 적용할 수 있으나 본프로그램에서 모든 컨트롤 포인트논 동인한 weight factor를 갖도록 프로그래밍 되어 있다.

㉢ 삼각격자 메쉬분할 기법의 특징

본 프로그램에서는 일반적인 삼각화에 사용되어지는 들로네 삼각기법을 이용하여 지오메트리를 삼각화 하고, 실제 시공이 가능하도록 삼각화를 스무딩 하는 알고리즘을 개발하여 적용 하였다. 들로네 삼각분할은 평면위의 점들을 삼각형으로 연결하여 공간을 분할할 때, 이 삼각형들의 내각의 최솟값이 최대가 되도록 하는 분할을 말한다



그림 2.2.7.4 삼각 격자 그리드 생성과정

위 그림 (a)와 같이 점들이 있을 때 이 점들을 연결하여 삼각형을 만드는 방법은 (b), (c)와 같이 다양하다. 들로네 삼각분할은 이러한 여러 삼각분할 중에서 (b)와 같이 각각의 삼각형들이 최대한 정삼각형에 가까운 즉, (c)와 같이 길쭉하고 홀쭉한 삼각형이 나오지 않도록 하는 삼각화가 진행된다.

㉣ 비정형 곡면설계의 직관적인 레이아웃과 인터페이스

비정형 곡면 설계 프로그램은 설계자가 편리하게 이용 할 수 있도록 대화 상자를 최소화하고 마우스 조작만으로 비정형 곡면을 설계할 수 있도록 개발 되었다. 쿼터뷰 방식의 드로잉 화면은 XY, YZ, ZX PLANE 과 3D VIEW 모드로 구성된 4개의 작업 화면으로 구성되어 있다. 사용자는 원하는 작업 평면의 뷰를 자유자재로 이동하며 모델링 할 수 있으며, 마우스 조작은 각각의 평면 위에서만 영향을 미치므로 4개의 뷰를 이용하면 아주 직관적이고 손쉽게 모델링을 진행 할 수 있다. 모든 그리기 명령은 [그리기 모드선택] ->[모델 선택 또는 좌표 선택]->[대상모델 선택 또는 대상좌표 선택]->[마우스 우측 버튼 클릭]의 단계로 일관되게 진행 되도록 개발 되었다.

㉤ 해석단위별 모듈 프로그램 환경 제공

텍스트 기반 데이터 모듈을 이용하여 외부 해석용 프로그램과의 단위모듈별 해석결과를 얻을 수 있는 환경을 제공한다. 다양한 해석모듈을 더 부가할 수 있으며, 개발된 모듈에서는 경사진 면의 일사량산출을 통한 곡면의 에너지 효율에 관한 데이터를 얻을 수 있다. 일사량에 대한 데이터베이스를 구축하여 솔라 에너지에 대한 설계곡면의 효률과 배치를 쉽게 판단하여 곡면을 보완하는데 유용하다. 격자 구조물의 구조 안정성에 대한 해석모듈로 구조설계에 대한 기본적인 내력의 상태와 외력에 대한 평형상태를 곡면변화에 따라 쉽게 얻어낼 수 있다.

㉥ 기존 소프트웨어와의 가성비

현재 개발된 프로그램은 기존의 범용적인 캐드와는 개념적으로 다르게 비정형 구조물 설계에 특화된 프로그램이다. 범용캐드들의 많은 설계 및 지오메트리 핸들링 등을 제거 하고 bSpline curve 와 nurbs 곡면만을 지원하도록 하여 아주 경량의 설계프로그램으로 개발하여 적은 용량과 매우 빠른 성능을 보인다.. 기존에는 삼각화 건물을 설계하기 위하여 유한 요소프로그램(ANSYS,PATRAN)등을 이용 하여 삼각화한 후 그 데이터를 geometry 로 변환

후 시공이 가능하도록 손으로 직접 모델링 데이터를 수정하는 수고를 해야 했다. 삼각화를 위하여 유한요소 프로그램을 구매하기에는 매우 고가이고 비효율적 일 수밖에 없으며, 시공 가능한 부재를 만들기 위하여 직접 모델링 하는 데도 많은 시간이 소모 되어 질 수 밖에 없다. 본 프로그램은 비정형 곡면을 갖는 삼각 그리드 면을 설계하는 데에만 중점을 두고 개발되어 많은 기능을 탑재하지 않았기 때문에 아주 저가로 공급이 가능하고 손으로 직접 삼각메쉬를 수행할 필요가 없으므로 작업시간을 기존 방법 대비 1/10이하로 줄 일 수 있다. 뿐만 아니라 주기능 중 하나인 솔라 패널의 최적 배치 기능을 이용 하여, 최적의 에너지 효율을 낼 수 있도록 설계가 가능한 프로그램은 현재는 본 프로그램이 유일하다.

다. 프로그램 레이아웃 및 가시화 영역

그림 2.2.7.5에서 보는바와 같이 개발된 자유 곡면과 삼각형 그리드 형상 설계프로그램(이하 패널디자이너)의 전체 스크린 샷에서 패널 디자이너는 크게 메뉴바, 도구바, 뷰포트레이아웃, 컨트롤바, 상태바, 뷰포트 담색 컨트롤로 구성되어 있다. 파일 메뉴에는 새로운 파일 생성, 파일 열기 및 저장, 다른 이름으로 저장 및 표준파일(STEP)의 임포트 익스포트 관련 메뉴가 존재한다. 편집메뉴에서는 화면에서 객체를 선택하고 편집하기 위한 명령이 포함되어 있으며 UNDO/REDO 기능역시 포함 하고 있다, 도구 메뉴는 화면에 모델링된 개체를 변경하거나 관리하는데 도와주는 명령을 포함하고 있다. 특히 여러 개의 객체를 변경하기 위한 기능들이 포함되어 있다. 그룹 메뉴에는 여러 개가 개체들을 그룹화 하여 이동, 삭제, 스케일 및, 숨기기 나타내기 등을 수행할 수 있도록 하여 화면에 많은 양의 모델이 존재할 때 편집이 용이 하도록 한다. 보기 메뉴에는 다양한 화면 보기 기능들을 제공한다. 쿼터뷰(xy plane,yz plane,zx plane ,iso view) 와 특정 화면을 전체로 확장하는 기능 화면의 줌 기능 등을 포함 하고 있다. 또한 설정 메뉴에서는 선, 면, 입체 등의 객체를 생성 할 수 있는 방법을 제공하며 여러 개의 하위 메뉴로 구성되어 있다.

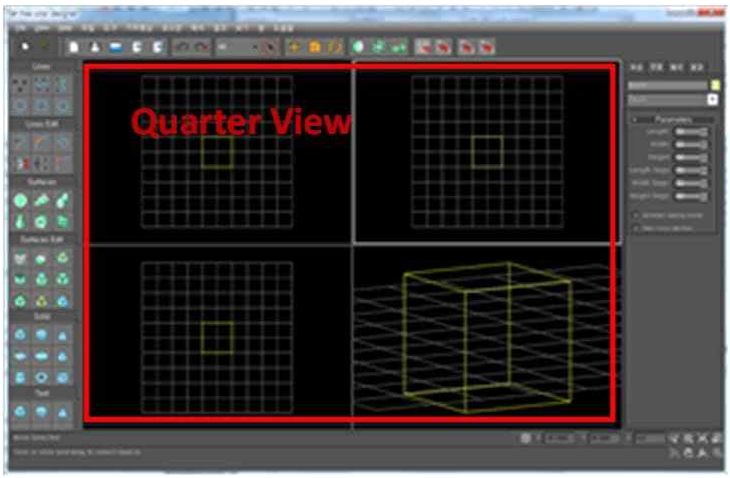


그림 2.2.7.5 패널 디자이너 GUI 레이아웃

라. 패널 디자이너 프로그램 개발의 구성 요소

패널 디자이너 프로그램은 하나의 완전한 설계 프로그램으로서의 기능을 가지고 있다. 3차원 자유곡면 설계 프로그램을 개발하기위해서는 다양한 기술들이 필요 하게 되는데, Geometry Kernel Library, Geometry Display Library, User Interative Modeling, Application Framework, Application Data managemenet System 과 CAD Interface(본연구에서는 Step Import/Export) 등으로 구성된다.

프로그램의 가장 핵심을 이루는 Geometry Kernel 은 20여년 이상 개발되어 사용되어진 프랑스의 Opencascade technology사의 opencascade geometry kernel을 제한 적으로 사용하였다. opencascade geometry 는 LGPL기반의 opensource 라이브러리로써 그 사용에 있어 라이센스적인 제약이 없으며, 20여년간 여러 프로젝트에 운용되어 그 안정성이 보장되고 기능 또한 풍부하다.

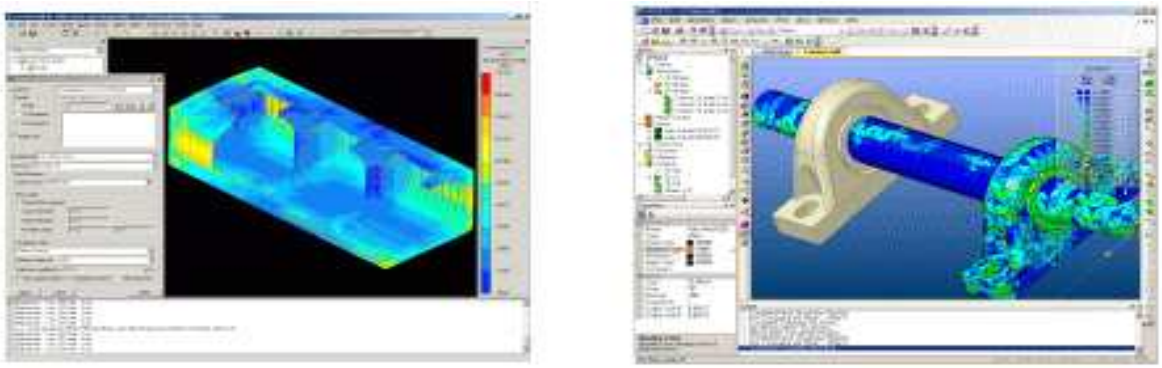


그림 2.2.7.6 Opencascade 적용 사례(RINA3D & MIDASIT)

Application Framework 로 사용된 QT 라이브러리는 컴퓨터 프로그래밍에서 GUI 프로그램 개발에 널리 쓰이는 크로스 플랫폼 프레임워크이다. 서버용 콘솔과 명령 줄 도구와 같은 비GUI 프로그램 개발에도 사용된다. 그래픽 사용자 인터페이스를 사용하는 경우에는 Qt를 위젯 툴킷으로 분류한다.

노르웨이 회사 트롤텍에 의해서 개발되었으며, 주로 C++를 주로 사용하지만, 파이썬, 루비, C, 펄, 파스칼과도 연동된다. 수많은 플랫폼에서 동작하며, 상당히 좋은 국제화를 지원한다. SQL 데이터베이스 접근, XML 처리, 스레드 관리, 단일 크로스 플랫폼 파일 관리 API를 제공한다.

3차원 그래픽 라이브러리로 사용된 OpenGL(Open Graphics Library, 오픈지엘)은 1992년 실리콘 그래픽스사에서 만든 2차원 및 3차원 그래픽스 표준 API 규격으로, 프로그래밍 언어 간 플랫폼 간의 교차 응용 프로그래밍을 지원한다. 이 API는 약 250여개 가량의 함수 호출을 이용하여 단순한 기하도형에서부터 복잡한 삼차원 장면을 생성할 수 있다. OpenGL은 현재 CAD, 가상현실, 정보시각화, 비행 시뮬레이션 등의 분야에서 활용되고 있다. 또한 컴퓨터 게임 분야에서도 널리 활용되고 있으며, 마이크로소프트사의 Direct3D와 함께 컴퓨터 그래픽 세계를 양분하고 있다. Direct3D와는 달리, 표준안이 여러 관련 업체의 토론과 제안으로 이루어지기에 버전 업데이트는 느린 편이다. OpenGL은 현존하는 대부분의 캐드 시스템에서 그래픽 처리를 위해 사용되어 되어 빠른 3D 하드웨어 가속을 지원함으로써 대규모 3D 모델

랜더링에 있어서 필수적으로 사용되어 진다.

특히 패널 디자이너 개발에 있어서는 OpenGL 을 이용한 Color Coding 기법을 적용 하여 빠른 마우스 피킹을 구현 하였다.

사용자가 모델링한 3차원 기하형상의 데이터는 프로그램 내에 데이터 형태로 저장되는데 3차원 데이터의 저장은 그 자료형이 매우 다양하고 복잡하여, 데이터 저장과 처리에 어려움이 많이 발생하게 된다. 본 과제를 수행함에 있어서 이러한 복잡한 데이터를 처리하기 위한 데이터 저장을 위해서 프로그램 메모리 내에서 동작하는 라이브러리 형태의 관계형 데이터베이스 시스템을 개발 하였으며 이 관계형 데이터베이스 이하(RENADB)는 데이터 정의 툴(그림 2.2.7.3) 을 통한 데이터 스키마의 정의, 데이터 관계 제약의 설정(NULL, CASCADE, DENY), 트랜잭션과 트랜잭션 단위의 UNDO/REDO, SAVE/LOAD 기능을 포함하고 있다. RENADB는 특히 그래픽 데이터 처리에 특화 하여 고성능에 초점이 맞추어져 있다.

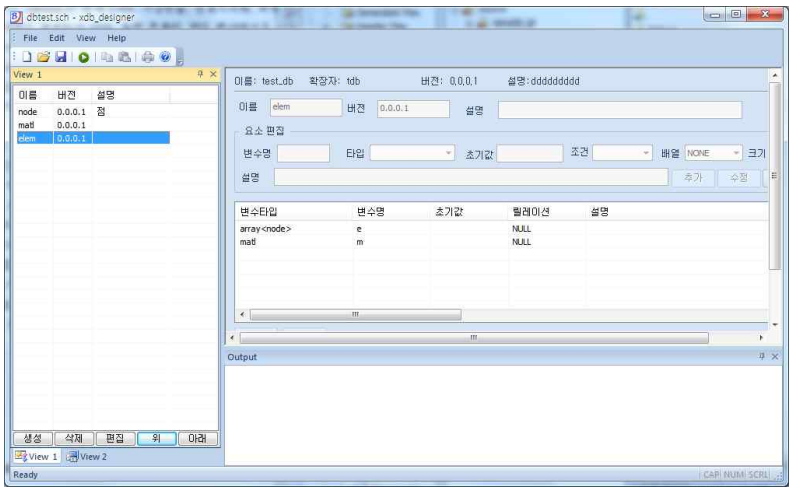


그림 2.2.7.7 RENADB 데이터 스키마 정의 프로그램

데이터 정의 프로그램은 패널 디자이너내부의 자료 구조와 각 데이터 형의 관계를 정의 한다.

삼각 그리드 패널은 xyz 좌표를 갖는 Node 자료로 정의 되며 삼각 그리드 형상은 세개의 Node를 참조 하고 있다. 지오메트리 Shape 형상은 내부에 각 Shape의 타입과 Shape을 정의 하는 수식을 문자열로 저장한다. 데이터 정의 프로그램에서는 프로그램 개발에 필요한 자료형에 대한 소스 코드를 자동으로 생성 한다. 표 2.2.7.1 에서는 패널 디자이너 프로그램에 내부의 자료에 대해서 자동으로 생성되 코드를 보여준다.

표 2.2.7.1 에서는 Node 데이터는 x, y, z 정보와 노드가 생성에 이용된 Shape 의 참조 그리고 Shape 에서의 UV 좌표를 저장 하도록 되어 있으며 Elem 은 여러개의 노드의 참조를 갖을 수 있도록 되어 있다. RENADB의 특징중 하나인 데이터 연관 기능에 의하면, 특정 Node 가 삭제 되면 특정 노드를 참조하고 있는 Elem 역시 같이 삭제되게 되며 , 특정 Shape 이 삭제되면, 순차적으로 Shape을 참조하는 Node 들이 모두 삭제 되고 삭제된 Node를 참조하고 있는 Elem 역시 삭제되어 프로그램 내부의 자료들의 참조 무결성을 유지 할수 있도록 되어 있다. 이와 같은 동작은 DB에서 Cascade Relation이라고 하는데, RENADB는 Deny,Null Relation역시 지원 한다. Deny 제약 조건은 참조하는 데이터가 존재하는 데이터가 삭제될 시에 삭제실패가

발생 하며, Null 제약 조건은 참조 하는 데이터의 삭제된 데이터부분에 0이로 채워지게 된다.

표 2.2.7.1 RENADB로부터 생성된 패널 디자이너 자료 코드

```
class qo_Shape : public XData
{
public:
  unsigned int type;
  Blob shape;
}

#pragma pack(push,1)

class qo_Elem : public XData
{
public:
  std::vector<accessor<qo_Node> > element;
}

class qo_Node : public XData
{
public:
  float x;
  float y;
  float z;
  accessor<qo_Shape> base;
  float u;
  float v;
  bool hard;
}
```

마. 패널 디자이너 프로그램 기능 목록

메인 도구 상자에는 가장 빈번하게 사용되는 기능을 프로그램 상단에 위치하게 하여 설계자가 작업 시에 마우스 동선을 최소화 할 수 있도록 한다.

표 2.2.7.2 메인 도구 상자

	되돌리기, 다시 실행 : 명령의 전 단계로 되돌리거나 다시 앞 단계로 되돌리는 기능이다.
	선택 : 객체를 선택하는 기능으로 마우스를 통해 사각형 선택, 자유곡선 선택, 다각형 선택 기능이 포함되어 있다.
	객체이동, 크기조절, 회전기능으로 x,y,z축의 통제가 가능하다.
	객체복사 : 선택한 객체를 입력한 개수만큼 이동, 회전, 크기 조절하여 복사한다
	그리드 스냅 : 객체를 통제할 때 화면의 그리드에 스냅 기능을 활성화 한다. 각도 스냅 : 객체를 회전할 때 30°씩 스냅을 활성화 한다.

뷰포트 네이게이션 바는 프로그램 우측 하단에 위치하고 있으며 화면 조작에 사용되는 기능들을 모아 놓은 도구 상자 이다.

표 2.2.7.3 뷰포트 네비게이션

	선택된 화면 확대 및 축소
	모든 화면에 대해서 확대 축소를 수행한다.
	선택된 객체를 중심으로 전체 화면 확대
	모든 객체를 중심으로 전체 화면 확대
	카메라 기준으로 Frustrum 초점 거리 이동
	화면의 이동
	화면의 회전
	쿼터뷰 화면을 선택한 화면으로 대체 또는 전체 화면을 쿼터뷰 화면으로

바. 패널 디자이너 프로그램의 기본 모델링 기능

패널 디자이너 프로그램은 다양한 2차원 및 3차원 상에서 선과 면으로 요소의 모델링 기능을 포함 하고 있다. 그림 2.2.7.8 는 geometry kernel 인 opencascade 의 shape hirachy를 보여 준다.

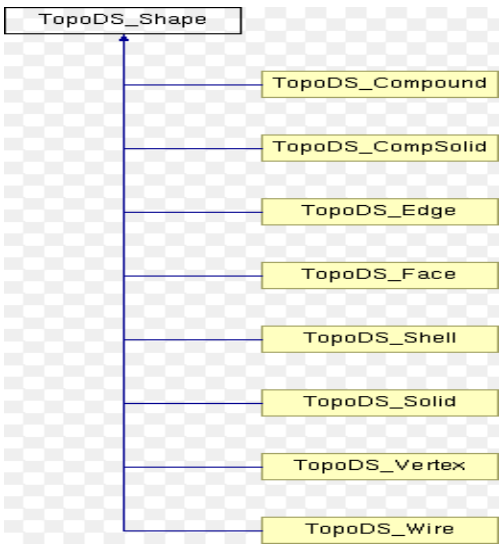


그림 2.2.7.8 Opencascade 의 Shape Hirachy

패널 디자이너 프로그램에서는 솔리드 요소는 필요하지 않으므로 Vertex, Edge, Wire, Face 의 와 Shape 자료 구조만을 이용한다. Vertex 는 하나의 점으로 Geometry를 구성하는 최하단의 Shape 이며 Edge 는 하나의 수식으로 정의되는 선을 의미 한다. Wire 는 1개 또는 여러 개의 Edge의 합을 의미 한다.

Face는 Nurbs 또는 경계있는 평면 또는 곡면등 하나의 수식으로 정의 될 수 있는 곡면을 의미 하며 Shell 은 여러개의 Face가 의 집합을 Shell 로 정의 하도록 하며, 모든 Geometry 요소는 Shape 으로 특정 되어 사용 되어 진다. 그림 2.2.7.9에서는 패널 디자이너 프로그램에서 모델링된 선과 면의 예시이다.

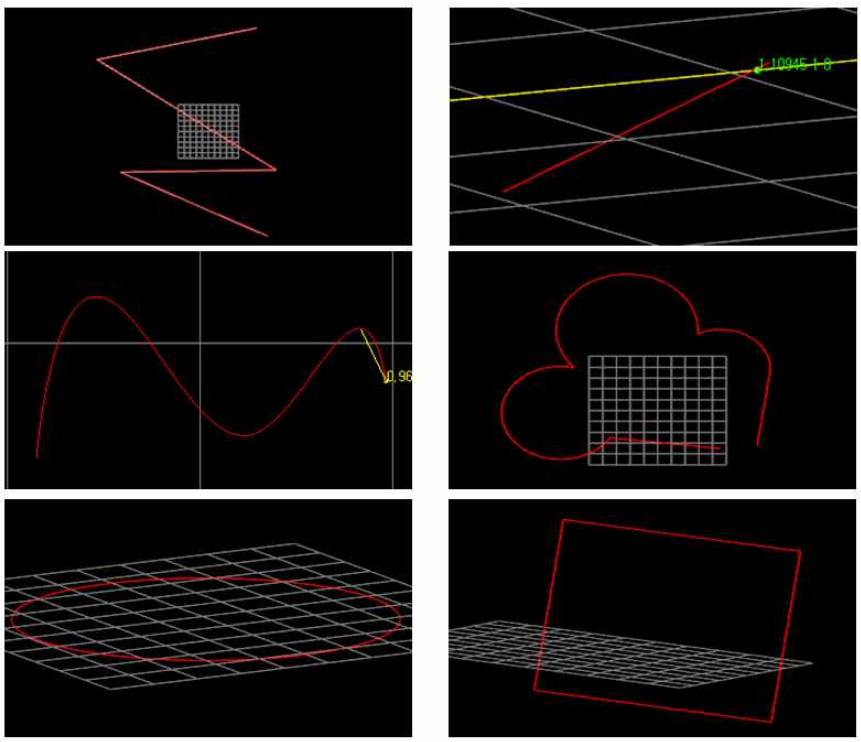


그림 2.2.7.9 패널 디자이너에서 디자인된 Edge 및 Face

직선 그리기 - 좌측의 모델링 도구 상자에서 직선 아이콘을 클릭한 후에 원하는 화면에 그리고자 하는 직선을 그린 뒤에 마우스 오른쪽 버튼을 클릭하면 직선이 완성된다. 멀티라인 아이콘의 경우 좌측 마우스를 클릭할 때 마다 연결된 직선이 생성된다. 우측 마우스를 클릭하면 멀티라인 그리기가 완료 된다.

곡선 그리기 - 곡선은 기본적으로 3차수의 B Spline Curve를 기리도록 되어 있다. 직선 그리기와 마찬가지로 좌측 마우스를 계속 클릭 하면 클릭점을 통과 하는 3차 BSpline Curve를 생성 한다. 두 점을 클릭하여 생성할 경우 1차 BSpline Curve 가 생성되며 생성 결과는 직선이다. 우측 마우스 클릭은 커브 그리기 명령을 종료 한다.

원 그리기 - 원은 총 3가지 방법으로 그릴수 있다. 원점과 반지를을 이용하는 경우 첫 번째 마우스 입력은 원의 중점이 되며 두 번째 마우스 입력 좌표는 원이 지나는 한 점이다. 두 번째 입력된 평면위에 첫 번째 점을 중심으로 하고 두 번째 점과 첫 번째 점의 거리를 반지름으로 하는 원을 생성한다. 두 점을 지나는 원 및 세 점을 지나는 원을 그릴 수 있다.

다각형 그리기- 다각형은 2가지 방법을 제공하는데 첫 번째로 여러 번의 마우스 입력을 받아 각 입력된 좌표를 연결하여 다각형을 생성한다. 두 번째 방법은 변의 개수와 다각형의 원점 그리고 그 다각형이 지나는 한 점을 입력 받아 N다각형을 생성 할 수 있다.

선 연장 기능은 선의 한 끝점을 선택 후 연장 버튼을 클릭하면 꼭짓점의 Tangent방향으로 선의 길이를 연장 한다. 연장된 선은 다른 Shape 과 충돌할 때 까지 연장 되며 충돌하지 않을 경우 길이는 1000으로 고정 되도록 되어 있다.

교차선 분할 기능은 여러 개의 선을 선택 하면 각각의 선이 교차하는 지점을 이용하여 각각의 선분을 분할한다.

선 병합 기능은 서로 끝점이 맞닿아 있는 선을 선택한 후 병합을 선택하면 두 선이 하나이 선으로 병합된다. 병합된 선은 Edge 로 구성되지 않고 Wire형태로 구성된다.

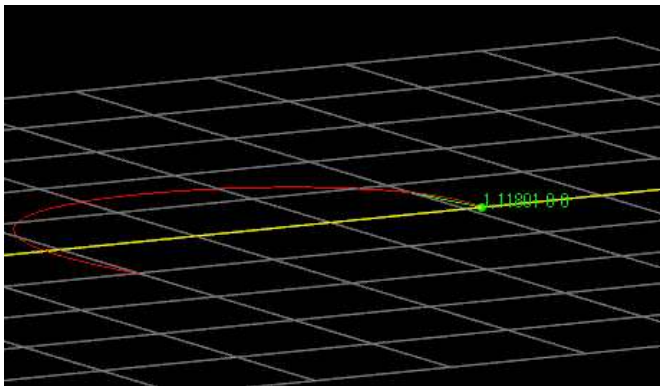


그림 2.2.7.10 그리드 스냅 기능

패널 디자이너는 그리드에 의한 Snap 기능을 제공하여 설계자가 보다 쉽게 좌표를 입력할 수 있도록 한다. 그림 2.2.7.10의 초록색 점은 마우스에 의해 snap된 점이다.

사. 패널 디자이너 프로그램의 자유 곡면 모델링 기능

디패널 디자이너 프로그램은 비정형 자유 곡면을 설계하기 위해서 NURBS(Non Uniform Rational B Spline) 지오메트리 표현 방법을 이용 한다. U,V 방향의 컨트롤 포인트의 개수를 설계전에 파라미터로 입력한후 작업 평면에서 사각형의 평면을 생성한 후 각각의 컨트롤 포인트를 X,Y,Z 좌표로 이동하여 원하는 자유 곡면을 생성할 수 있다. 패널 설계 프로그램의 Front View, Top View, Side View 는 화면뿐 만 아니라 마우스 입력도 뷰 영역에서만 조작이 가능 하므로 각각의 뷰를 이동 하면서 마우스 조작을 하면 손쉽게 원하는 형상을 구해 낼 수 있다. 아래의 그림 2.2.7.11을 패널 설계 프로그램을 이용한 자유 곡면의 생성 예이다.

그림 2.2.7.11 은 생성 하고자 하는 자유곡면의 컨트롤 포인트의 개수를 지정 한다. 그림에서는 U,V 에 각 4개씩의 컨트롤 포인트를 생성 하도록 입력 하였다. 두 번째 그림은 자유곡면을 평면에 모델링 하는 단계를 나타 낸다. 사용자는 총 3개의 포인트를 선택 하게 되는데 처음 선택 하는 2개의 점은 nurbs geometry dx방향의 한 변을 나타내게 되며 2번째 점과 3번째 점의 연결은 dy 방향의 변을 나타내게 되어 하나의 4각형 형태의 nurbs geometry를 생성 하게 된다. 생성된 사각면을 서피스 편집 기능을 이용하여 편집을 시작하면 수정 가능한 4X4개의 컨트롤 포인트를 볼 수 있다. 각각의 컨트롤 포인트를 선택한 후 이동을 원하는

평면에서 이동을 하여 원하는 자유곡면을 생성한다. 표 2.2.7.4에서는 생성된 자유곡면의 Control Points(Poles)를 수정 하여 자유곡면을 편집하는 소스 코드 이다.

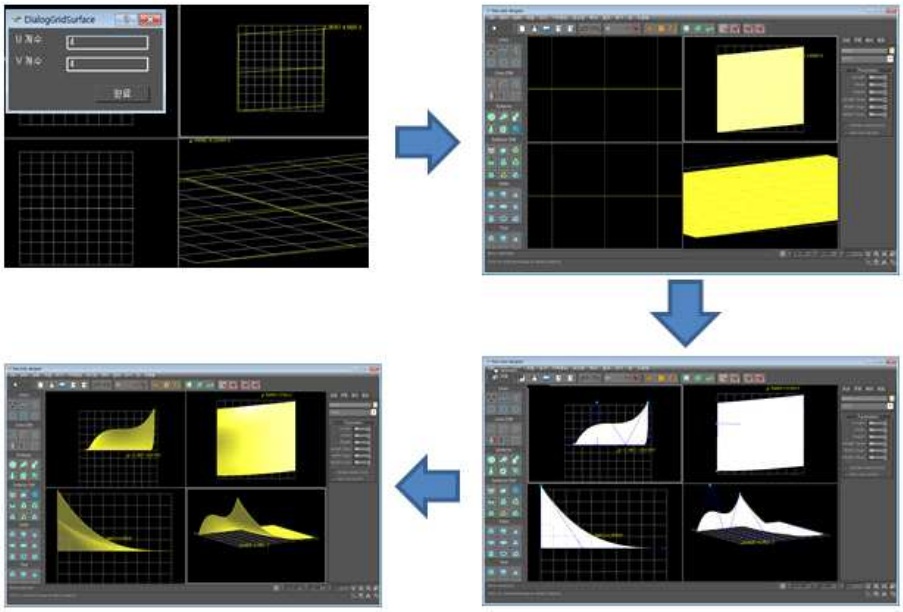


그림 2.2.7.11 패널 디자이너의 자유 곡면 생성 과정

표 2.2.7.4 Control Point 수정에 의한 자유곡면 수정 소스 코드

```
vector<SelectionData> selected;
Selector::getSelectedData(selected , st_shape_face);
if(selected.size() == 0)
  throw exception();
for(int i=0 ; i<selected.size() ; i++)
{
  SelectionData sd = selected[i];
  EditSurfaceCVD d;
  if( ((RenderObject*)sd.data)->shapeType() == TopAbs_FACE )
  {
    d.no = sd.no;
    d.src = (RenderObjectSurface*)sd.data;
    d.dest = new RenderObjectSurface(*d.src);
    d.src->setRenderEnable(false);

    TopoDS_Shape * sh =d.dest->getShape();
    TopoDS_Face face=TopoDS::Face(*sh/*oldShape*/);
    BRepAdaptor_Surface surfAdaptor(face);
    surfAdaptor.Initialize(face);

    Handle_Geom_BSplineSurface bs = surfAdaptor.BSpline();
    int nup = bs->NbUPoles();
    int nvp = bs->NbUPoles();
    d.numUPole = nup;
```

```
        d.numVPole = nvp;
        for( int j=0 ; j<nvp ; j++)
        {
          for( int i=0 ; i<nup ; i++)
          {
            gp_Pnt p= bs->Pole(i+1,j+1);
            srcPoints.push_back(Vector3(p.X(),p.Y(),p.Z()));
            d.poleIndecise.push_back( srcPoints.size()-1 );
          }
        }
        data.push_back(d);
      }
    }
     destPoints = srcPoints;
     gDoc->setSelection(SEL_CONTROL_POINT);
```

아. 패널 디자이너 그리드 형상 설계 결과

패널 디자이너 프로그램은 Delaunay Triangulation을 이용 하여 비정형 자유곡면에 3각 메쉬를 수행 하고 3차원 공간에서 Smoothing을 수행하여 균일한 길이의 삼각형상을 생성해 낼 수 있었다. 생성된 자유곡면에 대해서 그리드의 길이를 파라미터로 입력 받으며, 내부적인 반복 횟수는 10회로 정의 되어 잇다. 10회 이상의 경우 대부분 의미 없는 반복으로 간주된다. 아래의 그림 2.2.7.12은 패널 디자이너를 통한 삼각 그리드 설계 결과 이다.

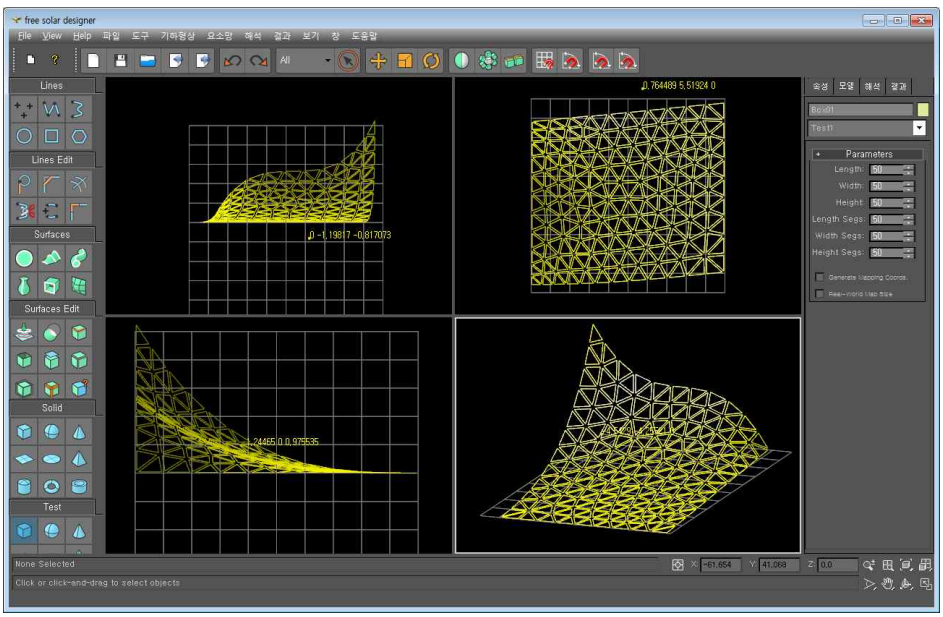


그림 2.2.7.12 패널 디자이너의 그리드 형상 설계 결과

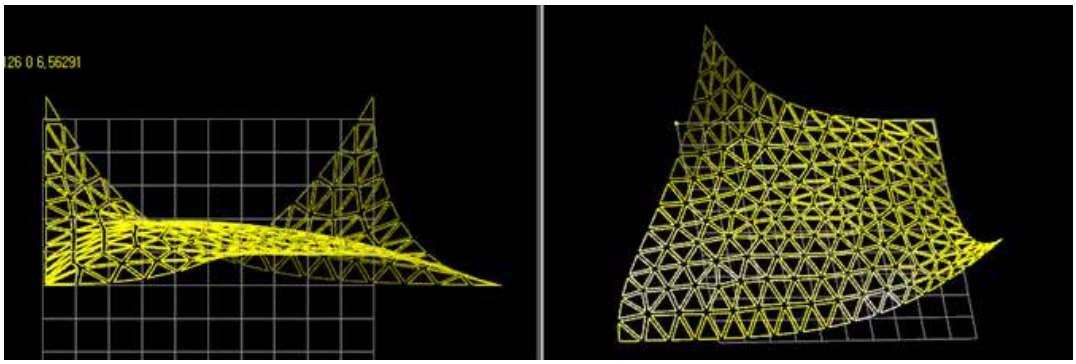


그림 2.2.7.13 패널 디자이너의 그리드 형상 설계 결과

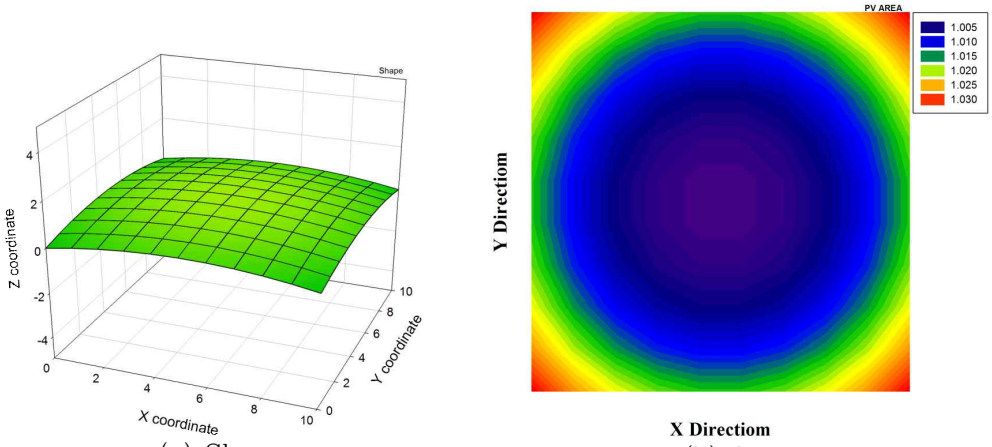
자. 곡면모델의 연간 일사량 계산과 솔라패널 최적형상 검토

비정형 곡면의 최적 에너지 효율을 찾기 위해서 포물선 곡면을 이용하여 일일 일사량을 산출하여 비교하였다. x방향 곡률과 y방향 곡률만을 변수로 하는 대상 곡면의 해석에서 모두 8가지 모델에 대해서 1,4,7,10월 첫날의 1일 일사량을 예측하였다. 8가지 모델은 각각 EP shell, Cylindrical shell 및 HP shell이며, 각 축의 a_0와 b_0의 차이에 따른 일사량 결과를 알아보았다. 곡률이 같은 경우 대상모델의 변화량은 형태가 다르더라도 동일한 양상에 대해서 알아 볼 수 있다. 해석결과는 모두 각 단위면적에 대한 경사진 태양전지에 따른 일사량을 계측한 것으로 계절에 따라서 태양의 방위와 고도에 따라서 다르게 나타나지만 곡률의 변화에 대한 형태의 영향도 쉽게 관측할 수 있다. 파라메트릭 디자인의 경우 설계를 위한 파라메타가 곡면의 형상이 복잡하더라도 비교적 작은 수로 조절이 가능함으로 이에 대한 에너지 효율을 판단하여 최적 곡면을 결정할 수 있다. 본 연구의 예제에서도 단순한 곡률변수 2개에 대한 변화를 살펴본 것으로서 매우 유용한 정보를 제공해 준다.

각각의 모델에 대해서 단면적의 변화는 곡률이 없는 경우에 비해 모두 증가하는 결과를 알 수 있으며, 이에 따른 에너지 생산의 능력의 증가는 당연한 결과이지만 곡면의 방위각과 경사각의 차이에 따른 변화를 살펴봄으로서 형상이 주는 에너지의 영향을 판단하고 이를 이용해서 최적곡면을 판단할 수 있게 한다. 대상 예제의 곡면이 기존의 포물선 함수를 이용하여 표현한 것이므로 기울기의 변화를 쉽게 예측할 수 있으며, 이에 대한 단위 면적의 위상에 대해서 단순하게 정의하도록 한다. 각 변의 최대 길이는 각각 10m로 정의하도록 하며, 모델의 높이는 밑변길이에 대해서 10% 및 30%의 차이에 대해서 살펴보도록 하였다. 분할된 면의 수는 10개로 동일하게 적용되었으며, 예측을 위해서 일출 및 일몰시간 내에 0.1시간 간격으로 계산된 값을 이용하여 일일 일사량을 산출하였다. 대상지역은 북위 37° 위치를 이용하도록 하며, 나머지 형상의 정보는 2.1절에서 다루어진 내용을 토대로 정의하도록 하였다.

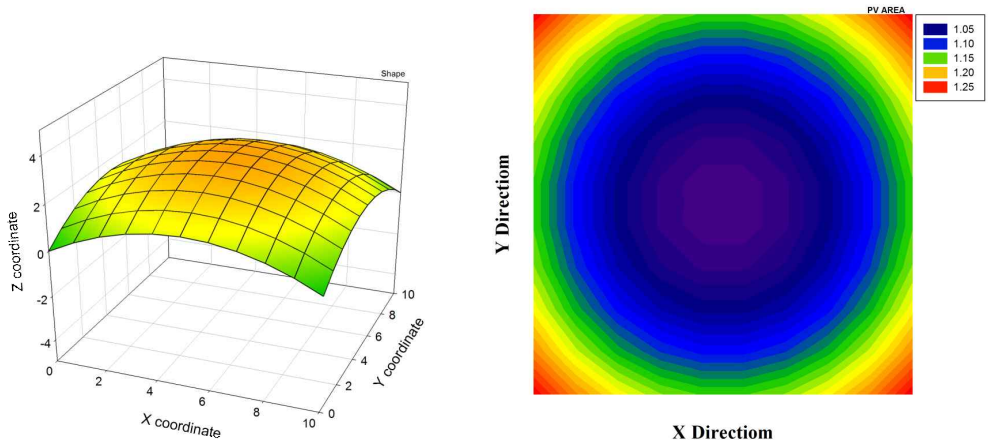
해석된 결과에서 볼 때, EP shell, Cylindrical shell 및 HP shell의 방위각과 경사각에 대한 변화를 잘 나타내고 있으며, 이에 대한 결과를 바탕으로 계산된 일일 일사량의 결과도 합리적인 분포를 보이고 있다. 물론 일사량이 단위 면적당 계산된 결과이므로 면적이 고려된 에너지 축척결과는 다소 차이가 있지만 여기서는 경향만을 살펴보기로 한다.

해석된 결과에서도 1월이나 4월 보다 7월의 일사량 결과가 크게 나타나며, 방위각이 북쪽을 향한 경우는 남쪽을 향한 경우보다 불리한 결과를 얻을 수 있다. 그러나 동쪽과 남쪽으로만 형성된 Cylindrical shell의 경우는 단순히 구조물이 향하고 있는 방위각이 동일함으로 경사각에만 의존하게 된다. EP shell과 HP shell의 경우는 매우 특이한 결론을 유도할 수 있으며, EP shell의 오목 볼록한 형상의 영향은 HP shell의 방향에 따라 변화하는 영향과 유사하다. 요약된 결론으로는 EP shell이나 HP shell의 경우 형상은 다르지만 동일한 곡률의 경우 유사한 일사량 변화가 나타난다. 특히 EP shell의 볼록 곡면모델 $a_0 = -0.06$, $b_0 = -0.06$인 경우는 HP shell의 $a_0 = 0.06, b_0 = -0.06$ 모델의 분포와 유사하고, 오목 곡면모델 $a_0 = 0.06$, $b_0 = 0.06$인 경우는 HP shell의 $a_0 = -0.06, b_0 = 0.06$ 모델의 분포와 유사하다. 즉, EP shell의 오목 또는 볼록 곡면의 형상차이는 HP shell의 위상각의 변화에 따라 나타나는 경향과 유사함을 쉽게 알 수 있다.



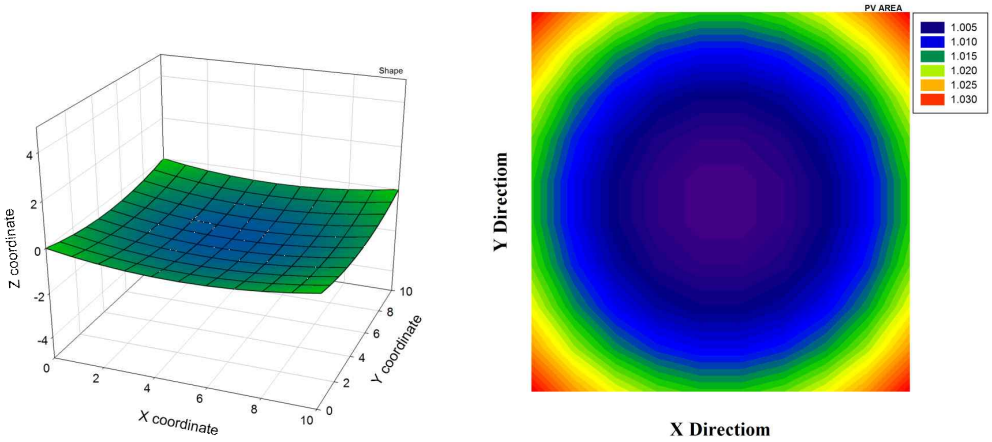
(a) Shape (b) Area

그림 2.2.7.14 Shape and Unit Area of an EP shell ($a_0 = -0.02, b_0 = -0.02$)



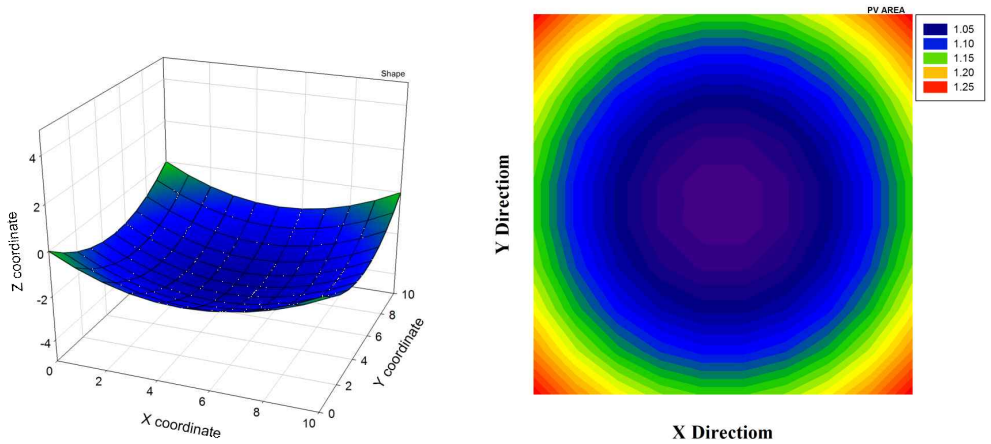
(a) Shape (b) Area

그림 2.2.7.15 Shape and Unit Area of an EP shell ($a_0 = -0.06, b_0 = -0.06$)



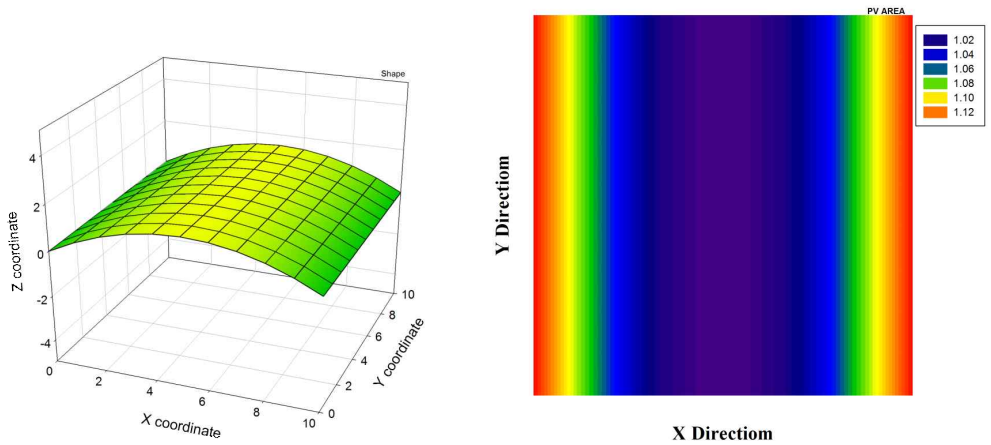
(a) Shape (b) Area

그림 2.2.7.16 Shape and Unit Area of an EP shell ($a_0 = 0.02, b_0 = 0.02$)



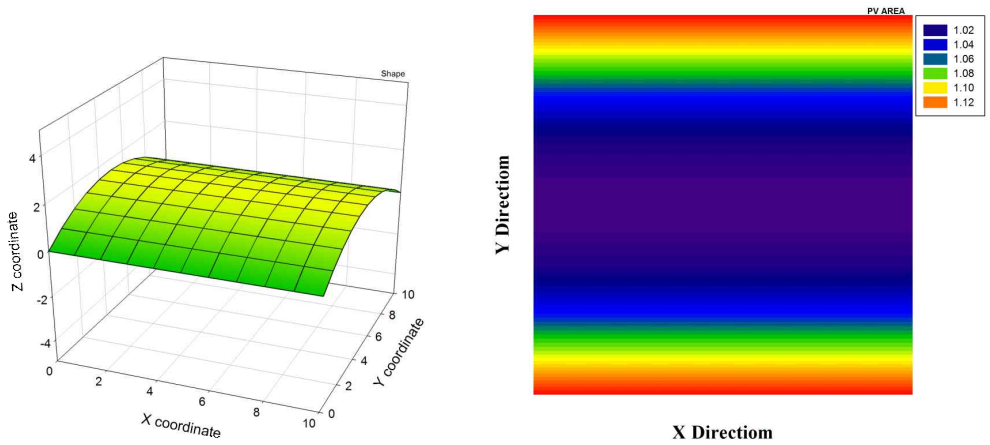
(a) Shape (b) Area

그림 2.2.7.17 Shape and Unit Area of an EP shell ($a_0 = 0.06, b_0 = 0.06$)



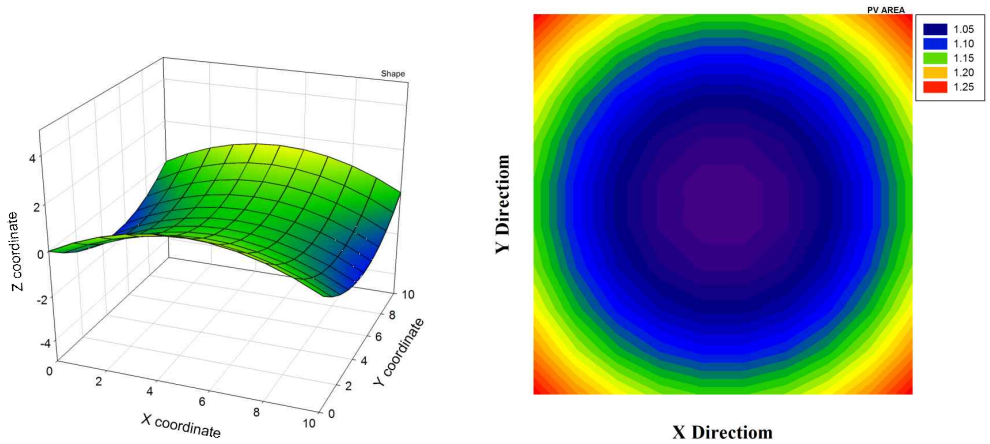
(a) Shape (b) Area

그림 2.2.7.18 Shape and Unit Area of a Cylindrical shell ($a_0 = -0.06, b_0 = 0$)



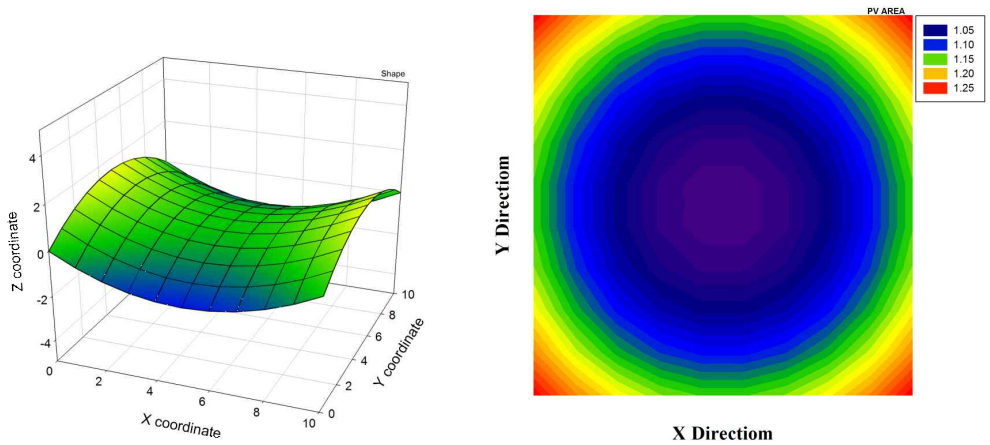
(a) Shape (b) Area

그림 2.2.7.19 Shape and Unit Area of a Cylindrical shell ($a_0 = 0, b_0 = -0.06$)



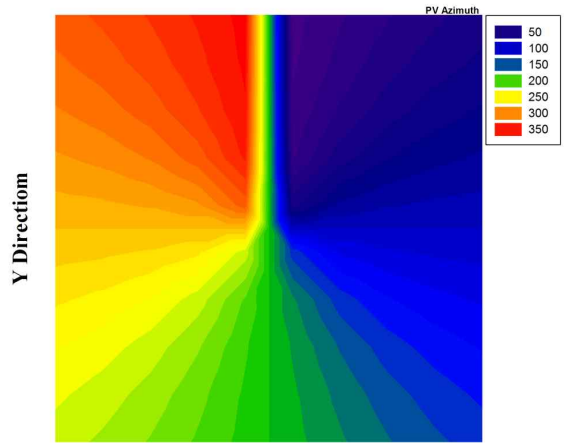
(a) Shape (b) Area

그림 2.2.7.20 Shape and Unit Area of a HP shell ($a_0 = -0.06, b_0 = 0.06$)

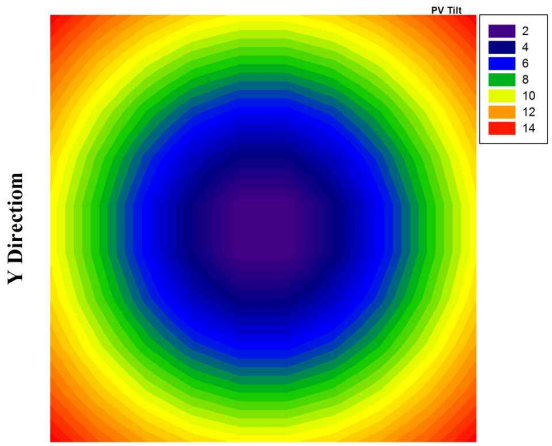


(a) Shape (b) Area

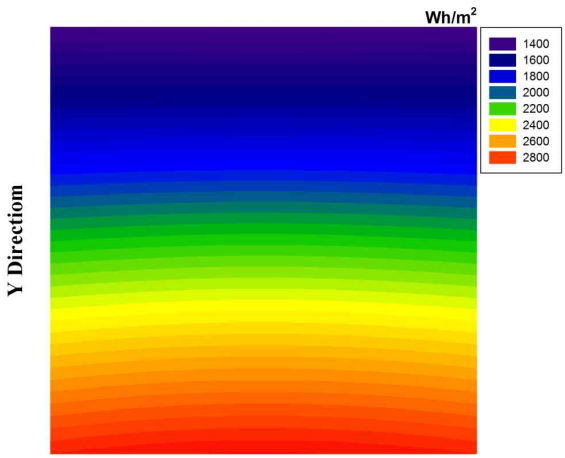
그림 2.2.7.21 Shape and Unit Area of a HP shell ($a_0 = 0.06, b_0 = -0.06$)



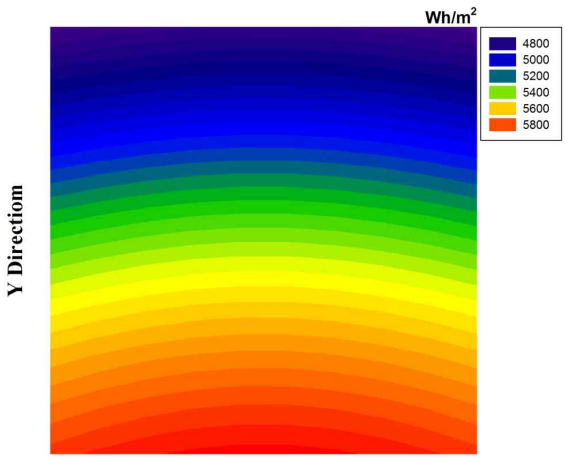
(a) Azimuth angle



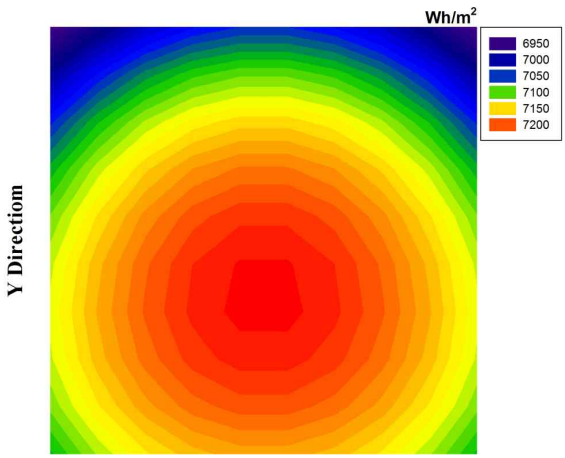
(b) Tilt angle



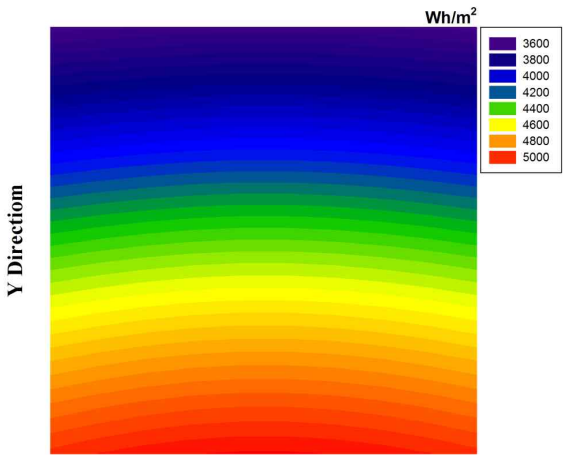
(c) 1th Jan



(d) 1th Apr

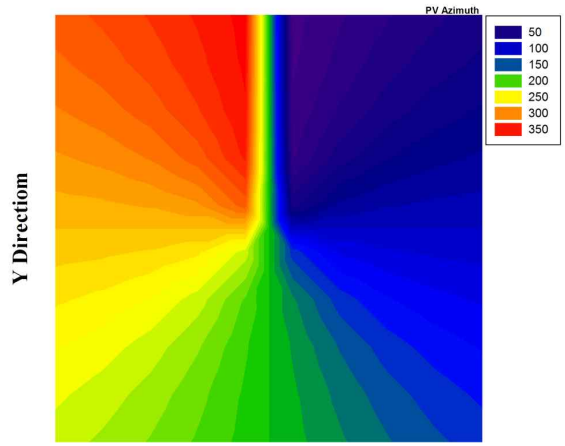


(e) 1th Jul

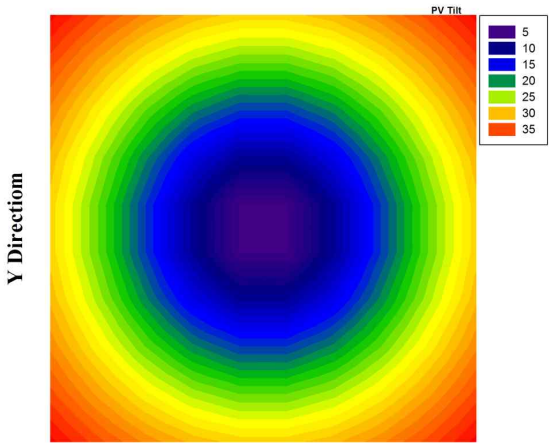


(f) 1th Oct

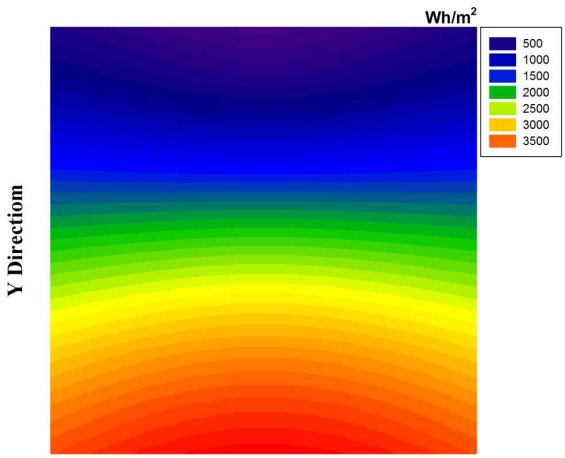
그림 9 Azimuth angle, Tilt angle and Solar irradiation of an EP shell ($a_0 = -0.02$, $b_0 = -0.02$)



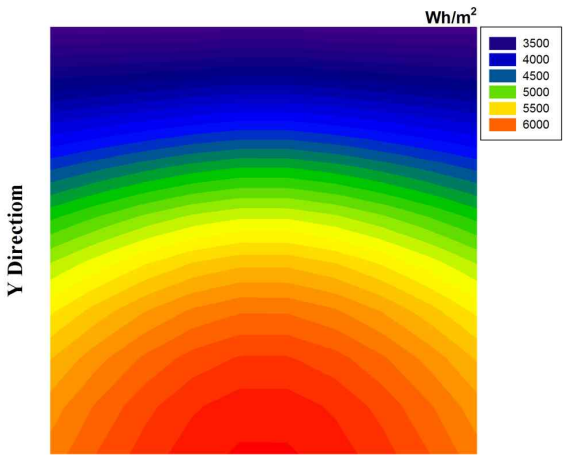
(a) Azimuth angle



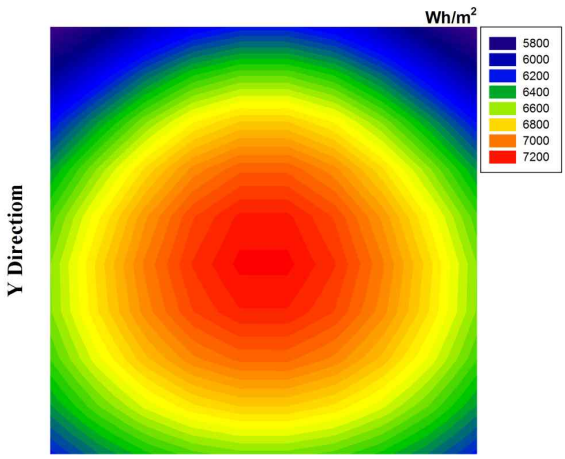
(b) Tilt angle



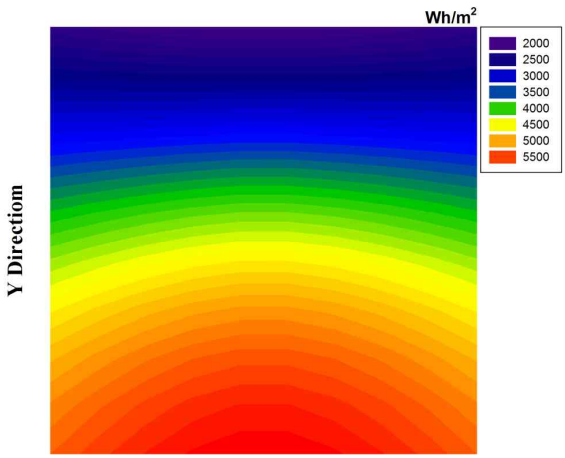
(c) 1th Jan



(d) 1th Apr

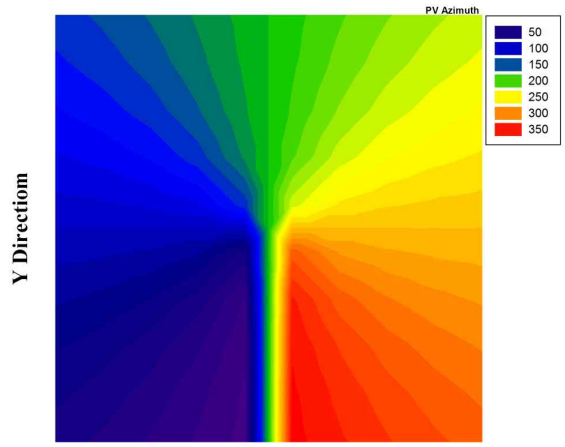


(e) 1th Jul

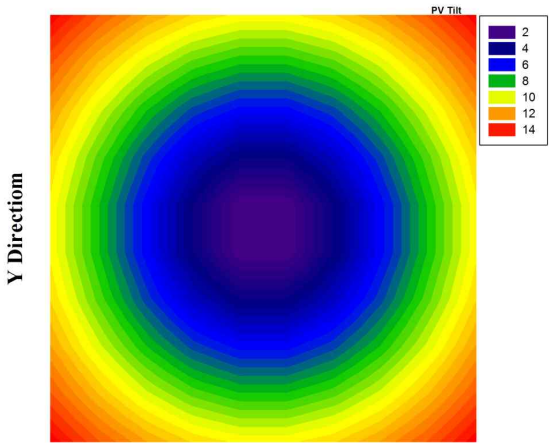


(f) 1th Oct

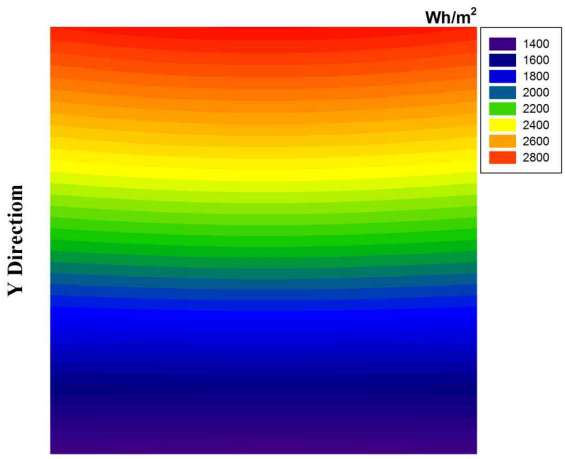
그림 10 Azimuth angle, Tilt angle and Solar irradiation of an EP shell ($a_0 = -0.06$, $b_0 = -0.06$)



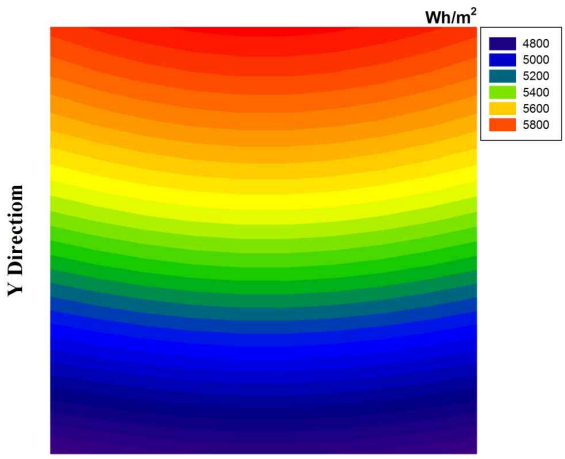
(a) Azimuth angle



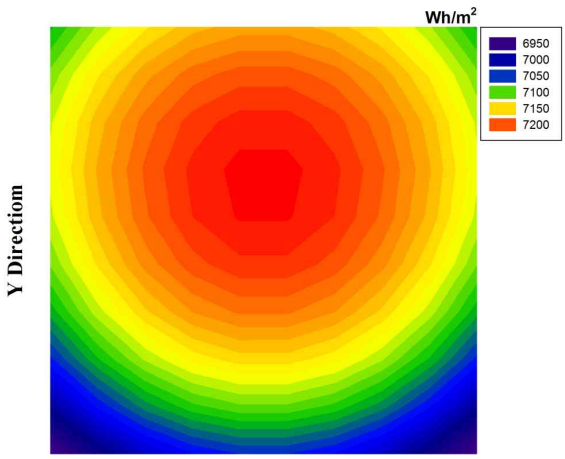
(b) Tilt angle



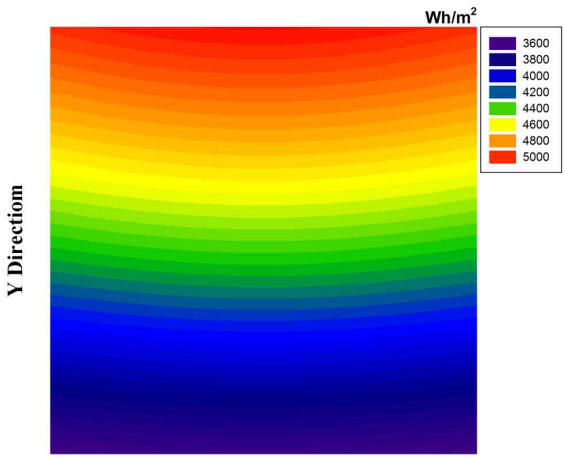
(c) 1th Jan



(d) 1th Apr

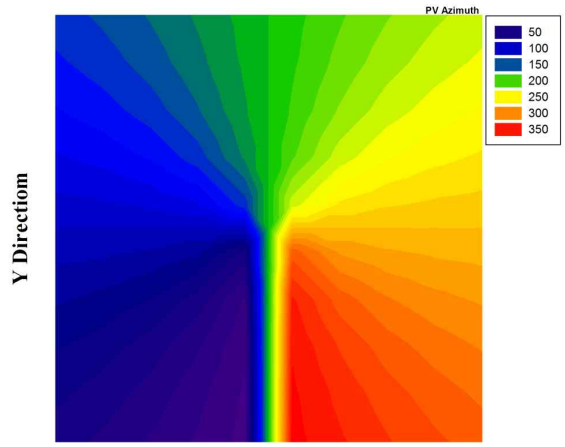


(e) 1th Jul

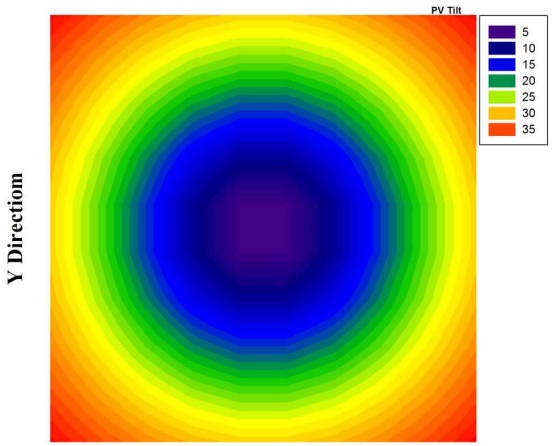


(f) 1th Oct

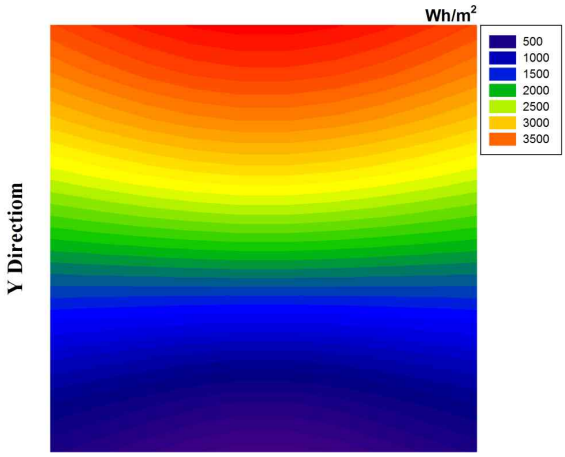
그림 11 Azimuth angle, Tilt angle and Solar irradiation of an EP shell ($a_0 = 0.02$, $b_0 = 0.02$)



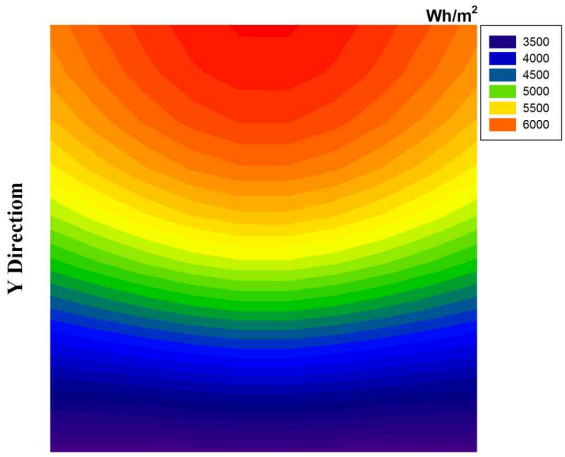
(a) Azimuth angle



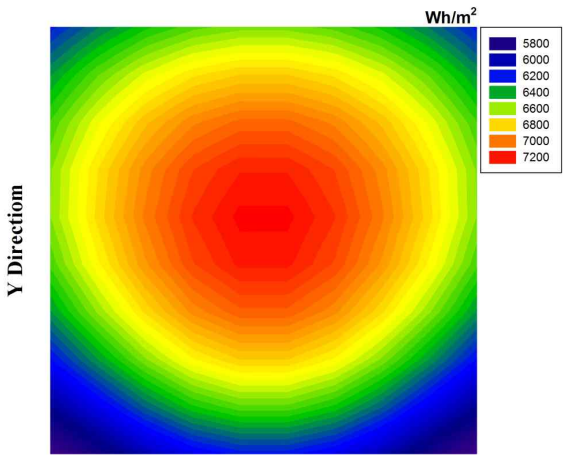
(b) Tilt angle



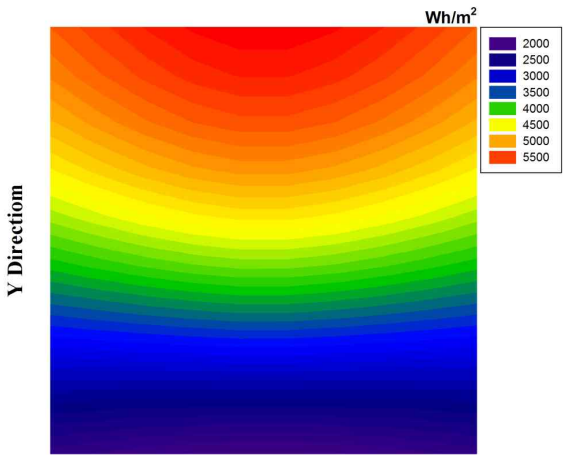
(c) 1th Jan



(d) 1th Apr

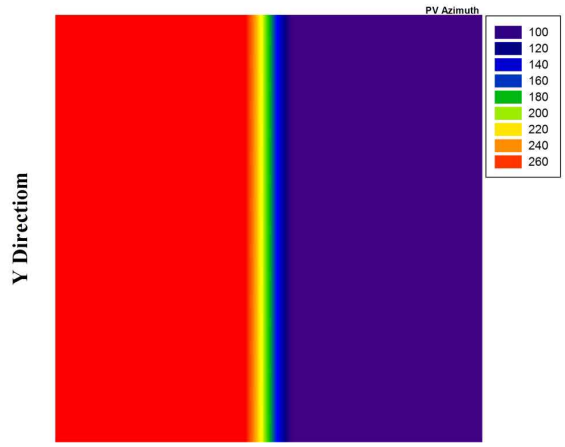


(e) 1th Jul

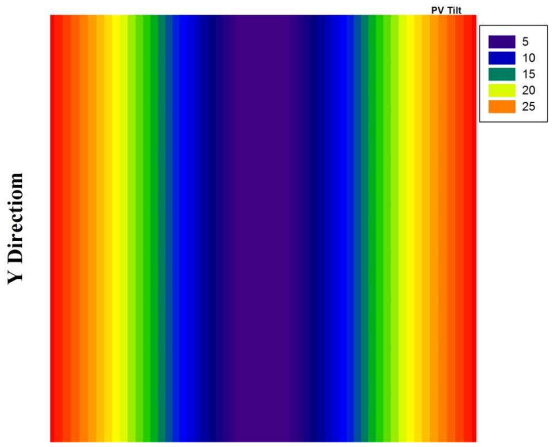


(f) 1th Oct

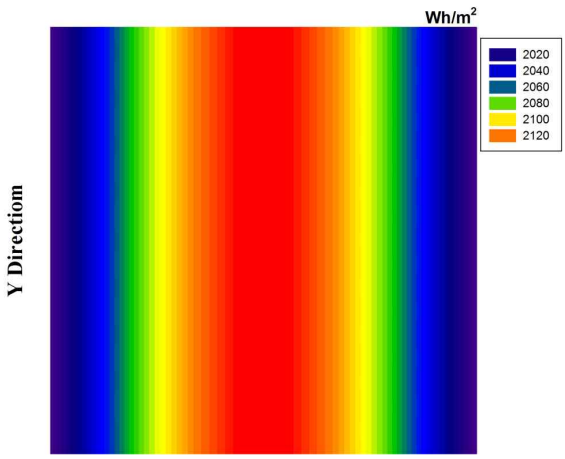
그림 12 Azimuth angle, Tilt angle and Solar irradiation of an EP shell ($a_0 = 0.06$, $b_0 = 0.06$)



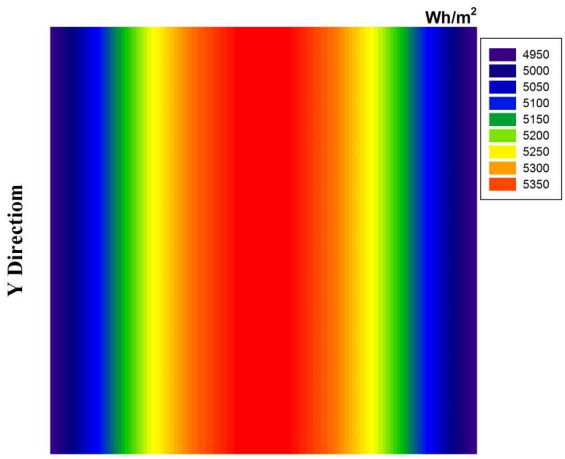
(a) Azimuth angle



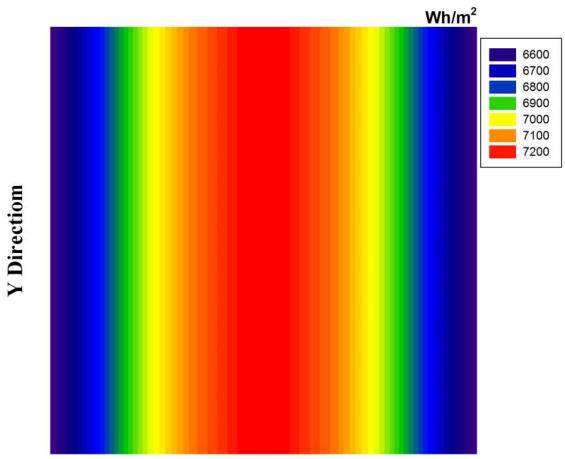
(b) Tilt angle



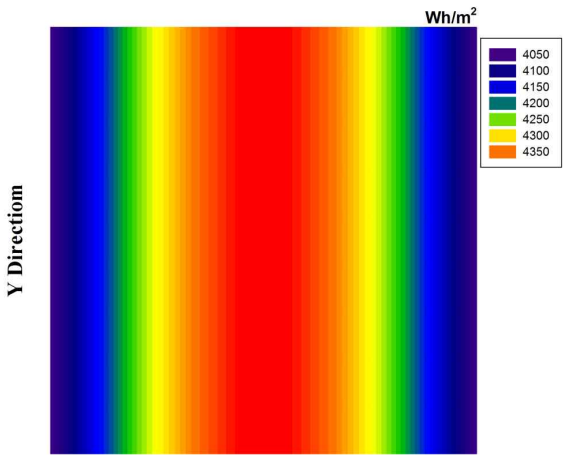
(c) 1th Jan



(d) 1th Apr

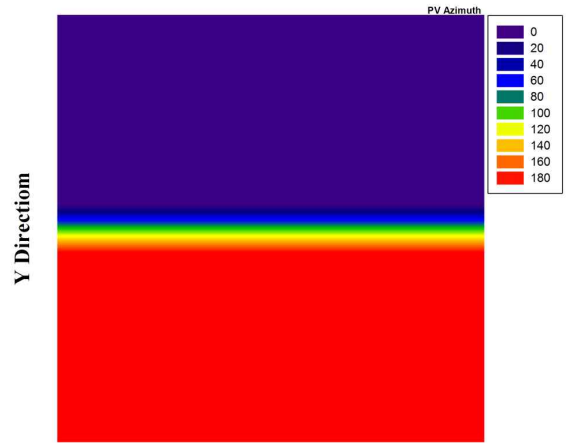


(e) 1th Jul

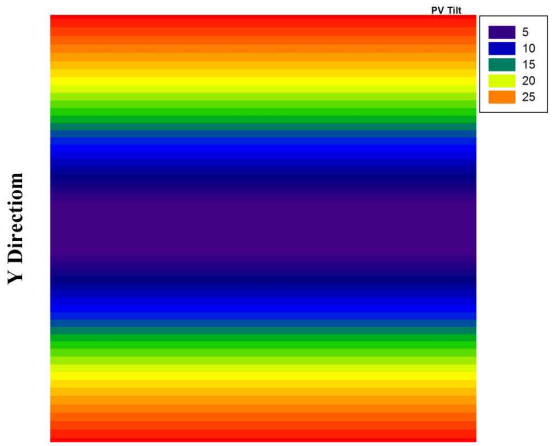


(f) 1th Oct

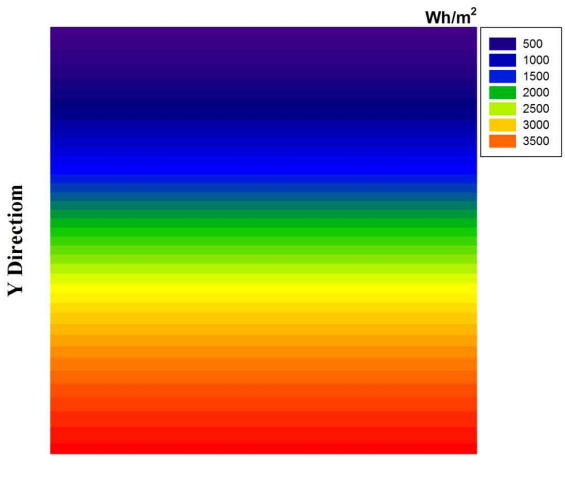
그림 13 Azimuth angle, Tilt angle and Solar irradiation of a Cylindrical shell ($a_0 = -0.06, b_0 = 0$)



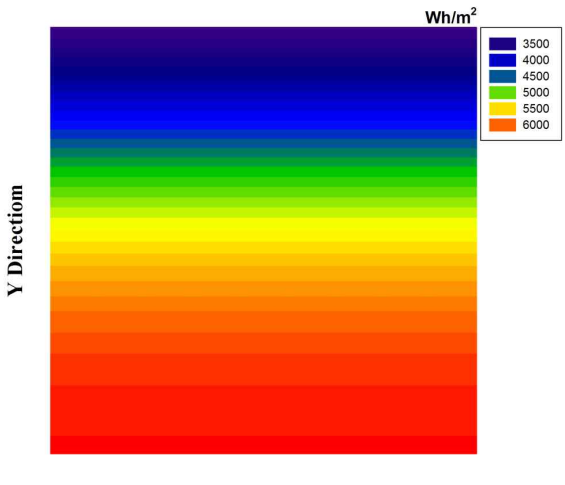
(a) Azimuth angle



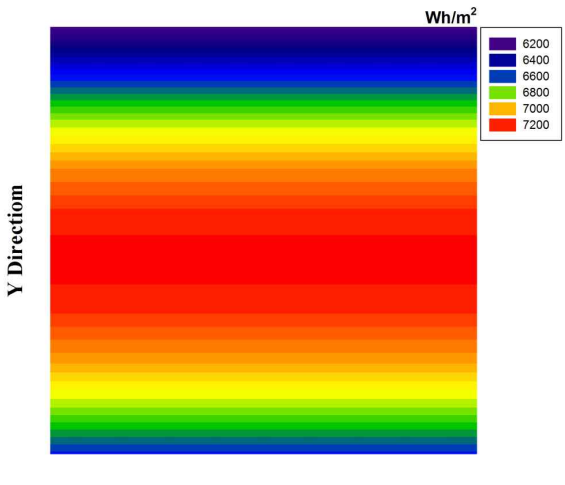
(b) Tilt angle



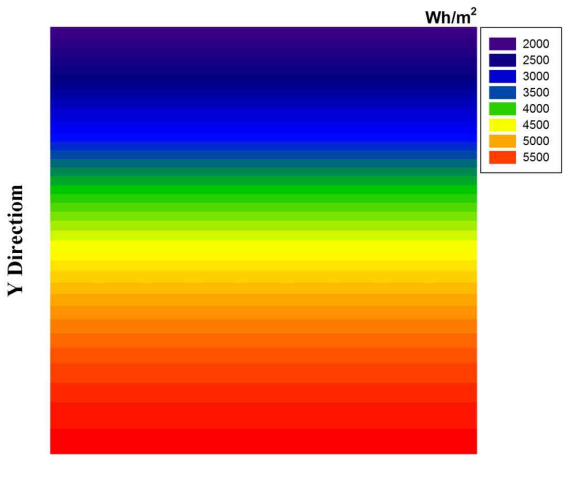
(c) 1th Jan



(d) 1th Apr

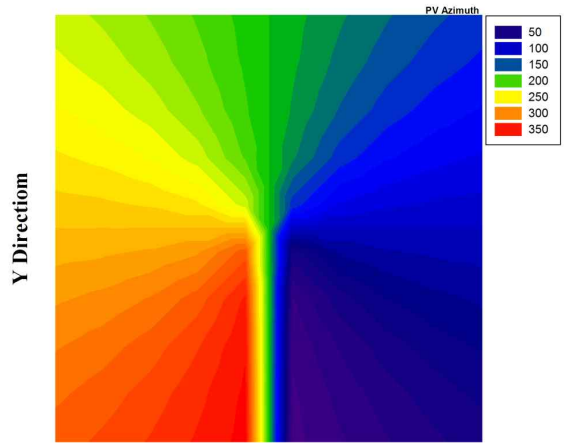


(e) 1th Jul

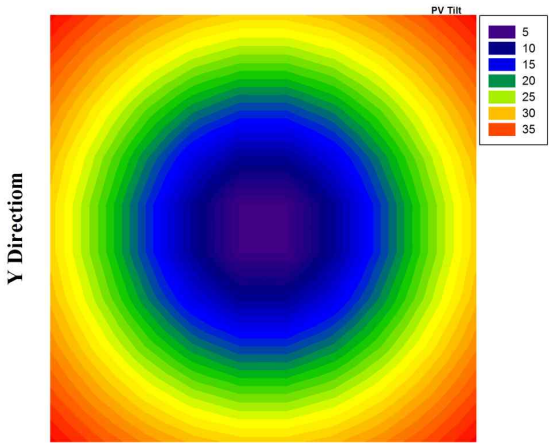


(f) 1th Oct

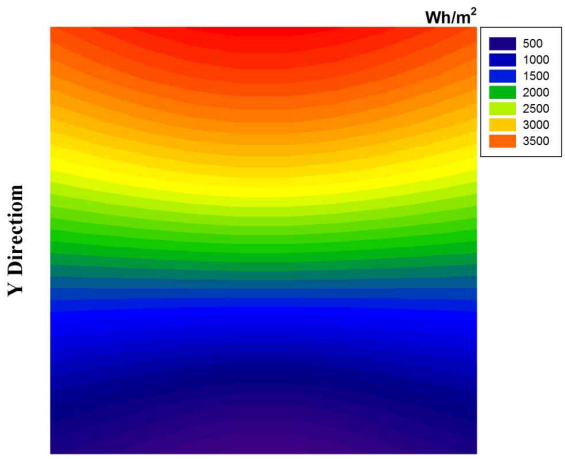
그림 14 Azimuth angle, Tilt angle and Solar irradiation of a Cylindrical shell ($a_0 = 0, b_0 = -0.06$)



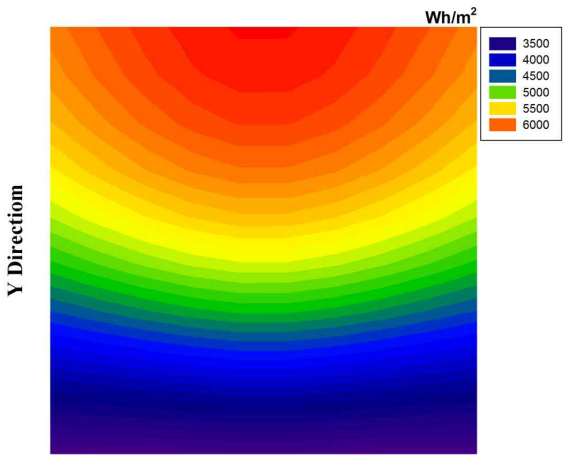
(a) Azimuth angle



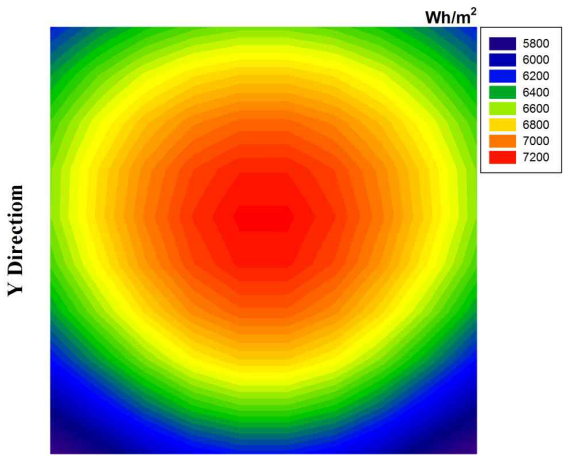
(b) Tilt angle



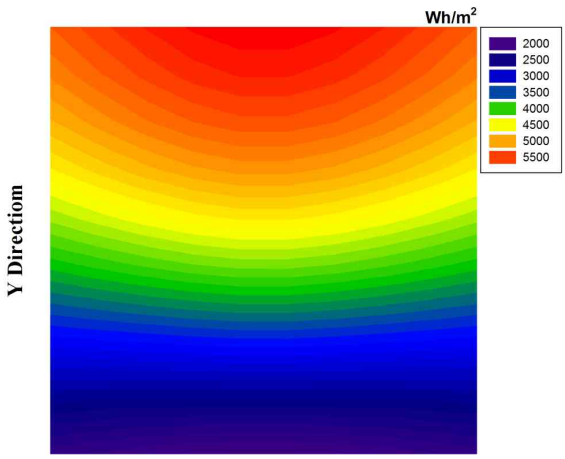
(c) 1th Jan



(d) 1th Apr

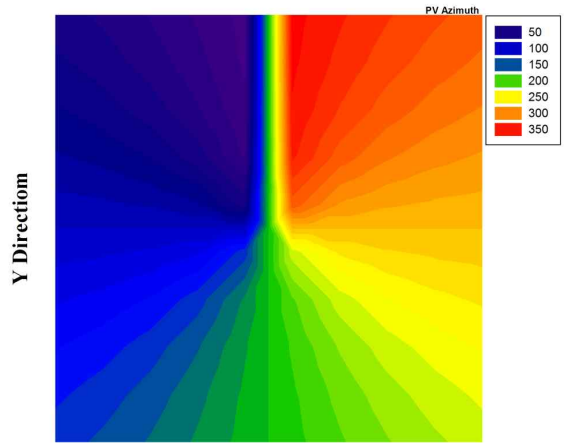


(e) 1th Jul

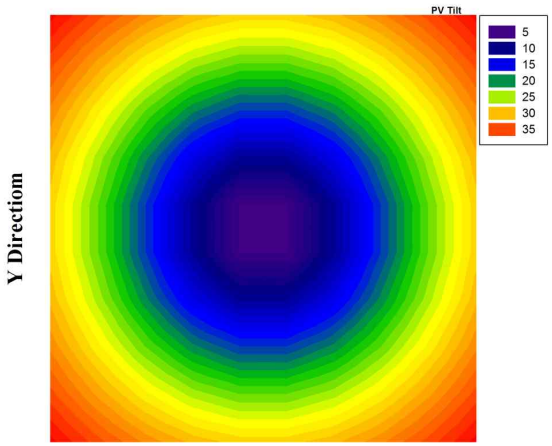


(f) 1th Oct

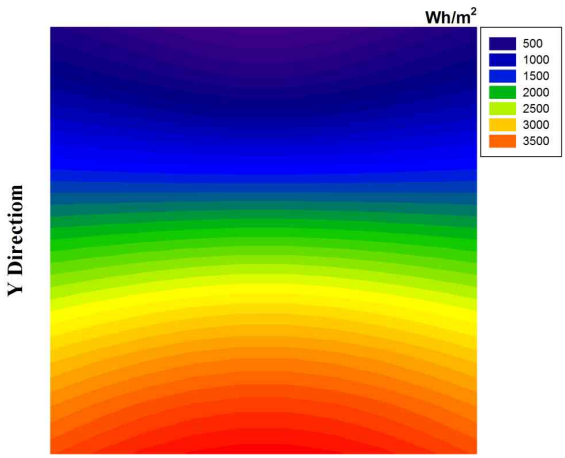
그림 15 Azimuth angle, Tilt angle and Solar irradiation of a HP shell ($a_0 = -0.06$, $b_0 = 0.06$)



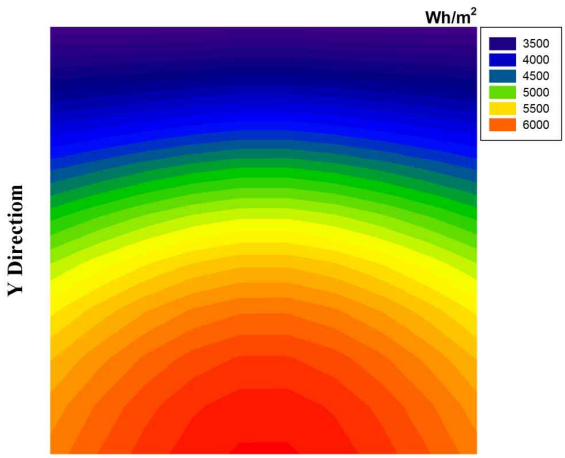
(a) Azimuth angle



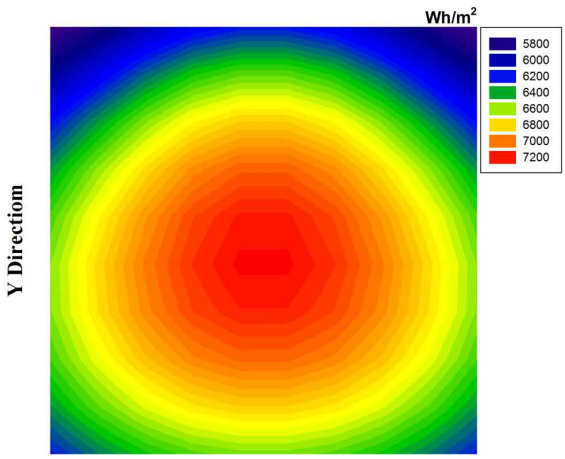
(b) Tilt angle



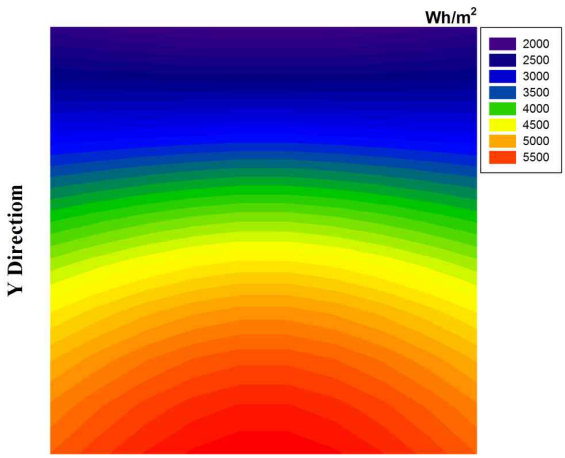
(c) 1th Jan



(d) 1th Apr



(e) 1th Jul



(f) 1th Oct

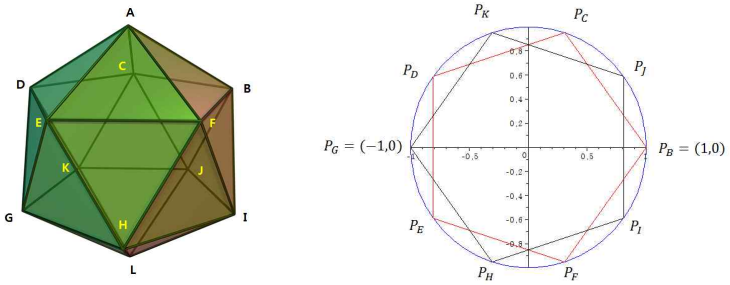
그림 16 Azimuth angle, Tilt angle and Solar irradiation of a HP shell ($a_0 = 0.06$, $b_0 = -0.06$)

8. 시험조형물 대상모델(MICD 모델)의 형상모델링

곡면구조의 실현에 있어서 본 장에서는 당해연도 연구의 목적을 달성하기 위해서 테스트베드의 설계에 대해서 다루도록 하며, 다음년도에 시공을 위한 제작 및 분석을 수행하도록 한다. 곡률을 가진 구조물 대상의 솔라패널은 주로 외장재의 면적을 통해 필요전력과 에너지를 얻을 수 있기 때문에 형태적 관점의 시스템 개발과 구조안정성의 관계는 매우 중요해 지므로 본장에서는 형태적 관점에서의 설계기법에 대해서 다루도록 한다. 형태적 관점에서 살펴보기 위해서 설계를 위한 모델링의 단위 유닛 형성과정을 제시할 수 있는 정20면체 기반의 반구형 시스템의 형상 설계를 설명 하도록 한다.

가. 정20면체(Icosahedron)의 기하학적 정의 및 형상 정보

정이십면체(Icosahedron)는 그림 2.2.8.1과 같이 한 개의 꼭짓점에 다섯 개의 면이 만나고, 20개의 정삼각형 면으로 이루어진 3차원 정다면체이다. 12개의 꼭짓점을 그림과 같이 A부터 L까지 나타내고 이 꼭짓점의 좌표를 구하여 정이십면체기반 정형곡면의 형상을 얻도록 한다.



(a) 정이십면체 (b) 오각형 좌표

그림 2.2.8.1 정이십면체(Icosahedron)의 기본형상과 오각형 좌표

우선, 그림 2.2.8.1(b)와 같은 오각형 좌표를 구하도록 한다. 평면상에서 오각형은 원주를 오등분한 점과 같고, 이 점은 복소방정식 $z^5 = 1$의 해와 동치이다. 따라서 오등분한 점의 좌표는 다음과 같다.

$$\left(\cos\frac{2k\pi}{5},\ \sin\frac{2k\pi}{5}\right) \quad ,\ k = 0,1,2,3,4 \tag{2.2.8.1}$$

삼각함수의 값을 대수로 표기하기 위해서, $\alpha = 2\pi/5$ 로 두면, $\sin(5\alpha) = \sin(2k\pi) = 0$ 이다. 따라서 삼각함수의 합곱 공식으로부터 다음의 관계를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}\sin(5\alpha) &= \sin(\alpha)\cos(4\alpha) + \cos(\alpha)\sin(4\alpha) \\ &= \sin(\alpha)[5 - 20\sin^2(\alpha) + 16\sin^4(\alpha)] = 0\end{aligned} \tag{2.2.8.2}$$

$$\sin(\alpha) \neq 0,$$

$$5-20\sin^2(\alpha)+16\sin^4(\alpha)=0$$

$\sin(\alpha)$ 에 대한 4차방정식의 근은 다음과 같고, 제곱공식으로부터 $\cos(\alpha)$ 를 구할 수 있다.

$$\sin(\alpha)=\pm\sqrt{\frac{10\pm\sqrt{100-80}}{16}}=\pm\sqrt{\frac{5\pm\sqrt{5}}{8}} \quad , \cos(\alpha)=\pm\sqrt{\frac{3\mp\sqrt{5}}{8}} \tag{2.2.8.3}$$

위 값들을 이용하여 위쪽 오각형의 좌표를 계산하면 다음과 같다.

$$P_B=(1,0) \tag{2.2.8.4a}$$
$$P_C=\left(\frac{\sqrt{3-\sqrt{5}}}{8},\frac{\sqrt{5+\sqrt{5}}}{8}\right) \tag{2.2.8.4b}$$
$$P_D=\left(-\frac{\sqrt{3+\sqrt{5}}}{8},\frac{\sqrt{5-\sqrt{5}}}{8}\right) \tag{2.2.8.4c}$$
$$P_E=\left(-\frac{\sqrt{3+\sqrt{5}}}{8},-\frac{\sqrt{5-\sqrt{5}}}{8}\right) \tag{2.2.8.4d}$$
$$P_F=\left(\frac{\sqrt{3-\sqrt{5}}}{8},-\frac{\sqrt{5+\sqrt{5}}}{8}\right) \tag{2.2.8.4e}$$

아래쪽 오각형의 좌표는 $P_G=(-1,0)$ 로 두고서 계산하면 다음 값과 같고, 아래 오각형은 위쪽 오각형 좌표에 대칭점이다.

$$P_G=-P_B=(-1,0) \tag{2.2.8.5a}$$
$$P_H=-P_C=\left(-\frac{\sqrt{3-\sqrt{5}}}{8},-\frac{\sqrt{5+\sqrt{5}}}{8}\right) \tag{2.2.8.5b}$$
$$P_I=-P_D=\left(\frac{\sqrt{3+\sqrt{5}}}{8},-\frac{\sqrt{5-\sqrt{5}}}{8}\right) \tag{2.2.8.5c}$$
$$P_J=-P_E=\left(\frac{\sqrt{3+\sqrt{5}}}{8},\frac{\sqrt{5-\sqrt{5}}}{8}\right) \tag{2.2.8.5d}$$
$$P_K=-P_F=\left(-\frac{\sqrt{3-\sqrt{5}}}{8},\frac{\sqrt{5+\sqrt{5}}}{8}\right) \tag{2.2.8.5e}$$

12개의 꼭짓점은 위쪽의 점들만 결정하면 대칭성을 이용하여 아래 쪽 점들을 결정할 수 있다. 즉, $V_A=(0,0,1)$ 라 놓으면 $V_L=-V_A=(0,0,-1)$ 이다. 먼저 그림 2.2.8.2와 같이 y축에 대한 시계반대방향의 회전의 생각하자. 이 경우 회전각 θ_0를 계산해야만 한다.

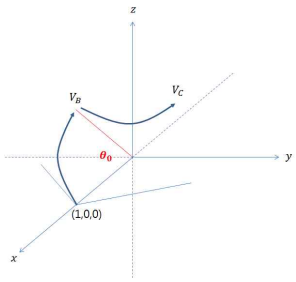


그림 2.2.8.2 좌표의 회전과 회전각 θ_0

단순한 표현을 위해 다음과 같이 표기한다.

$$c=\cos\theta_0\ ,\ s=\sin\theta_0\ ,\ c_1=\cos\frac{2\pi}{5}\ ,\ s_1=\sin\frac{2\pi}{5}\ ,\ c_2=\cos\frac{\pi}{5}\ ,\ s_2=\sin\frac{\pi}{5} \qquad (2.2.8.6)$$

각 y축에 대한 회전행렬은 식 2.2.8.7과 같고, z축에 대한 회전행렬을 식 2.2.8.8과 같이 도입하자.

$$R_y(\theta_0)=\begin{bmatrix} c & 0 & -s \\ 0 & 1 & 0 \\ s & 0 & c \end{bmatrix} \qquad (2.2.8.7)$$

$$R_z(\pm\alpha)=\begin{bmatrix} \pm c_1 & \mp s_1 & 0 \\ \pm s_1 & \pm c_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\ ,\ R_z(\pm\alpha/2)=\begin{bmatrix} \pm c_2 & \mp s_2 & 0 \\ \pm s_2 & \pm c_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (2.2.8.8)$$

위 변환행렬을 이용하여 꼭짓점 V_A에서 V_K까지 모두 계산할 수 있다. 우선, 점 V_A와 V_L을 식 2.2.8.9와 같이 두고, 점 V_B와 V_G를 정의하면 식 2.2.8.10과 같다.

$$V_A=(0,0,1)\quad ,\quad V_L=(0,0,-1) \qquad (2.2.8.9)$$

$$V_B=R_y(\theta_0)\,(1,0,0)^T=(c,0,s)=-\,V_G \qquad (2.2.8.10)$$

점 V_B를 $(c,0,s)$를 α만큼 z축을 중심으로 시계반대방향으로 회전하면,

$$V_C=R_z(\alpha)\,(c,0,s)^T=(c_1c,\ s_1c,\ s)=-\,V_H \qquad (2.2.8.11)$$

점 V_F를 $(c,0,s)$를 $-\alpha$만큼 z축을 중심으로 시계방향으로 회전하면,

$$V_F=R_z(-\alpha)\,(c,0,s)^T=(c_1c,\ -s_1c,\ s)=-\,V_K \qquad (2.2.8.12)$$

점 V_J는 $(c,0,s)$를 z축 시계반대방향으로 $\alpha/2$만큼 회전하면 얻어진다.

$$V_J = R_z(\alpha/2)(c, 0, s)^T = (cc_2,\ cs_1,\ s) = - V_E \tag{2.2.8.13}$$

점 V_I 는 $(c, 0, s)$를 z축 시계방향으로 $-\alpha/2$ 만큼 회전하면 얻어진다.

$$V_I = R_z(-\alpha/2)(c, 0, s)^T = (cc_2,\ -cs_1,\ s) = - V_D \tag{2.2.8.14}$$

모든 변의 길이는 같아야 하므로 아래와 같은 관계를 얻을 수 있다.

$$|V_A - V_B| = |V_B - V_C| = L \tag{2.2.8.15}$$

$$|V_A - V_B|^2 = c^2 + (1-s)^2 = c^2 + 1 - 2s + s^2 = 2(1-s) \tag{2.2.8.16a}$$

$$|V_B - V_C|^2 = c^2(1-c_1)^2 + c^2 s_1^2 = 2c^2(1-c_1) \tag{2.2.8.16b}$$

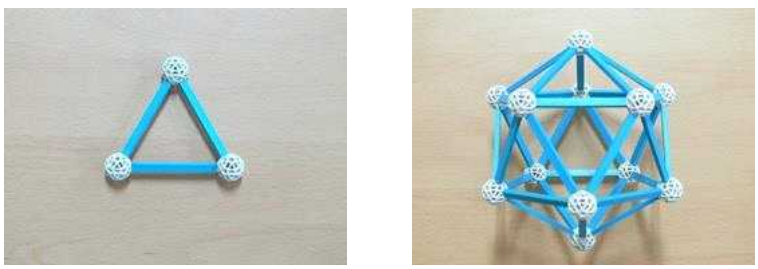
위의 식 2.2.8.16을 식 2.2.8.15에 대입하면 s와 c 값을 구할 수 있으며, 다음과 같다.

$$s = \frac{1}{\sqrt{5}},\ c = \frac{2}{\sqrt{5}} \tag{2.2.8.17}$$

이상과 같이 정이십면체의 꼭지점 좌표를 이용하여 변형된 삼각패널을 구성할 수 있다.

나. 정이십면체기반 정형모델의 기하학적 단위 모듈

20개의 정삼각형으로 구성된 정이십면체의 기본적인 단위모듈은 그림 2.2.8.3(a)에서 보는 바와 같이 삼각형 구조를 이룬다. 이들의 삼각형을 기반으로 그림 2.2.8.3(b)의 정20면체를 구성할 수 있으며, 이를 기반으로 반구형 지붕구조시스템을 형성할 수 있다. 이를 위해서 기하학적 단위모듈에 대해서 단순화 한 기하학적 시스템을 개발하고, 지붕구조시스템에 대해 유닛화 한다.

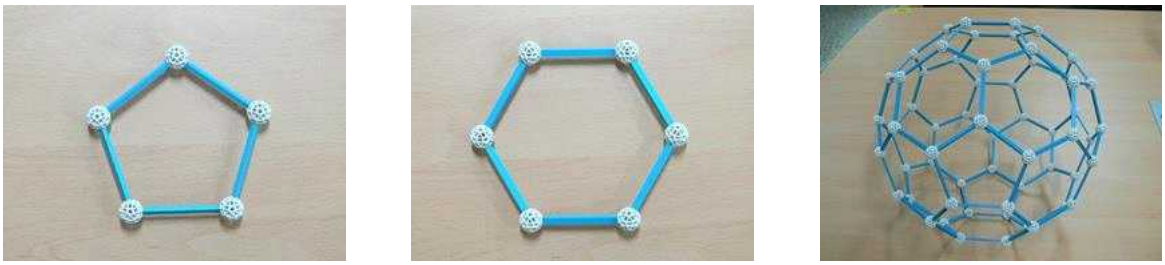


(a) 정삼각형 기본유닛　　(b) 정이십면체 축소모형

그림 2.2.8.3 정이십면체(Icosahedron)의 기본 유닛과 축소모형

정이십면체의 꼭짓점은 모두 12개이며, 꼭짓점을 각 모서리면의 1/3 지점에서 면을 형성할 경우 정이십면체는 그림 2.2.8.4에서 보는 바와 같이 오각형과 육각형 도형으로 구성된 변형된

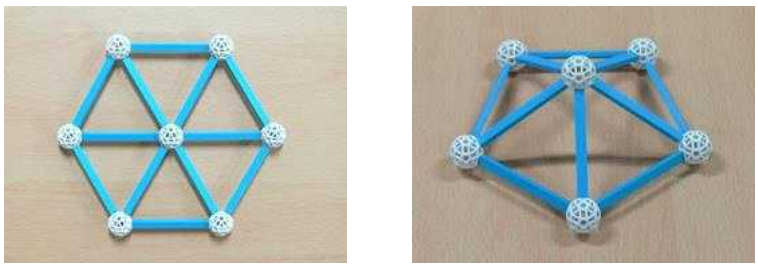
정이십면체 도형을 얻을 수 있으며, 축구공은 이와 같은 기하학적 상태에서 구성된 것이다.



(a) 정오각형 유닛 (b) 정육각형 유닛 (c) 변형된 정이십면체

그림 2.2.8.4 변형된 정20면체(Icosahedron)의 오각형 및 육각형 유닛

그림 2.2.8.4(c)를 구성하는 유닛은 정오각형과 정육각형으로 구성되지만 이와 같은 다각형은 삼각형의 조합으로 재구성되므로 가장 기본이 되는 유닛은 그림 2.2.8.3(a)의 삼각형이 된다. 삼각형이 가장 많이 쓰이는 이유는 모든 곡면을 표현할 최소 다각형이기 때문이며, 형상을 정의하기가 편리하다.



(a) 정삼각형 육각 유닛 (b) 오각뿔 유닛

그림 2.2.8.5 정삼각형을 이용한 오각 및 육각 유닛의 기하학적 형상

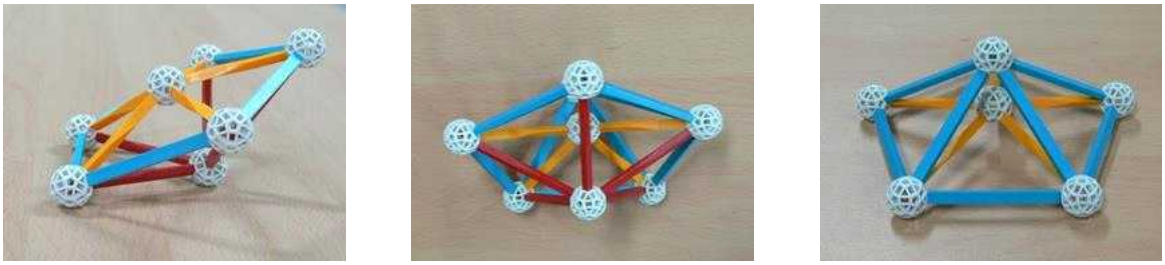
그림 2.2.8.4(a)와 그림 2.2.8.4(b)의 두 다각형은 모두 삼각형을 이용하여 구성할 수 있으나 평면에서 펼쳐지는 정삼각형으로 구성되는 유닛은 육각형 밖에 없으며, 나머지는 모두 공간상에서 구성된다. 그림 2.2.8.5(a)는 평면의 정삼각형으로 구성된 육각모형을 나타낸 것이고, 그림 2.2.8.5(b)는 오각형 유닛을 이용해서 정삼각형 모델링을 한 것으로서 그림에서 나타나는 것과 같이 정삼각형을 포함한 이등변 삼각형기반의 오각뿔 및 육각뿔 모형으로 변형된 정이십면체를 표현할 수 있다.



(a) 낮은 곡률의 오각뿔 (b) 높은 곡률의 오각뿔

그림 2.2.8.6 오각뿔 모형의 높이에 따른 형상

이상과 같이 그림 2.2.8.6과 같은 다각뿔의 모형을 곡률에 꼭짓점을 결정하면 삼각형 패턴의 격자돔과 같은 구조형상을 구현할 수 있으며, 네트워크 돔의 경우 육각뿔 모양으로 형성된다. 또한 이들을 이용하여 다양한 형태의 변형된 반-정이십면체의 지붕구조를 구현할 수 있다.



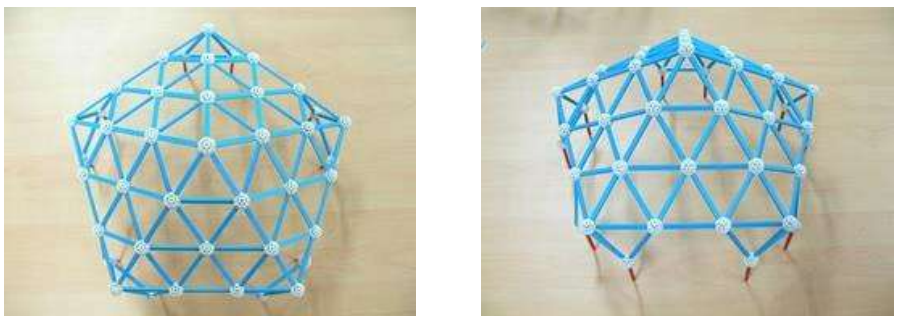
(a) (b) (c)

그림 2.2.8.7 언더텐션구조를 형성할 수 있는 다양한 중첩된 오각뿔 모형

그림 2.2.8.7의 경우 다각뿔의 형태에서 구조적 안정성을 확보할 수 있는 언더텐션 모형으로 유닛을 발전시킬 수 있으며, 모듈화 된 다각뿔을 이용해서 다양한 형태의 지붕구조의 구조불안정문제를 해결할 수 있다. 또한 기본적인 모듈을 계산하고 설계함으로서 변형된 구면의 형성이 간단해 진다.

다. 반-정20면체(Hemi-ICosahedron) 삼각패널 지붕 구조시스템

정이십면체의 꼭지점은 모두 구면에 위치하지만 정삼각형 패널로 분할한 구조인 그림 2.2.8.5를 단위 유닛으로 하여 구조체를 형성하기로 하며 그림 2.2.8.8에서 보는 바와 같다. 이와 같은 반-정이십면체(Hemi-ICosahedron) 삼각패널 모델(이하 HIC 모델이라 한다.)에 사용된 유닛은 모두 정삼각형이며, 정이십면체의 한 면이 10개의 정삼각형 유닛으로 구성된다. 곡률을 가지지 않는 정삼각형 유닛으로 구성되므로 구조물의 형상은 비교적 간단하게 구할 수 있다.

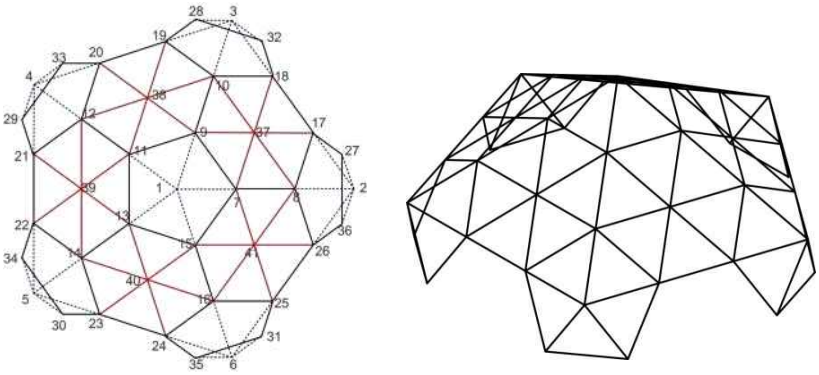


(a) (b)

그림 2.2.8.8 반-정이십면체(Hemi-Icosahedron) 지붕구조의 축소모형

기하학적 형상의 정의에 있어서 2.8.1절에서 설명된 방법으로 절점의 3차원 좌표를 구할 수 있으며, HIC 모델의 절점번호와 부재 길이단위를 그림 2.2.8.9와 같이 정의하도록 한다.

그림에서 절점은 모두 41개의 절점으로 구성되며, 60개의 정삼각형 모델링 요소 및 100개의 격자 네트워크 요소로 구성된다. 투영된 평면에서도 알 수 있듯이 모든 부재의 길이는 일정하며, 오각형과 육각형의 다각형 유닛이 정삼각형의 기본유닛으로 격자형 구조물을 구성하고 있다.



(a) 평면도 (b) 격자구조 입체도

그림 2.2.8.9 HIC 모델 형상과 절점번호

그림 2.2.8.9의 평면도에서 검은 실선으로 표현된 부재의 길이와 점선 및 붉은 실선의 길이는 모두 같고 정이십면체 격자구조의 한모서리 면의 1/3의 길이에 해당되며, 이 길이를 단위 유닛길이 l_u로 표현한다. 따라서 위의 모든 부재는 l_u로 구성됨을 의미하고 열 개의 삼각형으로 구성된 한 면은 곡률을 가지지 않는다. 이와 같은 조건의 형상에 대해서 면으로 구성된 입체 형상은 그림 2.2.8.8과 같고, 지붕구조의 각 모서리의 각은 일정한 절점각을 이루게 된다.

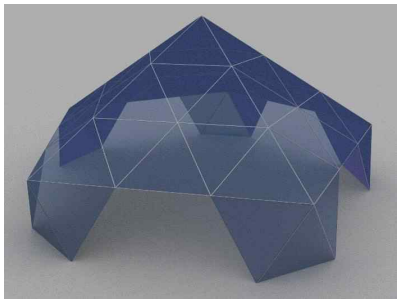
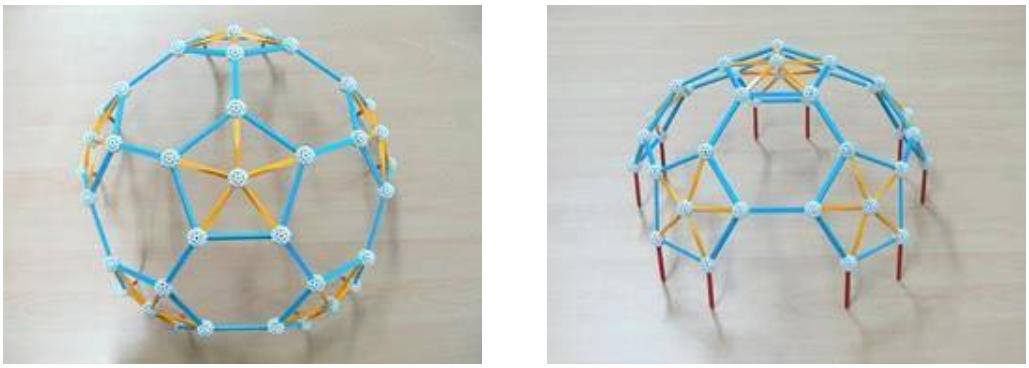


그림 2.2.8.10 HIC 삼각패널 모델의 모델링과 입체도

라. 곡률을 가진 수정된 반-정이십면체(Modified Hemi-Icosahedron) 정형모델

HIC 모델과는 달리 모든 절점이 구면의 중심에 위치하는 곡률을 가진 수정된 정이십면체(Modified Hemi-Icosahedron) 솔라패널 모델(이하 MHIC 모델이라 한다.)은 그림 2.2.8.5의 유닛으로는 구할 수 없다. 이와 같은 MHIC 삼각패널 모델에 사용되는 모든 유닛은 오각뿔 모형과 육각뿔 유닛으로 형성할 수 있으며, 두가지 형태의 다각뿔 모델이 기본 유닛이 된다. 여기서도 삼각형 격자구조는 여전히 유지되며, HIC 모델을 이용하여 중심에서 동일한 반경

위에 절점을 재조정하면 절점의 좌표를 구할 수 있다. 따라서 삼각형 유닛의 구조와 이를 둘러싸는 격자구조물의 연결구조는 두 모델이 동일하며 곡률의 차이만 있을 뿐이다.

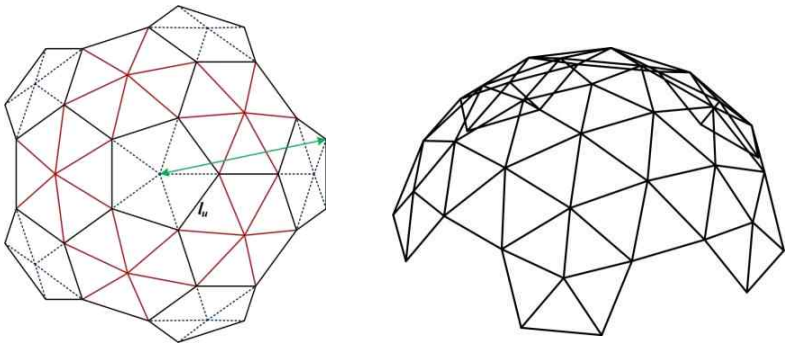


(a) (b)

그림 2.2.8.11 반-정이십면체(Hemi-Icosahedron) 지붕구조의 축소모형

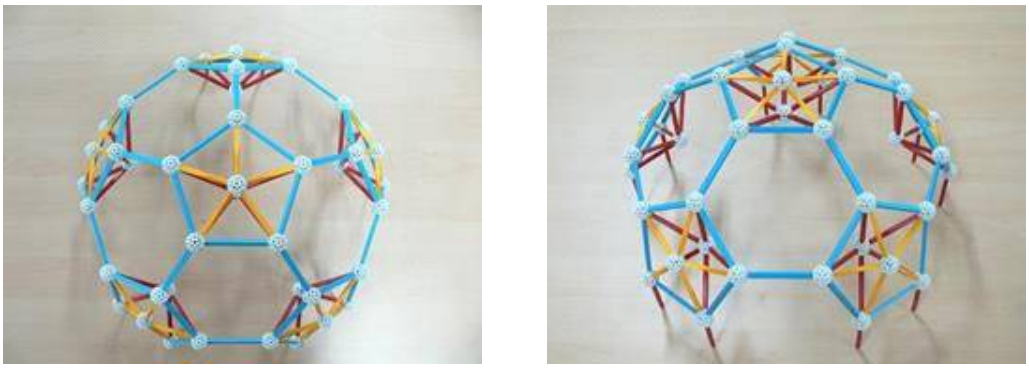
그림 2.2.8.11의 모형에서의 기본 단위체는 오각뿔과 육각뿔이며, 이들은 각각이 단위 삼각형을 가진다. 삼각 요소의 크기와 격자요소들은 크기가 다르다. 기하학적 형상의 정의에 있어서 두 모델의 부재연결은 같으므로 그림 2.2.8.12에 나타나는 단위길이 l_u는 HIC 모델과 동일하지만 오각뿔 내부와 육각뿔 내부의 길이는 다르다. 단위길이를 기준으로 오각뿔의 내부의 길이는 짧아지고 육각뿔의 내부의 길이는 길어진다. HIC 모델과 마찬가지로 절점은 모두 41개의 절점으로 구성되며, 60개의 정삼각형 모델링 요소 및 100개의 격자 네트워크 요소로 구성된다.

오각뿔과 육각뿔의 공간구조에서는 항상 초기조건에 기인한 불안정성을 예측할 수 있으며, 단층의 돔에서 나타나는 분기거동은 라이즈-스팬 비에 따라 역학적 거동이 달라진다. 그림 2.2.8.7의 언더텐션 모델을 기준으로 곡률을 가진 MHIC 모델을 구성하면 그림 2.2.8.13의 형태와 같이 보완할 수 있다. 보완된 MHCI 모델에서 기하학적 형상의 정의는 MHIC 모델과 동일하지만 추가되는 절점은 모두 중심에서 일정한 반경 내에 존재한다.



(a) 평면도 (b) 격자구조 입체도

그림 2.2.8.12 MHIC 모델 형상과 단위길이 l_u



(a) (b)

그림 2.2.8.13 보강부재를 포함한 반-정이십면체(Hemi-Icosahedron) 지붕구조의 축소모형

그림 2.2.8.12의 평면도에서 검은 실선의 l_u는 HIC 모델과 같이 정이십면체 격자구조의 한 모서리 면의 1/3의 길이에 해당되며, 열 개의 삼각형으로 구성된 한 면은 구면의 곡률을 가진다. 이와 같은 조건의 형상에 대해서 삼각형 면구조로 구성된 입체 형상은 그림 2.2.8.14와 같고, 절점과 부재 연결 각도는 MHIC 모델이 HIC 모델보다 더 다양한 절점유닛을 가지게 된다.



그림 2.2.8.14 MHIC 삼각패널 모델의 모델링과 입체도

9. 초기형상 모델링 및 해석/설계용 GUI 시스템

가. 구조시스템 제작용 프로그램 SHISR

정이십면체의 형상을 기초로 한 반구형 정형 모델인 HIC 모델과 MHIC 모델을 설계하기 위한 프로그램 SHISR(Shape moduler for Hemi-Icosahedron Solar Roof) v1.0 을 형상제작에 이용하도록 하였다. 형상 모듈을 위해서 기본단위길이 l_u만을 입력하여 삼각패털 HIC 모델 및 MHIC 모델의 지붕 형상을 얻을 수 있다. 프로그램을 통해서 생성되는 결과는 절점의 좌표, 삼각형 메쉬 및 격자구조 결합 순서 등이 계산되며, 각 패널의 면적과 삼각형길이의 표준편차 전체 삼각형 면적의 표준편차와 분산 등이 계산된다. 또한 격자구조의 길이에 따른 표준편차와 분산 등도 계산되어 설계와 제작에 대한 기초자료를 제공할 수 있게 하였다. 프로그램은 단위길이를 입력받아서 계산된 기하학적 정보를 기초로 설계와 제작에 필요한 계산결과 및 그래픽용 ASCII DXF(Drawing Exchange Format) 파일을 생성하며, 표 2.2.9.1과 같은 결과를 출력한다.

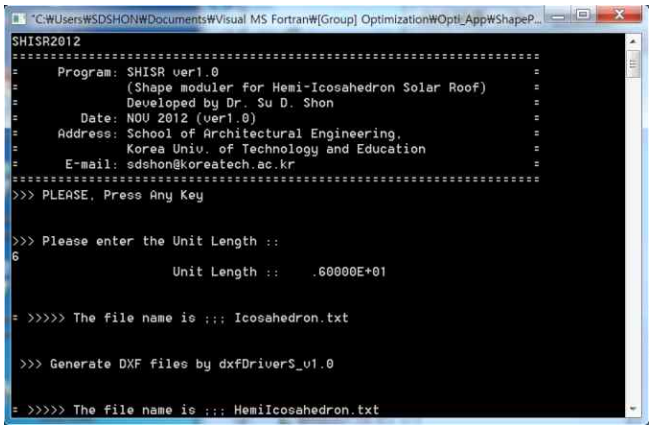


그림 2.2.9.1 SHISR(Shape moduler for Hemi-Icosahedron Solar Roof) v1.0의 실행화면

표 2.2.9.1 프로그램 SHISR의 출력용 파일과 내용

파일명	종류	내용
Icosahedron.txt	Text	정20면체의 형상정보
HemiIcosahedron.txt	Text	HIC 모델의 형상정보
cvHemiIcosahedron.txt	Text	MHIC 모델의 형상정보
IcosahedronTRI.dxf	DXF	정20면체 그래픽 정보 (삼각패널)
IcosahedronROD.dxf	DXF	정20면체 그래픽 정보 (격자구조)
HemiIcosahedronTRI.dxf	DXF	HIC 모델 그래픽 정보 (삼각패널)
HemiIcosahedronROD.dxf	DXF	HIC 모델 그래픽 정보 (격자구조)
cvHemiIcosahedronTRI.dxf	DXF	HIC 모델 그래픽 정보 (삼각패널)
cvHemiIcosahedronROD.dxf	DXF	HIC 모델 그래픽 정보 (격자구조)

표 2.2.9.2는 작성된 프로그램을 이용하여 단위유닛을 2m로 하였을 때의 정20면체를 기반으로 한 MHIC 모델의 삼각패널의 정보와 격자패널의 계산결과를 나타내었다. MHIC 모델의 단위유닛길이를 기준으로 오각뿔 내부의 삼각요소의 면적은 1.40894m^2, 각 길이의 표준편차는 0.15718이며, 격자부재의 길이는 1.72775m이다. 육각뿔 내부의 삼각요소의 면적은 1.78259 m^2, 각 길이의 표준편차는 0.2536이며, 격자 부재의 길이는 2.04393m로 계산되었다. 또한, 구면반경은 4.956m로 나타났으며, MHIC 모델의 투영된 형상의 최대 반지름은 4.88249m이다.

표 2.2.9.2 MHIC 모델의 계산결과 (l_u=2m, cvHemilcosahedron.txt)

```
SHISR2012
=====================================================================
=     Program: SHISR ver1.0                                         =
=              (Shape moduler for Hemi-Icosahedron Solar Roof)      =
=              Developed by Dr. Su D. Shon                          =
=        Date: NOV 2012 (ver1.0)                                    =
=     Address: School of Architectural Engineering,                 =
=              Korea Univ. of Technology and Education              =
=      E-mail: sdshon@koreatech.ac.kr                               =
=====================================================================

= >>>>> The file name is ;;; cvHemilcosahedron.txt


 >>> Generate DXF files by dxfDriverS_v1.0
     ROD model => cvHemilcosahedronROD.dxf
     TRI model => cvHemilcosahedronTRI.dxf


  01. Information

     No. of Node       :              41
           Rod         :             100
           Triangular  :              60
     SHISR. unitL      :             6.00000
           rPgon       :             5.10390
           hPgon       :             3.15439
           hPmid       :             5.10390
           rIron       :             5.70634


  02. Coordinate

          No          X-co          Y-co          Z-co          norm          norm2D
           1            .00000        .00000       4.95604       4.95604        .00000
           2           4.43281        .00000       2.21641       4.95604       4.43281
           3           1.36981       4.21586       2.21641       4.95604       4.43281
           4          -3.58622       2.60554       2.21641       4.95604       4.43281
           5          -3.58622      -2.60554       2.21641       4.95604       4.43281
           6           1.36982      -4.21586       2.21641       4.95604       4.43281
           7           1.70130        .00000       4.65488       4.95604       1.70130
           8           3.40260        .00000       3.60341       4.95604       3.40260
           9            .52573       1.61803       4.65488       4.95604       1.70130
          10           1.05146       3.23607       3.60341       4.95604       3.40260
중략


  03. Triangular mesh

          No       i       j       k          area          sdev

           1       1       7       9          1.40894          .15718
           2       1       9      11          1.40894          .15718
           3       1      11      13          1.40894          .15718
           4       1      13      15          1.40894          .15718
           5       1      15       7          1.40894          .15718
중략
         sum                                .95746E+02     .54763E+01
         ave                                  1.59577          .09127
        sdev                                   .18840          .06647


  04. Networks (Rod element)
```

```
          No        i        j                 length
           1        1        7                1.72775
           2        7        8                2.00000
           3        8        2                1.72775
           4        1        9                1.72775
           5        9       10                2.00000
           6       10        3                1.72775
           7        1       11                1.72775
           8       11       12                2.00000
           9       12        4                1.72775
          10        1       13                1.72775
중략
         sum                                .19315E+03
         ave                                  1.93150
        sdev                                   .13530

  ======================================================================
  = SINCE NOV2012 SHISR ver1.0                                         =
  = Dr. SHON, Su D.                                JESUS IS MY LOVE =
  ======================================================================
```

나. GUI 시스템의 개발 환경, 구성요소 및 레이아웃

정형곡면 솔라 패널 설계용 프로그램과 GUI 시스템은 다음과 같은 환경에서 개발되었다.

Microsoft visual studio 2008 IDE 및 compiler.
Opencascade geometry kernel
OpenGL
MFC & BCG MFC Extension
CM2Mesh Generator

솔라패널 설개 프로그램은 프로그램 안정화를 위한 code coverage 최적화 수행되었으며, 동작환경 WindowsXP 이상 한정된다.

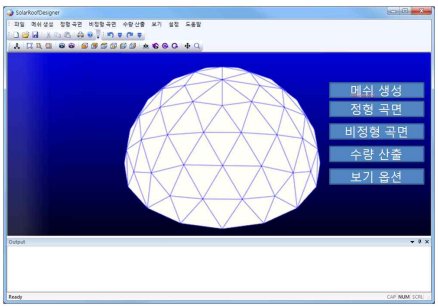


그림 2.2.9.2 솔라 패널 설계 프로그램 레이아웃

프로그램의 레이아웃은 그림 2.2.9.2와 같다. 솔라 패널 설계 프로그램은 크게 Geometry 처리기, 메쉬 생성기, 정형 곡면 기반 메쉬 생성기 , 재료 수량 산출 및 뷰도구등의 기능으로 구성되어 있다. 지오메트리 처리기는 캐드 프로그램에서 생성된 자유 곡면을 설계 프로그램으로 불러 올수 있다. Step, Iges 포맷을 지원한다. 메쉬 생성기는 설계 프로그램에 로드된 자유 곡면에 대해서 3각메쉬를 수행 한다. 메쉬 생성기에서 생성된 3각형 메쉬는 본 연구에 의한 결과물인 다른 3각형 메쉬 최적화 프로그램을 거쳐 솔라 패널 설계도면 으로 생성된다.

정형 곡면 생성 기능은, 일반 적으로 많이 사용되는 정형구조물의 설계 변수들을 입력 받아 정형 구조물이 설계도면을 DXF 포맷으로 자동 생성한다. 수량 산출 기능은 정형 및 비정형 구조물의 설계 내용을 바탕으로 빔 과 조인트의 종류 및 수량을 자동으로 산출하여 엑셀 형식으로 표현 한다. 뷰 옵션은 패널 설계를 하면서 필요한 화면 축소 및 확대 , 모델의 이동, 모델의 크리 조절 , 회전, 줌핏 등의 기능을 포함하여, 솔라 패널 설계시 프로그램 사용이 용이 하도록 한다.

다. 형상데이터 모델링 과정

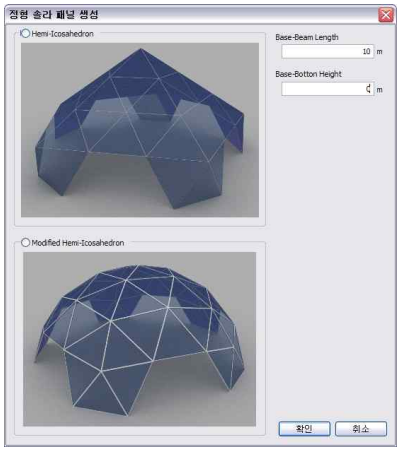


그림 2.2.9.3 돔형 솔라 루프 생성 위자드 대화상자

‘정형 솔라 루프 > 생성’ 메뉴를 선택하면 그림 2.2.9.3와 같은 대화 상자가 호출된다.

솔라 패널 설계 프로그램의 정형 루프 자동 생성 기능의 위의 그림 2.2.9.4와 같다. 설계 변수로는 base beam 의 길이와 , 루프의 바닥면의 높이를 m단위로 표현 한다. 현재 표현할 수 있는 기하 형상은 HIC와 MHIC 모델을 표현하고 있으며 다양한 정형 형상을 추가 할 수 있도록 PlugIn Attachable 한 구조로 정형 파트 생성 부분의 설계가 변경가능하다.

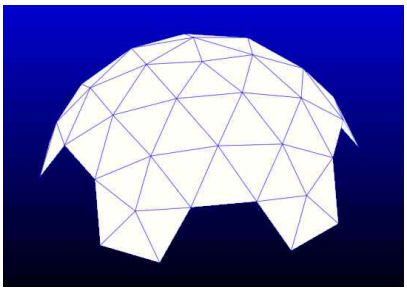


그림 2.2.9.4 솔라 루프 메시 위자드 실행 결과

해석과정에서 SHISR(Shape moduler for Hemi-Icosahedron Solar Roof) v1.0을 이용하여 해석결과를 얻을 수 있으며, 다양한 방법으로 접근할 수 있도록 위자드의 종류를 늘려간다. 메쉬 그리드의 형성과는 달리 테스트베드 시험설계가 가능하도록 프로그램의 일부를 수정할 수 있게 하였다.

라. 설계자의 편의를 위한 다양한 옵션

명령 실행 기능



1. 실행 취소　　2. 실행 기록　　3. 다시 실행

화면 조작 기능



1. 시점 초기화
2. 모델 전체 보기
3. 영역 확대
4. 작업 평면 전체 보기
5. 등각보기 모드1
6. 등각보기 모드2
7. 정면 보기
8. 후면 보기
9. 윗면 보기
10. 아랫면 보기
11. 좌측면 보기
12. 우측면 보기
13. 작업 평면 수직보기
14. 이전 시점 되돌아 가기
15. 회전 중심
16. 회전
17. 이동
18. 확대/축소

Geometry Surface 의 Import 및 Handling

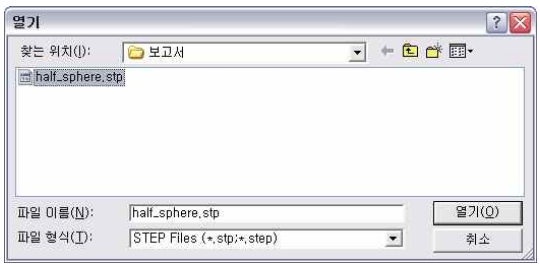


그림 2.2.9.5　지오메트리 임포트 화면

솔라 패널 설계 프로그램은 현재 지오메트리 표준 포맷인 step 과 iges 파일 포맷의 임포트를 지원하여, 다른 캐드 프로그램에서 생성한 자유 곡면 루프를 임포트 하여, 솔라 패널 설계를 수행 할 수 있다. Import 명령의 지오메트리의 점, 선 , 면 , 솔리드 중 사용자로 입력 받고자 하는 형상만 선택적으로 입력 받을 수 있다.

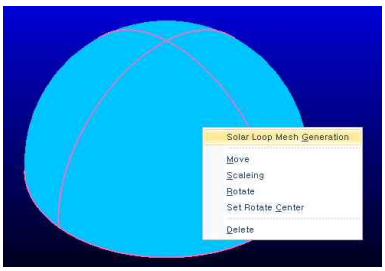


그림 2.2.9.6　STEP GEOMETRY IMPORT RESULT

입력된 결과 지오메트리는 지오메트리 조작 기능을 통하여 변형될 수 있다. 자유곡면을 조작 할 수 있는 방법은로 위의 그림 2.2.9.6에서 나타나는 바와 같이 지오메트리 선택 후 오른쪽 마우스 클릭으로 팝업 메뉴를 호출하면 이동, 확대/축소, 회전, 삭제 등의 조작을 할 수 있다. 회전 변환의 경우 회전 중심을 미리 정의 하여 이용 할 수 있다.

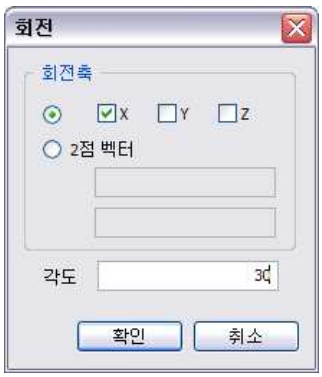


그림 2.2.9.7 Geometry 회전 대화 상자



그림 2.2.9.8 Geometry 이동 대화 상자

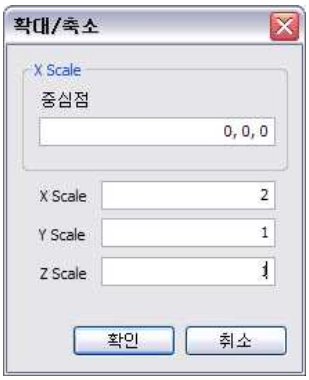


그림 2.2.9.9 Geometry 확대/축소 대화 상자

위 그림 지오메트리 회전 명령을 수행 하면 위 그림 2.2.9.7과 같은 회전 설정 대화 상자가 호출된다. 대화 상장에서는 기본적으로 X-Axis, Y-Axis, Z-Axis 로 회전을 수행할 수 있으며 이 경우 각 축은 Geometry의 중심만큼 Offset 되어 회전 변환을 수행한다. 다른 옵션의 경우 2점 벡터를 선택 할 수 있으며 2점 벡터는 입력된 두 포인트를 연결하는 벡터를 중심으로 입력된 각도만큼 반시계 방향으로 회전한다. 각도의 단위는 Degree 이다.

지오메트리 이동 명령을 수행하면 위 그림 2.2.9.8과 같은 이동 대화 상자가 호출된다. 이동 대화 이동 방향을 기본적으로 X,Y,Z 방향으로 설정 할 수 있으며 2점을 통하여 벡터 형태로 입력이 가능하다. 방향 설정후 거리를 설정하면 설정한 위치로 지오메트리가 이동한다. 설계프로그램에서 거리의 단위는 미터 단위가 사용되며, 역방향 이동인 경우 거리에 - 값을 입력하면 입력된 반대 방향으로 이동이 수행된다. 지오메트리 확대 축소 명령을 수행하면 위 그림 2.2.9.9의 대화 상자가 호출된다. 입력 값은 스케일 중심점과 X,Y,Z 방향의 Scale Factor 이다.

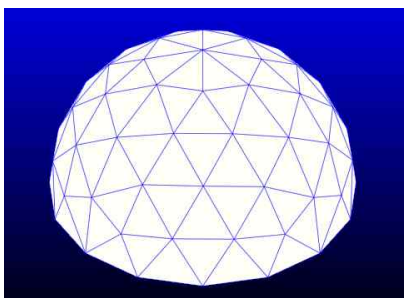


그림 2.2.9.10 메시 생성 결과

지오메트리를 선택한 후 우 클릭 하여 팝업 메뉴가 나오게 한 다음 Solar Loop Mesh Generation 을 클릭한다. 그림 2.2.9.9 와 같은 메쉬 생성 대화 상자가 호출된다. 메쉬 생성 기능은 요소 크기 또는 분할 개수를 입력 받아 경계면에 적당한 크기의 Seed 를 생성한후

Delaunay mesh 알고리즘 후 Loop Mesh 알고리즘을 적용 하여 3각형 메쉬를 생성한다. 입력된 기준길이는 절대값이 아니며, 단순히 Seed를 생성하기 위한 베이스 길이가 되며 메쉬 제너레이터는 기하형상의 범위에 벗어나지 않는 범위에서 최적 길이를 자동으로 계산하여 Seed 를 생성한다. 생성된 Seed 를 기반으로 3각형 메쉬가 생성된다. 생성된 메쉬는 Smoothing Method 를 통하여 품질을 향상 시키고 CleanUp 을 통하여 잘못된 메쉬 형상을 바로 잡는다. 지오메트리에 적용한 메쉬 알고리즘은 3각형 메쉬 알고리즘이다. 우리가 필요한 요소는 3각형 메쉬의 에지라인으로 구성된 Beam 요소 이므로, 최종 생성된 Beam 요소를 제외 한 3각형 메쉬는 삭제 되어도 무방하다.

Mesh Generator 로부터 생성된 Beam요소들은 SHISR 모듈을 거쳐 최종 설계 도면으로 최종 완성 된다. 도면은 DXF 포맷으로 출력된다.

마. 정형/비정형 지오메트리의 수량 산출

최종 결과는 *.DXF 형태의 설계 도면으로 생성이 된다. 생성된 도면은 동일한 길이를 갖는 Beam 요소들 그룹과, 동일한 형상의 조인트 그룹으로 구성된다. 각각의 Beam 요소와 Joint 요소들은 솔라 패널 설계 프로그램에서 제공 하는 대화 상자를 통해서 확인 할 수 있다. 뿐만 아니라 엑셀형식의 출력을 제공 하여 보다 쉽게 결과 데이터를 활용 할 수 있도록 한다. 아래의 그림 2.2.9.11은 수량 산출 결과 대화 상자이다.

산출된 Beam 요소는 길이를 기준으로 수량을 산정 하며, 조인트 요소는 Branch의 수로 기준을 삼는다. 단 조인트의 경우 Branch의 개수는 동일하나 형상이 다른 경우가 있을 수 있으므로 형상에 따라 다시 Type 을 구분 하도록 하였다.

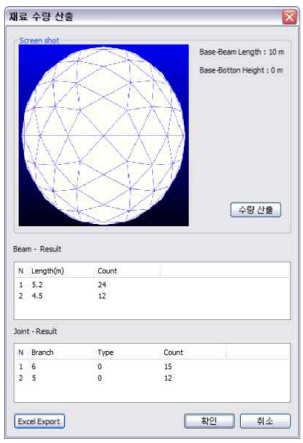
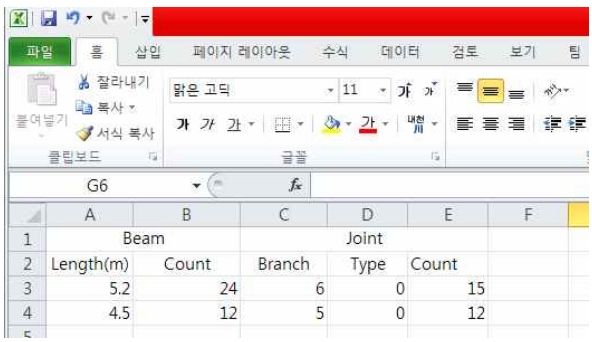


그림 2.2.9.11 수량 산출 대화 상자



	A	B	C	D	E
1	Beam		Joint		
2	Length(m)	Count	Branch	Type	Count
3	5.2	24	6	0	15
4	4.5	12	5	0	12

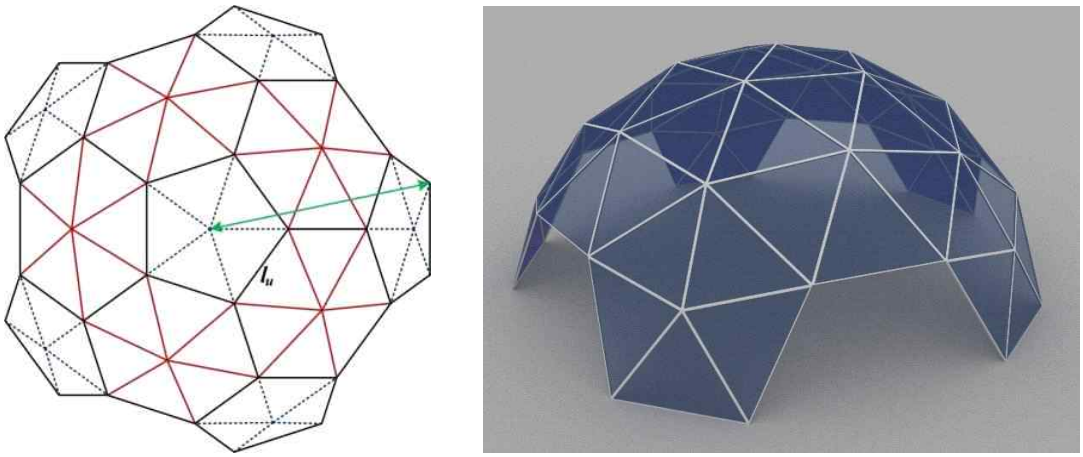
그림 2.2.9.12 수량 산출 결과의 엑셀 출력

10. MICD 모델의 구조모델링과 불안정모드 분석

가. MICD 모델의 구조해석정보와 선형해석

격자형 구조물의 불안정 현상은 부재좌굴과 절점좌굴 및 전체좌굴이며, 구조체가 복잡할수록 이들의 연성작용에 의해 불안정 거동을 한다. 곡률을 가진 MHIC 모델과 같은 단층 격자 프레임의 경우는 외적인 여러 가지 요인에 의해 그 불안정 현상이 복잡한 것은 미리 설명되어 잘 알고 있다.

평형경로 상의 임계점과 불안정 현상의 분류기준 등으로 공간구조물에 나타나는 뜀좌굴 현상과 분기거동을 예측할 수 있는데 이와 같은 분기점의 예측은 초기 좌굴모드에 따른 불완전성에 대한 고려가 필수적이다. 이와 같은 방법들의 적용과 분석에 대해 일반적인 여러 모델들의 경우 매우 특이한 현상이 독립적으로 나타날 수 있는 모델들이며, 해석의 검증을 위해서 연구자들이 많이 이용한다. 특히, 유효좌굴길이와 역학적 특성과의 관계로 절점강성 및 부재강성을 고려한 모델에서는 실질적인 구조물의 설계에서 나타나는 비선형적 변위거동이 재료적 강성비에 의해 설명될 수 있으므로 탄성범위 내에서의 불안정 거동의 규명이 가능해 졌다. 이러한 역학적 특성에 대한 알고리즘의 적용을 MHIC 모델을 이용하여 해석을 수행하고자 한다. 테스트베드 모델로 연구된 반정이십면체 기반 MHIC 모델의 경우 정형화된 돔과 같이 구면상에 모든 절점이 위치하며, 좌표의 계산과 형상 모델링은 앞서 설명되어진 SHISR(Shape moduler for Hemi-Icosahedron Solar Roof) 프로그램을 이용하여 간단히 구할 수 있다.



(a) 평면도 (b) 입체도

그림 2.2.10.1 MHIC 모델의 평면도 및 입체도

채택되어진 MHIC 모델의 형상은 그림 2.2.10.1과 같고, 그림에서 (a)는 평면도, (b)는 입체도이다. 구조물을 이루는 부재의 단위길이는 2.0m이며, 오각형 내부의 부재길이는 1.728m, 육각형 내부의 부재길이는 2.044m이며, 구면위에 모든 절점이 존재한다. 구의 반지름은 4.956m이며, 구조물의 저면반지름은 4.882m이다. 삼각형 단위모듈은 모두 2가지 형태로 나타나며, 각각의 단면적은 오각형 내부의 삼각형의 경우 1.409m^2, 육각형 내부의 삼각형은 1.783

m^2이다. 여기서 삼각형의 세변의 길이에 대한 표준편차는 각각 0.157과 0.025로 계산되었다. 이와 같은 형상의 MHIC 모델의 형상제원은 표 2.2.10.1과 같다.

표 2.2.10.1 MHIC 모델의 절점좌표 (단위부재길이 2.0m)

절점번호	좌표			절점번호	좌표		
	X	Y	Z		X	Y	Z
1	0.0000	0.0000	4.9560	21	-4.1292	1.0000	2.5520
2	4.4328	0.0000	2.2164	22	-4.1292	-1.0000	2.5520
3	1.3698	4.2159	2.2164	23	-2.2270	-3.6180	2.5520
4	-3.5862	2.6055	2.2164	24	-0.3249	-4.2361	2.5520
5	-3.5862	-2.6055	2.2164	25	2.7528	-3.2361	2.5520
6	1.3698	-4.2159	2.2164	26	3.9283	-1.6180	2.5520
7	1.7013	0.0000	4.6549	27	4.7790	1.0000	0.8507
8	3.4026	0.0000	3.6034	28	0.5257	4.8541	0.8507
9	0.5257	1.6180	4.6549	29	-4.4541	2.0000	0.8507
10	1.0515	3.2361	3.6034	30	-3.2785	-3.6180	0.8507
11	-1.3764	1.0000	4.6549	31	2.4279	-4.2361	0.8507
12	-2.7528	2.0000	3.6034	32	2.4278	4.2361	0.8507
13	-1.3764	-1.0000	4.6549	33	-3.2785	3.6180	0.8507
14	-2.7528	-2.0000	3.6034	34	-4.4541	-2.0000	0.8507
15	0.5257	-1.6180	4.6549	35	0.5257	-4.8541	0.8507
16	1.0515	-3.2361	3.6034	36	4.7790	-1.0000	0.8507
17	3.9283	1.6180	2.5520	37	2.4340	1.7684	3.9383
18	2.7528	3.2361	2.5520	38	-0.9297	2.8614	3.9383
19	-0.3249	4.2361	2.5520	39	-3.0086	0.0000	3.9383
20	-2.2270	3.6180	2.5520	40	-0.9297	-2.8614	3.9383
				41	2.4340	-1.7684	3.9383

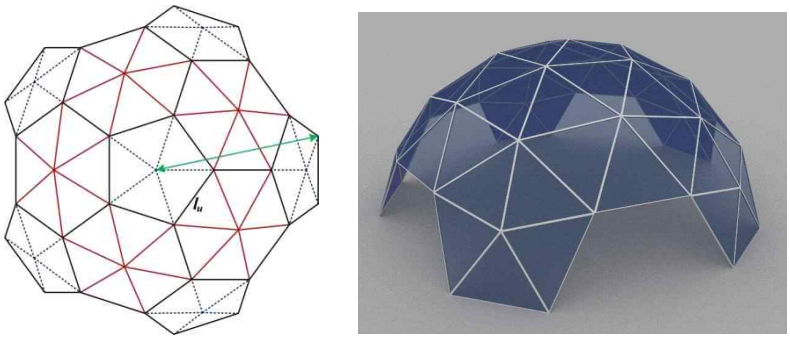
선형해석의 결과를 MIDAS프로그램을 이용하여 해석결과를 검증하였으며, 채택된 모델의 하중은 모든 절점에서 1.0N의 힘이 작용하는 것으로 가정하였다. 해석의 검증결과는 표 2.2.10.2와 같고 오차는 0.1E-6 이하로 나타났으며, 이와 같은 결과에서 볼 때 본 연구의 선형해석결과는 잘 일치하고 있으므로 해석결과에 대해 신뢰할 수 있다.

표 2.2.10.2 MHIC 모델의 선형해석결과와 상용프로그램 결과의 절점변위 비교 (단위길이 2.0m)

절점	본 연구 (RA)			MIDAS (RM)			오차 (Rm-Ra)X1.0e-7		
번호	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	3.144E-07	-8.712E-11	-9.978E-05	0.000E+00	0.000E+00	-1.000E-04	3.144	-0.001	2.200
2	2.323E-05	-8.499E-11	-6.977E-06	2.300E-05	0.000E+00	-7.000E-06	2.260	-0.001	0.229
3	7.265E-06	2.193E-05	-6.999E-06	7.000E-06	2.200E-05	-7.000E-06	2.650	-0.670	0.010
4	-1.785E-05	1.314E-05	-7.266E-06	-1.800E-05	1.300E-05	-7.000E-06	1.470	1.420	-2.659
5	-1.785E-05	-1.314E-05	-7.266E-06	-1.800E-05	-1.300E-05	-7.000E-06	1.470	-1.420	-2.658
6	7.265E-06	-2.193E-05	-6.999E-06	7.000E-06	-2.200E-05	-7.000E-06	2.649	0.670	0.010
7	-2.909E-06	-1.206E-10	-6.862E-05	-3.000E-06	0.000E+00	-6.900E-05	0.913	-0.001	3.810
8	-1.618E-07	-1.420E-10	-4.236E-05	0.000E+00	0.000E+00	-4.200E-05	-1.618	-0.001	-3.580
9	-6.936E-07	-3.042E-06	-6.863E-05	-1.000E-06	-3.000E-06	-6.900E-05	3.064	-0.423	3.740
10	1.295E-07	-4.108E-07	-4.241E-05	0.000E+00	0.000E+00	-4.200E-05	1.295	-4.108	-4.110
11	2.904E-06	-1.895E-06	-6.858E-05	3.000E-06	-2.000E-06	-6.900E-05	-0.959	1.055	4.210
12	7.096E-07	-2.580E-07	-4.224E-05	1.000E-06	0.000E+00	-4.200E-05	-2.904	-2.580	-2.370
13	2.904E-06	1.894E-06	-6.858E-05	3.000E-06	2.000E-06	-6.900E-05	-0.960	-1.056	4.210
14	7.094E-07	2.579E-07	-4.224E-05	1.000E-06	0.000E+00	-4.200E-05	-2.906	2.579	-2.370
15	-6.937E-07	3.042E-06	-6.863E-05	-1.000E-06	3.000E-06	-6.900E-05	3.063	0.422	3.740
16	1.292E-07	4.107E-07	-4.241E-05	0.000E+00	0.000E+00	-4.200E-05	1.292	4.107	-4.120
17	1.277E-05	7.920E-06	-2.080E-05	1.300E-05	8.000E-06	-2.100E-05	-2.310	-0.803	2.050
18	1.148E-05	9.285E-06	-2.105E-05	1.100E-05	9.000E-06	-2.100E-05	4.840	2.846	-0.520
19	-3.398E-06	1.459E-05	-2.063E-05	-3.000E-06	1.500E-05	-2.100E-05	-3.979	-4.080	3.740
20	-4.935E-06	1.348E-05	-2.114E-05	-5.000E-06	1.300E-05	-2.100E-05	0.649	4.820	-1.440
21	-1.382E-05	7.781E-07	-2.124E-05	-1.400E-05	1.000E-06	-2.100E-05	1.810	-2.219	-2.420
22	-1.382E-05	-7.782E-07	-2.124E-05	-1.400E-05	-1.000E-06	-2.100E-05	1.810	2.219	-2.420
23	-4.936E-06	-1.348E-05	-2.114E-05	-5.000E-06	-1.300E-05	-2.100E-05	0.640	-4.830	-1.430
24	-3.398E-06	-1.459E-05	-2.063E-05	-3.000E-06	-1.500E-05	-2.100E-05	-3.983	4.080	3.730
25	1.148E-05	-9.285E-06	-2.105E-05	1.100E-05	-9.000E-06	-2.100E-05	4.840	-2.852	-0.520
26	1.277E-05	-7.920E-06	-2.080E-05	1.300E-05	-8.000E-06	-2.100E-05	-2.320	0.801	2.050
27	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000	0.000	0.000
28	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000	0.000	0.000
29	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000	0.000	0.000
30	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000	0.000	0.000
31	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000	0.000	0.000
32	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000	0.000	0.000
33	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000	0.000	0.000
34	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000	0.000	0.000
35	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000	0.000	0.000
36	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000	0.000	0.000
37	5.584E-08	-1.465E-07	-4.775E-05	0.000E+00	0.000E+00	-4.800E-05	0.558	-1.465	2.520
38	3.938E-07	-2.254E-07	-4.771E-05	0.000E+00	0.000E+00	-4.800E-05	3.938	-2.254	2.920
39	1.400E-07	-3.245E-11	-4.686E-05	0.000E+00	0.000E+00	-4.700E-05	1.400	0.000	1.390
40	3.936E-07	2.254E-07	-4.771E-05	0.000E+00	0.000E+00	-4.800E-05	3.936	2.254	2.920
41	5.570E-08	1.463E-07	-4.775E-05	0.000E+00	0.000E+00	-4.800E-05	0.557	1.463	2.520

나. 초기형상과 고유좌굴모드 해석

구조불안정 특성 판별 알고리즘의 적용을 정20면체기반 돔(MICD) 모델을 대상으로 해석을 수행하고 해석결과를 분석한다. 정형 솔라패널 모델로 연구된 정20면체기반 MICD 모델의 경우 정형화된 돔과 같이 구면상에 모든 절점이 위치하며, 좌표의 계산과 형상 모델링은 개발되어진 SHISR(Shape moduler for Hemi-Icosahedron Solar Roof) v2.0 프로그램을 이용하여 구할 수 있다. 해석에 대해서 역학적 특성의 규명은 면요소의 특성과 함께 다루어져야 하지만 외피구조의 재료적 특성 등은 여기서는 고려하지 않도록 한다.



(a) 평면도 (b) 입체도

그림 2.2.10.2 MICD 모델의 평면도 및 입체도

표 2.2.1031 MICD 모델의 절점좌표 (단위: m)

절점번호	좌표			절점번호	좌표		
	X	Y	Z		X	Y	Z
1	0.000	0.000	3.717	21	-3.097	0.750	1.914
2	3.325	0.000	1.662	22	-3.097	-0.750	1.914
3	1.027	3.162	1.662	23	-1.670	-2.714	1.914
4	-2.690	1.954	1.662	24	-0.244	-3.177	1.914
5	-2.690	-1.954	1.662	25	2.065	-2.427	1.914
6	1.027	-3.162	1.662	26	2.946	-1.214	1.914
7	1.276	0.000	3.491	27	3.584	0.750	0.638
8	2.552	0.000	2.703	28	0.394	3.641	0.638
9	0.394	1.214	3.491	29	-3.341	1.500	0.638
10	0.789	2.427	2.703	30	-2.459	-2.714	0.638
11	-1.032	0.750	3.491	31	1.821	-3.177	0.638
12	-2.065	1.500	2.703	32	1.821	3.177	0.638
13	-1.032	-0.750	3.491	33	-2.459	2.714	0.638
14	-2.065	-1.500	2.703	34	-3.341	-1.500	0.638
15	0.394	-1.214	3.491	35	0.394	-3.641	0.638
16	0.789	-2.427	2.703	36	3.584	-0.750	0.638
17	2.946	1.214	1.914	37	1.826	1.326	2.954
18	2.065	2.427	1.914	38	-0.697	2.146	2.954
19	-0.244	3.177	1.914	39	-2.256	0.000	2.954
20	-1.670	2.714	1.914	40	-0.697	-2.146	2.954
				41	1.826	-1.326	2.954

채택되어진 해석대상모델의 형상은 그림 2.2.10.2와 같고, 그림에서 그림 2.2.10.2(a)는 평면도, 그림 2.2.10.2(b)는 입체도이다. 구조물을 이루는 부재의 단위길이는 1.5m이며, 오각형 내부의 부재 길이는 1.29581m, 육각형 내부의 부재 길이는 1.53295m이며, 구면위에 모든 절점이 존재한다. 구의 반지름은 3.71703m이며, 구조물의 저면반지름은 3.32461m이다. 삼각형 단위모듈은 모두 2가지 형태로 나타나며, 각각의 단면적은 오각형 내부의 삼각형의 경우 $0.79253m^2$, 육각형 내부의 삼각형은 $1.00271m^2$이다. 여기서 삼각형의 세변의 길이에 대한 표준편차는 각각 0.11789과 0.01902로 계산되었다. 이상의 설명과 더불어 해석대상 모델의 절점 좌표는 표 2.2.10.3과 같고, 절점 및 부재번호는 그림 2.2.10.3와 같다.

해석대상모델에서 채택된 부재는 모든 모델에서 동일한 단면적을 가지는 것으로 가정한다. 부재의 강성에 따른 변화가 있지만 본 연구에서는 고려하지 않으며, 추후 연구하도록 한다. 또한 적용되는 재료의 물성치도 동일하게 적용하며 각각의 값들은 다음과 같다. 탄성계수 $E = 2.05x10^5 Mpa$, 단면적 $A = 4.564cm^2$ 이며, 하중벡터는 모든 절점에 동일한 하중이 작용한 경우(U)와 중앙부 여섯 절점만 하중이 작용하는 경우(C)로 가정하였다. 또한 경계조건의 경우도 모든 경계절점이 Pin지지 된 모델과 Fix지지 된 모델로 나누어 적용한다. 모델 명칭을 구분하기 위해서 휨자유도가 고려된 등분포하중의 Pin 모델일 경우 “MICD_t_UPin“과 같이 표기하여 사용하도록 한다.

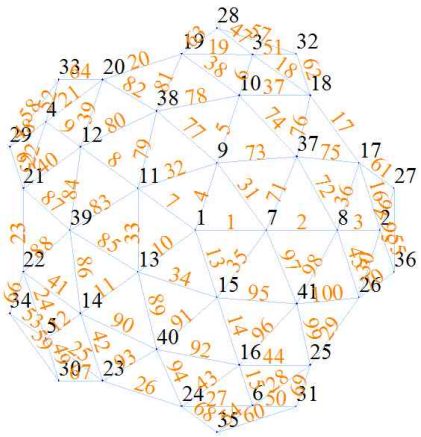
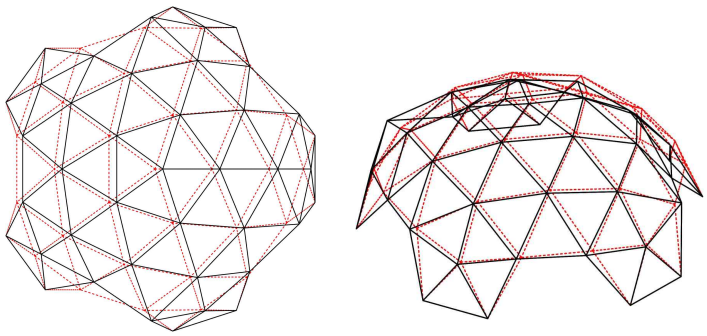


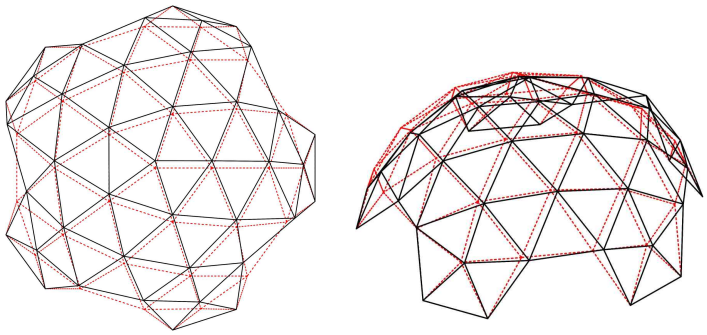
그림 2.2.10.3 해석대상모델의 절점번호 및 부재번호

우선 구조물의 좌굴모드의 해석에 대해서 초기형상에 대한 고유치해석을 수행하여 구조물의 고유모드를 계산하였다. 그림에서 최 저차 고유모드 네 개를 MICD 모델의 초기형상을 기준으로 나타내었으며, 라이즈-스팬이 비교적 높은 모델로 비대칭 고유모드를 얻을 수 있다. 스타 돔과 유사하게 절점간의 민감한 연성작용이 발생할 것으로 예상할 수 있으나 구조물의 형상이 얕은 돔 모델의 경우가 아니기 때문에 다양한 현상이 하중모드에 의해서 다르게 나타날 것으로 판단된다.

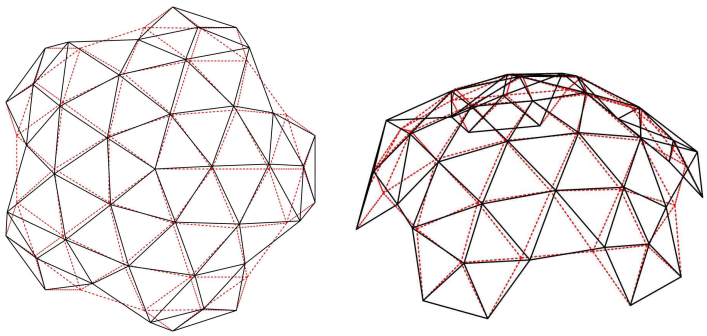
이상과 같이 MICD 모델의 고유좌굴모드해석을 수행하였으며, 해석결과는 그림 2.2.10.4에서 그림 2.2.10.6에 나타난 바와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 MICD 모델의 최 저차의 네 가지 고유모드 형상만을 나열하였다. 그림 2.2.10.4의 결과에서 볼 때, 대상모델의 꼭짓점에서 가장 크게 형상이 변하였고, 처음 두 모드는 대칭이며, 세 번째 모드는 중앙부의 변위벡터가 작게 나타났다.



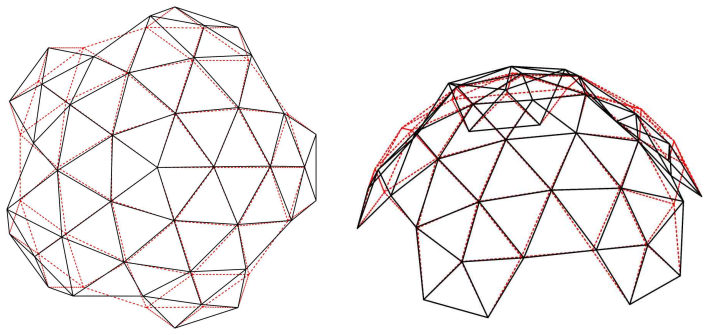
(a) 1st mode



(a) 2nd mode

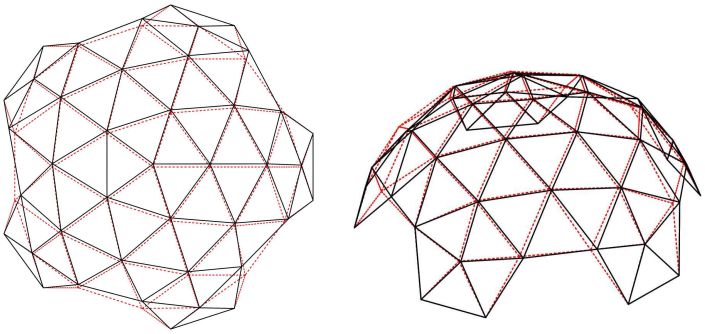


(a) 3th mode

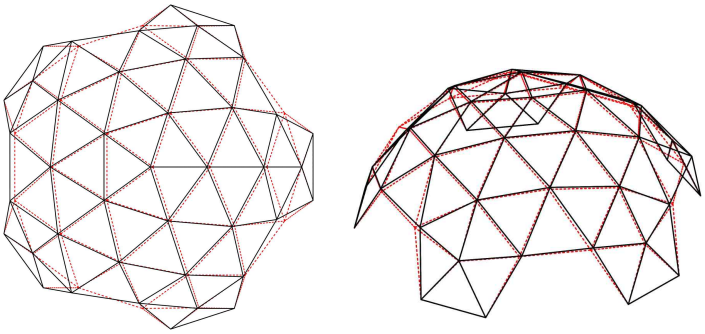


(a) 4th mode

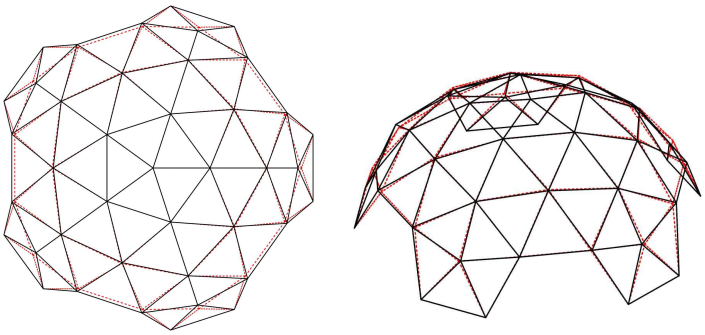
그림 2.2.10.4 MICD_t_nPin 모델의 고유좌굴모드의 형상



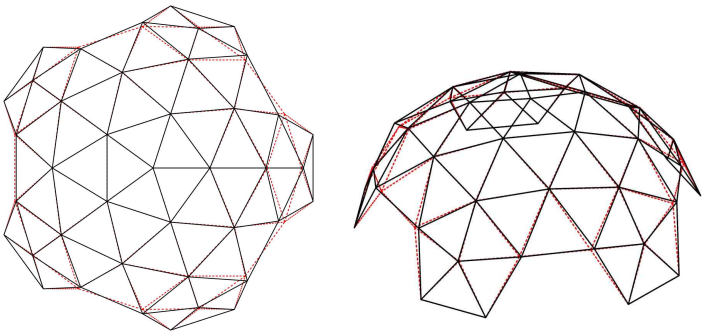
(a) 1st mode



(a) 2nd mode

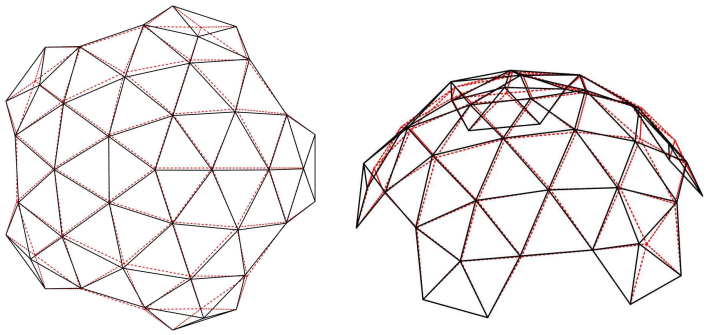


(a) 3th mode

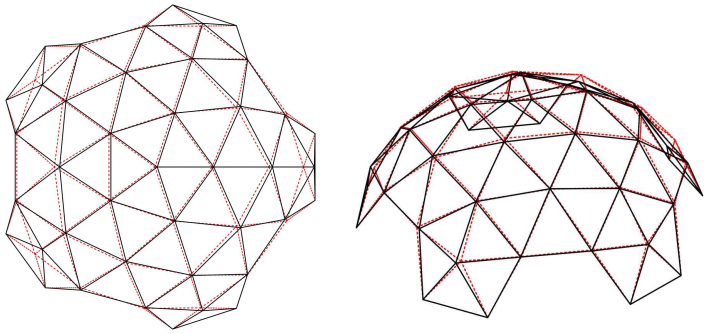


(a) 4th mode

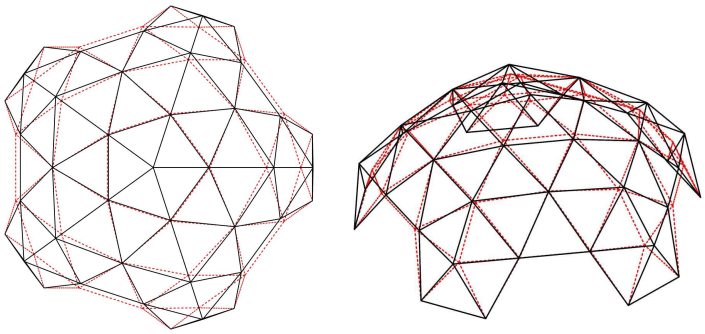
그림 2.2.10.5 MICD_b_nPin 모델의 고유좌굴모드의 형상



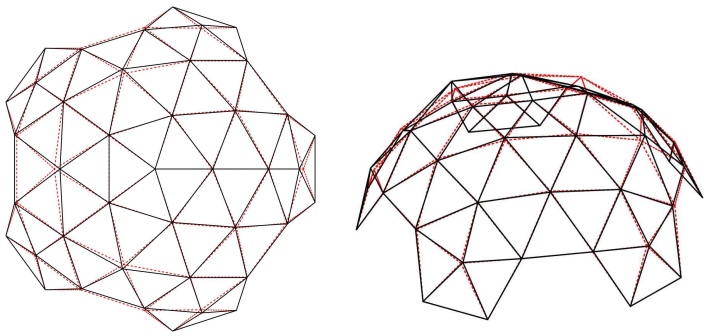
(a) 1st mode



(a) 2nd mode



(a) 3th mode



(a) 4th mode

그림 2.2.10.6 MICD_b_nFix 모델의 고유좌굴모드의 형상

11. MICD 모델의 비선형 불안정거동 및 임계좌굴하중

가. MICD_t 모델의 비선형 불안정 거동

MICT 모델의 비선형 불안정 거동을 알아보기 위해서 1절점 3자유도 구조모델로 가정된 대상모델(MICD_t)에 대해서 해석을 수행하도록 한다. 하중의 조건에 대해서 등분포 하중과 중앙부에 집중된 하중벡터로 나누도록 하며, 편의상 등분포 하중과 집중하중으로 정의하도록 한다. 일반적으로 라이즈-스팬 비율이 낮은 형상에서 나타나는 불안정 좌굴현상의 연구는 많이 다루어졌으나 비교적 높은 형상의 돔형 구조물에서는 연구가 미비한 편이다. 공간 트러스형 구조물에서 나타나는 좌굴의 형상은 주로 절점에서 국부적으로 발생하는 좌굴과 전체 구조물이 스냅 현상을 일으키는 것 그리고 압축부재가 좌굴하는 세 가지 현상으로 분류되며, 구조물이 복잡할수록 이러한 좌굴현상들의 연성작용에 의해서 불안정하게 거동한다.

본 장에서 다루게 될 MICD_t 모델의 경계조건에서 구조물의 하부에 지지구조물이 있다 하더라도 고정된 것으로 가정하도록 한다. 초기 형상의 고유좌굴모드에서 나타난 바와 같이 벡터형상이 비대칭으로 나타났으며, 구조물의 완전형상으로 가정된 결과에 대해서만 다루도록 한다. 불완전성에 대한 구조물의 변화와 비선형성에 따른 분기거동은 민감한 변화에 대한 관찰임으로 추후 해석대상으로 구성한다.

우선 MICD_t_UPin 모델의 결과를 먼저 살펴보면, 그림 2.2.11.1에 나타난 바와 같이 정점의 경로변화는 뜀-좌굴의 형상으로 타나났으며, 첫 번째 오각꼭짓점에 해당하는 절점의 수직방향 변위그래프인 그림 2.2.11.2는 이와는 다르게 나타났다. 두 그림에서 절점의 좌굴현상을 예측할 수 있으며, 스타 돔 모델을 다룬 문헌에서 쉽게 찾아볼 수 있는 형상이다. 나머지 절점에 대해서도 이와 유사하며, 그림 2.2.11.3와 그림 2.2.11.4에서도 동일한 결과를 보이고 있다. 구조물의 비선형 거동에 대한 대칭성을 살펴보기 위해서 첫 번째 오각형의 꼭짓점 변위의 거동을 그림 2.2.11.5에서 그림 2.2.11.7에 나타내었다. 그림에서 나타난 바와 같이 두 방향의 수평변위에 대해서는 중앙부 절점을 기준으로 대칭거동을 하고 있으며, 수직변위도 동일하게 변화하고 있다. 바깥쪽 절점에 대해서도 거동을 분석하기 위해서 오각도형과 연결된 육각형 도형 중심부의 절점변위도 그림 2.2.11.8에서 그림 2.2.11.10에 나타내었으며, 오각형 꼭짓점과 같이 대칭형 비선형 거동을 하고 있다.

다음으로 MICD_t_CPin 모델의 결과를 살펴보면, MICD_t_UPin의 모델과 유사한 결과를 얻었으며, 그림 2.2.11.11에 나타난 바와 같이 정점의 경로변화는 뜀-좌굴의 형상으로 타나났고, 첫 번째 오각꼭짓점에 해당하는 절점의 수직방향 변위그래프인 그림 2.2.11.12는 이와는 다르게 나타났다. 그러나 외각 오각도형의 중심절점 그림 2.2.11.14의 변화는 연결된 육각형 중앙절점 그림 2.2.11.13과는 다른 방향으로 진행하였으며, 이러한 것은 집중하중으로 인한 영향으로 판단된다. 구조물의 대칭거동도 그림 2.2.11.15에서 그림 2.2.11.17에 나타내었고, 모두 대칭형 변위거동을 보이고 있다. 바깥쪽 절점에 대해서도 거동을 분석하기 위해서 오각도형과 연결된 육각형 도형 중심부의 절점변위도 그림 2.2.11.18에서 그림 2.2.11.20에 나타내었으며, 오각형 꼭짓점과 같이 대칭형 비선형 거동을 하고 있다.

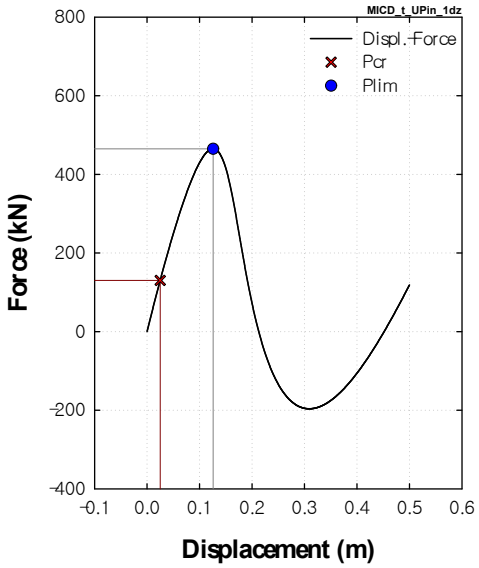


그림 2.2.11.1
하중-변위곡선(MICD_t_UPin)
(1-dz)

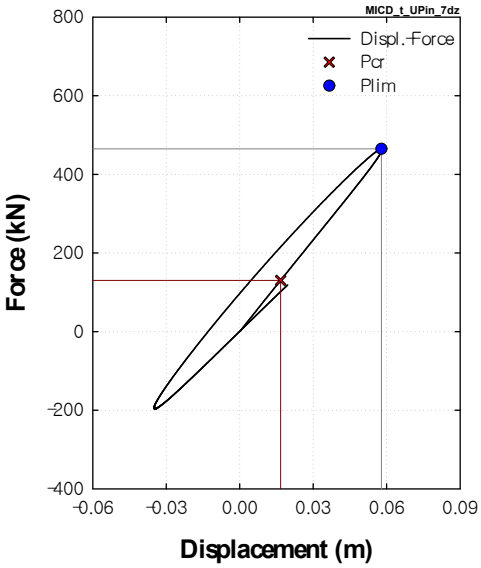


그림 2.2.11.2
하중-변위곡선(MICD_t_UPin)
(7-dz)

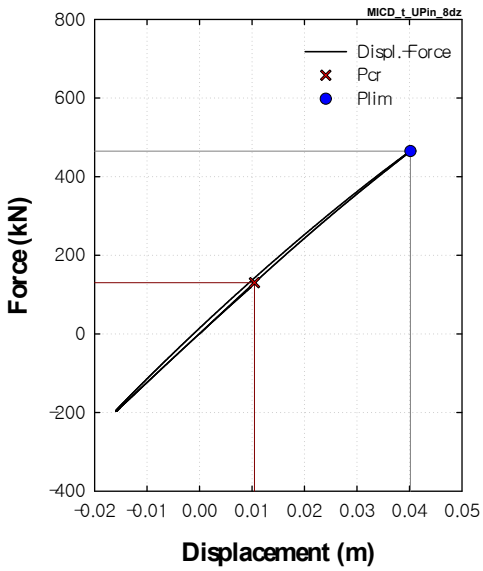


그림 2.2.11.3
하중-변위곡선(MICD_t_UPin)
(8-dz)

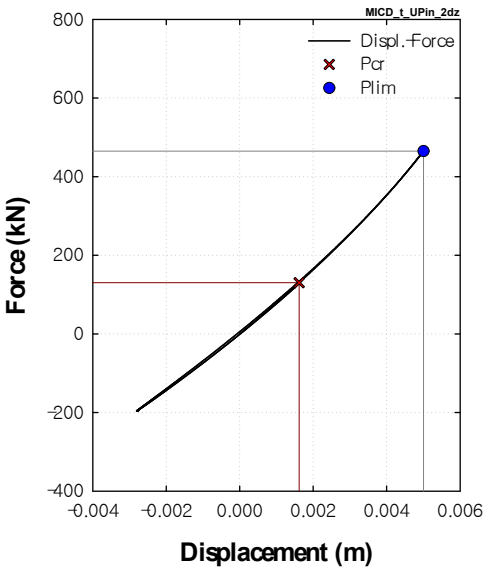


그림 2.2.11.4
하중-변위곡선(MICD_t_UPin)
(2-dz)

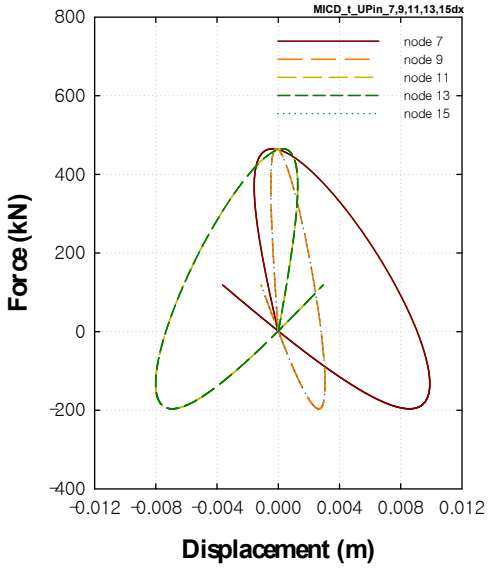


그림 2.2.11.5
하중-변위곡선(MICD_t_UPin)
(7,9,11,13,15-dx)

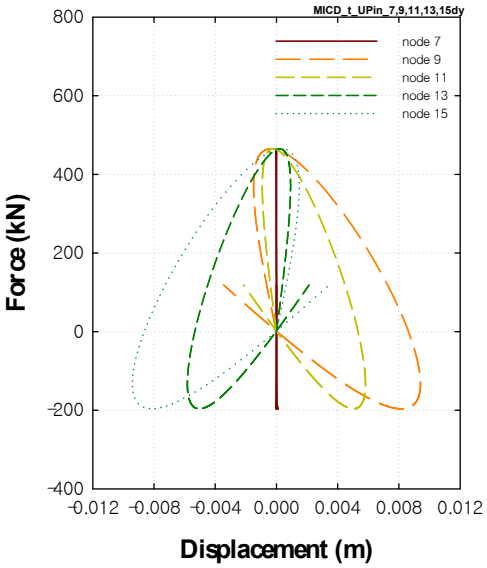


그림 2.2.11.6
하중-변위곡선(MICD_t_UPin)
(7,9,11,13,15-dy)

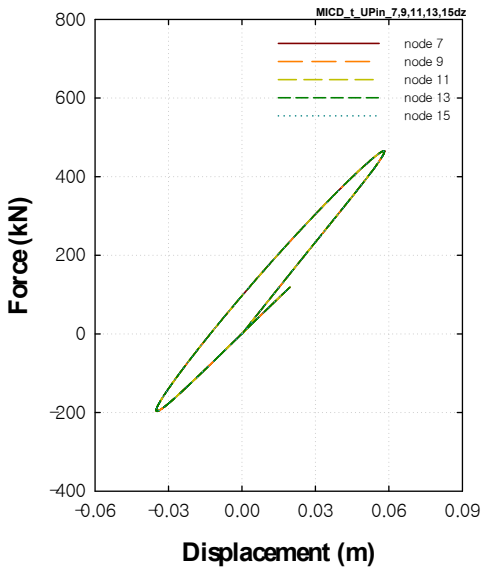


그림 2.2.11.7
하중-변위곡선(MICD_t_UPin)
(7,9,11,13,15-dz)

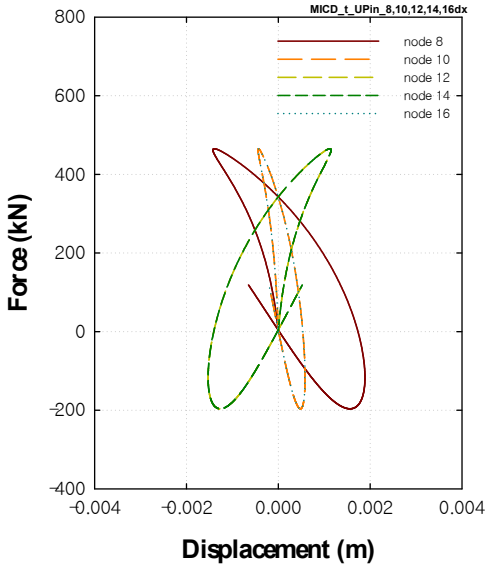


그림 2.2.11.8
하중-변위곡선(MICD_t_UPin)
(8,10,12,14,16-dx)

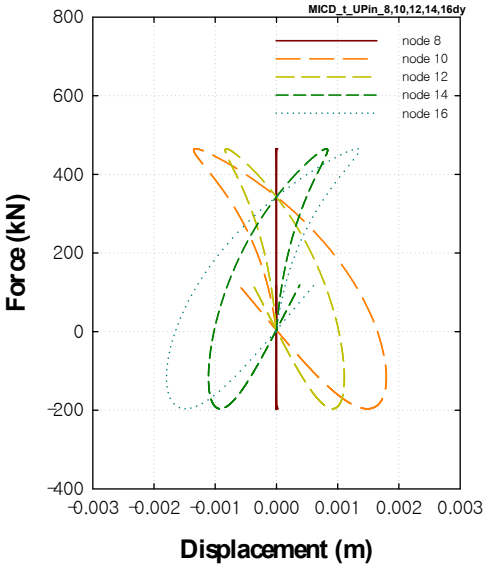


그림 2.2.11.9
하중-변위곡선(MICD_t_UPin)
(8,10,12,14,16-dy)

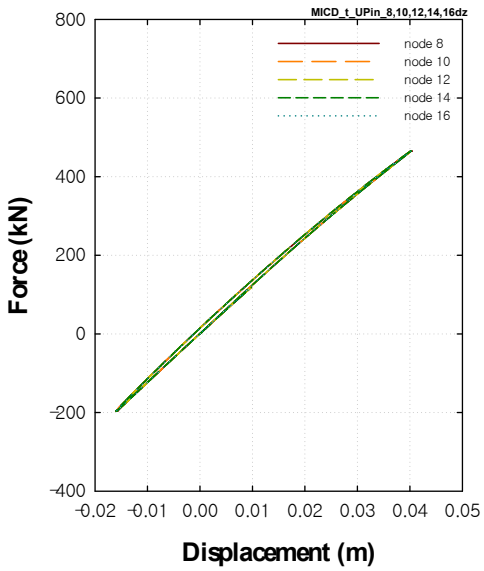


그림 2.2.11.10
하중-변위곡선(MICD_t_UPin)
(8,10,12,14,16-dz)

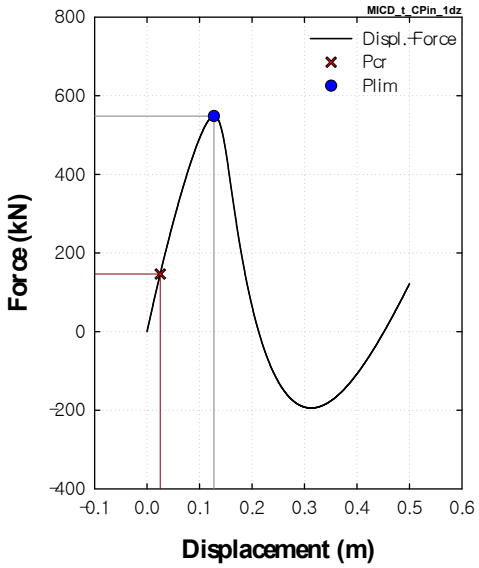


그림 2.2.11.11
하중-변위곡선(MICD_t_CPin)
(1-dz)

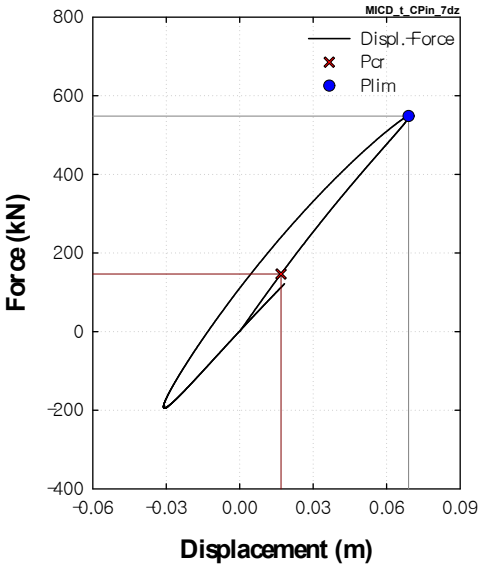


그림 2.2.11.12
하중-변위곡선(MICD_t_CPin)
(7-dz)

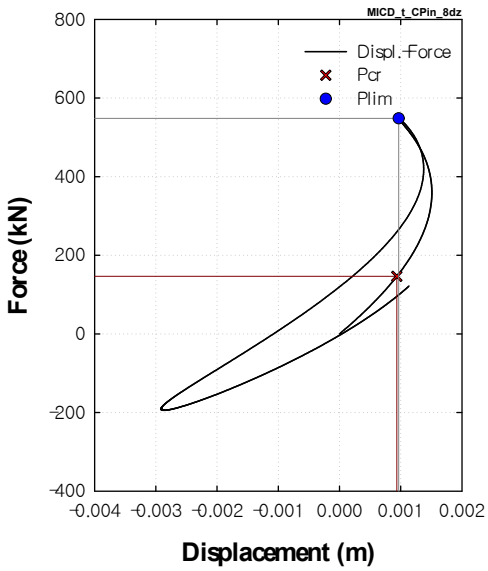


그림 2.2.11.13
하중-변위곡선(MICD_t_CPin)
(8-dz)

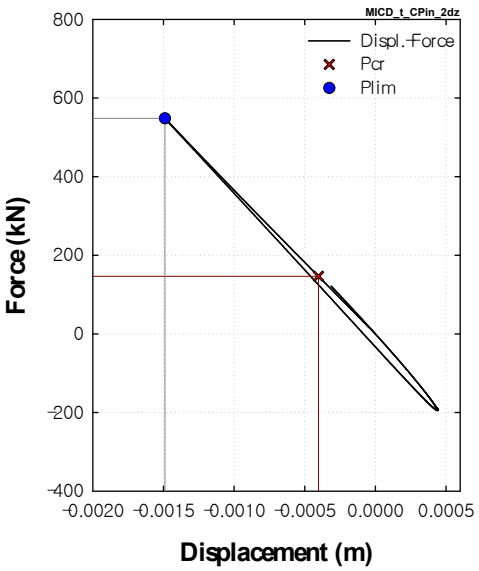


그림 2.2.11.14
하중-변위곡선(MICD_t_CPin)
(2-dz)

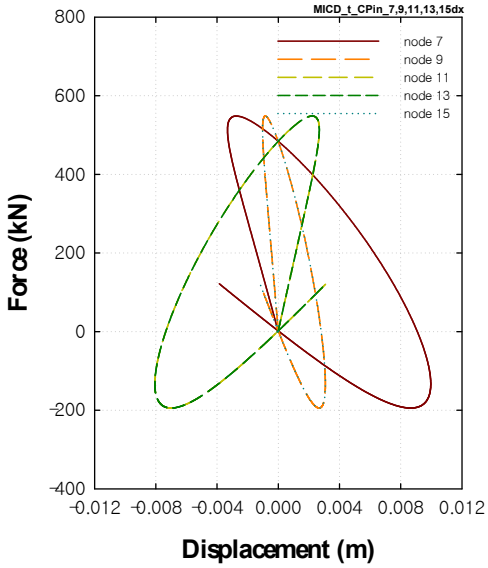


그림 2.2.11.15
하중-변위곡선(MICD_t_CPin)
(7,9,11,13,15-dx)

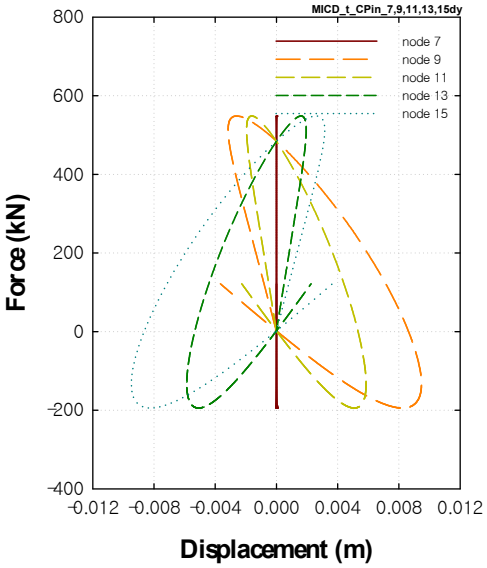


그림 2.2.11.16
하중-변위곡선(MICD_t_CPin)
(7,9,11,13,15-dy)

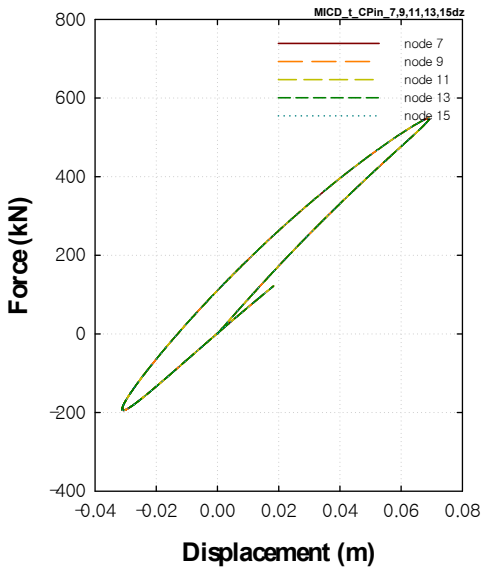


그림 2.2.11.17
하중-변위곡선(MICD_t_CPin)
(7,9,11,13,15-dz)

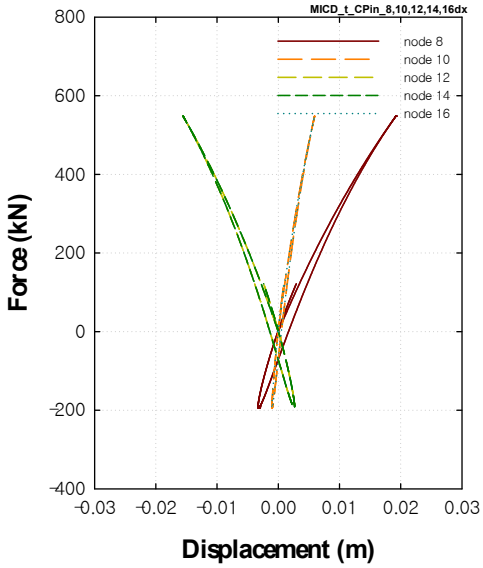


그림 2.2.11.18
하중-변위곡선(MICD_t_CPin)
(8,10,12,14,16-dx)

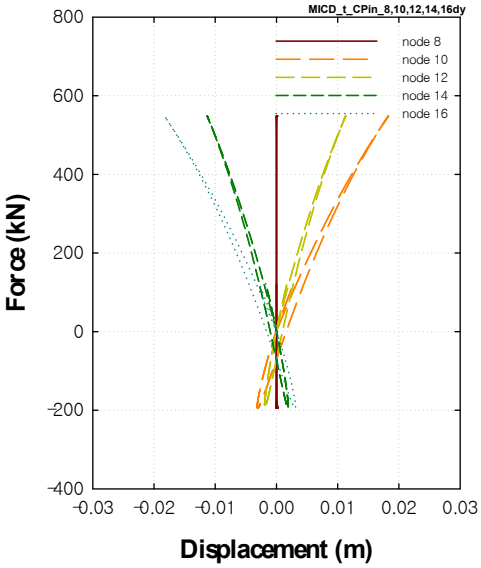


그림 2.2.11.19
하중-변위곡선(MICD_t_CPin)
(8,10,12,14,16-dy)

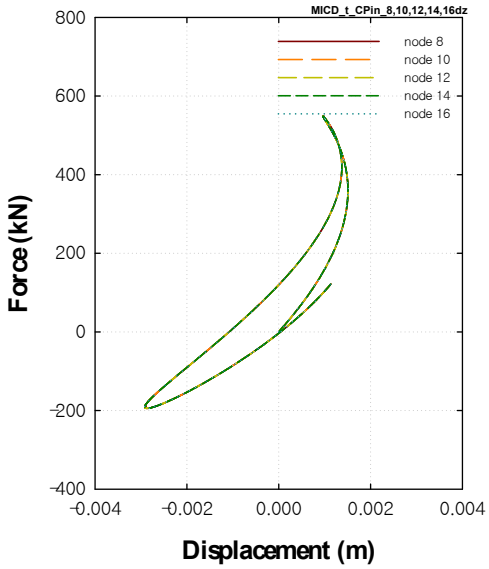


그림 2.2.11.20
하중-변위곡선(MICD_t_CPin)
(8,10,12,14,16-dz)

나. MICD_b 모델의 비선형 불안정 거동

공간 트러스형 모델과는 달리 MICD_b모델은 각 절점에 6자유도로 해석하기 위한 모델이다. 이동변위 외에 회전변위성분이 포함된 모델의 해석결과에 대한 검증은 A장에서 수행하였으며, 요소의 분할조건에 따라 해의 정밀도는 높아진다. 본 절에서는 대상모델의 비선형 해석에서 절점간의 연결만으로 구조물을 모델링하며, 구조물의 불안정거동에 대해서 부재의 강성레벨과 함께 고찰하였다. 사용되어진 부재는 모두 동일한 단면적과 동일한 재료로 구성되도록 하였으며, 부재의 단면이차모멘트에 대해서는 핀 절점 구조물에서의 압축재 좌굴하중에 따라 요구되는 단면이차모멘트 중 가장 큰 값을 이용하였고 이를 I_0로 나타내었다. 단면강성에 따른 변화를 살펴보기 위해서 단면적은 고정된 값을 이용하며, I_0를 기준으로 β값을 곱하여 재료 물성치 초기데이터로 사용하였다. 본 연구에서 고려되어진 단면 휨-강성비율 β는 0.75, 1.0, 1.25 및 1.5로 적용하였다.

회전자유도가 포함된 경우 절점의 불완전성은 매우 중요한 역할을 하지만 본 대상모델의 연구범위에서는 고려하지 않도록 한다. 초기조건에 대한 모델의 변화를 살펴보기 위해서 하중조건 외에 경계조건에 대한 변화를 고려하였다. 경계부의 절점이 핀절점으로 가정된 모델 MICD_b_nPin과 회전에 대한 구속력이 있는 모델 MICD_b_nFix을 대상으로 등분포하중모델과 집중하중모델로 나누어 살펴보았다.

각각의 모델에 대한 해석결과를 그림을 통하여 나타내었으며, 중앙부 절점의 수직변위 양상에 대해서 부재강성에 따른 형태의 변화를 살펴보았다. 해석결과에 대해서 그림 2.2.11.21에서 그림 2.2.11.24는 MICD_b_UPin모델에 대한 결과이며, 그림에서 보는 바와 같이 강성의 증가에 따른 극한점 하중레벨의 증가가 나타났다. 이것은 회전강성의 증가에 따라 전체강성도 증가하는 것을 알 수 있으며, 단면적에 따른 변화는 크게 없고, 휨-강성에 따라 증가하는 당연한 결과에 도달하고 있다. MICD_b_CPin모델의 해석결과인 그림 2.2.11.25에서 그림 2.2.11.28도 동일한 결과를 나타내고 있다. 경계조건의 차이에서도 이와 같은 비선형 거동은 동일하며, MICD_b_UFix 및 MICD_b_CFix 모델의 결과인 그림 2.2.11.29에서 그림 2.2.11.36에서 나타난 결과에서 보더라도 부재의 강성비의 증가에 따라 증가하는 동일한 결과를 얻었다.

임계좌굴하중의 변화에서도 강성비의 증가에 따라 대부분 증가하는 변화를 하였으며, 최소고유치의 변화율이 0인 지점의 변화도 이와 유사하게 나타나고 있다. 이것은 핀 절점의 공간구조물에서와는 다른 양상이며, 압축재 좌굴하중의 강성 이상을 가지는 모델에서는 절점강성을 기대할 수 없는 모델의 초기설계조건에 비해 덜 민감한 것을 생각할 수 있다. 정점의 변화에 따라 X축을 따라 배치된 절점의 변화인 그림 2.2.11.37에서 그림 2.2.11.40의 결과도 강성의 변화에 따라 변위-하중곡선도 이에 상응하는 결과를 나타내고 있으며, 모든 경우에서 유사하게 반응하고 있다.

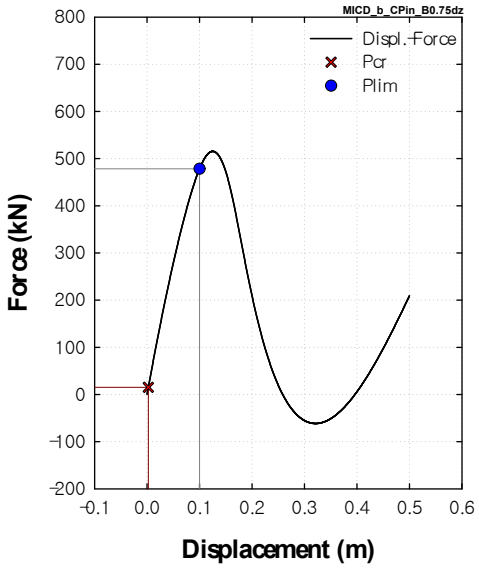


그림 2.2.11.21
하중-변위곡선(MICD_b_UPin)
(1-dz, β=0.75)

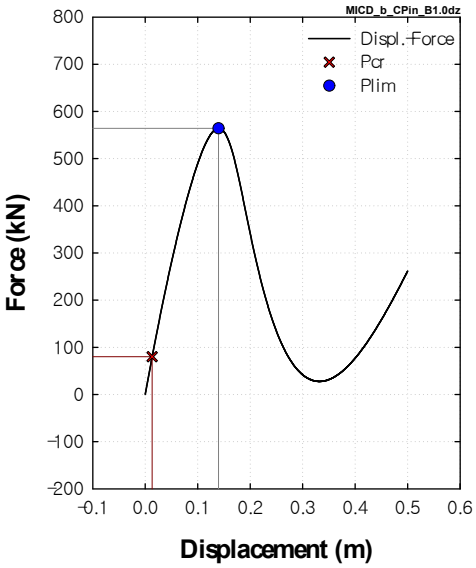


그림 2.2.11.22
하중-변위곡선(MICD_b_UPin)
(1-dz, β=1.00)

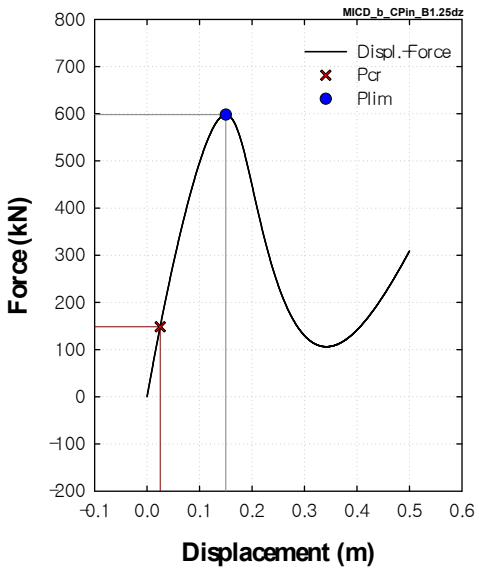


그림 2.2.11.23
하중-변위곡선(MICD_b_UPin)
(1-dz, β=1.25)

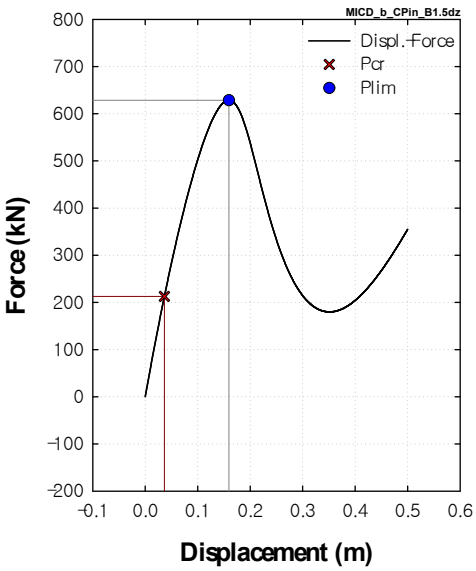


그림 2.2.11.24
하중-변위곡선(MICD_b_UPin)
(1-dz, β=1.50)

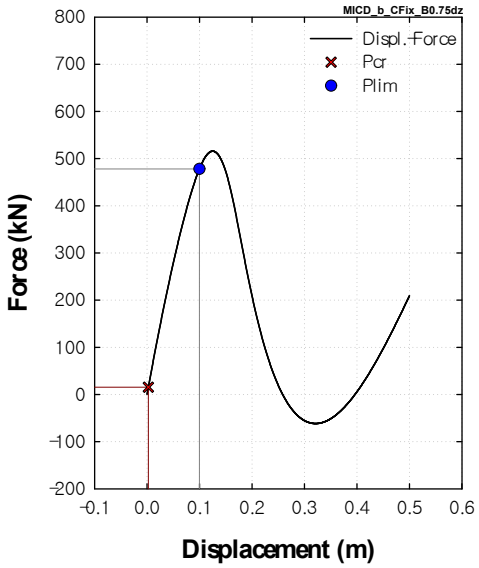


그림 2.2.11.25
하중-변위곡선(MICD_b_CPin)
(1-dz, β=0.75)

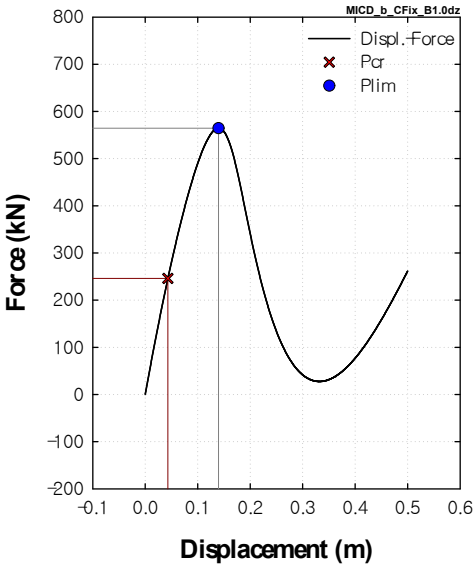


그림 2.2.11.26
하중-변위곡선(MICD_b_CPin)
(1-dz, β=1.00)

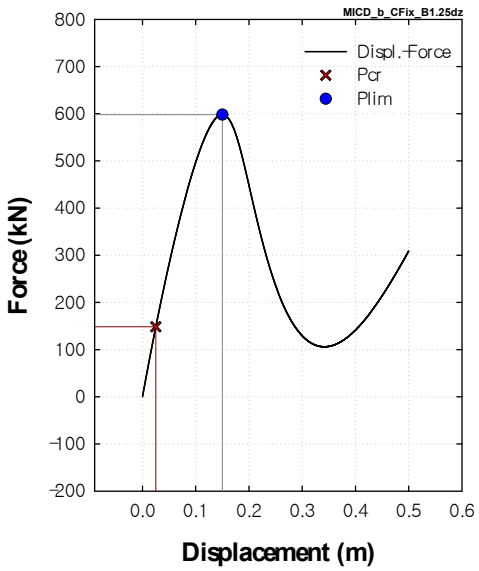


그림 2.2.11.27
하중-변위곡선(MICD_b_CPin)
(1-dz, β=1.25)

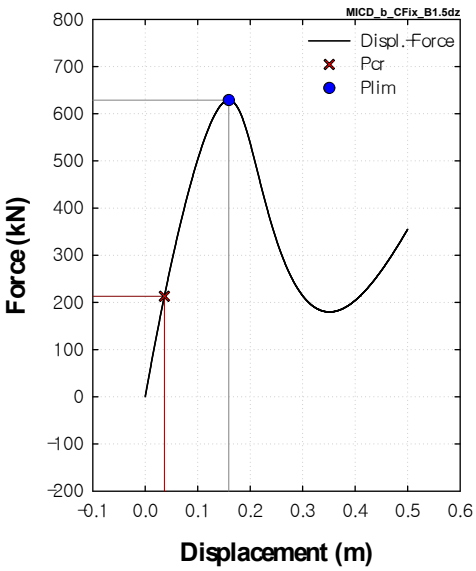


그림 2.2.11.28
하중-변위곡선(MICD_b_CPin)
(1-dz, β=1.50)

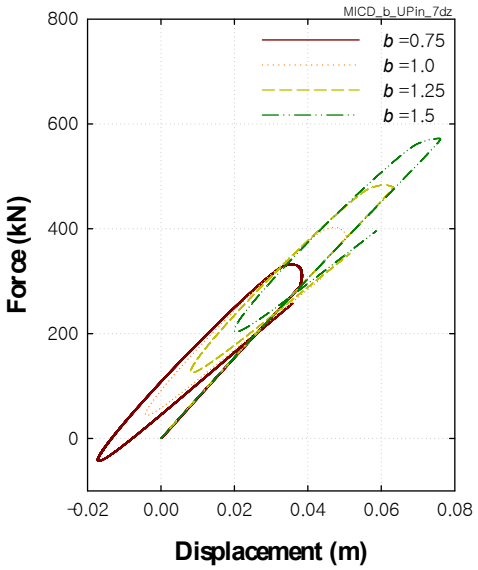


그림 2.2.11.29
하중-변위곡선(MICD_b_UFix)
(1-dz, β=0.75)

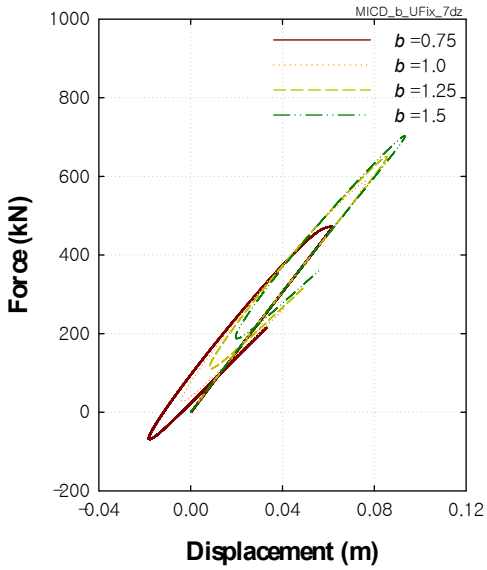


그림 2.2.11.30
하중-변위곡선(MICD_b_UFix)
(1-dz, β=1.00)

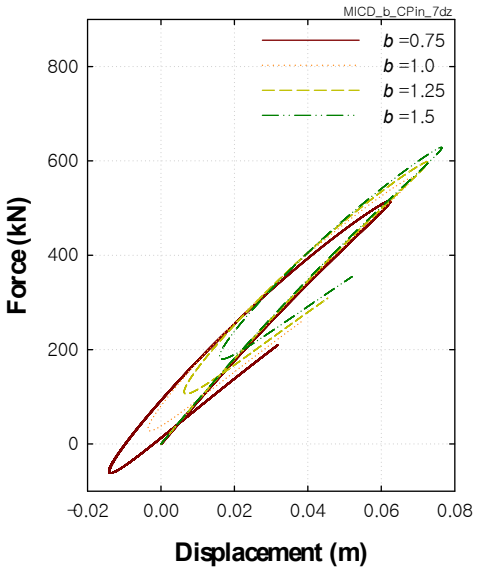


그림 2.2.11.31
하중-변위곡선(MICD_b_UFix)
(1-dz, β=1.25)

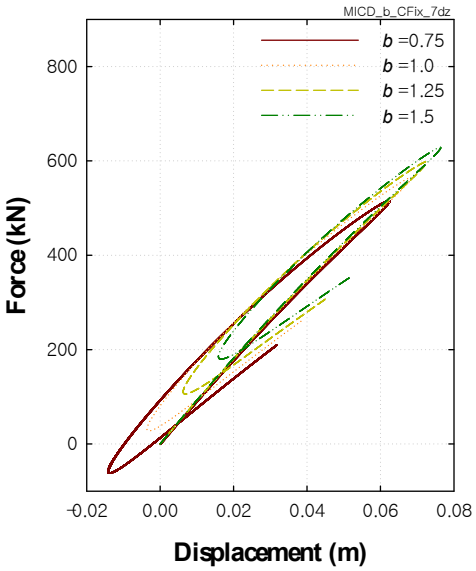


그림 2.2.11.32
하중-변위곡선(MICD_b_UFix)
(1-dz, β=1.50)

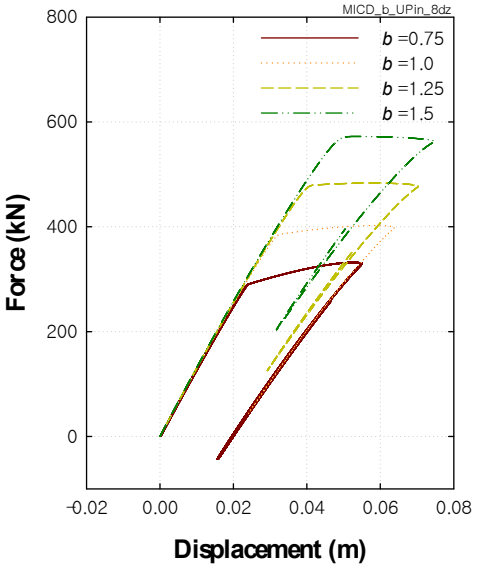


그림 2.2.11.33
하중-변위곡선(MICD_b_CFix)
(1-dz, β=0.75)

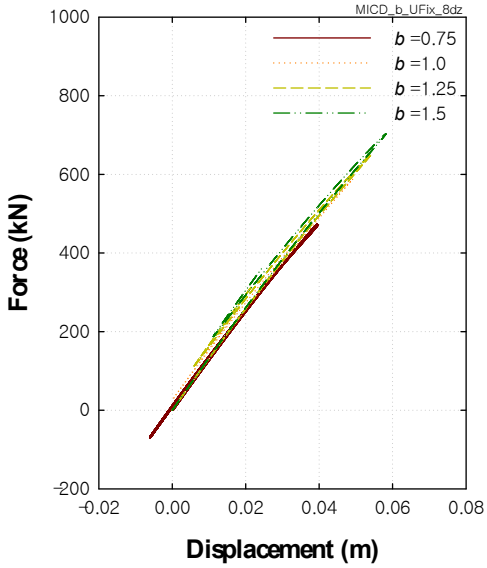


그림 2.2.11.34
하중-변위곡선(MICD_b_CFix)
(1-dz, β=1.00)

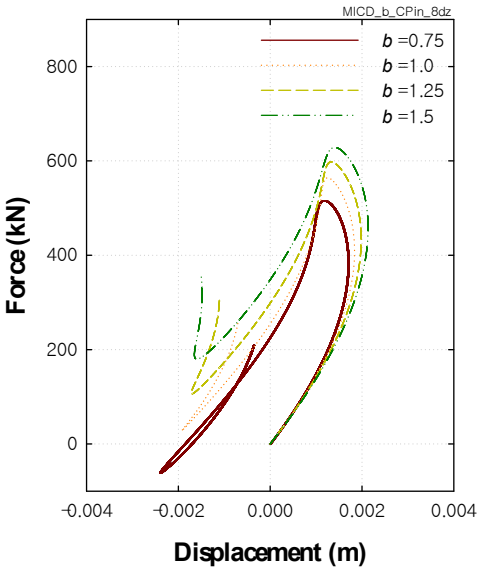


그림 2.2.11.35
하중-변위곡선(MICD_b_CFix)
(1-dz, β=1.25)

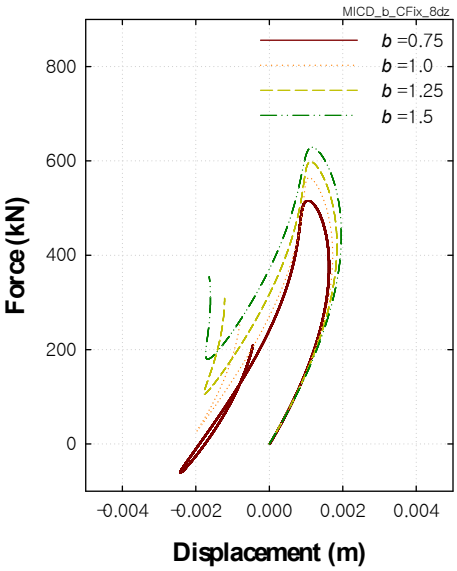


그림 2.2.11.36
하중-변위곡선(MICD_b_CFix)
(1-dz, β=1.50)

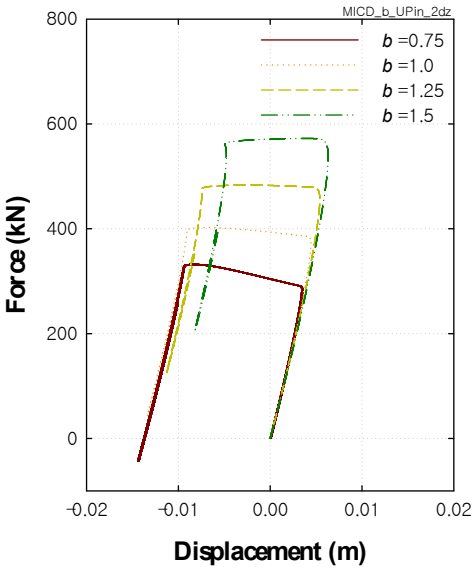


그림 2.2.11.37
하중-변위곡선(MICD_b_UPin)
(7-dz)

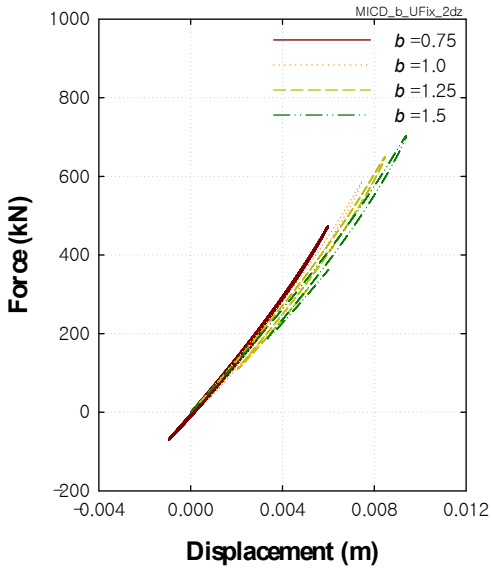


그림 2.2.11.38
하중-변위곡선(MICD_b_CPin)
(7-dz)

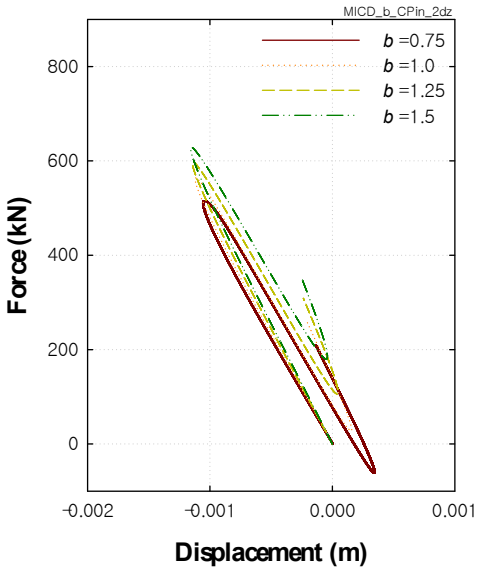


그림 2.2.11.39
하중-변위곡선(MICD_b_UFix)
(7-dz)

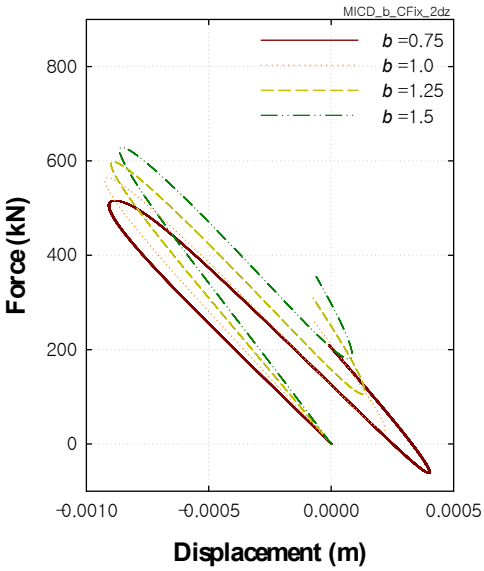
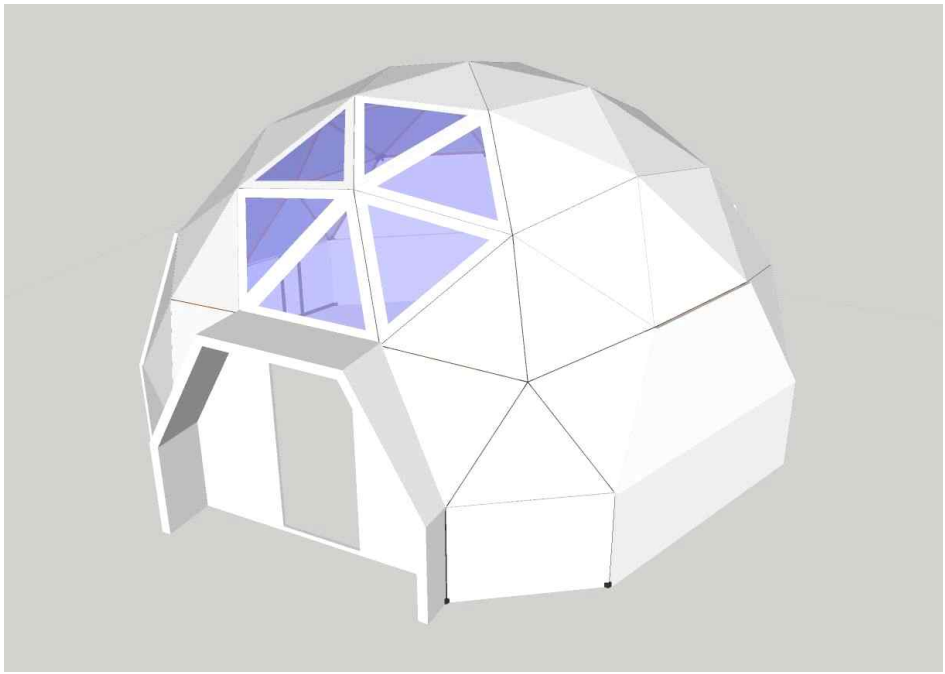


그림 2.2.11.40
하중-변위곡선(MICD_b_CFix)
(7-dz)

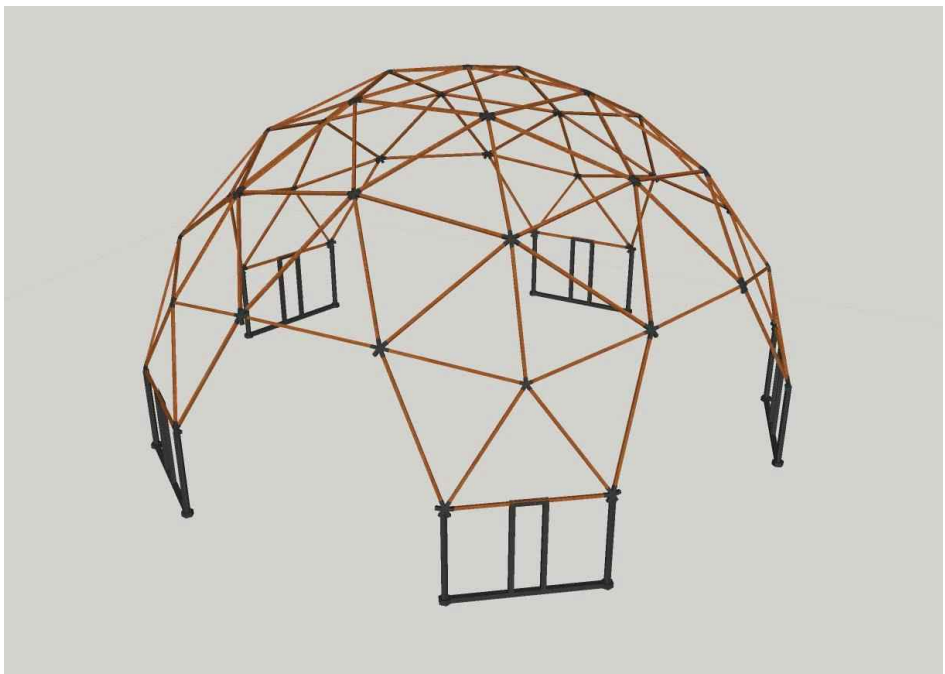
12. MICD 모델의 모듈화 평면계획과 확장설계모형

모듈러 돔 모델의 TYPE별 설계도면을 본 절에서 제시하도록 하며, 각 형태에 대한 확장된 설계모형으로 설계 및 시공가능하게 한다.

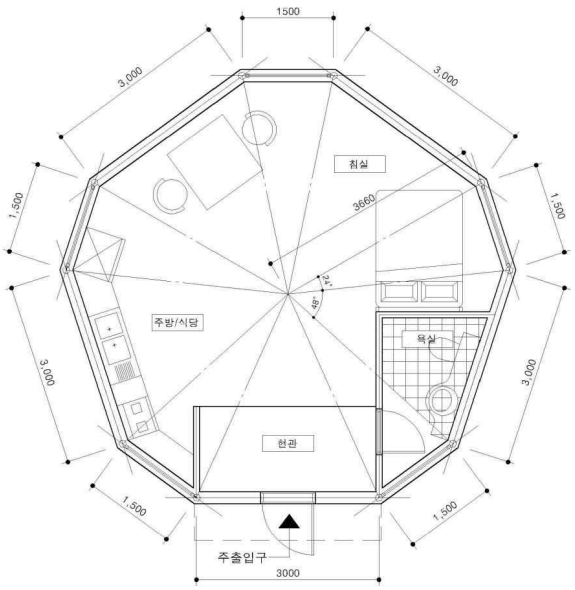
가. Type A



조감도 (Type A)



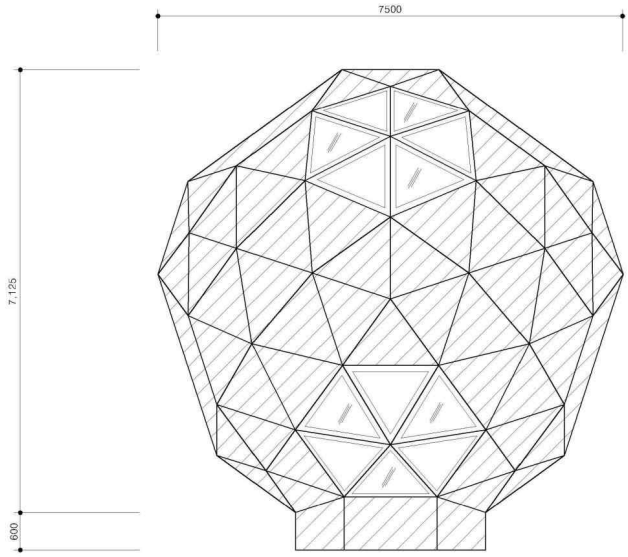
골조 투시도 (Type A)



A타입 1층 평면도

SCALE : 1/60

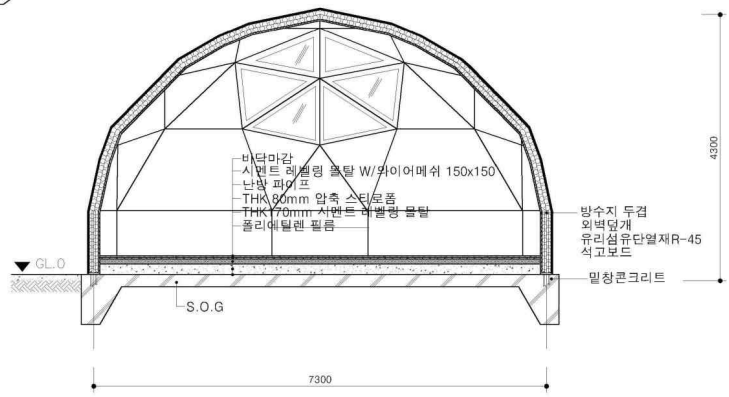
한국기술교육대학교	
PROJECT TITLE	모듈러 구조 시스템
DRAWING TITLE	A타입 1층 평면도
APPROVAL DATE	APPROVED
PROJECT NO.	CHECKED 2 이승재
ENGINEER	CHECKED 1 조상동
SCALE A4 : 1/60	DRAWN / DATE
DRAWING NO.	A-101



A타입 지붕층 평면도

SCALE : 1/60

한국기술교육대학교	
PROJECT TITLE	모듈러 구조 시스템
DRAWING TITLE	A타입 지붕층 평면도
APPROVAL DATE	APPROVED
PROJECT NO.	CHECKED 2 이승재
ENGINEER	CHECKED 1 조상동
SCALE A4 : 1/60	DRAWN / DATE
DRAWING NO.	A-102

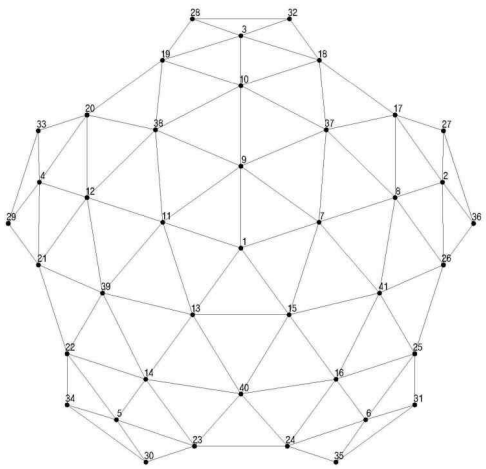


A타입 단면도

SCALE : 1/60

한국기술교육대학교	
PROJECT TITLE	모듈러 구조 시스템
DRAWING TITLE	A타입 단면도
APPROVAL DATE	APPROVED
PROJECT NO.	CHECKED 2 이승세
DESIGNER	CHECKED 1 조일동
SCALE A4 : 1/60	DRAWN / DATE
DRAWING NO.	A-105

NODE	X	Y	Z
1	0	0	3717
2	3324.6	0	1662.3
3	1027.35	3161.925	1662.3
4	-2689.65	1954.125	1662.3
5	-2689.65	-1954.13	1662.3
6	1027.35	-3161.93	1662.3
7	1275.975	0	3491.175
8	2551.95	0	2702.55
9	394.275	1213.5	3491.175
10	788.625	2427.075	2702.55
11	-1032.3	750	3491.175
12	-2064.6	1500	2702.55
13	-1032.3	-750	3491.175
14	-2064.6	-1500	2702.55
15	394.275	-1213.5	3491.175
16	788.625	-2427.08	2702.55
17	2946.225	1213.5	1914
18	2064.6	2427.075	1914
19	-243.675	3177.075	1914
20	-1670.25	2713.5	1914
21	-3096.9	750	1914
22	-3096.9	-750	1914
23	-1670.25	-2713.5	1914
24	-243.675	-3177.08	1914
25	2064.6	-2427.08	1914
26	2946.225	-1213.5	1914
27	3584.25	750	638.025
28	394.275	3640.575	638.025
29	-3340.58	1500	638.025
30	-2458.88	-2713.5	638.025
31	1820.925	-3177.08	638.025
32	1820.85	3177.075	638.025
33	-2458.88	2713.5	638.025
34	-3340.58	-1500	638.025
35	394.275	-3640.58	638.025
36	3584.25	-750	638.025
37	1825.5	1326.3	2953.725
38	-697.275	2146.05	2953.725
39	-2256.45	0	2953.725
40	-697.275	-2146.5	2953.725
41	1825.5	-1326.3	2953.725

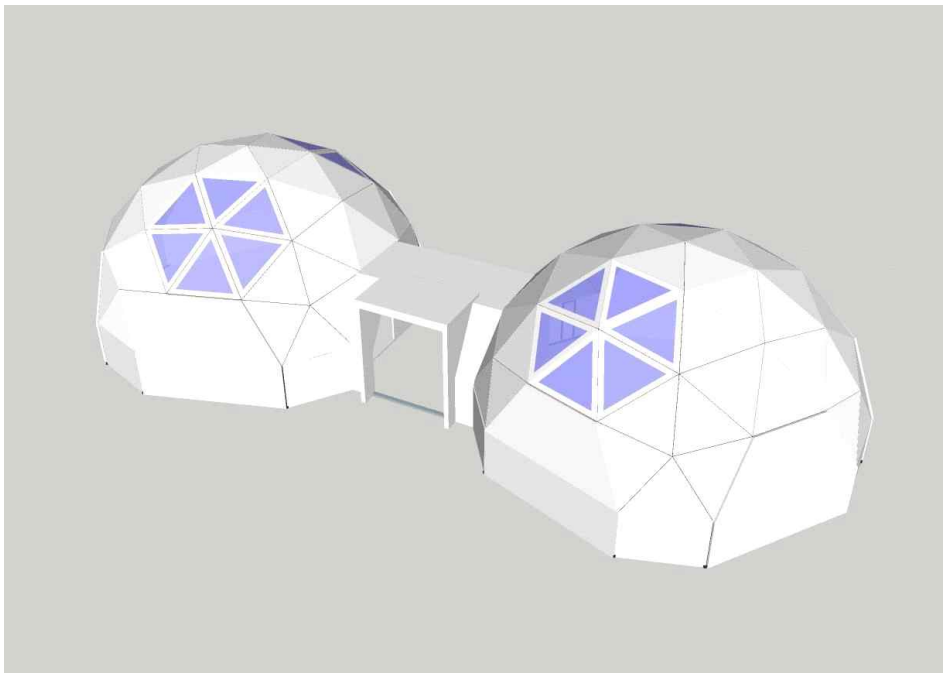


좌표(Coordinate)

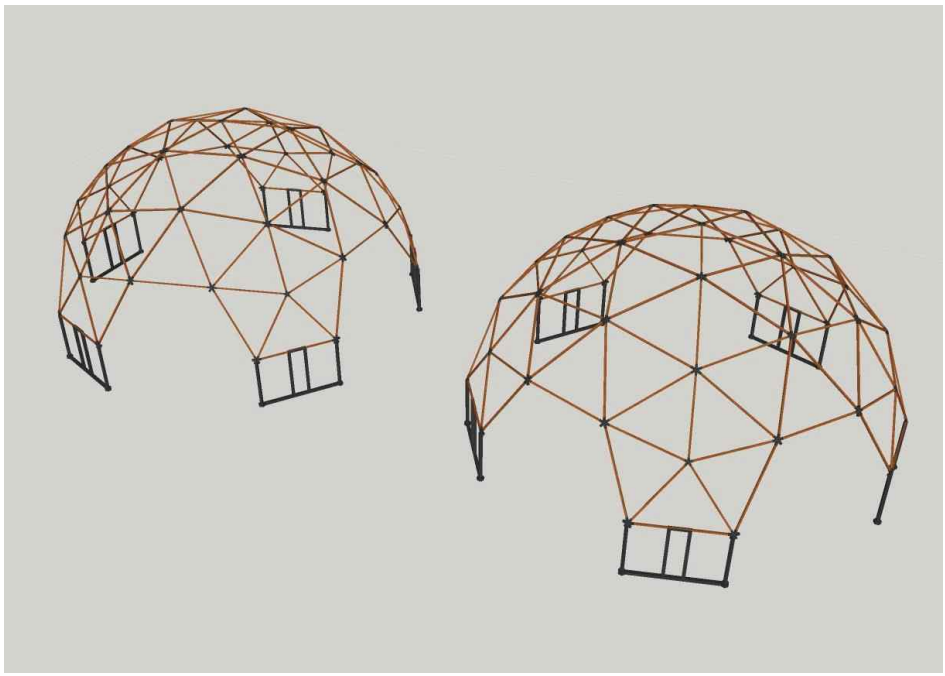
SCALE : 1/60

한국기술교육대학교	
PROJECT TITLE	모듈러 구조 시스템
DRAWING TITLE	좌표(Coordinate)
APPROVAL DATE	APPROVED
PROJECT NO.	CHECKED 2 이승세
DESIGNER	CHECKED 1 조일동
SCALE A4 : 1/60	DRAWN / DATE
DRAWING NO.	A-103

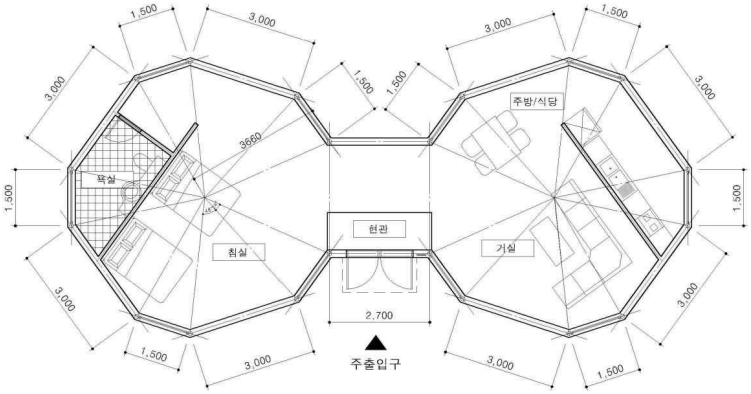
나. Type B



조감도 (Type B)



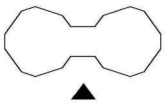
골조 투시도 (Type B)

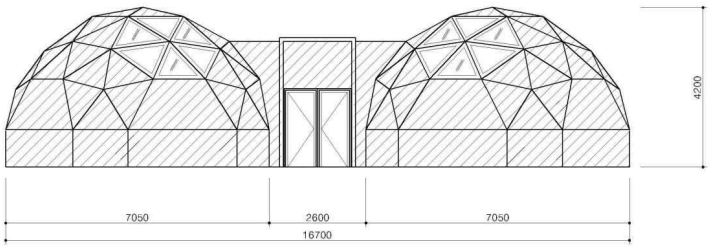


B타입 1층 평면도

SCALE : 1/100

한국기술교육대학교	
PROJECT TITLE	모듈러 구조 시스템
DRAWING TITLE	B타입 1층 평면도
APPROVAL DATE	APPROVED
PROJECT NO.	CHECKED 2 이승세
DRAWER	CHECKED 1 조길동
SCALE A4 : 1/100	DRAWN / DATE
DRAWING NO.	B-101

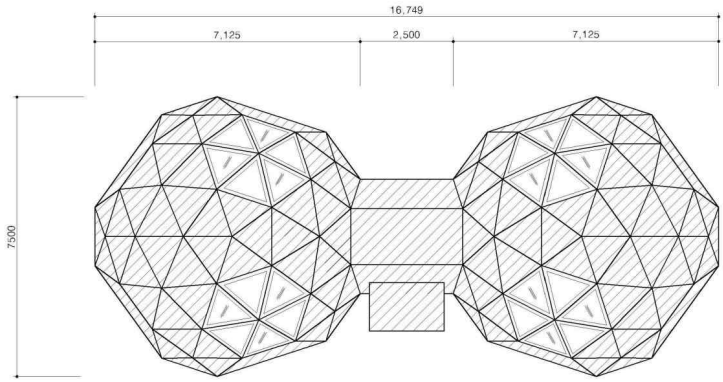




B타입 정면도

SCALE : 1/100

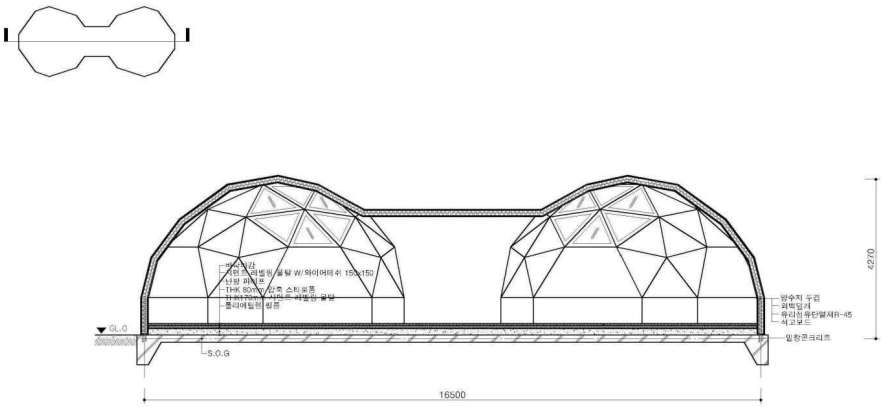
한국기술교육대학교	
PROJECT TITLE	모듈러 구조 시스템
DRAWING TITLE	B타입 정면도
APPROVAL DATE	APPROVED
PROJECT NO.	CHECKED 2 이승세
DRAWER	CHECKED 1 조길동
SCALE A4 : 1/100	DRAWN / DATE
DRAWING NO.	B-103



B타입 지붕층 평면도

SCALE : 1/100

한국기술교육대학교	
PROJECT TITLE	모듈러 구조 시스템
DRAWING TITLE	B타입 지붕층 평면도
APPROVAL DATE	APPROVED
PROJECT NO.	CHECKED 2 이승세
DRAWN BY	CHECKED 1 조길동
SCALE A4 : 1/100	DRAWN / DATE
DRAWING NO.	B-102

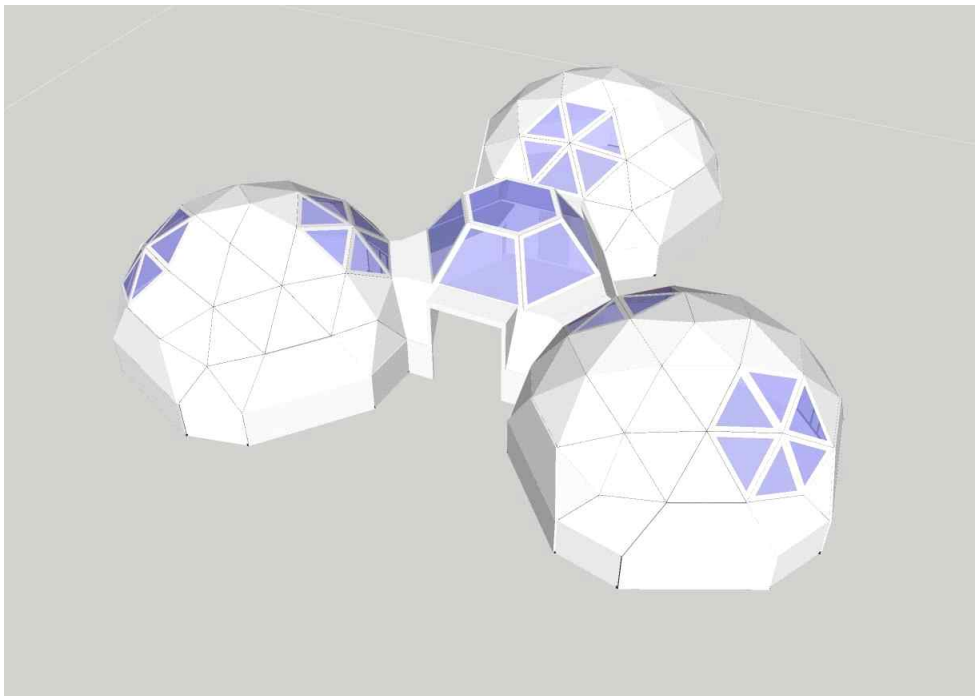


B타입 단면도

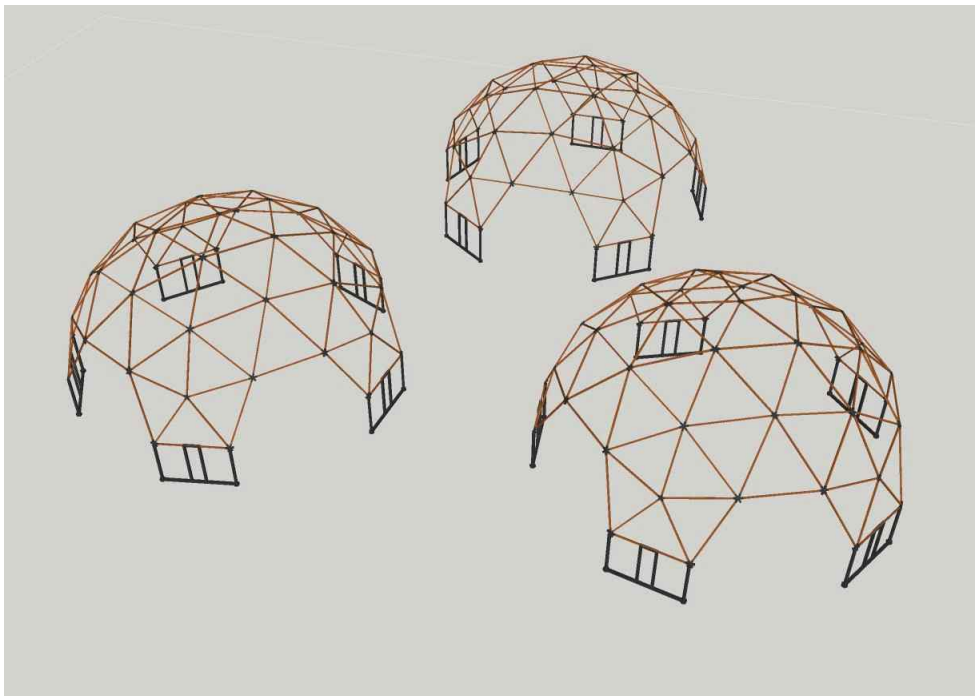
SCALE : 1/100

한국기술교육대학교	
PROJECT TITLE	모듈러 구조 시스템
DRAWING TITLE	B타입 단면도
APPROVAL DATE	APPROVED
PROJECT NO.	CHECKED 2 이승세
DRAWN BY	CHECKED 1 조길동
SCALE A4 : 1/100	DRAWN / DATE
DRAWING NO.	B-104

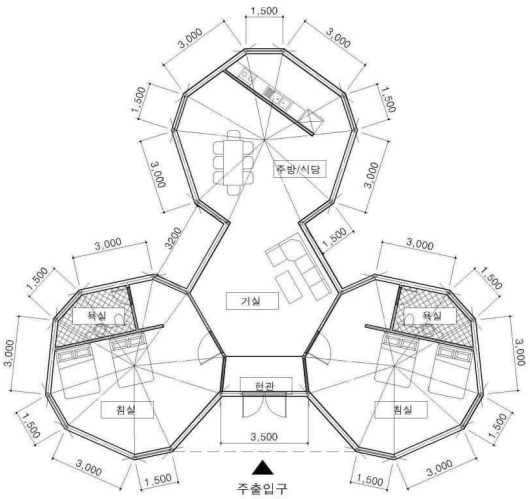
다. Type C



조감도 (Type C)



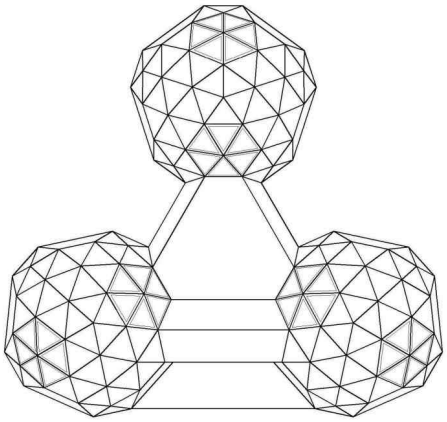
골조 투시도 (Type C)



C타입 1층 평면도

SCALE : 1/150

한국기술교육대학교	
PROJECT TITLE	모듈러 구조 시스템
DRAWING TITLE	C타입 1층 평면도
APPROVAL DATE	APPROVED
PROJECT NO.	CHECKED 2. 이승세
DESIGNER	CHECKED 1 조길동
SCALE A4 : 1/150	DRAWN / DATE
DRAWING NO.	C-101

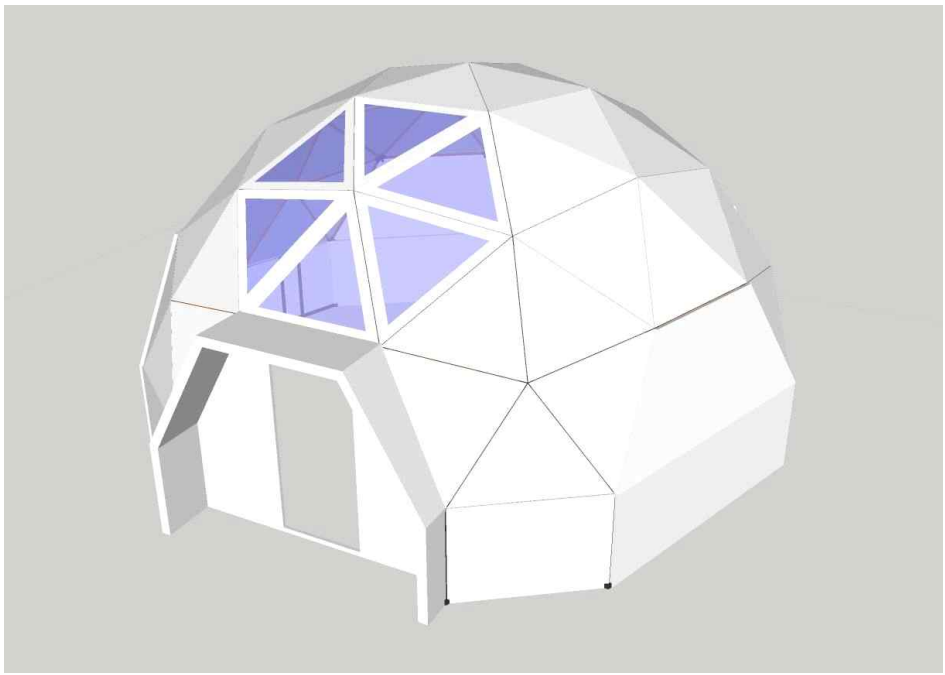


C타입 지붕층 평면도

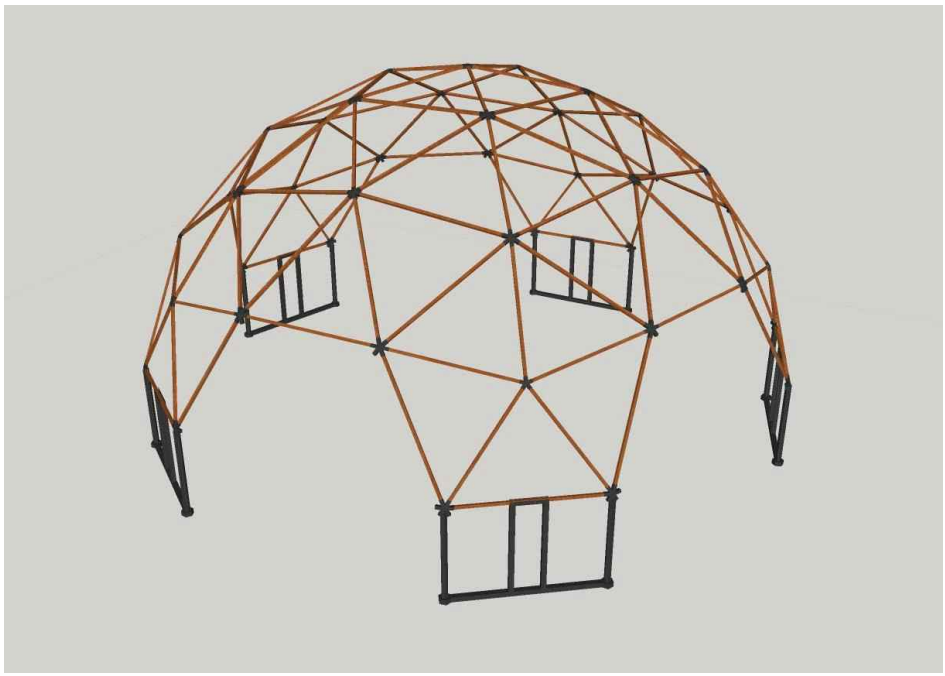
SCALE : 1/150

한국기술교육대학교	
PROJECT TITLE	모듈러 구조 시스템
DRAWING TITLE	C타입 지붕층 평면도
APPROVAL DATE	APPROVED
PROJECT NO.	CHECKED 2. 이승세
DESIGNER	CHECKED 1 조길동
SCALE A4 : 1/150	DRAWN / DATE
DRAWING NO.	C-102

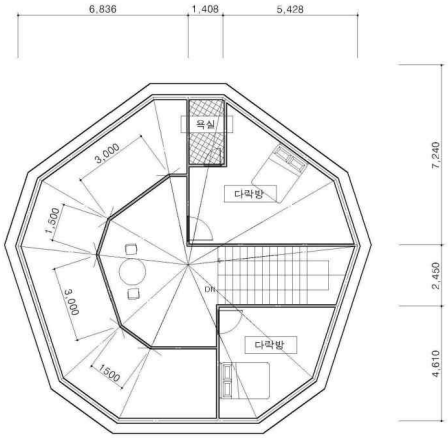
라. Type D



조감도 (Type D)



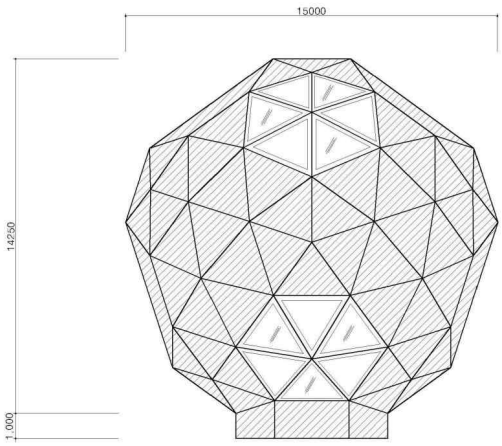
골조 투시도 (Type D)



D타입 2층 평면도

SCALE : 1/150

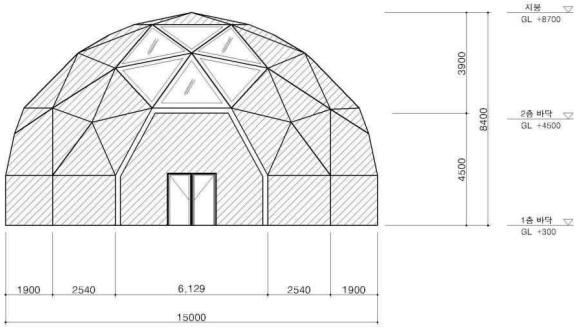
한국기술교육대학교	
PROJECT TITLE	모듈러 구조 시스템
DRAWING TITLE	D타입 2층 평면도
APPROVAL DATE	APPROVED
PROJECT NO.	CHECKED 2. 이승세
DESIGNER	CHECKED 1 조일동
SCALE A4 - 1/150	DRAWN / DATE
DRAWING NO.	D-102



D타입 지붕층 평면도

SCALE : 1/150

한국기술교육대학교	
PROJECT TITLE	모듈러 구조 시스템
DRAWING TITLE	D타입 지붕층 평면도
APPROVAL DATE	APPROVED
PROJECT NO.	CHECKED 2. 이승세
DESIGNER	CHECKED 1 조일동
SCALE A4 - 1/150	DRAWN / DATE
DRAWING NO.	D-103



D타입 정면도

SCALE : 1/150

한국기술교육대학교	
PROJECT TITLE	모듈러 구조 시스템
DRAWING TITLE	D타입 정면도
APPROVAL DATE	APPROVED
PROJECT NO.	CHECKED 2
DESIGNER	CHECKED 1
SCALE A4 : 1/150	DRAWN / DATE
DRAWING NO.	D-104

13. 절점 모듈화를 위한 시험조형물 상세설계 분석

가. 테스트베드 시험모형물의 형상과 절점 모델링

아래 그림과 같은 HMIC 모델의 형상은 모두 세가지 절점의 형태를 가진다. 그 이유는 매우 규격화된 삼각형으로 구현할 수 있기 때문이다. 하지만 절점의 각도와 형상의 제작은 매우 어렵게 구성된다. 각 부재의 각도와 절점에 대한 부재각의 모듈화된 형상을 구현하기 위해서는 각도와 연결부재수에 따른 세가지 형상이 일반적으로 나타난다. 본 절에서는 절점의 형상을 아주 쉽게 구현할 수 있는 방법에 대해서 설명하도록 한다. 여기서 적용되는 테넌 조인트와 조립이 간편한 돔의 격자 절점 형성방법의 시범 조형물에 대해서는 차년도에 다루도록 하며, 당해 연도는 절점의 구현방법과 특화된 방법 2가지를 소개하도록 한다.

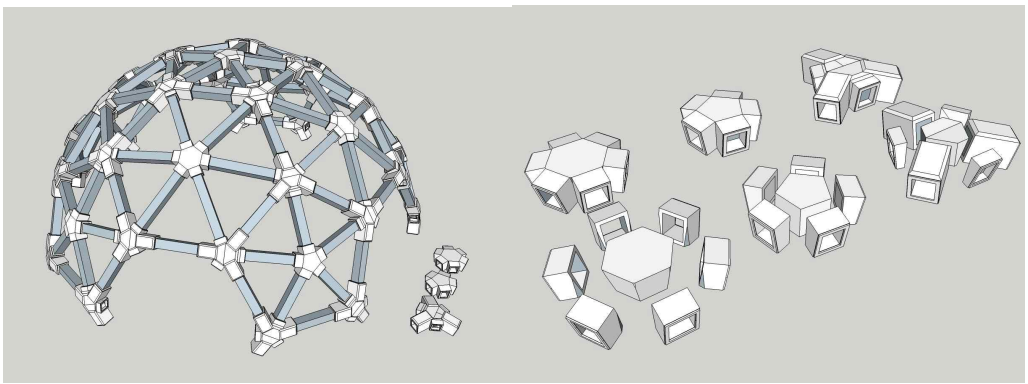


그림 2.2.13.1 테스트베드 MHIC 모델의 형상 시뮬레이션과 절점의 종류

나. 비정형 그리드 쉘 구조물의 테넌 조인트

건축에서 비정형이 가지는 매력은 최근 들어서 점화 확대되고 있다. 이러한 매력을 충족하기 위한 비정형 그리드 쉘 구조물은 4웨이 테넌 조인트, 6웨이 테넌 조인트를 포함하여 시공된다. 이러한 테넌 조인트들은 제작의 용이성, 결합부에서의 결합 강도 등이 고려되어야 한다. 특히 결합부에서의 결합 강도에 문제가 발생될 경우 그리드 쉘의 시공 오차가 발생되어 불안정화로 시공 품질이 저하된다.

삼각형 셀구조를 이용한 육각구조의 곡면 커튼월 구조는 중심브라켓에 연결파이프를 고정하고, 중심브라켓의 둘레에 6개의 삼각형 외벽판체를 고정하여 육각형 단위 셀구조를 형성하며, 레이저로 절단된 삽입단부가 양단에 형성된 연결파이프와 중심브라켓에 장부 맞춤구조를 형성하여 서로 연결한 후에 용접하여 고정하고, 연결파이프에 판체고정브라켓으로 외벽 판체가 고정되면서 곡면이 형성되도록 구성된다. 이것은 기하학적 곡면으로 쉽게 제작할 수 있고, 용접작업을 최대한 줄여서 커튼월을 형성할 수 있는데 반해, 연결파이프의 단부가 결합되는데 취약한 구조를 가지고 있다. 즉, 연결파이프의 삽입 단부측 홈부가 중심브라켓의 V자형 돌기부에 부분적으로 결합됨으로 인해 집중 응력을 받아 홈부의 변형 또는 파손이 발생될 소지를 가지고 있다. 이는 연결파이프의 삽입 단부측 홈부가 V자형 돌기부의 사선 부분

에서 전부 끼워지는게 아니라 약간 걸치는 구조로 비스듬히 끼워질 수밖에 없기 때문이다. 상호 체결되는 멀리언과 트랜섬의 조립체의 체결 부위를 커버하도록 멀리언 또는 트랜섬을 따라 체결되는 일면이 개방된 중공의 마감 본체와 상기 마감 본체를 상기 조립체에 결합시키는 체결 기구의 경우 건물 내부에 노출되는 멀리언 및 트랜섬의 체결 구조를 은폐하여 수려한 인테리어를 제공하는 데 반해, 제작 편의성 및 비정형 곡면을 추구할 수 없는 단점을 갖는다. 따라서 비정형 그리드 쉘 구조물의 테넌 조인트에 관한 제작이 간단 용이하고, 접합부의 보강이 이루어져 안정된 비정형 그리드 쉘 구조물을 시공할 수 있도록 한 쉘 구조물의 테넌 조인트의 개발은 매우 중요하다.

제안되는 제작이 간단 용이하고, 접합부의 보강이 이루어져 안정된 비정형 그리드 쉘 구조물을 시공할 수 있도록 한 비정형 그리드 쉘 구조물의 테넌 조인트는 다수개의 단위부재가 접합되어져 외접되는 다각 단면을 형성하여 중앙에 형성된 중공, 중공의 외측 둘레를 따라 접합된 걸침편, 중앙에 상부 브리지 삽입공을 갖고 단위부재의 일측 단부에 접합되어 있는 상부 브리지 연결과, 상부 브리지 연결판의 내면에 접합되어 있는 상부 브리지 체결너트를 갖는 조인트 중심부재와, 상기 걸침편에 끼움되는 걸침홈을 양단부에 갖는 파이프형 연결부재를 포함하고 상기 단위부재는 판상으로 접어져 일평면에서 밀착 상태로 포개져 있는 중앙 날개부, 중앙 날개부에서 양쪽으로 절곡되어 중공의 다각 단면을 제공하는 다각 판상부, 다각 판상부의 각 단부에서 외측으로 절곡된 측면 접합용 날개부를 갖도록 한다. 또한, 상기 파이프형 연결부재는, 단부의 상부벽과 하부벽에 각기 삼각형태로 절개된 한 쌍의 상부 절개부와 한 쌍의 하부 절개부를 좌우 및 상하로 대칭되게 형성하고, 상기 걸침홈을 갖는 양측벽을 안쪽으로 굽힘시켜 양측벽의 상,하면을 상부벽과 하부벽의 내면 사이에 면접되도록 위치시킨 후, 상,하부벽과 양측벽의 접합면을 용접으로 접합시키고, 상,하부벽에 각기 중앙 날개부 끼움홈이 형성되어서 제작하도록 한다. 이것은 다각 판상부의 벌어진 각도는 120°를 이루어 중공은 6각 단면을 이루기도하고, 135°를 이루어 중공은 8각 단면을 이루도록 하여 적용성을 높이고, 조인트 중심부재는 중앙에 브리지 삽입공과 단위부재 단부에 접합되어 있는 하부 브리지 연결판과, 하부 브리지 연결판의 내면에 접합되어 있는 하부 브리지 체결너트를 이용하여 결속력을 높인다.

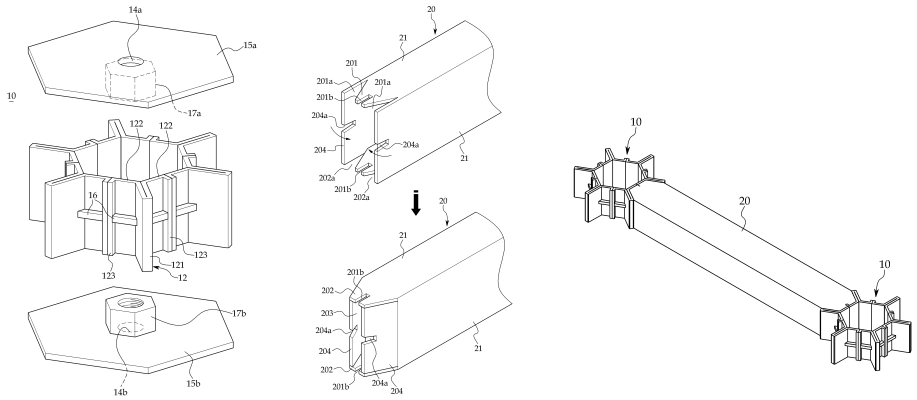


그림 2.2.13.2 비정형 그리드 쉘 구조물의 테넌 조인트

제안된 비정형 그리드 쉘 구조물의 테넌 조인트는, 파이프형 연결부재에 형성된 걸침홈이 형성된 좌,우 측벽이 상,하부벽에 확고히 접합 지지되어 있는 구조이므로 파이프형 연결부재의 단부 결합이 보강되는 효과를 얻게 된다. 이것은 조인트 중심부재에 의해 제작이 간단 용이하고, 접합부의 보강이 이루어져 안정된 비정형 그리드 쉘 구조물을 시공할 수 있다. 이와 같은 제안되는 테넌 조인트는 그림 2.2.13.2와 같다.

그림에서 보는 바와 같이 조인트 중심부재와 파이프형 연결부재로 구성된다. 조인트 중심부재는 여러 개의 단위부재가 접합되어져 외접되는 다각 단면을 형성하여 중앙에 중공을 갖고 동시에 중공의 외측 둘레를 따라 걸침편을 갖는다. 또한 조인트 중심부재는 중앙에 브리지 삽입공을 갖고 단위부재의 일측 단부에 접합되어 있는 상부 브리지 연결판과, 상부 브리지 연결판의 내면에 접합되어 있는 상부 브리지 체결너트를 갖도록 하는 조인트를 제안한다. 여기서 그림과 같이 다각 판상부의 벌어진 각도는 120°를 이루어 중공은 6각 단면으로 구성될 수도 있고, 벌어진 각도를 135°로 구성하여 8각 단면을 구성할 수 있다.

파이프형 연결부재는 조인트 중심부재의 걸침편에 끼움되는 걸침홈을 양단부에 설치하고, 연결부재는 연결 보강 구조를 갖기 위해 직사각 단면을 갖는 각파이프의 양 단부를 절개, 절곡, 접합 등의 방법을 통하여 보강된 구조를 갖도록 한다. 이것은 강판을 절곡시켜 제작된 단위부재들을 여러 개로 접합시켜 조인트 중심부재를 구성함으로써 제작이 간단 용이하여 비정형 그리드 구조물의 시공비용을 절감할 수 있다. 또한, 동일한 형상의 단위부재를 가지고 다각 판상부의 벌어진 각도를 달리 함으로써 2가지 형태의 조인트 중심부재를 쉽게 구성할 수 있다.

제작이 간단 용이하고, 접합부의 보강이 이루어져 안정된 비정형 그리드 쉘 구조물을 시공할 수 있도록 한 비정형 그리드 쉘 구조물의 테넌 조인트는 다수개의 단위부재가 접합되어져 외접되는 다각 단면을 형성하여 다각 판상부의 각 단부에서 외측으로 절곡된 측면 접합용 날개부를 갖는 것을 특징으로 한다.

다. 돔형 구조물의 커넥터 절점

지오데식 돔 구조물의 경우 돔형 건축에서 벽이나 기둥을 필요로 하지 않기 때문에 자유로운 발상으로 인테리어 설계를 할 수 있고, 또 자연광을 채광시킬 수 있으며, 실내에서 하늘도 볼 수도 있어 근자에 들어 널리 시공되고 있다. 지오데식 돔 구조물을 시공하고자 할 때 격자 그리드 시스템의 경우 다수의 돔 커넥터가 사용되며, 각 꼭짓점 영역에 배치되어 돔 구조물의 프레임을 형성하는 각재를 연결한다. 이때 돔 커넥터는 각재와 연결되기 위한 브라켓이 필요하게 되며, 브라켓의 각도 조절은 매우 어려운 일 중 하나이다. 이를 해결하기 위한 제안되는 커넥터 기술은 다각형 구조를 갖는 커넥터 바디의 각 외면에 하나씩 개별적으로 결합되는 다수의 가이드 브래킷들이 각각 회전 가능하게 힌지 결합되는 커넥터이다. 기존의 기술은 90도 이내에서 각도의 조절이 가능한데 반해, 가이드 브래킷의 구조가 복잡하고, 각재만을 연결시킬 수 있는 한계가 있으므로 원형 파이프를 이용하여 해결하고자 한다. 따라서 제안되는 커넥터는 부품 조립이 편리하고 쉽게 연결 가능하며 조립 후 견고하도록 개발하는 것에 그 목적이 있다.

제안되는 커넥터 허브의 내부에는 중심에서 육각의 꼭지점을 향해 반경 방향으로 뻗어나가 상하부 걸쇠의 이동을 제한하는 방사형 격벽이 구비되어 있는 것을 특징으로 한다. 또한, 상기 상부 걸쇠 및 하부 걸쇠는 커넥터 허브의 내면에 위치하는 내측 걸림판, 커넥터 허브의 외면에 위치하는 외측 걸림판, 내외측 걸림판을 연결하는 브리지로 구성되고, 내외측 걸림판은 커넥터 허브의 내,외면과 각기 동일한 곡률 반경을 갖는 동일 구조이되 상기 상부 걸쇠와 하부 걸쇠 중 어느 한 쪽에 볼트관통홀을 갖는 부싱과, 다른 한 쪽에 나사구멍이 형성된 체결너트가 구비되어 있는 것을 특징으로 한다. 상기 단부 조인트는 커넥터 허브의 외주면과 동일한 곡률 반경을 갖는 커넥터 지지판과, 커넥터 지지판의 외측 중앙에 직각 방향으로 입설된 커넥터 아암으로 구성된 것을 특징으로 한다. 특히 상기 커넥터 지지판에는 상,하부 걸쇠에서 이탈 억제되도록 양측에 절곡 날개가 포함되어 있다. 이와 같은 제안되는 테넌 조인트는 그림 2.2.13.3과 같다.

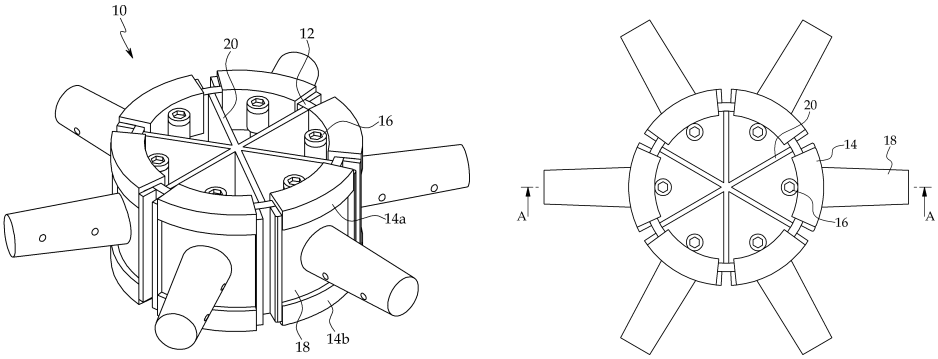


그림 2.2.13.3 돔형 구조물의 커넥터 절점

제시된 돔 커넥터는, 커넥터 지지판에 원형 또는 사각 단면의 커넥터 아암이 설치되어져 이에 대응되는 원형 또는 사각의 파이프 단면을 갖는 커넥터 로드를 끼움시키는 것만으로 조립될 수 있어 시공이 간편해진다. 또한, 각 쌍의 상부 걸쇠와 하부 걸쇠를 커넥터 허브에 위치 조립시킬 때 방사형 격벽이 위치를 결정시켜 주므로 정확한 위치의 조립이 가능하고, 시공 후에는 각 쌍의 상부 걸쇠와 하부 걸쇠의 이동을 방사형 격벽이 제한시켜 주므로 견고하여 시공 불량을 방지할 수 있다. 또한 방사형 격벽은 커넥터 허브를 보강시킴으로써 커넥터 허브에 집중되는 힘에 대한 저항력을 증가시킬 수 있다.

라. MHIC 모델의 절점 모듈과 부재연결각

MHIC 모델의 경우 삼각형 격자 그리드이면서 곡률이 일정한 곡면에 절점이 위치한다. 기본도형의 경우 앞서 설명한 바와 같이 삼각형을 기반으로 오각 및 육각 뿔 모양의 결합도형이 주 형상이된다. 그림 2.2.13.4에서 보는 바와 같이 세가지 경우의 절점 모듈을 제시할 수 있으며, 육각뿔의 연결로만 이루어진 육각 절점, 오각뿔의 도형에서 사용되어지는 오각 절점 그리고 오각형과 육각형이 서로 연결되는 절점에서의 오각 및 육각 교점의 절점으로 모듈화 할 수 있다.

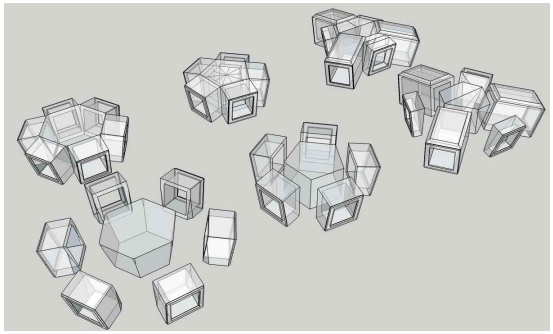


그림 2.2.13.4 MHIC 모델의 절점 모듈 투시도

세 모듈의 중앙부는 각각의 형태에 따라 제작 가능하며, 내부가 충실된 모형과 중공된 모형으로 모두 성형 가공 및 제작할 수 있다. 각각의 경우에 대해서 부재의 이음각도를 알아보기로 한다.

(1) 오각형 접합부

오각접합부의 이음부 각도는 그림에서 보는 1번의 각도를 의미하며, 10°이다. 모든 부재가 동일하게 적용되며, 각각의 부재의 각도는 정오각형이므로 평면에 투영하여 등각의 부재로 연결한다.

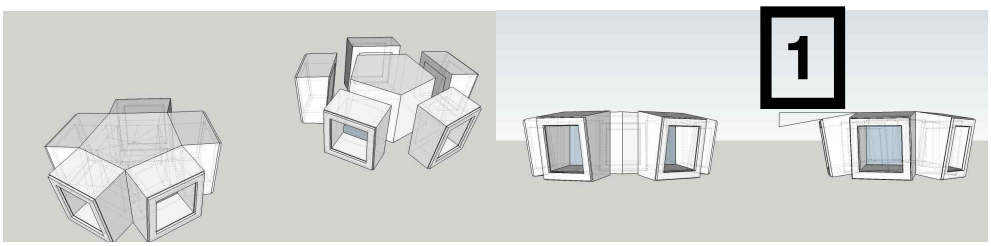


그림 2.2.13.5 오각형 접합부

(2) 육각형 접합부 이음

오각접합부의 이음부 각도는 그림에서 보는 2번의 각도를 의미하며, 11.9°이다.모든 부재가 동일하게 적용되며, 각각의 부재의 각도는 정육각형이므로 평면에 투영하여 등각의 부재로 연결한다.

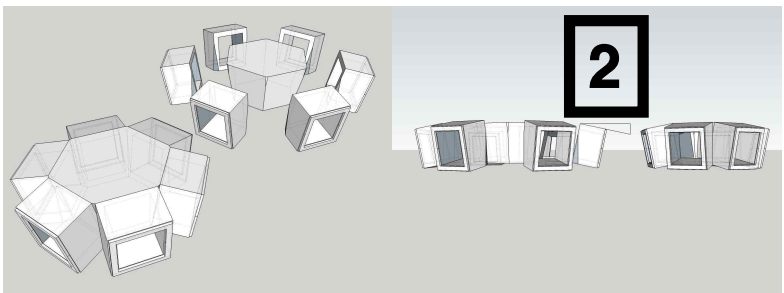


그림 2.2.13.6 오각형 접합부

(3) 오각-육각형 접합부 이음

오각형과 육각형을 잇는 접합부의 경우 각도의 조정이 어렵다. 우선 각각의 경우 절점의 접선면을 이용하여 투영된 면에서 부재의 사잇각을 살펴보는 것이 유리하다. 여기서 각각의 삼각형들에 접합되는 부재각은 대칭을 이루게 되며, 이를 이용하여 쉽게 제작할 수 있다. 또한 경사각의 차이에서 중앙부 중공 또는 충실절점의 경사단면을 조절하여 제작가능하게 할 수 있다. 여기서 부재의 사잇각을 알아보면 다음과 같다.

3번 오각-육각형 접합 이음부 각도: 12.9°
4번 오각-육각형 접합 이음부 각도: 13.0°
5번 오각-육각형 접합 이음부 각도: 12.0°
6번 오각-육각형 접합 이음부 각도: 15.0°

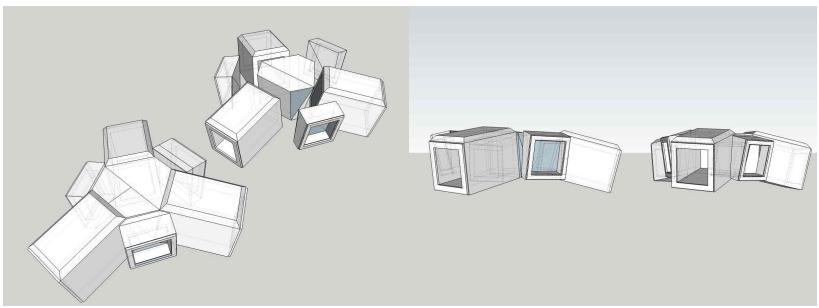


그림 2.2.13.7 오각-육각형 접합부

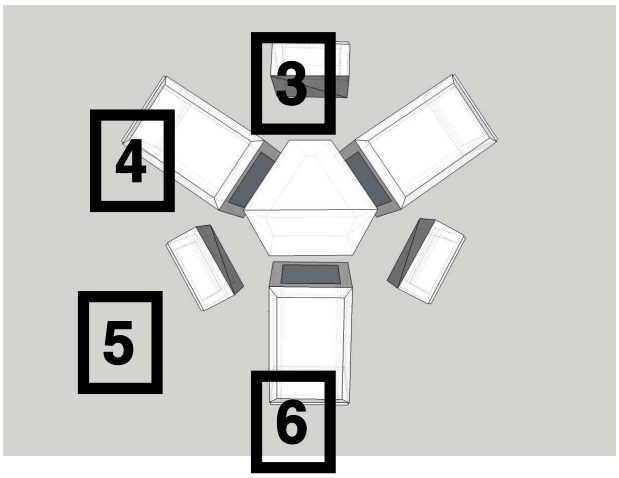


그림 2.2.13.8 오각-육각형 접합부 부재연결 각도

14. 시험조형물 설계도면 및 형상시뮬레이션 검토

가. 테스트베드 시험 조형물 설계를 위한 형상

기초형상의 정보는 절점 41개, 선부재 100개 및 삼각형 부재 60개로 구성되며, 그림 2.2.14.1에서 보는 바와 같은 형상이며, 만약 단위길이가 2m일 경우 표 2.2.14.1에서와 같은 좌표로 구성된다.



그림 2.2.14.1 MHIC 모델

표 2.2.14.1 MHIC 모델의 절점좌표 (Unit length: 2.0m)

Node	Coordinate			Node	Coordinate		
	X	Y	Z		X	Y	Z
1	0.0000	0.0000	4.9560	21	-4.1292	1.0000	2.5520
2	4.4328	0.0000	2.2164	22	-4.1292	-1.0000	2.5520
3	1.3698	4.2159	2.2164	23	-2.2270	-3.6180	2.5520
4	-3.5862	2.6055	2.2164	24	-0.3249	-4.2361	2.5520
5	-3.5862	-2.6055	2.2164	25	2.7528	-3.2361	2.5520
6	1.3698	-4.2159	2.2164	26	3.9283	-1.6180	2.5520
7	1.7013	0.0000	4.6549	27	4.7790	1.0000	0.8507
8	3.4026	0.0000	3.6034	28	0.5257	4.8541	0.8507
9	0.5257	1.6180	4.6549	29	-4.4541	2.0000	0.8507
10	1.0515	3.2361	3.6034	30	-3.2785	-3.6180	0.8507
11	-1.3764	1.0000	4.6549	31	2.4279	-4.2361	0.8507
12	-2.7528	2.0000	3.6034	32	2.4278	4.2361	0.8507
13	-1.3764	-1.0000	4.6549	33	-3.2785	3.6180	0.8507
14	-2.7528	-2.0000	3.6034	34	-4.4541	-2.0000	0.8507
15	0.5257	-1.6180	4.6549	35	0.5257	-4.8541	0.8507
16	1.0515	-3.2361	3.6034	36	4.7790	-1.0000	0.8507
17	3.9283	1.6180	2.5520	37	2.4340	1.7684	3.9383
18	2.7528	3.2361	2.5520	38	-0.9297	2.8614	3.9383
19	-0.3249	4.2361	2.5520	39	-3.0086	0.0000	3.9383
20	-2.2270	3.6180	2.5520	40	-0.9297	-2.8614	3.9383
				41	2.4340	-1.7684	3.9383

나. 테스트베드 시범조형물의 골조 모델링 및 렌더링 시뮬레이션

테스트베드 시험조형물의 설계를 위해서 3차원 상에서 모델링하였으며, 각각의 절점에 대해서 간섭되는 길이, 절점의 제작을 위한 각도보정 및 각각의 연결에 대한 정보들을 모듈화하기 위해서 그림 2.2.14.2에서와 같이 모델링 및 렌더링 하였다.

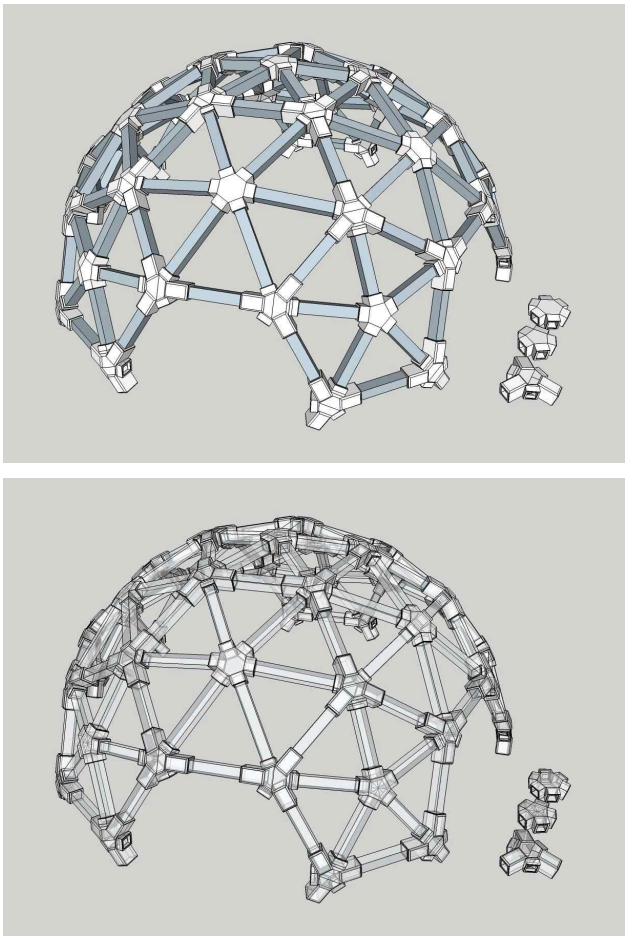


그림 2.2.14.2 MHIC 모델의 골조 시스템 모델링

그림에서 절점의 모듈화를 위해서 3개의 각도에 따른 그리고 인접 다각형의 조건에 따라 오각형 절점 및 육각형 절점을 구성하였다. 오각형 절점의 경우 오각뿔의 중앙에 위치한 절점으로 각도가 일정하여 설계 및 제작하기 간편하다. 육각형 절점의 경우 두가지 경우가 발생하는데 육각뿔의 정점에 위치한 절점과 오각형과 육각형의 모듈이 겹쳐지는 절점에서의 제작 각도가 다르게 나타난다. 따라서 설계 시에 이점을 매우 정밀히 다루어야 하며, 각각의 각도의 오차는 전체 구조물의 큰 영향을 미친다. 세가지 종류의 각도를 가진 절점은 제작시에 고려되어야 하는 각도에 대해서 앞장에서 설명한 바 있으며, 각각의 각도는 대부분 절점을 기준으로 대칭이므로 큰 어려움 없이 조립할 수 있다. 이상과 같은 형상의 테스트베드 시험 조형물을 모델링하여 평면도와 입면도를 살펴보면 아래 그림과 같다.

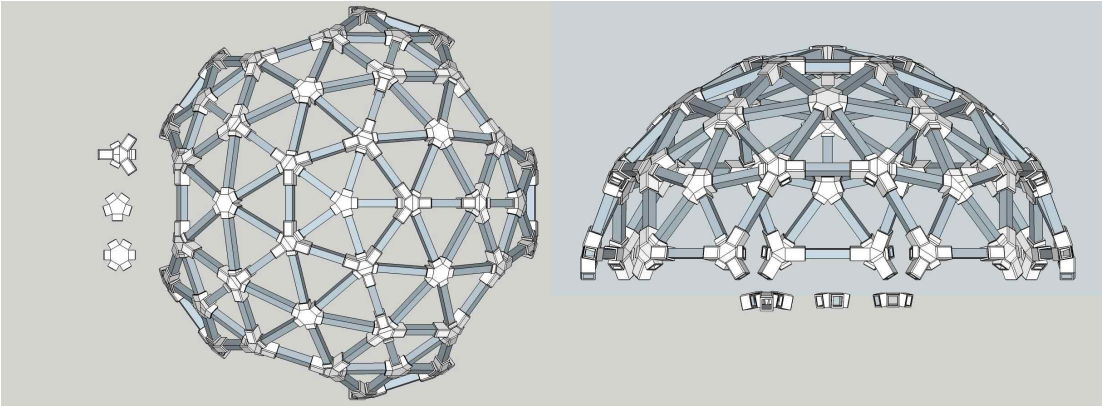
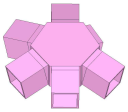


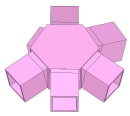
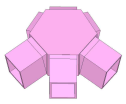
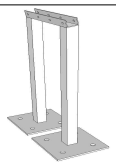
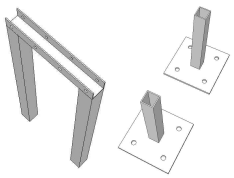
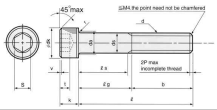
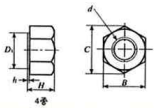
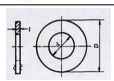
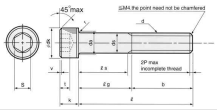
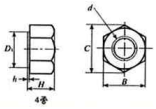
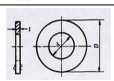
그림 2.2.14.3 MHIC 모델의 골조 시스템 모델링

다. 테스트베드 시범조형물의 단위부재 리스트

모델링의 단위길이가 다르다 하더라도 절점의 수와 부재의 수는 변함이 없으며, 길이의 조절은 절점에서 제작시 필요한 여유를 제외하고 매우 정밀하게 제작되어야 한다. 절점의 각도 및 부재의 종류 및 크기에 따라 각각의 모델링된 모형들은 표 2.2.14.2에서 나타난 리스트와 동일한 종류의 부재를 가공 및 조립하여야 한다. 시험조형물의 제작과 테스트 분석을 위해서 절점과 부재의 연결 및 하부 구조물의 제작도 함께 나타내도록 하였으며, 자세한 도면은 다음 절에서 소개하도록 한다. 모든 절점은 기본적으로 6의 배수로 구성되며, 40개의 절점이 필요하다. 여기서 경계부에 따른 절점의 형상변화와 이에 대한 도면의 작업이 필요하게 되며, 부재를 잇는 경계부의 경우도 동일한 상태의 경계점들이 형성되어야 한다. 각각의 부재에서 연결재의 구성은 일반구조물에서와 동일하나 더 큰 여유로 설계되어야 한다.

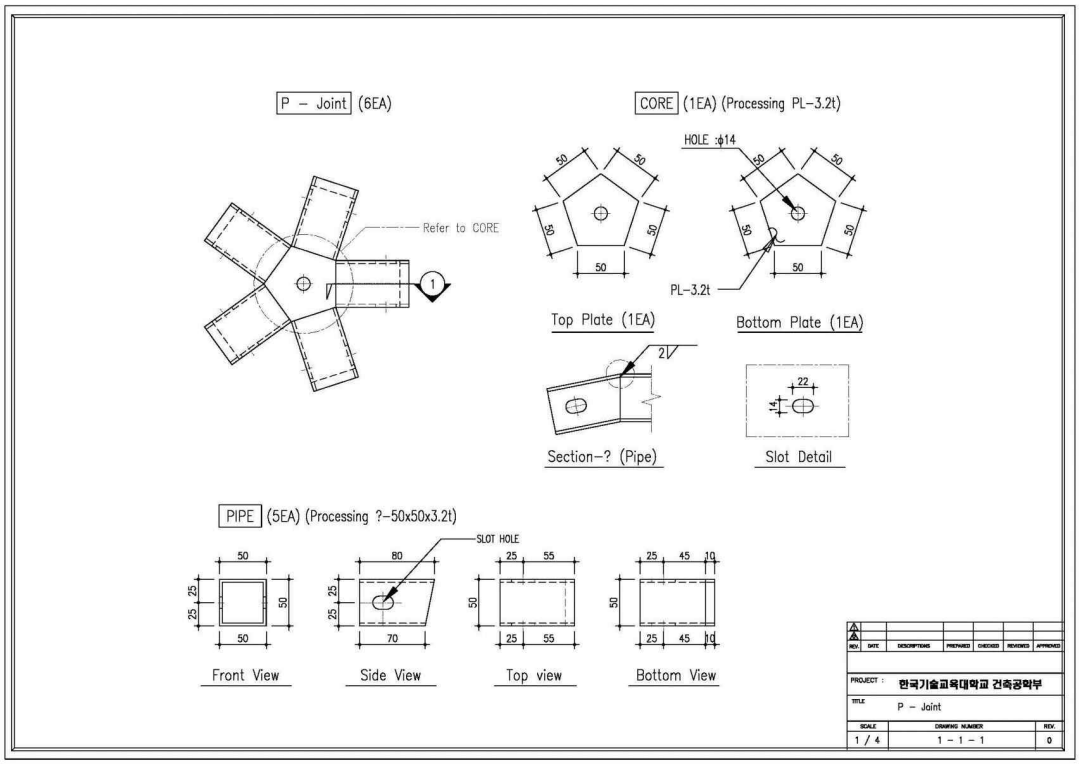
표 2.2.14.2 테스트베드 시험조형물의 제작용 부재 리스트

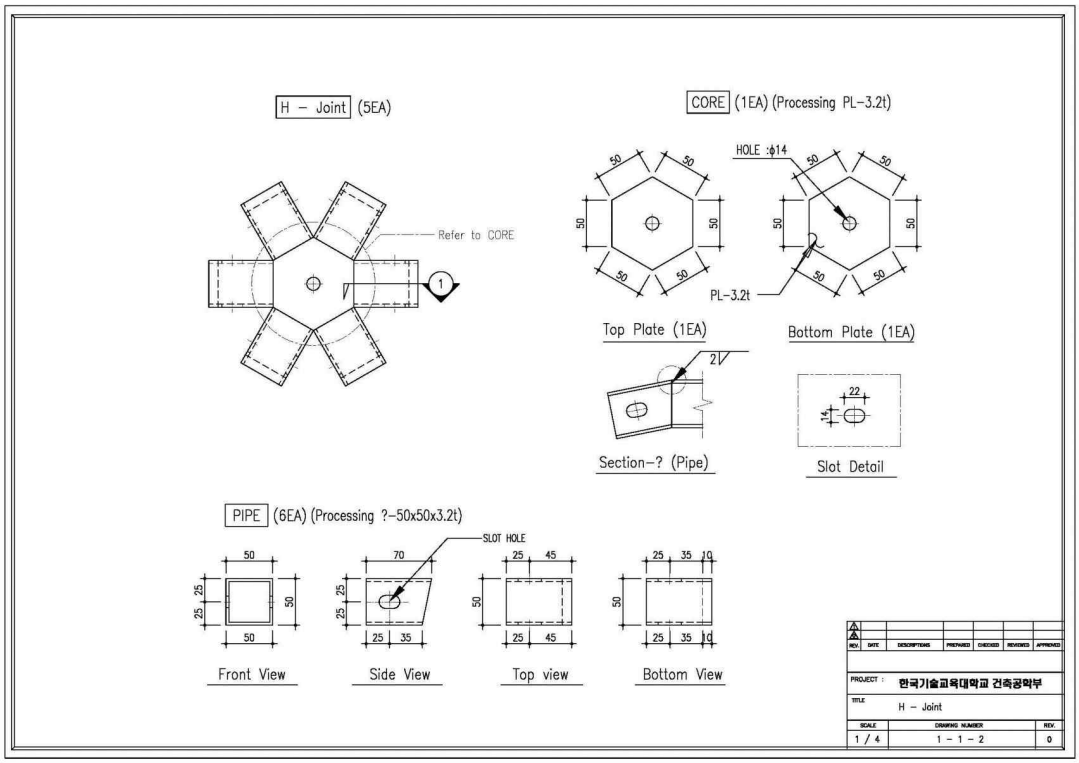
구분	용 도	도면 번호	부재 이름	수 량	비 고
1	Joint	1 - 1 - 1	P - Joint	6 EA	
2	Joint	1 - 1 - 2	H - Joint	5 EA	
3	Joint	1 - 1 - 3	PH - Joint - A	10 EA	
4	Joint	1 - 1 - 4	PH - Joint - B	5 EA	

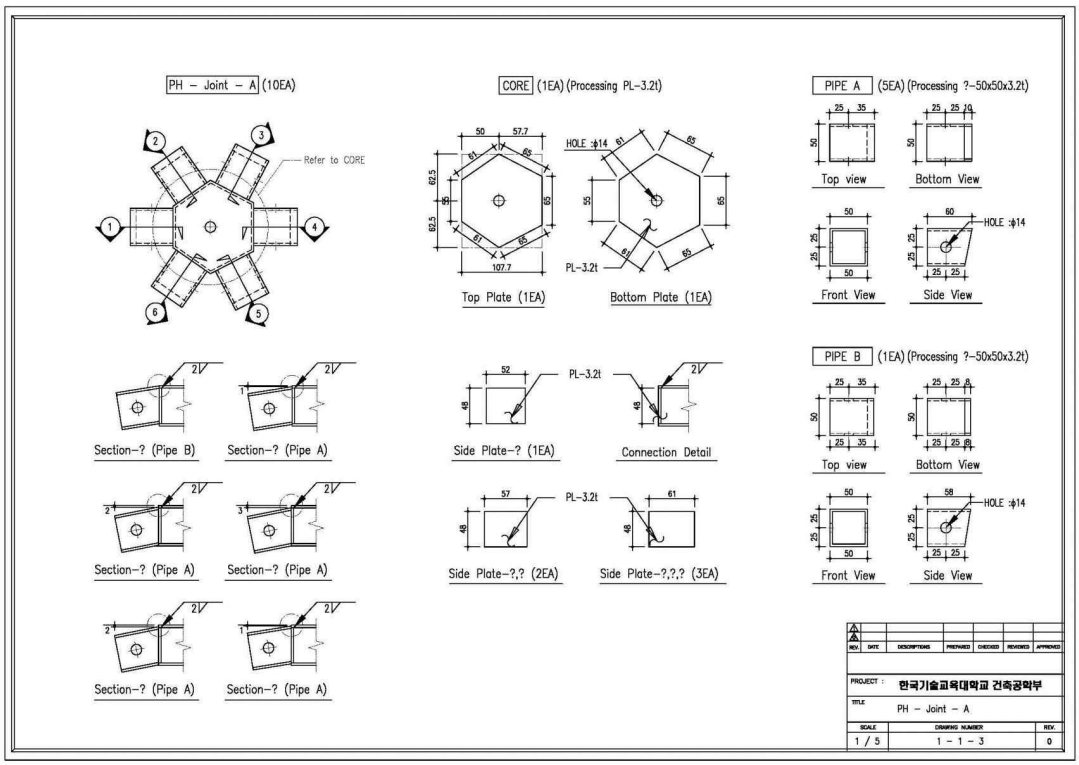
5	Joint	1 - 1 - 5	PH - Joint - C	5	EA	
6	Joint	1 - 1 - 6	PH - Joint - D	10	EA	
7	Beam	2 - 1 - 1	Bottom Pipe A (30 x 30 x 1.6t)	5	EA	 (480)
			Bottom Pipe B (30 x 30 x 1.6t)	15	EA	 (480)
8	Beam	2 - 1 - 2	Member Pipe A (30 x 30 x 1.6t)	30	EA	 (490)
			Member Pipe B (30 x 30 x 1.6t)	20	EA	 (480)
			Member Pipe C (30 x 30 x 1.6t)	30	EA	 (400)
9	Column	3 - 1 - 1	Column Pipe A	5	EA	
9	Column	3 - 1 - 3	Column Pipe C	5	EA	
10	Bolt	육각 볼트	M10 - 70mm	300	EA	
11	Nut	육각 너트	M10	300	EA	
12	Washer	와 셔	10	600	EA	
13	Bolt	육각 볼트	M16 - 80mm	50	EA	
14	Nut	육각 너트	M16	50	EA	
15	Washer	와 셔	16	100	EA	

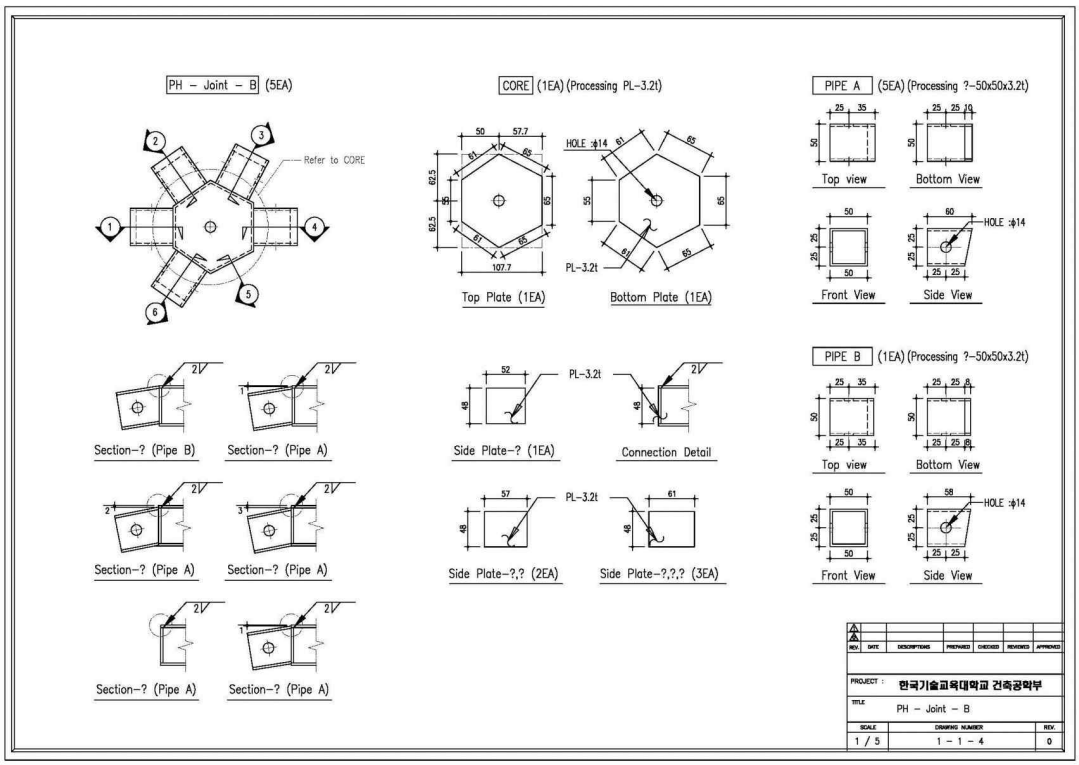
라. 테스트베드 시범조형물의 설계도면

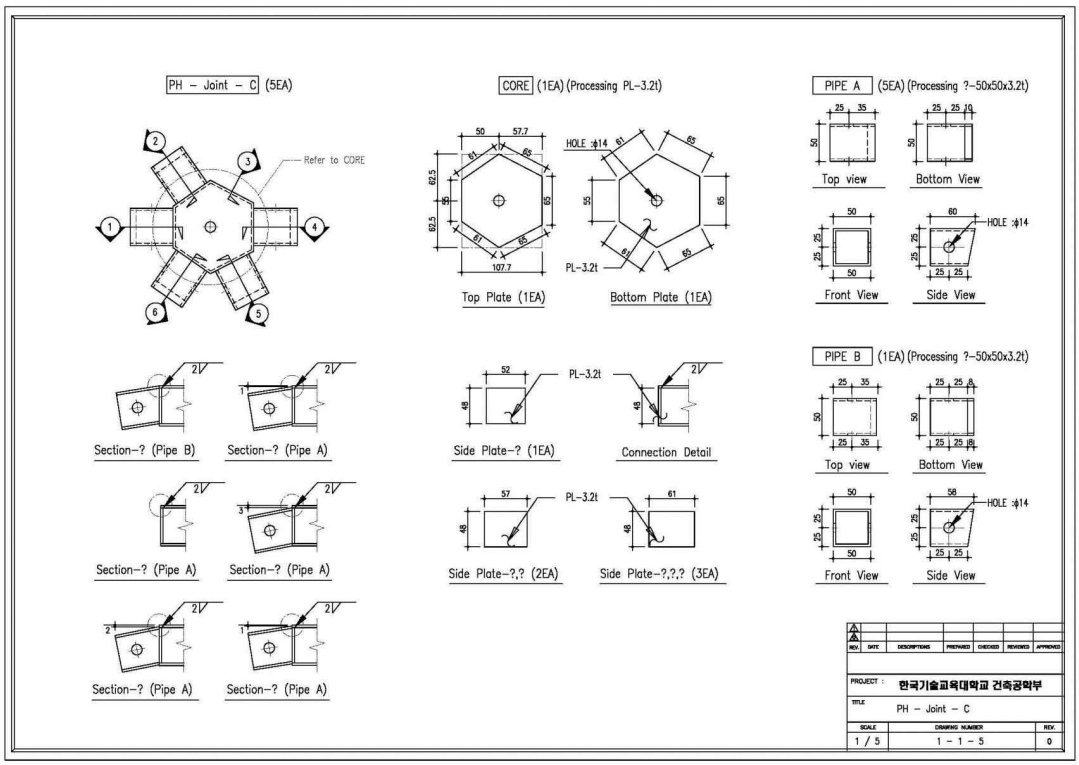
핵심성과물의 설계상세도면은 다음과 같다.

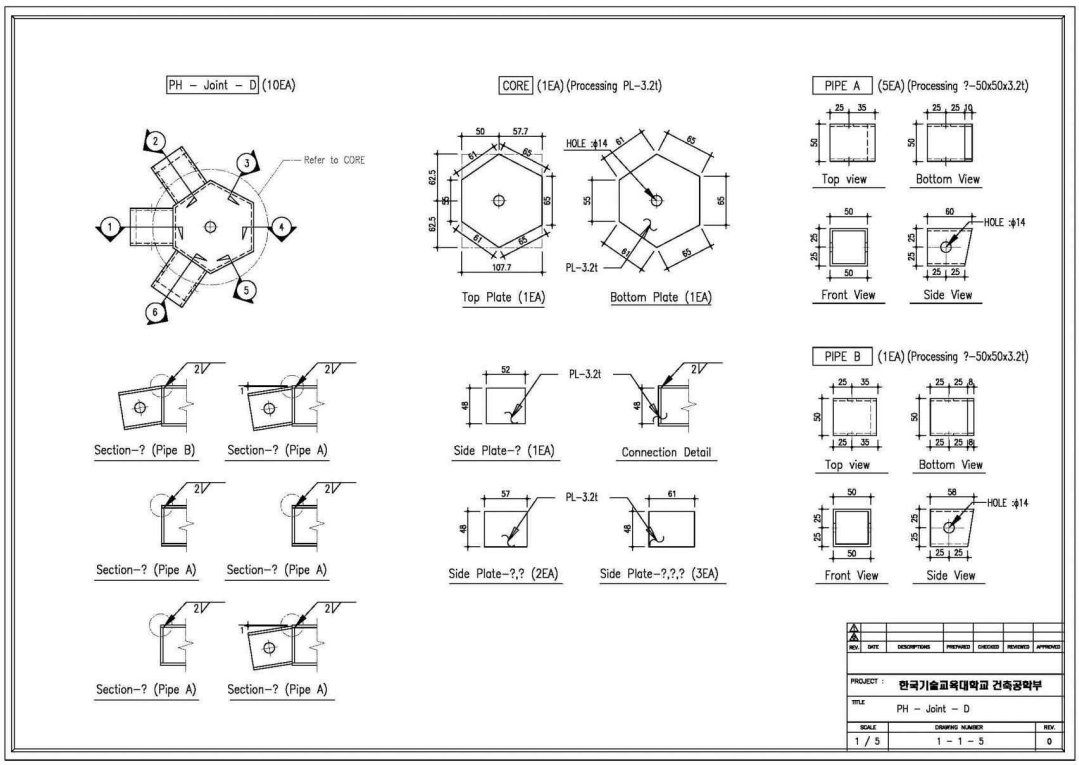


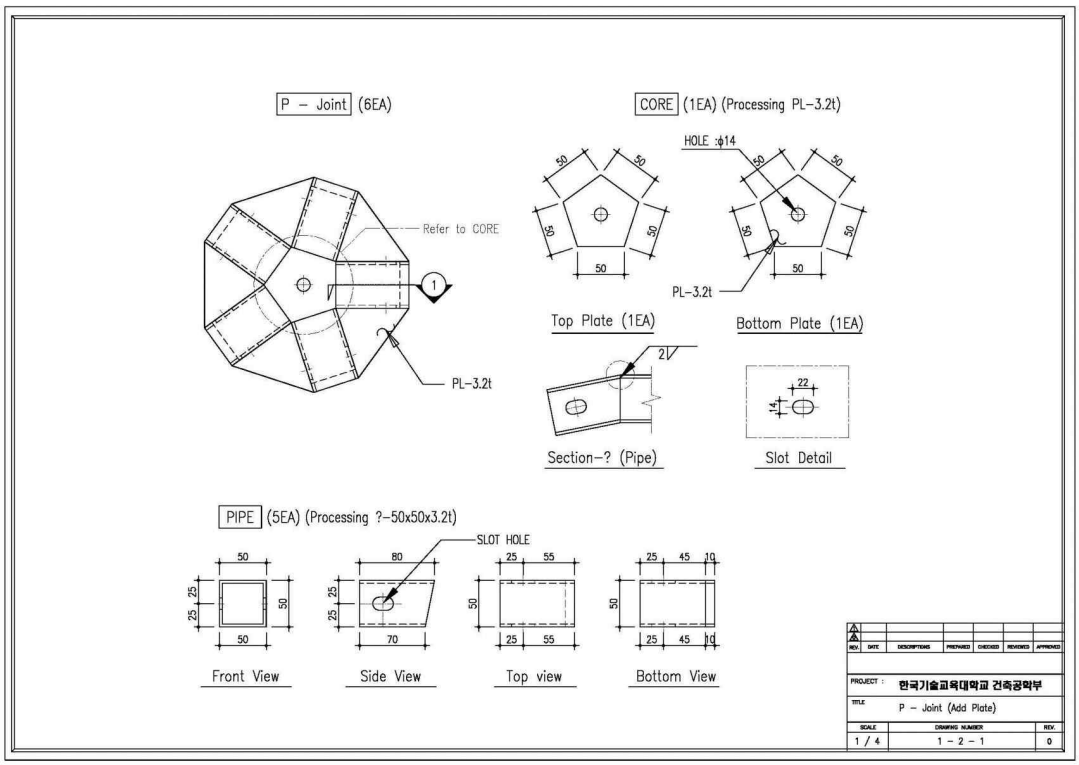


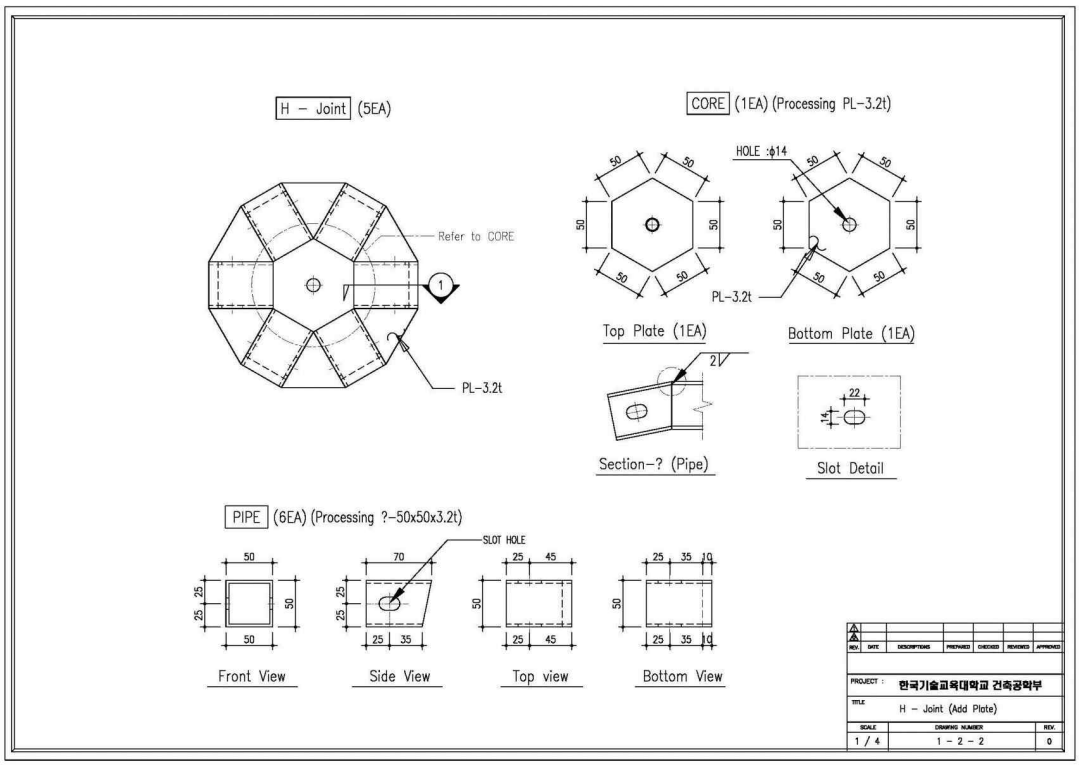

PH – Joint – A (10EA)
Refer to CORE
CORE (1EA) (Processing PL-3.2t)
Top Plate (1EA)
Bottom Plate (1EA)
PL-3.2t
HOLE :φ14
PIPE A (5EA) (Processing ?-50x50x3.2t)
Top view
Bottom View
Front View
Side View
PIPE B (1EA) (Processing ?-50x50x3.2t)
Section-? (Pipe B)
Section-? (Pipe A)
Side Plate-? (1EA)
Connection Detail
Side Plate-?,? (2EA)
Side Plate-?,?,? (3EA)
PROJECT : 한국기술교육대학교 건축공학부
PH – Joint – A
1 / 5
1 – 1 – 3
0

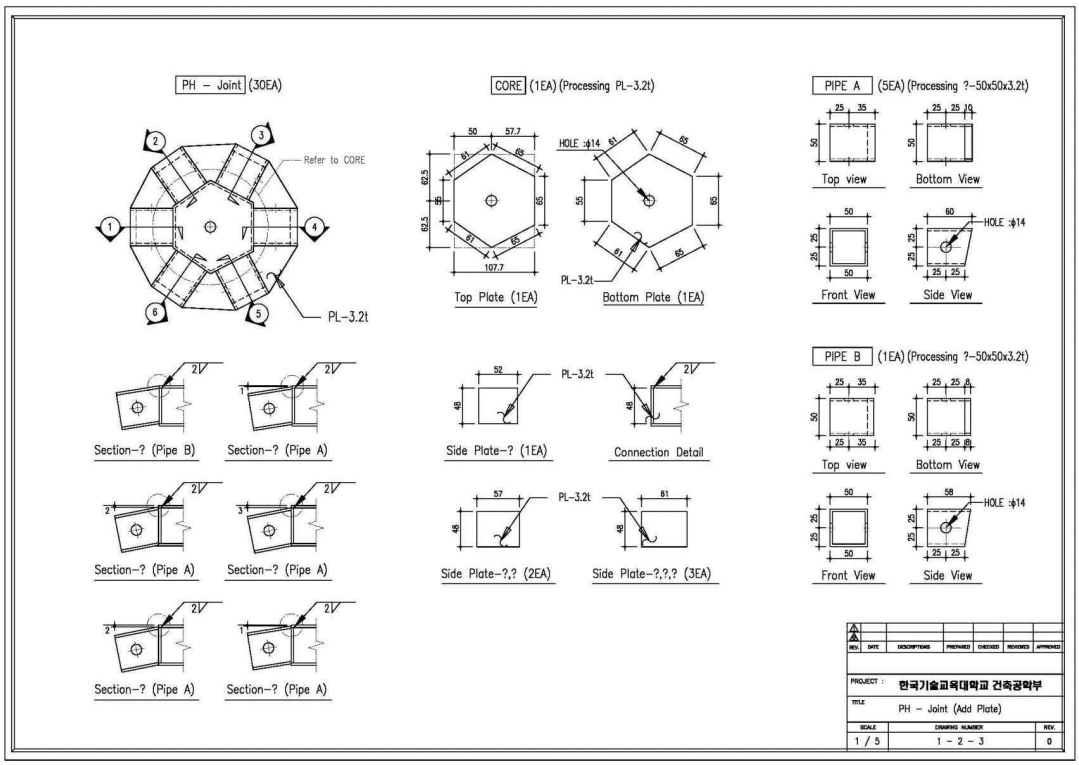

PH – Joint – B (5EA)
Refer to CORE
CORE (1EA) (Processing PL-3.2t)
Top Plate (1EA)
Bottom Plate (1EA)
PL-3.2t
HOLE :φ14
PIPE A (5EA) (Processing ?-50x50x3.2t)
Top view
Bottom View
Front View
Side View
PIPE B (1EA) (Processing ?-50x50x3.2t)
Section-? (Pipe B)
Section-? (Pipe A)
Side Plate-? (1EA)
Connection Detail
Side Plate-?,? (2EA)
Side Plate-?,?,? (3EA)
PROJECT : 한국기술교육대학교 건축공학부
PH – Joint – B
1 / 5
1 – 1 – 4
0

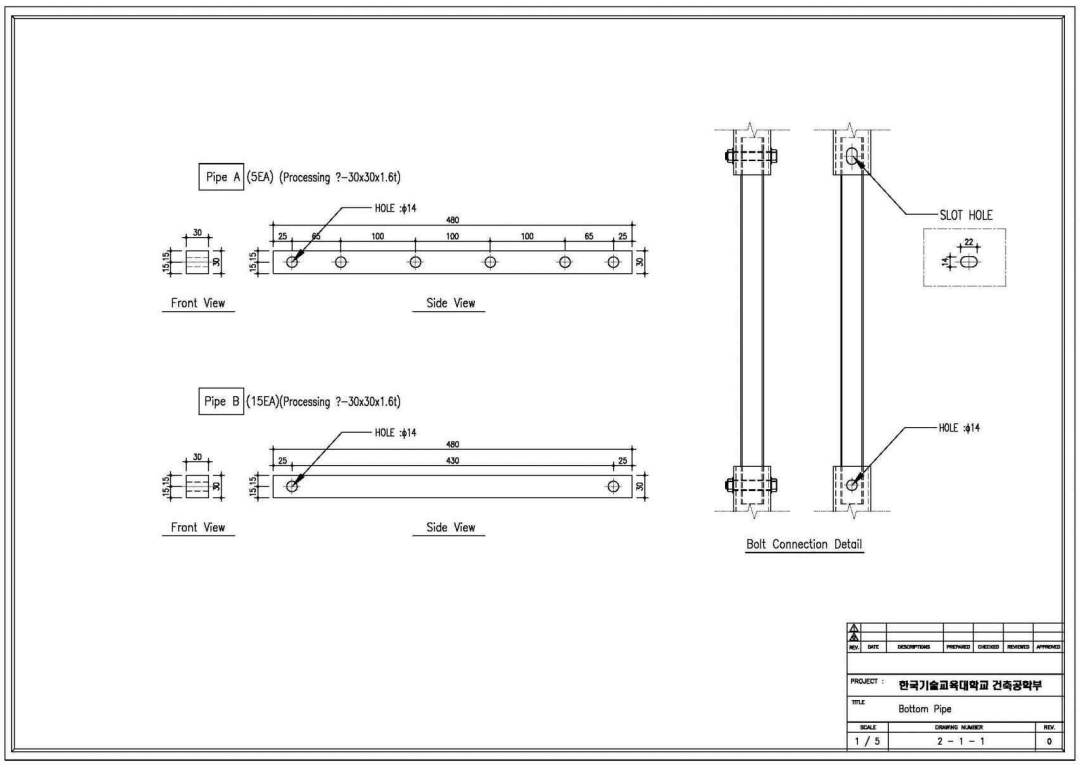

PH – Joint – C (5EA)
Refer to CORE
CORE (1EA) (Processing PL-3.2t)
Top Plate (1EA)
Bottom Plate (1EA)
PL-3.2t
PIPE A (5EA) (Processing ?-50x50x3.2t)
Top view
Bottom View
Front View
Side View
HOLE :φ14
PIPE B (1EA) (Processing ?-50x50x3.2t)
Section-? (Pipe B)
Section-? (Pipe A)
Side Plate-? (1EA)
Connection Detail
Side Plate-?,? (2EA)
Side Plate-?,?,? (3EA)
한국기술교육대학교 건축공학부
PH – Joint – C
1 / 5
1 – 1 – 5
0

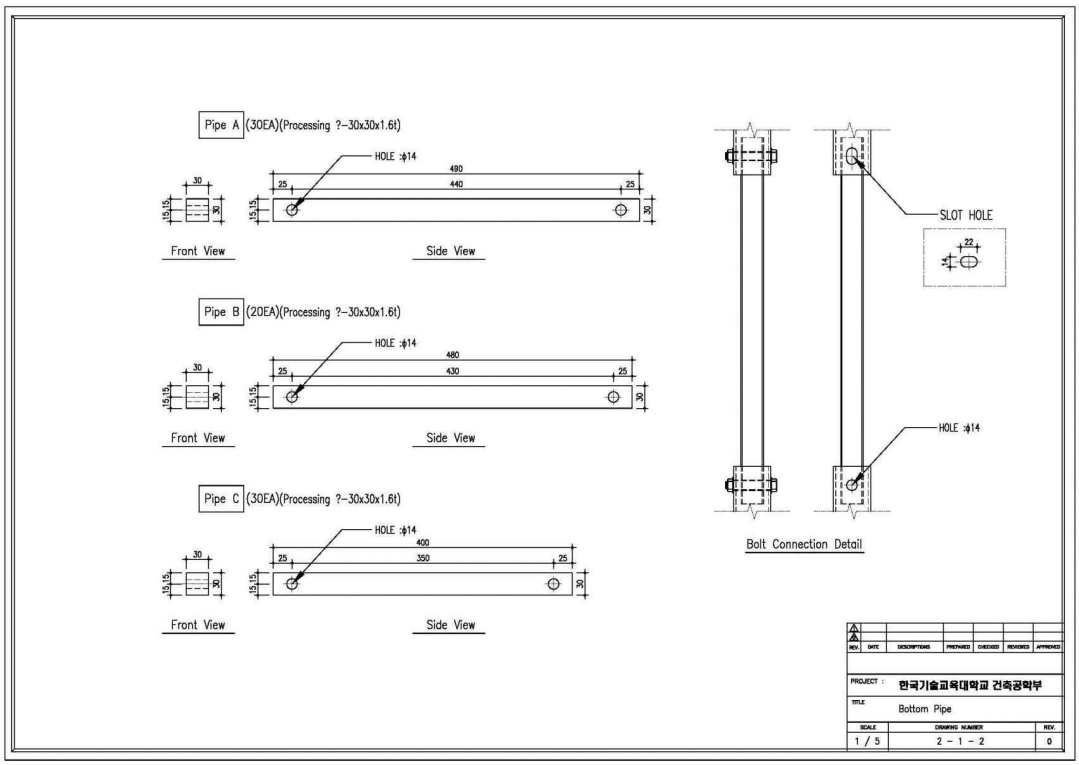

PH – Joint – D (10EA)
Refer to CORE
CORE (1EA) (Processing PL-3.2t)
Top Plate (1EA)
Bottom Plate (1EA)
PL-3.2t
PIPE A (5EA) (Processing ?-50x50x3.2t)
Top view
Bottom View
Front View
Side View
HOLE :φ14
PIPE B (1EA) (Processing ?-50x50x3.2t)
Section-? (Pipe B)
Section-? (Pipe A)
Side Plate-? (1EA)
Connection Detail
Side Plate-?,? (2EA)
Side Plate-?,?,? (3EA)
한국기술교육대학교 건축공학부
PH – Joint – D
1 / 5
1 – 1 – 5
0

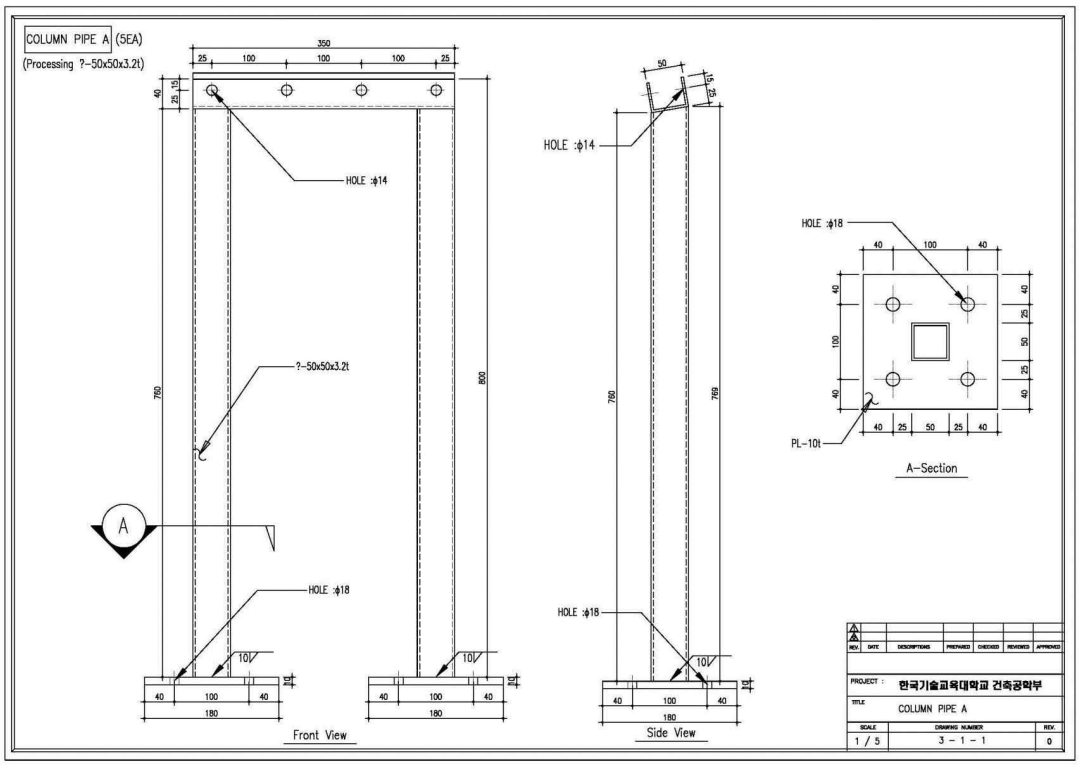

P – Joint (6EA)
CORE (1EA) (Processing PL-3.2t)
Refer to CORE
PL-3.2t
HOLE :ϕ14
Top Plate (1EA)
Bottom Plate (1EA)
Section–? (Pipe)
Slot Detail
PIPE (5EA) (Processing ?–50x50x3.2t)
SLOT HOLE
Front View
Side View
Top view
Bottom View
PROJECT : 한국기술교육대학교 건축공학부
TITLE P – Joint (Add Plate)
SCALE 1 / 4
DRAWING NUMBER 1 – 2 – 1
REV. 0

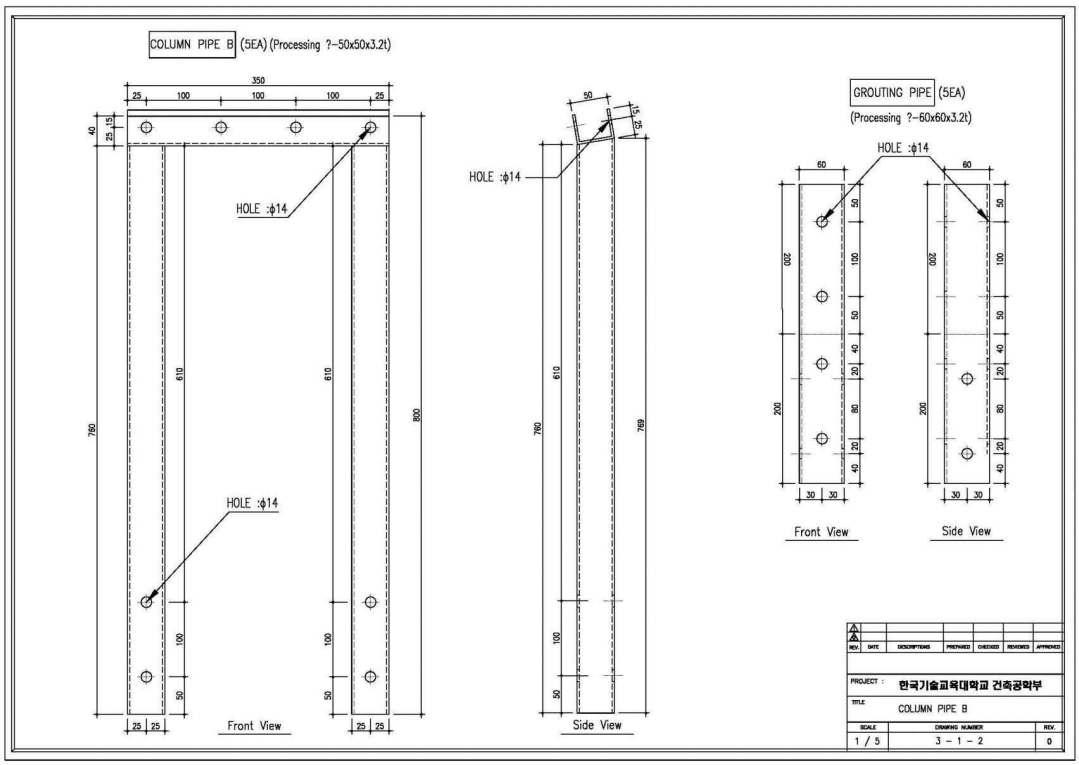

H – Joint (5EA)
CORE (1EA) (Processing PL-3.2t)
Refer to CORE
PL-3.2t
HOLE :ϕ14
Top Plate (1EA)
Bottom Plate (1EA)
Section–? (Pipe)
Slot Detail
PIPE (6EA) (Processing ?–50x50x3.2t)
SLOT HOLE
Front View
Side View
Top view
Bottom View
PROJECT : 한국기술교육대학교 건축공학부
TITLE H – Joint (Add Plate)
SCALE 1 / 4
DRAWING NUMBER 1 – 2 – 2
REV. 0

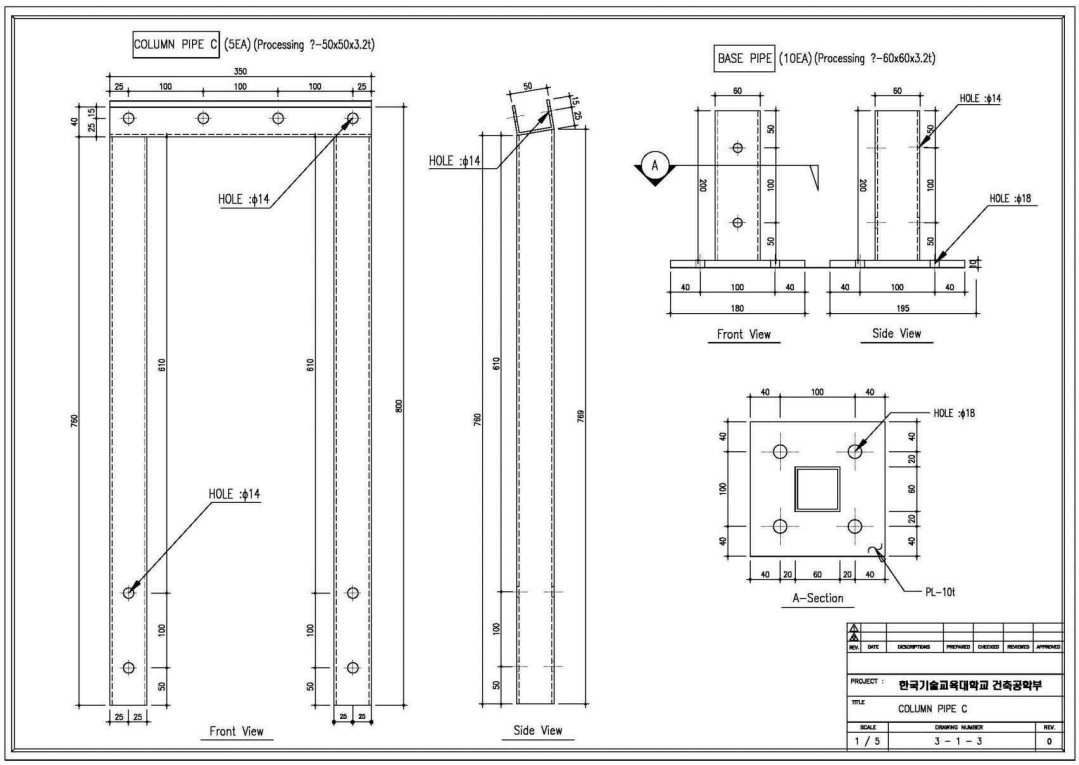

PH – Joint (30EA)
Refer to CORE
PL-3.2t
CORE (1EA) (Processing PL-3.2t)
Top Plate (1EA)
HOLE :φ14
PL-3.2t
Bottom Plate (1EA)
PIPE A (5EA) (Processing ?-50x50x3.2t)
Top view
Bottom View
Front View
HOLE :φ14
Side View
PIPE B (1EA) (Processing ?-50x50x3.2t)
Top view
Bottom View
Front View
HOLE :φ14
Side View
Section-? (Pipe B)
Section-? (Pipe A)
Section-? (Pipe A)
Section-? (Pipe A)
Section-? (Pipe A)
Section-? (Pipe A)
Side Plate-? (1EA)
PL-3.2t
Connection Detail
Side Plate-?,? (2EA)
PL-3.2t
Side Plate-?,?,? (3EA)
PROJECT : 한국기술교육대학교 건축공학부
TITLE PH – Joint (Add Plate)
SCALE 1 / 5
DRAWING NUMBER 1 – 2 – 3
REV. 0


Pipe A (5EA) (Processing ?-30x30x1.6t)
HOLE :φ14
Front View
Side View
Pipe B (15EA)(Processing ?-30x30x1.6t)
HOLE :φ14
Front View
Side View
SLOT HOLE
HOLE :φ14
Bolt Connection Detail
PROJECT : 한국기술교육대학교 건축공학부
TITLE Bottom Pipe
SCALE 1 / 5
DRAWING NUMBER 2 – 1 – 1
REV. 0


Pipe A (30EA)(Processing ?-30x30x1.6t)
HOLE :ϕ14
490
440
25
30
15
Front View
Side View
Pipe B (20EA)(Processing ?-30x30x1.6t)
480
430
Front View
Side View
Pipe C (30EA)(Processing ?-30x30x1.6t)
400
350
Front View
Side View
SLOT HOLE
22
HOLE :ϕ14
Bolt Connection Detail
REV. DATE DESCRIPTIONS PREPARED CHECKED REVIEWED APPROVED
PROJECT : 한국기술교육대학교 건축공학부
TITLE Bottom Pipe
SCALE 1 / 5
DRAWING NUMBER 2 - 1 - 2
REV. 0


COLUMN PIPE A (5EA)
(Processing ?-50x50x3.2t)
350
25
100
40
HOLE :ϕ14
?-50x50x3.2t
760
800
A
HOLE :ϕ18
10t
180
Front View
50
Side View
HOLE :ϕ18
PL-10t
A-Section
REV. DATE DESCRIPTIONS PREPARED CHECKED REVIEWED APPROVED
PROJECT : 한국기술교육대학교 건축공학부
TITLE COLUMN PIPE A
SCALE 1 / 5
DRAWING NUMBER 3 - 1 - 1
REV. 0


COLUMN PIPE B (5EA) (Processing ?-50x50x3.2t)
HOLE :ϕ14
HOLE :ϕ14
HOLE :ϕ14
Front View
Side View
GROUTING PIPE (5EA)
(Processing ?-60x60x3.2t)
HOLE :ϕ14
Front View
Side View
PROJECT : 한국기술교육대학교 건축공학부
COLUMN PIPE B
1 / 5
3 - 1 - 2
0


COLUMN PIPE C (5EA) (Processing ?-50x50x3.2t)
HOLE :ϕ14
HOLE :ϕ14
HOLE :ϕ14
Front View
Side View
BASE PIPE (10EA) (Processing ?-60x60x3.2t)
HOLE :ϕ14
HOLE :ϕ18
Front View
Side View
HOLE :ϕ18
PL-10t
A-Section
PROJECT : 한국기술교육대학교 건축공학부
COLUMN PIPE C
1 / 5
3 - 1 - 3
0

마. 테스트베드 시험조형물의 제작모형

핵심성과물의 설계도면을 기준으로 제작된 절점의 기초모형 두가지 타입과 형상모형을 제작하였으며, 그림에서 보는바와 같다.

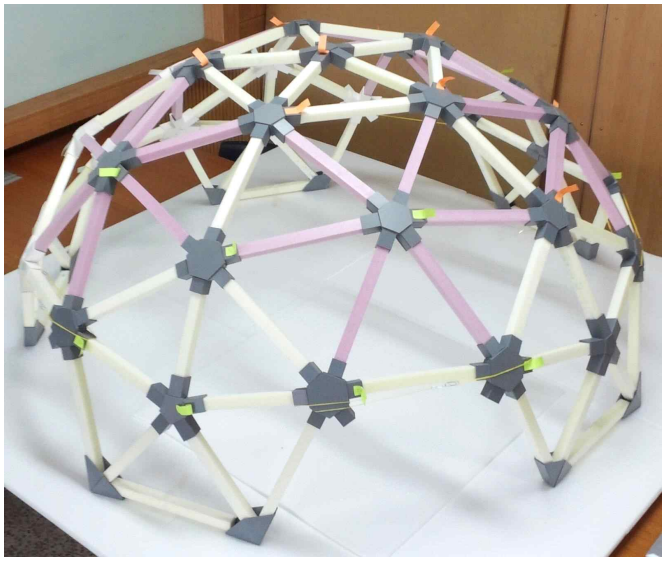
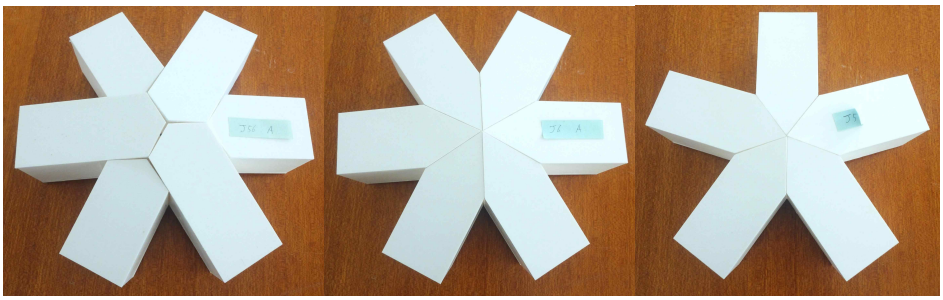
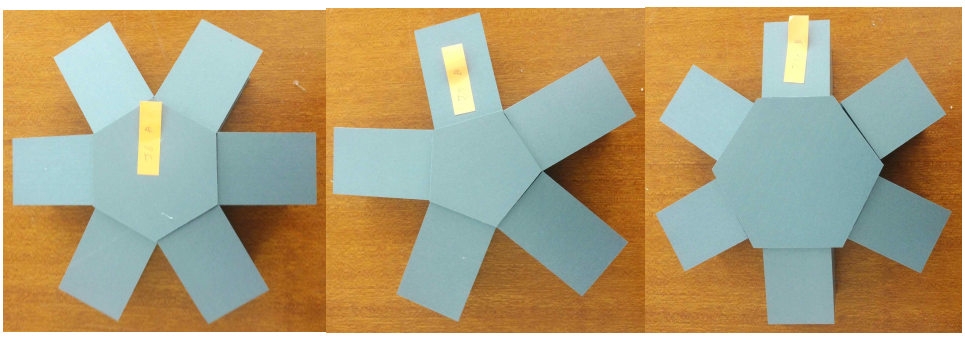


그림 2.2.14.4 테스트베드 시범모형물(MHIC 모델)의 모형



(a) A-type 조인트



(b) B-type 조인트

그림 2.2.14.5 테스트베드 시범모형물(MHIC 모델)의 절점모형

15. 돔형 공간의 에너지성능특성 및 시뮬레이션

가. 돔(Dome)공간의 에너지 성능 특성 및 부하특성

(1) 돔(Dome)공간 에너지성능의 기본특성

돔(Dome)의 에너지성능특성은 일반건물공간과 다른 특성을 나타낸다. 특히 유리를 통한 다량의 일사량은 온실효과에 의해 돔(Dome) 공간을 가열하게 되어 실내 온도가 상승하므로 동절기에는 난방효과를 얻을 수 있지만 하절기에는 과열 현상으로 가장 큰 실내 열 환경문제를 야기한다. 돔(Dome) 공간내의 과열은 냉방부하의 증가 및 복사열에 의한 인접공간의 거주자에게 불균형 복사열을 전달하여 불쾌감을 유발한다. 따라서 돔(Dome)의 최상부 온도는 열환경 평가에 있어 실내온도에 근접하게 유지 할 수 있는 대책이 필요하다.

(2) 돔(Dome)의 태양광선 온도분포에 영향을 주는 요소

- PV 종류 및 위치: 일반외벽조건에 비해 PV는 열저항율이 낮고 일사투과율이 높은 재료로써 실내환경을 결정짓는 중요한 요소가 되므로, PV면의 방위와 면적 등 적정한 유리 종류의 선택이 필요하다.

- 자연 환기구를 위한 개구부 : 돔(Dome) 상부 수직공간은 계절에 따라 온도분포가 크게 차이가 나므로 적절한 환기 조절이 필요하다. 동절기의 경우 찬 외부 공기를 차단할 필요가 있으며, 하절기의 경우 과열된 내부공기의 배출을 위한 환기구가 최상부에 필요하다.

- 열고임 공간 : 열고임 공간은 단면에서 볼 때 인접한 지붕면보다 돌출된 부분을 말한다. 돔공간내의 온도는 높이에 따라 비례적으로 상승하는 것이 아니라 최상부에서 급격하게 상승되므로 상부에 열고임 공간을 설치하여 인접 거주지역의 열환경을 개선 할 수 있다.

- 일사량의 유입 : 톱 라이트를 통한 일사량의 유입은 돔(Dome) 공간내의 가장 큰 부하이며, 일사의 유입은 동절기에는 실내온도를 상승시켜 난방효과가 있으나 유리면의 결로에 유의 하여야 하며, 하절기에는 실내온도의 과열과 큰 상하온도 편차에 유의하여야한다.

- 공기의 이동 : 환기는 공간내의 기류 이동에 큰 영향을 미치게 되며, 또한 공간내의 온도분포를 조절하는데 중요한 요소가 되므로, 유입 또는 유출되는 공기의 위치와 공기 이동에 관한 검토가 필요.

- 공간내의 온도상승 : 돔(Dome) 공간내의 더워진 공기가 팽창에 의해 가벼워져 위로 상승하는 굴뚝효과가 발생되며 또한 큰 환기력에 의해 저층부의취기 등이 상층부로 유입된다.

(3) 돔(Dome)공간 에너지계획의 주안점

- 돔(Dome) 공간은 거주공간, 비거주공간, 외주부로 구분한다. 돔(Dome)의 대공간을 완전히 공조한다는 것은 에너지 손실이 크므로 거주공간에 대해 부분공조방식을 택한다. 외기에 면한 천창 및 측창지역이 외주부에 해당되며 결로 방지를 위한 방안이 필요하다.

(4) 돔(Dome)공간의 효율적인공조방식

- 공기식에 의한 난방시스템은 온풍의 상승으로 인한 공간 내 온도 성층화를 발생시켜 아

트리움의 상하온도차가 커지게 된다. 난방방식은 복사난방이 효율적이며 특히 바닥 복사난방에 의해 거주자에게 직접 열을 전달하는 방식이 효과적이다. 공기방식을 사용할 경우 온풍상승을 방지할 수 있는 에어커튼의 적용을 검토하는 것이 바람직하다.

- 아트리움 상부에 자연통풍용 개구부를 설치함으로서 여름철의 과열현상을 방지하도록 하여야 한다. 상하온도차에 의해 형성된 상부의 고온공기가 시간경과에 따라 축적, 압축되어 거주공간에 밀려들어오기 때문이다. 자연통풍용 상부 개구부는 우수처리에 대한 고려가 필요하며 작동문제를 검토.

- 아트리움 상부의 톱 라이트는 결로가 발생하기 쉽다. 상부 개구부의 환기를 통해 습기를 제거하거나 별도의 제습방안을 검토하여야 한다. 결로 발생 시 결로수 낙하방지를 위한 방안이 필요하며 보다 근본적으로는 유리면 단열성능에 대한 고려가 필요하다.

- 아트리움 상부에는 화재발생시 제연을 목적으로 한 개구부의 설치가 필수적이므로 자연환기용 개구부 및 강제배기(배기팬)가 결합하여 처리하는 것이 바람직하다. 화재발생층의 연기를 아트리움으로 배출하도록 댐퍼의 개폐와 아트리움 상부배기 팬작동 등이 연동 할 수 있도록 방재시스템을 구축 하는 것이 필요하다.

(5) 돔(Dome)공간의 부하특성

- 외부조건에 따른 대공간의 특성은 주위벽이 외기에 면한 공간으로, 냉난방부하가 크고 공조를 필요로 하며 냉방시 콜드드레프트, 난방시 상하온도차가 발생하기 쉽다.

- 거주공간은 천장이 높기 때문에 상하온도분포가 형성된다. 상하온도분포는 거주자의 쾌적성과 실내에 대한 공급부하에 영향을 미친다.

- 냉방취출기류는 비중의 차이에 의해 바닥근처에 모이게 되므로 냉기를 느린 속도로 공급하는 것이 효과적이다. 노즐을 통하여 냉풍이 직접 인체에 도달하기 때문에 취출속도를 충분히 감쇠시키지 않는다면 콜드 드레프트 현상이 발생한다.

- 전공기식 난방방식일 경우 난방공기는 항상 위로 상승하기 때문에 확실한 난방효과를 얻을 수 없다. 온풍의 도달거리를 고려할 때, 난방 취출기류가 인체에 도달하기 전에 온풍상승이 이루어진다면 난방효과를 얻을 수 없을 것이다.

나. 돔(Dome)공간의 에너지 시뮬레이션계획

돔(Dome)공간의 에너지 설계단계에서는 실측이 불가능하므로, 대공간의 온열환경 해석을 위하여 빈번히 이용되고 있는 방법 중 하나인 CFD (computational fluid dynamics ; 전산유체역학) 해석 프로그램을 이용하여 시스템의 타당성 검증을 하였다. 특히 돔(Dome)공간에 적용된 자료로 활용하기 위하여 실시되었다. PV온도형성에는 기류, 열, 습도, 복사 등의 수많은 물리요소가 관련되어 있으므로 그 메커니즘은 매우 복잡하다. 그러므로 PV온도에 대한 이해는 PV온도전역에 걸쳐 장기간에 걸친 열환경관측 자료를 충분히 이용하는 것이 가장 이상적인 방법이다. 그러나 PV온도의 측정지점의 불균일성과 광역성 등의 여러 가지 한계에 의하여 공간적으로 세밀하고 정확한 열환경 정보를 제공할 수 있는 수치시뮬레이션을 이용한 연구방법이 많이 채택되고 있으며, 이들 연구는 수증기의 이동, 대기방사 등의 과정을 도

입하여 해석이 행하여지고 있지만, PV온도에 있어서 PV이용상태를 충분히 고려한 수치시뮬레이션 해석은 매우 드물다.

이에 따라 본 연구에서는 PV온도 분포 특성을 수치시뮬레이션을 통하여 해석하기 위하여 기존의$k-\epsilon$모델이 아닌, 건축분야에서는 잘 알려지지 않은 CSU-RAMS(Colorado State University-Regional atmospheric Modeling System)모델을 이용하여 연구를 진행하였으며, 본 모델을 이용한 수치시뮬레이션의 타당성을 알아보기 위하여 먼저, PV온도상황을 고려한 도시 열환경의 기류장, 온도장을 수치시뮬레이션 한 결과를 제시하였다. CSU-RAMS는 1990년대 미국 콜로라도 주립대학에서 개발된 구름모델과 지형변화에 의한 대기순환 모델을 결합한 열 환경 수치모델이다. 비정수(non-hydrostatic)레이놀드 원시방정식과 운동방정식, 열역학방정식, 수분에 대한 물질방정식, 비습방정식, 연속방정식이며, 기본적으로 압축성 유동을 모사하나, 정역학 근사를 할 때에는 비압축성 유동 또는 압축성 유동으로부터의 비탄성을 유동을 가정할 수 있다. CSU-RAMS모델은 2000년대 이후 Mesh 기능의 강화와 함께 광범위하게 사용되도록 개발되었으며, 중소규모 열환경 현상을 해석 하는데 많이 사용되고 있다.

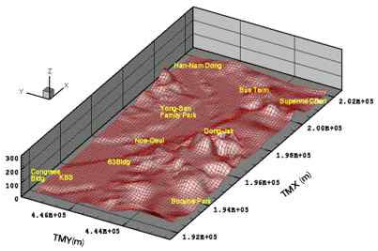


그림 2.2.15.1 모델링 영역 설정

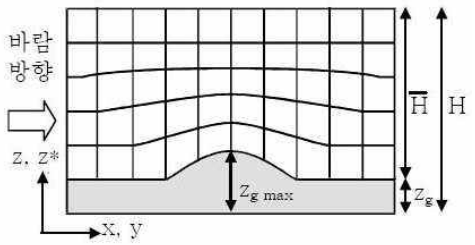


그림 2.2.15.2 지형에 따른 좌표계 설정

(1) 수치시뮬레이션 조건의 설정과 특성

수치시뮬레이션 조건은 8월초의 한여름을 대상으로, 새벽 0시를 계산시점으로 하여 산정하였다. 단, 계산직후의 결과는 초기 값의 영향을 크게 받을 것으로 예상하여, 후술하는 결과들은 초기 값의 영향을 무시할 수 있다고 판단되는 범위에서 관측결과와 비교하기로 한다.

(2) 기초방정식의 설정

PV온도를 수치시뮬레이션하기 위하여 이용한 기초방정식계는 운동량, 질량, 열에너지 등의 보존식에 기초한 운동장정식, 온위방정식, 비습방정식, 연속방정식, 정역학방정식, 지중온도방정식 등을 이용하였으며, 좌표계는 PV온도의 기복에 관계없이 계산할 수 있는 지형좌표계를 이용하였다.

연직좌표계에서 지형좌표계로의 변환식은

$$z^* = \bar{s}\frac{z - z_G(x,y)}{s(x,y,t) - z_G(x,y)} \qquad (2.2.15.1)$$

(z : 고도, z_G: 지형고도, $\bar{s}$: 계산영역 상면의 고도,
s: 질량보존을 고려한 상면의 경계높이가 시간과 장소에 대하여 변하는 물질표면)

운동방정식은

$$\frac{du}{dt} = fv - c_p\theta\frac{\delta\Pi}{\delta x} + g\frac{z^*}{\bar{s}}(\frac{\delta z_G}{\delta x}) - g\frac{z^*}{\bar{s}}\frac{\delta s}{\delta x}$$
$$+ (\frac{\bar{s}}{s - z_G})^2\frac{\delta}{\delta z^*}(K\frac{\delta u}{\delta z^*})v^{(m)} + \frac{\delta}{\delta x}(K_H\frac{\delta u}{\delta x}) + \frac{\delta}{\delta y}(K_H\frac{\delta u}{\delta y}) \quad (2.2.15.2)$$

$$\frac{dv}{dt} = -fu - c_p\theta\frac{\delta\Pi}{\delta y} + g\frac{z^* - \bar{s}}{\bar{s}}(\frac{\delta z_G}{\delta y}) - g\frac{z^*}{\bar{s}}\frac{\delta s}{\delta y}$$
$$+ (\frac{\bar{s}}{s - z_G})^2\frac{\delta}{\delta z^*}(k^{(m)}_{\frac{\delta v}{\delta z^*})v} + \frac{\delta}{\delta x}(K_H\frac{\delta v}{\delta x}) + \frac{\delta}{\delta y}(K_H\frac{\delta v}{\delta y}) \quad (2.2.15.3)$$

이다. 온위방정식은

$$\frac{d\theta}{dt} = (\frac{\bar{s}}{s - z_G})^2\frac{\delta}{\delta z^*}(K^{(\theta)}_{\frac{\delta\theta}{\delta z^*})v} + \frac{\delta}{\delta x}(K_H\frac{\delta\theta}{\delta x}) + \frac{\delta}{\delta y}(K_H\frac{\delta\theta}{\delta y}) \quad (2.2.15.4)$$

이고, 비습방정식은

$$\frac{dqv}{dt} = (\frac{\bar{s}}{s - z_G})^2\frac{\delta}{\delta z^*}(K^{(q)}_{\frac{aqv}{\delta z^*})v} + \frac{\delta}{\delta x}(K_H\frac{\delta qv}{\delta x}) + \frac{\delta}{\delta y}(K_H\frac{\delta qv}{\delta y}) \quad (2.2.15.5)$$

이고, 연속방정식은

$$\frac{\delta u}{\delta x} + \frac{\delta v}{\delta y} + \frac{\delta w^*}{\delta z^*} - \frac{1}{s - z_G}(u\frac{\delta z_G}{\delta x} + v\frac{\delta z_G}{\delta y}) + \frac{1}{s - z_G}(\frac{\delta s}{\delta t} + u\frac{\delta s}{\delta x} + v\frac{\delta s}{\delta y}) = 0 \quad (2.2.15.6)$$

이고, 정역학방정식은

$$\frac{\delta\Pi}{\delta z^*} = -\frac{s - z_g}{\bar{s}}\frac{g}{c_{p\theta}} \quad (2.2.15.7)$$

이고, 지중온도방정식은

$$\frac{\delta T_s}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta z}(K_s\frac{\delta T_s}{\delta z}) \quad (2.2.15.8)$$

이다. 여기에서

$$w^* = w\frac{\bar{s}}{s-z_G} + \frac{z^*-\bar{s}}{s-z_G}(u\frac{\delta z_G}{\delta x} + v\frac{\delta z_G}{\delta y}) - \frac{z^*}{s-z_G}(\frac{\delta s}{\delta t} + u\frac{\delta s}{\delta x} + v\frac{\delta s}{\delta y}) \quad (2.2.15.9)$$

이다.

(u,v,w: x,y,z방향의 속도성분(m/s),

w^*: 지형좌표계에 의한 연직방향의 속도성분(m/s),

t: 시간(s),θ: 온위(K),qv: 비습(kg/kg), T: 온도(K), T_s: 지중온도(K),

K_s: 토양의 열확산계수(m2/sec), R_d: 건조공기의 기체상수(J/kg・K), P: 기압(hPa),

c_p: 정압비열(J/kg・K), P_{00}: 기준 고도의 기압(hPa), f: Coriolis parameter(s-1),

θ: 위도(deg), Ω: 지구의 회전속도(rad/s), g: 중력가속도(m/s),

K_H: 수평방향 확산계수(m/s2),

$K^{(m)}_{,K^{(\theta)}_{,K^{(q)}_v}v}$: 각각 운동량, 열, 비습의 연직방향의 확산계수(m/s2) 이다.

(3) 연직방향의 도시 열환경 확산계수 산정 방식

지상으로부터 접지층, 그 위를 에크만 층으로 나누어 각각 계산하였다. 접지 층 내의 수송저항은 Monin-Obukhov의 상사이론을 풍속 및 온위의 연직분포에 적용한 Businger et al의 무차원 풍속, 온위표현식을 이용하여 운동량과 열 플럭스 및 연직방향 확산계수를 구하였다. 접지 층은 정상상태에서 수평방향으로 균일하다는 조건하에 풍속 및 온위의 연직경도를 보편함수에 의하여 다음과 같이 산정하였다.

$$\Phi_m(\xi) \equiv \frac{xz}{u_*}\frac{\delta U}{\delta z} \quad (2.2.15.10)$$

$$\Phi_h(\xi) \equiv \frac{xz}{u_*}\frac{\delta U}{\delta z} \quad (2.2.15.11)$$

(u_*: 마찰속도, θ_*: 마찰온위, x: Karman상수, $U=(u^2+v^2)^{1/2}$, $\xi - z/L$)

여기에서, 운동량과 열의 연직방향 확산계수는 식 2.2.15.10, 식 2.2.15.11을 이용하면,

$$K^m = u^2_{*\delta U/\delta z} = \frac{xu_*z}{\Phi_m}v \quad (2.2.15.12)$$

$$K^\theta = \frac{u_*\theta_*}{\delta\theta/\delta z} = \frac{xu_*z}{\Phi_h}v \quad (2.2.15.13)$$

으로 나타낼 수 있다. 따라서 $u_*,\theta_*,\Phi_m,\Phi_h$등이 결정되면 연직방향의 확산계수를 구할 수 있다. 이때 비습의 연직방향 확산계수는 열확산계수와 같다 ($K^{(q)}_{= K^{(\theta)}_v}$)고 가정하였다.

에크만 층에서는 대기상태에 따른 난류효과를 잘 표현한다고 판단되는 Yamada에 의한 종결모델을 사용하여 난류확산계수를 산정하였으며 운동량, 열, 비습의 확산계수는 다음과 같

이 표현된다.

$$K_{=ql}^{(m)} S_M y \tag{2.2.15.14}$$

$$K_{=}^{(\theta)} K_{=ql}^{(q)} S_{\#} v \tag{2.2.15.15}$$

여기에서,

$$q^2 = B_1 l^2 \left[(\frac{\delta u}{\delta z})^2 + (\frac{\delta v}{\delta z})^2 \right] (1 - Ri_f) S_M \tag{2.2.15.16}$$

$$l = \frac{xz}{1 + xz/l_0} \tag{2.2.15.17}$$

$$S_M = C_M \frac{(Ri_{fc} - Ri_f)(R_{f1} - Ri_f)}{(1 - Ri_f)(R_{f2} - Ri_f)} \tag{2.2.15.18}$$

$$S_H = C_H \frac{Ri_{fc} - Ri_f}{1 - Ri_f} \tag{2.2.15.19}$$

(실험상수B_1: 15.0, C_M: 1.4326, C_H: 1.9527, R_{f1}: 0.3257, R_{f2}: 0.3161,
Ri_f: Flux Richardson수, Ri_{fc}: 임계 Flux Richardson수 (=0.2748189), q^2: 속도 변동에너지,
l: 혼합길이)

(4) 격자범위의 경계조건 산정방식

광범위 격자에서 세밀한 격자의 경계조건의 설정은 계산정밀도가 높은 Clark와 Rarley의 산정방법을 사용하였다.

$$\phi = E_- \Phi_- + E_0 \Phi_0 + E_+ \Phi_+ \tag{2.2.15.20}$$

여기에서,

$$E_- = \epsilon(\epsilon - 1)/2 + \alpha \tag{2.2.15.21}$$

$$E_+ = \epsilon(\epsilon - 1)/2 + \alpha \tag{2.2.15.22}$$

$$E_0 = (1 - \epsilon^2) - 2\alpha \tag{2.2.15.23}$$

$$\alpha = \left[(\triangle l / \triangle L)^2 - 1 \right] / 24 \tag{2.2.15.24}$$

(Φ: 광범위 격자의 변수치, ϕ: 세밀한 격자의 변수치, ϵ: 광범위 격자의 상대적인 격자번호,
$\triangle L, \triangle l$: 광범위 격자와 세밀한 격자의 간격)

(5) 수치시뮬레이션 조건의 특성

- 초기조건 및 경계조건

초기조건으로 계산 대상영역이 정상상태에 있다고 가정하였다. 연직방향의 풍속성분은 전

영역에서 $w=0$으로 산정하였고, 수평방향 풍속성분은 지균풍이 없는 경우를 가정하여 계산하였으므로, $u=v=0$으로 하였다. 온위는

$$\theta=\theta_G+\Gamma\left\{z^{*}\overline{s}-z_G(x,y)\overline{s^{-1}}+z_G(x,y)\right\} \quad (2.2.15.25)$$

(Γ: 온위의 연직방향 감률(K/m))

- 경계조건: 지표면에서의 경계조건은 연직방향 풍속에 대하여 $w=0$으로 두었고, 수평방향 풍속u,v는 지표면에서의 격자점이 없기 때문에 지표면에 가장 가까운 점의 값 u_{ijk}와 v_{ijk}를 지표층 마찰속도로부터 구하여 그 값을 경계치로 하였다. 온위는 지표면 열수지모델을 이용하여 결정된 T_G를 경계치로 사용하였다.

비습은 지표면의 습윤도와 온도 등의 함수로 나타내는 다음식을 사용하였다.

$$q_{VG}=F_w q_{VGsat}+(1-F_w)q_V(z_2) \quad (2.2.15.26)$$

여기서, (F_w: 지표면의 습도,$q_v(Z_2)$: 고도 z_2에서의 비습,q_{VGsat}: 지표면에서의 포화비습(kg/kg)) 한편, 지중온도에 대해서는 $z_{G0}=100m$에서 다음과 같이 산정하였다.

상층면 경계조건은 지표면 가열에 의해 일어나는 하루 변화가 상층면에 영향을 미치지 않는다고 가정

$$\frac{u_{ijkmax}+u_{ijkmax-1}}{2}=U_g \quad (2.2.15.27)$$

$$\frac{u_{ijkmax}+u_{ijkmax-1}}{2}=V_g \quad (2.2.15.28)$$

로 정의하였으며, 전 변수는

$$\frac{\delta u}{\delta t}=\frac{\delta v}{\delta t}=\frac{\delta \theta}{\delta t}=\frac{\delta q_v}{\delta t}=\frac{\delta \Pi}{\delta t}=0 \quad (2.2.15.29)$$

로 하였다. 측면 경계조건은 유입측(inflow)에서는

$$\frac{\delta u}{\delta x}=\frac{\delta v}{\delta x}=\frac{\delta \theta}{\delta x}=\frac{\delta q_v}{\delta x}=\frac{\delta \Pi}{\delta x}=0 \quad (2.2.15.30)$$

$$\frac{\delta u}{\delta y}=\frac{\delta v}{\delta y}=\frac{\delta \theta}{\delta y}=\frac{\delta q_v}{\delta y}=\frac{\delta \Pi}{\delta y}=0 \quad (2.2.15.31)$$

로 하고 유출측(outflow)에서는 vector량 (u,v)와 scalar량 (θ,q_V)로 나누고, 수평풍속의 법선성분에 대하여 Klemp와 Wilhelmson의 경계조건을 사용하였다.

$$\frac{\delta V_n}{\delta t}+c\frac{\delta V_n}{\delta n}=0 \qquad (2.2.15.32)$$

여기에서 $\delta/\delta n$은 측면 법선방향의 미분,c는 eddy의 위상속도로

$$c=s\frac{N}{\pi} \qquad (2.2.15.33)$$

N: Brunt-Vaisala frequency로 $=(\frac{g}{\theta}\Gamma)^{1/2}$ 로 나타낸다.

수평풍속 접선성분 V_t, 온위와 비습은 내측 두 점의 값으로부터

$$\phi^m_{=2\phi^{m-1}-\phi^{m-2}bound} \qquad (2.2.15.34)$$

과 같이 구하였다. 여기에서 우측상단의 첨자는 격자점이다.

$$\frac{\delta z_G}{\delta x}=\frac{\delta z_G}{\delta y}=0 \qquad (2.2.15.35)$$

다. 돔(Dome)공간의 에너지 시뮬레이션 결과

(1) 돔(Dome)공간의 적용 시스템

본 시스템은 계통연계형 태양광 발전시스템으로 인버터와 계통으로부터의 전원공급을 통하여 전력을 공급하고 있다. 이 시스템에 설치된 태양전지로는 10직렬×13병렬 형태의 12개 군으로 모듈 5000개로 구성되어 최대 전력 25kW를 공급할 수 있는 직병렬형태로 구성되어 있다. 본 시스템의 사양은 다음과 같다.

표 2.2.15.1 시스템의 사양

구	분	성능	수량
태양전지모듈 (다결정실리콘)	개방전압(V)	21	5000EA
	단락전류(A)	3.30	
	정격전압(V)	17	
	정격전류(A)	3.02	
	정격용량(Wp)	90	
	외형크기(mm)	1200×600×38	
	중 량(Kg)	9	
인버터 (3상PWM)	정격용량 (KVA)	15	12EA
	선간전압(V)	310	
	상 전 압(V)	220	
	입력전압(V)	DC 280~400	
	출력주파수(Hz)	60±2%	

(2) 연구대상 지역의 외기조건

BIPV시스템의 전력생산량은 모듈에 입사되는 일사량에 비례하여 직접적으로 영향을 받는다. 최대한의 전력을 생산하기 위해서는 2011년 연구대상 건축물이 소재한 지역의 일조시간과 일사량을 검토하는 것이 선행되어야 하며 이를 바탕으로 BIPV시스템의 효율을 검토하여야 한다고 판단하여 다음과 같이 산정하였다.

- 연구대상 지역의 월별 일조시간 및 수평면 일사량

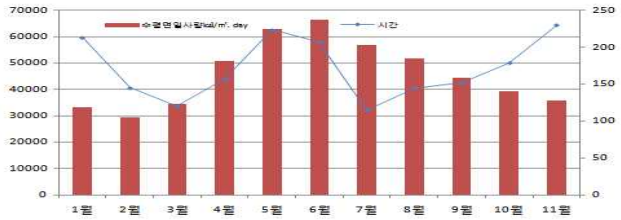


그림 2.2.15.3 월별 일조시간 및 수평면일사량

연구대상 지역의 2010년 연평균 일조시간은 171.525시간을 나타냈으며, 월별 일조시간은 11월이 230시간으로 최고를 나타내고 있으며, 7월이 112.1시간으로 최저의 월평균 일조시간을 기록했다. 이는 하절기의 장마로 인하여 상대적으로 일조시간이 부족함에 기인한다고 판단된다. 반면에 수평면일사량은 8월이 51594(0.01MJ/㎡) Radiation로 가장 높았으며, 12월이 28518(0.01MJ/㎡) Radiation로 가장 낮았다.

(3) 연구대상 지역의 시각별 일사량

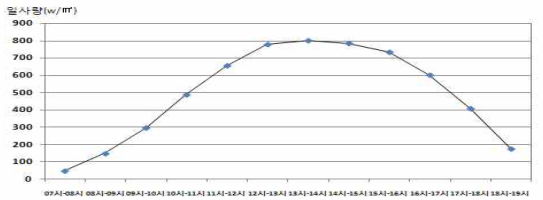


그림 2.2.15.4 연구대상 건축물의 시각별 일사량

그림 2.2.15.4은 연구대상 지역의 2010년 연평균 시각별 일사량은 07시부터 08시까지의 일사량이 46.3(w/㎡)으로 가장 낮은 일사량을 나타내고 있으며, 13시부터 14시까지의 일사량이 809.2(w/㎡)로 가장 높은 일일 일사량을 나타내고 있다.

(4) 연구대상 건축물의 전력 소비량

이러한 결과를 바탕으로 연구대상 돔(Dome) 건축물의 에너지소비를 상당부분 차지할 것으로 예상되는 있는 전력소비량에 대한 검토를 실시하고자 한다. 본 연구에서는 연구대상 건축물의 BIPV시스템 효율과 특성분석의 기초자료로 사용하였다.

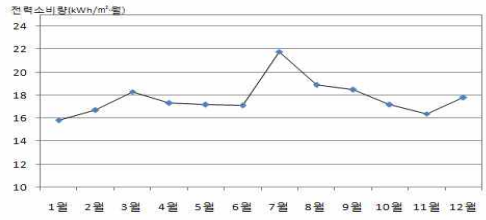


그림 2.2.15.5 월별 전력 사용량

- 월별 전력 소비량

2011년 기준 월별 전력 소비량을 분석한 결과 평균 19.8(kWh/㎡·월)을 나타내고 있으며, 7월이 24.8(kWh/㎡·월)로 가장 높은 소비량을 나타내고 있고, 1월이 17.8(kWh/㎡·월)로 가장 낮은 소비량을 나타내고 있다.

- 시각별 전력 소비량 부하율

연구대상 돔(Dome) 건축물의 시각별 전력 소비량 부하율은 06시부터 상승하여 07시에 6.1%로 오전 중 최고부하율을 기록하고, 차츰 낮아져 주간에는 4~5%로 일정비율로 유지하고 있으며, 18시부터 다시 상승하여 21시에는 8.4%로 하루 중 최고치를 기록하고 있다. 이는 오전 등교준비와 저녁 일과 마감관계로 전력 소비량 부하율이 상승하고 있음을 알 수 있다.

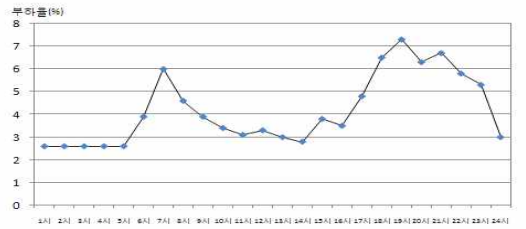


그림 2.2.15.6 시각별 전력 소비량 부하율

(5) 연구대상 돔(Dome) 건축물의 BIPV시스템 발전전력특성과 발전효율

본 연구에서는 연구대상 돔(Dome) 건축물의 일사량 데이터와 에너지 소비구성, 전력소비원단위, 부하율 등을 바탕으로 BIPV시스템의 발전전력특성과 발전효율·부하부담율 산정을 실시하고자 한다.

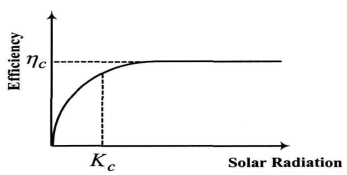


그림 2.2.15.7 일사량에 의한 태양전지 어레이 변환효율

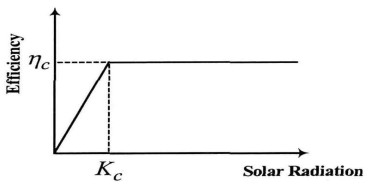


그림 2.2.15.8 일사량에 따른 어레이 변환효율의 근사화

태양광 발전은 시스템 주변의 여건, 태양전지 어레이 효율, 기상상태에 따른 일사강도, 태

양전지의 온도 등에 의해 효율이 제약된다. 또한 태양전지 어레이의 효율은 단위 일사량에 대한 태양전지 어레이의 출력전지의 비를 가지며, 항상 일정한 값이 아니라 일사량과 온도에 의해 변하는 특성이 있다. 이에 따라 그림 2.2.15.7과 같이 태양전지 어레이는 처음에는 작은 양의 일사량으로도 어레이 효율을 급격히 변화시키는 상태를 보이지만, 일사량이 증가하여 특정 일사량 지점(K_C)을 지나면서 효율이 포화되는 변환효율 특성을 지니고 있다. 그때의 변환 특성점 (ηc)이라고 하면 그림의 곡선은 그림 2.2.15.8의 변환효율의 근사화처럼 2개의 곡선으로 근사화 할 수 있으며, 이에 따라 다음의 식을 적용하여 변환효율을 구하였다.

$$Eff_{BIPV}(\gamma) = \frac{\eta c}{Kc} G_t (0 < G_t < K_c) \quad (2.2.15.36)$$

$$Eff_{BIPV}(\gamma) = \eta c (G_t > K_c) \quad (2.2.15.37)$$

또한 효율을 근사화 할 경우 그림 2.2.15.9에서처럼 일사량이 0에서 변곡점(K_C)까지 범위 내에서는 일정한 기울기를 가지는 일차함수로 표현 될 수 있고, 일사량이 변곡점(K_C)이상일 때 에는 상수로 표현 될 수 있다.

- BIPV시스템의 발전전력특성

연구대상 돔(Dome) 건축물의 2011년 외기 평균온도는 년평균 12.4℃로 8월이 27.2℃로 가장 높았으며, 1월이 -1.7℃로 가장 낮았다. 또한 BIPV모듈의 평균온도는 29.2℃로 8월이 41.3℃로 가장 높았으며, 1월이 16.1℃를 나타냈다. 또한 BIPV시스템 적용시 외기온도와 모듈온도는 전기를 발생시키는 과정에서 자체적으로 발생하는 열과 주변대기의 온도상태에 따라 온도가 변화하게 된다고 판단된다.

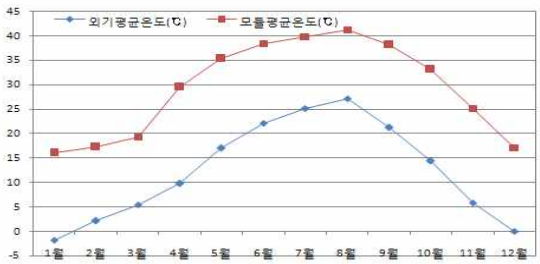


그림 2.2.15.9 월별 외기와 모듈의 평균온도의 변화

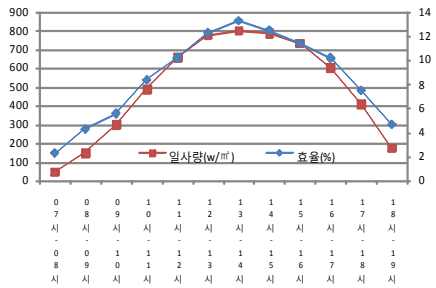


그림 2.2.15.10 시간에 따른 일사량과 효율

- 시간에 따른 일사량과 효율

본 연구에서는 연구대상 돔(Dome) 건축물에 적용된 BIPV시스템의 변환효율분석을 위하여 외기와 BIPV모듈의 평균온도를 바탕으로 변환효율에 대하여 조사하였다.

연구대상 돔(Dome) 건축물에 적용된 BIPV시스템의 시간에 따른 일사량과 효율은 평균 8.7%를 나타냈으며, 13시~14시까지의 변환효율이 13.3%로 가장 높았으며, 07~08시 사이의 변환효율이 2.3%로 가장 낮았다. 이에 따라 BIPV시스템은 온도상승에 따라 주변 외기온도

와 모듈자체 온도의 영향을 받아 변환효율이 결정되는 것으로 판단된다.

(6) BIPV시스템의 발전효율과 부하부담율

본 장에서는 연구대상 돔(Dome) 건축물에 적용된 외기와 BIPV 모듈의 평균온도와 변환효율을 바탕으로 태양전지발전량 대비 인버터 전력량과 발전효율·부하부담율을 산정하고자 한다.15)

- 태양전지발전량 대비 인버터 전력량

연구대상 돔(Dome) 건축물의 1년간 월별 태양전지발전량대비 인버터전력량을 살펴본 결과 5월이 최대치를 기록하고 있으며, 1월이 최소치를 기록하고 있다. 특히 하절기인 7, 8월의 태양전지발전량대비 인버터전력량이 중간기에 비하여 상대적으로 낮은 것은 하절기 장마철의 고르지 못한 일사량과 일조시간에 기인한 것으로 판단된다.

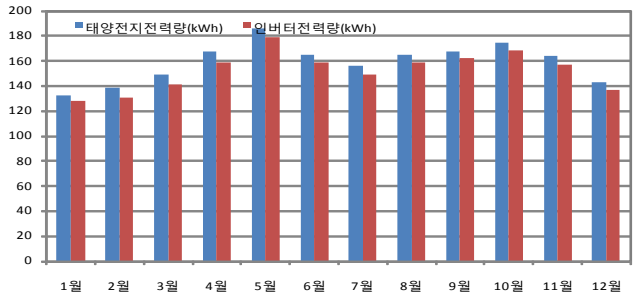


그림 2.2.15.11 월별 태양전지발전량대비 인버터전력량

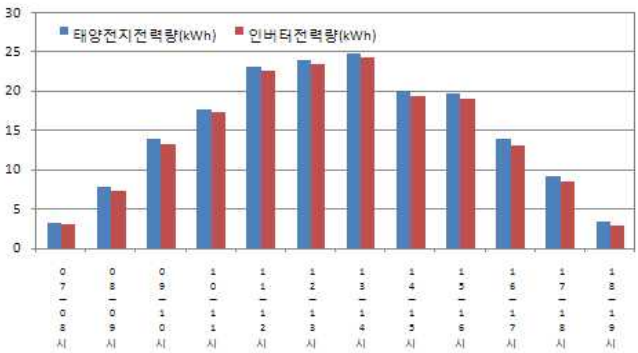


그림 2.2.15.12 태양전지발전량대비 인버터전력량

- 시각별 태양전지발전량대비 인버터전력량

이러한 결과에 따라 연구대상 돔(Dome) 건축물의 월별 태양전지발전량대비 인버터전력량이 최대치인 5월의 시각별 BIPV시스템의 태양전지발전량대비 인버터전력량을 살펴보면 13시~14시에 최대치를 기록하고 있으며, 태양전지발전량대비 인버터전력량의 효율은 94.3%를 나타내고 있다. 또한 07시부터 18시까지 전 출력범위에 거쳐 90%이상의 태양전지발전량대비 인버터전력량 효율을 나타내고 있다.

(7) BIPV시스템의 발전효율과 부하부담율

연구대상 돔(Dome) 건축물의 BIPV시스템의 발전효율은 다음과 같다.

$$\text{발전효율}(\%) = \frac{BIPV\ \text{시스템의 총발전량}(kWh/day)}{\text{연구대상건축물의 일일일사량}(kWh/\text{㎡}\cdot day)\times\text{어레이면적}(\text{㎡})}\times 100 \qquad (2.2.15.38)$$

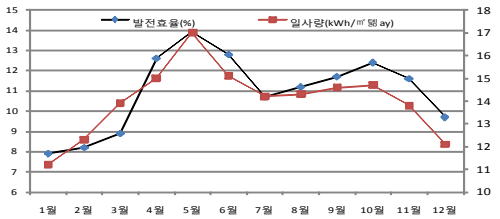


그림 2.2.15.13 BIPV시스템의 월별 발전효율

연구대상 돔(Dome) 건축물의 BIPV시스템의 월별 발전효율은 평균 10.7%를 나타내고 있으며, 5월이 13.7%를 나타냈으며, 1월이 10.2%로 가장 낮은 발전효율을 나타냈다. 이는 전력소비원단위와 비교할 때 동일시기(중간기)에는 전력소비가 감소하는 것과 비교할 때 설비와 전력소비 부하균등화에 대한 대책이 필요한 것으로 판단된다.

연구대상 돔(Dome) 건축물의 부하부담율은 연구대상 건축물의 BIPV시스템 설치와 운영이 전체 전력사용량에 얼마나 기여하였는가를 판단하는 기준으로 다음 식에 의하여 산정하였다.

$$\text{부하부담율}(\%) = \frac{\text{월별}\ BIPV\text{시스템 총발전량}(kWh)}{\text{월별연구대상건축물의전력사용량}(kWh)}\times 100 \qquad (2.2.15.39)$$

BIPV시스템의 월별 부하부담율은 평균 4.3%이며, 5월이 4.7%로 최고치를 나타냈으며, 7월이 3.2%로 가장 낮은 부하부담율을 나타냈다. 이는 5월의 경우 일사량과 외기조건의 상승으로 발전량의 증가와 상대적으로 중간기에 전력수요가 감소한 것에 기인하며, 7월의 경우 장마의 영향으로 발전량의 감소와 하절기 전력소비증가에 기인한 것으로 판단된다.

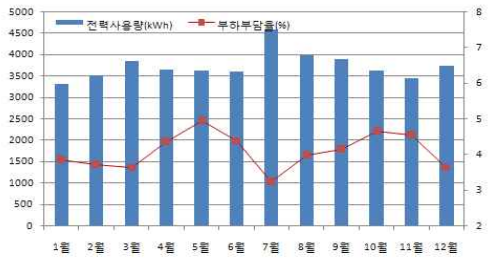


그림 2.2.15.14 BIPV시스템의 월별 부하부담율

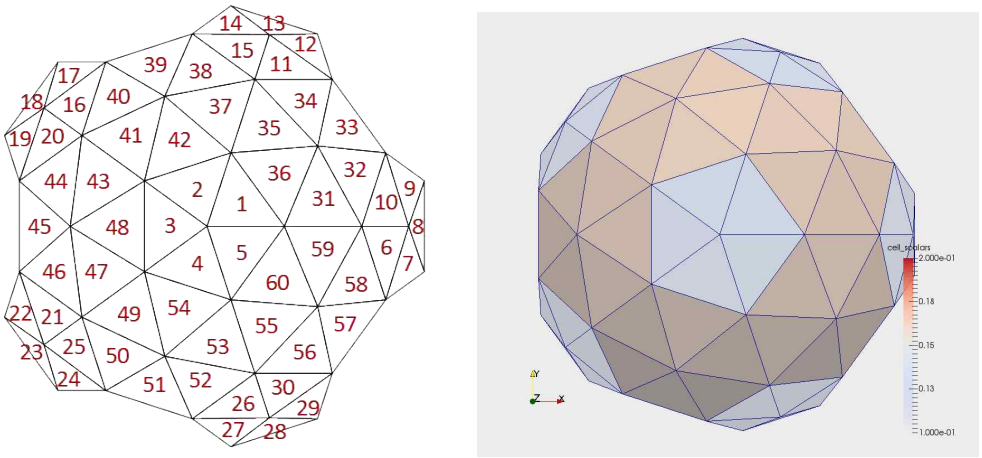
또한 향후 계속적인 돔 건축물의 에너지소비 원단위 산정과 BIPV시스템의 발전효율과 부하부담율에 대한 연구를 통하여 신·재생에너지 설비용량산정의 기초로 활용하고자 한다.

라. 테스트베드(MICD 모델)의 솔라패널 최적배치를 위한 효율성 검토

본 절에서는 테스트베드 대상모델을 대상으로 솔라패널을 최적의 상태로 배치하는데 필요한 기본적인 자료와 분석프로세스를 개발된 프로그램을 이용하여 시뮬레이션 한다. 솔라패널 발전시스템의 다양한 효율 등으로 바라보는 관점과는 달리 일별 년 중 태양각의 변화에 따른 거시적 관찰과 계절별 시간대에 따른 효율적인 일조를 관찰하는 미시적 관찰을 통해서 필요한 정보를 수집하고 변화추이를 예상하도록 한다. 이와 같은 과정에 대해서 테스트베드 구조물을 대상으로 모델의 상태와 기본적인 정보를 관찰하고, 시간별, 계절별, 일일별 변화상태 등을 파악하고, 음영을 고려한 일조조건의 변화도 함께 살펴본다.

(1) MICD 솔라패널 해석대상 모델

대상모델의 형상과 패널의 요소번호는 그림2.2.15.15와 같다. 오각형을 중심으로 삼각형 솔라패널 요소번호가 부여되며, 본 보고서의 MICD모델의 모델링과 동일하게 적용된다. 삼각형 솔라패널의 면적은 오각뿔 도형과 육각뿔 도형에서 두 가지 종류의 삼각형으로 나누어지며, 그림 2.2.15.15(b)에서 보는바와 같다. 삼각형 면적의 크기는 육각뿔을 구성하는 삼각형이 큰 값을 가진다. 아래 그림에서 보는 모델의 절점은 구의 표면에 위치하며, 부재의 길이도 3가지 종류로 설계가 가능하다. 따라서 2종류의 삼각형 솔라패널을 이용해서 대상모델을 건조할 수 있다.



(a) 패널 요소번호 (b) 삼각패널 면적

그림 2.2.15.15 테스트베드 (MICD 모델)의 형상과 솔라패널 요소번호

위 그림에서 나타난 솔라패널 해석대상모델은 일반적인 구조물에서 가지는 단순한 형태가 아니다. 이것은 각 패널의 방위각과 패널 경사각의 종류가 매우 많다. 이것을 그림 2.2.15.16에 패널별로 표현하였다. 그림에서 방위각은 정북의 경우가 0° 정남의 경우가 180°로 표현되며, 시계방향으로 값이 부여된다. 그러므로 정동방향은 90°가 된다. 대상모델의 위도와 경도는 시뮬레이션에서 매우 중요한 요인이 되며, 태양의 방위각과 고도각에 따라 에너지는 변화하게 된다. 본 모델의 경우 서울지역을 대상으로 한 위도와 경도를 적용하였다. 그림에서

발 수 있듯이 돔형모델이므로 매우 규칙적인 변화를 보이고 있다. 패널의 방위각의 경우는 정북방향의 경우는 모두 0°로 정의되므로 360°의 경우와 동일하게 적용되도록 프로그래밍 되어있다. 패널의 경사각의 경우 90°를 넘는 경우는 수직으로 세워진 패널을 넘어선 각도이므로 패널면이 바닥을 향하게 되는 것을 의미한다. 해석대상모델의 경우는 반구형 돔이므로 90°미만의 각도로 존재한다.

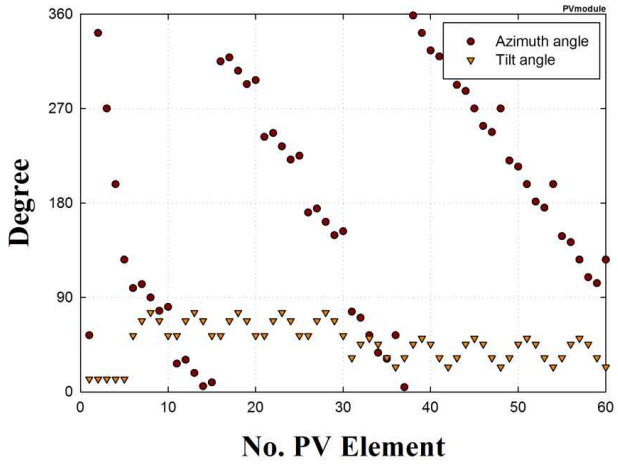
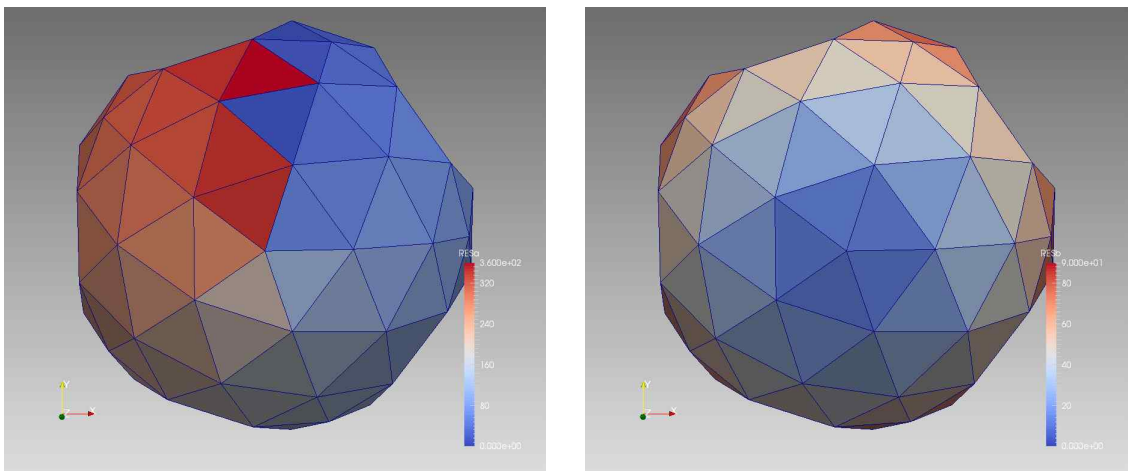


그림 2.2.15.16 패널별 방위각과 경사각 변화 그래프

해석대상모델의 패널별 방위각과 경사각을 그림 2.2.15.17에 형상과 함께 나타내었다. 그래프에서 설명한 바와 같이 방위각의 변화는 해석대상모델의 꼭짓점을 기준으로 시계방향으로 회전하고 있음을 쉽게 알 수 있다. 경사각의 경우도 꼭짓점을 기준으로 방사형으로 변화하고 있으며, 매우 균일한 변화를 보이고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 중앙부에서는 편평한 패널이 되는 것을 의미하며, 가장자리로 갈수록 수직에 가까운 솔라패널이 설치되는 것을 설명하고 있다.



(a) 패널 방위각 (b) 패널 경사각

그림 2.2.15.17 솔라패널 방위각과 경사각

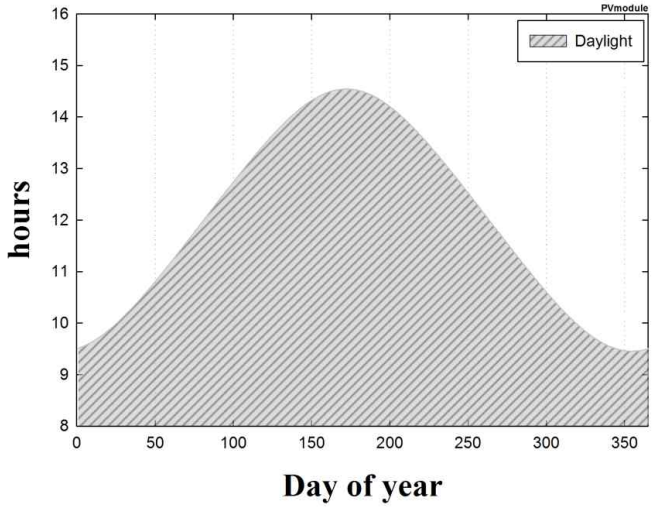


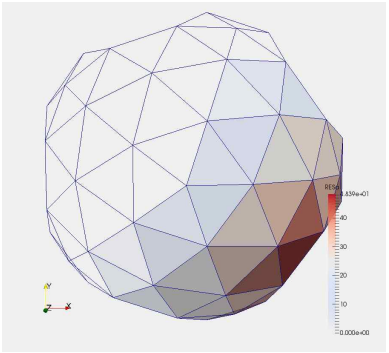
그림 2.2.15.18 연중 일조시간 변화 그래프

연중 일조시간의 변화는 위도에 따라 달라지며, 그림 2.2.15.18은 대상모델의 지역에 대한 일조시간을 그래프로 나타내었다. 계절별 일조시간이 달라지며, 여름의 경우가 가장 크게 나타난다. 위도에 따른 일조시간의 변화는 프로그램을 통해서 간단하게 얻을 수 있다.

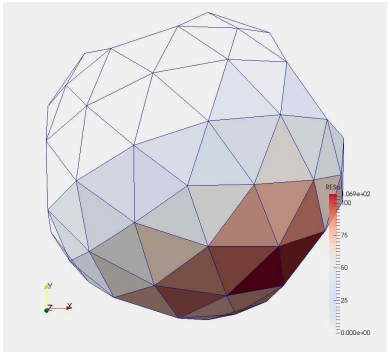
(2) 연중일별 태양위치에 따른 일사변화와 효율성 변화특성

일출과 일몰 사이의 시간의 변화에 따라서 태양의 방위각과 고도각도 함께 변화한다. 여기서 일조시간과 이들의 각도에 따라서 누적되는 량이 달라진다. 시간별 태양에 의해서 솔라패널에 영향을 주는 것을 관찰하기 위해서 그림2.2.15.19-그림2.2.15.22까지 시간대 별로 나타나는 솔라패널의 영향을 시뮬레이션 하였다. 각각의 그림이 의미하는 바는 그림순서대로 1월1일, 4월1일, 7월1일, 10월1일의 시간대별 변화그래프이다. 즉 겨울, 봄, 여름, 가을의 순서로 나타내고 있음을 의미한다. 각각의 그림에서 나타나있는 시간은 모두 오전8시부터 오후4시까지 두시간 간격으로 표현하였다. 따라서 그림에서 (c)항목이 정오에 해당된다.

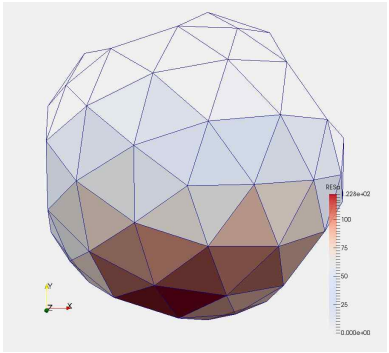
1월1일의 경우 시간별 변화를 쉽게 인식할 수 있다. 동남쪽 패널이 가장먼저 반응하고, 점점더 남쪽과 서쪽방향으로 진행한다. 정오가 지난 이후부터는 서북쪽으로 영향이 큰 방향으로 진행하는 것을 쉽게 관찰할 수 있다. 4월1일의 데이터와 비교해 볼 때 보다 남쪽으로 향하고 있으며, 편평한 패널보다 경사진 패널이 보다 유리가게 나타난다. 4월1일의 데이터의 경우 겨울에 나타나는 것 보다 훨씬 중앙부의 패널이 유리하게 작용한다. 이것은 위도 37° 근처의 대부분의 지역에서 동일하게 작용한다. 그림 2.2.15.21의 결과에서 볼 때, 이전의 두 그림에 비해 훨씬 중앙부로 집중되는데 여름철 태양의 위치가 머리위에 머무르는 것을 생각하면 쉽게 이해할 수 있다. 중앙부의 영향이 편평한데도 불구하고 적게 나타나는 것은 삼각형의 면적이 육각도형을 구성하는 삼각형보다 작기 때문이며, 단위면적당으로 나타낼 경우는 크게 나타난다. 그림2.2.15.22의 경우도 마찬가지로 우리나라 봄, 가을의 태양이 주는 영향이 유사한 것으로 쉽게 판단할 수 있다. 이상과 같이 솔라패널의 일별 시간대에 따른 변화그래프로 패널의 영향을 간단하게 식별할 수 있다.



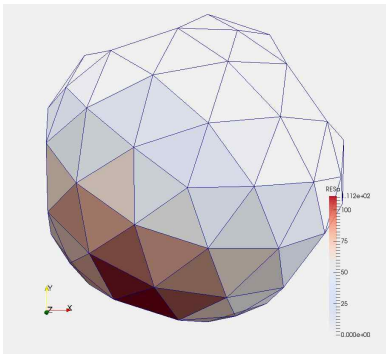
(a) 08:00



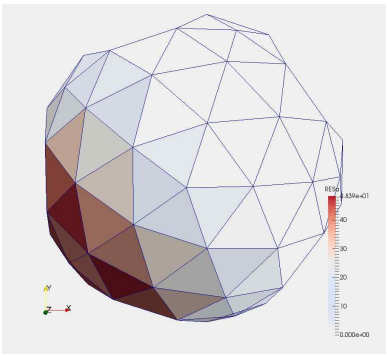
(b) 10:00



(c) 12:00

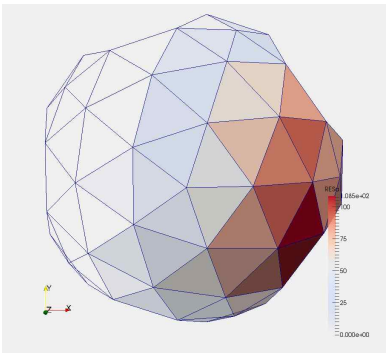


(d) 14:00

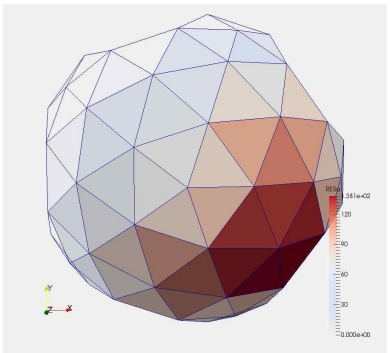


(e) 16:00

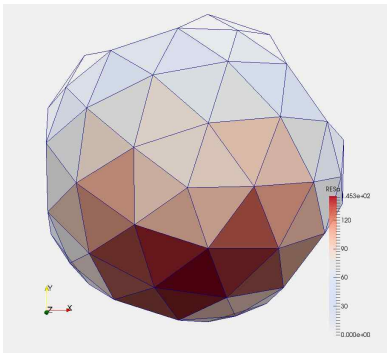
그림 2.2.15.19 MICD 모델의 시간에 따른 일사 시뮬레이션 (1th Jan - 1일)



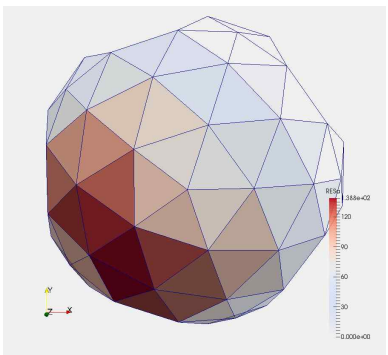
(a) 08:00



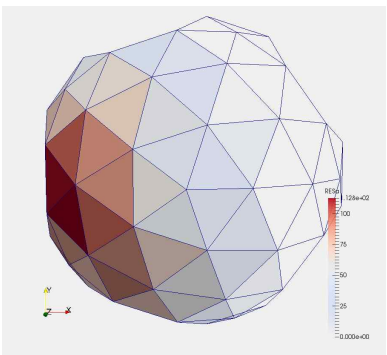
(b) 10:00



(c) 12:00

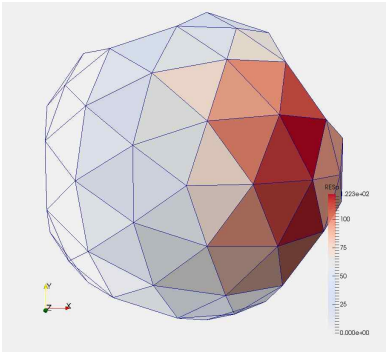


(d) 14:00

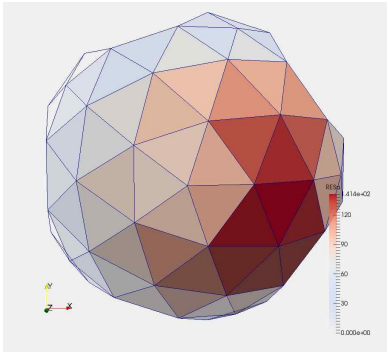


(e) 16:00

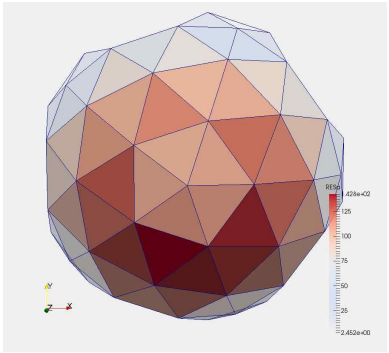
그림 2.2.15.20 MICD 모델의 시간에 따른 일사 시뮬레이션 (1th Apr - 91일)



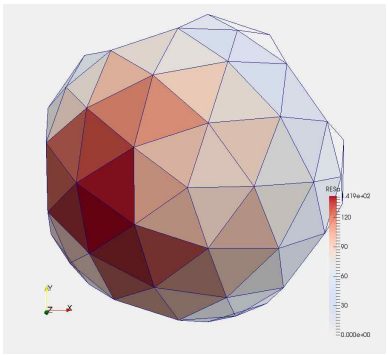
(a) 08:00



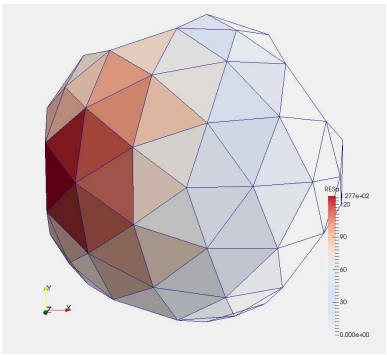
(b) 10:00



(c) 12:00

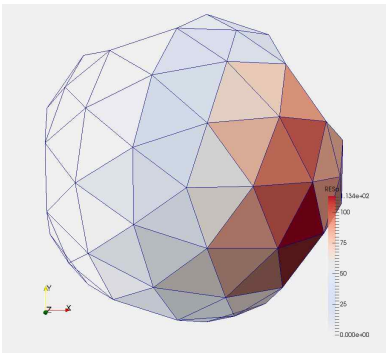


(d) 14:00

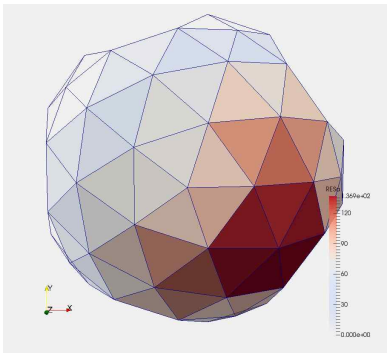


(e) 16:00

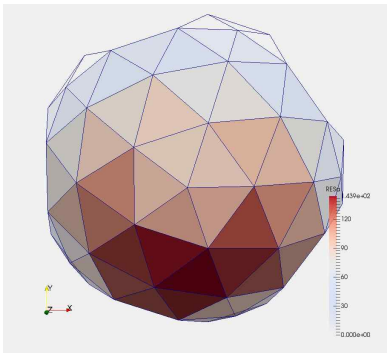
그림 2.2.15.21 MICD 모델의 시간에 따른 일사 시뮬레이션 (1th Jul - 182일)



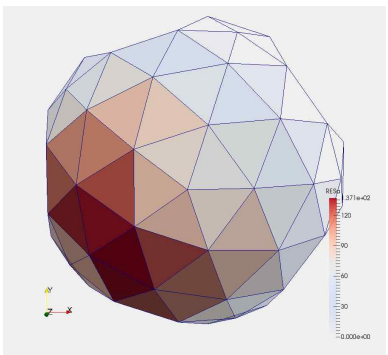
(a) 08:00



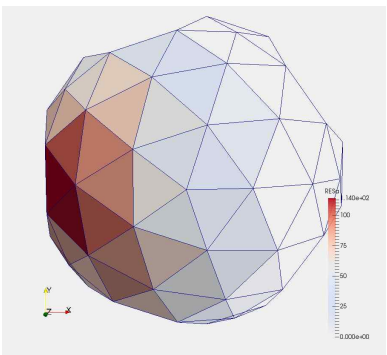
(b) 10:00



(c) 12:00



(d) 14:00



(e) 16:00

그림 2.2.15.22 MICD 모델의 시간에 따른 일사 시뮬레이션 (1th Oct - 244일)

이상과 같은 시뮬레이션 결과로 얻어진 다양한 솔라패널 모델의 태양이 주는 영향에 대해서 테스트베드(MICD 모델)의 태양열 에너지 발생을 위한 반응을 모니터링을 통한 자료와 비교해 본다. 그림 2.2.15.23에서 보는바와 같이 해석대상모델의 형상을 모듈화한 절점과 부재를 이용하여 제작하였으며, 각각의 단위 에너지 분포에 대해서 살펴보기 위해 삼각형 요소당 하나의 측정패널을 부착하였다. 이들을 측정할 수 있는 센서에 대해서 그림 2.2.15.24에서 보는 바와 같이 제작하였으며, 이들의 신호를 실시간으로 측정할 수 있다. 60개의 요소로 이루어진 모델에 대한 연결은 무선으로 데이터를 받을 수 있으나, 본 연구에서는 실시간 데이터를 유선으로 받게 된다. 이들을 이용한 에너지 생성정보를 비교하도록 한다.



그림 2.2.15.23 모니터링용 테스트베드 모델

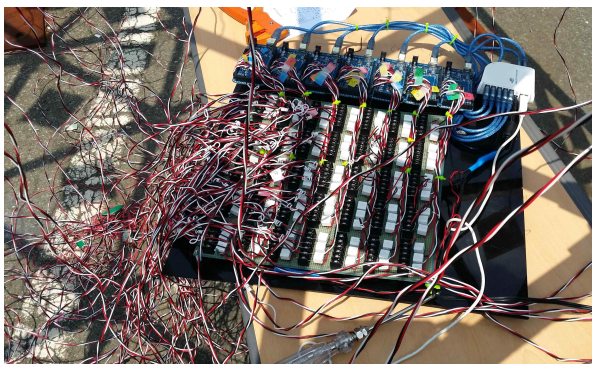


그림 2.2.15.24 태양전지 에너지 발생 측정 센서 조립상태

그림 2.2.15.25의 결과는 시뮬레이션에서 다루어진 상황에 대해서 비교적 유사한 상황에서 측정하였으며, 측정된 시간은 정오에 관찰하였다. 그림에서 보는바와 같이 주요 에너지 발현 위치는 시뮬레이션 결과에서 보는 바와 같고, 몇몇 센서의 물리적 결함으로 인한 데이터 손실은 센서가 비교적 작고 연결부위에서 문제가 발생하므로 측정상의 오차로 생각된다. 모든 위치에 대해서 동일한 면적과 성능의 패널을 부착하였으므로 특정한 상태에서 태양판의 모델링 결과는 각각의 격자에서 나타난 단위면적을 고려하지 않은 상황이다. 따라서 이들의 비교는 태양광이 주는 영향에 대한 패턴을 살펴보는 것이 합리적이다. 그림에서 볼 때, 이러한 패턴은 시뮬레이션 결과와 유사하다고 생각된다.

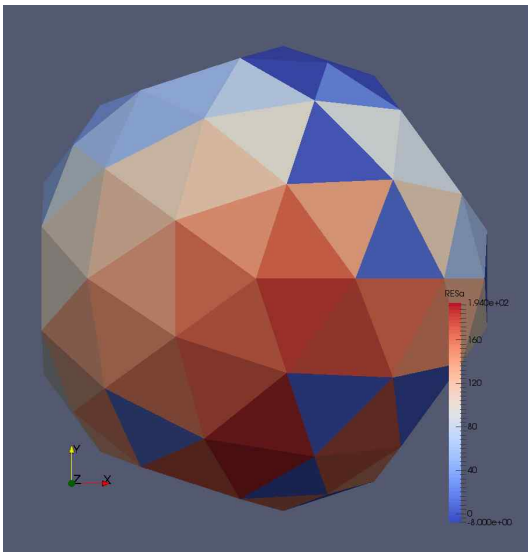
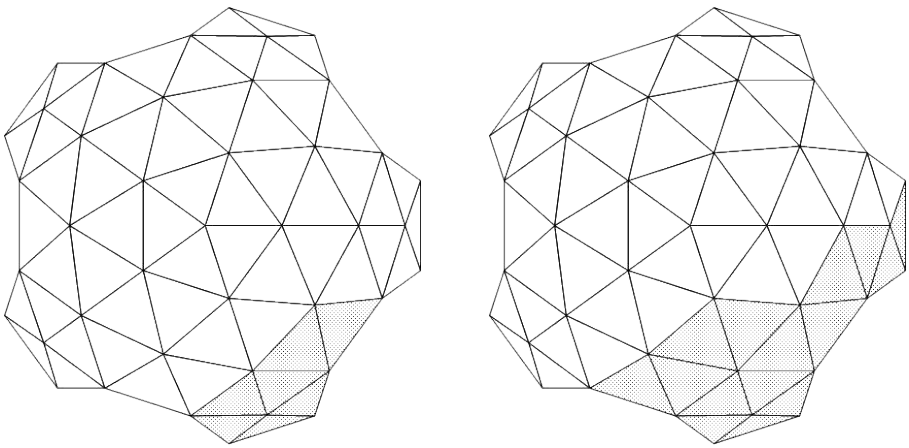


그림 2.2.15.25 모니터링용 테스트베드 솔라패널의 에너지 발생상태

(3) 계절별 일사량의 특성과 음영에 따른 효율성 검토

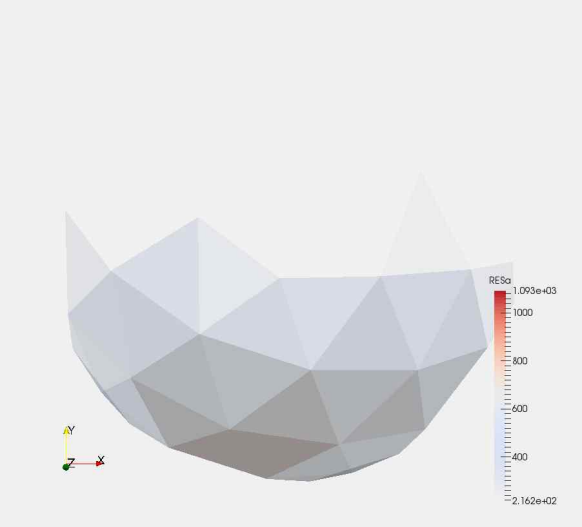
본 절에서는 그림자의 영향으로 인해서 발생하는 패널의 영향을 살펴보기 위해서 그림 2.2.15.26과 같은 상황에 대해서 시뮬레이션 하였다. 그림에 나타난 음영을 전체 구조물의 12%만 고려한 경우와 25%를 고려한 모델로 채택하였으며, 그림자의 영향에 대한 방향을 남동쪽 방향으로 고려하였다. 북쪽방향의 경우 그림자의 영향은 북반구에서는 나타나지 않으며, 인접건물과 고저차가 심하지 않은 경우는 큰 차이가 나타나지 않기 때문에 영향이 가장 큰 남동쪽 방향을 고려하였다.



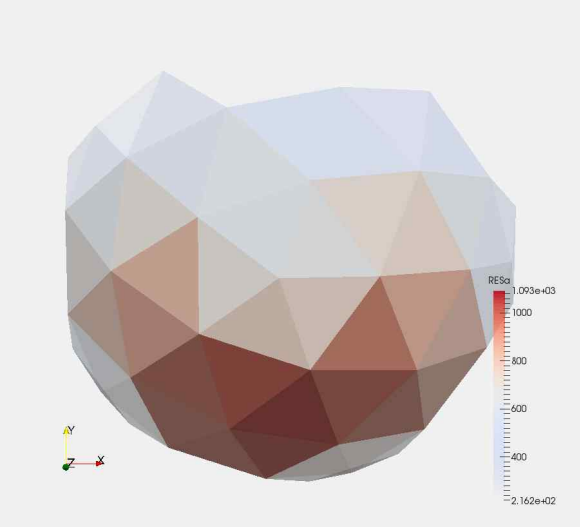
(a) 12% (b) 25%

그림 2.2.15.26 테스트베드 구조물의 음영을 고려한 해석모델

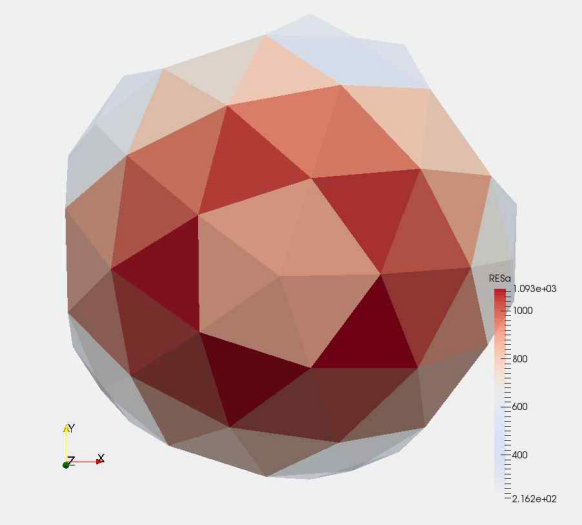
위 그림과 같은 상태의 테스트베드 구조물을 시뮬레이션 하였으며, 해석결과는 그림 2.2.15.27에서 그림 2.2.15.29에 나타난 바와 같다. 그림에서 나타난 바와 같이 음영의 영향에 따른 솔라패널의 일사그래프가 다르게 나타난다.



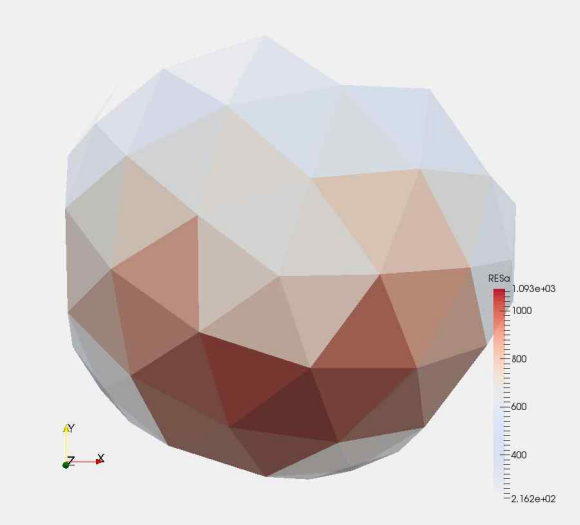
(a) 1th Jan (001day)



(b) 1th Apr (091day)



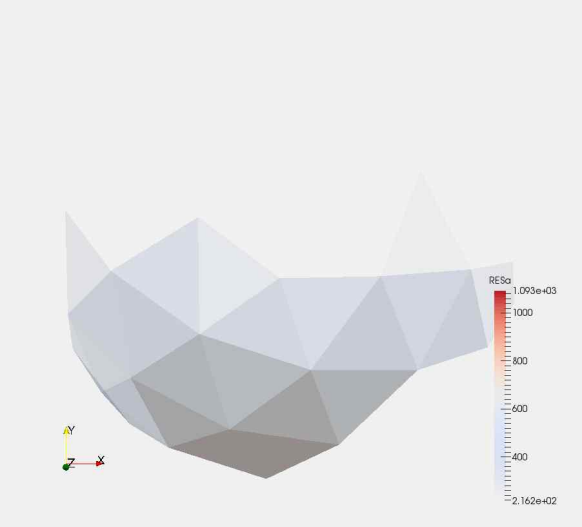
(c) 1th Jan (182day)



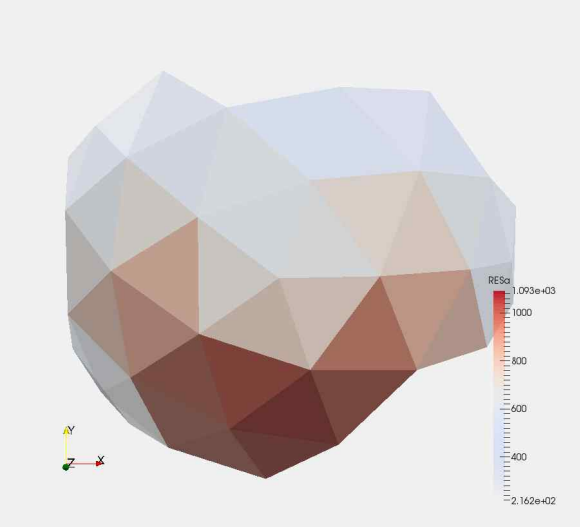
(d) 1th Apr (244day)

그림 2.2.15.27 테스트 베드 모델의 계절별 일사량 변화;
음영상태 (0% 모델)

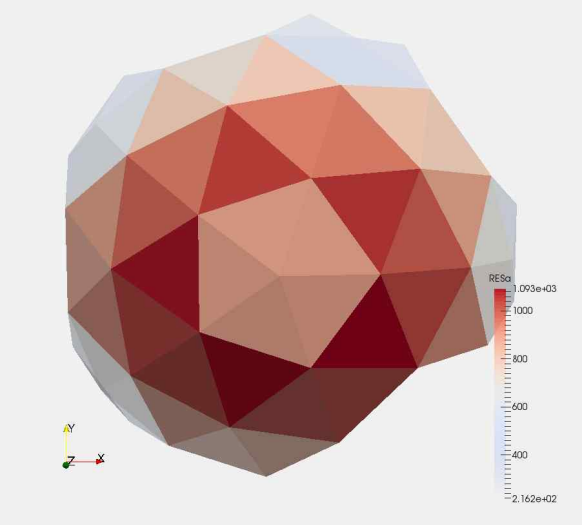
그림 2.2.15.27은 음영상태가 0%인 모델에 대해서 일사량을 계산한 결과이다. 그림에서 나타난 바와 같이 계절별 일사량의 값의 차이는 여름이 가장 크고, 겨울철이 가장 작은 것을 쉽게 알 수 있다. 각각의 그림에서 나타난 패널별 영향에 대해서 중앙부 삼각형이 적게 나타나는 것은 단위면적당으로 볼 때는 크게 나타나지만 여기서는 면적을 고려한 까닭에 경사면의 패널이 높게 나왔다. 이러한 형상으로 미루어 필요한 삼각형 솔라패널의 위치를 쉽게 판별할 수 있다. 겨울철의 경우인 (a)의 경우는 영향력이 매우 적으며, 여름철을 의미하는 (c)의 경우는 중앙부에 위치한 패널보다 중앙부 삼각형을 둘러싸고 있는 패널이 유리하게 작용한다. 봄과 가을의 경우인 (b)와 (d)의 경우는 남향에 가까운 패널이 영향을 주고 있다. 북쪽 패널의 경우 효율이 매우 낮으며, 구조물의 형태와 방향이 매우 중요한 것을 알 수 있다.



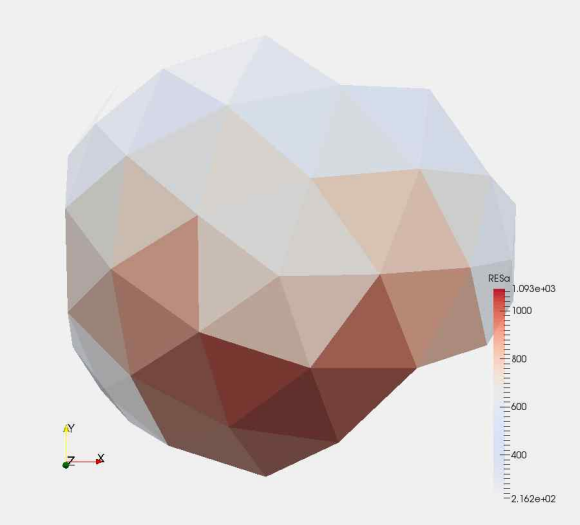
(a) 1th Jan (001day)



(b) 1th Apr (091day)



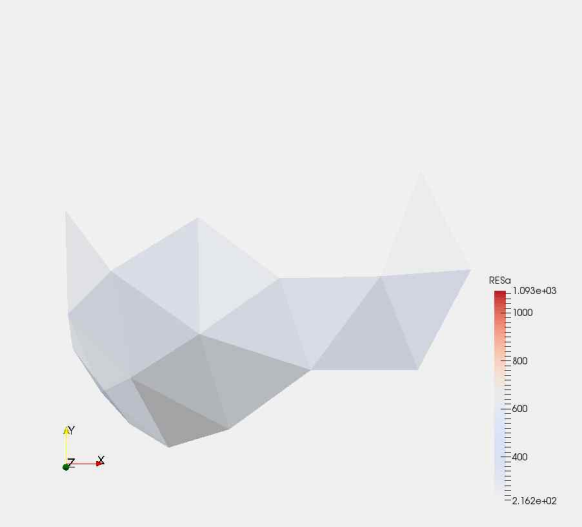
(c) 1th Jan (182day)



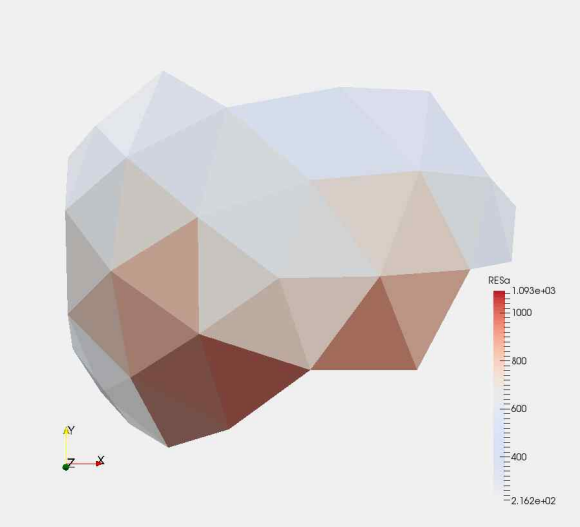
(d) 1th Apr (244day)

그림 2.2.15.28 테스트 베드 모델의 계절별 일사량 변화; 음영상태 (12% 모델)

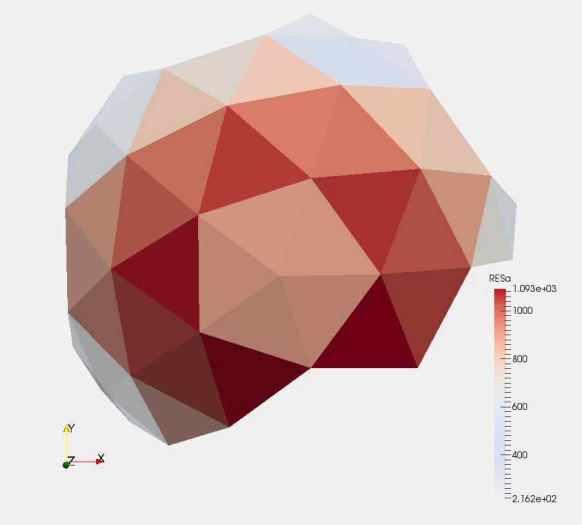
그림 2.2.15.28은 음영상태가 12%인 모델에 대한 결과이다. 그림에서 나타난 바와 같이 계절별 일사량의 값의 차이는 여름이 가장 크고, 겨울철이 가장 작으며, 음영 0%모델과 유사하다. 각각의 그림에서 나타난 패널별 영향에 대해서 중앙부 삼각형이 적게 나타나는 것으로 설명할 수 있으며, 삼각형 솔라패널의 위치를 쉽게 판별할 수 있다. 음영이 동남쪽 패널에 영향을 미치므로 이에 대한 계산결과를 잘 알 수 있으며, 패널의 효율을 쉽게 확일한 수 있다. 이전 모델과 동일하게 겨울철의 경우는 영향이 매우 적으며, 여름철의 경우는 중앙부의 패널이 봄과 가을의 경우는 남향에 가까운 패널이 영향을 주고 있다. 그러나 그림자의 형향으로 인해서 솔라패널의 에너지 발생효율은 감소하고 있다. 이상과 같이 음영에 따라서 에너지 효율에 유리한 위치를 판별할 수 있다.



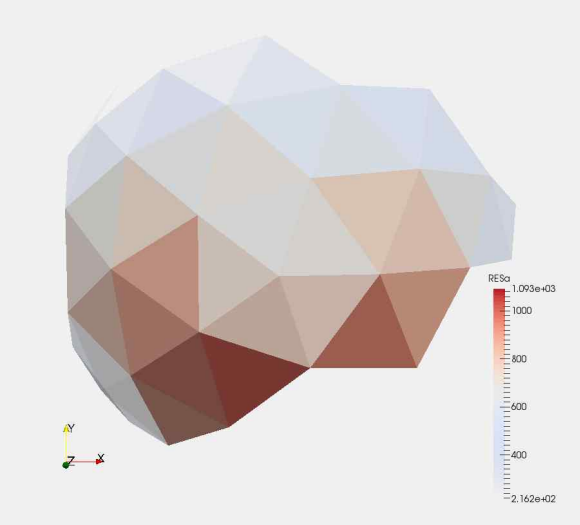
(a) 1th Jan (001day)



(b) 1th Apr (091day)



(c) 1th Jan (182day)



(d) 1th Apr (244day)

그림 2.2.15.29 테스트 베드 모델의 계절별 일사량 변화;
음영상태 (25% 모델)

그림 2.2.15.29은 음영 25%인 모델에 대한 결과이다. 그림에서 나타난 바와 같이 계절별 일사량의 양상은 유사하게 나타난다. 겨울철의 영향이 가장 작으며, 음영 0%모델과 12%모델과 마찬가지로 계절별 영향은 유사하다. 각각의 그림에서 나타난 패널별 영향도 중앙부 삼각형이 면적에 따라 적게 나타나는 것은 동일하며, 그림자의 영향이 크기 때문에 이에 대한 영향도 크게 나타난다. 남쪽방향 패널의 그림자로 인한 영향이 잘 설명되고 있으며, 패널의 효율을 쉽게 확일한 수 있다. 이전과 같이 겨울철 영향이 적고, 여름철은 중앙부 패널이 유리하게 작용하지만 봄과 가을의 경우는 음영의 영향으로 인해 에너지 효율이 적게 나타난다. 이상과 같이 음영을 고려하여 패널의 영향을 판단할 수 있으며, 이들의 결과를 이용해 필요한 패널을 쉽게 판단할 수 있다.

(4) 연중 일사량의 변화특성으로 고려할 수 있는 솔라패널 최적위치

해석대상모델의 일사량변화특성에 대해서 시뮬레이션 결과를 그림2.2.15.30에 타나내었다. 그림에 나타난 바와 같이 그림자의 영향이 크게 작용할수록 일사량의 변화는 낮게 나타난다. 여기서 효율의 측면으로만 연구되었으므로 계절별 기후의 영향에 따른 변화는 나타나지 않고 있다. 본 연구에서는 계절에 따른 청명도가 태양전지발전에 영향을 주는 것에 대해서는 고려하지 않았지만 패널의 영향을 판단하기에는 매우 유용한 결과를 얻을 수 있다.

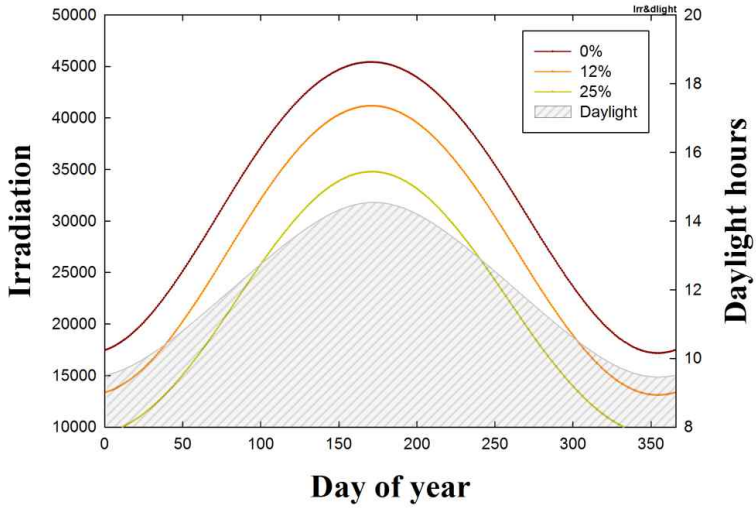


그림 2.2.15.30 테스트 베드 모델의 음영조건에 따른 연중 일사량 변화

그림 2.2.15.31에서 그림 2.2.15.33은 각각의 패널에 대한 전체 일사량을 계산한 것으로서 음영 0%, 12% 및 25% 모델을 각각 그래프로 나타내었다. 그래프를 통해서 필요한 패널의 위치를 쉽게 판단할 수 있고, 어떠한 기준을 이용하여 패널을 결정하는가 하는 문제는 비용적 측면이 고려되어야 한다.

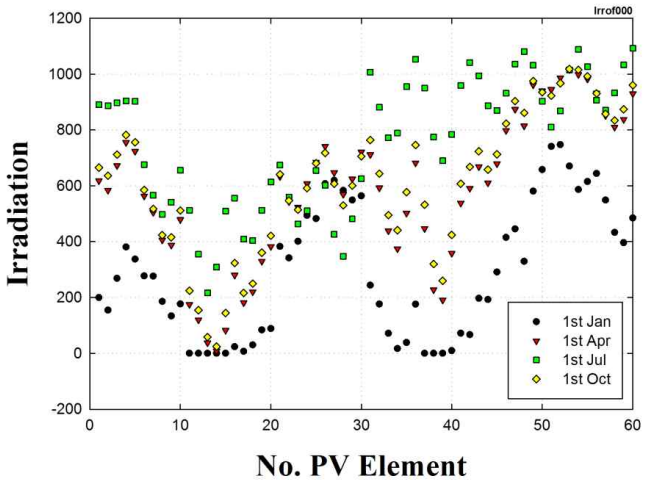


그림 2.2.15.31 음영상태를 고려한 솔라패널별 에너지 발생효율 (음영 0% 모델)

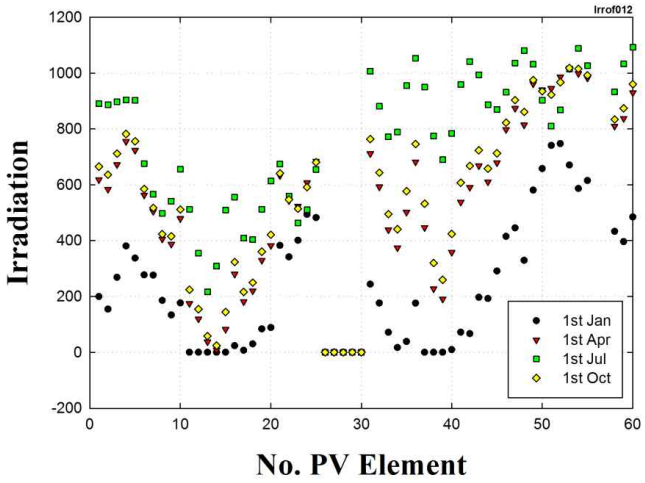


그림 2.2.15.32 음영상태를 고려한 솔라패널별 에너지 발생효율 (음영 12% 모델)

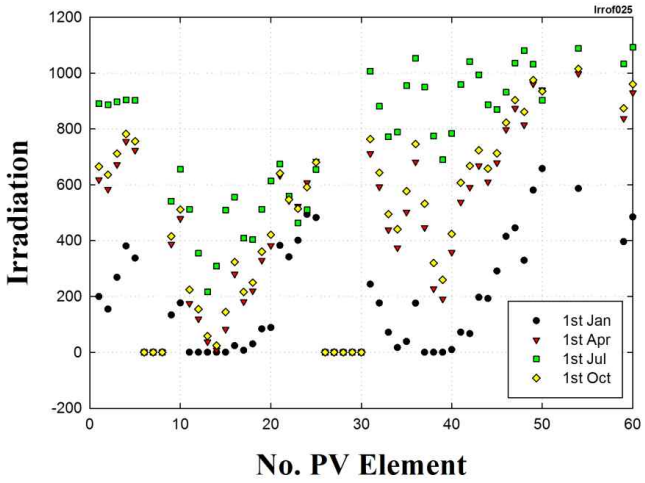


그림 2.2.15.33 음영상태를 고려한 솔라패널별 에너지 발생효율 (음영 25% 모델)

이상과 같이 삼각형 솔라패널에 대한 음영의 고려와 구조물의 위치 및 패널의 기하학적 특성을 고려하여 적합한 패널 위상을 결정하는 결과를 프로그램을 통해서 제공받을 수 있다. 패널의 결정에서 비용적 측면의 고려는 패널가격과 부대비용 및 에너지 효율에 따른 발전량에 따라 최종적으로 판단할 수 있다.

16. MICD 모델의 제작 및 설치 지침

가. MICD 모델의 일반 제작지침(안)

1. 적용범위

1.1 이 시방서는 『합성목재 모듈러 돔』에 대하여 적용한다.

1.2 이 시방서에 명시되지 않은 사항은 다음에 준용한다.

1) 국토해양부 제정 건축공사 표준 시방서

2) 토목, 건축, 기계설비, 전기, 조경표준시방서

3) 건축법, 건설기술 관리법, 건설산업기본법 등 본 공사와 관련이 되는 법령상의 관련규정

4) 산업표준화법, 근로기준법, 산업안전보건법, 환경보건관계법, 기타 건축공사 관계법령

5) 기타 본 공사와 관련이 있는 사항으로 일반적으로 적용하는 기술적 상식이나 규정 및 기준

6) 공사계약 일반조건, 공사입찰유의서, 기타 관계예규

2. 용어의 정의

2.1 이 시방서에서 ″발주자″라 함은 「OOOO OOO OOOO」을 말한다.

2.2 이 시방서에서 ″수급자″라 함은 「합성목재 모듈러 돔 설치시공자」를 말한다.

3. 공정계획서 제출

3.1 수급자는 계약일로 부터 7일 이내에 공정계획서를 발주자에게 제출하여 승인을 받아야 한다.

3.2 공정계획은 우기를 고려하여 작성하되 타 교통안전에 영향을 주지 않도록 한다.

3.3 공정계획서는 다음과 같이 나누어 작성하여야 한다.

1) 전체공정 계획서(막대식)

2) 공정별 상세 공정표(PERT/CPM식)

3) 시공도 작성 및 승인신청 일정계획

4) 자재 및 하수급 승인신청 일정계획

4. 시공도서의 제출

수급자는 공정별로 공사에 착수하기 전에 주요 부분 및 발주자가 요구하는 공정에 대한 시공계획서를 발주자에게 제출하여 승인을 받아야 한다.

5. 사용자재의 승인

5.1 수급자는 공사에 사용하는 모든 자재에 대해서 사용 전에 견본 등을 발주자에게 제출 승인을 얻어야 한다.

5.2 자재 사용 승인신청을 하는 때에는 다음 사항을 첨부하여야 한다.

1) 자재견본

2) 제조회사에 대한 자료
3) 관련 규격이나 기준
4) 공법에 대한 자료
5) 기타 발주자가 요하는 자료

6. 자재반입 및 검사
6.1 수급자는 자재를 현장에 반입하기 전에 자재 반입 계획서를 발주자에게 제출하여 승인을 받아야 한다.
6.2 수급자는 자재를 현장에 반입하고자 하는 경우에는 사전에 발주자에게 통보하여야 한다.
6.3 현장에 반입된 자재 및 장비는 발주자의 승인 없이 임의로 반출시켜서는 안 된다.
6.4 공사에 사용되는 모든 자재는 발주자의 검사를 받아야 한다.
6.5 수급자는 발주자가 자체 검사를 하는데 지장이 없도록 모든 편의를 제공하야 하며, 각종 시험 및 검사에 소요되는 비용은 수급자가 부담하여야 한다.

7. 시공검사
7.1 공사 중에는 공정별로 발주자의 중간검사를 받아야 하고, 후속 작업은 선행 작업의 중간 검사를 합격한 후에 시행하여야 한다.
7.2 수급자는 발주자가 검사(준공검사, 기성검사, 하자검사 등 모든 검사를 포함 한다) 하는데 지장이 없도록 모든 편의를 제공하여야 하며, 검사에 소요되는 모든 비용은 수급자가 부담한다.
7.3 공사 후 매몰이 되어 사후 검사가 곤란한 공정은 발주자가 지명한 감독관 입회하에서 시공하여야 한다.

8. 보고 등
8.1 수급자는 일일작업계획, 주간작업계획 및 실적, 월간공정 계획 및 실적 등을 발주자에게 보고하여야 한다.
8.2 공사 중 중요한 부위 및 매몰되는 부위에 대해서는 천연색으로 사진 촬영하여 사진에 설명을 기재한 사진첩을 제출하여야 한다.

9. 현장관리규정 등의 준수
9.1 수급자는 발주자가 현장 관리상 필요하여 제정한 규정이나 요구되는 사항에 대하여 이를 준수하여야 한다.
9.2 수급자는 발주자가 전체 공사의 공정 관리상 필요하여 요청하는 경우에는 이에 따라 공사를 진행하여야 한다.

10. 현장대리인
10.1 수급자는 발주자가 본 공사에 적당하다고 인정하는 경험과 기술능력을 가진 자를 현

장 대리인으로 신청하여 현장에 상주 시켜야 한다.
10.2 현장 대리인은 공사 전반에 대하여 수급자의 책임과 의무를 대행할 수 있어야 한다.

11. 현장조직
11.1 수급자는 공사 착수 전에 본 공사에 종사하는 인원의 조직 표를 발주자에게 제출하여 승인을 받아야 한다.
11.2 현장 대리인이나 관련 종사자가 공사의 수행상 부적당하다고 발주자가 판단하여 교체를 요구한 때에는 즉시 교체 하여야 한다.
11.3 조직 표는 성명, 직위, 주소, 비상연락처를 기입하여야 한다.

12. 책임시공
12.1 수급자는 본 시방서에 표기되지 않은 사항이 있을 경우에는 기술적 상식상의 품질이 확보될 수 있도록 시공하여야 한다.
13.2 수급자는 설계도서에 누락된 사항일지라도 공사의 성질상 당연히 시공하여야 할 경미한 사항은 발주자의 지시에 따라 시공하여야 한다.

13. 타 공사 수급자의 협조
수급자는 타 공사에 지장이 없도록 하여야 하며, 타 공사가 원활히 시행할 수 있도록 필요한 협조를 하여야 한다.

14. 의의
도면과 시방서의 내용이 서로 다르거나 명기가 없을 때 관련공사와 부합되지 아니할 때 또는 의문이 생길 때에는 발주자 해석 및 지시에 따라야 한다.

15. 관계관서의 수속
수급자는 관계관서의 수속이 필요한 경우 허가, 신고, 검사 등을 수급자의 비용으로 발주자를 대행하여 신속하게 이를 행하여야 한다.

16. 사용자재
16.1 공사에 사용되는 모든 자재는 K.S표시 품이 없을 경우에는 최상급 신품을 사용하여야 한다.
16.2 자재 생산업체가 다수 일 때에는 자체품질관리, 생산시설관리규모, 생산실적이 우수한 업체에서 생산되는 자재를 사용하여야 한다.

17. 안전관리 등
17.1 수급자는 현장 내 타수급자와 유기적인 협조로 전체공사장의 안전관리에 적극 협조하여야 한다.
17.2 수급자는 현장실정에 맞는 자체 안전관리 계획을 수립하여 시행하고 정기교육 등을

통하여 안전관리 규정준수에 만전을 기해야 한다.

17.3 현장 작업자는 안전모, 안전화를 착용하여야 한다.

17.4 수급자는 안전관리 소홀로 인하여 발생되는 사고나 재해에 대하여 민, 형사상의 모든 책임을 져야 한다.

17.5 수급자는 공사 중 타 시설물(포장, 수목, 부착물, 마감재등)에 손상을 주거나 인명피해, 교통방해 등이 발생하지 않도록 필요한 조치를 강구하여야 한다.

18. 발생물

수급자는 공사의 시행에 따라 생긴 발생 물은 발주자의 지시에 의해서 정리하고, 발생물 조서를 첨부하여 지시한 장소로 운반, 인도 하여야 한다.

19. 사고의 보고

수급자는 토사의 붕괴, 낙반, 가설물이나 구조물의 파손 및 기타 공사 수행에 영향을 미치는 사고나 인명의 손상 또는 제3자의 피해를 미치는 사고가 일어났을 때 혹은 그로 인한 사고 발생의 징조를 발견하였을 때에는 응급조치를 하고 발주자에게 즉시 보고하여야 한다.

20. 작업시간

수급자가 공사 내용상 불가피하여 야간작업을 하고자 하는 때에는 미리 발주자에게 승인을 받아야 한다.

나 MICD 모듈러 돔 모델의 시공을 위한 설치 매뉴얼

1 시공조건확인

작업착수전 기준선 먹메김, 앙카볼트의 위치 및 허용오차, 양중장비를 확인하여야 한다.

2 앵커볼트의 정착

(1) 앵커볼트심 위치 및 볼트머리부분의 높이는 형판을 사용하여 정확히 정한다.

(2) 앵커볼트의 유지 및 매립은 강제프레임 등에 의하여 고정하는 방식으로 하고 콘크리트 타설시 이동, 변형이 발생하지 않도록 한다.

(3) 모르터는 무수축 모르터로하고 철골 설치 전에 3일 이상 양생하여야 한다.

(4) 앵커볼트의 조임은 바로세우기 완료 후, 앵커볼트의 장력이 균일하게 되도록 한다. 너트의 풀림방지는 공사시방에 명기가 없는 경우는 콘크리트에 너트가 매립된 경우를 제외하고, 이중너트를 사용하여 풀림을 방지한다.

(5) 앵커볼트 조임력 및 조임 방법은 공사시방에 명기가 없는 경우 조임 방법은 너트회전법을 사용하고, 너트의 밀착을 확인한 후에 30°회전시킨다.

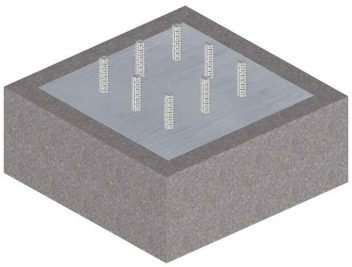
(6) 베이스플레이트 접촉면의 모르터 마감면은 기둥세우기 전에 레벨검사를 한다. 마감면의 정밀도는 공사시방에 명기가 없는 경우 “붙임1. 철골 정밀도 검사기준”에 따른다.



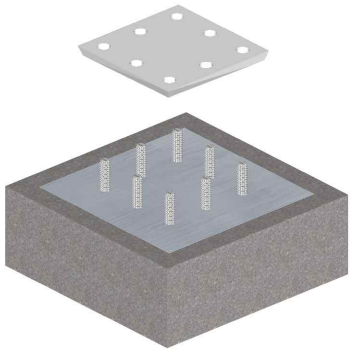
1) 기초위 강제 템플릿 거치



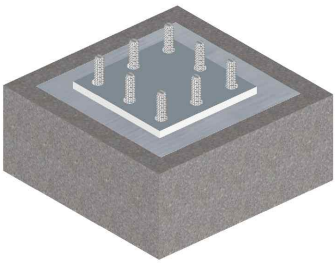
2) 강제템플릿 매입



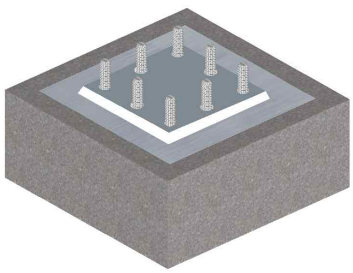
3) 앵커 볼트 설치



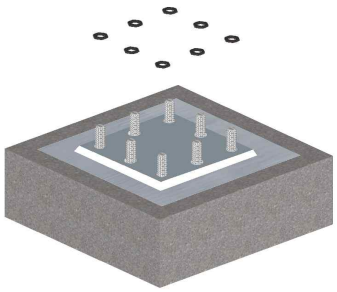
4) 패스너 플레이트



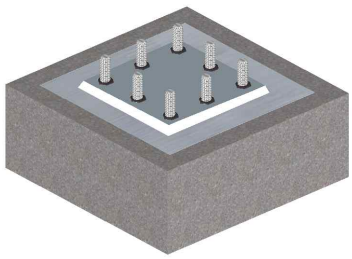
5) 고변형 성능 패스너 삽입



6) 패스너 플레이트 용접



7) 수평조절개 설치



6) 수평조절 및 기초 시공 완료

3 합성목재 모듈러 돔 현장설치

3.1 설치계획

건물의 규모, 형상, 대지 및 공정 등의 조건을 근거로 하여 반입방법, 설치순서, 설치기계, 양중방법 등의 설치계획을 결정한다. 이때, 설치 도중의 부분가구와 설치 후의 전체가구가

고정하중, 적재하중, 풍하중, 지진하중, 적설하중, 설치기계의 충격하중 등에 대하여 안전한가를 확인한다. 또한, 이러한 하중들이 구조 체의 품질을 저하 시키지 않도록 확인한다.

3.2 설치장비

최대하중, 작업 반경, 작업능률 등에 따라서 설치장비를 선정한다. 이때 설치장비 및 설치장비를 설치하는 구조체, 가설대, 노반(路盤)등이 풍하중, 지진하중, 크레인 운반시 충격하중 등에 대하여 안전한가를 확인한다.

(1) 제품의 반입

제품의 반입 시에는 철골제작업자의 발송대장을 조회하고, 제품의 수량 및 변형, 손상의 유무 등을 확인한다.

(2) 제품의 취급

제품의 취급 시에는 부재를 적절한 받침대 위에 올려놓아 변형, 손상을 방지한다. 부재가 변형, 손상이 생긴 경우는 설치 전에 수정한다.

3.3 지상조립

지상조립을 할 때에는 적절한 가설대, 지그 등을 사용하여 지상조립부재의 치수정밀도를 확인토록 한다. 접합방법은 “현장접합”기준에 따른다.

3.4 설치용 설비 및 기구

설치에 사용되는 와이어로프, 샤클, 달철물 등은 허용범위 이내에서 사용한다. 또한, 정기적으로 점검하여 손상이 된 것은 폐기한다.

3.5 바로 세우기

(1) 바로세우기를 하기 위하여 가력할 때는 부재의 손상을 방지한다.

(2) 턴버클이 붙은 가새가 있는 구조물은 그 가새를 사용하여 바로세우기를 해서는 안 된다.

(3) 바로세우기는 설치정밀도의 규정을 만족하도록 한다.

(4) 설치부재의 도괴방지용 와이어로프를 사용한 경우는 이 와이어로프를 바로세우기용으로 겸용하여도 된다.

3.6 가볼트 조임

가볼트는 중볼트 등을 사용하여 하나의 볼트군에 대하여 고력볼트 접합에서는 1/3 정도 또는 2개 이상, 혼용접합 및 병용접합에서는 1/2정도 또는 2개 이상을 규형 있게 배치하여 조인다. 또한, 용접이음을 위한 일렉션피스 등에 사용한 가볼트는 전부를 조인다.

3.7 설치정밀도

접합부 정밀도와 설치정밀도는 공사시방에 정한 바가 없는 경우, “붙임1. 철골정밀도 검사기준”에 따른다.

3.8 현장접합

(1) 고력볼트 현장 조임은 이 시방서의 “제작”에 명시된 “고력볼트 접합”기준에 따라서 볼트의 종류, 축력관리방법, 시공순서 등을 명시한 고력볼트조임 시공요령서를 작성하고 계획에 따른 시공, 관리를 한다.

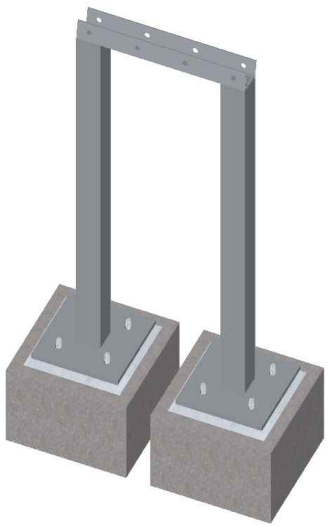
(2) 현장용접은 “용접” 기준에 따라 관리조직, 용접방법, 용접공, 용접기기 및 용접재료, 용접시공, 용접검사 및 용접보수 등을 명시한 용접 시공요령서를 작성하고, 계획에 따른 시공, 관리를 한다.

3.9 현장 녹막이칠

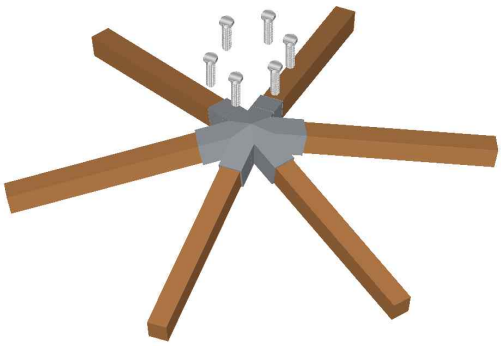
“A14000 도장공사”에 따라 칠한다. 현장접합부분을 칠할 경우는 접합부 검사를 완료한 후 칠한다.



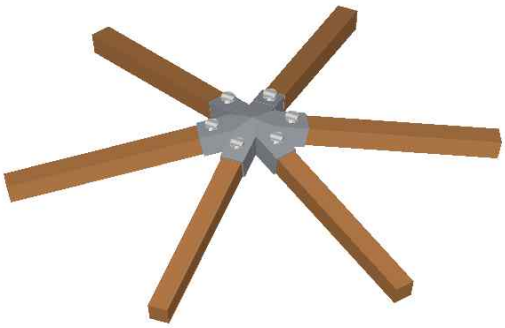
1) 돔 하부 기둥 구조물 설치



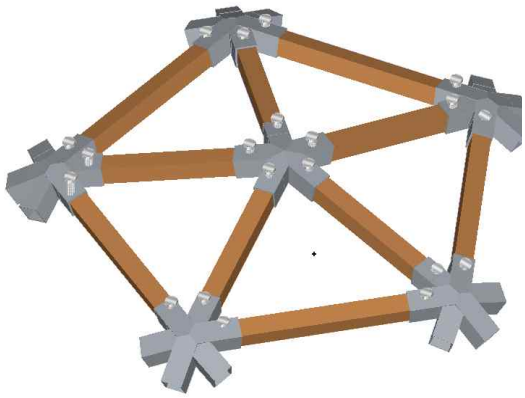
2) 돔 하부 기둥 구조물 볼트 체결



3) 상부 5각형 조인트 볼트 가조립



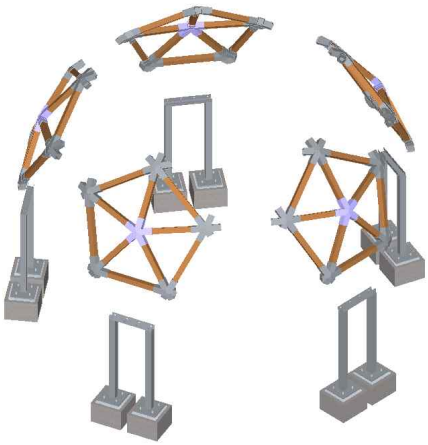
4) 상부 6각형 조인트 – WPC 부재 조립



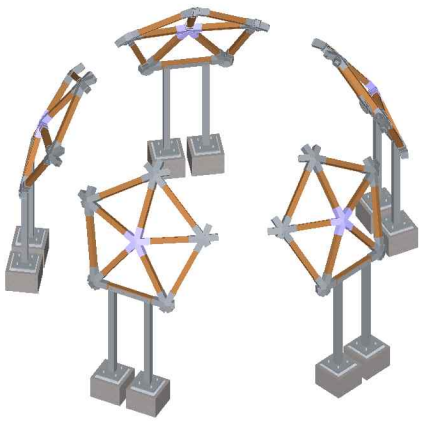
5) 상부 5각형 조인트 – WPC 부재 조립



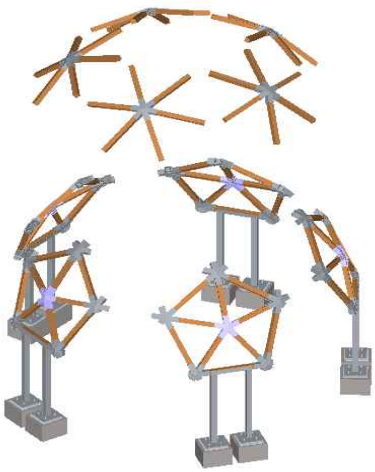
6) 상부 돔 조인트 사전 조립 완료



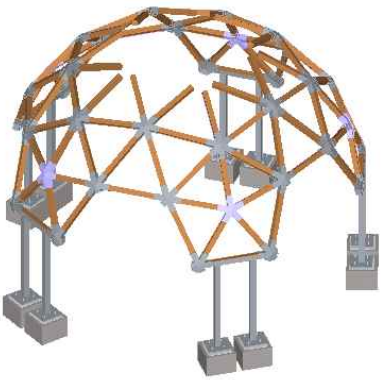
7) 돔 기둥 구조물 5각형 조인트 설치



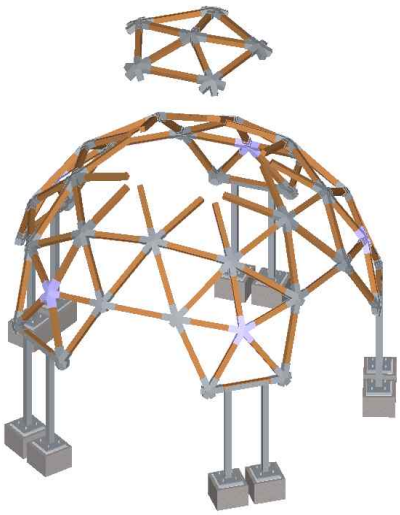
8) 돔 기둥 구조물 5각형 조인트 가조립



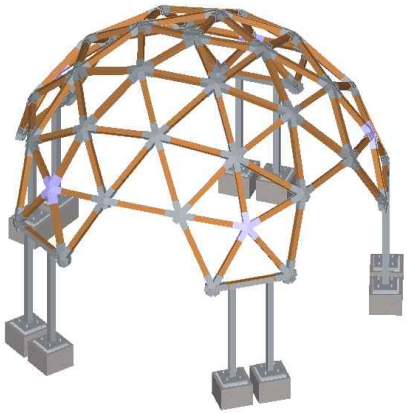
9) 5각형 조인트 – 6각형 조인트 설치



9) 5각형 조인트 – 6각형 조인트 가조립



10) 최상단 5각형 조인트 설치



11) 최상단 5각형 조인트 가조립



12) 수평조절 이후 볼트체결 실시



13) 모듈러 돔 구조물 조립 완료

4 시공 허용오차

합성목재 접합부 정밀도, 설치정밀도는 “붙임1. 철골 정밀도 검사기준“에 적합하여야 한다.

5 현장품질관리

공사현장 시공의 품질관리는 “2.4 합성목재제작업자의 품질”에 따르며 합성목재공사 품질관리책임자로 하여금 접합부 및 설치정밀도에 적합한지를 검사하도록 하고, 또한 그 결과를 작성하여 유지하도록 한다.

5.1 시공상태 확인

(1) 앙카볼트 검사: 정착길이, 후크구부림 (2) 세우기 허용오차 검사

(3) 스터드 볼트 용접부 검사 (4) 고력볼트 조임 검사

(5) 용접부 내부결함 및 표면결함 검사: 언더컷(Undercut), 오버랩(Overlap), 피트(Pit), 표면결함검사 (6) 도막상태 검사

17. MICD 모델의 내진성능 테스트

가. MICD 모델의 가진 테스트용 실험체 모형

구조물 설계에 있어서 매우 중요한 요소로 작용하는 것 중의 하나가 지진에 의한 지반운동이 구조물에 전달된다는 것과 이들이 건축물의 구조적 성능에 미치는 영향이 다른 하중에 비해서 매우 위험적인 요소로 작용한다는 것이다. 지진발생시 구조물이 저항해야 하는 힘은 구조물을 지지하는 지반의 움직임에 의해 발생하며, 지반운동에서 구조물의 구조적 변화는 구조물과 기초특성에 따라 달라진다. 지진은 짧은 시간 동안 구조물에 큰 외력을 발생시키기며 이때 구조물은 붕괴하지 않고, 중요 부재에도 큰 손상을 입지 않아야만 하는 것이 기본개념이다. 특히 구조물에 요구되는 비탄성변형능력은 변형이 회복 가능한 구간을 지나서도 계속해서 지진에 대한 저항이 가능한 능력을 가지게 하는 것은 매우 중요하다. 하지만 콘크리트와 같이 고유의 비탄성변형능력이나 연성이 부족한 재료들의 경우 연성의 확보를 위해서 많은 보강방법을 필요로 한다. 일반적으로 해석에서 사용되는 지반운동은 구조물 부근의 지반가속도 성분이며, 건물과 대부분의 구조물들은 수평변위에 가장 민감하기 때문에 지반운동의 수평성분에 대한 반응만을 주로 고려하게 된다. 본 대상기술의 구조성능에 대해서도 수평성분에 대한 고찰을 기본항목으로 한다.

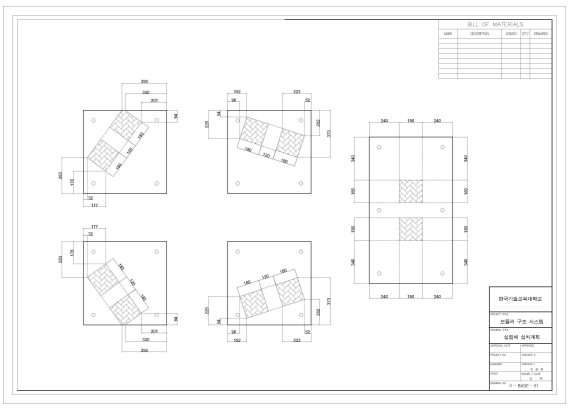


그림 2.2.17.1 가진모형 베이트플레이트

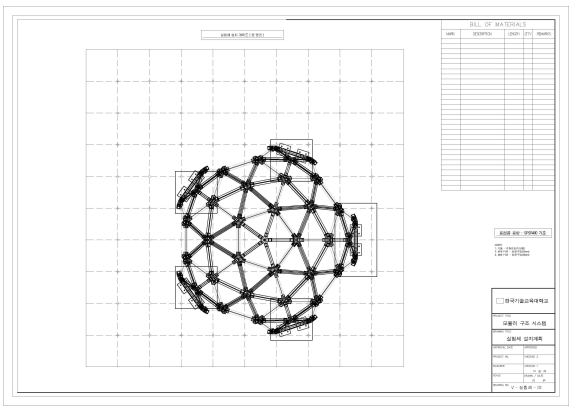


그림 2.2.17.2 가진모형 설치 완성도면

나. MICD 모델의 고유주기 계산결과

구조물에서 전체 시스템의 관성력은 각 부분 질량의 가속도를 평가함으로서 산정할 수 있다. 만약 구조물변형이 제한도니 수의 변위성분이나 좌표로 적절하게 표현된다면 해석은 크게 단순화 될 수 있다. 구조해석모델링을 할 때는 집중질량으로 가정되며, 바닥과 지붕 요소는 비교적 무겁기 때문에 건물질량의 대부분은 이들 요소에 집중되어 있으므로, 일반적으로 마감하중과 관련한 것들은 바닥이나 지붕 레벨에 집중된 것으로 가정한다. 다자유도계 시스템은 자유도 수만큼의 고유진동모드를 가지고 있으며, 비율로서의 모드형상이 결정된다. 이러한 고유모드형상은 각각의 고유주기를 가지고 있다. 따라서 이상화된 n층 건물은 1번째에서 n번째 고유

모드에 대응하는 n개의 고유주기를 가지며, 가장 긴 고유주기를 기본주기 T_1이라 한다.

지진이 작용하는 동안 구조물의 거동은 탄성영역을 넘어 비탄성영역에서의 감쇠특성을 고려하여 구조설계를 하도록 한다. 이것은 구조물의 설계에서 거동이 탄성영역에 국한된다면 최대반응가속도는 최대지반가속도의 몇 배에 이를 것이고, 비경제적이다. 설계지진력은 일반적으로 요구되는 탄성관성력보다 작기 때문에 설계지진력 아래에서 부재가 충분한 비탄성변형을 가짐으로써 지진 시 발생하는 반복하중에서도 건물이 붕괴하지 않고 저항할 수 있다. 따라서 내진기준은 모든 형태의 취성파괴를 피하고 구조물의 부재 또는 접합부의 일부 영역의 항복을 통하여 적절한 비탄성능력을 달성하도록 하고 있는 것이다. 최근 주요 지진들에서 내진설계기준에 따라 설계한 구조물이 큰 피해를 받지 않았다는 것은 적절하게 설계한 구조물이 일부 부재의 비탄성변형으로 지진에너지를 소산시켰기 때문이며, 구조물의 누적 손상과 지반구조물의 상호작용에 의한 시스템의 강성저하가 때로는 구조물의 비탄성변형을 돕는다. 격막, 벽체, 골조, 기초는 횡력이 구조물을 통하여 지반으로 전달되는 하중경로의 중요한 요소이다. 또한 이러한 요소간의 연결은 지진력을 전달하는 수평, 수직하중경로의 중요 구성요소이다.

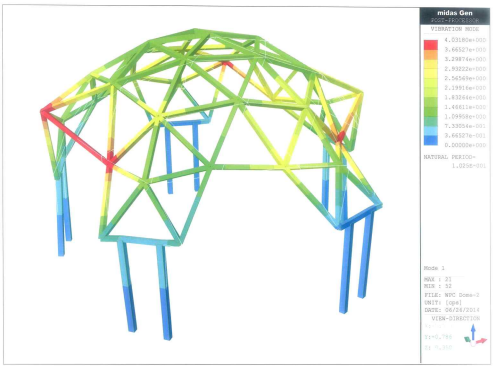


그림 2.2.17.3 모듈러 돔 구조물의 고유주기 해석결과 1

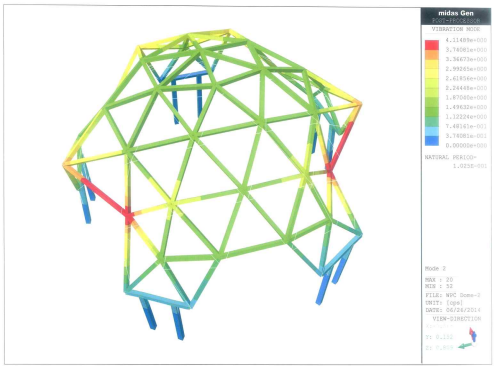


그림 2.2.17.4 모듈러 돔 구조물의 고유주기 해석결과 2

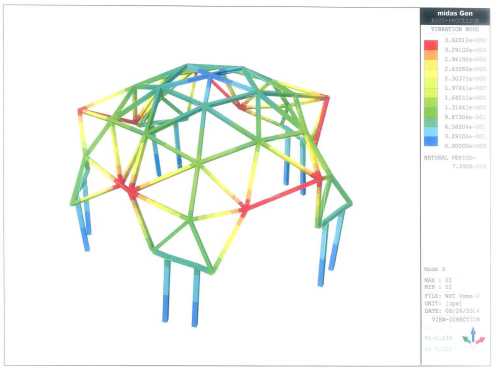


그림 2.2.17.5 모듈러 돔 구조물의 고유주기 해석결과 3

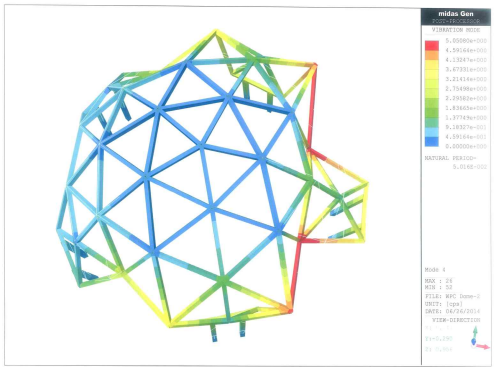


그림 2.2.17.6 모듈러 돔 구조물의 고유주기 해석결과 4

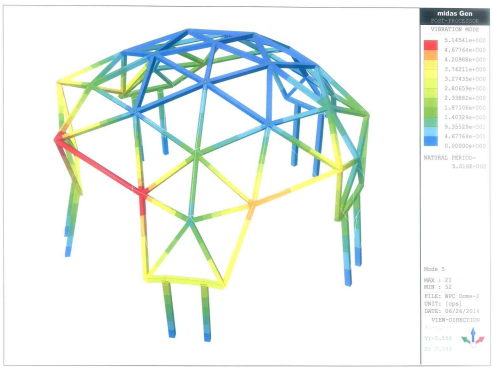


그림 2.2.17.7 모듈러 돔 구조물의 고유주기 해석결과 5

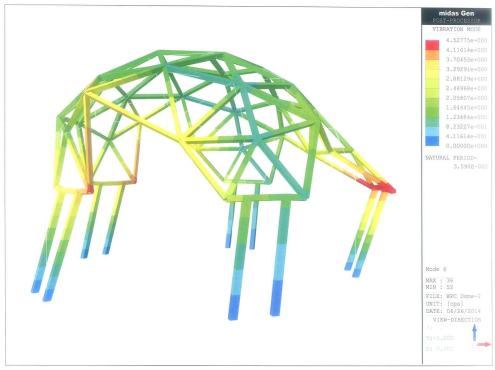


그림 2.2.17.8 모듈러 돔 구조물의 고유주기 해석결과 6

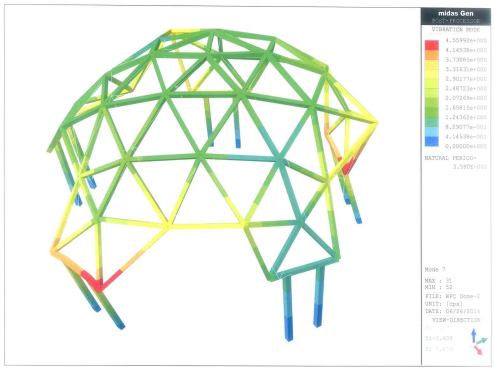


그림 2.2.17.9 모듈러 돔 구조물의 고유주기 해석결과 7

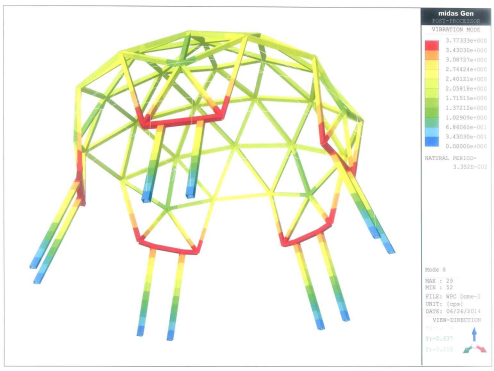


그림 2.2.17.10 모듈러 돔 구조물의 고유주기 해석결과 8

다. 돔 모듈러 실험체 조립

돔 모듈러 실험체은 하부 기둥 조인트 부분과 하단 5각형 조인트 부재를 사전 조립하여 하부 돔 구조물을 제작한 뒤에 상단부를 추가로 조립하여 설치를 완료하도록 한다. 본래 실재 현장조립에서는 앵커볼트와 기초부의 베이스 플레이트 위치에 맞추어 하부 골조 구조물을 설치하지만 본 실험에선 가진장치 규격에 맞추어 별도의 베이스 플레이트를 제작하여 구조물 설치를 진행한다. 하부의 5각형 조인트는 5각형 조인트 1개와 6각형 연결조인트 5개와 합성목재 부재 10개를 조립하여 제작하며 총 5개의 하부 5각형 조인트가 소요된다.








중단부의 6각형 조인트는 6각형 조인트 1개와 합성목재 6개를 조립하여 제작하며 중단부에 총 5개의 6각형 조인트가 소요된다. 최상단의 5각형 조인트는 마찬가지로 5각형 조인트 1개와 6각형 연결조인트 5개를 소요하여 사전 제작한다. 하부의 5각형 조인트와 중단부의 6각형을 순서대로 조립한 뒤에 최상단의 5각형을 볼트로 가조립하여 돔 구조물 가조립을 완료한 후 하부 기둥 조인트에 크레인을 이용하여 가조립 설치를 완료한다.




돔 구조물의 경우 자중에 의해 하단부의 5각형 및 6각형 조인트가 휘어지는 현상을 막기 위해 하단 기둥 조인트를 먼저 조임을 완료한 뒤 각각의 조인트의 아래 부분부터 볼트 체결을 실시해야 한다. 6각형 연결 조인트의 부착부위와 합성목재 부재가 평행한 방향으로 부재 조립이 이루어져야 돔 자체의 형상을 재대로 갖출 수 있으므로 볼트 체결간 크레인이나 지그 등을 사용하여 치수정밀도를 확인하여야 한다. 현장 조립의 품질관리는 “2.4 합성목재제 작업자의 품질”에 따르며 합성목재 공사 품질 관리책임자로 하여금 접합부 및 설치정밀도에 적합한지를 검토하도록 하고 그 결과를 작성하여 유지하도록 한다.









돔 구조물의 하단 기둥조인트 부분과 최상단 5각형 조인트에 각각 변위, 가속도 센서를 설치하고 스트레인 게이지의 경우 최상단 5각형 조인트 부재와 중단 6각형 조인트 부재, 하단 5각형 조인트 부재에 각각 설치하여야 하며 가진 장치의 주 진동 방향인 x축에 가깝게 부착하고, 5각형 및 6각형 조인트와 부재 연결부에도 스트레인 게이지를 설치한다.

돔 구조물 바로세우기 작업시 하단 기둥 조인트의 수평을 먼저 맞추어 조립한 후 하부 5각형 조인트부터 최상단 5각형 조인트 순으로 볼트 조립을 실시한다. 바로세우기 시에 설치 부재의 도괴 방지용 와이어 로프를 사용하여 설치 정밀도의 규정을 만족하도록 한다.

3절. 연구수행결과 및 검증

1. 연구수행 내용 및 결과

가. 연구개발결과 요약

연 차	연구 내용	연구 결과
1차년도	▪정형곡면의 구조모델링을 위한 기초데이터 작성 프로그램 개발 ▪돔 및 아치형태의 그리드 형성에 따른 에너지 효율 검토 ▪유닛 결합에 따른 정형 구조물의 축소모형제작 ▪기초 모델링과 축소모형과의 제작과정의 문제점 및 차이점 검토	▪정형곡면의 구조모델링 프로그램 등록 ▪차분진화법을 사용한 모듈과 곡면의 측지선 프로그램 개발 완료 ▪비선형 보요소를 사용한 단층격자 프레임 구조물의 불안정해석 프로그램 개발 완료 ▪돔 및 아치형 구조물의 에너지 효율 검토 에너지소비 원단위 산정과 BIPV시스템의 발전효율과 부하부담율 제시 ▪정형곡면 구조모델링 프로그램을 사용한 자동설계 및 축소모형 제작 ▪정형곡면 솔라패널 모델의 해석 및 설계를 위한 GUI 시스템 개발 완료
2차년도	▪메쉬생성과 그리드 패턴 형성방법 ▪최적곡면 탐색기법 정립/프로그래밍 ▪최적솔라패치 효율성 및 안정성 분석 ▪테스트베드 구조물 곡면설계 및 분석 ▪솔라패널 최적배치 및 시뮬레이션 ▪테스트베드 설계도면의 검토 및 보완	▪정삼각형 평면그리드 패턴 모델링 프로그램 등록 ▪최적 지오데직 격자 곡면지붕 모델링 프로그램 개발 및 등록 ▪기하학 정보 최적 데이터베이스 개발 및 라이브러리 등록 ▪3차원 최적화 메쉬 생성 프로그램 개발 및 등록 ▪솔라패널 전용CAD GUI 개발 및 등록 ▪태양광발전시스템 설치방법, 적용형태 모델링 및 설치제작방법 검토 및 제시 ▪솔라패널 설치와 에너지 효율에 대한 범용적 사례분석 및 검토 ▪삼각 그리드 구조물의 구조 안정성 평가 및 절점 모델링 ▪솔라패널 최적배치를 위한 테스트베드 설계 프로세스 및 설계기법 개발 ▪테스트베드 시범구조물의 설계 프로세스와 절점 모델링 및 모형 제작 ▪테스트베드 설계도면 및 축소모형 제작

3차년도	▪솔라패널 비정형 구조물의 3D 모델링 및 형상정보 프로그래밍 ▪비정형 그리드 구조물의 에너지 효율성 평가 및 안정해석 인터페이스 프로그래밍 ▪개발 프로그램의 설계검증 및 분석 ▪테스트베드 구조물의 부재제작 ▪곡면 형성에 대한 완성도 검증 ▪에너지 효율, 시공 및 이에 따른 문제점 검토 ▪테스트베드 조형물 에너지효율 및 경제성 검증	▪비정형 파사드 구조물의 최적설계 프로그램 개발 ▪3D모델링을 위한 데이터 교환 모듈 자동생성 프로그램 개발 ▪시험조형물 설계 및 설치메뉴얼 제작 ▪시험조형물 진동모형 테스트 및 분석 ▪비선형 불안정해석 및 임계하중 수치해석 및 단위부재 설계모듈 분석 ▪프레임형 돔 모델의 절점강성에 관한 임계하중 분석 ▪고충진 압출성형 합성목재를 이용한 시험조형물의 구조모델링 연구 ▪돔/아치 모델의 동적비선형해석기법과 준해석적해 연구 ▪돔 모델 동적 특성 분석을 위한 해석기법 및 결과분석 연구 ▪모듈화 조형물의 허브 단일형 및 복합형 커넥터 개발 및 특허출원 ▪비정형 그리드 쉘 테넌 조인트 프레임 개발 및 특허 등록 ▪정20면체 기반 모듈러 돔의 형상모델링 및 구조안정성 연구 ▪메타 휴리스틱 알고리즘의 적용을 위한 확률파라메타 연구 ▪보로노이 곡면형성기법의 조절 알고리즘 개발 및 프로그램 적용

2. 목표성과 및 성과검증방법

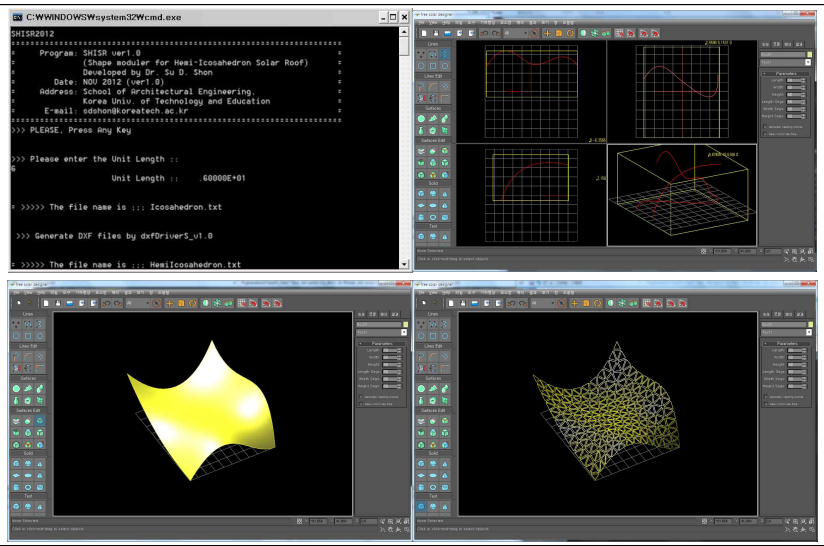
연차 (단계)	연차별 성과목표	성과지표	측정방법	목표치	가중치
1차년도	(질적지표) 정형 곡면의 솔라패널 모델링	정형 곡면 단위모듈 생성 및 기초입력 프로그램	정형곡면의 패널 형성 및 프로그램 완성도	70%이상	20%
		정형곡면 솔라페널의 에너지 분석	정형곡면 구조의 형태별 에너지 효율 연구논문	2건	20%
	(질적지표) 정형곡면 표준모델	유닛결합에 따른 정형 구조물의 축소모형 제작	정형곡면의 단위모듈 제작결과 도면 완성도	70%	40%

	개발	정형모델의 안정성 검증 분석	정형모델의 수치해석 결과 정밀도	95%이상	20%
	소 계				100%
	(양적지표) 정형 곡면의 솔라패널 모델링 및 표준모델 개발	학술지 게재 논문건수(국내/국외)	국내외 학술지 게재 논문건수	3건(3/0)	30%
		학술회의 발표논문건수(국내/국외)	학술회의(학회)에 참가해 발표한 건수	2건(2/0)	15%
		특허출원 건수(국내)	해당 과제(또는 사업)를 통해 산출된 특허출원 건수와 함께 연구비당 특허출원 건수, 참여연구원당 특허출원 건수를 산정	1건	10%
		소프트웨어(S/W)등록건수	해당 과제(또는 사업)를 통해 산출된 소프트웨어(S/W) 등록 건수와 함께 연구비당 소프트웨어(S/W) 등록 건수, 참여연구원당 소프트웨어(S/W) 등록 건수	1건	10%
		전문가 의견반영 실적	전문가 의견수렴 반영(설문조사, 회의 등) 건수	1건	10%
		설계도면 및 사양서 개발	설계도면 개발건수, 사양서 개발 건수	1건	10%
		산학연간 기술지원	산학연간 기술지원(현장기술지도, 기술상담, 교육훈련 및 홍보, 기술이전 등) 건수	2건	5%
		연구개발 관련 홍보	홍보(학술회의, 간담회, 세미나, 워크샵, 박람회, 공청회, 정기간행물 발간) 건수	2건	5%
		분야별 인력양성 배출실적	해당 과제(또는 사업)를 통해 양성된 학위별/전공분야별 인력 배출수	1건	5%
	소 계				100%
2차년도	(질적지표) 비정형 곡면 솔라패널 모델링	비정형 곡면 솔라패널 곡면생성 프로그램	비정형 곡면 삼각패널 메쉬 생성 프로그램 완성도	80%이상	20%
		최적곡면 탐색과 안정성 평가	에너지 효율을 고려한 최적화 기법의 적용과 효율분석	2건	20%
	(질적지표) 테스트베드 구조물 설계	구조물 제작도면	테스트베드 시공용 도면 및 사양서	1건	30%
		곡면 솔라패널 배치 시뮬레이션 결과	솔라패널 최적배치 상세의 완성도	2건	30%
	소 계				100%
	(양적지표) 비정형 곡면 솔라패널 모델링 및 솔라패널의 삼각배치 접합상세 개발	학술지 게재 논문건수(국내/국외)	국내외 학술지 게재 논문건수	3건(3/0)	25%
		학술회의 발표논문건수(국내/국외)	학술회의(학회)에 참가해 발표한 건수	2건(2/0)	15%
		SCI급 학술지 게재 논문건수	국내외 SCI급 학술지 게재 논문건수	1건	15%
		특허출원 건수(국내)	해당 과제(또는 사업)를 통해 산출된 특허출원 건수와 함께 연구비당 특허출원 건수, 참여연구원당 특허출원 건수를 산정	1건	10%
		소프트웨어(S/W)등록건수	해당 과제(또는 사업)를 통해 산출된 소프트웨어(S/W) 등록 건수와 함께 연구비당 소프트웨어(S/W) 등록 건수, 참여연구원당 소프트웨어(S/W) 등록 건수	2건	10%
		전문가 의견반영 실적	전문가 의견수렴 반영(설문조사, 회의 등) 건수	1건	5%
		설계도면 및 사양서 개발	설계도면 개발건수, 사양서 개발 건수	1건	5%
		산학연간 기술지원	산학연간 기술지원(현장기술지도, 기술상담, 교육훈련 및 홍보, 기술이전 등) 건수	2건	5%

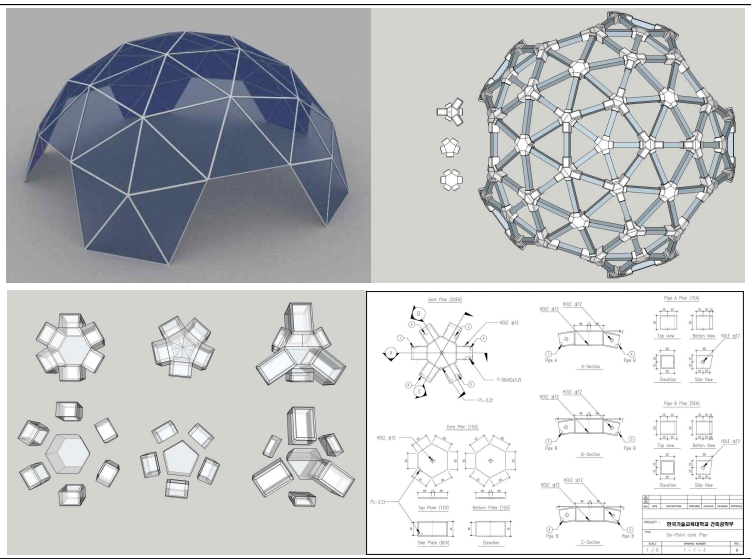
		연구개발 관련 홍보	홍보(학술회의, 간담회, 세미나, 워크샵, 박람회, 공청회, 정기간행물 발간) 건수	2건	5%
		분야별 인력양성 배출 실적	해당 과제(또는 사업)를 통해 양성된 학위별/전공분야별 인력 배출수	1건	5%
	소 계				100%
3차년도	(질적지표) 비정형 곡면 솔라패널 설계플랫폼	비정형 곡면 모델링 및 솔라패널 최적배치	비정형 곡면 삼각패널 최적 배치 프로그램 완성도	90%이상	20%
		평가결과 DB의 가시화 방안 및 최적 모델링	효율성 및 안정성 분석의 논문작성	2건	20%
	(질적지표) 테스트베드 시험조형물 시공	테스트베드 구조물 제작, 설치 및 시공성 향상	테스트베드의 완성도 및 특허출원	80%이상	30%
		에너지 효율 분석결과 검증 및 효율성 향상	시뮬레이션 결과와 분석결과의 검증	5%향상	30%
	소 계				100%
	(양적지표) 비정형 곡면 솔라패널 설계 플랫폼 및 비정형 솔라패널 최적배치 축소모형	학술지 게재 논문건수(국내/국외)	국내외 학술지 게재 논문건수	3건(3/0)	20%
		학술회의 발표논문건수(국내/국외)	학술회의(학회)에 참가해 발표한 건수	5건(4/1)	10%
		SCI급 학술지 게재 논문건수	국내외 SCI급 학술지 게재 논문건수	1건	15%
		특허출원 건수(국내)	해당 과제(또는 사업)를 통해 산출된 특허출원 건수와 함께 연구비당 특허출원 건수, 참여연구원당 특허출원 건수를 산정	2건	10%
		특허등록 건수(국내)	해당 과제(또는 사업)를 통해 산출된 특허등록 건수와 함께 연구비당 특허등록 건수, 참여연구원당 특허등록 건수를 산정	2건	10%
		소프트웨어(S/W)등록 건수	해당 과제(또는 사업)를 통해 산출된 소프트웨어(S/W) 등록 건수와 함께 연구비당 소프트웨어(S/W) 등록 건수, 참여연구원당 소프트웨어(S/W) 등록 건수	2건	10%
		수치해석 건수	수치해석건수	1건	5%
		설계도면 및 사양서 개발	설계도면 개발건수, 사양서 개발 건수	1건	5%
		산학연간 기술지원	산학연간 기술지원(현장기술지도, 기술상담, 교육훈련 및 홍보, 기술이전 등) 건수	2건	5%
		연구개발 관련 홍보	홍보(학술회의, 간담회, 세미나, 워크샵, 박람회, 공청회, 정기간행물 발간) 건수	2건	5%
		분야별 인력양성 배출 실적	해당 과제(또는 사업)를 통해 양성된 학위별/전공분야별 인력 배출수	1건	5%
	소 계				100%

제3장 최종 연구성과 및 적용실적

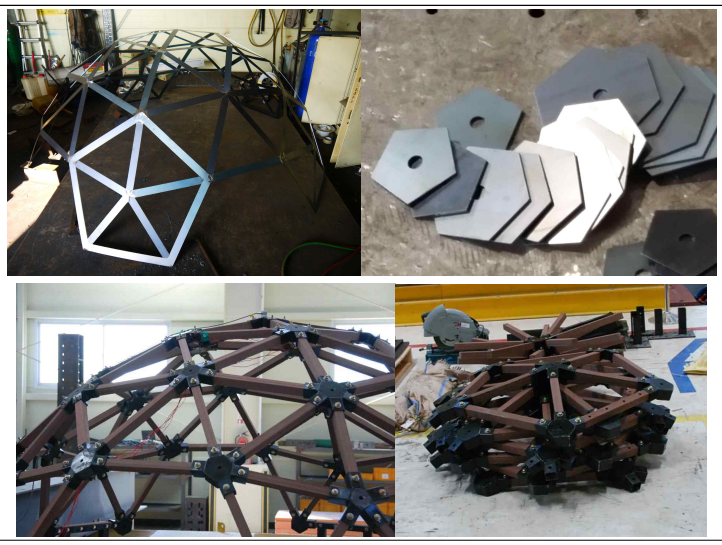
1절. 비정형 솔라패널 최적배치 설계프로세스(프로그램)

<table>
<tr><td>관련 그림 / 사진</td><td colspan="7"> 
</td></tr>
<tr><td>정 의</td><td colspan="7">비정형 곡면 지붕구조물의 최적 솔라패널 배치를 위한 설계 프로그램</td></tr>
<tr><td>설정사유</td><td colspan="7">비정형 파사드 구조물의 에너지 손실 문제를 해결하고 친환경 에너지의 활용을 기대할 수 있음.</td></tr>
<tr><td>목 적</td><td colspan="7">비정형 곡면으로 구성되는 파사드 구조물의 에너지 효율을 극대화 하고, 구조 안정성이 고려된 설계가 가능한 기술의 개발</td></tr>
<tr><td>성능목표</td><td colspan="7">(기존기술 수준) 기존의 비정형 파사드 외피구조물의 경우 솔라패널을 이용한 친환경 에너지의 활용은 전무한 실정임.
(개발기술 수준) 비정형 외피 구조물의 솔라패널을 이용한 에너지 효율 극대화 설계 기법과 곡면 격자구조 설계 도구로 활용 가증한 프로그램을 개발
(개발기술 수준 설정근거) 비정형 외피 파사드 구조물의 에너지 손실과 구조안정성 문제를 해결하기 위한 설계프로그램의 개발이 필요함.</td></tr>
<tr><td>성과달성 책임자 (소속기관)</td><td colspan="7">이승재(한국기술교육대학교), 권병천((주) 레나소프트웨어)</td></tr>
<tr><td>소요기간</td><td colspan="7">’12.04 ~’15.02 (2년10개월, 1년차-3년차)</td></tr>
<tr><td rowspan="11">핵심성과</td><td rowspan="3">달성 확인방법</td><td>1차년도</td><td colspan="5">학술지 게재논문 및 특허 출원</td></tr>
<tr><td>2차년도</td><td colspan="5">학술지 게재논문 및 곡면지붕 모델링 프로그램 완성도</td></tr>
<tr><td>3차년도</td><td colspan="5">개발 프로그램 등록 및 비정형 솔라패널 설계 프로세스 완성도</td></tr>
<tr><td rowspan="8">양적성과</td><td rowspan="2">1차년도</td><td>특허</td><td>SCI 논문</td><td>비SCI논문</td><td>S/W</td><td>기타</td></tr>
<tr><td>출원 1, 등록 0</td><td>국내 0, 국외 0</td><td>국내 1, 국외 0</td><td>2</td><td>학술논문발표 4건 등</td></tr>
<tr><td rowspan="2">2차년도</td><td>특허</td><td>SCI 논문</td><td>비SCI논문</td><td>S/W</td><td>기타</td></tr>
<tr><td>출원 0, 등록 0</td><td>국내 0, 국외 1</td><td>국내 0, 국외 0</td><td>3</td><td>학술논문발표 3건 등</td></tr>
<tr><td rowspan="2">3차년도</td><td>특허</td><td>SCI 논문</td><td>비SCI논문</td><td>S/W</td><td>기타</td></tr>
<tr><td>출원 0, 등록 0</td><td>국외 0</td><td>국내 3, 국외 0</td><td>2</td><td>학술논문발표 3건 등</td></tr>
<tr><td rowspan="2">계</td><td>특허</td><td>SCI 논문</td><td>비SCI논문</td><td>S/W</td><td>기타</td></tr>
<tr><td>출원 1, 등록 0</td><td>국외 1</td><td>국내 4, 국외 0</td><td>7</td><td>학술논문발표 9건 등</td></tr>
</table>

2절. 테스트베드 시험설계(설계기법)

<table>
<tr><td colspan="2">관련 그림 / 사진</td><td colspan="6">  </td></tr>
<tr><td colspan="2">정 의</td><td colspan="6">솔라패널 지붕 구조물의 설계 및 시공을 위한 시범 조형물의 설계기법</td></tr>
<tr><td colspan="2">설정사유</td><td colspan="6">솔라패널 곡면지붕 실현을 위한 구조모델링과 설계방법 제시</td></tr>
<tr><td colspan="2">목 적</td><td colspan="6">솔라패널 곡면지붕형성을 위한 세부 부재의 설계 및 절점의 단순화를 위한
설계방법을 제안하고, 구조물의 안정성을 도모하기 위한 기술의 개발</td></tr>
<tr><td colspan="2">성능목표</td><td colspan="6">(기존기술 수준) 기존의 비정형 파사드 외피구조물의 경우 솔라패널을 이용한
친환경 에너지의 활용은 전무한 실정임
(개발기술 수준) 외피 구조물의 솔라패널을 이용한 에너지 효율 극대화 설계에
대한 구조물 모델링 설계기법과 세부도면의 자동화
(개발기술 수준 설정근거) 곡면구조의 설계를 위해서 구조 안정성 문제와 더불어
모델링 및 시공을 위한 세부설계기법의 개발이 필요함</td></tr>
<tr><td colspan="2">성과달성 책임자 (소속기관)</td><td colspan="6">이승재(한국기술교육대학교), 권병천((주) 레나소프트웨어)</td></tr>
<tr><td colspan="2">소요기간</td><td colspan="6">’13.02 ～’14.02 (1년 1개월, 2차년도)</td></tr>
<tr><td rowspan="12">핵심성과</td><td rowspan="3">달성 확인방법</td><td>1차년도</td><td colspan="5">해당사항 없음.</td></tr>
<tr><td>2차년도</td><td colspan="5">특허출원, 학술지 게재논문 및 테스트베드 시험 조형물 설계도면 완성도</td></tr>
<tr><td>3차년도</td><td colspan="5">해당사항 없음.</td></tr>
<tr><td rowspan="10">양적성과</td><td rowspan="2">1차년도</td><td>특허</td><td>SCI 논문</td><td>비SCI논문</td><td>S/W</td><td>기타</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="2">2차년도</td><td>특허</td><td>SCI 논문</td><td>비SCI논문</td><td>S/W</td><td>기타</td></tr>
<tr><td>출원 2, 등록 0</td><td>국내 0, 국외 1</td><td>국내 2, 국외 0</td><td>2</td><td>학술논문발표 3건 등</td></tr>
<tr><td rowspan="2">3차년도</td><td>특허</td><td>SCI 논문</td><td>비SCI논문</td><td>S/W</td><td>기타</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="2">계</td><td>특허</td><td>SCI 논문</td><td>비SCI논문</td><td>S/W</td><td>기타</td></tr>
<tr><td>출원 2, 등록 0</td><td>국내 0, 국외 1</td><td>국내 2, 국외 0</td><td>2</td><td>학술논문발표 3건 등</td></tr>
</table>

3절. 테스트베드 시험조형물(조형물)

<table>
<tr><td colspan="2">관련 그림 / 사진</td><td colspan="7">  </td></tr>
<tr><td colspan="2">정 의</td><td colspan="7">솔라패널 지붕 구조물의 설계 및 시공을 위한 시범 조형물</td></tr>
<tr><td colspan="2">설정사유</td><td colspan="7">솔라패널 곡면지붕 실현을 위한 구조모델링과 설계방법 제시의 실용화</td></tr>
<tr><td colspan="2">목 적</td><td colspan="7">솔라패널 곡면지붕형성을 위한 세부 부재의 설계 및 절점의 단순화를 위한 제안된 설계방법의 실현과 문제점 검토 및 보완</td></tr>
<tr><td colspan="2">성능목표</td><td colspan="7">(기존기술 수준) 기존의 비정형 파사드 외피구조물의 경우 솔라패널을 이용한 친환경 에너지의 활용은 전무한 실정임
(개발기술 수준) 외피 구조물의 솔라패널을 이용한 에너지 효율 극대화 설계에 대한 구조물 실용화
(개발기술 수준 설정근거) 곡면구조의 설계, 시공 및 실용화를 위한 구조 안정성이 고려된 간단하게 시공되는 설계기법의 개발과 검증이 필요함</td></tr>
<tr><td colspan="2">성과달성 책임자 (소속기관)</td><td colspan="7">이승재(한국기술교육대학교), 권병천((주) 레나소프트웨어)</td></tr>
<tr><td colspan="2">소요기간</td><td colspan="7">’14.03 ~’15.02 (1년 0개월, 3차년도)</td></tr>
<tr><td rowspan="15">핵심성과</td><td rowspan="3">달성 확인방법</td><td>1차년도</td><td colspan="6">해당사항 없음.</td></tr>
<tr><td>2차년도</td><td colspan="6">해당사항 없음.</td></tr>
<tr><td>3차년도</td><td colspan="6">특허출원, 학술지 게재논문 및 테스트베드 시험 조형물 완성도</td></tr>
<tr><td rowspan="12">양적성과</td><td rowspan="2">1차년도</td><td>특허</td><td>SCI 논문</td><td>비SCI논문</td><td>S/W</td><td colspan="2">기타</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td rowspan="2">2차년도</td><td>특허</td><td>SCI 논문</td><td>비SCI논문</td><td>S/W</td><td colspan="2">기타</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td rowspan="2">3차년도</td><td>특허</td><td>SCI 논문</td><td>비SCI논문</td><td>S/W</td><td colspan="2">기타</td></tr>
<tr><td>출원 2, 등록 2</td><td>국내 1, 국외 0</td><td>국내 2, 국외 0</td><td>0</td><td colspan="2">학술논문발표 3건 등</td></tr>
<tr><td rowspan="2">계</td><td>특허</td><td>SCI 논문</td><td>비SCI논문</td><td>S/W</td><td colspan="2">기타</td></tr>
<tr><td>출원 2, 등록 2</td><td>국내 1, 국외 0</td><td>국내 2, 국외 0</td><td>0</td><td colspan="2">학술논문발표 3건 등</td></tr>
</table>

4절. 핵심성과의 연구 성과물 목록

1. 국내외 연구논문

가. 국외 학술저널논문(SCI(E))

	논문제목	학술지명	게재년월
1	Smooth cutting pattern generation technique for membrane structures by using geodesic line on the sub-plane and spline interpolation	Journal of Central South University	2013.11
2	Numerical evaluation of buckling behavior in space structure considering geometrical parameters with joint rigidity	Journal of Central South University	2014.03

나. 국내 학술저널논문(KCI)

	논문제목	학술지명	게재년월
1	수정-서브플랜을 이용한 막 구조물의 측지선 탐색과 평활 재단도에 관한 연구	대한건축학회논문집 구조계	2012.12
2	돔형 스페이스 프레임의 부재강성변화에 따른 임계좌굴하중과 유효좌굴길이계수	한국공간구조학회논문집	2013.03
3	차분진화알고리즘을 이용한 네트워크 돔의 정삼각형 메쉬 모델링에 관한 연구	대한건축학회논문집 구조계	2014.05
4	프레임형 대공간 구조물의 절점강성변화에 따른 불안정 현상과 임계좌굴하중	한국공간구조학회논문집	2014.09
5	고충진 압출성형 합성목재를 이용한 모듈러 돔의 구조모델링에 관한 연구	한국구조물진단유지관리공학회논문집	2015.03
6	멀티스테이지 호모토피 섭동법을 이용한 얕은 정현형 아치의 준-해석적 해	대한건축학회논문집 구조계	2015.04
7	화음탐색 알고리즘을 이용한 네트워크 돔의 정삼각형 격자 조절기법	한국공간구조학회논문집	2015.06
8	정20면체 모듈러 돔의 형상모델링 및 구조안정성에 관한 연구	한국공간구조학회논문집	2015.06
9	제형 및 정현형 주름강판의 전단좌굴 및 연성좌굴 경향성 비교 연구	대한건축학회논문집 구조계	2015.04

다. 국외 학술발표논문

	논문제목	학술회의 명칭	발표일
1	Analysis of the Heat Environment by Wind and Solar Radiation	In Proc. CODE2012	2012.11
2	Advanced analysis of node connection considering geometrical characteristics in the free form roof	In Proc. CODE2012	2012.11
3	Investigation of Effective Buckling Length Factor of Dome-typed Space Frame in Accordance with the Member rigidity	In Proc. IASS2013	2013.09
4	A study on the triangular mesh modeling of grid shell using the differential evaluation algorithm	In Proc. IASS-SLTE 2014	2014.09

라. 국내 학술발표논문

	논문제목	학술회의 명칭	발표일
1	유전자 알고리즘을 이용한 사인형 주름보의 이산화 최적구조설계	한국강구조학회	2012.06
2	수정-서브플랜을 이용한 삼각형 메쉬의 측지선 탐색	한국구조물진단유지관리공학회	2012.11
3	스페이스 프레임 구조물의 부재강성과 경계조건에 따른 유효좌굴길이계수에 관한 연구	한국구조물진단유지관리공학회	2013.04
4	차분진화법을 이용한 삼각형 네트워크 돔의 모델링에 관한 연구	한국공간구조학회	2013.05
5	스페이스 프레임 구조물의 부재강성과 경계조건에 따른 유효좌굴길이계수에 관한 연구	한국강구조학회	2013.06
6	정현파형 주름보의 DE기반 최적설계 프로그램	한국구조물진단유지관리공학회	2013.10
7	개선된 화음탐색알고리즘을 이용한 삼각격자돔 모델링에 관한 연구	한국구조물진단유지관리공학회	2013.10
8	QEA를 이용한 17부재 평면 트러스의 최적중량설계	한국구조물진단유지관리공학회	2014.04
9	정이십면체 기반 반구형 지붕의 구조모델링에 관한 연구	한국공간구조학회	2014.05
10	HS기반 삼각형 네트워크 돔의 모델링에 관한 연구	한국공간구조학회	2014.05
11	고충진 압출성형 재생목재를 이용한 모듈러 돔 구조물의 모델링	한국구조물진단유지관리공학회	2014.10

2. 특허출원 및 등록

	특허명	출원/등록 구분	출원/등록 번호	출원/등록 국가	출원/등록 날짜
1	비정형 그리드 쉘 구조물의 4웨이 테넌 조인트 프레임	출원	10-2013-0002263	대한민국	2013.01.08
2	비정형 그리드 쉘 구조물의 테넌 조인트	출원	10-2014-0008548	대한민국	2014.01.23
3	조립이 간편하고 견고한 돔 커넥터	출원	10-2014-0008550	대한민국	2014.01.23
4	비정형 그리드 쉘 구조물의 4웨이 테넌 조인트 프레임	등록	10-1456359	대한민국	2014.10.23
5	조립이 간편하고 견고한 돔 커넥터	등록	10-1483902	대한민국	2015.01.12
6	볼 조인트를 갖는 커넥터의 허브 단일형 돔 커넥터	출원	10-2015-0049226	대한민국	2015.04.07
7	볼 조인트를 갖는 커넥터의 허브 분할형 돔 커넥터	출원	10-2015-0049227	대한민국	2015.04.07

3. 소프트웨어 등록

	S/W 명칭	창작등록일
1	SolarRoofDesigner(솔라루프디자이너)	2013.01.04
2	정형 쏠라 패널 형상 모듈러	2013.01.08
3	FTMTs01(정삼각형 평면격자 모델링 프로그램)	2013.11.08
4	GNDModeling_RT_rvGA	2013.12.06
5	geometry optimized relational database	2013.12.30
6	effective 3d smoothing triangulator	2013.12.30
7	solar patch optimized cad	2013.12.30
8	Facade Optimizing Designer	2015.01.02
9	캐드 데이터 교환 모듈 자동 생성 프로그램	2015.01.02

4. 산학연구 기술지원

	교육명	교육내용	교육 대상	교육 일시	구분
1	격자 돔 구조물의 구조 불안정과 비선형 해석	□ 비선형 보요소를 이용한 격자 돔 구조물의 유한요수 - 기하학적 비선형성의 고려에 대한 요소방정식 유도과정과 전개과정 - 고차항의 소거로 인한 비선형 접선강성행렬의 전개과정과 비선형 해석 방법 - 접선강성행렬의 특성을 이용한 불안정 거동에 대한 판별과 분기거동 □ 절점강성과 부재강성을 고려한 돔형 구조물의 비선형 거동 - 얕은 구조물의 비선형 거동과 분기좌굴에 따른 정적좌굴하중 특성 비교 - 절점강성의 고려에 대한 구조물 불안정 현상 특성 비교와 좌굴하중 - 부재강성의 고려와 부재좌굴에 따른 유효좌굴길이 특성과 변화 특성 비교 □ MHIC 모델의 고유좌굴모드와 해석적 특성 - 고유치 해석을 통한 구조물의 고유좌굴모드에 대한 해석과 최저차모드 특성 - 상용프로그램과의 해석과정의 비교 및 결과에 대한 고찰 방법 - 돔형 구조물의 형상 계획 및 정형곡면의 특성에 대한 설계	㈜에프비지코리아	2012. 10.12	교육 훈련
2	정이십면체기반 정형솔라패널 형상설계기법	□ 정이십면체 기하학적 정의와 형상 정보 - 정이십면체의 정의와 응용도형 및 좌표형성 시스템 개요 - 기하학적 절점정보의 계산 방법과 형상정보 수정 방법 - 단위 유닛의 형성과 모듈화를 통한 반구형 지붕구조 형성 방법 □ 반-정이십면체(Modified Hemi-Icosahedron) 삼각패널 형성과정 - 정이십면체의 형상을 기반으로 한 모서리 오각형 설계와 형상제원 - 평면 오각형 구조와 곡률을 고려한 형상의 설계방법에 관한 부재각도 - 곡률을 가진 MHIC 모델의 계산과정과 길이표준편차 및 면적 계산 방법 □ SHISR v1.0을 이용한 정형구조 모델의 설계 - 정이십면체 구조체의 형상제원과 단위부재 입력 관련 매뉴얼 설명 - 반구형 정이십면체 모델 HIC 모델의 형상 제원과 형상설계 특이사항 - 곡률을 가진 MHIC 모델의 형상 제원과 설계패턴	주식회사 거츠	2012. 10.27	교육 훈련
3	차분진화법을 이용한 삼각형 그리드 돔의 설계	□ 삼각형 그리드 돔의 종류와 곡면형성방법 - 삼각형 그리드에 따른 곡면 돔의 종류와 그리드 형성방법 - 역학적 특성에 따른 그리드의 효율성과 장, 단점 및 관련자료 설명 - 돔의 형태에 따른 곡면의 구성과 최소곡면의 원리를 이용한 정삼각형 그리드 모델 □ 차분진화법을 이용한 최적삼각형 그리드 설계법 - 삼각형 그리드의 길이 및 면적의 표준편차를 최소화하는 방법 - 각 삼각형 면을 이용한 격자의 모델링과 길이편차계산방법 - 차분진화 알고리즘의 적용과 진화 연산자의 구성방법 □ 삼각형 그리드 돔의 모델링 예제 - 평면 삼각형 그리드의 정해와 비교한 결과에 대한 방법의 고찰 - 라이즈-스팬 비에 따른 삼각형 그리드의 정밀도 검토결과 - 형상의 대칭성을 고려한 예제의 결과 및 결론도출	㈜에프비지코리아	2013. 09.11	교육 훈련

4	경량 대공간 구조물의 구조설계와 이론	□ 대공간 구조물의 국내 시공사항 - 구조시스템에 따른 구조물의 분류와 대표건축물 - 시스템별 구조물의 설계방법의 차이와 이들을 조절 제어하는 방법 - 돔의 형태에 따른 곡면의 구성과 최소곡면의 원리 □ 강성 공간구조물의 설계와 불안정에 대한 고려 - 구조 불안정이 대공간 구조물에 미치는 영향과 대형 사고 - 구조물의 불안정 고유모드의 예측과 고유모드에 따른 구조체의 변형 - 절점강성의 고려와 구조물의 불안정 특성을 고려한 설계방법 □ 연성 막구조물의 구조설계 특성과 시공에 대한 문제점 - 측지선을 구하는 원리와 측지선에 대한 재단도 특성 - 형상해석과 평형해석의 원리와 공기막구조물의 해석방법 - 케이블지지 구조형태에서 발생하는 슬립의 문제점과 최단거리 계산법	한국공간구조학회	2013. 10.08	교육훈련
5	건축물의 태양광 발전설비와 설치모듈	□ 친환경 태양전지의 특성과 인버터 설치 - 태양전지에 방사되는 조도의 변화와 강도에 따른 발생전압 특성 - 인버터의 기본적인 원리, 종류, 특징 분류 및 인버터 주요기능 - 계통연계운전 전력망의 정전에 대한 인버터 단독운전 방지 검출방법 □ 태양광 발전의 형태와 계통연계형 발전소 - 독립형 인버터의 모듈제어 기본적인 원리, 단위유닛 및 제원 특성 - 계통연계형 태양광발전설비의 특성과 인버터 설치위치에 따른 분류 - 태양광 발전설비 설치에 대한 고려사항과 설치조건 분석방법 □ 건축물의 태양광 발전 설치기준, 유형 및 적용형태 - 태양 전지판의 모듈 설치용량 방위각, 전기배선 및 접속함의 정의와 특성 - 태양광 적용형태에 따른 지붕의 분류와 접지방법 및 예제 - 차양에 설치된 태양전지의 사례 및 천정에 설치된 전지의 사례	㈜아크로비젼	2014. 10.24	교육훈련
6	삼각요소기반 자유형상 및 MHIC 돔의 설계 GUI	□ 삼각요소기반 자유곡면 형상설계 프로그램 - 패널 디자이너 레이아웃과 Opencascade 라이브러리를 이용한 사례 - 3차원 그래픽 라이브러리 OpenGL을 이용하는 방법과 데이터 스키마 정의 - 프로그램 기능목록: 메인도구상자와 뷰포트 네비게이션 이용방법 □ 패널 디자이너 프로그램의 기본 모델링 - 2차원 및 3차원 상에서 1차원 및 2차원 요소의 모델링 기능을 설정하는 방법 - 자유형상 그리기 도구모임의 연관성 및 삼각그리드격자 구조의 절점 스무딩 방법 - 생성곡면의 컨트롤 포인트 수정과 입출력 관계에서 주요기능별 조절방법 □ MHIC 돔 모델의 설계용 GUI 프로그램과 계산원리 - MHIC 돔 모델의 설계데이터 생성방법과 GUI의 활용방법 - 해석결과에 따른 최종 출력파일의 종류와 형상정보 파일에서 제공되는 데이터 - 자동설계를 위한 좌표시스템의 채택과 비정형 격자구조물의 수량산출방법	㈜아크로비젼	2014. 11.28	교육훈련

5. 연구개발 관련 홍보 및 기타

가. 연구개발 관련홍보

	홍보명칭	홍보내용	홍보장소	일시
1	2nd International Conference on Computational Design in Engineering (CODE2012)-Organized Session 212 : Control Device of Thin Corrugated Plate_MLTM 12High-techUrban23	Freeform Surface and Optimal Solar Panel	Phoenix Island, Jeju, Korea	2012.11.15
2	삼각형 메쉬 곡면의 측지선과 적용	삼각형 그리드 곡면형성과 곡면의 측지선 탐색에 관한 연구기술기사	한국공간구조학회지 12권 4호 학술기사	2012.12.01

나. 전문기술인력 양성

	취득학위	이름	성별	학위취득일
1	석사	유미나	여자	2013.02.22
2	석사	곽의신	남자	2015.02.16
3	석사	조혜원	여자	2015.02.16
4	학사	이돈우	남자	2014.02.21
5	학사	김 원	남자	2015.02.16

다. 수상실적

	수상	기관	수상자	수상일
1	우수신진논문상	한국구조물진단유지관리공학회	유미나, 손수덕, 이승재, 강주원	2013.04.12
2	우수논문상	한국공간구조학회	손수덕, 우효준, 이승재	2013.05.31
3	우수논문상	한국공간구조학회	조혜원, 손수덕, 이승재	2014.05.31
4	논문상	한국구조물진단유지관리공학회	손수덕	2014.11.28

제4장 연구목표 달성 및 효과

1절. 연구개발 최종목표 달성도

1. 성과점검기준표 (1차년도)

	과제명		성과목표		성과지표		성과검증 기준				가중치	달성평점 (평점1~5)
							목표수준		측정방법	검증방법		
							목표치	달성치				
성과 질적 목표 점검	1	비정형 구조물의 태양광 발전 효율 극대화를 위한 솔라패널 최적배치 프로그램 개발 (1차년도)	1-1	정형 곡면의 솔라패널 모델링	①	정형 곡면 단위모듈 생성 및 기초 입력 프로그램	70%이상	70%	정형 곡면의 패널 형성 및 프로그램 완성도	프로그램 완성도	20%	
					②	정형곡면 솔라패널의 에너지 효율성 분석	2건	2건	정형곡면 구조의 그리드 형태별 에너지 효율 평가	논문	20%	
			1-2	정형 곡면 표준모델 개발	①	유닛 결합에 따른 정형 구조물의 축소모형제작	70%이상	70%	정형 곡면의 솔라패널에 대한 단위 모듈 제작결과의 완성도	설계도면 및 사양서	40%	
					②	정형 모델의 안정성 검증 분석	90%이상	90%	정형곡면모델의 수치해석 결과 정밀도	수치해석 결과	20%	
	종합점수 = ∑ (성과목표별 달성평점 ×가중치)										100%	

		목표	목표 건수	달성 건수	증빙	인정 건수	달성율 (%)	가중치	달성평점
양적 지표 점검	사업연계지표	학술지 게재 논문건수 (국내/국외)	3	1	첨부		33%	30%	10
		학술회의 발표논문건수(국내/국외)	2	3	첨부		150%	15%	23
		특허출원 건수(국내)	1	2	첨부		200%	10%	20
		소프트웨어(S/W)등록 건수	1	2	첨부		200%	10%	20
		전문가 의견반영 실적	1	1	첨부		100%	10%	10
		설계도면 및 사양서 개발	1	1	첨부		100%	10%	10
		산학연간 기술지원	2	2	첨부		100%	5%	5
		연구개발 관련 홍보	2	2	첨부		100%	5%	5
		분야별 인력양성 배출 실적	1	1	첨부		100%	5%	5
	종합점수 = ∑ (성과별달성율×가중치)							100%	107

2. 성과점검기준표 (2차년도)

	과제명		성과목표		성과지표		성과검증 기준				가중치	달성평점 (평점1~5)
							목표수준		측정방법	검증방법		
							목표치	달성치				
성과 질적 목표 점검	1	비정형 구조물의 태양광 발전 효율 극대화를 위한 솔라패널 최적배치 프로그램 개발 (2차년도)	1-1	비정형 곡면 솔라패널 모델링	①	비정형 곡면 솔라패널 곡면 생성 프로그램	80%이상	80%	비정형 곡면 삼각패널 메쉬 생성 프로그램	프로그램 완성도	20%	
					②	최적곡면 탐색과 안정성 평가	2건	2건	에너지 효율을 고려한 최적화 기법의 적용결과 효율 분석	논문	20%	
			1-2	테스트베드 구조물 설계	①	구조물 제작도면	1건	1건	테스트베드 시공용 도면의 완성도	설계도면 및 사양서	30%	
					②	곡면 솔라패널 배치 시뮬레이션	2건	2건	솔라패널 최적배치 상세의 완성도	전문가 의견반영	30%	
	종합점수 = ∑ (성과목표별 달성평점 ×가중치)										100%	

		목표	목표 건수	달성 건수	증빙	인정 건수	달성율 (%)	가중치	달성평점
양적 지표 점검	사업연계지표	학술지 게재 논문건수 (국내/국외)	3/0	2/0	첨부		67	25%	17
		학술회의 발표논문건수(국내/국외)	2/0	4/1	첨부		250	15%	38
		SCI급 학술지 게재 논문건수	1	1	첨부		100	15%	15
		특허출원 건수(국내)	1	2	첨부		200	10%	20
		소프트웨어(S/W)등록 건수	2	5	첨부		250	10%	25
		전문가 의견반영 실적	1	1	첨부		100	5%	5
		설계도면 및 사양서 개발	1	1	첨부		100	5%	5
		산학연간 기술지원	2	2	첨부		100	5%	5
		연구개발 관련 홍보	2	2	첨부		100	5%	5
		분야별 인력양성 배출 실적	1	1	첨부		100	5%	5
	종합점수 = ∑ (성과별달성율×가중치)							100%	140

3. 성과점검기준표 (3차년도)

	과제명		성과목표		성과지표		성과검증 기준				가중치	달성평점 (평점1~5)
							목표수준		측정방법	검증방법		
							목표치	달성치				
성과 질적 목표 점검	1	비정형 곡면구조 솔라패널의 최적배치 프로그램 개발 및 시제품 개발 (3차년도)	1-1	비정형 곡면 솔라패널 설계 플랫폼	①	비정형 곡면 모델링 및 솔라패널 최적배치	90%이상	90	비정형 곡면 솔라패널 최적 배치 프로그램	프로그램 완성도	20%	
					②	평가결과 DB의 가시화 방안 및 최적 모델링	2건	2	효율성 및 안정성 분석의 논문작성	논문	20%	
			1-2	테스트베드 구조물 시공	①	구조물 제작 및 설치	80%이상	80	테스트베드의 완성도	특허출원	30%	
					②	에너지 효율 분석 결과	5% 향상	분석중	시뮬레이션 결과와 분석결과 검증	전문가 의견반영	30%	
	종합점수 = ∑ (성과목표별 달성평점 ×가중치)										100%	

		목표	목표 건수	달성 건수	증빙	인정 건수	달성율 (%)	가중치	달성평점
양적 지표 점검	사업연계지표	학술지 게재 논문건수 (국내/국외)	3/0	6/0	첨부		200	25%	50
		학술회의 발표논문건수(국내/국외)	4/1	4/1	첨부		100	15%	15
		SCI급 학술지 게재 논문건수	1	1	첨부		100	15%	15
		특허출원 건수(국내)	2	2	첨부		100	5%	5
		특허등록 건수(국내)	2	2	첨부		100	5%	5
		소프트웨어(S/W)등록 건수	2	2	첨부		100	10%	10
		수치해석 건수	1	1	첨부		100	5%	5
		설계도면 및 사양서 개발	1	1	첨부		100	5%	5
		산학연간 기술지원	2	2	첨부		100	5%	5
		연구개발 관련 홍보	2	2	첨부		100	5%	5
		분야별 인력양성 배출 실적	1	3	첨부		300	5%	15
	종합점수 = ∑ (성과별달성율×가중치)							100%	136

2절. 연구개발성과의 기술적 효과분석

1. 핵심성과물의 기술적 효과

- 대체 에너지 활용장치의 개발로 인한 건축 구조물의 저탄소 구조물 시공
  다양한 형태의 설계를 위한 프로그램의 활용이 가능하며, 곡면형상에 대한 솔리드모델로의 확장에 추가연구를 통해서 활용 및 확장적용이 가능함.

- 메쉬관련 연구자료로 활용 가능한 기초 데이터 구축
  개발된 메쉬스무딩 기법을 이용한 실제 곡면구조물의 시공가능한 다각형 곡면형성의 적용이 가능하며, 최소편차를 이용한 구조물의 모듈화된 생산공정에 활용 가능함.

- 시범조형물 프로젝트를 통한 기술축적과 개발
  모듈화된 시범조형물에 대한 세부디테일의 기술축적과 특허 등의 다양한 기술결과들을 이용한 돔형 주택, 건축물 활용가능성 제시

- 돔형 구조물 관련 불안정해석 및 설계기술의 자립
  곡면 쉘 구조물의 비선형해석기법의 개발과 설계에 적용하는 기술의 개발을 통해서 고급해석기술의 자립과 발전의 기회를 제공함. 또한 기존의 성능설계에서 요구되는 곡면구조물의 설계방법을 제시할 수 있음.

2. 기대성과 및 파급효과

- 형상의 분석과 규준의 분석을 통한 국내형 모델 제시
  과제에서 개발된 형상모델링 결과들을 통한 국내형 모듈러 구조물의 모델을 제시할 수 있으며, 개량된 소규모 제로에너지 구조물에 성과물을 적용할 수 있음.

- 독자적 기술확보를 통한 국제 경쟁력 강화와 국가 이미지 제고
  기존의 곡면구조물에 대한 솔라에너지 활용방안에 대한 독자적인 기술자립 및 확보가 가능하며, 곡면구조의 설계기법을 한단계 업그래이드 할 수 있음. 또한 개발기술의 축적과 보급을 통한 산업 전반의 시너지 효과 기대

- 시공성 확보를 위한 설계프로그램의 개발로 인한 비용절감
  모듈화되고 환경 친화적인 구조물의 설계 및 시공이 가능한 방안을 제공함으로서 보다 경제적인 에너지 자급형 구조물을 설계할 수 있음. 또한 건설 사업비 최적화 가능 및 재료비 절감 가능함.

- 형태저항형 비정형 구조물에 대한 전문 연구인력양성

형태저항이 가능한 이중곡률곡면의 전문 연구인력을 양성함으로서 국내의 대공간 구조물에 대한 고급 설계인력의 설계능력이 확대 가능함.

3절. 연구개발성과의 경제적 효과분석

- 독자적 기술확보를 통한 국제 경쟁력 강화와 국가 이미지 제고
- 형태저항형 비정형 구조물에 대한 전문 연구인력양성
- 개발기술의 축적과 보급을 통한 산업 전반의 시너지 효과 기대
- 형상의 분석과 규준의 분석을 통한 국내형 모델 제시
- 시공성 확보를 위한 설계프로그램의 개발로 인한 비용절감
- 곡면구조 관련 해석기술 및 설계기술의 발전 및 자립화
- 건설 사업비 최적화 가능 및 재료비 절감 가능
- 대체 에너지 장치의 개발로 인한 구조물의 저탄소 구조물 시공
- 기존 노후화 공공건축물의 자원절약형 리모델링
- 파일럿 프로젝트를 통한 기술축적과 개발
- 표준 모델의 제시로 인한 최적화된 비정형 곡면의 구현
- 소프트웨어 및 표준모델의 제시로 인한 기술의 정착 및 확산
- 메쉬관련 연구자료로 활용 가능한 기초 데이터 구축
- 관련특허 출원 및 등록으로 인한 지적 재산권 확대

4절. 연구개발성과의 정책적 효과분석

1. 정책 및 관계법령

곡면지붕 솔라에너지의 응용에 대한 새로운 기술보급과 기술영역의 확대는 국내 단기성과형 전략적 특수성을 만족할 수 있으며, 내수시장의 새로운 상품을 기대할 수 있다. 또한 이를 토대로 한 자유형상 구조물의 핵심전략기술로 자리를 확보함으로서 국가 경쟁력을 함께 높일 수 있는 기획은 국가 전략적 기술개발구조에 부합한다. 정부지원 R&D사업의 우선순위에서 보더라도 현재 시장성을 공략할 수 있는 기획아이디어와 더불어 이들이 고급기술에서 파생될 수 있는 전략적 가치의 핵심기술 확보는 세계시장에서의 경쟁력을 확보하기 위한 시기적절한 전략과 지적재산을 보유할 수 있다. 특히 솔라 에너지 관련 국내 내수시장의 소규모 아이템들의 개발 실적은 이어서 대규모 기술상품을 개발할 수 있는 원천을 제공하게 된다.

국가재정운용계획의 R&D부분 투자계획의 경우 창조화 혁신을 바탕으로 ICT-SW 접목을 통한 산업 소프트파워 강화에 집중하고 있다. 창업초기와 핵심기술개발, 사업화 등의 성장단

계별 지원을 계획하고 있는 부분과 연계하여 곡면구조와 솔라에너지 시스템의 기술 개발은 타산업에 많은 영향을 미칠 것이다. 또한 국민 체감형 R&D 투자는 안전확보, 선제적, 맞춤형 대응기술개발의 투자방안으로 제시하고 있다. 이것은 저탄소 에너지 건축기술 기획에서 정책적 중요한 역할을 할 것이다.

기술자립과 기술경쟁력에 있어서 국내는 물론 국외 수출을 지향할 수 있는 친환경 에너지 관련 과제이므로 지방자치단체의 중소기업 기술의 확보에 있어서도 지역건설업체의 건설기술영역을 확보할 수 있고, 국가 전체의 확대된 기술시장을 기대할 수 있다.

아시아태평양 권역은 '20년 기준으로 약 4.5조불로 급성장(43.7%)하고, 남미권도 '15년전까지 평균 6.5% 수준의 시장 성장률 기대하고 있으며, 중동 및 북아프리카지역(MENA)의 경우 GDP 대비 건설예산 비중이 '10년 이후 상승세를 지속하며 '13년 24.5%로 예상된다. 이러한 시장 확대에 맞추어 해외건설동향에 맞추어진 환경친화적 건축물의 건설기술과 대체에너지의 활용에 대한 연구의 효과는 크다고 볼 수 있다. 특히 고부가가치 엔지니어링 분야의 기술력 부족에 대한 보완해야할 것으로 전망하고 있다.

2. 정부지원 정책사업

국토해양부의 건설기술혁신사업들에서 환경친화적이며 경제적인 구조물에 관한 연구와 유지관리 등의 문제가 해결된 장수명화에 관한 연구와 성능개선의 주제는 계속해서 많은 연구자와 기술자들이 제안하고 있다. 특히, 대처에너지의 개발에 대한 연구와 이들을 활용하기 위한 다양한 시도는 현 시점의 가장 합리적인 방안에 대한 정부의 일반적인 방침과 동일한 방향으로 진행되고 있다. 환경 및 녹색정책 등에 중점적인 가치를 두고 현재의 풀어나갈 문제들의 형성은 본 제안과제의 성격상으로 볼 때 이와 부합된다.

많은 정부지원 정책사업이 현재 저탄소 녹색성장과 경제성에 대한 새로운 물결에 합류하여 인류의 미래에 대한 환경과의 조화를 꿈꾸고 있다. 이에 대한 정책과 연구 과제에 부합하고 순환형 사회구조에 적절히 대응하기 위한 친환경·재료절감형 제안 연구과제인 곡면 구조물의 솔라에너지 활용을 위한 최적패치 설계프로그램의 개발 기술은 국내외 관련 상황과 미루어 매우 시기적절한 연구이다. 이를 통하여 국가 경쟁력 향상과 국민의 복지 및 경제성 높은 기술결과로 인한 저탄소 그린성장의 목적에 부합한 결과를 얻을 수 있을 것이다.

제5장 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성

1절. 연구성과 향후 활용방안

가. 설계프로세스(설계프로그램) 활용가능성 및 범위

- **비정형 곡면구조물의 형상설계와 그리드 모델링**

자유형상 구조물의 설계에 필요한 곡선 및 곡면을 모델링할 수 있는 기능과 NURBS 곡면을 이용한 메쉬생성 및 삼각화 기능이 제공됨으로 격자 비정형 구조물의 설계에 활용할 수 있다. 다양한 기본적인 곡선을 이용할 수 있으며, 형상의 제어 절점을 이용하여 곡면설계가 가능하다. 기존의 설계프로그램 형상정보와도 호환이 가능하며, 텍스트 기반의 정보도 이용가능하다.

- **격자 프레임 구조물의 시공성 향상을 위한 부재 모듈화**

격자형 곡면구조물의 격자길이 최소표준편차 모델링이 가능함으로 일정한 길이의 부재로 모듈화에 활용 가능하다. 실무에서 자동으로 설계할 수 없는 부분이기도 하므로 매우 효율적인 기능이다. 이것은 실시설계에서 생산부재의 최적화된 모듈을 제시할 수 있고, 절점의 모듈 또한 간소화함으로서 시공성 향상과 비용절감이 가능하다. 기존의 방법에서는 설계자의 시행오차를 통해 결과물을 얻을 수 있는 부분이다. 따라서 대규모 공간의 곡면구조물 설계에서는 활용도가 높을 것으로 사료된다.

- **삼각격자 파사드 구조물의 구조해석 및 불안정 설계**

단층의 격자구조물을 사용하는 파사드 구조물의 구조설계는 일반적인 구조설계에서는 해결할 수 없는 불안정성을 고려한 설계를 실시해야하며, 프로그램은 이러한 고급해석기능을 제공해 준다. 삼각격자곡면구조물의 구조해석과 형상해석이 동시에 가능함으로 설계실무자들이 매번 바뀌는 형상에 대해서 구조적 검토를 손쉽게 할 수 있다. 또한 구조설계에 필요한 GUI도 제공된다.

- **곡면의 태양전지 효율성 시뮬레이션과 최적배치설계**

솔라에너지 활용이 가능한 곡면구조 설계에 활용할 수 있으며, 최적의 곡면효율을 위한 격자그리드를 제공할 수 있다. 또한 파사드 구조물의 대안으로 제시할 수 있으며, 주택과 같은 소규모 공간뿐 아니라 대공간 구조물의 설계를 위한 기초곡면의 형성에 활용할 수 있다. 지역 및 지리적 정보를 제공하고, 구조물의 형상을 정의하면 각 연중일별, 시간대별 일조와 일사에 관한 기초적인 정보를 제공해 주며, 곡면형 축소모형을 이용한 모니터링을 통해서 확인할 수 있다.

나. 시범조형물 연구결과 활용방안

- **조형물관련 특허출원 및 등록 등의 지적 재산권 확대**
  절점모듈화 관련된 다수의 특허 등으로 지적 재산권이 확대됨으로 인해 기술의 확산이 가능하게 한다. 단순 모듈러 시스템의 활용에 대한 세부적인 기술에서 기초적인 시공 데이터로 이용 가능하다.

- **대체 에너지 활용장치 개발을 위한 연구에 적용**
  일반 구조물의 미적 외피구조에서 적용할 수 있는 다각형 솔라패널에 대한 연구에도 활용가능하며, 다양한 형태의 건축 구조물의 저탄소 구조시스템의 시공이 가능한 데이터를 제공한다.

- **표준 모델의 제시로 인한 최적화된 비정형 곡면의 구현**
  정형의 곡면구조물에 대한 표준모델의 연구성과는 다양한 평면의 주거와 응용가능한 건축구조물에 확장되어 설계가 가능하며, 다양한 확장을 통해서 활용범위를 확대할 수 있다. 임시 주거물로도 설계가 가능함으로 자연재해로 인한 재난지역의 임시구조물에 활용가능하다.

2절. 추가연구 필요성

가. 솔라패널에 관한 추가연구 필요성

- 다각형 솔라패널 양산기법 개발로 인한 가격경쟁력 향상 연구
  다양한 형태의 솔라패널에 대한 생산방법을 개발하여 곡면구조물에 적용하기 적합한 재료의 연구와 보다 대량생산에 따른 생산공정 등의 연구가 필요함.

- 곡면구조물의 솔라 에너지 발전 시스템 개발에 관한 연구
  곡면구조의 솔라패널에서 생산된 에너지의 손실을 최소화하고 전열기구의 합리적인 배치와 활용시스템의 연구가 필요함. 또한, 생산된 에너지의 활용에 대한 솔라패널의 최적 병렬화가 가능한 조합최적설계기법의 개발도 필요함.

나. 자유형상 곡면구조에 관한 추가연구 필요성

- 자유형상 파사드의 솔라패널 적용에 대한 내구성 증가를 위한 추가연구
  곡면 파사드의 외기차에 의한 에너지손실을 줄이고 솔라에너지를 이용한 저탄소구조물의 실현에서 발열문제에 대한 내구성 저하에 대한 개선방법에 대한 추가연구가 필요함. 또한 유지관리에 대한 방안의 연구도 필요함.

- 형태생성기법을 적용한 곡면구조의 모듈화 연구 필요
  보로노이곡면을 이용한 이중곡률면의 격자생성에 관한 3차원 확장으로 곡면 외피를 이루는 격자골조의 모듈화 연구가 필요하며, 이를 이용한 3D프린팅 기술을 적용한 건축 외피구조물의 설계에 적용하는 연구가 필요함.

참고문헌

1. 김인일, 외 3명, “라인 제약조건을 가지는 2차원 사각 메쉬의 자동 생성 알고리즘,” 한국 CAD/CAM 학회 논문집, 제8권 제1호, 2003, pp.10-18
2. 손수덕, 외 3명, “돔형 스페이스 프레임 구조물의 하중모드에 따른 분기점 특성에 관한 연구,” 한국공간구조학회 논문집, 제11권 1호, 2011, pp.121-130
3. 윤한흠, 외 1명, “래티스돔의 다분기 해석을 위한 알고리즘에 관한연구,” 대한건축학회논문집 구조계, 제16권 9호, 2000, pp.3-9
4. 이상진, “CAGD를 이용한 프리폼 이산화 공간구조물의 유한요소망 자동생성기법,” 한국공간구조논문집, vol. 10, no. 2, 2010, pp.77-86
5. 이강국, 외 1명, “Mesh Data를 활용한 도시 중심지역 에너지소비 유형분석,” 대한건축학회 논문집 계획계, vol. 22, no. 7, 2006, pp.223-233
6. 손수덕, 외 3명, “막 구조물의 삼각형 Re-mesh 패턴을 적용한 재단도 생성에 관한 연구,” 한국공간구조학회논문집, 제7권 3호, 2007.6, pp.153-165
7. 최미영, 외 3명, “벽면 일체형 BIPV 시스템의 효율성 평가와 개선방안에 관한 연구,” 대한건축학회 학술발표대회논문집, 2007, pp.1073-1076
8. 황경주, 외 1명, "단층 프리폼 그리드 대공간 구조물을 위한 접합 시스템," 한국강구조학회지, 제23권 4호, 2011, pp.24-29
9. 황경주, 외 1명, "The Design Process of Complex-Shaped Glass Grid Shell Structures," 한국공간구조학회, 8권 1호, 2011, pp.100-107
10. 윤종호, "건물일체형 태양광 발전 기술 동향," 전기전자재료학회논문지, 27권 1호, 2014, pp.1-7
11. 황경주, 외 3명, "Investigation and Numerical Analysis of Node Connectors in Free-Form Spatial Structures," 한국공간구조학회, 7호 3권, 2007, pp.87-95
12. Abedi K, Parke G A R. Progressive collapse of single-layer braced domes. International Journal of Space Structures. 1991, 11(3): 291-306
13. Agbasi, E., et al. "Twords computer-integrated manugacture of cladding system," Proc., int. Conference on Building Envelope systems and Technologies, Ottawa, 2001, pp.233-237
14. Behling, S., et al., Solar Power: The Evolution of Solar Architecture, Prestel, 2000
15. Bergan, PG(1980), Solution algorithms for nonlinear structural problems, Computers and Structures, Vol.12, 497-509
16. Bezerra L M, de Freitas C A S, Matias W T, Yosiaki N. Increasing load capacity of steel space trusses with end-flattened connections. Journal of Constructional Steel Research. 2009, 65(12): 2197-2206.
17. Bulenda Th, Knippers J. Stability of grid shells. Computers and Structures, 2001, 79: 1161-1174.

18. Chan SL and Zhou ZH(1995), Second-order elastic analysis of frames using single imperfect element per member, Journal of Structural Engineering, Vol 121, 939-945
19. Caglayan O, Yuksel E. Experimental and finite element investigations on the collapse of a Mero space truss roof structure – A case study. Engineering Failure Analysis. 2008, 15(5): 458-470.
20. Chan S L, Zhou Z H. Second-order elastic analysis of frames using single imperfect element per member. Journal of Structural Engineering, 1995, 121: 939-945.
21. Choong K K, Hangai Y. Review on methods of bifurcation analysis for geometrically nonlinear structures. Bulletin of the International Association for Shell and Spatial structures, 1993, 34(112): 133-149.
22. Choong K K, Kim J Y. A numerical strategy for computing the stability boundaries for multi-loading systems by using generalized inverse and continuation method, Engineering Structures. 2001, 23: 715-724.
23. Cirak, F., et al.. "Subdivision shells with exact boundary control and non-manifold geometry," International Journal for Numerical Methods in Engineering, vol. 88, no. 9, 2011, pp.897-923
24. Deng, H. et al., “Unified classification of stability of pin-jointed bar assemblies,” International Journal of Solids and Structures, v.42, 2005, pp.4393-4413.
25. El-Sheikh A(1998), Design of space truss structures, Structural Engineering and Mechanics, Vol 6(2), 185-200
26. Fan F, Cao Z, Shen S. Elasto-plastic stability of single-layer reticulated shells. Thin-Walled Structures, 2010, 48(10-11): 827-836.
27. Fan F, Ma H, Cao Z, Shen S. A new classification system for the joints used in lattice shells. Thin-Walled Structures. 2011, 49: 1544-1553.
28. Fan F, Yan J, Cao Z. Elasto-plastic stability of single-layer reticulated domes with initial curvature of members. Thin-Walled Structures, 2012, 60: 239-246.
29. Fan F, Yan J, Cao Z, Zhou Q. Calculation methods of stability of single-layer reticulated domes considering the effect of initial bending of members. Proceeding of the IASS symposium 2010, Shanghai, 2010, 339-347.
30. Hwang K J, Knippers J. Stability of single layered grid shells with various connectors. Proceeding of the ICSA 2010 Guimaraes. Portugal, 2010, 581-588.
31. Hughes, T.J.R., et al., "Isogeometric analysis: CAD, finite elements, NURBS, exact geometry and mesh refinement," Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. v.194, 2005, pp.4135-.4195
32. Huseyin K. The multi-parameter perturbation technique for the analysis of nonlinear system. International Journal of Nonlinear Mechanics. 1973, 8(5):

431-443.
33. Jung HM(1997), An effect of equipment-loading on the buckling characteristics of single-layer latticed domes, Journal of Korean society of steel construction, Vol 9(3), 323- 332
34. Kato S, Mutoh I, Shomura M. Effect on joint rigidity on buckling strength of single layer lattice dome. Bulletin of the International Association for Shell and Spatial Structures. 1994, 35(115): 101-109.
35. Kato S, Nakazawa S, Nobe K, Yoshida N. Semi-probabilistic evaluation of buckling strength of two-way single layer lattice dome. Proceeding of the IASS symposium, Shanghai, 2010, 384-395.
36. Kato S, Yamashita T, Nakazawa S, Kim Y, Fujibayashi A. Analysis based evaluation for buckling loads of two-way elliptic paraboloidal single layer lattice domes. Journal of Constructional Steel Research. 2007, 63: 1219-1227.
37. Kim JK and Han SE(1998), The geometrically nonlinear analysis of single layer latticed domes by mode superposition method, Journal of Architectural Institute of Korea - Structure & Construction, Vol 14(4), 317-325
38. Kim NS, Shon SD and Kim SD(2008), A study on the Unstable behavior according to load and boundary condition of shelled space frame structures, Proceedings of KASS symposium 2008, Vol 5(1), 80-85
39. Knippers J., et al., "From the Beginning of the Design to the Execution of Free-Formed Grid-Shells – A Consistent Design Process," Stahlbau 77, Heft 1, 2008, pp.10-15
40. Kwan TJ, Kim SD and Kim JM(1997), A study on the unstable behavior of pin-connected single-layer latticed domes considering geometric nonlinearity, Proceedings of the Computational Structural Engineering Institute Conference, Vol 10(1), 240-247
41. Lee KS and Han SE(2009), A development of analytical strategies for elastic bifurcation buckling of the spatial structures, Journal of Korean society of steel construction, Vol 21(6), 563-574
42. Lee SJ and Shon SD(2012), Characteristics of buckling load and bifurcation in accordance with rise-span ratio of space truss considering initial imperfection, Journal of Korean society of steel construction, Vol 24(3), 337-348
43. Lee S J, Shon S D. Tensile strength characteristics on ETFE film for membrane roof system. Journal of Applied Mechanics and Materials. 2013, 365-366: 1106-1109.
44. López A, Puente I, Serna M A. Direct evaluation of the buckling loads of semi-rigidly jointed single-layer latticed domes under symmetric loading. Engineering Structures, 2007, 29(1): 101-109.

45. Lopez A, Puente I, Serna M A. Numerical model and experimental tests on single-layer latticed domes with semi-rigid joints. Computers and Structures, 2007, 85: 360-374.
46. Moon HS, An SG, Shon SD, Lee DW and Kim SD(2006), A study on buckling load characteristic of Songdo Convention Center with initial imperfection and joint rigidity, Proceedings of KASS symposium 2006, Vol 3(1), 191-204
47. Owen, S.J., "A survey of Unstructured mesh generation technology," 7th international Mesh Round Table, Dearborn Michigan, October, 1998
48. Prasad, D.K., et al., Designing with Solar Power: A Source Book For Building Integrated Photovoltaics(BiPV), Images Publishing, 2005
49. Roberts. S., et al., Building Integrated Photovoltaics: A Handbook, Springer, 2009
50. Schittich, C., in Detail: Building Skins, Birkhauser, 2001
51. Schlaich, J., et al., "New Trade Fair in Milan - Grid Topology and Structural Behaviour of a Free-Formed Glass-Covered Surface, Int. J. of Space Structures, v20, 2005, pp.1-14[10] Shon S D, Lee S J. Nonlinear unstable phenomenon and bifurcation of simple space truss system. Proceeding of IASS symposium. Seoul, 2012, 48.
52. Shon S D, Lee S J, Lee G K. Characteristics of bifurcation and buckling load of space truss in consideration of initial imperfection and load mode. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A, 2013, 14(3): 206-218.
53. Shon SD, Ha JH and Lee SJ(2012), Nonlinear dynamic analysis of space truss by using multistage homotopy perturbation method, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol 22(9), 879-888
54. Shon SD, Kim SD, Hwang KJ and Kang MM(2003), A study of nonlinear unstable phenomenon of framed space structures considering joint rigidity, Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol 3(1), 87-97
55. Shon SD, Kim SD, Kang MM, Lee SG and Song HS(2002), Nonlinear instability analysis of framed space structures with semi-rigid joints, Proceeding of the IASS symposium 2002, Warsaw, 422-427
56. Shon SD, Kim SD, Lee SJ and Kim JS(2011), A study on the critical point and bifurcation according to load mode of dome-typed space frame structures, Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol 11(1), 121-130[24] Steinboeck A, Jia X, Hoefinger G, Mang H A. Conditions for symmetric, antisymmetric, and zero-stiffness bifurcation in view of imperfection sensitivity and insensitivity. Computer methods in applied mechanics and engineering. 2008, 197: 3623-2626.
57. Solar Energy Int., Photovoltaics: Design & Installation Manual, New Society

Publishers, 2004
58. Stephan, S., et al., "Reticulated Structures on Free-Form Surfaces," Stahlbau 73, 2004
59. Thai H T, Kim S E. Large deflection inelastic analysis of space trusses using generalized displacement control method. Journal of Constructional Steel Research. 2009, 65(10-11): 1987-1994.
60. Thomas, R., Photovoltaics and Architecture, Taylor & Francis Group, 200101. Thompson JMT and Hunt GW(1983), On the buckling and imperfection-sensitivity of arches with and without prestress. International Journal of Solids and Structures, Vol 19(5), 445-459
61. Woo H J, Shon S D, Lee S J. Unstable phenomenon of flow truss dome with asymmetric load mode. International conference on Computational Design in Engineering 2012. Jeju, 2012, 217.
62. Wigginton, M., et al., Intelligent Skins, Elservier, 2003
63. Winslow, P., et al., "Multi-Objective Optimization of Free-Form Grid Structures, International Conference on Engineering Optimization (EngOpt 2008), Brazil, 2008, pp.1-10
64. Yamada S, Matsumoto Y, Sakamoto A, Croll J G A. Design estimation method of buckling load and the associated mode for single layer lattice dome roof with square plan. Proceeding of the IABSE-IASS symposium. London, 2011, 72.
65. Yang Y B, Lin T J, Leu L J, Huang C W. Inelastic postbuckling response of steel trusses under thermal loadings. Journal of Constructional Steel Research. 2008, 64(12): 1394-1407.

부 록

성과물 증빙자료 목록

증빙 01 : 학술지 게재 논문건수 (국내/국외)

- 수정-서브플랜을 이용한 막 구조물의 측지선 탐색과 곡선 재단도 작성에 관한 연구
- 돔형 스페이스 프레임의 부재강성변화에 따른 임계좌굴하중과 유효좌굴길이계수
- 차분진화알고리즘을 이용한 네트워크 돔의 정삼각형 메쉬 모델링에 관한 연구
- 프레임형 대공간 구조물의 절점강성변화에 따른 불안정 현상과 임계좌굴하중
- 고층진 압출성형 합성목재를 이용한 모듈러 돔의 구조모델링에 관한 연구
- 멀티스테이지 호모토피 섭동법을 이용한 얕은 정현형 아치의 준-해석적 해
- 화음탐색 알고리즘을 이용한 네트워크 돔의 정삼각형 격자 조절기법
- 정20면체 모듈러 돔의 형상모델링 및 구조안정성에 관한 연구
- 제형 및 정현형 주름강판의 전단좌굴 및 연성좌굴 경향성 비교 연구

증빙 02 : 학술회의 발표논문건수(국내/국외)

- 유전자 알고리즘을 이용한 사인형 주름보의 이산화 최적구조설계
- 수정-서브플랜을 이용한 삼각형 메쉬의 측지선 탐색
- 차분진화법을 이용한 삼각형 네트워크 돔의 모델링에 관한 연구
- 스페이스 프레임 구조물의 부재강성과 경계조건에 따른 유효좌굴길이계수에 관한 연구
- 정현파형 주름보의 DE기반 최적설계 프로그램
- 개선된 화음탐색알고리즘을 이용한 삼각격자돔 모델링에 관한 연구
- 스페이스 프레임 구조물의 부재강성과 경계조건에 따른 유효좌굴길이계수에 관한 연구
- QEA를 이용한 17부재 평면 트러스의 최적중량설계
- 정이십면체 기반 반구형 지붕의 구조모델링에 관한 연구
- HS기반 삼각형 네트워크 돔의 모델링에 관한 연구
- 고층진 압출성형 재생목재를 이용한 모듈러 돔 구조물의 모델링
- Advanced analysis of node connection considering geometrical characteristics...
- Analysis of the heat environment by wind and solar radiation
- Investigation of effective buckling length factor of dome-typed space frame...
- A study on the triangular mesh modeling of grid shell using the differential evaluation...

증빙 03 : SCI급 학술지 게재 논문건수

- Smooth cutting pattern generation technique for membrane structures using geodesic line...
- Numerical evaluation of buckling behavior in space structure considering geometrical...

증빙 04 : 특허출원 건수(국내)

- 비정형 그리드 쉘 구조물의 4웨이 테넌 조인트 프레임
- 비정형 그리드 쉘 구조물의 테넌 조인트
- 조립이 간편하고 견고한 돔 커넥터
- 볼 조인트를 갖는 커넥터의 허브 단일형 돔 커넥터
- 볼 조인트를 갖는 커넥터의 허브 분할형 돔 커넥터

증빙 05 : 특허등록 건수(국내)

- 비정형 그리드 쉘 구조물의 4웨이 테넌 조인트 프레임
- 조립이 간편하고 견고한 돔 커넥터

증빙 06 : 소프트웨어(S/W)등록 건수

- 정형 쏠라 패널 형상 모듈러
- Solar Roof Designer
- FTMTs01
- GNDModeling_RT_rvGA
- Geometry optimized relational database
- Effective 3d smoothing triangulator
- Solar patch optimized cad
- 캐드 데이터 교환 모듈 자동 생성 프로그램
- Facade Optimizing Designer

증빙 07 : 전문가자문 건수

- 돔 공간의 에너지 성능 및 부하 특성 모델링
- 환경 친화형 외피 디자인 적용방안

증빙 08 : 수치해석 건수

- 모듈러 돔 곡면지붕 격자구조 비선형 불안정 해석

증빙 09 : 설계도면 및 사양서 개발

- MHIC 솔라지붕 형상설계용 기초자료 및 사양서
- MHIC 솔라패널 곡면지붕 설계기법 및 상세도면
- 모듈러 돔(icoDome) 곡면지붕 설계도면 및 설치매뉴얼

증빙 10 : 산학연간 기술지원

- 정이십면체기반 정형솔라패널 형상설계기법
- 격자 돔 구조물의 구조 불안정과 비선형 해석
- 차분진화법을 이용한 삼각형 그리드 돔의 설계
- 경량 대공간 구조물의 구조설계와 이론
- 건축물의 태양광 발전설비와 설치모듈
- 삼각요소기반 자유형상 및 MHIC 돔의 설계 GUI

증빙 11 : 연구개발 관련 홍보

- CODE2012 국제컨퍼런스 세션발표
- 삼각형 메쉬 곡면의 측지선과 적용 (한국공간구조학회 학술기사)
- 우수논문상 (한국공간구조학회)
- 우수신진논문상 (한국구조물진단유지관리공학회)
- 우수논문상 (한국공간구조학회)
- 논문상 (한국구조물진단유지관리공학회)

증빙 12 : 분야별 인력양성 배출 실적

- 학위수여증명서(학사2)
- 학위수여증명서(석사3)

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.