

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

‘수평파형 강판을 복부판에 적용한 성능맞춤형 콘크리트-강합성 복합거더 설계기술 개발’(연구개발 기간 : 2017. 04. 01. ~ 2018. 12. 31.) 과제의 최종보고서 10부를 제출합니다.

2018. 03. .

주관연구기관명 : 동국대학교 산학협력단 (대표자) 김 대 영 (인)

공동연구기관명 : (주)효명이씨에스 (대표자) 한 녹 희 (인)

주관연구기관책임자: 이 성 철

공동연구기관책임자: 한 녹 희

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	18CTAP-C129793-02	해당 단계 연구 기간	2018.01.01. ~2018.12.31.	단계구분	2/2
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	기초원천			
연구과제명	대과제명				
	세부과제명	수평파형 강판을 복부판에 적용한 성능맞춤형 콘크리트-강합성 복합거더 설계기술 개발			
연구책임자	이성철	해당단계 참여연구원 수	총: 9 명 내부: 6 명 외부: 3 명	해당단계 연구비	정부:220,000 천원 민간: 80,000 천원 계:300,000 천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 10 명 내부: 6 명 외부: 4 명	총 연구비	정부:370,000 천원 민간:130,000 천원 계:500,000 천원
연구기관명 및 소속 부서명	주관:동국대학교 산학협력단 공동:(주)효명이씨에스			참여기업명	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	창의도전연구 공고 및 평가접수 안내서 상 보안등급은 평가위원회에서 확정할 예정이므로 '일반' 으로 지정하였음
-------------------------	--

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설 · 장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록·기 탁 번호											

요약

보고서 면수 : 91

본 연구의 최종목표는 『수평파형 강판을 복부판에 적용한 성능맞춤형 콘크리트-강합성 복합거더 설계기술 개발』이며 최종성과물은 [콘크리트거더 복부판에 적용 가능한 성능맞춤형 신개념 수평파형 복부판]이다.

제작성, 경제성 및 좌굴강도가 우수한 최적 수평파형 형상 개발

- ♣ 휨좌굴 및 전단좌굴을 포함한 국부좌굴강도가 우수한 다양한 파형형상 안을 유한요소 좌굴 해석을 통하여 도출함
- ♣ 경제성 및 제작성을 고려하여 복부판의 높이, 두께 및 항복강도 별 최적 파형형상선정
- 강거더 모형실험을 통한 파형강판의 구조성능 검증
 - ♣ 구조성능 검증의 효율성 제고를 위해, 개발된 수평파형 복부판을 보다 제작이 용이한 강거더에 적용하여 구조성능(휨, 전단, 지압)을 검증함
 - ♣ 강거더 설계/제작
 - ♣ 실험을 통한 검증
- 수평파형 복부판과 콘크리트 슬래브 합성작용을 위한 최적 연결방법 개발
 - ♣ 완벽한 합성작용을 위하여 수평파형 복부판과 콘크리트 슬래브를 효율적으로 연결하기 위한 설계상세 개발
- 축소 모델 (Bench scale) 실험을 통한 구조성능 및 적용성 검증
 - ♣ 단순지지 합성거더 모델(Bench scale model) 설계 및 해석을 통한 검증
 - ♣ 축소 모델 제작
 - ♣ 실험을 통한 검증

〈 요약문 〉

연구의 목적 및 내용	- 연구 목적 수평파형 강판을 복부판에 적용한 성능맞춤형 콘크리트-강합성 복합거더 설계기술 개발』이며 이를 위하여 다음과 같은 단계별 세부목표를 설정함. ☞ 콘크리트거더 복부판에 적용 가능한 신개념 수평파형 복부판 설계기술 개발 ☞ 실험을 통한 수평파형 복부판의 구조성능 검증 ☞ 수평파형 복부판과 콘크리트와의 합성을 위한 최적연결 방법 ☞ 실험을 통한 합성연결 상세 검증 - 연구 내용 ♣ 유한요소해석 연구를 통한 수평파형 복부판의 최적형상을 개발 ☞ 구조해석을 통하여 수평파형 복부판의 높이, 강종(항복강도) 및 두께 별로 국부좌굴강도가 강재항복강도를 초과하는 여러 수평파형 복부판 형상을 도출함 ☞ 제작성 및 경제성 분석을 통하여 제작성 및 경제성이 우수한 최적형상을 결정 ☞ 지점부 및 하중집중부에서 필요한 지압강도가 우수한 최적 보강방안 도출 ♣ 개발된 수평파형 복부판을 거더에 적용하는 구조성능 및 적용성 검증 ☞ 1차년도에 개발된 수평파형 복부판의 구조성능을 검증하기 위하여, 강거더에 적용한 실험체를 제작하고 실험을 수행함 ☞ 기존 수직파형 복부판에 적용된 합성방법을 연구 검토하여, 신개념 수평복부판에 적합한 효율적인 합성방법을 개발함				
연구개발성과	핵심연구성과1: 콘크리트거더에 적용가능한 신개념 수평파형 복부판 형식 개발 ※ 다양한 수평파형 복부판 형식 선정 ※ 구조해석을 통한 다양한 수평파형 복부판 성능검토 ※ 제작성 및 경제성 분석을 통한 수평파형 복부판의 높이, 두께 및 강종 별 최적파형형상 결정 핵심연구성과2: 수평파형 복부판과 콘크리트슬래브의 합성연결 방법 개발 ※ 실험을 통해 1차 연도에 개발된 수평파형 복부판의 구조성능 검증 ※ 수평파형 복부판과 콘크리트부재의 합성을 위한 효율적인 방법 개발 ※ 단경간 콘크리트거더 축소모델 실험을 통한 성능 검증				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	(1) 지적 재산권 확보 ▶ 본 연구를 수행하여 개발된 수평파형 복부판 및 설계상세 관련 국내외 특허 출원을 통하여 지적재산권을 확보함 (2) 국내 교량건설에 적용하여 국가 예산 절감에 크게 기여함 ▶ 상부구조 가설 기간 단축 및 공사비 절감, 하부구조 공사비 절감(20%) 등을 통하여 상당한 국가예산 절감 가능 (3) 타 분야에 적용 ▶ 본 연구에서 개발된 콘크리트거더용 수평파형 복부판은 그밖에 다양한 여러 거더형식에 효과적으로 적용 가능할 것으로 예상됨 (4) 국내 전문가들에게 기술보급 ▶ 기술강습회, 세미나, 학술대회 발표 등을 통하여 국내 교량설계 전문가들에게 개발된 신기술을 적극 홍보하여 국내 설계 기술력 향상에 기여함 (5) 북한의 도로/교량 건설에 활용 ▶ 산악지형이 대부분인 북한의 지형을 감안할 때, 남북통일 대비 혹은 통일 후, 본 연구에서 개발한 신개념 콘크리트/강 합성거더 구조시스템이 북한의 교량건설에 크게 활용될 가능성이 매우 높음				
핵심어 (5개 이내)	국부좌굴	다이아프램	수평파형 복부판	콘크리트 복부판	합성연결

< SUMMARY >

Purpose & Contents					
--------------------	---	--	--	--	--

〈 목 차 〉

제1장 연구개발과제의 개요	1
1. 연구개발 목적	1
2. 연구개발의 필요성	3
3. 연구개발 범위	5
제2장 국내외 기술 개발 현황	6
1. 국내 현황	6
2. 해외 현황	7
3. 국내외 현황 분석 결론	8
제3장 연구수행내용 및 성과	9
제1절 최적 수평파형 복부판 형식 개발	9
1. 서론	9
2. 유한요소해석	9
3. 실험을 통한 지압 성능 검토	27
4. 수평 절곡 복부판의 성능 시험	38
제2절 콘크리트-강재 합성 거더	57
1. 수평파형 복부판과 콘크리트 슬래브의 합성 방법	57
2. 합성연결부 접합방법	57
3. 실험연구 내용 및 결과	61
제3절 복부판의 형상별 경제성 분석	77
1. 공사비 검토 개요	77
2. 강박스거더 공사비 구성 분석	77
3. 복부판 형상별 제작비 비교	79
4. 결과 분석	85
제4장 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	86
1. 목표 달성도	86
2. 관련분야에의 기여도	87
3. 목표 미달성 시 원인(사유) 및 차후대책(후속연구의 필요성 등)	87
제5장 연구개발성과의 활용계획	88
제6장 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	88
제7장 연구개발성과의 보안등급	88
제8장 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	89
제9장 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	89
제10장 연구개발과제의 대표적 연구 실적	89
제11장 참고 문헌	89

제1장 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

본 연구의 최종목표는 『수평파형 강판을 복부판에 적용한 성능맞춤형 콘크리트-강합성 복합거더 설계기술 개발』이며 최종성과물은 [콘크리트거더 복부판에 적용 가능한 성능맞춤형 신개념 수평파형 복부판]이다.



가. 최종목표

- 제작성, 경제성 및 좌굴강도가 우수한 최적 수평파형 형상 개발
 - ♣ 휨좌굴 및 전단좌굴을 포함한 국부좌굴강도가 우수한 다양한 파형형상 안을 유한요소 좌굴해석을 통하여 도출함
 - ♣ 경제성 및 제작성을 고려하여 복부판의 높이, 두께 및 항복강도 별 최적 파형형상선정
- 강거더 모형실험을 통한 파형강판의 구조성능 검증
 - ♣ 구조성능 검증의 효율성 제고를 위해, 개발된 수평파형 복부판을 보다 제작이 용이한 강거더에 적용하여 구조성능(휨, 전단, 지압)을 검증함
 - ♣ 강거더 설계/제작
 - ♣ 실험을 통한 검증
- 수평파형 복부판과 콘크리트 슬래브 합성작용을 위한 최적 연결방법 개발
 - ♣ 완벽한 합성작용을 위하여 수평파형 복부판과 콘크리트 슬래브를 효율적으로 연결하기 위한 설계상세 개발
- 축소 모델 (Bench scale) 실험을 통한 구조성능 및 적용성 검증
 - ♣ 단순지지 합성거더 모델(Bench scale model) 설계 및 해석을 통한 검증
 - ♣ 축소 모델 제작
 - ♣ 실험을 통한 검증

나. 최종목표의 성격

『수평파형 강판을 복부판에 적용한 성능맞춤형 콘크리트-강합성 복합거더 설계기술 개발』이라는 본 연구 최종목표는 [이론적 아이디어 개발] [아이디어의 구체화] 및 [적용성 검증]이라는 3단계의 성격을 지니고 있음

다. 최종목표의 설정근거

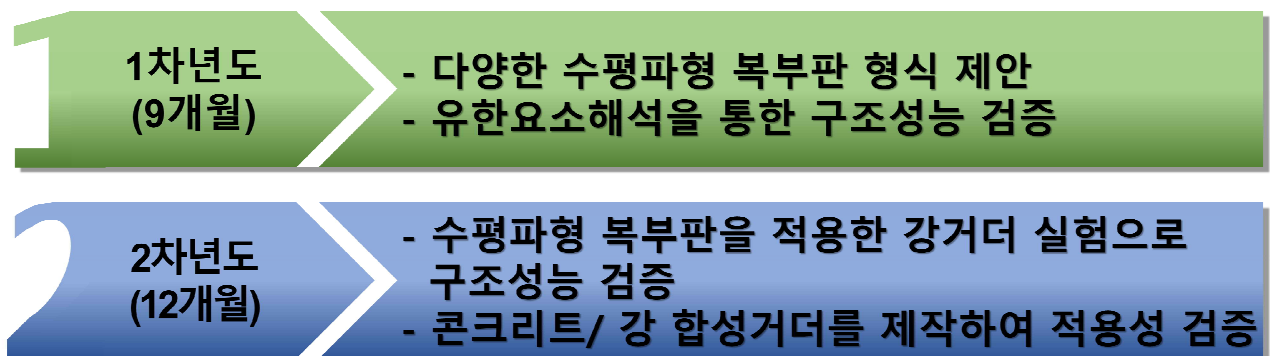
1) 연구기간의 적정성

♣ 연구목표를 지정된 연구기간(1년 9개월) 내에 충분히 달성할 수 있음:

1차년도(9개월) ⇨ 유한요소해석 연구를 통한 수평파형 복부판의 최적형상을 개발

2차년도(12개월) ⇨ 개발된 수평파형 복부판을 강거더에 적용하는 구조성능 검증

⇨ Bench scale model 단순 합성거더 제작 및 실험을 통한 구조성능 및 적용성 검증



2) 연구비의 적정성

본 연구를 위한 예산(총 5억원/년: 국가지원 3.7억원, 기업부담금 1.3억원)은 실험을 포함한 모든 연구를 수행하는 데 적정한 규모임.

3) 연구자의 역량

♣ 연구책임자는 본 연구의 성공적인 수행을 위한 충분한 역량을 갖추었음

⇨ 다수의 SCI논문과 국제학술대회 발표 및 저서(Stability of Structures, Elsevier출판, 2011)를 통하여 강구조/강교량 분야에서 세계적으로 업적을 인정받고 있음

⇨ 강구조/강교량 분야에서 국가지원과제를 수행한 경험이 풍부함

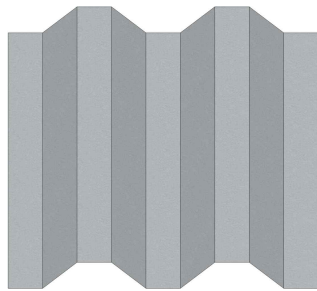
♣ 협동연구기관인 효명E&C는 교량의 설계 및 시공 실적이 매우 풍부하며 우수함.

2. 연구개발의 필요성

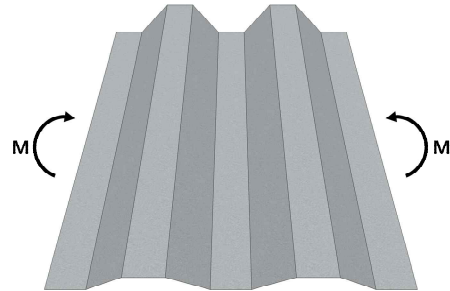
파형강판을 복부판에 적용하여 콘크리트거더의 중량을 감소시킴으로써 얻어지는 여러 장점에도 불구하고, 다음과 같은 단점으로 최근에는 세계적으로 적용사례가 거의 없음

가. 파형복부판의 휨강성이 무시됨

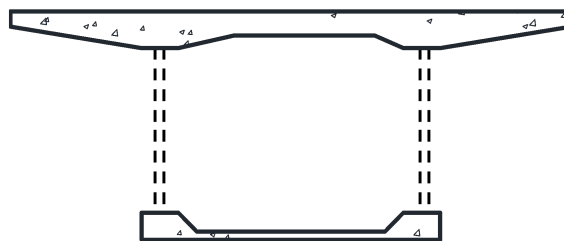
- ♣ 아코디언 효과로 수직파형 복부판의 휨강성이 매우 낮아 설계에서 무시됨(일반 강교에서 복부판의 휨강성 기여도는 20% 내외정도임)



[수직파형 복부판]



[휨모멘트에 의한 아코디언 효과]



[복부판이 무시된 유효단면]

나. Press-bending 작업공정 상 패널폭 제한

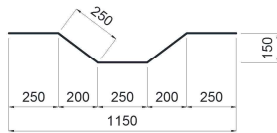
- ♣ 교량 파형복부판에 적용되는 15mm 내외의 강판 절곡 시 다음과 같은 Press-bending Machine이 이용됨
- ♣ Bending 방향이 바뀌면 판 자체를 180도 뒤집어야 하는 번거로운 작업이 필요함



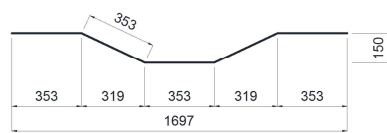
[Press-bending에 의한 강판의 절곡작업]

♣ 패널의 폭이 보통 150cm 내외, 그리고 패널 당 절곡은 보통 4회로 제한

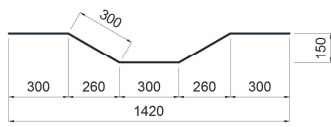
신카이교



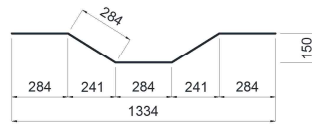
Cognac교



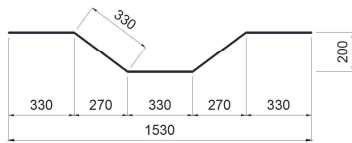
마츠노키교



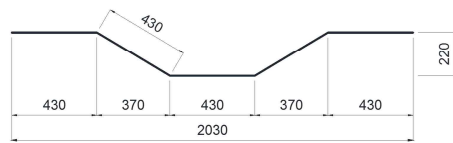
Maupre교



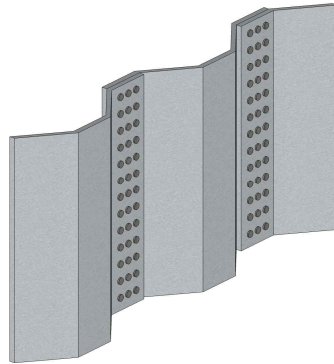
혼다니교



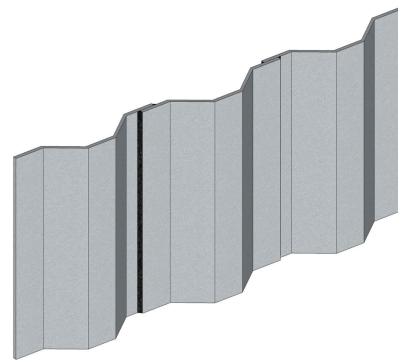
Dole교



♣ 수직파형 복부 패널을 공장 또는 현장에서 고장력볼트나 용접으로 연결해야하므로 제작시간 및 비용이 증가



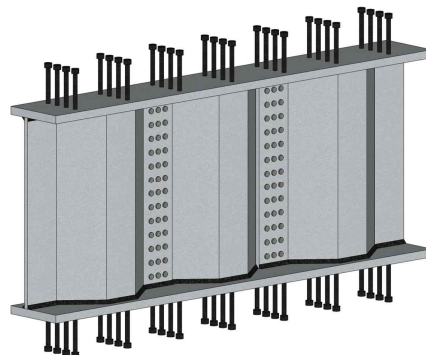
[고장력볼트 연결]



[용접 연결]

다. 콘크리트 슬래브와 합성을 위한 플랜지 용접의 어려움

♣ 플랜지와 수직파형의 절곡면을 따라 용접해야 하므로 용접시간 및 비용이 증가함



[플랜지와 수직파형의 용접]

따라서 파형강판을 콘크리트거더 복부판에 적용함으로써 얻는 장점을 최대한 살리기 위해서는 수직파형강판의 단점을 보완하는 신개념 파형강판 형식을 개발하는 것이 필요함

3. 연구개발 범위

유한요소 구조해석을 통해 기존 수직파형 복부판을 대체할 수 있는 수평파형 복부판을 개발하고 실험을 통해 구조성능을 검증한다. 이를 위해 다음과 같이 2개의 핵심성과에 대한 연구를 수행한다.

♣ 콘크리트거더 복부판에 적용 가능한 신개념 수평파형 복부판 설계기술 개발

	세부 개발 목표	개발내용 및 범위	연구 기관
1	다양한 수평파형 복부판 형식 선정	수직파형 복부판을 대체할 수 있는 다양한 수평파형 형식 선정	동국대(주관) 효명E&C(공동)
2	구조해석을 통한 다양한 수평파형 복부판 성능검토	유한요소법을 이용한 구조해석을 수행하여 선정된 수평파형 복부판의 구조성능 검토	동국대(주관)
3	제작성 및 경제성 분석을 통한 수평파형 복부판의 높이, 두께 및 강종 별 최적 파형형상 결정	제작성 및 경제성 분석을 수행하여 압축플랜지의 폭, 두께, 강종 별 최적의 파형형상을 결정함	동국대(주관) 효명E&C(공동)

♣ 수평파형 복부판과 콘크리트와의 합성을 위한 최적연결 방법

	세부 개발 목표	개발내용 및 범위	연구 기관
1	실험을 통해 1차 연도에 개발된 수평파형 복부판의 구조성능 검증	- 개발된 수평파형 복부판을 적용한 강거설계 및 제작 - 유한요소 구조해석을 통한 성능검증 - 실험을 통한 구조성능을 검증	동국대(주관) 효명E&C(협동)
2	수평파형 복부판과 콘크리트부재의 합성을 위한 효율적인 방법 개발	- 파형 복부판에 사용된 합성방법 검토 및 수평파형 복부판에 적합한 방법을 제안 - 구조성능/제작성 등을 검토하여 효율적인 합성방법 선정	동국대(주관)
3	단경간 콘크리트거더 축소모델 실험을 통한 성능 검증	- 단경간 합성거더 모델설계 - 유한요소 구조해석을 통한 구조성능 조사 - 실험을 통하여 수평파형 복부판의 구조성능 및 합성연결 설계상세의 적용성을 검증함	동국대(주관) 효명E&C(협동)

제2장 국내외 기술 개발 현황

1. 국내 현황

가. 적용 현황

- ☞ 일선대교(2007년)에 국내 최초로 수직파형 Web PSC 박스거더교가 시공됨
- ☞ 그 이후에는 수직파형 Web 콘크리트교가 건설된 적도 없음
- ☞ 현재 계획단계에 있는 교량도 없음

나. 관련 연구 현황

- ☞ 수직파형강판 Web의 국부좌굴강도와 관련된 학계의 연구가 수행됨 (참고문헌)
- ☞ 본 연구에서 계획된 바와 같이 파형강판의 성능이나 경제성 또는 시공성을 향상시키기 위해서 획기적으로 파형형식을 변화시키는 연구는 진행된 적이 없음

다. 주요 연구논문

- 김승준, 한택희, 원덕희, 강영종(2013), “파형 복부판이 수평 곡선 I형 거더의 극한 거동에 미치는 영향”, 대한토목학회 논문집, vol. 33, pp.13247-1336
- 문지호, 임남형, 이학은(2012), “선형 모멘트 구배가 작용하는 파형강판 I-거더의 횡-비틀 좌굴강도”, 대한토목학회논문집, 제32권 3A호, pp.149-160.
- 지효선(2011), “파형 복부판을 갖는 플레이트 거더의 좌굴거동”, 한국강구조학회 논문집, 제23권 2호, pp. 221-228.
- 최규태, 안진희, 박현민, 김상호, 정상욱(2009), “부분 파형강판을 복부로 사용한 PSC거더의 시공”, 한국콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, vol. 21, pp.47-48
- 이한구, 김광수(2008), “복부 파형강판을 사용한 PSC 복합 교량의 비틀림 해석모델의 제안 및 변수해석”, 대한토목학회 논문집, 제28권 2A호, pp. 281-288.
- 손병직, 허용학(2008), “파형 복부판을 갖는 플레이트 거더의 좌굴강도”, 대한토목학회 정기학술대회 논문집, pp.2344-2347
- 이종원, 문지호, 고희중, 이학은(2007), “파형강판 복부판을 갖는 거더의 동적 특성 분석”, 한국강구조학회 2007년도 학술발표대회 논문집, pp.252-255
- 김광수, 정광희(2004), “파형강판 복부를 갖는 프리스트레스트 콘크리트 박스거더 교량의 설계와 시공단계 해석”, 전산구조공학, 제17권 4호, pp.29-3

2. 국외 현황

가. 적용 현황

- ☞ 1986년 프랑스에서 Charente강을 횡단하는 Cognac교에 세계 최초로 적용하였고, 이후 3개교 (Maupre교 1987, Asterix교 1989, Dole교 1994)에 적용
- ☞ 일본에서 신카이교(1993년)를 시작으로 2007년까지 40여개의 도로교에 적용
- ☞ 최근에는 수직파형 Web를 적용한 PSC 박스거더교가 시공되었다는 보고가 없음

나. 관련 연구 현황

- ☞ 수직파형강판의 국부좌굴강도 평가와 관련된 연구(참고문헌) 및 수직파형 복부판과 콘크리트의 합성방법에 관한 연구(참고문헌)가 많이 진행된바 있음
- ☞ 본 연구에서 계획된 바와 같이 파형강판의 성능이나 경제성 또는 시공성을 향상시키기 위해서 획기적으로 파형형식을 변화시키는 연구는 진행된 적이 없음

다. 주요 연구논문

- Z.Y. Wang, Q.Y. Wang, R.J. Jiang(2017), “Finite element based fatigue assessment of corrugated steel web beams in highway bridges”, International Journal of Civil Engineering, vol. 13, pp.419-431
- Rui Juan Jiang, Francis Tat Kwong Au and Yu Feng Xiao(2015), “Prestressed Concrete Girder Bridges with Corrugated Steel Webs: Review” Journal of Structural Engineering, vol. 141, Issue 2
- Arie Romeijn, Reza Sarkhosha, Huigert de Hoop(2009), “Basic parametric study on corrugated web girders with cut outs”, Journal of Constructional Steel Research vol. 65, pp.395-407
- Shoji Ikeda, M. Sakurada(2005) “Development of Hybrid Prestressed Concrete Bridges with Corrugated Steel Web Construction” OUR WORLD IN CONCRETE & STRUCTURES, 30th Conference, Singapore
- Huang L, Hikosaka H, Komine K., “Simulation of accordion effect in corrugated steel web with concrete flanges”, Computers and Structures, 2004, Vol. 82, pp.2061-2069.
- Y.A. Khalid, C.L. Chan, B.B. Sahari, A.M.S. Hamouda(2004), “Bending behaviour of corrugated web beams”, Journal of Materials Processing Technology vol. 150, pp. 242-254.
- Richard Sause, Hassam H. Abbas, Wagdy G. Wassef, Robert G. Driver and Mohamed Elggly(2003), “Corrugated Web Girder Shape and Strength Criteria”, Pennsylvania Innovative High Performance Steel Bridge Demonstration Project, ATLSS Report No. 03-18
- C.L. Chan, Y.A. Khalid, B.B. Sahari, A.M.S. Hamouda(2002), “Finite element analysis of corrugated web beams under bending”, Journal of Constructional Steel Research, vol. 58, pp 1391-1406

3. 국내외 현황 분석 결론

가. SWOT 분석

국내외 적용 현황 및 연구 동향을 바탕 기존 수직파형 Web 콘크리트/강 합성거더의 SWOT (장점, 단점, 기회요인, 위협요인) 분석을 수행한 결과는 다음과 같음



나. 본 연구개발과제의 우수성

SWOT 분석을 통해 나타난 본 연구개발과제의 우수성을 <미래 핵심원천기술로 국토교통 중장기 전략과의 부합성> <창의성 및 발전 가능성>, <연구목표의 기술적 난이도 및 도전성> 및 <기초연구 및 원천기술 개발의 시의성 및 시급성> 측면에서 보면 다음과 같음

♣ 창의성 및 발전 가능성

- 콘크리트복부판이나 수직파형 복부판을 대체하기 위하여 수평 파형강판을 적용하는 연구는 아직 전 세계적으로 시도된 적이 없는 창의성이 매우 높은 연구임
- 콘크리트거더 뿐 아니라 플레이트거더나 강박스거더 등 다양한 거더구조 시스템에 적용 가능하여 발전성이 매우 높은 기술임
- 콘크리트 교량을 선호하는 유럽, 동남아시아, 중국 등에 기술수출이 가능함

♣ 연구목표의 기술적 난이도 및 도전성

- 수평파형 복부판의 최적 파형형상을 도출하는 기술은 파형강판의 휨국부좌굴(local bend buckling)과 전단국부좌굴(local shear buckling) 및 휨-전단 상호작용(bend-shear interaction)을 고려해야 하므로 기술적 난이도와 도전성이 매우 높음
- 좌굴강도(local buckling strength)의 평가와 비용 최적화(cost minimization)문제가 상호 연관된 난이도가 높은 기술임

♣ 기초연구 및 원천기술 개발의 시의성 및 시급성

- 최근 교량이나 도로 등 국가 기반시설 관련 국가예산의 투자가 급격히 감소
- 교량 건설비용을 대폭 절감을 통한 민간투자의 활성화 필요
- 산악지형이 대부분인 북한의 도로/교량 건설 수요에 대비하여 통일비용을 절감할 수 있는 교량 건설기술 개발 및 축적이 요구됨

제3장 연구수행내용 및 성과

제1절 최적 수평파형 복부판 형식 개발

1. 서론

기존 수직파형 복부판은 콘크리트거더의 중량을 감소시키기 위해 적용되는데 아코디언 효과로 휨 강성이 매우 낮아 설계에서 무시되고 절곡 공정상 패널 당 절곡 수가 4회로 제한되어 각각의 단위 패널을 현장 또는 공장에서 용접이나 볼트로 연결해야하므로 제작 시간 및 비용이 증가하는 단점을 갖는다. 이와 같은 수직파형강판의 단점을 보완하여 파형강판을 콘크리트거더 복부판에 적용함으로써 얻는 장점을 최대한 살리기 위해서 수평방향으로 절곡된 복부판을 개발하는 것이 본 연구의 목적이다.

2. 유한요소해석

가. 검토 형상

그림 1과 같이 총 4개의 형식을 갖는 절곡판에 대한 유한요소 구조해석을 수행하였다. 각각의 형식은 크게 2F, 4F로 나뉘며 이는 판의 절곡 횟수를 의미한다. 모든 형식의 절곡 위치는 절곡 횟수에 따라 판을 등분하도록 한다.

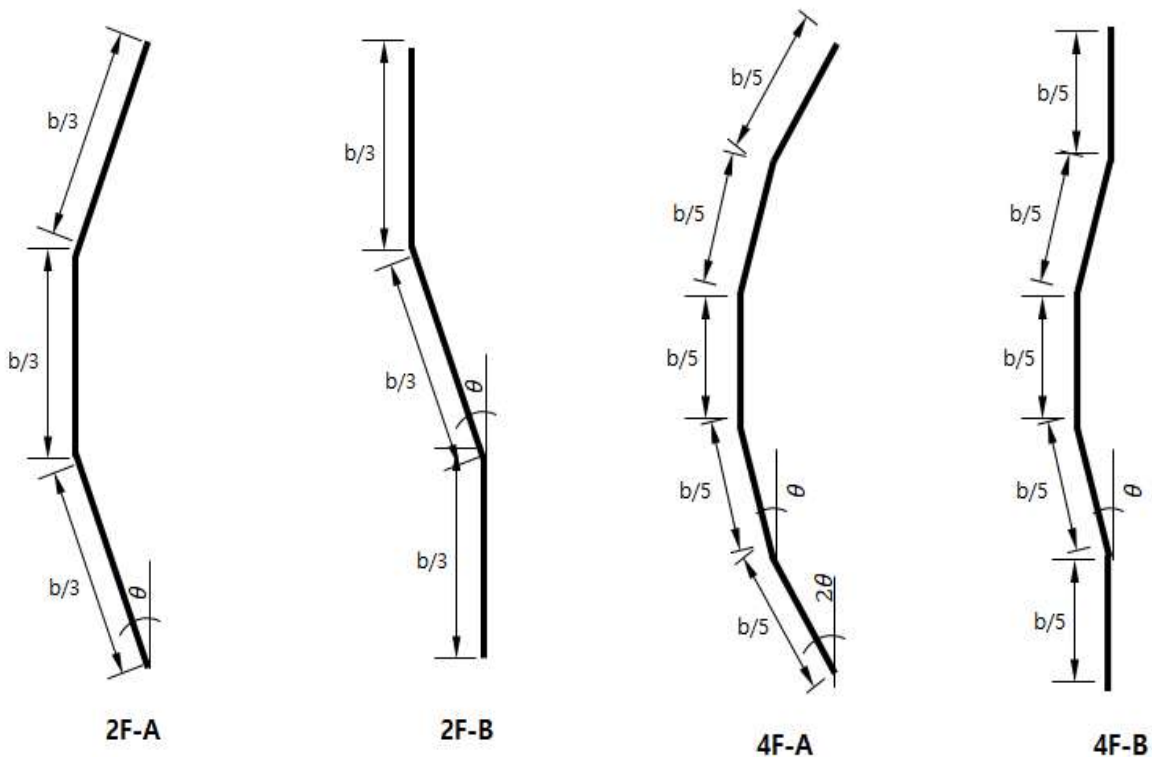


그림 1. 제안된 파형 절곡 복부판 형상

나. 탄성좌굴해석

본 연구에서는 범용구조해석프로그램 ADINA 9.4를 사용하였다. 거더 복부판의 경우 휨과 전단이 동시에 작용하는 부재이다. 따라서 휨에 의한 좌굴 및 전단에 의한 좌굴에 대한 해석을 수행하였다.

1) 형상비 1인 판의 좌굴해석

우선적으로 판 절곡에 따른 좌굴성능 검토를 위해 2F-A, 4F-A 두 가지 형식에 대해 판의 길이/폭 비인 형상비가 1인 판의 휨 및 전단 좌굴 해석을 수행하였다. 판의 폭 및 길이 $a=b=1,500\text{mm}$ 이고, 탄성계수 $E=200\text{GPa}$, 프아송 비 $\nu=0.3$ 로 모델링 하였다. 절곡각도 및 판의 폭/두께 비(b/t , 세장비)를 매개변수로 하여 각각 $0\sim 20^\circ$, $60\sim 200$ 으로 변화시키며 해석하였다. 해석 모델의 형상 및 경계조건은 그림 2와 3 및 표 1에서 주어진다. 휨 및 전단을 받는 판의 하중조건은 그림 4와 5에서 나타내었다.

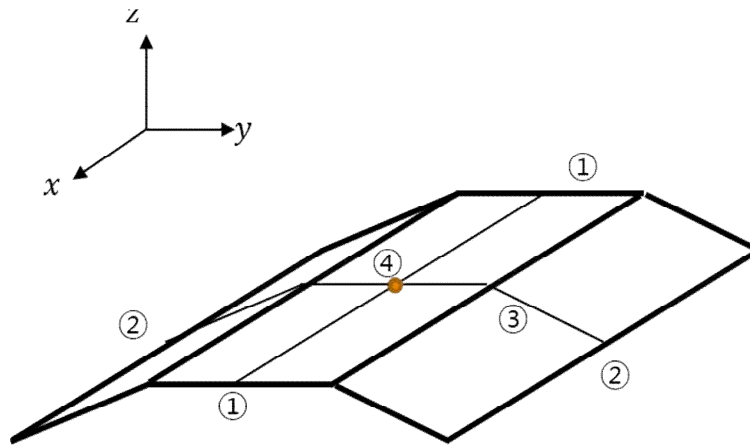


그림 2. 해석모델 형상 및 경계조건 위치 (2F-A)

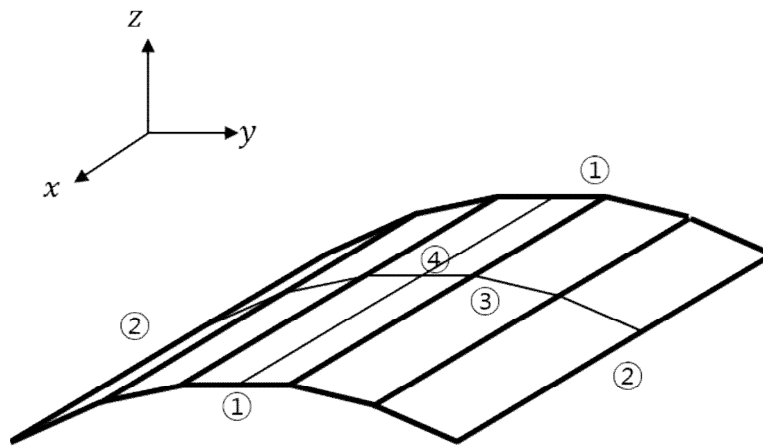


그림 3. 해석모델 형상 및 경계조건 위치 (4F-A)

표 1. 경계조건 (○:Free, ●:Fixed)

	u_x	u_y	u_z	θ_x	θ_y	θ_z
Line ①	○	○	●	●	○	○
Line ②	○	○	●	○	●	○
Line ③	●	○	○	○	○	○
Point ④	○	●	○	○	○	○

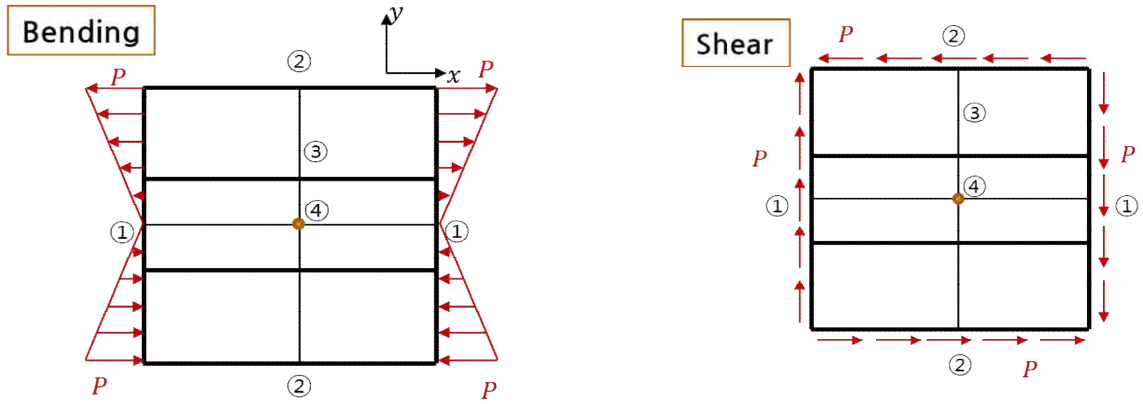


그림 4. 휨 및 전단 하중조건 (2F-A)

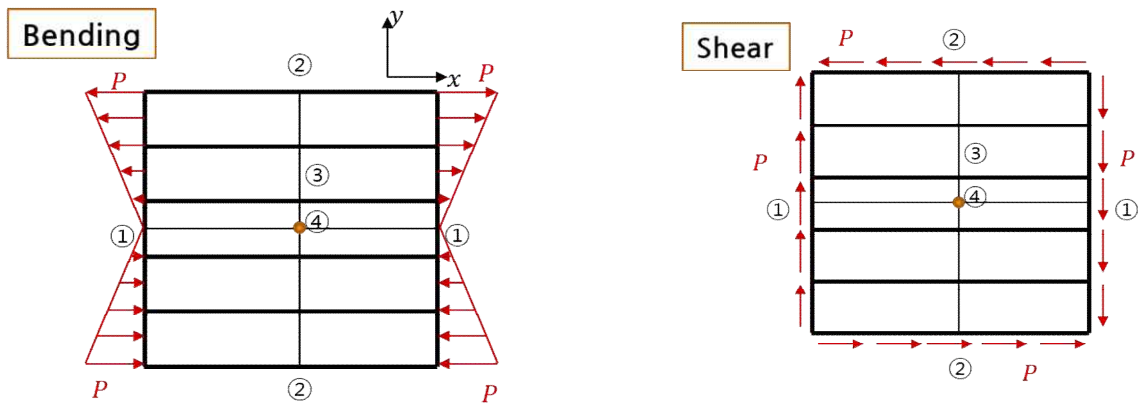


그림 5. 휨 및 전단 하중조건 (4F-A)

휨에 대한 형상비가 1인 2F-A, 4F-A 두 형식의 해석결과는 그림 6, 7과 같다. 그림과 같이 형상 및 세장비에 관계없이 절곡 각도가 증가함에 따라 휨/전단 좌굴 성능이 증가함을 알 수 있다. 휨 좌굴의 경우 2F-A와 4F-A 모델 모두 절곡 각도의 증가에 따라 좌굴 성능이 급격히 증가하나 일정 각도 이상의 절곡 각도를 갖는 경우 좌굴 성능의 증가폭이 점점 감소하여 종국에는 거의 일정한 값으로 수렴하게 되는 결과를 보인다. 이와 같이 좌굴 성능의 증가폭이 감소하게 되는 각도는 세장비가 클수록 작은 각도에서 발견되었다. 따라서 세장비가 클수록 좌굴 성능이 거의 증가하지 않고 일정하게 유지되는 추세를 뚜렷히 나타내었다.

그림 8, 9에서 세장비가 160인 2F-A와 4F-A 형상을 갖는 판의 절곡 각도에 따른 좌굴 모드 형상을 나타내었다. 2F-A 모델의 절곡 각도가 2° 인 판의 경우 평판과 동일한 모드 형상을 나타내었다. 이 후 절곡 각도가 증가함에 따라 좌굴 모드 형상이 변화하여 10° 이상인 경우 절곡부를 따라 최외단 패널이 중앙 패널과 독립되어 따로 압축좌굴이 발생하는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 추세는 4F-A 모델에서도 절곡 각도에 따른 차이는 있으나 동일하게 18° 이상인 경우 최외단 패널에서 주로 변형이 발생하는 것을 알 수 있다.

이와 같은 현상을 통해 충분한 절곡 각도가 주어진다면, 종방향 보강재가 배치되지 않았으나 절곡부를 따라 종방향 보강재가 배치된 복부판과 같이 나뉘어진 판으로 거동할 수 있음을 알 수 있고 이와 같은 영향으로 좌굴 성능을 증가를 설명할 수 있다.

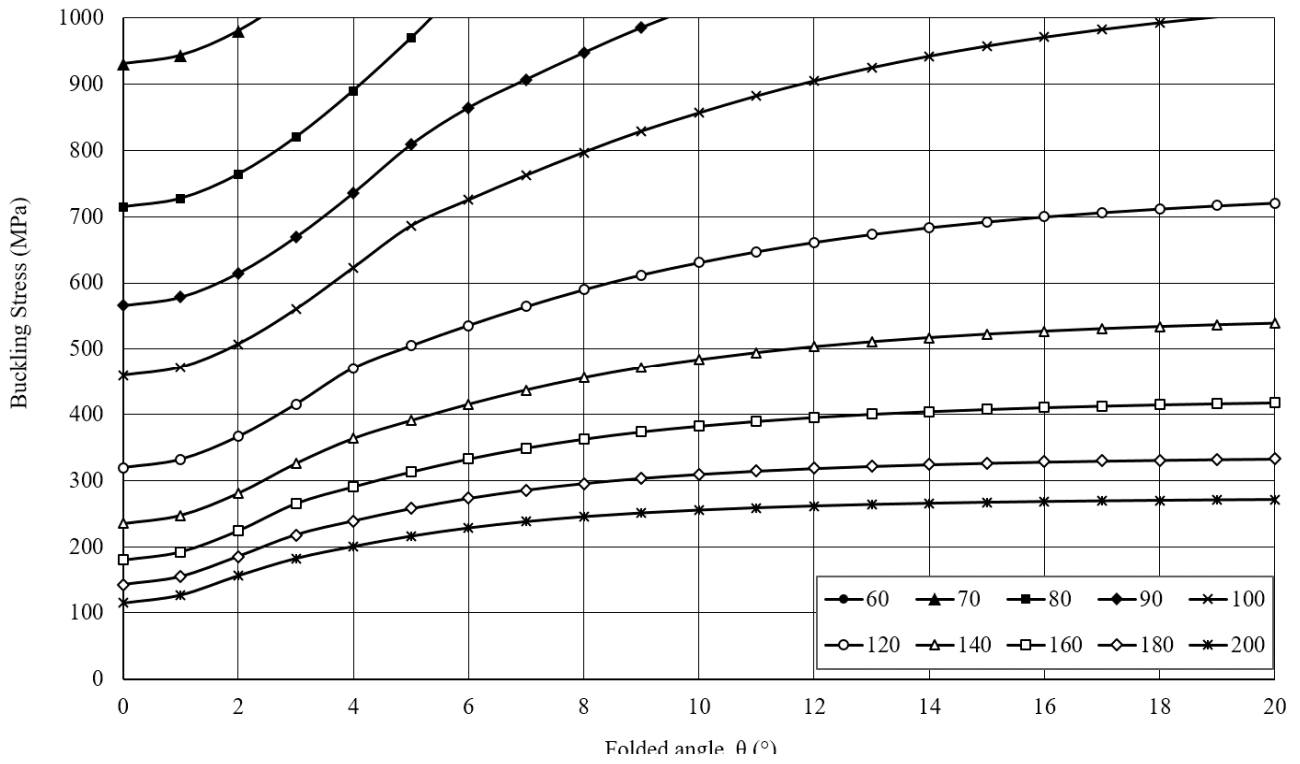


그림 6. 휨 좌굴 해석결과 (2F-A)

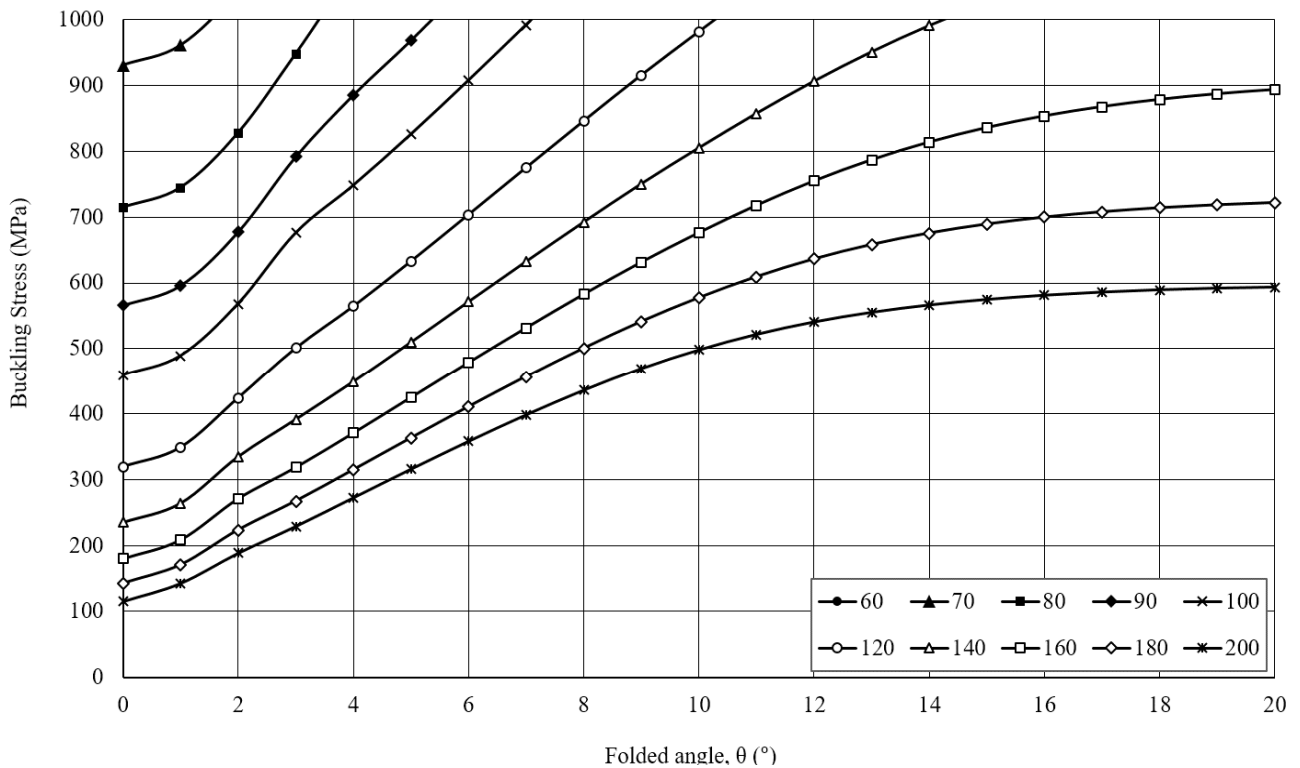


그림 7. 휨 좌굴 해석결과 (4F-A)

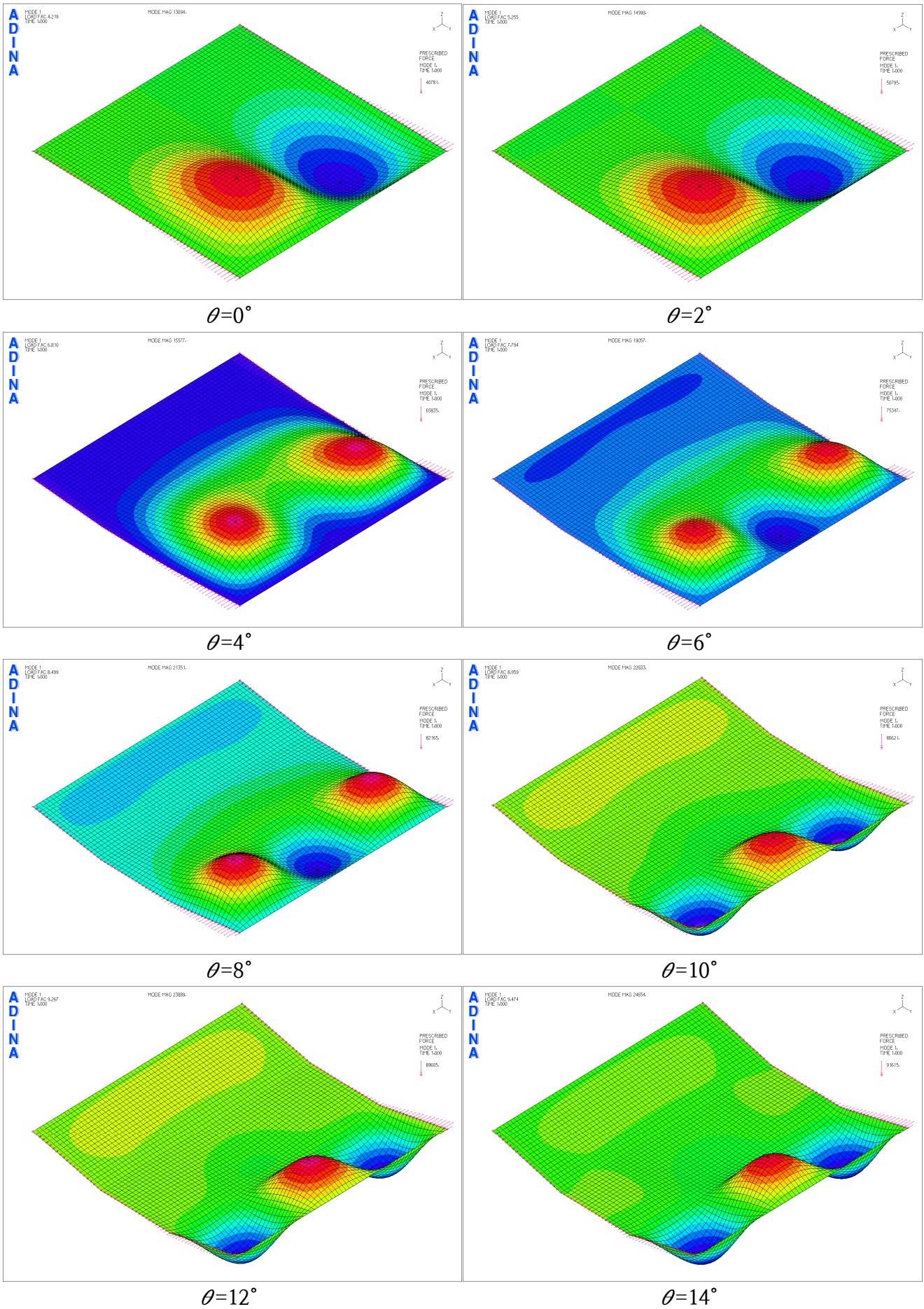
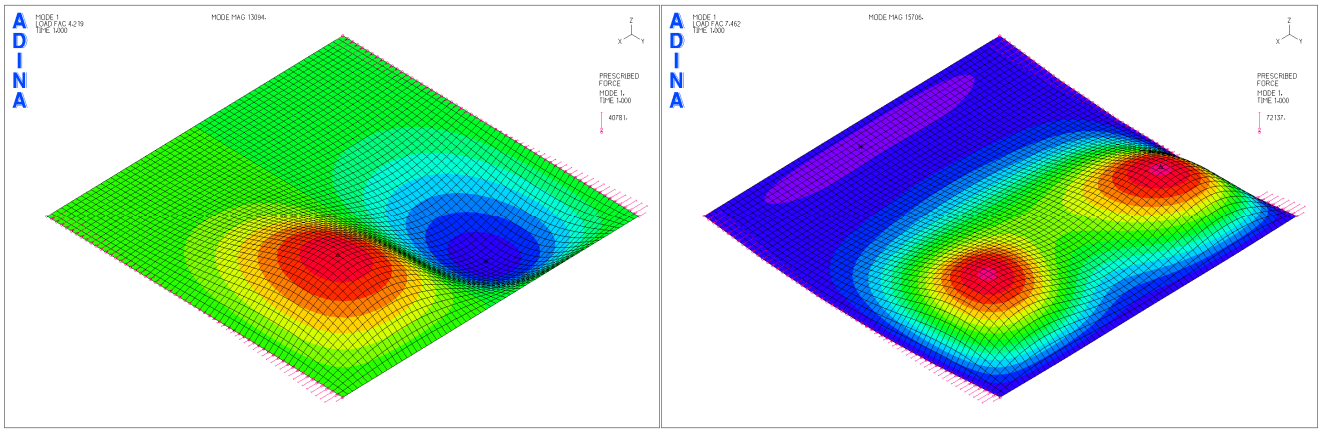
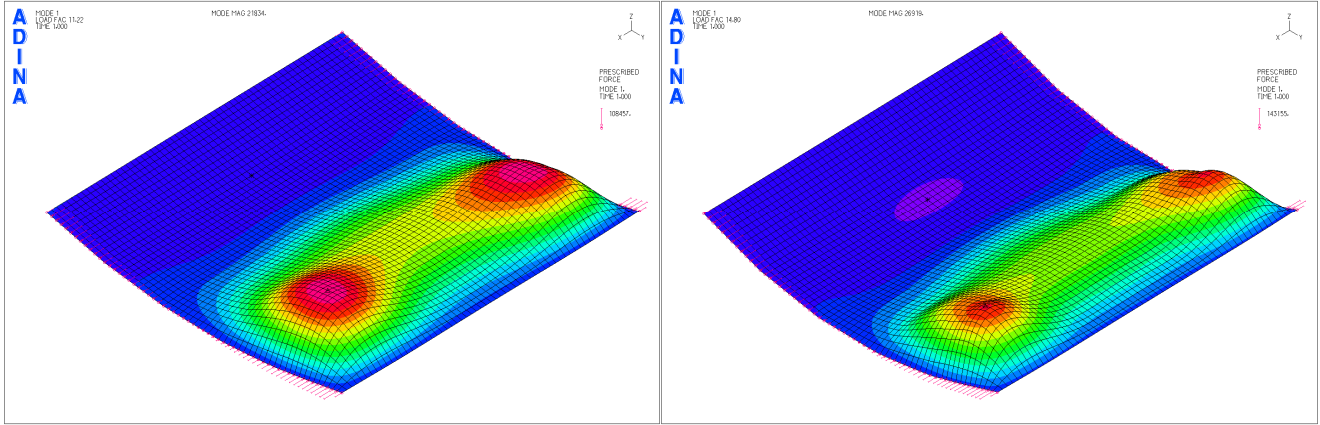


그림 8. 좌굴 모드 형상 (2F-A)



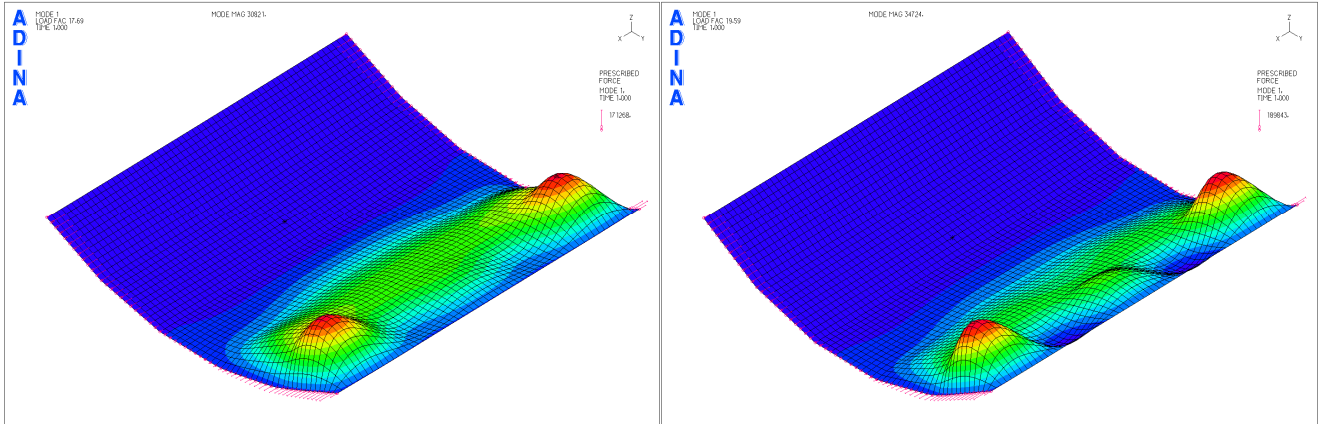
(a) $\theta=0^\circ$

(b) $\theta=3^\circ$



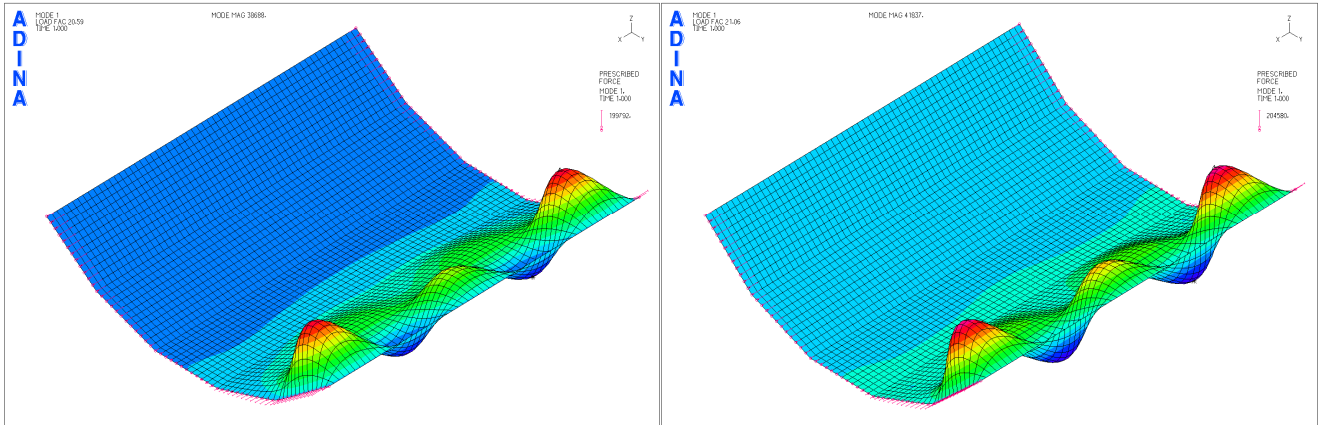
(c) $\theta=6^\circ$

(d) $\theta=9^\circ$



(e) $\theta=12^\circ$

(f) $\theta=15^\circ$



(g) $\theta=18^\circ$

(h) $\theta=21^\circ$

그림 9. 좌굴 모드 형상 (4F-A)

그림 8, 9의 전단 좌굴 결과의 경우 휨 좌굴 해석결과와 같이 절곡 각도가 매우 작은 경우 급격히 증가하는 좌굴 성능이 일정각도 이상의 경우 증가폭이 감소하여 거의 일정한 증가폭을 가지고 절곡 각도에 대해 선형적으로 증가하는 추세를 나타내었다. 이를 통해 절곡을 통해 판의 전단 좌굴 성능 또한 증가시킬 수 있음을 알 수 있다.

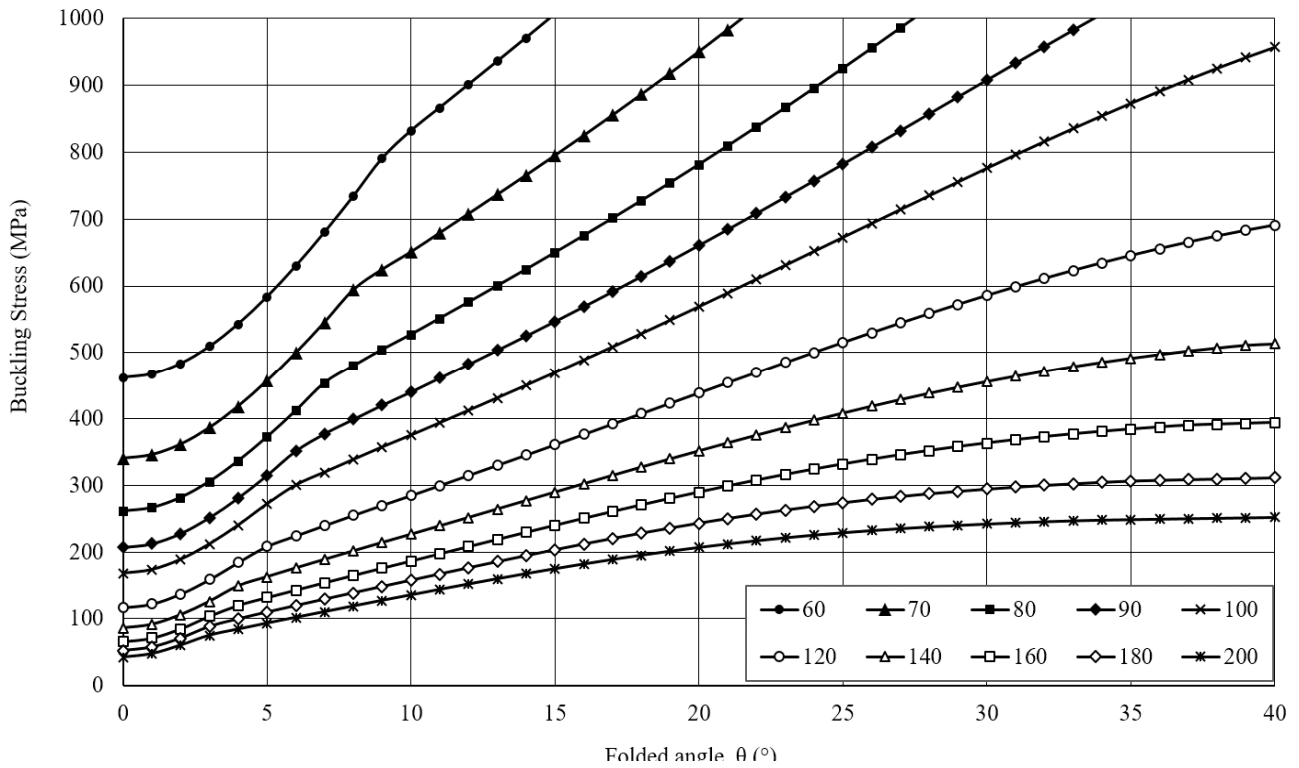


그림 10. 전단 좌굴 해석결과 (2F-A)

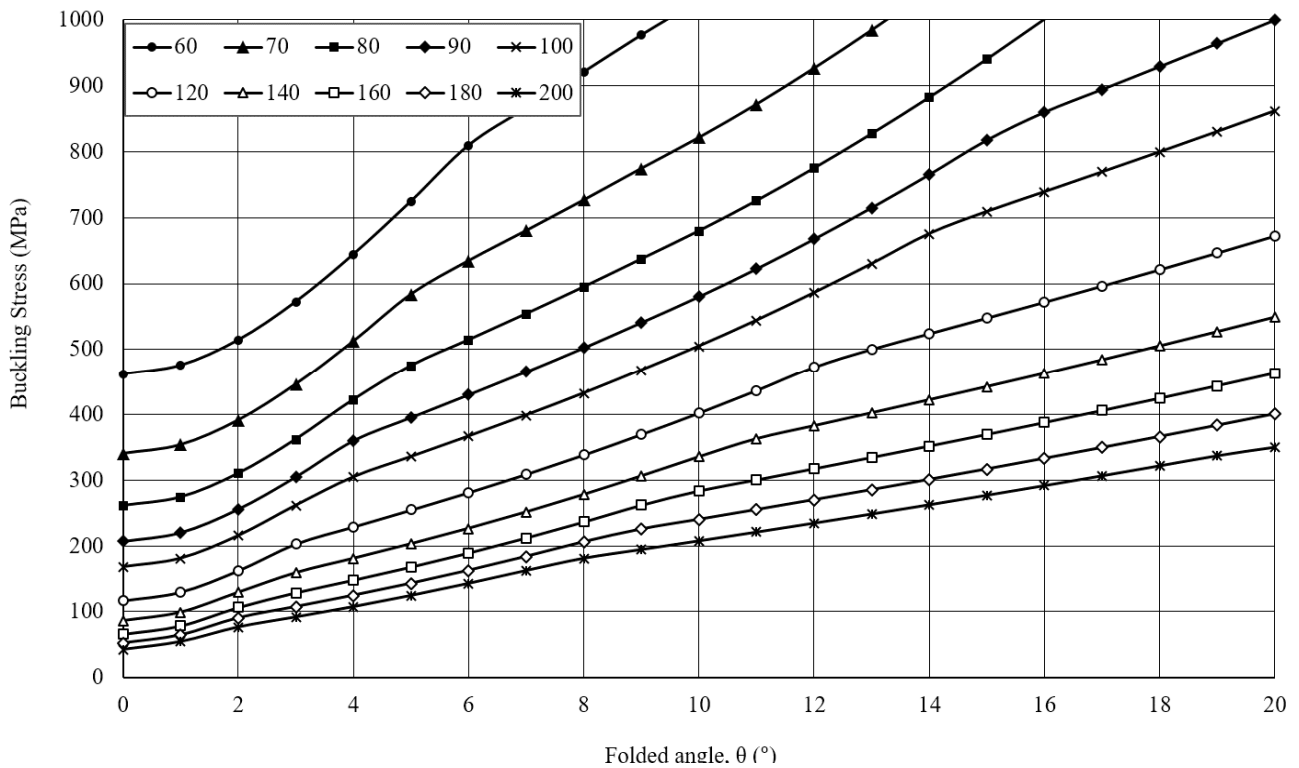


그림 11. 전단 좌굴 해석결과 (4F-A)

2) 형상비에 따른 휨 좌굴 성능

단순지지된 순수 휨을 받는 판의 좌굴 계수는 무한히 긴 판의 경우 23.9의 최소값을 가지며, 형상비가 2/3인 경우 동일한 좌굴 계수를 갖는다(Teoman Pekoz, 1987, Development of a unified approach to the design of cold formed steel members). 따라서 안전한 설계를 위해 휨 좌굴해석모델의 형상비를 2/3으로 하여 2F-A, 2F-B, 4F-A 및 4F-B 모델에 대한 해석을 수행하였다. 해석모델의 경계조건 및 하중조건은 1)에서 해석한 모델과 동일하며 판의 길이($a=1,000\text{mm}$)만 변경하여 해석하였다. 해석모델 형상은 그림 12와 같다.

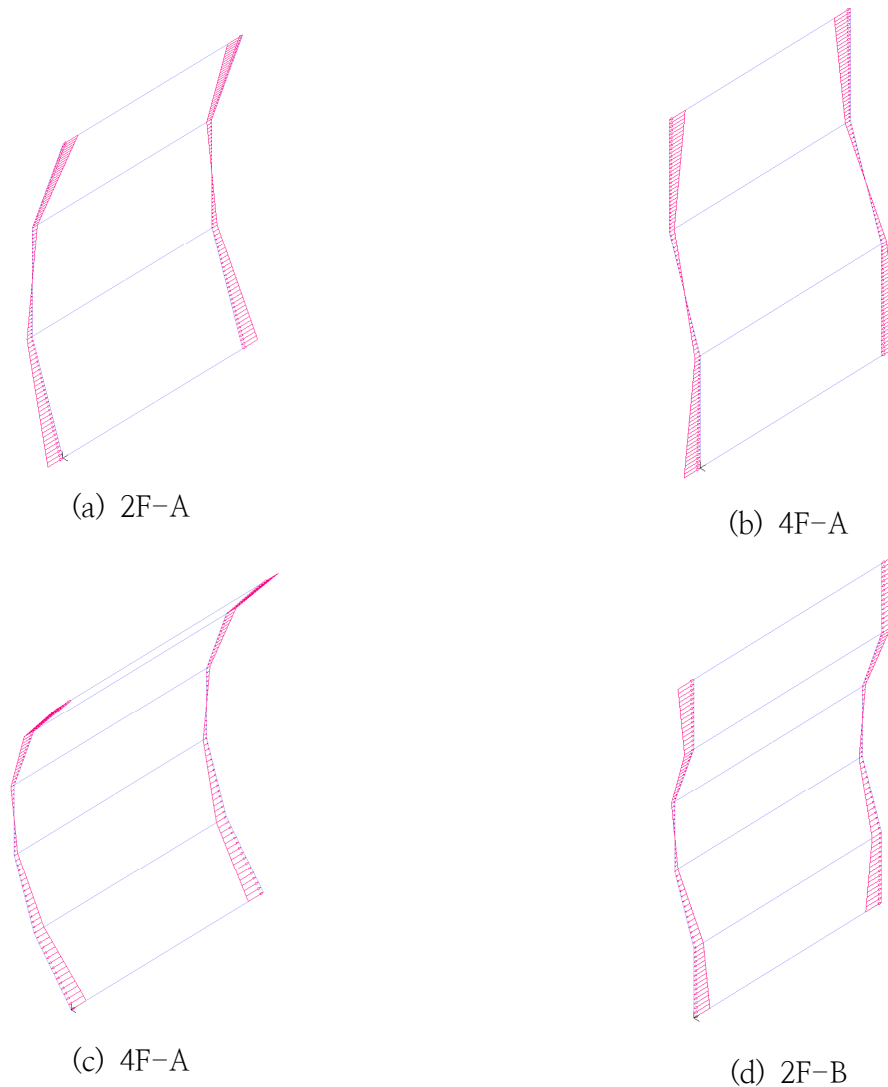


그림 12. 휨 좌굴 해석 모델 형상 (형상비 0.667)

2번 절곡한 판의 해석 결과는 그림 13, 14와 같다. 그림 13의 2F-A 모델의 해석결과에서 곡선의 전체적인 경향은 그림 12의 형상비가 1인 판의 해석결과와 대동소이하게 나타났다. 단지 순수 휨을 받는 판의 최소 좌굴계수를 갖는 형상비가 0.667인 판에 대한 해석결과이므로 좌굴응력 값이 다소 작게 나타났다. 추후 설계 시 절곡각도 별 좌굴강도 곡선을 사용한다면 안전한 설계를 위해 그림 13의 강도곡선을 사용하는 것이 타당하다고 판단된다.

그림 14의 2F-B의 해석 결과 또한 2F-A 모델과 유사한 경향을 나타내었고 상대적으로 좌굴 강도는 다소 낮게 나타났다. 또한 2F-B 모델의 경우 판 절곡 작업에서 판을 뒤집는 작업이 불가피하여 2F-A 모델에 비해 상대적으로 긴 제작기간을 필요로 하며 제작비용 증가에 따라 가격 경쟁력 또한 낮으므로 2번 절곡하는 판의 경우 2F-A와 같은 형상을 갖는 판으로 형상을 최종적으로 결정하였다.

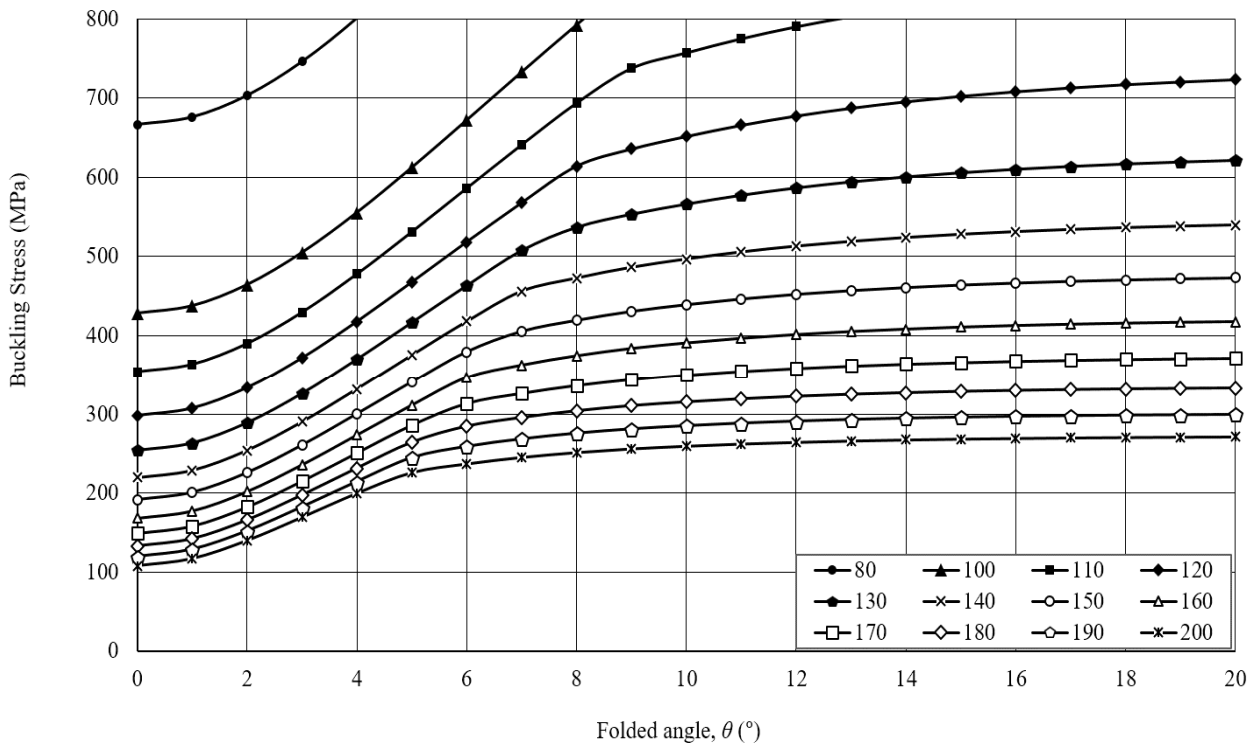


그림 13. 휨 좌굴해석 결과 (2F-A, $a/b=0.667$)

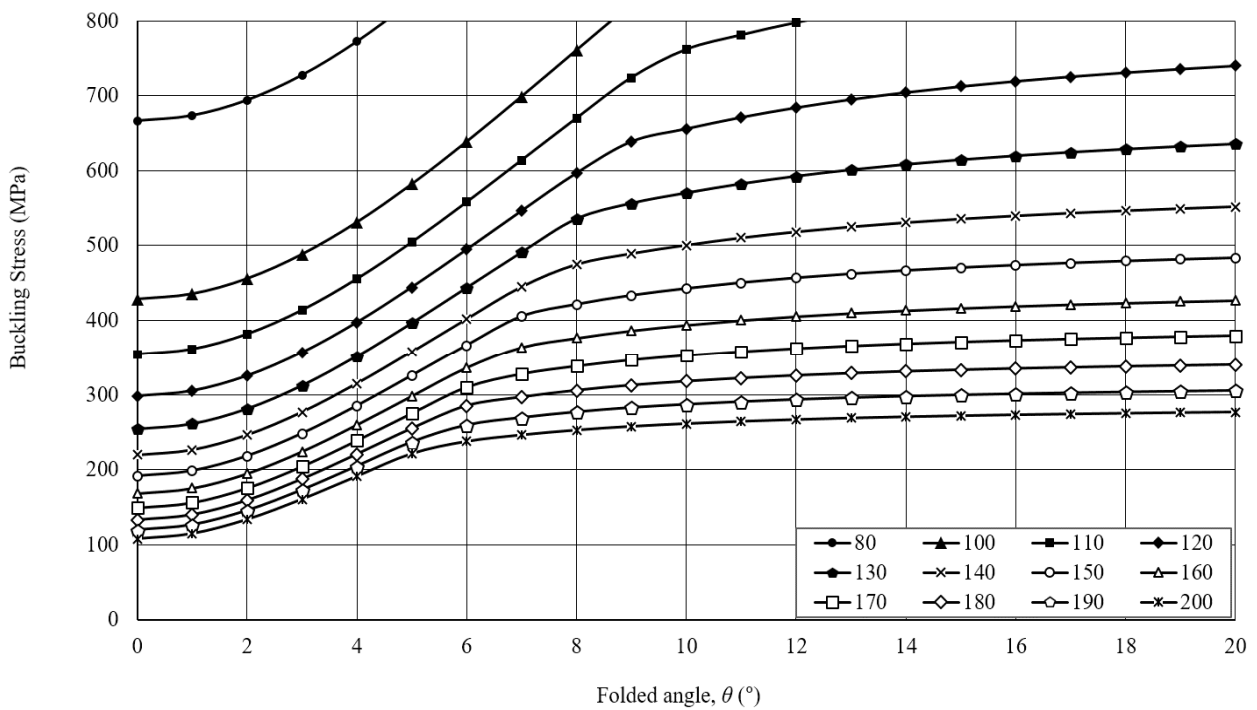


그림 14. 휨 좌굴해석 결과 (2F-B, $a/b=0.667$)

4번 절곡한 판(4F-A, 4F-B)의 해석결과는 그림 15, 16와 같다. 4번 절곡한 판의 경우 가장 바깥쪽 패널의 경우 절곡전 평면에 대해 2θ 만큼 절곡되는데 절곡 각도를 40° 까지 고려하면 같은 강재량을 사용하는 경우 절곡 각도가 커질수록 거더 높이가 줄어들어 거더의 전체 휨강성을 낮추게 되는 등의 단점이 발생하므로 4번 절곡한 판의 경우 절곡 각도 θ 를 10° 까지만 고려하였다. 4번 절곡한 판의 경우에도 2번 절곡한 판과 마찬가지로 4F-A, 4F-B 좌굴 강도곡선의 형태가 서로 거의 유사한 경향을 나타내며 4F-A 모델에 비해 4F-B 모델의 좌굴 강도는 유사하거나 혹은 낮게 나타났다. 4F-B 모델 역시 2F-B 모델과 마찬가지로 제작시 판을 뒤집는 공정이 불가피하여 제작기간 및 제작비용에서 약점을 갖는다. 이에 4번 절곡한 판의 형상 또한 최종적으로 4F-A 모델의 형상으로 결정하였다.

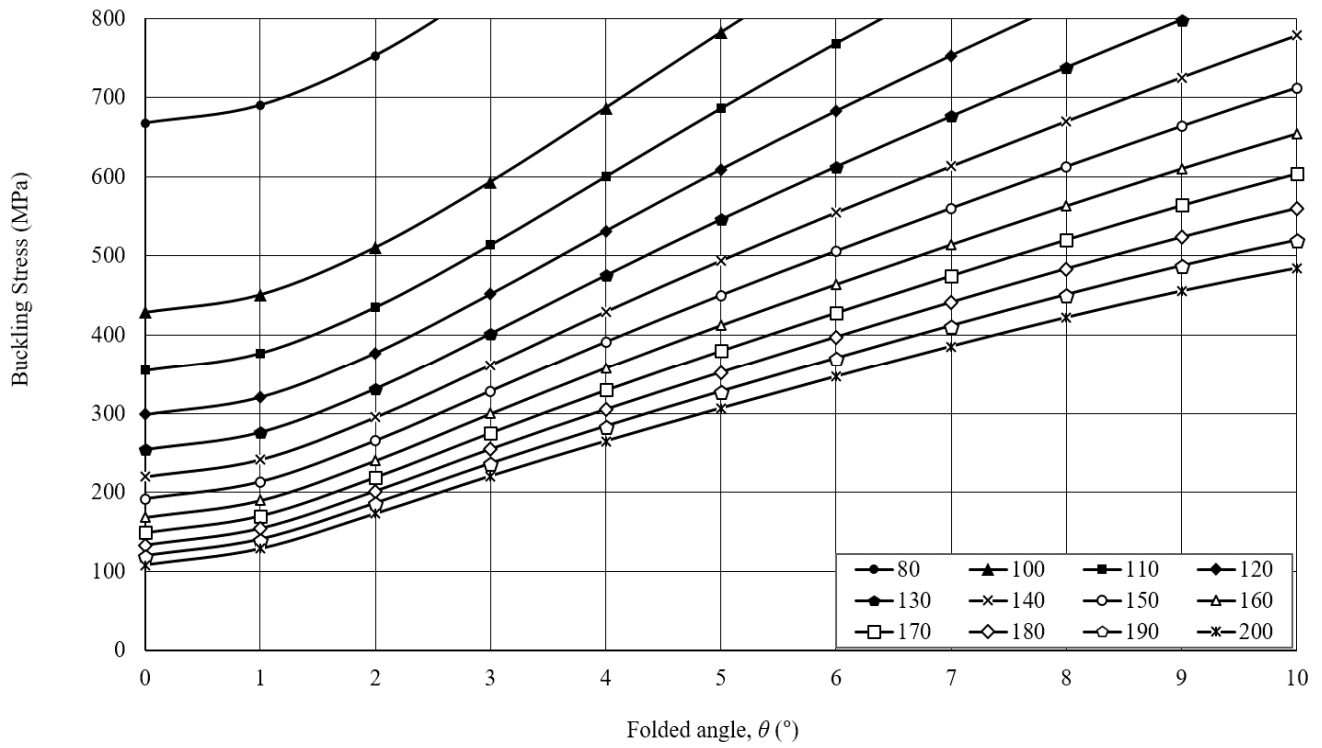


그림 15. 휨 좌굴해석 결과 (4F-A, $a/b=0.667$)

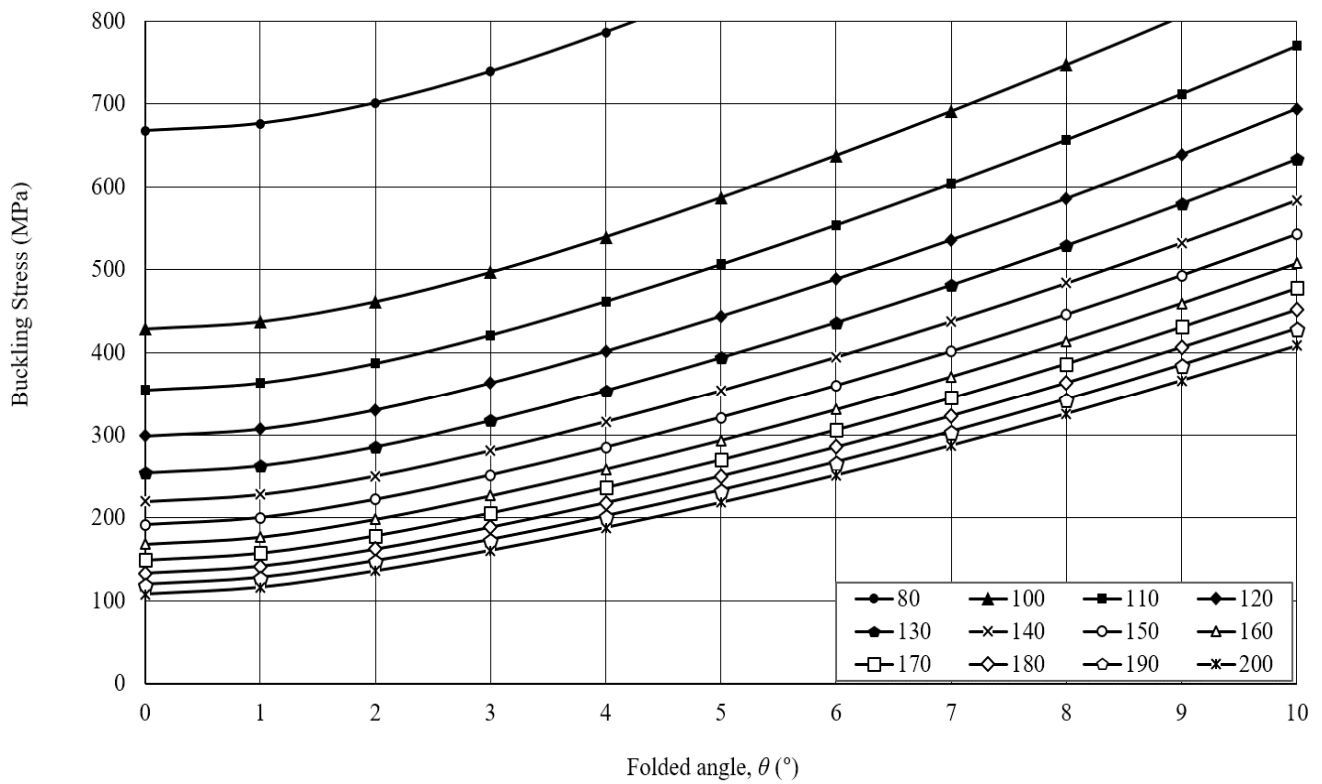


그림 16. 휨 좌굴해석 결과 (4F-B, $a/b=0.667$)

3) 형상비에 따른 전단 좌굴 성능

단순지지된 판의 전단 좌굴강도는 형상비 $\alpha (=a/b)$ 가 1과 같거나 큰 판에 대해 식 1과 같이 나타내어진다.

$$k_s = 5.34 + \frac{4}{\alpha^2} \quad (1)$$

형상비 1인 경우 9.34의 좌굴 계수를 가지며 무한히 긴 판의 경우 최소 좌굴강도인 5.34를 갖게 된다. 그러나 무리하게 긴 판에 대한 좌굴 해석 시 판의 양단에 작용하는 하중의 원활한 전달이 이루어지지 않아 불확실한 결과를 보이는 경향이 있다. 이와 같은 이유로 형상비 5를 갖는 판에 대한 해석을 수행하였다. 형상비가 5인 경우 좌굴계수는 5.5가 되고 무한히 긴 판의 좌굴계수 5.34와 비교하여 3% 정도의 차이를 갖는다. 따라서 기 수행한 해석에서와 동일한 물성치, 경계조건 및 하중조건을 갖는 형상비 5인 판에 대한 전단 해석을 수행하였다. 이 때, 해석 모델의 형상은 그림 17과 같다.

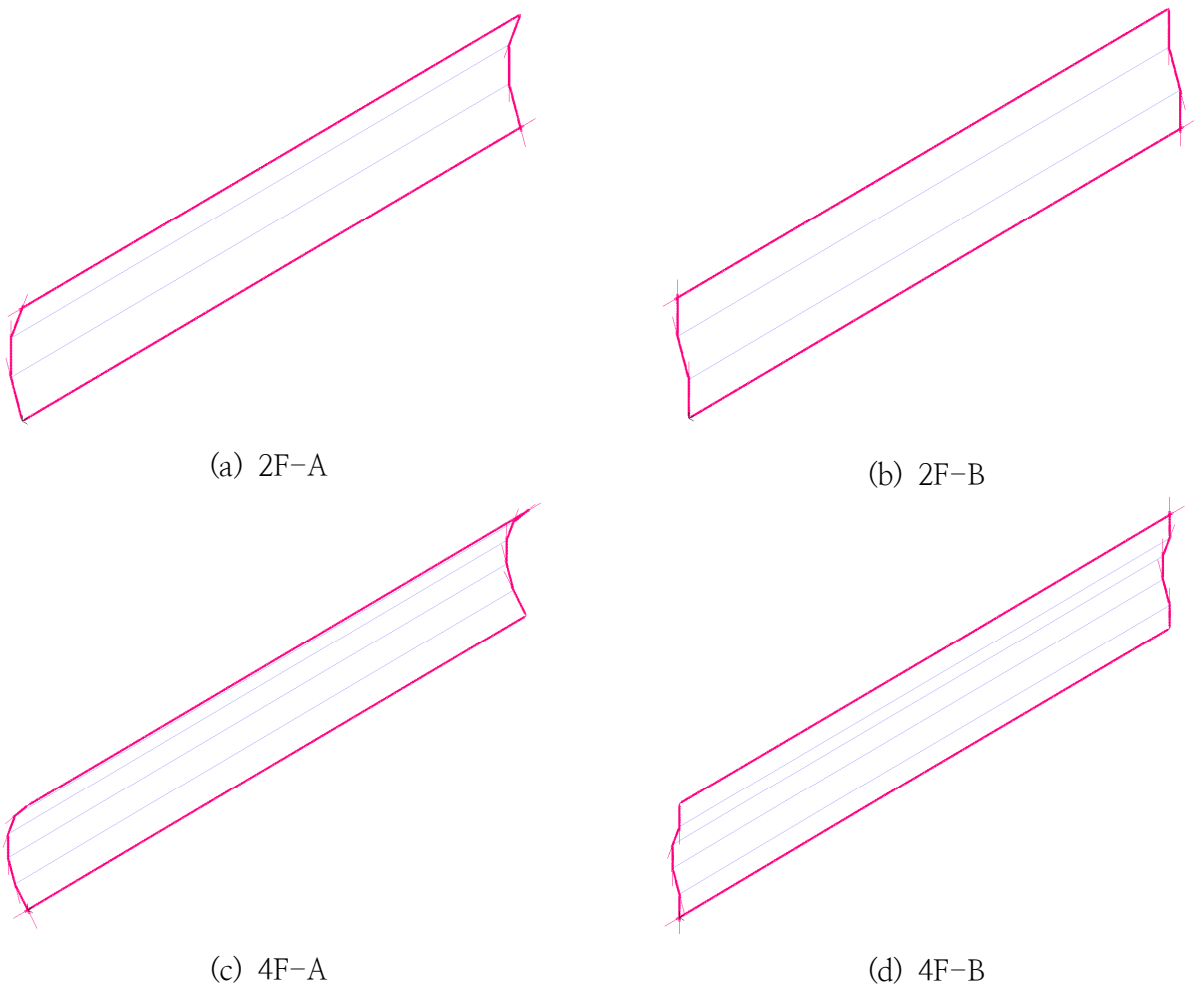


그림 17. 전단 좌굴 해석 모델 형상 (형상비 5)

전단 좌굴 해석 결과는 그림 18~21과 같다. 휨 좌굴 해석에서와 같이 절곡한 횡수가 동일한 판의 경우 A모델과 비교할 때, B모델의 해석결과 절곡 각도에 따른 좌굴 성능 증가 경향은 거의 유사하게 나타났으며 좌굴 강도는 거의 동일하거나 상대적으로 약간 낮은 수준으로 나타났다. 앞에서 언급한 것과 같이 B모델 형상의 경우 제작 시 판을 뒤집어서 절곡하는 공정이 불가피한 단점을 가지므로 두 번, 네 번 절곡한 판의 A모델 형상을 각각의 최적형상으로 결정하는 것이 타당하다고 판단된다.

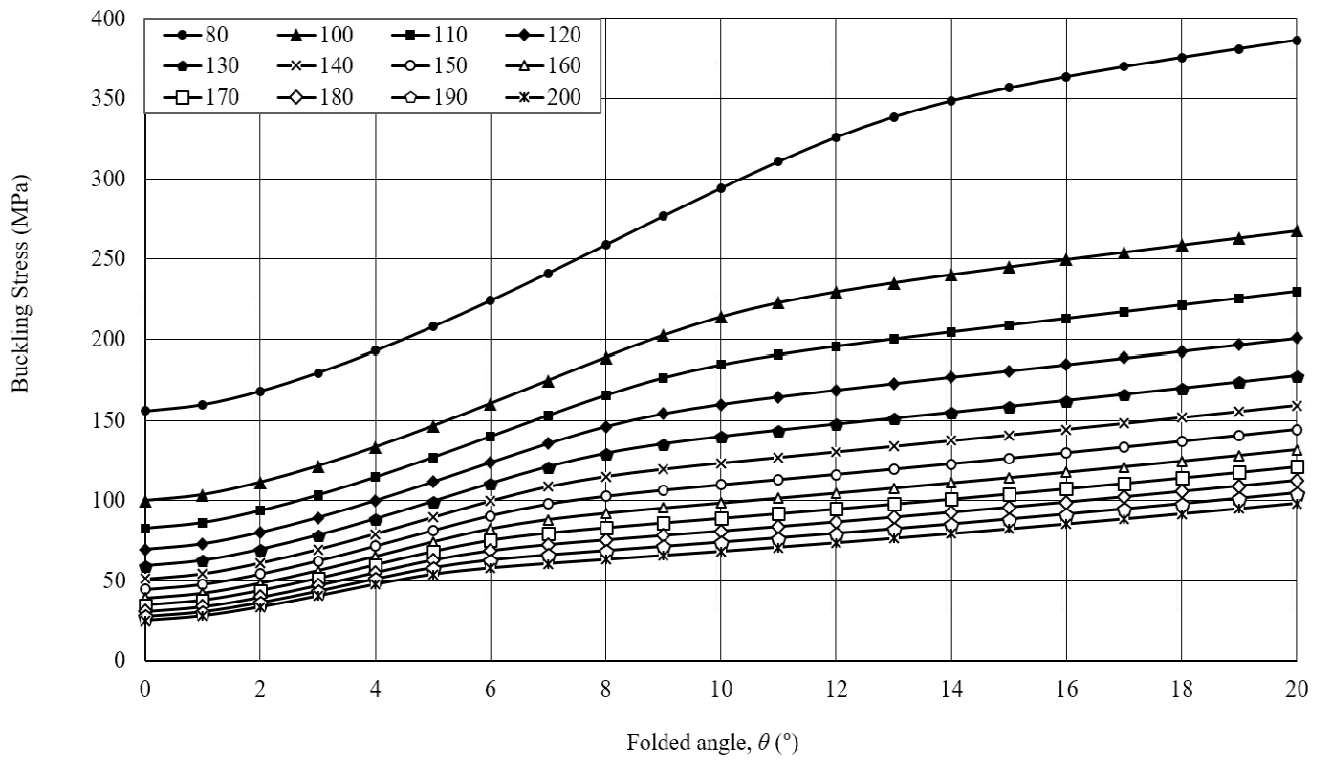


그림 18. 전단 좌굴해석 결과 (2F-A, $a/b=5$)

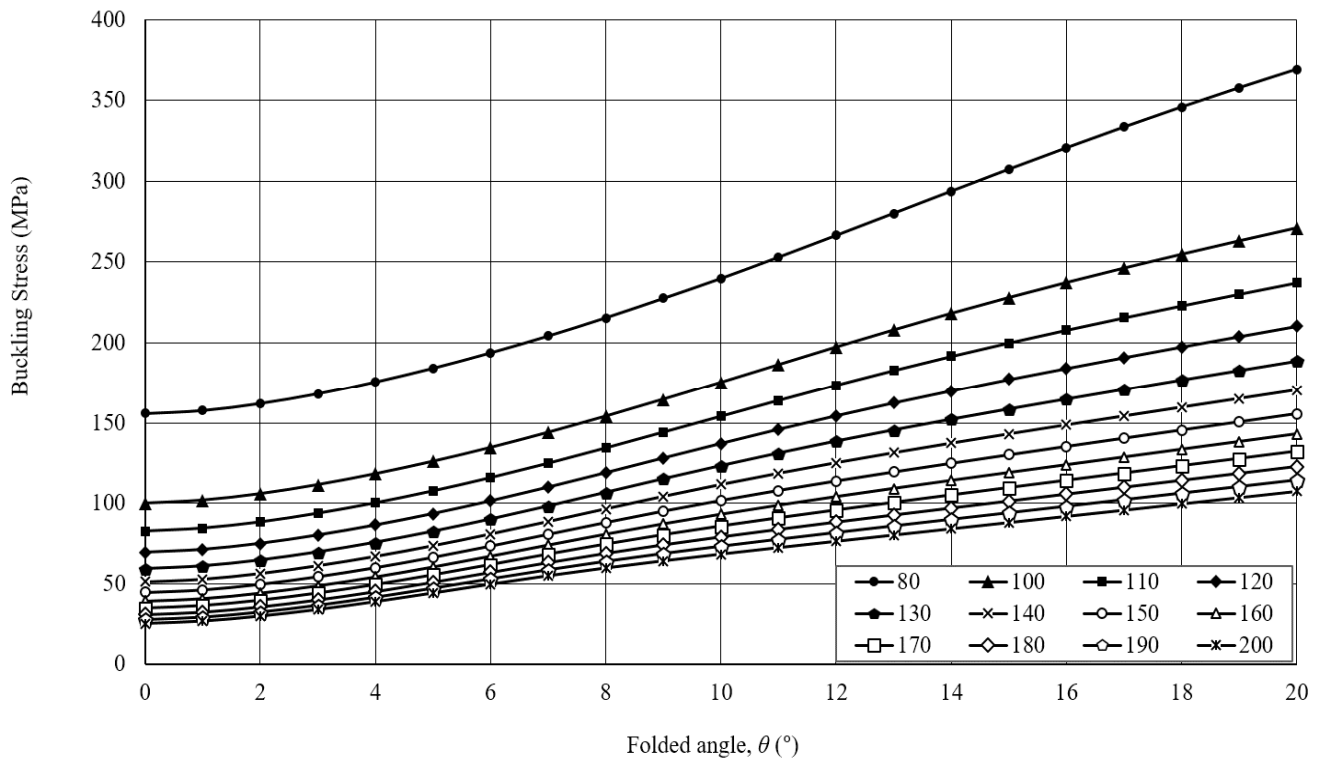


그림 19. 전단 좌굴해석 결과 (2F-B, $a/b=5$)

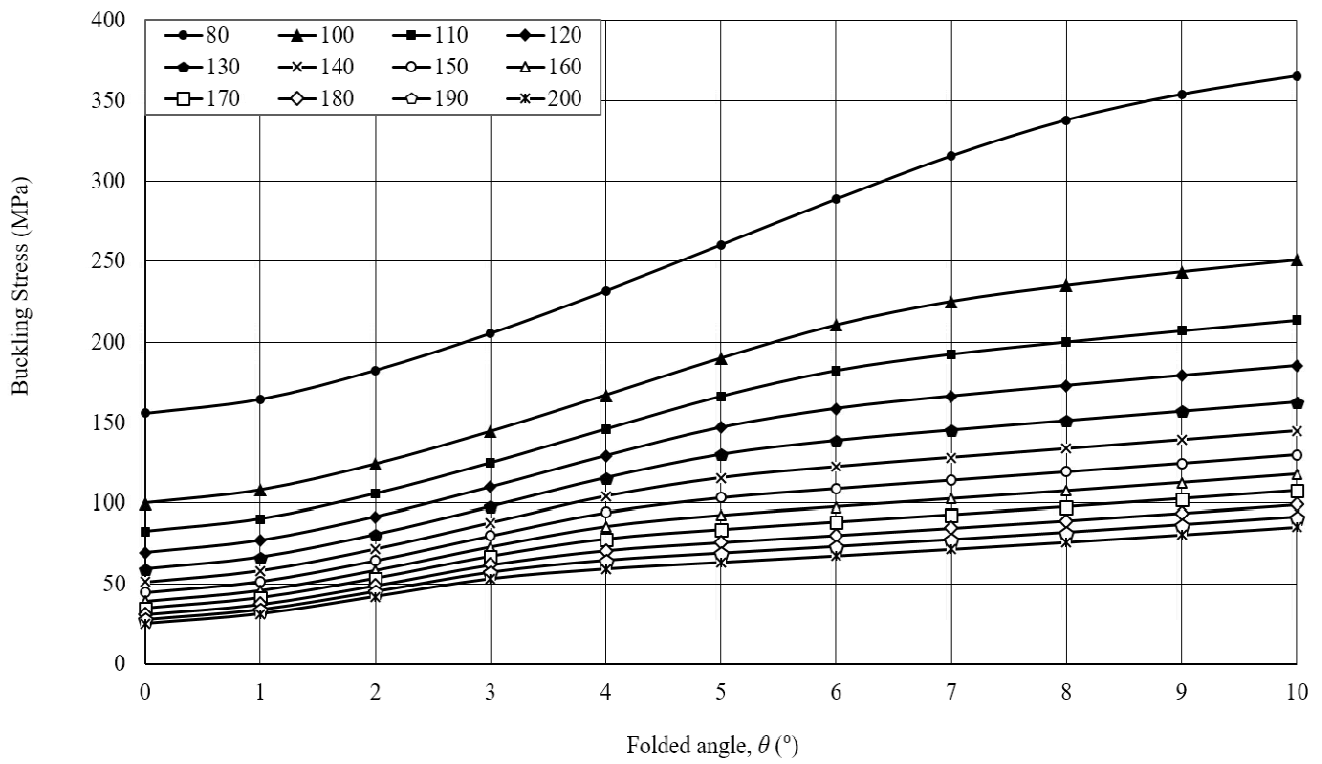


그림 20. 전단 좌굴해석 결과 (4F-A, $a/b=5$)

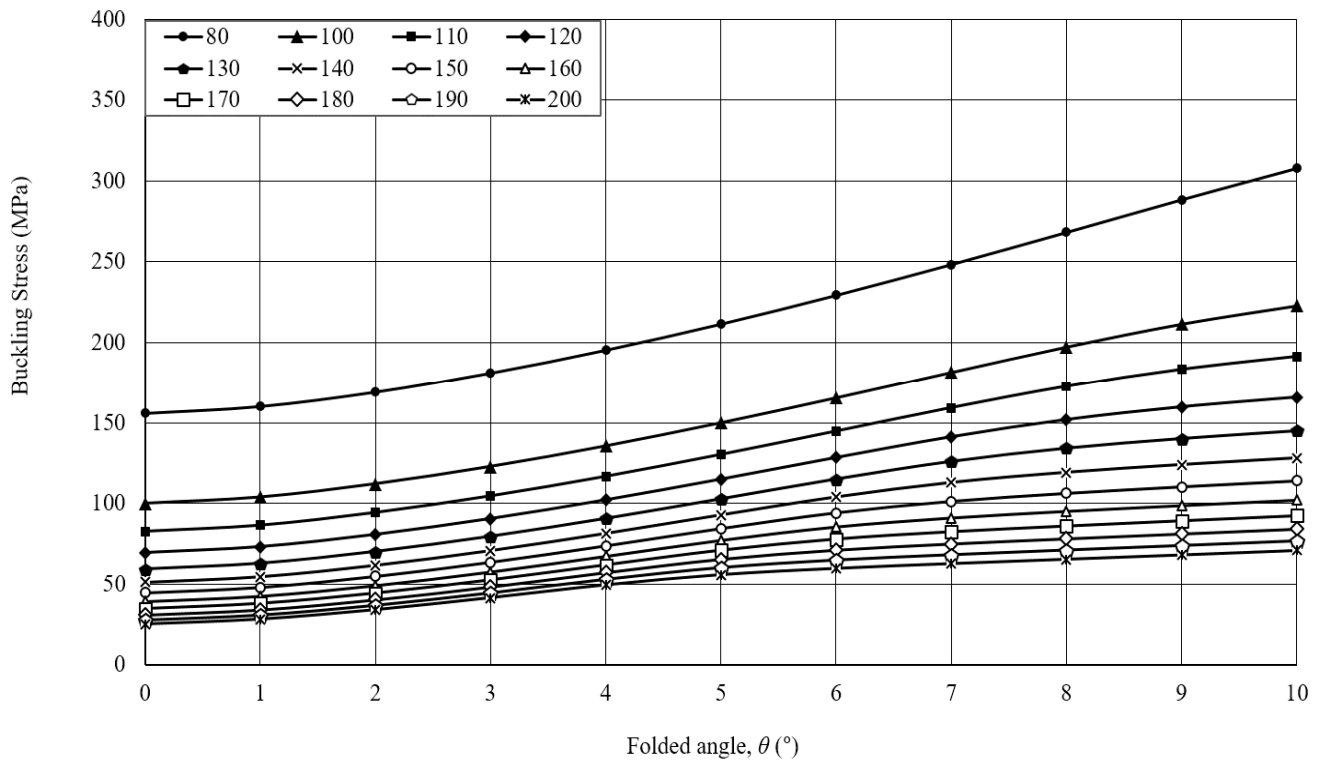


그림 21. 전단 좌굴해석 결과 (4F-B, $a/b=5$)

4) 휨과 전단을 동시에 받는 판의 좌굴 성능

앞서 형상비가 1인 판에 대한 휨 및 전단 좌굴 해석을 수행하였고, 이 결과를 바탕으로 휨과 전단을 동시에 받는 판의 휨-전단 상호작용효과를 검토하기 위해 형상비가 1이고 휨과 전단 하중을 동시에 재하 한 모델에 대한 해석을 수행하였다. 물성치와 경계조건은 이전 해석들과 동일하고 하중재하조건은 그림 22와 같다.

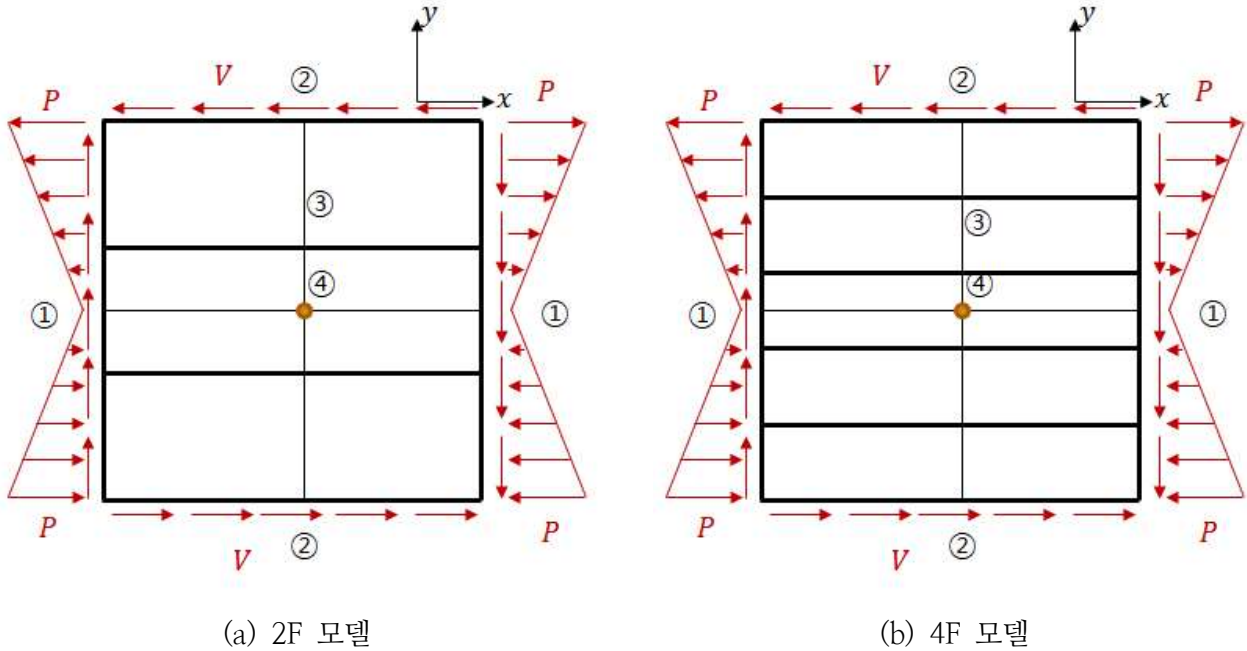


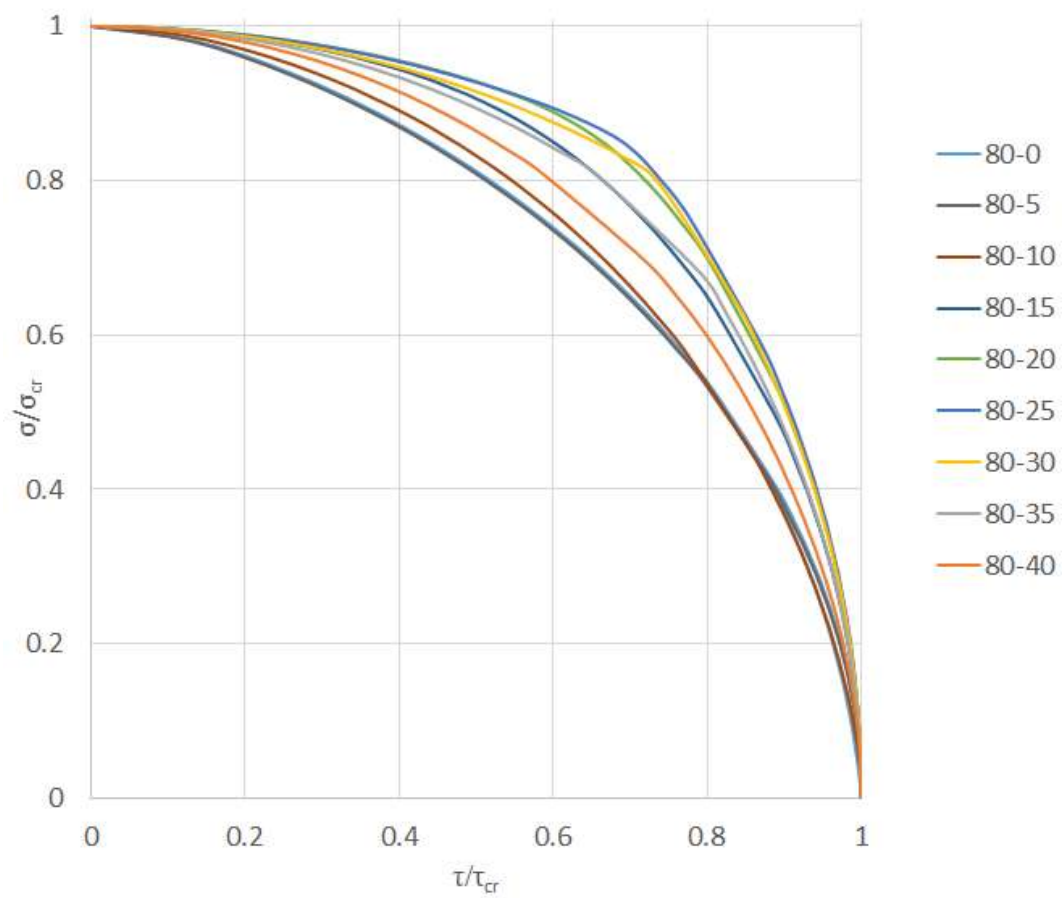
그림 22. 휨-전단 상호작용 검토 모델 하중조건

본 해석에서의 매개변수는 총 3가지로 이전 해석들과 동일하게 절곡 각도 및 판의 세장비를 변화시키며 해석하였고, 휨 하중 P 와 전단하중 V 의 비율 P/V 를 변화시키며 각각 휨과 전단의 기여도를 변화시키며 해석을 수행하였다.

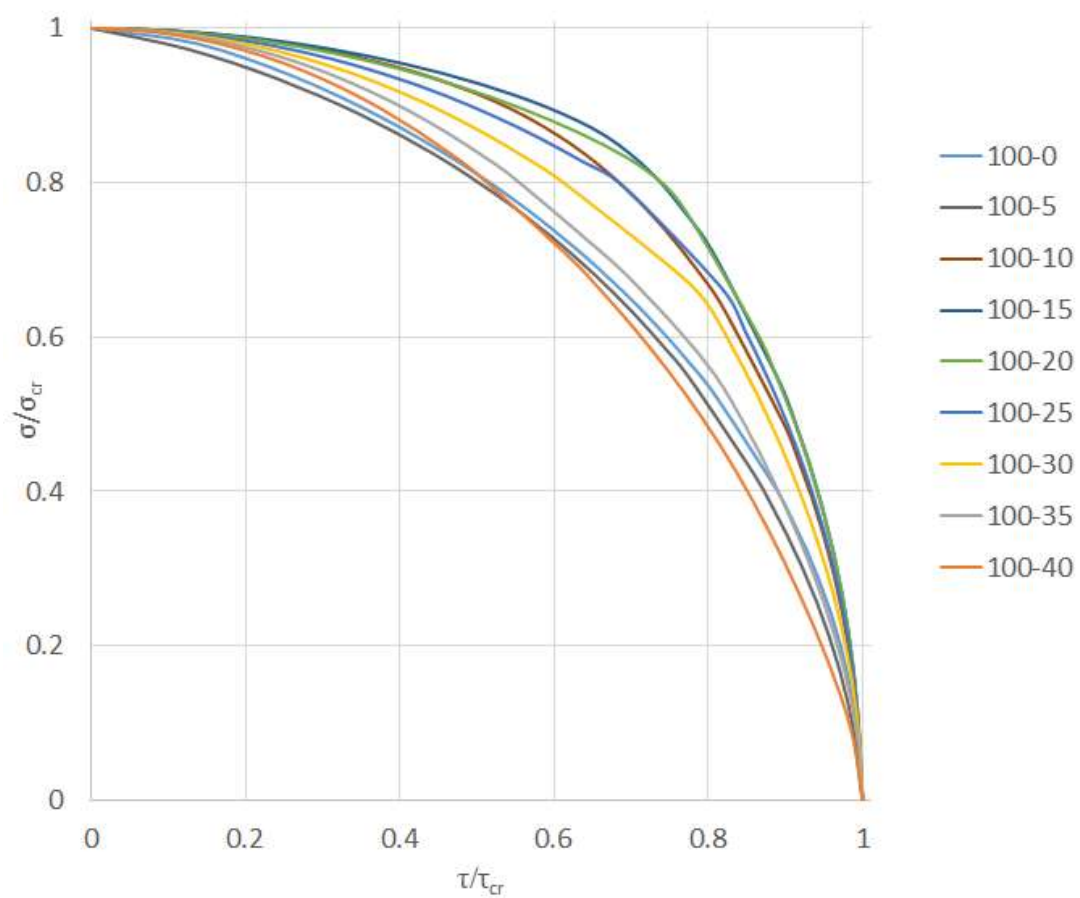
해석 결과는 그림 23에서 주어진다. 절곡 횟수 및 세장비에 따라 미소한 차이는 있으나 전체적으로 절곡 각도가 0, 즉 평판인 경우 상호작용효과가 가장 크게 발생함을 알 수 있다. 안전한 설계를 위해 휨과 전단을 동시에 받는 형상비 1인 판의 상호작용 곡선을 설계곡선으로 사용함이 타당하다고 판단하였고, 이에 평판의 상호작용 곡선을 고려한 설계식은 식 (2)와 같다.

$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_{cr}} + 0.1 \right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{cr}} + 0.1 \right)^2 = 1.22 \quad (2)$$

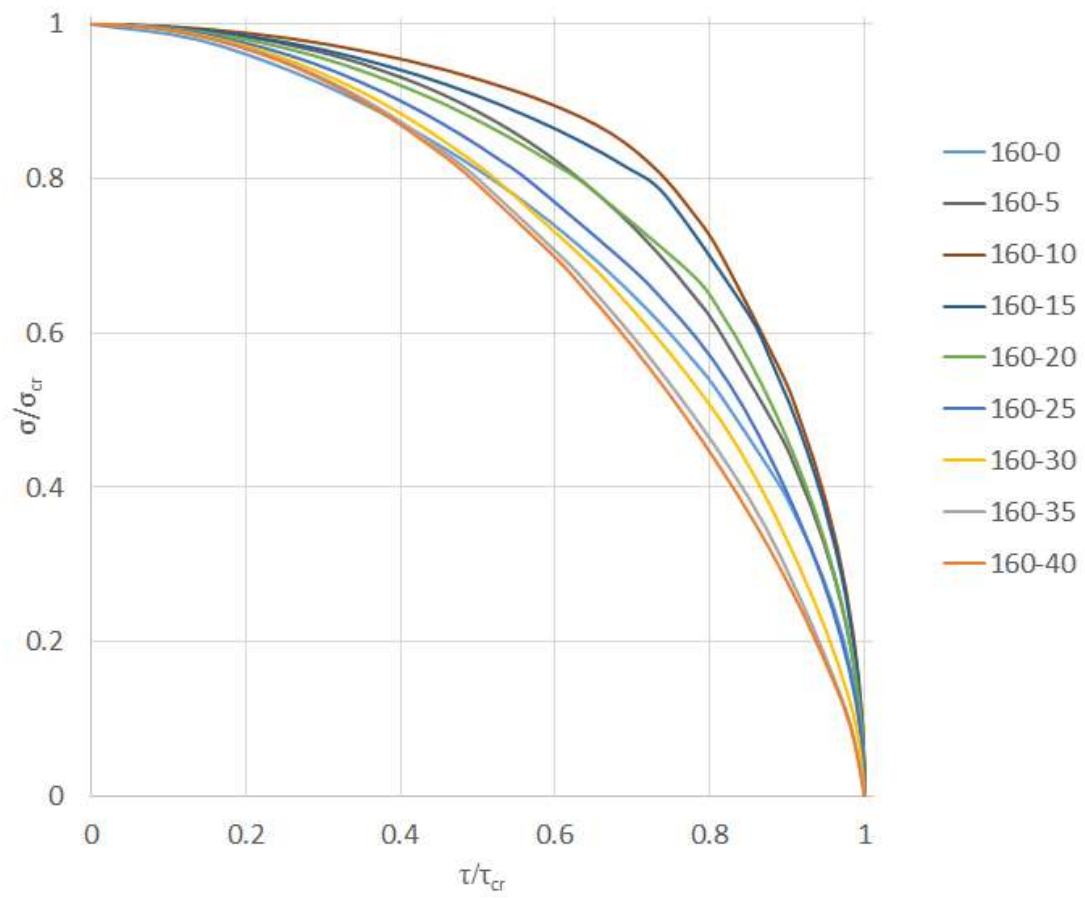
이를 평판의 상호작용 검토 해석 결과와 같이 도식화하면 그림 24와 같다. 그림에서 보는 것과 같이 설계식을 통해 평판의 상호작용 곡선을 거의 유사하게 표현함을 알 수 있다. 따라서 설계 시 식 (2)를 통해 휨-전단 상호작용을 검토하도록 한다.



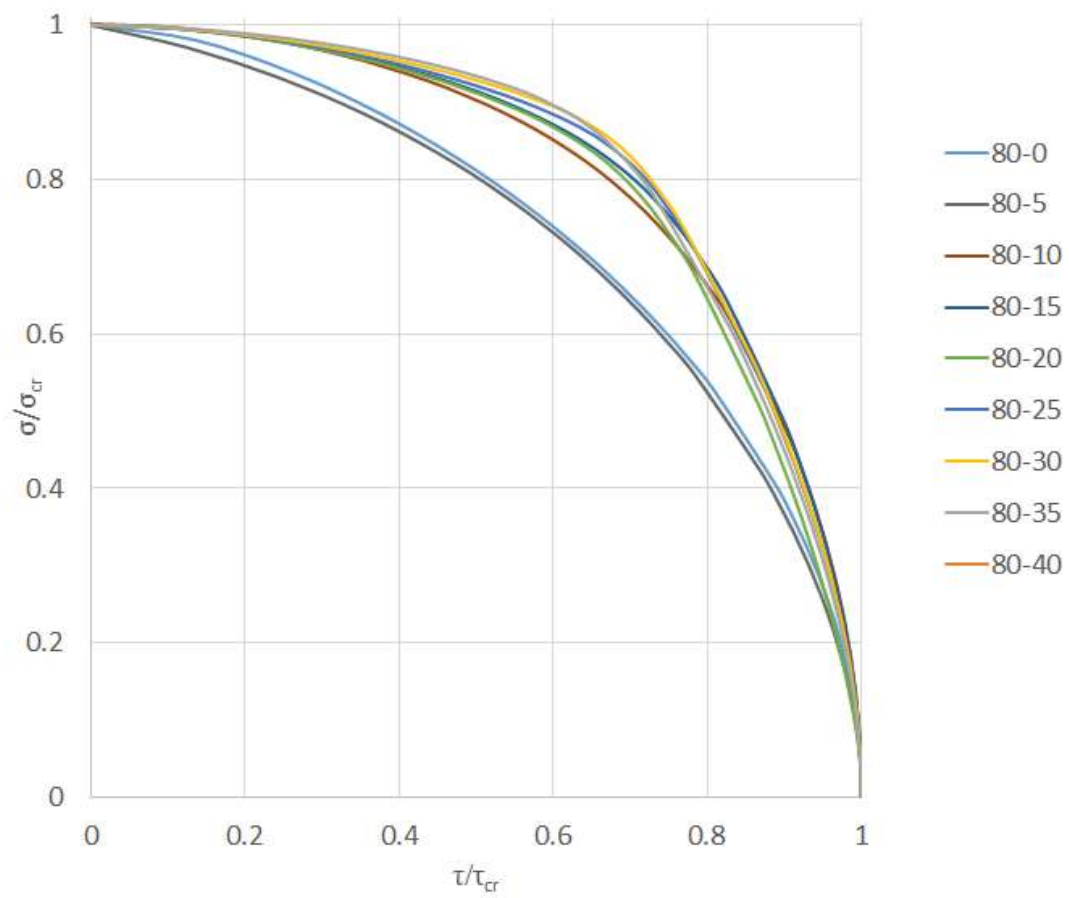
(a) 2F ($b/t=80$)



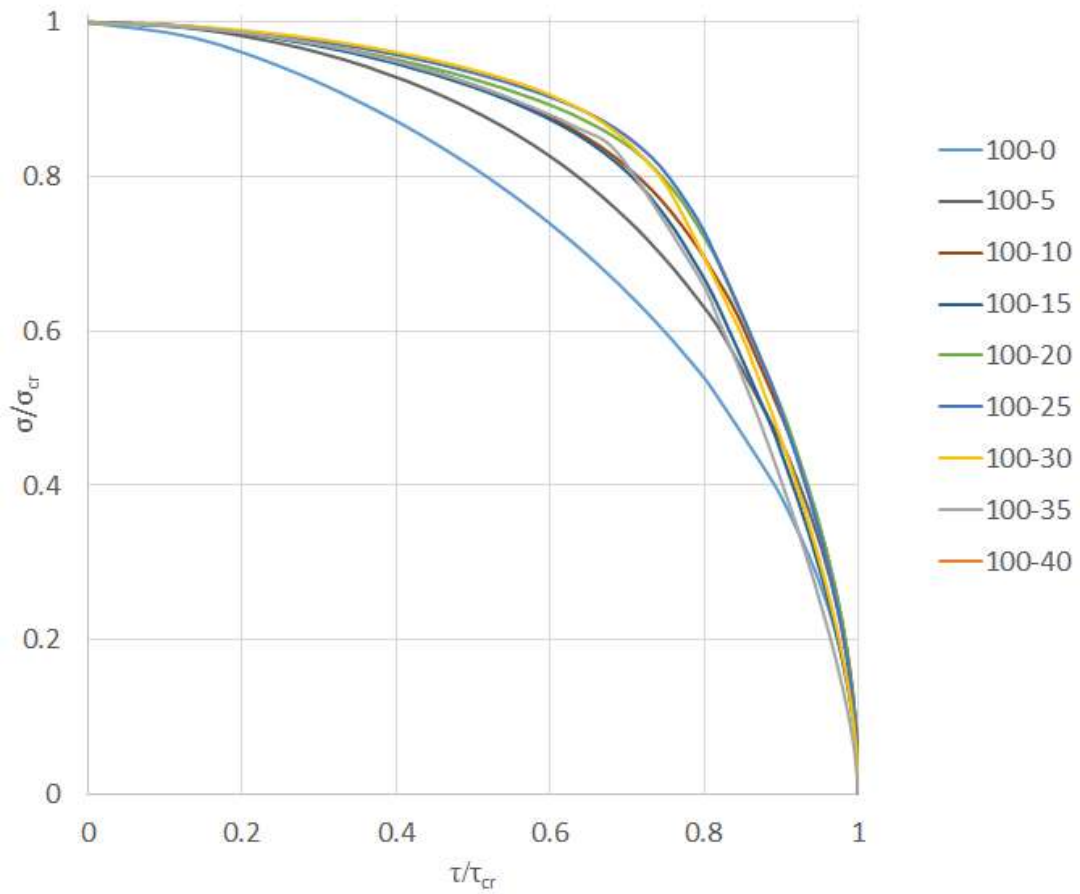
(b) 2F ($b/t=100$)



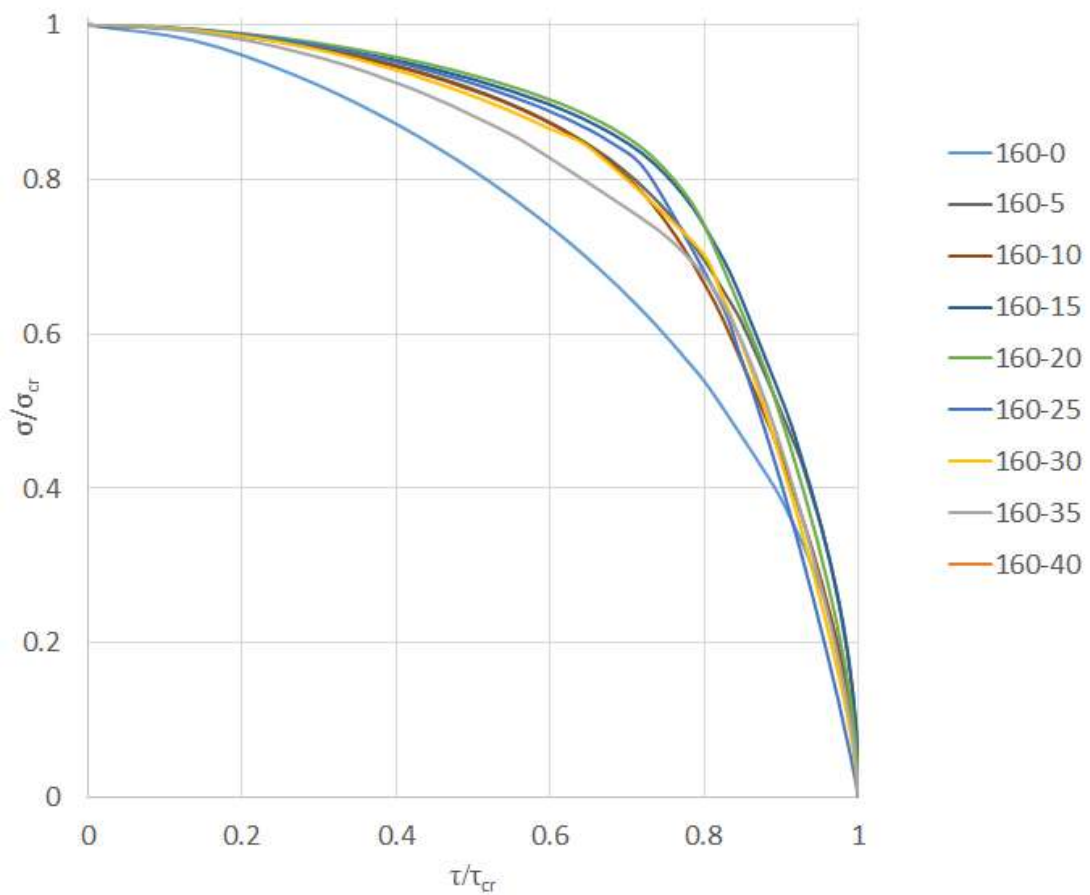
(c) 2F ($b/t=160$)



(d) 4F ($b/t=80$)



(e) 4F ($b/t=100$)



(f) 4F ($b/t=160$)

그림 23. 휨-전단 상호작용 곡선

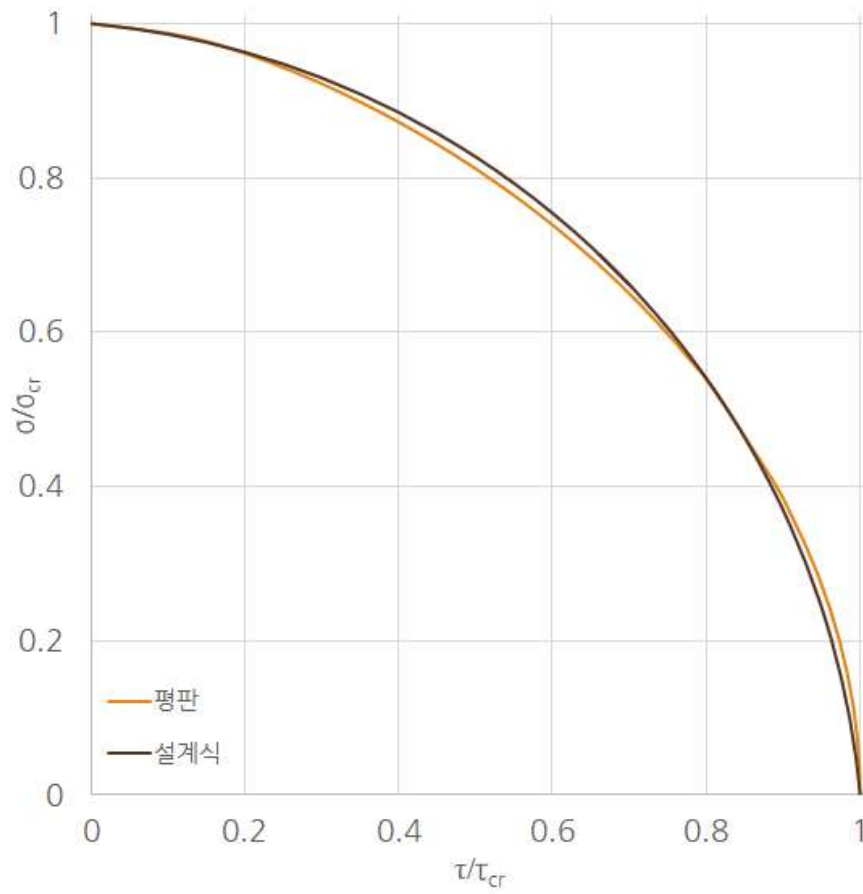


그림 24. 평판의 상호작용 곡선 vs. 설계식 곡선

3. 실험을 통한 지압 성능 검토

가. 실험체 제원

1) 전체 제원 및 복부판

가) Single 모델

2F-A 형상의 복부판을 갖는 실험체 Single 모델로 명명하였다. 지점간 거리 10m, 거더 폭 960mm 및 절곡 전 복부판의 폭 1140mm를 갖는 거더로 설계하였다. 복부판 두께는 8mm로 세장비 142.5이다. 복부판 설계는 앞서 도출한 절곡 각도에 따른 좌굴강도 곡선을 이용하였다. 실험체를 구성하는 강판은 모두 SM400 강재로 하였으며, 이때 설계기준에서 제시하는 최소 항복강도는 235MPa이다. 그러나 이전 수행한 타 과제에서 진행한 실험 시 강재의 재료성능시험 결과에 따르면 SM400 강재임에도 불구하고 항복강도가 300MPa 이상, 혹은 항복강도인 400MPa 이상을 갖는 강판이 상당히 많았다. 실험체 설계 이전에 재료시험을 통해 확실한 성능을 확인하는 것이 최선의 방법이었으나 현실적으로 연구 진행도 및 연구 기간에 제한이 있어 강재의 성능을 400MPa로 가정하여 설계하였다.

그림 25를 통해 400MPa 이상의 좌굴 강도를 갖기 위해서 대략 8° 이상의 절곡 각도를 가지는 경우 충분한 좌굴 성능을 보일 것으로 판단된다. 여기에 안전측으로 10° 의 절곡 각도를 갖도록 설계하였다.

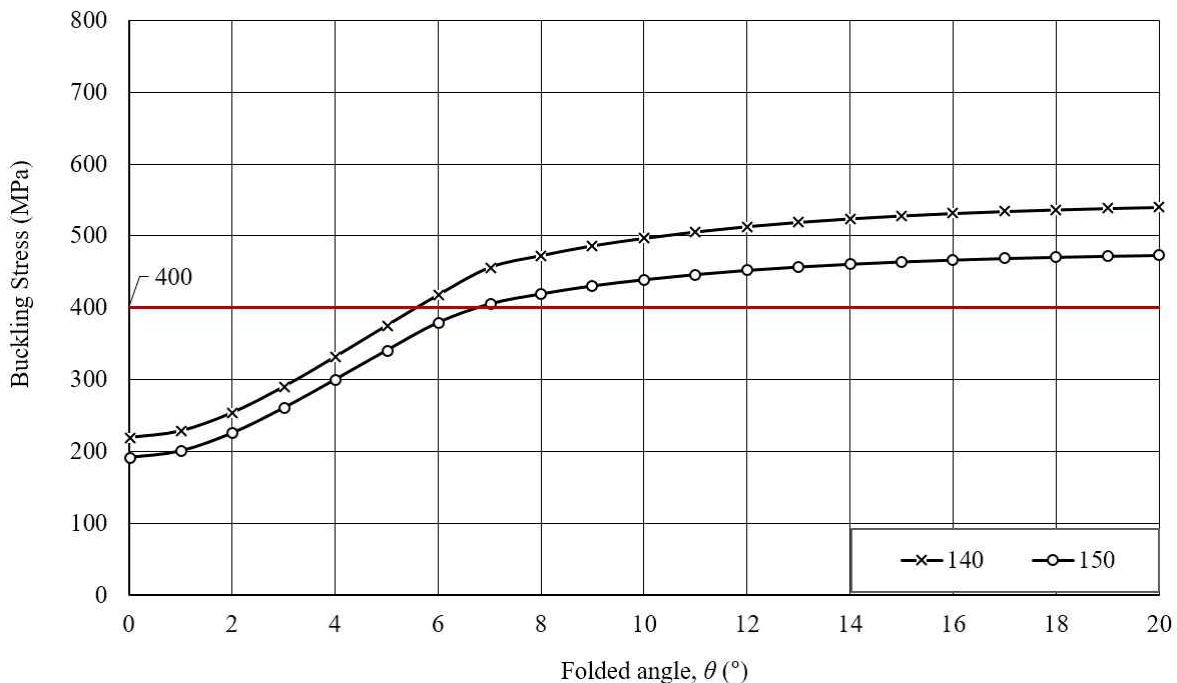


그림 25. 휨 좌굴 검토(Single)

결정된 단면을 토대로 예상되는 플랜지 항복도달 시 하중은 1972kN이고, 이때 전단응력은 54MPa이다. 이 값을 전단강도 곡선으로 검토하면 그림 26과 같다. 절곡 각도 10° 인 세장비 150인 판의 전단좌굴 강도가 110MPa 정도이므로 전단 좌굴에 대해 안전하다고 판단 할 수 있다.

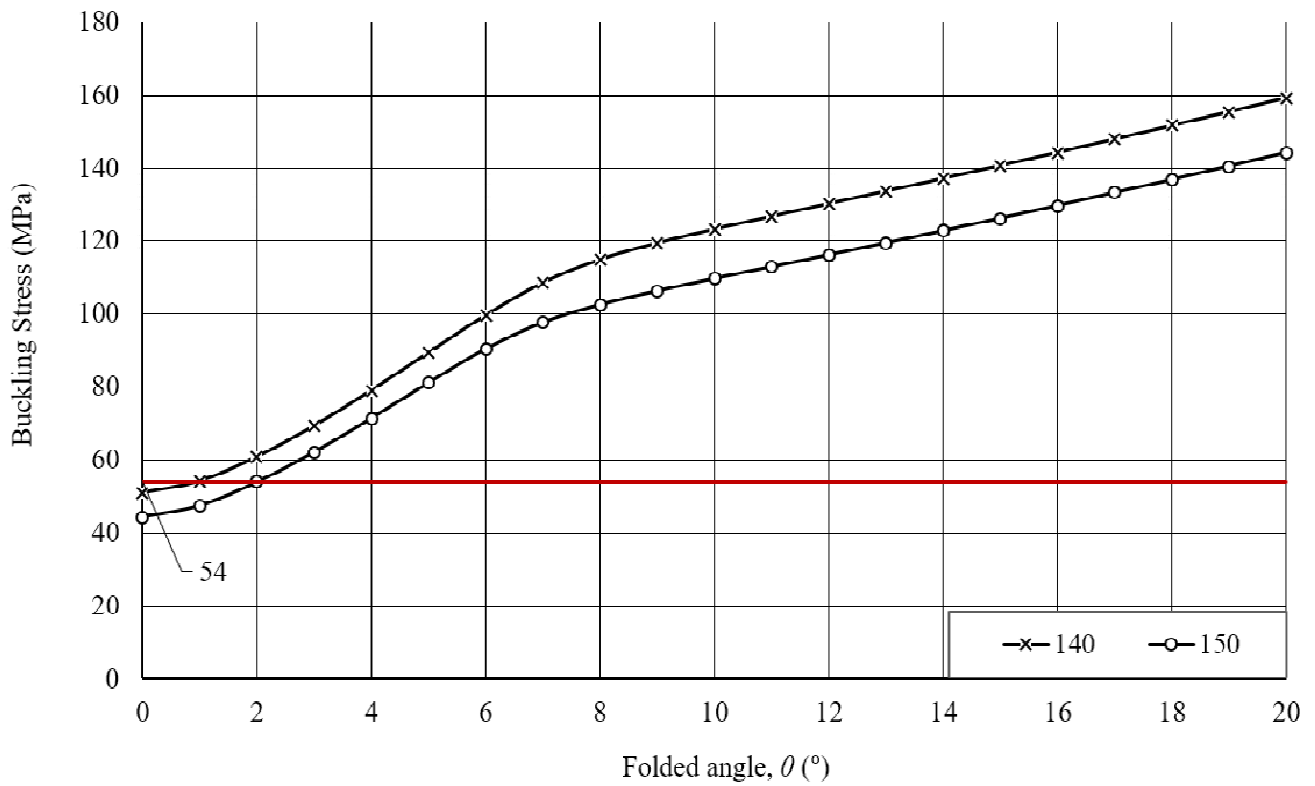


그림 26. 전단 좌굴 검토(Single)

나) Double 모델

4F 형상의 복부판을 갖는 실험체를 Double 모델이라 명명한다. 복부판의 형상과 복부판 형상의 차이에 따른 거더 높이를 제외한 모든 제원은 Single 모델과 동일하다. Double 모델도 강재 항복강도를 400MPa로 가정하여 설계하였으며 이에, 4F-A 휨 좌굴 강도곡선을 이용하면 그림 27과 같으며, 수치해석을 통한 Double 거더의 항복하중은 1977kN으로 이때 발생하는 전단응력은 54Mpa 수준이므로 그림 28와 같이 전단 좌굴에 대해 안전함을 확인할 수 있다. 최종 실험체 도면은 그림 31과 같다.

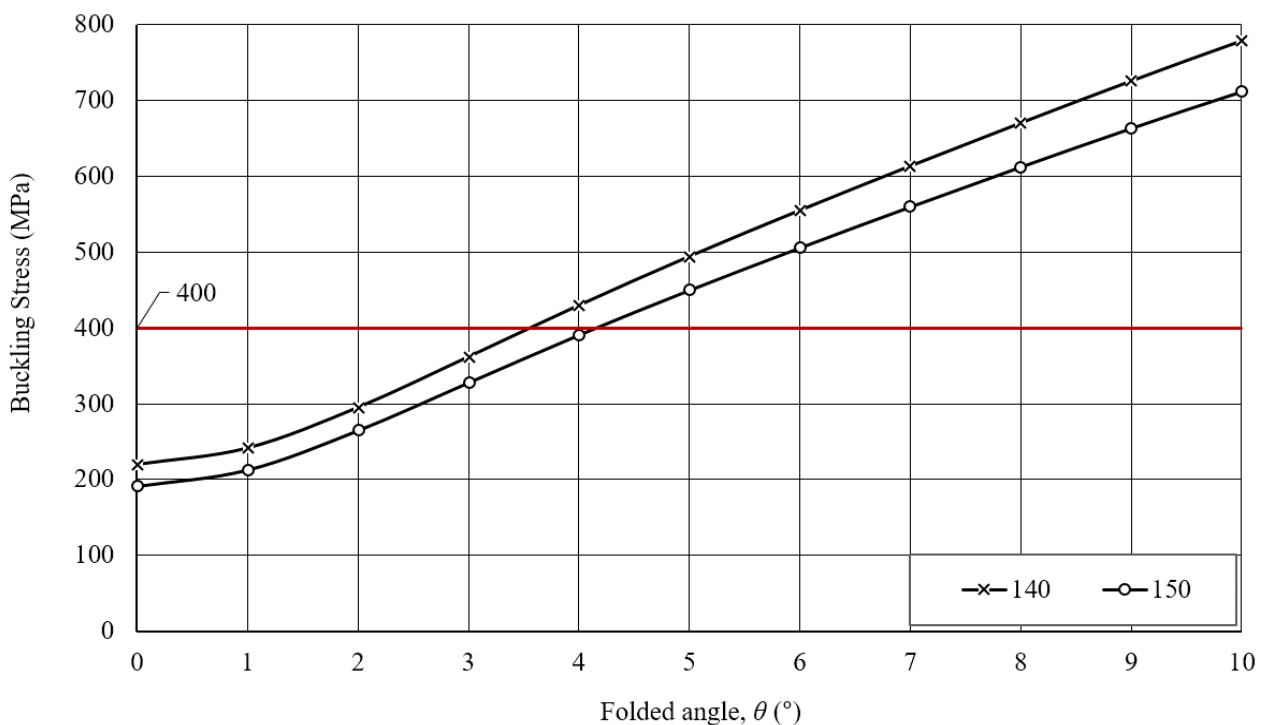


그림 27. 휨 좌굴 검토(Double)

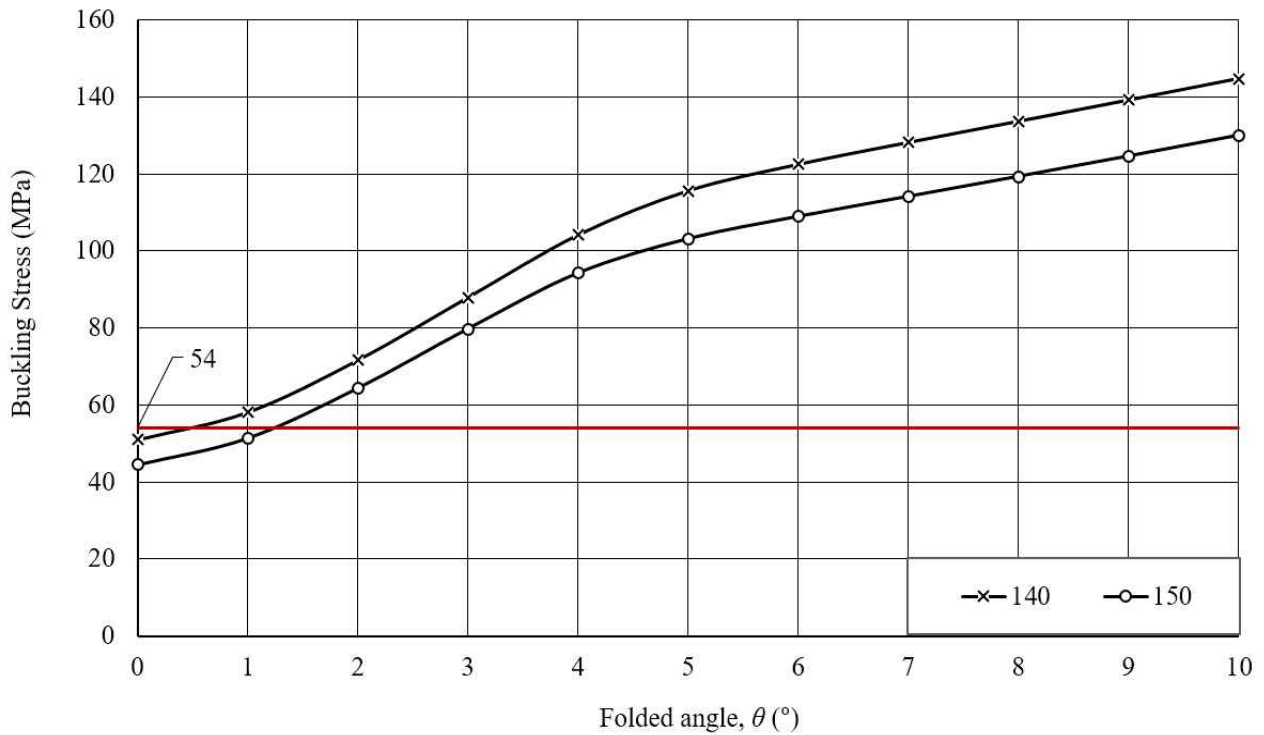


그림 28. 전단 좌굴 검토(Double)

2) 플랜지

본 실험의 목적은 복부판의 거동을 검토하는데 있다. 따라서 압축플랜지에서 발생할 수 있는 국부 좌굴에 대한 검토를 진행하였다.

압축플랜지의 폭은 200mm, 두께는 20mm로 하여 세장비 5인 판으로 그림 29와 같이 하중을 받는 모서리가 단순지지되고 하중을 받지않는 모서리는 각각 단순지지와 자유단으로 가정하면 좌굴계수는 0.425이고 이 때, 좌굴응력은 3150MPa이다. 따라서 압축플랜지는 좌굴을 방지하는데 충분하게 설계되었다.

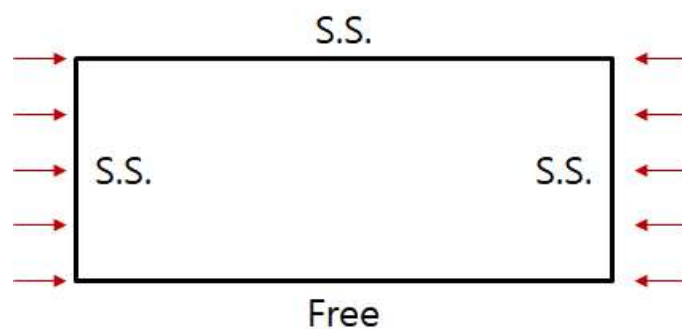


그림 29. 압축플랜지 경계조건

인장플랜지는 압축플랜지의 제원에 따라 거더 중립축이 복부판 중앙부에 위치할 수 있도록 폭 800mm, 두께 10mm로 결정하였었다.

3) 보강재

개형 단면이므로 상부플랜지에 K형 브레이싱을 설치하였고 지점부 및 하중 재하부에 집중되는 하중에 의한 파괴를 방지하기 위해 보강재를 충분히 배치하였다.

최종적으로 결정된 실험체 도면은 그림 30, 31과 같다.

Single

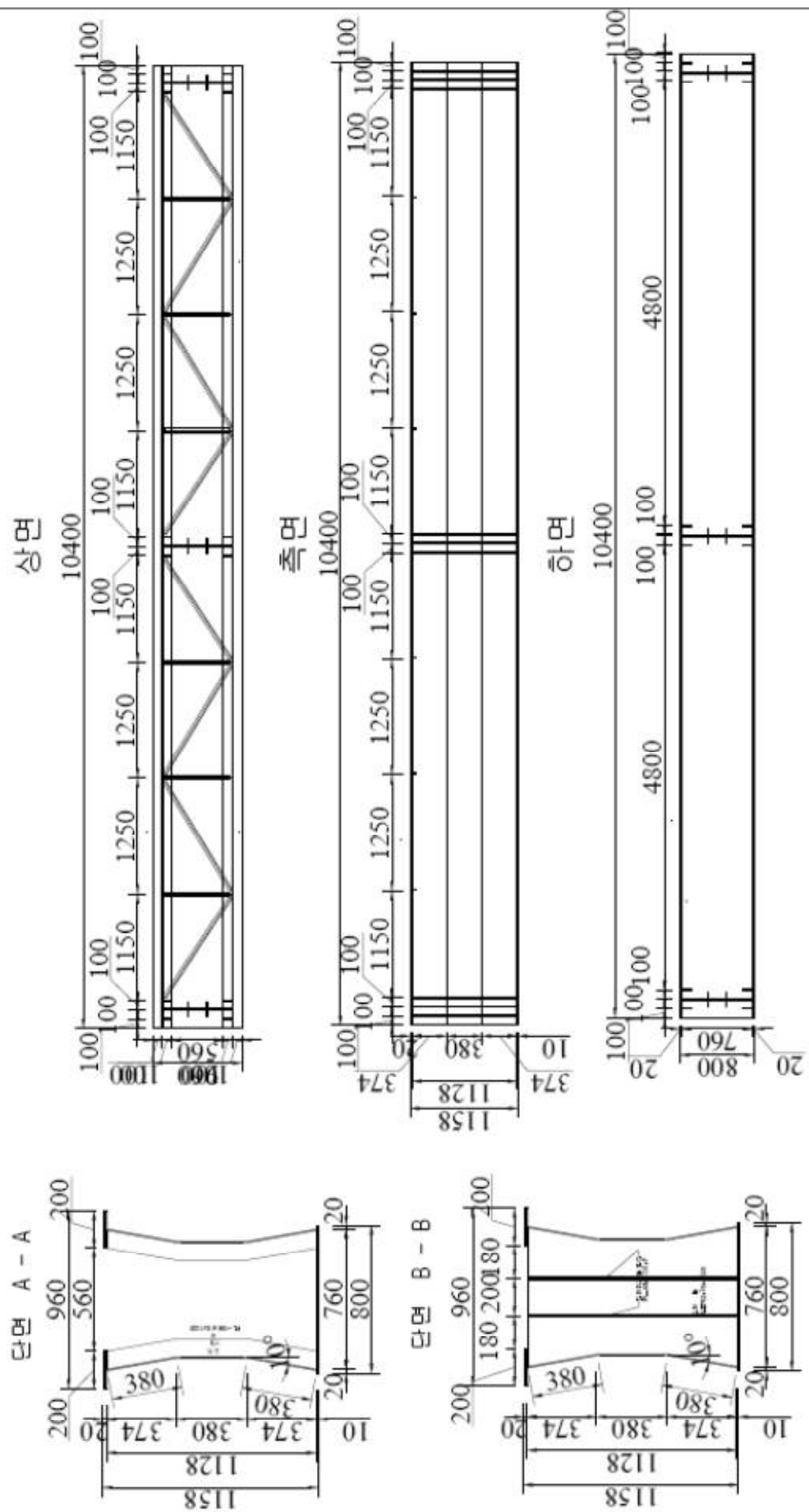


그림 30. Single 모델 설계도면

The drawing consists of four main views of a bridge structure:

- 상면 (Top View):** Shows the plan view of the bridge deck. It features a central rectangular area with diagonal reinforcement bars. Dimensions include a total width of 10400 mm and a central width of 4800 mm. Spacing between reinforcement bars is indicated as 100 mm and 1150 mm.
- 측면 (Side View):** Shows the side elevation of the bridge deck. It highlights the thickness of the deck and the arrangement of reinforcement bars. Dimensions include a total width of 10400 mm and a central width of 4800 mm. Spacing between reinforcement bars is indicated as 100 mm and 1150 mm.
- 하면 (Bottom View):** Shows the bottom view of the bridge deck. It features a central rectangular area with diagonal reinforcement bars. Dimensions include a total width of 10400 mm and a central width of 4800 mm. Spacing between reinforcement bars is indicated as 100 mm and 1150 mm.
- 단면 A-A (Section A-A):** A cross-section of the bridge deck. It shows the thickness of the deck and the arrangement of reinforcement bars. Dimensions include a total width of 10400 mm and a central width of 4800 mm. Spacing between reinforcement bars is indicated as 100 mm and 1150 mm.

- 31 -

나. 실험 방법 및 결과

본 실험의 목적은 절곡된 복부판의 지압성능을 검토하는데 있다. 본 연구에서 개발된 복부판은 수평방향으로 절곡하여 좌굴 성능을 증가시켰으나, 수직하중을 받는 경우 각각의 서브 패널이 서로 일정 각도를 가지고 기울어진 형태이므로 복부판 내에서 편심이 발생하여 복부판 자체가 찌그러져 강성을 잃는 파괴에 취약할 가능성을 배제할 수 없다. 따라서 이와 같은 문제점을 검토하기 위해 실험을 수행하였다.

본 실험에서 그림 32와 같은 3점 재하조건으로 가력하였다. 실험체의 형상은 Single/Double 모델 각각 그림 33, 34와 같다.

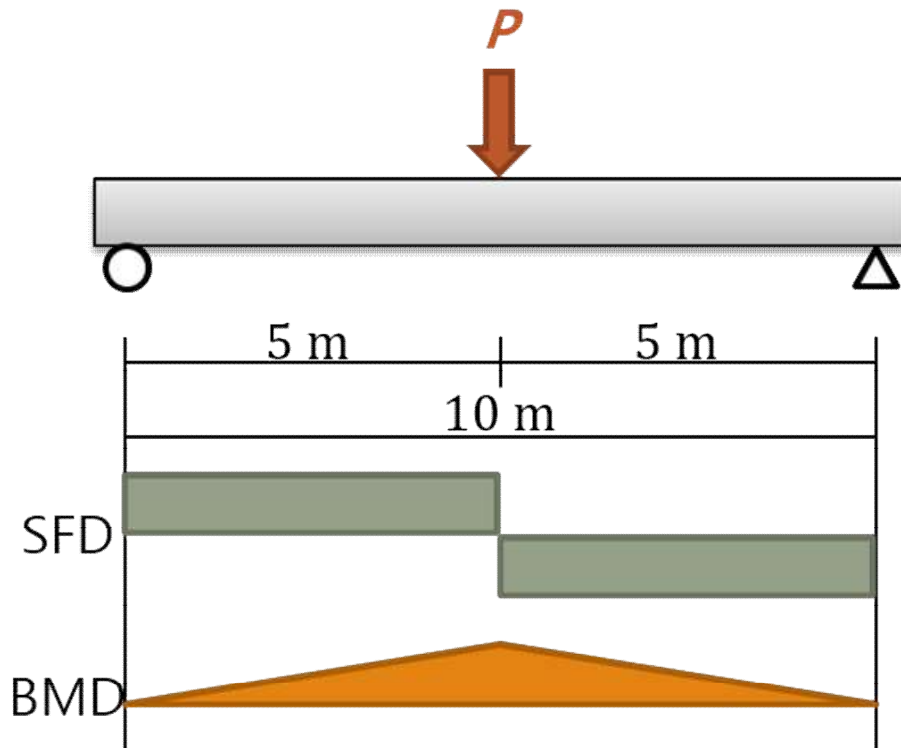


그림 32. 3점 재하 하중조건



그림 33. Single 모델 형상

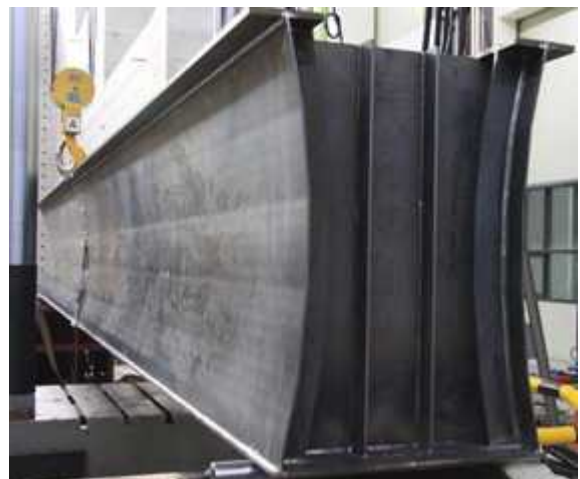
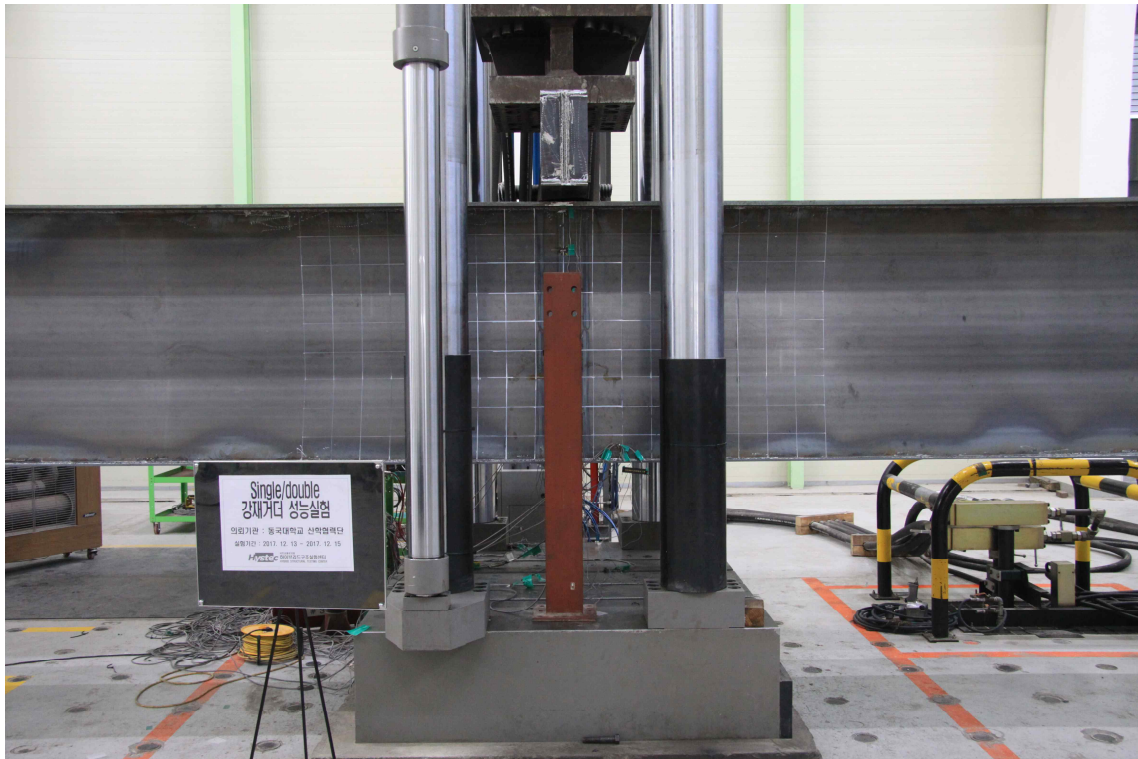
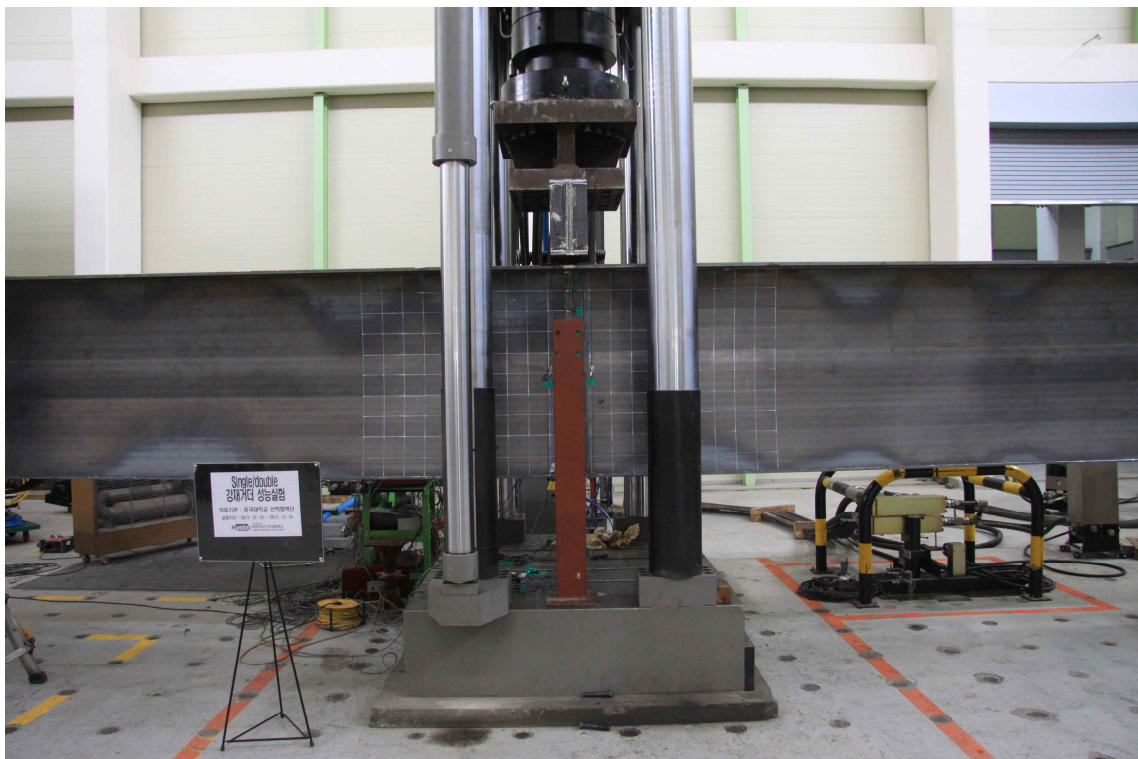


그림 34. Double 모델 형상

실험은 명지대학교 하이브리드 센터에서 5000kN급 UTM으로 수행되었으며 그림 36와 같이 거치하여 실험하였다. 이때 하중 가력은 그림 36과 같이 폭 200mm의 지그를 UTM 헤드에 설치하여 변위제어로 진행하였다.



(a) Single 모델



(b) Double 모델

그림 35. 실험체 거치 전경



그림 36. 가력부 지그

다. 실험결과 및 고찰

1) 유한요소해석

실험연구 결과 검토를 위해 한국화학시험연구원에 위탁 의뢰한 강재 시편시험 결과를 바탕으로 유한요소 극한해석을 수행하였다. 각 강재 별 시편시험결과는 증빙 p.3~10으로 제출하며, 표 2에서 정리하였다. 강재 항복 강도가 실험 설계 시 예상한 400MPa에 크게 미치지 못하나 설계기준에서 제시한 최소항복강도와 비교하여 매우 큰 폭으로 차이를 보임을 알 수 있다. 또한 강판 두께가 압축플랜지를 제외한 인장 플랜지, 복부판 및 다이아프램은 2~6% 정도 작게 측정되었다. 이와 같은 시편 시험 결과를 유한요소해석에 적용하였다.

해석 모델의 형상은 그림 37, 38과 같다.

표 2. 부재별 시편시험결과

Member	Thickness (mm)	Yield strength (MPa)	Tesile strength (MPa)	Elongation (%)
T. Flange (10t)	9.6	310	479	25
C. Flange (20t)	20.1	287	454	25
Web (8t)	7.5	332	481	22
Diaphragm (15t)	14.6	335	515	23

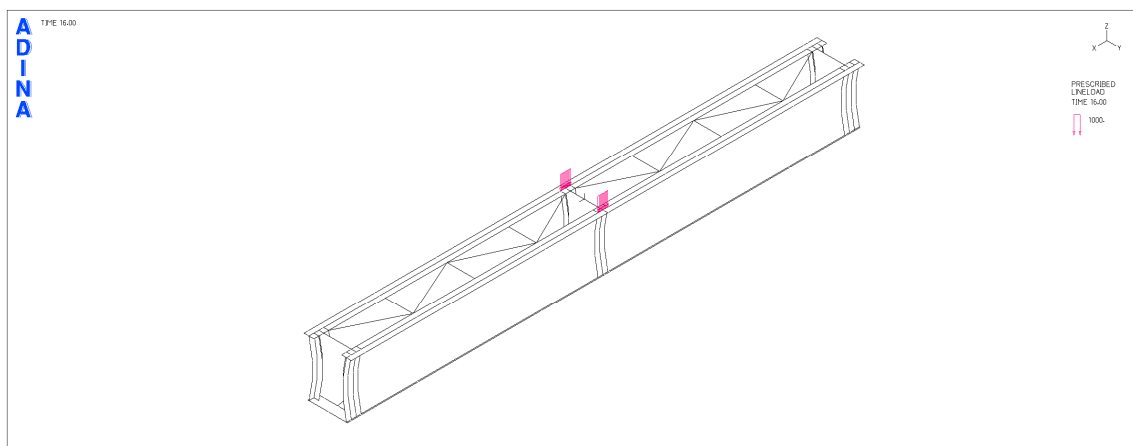


그림 37. Single 해석모델 형상

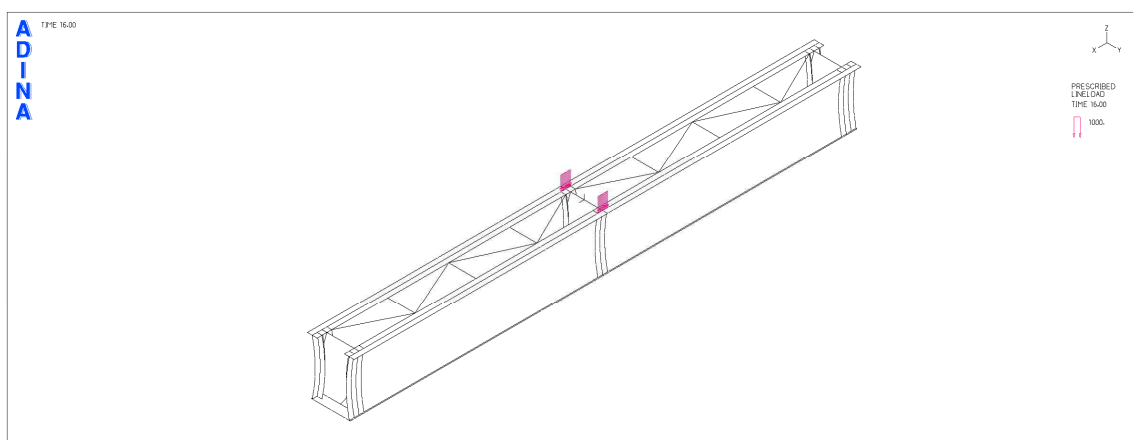
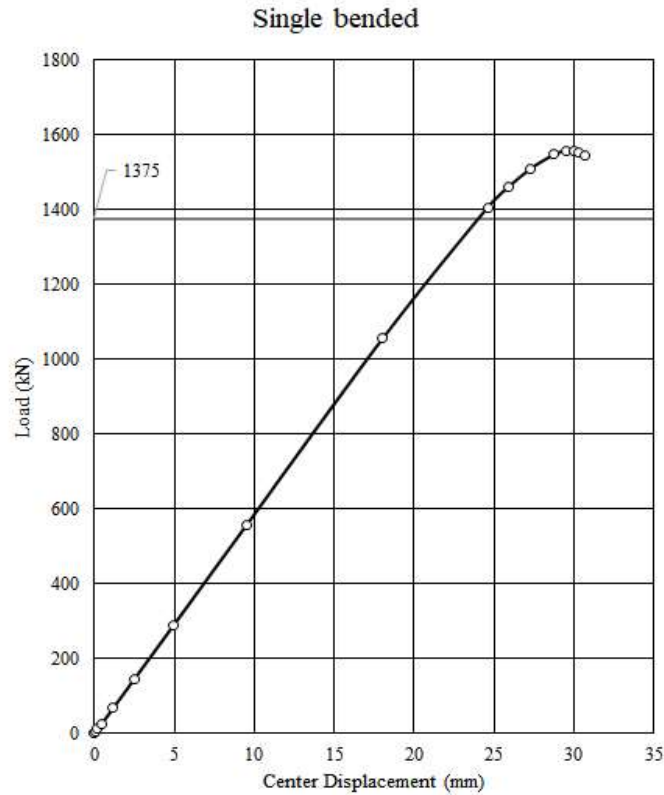
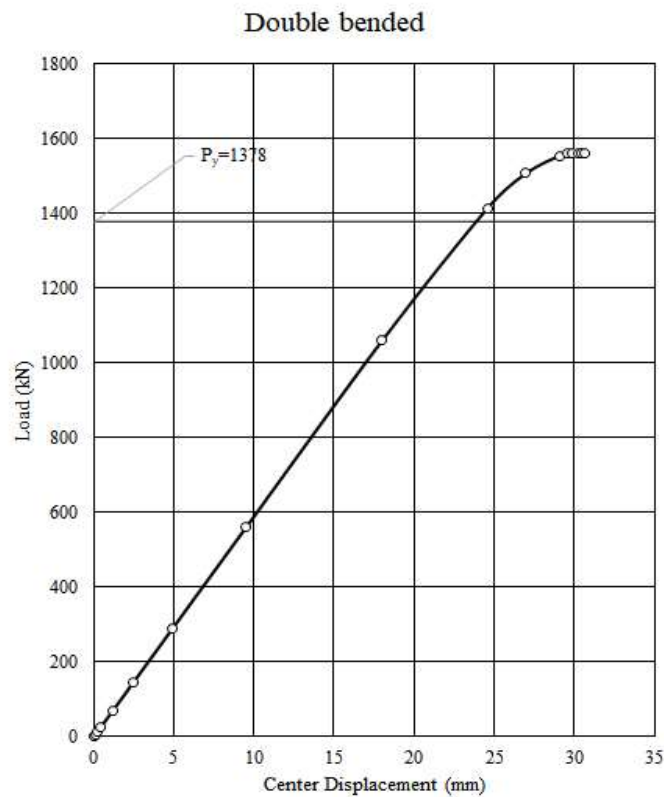


그림 38. Double 해석모델 형상

시편시험 결과를 바탕으로 계산된 항복하중은 Single/Double 모델 각각 1,375/1,378 kN이고 해석 결과와 같이 나타내면 그림 39와 같다. 두 모델 모두 하중-변위 곡선이 항복 하중에 도달하기 이전 선형성을 유지하며 하중이 꾸준히 증가하며 항복하중 이후 즉, 플랜지 항복이후 거더가 서서히 강성을 잃어가는 전형적인 거동을 보였다.



(a) Single 모델

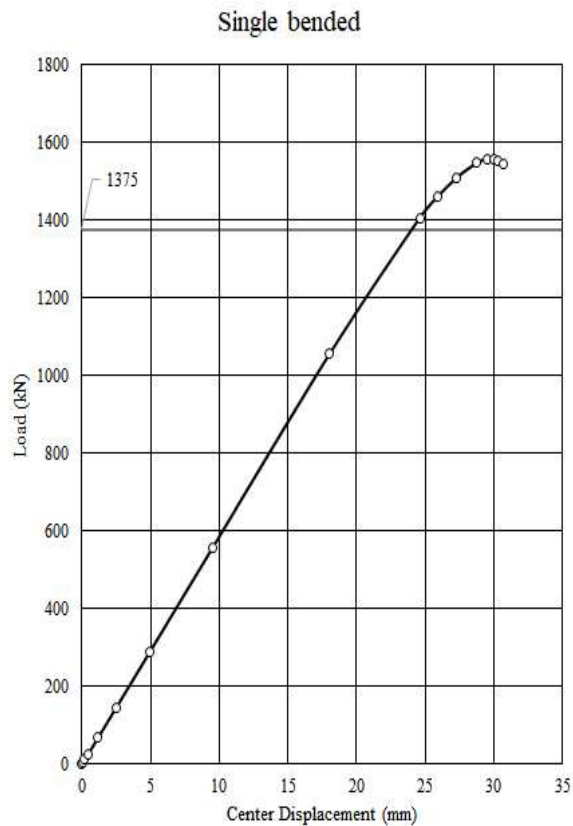


(b) Double 모델

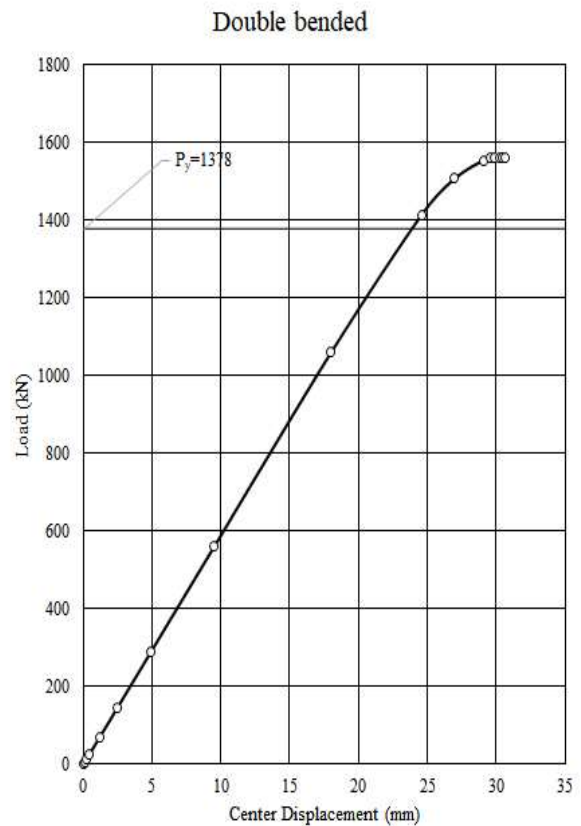
그림 39. 해석결과 (Load-Center disp.)

2) 실험결과 검토

앞서 수행된 유한요소해석 결과와 실험을 통해 얻은 실험체의 하중-변위 곡선을 그림 40과 같다. 그림에서 보는 것과 같이 실험 결과의 경우 해석결과에 비해 다소 작은 하중에서 강성을 잃기 시작하여 최대 하중은 10% 정도 작게 나타났다. 그러나 실험 시 최대하중에 도달하기까지 복부판에 국부적인 변형이 발생하지 않았으며, 최대하중 도달 후 추가적인 가력에 의해 그림 40과 같이 복부판에 국부적인 변형이 발견되었다. 비록 실험결과가 해석결과에 비해 다소 낮은 성능을 보였으나 수평 절곡 복부판을 적용하면서 우려했던 복부판 찌그러짐에 의한 급격한 파괴양상은 나타나지 않았고 강도 또한 충분히 발현되었다고 판단된다.



(a) Single 모델



(b) Double 모델

그림 40. 실험결과 vs. 해석결과 (Load-Center Disp.)

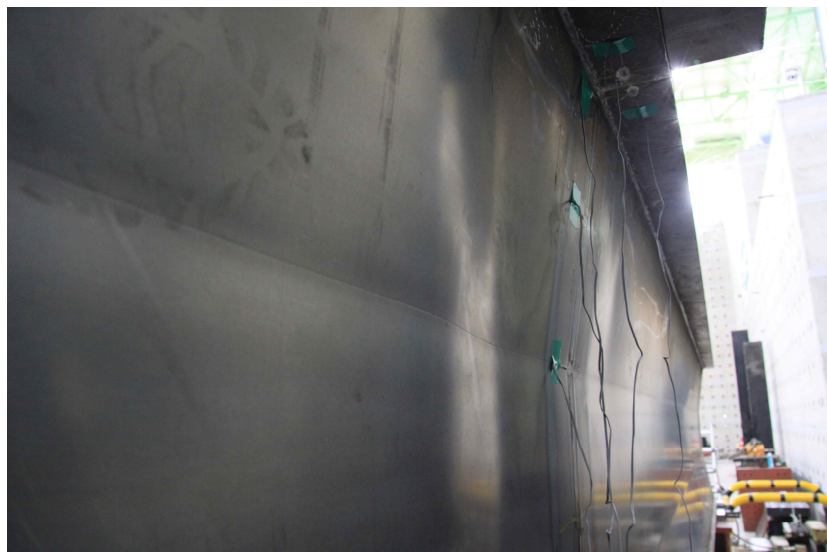


그림 41. 실험 종료 후 복부판 형상

4. 수평 절곡 복부판의 성능 시험

가. 실험체 제원

1) 휨 거동 검토 모델

가) 전체 제원 및 복부판

순수 휨을 받는 2F-A/4F-A 형상의 복부판을 갖는 실험체를 각각 2F/4F-Bending 모델로 명명하였다. 지점간 거리 6m, 거더 폭 900mm 및 절곡 전 복부판의 폭 900mm를 갖는 거더로 설계하였다. 복부판 두께는 6mm로 세장비 150이다. 복부판 설계는 앞서 도출한 절곡 각도에 따른 좌굴강도 곡선을 이용하였다. 실험체를 구성하는 강판은 모두 SM400 강재로 하였으며, 이때 설계기준에서 제시하는 최소 항복강도는 235MPa이다. 그러나 기 수행된 실험에서 시편시험 결과 SM400 강재임에도 불구하고 항복강도가 300MPa 이상을 갖는 강판이 상당히 많았다. 실험체 설계 이전에 재료시험을 통해 확실한 성능을 확인하는 것이 최선의 방법이겠으나 현실적으로 힘든 상황으로 강재의 성능을 400MPa로 가정하여 설계하였다. 이는 명지대 하이브리드 센터의 UTM 용량이 5,000kN이나 안전율을 적용하여 10~20% 작은 하중까지 가력하게 되는데 설계기준 상의 항복강도인 235MPa로 제작 후 가력 시 UTM 용량 부족으로 인해 실험이 중지되는 현상을 방지하기 위함이다.

(1) 2F-Bending 모델

앞서 개발한 2F-A 모델 휨 좌굴 강도곡선을 이용하여 복부판은 그림 42를 통해 설계하였으며, 400MPa 이상의 좌굴 강도를 갖기 위해서 대략 8° 이상의 절곡 각도를 가지는 경우 충분한 좌굴 성능을 보일 것으로 판단된다. 여기에 안전측으로 10° 의 절곡 각도를 갖도록 설계하였다.

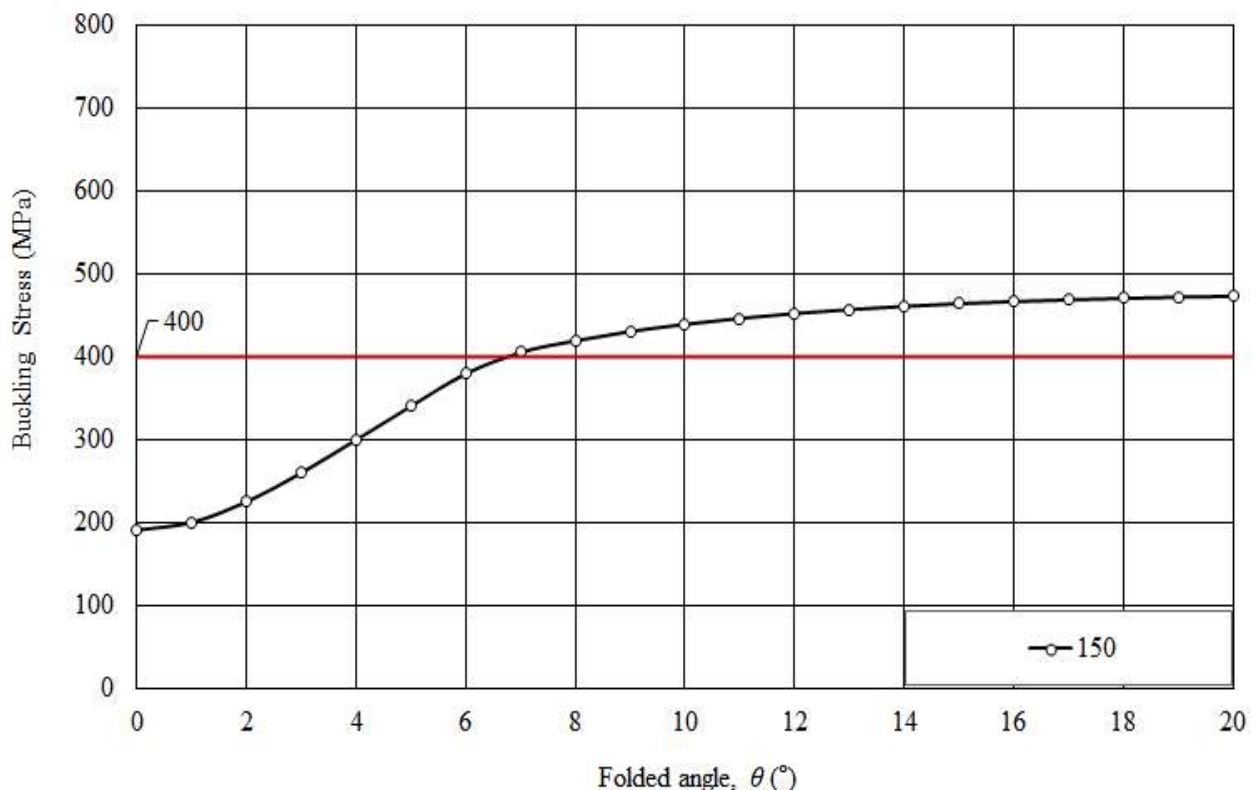


그림 42. 휨 좌굴 검토(2F-Bending)

(2) 4F-Bending

앞서 개발한 4F-A 모델 휨 좌굴 강도곡선을 이용하여 그림 43과 같이 400MPa 이상의 좌굴 강도를 갖기 위해서 8° 의 절곡 각도를 선택하였다.

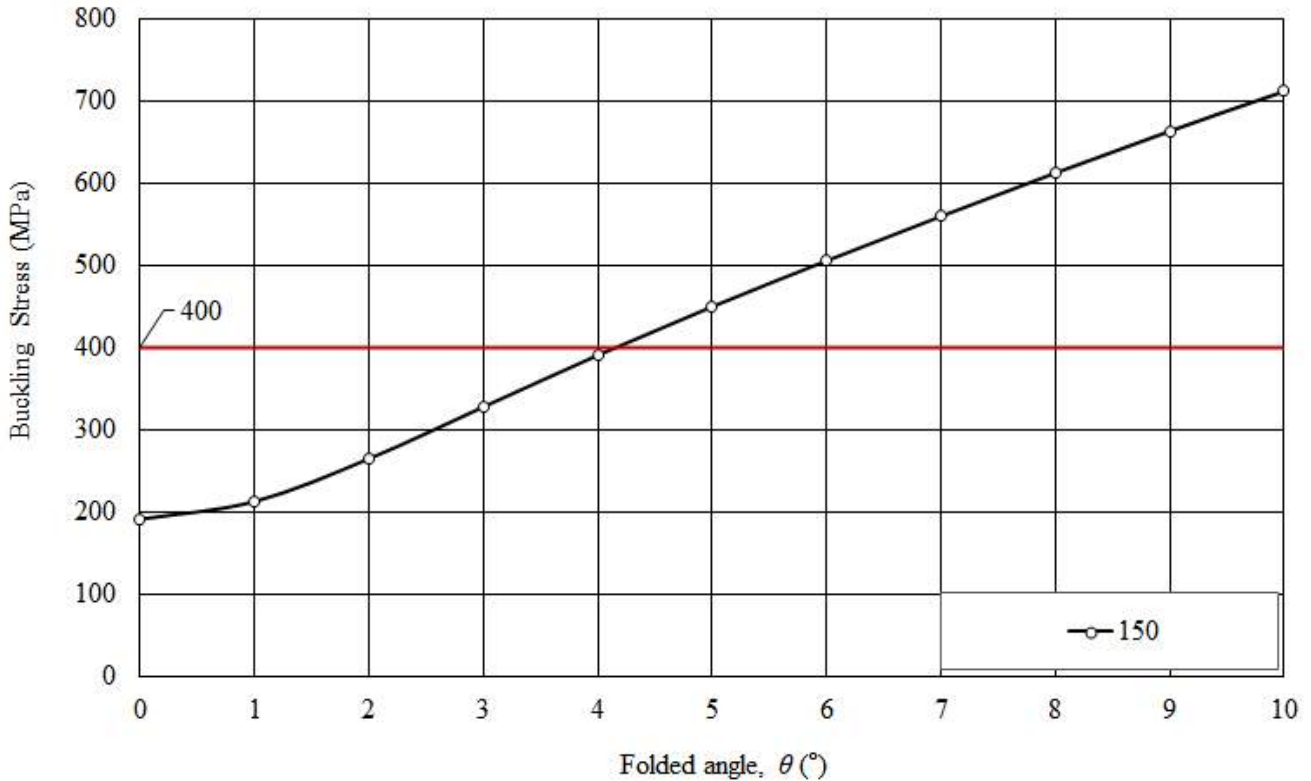


그림 43. 휨 좌굴 검토(4F-Bending)

나) 플랜지

본 실험의 목적은 복부판의 거동을 검토하는데 있다. 따라서 압축플랜지에서 발생할 수 있는 국부 좌굴에 대한 검토를 진행하였다.

압축플랜지의 폭은 200mm, 두께는 20mm로 하여 세장비 5인 판으로 그림 29와 같이 하중을 받는 모서리가 단순지지되고 하중을 받지않는 모서리는 각각 단순지지와 자유단으로 가정하면 좌굴계수는 0.425이고 이 때, 좌굴응력은 3150MPa이다. 따라서 압축플랜지는 좌굴을 방지하는데 충분하게 설계되었다.

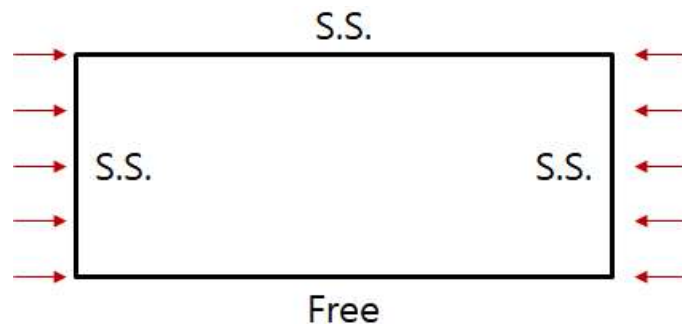


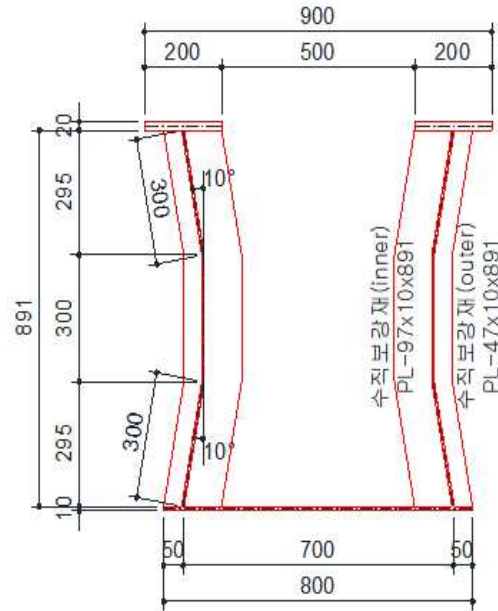
그림 44. 압축플랜지 경계조건

인장플랜지는 압축플랜지의 제원에 따라 거더 중립축이 복부판 중앙부에 위치할 수 있도록 폭 800mm, 두께 10mm로 결정하였었다.

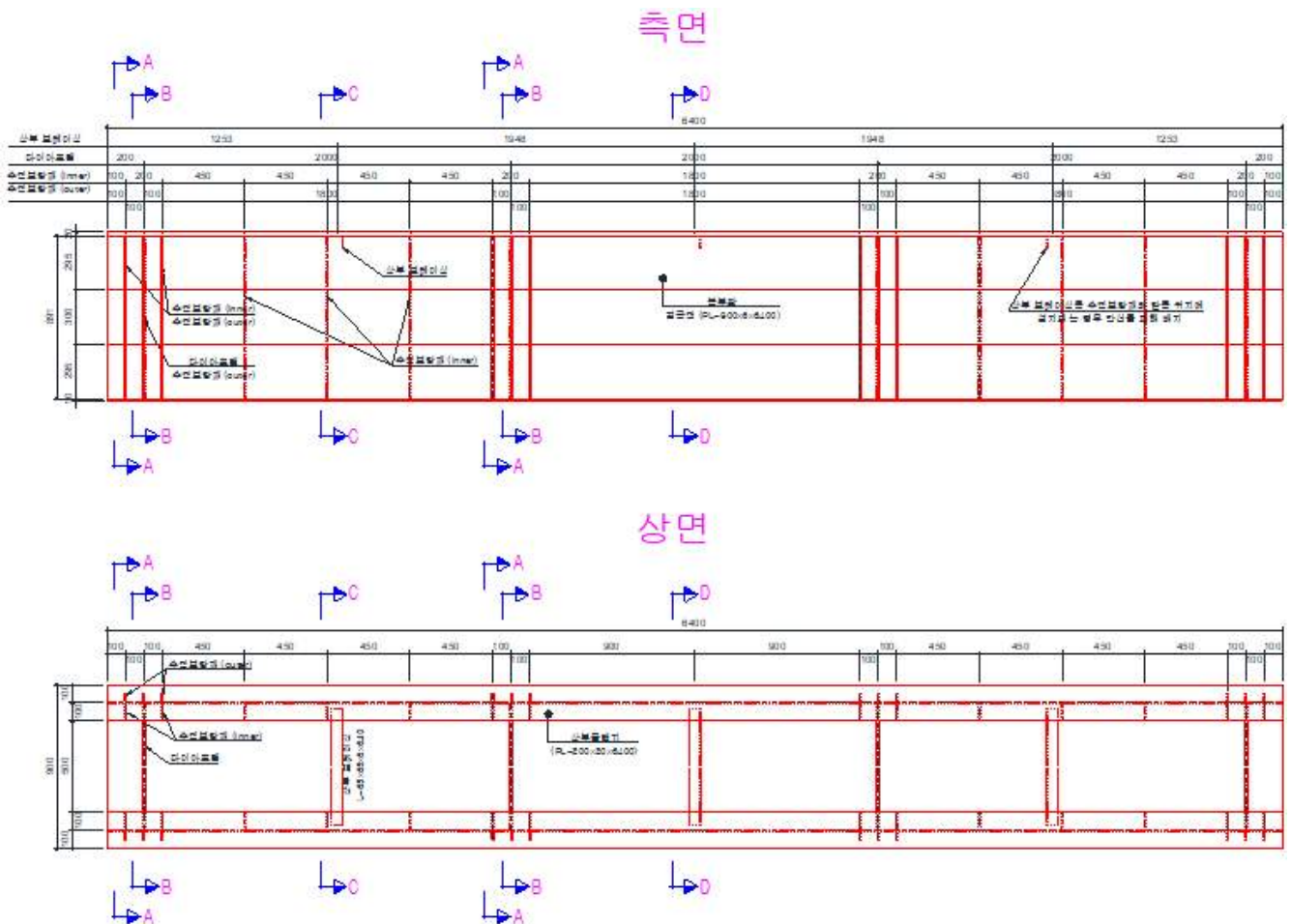
다) 보강재

개형 단면이므로 상부플랜지에 브레이싱으로 L형강을 배치하였고 지점부 및 하중 재하부에 집중되는 하중에 의한 파괴를 방지하기 위해 보강재를 충분히 배치하였다.

최종적으로 결정된 실험체 도면은 2F/4F-Bending 각각 그림 45, 46과 같다.

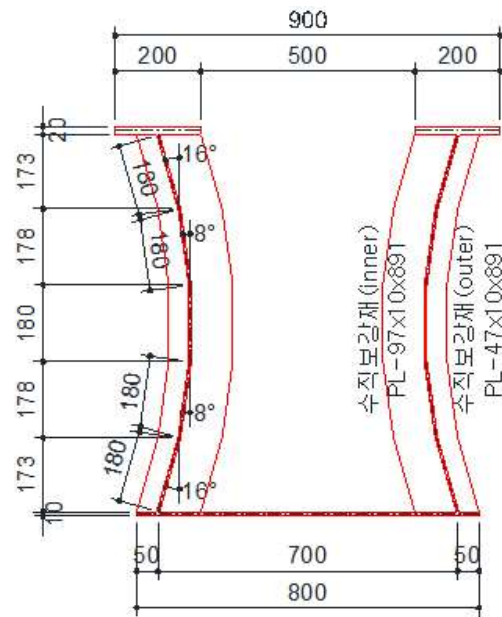


(a) 단면형상



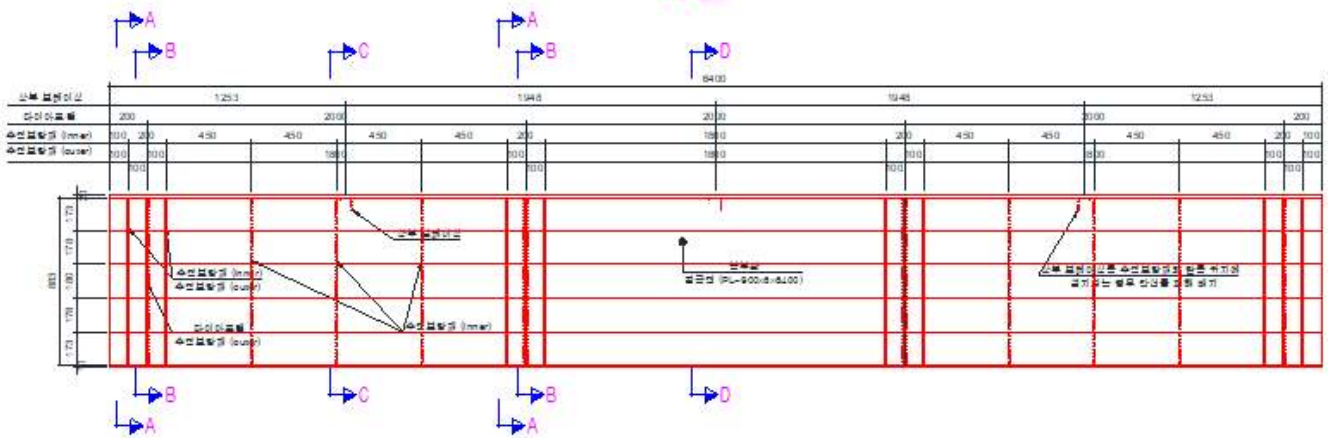
(b) 거더 측면 및 상면도

그림 45. 2F-Bending 설계도면

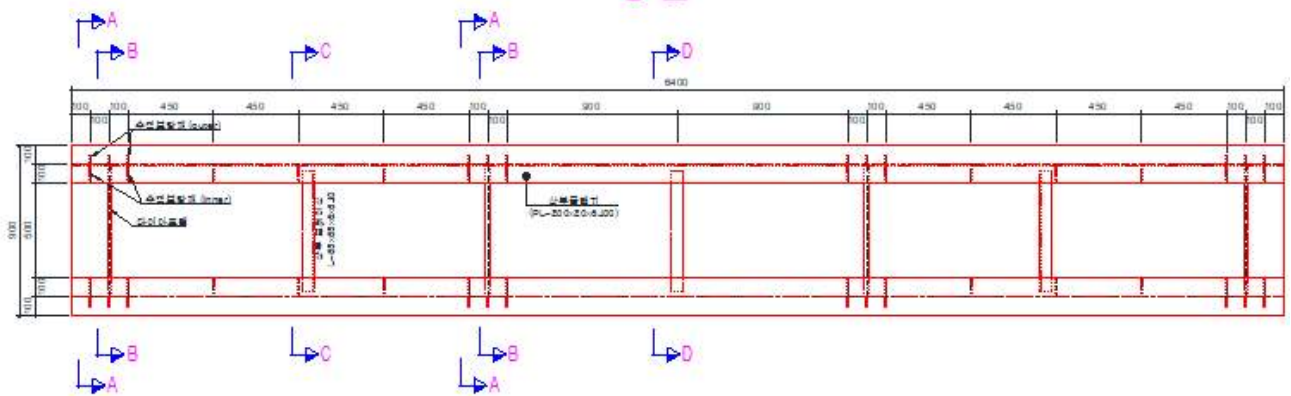


(a) 단면형상

측면



상면



(b) 거더 측면 및 상면도

그림 46. 4F-Bending 설계도면

2) 전단 거동 검토 모델

가) 전체 제원 및 복부판

거더에 순수전단이 발생하도록 하중을 재하할 수 없어 휨과 전단이 동시에 작용하지만 전단의 기여도가 상대적으로 크도록 설계하여 거더 전단 거동을 검토하였다. 이때, 2F-A/4F-A 형상의 복부판을 갖는 실험체를 각각 2F/4F-Shear 모델로 명명하였다. 지점간 거리 2.6m, 거더 폭 900mm 및 절곡 전 복부판의 폭 900mm를 갖는 거더로 설계하였다. 복부판 두께는 6mm로 세장비 150이다. 복부판 설계는 앞서 도출한 절곡 각도에 따른 좌굴강도 곡선을 이용하였다. 실험체를 구성하는 강판은 모두 SM400 강재로 하였으며, 이때 강재의 항복강도는 휨 거동 검토 모델과 동일하게 400MPa로 가정하여 설계하였다.

(1) 2F-Shear

항복강도가 400MPa 일 때, 전단 항복강도는 230MPa이다. 이를 앞에서 구해진 전단강도 곡선을 이용하여 세장비 150인 곡선과 나타내면 그림 47과 같다. 여기에서 전단 항복강도 이상의 전단 좌굴 강도를 가질 수 있도록 15°의 절곡각도를 선택하였다. 이 때, 전단 검토 모델의 경우 휨을 동시에 받기 때문에 휨에 대한 검토가 필요한데 그림 42에서 절곡 각도 8° 이상이면 항복강도인 400MPa 이상의 좌굴강도를 가지므로 충분한 휨 좌굴강성 또한 갖음을 확인할 수 있다.

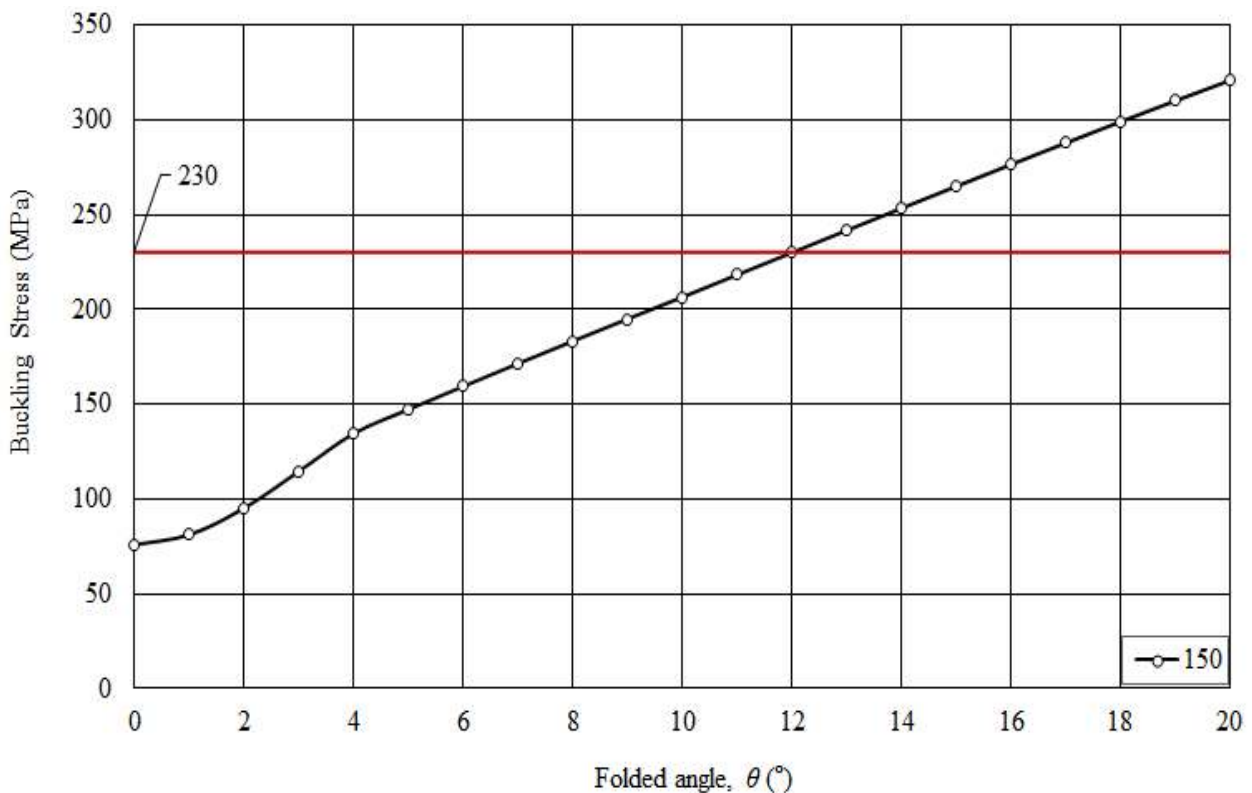


그림 47. 전단 좌굴 검토(2F-Shear)

(2) 4F-Shear

4F-Shear 모델 4F-A 전단좌굴 곡선을 이용하여 설계하였으며 그림 48과 같이 8°의 절곡 각도를 선택하면 충분한 전단좌굴 성능을 가질 것으로 판단되고 2F-Shear 모델과 같이 이미 휨에 대한 실험체 설계시 항복강도 400MPa에 대한 휨 좌굴강도 평가를 진행했으므로 휨에 대해서도 좌굴에 안전하다고 판단된다.

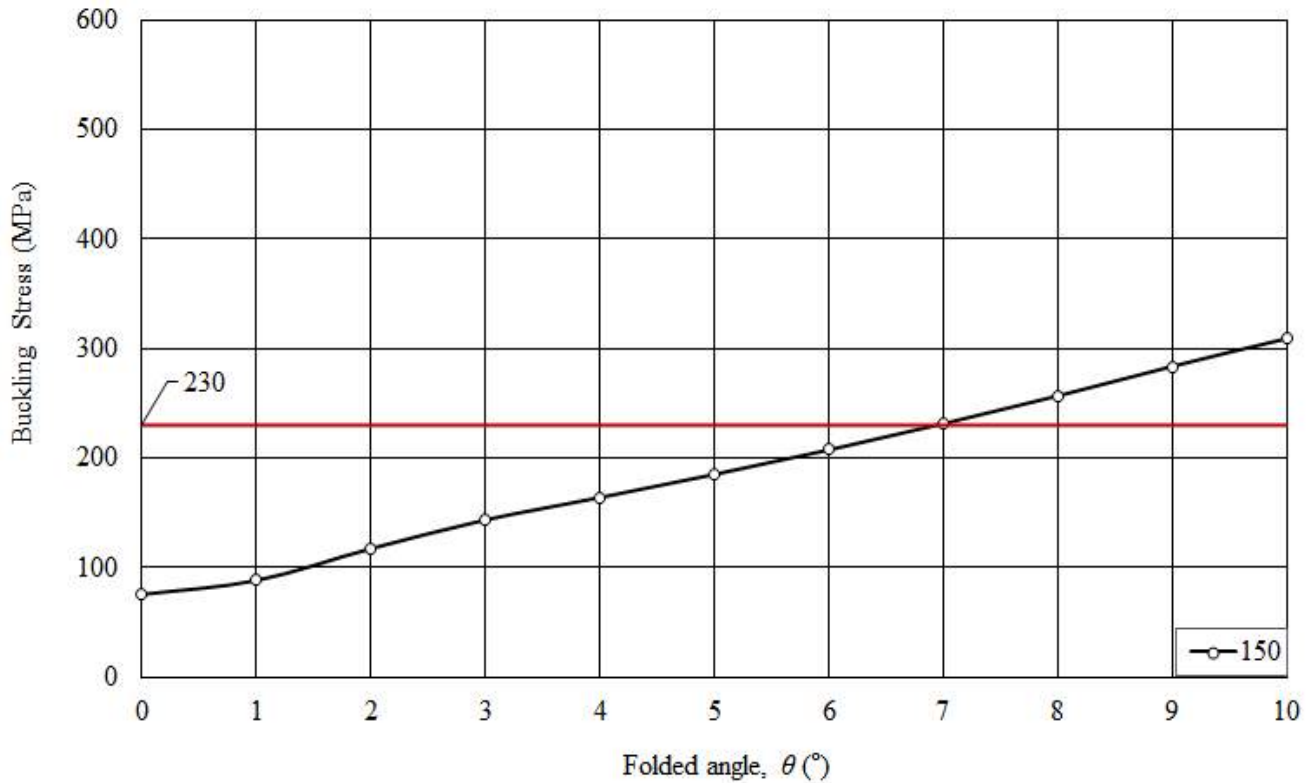


그림 48. 전단 좌굴 검토(4F-Shear)

나) 플랜지

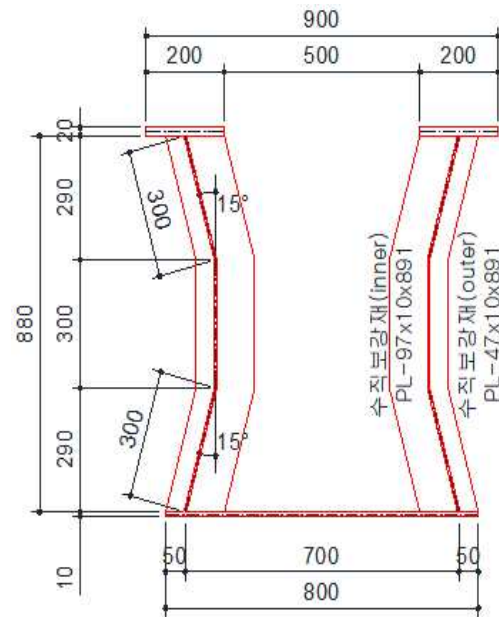
플랜지 제원은 휨 검토 모델과 동일하다.

다) 보강재

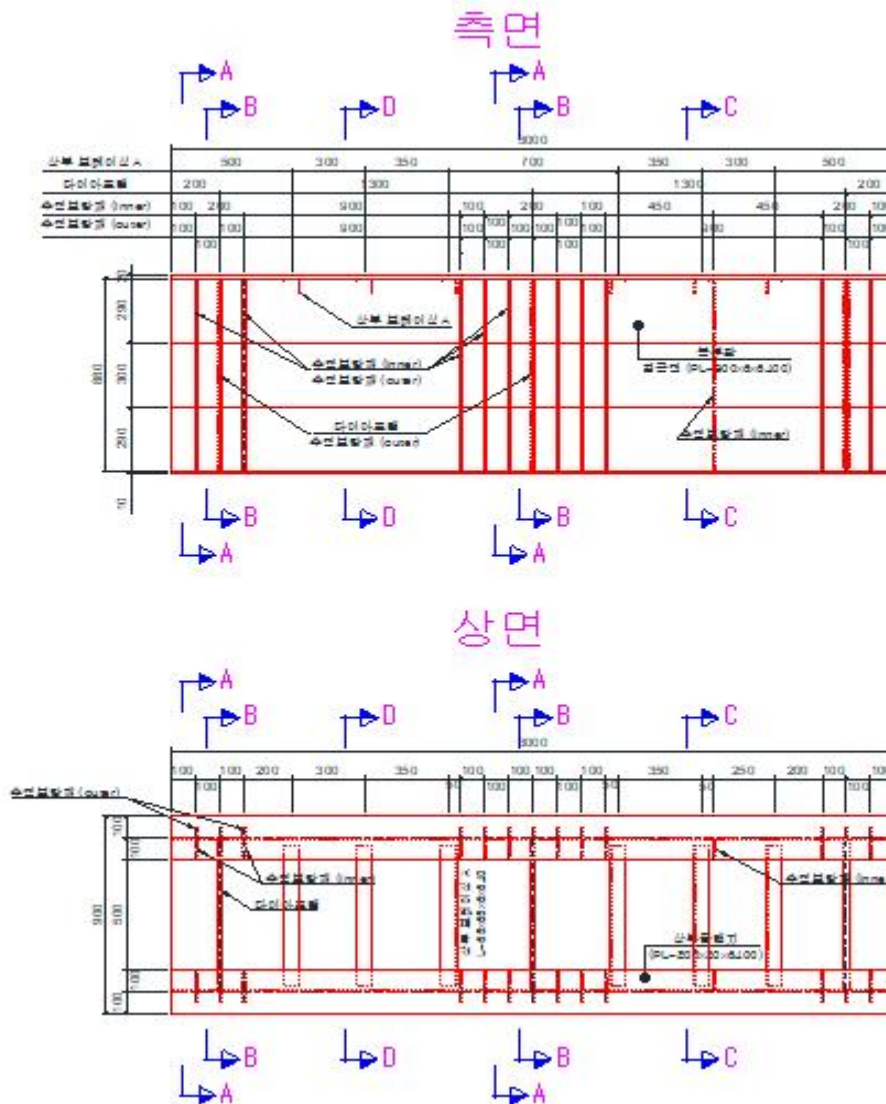
휨 검토 모델과 동일하게 개형 단면이므로 상부플랜지에 브레이싱으로 L형강을 배치하였으며 지점부를 충분히 보강하였다..

전단 검토 모델은 검토 패널에서 휨에 의한 영향을 줄이기 위해 하중 재하부 즉, 중앙부에 600mm 너비의 과보강 구역을 배치하였다. 에 집중되는 하중에 의한 파괴를 방지하기 위해 보강재를 충분히 배치하였다.

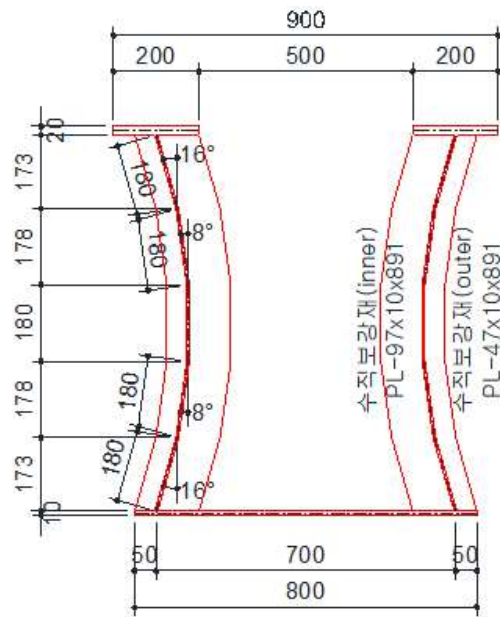
최종적으로 결정된 실험체 도면은 2F/4F-Shear 각각 그림 49, 50과 같다.



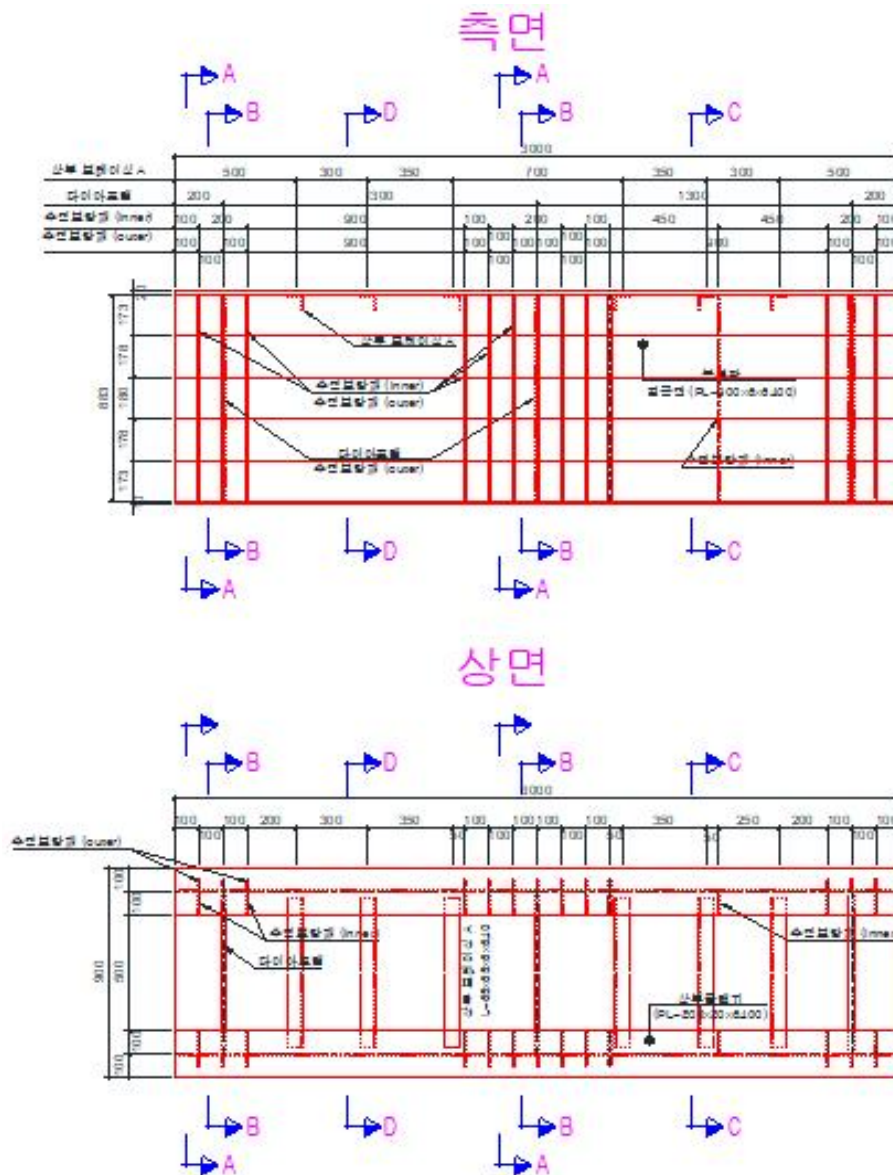
(a) 단면형상



(b) 거더 측면 및 상면도
그림 49. 2F-Shear 설계도면



(a) 단면형상



(b) 거더 측면 및 상면도
그림 50. 4F-Shear 설계도면

나. 실험 방법 및 결과

본 실험의 목적은 수평 절곡 복부판을 적용한 거더의 휨 및 전단에 대한 거동을 검증하기 위함이다. 이 때, 휨 거동 검토 모델(2F/4F-Bending)은 그림 51과 같이 하중을 4점 재하하여 검토 패널에서 순수 휨이 발생하도록 하였다.

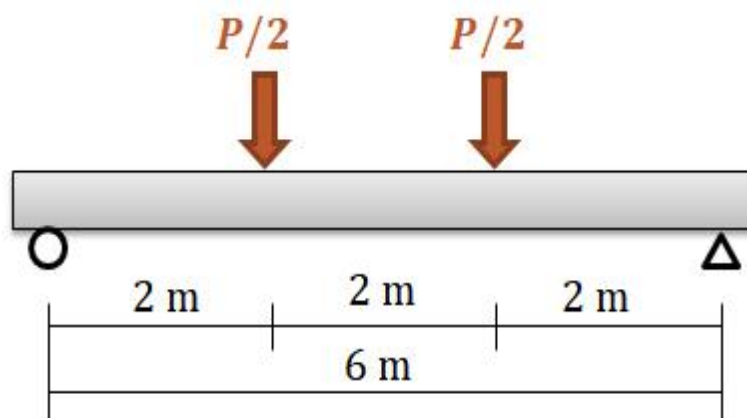


그림 51. 4점 재하 하중조건 (Bending)

전단 검토 모델(2F/4F-Shear)은 그림 52와 같이 3점 하중재하를 통해 가력하였으며 설계 파트에서 언급한 바와 같이 중앙부 600mm 구간에 100mm 간격으로 보강재를 충분히 배치하여 하중 집중에 의한 파괴를 방지하고 검토패널을 거더 중앙에서 300mm 만큼 떨어진 지점에 배치하여 검토패널에 작용하는 휨의 기여를 낮추었다.

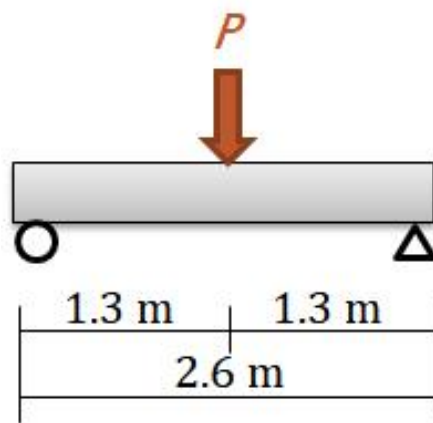


그림 52. 3점 재하 하중조건(Shear)

실험은 명지대학교 하이브리드 센터에서 5000kN급 UTM으로 수행되었으며 그림 53과 같이 거치하여 실험하였다. 이때 하중 가력은 그림 36과 같이 폭 200mm의 지그를 UTM 헤드에 설치하여 변위제어로 진행하였다.



(a) 휨 검토 모델



(b) 전단 검토 모델

그림 53. 실험체 가력부 형상 및 거치 전경

다. 실험결과 및 고찰

1) 유한요소해석

실험연구 결과 검토를 위해 한국화학시험연구원에 위탁 의뢰한 강재 시편시험 결과를 바탕으로 유한요소 극한해석을 수행하였다. 각 강재 별 시편시험결과는 증빙 13~28로 제출하며, 표 3에서 정리하였다. 본 실험체 제작에 사용된 강재 항복 강도가 설계기준에서 제시한 최소항복강도 235MPa에 비해 상당히 큰 값을 가짐을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 두께가 얇은 판일수록 두드러진다. 그러나 이번 시험체에 사용된 강판의 두께는 1~2% 미만의 차이만을 보였다. 이와 같은 시편시험 결과를 모델링에 적용하여 해석하였다.

해석 모델의 형상은 그림 54~57과 같다. 그림과 같이 ADINA에서 제공하는 Rigid link 요소를 적용하여 가력부 플랜지의 수직변위를 일치시켜 휨 검토 모델의 경우 롤러 2ea, 전단 검토 모델의 경우 롤러 1ea를 사용한 실험 환경과 가장 유사한 가력조건을 모사하였다.

표 3. 부재별 시편시험결과

Plate	Yield strength (MPa)	Tesile strength (MPa)	Elongation (%)	Thickness (mm)
6	352	498	25	6
6	354	497	24	6
6	354	498	25	6
6	350	497	23	6
6	357	497	25	6
6	353	497	26	6.1
10	315	438	30	9.8
10	314	435	33	9.9
10	316	437	33	9.8
10	319	438	30	9.8
20	266	445	27	19.8

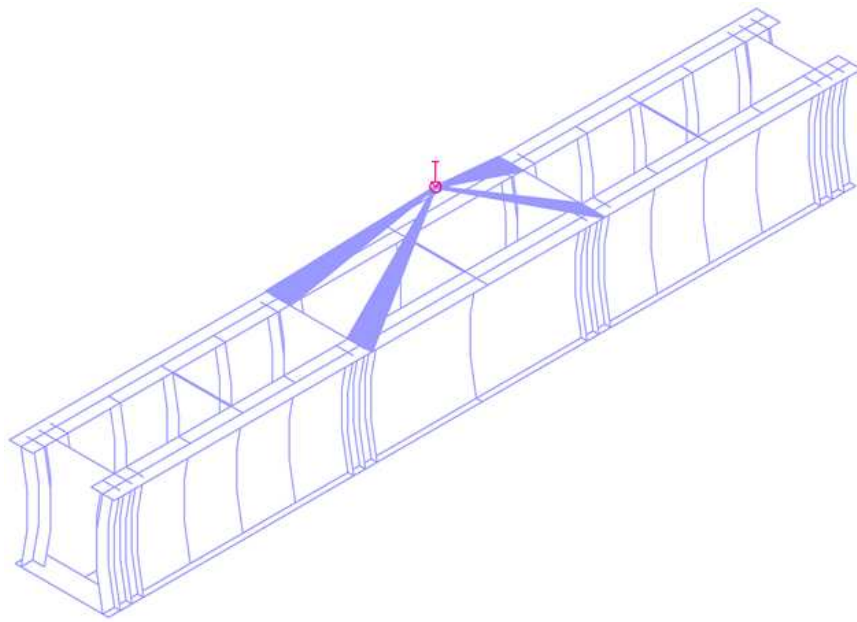


그림 54. 2F-Bending 해석모델 형상

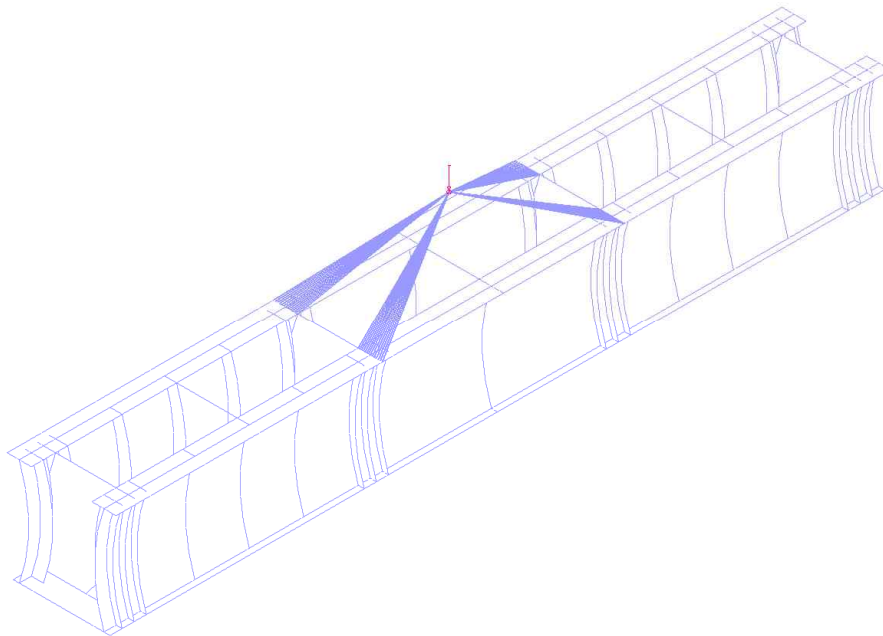


그림 55. 2F-Bending 해석모델 형상

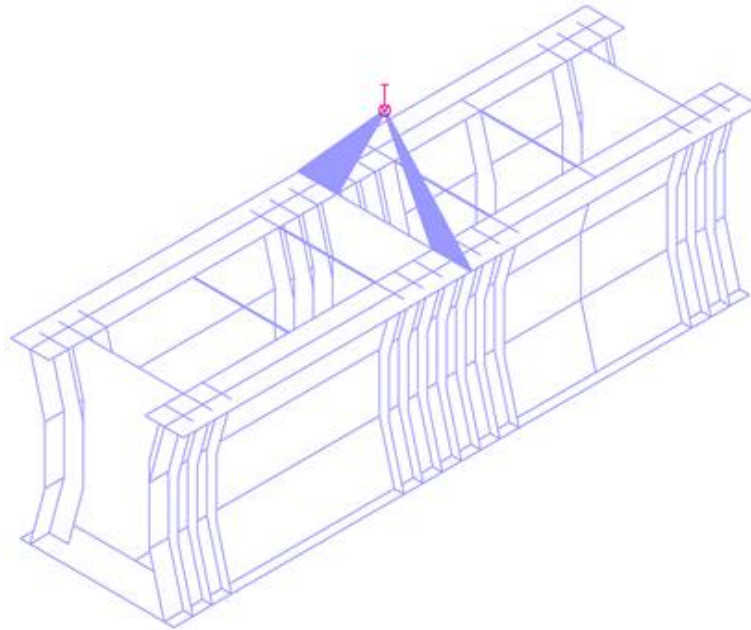


그림 56. 2F-Bending 해석모델 형상

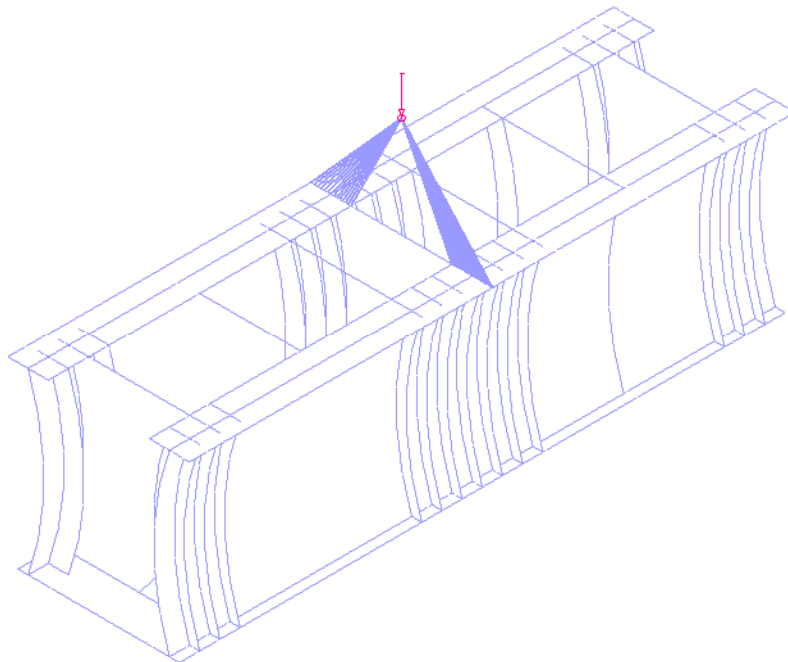
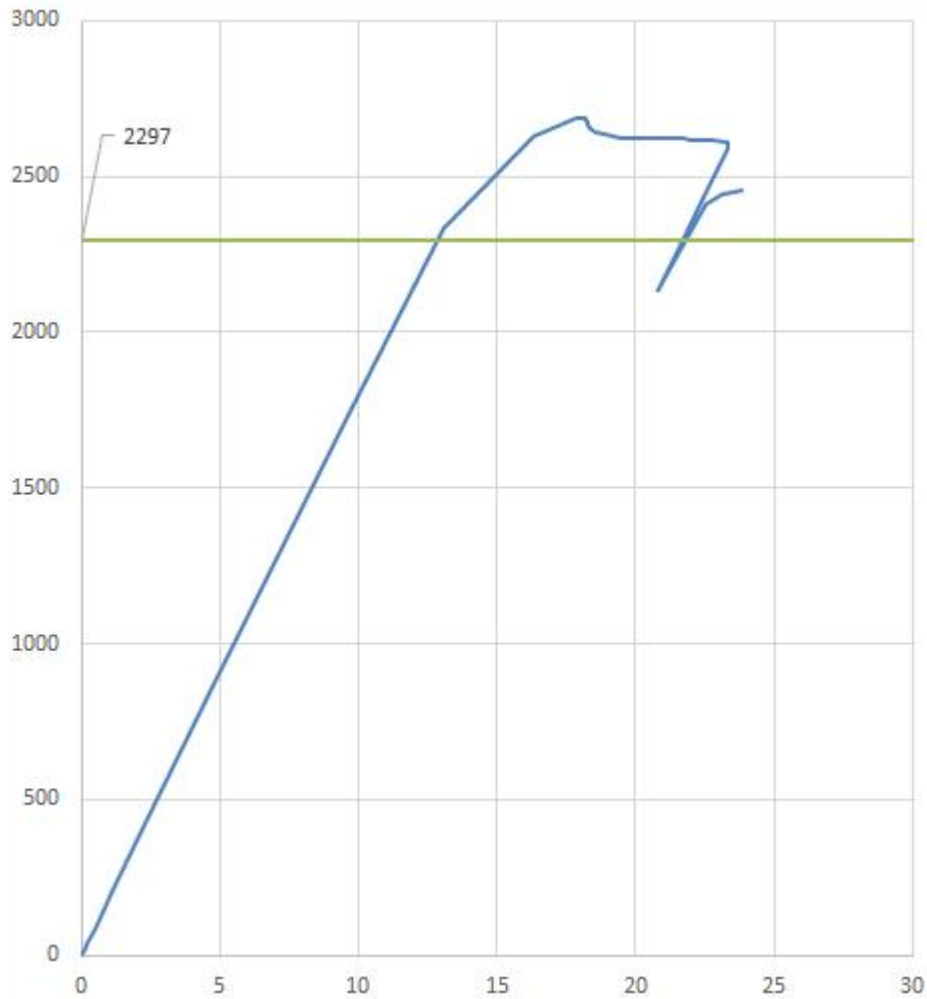


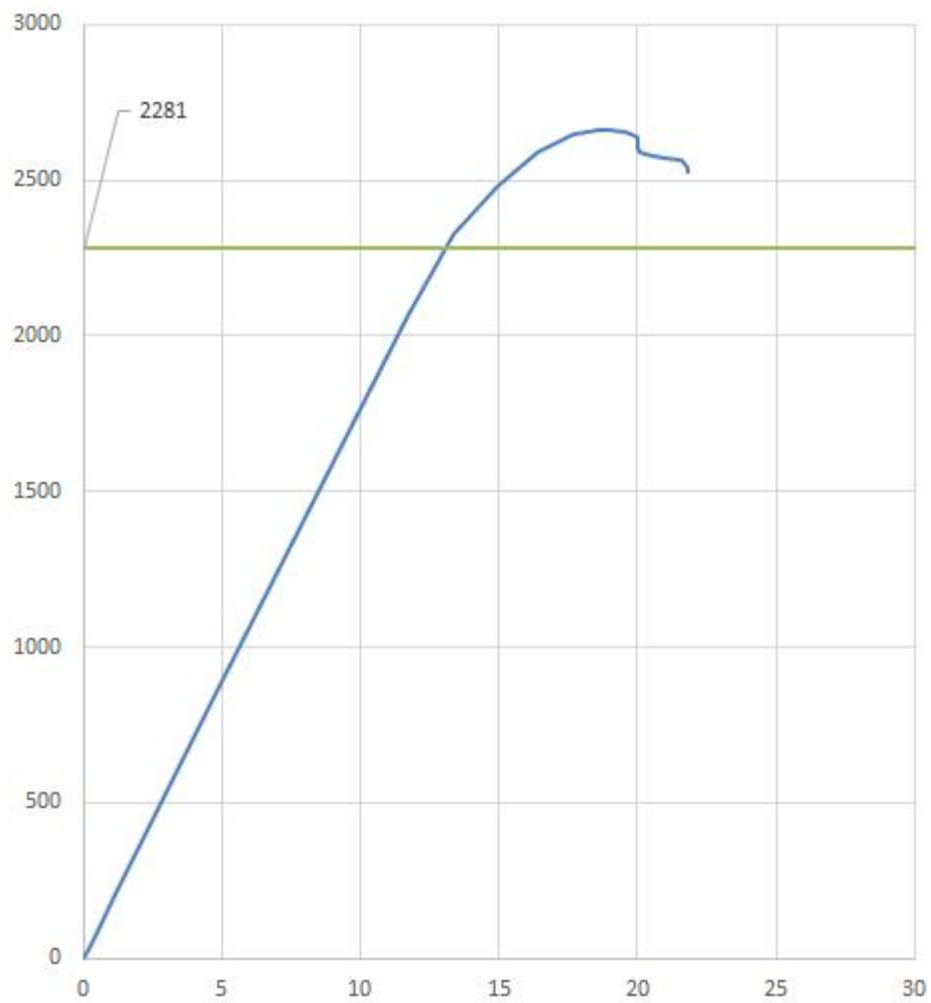
그림 57. 2F-Bending 해석모델 형상

가) 휨 거동 검토모델

시편시험 결과를 바탕으로 계산된 항복하중은 2F/4F-Bending 모델 각각 2,297/2,281kN이고 해석결과와 같이 나타내면 그림 58과 같다. 두 모델 모두 하중-변위 곡선이 항복 하중에 도달하기 이전 선형성을 유지하며 하중이 꾸준히 증가하며 항복하중 이후 즉, 플랜지 항복이후 거더가 서서히 강성을 잃어가는 전형적인 거동을 보임을 알 수 있다.



(a) 2F-Bending

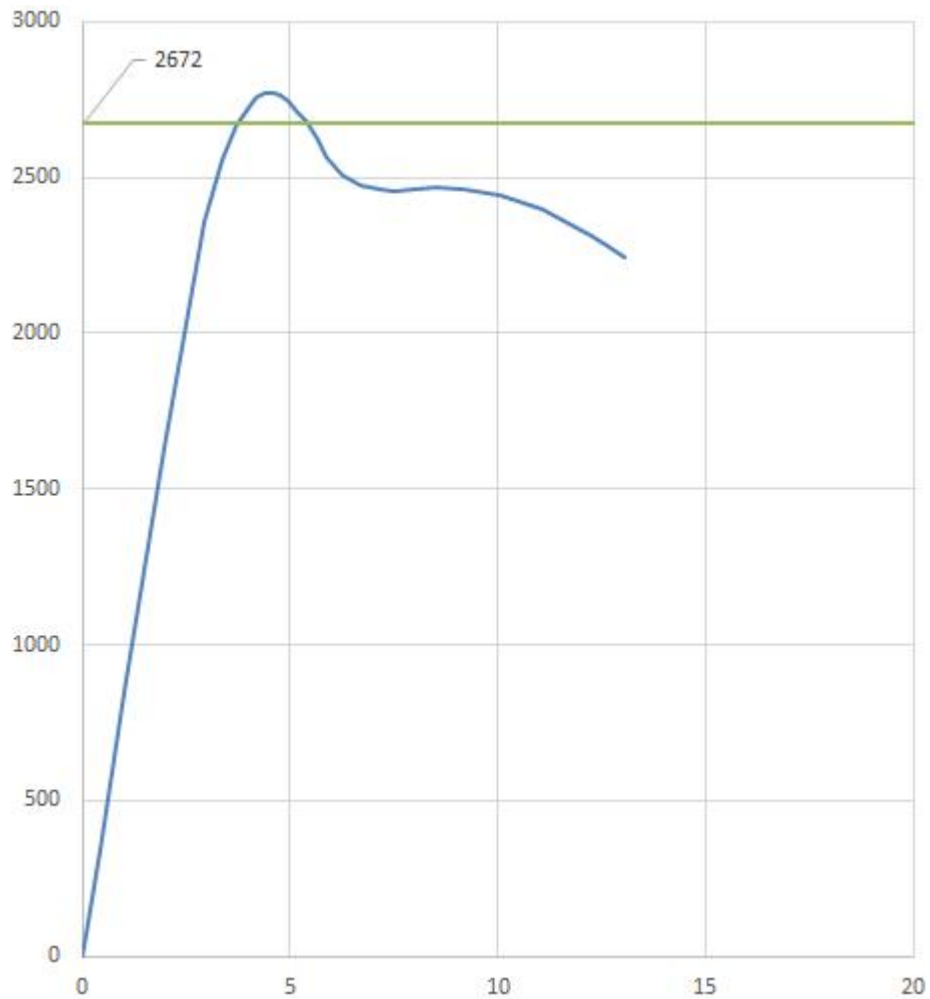


(b) 4F-Bending

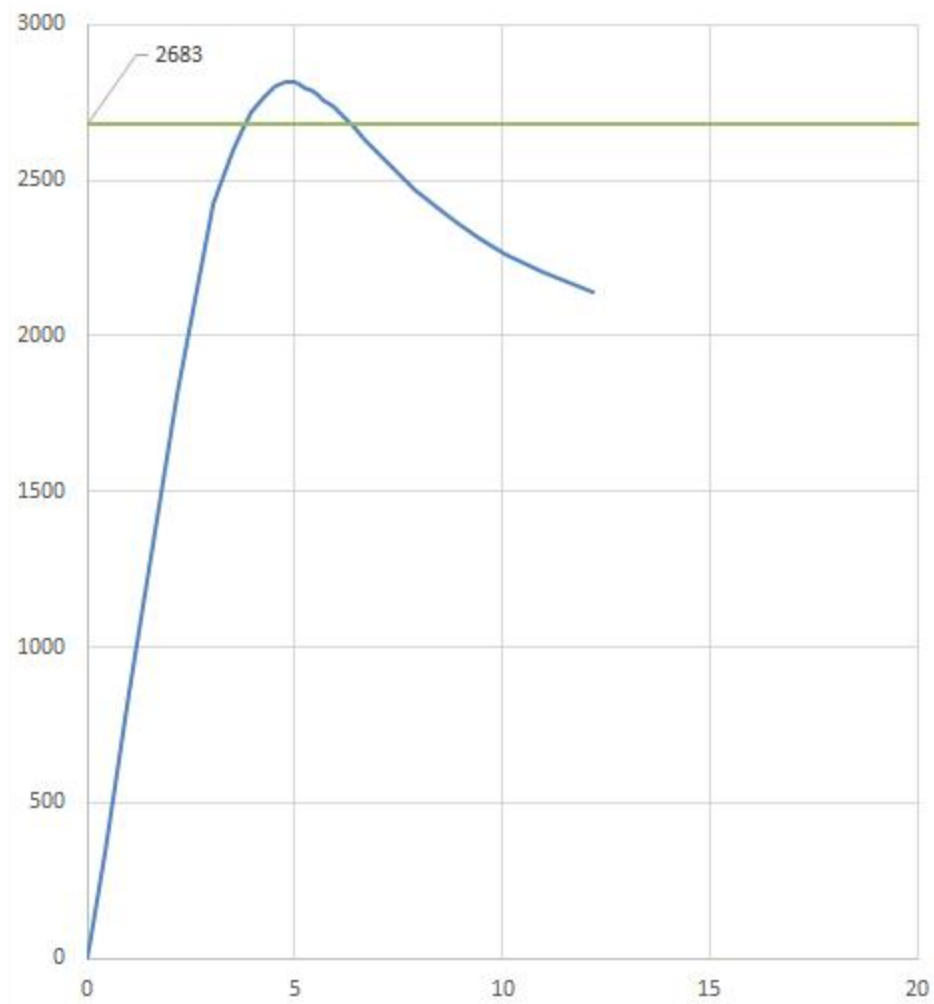
그림 58. 휨 거동 검토 모델 해석결과 (Load-Center disp.)

나) 전단 거동 검토 모델

2F/4F-Shear 모델의 경우 검토 패널에 작용하는 휨응력의 영향을 최소화하기 위해 설계 하였으나 표 3에서 보여지는것과 같이 상부 플랜지의 항복강도가 복부판 항복강도의 75%정도를 갖게되어 휨에 의한 상부플랜지 파괴가 거더의 전체 거동을 지배하였다. 해석결과는 그림 59와 같다.



(a) 2F-Shear 해석모델



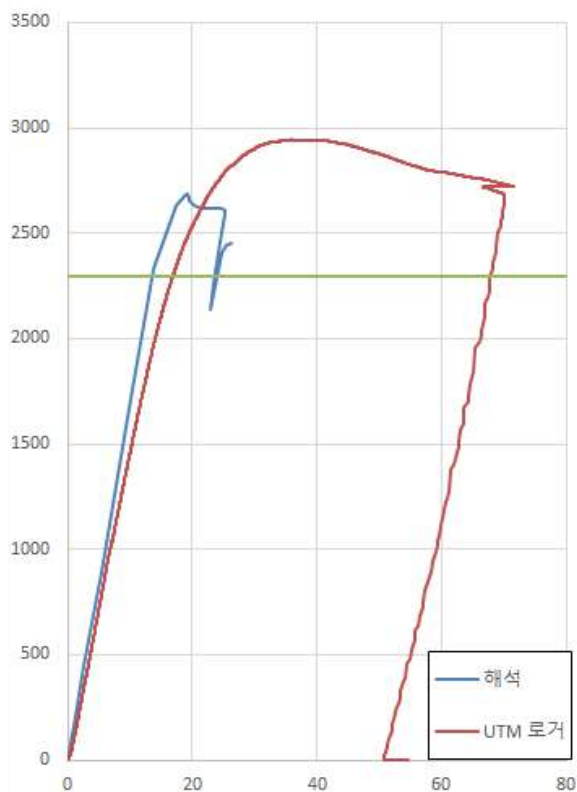
(b) 4F-Shear

그림 59. 전단 거동 검토 모델 해석결과 (Load-Center disp.)

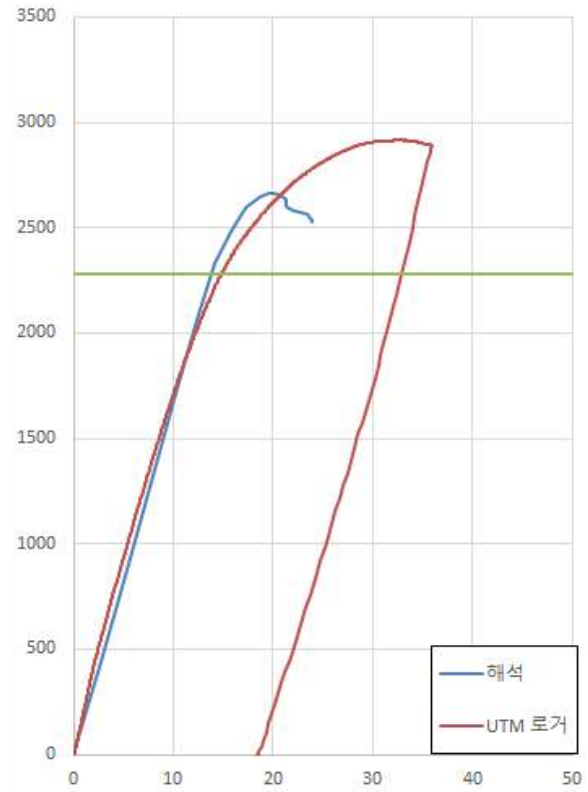
2) 실험결과 검토

가) 휨 거동 검토 모델 실험 결과

앞서 수행된 유한요소해석 결과와 실험을 통해 얻은 2F/4F-Bending 실험체의 하중-변위 곡선을 그림 60과 같다. 그림에서 보여지는것과 같이 항복하중까지 선형성을 유지하며 변위 증가에 따라 하중이 증가하며 항복하중 근처에 다다른 후 서서히 강성을 잃으며 최대하중까지 증가함을 볼 수 있다. 유한요소해석 결과와 비교해 볼 때 오히려 실험 결과가 보다 큰 연성거동을 보이며 극한하중까지 도달함을 알 수 있다. 그림 62는 파괴 이후 복부판 형상으로 국부적인 변형에 따른 손상은 발견되지 않았다. 극한하중 도달 후 변위 증가에 따라 서서히 하중이 줄어드는데 이 과정의 곡선이 매우 완만하고 이미 거더의 최대하중에는 도달한 이후이기 때문에 실험을 중단하여 복부판에 과도한 변형은 없었다고 볼 수 있다.



(a) 2F-Bending



(b) 4F-Bending

그림 60. 휨 거동 검토 모델 실험결과 vs. 해석결과 (Load-Center Disp.)

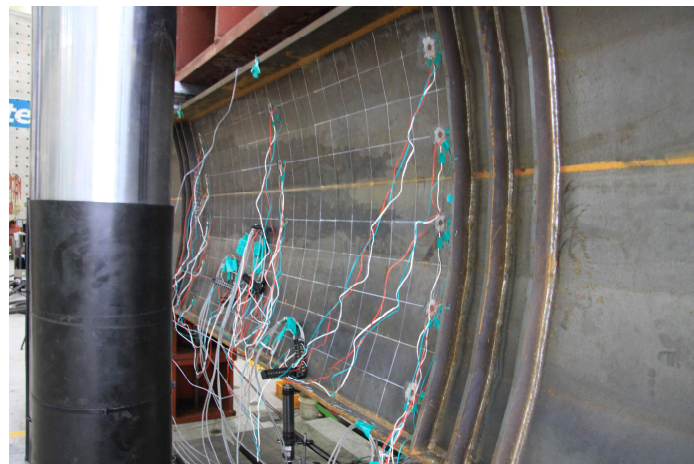


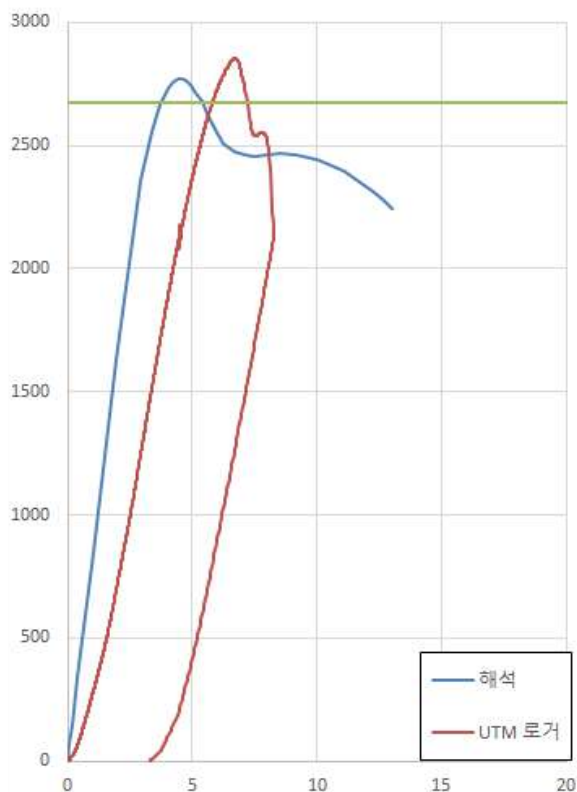
그림 61. 실험 종료 후 복부판 형상 (4F-Bending)

나) 전단 거동 검토 모델 실험 결과

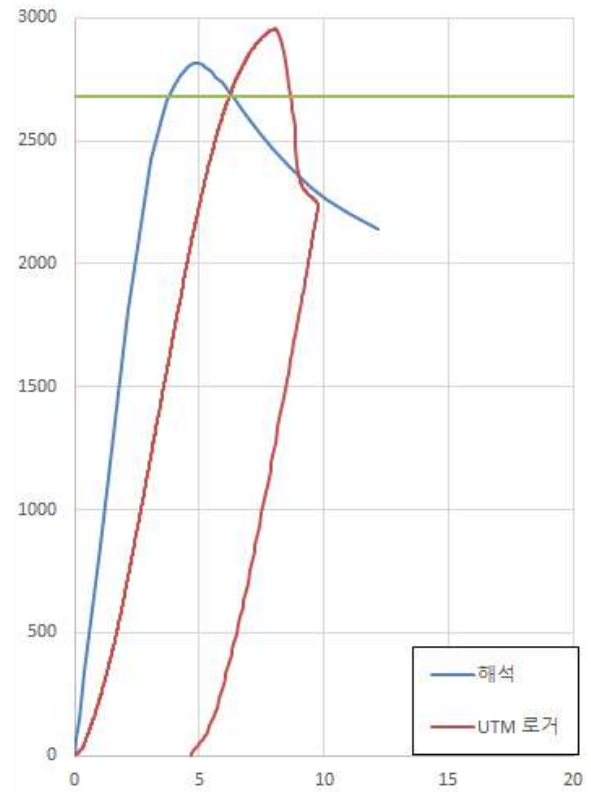
전단 거동 검토 모델(2F/4F-Shear) 실험체의 하중-변위 곡선을 그림 62와 같다. 실험결과가 해석 결과에 비해 탄성구간의 기울기가 작네 나타나며 변위 증가에 비해 하중의 증가폭이 작았으나 최대 하중은 해석결과의 최대하중을 상회하는 결과가 나타났다.

그림 63은 실험 후 복부판 형상으로 검토 패널에서 전형적인 전단좌굴에 의한 국부 변형에 의한 파괴현상이 나타났다.

앞에서 언급한 것과 같이 거더의 부재간의 강도차이가 크게 발생하여 상부플랜지가 예상보다 빠르게 항복에 도달하였는데 이에 상부플랜지가 강성을 잃으며 복부판에 과도한 전단 및 휨이 동시에 작용하게 되어 이와 같은 결과가 나타난 것으로 판단된다.



(a) 2F-Shear



(b) 4F-Shear

그림 62. 전단 거동 검토 모델 실험결과 vs. 해석결과 (Load-Center Disp.)

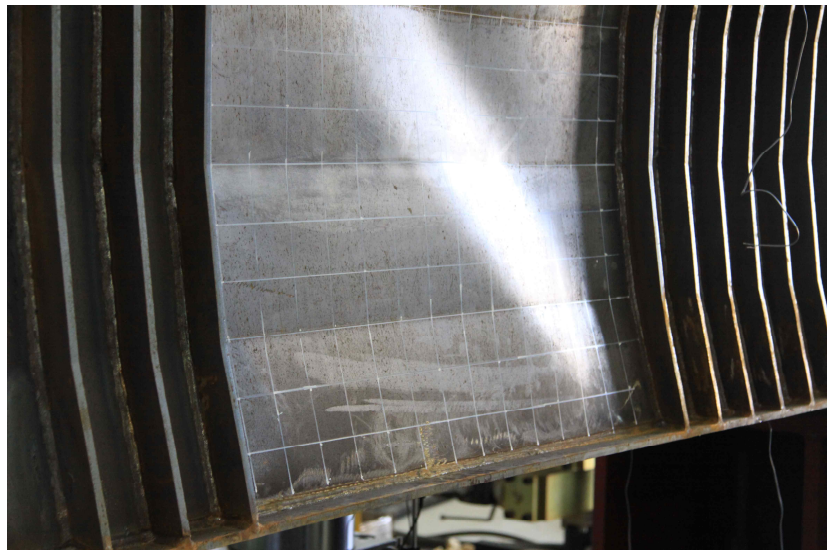


그림 63. 실험 종료 후 복부판 형상(4F-Shear)

제2절 콘크리트-강재 합성 거더

1. 수평파형 복부판과 콘크리트 슬래브의 합성 방법

가. 서론

콘크리트와 강재로 이루어진 합성단면의 접합성능은 접합면의 표면상태, 재료의 강도 및 철근배근 방법 등의 여러 가지 요인들의 상호관계에 의해 결정되어 진다. 수평파형 복부판과 콘크리트 슬래브의 최적 접합방법을 도출하기 위해 국내 및 해외의 유사형식 사례를 조사하고, 본 연구개발 과제 구조물 단면형상에 적합한 합성 방법을 도출하도록 하였다.

2. 합성연결부 접합방법

가. 유사교량 국내외 적용 사례

복부판을 수직방향으로 굴곡한 복부 파형강판 PSC 거더 교량에 대한 합성연결부 사례를 조사하였다. 복부판에 파형강판을 적용한 거더는 교축방향의 강성이 무시할 수 있을 정도로 작아 복부판에 의한 콘크리트 바닥판과 전단지연 효과가 작아지는 장점이 있다. 또한 아코디언 효과로 인한 콘크리트 부재의 프리스트레스 도입력 증가와 크리프 건조수축과 같은 2차응력 영향이 작아지는 장점도 있다. 그러나 파형강판 복부판의 교축방향 강성이 매우 작아 합성후에 많은 문제가 발생될 수 있으므로 접합부의 합성방법에 대한 다양한 방법들이 연구되어 적용되었다. 복부 파형강판 PSC 박스거더 교량은 일본에서 가장 많이 적용되었으며, 국내에도 낙동강을 횡단하는 총연장 800m로 선산대교가 2009년 개통되어 공용중에 있다.



(a) 선산대교(대한민국, 2009년)



(b) 혼다니교(일본, 1998년)

그림 1. 복부 파형강판 PSC 박스거더교 적용 사례

나. 복부 파형강판 PSC 거더교의 합성연결부 접합방법 적용 사례

파형강판 복부판 적용 PSC 거더의 기존 사례를 보면 파형강판이 상부슬래브 또는 하부슬래브 콘크리트 내에 추가적인 플랜지 없이 파형강판에 홈을 설치하여 접합하는 방법, 추가적인 플랜지를 설치하여 스테드를 설치하는 접합방법 등의 다양한 방법이 적용되어 왔다. 아래 그림은 대표적인 적용 사례이며 각각의 접합방법에 따른 특징을 표1에 나타내었다.

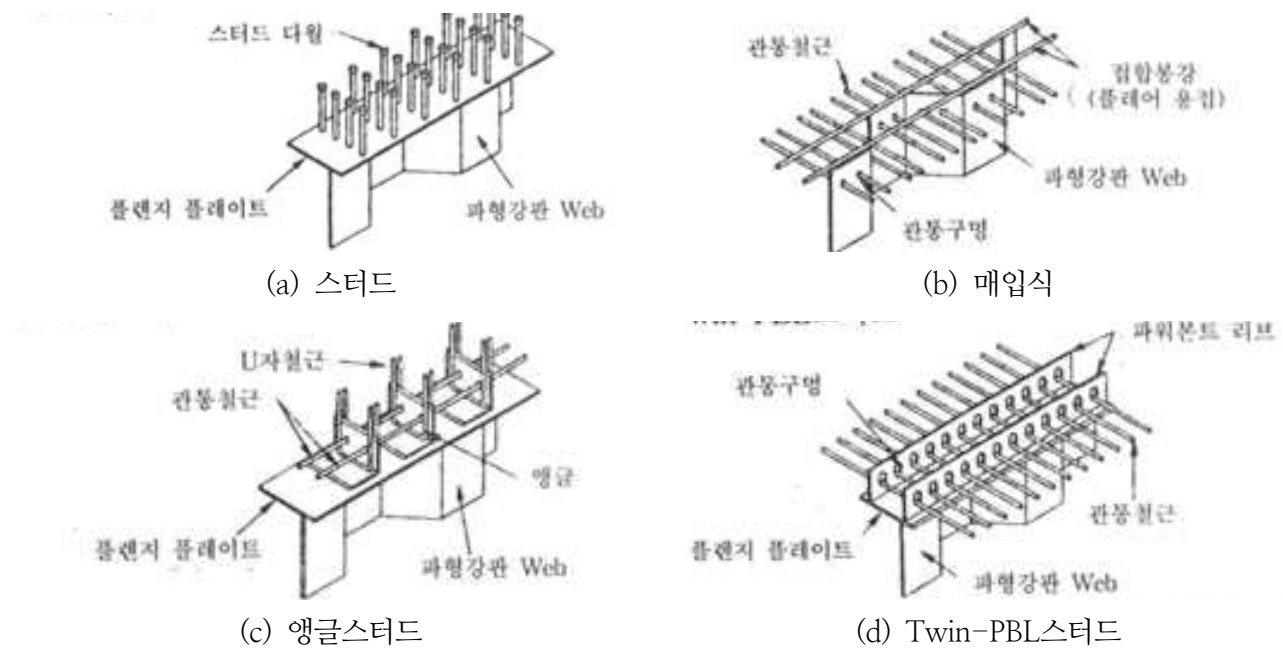


그림 2. 합성연결부 접합방법 사례

표 1. 합성연결부 접합방법별 특징

구 분	스테드	매입식	앵글 스테드	Twin-PBL 스테드
구조적 특 성	- 플랜지 추가 설치후 스테드 용접 - 꺽임모멘트에 대한 스테드의 인장강도 저하 우려	- 구멍을 뚫은 파형강판 단부에 접합강봉 용접 - 꺽임모멘트에 대한 충분한 피로내구성 보유	- 플랜지 추가 설치후 앵글 스테드 용접 - 관통철근, U자형 철근 배치 - 미끌림 전단 및 꺽임모멘트 저항성 높음.	- PBL 2장을 배치하여 관통철근 배치 - 꺽임모멘트에 대한 높은 저항성 유지
시공성	- 플랜지 설치로 거푸집 설치용이 - 상부 바닥판 철근 배치 용이	- 상부바닥판 거푸집 설치가 번잡 - 하부바닥판은 플랜지가 없어 콘크리트 타설 용이	- 플랜지 설치로 거푸집 설치용이 - 관통철근 삽입 및 U자형 철근 배치가 번잡	- 플랜지 설치로 거푸집 설치용이 - PBL 구멍이 커 철근 배치 용이.
경제성	- 파형강판에 플랜지 용접 필요 (비용증가) - 스테드 용접회수가 많아짐 (비용증가)	- 파형강판에 플랜지 용접 불필요 (비용절감) - 강과 콘크리트 경계면이 벌어질 우려가 있으므로 세밀한 코팅 필요 (비용증가)	- 파형강판에 플랜지 용접 필요 (비용증가) - 앵글스테드 주면 용접길이가 가장 길게 됨 (비용증가)	- 파형강판에 플랜지 용접 필요 (비용증가) - 플랜지에 PBL을 교축방향으로 용접 (비용증가)

특히, 매입식의 경우 플랜지를 설치하지 않음으로써 강재량이 줄고 추가적인 용접이 최소화 되는 장점이 있으나, 접합면의 세심한 관리가 요구된다.

국내 선산대교의 경우, 설계방법이 명확하며 강합성교량 등에서의 적용실적이 풍부하여 시공품질에 이상이 없는 스티드에 의한 접합방법을 사용하였다. 그림3의 (b)는 매입식 방법을 사용한 혼다니교의 접합부 시공 사진이다.



(a) 선산대교 접합부 상세 (스티드)



(b) 혼다니교 접합부 상세

그림 3. 합성연결부 접합부 시공 사진

다. 수평 절곡강판 거더의 합성연결부 접합방법 적용

본 연구개발 과제 시험체는 선산대교에서 적용된 것과 같이 스티드 접합방법을 사용하였다.(그림4)



그림 4. 수평 절곡강판 거더 합성연결부 접합부 제작 사진

아래와 같은 이점으로 인해 스티드에 의한 접합방법을 적용하였다.

첫째, 상부플랜지가 이미 설치되어 있어 스티드 연결을 위한 부가적인 부재가 필요하지 않다.

둘째, 수직방향으로 형성되는 파형강판의 용접시 물결형태로 용접을 해야 하는 반면, 수평파형 복부판은 직선 형태으로써 용접이 용이하다.

셋째, 복부 파형강판 PSC거더의 복부판은 교축방향으로의 강성이 거의 없어 복부판 변형에 따른 합성연결부에 큰 수평전단력이 작용하나, 수평 절곡 복부판 거더는 복부판 변형이 상대적

으로 작아 접합면에 작은 수평전단력이 발생하므로 일반적인 연성 연결방법인 스티드 연결상세로도 충분한 안전율을 확보할 것으로 판단된다.

넷째, 설계방법이 확립되어 있고 강합성교에 대한 적용 실적이 풍부하여 품질관리에 유리하다.

3. 실험연구 내용 및 결과

가. 실험체 설계

1) 실험체 개요

가) 실험목표

콘크리트와 합성된 수평파형 복부판의 구조성능을 검증하기 위하여 콘크리트와 합성된 직선 복부판인 경우의 구조성능을 비교하였다.

우선 직선 복부판인 경우 하부 플랜지가 항복되기 전에 복부판의 휨 압축응력에 의한 좌굴이 발생할 수 있는 형상을 설계하고 직선 복부판과 모든 조건은 동일하지만 단지 수평파형 복부판만 변경될 경우, 하부 플랜지가 얼마간의 소성화가 진행되더라도 복부판은 휨 압축응력으로 인한 좌굴이 발생되지 않음을 증명하여 수평파형 복부판의 구조성능이 직선 복부판보다 증가됨을 증명하는 것을 실험 목표로 한다.

나) 실험방법

500ton 유압잭 하나로 중앙부 1개소에 하중을 제하하는 3점 재하형식으로 결정하였고 최대 재하 하중이 300ton 수준이 되도록 단면과 지간을 설계 하였다.

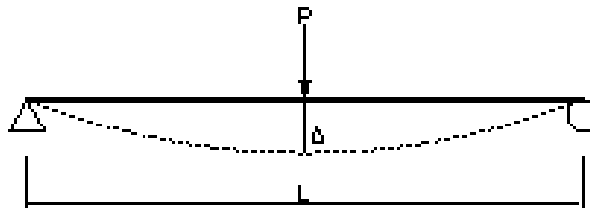


그림 5. 실험체 자유물체도

나. 단면설계

실험체 제작에 사용된 강종은 SS275 강재를 적용하였다. 도로교설계기준(한계상태설계법)에서 SS275 강재의 최소항복강도는 두께 40mm 이하인 경우 275MPa 적용하고 두께가 증가함에 따라 감소된 항복강도를 적용한다고 규정한다. 단면의 효율적 활용을 위하여 단면두께는 40mm 미만으로 사용하였다.

1) 상부플랜지

상부플랜지는 폭 100mm, 두께 10mm로 설계하였고 아래와 같이 강구조설계기준(하중저항계수설계법)을 만족하도록 설계하였다.

- 압축 또는 인장을 받는 U형 단면의 상부플랜지 단면비

$$\bullet \frac{b_f}{2 \times t_{fc}} \leq 12.0, \quad \frac{b_f}{2 \times t_{fc}} = \frac{100mm}{2 \times 10mm} = 5 \leq 12.0 \quad \therefore O.K$$

$$\bullet b_f \geq D/6, \quad b_f = 100mm < D/6 = 1,200mm/6 = 200 \quad \therefore N.G$$

$$\bullet t_{fc} \geq 1.1t_w, \quad t_{fc} = 10mm \geq 1.1t_w = 1.1 \times 6mm = 6.6 \quad \therefore O.K$$

여기서 $b_f \geq D/6$ 기준은 폭이 매우 좁은 플랜지를 사용할 경우 바닥판콘크리트와의 합성전에 복부판 휨 좌굴이 발생될 수 있으므로 일정폭 이상의 플랜지 폭을 사용하도록 하기 위함이다. 그러나 본 실험체의 경우 강거더 제작시 이미 콘크리트 슬래브와 합성이 되기 때문에 복부의 휨 좌굴이 발생하지 않는 것으로 하였다.

2) 하부플랜지

본 실험은 복부판의 압축부의 좌굴에 대한 연구이므로 복부판의 압축부에 충분한 압축응력이 발생 되도록 단면의 중립축을 인장플랜지 쪽으로 위치시키기 위해 인장플랜지 단면을 다른 요소들에 비해 크게 설계하였다. 하부플랜지는 폭 800mm, 두께 26mm로 설계하였고 복부판과 하부플랜지의 용접을 위해 복부판의 외측으로 50mm 돌출되도록 하였다.

3) 복부판

수평파형 복부판의 좌굴성능이 직선 복부판의 좌굴성능보다 증가되는 것을 증명하기 위해 KDS 14 31 10 강구조 부재 설계기준(하중저항계수설계법)에 따라 복부판의 폭/두께비는 직선 복부판을 사용할 경우 수평보강재가 필요로 하지만 수평보강재를 사용하지 않는 경우의 좌굴성능과 수평파형 복부판을 적용한 경우의 좌굴성능을 비교할 수 있는 복부판의 크기를 결정하였다. 적용된 복부판은 높이 1200mm, 두께 6mm로 설계하였고 절곡형태는 대칭으로 4번 절곡된 형태인 4F-A 단면이며 절곡각도는 5° 이다.

수평파형 복부판의 전단강도가 직선 복부판의 전단강도 보다 얼마만큼 향상되는지 확인하기 위하여 직선 복부판의 좌굴강도를 강구조설계기준(하중저항계수설계법)에 따라 아래 그림과 같이 산정하였다. 설계식에 의한 전단 좌굴강도는 단부패널의 전단강도인 44.8MPa이고 휨 좌굴 강도는 수평보강재가 없는 경우인 145MPa로 산정되었다.

직선 복부판의 전단 설계

① 복부판 제원

· 강재의 탄성계수	: E = 205000 MPa
· 강재의 항복강도	: F _{yw} = 235 MPa
· 복부의 높이	: D = 1200 mm
· 복부의 두께	: t _w = 6 mm
· 수직보강재 간격	: d ₀ = 1250 mm
· 수평보강재 개수	: n = 1 EA
· 수평보강재 상면으로 부터 위치	: d _s = 240 mm
· 압축축 깊이	: D _c = 641 mm

② 복부판 단면비 검토

$$\frac{D}{t_w} = \frac{1200}{6} = 200 \leq \begin{matrix} 150 : \text{수평보강재가 없는 복부판} \\ 300 : \text{수평보강재가 있는 복부판} \end{matrix} \quad \therefore \text{수평보강재가 있는 복부판으로 설계}$$

③ 보강된 복부판의 전단좌굴강도 (web shear-buckling resistance)

○ 전단좌굴계수, k

$$k = 5 + \frac{5}{(d_0/D)^2} = 5 + \frac{5}{(1250/1200)^2} = 9.61$$

○ 전단항복강도에 대한 전단좌굴강도의 비 (C)

$$\begin{aligned} \frac{D}{t_w} &\leq 1.12 \sqrt{\frac{E \cdot k}{F_{yw}}} && \text{이면, } C = 1.000 \\ 1.12 \sqrt{\frac{E \cdot k}{F_{yw}}} &\leq \frac{D}{t_w} \leq 1.40 \sqrt{\frac{E \cdot k}{F_{yw}}} && \text{이면, } C = \frac{1.12}{D/t_w} \sqrt{\frac{E \cdot k}{F_{yw}}} = 0.513 \\ \frac{D}{t_w} &> 1.40 \sqrt{\frac{E \cdot k}{F_{yw}}} && \text{이면, } C = \frac{1.57}{(D/t_w)^2} \left(\frac{E \cdot k}{F_{yw}} \right) = 0.329 \\ 1.12 \sqrt{\frac{E \cdot k}{F_{yw}}} &= 102.54, \quad 1.40 \sqrt{\frac{E \cdot k}{F_{yw}}} = 128.17, \quad \frac{D}{t_w} = 200 && \text{이므로, } C = 0.329 \end{aligned}$$

○ 단부패널의 전단강도 (V_n)

$$\begin{aligned} V_n &= V_{cr} \\ &= C \cdot V_p \\ &= C \cdot 0.58 \cdot F_{yw} \cdot D \cdot t_w \\ &= 0.329 \times 0.58 \times 235.0 \times (D \cdot t_w) \\ &= \underline{44.84 \text{ MPa}} \times (D \cdot t_w) \end{aligned}$$

○ 내부패널의 전단강도

$$\begin{aligned} - \frac{2 \cdot D \cdot t_w}{(b_{lc} t_{lc} + b_{lt} t_{lt})} &\leq 2.5 \text{ 이면 } V_n = C' \cdot V_p = \left[C + \frac{0.87(1-C)}{\sqrt{1+(d_0/D)^2}} \right] V_p \\ \frac{2 \cdot D \cdot t_w}{(b_{lc} t_{lc} + b_{lt} t_{lt})} &> 2.5 \text{ 이면 } V_n = C' \cdot V_p = \left[C + \frac{0.87(1-C)}{\sqrt{1+(d_0/D)^2} + d_0/D} \right] V_p \\ - \frac{2 \cdot D \cdot t_w}{(b_{lc} t_{lc} + b_{lt} t_{lt})} &= \frac{14400}{55000} = 0.26 \leq 2.5 \text{ 이므로} \\ V_n &= V_{cr} \\ &= C' \cdot V_p \\ &= 0.733 \times 0.58 \times 235.0 \times (D \cdot t_w) \\ &= \underline{99.94 \text{ MPa}} \times (D \cdot t_w) \end{aligned}$$

그림 6. 직선 복부판 좌굴강도 산정시트(1)

④ 복부판의 휨 좌굴 강도 (web bend-buckling resistance)

○ 휨좌굴계수 (K)

- 수평보강재가 없는 경우

$$K = \frac{9}{(D_c/D)^2} = \frac{9}{(641.0 / 1200)^2} = 31.5$$

- 수평보강재가 있는 경우

$$k = \frac{5.17}{(d_s/D)^2} = \frac{5.17}{(240.0 / 1200.0)^2} = 129.3, \frac{d_s}{D_c} \geq 0.4 \text{ 일 경우}$$

$$\geq \frac{9}{(D_c/D)^2} = \frac{9}{(641.0 / 1200.0)^2} = 31.5$$

$$= \text{Max}(129.3, 31.5) = 129.3$$

$$k = \frac{11.64}{((D_c - d_s)/D)^2} = \frac{11.64}{(401.0 / 1200.0)^2} = 104.2, \frac{d_s}{D_c} < 0.4 \text{ 일 경우}$$

$$- k = 104.2 \quad \frac{d_s}{D_c} = \frac{240}{641} = 0.37 < 0.4 \text{ 이므로,}$$

○ 공칭휨좌굴강도 (F_{crw})

- 수평보강재가 없는 경우

$$F_{crw} = \frac{0.9 E k}{(D/t_w)^2} = \frac{0.9 \times 205,000 \times 31.5}{(1,200.0 / 6)^2} = 145.3 \text{ MPa} \leq \frac{\min(R_y F_{yc}, F_{yw}/0.7)}{\min(235, 336)}$$

$$= 145.29 \text{ MPa}$$

- 수평보강재가 있는 경우

$$F_{crw} = \frac{0.9 E k}{(D/t_w)^2} = \frac{0.9 \times 205,000 \times 104.2}{(1,200.0 / 6)^2} = 480.6 \text{ MPa} \leq \frac{\min(R_y F_{yc}, F_{yw}/0.7)}{\min(235, 336)}$$

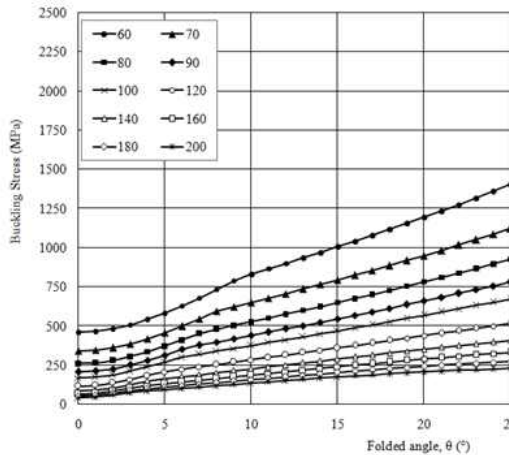
$$= 235.00 \text{ MPa}$$

그림 7. 직선 복부판 좌굴강도 산정시트(2)

4) 수평파형 복부판의 좌굴강도

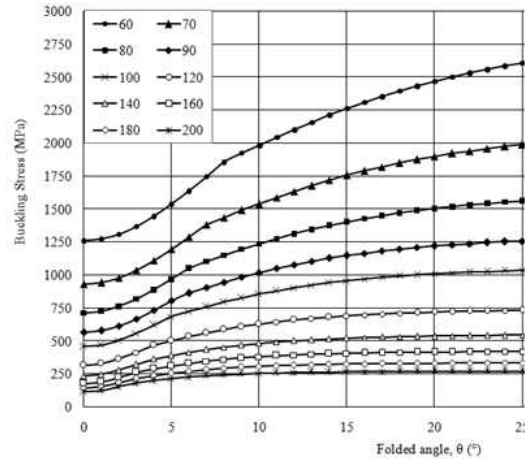
수평파형 복부판의 좌굴강도는 1차 연도 연구결과를 바탕으로 산정하였다. 아래 그래프는 폭/두께비 및 절곡각도에 대한 전단 좌굴강도와 휨 좌굴강도이다. 본 실험체의 폭/두께비 200에 해당되는 수평파형 복부판의 전단 좌굴강도는 4F-A-05° 일 때 120MPa이고 휨 좌굴 강도는 4F-A-05° 일 때 310MPa으로 직선 복부판의 휨 좌굴강도보다 증가됨을 보여준다.

Shear (Single)



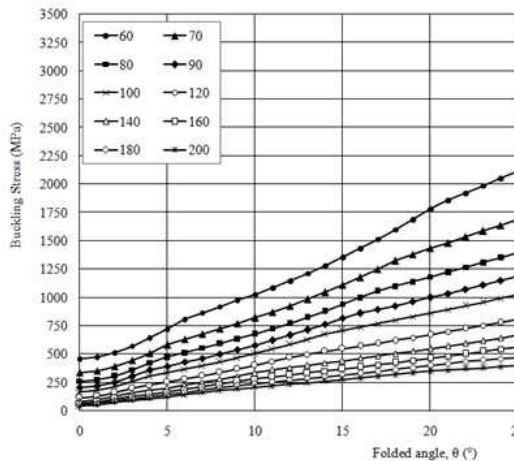
(a) 2F-A 단면의 전단 좌굴강도

Bending (Single)



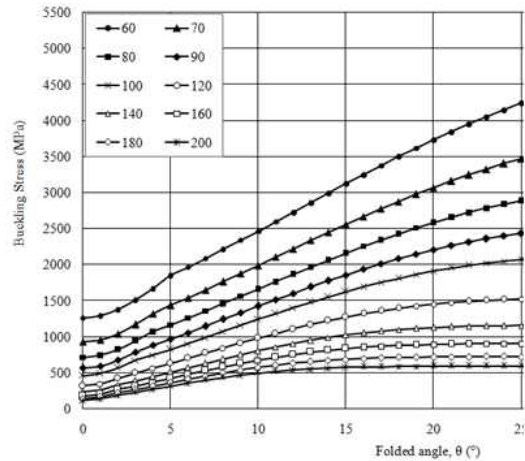
(b) 2F-A 단면의 휨 좌굴강도

Shear (Double)



(c) 4F-A 단면의 전단 좌굴강도

Bending (Double)



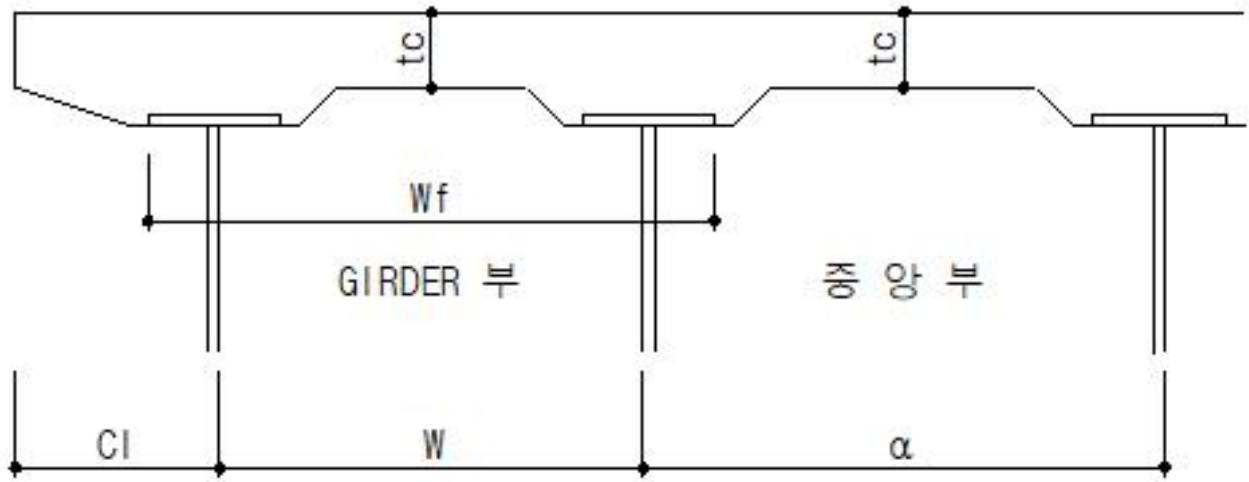
(d) 4F-A 단면의 휨 좌굴강도

그림 8. 1차 연도 연구 결과(수평 절곡 강판 좌굴강도)

5) 바닥판 및 전단연결재

중립축이 인장플랜지 쪽으로 위치시키기 위하여 바닥판은 최소 크기로 설계하였다. 바닥판의 두께는 스티드의 매입깊이와 철근피복을 고려하여 최소로 결정하였고 바닥판의 폭은 바닥판의 유효폭보다 작게 고려하여 슬래브 전체가 유효하게 작용할 수 있게 하였다. 실험체는 단순지지된 형태이므로 바닥판은 압축력만 받게 되므로 바닥판에 배근되는 철근은 온도철근 이상의 철근만 배근하였다. 바닥판과 전단연결재 설계는 도로교설계기준(한계상태설계법)에 따라 설계하였다. 바닥판의 크기는 폭 1,000mm, 두께 150mm이며 철근량은 상단 및 하단에 H10@300으로 직각 배근 하였다.

가) 바닥판의 유효폭 (Be)



L: 등가 치간장

그림 9. 바닥판의 유효폭 산정 변수

- $B_e = \frac{L}{8} = \frac{10,000mm}{8} = 1,250mm$
- $B_e = 12t_c = 12 \times 150mm = 1,800mm$
- $B_e = 6t_c + \max[\frac{W_f}{4}, \frac{W}{2}] = 6 \times 150mm + \max[\frac{700mm}{4}, \frac{830mm}{2}] = 1,800mm$

∴ 바닥판의 폭은 위의 유효폭보다 작은 1,000mm로 적용

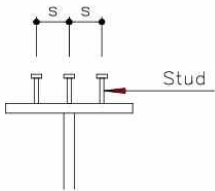
나) 바닥판의 철근량

- 필요철근량 : $0.002 \times B \times H = 0.002 \times 1000 \times 150 = 300 \text{ mm}^2$
- 사용철근량 : D10-8EA-2EA(상,하단) = $1140 \text{ mm}^2 > 300 \text{ mm}^2 \therefore \text{O.K}$

전단연결재 직경은 16mm, 높이 80mm로 상부플랜지에 1열로 150mm간격으로 설치하였고 전단연결재 설계과정은 아래 그림과 같다.

전단연결재 설계

(1) 형태 검토



$s =$	0 mm	(s : stud 의 횡방향 최소간격)
$d =$	16 mm	(d : stud 의 직경)
$H =$	80 mm	(h : stud 의 전높이)
$n =$	2 본 사용	(박스거더 한 단면에 배치된 전단연결재 개수)
$\frac{H}{D} =$	5.0	≥ 4.0 0.K

(2) 횡방향간격 검토

1) 전단연결재 횡방향 간격은 전단연결재 직경의 4배이상

$$S_{use} = 0 < 4d = 64.000 \text{ mm} \quad \text{1열 배열이므로 검토 필요 없음.}$$

2) 상부플랜지 연단과 가장 인접한 전단연결재 간의 연단거리는 25mm 이상

$$\frac{b_{tf} - (N-1) \cdot S}{2} - \frac{d}{2} = 42.000 \geq 25.0 \text{ mm} \quad \text{0.K}$$

여기서, $b_{tf} = 100 \text{ mm}$ (전단연결재가 접합된 플랜지의 폭)
 $N = 1 \text{ EA}$ (개구형 플랜지의 횡방향 전단연결재 개수, $n/2$)
 $S = 0 \text{ mm}$ (전단연결재의 횡방향 간격)
 $D = 16 \text{ mm}$ (전단연결재 지름)

(3) 덮개와 관입 검토

1) 전단연결재의 피복덮개 높이는 50mm 이상

$$T_{cu} + T_h - t_f - H = 150 + 0 - 10 - 80 = 60 \text{ mm} \geq 50 \text{ mm} \quad \text{0.K}$$

여기서, $T_{cu} = 150 \text{ mm}$ (바닥판 두께)
 $T_h = 0 \text{ mm}$ (바닥판 현치 두께)
 $t_f = 10 \text{ mm}$ (전단연결재가 접합된 플랜지의 두께)
 $H = 80 \text{ mm}$ (stud의 전높이)

2) 전단연결재는 50mm 이상 슬래브 내부로 관입

$$H - t_h = 80 - 0 = 80 \text{ mm} \geq 50 \text{ mm} \quad \text{0.K}$$

그림 10. 전단연결재 설계시트(1)

(3) 극한한계상태 검토

1) 전단연결재 공칭전단강도 (☞ 강구조설계 설계기준 한계상태 설계법 6.3.1.10.4(3))

$$Q_{ncal} = 0.27 \cdot d^2 \cdot \sqrt{f_{ck} E_c} = 54.402 \text{ kN}$$

$$Q_{nlim} = 0.8 \cdot A_{sc} \cdot F_u = 64.340 \text{ kN}$$

$$\therefore Q_n = \min(Q_{ncal}, Q_{nlim}) = 54.402 \text{ kN}$$

$$Q_r = \Phi_{se} \cdot Q_n = 46.241 \text{ kN}$$

여기서, $f_{ck} = 24 \text{ MPa}$ (콘크리트 28일 압축강도)

$$E_c = 25811 \text{ MPa}$$
 (슬래브 탄성계수)

$$A_{sc} = 201 \text{ mm}^2$$
 (전단연결재 면적)

$$F_u = 400 \text{ MPa}$$
 (전단연결재 인장강도)

$$\Phi_{se} = 0.85$$
 (6.5.4.2에 규정된 전단연결재에 대한 저항계수)

2) 소요 전단연결재 (단부-정모멘트최대 구간)

- 공칭전단력 산정 (☞ 강구조설계 설계기준 한계상태 설계법 6.3.1.10.4(2))

$$P = P_p^2 + F_p^2 = 3,060.000 \text{ kN}$$

P_p : 최대 정모멘트(활하중+충격하중) 지점에서 콘크리트 바닥판의 총 종방향 전단력

$$P_{1p} = 0.85f_{ck} \cdot b \cdot t_s, \quad P_{2p} = F_{yw} \cdot D \cdot t_w + F_{yt} \cdot b_t \cdot t_t + F_{yc} \cdot b_c \cdot t_c \text{ 중 작은값(N)}$$

$$P_{1p} = 0.85f_{ck} \cdot b \cdot t_s = 3060 \text{ kN}$$

$$P_{2p} = F_{yw} \cdot D \cdot t_w + F_{yt} \cdot b_t \cdot t_t + F_{yc} \cdot b_c \cdot t_c = 7050 \text{ kN}$$

$$\therefore P_p = \min(P_{1p}, P_{2p}) = 3060 \text{ kN}$$

F_p : 최대 정모멘트(활하중+충격하중) 지점에서 콘크리트 바닥판의 총 반경방향 전단력

$$F_p = P_p \cdot L_p / R = 0 \text{ kN (직선교)}$$

여기서, $b = 1000 \text{ mm}$ (바닥판 유효폭)

$$t_s = 150 \text{ mm}$$
 (바닥판 두께)

$$b_c = 100 \text{ mm}$$
 (압축플랜지 폭, 개구형)

$$t_c = 10 \text{ mm}$$
 (압축플랜지 두께)

$$b_t = 800 \text{ mm}$$
 (인장플랜지 폭)

$$t_t = 26 \text{ mm}$$
 (인장플랜지 두께)

$$F_{yw} = 235 \text{ MPa}$$
 (복부판 항복강도)

$$F_{yt} = 235 \text{ MPa}$$
 (인장플랜지 항복강도)

$$F_{yc} = 235 \text{ MPa}$$
 (압축플랜지 항복강도)

$$D = 1200 \text{ mm}$$
 (복부판 높이)

$$t_w = 6 \text{ mm}$$
 (복부판 두께)

$$L_p = 5.2 \text{ m}$$
 (단부에서 최대정모멘트까지의 호의 길이)

$$R = \infty \text{ m}$$
 (L_p 구간 내의 최소 거더반경)

- 정모멘트 구간에서 소요 전단연결재 개수

$$n_{req} = P/Q_r = 67 \text{ EA}$$

- 정모멘트 구간에서 전단연결재 간격 (S)

$$n = 2 \text{ 본 사용}$$
 (박스거더 한 단면에 배치된 전단연결재 개수)

$$L = 5200 \text{ mm}$$

$$S = L / (n_{req} / n) = 155 \text{ mm} > \underline{\underline{S_{ues} = 150 \text{ mm}}} \text{ 적용}$$

그림 11. 전단연결재 설계시트(2)

다. 실험체 단면예비 검토

본 실험에 적용된 수평파형 복부의 형태는 5° 로 4번 절곡 복부판을 적용하였다. 아래의 그림은 비교대상이 되는 직선 복부판과 실험체 단면형상이다.

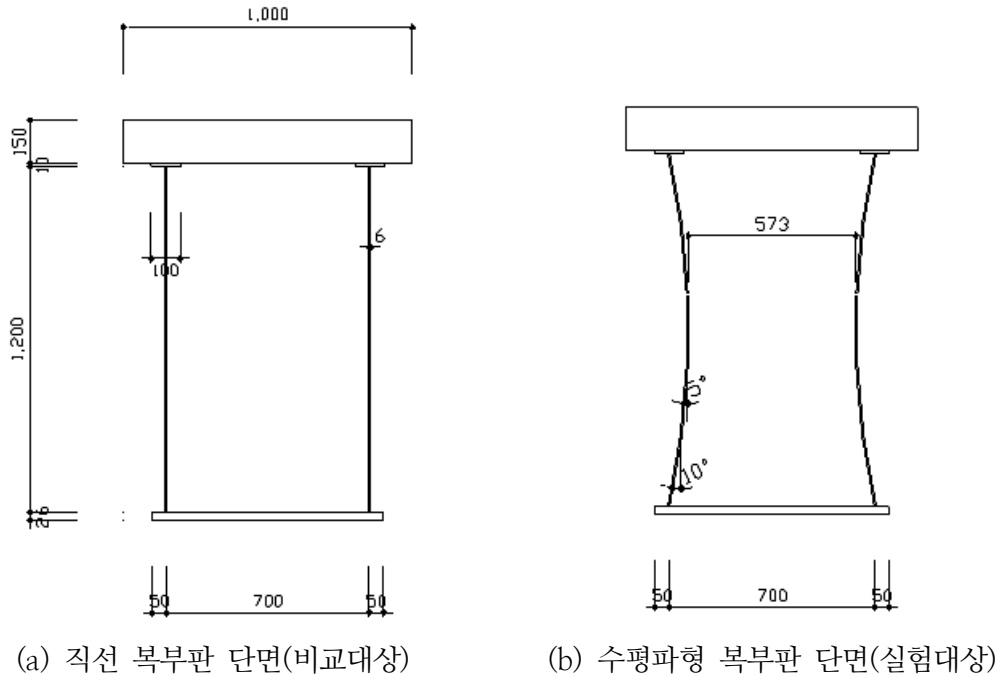
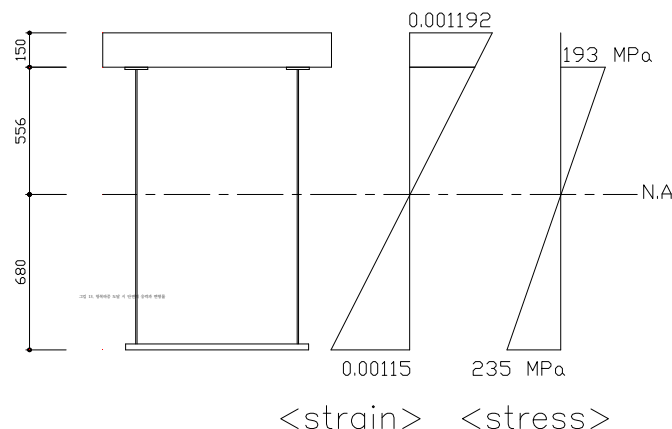


그림 12. 검토단면

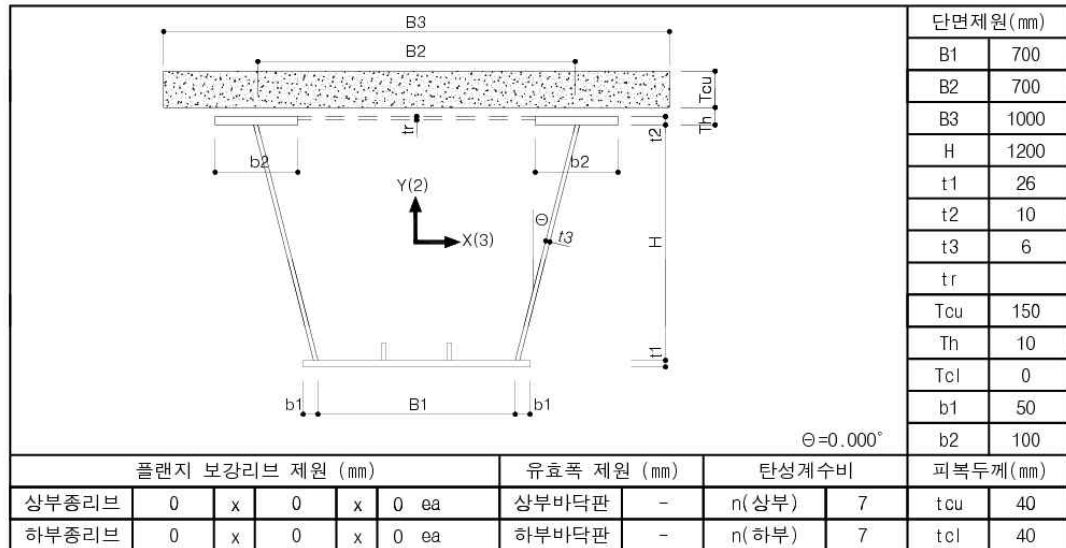
1) 하부플랜지 항복시 거동 예측

본 실험의 목적이 직선 복부판인 경우 하부 플랜지가 항복되기 전에 복부판의 휨 압축응력에 의한 좌굴이 발생이 되고 반면에 수평파형 복부판인 경우 하부 플랜지가 충분히 항복한 후에도 복부판은 휨 압축응력으로 인한 좌굴이 발생되지 않음을 증명하는 것이다. 따라서 하부플랜지가 항복한 직후에 단면의 각 위치의 변형률과 응력을 역학이론으로 계산하여 복부의 휨 좌굴 여부를 사전에 확인하였다. 초등재료역학으로 계산되는 응력과 변형률은 수평파형 복부판과 직선 복부판의 결과 차이가 미미하므로 직선 복부판의 단면의 변형률, 응력값을 같이 적용하였다. 아래의 그림은 직선 복부판 단면에서 하부플랜지가 항복한 직후 변형률과 응력값이다.



하부플랜지 항복 시 복부판 상단에 발생하는 휨 압축응력은 193MPa로서 직선 복부판의 휨 좌굴 강도 145MPa보다 큰 값이다. 이는 직선 복부판일 때 하부플랜지가 항복하기 전에 복부판에서 휨 좌굴에 의해 파괴가 발생할 수 있다. 반면 수평파형 복부판의 휨 좌굴강도는 310MPa로서 강재의 항복응력을 넘는 값으로 하부플랜지가 항복되더라도 복부판의 휨 좌굴은 발생되지 않음을 의미하므로 이론적으로 본 실험의 목적과 맞게 단면이 설계되었다. 아래의 그림은 단면정수 산정과정이다.

직선 복부판의 단면정수



※ tr : 비틀림강성 산정을 위한 브레이싱의 유효두께 (아래계산 참조)

※ 바닥판의 유효두께는 상부플랜지의 두께를 공제한 것을 적용, 단, 하중산정시는 전체 두께를 고려함

① 합성전 단면

구 분	규	격	As(mm ²)	Y(mm)	AsY(mm ³)	AsY ² (mm ⁴)	Io(mm ⁴)
상부플랜지	2	- 100 x 10	2000	605.0	1.210E+06	7.321E+08	1.667E+04
상부종리브	0	- 0 x 0	0	600.0	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
복 부 판	2	- 1200 x 6	14400				1.728E+09
하부종리브	0	- 0 x 0	0	-600.0	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
하부플랜지	1	- 800 x 26	20800	-613.0	-1.275E+07	7.816E+09	1.172E+06
TOTAL			37200		-1.154E+07	8.548E+09	1.729E+09

$$I_{s'} = \sum AsY^2 + \sum I_o = 8548045200 + 1729188400 = 1.028E+10 \text{ mm}^4$$

$$\delta_s = \frac{\sum AsY}{\sum As} = \frac{-11540400}{37200} = -310.2 \text{ mm}$$

$$I_{33} = I_{s'} - \sum As \times \delta_s^2 = 10277233600 - 37200 \times (-310.226)^2 = 6.697E+09 \text{ mm}^4$$

$$I_{22} = (b_2^3 \times t_2 / 12 \times 2) + ((B_1 + b_1 \times 2)^3 \times t_1 / 12) + ((H \times t_3^3 / 12 \times 2) + [(b_2 \times t_2 + H \times t_3) \times (B_1 / 2 + t_3 / 2)^2] \times 2) \\ = (100^3 \times 10 / 12 \times 2) + (800^3 \times 26 / 12) + ((1200 \times 6^3 / 12) + [(100 \times 10) + (1200 \times 6) \times (700 / 2 + 6 / 2)^2] \times 2) = 3.150E+09 \text{ mm}^4$$

$$S_{top} = I_{33} / y_{sv} = 6,697,103,703 / 920 = 7.278E+06 \text{ mm}^3$$

$$S_{bot} = I_{33} / y_{sv} = 6,697,103,703 / 316 = 2.121E+07 \text{ mm}^3$$

그림 14. 단면정수 계산시트(1)

② 합성후 단면

구 분	규 격	As(mm ²)	Y(mm)	AsY(mm ³)	AsY ² (mm ⁴)	Io(mm ⁴)
UPPER FL.	2 - 100 x 10	2000	1,231.0	2.462E+06	1.675E+09	1.667E+04
UPPER RIB	0 - 0 x 0	0	1,226.0	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
W E B	2 - 1200 x 6	14400	626.0	9.014E+06	1.386E+09	1.728E+09
LOWER RIB	0 - 0 x 0	0	26.0	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
LOWER FL.	1 - 800 x 26	20800	13.0	2.704E+05	1.907E+09	1.172E+06
TOTAL		37200	315.8	1.175E+07	4.968E+09	1.729E+09

(탄성계수비 n 적용)

구 분	규 격	As(mm ²)	Y(mm)	AsY(mm ³)	AsY ² (mm ⁴)	Io(mm ⁴)
상부슬래브	1 - 1000 x 150	150000				2.813E+08
환산슬래브		21428.57143	1,311.0	2.809E+07	8.545E+09	4.018E+07
상부철근	0 - : 0					
하부철근	0 - : 0					
강형		37200	315.8	1.175E+07	4.922E+09	6.697E+09
TOTAL		58628.57143	679.5	3.984E+07	1.347E+10	6.737E+09

- 도심 : $y_b = 39839657/58629 = 679.526 \text{ mm}$
 $y_t = D - y_b = 556.474 \text{ mm}$

$I_{v33} = \sum AsY^2 + \sum I_o$
 $= 13466976570 + 6737282275 = 2.020E+10 \text{ mm}^4$

$I_{v22} = I_{22} + B1^3 \times TcI / 12 / n$
 $= 3150412800 + 1000.000^3 \times 150.0 / 12 / 7 = 4.936E+09 \text{ mm}^4$

그림 15. 단면정수 계산시트(2)

2) 항복하중 추정

본 실험은 5,000kN 유압잭 하나로 중앙부 1개소에 하중을 재하하기로 하였으므로 하부플랜지가 항복에 도달하는 항복하중을 5,000kN 용량의 유압잭의 60% 수준인 3,000kN 수준이 되도록 지간을 설정하였다. 그 결과 지간은 10m로 설정이 되었고 항복하중은 2,800kN 수준이므로 유압잭 용량에 맞게 실험이 가능한 수준이다.

실험체 도면은 그림 16과 같다.

라. 실험결과 및 고찰

실험연구 결과 검토를 위해 한국화학시험연구원에 위탁 의뢰한 강재 시편시험 결과를 바탕으로 수치해석을 수행하였다. 각 강재 별 시편시험결과는 증빙 13~28로 제출하였으며, 표 2에서 정리하였다. 그 결과 인장플랜지에서 먼저 항복이 발생했으며 이 때, 항복하중은 4,363kN이다.

표 13. 부재별 시편시험결과

Plate	Yield strength (MPa)	Tesile strength (MPa)	Elongation (%)	Thickness (mm)
6	352	498	25	6
6	354	497	24	6
6	354	498	25	6
6	350	497	23	6
6	357	497	25	6
6	353	497	26	6.1
10	315	438	30	9.8
10	314	435	33	9.9
10	316	437	33	9.8
10	319	438	30	9.8
16	293	451	27	16.2
16	293	458	24	16.1
20	266	445	27	19.8
26	369	527	26	26.2
철근	479	592	20	

실험을 진행하는 과정에서 설계시 충분한 좌굴강도를 갖도록 절곡각도를 결정하였으나, 중앙부 복부판에서 전단좌굴이 발생하며 파괴되는 현상이 발견되었다. 이 때의 복부판 변형 형상은 그림 17과 같다.



그림 17. 파괴 후 거더 복부판 형상

실험을 통해 얻은 하중-변위 데이터를 이용해 앞서 수행된 수치해석을 통해 얻은 항복하중과 나타내면 그림 18과 같다. 평면인 판의 휨/전단 좌굴강도는 각각 111, 43MPa로 각각의 좌굴하중은 1,312, 1,247kN이다. 실험결과 곡선을 살펴보면 평면인 판의 좌굴하중 이상 복부판 좌굴 없이 꾸준히 하중이 증가하였으므로 절곡을 통해 복부판의 좌굴성능 증가 효과가 있음을 확인할 수 있다. 그러나 실험체의 복부판은 형상비 1정도를 갖도록 수직보강재가 배치되었고, 이에 복부판은 형상비 1인 4F-A 전단좌굴 곡선을 이용하여 휨/전단 좌굴강도가 각각 316, 124MPa를 갖도록 설계되었다.

휨/전단 좌굴하중은 각각 3,756, 3,583MPa로 계산되는데 이보다 매우 작은 1,800kN 정도의 하중에서 첫 번째 전단좌굴이 발생하였음을 확인할 수 있다.

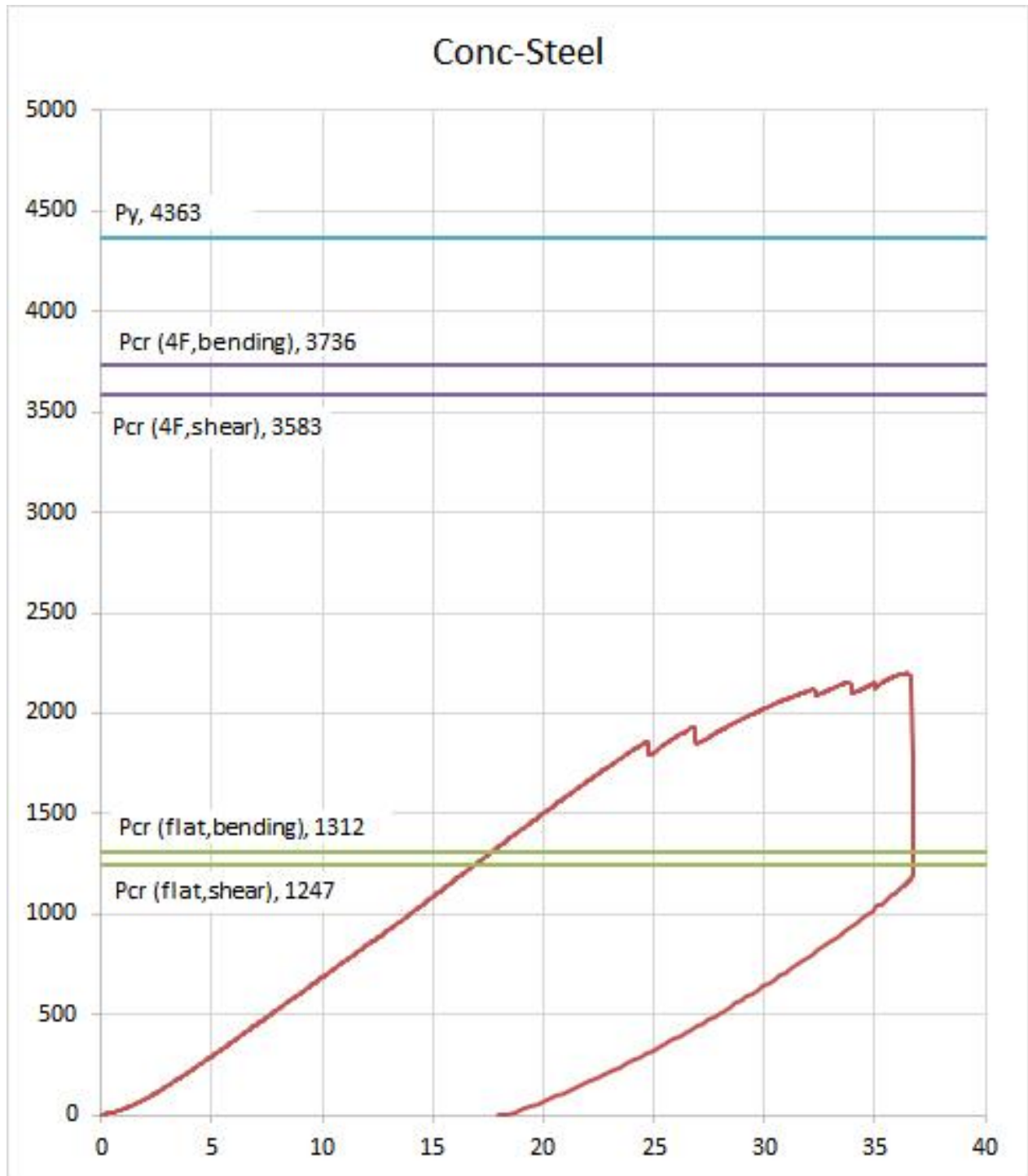


그림 18. 콘크리트-강재 합성 거더 실험 결과

여기에서;

P_y : 인장플랜지 항복응력 도달 시 하중

$P_{cr}(flat, bending)$: 평판 휨 좌굴응력 도달 시 하중

$P_{cr}(flat, shear)$: 평판 전단 좌굴응력 도달 시 하중

$P_{cr}(4F, bending)$: 4F-A 모델 휨 좌굴응력 도달 시 하중

$P_{cr}(4F, shear)$: 4F-A 모델 (형상비=1) 전단 좌굴응력 도달 시 하중

4F-A 모델 전단강도곡선, 형상비=5,(1절 그림 20)을 사용하여 세장비 100, 절곡 각도 5° 인 판의 전단좌굴강도를 확인하면 63MPa이고, 수치해석 상의 전단 좌굴하중은 1,833kN이다. 이를 그림 19에 나타내었다. 그림에서 보는 것과 같이 수치해석 상의 전단 좌굴하중근처에서 첫 번째 전단 좌굴이 발생했음을 확인할 수 있다. 이를 통해 복부판에 수직보강재를 배치하였으나 보강재로서 역할을 하지 못하여 복부판이 형상비 1인 판으로 거동하지 못했음을 확인할 수 있다.

따라서, 적절한 보강재 설계에 대한 추후 연구가 필요할 것으로 판단된다.

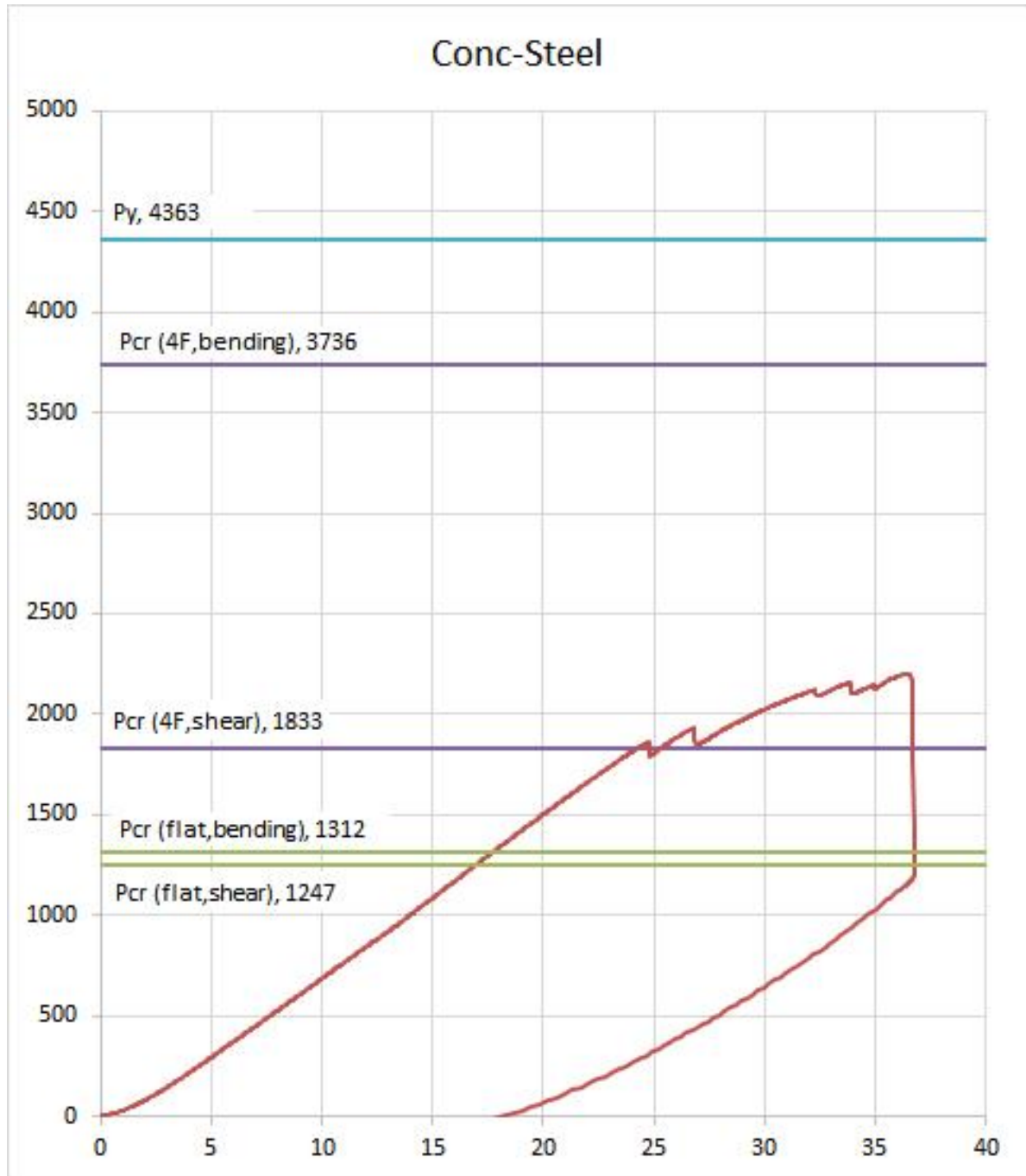


그림 19. 콘크리트-강재 합성 거더 실험 결과

여기에서;

P_y : 인장플랜지 항복응력 도달 시 하중

$P_{cr} (flat, bending)$: 평판 휨 좌굴응력 도달 시 하중

$P_{cr} (flat, shear)$: 평판 전단 좌굴응력 도달 시 하중

$P_{cr} (4F, bending)$: 4F-A 모델 휨 좌굴응력 도달 시 하중

$P_{cr} (4F, shear)$: 4F-A 모델 (형상비=5) 전단 좌굴응력 도달 시 하중

제3절 복부판의 형상별 경제성 분석

1. 공사비 검토 개요

본 절에서는 강판을 사용한 복부판에 대해서 수직 파형 형상과 본 연구진이 개발한 수평 절곡판을 이용하였을 경우에 대한 교량 공사비를 분석하였다. 파형 방향별 형상은 그림 1과 같다.

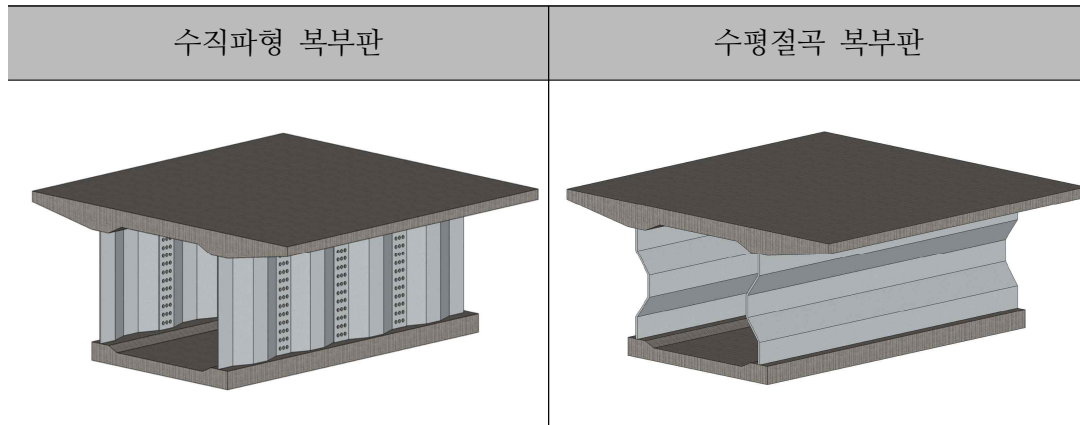
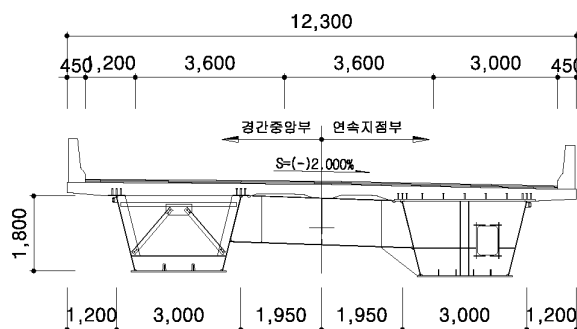


그림 1 복부판 파형 방향별 형상

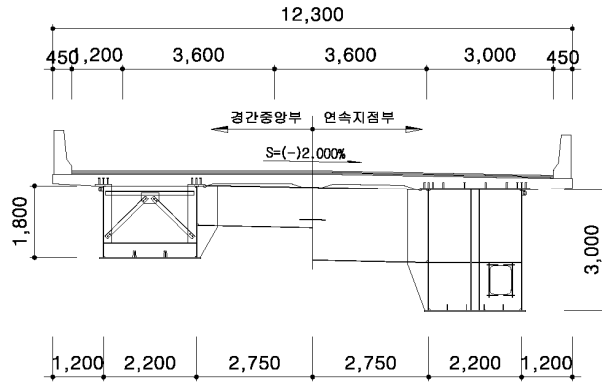
2. 강박스거더 공사비 구성 분석

가. 공사비 구성 분석을 위한 교량 선정

복부판의 파형 형상에 따른 공사비 분석에 앞서 기존 강박스거더의 공사비 구성을 분석하였다. 대상 교량은 그림 2와 같이 중앙 경간장이 50m, 70m인 3경간 연속교량에 대해서 중앙 경간장 50m 교량은 단면높이를 동일하게 하고 복부를 경사로한 제형형상으로, 70m 교량은 단면 높이를 변화하고 복부를 연직으로 배치한 구형형상으로 계획하였다. 바닥판과 합성되는 상부플랜지의 경간 중앙부는 개구형 단면을 적용하고 연속지점부는 폐합 단면을 적용하여 최근 설계 및 시공 추세에 부합되도록 대상교량을 선정하였다.



(a) 경간구성: $L=40+50+40=130.0\text{m}$



(b) 경간구성 : $L=53+70+53=176.0\text{m}$

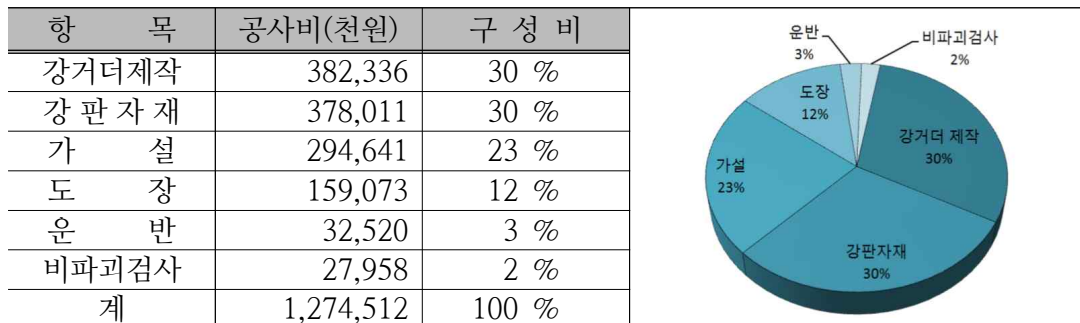
그림 2 경간구성별 강박스거더 공사비 분석 대상교

나. 강박스거더 공사비 구성

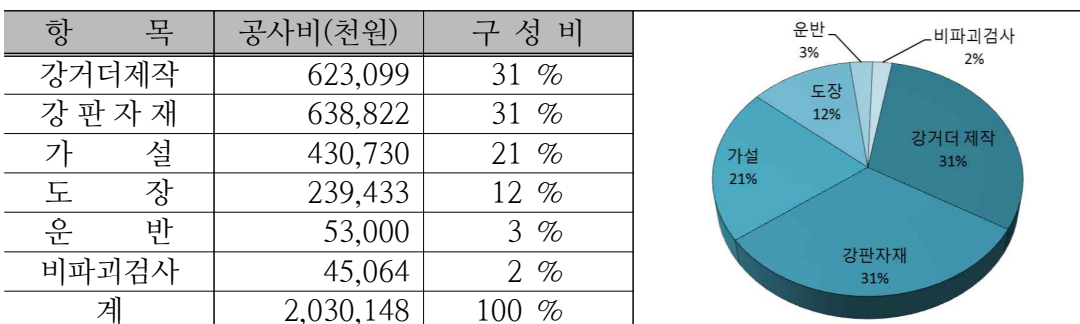
경간장과 단면구성 조건이 서로 다른 대상교량에 대한 강박스거더의 공사비 구성을 표 1에 정리하였다. 강박스거더의 공사비 구성 항목 중 강거더 제작비, 자재비 및 강거더 가설이 지배적이며 강거더 전체 공사비의 83%의 비중을 차지하고 도장, 운반, 비파괴검사 순으로 기타 공사비를 구성하고 있다. 경간장에 따른 두 대상교량의 공사비 구성 비율은 거의 동일한 것으로 나타났다.

표 1 강거더의 경간장별 공사비 구성

(a) 경간구성 : $L=40+50+40=130.0\text{m}$



(b) 경간구성 : $L=53+70+53=176.0\text{m}$

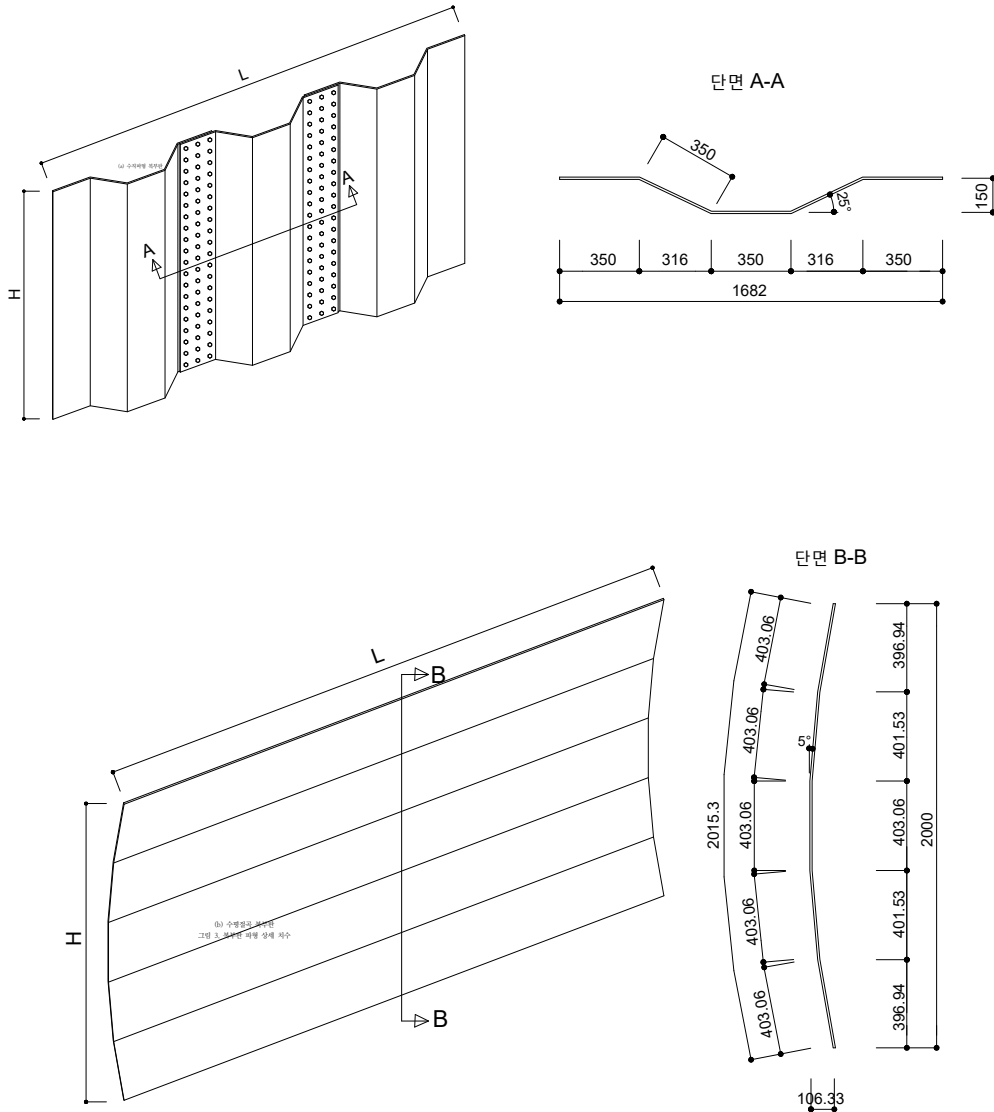


이상과 같이 강거더 제작, 자재에 따른 공사비 분석이 전체 강거더 공사비의 60%로 지배적이다.

3. 복부판 형상별 제작비 비교

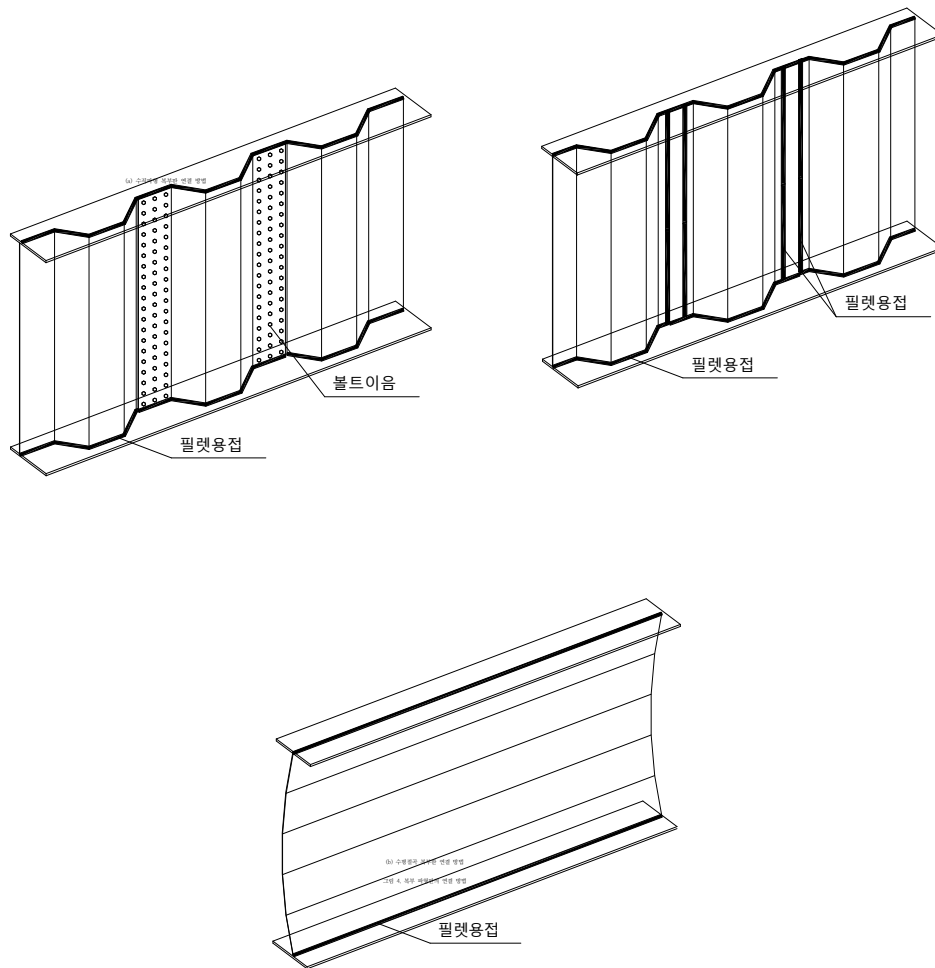
가. 복부판 형상별 제원

기존에 사용해온 수직파형 복부판과 본 연구진이 개발한 수평절곡 복부판의 자재비를 포함한 제작비를 비교하였다. 비교 대상 복부판의 상세치수는 그림 3에 표시하였다. 복부판의 두께는 10mm에서 16mm까지 2mm씩 변화를 주면서 분석하였다. 복부판의 높이 H는 2.0m, 길이 L은 10.0m로 비교 분석 하였다.



나. 상·하부 플랜지와의 연결 및 복부판 간의 연결 상세

복부판과 상·하부 플랜지는 일반적 방법인 필렛용접으로 가정하였고, 수직파형 복부판과의 이음은 제작설비상 4번 절곡하는 것으로 하고 볼트이음과 용접이음의 두가지에 대해서 분석하였다. 수평절곡 복부판은 4번 절곡하여도 복부판의 이음이 없으므로 상·하 플랜지와의 연결을 위한 필렛용접이 필요한 것으로 분석하였다. 연결 개요도를 그림 4에 표시하였다.



다. 공사비 산정 기준

강재 종류는 최근 강합성 박스교량에서 주로 적용되는 강재를 사용하였다. 복부판 등 주요부재 HSB380(개정KS 신강재)을 적용하고 수직보강재 등 부부재는 SM275B(개정KS 신강재)를 사용하였다. 「건설공사 표준품셈(2018)」 및 2018년 하반기 노임단가를 적용하여 최근 공사비로 산정하였다. 표 2~표 5은 복부 파형판의 두께별 수량 및 공사비 상세내역을 정리하여 나타낸 것이다.

표 2 복부판 형상별 제작비 산정(복부판 T=10mm, L=10.0m)

(a) 수직파형-볼트이음

공 종	Ton당 공사비(천원)				수량	단위	공사비 (천원)
	재료비	노무비	경비	계			
1. 강판자재비	850			850	2.159	Ton	1,836
2. 거더 제작							
2.1 철판공		149		149	1.963	Ton	292
2.2 용접공		238		238	1.963	Ton	468
2.3 철 공		122		122	1.963	Ton	239
2.4 제작재료비	105			105	1.963	Ton	207
2.5 제경비			306	306	1.963	Ton	600
2.6 제작도면작성		63		63	1.963	Ton	123
2.7 볼트이음	282	278	6	566	1.963	Ton	1,110
2.8 복부 파형절곡		325		325	1.963	Ton	638
계	1,238	1,175	311	2,723			5,513

(b) 수직파형-용접이음

공 종	Ton당 공사비(천원)				수량	단위	공사비 (천원)
	재료비	노무비	경비	계			
1. 강판자재비	850			850	2.056	Ton	1,747
2. 거더 제작							
2.1 철판공		149		149	1.869	Ton	278
2.2 용접공		395		395	1.869	Ton	738
2.3 철 공		122		122	1.869	Ton	228
2.4 제작재료비	105			105	1.869	Ton	197
2.5 제경비			399	399	1.869	Ton	746
2.6 제작도면 작성		63		63	1.869	Ton	117
2.7 복부 파형절곡		325		325	1.869	Ton	607
계	955	1,053	399	2,408			4,659

(c) 수평절곡

공 종	Ton당 공사비(천원)				수량	단위	공사비 (천원)
	재료비	노무비	경비	계			
1. 강판자재비	850			850	1.740	Ton	1,479
2. 거더 제작							
2.1 철판공		149		149	1.582	Ton	236
2.2 용접공		284		284	1.582	Ton	450
2.3 철 공		122		122	1.582	Ton	193
2.4 제작재료비	105			105	1.582	Ton	166
2.5 제경비			333	333	1.582	Ton	527
2.6 제작도면 작성		63		63	1.582	Ton	99
2.7 복부 수평절곡		143		143	1.582	Ton	226
계	955	761	333	2,049			3,376

표 III.3.3 복부판 형상별 제작비 산정(복부판 T=12mm, L=10.0m)

(a) 수직파형-볼트이음

공 종	Ton당 공사비(천원)				수량	단위	공사비 (천원)
	재료비	노무비	경비	계			
1. 강판자재비	850			850	2.591	Ton	2,203
2. 거더 제작							
2.1 철판공		149		149	2.356	Ton	351
2.2 용접공		198		198	2.356	Ton	468
2.3 철 공		122		122	2.356	Ton	287
2.4 제작재료비	105			105	2.356	Ton	248
2.5 제경비			282	282	2.356	Ton	664
2.6 제작도면작성		63		63	2.356	Ton	147
2.7 볼트이음	235	231	5	471	2.356	Ton	1,110
2.8 복부 파형절곡		325		325	2.356	Ton	766
계	1,190	1,088	286	2,565			6,244

(b) 수직파형-용접이음

공 종	Ton당 공사비(천원)				수량	단위	공사비 (천원)
	재료비	노무비	경비	계			
1. 강판자재비	850			850	2.467	Ton	2,097
2. 거더 제작							
2.1 철판공		149		149	2.243	Ton	334
2.2 용접공		329		329	2.243	Ton	738
2.3 철 공		122		122	2.243	Ton	273
2.4 제작재료비	105			105	2.243	Ton	236
2.5 제경비			360	360	2.243	Ton	807
2.6 제작도면 작성		63		63	2.243	Ton	140
2.7 복부 파형절곡		325		325	2.243	Ton	729
계	955	987	360	2,302			5,355

(c) 수평절곡

공 종	Ton당 공사비(천원)				수량	단위	공사비 (천원)
	재료비	노무비	경비	계			
1. 강판자재비	850			850	2.088	Ton	1,775
2. 거더 제작							
2.1 철판공		149		149	1.898	Ton	283
2.2 용접공		237		237	1.898	Ton	450
2.3 철 공		122		122	1.898	Ton	231
2.4 제작재료비	105			105	1.898	Ton	200
2.5 제경비			305	305	1.898	Ton	578
2.6 제작도면 작성		63		63	1.898	Ton	119
2.7 복부 수평절곡		143		143	1.898	Ton	271
계	955	713	305	1,973			3,907

표 III.3.4 복부판 형상별 제작비 산정(복부판 T=14mm, L=10.0m)

(a) 수직파형-볼트이음

공 종	Ton당 공사비(천원)				수량	단위	공사비 (천원)
	재료비	노무비	경비	계			
1. 강판자재비	850			850	3.023	Ton	2,570
2. 거더 제작							
2.1 철판공		149		149	2.748	Ton	409
2.2 용접공		170		170	2.748	Ton	468
2.3 철 공		122		122	2.748	Ton	334
2.4 제작재료비	105			105	2.748	Ton	289
2.5 제경비			265	265	2.748	Ton	727
2.6 제작도면작성		63		63	2.748	Ton	172
2.7 볼트이음	202	198	4	404	2.748	Ton	1,110
2.8 복부 파형절곡		325		325	2.748	Ton	893
계	1,157	1,027	269	2,453			6,974

(b) 수직파형-용접이음

공 종	Ton당 공사비(천원)				수량	단위	공사비 (천원)
	재료비	노무비	경비	계			
1. 강판자재비	850			850	2.878	Ton	2,446
2. 거더 제작							
2.1 철판공		149		149	2.617	Ton	390
2.2 용접공		282		282	2.617	Ton	738
2.3 철 공		122		122	2.617	Ton	319
2.4 제작재료비	105			105	2.617	Ton	275
2.5 제경비			332	332	2.617	Ton	868
2.6 제작도면 작성		63		63	2.617	Ton	167
2.7 복부 파형절곡		325		325	2.617	Ton	850
계	955	940	331	2,227			6,050

(c) 수평절곡

공 종	Ton당 공사비(천원)				수량	단위	공사비 (천원)
	재료비	노무비	경비	계			
1. 강판자재비	850			850	2.436	Ton	2,071
2. 거더 제작							
2.1 철판공		149		149	2.215	Ton	330
2.2 용접공		203		203	2.215	Ton	450
2.3 철 공		122		122	2.215	Ton	270
2.4 제작재료비	105			105	2.215	Ton	233
2.5 제경비			284	284	2.215	Ton	630
2.6 제작도면 작성		63		63	2.215	Ton	139
2.7 복부 수평절곡		143		143	2.215	Ton	317
계	955	679	284	1,919			4,438

표 III.3.5 복부판 형상별 제작비 산정(복부판 T=16mm, L=10.0m)

(a) 수직파형-볼트이음

공 종	Ton당 공사비(천원)				수량	단위	공사비 (천원)
	재료비	노무비	경비	계			
1. 강판자재비	850			850	3.455	Ton	2,927
2. 거더 제작							
2.1 철판공		149		149	3.141	Ton	468
2.2 용접공		149		149	3.141	Ton	468
2.3 철 공		122		122	3.141	Ton	383
2.4 제작재료비	105			105	3.141	Ton	330
2.5 제경비			252	252	3.141	Ton	791
2.6 제작도면작성		63		63	3.141	Ton	196
2.7 볼트이음	176	174	3	354	3.141	Ton	1,110
2.8 복부 파형절곡		325		325	3.141	Ton	1,021
계	1,132	981	255	2,368			7,705

(b) 수직파형-용접이음

공 종	Ton당 공사비(천원)				수량	단위	공사비 (천원)
	재료비	노무비	경비	계			
1. 강판자재비	850			850	3.289	Ton	2,796
2. 거더 제작							
2.1 철판공		149		149	2.990	Ton	445
2.2 용접공		247		247	2.990	Ton	738
2.3 철 공		122		122	2.990	Ton	364
2.4 제작재료비	105			105	2.990	Ton	315
2.5 제경비			311	311	2.990	Ton	929
2.6 제작도면 작성		63		63	2.990	Ton	187
2.7 복부 파형절곡		325		325	2.990	Ton	972
계	955	905	311	2,171			6,746

(c) 수평절곡

공 종	Ton당 공사비(천원)				수량	단위	공사비 (천원)
	재료비	노무비	경비	계			
1. 강판자재비	850			850	2.784	Ton	2,367
2. 거더 제작							
2.1 철판공		149		149	2.531	Ton	377
2.2 용접공		178		178	2.531	Ton	450
2.3 철 공		122		122	2.531	Ton	308
2.4 제작재료비	105			105	2.531	Ton	266
2.5 제경비			269	269	2.531	Ton	681
2.6 제작도면 작성		63		63	2.531	Ton	158
2.7 복부 수평절곡		143		143	2.531	Ton	362
계	955	654	269	1,878			4,970

4. 결과 분석

복부판의 형상별 제작비 결과를 표 6에 비교 정리하였다. 수직파형 강판의 경우 평판을 수직파형으로 절곡 시 상·하면 강판을 여러번 뒤집어 가며 제작하여야 하고, 절곡된 수직파형 복부판을 볼트이음 또는 용접이음으로 이음하여야 하며, 상·하부 플랜지에 용접시 용접선이 나란하지 않아 자동용접이 아닌 수동으로 용접하여야 하는 등의 제작상의 공정이 복잡하여 공사비 증가 요인이 발생한다. 이러한 단점을 개선한 수평파형 강판의 경우 강판의 절곡을 최소화 하고, 이음 개소를 최소화하며, 상·하 플랜지와 용접시 자동용접이 가능하여 제작비가 대폭 절감되는 효과가 발생한다.

수평절곡판의 제작상의 여러 장점으로 인해 종래에 수직파형 대비 최소 36% 이상의 제작비 절감 효과와 있어 수평절곡판을 교량 상부거더에 적용시 제작 공사비 절감 효과가 클 것으로 분석되었다.

표 6 복부판 형상별 제작비 결과 비교

복부판 두께	공사비(천원)			평판대비 제작비 비율		
	수직파형 - 볼트이음	수직파형 - 용접이음	수평절곡	수직파형 - 볼트이음	수직파형 - 용접이음	수평절곡
T=10mm	5,513	4,659	3,376	163 %	138 %	100 %
T=12mm	6,244	5,355	3,907	160 %	137 %	100 %
T=14mm	6,974	6,050	4,438	157 %	136 %	100 %
T=16mm	7,705	6,746	4,970	155 %	136 %	100 %

제4장 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

가. 양적 성과

핵심성과 (CTE)		양적 성과 목표	양적 성과 달성
1	콘크리트거더에 적용가능한 신개념 수평파형 복부판 형식	특허 출원: 1 건 시제품 : 4 건	특허 출원: 2 건 시제품 : 6 건
2	수평파형 복부판과 콘크리트슬래브의 합성연결 방법	특허 출원 : 1 건 특허 등록 : 1 건 시제품 : 2 건	특허 출원 : 0 건 시제품 : 1 건
계		특허 출원 : 2 건 특허 등록 : 1 건 시제품 : 6 건	특허 출원 : 2 건 시제품 : 7 건

나. 질적 성과

세부 연구 목표 (연구 계획서의 목표)	비중 (%)	달성도 (%)	자체 평가
다양한 수평파형 복부판 형식 선정	20	100	복부판에 적용 가능한 4가지 파형형식을 개발하였음
구조해석을 통한 수평파형 복부판의 좌굴성 능 검토	30	100	유한요소해석을 통하여 4가지 형식별로, 세장비, 형상비 및 절곡각도에 따른 좌굴강도 산정방법을 개발하였음
제작성 및 경제성 분석을 통하여 최적파형형 식 선정	5	100	도출된 4가지 파형형식 중 제작성 및 경제성이 우수한 single-bend type과 double-bend type을 선정하고 지압강도 성능평가 실험을 수행
실험을 통한 수평파형 복부판의 구조성능 검 증	30	100	
수평파형 복부판과 콘크리트부재의 합성방법	5	100	일반 강합성 거더에 사용되는 stud connection이 최적으로 판단하였음
단경간 콘크리트거더 모델 실험을 통한 성능 검증	10	100	수평파형 복부판의 적용 가능성을 평가하였음
합계	100점	100	전체적으로 연구목표를 성공적으로 달성하였다고 판단

2. 관련분야에의 기여도

가. 공공적 측면

- 교량 건설 및 유지관리에 소요되는 국가예산을 크게 절감할 수 있음
- 수평절곡 복부판을 적용하여 교량의 미관 우수
- 하부구조 경량화 및 장지간화로 토지점유 면적 최소화

나. 기술적 측면

- 수직파형 복부판을 대체할 수 있는 수평복부판 형식 개발
- 복부판의 항복강도, 세장비, 형상비에 따른 소요 절곡각도를 결정할 수 있는 설계 차트 개발
- 다른 형식의 교량에도 적용 가능함

다. 학술적 측면

- 수평파형 복부판의 휨좌굴, 전단좌굴 거동에 대한 최초 연구를 수행함
- 실험을 통한 성능 검증(7개 실험체)
- 타 교량 형식에 파급효과

라. 경제적 측면

- 기존 수직파형 복부판의 제작비 대비 30% 이상 절감 가능
- 상부구조 경량화에 따른 하부구조 경량화 및 장지간화로 시공비용 및 공기 단축

3. 목표 미달성 시 원인(사유) 및 차후대책(후속연구의 필요성 등)

당초 계획상 특허 등록 1건의 성과 목표가 있으나 0건으로 미달성되었다. 이는 특허 등록 특성상 보다 충분한 시간이 필요하며 과제 종료 이후 기 출원된 특허가 등록 될 것으로 판단된다.

제5장 연구개발성과의 활용계획

1) 지적 재산권 확보

- 본 연구를 수행하여 개발된 압축플랜지 파형강판 및 설계상세 관련 국내 특허 출원을 통하여 지적재산권을 확보하고 함
- 또한 국제특허 출원을 통한 기술수출도 가능할 것으로 판단됨

2) 국내 교량건설에 적용하여 국가 예산 절감에 크게 기여함

- 본 연구에서 개발된 수평 절곡 복부판을 적용하므로서 기존 수직 파형 복부판에 비해 30~60%까지 제작비 절감이 가능 함
- 기존 수직 파형 복부판에 비해 용접 또는 볼트 연결부가 적으므로 주기비용(Life-cycle cost)의 절감이 가능함

3) 국내 전문가들에게 기술보급

- 기술강습회, 세미나, 학술대회 발표 등을 통하여 국내 교량설계 전문가들에게 개발된 신기술을 적극 홍보하여 국내 설계 기술력 향상에 기여함

4) 북한의 도로/교량 건설에 활용

- 남북통일을 대비하여 북한의 사회기반 시설물 수준을 상당히 끌어올려야할 필요성이 대두됨
- 산악지형이 대부분이 북한의 지형을 감안한다면, 지간장이 크면서 시공이 유리한 교량형식이 경쟁력이 있음
- 이 같은 점을 고려한다면 본 연구에서 개발한 차세대 강박스거더 구조시스템이 북한의 교량건설에 크게 활용될 가능성이 매우 높음

5) 후속연구의 필요성

- 수평파형 강판의 각도 정밀 제작 기준, 볼트이음 방법에 대한 기준 마련 필요
- 수직보강재 상세설계에 대한 추가연구
- 안전율을 적용한 새로운 설계기준 개발 및 적용 교량 확대방안
- 일반 판형 복부판과의 비교 연구

제6장 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

해당사항 없음.

제7장 연구개발성과의 보안등급

보안등급 분류	보안	일반
		○
결정 사유	창의도전연구 공고 및 평가접수 안내서 상 보안등급은 평가위원회에서 확정할 예정이므로 '일반'으로 지정하였음	

제8장 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

해당사항 없음

제9장 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

○ 기술적 위험 요소 분석, 안전 관리 대책

본 연구의 연구기관인 동국대학교는 다년간의 학교 운영 및 연구실 운영의 경험을 바탕으로 연구실 안전시설이 완비되어있고, 매년 기관 차원의 정기적인 정밀안전진단과 연구원의 건강검진 및 안전교육이 실시되고 있다. 또한 실험연구 시 사용하게 될 하이브리드 구조실험센터는 여러 분야의 대형 구조실험 및 최첨단의 하이브리드구조실험을 수행할 수 있는 세계적 규모의 최첨단 실험시설로써 연구실의 안전이 기 확보되어 있고, 실험 시 참여연구원의 필요 훈련 및 보험가입을 의무로 하고 있다.

제10장 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/ 기타	소속 기관명	역할	특허 출원 국가	영향력 지수	특허 출원일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	특허	오목형 복부판을 구비한 박스형 거더			한국		2017.11.30		
2	특허	복부판을 수평 절곡한 박스형 거더			한국		2018.11.02		

제11장 참고 문헌

- 1) 이종원, 염광수, 문지호, 이학은(2007), “Shear Buckling Strength of Trapezoidally Corrugated Steel Webs”, 대한토목학회논문집 A, Vol.27 No.2, pp.181-186.
- 2) 길홍배, 이승록, 이학은, 윤태양(2004), Shear Buckling Strength of Trapezoidally Corrugated Steel Webs for Bridges, 대한토목학회논문집 A, Vol.24 No.1, pp.197-202.
- 3) 최규태(2008), 제형파형 복부판의 형상비에 따른 탄성전단좌굴 특성, 연세대학교, 토목공학과, 석사학위논문.
- 4) 김성남(2010), Elastic/inelastic lateral-torsional buckling strength and moment gradient

correction factor of corrugated web I-girder, 고려대학교, 토목환경공학과, 박사학위논문.

5) 이승록(2004), Shear Buckling Strength of Trapezoidally Corrugated Webs, 고려대학교, 토목강구조공학과, 박사학위논문.

6) 이종원(2006), Interactive Shear Buckling of Trapezoidally Corrugated Steel Webs Considering Geometric Characteristics, 고려대학교, 토목공학과, 박사학위논문.

7) 전진수(2008), 선형 모멘트 구배가 작용하는 파형강판 I-거더의 횡-비틀 좌굴 강도, 고려대학교, 토목공학과, 석사학위논문.

8) 지효선(2011), Buckling Behaviors of Plate Girder with Corrugated Steel Web, 한국강구조학회 논문집, Vol.23 No.2, pp.221-228.

9) Ucak, A.(2003), Design of Corrugated-Web Girders, SEAOC CONVENTION -PROCEEDINGS-, Vol.- No.72, pp.385-392.

10) Yang, B.W., Zhang, J.D. and Wan, S.(2012), Curved Box-Girders with Corrugated Steel Webs under Torsion Loading, Applied Mechanics and Materials, Vol.105-107 No.2, pp.837-843.

11) 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, ENGINEERING STRUCTURES Vol.57, pp.554-564.

12) Hassanein, M.F., Kharoob, O.F.(2013), Behavior of bridge girders with corrugated webs: (II) Shear strength and design, ENGINEERING STRUCTURES Vol.57, pp.544-553.

13) Nie J.G., Zhu L. and Tao M.X.(2013), Shear strength of trapezoidal corrugated steel webs, Journal of constructional steel research v.85 , pp.105 - 115.

14) Nguyen, Ngoc Duong(2011), Elastic lateral-torsional buckling of tapered I-girder with corrugated webs, 고려대학교, 건축·사회환경공학과, 박사학위논문.

15) Elgaaly, M., Seshadri, A., Rodriquez, R., Ibrahim, S.(2000), Bridge Girders with Corrugated Webs, Transportation Research Record, No.1696/2, pp.162-170.

16) 김영진(2003), (A) Study on Rational Design of Compression Flange Stiffeners in Steel Box Girder Bridges, 동국대학교, 토목환경공학과, 석사학위논문.

17) 이두성, 박찬식, 이성철(2007), Shear Buckling Coefficients for Horizontally Curved Compression Flange with Longitudinal Stiffeners, 대한토목학회논문집 A, Vol.27 No.3 pp.339-345.

18) 최한식, 윤동용, 이성철(2000), Study on the Optimum Rigidity of Longitudinal Stiffeners Attached on Compression Flanges of Steel Box Girders, 대한토목학회 학술발표회 논문집, Vol.2000

19) 윤동용(2000), (A) Study on the ultimate strength design for compression flanges of steel box girder bridges, 동국대학교, 토목공학과, 박사학위논문.

20) 박찬식(2010), An Experimental Study on Ultimate Behavior of Compression Flanges in Open-Top Trapezoidal Steel Box Girder Bridges, 동국대학교, 토목환경공학과, 박사학위논문.
