14CHUD
C061971-03

곡선주름강판을 이용한 건축용 제진장치 개발

최종보고서

2015.5

국토교통과학기술진흥원

국토교통기술촉진연구사업 14CHUD-C061971-03

곡선 주름강판을 이용한 건축용 제진장치 개발 최종보고서

2015. 5.

Infrastructure
R&D Report

주관연구기관 / 영남대학교 산학협력단
공동연구기관 / 한국기술교육대학교 산학협력단

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

주 의 사 항

1. 이 보고서는 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원이 위탁 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 최종보고서입니다.
2. 본 보고서의 내용을 발표할 때에는 반드시 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원이 위탁 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니 됩니다.

제 출 문

국토교통과학기술진흥장관 귀하

이 보고서를 "곡선 주름강판을 이용한 건축용 제진장치 개발"과제의 보고서로 제출합니다.

2015. 5

주관연구기관명 : 영남대학교 산학협력단
주관연구책임자 : 강주원
연 구 원 : 김광일
연 구 원 : 윤성욱
연 구 원 : 박상욱
연 구 원 : 유유진
연 구 원 : 이영락
연 구 원 : 김수진

협동연구기관명 : 한국기술교육대학교 산학협력단
협동연구책임자 : 이승재
연 구 원 : 손수덕
연 구 원 : 박재성
연 구 원 : 유미나
연 구 원 : 곽의신
연 구 원 : 이돈우

참여기업명 : ㈜티엔아이엔지니어링
참여기업책임자 : 주동현
연 구 원 : 장지영
연 구 원 : 유진후
연 구 원 : 이채환
연 구 원 : 이진왕
연 구 원 : 이민석
연 구 원 : 박주호

참여기업명 : ㈜보루
참여기업책임자 : 김윤태
연 구 원 : 박광섭

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제고유번호</td><td>14CHUD-C061971-03</td><td>해 당 단 계
연 구 기 간</td><td colspan="2">2014.3.1~
2015.2.9</td><td>단 계 구 분</td><td>(해당단계)/
(총 단 계)</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">곡선 주름강판을 이용한 건축용 제진장치 개발</td></tr>
<tr><td rowspan="2">단위과제명</td><td colspan="5">주관 : 최적주름형상 제안 및 지침서</td></tr>
<tr><td colspan="5">공동연구 : 제진주름강판의 성능 검증</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 책 임 자</td><td rowspan="2">강 주 원</td><td>해당단계
참 여
연구원수</td><td>총 : 22명
내부 : 7명
외부 : 15명</td><td>해당
단계
연구비</td><td colspan="2">정부 : 255,000천원
기업 : 85,000천원
계 : 340,000천원</td></tr>
<tr><td>총연구기간
참 여
연구원수</td><td>총 : 61명
내부 : 28명
외부 : 33명</td><td>총
연구비</td><td colspan="2">정부 : 755,000천원
기업 : 259,000천원
계 : 1,014,000천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소 속 부 서 명</td><td colspan="2">영남대학교 산학협력단</td><td>참여기업명</td><td colspan="3">㈜티엔아이엔지니어링
㈜보루</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>305</td></tr>
<tr><td colspan="7">▪ 제형 및 정현파형 주름강판의 진동제어 성능 분석
▪ 기하학적 특성을 갖는 파형강판의 좌굴 강도 및 거동 분석
▪ 주름강판의 곡선길이와 접선각도에 따른 전단좌굴특성 분석
▪ 형상에 따른 주름강판의 탄성전단좌굴 특성 및 경향성 분석
▪ 유로코드를 통한 주름웨브에 대한 구조설계 메커니즘 제안
▪ 곡선주름강판 제진장치 설계시방서(안) 제안
▪ 이론식을 통한 주름판 제진성능의 거동 특성 분석
▪ 형상에 따른 주름강판의 전단좌굴응력 분석을 통한 좌굴모드 예상
▪ 경계조건에 따른 곡선주름강판 성능 분석을 통한 최적주름형상 제안
▪ 형상비에 따른 성능분석을 통한 성능개선 방안 제안
▪ 주름판 실용화를 위한 곡선주름강판 제진장치 설계시방서 작성</td></tr>
<tr><td rowspan="2">색 인 어
(각 5개 이상)</td><td>한 글</td><td colspan="5">파형강판, 사인파형, 최적주름설계, 에너지 흡수형, 제진장치</td></tr>
<tr><td>영 어</td><td colspan="5">Corrugated steel plate, Sinusoidal corrugation shape, Optimum corrugation design, Energy absorption type, Seismic control device</td></tr>
</table>

요 약 문

Ⅰ. 제목

곡선 주름강판을 이용한 건축용 제진장치 개발

Ⅱ. 연구개발과제 개요

정부의 2002년 국가기술지도(National Technology Road Map)에서는 10년 후 1인당 국내총생산량(GDP) 2-3만 달러, 국가 종합경쟁력 세계 10위를 지향한 5대 국가과학기술발전 비전을 설정하여 다양한 분야에서 R&D사업과 연구가 진행되어 왔으며, 2010년 기준 1인당 약 2.5만 달러의 GDP를 기록하고 있으며, 구체화된 기술발전 비전의 장이 열릴 시기이다. 상기 비전을 구체화한 환경/에너지 프론티어 진흥 부문 로드맵에서 건설산업 분야의 발전 전략의 핵심은 인간과 자연이 상생하는 인프라 건설로서 친환경·자원절약형 건축기술의 개발은 건축의 미래 비전이자 현재의 이슈라고 할 수 있다.

지금까지 건설산업 분야의 친환경·자원절약형 건축기술은 설비부문과 환경부문에서의 문제로만 인식되어 왔다. 그러나 건설산업 분야의 친환경·자원절약형 건축기술이 가장 큰 발전을 이루었다고 평가되는 일본에서조차도 구체적인 친환경·자원절약형 건축구조시스템의 프로토타입은 제시하지 못하고 있는 실정이다. 그 이유는 환경학적 해결문제와 더불어 공학적 접근을 포함한 재난에 관한 안정성도 구조물 설계에 포함되기 때문이다. 최근 들어 비교적 지진 안전지대로 인식되어진 우리나라에서도 지진이 빈번하게 발생하고 있으며, 국내외 지진 발생 추이가 꾸준히 증가하고 있다. 그러나 기존 구조시스템이 갖고 있는 많은 구조적 제약과 대안 기술의 부족으로 문제해결의 요구에 충분히 대응하지 못하고 있을 뿐만 아니라 최근 사회문제로 까지 대두되고 있는 재건축 및 리모델링 분야의 요구를 만족시키지 못하고 있다.

따라서 국내의 건축구조 분야의 재난 극복형 구조시스템과 장수명화, 재사용 및 재활용 가능한 친환경·자원절약형 기술의 연구개발이 시급히 요구되고 있으며, 환경 친화적이고 시공성 높은 에너지 흡수형 방재장치의 기술과 경제성을 고려한 제안기술의 표준 모델링관련 연구·개발은 매우 중요한 해결방안 중 하나이다. 또한, 구조 안정성과 재난 대비에 관한 문제는 필수 불가결한 문제이므로 당면하는 문제에 대한 새로운 방안은 여러 각도에서 연구되어야 하며, 재료의 특성에 기인한 에너지 흡수장치보다 절판구조와 같은 기하학적 형상에 기인한 흡수장치의 접근이 경제적인 측면에서 보다 유리하므로 주름형 에너지 흡수장치와 같은 대안기술의 연구가 반드시 필요하다. 이와 같은 연구의 개발은 재건축 및 리모델링 분야에 있어서 장수명화, 재사용 및 재활용 가능한 환경 친화적 대안 기술의 시스템 개발로 침체일로의 건설시장에 새로운 시장으로 인식되어 블루오션을 구축해 나갈 것이다.

Ⅲ. 연구개발 수행내용 및 결과

연 차	연구 내용	연구 결과	보고서 페이지
1차년도	▪ 주름판의 전체좌굴에 대한 이론 연구	▪ 주름판의 전체좌굴에 대한 이론식과 전체좌굴에 대한 전단좌굴응력 특성에 대해서 이론적 연구를 수행하였으며, 평판의 전단좌굴 유한요소 모델링을 통한 전단좌굴 특성을 비교하였음	p.35 ~ p.107
	▪ 주름판의 국부좌굴에 대한 이론 연구	▪ 주름판의 국부좌굴에 대한 이론식과 국부좌굴에 대한 전단좌굴응력 특성에 대해서 이론적 연구를 수행하였으며, 평판의 전단좌굴 유한요소 모델링을 통한 전단좌굴 특성을 비교하였음	p.35 ~ p.107
	▪ 주름 형상 및 연성좌굴 연구	▪ 제형 주름 및 정현파형 주름판에 대한 전단좌굴응력 특성 및 두께에 따른 전단좌굴응력 특성 연구를 수행 하였으며, 두 좌굴형태에서 발생하는 연성구간에 대해서 주름의 형상에 대한 확장된 연성좌굴 형상에 대해 해석을 수행하였음	p.35 ~ p.107
	▪ 주름 형태에 대한 파라메타 분석	▪ 주름의 깊이와 주름의 길이에 대한 파라메트릭 스터디를 수행하여 구조적 성능을 분석하고 전단좌굴응력과 성능에 대한 비교 및 변화 특성을 규명하였음	p.35 ~ p.107
	▪ 주름 형태에 따른 단위모듈 제작	▪ 주름형 단위부재 모듈의 구조설계최적화 방안 구축 및 설계변수에 따른 파라메타의 최적중량 분석 수행하였음	p.108 ~ p.125
	▪ 주름판 제진장치의 축소모형 제작	▪ 일반 골조 구조물에 적용 가능한 주름판 제진장치 프로토타입 모델 제안과 확장성을 고려한 제진장치 기본 모듈러의 제작방법 연구 및 일체성 확보를 위한 구조체 고안, 전단성능의 특성 및 취약점 고찰하였음	p.108 ~ p.125
2차년도	▪ 주름판의 파라메타에 따른 제진성능 분석	▪ 정현파형 및 제형주름 형상파라메타의 설정 및 두 형상의 등가 단면 비교분석 ▪ 주름형상에 따른 좌굴응력산정과 제진성능에 필요한 좌굴범위 비교 분석	p.126 ~ p.147
	▪ 설계규준에 따른 구조설계 메커니즘 분석	▪ 정현형 및 제형 주름의 주름판 설계 메커니즘과 전단좌굴강도 이론식의 분석 ▪ 제형 및 등가 정현형 주름 형상의 설계코드별 구조설계 메커니즘 분석	p.148 ~ p.160
	▪ 주름웨브 구조설계 프로그램 개발	▪ 메타 휴리스틱 알고리즘을 이용한 해석 및 최적설계 프로세스 개발 ▪ 정현형 주름웨브 단면특성 계산 프로그램 개발 및 등록	p.161 ~ p.172
	▪ 전단좌굴 및 제진성능에 대한 실물실험	▪ 제형 주름판 전단좌굴 평가를 위한 실험체 도면 작성 및 형상 분석 ▪ 제진성능평가를 위한 제진 주름판 설치 실험대 도면 작성 및 부재설계	p.173 ~ p.234
	▪ 주름형상의 세장비에 관한 연구	▪ 제형 주름과 정현형 주름의 좌굴 경향성 비교 및 형상 특성 분석 ▪ 정현형 주름의 연성좌굴 특성에 따른 형상 파라메타의 정의 및 분석	p.126 ~ p.147
	▪ 주름웨브의 좌굴거동 및 임계하중 분석	▪ 정현형 주름웨브 보의 설계를 위한 임계하중 및 탄성좌굴 분석 ▪ 연성좌굴의 이론식과 해석결과의 비교 및 경향성 비교 및 고찰	p.126 ~ p.147
3차년도	▪ 주름강판 제진장치와 기존의 관련 진동제어 기술과의 비교	▪ 제형 및 정현파형 주름강판의 진동제어 성능 분석 ▪ 곡선주름강판의 전단 성능 실험을 통한 성능 분석	p.173 ~ p.234
	▪ 주름방향과 경계조건에 따른 전단좌굴응력 특성 분석	▪ 기하학적 특성을 갖는 파형강판의 좌굴 강도 및 거동 분석 ▪ 경계조건에 따른 제형 및 정현파형 강판의 전단좌굴강도 분석	p.35 ~ p.107
	▪ 곡선형 주름과 직선형 주름의 전단좌굴특성 비교	▪ 제형 및 정현파형 주름강판의 전단좌굴특성 비교 분석 ▪ 주름강판의 곡선길이와 접선각도에 따른 전단좌굴특성 분석	p.173 ~ p.234

	▪ 주름판의 파형에 따른 최적형상 분석	▪ 형상에 따른 주름강판의 탄성전단좌굴 특성 및 경향성 분석 ▪ 주름강판의 두께 및 곡선길이에 따른 특성 분석	p.119 ~ p.127
	▪ 주름웨브에 대한 구조 설계 메커니즘 제안	▪ 유로코드를 통한 주름웨브에 대한 구조설계 메커니즘 제안	p.108 ~ p.138
	▪ 최적형상의 제진장치 설계시방서 작성	▪ 곡선주름강판 제진장치 설계시방서(안) 작성	p.100 ~ p.107 p.245
	▪ 주름판 제진성능의 거동 분석과 특성비교	▪ 곡선주름강판의 전단 성능 실험을 통한 제진성능의 거동 및 특성 분석 ▪ 이론식을 통한 주름판 제진성능의 거동 특성 분석	p.139 ~ p.160, p.173 ~ p.234
	▪ 최적형상에 따른 전단 성능 평가모델 결정	▪ 전단좌굴특성 분석을 통한 최적형상 모델 분석 ▪ 형상에 따른 주름강판의 전단좌굴응력 분석을 통한 좌굴모드 예상	p.173 ~ p.234
	▪ 최적주름형상의 설계모형 개발	▪ 곡선주름강판 전단 성능 실험을 통한 최적설계모형 분석 ▪ 경계조건에 따른 곡선주름강판 성능 분석을 통한 최적주름 형상 제안	p.139 ~ p.160
	▪ 제진장치의 성능개선 방안 검토	▪ 형상비에 따른 성능분석을 통한 성능개선 방안 제안 ▪ 곡선주름강판 전단 성능 실험결과를 곡선주름강판 성능개선	p.173 ~ p.234
	▪ 주름판 실용화를 위한 형상성능 분석과 활용성 분석	▪ 주름판 실용화를 위한 곡선주름강판 제진장치 설계시방서(안) 작성	p.139 ~ p.160, p.173 ~ p.234

Ⅳ. 최종 연구성과 및 적용실적

1. 특허 등록

	특허명	출원/등록 구분	등록 번호	등록 국가	등록 날짜
1	라멘 골조에 설치되는 지진하중 흡수장치	등록	10-1187093-0000	대한민국	2012.09.24
2	파형 웨브가 구성된 지진하중 흡수장치를 이용한 칸막이 벽체의 시공방법	등록	10-1236575-0000	대한민국	2013.02.18
3	슬릿형 웨브가 구성된 지진하중 흡수장치를 이용한 칸막이 벽체의 시공방법	등록	10-1242978-0000	대한민국	2013.03.06
4	단위 모듈러 지진하중 흡수장치를 이용한 칸막이 벽체의 시공방법	등록	10-1242972-0000	대한민국	2013.03.06
5	칸막이 벽체 시공용 단위 모듈러 지진하중 흡수장치	등록	10-1243024-0000	대한민국	2013.03.06
6	내하성능 보강이 가능한 단위 모듈러 지진하중 흡수장치 및 이를 이용한 철골구조물 보강방법	등록	10-1372154-0000	대한민국	2014.03.03
7	단위 모듈러 지진하중 흡수장치를 이용한 철골구조물 보강방법	등록	10-1372087-0000	대한민국	2014.03.03

2. 특허 출원

	특허명	출원/등록 구분	출원 번호	출원 국가	출원 날짜
1	단위 모듈러 지진하중 흡수장치를 이용한 철골구조물 보강방법	출원	10-2013-0002259	대한민국	2013.01.08
2	내하성능 보강이 가능한 단위 모듈러 지진하중 흡수장치 및 이를 이용한 철골구조물 보강방법	출원	10-2013-0002260	대한민국	2013.01.08
3	단위 모듈러 지진하중 흡수장치 및 이를 이용한 철골구조물 보강방법	출원	10-2013-0002261	대한민국	2013.01.08
4	절개부를 갖는 지진하중 흡수장치를 이용한 내진 보강 방법	출원	10-2014-0008547	대한민국	2014.01.23
5	영구거푸집이 구비된 날개벽을 기둥에 증설하는 내진 보강 방법	출원	10-2014-0008546	대한민국	2014.01.23

3. 게재 논문

	구분	논문제목	학술지명	게재년월
1	비SCI급	최소중량설계에 의한 사인형 주름웨브보의 단면 특성	대한건축학회논문집	2012.10
2	비SCI급	사인형 주름웨브보의 이산화 최적구조설계	한국강구조학회논문집	2012.12
3	비SCI급	유로코드를 이용한 주름웨브보의 최적설계 연구	한국공간구조학회지	2012.12
4	비SCI급	ABAQUS를 이용한 정현파형 주름판의 전단좌굴해석과 경계조건에 관한 연구	대한건축학회논문집	2013.11
5	비SCI급	차분진화알고리즘을 이용한 정현파형 주름웨브보의 최적설계프로그램 개발	대한건축학회논문집	2013.12
6	비SCI급	정현파형 주름강판의 전단좌굴특성 분석	한국구조물진단유지관리공학회 논문집	2014.05
7	비SCI급	제형 및 정현파형 주름강판의 전단좌굴특성 비교 연구	대한건축학회논문집	2014.09
8	비SCI급	형상에 따른 주름강판의 탄성전단좌굴 특성 및 경향성 분석 연구	한국구조물진단유지관리공학회 논문집	2014.11
9	비SCI급	제형 및 정현형 주름강판의 전단좌굴 및 연성좌굴 경향성 비교 연구	대한건축학회논문집 구조계	심사중
10	SCI급	Application of Multistage Homotopy Perturbation Method to the Nonlinear Space Truss Model	International Journal of Steel Structures	게재확정 (발간예정)
11	SCI급	Minimum Weight Design of Sinusoidal Corrugated Web Beam using Differential Evolution Algorithm	International Journal of Steel Structures	게재확정 (발간예정)
12	SCI급	An analytical approach for nonlinear dynamic system of shallow arches using higher order Taylor method	Journal of Central South University	심사중
13	SCI급	A Study on the Elastic Shear Buckling Characteristic and Tendency of the Corrugated Plate According to Its Shape	Materials	심사중

4. 학술회의 발표 논문

	논문제목	학술회의 명칭	발표일
1	사인형 주름웨브 보의 최소중량설계와 최적단면 특성	대한건축학회 2012 춘계학술발표대회	2012.04
2	A STUDY ON THE APPLICATION OF EQUIVALENT PLATE ELEMENT FOR DYNAMIC ANALYSIS OF ONE-WAY HOLLOW SLAB	2nd International Conference on Computational Design in Engineering (CODE2012)	2012.11
3	DYNAMIC ANALYSIS OF SPATIAL STRUCTURE ACCORDING TO THE ASPECT RATIO AND COLUMNS	2nd International Conference on Computational Design in Engineering (CODE2012)	2012.11
4	MINIMUM WEIGHT DESIGN OF CORRUGATED WEB GIRDER USING GA	2nd International Conference on Computational Design in Engineering (CODE2012)	2012.11
5	GA을 이용한 정현파형 주름판의 중량최적설계 프로그램 개발	한국구조물진단유지관리공학회 2013년 봄 학술발표회	2013.04
6	차분진화알고리즘을 이용한 정현파형 주름판의 중량최적설계	2013 한국공간구조학회 춘계학술발표회	2013.05
7	정현파형 주름판의 전단좌굴특성에 관한 파라메트릭 스터디	2013년도 한국강구조학회 학술대회	2013.06
8	A Study on Shear Buckling of Sinusoidal Corrugated Plate in Accordance with Boundary Condition	Proceedings of the International Association forShell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2013	2013.09
9	정현파형 웨브의 탄성좌굴강도 분석	2013 대한건축학회 추계학술발표대회	2013.10
10	정현파형 주름판의 전단좌굴경향성에 관한 연구	2013 한국구조물진단유지관리공학회 가을 학술발표회	2013.10
11	정현 및 제형 주름강판의 좌굴거동에 관한 해석적 연구	2014 한국구조물진단유지관리공학회 봄 학술발표 논문집	2014.04
12	주름보의 최소중량설계를 위한 유전자알고리즘과 차분진화기법의 비교 연구	2014 한국공간구조학회 춘계학술발표대회 및 정기총회	2014.05
13	형상에 따른 주름강판의 전단좌굴응력에 관한 연구	2014 한국공간구조학회 춘계학술발표대회 및 정기총회	2014.05
14	An Investigation of the Shear Buckling Stress of Sinusoidal Corrugated Plate	Proceedings of the IASS-SLTE 2014 Symposium“Shells, Membranes and Spatial Structures: Footprints”	2014.10

5. 소프트웨어 등록

	S/W 명칭	창작일
1	SPSCWB (정현파형 주름웨브 보의 단면성질 계산 프로그램)	2013.09.01
2	정현파형 주름웨브 단순보의 최적설계 프로그램(ODSCWSB_DE)	2014.10.01

6. 인력양성

	취득학위	이름	성별	학위취득일
1	석사	유미나	여자	2013.01.09
2	석사	곽의신	남자	2015.02.27

7. 산학연간 기술지원

	교육명	교육내용	교육대상	교육일시	구분
1	주름웨브보의 특성 및 건축물에 적용 방법	□ 주름웨브보의 구조적 개요 및 특성 - 주름웨브보의 휨 및 전단에 대한 구조적 특성 - 곡선 주름웨브보와 제형 주름웨브보의 비교 - 주름웨브보와 관련된 주요 구조설계기준 □ 주름웨브보의 기존 연구개발 현황 - 미국 PACO사의 주름 웨브 I형 단면 형강 개발 - 프랑스, 일본에서의 교량에 적용 사례 □ 주름웨브보의 적용시 주요 고려사항 - 웨브의 높이 및 주름 형태에 따른 전단좌굴 - 주름웨브보의 횡좌굴, 피로파괴에 대한 웨브의 거동, 주름 웨브 거더의 플랜지 휨저항 - 사인형 주름 웨브의 형상파라메타에 따른 전단좌굴거동 - 사인형 주름 웨브를 이용한 진동제어장치의 메커니즘	㈜ITS 엔지니어링	2012.11.23	교육훈련
2	사인형 주름웨브의 전단해석 및 설계	□ 주름웨브보의 구조적 개요 및 특성 - 주름웨브보의 휨 및 전단에 대한 구조적 특성 - 곡선 주름웨브보와 제형 주름웨브보의 비교 - 주름웨브보의 주요 연구개발 동향 □ 주름웨브 관련 구조설계기준 - DASt-R015에 의한 주름웨브설계 - Eurocode 3_ EN 1993-1-5에 의한 주름웨브설계 - DIN 18800에 의한 주름웨브설계 □ 사인형 주름웨브의 해석과 제진장치로서의 이용 방법 - 주름웨브의 전단설계기준 및 제안된 설계식에 따른 주름웨브의 전단좌굴해석 - 제진장치로서의 사인형 주름웨브의 메커니즘	㈜구조기술사 연합법인	2012.11.30	교육훈련
3	주름웨브보의 전단좌굴 특성과 설계방법	□ 주름웨브보의 구조적 개요 및 전단좌굴 특성 - 주름웨브보의 휨거동 및 전단거동 특성 - 일반 H형강보와 주름웨브보의 구조적 거동 특성 비교 □ 주름웨브보의 해석을 위한 소프트웨어 - ABAQUS를 이용한 주름웨브보의 해석 방법 - 유전자 알고리즘 및 차분진화알고리즘에 의한 해석방법 □ 주름웨브보의 설계를 위한 단면특성 산정 방법 - 주름웨브보의 외부높이, 단면적, 환산단면적, 단위길이 중량, 표면적, 단면이차모멘트, 단면이차 반경 등의 기본적인 단면성질 정의 방법 - 현재 사용되는 주름웨브보 설계 소프트웨어와 개발된 소프트웨어 비교	㈜ITS 엔지니어링	2013.10.25	교육훈련

4	정현파형 주름판의 해석 및 설계시 유전자알고리즘 적용 방법	□ 주름강판 부재의 개요 - 주름강판의 전단좌굴 특성 - 정현파형 주름강판과 제형주름강판의 구조적 특성 비교 - 정현파형 주름강판의 개발 배경 및 향후 전망 □ 주름웨브보의 최적설계프로그램 - 유로코드 설계식에 따른 정현파형 주름강판의 최적설계 방법 - 실변수 유전자알고리즘에 의한 주름강판의 최적화 기법 - 차분진화알고리즘에 의한 주름강판의 최적화 기법 - 제안된 최적화 알고리즘과 향후 프로그램 개발 방향 □ 정현파형 주름강판 제진장치 설계시 적용방법 - 주름강판의 전단성능에 대한 파라메타와 최적화 기법 - 주름강판 제진장치의 적용방안	㈜구조기술사 연합법인	2014.11. 12.	교육훈련

8. 연구개발 관련 홍보

	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-techUrban16	Control Device of Thin Corrugated Plate	Phoenix Island, Jeju, Korea	2012.11.15
2	한국강구조학회지 24권 6호 학술기사	사인형 주름웨브 판에 대한 전단좌굴 해석과정과 좌굴특성 및 전단설계	한국강구조학회지 24권 6호 학술기사	2012.12.31
3	2013 한국구조물진단유지관리공학회 봄학술발표회 및 포럼 임시총회	ABAQUS를 이용한 주름판의 전단좌굴해석과 경계조건	부산 해운대 그랜드호텔	2013.04.12
4	2013 한국구조물진단유지관리공학회 가을 학술발표	파라메트릭 스터디를 통한 정현파형강판의 전단좌굴응력 변화 특성	강원도 쏠비치 호텔&리조트	2013.10.11
5	2014 학국구조물진단유지관리공학회 봄 학술발표	주름판의 형상에 따른 전단좌굴특성 비교 연구	경북대학교 글로벌플라자	2014.04.10. ~ 2014.04.12
6	2014 한국구조물진단유지관리공학회 가을 학술발표	주름보를 이용한 단순구조물의 최소중량설계	제주 롯데시티호텔	2014.10.01. ~ 2014.10.03
7	2014 한국구조물진단유지관리공학회 가을 학술발표	파형강판의 형상에 따른 탄성전단좌굴 특성 분석 연구	제주 롯데시티호텔	2014.10.01. ~ 2014.10.03

9. 주요 실적

- 전단좌굴 및 제진성능 실물실험을 통한 최적 곡선주름 강판 모형 제안(5건) 및 모듈러 제진장치 보강기술 제안(2건)

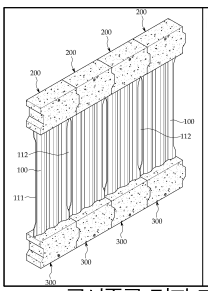
- 최적 형상 제진장치 설계 및 시공을 위한 설계 프로그램(2건) 및 시방서 제안

- 기존 건축용 제진장치(MR댐퍼, 창호형 댐퍼, 탄소섬유 보강보강 등) 대비 공사비 900만원(건당) 절감 및 재래식 제진공법(RC전단벽 보강 등) 대비 10-20일 공기단축예상, 철골 브레이스 공법에 비해 설치가 간편하고 마감이 용이함.

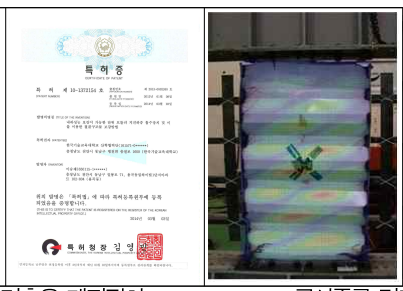
구분	곡선주름 강판	철골 브레이스 공법	창호형 댐퍼
공법	건식공법	건식공법	건식공법
개소당 평균 공사금액	1,150만원(보강) +250만원(마감공사)	1,100백만원(보강) +300만원(마감공사)	1,970백만원(보강) +330백만원(마감공사)
특징	저렴한 가격(박판사용). 모듈화 제품은 시공 간편, 중장비 불필요 및 부분교체 가능. 절곡공정 어려움.	가장 일반적인 공법. 공사기간 다소소요. 반입 시 중장비 필요함. 현장 적용성 우수. 가격 저렴함.	시공 간편함(공장생산). 반입 시 중장비 필요. 지진 후 댐퍼교체. 진동제어 탁월하지만 고가의 제품.

- 참여기업과 기술이전을 위한 기술실시계약 1건을 체결((주)아이스트엔지니어링, 5,000만원)하였으며, 시공업체(㈜산돌기업 등)와 실시계약 체결 예정

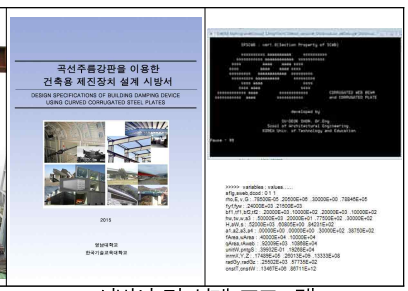
- 노후화된 건축물을 대상으로 지속적인 홍보 및 설명회를 개최하여 기술이전 확대 추진('15년 개최 예정)



< 곡선주름 강판 건축용 제진장치 >



< 곡선주름 강판 실물 실험 >



< 시방서 및 설계 프로그램 >

Ⅴ. 연구성과의 기대효과 및 활용방안

요약서		
연구성과	기술적 기대성과	• 장수명화를 위한 건축구조물의 내진 보강설계 가능 • 주름관련 산업분야의 유닛화를 통한 구조개선 • 주름형상 설계규준의 분석을 통한 국내형 설계 방안 제시로 안전성 확보 • 관련 해석 및 설계기술의 자립과 시공기술의 자립 • 전문인력 양성으로 인한 기술집약적 산업으로의 연구인프라 구축가능 • 개발기술의 축적과 보급을 통한 산업 전반의 시너지 효과 기대 • 주름관련 파생상품 개발 가능성 제공 • 중소기업형 기술세분화로 필요 연구개발과제 분할활용 가능
	사회·경제적 파급효과	• 유닛화된 제진장치의 시공과 제작의 경비 절감 가능 • 독자적 기술확보를 통한 국제 경쟁력 강화와 국가 이미지 제고 • 시공성 확보를 위한 유닛 구조에 대한 비용절감 가능 • 형태저항형 곡면판요소에 대한 전문 연구인력양성 • 주름관련 유닛의 개발로 인한 타 연계산업 확장 가능성 제공 • 형태적 설계방법에 따른 재료절감효과 기술 제공 • 건설 사업비 최적화 가능 및 재료비 절감 가능 • 건설경기 활성화에 기여할 수 있으며, 고용창출효과 가능
활용방안		• 에너지 흡수형 제진장치의 개발로 인한 구조물의 장수명화 가능 • 기존 노후화 공공건축물의 내진설계 강화방안 제공 • 재료비 절감과 기술 확보로 인한 경쟁상품 개발가능 • 주름판 설계프로그램의 개발로 인한 설계가능 환경 제공 • 표준 모델의 제시로 인한 최적화된 주름 유닛의 구현 • 표준 모델에 대한 시방서 제시로 인한 기술의 정착 및 확산가능 • 제진장치 평가자료로 활용 가능한 기초 연구데이터 구축 • 관련특허 출원 및 등록으로 인한 지적 재산권 확대 • 핵심연구 아이디어를 통한 주름관련 기초연구자료 확보 • 주름웨브 복합 구조물에 대한 역학적 자료 제공가능 • 최적 주름모델의 성과물에 대한 설계응용

SUMMARY

Following to the government's 2002 National Technology Road Map, R&D businesses and studies were carried out in various fields after setting top five visions of national science technology development aiming at the world's 10th national synthetic competitiveness within 10 years. Based on 2010, the national GDP was recorded to be 25,000 dollars per capita and now it's time to materialize the vision of technology development. Among the above materialized road maps of environment/energy frontier promotion sector, the core development strategy of construction industry field is to construct infrastructure for coexistence of human and nature. Development of eco-friendly and resource-saving typed construction technology is the future and present issue of construction.

Until now, eco-friendly and resource-saving typed construction technology of relative industry field was recognized only as problems of facility and environment sector. However, even Japan where eco-friendly and resource-saving typed construction technology was most developed is also not able to suggest prototype of building construction system for detailed eco-friendly and resource-saving type. The reason is that construction design includes stability against disasters including technological approach as well as environmental solution problem.

Recently, there have been earthquakes frequently occurred even in Korea which used be recognized as a comparatively safety zone while internal and external earthquake trend is constantly increasing. However, due to many restriction of current structural system and lack of alternative technology, problem solving demand is not responded enough, nor demand of reconstruction and remodeling field recently raised as a social problem is satisfied.

Therefore, it's urgently required to research and develop disaster recovery typed construction system in building construction field and eco-friendly and resource-saving technology available for long life, re-sue, and recycling. Standard modeling related research and development of suggested technology concerning technology and economic feasibility of energy absorbing disaster prevention device with high construct ability is one of critical solving methods.

In addition, as structural stability and preparation against disaster related matters are indispensable, new method to solve the present problem should be studied through various angles. And as approaches to absorbing device resulting from geometrical shape such as folded plate structure is more advantageous than energy absorbing device resulting from characteristics of material in terms of economics, studies about alternative technique such as wrinkle-type energy absorbing advice are essential. The above research and development will establish blue oceans by making new markets through

system development of eco-friendly alternative technology available for long-life, re-use, and recycling in reconstruction and remodeling field of currently depressed construction market.

CONTENTS

[REPORT SUMMARY DOCUMENT] ····· 2
[SUMMARY(Korean)] ····· 3
[SUMMARY(English)] ····· 12
[CONTENTS(English)] ····· 14
[CONTENTS(Korean)] ····· 16

Chapter 1. Research projects outline ····· 18
Paragraph 1. Purpose and need of research and development ··· 18
Paragraph 2. Domestic and international technology development condition of related area ····· 25
Paragraph 3. Position a result of research in the related fields ··· 29

Chapter 2. Research and development performance contents and result ····· 30
Paragraph 1. Research performance strategy and methodology ····· 30
Paragraph 2. Research performance process and contents ····· 35
Paragraph 3. Research performance result and verification method of result ····· 241

Chapter 3. Final research result and application result ····· 246
Paragraph 1. Detailed description for each key performance ···· 246
Paragraph 2. Research result list ····· 251

Chapter 4. Research goal achievement and effect ····· 257
Paragraph 1. Research development final goal achievement ····· 257
Paragraph 2. Descriptive effect analysis on research development result ····· 263
Paragraph 3. Economic effect analysis on research development result ····· 264
Paragraph 4. Political effect analysis on research development result

..... 267
Chapter 5. Utilization of research result and need for additional research 269
Paragraph 1. Research and future application plan 269
Paragraph 2. Need for additional research 271

[Reference] 273
[Supplement] 283

목 차

[보고서 요약서] ····· 2
[요약문] ····· 3
[SUMMARY] ····· 12
[CONTENTS] ····· 14
[목 차] ····· 16

제1장. 연구과제의 개요 ····· 18
 1절. 연구개발의 목적 및 필요성 ····· 18
 2절. 관련분야의 국내외 기술개발 현황 ····· 25
 3절. 연구개발결과가 관련분야에서 차지하는 위치 ····· 29

제2장. 연구개발 수행 내용 및 결과 ····· 30
 1절. 연구수행 전략 및 방법론 ····· 30
 2절. 연구수행과정 및 내용 ····· 35
 3절. 연구수행결과 및 결과의 검증 방법 ····· 241

제3장. 최종 연구성과 및 적용실적 ····· 246
 1절. 핵심 성과별 세부설명 ····· 246
 2절. 연구성과 목록 ····· 251

제4장. 연구목표 달성 및 효과 ····· 257
 1절. 연구개발 최종목표 달성도 ····· 257
 2절. 연구개발 성과의 기술적 효과분석 ····· 263
 3절. 연구개발 성과의 경제적 효과분석 ····· 264
 4절. 연구개발 성과의 정책적 효과분석 ····· 267

제5장. 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성 ····· 269
 1절. 연구성과 향후 활용방안 ····· 269
 2절. 추가연구 필요성 ····· 271

[참고문헌] ····· 273
[부 록] ····· 283

제1장 연구개발과제 개요

1절. 연구개발의 목적 및 필요성

1. 연구개발의 목적

정부의 2002년 국가기술지도(National Technology Road Map)에서는 10년 후 1인당 국내총생산량(GDP) 2-3만 달러, 국가 종합경쟁력 세계 10위를 지향한 5대 국가과학기술발전 비전을 설정하여 다양한 분야에서 R&D사업과 연구가 진행되어 왔으며, 2010년 기준 1인당 약 2.5만 달러의 GDP를 기록하고 있으며, 구체화된 기술발전 비전의 장이 열릴 시기이다. 상기 비전을 구체화한 환경/에너지 프론티어 진흥 부문 로드 맵에서 건설산업 분야의 발전 전략의 핵심은 인간과 자연이 상생하는 인프라 건설로서 친환경·자원절약형 건축기술의 개발은 건축의 미래 비전이자 현재의 이슈라고 할 수 있다.

지금까지 건설산업 분야의 친환경·자원절약형 건축기술은 설비부문과 환경부문에서의 문제로만 인식되어 왔다. 그러나 건설산업 분야의 친환경·자원절약형 건축기술이 가장 큰 발전을 이루었다고 평가되는 일본에서 조차도 구체적인 친환경·자원절약형 건축구조시스템의 프로토타입은 제시하지 못하고 있는 실정이다. 그 이유는 환경학적 해결문제와 더불어 공학적 접근을 포함한 재난에 관한 안정성도 구조물 설계에 포함되기 때문이다. 최근 들어 비교적 지진 안전지대로 인식되어진 우리나라에서도 지진이 빈번하게 발생하고 있으며, 국내외 지진 발생 추이가 꾸준히 증가하고 있다. 그러나 기존 구조시스템이 갖고 있는 많은 구조적 제약과 대안 기술의 부족으로 문제해결의 요구에 충분히 대응하지 못하고 있을 뿐만 아니라 최근 사회문제로 까지 대두되고 있는 재건축 및 리모델링 분야의 요구를 만족시키지 못하고 있다.

따라서 국내의 건축구조 분야의 재난 극복형 구조시스템과 장수명화, 재사용 및 재활용 가능한 친환경·자원절약형 기술의 연구개발이 시급히 요구되고 있으며, 환경 친화적이고 시공성 높은 에너지 흡수형 방재장치의 기술과 경제성을 고려한 제안기술의 표준 모델링관련 연구·개발은 매우 중요한 해결방안중 하나이다. 또한, 구조 안정성과 재난 대비에 관한 문제는 필수 불가결한 문제이므로 당면하는 문제에 대한 새로운 방안은 여러 각도에서 연구되어야 하며, 재료의 특성에 기인한 에너지 흡수장치보다 절판구조와 같은 기하학적 형상에 기인한 흡수장치의 접근이 경제적인 측면에서 보다 유리하므로 주름형 에너지 흡수장치와 같은 대안기술의 연구가 반드시 필요하다. 이와 같은 연구의 개발은 재건축 및 리모델링 분야에 있어서 장수명화, 재사용 및 재활용 가능한 환경 친화적 대안 기술의 시스템 개발로 침체일로의 건설시장에 새로운 시장으로 인식되어 블루오션을 구축해 나갈 것이다.

2. 연구개발의 필요성

가. 구조시스템 측면에서 연구의 필요성

- 건설산업 분야에서 가장 적극적이고 항구적인 친환경·자원절약형 건축기술은 장수명화와 재사용 가능한 건축구조시스템의 개발이 필요함
- 기존의 건축구조시스템이 비록 재래적이라 할지라도 오랜 시간동안의 자리매김은 시스템으로서의 제도적 혹은 사회적 특성상 다른 제안이 없는 경우가 많음
- 습식공법의 철근콘크리트의 구조물에서는 재활용을 기대하기 어려울 뿐 아니라 환경친화적 방향의 모색은 재료적 접근이 먼저 이루어짐
- 폐콘크리트와 철근의 재활용을 위한 부가되는 비용과 환경부하는 감당하기 힘든 상황임
- 비교적 재활용률이 높은 철골구조에서도 용접이 주는 부재의 일체성은 재사용 해체를 위한 추가경비의 발생
- 대표적인 두 구조시스템에 있어 실질적인 문제를 해결하는 데는 설계, 시공성 및 유지관리측면 등의 모든 측면을 고려한 방안이 필요
- 특히 **친환경·장수명화를 위한 구조시스템의 설계 패러다임은 문제의 본질을 정성적**으로 다루게 되므로 정량적인 판단을 하기 힘듦
- **시공 및 유지관리의 측면에서 붕괴모드를 컨트롤하기 위한 에너지 흡수장치의 다양한 개발과 이와 유사한 대안의 마련**이 매우 중요

나. 구조설계의 기술적 측면에서 연구의 필요성

- 기존의 건축구조시스템의 설계 메커니즘은 연직하중과 지진하중 등의 수평하중에 직접 저항하도록 설계되는 재래적 방법으로 구조물 자체가 에너지를 흡수하고 저항하며 연성거동을 하기 위해 소성변형 함
- 구조체 및 접합부 등의 소성변형이 곧 비구조체의 손상으로 이어지고, 이러한 영구변형은 구조물의 재사용을 불가능
- 최근에 들어 구조 자체는 탄성거동하고, 지진 등으로 야기되는 에너지를 소산시키기 위하여 비용면에서 효과적인 에너지 흡수장치의 개발
- 에너지 흡수형 강재 댐퍼를 사용하는 경우, 주 구조체에 비해 높은 강성을 갖는 강재 댐퍼가 소폭의 변위에 소성화 함으로서 이력에 의한 지진에너지를 흡수
- 에너지 흡수형 제진장치의 이용은 손상순서의 제어와 함께 붕괴모드를 컨트롤 할 수 있는 구조시스템을 개발하게 되는 것이며, 기존의 시스템의 전역적인 변형을 유도하지 않으면서도 획기적인 영향력이 발생
- 붕괴모드의 컨트롤에 따른 에너지 **흡수형 제진장치의 개발은 시스템적 형태변형이 없더라도 환경친화적·에너지 절감형 시스템을 유도**할 수 있는 핵심 기술임

다. 지진에 대비한 설계 패러다임 측면에서 연구의 필요성

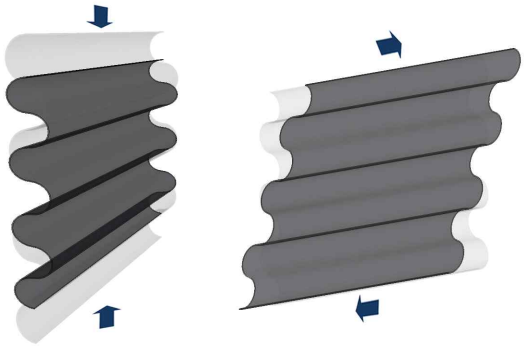
- 국내의 지진에 대비하는 구조설계는 1985년 멕시코 대지진을 계기로 1986년 내진설계법이 마련되어 1988년부터 적용되다가 2000년에 내진설계 적용대상을 5층 이상으로 강화하였으며, 2005년(건축구조설계기준, KBC 2005제정) 신내진기준을 적용
- 기상청에 따르면 2011년 12월까지 우리나라 발생한 규모 2.0이상 지진은 총 51회였고, 그 중 규모 3.0이상은 9회 발생
- 대규모 지진에 대한 영향에서는 벗어난다 할지라도 여전히 잠재적 방어와 안전성의 구축이 필요한 지대임은 분명함
- 지질학자들은 중국과 일본의 지진이 한반도에 직접 영향을 끼치기 어렵다면서도 당장 눈에 드러나진 않더라도 먼 곳에서 한반도로 전해져 쌓이는 지진에너지의 확산에는 반드시 관심을 기울여야 한다고 강조함
- 향후 노후 시설이나 공공건물 및 학교와 같은 교육시설물들의 지역사회 **방재거점으로서의 역할을 수행하기 위한 안전성의 확보와 제진설계의 확산**은 시기적절한 연구과제임
- 주름형 강판의 이용에 대한 제도적 연구와 규준을 위한 지침안 등의 개발과 연구는 향후 다른 산업에의 응용에도 적극적인 반영을 유도할 수 있으며, 산업 전반의 재난대비 대응책으로 반드시 필요함

라. 형태적 저항의 기술·경제적 측면에서 연구의 필요성

- 건축·토목 구조물의 구조설계에 있어서 형태적 변화에 따른 저항능력의 상승은 면적이나 체적변화를 통한 저항능력의 상승에 비해 보다 정성적인 면이 더 부각되는 방법임
- 과거 건축물들을 통해 볼 때, 절판구조, 아치구조나 쉘구조와 같은 역학적으로 우수한 형상을 이용하여 문제를 해결
- 재료적 성능의 변화를 시도하는 방법과 비교해 아이디어 상품임에는 분명하지만 극단의 문제를 극복하는 것이 아니라면 두 가지 측면중 하나만 고려하여도 해결책을 얻을 수 있음
- 평면의 재료에 형태적 변형, 즉 곡률을 주어 형상의 역학적 가치상승을 기대하는 방법은 많은 측면에서 유리함
- 더 얇게 혹은 더 세장하게 부재를 형성할 수 있는 것을 감안한다면 재료의 사용을 최소화 할 방안을 제시하게 됨
- 주름형 구조물의 경우는 초기 항공기의 동체에 적용되기도 하였고, 지금도 많이 산업과 공학 전반에 응용되고 있으며, 컨테이너, 지붕, 항공기 동체, 교량 및 공학 연구 결과물들의 다수에 응용됨
- 평면의 재료로 재료적으로 이방성의 성질에 해당하는 효과(아코디언 효과)를 부여할 수 있을 뿐만 아니라 전단에 대한 능력을 극대화함
- 이와 같은 능력의 개발들은 횡력저항시스템에 대한 수직력의 감쇠 또는 그 반대의 역

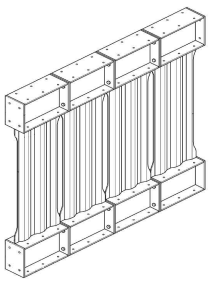
할을 감당할 수 있게 함

- **역학적 성능을 우수하게 하면서도 경제적인 성능을 유도할 수 있는 형태적 저항능력**의 개발 연구는 재료적 측면에서 바라보는 연구 이상으로 중요함
- 역학적 성능에서 반드시 고려해야하는 주름의 전단좌굴에 대한 정량적 평가기준에 관한 최적형상의 표준 모델은 생산성과 시공성을 감안하면 반드시 정의되어야 함

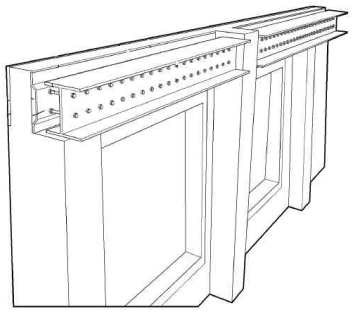


아코디언 효과　　전단저항능력

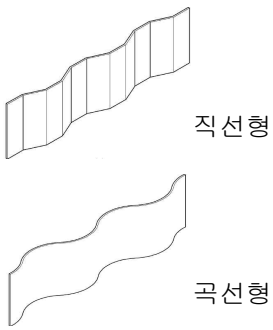
- 에너지 흡수장치에 대한 개발에 있어서 시공 및 조립이 간편하게 블록화 할 수 있는 방안의 연구와 표준 모델을 위한 해석적 연구 및 기존의 벽판에 대한 내진성능도 함께 올릴 수 있는 다양한 각도의 특허와 연구는 경제성 향상을 위해 매우 중요



시공성을 고려한
최적표준유닛



제진댐퍼의 설치기구



마. 경제・산업적 측면에서 연구의 필요성

- 건축물의 리모델링을 어렵게 만드는 요인은 평면 가변성의 부족, 구조체와 설비의 공간 공유 그리고 보수·보강비용의 과다 등이 있음
- 기존의 건축물을 구성하는 공법과 구법은 신축과 폐기 시에 산업 폐기물을 대량 배출할 뿐만 아니라 재사용 혹은 재활용을 어렵게 함
- 건축물 특히 공동 주택은 철근 콘크리트를 현장 타설하는 벽식 구조의 습식 공법위주로 이루어지고 현장에서 절단 가공하여 시공 조립함으로 폐자재의 배출감소가 어려움

- 가능한 신축을 억제하는 것이 가장 효과적인 친환경 자원절약 정책이 될 수 있음
- 최근 정부에서는 이와 같은 재건축에 따른 사회적·경제적 비용의 심각성을 인식하고 이들의 억제정책과 함께 리모델링 장려책을 적극 도입
- 신축건물에 대한 설계 시 향후 예상되는 리모델링에 대비하여 설계하도록 법제화 하는 문제도 연구함
- 재사용성 개념이 포함되는 **순환형 사회구조에 적절히 대응**하기 위해서는 재사용 및 해체 가능하고 재활용이 용이한 **장수명화된 건축구조 시스템의 요소개발**이 경제적이며, 산업 전반에 걸쳐 시급히 요구됨
- **강재 사용량의 감소로 인한 이산화탄소 배출량의 감소**는 녹색성장을 이루고자 하는 산업사회의 니즈를 만족시키는 결과를 얻을 수 있음

바. 사회・문화적 측면에서 연구의 필요성

- 친환경·자원절약형 건축산업의 유도는 녹색산업의 근간이 되는 발상의 제공과 함께 사회·문화적 이슈를 함께 지니고 있어야 함
- 세계는 지금 기후변화로 상징되는 환경위기와 고유가로 대표되는 자원 위기에 동시에 직면해 있으며, 특히 기후변화 문제는 연이은 기상재해를 유발하는 것은 물론 생태계 질서를 근본적으로 뒤흔들어 인류의 생존을 위협함
- 에너지 다소비 체제가 지속될 경우 세계가 치러야 할 경제적 손실이 막대한 것은 예측 가능하며, 에너지·자원 부족현상을 부추김으로 인한 가격상승의 가속화는 지속됨
- 선진국들은 이미 자원의 효율적·환경 친화적 이용에 국력을 집중하고 있으며, 녹색산업과 녹색성장은 이제 개개의 국가적 문제를 넘어선 범세계적 인류의 이슈를 함께 지닌 사회·문화적 측면에서의 공감대를 형성
- 이런 패러다임에 입각한 저탄소 녹색성장은 재료적 측면에서의 과다한 경쟁보다 아이디어 측면의 기술 융합이 보다 경쟁적이고 경제적임
- 양질의 기술적 경제성장은 에너지효용에 대한 극대화를 기대할 수 있으며, 기후변화 등에 대한 간접적 영향을 기반으로 에너지 안보를 이루는 선순환 계기를 도모할 수 있음
- **융복합 기술에 대한 문화적 이해도**를 높일 수 있을 것이며, 현 시점의 정책적·사회적 시점임을 생각한다면 지금의 과제는 **녹색성장의 패러다임에 부합된 시의성**을 가지게 됨

3. 연구개발의 범위

곡선 주름강판을 이용한 건축용 제진장치 개발과제의 최종 목표를 달성하기 위해 본 연구과제에서는 6개의 목표로 세분화하고 그에 합당한 연구를 진행할 것이다. 각 목표는 아래와 같다.

- 주름판의 전단좌굴성능 평가
- 주름판을 이용한 제진장치 모형 개발
- 주름웨브의 구조설계 프로그램 개발
- 주름웨브의 실물실험을 통한 성능평가
- 제진장치 표준 모델 및 설계방법 개발
- 최적주름형상 제진구조모델 개발로 이루어진다.

각각의 주요 연구내용은 다음과 같다.

- 전단 좌굴 성능 평가를 위한 이론 연구
- 주름형태의 단위 모듈 모형제작
- 주름판을 이용한 제진장치 모형제작
- 상용프로그램을 이용한 전단좌굴해석
- 주름웨브 구조설계 프로그램 개발
- 전단좌굴성능평가를 위한 실물테스트
- 세장비에 따른 전단좌굴하중 분석
- 전역 탐색기법을 이용한 최적설계 연구
- 제진장치 표준 모델 및 설계방법 제안
- 최적형상에 따른 전단좌굴능력 실물테스트
- 최적주름형상 제진구조모델 개발

이를 각 연차별로 정리하면 다음과 같다.

1차년도에 전단좌굴 성능평가를 위한 이론 연구, 주름형태의 단위 모듈 모형제작, 주름판을 이용한 제진장치 모형제작을 수행한다.

2차년도에 상용프로그램을 이용한 전단좌굴해석, 주름웨브 구조설계 프로그램 개발, 전단좌굴 성능평가를 위한 실물테스트, 세장비에 따른 전단좌굴하중 분석을 수행한다.

3차년도에 전역 탐색기법을 이용한 최적설계 연구, 제진장치 표준 모델 및 설계방법 제안, 최적형상에 따른 전단좌굴능력 실물테스트, 최적주름형상 제진구조모델 개발을 수행한다.

최종연구목표의 결과물에 대해서 에너지 흡수형 제진장치 개발이 당해 기술 연구성과물에 해당되며, 이들 연구를 위해 원천기술 아이디어의 기술정립과 원천핵심 세부기술을 유닛화하기 위한 목표를 아래와 같이 두 가지로 범위를 나누어 계획을 추진하도록 한다.

- 주요 연구목표 Ⅰ - 최적주름형상 제안 및 지침서
  : 최적주름형상을 제안하고 표준 모델을 제시하기 위한 이론적인 설계와 프로그램을 개발하여 실무 설계에 적용
- 주요 연구목표 Ⅱ - 제진주름강판의 성능검증
  : 제진주름강판의 성능을 검증하기 위한 표준 모델의 모형과 실험을 통한 성능검증을 시도하여 평가 자료를 제시함과 더불어 다수의 특허 획득으로 연구 개발성과의 실용화

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

2절. 관련분야의 국내외 기술개발 현황

1. 국내 기술 및 산업 동향

- 국내 연구 인프라의 경우 건축구조물과 쉘형 또는 곡선형 주름관련연구와의 연관성이 있는 학계 연구진은 그리 많지 않음
- 주로 직선형 파형강판이나 강관의 전단좌굴에 관한 연구가 대부분이고, 파형웨브의 경우 주로 교량에 관한 연구가 관심의 대상임
- 최근 국내에서도 “일선대교”와 같이 Box Girder의 웨브에 경제적인 설계를 위해 파형강판을 이용한 교량이 건설됨



▪ 일선대교
▪ 형식 : 11경간연속
▪ 경간(m) : 801
▪ 폭(m) : 21.2
▪ 완공(年) : 2005

- 파형웨브에 대한 대부분의 연구자들은 건축물의 내진이나 제진에 관한 연구는 수행된 적이 없고, 이들의 내용은 전단저항메커니즘에 대한 연구로서 일부 발표된 바 있음
- 동적 문제에 관한 제어나 에너지 흡수장치에 관한 연구 또는 주름의 파형 형상에 대한 이력특성을 고려한 연구와 연구 인프라는 국내에서는 미비한 실정임

형상에 관한 연구와 내진 및 제진장치의 개발의 경험을 소유한 연구자들은 아래 표에 보는 바와 같다.

국내 학계 전문가(쉘/주름형상 및 내진/제진연구 관련)

연구기관 /연구자	관련연구	연구분야 및 내용
영남대학교/ 강주원	구조물 동적 제어시스템	내진 및 제진시스템 개발, 초대공간 구조물 동적해석
한국기술교육대학교/ 손수덕	주름판 최적설계	사인형 주름웨브 최적설계/해석, 쉘구조의 정적 및 동적안정해석
한국기술교육대학교/ 이승재	에너지 흡수형 제진댐퍼	강구조물 에너지 흡수형 제진장치, 건축구조물 정밀센서 및 측정
부산대학교/ 오상훈	제진댐퍼	제진댐퍼의 동적 거동 규명
조선대학교/ 조창근	제진댐퍼	제진댐퍼의 구조물 적용

- 시공 및 생산 시스템을 구축한 산업체의 경우도 현재 국내에서 생산 가능한 파형강판은 내진 또는 제진장치로서의 생산업체는 전무하고 주로 콘크리트 복합형 교량시공 및 이와 관련된 기술결과물임
- 곡선형의 경우, (주)에스아이사의 파형강판을 이용한 암거나 도로의 소규모 터널용 강판 및 강관재료의 생산이 있지만, 이들 대부분의 사용영역도 도로용 암거이거나 지붕구조물을 대상으로 하고 있으며, 내진 및 제진 시스템과는 무관함
- 대상구조물에 따라 다르게 제작 및 시공되는 문제점들이 발생
- 최적의 값을 구한다는 것은 상당히 중요한 연구이며, 각각의 경우에 합당하고 경제적인 최적 표준모델의 형성이 필요함

2. 국외 기술 및 산업 동향

- 국내와 유사하게 국외의 연구도 주로 교량과 주름형 지붕재의 연구
- 일찍 주름형 구조물에 대한 연구가 이루어진 유럽의 경우 다양한 부산물들이 나타났으며, 대공간 구조물의 거대 원형 거더에서 전단 저항력을 높이기 위한 기술도 연구됨
- 연구결과에서 곡선형 주름이 직선형 주름에 비해 역학적 성능이 우수하다는 결론을 제시한 문헌도 있음
- 주름강판이 일본과 유럽 등에서 Web PSC Box Girder 교량은 높은 전단좌굴강도, 자중경감에 따른 장경간과 지진에 대한 영향 감소, 시공성 및 공사비 절감 등의 장점으로 건설된 사례가 많음
- 이러한 파형강판 Web PSC Box Girder는 자중의 감소로 인한 내진설계상의 유리한 점은 있으나, 직접적으로 지진에너지를 흡수하고 제어하는 역할은 하지 못함

Cognac교(프랑스)	Dole교(프랑스)	本谷橋(일본)
		
▪ 형식 : 3경간연속 ▪ 경간(m) : 105 ▪ 폭(m) : 12.1 ▪ 완공(年) : 1986	▪ 형식 : 7경간연속 ▪ 경간(m) : 496 ▪ 폭(m) : 14.5 ▪ 완공(年) : 1994	▪ 형식 : 3경간연속 ▪ 경간(m) : 198.3 ▪ 폭(m) : 11.5 ▪ 완공(年) : 1998

小犬丸川橋(일본)	白澤橋(일본)	津久見川橋(일본)
		
▪ 형식 : 6경간연속 ▪ 경간(m) : 429.9 ▪ 폭(m) : 10.39 ▪ 완공(年) : 2001	▪ 형식 : 단순교 ▪ 경간(m) : 51.6 ▪ 폭(m) : 9.2 ▪ 완공(年) : 2001	▪ 형식 : 5경간연속 ▪ 경간(m) : 291 ▪ 폭(m) : 10.7 ▪ 완공(年) : 2004
田東JCT.Cランプ橋(일본)	杉谷川橋(일본)	池山高架橋(일본)
		
▪ 형식 : 3경간연속 ▪ 경간(m) : 244.4m ▪ 폭(m) : 12.9 ▪ 완공(年) : 2004	▪ 형식 : 6경간연속 ▪ 경간(m) : 453 ▪ 폭(m) : 16.5 ▪ 완공(年) : 2005	▪ 형식 : 10경간연속 ▪ 경간(m) : 941 ▪ 폭(m) : 11.3 ▪ 완공(年) : 2007

- 곡선형 주름의 성능에 관한 개발과 에너지 흡수형 제진장치로의 연구는 국내 시장 뿐 아니라 해외 시장에도 강재 생산 산업과 맞물려 확장할 수 있음
- 국제도로교통박람회(ROTREX 2011)에 평산에스아이사(www.pyungsan.co.kr)의 파형강판구조물의 도로건설기술 및 공법의 우수성 및 이를 인정받은 포스코 철강에서 생산된 강판의 중국수출 활로를 개척한 성과는 본 연구과제가 국외 기술동향과 산업동향에 발맞추어 나가는 것을 의미함
- 유럽의 Zeman사는 최초로 생산시설을 자동화하여 정현파형 주름 구조물을 생산하여 유럽 및 터키 등의 동아시아 활로를 개척하고 있는 상황임
- 이와 같은 일련의 산업계의 동향과 마찬가지로 독일의 Cottbus 대학에서는 전단성능에 대한 좌굴검증의 연구가 계속 수행됨
- Lehigh대학의 HPS(High Performance Steel) 적용을 위한 연구도 주목을 받고 있음

3. 특허 동향

- 국내의 주름판을 이용한 제진장치나 내진벽판에 대한 특허는 전무함
- 세계적으로도 일본에서 콘크리트 구조물과의 주름벽판의 합성과 내진성능에 관한 특허(JP-2005-264713)가 최근 나타나기 시작했으며, 에너지 흡수형에 대한 연구나 특허동향은 없음
- 따라서, 이 시점에 부합되어 조속한 연구동향의 분석과 더불어 연구를 진행하여 성공적인 기술로 자리 잡는다는 것은 국제적으로도 높은 위상을 차지하는 것을 의미함
- 또한 기존의 일본 벽판의 특허는 단순히 벽 전면에 콘크리트와의 일체성을 유지하고 생산하기 위한 특허이지 힘의 제어나 제진장치로서의 역할은 수행할 수 없을 뿐만 아니라 확장성과 가변성은 전혀 없음
- 이미 본 연구의 파생연구인 주름웨브강판에 대한 최적설계방향에 대한 연구논문이 제시되었으며, 일부 아이디어의 연구결과와 기술의 결과에 대한 검증을 수행하기 위한 노력이 시도되고 있음

4. 정부지원정책 현황

가. 관련법령, 정부 정책 및 담당기관

- 정부의 국가기술지도(National Technology Road Map)의 환경/에너지 프론티어 진흥부문 로드 맵에서 건설산업 분야의 발전 전략의 핵심은 인간과 자연이 상생하는 인프라 건설로서 친환경·자원절약형 건축기술의 개발은 국가적 사업이자 건축의 미래와 현재의 비전
- 또한 최근 국내외 지진발생 추이가 꾸준히 증가하고 있으며, 기상청에 따르면 2011년 12월까지 우리나라 발생한 규모 2.0이상 지진은 총 51회였고, 그 중 규모 3.0이상은 9회 발생됨
- 이에 대한 국내의 내진설계 1985년 멕시코 대지진을 계기로 1986년 내진설계법이 마련되어 1988년부터 적용되다가 2000년에 내진설계 적용대상을 5층 이상으로 강화하였으며, 2005년(건축구조설계기준, KBC 2005제정) 신내진기준을 적용하고 있음
- 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
- 건설교통안전기획단에서도 기존의 교량 및 토목 구조물의 적용과 미루어 볼 때도 본 과제의 각종 규준 및 시방서의 제공은 국민의 안전하고 행복한 삶을 지향하는 목적에 합당함
- 기술자립과 기술경쟁력에 있어서 국내는 물론 국외 수출을 지향할 수 있는 과제이므로 지방자치단체의 중소기업 기술의 확보에 있어서도 지역건설업체의 건설기술영역을 확보할 수 있고, 국가 전체의 확대된 기술시장을 기대할 수 있음

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 경제성이 강조되는 구조물의 장수명화에 관한 연구들과 성능개선 및 내진성능의 향상에 대한 주제가 복합되어 나타나며, 이에 여러 연구과제가 제안 및 진행됨
- 특히, 재해에 대한 인류의 궁극적인 해결책으로 현 시점에서의 가장 합리적인 방안을 찾고자 노력하는 정부의 일반적인 방침은 일반연구자들 사이에서 당면하고 있는 가장 중요한 과제로 인식됨
- 재난에 대비한 방재기술과 재해에 대한 국내환경조건 및 사회적 이슈로 인해 관련 연구의 주제는 제안된 과제들 중에서 우선적으로 다루어지며, 경쟁력 있는 고부가가치와 고도의 기술을 요구하는 연구들이 등장
- 환경 및 녹색정책 등에 중점적인 가치를 두고 현재의 풀어나갈 문제들의 형성은 본 제안과제의 성격상 이와 부합됨
- 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. 연구개발결과가 관련분야에서 차지하는 위치

- 곡선 주름강판을 이용한 에너지 흡수형 제진장치의 개발에 대한 연구는 아직 국내에서는 다루어진바 없는 연구과제임
- 제진장치의 개발측면에서도 일반적인 상황에서 적용되는 장치시스템에 대한 접근이 아니라 형태적 접근을 시도하는 연구로서 재료절감형 아이디어에서 출발하므로 넓은 범주에서 과제성격을 비추어 보더라도 충분히 차별화됨
- 또한, 표준 모델의 제안을 통해서 시공성에 대한 기술의 확장과 더불어 유닛화를 통한 생산성의 향상은 보다 더 실용적인 기술개발임

제2장 연구개발 수행 내용 및 결과

1절. 연구수행 전략 및 방법론

1. 연구개발 추진전략

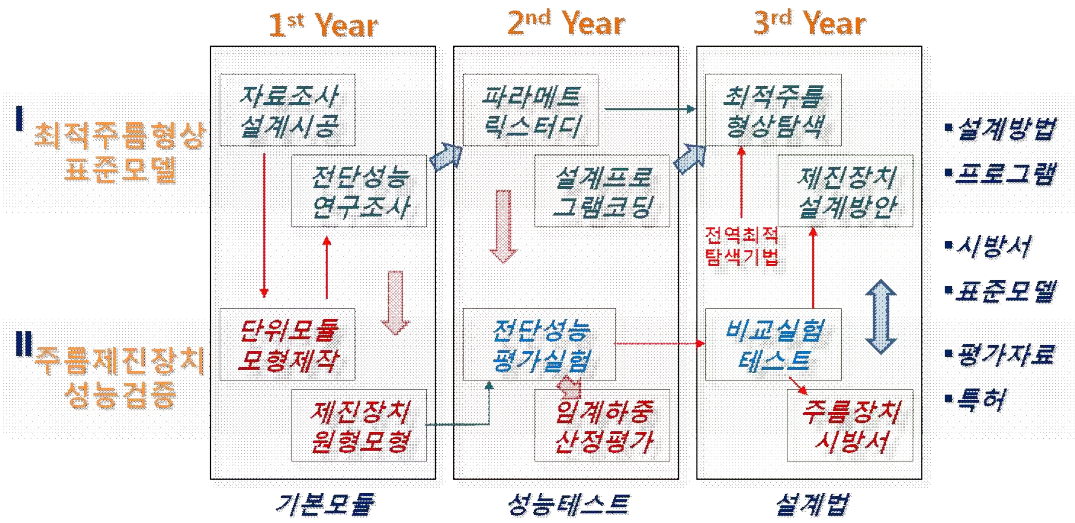
가. 연구개발 추진체계

최종연구목표의 결과물에 대해서 에너지 흡수형 제진장치 개발이 당해 기술 연구성과물에 해당되며, 이들 연구를 위해 원천기술 아이디어의 기술정립과 원천핵심 세부기술을 유닛화하기 위한 목표를 아래와 같이 두 가지로 나누어 계획을 추진하도록 한다.

- 주요 연구목표 Ⅰ - 최적주름형상 제안 및 지침서
  : 최적주름형상을 제안하고 표준 모델을 제시하기 위한 이론적인 설계와 프로그램을 개발하여 실무설계 사용기반 마련

- 주요 연구목표 Ⅱ - 제진주름강판의 성능검증
  : 제진주름강판의 성능을 검증하기 위한 표준 모델의 모형과 실험을 통한 성능검증을 시도하여 평가 자료를 제시함과 더불어 다수의 특허 획득으로 연구 개발의 상용화 기반 마련

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.



연구목표별 추진과제 및 연구 결과물

구 분	주관(위탁)연구기관	협동(위탁)연구기관	참여기업
1차년도 (2012.4.10. ~ 2013.2.9.)	영남대학교	한국기술교육대학교	㈜티엔아이엔지니어링
2차년도 (2013.2.10. ~ 2014.2.9.)	영남대학교	한국기술교육대학교	㈜티엔아이엔지니어링 ㈜보루
3차년도 (2014.2.10. ~ 2015.2.9.)	영남대학교	한국기술교육대학교	㈜티엔아이엔지니어링 ㈜보루

나. 연차별 세부 추진계획 및 방법

연차	연구내용	세부추진 계획 및 방법	수행 기간	해당 기관
1차년도	■ 주름판의 전체좌굴에 대한 이론 연구	■ 곡면판의 좌굴에 관한 해석적 연구 ■ 주름판의 형상에 따른 전체 좌굴성능 분석	3개월	영남대학교
	■ 주름판의 국부좌굴에 대한 이론 연구	■ 주름판의 국부좌굴에 관한 해석적 연구 ■ 주름판의 국부좌굴 평가 및 영향인자 분석	3개월	영남대학교
	■ 주름 형상 및 연성좌굴 연구	■ 주름판 좌굴에 관한 파라메타 분석 ■ 연성좌굴과 주름의 형상에 따른 좌굴이론식 연구	6개월	영남대학교
	■ 주름 형태에 대한 파라메타 분석	■ 주름 형태별 파라메타 설정 ■ 파라메타 분석에 따른 구조적 성능평가	4개월	한국기술교육대학교
	■ 주름 형태에 따른 단위 모듈 제작	■ 분석된 파라메타에 따른 단위모듈 제작 ■ 단위모듈의 성능 검증 실험	4개월	한국기술교육대학교

	■ 주름판 제진장치의 축소모형 제작	■ 주름판 제진장치 프로토타입 모델 제안 ■ 확장성을 고려한 제진장치 축소모형 제작	4개월	한국 기술교육 대학교
2차 년도	■ 주름판의 파라메타에 따른 제진성능 분석	■ 주름판의 높이 및 두께에 대한 제진성능 파라메트릭 스터디 ■ 주름의 간격 및 폭에 대한 제진성능 파라메트릭 스터디	3개월	영남 대학교
	■ 설계규준에 따른 구조설계 메커니즘 분석	■ 설계규준에 따른 주름판의 파라메타 적용성 분석 ■ 설계규준에 의한 구조설계 메커니즘 분석	5개월	영남 대학교
	■ 주름웨브 구조설계 프로그램 개발	■ 전단좌굴을 고려한 구조설계프로그램 코딩 ■ 설계규준에 따른 구조설계프로그램 검증	6개월	영남 대학교
	■ 전단좌굴 및 제진성능에 대한 실물실험	■ 파라메트릭 스터디를 통한 주름간격 폭 결정 ■ 실험을 통한 전단좌굴성능평가와 제진성능 평가	5개월	한국 기술교육 대학교
	■ 주름형상의 세장비에 관한 연구	■ 주름형상의 세장비에 따른 실험결과와 이론식의 비교 및 검토	3개월	한국 기술교육 대학교
	■ 주름웨브의 좌굴거동 및 임계하중 분석	■ 실험모델의 좌굴거동 분석 및 임계하중 산정 ■ 산출된 임계하중에 대한 이론 및 실험결과의 검증	4개월	한국 기술교육 대학교
3차 년도	■ 주름강판 제진장치와 기존의 관련 진동제어 기술과의 비교	■ 제진장치 및 내진보강 관련 업계로부터 자료수집 및 자문을 통한 기존의 관련 진동제어 기술과의 특성 및 경제성 비교 검토	2개월	영남 대학교
	■ 주름방향과 경계조건에 따른 전단좌굴응력 특성 분석	■ 구조해석 및 실험결과를 이용한 전단좌굴 응력 및 구조적 거동 특성 분석	2개월	영남 대학교
	■ 곡선형 주름과 직선형 주름의 전단좌굴특성 비교	■ 구조해석 및 실험결과를 통한 주름형상에 따른 전단좌굴특성 비교 분석	2개월	영남 대학교
	■ 주름판의 파형에 따른 최적형상 분석	■ 기 수행된 연구결과를 바탕으로 주름판의 최적형상 분석과 기본적인 설계 도면 작성	4개월	영남 대학교
	■ 주름웨브에 대한 구조설계 메커니즘 제안	■ 최적형상의 주름웨브에 대한 구조설계 메커니즘 제안 ■ 제안된 메커니즘에 대하여 관련 전문가와의 자문회의를 통한 검증	6개월	영남 대학교

	■ 최적형상의 제진장치 설계시방서 작성	■ 최적형상의 주름판 제진장치 설계를 위한 도면 및 시방서 작성 ■ 한국구조물진단유지관리공학회를 통한 공청회를 개최하여 제안된 주름판 제진장치의 설계시방서의 심의 및 검토 ('14.10~'14.11 에 공청회 개최 계획)	7개월	영남 대학교
	■ 주름판 제진성능의 거동 분석과 특성비교	■ 기존 연구결과와 실험결과를 통한 주름판의 거동 분석과 주름판 제진장치의 성능 검증	4개월	한국 기술교육 대학교
	■ 최적형상에 따른 전단 성능 평가모델 결정	■ 주름판 형상과 경계조건에 따른 최적형상 분석 ■ 분석된 최적형상을 이용하여 전단성능 평가 모델 제시	4개월	한국 기술교육 대학교
	■ 최적주름형상의 설계모형 개발	■ 최적주름형상의 설계모형 개발과 관련 전문가와의 자문회의를 통한 설계모형의 검증	6개월	한국 기술교육 대학교
	■ 제진장치의 성능개선 방안 검토	■ 전문가 자문과 기술적 검토를 통해 제진장치의 추가적인 고려사항과 성능개선에 필요한 기술적 요소의 파악	5개월	한국 기술교육 대학교
	■ 주름판 실용화를 위한 형상성능 분석과 활용성 분석	■ 주름판 제진장치 형상에 따른 제진성능 분석 ■ 현장적용을 위한 매뉴얼 작성 ■ 설계시방서 관련 공청회를 통한 현장적용성에 대한 검증과 매뉴얼에 추가보완사항 검토	7개월	한국 기술교육 대학교

다. 연구 추진역량

(1) 연구진의 인적 능력

성 명	소 속	직 위	경 력	비 고
강주원	영남대	교 수	▪ 한국공간구조학회 학술담당 이사 (2007.6-2011.5) ▪ 경상북도 도청이전 자문위원 (2007.9-2009.4) ▪ 한국전산구조공학회 이사 (2008.4-현재) ▪ 대구광역시 서구 안전관리자문단 (2008.9-현재) ▪ (사)한국건축구조기술사회 특별회원 (2009.6-현재) ▪ 대한건축학회 논문편집위원회 (2010.6-현재) ▪ 한국구조물진단유지관리공학회 이사 (2011.1-현재) ▪ 한국공간구조학회 연구담당 이사 (2011.6-현재)	공학박사 (Michigan State University)
이승재	한국기술 교육대	교 수	▪ 동경대학생산기술연구소 문부과학교관(1998-2002) ▪ 동경대학 파견 연구원 University of California at Berkeley (2001-2002) ▪ 일본건축학회 한계상태설계위원회 연구위원 ▪ (2000-2002) ▪ 대한주택공사 설계자문위원회 위원(2003-)	공학박사 (東京大)

(2) 연구기기·장비·시설 구축 수준

기 자 재 명	규 격	수 량	용 도
ABAQUS	S/W	1	유한요소해석
Midas-Gen	S/W	1	범용 구조해석 및 설계
MTS actuator	H/W	1	구조실험
DATA Logger	H/W	1	구조실험
Dial Gauge	25mm ADAPTOR, RELEASE PD-25	3	변위를 눈금을 통해 바로 읽을 수 있도록 하는 기기
철근탐사기	PROFOMETER-4SCANLOG	1	철근콘크리트 내 철근의 위치와 피복두께를 탐사하는 기기
염분량측정기록계	EM-250A	1	시험체의 염분함유량을 측정하는 기기
오일 확산 펌프 시스템	수동식 100t,DSP-3B	1	전동 또는 반수동으로 유압오일에 압력을 가하는 장치
정적변형율측정기	SYSTEM 4000	1	전기신호를 변위값으로 변환하는 기기
	TDS601	1	

2절. 연구수행과정 및 내용

1. 주름강판의 전단좌굴특성과 형상파라메타

주름판은 영국의 Palmer사에 의해 1829년 특허를 받은 것을 시점으로 여러 분야에 활발한 적용이 시작되었다. 항공분야에서도 JU 52기의 동체 제작에서 초창기 활용되었으며, 비교적 얇은 판재를 이용하는 다양한 분야에서 매우 효율적인 형태저항 시스템의 하나로 이용되어 왔다. 오늘날에도 컨테이너 혹은 기차나 격납고 문과 같은 구조물에서 주름진 판의 적용은 쉽게 찾을 수 있으며, 전단성능의 개선을 위한 원천기술 중의 하나이다. 본 절에서는 주름판의 일반사항과 얇은 판의 개선으로 인한 전단좌굴특성의 변화 및 구조부재로서의 특성에 대해서 다루도록 한다.



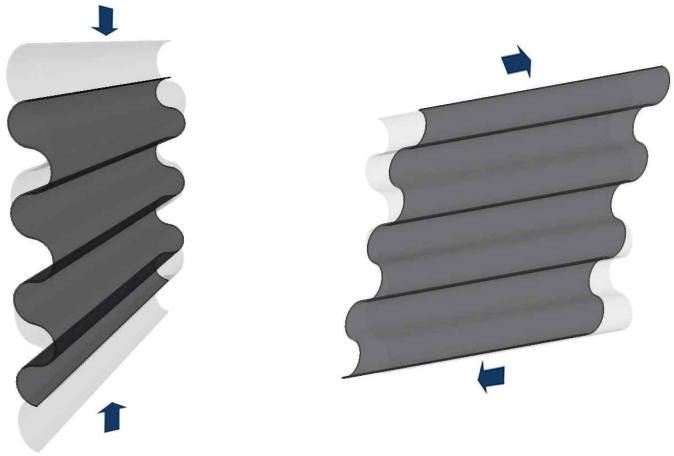
그림 2.2.1.1 주름판을 이용한 다양한 구조체

가. 주름판 구조부재의 일반사항

건축·토목 구조물의 구조설계에 있어서 이러한 형상 변화에 따른 저항능력의 상승은 면적이나 체적변화를 통한 저항능력의 상승에 비해 보다 정성적인 면이 더 부각되는 방법으로 원천기술을 확보하기에 매우 유용하다. 과거 건축물들을 통해 볼 때, 절판구조, 아치구조나 쉘구조와 같은 역학적으로 우수한 형상을 이용하여 문제를 해결하였던 것과 유사한 맥락에 해당된다. 재료적 성능의 변화를 시도하는 방법의 경우 부가되는 손실은 형상의 개발과 단위부재의 개발로 인한 해결책과 비교해 보면 매우 크며, 곡률을 주어 형상의 역학적 가치상승을 기대하는 방법은 많은 측면에서 유리하다. 하지만 더 얇게 혹은 더 세장하게 부재를 형성함으로 인해서 발생하는 구조불안정 문제의 해결은 매우 중요한 부분이 된다.

일반적인 주름을 가진 구조부재의 설계에서는 중심축을 따라서 힘의 전달이 잘 이루어지지 않는 아코디언효과가 구조설계를 하는데 고려되어지며, 보부재로 활용할 경우 휨 모멘트

를 웨브에서는 단지 전단력만 감당하는 방법의 설계가 주를 이루었다. 과거 기술력 부재로 인한 박판 가공의 현실적인 제작의 어려움은 용접기술의 발전과 더불어 실현 가능하게 되었고, 자동생산기술의 발전으로 가격에서 경쟁력을 가질 수 있게 되었다. 뿐만 아니라 스티프너를 설치한 플레이트 거더의 설계에서는 스티프너의 설계 없이 웨브를 얇게 처리할 수 있다는 장점과 더불어 피로성능의 개선으로 제작비용의 상승에도 불구하고 경제성을 유지할 수 있었다. 현재는 유럽 뿐 아니라 국내에서도 주름웨브를 가진 교량이나 철골구조물들이 등장하고 있고, 주름 형상이 주는 전단좌굴의 특성에 대한 설계규준의 확립이나 형상의 정확한 구현 등은 실용적 측면에서 매우 중요한 주제가 되고 있다.



(a) 아코디언 효과 (b) 전단저항능력

그림 2.2.1.2 주름판의 구조적 특성

아코디언 효과는 그림 2.2.1.2(a)에서 보는 바와 같이 힘의 전달이 축방향에서는 기대하기 힘들다. 그러나 전단성능의 개선은 월등히 높아지는 원리를 지니고 있기 때문에 등방재료를 사용함에도 불구하고 이방성 재료의 특성을 지니게 된다. 이와 같은 성질은 구조물의 전단좌굴특성을 규명하는데 있어서 매우 유리하게 접근할 수 있었으며, 실험적 해석적 연구과정을 통해서 설계가 가능하게 된다. 특히 전단설계를 위한 전단좌굴강성의 정의는 매우 복잡하며, 연구자들의 주요 주제가 되었다. 월등한 전단성능에 대한 많은 연구자들의 시각들은 과거 매우 큰 전단력에 저항하기 위한 특수 구조물의 일부분의 전환에서 항공분야에의 적용 및 토목, 건축 분야에 활발히 적용되기 시작하며, 에너지 흡수장치분야에 있어서도 블록화 할 수 있는 방안, 표준 모델을 위한 해석적 연구 및 벽판 내진재로의 다양한 연구에 관심을 기울이고 있다.

나. 제형 및 정현파형 주름판 부재의 연구 및 기술연혁

건물이나 교량 구조물에 대한 주름의 적용은 원래 항공학에서의 많은 연구 결과물들이 받아들여져 보의 웨브에 적용한 사례로 시작되었고, 유럽, 특히 스웨덴에서는 1960년대 초부터 일반적인 강구조물에 많이 활용되었다. 주름웨브 부재의 개발은 미국에서도 PACO사에 의해

이용되어 웨브에 주름을 넣은 I-단면 형강이 1981년 특허를 받아 제작되었고, 이후 저층구조물을 짓는데 주름판을 이용한 부재들을 많이 이용하였다. 또한, 1980년 이후부터 주름웨브를 이용한 교량의 개발이 프랑스와 일본에서 진행되어 다양한 형태의 주름웨브 합성보를 건설하였으며, 미국에서도 초고강도 강재를 교량에 활용할 방안으로 주름웨브 교량의 해석과 구조설계 및 요소개발에 대한 다양한 연구가 많이 진행되었다. 또한 PSC교량의 주름웨브 활용은 복부재에 사용되는 강판을 파형으로 가공하여 전단좌굴강도를 향상시킴과 동시에 보강재를 생략하여 생산성을 높일 수 있으며, 바닥판에서의 면외곡률에 의한 용법부 피로영향을 작게 하려는 의도로 비교적 판의 높은 구조적 역할을 확보할 수 있다.

표 2.2.1.1 주름판을 이용한 교량

Cognac교(프랑스)	Dole교(프랑스)	本谷橋(일본)
		
小犬丸川橋(일본)	白澤橋(일본)	津久見川橋(일본)
		
田東JCT.Cランプ橋(일본)	杉谷川橋(일본)	池山高架橋(일본)
		

주름의 형태에 대해서는 주로 사다리꼴이나 정현파형이 가장 많이 설계되고 연구되었다. 그러나 박판의의 주름은 정현파형 주름 파의 파고를 늘리는데 사다리꼴 주름보다 제작상의 한계를 가지게 되므로, 비교적 큰 전단응력이 작용되는 경우에는 사다리꼴 형태를 많이 이용한다. 얇은 두께로 인한 전단좌굴은 웨브의 높이 및 주름 형태에 따라 영향을 받으며, 국부좌굴과 전체좌굴 및 이들의 연성으로 전단좌굴현상이 발생한다. 주름웨브는 주로 전단좌굴거동과 안정성, FE 좌굴해석, 주름웨브보의 횡좌굴, 피로파괴에 대한 웨브의 거동, 주름웨브의 천공, 주름웨브 거더의 플랜지 휨저항, 주름웨브보의 생산 등에 관한 연구가 주를 이루었다. 특히 웨브의 초기 불완전성은 전단좌굴을 발생시키기에 충분히 민감하며, 제작된 주름웨브보의 완전성 및 형태에 대한 좌굴저항능력의 검증은 매우 중요하다.

가장 중요한 주제 중 하나인 전단좌굴에 관한 연구는 Easley(1969)이 직교판 이론을 기초로 탄성좌굴거동을 설명할 수 있는 적합한 해를 연구하였고, 실험을 통해 이를 증명하였으며, 이 후 연구자들은 다양한 형태의 주름웨브의 강재나 콘크리트 거더교의 개발을 위해서 해석과 실험을 거듭하였다. 최근 Abbas(2002)의 연구는 웨브의 국부 및 전체 좌굴에 대한 특성과 제한식을 해석적인 방법으로 다루었으며, 초기 불완전성에 따른 영향도 함께 고려하였다. 이후, 주름웨브를 이용한 교량의 전단좌굴에 대한 설계범주를 제안하였고, Moon(2009)은 보다 좋은 평가를 할 수 있는 전단좌굴 파라메타와 실제 설계를 위한 설계범주를 주제로 연구하였다. 또한, 원형파형에 대해서도 유한요소 해석과 웨브판에 비해 주름이 주는 강성의 개선에 대해 해석적 방법과 실험적 결과를 비교하였으며, 해석 대상이 된 주름은 주로 수직원형과 수평원형이었다. 국내에서도 정현파형 주름은 제형 주름에 비해 많지는 않지만 전단좌굴이나 다양한 부재의 내력에 대한 실험적 및 해석적 연구가 진행되고 있다. (한택희 등, 2002; 김성남 등, 2010; 오재열 등, 2011; 지효선, 2011)

이 외에 주름웨브보의 최적화에 관한 연구에서는 최적단면을 정의하기 위한 Zhang(2010)의 연구 결과물이 있으나 열간압연 WCW(Wholly Corrugated Web) H-형강 단면만이 대상이 되었다. 그의 연구는 편평한 웨브의 H-형강을 바탕으로 WCW H-형강의 최적 파라메타 집합을 구성하고, 주름 파라메타의 영향을 조사하였다. 목적함수는 압축에 대한 안정성이 일반 H-형강에 비해 1.5-2배가량 높다는 것을 고려하여 등가 좌굴강성으로 구성하였다. 여기서, 주름의 크기가 웨브 두께의 2배에서 4.6배로 제한되는데, 이것은 열간압연 WCW H-형강의 생산에 관한 일반사항을 고려한 것이었다. 그러나 얇은 주름웨브를 편평한 플랜지에 용접한 보의 최적화에는 이와 같은 사항들이 유효하지 않고, 압축부재의 좌굴에 대한 안정성의 확보보다 전단좌굴에 대한 저항능력이 설계의 중요한 결정인자가 된다. 또한 정현파형 웨브의 경우는 사다리꼴에 비해 역학적으로 더 우수함에도 불구하고 단지 몇몇 연구자들에 의해서만 연구가 진행되어 왔다. 전단좌굴을 고려한 정현파형 주름보의 최적설계는 손수덕 등(2011)에 의해 유전자 알고리즘 기법을 적용하여 연구되었으며, 유럽의 여러 기준들이 검토되었다. 또한, 시공성과 생산부재를 고려한 실용성 위주의 연구도 진행되고 있다.

다. 주름판의 형상 파라메타와 단위부재의 단면특성

주름판의 경우 일반 평판과는 달리 형상의 파라메타가 매우 복잡해진다. 일반적으로 평판의 경우 판의 가로, 세로 및 두께로 표현할 수 있으며, 사면의 경계조건에 따라 전단좌굴강도를 계산하는 방법에서 차이가 난다. 그러나 정현파형 주름판의 경우는 가로, 세로 및 두께 이외에도 주름의 형상에 따라 단면의 성질이 달라지며, 어떠한 형상을 사용하느냐에 따라 파라메타의 수도 달라진다. 본 절에서는 마름모형 주름과 정현파형 주름에 대해서 형상을 정의할 파라메타를 설명하도록 한다. 기본적인 주름형상의 파라메타 특성은 주름의 간격과 주름 깊이가 주요 설계 파라메타가 된다.

우선 그림 2.2.1.3에서와 같은 마름모형 단면의 경우 주름 간격 w, 주름 길이 s, 두께 t, 주름의 재축방향 길이 a_1, 주름 빗면길이 a_2, 주름의 깊이 $a_3/2$, 빗면 길이의 재축방향 투영길이 a_4, 및 주름의 각도 θ_c로 표현할 수 있다. 각각의 형상 파라메타들은 파형에 따라 결정되

므로 모든 파라메타들은 주요한 파라메타만을 정의하면 계산이 가능하다. 주요한 파라메타로서 주름의 간격과 주름의 깊이는 매우 유용하게 적용될 수 있으며, 여기에서 주름의 각도만 주어지면 다음과 같이 계산할 수 있다.

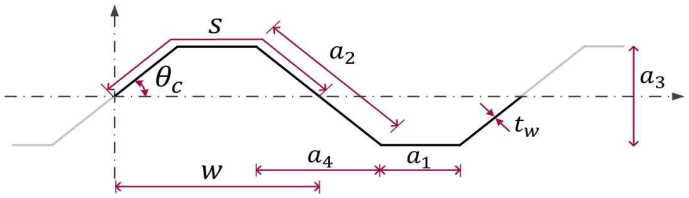


그림 2.2.1.3 마름모형 주름의 형상과 형상 파라메타

$$a_2 = \frac{a_3}{\sin(\theta_c)} \ , \ a_4 = \frac{a_2}{\cos(\theta_c)} \ , \ a_1 = w - a_4 \ , \ s = a_1 + a_2 \tag{2.2.1.1}$$

주어진 값에 대해서 주름의 각도 대신 빗면 길이의 재축방향 투영길이 a_4가 주어져도 각도를 구하는 간단한 계산을 통해서 다음과 같이 구할 수 있다.

$$a_2 = \sqrt{a_3^2 + a_4^2} \ , \ a_1 = w - a_4 \ , \ s = a_1 + a_2 \ , \ \theta_c = \arccos(\frac{a_4}{a_2}) \tag{2.2.1.2}$$

정현파형 주름에 대한 형상파라메타를 정의하면, 그림 2.2.1.4와 같고, 마름모형과 마찬가지로 주름 간격 w, 주름 길이 s, 두께 t 와 주름의 깊이 $a_3/2$ 및 주름 각도 θ_c로 표현할 수 있다. 정현파형 주름의 경우 마름모형 주름에 비해 파라메타가 적으나 형상은 부드러워진다. 또한 파라메타는 주요 파라메타인 주름 간격과 주름 깊이를 알면 나머지 값들은 계산가능하다. 정현파형 주름의 두 파라메타는 식 (2.2.1.3a)과 같은 연속된 형상함수로 표현할 수 있으며, 주름의 길이는 길이함수인 식 (2.2.1.3b)를 계산하여 구할 수 있다. 또한 이를 이용하여 정현파형 주름의 각도 θ_c를 식 (2.2.1.3c)와 같이 정의할 수 있다.

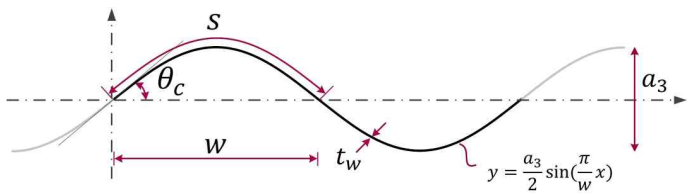


그림 2.2.1.4 정현파형 주름의 형상과 형상 파라메타

$$y = \frac{a_3}{2} sin(\frac{\pi}{w}x) \tag{2.2.1.3a}$$

$$s = \int_0^w \sqrt{1 + \left\{\frac{a_3 \pi}{2w} cos(\frac{\pi}{w}x)\right\}^2} \, dx \tag{2.2.1.3b}$$

$$\theta_c = \frac{a_3}{2} \cdot \frac{\pi}{w} \tag{2.2.1.3c}$$

주름판을 적용한 단위부재의 경우는 웨브에 적용한 사례가 매우 많이 등장하고 있다. 주름진 웨브를 플랜지에 용접하여 사용하는 보는 미국이나 일본보다 유럽에서 먼저 개발되고 자동화생산으로 인해 상용화 된 까닭에 기본적인 설계를 DASt-R015, DIN 18800 T.1-3 및 EN 1993-1-5에 정의된 코드로 체계적으로 설계를 수행할 수 있다. 또한, Pasternak 등(2004)의 문헌에서는 부재설계에서 DASt-R015와 EN 1993-1-5의 주름보에 대한 D항을 대신할 수 있는 식들에 대해 설명하고 있으며, 단면의 성질에 대해서 정의하기 위해서 설계의 메커니즘을 적용하기도 한다. 주름웨브보의 기본적인 설계 메커니즘의 경우 플랜지는 휨을 웨브는 전단력을 담당하도록 설계가 되기 때문에 주로 단면성능의 계산에서 이를 고려하게 된다.

우선, 각각의 형상에 대한 단면적은 주름의 길이 s와 두께 t를 곱하여 구할 수 있으며, 단면 이차 모멘트의 경우 마름모형 주름은 비교적 쉽게 구할 수 있다. 정현파형 주름의 경우도 형상함수를 이용하여 식 (2.2.1.4)와 같이 구할 수 있다.

$$I_x = \int_0^w \left[\frac{t_w^3}{12} + t_w \left\{ \frac{a_3}{2} sin(\frac{\pi}{w} x) \right\}^2 \right] dx \tag{2.2.1.4}$$

주름웨브 뿐 아니라 주름판의 경우 이방성 재질로 전단좌굴강성을 제시하고 있으므로 동일하게 적용된다. 따라서, 휨강성에 대해서 다음과 같이 가로 및 세로방향 강성을 정의하고 있다.

$$D_x = \frac{E\,t^3}{12} \cdot \frac{w}{s} \tag{2.2.1.5a}$$

$$D_y = \frac{E\,I_x}{w} \tag{2.2.1.5b}$$

플랜지의 단면 성질에 있어서 유효단면적의 경우 주름의 크기가 그리 크지 않다면 고려되지 않을 수도 있으나 일반적으로 주름의 폭은 제외되기도 한다. 이때 플랜지의 중심에서 끝단까지의 유효거리는 플랜지 중심에서 주름 깊이의 반에 해당되는 값을 제외하여 계산하는 것이 바람직하다. 단일 보부재의 경우 Zeman co. Ltd에서 제시하는 전단환산단면적은 다음과 같고 전단환산계수 G^*주름의 형태에 따라 달라진다. 아래 식에서 $G^* = G\,w/s$ 이다.

$$A_q = h_w \cdot t_w \cdot \frac{G^*}{G} \tag{2.2.1.6}$$

휨 부재의 경우 고려되어야 할 중요한 단면의 특성 중에서 비틀림 상수의 정의 및 뒤틀림 상수의 정의는 다음과 같이 제시되고 있다.

$$I_t = \frac{2}{3} b_f t_f^3 + \frac{1}{3} h_w t_w^3 \qquad (2.2.1.7a)$$

$$I_w = \frac{A_f}{24} b_f^2 z^2 \qquad (2.2.1.7b)$$

여기서, i_y, i_z: 단면이차반경, A_f: 플랜지의 단면적, b_f: 플랜지 폭, h_w: 웨브 높이, t_f, t_w: 웨브와 플랜지의 두께이다. 이와 같은 식을 이용하여 단면특성을 계산할 수 있으며, 아래 표 2.2.1.2는 플랜지의 높이 1000mm에 대한 단면특성 계산결과이다.

표 2.2.1.2 주름웨브보의 단면성능 계산결과
(t_w=2.0mm, h_w=1000mm, w=77.5mm, a_3=40mm)

$b_f \times t_f$(S/W) mm	A_q cm^2	H mm	W kg/m	S m^2/m	A cm^2	I_y cm^4	i_y cm	I_z cm^4	i_z cm	I_t cm^4	I_w cm^6
200x10(1.1482)	17.42	1020	49.4	3.14	40.0	102013	50.50	1333	5.77	13.6	3400444
200x10(1.1482)	17.42	1020	49.4	3.14	40.0	102013	50.50	1333	5.77	13.6	3400444
220x10(1.1482)	17.42	1020	52.6	3.22	44.0	112215	50.50	1775	6.35	14.9	4525992
250x10(1.1482)	17.42	1020	57.3	3.34	50.0	127517	50.50	2604	7.22	16.9	6641493
200x12(1.1482)	17.42	1024	55.7	3.14	48.0	122903	50.60	1600	5.77	23.3	4096768
220x12(1.1482)	17.42	1024	59.5	3.22	52.8	135193	50.60	2130	6.35	25.6	5452798
250x12(1.1482)	17.42	1024	65.1	3.34	60.0	153629	50.60	3125	7.22	29.1	8001500
300x12(1.1482)	17.42	1024	74.5	3.54	72.0	184355	50.60	5400	8.66	34.8	13826592
220x15(1.1482)	17.42	1030	69.8	3.24	66.0	170000	50.75	2662	6.35	49.8	6856647
250x15(1.1482)	17.42	1030	76.9	3.36	75.0	193181	50.75	3906	7.22	56.5	10061523
300x15(1.1482)	17.42	1030	88.7	3.56	90.0	231818	50.75	6750	8.66	67.8	17386313
350x15(1.1482)	17.42	1030	100.5	3.76	105.0	270454	50.75	10719	10.10	79.0	27608820
250x20(1.1482)	17.42	1040	96.5	3.38	100.0	260133	51.00	5208	7.22	133.6	13548611
300x20(1.1482)	17.42	1040	112.2	3.58	120.0	312160	51.00	9000	8.66	160.3	23412000
350x20(1.1482)	17.42	1040	127.9	3.78	140.0	364187	51.00	14292	10.10	186.9	37177389
400x20(1.1482)	17.42	1040	143.6	3.98	160.0	416213	51.00	21333	11.55	213.6	55495111
300x25(1.1482)	17.42	1050	135.8	3.60	150.0	394063	51.26	11250	8.66	312.8	29554688
350x25(1.1482)	17.42	1050	155.4	3.80	175.0	459740	51.26	17865	10.10	364.9	46931749
400x25(1.1482)	17.42	1050	175.0	4.00	200.0	525417	51.26	26667	11.55	416.9	70055556
430x25(1.1482)	17.42	1050	186.8	4.12	215.0	564823	51.26	33128	12.41	448.2	87029798
350x30(1.1482)	17.42	1060	182.9	3.82	210.0	557130	51.51	21438	10.10	630.3	56873688
400x30(1.1482)	17.42	1060	206.4	4.02	240.0	636720	51.51	32000	11.55	720.3	84896000
430x30(1.1482)	17.42	1060	220.6	4.14	258.0	684474	51.51	39754	12.41	774.3	105466036
430x30(1.1482)	17.42	1060	220.6	4.14	258.0	684474	51.51	39754	12.41	774.3	105466036

라. 주름판의 전단좌굴 특성과 좌굴형태 분류

얇은 판에서 나타나는 탄성전단좌굴은 주름진 판에서도 나타난다. 평판의 탄성전단좌굴은 전단변형을 고려하지 않는 경우의 등질 등방의 판에서 면내에 작용하는 힘과 판형에 교차되어 나타나는 전단좌굴변형은 고전적인 연구에서 이론식과 설계식이 많이 제안되었다. 그러나 주름판의 경우는 평판과는 다른 특성을 보인다. 초창기 연구에서 이와 같은 특성의 규명에 있어서 주름진 판의 탄성전단좌굴의 접근을 비록 재료는 등질 등방이라 할지라도 방향성에 따른 단면 휨강성의 차이를 고려하여 접근하였고, 좌굴거동을 전체좌굴과 국부좌굴 및 이들의 연성작용에 의해 나타나는 좌굴로 분류하여 다루게 되었다. 세 가지 좌굴 중 국부좌굴은 평판에서 나타나는 것과는 달리 각각의 주름 내부에서 발생하는 전단좌굴을 의미하며, 그림 2.2.1.5에서 보는 바와 같이 각 주름에 여러 좌굴패턴이 연속으로 발생한다. 전체좌굴은 여러 주름에 걸쳐서 나타나는 평판의 좌굴형태로 동일한 형상에서는 두께가 두꺼운 경우 나타나는 현상으로 그림 2.2.1.6과 같다. 마지막으로 연성좌굴은 이들 두 좌굴의 연성작용에 의해서 나타나며, 매우 위험한 상태를 초래할 수도 있는 형태이다.

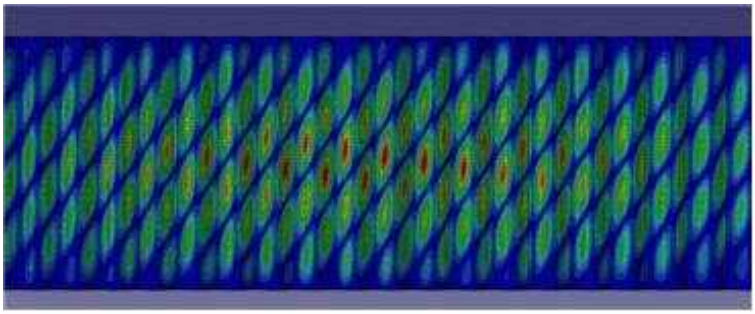


그림 2.2.1.5 주름판의 전단좌굴 - 국부좌굴

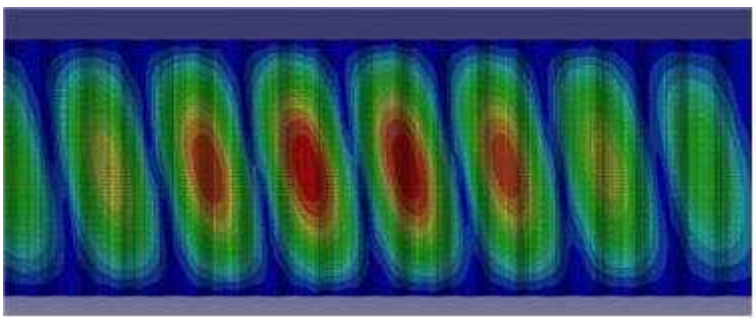


그림 2.2.1.6 주름판의 전단좌굴 - 전체좌굴

위의 그림은 순수전단 하에서는 주름판의 경계면을 따라 전단 응력이 균일하게 분포하는 가정을 이용하여 해석을 수행할 경우 위의 그림과 같은 결과를 얻을 수 있으며, 이와 같은 가정은 정적 재하 실험 연구에 의해서 사실로 검증 되었다. (한택희 등, 2002)

주름판의 국부좌굴은 각 주름에 대해 탄성국부좌굴공식을 이용하여 계산하며, 주름진 강판

에서 각 주름의 좌굴이 동일한 응력분포에서 발생하게 되므로 순수전단 상태의 강판의 전단흐름을 비교적 균일하게 일어난다고 가정하게 된다. 국부좌굴에 대한 이론식은 전통적인 판이론의 결과물이므로 여러 규정에서 유사하게 사용된다. 그러나 순수전단상태의 주름 간 경계조건의 적용은 국가별로 다르게 적용되어 왔으며, 캐나다의 경우를 제외하고는 단순지지의 경계로 적용되었다. 다음의 식은 EUROCODE3에서 제안하는 전체좌굴에 대한 좌굴응력으로 식 (2.2.1.8a)의 경우는 마름모형 주름이고 식 (2.2.1.8b)의 경우는 정현파형 주름에 해당한다.

$$\tau_{cr,l} = 4.83\,E\frac{t}{a_{\max}}\ ,\quad a_{\max} = \max(a_1, a_2) \tag{2.2.1.8a}$$

$$\tau_{cr,l} = \left(5.34 + \frac{a_3\,s}{h\,t}\right)\frac{\pi^2\,E}{12(1-\nu^2)}\left(\frac{t}{s}\right)^2 \tag{2.2.1.8b}$$

전체좌굴의 경우 초창기 좌굴응력은 이방성 판으로 생각하여 각 판의 휨강성 D_x, D_y 를 이용하여 식 (2.2.1.9)와 같이 계산하며, Easley에 의해서 제안되어 졌다. 그의 공식은 전체좌굴의 미분방정식을 간략화 시킨 식으로서 단위 폭 당 임계하중에 대해서 나타내며, 부재의 축방향과 직강방향의 강성비가 현저한 차이를 나타낼 때 미분 방정식으로 유도해 낸 식과 비교해 미소한 오차를 보여준다. 아래 식에서 β의 값은 0.9를 이용하고 있다.

$$\tau_{cr,g} = \frac{36\,\beta}{t\ h^2}\sqrt[4]{D_x\ D_y^3} \tag{2.2.1.9}$$

위의 식의 경우 마름모형 주름에 적용되는 공식이지만 정현파형의 경우 등가한 값을 이용하여 적용하기도 한다. EUROCODE3의 D항에서 채택하고 있는 위의 식은 이상화된 전단좌굴응력으로 정의하고 있지만 정현파형 주름의 경우 Pasternak 등(2004)은 제형보다 형상이 더 매끈하기 때문에 안정성이 높다고 설명하면서 범위가 $a_3 \le 40mm$ 와 $77.5mm \le w \le 155mm$ 에 대한 전체좌굴의 실험에 따른 이론식들을 소개하고 있다. 또한 Pasternak 등(2010)의 문헌에서 사인 주름의 경우 웨브가 전단 항복 응력에 도달하기 전에는 국부좌굴이 일어나지 않는다고 설명했다.

마. 주름가공 및 부재설계에서 고려할 사항

주름웨브를 이용한 부재는 유럽에서 주로 사용하고있는 전단좌굴에 대한 저항성능을 높인 부재로서 형태를 이용한 성능 개선모델이다. 절판구조의 원리와 같이 평판보다 주름판이 더 큰 강성을 가진다는 것은 쉽게 알 수 있지만, 주름방향에 따른 강성의 평가는 서로다르게 다루어 진다. 또한 주름웨브보는 얇은 주름웨브가 플랜지에 용접되어 있으므로 주름에 대한 능력과 주름방향을 따라 플랜지에 발생하는 힘의 불균형 등은 단순하지 않다. 뿐만 아니라 박판의 웨브이므로 용접으로 인해 발생되는 문제와 생산과정에서의 불완전성 등에 기인한 제품의 품질저하와 붕괴메커니즘에 대한 규명 등은 부재설계를 위해서는 반드시 고려해야만하는 사항이다.

주름형상의 가공에서 비교적 큰 전단능력을 위해서는 제형을 많이 이용하는데 이것은 정현형의 경우 파고를 조절하는데 제작상의 한계가 있기 때문이다. 또한 유럽이나 독일의 설계메커니즘은 주름웨브에 대한 계수적용이 주름형상에 따라 다르지만 등가한 형상으로 설계되므로 과다한 설계를 유도한다. 주름웨브의 전단응력에 의한 플랜지의 영향에 대한 고려나 세장한 주름판의 좌굴문제에 대한 조건들은 두께에 따른 위험에 대해서 상당히 주의 깊게 설계하고 있으며, 주름강판 부재생산에서 주의해야만 하는 항목들을 살펴보면 다음과 같다.

- 주름을 형성하는 과정에서 발생하는 응력의 제거
- 플랜지에 박판의 웹을 연결하기 위한 특수용접가공
- 부재가 주름판을 용접함으로인해 전단응력이 미리 발생하지 않도록 할 것
- 주름으로 인해 용접이 미비한 곳의 녹 방지를 위한 사항
- 낮은 열 전도현상으로 인한 비틀림 현상

위의 항목들은 모두가 웨브에서 발생하는 전단좌굴 메커니즘에 기인한 사항들이며, 부재설계를 위해서는 박판주름강판의 좌굴을 설계에서 떼어놓을 수 없는 사항들이다. 큰 판이 주름으로 인해 세분화 됨으로 좌굴이 각 세분화 된 판마다 영향을 미친다. 이것은 제작 시 발생하는 불완전성과 초기 응력의 발생은 문제를 일으키기에 충분히 민감하다. 독일 Cottbus 대학의 파형 주름보에 대한 파고와 파장 및 웹의 높이에 따른 국부좌굴의 발생과 전체좌굴 및 연성관계에 대한 연구결과들은 이를 입증해 주며, 국내 연구결과에서도 파고와 파장 같은 파의 형상 및 웹의 높이에 따라서 좌굴 종류가 다르게 나오는 파라메타임을 이미 밝히고 있다. 따라서 파형 웹을 제작하는 과정과 제작된 주름보의 완전성 및 형태에 대한 좌굴성능의 검증은 매우 중요함을 위의 검토항목에서 말해 준다. 국내 제형강판의 경우는 절곡과정으로 생산하지만 곡선형의 경우는 주로 프레스가공과 롤링가공이 둘다 적용되고 있다.



(a) 프레스 가공 (b) 롤링가공

그림 2.2.1.7 곡선주름강판의 주름가공방법

부재설계를 위해서 유럽과 독일의 설계코드들은 휨의 능력과 전단의 능력을 나누어 다루고 있다. 그러나 플랜지의 경우 웹의 주름에 의해 발생하는 추가 전단력이 고려된다. 특히 파고가 큰 경우 추가전단력은 플랜지의 저항능력을 감소시키므로 이를 설계에서 고려한다.

뿐만 아니라 판의 세장비 제한에서도 주름진 파고에 대한 고려가 추가된다. 이것은 플레이트 거더의 설계에는 고려되지않는 웨브의 형상이 포함되는 것이며, 이것은 마치 힘의 저항을 분리하여 설계하는 듯 하지만 상호관계에 의해서 발생되는 사항들을 모두 고려하게 된다.

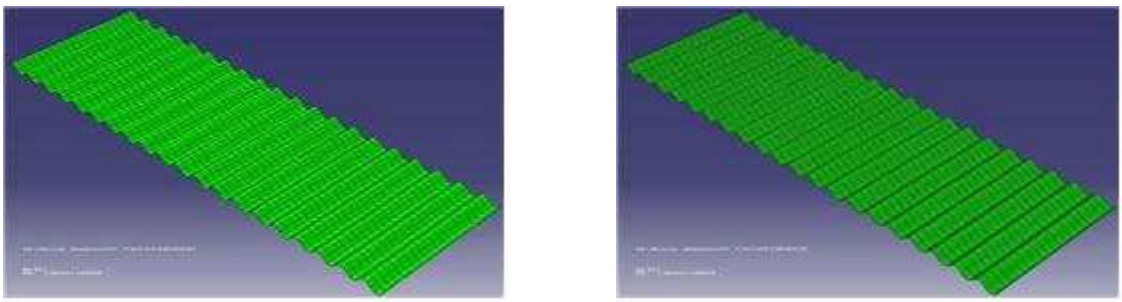
전단좌굴에 대한 부재설계 제한도 각 나라마다 조금씩 다르지만 기본적으로는 국부좌굴검토와 전체좌굴검토를 통해서 더 취약한 좌굴에 저항하도록 설계된다. 연성좌굴의 설계제한은, 일본의 경우 연성좌굴이 발생하지 않는 영역에서만 설계하도록 제한하고 있고, 유럽에서는 국부좌굴이 발생하지 않는 기본모듈이 제시되고 있다. 이러한 사항들을 볼 때 웨브의 좌굴이 일반 보와는 다른 메커니즘을 가지고 있어서 이를 모두 고려하여야 한다. 또한 조합응력, 특히 모멘트와 판의 좌굴, 모멘트와 비틀림, 뒤틀림 같은 사항을 고려하여야 한다. 다음은 해석/설계에 고려해야 될 구조적 항목들로 유럽과 독일설계코드에 나타난 몇 가지 사항을 열거 하였다.

- 주름판에 대한 판좌굴에 대한 검토
- 주름으로 인해 발생하는 플랜지의 추가 전단응력의 고려
- 플랜지의 휨좌굴과 비틀림좌굴의 검토
- 파고를 고려한 한계세장비의 검토
- 휨과 비틀림의 조합응력에 대한 검토
- 모멘트와 전단에 대한 조합응력의 검토
- 주름웨브의 전단좌굴에 대한 검토 및 단면 손실여부
- 국부 집중하중의 전달에 대한 검토
- 형상(수평, 수직, 주름모양 등)의 불완전성에 따른 내력의 감소

유럽에서는 여러 가지 연구와 실험을 통해서 해석/설계, 제작공정 및 시공을 위한 방안을 내 놓고 있으며, 제작의 특수성을 감안해서 제품에 대한 품질을 매우 엄격히 다루고 있다. 뿐만 아니라 제작된 품질의 성능에 대한 결과를 제시할뿐더러 양산과정에 대한 단면을 제시하기도 한다. 국내에서도 이와 같은 연구가 매우 필요하다고 사료된다.

2. 주름진 판의 상용프로그램을 이용한 유한요소해석

현재 평판에서 많이 이용되고 있는 전단좌굴계수는 판의 탄성전단좌굴을 이론적으로 유도하고 간략화 시킨 것이다. 그러나 주름진 판에서는 각 파형이 갖는 형상의 영향으로 인해서 탄성전단좌굴이 평판의 것과는 다르게 나타난다. 판의 전단좌굴의 이론식은 평판의 가로와 세로길이에 따른 두 개의 독립변수로 표현되지만 파형의 경우는 매우 복잡한 형상 파라메타를 가지게 되므로 이론식의 도출은 매우 어렵다. 마름모형 주름의 경우 구간 연속의 함수로 표현하기 매우 힘들게 되며, 좌굴의 특성 또한 평판과 비교해 볼 때 기저를 정의하기가 매우 어렵다. 정현파형의 경우 형상 함수의 정의가 비교적 마름모형에 비해 쉽지만 이들의 함수를 이용해서 탄성전단좌굴을 정의하는 것은 복잡하다. 본 연구에서는 주름판의 탄성전단좌굴에 대한 유한요소해석방법에 대해서 다루도록 한다. 평판을 기준으로 경계조건에 따른 이론해 비교를 통해서 적합한 경계조건을 규정하고, 주름 수와 요소수에 따른 해석결과의 수렴성을 통해서 전단좌굴해석에 사용될 해석기준을 결정하도록 한다.



(a) 마름모형 주름판 (b) 정현파형 주름판

그림 2.2.2.1 마름모형 주름판과 정현파형 주름판의 형상

가. 주름판의 전단좌굴응력과 유한요소해석 개요

주름판의 경우 독단적으로 순수전단을 받는 상황을 유한요소해석에서 모델링하는 것은 한계가 있다. 그러나 전단하중이 작용하는 경우 적절한 경계조건의 설정으로 정해에 가까운 값을 얻을 수 있다. 평판의 전단좌굴의 경우 여러 논문에서 선형좌굴해석을 통해서 순수전단좌굴 이론 해와 비교하는 연구가 많이 진행되었으며, 상용프로그램을 이용해서 해의 정도를 검증하였다. 유한요소 해석을 통한 전단좌굴의 경우 직선 판형의 경우 수직 보강재 설치의 간격에 따라 좌굴 강도가 달라지지만 판의 길이가 길어진다면 판의 전단 좌굴 강도는 일정 길이 이상일 때 최소 전단 좌굴 강도로 수렴하게 된다. 이것은 주름진 판의 경우에도 같아, 판의 길이(L)가 높이(h)의 두 배 이상일 때, 그리고 판의 길이(L)가 반파장의 길이(w)의 6배 이상일 경우에는 전단 좌굴 강도는 거의 일정한 값에 수렴하므로 이를 고려하여 해석모델의 길이를 채택하는 연구가 많이 진행된다. 해석결과의 정밀도를 높이기 위해서 요소의 분할의 수를 높여 진행하지만 주름의 경우는 전체 요소수의 결정에서 그림 2.2.2.2과 같이 골 수의 분할을 잘 이용하는 것이 매우 중요하다. 유한요소의 이용에 있어서 해석되는 요소의 경우 8

절점 5자유도 쉘요소가 많이 사용되었으며, ABAQUS는 S8R5요소가 이에 해당된다.

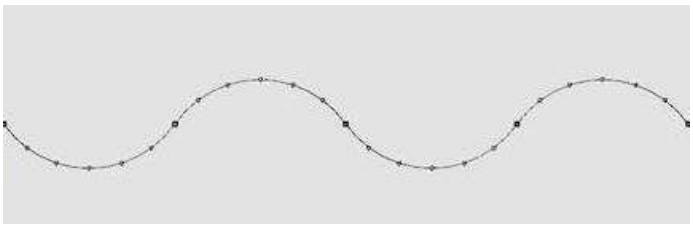


그림 2.2.2.2 주름진 판의 형상과 요소 분할

전단좌굴에 대한 해석모델의 경계조건과 하중조건은 한택희(2002)의 문헌에서 제시된 방법이 많이 이용되는데, 전체 주름 웨브의 길이가 좌굴 강도에 주는 영향을 고려하여 충분히 큰 값과 파형을 유지하도록 한다. 경계조건의 경우 그림 2.2.2.3와 같이 사면의 경계와 중심라인 및 중앙부 절점에 적용되는 경계조건으로 많이 다루어 졌으며, 해석결과에 대해서 평판을 기준으로 제시되었다. 특히, 이동변위와 회전변위에 대해서 사변의 조건을 조절하여 순수전단에 해당되는 값을 얻기 위한 시도가 있었으며, 하중조건도 경계면을 따라 적용한다. 이는 순수전단 하에서는 주름판의 경계면을 따라 전단 응력이 균일하게 분포한다는 가정을 사용한 것으로 정적 재하 실험 연구에 의해서 사실로 검증 되었다.

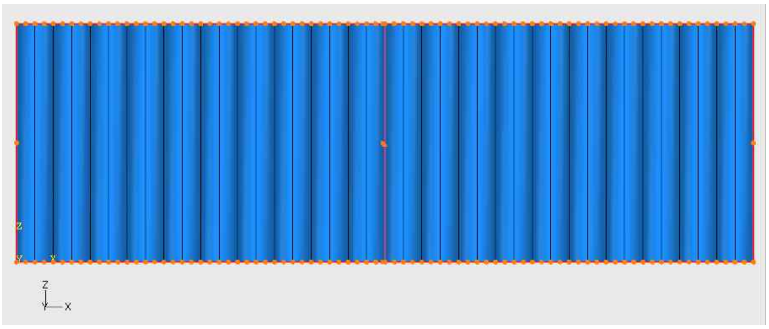


그림 2.2.2.3 주름판의 경계조건을 설정하기 위한 제어 절점

탄성 좌굴하중 산정을 위한 유한요소해석의 경우, 산정식의 적합성을 검토하기 위해서 주름판을 모델링하는 경우보다 주름진 판을 이용한 대상 부재의 모델링을 통하여 좌굴응력을 산정하는 방법도 이용되고 있다. 이것은 좌굴응력의 산정에서 순수전단에 의한 영향을 유도하기 위해서 강체요소를 이용하여 해석을 수행하였고, 고유치 해석을 통해서 최저차 모드에 대한 고유치를 좌굴하중으로 환산하였다. 이때 순수 전단응력을 유도하기 위한 경계부의 강체판 요소들의 이용은 비교적 효율적이었으나 경계조건의 처리에서 주름판만을 이용할 때와는 다소 차이가 발생한다는 것이 보고된바 있다. 순수전단의 해석에서 판형의 면내에 발생하는 응력이 균등한 분포를 갖는 조건을 충족하는 것이며, 이를 얻기 위한 다양한 경계조건의 방법이 검토되기도 하였다.

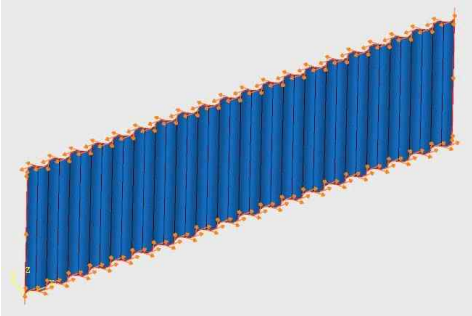


그림 2.2.2.4 순수전단좌굴해석을 위한 하중조건

나. 평판의 전단좌굴과 경계조건에 따른 해석결과의 비교

유한요소해석을 통한 전단좌굴하중 산정의 조건을 검토하기 위해서 평판을 대상으로 경계조건의 적용과정을 알아보도록 한다. 여러 문헌에서 제시되고 있는 경계조건에서 주로 사용되어진 방법은 그림 2.2.2.5에서 보는 바와 같이 네 모서리 방향의 절점과 중심선 및 중심점의 절점의 조건을 이용하여 전단좌굴하중에 대한 이론해와 비교한다. 여기서 순수전단좌굴의 정해는 순수전단좌굴의 지배미분방정식에 의해서 유도된 값이며, 판의 탄성전단좌굴에 많이 이용되는 식으로 사변 단순지지 상태의 판을 대상으로 해석을 수행하도록 한다. 사변지지에 대한 경계조건에 대해서는 전단좌굴응력을 산정할 수 있도록 전단응력의 분포가 균일하도록 하중조건과 더불어 유한요소해석에서 고려한다.

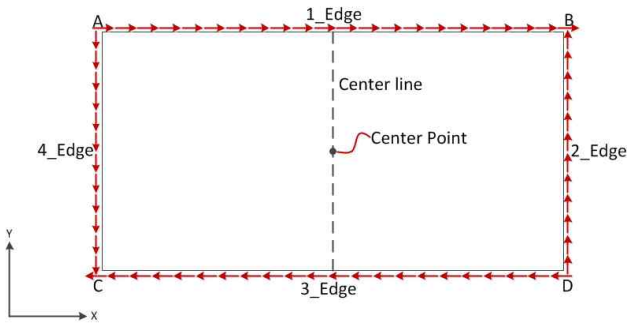


그림 2.2.2.5 평판의 전단좌굴하중 산정을 위한 경계조건

주름판의 전단좌굴하중 산정에 관한 연구에서 이용되어진 경계조건은 한택희(2000)의 경우 사면의 경계조건과 중심선의 경계 및 중심절점을 모두 이용하여 전단좌굴응력 산정에 고려되었다. 그의 논문에서 정해와 비교된 평판의 경우 매우 근사한 값을 얻었으며, 원형 주름강판에 적용하여 해석을 수행하였다. 그의 논문에서 제시된 순수좌굴응력의 평판거동의 평가는 메쉬수와 주름의 수를 결정하는데 고유치 해석에 의한 결과의 수렴정도로 판정하였다. 이승록(2004)의 문헌에서도 이와 유사한 방법을 제안하고 있지만 경계조건은 다르게 적용되었다. 한택희의 경우 중심선과 중앙절점의 변형을 허용하는 경계조건은 주름의 형태에 대한 대칭성이 필요하지만 이승록의 문헌에서는 사면의 경계와 네 꼭짓점의 경계를 적절하게 조합하

는 방법도 제시되고 있다. 두 방법에 대한 경계조건은 표 2.2.2.1과 표 2.2.2.2와 같고, 각각을 Case A와 Case B로 정의하여 다루도록 한다.

표 2.2.2.1 평판의 전단좌굴하중 산정을 위한 경계조건 CASE A - 한택희(2000)

구분			1,2,3,4_Edge	Center line	Center point
Case A	Translation	X	Free	Fix	Fix
		Y	Free	Free	Fix
		Z	Fix	Free	Free
	Rotation	X	Free	Free	Free
		Y	Free	Free	Free
		Z	Free	Free	Free

표 2.2.2.2 평판의 전단좌굴하중 산정을 위한 경계조건 CASE B - 이승록(2004)

구분			1,2,3,4_Edge	A-C	D
Case B	Translation	X	Free	Fix	Free
		Y	Free	Free	Fix
		Z	Fix	Free	Free
	Rotation	X	Free	Free	Free
		Y	Free	Free	Free
		Z	Free	Free	Free

두 경우의 다른점은 Case A의 경우 중심선과 중앙절점이 경계조건의 설정이 있는 반면 Case B의 경우는 네 꼭짓점의 경계조건이 이용되었다. 두 경우 모두 유사한 결과를 얻을 수 있으나 주름진 판의 경우는 Case A의 경우가 까다롭게 적용될 것이다. 따라서 다음의 네 가지 경우의 경계조건의 처리를 살펴보도록 한다. 표 2.2.2.3은 네 모서리의 경계절점에 대해서만 경계조건을 부여하는 조건이며, 이 과정에서 평판에 대한 해석을 수행한다. 네 모서리의 경계조건에서 대칭 조건을 부여하였으며, Case C와 D 및 Case E와 F는 각각 유사한 조건이지만 약간의 차이가 있다. Case D의 경우는 Case C에서 회전자유도를 모두 자유단으로 처리한 것이며, Case E와 Case F는 단지 경계구속조건을 두 방향에 대해서 대칭 변화하였다. Case A의 경우에서도 중심선의 고정은 모서리 경계조건에 대해서 자유로울 수 있게 처리한 것과 같이 네 모서리의 적절한 경계조건으로 면내 응력의 균등한 분포를 유도할 수 있다. 전단좌굴응력은 고유치해석을 수행하므로 최소고유치를 이용한 환산된 좌굴응력을 산정하도록 한다.

표 2.2.2.3 평판의 전단좌굴하중 산정을 위한 경계조건 Case C ~ Case E

구분			1_Edge	2_Edge	3_Edge	4_Edge
Case C	Translation	X	Fix	Free	Fix	Free
		Y	Free	Free	Free	Fix
		Z	Fix	Fix	Fix	Fix
	Rotation	X	Free	Free	Free	Free
		Y	Free	Fix	Free	Free
		Z	Free	Fix	Free	Free
Case D	Translation	X	Fix	Free	Fix	Free
		Y	Free	Free	Free	Fix
		Z	Fix	Fix	Fix	Fix
	Rotation	X	Free	Free	Free	Free
		Y	Free	Free	Free	Free
		Z	Free	Free	Free	Free
Case E	Translation	X	Fix	Fix	Fix	Fix
		Y	Free	Free	Free	Fix
		Z	Fix	Fix	Fix	Fix
	Rotation	X	Fix	Free	Fix	Free
		Y	Free	Fix	Free	Fix
		Z	Free	Free	Free	Free
Case F	Translation	X	Free	Free	Fix	Free
		Y	Fix	Fix	Fix	Fix
		Z	Fix	Fix	Fix	Fix
	Rotation	X	Fix	Free	Fix	Free
		Y	Free	Fix	Free	Fix
		Z	Free	Free	Free	Free

Case C에서 Case F까지는 모두 네 모서리만을 이용한 경계조건이며, 평판의 전단좌굴해석에 적용하여 해를 비교하도록 한다. 평판의 임계순수전단좌굴의 응력은 식 (2.2.2.1)과 같이 정의되며, 전단좌굴계수를 이용하여 가로세로비율에 따라 좌굴응력이 결정된다. (윤상렬, 2002)

$$\tau_{cr} = k_v \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{a}\right)^2 \qquad (2.2.2.1)$$

여기서, k_v는 순수전단좌굴계수이며, a은 판형의 길이와 높이 중에서 작은 값이다. 판형의

가로세로 비율을 a/h라 하였을 경우, 순수전단 좌굴미분방정식을 통해서 나온 정해 값은 식 (2.2.2.2)의 계수를 통해서 얻을 수 있다.

$$k_v = 5.35 + \frac{4.0}{\left(\frac{a}{h}\right)^2} \qquad (2.2.2.2)$$

본 절에서 적용되는 평판의 이론해에 대한 경계조건도 사변이 단순지지된 평판으로 가정하였으며, 각각의 경계조건에 따른 해석결과를 유한요소 해석과 비교하여 나타내었다. 형상은 가로세로가 각각 1m X 1m, 2m, 3m로 채택하였으며, 탄성계수 $E = 2.1 \times 10^5 MPa$, 포아송비 $\nu = 0.3$ 을 각각 이용하였다. 두께는 10mm로 하였으며, 여섯 가지 경계조건에 대해서 해석을 수행하였다. 일반적으로 가로세로비율이 증가할수록 전단좌굴응력의 변화는 작아진다. 이상의 조건에 대한 해석결과를 표 2.2.2.4에서 표 2.2.2.6에 나타내었고, 각각의 경우 오차의 변화를 그림 2.2.2.6-그림 2.2.2.8에 나타내었다.

평판의 가로세로비가 동일한 모델의 해석결과를 그림 2.2.2.6에 나타내었으며, 경계조건 Case A, B, D의 경우가 정해와 가장 일치하였고, Case E, F는 매우 큰 차이를 보였다. 표 2.2.2.4에서 보는 것과 같이 좌굴모드에서도 동일한 차이를 보이고 있다. 표에서 보는 바와 같이 정해와 잘 일치하는 좌굴모드는 면외방향 좌굴모드의 형상이 유사한데 비해서 Case E와 F는 타원형상이 더 길게 나타나며 곡률의 변화가 한번더 발생한다. 가장 일치하는 경우의 오차는 Case A, B, D가 동일하게 0.9116%로서 정해와 매우 일치하며, 가장 일치하지 않는 경우의 오차는 56.3306%로 Case E와 F는 매우 부적합한 조건에 해당된다.

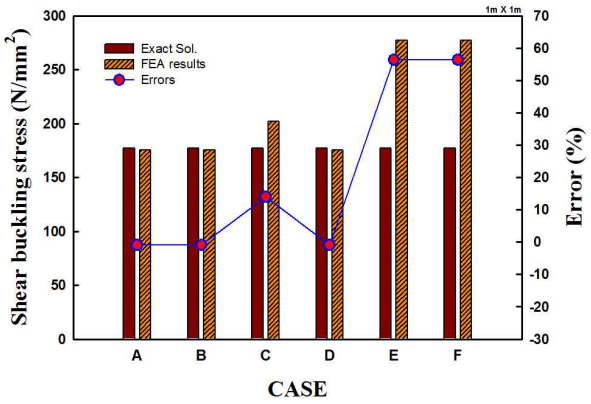


그림 2.2.2.6 평판의 전단좌굴응력 계산결과와 정해와의 비교 1000mmX1000mm

가로세로비가 1:2인 모델의 해석결과를 그림 2.2.2.7에 나타내었으며, 경계조건 Case A, B, C, D의 경우가 정해와 가장 일치하였고, Case E, F는 매우 큰 차이를 보였다. 이것은 가로세로비가 동일한 모델과 유사하나 Case C의 정밀도가 더 높아졌다. 이와 같은 결과의 전단좌굴응력을 표 2.2.2.4에 나타내었으며, 표에서 보는 것과 같이 좌굴모드에서도 동일한 차이를 보이고 있다. 표에서 정해와 잘 일치하는 좌굴모드는 면외방향 좌굴모드의 형상이 유사한

데 비해서 Case E와 F는 전혀 다른 형상의 모드로 나타난다. 가장 일치하는 경우는 Case C로 오차는 0.1158%로서 정해와 매우 일치하며, 가장 일치하지 않는 경우는 이전 모델과 동일한 경우인 Case E와 F로 오차는 54.9861%이다. 경계조건 Case E와 F는 가로세로비가 동일한 모델과 같이 여전히 부적합한 조건에 해당되었다.

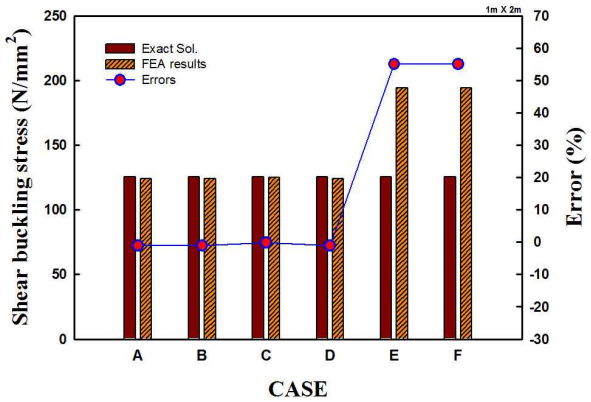


그림 2.2.2.7 평판의 전단좌굴응력 계산결과와 정해와의 비교 1000mmX2000mm

가로세로비가 1:3인 모델의 해석결과를 그림 2.2.2.8에 나타내었으며, 경계조건 Case A, B, C, D의 경우가 정해와 가장 일치하였고, Case E, F는 매우 큰 차이를 보였다. 이것은 앞서 선행한 두 모델과 동일한 결과이며, 1:2의 모델에서와 같이 Case C의 정밀도가 가장 높다. 이와 같은 결과의 전단좌굴응력을 표 2.2.2.5에 나타내었으며, 표에서 보는 것과 같이 좌굴모드에서도 동일한 차이를 보이고 있다. 표에서 정해와 잘 일치하는 좌굴모드는 좌굴모드의 형상이 유사한데 비해서 Case E와 F는 전혀 다른 형상으로 나타난다. 가장 일치하는 경우는 Case C로 오차는 0.7430%로서 정해와 매우 일치하며, 가장 일치하지 않는 경우는 이전 모델과 동일한 경우인 Case E와 F로 오차는 61.3277%이다. 경계조건 Case E와 F는 가로세로비가 동일한 모델과 같이 여전히 부적합한 조건에 해당되었다.

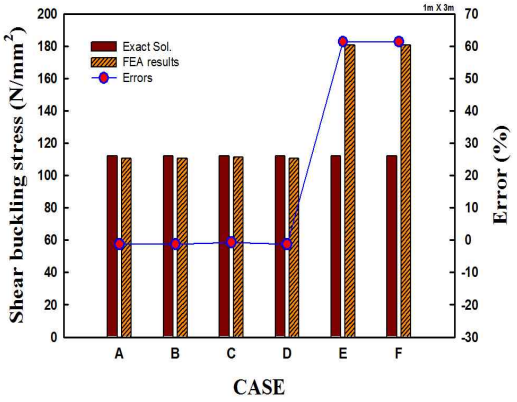


그림 2.2.2.8 평판의 전단좌굴응력 계산결과와 정해와의 비교 1000mmX3000mm

해석결과에서 볼 때, 평판의 조건에서 경계조건은 Case C가 가장 적합하며, 가로세로 비율이 1:2이상에서는 매우 좋은 결과를 얻고 있으며, Case A, B, D의 결과도 비교적 적용 가능하다. 그러나 Case E와 F의 경우는 전단좌굴응력을 산정하기에는 부적절한 경우이다.

표 2.2.2.4 평판의 전단좌굴모드와 좌굴응력 계산결과 1000mmX1000mm (N/mm^2)

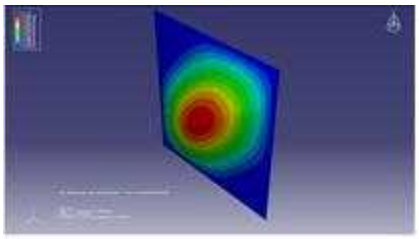
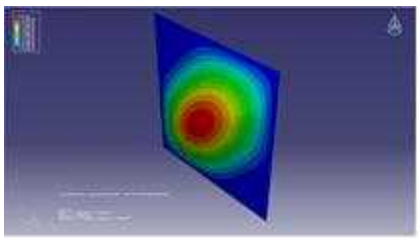
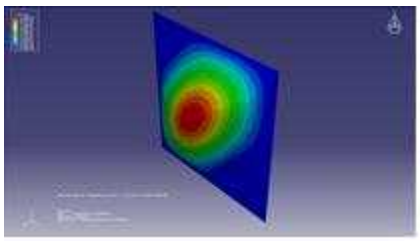
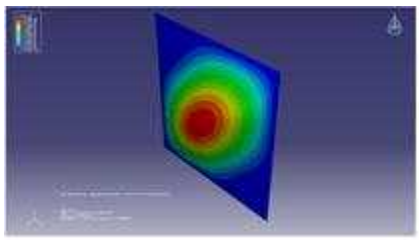
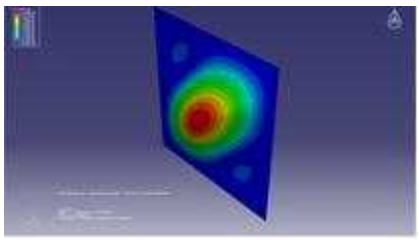
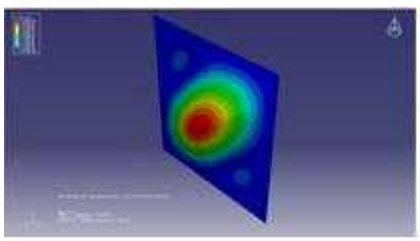
Case	Buckling mode	Exact Sol.	FEM result	Error(%)
A		177.273	175.657	-0.9116
B		177.273	175.657	-0.9116
C		177.273	202.040	13.9711
D		177.273	175.657	-0.9116
E		177.273	277.132	56.3306
F		177.273	277.132	56.3306

표 2.2.2.5 평판의 전단좌굴모드와 좌굴응력 계산결과 1000mmX2000mm (N/mm^2)

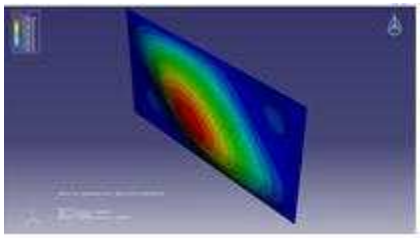
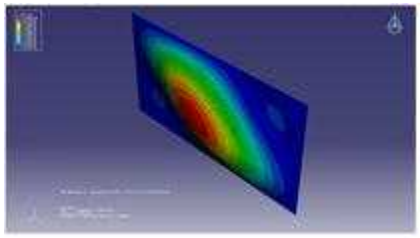
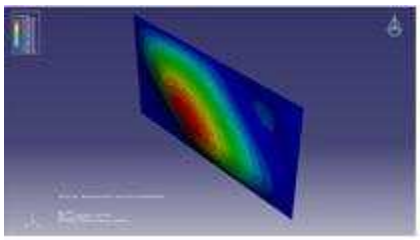
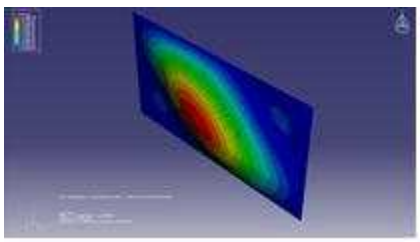
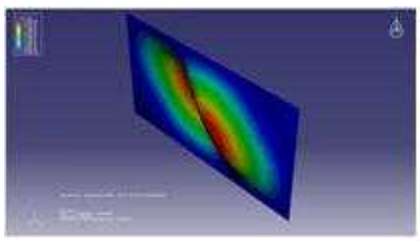
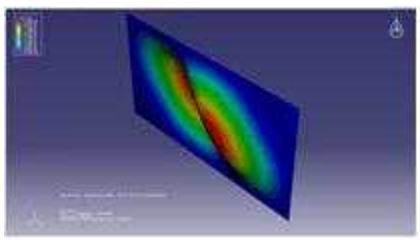
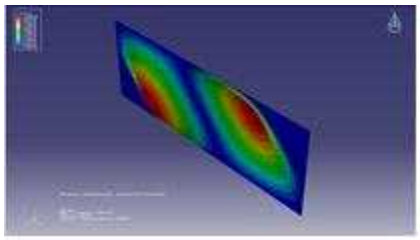
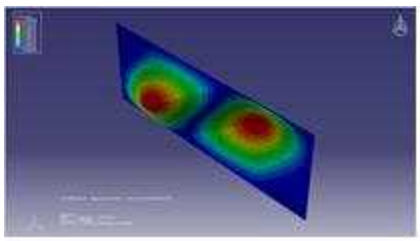
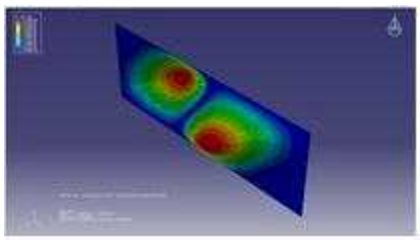
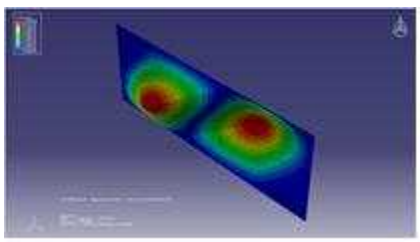
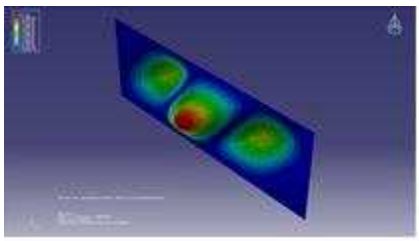
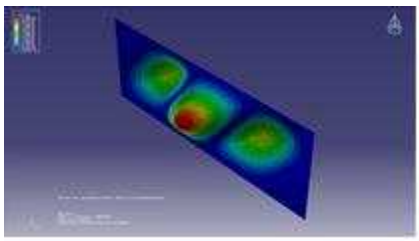
Case	Buckling mode	Exact Sol.	FEM result	Error(%)
A		125.268	123.865	-1.1200
B		125.268	123.865	-1.1200
C		125.268	125.123	-0.1158
D		125.268	123.865	-1.1200
E		125.268	194.148	54.9861
F		125.268	194.148	54.9861

표 2.2.2.6 평판의 전단좌굴모드와 좌굴응력 계산결과 1000mmX3000mm (N/mm^2)

Case	Buckling mode	Exact Sol.	FEM result	Error(%)
A		111.982	110.512	-1.3127
B		111.982	110.511	-1.3136
C		111.982	111.150	-0.7430
D		111.982	110.511	-1.3136
E		111.982	180.658	61.3277
F		111.982	180.658	61.3277

다. 유한요소 분할에 따른 전단좌굴해석과 좌굴응력

유한요소 해석의 경우 해는 요소의 분할에 따라 그 값이 달라진다. 앞서 설명된 경계조건의 적용과 더불어 해석요소수의 결정은 해의 정도를 설명하는 방법이 된다. 특히, 요소수의 분할을 너무 많이 늘이는 것은 비효율적인 해석결과를 얻을 수 있으며, 너무 작은 분할 수는 해석결과에 대한 신뢰도에 문제가 있다. 따라서 해석결과의 검증과 함께 적절한 분할 수를 결정하기 위해서 본 절에서는 경계조건에 따른 전단좌굴강도에 있어서 분할수에 따른 해석결과의 수렴관계를 고찰해 보도록 한다. 앞 절에서 설명한 바와 같이 경계조건에 따라 해석의 정도와 순수전단에 대한 모델링의 결과에 대해서 유한요소 분할 수를 이용하여 파라메트릭 스터디를 하도록 한다. 여기서 채택된 경계조건은 평판의 해석결과에서 매우 안정적인 해석결과를 얻을 수 있었던 Case A, C, D만을 대상으로 해석을 수행하도록 하며, 물성치와 형상의 조건은 앞 절에서 설명한 바와 같다. 해석을 수행하기 위해 채택된 모델은 표2.2.2.7에 나타난 바와 같고, 요소분할수, 경계조건 및 주름판의 두께에 대해서 고려되었으며, 본 절에서는 정현파형 주름판에 대해서만 다루도록 한다.

표 2.2.2.7 요소분할수를 고려한 주름판의 해석대상 모델

구분	비고
요소분할수 (Number of Mesh)	3-10
경계조건 (Boundary Condition)	Case A, C, D
주름 길이 (w)	77.5mm
주름 깊이 (a_3)	40mm
주름판 두께 (t)	2.5, 5.0, 10.0, 15.0mm

해석결과는 그림 2.2.2.9-그림 2.2.2.11에 나타내었다. 모든 경우에서 주름판 두께의 증가는 좌굴응력의 증가를 보였고, 요소분할 수의 증가에 따라 좌굴응력은 수렴하였다.

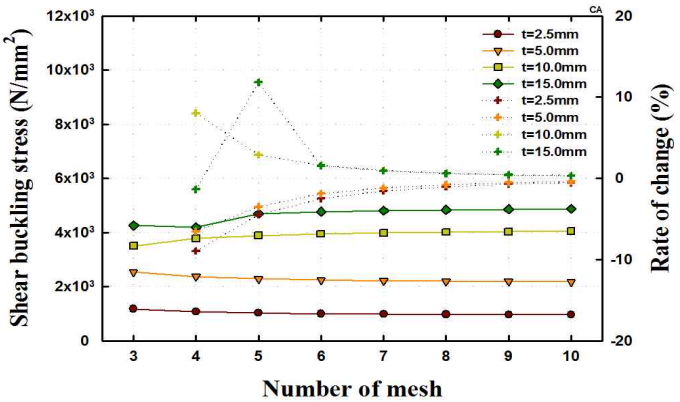


그림 2.2.2.9 요소분할수에 따른 전단좌굴응력의 변화와 감소율 (Case A)

경계조건에 대해서 Case A의 모델인 그림 2.2.2.9의 경우 두께의 증가에 따른 좌굴응력은 증가하는 경향을 보였으며, 두께와 관계없이 분할 수가 7 이상에서 감소율의 변화가 작아지기 시작하며 수렴하였다. 이와 같은 결과에서 볼 때, 해석 요소수가 7 이상의 분할에서 좋은 결과를 기대할 수 있다.

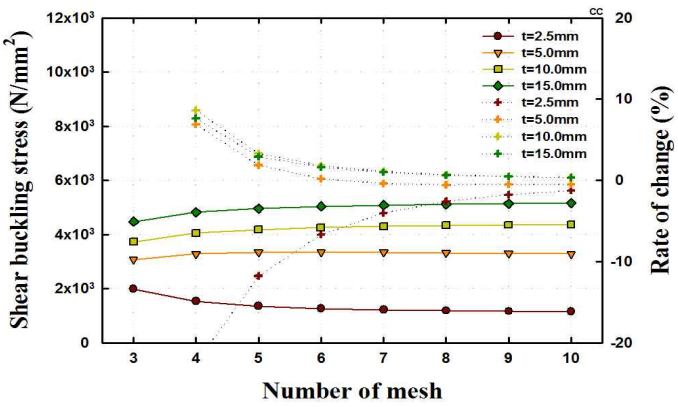


그림 2.2.2.10 요소분할수에 따른 전단좌굴응력의 변화와 감소율 (Case C)

경계조건에 대해서 Case C의 모델인 그림 2.2.2.10의 경우도 Case A의 경우와 같이 두께의 증가에 따른 좌굴응력은 증가하며, 두께에 따라 다소 차이는 있지만 요소분할 수가 7 이상에서 감소율의 변화가 작아지기 시작하며 수렴하였다. 이것은 Case A에서와 동일한 결과이지만 두께에 따른 감소율의 변화가 나타났다. 그러나 요소분할수가 9 이상에서 매우 작은 변화율을 보이고 있다.

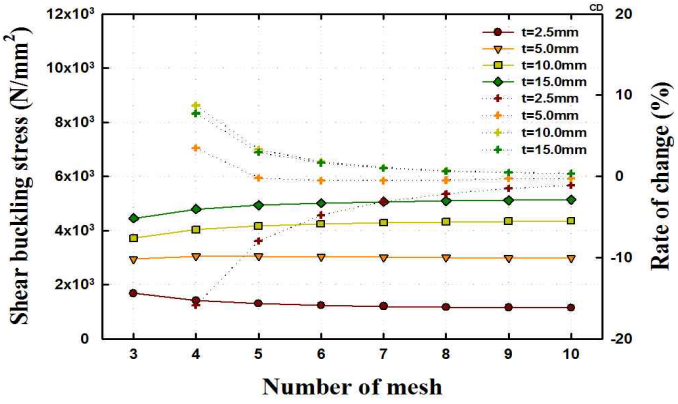


그림 2.2.2.11 요소분할수에 따른 전단좌굴응력의 변화와 감소율 (Case D)

Case D의 결과인 그림 2.2.2.11의 경우도 앞서 두 경계조건과 마찬가지의 결과를 얻었으며, Case C의 경우와는 매우 유사한 경향임을 알 수 있다. 이 모델도 요소분할 수가 7 이상에서 감소율의 변화가 작아지기 시작하며 수렴하였다. 이것은 Case A에서와 동일한 결과이지만 두께에 따른 감소율의 변화가 나타났다. 이상의 결과에서 볼 때, 해석요소의 분할은 8

개 이상의 분할을 가질 경우 매우 근소한 오차 범위내의 전단좌굴응력값을 얻을 수 있을 것으로 생각한다.

라. 주름의 수에 따른 전단좌굴해석과 좌굴응력

등방성 재질의 주름판, 즉 한 방향으로는 아코디언 효과가 다른 한 방향으로는 매우 강성이 큰 효과를 볼 수 있는 경우 주름의 수에 따른 강도의 감소율을 생각해 볼 수 있다. 주름의 길이가 판의 측면길이에 비해 매우 작다면 근사적으로 직교 이방성 판재로 고려될 수 있으며, 이와 같은 연구가 많이 진행되었다. 따라서 해석결과의 검증과 함께 경계조건에 따른 전단좌굴강도에 있어서 주름 수에 따른 감소율의 판형 범위를 고찰해 볼 필요가 있다. 앞 절에서 설명한 바와 같이 경계조건에 따라 해석의 정도와 순수전단에 대한 모델링의 결과에 대해서 주름의 수와 함께 해석결과를 고찰해 보도록 한다. 여기서 채택된 경계조건은 평판의 해석결과에서 매우 안정적인 해석결과를 얻을 수 있었던 Case A, C, D만을 대상으로 해석을 수행하도록 하며, 물성치와 형상의 조건은 앞 절에서 설명한 바와 같다. 해석을 수행하기 위해 채택된 모델은 표 2.2.2.8에 나타난 바와 같고, 주름수, 경계조건 및 주름판의 두께에 대해서 고려되었으며, 정현파형 주름판을 대상으로 해석을 수행한다.

표 2.2.2.8 주름수를 고려한 주름판의 해석대상 모델

구분	비고
주름수 (Number of Corrugation)	1-10
경계조건 (Boundary Condition)	Case A, C, D
주름 길이 (w)	77.5mm
주름 깊이 (a_3)	40mm
주름판 두께 (t)	2.5, 5.0, 10.0, 15.0mm

해석결과는 그림 2.2.2.12-그림 2.2.2.14에 나타내었다. 모든 경우에서 주름판 두께의 증가는 좌굴응력의 증가를 보였고, 주름수의 증가에 따라 좌굴응력은 수렴하였다.

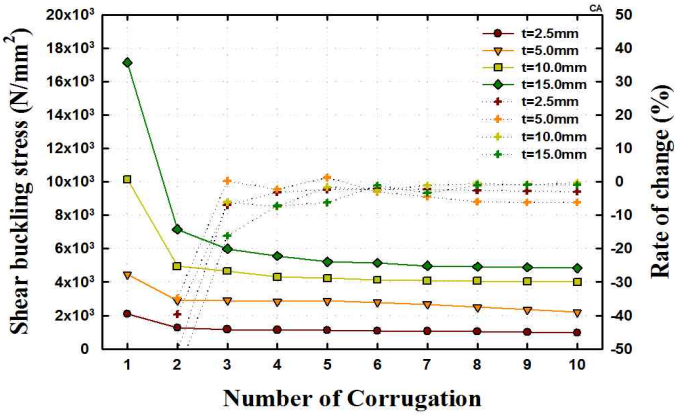


그림 2.2.2.12 주름수에 따른 전단좌굴응력의 변화와 감소율 (Case A)

경계조건에 대해서 Case A의 모델인 그림 2.2.2.12의 경우 두께의 증가에 따라 전단좌굴응력은 증가하였으며, 두께가 두꺼운 경우 전단좌굴응력의 변화가 크게 나타났으며, 주름의 수가 6 이상에서 감소율의 변화가 작아지기 시작하며, 7 이상에서 변화율 변동이 낮아지기 시작한다. 두께가 얇고 주름수가 많은 경우 변화율은 두께가 두꺼운 경우에 비해서 상대적으로 높은 갚을 가지지만 주름수가 낮은 경우에 비해 현저히 낮은 결과를 보이고 있다. 평판과 비교해서 유사한 결과를 보이고 있으며, 길이가 길어질수록 전단좌굴응력은 하나의 값으로 수렴하는 것을 예상할 수 있다.

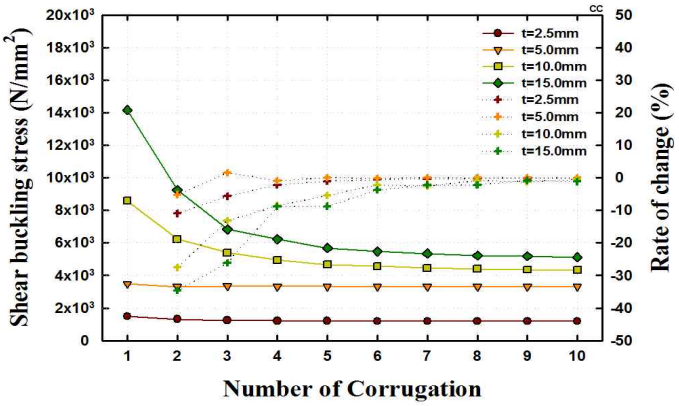


그림 2.2.2.13 주름수에 따른 전단좌굴응력의 변화와 감소율 (Case C)

경계조건 Case C의 모델인 그림 2.2.2.13에서도 두께의 증가에 따른 증가와 변화율 감소를 보였으며, 두께가 두꺼운 경우 감소하는 변화는 크게 나타났으며, 주름의 수가 6 이상에서 감소율의 변화가 작아지기 시작하며, 7 이상에서 변화율 변동이 낮아지기 시작한다. 두께가 얇고 주름수가 많은 경우 변화율은 두께가 두꺼운 경우에 비해서 상대적으로 높은 갚을 가지지만 주름수가 낮은 경우에 비해 현저히 낮은 결과를 보이고 있다. Case A와 비교해 유사한 변화를 보이고 있으나 변화율은 Case A와 비교해서 매우 부드러운 변화 곡선을 보이고 있으며, 수렴과정이 잘 설명되고 있다. 또한 Case A와 마찬가지로 평판과 비교해서 유사한 결과를 보이고 있으며, 길이가 길어질수록 전단좌굴응력은 하나의 값으로 수렴하는 것을 예상할 수 있다.

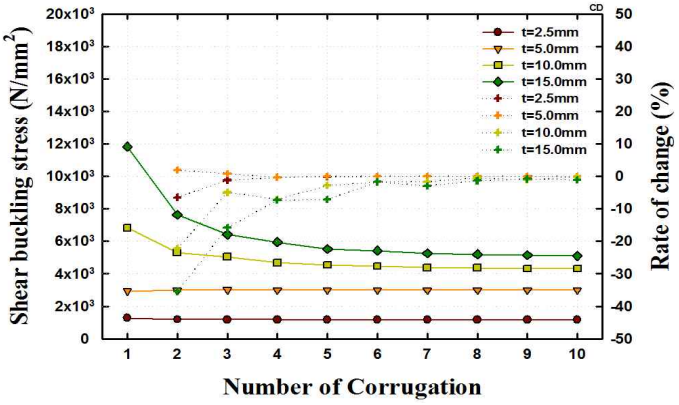


그림 2.2.2.14 주름수에 따른 전단좌굴응력의 변화와 감소율 (Case D)

경계조건 Case D의 모델인 그림 2.2.2.14에서도 두께의 증가에 따른 다른 모델과 유사한 경향의 결과를 보였으며, 두께가 두꺼운 경우 감소하는 변화는 크게 나타났다. 주름의 수가 6 이상에서 감소율의 변화가 작아지기 시작하며, 7 이상에서 변화율 변동이 낮아지기 시작한다. 두께가 얇고 주름수가 많은 경우 변화율은 두께가 두꺼운 경우에 비해서 상대적으로 높은 값을 가지지만 주름수가 낮은 경우에 비해 현저히 낮은 결과를 보이고 있다. Case A, C와 비교해 유사한 변화를 보이고 있으나 변화율은 Case A와 비교해서 매우 부드러운 변화곡선을 보이고 있으며, Case C와 더불어 수렴과정이 잘 설명되고 있다. 또한 Case A와 마찬가지로 평판과 비교해서 유사한 결과를 보이고 있으며, 길이가 길어질수록 전단좌굴응력은 하나의 값으로 수렴하는 것을 예상할 수 있다. 이상의 결과에서 살펴볼 때 주름 수의 변화에 따른 전단좌굴응력의 감소를 설명하는 데는 경계조건이 Case C와 Case D의 경우가 보다 더 매끄러운 곡선으로 나타났으며, 해석결과의 전단좌굴강도 변화 또한 유사하게 나타났다.

그림 2.2.2.15에서 그림 2.2.2.18는 이와 같은 결과를 각 두께별 경계조건의 변화와 함께 나타낸 그림이다. 그림에서 볼 때, 해석결과들은 경계조건의 경우 매우 유사한 결과를 보이고 있으며, 다소간의 차이는 있으나 전단좌굴해석에 모두 유효한 경계조건의 결과를 나타내고 있다.

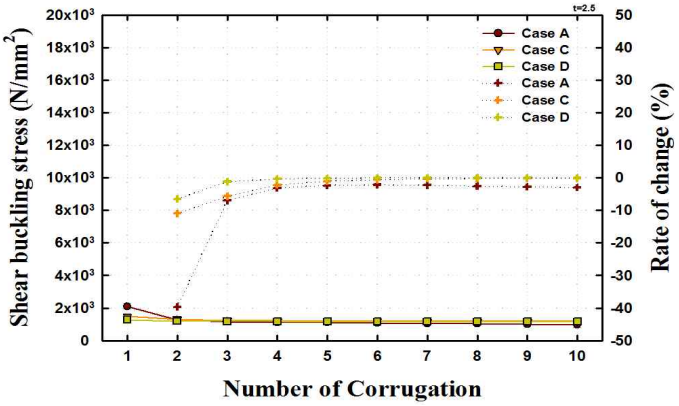


그림 2.2.2.15 주름수에 따른 전단좌굴응력의 변화와 감소율 (t=2.5mm)

두께 2.5mm의 해석결과인 그림 2.2.2.15의 경우 Case A의 경우만이 낮은 주름수에서 최저값을 보이며 변화율이 변화하였고, 나머지 영역에서는 채택된 경계조건에서 모두 유사한 결과를 얻었다. 그리고 주름의 수에 따라서 수렴하는 과정이 매우 잘 나타나며, 각 경우에서 모두 유사한 범위에서 계산되고 있다. 변화율의 변동 또한 앞서 설명한 바와 같이 일정한 수가 넘어서면 변화가 없어지기 시작하며, 이것은 평판에서 나오는 결과와 유사하다. 물론 형상의 특성에 따라서 이러한 결과 외에도 다양한 형상의 변화를 기대할 수 있으나 채택된 범위의 형상과 경계조건에서는 매우 단순한 양상만을 나타내고 있다. 형상의 변화에 따른 주름판의 전단좌굴의 경우 국부좌굴과 전체좌굴의 발생영역이 변화하므로 연성구간에 대한 고찰이 필요할 것이며, 이러한 주제에 대해서는 본 절에서는 다루지 않도록 한다.

두께 5.0mm의 해석결과인 그림 2.2.2.16의 경우도 Case A의 경우만이 낮은 주름 수에서 최저값을 보이며 변화율이 변화하였고, 나머지 영역에서는 채택된 경계조건에서 모두 유사한

결과를 얻었다. 그리고 주름의 수에 따라서 수렴하는 과정이 매우 잘 나타나며, 각 경우에서 모두 유사한 범위에서 계산되고 있다. 변화율의 변동 또한 앞서 설명한 바와 같이 일정한 수가 넘어서면 변화가 없어지기 시작하며, 이것은 평판에서 나오는 결과와 유사하다.

두께 10.0mm의 해석결과인 그림 2.2.2.17의 경우도 Case A의 경우만이 낮은 주름 수에서 최저값을 보이며 변화율이 변화하였고, 나머지 영역에서는 채택된 경계조건에서 모두 유사한 결과를 얻었다. 이와 같은 결과는 두께 2.5mm와 5.0mm에서도 동일한 결과이며, 주름의 수에 따라서 수렴하는 과정이 매우 잘 나타나고 있다. 각 경우에서 모두 유사한 범위로 수렴하고 있으며, 변화율의 변동 또한 앞서 설명한 바와 같이 일정한 수가 넘어서면 변화가 없어지기 시작한다.

그림 2.2.2.18에서 보는 바와 같이 두께 15.0mm의 경우도 Case A의 경우만이 낮은 주름 수에서 최저값을 보이며 변화율이 변화하였고, 나머지 영역에서는 채택된 경계조건에서 모두 유사한 결과를 얻었다. 이와 같은 결과는 앞서 언급한 대로 모든 예제에서 동일하게 설명되고 있으며, 주름의 수에 따라서 수렴하는 과정이 매우 잘 나타나고 있다. 이와 같은 결과에서 볼 때, 경계조건의 설정에서 Case A, C 및 D의 경우는 비교적 가로세로비율이 큰 모델의 전단좌굴응력을 계산할 경우 모두 적용 가능한 경계조건으로 생각된다.

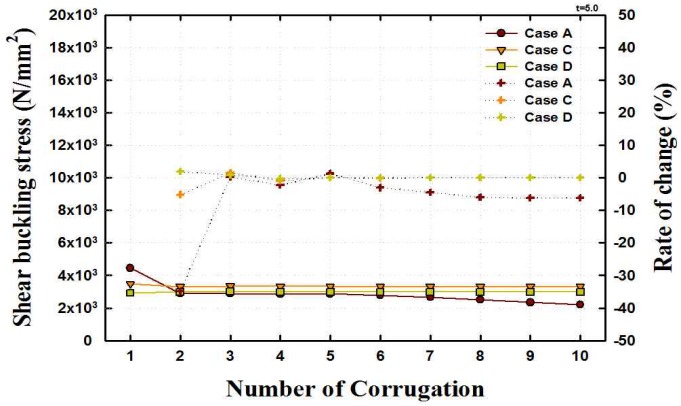


그림 2.2.2.16 주름수에 따른 전단좌굴응력의 변화와 감소율 (t=5.0mm)

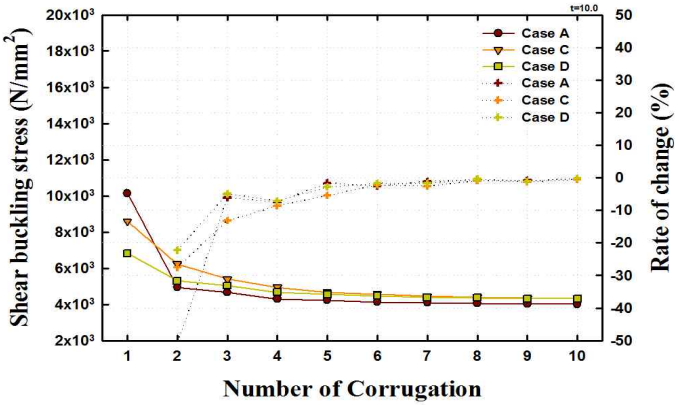


그림 2.2.2.17 주름수에 따른 전단좌굴응력의 변화와 감소율 (t=10.0mm)

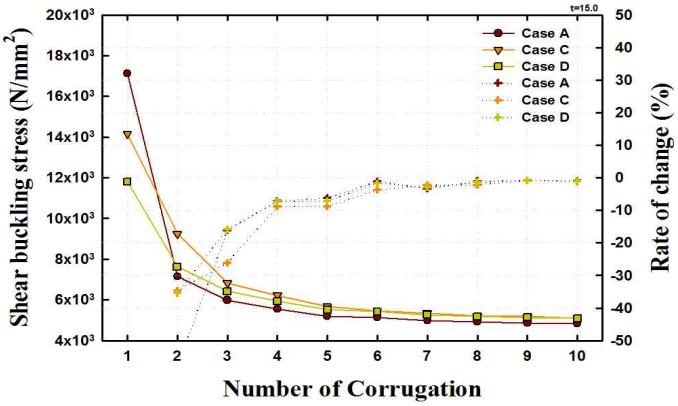


그림 2.2.2.18 주름수에 따른 전단좌굴응력의 변화와 감소율 (t=15.0mm)

마. 정현파형 주름판의 전단좌굴모드와 형상

요소분할과 주름 수의 영향에 대해서 살펴본 바와 같이 요소를 많이 분할할수록 더 정밀한 해에 도달하고, 주름의 수가 늘어날수록 전단좌굴응력의 값은 일정한 값으로 수렴한다. 그러나 경계조건에 따라 값의 분포와 변화율은 다소 다르게 나타나며, 본 절에서는 좌굴모드에 대해서 전단좌굴의 흐름을 관찰할 수 있는 경계조건과 변화의 특성을 고찰하도록 한다. 다루게 될 예제는 각각의 경계조건에 대해서 앞에서 다루었던 정현파형 주름판 모델이며, 최저차고유치에 상응하는 고유모드를 이용하도록 한다. 해석 형상을 설명하며, a_3=40mm, w=77.5mm의 주름형상에 대해서 판의 높이 h=500mm, 그리고 주름판의 길이 L=1550mm으로 판의 가로세로 길이비가 약 1:3에 해당되는 모델이며, 주름 수(L/2w)는 모두 10개이다.

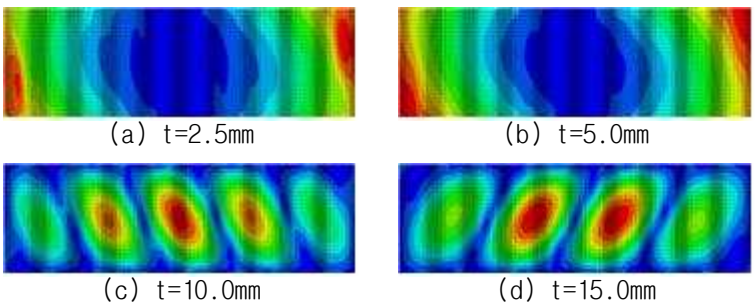


그림 2.2.2.19 정현파형 주름판의 전단좌굴모드형상 (Case A, 요소분할 5)

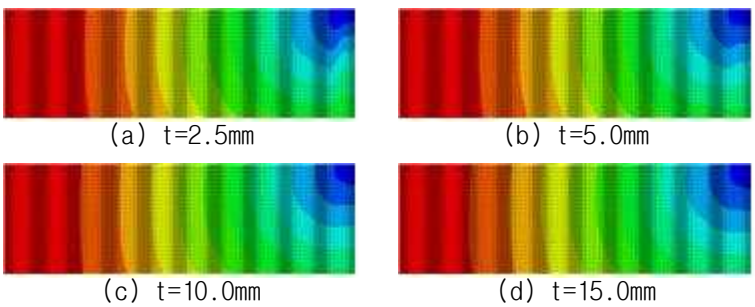


그림 2.2.2.20 정현파형 주름판의 전단좌굴모드형상 (Case B, 요소분할 5)

우선, 정현파형 주름의 반주기에 요소 분할을 5개로 하였을 때의 좌굴모드 결과형상을 그림 2.2.2.19에서 그림 2.2.2.22에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 경계조건 Case A의 경우 두께 t가 10mm 이상의 모델에서는 전체좌굴모드의 형상이 나타났으며, 두께 2.5mm와 5.0mm에서는 좌굴모드의 형태가 주름판의 국부좌굴이나 전체좌굴의 형태에서 나타나는 양상과는 조금 다른 형태를 보이고 있으며, 전체 판의 모서리에서 국부적인 형상의 변화가 나타났다. Case B의 경우는 이와는 전혀 다른 모드의 형상으로 전단에 의한 면외방향 전단좌굴거동 형상은 나타나지 않는다. 채택된 모든 두께의 모델에서 동일한 형상을 나타내고 있으며, 주름 내부에서의 국부적 전단좌굴형상이나 주름과 주름사이를 넘어선 전체 전단좌굴의 모드가 나타나지 않는 것은 경계조건의 잘못된 설정으로 설명할 수 있다. 휨 변형과 같은 모드의 형상에 대해 상응하는 전단좌굴형상을 나타내고 있다.

그림 2.2.2.21에서 보는 바와 같은 경계조건 Case C의 경우는 낮은 두께에서는 국부좌굴이 두꺼운 모델에서는 전체좌굴이 발생하는 형상을 보여주고 있으며, 주름판 전단좌굴의 형상을 잘 설명해 주고 있다. 일반적으로 동일한 형상과 크기의 주름판에서 두께의 변화는 국부좌굴에서 전체좌굴로 변화하는 양상에 대해서 경계조건 Case C의 결과는 매우 만족할 수 있는 결과이다.

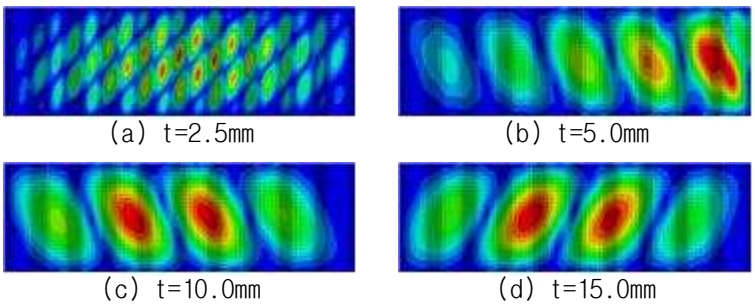


그림 2.2.2.21 정현파형 주름판의 전단좌굴모드형상 (Case C, 요소분할 5)

그림 2.2.2.21의 Case C와 유사한 경계조건인 Case D의 경우는 얇은 두께에서는 국부좌굴이 두꺼운 모델에서는 전체좌굴이 발생하는 형상을 보여주고 있으나 얇은 두께에서의 형상이 모서리에 매우 가까운 영역에서 나타난다. 일반적인 두께의 변화를 잘 설명해 주고 있으나 국부좌굴에 대한 형상이 Case C의 결과와 비교해 볼 때, Case C의 경우가 보다 명확하게 나타난다.

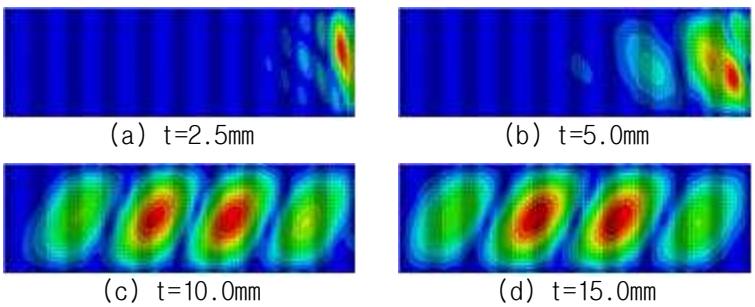


그림 2.2.2.22 정현파형 주름판의 전단좌굴모드형상 (Case D, 요소분할 5)

이와 같은 결과에 대해서 보다 세분한 요소분할의 경우에 대해서 살펴보도록 한다. 그림 2.2.2.23과 그림 2.2.2.24는 Case C와 Case D의 경우에 대해서 요소분할이 이전 모델에 비해 두 배 높게 분할한 10등분 분할 수 모델이다. 그림에서 보는 바와 같이 5등분 분할한 모델에 비해서 보다 더 자세한 패턴이 형성되지만 결과는 매우 유사하며, 두께 5mm의 결과는 국부좌굴과 전체좌굴의 중간영역에 해당되는 연성좌굴로 생각된다. 두 좌굴의 명확한 패턴의 분할을 통해서 좌굴모드의 신뢰성을 확보할 수 있으며, 두께의 파라메타에 대한 좌굴형상모드의 변화를 구할 수 있다.

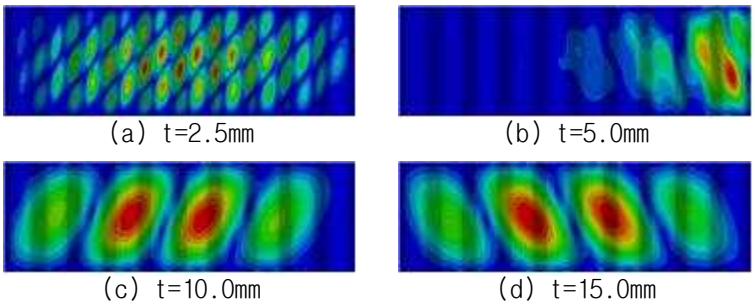


그림 2.2.2.23 정현파형 주름판의 전단좌굴모드형상 (Case C, 요소분할 10)

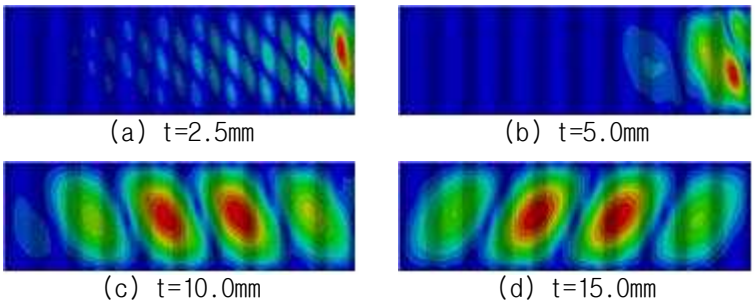


그림 2.2.2.24 정현파형 주름판의 전단좌굴모드형상 (Case D, 요소분할 10)

3. 파라메트릭 스터디를 통한 주름강판의 전단좌굴 특성분석

주름판의 순수전단좌굴거동은 국부좌굴과 전체좌굴 및 이들의 연성작용에 의한 좌굴로 나타난다. 하나의 주름 내부의 판에서 나타나는 국부좌굴은 사변지지 평판의 탄성전단좌굴이론식을 이용해서 특성과 좌굴응력을 산정할 수 있으며, 여러 주름에 걸쳐서 나타나는 전체좌굴은 이방성 평판으로 가정한 판 좌굴이론으로 좌굴응력에 대한 평가를 수행하여 좌굴에 대한 저항능력을 판단한다. 그러나 두 좌굴사이에서의 연성작용의 발생은 좌굴응력의 판단에 있어서 여러 영향을 미칠 수 있으며, 두 좌굴저항능력에 대한 우위를 가리기 힘든 형상과 두께의 모델에서 발생하게 된다. 이와 같은 전단좌굴응력의 산정 이론식에 있어서 평판에서 사용되어지는 이론식의 확장은 전단좌굴에 대한 정확한 값과 전단좌굴의 특성을 정의하고 예측하는데 어려움이 있으며, 연성좌굴이 발생하는 구간과 국부 및 전체좌굴의 발생 범위에 대한 해석적 방법의 접근이 필요하다. 따라서 본 장에서는 이와 같은 주름판의 좌굴응력의 산정에 있어서 유한요소법을 이용하여 산정하도록 하며, 전단좌굴응력의 변화와 전단좌굴모드의 특성변화를 다양한 파라메타를 설정하여 고찰하고자 한다. 주름형상은 마름모형과 정현파형 주름판으로 채택하며, 요소 분할과 주름 수는 해석결과의 신뢰도를 위해 충분히 큰 값을 이용한다.

가. 마름모형 주름판의 형태에 따른 전단좌굴응력

마름모형 주름판의 형태에 따른 전단좌굴에 대한 해석에 있어서 경계조건에 대한 해석결과를 먼저 살펴보도록 한다. 앞 장에서 다루었던 경계조건 중에서 Case A, B, C 및 D를 적용하기로 하며, 앞서 설명한대로 Case B의 경우는 전단좌굴모드의 결과형상에서 좌굴의 형태를 표현하는데 어려움이 있었고, Case C와 D의 경우가 비교적 이상적인 결과를 얻었다.

우선, a_1=30mm, a_2=47.5mm, a_3=40mm의 마름모꼴의 형상에 대해서 살펴보도록 하며, 모델에 적용되는 두께 t는 각각 2.5, 5.0, 10.0 및 15.0mm이다. 해석결과는 그림 2.2.3.1에 나타난 바와 같으며, 앞서 설명된 바와 같이 두께 2.5mm 모델에서 경계조건 Case B의 좌굴응력 산정값이 다른 조건의 모델과 다르게 나타났다. 경계조건의 경우에서는 Case B를 제외하고는 유사한 값으로 나타났으며, 두께의 증가에 따라 좌굴하중응력도 증가하는 결과를 보였다.

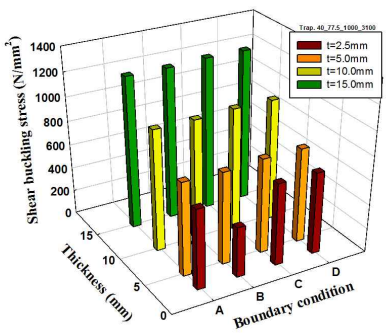


그림 2.2.3.1 마름모형 주름판의 경계조건과 전단좌굴응력

다음으로 a_1=30mm, a_2=47.5mm, a_3=40mm의 마름모꼴 모델에서 주름의 수(L/2w)를 12, 16, 20일 때의 결과를 그림 2.2.3.2에 나타내었으며, 경계조건은 Case C를 이용하였다. 그림에서 보는 바와 같이 두께의 변화에 좌굴응력은 증가하지만 주름의 수가 충분히 많을 경우 좌굴응력의 변화는 크게 나타나지 않았다. 또한 주름의 형상 파라메타가 a_1=200mm, a_2=196mm, a_3=40mm의 형상의 결과와 비교해 볼 때, 좌굴응력 산정 값은 작게 나타났다. 그러나 두께가 증가할수록 두 형상의 좌굴응력의 차이는 작아진다.

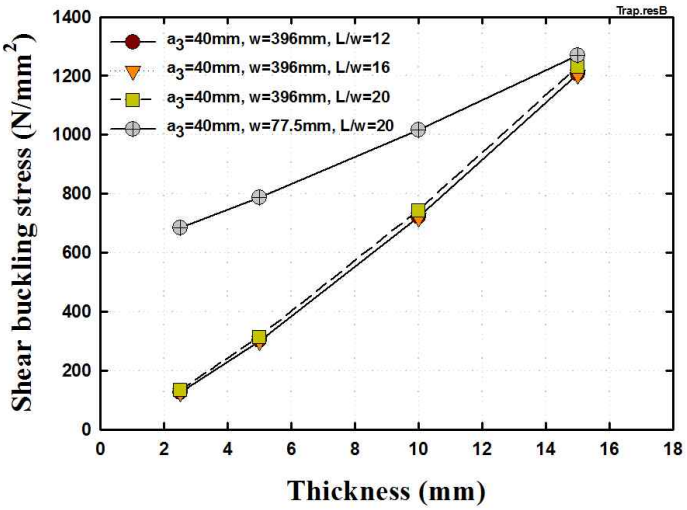


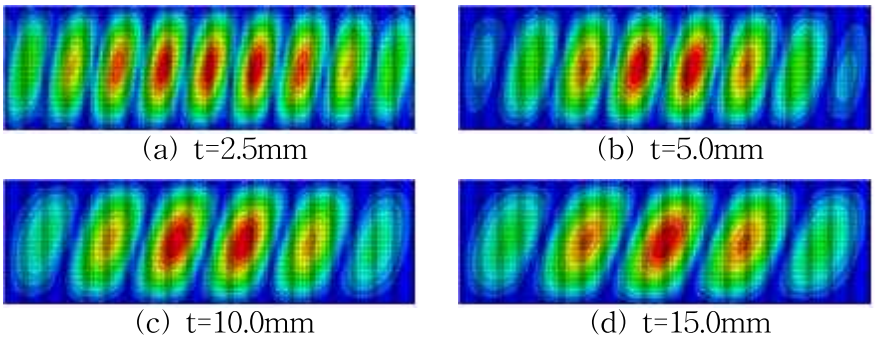
그림 2.2.3.2 마름모형 주름판의 형상에 따른 전단좌굴응력 특성

위의 그림에서 볼 때, 주름깊이가 동일한 모델에서 주름길이가 긴 모델의 좌굴응력은 낮아진다. 그러나 두께가 두꺼워 질수록 두 좌굴응력의 차이는 점점 줄어드는 것을 알 수 있으며, 두께가 15.0mm모델에서는 두 값의 차이가 매우 작아진다. 이와 같은 현상은 형상에 따라 나타나는 좌굴응력의 특징이며, 두께가 얇은 모델에서는 국부좌굴이 두께가 두꺼운 모델에서는 전체좌굴이 발생하는 것으로 볼 때, 좌굴특성의 영향이 주름형상과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

나. 마름모형 주름판의 전단좌굴모드 형상

경계조건에 따른 마름모형 주름판의 전단좌굴모드를 살펴보면, 그림 2.2.3.3에서 그림 2.2.3.6과 같고, a_1=30mm, a_2=47.5mm, a_3=40mm, h=1000mm, L=3100mm, L/2w=20모델에 대해서 나타낸 것이며 주름의 길이 w는 a_1과 a_2를 더한 값인 77.5mm이 된다. 각각의 그림에서 나타난 좌굴모드의 경향은 그림 2.2.3.3과 그림 2.2.3.4에서 얻은 결론을 잘 설명해 주고 있으며, 좌굴모드의 성향에 대한 결과로 신뢰할 수 있다. 즉, 그림 2.2.3.4에서 Case B의 좌굴형상은 두께 2.5mm와 5.0mm에서 일반적인 전단좌굴의 형상과는 다른 좌굴모드를 보이고 있으며, Case A, C, D의 경우는 매우 이상적인 결과임을 알 수 있다. 그림에서 두께가 낮은 경우는 주름진 각각의 판이나 또는 두 개의 판에 걸쳐서 나타나지만 두꺼운 두께일수록 여

러 주름에 걸쳐서 면외방향 좌굴형상이 나타난다. 이와 같은 결과에서 비추어 볼 때, 더 얇은 모델에서는 명확한 국부좌굴을 관찰할 수 있을 것이며, 이들의 두께의 변화에 따라 연성좌굴이 발생하는 범위를 예측하는데 유용한 파라메타로 이용할 수 있다.

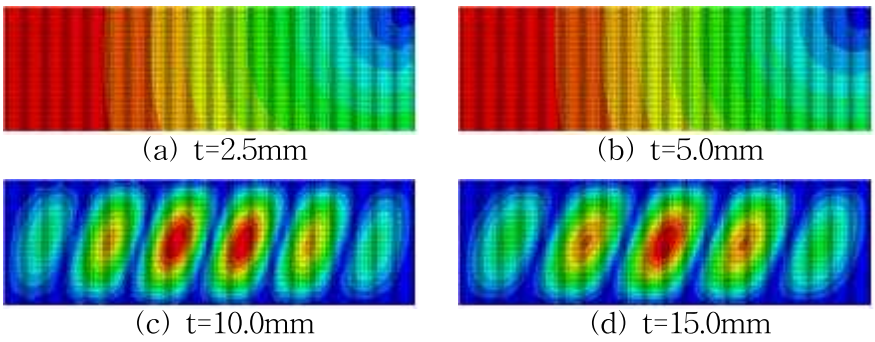


(a) t=2.5mm (b) t=5.0mm

(c) t=10.0mm (d) t=15.0mm

그림 2.2.3.3 마름모형 주름판의 전단좌굴모드형상

(a_3=40mm ,w=77.5mm, h=1000mm, L=3100mm, L/2w=20, Case A)

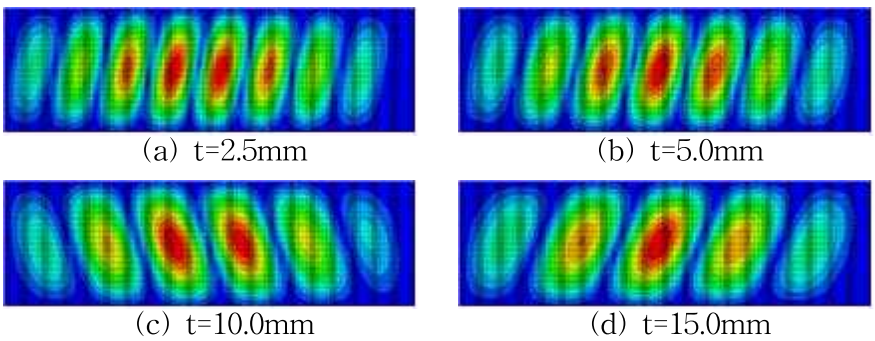


(a) t=2.5mm (b) t=5.0mm

(c) t=10.0mm (d) t=15.0mm

그림 2.2.3.4 마름모형 주름판의 전단좌굴모드형상

(a_3=40mm ,w=77.5mm, h=1000mm, L=3100mm, L/2w=20, Case B)

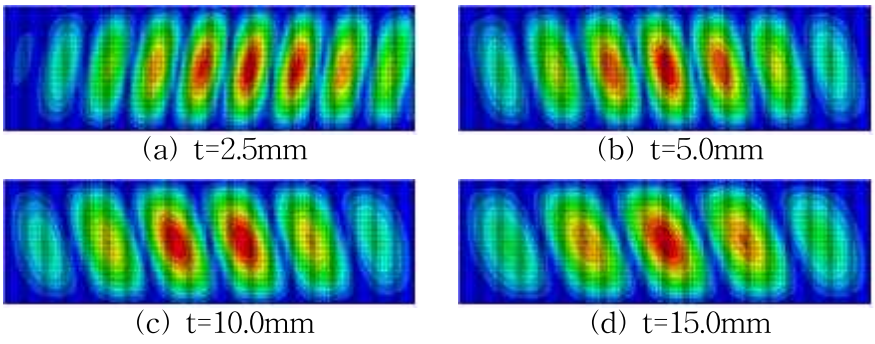


(a) t=2.5mm (b) t=5.0mm

(c) t=10.0mm (d) t=15.0mm

그림 2.2.3.5 마름모형 주름판의 전단좌굴모드형상

(a_3=40mm ,w=77.5mm, h=1000mm, L=3100mm, L/2w=20, Case C)



(a) t=2.5mm (b) t=5.0mm

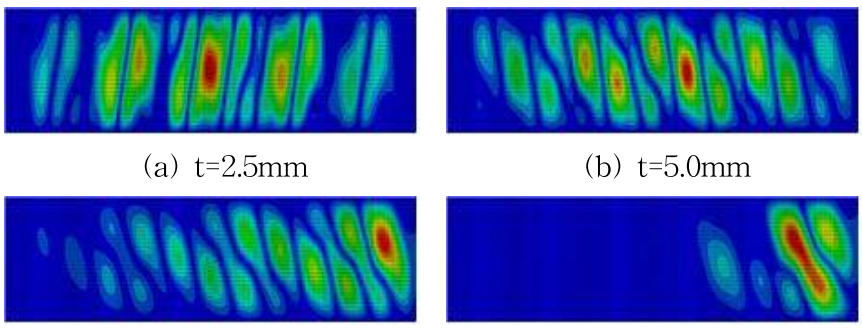
(c) t=10.0mm (d) t=15.0mm

그림 2.2.3.6 마름모형 주름판의 전단좌굴모드형상

(a_3=40mm ,w=77.5mm, h=1000mm, L=3100mm, L/2w=20, Case D)

위의 그림에서 볼 때, 두께가 두꺼워 질수록 여러 주름에 걸쳐서 좌굴형상이 나타나고 있으며, 주름판이 하나의 판과 유사하게 좌굴형상이 나타나는 것을 볼 수 있다. 얇은 두께에서도 하나 이상의 주름판에서 나타나기는 하지만 두꺼운 두께와 비교할 때 둘 또는 세 개의 판에서 겹쳐져 나타난다. 이와 같은 결과들은 Case B를 제외하고 모두 유사하게 나타나고 있다. 경계조건의 결과는 앞 장에서 설명되어진 결과와 유사하며, 좌굴응력의 변화도 동일한 특성을 지니고 있다.

주름의 길이가 w=77.5mm보다 긴 396mm 모델인 a_1=200mm, a_2=196mm, a_3=40mm, h=1000mm, L=7920mm, L/2w=20모델의 해석결과를 그림 2.2.3.7에 나타내었다. 앞의 모델에서 동일한 주름수의 형상에 비해 주름길이가 길기 때문에 전체길이는 더 길게 나타나는 모델이며, 좌굴형상의 변화도 다르다. 두께가 얇은 그림 2.2.3.7(a)의 그림에서 볼 때, 국부좌굴이 명확히 드러난다. 또한 그림 2.2.3.7(b)의 모델에서도 이와 같은 현상이 발생하며, 그림 2.2.3.7(c)에서는 하나의 주름을 넘어서는 형태를 보이기 시작하였다. 두께 15.0mm인 그림 2.2.3.7(d)에서는 주름과 주름을 넘어서는 면외방향 좌굴형상을 보여주고 있으며, 두께의 증가에 따른 좌굴형태의 변화를 예측할 수 있다.



(a) t=2.5mm (b) t=5.0mm

(c) t=10.0mm (d) t=15.0mm

그림 2.2.3.7 마름모형 주름판의 전단좌굴모드형상

(a_3=40mm ,w=396mm, h=1000mm, L=7920mm, L/2w=20, Case C)

형상의 차이가 있는 두 모델의 조건이 유사한 경우인 그림 2.2.3.6과 그림 2.2.3.7의 해석결

과에서 볼 때, 두께 2.5mm의 모델에서는 주름길이가 짧은 경우는 두 개 또는 세 개의 주름에 걸쳐서 발생하는 좌굴형상이 주름길이가 긴 모델에서는 하나의 주름 내부에서 발생하였다. 두께가 두꺼워 질수록 면외방향 전단좌굴형상이 여러 주름에 걸쳐서 일정한 간격으로 반복되어 나타나며, 주름길이가 긴 모델에서 국부좌굴과 전체좌굴사이의 연성좌굴도 관찰할 수 있다. 또한, 주름길이가 길어질수록 동일한 두께에서는 전체좌굴보다는 국부좌굴이 발생하기 쉽고, 두꺼운 두께일수록 전체좌굴이 발생한다.

다. 정현파형 주름판의 두께변화에 따른 전단좌굴응력

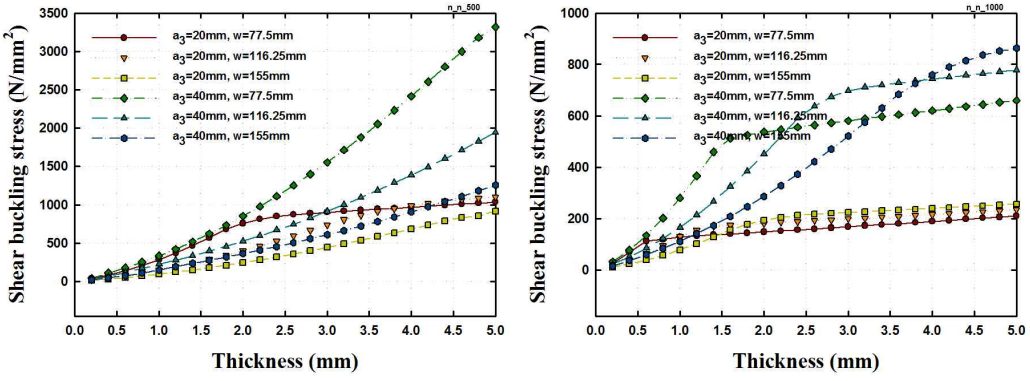
마름모형 주름판의 경우 두께에 따른 좌굴하중의 증가는 매우 큰 주름길이와 함께 상대적으로 짧은 모형을 선정하였다. 두 주름의 형태에 대해서 전체좌굴과 국부좌굴 및 연성좌굴의 발생범위는 차이가 있었으며, 두께의 변화에 따라 전체형상에 영향을 주는 전체좌굴이 우세한 형태로 나타나기 시작한다. 본 절에서는 정현파형 주름에 대해서 두께의 변화에 따른 좌굴응력의 변화만을 고찰하도록 한다.

마름모형과 정현파형의 두 주름형태에 대해서 다양한 시각에서의 장단점이 설명되어지지만 일반적으로 정현파형 주름의 경우 매끄러운 형상의 변화로 인한 부재의 역학적 우수성을 장점으로 여러 문헌에서 언급하고 있다. 그 이유는 주름길이가 짧은 경우의 모델에서 마름모형 주름의 형성은 매우 큰 각도의 판재가 굽혀짐으로 인해서 피로파괴를 유발할 수 있으며, 성형하는 과정에서의 누적되는 초기잔류응력들은 박판의 주름판에서 심각한 영향을 미칠 수 있기 때문이다.

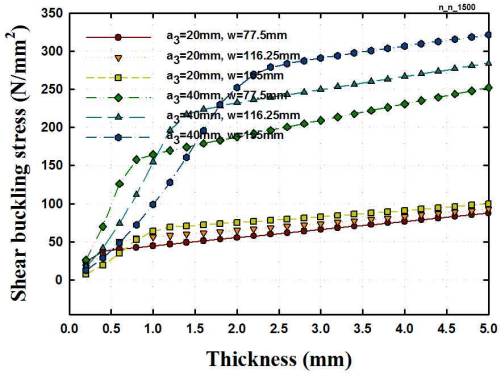
해석을 위해서 사용된 정현파형 주름의 형상의 범위에 대해서 위에서 단일부재의 웨브에 많이 이용되고 있는 형상의 범위에 대해서 다루도록 하였다. 실험대상으로 많이 등장하는 정현파형 주름의 범위는 $a_3 \leq 40mm$와 $77.5mm \leq w \leq 155mm$이며, 마름모형 주름과 동일한 파라메타에서 비교할 때 마름모형의 주름은 상대적으로 매우 큰 각도의 절판을 필요로 한다. 이상의 형상범위에서 본 해석대상모델은 주름깊이 a_3가 20mm와 40mm, 주름길이 w가 77.5mm, 116.25mm 및 155mm인 형상을 조합한 여섯 개 모델에 대해서 다루었다.

두께에 따른 전단좌굴응력에 대한 해석결과를 판의 높이 별로 그림 2.2.3.8에 나타내었고, 그림 2.2.3.8(a)는 h=500mm, 그림 2.2.3.8(b)는 h=1000mm, 그림 2.2.3.8(c)는 h=1500mm에 대한 결과이다. 그림에서 보는 것과 같이 주름판의 두께의 증가는 좌굴응력이 증가하는 결과를 보여주고 있다. 각각의 해석결과에서는 형상에 따라 다른 양상의 좌굴응력변화를 관찰할 수 있다. 우선 그림 2.2.3.8(a)의 경우 주름깊이가 큰 모델 중에서 주름길이가 가장 작은 모델은 변화곡선에서 변곡점이 나타난다. 이와 같은 현상은 좌굴양상의 변화를 기대할 수 있으며, 변곡점 이후의 증가폭은 감소하였다. 그림 2.2.3.8(b)의 경우 모든 모델에서 변화곡선의 변곡점이 나타나고 있으며, 형상에 따라 발생하는 지점이 달라진다. 좌굴양상의 변화를 기대할 수 있는 이러한 변화는 그림 2.2.3.8(a)의 경우에서도 발견할 수 있는 양상이며, 그림 2.2.3.8(b)의 경우는 모든 모델에서 동일하다. 그림 2.2.3.8(c)의 경우에서도 앞의 두 형상범위에서와 마찬가의 결과를 얻을 수 있었으며, 형상에 따라 좌굴하중의 크기에서 차이가 많이 난다. 이와 같은 경향에 대해서 채택된 모든 모델의 결과는 두께의 증가에 따라서 증가하는

일반적인 결과를 얻을 수 있으며, 형상에 따른 변곡점이 발생하는 것을 알 수 있다.



(a) h=500mm (b) h=1000mm



(c) h=1500mm

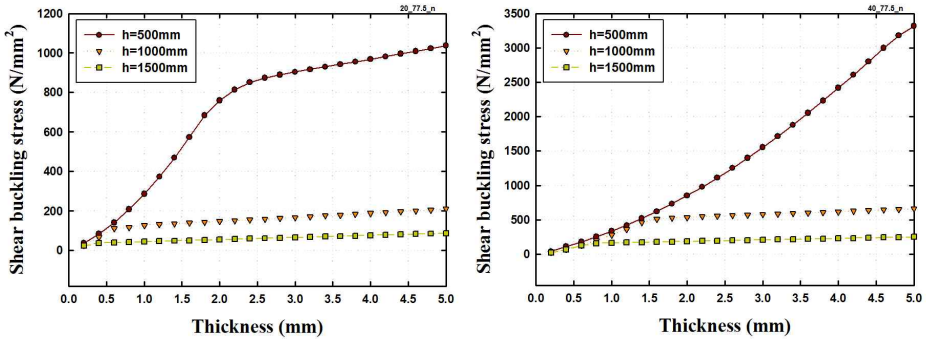
그림 2.2.3.8 두께에 따른 전단좌굴응력의 변화

라. 정현파형 주름판의 형상파라메타에 따른 전단좌굴응력

정현파형 주름판의 형상 파라메타에 대한 좌굴응력의 변화를 고찰하기 위해서 앞에서 다루어진 형상범위를 이용하도록 하며, 각각의 경우에 대한 좌굴응력 결과 변화그래프를 통해서 특성을 분석하도록 한다. 우선 전단좌굴의 응력을 주름길이별 변화특성 결과에 대해서 그림 2.2.3.9에서 그림 2.2.3.11에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 두께에 따라 좌굴응력이 증가하는 결과를 알 수 있으며, 형상에 따라 증가양상이 다르게 나타난다. 특히 얇은 두께의 모델에서 좌굴응력변화의 빠른 증가 양상과 두꺼운 두께의 모델에서 변화율이 달라지는 현상은 여러 모델에서 나타나며, 주름의 깊이와 주름의 길이 및 폭의 높이에 따라 여러 차이점이 발생한다.

주름길이 w가 77.5mm인 경우 주름 깊이가 얕은 그림 2.2.3.9(a)의 경우는 높은 경우인 그림 2.2.3.9(b)보다 좌굴응력이 낮게 나타났으며, h가 낮은 모델이 높은 모델에 비해 높게 나타났다. 또한, h가 낮은 모델은 높은 모델에 비해 현저히 높게 나타나며 일정한 구간이 지난 이후는 증가량이 크게 감소한다. 주름의 깊이가 깊은 모델인 그림 2.2.3.9(b)에서는 h가 낮을

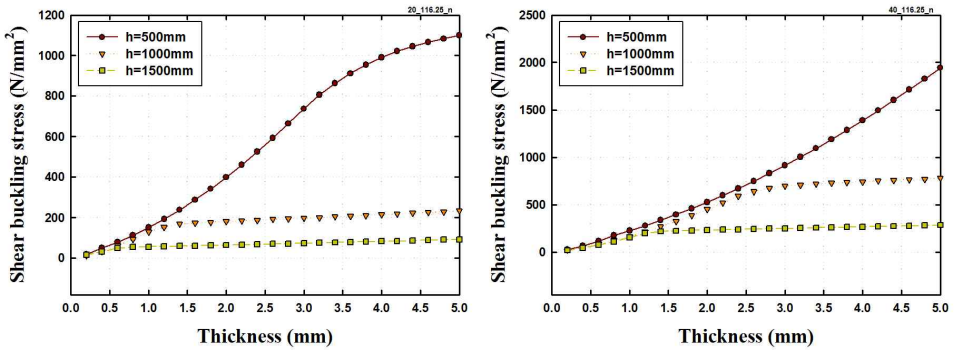
수록 높아지는 좌굴응력의 변화 양상은 동일하지만 채택된 모델의 두께 변화에 변화곡선의 변곡점이 나타나지 않고, 다른 높이의 모델에서만 유사하게 나타난다. 또한 좌굴응력의 증가추세의 변화가 발생하는 시작점은 주름깊이가 얕을수록 빨리 나타나는 경향이 있다.



(a) $a_3 = 20mm$ (b) $a_3 = 40mm$

그림 2.2.3.9 정현파형 주름판 형상에 따른 전단좌굴응력 ($w = 77.5mm$)

주름길이 w가 116.25mm인 경우 주름 깊이가 얕은 그림 2.2.3.10(a)의 경우는 높은 경우인 그림 2.2.3.10(b)보다 좌굴응력이 낮게 나타나는 현상은 동일하며, h가 낮은 모델이 높은 모델에 비해 높게 나타났다. 또한, h가 낮은 모델은 높은 모델에 비해 현저히 높게 나타나며 일정한 구간이 지난 이후는 증가량이 크게 감소하는 양상은 나타나지 않는다. 주름의 깊이가 깊은 모델인 그림 2.2.3.10(b)에서도 h가 낮을수록 높아지는 좌굴응력의 변화 양상은 동일하지만 채택된 모델의 두께 변화에 변화곡선의 변곡점이 나타나지 않는 양상이 이전 모델과 비교된다. 또한 좌굴응력의 증가추세의 변화가 발생하는 모델의 경우 변곡점의 시작은 주름깊이가 깊을수록 빨리 나타났다.

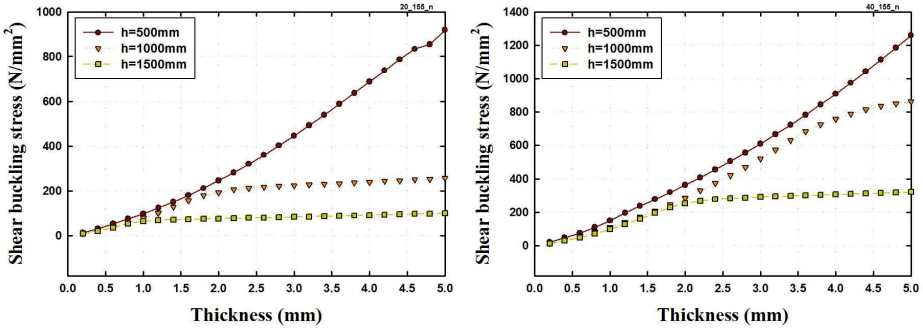


(a) $a_3 = 20mm$ (b) $a_3 = 40mm$

그림 2.2.3.10 정현파형 주름판 형상에 따른 전단좌굴응력 ($w = 116.25mm$)

주름길이 w가 155mm인 경우 주름 깊이가 얕은 그림 2.2.3.11(a)의 경우는 높은 경우인 그림 2.2.3.11(b)보다 좌굴응력이 큰 경우도 나타났으며, 이와 같은 현상은 앞의 두 모델과 비교해 볼 때 다른 양상이다. 그러나 h가 낮은 모델이 높은 모델에 비해 높게 나타나는 경향

은 이전과 동일하다. 그림 2.2.3.11에서 h가 낮은 모델이 높은 모델에 비해 높게 나타나며 이전의 두 모델에서 나타나는 현저한 차이는 보이고 있지 않다. 일정한 구간이 지난 이후는 증가량이 크게 감소하는 양상 h가 높을수록 나타난다. 또한 좌굴응력의 증가추세의 변화가 발생하는 모델의 경우 변곡점의 시작은 주름깊이가 깊을수록 빨리 나타났다.



(a) $a_3 = 20mm$ (b) $a_3 = 40mm$

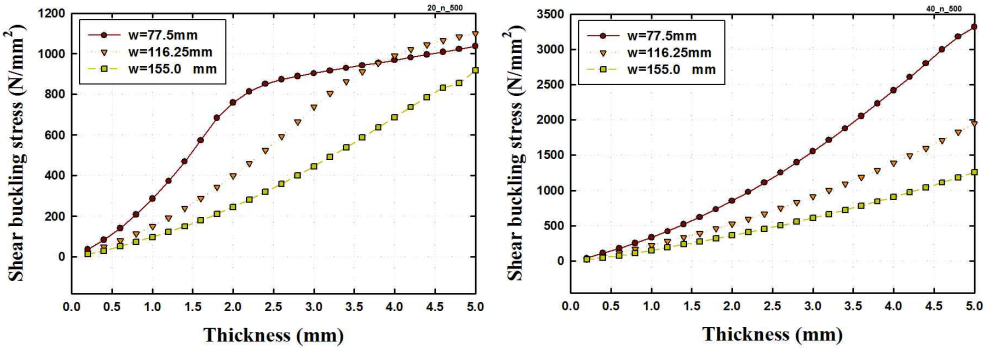
그림 2.2.3.11 정현파형 주름판 형상에 따른 전단좌굴응력 ($w = 155mm$)

주름판의 높이에 따른 변화에 대해서도 해석결과를 그림 2.2.3.12에서 그림 2.2.3.14에 나타내었다. 주름 길이에 대한 결과와 마찬가지로 두께의 변화에 대한 좌굴응력의 증가양상은 동일하며, 앞의 모델의 결과들에 대한 다른 시각에서 생각해 보는 좌굴응력의 변화 양상들이다.

주름 높이 h가 500mm인 경우의 결과를 그림 2.2.3.12에 나타내었으며, 얕은 주름의 경우를 그림 2.2.3.12(a), 높은 경우를 그림 2.2.3.12(b)에 나타내었다. 그림에서 주름길이의 증가는 좌굴응력이 대부분 감소하는 결과를 얻었으나, 주름 깊이가 얇은 모델에서 변곡점이 생기는 경우가 발생하였다. 두 경우의 결과를 비교해 볼 때 일부 구간에서는 주름길이가 길수록 동일한 두께의 모델에서는 낮은 좌굴응력을 보이지만 일정한 두께 이상에서는 반대의 경향이 나타난다. 이와 같은 양상에서 볼 때, 모델의 두께의 증가는 변곡점이 발생하는 두께의 범위가 더 클 것으로 생각된다.

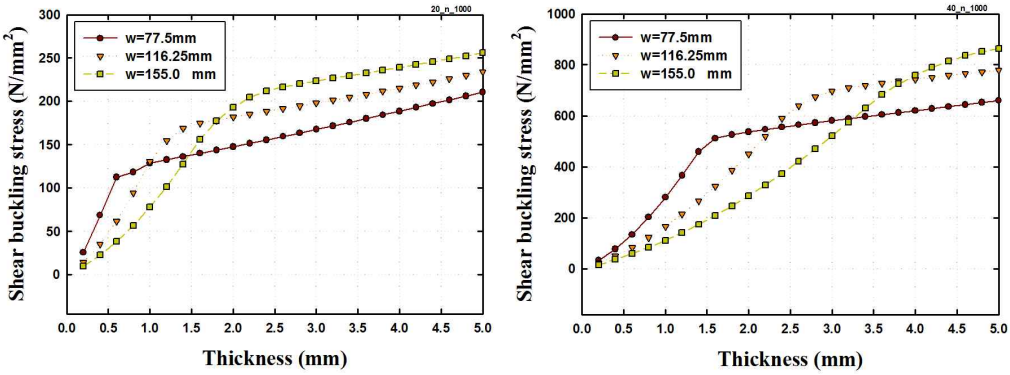
h가 1000mm인 경우의 결과를 그림 2.2.3.13에 나타내었으며, 얕은 주름의 경우를 그림 2.2.3.13(a), 높은 경우를 그림 2.2.3.13(b)에 나타내었다. 그림에서 두께의 증가는 좌굴응력의 증가를 예상할 수 있지만 주름 길이의 증가가 좌굴응력의 증가나 감소의 영향이 일정하지 않음을 알 수 있다. 그림에서 두 모델 모두 얇은 두께에서는 주름길이의 증가가 좌굴응력이 감소하는 결과를 얻을 수 있으나 일정한 두께 이상에서는 이와 같은 양상이 바뀌어 진다. 특히, 이들의 곡선들에서 엇갈리는 점이 나타나는 시작점은 주름 깊이가 얕을수록 더 빠르게 나타나며, 주름 깊이가 길수록 다르게 나타난다. 또한 주름의 깊이가 깊고, 주름의 길이가 가장 긴 모델의 경우 두께의 증가에 대한 변화곡선은 제일 완만하게 나타났다.

h가 1500mm인 경우의 결과를 그림 2.2.3.14에 나타내었으며, 얕은 주름의 경우를 그림 2.2.3.14(a), 높은 경우를 그림 2.2.3.14(b)에 나타내었다.



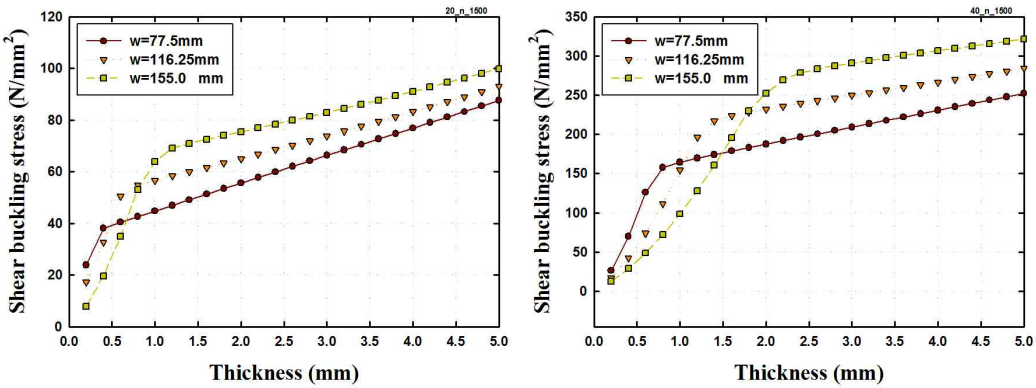
(a) $a_3 = 20mm$ (b) $a_3 = 40mm$

그림 2.2.3.12 정현파형 주름판 형상에 따른 전단좌굴응력 (h=500mm)



(a) $a_3 = 20mm$ (b) $a_3 = 40mm$

그림 2.2.3.13 정현파형 주름판 형상에 따른 전단좌굴응력 (h=1000mm)



(a) $a_3 = 20mm$ (b) $a_3 = 40mm$

그림 2.2.3.14 정현파형 주름판 형상에 따른 전단좌굴응력 (h=1500mm)

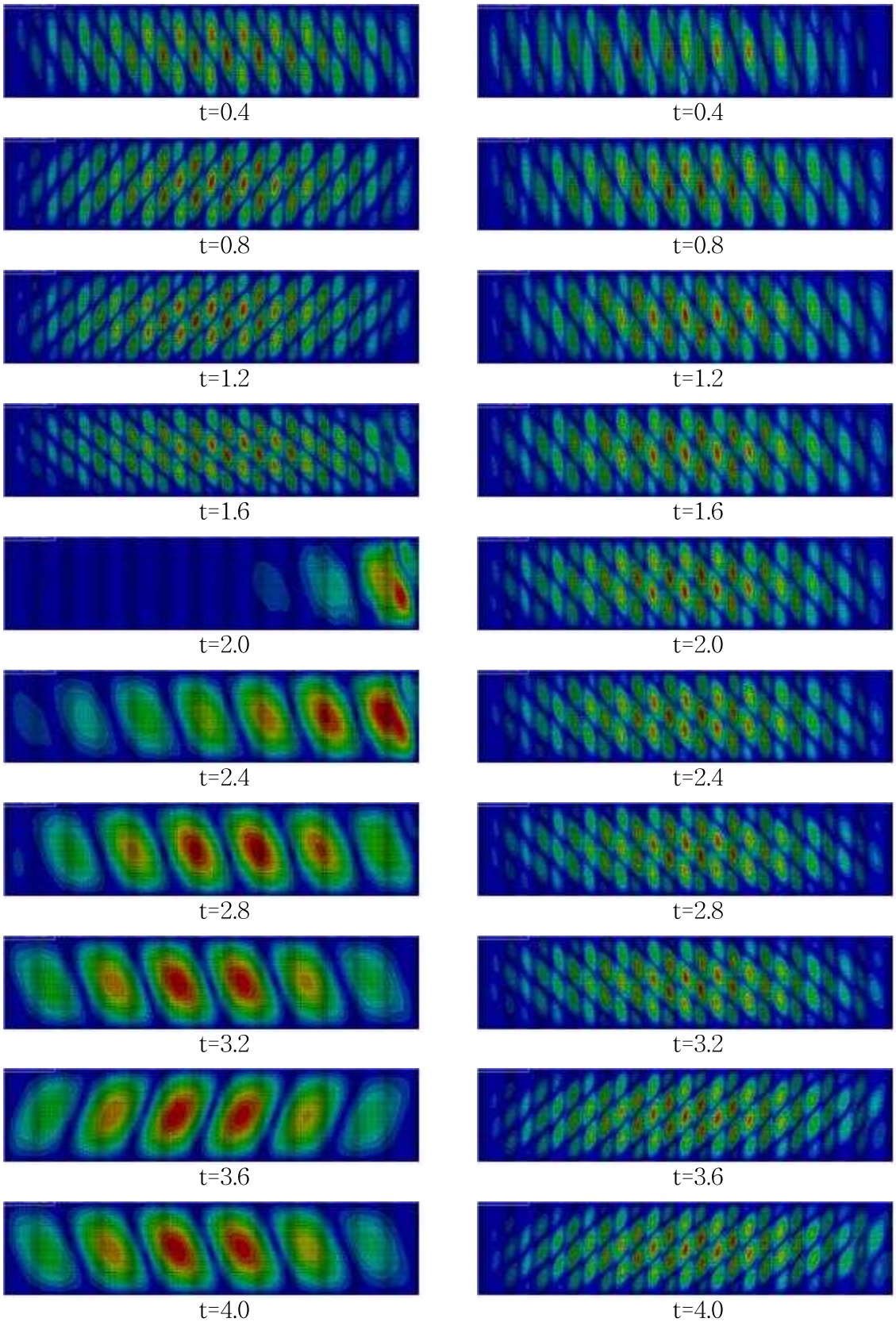
그림에서 두께의 증가는 좌굴응력의 증가를 예상할 수 있지만 주름 길이의 증가가 좌굴응력의 증가나 감소의 영향이 일정하지 않음을 알 수 있다. 그림에서 두 모델 모두 얇은 두께에서는 주름길이의 증가가 좌굴응력이 감소하는 결과를 얻을 수 있으나 일정한 두께 이상에

서는 이와 같은 양상이 바뀌어 진다. 특히, 이들의 곡선들에서 엇갈리는 점이 나타나는 시작점은 주름 깊이가 얕을수록 더 빠르게 나타나며, 주름 깊이가 길수록 다르게 나타난다. 또한 주름의 깊이가 깊고, 주름의 길이가 가장 긴 모델의 경우 두께의 증가에 대한 변화곡선은 제일 완만하게 나타났다. 그러나 주름 깊이가 긴 모델이 좌굴응력이 더 크게 나타나며, 그림 2.2.3.13의 경우와 매우 유사한 좌굴응력의 변화 양상을 가지고 있다.

마. 정현파형 주름판의 전단좌굴모드 형상과 변화특성

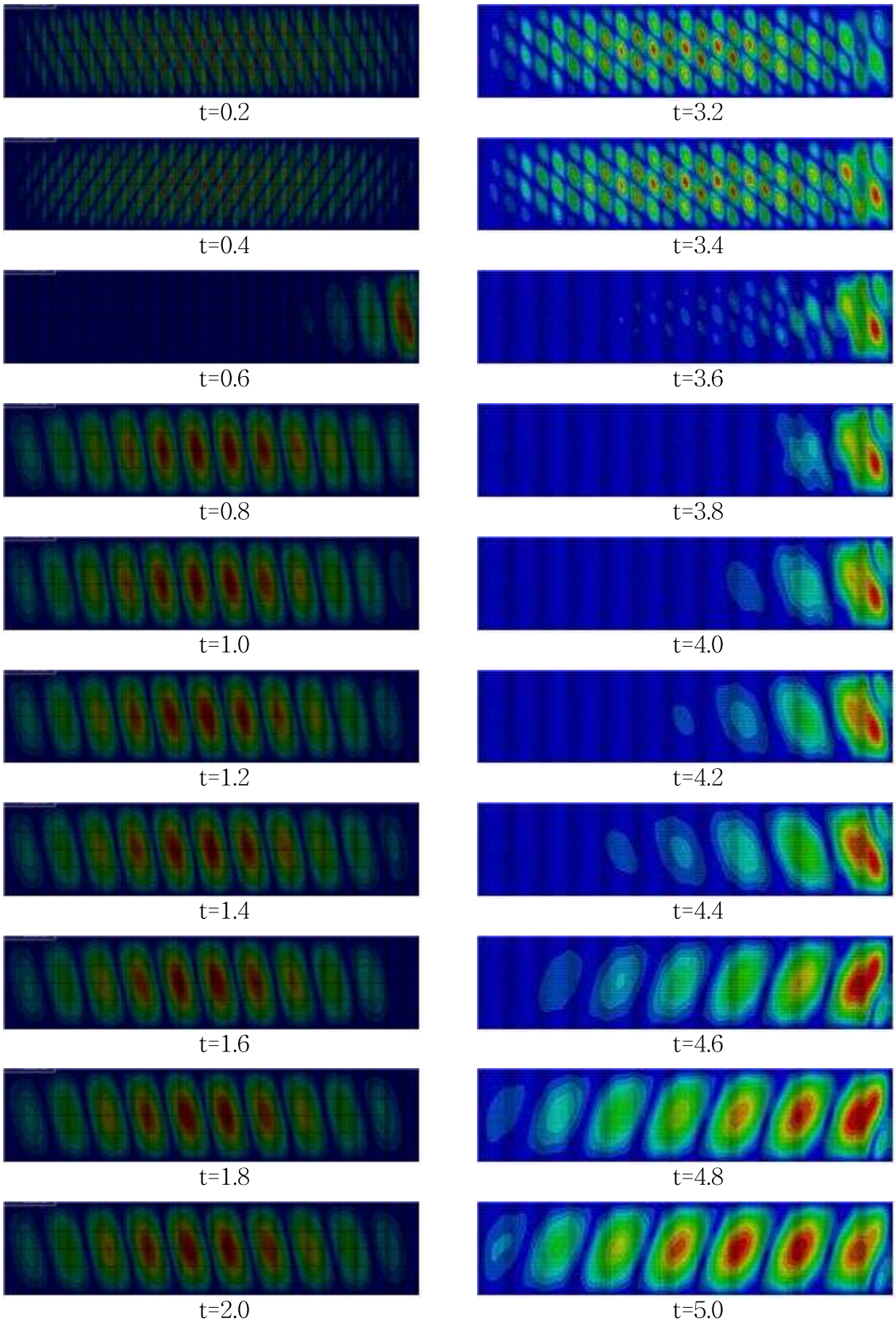
정현파형 주름판의 전단좌굴모드의 특성을 분석하기 위해서 앞에서 다루어진 모델의 좌굴모드 형상에 대해서 변화양상을 본 절에서 다루도록 한다. 주름판의 전단좌굴은 국부좌굴 전체좌굴 및 연성좌굴의 형태로 나타나며, 각 모델에 대한 이들의 특성을 살펴볼 필요가 있다. 그 이유는 각 모델에서 나타나는 좌굴응력 변화곡선에서의 변곡점에 대한 좌굴특성의 변화와 더불어 두께에 따른 연성좌굴구간의 크기가 좌굴특성에 나타나는 형상의 변화를 살펴보기 위한 것으로서 구조물의 전단좌굴에 대한 설계의 범위를 예측할 수 있기 때문이다. 각각의 해석결과에 대해서 그림 2.2.3.15에서 그림 2.2.3.17에 나타내었고, 앞에서 나타나는 좌굴응력의 변화특성을 설명하는데 적절한 결과를 보이고 있다.

그림 2.2.3.15에 나타난 좌굴모드는 w=77.5mm, h=500mm 주름판에 대한 결과형상으로 그림 2.2.3.15(a)는 a_3=20mm의 결과이며, 그림 2.2.3.15(b)는 a_3=40mm의 결과형상이다. 그림에서 나타난 특징에서 그림 2.2.3.15(b)의 경우는 국부좌굴만 발생하며, 전체좌굴은 발생하지 않는다. 그러나 그림 2.2.3.15(a)의 경우는 얇은 두께에서는 국부좌굴이 두꺼운 두께에서는 전체좌굴이 발생하며, 두 좌굴의 경계점에서 연성좌굴이 발생하는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과에 대해서 그림 2.2.3.15(a)의 결과에서도 변곡점이 발생하는 모델에 대한 결과임을 예측할 수 있다. 두 좌굴의 경계점에 해당되는 t=2.0mm 모델은 좌굴의 특성이 이보다 얇은 두께에서의 결과와 이보다 두꺼운 두께에서의 결과와 매우 다른 특성을 지니며, 두 좌굴성향과는 매우 다른 결과를 보이고 있다. 특히 연성구간의 발생구간에 대한 변화는 하나의 주름판에서 발하여 그 특성이 전이되는 형태를 보이고 있으며, 국부좌굴과 전체좌굴간의 경향성을 분석할 필요가 있다.



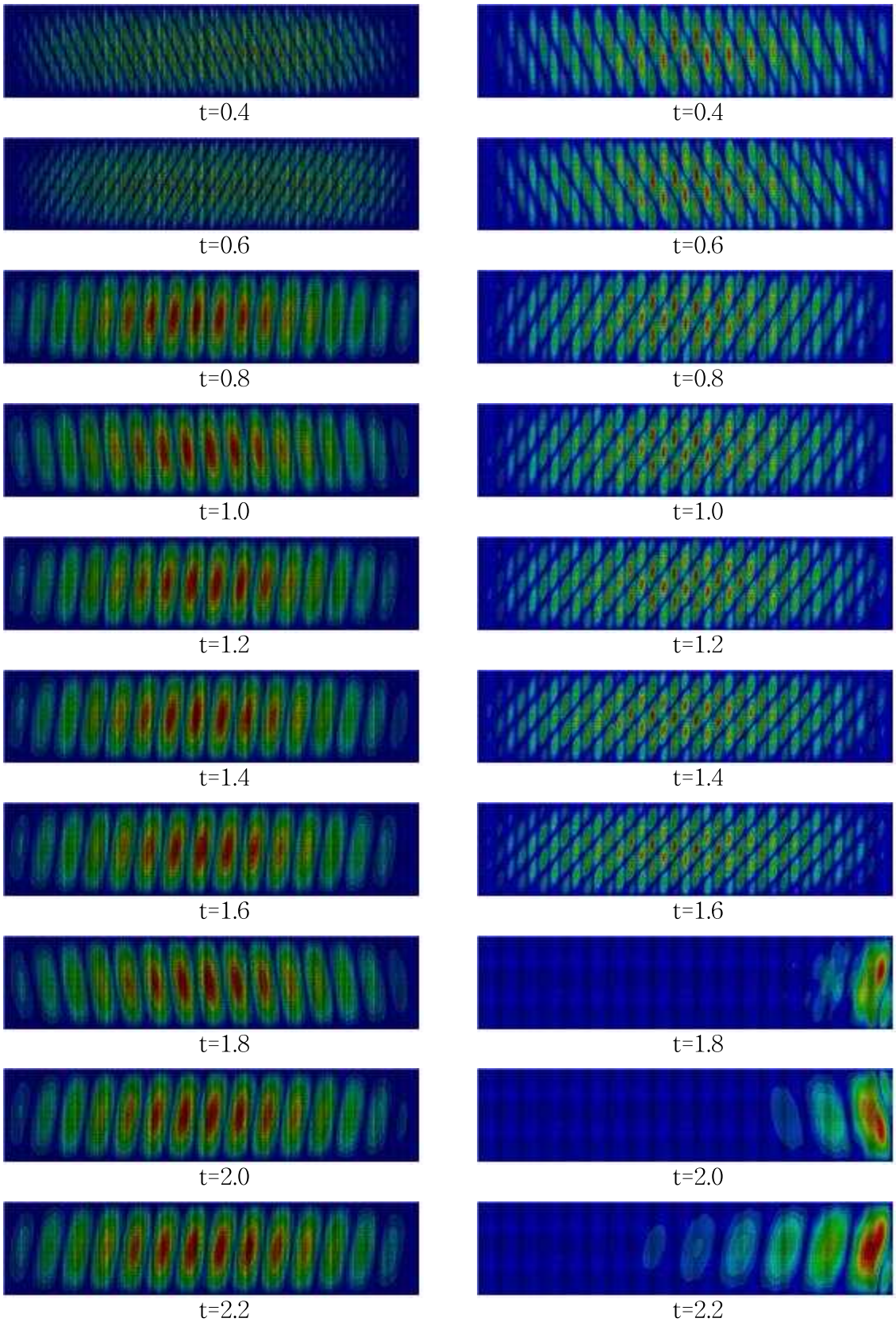
(a) a_3=20mm (b) a_3=40mm

그림 2.2.3.15 정현파형 주름판의 전단좌굴모드 형상 (w=77.5mm, h=500mm)



(a) a_3=20mm, w=77.5mm (b) a_3=40mm, w=155mm

그림 2.2.3.16 정현파형 주름판의 전단좌굴모드 형상 (h=1000mm)



(a) w=77.5mm (b) w=155mm

그림 2.2.3.17 정현파형 주름판의 전단좌굴모드 형상 (a_3=40mm, h=1500mm)

그림 2.2.3.16에 나타난 좌굴모드는 h=1000mm에 대한 결과형상으로 그림 2.2.3.16(a)는 a_3=20mm, w=77.5mm의 결과이며, 그림 2.2.3.16(b)는 a_3=40mm, w=155mm의 결과형상이다. 그림 2.2.3.16의 경우 그림 2.2.3.13에서와 같이 두께별 좌굴응력 변화곡선에서 변곡점이 나타나는 모델이지만 변화구간이 그림 2.2.3.16(a)의 모델은 짧게 나타나고 그림 2.2.3.16(b)의 모델은 길게 나타나는 모델이다. 그림에서 좌굴모드형상의 변화도 이와 유사한 경향을 보인다. 그림 2.2.3.16(a)의 경우는 t=0.4mm이전에는 국부좌굴이 나타나며, t=0.6mm에서 연성좌굴이, t=0.8mm이상의 모델에서는 전체좌굴이 나타난다. 그러나 그림 2.2.3.16(b)의 경우는 연성구간이 매우 길게 나타난다. 그림에서 보는바와 같이 t=3.4mm이하의 모델에서는 국부좌굴이 발생하며, t=3.6mm에서 시작하여 점진적으로 전체좌굴의 형태로 바뀌어간다. 두께에 따른 좌굴성향의 변화가 매우 긴 구간에 걸쳐서 진행된다.

마지막으로 그림 2.2.3.17에 나타난 좌굴모드는 a_3=40mm, h=1500mm에 대한 결과형상으로 그림 2.2.3.17(a)는 w=77.5mm의 결과이며, 그림 2.2.3.17(b)는 w=155mm의 결과형상이다. 그림 2.2.3.17의 경우 주름길이에 따라서 좌굴응력의 변곡점의 위치가 달라지는 것에 대한 설명으로 주름 길이가 긴 모델에서는 양상의 변화 시점이 늦게 나타난다. 그림에서 나타난 바와 같이 두께가 낮은 영역에서의 좌굴형상은 모두 국부좌굴이 우세하며, 두께가 두꺼운 모델은 전체좌굴이 우세한 결과는 동일하게 나타난다. 이와 같은 형상의 변화와 두께의 변화에 대한 전단좌굴모드의 변화 양상은 앞에서 다루었던 전단좌굴응력의 변화에 대한 곡선의 양상을 설명하기에 충분한 결과를 보여주고 있다.

4. GA기반 정현형파 주름강판 부재의 설계방법과 최적화

주름진 판의 경우 미국이나 일본보다 유럽에서 먼저 연구 개발된 까닭에 기본적인 설계규준이 잘 마련되어 있다. 특히, 독일의 규준은 유로코드에 영향을 주고 있으며, 기본적으로 DASt-R015, DIN 18800 T.1-3 및 EN 1993-1-5에 정의된 코드로 체계적인 전단설계나 주름판을 응용한 부재의 설계를 수행할 수 있다. 사인형 주름판의 응용에서 Pasternak(2004)의 문헌은 마름모형 주름의 설계식이 사인형 주름의 전단설계에 적용되기 때문에 DASt-R015와 EN 1993-1-5 D항을 대신할 수 있는 전단좌굴응력 산정식의 필요성을 언급하였다. 정현파형 주름웨브보의 설계변수에 대해서 앞서 정의한 바와 같이 주름의 깊이($a_3/2$), 파장(w) 그리고 주름판의 두께(t)로 정의 할 수 있으며, 사인 형상의 주름함수(y), 한 파장에 대한 길이(s)를 이용하여 단면의 성질을 계산할 수 있다. 본 절에서는 정현파형 주름판의 전단설계방법에 대해서 분석하도록 하며, 유전자 알고리즘을 적용하여 부재의 설계방법과 최적화를 통한 설계방법에 대해서 다루도록 한다.

가. 주름판 부재의 설계규준과 규준별 전단설계 영역

플레이트 거더의 대용으로 개발된 주름웨브보의 경우 웨브의 전단좌굴은 주름에 의해서 저항하므로 판의 전단좌굴을 보강할 스티프너가 필요 없게 되었으며, 얇은 두께에도 비교적 큰 두께의 편평한 웨브와 동일한 성능을 발휘할 수 있었다. 그러나 주름 웨브는 주름 한 판에서 발생하는 국부좌굴, 여러 판에 걸쳐 나타나는 전체좌굴 및 이들의 연성좌굴에 대한 안정성이 확보되어야만 하며, 주름판의 설계를 위해서는 해결되어야 하는 문제이다. 정현파형 주름의 경우 마름모형보다 형상이 더 매끈하기 때문에 여러 장점이 있으며, 형상의 범위가 $a_3 \leq 40mm$와 $77.5mm \leq w \leq 155mm$에 대한 전체좌굴의 실험에 따른 이론식들의 경우 마름모형과는 다소 차이를 보이고 있다. 본 절에서는 기존의 설계규준에서 제시하고 있는 전단좌굴응력에 대한 정현파형 주름웨브보의 일반적인 설계범주에 있는 형상에 대해서 전단좌굴응력의 특성에 대해서 설명하도록 한다.

전단력에 대한 주름웨브판의 경우 유럽의 설계식은 기본적으로 식 (2.2.4.1)을 만족하도록 설계하고 있으며, 이는 전단력의 역할을 주름판에서만 감당하도록 설계하는 개념에서 출발하기 때문이다. 여기서, 전단설계는 식 (2.2.4.1)을 만족해야 하며, 계수 C와 κ는 EN 1993-1-5와 DASt-R015에서 제안하는 값이 다르게 나타난다. 그러나 설계의 기본적인 개념은 동일하며, 국부좌굴과 전체좌굴에 대한 제한세장비에 따라 감소계수 κ가 결정된다.

$$V_{Sd} \leqq V_{Rd} \ (= V_{Rk}/\gamma_M) \qquad (2.2.4.1a)$$

$$V_{Rk} = C \cdot \kappa \cdot f_y \cdot h \cdot t \qquad (2.2.4.1b)$$

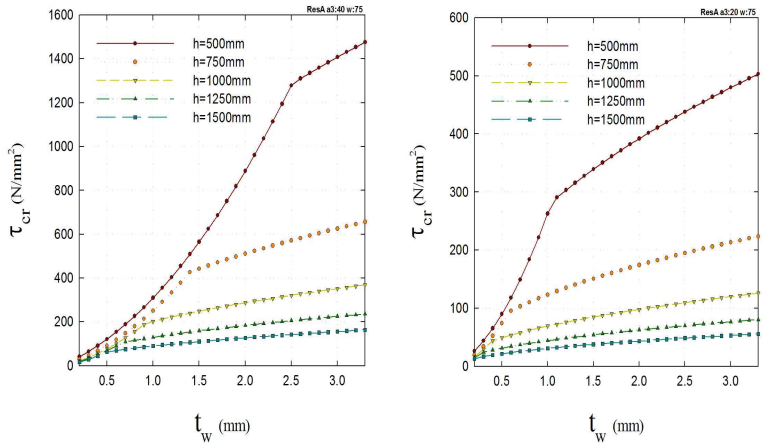
여기서 EN 1993-1-5나 Pasternak 등(2004)은 C 값을 $1/\sqrt{3}$으로 정의하였고, DASt-R015는 0.35로 각각 정의되어 있다. 또한 감소계수도 좌굴 종류에 따라 다르게 제시하고 있으며, 전단력에 대해 저항하는 설계영역은 다소 차이가 난다.

위의 설계식에 대해서 주름판의 전단좌굴응력은 다음의 식을 통해서 계산되거나, 부재의 제작형태에 따라 강성의 정의를 제시하여야만 설계가 가능하다. 특히, Pasternak 등(2010)의 문헌에서 일반 건축구조물에 많이 사용되는 정현파형상의 경우 주름판이 전단 항복 응력에 도달하기 전에는 국부좌굴이 일어나지 않는다고 설명하였으며, 이와 같은 관점에서 볼 때 설계방법은 조정되어야만 한다.

$$\tau_{cr,l} = \left(5.34 + \frac{a_3\, s}{h_w\, t_w} \right) \frac{\pi^2\, E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t_w}{s} \right)^2 \tag{2.2.4.2a}$$

$$\tau_{cr,g} = \frac{32.4}{t\ h^2} \sqrt[4]{D_x\ D_y^3} \tag{2.2.4.2b}$$

여기서, $\tau_{cr,l}, \tau_{cr,g}$ 은 각각 국부좌굴 및 전체좌굴응력이며, D_x, D_y 는 각각의 축에 대한 휨강성이다. 탄성전단좌굴의 이론식에서 정의된 국부좌굴응력 산정식과 이방성 판으로 가정한 주름판의 전체좌굴응력 산정식이 주름진 판의 좌굴응력을 산정하는 기초를 제공해 줄 수 있다. 따라서 주름판의 좌굴은 국부좌굴 또는 전체좌굴 중 우세한 성향에 따라 결정될 것이며, 이들의 경계점에서 연성작용이 일어난다. 그러므로 위의 식은 좌굴성향을 판단하는데 매우 유용하게 이용될 수 있으며, 경계에서 나타나는 연성작용으로 인한 좌굴거동을 규명하는 것은 매우 세심한 분석이 필요하다. 또한, 식 (2.2.4.2)의 전단좌굴응력은 형상에 따라 변화가 다르게 나타나며, 각각의 좌굴특성의 우세함에 따라 좌굴저항능력이 결정된다. 그림 2.2.4.1은 전단좌굴응력 산정식을 이용하여 형상에 따른 두께별 좌굴응력을 산정한 곡선이다. 그림에서 정현파형 주름의 파고가 낮은 경우 전단좌굴강성의 차이가 현저하며, 전단좌굴패턴도 다르게 나타난다. 이 곡선에서 변곡점 부근이 연성좌굴의 가능성을 설명해 준다. 유럽에서 제안된 전단좌굴응력은 주름의 깊이가 깊을수록 두께가 클수록 전체좌굴이 나타나며, 완만한 곡률의 모델인 그림 2.2.4.1(b)는 비교적 곡률이 큰 그림 2.2.4.1(a)와 비교해 더 낮은 두께에서 곡선의 변곡점이 발생한다.



(a) $a_3 = 40\text{mm},\ w = 77.5\text{mm}$ (b) $a_3 = 20\text{mm},\ w = 77.5\text{mm}$

그림 2.2.4.1 정현파형상에 따른 전단좌굴응력 변화

좌굴응력에 상응하게 전단력에 대한 주름판의 설계에서는 설계규준에 따라 다르게 나타난다. 식 (2.2.4.3)의 계수 C의 차이에서도 설계의 영역은 차이가 날 수 있으나 좌굴응력의 감소계수에 의한 영향에 각각의 규준들은 다르게 제안되어진다. 본 절에서는 DASt-R015 규준과 Eurocode3 및 Pasternak 등(2004)과 Siokola(1999)들의 유럽설계규준을 대상으로 분석하도록 한다.

DASt-R.015의 경우를 먼저 살펴보면, 세장비(λ_c)는 국부좌굴과 전체좌굴에 대한 세장비 중에서 작은 값으로 감소계수가 결정된다. 특히 전체좌굴의 경우는 전체좌굴응력이 국부좌굴응력에 비해 0.5배 이상, 2배 미만일 때를 구분하고 있다.

$$\kappa = \frac{0.84}{\lambda_c} \leqq 1.0 \tag{2.2.4.3}$$

여기서,

$$\lambda_c = \mathrm{mim}(\lambda_{c,l} : \lambda_{c,g}) \tag{2.2.4.3a}$$

$$\lambda_{c,l} = \sqrt{\frac{f_{y,w}}{\sqrt{3} \bullet \tau_{cr,l}}} \tag{2.2.4.3b}$$

$$\lambda_{c,g} = \begin{cases} \sqrt{\dfrac{2\ f_{y,w}}{\sqrt{3}\ \tau_{cr,g}}} & 0.5 \leqq \dfrac{\tau_{cr,g}}{\tau_{cr,l}} \leqq 2.0 \\ \sqrt{\dfrac{f_{y,w}}{\sqrt{3}\ \tau_{cr,g}}} & \text{other} \end{cases} \tag{2.2.4.3c}$$

EN 1993-1-5의 경우에서도 다른 규준과 유사하지만 감소계수 식이 국부좌굴과 전체좌굴에 대해 다르게 제안하지만, 세장비는 동일한 식을 이용하고 있다.

$$\kappa_l = \frac{1.15}{0.9 + \lambda_{c,l}} \leqq 1.0 \tag{2.2.4.4a}$$

$$\kappa_g = \frac{1.5}{0.5 + \lambda_{c,g}^2} \leqq 1.0 \tag{2.2.4.4b}$$

여기서,

$$\lambda_{c,l(g)} = \sqrt{\frac{f_{y,w}}{\sqrt{3}\ \tau_{cr,l(g)}}} \tag{2.2.4.4c}$$

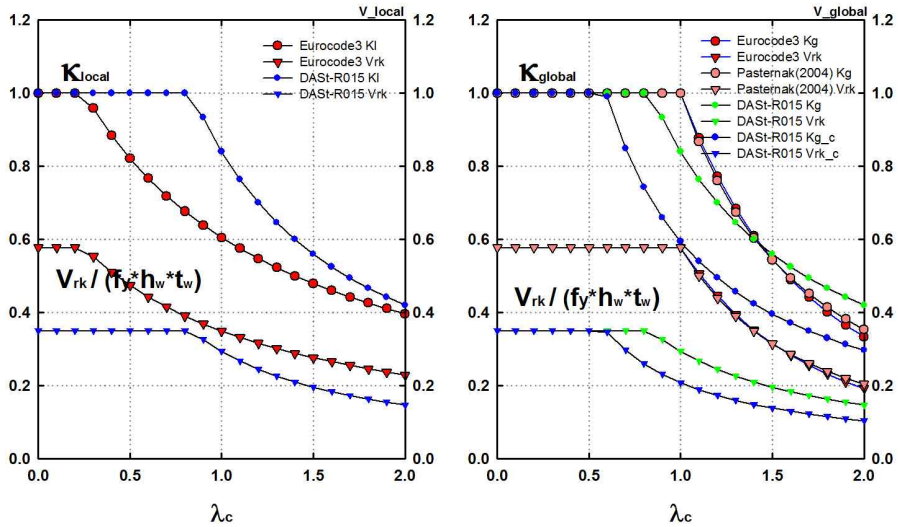
Pasternak 등(2004)과 Siokola(1999)는 정현파형 주름의 경우 국부좌굴은 고려되지 않고 전체좌굴에 대해서만 다음 식 (2.2.4.5)으로 제시하고 있다.

$$\kappa = \frac{1}{\lambda_c^{1.5}} \leqq 1.0 \tag{2.2.4.5}$$

여기서,

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{f_{y,w}}{\sqrt{3}\ \tau_{cr,g}}} \qquad (2.2.4.5a)$$

이상의 전단좌굴에 대한 감소인자를 세장비에 따라 살펴보면 국부좌굴의 경우는 그림 2.2.4.2(a), 전체좌굴의 경우는 그림 2.2.4.2(b)와 같다. 그림에서 감소계수와 무차원 좌굴저항응력은 각각 원형과 삼각형으로 표시하였다. 국부좌굴의 경우, EN 1993-1-5의 전단좌굴저항능력은 DASt_R.015의 규준보다 감소계수의 영역이 낮음에도 불구하고 실질적으로 높게 평가되었음을 알 수 있다. 전체좌굴의 경우 국부좌굴과 유사하나 EN 1993-1-5는 Pasternak 등(2004)에서 제시된 곡선과 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 또한 그림 2.2.4.2(b)에서 DASt_R.015는 전체좌굴응력이 국부좌굴과 비교해 0.5배 이상 2배 이하의 모델(DASt_R.015 Vkr_c)에서는 설계저항능력이 더 불리한 조건으로 작용한다. 이와 같은 조건은 두 좌굴간의 연성작용에 대한 저항능력의 감소를 의미한다.



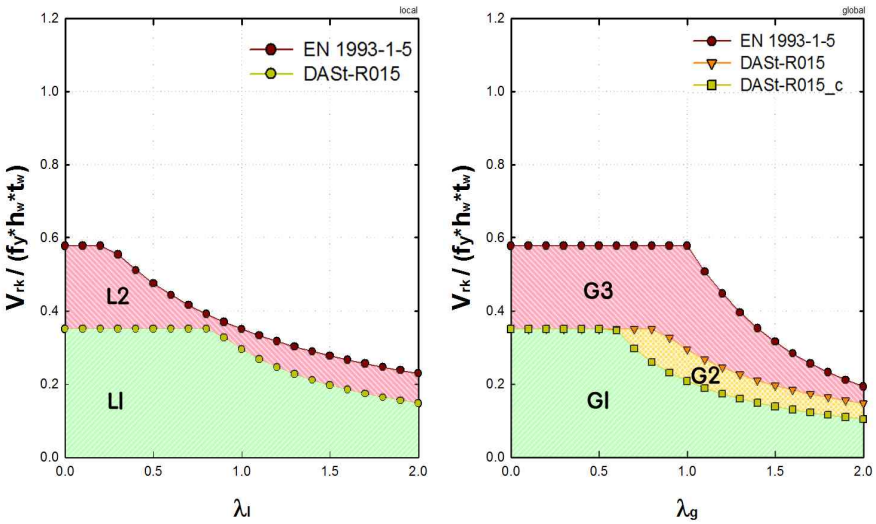
(a) 국부좌굴 (b) 전체좌굴

그림 2.2.4.2 세장비 λ_c 에 따른 주름판 전단설계식의 감소율

전단력만을 담당하는 경우 이 외에도 다양한 조합응력 및 집중하중 에 대한 설계 시에도 휨의 능력은 아코디언 효과로 인해서 힘의 전달을 고려할 필요가 없어지며, 전단력과 모멘트 조합응력에 대한 제한은 주로 연속보 단부에서 전단력과 휨모멘트가 동시에 발생할 경우 하중능력이 감소되는 경우가 있지만 주름판이 적용된 부재의 일반적인 특성에서는 나타나지 않을 것이다.(Pasternak 등, 2004) 주름웨브를 이용한 보에서는 주름에서 발생하는 국부좌굴, 여러 판에 걸쳐 나타나는 전체좌굴 및 이들의 연성좌굴에 대한 안정성이 확보되어야한다. 전단좌굴연구는 Easley가 직교이방성 이론을 이용하여 전체좌굴을 정의하였고, 이후 Elgaaly는 주름 웨브 개발에 관해 문헌을 발표하게 되었으며, 이들의 노력으로 구조물의 설계는 매우 단순하게 계산할 수 있는 방법들이 제시되는 결과를 낳았다. 또한 Abbas는 연성좌굴 특성을

해석적으로 연구하였으며, 설계범주의 결정과 더불어 이론적 해석을 통해서 주름으로 인한 플레이트의 연결 특성과 역학적 거동에 대해서도 많은 연구를 진행하였다. 그러나 전단좌굴 특성을 하나의 파라메타로 정의하기는 매우 어렵다.

정현파형 주름의 경우 국부좌굴은 고려되지 않고 전체좌굴에 대해서만 고려하는 특정한 형상의 영역이 제공되기도 하였으며, 제안된 전체좌굴의 설계식은 EN 1993-1-5와 유사한 설계범위를 나타내고 있다. 또한, 국부좌굴의 경우 EN 1993-1-5가 DASt-R015의 기준보다 감소계수의 영역은 낮더라도 설계영역은 크게 나타나며, 전체좌굴의 경우 연성구간에서 불리한 조건이 적용된다. 설계영역에 대해서 세장비에 따른 설계영역을 살펴보면 그림 2.2.4.3과 같다. 그림 2.2.4.3(a)와 그림 2.2.4.3(b)에서 보는 바와 같이 DASt-R015의 경우 국부좌굴은 L1으로 표시된 영역이며, 전체좌굴은 $0.5 \leqq \tau_{cr,g}/\tau_{cr,l} \leqq 2.0$ 에서는 G1영역에 그렇지 않을 경우는 G2영역이 포함된 설계영역으로 나타난다. EN 1993-1-5의 경우는 국부좌굴이 L2, 전체좌굴의 경우 G3의 영역으로 나타나므로 DASt-R015이 보다 더 넓은 설계가능공간을 갖는다.



(a) 국부좌굴 (b) 전체좌굴

그림 2.2.4.3 설계규준별 전단설계 가능 영역

나. 주름판 부재의 최소중량 설계를 위한 수리모형과 제약함수

구조물의 최적설계는 설계변수에 부과된 제약조건을 동시에 만족하면서 목적함수를 최소로 하는 설계변수 조합을 수학적 표현에 의하여 구하는 방법을 말하며, 경제적인 설계를 위한 문제는 일반적으로 부재의 중량이 목적함수로 많이 채택된다. 구조물의 중량을 목적함수 $F(\boldsymbol{x})$ 로 정의된 최적화 문제는 식 (2.2.4.6)과 같이 정의할 수 있으며, 제약조건식을 만족하는 최소중량의 설계변수 탐색이 목적이다. 여기서 모든 부재가 동일한 재료를 사용할 경우 목적함수식에서 나타나는 단위중량은 상수이므로 최소부피가 곧 최소중량을 의미하게 된다.

$$\text{minimize} \quad F(\boldsymbol{x}) = \rho_i \, A(\boldsymbol{x})_i \, L_i \tag{2.2.4.6a}$$

$$\text{subject to} \quad g_j(\boldsymbol{x}) \le 0 \quad (j=1,...,n) \qquad \boldsymbol{x}^{low} \le \boldsymbol{x} \le \boldsymbol{x}^{high} \tag{2.2.4.6b}$$

여기서,

$\boldsymbol{x} = \{b_f, t_f, h_w, t_w\}^T$: 설계변수벡터

ρ_i, $A(\boldsymbol{x})_i$, L_i : i 부재의 단위중량, 단면적, 길이

$A(\boldsymbol{x})_i = \left\{2\, b_f\, t_f + h_w\, t_w \frac{s}{w}\right\}_i$

$g_j(\boldsymbol{x})$, $\boldsymbol{x}^{low}$, $\boldsymbol{x}^{high}$: 제약 함수와 설계변수의 상, 하한치

제약조건은 보 부재의 경우 판-폭두께비 제약(g_1, g_2), 부재력 제약식(g_3, g_4) 및 처짐에 대한 제약(g_5)으로 아래와 같이 구성된다. 여기서, 판-폭두께비의 제약은 각각 DASt_R015의 El.120, K115 및 El.409 항목에 의한 제약으로 주름 웨브와 주름웨브보의 플랜지에 대한 제약이다.(Pasternak 등, 2004; Siokola, 1999b)

$$g_1 = \frac{\lambda_p}{\lambda_{\mathrm{p,max}}} - 1.0 \le 0 \tag{2.2.4.7a}$$

$$g_2 = \frac{\lambda_f}{\lambda_{\mathrm{f,max}}} - 1.0 \le 0 \tag{2.2.4.7b}$$

$$g_3 = \frac{V_{\mathrm{Sd}}}{V_{\mathrm{Rd}}} - 1.0 \le 0 \tag{2.2.4.7c}$$

$$g_4 = \frac{N_{\mathrm{Sd}}}{N_{\mathrm{Rd}}} - 1.0 \le 0 \tag{2.2.4.7d}$$

$$g_5 = \frac{\delta_{\mathrm{max}}}{\delta_{\mathrm{limit}}} - 1.0 \le 0 \tag{2.2.4.7e}$$

여기서,

$$\lambda_p = 0.8\left(\frac{h_w}{t_w}\right)\sqrt{\frac{f_{y,w}}{\kappa_{cr,l}\,E}} \quad , \quad \lambda_{\mathrm{p,max}} = 0.316\sqrt{\frac{E}{f_{y,w}}} \quad , \quad \lambda_p = \frac{b_f + a_3}{t_f} \quad , \quad \lambda_{\mathrm{p,max}} = 1.03\sqrt{\frac{E}{f_{y,w}}}$$

Siokola(1999)와 Pasternak 등(2004)의 주름이 적용된 휨재의 설계방안에 따라 모멘트와 전단력을 각각 플랜지와 웨브에서 저항하게 설계하고자 할 때, 모멘트에 대한 플랜지의 기본적인 설계는 다음 식 (2.2.4.8)을 만족하여야 하며, 앞서 설명한 전단력에 대한 설계메커니즘과 동일하다. 여기서 N_{Sd} 는 플랜지에 발생되는 부재력, N_{Rd} 는 설계응력이며, γ_{M} 은 부분계수이다.

$$N_{\mathrm{Sd}} \le N_{\mathrm{Rd}} \ (= N_{\mathrm{Rk}}/\gamma_{\mathrm{M}}) \tag{2.2.4.8a}$$

$$N_{\mathrm{Rk}} = \min(N_{\mathrm{Z,Rk}} : N_{\mathrm{D,Rk,l}} : N_{\mathrm{D,Rk,g}}) \tag{2.2.4.8b}$$

플랜지의 축력에 대한 계산은 인장이냐 압축이냐에 따라 구분되며, 인장에 대한 플랜지의 설계저항능력은 다음과 같고, 여기서 f_y는 강재의 항복응력이다.

$$N_{\mathrm{Z,Rk}} = f_y \cdot b_f \cdot t_f \qquad (2.2.4.9)$$

압축의 경우에는 좌굴에 관한 안정성 문제에 대해서 고려해야 하며, 국부좌굴과 전체좌굴에 대한 검토가 필요하다. 우선 국부좌굴은 한계 판-폭두께비에 의한 검토이며, 파형으로 인해 감소된 플랜지의 유효폭을 적용하여 플랜지의 감소된 응력을 식 (2.2.4.10)과 같이 계산된다. 여기서, σ_1은 압축응력값 가운데서 가장 큰 값이다.(DIN 18800 T.1 Tab.13)

$$N_{\mathrm{D,Rk,l}} = \sigma_1 \cdot b_f \cdot t_f \qquad (2.2.4.10)$$

플랜지의 전체좌굴은 압축플랜지 측면의 지지점 간격에 의해 영향을 받게 되며, 다음 식 (2.2.4.11)과 같이 정의된다.(Pasternak 등, 2004) 여기서, k_c는 DIN 18800 T.1 Tab.8에 제시되어 있고, c는 플랜지의 수평지지길이이다. 그러나 플랜지에 발생하는 하중이 최대하중을 넘지 않을 경우 검토는 생략된다.

$$N_{\mathrm{D,Rk,g}} = \frac{0.5\,\pi}{\sqrt{12}} \sqrt{E\,f_y}\,\frac{b_f\,t_f}{k_c\,c} \qquad (2.2.4.11)$$

이상의 설계식이 적용된 제약조건과 이들을 만족하는 목적함수의 정해를 구하는 문제는 매우 복잡하며, 전역적 최적해를 구하기 위해서는 국소최적해에 수렴하지 않는 확률적 해석방법의 적용이 필요하다. 과거 최적화 문제의 어려움들은 수치해석기법과 컴퓨터의 발달로 인해 최적화 알고리즘의 개발이 용이하여졌다. 이 중 유전자 알고리즘은 설명하고 프로그래밍하기 간단하기 때문에 많은 문제에 적용되어 왔지만, 그 행동이 매우 복잡해질 우려가 있으며, 어떻게 동작 하는가 그리고 어떠한 종류의 문제에 가장 적합한 것인지에 관한 문제를 조명하는 것은 쉽지 않다. 그러나 고전적인 방법으로 해결하기 힘든 문제나 전역 최적화 문제에서는 매우 유용한 기법이며, 본 연구에서는 실변수 유전자 알고리즘(Real-valued Genetic Algorithm)을 이용하여 해를 구하도록 한다.

다. 실변수 유전자 알고리즘(Real-valued GA)의 연산자와 전역 최적해 탐색 방법

최적화 문제의 해를 구하는 기법으로 실변수 유전자 알고리즘을 채택하며, 유전정보의 표현을 이진수가 아닌 실수로 구성하여 전역 해를 구한다. 유전자 알고리즘은 SA(Simulated Annealing)와 마찬가지로 다양한 유형의 문제에도 적용가능하며, 달리 방법이 없는 경우 사용되는 전역적 최적기법이다. 자연계에서 나타나는 유전과정을 모방하여 생물학적 유전인자인 염색체와 유사한 구조를 지니는 설계변수집합의 선택(selection), 교차(crossover) 및 돌연

변이(mutation)연산을 거쳐 다음 세대의 새로운 연산자를 인공적으로 만들어 내는 과정을 통해 적합한 해를 탐색한다. 따라서 국부탐색을 하면서 전체 최적(global optimum)을 찾기 위해 다수의 초기점에 대해 반복계산을 하는 기존의 최적화 방법과는 달리 유전자 알고리즘은 하나의 설계점이 아닌 설계집단을 사용하여 확률론적인 탐색을 실시하므로 전체 최적점에 도달할 신뢰도가 큰 것으로 평가되고 있다. 여기서 소개되는 실변수 유전자 알고리즘은 이진변수를 이용한 유전자 알고리즘과 비교할 때 알고리즘은 같으나 설계변수가 이진수가 아닌 실수로 이루어지므로 이진화(Encoding)와 십진화(Decoding)과정이 필요 없고, 조작 및 종류와 방법에 있어서 다소 차이가 난다. 해를 탐색하는 과정에서 부모세대와 자식세대간의 유전연산은 적합도를 이용하여 형질을 유전시킨다. 유전자 알고리즘에서 적합도(fitness)란 생태계에서 살아남을 수 있는 능력의 척도로서, 교배지역(mating pool)에 개체들이 배치(복사)될 때 배치여부를 판정한다. 따라서 높은 적합도를 가지는 개체들은 다음 세대에 부모로 선택될 확률이 크다는 것을 의미한다. 본 연구에서 목적함수는 구조물의 중량이며 제약을 위반할 시 벌점함수 $P(\boldsymbol{x})$를 목적함수에 부가하도록 형성되어 있으므로 최소화문제(minimization problem)로 구현되기 위해서 적합도 함수 $\phi(\boldsymbol{x})$는 식 (2.2.4.12)과 같이 구성된다. 여기서, $g_i(\boldsymbol{x})$, $g_j(\boldsymbol{x})$는 제약함수이고, r_p, q는 벌칙함수의 증가계수 및 승수이며, 제약을 위반하였을 경우 벌점이 부과된다.

$$\phi(\boldsymbol{x}) = \frac{c_2}{c_1 + \{F(\boldsymbol{x}) + r_p P(\boldsymbol{x})\}} \tag{2.2.4.12a}$$

$$P(\boldsymbol{x}) = \sum_{i=1}^{m} \{g_i(\boldsymbol{x})\}^q + \sum_{j=1}^{n} \{g_j(\boldsymbol{x})\}^q \tag{2.2.4.12b}$$

자식세대($\boldsymbol{x}^{offspring}$)는 부모세대($\boldsymbol{x}^{parent}$)로부터 선택, 교차 및 돌연변이 등의 연산과정을 통해 형성되며, 각각의 연산과정들은 수렴도를 높이거나 우수한 형질을 유지하는 등의 목적으로 연산을 수행한다. 특히 유전연산에서 확률변수들은 수리모형의 문제에 따라 효율적인 값이 다르게 적용되므로, 적절한 변수를 채택하는 것은 중요하다. 본 연구에서 채택되어진 교차, 돌연변이, 엘리트 보존전략(Elitist Strategy) 및 이계교배(Out-breeding)에 대한 연산을 설명하면 다음과 같다. 이진변수의 교차는 부모세대의 염색체로부터 유전정보를 혼합하는 것으로 일점, 다점 및 균일교차 등이 있으나 실변수 유전자 알고리즘의 경우는 유전형질을 담고 있는 염색체의 형태로 변환하지 않기 때문에 교차방법이 다르며, 내삽(Interpolation)법, 외삽(Extrapolation)법, 휴리스틱(Heuristic)법 및 교차와 혼용한 휴리스틱법 등이 있다. 이중 내(외)삽 및 휴리스틱 방법은 식 (2.2.4.13)을 이용하여 자녀세대에게 혼합 전수시키는 방법이고, 여기서 r은 난수(Random number)이다.

$$\boldsymbol{x}^{offspring} = \pm r\, \boldsymbol{x}_i^{parent} + (1 \mp r)\, \boldsymbol{x}_j^{parent} \tag{2.2.4.13a}$$

$$\boldsymbol{x}^{offspring} = \boldsymbol{x}_i^{parent} + r(\boldsymbol{x}_i^{parent} - \boldsymbol{x}_j^{parent}) \tag{2.2.4.13b}$$

돌연변이 연산은 교차조작과 마찬가지로 부모세대와는 전혀 다른 확률에 따라 자녀세대의

유전정보가 정의되는 것을 의미한다. 이진변수의 경우는 0과 1로 구성되므로 단순히 뒤바꾸면 되는 연산이지만 실변수 경우는 광범위한 설계공간의 탐색에 대한 새로운 탐색공간으로의 전위가 가능하도록 함으로써 국소 최적공간을 벗어날 수 있게 한다. 비교적 이진변수의 경우보다 높은 돌연변위 확률이 문제에 따라 다르게 적용되며, 다음과 같이 정의된다.

$$x_i^{new} = \begin{cases} x_i^{low} + r(x_i^{high} - x_i^{low}), & \text{if } r \le p_M \\ x_i^{current}, & \text{if } r > p_M \end{cases} \qquad (2.2.4.14)$$

Kenneth De Jong(1975)에 의해 처음 소개된 엘리트 보존전략은 각 세대의 선택과정에서 가장 좋은 개체가 제외되거나, 교배 또는 변이에 의하여 가장 좋은 개체가 파괴되는 것을 방지하기 위하여 이를 강제로 유지시키는 것이다. 엘리트 보존전략을 이용할 경우, 세대의 교체 과정에서 적합도가 향상됨에 따라 최적개체를 보존함으로서 모집단을 구성하는 최적개체의 적합도를 유지할 수 있다.

마지막으로 이계 교배는 세대가 증가할수록 개체의 유전정보가 유사하거나 동일한 개체들이 발생하여 설계공간에 대한 탐색 효율이 저하되므로 이를 방지하기 위하여 매 세대마다 모집단에 속한 일부를 새로운 개체로 대체시켜 교배 즉, 이계 교배(Out-breeding)를 한다. 이계 교배 방법으로는 기존 개체에 미리 정의된 크기의 섭동(Perturbation)벡터 $d\boldsymbol{x}$와 난수벡터 $\boldsymbol{r}$를 이용해 생성하며, 다음과 같이 정의된다.

$$\boldsymbol{x}^{new} = \boldsymbol{x}^{current} \pm \boldsymbol{r} \odot d\boldsymbol{x} \qquad (2.2.4.15)$$

여기서, $\boldsymbol{r} \odot d\boldsymbol{x} = diag(\boldsymbol{r}) \cdot d\boldsymbol{x}$이다. 섭동 벡터는 일반적으로 연산 초기에 결정되므로 설계변수공간의 크기에 따라 정의할 수 있으며, 해의 수렴도와 정밀도에 영향을 미친다.

이상의 연산자를 이용하여 최적화를 위한 실변수 유전자 알고리즘 프로그램을 구현하고 프로그램의 흐름도를 나타내면 다음과 같다.

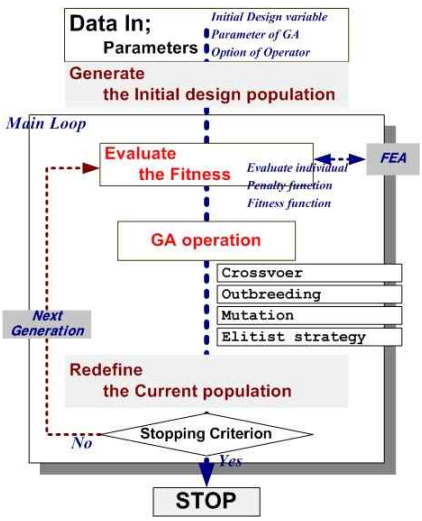


그림 2.2.4.4 실변수 유전자 알고리즘을 이용한 최적화 프로그램의 흐름도

라. 단순보 모형을 이용한 중량 최적설계와 확률변수

정현파형 주름을 가진 휨재의 중량 최소화를 위한 목적함수와 단면 및 처짐에 관한 제약함수로 구성된 최적화 문제의 전역 최적점을 구하기 위해서 실변수 유전자 알고리즘을 적용하고, 단순보에 적용된 해석결과의 고찰을 통해 해석상의 확률 파라메타의 효율성과 해석결과의 유효성에 대해서 살펴본다.

실변수 유전자 알고리즘은 여러 가지 유전연산을 통해서 부모세대로부터 자식세대를 형성하며, 세대수가 증가할수록 적합도가 증가된 세대를 얻을 수 있다. 이 과정에서 나타나는 연산의 많은 부분은 난수의 발생과 발생된 난수가 유전 연산자에 대한 확률(Probability)에 의해 어떠한 연산을 수행할 것인지를 결정하는 것이다. 개발된 프로그램에서 채택된 연산자의 확률변수로는 교배확률(Crossover probability:p_C)과 돌연변이확률(Mutation probability:p_M)이 있다. 유전 연산자 중에서 돌연변이는 국소 최적점에서 탈피해 전역해를 탐색하기 위한 방법으로 제시된 것으로서 부모세대와는 전혀 다른 염색체를 가지게 되는 것이다. 이와 목적이 비교적 유사하지만 이계교배의 경우는 자식세대의 형성에 있어서 부모세대에 섭동벡터를 통한 또 다른 부모세대를 형성하는 것으로서 부모세대에서의 유사한 형질 선택으로 인해 낮아진 설계공간의 탐색 효율을 높이는 것이다. 즉, 설계공간의 확대를 위한 섭동벡터 공간의 크기는 탐색효율에 영향을 미친다.

단순보 모델에 이와 같은 방법을 적용하였을 때 확률변수들과 섭동벡터의 변화에 따른 해의 수렴도와 효율성을 함께 살펴보도록 한다. 또한 부재의 항복강도와 하중의 증가에 따른 최적결과의 변화와 제약함수의 변화를 통한 해석결과의 타당성을 함께 살펴본다. 적용될 예제는 스팬(L)이 10 m이고, 등분포 하중 $w = 100\ \mathrm{N/mm}$ 가 작용한다. 여기서 재료 탄성계수(E)와 포와송비(ν)는 각각 $21000\ \mathrm{kN/cm^2}$ 및 0.3이다. 최적설계에서 주름의 형상은 $a_3 = 40\ \mathrm{mm}$ 와 $w = 77.5\ \mathrm{mm}$ 로 채택한다. 여기서 제시된 사인파형은 오스트리아 빈의 Zeman & CO사에서 개발되어진 자동생산기계를 통해서 제작되어지는 형상을 채택한 것이다. 해석을 수행하기 위해서 채택되어진 설계변수의 상·하한치는 아래식과 같고, 보의 처짐에 대한 제약은 $\delta_{\mathrm{limit}} = L/300$로 한다. 설계를 위한 부재력은 단순보이므로 최대 휨모멘트와 최대전단력을 이용하여 해석을 수행하며, 문제의 단순화를 위해서 부재의 자중과 정현파형 웨브의 연성효과에 대한 영향은 무시하였다.

$$10 \le b_f(\text{or } h_w) \le 3000 \qquad (2.2.4.16a)$$

$$1 \le t_f(\text{or } t_w) \le 300 \qquad (2.2.4.16b)$$

유전자 알고리즘은 일반적으로 개체수의 증가와 세대수의 증가에 따라 유전형질이 좋아진다. 그러나 확률적 연산을 기초로 하므로 매개변수의 약간의 변화에도 좋은 해를 얻을 수 있지만 연산을 많이 수행하여도 연산 량에 비례한 좋은 결과를 얻지 못할 수 있다. 따라서 단순보 예제를 이용해서 세대수의 증가와 개체수의 증가에 따른 목적함수와 적합도의 변화를 살펴본다. 여기서, 개체(Population)수는 10에서 100까지 10씩 증가시키고, 세대(Generation)수는 모두 1000세대까지 해석하여 적합한 확률변수의 범위를 살펴보도록 한다.

그림 2.2.4.5와 그림 2.2.4.6은 정현파형 주름판을 적용한 단순보의 최적설계 해석결과에 대해서 각 개체수 별 엘리트 개체에 대한 목적함수와 적합도의 변화를 나타내었다. 여기서 그림 2.2.4.5는 교배확률 p_C는 87.5%, 돌연변이확률 p_M을 30% 및 이계교배의 섭동벡터는 전체 설계공간 $\boldsymbol{x}^d$의 0.1%로 채택한 결과이고, 그림 2.2.4.6은 교배확률 p_C는 25%, 및 섭동벡터를 설계공간의 30%로 채택한 결과이며 돌연변이 연산은 수행하지 않았다. 이와 같은 교차검토를 통해서 각 확률변수간 적합한 값의 범위를 설정할 수 있으며, 실변수 최적화 방법을 이용하기 위한 기초자료를 제공할 수 있다.

각 해석결과에 대한 수렴된 엘리트 객체의 설계변수와 벌칙함수의 값을 표 2.2.4.1과 표 2.2.4.2에 각각 나타내었다.

표 2.2.4.1 정현파형 주름을 이용한 휨재의 최적설계($p_C = 0.875$, $p_M = 0.3$, $d\boldsymbol{x} = 0.001\boldsymbol{x}^d$)

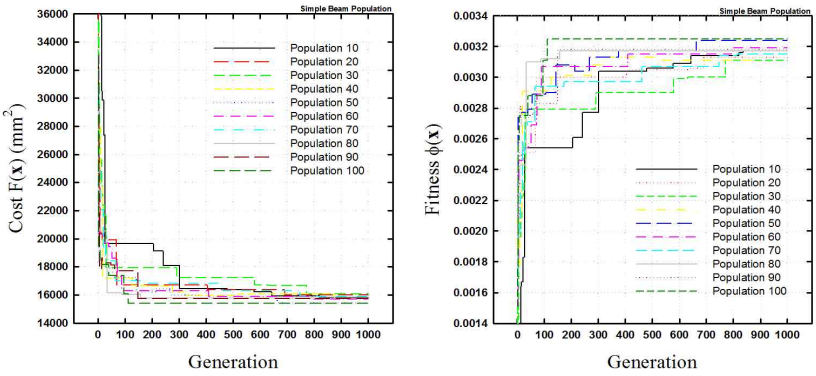
개체수	$F(\boldsymbol{x})$ (mm^2)	$\phi(\boldsymbol{x})$	b_f (mm)	t_f (mm)	h_w (mm)	t_w (mm)	$P(\boldsymbol{x})$
10	15789.6	3.164×10^{-3}	217.7	15.0	1737.0	4.6	0.0
20	15980.3	3.129×10^{-3}	240.5	17.4	1359.5	4.9	0.0
30	16056.0	3.114×10^{-3}	324.1	13.2	1417.6	4.6	0.0
40	15785.8	3.167×10^{-3}	313.2	12.7	1516.4	4.5	0.0
50	15445.9	3.237×10^{-3}	185.7	20.4	1505.1	4.6	0.0
60	15680.6	3.189×10^{-3}	249.3	14.8	1579.9	4.6	0.0
70	15892.0	3.146×10^{-3}	207.6	17.4	1573.9	4.8	0.0
80	15767.4	3.171×10^{-3}	212.4	18.2	1514.3	4.6	0.0
90	15742.9	3.176×10^{-3}	292.9	13.2	1531.6	4.5	0.0
100	15383.7	3.237×10^{-3}	258.3	14.1	1577.3	4.5	0.0

표 2.2.4.2 정현파형 주름을 이용한 휨재의 최적설계 ($p_C = 0.25$, $p_M = 0.0$, $d\boldsymbol{x} = 0.3\boldsymbol{x}^d$)

개체수	$F(\boldsymbol{x})$ (mm^2)	$\phi(\boldsymbol{x})$	b_f (mm)	t_f (mm)	h_w (mm)	t_w (mm)	$P(\boldsymbol{x})$
10	16458.1	3.038×10^{-3}	184.7	18.7	1676.7	5.0	0.0
20	15387.0	3.247×10^{-3}	240.7	16.3	1438.2	4.6	0.0
30	15403.6	3.246×10^{-3}	200.5	19.0	1499.7	4.5	0.0
40	15316.1	3.262×10^{-3}	237.3	14.9	1601.5	4.5	0.0
50	15279.4	3.270×10^{-3}	290.2	13.1	1490.3	4.5	0.0
60	15412.4	3.244×10^{-3}	229.7	16.2	1537.8	4.5	0.0
70	15403.7	3.246×10^{-3}	254.9	13.4	1666.5	4.5	0.0
80	15283.1	3.271×10^{-3}	203.6	18.1	1539.2	4.5	0.0
90	15295.9	3.268×10^{-3}	261.4	14.3	1516.5	4.5	0.0
100	15313.9	3.264×10^{-3}	246.0	15.3	1507.7	4.5	0.0

여기서 벌칙함수 값이 0을 초과하지 않으므로 설계변수에 대한 목적함수는 제약조건을 위배하지 않는 유효한 영역에 있음을 알 수 있다. 두 결과에서 알 수 있듯이 세대수의 증가는 유사한 최적점으로 수렴하고 있으나 개체수가 적을수록 수렴속도는 나빠지게 됨을 그림

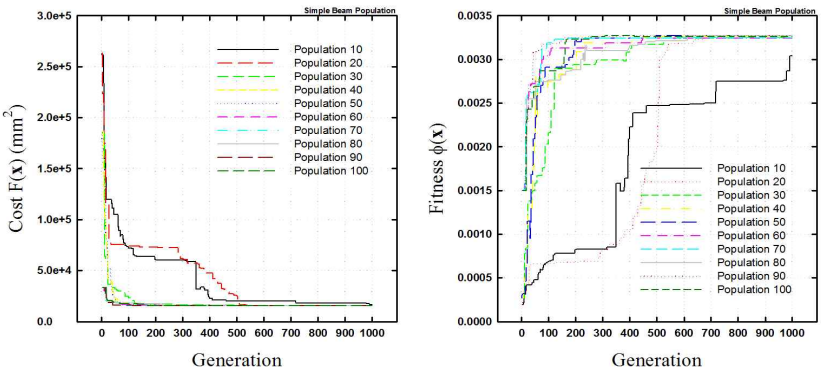
2.2.4.5과 그림 2.2.4.6을 통해서 직관적으로 알 수 있다. 또한 개체수의 단순 증가에 따른 최종 수렴 값은 적합도의 상승의 결과를 얻지는 못한다. 표에서 볼 때, 최종적인 주름 웨브의 두께는 모두 4.5mm로 수렴하고 있으며, 다른 설계변수들은 다소 차이가 있다.



(a) 목적함수 (b) 적합도

그림 2.2.4.5 정현파형 주름을 이용한 휨재의 최적설계

($p_C = 0.875$, $p_M = 0.3$, $d\boldsymbol{x} = 0.001\boldsymbol{x}^d$)



(a) 목적함수 (b) 적합도

그림 2.2.4.6 정현파형 주름을 이용한 휨재의 최적설계

($p_C = 0.25$, $p_M = 0.0$, $d\boldsymbol{x} = 0.3\boldsymbol{x}^d$)

세대수의 증가로 수렴된 엘리트 객체는 표 2.2.4.1과 표 2.2.4.2의 벌점함수 $P(\boldsymbol{x})$ 값을 볼 때 설계가능영역에 있음을 알 수 있다. 그러나 각 설계변수에 대한 제약함수 값이 모두 허용하고 있는 범위를 최상으로 만족하는 것은 아니다. 그림 2.2.4.7은 그림 2.2.4.6에서 최종 수렴한 엘리트 객체의 설계변수에 대한 제약함수 값을 그래프로 나타내었다. 여기서 제약함수 값은 주름진 웨브의 전단좌굴에 대한 제약(g_3)과 플랜지의 응력에 대한 제약(g_4)이 모두 경계점에 도달해 있음을 알 수 있다. 그리고 개체수의 증가에 따른 양상의 변화는 크게 없지만 가장 낮은 개체수의 해석의 경우 웨브의 전단응력에 대한 제약 g_3의 경계에 도달하지는 못했고, 수렴된 엘리트 객체의 목적함수 결과도 가장 높음을 알 수 있다. 이와 같은 결과에서 볼 때, 설계제약함수의 주된 제약조건이 무엇인지를 쉽게 판단할 수 있는 근거를 제시한 것

으로 정현파형 주름판의 전단이 설계에 큰 영향을 미친다.

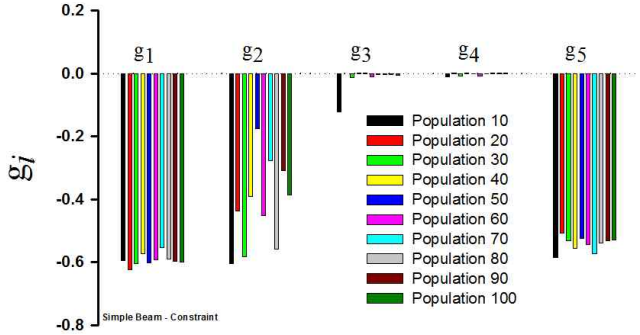
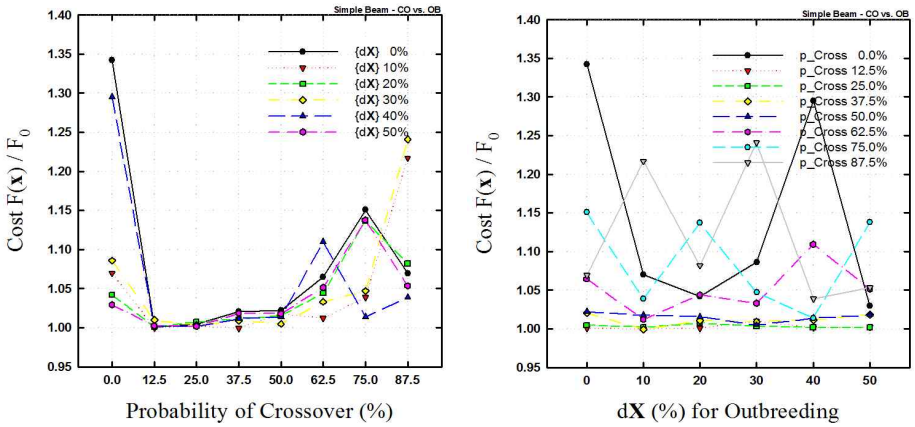


그림 2.2.4.7 수렴된 개체의 제약함수 ($p_C = 0.25$, $p_M = 0.0$, $d\boldsymbol{x} = 0.3\boldsymbol{x}^d$)

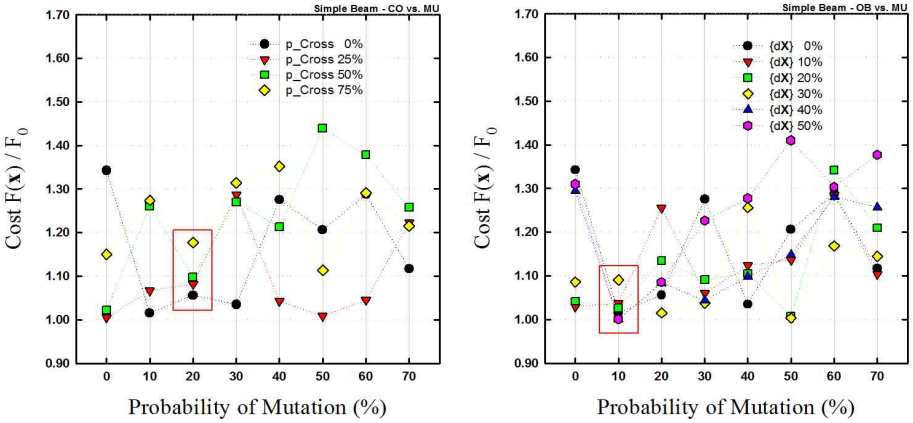
교배확률변수, 돌연변이확률변수 및 섭동벡터의 크기는 해의 수렴도와 전역탐색에 영향을 미친다. 각각의 파라메타는 발생하는 난수에 의해서 교배나 돌연변이연산을 수행하며, 돌연변이 연산이나 섭동벡터는 전역탐색을 위해서 또는 부모세대의 형질의 유사성으로 인한 탐색효율을 높이는데 목적을 두고 있다. 그러나 최적의 파라메타 값은 형성된 문제에 따라 다르며, 변수의 단순 증가나 감소가 효율적이거나 유효한 탐색의 결과를 낳는 것은 아니다. 따라서 유전 연산자 간의 파라메타에 따른 전역최적해의 결과를 비교하도록 하며, 채택된 문제의 최적화에 적합한 연산자와 파라메타 값에 대해 살펴보도록 한다. 여기서 해의 탐색을 위해서 100개의 개체를 1000세대동안 해석을 수행하며, 세 연산자의 효율성을 살펴보기 위해서 각각 두 가지 연산만을 서로 적용한다. 즉, 전역최적해를 탐색하는데 영향이 큰 돌연변이연산과 이계교배 연산을 기준으로 매개변수의 범위를 검토하도록 한다.

그림 2.2.4.8은 돌연변이 연산을 제외한 결과이며, 그림 2.2.4.9는 각각 이계교배 및 교배의 연산을 제외하여 해석을 수행한 결과이다.



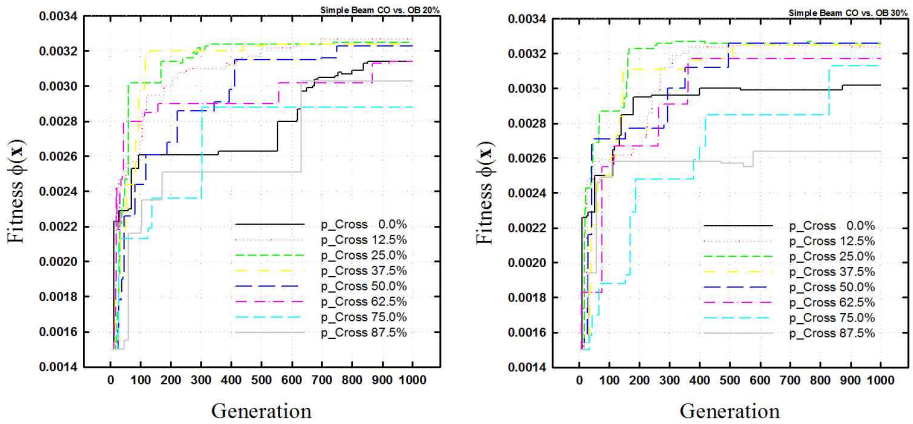
(a) 교배확률 해석결과 (b) 이계교배 해석결과

그림 2.2.4.8 교배 및 이계교배 연산에 따른 해석결과



(a) 돌연변위 확률과 교배확률 (b) 돌연변위 확률과 이계교배의 섭동벡터

그림 2.2.4.9 돌연변이확률의 변화에 따른 해석결과



(a) $p_M = 0.0$, $d\boldsymbol{x} = 0.3\boldsymbol{x}^d$의 해석결과 (b) $p_M = 0.0$, $d\boldsymbol{x} = 0.3\boldsymbol{x}^d$의 해석결과

그림 2.2.4.10 교배확률에 따른 최적설계 해석결과

그림 2.2.4.8의 결과에 대해 섭동벡터의 값이 20%와 30%일 때의 해를 살펴보면 그림 2.2.4.10과 같다. 그림의 결과를 살펴볼 때, 교배확률이 25%와 37.5%일 때가 가장 빠르게 수렴한다. 그림의 세로축은 목적함수를 $F_0 = 15260.7$로 무차원화 한 값이며, 돌연변이 연산을 수행하지 않은 모델의 해석결과 중에서 가장 좋은 엘리트 객체의 목적함수 값이다. 그림에서 볼 때에도 값의 단순한 증가나 감소에 대해서 수렴결과의 향상을 기대할 수는 없다. 그러나 그림 2.2.4.8의 돌연변이 연산을 수행하지 않은 해석결과를 보면 교배확률에 따라 수렴된 최적해의 안정 구간이 나타난다. 즉 교배확률이 12.5%에서 50%사이의 값은 비교적 안정된 최적해석결과를 보이고 있으며, 섭동벡터의 크기에 비교적 영향을 적게 받는 것을 알 수 있다. 이계교배 연산을 수행하지 않은 그림 2.2.4.9(a)의 결과에서는 비교적 일정한 양상은 보이지 않지만 돌연변이 확률이 20%에서 가장 작은 편차를 보이고 있다. 또한 그림 2.2.4.9(b)의 교배연산을 수행하지 않은 결과에서 볼 때는 돌연변이 확률이 10%에서 가장 작은 편차와 높은 적합도의 개체로 수렴하였다. 이것은 이진변수 유전자 알고리즘에서 사용되는 일반적인 돌연변이 확률인 0.1~1%의 값보다 높게 나타난다.

마. 하중 파라메타에 따른 최적중량과 설계변수의 변화

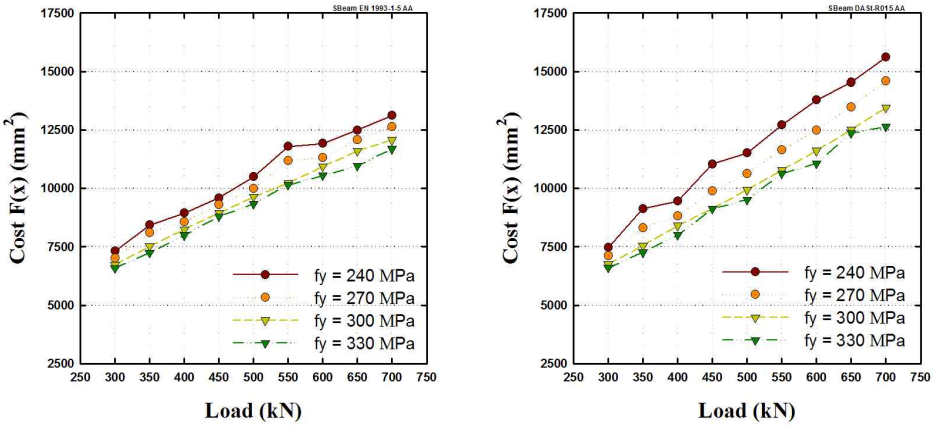
주름진 판을 이용한 부재의 경우 전단력은 일반적으로 주름판이 부담하게 된다. 전단설계는 설계규준에 따라 차이가 나며, 앞서 설명한 EN 1993-1-5의 경우가 DASt-R015보다 더 작을 것이다. 이러한 경향에 대해서 그림 2.2.4.11은 설계방법에 따른 범위를 그림으로 표현하였으나 설계전단력과 모멘트에 따른 전체단면적 차이가 나타나 있지는 않다. 특히, 최소중량설계에 의한 단면의 특성을 분석하는 것은 제약조건에서 나타나는 중요 설계인자 등을 판단해 볼 수 있으므로 단순보를 대상으로 하중에 따른 최적설계의 결과를 비교하여 규준별 최적중량의 특성을 알아볼 필요가 있다. 적용될 단순보는 앞에서 다룬 예제와 동일하며, 하중은 등분포 하중(w)과 집중하중(P)를 채택하였다. 여기서, 제약조건 g_3에 대해서 DASt-R015의 규준을 이용할 경우 Case A, EN 1993-1-5를 이용할 경우는 Case B로 나누어 설명하도록 한다.

우선, 집중하중의 경우를 먼저 살펴보도록 한다. 여기서 하중의 범위는 300－700kN 으로 50kN씩 증가된 값을 이용하며, 항복응력 f_y는 각각 240, 270, 300, 330MPa 을 적용하였다.

해석결과 그림 2.2.4.11과 같은 결과를 얻었다. 여기서, 그림 2.2.4.11(a)는 Case A의 결과이며, 그림 2.2.4.11(b)는 Case B의 결과이다. 두 경우의 최적중량은 예상했던 것과 같이 Case B가 더 작게 나타난다. 두 설계방법의 차이 이외에도 항복강도가 증가할수록 최적단면적이 작아지며, 하중이 증가할수록 최적단면적이 증가하며, 이러한 경향은 매우 일반적인 결과이다. 그림에서 나타난 최적설계에 따른 최적단면적은 f_y=240MPa에서 하중이 가장 클 때 Case A는 15605.7mm^2, Case B는 13111.1mm^2이다. 각각의 경우에 대해서 최적단면적의 차이를 비율로 나타내면 표2.2.4.3과 같다. 집중하중 P가 낮은 값에서는 Case A, B 모두 큰 차이는 없지만 하중이 증가할수록 두 경우의 단면적 차는 크게 나타나며, 항복강도가 커질수록 단면적의 차이는 적어진다. 최대단면적의 차이는 f_y=240MPa의 P=700kN에서 Case A가 B보다 19.03% 크게 나타났다.

표 2.2.4.3 항복강도에 따른 최적단면적 증감 비교 (집중하중)

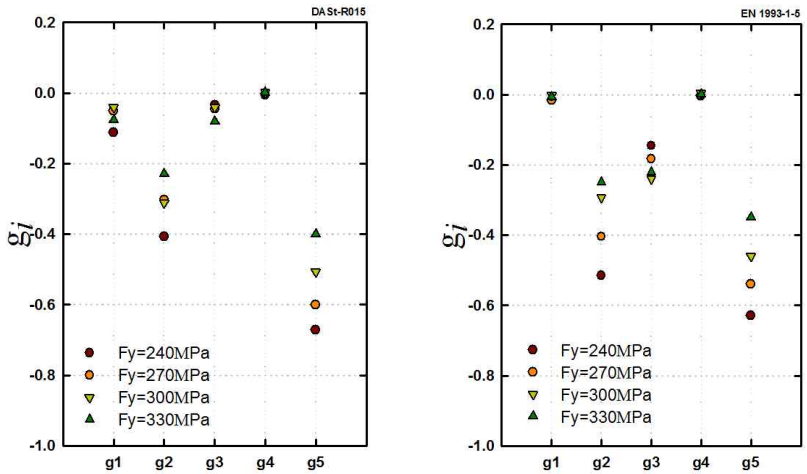
하중(kN)	최적 단면적 차이 $\left(\frac{F(X)_{CaseA}}{F(X)_{CaseB}}-1\right)\%$			
	240MPa	270MPa	300MPa	330MPa
300	2.12	1.36	0.44	0.22
350	8.31	2.58	0.41	0.30
400	5.68	2.96	1.98	0.04
450	15.12	6.42	2.08	3.58
500	9.74	6.53	3.12	1.95
550	7.79	4.02	5.51	4.72
600	15.61	10.45	6.19	4.91
650	16.32	11.71	7.84	12.74
700	19.03	15.56	11.40	8.20



(a) Case A (DASt-R015) (b) Case B (EN 1993-1-5)

그림 2.2.4.11 정현파형 주름판을 이용한 단순보의 최적설계결과 (집중하중)

최적설계에 따른 제약조건식의 값의 분포를 알아보기 위해서 그림 2.2.4.12에 최적해로 나타난 개체에 대해서 제약함수 값을 항복강도별 평균값을 나타내었다. Case A의 경우 플랜지의 축력에 대한 제약조건식 g_4가 0.0에 가장 가까운 값으로 나타났으며, 다음으로 주름웨브의 전단력 제약 g_3이 0.0에 근접한 값을 보였고, 주름웨브의 세장비 제약조건 g_1의 경우가 그 다음으로 나타났다. 여기서 제약함수가 0.0에 가까운 것은 제약조건에 매우 근접하게 설계되는 것을 의미하는 것으로서 플랜지와 웨브의 부재력 조건의 영향이 큰 것을 의미한다. 그러나 Case B의 경우는 그림 2.2.4.12(b)에서 보는 바와 같이 플랜지에 대한 제약의 경우는 위와 동일하지만 주름웨브의 경우 전단제약보다 세장비에 의해 설계되는 것을 알 수 있다. 주름웨브의 전단제약이 세장비의 다음 순서로 나타나지만 전단좌굴능력에 대한 평가가 Case A보다 Case B가 더 크기 때문에 나타나는 결과로 생각된다.

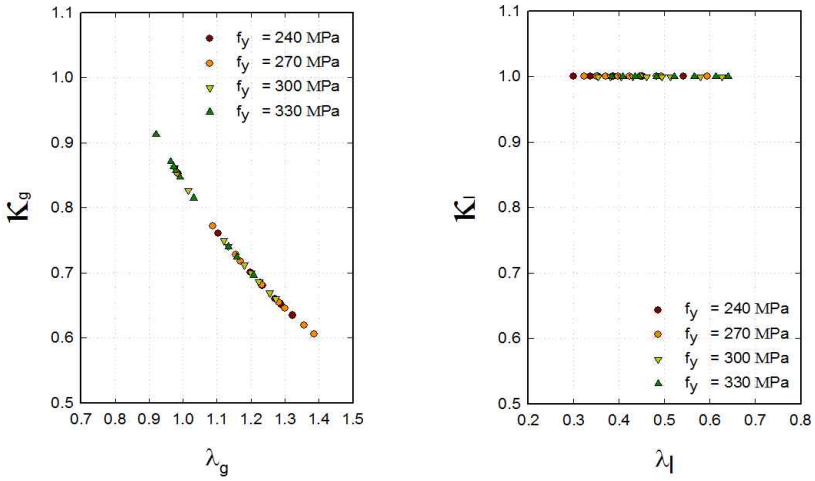


(a) Case A (DASt-R015) (b) Case B (EN 1993-1-5)

그림 2.2.4.12 최적설계결과에 대한 항복강도별 제약함수 (집중하중)

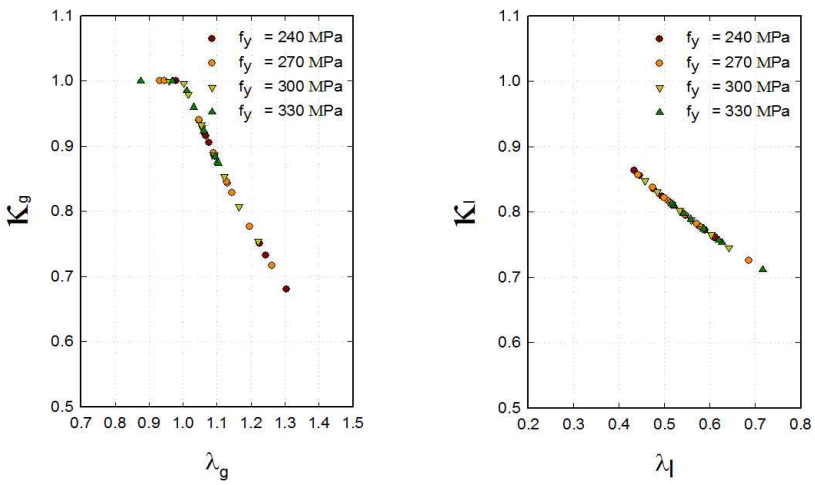
전단력에 대한 주름판의 세장비가 어떠한 분포로 나타나는지 알아보기 위해 그림 2.2.4.13

과 2.2.4.14에 세장비에 따른 감소계수의 분포도를 나타내었다. 그림 2.2.4.13의 Case A의 경우는 전체좌굴 세장비 λ_g가 0.92-1.39의 범위에서 분포되어 있으며, 이때의 감소계수는 0.60-0.91으로 나타났다. 국부좌굴의 경우 세장비 λ_l은 0.29-0.64로 감소계수는 모두 1.0으로 나타났다. 그림 2.2.4.14의 Case B는 전체좌굴의 세장비 영역이 0.88-0.98로 감소계수 0.68-1.0의 값으로 나타났으며, 국부좌굴의 경우는 세장비가 0.43-0.72의 값을 가지며, 감소계수는 0.71-0.86이다. 전체좌굴에 대한 세장비의 영역은 Case A가 Case B보다 높게 나타나고, 감소계수는 낮게 나타난다. 그러나 국부좌굴의 경우는 Case A가 B보다 낮지만 감소계수는 Case B가 더 낮게 나타난다. 이것은 설계기준의 감소계수에 대한 차이에서 나타난다.



(a) 전체좌굴 (b) 국부좌굴

그림 2.2.4.13 최적설계결과에 대한 감소계수 분포도 (집중하중, Case A)

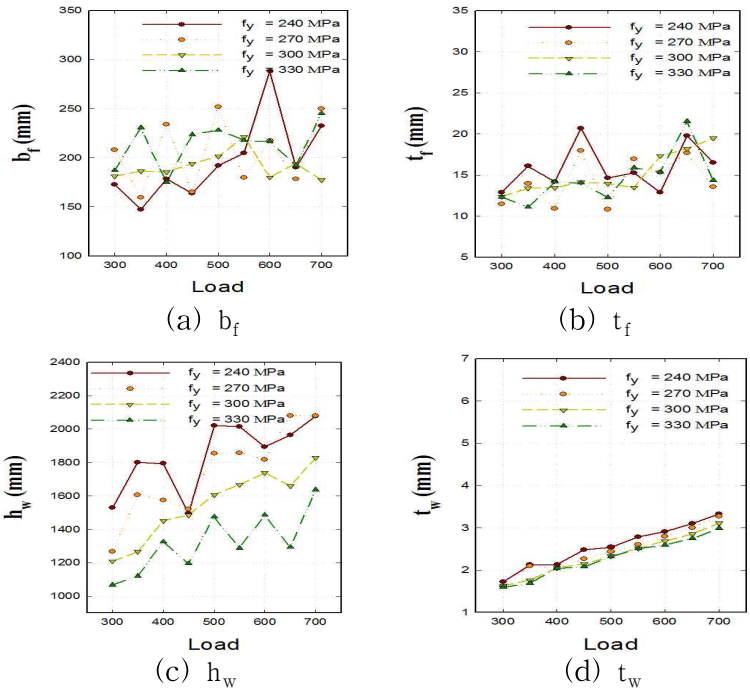


(a) 전체좌굴 (b) 국부좌굴

그림 2.2.4.14 최적설계결과에 대한 감소계수 분포도 (집중하중, Case B)

최적설계의 결과에 따른 최적단면의 형상을 Case A는 그림 2.2.4.15 Case B는 그림 2.2.4.16에 각각 나타내었다. 각 그림에서 하중의 증가에 따라 최적단면에 대한 설계변수 값

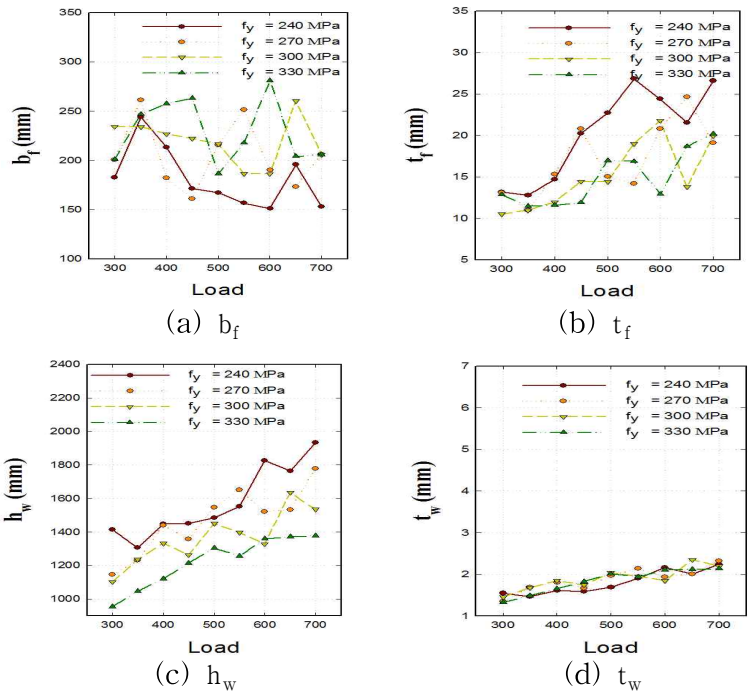
의 변화를 알 수 있으며, 두 그림 모두 크기가 증가하는 경향을 보인다. 그 중, 웨브의 두께의 변화가 가장 항복강도에 관계없이 일률적인 증가곡선을 나타내고 있으며, 값의 구간은 Case A의 경우 1.59-3.32mm, Case B의 경우 1.33-2.35mm로 나타난다. 이러한 결과는 웨브 두께의 증가와 하중의 증가에 따른 전체중량의 증가와 일치하는 경향이 있다.



(a) b_f (b) t_f

(c) h_w (d) t_w

그림 2.2.4.15 최적설계결과에 따른 설계변수의 변화 (집중하중, Case A)

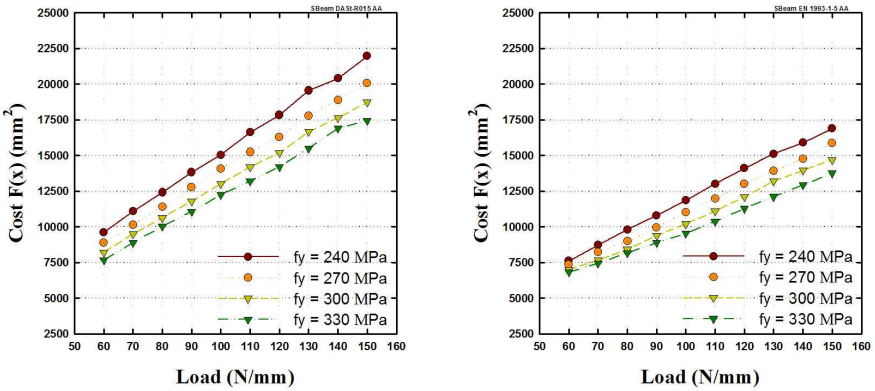


(a) b_f (b) t_f

(c) h_w (d) t_w

그림 2.2.4.16 최적설계결과에 따른 설계변수의 변화 (집중하중, Case B)

다음으로 등분포하중을 받는 예제의 모델에 대해서 살펴보도록 한다. 적용되는 하중 범위는 w=60-150N/mm이며 10N/mm증가시켜 적용하였고, 재료의 물성치 형상 설계조건 등의 자료는 집중하중 예제와 동일하다.



(a) Case A (DASt-R015)　　(b) Case B (EN 1993-1-5)

그림 2.2.4.17 정현파형 주름판을 이용한 단순보의 최적설계결과 (등분포하중)

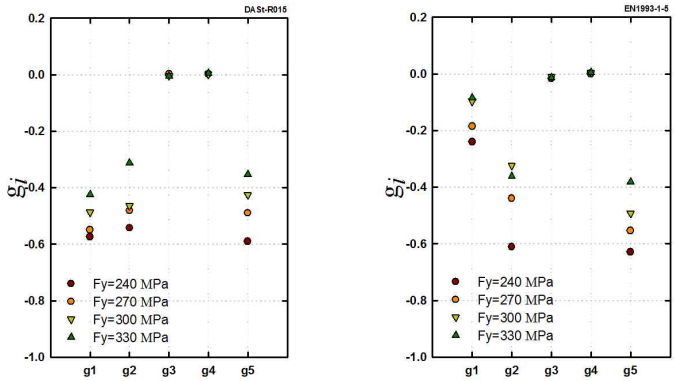
표 2.2.4.4 항복강도에 따른 최적단면적 증감 비교 (등분포하중)

하중(N/mm)	최적 단면적 차이 $\left(\frac{F(X)_{CaseA}}{F(X)_{CaseB}}-1\right)\%$			
	240MPa	270MPa	300MPa	330MPa
60	26.35	20.45	17.36	12.19
70	26.98	23.18	23.80	19.49
80	26.47	26.78	26.25	22.76
90	27.93	28.32	25.70	24.68
100	26.79	27.67	27.49	28.45
110	27.67	27.20	27.81	27.03
120	26.49	25.22	25.43	25.97
130	29.31	27.89	26.18	27.87
140	28.24	27.86	26.44	30.70
150	30.01	26.41	27.45	26.83

해석결과는 그림 2.2.4.17과 같고, 그림 2.2.4.17(a)는 Case A, 그림 2.2.4.17(b)는 Case B의 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 두 경우의 최적중량은 예상했던 것과 같이 Case B가 더 작게 나타난다. 두 설계방법에 대한 차이 이외에도 항복강도가 증가할수록 최적단면적이 더 작아지며, 하중의 증가함에 따라서 최적단면적 값은 증가하며, 결과는 집중하중의 예제와 동일하다. 그림에서 나타난 최적설계에 따른 최적단면적은 f_y=240MPa의 모델에서 하중이 가장 클 때 Case A는 21965.6mm^2, Case B는 16894.9mm^2로 나타났다.

각각의 경우에 대해서 최적단면적의 차이를 비율로 나타내면 표 2.2.4.4와 같다. w가 낮을 경우 Case A, B 모두 큰 차이는 없지만 하중이 증가할수록 두 경우의 단면적 차는 크게 나타나며, 항복강도가 커질수록 단면적의 차이는 적어진다. 이와 같은 결과는 집중하중의 모델에서도 유사하게 나타난 결과이며, 최대단면적의 차이는 f_y=240MPa의 w=150N/mm에서 가

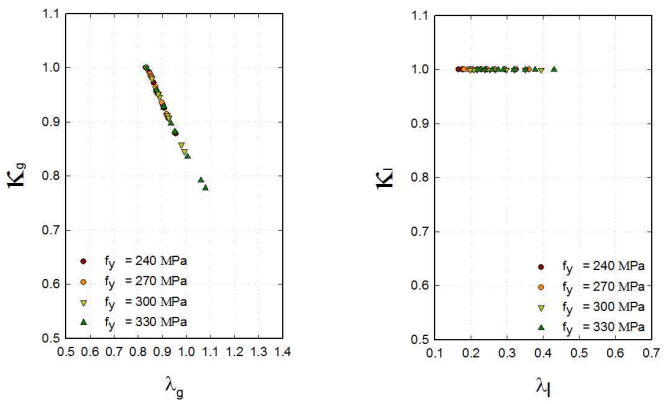
장 크게 나타났으며, Case A가 B보다 30.01% 크게 나타난다.



(a) CaseA(DASt-R015)　　(b) CaseB(EN 1993-1-5)

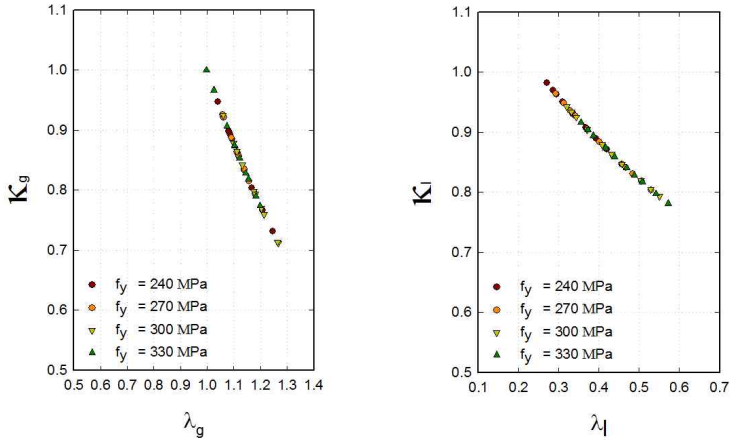
그림 2.2.4.18 최적설계결과에 대한 항복강도별 제약함수 (등분포하중)

최적설계에 대한 제약조건의 상태를 알아보기 위해서 최적단면에 대한 제약함수 값의 평균을 항복강도별로 그림 2.2.4.18에 나타내었다. Case A의 경우(그림 2.2.4.18(a))는 플랜지의 축력 제약 g_4와 웨브의 전단력 제약 g_3가 0.0에 가까운 값으로 나타났다. 이것은 Case B에서도 동일하다.(그림 2.2.4.18(b)) 그러나 웨브의 세장비에 대한 조건식은 Case B에서 더 큰 영향을 미치는 것으로 보인다. 이 결과에서 볼 때 부재력에 대한 제약이 설계에 가장 큰 영향으로 나타나며, Case B가 Case A보다 웨브의 세장비의 영향이 크다. 그림에서 보는 바와 같이 두 규준의 최적설계에 관한 제약조건식의 분포는 세 번째와 네 번째 제약조건에서 중요한 특징이 있음을 알 수 있으며, 주름웨브와 플랜지의 축력에 대한 제한 사항에 따라 다르게 나타난다. 이와 같은 특징에 대해서 최적해의 각 개체에 대한 설계변수의 세장비 분포를 살펴보도록 한다.



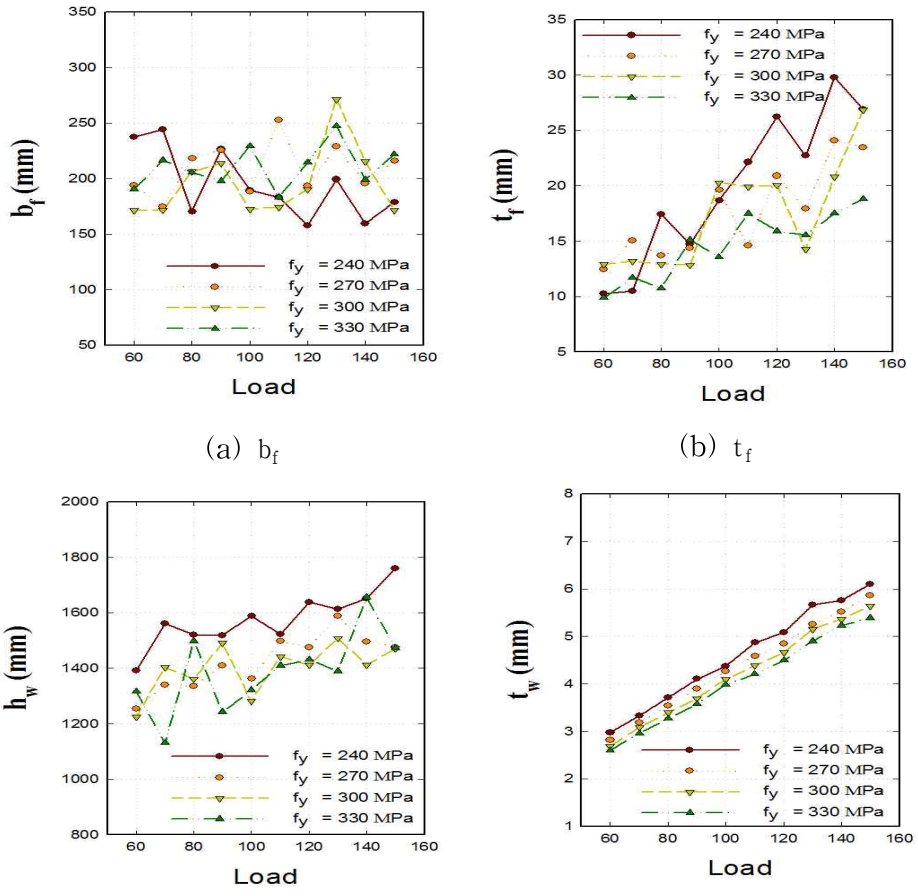
(a) 전체좌굴　　(b) 국부좌굴

그림 2.2.4.19 최적설계결과에 대한 감소계수 분포도 (등분포하중, Case A)



(a) 전체좌굴 (b) 국부좌굴

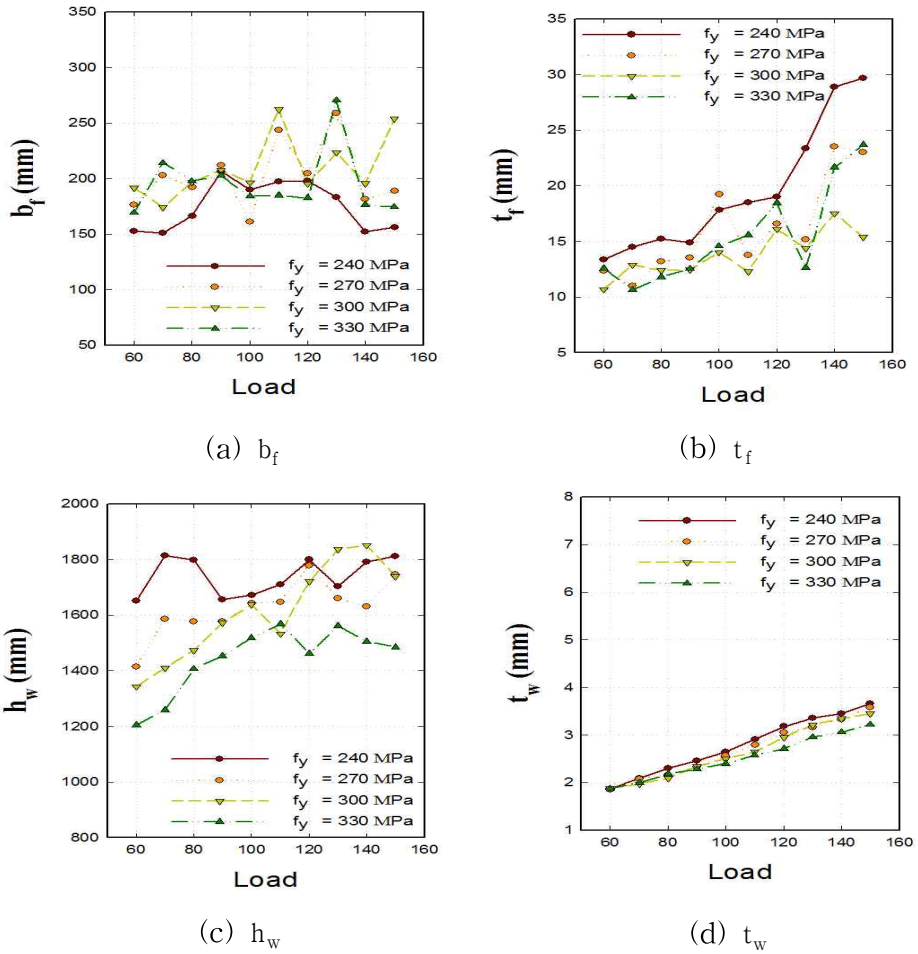
그림 2.2.4.20 최적설계결과에 대한 감소계수 분포도 (등분포하중, Case B)



(a) b_f (b) t_f

(c) h_w (d) t_w

그림 2.2.4.21 최적설계결과에 따른 설계변수의 변화 (등분포하중, Case A)



(a) b_f (b) t_f

(c) h_w (d) t_w

그림 2.2.4.22 최적설계결과에 따른 설계변수의 변화 (등분포하중, Case B)

전단력에 대한 주름판 적용 휨 부재의 최적설계에서 세장비와 감소계수가 어떠한 분포로 나타나는지 알아보기 위해서 그림 2.2.4.19와 그림 2.2.4.22에 세장비에 따른 감소계수를 나타내었다. Case A의 경우(그림 2.2.4.19)는 전체좌굴의 세장비 λ_g가 0.83-1.08의 범위에서 각 값들이 분포되어 있으며, 이때의 감소계수κ_g 범위는 0.78-1.0으로 나타났다. 국부좌굴의 경우 세장비λ_l은 0.17-0.43의 범위로 감소계수κ_l는 모두 1.0의 값이 적용되는 결과를 보였다. Case B의 경우(그림 2.2.4.20)는 전체좌굴의 세장비λ_g 영역이 0.99-1.27로 감소계수κ_g가 0.72-1.0의 값으로 나타났으며, 국부좌굴의 경우는 세장비λ_l가 0.27-0.57의 값을 가지며, 감소계수 κ_l의 범위는 0.78-0.98이다. 전체좌굴에 대한 세장비의 영역은 Case A가 Case B보다 낮게 나타나며, 감소계수는 높게 나타난다. 그러나 국부좌굴의 경우는 Case A가 B보다 낮지만 감소계수는 Case B가 더 낮게 나타난다.

최적설계의 결과에 따른 최적단면의 형상을 Case A는 그림 2.2.4.21, Case B는 그림 2.2.4.22에 각각 나타내었다. 하중의 증가에 따라 형상의 변화가 발생하는 것을 알 수 있으며, 양상은 집중하중의 경우와 유사하다. 웨브의 두께의 변화도 집중하중의 경우와 마찬가지로 가장 안정적인 증가곡선을 나타내고 있으며, 값의 구간은 Case A의 경우(그림 2.2.4.21) 2.59-6.09mm, Case B의 경우(그림 2.2.4.22) 1.86-3.67mm로 나타난다.

집중하중이 작용하는 단순보와 동일한 양의 등분포하중이 작용하는 단순보는 최대전단력은 동일하지만 최대모멘트는 집중하중의 경우가 더 크다. 두 경우 모두 부재설계는 발생하는 모멘트에 대한 플랜지의 축력저항능력과 좌굴에 대한 안정성을 확보하여야 하며 이는 주름웨브의 높이가 높을수록 유리하다. 최적설계에서 기준들에 의해 제약을 받는 설계 파라메타들은 비교적 세장하면서도 발생하는 응력을 모두 감당할 수 있는 값을 찾는 것으로서 설계기준에 따라 다르게 나타날 것이다.

두 하중조건에 대한 최적단면의 단면적은 항복강도의 증가에 따라 감소하며, 전단설계식이 DASt-R015에서 제안된 것을 이용하는 Case A나 EN 1993-1-5의 Case B나 모두 동일한 결과를 나타내고 있다. 또한, 하중의 증가에 따라서 증가하는 단면적은 안정적인 증가양상을 보이고 있으며, 이와 같은 양상은 두 설계기준에서 모두 동일한 결과를 나타내었다. 양상은 같다 하더라도 최적단면은 Case A가 Case B보다 크게 나타나며, 적용되어진 하중범위에 대해서 집중하중의 경우 최대 19.03%, 등분포하중의 경우 30.01%의 차이가 난다. 즉, 최적단면적은 EN 1993-1-5의 경우가 DASt-R015에 비해 더 작은 단면적으로 설계된다. 각각의 항복응력에 대해서는 240MPa의 경우가 가장 큰 증가폭을 나타나며, 330MPa의 경우가 가장 작게 나타났다. 하중의 크기에서도 가장 낮은 하중에서는 어느 설계기준에서나 마찬가지로 단면적 차이는 거의 나타나지 않았으며, 이것은 집중하중이나 등분포하중 모두 동일한 결과이다. 세장비에 대한 감소계수를 보면, 두 하중조건 모두 국부좌굴에서 Case A는 1.0의 값을 나타내고 있으며, Case B는 1.0 미만의 값으로 나타낸다. 이 결과는 Case B의 경우 보다 더 세장한 단면으로 설계되는 것을 의미하며, Case A가 연성좌굴에 대한 고려와 더불어 더 큰 안전율을 고려하는 것으로 생각된다. 그리고 최적단면의 설계변수에 대한 변화에서 주름웨브의 두께변화는 다른 설계변수에 비해 안정적인 증가를 보이며, 이것은 최적단면적의 증가와 같이 증가하는 경향이 있다.

현재 유럽에서 많이 생산되고 연구되는 휨재의 주름판 부재는 파장의 범위가 $a_3/2 \leq 40\text{mm}$, $155\text{mm} \leq 2w \leq 310\text{mm}$이며, 정현파형 웨브의 전단좌굴에 대해서 많이 연구되었다. 주름웨브의 전단좌굴해석과 각 좌굴모드에 대한 좌굴응력들은 주로 탄성범위에서 많이 다루어지며, 좌굴의 형태는 국부좌굴, 전체좌굴 그리고 이들의 연성작용으로 발생되는 좌굴이 보고되고 있다. 여기서, 전단좌굴의 특성을 정의하는 형상 파라메타는 파장, 파고, 두께 및 웨브의 높이 등으로 매우 복잡하며, 가장 기본적인 보의 특성에 대해서 본 절에서 분석하였다. 이와 같은 기초자료에서 볼 때, 주름판은 전단력에 매우 효율적인 적용이 가능하며, 얇은 두께로 큰 저항능력을 유도할 수 있다. 전단력에 대한 능력의 증가는 내진 재료로서의 가능성을 설명할 수 있으며, 이와 같은 특성의 분석으로 전단좌굴의 세 가지 특성에 대한 적절한 방향으로의 부재성능을 조절할 수 있게 된다. 따라서 본 최적해석의 결론을 기반으로 내진부재로의 적용을 위한 범위의 기초자료로 적용할 수 있다.

5. 주름강판을 이용한 제진장치 기본모형

최근 국내외에서 발생한 일련의 큰 지진으로 인하여 지진의 피해에 대한 경각심과 내진설계의 필요성에 대한 인식이 확산되고 있다. 특히 박물관, 원자력발전소와 같은 중요한 구조물이나 고층빌딩, 경기장 및 교량과 같은 대형 구조물의 지진피해는 막대한 인명 및 재산 피해를 동반하므로 충분한 내진성능을 확보할 필요가 있다. 또한 주거용 건물의 리모델링이 광범위하게 추진됨에 따라 내진설계기준이 적용되기 이전에 시공된 건물의 내진보강방법에 대한 관심이 점차 증가하고 있으며, 이들에 대한 대책이 매우 필요한 시점이다.

재시공시 건물은 안전성과 경제성에 입각하여 작용하는 하중의 특성에 따라 효과적인 대응을 해야 한다. 특히 국내 내진 기준은 지속으로 강화되고 있는 추세이며 1990년대 이전에 건축된 대다수의 건물이 강화된 현재의 내진 기준을 만족하지 못하고 있는 실정이다. 따라서 지진에 대한 내력 및 연성 확보를 위해 기존 구조물의 횡력저항요소 설계에 세심한 주의가 필요하다. 전통적으로 건물을 지진력에 저항할 수 있도록 튼튼하게 설계하는 내진설계와 더불어 최근에는 건물을 지반에서 분리하여 건물의 진동 주기를 지진의 주요 주기(Predominant period)에서 멀어지게 함으로써 건물이 지진을 피해가도록 하는 면진(Seismic Isolation) 및 지진에 의한 입력에너지를 각종 제진장치를 이용하여 효율적으로 소산함으로써 건물의 피해를 최소화하는 제진(Seismic Control) 등 다양한 설계를 동원하여 지진에 의한 인명 및 재산 피해를 최소화할 수 있도록 강구하고 있다.

기존 건축물에 제진댐퍼를 설치하기 위한 설치프레임에 있어서, 제진댐퍼와 이들 연결된 각종 장치기구들의 설치프레임의 접합구조들이 많이 제안되고 있으나 기존 콘크리트 벽체를 치핑한 제진댐퍼의 경우 시공과정이 복잡할 뿐만 아니라, 칸막이 벽시공이나 신축공사시에는 이용하기 어려운 문제점이 있고 이들의 보완뿐 아니라 재진성능의 개선 필요성이 많이 언급되었다.

가. 주름형태에 따른 전단좌굴 특성 및 일반사항

다양한 주름의 형태에 대한 연구는 유럽 여러나라 뿐만 아니라 러시아의 연구에서도 형태별 좌굴특성을 규명하려는 시도도 많이 있었으며, 마름모형이나 정현파형 외에도 다양한 면외방향 주름특성과 돌출방향 엠보싱 등을 이용한 판의 강성 확보 등의 여러 시도가 있었다. 일반적으로 주름의 형태에 대해서는 사다리꼴이나 정현파형이 가장 많이 제안되고 있다. 많은 이유 중에서 형상의 부드러움으로 인한 역학적 장점은 여러 연구자들이 설명하고 있다. 박판의 주름은 정현파형 주름 파의 파고를 늘리는데 사다리꼴 주름보다 제작상의 한계를 가지게 되므로, 비교적 큰 전단응력이 작용되는 경우에는 사다리꼴 형태를 많이 이용한다. 얇은 두께로 인한 전단좌굴은 웨브의 높이 및 주름 형태에 따라 영향을 받으며, 국부좌굴과 전체좌굴 및 이들의 연성으로 전단좌굴현상이 발생한다. 주름웨브는 주로 전단좌굴거동과 안정성, FE 좌굴해석, 주름웨브보의 횡좌굴, 피로파괴에 대한 웨브의 거동, 주름웨브의 천공, 주름웨브 거더의 플랜지 휨저항, 주름웨브보의 생산 등에 관한 연구가 주를 이루었다. 특히 웨브의 초기 불완전성은 전단좌굴을 발생시키기에 충분히 민감하며, 제작된 주름웨브보의 완전

성 및 형태에 대한 좌굴저항능력의 검증은 매우 중요하다.

주름판을 이용한 제진장치의 경우 전단강성을 높임으로 인한 전단저항성능으로 횡력에 대한 지지력을 증가시킬 수 있으며, 아코디언효과를 이용해서 다양한 역학적 특성을 유도할 수 있다. 이와 같은 성질에 대한 고찰에 앞서서 전단저항성능의 개선은 매우 중요한 과제이며, 두께 형상에 따라서 성능의 개선을 유도할 수 있다. 특히 전단좌굴성능의 성향에 대한 분석과 이들을 이용한 전단성능의 요구사항에 대한 역학적 메커니즘을 형성하는 것도 필요하다.

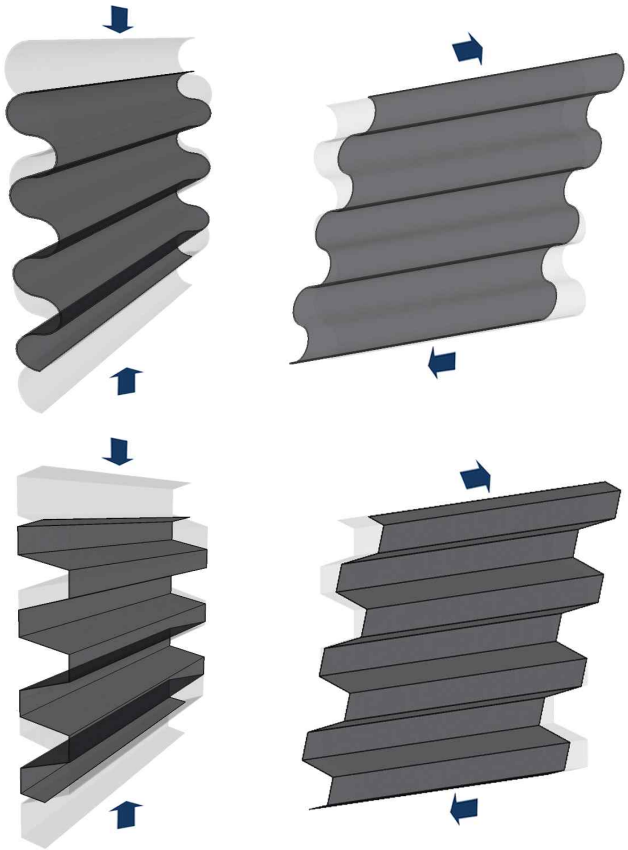


그림 2.2.5.1 주름판의 전단좌굴 저항형태와 아코디언 효과

나. 표준모델 유닛화와 단위 모듈에 따른 적용방안

기둥과 보가 강접된 라멘 골조 건물에 있어 기둥과 보 사이의 공간에 간단하게 병렬 배치된 칸막이 벽체를 이용하여 지진하중을 흡수, 저감시킬 수 있는 라멘 골조에 설치되는 단위 모듈러 지진하중 흡수장치의 경우 단부부재와 파형 웨브로 구성되는 지진에 저항하는 장치를 단위 모듈화하여 라멘 골조 건물의 기둥과 보 사이의 공간에 간단하게 설치하는 것을 제안할 수 있으며, 이들을 병렬배치해 칸막이 벽체 시공이 가능하도록 하고, 시공이 매우 용이하며 공기를 획기적으로 단축시킬 수 있으며, 지진하중이 작용할 경우 먼저 단부부재의 전단변형부재가 변형되도록 하고 그 후 파형 웨브가 변형하도록 유도하여 더 큰 지진에너지를 흡수할 수 있도록 구성하기 때문에, 지진하중에 대한 건물의 저항능력을 효율적으로 향상시

켜 주 구조부재인 기둥과 보가 피해를 받게 되는 것을 방지하도록 하여 지진하중을 흡수할 수 있다. 파형강판으로 이루어지는 파형 웨브와 상부판, 상부판의 하면에 결합된 다수 개의 전단연결재, 전단연결재 등을 고려하여 전단좌굴에 대한 성능을 확보할 수 있게 하며, 하부에 돌출되게 설치된 다수 개의 전단변형부재 파형 웨브의 상하단부에 각각 하부채널이 서로 마주보는 형태로 결합 구성되는 단부부재로 구성되는 것을 이용하여 단위 모듈러를 설치할 경우 좌굴의 특성은 전체좌굴 국부좌굴 및 이들의 연성작용을 고려할 필요가 있다. 각각의 모듈들에 대한 연결부재의 특성과 조합은 기존에 형성된 주 골조와의 연결을 고려하여야 하며, 구조체와의 일체성을 확보하는 것이 매우 중요한 사항이다.

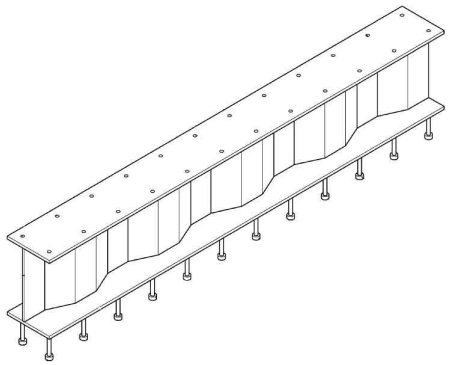


그림 2.2.5.2 주름판을 이용한 단위부재와 골조와의 연결부위

라멘 골조에 설치되는 단위 모듈러 장치는 단부부재와 파형 웨브로 구성된 지진하중 흡수장치를 단위 모듈화하여 라멘 골조건물의 기둥과 보 사이의 공간에 간단하게 배치하므로 칸막이 벽체 시공이 가능하도록 할 수 있다. 또한 재료의 특성상 순수 건식공법으로 보강할 수 있기 때문에 시공이 매우 용이하게 계획할 수 있으며, 공기의 단축도 도모할 수 있다.

다. 판형 표준모델과 부재형 표준모델의 유닛화

지진하중이 작용할 경우 먼저 단부부재의 전단변형부재가 변형되도록 하고 그 후 파형 웨브가 변형하도록 유도하는 경우 에너지 흡수율이 매우 효율적으로 구성할 수 있기 때문에 성능의 향상을 도모할 수 있다. 특히 지진하중에 대한 건물의 저항능력을 효율적으로 향상시켜 주 구조부재인 기둥과 보가 피해를 받게 되는 것을 방지하도록 하여 지진하중을 흡수, 저감시킬 수 있는 유용한 효과가 있다.

판형 표준모델에 대해서 제시되는 모듈화된 판의 패치들은 표준모델로 유닛화 할 수 있으며, 다양한 형상을 고려할 수 있다. 형상의 제원에서 나타나는 특성으로 볼 때 부재형 모델과 판형 모델로 구분할 수 있으며, 부재형 모델의 모듈화를 이용하여 시공성과 일체성을 확보할 수 있다. 기존의 에너지 흡수형 장치의 경우 콘크리트 구조체의 일체형에 따른 연결부재의 특성과 일체성확보를 위한 여러 가지 방안을 제시하는 것이 차후 필요하다.

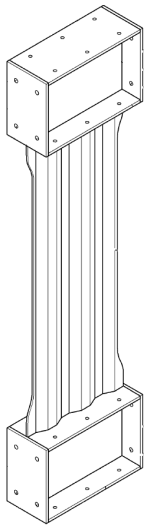


그림 2.2.5.3 주름판을 이용한 단위부재와 골조와의 연결부위

상기 전단변형부재에는 철근과 같은 부재들이 될 수 있고, 모르타르, 콘크리트 또는 섬유보강 콘크리트 등과 같은 일체형 구조물을 확보할 수 있는 재료가 적용될 것이다. 부재형 모듈화의 경우 상기 상부판에 전단변형부재 조립공을 천공하고 전단변형부재의 상단에 나사산을 가공하여 전단변형부재 조립공에 나사결합하고 너트를 체결하여 전단변형부재를 상부판에 고정할 수 있으므로 매우 효율적인 시공이 가능하다.

라. 표준모델 유닛화에 따른 기존 구조물과의 일체화

단부부재와 파형 웨브로 구성된 지진하중 흡수장치의 모듈화와 라멘 골조 건물의 기둥과 보 사이의 공간에 간단하게 병렬 배치해 칸막이 벽체 시공이 가능하도록 하는 경우 시공이 매우 용이하며 공기를 획기적으로 단축시킬 수 있기 때문에 매우 유리한 모듈이 가능하다. 지진하중이 작용할 경우 먼저 단부부재의 전단변형부재가 변형되도록 하고 그 후 파형 웨브가 변형하도록 유도하여 더 큰 지진에너지를 흡수할 수 있도록 구성하기 때문에, 지진하중에 대한 건물의 저항능력을 효율적으로 향상시켜 주 구조부재인 기둥과 보가 피해를 받게 되는 것을 방지하도록 하여 지진하중을 흡수, 저감시킬 수 있는 라멘 골조에 설치되는 단위 모듈러 지진하중 흡수장치를 제공하는 것이 주요 장점이 될 것이다. 이러한 경우 주 골조와의 결합에 사용되는 연결부재의 일체성은 매우 중요한 사항이 되며, 아래 그림과 같은 방법을 고려할 필요가 있다. 여기서, 하면에 결합된 다수 개의 전단연결재와 전단연결재를 내부에 수용하도록 상부판의 하부에 배치된 하부채널 등의 구성들은 모두 상부판에 결합되고 다른 쪽 끝이 하부채널을 관통하여 일정 길이가 하부채널의 하부에 돌출되게 설치된다. 다수 개의 전단변형부재 상부판과 하부채널에 의해 둘러싸인 공간은 기둥과 보의 강도보다 작은 강도를 가지는 재료들로 충전되어 매립되는 전단변형 부재가 충전재와 부착되지 않도록 전단변형부재를 보호하여야 하는 장치와 더불어 웨브의 상하단부에 각각 하부채널이 서로 마주보는 형태로 결합된 단부부재로 구성하는 것이 매우 중요한 일체형 방법 중 하나이다.

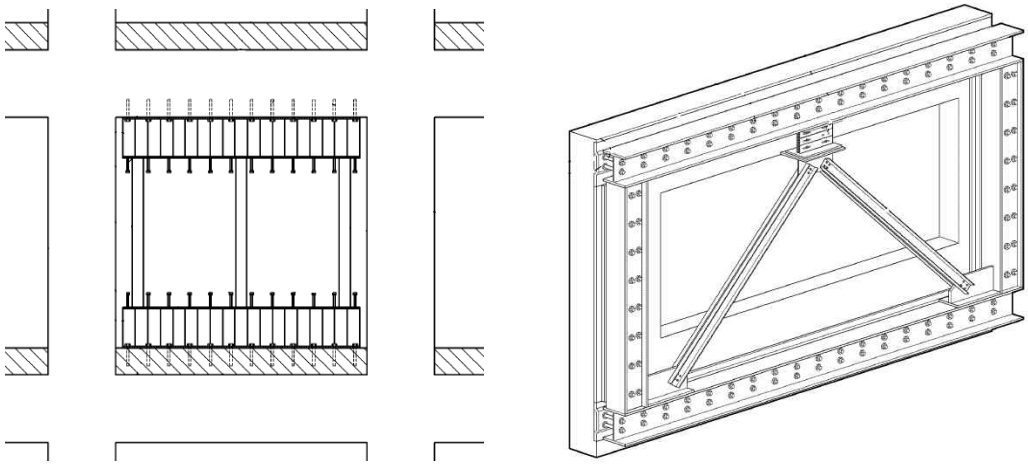


그림 2.2.5.4 에너지 흡수형 제진댐퍼와 주 구조체의 연결

기존 건축물에 제진댐퍼를 설치하기 위한 설치프레임에 있어서도 기존콘크리트를 치핑한 면에 설치된 앵커볼트와 베이스플레이트 등의 연결부재들과 양 부재 사이의 간격재 및 베이스플레이트와 이격 구비된 몸체에 이와 같은 제진댐퍼가 연결되는 댐퍼프레임 및 일체화시키는 고정재, 충진재를 포함한 접합구조의 기술에 대응할 수 있는 구조가 적절하다.

마. 적용 공간의 분석과 전단성능확보를 위한 취약점 검토

단위 모듈러 지진하중 흡수장치의 경우 파형강판과 상하부면에 결합된 전단연결재를 이용하므로 전단연결재를 내부에 수용하도록 함으로서 기존의 기둥과 보에 일체가 가능하게 할 수 있다. 하부채널을 관통하여 일정 길이의 부재가 돌출되게 설치할 수 있는 특성을 이용하여 일체화가 가능하며, 건식으로 제작할 수 있고 모듈화가 가능하다. 그러나 이들의 개개의 판에서 발생하는 전단좌굴성능의 분석과 이들의 연성에 대한 전단강성의 확보 및 이들의 분석은 에너지를 흡수하는 능력을 판단할 수 있는 중요한 요인이 된다. 또한 이들이 가지고 있는 직교이방성능의 특징은 때때로 이들이 가지고 있는 전단성능의 판단이 어려울 수도 있으므로 이에 대한 보완이 필요하며, 이들의 특성을 확보할 방법을 강구할 필요가 있다. 그리고 웨브의 상하단부에 각각 하부채널이 서로 마주보는 형태로 결합구성되는 단부부재의 구성과 지진하중 흡수장치를 단위 모듈화하여 라멘 골조 건물에 있어 기둥과 보 사이의 공간에 간단하게 병렬 배치하는 칸막이 벽체의 시공 가능성은 매우 용의하며 공기를 획기적으로 단축시킬 수 있고, 지진하중이 작용할 경우 전단변형부재의 전단변형을 통해 지진하중을 흡수하도록 함과 동시에, 소성변형을 통한 아코디언 효과의 발현은 지진하중에 대한 건물의 저항능력을 효율적으로 향상시켜 주 구조부재인 기둥과 보가 피해를 받게 되는 것을 방지할 수 있다.

바. 주름강판을 응용한 내/제진장치의 개발범위와 기존건물 보강용 설치도면

본 연구개발과제는 주름강판을 적용한 내진 및 제진장치에 대한 연구를 주제로 하고 있으며, 국내에서는 아직 연구된 바 없다. 따라서 본 과제에서 다루는 주름강판의 제작에 대해서는 직선모델을 이용하여 실험하고 해석에 접근하도록 한다. 제진장치의 개발에 대해서도 전단저항 부재의 대안으로 주름강판을 제시한 모델과 시공을 용이하게 할 수 있는 모델로 기본 모형을 제시하였다. 이 과정에서 성능의 검증은 전체 저항시스템의 제진성능 검증의 시도가 필요하지만 주름강판의 내/제진성능의 평가가 우선되므로 기본모형에 파생되어 제시되는 다양한 모델들은 추후 지속되는 연구가 필요하다. 본 과제에서는 단일 전단저항 시스템의 성능검증과 형상에 따른 내진 및 제진 성능을 검증하도록 하며, 지지조건에 대해서 네 변이 고정되어 있는 모델을 우선적으로 성능을 검토하도록 한다. 또한 개발되는 제진장치와 주름강판의 적용에 대해서는 유공강판 등의 적용이 가능한 부분에 전체 시스템의 해석이 아니라 주름강판만을 대상으로 해석과 실험을 통해 성능의 평가에 접근하도록 한다. 이것은 기존에 개발된 장치에 대처할 수 있는 주름강판의 적용 또는 전단벽판으로도 활용 가능함으로 기존의 전단저항 부재로 적용된 경우는 기존 설계방법에 준하여 다루도록 하며, 추후 연구개발과제를 통해서 실험 및 검증을 수행하도록 한다. 개발되어진 에너지 흡수형 제진성능을 위한 주요 구조부재의 연결 및 주름강판 적용 단위 모듈러 등의 재진장치 보강용 설치는 다음의 그림에 설명된 도면에 따라 시공이 가능하며, 시방서에 따라 설치한다.

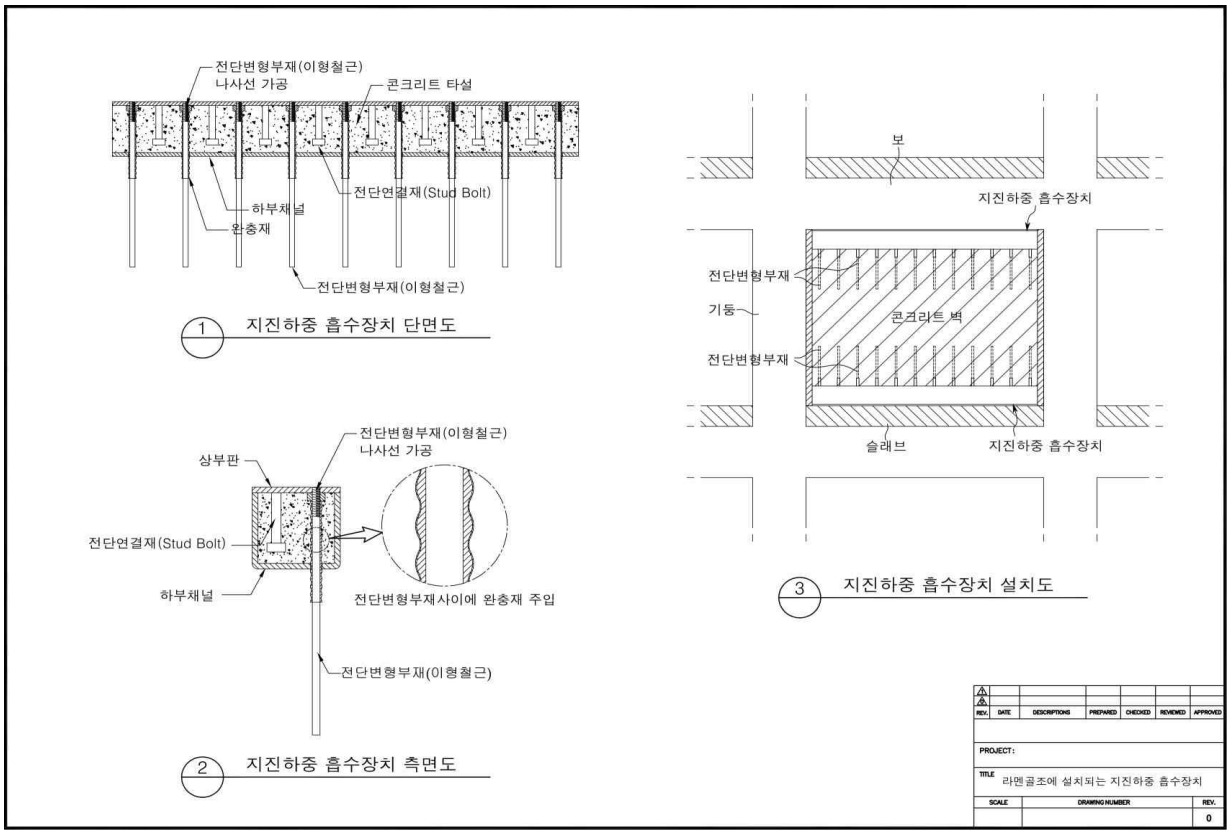


그림 2.2.5.5 콘크리트 구조물 보강용 지진하중 흡수장치 및 도면

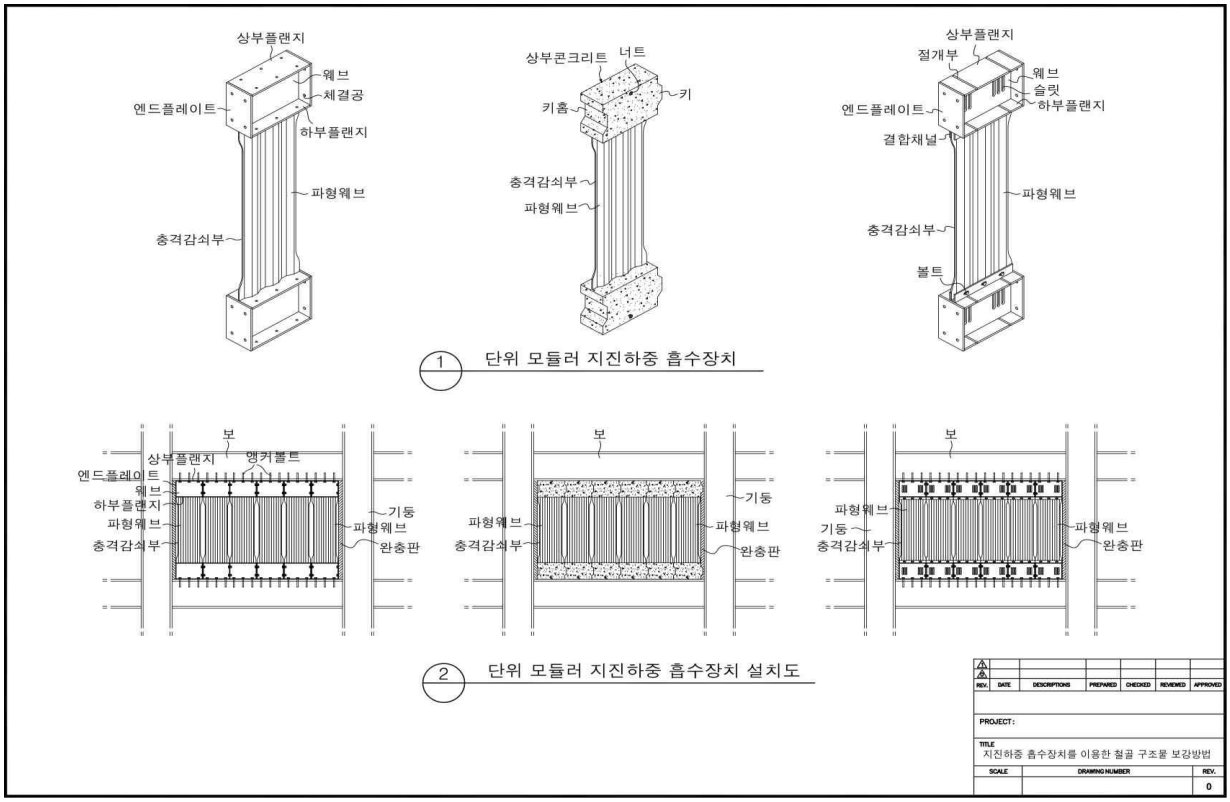


그림 2.2.5.6 단위 모듈러 지진하중 흡수장치 설치 도면

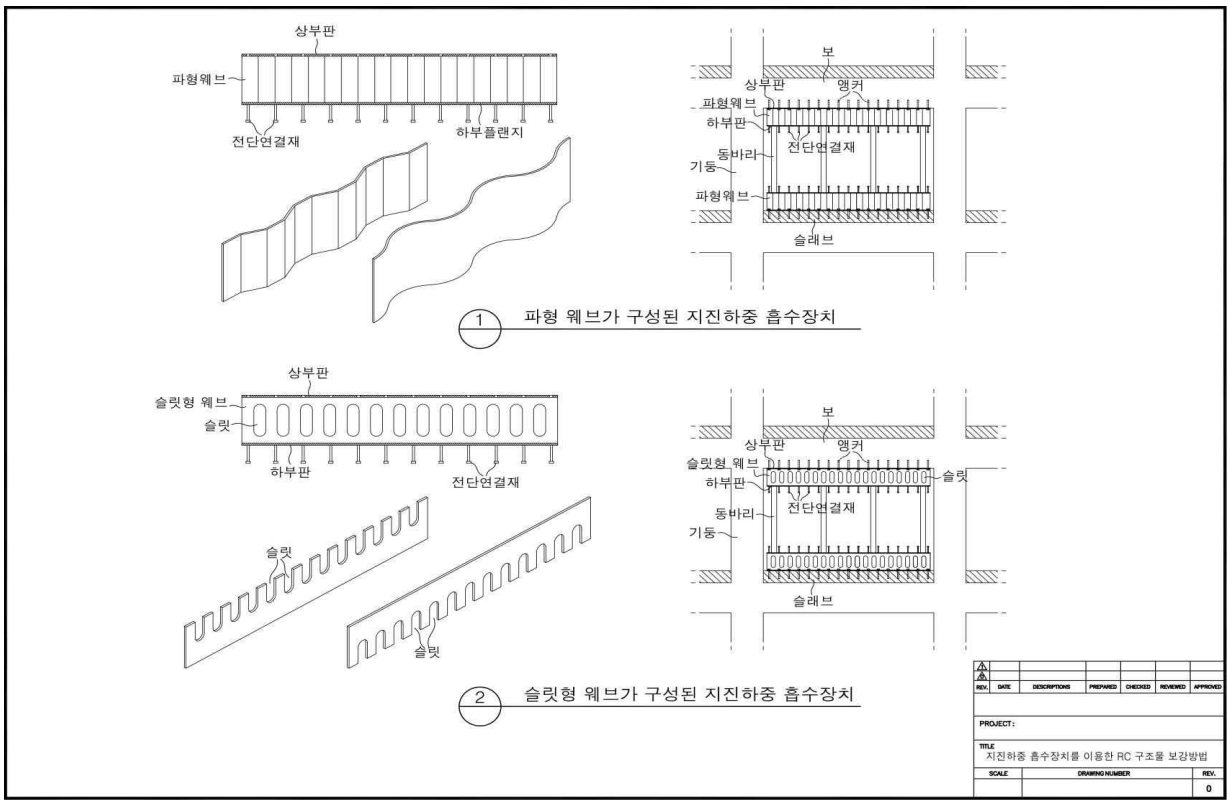


그림 2.2.5.7 슬릿웨브 및 파형웨브로 구성된 지진하중 흡수장치 도면

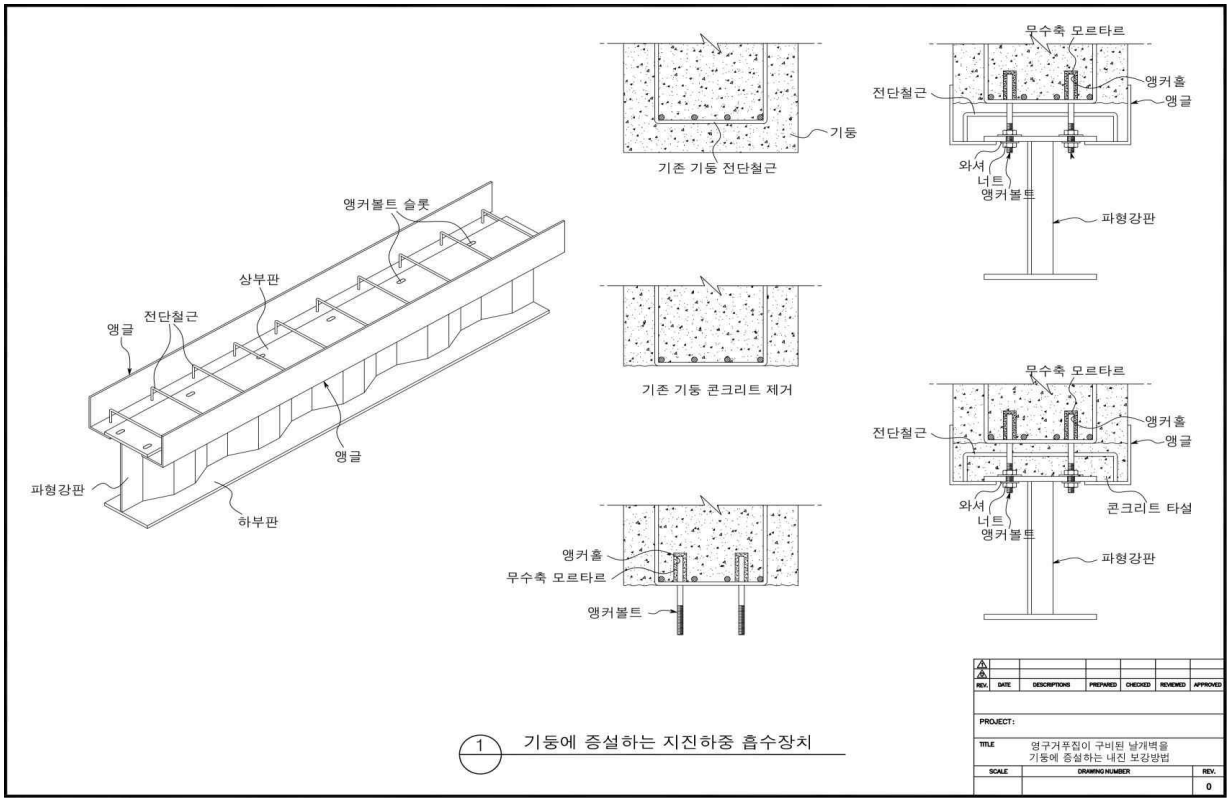


그림 2.2.5.8 콘크리트 구조물 보강용 지진하중 흡수장치 시공을 위한 설치도면

그림 2.2.5.5에서 2.2.5.8을 보면 라멘골조에 설치되는 지진하중 흡수장치, 지진하중 흡수장치를 이용한 철골 구조물 보강방법과 철근 콘크리트 구조물 보강방법 및 영구거푸집이 구비된 날개벽을 기둥에 증설하는 내진 보강방법의 시공도를 나타내었다. 각각의 경우 도면에 나타난 설치순서와 기존의 콘크리트 구조물 또는 강구조물에 설치상의 상세를 따라 시공 및 보강을 할 수 있다.

6. ABAQUS를 이용한 주름강판의 전단좌굴해석과 경계조건

본 연구에서는 유한요소 해석으로 정현파형 주름판의 좌굴거동을 모사하기 위한 가장 적절한 경계조건에 대해서 연구를 수행하고자 하며, 마름모형 주름판의 연구에 비해 비교적 연구가 미비한 정현파형 주름판을 대상으로 연구를 수행하였다. 유한요소해석은 상용 프로그램인 ABAQUS을 사용하여 전단좌굴응력을 구하였다.

가. 평판의 전단좌굴응력 이론식

기본적으로 평판의 순수전단좌굴의 미분방정식은 평판의 압축좌굴 미분방정식과 동일하다. 평판의 순수전단좌굴 미분방정식을 정리하면 식 (2.2.6.1)과 같다.

$$\frac{\partial^2\omega}{\partial x^4}+2\frac{\partial^4\omega}{\partial x^2\partial y^2}+\frac{\partial^4\omega}{\partial y^4}=\frac{1}{D}[q+N_x\frac{\partial^2\omega}{\partial x}+N_y\frac{\partial^2\omega}{\partial y^2}+2N_{xy}\frac{\partial^2\omega}{\partial x\partial y}] \quad (2.2.6.1)$$

여기서 $\frac{D=Et_w^3}{12(1-\nu^2)}$는 단위 두께당의 판의 휨강도이다. 식 (2.2.6.1)을 단순지지의 판이 면내하중에 의해 좌굴하였을 때의 휨의 평형식을 규정하고 있는 경계조건을 이용하여 풀면 좌굴응력(σ_{cr})는 식 (2.2.6.2)와 같이 얻을 수 있다.

$$\sigma_{cr}=\frac{k\pi^2E}{12(1-\nu^2)}(\frac{t}{b})^2 \quad (2.2.6.2)$$

여기서, k_v는 순수전단좌굴계수, E는 탄성계수, ν는 포아송비, a는 판형의 길이와 높이 중에서 작은 값, t_w는 판의 두께이다.

$$k_v=5.35+\frac{4.0}{(\frac{a}{h})^2};\frac{a}{h}>1 \quad (2.2.6.3)$$

식 (2.2.6.3)의 순수전단좌굴계수는 실무에 적용하기 위해 정해를 판형의 형상비(a/h)에 대해 간략하게 표현된 식이다. 식 (2.2.6.2)를 통해 R.V. Southwell이 제시한 순수전단좌굴 미분방정식에서 나온 정해 값은 표 2.2.6.1과 같다.

표 2.2.6.1 R.V. Southwell이 제시한 탄성전단좌굴계수의 정해

$\frac{a}{h}$	1.0	2.0	3.0	4.0
k_v	9.34	6.6	5.9	5.7

일반적으로 대부분의 시방서에서 판형의 경우 단순지지의 거동을 만족하는 수직보강재의 강성을 제시하고 있으며, 복부판의 접합면을 단순지지로 가정하는 것이 타당하다고 생각한다(윤상열 등, 2002). 따라서 평판의 이론해에 대한 경계조건은 사변 단순지지평판으로 가정하였으며, 각각의 경계조건에 따른 해석결과를 유한요소해석과 비교하였다.

선형 좌굴해석은 일반적으로 강성 구조(stiff structure)의 임계 좌굴 하중을 계산하는데 사용된다. 이러한 강성 구조는 주로 휨보다는 면내응력에 대한 설계하중이 전달되며 일반적인 고유치 좌굴문제(eigenvalue buckling problem)에서 0의 값을 갖는다. 고유치를 이용한 좌굴문제는 식 (2.2.6.5)에서 무용해가 아닌 해(non-trivial solutions) D^M이 존재하는 조건에서 일치하는 하중을 찾을 수 있다.(ABAQUS/CAE User's Manual)

$$K^{MN}D^M = 0 \tag{2.2.6.4}$$

$$(K_0^{NM} + \lambda_i K_{\triangle}^{NM})D_i^M = 0 \tag{2.2.6.5}$$

따라서 탄성좌굴의 임계하중은 다음 식 (2.2.6.6)으로 부터 얻을 수 있다.

$$P^N + \lambda_i Q^N = 0 \tag{2.2.6.6}$$

여기서, 하중(P^N)과 증분하중(Q^N)은 다른 값을 취하며 일반적으로 고유치(λ_i)는 최솟값을 적용한다. 좌굴모드형상(D_i^M)은 임계하중일 때 변형된 실제 크기를 의미하지는 않는다. 일반적으로 가장 큰 성분이 1.0의 값을 가진 일반화된 모드를 의미하며, 만약 모든 변위 요소가 0이면, 최대 회전 요소 값은 1.0이 된다. 이 좌굴모드 형상은 고유치문제에서 결과를 내는데 매우 유용하게 사용된다.(윤상열 등, 2002) 본 연구에서는 유한요소법을 통해 좌굴응력을 계산하기 위해서 상용프로그램인 ABAQUS/ CAE를 사용하였다.

나. 경계조건에 따른 평판의 좌굴해석

하중조건 및 경계조건의 변화로 전단 응력 값을 얻기 위하여 그림 2.2.6.1과 같은 모델을 선정하여 유한요소해석을 실시하였다. 모델의 높이(h)는 1000mm이고 길이(l)의 범위는 1000mm-4000mm으로 1000mm간격이며 판의 두께(t)는 10mm로 해석하였다. 평판의 재료적 성질은 탄성계수 $E = 2.1 \times 10^5 MPa$, 포아송 비 $\nu = 0.3$을 각각 이용하였다. 경계조건 중 Case A는 한택희(한택희, 2000)의 문헌에서 제시된 조건으로 각 모서리와 중심선, 중앙점에 경계조건을 두었다. 경계조건 Case B는 이필구 등(이필구 등, 2003)에서 제시한 조건으로 각 모서리와 꼭짓점에 경계조건을 두었다. Case C와 D는 각 모서리에 경계조건을 두고 순수전단변형을 가정 하였으며, Case E와 F는 한 방향으로 전단변형이 발생하는 경계조건을 가정하였다. 이상과 같이 유한요소해석에서 가정된 경계조건은 각각 표 2.2.6.2, 표 2.2.6.3, 표 2.2.6.4와 같다.

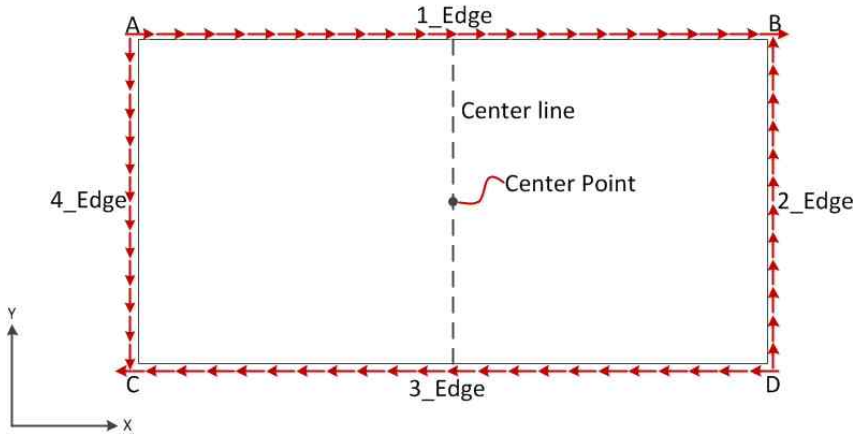


그림 2.2.6.1 평판의 전단응력 분포도

표 2.2.6.2 경계조건(Case A, Case B)

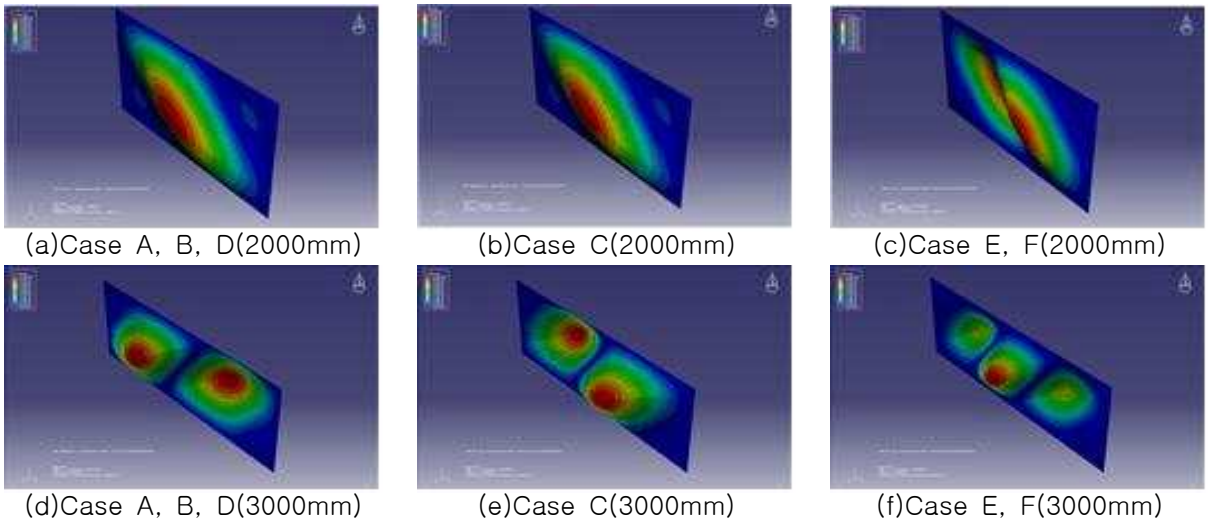
구분			1,2,3,4_Edge	Center line (A-C)	Center point (D)
Case A(B)	Translation	X	Free	Fix	Fix(Free)
		Y	Free	Free	Fix
		Z	Fix	Free	Free
	Rotation	X	Free	Free	Free
		Y	Free	Free	Free
		Z	Free	Free	Free

표 2.2.6.3 경계조건(Case C, Case D)

구분			1_Edge	2_Edge	3_Edge	4_Edge
Case C(D)	Translation	X	Fix	Free	Fix	Free
		Y	Free	Free	Free	Fix
		Z	Fix	Fix	Fix	Fix
	Rotation	X	Free	Free	Free	Free
		Y	Free	Fix(Free)	Free	Free
		Z	Free	Fix(Free)	Free	Free

표 2.2.6.4 경계조건(Case E, Case F)

구분			1_Edge	2_Edge	3_Edge	4_Edge
Case E(F)	Translation	X	Fix(Free)	Fix(Free)	Fix	Fix(Free)
		Y	Free(Fix)	Free(Fix)	Free(Fix)	Fix
		Z	Fix	Fix	Fix	Fix
	Rotation	X	Fix	Free	Fix	Free
		Y	Free	Fix	Free	Fix
		Z	Free	Free	Free	Free

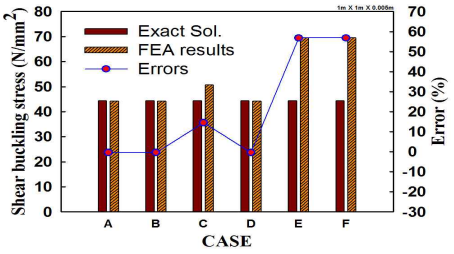


(a)Case A, B, D(2000mm) (b)Case C(2000mm) (c)Case E, F(2000mm)

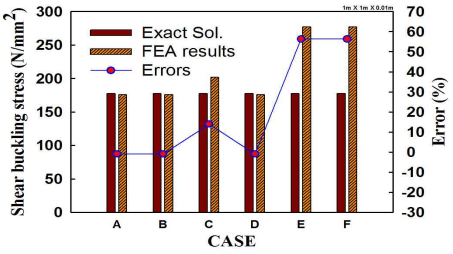
(d)Case A, B, D(3000mm) (e)Case C(3000mm) (f)Case E, F(3000mm)

그림 2.2.6.2 1차 전단좌굴모드의 형상(L=2000mm, 3000mm)

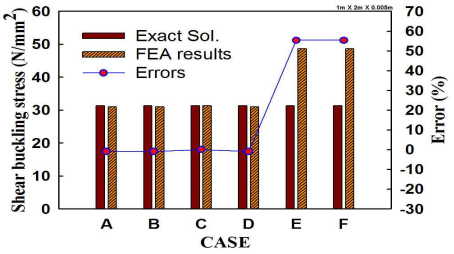
판형의 경계조건에 따른 해석결과는 정해와 비교하였으며 정해는 앞에서 제시한 평판좌굴이론 식 및 R.V.Southwell에 의해 순수전단좌굴 미분방정식에서 나온 좌굴 계수(k_v)을 사용하였다. 앞의 조건에 대한 정해와 해석의 오차변화는 그림 2.2.6.3 및 표 2.2.6.5, 표 2.2.6.6에 나타내었다. 경계조건 Case A, B, D는 길이가 1000mm이상일 때 정해와의 차이가 평균 2% 이하의 오차를 나타냈다. Case C의 경우 판의 길이가 1000mm일 때 정해와 10%이상의 차이를 보였으나, 2000mm이상에서 1%이하의 오차로 정해와 가장 가까운 값을 얻을 수 있다. Case E, Case F는 모든 결과에서 정해와의 차이가 55%이상의 오차를 나타내어 부적합한 조건임을 알 수 있다. 또한 경계조건 별 좌굴모드 형상의 차이를 비교하였을 때, 그림 2.2.6.3(a),(d)는 같은 결과를 갖는 Case A, Case B, Case D의 모드 형상, 그림 2.2.6.3(b),(e)는 Case C의 모드형상, 그림 2.2.6.3(c),(f)는 Case E, Case F의 모드형상을 나타내었다. 해석결과, 길이(L)가 2000mm일 때, 그림 2.2.6.2(a)와 그림 2.2.6.2(b)의 경우는 좌굴 모드 형상이 유사한데 비해 그림 2.2.6.2(c)의 경우 전혀 다른 형상으로 나타남을 알 수 있다. 이러한 결과는 길이가 3000mm일 때도 동일하게 나타난다. 이는 Case E, Case F가 전단좌굴모드를 해석하는데 부적합한 조건에 해당됨을 알 수 있다.



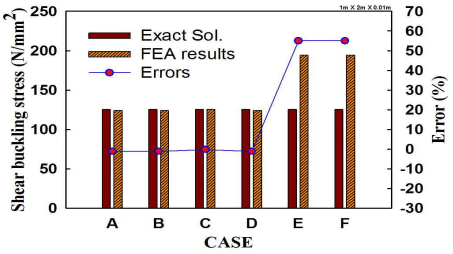
(a)t_w=5mm, L=1m



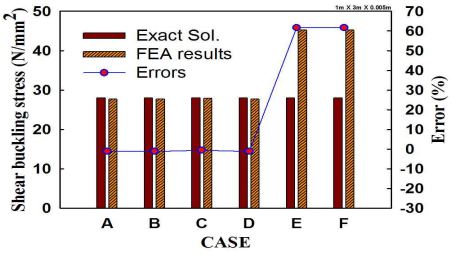
(b)t_w=10mm, L=1m



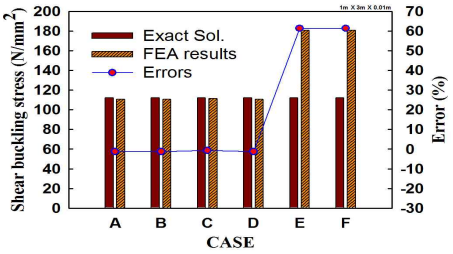
(c)t_w=5mm, L=2m



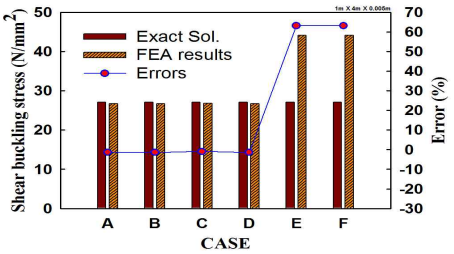
(d)t_w=10mm, L=2m



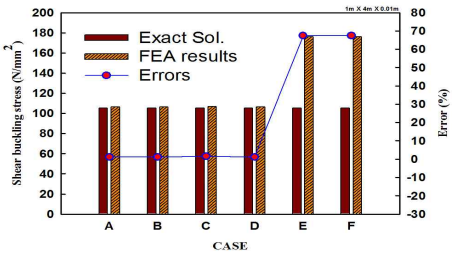
(e)t_w=5mm, L=3m



(f)t_w=10mm, L=3m



(g)t_w=5mm, L=4m



(h)t_w=10mm, L=4m

그림 2.2.6.3 평판의 전단좌굴응력 이론해와 FEA의 결과비교

표 2.2.6.5 판의 길이에 따른 전단좌굴응력의 오차(1000mm, 2000mm)

$\mathrm{Error}\left(FEA_{results}/Exact_{sol.}-1\right)\times 100(\%)$				
길이(mm)	1000		2000	
두께(mm)	5	10	5	10
Case A	-0.397	-0.912	-0.894	-1.120
Case B	-0.397	-0.912	-0.894	-1.120
Case C	14.459	13.971	0.115	-0.116
Case D	-0.397	-0.912	-0.894	-1.120
Case E	56.803	56.331	55.307	54.986
Case F	56.803	56.331	55.307	54.986

표 2.2.6.6 판의 길이에 따른 전단좌굴응력의 오차(3000mm, 4000mm)

$\mathrm{Error}\left(FEA_{results}/Exact_{sol.}-1\right)\times 100(\%)$				
길이(mm)	3000		4000	
두께(mm)	5	10	5	10
Case A	-1.086	-1.313	-1.394	1.190
Case B	-1.`086	-1.314	-1.394	1.190
Case C	-0.514	-0.743	-0.958	1.642
Case D	-1.086	-1.314	-1.394	1.190
Case E	61.652	61.328	63.123	67.451
Case F	1.652	61.328	63.123	67.451

다. 주름판의 전단좌굴모드와 좌굴응력

정현파 주름판의 경우, 평판의 해석을 바탕으로 검증된 유한 요소 해석을 사용하여 정해에 가까운 결과를 얻을 수 있었던 경계조건 Case A, B, C, D를 바탕으로 해석을 수행하였으며, 그림 2.2.6.4의 형상 및 파라메타를 사용하였다. 그림 2.2.6.4의 파라메타는 파고($a_3/2$), 파장(w) 그리고 웨브의 두께(t_w)로 정의 할 수 있으며, 사인 형상의 주름함수(y), 반 파장에 대한 곡선 길이(s) 및 주름 사이의 각(θ_c)은 식 (2.2.6.7), (2.2.6.8), (2.2.6.9)와 같이 각각 정의할 수 있다.

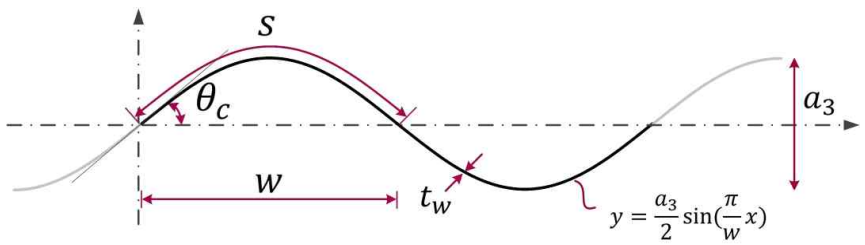


그림 2.2.6.4 정현파형 주름판의 파라메타 형상

$$y=\frac{a_3}{2}sin(\frac{\pi}{w}x) \tag{2.2.6.7}$$

$$s=\int_0^w\sqrt{1+\left\{\frac{a_3\pi}{2w}cos(\frac{\pi}{w}x)\right\}^2}\,dx \tag{2.2.6.8}$$

$$\theta_c=\frac{a_3}{2}\cdot\frac{\pi}{w} \tag{2.2.6.9}$$

주름판의 경우 곡선으로 이루어져 있어 직선요소로 곡선의 거동을 표현하기 위해 충분한 요소를 사용하여야 하며(Moon 등, 2009) 요소분할 수가 증가할수록 정해에 가깝게 수렴한다. 하지만 유한요소 해석의 경우 요소수의 분할이 너무 많으면 비효율적인 해석결과를 얻을 수 있고, 너무 작을 경우 해석결과에 대한 신뢰도에 문제가 생기므로 적절한 요소의 분할 수

를 결정하기 위해 본 절에서는 분할 수에 따른 해석결과의 수렴관계를 고찰해 보았다.

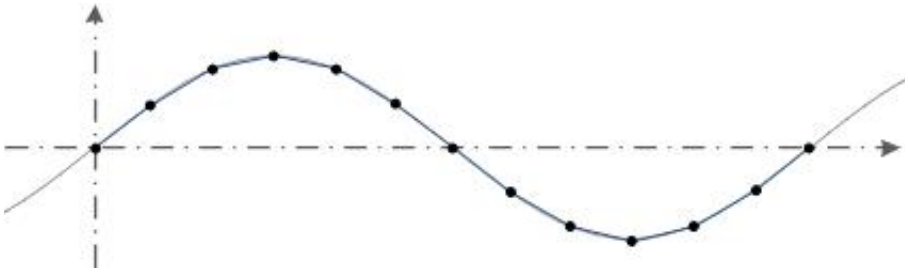
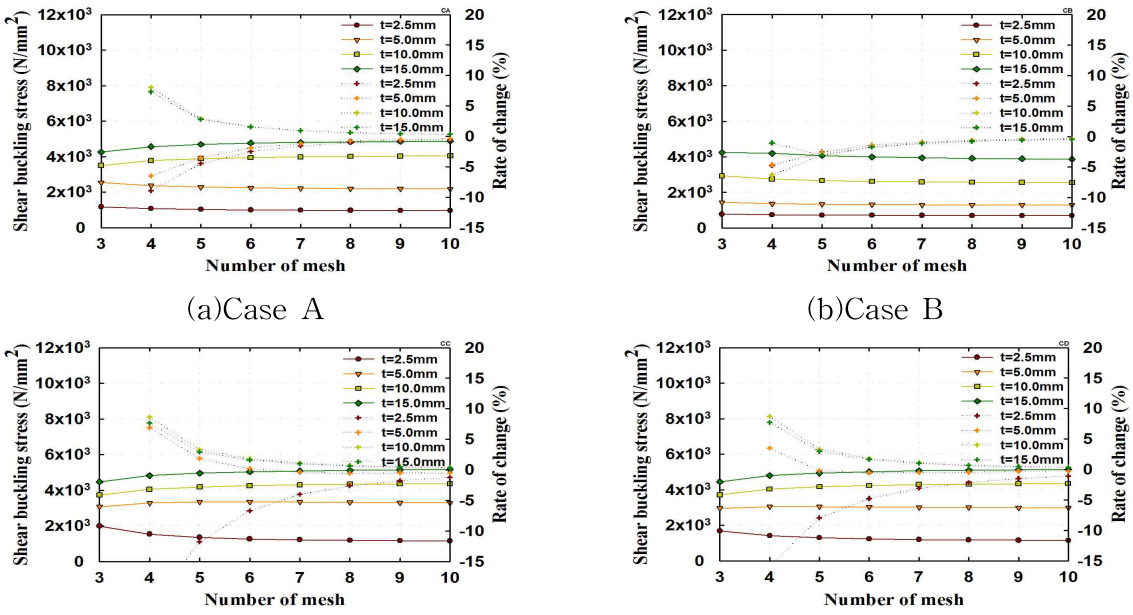


그림 2.2.6.5 정현파형 주름판의 요소분할 (메쉬 수 : 6)

요소 분할 수는 그림 2.2.6.5와 같이 반파장(half-wave)의 곡선을 3-10개로 분할해 나누어 해석하였고, 해석에 사용된 파라메타는 표 2.2.6.7과 같다.

표 2.2.6.7 정현파형 주름판의 파라메타 데이터

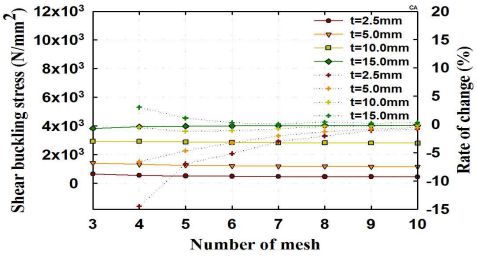
	기호	치수(mm)
파형길이	w	77.5, 155
파형깊이	a_3	40
판의 높이	A	500
판의 폭	B	1550
판의 두께	t_w	2.5, 5.0, 10.0, 15.0



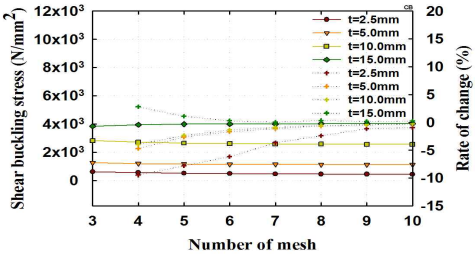
(a)Case A (b)Case B

(c)Case C (d)Case D

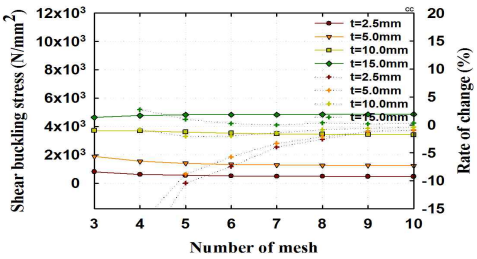
그림 2.2.6.6 요소분할 수에 따른 전단좌굴응력도($w = 77.5mm$)



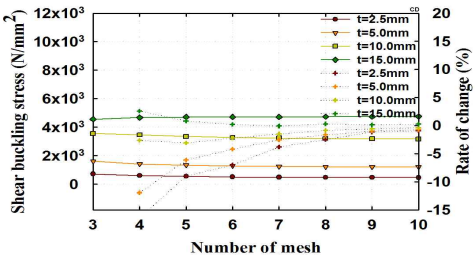
(a)Case A



(b)Case B



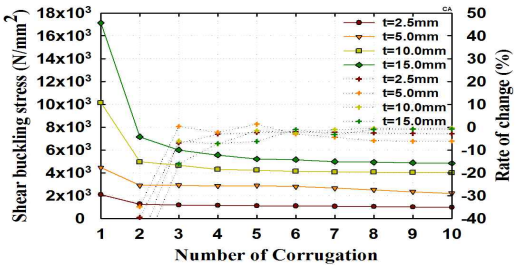
(c)Case C



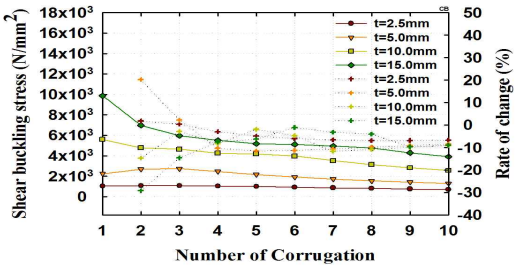
(d)Case D

그림 2.2.6.7 요소분할 수에 따른 전단좌굴응력도($w = 155mm$)

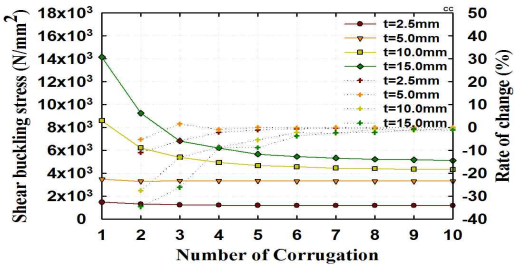
그림 2.2.6.6 및 그림 2.2.6.7에서 실선의 그래프는 요소분할 수에 따른 전단좌굴응력도이며 점선은 요소분할 수에 따른 오차율이다. 해석결과 파형 길이에 따라 공통적으로 두께가 증가함에 따라 좌굴응력이 증가하는 경향을 보이며 두께와 경계조건에 상관없이 분할 수 8개 이상에서 감소율의 변화가 작아지며 값이 수렴하였다. 따라서 반 파형을 8개 이상의 요소로 구성한다면 매우 근소한 오차 범위내의 전단 좌굴 응력 값을 얻을 수 있는 충분한 곡선의 거동을 표현할 수 있을 것이다. 이상의 결과를 토대로 본 논문의 해석대상 모델에 대한 요소수는 곡선의 거동을 표현하기에 충분한 최소 요소수인 8개로 분할된 요소를 사용한다.



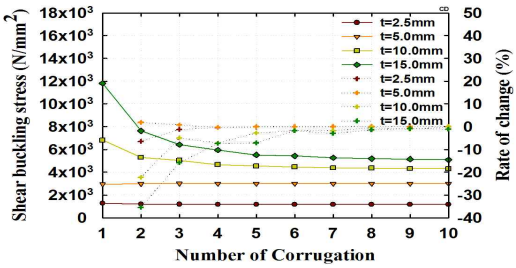
(a)Case A



(b)Case B

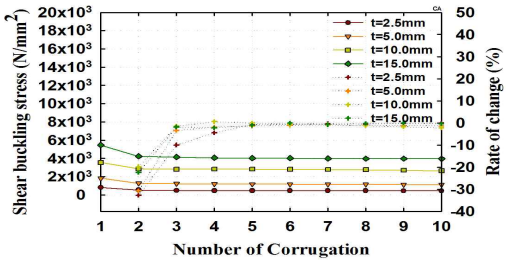


(c)Case C

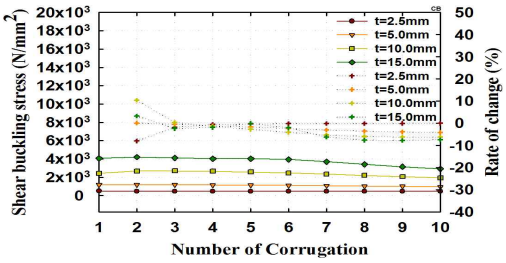


(d)Case D

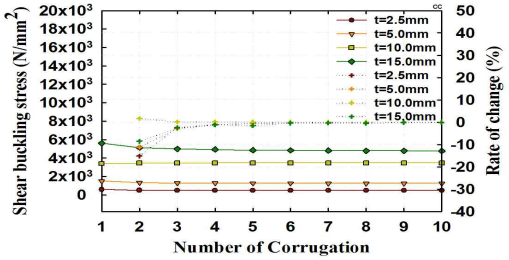
그림 2.2.6.8 주름 수에 따른 전단좌굴응력도($w = 77.5mm$)



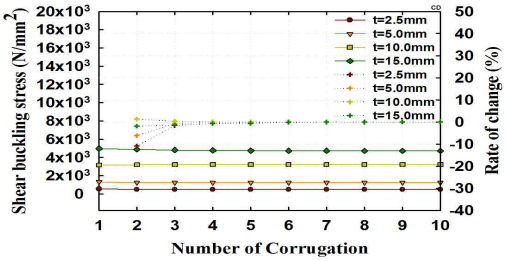
(a)Case A



(b)Case B



(c)Case C



(d)Case D

그림 2.2.6.9 주름 수에 따른 전단좌굴응력도($w=155mm$)

제형파형 주름판의 최소전단좌굴강도로 수렴하는 판형길이(B)를 알아보기 위하여 본 절에서는 주름수의 증가에 따른 해석결과의 수렴관계를 고찰해 보았다. 파형길이(w)를 각각 $77.5mm$, $155mm$로 고정하였고, 주름수를 1개에서 10개까지 늘려서 해석하였다. 해석에 사용된 파라메타는 표 2.2.6.7과 같으며 그림 2.2.6.8과 2.2.6.9는 각각의 경계조건의 두께별 주름수 증가에 따른 전단좌굴응력의 수렴도를 나타내었다. 그래프에서 실선의 그래프는 주름수에 따른 전단좌굴응력도이며 점선은 주름수에 따른 오차율이다.

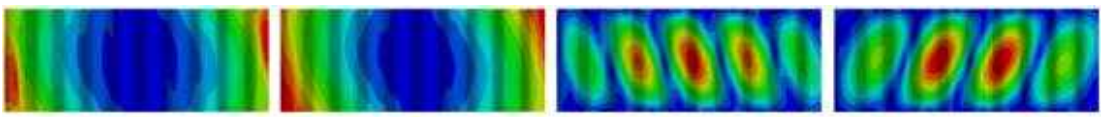
해석결과 경계조건에 관계없이 주름수가 증가할수록 각각의 최소전단좌굴강도에 수렴하였다. 또한 Case A와 B의 전단좌굴강도 수렴도에 비해 Case C와 D의 전단좌굴강도 수렴도가 주름수의 증가에 대해 일정하게 수렴하는 것을 볼 수 있다. 파형길이가 $w=77.5mm$의 경우 비교적 수렴도가 좋은 경계조건 Case C와 D을 적용한 해석결과, 해석된 4가지 판의 두께t_w에서 주름수가 9개 이상일 때 전단좌굴강도의 변화율이 2% 미만으로 거의 일정한 값에 수렴함을 알 수 있다. 파형길이가 $w=155mm$의 경우 경계조건 Case C와 D을 적용한 해석결과, 4가지 판의 두께t_w에서 주름수 4개 이상일 때 전단좌굴강도의 변화율이 2% 미만으로 거의 일정한 값에 수렴함을 알 수 있다. 본 절의 해석 결과를 바탕으로 경계조건 설정에서 Case C와 D의 경우는 비교적 가로세로비율이 큰 모델의 전단좌굴응력을 계산할 경우 적용 가능한 경계조건으로 생각된다. 본 절의 해석 결과를 바탕으로 경계조건 설정에서 Case C와 D의 경우는 비교적 가로세로비율이 큰 모델의 전단좌굴응력을 계산할 경우 적용 가능한 경계조건으로 생각된다.

앞 절에서 정현파형 주름판의 좌굴거동을 효율적으로 분석하기 위해 우선적으로 요소분할과 주름 수를 결정하고 그 영향에 대해서 살펴보았다. 그 결과 경계조건에 따라 값의 분포와 변화율은 다소 다르게 나타나지만 공통적으로 요소를 많이 분할할수록 더 정밀한 해에 도달하고, 주름의 수가 늘어날수록 전단좌굴응력의 값은 일정한 값으로 수렴함을 확인 할 수 있었다. 본 절에서는 좌굴모드형상을 예시하여 전단좌굴의 흐름을 관찰하고 경계조건과 변화의

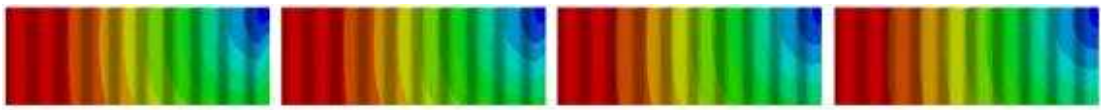
특성을 고찰하도록 한다. 해석 형상은 표 2.2.6.7의 파라메타와 요소분할 수 8개를 사용하였다.

해석결과, 그림 2.2.6.10의 $a_3 = 40mm$, $w = 77.5mm$에서 경계조건 Case A을 판에 적용한 경우, 두께가 2.5mm, 5mm일 때 좌굴모드는 전체 판의 모서리에서 국부좌굴이 생기는 형상을 띄었으나 주름판에서 예상되는 국부좌굴 및 전체좌굴의 형상과는 다른 형상을 보이며, 두께 10mm 이상에서는 전체좌굴모드의 형상을 나타낸다. Case B의 경우, 판의 두께에 상관없이 전단에 의한 면외방향의 좌굴거동 형상을 나타내지 못하였다. Case C의 경우, 얇은 판에서는 국부좌굴형상을 나타내며 두꺼운 판에서는 전체좌굴형상을 보여주고 있으며 이는 주름판의 전단좌굴 형상을 잘 설명해주고 있다. Case D의 경우, 얇은 판에서 한쪽 모서리에 치우친 국부좌굴형상을 나타내며 두꺼운 판에서는 전체 좌굴형상을 보여준다. 이는 두께변화에 대한 형상의 변화를 보여주고 있으나 Case C의 결과와 비교해 볼 때 Case C가 보다 명확하게 나타남을 알 수 있다.

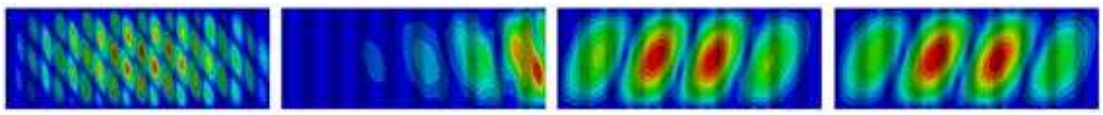
두 번째로, 그림 2.2.6.11과 같은 형상파라메타 $a_3 = 40mm$, $w = 155mm$에서 경계조건 Case A을 판에 적용한 경우, 두께가 증가할수록 국부좌굴형상에서 전체좌굴형상을 변화함을 볼 수 있으나 얇은 판에서 국부좌굴형상이 모서리에 치우쳐 발생함을 보여준다. Case B의 경우, 두께가 2.5mm에서 국부좌굴형상을 보여주나 5mm이상의 두께에서 좌굴거동 형상을 나타내지 못하였다. Case C의 경우, 얇은 판에서 판 내에 균등한 국부좌굴형상을 보여주며 15mm에서 국부좌굴형상을 볼 수 있다. 또한 두께 10mm의 결과에서 국부좌굴과 전체좌굴의 중간영역에서는 연성좌굴형상이 발생됨을 예상할 수 있다. Case D의 경우, Case C의 경우와 유사한 결과를 보여준다. 그 외 해석 결과, 파형의 길이가 길어질수록 더 자세한 패턴이 형성되지만 두 결과는 유사한 결과를 나타내었다.



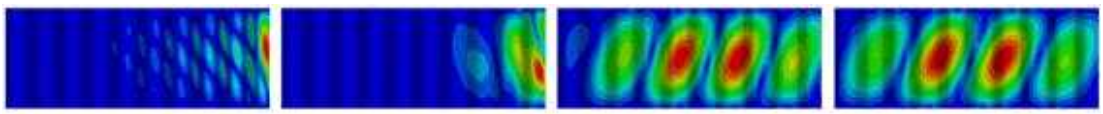
(a)Case A



(b)Case B



(c)Case C



(d)Case D

2.5mm 5.0mm 10.0mm 15.0mm

그림 2.2.6.10 판의 두께에 따른 1차 전단좌굴모드 형상($w = 77.5mm$)

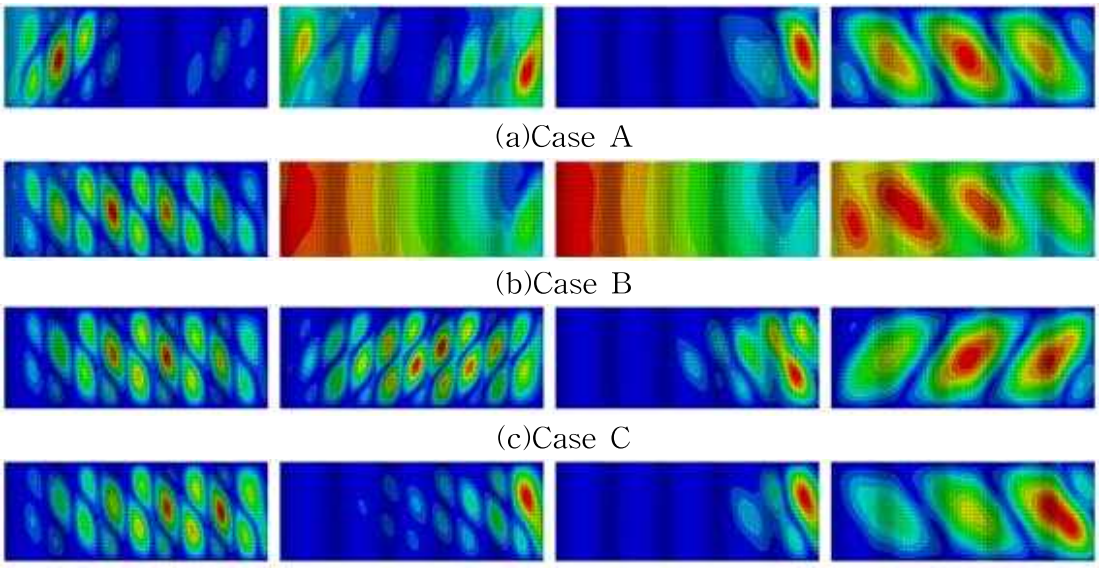


그림 2.2.6.11 판의 두께에 따른 1차 전단좌굴모드 형상($w=155mm$)

라. 제형주름강판의 주름방향별 경계조건에 따른 전단좌굴특성

근래의 제형 또는 정현형파 주름강판의 경우 형상 연구는 주로 해석에 의존하는 문헌이 많이 등장하고 있으며, 제작상의 어려움에 따른 연구경향으로 판단된다. 본 절에서는 주름의 형상에 대한 연구에서 주름방향과 경계조건에 대한 선형전단좌굴응력의 특성을 고찰하도록 한다. 대상 모델은 표 2.2.6.8과 같이 모두 11개의 모델에 대해서 좌굴해석을 수행하도록 하며, 경계조건의 경우 사변고정모델과 이변고정모델로 나누어 표 2.2.6.9와 같이 적용하여 해석을 수행하도록 한다.

표 2.2.6.8 제형주름강판 해석대상모델의 형상변수

Name	주름강판 두께(mm)	주름강판 높이(mm)	주름강판 너비(mm)	변수		
				a_1	a_3	θ_c
#01 TR75-9.74-5-30	2.3	1,288	750	97.4	50	30
#02 TR75-7.1-5-15				71	50	15
#03 TR75-5.65-5-30				56.5	50	30
#04 TR150-8.46-7.5-30			1,500	84.6	75	30
#05 TR150-7.1-5-15				71	50	15
#06 TR150-4.2-7.5-15				42	75	15
#07 TR150-5.63-10-15				56.3	100	15
#08 TR225-5.65-5-30			2,250	56.5	50	30
#09 TR225-4.9-5-45				49	50	45
#10 TR225-4.2-7.5-15				42	75	15
#11 TR225-5.4-7.5-30				54	75	30

표 2.2.6.9 제형주름강판 해석대상모델의 경계조건

구분		Boundary A				Boundary B			
		1_Edge	2_Edge	3_Edge	4_Edge	1_Edge	2_Edge	3_Edge	4_Edge
Translation	X	Fix	Free	Fix	Free	Free	Free	Fix	Free
	Y	Free	Free	Fix	Free	Fix	Free	Fix	Free
	Z	Fix	Free	Fix	Free	Fix	Free	Fix	Free
Rotation	X	Free	Fix	Free	Free	Fix	Free	Fix	Free
	Y	Free	Fix	Free	Free	Fix	Free	Fix	Free
	Z	Free	Free	Free	Free	Fix	Free	Fix	Free

두 번째 경계조건인 이변고정모델의 경우 평판의 경계조건에서 도출한 경계조건 대신 이변고정모델은 상하부에서 고정되는 것으로 가정하였다. 각각의 경우에 대해서 이론적인 해의 값과 FEM에 의한 해석결과와 비교하였으며, 이때의 이론적인 좌굴응력은 모두 경계조건이 사변고정에 해당하는 식을 이용하여 나타내었다.

해석결과 전단좌굴응력은 표 2.2.6.10에서 표2.2.6.12에 나타내었고, 표 2.2.6.10에서 이론값인 $\tau_{cr,l}$와 $\tau_{cr,g}$는 사변고정의 경우에 해당되는 전단좌굴응력의 결과이다. 우선, 전단좌굴응력에 대한 결과에서 사변이 모두 고정되어진 해석대상모델에서 가장 좋은 전단좌굴응력의 결과를 얻을 수 있었고, 상하부로 고정된 모델인 경계조건 B에서는 주름방향에 따라 다르게 나타난다. 경계조건 B에서는 전단좌굴응력결과표에서 볼 때 가로로 주름진 경우의 모델보다 세로로 주름진 경우인 표 2.2.6.11의 결과가 좌굴응력이 높게 나타났다.

표 2.2.6.10 제형주름강판의 파형방향에 따른 전단좌굴응력 (Shape A, Boundary A) unit: MPa

	#01	#02	#03	#04	#05	#06
FEM	341.72	106.56	349.32	18.71	93.50	44.8
$\tau_{cr,l}$	357.99	99.37	357.99	158.19	95.84	43.25
$\tau_{cr,g}$	617.29	510.63	559.86	257.05	124.49	196.68
	#07	#08	#09	#10	#11	
FEM	29.29	129.05	117.60	43.61	168.87	
$\tau_{cr,l}$	24.84	354.46	707.09	42.59	157.54	
$\tau_{cr,g}$	303.02	139.96	68.14	87.41	105.30	

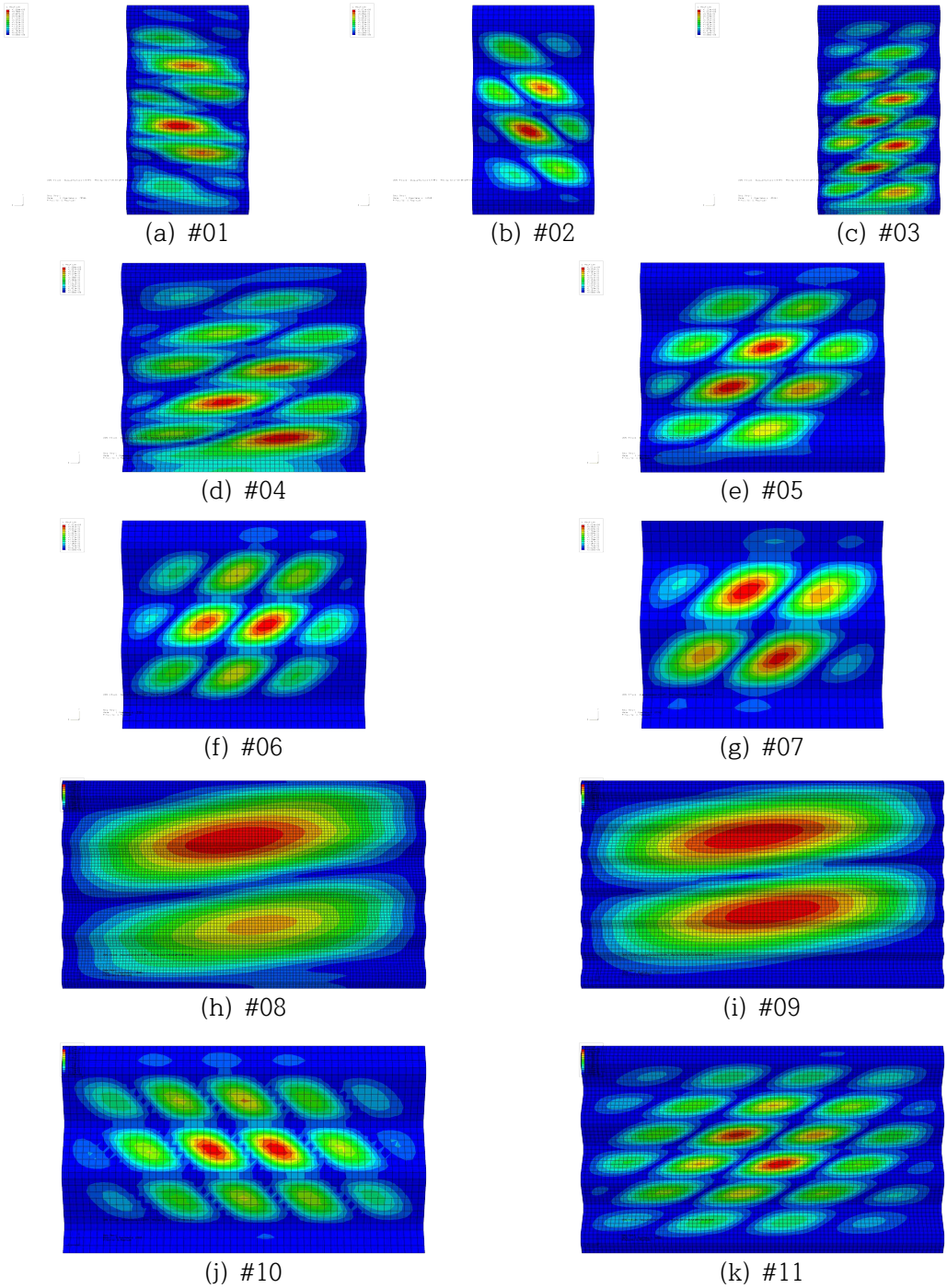
표 2.2.6.11 제형주름강판의 파형방향에 따른 전단좌굴응력 (Shape B, Boundary B) unit: MPa

	#01	#02	#03	#04	#05	#06
FEM	95.42174	47.42609	120.5043	88.94348	47.96957	29.37174
	#07	#08	#09	#10	#11	
FEM	27.97696	120.5391	190.713	29.34739	93.65652	

표 2.2.6.12 제형주름강판의 파형방향에 따른 전단좌굴응력 (Shape A, Boundary B) unit: MPa

	#01	#02	#03	#04	#05	#06
FEM	3.29	3.42	3.22	0.56	5.65	6.07
	#07	#08	#09	#10	#11	
FEM	9.06	7.34	6.76	7.79	7.54	

각각의 좌굴응력에 해당하는 전단좌굴모드의 형상 결과를 그림 2.2.6.12에서 그림 2.2.6.14에 나타내었다. 그림에서 볼 때, 조건에 따른 현상을 명확하게 반영되어 있다. 그림 1의 경우는 전체좌굴과 국부좌굴의 형태를 명확하게 볼 수 있으며, 그림 2.2.6.13와 2.2.6.14의 경우는 경계부로 인해 좌굴모드의 특성이 매우 다르게 나타난다. 좌굴모드에서 동일한 형상에 대해서 경계조건의 영향은 좌굴모드의 형상이 바뀌어 지는 것을 알 수 있다.



(a) #01 (b) #02 (c) #03

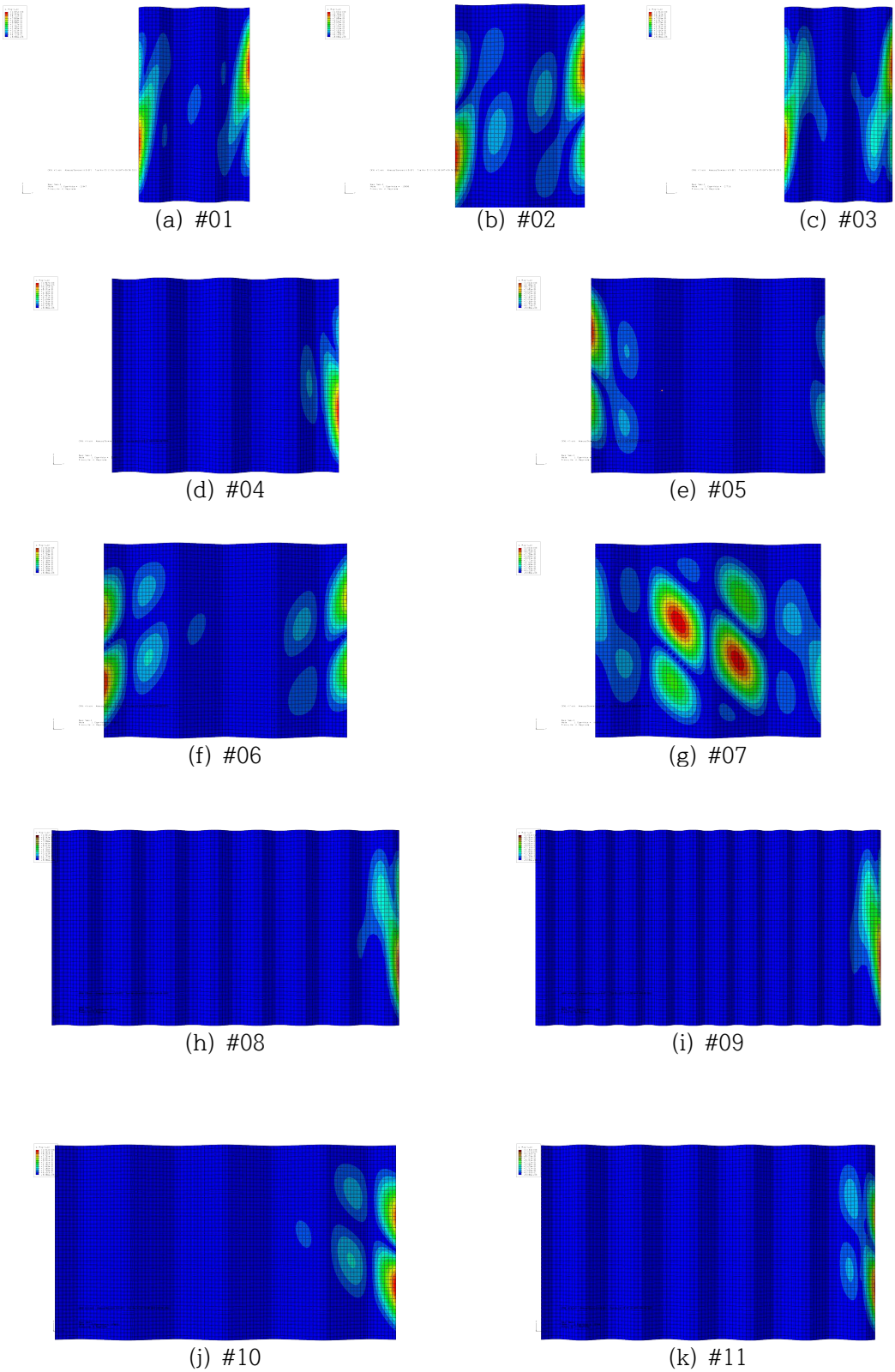
(d) #04 (e) #05

(f) #06 (g) #07

(h) #08 (i) #09

(j) #10 (k) #11

그림 2.2.6.12 제형주름강판의 전단좌굴모드 해석결과 (Shape A, Boundary A)



(a) #01 (b) #02 (c) #03

(d) #04 (e) #05

(f) #06 (g) #07

(h) #08 (i) #09

(j) #10 (k) #11

그림 2.2.6.13 제형주름강판의 전단좌굴모드 해석결과 (Shape B, Boundary B)

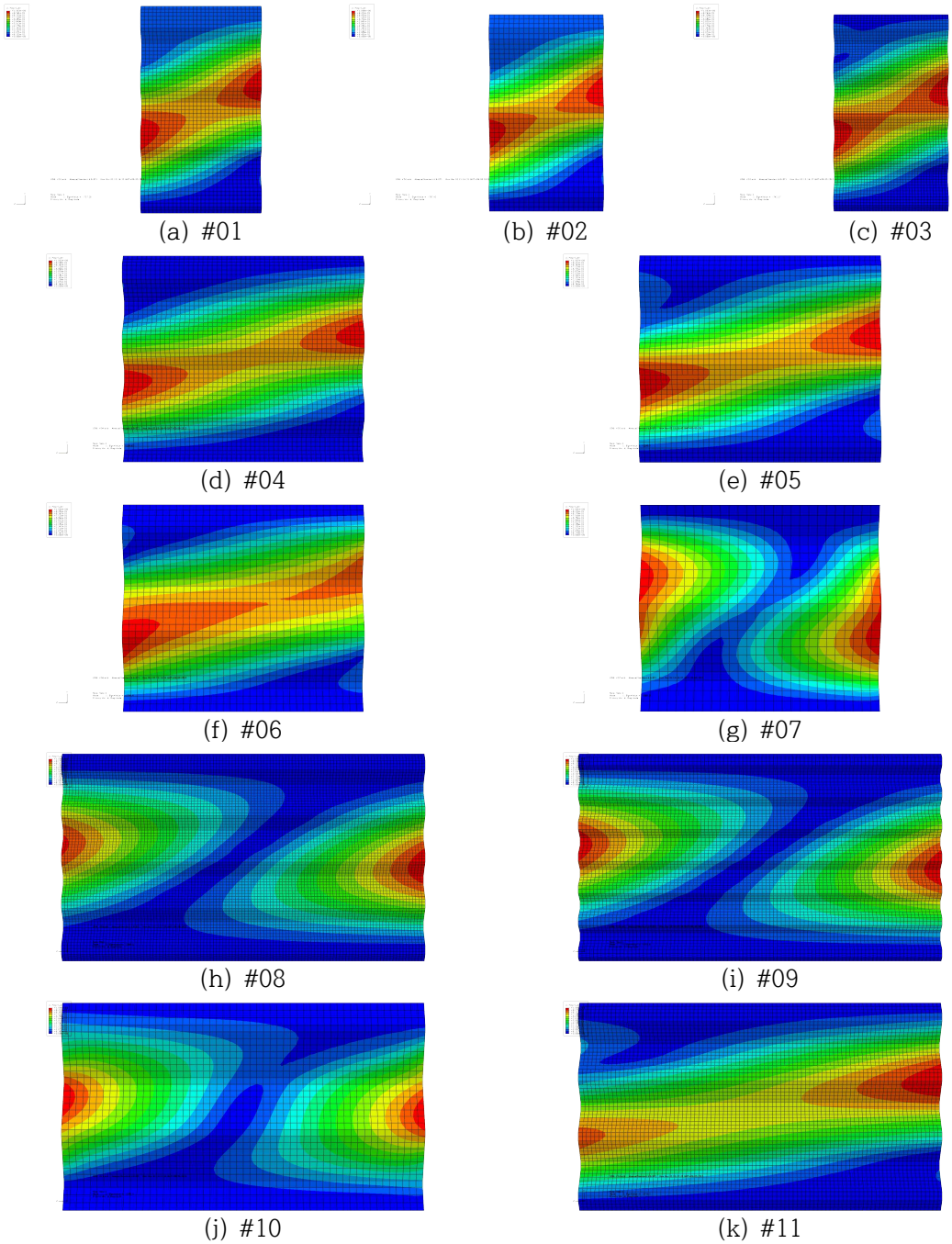


그림 2.2.6.14 제형주름강판의 전단좌굴모드 해석결과 (Shape A, Boundary B)

마. 골조구조물 내진 보강용 제형주름강판 모델의 전단좌굴특성

골조구조물의 내진 및 제진장치의 적용모델에 대해서 벽면 모듈에 해당하는 가로세로 비율은 비교적 일정하다. 몇 개의 분할된 모듈로 적용될 수 있으나 본 절에서는 하나의 모델로 골조구조물에 설치될 경우에 대한 전단좌굴응력과 좌굴변형형상에 대해서 살펴보았다. 형상의 방향 및 경계조건의 영향에 대해서 동일하게 적용하여 해석을 수행하였으며, 사변고정 또는 이변고정에 대한 조건은 라. 항목에서 다루었던 조건과 동일한 조건을 이용하도록 한다.

해석대상모델에 대해서 동일한 가로, 세로의 모델에서 주름의 형상은 두 가지 종류로 정의하였으며, 주름강판 두께도 두 가지 경우만을 고려하였다.

표 2.2.6.13 골조용 내진보강 제형주름강판 해석모델의 형상변수

Name	주름판 두께(mm)	높이 (mm)	너비 (mm)	변수		
				a_1	a_3	θ_c
#01-FR-TR3.2-V917-67	3.2	1,775	2,750	67	50	15
#02-FR-TR4.5-V917-67	4.5					
#03-FR-TR3.2-V917-48	3.2			48	75	30
#04-FR-TR4.5-V917-48	4.5					
05-FR-TR3.2-H888-67	3.2			67	50	15
06-FR-TR4.5-H888-67	4.5					
#07-FR-TR3.2-H888-48	3.2			48	75	30
#08-FR-TR4.5-H888-48	4.5					

표 2.2.6.14 골조용 내진보강 제형주름강판 해석모델의 전단좌굴응력 (Boundary A) unit: MPa

	#03	#04	#05	#06	#07	#08	#09	#10
FEM	147.97	171.12	251.35	279.47	219.77	370.34	437.00	730.75
$\tau_{cr,l}$	279.1	552.0	462.3	914.2	280.6	554.8	463.7	917.1
$\tau_{cr,g}$	65.6	77.8	123.6	146.6	157.4	186.7	296.7	351.9

표 2.2.6.15 골조용 내진보강 제형주름강판 해석모델의 전단좌굴응력 (Boundary B) unit: MPa

	#03	#04	#05	#06	#07	#08	#09	#10
FEM	10.6	19.69	10.38	19.80	107.94	155.94	214.37	316.73

해석결과 전단좌굴응력은 표 2.2.6.14와 2.2.6.15에 나타내었고, 표에서 이론값인 $\tau_{cr,l}$와 $\tau_{cr,g}$는 사변고정의 경우에 해당되는 전단좌굴응력의 결과이다. 전단좌굴응력에 대한 결과에서 사변이 고정되어진 해석대상모델에서 가장 좋은 전단좌굴응력의 결과를 얻을 수 있었고, 상하부로 고정된 모델에서는 이전과 동일하게 가로로 주름진 경우의 모델보다 세로로 주름진 경우가 좌굴응력이 높게 나타났다. 주름 형태와 모델의 가로세로 비율에 따라서 좌굴응력은 달라질 수 있는데 이것은 형태가 주는 영향과 방향이 주는 영향이 동시에 작용한다. 방향에 대해서는 너비가 넓고 높이가 낮은 모델의 경우에는 파형의 골수가 많이 들어가도록 하는 것이 바람직하다. 전단좌굴모드의 경우에서도 이러한 경향을 파악할 수 있으며, 그림 2.2.6.15 및 2.2.6.16의 좌굴모드를 살펴볼 때, 경계면의 지지조건과 주름의 골 수 및 가로세로 비율에 영향이 모드에 잘 나타나 있다.

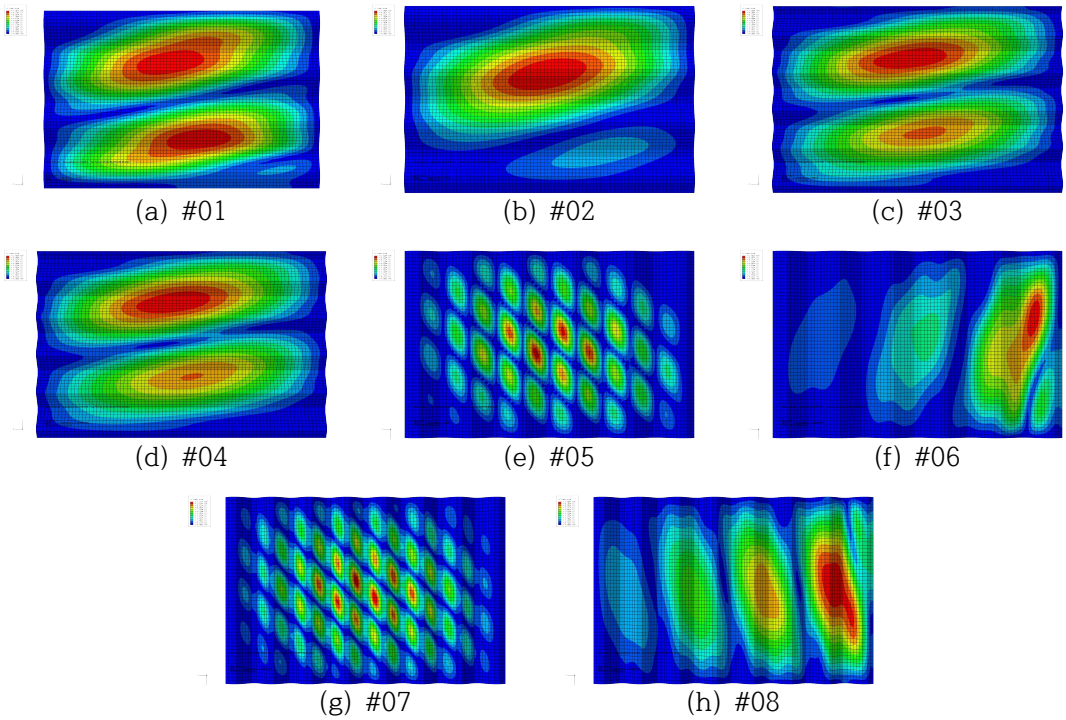


그림 2.2.6.15 골조용 내진보강 제형주름강판 해석모델의 좌굴모드 (Boundary A)

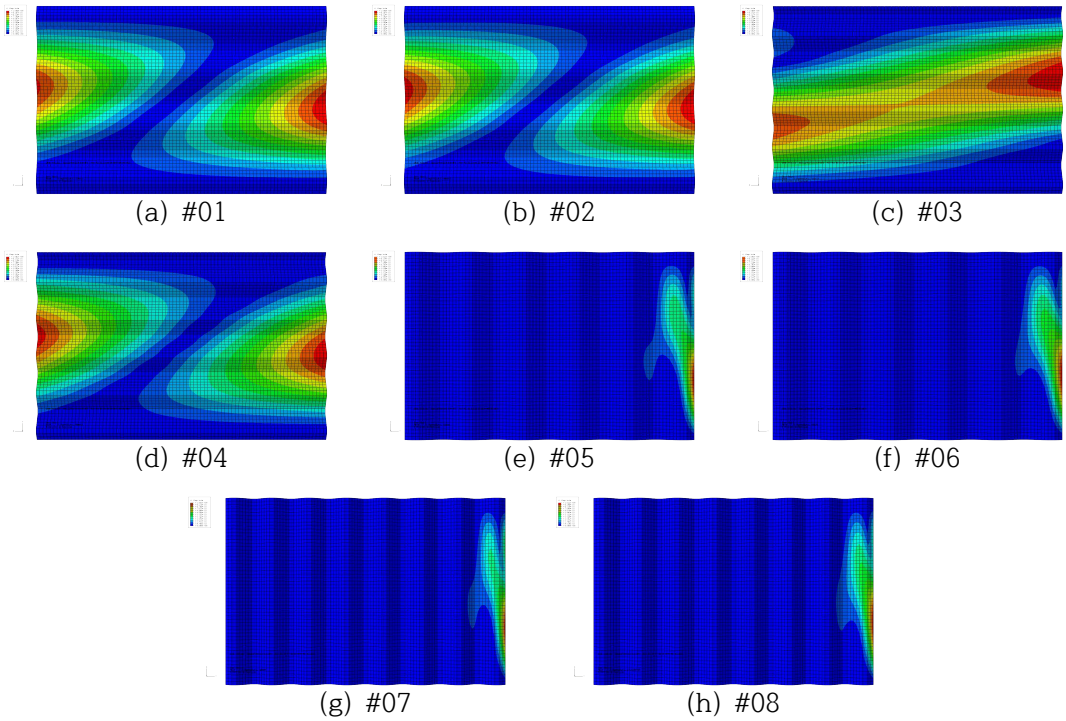


그림 2.2.6.16 골조용 내진보강 제형주름강판 해석모델의 좌굴모드 (Boundary B)

바. 결 론

1) 판형의 경계조건에 따른 해석결과는 정해와 비교하였을 때, 참고문헌의 경계조건 Case A, B와 본 연구에서 제안된 각 모서리에 경계조건을 둔 Case C, D의 경우 이론 해와 가까운 값을 얻을 수 있었으나, 한 방향으로 전단변형이 발생하도록 한 Case E, F는 정해와의 차이가 55%이상 나타나는 부적합한 조건임을 알 수 있다.

2) 정현파형 주름판의 좌굴응력은 파형 길이와 두께가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이며, 이것은 모든 해석대상 모델에서 동일하게 나타났다. 또한 해석대상 모델의 요소분할 수가 주름의 반 파장에서 8개 이상으로 분할될 경우 매우 근소한 오차 범위내의 전단좌굴응력을 얻을 수 있으며, 경계조건의 차이에 따른 변화는 나타나지 않았다.

3) 정편파형 주름판에서 경계조건 Case C와 D는 전단좌굴응력의 수렴도가 주름수의 증가에 대해 일정하게 수렴하는 것을 볼 수 있으며 이는 비교적 가로세로비율이 큰 모델의 전단좌굴응력을 계산할 경우 매우 적절한 경계조건으로 사료된다. 또한 전단좌굴모드의 형상에서 국부좌굴형상 및 전체좌굴형상에 대한 패턴은 Case C의 경우가 보다 더 명확한 패턴으로 나타남을 확인 할 수 있었으며 주름판의 전단좌굴특성을 잘 설명해 준다.

7. 차분진화알고리즘을 이용한 정현형파 주름웨브 부재의 최적설계

가. 설계기준

주름웨브보의 경우 유럽에서 먼저 개발되고 상용화된 까닭에 유럽 EN1993-1-5 (Annex D)기준은 주름웨브 보의 구체적인 설계 방법을 제안하고 있다. 기본적인 설계방법은 웨브는 전단을, 플랜지는 휨을 담당하며, 여기서 전단에 대한 설계는 여러 좌굴현상이 복잡하게 나타나므로 복잡하다. 본 절에서는 정현파형 주름판의 최적설계를 위한 유로코드의 설계식에 대해서 설명하도록 한다. 정현파형 주름웨브에 대한 설계를 위해 형상파라메타는 그림 2.2.7.1과 같이 정의할 수 있다.

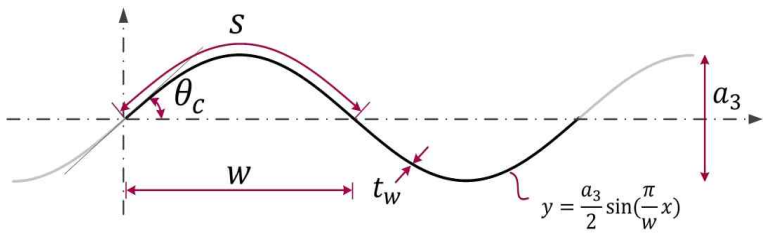


그림 2.2.7.1 정현파형 주름의 단면 형상

웨브의 설계전단강도(V_{Rd})는 식 (2.2.7.1)과 같으며 소요전단강도(V_{Sd}) 이상이 되어야 한다.

$$V_{Sd} \leq V_{Rd}(=\chi_c \frac{f_{y,w}}{\sqrt{3}\,\gamma_M} h_w t_w) \tag{2.2.7.1}$$

여기서, χ_c는 판의 국부좌굴 감소계수$\chi_{c,l}$와 전체좌굴 감소계수$\chi_{c,g}$중에서 작은 값이다. 판의 국부좌굴 감소계수와 전체좌굴 감소계수는 식 (2.2.7.2)와 같이 정의된다.

$$\chi_l = \frac{1.15}{0.9+\lambda_{c,l}} \leqq 1.0 \tag{2.2.7.2a}$$

$$\chi_g = \frac{1.5}{0.5+\lambda_{c,g}^2} \leqq 1.0 \tag{2.2.7.2b}$$

판의 상대세장비는 국부좌굴감소계수와 전체좌굴감소계수에서 동일한 식을 사용하며, 세장비는 식 (2.2.7.3)와 같이 정의된다.

$$\lambda_{c,l(g)} = \sqrt{\frac{f_{y,w}}{\sqrt{3}\ \tau_{cr,l(g)}}} \tag{2.2.7.3}$$

또한 웨브의 횡 좌굴응력은 국부좌굴과 전체좌굴로 나누어 계산하며 식 (2.2.7.4)와 같이 정의

된다.

$$\tau_{cr,l} = (5.34 + \frac{a_3\, s}{h_w\, t_w}) \frac{\pi^2\, E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t_w}{s}\right)^2 \quad (2.2.7.4a)$$

$$\tau_{cr,g} = \frac{32.4}{t_w\, h_w^2} \sqrt[4]{D_x\, D_y^3} \quad (2.2.7.4b)$$

$$D_x = \frac{E t_w^3}{12} \frac{w}{s} \ , \ D_y = \frac{E I_x}{2w} \quad (2.2.7.4c)$$

$$I_x = \int_0^w [\frac{t_w^3}{12} + t_w^2 (\frac{a_3}{2} sin \frac{\pi}{2} x)^2] dx \quad (2.2.7.4d)$$

나. 최적화 기법

본 연구에서는 손수덕 등에서 제시한 수리모델링을 적용하여 정현파형 주름웨브보의 DE의 최적화프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램은 손수덕 등의 문헌의 실변수GA을 이용한 최적화와 비교하여 프로그램의 타당성을 검토하였다.

최적설계는 소비자의 설계요구를 수학적으로 표현하여 설계변수를 구하는 방법으로, 설계자가 결정해야 할 모든 변수의 집합인 설계변수, 최적설계의 기준이 되는 목적 함수, 설계를 만족하여야하는 제약조건으로 구성된다. 구조물의 최적설계의 경우 경제적인 설계를 위해 일반적으로 부재의 중량을 목적함수로 갖는다.

본 연구의 목적함수 및 제약조건식은 기존에 제시된 식을 사용하였으며 식 (2.2.7.5), 식 (2.2.7.6)에 정의하였다. 구조물의 중량을 목적함수 $F(\boldsymbol{x})$로 한 최적화 문제는 식 (2.2.7.5)와 같이 정의할 수 있다. 여기서 부재가 동일한 재료를 사용할 경우, 목적(비용)함수에서 나타나는 단위중량이 상수이므로 최소 부피나 단면적이 곧 최소중량을 의미하게 된다.

$$\min \quad F(\boldsymbol{x}) = \rho_i\, A(\boldsymbol{x})_i\, L_i \quad (2.2.7.5a)$$

$$g_j(\boldsymbol{x}) \le 0 \quad (j = 1,...,n) \quad (2.2.7.5b)$$

$$\boldsymbol{x}^{low} \le \boldsymbol{x} \le \boldsymbol{x}^{high}$$

여기서,

$\boldsymbol{x} = \{b_f, t_f, h_w, t_w\}^T$: 설계변수벡터

ρ_i, $A(\boldsymbol{x})_i$, L_i : 부재의 단위중량, 단면적, 길이

$A(\boldsymbol{x})_i = \left\{2\, b_f\, t_f + h_w\, t_w \frac{s}{w}\right\}_i$

$g_j(\boldsymbol{x})$, $\boldsymbol{x}^{low}$, $\boldsymbol{x}^{high}$: 제약 함수와 설계변수의 상, 하한치

설계의 적합도를 평가하기 위해서 식 (2.2.7.5b)의 제약함수의 만족여부를 검토하였으며, 제약조건은 각 부재의 판-폭두께비, 부재력, 처짐에 대해 허용치를 초과하지 않도록 식 (2.2.7.6)와 같이 구성하였다.

$$g_1 = \frac{\lambda_p}{\lambda_{\mathrm{p,max}}} - 1.0 \leq 0 \tag{2.2.7.6a}$$

$$g_2 = \frac{\lambda_f}{\lambda_{\mathrm{f,max}}} - 1.0 \leq 0 \tag{2.2.7.6b}$$

$$g_3 = \frac{V_{\mathrm{Sd}}}{V_{\mathrm{Rd}}} - 1.0 \leq 0 \tag{2.2.7.6c}$$

$$g_4 = \frac{N_{\mathrm{Sd}}}{N_{\mathrm{Rd}}} - 1.0 \leq 0 \tag{2.2.7.6d}$$

$$g_5 = \frac{\delta_{\mathrm{max}}}{\delta_{\mathrm{limit}}} - 1.0 \leq 0 \tag{2.2.7.6e}$$

여기서,

$$\lambda_p = 0.8\left(\frac{h_w}{t_w}\right)\sqrt{\frac{f_{y,w}}{\kappa_{cr,l}\,E}},\ \lambda_{\mathrm{p,max}} = 0.316\sqrt{\frac{E}{f_{y,w}}}$$

$$\lambda_f = \frac{b_f + a_3}{t_f},\ \lambda_{f,\mathrm{max}} = 1.03\sqrt{\frac{E}{f_{y,w}}}$$

따라서 위의 부등제약이 포함된 최적설계 수리모델은 벌칙함수를 이용하여 부등제약 수리모델로 치환하여 해석을 수행하도록 한다.

벡터 개체를 기본으로 하는 확률론적 최적화 기법인 DE는 GA와 유사한 전역해 최적화 기법으로 연산자(Operator)를 사용하는 진화 알고리즘이다. 두 알고리즘은 초기 개체를 샘플링(Sampling)하여 이들을 교배(Crossover), 변이(Mutation), 선택(Selection) 연산을 거쳐 다음 세대에 적합도가 개선된 새로운 연산자를 만들어 내는 공통점을 가지고 있으나, DE의 경우 설계점을 이진수로 인코딩(Encoding)하는 과정이 없고 최적화과정에서 파라메타 수가 적으며 집단에서 선택된 벡터의 거리와 방향 정보를 사용하여 벡터를 랜덤하게 변화시키면서 해를 찾으므로 GA보다 뛰어난 수렴성을 갖는다. 기본적인 DE의 연산과정은 크게 매개변수 벡터의 초기화. 돌연변이(Mutation) 연산, 교배(Crossover) 연산, 선택(Selection) 연산으로 나눌 수 있으며 본 연구에서 적용한 돌연변이 기법은 식 (2.2.7.7)과 같이 정의할 수 있다.

대표적인 DE(DE/rand/1)의 돌연변이 연산에서 기본벡터 $y_{i,g} = x_{r0,g}$의 섭동(perturbation)은 돌연변이에 기반을 둔 랜덤으로 선택된 벡터의 차이 벡터를 사용하여 돌연변이 벡터($v_{i,g}$)를 발생시킨다. 본 연구에서 적용한 DE의 기법(Schemes)은 크게 5가지로 나눌 수 있으며 표기법은 DE/x/y로 정의되어 있다. x는 기본벡터(base vector)로 돌연변이 벡터를 만들기 전 부모벡터, y는 차이벡터의 사용 개수를 의미한다.

DE/rand/1

$$\boldsymbol{v_{i,g}} = \boldsymbol{y_{i,g}} + F \cdot (\boldsymbol{x_{r1,g}} - \boldsymbol{x_{r2,g}}) \tag{2.2.7.7a}$$

DE/best/1

$$\boldsymbol{v_{i,g}} = \boldsymbol{x_{best,g}} + F \cdot (\boldsymbol{x_{r1,g}} - \boldsymbol{x_{r2,g}}) \tag{2.2.7.7b}$$

DE/current-to-best/1

$$v_{i,g} = x_{r0,g} + F \cdot (x_{best,g} - x_{i,g}) + F \cdot (x_{r1,g} - x_{r2,g}) \quad (2.2.7.7c)$$

DE/best/2

$$v_{i,g} = x_{r0,g} + F \cdot (x_{best,g} - x_{i,g} + x_{r3,g} - x_{r4,g}) \quad (2.2.7.7d)$$

DE/rand-or-best/N

$$v_{i,g} = y_{i,g} + F \cdot \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} (x_{r(2n+1),g} - x_{r(2n+2),g}) \quad (2.2.7.7e)$$

DE의 연산과정을 정리하면 그림 2.2.7.2(Flowchart)와 같이 나타낼 수 있다.

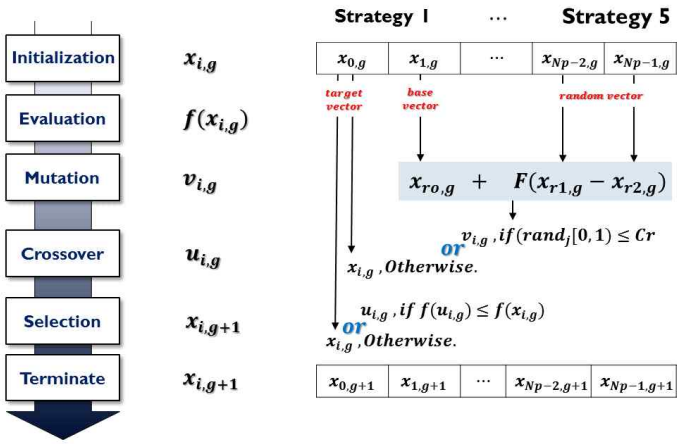


그림 2.2.7.2 Classic DE의 연산과정

DE를 이용한 구조물의 설계최적화과정을 정리하면 그림 2.2.7.3과 같다. 본 연구에서는 DE를 이용한 최적설계프로그램을 검증하기 위해 양단고정보의 최적화를 수행하였으며 그 결과를 기존의 최적화연구와 비교하여 기술하였다.

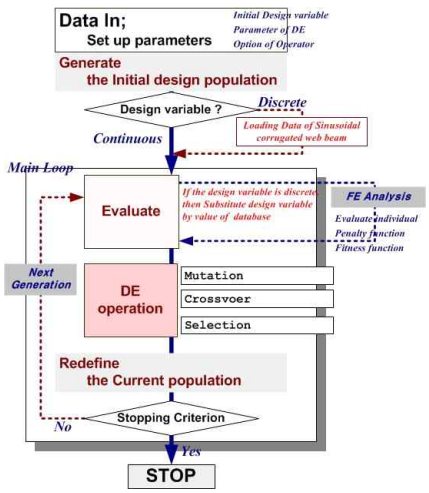
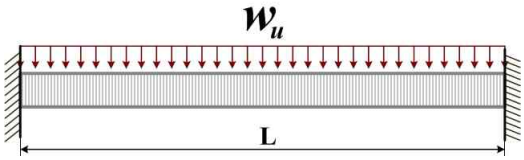


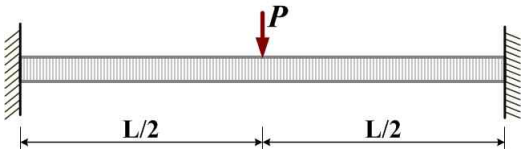
그림 2.2.7.3 차분진화알고리즘을 이용한 구조물의 설계최적화 과정

다. 연산자의 영향과 최적해의 수렴성

돌연변이 연산의 5가지 기법이 적용된 DE의 성능을 조사하기 위하여 앞에서 제안한 프로그램을 이용하여 정현파형 주름웨브를 갖는 양단고정보 예제를 해석하였다. 예제의 목적함수와 제약조건식은 앞의 식을 채택하여 최적화를 수행하였다. 적용될 양단고정보 예제는 스팬(L)이 10 m, 등분포 하중 $w=100\,\mathrm{N/mm}$을 작용하였으며, 하중 종류에 대한 계수는 고려하지 않는다. 여기서 재료 탄성계수(E)와 포와송비(ν)는 각각 $21000\,\mathrm{kN/cm^2}$ 및 0.3이다. 최적설계에서 주름의 형상은 오스트리아 빈의 Zeman & CO사에서 개발되어 자동생산 제작되어지는 형상인 $a_3=40\,\mathrm{mm}$와 $w=77.5\,\mathrm{mm}$로 채택하였다. DE는 GA과는 달리 개체수의 증가에 영향을 받지 않는다. 또한 각각의 문제에 적용되어지는 기법의 변화 및 돌연변이 환산계수(Mutation scale factor:F) 값에 따라 수렴속도를 높이며 좋은 결과를 얻을 수 있다. 따라서 본 절에서는 DE의 연산자 성능을 비교하기 위해 양단고정보 예제에 대해 세대수 증가와 개체 수 증가에 따른 각 기법 및 F의 범위 별 목적함수의 변화를 살펴본다. 개체 수(Population size:NP)는 4개에서 10개까지 1개씩 증가시키고, 세대수는 500세대까지 해석하였다. 각각의 기법은 돌연변이 연산의 5가지 기법을 적용하였으며, 돌연변이 환산계수 값은 고정 값의 0.8과 임의의 값의 범위를 각각 [0,1], [-1,1]일 때의 값을 적용한다. 또한, 모든 해석의 교배율(Crossover rate:Cr)는 0.9로 고정하여 해석하였다.



(a) 등분포하중을 받는 양단고정보

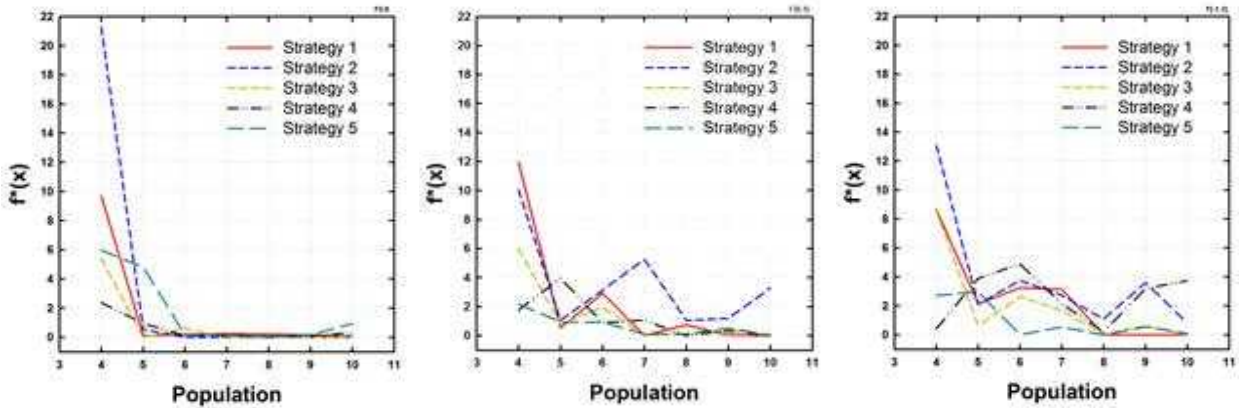


(b) 집중하중을 받는 양단고정보

그림 2.2.7.4 양단고정보 예제

그림 2.2.7.5및 표 2.2.7.1, 2.2.7.2, 2.2.7.3은 각 기법 별 수렴 값과 고정된 F값의 최소 수렴 값을 최적단면적의 차이를 비율로 나타낸 결과이다. 그림 2.2.7.5(a)와 표 2.2.7.1은 $F=0.8$일 때 최적단면적 차이의 해석결과이며, DE/best/1, 개체수가 7개일 때 최솟값 $7315.4160m^2$을 갖는다. 그림 2.2.7.5(b)와 표 2.2.7.2는 $F\in[0,1]$일 때 최적단면적 차이의 해석결과이며, DE/current-to-be st/1, 개체수가 10개일 때 최솟값 $7315.4300mm^2$을 갖는다. 그림 2.2.7.5(c)와 표 2.2.7.3은 $F\in[-1,1]$일 때 최적단면적 차이의 해석결과이며, DE/rand/1, 개체수가 10개일 때 최솟값을 갖는다. 그림 2.2.7.5 및 표 2.2.7.1, 2.2.7.2, 2.2.7.3에서는 고정된 F값을 갖는 목적함수의 최솟값으로 DE/best/1, 개체수가 7개 일 때, 목적함수 값 $7315.4160m^2$이다. 해석

결과, 그림 2.2.7.5(a) 및 표 2.2.7.1의 F값을 고정으로 하였을 때의 결과 값이 개체수 5개 이상에서 최솟값과 거의 일치하는 값을 갖으며, 세 가지 조건에서 공통적으로 개체수가 7개 이상일 때 최솟값과 차이가 작게 나타난다.



(a) 최적단면적 오차율($F=0.8$)　(b) 최적단면적 오차율($F\in[0,1]$)　(c) 최적단면적 오차율($F\in[-1,1]$)

그림 2.2.7.5 최적단면적 오차율

표 2.2.7.1 최적단면적 오차율($F=0.8$)

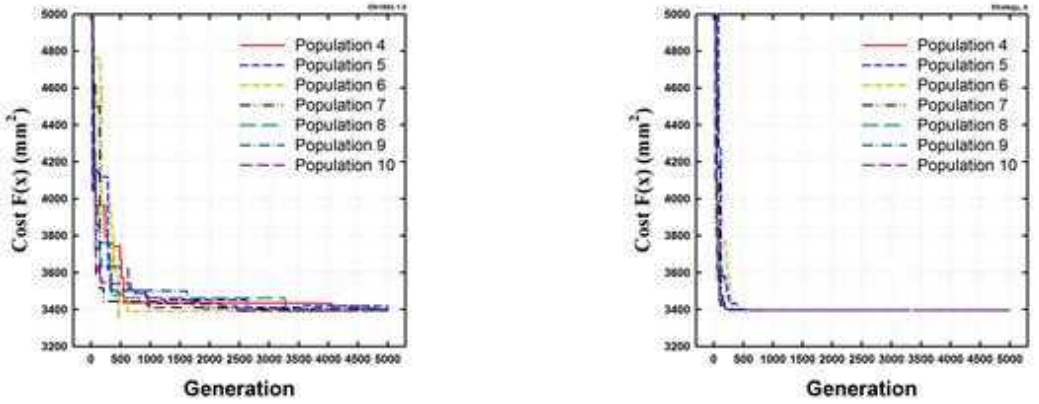
$F=0.8$	$f_{\min}=(\frac{F(x)_{strategy\,i,\,population\,j}}{F(x)_{\min(F=0.8)}}-1)*100(\%)$				
개체수	DE/rand/1	DE/best/1	DE/current-to-best/	DE/best/2	DE/rand-or-best/N
4	9.712	21.265	5.415	2.380	5.965
5	0.126	0.537	0.000	0.949	4.821
6	0.189	0.004	0.615	0.106	0.147
7	0.245	0.000	0.016	0.120	0.164
8	0.220	0.044	0.000	0.014	0.063
9	0.164	0.009	0.004	0.115	0.163
10	0.077	0.006	0.014	0.315	0.934

표 2.2.7.2 최적단면적 오차율($F\in[0,1]$)

$F\in[0,1]$	$f_{\min}=(\frac{F(x)_{strategy\,i,\,population\,j}}{F(x)_{\min(F=0.8)}}-1)*100(\%)$				
개체수	DE/rand/1	DE/best/1	DE/current-to-best/	DE/best/2	DE/rand-or-best/N
4	11.971	10.0556	6.015	1.738	2.181
5	0.551	1.0518	0.794	3.972	0.951
6	2.932	3.1247	1.965	0.898	0.919
7	0.007	5.2699	0.009	1.040	0.096
8	0.761	1.0541	0.105	0.003	0.125
9	0.046	1.1785	0.466	0.327	0.522
10	0.019	3.2761	0.000	0.002	0.030

표 2.2.7.3 최적단면적 오차율($F \in [-1,1]$)

$F \in [-1,1]$	$f_{\min} = (\frac{F(x)_{strategy\,i,\,population\,j}}{F(x)_{\min(F=0.8)}} - 1) * 100(\%)$				
개체수	DE/rand/1	DE/best/1	DE/current-to-best/	DE/best/2	DE/rand-or-best/N
4	8.669	13.093	8.586	0.419	2.710
5	2.142	2.114	0.628	3.899	2.963
6	3.252	3.755	2.654	4.896	0.011
7	3.138	2.720	1.667	2.136	0.530
8	0.028	1.087	0.031	0.208	0.001
9	0.005	3.599	0.633	3.206	0.548
10	0.000	0.803	0.009	3.734	0.086



(a) GA (b) DE

그림 2.2.7.6 최적해의 수렴성 비교

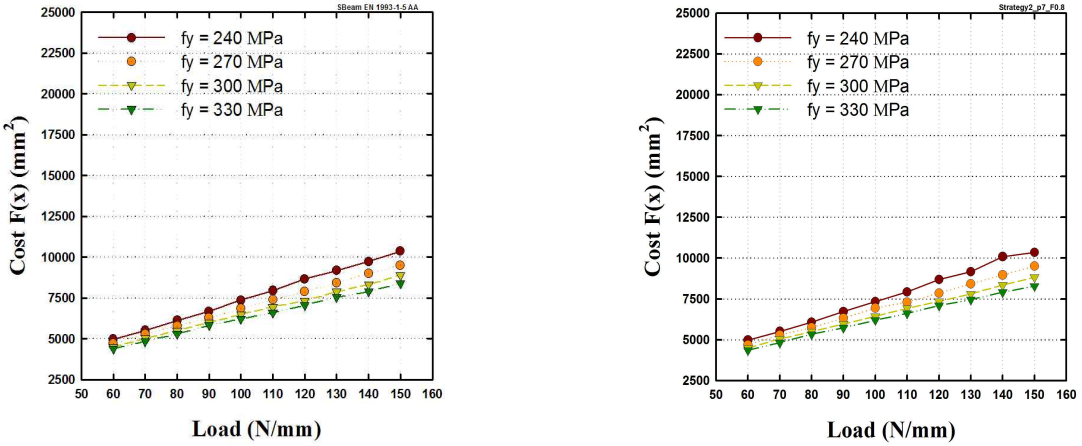
DE와 GA의 수렴성 평가를 위해서 단순보 모델을 대상으로 개채수별 목적함수의 수렴과정을 살펴보았다. 그림 2.2.7.6에서 보는 바와 같이 개체수가 4에서 10까지 1씩 증가시키고 세대수는 5000세대까지를 대상으로 해석을 수행하였으며, 각각의 기법에 대한 목적함수의 수렴결과를 비교하여 그래프로 나타내었다. 개체수의 증가에 따른 수렴도 비교결과에서 DE가 GA보다 적은 개체수에서도 최적점에 빠르게 수렴함을 알 수 있다.

라. 수치 예제

앞 절의 결과를 바탕으로 정현파형 주름웨브 보의 최적설계 단면 특성을 본 절에서 다루도록 한다. DE의 돌연변이 연산 기법은 가장 좋은 결과를 얻은 DE/best/1을 적용하였으며 7개의 개체를 세대수 500세대동안 해석하였다. 또한 결과의 정확성을 판단하기 위하여 GA을 이용한 최적설계 프로그램의 최적중량의 결과와 비교하였다. GA을 이용한 최적설계에서 충분히 정확한 최적 해를 얻기 위하여 200개체를 세대수 10000세대동안 해석하였으며, 연산자는 $P_c = 0.875$, $P_m = 0.3$, $dx = 0.001x^d$을 적용하였다. 예제는 그림 2.2.7.7의 양단고정보 예제를 이용하였다. 그림에서 세로축의 비용(Cost)함수값은 최적중량에 해당하는 단면적이며, 가로축은 외력에 해당된다. 나타난 그림 2.2.7.7는 등분포하중을 받는 양단고정보이며 하중의 범

위는 $60-150N/mm$ 으로 $10N/mm$씩 증가된 값을 이용하며, 항복강도 f_y는 각각 240, 270, 300, 330MPa을 적용하여 해석하였다.

해석결과, 그림 2.2.7.7(a)의 결과는 GA을 이용한 최적설계 프로그램의 최적중량결과이며, 그림 2.2.7.7(b)는 DE를 이용한 최적설계 프로그램의 최적중량결과이다. 두 결과는 공통적으로 항복강도가 증가할수록 최적단면적이 작아지며, 하중이 증가할수록 단면적이 증가하는 일반적인 결과를 나타낸다. 그림 2.2.7.7에서 나타난 최적설계에 따른 최적단면적은 항복강도 $f_y=240MPa$에서 하중이 가장 클 때 그림 2.2.7.7(a)의 최적중량은 $10369.8mm^2$, 그림 2.2.7.7(b)의 최적중량은 $10349.52mm^2$이다. 표 2.2.7.4의 결과에서, 각각의 경우에 대해서 하중에 대한 최적중량을 비교하였을 때 각각의 하중에 따른 DE의 최적중량과 GA의 최적중량의 차이가 3.6%이하의 작은 최적중량 차이를 보였다. 이 결과로 볼 때, DE를 이용한 최적설계 프로그램의 정확성을 확인할 수 있다.



(a) 등분포하중을 받는 양단고정보(GA) (b) 등분포하중을 받는 양단고정보(DE)

그림 2.2.7.7 최적중량 변화율(등분포하중을 받는 양단고정보)

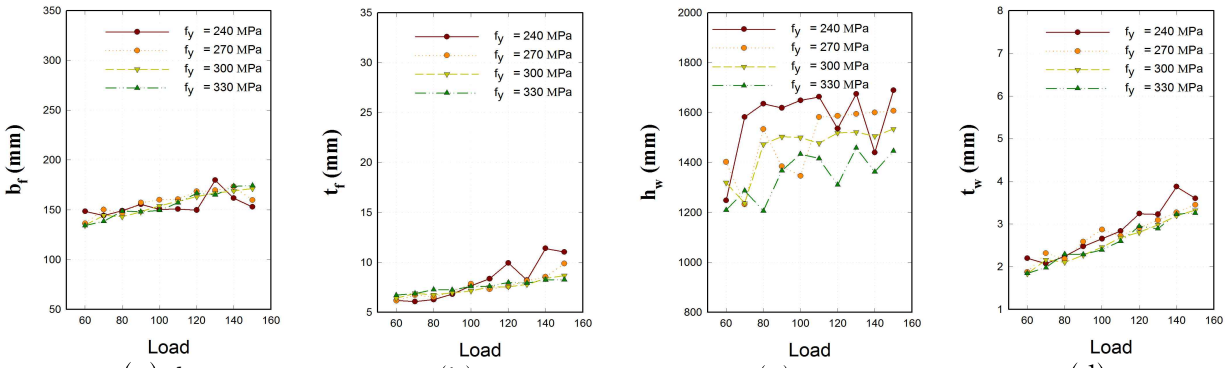
표 2.2.7.4 최적중량 비교(등분포하중을 받는 양단고정보)

$$\left|\left(\frac{F(x)_{GA}}{F(x)_{DE}}-1\right)*100\right|(\%)$$

f_y / 하중(N/mm)	240MPa	270MPa	300MPa	330MPa
60	0.18	0.38	0.41	0.81
70	0.10	0.29	0.40	0.98
80	1.10	0.67	0.55	0.55
90	0.52	0.48	0.53	1.67
100	0.62	1.29	1.00	0.39
110	0.27	1.42	0.55	0.12
120	0.30	0.42	0.02	0.28
130	0.19	0.10	0.98	1.35
140	3.57	0.25	0.21	0.01
150	0.20	0.04	0.98	1.38

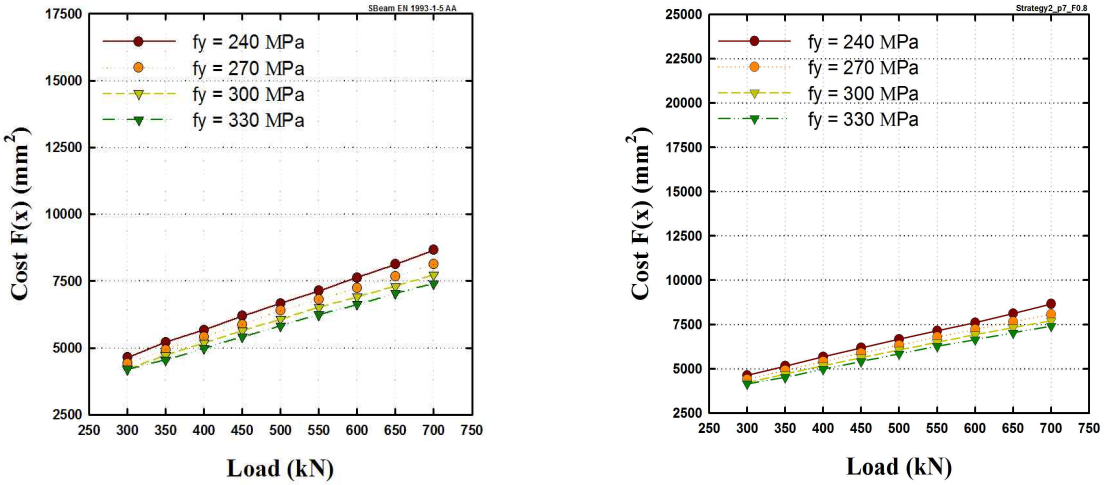
그림 2.2.7.8은 DE의 최적설계결과에 따른 최적단면 형상의 설계변수의 변화를 나타내었다. 각 설계변수의 그래프에서 하중의 증가에 따라 두께와 길이가 증가하는 변화를 보인다. 그 중 설계변수의 변화는 웨브의 두께와 플랜지의 두께가 가장 일률적으로 증가하며 설계변수의 구간은 플랜지의 폭(b_f)의 경우 134.12-179.87mm, 플랜지의 두께(t_f)의 경우 6.06-9.87mm, 웨브의 높이(h_w)의 경우 1209.32-1689.36mm, 웨브 두께(t_w)의 경우 1.84-3.87mm로 나타난다.

그림 2.2.7.9와 같이 집중하중을 받는 양단고정보 예제 모델을 해석하기 위하여 하중 범위는 $300-700kN$이며 $50kN$간격으로 증가시켜 적용하였고, 그 외의 조건은 등분포하중을 받는 양단고정보의 예제와 동일하다.



(a) b_f (b) t_f (c) h_w (d) t_w

그림 2.2.7.8 설계변수의 변화(등분포하중을 받는 양단고정보)



(a) 집중하중을 받는 양단고정보(GA) (b) 집중하중을 받는 양단고정보(DE)

그림 2.2.7.9 최적중량 변화율(집중하중을 받는 양단고정보)

최적중량 변화에 대한 결과는 그림 2.2.7.9과 같으며 그림 2.2.7.9(a)의 결과는 GA을 이용한 최적설계 프로그램의 최적중량결과이며, 그림 2.2.7.9(b)은 DE를 이용한 최적설계 프로그램의 최적중량결과이다. 두 결과는 공통적으로 항복강도가 증가할수록 최적단면적이 작아지며, 하중이 증가할수록 단면적이 증가하는 일반적인 결과를 나타낸다. 그림 2.2.7.9에서 나타난 최

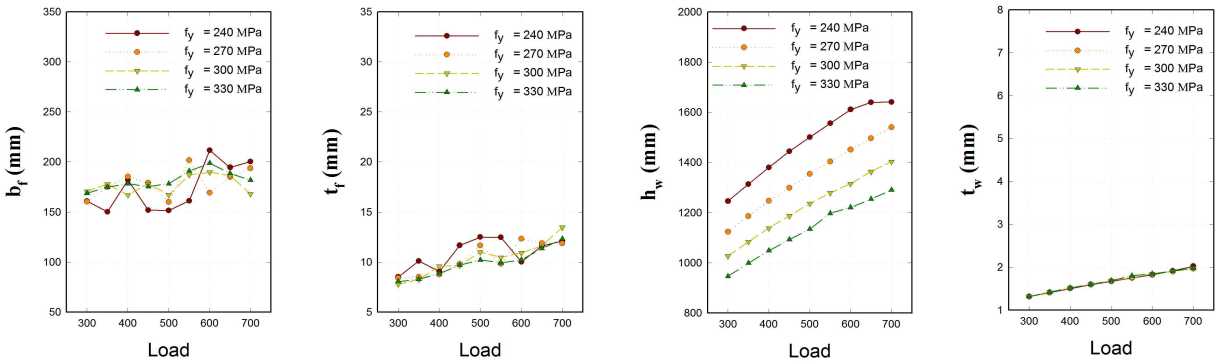
적설계에 따른 최적단면적은 항복강도 $f_y = 240MPa$에서 하중이 가장 클 때 GA의 최적중량은 $8660.024mm^2$, DE의 최적중량은 $8666.478mm^2$이다. 각각의 경우에 대해서 하중에 대한 최적중량을 비교하였을 때 표 2.2.7.5의 결과에서 각각의 하중에 따른 DE의 최적중량과 GA의 최적중량의 차이가 1.6%이하의 작은 최적중량 차이를 보였다. 이 결과로 볼 때, DE를 이용한 최적설계프로그램의 정확성을 확인할 수 있다.

표 2.2.7.5. 최적중량 비교(집중하중을 받는 양단고정보)

$\left|(\frac{F(x)_{GA}}{F(x)_{DE}} - 1)*100\right|(\%)$

f_y / 하중(N/mm)	240MPa	270MPa	300MPa	330MPa
300	0.40	0.35	0.01	1.60
350	1.09	0.57	0.76	0.66
400	0.10	0.03	0.46	0.19
450	0.23	0.22	0.37	0.06
500	0.01	1.08	0.22	0.17
550	0.13	0.17	0.43	0.45
600	0.29	0.45	0.30	0.23
650	0.08	0.27	0.12	0.15
700	0.07	0.79	0.45	0.09

그림 2.2.7.10은 DE의 최적설계결과에 따른 최적단면 형상의 설계변수의 변화를 나타내었다. 각 설계변수의 그래프에서 하중의 증가에 따라 두께와 길이가 증가하는 변화를 보인다. 그 중 설계변수의 변화는 웨브의 두께와 웨브의 높이가 가장 일률적으로 증가하며 설계변수의 구간은 플랜지 폭(b_f)의 경우 160.31-211.76mm, 플랜지 두께(t_f)의 경우 7.78-13.46mm, 웨브 높이(h_w)는 946.26-1641.06mm, 웨브 두께(h_w)는 1.31-2.02mm로 나타난다.



(a) b_f (b) t_f (c) h_w (d) t_w

그림 2.2.7.10 설계변수의 변화(집중하중을 받는 양단고정보)

위의 두 예제의 결과에서 DE를 이용한 프로그램의 정확성을 확인할 수 있었으며 설계변수의 변화에서 두 예제가 공통적으로 다른 설계변수에 비해 웨브의 두께의 하중에 따른 변

화가 일률적으로 증가함을 확인 할 수 있으며, 이것은 최적단면적의 증가와 같은 경향을 보인다. 이러한 결과는 설계변수 중 웨브의 두께 변화가 전체중량의 변화에 영향이 큰 것으로 생각된다.

마. 주름웨브 부재의 DE기반 최적구조설계용 프로그램과 입력데이터

주름웨브를 갖는 부재들의 최적구조설계를 위해서 본 과제에서 개발된 DE(차분진화 알고리즘)기반의 프로그램은 실수기반의 설계변수로 구성되며 메타 휴리스틱 알고리즘 중에서 전역 최적 값을 얻을 수 있으면서도 속도가 많이 개선된 것으로 알려져 있다. 연산방법이 비교적 단순하나 탐색벡터의 섭동을 통한 확률적 탐색은 해석결과에 영향을 미치며, 연산자의 특성에 따라 최적해 근처에서의 수렴도 및 국소 최적 점에서 벗어날 수 없는 상황도 발생하게 된다. 해석과정의 세대에 대한 수렴성은 적합도 함수를 이용하며, 부등 제약조건을 벌칙함수를 이용하여 등제약조건화 한다. 이때 사용되는 벌칙함수의 구성도 해의 수렴성에 영향을 주기 때문에 벌칙함수를 상수제약에서 계단함수 또는 선형변화함수를 이용하여 계산한다.

최적설계용 프로그램(ODSCWSB_DE.exe)의 초기입력데이터는 아래 그림에서 나타난 바와 같고, 텍스트 기반 입력데이터를 이용하며, 출력 텍스트 데이터 파일을 이용해 결과를 분석한다. 사용자 인터페이스는 본 절에서는 다루지 않으며, 프로그램을 실행하는 일련의 과정을 통해서 각 세대의 최대 적합도 개체의 설계변수와 해석상황을 알 수 있다.

```
[Example] CW member Opti. by DE          ; Title
      20    10000       10        6         - DE 세대/개체 수 및 해석옵션
     100       17       18       19         - 출력데이터 조절 변수
       0        1        1                  - 해석조건별 선택사항
   -1.0e-4  1.0e-7      0.5                 - 수렴과정 조절 파라메타
     0.8      0.8                          - 확률 파라메타
     0.0  500000.0      0.25                - 벌칙함수
    50.0       0.0      0.0                 - Dummy
4                                          ; 설계변수의 숫자
   1    10.   1000.      0.                  ; i 번째 설계변수, 최대, 최소, ith-dummy
   2     1.     30.      0.                  ; 상동
   3    10.   2000.      0.                  ; 상동
   4     1.      5.      0.                  ; 상동
2                                          ; 설계코드
     40.0    77.5     88.9852                ; 주름형상변수
    240.0   240.0                           ; 재료상수 - 항복강도
  10000.0    60.0                          ; 부재의 길이 및 하중조건
end                                        ; End card
```

그림 2.2.7.11 DE기반 주름웨브 부재용 최적구조설계 프로그램 초기입력 데이터

입력데이터를 작성하기 위해서는 그림에서 설명된 바와 같이 크게 세 개의 변수데이터 군을 필요로 하며, 첫 번째 라이에서는 해석데이터의 제목과 해석데이터의 끝부분에 'end' 키워

드를 통해서 종료하게 된다. 세 가지 입력데이터 군에서 첫 번째는 DE기반 탐색기법을 적용하기 위한 입력데이터이며, 두 번째는 설계변수와 설계변수의 상 하한치, 마지막으로는 주름웨브 부재에 대한 형상, 재료상수(항복강도), 부재의 길이 및 하중조건이다.

첫 번째 DE기반 탐색기법을 위한 파라메타로는 세대별 개체의 수와 최대 세대 수를 입력해야하며, 개체 수의 경우 유전자 알고리즘과 대비해서 10개의 개체 수만으로도 매우 만족할 수 있는 결과를 얻을 수 있으며, 수렴 정도를 비교한 결과에 따라서 1000세대 이내에서도 만족함으로 주어진 범위 내에서 입력하면 된다. 출력 조절 데이터의 경우 각 세대에 대한 최대 적합도 개체에 대한 적합도 및 각 설계변수의 상태와 변화과정을 정해진 간격으로 출력할 수 있도록 하며, 각 세대의 개체에 대한 전체 설계변수의 변화를 출력하기 위해서 옵션을 지정할 수 있다. 해석조건에 대해서는 DE 연산자의 다양한 옵션을 설정할 수 있으며, 모두 다섯 가지 방법을 제안하고 있다. 각각의 방법에 대해서는 고전적인 DE기법에서 설명하고 있는 방법 모두를 구현할 수 있으며, DE/rand/1, DE/best/1, DE/current-to-best/1, DE/best/2, DE/rand-or-best/N 의 옵션을 번호순서대로 구성하였다. 수렴과정과 종료조건에 대해서 이전 세대에 대한 변화율을 정의할 수 있으며, 0에 가까운 값을 입력하면 결과의 변화가 없을 경우 종료되어 출력된다. 확률변수의 경우 설계벡터의 조합을 위해서 사용되는 값들로 실행오차과정을 통해서 구할 수 있으며, 본 절에서 확률파라메타에 따른 최적해의 결과 값을 제시하였으므로 이에 준하는 상수를 이용하면 쉽게 얻을 수 있다. 마지막으로 벌칙함수의 구성은 상수로 구성하는 경우 적합도 함수가 분모 항이 0이 되지 않도록 1 이상의 값을 지정해서 넣으면 된다. 여기서, 최댓값을 찾는 문제에서는 적합도함수의 증가와 목적함수의 증가가 일치하는 경우가 많으므로 고려할 필요가 없다. 구간별 벌칙함수의 증가를 위해서 초기 세대에서는 낮게 입력하고, 세대수가 증가된 경우는 높은 값을 사용하는 것이 필요하다. 벌칙함수의 값에 따라서 제약조건의 위배정도가 달라진다.

두 번째 입력데이터는 설계변수의 설정에서 상한치와 하한치 값을 입력하는 과정이다. 이 값을 통해서 제약함수의 설계변수에 대한 영역이 설정되며, 주름웨브 부재의 설계에서 설계변수 영역은 플랜지의 폭과 두께, 웨브의 높이와 두께가 주로 사용되어 네 개의 설계변수 군을 지정하였다. 각각의 설계변수 영역은 두께의 경우 폭이나 높이의 경우보다 경계를 좁혀서 다루는 것이 최적해의 수렴 시간에 영향을 미치게 되므로 생산되는 부재의 영역에 맞게 책정하여 두어야하는 것이 필요하다.

세 번째 입력데이터 군은 주름의 형상과 재료상수 등이 입력되며, 주름형상의 변수로는 정현형파 주름에 대해서 입력이 가능하게 하였다. 형상에 대한 설계변수의 입력 이전에 데이터 군이 지정되어 있는 설계코드는 각각 세 가지 설계기준을 이용하도록 항목을 지정하였으며, DIN18800/DAStR015, EUROCODE, 및 정현형파 주름에 대한 실험식을 기준으로 한 Pasternak et al.(2004)의 기준식을 이용한 코드자료로 구분하였다. 초기입력데이터에서 적용하고자 하는 설계기준을 선택할 수 있으며, 이들 각각에 대한 설계 범위와 설계방법의 특성들은 본 절에서 일부 언급하였으며, 10절에서 각 국가별 전단좌굴에 대한 이론 및 설계 방법에 대해서 기술하였다. 형상의 설계변수로 사용되는 것 중에서 정현형파는 파고, 정현형파의 반 파장 주기 및 한 구간의 정현형파의 길이를 요구한다. 각각의 경우 단위를 통일하여 입력하는 것이 필요하며, 재료상수의 입력에서 강재의 일반적인 값은 이미 입력되어 있으며, 항

복강도만을 초기입력데이터로 요구하도록 프로그래밍 되어있다. 마지막으로 부재의 길이 값과 하중을 입력하면 된다.

이상의 과정을 통해서 입력데이터를 구성할 수 있으며, 아래 그림과 같은 결과파일을 통해서 최적설계단면을 얻을 수 있다. 출력되는 텍스트 데이터의 결과는 설계된 단면의 성질과 형상의 특성에 따른 전단좌굴의 상태에 대해서 결과를 얻을 수 있다. 이러한 결과파일 이외에 세대별 적합도 값의 변화를 출력할 수 있는 텍스트 결과파일도 함께 출력된다.

```
### OPTIMUM SOLUTION ###

Applied code is 2.  (1=DASt 2=EURO 3=PNAK)

Itermax : 10000    xFitness          xCost             xPenalty
                  .7596229E+04     .7596229E+04     .1000000E-06

   NP   itermax          P1             P2            P3          C1          C2          C3
   20     10000       .00000  500000.00000        .25000    50.00000      .00000      .00000

      bf          tf          hw          tw          a3          w           s
   149.10654    14.18319  1610.80784     1.82026    40.00000    77.50000    88.98520
    Load         Nsd         Vsd         Msd        Deflc      Lenght
  .60000E+02  .46154E+06  .30000E+06  .75000E+09  .13323E+02  .10000E+05

xCost :       7596.22869
gi(i) :     .1228362E-03   -.5623858E+00    .8453253E-04    .2788647E-03   -.6002961E+00

     tau_l       lam_l       kap_l       tau_g       lam_g       kap_g
  .52051E+03      .51595      .81217  .10552E+03     1.14595      .82727
 tau_g/tau_l  kap_g/kap_l     Vrk         Vrd        gammaM
      .20272      1.01859  .32997E+06  .29997E+06     1.10000
```

그림 2.2.7.12 주름웨브 부재의 최적구조설계 해석결과 데이터

해석결과에서 얻어지는 결과에 대해서 위의 그림에서 언급된 내용은 우선, 적용된 설계코드에 대해서 설명하고 있으며, 반복횟수와 최적 단면의 적합도 값과 비용함수 결과 값이 출력된다. 각각의 경우에서 설계된 형상의 단면과 주름웨브 부재의 설계 부재내력 및 길이와 전단좌굴과 설계에 필요한 상태에 대해서 모두 제공한다.

이상의 과정을 통해서 개발된 DE기반 정현형파 주름웨브 부재의 최적중량설계 프로그램은 기존방법을 이용한 것 보다 수렴성이 좋으며, 낮은 개체수의 해석에서도 비교적 좋은 해를 얻을 수 있다. 다루어진 예제 모델의 경우 개체수가 7개 이상 일 때 가장 잘 수렴하며, 연산자 중 고전적인 기법인 DE/best/1이 가장 적합한 모델이었다. 단순보 예제에서 DE를 이용한 결과와 GA를 이용한 결과의 차이는 등분포하중 예제에서 3.6%이하, 집중하중 예제에서 1.6%이하의 작은 차이를 보였다. 또한, 최적단면의 변화 그래프에서 웨브의 두께 변화가 최적단면적의 증가 경향과 유사한 증가를 하였으며, 이것은 설계변수 중 웨브의 두께 변화가 전체중량의 변화에 가장 큰 영향을 미친다.

8. 정현형파 주름강판의 전단좌굴특성 분석

가. 탄성전단좌굴이론

(1) 탄성국부좌굴이론

탄성국부좌굴은 반파장 (half-wave)의 패널 내에서 발생하며 인접해있는 플랜지 또는 패널은 경계조건으로 작용한다고 가정하여 기존의 평판 전단좌굴강도식을 이용할 수 있다.

국부 전단좌굴응력 ($\tau_{cr,l}$)은 기존의 평판 좌굴 전단좌굴 응력식을 이용하여 다음과 같이 정의 된다 (Timoshenko, 1981).

$$\tau_{cr,L} = \frac{k\pi^2 E}{12(1-\nu^2)}\left(\frac{t}{b}\right)^2 \tag{2.2.8.1}$$

국부전단좌굴계수 (k_v)의 경우 형상비와 경계조건에 따라 다르게 결정되며, 4변 단순지지의 경우 식 (2.2.8.2)와 같이 결정된다.

$$k_v = 5.35 + \frac{4.0}{\left(\frac{a}{h}\right)^2}; \frac{a}{h} > 1 \tag{2.2.8.2}$$

여기서, k_v는 단순지지조건의 국부전단좌굴계수, E는 탄성계수 (N/mm2), v는 포아송비, a는 판형의 길이와 높이 중 작은 값 (mm), t는 판의 두께 (mm)이다.

(2) 탄성전체좌굴이론

탄성전체좌굴은 파형영역 전체에 걸쳐 좌굴이 발생하며 파형 내에서 교축방향과 교축직각방향의 강성이 다르므로 직교이방성을 고려해야 한다(Oh, 2010).

Easley (1969)는 파형강판을 직교이방성판으로 가정하여 전체 전단 좌굴 응력을 제안하였으며, 탄성 전체 전단 좌굴응력은 식 (2.2.8.3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_{cr,G} = 36\beta\frac{D_x^{1/4} D_y^{3/4}}{th^2} \tag{2.2.8.3}$$

여기서, D_x는 주축방향 중립축에 대한 휨강성(Nmm), D_y는 주축직각방향 중립축에 대한 휨강성 (Nmm), h는 평형의 높이 (mm), β는 경계조건에 따른 전체전단좌굴계수(단순지지일 경우 1, 고정지지일 경우 1.9), t는 판의 두께(mm)이다. 그리고 D_x와 D_y를 구하는 식은 다음과 같다.

$$D_x = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}\frac{w}{s} \tag{2.2.8.4}$$

$$D_y = \frac{EI_y}{w} \tag{2.2.8.5}$$

(3) 탄성연성좌굴이론

연성좌굴은 전체 및 국부좌굴의 상호작용에 의해 발생하는 좌굴현상으로 현재 그 거동이 명확히 규명되지 않고 있으며, 여러 연구자들에 의해 강도를 감소시키는 이론식을 연성좌굴식으로 사용하고 있다. 최근 Yi et al. (2008)의 연구에서는 연성 좌굴은 재료의 성질과는 무관한 기하학적 문제이므로 항복강도 항을 생략할 수 있으며, 1차 연성좌굴식이 파형강판의 탄성 연성 좌굴 강도를 합리적으로 예측할 수 있다고 제안하였으며, 1차 연성 전단좌굴식은 식 (2.2.8.6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{\tau_{cr,I}} = \frac{1}{\tau_{cr,L}} + \frac{1}{\tau_{cr,G}} \tag{2.2.8.6}$$

본 절에서 적용되는 평판의 이론 해에 대한 경계조건은 4변 단순지지 평판으로 가정하였으며, 각각의 경계조건에 따른 해석결과를 유한요소 해석과 비교하였다.

(4) 고유치해석을 통한 전단좌굴강도의 산정

고유치해석을 통한 좌굴응력 산정은 이상적인 선형탄성구조물의 임계하중을 예측하는 방법으로, 식 (2.2.8.7)과 같이 역이 존재하지 않는 강성매트릭스 모델에서 고유벡터 (v_i^M)가 영이 아닌 해를 가져야만 하는 조건으로 식 (2.2.8.8)과 같은 특성방정식을 유도할 수 있다.

$$(K_0^{NM} + \lambda K_\Delta^{NM}) v_i^M = 0 \tag{2.2.8.7}$$

$$\det\left| K_0^{NM} + \lambda_i K_\Delta^{NM} \right| = 0 \tag{2.2.8.8}$$

여기서 K_0^{NM}는 시스템의 강성행렬, K_Δ^{NM}는 응력강성행렬, λ_i는 고유치, v_i^M는 좌굴모드를 나타내는 고유벡터를 나타낸다. 따라서 탄성좌굴에서 임계하중은 다음 식으로부터 얻을 수 있으며, 식에서 Q^N은 고유좌굴을 예측하는 단계에서 정의되는 하중벡터이다.

$$P^N + \lambda_i Q^N = 0 \tag{2.2.8.9}$$

좌굴하중은 구조의 기본 상태를 기준으로 계산되며 일반적으로 좌굴모드형상 (v_i^M)에 대한 임계하중변형은 실제 크기가 아닌 가장 큰 변위 요소가 1.0의 값을 가지며 만약 모든 변위 요소가 0이면, 최대 회전 요소 값은 1.0이 된다. 이때 최저차 좌굴모드의 형상은 고유치문제에서 좌굴거동의 형태를 예측하는데 매우 유용하게 사용할 수 있다 (ABAQUS/CAE User's Manual).

나. 경계조건 및 전단좌굴 해석모형

(1) 평판의 해석과 경계조건의 가정

플랜지와 웨브는 사실상 단순지지와 고정지지의 중간상태인 탄성적인 지지상태이나 Abbas (2002), Gill et al. (2003), Choi et al. (2009) 및 Oh (2010)는 복부판의 경계조건을 안전측인 단순지지로 가정하여 프로그램을 검증하였다. 본 연구에서도 프로그램 검증을 위해 경계조건을 단순지지로 가정하였으며 그림 2.2.8.1과 같이 순수전단좌굴이 작용하는 경우에 대해 해석을 수행하였다.

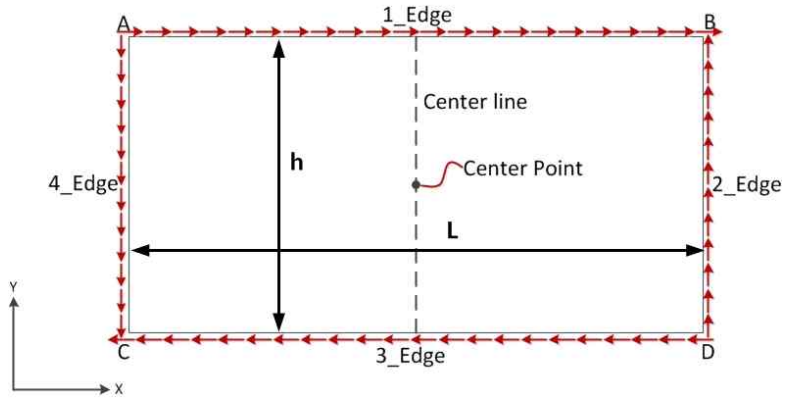


그림 2.2.8.1 Shear stress distribution map of flat plate

표 2.2.8.1 Boundary condition

Degree of freedom			1_Edge	2_Edge	3_Edge	4_Edge
B.C	Translation	X	Fix	Free	Fix	Free
		Y	Free	Free	Free	Fix
		Z	Fix	Fix	Fix	Fix
	Rotation	X	Free	Free	Free	Free
		Y	Free	Fix	Free	Free
		Z	Free	Fix	Free	Free

표 2.2.8.2 Shear buckling analysis result about B.C.

	$Exact_{sol.}$ $[N/mm^2]$		$FEA_{results}$ $[N/mm^2]$		$Error$ $[\%]$	
$L[mm]$ \ $t_w[mm]$	5	10	5	10	5	10
1000	44.318	177.273	50.726	202.040	14.459	13.971
2000	31.32	125.268	31.356	125.123	0.115	-0.116
3000	27.996	111.982	27.852	111.150	-0.514	-0.743
4000	27.047	105.186	26.788	106.913	-0.958	1.642
5000	26.145	104.580	26.31	105.008	0.631	0.409

그림 2.2.8.1에서 판의 높이 (h)는 1000mm, 길이 (L)의 범위는 1000mm~5000mm으로 1000mm간격이며 판의 두께 (t)는 10mm로 모델링하였다. 파형강판의 재료적 성질인 탄성계수(E)와 포아송비 (ν)는 각각 2.1×10^5MPa 및 0.3으로 가정하였으며, 하중 (P)는 10N/mm의 분포하중이 작용하였다. 평판은 쉘요소를 이용하여 모델링하였으며, 경계조건은 표 2.2.8.1과 같다 (Yoo et al., 2013).

표 2.2.8.2는 경계조건을 적용한 모델의 유한요소 해석결과를 국부좌굴식인 식 (2.2.8.9)의 계산결과와 비교한 것이다. 표 2.2.8.2의 해석결과, 유한요소 해석 값이 판의 길이가 1000mm일 때를 제외한 나머지 결과에서 오차 1% 내외로 이론값과 상당히 일치함을 확인할 수 있었다. 여기서 판의 가로세로 비율에 따른 정밀도의 차이는 판의 형상, 요소의 분할 수 및 경계조건에 따라 조금씩 다르게 나타난다 (Yoo et al., 2013).

다. 두께변화에 따른 전단좌굴응력

정현파형강판의 형상파라메타는 그림 2.2.8.2와 같으며 주축의 단면 2차 모멘트는 식 (2.2.8.10)과 같다. 파형형상은 Pasternaket al. (2004)의 파형형상을 세분화하여 해석모델을 선정하였으며, 반파장 길이 당 요소분할 수는 8개로 분할하였으며, 가로세로비는 약 4:1로 해석하였다. 해석을 위해 경계조건 및 재료적 성질은 앞 절에서 제시한 값을 동일하게 적용하였으며 고유치 해석의 최저차 좌굴모드을 통해 좌굴거동을 예측하였다.

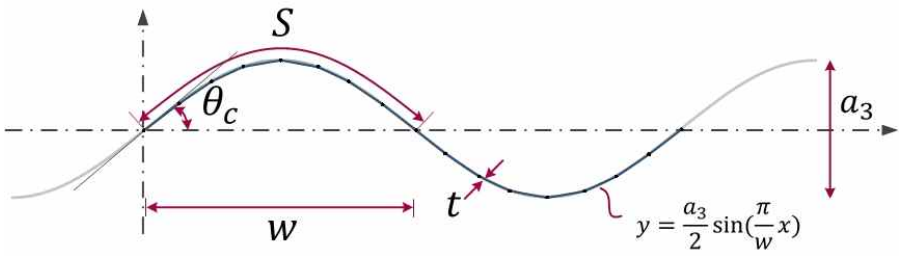


그림 2.2.8.2 Parameter of sinusoidal corrugation and number of mesh (mesh : 8)

표 2.2.8.3 Analysis model parameter of sinusoidal corrugation

a_3 (mm)	w(mm)		h(mm)		L(mm)	N
	구분	치수	구분	치수		
20, 30, 40	a	77.5	H1	500	2015	13
			H2	1000	4030	26
			H3	1500	6045	39
	b	116.25	H1	500	2092.5	9
			H2	1000	3952.5	17
			H3	1500	6045	26
	c	155	H1	500	1860	6
			H2	1000	4030	13
			H3	1500	5890	19

해석을 위한 27가지 모델은 표 2.2.8.3과 같으며 판의 두께 (t) 0.2~5mm를 0.2mm간격으로 해석하였다. 또한 그래프 내의 범례는 a_3_a(or b, c)_H1(or H2, H3)로 표기하였다. 여기서 a_3는 주름의 파고, w는 반파장의 길이, h는 판의 높이, L은 판의 길이, N은 파장의 개수이다.

$$L_y = \int_0^w \left[\frac{t^3}{12} + t^2 \frac{a_3}{2} sin \frac{\pi}{w} x^2 \right] dx \qquad (2.2.8.10)$$

(1) 전단좌굴응력변화의 변화

본 절에서는 판의 높이 별 두께 증가에 따른 응력 변화를 분석하였다. 앞의 표 2.2.8.3의 조건을 바탕으로 판 높이 별 응력변화그래프는 그림 2.2.8.3, 그림 2.2.8.4와 그림 2.2.8.5에 나타내었다. 그림 2.2.8.3, 그림 2.2.8.4와 그림 2.2.8.5의 그래프에서 공통적으로 두께가 증가할수록 전단좌굴응력이 증가하며 파고가 깊어질수록 전단좌굴응력이 더 크게 나타나는 일반적인 결과를 얻을 수 있었다. 또한, 그림 2.2.8.3, 그림 2.2.8.4와 그림 2.2.8.5 그래프의 전단좌굴응력곡선에서 변곡점이 발생한 후 전단좌굴응력 증가율이 감소하며, 두께가 증가함에 따라 변곡점이 발생하였다. 이러한 결과로부터 해석변수가 전단좌굴에 영향을 미침을 예상할 수 있었다. 그러나 전단좌굴응력의 증가곡선으로는 전단좌굴거동을 예상할 수 없으므로 해석형상을 통해 파형강판의 거동을 분석하였다.

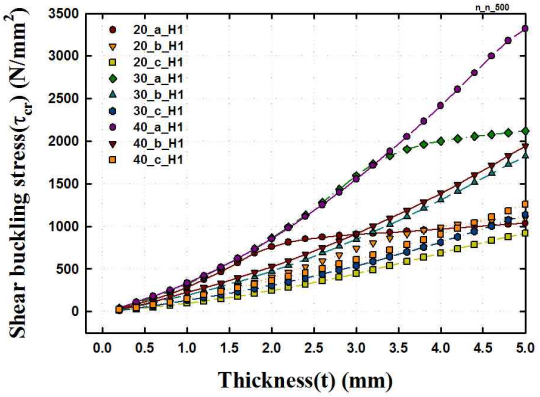


그림 2.2.8.3 Changes in shear buckling stress ($h = 500mm$)

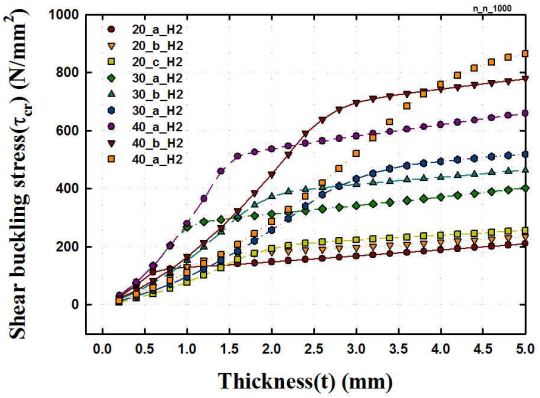


그림 2.2.8.4 Changes in shear buckling stress ($h = 1000mm$)

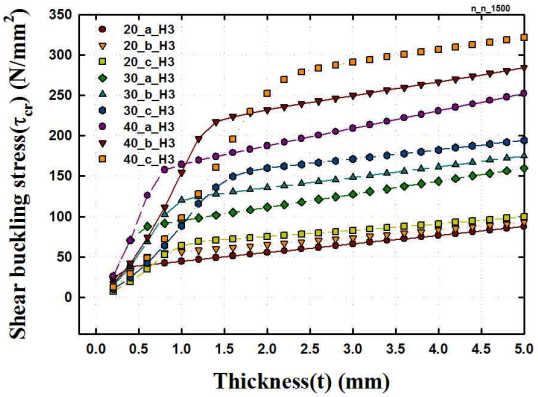


그림 2.2.8.5 Changes in shear buckling stress ($h=1500mm$)

(2) 파형강판의 좌굴형상 분석

해석결과 그림 2.2.8.6은 모델 20_a_H1의 결과, 그림 2.2.8.7은 30_a_H1모델의 결과이며 그림 2.2.8.8은 40_a_H1 모델의 결과이다. 좌굴모드형상을 통해 얇은 판에서는 국부좌굴이 발생하고 두꺼운 판에서는 전체좌굴이 발생하며 그 사이에서는 연성좌굴이 발생하는 형상을 확인 할 수 있다. 두께에 따른 좌굴의 성질을 앞 절의 전단좌굴응력 그래프와 비교하였을 때 그림 2.2.8.3, 그림 2.2.8.4 및 그림 2.2.8.5 그래프의 변곡점이 발생하는 부근에서 연성좌굴이 발생하였다. 또한 파고가 얕을수록 얇은 판에서 국부좌굴에서 연성좌굴로 넘어가며 주름의 길이가 길어질수록 국부좌굴에서 전체좌굴로 넘어가는 연성좌굴의 범위가 늘어나는 것을 형상의 변화를 통해 예상할 수 있었다.

(3) 전단좌굴거동의 경향

정현파형 강판의 두께 변화에 따른 전단좌굴거동을 고찰하기 위해 τ_{fe}/τ_{cr} 값을 통하여 좌굴의 경향성에 대하여 해석을 수행하였다. 해석을 수행하기 위해 표 2.2.8.3의 형상을 이용하였으며 정현파형 강판의 좌굴거동을 설명하기 위한 변수는 전체좌굴과 국부좌굴의 이론비 ($\tau_{cr,G}/\tau_{cr,L}$), 판의 두께 (t), 판의 높이 (h), 파고 (a_3), 반파장길이 (w)를 선택하였다.

좌굴 이론비에 대한 경향성은 그림 2.2.8.9, 그림 2.2.8.10 및 그림 2.2.8.11과 같으며 그래프에서 x축은 전체좌굴이론값 ($\tau_{cr,G}$)을 국부좌굴이론값($\tau_{cr,L}$)으로 나눈 값, y축은 유한요소해석에 의한 전단좌굴강도 값과 국부좌굴 및 전체좌굴의 이론값의 비를 나타낸 무차원 좌굴강도이다 (Oh, 2010). y축에서 $\tau_{cr,G}/\tau_{cr,L}>1$ 일때 유한요소해석의 전단좌굴강도 값을 국부좌굴 이론값으로 나누고, $\tau_{cr,G}/\tau_{cr,L}<1$일 때 유한요소 해석의 전단좌굴강도 값을 전체좌굴 이론값으로 나누어 그래프를 작도하였다.(Hyun, 2002).

그림 2.2.8.9는 주름깊이 (a_3) 20mm, 그림 2.2.8.10은 주름깊이 (a_3) 30mm의 결과이며 그림 2.2.8.11은 주름깊이 (a_3) 40mm의 결과이다. 그림에서 $\tau_{cr,G}/\tau_{cr,L}$가 가장 작은 영역 (Case1), $\tau_{cr,G}/\tau_{cr,L}=1$인 영역 (Case4), $\tau_{cr,G}/\tau_{cr,L}$이 가장 큰 영역 (Case7), $\tau_{cr,G}/\tau_{cr,L}<1$ 영역에서의 변곡점 (Case2), $\tau_{cr,G}/\tau_{cr,L}>1$영역에서의 변곡점 (Case6), $\tau_{cr,G}/\tau_{cr,L}<1$영역과 $\tau_{cr,G}/\tau_{cr,L}=1$ 사이의 중간 영역 (Case3), $\tau_{cr,G}/\tau_{cr,L}>1$영역과 $\tau_{cr,G}/\tau_{cr,L}=1$사이의 중간 영역 (Case5)으로 나누어 7가지 영역을 그림 2.2.8.9, 2.2.8.10및 2.2.8.11의 그래프에 표현하였다.

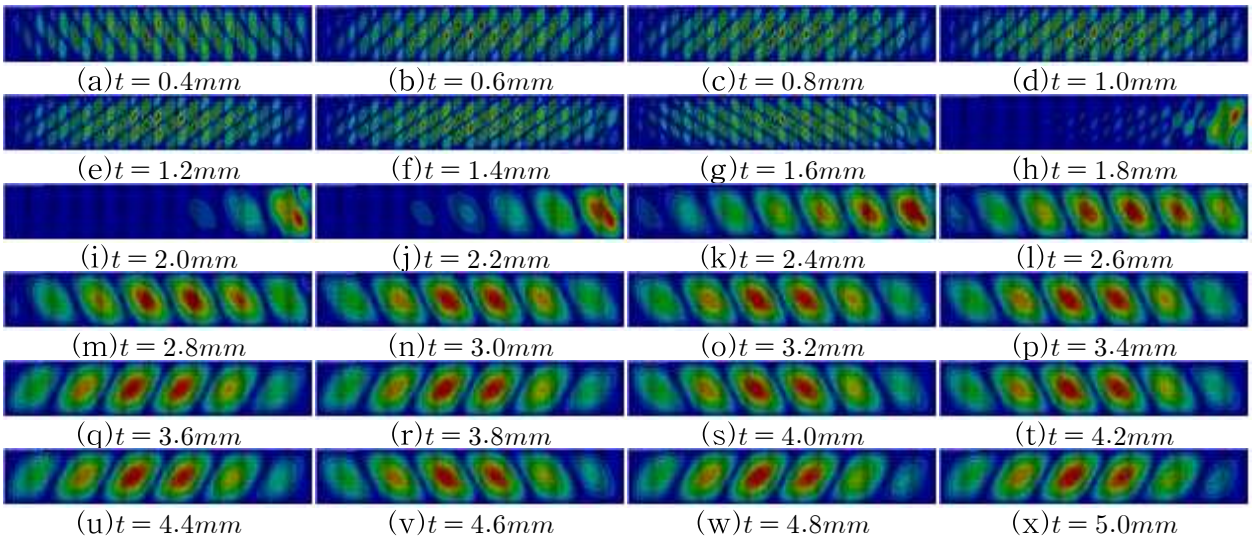


그림 2.2.8.6 Changes shape in shear buckling stress ($a_3=20mm,\ w=77.5mm,\ h=500mm$)

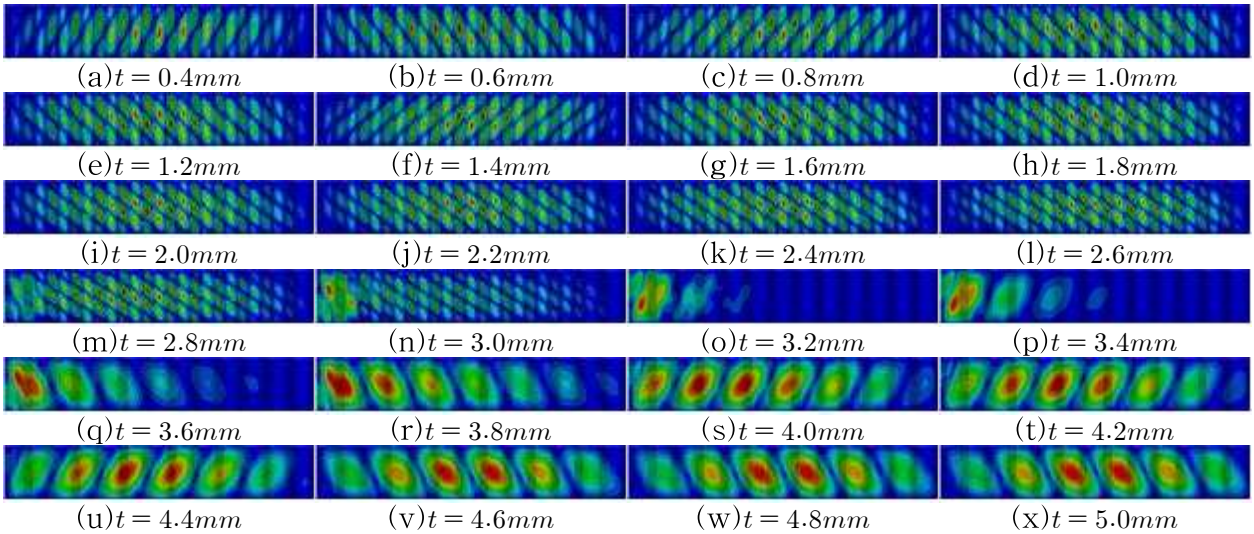


그림 2.2.8.7 Changes shape in shear buckling stress ($a_3=30mm,\ w=77.5mm,\ h=500mm$)

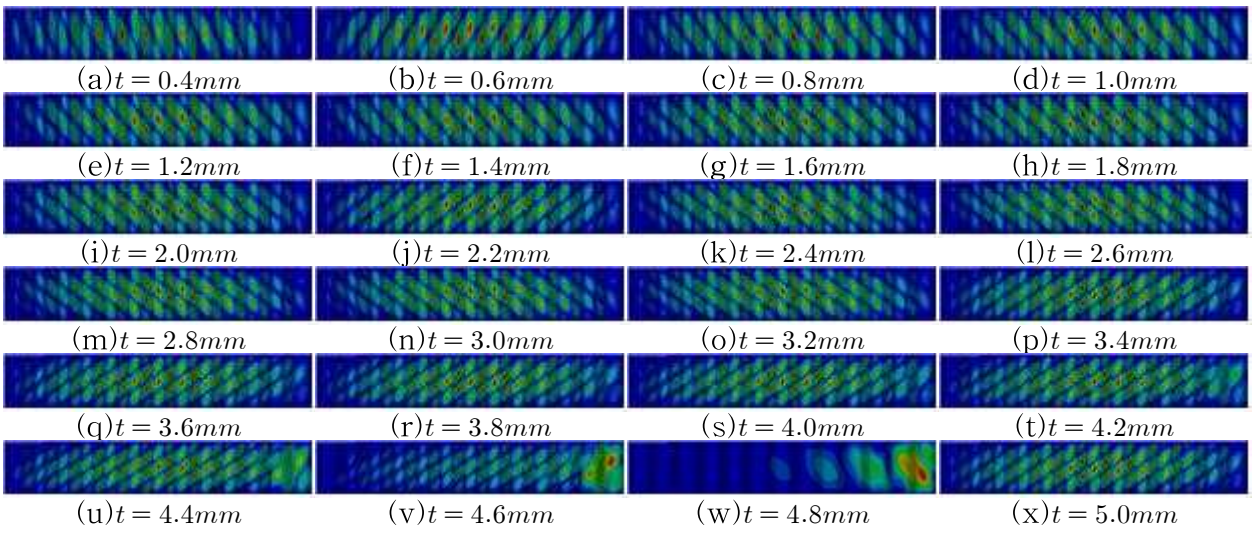
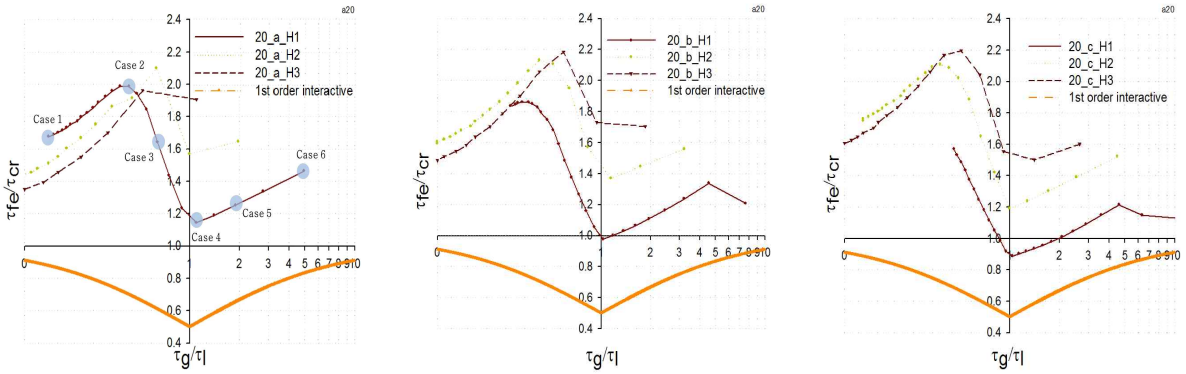
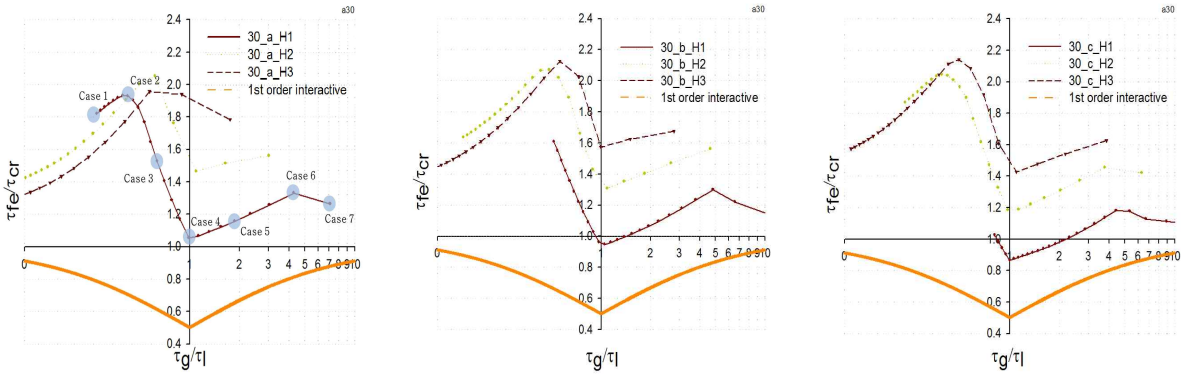


그림 2.2.8.8 Changes shape in shear buckling stress ($a_3=40mm,\ w=77.5mm,\ h=500mm$)



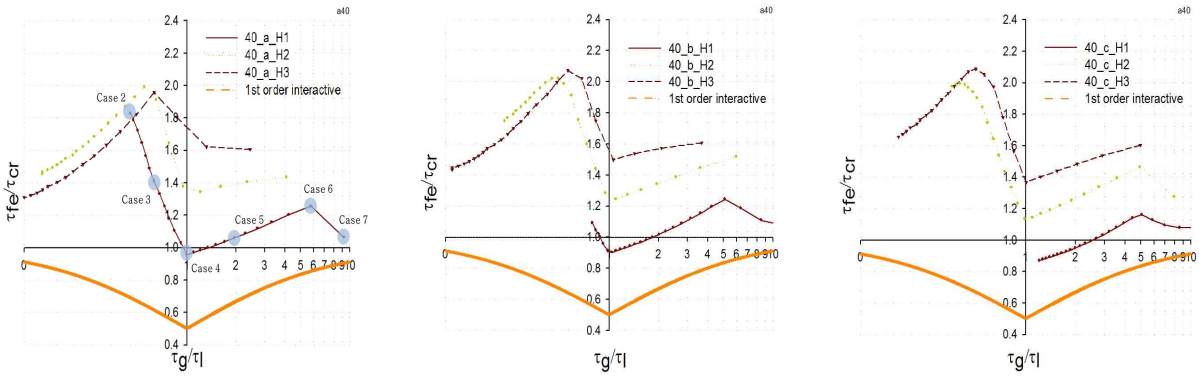
(a)$a_3 = 20mm,\ w = 77.5mm$ (b)$a_3 = 20mm,\ w = 116.25mm$ (c)$a_3 = 20mm,\ w = 155mm$

그림 2.2.8.9 Influence of $\tau_{cr,G}/\tau_{cr,L}$ on shear buckling stress ($a_3 = 20mm$)



(a)$a_3 = 30mm,\ w = 77.5mm$ (b)$a_3 = 30mm,\ w = 116.25mm$ (c)$a_3 = 30mm,\ w = 155mm$

그림 2.2.8.10 Influence of $\tau_{cr,G}/\tau_{cr,L}$ on shear buckling stress ($a_3 = 30mm$)



(a)$a_3 = 40mm,\ w = 77.5mm$ (b)$a_3 = 40mm,\ w = 116.25mm$ (c)$a_3 = 40mm,\ w = 155mm$

그림 2.2.8.11 Influence of $\tau_{cr,G}/\tau_{cr,L}$ on shear buckling stress ($a_3 = 40mm$)

해석결과 공통적으로 Case7에서는 국부좌굴이 발생하며 Case1에서는 전체좌굴이 발생을 고유모드의 형상을 통해 확인하였다. Case4 부근에서 국부좌굴에서 전체좌굴로 넘어가는 연

성좌굴이 나타났다. Case6에서 Case4사이에서는 국부좌굴의 형상이 나타나며 유한요소해석의 전단좌굴 강도 값과 이론값의 차가 점차 감소하였다. Case4에서 Case2로 국부좌굴에서 연성좌굴로 파형 형상이 변해가는 과정에서 유한요소해석의 전단좌굴 강도 값과 이론값의 차가 점차 증가하였다. Case3에서는 국부좌굴에서 연성좌굴로 넘어가는 형상을 확인 할 수 있었다. 또한 Case2의 변곡점에서 연성좌굴에서 전체좌굴로 넘어가는 형상을 확인할 수 있었다. 각각의 모델에서 두께가 두꺼워질수록 국부좌굴에서 전체좌굴로 바뀌는 양상이 나타나며 그 사이에 연성좌굴이 발생한다. 연성좌굴대상 모델의 경우 Case3과 Case2사이에서 좌굴모드 형상의 변화과정이 나타났다. 또한, 그림에서 $\tau_{cr,G}/\tau_{cr,L}$가 1.0에 근접할 때, 그림 2.2.8.9의 20_b_H1 및 20_c_H1, 그림 2.2.8.10의 30_b_H1, 30_c_H1, 그림 2.2.8.11의 40_a_H1, 40_b_H1 및 40_c_H1의 7개 모델에서 이론전단좌굴강도보다 더 작은 해석의 전단좌굴강도($\tau_{fe}/\tau_{cr}<0$)를 가짐을 확인할 수 있었다. 그러나 모든 모델에서 1차 연성전단좌굴강도보다 크게 나오며, 1차 연성좌굴이론이 정현파형 강판을 설계하는데 충분함을 예상할 수 있다. $\tau_{cr,G}/\tau_{cr,L}>1$인 국부좌굴이 지배적인 범위에서 판높이 ($h$)와 판너비 ($w$)가 길어질수록 이론값과 해석 값의 차이가 크게 나타나지만 $\tau_{cr,G}/\tau_{cr,L}<1$인 전체좌굴이 지배적인 범위에서 변곡점이 발생한 이후 그래프가 역전된다. 이 결과로부터 판의 두께 (t), 판높이 (h)와 판너비 (w)가 좌굴 형상에 민감하게 작용함을 예상할 수 있었다.

라. 결 론

본 연구는 정현파형 주름강판의 전단좌굴거동특성에 대한 해석적 연구를 수행하였다. 정현파형 강판의 구조적 특성을 분석하기 위하여 파형이 가지는 좌굴특성을 여러 형상 파라메타를 대상으로 평가하였으며, 분석결과를 바탕으로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 정현파형 강판의 두께가 증가할수록 전단좌굴응력이 증가하고 파고가 깊을수록 전단좌굴강도가 크게 나타나는 결과를 얻을 수 있었다. 두께에 따른 좌굴강도곡선은 변곡점이 발생한 이후 전단좌굴응력의 증가율이 감소함을 확인할 수 있었으며, 판의 두께가 증가할수록 국부좌굴에서 연성좌굴로, 연성좌굴에서 전체좌굴로 좌굴경향이 변화하는 것을 고찰할 수 있었다.

(2) 정현파형 형상에서 파고가 얕을수록 얇은 판에서 국부좌굴에서 연성좌굴로 변화하며, 반파장의 길이가 길어질수록 연성좌굴의 범위가 늘어남을 고유좌굴모드의 형상을 통해 예측할 수 있다. 대상예제의 이러한 결과로부터 형상의 파라메타가 전단좌굴에 미치는 영향이 매우 크고 민감한 영향이 있음을 확인할 수 있었다.

(3) 파형강판의 두께 변화에 따른 전단좌굴 거동을 파악하기 위한 좌굴응력의 이론비에 대한 경향성 분석 결과는 이론식에 의한 전단좌굴강도가 고유치해석을 통한 전단좌굴강도보다 낮으며, 모든 해석대상 모델에서 1차 연성전단좌굴이론식의 곡선보다 큰 값으로 나타났다.

9. 형상에 따른 주름강판의 탄성전단좌굴 특성 및 경향성 분석 연구

가. 파형강판의 전단좌굴이론과 좌굴응력계산

(1) 탄성전단좌굴이론식

탄성전단좌굴이론식은 주로 제형파형 강판을 대상으로 연구가 진행되어왔으며, 국부좌굴형상, 전체좌굴형상, 연성좌굴형상의 이론식으로 나누어 각각의 좌굴모드별로 강도를 결정하였다. 그러나 곡선주름인 정현파형의 경우에 있어서 좌굴모드별 강도의 결정은 어려움이 많아 따랐으며 본 논문을 통해서 이들을 정리하여 설명하도록 한다.

표 2.2.9.1 Equation of corrugated plate

	Sinusoidal	Trapezoidal
Local Buckling ($\tau_{cr,l}$)	$\tau_{cr,l}=\frac{k\pi^2E}{12(1-\nu^2)}(\frac{t}{S_{(s)}})^2$ $k=5.35+4(\frac{S_{(s)}}{h})^2$	$\tau_{cr,l}=\frac{k\pi^2E}{12(1-\nu^2)}(\frac{t}{a})^2$ $k=5.34$ $a=Max(a_1,a_2)$
Global Buckling ($\tau_{cr,g}$)	$\tau_{cr,g}=36\beta\frac{D_x^{1/4}D_y^{3/4}}{th^2}$ $D_x=\frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}\frac{w}{S_{(s)}}$ $D_y=\frac{EI_y}{w}$	$\tau_{cr,g}=k_g\frac{D_x^{1/4}D_y^{3/4}}{th^2}$ $D_x=\frac{b_0}{2S_{(t)}}\frac{Et^3}{12}$ $D_y=\frac{EI_y}{b_0}$
Interactive Buckling($\tau_{cr,I}$)	$\frac{1}{\tau_{cr,I}}=\frac{1}{\tau_{cr,l}}+\frac{1}{\tau_{cr,G}}$	

탄성국부좌굴은 파형강판의 한 패널 내에서 좌굴이 발생하는 형상을 말하며, 인접해있는 패널 및 플랜지의 경계조건에 의해 결정된다고 가정하여 Timoshenko(1981)의 판 좌굴 이론에 의한 식이 이용된다. 국부좌굴응력은 경계조건과 형상비(h/a_3)에 따라 국부전단좌굴계수(k)가 결정되며 경계조건은 장변 및 단변의 단순지지, 고정지지의 조건으로 나뉜다.

탄성전체좌굴은 파형강판 전체에 발생하는 형상을 말하며 Easley(1969)가 제안한 파형강판을 직교이방성판으로 가정하여 Ritz-energy 법을 이용하여 유도된 좌굴이론식을 이용한다.

연성좌굴의 경우는 앞서 설명된 두 좌굴과는 달리 그 형상이 다양하며 발생의 원인과 강도가 명확하게 정의되지 않는다. 탄성연성좌굴의 경우 탄성국부좌굴과 탄성전체좌굴의 비의 영향을 받으나 강재의 재료적 성질과는 무관하므로 국부좌굴응력, 전체좌굴응력의 항만을 이용하여 강도를 감소시키는 식이 주로 적용된다(Yi et al., 2007). 이상의 내용에 대해서 좌굴

응력산정식을 정리하면 표 2.2.9.1와 같고, 단순지지상태의 국부좌굴이론식 (Abbas et al., 2002), Elgaaly(1996)의 제안한 전체좌굴이론식을 본 연구에서 유한요소해석결과(FEM)과 함께 비교한다. 기본적인 형상변수로서 제형 형상은 w, a_1, a_2, $a_{3(t)}$, a_4, $S_{(t)}$이고, 정현형의 변수는 w, $a_{3(s)}$, $S_{(s)}$이며 표 2.2.9.2과 같다. 여기서, $S_{(t)}$와 $S_{(s)}$는 각각 제형 및 정현형의 반파장 길이이다. 제형과 정현형의 공통된 변수는 w와 θ_c이며, θ_c는 초기접선각도이다.

표 2.2.9.2 Geometric notations of corrugated plates

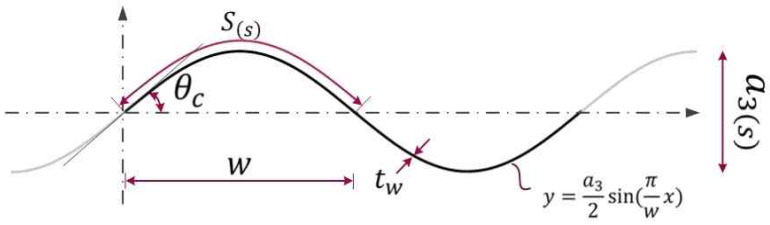
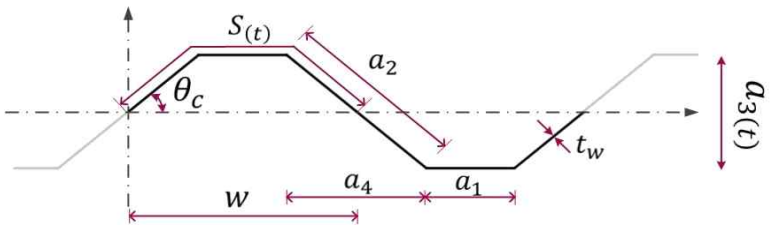
Shape	Geometric notation
Sinusoidal	
Trapezoidal	

표 2.2.9.3 Profiles of corrugated steel plates

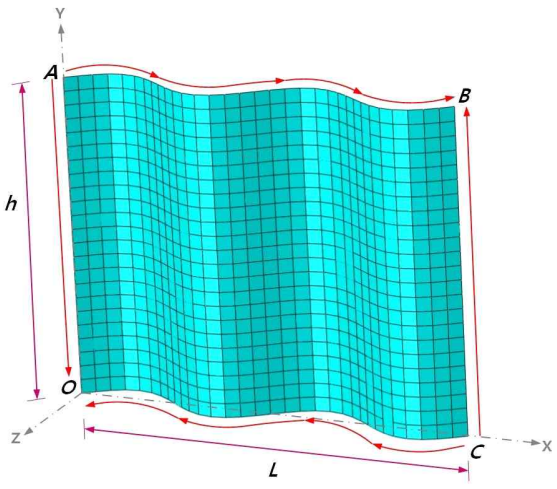
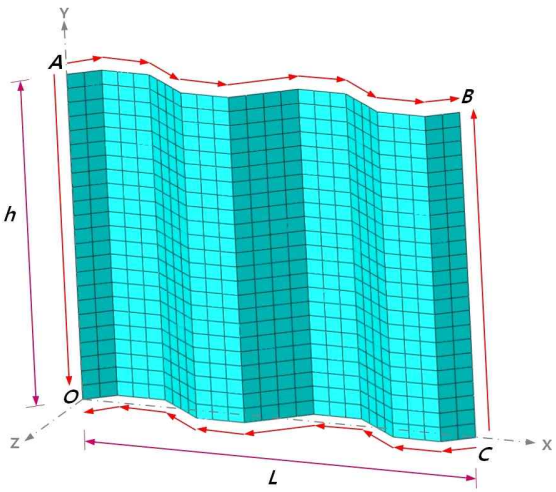
Sinusoidal	Trapezoidal
	

표 2.2.9.4 Parameters of analysis models

w	a			$S_{(t)\text{or}(S)}$	h	L
	$a_{3(s)}$	a_1	$a_{3(t)}$			
77.5	20	38.3	15.9	81	500	2015
	30		24.0	84	1,000	4030
	40		32.4	89	1,500	6045
116.25	20	58.1	15.7	118	500	2093
	30		23.8	121	1,000	3953
	40		31.9	124	1,500	6045
155	20	77.4	15.7	157	500	1860
	30		23.7	159	1,000	4030
	40		31.7	161	1,500	5890

unit : mm

(2) 유한요소해석에 의한 전단좌굴응력 계산방법

파형강판의 전단좌굴응력은 고유치해석을 통해 얻을 수 있으며, 표 2.2.9.3과 같이 유한요소로 주름강판을 모델링하여 해석을 수행한다. 이 때, 좌굴응력 산정식은 식(2.2.9.1)과 같고, 최소고유치인 1차 모드를 이용하여 유도된다.

$$\tau_f = \frac{\text{Eigenvalue}_{1^{st}\text{mode}} \times \text{Load(N/mm)}}{\text{thickness(mm)}} \tag{2.2.9.1}$$

하중은 순수전단 하에서 직선 복부판의 경계면을 따라 전단응력이 균일하게 분포한다고 가정되며, 파형강판의 전단좌굴에 대한 대부분의 연구에서 적용된 것이다. 이러한 가정은 정적재하실험연구에 의해서 사실로 검증되었다(Han, 2000). 해석에서 경계조건은 플랜지와 웨브가 단순지지와 고정지지의 중간상태인 탄성적 지지상태로 고려되는데, 파형 형상을 유지하기 위해 $\overline{AB}$, $\overline{OC}$모서리를 x축 방향으로 구속하여 적용하는 것을 반영한 것이다. 경계조건의 경우 조건에 따라 결과의 차이가 발생하며, 언급된 경계조건은 Yoo et al.(2013)의 문헌에서 설명된 가장 적합한 경계조건에 해당된다.

나. 해석결과

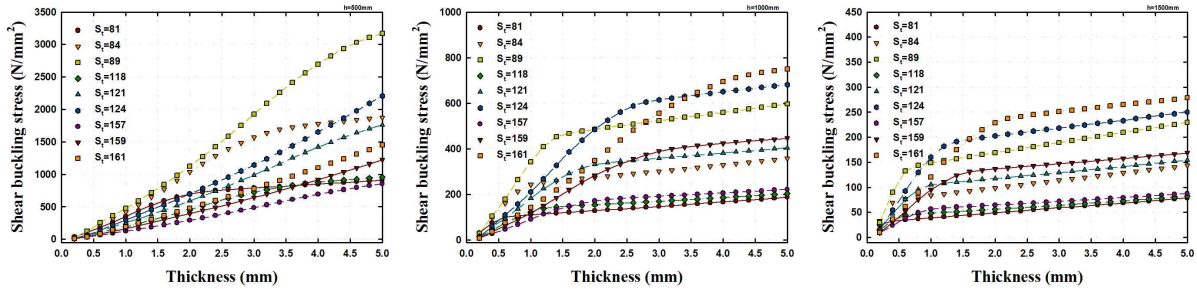
(1) 파형강판 해석모델

두 파형의 전단좌굴특성을 비교하기 위해 수행되는 유한요소해석은 ABAQUS를 이용하도록 하며, 파형강판의 전단좌굴 강도와 모드에 영향을 미치는 독립된 기하학적 변수는 판두께 t_w, 반파장의 길이 w, 수평 패널폭 a_1, 파고 a_3, 접선각도 θ_c이다. 정현형은 독일 Stahlbau - Kalender 2004(Pasternak, 2004)문헌에서 소개된 형상을 기준으로 변수를 결정하였으며, 제형 형상은 표 2.2.9.4과 같이 정현형의 초기접선각도와 반파장 곡선길이를 동일하게 적용한

변수를 이용하였다. 이것은 반파장길이 및 초기접선각도가 동일한 모델은 강재의 사용량이 동일한 상태라는 것을 의미한다. 해석대상모델에서 반파장 길이는 같지만 파고의 깊이 a_3는 형상에 따라 다르다. 모델에 이용된 a_3는 각각 20, 30, 40mm, 판높이 h는 500, 1000, 1500mm가 적용되었고, 반파장곡선길이 S에 대해 두께가 증가함에 따른 응력변화를 분석하였다. 두께의 범위는 0.2~5mm이다. 이상과 같이 설명한 모델에 대해서 동일한 길이 S ($S_{(s)}$와 $S_{(t)}$을 S로 같이 표기함)를 갖는 파형강판의 좌굴응력 및 형상을 비교하며, 모델의 파라메타는 표 2.2.9.4에 요약하였다.

(2) 두께변화에 따른 좌굴응력변화

그림 2.2.9.1에서 보는바와 같이 정현형 강판의 경우 두께가 증가함에 따라 전단좌굴응력은 증가하며, 일정한 증가이후에 감소한다. 이것은 얇은 두께에서 국부좌굴이, 두꺼운 두께에서는 전체좌굴이 나타나는 경향 때문이다(Shon, 2014). 제형의 경우에도 정현형 강판과 같이 유사한 경향이 분석되었다. 전단좌굴응력 증가율이 감소하는 구간에서 연성좌굴형상이 발생하는 것도 정현형에서 나타난 경향이다. 두께 증가에 따른 좌굴응력곡선에서 곡선의 증가율이 달라지는 시점이 가장 빠른 모델은 S=81mm모델이었다. 증가율이 달라지는 구간에 대해서 국부좌굴 영역은 S=89mm모델이, 전체좌굴영역은 S=161mm이 가장 크게 나타났다.



(a) h=500mm (b) h=1000mm (c) h=1500mm

그림 2.2.9.1 Buckling stress curve of trapezoidal models

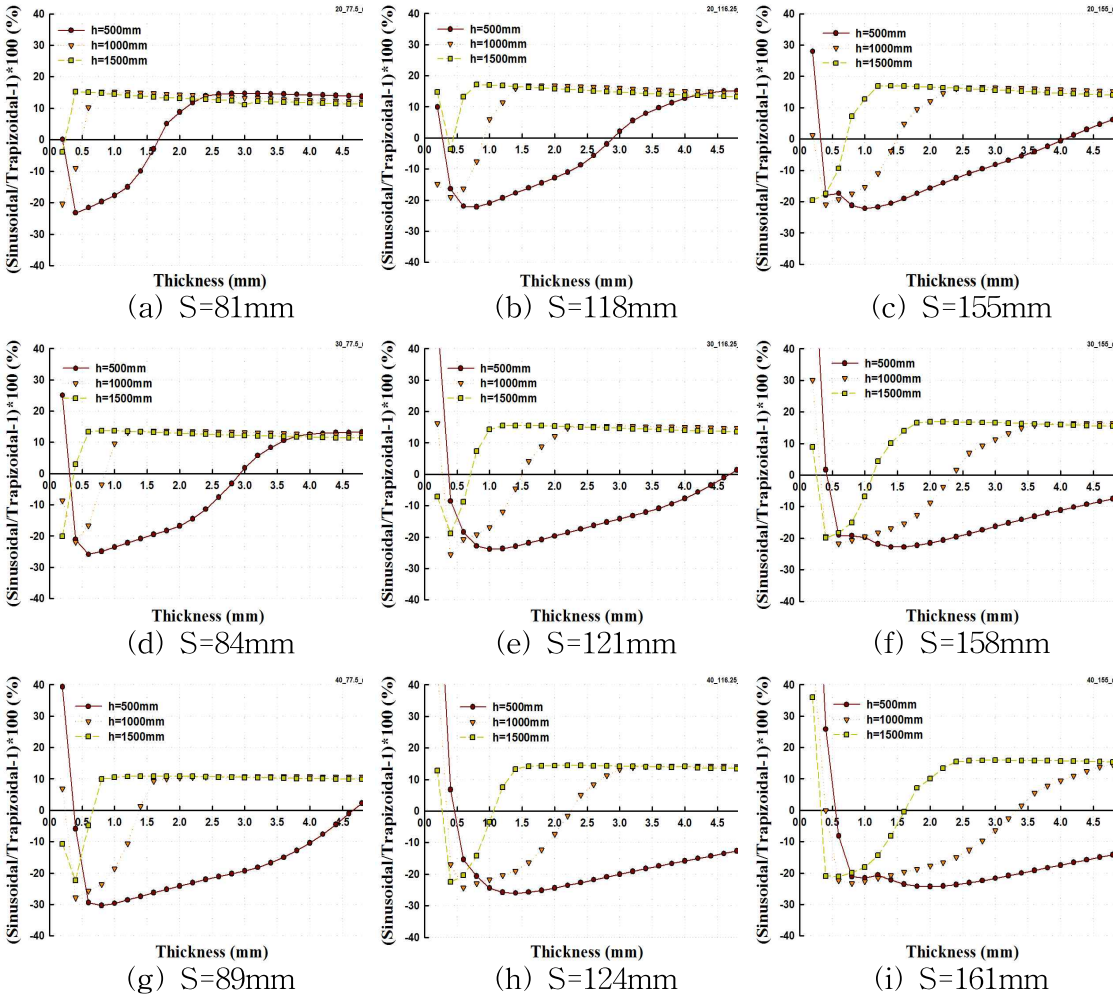
(3) 제형 및 정현형의 전단좌굴응력 비

표 2.2.9.5, 표 2.2.9.6 및 표 2.2.9.7은 각 형상별 27개의 모델간의 전단좌굴응력 비를 계산하였다. 여기서 정현형 좌굴응력(S)와 제형의 좌굴응력(T) 비({(S/T)-1}*100(%))를 γ로 표현하였으며 비율의 최대값을 γ_{max}로 표기하였다.

그림 2.2.9.2의 27개의 비율변화 곡선이 공통적으로 γ>0구간에서 두 형상에 따른 전단좌굴응력 차비의 변화 증가하다가 1%이내로 수렴한다. 또한 판높이(h)가 높을수록 얇은 판에서 비율변화의 수렴도가 빠르게 나타남을 확인할 수 있다.

그림 2.2.9.2에서 γ<0구간은 제형의 전단좌굴응력이 정현형의 전단좌굴응력보다 큰 구간이며, γ>0구간은 정현형의 전단좌굴응력이 제형의 전단좌굴응력보다 큰 구간이다. 표 2.2.9.5, 표 2.2.9.6 및 표 2.2.9.7의 γ<0구간에서 최대 30.27%, γ>0구간에서 최대 17.1%의 차이를 나

타낸다. 이는 γ<0구간의 얇은 강판에서 제형이 정현형의 전단좌굴응력보다 최대 30.27% 큰 좌굴응력을 갖으며 얇은 판에서 제형이 정현형보다 유리하다는 것을 의미한다. 이에 반해 γ>0구간에서 정현형이 제형의 전단좌굴응력보다 최대 17.1% 큰 좌굴응력을 갖으며 강판이 5mm에 가까워질수록 정현형이 제형보다 유리한 값을 갖는다.



(a) S=81mm (b) S=118mm (c) S=155mm
(d) S=84mm (e) S=121mm (f) S=158mm
(g) S=89mm (h) S=124mm (i) S=161mm

그림 2.2.9.2 γ of half wave curve length

표 2.2.9.5 γ_{max} of half wave curve length(S=81, 118, 155mm)

h	shape	S		
		81	118	155
500	Sinusoidal	14.71	15.16	7.40
	Trapezoidal	21.61	22.21	22.23
1000	Sinusoidal	15.14	16.84	16.49
	Trapezoidal	-	16.32	19.29
1500	Sinusoidal	15.10	17.10	16.96
	Trapezoidal	-	-	9.39

표 2.2.9.6 γ_{max} of half wave curve length(S=81, 121, 158mm)

h	shape	S		
		84	121	158
500	Sinusoidal	13.20	3.52	-
	Trapezoidal	25.87	23.87	22.83
1000	Sinusoidal	13.61	15.36	16.42
	Trapezoidal	16.65	20.74	21.71
1500	Sinusoidal	13.69	15.56	16.84
	Trapezoidal	-	8.79	18.32

표 2.2.9.7 γ_{max} of half wave curve length(S=89, 124, 161mm)

h	shape	S		
		89	124	161
500	Sinusoidal	4.69	-	-
	Trapezoidal	30.27	26.01	24.33
1000	Sinusoidal	10.83	14.22	15.05
	Trapezoidal	25.66	24.26	23.30
1500	Sinusoidal	10.89	14.41	15.89
	Trapezoidal	4.83	20.39	21.16

(4) 제형 및 정현형 좌굴응력 경향

본 논문에서는 파형강판의 좌굴응력과 좌굴형상의 경향을 파악하기 위해 형상파라메타 변수를 포함하는 이론적인 전체좌굴응력 및 국부좌굴응력식의 비를 이용하였다. 그림 2.2.9.4는 전체좌굴응력식과 국부좌굴응력식의 비에 따른 좌굴응력과 이론적인 응력의 비의 그래프이다. 수평축은 표 2.2.9.4의 형상을 표 2.2.9.1의 정현형 및 제형의 각각의 이론적인 응력식으로 계산하여 전체좌굴응력을 국부좌굴응력으로 나누어 로그 스케일로 표현하였다. 여기서 수평축의 이론적인 전체좌굴응력과 국부좌굴응력의 비(τ_g/τ_l)를 G/L로 표현하였으며 $0<G/L<10$의 구간만을 고려하였다. 수직축은 해석결과로부터 유도한 좌굴응력을 이론적인 전체좌굴응력과 국부좌굴응력 중 작은 값으로 나누어 나타낸 무차원 좌굴강도이다. 여기서 수직축의 응력비$FEM/\min(G,L)$로 표현하였다.

그림 2.2.9.4의 해석결과에서 G/L가 1보다 큰 구간은 이론상 국부좌굴이 발생할 가능성이 큰 구간이며, G/L가 1보다 작은 구간은 이론상 전체좌굴이 발생한 가능성이 큰 구간이다.

제형과 정현형이 공통적으로 전체좌굴범위에 더 많은 실험체가 존재하며 판의 높이별로 그래프를 비교하였을 때 판높이(h)가 높아질수록 해석과 이론값 차이가 증가하고 이론상의 국부좌굴 범위에 들어서는 형상이 줄어든다.

G/L가 1보다 큰 구간에서 그림 2.2.9.4(a)의 $FEM/\min(G,L)$이 제형강판의 경우 최대 1.6이며 정현형 강판의 경우 최대 1.9이다. 이는 해석결과로부터 계산한 좌굴응력이 이론적 전체좌굴응력에 비해 제형강판의 경우 최대 160%, 정현형의 경우 최대 190% 큰 좌굴응력을 나타낸다. 그림 2.2.9.4(b)에서 $FEM/\min(G,L)$이 제형강판의 경우 최대 1.5, 정현형 강판의 경우 최대 1.7이며 그림 2.2.9.4(c)에서 $FEM/\min(G,L)$이 제형강판의 경우 최대 1.4, 정현형 강판의 경우 최대 1.6이다. 그림 2.2.9.4(d)에서 제형과 정현형이 각각 최대 1.7, 1.8, 그림 2.2.9.4(e)는 1.6, 1.7, 그림 2.2.9.4(f)는 1.6, 1.6, 그림 2.2.9.4(g)는 1.9, 1.9, 그림 2.2.9.4(h)는 1.7, 1.6, 그림 2.2.9.4(i)는 1.6, 1.6가 나타났다.

G/L가 1보다 작은 구간에서 그림 2.2.9.4(a)의 $FEM/\min(G,L)$이 제형강판의 경우 최대 2.1이며 정현형의 경우 최대 2.1이다. 이는 해석결과로부터 계산한 좌굴응력이 이론적 국부좌굴응력에 비해 제형과 정현형이 최대 210% 큰 좌굴응력을 나타낸다. 그림 2.2.9.4(b)에서 $FEM/\min(G,L)$이 제형 강판과 정현형이 각각 최대 2.1, 2.2, 그림 2.2.9.4(c)는 2.1, 2.2, 그림 2.2.9.4(d)는 2.1, 2.1, 그림 2.2.9.4(e)는 2.1, 2.1, 그림 2.2.9.4(f)는 2.1, 2.1, 그림 2.2.9.4(g)는 2.1, 2.1, 그림 2.2.9.4(h)는 2.1, 2.1, 그림 2.2.9.4(i)는 2.1, 2.1이 나타난다. 해석결과 G/L가 1보다 큰 구간에서는 해석결과로부터 계산한 좌굴응력이 이론적 좌굴응력에 비해 1.5배에서 2.0배 차이를 나타내며 G/L가 1보다 작은 구간에서는 해석결과로부터 계산한 좌굴응력이 이론적 좌굴응력에 비해 약 2.0배정도 차이를 나타낸다. 이러한 차이는 이론적인 좌굴응력의 계산에서 좌굴계수를 안전 측으로 가정하였기 때문이다(Gill et al., 2004).

표 2.2.9.4의 형상을 $0.2 \le t \le 5.0$범위에서 그림 2.2.9.3과 같이 국부, 전체, 연성좌굴 형상별로 나누어 비교하였다. 해석결과 정현형 형상의 경우 연성구간의 범위가 제형보다 좁고 특히 국부좌굴경향의 연성좌굴의 범위가 제형에서 길게 나타남을 확인 할 수 있다.



(a) Local buckling(t=0.8mm) (b) interactive buckling(t=2mm) (c) Global buckling(t=3.2mm)

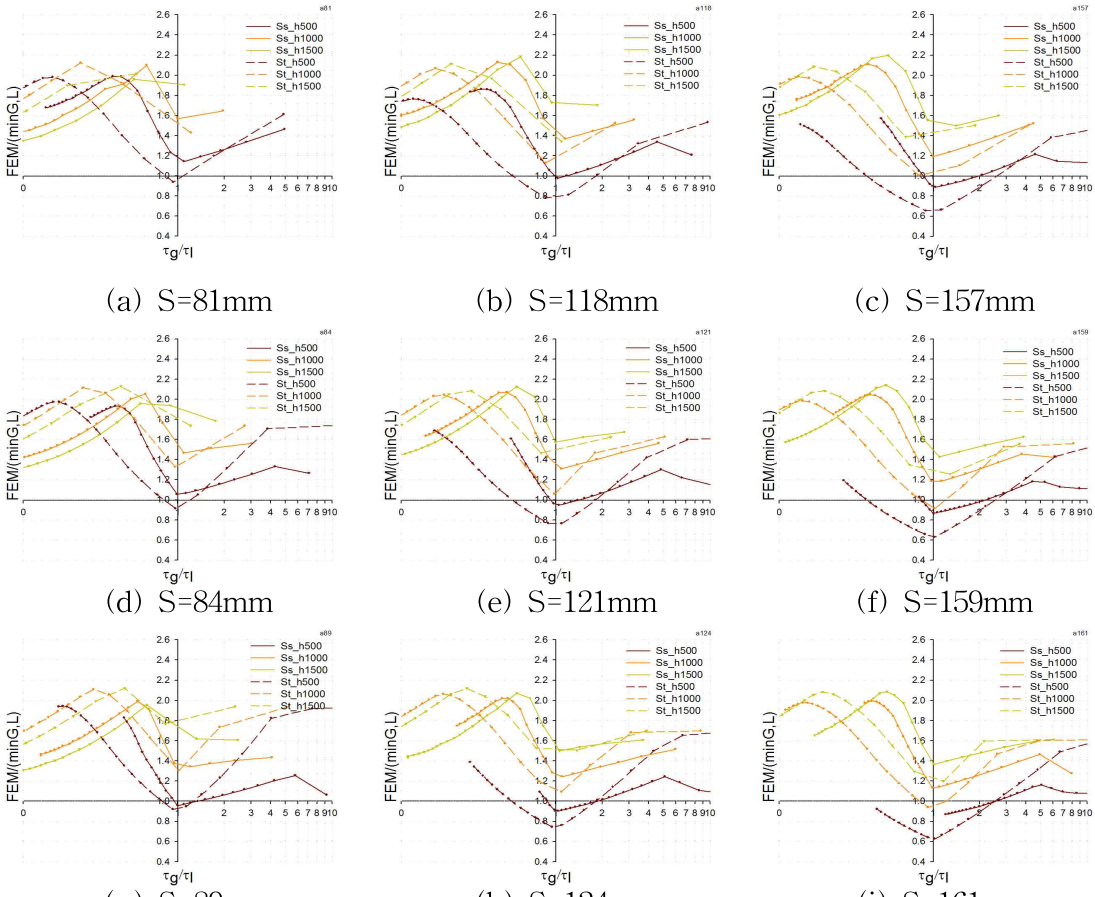
그림 2.2.9.3 Sinusoidal mode shape(S ≒81mm, h=500mm)

그림 2.2.9.3를 그림 2.2.9.4의 좌굴응력과 비교하였을 때 제형의 경우 전체좌굴응력과 국부좌굴응력이 같아지는 $G/L=1$의 수직축을 중심으로 좌우에서 연성좌굴이 발생하고 G/L가 0에 가까울수록 전체좌굴이 발생하며 G/L가 10에 가까울수록 국부좌굴이 발생하게 된다. 그러나 정현형의 경우 이론적으로 전체좌굴이 발생할 가능성이 큰 $G/L<1$구간에서 국부 좌굴의 형상이 발생한다. 이는 기존의 제형을 바탕으로 만들어진 정현형의 식으로 정현형의 좌굴모드를 예측하기 어려움을 예상할 수 있다.

그림 2.2.9.4의 $G/L>1$, $G/L<1$, $G/L \approx 1$구간에 발생하는 3개의 변곡점과 형상간의 연관성

을 보았을 때 제형 및 정현형이 공통으로 좌측의 변곡점을 전후로 연성과 전체좌굴이 뚜렷하게 구분된다. 또한 $G/L<1$구간에서 좌굴응력과 이론적인 응력의 비($FEM/\min(G,L)$)의 차이가 가장 큰 점이 변곡점이 발생하는 점으로 $FEM/\min(G,L)$가 약 2배 차이가 날 때 연성구간에서 전체좌굴로 넘어가는 경향을 예측할 수 있다. 주로 정현형의 국부좌굴범위에서 발생한 변곡점의 경우 변곡점이 발생한 이후인 10에 가까울수록 좌굴의 패턴을 확인하기에 명확하지 않은 형상이 발생하였다. 이는 앞에서 경향이 일정하지 않는 $0.2 \le t \le 0.6$의 구간에 해당한다.

연성좌굴의 범위를 비교하였을 때 제형의 연성구간이 정현형의 연성구간에 비해 길게 나타났으며 제형의 경우 국부좌굴에 대한 연성구간이 전체좌굴에 대한 연성좌굴구간보다 길다.



(a) S=81mm (b) S=118mm (c) S=157mm

(d) S=84mm (e) S=121mm (f) S=159mm

(g) S=89mm (h) S=124mm (i) S=161mm

그림 2.2.9.4 Influence of theoretical equation on shear buckling stress

다. 주름파형 형상별 연성좌굴구간의 특성과 예측범위

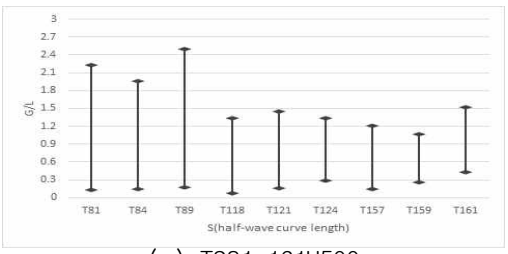
주름파형 형상별 연구에서 연성좌굴구간에 대한 좌굴응력의 평가에서 매우 복잡하다. 가장 낮은 차수의 연성좌굴응력의 평가는 비교적 단순한 표현이 가능하지만 일정한 형상의 범위에서만 감소계수를 적용한 결과와 일치하게 된다. 본 모델에서는 정현형파와 제형파와의 등가한 모델에서 나타나는 연성범위의 예측과 차이점을 다루고자 한다. 이를 위해서 표 2.2.9.8

과 같은 일람표의 해석모델을 채택하기로 하며, 정현형파 형상은 독일의 Stahlbau-Kalender(2004)의 문헌에서 소개되어진 형상을 기준으로 독립된 형상파라메타인 주름강판 두께, 파고, 반파장의 길이(t_w, a_3, w)를 세분화한 27가지 해석모델이다.

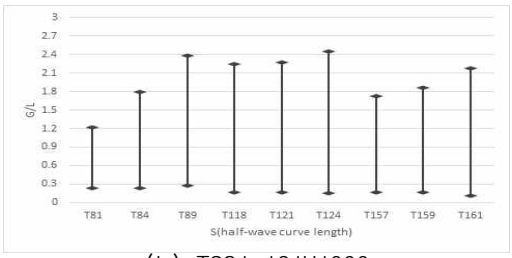
표 2.2.9.8 해석대상모델의 파라메타와 모델명칭 일람표

w	a			$S_{(t)\text{or}\,(S)}$	h	L
	$a_{3(s)}$	a_1	$a_{3(t)}$			
77.5	20	38.3	15.9	81	500	2015
	30		24.0	84	1,000	4030
	40		32.4	89	1,500	6045
116.25	20	58.1	15.7	118	500	2093
	30		23.8	121	1,000	3953
	40		31.9	124	1,500	6045
155	20	77.4	15.7	157	500	1860
	30		23.7	159	1,000	4030
	40		31.7	161	1,500	5890

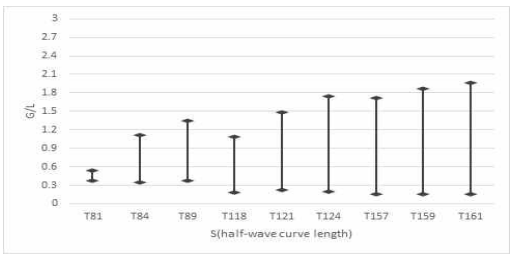
unit : mm
Designation : SS00H00
└ 평판높이 : 00mm
└ 반파장 곡선길이 : 00mm
└ TYPE (S : Sinusoidal , T : Trapezoidal)



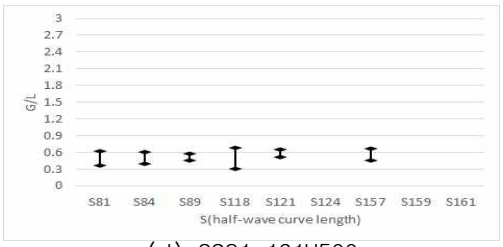
(a) TS81-161H500



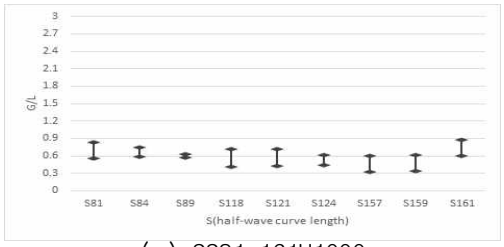
(b) TS81-161H1000



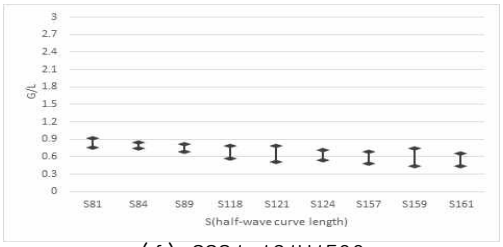
(c) TS81-161H1500



(d) SS81-161H500



(e) SS81-161H1000



(f) SS81-161H1500

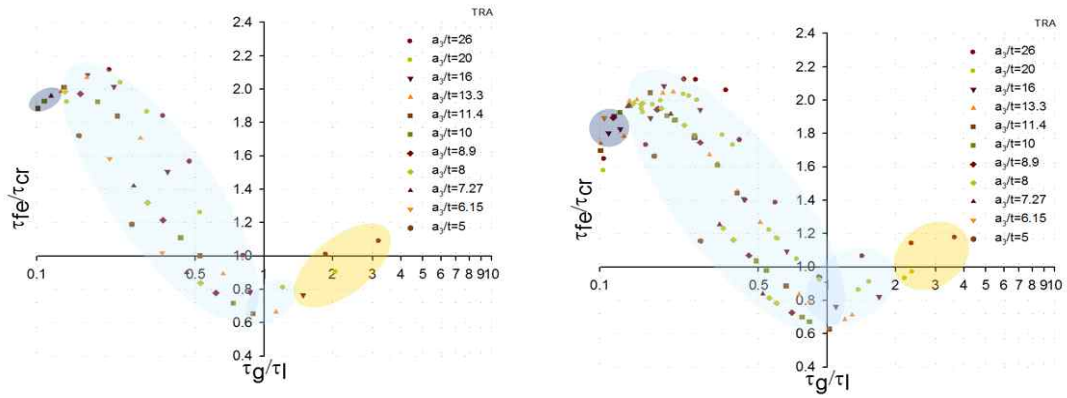
그림 2.2.9.5 주름파형 형상별 연성좌굴 발생범위

그림 2.2.9.5는 대상 예제의 연성좌굴구간을 G/L을 기준으로 구분한 결과이다. 해석결과,

제형의 경우 연성좌굴구간은 0.12≤G/L≤2.45이고 정현형의 연성좌굴구간은 0.31≤G/L≤0.92로 제형의 연성좌굴구간이 정현형의 연성좌굴구간보다 길게 나타났다. 결과를 기존 이론식 DASt-R.015(1990)의 규준에서 연성좌굴 구간인 0.5≤G/L≤2.0과 비교하였을 때, 제형의 연성구간은 기존의 이론식과 유사하게 G/L=1인 수평축의 상·하로 나타나지만 연성좌굴의 범위는 더 넓게 나타났다. 정현형파 모델에 대한 연성좌굴구간의 경우 대부분 G/L<1범위에서 발생하며 이는 기존의 제형을 바탕으로 만들어진 정현형파의 식으로 정현형의 좌굴모드를 예측하기 어려움을 예상할 수 있다.

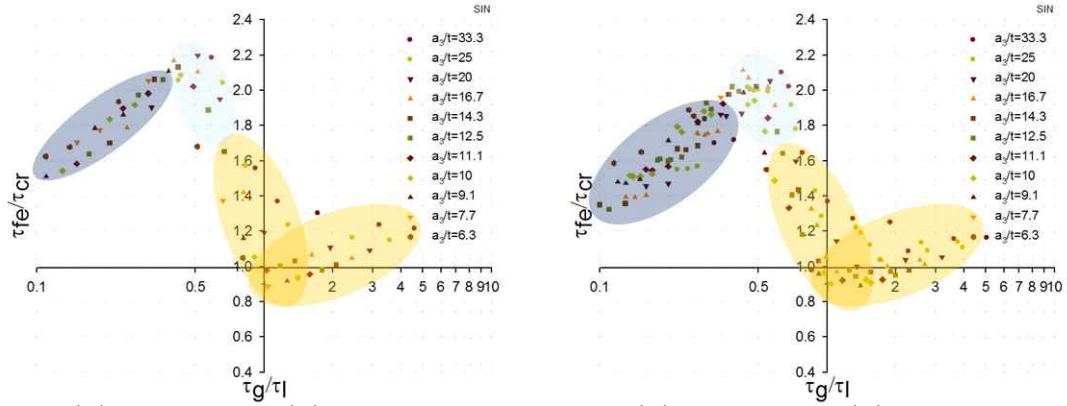
라. 좌굴변수(a_3/t)에 따른 좌굴형상 특성 비교

두께와 파형에 대한 좌굴변수 a_3/t에 대한 좌굴경향성을 분석하기 위해서 a_3/t와 a_1/h가 파형강판의 전단거동에 미치는 영향을 제형 형상파라메타 a_1과 a_2의 관계를 $a_1 = a_2$와 $a_1 \neq a_2$인 경우로 분리하여 차이를 분석하도록 한다. 그림 2.2.9.5(a)은 a_1과 a_2의 차이가 3%이하인 모델로 TS118H500, TS118H1000, TS118H1500, TS157H500, TS157H1000, TS157H1500의 6개에 대해서 a_3/t에 따른 해석결과와 이론적인 좌굴응력을 비교한 것이다. 또한 그림 2.2.9.5(b)은 a_1과 a_2의 차이가 3%이하인 모델을 제외한 24개의 모델의 a_1과 a_2에 따른 해석결과를 비교한 그래프이다. 결과그림에서 볼 때, $a_1 = a_2$와 $a_1 \neq a_2$의 경향성 분포는 유사한 경향을 보이며, 국부, 연성, 전체좌굴 형상별로 나누어 비교하였을 경우 노란색구간인 국부좌굴구간, 하늘색구간이 연성좌굴구간, 남색구간인 전체좌굴구간으로 유사한 범위에서 현상이 나타남을 확인 할 수 있다. 그림 2.2.9.5와 마찬가지로 그림 2.2.9.6의 결과는 동일한 패턴으로 정현형파 모델의 좌굴경향성을 분석한 것이다. 그림 2.2.9.6(a)도 6개의 모델과 동일한 S를 갖는 모델인 SS118H500, SS118H1000, SS118H1500, SS157H500, SS157H1000, SS157H1500의 6개 모델에 대해 a_3/t에 따른 좌굴경향성을 나타낸 그래프이다. 그림 2.2.9.6(b)도 동일한 S을 갖는 24개의 모델의 a_3/t에 따른 좌굴경향성 결과이며, 좌굴 경향성에 대한 범위의 분포는 유사한 경향으로 나타난다.



(a) $a_1 = a_2$ (b) $a_1 \neq a_2$

그림 2.2.9.6 제형파형 형상에 관한 전단좌굴응력의 이론식 영향



(a) 그림 2.2.9.6(a)와 동일한 S를 갖는 형상

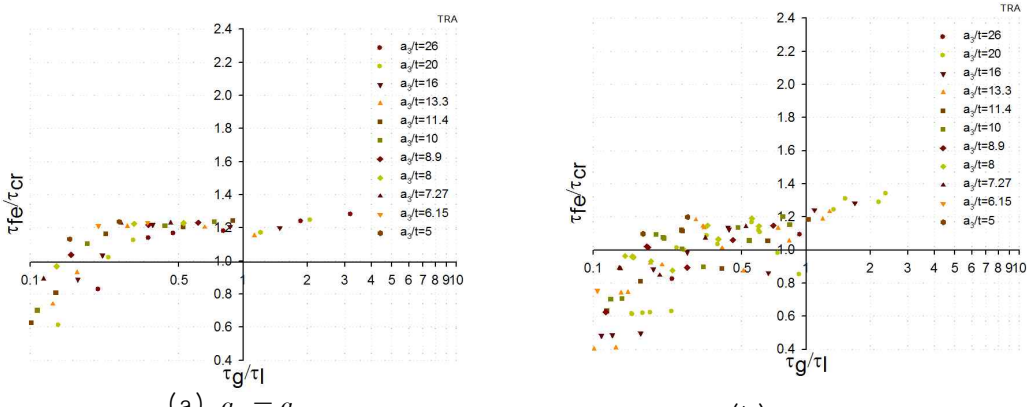
(b) 그림 2.2.9.6(b)와 동일한 S를 갖는 형상

그림 2.2.9.7 제형파형 형상에 관한 전단좌굴응력의 이론식 영향

이상의 해석결과에서 연성구간을 비교하였을 때 제형의 연성구간은 정현형파보다 넓게 나타나며, 정현형의 연성구간은 0.1<G/L<1.0사이 구간이고 G/L가 0.1에 가까울수록 선형적 증가경향을 보인다. 따라서 기존의 이론식에 의해 연성좌굴범위에서 연성좌굴로 인한 강도 감소는 예상할 수 없다. 제형과 정현형파가 공통적으로 전체좌굴과 연성좌굴이 나타나는 구간에서 이론식의 값이 과소평가 된다. 따라서 이에 대한 강도수정계수가 필요하며, Yi et al.(2007)에서 회귀분석을 통해 제안한 강도수정계수를 이용하여 제형 및 정현형의 좌굴경향성을 그림 2.2.9.8, 2.2.9.9에 나타내었다. 여기서 Yi et al.(2007)에서 제안한 강도 수정계수는 다음 식과 같다.

전체좌굴모드: $0.16(\frac{a_1}{h})^{-1.587}(\frac{a_3}{t})^{-0.732}$ (2.2.9.2)

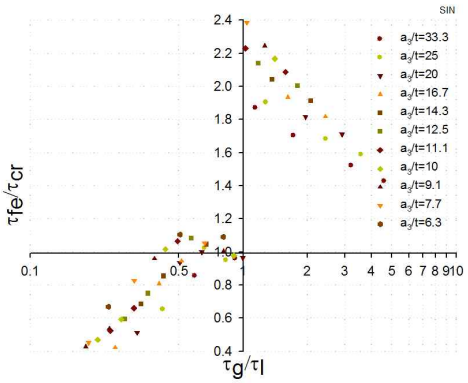
국부좌굴모드: $0.18(\frac{a_1}{h})^{1.55}(\frac{a_3}{t})^{0.564}$ (2.2.9.3)



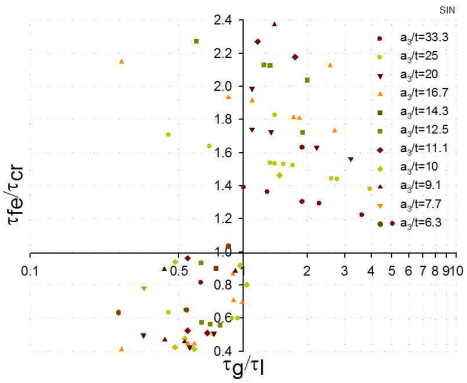
(a) $a_1 = a_2$

(b) $a_1 \neq a_2$

그림 2.2.9.8 강도보정계수를 사용한 전단좌굴응력의 제형 이론식 영향



(a) 그림 2.2.9.8(a)와 동일한 S를 갖는 형상



(b) 그림 2.2.9.8(b)와 동일한 S를 갖는 형상

그림 2.2.9.9 전단좌굴응력의 정현형파 이론식 영향

그림 2.2.9.8(a)는 그림 2.2.9.6(a)의 모델에 강도수정계수를 이용하여 수정된 좌굴경향성 그래프이다. 해석결과 연성좌굴구간 중 이론식이 과소평가된 부분에서 강소수정계수를 적용하였을 때 해석결과와 좌굴강도가 약 1.2배차이가 났으나 전체좌굴이 발생하는 구간(G/L:=0.1)에서는 강소수정계수에 의해 최소 0.6배 차이가 난다. 그림 2.2.9.8(b)도 강도수정계수를 이용하여 수정된 좌굴경향성 그래프이며, 그림 2.2.9.8(a)와 유사하게 나타났으며 $a_1 = a_2$의 모델을 통해 $a_1 \neq a_2$의 좌굴경향성을 예측할 수 있으며 해석 값(τ_{fem})이 이론 값($\min(\tau_{cr,G}, \tau_{cr,L})$ 에 비해 안전 측에 도달한다.

그림 2.2.9.9는 그림 2.2.9.8에 적용한 강도수정계수를 이용하여 수정된 좌굴경향성 그래프이며, 그림 2.2.9.9(a)의 수정된 좌굴경향성 결과, 일정한 곡선의 경향을 보인다. 기존의 좌굴경향성 그래프보다 국부좌굴이 발생하는 구간에서는 이론식이 과소평가되고 전체좌굴이 발생하는 구간에서는 이론식이 과대평가된다. 그림 2.2.9.9(b)의 수정된 좌굴경향성 결과는 그림 2.2.9.9(a)와 같이 국부좌굴이 발생하는 구간에서 이론식이 과소평가되고 전체좌굴이 발생하는 구간에서는 이론식이 과대평가된다. 그러나 그림 2.2.9.9(a)와는 달리 일정한 경향이 보이지 않으며 그 양상을 예측하기가 어렵다. 이상의 해석결과로부터 정현형의 이론식이 제형의 이론식을 바탕으로 만들어졌지만 제형에 적용되어 과대 및 과소평가를 줄여주는 강도수정계수를 정현형파에 동일하게 적용할 경우 제형의 수정된 좌굴경향성과 다른 경향을 보인다. 또한 기존의 좌굴경향성과 비교하였을 때 수정된 경향성이 보정되지 않았으며 그 차이가 더 크게 나타난다. 따라서 제형에 대한 강도수정계수는 정현형파에 적절하지 않으며 정현형파에 적절한 강도수정계수를 제안해야 한다.

마. 제형 및 정현형파 주름강판의 등가형상모델의 고찰

반파장곡선길이(S)와 접선각도(Θ)가 동일한 제형 및 정현형의 전단좌굴강도 비교에 대한 해석적 연구의 결과는 파형 강판의 구조적 특성을 분석하기 위하여 파형이 가지는 좌굴특성을 여러 형상 파라메타를 대상으로 평가한 것으로 검토되었고, 이를 위해 파형강판의 전단좌굴에 영향을 미치는 변수를 선정하였다. 탄성좌굴해석을 통해 형상별 전단좌굴응력과 형상과

의 관계를 분석한 결과 다양한 특성을 파악할 수 있었다.

우선, 두께변화에 따른 좌굴응력 곡선은 판-두께의 증가에 따라 국부좌굴, 연성좌굴, 전체좌굴 순으로 좌굴경향이 변화하며, 파고(a_3)가 얕을수록 얇은 판에서 국부좌굴에서 연성좌굴로 변화한다. 반파장의 길이(S)가 길어질수록 연성좌굴의 범위가 늘어남을 고유좌굴모드의 형상을 통해 예측할 수 있다. 또한 단면파라메타 높이(h)가 증가할수록, w 및 $a_{3(t)\mathrm{or}\,(s)}$가 감소할수록 얇은 판에서 전체좌굴이 지배좌굴모드가 되며, 형상파라메타가 미치는 영향이 매우 크다.

두 형상에 따른 전단좌굴응력 차비와 거동을 비교한 결과, 제형 및 정현형의 동일한 S을 갖는 모델을 비교하였을 때 교차점 전 제형 형상의 좌굴응력이 최대 29.4% 크게 나타났으며 교차점 후 정현형파 형상의 좌굴응력이 최대 16.2% 크게 나타났다. 이러한 결과로부터 얇은 판에서 발생하는 국부좌굴에 제형이 강하고 두꺼운 판에서 발생하는 전체좌굴에 정현형파가 강함을 예상할 수 있다. 두형상의 좌굴모드를 비교하였을 때 공통적으로 판-두께가 증가함에 따라 국부좌굴에서 전체좌굴형태로 넘어가는 양상을 보이며 반파장곡선길이(S)가 클수록 연성좌굴구간이 넓다.

두께에 따른 좌굴경향성은 이론상 전체좌굴범위에 모델이 많이 존재하며 판의 높이(h)가 높아질수록 해석과 이론값 차이가 증가한다. G/L이 1보다 큰 구간에서 해석으로부터 계산된 좌굴응력이 이론적 전체좌굴응력에 비해 제형은 최대 190%, 정현형파 주름강판은 최대 190% 큰 좌굴응력을 나타낸다. G/L이 1보다 작은 구간에서 계산된 좌굴응력이 이론적 국부좌굴응력에 비해 제형은 최대 210%, 정현형파는 최대 220% 큰 좌굴응력을 보인다. 이러한 차이는 이론적 좌굴응력 계산에서 좌굴계수를 안전한 범위인 1.0으로 가정하였기 때문이다.

두 파형형상의 연성좌굴 발생 구간을 G/L을 기준으로 구분하였을 때 제형의 경우 G/L=1의 수평축 기준으로 상하인 $0.12 \leq G/L \leq 2.45$이고 정현형의 연성좌굴 범위는$G/L<1$인 $0.31 \leq G/L \leq 0.92$로 나타났으며 이는 제형의 경우 기존의 연성좌굴 이론식으로 좌굴모드의 범위를 예측할 수 있으나 정현형의 경우 좌굴모드를 예측하기 어렵다.

좌굴변수에 따른 좌굴경향성을 분석한 결과, a_1=a_2와 a_1≠a_2일 때 제형의 좌굴경향성은 유사하게 나타나며 동일한 S를 갖는 정현형의 경우도 유사한 경향을 보인다. 경향성 결과에 기존에 제안된 강도수정계수를 이용하여 수정된 좌굴경향성을 분석한 결과 제형의 경우 이론상 전체좌굴구간에서 최대 1.9배로 이론값이 과소평가되는 구간이 최대 1.3배로 보정되었다. 제형과 동일한 강도수정계수를 정현형파에 이용한 결과의 새로운 경향성 그래프가 기존 그래프대비 보정되지 않았으며 그 차이가 더 크게 나타났다. 이에 따라 정현형파에 적절한 강도수정계수의 제안이 필요하다고 판단된다.

10. 주름웨브 부재의 단면성질 계산 및 구조설계 프로그램

파형강판의 형상은 주로 제형, 정현형파 또는 원형의 형상으로 가공되어 구조부재로 활용되어 왔다. 사용위치에 따라 주름방향을 다양하게 설정할 수 있는 장점과 우월한 전단강성은 비행기 동체에서부터 교량 및 건축물에 이르기까지 다양한 구조물에 적용되었으며, 유럽의 경우 다양한 설계기준이 연구되었다. 플레이트거더에서 스티프터의 역할을 담당할 수 있는 박판의 주름웨브는 전단력만을 부담하고, 주름방향으로의 변형에 유연성을 주어 이방성재료와 같이 취급할 수 있었고, 높은 전단강성을 갖는 파형강판을 사용한 부재가 일반 플레이트거더에 비해 상부자중을 30~60%정도 감소시킬 수 있기 때문에 경제적인 부재로 많이 인식되었다. 그러나 파형강판은 기하학적 형상으로 인하여 강성을 정의하고 거동을 예측하는데 매우 복잡한 과정과 좌굴문제를 해결해야만 안전한 설계가 가능하다. 본 절에서는 이러한 주름웨브를 갖는 부재의 설계방법에 대해서 알아보도록 한다. 우선 주름웨브의 전단강성을 정의하는 방법에 대해서 연구자들에 의해서 제안되고 규준에 채택되어온 이론적인 배경과 탄성전단좌굴응력의 계산식에 대해서 설명하도록 한다. 이것은 직교이방성 재료로 취급하여 결정하는 전체좌굴의 이론과 국부좌굴로 설명되는 주름내부의 요철모양의 좌굴 응력과 계산방법에 대해서 다양한 식들을 기술하는 것으로 매우 다양한 연구자들의 견해를 살펴볼 수 있다. 또한 연성좌굴에서 경향성 분석을 위해서 제시되는 이론식에 대해서 기술하도록 한다. 다음으로 주름웨브를 갖는 보 부재의 일정한 형상에 대한 단면성능을 계산하는 과정과 계산프로그램 매뉴얼을 기술하고, 유럽규준을 바탕으로 구조설계가 가능한 프로그램에 대해서 다루도록 한다.

가. 전단좌굴에 대한 설계기준과 이론식

탄성전단좌굴이론식은 주로 제형 강판을 대상으로 연구가 진행되어왔으며, 국부좌굴형상, 전체좌굴형상, 연성좌굴형상의 이론식으로 나누어 각각의 좌굴모드별로 강도를 결정하였다. 그러나 곡선주름인 정현형의 경우에 있어서 좌굴모드별 강도의 결정은 어려움이 많아 따른다. 탄성국부좌굴은 주름강판의 하나의 주름 내에서 발생하는 것을 의미하므로 탄성국부좌굴응력 계산식은 하나의 주름에 인접해 있는 경계조건에 의해 결정된다는 가정 하에 기존의 평판 전단좌굴응력 이론식을 적용한다. 국부좌굴응력은 각 주름의 경계조건에 의해 사변 단순지지, 장변단순지지-단변 고정지지, 장변고정지지-단변 단순지지, 사변 고정지지로 나누어 국부좌굴계수가 결정된다. 이러한 이론을 바탕으로 표 2.2.10.1과 같이 Abbas, El-Matwally, Bryan 등의 연구에서 다양한 경계조건을 적용한 결과를 얻을 수 있었다.

주름강판은 주름방향에 따라 강성이 다르므로 직교이방성 재료로 고려되어야한다. 좌굴응력 이론식의 연구에서 Easley는 파형강판을 직교이방성판으로 가정하여 Ritz-Energy Method를 이용하여 제안한 식을 기본적으로 사용하지만 각각의 연구자들에 의해 휨 강성 산정방법이 다양하게 제시된다. 전체좌굴응력은 경계조건에 의해 사변 단순지지, 사변 고정지지로 나누어 좌굴계수가 결정되며, Easley의 식을 바탕으로 Abbas는 휨 강성 대신 무차원의 계수를 이용하여 최적단면을 찾는 방법을 제안하였으며, Bryan은 재료의 비탄성을 고려

하지 않았으며, El-Matwally는 탄성만을 고려하고 항복 강도를 연성좌굴 강도에 포함시키는 방법으로 고려하는 등 다양한 연구가 진행되었다. 이외 표 2.2.10.2와 같이 다양한 연구자에 의해 전체좌굴에 대한 이론식이 제안되었으며 정현형파에 대한 전체좌굴응력 이론식은 표 2.2.10.2의 EN1993-1-5에서 제형과 등가의 이론식이 제안되었다.

표 2.2.10.1 주름강판의 국부좌굴에 관한 전단좌굴응력 이론식

Elastic local buckling stress		B.C.		Buckling factor(k_l)
		Long	Short	
$\tau_{cr,L} = k_L \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)}(\frac{t}{a})^2$ For sinusoidal, a=S(s) For trapezoidal, $a = \max(a_1, a_2)$	Theodore V. G.	S.S.	S.S.	$5.34+4(a/h)^2$
		S.S.	Fixed	$5.34+2.31(a/h)-3.44(a/h)^2+8.39(a/h)^3$
		Fixed	S.S.	$8.98+5.61(a/h)^2-1.99(a/h)^3$
		Fixed	Fixed	$8.98+5.6(a/h)^2$
	Japan	S.S.	S.S.	$5.34+4(a/h)^2$
	Abbas	S.S.	S.S.	$5.34, h \gg a$
	El-Matwally	S.S.	Fixed	(concrete) $5.34+2.31(a/h)-3.44(a/h)^2+8.39(a/h)^3$
		S.S.	S.S.	(steel flange) $5.34+4(a/h)^2$
	Bryan	S.S.	S.S.	$5.34, k_f = 0.88$

표 2.2.10.2 주름강판의 전체좌굴에 관한 전단좌굴응력 이론식

Researcher	B.C.	Global factor(k_g)	Elastic global buckling stress
Easley & McFarland	S.S.	-	$\frac{D_x^{1/4} D_y^{3/4}}{h^2}$
Bergmann & Reissner	S.S.	-	$4\lambda \frac{D_x^{1/4} D_y^{3/4}}{h^2}$, $\theta = 2\frac{(D_x D_y)^{1/2}}{D_{xy}}$, $\phi = \frac{h}{L}(\frac{D_x}{D_y})^{1/2}$
Design manual of Japan	S.S.	$\beta = 1.0$	$36\beta \frac{(EI_y)^{1/4}(EI_x)^{3/4}}{th^2}$, $I_x = t^3(\delta^2+1)/6\eta$, $I_y = t^3/[12(1-\nu^2)]$ $\delta = a_{3(t)}/t$, , $\eta = (a_1+a_4)/(a_2+a_{3(t)})$
Elgaaly	Fixed	$k_g = 59.2$	$k_g \frac{D_y^{1/4} D_x^{3/4}}{th^2}$, $D_x = \frac{EI_x}{c}$, $D_y = \frac{c}{s}(\frac{Et^3}{12})$, $I_x = 2a_1 t(\frac{a_{3(t)}}{2})^2 + \frac{td^3}{6\sin\theta_c}$ $s = 2(a_1+a_2)$, $c = 2(a_1+a_4) = 2(a_1+a_2\cos\theta_c)$
Abbas	S.S.	$k_g = 31.6$	$k_g \frac{Et^{1/2}a_1^{3/2}}{12h^2} F(\theta_c, \beta)$, $F(\theta_c,\beta) = \sqrt{\frac{(1+\beta)\sin^3\theta_c}{\beta+\cos\theta_c}} \left\{\frac{3\beta+1}{\beta^2(\beta+1)}\right\}^{3/4}$ $\beta = a_1/a_2$

El-Metwally	Fixed	$k_g = 68.4$	$k_g \frac{D_y^{1/4} D_x^{3/4}}{th^2}$, $D_x = \frac{EI_x}{c}$, $D_y = \frac{c}{s}(\frac{Et^3}{12})$, $I_x = 2a_1 t(\frac{a_{3(t)}}{2})^2 + \frac{td^3}{6\sin\theta}$ $s = 2(a_1 + a_2)$, $c = 2(a_1 + a_4) = 2(a_1 + a_2\cos\theta)$
Bryan	S.S.	$k_g = 32.4$	$k_g \frac{D_y^{1/4} D_x^{3/4}}{th^2}$, $D_x = \frac{EI_x}{c}$, $D_y = \frac{c}{s}(\frac{Et^3}{12})$, $I_x = 2a_1 t(\frac{a_{3(t)}}{2})^2 + \frac{td^3}{6\sin\theta}$ $s = 2(a_1 + a_2)$, $c = 2(a_1 + a_4) = 2(a_1 + a_2\cos\theta)$
EN1993-1-5	S.S.	$\beta = 0.9$	$\tau_{cr,g} = 36\beta \frac{D_x^{1/4} D_y^{3/4}}{th^2}$, $D_x = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \frac{w}{S_{(s)}}$, $D_y = \frac{EI_y}{w}$, $I_x = \int_0^w \left[\frac{t_w^3}{12} + t_w \left\{ \frac{a_3}{2} sin(\frac{\pi}{w} x) \right\}^2 \right] dx$

표 2.2.10.3 주름강판의 연성좌굴에 관한 전단좌굴응력 이론식

Researcher	Elastic Interactive buckling stress	Design method
Design manual of Japan	$\frac{1}{\tau_{cr,I}^4} = \frac{1}{\tau_{cr,L}^4} + \frac{1}{\tau_{cr,G}^4}$	Traditionally, the design was to avoid the shear buckling Since material properties are designed to be included in the local and global buckling stress
Abbas	$\frac{1}{\tau_{cr,I}^2} = \frac{1}{\tau_{cr,L}^2} + \frac{1}{\tau_{cr,G}^2}$	Material properties are calculated taking into account the inelastic and material yield when estimating local and global buckling strength
El-Metwally	$\frac{1}{\tau_{cr,I}^2} = \frac{1}{\tau_{cr,L}^2} + \frac{1}{\tau_{cr,G}^2} + \frac{1}{\tau_y^2}$	a flexible consideration separated by Material properties and the shear stress
Cafolla, Yi	$\frac{1}{\tau_{cr,I}} = \frac{1}{\tau_{cr,L}} + \frac{1}{\tau_{cr,G}}$	Ductility considered for the buckling stress of the yield below
Sayed-Ahmed	$\frac{1}{\tau_{cr,I}^3} = \frac{1}{\tau_{cr,L}^3} + \frac{1}{\tau_{cr,G}^3} + \frac{1}{\tau_y^3}$	a flexible consideration separated by Material properties and the shear stress
Sause	$\frac{1}{\tau_{cr,I}^2} = \frac{1}{\tau_{cr,L}^2} + \frac{1}{\tau_{cr,G}^2}$	Including material properties in the local and global buckling stress

연성좌굴의 경우 국부좌굴과 전체좌굴의 상호작용에 의해 발생하는 현상으로 현재까지 그 원인과 강도가 명확하지 않아 국부좌굴응력, 전체좌굴응력, 항복응력을 이용한 기본 식을 채택하고 있으며, 연구자 별로 그 적용 방식에 다소 차이를 보인다. El-Matwally는 기본 식에서 각항의 승수(n) 값이 클수록 연성곡선이 각 좌굴 이론식에 근접하는 것을 근거로 n=2를 이용하여 최적단면을 결정하였으며, Bryan과 Yi은 항복응력을 제외한 탄성 국부좌굴과 전체좌굴만을 고려하여 n=1로 가정하여 계산하였다. 또한 Abbas는 항복응력을 고려하지 않고

n=2를 제안하였고, Sayed-Ahmed는 n=3의 값을 사용하였다. 이외 다양한 연구결과들이 표 2.2.10.3과 같이 제안되었으며 정현형의 연성좌굴식도 제형과 동일하게 사용한다.

전단좌굴응력에 대해서 선형좌굴응력을 구할 경우 유한요소해석에 적용되는 경계조건은 해석의 결과에 대해서 이론식과 일반적으로 차이를 보이고 있는데 이러한 경향에 대한 분석을 통해서 전단좌굴에 대한 이론식의 감소계수 등을 적용하여 오차를 줄일 수 있다.

나. 주름강판의 연성좌굴에 대한 설계기준과 경향성 분석 이론식

연성좌굴이론식은 연성좌굴로 인해 발생하는 강도감소를 예측한 식이며 대부분의 단면이 보수적인 측면에서 강도를 예측할 수 있다. 그러나 이것만으로는 연성좌굴 거동을 예측하기 어렵다. 연성좌굴거동을 예측하기 위해서는 변수에 따른 좌굴거동을 분석해야 하며, 제형 강판 및 정현형파 주름강판의 독립변수는 a_1, a_3와 θ_c이고, a_2, a_4는 a_1, a_3의 종속변수로 취급할 수 있다. 국부좌굴의 경우 a_1/a_2>1.0 일 때 a_1이 a_2에 비해 상대적으로 넓어짐에 따라 a_1 영역에서 좌굴이 발생하고 a_1/a_2<1.0 일 때 a_2 영역이 a_1에 비해 상대적으로 넓어짐으로 a_2 영역에서 좌굴이 발생하게 되는 경향이 있다. 특히, 전체좌굴의 경우 a_1/a_2가 작을수록 면외강성이 증가하게 된다.

연성좌굴의 경우 좌굴형상이 다양하여 하나의 식으로 표현할 수 없고, 국부좌굴 및 전체좌굴의 영향을 받으므로 국부좌굴과 전체좌굴의 이론식으로 표현된다. 우선, 국부좌굴식과 전체좌굴 이론식을 다음과 같이 정의한다.

$$\tau_{cr,L} = k_L \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)}\left(\frac{t}{a_1}\right)^2 \tag{2.2.10.1}$$

정현형의 경우, $\tau_{cr,g} = 36\beta\dfrac{D_x^{1/4} D_y^{3/4}}{th^2}$ (2.2.10.2a)

제형의 경우, $\tau_{cr,g} = k_g\dfrac{D_y^{1/4} D_x^{3/4}}{th^2}$ (2.2.10.2b)

위 식에 등가강성 $k_g\dfrac{D_y^{1/4} D_x^{3/4}}{th^2}$, $D_x = \dfrac{EI_x}{c}$, $D_y = \dfrac{c}{s}\left(\dfrac{Et^3}{12}\right)$ 을 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\tau_{cr,G} = {} & k_G\frac{E}{12^{0.25}4^{0.75}}\frac{a_3^{1.5}t^{0.5}}{h^2} \\ & \times(a_1 + a_3\sec\theta)^{-0.25}(a_1 + a_3\cot\theta)^{-0.5}\left(a_1 + \frac{1}{3}a_3\operatorname{cosec}\theta\right)^{0.75}\end{aligned} \tag{2.2.10.3}$$

형상에서 $a_1 = a_2$라 가정할 경우 θ는 전단좌굴강도에 미치는 영향이 적으므로 전단좌굴 거동 관련 변수에서 소거할 수 있다. 이와 같은 식에 대해서 정리하면 다음과 같다.

$$\tau_{cr,L} = C_L(\frac{t}{a_1})^2 \qquad (2.2.10.4)$$

$$\tau_{cr,G} = C_G(\frac{a_3}{t})^{1.5}(\frac{t}{h})^2 \qquad (2.2.10.5)$$

여기서, $C_L = 5.34\frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)}$, $C_G = 36\beta E\frac{1}{[12(1-\nu^2)]^{0.25}}\frac{1}{(6\eta)^{0.75}}$, $\eta = \frac{a_1+a_4}{a_1+a_2} = \frac{1}{2}(1+\cos\theta)$ 이다. 연성좌굴 발생은 국부좌굴응력과 전체좌굴응력의 비율(G/L)이 1에 가까워질수록 발생가능성이 커지며 기존의 연성좌굴이론식 또한 이러한 가정 하에 결정되었으므로 좌굴비율(G/L)을 통해서 경향성이 분석되어질 수 있으며, 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\frac{\tau_{cr,G}}{\tau_{cr,L}} = \frac{G}{L} \qquad (2.2.10.6)$$
$$= C_I(\frac{a_3}{t})^{1.5}(\frac{a_1}{h})^2(a_1+a_3\sec\theta)^{-0.25}(a_1+a_3\cot\theta)^{-0.5}(a_1+\frac{1}{3}a_3\mathrm{cosec}\theta)^{0.75}$$

$$\frac{\tau_{cr,G}}{\tau_{cr,L}} = \frac{G}{L} = C_I(\frac{a_3}{t})^{1.5}(\frac{a_1}{h})^2 \qquad (2.2.10.7)$$

여기서, $C_I = \frac{k_G}{k_L}\frac{12^{0.75}(1-\nu^2)}{4^{0.75}\pi^2}$, $C_I = 0.6831\beta[\frac{2(1-\nu^2)}{\eta}]^{0.75}$ 이다. 두 식은 공통적으로 $(\frac{a_3}{t})$와 $(\frac{a_1}{h})$의 두 변수에 의해 결정된다. 그러나 $a_1 \neq a_2$인 식(6)의 경우 a_1, a_2, θ로 이루어진 항들에 영향을 미치게 된다. 이상의 식들을 이용하여 설계에서 연성좌굴에 대한 영향성을 평가할 수 있다.

다. 단면성질 계산용 프로그램과 입력데이터

주름강판을 이용하여 부재를 제작할 경우 단면의 성능과 특성을 알아야 해석과 설계에 이용할 수 있으며, 이들의 값들은 일반적으로 생산되어져 나오는 구조부재의 일람표를 통해서 얻을 수 있는 정보와는 달리 경우에 따라서 제작되는 형태와 크기가 다르기 때문에 매번 계산을 하여야 한다. 주름강판의 경우 평판과는 달리 굴곡진 단면으로 인해서 계산이 매우 까다롭고, 정현형파의 경우 수치적분을 이용해서 얻어야 하는 데이터도 있다. 이러한 까닭에 본 절에서는 주름웨브를 갖는 부재의 단면성질을 계산할 수 있는 프로그램을 작성하여 입력데이터와 출력데이터에 대해서 설명하고자 한다. 텍스트 기반의 입력데이터와 출력데이터는 실행파일 SPSCWB.exe (Section Property of Sinusoidal and trapezoidal Corrugated Web Beam)를 통해서 입력받고 출력하도록 구성하였으며, 기본적인 모듈은 단일 프로그램 모듈과 하부프로그램인 DLL모듈로 나누어서 개발하였다.

```
constants
   7850e-9              ;01 rho       weight(kg/mm^3)
   205000               ;02 E         elastic modulus(N/mm^2)
   0.3                  ;03 v         poisson's ratio
   240                  ;04 fyf       yield stress of flange material(N/mm^2)
   215                  ;05 fyw       yield stress of Web material(N/mm^2)
Parameter
   0                    ;01 sflg      ShapeParameter_flange (0=equl, 1=diff)
   1                    ;02 sweb      ShapeParameter_web (0=trap, 1=sine)
   1                    ;03 dcod      Code Parameter_design (0=euro, 1=zemn, 2=dinn)
Shapes
   200.                 ;01 bf1       width of flange 1
   10.                  ;02 tf1       thickness of flange 1
   500.                 ;03 hw        height of web
   2.                   ;04 tw        thickness of web
   77.5                 ;05 w         unit length of corrugated web
   30.                  ;06 a3        parameter of trapezoidal shape
   0.                   ;07 bf2       width of flange 2
   0.                   ;08 tf2       thickness of flange 2
   0.                   ;09 aW        angle of corrugated web
   0.                   ;10 a1        parameter of trapezoidal shape
   0.                   ;11 a2        parameter of trapezoidal shape
```

그림 2.2.10.1 주름웨브 부재의 단면성능 계산 프로그램의 입력데이터

구조해석용 단면성질을 계산하기 위한 입력데이터의 구성은 그림에서 보는 바와 같이 단위중량, 탄성계수, 포와송 비, 조립된 각 부분 강재의 항복강도를 필요로 한다. 기본적인 정보데이터들인 이들의 단위는 SI단위로 입력된다. 주름강판의 형상과 설계코드에 대해서도 입력데이터를 요구하도록 되어있지만 단면성능에서는 형상과 웨브 경계부의 연결된 부재의 대칭성만을 필요로 하며, 동일한 길이인지 아닌지 또는 제형주름인지 정현형파 주름인지를 입력해 준다. 설계코드의 경우 단면성질에는 관계없더라도 하위 모듈 프로그램으로 계획하기 위해서 변수를 할당해 두도록 하며, 기본적으로 EUROCODE, DIN18800 등의 코드를 사용할 수 있게 한다. 형상에 대한 치수로는 단면의 두께와 폭 및 부재의 높이 부분과 같이 최적설계를 위한 변수로 이용되는 파라메타 외에도 형상에 대한 종속변수의 값을 입력해 주도록 되어있다. 또한 계산 가능한 단면형상의 경우 제형과 주름에 따른 파라메타가 달라지므로 각각의 형상에 대한 파라메타를 분리해서 입력가능하게 하였다.

```
>>>>> variables   :  values......

 sflg,sweb,dcod   :  0    1    1

      rho,E,v,G   :  .78500E-05  .20500E+06  .30000E+00  .78846E+05
        fyf,fyw   :  .24000E+03  .21500E+03

bf1,tf1,bf2,tf2   :  .20000E+03  .10000E+02  .20000E+03  .10000E+02
     hw,tw,w,a3   :  .50000E+03  .20000E+01  .77500E+02  .30000E+02
         H,aW,s   :  .52000E+03  .60805E+00  .84231E+02
    a1,a2,a3,a4   :  .00000E+00  .00000E+00  .30000E+02  .38750E+02

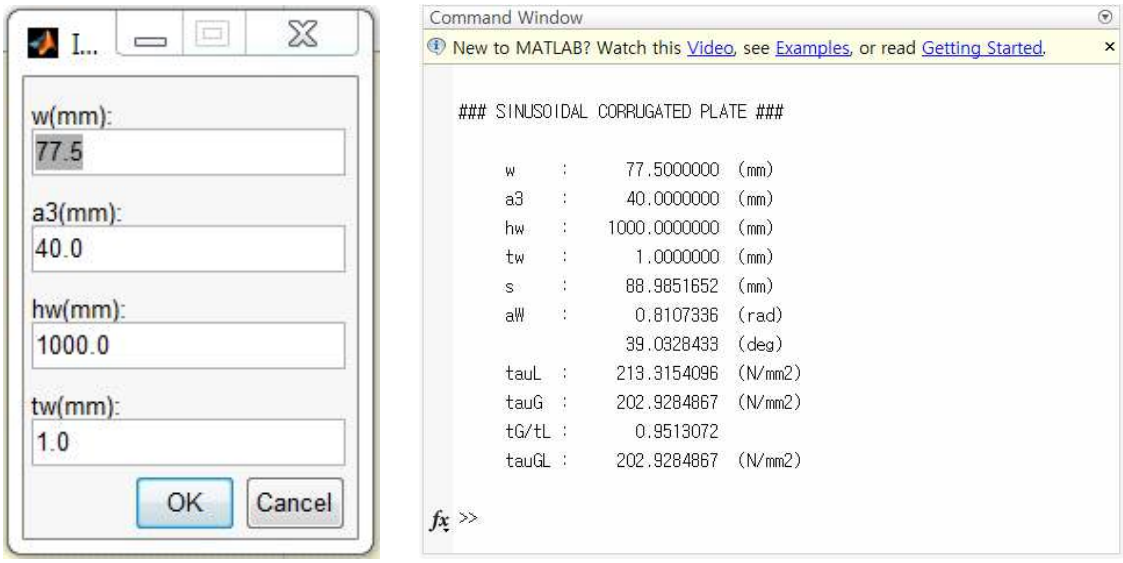
    fArea,wArea   :  .40000E+04  .10000E+04
    qArea,rAweb   :  .92009E+03  .10868E+04
    unitW,pntgS   :  .39932E-01  .19268E+04
      inrmX,Y,Z   :  .17489E+05  .26013E+09  .13333E+08
    radGy,radGz   :  .25502E+03  .57735E+02
    cnstT,cnstW   :  .13467E+06  .86711E+12
```

그림 2.2.10.2 주름웨브 부재의 단면성능 계산 프로그램의 계산결과

단면성질에 관한 출력데이터로서 그림 2.2.10.2에서 나타나는 것과 같이 구조물의 입력데이터 상태가 출력되며, 재료적 성질의 데이터 및 형상에 관한 데이터의 순서로 출력된다. 계산된 결과로는 주름웨브나 평판부재의 단면적, 환산단면적, 주름진 길이와 이를 이용해서 구한 단위길이당의 중량 및 단면계수를 얻을 수 있다. 단면의 각 축에 대한 단면이차모멘트 또한 계산되며, 단면이차반경과 비틀림 및 뒤틀림 상수도 계산결과로 출력된다.

하부 프로그램용으로 개발되는 DLL모듈의 경우 단면성능을 계산하는 과정을 호출하는 것으로 필요한 정보를 얻을 수 있다. 성능계산과정에서 적분에 대한 내용은 모두 수치적분을 하여 얻은 값으로 비교적 정확도가 높도록 초기정보를 조절하였다. 기존의 연구에서 비틀림 상수 및 뒤틀림 상수에 대한 연구가 진행되었으나 본 프로그램에서는 반영하지 않았으며, 일반적으로 제공되는 방식을 이용하여 계산하였다. 단면 이차모멘트의 경우도 동일하게 계산되었으며, 주름진 방향의 아코디언 효과로 인한 줄어든 강성에 대한 영향은 모두 무시하였다. 형상파라메타에 대해서도 제형주름과 정현형파 주름의 특성을 동시에 다룰 수 있도록 초기각도를 기준으로 환산된 제형주름을 계산할 수 있는 과정이 추가되어 있으며, 사이의 각도와 높이 및 주름진 방향의 길이에 대한 값도 계산되어 출력된다. 주름진 강판을 이용한 부재의 단면성능에 대한 프로그램은 단일 목적으로 이용되기보다 구조설계용 프로그램에 하부프로그램에 이용되는 단위모듈이며, 본 과제에서는 부재설계용 부 프로그램으로 이용되며, 최적구조설계를 위한 초기입력데이터를 얻기 위해서 이용되었다.

주름강판의 구조설계를 위해 계산되는 단면성질과 형상에 대한 각각의 치수 및 전단좌굴응력을 하부프로그램의 형식으로 계산을 얻는 과정에 사용자들이 편리하게 값을 확인할 수 있도록 다이얼로그 방식을 이용하여 독립된 형태의 프로그램으로도 개발하였다. 개발된 프로그램은 전단좌굴응력을 간단하게 확인할 수 있도록 단면의 형상데이터만 입력하도록 하였으며, 아래 그림과 같다.



(a) 입력 다이얼로그 박스 (b) 계산결과

그림 2.2.10.3 다이얼로그 방식의 단면성질 계산 프로그램

그림에서 보는 바와 같이 계산결과에 대해서는 좌굴응력이론식의 값과 국부좌굴과 전체좌굴의 비율이 출력된다. 그러나 필요한 단면성질에 대해서는 바이너리데이터로 저장되도록 프로그래밍하였으며, 단면적, 주름길이 등의 하부프로그램 형식의 계산정보와 동일한 값을 얻을 수 있다. 주름강판 전단좌굴의 경우 전체좌굴과 국부좌굴의 비율에 따라 연성좌굴의 경향식이 설명되므로 매우 유용하다. 각각의 경우 국부좌굴에서 발전되어 연성좌굴로 진행될지 아니면 전체좌굴의 발생에 대한 전이단계로 나타나는 연성인지를 살펴보는 경향성 분석에 필요한 정보이다. 이들의 값에 대한 유한요소해석과정에서 얻어지는 좌굴응력과의 상태를 분석하여 평가되는 결과값으로 연성좌굴이 발생하는 경향과 설계에서 어떠한 축소된 응력을 이용할지를 결정할 수 있다.

라. 주름웨브 부재의 구조설계용 프로그램

주름웨브 부재의 구조설계의 설계규준의 경우는 유럽에서 먼저 개발되어 항공기의 동체 등에 이미 적용되었고 활발히 이용된 까닭에 기본적으로 EUROCODE나 DIN18800 또는 박판에 대한 규준인 DASt-R015에 의해서 설계할 수 있는 방법이 제시되어 있다. 본 절에서는 주름부재의 구조설계용 프로그램과 사용을 위한 입력데이터 등을 설명하고 설계를 위해서 적용되는 규준에 대해서 설명하도록 한다.

기본적인 입력데이터는 주름웨브로 구성된 부재의 외력과 외력에 의해 발생하는 부재내력을 입력하는 것이고, 단면성질의 계산에 필요한 사항들과 연계되도록 되어있다. 형상에 관한 파라메타와 더불어 다양한 상태의 정보를 입력해 주어야 한다. 재료의 성질과 더불어 설계환경에 대해서도 입력을 요구한다. 설계상황에 대해서는 양단부에서 발생하는 부재내력에 대응하여 설계되도록 하였으며, 축력, 전단력, 모멘트의 값을 입력데이터로 사용된다. 설계환경에 대해서 적용되어야할 설계코드 들은 초기 자료에서 결정되며, 적용되어야할 부재내력과 길이 및 압축재 좌굴에 따른 필요한 정보들과 판에서 나타나는 전체 및 국부좌굴에 대한 고려되어야할 제약들은 해석과정에서 계산되어진다. 초기설계단계에서 최종적인 상태와 설계조건 및 상수들의 계산결과는 다음 그림 2.2.10.4와 같이 나타난다.

초기정보를 바탕으로 부재 설계에 필요한 계수와 다양한 파라메타들을 계산하는 과정에서 단면성능의 계산은 단면계산용 하부 프로그램을 이용하여 계산되며, 결과들에 대해서 그림 2.2.10.5와 같이 출력될 수 있도록 프로그램을 작성하였다.

```
=========================================================
PG module (Design for Corrugated Web i-Beam)
    By Dr. Shon, Sudeok
=========================================================

[REFERENCE]

  [DIN 18800 Teil 1-3] [DASt-Ri 015] [Stahlbau-Kalender 2004] [EUROCODE 3]

[TITLE]    This is Example for CWB (Unit:N,mm)

[INITIAL INFORMATION for CORRUGATED WEB BEAM]
```

```
01. default code    [dast] [euro] codeV
02. shape parameter [sinu] [equl] flange
03. Kind of element [beam]

04. Material Property

     sWeight=          7850.00 (N)          E      =        210000.00 (N)
     G      =         81000.00 (N)          v      =             0.30 (N)
  ...fyf    =           240.00 (Nmm)     ...fyw    =           240.00 (Nmm)

05. Design Configuration

     Length =          9500.00 (mm) (or Height)
  ...Loff 1 =             0.00 (mm)      ...Loff 2 =          9500.00 (mm)

     N-i    =       -106781.60 (N)          N-j    =        -99872.40 (N)
     V-i    =        -69786.70 (N)          V-j    =         -1385.60 (N)
  ...M-i    =    -151269533.90 (Nmm)     ...M-j    =     183154102.20 (Nmm)

     N-ioff =       -106781.60 (N)          N-joff =        -99872.40 (N)
     V-ioff =        -69786.70 (N)          V-joff =         -1385.60 (N)
  ...M-ioff =    -151269533.90 (Nmm)     ...M-joff =     183154102.20 (Nmm)

06. Design Condition      ;;; 2 -th NODE

     Nf     =        -99872.40 (N)
     Vf     =         -1385.60 (N)
  ...Mf     =     183154102.20 (Nmm)

 new Length =          9500.00 (mm) (or new Height)
     Lb0    =          9500.00 (mm) (for Buckling)
     Lb     =           150.00 (mm) (for flange Buckling)
     Lu2    =             0.00 (mm) (distence of beam)
  ...cdis   =           150.00 (mm) (distence of concentrated load)

07. Design Parameter & Value      ;;; TypeCWB is D-type

    Type CWB   Flange Top  ;  A-인장  B-압축  C-인장  D-압축
               Flange Down ;    인장    압축    압축    인장

  ...gammaM =             1.10 (N)
  ...k_c(psiN) =0.97909(0.93530)          ...zeta(psiM)=2.40595(-0.82591)

  ...Nsd_u  =       -338367.86 (N)        ...Nsd_d  =        238495.46 (N)
  ...Vsd    =          1385.60 (N)
  ...Msd    =     183154102.200 (Nmm)
  ...Fzd    =         69786.70 (N)  (Transfer shear on flange)
```

그림 2.2.10.4 주름웨브 부재의 구조설계 프로그램의 결과파일 - 설계초기상태출력

```
=========================================================
SECTION PROPERTY
---------------------------------------------------------
      bf1     tf1     bf1     tf1     hw      tw      a1      a2      a3(bt)  a4
    250.0    10.0   250.0    10.0   625.0     2.0    31.0     0.0    40.0     0.0
      w(i)    s       aW      hm      zp      zt
     77.5    89.0     0.0   635.0  -322.5   317.5    (unit:mm,theta)
---------------------------------------------------------
          Ag  :        10.88665  (cm^2)            H  :       645.00000  (mm)
      Weight  :        50.51667  (kg/m)       Surface  :         2.47524  (m^2/m)
        2 Ag  :        50.00000  (cm^2)

     Ix(One)  :         3.10517  (cm^4)
          Iy  :     50407.29167  (cm^4)           iy  :        31.75131  (cm)
          Iz  :      2604.16667  (cm^4)           iz  :         7.21688  (cm)
```

```
        It  :        16.83333  (cm^4)          Iw  :   2625379.77431  (cm^6)

        Zy  :      1563.01680  (cm^3)

        Iv1 :         2.08333  (cm^4)
        Iv2 :         2.08333  (cm^4)          Ivw :      4069.01042  (cm^4)
        Iz1 :      1302.08333  (cm^4)          Iz2 :      1302.08333  (cm^4)
        Iw0 :   2625162.76042  (cm^6)

        ux  :         0.02120  (cm/kN)         cw  :     49076.80476  (kNcm^2)
        IwS :   2838862.72483  (cm^6)

 Total Weight :       479.90837  (kg)
Total Surface :        23.51482  (m^2)
```

그림 2.2.10.5 주름웨브 부재의 구조설계 프로그램의 결과파일 - 단면성능계산결과

설계초기상태에 대한 출력과정과 단면성능계산과정을 거쳐 설계코드에 따라 안전한 설계가 가능하도록 검토하는 과정이 필요하다. 크게는 주름진 웨브의 세장한 정도에 따른 규준들의 검토와 플랜지부분에 대한 검토들이 필요하다. 이것은 강판으로 구성되는 부재인 까닭에 평판의 좌굴에 대한 검토가 필요한 것이다. 플랜지의 경우와 달리 웨브의 경우는 면내의 주름방향에 대해서는 고려할 필요가 없다. 아코디언 효과로 인해서 외력에 대한 저항이 거의 없어지기 때문이다. 그러나 주름의 직각방향과 전단에 대한 검토는 반드시 필요하다. 전단에 대한 검토는 이미 많이 다루어진 전단좌굴응력에 따라 감소하는 정도를 파악해야 한다. 감소계수에 따라 설계의 범위가 결정되며, DASt-R015의 경우가 다른 규준에 비해 엄격한 범위로 제안되는 까닭에 사용재료의 증가를 기대할 수 있다. 이 외에도 횡-좌굴에 대한 검토와 연성좌굴에 대한 영향 및 플랜지에서 발생하는 주름진 웨브의 영향으로 추가되는 모멘트의 고려도 반드시 필요하다. 이상의 과정에 대해서 다음과 같이 설계를 위해 검토하는 과정을 요약할 수 있다.

TO DESIGN >>> Slenderness and flange area for CW
CHECK >>> Slenderness for web buckling
CHECK >>> Tensile stress of flange
CHECK >>> Shear of CWB
CHECK >>> Flange for compression
CHECK >>> DIN 18800 T1 Table 13, Line 4
CHECK >>> DIN 18800 T2 El.310
CHECK >>> Warping of CWB
CHECK >>> Interaction of Warping and Buckling of flange

각각의 경우에 대해서 적용되는 설계기준의 결과에 대해서 그림 2.2.10.6에 타나내었다. 압축재의 세장한 부분에 대해서는 Beam이나 Girder와 같은 경우는 고려대상이 아니며, 그림의 결과는 Girder에 대한 결과이다.

```
=======================================================
TO DESIGN >>> Slenderness and flange area for CW
=======================================================
  >>> code is [dast]
  >>> sPmW is [sinu]
  >>> ePmD is [beam]

      A          =      5000.0000000       Aa         =      1088.6646126
      iy         =       317.5131231       Lb0        =      9500.0000000
      lambda_y   =        29.9200232       lambda_1_2 =       118.9530720

  >>> Idealized Slenderness
      lambda_id  =        31.8458923

  >>> Idealized Flange stress
      Nsd_u      =   -338367.857 (N)       Nsd_d      =    238495.457 (N)

=======================================================
CHECK >>> Slenderness for web buckling
=======================================================
  >>> code is [dast]
  >>> sPmW is [sinu]

  ... lambda_p =   2.954  <= ???   9.347 = lambda_p_max   (k_tau= 8.1875)

      [OK]     (lambda_p <= lambda_p_max) Slenderness is satisfied.

=======================================================
CHECK >>> Tensile stress of flange                (in ZEMAN)
=======================================================
  >>> code is [dast]
  >>> type is [D-type]

  >>> Check flange is [TOP ] 압축플랜지

  >>> Check flange is [DOWN] 인장

      NgRk(gammaM)=  600000.0 ( 1.1)
  ... Nsd =    238495.46   <= ???     545454.55 = NgRd

      [OK]     Nsd/NgRd(0.437) <= 1.0 ...is satisfied.

=======================================================
CHECK >>> Shear of CWB
-------------------------------------------------------
  >>> code is [euro]
  >>> sPmW is [sinu]
  >>> ePmD is [beam]

      tauL = 785.008   lambdaL =  0.420   kapaL =  0.871
      tauG = 697.067   lambdaG =  0.446   kapaG =  1.000
      kapa =   0.871   (Dx =    133989.491    Dy =  84140000.000)

  ... Vsd =    1385.6  <= ???   137166.4 = Vrd   (gammaM =1.1)

      [OK]     Vsd/Vrd(0.010) <= 1.0 ...is satisfied.

=======================================================
CHECK >>> Flange for compression
-------------------------------------------------------
  >>> code is [dast]
  >>> sPmW is [sinu]
  >>> ePmD is [beam]

      Aef(bef)   =     2500.00000 (          250.00000)
      ief        =       72.16878
      lambda_a   =       92.92956       lambda_k_bar=        0.02237

      Mzd_G      =        0.00       Fyd_bt     =        0.00       Fyd_F      =        0.00
      x_V        =        0.00       Mzd        =        0.00       Wz         =        0.00
      sigma_x    =        0.00       fT         =        1.00
```

```
  ... (bf+bt)/tf =    29.0  < ???     30.5 = 1.03*sqrt(E/fyf)

      cnt01 =0.490   kbm(k) =1.000 (0.457)
      ktm=1.000   kappa_k =1.000

  ... Nsd =    338367.86   <= ???     545454.55 = Nrd

      [OK]     Nsd/Nrd(  0.620) <= 1.0 ...is satisfied.

      Mrd00       =   346363636.36364

  @@@ INTERACTION CHECK - V and M @@@@@@@@@@ (Unit:N,mm)

      Msd(Mrd) = 183154102.2 ( 346363636.4) ;;; Msd/Mrd= 0.529 (psi_V=1.000)
      Vsd(Vrd) =      1385.6 (    137166.4) ;;; Vsd/Vrd= 0.010 (psi_M=1.000:)

      Msd/(Mrd*psi_M) = 0.5288       Vsd/(Vrd*psi_V) = 0.0101

      [OK]     M(V)sd/(M(V)rd*psi_M(V)) <= 1.0 .

=========================================================
CHECK >>> DIN 18800 T1 Table 13, Line 4            (in ZEMAN)
---------------------------------------------------------
  >>> code is [dast]
  >>> sPmW is [sinu]
  >>> ePmD is [beam]

      b(bf) = 115.00 ( 250.00)

  ... b(=bf/2-bt/4) = 115.00  > ???   12.90 = 12.9*sqrt(240/fyf)

      Nrk = 756143.67       sigma1 =    302.46
  ... Nsd = 338367.86  <= ???   687403.33 = Nrd   (gammaM=1.1)

      [OK]     Nsd/Nrd(  0.492) <= 1.0 ...is satisfied.

      Mrd00       = 436501117.0304175

  @@@ INTERACTION CHECK - V and M @@@@@@@@@@ (Unit:N,mm)

      Msd(Mrd) = 183154102.2 ( 436501117.0) ;;; Msd/Mrd= 0.420 (psi_V=1.000)
      Vsd(Vrd) =      1385.6 (    137166.4) ;;; Vsd/Vrd= 0.010 (psi_M=1.000:)

      Msd/(Mrd*psi_M) = 0.4196       Vsd/(Vrd*psi_V) = 0.0101

      [OK]     M(V)sd/(M(V)rd*psi_M(V)) <= 1.0 .

=========================================================
CHECK >>> DIN 18800 T2 El.310                      (in ZEMAN)
---------------------------------------------------------
  >>> code is [dast]
  >>> sPmW is [sinu]
  >>> ePmD is [beam]

      Nrk =13699630.84       bf(bef) = 250.00 ( 250.00)       kappa_k = 1.00
  ... Nsd = 338367.86  <= ??? 12454209.86 = Nrd    (gammaM=1.1)

      [OK]     Nsd/Nrd(  0.027) <= 1.0 ...is satisfied.

      Mrd00       =7908423260.4182892

  @@@ INTERACTION CHECK - V and M @@@@@@@@@@ (Unit:N,mm)

      Msd(Mrd) = 183154102.2 (7908423260.4) ;;; Msd/Mrd= 0.023 (psi_V=1.000)
      Vsd(Vrd) =      1385.6 (    137166.4) ;;; Vsd/Vrd= 0.010 (psi_M=1.000:)

      Msd/(Mrd*psi_M) = 0.0232       Vsd/(Vrd*psi_V) = 0.0101

      [OK]     M(V)sd/(M(V)rd*psi_M(V)) <= 1.0 .
```

```
=========================================================
CHECK >>> Warping of CWB
---------------------------------------------------------
  >>> code is [dast]
  >>> sPmW is [sinu]
  >>> ePmD is [beam]

      zeta = 2.41   kappa_k =1.00   gammaM =1.1   Length = 9500.0   c^2 = 131763.99

      Nki_d    =      543685.71       Mki_d    =   308638347.58
      Mpl_y_k  =   375000000.00       Mpl_y_d  =   340909090.91

  >>> DIN 18800 T.2 El.(311) (110)       (Unit:N,mm)

      nn = 2       lambda_M_bar =  1.0510       kappa_M =  0.6711
  ... Msd = 183154102.20  <= ???  228800658.00 = kappa_M*Mpl_y_d

      [OK]     Msd/kappa_M*Mpl_y_d(  0.800) <= 1.0 .

      Mrd00       = 228800658.0045326

  @@@ INTERACTION CHECK - V and M @@@@@@@@@@ (Unit:N,mm)

      Msd(Mrd) = 183154102.2 ( 228800658.0) ;;; Msd/Mrd= 0.800 (psi_V=1.000)
      Vsd(Vrd) =      1385.6 (    137166.4) ;;; Vsd/Vrd= 0.010 (psi_M=1.000:)

      Msd/(Mrd*psi_M) = 0.8005       Vsd/(Vrd*psi_V) = 0.0101

      [OK]     M(V)sd/(M(V)rd*psi_M(V)) <= 1.0 .

=========================================================
CHECK >>> Interaction of Warping and Buckling of flange
---------------------------------------------------------
  >>> code is [dast]
  >>> sPmW is [sinu]
  >>> ePmD is [beam]

  ... (bf+bt)/tf =    29.0  <= ???     30.5 = 1.03*sqrt(E/fyf)

      [OK]     Interaction is satisfied...

      Mrd00       =         0.0000000
```

그림 2.2.10.6 주름웨브 부재의 구조설계 프로그램 최종계산결과 (Girder용)

11. 주름강판의 전단성능 실험 - 1차 실험

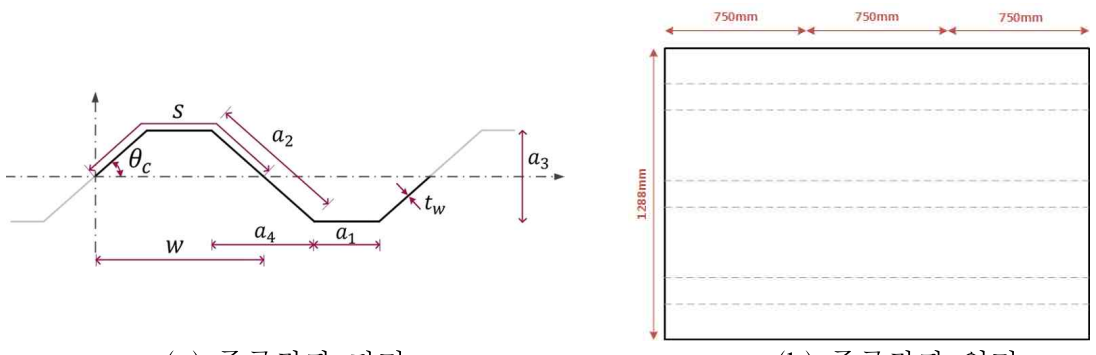
가. 실험 개요

(1) 실험체 계획

실험체는 표 2.2.11.1에 나타낸 것과 같이 12개의 실험체이다. 12개의 실험체의 주름강판은 SS400급의 강판을 제형으로 절곡하여 제작하였고, SS400강재의 상·하부 플랜지와 용접하였다. 표 2.2.11.2, 표 2.2.11.3는 실험에 사용한 1축 및 3축 Strain Gage정보이다.

표 2.2.11.1 실험체 일람

Specimen Name	주름강판 두께(mm)	주름강판 높이(mm)	주름강판 너비(mm)	변수		
				a_1	a_3	θ_c
#01 TR75-9.74-5-30	2.3	1,288	750	97.4	50	30
#02 TR75-7.1-5-15				71	50	15
#03 TR75-5.65-5-30				56.5	50	30
#04 TR150-8.46-7.5-30			1,500	84.6	75	30
#05 TR150-7.1-5-15				71	50	15
#06 TR150-4.2-7.5-15				42	75	15
#07 TR150-5.63-10-15				56.3	100	15
#08 TR225-5.65-5-30			2,250	56.5	50	30
#09 TR225-4.9-5-45				49	50	45
#10 TR225-4.2-7.5-15				42	75	15
#11 TR225-5.4-7.5-30				54	75	30
#12 TR225-4.9-7.5-60				49	75	60



(a) 주름강판 단면 (b) 주름강판 입면

그림 2.2.11.1 실험체 변수

표 2.2.11.2 1축 Strain Gage

TYPE	KFEL-5-120-C1L32R		GAGE FACTOR	2.10±1.0%
GAGE LENGTH	5mm		APPLICABLE GAGE CEMENT	CC-46,EP-18
GAGE RESISTANCE	120.4±0.4Ω			
LOT No.	Y152S		QUANTITY	10
BATCH	077A	K06		

표 2.2.11.3 3축 Strain Gage

TYPE	KFEL-5-120-D35L3M2S		GAGE FACTOR	1	2.06±1.0%
				2	2.06±1.0%
				3	2.09±1.0%
GAGE LENGTH	5mm		APPLICABLE GAGE CEMENT		CC-36, EP-180
GAGE RESISTANCE	120.0±0.8Ω				
LOT No.	Y290		QUANTITY		10
BATCH	045A	T12	TEMPERATURE COEFFICIENT OF GAGE FACTOR		+0.015%/℃

그림 2.2.11.2 - 그림 2.2.11.3에 나타낸 12개의 실험체는 두께 2.3mm 및 주름강판 높이 1,288mm가 동일하게 구성되었다. 주름강판 너비는 실험체 #01, #02, #03는 750mm, 실험체 #04, #05, #06, #07은 1,500mm, 실험체 #08, #09, #10, #11, #12는 2,250mm로 구성되어 있다. 또한 각각의 실험체는 주름강판 단면의 독립변수인 a_1, a_3, θ_c에 따라 주름형상이 달라지며 실험변수가 실험체에 미치는 영향을 알아보고자 하였다.

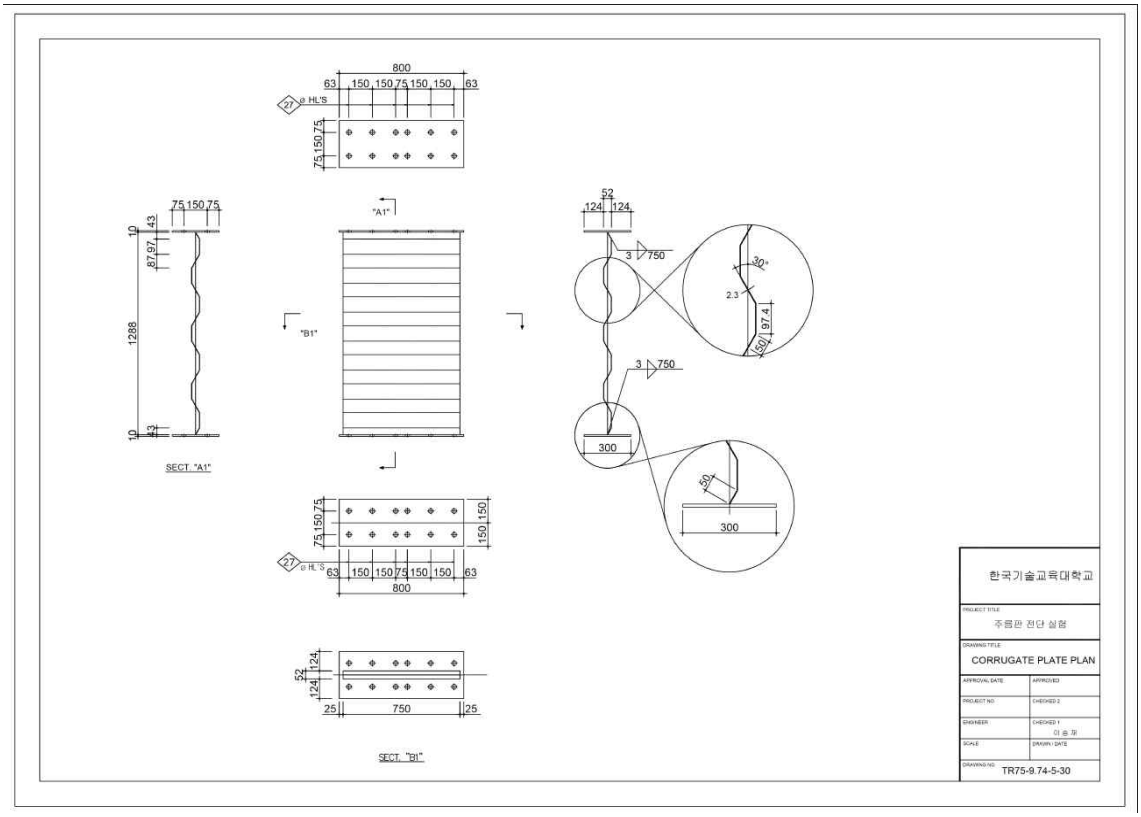


그림 2.2.11.2 #01 TR75-9.74-5-30 상세도

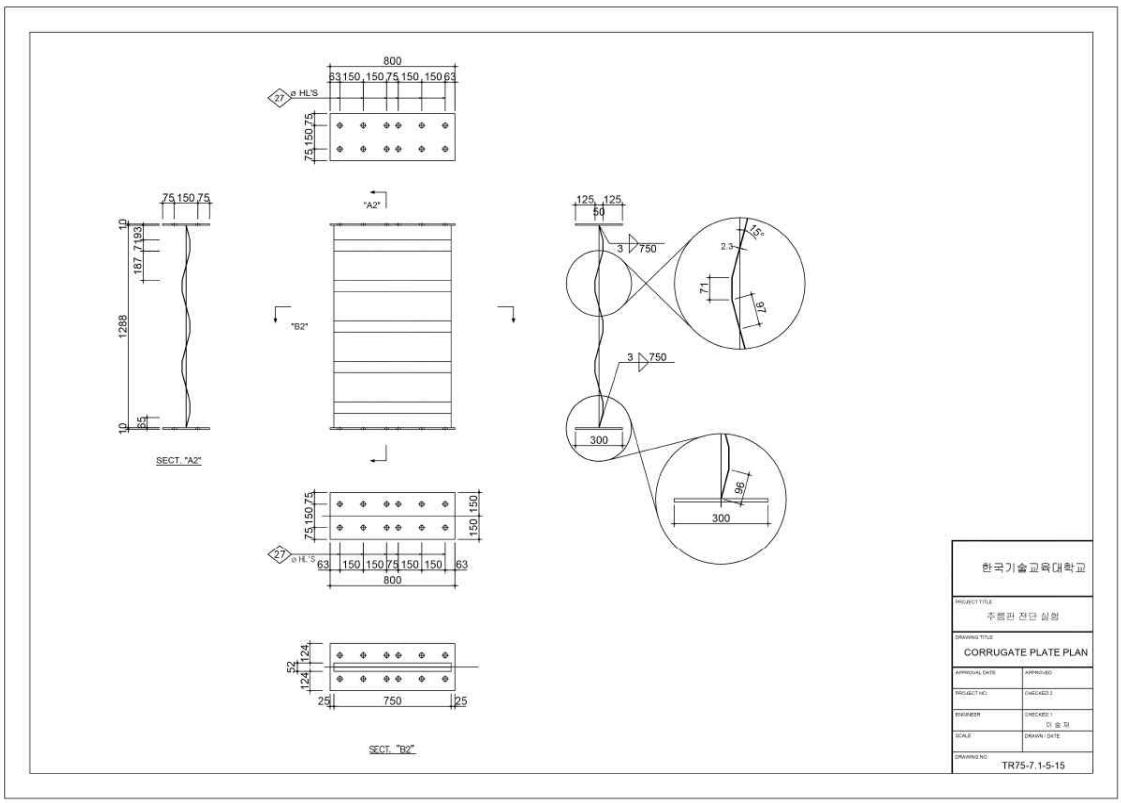


그림 2.2.11.3 #02 TR75-7.1-5-15 상세도

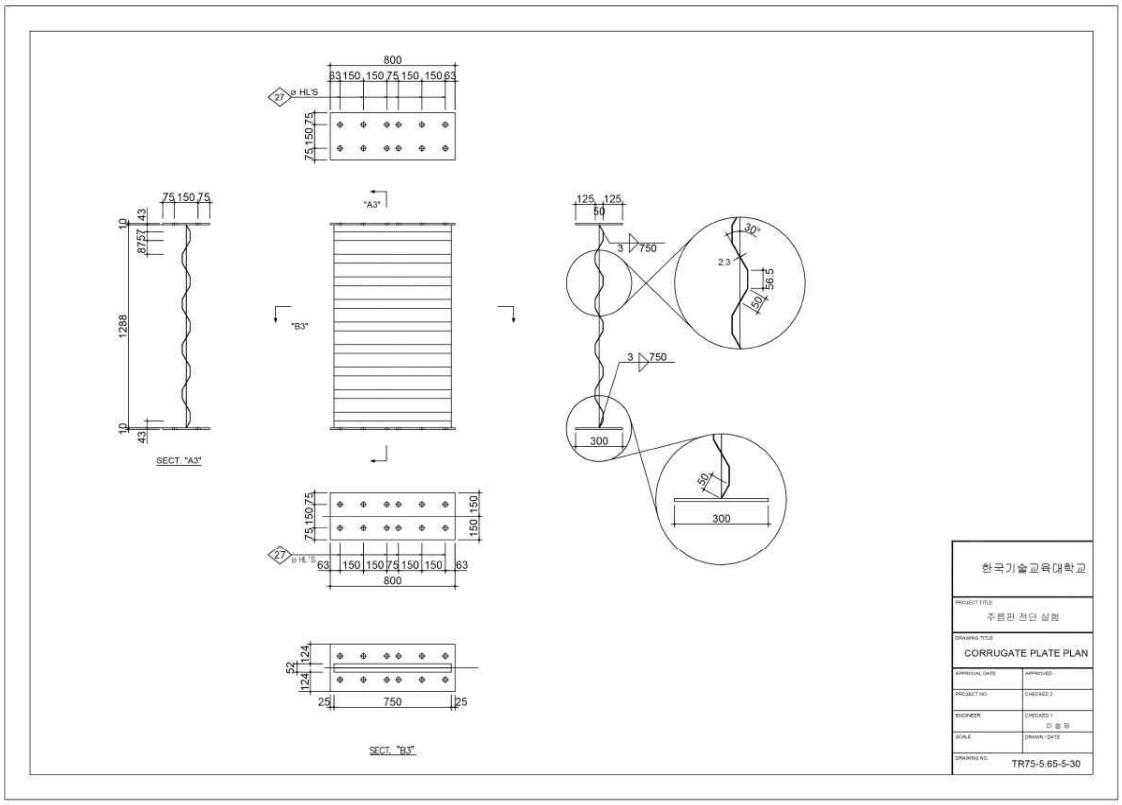


그림 2.2.11.4 #03 TR75-5.65-5-30 상세도

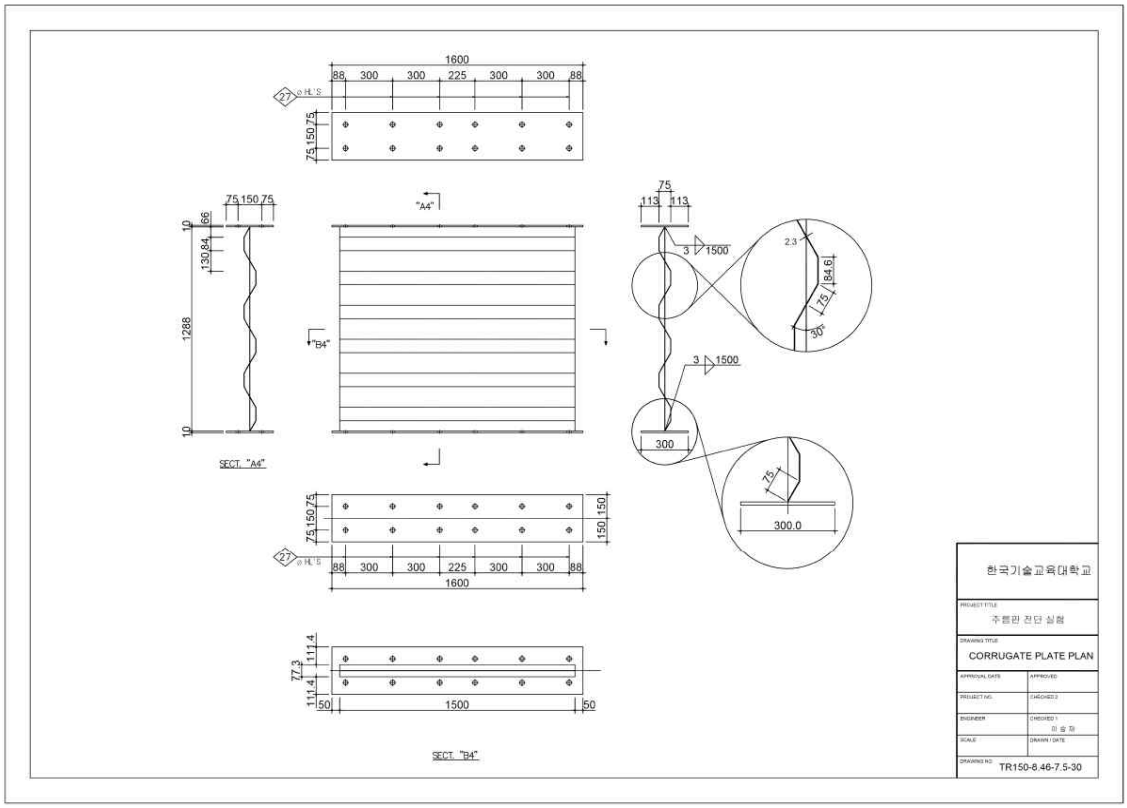


그림 2.2.11.5 #04 TR150-8.46-7.5-30 상세도

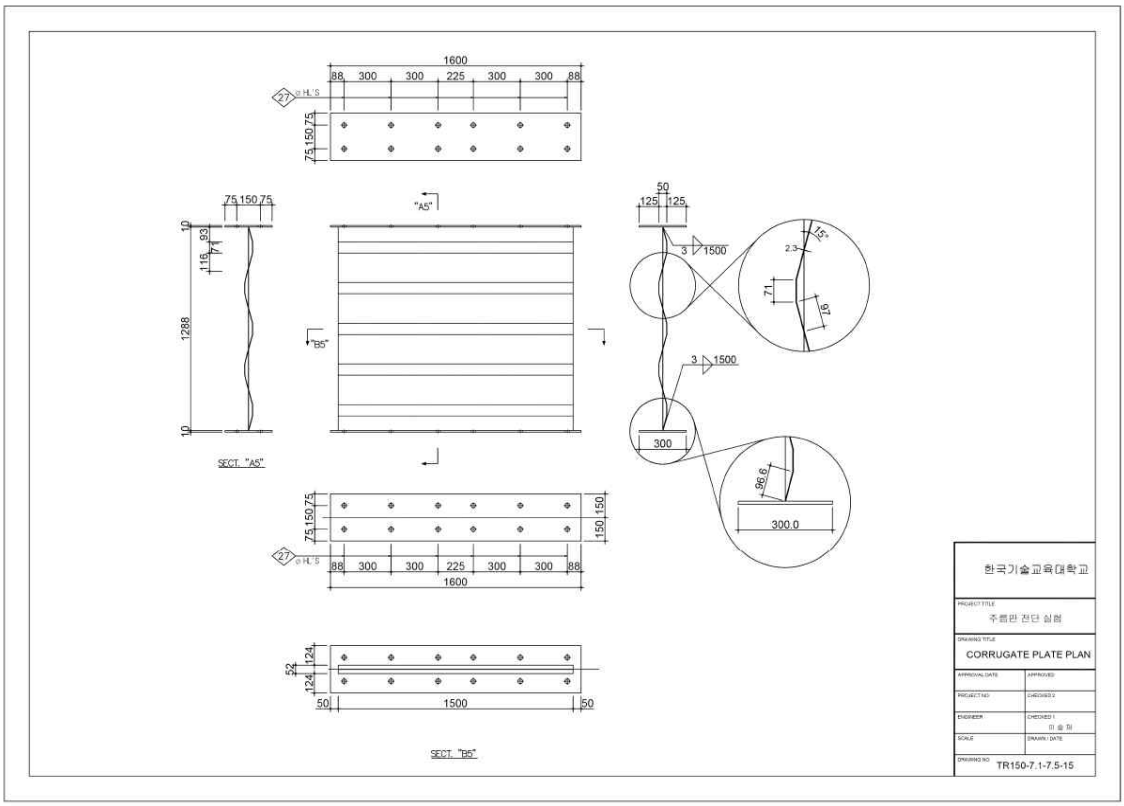


그림 2.2.11.6 #05 TR150-7.1-5-15 상세도

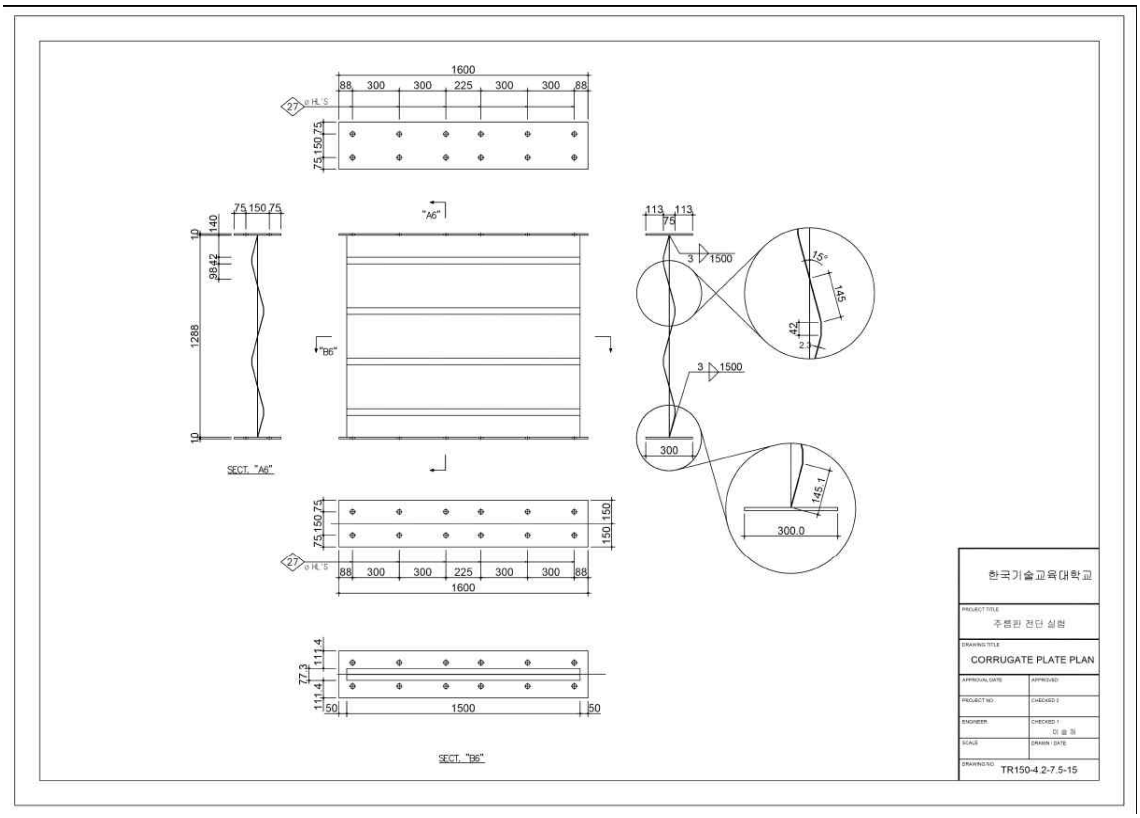


그림 2.2.11.7 #06 TR150-4.2-7.5-15상세도

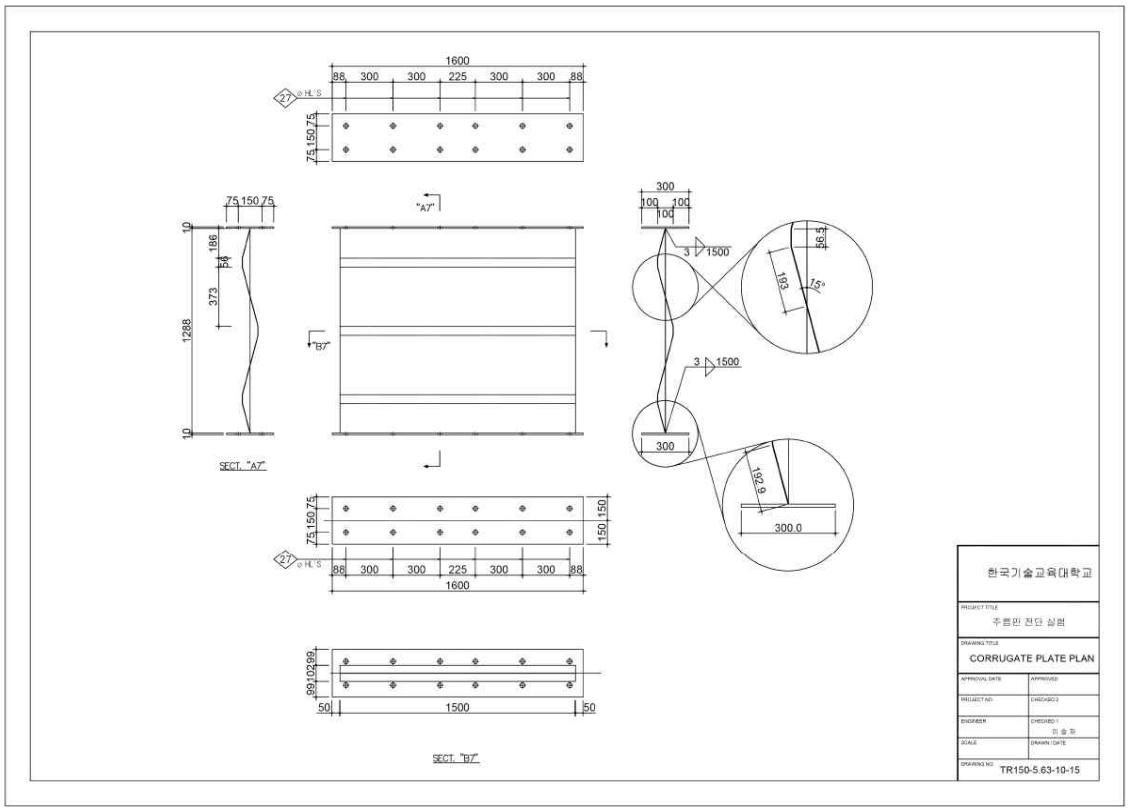


그림 2.2.11.8 #07 TR150-5.63-10-15상세도

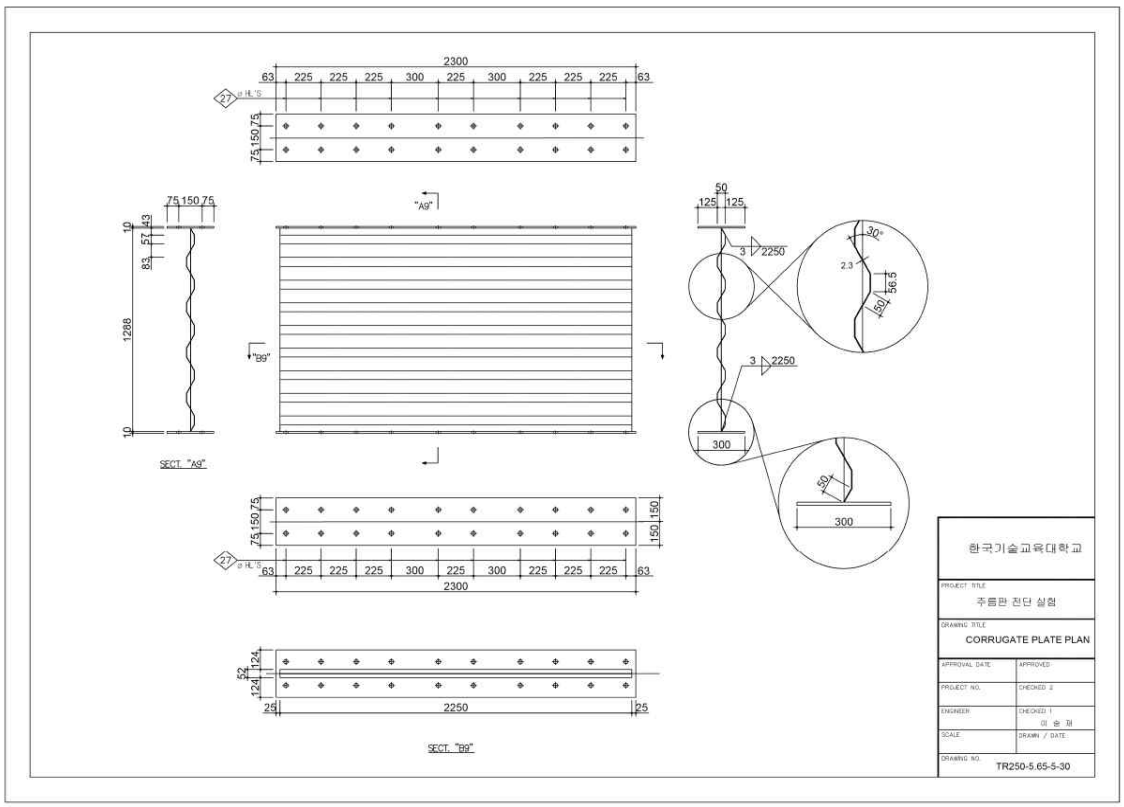


그림 2.2.11.9 #08 TR225-5.65-5-30 상세도

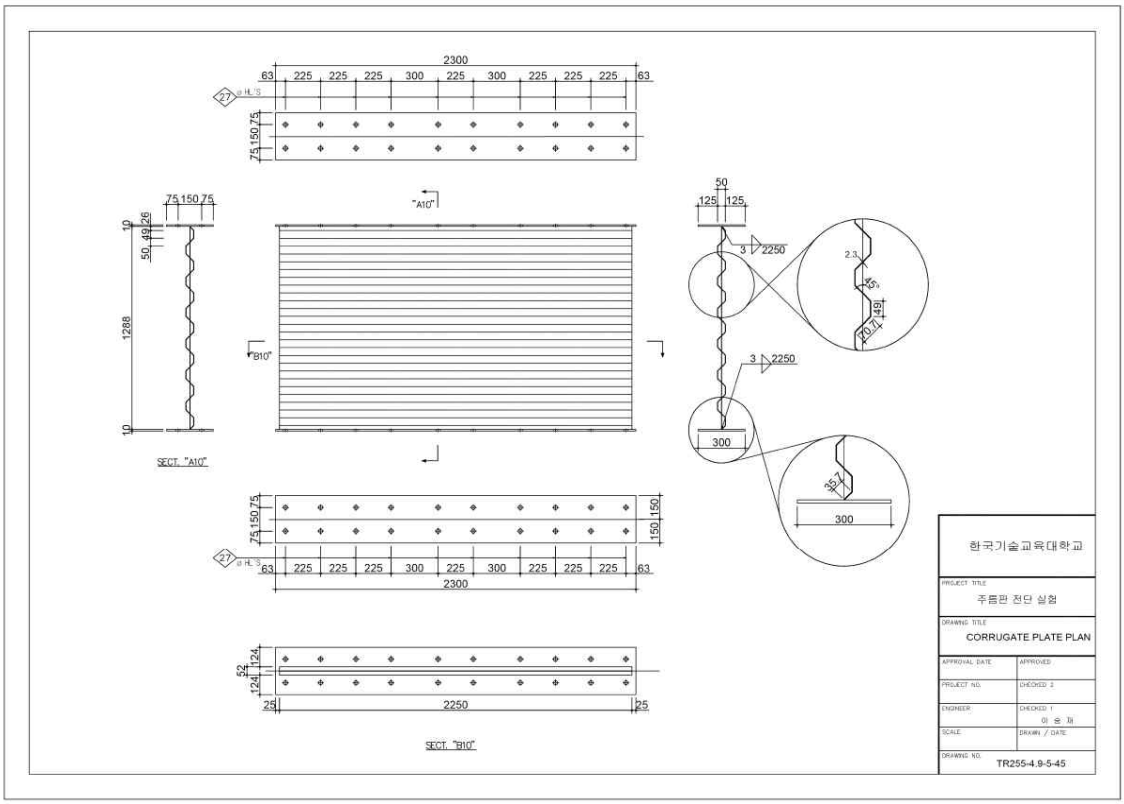


그림 2.2.11.10 #09 TR225-4.9-5-45상세도

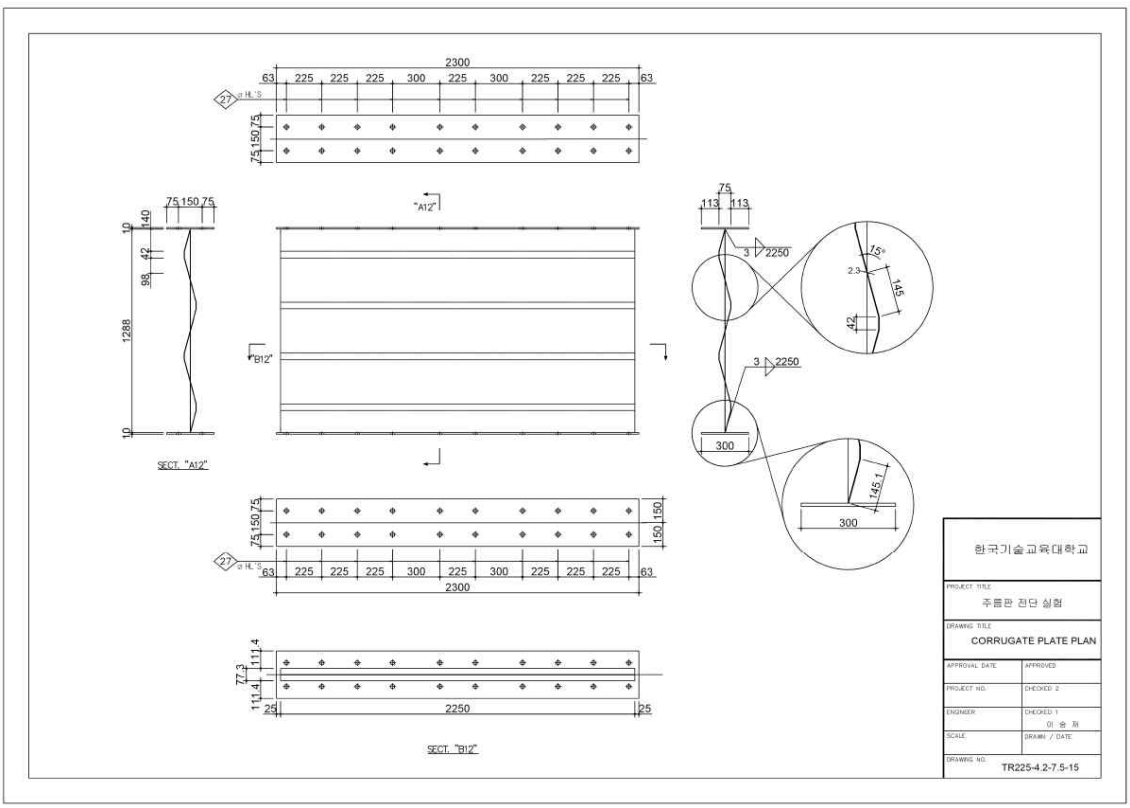


그림 2.2.11.11 #10 TR225-4.2-7.5-15 상세도

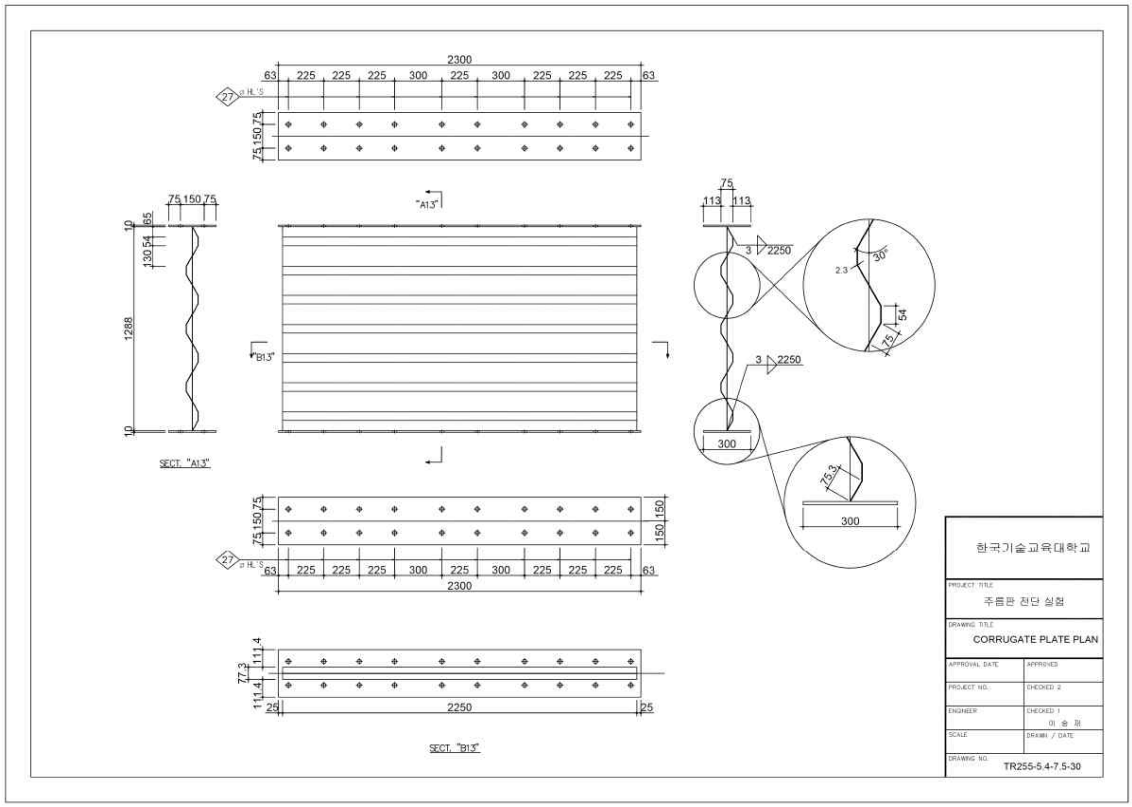


그림 2.2.11.12 #11 TR225-5.4-7.5-30 상세도

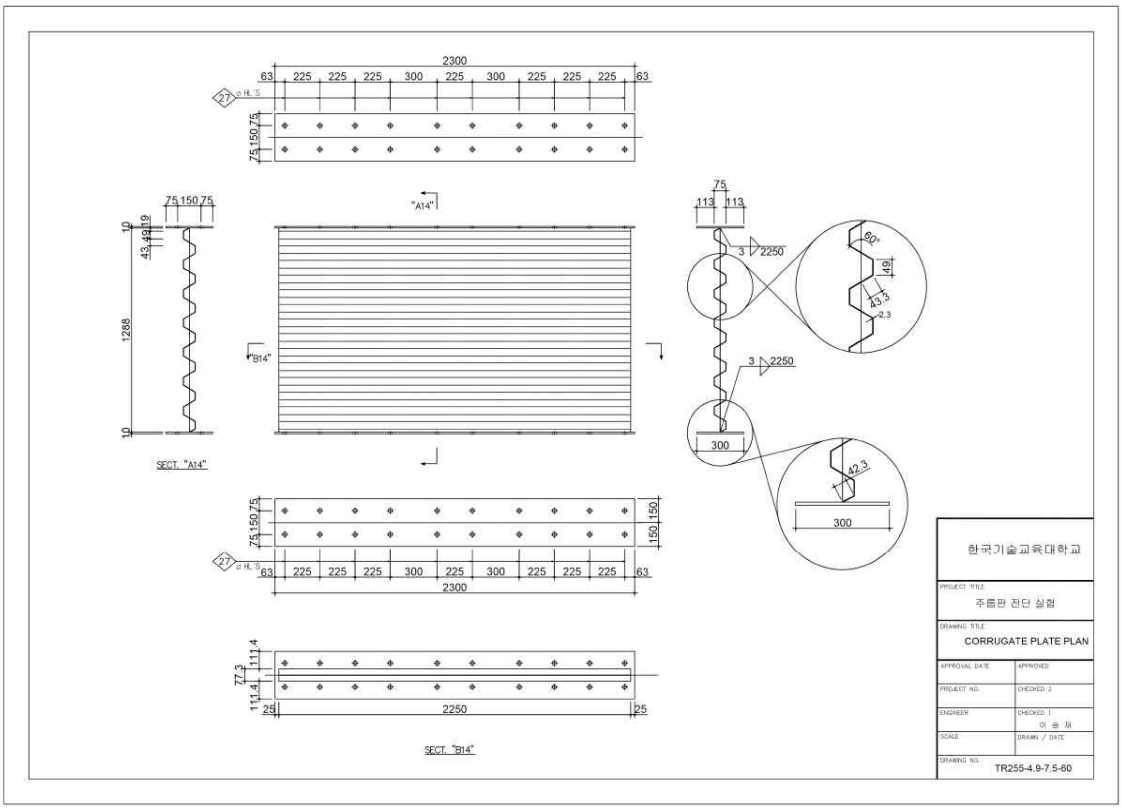


그림 2.2.11.13 #12 TR225-4.9-7.5-60 상세도

(2) 가력 계획

가력은 KBC2009의 보-기둥모멘트접합부의 가력방법 참고하였으며 내진성능 검증을 위한 반복재하 이력에 기초하여 변위 제어하였다. 표 2.2.11.4에 나타낸 것과 같이 상부블럭과 하부블럭의 사이 길이 Lb=1,308mm를 기준으로 층간 변위각 0.00375rad.~0.075rad.까지는 6회, 0.01rad.은 4회, 그리고 0.015rad. 이후부터 실험이 종료 될 때 까지는 2회씩 가력 하였다. 그림 2.2.11.14에 반복재하 패턴을 나타내었다.

표 2.2.11.4 반복재하 프로그램

Rotation [rad.]	Displacement [mm]	Cycle	Rate [mm/sec]
1	±0.375	6	±4.905
2	±0.5	6	±6.540
3	±0.75	6	±9.810
4	±1.0	4	±13.08
5	±1.5	2	±19.62
6	±2.0	2	±26.13
7	±3.0	2	±39.24
8	±4.0	2	±52.32
9	±5.0	2	±65.40
10	±6.0	2	±78.48
11	±7.0	2	±91.56
12	±8.0	2	±104.64

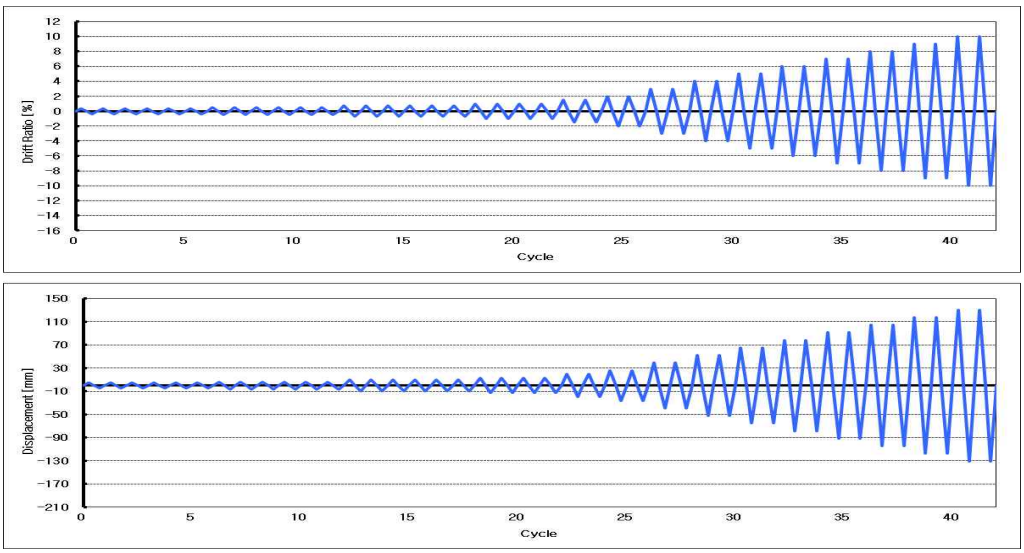


그림 2.2.11.14 반복재하 패턴

그림 2.2.11.15은 실험체 전경 도면이며 상·하부의 블록과 실험체의 상·하부의 플랜지와 연결하였다. 액추에이터 기준으로 미는 방향을 (+)방향, 당기는 방향을 (-)방향으로 정의하였다. 그림 2.2.11.16에 실험체별 세팅 사진을 나타내었다.

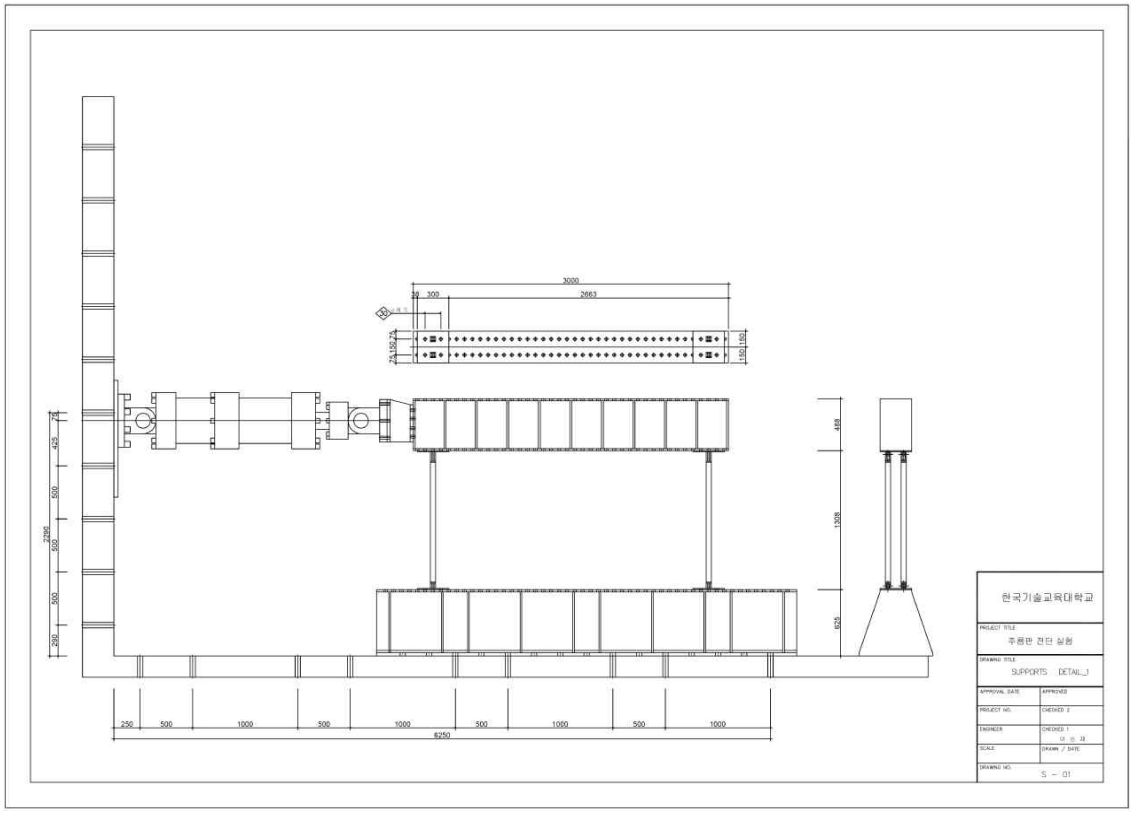
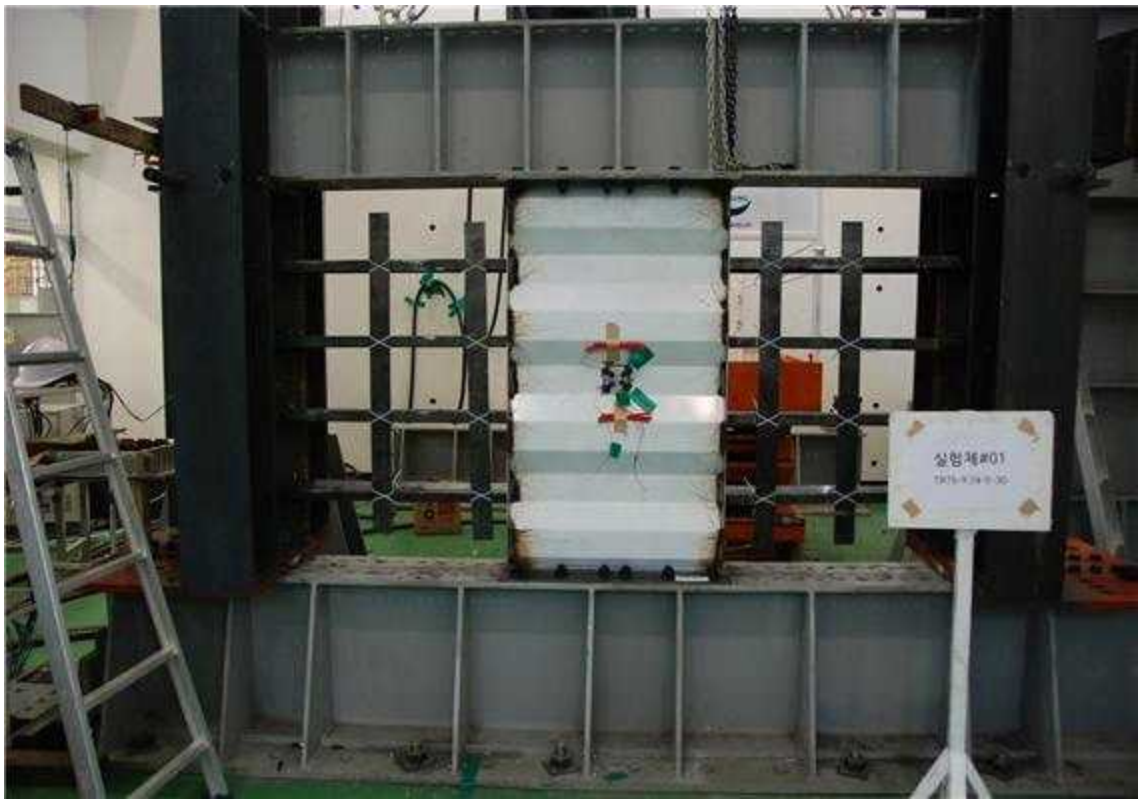
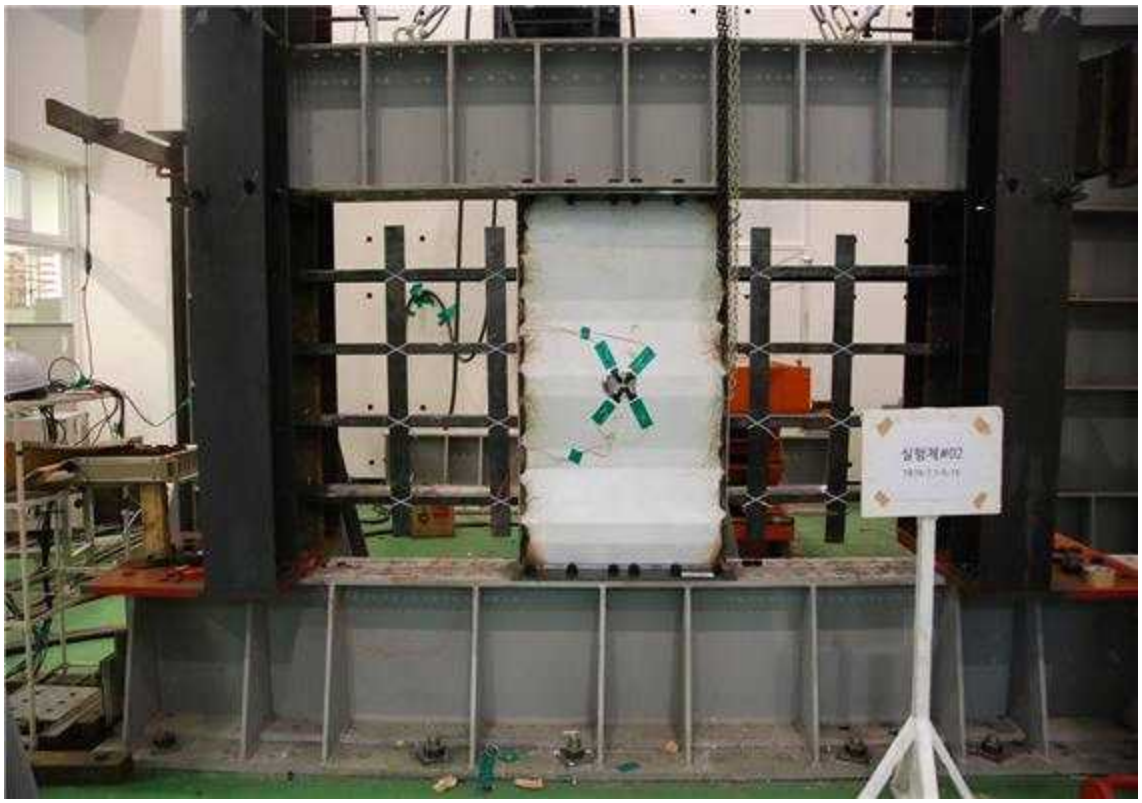


그림 2.2.11.15 실험 전경 도면



(a) #01 TR75-9.74-5-30

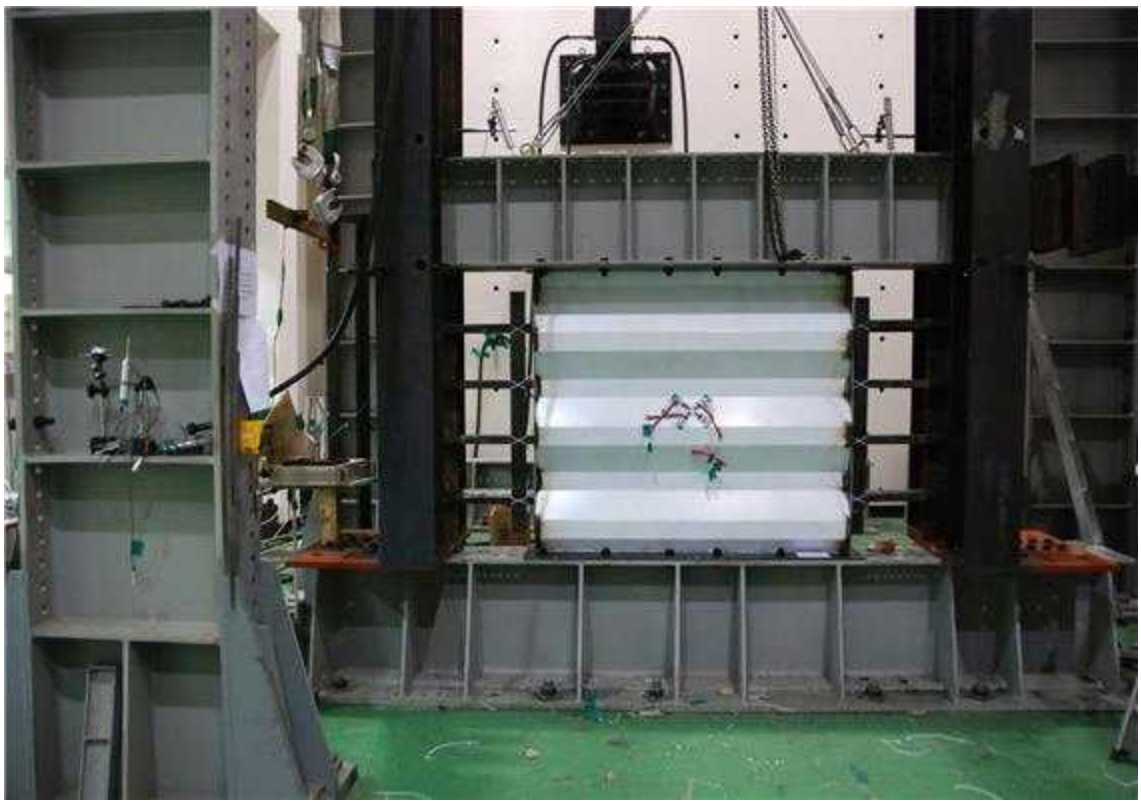


(b) #02 TR75-7.1-5-15

그림 2.2.11.16 실험체 셋팅(계속)

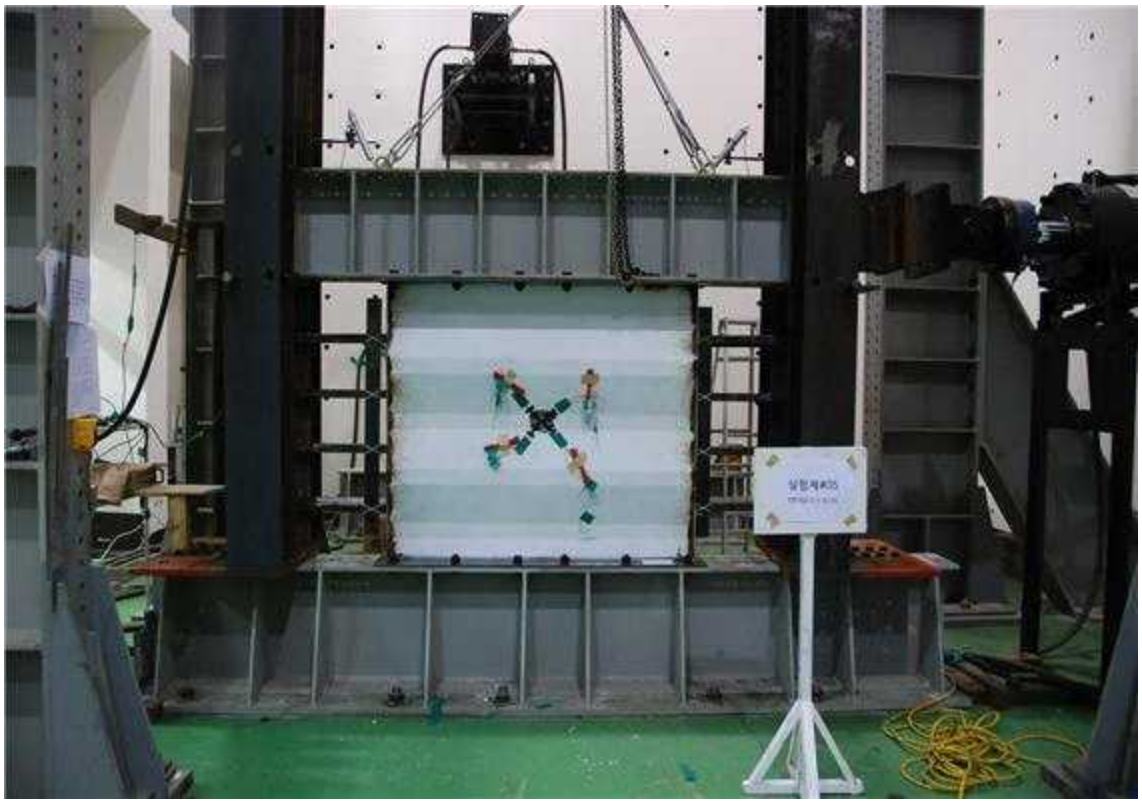


(c) #03 TR75-5.65-5-30

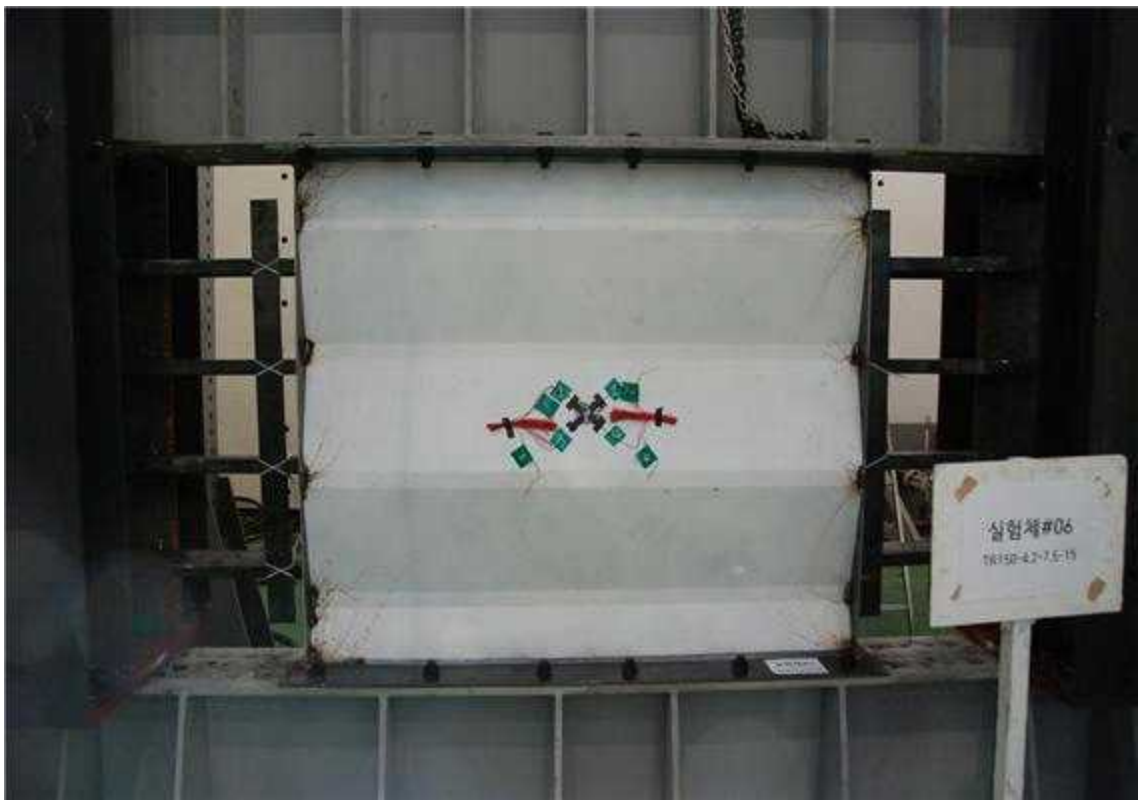


(d) #04 TR150-8.46-7.5-30

그림 2.2.11.16 실험체 셋팅(계속)



(e) #05 TR150-7.1-5-15

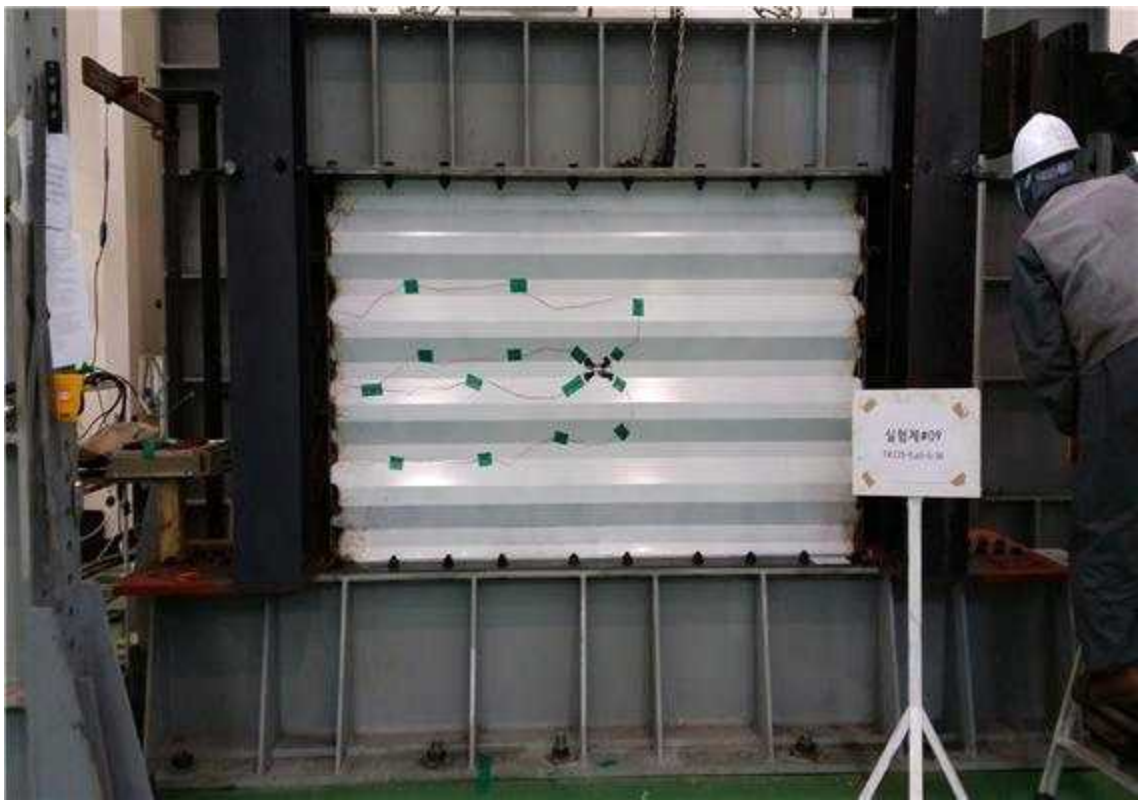


(f) #06 TR150-4.2-7.5-15

그림 2.2.11.16 실험체 셋팅(계속)



(g) #07 TR150-5.63-10-15

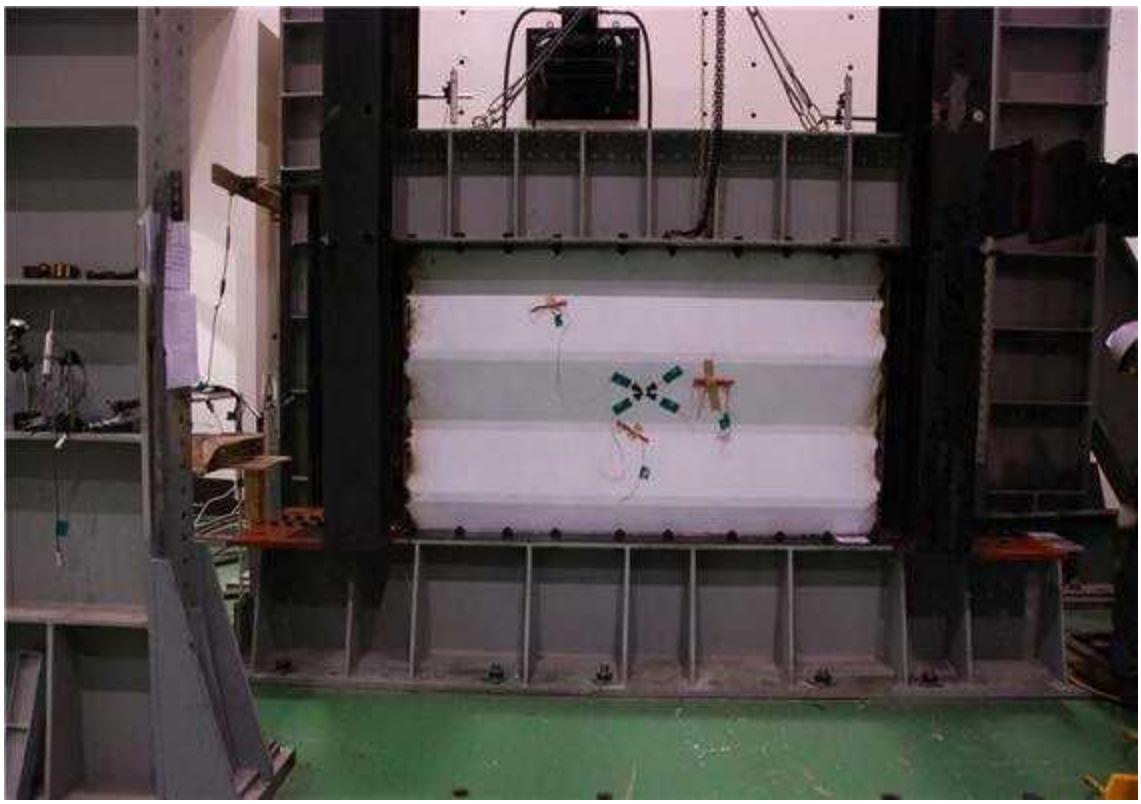


(h) #08 TR225-5.65-5-30

그림 2.2.11.16 실험체 셋팅(계속)



(i) #09 TR225-4.9-5-45



(j) #10 TR225-4.2-7.5-15

그림 2.2.11.16 실험체 셋팅(계속)



(k) #11 TR225-5.4-7.5-30



(l) #12 TR225-4.9-7.5-60

그림 2.2.11.16 실험체 셋팅(계속)

(3) 소재 인장시험

실험체 제작에 사용된 강재의 기계적 성질을 평가하기 위하여 소재 인장시험을 실시하였다. 시험편은 KS B 0801(금속 재료 인장 시험편)의 기준에 준하여 2.3mm 두께의 SS400급 강재를 실험체의 압연방향 및 압연수직방향으로 각각 4개씩 채취하였다. 시험편은 레이저가공으로 제작하였다. 제작된 시험편의 모양 및 치수는 그림 2.2.11.17과 표 2.2.11.5에 나타내었다.

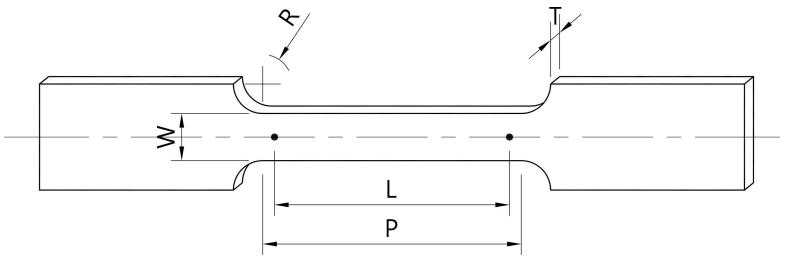


그림 2.2.11.17 금속 재료 인장 5호 시험편의 모양 및 치수

표 2.2.11.5 금속 재료 인장 5호 시험편의 구별

단위 : mm

구별	너비	표점 거리	평행부 길이	어깨부의 반지름	두께
	(W)	(L)	(P)	(R)	(T)
5호	25	50	약 60	15 이상	원래 두께대로

시험은 KOLAS(Korea Laboratory Accreditation Scheme) 인증기관에 의뢰하여 진행하였고, 시험 결과는 표 2.2.11.6에 나타낸다.

표 2.2.11.6 금속 재료 인장 5호 시험편의 시험결과

		비례한도	탄성계수	항복강도	항복 변형율	극한강도	극한강도 변형율
압연방향	H1	300.64	136654.7	323.15	0.0026	381.88	0.1051
	H2	300.90	136774.6	318.81	0.0009	376.31	0.117
	H3	260.12	144509.3	311.88	0.0028	373.68	0.0983
	H4	253.99	126997.1	311.18	0.004	378.90	0.0999
압연 수직방향	V1	302.82	131661.7	341.17	0.0028	374.64	0.0874
	V2	287.81	143906.4	337.69	0.0029	380.67	0.0928
	V3	277.39	138692.7	335.33	0.0032	380.59	0.0889
	V4	266.01	147783.3	349.75	0.0028	390.80	0.0935
평균		**281.21**	**138372.5**	**328.62**	**0.00275**	**379.68**	**0.0979**

나. 실험결과

(1) 실험체 #01 TR75-9.74-5-30

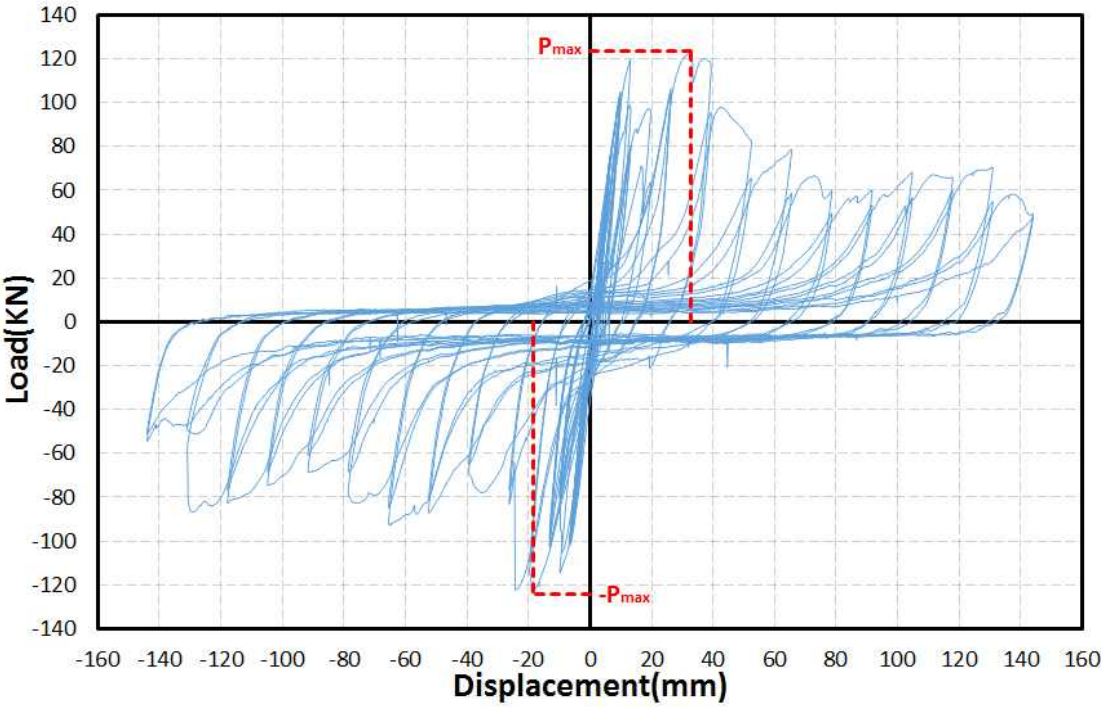
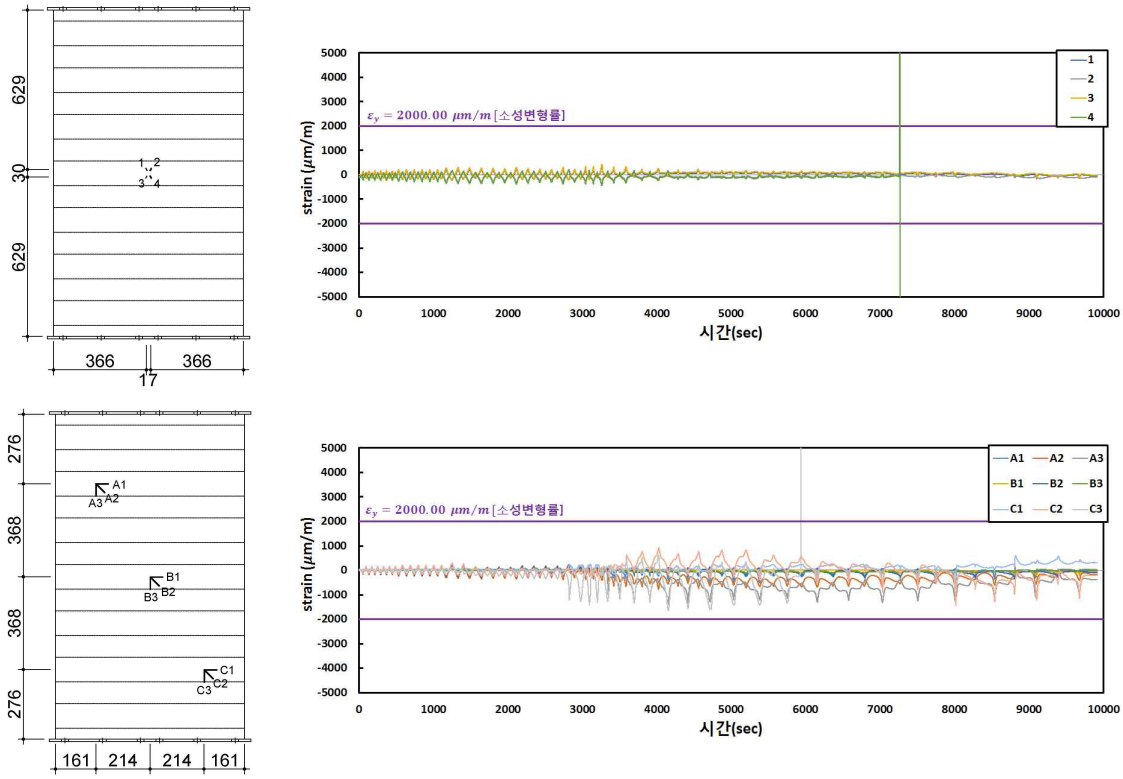


그림 2.2.11.18 하중-변위 관계 (#01 TR75-9.74-5-30)

표 2.2.11.7 실험결과표 (#01 TR75-9.74-5-30)

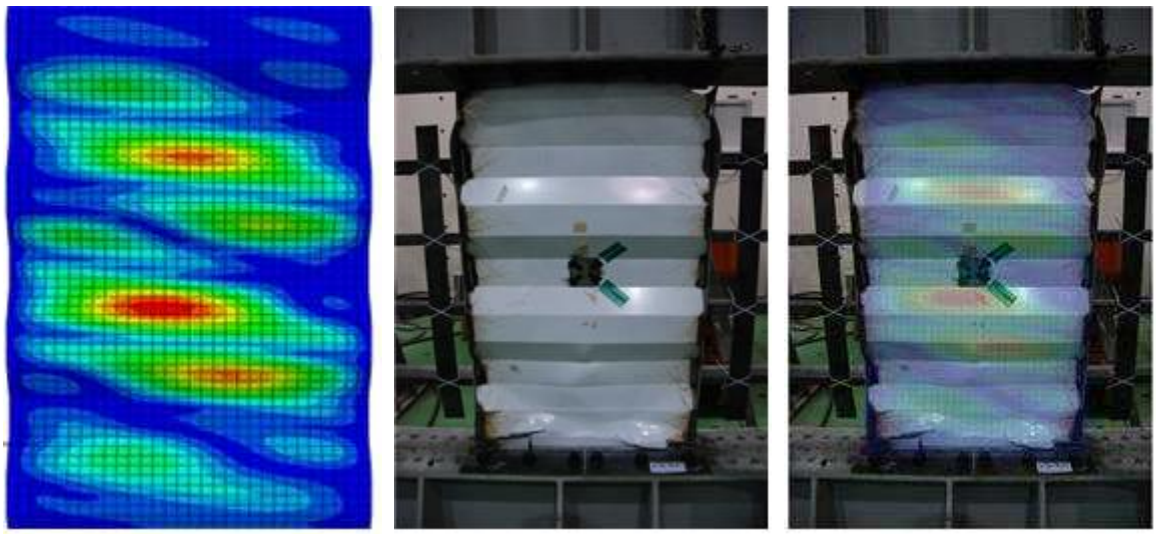
이론값				실험값				
전단항복강도	국부좌굴하중	전체좌굴하중	고유치해석 탄성 좌굴강도	최대하중	최대하중 시 변위	좌굴하중	좌굴 시 변위	전단강성
[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN/mm]
304.8	918.3	1583.7	875.5	123.5	32.6	-	-	3.79

실험체 #01 TR75-9.74-5-30는 변위가 (-)방향에서 하중 103.9kN일 때 하단부의 용접부가 찢어지기 시작하고 변위가 (+)방향에서 하중 70.56kN일 때 상단부의 용접부가 찢어지기 시작한다. 최대 하중 및 최대하중에 대한 변위는 (+)방향에서 123.5kN일 때 32.6mm이다. 실험결과 좌굴은 발생하지 않았으며 이론치 전단항복강도 대비 최대하중은 40.5% 수준을 나타내었다. 이는 상하부 용접부가 찢어지면서 발생하는 하중 저하로 예상된다.



(a) Strain Gage 위치 (b) Strain Gage 변형율의 시간이력

그림 2.2.11.19 변형율 분포 (#01 TR75-9.74-5-30)



(a) 고유치 해석결과 (b) 실험 후 결과 (c) 해석 및 실험결과 비교

그림 2.2.11.20 해석 및 실험 후 결과 (#01 TR75-9.74-5-30)

그림 2.2.11.19(b)는 Strain Gage 변형율의 시간이력곡선이다. 실험결과 1축 게이지 4번, 3축 게이지의 C3 방향을 제외하고 나머지 변형률 게이지는 소성화되지 않았다. 1축 게이지 4번, 3축 게이지의 C3 방향은 실험도중 게이지 선의 끊김으로 인해 소성화되었다.

그림 2.2.11.20은 고유치해석결과와 실험결과를 비교한 결과, 사진으로부터 해석에서의 좌

굴의 형상은 국부좌굴의 경향을 띄는 연성좌굴로 추측되며 실험 후 실험체에서도 몇 개의 골에 걸쳐 굽힘이 발생한다. 그러나 해석과는 달리 실험체의 중앙부에는 변화가 없다.

(2) 실험체 #02 TR75-7.1-5-15

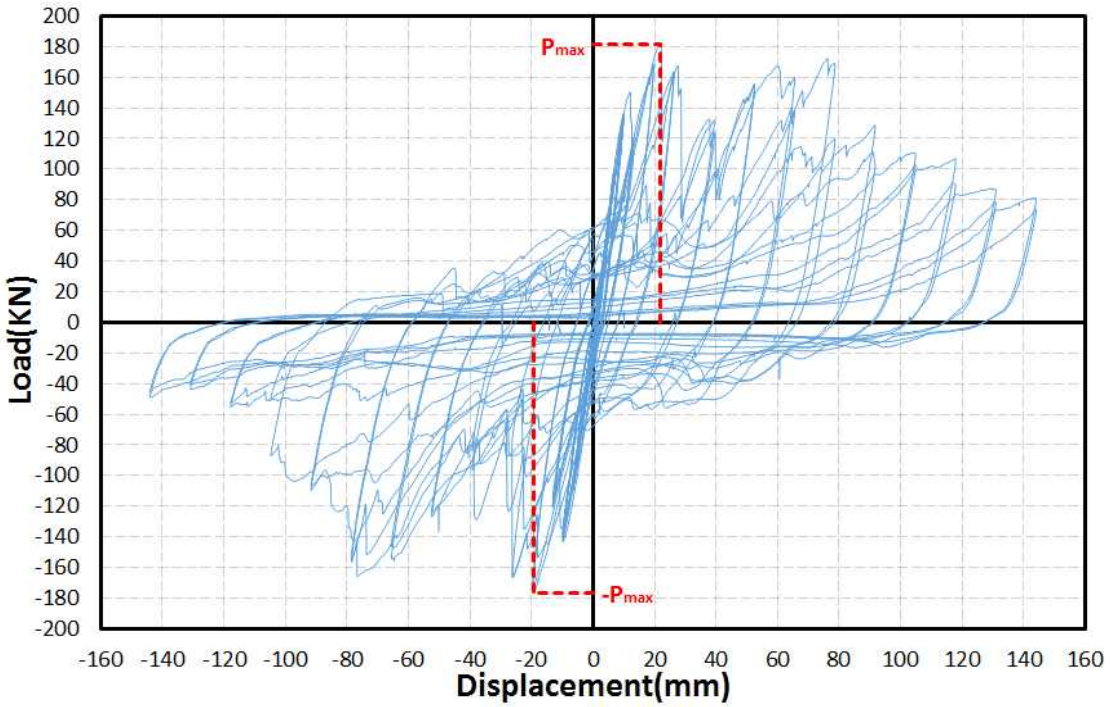
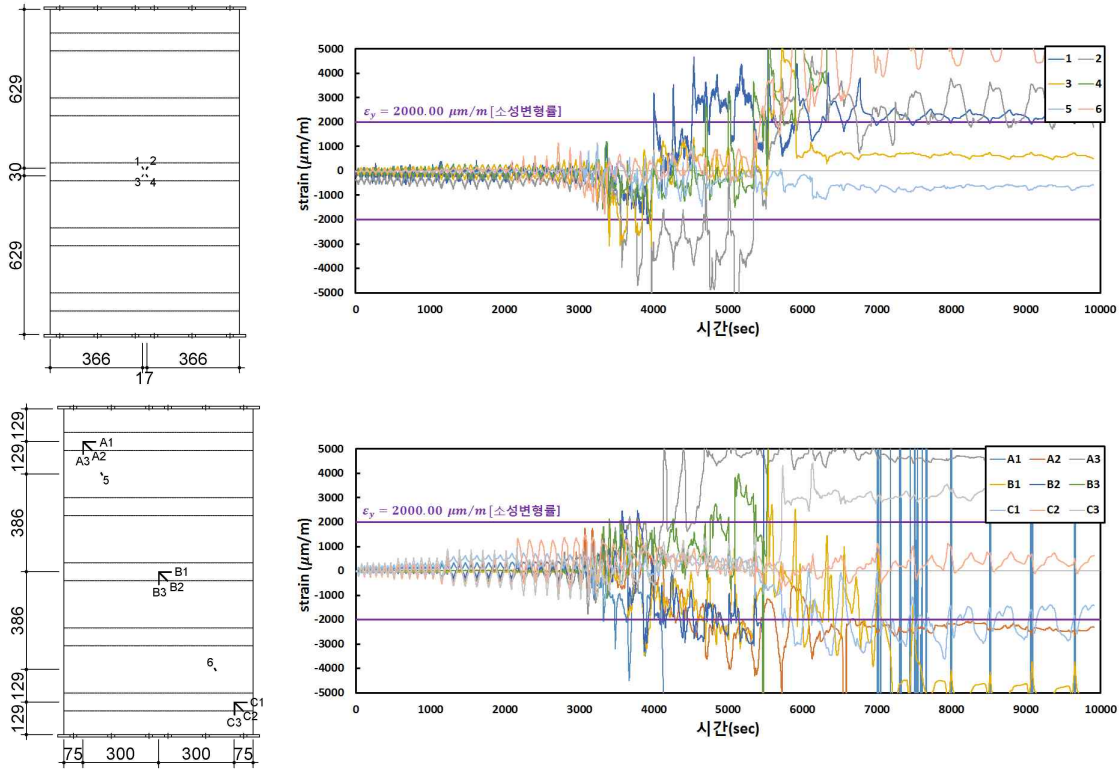


그림 2.2.11.21 하중-변위 관계 (#02 TR75-7.1-5-15)

표 2.2.11.8 실험결과표 (#02 TR75-7.1-5-15)

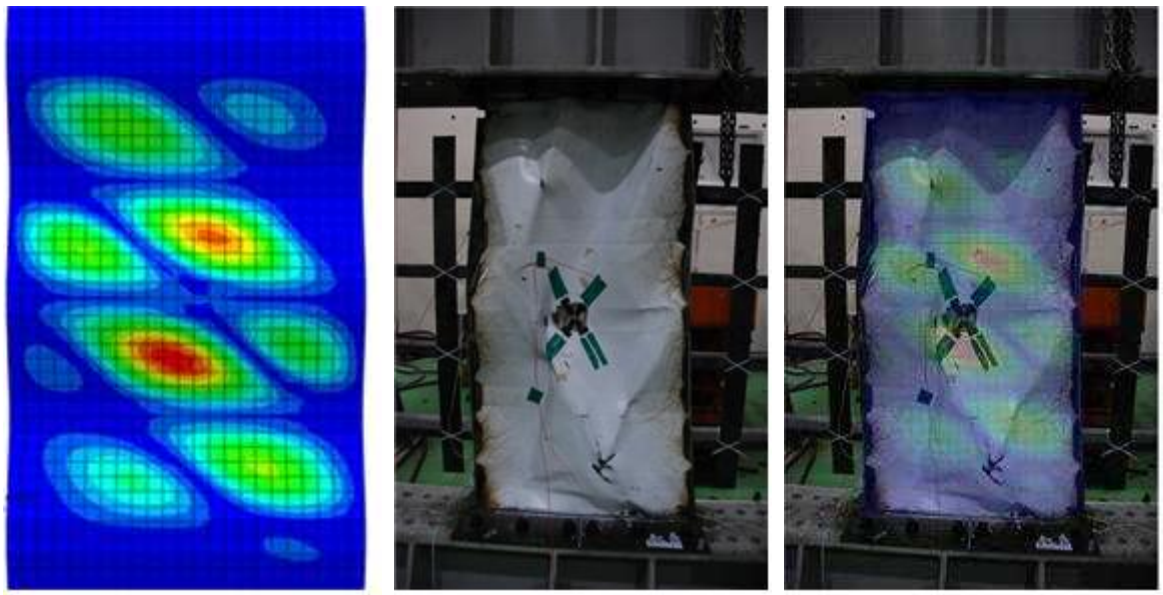
이론값				실험값				
전단항복강도	국부좌굴하중	전체좌굴하중	고유치해석 탄성 좌굴강도	최대하중	최대하중 시 변위	좌굴하중	좌굴 시 변위	전단강성
[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN/mm]
304.8	168.0	842.0	180.32	181.1	22.1	168.2	19.62	8.19

실험체 #02 TR75-7.1-5-15는 항복하중에 도달하기 전에 (-)방향, (+)방향 양축에서 좌굴이 발생한다. 좌굴은 (+)방향의 변위 19.62mm, 하중 168.2kN일 때 중앙부 하단에 초기 좌굴이 발생하며 이후 (-)방향의 변위 39.4mm, 하중 81.9kN일 때 상부에 좌굴이 발생한다. 좌굴은 반복하중을 통해 좌굴이 발생한 부분이 넓게 퍼져나간다. 초기 좌굴하중은 이론치 국부좌굴하중 대비 100.1% 수준으로 이론값과 실험값이 유사하게 나타났다.



(a) Strain Gage 위치 (b) Strain Gage 변형율의 시간이력

그림 2.2.11.22 변형율 분포 (#02 TR75-7.1-5-15)



(a) 고유치 해석결과 (b) 실험 후 결과 (c) 해석 및 실험결과 비교

그림 2.2.11.23 해석 및 실험 후 결과 (#02 TR75-7.1-5-15)

그림 2.2.11.22(b)는 Strain Gage 변형율의 시간이력곡선이다. 실험결과 1축 게이지 5번, 3축 게이지의 B2, C3 방향을 제외하고 나머지 변형률 게이지는 소성화되었다.

그림 2.2.11.23는 고유치해석결과와 실험결과를 비교한 결과, 실험결과가 해석과 유사하게 2개의 대각방향으로 좌굴이 발생한다. 그림 2.2.11.23(a)의 결과에서 좌굴형상은 국부좌굴의 형상을 띈다. 실험의 경우 좌굴이 시작하는 시점에서는 국부적으로 좌굴이 발생하다가 넓게 퍼지면서 전체적으로 좌굴이 발생하게 되며 그림 2.2.11.23(c)와 같이 동일한 유사한 좌굴형상을 보인다.

(3) 실험체 #03 TR75-5.65-5-30

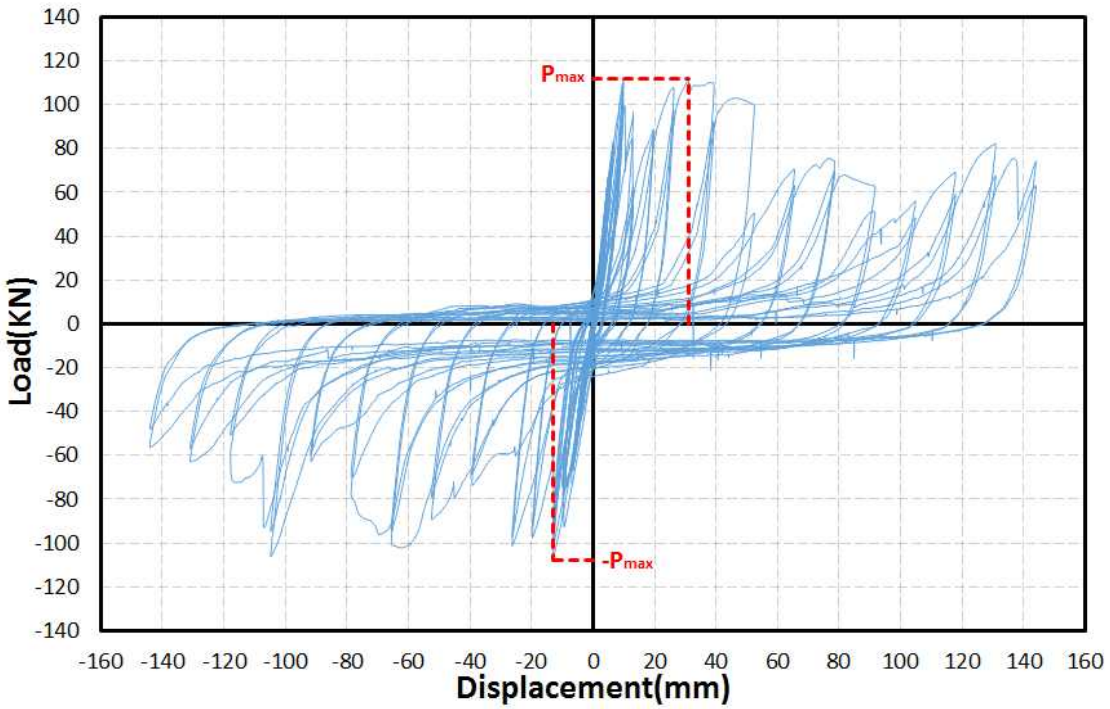
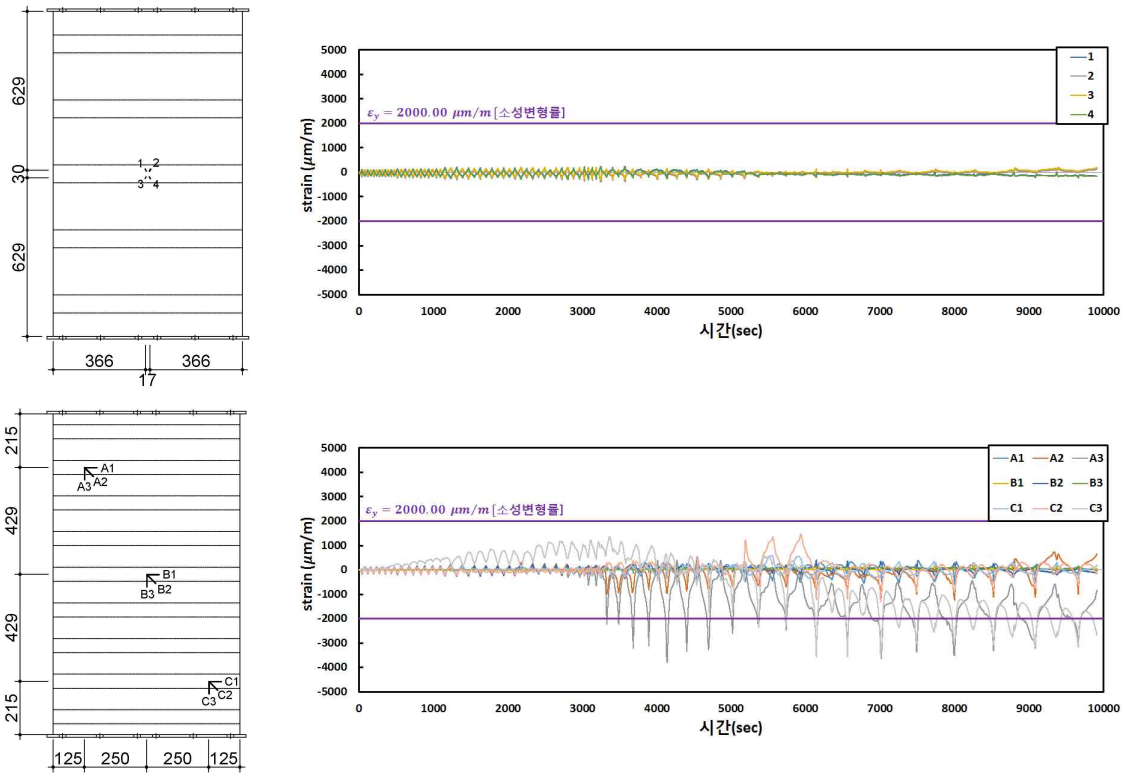


그림 2.2.11.24 하중-변위 관계 (#03 TR75-5.65-5-30)

표 2.2.11.9 실험 결과표 (#03 TR75-5.65-5-30)

이론값				실험값				
전단항복강도	국부좌굴하중	전체좌굴하중	고유치해석 탄성 좌굴강도	최대하중	최대하중 시 변위	좌굴하중	좌굴 시 변위	전단강성
[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN/mm]
304.8	605.2	899.2	421.5	111.7	31	-		3.60

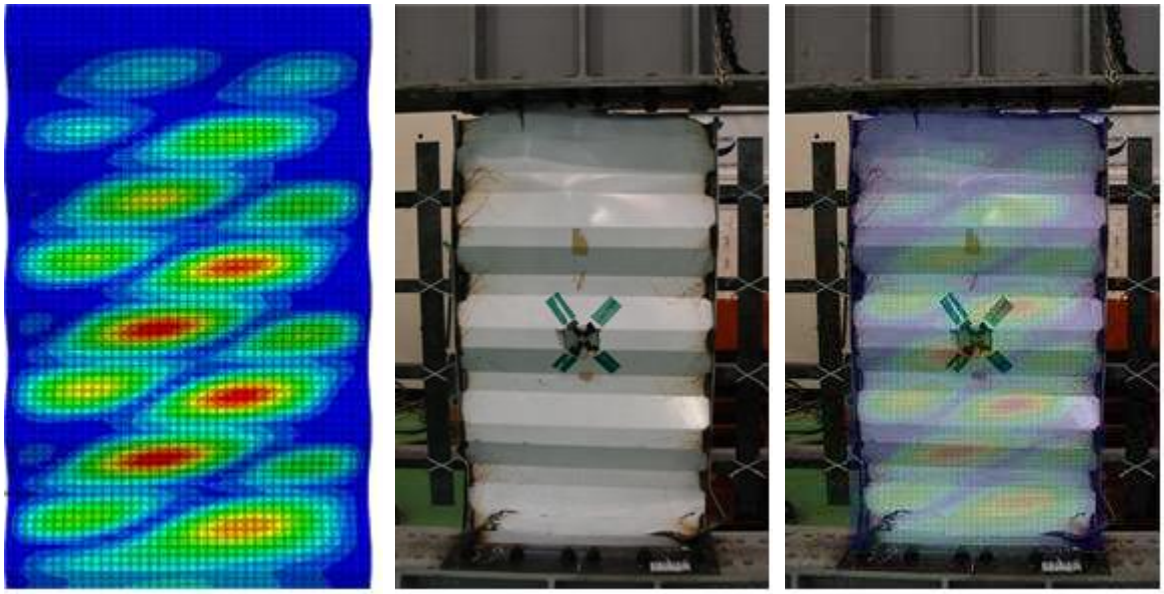
실험체 #03 TR75-5.65-5-30는 변위가 (-)방향에서 하중 78.4kN일 때 좌측 하단부의 용접부가 찢어지기 시작하고 변위가 (+)방향에서 하중 98kN일 때 우측 하단부의 용접부가 찢어지기 시작한다. 최대하중 및 최대하중에 대한 변위는 (+)방향에서 111.7kN일 때 31mm이다. 실험결과 좌굴은 발생하지 않았으며 이론치 전단항복강도 대비 최대하중은 36.6% 수준을 나타내었다. 이는 상하부 용접부가 찢어지면서 발생하는 하중 저하로 예상된다.



(a) Strain Gage 위치 (b) Strain Gage 변형율의 시간이력

그림 2.2.11.25 변형율 분포 (#03 TR75-5.65-5-30)

그림 2.2.11.25(b)은 Strain Gage 변형율의 시간이력곡선이다. 실험결과 3축 게이지의 A3과 C3 방향을 제외하고 나머지 변형률 게이지는 소성화되지 않았다. 3축 게이지의 A3과 C3 방향은 주름판 좌, 우측의 플랜지와의 용접부가 찢어지면서 주름의 형상을 유지하지 못하고 주름이 펴지며 소성화되었다.



(a) 고유치 해석결과 (b) 실험 후 결과 (c) 해석 및 실험결과 비교

그림 2.2.11.26 해석 및 실험 후 결과 (#03 TR75-5.65-5-30)

그림 2.2.11.26은 고유치해석결과와 실험결과를 비교한 결과, 사진으로부터 해석에서의 좌굴의 형상은 국부좌굴이 나타나며 실험 후 실험체에서도 몇 개의 골에 걸쳐 굽힘이 발생한다. 그러나 해석과는 달리 실험체의 중앙부에는 변화가 없다.

(4) 실험체 #04 TR150-8.46-7.5-30

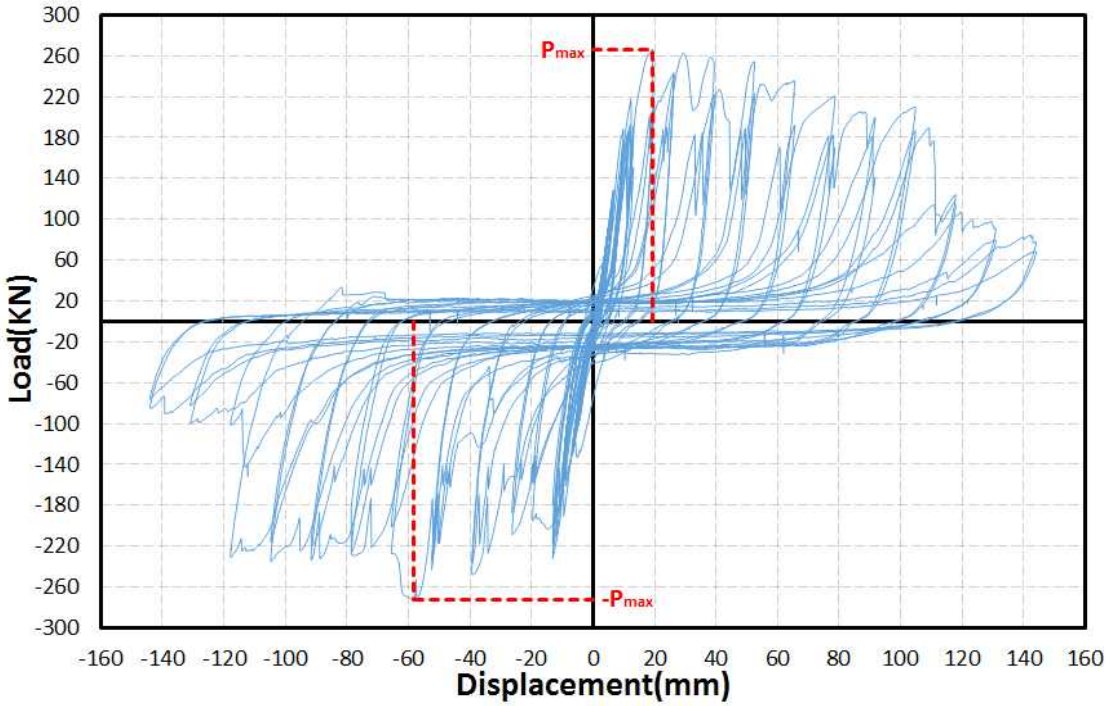
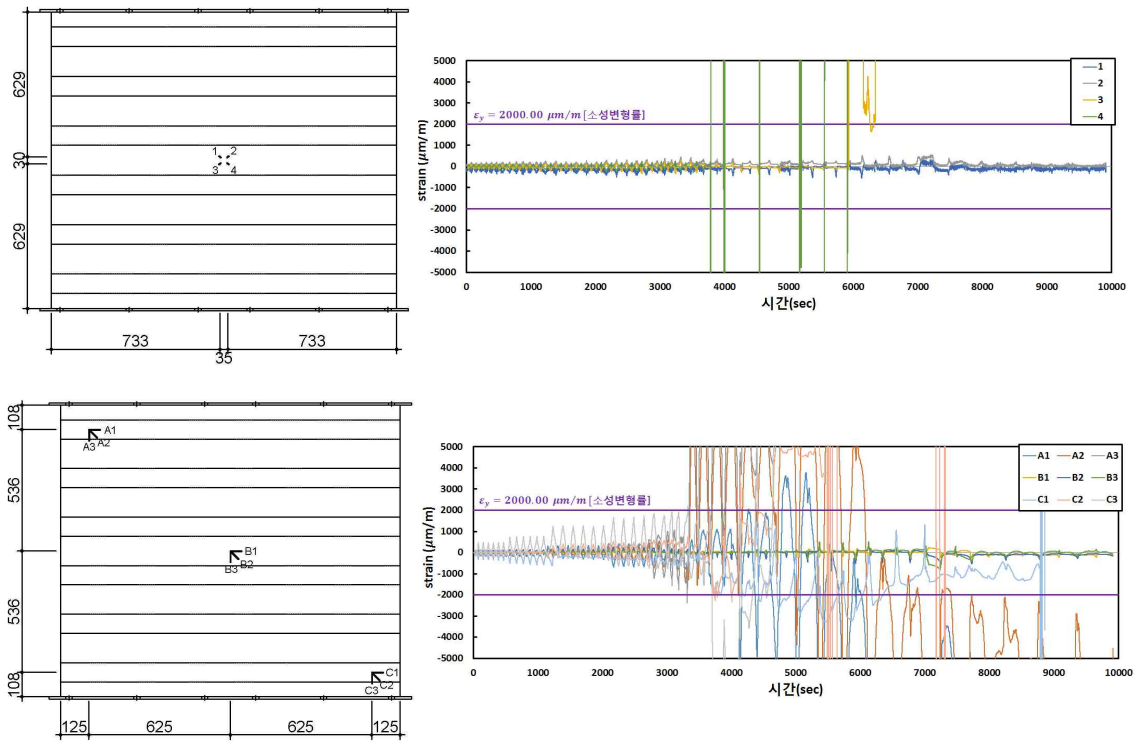


그림 2.2.11.27 하중-변위 관계 (#04 TR150-8.46-7.5-30)

표 2.2.11.10 실험 결과표 (#04 TR150-8.46-7.5-30)

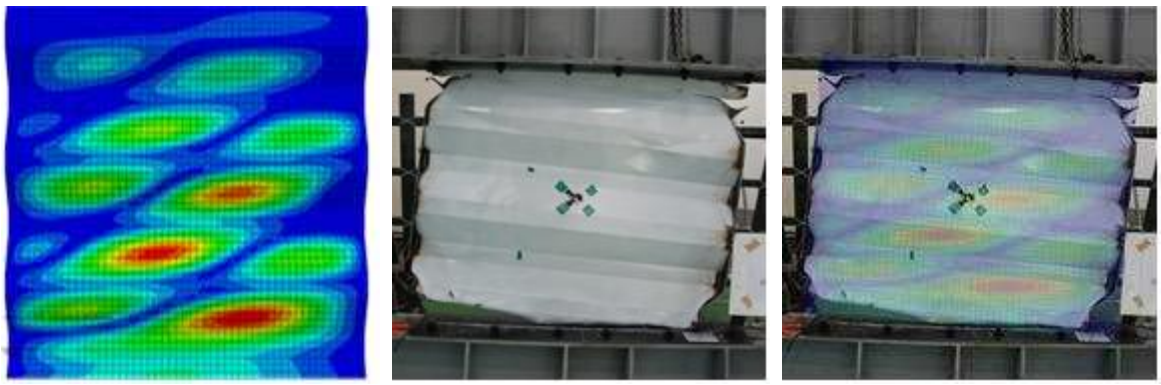
이론값				실험값				
전단항복강도	국부좌굴하중	전체좌굴하중	고유치해석 탄성 좌굴강도	최대하중	최대하중시 변위	좌굴하중	좌굴시 변위	전단강성
[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN/mm]
608.6	1198.5	509.2	633.0	202.2	58.4	-	-	3.46

실험체 #04 TR150-8.46-7.5-30는 변위가 (-)방향에서 하중 154.8kN일 때 좌측 하단부의 용접부가 찢어지기 시작하고 변위가 (+)방향에서 하중 243.0kN일 때 우측 하단부의 용접부가 찢어지기 시작한다. 최대하중 및 최대하중에 대한 변위는 (-)방향에서 202.2kN일 때 58.4mm이다. 실험결과 좌굴은 발생하지 않았으며 이론치 전단항복강도 대비 최대하중은 39.7% 수준을 나타내었다. 이는 상하부 용접부가 찢어지면서 발생하는 하중 저하로 예상된다.



(a) Strain Gage 위치 (b) Strain Gage 변형율의 시간이력

그림 2.2.11.28 변형율 분포 (#04 TR150-8.46-7.5-30)



(a) 고유치 해석결과 (b) 실험 후 결과 (c) 해석 및 실험결과 비교

그림 2.2.11.29 해석 및 실험 후 결과 (#04 TR150-8.46-7.5-30)

그림 2.2.11.28(b)는 Strain Gage 변형율의 시간이력곡선이다. 실험결과 1축게이지 1번, 2번과 3축 게이지의 B, C1방향을 제외하고 나머지 변형률 게이지는 소성화되었다. 1축게이지 1번, 2번과 3축 게이지의 B방향은 중앙부가 변형이 발생하지 않아 변형량이 탄성범위 내에 있다.

그림 2.2.11.29은 고유치해석결과와 실험결과를 비교한 결과, 해석에서의 좌굴의 형상은 상부는 국부좌굴이 나타나며 하부는 국부좌굴경향의 연성좌굴이 발생한다. 실험 후 실험체의 경우 몇 개의 골에 걸쳐 굽힘이 발생한다. 상·하부의 굽힘의 형상은 해석결과와 유사하게 나타나나 해석과는 달리 실험체의 중앙부에는 변화가 없다.

(5) 실험체 #05 TR150-7.1-5-15

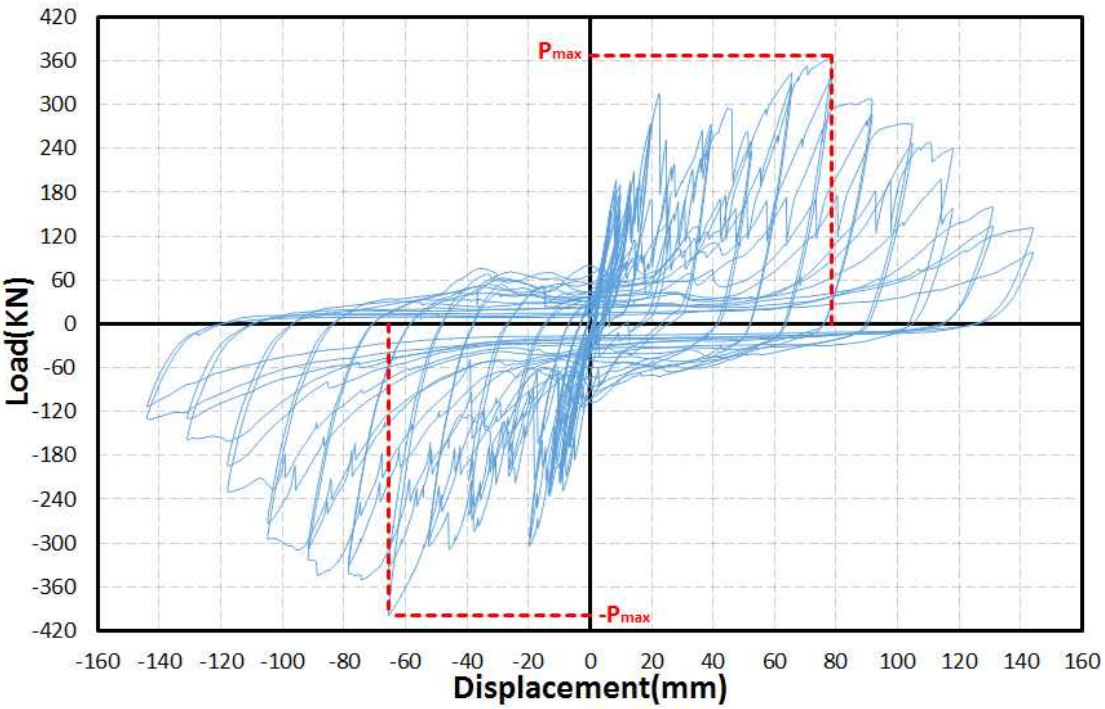
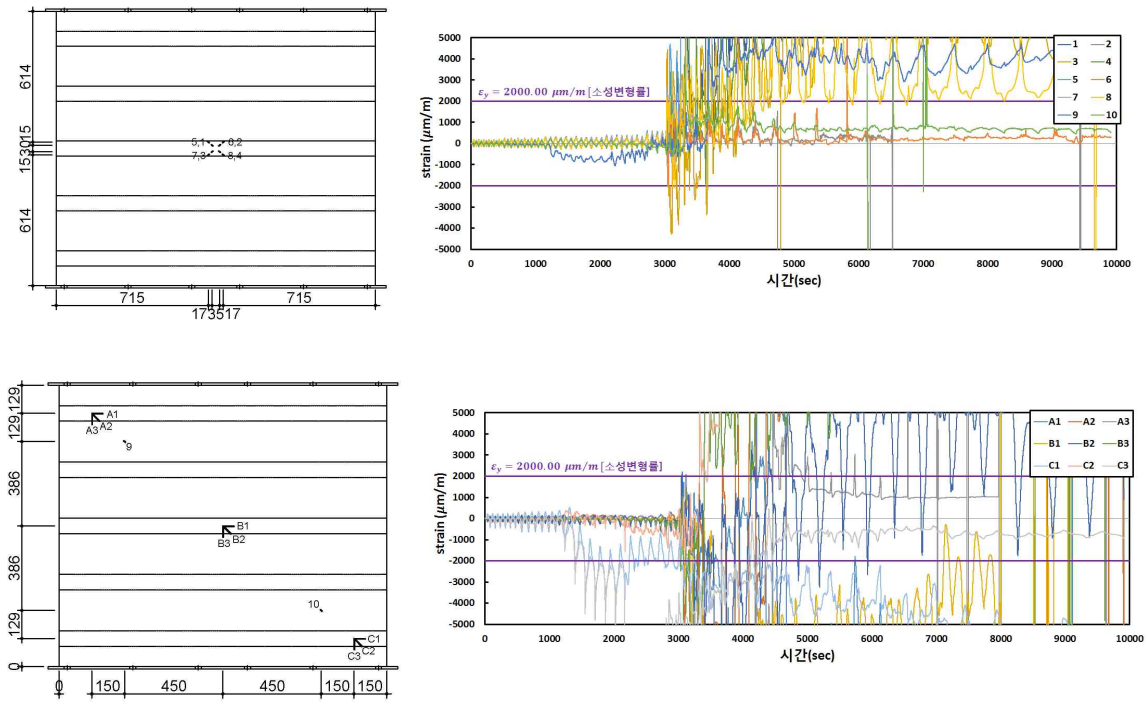


그림 2.2.11.30 하중-변위 관계 (#05 TR150-7.1-5-15)

표 2.2.11.11 실험 결과표 (#05 TR150-7.1-5-15)

이론값				실험값				
전단항복 강도	국부좌굴 하중	전체좌굴 하중	고유치해석 탄성 좌굴강도	최대 하중	최대하중 시 변위	좌굴 하중	좌굴 시 변위	전단강성
[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN/mm]
608.6	324.1	421.0	316.1	399.1	65.5	315.6	22.6	6.09

실험체 #05 TR150-7.1-5-15는 항복하중에 도달하기 전에 (-)방향, (+)방향 양축에서 좌굴이 발생한다. 좌굴은 (+)방향의 변위 19.62mm, 하중 267.5kN일 때 사선방향(/)의 좌굴이 발생하며 이후 (-)방향의 변위 39.2mm, 하중 262.64kN일 때 사선방향(\ )의 좌굴이 발생한다. 초기 좌굴하중은 이론치 국부좌굴하중 대비 97.4% 수준으로 이론값과 실험값이 유사하게 나타났다.



(a) Strain Gage 위치 (b) Strain Gage 변형율의 시간이력

그림 2.2.11.31 변형율 분포 (#05 TR150-7.1-5-15)



(a) 고유치 해석결과 (b) 실험 후 결과 (c) 해석 및 실험결과 비교

그림 2.2.11.32 해석 및 실험 후 결과 (#05 TR150-7.1-5-15)

그림 2.2.11.31(b)는 Strain Gage 변형율의 시간이력곡선이다. 실험결과 하부끝단의 3축 게이지의 C1, C3 방향을 제외하고 나머지 변형률 게이지는 좌굴이 발생한 이후 탄성한계에 들어섰다. 3축 게이지의 C1, C1 방향은 하부끝단의 주름판이 찢어지면서 변형률이 증가하여 소성화되었다.

그림 2.2.11.32은 고유치해석결과와 실험결과를 비교한 결과, 실험결과가 해석과 유사하게 2개의 대각방향으로 좌굴이 발생한다. 그림 2.2.11.32(a)의 결과에서 좌굴형상은 국부좌굴의 형상을 띈다. 실험의 경우 좌굴이 시작하는 시점의 좌굴형상이 해석결과의 좌굴형상과 유사하게 나타난다.

(6) 실험체 #06 TR150-4.2-7.5-15

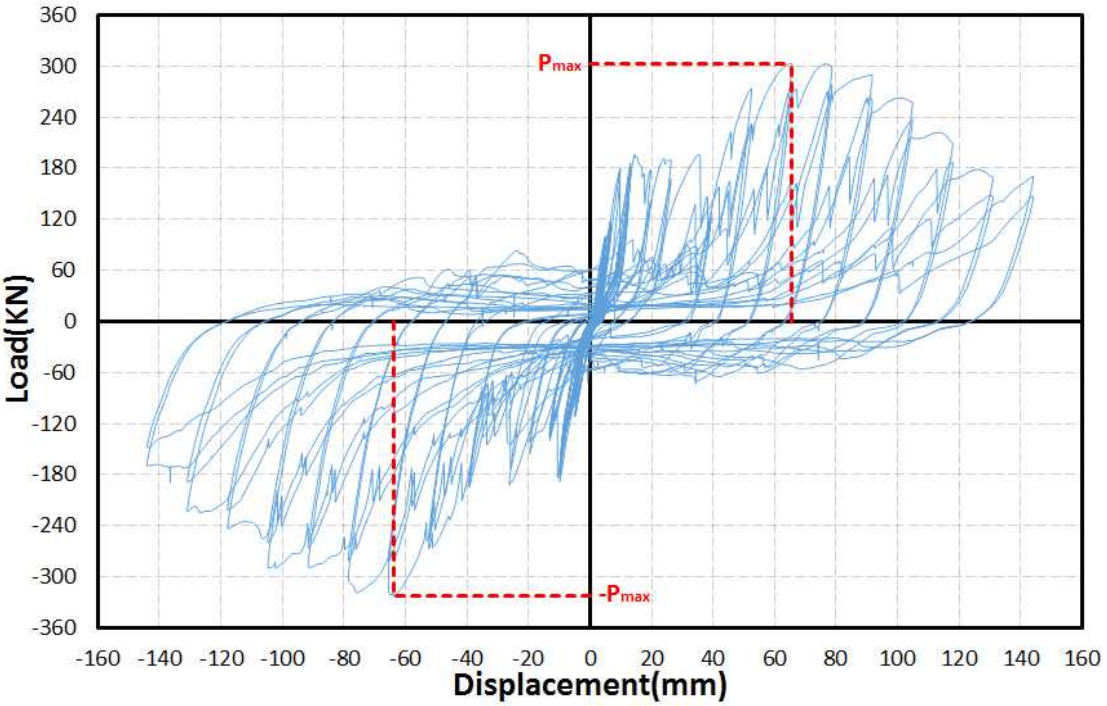
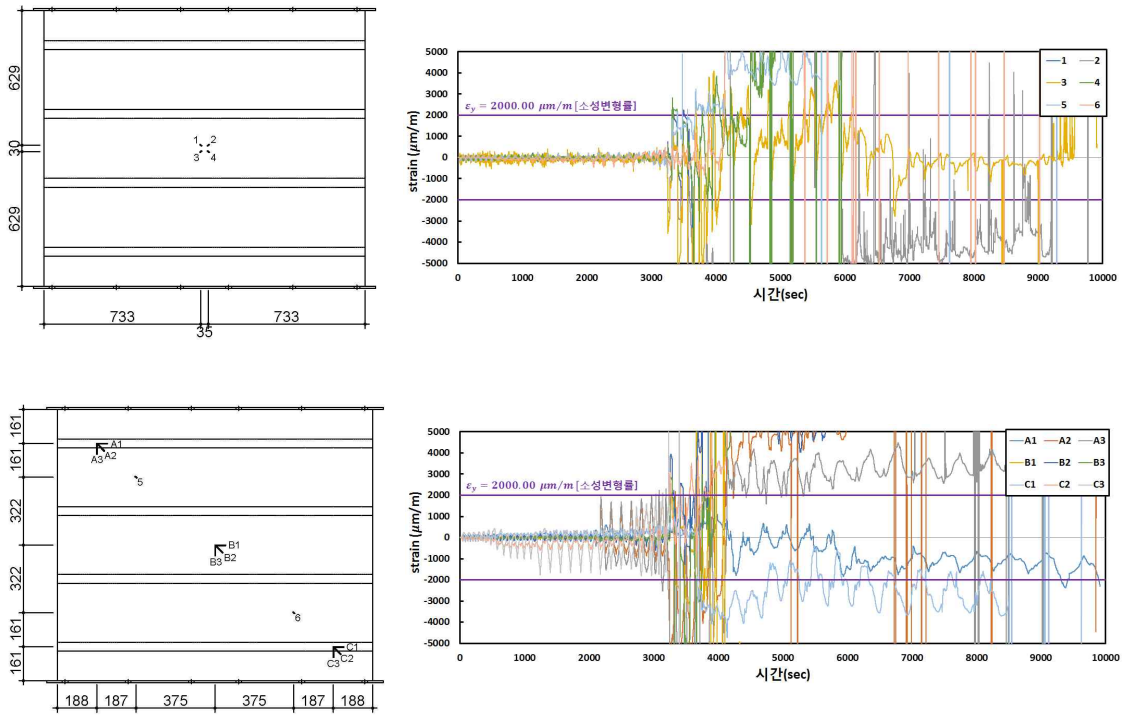


그림 2.2.11.33 하중-변위 관계 (#06 TR150-4.2-7.5-15)

표 2.2.11.12 실험 결과표 (#06 TR150-4.2-7.5-15)

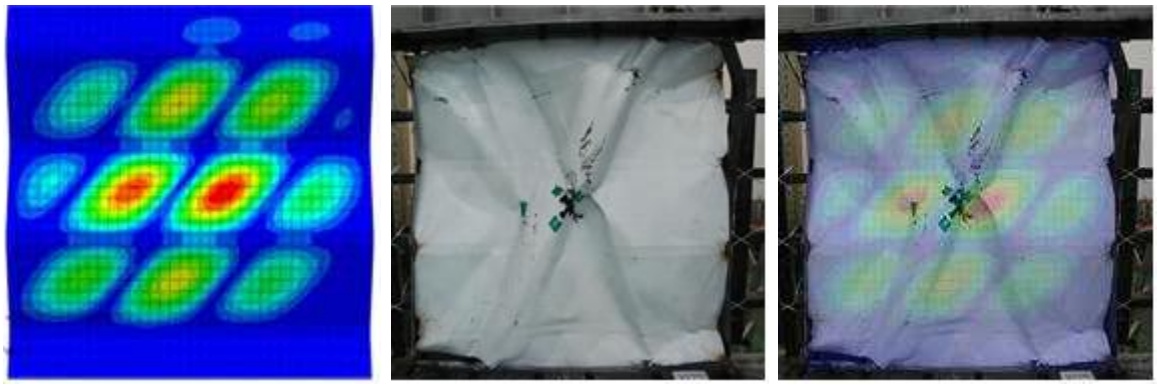
이론값				실험값				
전단항복 강도	국부좌굴 하중	전체좌굴 하중	고유치해석 탄성 좌굴강도	최대 하중	최대하중 시 변위	좌굴 하중	좌굴 시 변위	전단강성
[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN/mm]
608.6	146.2	665.1	151.5	323.1	64	190.1	26.1	5.05

실험체 #06 TR150-4.2-7.5-15는 항복하중에 도달하기 전에 (-)방향, (+)방향 양축에서 좌굴이 발생한다. 좌굴은 (+)방향의 변위 19.62mm, 하중 190.1kN일 때 사선방향(/)의 좌굴이 발생하며 이후 (-)방향에 사선방향(\ )의 좌굴이 발생한다. 초기 좌굴하중은 이론치 국부좌굴하중 대비 130.0% 수준으로 이론값보다 실험값이 30%이상 크게 나타났다.



(a) Strain Gage 위치 (b) Strain Gage 변형율의 시간이력

그림 2.2.11.34 변형율 분포 (#06 TR150-4.2-7.5-15)



(a) 고유치 해석결과 (b) 실험 후 결과 (c) 해석 및 실험결과 비교

그림 2.2.11.35 해석 및 실험 후 결과 (#06 TR150-4.2-7.5-15)

그림 2.2.11.34(b)는 Strain Gage 변형율의 시간이력곡선이다. 실험결과 양끝단의 3축 게이지의 A2, A3 및 C2, C3 방향을 제외하고 나머지 변형률 게이지는 좌굴이 발생한 이후 탄성한계에 들어섰다. 3축 게이지의 A2, A3 및 C2, C3 방향은 양끝단의 주름판이 찢어지면서 변형률이 증가하여 소성화되었다.

그림 2.2.11.35은 고유치해석결과와 실험결과를 비교한 결과 그림 2.2.11.35(a)의 결과에서 좌굴형상은 국부좌굴의 형상을 띈다. 실험의 경우 좌굴이 시작하는 시점의 좌굴형상이 해석결과의 좌굴형상과 유사하게 나타난다.

(7) 실험체 #07 TR150-5.63-10-15

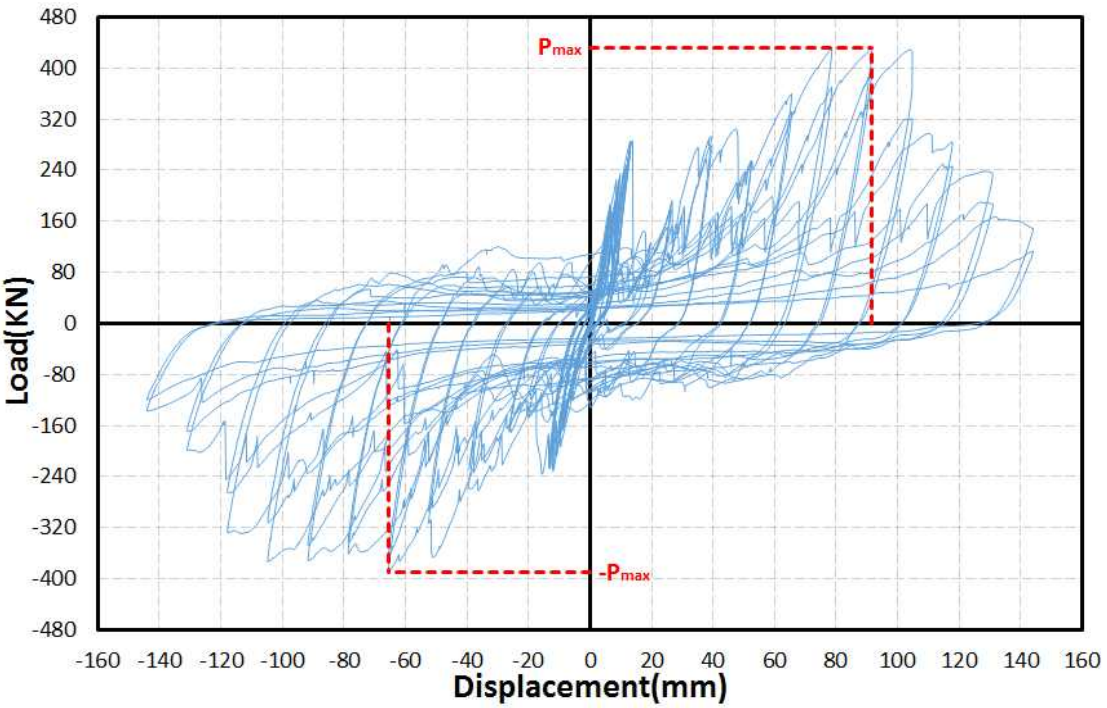
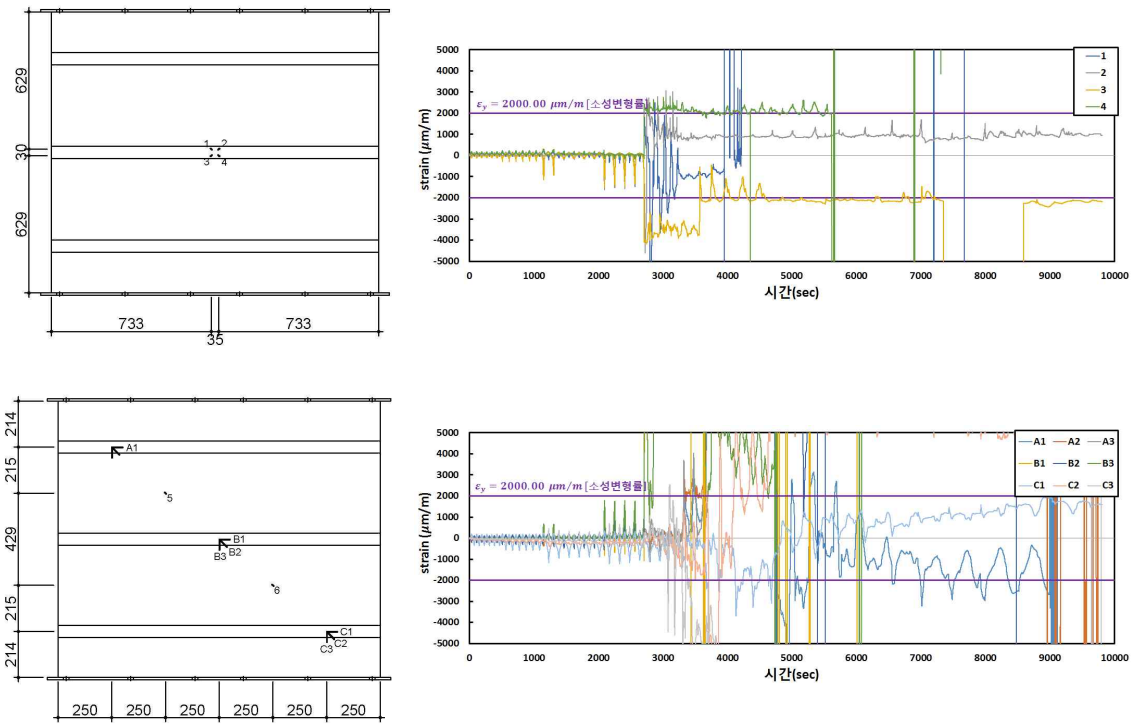


그림 2.2.11.36 하중-변위 관계 (#07 TR150-5.63-10-15)

표 2.2.11.13 실험 결과표 (#07 TR150-5.63-10-15)

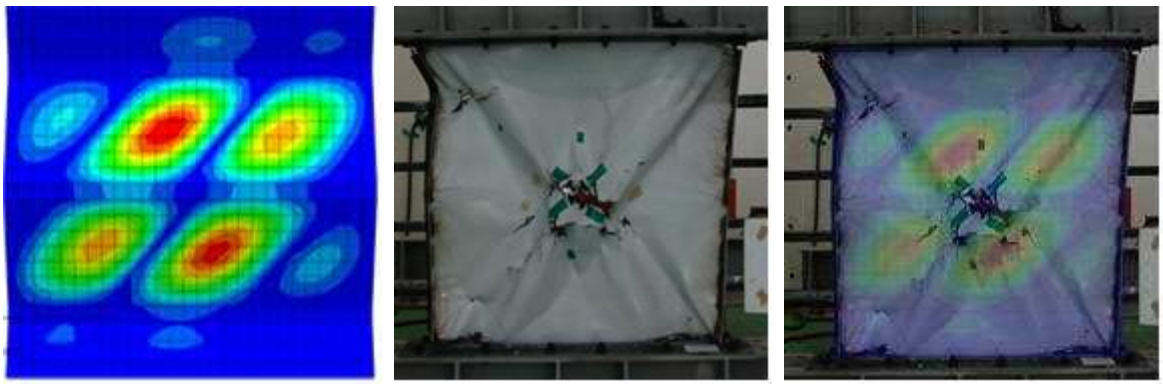
이론값				실험값				
전단항복 강도	국부좌굴 하중	전체좌굴 하중	고유치해석 탄성 좌굴강도	최대 하중	최대하중 시 변위	좌굴 하중	좌굴 시 변위	전단강성
[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN/mm]
608.6	84.0	1025.1	99.1	431.0	91.6	284.2	13.08	4.71

실험체 #07 TR150-5.63-10-15는 항복하중에 도달하기 전에 (-)방향, (+)방향 양축에서 좌굴이 발생한다. 좌굴은 (+)방향의 변위 13.08mm, 하중 284.2kN일 때 사선방향(/)의 좌굴이 발생하며 좌측하부의 용접부가 찢어진다. 이후 (-)방향에 사선방향(\ )의 좌굴이 발생한다. 초기 좌굴하중은 이론치 국부좌굴하중 대비 338% 수준으로 이론값보다 실험값이 3배 이상 크게 나타났다.



(a) Strain Gage 위치 (b) Strain Gage 변형율의 시간이력

그림 2.2.11.37 변형율 분포 (#07 TR150-5.63-10-15)



(a) 고유치 해석결과 (b) 실험 후 결과 (c) 해석 및 실험결과 비교

그림 2.2.11.38 해석 및 실험 후 결과 (#07 TR150-5.63-10-15)

그림 2.2.11.37(b)는 Strain Gage 변형율의 시간이력곡선이다. 실험결과 모든 변형률 게이지는 좌굴이 발생한 이후 소성화 되었으며 좌굴이 탄성범위에서 발생하였다.

그림 2.2.11.38는 고유치해석결과와 실험결과를 비교한 결과 그림 2.2.11.38(a)의 결과에서 좌굴형상은 국부좌굴의 형상을 띈다. 실험의 경우 좌굴이 시작하는 시점의 좌굴형상이 해석결과의 좌굴형상과 유사하게 나타난다.

(8) 실험체 #08 TR225-5.65-5-30

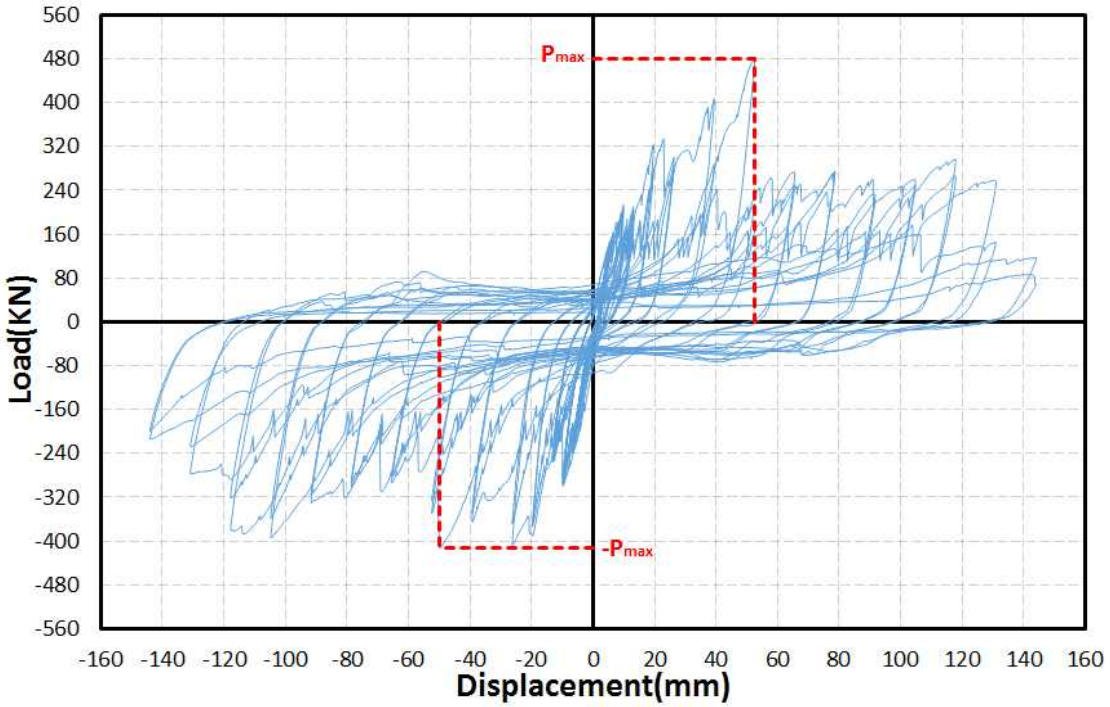
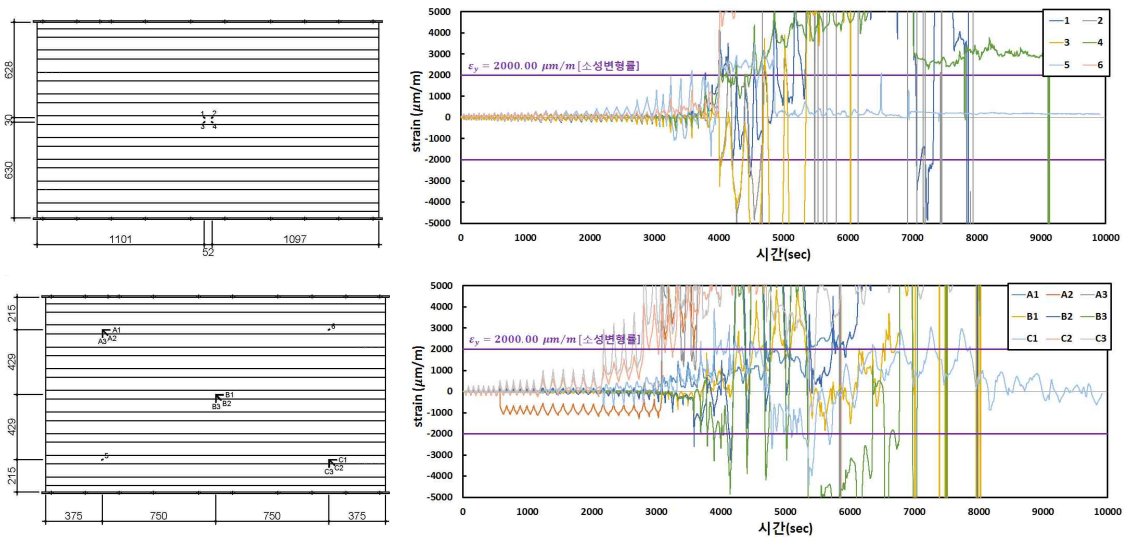


그림 2.2.11.39 하중-변위 관계 (#08 TR225-5.65-5-30)

표 2.2.11.14 실험 결과표 (#08 TR225-5.65-5-30)

이론값				실험값				
전단항복 강도	국부좌굴 하중	전체좌굴 하중	고유치해석 탄성 좌굴강도	최대 하중	최대하중 시 변위	좌굴 하중	좌굴 시 변위	전단강성
[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN/mm]
912.9	1794.4	315.6	654.4	479.2	52.4	479.2	52.4	9.15

실험체 #08 TR225-5.65-5-30는 항복하중에 도달하기 전에 (-)방향, (+)방향 양축에서 좌굴이 발생한다. 좌굴하중은 최대하중과 동일하며 (+)방향의 변위 52.4mm, 하중 479.2kN일 때 사선방향(/)의 좌굴이 발생하며 이후 (-)방향에 사선방향(\ )의 좌굴이 발생한다. 초기 좌굴하중은 이론치 국부좌굴하중 대비 152% 수준으로 이론값보다 실험값이 50% 이상 크게 나타났다.



(a) Strain Gage 위치 (b) Strain Gage 변형율의 시간이력

그림 2.2.11.40 변형율 분포 (#08 TR225-5.65-5-30)



(a) 고유치 해석결과 (b) 실험 후 결과 (c) 해석 및 실험결과 비교

그림 2.2.11.41 해석 및 실험 후 결과 (#08 TR225-5.65-5-30)

그림 2.2.11.40(b)는 Strain Gage 변형율의 시간이력곡선이다. 실험결과 양끝단의 3축 게이

지의 C2, C3 방향을 제외하고 나머지 변형률 게이지는 좌굴이 발생한 이후 소성 범위에 들어섰다. 3축 게이지의 C2, C3 방향은 양끝단의 주름판이 찢어지면서 변형률이 증가하여 소성화되었다.

그림 2.2.11.41는 고유치해석결과와 실험결과를 비교한 결과 그림 2.2.11.41(a)의 결과에서 좌굴형상은 전체좌굴의 형상을 띈다. 실험결과의 경우 사선으로 좌굴이 발생하였으나 변위 52.40mm, 하중 479.25kN일 때 중앙부에서 판이 안으로 굽는 현상이 나타난다.

(9) 실험체 #09 TR225-5.65-5-30

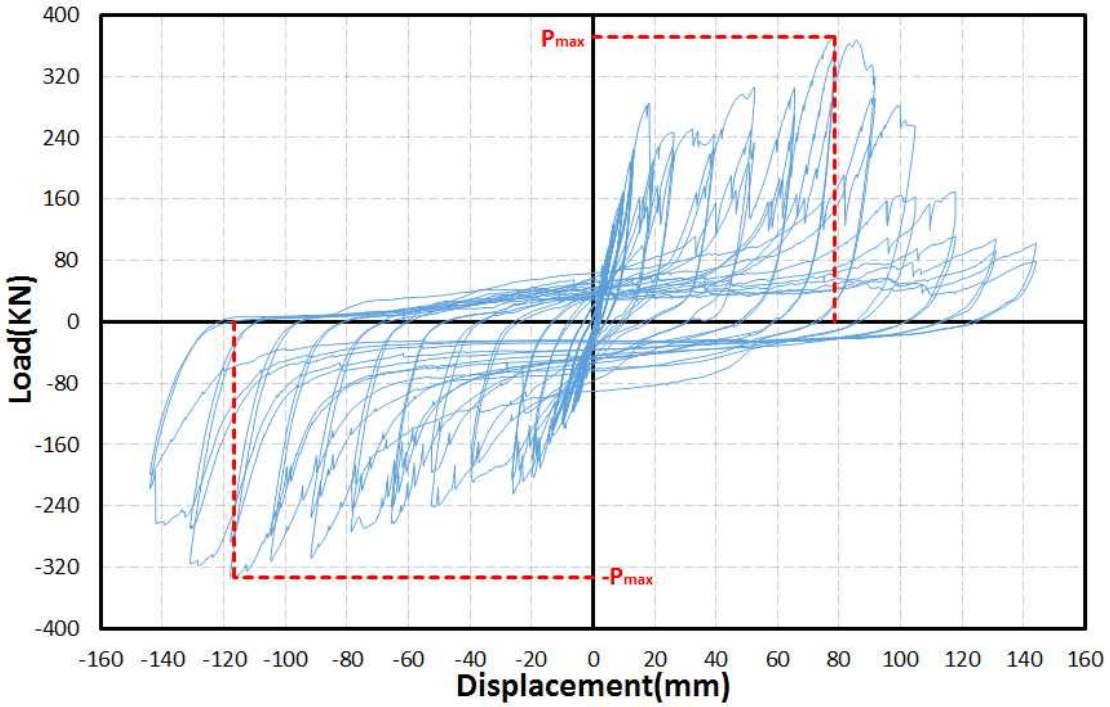
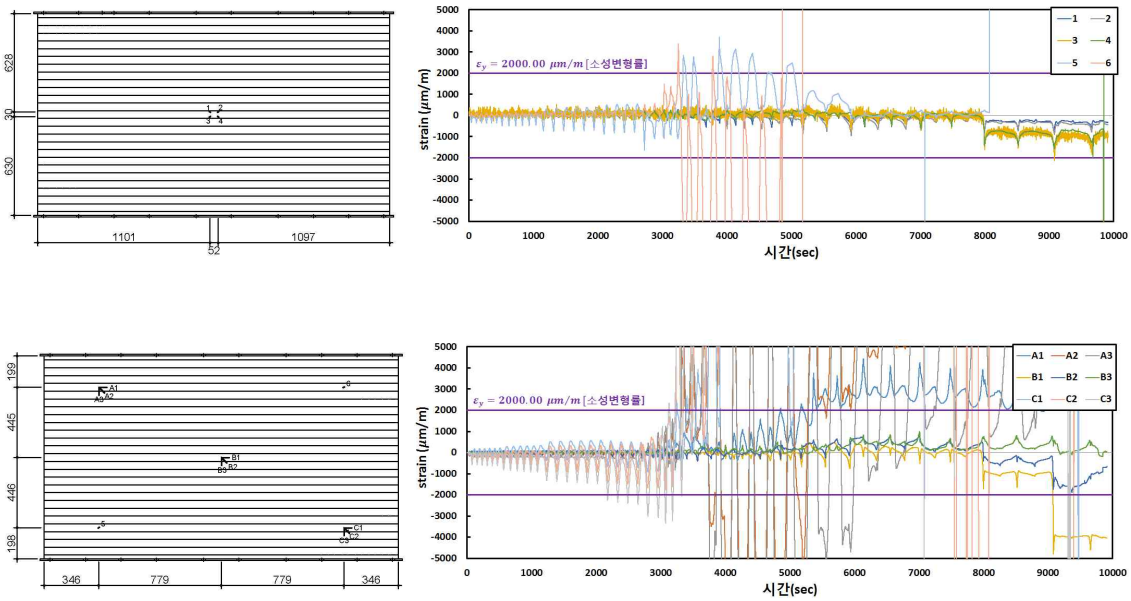


그림 2.2.11.42 하중-변위 관계 (#09 TR225-5.65-5-30)

표 2.2.11.15 실험 결과표 (#09 TR225-5.65-5-30)

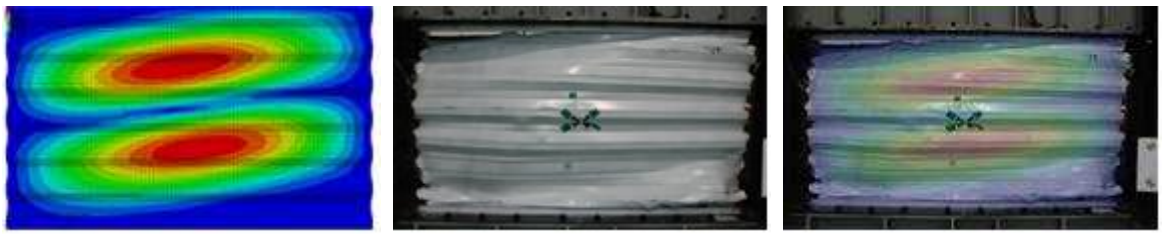
이론값				실험값				
전단항복강도	국부좌굴하중	전체좌굴하중	고유치해석 탄성 좌굴강도	최대하중	최대하중 시 변위	좌굴하중	좌굴 시 변위	전단강성
[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN/mm]
913.4	3586.7	345.6	596.4	371.4	78.4	-	-	4.74

실험체 #09 TR225-5.65-5-30는 변위가 (+)방향에서 하중 94.88kN일 때 좌측 ·우측하단부의 용접부가 찢어지기 시작한다. 최대 하중 및 최대하중에 대한 변위는 (+)방향에서 371.4kN일 때 78.4mm이다. 실험결과 좌굴은 발생하지 않았으며 이론치 전단항복강도 대비 최대하중은 107.5% 수준으로 유사하게 나타났다.



(a) Strain Gage 위치 (b) Strain Gage 변형율의 시간이력

그림 2.2.11.43 변형율 분포 (#09 TR225-5.65-5-30)



(a) 고유치 해석결과 (b) 실험 후 결과 (c) 해석 및 실험결과 비교

그림 2.2.11.44 해석 및 실험 후 결과 (#09 TR225-5.65-5-30)

그림 2.2.11.43(b)는 Strain Gage 변형율의 시간이력곡선이다. 실험결과 중앙부의 1축게이지 1, 2, 3, 4번, 3축게이지 B를 제외하고 나머지 변형률 게이지는 소성 범위에 들어섰다. 중앙부의 1축게이지 1, 2, 3, 4번, 3축게이지 B를 제외한 변형률 게이지는 양끝단부의 용접부가 찢어지면서 소성화되었다.

그림 2.2.11.44는 고유치해석결과와 실험결과를 비교한 결과, 사진으로부터 해석에서의 좌굴의 형상은 전체좌굴이 나타나며 실험결과 좌굴이 발생하지 않았지만 판 내에 크게 굽힘이 발생하며 좌굴의 형상과 유사하게 나타난다.

(10) 실험체 #10 TR225-4.2-7.5-15

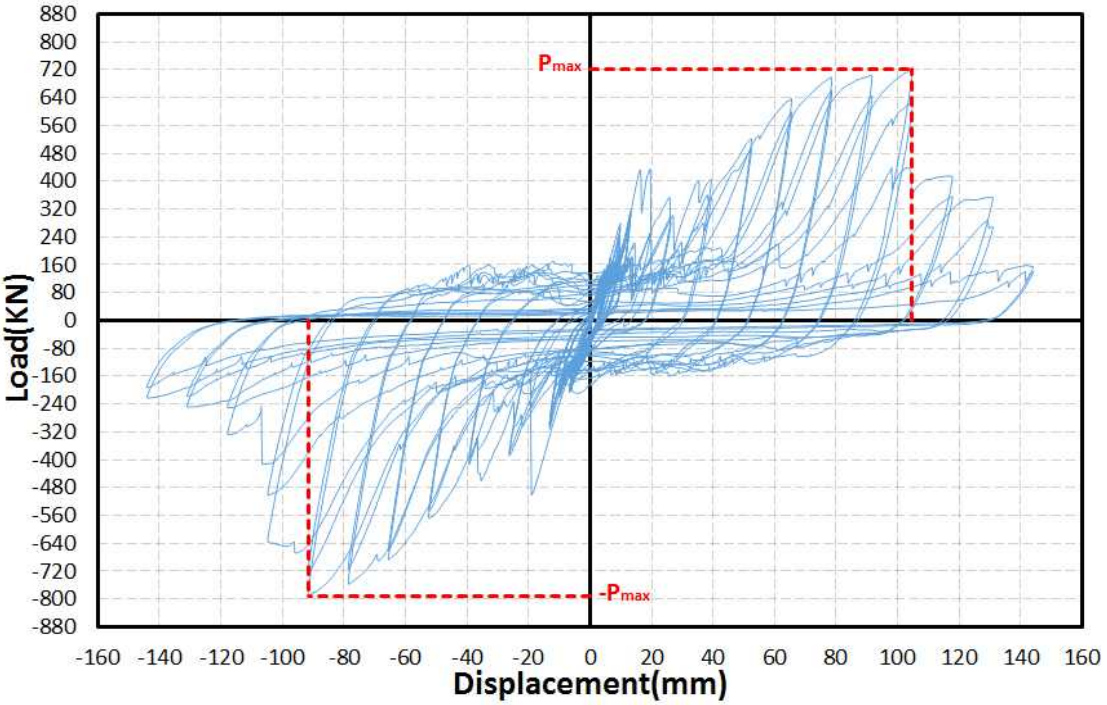
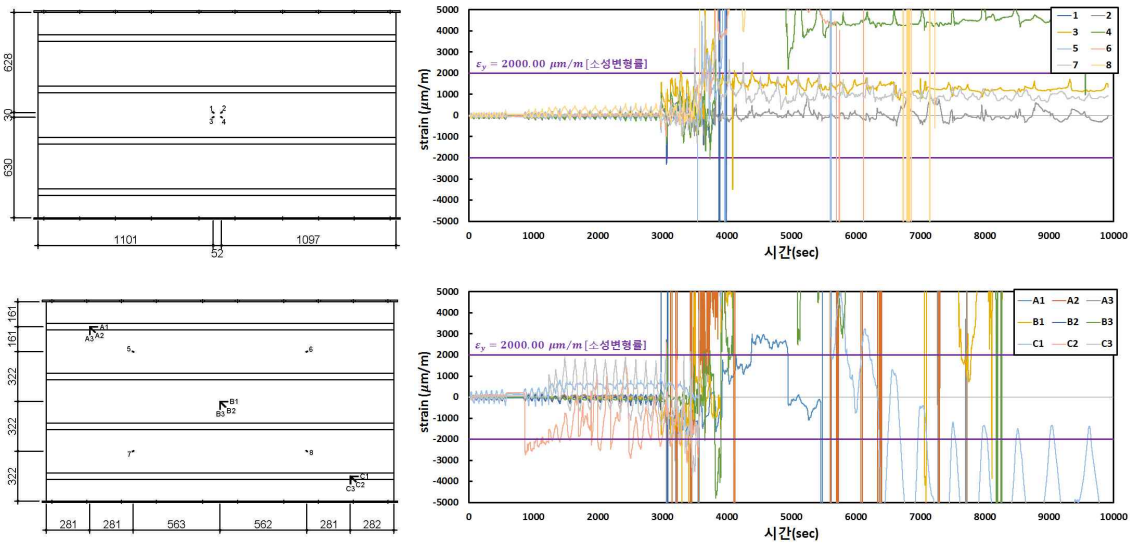


그림 2.2.11.45 하중-변위 관계 (#10 TR225-4.2-7.5-15)

표 2.2.11.16 실험 결과표 (#10 TR225-4.2-7.5-15)

이론값				실험값				
전단항복 강도	국부좌굴 하중	전체좌굴 하중	고유치해석 탄성 좌굴강도	최대 하중	최대하중 시 변위	좌굴 하중	좌굴 시 변위	전단강성
[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN/mm]
913.4	216.0	443.5	221.2	792.8	91.6	436.1	19.6	8.66

실험체 #10 TR225-4.2-7.5-15는 항복하중에 도달하기 전에 (-)방향, (+)방향 양축에서 좌굴이 발생한다. 초기좌굴하중은 (+)방향의 변위 19.64mm, 하중 436.1kN일 때 사선방향(/)의 좌굴이 발생하며 이후 (-)방향에 변위 18.9mm, 하중 501.8kN일 때 사선방향(\)의 좌굴이 발생한다. 초기 좌굴하중은 이론치 국부좌굴하중 대비 202% 수준으로 이론값보다 실험값이 2배 이상 크게 나타났다.



(a) Strain Gage 위치 (b) Strain Gage 변형율의 시간이력

그림 2.2.11.46 변형율 분포 (#13 TR225-4.2-7.5-15)



(a) 고유치 해석결과 (b) 실험 후 결과 (c) 해석 및 실험결과 비교

그림 2.2.11.47 해석 및 실험 후 결과 (#13 TR225-4.2-7.5-15)

그림 2.2.11.46(b)는 Strain Gage 변형율의 시간이력곡선이다. 실험결과 양끝단의 3축 게이지의 C2, C3 방향을 제외하고 나머지 변형율 게이지는 좌굴이 발생한 이후 소성범위에 들어섰다. 3축 게이지의 C2, C3 방향은 하부의 웨브 용접부가 찢어지면서 좌굴 전에 소성 화되었다.

그림 2.2.11.47은 고유치해석결과와 실험결과를 비교한 결과 그림 2.2.11.47(a)의 결과에서 좌굴형상은 국부좌굴의 형상을 띈다. 실험의 경우 해석의 결과와 유사한 좌굴의 형상을 나타낸다.

(11) 실험체 #11 TR225-5.4-7.5-30

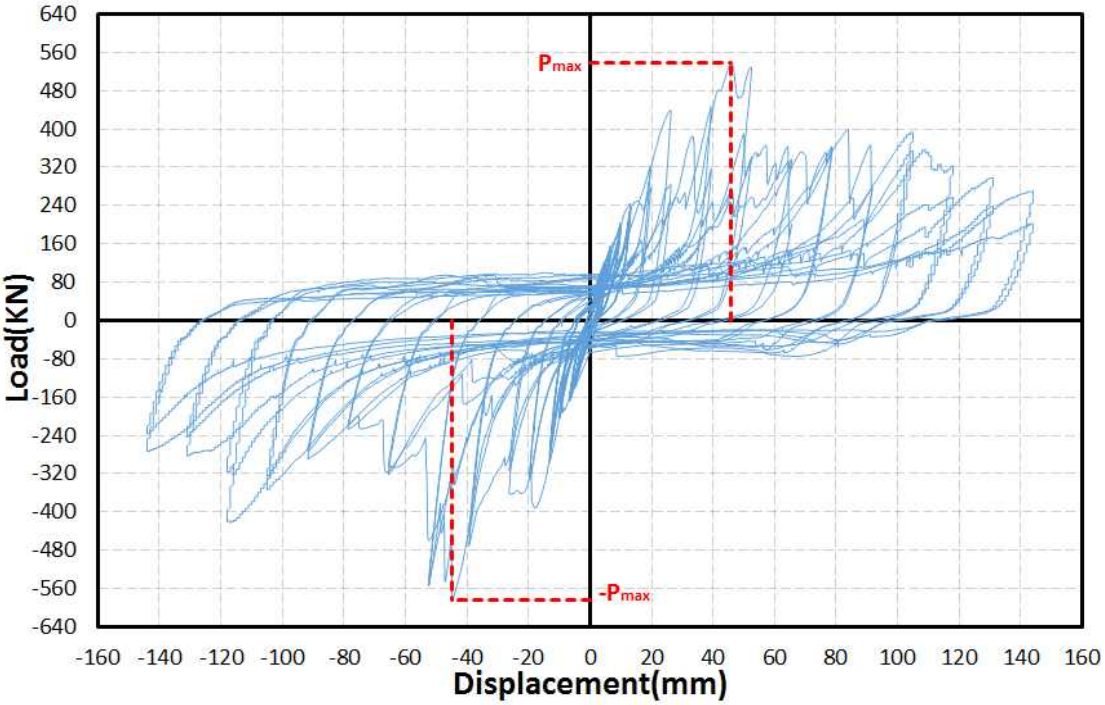
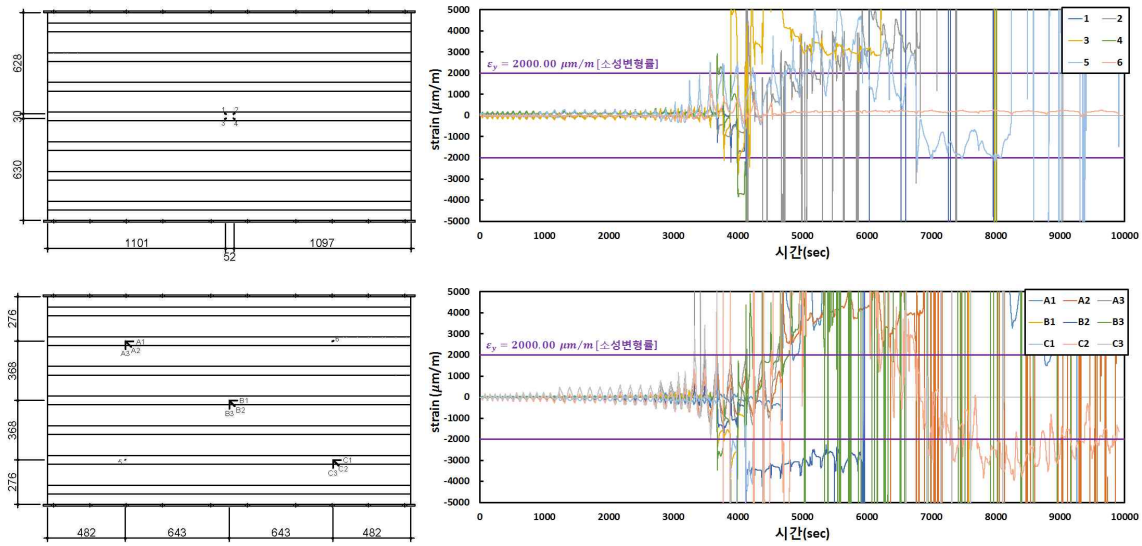


그림 2.2.11.48 하중-변위 관계 (#11 TR225-5.4-7.5-30)

표 2.2.11.17 실험 결과표 (#11 TR225-5.4-7.5-30)

이론값				실험값				
전단항복강도	국부좌굴하중	전체좌굴하중	고유치해석 탄성 좌굴강도	최대하중	최대하중 시 변위	좌굴하중	좌굴 시 변위	전단강성
[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN/mm]
913.4	799.1	534.1	856.5	584.1	44.8	584.1	44.8	13.04

실험체 #11 TR225-5.4-7.5-30는 항복하중에 도달하기 전에 (-)방향, (+)방향 양축에서 좌굴이 발생한다. 초기좌굴하중은 (+)방향의 변위 44.8mm, 하중 584.1kN일 때 사선방향(/)의 좌굴이 발생하며 이후 (-)방향에 변위 65.5mm, 하중 200.9kN일 때 사선방향(\ )의 좌굴이 발생한다. 초기 좌굴하중은 이론치 국부좌굴하중 대비 109% 수준으로 이론값과 유사하게 나타났다.



(a) Strain Gage 위치 (b) Strain Gage 변형율의 시간이력

그림 2.2.11.49 변형율 분포 (#11 TR225-5.4-7.5-30)



(a) 고유치 해석결과 (b) 실험 후 결과 (c) 해석 및 실험결과 비교

그림 2.2.11.50 해석 및 실험 후 결과 (#11 TR225-5.4-7.5-30)

그림 2.2.11.49(b)는 Strain Gage 변형율의 시간이력곡선이다. 실험결과 양끝단의 3축 게이지의 C2, C3 및 1축게이지 5방향을 제외하고 나머지 변형률 게이지는 좌굴이 발생한 이후 소성범위에 들어섰으며 좌굴은 탄성범위에서 발생하였다. 3축 게이지의 C2, C3 및 1축게이지 5 방향은 하부의 웨브 용접부가 찢어지면서 좌굴 전에 소성화되었다.

그림 2.2.11.50은 고유치해석결과와 실험결과를 비교한 결과 그림 2.2.11.50(a)의 결과에서 좌굴형상은 국부좌굴의 형상을 띈다. 실험의 경우 해석의 결과와 유사한 좌굴의 형상을 나타낸다.

(12) 실험체 #12 TR225-4.9-7.5-60

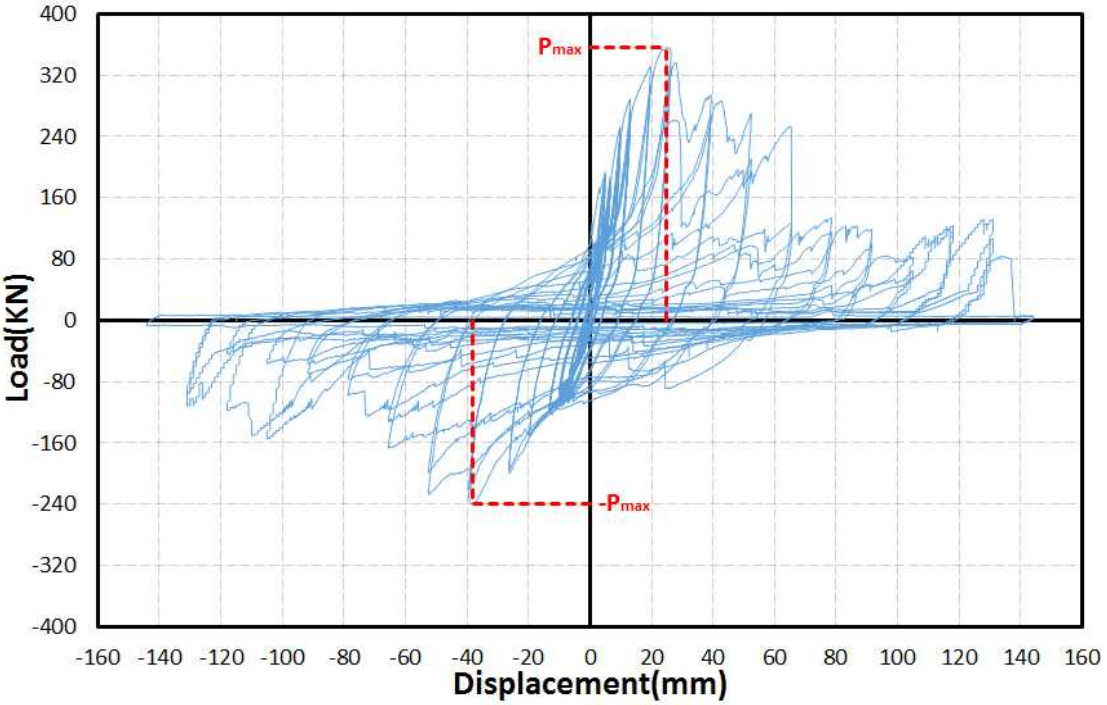
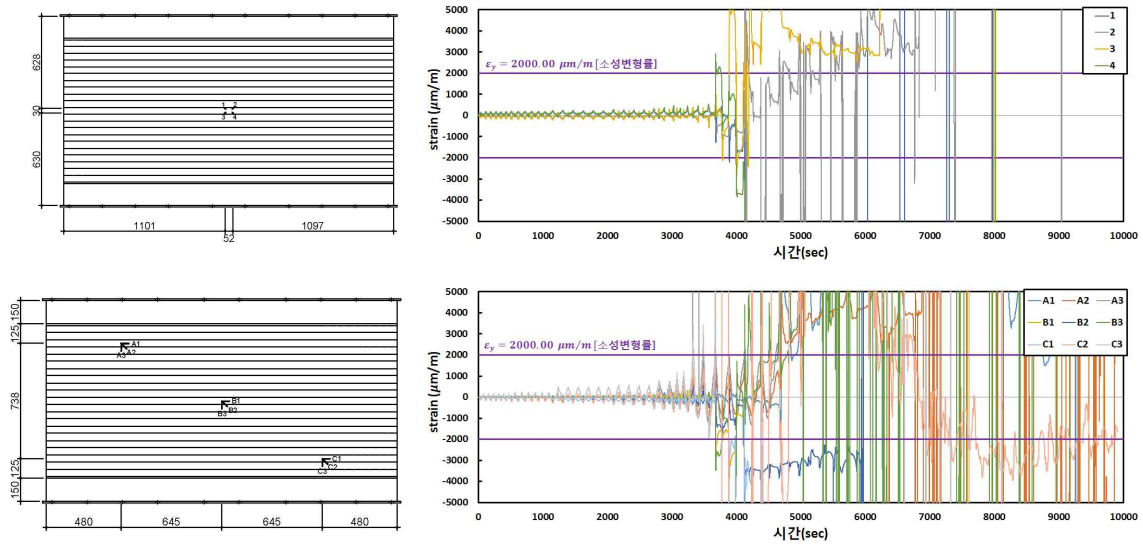


그림 2.2.11.51 하중-변위 관계 (#12 TR225-4.9-7.5-60)

표 2.2.11.18 실험 결과표 (#12 TR225-4.9-7.5-60)

이론값				실험값				
전단항복강도	국부좌굴하중	전체좌굴하중	고유치해석 탄성 좌굴강도	최대하중	최대하중 시 변위	좌굴하중	좌굴 시 변위	전단강성
[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN/mm]
913.4	2395.7	673.3	343.2	355.7	24.7	-	-	14.4

실험체 #15 TR225-4.9-7.5-60는 변위가 (+)방향에서 변위 13.08mm, 하중 289.1kN일 때 우측 하단부의 용접부가 찢어지기 시작하고 변위가 (-)방향에서 변위 3.53mm, 하중 75.46kN일 때 우측 하단부의 용접부가 찢어지기 시작한다. 최대 하중 및 최대하중에 대한 변위는 (-)방향에서 355.7kN일 때 24.7mm이다. 실험결과 좌굴은 발생하지 않았으며 이론치 전단항복강도 대비 최대하중은 52.8% 수준을 나타내었다. 이는 상하부 용접부가 찢어지면서 발생하는 하중 저하로 예상된다.



(a) Strain Gage 위치 (b) Strain Gage 변형율의 시간이력

그림 2.2.11.52 변형율 분포 (#12 TR225-4.9-7.5-60)



(a) 고유치 해석결과 (b) 실험 후 결과 (c) 해석 및 실험결과 비교

그림 2.2.11.53 해석 및 실험 후 결과 (#12 TR225-4.9-7.5-60)

그림 2.2.11.53는 고유치해석결과와 실험결과를 비교한 결과, 고유치해석결과 및 실험결과 모두 좌굴이 발생하지 않았다.

다. 전단성능 실험 대상모델의 에너지소산 성능분석

주름강판에 대한 성능을 분석하기 위한 12개의 실험체 모델은 각각의 경우 모두 다른 패턴으로 제안되었다. 동일한 조건을 부여한 것과 달라지는 패턴에도 불구하고 유사조건을 유도하고 강성이나 연성에 관련된 부분을 설명하기 위해서 제작된 모델은 전단좌굴에 대한 각각의 연성좌굴패턴을 설명할 수 있다. 본 연구과제에서는 주름강판의 사용에서 매우 얇은 두께를 채택하여 실험하였으며, 두께 2.3mm를 용접하여 제작되었다. 우선 주름직각방향 길이가 동일한 모델별로 설명하도록 하며, 첫 번째 크기의 패턴은 모두 3개의 실험체이다.

- #1: 국부좌굴에서의 연성좌굴경향 ($\tau_g/\tau_l > 1,\ \tau_{fe}/\tau_{cr} < 1$)
- #2: 국부좌굴에 대한 경향 ($\tau_g/\tau_l > 1,\ \tau_{fe}/\tau_{cr} > 1$)
- #3: 국부좌굴에서의 연성좌굴경향 ($\tau_g/\tau_l > 1,\ \tau_{fe}/\tau_{cr} < 1$)

세 개의 실험모델에서 모두 일정한 반복가력테스트를 수행하였으나 두 번째 모델에서 좌굴발생단계의 응력이 이론식에서 제공하는 값과 유사하였다. 첫 번째와 세 번째의 경우는 그 값의 발생을 예측하기 어려우며, 그 까닭은 실험체의 붕괴메커니즘이 상하단 경계부의 접합된 부분에서 파괴가 발생하였기 때문이다. 특히, 경계부위의 용접에서 박판과의 용접이 비교적 힘든 까닭에 주름방향과 기울어진 패널부분의 연속성이 매우 취약하며, 이력거동의 변위가 증가할수록 응력의 집중을 예상할 수 있다. 이 세 개의 실험체에서 비록 이러한 영향은 있었다 할지라도 국부전단좌굴의 경향이 있는 모델에서의 에너지 소산 능력을 검증할 수 있다. 이것은 주름강판을 이용하여 전단좌굴이 발생하는 모델에서 구조물의 에너지를 흡수할 수 있는 역할을 한다는 것이다.

다음으로 두 번째 길이조건이 같은 모델에 대한 경향을 살펴보았다. 네 개의 모델은 모두 동일한 길이이며, 두께도 동일하다. 여기에서의 용접도 이전의 세 개의 모델에서와 같이 얇은 두께로 인해서 나타나는 파괴메커니즘이 유사하다. 위의 세 모델에서 에너지 소산능력이 가장 낮은 모델은 좌굴이 발생하지 않은 모델이며, 가장 큰 모델은 좌굴이 비교적 잘 발생하는 모델이다. 아래의 분석에서도 마찬가지로 #4 모델이 좌굴이 발생하지 않으면서 계속해서 모서리 경계부위의 파단과 더불어 구조물이 반복하중에 따라 거동한다. 이것은 이전 예제와 동일하며, 가장 큰 경우에 대한 #7의 경우는 비교적 국부전단좌굴이 잘 방생하여 이력곡선에 표현되었다. 여기서 유사한 점은 국부좌굴을 유도한 모델에서 좋은 결과를 얻을 수 있었으며, 연성좌굴은 반복가력이 진행될수록 발생하고 있음을 알 수 있다.

- #4: 전체좌굴에 대한 경향 ($\tau_g/\tau_l < 1,\ \tau_{fe}/\tau_{cr} > 1$)
- #5: 전체좌굴에서의 연성좌굴경향 ($\tau_g/\tau_l > 1,\ \tau_{fe}/\tau_{cr} < 1$)
- #6: 국부좌굴에 대한 경향 ($\tau_g/\tau_l > 1,\ \tau_{fe}/\tau_{cr} > 1$)
- #7: 국부좌굴에 대한 경향 ($\tau_g/\tau_l > 1,\ \tau_{fe}/\tau_{cr} > 1$)

다음으로 이제까지의 모델보다 더 큰 길이의 주름강판에 대해서 계산된 결과를 바탕으로 분류 및 분석해 보았다. #9과 #12의 경우는 경계모서리 부분의 용접부분에서 파괴가 진행되었으며, 이전과 동일하게 가장 낮은 에너지 소산능력을 가진 모델이었고, 이제까지의 결과로도 예상할 수 있는 #10 모델이 가장 적합한 모델로 나타났다. 이전 모델과 동일하게 국부좌굴의 경향성이 짙은 모델에서 가장 큰 값의 결과를 얻었으며, 이 결과는 에너지 소산능력 그래프에 함께 나타내었다. 좌굴이 발생하지 않으면서 계속된 하중의 반복가력은 예상하고자 하는 거동을 얻을 수 없이 에너지의 흡수없이 변형만 증가하게 된다. 이러한 상황과 대비해서 비교적 좌굴거동을 쉽게 예상하고 얻을 수 있는 모델은 가장 큰 효과를 보였다.

- #8: 전체좌굴에 대한 경향 ($\tau_g/\tau_l < 1,\ \tau_{fe}/\tau_{cr} > 1$)
- #9: 전체좌굴에 대한 경향 ($\tau_g/\tau_l < 1,\ \tau_{fe}/\tau_{cr} > 1$)
- #10: 국부좌굴에 대한 경향 ($\tau_g/\tau_l > 1,\ \tau_{fe}/\tau_{cr} > 1$)

- #11: 전체좌굴에 대한 경향 ($\tau_g/\tau_l < 1,\ \tau_{fe}/\tau_{cr} > 1$)
- #12: 전체좌굴에서의 연성좌굴경향 ($\tau_g/\tau_l < 1,\ \tau_{fe}/\tau_{cr} < 1$)

이러한 결과를 볼 때, 최적의 에너지 소산능력을 예상하는 것은 형상에 따라 매우 다루기 힘든 부분일 뿐만 아니라 경계부의 길이에 따라서도 영향을 가지므로 하나의 형상으로만 정의되지는 않는다. 즉 어떠한 형상이 최고의 능력을 나타낼 것인가는 형상에 대해서 가공된 부재가 어떠한 상태와 조건을 가지는지도 고려되어야 한다. 또한 이것은 제작상의 문제와도 연관된다. 제작에 대한 위험성이 존재하는 형상의 경우 에너지 소산능력의 증가보다 제작에서 발생하는 문제로 인해서 원하는 결과를 얻을 수 없을지도 모른다. 이상의 분석에 대해서 실험체들의 매우 얇은 강판의 용접과 경계부위의 용접에 따라 발생된 반복가력실험에서의 파단에 따른 영향은 향후 연구과제로 제시하도록 한다. 여기서 나타난 경계부위의 형성에서도 경계조건의 강성에 대한 평가는 매우 어려우므로 어떠한 조건에서 전단좌굴로 인한 에너지 흡수능력의 증대를 유도할 것인가는 매우 중요하며 연구의 필요성이 나타난다.

12개의 실험체 모델에 대해서 본 절에서는 에너지 소산능력에 대해서 검토하였다. 각 주름의 경우 크기와 주름의 형태가 모두 다르므로 하중-변위 곡선에서 나타나는 에너지 소산능력이 누적되는 크기도 모두 다르게 나타난다. 정확한 형상 제어를 위해 얇은 판의 사용으로 접합부의 결함이 발생하여, 일부 실험체에서 해석결과와 실험결과의 오차가 발생하였다. 그림 2.2.11.54에서 나타난 것과 같이 12개의 모델은 탄성비례구간을 지나서 에너지 소산능력이 모두 증가하며, 전체 모델 중에서 10번째 실험체가 가장 크게 나타났으며, 1번째 실험체가 가장 낮게 나타났다. 그림에서 나타난 12개의 모델에서 주름강판의 크기를 고려해 볼 때, 1-3번째 실험체 모델, 4-7번째 실험체 모델 및 9-12번째 실험체 모델로 나누어 생각해 볼 수 있다. 2번째 실험체 모델의 경우는 4번째 실험체 모델보다 너비가 작음에도 불구하고 높은 에너지 소산능력을 갖고 있으며, 7번째 모델의 경우는 8, 9, 12번째 실험체 모델에 비해 크게 나타났다. 이러한 결과에서 볼 때 형상이 주는 영향은 매우 크며, 크기에 대한 적합한 형상을 정의하는 것은 중요한 연구의 한 부분이 된다.

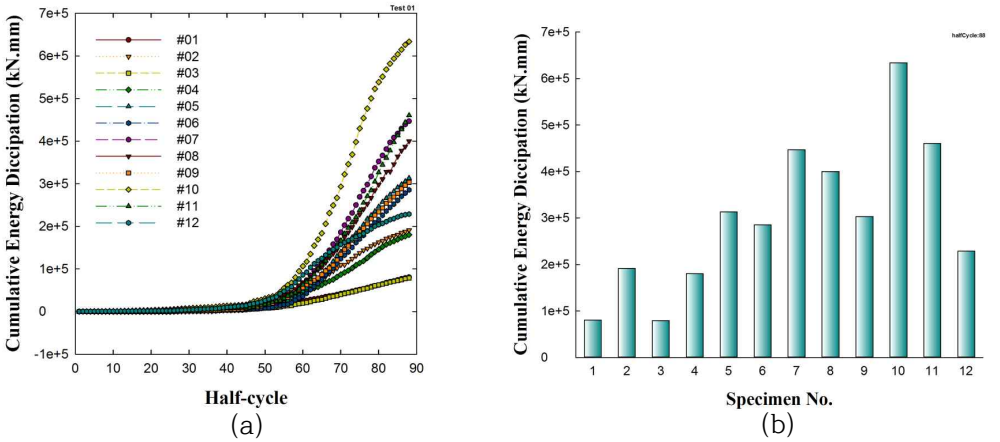
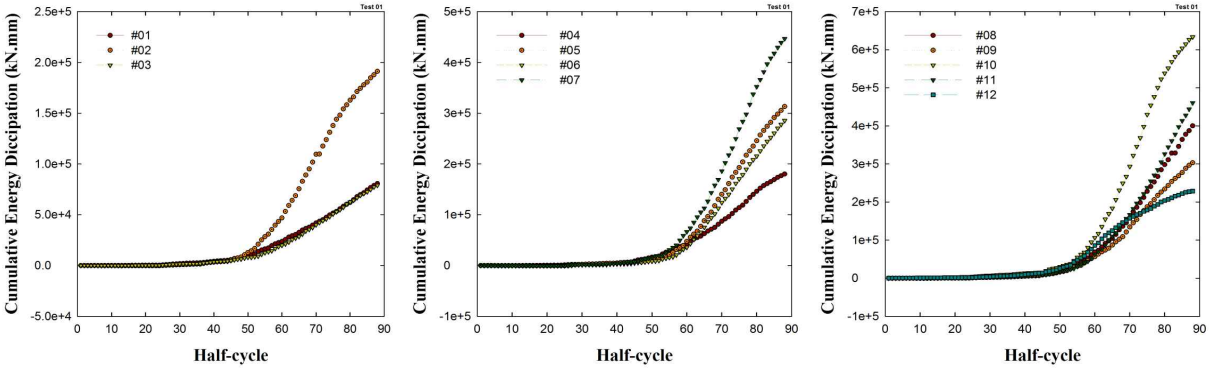


그림 2.2.11.54 전단성능 실험대상 모델의 에너지소산 성능분석

해석결과에 대해서 각각의 모델 형태별 변화를 쉽게 비교할 수 있도록 에너지 소산 성능

그래프를 그림 2.2.11.55에 크기별로 나누어 나타내었다. 그림에서 나타난 바와 같이 2번째 실험체 모델 그림 2.2.11.55(a)과 7번째 실험체 모델 그림 2.2.11.55(b) 및 10번째 실험체 모델 그림 2.2.11.55(c)이 가장 크게 증가하며, 12번째 실험체 모델의 경우는 반복주기가 70회(half-cycle) 이상에서는 점차 감소하는 경향을 보인다. 동일한 크기의 평판에서 주름에 따른 에너지 소산 능력의 차이는 매우 다르게 나타나며, 에너지 소산 능력을 갖는 모델에 대해서 형태에 따른 차이를 구분하기 위해서 더 많은 연구가 필요하다고 판단된다.



(a) #01~#03 (b) #04~#07 (c) #08~#12

그림 2.2.11.55 전단성능 실험대상 모델의 에너지소산 성능분석

12. 주름강판의 전단성능 실험 - 2차 실험

주름강판의 전단저항에 대한 성능을 분석하기 위해서 본 절에서는 단순하게 두 개의 두께에 대한 실험체 모델을 평가하도록 한다. 주름의 방향에 대해서는 기존의 문헌(Emami et al. 2013)에서 설명한 바와 같이 부재의 항복상태 순서에 대한 차이는 있지만 거의 동일한 결과로 설명되어졌다. 따라서 본 절에서는 주름의 1차 실험에서 다루지 않은 수평방향으로 진행되는 주름강판의 주름유무에 대한 영향을 단편적인 검토를 수행하고자 한다. 여기서 진행되는 실험모델에서 주름의 형상과 두께의 다양한 변화에 대해서는 다루지 않도록 한다.

가. 실험개요

1) 실험체 계획

실험체는 표 2.2.12.1에 나타낸 것과 같고, 실험체의 주름강판은 GS400급의 강판을 절곡하여 제작하였다. 골조는 SM490급 강판을 사용하여 250x250x9.0x14의 H형강으로 제작하였고, H형강 단부 내에 120.5x222의 스티프너가 보강되는 형태이다. 계측을 위해서 사용된 Strain Gage의 정보는 표 2.2.12.2와 같다. 본 절에서는 수평방향으로 진행되는 주름강판과 수직방향으로 진행되는 주름강판을 실험 변수로 설정하였고, 건축구조기준에 따라 반복재하인증실험체 5개를 제작하여 성능을 검증하였다. 주름 형상은 11절에서 다루어진 해석대상 모델 중에서 에너지 소산 능력이 주름강판의 크기에 비해서 비교적 크게 나타난 형상 중에서 고려하였으며, 골조실험체의 크기를 고려하여 주름방향의 길이를 조절하였다. 전체 주름형상에서 주름방향의 초기각도 θ_c와 빗면의 길이 a_3는 동일한 값을 이용하였으며, 주름방향으로 동일한 방향의 길이 a_1에서 전체 골조에 설치될 수 있도록 조절하였다.

이상과 같은 실험체에 대해서 사용된 게이지의 정보와 실험을 수행하기 위한 모든 사항에 대해서는 주름강판에 대한 2차 보완실험에서 다루어진 내용과 동일한 상태로 실험을 진행하도록 하였다. 가력에 대해서도 KBC2009의 보-기둥모멘트접합부의 가력방법을 적용하였으며, 내진성능 검증을 위한 반복재하 이력에 기초하여 변위 제어하였다. 앞서 설명된 바와 같이 상·하부 보 사이 길이를 기준으로 층간 변위각 0.00375rad.~0.075rad.까지는 6회, 0.01rad.은 4회, 그리고 0.015rad. 이후부터 실험이 종료 될 때 까지는 2회씩 가력 하였다.

표 2.2.12.1 주름강판 전단성능 실험대상 모델의 형상정보

Specimen Name	두께(mm)	높이(mm)	형상 파라메타		
			a_1	a_3	θ_c
#01-FR01	-	-	-	-	-
#05-FR-TR3.2-V917-48	3.2	1,288	48	75	30
#07-FR-TR3.2-H888-67			67	50	15
#09-FR-TR3.2-H888-48			48	75	30
#12-FR-PL4.5	4.5		-	-	-

표 2.2.12.2 실험체 계측용 1축 Strain Gage 상세설명

TYPE	KFEL-5-120-C1L32R		GAGE FACTOR	2.10±1.0%
GAGE LENGTH	5mm		APPLICABLE GAGE CEMENT	CC-46,EP-18
GAGE RESISTANCE	120.4±0.4Ω			
LOT No.	Y152S		QUANTITY	10
BATCH	077A	K06		

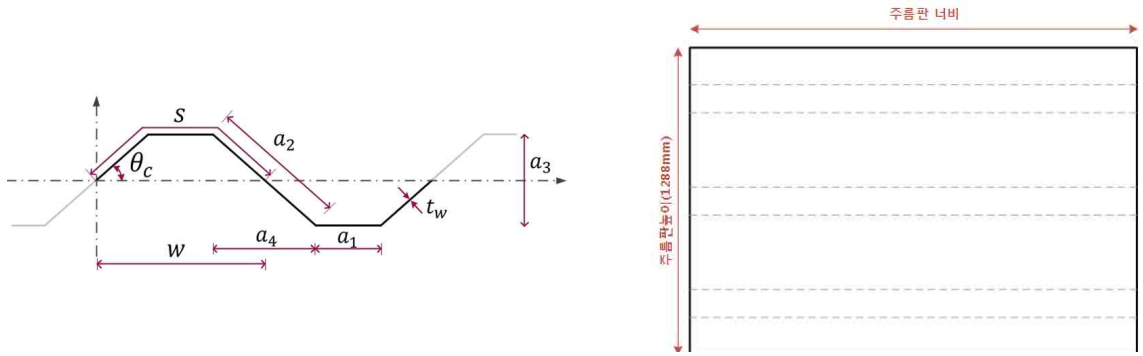


그림 2.2.12.1 주름강판 전단성능 실험대상 모델의 파라메타

실험대상 모델 중 주름방향의 차이는 그림 2.2.12.2와 그림 2.2.12.3에 나타난 것과 같다. 모델 모두 크기는 거의 동일하며, 주름의 유무와 주름의 방향에 대한 비교를 위해서 제작된 실험체 모형이다. 평판은 주름강판에 비해서 두께가 더 큰 모델을 선정하였다. 두께의 차이에도 불구하고 평판은 주름강판과 거의 동일한 강성을 가질 것으로 예상되는 모델이며, 이전 실험에서 크기에 비해 에너지 소산 능력이 큰 형상을 채택한 실험체 모델이다.

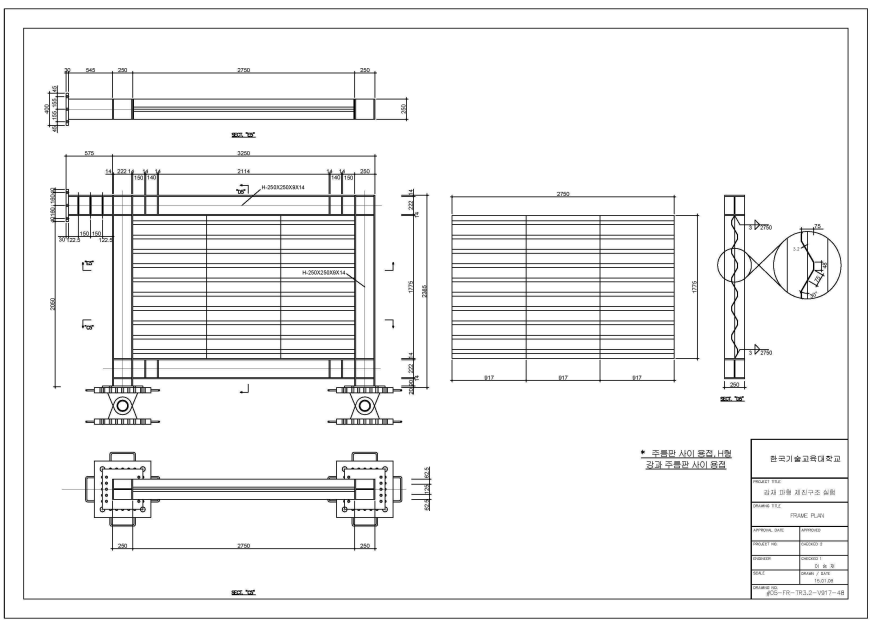


그림 2.2.12.2 실험체 상세도 #05-FR-TR3.2-V917-48

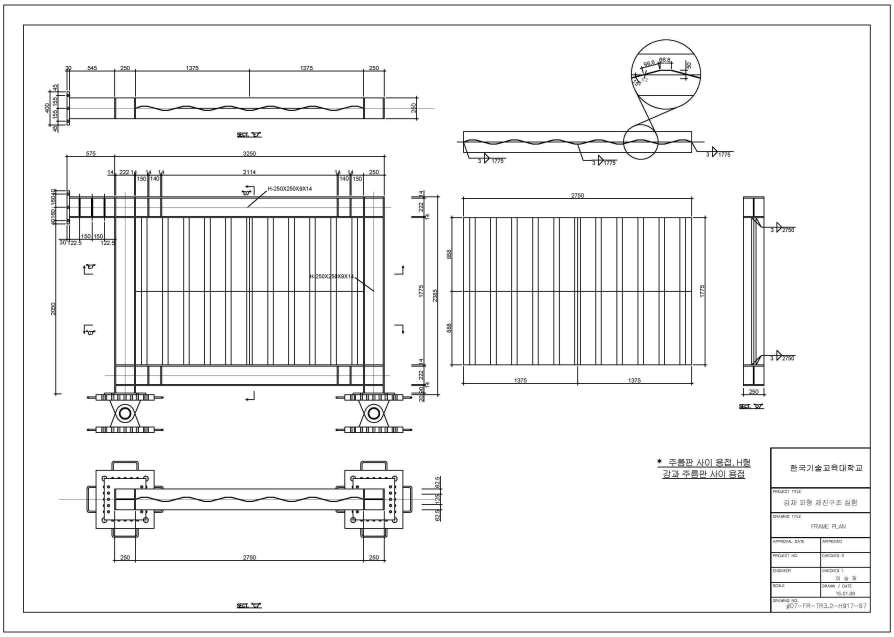


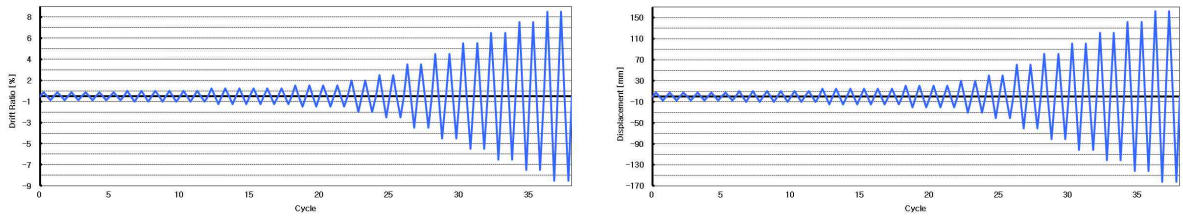
그림 2.2.12.3 실험체 상세도 #07-FR-TR3.2-H888-67

2) 가력 계획

가력은 KBC2009의 보-기둥모멘트접합부의 가력방법 참고하였으며 내진성능 검증을 위한 반복재하 이력에 기초하여 변위 제어하였다. 표 2.2.12.3에 나타낸 것과 같이 상·하부 보 사이 길이 Lb=2,025mm를 기준으로 층간 변위각 0.00375rad.~0.075rad.까지는 6회, 0.01rad.은 4회, 그리고 0.015rad. 이후부터 실험이 종료 될 때 까지는 2회씩 가력 하였다. 이상의 가력과정에 대해서 그림 2.2.12.4에 반복재하 패턴을 나타내었다.

표 2.2.12.3 반복재하 입력데이터

No.	Drift Ratio [%]	Cycle	Displacement [mm]	Rate [mm/sec]
1	±0.375	6	±7.594	0.25
2	±0.5	6	±10.125	0.25
3	±0.75	6	±15.188	0.25
4	±1.0	4	±20.250	0.33
5	±1.5	2	±30.375	0.50
6	±2.0	2	±40.500	1.00
7	±3.0	2	±60.750	1.00
8	±4.0	2	±81.000	1.00
9	±5.0	2	±101.250	1.00
10	±6.0	2	±121.500	1.00
11	±7.0	2	±141.750	1.00
12	±8.0	2	±162.000	1.00



(a) Drift ratio (b) Displacement

그림 2.2.12.4 실험체 반복재하 패턴

그림 2.2.12.5는 실험체 전경 도면이며 액추에이터 기준으로 미는 방향을 (+)방향, 당기는 방향을 (-)방향으로 정의하였다. 그림 2.2.12.6에 실험체별 세팅 사진을 나타내었다.

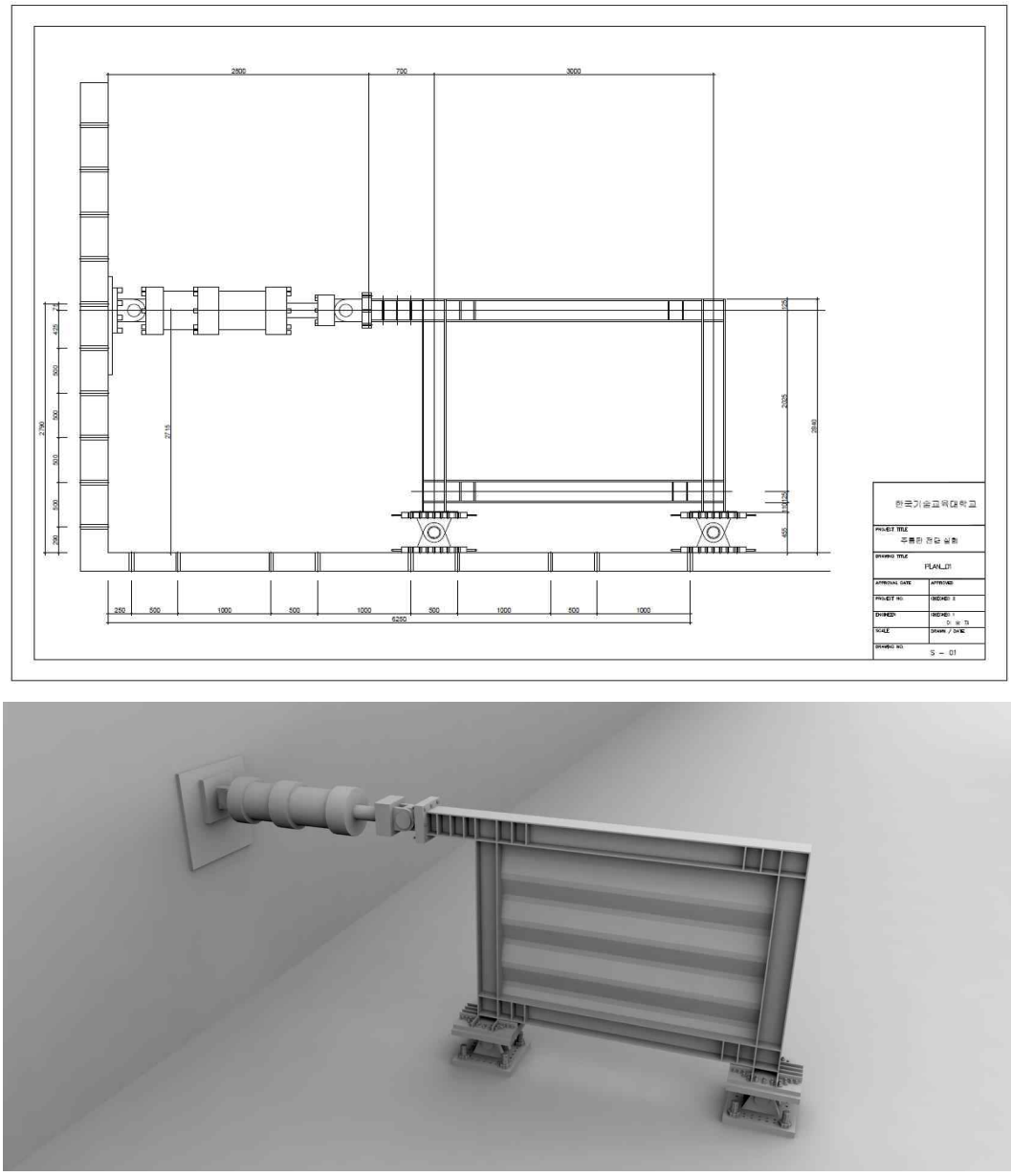
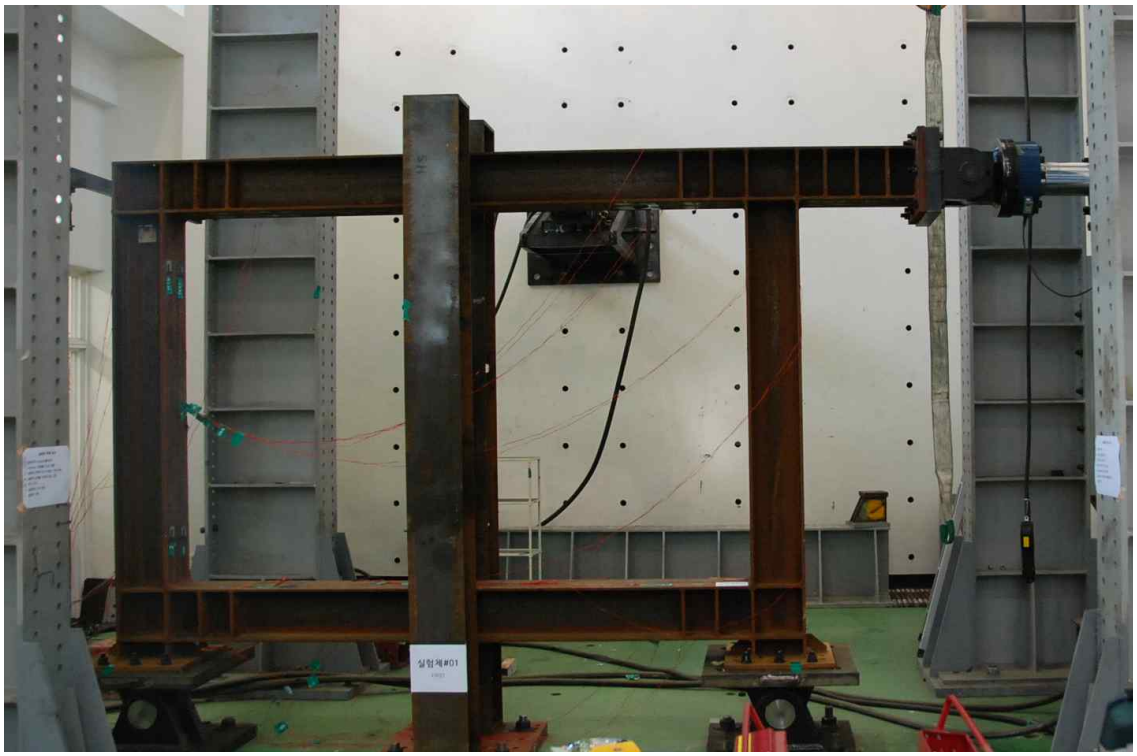


그림 2.2.12.5 실험체 전경 도면 및 가상 입체도

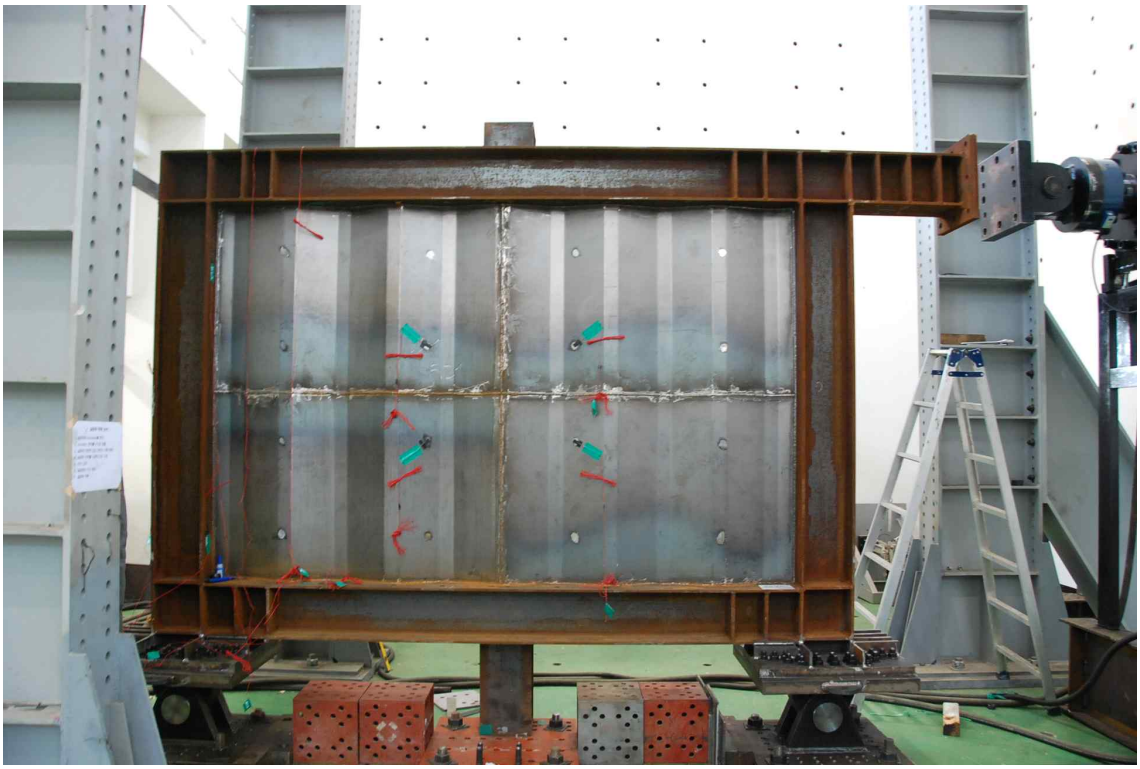


(a) #01-FR01



(b) #05-FR-TR3.2-V917-48

그림 2.2.12.6 실험체 셋팅(계속)

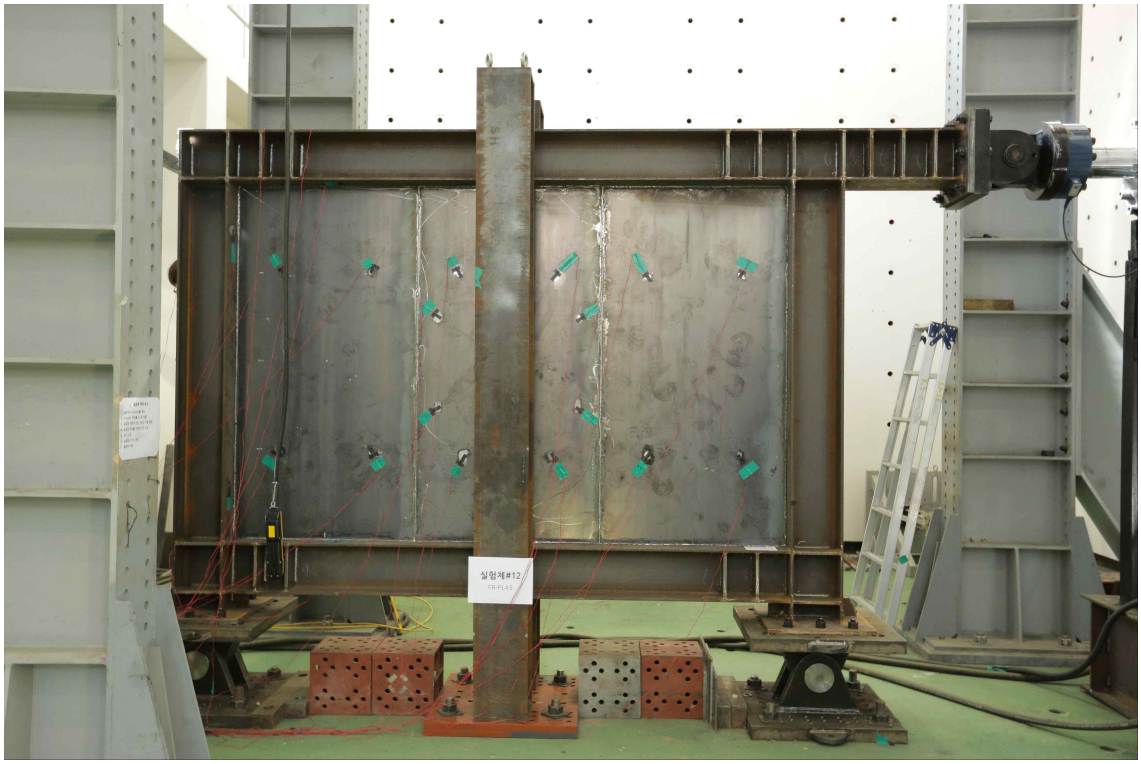


(c) #07-FR-TR3.2-H888-67



(d) #09-FR-TR3.2-H888-48

그림 2.2.12.6 실험체 셋팅(계속)



(e) #12-FR-PL4.5

그림 2.2.12.6 실험체 셋팅(계속)

나. 실험결과

1) 실험체 #01_FR01

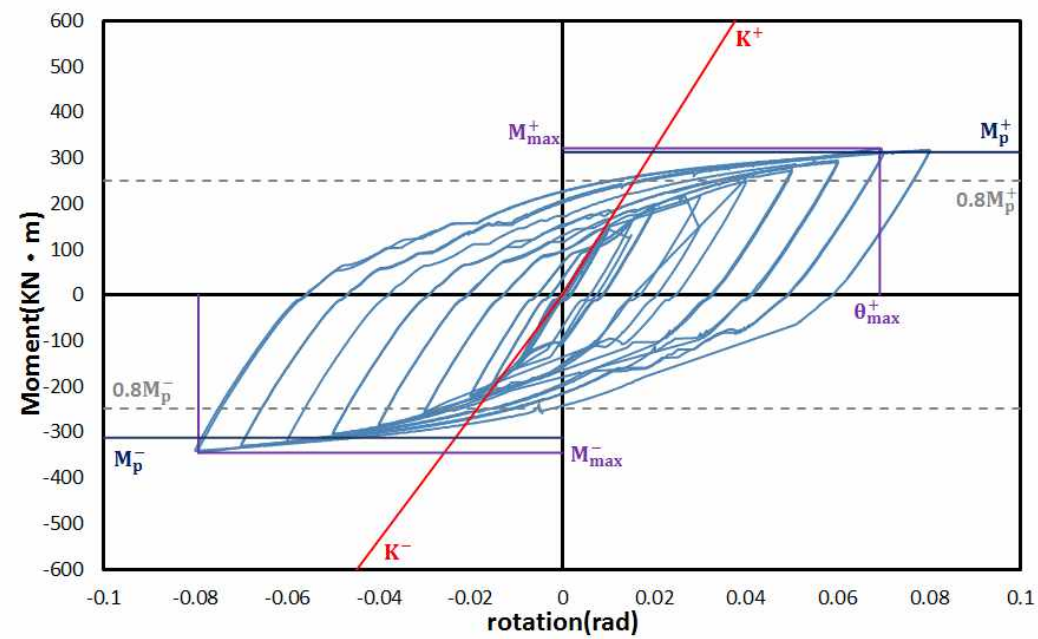


그림 2.2.12.7 하중-변위 곡선 (#01_FR-TR3.2-H888-67)

표 2.2.12.4 실험 결과표 (#01_FR-TR3.2-H888-67)

${}_tK_i^+$ [kN · m/rad.]	${}_tK_i^-$ [kN · m/rad.]	${}_tK_i^+/{}_aK_i^+$ [%]	${}_tK_i^-/{}_aK_i^-$ [%]	${}_tM_{max}^+$ [kN · m]	${}_tM_{max}^-$ [kN · m]	${}_tM_{max}^+/M_p^+$ [%]	${}_tM_{max}^-/M_p^-$ [%]
15,923	13,391	96.74	81.34	320.5	345.4	102.6	110.6

${}_tK_i^+$: (+)방향 실험체 초기강성	${}_tK_i^-$: (-)방향 실험체 초기강성
${}_aK_i$: 초기강성 이론값 [kN · m/rad.]	
${}_tM_{max}^+$: (+)방향 실험체 최대 모멘트	${}_tM_{max}^-$: (-)방향 실험체 최대 모멘트
M_p : 골조의 소성 모멘트 = 312.3 [kN · m]	

실험체 #01_FR01는 골조 실험체로서 초기강성은 (+)방향에서 15,923kN·m/rad.을 나타내고, (-)방향에서 13,391kN·m/rad.을 나타내었다. 이론치 초기강성 대비 (+)방향은 96.74%, (-)방향은 81.34%의 수준을 나타내었다. 최대 모멘트는 (+)방향에서 320.5kN·m를 나타내고, (-)방향에서 345.4kN·m를 나타내었다. 이론치 소성모멘트 대비 (+)방향은 102.6%, (-)방향은 110.6%의 수준을 나타내었다. 따라서 실험결과 최대내력은 이론치 최대내력을 상회하여, 구조성능이 확보됨을 확인하였다.

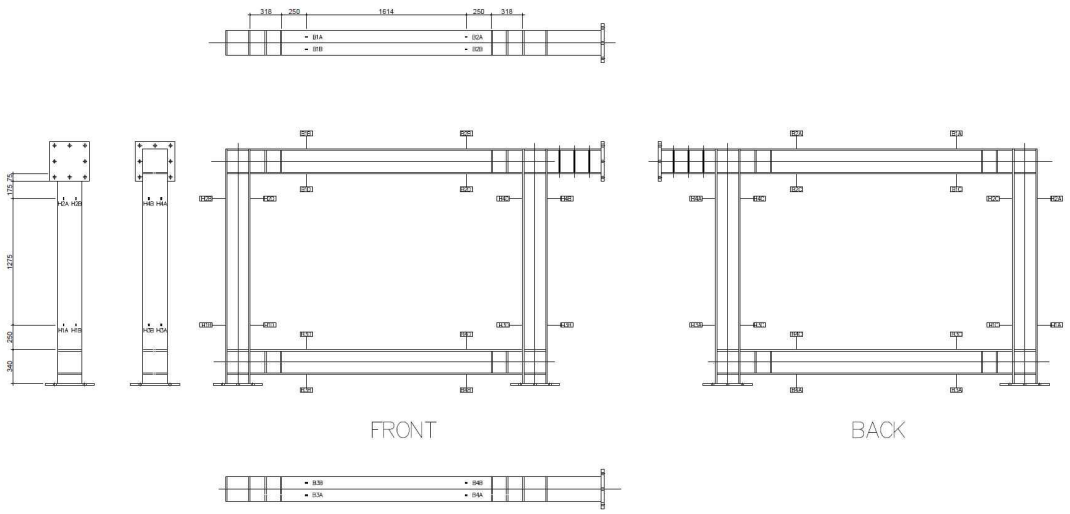


그림 2.2.12.8 Strain Gage 위치 (#01_FR-TR3.2-H888-67)

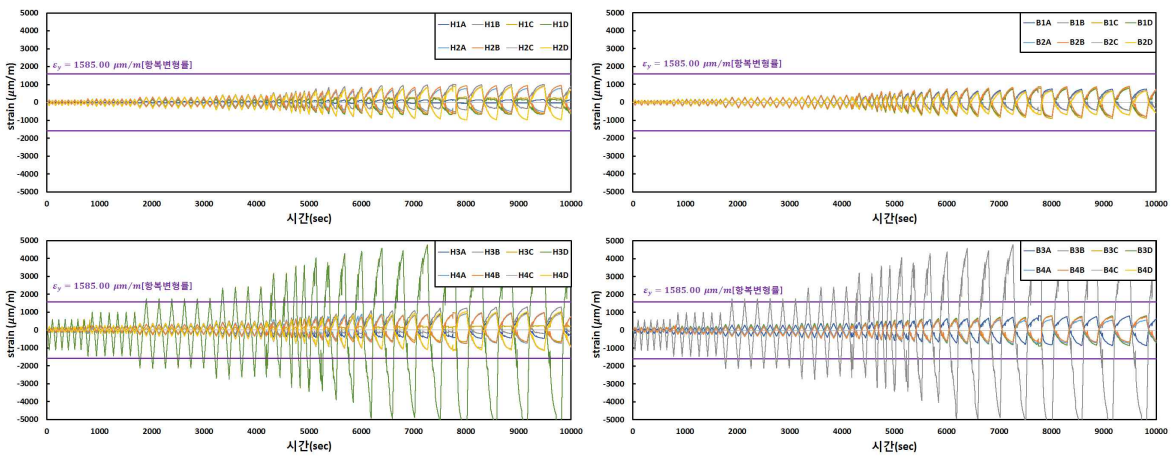


그림 2.2.12.9 Strain Gage 변형률의 시간이력 (#01_FR01)

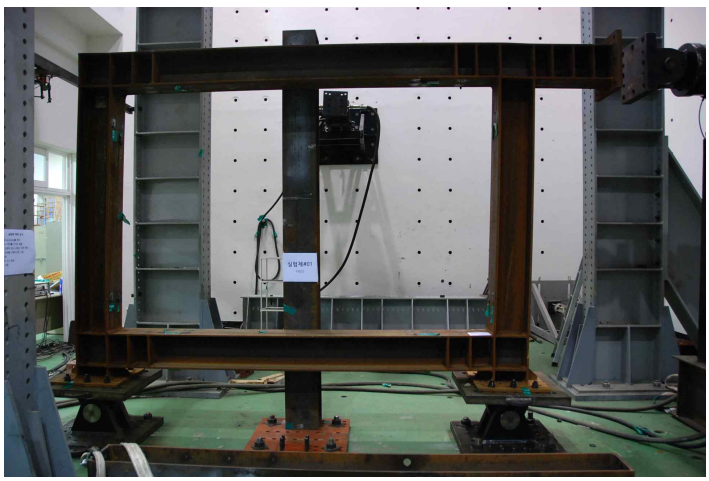


그림 2.2.12.10 실험 후 변형 형상 (#01_FR01)

그림 2.2.12.8은 Strain Gage 설치 위치를 나타낸 그림이며, 그림 2.2.12.9는 측정결과를 통해 나타낸 변형율의 시간이력곡선이다. 실험 결과 변위 15.188mm일 때 하부보의 B3B게이지 변형율이 최대 2124를 나타내며 소성변형하였다. 기둥의 변형율 게이지는 좌측기둥의 H1B, H1C와 H1D의 변형율 양이 유사하게 나타났으며, H2A, H2B, H2C와 H2D의 변형율 양이 유사하게 나타났다. 또한 우측기둥의 H3A H3B의 변형율 양이 초기에 유사하게 나타났으며, H4A, H4B, H4C와 H4D의 변형율 양이 유사하게 나타났다. 보의 변형율 게이지는 상부보의 B1A와 B1B의 변형율 값이 유사하게 나타났으며 B1C와 B1D, B2A와 B2B, B2A와 B2B의 변형율 값이 유사하게 나타났다. 따라서 기둥 및 보의 좌우 변형율값이 유사하게 나타남을 확인하였다. 최종 가력 후 변형된 형상은 그림 2.2.12.10과 같다.

2) #05-FR-TR3.2-V917-48

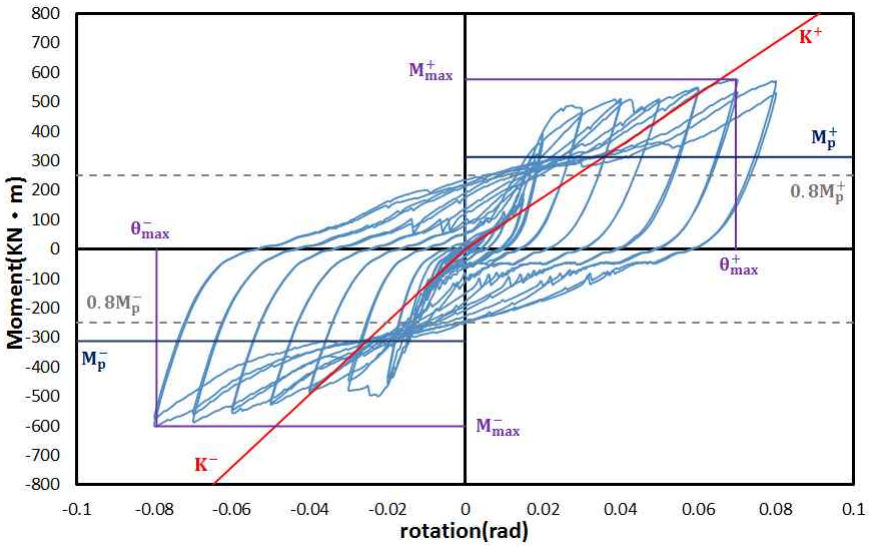


그림 2.2.12.11 하중-변위 곡선 (#05-FR-TR3.2-V917-48)

표 2.2.12.5 실험 결과표 (#01-FR-TR3.2-V917-48)

${}_tK_i^+$ [kN · m/rad.]	${}_tK_i^-$ [kN · m/rad.]	${}_tK_i^+/{}_aK_i^+$ [%]	${}_tK_i^-/{}_aK_i^-$ [%]	${}_tM_{max}^+$ [kN · m]	${}_tM_{max}^-$ [kN · m]	${}_tM_{max}^+/M_p^+$ [%]	${}_tM_{max}^-/M_p^-$ [%]
8,781	12,319	-	-	575.9	601.2	184	192

${}_tK_i^+$: (+)방향 실험체 초기강성 ${}_tK_i^-$: (-)방향 실험체 초기강성

${}_aK_i$: 초기강성 이론값 [kN · m/rad.]

${}_tM_{max}^+$: (+)방향 실험체 최대 모멘트 ${}_tM_{max}^-$: (-)방향 실험체 최대 모멘트

M_p : 골조의 소성 모멘트 = 312.3 [kN · m]

실험체 #01-FR-TR3.2-V917-48은 골조 실험체로서 초기강성은 (+)방향 8,781kN·m/rad을 그리고 (-)방향 12,319kN·m/rad을 나타내었다. 최대 모멘트는 (+)방향에서 575.9kN·m를 나

타내고, (-)방향에서 601.2kN·m를 나타내었다. 이론치 소성모멘트 대비 (+)방향은 184%, (-)방향은 192%의 수준을 나타내었다. 따라서 실험결과 최대내력은 이론치 최대내력을 상회하여, 구조성능이 확보됨을 확인하였다. 하중-변위 곡선 상에서 초기강성에 대한 이력거동에서 탄성비례한도를 넘어선 이후의 구간에서의 요철은 주름강판에 따른 거동으로 예측할 수 있으며 이 과정에서 주름형상에 대한 불규칙한 거동이 예측된다.

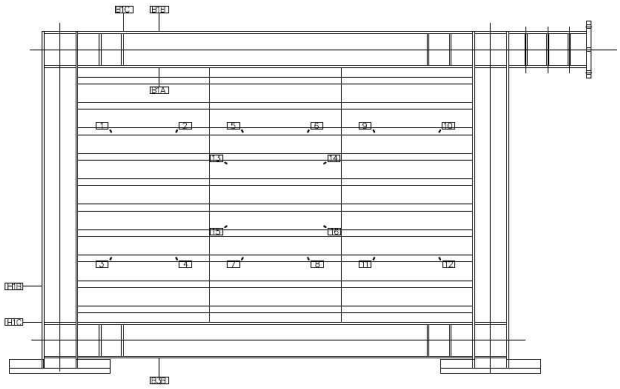


그림 2.2.12.12 Strain Gage 위치 (#01-FR-TR3.2-V917-48)

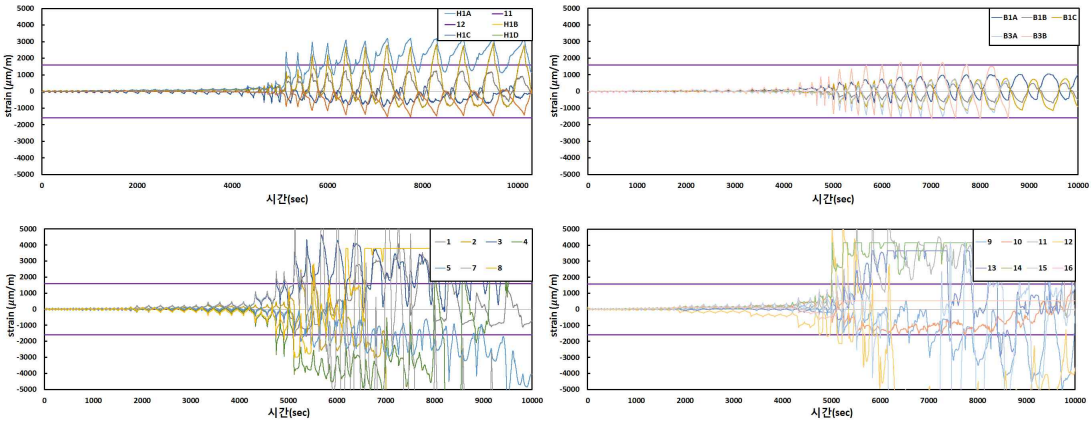


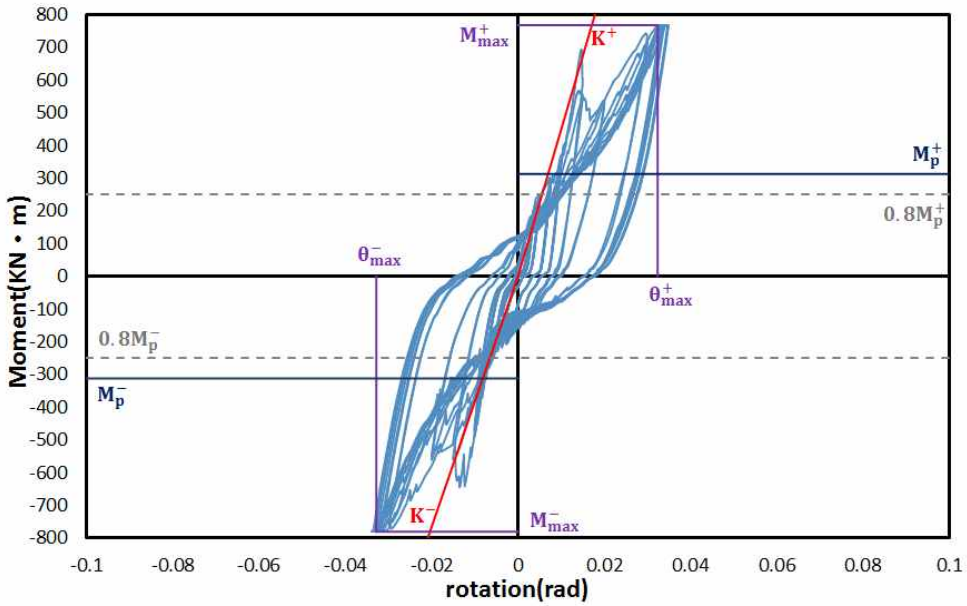
그림 2.2.12.13 Strain Gage 변형률의 시간이력 (#01-FR-TR3.2-V917-48)



그림 2.2.12.14 실험 후 변형 형상 (#01-FR-TR3.2-V917-48)

그림 2.2.12.13은 Strain Gage 변형율의 시간이력곡선이다. 실험 결과 변위 40.5mm일 때 국부좌굴이 발생하였으며, 3, 4, 7, 12, 14 게이지 변형률이 2095, 2340, 2411, 1719, 4152를 나타내며 소성변형 하였다. 이후 변위가 60.75mm일 때 중앙부에 국부좌굴이 발생하고 15, 9, 11, 2, 5, 8, 1게이지가 2125, 1589, 1823, 2473, 2020, 3060, 1679를 나타내며 소성변형 하였다. 변위 81mm일 때 국부좌굴이 전체좌굴로 번지면서 상하부에 좌굴이 발생하고, 나머지 13, 10 게이지가 2441, 1537의 변형률을 나타내며 소성변형 하였다. 기둥의 변형률게이지는 변위 60.75mm일 때 H2A 게이지 변형률이 2378을 나타내며 소성변형하고 81mm일 때 H1C게이지 변형률이 2214를 나타내며 소성변형 하였다. 보의 변형률게이지는 변위 81mm일 때 B3B 게이지 변형률이 1695를 나타내며 소성변형 하였다. 최종 가력 후 변형된 형상은 그림 2.2.12.14와 같다.

3) 실험체 #07_FR-TR3.2-H888-67



[그림 2.2.12.15] 하중-변위 관계 (#07_FR-TR3.2-H888-67)

표 2.2.12.6 실험 결과표 (#07_FR-TR3.2-H888-67)

tKi+ [kN · m/rad.]	tKi- [kN · m/rad.]	tKi+/ aKi+ [%]	tKi-/ aKi- [%]	tMmax+ [kN · m]	tMmax- [kN · m]	Mmax+/ Mp+ [%]	Mmax-/ Mp- [%]
44,865	38,263	-	-	767.3	781.1	245.7	250.1

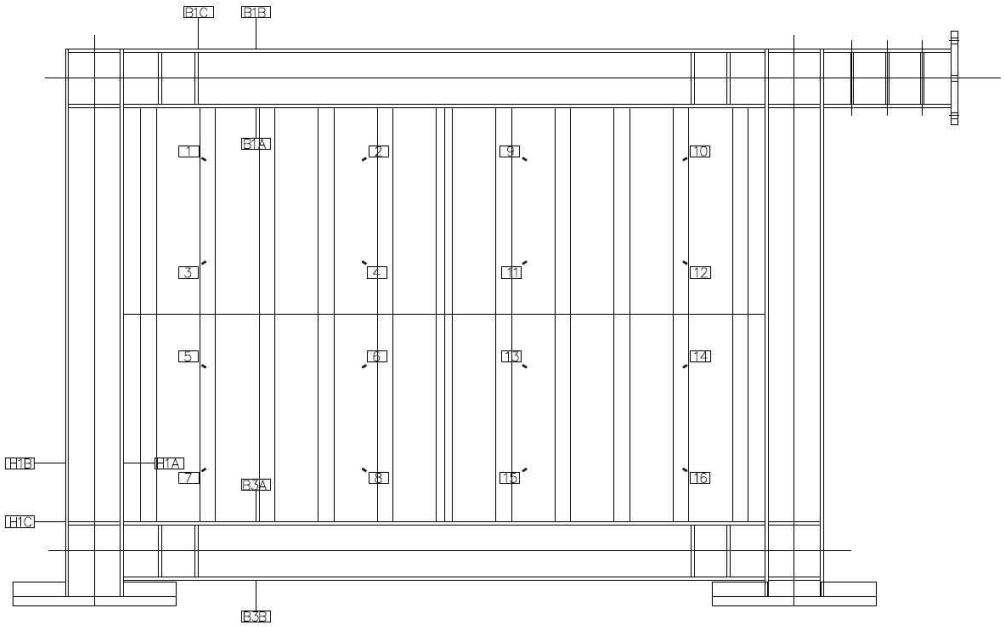
$_tK_i^+$: (+)방향 실험체 초기강성 $_tK_i^-$: (-)방향 실험체 초기강성

$_aK_i$: 초기강성 이론값 [kN · m/rad.]

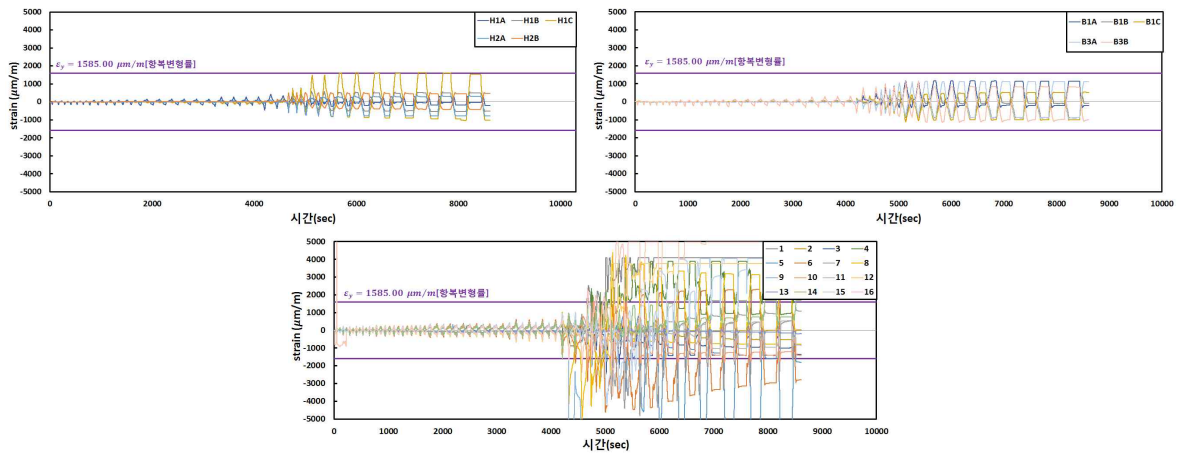
$_tM_{max}^+$: (+)방향 실험체 최대 모멘트 $_tM_{max}^-$: (-)방향 실험체 최대 모멘트

M_p : 골조의 소성 모멘트 = 312.3 [kN · m]

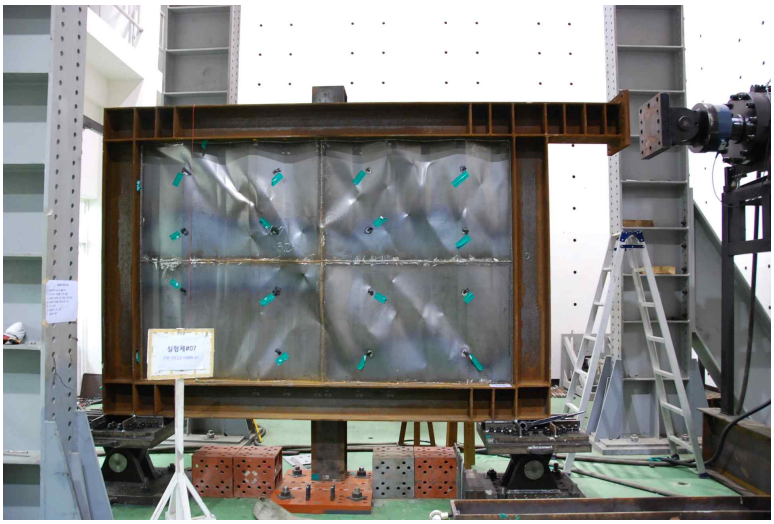
실험체 #07_FR-TR3.2-H888-67은 골조 실험체로서 초기강성은 (+)방향에서 44,865 kN·m/rad.을 나타내고, (-)방향에서 38,263kN·m/rad.을 나타내었다. 최대 모멘트는 (+)방향에서 767.3kN·m를 나타내고, (-)방향에서 781.1kN·m를 나타내었다. 이론치 소성모멘트 대비 (+)방향은 245.7%, (-)방향은 250.1%의 수준을 나타내었다. 따라서 실험결과 최대내력은 이론치 최대내력의 2배 이상의 성능을 발휘하며, 구조성능이 확보됨을 확인하였다.



[그림 2.2.12.16] Strain Gage 위치 (#07_FR-TR3.2-H888-67)



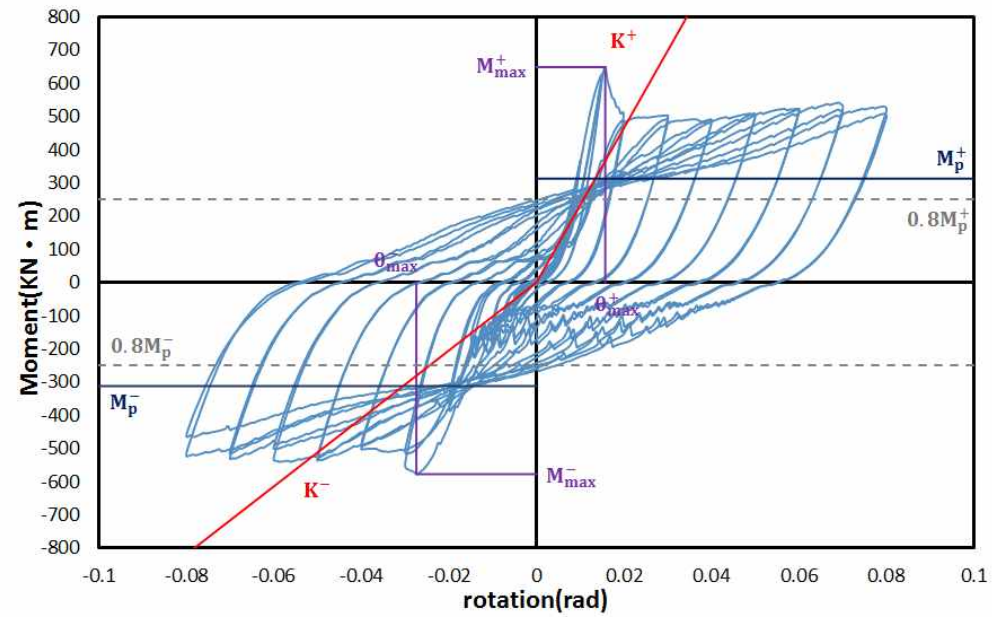
[그림 2.2.12.17] Strain Gage 변형율의 시간이력 (#07_FR-TR3.2-H888-67)



[그림 2.2.12.18] 해석 및 실험 후 결과(#07_FR-TR3.2-H888-67)

[그림 2.2.12.17]은 Strain Gage 변형율의 시간이력곡선이다. 실험 결과 변위 30.375mm, 1Cycle에서 주름판에 국부적으로 좌굴이 발생하며 주름판 내 5, 8, 9, 12, 15의 변형율이 최대 1628, 4154, 10066, 1695, 1631를 나타내며 소성변형이 발생한다. 이후 변위 40.5mm일 때 주름판이 전체적으로 좌굴이 시작되며 내 10, 1, 7, 4의 변형율이 최대 2256, 2527, 1519, 2367를 나타내며 소성변형하며, 변위 60.75mm, 1Cycle, 주름판 내 3, 16, 13, 5, 14의 변형율이 최대 2467, 4199, 2752, 1572, 2176를 나타내며 소성 변형하였다. 기둥의 경우 변위 81mm, 1Cycle에서 좌측기둥 H1C의 변형율이 1585를 넘으며 소성변형 하였다.

4) #09-FR-TR3.2-H888-48



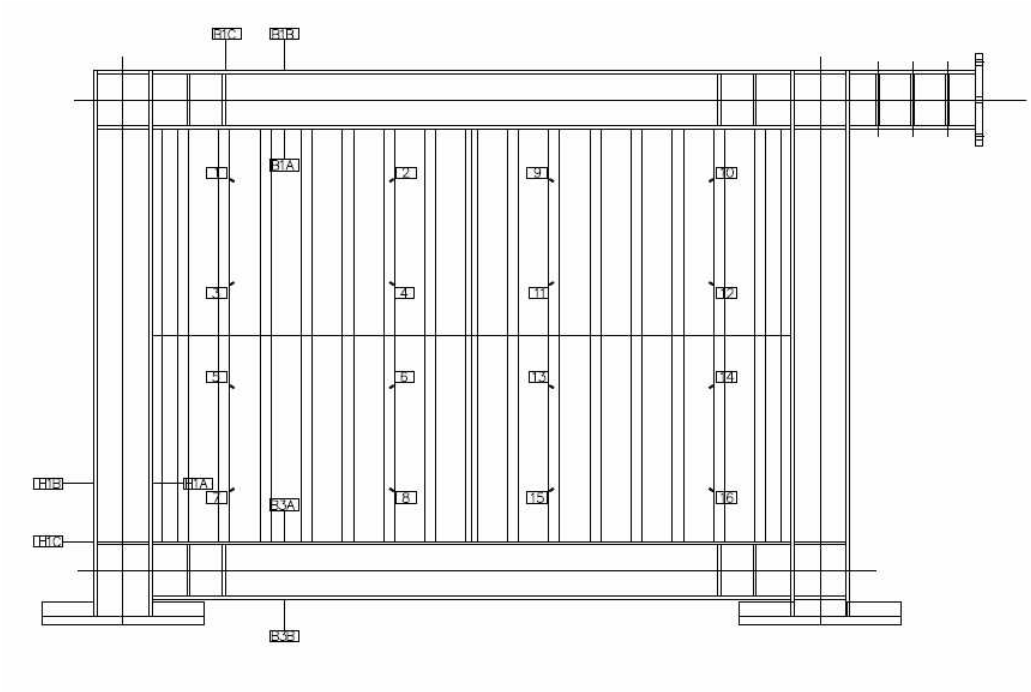
[그림 2.2.12.19] 하중-변위 관계 (#09-FR-TR3.2-H888-48)

표 2.2.12.7 실험 결과표 (#09-FR-TR3.2-H888-48)

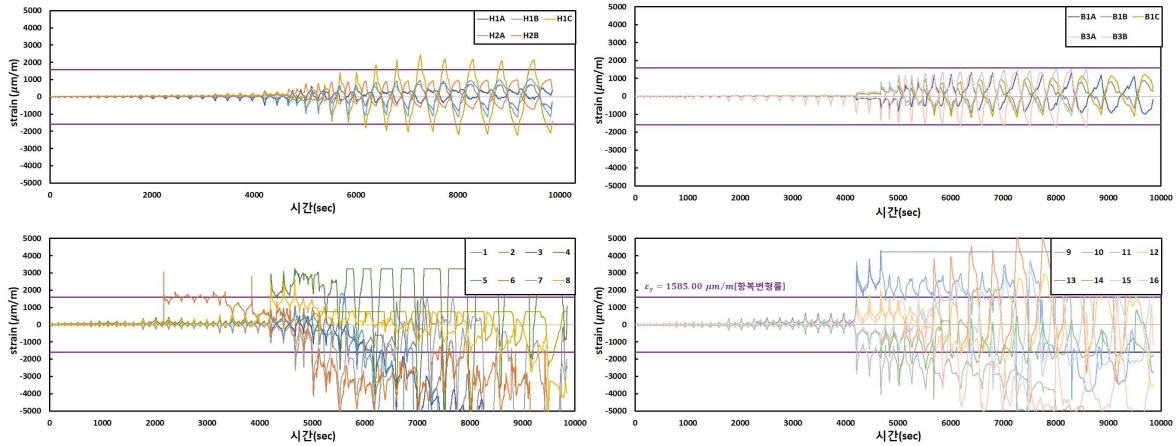
${}_tK_i^+$ [kN·m/rad.]	${}_tK_i^-$ [kN·m/rad.]	${}_tK_i^+/{}_aK_i^+$ [%]	${}_tK_i^-/{}_aK_i^-$ [%]	${}_tM_{max}^+$ [kN·m]	${}_tM_{max}^-$ [kN·m]	${}_tM_{max}^+/M_p^+$ [%]	${}_tM_{max}^-/M_p^-$ [%]
23,282	10,236	-	-	648.5	577.3	207.7	184.9

${}_tK_i^+$: (+)방향 실험체 초기강성
${}_tK_i^-$: (-)방향 실험체 초기강성
${}_aK_i$: 초기강성 이론값 [kN·m/rad.]
${}_tM_{max}^+$: (+)방향 실험체 최대 모멘트
${}_tM_{max}^-$: (-)방향 실험체 최대 모멘트
M_p : 골조의 소성 모멘트 = 312.3 [kN·m]

실험체 #09-FR-TR3.2-H888-48은 골조 실험체로서 초기강성은 (+)방향에서 23,282 kN·m/rad.을 나타내고, (-)방향에서 10,236kN·m/rad.을 나타내었다. 최대 모멘트는 (+)방향에서 648.5kN·m를 나타내고, (-)방향에서 577.3kN·m를 나타내었다. 이론치 소성모멘트 대비 (+)방향은 207.7%, (-)방향은 184.9%의 수준을 나타내었다. 따라서 실험결과 최대내력은 이론치 최대내력을 상회하여, 구조성능이 확보됨을 확인하였다.



[그림 2.2.12.20] Strain Gage 위치 (#09-FR-TR3.2-H888-48)



[그림 2.2.12.21] Strain Gage 변형율의 시간이력 (#09-FR-TR3.2-H888-48)



[그림 2.2.12.22] 해석 및 실험 후 결과(#09-FR-TR3.2-H888-48)

[그림 2.2.12.21]은 Strain Gage 변형율의 시간이력곡선이다. 실험 결과 변위 15.188mm일 때 6게이지 변형율이 3066를 나타내며 소성변형하였다. 이후 변위가 30.375mm일 때 9, 13, 11, 4, 8, 12 게이지 변형율이 3694, 3484, 2897, 2978, 2416, 1659를 나타내며 소성변형하였다. 변위 40.5mm일 때 중앙부에 전체좌굴이 발생하였으며 10, 14, 7 게이지 변형율이 1542, 1932, 2406를 나타내며 소성변형하였다. 변위 60.75mm일 때 좌굴이 발생하며 15, 3게이지가 1537, 1574를 나타내며 소성변형하였다. 변위 81mm일 때 1, 5, 16, B3B 게이지 변형율이 1867, 1808, 2122, 1556를 나타내며 소성변형하였다. 변위 101.25mm일 때 기둥의 H1C 게이지가 1816를 나타냈다.

5) 실험체 #12_FR-PL4.5

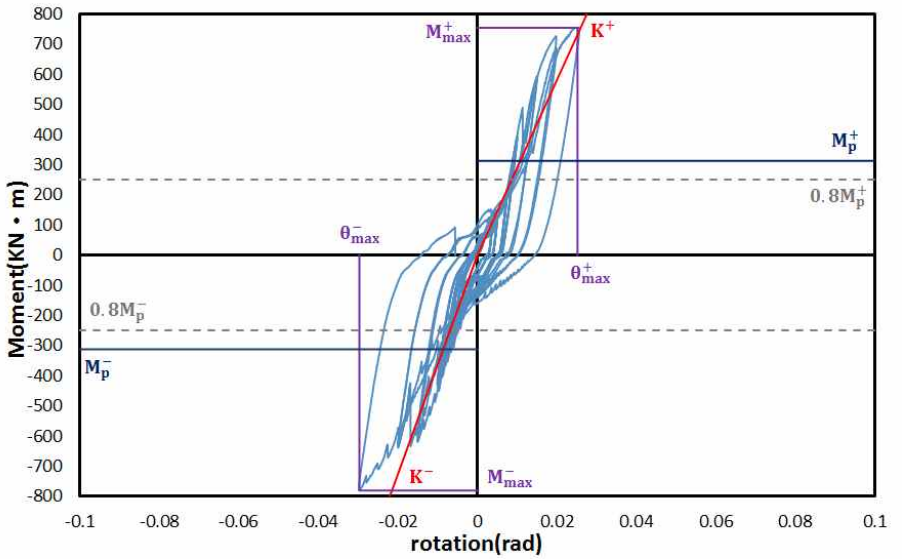


그림 2.2.12.23 하중-변위 곡선 (#02_FR-PL4.5)

표 2.2.12.8 실험 결과표 (#01_FR-TR3.2-H888-67)

${}_tK_i^+$ [kN · m/rad.]	${}_tK_i^-$ [kN · m/rad.]	${}_tK_i^+/{}_aK_i^+$ [%]	${}_tK_i^-/{}_aK_i^-$ [%]	${}_tM_{max}^+$ [kN · m]	${}_tM_{max}^-$ [kN · m]	${}_tM_{max}^+/M_p^+$ [%]	${}_tM_{max}^-/M_p^-$ [%]
29,042	36,346	-	-	754.3	780.5	242	250

${}_tK_i^+$: (+)방향 실험체 초기강성
${}_tK_i^-$: (-)방향 실험체 초기강성
${}_aK_i$: 초기강성 이론값 [kN · m/rad.]
${}_tM_{max}^+$: (+)방향 실험체 최대 모멘트
${}_tM_{max}^-$: (-)방향 실험체 최대 모멘트
M_p : 골조의 소성 모멘트 = 312.3 [kN · m]

실험체 #02_FR-PL4.5는 골조 실험체로서 초기강성은 (+)방향에서 29,042kN·m/rad.을 나타내고, (-)방향에서 36,346kN·m/rad.을 나타내었다. 최대 모멘트는 (+)방향에서 754.3kN·m을 나타내고, (-)방향에서 780.5kN·m을 나타내었다. 골조의 이론치의 소성모멘트 대비 (+)방향은 242%, (-)방향은 250%의 수준을 나타내었다. 실험결과 최대내력은 이론치의 최대내력을 상회하므로 평판이 없는 골조 구조물에 비하여는 구조성능이 확보된다. 그러나 첫 번째 골조 실험체 모델인 주름강판을 적용한 것에는 두께가 두꺼움에도 불구하고 내진성능은 증가하지 않는 것으로 나타났다.

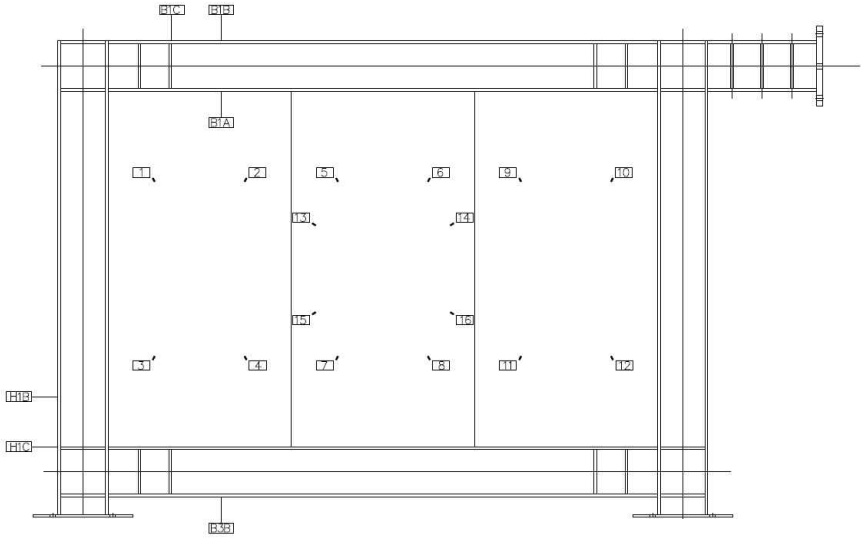


그림 2.2.12.24 Strain Gage 위치 (#02_FR-PL4.5)

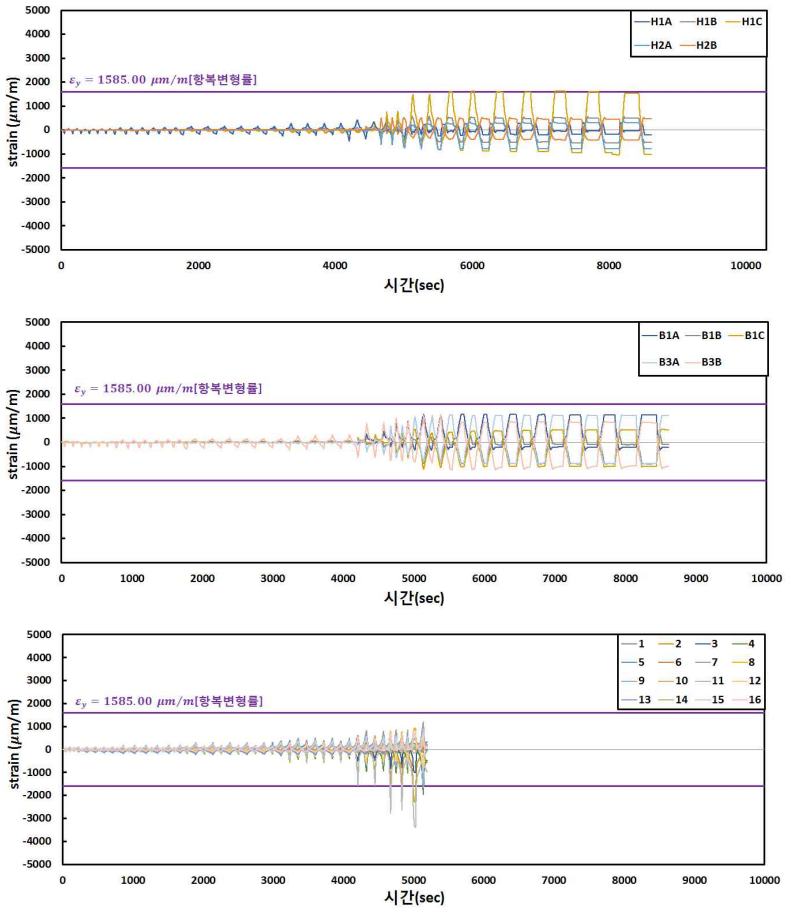


그림 2.2.12.25 Strain Gage 변형률의 시간이력 (#02_FR-PL4.5)



그림 2.2.12.26 실험 후 변형 형상 (#02_FR-PL4.5)

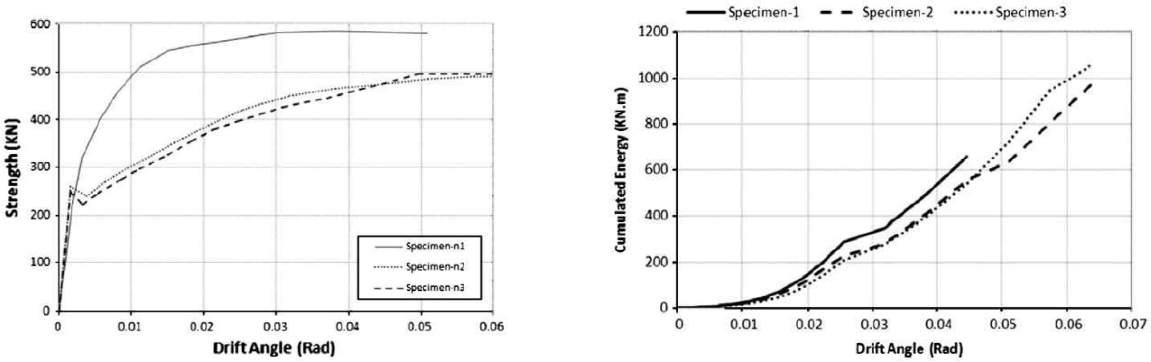
그림 2.2.12.24는 실험체 #12_FR-PL4.5의 Strain Gage 위치이며, 그림 2.2.12.25은 변형율의 시간이력곡선이다. 실험결과 변위 30.375mm, 1Cycle에서 평판 내 전체좌굴이 발생하였으며, 40.5mm 1Cycle에서 평판 내 11의 변형률이 2761을 나타내며 소성 변형하였다. 이후 60.75mm, 1Cycle에서 평판 내 2의 변형률이 2295, 2Cycle에서 평판 내 4의 변형률이 5136을 나타내며 소성 변형하였다.

다. 주름강판 골조 실험체의 실험결과 및 고찰

평판과 주름강판으로 보강된 골조 실험체에서 두 모델의 성능은 주름강판을 적용한 경우가 높게 나타났다. 주름의 방향이 수평방향으로 진행되도록 설치된 실험체에서 사용된 주름형상은 내진성능을 평가하기 위한 첫 번째 실험에서 작은 면적임에도 불구하고 높은 에너지 소산 능력으로 평가된 모델을 이용하였다. 두 시험체간의 차이는 주름의 방향이지만 기존의 문헌에서 소개된 바에 의하면 주름의 방향이 미치는 영향은 소성변형을 이루는 부재의 순서와 크기에서의 차이는 있지만 두 방향 모두 주름강판에서의 소성변형이 나타난 것으로 보고되고 있다. 그림 2.2.12.27는 Emami et al.(2013)에 의해 수행된 실험연구로서 평판의 골조 실험체 모델과 주름방향이 각각 90도의 위상차이가 있는 모델의 반복하중 실험결과이다. 그림에서 볼 수 있는 그래프는 각각의 실험체 모델에 대한 에너지 소산능력을 표현한 것으로서 주름의 방향과는 차이가 크게 나타나지 않으며, 단방향 하중증가에 대한 관계곡선도 주름의 방향에 대한 영향은 거의 동일하게 나타나고 있다. 이와 같은 연구결과에서 볼 때, 사변지지 주름강판의 주름방향이 미치는 영향은 낮을 것으로 예상된다.



Specimen 1 Specimen 2 Specimen 3



(a) Strength under monotonic loading (b) Cumulated Energy

그림 2.2.12.27 Emami et al.(2013) 문헌의 해석결과

실험결과에 대해서 앞서 설명한 바와 같이 첫 번째 실험체인 #01_FR-TR3.2-H888-67은 초기강성이 (+)방향에서 44,865kN·m/rad로 나타내고, (-)방향에서 38,263 kN·m/rad로 나타났다. 두번째 실험체인 #02_FR-PL4.5와 비교해 볼 때, 초기강성은 (+)방향에서 6,602 kN·m/rad만큼 높고, (-)방향에서는 1,917 kN·m/rad만큼 높다. 최대 모멘트는 첫 번째 모델이 (+)방향에서 767.3 kN·m, (-)방향에서 781.1kN·m이며, 이론치의 소성모멘트에 비교해 (+)방향은 245.7%, (-)방향은 250.1%의 수준을 나타내며, 두 번째 실험체인 평판 골조 실험체의 결과와는 (+)방향은 13.0 kN·m, (-)방향은 0.6 kN·m만큼 높게 나타났다. 실험결과 최대내력은 이론값에 비해 최대내력의 2배 이상의 성능을 발휘하며, 내진구조성능이 확보됨을 알 수 있으며, 주름강판을 적용한 것보다 평판모델이 두께가 두꺼움에도 불구하고 구조물의 내진성능은 낮게 나타난다.

두 번째 실험에 대해서는 골조에 설치된 경우에 대해서 다양한 각도로 비교분석하기 위해서 모두 실험체의 조건이 달라진다. 두께의 경우도 1차 실험에서 다루었던 2.3mm에서 3.2mm의 강판으로 바뀌며, 평판의 모델로 추가된다. 평판에서는 두께 4.3mm의 모델을 사용하여 두꺼운 경우와 비교하였다. 또한 동일한 주름의 경우에 대해서 방향이 다른 두 모델을 채택하였다. 방향성에 대해서는 이미 앞서 설명한 대로 동일한 효과를 기대할 수 있다. 그러나 붕괴 메커니즘의 차이는 어느부분이 소성화 되는 것인가에서 나타나며, 여기서 채택된 모델의 결과에서도 동일한 결과를 얻었다. 즉, 강판의 주름에 대한 길이를 고려한 경우에는 크기가 다르다 할지라도 골조구조에서의 크기가 같으므로 동일한 조건에서의 강성을 예측할 수 있다. 그러나 초기강성에 대해서는 두 모델이 다르게 나타나지만 누적에너지소산능력은 동일한 결과를 얻을 수 있다.

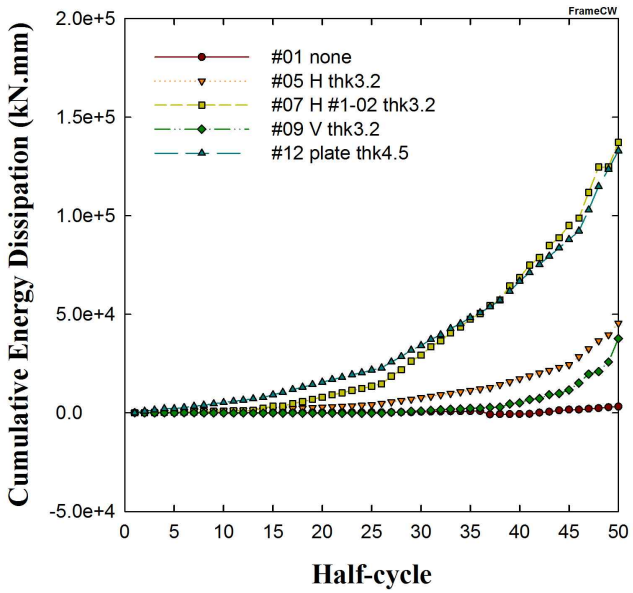


그림 2.2.12.28 주름강판 골조모델의 누적 에너지 소산 그래프

실험체 각각의 에너지소산능력에 대해서 그림2.12.27에 분석결과를 나타내었다. 우선, 그림의 결과에서 #12 골조모델의 거동은 다른 실험체인 판형 부재가 에너지 흡수능력이 나타나기 시작하는 시점에서 탄성상태임을 알 수 있다. 동일한 형상에 대한 주름방향의 모델인 #5와 #9는 차이를 보이고 있으나 다른 모델의 누적에너지 흡수량에 비하면 비교적 유사하다.

주름의 형상별 차이를 위해서 모델 #7과 #9를 주목할 필요가 있다. 두 개의 모델은 경계조건과 크기는 같지만 형상이 다르다. 그러나 결과는 큰 차이가 있다. 여기서 나타난 형상은 2장 2-11에서 다루어진 실험체 모델의 형상이며, 가작 작은 평판크기의 모형 중 가장 큰 에너지 소산능력을 보이는 모델이었다. 해석결과에서 볼 때 매우 큰 차이를 보이고 있다. 이 실험체를 평판 실험체와 비교하도록 하였다. 그림에서 두께가 현저히 두꺼운 4.5mm 두께의 평판모델인 #12를 주름모델 #7과 비교하여보니 거의 비교적 유사하게 에너지 흡수능력이 변화하였다. 따라서 두께를 줄이면서도 에너지 흡수능력을 유지할 수 있고, 주름방향으로의 강성은 전혀 없기 때문에 다양한 방법으로 주름강판을 활용할 수 있다.

동일한 크기의 평판에서 주름의 방향은 에너지소산능력에 큰 영향이 없지만 주름의 형태에서 볼 때 이와는 다르므로 에너지 소산 능력을 갖는 모델에 대해서 형태에 따른 차이를 구분하기 위해서 더 많은 연구가 필요하다고 판단된다. 또한 주름강판의 내진 및 제진성능은 기존의 평판에서이 저항성능보다 우월하며, 두께를 줄여 설계할 수 있으므로 경제적이다. 실험체의 주름방향에 대한 실험결과에 대해서도 문헌에 나타난 바와 유사한 결론을 얻을 수 있었으며, 본 결과는 주름강판을 이용한 구조모델의 전단성능 및 에너지 흡수능력에 대한 평가 기초자료로 이용될 수 있으며, 경계점의 지지조건에 대한 다양한 연구가 향후 필요하다.

3절. 연구수행결과 및 결과의 검증 방법

1. 연구수행 내용 및 결과

가. 연구개발결과 요약

연 차	연구 내용	연구 결과
1차년도	▪ 주름판의 전체좌굴에 대한 이론 연구	▪ 주름판의 전체좌굴에 대한 이론식과 전체좌굴에 대한 전단좌굴응력 특성에 대해서 이론적 연구를 수행하였으며, 평판의 전단좌굴 유한요소 모델링을 통한 전단좌굴 특성을 비교하였음
	▪ 주름판의 국부좌굴에 대한 이론 연구	▪ 주름판의 국부좌굴에 대한 이론식과 국부좌굴에 대한 전단좌굴응력 특성에 대해서 이론적 연구를 수행하였으며, 평판의 전단좌굴 유한요소 모델링을 통한 전단좌굴 특성을 비교하였음
	▪ 주름 형상 및 연성좌굴 연구	▪ 사다리형 주름 및 정현파형 주름판에 대한 전단좌굴응력 특성 및 두께에 따른 전단좌굴응력 특성 연구를 수행 하였으며, 두 좌굴형태에서 발생하는 연성구간에 대해서 주름의 형상에 대한 확장된 연성좌굴 형상에 대해 해석을 수행하였음
	▪ 주름 형태에 대한 파라메타 분석	▪ 주름의 깊이와 주름의 길이에 대한 파라메트릭 스터디를 수행하여 구조적 성능을 분석하고 전단좌굴응력과 성능에 대한 비교 및 변화 특성을 규명하였음
	▪ 주름 형태에 따른 단위모듈 제작	▪ 주름형 단위부재 모듈의 구조설계최적화 방안 구축 및 설계변수에 따른 파라메타의 최적중량 분석 수행하였음
	▪ 주름판 제진장치의 축소모형 제작	▪ 일반 골조 구조물에 적용 가능한 주름판 제진장치 프로토타입 모델 제안과 확장성을 고려한 제진장치 기본 모듈러의 제작방법 연구 및 일체성 확보를 위한 구조체 고안, 전단성능의 특성 및 취약점 고찰하였음
2차년도	▪ 주름판의 파라메타에 따른 제진성능 분석	▪ 정현형 및 제형주름 형상파라메타의 설정 및 두 형상의 등가단면 비교분석 ▪ 주름형상에 따른 좌굴응력산정과 제진성능에 필요한 좌굴범위 비교 분석
	▪ 설계규준에 따른 구조설계 메커니즘 분석	▪ 정현형 및 제형 주름의 주름판 설계 메커니즘과 전단좌굴강도 이론식의 분석 ▪ 제형 및 등가 정현형 주름 형상의 설계코드별 구조설계 메커니즘 분석
	▪ 주름웨브 구조설계 프로그램 개발	▪ 메타 휴리스틱 알고리즘을 이용한 해석 및 최적설계 프로세스 개발 ▪ 정현형 주름웨브 단면특성 계산 프로그램 개발 및 등록
	▪ 전단좌굴 및 제진성능에 대한 실물실험	▪ 제형 주름판 전단좌굴 평가를 위한 실험체 도면 작성 및 형상 분석 ▪ 제진성능평가를 위한 제진 주름판 설치 실험대 도면 작성 및 부재설계
	▪ 주름형상의 세장비에 관한 연구	▪ 제형 주름과 정현형 주름의 좌굴 경향성 비교 및 형상 특성 분석 ▪ 정현형 주름의 연성좌굴 특성에 따른 형상 파라메타의 정의 및 분석
	▪ 주름웨브의 좌굴거동 및 임계하중 분석	▪ 정현형 주름웨브 보의 설계를 위한 임계하중 및 탄성좌굴 분석 ▪ 연성좌굴의 이론식과 해석결과의 비교 및 경향성 비교 및 고찰

3차년도	▪ 주름강판 제진장치와 기존의 관련 진동제어 기술과의 비교	▪ 제형 및 정현파형 주름강판의 진동제어 성능 분석 ▪ 곡선주름강판의 전단 성능 실험을 통한 성능 분석
	▪ 주름방향과 경계조건에 따른 전단좌굴응력 특성 분석	▪ 기하학적 특성을 갖는 파형강판의 좌굴 강도 및 거동 분석 ▪ 경계조건에 따른 제형 및 정현파형강판의 전단좌굴강도 분석
	▪ 곡선형 주름과 직선형 주름의 전단좌굴특성 비교	▪ 제형 및 정현파형 주름강판의 전단좌굴특성 비교 분석 ▪ 주름강판의 곡선길이와 접선각도에 따른 전단좌굴특성 분석
	▪ 주름판의 파형에 따른 최적형상 분석	▪ 형상에 따른 주름강판의 탄성전단좌굴 특성 및 경향성 분석 ▪ 주름강판의 두께 및 곡선길이에 따른 특성 분석
	▪ 주름웨브에 대한 구조 설계 메커니즘 제안	▪ 유로코드를 통한 주름웨브에 대한 구조설계 메커니즘 제안
	▪ 최적형상의 제진장치 설계시방서 작성	▪ 곡선주름강판 제진장치 설계시방서 작성 중
	▪ 주름판 제진성능의 거동 분석과 특성비교	▪ 곡선주름강판의 전단 성능 실험을 통한 제진성능의 거동 및 특성 분석 ▪ 이론식을 통한 주름판 제진성능의 거동 특성 분석
	▪ 최적형상에 따른 전단 성능 평가모델 결정	▪ 전단좌굴특성 분석을 통한 최적형상 모델 분석 ▪ 형상에 따른 주름강판의 전단좌굴응력 분석을 통한 좌굴모드 예상
	▪ 최적주름형상의 설계모형 개발	▪ 곡선주름강판 전단 성능 실험을 통한 최적설계모형 분석 ▪ 경계조건에 따른 곡선주름강판 성능 분석을 통한 최적주름 형상 제안
	▪ 제진장치의 성능개선 방안 검토	▪ 형상비에 따른 성능분석을 통한 성능개선 방안 제안 ▪ 곡선주름강판 전단 성능 실험결과를 곡선주름강판 성능개선
	▪ 주름판 실용화를 위한 형상성능 분석과 활용성 분석	▪ 주름판 실용화를 위한 곡선주름강판 제진장치 설계시방서 작성

2. 연구성과 목표

연차	성과목표	성과지표	측정방법	목표치	가중치
1차년도	(질적지표) 주름판의 전단좌굴 성능 평가 및 제진장치 기본 모형 개발	주름판 좌굴성능의 이론적 구현의 정확도	주름 형상에 따른 전단좌굴성능을 실험결과와 비교	90% 이상	50%
		주름판의 제진성능 구현의 정확도	실물실험결과와 이론적 해석결과의 일치도	95% 이상	50%
	소 계				100%
	(양적지표) 주름판의 전단좌굴 성능 평가 및 제진장치 기본 모형 개발	학술지 게재 논문건수 (국내/국외)	국내외 학술지 게재 논문건수	3건	20%
		학술회의 발표 논문건수 (국내/국외)	학술회의(학회)에 참가해 발표한 건수	2건	15%
		특허출원 건수(국내)	해당 과제(또는 사업)를 통해 산출된 특허출원 건수와 함께 연구비당 특허출원 건수, 참여 연구원당 특허출원 건수를 산정	2건	15%
		요소 기술의 성능 목표 달성도	해당 과제(또는 사업)의 수행 단계별 혹은 최종단계에서 요소 기술의 기술적 성능(강도, 속도 등)을 측정하여 목표값 대비 퍼센트(%)로 환산	90%	15%
		전문가 의견반영 실적	전문가 의견수렴 반영(설문조사, 회의 등) 건수	2건	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	10%
		분야별 인력양성 배출 실적	해당 과제(또는 사업)를 통해 양성된 학위별/전공분야별 인력 배출 수	1건	10%
	소 계				100%
2차년도	(질적지표) 주름웨브의 구조설계 프로그램 개발 및 실물실험을 통한 성능평가	주름웨브의 구조설계 프로그램의 정확도	상용프로그램과 개발된 프로그램을 이용한 주름웨브 설계시 정확도 비교	90% 이상	50%
		주름판의 주요 형상변수에 따른 주름웨브의 전단성능 검증	이론적 모델과 실물실험결과 정확도	90% 이상	50%
	소 계				100%
	(양적지표) 주름웨브의 구조설계 프로그램	학술지 게재 논문건수 (국내/국외)	국내외 학술지 게재 논문건수	3건	20%
		학술회의 발표 논문건수 (국내/국외)	학술회의(학회)에 참가해 발표한 건수	2건	5%

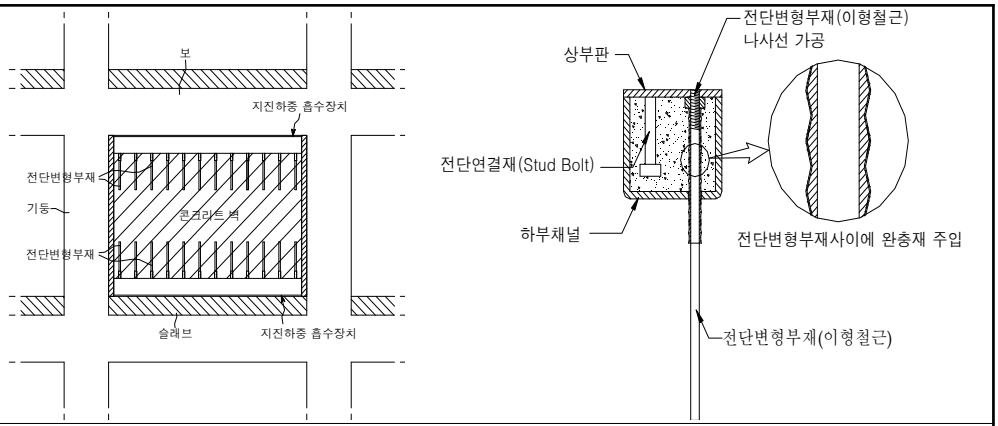
	개발 및 실물실험을 통한 성능평가	SCI급 학술지 게재 논문건수	국내외 SCI급 학술지 게재 논문건수	2건	20%
		특허출원 건수(국내)	해당 과제(또는 사업)를 통해 산출된 특허출원 건수와 함께 연구비당 특허출원 건수, 참여연구원당 특허출원 건수를 산정	2건	15%
		소프트웨어(S/W)등록 건수	해당 과제(또는 사업)를 통해 산출된 소프트웨어(S/W) 등록 건수와 함께 연구비당 소프트웨어(S/W) 등록 건수, 참여연구원당 소프트웨어(S/W) 등록 건수	1건	10%
		수치해석 건수	수치해석건수	1건	5%
		요소 기술의 성능 목표 달성도	해당 과제(또는 사업)의 수행 단계별 혹은 최종단계에서 요소기술의 기술적 성능(강도, 속도 등)을 측정하여 목표값 대비 퍼센트(%)로 환산	90%	5%
		연구장비 구축 실적	연구장비 구입 건수, 투자액 및 상대치(연구비 1억원당, 연구원 1인당)	1건	5%
		산학연간 기술지원	산학연간 기술지원(현장기술지도, 기술상담, 교육훈련 및 홍보, 기술이전 등) 건수	1건	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 배출 수	1건	5%
	소 계				100%
3차년도	(질적지표) 제진장치 표준 모델 및 설계방법과 최적 주름형상 제진구조모델 개발	제진장치 표준 모델의 제진성능 향상 정도	기존의 상용화 된 제진장치와의 제진성능 비교	10% 이상	50%
		최적주름형상의 적용에 의한 제진성능 향상 정도	기존의 주름판과 개발된 주름판 제진장치의 내진 및 제진성능 비교	10% 이상	50%
	소 계				100%
	(양적지표) 제진장치 표준 모델 및 설계방법과 최적 주름형상 제진구조모델 개발	학술지 게재 논문건수 (국내/국외)	국내외 학술지 게재 논문건수	3건	20%
		학술회의 발표 논문건수 (국내/국외)	학술회의(학회)에 참가해 발표한 건수	2건	10%
		SCI급 학술지 게재 논문건수	국내외 SCI급 학술지 게재 논문건수	2건	20%
		특허출원 건수(국내)	해당 과제(또는 사업)를 통해 산출된 특허출원 건수와 함께 연구비당 특허출원 건수, 참여연구원당 특허출원 건수를 산정	2건	5%

		특허등록 건수(국내)	해당 과제(또는 사업)를 통해 산출된 특허등록 건수와 함께 연구비당 특허등록 건수, 참여 연구원당 특허등록 건수를 산정	1건	15%
		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 건수를 기재	1건	5%
		설계도면 및 사양서 개발	설계도면 개발건수, 사양서 개발 건수	2건	15%
		산학연간 기술지원	산학연간 기술지원(현장기술지도, 기술상담, 교육훈련 및 홍보, 기술이전 등) 건수	1건	5%
		연구개발 관련 홍보	홍보(학술회의, 간담회, 세미나, 워크샵, 박람회, 공청회, 정기간행물 발간) 건수	2건	5%
	소 계				100%

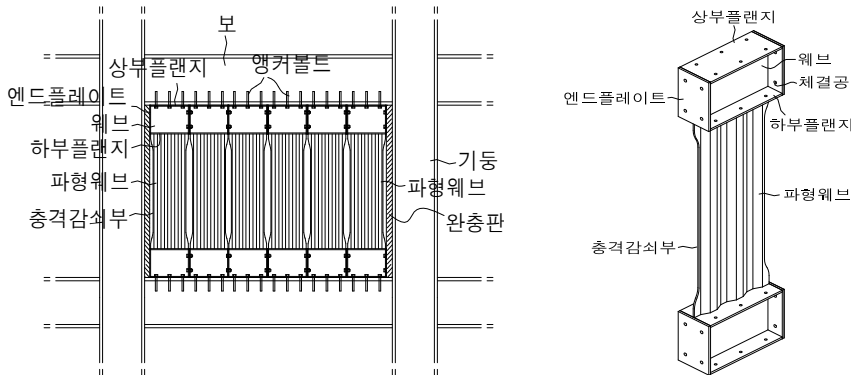
제3장 최종 연구성과 및 적용실적

1절. 핵심 성과별 세부설명

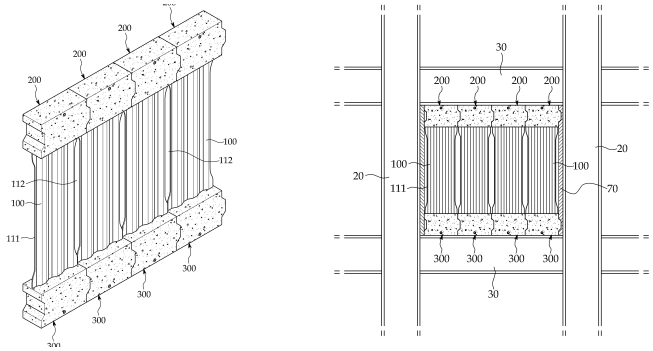
1. 핵심성과명 : 라멘골조에 설치되는 지진하중 흡수장치

<table>
<tr><td colspan="2">관련 그림 / 사진</td><td colspan="6"> 
</td></tr>
<tr><td colspan="2">정의</td><td colspan="6">* 라멘 골조에 있어 기둥과 보 사이의 공간에 설치되 설치되는 지진하중 흡수장치</td></tr>
<tr><td colspan="2">설정사유</td><td colspan="6">* 주름강판을 이용한 제진장치의 표준모델의 유닛화 및 적용 방안 제시</td></tr>
<tr><td colspan="2">목적</td><td colspan="6">* 우리나라의 주거용 및 상업용 건축물의 대다수를 차지하고 있는 라멘 골조에
바람직하게 적용될 수 있는 저비용의 경제적인 지진하중 흡수장치를 제공</td></tr>
<tr><td colspan="2">성능목표</td><td colspan="6">(기존기술 수준)
* 기존 건축물에 제진댐퍼를 설치하기 위한 설치프레임에 있어서, 제진댐퍼와 이들 연결된 각종 장치 기구들의 설치프레임의 접합구조들이 많이 제안됨
* 기존 콘크리트 벽체를 치핑한 제진댐퍼의 경우 시공과정이 복잡할 뿐만 아니라, 칸막이 벽시공이나 신축공사시에는 이용하기 어려움
(개발기술 수준)
* 기둥과 보가 강접된 라멘 골조의 보의 하면에 고정되어 지진하중을 흡수, 저감
* 전단연결재(철근 또는 주름강판)와 보에 고정되는 상하부판, 충전재, 완충재로 구성
* 나사절합을 통하여 라멘 골조에 간단하게 설치되는 지진하중 흡수장치가 제공
(개발기술 수준 설정근거)
* 주름 강판 제진장치의 적용을 위해 전단연결재를 이용한 기존 건축물에 제진장치 적용 방안 제시</td></tr>
<tr><td colspan="2">성과달성 책임자 (소속기관)</td><td colspan="6">* 강주원(영남대학교), 이승재(한국기술교육대학교)</td></tr>
<tr><td colspan="2">소요기간</td><td colspan="6">'12.04 ~ '13.02 (10개월, 1년차)</td></tr>
<tr><td rowspan="11">핵심성과</td><td rowspan="3">달성 확인방법</td><td>1차년도</td><td colspan="5">* 특허등록 건수</td></tr>
<tr><td>2차년도</td><td colspan="5"></td></tr>
<tr><td>3차년도</td><td colspan="5"></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>출원0, 등록1</td><td>국내0, 국외0</td><td>국내1, 국외0</td><td></td><td>국내외 학술회의 발표1</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>출원0, 등록0</td><td>국내0, 국외0</td><td>국내0, 국외0</td><td></td><td></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>출원0, 등록0</td><td>국내0, 국외0</td><td>국내0, 국외0</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>출원0, 등록1</td><td>국내0, 국외0</td><td>국내1, 국외0</td><td></td><td>국내외 학술회의 발표1</td></tr>
<tr><td rowspan="3">질적성과</td><td>1차년도</td><td colspan="5">* 주름판 좌굴성능의 이론적 구현의 정확도 - 90%
* 주름판의 제진성능 구현의 정확도- 90%</td></tr>
<tr><td>2차년도</td><td colspan="5"></td></tr>
<tr><td>3차년도</td><td colspan="5"></td></tr>
<tr><td colspan="2">성과 활용계획</td><td colspan="6">* 전단연결재를 이용한 제진장치로써 향후 주름강판 제진장치의 표준모델 유닛화에 적용</td></tr>
</table>

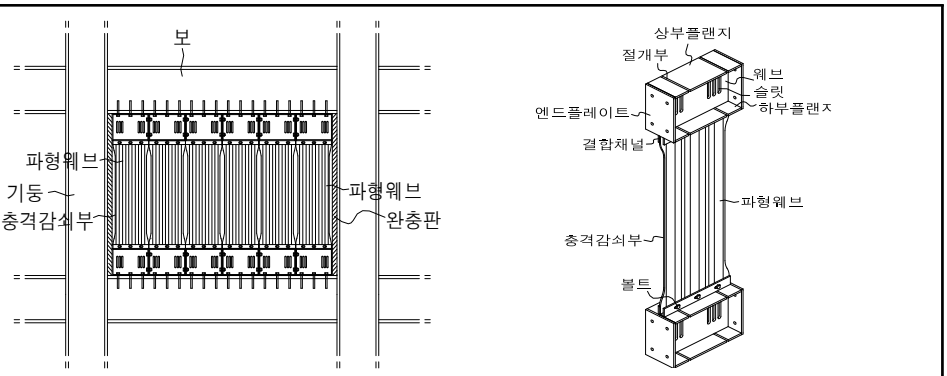
2. 핵심성과명 : 단위 모듈러 지진하중 흡수장치를 이용한 철골구조물 보강방법

<table>
<tr><td colspan="2">관련 그림 / 사진</td><td colspan="6"> 
</td></tr>
<tr><td colspan="2">정의</td><td colspan="6">* 철골구조물의 기둥과 보 사이에 단위모듈러화 된 지진하중 흡수장치를 병렬배치하여 순수 건식공법의 칸막이 벽체를 시공
* 지진하중을 흡수, 저감시키는 기능을 갖도록 하는 단위모듈러 지진하중 흡수장치를 이용한 철골구조물 보강방법</td></tr>
<tr><td colspan="2">설정사유</td><td colspan="6">* 주름강판을 이용한 제진장치의 표준모델의 유닛화 및 적용 방안 제시</td></tr>
<tr><td colspan="2">목적</td><td colspan="6">* 철골구조물에 있어서 기둥과 보 사이의 공간에 설치되어 단순히 실과 실을 분리하는 칸막이 벽체를, 단위 모듈러화 된 지진하중 흡수장치를 병렬배치하여 고정하여 구성
* 순수건식공법으로 보강할 수 있어 시공을 간소화
* 단위 모듈러 지진하중 흡수장치의 파형 웨브가 소성변형을 일으켜 아코디언 효과를 발현할 수 있도록 하여 지진하중에 대한 건물의 저항능력을 효율적으로 향상</td></tr>
<tr><td colspan="2">성능목표</td><td colspan="6">(기존기술 수준)
* 기존 콘크리트 벽체를 치핑하여 제진댐퍼를 설치하였기 때문에 시공과정이 복잡할 뿐만 아니라, 실과 실을 나누는 칸막이벽 시공이나 신축공사시에는 이용하기 어려움
(개발기술 수준)
* 철골구조물에 있어서 실과 실을 분리하는 칸막이 벽체에 단위 모듈러화 된 지진하중 흡수장치를 병렬배치하여 구성함으로써 순수건식공법을 통한 시공을 간소화
* 단위 모듈러 지진하중 흡수장치의 파형 웨브가 소성변형을 일으켜 아코디언 효과를 발현할 수 있도록 하여 지진하중에 대한 건물의 저항능력을 효율적으로 향상
(개발기술 수준 설정근거)
* 주름 강판 제진장치의 적용을 위한 모듈화 및 기존 건축물에 제진장치 적용 방안 제시</td></tr>
<tr><td colspan="2">성과달성 책임자 (소속기관)</td><td colspan="6">* 강주원(영남대학교), 이승재(한국기술교육대학교)</td></tr>
<tr><td colspan="2">소요기간</td><td colspan="6">'12.04 ~'13.02 (10개월, 1년차)</td></tr>
<tr><td rowspan="12">핵심성과</td><td rowspan="3">달성 확인방법</td><td>1차년도</td><td colspan="5">* 특허출원 건수</td></tr>
<tr><td>2차년도</td><td colspan="5"></td></tr>
<tr><td>3차년도</td><td colspan="5"></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>출원1, 등록0</td><td>국내0, 국외0</td><td>국내1, 국외0</td><td></td><td>국내외 학술회의 발표1</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>출원0, 등록0</td><td>국내0, 국외0</td><td>국내0, 국외0</td><td></td><td></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>출원0, 등록0</td><td>국내0, 국외0</td><td>국내0, 국외0</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>출원1, 등록0</td><td>국내0, 국외0</td><td>국내1, 국외0</td><td></td><td>국내외 학술회의 발표1</td></tr>
<tr><td rowspan="3">질적성과</td><td>1차년도</td><td colspan="5">* 주름판 좌굴성능의 이론적 구현의 정확도 - 90%
* 주름판의 제진성능 구현의 정확도- 90%</td></tr>
<tr><td>2차년도</td><td colspan="5"></td></tr>
<tr><td>3차년도</td><td colspan="5"></td></tr>
<tr><td colspan="2">성과 활용계획</td><td colspan="6">* 기존 구조물의 내진보강에 있어서 주름강판 제진장치의 표준모듈 및 적용 방법으로 이용</td></tr>
</table>

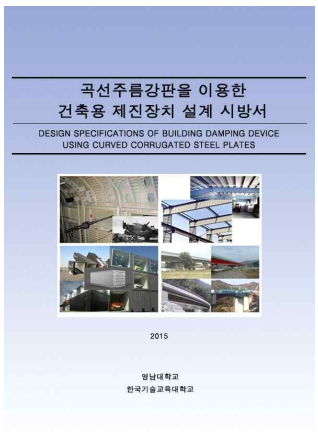
3. 핵심성과명 : 내하성능 보강이 가능한 단위 모듈러 지진하중 흡수장치 및 이를 이용한 철골구조물 보강방법

<table>
<tr><td colspan="2">관련 그림 / 사진</td><td colspan="6"> 
</td></tr>
<tr><td colspan="2">정의</td><td colspan="6">* 철골구조물에 있어 기둥과 보 사이에 공간에 설치되어 단순히 실과 실을 분리하는 칸막이 벽체의 내하성능 보강을 하는 동시에 동시에 지진하중을 흡수, 저감시키는 기능을 갖도록 한 단위 모듈러 지진하중 흡수장치 및 철골구조물 보강방법</td></tr>
<tr><td colspan="2">설정사유</td><td colspan="6">* 주름강판을 이용한 제진장치의 표준모델의 유닛화 및 적용 방안 제시</td></tr>
<tr><td colspan="2">목적</td><td colspan="6">* 철골구조물에 있어서 칸막이 벽체의 단위 모듈러화 된 지진하중 흡수장치를 병렬배치하여 고정하고 전면에 합성목재 패널을 구성하는 건식구조로 시공을 간소화
* 파형 웨브가 소성변형을 일으켜 아코디언 효과를 발현할 수 있도록 하여 지진하중에 대한 건물의 저항능력을 효율적으로 향상
* 파형 웨브의 상하부에 구성된 콘크리트가 내하성능을 보강할 수 있는 단위 모듈러 지진하중 흡수장치 및 이를 이용한 철골구조물 보강방법을 제공</td></tr>
<tr><td colspan="2">성능목표</td><td colspan="6">(기존기술 수준)
* 기존 콘크리트 벽체를 치핑하여 제진댐퍼를 설치하였기 때문에 시공과정이 복잡할 뿐만 아니라, 실과 실을 나누는 칸막이벽 시공이나 신축공사시에는 이용하기 어려움
* 종래의 제진장치도 대부분 강구조물로 이루어져 부식과 단면감소로 인한 내하성능이 저하
(개발기술 수준)
* 철골구조물에 있어서 칸막이 벽체의 단위 모듈러화 된 지진하중 흡수장치를 병렬배치하여 고정하고 전면에 합성목재 패널을 구성하는 건식구조
* 파형 웨브가 소성변형을 일으켜 아코디언 효과를 발현할 수 있도록 하여 지진하중에 대한 건물의 저항능력을 효율적으로 향상
(개발기술 수준 설정근거)
* 주름 강판 제진장치의 적용을 위한 모듈화 및 기존 건축물에 제진장치 적용과 내하성능 향상 방법 제시</td></tr>
<tr><td colspan="2">성과달성 책임자 (소속기관)</td><td colspan="6">* 강주원(영남대학교), 이승재(한국기술교육대학교)</td></tr>
<tr><td colspan="2">소요기간</td><td colspan="6">'12.04 ~ '13.02 (10개월, 1년차)</td></tr>
<tr><td rowspan="11">핵심성과</td><td rowspan="3">달성 확인방법</td><td>1차년도</td><td colspan="5">* 특허출원 건수</td></tr>
<tr><td>2차년도</td><td colspan="5"></td></tr>
<tr><td>3차년도</td><td colspan="5"></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>출원1, 등록0</td><td>국내0, 국외0</td><td>국내1, 국외0</td><td></td><td>국내외 학술회의 발표1</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>출원0, 등록0</td><td>국내0, 국외0</td><td>국내0, 국외0</td><td></td><td></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>출원0, 등록0</td><td>국내0, 국외0</td><td>국내0, 국외0</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>출원1, 등록0</td><td>국내0, 국외0</td><td>국내1, 국외0</td><td></td><td>국내외 학술회의 발표1</td></tr>
<tr><td rowspan="3">질적성과</td><td>1차년도</td><td colspan="5">* 주름판 좌굴성능의 이론적 구현의 정확도 - 90%
* 주름판의 제진성능 구현의 정확도- 90%</td></tr>
<tr><td>2차년도</td><td colspan="5"></td></tr>
<tr><td>3차년도</td><td colspan="5"></td></tr>
<tr><td colspan="2">성과 활용계획</td><td colspan="6">* 주름 강판 제진장치의 적용을 위한 모듈화 및 적용에 있어서 내하성능 향상 방법으로 활용</td></tr>
</table>

4. 핵심성과명 : 단위 모듈러 지진하중 흡수장치 및 이를 이용한 철골 구조물 보강방법

<table>
<tr><td colspan="2">관련 그림 / 사진</td><td colspan="6"> 
</td></tr>
<tr><td colspan="2">정의</td><td colspan="6">* 철골구조물에 있어 칸막이 벽체를 상하부와 중앙부로 단계적으로 지진하중을 흡수, 저감시키는 기능을 갖도록 한 단위 모듈러 지진하중 흡수장치 및 철골구조물 보강방법</td></tr>
<tr><td colspan="2">설정사유</td><td colspan="6">* 주름강판을 이용한 제진장치의 표준모델의 유닛화 및 적용 방안 제시</td></tr>
<tr><td colspan="2">목적</td><td colspan="6">* 철골구조물에 있어서 칸막이 벽체의 단위 모듈러화 된 지진하중 흡수장치를 병렬 배치하여 고정하고 전면에 합성목재 패널을 구성하는 건식구조로 시공을 간소화
* 지진하중 발생시 상하부에 구성된 지지부재의 절개부 및 슬릿에 의하여 초기 변형을 유도하여 지진하중에 의한 주 구조부재의 손상을 방지
* 중앙부의 파형 웨브가 아코디언과 같이 변형되면서 지진하중을 흡수함으로써 주구조부재에 전달되는 지진하중을 단계적으로 저감</td></tr>
<tr><td colspan="2">성능목표</td><td colspan="6">(기존기술 수준)
* 기존 콘크리트 벽체를 치핑하여 제진댐퍼를 설치하였기 때문에 시공과정이 복잡할 뿐만 아니라, 실과 실을 나누는 칸막이벽 시공이나 신축공사시에는 이용하기 어려움
* 종래의 제진장치에서도 강구조물로 이루어진 것이 대부분이어서 부식과 단면감소로 인하여 내하성능이 저하
(개발기술 수준)
* 철골구조물에 있어 칸막이 벽체의 단위 모듈러화 된 지진하중 흡수장치를 병렬배치하여 전면에 합성목재 패널을 구성하는 건식구조
* 지진하중 발생시 상하부에 구성된 지지부재의 절개부 및 슬릿에 의하여 초기 변형을 유도하여 지진하중에 의한 주 구조부재의 손상을 방지
(개발기술 수준 설정근거)
* 주름 강판 제진장치의 적용을 위한 모듈화 및 기존 건축물에 제진장치 시공의 용이성</td></tr>
<tr><td colspan="2">성과달성 책임자 (소속기관)</td><td colspan="6">* 강주원(영남대학교), 이승재(한국기술교육대학교)</td></tr>
<tr><td colspan="2">소요기간</td><td colspan="6">'12.04 ~ '13.02 (10개월, 1년차)</td></tr>
<tr><td rowspan="12">핵심성과</td><td rowspan="3">달성 확인방법</td><td>1차년도</td><td colspan="5">* 특허출원 건수</td></tr>
<tr><td>2차년도</td><td colspan="5"></td></tr>
<tr><td>3차년도</td><td colspan="5"></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>출원1, 등록0</td><td>국내0, 국외0</td><td>국내0, 국외0</td><td></td><td>국내외 학술회의 발표1</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>출원0, 등록0</td><td>국내0, 국외0</td><td>국내0, 국외0</td><td></td><td></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>출원0, 등록0</td><td>국내0, 국외0</td><td>표</td><td></td><td>국내외 학술회의 발표1</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>출원1, 등록0</td><td>국내0, 국외0</td><td>국내0, 국외0</td><td></td><td>국내외 학술회의 발표2</td></tr>
<tr><td rowspan="3">질적성과</td><td>1차년도</td><td colspan="5">* 주름판 좌굴성능의 이론적 구현의 정확도 - 90%
* 주름판의 제진성능 구현의 정확도- 90%</td></tr>
<tr><td>2차년도</td><td colspan="5"></td></tr>
<tr><td>3차년도</td><td colspan="5"></td></tr>
<tr><td colspan="2">성과 활용계획</td><td colspan="6">* 주름강판 제진장치 표준 모델의 모듈화와 시공성 향상 방법으로 활용</td></tr>
</table>

5. 핵심성과명 : 제진주름강판의 표준모델 및 시방서

<table>
<tr><td colspan="2">관련 그림 / 사진</td><td colspan="6"> 
</td></tr>
<tr><td colspan="2">정의</td><td colspan="6">* 최적화 된 제진주름강판의 표준모델 제시와 제진장치 제작, 설계, 시공방법에 관한 지침 또는 시방서</td></tr>
<tr><td colspan="2">설정사유</td><td colspan="6">* 개발된 주름강판 제진장치의 표준모델과 실제 적용방안 제시</td></tr>
<tr><td colspan="2">목적</td><td colspan="6">* 주름강판 제진장치 적용에 있어서 최적의 주름형상 구조설계 및 적용방법 제시</td></tr>
<tr><td colspan="2">성능목표</td><td colspan="6">(기존기술 수준)
* 기존의 제진장치는 기존 구조물에 대한 시공과정이 복잡
* 칸막이 벽시공이나 신축공사시에는 이용하기 어려운 문제점이 있어서 이들의 보완 뿐만 아니라 제진성능의 개선 필요
(개발기술 수준)
* 주름강판을 이용한 제진장치로 기존 구조물 뿐만 아니라 신축 구조물에 적용이 용이한 제진장치를 개발
* 최적의 주름형상 구조설계 및 적용방안을 제시함으로써, 시공성 및 경제성을 향상.
(개발기술 수준 설정근거)
* 주름 강판 제진장치의 적용을 위해 최적 주름형상 결정 및 제진장치 적용성 향상 방안을 제시</td></tr>
<tr><td colspan="2">성과달성 책임자 (소속기관)</td><td colspan="6">* 강주원(영남대학교), 이승재(한국기술교육대학교)</td></tr>
<tr><td colspan="2">소요기간</td><td colspan="6">'12.04 ~ '15.02 (2년 10개월, 3년차)</td></tr>
<tr><td rowspan="11">핵심성과</td><td rowspan="3">달성 확인방법</td><td>1차년도</td><td colspan="5"></td></tr>
<tr><td>2차년도</td><td colspan="5"></td></tr>
<tr><td>3차년도</td><td colspan="5">제진주름강판의 표준모델 및 구조설계 방법과 시방서 제시</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>출원0, 등록0</td><td>국내0, 국외0</td><td>국내0, 국외0</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>출원2, 등록0</td><td>국내0, 국외2</td><td>국내3, 국외0</td><td>1</td><td>국내외 학술회의 발표2</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>출원2, 등록0</td><td>국내0, 국외2</td><td>국내3, 국외0</td><td></td><td>설계도면 및 사양서 개발1
국내외 학술회의 발표2</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>출원4, 등록0</td><td>국내0, 국외4</td><td>국내6, 국외0</td><td>1</td><td>설계도면 및 사양서 개발1
국내외 학술회의 발표2</td></tr>
<tr><td rowspan="3">질적성과</td><td>1차년도</td><td colspan="5">* 주름판 좌굴성능의 이론적 구현의 정확도 - 90%
* 주름판의 제진성능 구현의 정확도- 90%</td></tr>
<tr><td>2차년도</td><td colspan="5">* 주름판의 주요 형상변수에 따른 주름웨브의 전단성능 검증 프로그램의 정확도 -90%
* 주름판의 제진성능 구현의 정확도 - 90%</td></tr>
<tr><td>3차년도</td><td colspan="5">* 제진장치 표준 모델의 제진성능 향상 정도 - 10%
* 최적주름형상의 적용에 의한 제진성능 향상 정도 - 10%</td></tr>
<tr><td colspan="2">성과 활용계획</td><td colspan="6">* 2차년도에는 제진주름강판의 실물시험을 통한 검증을 수행
* 3차년도에는 신기술 지정 신청과 더불어 실제 현장에 적용되는 시방서에 반영될 수 있도록 관련 학회에 협조 및 사전승인을 받도록 할 예정</td></tr>
</table>

2절. 연구성과 목록

1. 특허 등록

	특허명	출원/등록 구분	출원/등록 번호	출원/등록 국가	출원/등록 날짜
1	라멘 골조에 설치되는 지진하중 흡수장치	등록	10-1187093-0000	대한민국	2012.09.24
2	파형 웨브가 구성된 지진하중 흡수장치를 이용한 칸막이 벽체의 시공방법	등록	10-1236575-0000	대한민국	2013.02.18
3	슬릿형 웨브가 구성된 지진하중 흡수장치를 이용한 칸막이 벽체의 시공방법	등록	10-1242978-0000	대한민국	2013.03.06
4	단위 모듈러 지진하중 흡수장치를 이용한 칸막이 벽체의 시공방법	등록	10-1242972-0000	대한민국	2013.03.06
5	칸막이 벽체 시공용 단위 모듈러 지진하중 흡수장치	등록	10-1243024-0000	대한민국	2013.03.06
6	내하성능 보강이 가능한 단위 모듈러 지진하중 흡수장치 및 이를 이용한 철골구조물 보강방법	등록	10-1372154-0000	대한민국	2014.03.03
7	단위 모듈러 지진하중 흡수장치를 이용한 철골구조물 보강방법	등록	10-1372087-0000	대한민국	2014.03.03

2. 특허 출원

	특허명	출원/등록 구분	출원/등록 번호	출원/등록 국가	출원/등록 날짜
1	단위 모듈러 지진하중 흡수장치를 이용한 철골구조물 보강방법	출원	10-2013-0002259	대한민국	2013.01.08
2	내하성능 보강이 가능한 단위 모듈러 지진하중 흡수장치 및 이를 이용한 철골구조물 보강방법	출원	10-2013-0002260	대한민국	2013.01.08
3	단위 모듈러 지진하중 흡수장치 및 이를 이용한 철골구조물 보강방법	출원	10-2013-0002261	대한민국	2013.01.08
4	절개부를 갖는 지진하중 흡수장치를 이용한 내진 보강 방법	출원	10-2014-0008547	대한민국	2014.01.23
5	영구거푸집이 구비된 날개벽을 기둥에 증설하는 내진 보강 방법	출원	10-2014-0008546	대한민국	2014.01.23

3. 게재 논문

	구분	논문제목	학술지명	게재년월
1	비SCI급	최소중량설계에 의한 사인형 주름웨브보의 단면 특성	대한건축학회논문집	2012.10
2	비SCI급	사인형 주름웨브보의 이산화 최적구조설계	한국강구조학회논문집	2012.12
3	비SCI급	유로코드를 이용한 주름웨브보의 최적설계 연구	한국공간구조학회지	2012.12
4	비SCI급	ABAQUS를 이용한 정현파형 주름판의 전단좌굴해석과 경계조건에 관한 연구	대한건축학회논문집	2013.11
5	비SCI급	차분진화알고리즘을 이용한 정현파형 주름웨브보의 최적설계프로그램 개발	대한건축학회논문집	2013.12
6	비SCI급	정현파형 주름강판의 전단좌굴특성 분석	한국구조물진단유지관리공학회 논문집	2014.05
7	비SCI급	제형 및 정현파형 주름강판의 전단좌굴특성 비교 연구	대한건축학회논문집	2014.09
8	비SCI급	형상에 따른 주름강판의 탄성전단좌굴 특성 및 경향성 분석 연구	한국구조물진단유지관리공학회 논문집	2014.11
9	비SCI급	제형 및 정현형 주름강판의 전단좌굴 및 연성좌굴 경향성 비교 연구	대한건축학회논문집 구조계	심사중
10	SCI급	Application of Multistage Homotopy Perturbation Method to the Nonlinear Space Truss Model	International Journal of Steel Structures	게재확정 (발간예정)
11	SCI급	Minimum Weight Design of Sinusoidal Corrugated Web Beam using Differential Evolution Algorithm	International Journal of Steel Structures	게재확정 (발간예정)
12	SCI급	An analytical approach for nonlinear dynamic system of shallow arches using higher order Taylor method	Journal of Central South University	심사중
13	SCI급	Semi-analytic Solution and Stability of a Space Truss using a Multi-step Taylor Series Method	Materials	심사중

4. 학술회의 발표 논문

	논문제목	학술회의 명칭	발표일
1	사인형 주름웨브 보의 최소중량설계와 최적단면 특성	대한건축학회 2012 춘계학술발표대회	2012.04
2	A STUDY ON THE APPLICATION OF EQUIVALENT PLATE ELEMENTFOR DYNAMIC ANALYSIS OF ONE-WAY HOLLOW SLAB	2nd International Conference on Computational Design in Engineering (CODE2012)	2012.11
3	DYNAMIC ANALYSIS OF SPATIAL STRUCTUREACCORDING TO THE ASPECT RATIO AND COLUMNS	2nd International Conference on Computational Design in Engineering (CODE2012)	2012.11

4	MINIMUM WEIGHT DESIGN OF CORRUGATED WEB GIRDER USING GA	2nd International Conference on Computational Design in Engineering (CODE2012)	2012.11
5	GA을 이용한 정현파형 주름판의 중량최적설계 프로그램 개발	한국구조물진단유지관리공학회 2013년 봄 학술발표회	2013.04
6	차분진화알고리즘을 이용한 정현파형 주름판의 중량최적설계	2013 한국공간구조학회 춘계학술발표회	2013.05
7	정현파형 주름판의 전단좌굴특성에 관한 파라메트릭 스터디	2013년도 한국강구조학회 학술대회	2013.06
8	A Study on Shear Buckling of Sinusoidal Corrugated Plate in Accordance with Boundary Condition	Proceedings of the International Association forShell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2013	2013.09
9	정현파형 웨브의 탄성좌굴강도 분석	2013 대한건축학회 추계학술발표대회	2013.10
10	정현파형 주름판의 전단좌굴경향성에 관한 연구	2013 한국구조물진단유지관리공학회 가을 학술발표회	2013.10
11	정현 및 제형 주름강판의 좌굴거동에 관한 해석적 연구	2014 한국구조물진단유지관리공학회 봄 학술발표 논문집	2014.04
12	주름보의 최소중량설계를 위한 유전자알고리즘과 차분진화기법의 비교 연구	2014 한국공간구조학회 춘계학술발표대회 및 정기총회	2014.05
13	형상에 따른 주름강판의 전단좌굴응력에 관한 연구	2014 한국공간구조학회 춘계학술발표대회 및 정기총회	2014.05
14	An Investigation of the Shear Buckling Stress of Sinusoidal Corrugated Plate	Proceedings of the IASS-SLTE 2014 Symposium“Shells, Membranes and Spatial Structures: Footprints”	2014.10

5. 소프트웨어 등록

	S/W 명칭	창작일
1	SPSCWB (정현파형 주름웨브 보의 단면성질 계산 프로그램)	2013.09.01
2	정현파형 주름웨브 단순보의 최적설계 프로그램(ODSCWSB_DE)	2014.10.01

6. 인력양성

	취득학위	이름	성별	학위취득일
1	석사	유미나	여자	2013.01.09
2	석사	곽의신	남자	2015.02.27

7. 산학연간 기술지원

	교육명	교육내용	교육대상	교육일시	구분
1	주름웨브보의 특성 및 건축물에 적용 방법	□ 주름웨브보의 구조적 개요 및 특성 - 주름웨브보의 휨 및 전단에 대한 구조적 특성 - 곡선 주름웨브보와 제형 주름웨브보의 비교 - 주름웨브보와 관련된 주요 구조설계기준 □ 주름웨브보의 기존 연구개발 현황 - 미국 PACO사의 주름 웨브 I형 단면 형강 개발 - 프랑스, 일본에서의 교량에 적용 사례 □ 주름웨브보의 적용시 주요 고려사항 - 웨브의 높이 및 주름 형태에 따른 전단좌굴 - 주름웨브보의 횡좌굴, 피로파괴에 대한 웨브의 거동, 주름 웨브 거더의 플랜지 휨저항 - 사인형 주름 웨브의 형상파라메타에 따른 전단좌굴거동 - 사인형 주름 웨브를 이용한 진동제어장치의 메커니즘	(주)ITS엔지니어링	2012.11.23	교육훈련
2	사인형 주름웨브의 전단해석 및 설계	□ 주름웨브보의 구조적 개요 및 특성 - 주름웨브보의 휨 및 전단에 대한 구조적 특성 - 곡선 주름웨브보와 제형 주름웨브보의 비교 - 주름웨브보의 주요 연구개발 동향 □ 주름웨브 관련 구조설계기준 - DASt-R015에 의한 주름웨브설계 - Eurocode 3_ EN 1993-1-5에 의한 주름웨브설계 - DIN 18800에 의한 주름웨브설계 □ 사인형 주름웨브의 해석과 제진장치로서의 이용 방법 - 주름웨브의 전단설계기준 및 제안된 설계식에 따른 주름웨브의 전단좌굴해석 - 제진장치로서의 사인형 주름웨브의 메커니즘	(주)구조기술사연합법인	2012.11.30	교육훈련
3	주름웨브보의 전단좌굴 특성과 설계방법	□ 주름웨브보의 구조적 개요 및 전단좌굴 특성 - 주름웨브보의 휨거동 및 전단거동 특성 - 일반 H형강보와 주름웨브보의 구조적 거동 특성 비교 □ 주름웨브보의 해석을 위한 소프트웨어 - ABAQUS를 이용한 주름웨브보의 해석 방법 - 유전자 알고리즘 및 차분진화알고리즘에 의한 해석방법 □ 주름웨브보의 설계를 위한 단면특성 산정 방법 - 주름웨브보의 외부높이, 단면적, 환산단면적, 단위길이 중량, 표면적, 단면이차모멘트, 단면이차 반경 등의 기본	(주)ITS엔지니어링	2013.10.25	교육훈련

		적인 단면성질 정의 방법 - 현재 사용되는 주름웨브보 설계 소프트웨어와 개발된 소프트웨어 비교			
4	정현파형 주름판의 해석 및 설계시 유전자알고리즘 적용 방법	□ 주름강판 부재의 개요 - 주름강판의 전단좌굴 특성 - 정현파형 주름강판과 제형주름강판의 구조적 특성 비교 - 정현파형 주름강판의 개발 배경 및 향후 전망 □ 주름웨브보의 최적설계프로그램 - 유로코드 설계식에 따른 정현파형 주름강판의 최적설계 방법 - 실변수 유전자알고리즘에 의한 주름강판의 최적화 기법 - 차분진화알고리즘에 의한 주름강판의 최적화 기법 - 제안된 최적화 알고리즘과 향후 프로그램 개발 방향 □ 정현파형 주름강판 제진장치 설계시 적용방법 - 주름강판의 전단성능에 대한 파라메타와 최적화 기법 - 주름강판 제진장치의 적용방안	㈜구조기술사 연합법인	2014.11. 12.	교육훈련

8. 연구개발 관련 홍보

	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-techUrban16	Control Device of Thin Corrugated Plate	Phoenix Island, Jeju, Korea	2012.11.15
2	사인형 주름웨브의 전단좌굴과 구조설계	사인형 주름웨브 판에 대한 전단좌굴 해석과정과 좌굴특성 및 전단설계	한국강구조학회지 24권 6호 학술기사	2012.12.31
3	2013 한국구조물진단유지관리공학회 봄학술발표회 및 포럼 임시총회	ABAQUS를 이용한 주름판의 전단좌굴해석과 경계조건	부산 해운대 그랜드호텔	2013.04.12
4	2013 한국구조물진단유지관리공학회 가을 학술발표	파라메트릭 스터디를 통한 정현파형강판의 전단좌굴응력 변화 특성	강원도 쏠비치 호텔&리조트	2013.10.11
5	2014 학국구조물진단유지관리공학회 봄 학술발표	주름판의 형상에 따른 전단좌굴특성 비교 연구	경북대학교 글로벌플라자	2014.04.10. ~ 2014.04.12

6	2014 한국구조물진단유지관리공학회 가을 학술발표	주름보를 이용한 단순구조물의 최소중량설계	제주 롯데시티호텔	2014.10.01. ~ 2014.10.03
7	2014 한국구조물진단유지관리공학회 가을 학술발표	파형강판의 형상에 따른 탄성전단좌굴 특성 분석 연구	제주 롯데시티호텔	2014.10.01. ~ 2014.10.03

9. 주요 실적

- 전단좌굴 및 제진성능 실물실험을 통한 최적 곡선주름 강판 모형 제안(5건) 및 모듈러 제진장치 보강기술 제안(2건)

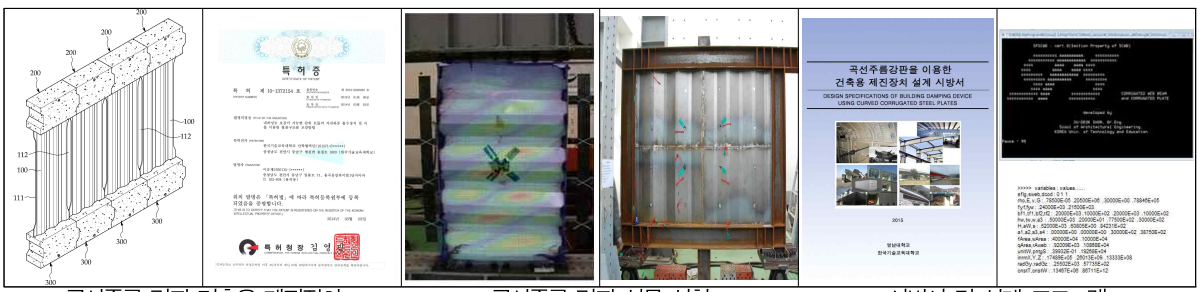
- 최적 형상 제진장치 설계 및 시공을 위한 설계 프로그램(2건) 및 시방서 제안

- 기존 건축용 제진장치(MR댐퍼, 창호형 댐퍼, 탄소섬유 보강보강 등) 대비 공사비 900만원(건당) 절감 및 재래식 제진공법(RC전단벽 보강 등) 대비 10-20일 공기단축예상, 철골 브레이스 공법에 비해 설치가 간편하고 마감이 용이함.

구분	곡선주름 강판	철골 브레이스 공법	창호형 댐퍼
공법	건식공법	건식공법	건식공법
개소당 평균 공사금액	1,150만원(보강) +250만원(마감공사)	1,100백만원(보강) +300만원(마감공사)	1,970백만원(보강) +330백만원(마감공사)
특징	저렴한 가격(박판사용). 모듈화 제품은 시공 간편, 중장비 불필요 및 부분교체 가능. 절곡공정 어려움.	가장 일반적인 공법. 공사기간 다소소요. 반입 시 중장비 필요함. 현장 적용성 우수. 가격 저렴함.	시공 간편함(공장생산). 반입 시 중장비 필요. 지진 후 댐퍼교체. 진동제어 탁월하지만 고가의 제품.

- 참여기업과 기술이전을 위한 기술실시계약 1건을 체결((주)아이스트엔지니어링, 5,000만원)하였으며, 시공업체(㈜산돌기업 등)와 실시계약 체결 예정

- 노후화된 건축물을 대상으로 지속적인 홍보 및 설명회를 개최하여 기술이전 확대 추진('15년 1회 개최 예정)



< 곡선주름 강판 건축용 제진장치 > < 곡선주름 강판 실물 실험 > < 시방서 및 설계 프로그램 >

제4장 연구목표 달성 및 효과

1절. 연구개발 최종목표 달성도

성과점검기준표(1차년도)

	과제명		성과목표		성과지표		성과검증 기준				가중치	달성평점 (평점1~5)
							목표수준		측정방법	검증 방법		
							목표치	달성치				
성과 질적 목표 점검	1	최적주름 형상 제안 및 지침서	1-1	주름판의 전단좌굴 성능 평가	①	주름판 좌굴성능의 이론적 구현의 정확도	90% 이상	100%	주름형상에 따른 전단좌굴성능을 실험결과와 비교	실물실험과 컴퓨터 시뮬레이션 동영상	50%	5
	2	제진주름 강판의 성능검증	2-1	주름판을 이용한 제진장치 모형개발	②	주름판의 제진성능 구현의 정확도	95% 이상	100%	실물실험결과와 이론적 해석결과의 일치도	실물실험과 컴퓨터 시뮬레이션 동영상	50%	5
	종합점수 = ∑ (성과목표별 달성평점 ×가중치)										100%	100

		목표	목표 건수	달성 건수	증빙	달성율 (%)	가중치	달성평점
양적 지표 점검	사업연계지표	학술지 게재 논문건수 (국내/국외)	3	3	국내외 학술지 게재 논문건수	100	20%	20
		학술회의 발표 논문건수(국내/국외)	2	4	학술회의(학회)에 참가해 발표한 건수	100	15%	20
		특허출원 건수(국내)	2	3	해당 과제(또는 사업)를 통해 산출된 특허출원 건수와 함께 연구비당 특허출원 건수, 참여연구원당 특허출원 건수를 산정	100	15%	15
		요소 기술의 성능 목표 달성도	90%	90 %	해당 과제(또는 사업)의 수행 단계별 혹은 최종단계에서 요소기술의 기술적 성능(강도, 속도 등)을	100	15%	15

					측정하여 목표값 대비 퍼센트(%)로 환산			
		전문가 의견반영 실적	2	2	전문가 의견 수렴 반영(설문조사, 회의 등) 건수	100	10%	10
		산학연간 기술지원	2	2	산학연간 기술지원(현장 기술지도, 기술상담, 교육훈련 및 홍보, 기술이전 등) 건수	100	5%	5
		연구개발 관련 홍보	2	2	홍보(학술회의, 간담회, 세미나, 워크샵, 박람회, 공청회, 정기간행물 발간) 건수	100	10%	10
		분야별 인력양성 배출 실적	1	1	해당 과제(또는 사업)를 통해 양성된 학위별/전공분야별 인력 배출 수	100	10%	10
	종합점수 = ∑ (성과별달성율×가중치)						100%	100

성과점검기준표(2차년도)

	과제명		성과목표		성과지표		성과검증 기준				가중치	달성평점 (평점1~5)
							목표수준		측정방법	검증방법		
							목표치	달성치				
성과 질적 목표 점검	1	최적주름형상 제안 및 지침서	1-1	주름웨브의 구조설계 프로그램 개발	①	주름웨브의 구조설계 프로그램의 정확도	90% 이상	100%	상용프로그램과 개발된 프로그램을 이용한 주름웨브 설계시 정확도 비교	프로그램 시연 및 정확도의 수치적 비교	50%	5
	2	제진주름강판의 성능검증	2-1	주름웨브의 실물실험을 통한 성능평가	②	기존 제진장치와 주름판의 제진장치의 성능 비교	10% 이상 향상	10% 이상 향상	이론모델과 실물실험의 결과치 비교와 기존 제진장치와의 성능 비교	실물실험과 컴퓨터 시뮬레이션 (동영상)	50%	5
	종합점수 = ∑ (성과목표별 달성평점 ×가중치)										100%	100

		목표	목표 건수	달성 건수	증빙	달성율 (%)	가중치	달성평점
양적 지표 점검	사업연계지표	학술지 게재 논문건수 (국내/국외)	3	2	국내외 학술지 게재 논문건수	66.6	20%	13.33
		학술회의 발표 논문건수(국내/국외)	2	6	학술회의(학회)에 참가해 발표한 건수	100	5%	5
		SCI급 학술지 게재 논문건수	2	0	국내외 SCI급 학술지 게재 논문건수	0	20%	0
		특허출원 건수(국내)	2	2	해당 과제(또는 사업)를 통해 산출된 특허출원 건수와 함께 연구비당 특허출원 건수, 참여연구원당 특허출원 건수를 산정	100	15%	15
		소프트웨어(S/W)등록 건수	1	1	해당 과제(또는 사업)를 통해 산출된 소프트웨어(S/W) 등록 건수와 함께 연구비당 소프트웨어(S/W) 등록 건수, 참여연구원당 소프트웨어(S/W) 등록 건수를 기재	100	10%	10
		수치해석 건수	1	1	수치해석건수	100	5%	5
		요소 기술의 성능 목표 달성도	90%	95%	해당 과제(또는 사업)의 수행 단계별 혹은 최종단계에서 요소기술의 기술적 성능(강도, 속도 등)을 측정하여 목표값 대비 퍼센트(%)로 환산	100	5%	5

		연구장비 구축 실적	1	0	연구장비 구입 건수, 투자액 및 상대치(연구비 1억원당, 연구원 1인당)	0	5%	0
		산학연간 기술지원	1	1	산학연간 기술지원(현장기술지도, 기술상담, 교육훈련 및 홍보, 기술이전 등) 건수	100	5%	5
		연구개발 관련 홍보	2	2	홍보(학술회의, 간담회, 세미나, 워크샵, 박람회, 공청회, 정기간행물 발간) 건수	100	5%	5
		분야별 인력양성 배출 실적	1	0	해당 과제(또는 사업)를 통해 양성된 학위별/전공분야별 인력 배출 수	0	5%	0
	종합점수 = ∑ (성과별달성율×가중치)						100%	63.33

성과점검기준표(3차년도)

		과제명		성과목표		성과지표		성과검증 기준				가중치	달성평점 (평점1~5)
								목표수준		측정방법	검증 방법		
								목표치	달성치				
성과 질적 목표 점검	1	최적주름형상 제안 및 지침서	1-1	제진장치 표준 모델 및 설계방법 개발	①	제진장치 표준 모델의 제진성능 향상 정도	10% 이상 향상	10% 이상 향상	기존의 상용화 된 제진장치와의 제진성능 비교	표준모델의 시뮬레이션 결과 비교	50%	5
	2	제진주름강판의 성능검증	2-1	최적주름형상 제진구조모델 개발	②	최적주름형상의 적용에 의한 제진성능 향상 정도	10% 이상 향상	10% 이상 향상	기존의 주름판과 개발된 주름판 제진장치의 내진 및 제진성능 비교	시뮬레이션 결과 비교	50%	5
		종합점수 = ∑ (성과목표별 달성평점 ×가중치)										100%	100

		목표	목표 건수	달성 건수	증빙	달성율 (%)	가중치	달성평점
양적 지표 점검	사업연계지표	학술지 게재 논문건수 (국내/국외)	3	4 (1건 심사중)	국내외 학술지 게재 논문건수	100	20%	20
		학술회의 발표 논문건수 (국내/국외)	2	4	학술회의 (학회)에 참가해 발표한 건수	100	10%	10
		SCI급 학술지 게재 논문건수	2	4 (2건 심사중)	국내외 SCI급 학술지 게재 논문건수	100	20%	20
		특허출원 건수(국내)	2	0	해당 과제(또는 사업)를 통해 산출된 특허출원 건수와 함께 연구비당 특허출원 건수, 참여연구원 당 특허출원 건수를 산정	0	5%	0

		특허등록 건수(국내)	1	2	해당 과제(또는 사업)를 통해 산출된 특허등록 건수와 함께 연구비당 특허등록 건수, 참여연구원당 특허등록 건수를 산정	100	15%	15
		소프트웨어(S/W)등록 건수	1	1	해당 과제(또는 사업)를 통해 산출된 소프트웨어(S/W) 등록 건수와 함께 연구비당 소프트웨어(S/W) 등록 건수, 참여연구원당 소프트웨어(S/W) 등록 건수를 기재	100	5%	5
		설계도면 및 사양서 개발	2	2	설계도면 개발건수, 사양서 개발 건수	100	15%	15
		산학연간 기술지원	1	1	산학연간 기술지원(현장기술지도, 기술상담, 교육훈련 및 홍보, 기술이전 등) 건수	100	5%	5
		연구개발 관련 홍보	2	3	홍보(학술회의, 간담회, 세미나, 워크샵, 박람회, 공청회, 정기간행물 발간) 건수	100	5%	5
	종합점수 = ∑ (성과별달성율×가중치)						100%	95

2절. 연구개발 성과의 기술적 효과분석

국내의 지진에 대비하는 구조설계는 1985년 멕시코 대지진을 계기로 1986년 내진설계법이 마련되어 1988년부터 적용되다가 2000년에 내진설계 적용대상을 5층 이상으로 강화하였으며, 2005년 신내진기준을 적용하였다. 기상청에 따르면 2011년 12월까지 우리나라에 발생한 규모 2.0이상 지진은 총 51회였고, 그중 규모 3.0이상은 9회 발생하였다. 향후 노후 시설이나 공공건물 및 학교와 같은 교육시설물들의 지역사회 방재거점으로서의 역할을 수행하기 위한 안전성의 확보와 제진설계의 확산이 필요하다. 이러한 시점에서 다양한 내진 및 제진장치의 개발과 다양한 응용기술 및 원천기술의 보유는 국내 지진으로인한 토목, 건축구조물들의 안전성 확보를 넘어서 해외 기술로 부터의 자립과 상품화를 도모하기에 적합한 시기이다.

유럽에서 많은 활용을 보여온 주름강판은 미국을 비롯하여 캐나다, 일본 등 여러 나라에서 확산되어 각각의 나라에 맞게 활용법과 시방서 등이 개발되었다. 주름이 주는 역학적 장점은 오래전부터 여러 방면에 활용되었고, 주름강판을 이용한 건축용 제진장치는 기존 강판이 좌굴로 인해 내력저하 현상이 발생하는 것을 주름을 활용하여 전단내력 및 변형 성능을 대폭 개선한 구조이다. 강판의 좌굴모드에 대해서주름형상을 이용하여 컨트롤하고 좌굴로 인한 내력저하를 방지하도록 주름을 형성한 것이다. 인장측 장령장형성을 최대한 활용하는 구조이므로 내진 및 제진성능이 기존의 제진장치에 비해서 비교적 우세하며, 비용적 측면에서도 유리하게 작용하고 있다. 이것은 얇은 강판을 이용하므로 두꺼운 강판으로 제작되는 내진 및 제진장치에 비해 경제적으로 유리하며, 또한 우수한 성능의 능동적인 제진장치들이 고가인 반면에 장치의 개발이 이들과 대비해서 저가형이다. 저렴한 내진, 제진장치의 경우 콘크리트 전단벽과 같은 습식공법은 주름강판을 이용한 기구의 개발과 보강공법이 주로 건식공법이므로 상대적으로 짧은 공사기간과 시공성을 확보할 수 있다. 또한, 개구부 전면 및 부분보강이 가능하므로 창호 등의 방해요소의 자유도를 확보할 수 있는 장점이 있을 뿐만 아니라 벽체가 필요한 부분에 대해서는 따로 간막이 벽체를 시공하지 않아도 된다는 장점이 있다.

이러한 주름강판 내진, 제진기술의 개발을 통해 장수명화를 위한 건축구조물의 내진 보강설계가 가능하며, 형태적 설계방법에 따른 재료절감효과 기술을 함께 제공할 수 있다. 주름형상 설계규준의 분석과 연구를 통해 '곡선주름강판을 이용한 건축용 제진장치 설계 시방서'를 제안하였으며, 이를 통해 국내형 설계 방안 제시로 안전성 확보가 가능하다. 개발기술의 교육과 기술공개를 통해 형태저항형 곡면판요소에 대한 전문 연구인력양성을 할 수 있으며, 전문인력 양성으로 인한 기술집약적 산업으로의 연구인프라 구축이 가능하다. 개발된 구조설계용 프로그램과 정현파형 주름웨브단순보의 최적설계 프로그램은 이들을 설계하는 관련 해석 및 설계기술의 자립과 특성화 및 시공기술의 개선이 가능할 것으로 판단된다.

현재 ㈜아이스트와 기술실시계약을 채결하였으며, 중견 시공회사와의 실시계약이 예정되어 있으며, 이러한 기술성과물을 통해서 우수성을 입증할 수 있다. 이것은 개발기술의 축적과 보급으로 인해 산업 전반의 발전과 이들의 시너지 효과를 기대할 수 있다. 주름강판관련 개발기술의 기술세분화를 통하여 새로운 아이디어를 추구할 수 있을 것으로 생각되며, 필요 연구개발과제의 분할활용 또한 가능할 것으로 판단된다.

3절. 연구개발 성과의 경제적 효과분석

1. 모듈화된 주름강판 제진장치에 대한 친환경성과 경제적 효과

건축물의 리모델링을 어렵게 만드는 요인은 평면 가변성의 부족, 구조체와 설비의 공간공유 그리고 보수/보강 비용의 과다 등이 있다. 기존의 건축물을 구성하는 공법과 구법은 신축과 폐기시 산업 폐기물을 대량 배출할 뿐만 아니라 재사용 혹은 재활용을 어렵게 한다. 건축물 특히 공동 주택은 철근 콘크리트를 현장 타설하는 벽식 구조의 습식 공법위주로 이루어지고 현장에서 절단 가공하여 시공 조립함으로 폐자재의 배출감소가 어렵다. 따라서 가능한 신축을 억제하는 것이 가장 효과적인 친환경 자원절약이 될 수 있다. 본 연구를 통해 개발된 곡선주름강판을 이용한 건축용 제진장치는 장수명화를 위한 건축구조물의 내진 보강설계가 가능할 뿐만 아니라, 유닛화로 인해 제진장치의 시공과 제작의 경비 절감이 가능하다. 재사용성 개념이 포함되는 순환형 사회구조에 적절히 대응하기 위해 재사용 및 해체 가능하고 재활용이 용이한 장수명화된 건축구조 시스템의 요소개발을 통해 산업 전반에 경제적으로 용이하게 이용할 수 있을 것으로 판단된다. 특히 곡선주름강판을 이용한 제진/면진 장치의 강재 사용량의 감소로 인한 이산화탄소 배출량의 감소는 녹색성장을 이루고자 하는 산업사회의 니즈를 만족시키는 결과를 얻을 수 있다.

2. 효율적인 자재의 사용으로 평가되는 주름강판 내진 및 제진장치

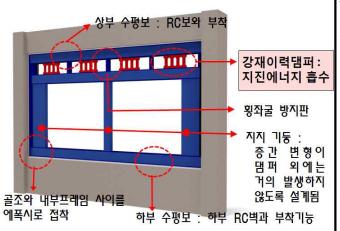
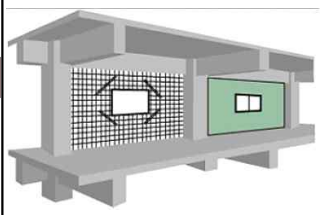
박판을 가공하는 기술로 개발되는 주름강판과 이들의 합성구조물들은 기본적으로 박판을 이용함으로 다른 구조체에 비해 재료의 사용이 억제되는 것은 당연한 것이다. 이러한 기술개발을 통해 주름관련 산업분야의 유닛화를 통한 구조개선은 효율적인 자재를 사용하는 측면과 더불어 매우 큰 경제적으로 절감할 수 있는 방법을 제시하는 것이다. 타 연계산업 확장 가능성 또한 제공할 수 있으며, 이로 인해서 건설경기 활성화에 기여할 수 있을 것으로 사료된다. 또한 고급기술의 확보와 활용은 고용창출효과로 이어질 가능성이 크며, 이러한 독자적 개발기술을 통해 국제 경쟁력 강화와 국가 이미지 제고 또한 가능할 것으로 판단된다.

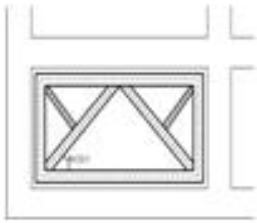
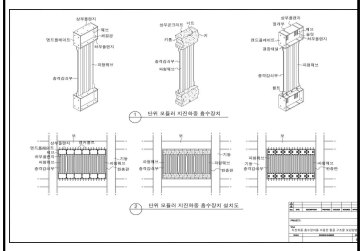
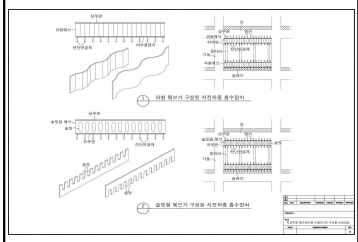
3. 저층건축물 내진(제진)보강공법과 이를 통해 본 경제성

저층건축물의 보수보강에서 지진에 대한 보수와 보강방법은 많은 연구개발이 진행되어왔으며, 기능적 측면과 경제적 측면에서 보다 합리적이고 우수한 성능을 확보한 제품을 개발하고자 많은 노력을 기울였다. 저층건축물의 보강공법에 대해서 다양한 방법이 시도되었으나 표에서 보는 바와 같이 비교적 고가의 성능이 월등히 높은 모델들이 많이 개발되었다. 그러나 비교적 고가의 에너지 흡수장치들은 구조물의 가격에서 바라볼 때 새로운 방법을 모색할 필요성이 나타났다. 이것은 저가형 저층 구조물에 최소한의 필요조건을 만족할 수 있는 방법과 기능적 측면에서 공사기간의 단축 및 모듈화를 통한 대량생산 등의 항목을 확보하는데

주름강판을 활용한 장치들은 매우 합리적이고 경제적이다.

저층 건축물 내진(제진)보강공법 비교표

구조 시스템	X방향 / Y방향	MR댐퍼 제진시스템 전단벽 또는 철골브레이스 또는 탄소섬유		창호형 댐퍼 설치		RC 전단벽 보강	
공법 개요		- MR댐퍼 제진시스템 - 전단벽, 철골브레이스 등으로 강도보강		- 기존 건물의 기둥과 보 사이에 설치		- 기존 건물 조적벽체 및 창호, 개구부를 철거하고 철근콘크리트 내력벽을 증설하여 내력과 강성을 향상	
개념도						
장점		- 지진 발생후에도 반복사용 가능 - 비노출형 구조로 내외부 구조 및 미관 손상이 없음		- 구조체와 일체성 확보에 유리 - 건물 입면의 변화가 없다. (다양한 입면 디자인이 가능) - 채광, 조망 및 통풍성 우수 - 학습 정서에 장애가 없다.		- 강성균형개선이 용이하다. - 리모델링공사에 유리 - 보강비용이 다소 저렴하다	
단점		- 진동감지센서 등 주변장치 필요함		- 구조물규모에 따라 중장비가 필요 - 사전 주문제작 기간이 필요		- 보강위치 및 개구부에 대한 제약 - 많은 접합앵커개소로 시공성이 문제 - 조적벽체 철거 후 전단벽 신설로 폐기물 발생 - 기초보강공사 필요시 공기증가 - 섬유보강시 단가 증가	
개소당 평균공사금액 (원)		내진 보강 (개당내력: 200 kN)	35,960,000	내진 보강 (개당내력: 300 kN)	19,700,000	내진 보강 (개당내력: - kN)	9,000,000
		마감 공사	5,000,000	마감 공사	3,300,000	마감 공사	3,000,000
		합 계	40,960,000	합 계	23,000,000	합 계	12,000,000

구조 시스템	전단형 마찰댐퍼 복합제진시스템		철골 브레이스 보강		주름강판 제진장치	
공법 개요	- 건축물 외부에 전단형 마찰 댐퍼 제진시스템을 시공 - 중요 구조부에 탄소섬유시트, 복합보강판을 이용		- 철골프레임의 기본 틀에 브레이싱을 연결한 구조		- 기존 강판의 좌굴로 인한 내력저하 현상을 주름을 활용하여 전단내력 및 변형 성능을 대폭 개선한 구조	
개념도	 		 		 	
장점	- 조립형 프레임으로 짧은 시공기간 - 설치 시 중량감소로 인한 주구조체 피해 방지. - 시야가림이 없고 채광 및 통풍이 용이.		- 자재에 대한 신뢰성 - 사전 공장주문제작하여 공사기간이 짧다. - 용도에 따라 현장적용성 우수		- 강판의 좌굴모드를 주름형상을 이용하여 컨트롤하고 좌굴로 인한 내력저하를 방지하여 인장측 장력장형성을 최대한 활용하는 구조이므로 내진 및 제진성능이 탁월함 - 기존 건축용 제진장치 대비 공사비 900원(건당) 절감 - 공장제작 후 현장장착 시공 프로세스로서 인건비 절약 및 정밀시공 가능 - 재래식 제진공법 대비 10-20일 공기단축 가능 - 개구부 전면 및 부분보강이 가능하여 창호 등의 방해 요소의 자유도를 확보할 수 있음	
단점	- 전단형 마찰댐퍼를 적용하기 위한 전문가 필요. (전단형 마찰댐퍼 도입장력정, 대상구조물과 제진시스템 연결, 기초부 보강)		- 건물이 취성적이되므로 반복된 지진에는 내진성능 현저히 저하 - 조망 및 채광이 불리 - 조건에 따라 기초를 보강		- 공장제작 시 절곡 등의 부가공정이 필요함 - 기존 구조물과의 완전 고정에 가까운 정착이 필요함	
개소당 평균공사금액 (원)	내진 보강 (개당내력: 400 kN)	22,000,000	내진 보강 (개당내력 : 1000 kN)	11,000,000	내진보강 (개당내력: kN)	1,150,000
개소당 평균공사금액 (원)	마감 공사	2,600,000	마감 공사	3,000,000	마감 공사	2,500,000
	합 계	24,600,000	합 계	14,000,000	합 계	14,000,000

4절. 연구개발 성과의 정책적 효과분석

1. 관련법령, 정부 정책 및 담당기관

- 정부의 국가기술지도(National Technology Road Map)의 환경/에너지 프론티어 진흥부문 로드 맵에서 건설산업 분야의 발전 전략의 핵심은 인간과 자연이 상생하는 인프라 건설로서 친환경·자원절약형 건축기술의 개발은 국가적 사업이자 건축의 미래와 현재의 비전.
- 또한 최근 국내외 지진발생 추이가 꾸준히 증가하고 있으며, 기상청에 따르면 2011년 12월까지 우리나라 발생한 규모 2.0이상 지진은 총 51회였고, 그 중 규모 3.0이상은 9회 발생됨.
- 이에 대한 국내의 내진설계 1985년 멕시코 대지진을 계기로 1986년 내진설계법이 마련되어 1988년부터 적용되다가 2000년에 내진설계 적용대상을 5층 이상으로 강화하였으며, 2005년(건축구조설계기준, KBC 2005제정) 신내진기준을 적용하고 있음.
- 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.
- 건설교통안전기획단에서도 기존의 교량 및 토목 구조물의 적용과 미루어 볼 때도 본 과제의 각종 규준 및 시방서의 제공은 국민의 안전하고 행복한 삶을 지향하는 목적에 합당함.
- 기술자립과 기술경쟁력에 있어서 국내는 물론 국외 수출을 지향할 수 있는 과제이므로 지방자치단체의 중소기업 기술의 확보에 있어서도 지역건설업체의 건설기술영역을 확보할 수 있고, 국가 전체의 확대된 기술시장을 기대할 수 있음.

2. 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 경제성이 강조되는 구조물의 장수명화에 관한 연구들과 성능개선 및 내진성능의 향상에 대한 주제가 복합되어 나타나며, 이에 여러 연구과제가 제안 및 진행됨.
- 특히, 재해에 대한 인류의 궁극적인 해결책으로 현 시점에서의 가장 합리적인 방안을 찾고자 노력하는 정부의 일반적인 방침은 일반연구자들 사이에서 당면하고 있는 가장 중요한 과제로 인식됨.
- 재난에 대비한 방재기술과 재해에 대한 국내환경조건 및 사회적 이슈로 인해 관련 연구의 주제는 제안된 과제들 중에서 우선적으로 다루어지며, 경쟁력 있는 고부가가치와 고도의 기술을 요구하는 연구들이 등장.

- 환경 및 녹색정책 등에 중점적인 가치를 두고 현재의 풀어나갈 문제들의 형성은 본 제안과제의 성격상 이와 부합됨.
- 친환경재료의 권장 사용 및 요소기술개발로 인한 기술력 향상은 경제적 산물의 연구결과물들과 부합되어 재료절감형 연구가 도출되며, 이것은 녹색정책의 저탄소국가로 가기 위한 일차적인 영향이 고려되는 방안임.

3. 종합 결론

많은 정부지원 정책사업이 현재 저탄소 녹색성장의 물결에 합류하여 인류의 미래에 대한 환경과 조화를 꿈꾸고 있으며, 이에 대한 정책과 연구 과제에 부합하고 순환형 사회구조에 적절히 대응하기 위한 친환경·재료절감형 제안 연구과제인 환경 친화적이고 시공성 높은 곡선 주름형 에너지 흡수형 방재장치의 기술과 경제성을 고려한 제안기술의 표준 모델링관련 연구·개발은 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

1. 핵심성과의 활용가능성 및 범위

가. 라멘골조용 주름강판 지진하중 흡수장치

라멘 골조의 기둥과 보 사이에 설치되는 주름강판을 이용한 지진하중 흡수장치로 활용할 수 있으며, 표준모델의 유닛화 및 적용 방안을 제시할 수 있다. 국내 주거용 및 상업용 건축물의 대다수를 차지하고 있는 라멘 골조에 비교적 저가의 장치를 제공할 수 있다. 기존 건축물에 능종형 제진댐퍼를 설치할 경우 구조물의 비용에 비해서 고가이며, 시공상의 어려움도 존재하므로 활용하기에 적합하다.

나. 단위 모듈러 지진하중 흡수장치를 이용한 철골구조물

모듈화된 주름강판장치를 철골구조물에 활용하도록 한다. 단위 모듈화된 장치의 활용의 건식공법은 습식공법에 비해 매우 효과적으로 교체할 수 있다. 지진하중을 저감시키는 기능의 단위모듈 흡수장치를 이용하여 벽면을 처리할 수 있으므로 간막이 공사를 따로할 필요가 없는 설계에 대한 장점을 가지고 있다.

다. 주름강판 설계프로그램의 개발로 인한 설계환경 제공

주름강판의 전단설계에 필요한 계산프로그램과 단순한 모듈의 최적화 통합 프로그램을 개발함으로 주름강판을 이용한 구조부재의 기초설계에 활용할 수 있다. 단면 성능계산과 전단좌굴응력 및 경향성 파악을 위한 해석모듈을 통하여 주름판에 대한 좌굴성능을 설계초기에 쉽게 판단 가능한 프로그램으로 활용하기에 적합하다.

라. 메타 휴리스틱 알고리즘을 이용한 주름웨브보의 최적설계

주름웨브를 이용한 단순보의 구조물 설계에 활용가능하며, 메타 휴리스틱 알고리즘을 이용하여 개발된 최적설계프로그램은 구조물의 설계를 보다 쉽고 단순하게 부재설계를 할 수 있다. 이와 같은 결과물들을 이용하여 보를 설계하는데 초기자료로 활용할 수 있고, 초기설계값을 정하는데 매우 유용할 것이다.

마. 에너지 흡수형 주름강판의 표준모델 및 시방서

구조물의 장수명화를 도모할 수 있는 에너지 흡수형 주름강판의 설계를 위해서 구조물의 상황과 조건에 따른 설계방식의 표준모델을 제공하며, 시방서를 통해서 적용하는 방법과 더불어 간막이 벽체의 시공을 쉽게하기 위한 모듈화 방법과 구조설계방법 및 신축과 보수보강에 대한 필요한 자료를 제공한다. 이러한 시방서는 표준모델로 인한 기술의 정착 및 확산이 가능하다.

2. 주름관련 연구결과의 활용가능성

가. 기존 노후화된 공공건축물의 내진설계 강화방안 제공

주름강판을 이용한 벽체활용으로 전단강성을 높일 수 있으므로 이를 활용하여 구조물을 신축 및 보강할 수 있다. 기존의 노후화된 건축물에 대해서 벽체에 대한 본 연구에서 제시된 콘크리트 구조물 보강방법을 적용하여 주름강판을 활용할 수 있으며, 간막이 공사에 대한 비교적 저가형의 공기단축 모델을 제시할 수 있다.

나. 주름강판 및 주름강판 합성보 관련 기초연구자료 구축

다양한 분야에서 여러 형태로 적용되는 주름강판의 역학적 자료를 구축함으로서 응용분야에 활용할 수 있는 범위를 확대할 수 있다. 여러 가지 상황에 대한 반복하중 테스트의 결과들은 내진 및 제진장치의 활용에 다양한 기초자료를 제공하며, 활용가능하다. 특히 경계조건과 방향성에 대한 특성은 상황에 따라 달라지므로 이러한 기술적 정보들을 제공함으로서 학문적 기술적 분야에 활용될 수 있다.

다. 관련 특허의 출원 및 등록으로 인한 지적재산권 확대

주름강판의 활용부재에 대한 다양한 특허권을 확보함으로서 국가 지적재산권을 확보함과 동시에 국가 기술력 향상에 역할을 하였다. 이러한 연구활동을 통해서 아이디어 개발을 보다 다양한 범위로 확대할 수 있으며, 주름관련 주요 구조부재의 활성화를 기대할 수 있다. 또한 주름 뿐 아니라 요철을 이용한 강판의 활용에 다양한 연구 및 기술적 방향을 제시할 수 있다.

라. 재료절감형 주름웨브 합성보 기술개발에 활용

다양한 주름웨브형 합성부재의 개발이 국내에서 진행중이며, 다양한 아이디어 제품이 계속 연구되고 있다. 이러한 연구 및 기술개발과제에 다양한 아이디어를 제공할 수 있으며, 주름강판관련 활용제품의 개발을 기대할 수 있다. 제진장치 이외의 모델에서 프리스트레스를 잘 활용하는 주름강판과 강판사이의 골판지 효과를 볼 수 있는 모델 및 간막이 벽체로 활용가능한 제품의 개발 등의 개발에 새로운 아이디어를 제공할 수 있다. 특히 강재 이외의 다양한 금속을 이용하는 방안도 고려될 수 있으므로 활용가능성과 범위가 보다 넓어질 것으로 생각된다.

2절. 추가연구 필요성

1. 핵심성과관련 추가연구

가. 모듈화 주름강판 제진장치의 주름가공과 용접

단위 모듈로 제작되는 주름 내진 및 제진장치의 개발에서 주름형상의 가공은 응력집중에 따른 성능저하와 용접에 대한 추가적인 문제점이 발생할 수 있다. 특히 주름강판과 강판의 경계에서 필요한 부재들과의 용접과정에서 발생하는 잔류응력 등의 문제를 연구하여야만 보다 높은 기술수준의 제품을 개발할 수 있기 때문이다. 이러한 기술의 추가연구는 주름강판을 이용하는 다른 연구주제에도 필요한 주제이며, 주름웨브 합성보의 개발에서도 연구되어야할 항목들이다.

나. 자동화된 주름가공과 주름형 단위부재의 생산방법 개발연구

주름가공을 자동화 하기위해서 사용되는 롤링과정에서 로봇팔을 이용한 자동용접 및 이와 같은 정밀가공이 가능한 기계기술의 연구와 개발이 필요하다. 자동화 제작을 통해서 제품의 성능을 균질하게 생산할 수 있도록 하는 연구는 관련기술은 유럽등지에서 이미 연구되어 왔으나 이들의 기술을 보다 업그레이드 할 수 있는 방법과 단위부재를 생산하는 방법을 연구하는 것이 필요하다.

다. 주름강판의 강성에 대한 평가방법과 에너지 흡수 모델링

주름강판의 강성에 대한 다양한 평가방법은 앞서 설명한 대로 아코디언 효과와 이방성재료와 같이 거동하는 수리모형으로 전단강성에 대해서 다루었다. 본 연구에서도 살펴본 바와 같이 이러한 특성의 재료들이 가지는 이론식의 문제점에 대해서 연성좌굴의 발생범위에 대한 이론식의 재평가는 형상에 따라 변화가 많다. 또한 재료비선형거동에 따른 수리모형으로 에너지 흡수 능력을 평가하기 위한 새로운 모형이 필요하다. 이와 같은 추가되는 연구로 보다 정밀한 동적 특성이 연구되어야 한다. 최소한의 강성변화에 따른 최대한의 연성효과를 보기위해서 본 연구에서 검토한 방법을 통해서 수리모형을 개발하면 보다 앞선 기술수준을 확보할 수 있다.

라. 강재의 재질이 주름형 내, 제진장치들에 미치는 영향

주름강판형 관련제품들의 강재의 종류와 강재가 아닌 다른 금속을 이용한 방법에 대해서 연구할 필요가 있다. 강재의 가공에 적합한 종류와 대량생산을 위해 적합한 공정 및 강재의 종류는 실용화 측면에서 매우 필요한 관련연구분야이다. 다양한 재료의 적용을 통해서 새로운 연성능력과 강성능력을 보유할 수 있는 방법을 모색할 수 있으며, 고성능 장치의 개발에 필요할 것으로 판단된다.

마. 주름강판 부재설계 프로그램과 최적화에 관한 연구

주름강판을 이용한 부재설계와 하부프로그램들의 단위 모듈 프로그램 개발에 있어서 사용자 편의를 도모할 수 있는 GUI 시스템을 구축하여 실무자들이 보다 쉽게 접근할 수 있는 방법을 제시할 필요가 있다. 구조물의 해석과정에서 설계과정이 포함되어 필요한 단면과 최적의 상태에 대해서 쉽게 얻을 수 있는 통합 프로세스가 필요하다. 부재의 수가 늘어날수록 동적계획법과 같은 최적설계기법을 도입하여 부재최적설계 뿐만 아니라 전체 구조물의 조합최적화 문제도 동시에 해결할 수 있는 연구가 필요하다.

바. 주름제진장치용 시방서의 세분화된 기술지침 확장과 설계기준

주름제진장치의 시공과정과 모듈화된 제품의 생산과정 및 이들을 손쉽게 설계하고 적용할 수 있는 기술지침이 보다 세분되는 것이 필요하다. 이것은 주름강판의 활용도와 새로운 아이디어를 개발할 수 있도록 하며, 설계기준을 제시할 수 있는 방안을 확보하는 것으로서 일반성있는 부재로서의 규준을 설정한다.

2. 주름관련 추가연구 필요성

가. 주름웨브 합성보의 기술개발과 다양한 아이디어 제품

합성보의 기술개발에서 주름강판을 웨브에 적용하여 다양한 제품을 고안할 필요가 있으며, 현재에도 많은 연구자들이 새로운 방법과 시도를 하고 있다. 강재를 이용한 합성보 뿐만 아니라 목재와 케이블을 합성한 방법의 연구는 기존의 성능과 경제성, 친환경성을 확보하기 위한 방법으로 많이 등장한다. 또한 고성능 강재의 활용에서 필요한 연구로 사료된다.

나. 강판의 주름패턴 및 요철에 따른 구조체 비선형 거동 연구

강판의 주름가공 이외에도 요철을 이용한 강판 성능의 개선에 관한 연구가 많이 진행되고 있으며, 요철 패턴 및 주름 패턴에 따라 다르게 나타나는 구조체의 비선형적 거동에 관한 연구를 통하여 새로운 아이디어를 개발할 필요가 있다. 연성능력을 확보하기 위한 다양한 시도들은 주름의 반복 패턴에 대해서도 고찰할 필요가 있다. 이것은 주름가공 및 생산기술의 발전과 더불어 연구되어야 할 것이다.

다. 주름강판 부재의 방음과 차단효과

간막이 벽체의 시공이 필요없는 경우 주름강판에 의한 방음과 차단효과 및 이들의 성능을 개선할 수 있는 방안이 연구되어야 한다. 편형한 강판 사이에 주름강판을 적용하여 재료의 성능을 개선하는 방안과 더불어 이러한 구조체가 주는 차단효과에 대해서도 연구되어야 하며, 지속적인 연구를 토해서 설계규준에 반영되어야 한다.

[참고문헌]

- Abbas HH (2003) Analysis and Design of Corrugated Web I-girders for Bridges using High Performance Steel, PhD dissertation, Lehigh University, Bethlehem, Pa.
- Abbas HH, Sause R and Driver R (2002) Shear Strength and Stability of High Performance Steel Corrugated Web Girders, Proceedings, Structural Stability Research Council, 361-387
- Chan CL, Khalid YA, Sahari BB and Hamouda AMS, Finite Element Analysis of Corrugated Web Beams under Bending, Journal of Constructional Steel Research 58 (2002) 1391-1406.
- Driver R, Abbas HH and Sause R, Shear Behavior of Corrugated Web Bridge Gir- ders, Journal of Structural Engineering, ASCE 132(2) (2006) 195-203
- Easley JT and McFarland DE, Buckling of Light-gage Corrugated Metal Shear Diaphragms, Journal of the Structural Division ASCE 95(ST7) (1969) 1497-1516
- Elgaaly M and Dagher H, Beams and Girders with Corrugated Webs, Proceedings, SSRC Annual Technical Session, Bethlehem, PA (1990) 37-53
- EN 1993-1-5, Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-5 (1993)
- Li Y, Zhang W, Zhou Q, Qi X and Widera GEO, Buckling Strength Analysis of the Web of a WCW H-beam: Part2, Journal of Materials Processing Technology 101 (2000) 115-118
- Moon J, Yi J, Choi HH and Lee HE, Shear Strength and Design of Trapezoidally Corrugated Steel Webs, Journal of Constructional Steel Research 65 (2009) 1198-1205
- Pasternak H and Kubieniec G, Plate girders with corrugated webs, Journal of civil engineering and management 16(2) (2010) 166-171
- Siokola W, Poster H, Fabrication Tools for Corrugated Web I-beams, Modern Steel Construction, American Institute of Steel Construction (1999) 42-45
- Zhang W, Li Y, Zhou Q, Qi X and Widera GEO, Optimization of the Structure of an H-beam with either a Flat or a Corrugated Web: Part3, Journal of Materials Processing Technology 101 (2000) 119-123
- DASt-Richtlinie 015, Träger mit schlanken Stegen, Stahlbau-V., German (1990) (in German)
- DIN 18800 Stahlbauten Teil 1-3, German (1990) (in German)
- Pasternak H and Hannebauer D, Stahlbau Kalender 2004; 4. Trager mit profilierten Stegen, Ernst & Shon, German (2004) 449-492
- Siokola W, Wellstegtrager Technische Dku- mentation, 2. Auflage, Zeman & Co Gesellschaft mbH, Wien (1999) (in German)
- 한택희, 파형 plate의 탄성전단좌굴 특성, 고려대학교, 석사학위논문, 2000

- 이성록, Shear Buckling Strength of Trapezoidally corrugated webs, 고려대학교, 박사학위논문, 2004
- 김성남, 전진수, 느규옌 반 반, 강영종, 파형 복부판을 갖는 I형 거더의 비틀림 거동 연구, 2008년도 학술발표회논문집, 한국강구조학회 (2008) 407-410
- 이재민, 김성남, 한금호, 강영종, 파형 복부판 I형 거더의 비틀림 거동에 대한 해석적 연구, 2009년도 학술발표회논문집, 한국강구조학회 (2009) 119-120
- 뉴웬 녹 융, 김성남, 강영종, 순수휨을 받는 사인 파형 복부판 I형 거더의 횡-비틀림 좌굴 강도, 2010년도 학술발표회논문집, 한국강구조학회 (2010) 77-78
- 김성남, Ngoc Duong Nguyen, 한승룡, 강영종, 파형 복부판 거더의 횡비틀림 좌굴 강도, 2011년도 학술대회발표집, 한국강구조학회 (2011) 125-126
- 오재열, 이득행, 김강수, 황진하, 파형보의 아코디온효과에 대한 해석적 연구, 2011년도 학술대회발표집, 한국강구조학회 (2011) 285-286
- 지효선, 파형 복부판을 갖는 플레이트 거더의 좌굴거동, 강구조학회논문집, 한국강구조학회 23(2) (2011) 221-228
- 손수덕, 이승재, 실수형 유전자 알고리즘을 이용한 사인형 주름웨브보의 최적구조설계, 강구조학회논문집 23(5) (2011) 581-593
- Abbas H. H., Sause R. and Driver R. G. (2002), Shear strength and stability of high performance steel corrugated web girders, Social stability research council conference, 361-388.
- Abbas, H., Sause, R., and Driver, R. (2006), Behavior of corrugated web I-girders under in-plane loads, Journal of Engineering Mechanics, 132(8), 806-814.
- Cafolla, J. (1995), Corrugated webs and lateral restraints in plate girders for bridges, Ph.D. thesis. University of Warwick.
- Choi, K. T., Ahn, J. H., Park, H. M., Kim, S. H., Jung, S.W. (2009), Behavior of PSC Girder with Partially Corrugated Web, Proceeding of Korea Concrete Institute, 21(1), 47-48.
- Easley, J. T., McFarland D. E. (1969), Buckling of light-gage corrugated metal shear diaphragms, Journal of the Structural Division, 95(12), 1497-1516.
- Elgaaly, M., Hamilton, R. W., and Seshardri A. (1996), Shear strength of beam with corrugated webs, Journal of Structural Engineering, ASCE, 122(4), 390-398.
- Elgaaly, M., Seshadri, A., and Hamilton, R. (1997), Bending strength of steel beams with corrugated webs, Journal of Structural Engineering, 123(6), 772-782.
- Elgaaly, M., Seshardri A. (1998), Steel Built-up Girder With Trapezoidally Corrugated Webs, AISC Engineering Journal, First Quarter, 1-11.
- El-Metwally, A. S. (1998), Prestressed composite girders with corrugated steel webs, Master thesis, University of Calgary.
- Gill, H. B., Lee, S. R., Lee, H. E., and Yoon, T. Y. (2004), Shear buckling strength of trapezoidally corrugated steel webs for bridges, Journal of Architectural

Institute of Korea, 24(1A), 197-202.
- Gill, H. B., Lee, S. R., Lee, H. G., and Lee, P. G. (2003), A Study on the Geometric Parameters that Influence the Shear Buckling of Trapezoidally Corrugated Webs, Journal of Korean Society of Steel Construction, 15(5), 591-602.
- Han, T. H. (2000), Elastic shear buckling characteristics of corrugated plates, Ph.D. thesis, Korea university.
- Han, T. H., Lim, N. H., Park, N. H., and Kang, Y. J. (2002), Elastic Shear Buckling Characteristics of Circularly Corrugated Plates, Journal of Korean Society of Steel Construction, 14(4), 529-539.
- Hyun, G. H. (2002), Shear Buckling Strength of Trapezoidally Corrugated Steel Webs for Bridges, Master thesis, Korea university.
- Ibrahim, S. A., El-Dakhakhni, W. W., and Elgaaly, M. (2006), Behavior of bridge girders with corrugated webs under monotonic and cyclic loading, Journal of Engineering Structures, 28(14), 1941-1955.
- Ji, H. S. (2011), Buckling Behaviors of Plate Girder with Corrugated Steel Web, Journal of Korean Society of Steel Construction, 23(2), 221-228.
- Kim, S. J., Jeon, J. S., Won, D. H., and Kang, Y. J. (2012), Torsional and Warping Constants of I-shaped Plate Girders with a Sine Corrugated Web, Journal of Korean society of civil engineers, 32(6A), 347-354.
- Luo, R., Edlund, B. (1996), Shear capacity of plate girders with trapezoidally corrugated webs, Journal of Thin Walled Structures, 26(1), 19-44.
- Oh, H. S., Lee, J. W., Jun, B. G. (2011), An experimental assessment on the structural behavior of bolt connected deep corrugated steel plate, Journal of KSMI, 15(3), 79-87.
- Oh, Y. S. (2010), Shear buckling analysis for various geometrical shapes of partially corrugated web, Master thesis, Yonsei university.
- Pasternak, H., and Hannebauer, D. (2004), Stahlbau-Kalender 2004-3 Schlanke stabtragwerke, 461-469.
- Shon, S. D., Lee, S. J. (2011), Optimum structural design of sinusoidal corrugated web beam using real-valued genetic algorithm, Journal of Korean Society of Steel Construction, 23(5), 581-594.
- Shon, S. D., Yoo, M. N., Lee, S. J. (2012), Characteristics of cross-section of sinusoidal corrugated web girder in accordance with minimum weight design, Journal of Korean Society of Steel Construction, 28(10), 73-80.
- Shon, S. D., Yoo, M. N., Lee, S. J. (2012), Discrete optimum design of sinusoidal corrugated web girder, Journal of Korean Society of Steel Construction, 24(6), 671-682.
- Sim, J. S., Lee, H. G., Kang, T. S. (2011), A study on the evaluation of design

compressive strength and flexural strength of the improved deep corrugated steel plate, Journal of KSMI, 15(3), 155-162.
- SIMULIA (2012), ABAQUS/CAE User's Manual, ABAQUS Version 6.12 : abaqus.me.chalmers.se/v6.12/.
- Timoshenko, S. P., and Gere, J. M. (1981), Theory of Elastic Stability, 2nd Ed., McGraw-Hill Publishing Co., New York, NY.
- Yamazaki, M. (2001), Buckling strength of corrugated webs, Journal of Structural Engineering, ASCE, 47A(1), 19-26.
- Yi, J. W., Gil, H. B., Youm, K. S., and Lee, H. E. (2008), Interactive shear buckling behavior of trapezoidally corrugated steel webs, Journal of Engineering Structures, 30(6), 1659-1666.
- Yi, J. W., Gill, H. B., and Lee, H. E. (2005), Elastic interactive shear buckling behavior of trapezoidally corrugated steel webs, Journal of Korean Society of Steel Construction, 17(6), 707-715.
- Yoo, M. N., Lee, S. J., and Shon, S. D. (2013), Boundary condition of sinusoidal corrugated plate, Proceeding of Architectural Institute of Korea, 33(1), 349-350.
- Yoo, M. N., Shon, S. D., Lee, S. J., Kang, J. W. (2013), A study on shear buckling analysis and boundary condition of sinusoidal corrugated plate by using ABAQUS, Journal of Architectural Institute of Korea, 29(11), 3-11.
- Yi, J. W., Youm, K. S., Moon, J. H., Lee, H. E., "Shear Buckling Strength of Trapezoidally Corrugated Steel Webs", Journal of korean society of civil engineers, Vol. 27, No.2A, 2007, pp.181-186.
- 김영완, 균일 분포하중을 받는 사다리꼴 주름판의 정적해석, 한국동력기계공학회지, 18권, 1호, p.p. 99~105, 2014.
- 이종원, 기하학적 특성을 고려한 제형 파형강판 복부판의 연성 전단 좌굴, 박사학위논문, 고려대학교, p.122, 2006.
- E. Gruber, Berechnung Prismatisher Scheibenwerke, Memoires, Association Internationale des Ponts et Charpentes, Vol.1, p.225, 1932.
- G. Winter and M. Pei, Tipped plate Construction, Journal A merican concrete institute, 1947.
- I. Gaafar, Hipped plate analysis considering joint displaceme nts, ASCE, Vol.119, p.p. 743~784, 1954.
- 한택희, 파형 plate의 탄성전단좌굴 특성, 석사학위논문, 고려대학교, p.110, 2000.
- 윤상열, 제형파형 Plate의 탄성전단좌굴 특성, 석사학위논문, 고려대학교, p.67, 2002.
- Lee, S.R., Shear Buckling Strength of Trapezoidally Corrugated Steel Webs, Ph.D. thesis, Korea university, p.136, 2004.
- J. W. Lee, S. R. Lee, H. B. Gil, H. E. Lee, Shear Buckling Strength of Trapezoidally Corrugated Steel Webs for Bridges, Proceedings of Japan-Korea

Joint Seminar on Steel Bridges(JSSB-JK), p.p.329~339, 2003.
- H. Nilson, A.R. Ammar, Finite Element Analysis of Metal Deck Shear Diaphragms, Journal of the Structural Division(ASCE), Vol.100, No.4, p.p. 711~726, 1974.
- J.M. Davis, "SIMPLIFIED DIAPHRAGM ANALYSIS", Journal of the Structural Division(ASCE), Vol.103, No.ST11, p.p. 2093~2109, 1978.
- H.A. Mang, "Finite Element Analysis of Doubly Corrugated Shells", Journal of the Structural Division(ASCE), Vol.102, No.10, p.p. 2033~2051, 1976.
- McFarland, An investigation of the static stability of corrugated rectangular plates loaded in pure shear, Ph.D. thesis, University of Kansas, 1967.
- M. Mukhopadhyay, Finite element static and dynamic analyses of folded plates, Journal of Engineering Structures, Vol. 21, p.p. 277~287, 1999.
- 서기홍, 김성호, 임성순, 주석범, 직교이방성 판을 이용한 파형강판의 거동 해석, 대한토목학회논문집, 25권, 1A호, p.p. 19~29, 2005.
- 정강, 김영완, 사각 주름판의 굽힘강성 및 굽힘해석, 한국동력기계공학회지, 16권, 6호, p.p. 38~44, 2012.
- R.G. Driver, H.H. Abaas, R. Sause, Shear behavior of corrugated web bridge girder, Journal of Structural Engineering, Vol.132, No.2, p.p. 195~203, 2006.
- 손수덕, 유미나, 이승재, 강주원, 차분진화알고리즘을 이용한 정현파형 주름웨브보의 최적설계프로그램 개발, 대한건축학회 논문집, 29권, 12호, p.p. 21~28, 2013.
- Theodore V. Galambos, Stability criteria for metal structures, Fifth Ed., A WILEY, Inc., 1998.
- El-Matwally, A. S., Prestressed composite girders with corrugated webs, M. Sc. Thesis, Department of Civil Engineering, The University of Calgary, Calgary, Alta., 1999.
- Cafolla, Shear flexibility and strength of corrugated decks, Journal of the structural division, Vol.94, No.ST11, p.p. 2549~2580, 1968.
- Sayed-Ahmed. Ezzeldine Yazeed, Plate girders with corrugated steel webs, AISC Engineering Journal, First Quater, p.p. 1~13, 2005.
- ABAQUS/CAE User's Manual, ABAQUS 6.12 student edition, Dassault systems Simulia Corp.
- (주)브이이엔지, 초급 및 중급 사용자를 위한 Abaqus 입문서, 비비미디어, 2013.
- 손수덕, 유미나, 이승재, 강주원, 정현파형 주름강판의 전단좌굴특성 분석, 한국구조물진단유지관리공학회 논문집, 18권, 3호 p.p.10~19, 2014.
- M.E.A.-H. Eldib, Shear buckling strength and design of curved corrugated steel webs for bridges, Journal of constructional steel research, Vol. 65, p.p.2129~2139, 2014.
- Coan, C.H. and Plaut, R.H. (1983) "Dynamic stability of a lattice dome"

Earthquake Engineering and Structural Dynamics 11, pp.269-274.
- Kassimali, A. and Bidhendi, E. (1988) "Stability of trusses under dynamic loads" Computers & Structures 29, pp.381-392.
- Hill, C.D., Blandford, G.E. and Wang, S.T. (1989) "Post-bucking analysis of steel space trusses" Journal of Structural Engineering 115, pp.900-919.
- Blandford, G.E. (1996) "Progressive failure analysis of inelastic space truss structures" Computers & Structures 58, 981-990.
- Tada, M. and Suito, A. (1998) "Static and dynamic post-buckling behavior of truss structures" Engineering Structures 20, pp.384-389.
- Mang, H.A., Schranz, C. and Mackenzie-Helnwein, P. (2006) "Conversion from imperfection-sensitive into imperfection-insensitive elastic structures I: Theory" Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 195, pp.1422-1457.
- Lopez, A., Puente, I. and Serna, M.A. (2007) "Numerical model and experimental tests on single-layer latticed domes with semi-rigid joints" Computers & Structures 85, pp.360-374.
- Belytschko, T. (1976) "A survey of numerical methods and computer programs for dynamic structural analysis" Nuclear Engineering and Design 37, pp.23-34.
- Kim, S.D., Kang, M.M., Kwun, T.J. and Hangai, Y. (1997) "Dynamic instability of shell-like shallow trusses considering damping" Computers & Structures 64(1-4), pp.481-489.
- Ario, I. (2004) "Homoclinic bifurcation and chaos attractor in elastic two-bar truss" International Journal of Non-Linear Mechanics 39(4), pp.605-617.
- Sadighi, A., Ganji, D.D. and Ganjavi, B. (2007) "Travelling wave solutions of the sine-gordon and the coupled sine-gordon equations using the homotopy perturbation method" Scientia Iranica Transaction B: Mechanical Engineering 16(2), pp.189-195.
- He, J.H. (1999) "Homotopy perturbation technique" Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 178, pp.257-262.
- He, J.H. (2000) "A coupling method of homotopy technique and perturbation technique for nonlinear problems" International Journal of Non-Linear Mechanics 35(1), pp.37 - 43.
- He, J.H. (2005) "Homotopy perturbation method for bifurcation of nonlinear problems" International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation 6(2), pp.207-208.
- Liao, S.J. (1992) "The proposed homotopy analysis technique for the solution of nonlinear problems" PhD Thesis, Shanghai Jiaotong University.
- Sajid, M., Hayat, T. and Asghar, S. (2007) "Comparison between the HAM and HPM solutions of thin film flows of non-Newtonian fluids on a moving belt"

Nonlinear Dynamics 50(1-2), pp.27-35.
- Wen, J. and Cao, Z. (2008) "Nonlinear oscillations with parametric excitation solved by homotopy analysis method" Acta Mechanica Sinica 24(3), pp.325-329.
- Ganji, D.D. (2006) "The application of He's homotopy perturbation method to nonlinear equations arising in heat transfer" Physics Letters A 355, pp.337 - 341.
- Blendez, A. and Hernandez, T. (2007) "Application of He's homotopy perturbation method to the doffingharmonic oscillator. International Journal of Nonlinear Science and Numerical Simulation 8(1), pp.79-88.
- Chowdhury, M.S.H., Hashim, I. and Abdulaziz, O. (2007) "Application of homotopy perturbation method to nonlinear population dynamics models" Physics Letters A 368, pp.251 - 258.
- Chowdhury, M.S.H. and Hashim, I. (2008) "Analytical solutions to heat transfer equations by homotopy perturbation method revisited" Physics Letters A 372, pp.1240 - 1243.
- Hashim, I. and Chowdhury, M.S.H. (2008) "Adaptation of homotopy perturbation method for numericanalytic solution of system of ODEs" Physics Letters A 372, pp.470 - 481.
- Chowdhury, M.S.H., Hashim, I. and Momani, S. (2009) "The multistage homotopy-perturbation method: A powerful scheme for handling the Lorenz system" Chaos, Solitons and Fractals 40(4), pp.1929-1937.
- Chowdhury, S.H. (2011) "A Comparison between the modified homotopy perturbation method and adomain decomposition method for solving nonlinear heat transfer equations" Journal of Applied Sciences 11(8), pp.1416-1420.
- Hashim, I., Chowdhury, M.S.H. and Mawa, S. (2008) "On multistage homotopy perturbation method applied to nonlinear biochemical reaction model" Chaos, Solitons & Fractals 36, pp.823-827.
- Chowdhury, M.S.H. and Hashim, I. (2009) "Application of multistage homotopy-perturbation method for the solutions of the Chen system" Nonlinear Analysis: Real World Applications 10, pp.381 - 391.
- Yu, Y. and Li, H.X. (2009) "Application of the multistage homotopy-perturbation method to solve a class of hyperchaotic systems" Chaos, Solitons and Fractals 42, pp.2330 - 2337.
- Alnasr, M.H. and Erjaee, G.H. (2011) "Application of the multistage homotopy perturbation method to some dynamical systems" International Journal of Science & Technology A1, pp.33-38.
- Wang, S. and Yu, Y. (2012) "Application of Multistage Homotopy-perturbation Method for the Solutions of the Chaotic Fractional Order Systems" International Journal of Nonlinear Science 13(1), pp.3-14.

- Compean, F.I., Olvera, D., Campa, F.J., Lopez de Lacalle, L.N., Elias-Zuniga, A. and Rodriguez C.A. (2012) "Characterization and stability analysis of a multivariable milling tool by the enhanced multistage homotopy perturbation method" International Journal of Machine Tools & Manufacture 57, pp.27 - 33.
- Saffari, H., Mansouri, I., Bagheripour, M.H. and Dehghani, H. (2012) "Elasto - plastic analysis of steel plane frames using Homotopy Perturbation Method" Journal of Constructional Steel Research 70, pp.350 - 357.
- Rashidi, M.M., Shooshtari, A. and Anwar Beg, O. (2012) "Homotopy perturbation study of nonlinear vibration of Von Karman rectangular plates" Computers and Structures 106 - 107, pp.46 - 55.
- Allahverdizadeh, A., Oftadeh, R., Mahjoob, M.J. and Naei, M.H. (2014) "Homotopy perturbation solution and periodicity analysis of nonlinear vibration of thin rectangular functionally graded plates" Acta Mechanica Solida Sinica 27(2), pp.210-220.
- Shon, SD., Lee, S.J. and Lee, K.G. (2013) "Characteristics of bifurcation and buckling load of space truss in consideration of initial imperfection and load mode" Journal of Zhejiang University-SCIENCE A 14(3), pp.206-218.
- Shahmohammadi, A., Mirghaderi, R., Hajsadeghi, M., Khanmohammadi, M. (2013), Application of corrugated plates as the web of steel coupling beams, Journal of Constructional Steel Research, 85, 178-190.
- Eldib, M. E. A. -H. (2009), Shear buckling strength and design of curved corrugated steel webs for bridges, Journal of constructional steel research, 65, 2129-2139.
- Romeijn, A., Sarkhosh, R., Hoop, H. (2009), Basic parametric study on corrugated web girders with cut outs, Journal of constructional steel research, 65, 395-407.
- Sause, R., Braxtan, T. N. (2011), Shear strength of trapezoidal corrugated steel webs, Journal of constructional steel research, 27, 223-236.
- Basher, M., Shanmugam, N.E., Khalim, A.R., Horizontally curved composite plate girders with trapezoidally corrugated webs, Journal of constructional steel research, 67, 947-956.
- He, J., Liu, Y., Chen, A., Yoda, T. (2012), Shear behavior of partially encased composite I-girder with corrugated steel web: Numerical study, Journal of constructional steel research, 79, 166-182.
- Hassanein, M. F., Kharoob, O. F. (2013), Behavior of bridge girders with corrugated webs: (I) Real boundary condition at the juncture of the web and flanges, Journal of Engineering Structures, 57, 554-564.
- Nie, J. G., Zhu, L., Tao, M. X., Tang, L. (2013), Shear strength of trapezoidal corrugated steel webs, Journal of constructional steel research, 85, 105-115.

- Hassanein, M. F., Kharoob, O. F. (2013), Behavior of bridge girders with corrugated webs: (II) Shear strength and design, Journal of Engineering Structures, 57, 544-553.
- Emami, F., Mofid, M., Vafai, A., Experimental study on cyclic behavior of trapezoidally corrugated steel shear walls, Journal of Engineering Structures, 48, 750-762.
- Moon, J. H., Yi, J. W., Choi, B. H., Lee, H. E. (2008), Shear strength and design of trapezoidally corrugated steel webs, Journal of constructional steel research, 65, 1198-1205.
- He, J., Liu, Y., Chen, A., Yoda, T. (2012), Shear behavior of partially encased composite I-girder with corrugated steel web: Experimental study, Journal of constructional steel research, 77, 193-209.
- Nguyen, N. D., Kim, S. N., Han, S. R., Kang, Y. J. (2010), Elastic lateral-torsional buckling strength of I-girder with trapezoidal web corrugations using a new warping constant under uniform moment, Journal of Engineering Structures, 32, 2157-2165.
- Kazemi nia korrani. H. (2010), Lateral bracing of I-girder with corrugated webs under uniform bending, Journal of constructional steel research, 66, 1502-1509.
- Kövesdi, B., Braun, B., Kuhlmann, U., Dunai, L. (2010), Patch loading resistance of girders with corrugated webs, Journal of constructional steel research, 66, 1445-1454.
- Martins, A.G., Fakury, R.H., Pimenta, R.J., Queiroz, G., Rodrigues, F.C., Moment resistance of composite steel and concrete connection in sinusoidal-web girders, Journal of constructional steel research, 76, 112-120.
- He, J., Liu, Y., Chen, A., Wang, D., Yoda, T. (2014), Bending behavior of concrete-encased composite I-girder with corrugated steel web, Journal of Thin-Walled structures, 74, 70-84.
- Kövesdi, B., Braun, B., Kuhlmann, U. (2012), Interacting stability behaviour of steel I-girders with corrugated webs, Journal of Thin-Walled structures, 61, 132-144
- Moon, J. H., Yi, J. W., Choi, B. H., Lee, H. E. (2009), Lateral-torsional buckling of I-girder with corrugated webs under uniform bending, Journal of Thin-Walled structures, 47, 21-30.
- Moon, J. H., Lim, N. H., Lee, H. E., Moment gradient correction factor and inelastic flexural-torsional buckling of I-girder with corrugated steel webs, Journal of Thin-Walled structures, 62, 18-27.
- Ding, Y., Jiang, K. B., Liu, Y. W. (2012), Nonlinear analysis for PC box-girder with corrugated steel webs under pure torsion, Journal of Thin-Walled structures,

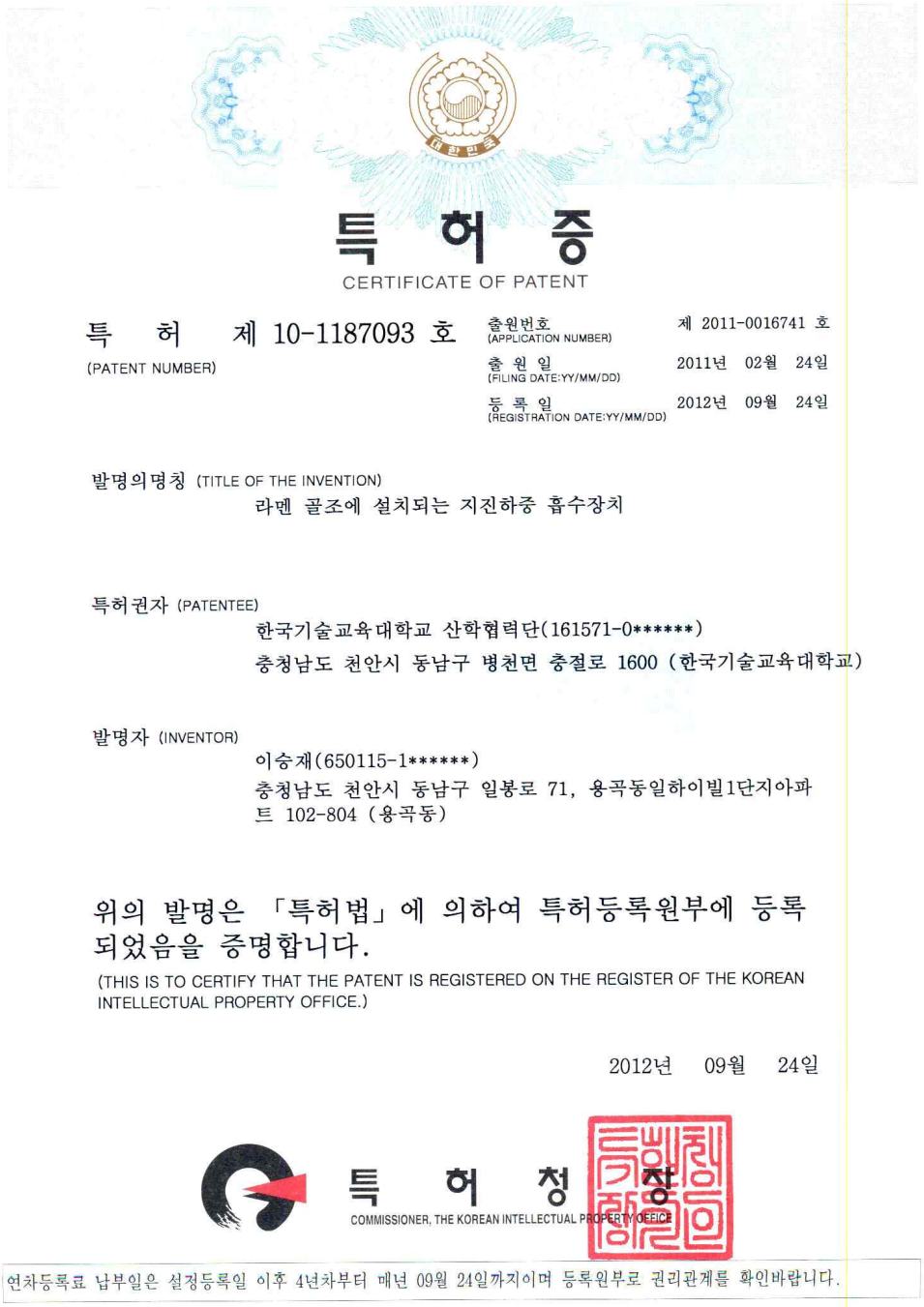
51, 167-173.

- Aydın, R., Yuksel, E., Yardımcı, N., M. HasimKısa, M., Gokce, T. (2014), In-plane behaviour of beam-to-column connections of corrugated web I-sections, Journal of constructional steel research, 100, 183-196.
- Oh, J. Y., Lee, D. H., Kim, K. S. (2012), Accordion effect of prestressed steel beams with corrugated webs, Journal of Thin-walled structures, 57, 49-61.
- Moon, J. H., Yi, J. W., Choi, B. H., Lee, H. E. (2008), Shear Design of Trapezoidally Corrugated Steel Webs, Journal of korean society of civil engineers, 28(4A), 497-505
- Kim, Y. S., Lho, S. H., Park, M. W., Do, B. H., Ju, Y. K, Kim, S. D. (2012), Shear Capacity of Corrugated Web Beam for Roof Frame of Industrial Buildings, Journal of korean society of civil engineers, 28(9), 57-65.
- Lee, D. H., Kim, K. S., Oh, J. Y., Lim, J. H., Choi, S. M., Kim, J. M., (2010), Experimental Study on Prestressed Composite Girders with Corrugated Webs, Journal of architectural institute of korea, 26(11), 57-65.
- Oh, J. Y., Lee, D. H., Kim, K. S., Kang, H., Kim, H. Y., Kim, H. J. (2013), Experimental Study on Prestressed Composite Girders with Corrugated Webs, Journal of architectural institute of korea, 29(1), 31-39.
- Moon, J. H., Lim, N. H., Lee, H. E. (2012), Lateral-Torsional Buckling Strength of I-girder with Corrugated Steel Webs under Linear Moment Gradient, Journal of korean society of civil engineers, 32(3), 149-160.

[부 록]

1. 특허출원 및 등록

1-1. 라멘 골조에 설치되는 지진하중 흡수장치



특 허 증

CERTIFICATE OF PATENT

특 허 제 10-1187093 호
(PATENT NUMBER)

출원번호 (APPLICATION NUMBER) 제 2011-0016741 호
출 원 일 (FILING DATE:YY/MM/DD) 2011년 02월 24일
등 록 일 (REGISTRATION DATE:YY/MM/DD) 2012년 09월 24일

발명의명칭 (TITLE OF THE INVENTION)
라멘 골조에 설치되는 지진하중 흡수장치

특허권자 (PATENTEE)
한국기술교육대학교 산학협력단(161571-0******)
충청남도 천안시 동남구 병천면 충절로 1600 (한국기술교육대학교)

발명자 (INVENTOR)
이승재(650115-1******)
충청남도 천안시 동남구 일봉로 71, 용곡동일하이빌1단지아파트 102-804 (용곡동)

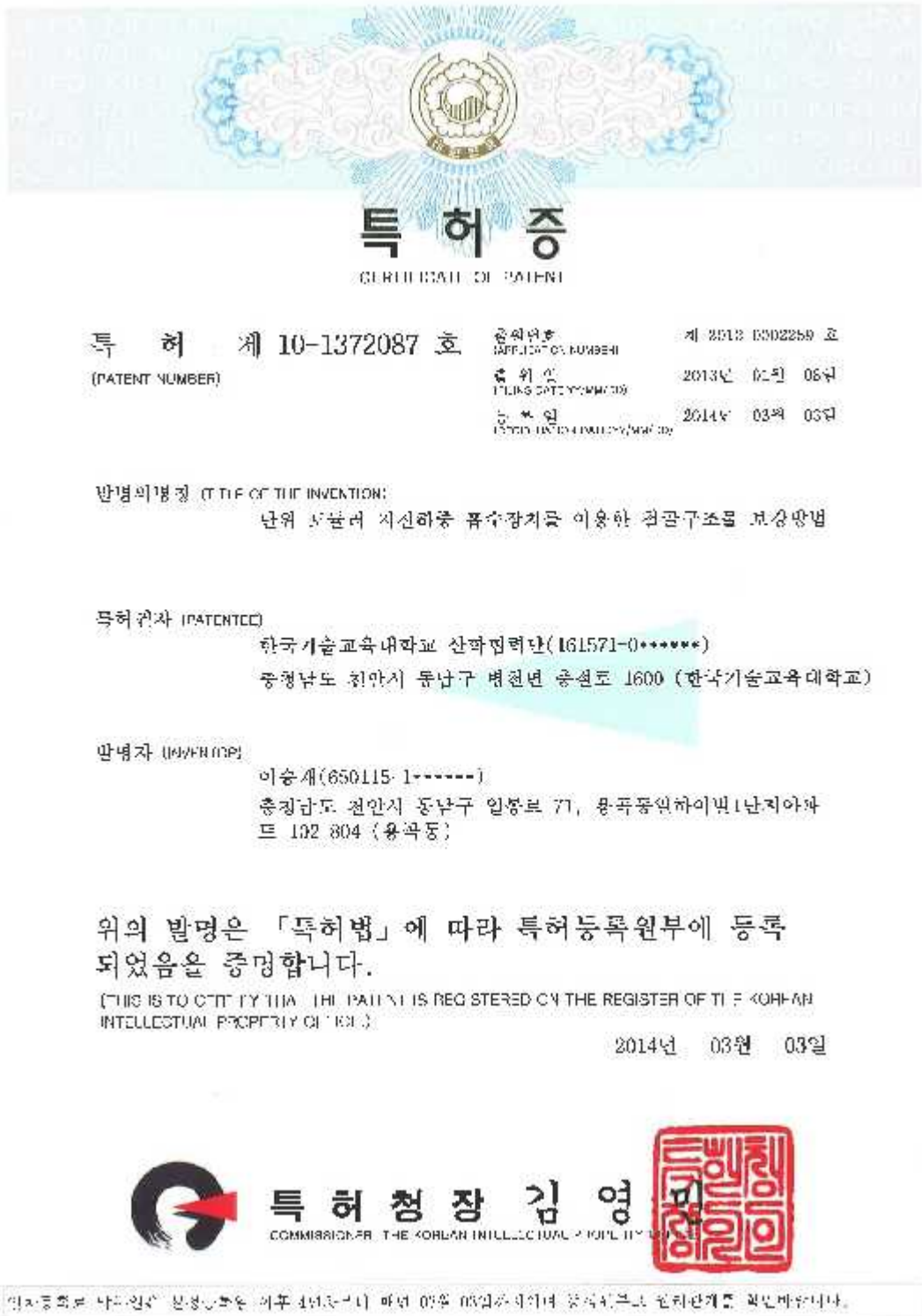
위의 발명은 「특허법」에 의하여 특허등록원부에 등록되었음을 증명합니다.
(THIS IS TO CERTIFY THAT THE PATENT IS REGISTERED ON THE REGISTER OF THE KOREAN INTELLECTUAL PROPERTY OFFICE.)

2012년 09월 24일

특 허 청 장
COMMISSIONER, THE KOREAN INTELLECTUAL PROPERTY OFFICE

연차등록료 납부일은 설정등록일 이후 4년차부터 매년 09월 24일까지이며 등록원부로 권리관계를 확인바랍니다.

1-2. 단위 모듈러 지진하중 흡수장치를 이용한 철골구조물 보강방법



특 허 증

CERTIFICATE OF PATENT

특 허 제 10-1372087 호
(PATENT NUMBER)

출원번호 (APPLICATION NUMBER) 제 2013-0002259 호
출 원 일 (FILING DATE:YYYY/MM/DD) 2013년 01월 08일
등 록 일 (ISSUED DATE:YYYY/MM/DD) 2014년 03월 03일

발명의명칭 (TITLE OF THE INVENTION)
단위 모듈러 지진하중 흡수장치를 이용한 철골구조물 보강방법

특허권자 (PATENTEE)
한국기술교육대학교 산학협력단(161571-0******)
충청남도 천안시 동남구 병천면 충절로 1600 (한국기술교육대학교)

발명자 (INVENTOR)
이승재(650115-1******)
충청남도 천안시 동남구 일봉로 71, 용곡동일하이빌1단지아파트 102-804 (용곡동)

위의 발명은 「특허법」에 따라 특허등록원부에 등록되었음을 증명합니다.

(THIS IS TO CERTIFY THAT THE PATENT IS REGISTERED ON THE REGISTER OF THE KOREAN INTELLECTUAL PROPERTY OFFICE.)

2014년 03월 03일

특허청장 김 영 [illegible]
COMMISSIONER, THE KOREAN INTELLECTUAL PROPERTY [illegible]

1-3. 내하성능 보강이 가능한 단위 모듈러 지진하중 흡수장치 및 이를 이용한 철골구조물 보강방법

관인생략

출원번호통지서

출원일자	2013.01.08
특기사항	심사청구(유) 공개신청(무)
출원번호	10-2013-0002260 (접수번호 1-1-2013-0020801-65)
출원인 명칭	한국기술교육대학교 산학협력단(2-2005-024336-1)
대리인 성명	정남진(9-2002-000110-3)
발명자 성명	이승재
발명의 명칭	내하성능 보강이 가능한 단위 모듈러 지진하중 흡수장치 및 이를 이용한 철골구조물 보강방법

특 허 청 장

<< 안내 >>

1. 귀하의 출원은 위와 같이 정상적으로 접수되었으며, 이후의 심사 진행상황은 출원번호를 통해 확인하실 수 있습니다.

2. 출원에 따른 수수료는 접수일로부터 다음날까지 동봉된 납입영수증에 성명, 납부자번호 등을 기재하여 가까운 우체국 또는 은행에 납부하여야 합니다.
※ 납부자번호 : 0131(기관코드) + 접수번호

3. 귀하의 주소, 연락처 등의 변경사항이 있을 경우, 즉시 [출원인코드 정보변경(경정), 정정신고서]를 제출하여야 출원 이후의 각종 통지서를 정상적으로 받을 수 있습니다.
※ 특허로(patent.go.kr) 접속 > 민원서식다운로드 > 특허법 시행규칙 별지 제5호 서식

4. 특허(실용신안등록)출원은 명세서 또는 도면의 보정이 필요한 경우, 등록결정 이전 또는 의견서 제출기간 이내에 출원서에 최초로 첨부된 명세서 또는 도면에 기재된 사항의 범위 안에서 보정할 수 있습니다.

5. 외국으로 출원하고자 하는 경우 PCT 제도(특허·실용신안)나 마드리드 제도(상표)를 이용할 수 있습니다. 국내출원일을 외국에서 인정받고자 하는 경우에는 국내출원일로부터 일정한 기간 내에 외국에 출원하여야 우선권을 인정받을 수 있습니다.
※ 제도 안내 : http://www.kipo.go.kr-특허마당-PCT/마드리드
※ 우선권 인정기간 : 특허·실용신안은 12개월, 상표·디자인은 6개월 이내
※ 미국특허상표청의 선출원을 기초로 우리나라에 우선권주장출원 시, 선출원이 미공개상태이면, 우선일로부터 16개월 이내에 미국특허상표청에 [전자적교환허가서(PTO/SB/39)]를 제출하거나 우리나라에 우선권 증명서류를 제출하여야 합니다.

6. 본 출원사실을 외부에 표시하고자 하는 경우에는 아래와 같이 하여야 하며, 이를 위반할 경우 관련법령에 따라 처벌을 받을 수 있습니다.
※ 특허출원 10-2010-0000000, 상표등록출원 40-2010-0000000

7. 기타 심사 절차에 관한 사항은 동봉된 안내서를 참조하시기 바랍니다.

발급일자 : 20120822 1/3

1-4. 단위 모듈러 지진하중 흡수장치 및 이를 이용한 철골구조물 보강방법

관 인 생 략

출 원 번 호 통 지 서

출 원 일 자	2013.01.08
특 기 사 항	심사청구(유) 공개신청(무)
출 원 번 호	10-2013-0002259 (접수번호 1-1-2013-0020800-19)
출원인 명칭	한국기술교육대학교 산학협력단(2-2005-024336-1)
대 리 인 성 명	정남진(9-2002-000110-3)
발 명 자 성 명	이승재
발 명 의 명 칭	단위 모듈러 지진하중 흡수장치를 이용한 철골구조물 보강방법

특 허 청 장

<< 안내 >>

1. 귀하의 출원은 위와 같이 정상적으로 접수되었으며, 이후의 심사 진행상황은 출원번호를 통해 확인하실 수 있습니다.

2. 출원에 따른 수수료는 접수일로부터 다음날까지 동봉된 납입영수증에 성명, 납부자번호 등을 기재하여 가까운 우체국 또는 은행에 납부하여야 합니다.
※ 납부자번호 : 0131(기관코드) + 접수번호

3. 귀하의 주소, 연락처 등의 변경사항이 있을 경우, 즉시 [출원인코드 정보변경(경정), 정정신고서]를 제출하여야 출원 이후의 각종 통지서를 정상적으로 받을 수 있습니다.
※ 특허로(patent.go.kr) 접속 > 민원서식다운로드 > 특허법 시행규칙 별지 제5호 서식

4. 특허(실용신안등록)출원은 명세서 또는 도면의 보정이 필요한 경우, 등록결정 이전 또는 의견서 제출기간 이내에 출원서에 최초로 첨부된 명세서 또는 도면에 기재된 사항의 범위 안에서 보정할 수 있습니다.

5. 외국으로 출원하고자 하는 경우 PCT 제도(특허·실용신안)나 마드리드 제도(상표)를 이용할 수 있습니다. 국내출원일을 외국에서 인정받고자 하는 경우에는 국내출원일로부터 일정한 기간 내에 외국에 출원하여야 우선권을 인정받을 수 있습니다.
※ 제도 안내 : http://www.kipo.go.kr-특허마당-PCT/마드리드
※ 우선권 인정기간 : 특허·실용신안은 12개월, 상표·디자인은 6개월 이내
※ 미국특허상표청의 선출원을 기초로 우리나라에 우선권주장출원 시, 선출원이 미공개상태이면, 우선일로부터 16개월 이내에 미국특허상표청에 [전자적교환허가서(PTO/SB/39)]를 제출하거나 우리나라에 우선권 증명서류를 제출하여야 합니다.

6. 본 출원사실을 외부에 표시하고자 하는 경우에는 아래와 같이 하여야 하며, 이를 위반할 경우 관련법령에 따라 처벌을 받을 수 있습니다.
※ 특허출원 10-2010-0000000, 상표등록출원 40-2010-0000000

7. 기타 심사 절차에 관한 사항은 동봉된 안내서를 참조하시기 바랍니다.

발급일자 : 20120822 1/3

1-5. 파형 웨브가 구성된 지진하중 흡수장치를 이용한 칸막이 벽체의 시공방법



특 허 증

CERTIFICATE OF PATENT

특 허 제 10-1236575 호
(PATENT NUMBER)

출원번호 (APPLICATION NUMBER) 제 2011-0132203 호

출 원 일 (FILING DATE:YY/MM/DD) 2011년 12월 09일

등 록 일 (REGISTRATION DATE:YY/MM/DD) 2013년 02월 18일

발명의명칭 (TITLE OF THE INVENTION)

파형 웨브가 구성된 지진하중 흡수장치를 이용한 칸막이 벽체의 시공방법

특허권자 (PATENTEE)

한국기술교육대학교 산학협력단(161571-0******)

충청남도 천안시 동남구 병천면 충절로 1600 (한국기술교육대학교)

발명자 (INVENTOR)

이승재(650115-1******)

충청남도 천안시 동남구 일봉로 71, 용곡동일하이빌1단지아파트 102-804 (용곡동)

위의 발명은 「특허법」에 의하여 특허등록원부에 등록되었음을 증명합니다.

(THIS IS TO CERTIFY THAT THE PATENT IS REGISTERED ON THE REGISTER OF THE KOREAN INTELLECTUAL PROPERTY OFFICE.)

2013년 02월 18일

특 허 청 장
COMMISSIONER, THE KOREAN INTELLECTUAL PROPERTY OFFICE

연차등록료 납부일은 설정등록일 이후 4년차부터 매년 02월 18일까지이며 등록원부로 권리관계를 확인바랍니다.

1-6. 단위 모듈러 지진하중 흡수장치를 이용한 칸막이 벽체의 시공 방법

특 허 증
CERTIFICATE OF PATENT

특 허 제 10-1242972 호
(PATENT NUMBER)

출원번호 (APPLICATION NUMBER)	제 2011-0132206 호
출 원 일 (FILING DATE:YY/MM/DD)	2011년 12월 09일
등 록 일 (REGISTRATION DATE:YY/MM/DD)	2013년 03월 06일

발명의명칭 (TITLE OF THE INVENTION)
단위 모듈러 지진하중 흡수장치를 이용한 칸막이 벽체의 시공 방법

특허권자 (PATENTEE)
한국기술교육대학교 산학협력단(161571-0******)
충청남도 천안시 동남구 병천면 충절로 1600 (한국기술교육대학교)

발명자 (INVENTOR)
이승재(650115-1******)
충청남도 천안시 동남구 일봉로 71, 용곡동일하이빌1단지아파트 102-804 (용곡동)

위의 발명은 「특허법」에 따라 특허등록원부에 등록되었음을 증명합니다.
(THIS IS TO CERTIFY THAT THE PATENT IS REGISTERED ON THE REGISTER OF THE KOREAN INTELLECTUAL PROPERTY OFFICE.)

2013년 03월 06일

특 허 청 장 김 호
COMMISSIONER, THE KOREAN INTELLECTUAL PROPERTY OFFICE

연차등록료 납부일은 설정등록일 이후 4년차부터 매년 03월 06일까지이며 등록원부로 권리관계를 확인바랍니다.

1-7. 슬릿형 웨브가 구성된 지진하중 흡수장치를 이용한 칸막이 벽체의 시공방법

특 허 증
CERTIFICATE OF PATENT

특 허 제 10-1242978 호
(PATENT NUMBER)

출원번호 (APPLICATION NUMBER) 제 2011-0132204 호
출 원 일 (FILING DATE:YY/MM/DD) 2011년 12월 09일
등 록 일 (REGISTRATION DATE:YY/MM/DD) 2013년 03월 06일

발명의명칭 (TITLE OF THE INVENTION)
슬릿형 웨브가 구성된 지진하중 흡수장치를 이용한 칸막이 벽체의 시공방법

특허권자 (PATENTEE)
한국기술교육대학교 산학협력단(161571-0******)
충청남도 천안시 동남구 병천면 충절로 1600 (한국기술교육대학교)

발명자 (INVENTOR)
이승재(650115-1******)
충청남도 천안시 동남구 일봉로 71, 용곡동일하이빌1단지아파트 102-804 (용곡동)

위의 발명은 「특허법」에 따라 특허등록원부에 등록되었음을 증명합니다.
(THIS IS TO CERTIFY THAT THE PATENT IS REGISTERED ON THE REGISTER OF THE KOREAN INTELLECTUAL PROPERTY OFFICE.)

2013년 03월 06일

특허청장 김 호
COMMISSIONER, THE KOREAN INTELLECTUAL PROPERTY OFFICE

연차등록료 납부일은 설정등록일 이후 4년차부터 매년 03월 06일까지이며 등록원부로 권리관계를 확인바랍니다.

1-8. 칸막이 벽체 시공용 단위 모듈러 지진하중 흡수장치



특 허 증
CERTIFICATE OF PATENT

특 허 제 10-1243024 호
(PATENT NUMBER)

출원번호 (APPLICATION NUMBER) 제 2011-0132205 호
출 원 일 (FILING DATE:YY/MM/DD) 2011년 12월 09일
등 록 일 (REGISTRATION DATE:YY/MM/DD) 2013년 03월 06일

발명의명칭 (TITLE OF THE INVENTION)
칸막이 벽체 시공용 단위 모듈러 지진하중 흡수장치

특허권자 (PATENTEE)
한국기술교육대학교 산학협력단(161571-0******)
충청남도 천안시 동남구 병천면 충절로 1600 (한국기술교육대학교)

발명자 (INVENTOR)
이승재(650115-1******)
충청남도 천안시 동남구 일봉로 71, 용곡동일하이빌1단지아파트 102-804 (용곡동)

위의 발명은 「특허법」에 따라 특허등록원부에 등록되었음을 증명합니다.
(THIS IS TO CERTIFY THAT THE PATENT IS REGISTERED ON THE REGISTER OF THE KOREAN INTELLECTUAL PROPERTY OFFICE.)

2013년 03월 06일

특허청장 김 호
COMMISSIONER, THE KOREAN INTELLECTUAL PROPERTY OFFICE

연차등록료 납부일은 설정등록일 이후 4년차부터 매년 03월 06일까지이며 등록원부로 권리관계를 확인바랍니다.

1-9. 영구거푸집이 구비된 날개벽을 기둥에 증설하는 내진 보강 방법

관인생략

출원번호통지서

출원일자	2014.01.23
특기사항	심사청구(유) 공개신청(무)
출원번호	10-2014-0008546 (접수번호 1-1-2014-0073251-18)
출원인 명칭	한국기술교육대학교 산학협력단(2-2005-024336-1)
대리인 성명	정남진(9-2002-000110-3)
발명자 성명	이승재 강주원 손수덕 유미나
발명의 명칭	영구거푸집이 구비된 날개벽을 기둥에 증설하는 내진 보강 방법

특 허 청 장

<< 안내 >>

1. 귀하의 출원은 위와 같이 정상적으로 접수되었으며, 이후의 심사 진행상황은 출원번호를 통해 확인하실 수 있습니다.

2. 출원에 따른 수수료는 접수일로부터 다음날까지 동봉된 납입영수증에 성명, 납부자번호 등을 기재하여 가까운 우체국 또는 은행에 납부하여야 합니다.
※ 납부자번호 : 0131(기관코드) + 접수번호

3. 귀하의 주소, 연락처 등의 변경사항이 있을 경우, 즉시 [출원인코드 정보변경(경정), 정정신고서]를 제출하여야 출원 이후의 각종 통지서를 정상적으로 받을 수 있습니다.
※ 특허로(patent.go.kr) 접속 > 민원서식다운로드 > 특허법 시행규칙 별지 제5호 서식

4. 특허(실용신안등록)출원은 명세서 또는 도면의 보정이 필요한 경우, 등록결정 이전 또는 의견서 제출기간 이내에 출원서에 최초로 첨부된 명세서 또는 도면에 기재된 사항의 범위 안에서 보정할 수 있습니다.

5. 외국으로 출원하고자 하는 경우 PCT 제도(특허·실용신안)나 마드리드 제도(상표)를 이용할 수 있습니다. 국내출원일을 외국에서 인정받고자 하는 경우에는 국내출원일로부터 일정한 기간 내에 외국에 출원하여야 우선권을 인정받을 수 있습니다.
※ 제도 안내 : http://www.kipo.go.kr-특허마당-PCT/마드리드
※ 우선권 인정기간 : 특허·실용신안은 12개월, 상표·디자인은 6개월 이내
※ 미국특허상표청의 선출원을 기초로 우리나라에 우선권주장출원 시, 선출원이 미공개상태이면, 우선일로부터 16개월 이내에 미국특허상표청에 [전자적교환허가서(PTO/SB/39)를 제출하거나 우리나라에 우선권 증명서류를 제출하여야 합니다.

6. 본 출원사실을 외부에 표시하고자 하는 경우에는 아래와 같이 하여야 하며, 이를 위반할 경우 관련법령에 따라 처벌을 받을 수 있습니다.
※ 특허출원 10-2010-0000000, 상표등록출원 40-2010-0000000

7. 기타 심사 절차에 관한 사항은 동봉된 안내서를 참조하시기 바랍니다.

1-10. 절개부를 갖는 지진하중 흡수장치를 이용한 내진 보강 방법

관인생략

출원번호통지서

출원일자	2014.01.23
특기사항	심사청구(유) 공개신청(무)
출원번호	10-2014-0008547 (접수번호 1-1-2014-0073252-64)
출원인 명칭	한국기술교육대학교 산학협력단(2-2005-024336-1)
대리인 성명	정남진(9-2002-000110-3)
발명자 성명	이승재 강주원 손수덕 유미나
발명의 명칭	절개부를 갖는 지진하중 흡수장치를 이용한 내진 보강 방법

특 허 청 장

<< 안내 >>

1. 귀하의 출원은 위와 같이 정상적으로 접수되었으며, 이후의 심사 진행상황은 출원번호를 통해 확인하실 수 있습니다.

2. 출원에 따른 수수료는 접수일로부터 다음날까지 동봉된 납입영수증에 성명, 납부자번호 등을 기재하여 가까운 우체국 또는 은행에 납부하여야 합니다.
※ 납부자번호 : 0131(기관코드)+접수번호

3. 귀하의 주소, 연락처 등의 변경사항이 있을 경우, 즉시 [출원인코드 정보변경(경정), 정정신고서]를 제출하여야 출원 이후의 각종 통지서를 정상적으로 받을 수 있습니다.
※ 특허로(patent.go.kr) 접속 > 민원서식다운로드 > 특허법 시행규칙 별지 제5호 서식

4. 특허(실용신안등록)출원은 명세서 또는 도면의 보정이 필요한 경우, 등록결정 이전 또는 의견서 제출기간 이내에 출원서에 최초로 첨부된 명세서 또는 도면에 기재된 사항의 범위 안에서 보정할 수 있습니다.

5. 외국으로 출원하고자 하는 경우 PCT 제도(특허·실용신안)나 마드리드 제도(상표)를 이용할 수 있습니다. 국내출원일을 외국에서 인정받고자 하는 경우에는 국내출원일로부터 일정한 기간 내에 외국에 출원하여야 우선권을 인정받을 수 있습니다.
※ 제도 안내 : http://www.kipo.go.kr-특허마당-PCT/마드리드
※ 우선권 인정기간 : 특허·실용신안은 12개월, 상표·디자인은 6개월 이내
※ 미국특허상표청의 선출원을 기초로 우리나라에 우선권주장출원 시, 선출원이 미공개상태이면, 우선일로부터 16개월 이내에 미국특허상표청에 [전자적교환허가서(PTO/SB/39)]를 제출하거나 우리나라에 우선권 증명서류를 제출하여야 합니다.

6. 본 출원사실을 외부에 표시하고자 하는 경우에는 아래와 같이 하여야 하며, 이를 위반할 경우 관련법령에 따라 처벌을 받을 수 있습니다.
※ 특허출원 10-2010-0000000, 상표등록출원 40-2010-0000000

7. 기타 심사 절차에 관한 사항은 동봉된 안내서를 참조하시기 바랍니다.

1-11. 단위 모듈러 지진하중 흡수장치를 이용한 철골구조물 보강방법



특 허 증

CERTIFICATE OF PATENT

특 허 제 10-1372087 호
(PATENT NUMBER)

출원번호 (APPLICATION NUMBER) 제 2013-0002259 호
출 원 일 (FILING DATE:YY/MM/DD) 2013년 01월 08일
등 록 일 (REGISTRATION DATE:YY/MM/DD) 2014년 03월 03일

발명의명칭 (TITLE OF THE INVENTION)
단위 모듈러 지진하중 흡수장치를 이용한 철골구조물 보강방법

특허권자 (PATENTEE)
한국기술교육대학교 산학협력단(161571-0******)
충청남도 천안시 동남구 병천면 충절로 1600 (한국기술교육대학교)

발명자 (INVENTOR)
이승재(650115-1******)
충청남도 천안시 동남구 일봉로 71, 용곡동일하이빌1단지아파트 102-804 (용곡동)

위의 발명은 「특허법」에 따라 특허등록원부에 등록되었음을 증명합니다.

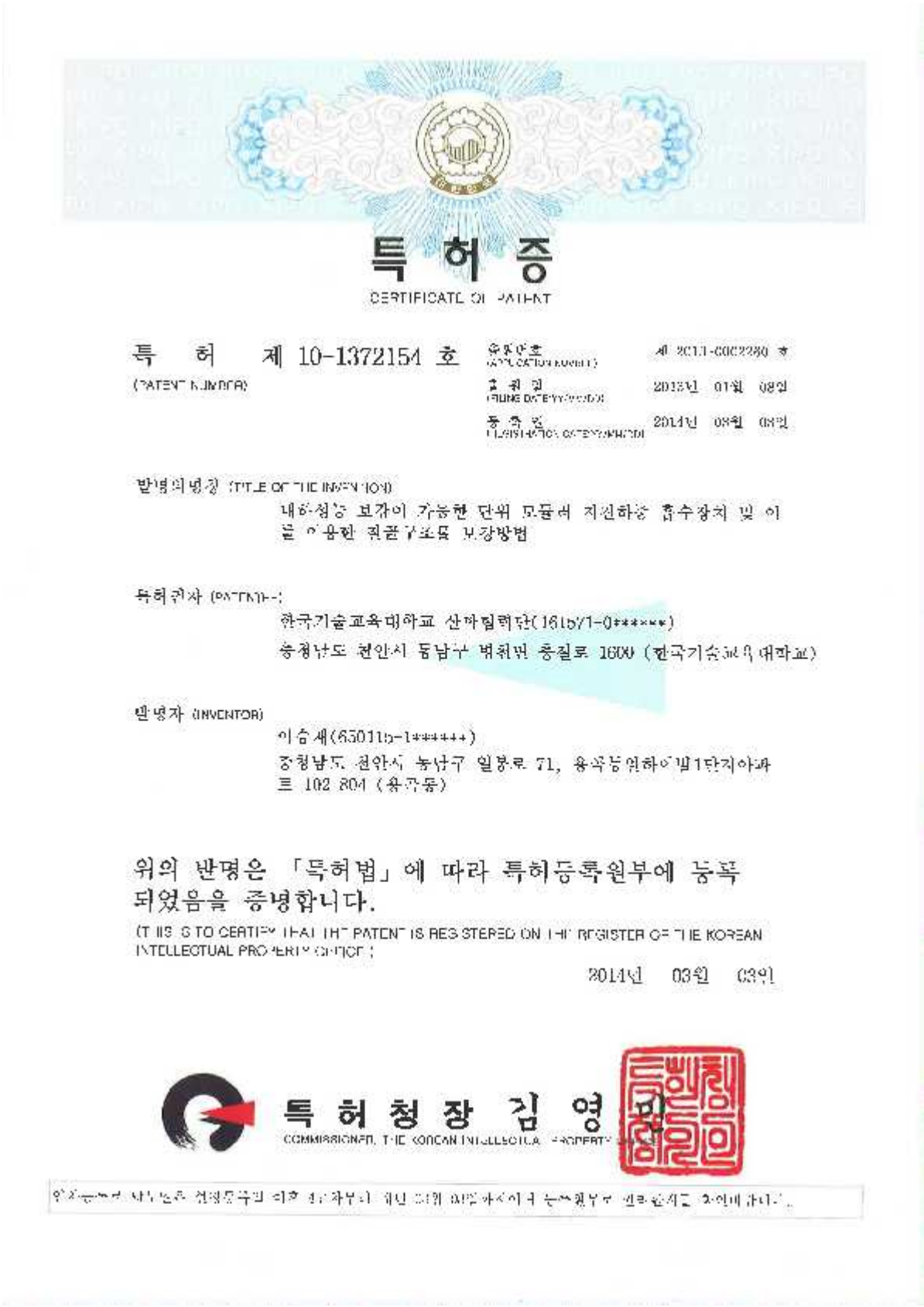
(THIS IS TO CERTIFY THAT THE PATENT IS REGISTERED ON THE REGISTER OF THE KOREAN INTELLECTUAL PROPERTY OFFICE.)

2014년 03월 03일

특 허 청 장 김 영 민
COMMISSIONER, THE KOREAN INTELLECTUAL PROPERTY OFFICE

연차등록료 납부일은 설정등록일 이후 4년차부터 매년 03월 03일까지이며 등록원부로 권리관계를 확인바랍니다.

1-12. 내하성능 보강이 가능한 단위 모듈러 지진하중 흡수장치 및 이를 이용한 철골구조물 보강방법



특 허 증

CERTIFICATE OF PATENT

특 허 제 10-1372154 호

(PATENT NUMBER)

출원번호 제 2011-0002280 호

출원일 2011년 01월 07일

등록일 2014년 03월 03일

발명의명칭 (TITLE OF THE INVENTION)

내하성능 보강이 가능한 단위 모듈러 지진하중 흡수장치 및 이를 이용한 철골구조물 보강방법

특허권자 (PATENTEE)

한국기술교육대학교 산학협력단(2015**-0******)

충청남도 천안시 동남구 병천면 충절로 1600 (한국기술교육대학교)

발명자 (INVENTOR)

이승세(650115-1******)

충청남도 천안시 동남구 일봉로 71, 용곡동원하이빌1단지아파트 102 804 (용곡동)

위의 발명은 「특허법」에 따라 특허등록원부에 등록되었음을 증명합니다.

(THIS IS TO CERTIFY THAT THE PATENT IS REGISTERED ON THE REGISTER OF THE KOREAN INTELLECTUAL PROPERTY OFFICE.)

2014년 03월 03일

특허청장 김 영 [illegible]

COMMISSIONER, THE KOREAN INTELLECTUAL PROPERTY [illegible]

2. 산학연간 기술지원

2-1. 주름웨브보의 특성 및 건축물에 적용 방법

기술공개 및 교육 확인서

주관연구기관	영남대학교	주관연구책임자	강주원
기술공개 및 교육 담당자	성명	강주원	
	소속	영남대학교 건축학부	
	전화번호	053-810-2429	
	E-mail	kangj@ynu.ac.kr	
기술공개 및 교육 대상기관	기관명	(주) ITS엔지니어링	
	기관대표	이 형 석	
	법인번호	170111-0275934	
	사업자등록번호	502-81-77590	
기술공개 및 교육 일정	일시	2012. 11. 23	
	장소	(주) ITS엔지니어링 회의실	
기술공개 및 교육명	주름 웨브보의 특성 및 건축물에 적용 방법		
주요 내용	□ 주름 웨브보의 구조적 개요 및 특성 - 주름 웨브보의 휨 및 전단에 대한 구조적 특성 - 곡선 주름 웨브보와 제형 주름 웨브보의 비교 - 주름 웨브보와 관련된 주요 구조설계기준 □ 주름 웨브보의 기존 연구개발 현황 - 미국 PACO사의 주름 웨브 I형 단면 형강 개발 - 프랑스, 일본에서의 교량에 적용 사례 □ 주름 웨브보의 적용시 주요 고려사항 - 웨브의 높이 및 주름 형태에 따른 전단좌굴 - 주름웨브보의 횡좌굴, 피로파괴에 대한 웨브의 거동, 주름웨브 거더의 플랜지 휨저항 - 사인형 주름 웨브의 형상파라메타에 따른 전단좌굴거동 - 사인형 주름 웨브를 이용한 진동제어장치의 메카니즘		

상기와 같이 기술공개 및 교육이 이루어졌음을 증명합니다.

2012년 11월 23일

담당자 : 강 주 원 (작인)

주관연구책임자 : 강 주 원 (작인)

기관대표 : 이 형 석 (작인)

2-2. 사인형 주름웨브의 전단 해석 및 설계

기술공개 및 교육 확인서

주관연구기관	영남대학교	주관연구책임자	강주원
기술공개 및 교육 담당자	성명	손수덕	
	소속	한국기술교육대학교 건축공학부	
	전화번호	070-4366-0984	
	E-mail	sdshon@kut.ac.kr	
기술공개 및 교육 대상기관	기관명	㈜ 구조기술사 연합법인	
	기관대표	임 헌 욱	
	법인번호	170111-0358186	
	사업자등록번호	502-81-96812	
기술공개 및 교육 일정	일시	2012. 11. 30.	
	장소	(주)구조기술사연합법인 회의실	
기술공개 및 교육명	사인형 주름웨브의 전단 해석 및 설계		
주요 내용			

□ 주름 웨브보의 구조적 개요 및 특성
- 주름 웨브보의 휨 및 전단에 대한 구조적 특성
- 곡선 주름 웨브보와 제형 주름 웨브보의 비교
- 주름 웨브보의 주요 연구개발 동향

□ 주름웨브 관련 구조설계기준
- DASt-R015에 의한 주름웨브설계
- Eurocode 3_ EN 1993-1-5에 의한 주름웨브설계
- DIN 18800에 의한 주름웨브설계

□ 사인형 주름웨브의 해석과 제진장치로서의 이용 방법
- 주름웨브의 전단설계기준 및 제안된 설계식에 따른 주름웨브의 전단좌굴해석
- 제진장치로서의 사인형 주름웨브의 메카니즘

상기와 같이 기술공개 및 교육이 이루어졌음을 증명합니다.

2012년 11월 30일

담당자 : 손 수 덕 (직인)
주관연구책임자 : 강 주 원 (직인)
기관대표 : 임 헌 욱 (직인)

2-3. 주름웨브보의 전단좌굴특성과 설계방법

기술공개 및 교육 확인서

수관련 기관명	영남대학교	주관연구책임자	강주원
기술공개 및 교육 담당자	성명	강주원	
	소속	영남대학교 건축학부	
	전화번호	053-810-2429	
	E-mail	kangj@ynu.ac.kr	
기술공개 및 교육 내실고 관	기관명	(주) ITSP시스템즈	
	기관대표	이 형 석	
	법인번호	170111-0275934	
	사업자등록번호	502-81-77590	
기술공개 및 교육 일정	일시	2013. 10. 25	
	장소	(주) TSP시스템즈 이사 회의실	
기술공개 및 교육명	주름 웨브보의 전단좌굴특성과 설계방법		

수요 내용

□ 주름 웨브보의 구조적 개요 및 전단좌굴 특성
- 주름 웨브보의 역학적 및 전단거동 특성
- 일반 H형강보와 주름 웨브보의 구조적 거동 특성 비교

□ 주름 웨브보의 해석을 위한 소프트웨어
- ABAQUS를 이용한 주름 웨브보의 해석 모델링
- 유전자 알고리즘 및 자유선화상그리즘에 의한 해석방법

□ 주름웨브보의 설계를 위한 관련특성 산정 방법
- 주름웨브보의 외스늄이, 단면적, 휨순단면서, 나위길이중량, 1차식, 단부이치로에트, 단면이차 반경 등의 기본적인 단면성질 정의 방법
- 현재 사용되는 주름웨브보 설계 소프트웨어과 개발된 소프트웨어 비교

상기와 같이 기술공개 및 교육이 이루어졌음을 증명합니다.

2013년 10월 25일

담당자 : 강 주 원 (인)
주관연구책임자 : 강 수 원 (인)
기관대표 : 이 형 석 (인)

2-4. 정현파형 주름판의 해석 및 설계시 유전자알고리즘 적용 방법

기술공개 및 교육 확인서

주관연구기관	영남대학교	주관연구책임자	강주원
기술공개 및 교육 담당자	성명	손수덕	
	소속	한국기술교육대학교 건축공학부	
	전화번호	070-4366-0984	
	E-mail	sdshon@kut.ac.kr	
기술공개 및 교육 대상기관	기관명	(주) 구조기술사 연합법인	
	기관대표	임 헌 욱	
	법인번호	170111-0358186	
	사업자등록번호	502-81-96812	
기술공개 및 교육 일정	일시	2014. 11. 12.	
	장소	(주) 구조기술사연합법인 회의실	
기술공개 및 교육명	정현파형 주름판의 해석 및 설계시 유전자알고리즘 적용 방법		
주요 내용	□ 주름강판 부재의 개요 - 주름강판의 전단좌굴 특성 - 정현파형 주름강판과 제형주름강판의 구조적 특성 비교 - 정현파형 주름강판의 개발 배경 및 향후 전망 □ 주름웨브보의 최적설계프로그램 - 유로코드 설계식에 따른 정현파형 주름강판의 최적설계 방법 - 실변수 유전자알고리즘에 의한 주름강판의 최적화 기법 - 차분진화알고리즘에 의한 주름강판의 최적화 기법 - 제안된 최적화 알고리즘과 향후 프로그램 개발 방향 □ 정현파형 주름강판 제진장치 설계시 적용방법 - 주름강판의 전단성능에 대한 파라메타와 최적화 기법 - 주름강판 제진장치의 적용방안		

상기와 같이 기술공개 및 교육이 이루어졌음을 증명합니다.

2014년 11월 12일

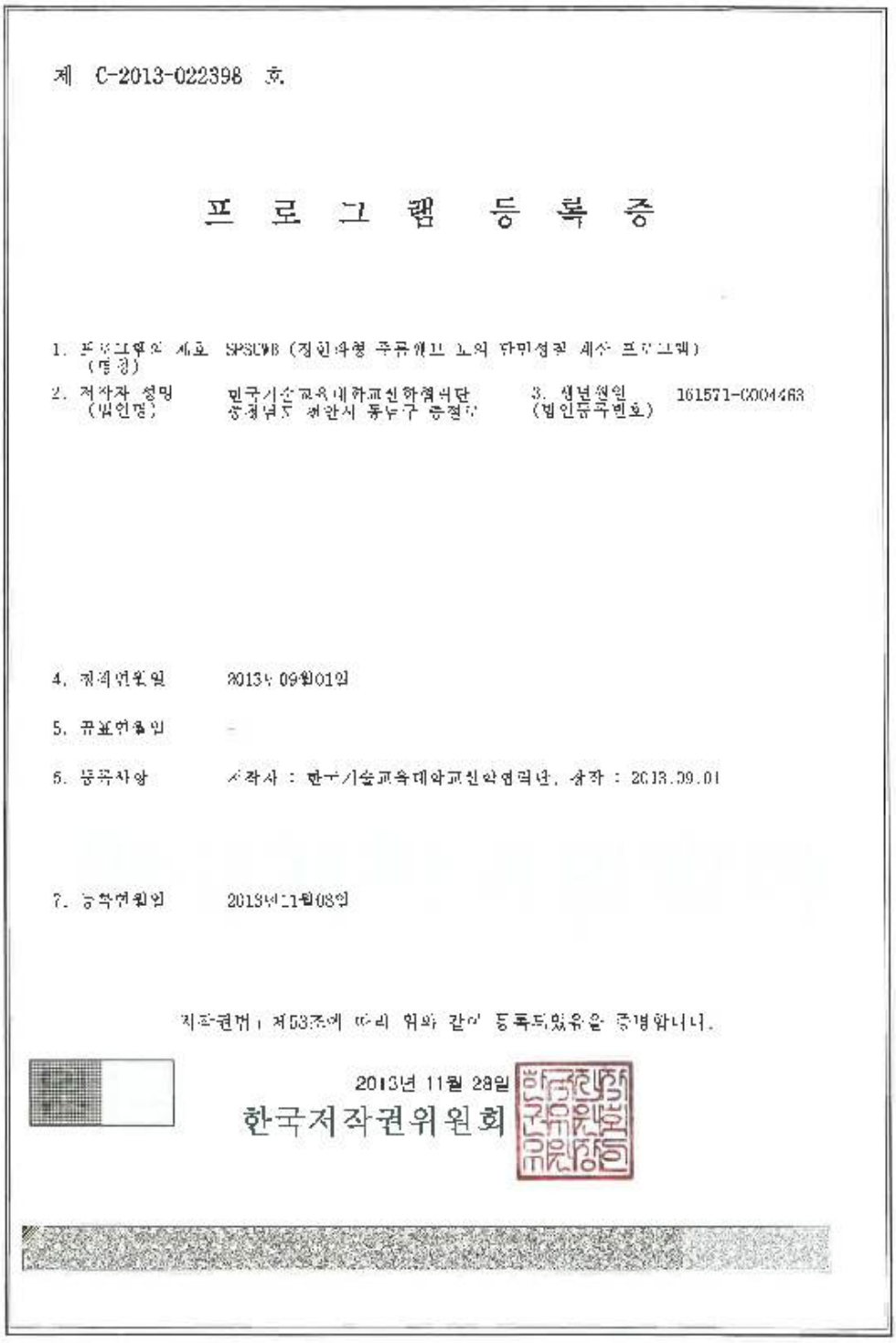
담당자 : 손 수 덕 (주인)

주관연구책임자 : 강 주 원 (주인)

기관대표 : 임 헌 욱 (주인)

3. 소프트웨어(SW) 등록 건수

3-1. SPSCWB (정현파형 주름웨브 보의 단면성질 계산 프로그램)



제 C-2013-022398 호.

프 로 그 램 등 록 증

1. 프로그램의 제호 (명칭) SPSCWB (정현파형 주름웨브 보의 단면성질 계산 프로그램)

2. 저작자 성명 (법인명) 한국기술교육대학교산학협력단
충청남도 천안시 동남구 충절로

3. 생년월일 (법인등록번호) 161571-0004463

4. 최초발행일 2013년 09월01일

5. 공표여부일 -

6. 등록사항 저작자 : 한국기술교육대학교산학협력단, 창작 : 2013.09.01

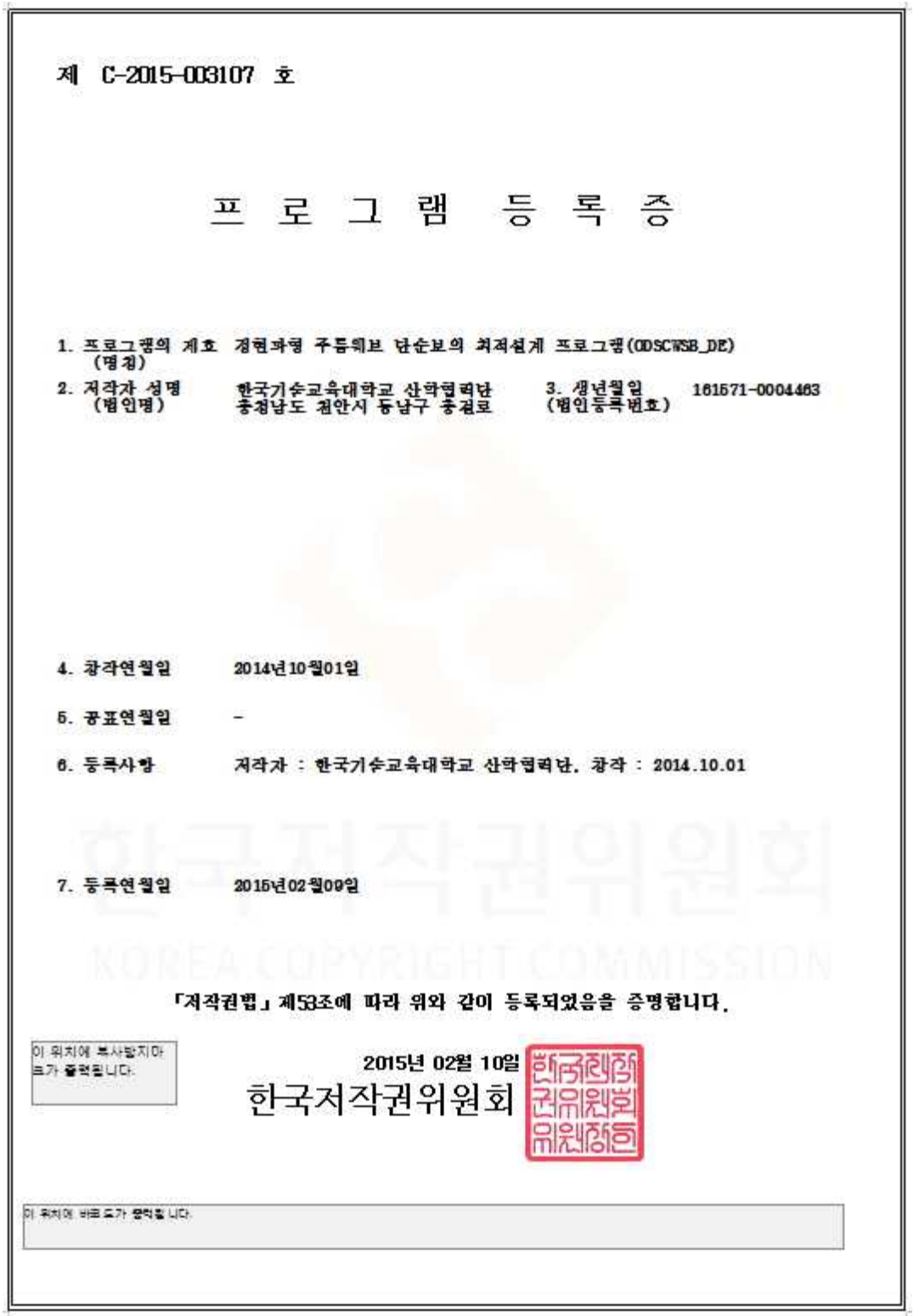
7. 등록연월일 2013년11월08일

저작권법 제53조에 따라 위와 같이 등록되었음을 증명합니다.

2013년 11월 28일

한국저작권위원회

3-2 정현파형 주름웨브 단순보의 최적설계 프로그램(ODSCWSB_DE)



제 C-2015-003107 호

프 로 그 램 등 록 증

1. 프로그램의 제호 (명칭) 정현파형 주름웨브 단순보의 최적설계 프로그램(ODSCWSB_DE)
2. 저작자 성명 (법인명) 한국기술교육대학교 산학협력단 충청남도 천안시 동남구 충절로
3. 생년월일 (법인등록번호) 161571-0004463
4. 창작연월일 2014년10월01일
5. 공표연월일 -
6. 등록사항 저작자 : 한국기술교육대학교 산학협력단. 창작 : 2014.10.01
7. 등록연월일 2015년02월09일

한국저작권위원회
KOREA COPYRIGHT COMMISSION

「저작권법」 제53조에 따라 위와 같이 등록되었음을 증명합니다.

이 위치에 복사방지마크가 출력됩니다.

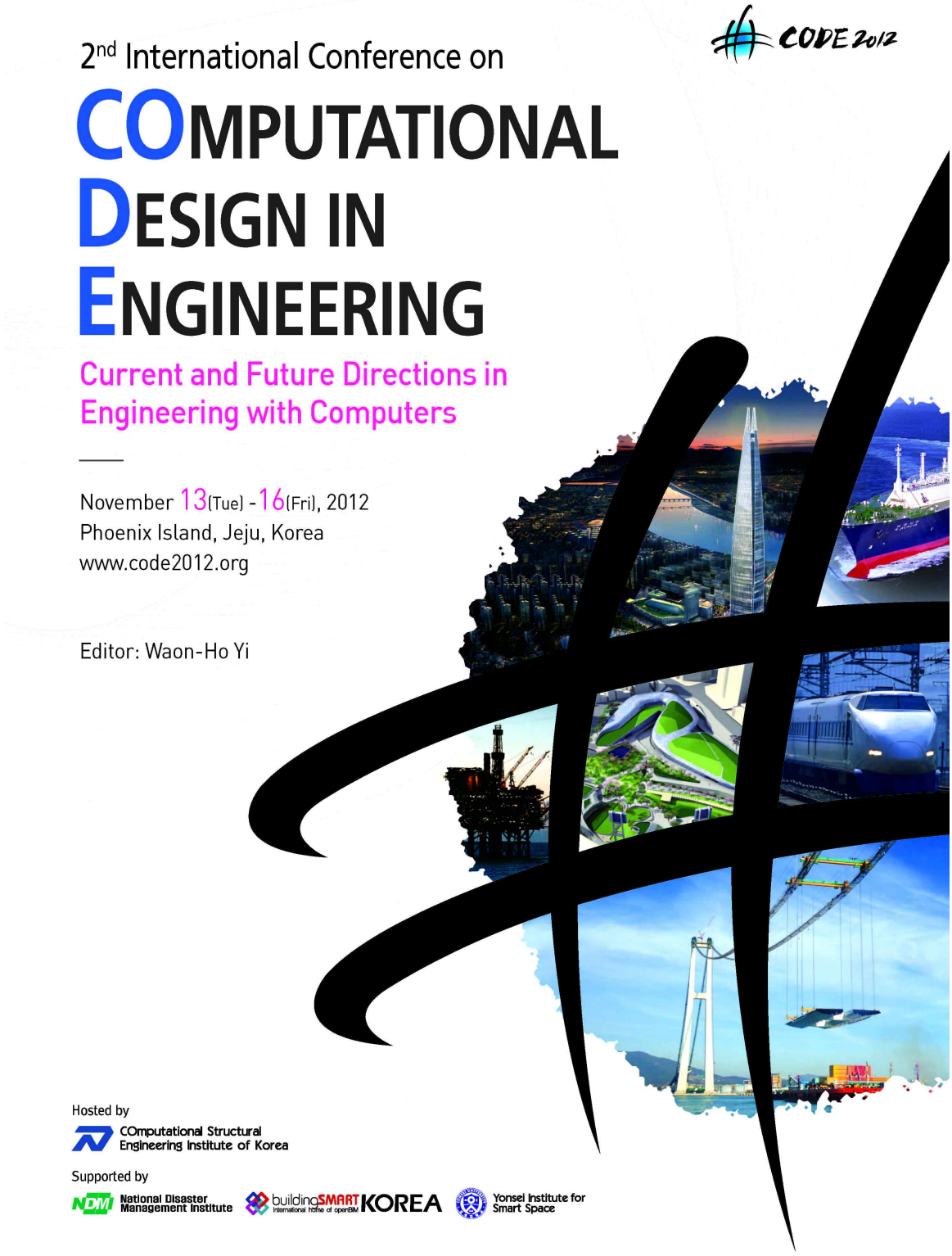
2015년 02월 10일

한국저작권위원회

이 위치에 바코드가 출력됩니다.

4. 연구개발 관련 홍보

4-1. Control Device of Thin Corrugated Plate - MLTM:12High-techUrban16



PROGRAM AT-A-GLANCE

Date	Nov. 15 (Thu)						Nov. 16 (Fri)	
Rm.	Lobby	Island Ballroom A	Island Ballroom B	Island Ballroom C	Wind Hall A	Wind Hall B	Island Ballroom A	
08:00-09:00	Registration (08:00-18:00) / Posters (08:00-18:00)							
09:00-09:40		**Keynote Lecture 2** Structural Modeling of the Human Cornea: from Molecular to Macroscopic Scales					Post Conference Workshop (09:00-17:10)	
09:40-10:20		**Keynote Lecture 3** BIM Concepts and Benefits						
10:20-10:40		Coffee Break						
10:40-12:20		**OS211** Cutting-edge Technology on Building Safety and Serviceability	**OS212** Control Device of Thin Corrugated Plate - MLTM: 12High-techUrban16	**OS213** Electromagnetic Field Analysis	**OS214** Multidisciplinary Computational Mechanics	**OS215** Building Engineering with BIM		
12:20-13:40		Lunch						Technical Tour (13:30-15:00)
13:40-15:00		**OS221** Advanced Composite Structure Design	**OS222** Recent Topics in Structural Optimization (Size, Shape and Topology) I	**OS223** Freeform Surface and Optimal Solar Panel - MLTM: 12High-techUrban23 I	**OS224** Development of New Traditional Korean-style House I	**OS225** Application of BIM Technology in the Life-cycle of Building and Infrastructure I		
15:00-15:20		Coffee Break						
15:20-16:40		**S231** Computational Engineering and Mechanics IX	**OS232** Recent Topics in Structural Optimization (Size, Shape and Topology) II	**OS233** Freeform Surface and Optimal Solar Panel - MLTM: 12High-techUrban23 II	**OS234** Development of New Traditional Korean-style House II	**OS235** Application of BIM Technology in the Life-cycle of Building and Infrastructure II		
16:40-17:40					**S241** Computational Engineering and Mechanics X	**S242** Building Information Modeling		
17:40-18:00								
18:00-20:00		Banquet & Closing Ceremony						

13:10-13:40 / 15:00-15:20
Poster Presentation (Lobby, 2F)

SESSION TOPICS

Computational Engineering and Mechanics

Adaptive Methods	S231
Advanced Composite Structure Design	OS221
Advances in Computational Mechanics	OS116
Assessment of Structural Behavior based on Response Monitoring System	OS115
Biomechanics	S132
Case Based Designs	P2, S132
Computational Design in Disaster Prevention	OS142
Computational Mechanics using Mobile Interface	S241
Computational Methods for Simulating Complicated Behavior of Materials and Structures	OS123, OS143
Computer Aided Design	S145
Computer Aided Engineering in Samsung C&T	OS112
Construction - IT Convergence	OS114
Control Device of Thin Corrugated Plate - MLTM: 12High-techUrban16	OS212
Cutting-edge Technology on Building Safety and Serviceability	OS211
Daewoo E&C	OS122
Development of New Traditional Korean-style House	OS224, S234
Electromagnetic Field Analysis	OS213
Evaluating Future Earthquake Disaster	OS126
Formfinding, Topology and Structural Morphology	S132
Fracture Mechanics	P2, S136
Freeform Surface and Optimal Solar Panel - MLTM: 12High-techUrban23	OS223, OS233
Integrated Design Systems	S153
Isogeometric Methods: Integration of CAD, CAE and Design Optimization	OS124
Lifetime Costs	P2
Model Verification and Validation	P2, S241
Monitoring of Structures & Buildings	S153
Multidisciplinary Computational Mechanics	OS214
Multiscale and Multiphysics Simulations of Material Sciences and Engineering	OS113
Real Time 3D Simulation	S153
Recent Topics in Structural Optimization (Size, Shape and Topology)	OS222, OS232
Reduction Method in Analysis and Design of the Large Scale Problems	OS144
Reliability and Probability in Engineering Mechanics	OS125, OS135
Safety Analysis	P2
Seismic Isolation Assessment of NPP	OS134
Structural Control	P1, S231
Structural Engineering Including Steel, Bridge, Composite, Reinforced Concrete and Masonry Structures	P1, P2, S146, S154, S156
Structural Optimization and Sensitivity Analysis	P1, S145, S146, S156
Uncertainty Models	S132
Others	S153

Nov. 15 (Thu)

09:00 - 09:40 Keynote Lecture 2 — Island Ballroom A

Moderator: J.S. KONG (Korea University, Korea)

STRUCTURAL MODELING OF THE HUMAN CORNEA: FROM MOLECULAR TO MACROSCOPIC SCALES
P.M. PINSKY (Stanford University, U.S.A.)

09:40 - 10:20 Keynote Lecture 3 — Island Ballroom A

Moderator: J.S. KONG (Korea University, Korea)

BIM CONCEPTS AND BENEFITS
R. BRINKMAN (Brinkman International Management Services, Hong Kong)

10:20 - 10:40 Coffee Break

10:40 - 12:20 Organized Session 211: Cutting-edge Technology on Building Safety and Serviceability — Island Ballroom A

Chair: Y.H. LEE (Kyung Hee University, Korea)

OS211-1 BEHAVIOUR RESEARCHS FOR USER NEEDS CASE IN CHILDREN'S CLINICS/HOSPITAL
C-H. HSU and C-H. HE (Nation Yunlin University of Science & Technology, Taiwan)

OS211-2 EXPERIMENTAL STUDY ON THE TEMPERATURE DEPENDENCY OF LOW HARDNESS FULL SCALE LEAD RUBBER BEARING
J.Y. PARK, K.S. JANG, K.N. PARK (UNISON eTech. Co., Ltd., Korea), H.P. LEE (KHNP-Central Research Institute, Korea) and H.C. KIM (Kyung-Hee University, Korea)

OS211-3 AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE STRUCTURAL BEHAVIOR OF SEISMIC RETROFIT WALL SUBJECTED TO AXIAL FORCE AND CYCLIC LATERAL LOAD
J.W. PARK, K.C. SIM, J.Y. PARK, K.N. PARK (UNISON eTech. Co. Ltd., Korea) and H.C. KIM (Kyung Hee University, Korea)

OS211-4 EXPERIMENTAL STUDY ON BOND PERFORMANCE AND STRENGTH OF SHEAR STUD BETWEEN HIGH STRENGTH CONCRETE AND STEEL PIPE
J. CHOI, M.S. KIM, Y.H. LEE (Kyung Hee University, Korea), A. SCANLON (Pennsylvania State University, U.S.A.), C.H. EOM (Uiduk University, Korea), H. KIM and D.J. KIM (Kyung Hee University, Korea)

OS211-5 EXPERIMENTAL STUDY OF CIRCULAR CENTRIFUGAL HOLLOW PRECAST CONCRETE COLUMN AND STEEL BEAM JOINT MEMBERS
D.H. SHIN, H. KIM, Y.H. LEE (Kyung Hee University, Korea) and K.H. LEE (Provincial Fire and Disaster Headquarters,, Korea)

10:40 - 12:20 Organized Session 212: Control Device of Thin Corrugated Plate - MLTM: 12High-techUrban16 — Island Ballroom B

Chair: J-W. KANG (Yeungnam University, Korea)

OS212-1 DUAL-FORMATION CONTROL OF MULTIPLE 2-LINK MOBILE MANIPULATORS
B.N.SHARMA, J. VANUALAILAI and A.PRASAD (University of the South Pacific, Fiji)

OS212-2 THE OPTIMAL CONTROL PROBLEM OF A LINEAR HYPERBOLIC SYSTEM
J.H. HA (Korea University of Technology and Education, Korea), S-I. NAKAGIRI (Kobe University, Japan) and S.J. LEE (Korea University of Technology and Education, Korea)

OS212-3 MINIMUM WEIGHT DESIGN OF CORRUGATED WEB GIRDER USING GA
S.D. SHON, M.N. YOO, J.H. HA (Korea University of Technology and Education, Korea), J.W. KANG and K.Y. SEOK (Yeongnam University, Korea)

OS212-4 STABILITY OF SINGLE LAYER GRID SHELL CONSIDERING BOLT CLEARANCE IN THE NODE CONNECTION
K.J. HWANG (G&H Design Workshop, Korea) and S.J. LEE (Korea University of Technology and Education, Korea)

OS212-5 DISPLACEMENT CONTROL TECHNIQUE OF THE CABLE DOME
S.D. SHON, H.J. WOO and S.J. LEE (Korea University of Technology and Education, Korea)

OS212-6 STABILITY OF SHALLOW ARCHES
J.H. HA (Korea Tech, Korea), S. GUTMAN (University of Oklahoma, U.S.A.) and S.D. SHON (Korea Tech, Korea)

10:40 - 12:20 Organized Session 213: Electromagnetic Field Analysis — Island Ballroom C
Chair: H.J. CHUN (Yonsei University, Korea)

OS213-1 ELECTROMAGNETIC ANALYSIS OF FSS RADOME
J. H. KIM, Y. B. PARK (Ajou University, Korea), H. J. CHUN (Yonsei University, Korea), I. P. HONG (Kongju University, Korea) and M. G. LEE (Agency for Defense Development, Korea)

OS213-2 NOVEL 2-D FDTD SCHEME BASED ON COMBINATION OF THE STANDARD AND HIGHER ORDER FDTD SCHEME FOR LOW DISPERSION ERROR
I.Y. OH (Yonsei University, Korea), Y.J. HONG (Agency for Defense Development, Korea) and J.G. YOOK (Yonsei University, Korea)

OS213-3 ANALYSIS OF MISSILE WITH RADOME BASED ON FINITE DIFFERENCE TIME DOMAIN METHOD
S.Y. HYUN, I.Y. OH (Yonsei University, Korea), J-W. Ahn, S-M. Hwang (Hanwha Corporation, Korea) and J.G. YOOK (Yonsei University, Korea)

OS213-4 CHANGE IN TRANSMISSION CHARACTERISTICS OF THE FREQUENCY SELECTIVE SURFACE IN HYBRID COMPOSITE STRUCTURES DUE TO THERMAL RESIDUAL STRESSES
I.H. HWANG, H.J. CHUN, K.M. PARK (Yonsei University, Korea), I.P. HONG (Kongju National University, Korea), M.G. LEE (Agency for Defense Development, Korea) and Y.B. PARK (Ajou University, Korea)

OS213-5 SCATTERING ANALYSIS OF MULTILAYERED CYLINDRICAL FREQUENCY SELECTIVE SURFACE BASED ON DIPOLE PATCH
Y.R. JEONG (Yonsei University, Korea), I.P. HONG (Kongju National University, Korea), H.J. CHUN (Yonsei University, Korea), M.G. LEE (Agency for Defense Development, Korea) and J.G. YOOK (Yonsei University, Korea)

OS213-6 SCATTERING ANALYSIS OF MULTILAYERED PERIODIC TRI-POLE ARRAY
C.S. PARK, Y.R. JEONG (Yonsei University, Korea), I.P. HONG (Kongju National University, Korea), H.J. CHUN (Yonsei University, Korea), M.G. LEE (Agency for Defense Development, Korea) and J.G. YOOK (Yonsei University, Korea)

OS213-7 EFFICIENCY IMPROVEMENT OF A THIN FILM SOLAR CELL USING THE SURFACE PLASMON EFFECT
S.H. BYUN, J. YOO (Yonsei University, Korea) and H.J. SOH (Hyudai Motor Co., Korea)

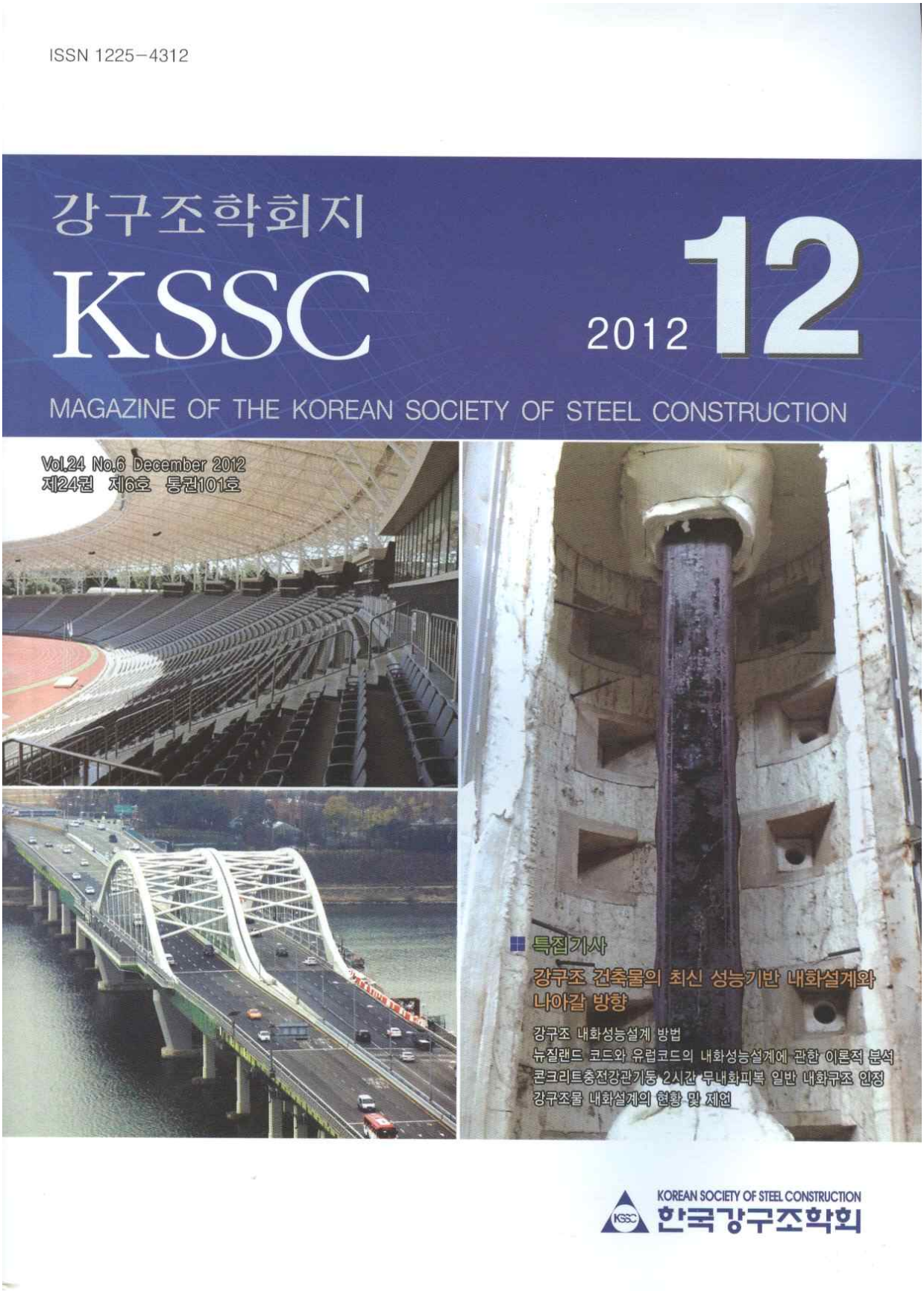
10:40 - 12:20 Organized Session 214: Multidisciplinary Computational Mechanics — Wind Hall A
Chair: H.S. KIM (Dongguk University, Korea)

OS214-1 FAULT DETECTION AND CLASSIFICATION OF ROLLER-BEARING SYSTEM
B.H. KOH, D.H. YANG, D.H. KWAK and M.K. KWAK (Dongguk University, Korea)

OS214-2 NUMERICAL ANALYSIS FOR TOOTH BRUSHING USING DISCRETE ELEMENT METHOD
D.H. NGUYEN and J. PARK (Kumoh National Institute of Technology, Korea)

OS214-3 A COMPUTATIONAL ASYMPTOTIC MODEL OF LAMINATED COMPOSITE PLATES WITH DAMAGED INTERFACES
J.-S. KIM (Kumoh National Institute of Technology, Korea)

4-2. 사인형 주름웨브의 전단좌굴과 구조설계



Vol.24 No.6 December 2012

Editorial Committee

Editor-in-Chief Eui-Seung Hwang
Manager-in-Chief Joowon Kang
Chul-Young Kim

Special Subcommittee- Arch.Engrg.
Chairman Hyung-Joon Kim
Manager Junhee Kim
Members H. Ko, H.S Ryu, K.H Moon, J.S Bang, S.H Oh, K.K Lee, M.H Lee, Y.H Choi

Special Subcommittee- Civil Engrg.
Chairman Kab-Soo Kyung
Manager Seung Yong Lee
Members S.C Kwon, G.N Kim, S.Y Kim, J.H Yun, W.C Lee, J.H Lee, hee, C.H Chang, J.C Jeon, C.J Cha, S.K Choi

Academic Subcommittee- Arch.Engrg.
Chairman Tae Soo Kim
Manager Dong Keon Kim
Members H.S Kang, Y.J Kim, J.W Kim, K.S Park, H.S Ryu, M.H Lee, S.S Lee, K.S Chung

Academic Subcommittee- Civil Engrg.
Chairman Ki-Yong Yoon
Manager Byung-Ho Choi
Members Y.S Kang, Y.M Kim, J.S Park, D.Y Yoon, S.H Lee, S.R Lee, N.H Lim, Y.J Choi, T.H Han, M.H Hwang

Technical Subcommittee- Arch.Engrg.
Chairman Seok Hwangbo
Manager Taejin Kim
Members P.S Kang, D.J Kim, K.P Hwang, S.M Kim, I.H Baek, T.S Eom, S.J Lee, D.W Jang, J.S Hwang

Technical Subcommittee- Civil Engrg.
Chairman Wansoo Lee
Manager Kyungsik Kim
Members J.W Kwak, N.I Kim, S.I Kim, J.C Kim, S.Y Park, J.G Park, J.H Park, S.S Ahn, M.S Oh, J.G Yoon, K.H Lee, J.K Lee, K.S Cho

General Subcommittee- Arch.Engrg.
Chairman Kangmin Lee
Manager Gee-cheol Kim
Members J.K Kim, T.H Kim, H.S Kim, H.D Kim, I.S Yang, M.H Oh, Y.H Choi, H.H Choi

GeneralSubcommittee- Civil Engrg.
Chairman Chul-Young Kim
Manager Sungil Kim
Members R.G Kim, J. Bae M.S Oh, J.Y Lee, K.S Cho

Editorial Assistant S.K Lee

KOREAN SOCIETY OF STEEL CONSTRUCTION
(KSSC), 106-18, Munjung-dong, Songpa-gu, Seoul, 138-200, KOREA
- Phone 82-2-400-7101 ■ Fax 82-2-400-7104
- Homepage www.kssc.or.kr
- Webhard ID : KSSCOK PW : KSSC
- E-mail kssc1989@chol.com
- Publisher Jong-Rak Kim
- ISSN No. ISSN 1225-4312
- Date of Publication December. 24, 2012
- Printer Dong Hwa Print

■ Preface 4

■ Special Issue

Performance Based Fire Resistant Design Method for Steel Structure
/ Heung-Youl Kim · Jun-Hyung Kim 7

A Theoretical Analysis on Performance-Based Fire Design of New Zealand and EURO Code
/ Jae-Sung Lee · Seung-Cho Yang · Seung-Mun Son · In-Hwan Lyoh · Hyung-Jun Kim 11

General Certificate of Unprotected Concrete Filled Steel Tube Columns in 2hours Fire
/ Kyung-Soo Chung · In-Rak Choi · Do-Hwan Kim · Heung-Youl Kim · Bum-Sik Kim · Seung-Min Lee 16

Current Status and Suggestions of Structural Fire Design for Steel Structures
/ Sun-Hee Kim · Jeong-Ki Min · Sung-Mo Choi 21

■ Announcement of Next Special Issue 27

■ Research Articles

Evaluation of Unit Modular Lateral System for High-rise Building
/ Sang-Sup Lee · Keum-Sung Park · Sung-Yub Hong · Kyu-Woong Bae 28

Shear Buckling and Structural Design of Sinusoidal Corrugated Web
/ Su-Deok Shon · Seung-Jae Lee · Joo-Won Kang 33

Development and Application of Coupling Beam Damper
/ Woon La · Hyun-Sup Noh · Jae-Un Jung · Tae-Sang Ahn · Young-Ju Kim 39

Structural Performance of Modular Simplified Composite Steel I-Beam Bridge
/ Jong-sup Park · Gi-yong Yoon · Son-ho Lee · Jae-Heung Kim · Sung-yong Kang 48

■ Technical Reports

New Shape Hybrid Forming Composite Beam / Sung-Bae Kim · Sang-Seup Kim 53

Powerful Seismic Frame Method for Existing Mid/Low-rise Buildings using Steel Box Columns (SN, SHN) / Do-An Kang · Byoung-Moon Youn · Yong-Sik Bang · Dong-Seok Kim 59

Temporary Sheathing Methods Uning Arch Waling
/ Chun-Ho Kim · Hee-Jeong Shin · Tae-Moo Shim 62

■ General Topics

Expecting the Takeoff of Green Building Certification Criteria / Cheol-Hak Bae 67

8th Steel Pile & Tube Industrial Development Seminar / Jae-Jin Lee 69

Review of Technical Presentations in 2012 / Sun-Kwang Lee 71

■ Project of the Month 74

■ Open Board 77

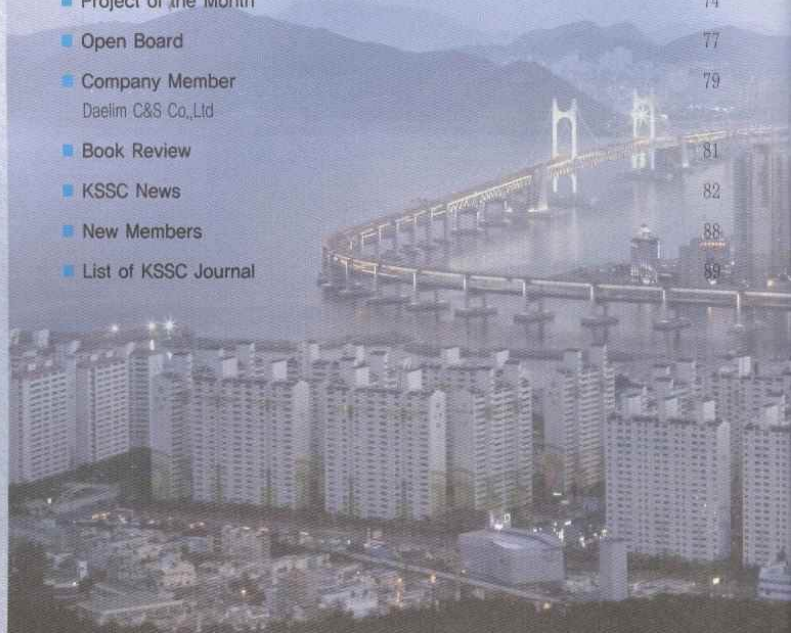
■ Company Member 79
Daelim C&S Co.,Ltd

■ Book Review 81

■ KSSC News 82

■ New Members 88

■ List of KSSC Journal 89



제24권 제6호 통권 제101호 2012년 12월

■ 권두언 4

■ 특집기사

강구조 내화성능설계 방법 / 김흥열 · 김형준 7

뉴질랜드 코드와 유럽코드의 내화성능설계에 관한 이론적 분석 / 이재승 · 양승조 · 손승문 · 여인환 · 김형준 11

콘크리트충전강관기둥 2시간 무내화피복 일반 내화구조 인정 / 정경수 · 최인락 · 김도환 · 김홍렬 · 김범식 · 이승민 16

강구조물 내화설계의 현황 및 제언 / 김선희 · 민정기 · 최성모 21

■ 특집 예고

도로교량 한계 상태 설계법 개요 및 적용 27

■ 학술기사

고층화 구현을 위한 유닛 모듈러 횡력시스템 평가 / 이상섭 · 박금성 · 홍성엽 · 배규웅 28

사인형 주름웨브의 전단좌굴과 구조설계 / 손수덕 · 이승재 · 강주원 33

커플링보 제진장치의 개발 및 적용 / 나운 · 노현섭 · 정재은 · 안태상 · 김영주 39

모듈러 초간편 H형강 교량의 성능평가 / 박종섭 · 윤기용 · 이선호 · 김재홍 · 강성용 48

■ 기술기사

신형상 HyFo 합성보의 특성 / 김성배 · 김상섭 53

내지진 강관을 이용한 기존 중저층 건축물 내진보강 공법 / 강도안 · 윤병문 · 방용석 · 김동석 59

가시설 흙막이공 ARCH띠장 공법 / 김춘호 · 신희정 · 심태무 62

■ 일반기사

녹색건축인증제도의 새로운 도약을 기대하며 / 배철학 67

제8회 강관산업발전세미나 개최 / 이재진 69

2012 강구조 기술발표회 / 이선광 71

■ 강구조 작품소개

Tofiq Bahramov Stadium 리모델링_아제르바이잔 바쿠 74

양화대교 – 로제아치교 76

■ 열린마당

올바른 자세 1편. 책상과 의자 팔걸이에 팔을 걸쳤을 때의 자세 / 유인식 77

■ 탐방

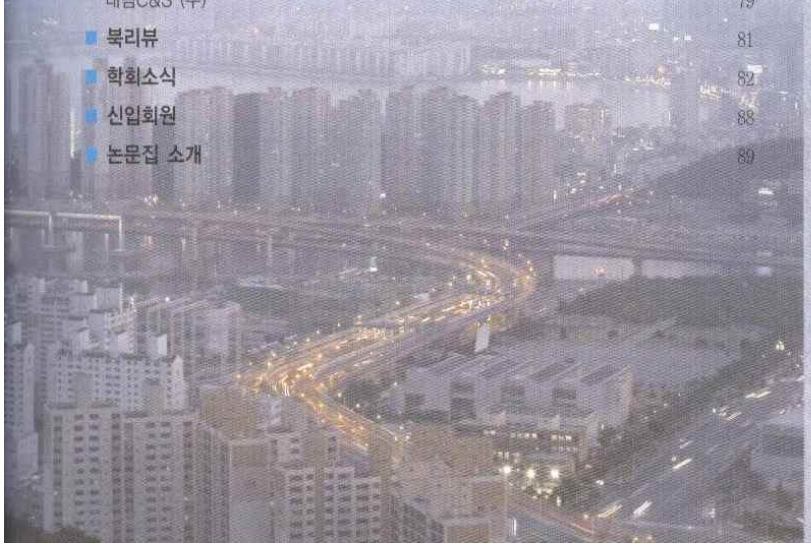
대림C&S (주) 79

■ 북리뷰 81

■ 학회소식 82

■ 신입회원 88

■ 논문집 소개 89



학회지편집위원회

학회지편집위원회
위 원 장 황의승(경희대)
부위원장 강주원(영남대), 김철영(명지대)

특집분과위원회 – 건축
분과장 김형준(서울시립대) 간사 김준희(건기연)
위 원 고 헌(아이스트) 유홍식(RIST)
문기훈(한양대) 방중석(대림산업)
오상훈(부산대) 이경구(단국대)
이명호(대우건설) 최영환(서울시립대)

특집분과위원회 – 토목
분과장 정감수(해양대) 간사 이승용(한국교통대)
위 원 권순철(삼부토건) 김기남(현대건설)
김성연(현대엔지니어링) 윤정현(스찍엔지니어링)
이원철(청석엔지니어링) 이준희(삼안)
장준호(계명대) 전준창(씨티씨)
차철준(시설안전공단) 최성권(삼보기술단)

학술분과 – 건축
분과장 김태수(한발대) 간사 김동건(한양대)
위 원 강현식(경남과학기술대) 김영주(동일DRB)
김진원(RIST) 박금성(건기연)
유홍식(RIST) 이명호(대우건설)
이상섭(건기연) 정경수(RIST)

학술분과 – 토목
분과장 윤기용(선문대) 간사 최병호(한발대)
위 원 강은석(철도기술연구원) 김영민(대우건설)
박종섭(상명대) 윤동용(현대제철)
이선호(석탑엔지니어링) 이승욱(포스코건설)
임남형(충남대) 최영준(현대산업개발)
한택희(해양연구원) 황민오(RIST)

기술 및 홍보분과 – 건축
분과장 황보석(ES건축구조) 간사 김태진(창 · 민우구조)
위 원 강원수(두산건설) 김대진(경희대) 황규표(금호건설)
김상모(반석 TVS) 백일현(NI스틸)
염태성(대구가톨릭대) 이승제(Meinhardt)
장동윤(방용건설) 황재승(전남대)

기술 및 홍보분과 – 토목
분과장 이완수(삼성물산) 간사 김경식(청주대)
위 원 곽종원(건기원) 김남일(한양대)
김성일(철도기술연구원) 김제춘(대우건설)
박수영(평화엔지니어링) 박재균(단국대)
박종헌(GS건설) 안상섭(노로공사)
윤지길(대림산업) 이경훈(유신)
이종관(RIST)

일반분과 – 건축
분과장 이강민(충남대) 간사 김기철(서일대)
위 원 김재진(현대건설) 김태호(대림산업)
김현수(선문대) 김희동(인하공전)
양일승(동신대) 오명호(목포대)
최영환(서울시립대) 최현훈(삼성물산)

일반분과 – 토목
분과장 김철영(명지대) 간사 김성일(철도기술연구원)
위 원 김광균(현대엔지니어링) 배 정(삼부토건)
오명석(서영엔지니어링) 이종영(현대스틸산업)
조경식(DM엔지니어링)

편집담당 이선광

■ **발행처** 사단법인 한국강구조학회
138-200 서울특별시 송파구 문정동 106-18
■ **대표전화** (02)400-7101 ■ **Fax** (02)400-7104
■ **홈페이지** www.kssc.or.kr ■ **E-mail** kssc1989@chol.com
■ **학회웹하드** ID : KSSCOK PW : KSSC
■ **발행인** 김종락
■ **등 록** 1989년 11월 1일 ■ **ISSN** 1225-4312
■ **인 쇄** 2012년 12월 20일 ■ **발 행** 2012년 12월 24일
■ **제 작** 동희인쇄공사



표지 : ①아제르바이잔 바쿠 (P.75)
②양화대교 (P.76)
③내화실험 후 시험체 형상 (P.19)

사인형 주름웨브의 전단좌굴과 구조설계

(Shear Buckling and Structural Design of Sinusoidal Corrugated Web)

손 수 덕 (Su-Deok Shon), 한국기술교육대학교 건축공학부 연구교수
이 승 재 (Seung-Jae Lee), 한국기술교육대학교 건축공학부 교수
강 주 원 (Joo-Won Kang), 영남대학교 건축학부 교수, kangj@ynu.ac.kr

1. 서 론

강구조물에서 긴 스팬이나 비교적 큰 하중이 작용하는 경우는 스티프너로 보강된 플레이트 거더를 많이 사용한다. 그러나 얇은 웨브는 좌굴에 관한 문제를 본질적으로 내포하고 있으며, 이를 해결하기 위한 대안으로 연구된 것이 주름 웨브이다. 좀 더 거슬러 올라가면 주름판은 영국의 Palmer사에 의해 1829년 특허를 받은 것을 시점으로 여러 분야에 활발한 적용이 시작되었고, JU 52기의 동체 제작에도 활용되었으며, 오늘날에도 컨테이너 혹은 기차나 격납고 문과 같은 구조물에서 주름진 판의 적용은 쉽게 찾을 수 있다. 일반적인 주름웨브를 가진 구조부재의 설계에서는 주름의 아코디언 효과가 중심축을 따라서 발생하므로 플랜지에서는 휨 모멘트를 웨브에서는 단지 전단력만 감당하는 방법으로 설계되어왔다. 과거 기술력 부재로 인한 박판 가공의 현실적인 제작의 어려움은 용접기술의 발전과 더불어 실현 가능하게 되었고, 자동생산기술의 발전으로 가격에서 경쟁력을 가질 수 있게 되었다. 뿐만 아니라 스티프너 없이 웨브를 얇게 설계할 수 있는 장점과 피로성능의 개선은 제작비용의 상승에도 불구하고 가격 면에서 경제성을 유지할 수 있었다. 현재는 유럽 뿐 아니라 국내에서도 주름웨브를 가진 교량이나 철골구조물들이 등장하고 있고, 주름 형상이 주는 전단좌굴의 특성에 대한 설계규준의 확립이나 형상의 정확한 구현 등은 실용적 측면에서 매우 중요한 주제가 되고 있다.

본 기사에서는 사인형 웨브 판에 대한 전단좌굴 해석과정과 좌굴 특성 및 전단설계에 대해서 소개한다. 전단좌굴과 주름웨브 보에 관한 연구 동향에 대해서 기술하고, 전단력이 작용하는 사인파형 판에 대해서 유한요소법을 이용하여 전단좌굴해석과 좌굴응력의 산정 및 국부좌굴과 전체좌굴의 변형모드에 대해서 다루도록 한다. 여기서, 두께를 파라메타로 한 해석결과에서 전체좌굴과 국부좌굴의 변형모드가 어떻게 바뀌는지를 살펴보고, 유럽의 설계기준에 따른 좌굴응력식과 설계제안식의 특성에 대해서도 기술하도록 한다.



그림 1. 주름진 판을 이용한 다양한 구조체

2. 연구동향

건물이나 교량 구조물에 대한 주름의 적용은 원래 항공학에서의 많은 연구 결과물들이 받아들여져 보의 웨브에 적용한 사례로 시작되었고, 유럽, 특히 스웨덴에서는 1960년대 초부터 일반적인 강구조물에 많이 활용되었다. 주름웨브 부재의 개발은 미국에서도 PACO사에 의해 이용되어 웨브에 주름을 넣은 I-단면 형강이 1981년 특허를 받아 제작되었고, 이후 저층구조물을 짓는데 주름판을 이용한 부재들을 많이 이용하였다. 또한, 1980년 이후부터 주름웨브를 이용한 교량의 개발이 프랑

스와 일본에서 진행되어 다양한 형태의 주름웨브 합성보를 건설하였으며, 미국에서도 초고강도 강재를 교량에 활용할 방안으로 주름웨브 교량의 해석과 구조설계 및 요소개발에 대한 다양한 연구가 많이 진행되었다.

주름의 형태에 대해서는 주로 사다리꼴이나 사인형이 가장 많이 설계되고 연구되었다. 그러나 박판의 주름은 사인형 주름파의 파고를 늘리는데 사다리꼴 주름보다 제작상의 한계를 가지게 되므로, 비교적 큰 전단응력이 작용되는 경우에는 사다리꼴 형태를 많이 이용한다. 얇은 두께로 인한 전단좌굴은 웨브의 높이 및 주름 형태에 따라 영향을 받으며, 국부좌굴과 전체좌굴 및 이들의 연성으로 전단좌굴현상이 발생한다. 주름웨브는 주로 전단좌굴거동과 안정성, FE 좌굴해석, 주름웨브보의 횡좌굴, 피로파괴에 대한 웨브의 거동, 주름웨브의 천공, 주름웨브 거더의 플랜지 휨저항, 주름웨브보의 생산 등에 관한 연구가 주를 이루었다. 특히 웨브의 초기 불완전성은 전단좌굴을 발생시키기에 충분히 민감하며, 제작된 주름웨브보의 완전성 및 형태에 대한 좌굴저항능력의 검증은 매우 중요하다.

가장 중요한 주제 중 하나인 전단좌굴에 관한 연구는 Easley (1969)이 직교판 이론을 기초로 탄성좌굴거동을 설명할 수 있는 적합한 해를 연구하였고, 실험을 통해 이를 증명하였으며, 이 후 연구자들은 다양한 형태의 주름웨브의 강재나 콘크리트 거더교의 개발을 위해서 해석과 실험을 거듭하였다. 최근 Abbas(2002)의 연구는 웨브의 국부 및 전체 좌굴에 대한 특성과 제한식을 해석적인 방법으로 다루었으며, 초기 불완전성에 따른 영향도 함께 고려하였다. 이 후, 주름웨브를 이용한 교량의 전단좌굴에 대한 설계범주를 제안하였고, Moon(2009)은 보다 좋은 평가를 할 수 있는 전단좌굴 파라메타와 실제 설계를 위한 설계범주를 주제로 연구하였다. 또한, 원형파형에 대해서도 유한요소 해석과 웨브판에 비해 주름이 주는 강성의 개선에 대해 해석적 방법과 실험적 결과를 비교하였으며, 해석대상이 된 주름은 주로 수직원형과 수평원형이었다. 국내에서도 사인형 주름은 제형 주름에 비해 많지는 않지만 전단좌굴이나 다양한 부재의 내력에 대한 실험적 및 해석적 연구가 진행되고 있다.(한택희 등, 2002; 김성남 등, 2010; 오재열 등, 2011; 지효선, 2011)

주름웨브보의 최적화에 관한 연구에서는 최적단면을 정의하기 위한 Zhang(2010)의 연구 결과물이 있으나 열간압연 WCW(Wholly Corrugated Web) H-형강 단면만이 대상이 되었다. 그의 연구는 편평한 웨브의 H-형강을 바탕으로 WCW H-형강의 최적 파라메타 집합을 구성하고, 주름 파라메타의 영향을 조사하였다. 목적함수는 압축에 대한 안정성이 일반 H-형강에 비해 1.5-2배 가량 높다는 것을 고려하여 등가 좌굴강성으로 구성하였다. 여기서, 주름의 크기가 웨브 두께의 2배에서 4.6배로 제한되는데, 이것은 열간압연 WCW H-형강의 생산에 관한 일반사항을 고려한 것이었다. 그러나 얇은 주름웨브를 편평한 플랜지에 용접한 보의 최적화에는 이와 같은 사항들이 유효하지 않고, 압축부재의 좌굴에 대한 안정성의 확보보다 전단좌굴에 대한 저항능력이 설계의 중요한 결정인자가 된다. 또한 사인형 웨브의 경우는 사다리꼴에 비해 역학적으로 더 우수함에도 불구하고 단지 몇몇 연구자들에 의해서만 연구가 진행되어 왔다. 전단좌굴을 고려한 사인형 주름보의 최적설계는 손수덕 등(2011)에 의해 유전자 알고리즘 기법을 적용하여 연구되었으며, 유럽의 여러 기준들이 검토되었다. 또한, 시공성과 생산부재를 고려한 실용성 위주의 연구도 진행되고 있다.

3. 사인형 주름판의 전단좌굴해석

주름진 판의 경우 전단좌굴응력은 각 파형의 파장, 파고, 두께 및 판형의 가로, 세로 비 등과 같이 많은 파라메타가 영향을 미친다. 유럽의 여러 나라에서는 이미 파형의 형상과 좌굴거동에 대해서 해석적 및 실험적 연구가 많이 수행되었고, 사인파형에 대한 역학적 우수성이 보고되기도 했다. 우선, 사인형 주름웨브의 형상파라메타를 정의하면, 그림 2와 같이 파고($a_3/2$), 파장(w,s) 그리고 웨브의 두께(t_w)로 나타낼 수 있으며, 주름의 길이(s)는 형상함수(y)를 이용하여 구할 수 있다.

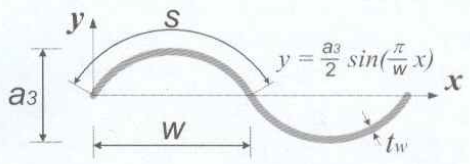


그림 2. 사인형 주름 형상과 형상 파라메타

현재 유럽에서 많이 생산되고 연구되는 사인형 주름 웨브의 형태는 파장의 범위가 $a_3/2 \leq 40$mm, $155\text{mm} \leq 2w \leq 310\text{mm}$ 이며, 사인형 웨브의 전단좌굴에 대해서 연구되고 있다. 주름웨브의 전단좌굴해석과 각 좌굴모드에 대한 좌굴응력들은 주로 탄성범위에서 많이 다루어지며, 좌굴의 형태는 국부좌굴,

전체좌굴 그리고 이들의 연성작용으로 발생되는 좌굴이 보고되고 있다. 여기서, 전단좌굴의 특성을 정의하는 형상 파라메타는 파장, 파고, 두께 및 웨브의 높이 등으로 매우 복잡하다. 본 절에서는 사인형 주름 웨브의 전단좌굴해석 방법에 대해서 살펴보도록 하며, 웨브 판의 두께만을 대상으로 탄성영역에서 좌굴발생 범위를 범용해석 프로그램 ABAQUS를 이용하여 해석하도록 한다. 채택된 형상은 그림 3에서 보는 바와 같은 $a_3/2=40$mm, 2w=155mm, 높이 h=1m의 모델로 두께를 1mm~3mm까지 1mm씩 분할한 모델을 이용하고, 물성치는 $E=2.1\times10^5 MPa$, 포아송 비 $\nu=0.3$이다. 직선 판형의 경우 수직 보강재 설치의 간격에 따라 좌굴 강도가 달라지지만 판의 길이가 길어진다면 판의 전단 좌굴 강도는 일정 길이 이상일 때 최소 전단 좌굴 강도로 수렴하게 된다. 이것은 파형 판형의 경우에도 같아, 판의 길이(L) 가 웨브의 높이(h)의 두 배 이상일 때, 그리고 판의 길이(L)가 반파장의 길이(w)의 6 배 이상일 경우에는 전단 좌굴 강도는 거의 일정한 값에 수렴하므로 이를 고려하여 해석모델의 길이를 채택하였고, 해석결과의 정밀도를 높이기 위해서 요소의 분할을 그림 4와 같이 분할하여 이용하도록 한다. 여기서 이용되는 ABAQUS의 요소는 8절점 쉘요소인 S8R5 요소를 이용하도록 한다.

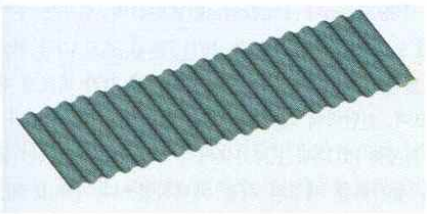


그림 3. 사인형 웨브의 전단좌굴 해석모델

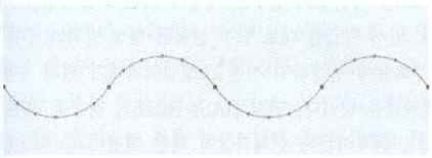


그림 4. 해석모델의 요소분할

전단좌굴에 대한 해석모델의 경계조건과 하중조건은 한택희(2002)의 문헌에서 제시된 방법을 이용하기로 하며, 전체 주름 웨브의 길이가 좌굴 강도에 주는 영향을 고려하여 충분히 큰 값과 파형을 유지하도록 한다. 경계조건의 경우 그림 5와 같이 사면의 경계와 중심라인 및 중앙부 절점에 적용되는 경계조건으로 나누어지며, 표 1에서 나타난 바와 같이 이동변위와 회전변위에 대해서 각각 적용하며, 하중조건도 문헌에서 제시하는 것과 같이 경계면을 따라 적용한다. 이는 순수전단 하에서는 복부판의 경계면을 따라 전단응력이 균일하게 분포한다는 가정을 사용한 것으로 정적 재하 실험 연구에 의해서 사실로 검증되었다.(한택희 등, 2002)

표 1. 해석모델의 경계조건

		4 Edges	Center Line	Center Point
이동변위	X	F	R	R
	Y	R	F	F
	Z	F	F	R
회전변위	X	F	F	F
	Y	F	F	F
	Z	F	F	F

(F: Free, R: Restrained)

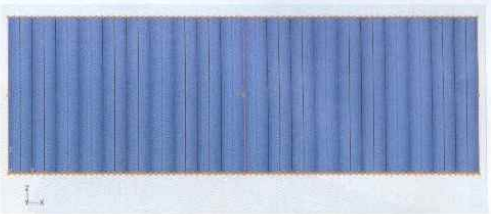


그림 5. 해석모델의 경계조건

해석대상모델의 해석결과에 따른 전단좌굴모드는 그림 6~8과 같다. 그림 6의 경우 주름웨브에서 국부좌굴이 발생하며, 두께가 2mm에서는 조금 달라진다. 그러나 판의 두께가 3.0 mm 모델에서는 전체 좌굴이 확연하게 드러난다. 이 결과는 탄성 좌굴 해석을 한 Pasternak(2004)의 결과와 유사하며, 두 좌굴현상의 범위가 같게 나타난다. 특히, 웨브의 높이 h가 증가할수록 국부좌굴과 전체좌굴의 판의 두께에 관한 경계는 더 감소할 것이며, 높이가 낮아질수록 채택된 형상의 주름 웨브는 국부좌굴의 영향이 더 크게 나타날 것이다. 두 좌굴의 형태는 본 절에서 다룬 것과 같이 두께에 따라 정의하기에는 어려움이 따르는 것은 분명하나 동일한 조건에서의 두께는 전체좌굴의 영향을 구분할 수 있는 형상 파라메타중 하나임에는 분명하다.

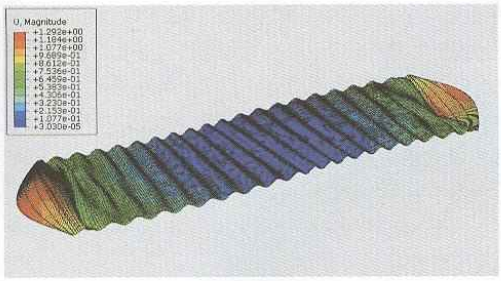


그림 6. 사인형 주름 웨브의 전단좌굴모드 (t_w=1.0mm)

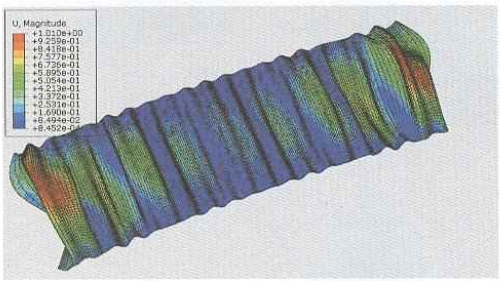


그림 7. 사인형 주름 웨브의 전단좌굴모드 (t_w=2.0mm)

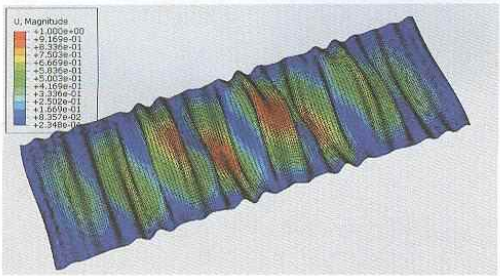


그림 8. 사인형 주름 웨브의 전단좌굴모드 (t_w=3.0mm)

전단좌굴에 대한 좌굴응력의 계산은 한가지 형태로 정의할 수는 없지만 두 좌굴에 대한 좌굴응력식의 경우 앞서 설명한 형상 범위에서의 이상화된 좌굴값으로 EN 1993-1-5과 DASt-R015는 다음 식(1)과 같이 제안하고 있다.

$$\tau_{cr,l} = \left(5.34 + \frac{a_3\, s}{h_w\, t_w}\right) \frac{\pi^2\, E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t_w}{s}\right)^2 \qquad (1a)$$

$$\tau_{cr,g} = \frac{32.4}{t_w h_w^2} \sqrt[4]{D_x\, D_y^3} \qquad (1b)$$

여기서, $\tau_{cr,l}$, $\tau_{cr,g}$은 각각 국부좌굴 및 전체좌굴응력이며, D_x, D_y는 각각의 축에 대한 휨강성이다.

플레이트 거더와는 달리 웨브의 전단좌굴은 주름에 의해서 저항하므로 스티프너가 크게 필요 없다. 특히 얇은 두께에도 비교적 큰 두께의 편평한 웨브와 동일한 성능을 발휘할 수 있어서 다른 보에 비해 무게를 줄일 수 있지만, 안정성에 관한 문제는 반드시 해결해야하며, 주름좌굴의 경우 이상의 특성이 고려된 전단설계가 수반되어야 한다.

4. 사인형 주름웨브의 전단설계기준

미국이나 일본보다 유럽에서 먼저 상용화된 까닭에 주름진 웨브 부재의 설계는 유럽과 독일 규준에 제시되어 있으며, 부재설계에서 주름이 잡힌 웨브는 단지 전단력만 감당하는 방법이 제시되고 있다. 전단력에 대한 설계의 기본적인 방법은 설계전단력이 부재의 전단력을 초과할 수 없으며, 전단좌굴응력에 의해서 감소계수 κ가 결정된다.

$$V_{Sd} \leq V_{Rd} \ (= V_{Rk}/\gamma_M) \qquad (2a)$$

$$V_{Rk} = C \cdot \kappa \cdot f_{y,w} \cdot h_w \cdot t_w \qquad (2b)$$

EN 1993-1-5나 Pasternak(2004)의 경우는 C 값이 $1/\sqrt{3}$으로 정의되고, DASt-R015는 0.35로 각각 정의되어 있다. 또한 감소계수도 좌굴 종류에 따라 각각 다르게 제시하고 있으며, 전단력에 대해 저항하는 설계영역에서 차이가 난다. 특히, DASt-R015나 EN 1993-1-5는 사인형 전단좌굴저항능력을 등가화한 제형의 식을 채택하였으나, DASt-R015의 경우는 제형의 규정만을 제공하고 있으며, EN 1993-1-5에서는 제형 웨브와 등가한 값으로 이상화된 좌굴응력을 제시하고 있다. 또한, 사인형의 경우는 제형과 다른 좌굴특성을 지니고 있으며, 앞서 언급한 대로 일부 선별된 형상 범위의 주름 웨브는 국부좌굴이 발생하기 전에 소성영역파괴가 먼저 수반되는 실험결과들을 얻었다. 먼저 DASt-R015의 경우를 보면 세장비(λ_c)는 국부좌굴과 전체좌굴에 대한 세장비 중 작은값으로 감소계수의 값이 결정된다. 특히 전체좌굴의 경우는 전체좌굴응력이 국부좌굴응력에 비해 0.5배미만이거나 2배를 초과하는 경우는 다른 형태의 세장비식이 제안된다.

$$\kappa = \frac{0.84}{\lambda_c} \leqq 1.0 \qquad (3)$$

여기서,

$$\lambda_c = mim(\lambda_{c,l} : \lambda_{c,g})$$

$$\lambda_{c,l} = \sqrt{\frac{f_{y,w}}{\sqrt{3} \cdot \tau_{cr,l}}}$$

$$\lambda_{c,g} = \begin{cases} \sqrt{\dfrac{2 f_{y,w}}{\sqrt{3}\, \tau_{cr,g}}} & 0.5 \leqq \dfrac{\tau_{cr,g}}{\tau_{cr,l}} \leqq 2.0 \\ \sqrt{\dfrac{f_{y,w}}{\sqrt{3}\, \tau_{cr,g}}} & other \end{cases}$$

EN 1993-1-5의 경우도 유사하지만 감소계수의 식이 국부좌굴과 전체좌굴에 대해 다른값을 제안하고 있지만, 세장비는 동일한 식을 이용하고 있다.

$$\kappa_l = \frac{1.15}{0.9 + \lambda_{c,l}} \leqq 1.0 \qquad (4a)$$

$$\kappa_g = \frac{1.5}{0.5 + \lambda_{c,g}^2} \leqq 1.0 \qquad (4b)$$

여기서,

$$\lambda_{c,l(g)} = \sqrt{\frac{f_{y,w}}{\sqrt{3} \cdot \tau_{cr,l(g)}}}$$

이상의 전단좌굴에 대한 감소인자를 세장비에 따라 살펴보면 국부좌굴의 경우는 그림 9, 전체좌굴의 경우는 그림 10과 같은 관계이다. 그림에서 감소계수와 무차원 좌굴저항응력은 각각 원형과 삼각형으로 표시하였다. 국부좌굴의 경우, EN 1993-1-5의 전단좌굴저항능력은 DASt-R015의 규준보다 감소계수의 영역이 낮음에도 불구하고 실질적으로 높게 평가되었음을 알 수 있다. 전체좌굴의 경우 국부좌굴과 유사하나 EN 1993-1-5는 실질적으로 Pasternak(2004)에서 제시된 곡선과 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 또한 DASt-R015는 전체좌굴응력이 국부좌굴과 비교해 0.5배 이상에서 2배 이하의 모델에서는 감소계수와 설계저항능력이 낮게 평가된다. 이것은 연성좌굴의 발생에 대한 고려로 볼 수 있다.

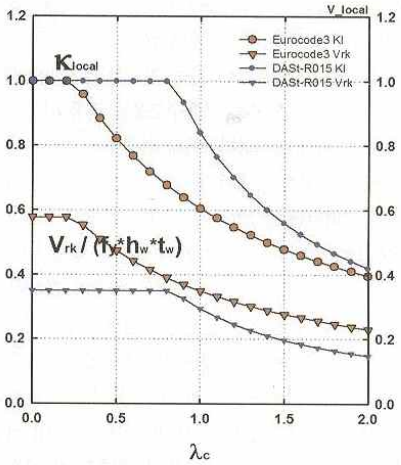


그림 9. 세장비 λ_c 에 관한 감소율 (국부좌굴)

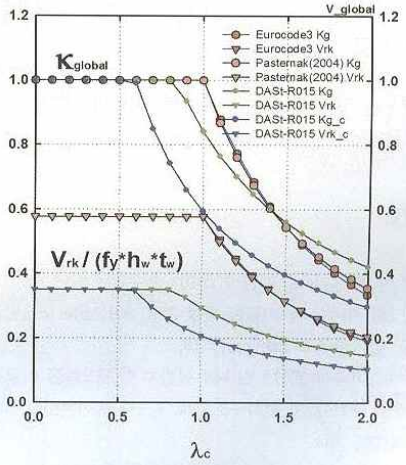


그림 10. 세장비 λ_c 에 관한 감소율 (전체좌굴)

5. 맺음말

플레이트 거더와는 달리 웨브의 전단좌굴은 주름에 의해서 저항하며, 얇은 두께에도 비교적 큰 두께의 편평한 웨브와 동일한 성능을 발휘할 수 있다. 그러나 주름 웨브의 전단좌굴에 대한 안정성이 확보되지 않는다면 박판의 웨브로 인해 매우 심각한 결과를 초래할 수도 있다. 다른 여러 나라의 규정에서도 국부, 전체 및 연성좌굴의 특성과 이들의 설계범위의 제안에

대해서는 매우 많은 연구를 통해서 제안하게 되며, 실험과 해석을 통해서 그 특성을 규명하기에 많은 노력을 하고 있다.

국내의 사인형 주름 웨브에 관한 전단성능의 연구는 제형에 비해서 매우 부족한 편이며, 건축구조물에 적용되는 주름 웨브 보의 설계규준 또한 미비하다. 여러 건축물의 골조에서 사인형 주름웨브 보를 반영한 설계가 등장하고 있으며, 외국의 자동생산기계들의 도입이나 그 밖에 여러 가지 형태의 접근이 활성화 될 시점에 있다. 그러나 경제적인 구조물을 형성하기 위한 아이디어들의 이면에 존재하는 기술적인 배경과 간과하지 말아야 할 취약점들은 상용화와 안전을 위해서는 반드시 규명해야만 하며, 박판의 주름웨브에 대한 전단좌굴의 특성 규명 및 설계기준의 수립은 강구조물에서의 주름형 부재의 활성화와 인프라 구축에 많은 영향을 미칠 것이다. 또한, 국내 현실을 고려한 접합부 및 다양한 요소기술들이 개발은 현 시점에서 볼 때 강구조 부분의 산업발전과 기술 자립에 매우 중요한 역할을 하리라 생각한다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업의 연구비지원(과제번호# 12첨단도시16)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 뉴웬 녹 융, 김성남, 강영종(2010) 순수휨을 받는 사인 파형 복부판 I형 거더의 횡-비틀림 좌굴 강도, 2010년도 학술발표회 논문집, 한국강구조학회, pp.77-78.
2. 손수덕, 이승재(2011) 실수형 유전자 알고리즘을 이용한 사인형 주름 웨브 보의 최적구조설계, 강구조학회논문집, 제23권 5호, pp.581-593.
3. 오재열, 이득행, 김강수, 황진하(2011) 파형보의 아코디온효과에 대한 해석적 연구, 2011년도 학술대회 발표집, 한국강구조학회, pp.285-286.
4. 지효선(2011) 파형 복부판을 갖는 플레이트 거더의 좌굴거동, 강구조학회논문집, 제23권 2호, pp.221-228.
5. 한택희, 임남형, 박남희, 강영종(2002) 원형 파형 판의 탄성전단좌굴 특성, 한국강구조학회 논문집 제14권 4호, pp.529-538.
6. Abbas, H.H., Sause, R., and Driver, R. (2002) Shear Strength and Stability of High Performance Steel Corrugated Web Girders, Proceedings, Structural Stability Research Council, pp. 361-387.
7. DASt-Richtlinie 015 (1990) Träger mit schlanken Stegen, Stahlbau-V., German
8. DIN 18800 (1990) Stahlbauten Teil 1-3, German.
9. Easley, J.T., and McFarland, D.E. (1969) Buckling of Light-gage Corrugated Metal Shear Diaphragms, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 95, No. ST7 pp.1497-1516.
10. EN 1993-1-5 (1993), Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-5 Plated structural elements.
11. Moon, J., Yi, J., Choi, H.H., and Lee, H.E. (2009) Shear Strength and Design of Trapezoidally Corrugated Steel Webs, Journal of Constructional Steel Research, vol. 65, pp.1198-1205.
12. Pasternak, H., and Hannebauer (2004) 4. Träger mit profilierten Stegen, Stahlbau Kalender 2004, Ernst & Shon, German, pp.449-492.
13. Siokola, W. (1999) Wellstegträger Technische Dkumentation, 2. Auflage, Zeman & Co Gesellschaft mbH, Wien.
14. Zhang, W., Li, Y., Zhou, Q., Qi, X., and Widera, G.E.O. (2000) Optimization of the Structure of an H-beam with either a Flat or a Corrugated Web: Part3. Development and Research on H-beams with Wholly Corrugated Webs, Journal of Materials Processing Technology, vol. 101 pp.119-123.

ABAQUS를 이용한 주름판의 전단좌굴해석과 경계조건

Shear Buckling Analysis and Boundary Condition of Corrugated Plate by Using ABAQUS

유 미 나* 손 수 덕** 이 승 재*** 하 준 홍**** 강 주 원*****
Yoo, Mi Na Shon, Su Deok Lee, Seung Jae Ha, Jun Hong Kang, Joo Won

*Doctor' s Course, Architectural Eng., Korea University of technology and Education, Cheonan, mina39555@gmail.com
**Research Professor, Architectural Eng., Korea University of technology and Education, Cheonan, Republic of Korea, sdshon@koreatech.ac.kr
***Professor, Architectural Eng., Korea University of technology and Education, Cheonan, Republic of Korea, leeseung@koreatech.ac.kr
****Professor, Faculty of Liberal Arts, Korea University of technology and Education, Cheonan, Republic of Korea, hjh@koreatech.ac.kr
*****Professor, School of Architecture, Yeongnam University, Gyeongsan, Republic of Korea, kamgj@ynu.ac.kr

There is a limit to the representation of finite element analysis modeling of the pure shear of corrugated plate. However, if the shear force is applied to the corrugated plate, the set of appropriate boundary can be obtained to the nearest theory value. In this study compared Shear buckling strength about each boundary condition with the plate shear theory. And then each boundary condition applied to sinusoidal corrugated plate, evaluate convergence of the mini mum shear buckling strength of each boundary condition and shear buckling flow was observed through shear buckling mode shape.

INTRODUCTION

주름판 - 주름형상으로 가공된 판으로 아코디언과 같은 신축하는 성질을 가지고 있어 평판보다 높은 면외방향 강성을 갖기 때문에 수직전단 보강재를 생략할 수 있고, 얇은 판을 사용할 수 있어 경제적인 장점을 가짐.
아코디언효과와 같은 기하학적 특성으로 인해, 보의 웨브에 주름판을 활용할 경우 휨모멘트를 웨브에서 전단력으로 감당하는 방법으로 설계하는데 유용.



[아코디언 효과]

주름판의 해석적 연구에서 순수전단을 받는 상황을 유한요소 해석으로 모사하기 위한 경계조건이 불분명하여 설계자에 따라 상이하게 적용될 수 있으며 이로 인해 다른 결과를 얻을 수 있음.

유한요소해석을 이용하여 정현파형 주름판의 전단좌굴특성 및 전단좌굴거동을 파악하기 위한 적정 경계조건을 제안

BUCKLING THEORY

가정

1. 전단변형을은 무시할 수 있다.
2. Z방향의 응력과 변형을은 무시할 수 있다.
3. 판형의 단면은 원래의 형상을 유지한다.
4. 판형의 재료는 등질, 등방성이며, Hooke의 법칙을 따른다.

평판의 순수전단좌굴 미분 방정식

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^4}+2\frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2}+\frac{\partial^4 w}{\partial y^4}=\frac{1}{D}[q+N_x\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+N_y\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+2N_{xy}\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}]$$

$$D=\frac{Et_w^3}{12(1-\nu^2)}$$; 단위 두께당 판의 휨강도

좌굴응력

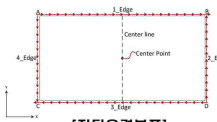
$$\sigma_{cr}=\frac{k\pi^2 E}{12(1-\nu^2)}(\frac{t}{b})^2 \qquad k_v=5.35+\frac{4.0}{(\frac{a}{h})^2}\ ;\ \frac{a}{h}>1$$

R.V.Southwell의 순수전단좌굴계수의 정해

$\frac{a}{h}$	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.5	3.0	4.0
k_v	9.34	8.0	7.3	7.0	6.8	6.6	6.1	5.9	5.7

BOUNDARY CONDITION

평판의 순수전단좌굴 이론식의 정해와 가까운 해석 값을 갖는 경계조건을 찾아내기 위해 주름판의 전단좌굴하중 산정에 관한 연구에서 이용되어진 경계조건과 본 연구에서 제시하는 경계조건을 설정하여 해석을 실시
Case A : 한택희 논문에서 제시한 조건, 각 모서리와 중심선, 중앙점에 경계조건
Case B : 이승룩 논문에서 제시한 조건, 각 모서리와 꼭짓점에 경계조건
Case C, Case D : 순수전단(Pure shear)을 각 모서리에 경계조건
Case E, Case F : 단순전단(Simple shear)을 각 모서리에 경계조건



[전단응력분포]

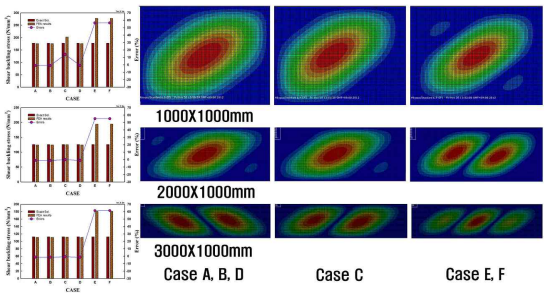
	구분		1,2,3,4_Edge	Center line (A-C)	Center point (D)
A (B)	Translation	X	Free	Fix	Fix(Free)
		Y	Free	Free	Fix
		Z	Fix	Free	Free
	Rotation	X	Free	Free	Free
		Y	Free	Free	Free
		Z	Free	Free	Free

	구분		1_Edge	2_Edge	3_Edge	4_Edge
C (D)	Translation	X	Fix	Free	Fix	Free
		Y	Free	Free	Free	Fix
		Z	Fix	Fix	Fix	Fix
	Rotation	X	Free	Free	Free	Free
		Y	Free	Fix(Free)	Free	Free
		Z	Free	Fix(Free)	Free	Free

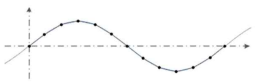
	구분		1_Edge	2_Edge	3_Edge	4_Edge
E (F)	Translation	X	Fix(Free)	Fix(Free)	Fix	Fix(Free)
		Y	Free(Fix)	Free(Fix)	Free(Fix)	Fix
		Z	Fix	Fix	Fix	Fix
	Rotation	X	Fix	Free	Fix	Free
		Y	Free	Fix	Free	Fix
		Z	Free	Free	Free	Free

BUCKLING OF PLATE

Case A, Case B, Case D은 길이가 1000mm이상일 때 정해와의 차이가 평균2%이하의 오차를 보임.
Case C의 경우 판의 길이가 1000mm일 때 정해와 10%이상의 차이를 보이나, 2000mm이상에서 1%이하의 오차로 정해와 가장 가까운 값을 얻음
Case E, Case F는 모든 결과에서 정해와의 차이가 55%이상의 오차를 나타내며, 좌굴형상의 차이로 전단좌굴모드를 해석하는데 부적합한 조건에 해당됨을 알 수 있음.

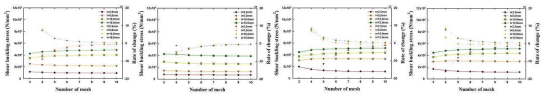


BUCKLING OF CORRUGATED PLATE

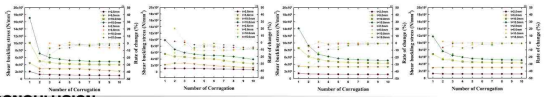


	기호	치수(mm)
파형길이	w	77.5
파형깊이	a_3	40
판의 높이	A	500
판의 폭	B	1550
판의 두께	t_w	2.5, 5.0, 10.0, 15.0

파형 길이에 따라 공통적으로 두께가 증가함에 따라 좌굴응력이 증가하는 경향을 보이며 두께와 경계조건에 상관없이 분할 수 8개 이상에서 감소율의 변화가 작아지며 값이 수렴
따라서 반 파형을 8개 이상의 요소로 구성한다면 매우 근소한 오차 범위내의 전단 좌굴 응력 값을 얻을 수 있는 충분한 곡선의 거동을 표현할 수 있을 것으로 사료됨



경계조건에 관계없이 주름수가 증가할수록 최소전단좌굴강도에 수렴
Case A와 Case B의 전단좌굴강도 수렴도에 비해 Case C와 Case D의 전단좌굴강도 수렴도가 주름수의 증가에 대해 일정하게 수렴
Case C, Case D의 경우는 비교적 가로세로비율이 큰 모델의 전단좌굴응력을 계산할 경우 적용 가능한 경계조건으로 사료됨



CONCULUSION

1) 판형의 경계조건에 따른 해석결과는 정해와 비교하였을 때, Case A, B, C, D의 경우 정해와 가까운 값을 얻을 수 있었으나, Case E, F는 정해와의 차이가 55%이상의 오차를 나타내어 부적합한 조건임을 알 수 있다.
2) 정현파형 주름판에서 두께가 증가함에 따라 좌굴응력이 증가하는 경향을 보인다.
3) 정현파형 주름판에서 경계조건에 상관없이 요소분할 수가 8개 이상을 구성한다면 매우 근소한 오차 범위내의 전단 좌굴 응력 값을 얻을 수 있다.
4) 정현파형 주름판에서 경계조건 Case C, D의 전단좌굴강도 수렴도가 주름수의 증가에 대해 일정하게 수렴하는 것을 볼 수 있으며 이는 비교적 가로세로비율이 큰 모델의 전단좌굴응력을 계산할 경우 적용 가능한 경계조건으로 생각된다.

KOREATECH . ERS
KOREA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY AND EDUCATION — EARTHQUAKE RESISTANT STRUCTURE LAB
KOREATECH KOREA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY & EDUCATION

4-4. 파라메트릭 스터디를 통한 정현파형강판의 전단좌굴응력 변화 특성

파라메트릭 스터디를 통한 정현파형강판의 전단좌굴응력 변화 특성

Shear Buckling Stress Characteristics of sinusoidal corrugated plate usiong Parametric Study

손 수 덕 Shon, Su deok | 유미나 Yoo, Mi Na | 이 승 재 Lee, Seung jae | 강주원 Kang, Joo Won

*Research Professor, Architectural Eng., Korea University of technology and Education, Cheonan, Republic of Korea, sdshon@koreatech.ac.kr
**Ph.D Student, Architectural Eng., Korea University of technology and Education, Cheonan, mina39555@gmail.com
***Professor, Architectural Eng., Korea University of technology and Education, Cheonan, Republic of Korea, leeseung@koreatech.ac.kr
****Professor, School of Architecture, Yeongnam University, Gyeongsan, Republic of Korea, kamgj@ynu.ac.kr

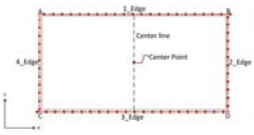
Corrugated plate is made that the local buckling, global buckling and interactive buckling occurs because of the geometric properties suchas the accordion effect. Corrugated steel having such characteristics is shows a buckling characteristic different from the plate. However, it was a design by the basis of the shear buckling equation of plate. Therefore, this study was investigate the characteristics of the shear buckling mode and shear buckling stress of sinusoidal corrugated plate through a parametric study using the finite element method.

서 론

파형강판 – 아코디언 효과와 같은 기하학적 특성으로 전단력은 웨브가 부담하고 휨모멘트는 플랜지가 부담하는 방법으로 설계하는데 유용
그러나 이러한 기하학적 특성으로 인해 국부좌굴, 전체좌굴, 이들의 연성에 의해 발생하는 연성좌굴의 복잡한 좌굴 형상이 발생
이러한 특성을 갖는 파형강판은 웨브의 높이, 주름의 폭 등의 파라메타에 영향을 받아 평판과는 다른 좌굴 특성을 나타내지만, 전단좌굴 응력을 분석하기 위한 이론식은 기존의 평판에 대한 전단좌굴 식을 바탕으로 하는 보수적인 설계가 이루어지고 있는 실정, 정확한 전단좌굴의 특성을 정의하고 예측하는데 어려움을 갖음

유한요소법을 이용한 파라메트릭 스터디를 통해 정현파형강판의 전단좌굴응력 및 전단좌굴모드의 특성을 파악하고자 함.

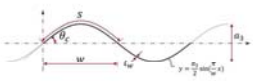
경계조건



B.C		1_Edge	2_Edge	3_Edge	4_Edge
Translate	X	Fix	Free	Fix	Free
	Y	Free	Free	Free	Fix
	Z	Fix	Fix	Fix	Fix
Rotation	X	Free	Free	Free	Free
	Y	Free	Fix	Free	Free
	Z	Free	Fix	Free	Free

해석 조건

Shape and parameter of sinusoidal corrugation



$$s = \int_0^w \sqrt{1 + \left\{\frac{a_3\pi}{2w}\cos\left(\frac{\pi}{w}x\right)\right\}^2}\,dx$$

$$I_x = \int_0^w \left[\frac{t_w^3}{12} + t_w^2\left\{\frac{a_3}{2}\sin\frac{\pi}{w}x\right\}^2\right]dx$$

SHAPE OF SINUSOIDAL CORRUGATION		PARAMETER OF SINUSOIDAL CORRUGATION	
Full name	Size	Full name	Size
Element mesh	8	Wave length (w)	77.5mm, 116.25mm, 155mm
Aspect ratio	4:1	Wave depth (a_3)	20mm, 30mm, 40mm
Plate height (h)	500mm, 1000mm, 1500mm	Plate thickness (t_w)	0.2mm – 5.0mm interval 0.2mm

PARAMETRIC STUDY 변수표

변수	w(mm)	h(mm)	L(mm)	W
길이	77.5	500	2015	13
		1000	4030	26
		1500	6045	39
	116.25	500	2092.5	9
		1000	3952.5	17
		1500	6045	26
	155	500	1860	6
		1000	4030	13
		1500	5890	19

a3=20mm

변수	w(mm)	h(mm)	L(mm)	W
길이	77.5	500	2015	13
		1000	4030	26
		1500	6045	39
	116.25	500	2092.5	9
		1000	3952.5	17
		1500	6045	26
	155	500	1860	6
		1000	4030	13
		1500	5890	19

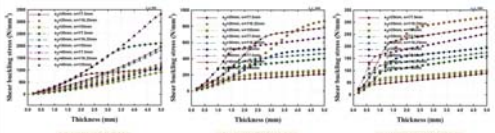
a3=30mm

변수	w(mm)	h(mm)	L(mm)	W
길이	77.5	500	2015	13
		1000	4030	26
		1500	6045	39
	116.25	500	2092.5	9
		1000	3952.5	17
		1500	6045	26
	155	500	1860	6
		1000	4030	13
		1500	5890	19

a3=40mm

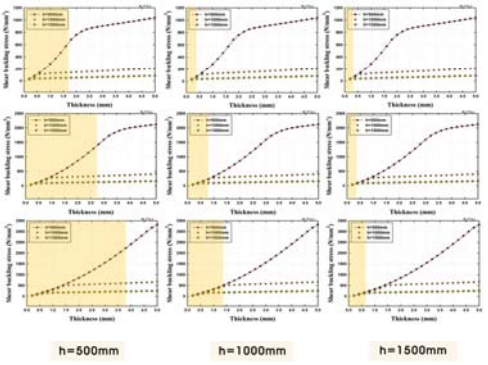
해석 결과

판 높이 별 해석 결과

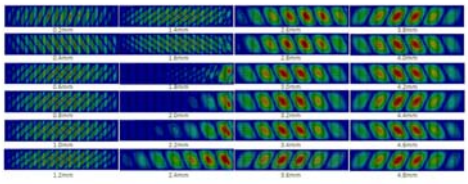


h=500mm | h=1000mm | h=1500mm

주름의 깊이 별 해석 결과 및 형상



h=500mm | h=1000mm | h=1500mm



a3=20mm, w=77.5mm, h=500mm

결론

두께가 증가할수록 전단좌굴응력이 증가하는 일반적인 경향을 나타냄
주름의 깊이가 깊을수록 전단좌굴응력이 크게 나타남
좌굴응력변화곡선에서 변곡점이 발생한 이후 전단좌굴응력의 증가율이 감소
해석 형상을 통해 얇은 판에서 국부좌굴이 발생하고, 두꺼운 판에서 전체좌굴이 발생하며, 그 사이에서 연성좌굴이 발생하는 형상의 변화를 확인
주름의 깊이를 20mm, 40mm로 해석한 결과 주름의 깊이가 깊을수록 국부좌굴의 범위가 증가하며, 여섯번째로 변곡점에서 연성좌굴이 발생한다고 하였을때, 주름의 길이가 길어질수록 연성좌굴의 범위가 증가하는 것을 확인

KOREA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY AND EDUCATION – EARTHQUAKE RESISTANT STRUCTURE LA

주름판의 형상에 따른 전단좌굴특성 비교 연구

A Comparative Study on the Shear Buckling Characteristics of corrugated plate according to shape

유 미 나 Yoo, Mi Na　　손 수 덕 Shon, Su deok　　이 승 재 Lee, Seung jae

*Ph.D Student, Architectural Eng., Korea University of technology and Education, Cheonan, mina39555@gmail.com
**Research Professor, Architectural Eng., Korea University of technology and Education, Cheonan, Republic of Korea, sdshon@koreatech.ac.kr
***Professor, Architectural Eng., Korea University of technology and Education, Cheonan, Republic of Korea, leeseung@koreatech.ac.kr

Corrugated steel plates have been used in civil engineering applications such as buildings and bridges, and many studies. These corrugated plate has geometrical characteristic – accordion effect. This study analyzed the elastic shear buckling about geometric parameters of sinusoidal and trapezoidal corrugated plate.

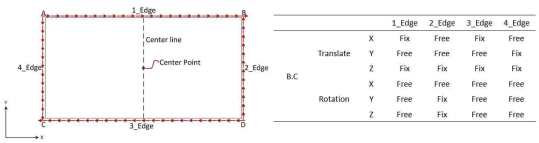
서 론

파형강판은 사용위치에 따라 형상을 다양하게 변형할 수 있는 장점과 판에 변형을 주어 강성을 극대화 시킬수 있는 장점이 있기 때문에 많은 분야에서 이용.
파형강판은 주로 제형, 정현, 원형 등의 형상을 이루며, 이를 플레이트거더의 웨브로 사용할 경우 아코디언 효과의 고유한 특성으로 웨브가 전단력만을 부담하여 평판보다 높은 전단강성을 갖음. 또한 평판보다 높은 면외강성을 가지고 있어 스티프너를 사용하는 일반거더에 비해 상부자중을 30~60%정도 줄여 경제적인 장점을 갖음

파형강판의 연구는 주로 강성산정, 파형강판의 이음, 전단좌굴강도 산정을 위한 경계조건 등 주로 제형강판이나 정현강판에 관한 연구가 많이 진행되고 있으나 제형강판과 정현강판의 전단좌굴 강도의 비교에 관한 연구는 미흡한 실정

파형 길이 및 파형의 접선각도 등의 동일 단면파라메타를 갖는 정현 및 제형파형강판의 전단좌굴특성을 해석적 방법으로 접근하여 전단좌굴거동을 비교 분석

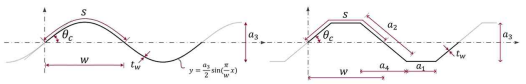
경계 조건 및 해석 조건



		1_Edge	2_Edge	3_Edge	4_Edge
B.C	Translate X	Fix	Free	Fix	Free
	Translate Y	Free	Free	Free	Fix
	Translate Z	Fix	Fix	Fix	Fix
	Rotation X	Free	Free	Free	Free
	Rotation Y	Free	Fix	Free	Free
	Rotation Z	Free	Fix	Free	Free

LOADING CONDITION & BOUNDARY CONDITION

Shape and parameter of corrugation



SHAPE OF SINOSOIDAL CORRUGATION　　SHAPE OF TRAPEZOIDAL CORRUGATION

w(mm)	a_3(mm)	s(mm)	h(mm)	$L(ea)$
77.5	20	80.59	500	13
			1000	26
			1500	39
116.25	20	118.34	500	9
			1000	17
			1500	26
155	20	156.58	500	6
			1000	13
			1500	19

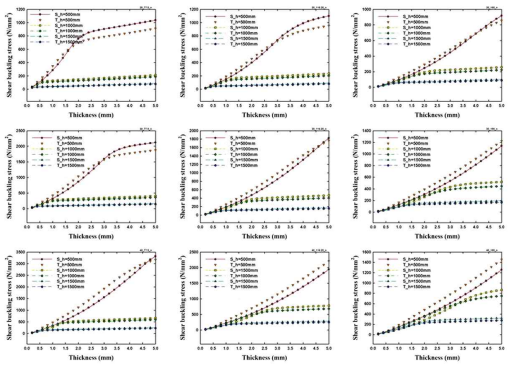
PARAMETER INFORMATION OF SINOSOIDAL CORRUGATION

w(mm)	a_1(mm)	a_2(mm)	a_3(mm)	a_4(mm)	s(mm)	h(mm)	$L(ea)$
77.5	38.3	42.30	15.9	39.2	80.59	500	13
						1000	26
						1500	39
116.25	58.05	60.29	15.74	58.2	118.34	500	9
						1000	17
						1500	26
155	77.4	79.18	15.74	77.6	156.58	500	6
						1000	13
						1500	19

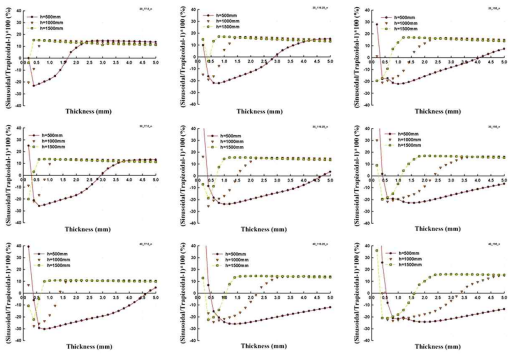
PARAMETER INFORMATION OF TRAPEZOIDAL CORRUGATION

해석 결과

두께변화에 따른 전단좌굴응력 비교



h=500mm　　h=1000mm　　h=1500mm



h=500mm　　h=1000mm　　h=1500mm

결론

파장길이 별 전단좌굴응력 그래프에서 그래프의 좌측의 변곡점 전은 정현파형강판의 전단좌굴응력이 제형파형강판의 전단좌굴응력보다 크게 나타나며 변곡점 이후 정현파형의 전단좌굴응력이 제형파형의 전단좌굴응력보다 작게 나타남

전단응력차이 비율 그래프와 전단좌굴응력 그래프를 비교하였을 때 좌굴응력 비교 그래프의 정현파형곡선과 제형파형곡선의 교차점에서 두 형상의 비율이 -값에서 +값으로 이동하면서 정현파형강판의 좌굴응력이 교차점 이후 증가
→ 교차점을 전후로 좌굴형상의 변화가 예상

파장의 길이와 각도가 동일한 두 형상을 비교하였을 때 제형파형이 국부좌굴에 강하고 정현파형 강판이 전체좌굴에 강함

KOREATECH . ERS
KOREA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY AND EDUCATION — EARTHQUAKE RESISTANT STRUCTURE LAB
KOREATECH KOREA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY & EDUCATION

주름보를 이용한 양단고정보의 최소중량설계

The Minimum Weight design of fixed beam using corrugated web

유미나 Yoo, Mi Na | 손수덕 Shon, Su Deok | 강주원 Kang, Joo-Won | 박상욱 Park, Sang-Wook | 이영락 Lee, Young-Rak

*Ph.D Student, Architectural Eng., Korea University of technology and Education, Cheonan, mina39555@gmail.com
**Research Professor, Architectural Eng., Korea University of technology and Education, Cheonan, Republic of Korea, sdshon@koreatech.ac.kr
***Professor, School of Architecture, Yeongnam University, Gyeongsan, Republic of Korea
****Master's Course, School of Architecture, Yeongnam University, Gyeongsan, Republic of Korea

This study conducted the minimum weight optimum design using the differential evolution and genetic algorithm of simple structure. And then, the optimization program was verified with the numerical analysis examples of fixed beams. As a result, the graphs of these two optimization programs increased similarly.

서 론

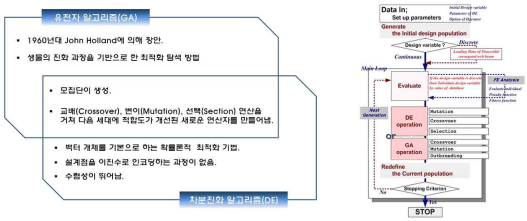
파형강판



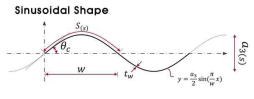
단순구조물의 최소중량설계를 위해 유전자알고리즘과 차분진화 알고리즘을 이용한 전역최적화를 수행, 수행한 두 결과를 하중에 따른 최소중량 그래프로 나타내어 두 알고리즘의 최적해 수렴성을 비교

최적화 기법

유전자 알고리즘(GA)과 차분진화알고리즘(DE)



정현형(Sinusoidal)형상과 파라메타 및 전단좌굴 이론식

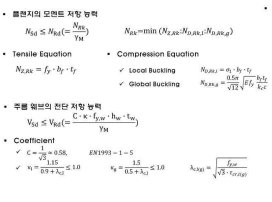


$$s = \int_0^w \sqrt{1 + \left\{\frac{a_3\pi}{2w}\cos\left(\frac{\pi}{w}x\right)\right\}^2}\,dx$$

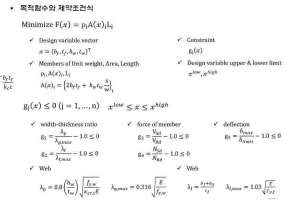
$$I_x = \int_0^w \left[\frac{t_w^3}{12} + t_w^2\left\{\frac{a_3}{2}\sin\frac{\pi}{w}x\right\}^2\right]dx$$

	Local Buckling ($\tau_{cr,l}$)	Global Buckling ($\tau_{cr,g}$)
전단좌굴이론식	$\tau_{cr,l} = \frac{km^2E}{12(1-\mu^2)}\left(\frac{t}{S_{(x)}}\right)^2$ $k = 5.35 + 4\left(\frac{S_{(x)}}{h}\right)^2$	$\tau_{cr,g} = 36.2\frac{D_x^{1/4}D_y^{3/4}}{th^2}$ $D_x = \frac{Et^3}{12(1-\mu^2)}\frac{w}{S_{(x)}}$ $D_y = \frac{EA_f}{w}$

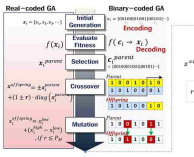
플랜지 및 웨브 설계방법



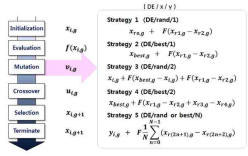
목적함수와 제약조건식



GA 연산자 Flowchart



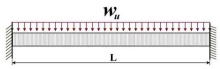
DE 연산자 Flowchart



해석결과

양단고정보 등분포하중 Modeling

- 모델링



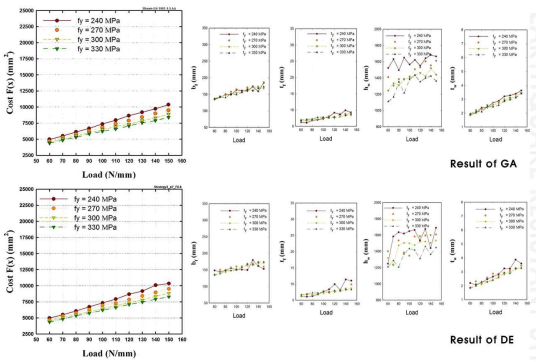
$10\text{mm} \le b_f(\text{or } h_w) \le 3000\text{mm}$

$1\text{mm} \le t_f(\text{or } t_w) \le 300\text{mm}$

- Model Information
  - ✓ $E = 210000MPa$, $V = 0.3$
  - ✓ $f_{y(f)} = 240MPa$
  - ✓ $f_{y(w)} = 240MPa$
  - ✓ $L = 10000mm$
  - ✓ $a_3 = 40mm$, $w = 77.5mm$
  - ✓ $Uniform\ load(w) = 60 - 150N/mm$ 10 intervals

- Algorithm Information
  - ✓ Population Size: 7 (DE), 200 (GA)
  - ✓ Generation Size: 500 (DE), 10000 (GA)
  - ✓ Operator: F=0.8, Cr=0.9 (DE); P_c=0.125, P_m=0.2, dx=0.001 x^d (GA)

양단고정보 등분포하중 최적중량 및 설계변수 결과



결론

- 유전자 알고리즘과 비교해 보았을 때 차분진화 알고리즘의 Strategy 2의 Population 7일 때 값이 가장 좋은 수렴속도를 보임
- 차분진화 알고리즘(DE)이 유전자 알고리즘(GA) 보다 수렴속도가 더 빠름
- 설계변수의 변화에서 웨브의 두께가 최적 중량의 증가와 유사한 경향을 보임

KOREATECH · ERS
KOREA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY AND EDUCATION — EARTHQUAKE RESISTANT STRUCTURE LAB
한국기술교육대학교 KOREA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY & EDUCATION

파형강판의 형상에 따른 탄성전단좌굴 특성 분석 연구

Analysis on the Elastic Shear buckling Characteristics in accordance with corrugation shape of Corrugated steel plate

유미나 Yoo, Mi Na | 손수덕 Shon, Su Deok | 이돈우 Lee, Don Woo | 이 승 재 Lee, Seung jae | 유유진 Yu, Yu-Jin

*Ph.D Student, Architectural Eng., Korea University of technology and Education, Cheonan, mina39555@gmail.com
**Research Professor, Architectural Eng., Korea University of technology and Education, Cheonan, Republic of Korea, sdshon@koreatech.ac.kr
***Master's Course, Architectural Eng., Korea University of technology and Education, Cheonan, lov1004ely@koreatech.ac.kr
****Professor, Architectural Eng., Korea University of technology and Education, Cheonan, Republic of Korea, leeseung@koreatech.ac.kr
****Master's Course, School of Architecture, Yeongnam University, Gyeongsan, Republic of Korea, skud2000@naver.com

This study compares the buckling characteristics of corrugation shapes and analyzes them. To do this, I adopt the equal-length trapezoidal corrugation and sinusoidal one for the analytical models, and analyze the shear buckling characteristics through linear buckling analysis and on its theory. According to the analysis results, interactive buckling mode appears on the boundary of local buckling and global bucking in trapezoidal corrugation. However, in the case of corrugated steel plates with sinusoidal configuration, interactive buckling mode appears in the part where global bucking takes place. Besides, trapezoidal shapes works for shear buckling in the local buckling section, and sinusoidal shapes does in the global buckling section

서 론

▣ 파형강판

주로 제형(Trapezoidal), 정현형(Sinusoidal), 원형(Circularly)으로 가공주름으로 인해 전단강성을 향상시키고 주름방향으로 유연성을 주어 이방성재료와 같이 취급
구조물의 경량화를 유지하면서 하중부하능력을 개선
경량인 파형강판의 사용으로 자중을 경감하므로 상부구조뿐만 아니라 기초 및 하부구조에서의 하중 부담을 감소
그러나 이러한 기하학적 특성으로 인해 국부좌굴, 전체좌굴, 이들의 연성에 의해 발생하는 연성좌굴의 복잡한 좌굴 형상이 발생
파형강판에 대한 연구는 대부분 한가지 형상의 변수분석에 대한 연구이며 파형의 변화에 따른 전단강도 및 거동에 대한연구는 미흡

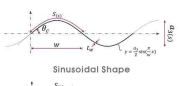
동일한 자중을 갖는 제형 및 정현형 형상의 전단좌굴강도를 비교하고 전단좌굴의 형태에 따른 두 형상의 특성과 경향성을 분석

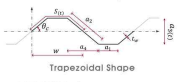
전단좌굴이론 및 파형강판 형상

▣ 전단좌굴이론식

	Sinusoidal	Trapezoidal
Local Buckling ($\tau_{cr,l}$)	$\tau_{cr,l}=\frac{k\pi^2E}{12(1-\nu^2)}(\frac{t}{S_{(s)}})^2$, $k=5.35+4(\frac{S_{(s)}}{h})^2$	$\tau_{cr,l}=\frac{k\pi^2E}{12(1-\nu^2)}(\frac{t}{a})^2$, $k=5.34$, $a=Max(a_1,a_2)$
Global Buckling ($\tau_{cr,g}$)	$\tau_{cr,g}=36.3\frac{D_x^{1/4}D_y^{3/4}}{th^2}$, $D_x=\frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}\frac{w}{S_{(s)}}$, $D_y=\frac{EI_y}{w}$	$\tau_{cr,g}=k_g\frac{D_x^{1/4}D_y^{3/4}}{th^2}$, $D_x=\frac{b_0}{2S_{(t)}}\frac{Et^3}{12}$, $D_y=\frac{EI_y}{b_0}$, $b_0=2a_1+2a_4$, $I_y=2a_1t(\frac{a_4\tan\theta_c}{2})^2+2t\frac{a_4^2(\tan\theta_c)^2}{12\cos\theta_c}$
Interactive Buckling($\tau_{cr,I}$)	$\frac{1}{\tau_{cr,I}}=\frac{1}{\tau_{cr,l}}+\frac{1}{\tau_{cr,G}}$	

▣ 파형강판 형상



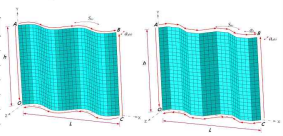


a_1: 수평 패널폭 (mm)
a_2: 경사 패널폭 (mm)
$a_{3(t)}$: 제형 파고 (mm)
$a_{3(s)}$: 정현파형 파고 (mm)
a_4: 경사패널 x축 사영 길이(mm)
w: 반파장의 길이(mm)
θ_c: 골형각도 (deg)
$S_{(t)}$: 제형의 반파장 곡선 길이 (mm)
$S_{(s)}$: 정현파형의 반파장 곡선 길이 (mm)

▣ 경계조건

		$\overline{AB}$	$\overline{BD}$	$\overline{CD}$	$\overline{AC}$
Translation	X	Fix	Free	Fix	Free
	Y	Free	Free	Free	Fix
	Z	Fix	Fix	Fix	Fix
Rotation	X	Free	Free	Free	Free
	Y	Free	Fix	Free	Free
	Z	Free	Fix	Free	Free

▣ 하중조건



▣ 해석모델 일람표

Sinusoidal Shape

w	$a_{3(s)}$	$S_{(s)}$	h	L
77.5	20	80.59	500	13
	30	84.23	1,000	26
	40	88.99	1,500	39
116.25	20	118.34	500	9
	30	120.89	1,000	17
	40	124.32	1,500	26
155	20	156.58	500	6
	30	158.52	1,000	13
	40	161.18	1,500	19

Trapezoidal Shape

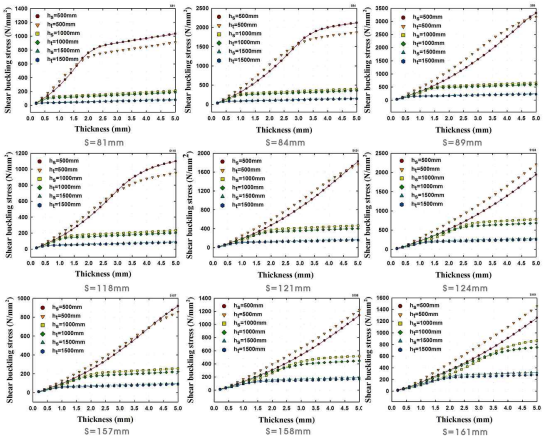
w	a_1	$a_{3(t)}$	a_4	$S_{(t)}$	h	L
77.5	38.3	15.9	39.2	80.59	500	13
		24.0		84.22	1,000	26
		32.4		88.67	1,500	39
116.25	58.1	15.7	58.2	118.34	500	9
		23.8		120.88	1,000	17
		31.9		124.15	1,500	26
155	77.4	15.74	77.6	156.58	500	6
		23.68		158.52	1,000	13
		31.7		161.2	1,500	19

▣ 좌굴형상

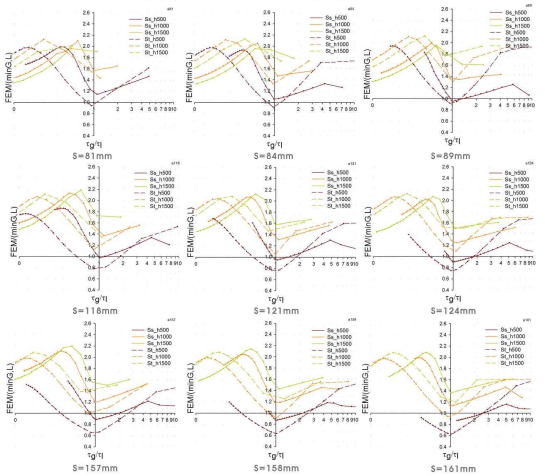


해석 결과

▣ 두께변화에 따른 반파장곡선길이별 전단좌굴응력 변화곡선



▣ 반파장곡선길이별 전단좌굴응력 경향성 곡선



결론

▣ 정현형 및 제형강판은 두께가 증가함에 따라 전단좌굴응력은 증가하며, 일정한 증가이후에 감소하는 유사한 경향 및 전단좌굴응력 증가율이 감소하는 구간에서 연성좌굴형상이 발생하는 유사한 경향이 나타남.

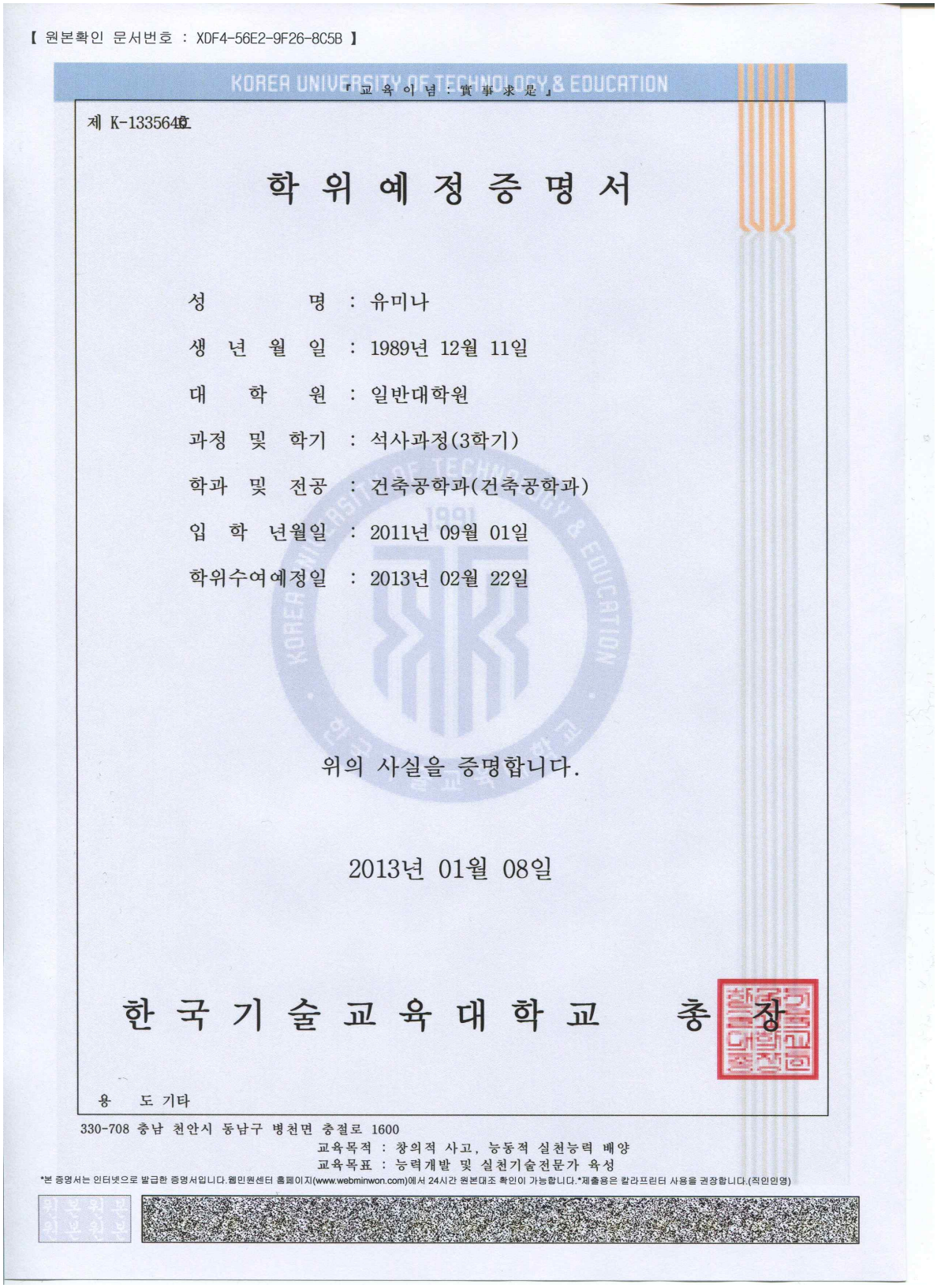
▣ 이론비를 이용하여 경향성을 분석한 결과, 제형의 경우 0.5<X<1 구간에서 연성좌굴형상이 발생하나, 정현형의 경우 X<1구간에서 모두 연성좌굴이 발생, 두 형상의 연성좌굴의 범위를 비교하였을 때 제형의 연성구간이 더 넓게 나타남.

▶제형의 경우 기존의 연성좌굴 이론식으로 좌굴모드의 범위를 예측할 수 있으나 정현형의 경우 좌굴모드를 예측하기 어려움을 예상.

KOREATECH . ERS
KOREA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY AND EDUCATION — EARTHQUAKE RESISTANT STRUCTURE LAB
한국기술교육대학교 KOREA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY & EDUCATION

5. 분야별 인력 양상 배출 실적

5-1. 학위예정증명서 : 유미나



【 원본확인 문서번호 : XDF4-56E2-9F26-8C5B 】

KOREA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY & EDUCATION

「교육이념 : 實事求是」

제 K-133564호

학 위 예 정 증 명 서

성 명 : 유미나

생 년 월 일 : 1989년 12월 11일

대 학 원 : 일반대학원

과정 및 학기 : 석사과정(3학기)

학과 및 전공 : 건축공학과(건축공학과)

입 학 년월일 : 2011년 09월 01일

학위수여예정일 : 2013년 02월 22일

위의 사실을 증명합니다.

2013년 01월 08일

한 국 기 술 교 육 대 학 교 총 장

용 도 기타

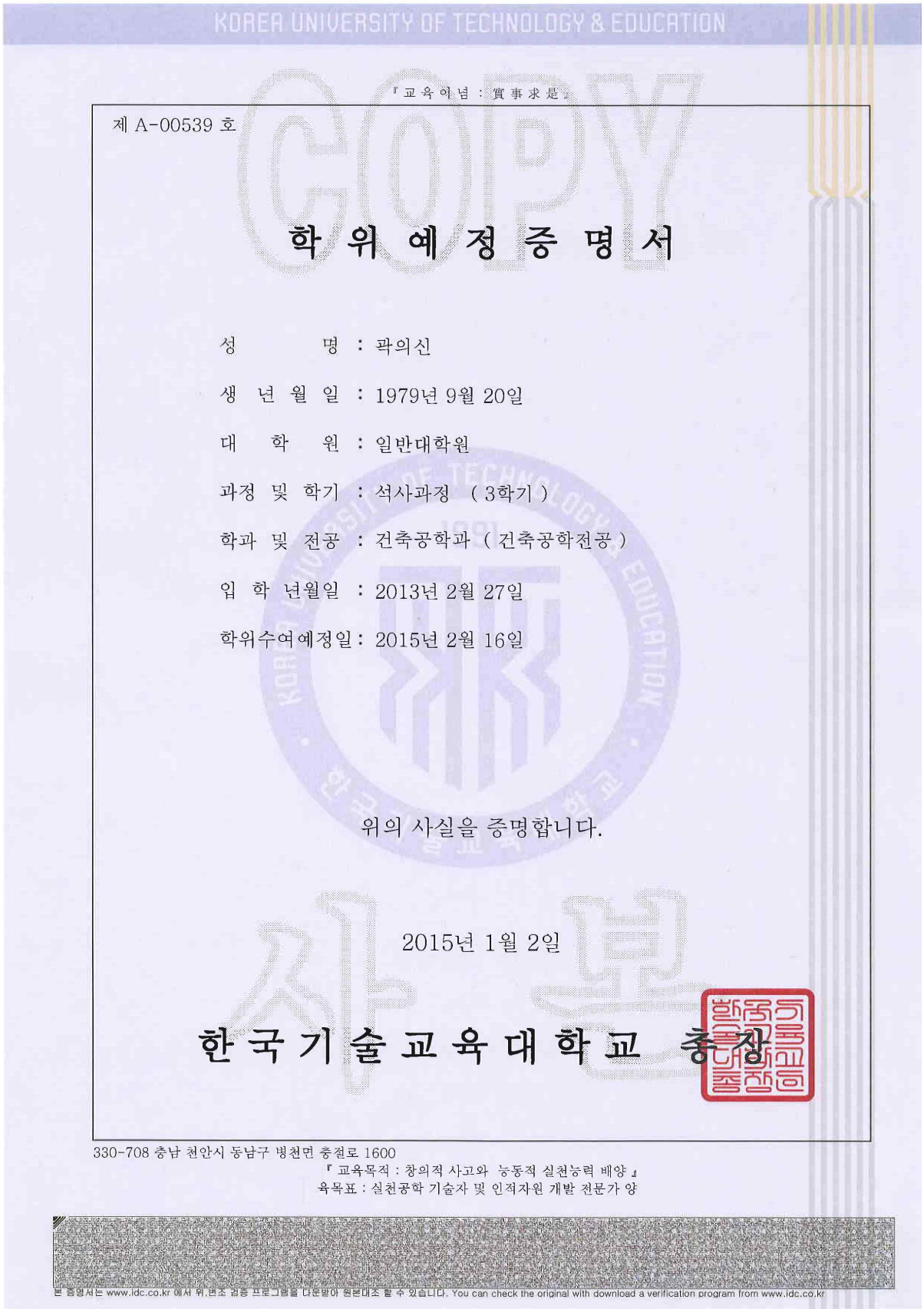
330-708 충남 천안시 동남구 병천면 충절로 1600

교육목적 : 창의적 사고, 능동적 실천능력 배양

교육목표 : 능력개발 및 실천기술전문가 육성

*본 증명서는 인터넷으로 발급한 증명서입니다.웹민원센터 홈페이지(www.webminwon.com)에서 24시간 원본대조 확인이 가능합니다.*제출용은 칼라프린터 사용을 권장합니다.(직인인영)

5-2. 학위예정증명서 : 곽의신



KOREA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY & EDUCATION

『교육이념 : 實事求是』

제 A-00539 호

학 위 예 정 증 명 서

성 명 : 곽의신

생 년 월 일 : 1979년 9월 20일

대 학 원 : 일반대학원

과정 및 학기 : 석사과정 (3학기)

학과 및 전공 : 건축공학과 (건축공학전공)

입 학 년월일 : 2013년 2월 27일

학위수여예정일 : 2015년 2월 16일

위의 사실을 증명합니다.

2015년 1월 2일

한국기술교육대학교 총장

330-708 충남 천안시 동남구 병천면 충절로 1600

『교육목적 : 창의적 사고와 능동적 실천능력 배양』

육목표 : 실천공학 기술자 및 인적자원 개발 전문가 양

본 증명서는 www.idc.co.kr 에서 위,변조 검증 프로그램을 다운받아 원본대조 할 수 있습니다. You can check the original with download a verification program from www.idc.co.kr

6-1. 기술이전 계약서

Know-how 기술이전 계약서

■ 계약명 : 주름강관을 활용한 제진장치 및 내진장치에 관한 기술 이전

한국기술교육대학교 산학협력단 (이하 '갑'이라 한다)과 **(주)아이스트**(이하 '을'이라 한다)는 '갑'이 보유하고 있는 "주름강관을 활용한 제진장치 및 내진장치에 관한 기술"을 '을'이 실시함에 있어 다음과 같이 계약을 체결한다.

제1조(대상기술) 본 협약에서 "대상기술"이라 함은 한국기술교육대학교에서 개발한 주름강관을 활용한 제진장치 및 내진장치에 관한 기술을 말한다.

제2조(기술이전 방법) ①'갑'은 계약 체결 후 **1개월**이내에 대상기술을 '을'에게

제19조(계약의 효력) 본 계약의 효력은 계약 당사자가 서명·날인한 날로부터 유효하고 계약서 원본 2부를 작성하여 '갑', '을'이 각 1부씩 보관한다.

2015년 1월 31일

'갑'	'을'
충남 천안시 동남구 병천면 충절로 1600	서울특별시 강남구 역삼로 120 성보역삼
한국기술교육대학교 산학협력단	빌딩 2층
	㈜아이스트
산학협력단장 남 병 욱 (인)	대표이사 이 동 우 (인)
연구책임자(발명자) : 이 승 재 (인)	
손 수 덕 (인)	

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.