

고성능강재의 건설구조적용을 위한 휨재 및
압축재의 LRFD 설계기술 표준화 최종보고서

고성능강재의 건설구조적용을 위한 휨재 및 압축재의 LRFD 설계기술 표준화 최종보고서

2014.10

2014.10.07

Infrastructure
R&D Report

주관연구기관 / 한국강구조학회

국토교통과학기술진흥원

주 의 사 항

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

국토교통부
국토교통과학기술진흥원

성능기반 강·콘크리트 합성구조
설계기준 개발 최종보고서

성능기반 강-콘크리트 합성구조 설계기준 개발 최종보고서

2014.10

2014.10.07

Infrastructure
R&D Report

주관연구기관 / 한국강구조학회
공동연구기관 / 한국콘크리트학회

국토교통과학기술진흥원
국토교통부

주 의 사 항

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

국토교통부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통부장관 귀하

이 보고서를 "고성능강재의 건설구조 적용을 위한 휨재 및 압축재의 LRFD 설계기술 표준화에 관한 연구"과제의 보고서로 제출합니다.

2014. 12.

주관연구기관명 : (사)한국강구조학회
주관연구책임자 : 김 성 은

연 구 원 : 이명재, 이성철, 오영석
신동구, 김주우, 이강민
김경식, 한상철, 송현상
임유하, 강덕경, 이혜림
박병훈, 임현욱, 손진희,
최용수, 이희정, Ding Xiaoxia

보고서 요약서

과제고유번호	11기술표준 화01-01	해 당 단 계 연구 기 간	2013.09.08. - 2014.09.07.	단 계 구 분	3차년도/ 3차년도
연구사업명	R&D정책인프라사업(기술표준화분야)				
연구과제명	최 상 위 과 제 명	고성능강재의 건설구조 적용을 위한 휨재 및 압축재의 LRFD 설계기술 표준화			
	단위과제명				
연구책임자	김성은	총연구기간 참 여 연구원수	총 : 31 명 내부: 9 명 외부: 22 명	총연구비	정부 :1,000,000 천원 기업 : 천원 계 :1,000,000 천원
연구기관명 및 소 속 부 서 명	(사)한국강구조학회 강구조기술연구소		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서면수	85
본 연구개발과제에서는 고강도로 제작된 휨재, 압축재, 그리고 휨과 압축의 조합력을 받는 보-기둥 부재들의 다양한 한계상태에서의 거동 규명을 통하여 설계목적에 부합되게 제어할 수 있는 설계기준 정립하기 위하여 기존의 관련 연구 및 기준 조사를 통하여 수치해석 및 실험연구 계획을 수립하고 연구를 수행하였다. 해석적 및 실험적 연구를 통하여 고성능 강재를 사용한 휨재, 압축재 및 보-기둥 부재가 현재 개정 작업 중인 관련 기준에 적용이 가능한 것으로 판단되어 관련 기준 위원회에 연구결과 적용을 제안하였고 위원회에서는 연구결과의 타당성을 인정하여 개정된 기준에 연구결과가 반영될 예정이다. 또한 연구과제의 3년간의 연구결과 연구개발 초기에 설정한 양적 및 질적 목표 연구성과를 모두 초과 달성하는 성과를 거두었다.					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	고성능강재, 휨재, 압축재, 보-기둥부재, LRFD 설계기준			
	영 어	high performance steel, flexural member, compression member, beam-column member, LRFD standard			

요 약 문

I. 제 목

고성능강재의 건설구조 적용을 위한 휨재 및 압축재의 LRFD 설계기술 표준화

II. 연구개발과제 개요

• 연구개발과제의 목적

본 연구개발과제의 목적은 고강도로 제작된 휨재, 압축재, 그리고 휨과 압축의 조합력을 받는 보-기둥 부재들의 다양한 한계상태에서의 거동 규명을 통하여 설계목적에 부합되게 제어할 수 있는 설계기준 정립이다.

• 연구개발과제의 필요성

고강도강을 적용한 국내외 주요 설계기준과 관련하여 선진국에서는 수년 내에 연구결과를 설계기준에 반영할 것으로 예상된다.

국내 관련 연구는 아직 초기 단계로, 설계기준 반영 위한 다양한 설계규정에 대한 연구결과와 도출 및 분석에 의한 설계식 개발 노력이 절실한 것으로 판단된다.

특히 800MPa급의 강재의 특성 중에 높은 항복비와 다소 적은 연성 등은 기존 설계식의 적용성에 무리가 있다. 따라서 고강도강재를 사용하는 경우 현행설계기준의 적용성에 대한 문제점의 파악과 사용한계를 분석함은 필수적이라 할 수 있다.

또한 경제성과 안전성이 확보된 고급강재인 고강도강재의 적극적인 활용을 위하여, 고강도로 제작된 휨재, 압축재, 보-기둥 부재들의 다양한 한계상태에서의 거동 규명을 통하여 설계목적에 부합되게 제어할 수 있는 설계기준 정립할 필요가 있다.

• 연구개발과제의 범위

상기 정의된 연구개발의 필요성에 따른 연구개발의 목적을 달성하기 위한 세부 목표별 연구개발의 범위는 다음과 같다.

○ 항복강도 690MPa급 고성능강 적용 휨부재 휨저항강도 LRFD 설계식 개발

- (1) 정·부모멘트에 대한 휨저항강도 설계식 개발
- (2) 인장역작용을 고려한 전단강도 설계식 개발
- (3) 하중저감계수 및 하이브리드계수 설계식 개발
- (4) 사용성을 고려한 설계식 개발

○ 항복강도 690MPa급 고성능강 적용 압축재 LRFD 설계기준 정립

- (1) 균등 압축재 단면 조밀성 기준 개발
- (2) 부재 세장비를 고려한 압축강도 기준 개발

○ 항복강도 690MPa급 고성능강 적용 보-기둥 부재 LRFD 설계기준 정립

- (1) 조합력을 받는 보-기둥 단면 조밀성 기준 개발
- (2) 조합력을 받는 보-기둥 부재의 횡지지 기준 개발
- (3) 조합력을 받는 보-기둥 부재의 설계강도 기준 개발

III. 연구개발 수행내용 및 결과

• 연구수행과정

본 연구과제의 최종 목표인 “항복강도 690MPa급 고성능강 부재들의 다양한 한계상태에서의 거동 규명을 통하여 설계목적에 부합되게 제어할 수 있는 설계기준의 정립”을 위한 연구과제를 원활하게 수행하기 위하여 다음과 같은 연구수행 과정에 따라 연구개발이 진행되었다.

○ 기반연구 단계

- (1) 한국건설교통기술평가원 및 한국과학재단 등 국가과제를 중심으로 기존 연구성과 및 기술개발의 성과자료 수집 및 분석
- (2) POSCO 및 현대제철 등 국내 제철사와 미국, 일본, 유럽 등 해외 제철사의 고성능강 관련 재료 특성과 관련한 자료 수집 및 분석
- (3) 국내·외 관련 공공기관 및 학회의 고성능강 관련 설계법 및 기준 자료를 조사 및 분석하여 그 결과를 본 연구의 최종목표를 달성하기 위한 기초자료로 사용

○ 정밀해석 및 실험 연구 단계

- (1) 재료 및 기하비선형성, 인장 및 압축영역의 강도특성 차이, 초기결함 및 잔류응력 등 제작 시 발생될 수 있는 주요 요소들을 종합적으로 고려한 정밀해석을 수행
- (2) 극한강도 특성을 검정할 수 있는 구체적인 구조 실험계획 수립을 하고 실험연구 수행
- (3) 국내 최대 구조실험 장비를 구축하고 있는 (재)포항산업과학연구소(RIST)의 연구조직과의 유기적인 협력 관계를 구축하여 실험연구를 효율적으로 진행
- (4) 제한적인 변수에 의한 실험 연구를 보완하기 위하여 다양한 변수의 구조해석 연구를 수행
- (5) 신뢰성 및 통계적 의미를 부여하는 작업을 통해 설계 수식의 제안

○ 설계기준(안) 작성 단계

- (1) 본 연구로부터의 결과물을 실무에서 사용하게 될 설계엔지니어링의 실무자와 대학 및 관련 학회의 추천을 받은 연구자들의 유기적인 협조 및 자문 아래 설계기준(안) 초안 작성

(2) 본 연구 결과물 관련 실무자, 연구자 및 건설교통부 등의 유관 기관 관련자 초청 공청회를 통하여 작성 초안에 대한 의견을 교류하고 의견 수렴

(3) 고성능강 적용 범주 및 설계기준(안) 작성

- 연구수행내용

본 연구에서는 구조부재 가운데 가장 기본적이고 활용범위가 넓은 휨재, 압축재 및 휨과 압축의 조합력을 받는 보-기둥 부재들을 대상으로 고성능강을 적용한 LRFD 설계기준 정립을 위한 연구수행 내용은 다음과 같다.

- 휨재 휨강도, 전단강도 및 사용성 관련 LRFD 설계기준의 정립을 위한 기반연구

- (1) 고강도강 강교량 거더의 단면 조밀성 분류를 위한 이론연구

- (2) 정/부모멘트부 휨저항강도식 개발을 위한 실험/해석 연구

- (3) 인장역작용을 고려한 전단강도 설계식 개발

- (4) 하중저감계수 및 하이브리드계수 설계식 개발

- (5) 사용성(거더 처짐 및 복부판 국부변형)을 고려한 실험 및 해석 연구

- (6) 휨재 휨강도 및 전단강도 LRFD 설계기준(안) 제시

- 고성능강 압축재의 LRFD 설계기준의 정립을 위한 기반연구

- (1) 고성능강 소재의 기계적성질에 관한 기초연구

- (2) 고성능강 및 비교강재의 압축력을 받는 부재의 설계식을 위한 실험/해석 연구

- (3) 압축부재의 설계식 제안을 위한 보완 및 추가연구

- (4) 압축부재의 LRFD 설계기준(안) 제시

- 고성능강 보-기둥부재의 LRFD 설계기준의 정립을 위한 기반연구

- (1) 고성능강의 휨과 압축력을 받는 보-기둥부재의 설계식을 위한 실험/해석 연구

- (2) 보-기둥부재의 설계식 제안을 위한 보완 및 추가연구

- (3) 보-기둥부재의 LRFD 설계기준(안) 제시

- 연구수행결과

고성능강을 사용한 휨재, 압축재 및 휨과 압축의 조합력을 받는 보-기둥 부재들을 대상으로 고성능강을 적용한 LRFD 설계기준 정립을 위한 연구수행결과는 다음과 같다.

- 휨재 LRFD 설계기준 정립을 위한 기반연구

(1) AASHTO LRFD 설계기준에서는 일반 강재를 적용한 강합성 I-거더의 정모멘트에 대한 공칭 휨저항강도 및 연성 요구조건을 소성모멘트와 연성비를 이용하여 규정되어 있다. 하지만 고성능 강재(HSB800)의 응력-변형률 곡선에서는 완전소성 영역이 불분명하기 때문에, 이 규정은 HSB800을 플랜지 요소로서 포함하고 있는 강합성 거더에 적용하기에 적합하지 않다. 본 연구에서는 HSB800의 이상화된 응력-변형률 곡선에서 완전소성

영역을 가정하여 HSB800을 인장 플랜지에 적용한 강합성 복합단면 I-거더의 소성모멘트와 연성비를 정의하였다. 다양한 치수를 갖는 조밀한 단면에 대하여 수행된 수치 해석의 결과를 통해 인장 플랜지에 HSB800을, 웹 및 압축플랜지에 SM570을 적용한 강합성 복합단면 I-거더의 연성 요구조건 및 공칭 휨저항강도 산정식을 제안하였다.

(2) HSB800 강재를 적용한 부모멘트부 강합성 플레이트 거더의 극한 휨강도를 비선형 유한요소해석으로 분석하였다. 휨강도는 AASHTO 부록 A6로 산정한 휨강도 보다 평균 12%, 본문 6.10.8로 산정한 휨강도 보다 평균 22% 크게 평가되었으며, 유로코드의 경우 평균 16% 크게 산정되었다. 도로교설계기준, 부록 A6 및 Eurocode 3으로 산정한 휨강도가 본문 6.10.8로 산정한 휨강도 보다 유한요소해석과 더 잘 일치하는 것으로 파악되었다. 강재단면이 항복한 후에 비탄성 국부좌굴에 의해 극한휨강도가 결정되기 때문에 바닥판 철근의 양의 영향은 무시할 정도로 작은 것으로 분석되었다.

(3) HSB 800을 적용한 플레이트 거더의 플랜지 국부좌굴에 대한 강도를 비선형 유한요소해석으로 평가하였다. 복부판이 조밀, 비조밀 그리고 세장 단면을 갖는 압축 플랜지에 대해 매개변수 해석을 수행한 결과 AASHTO LRFD 본문 6.10.3은 안전측으로 적용이 가능한 것으로 파악되었다. 그러나 AASHTO LRFD 부록 6 및 도로교설계기준의 Q 공식의 적용은 적용한 공칭 휨저항 강도 곡선에서 조밀단면의 압축 플랜지 한계 세장비에 인접한 단면에서의 적용은 신중해야 할 것으로 파악되었다.

(4) HSB800 강재가 적용된 균질단면 및 하이브리드단면의 이축대칭 및 일축대칭 플레이트거더에 대해 LTB 강도를 해석으로부터 평가하였다. 이로부터 비조밀 및 조밀 복부판을 갖는 균질단면 및 하이브리드거더는 대부분 AASHTO LRFD 부록 A6의 적용이 가능하였으나, 압축플랜지가 인장플랜지보다 작은 일축단면에 대해서는 검증실험 연구가 필요한 것으로 나타났다.

(5) 비선형 유한요소 해석에 의한 SM490, SM520, HSB600 플레이트거더의 극한휨강도는 AASHTO LRFD 공칭휨강도보다 4%, Eurocode 3의 공칭휨강도에 비해서는 14% 정도 더 큰 것으로 분석된 반면에 세장 복부판을 갖는 HSB800 거더의 경우 FEA 극한휨강도는 AASHTO LRFD의 9%, Eurocode 3 보다는 21% 크게 계산되었다. HSB800 강재의 연성이 상대적으로 나쁜 점을 감안하면 현재의 AASHTO LRFD 또는 이를 준용하고 있는 한계상태법 도로교설계기준 휨강도 산정식은 변경없이 사용하는 것이 합리적인 것으로 판단된다.

(6) 일반적인 강종에 대비한 고강도 HSB800강재는 탁월히 높은 강도를 가지는 장점에 반해 다소 낮은 연성거동과 큰 항복비를 보인다. 최신 국외 한계상태설계법은 소성 범위의 휨모멘트 강도에 관한 규정을 제시하고 있으며, 이는 항복강도 485MPa 이하로써 적용이 제한된다. 따라서, 항복강도 485MPa급 이상의 고강도 강재를 적용한 플레이트 거더에 대한 해당 설계기준의 적용성이 대두되고 있다. 본 연구는 HSB800을 적용한 조밀 단면 I-형 거더의 극한 휨강도 및 파괴 후 연성거동을 실험적 및 해석적으로 평가하였다. 대표적인 제원범위의 거더에 대한 해당 규정의 적용가능성이 확인되었다. 추후 HSB800

강재 조밀거더의 고성능 휨모멘트 내하력의 활용방안을 제시하는데 중요한 근거가 될 수 있을 것으로 사료된다.

(7) 재료의 기계적 특성이 일반강재와 매우 다른 고강도강재 (HSB800)가 적용된 플레이트거더 복부판의 전단거동 평가를 위해 기존 설계기준에 적용된 전단설계식을 사용하기에는 무리가 있음이 밝혀졌다. 그러나 Lee 등 (2008)에서 제안한 형상비 3 이상의 긴 패널에 대한 전단설계식이 고강도강재 (HSB800)가 적용된 플레이트거더 복부판의 전단거동을 비교적 매우 정확한 값을 예측하며, 형상비가 3 이하인 거더에 대해서도 적용할 수 있음이 확인되었다.

○ 압축재 LRFD 설계기준 정립을 위한 기반연구

(1) HSA800강재의 소재시험결과는 일부시험편에서 절삭가공시 발생한 압축잔류응력에 의해 항복강도가 KS D 5994 제한치를 초과하여 평균 항복비가 0.87로 나타나 기준치인 0.85를 초과한 것으로 나타났지만 인장강도 및 연신율은 KSD 5994 제한치를 만족하였다.

(2) 용접H형강 단주 압축실험결과, 플랜지의 판폭두께비 및 웨브의 판폭두께비가 각각 증가하는 경우 최대 압축좌굴하중이 증가하는 경향을 보였고, 최대 평균응력은 국부좌굴에 의해 최대내력이 결정된 실험체의 경우 판폭두께비가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였고 전체좌굴에 의해 최대내력이 결정된 실험체의 경우 플랜지의 판폭두께비가 커질수록 응력이 작아지는 경향이 확인되었다.

(3) 용접각형강관 단주 압축실험결과, 동일두께로 구성된 각형강관의 경우 단면크기가 증가함에 따라 최대압축하중은 증가한 반면 단면크기의 증가로 판폭두께비가 증가한 경우 국부좌굴에 의해 급격한 내력 저하를 확인되었다. 최대압축하중을 단면적으로 나눈 평균압축응력값은 부재가 세장해지면서 감소하는 경향을 나타내었고 세장비가 작을수록 전단면이 재료의 항복강도 도달 이후에 국부좌굴에 의한 최대내력이 결정되어 충분한 소성변형양상을 보였다.

(4) 용접 H형강 기둥에서 실험결과와 해석결과의 전체적인 비교 결과로써 최대좌굴하중의 평균오차가 약 5.3%로 해석모델이 실험결과를 비교적 정확히 예측했다. 응력-변형도 관계곡선에서는 초기강성은 실험치와 해석치가 정확히 일치하였고, 축하중-축변위 관계 및 응력-변형도 곡선 양상 또한 실험결과와 해석결과가 상당히 유사했다. 국부적인 비교 결과로써 응력 집중과 함께 국부 좌굴 형상도 실험결과와 해석결과가 유사하게 나타났다. 용접H형강단면 모델의 경우, 폭두께비(h/t_w)가 증가함에 따라 압축하중곡선과 최대 압축하중(P_{Max})이 증가하고, 평균응력곡선과 최대 평균응력(F_{Max})은 감소하는 경향을 보였다. 모든 변수해석 결과가 판의 국부좌굴에 의해 최대내력이 결정된 경우로 국부좌굴 후 내력이 급속히 감소하면서 종국상태에 도달됨을 알 수 있다.

(5) 용접 각형강관 기둥에서 실험결과와 해석결과의 전체적인 비교 결과로써 좌굴하중의 평균오차가 약 2.3%로 해석모델이 실험결과를 비교적 정확히 예측했다. 초기강성은 실험치와 해석치가 정확히 일치하였고 축하중-축변위 관계 및 응력-변형도 곡선 양상 또한 실험결과와 해석결과가 상당히 유사했다. 국부적인 비교 결과로써 응력 집중과 함께 국부 좌굴 형상도 실험결과와 해석결과가 유사하게 나타났다. 용접각형강관 모델의 경우, 폭두께비가 증가함에 따라 최대압축하중은 증가하였고 최대내력 도달 이후 국부좌굴에 의해 내력이 급격하게 저하됨을 알 수 있었다. 반면 최대 평균응력은 폭두께비가 증가함에 따라 감소하였다. 이는 폭두께비가 작을수록 판의 국부좌굴 발생 전에 외부하중에 대해 전단면이 충분히 저항하여 단면의 대부분이 재료의 항복강도 이상까지 저항한다는 것을 나타낸다.

(6) 현행설계기준의 요구강도와 비교한 결과, 대부분의 용접H형단면과 모든 용접각형강관 모델에서 요구강도를 상회하는 결과를 보여주었다. 특히 용접H형단면 모델의 경우, 웹의 폭두께비가 커질수록 현행설계기준의 요구강도와 마진이 점점 커지면서 충분한 여유를 갖고 만족하였고, 용접각형강관 모델의 세장단면의 경우, 현행설계기준에 상당히 근접한 상태로 만족시키는 결과를 나타내었다.

○ 휨-압축재 LRFD 설계기준 정립을 위한 기반연구

(1) HSA800강재의 소재시험결과는 불분명한 항복점과 항복참, 높은 항복비를 갖는 대표적인 고성능강의 특징이 나타났고, 모든 시험체의 항복강도, 인장강도 및 연신률은 KS의 허용한계기준을 만족하는 것으로 나타났다.

(2) 각 플랜지의 판폭두께비 및 웹의 판폭두께비가 각각 감소하는 경우, 최대 압축좌굴하중이 감소하는 경향을 보였다. 실험최대 평균응력은 국부좌굴에 의한 최대내력이 결정된 실험체에 대해서는 판폭두께비가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다.

(3) 휨응력에 대해 비콤팩트 단면으로 설계된 HSA800 단주 실험체는 P-M 상관관계에서 축력비가 감소할수록 상대적으로 휨강도에 대해 큰 마진을 보였다. 특히 용접 각형강관이 용접 H형강보다 현행 기준의 요구강도에 대해 충분한 여유를 갖고 있는 것으로 나타났다.

(4) 모든 실험체는 휨 좌굴이 일어나기 전에 국부좌굴이 발생하지 않았고, 용접 H형단면 실험체에서만 휨 좌굴 발생 후에 국부좌굴이 나타났다. SCH-HSA800-8-25-E0.8를 제외한 모든 H형강 실험체에서 최대압축하중에 90%이상 도달하였을 때 국부좌굴이 발생하는 것을 알 수 있었다.

(5) 응력-변형률 곡선에서 실험결과와 해석결과 모두 항복 후 국부 좌굴에 의해 응력이 감소되는 현상이 발생했으며 전체적인 거동 및 초기강성은 비교적 일치하였다. 또한, 축력비가 증가할수록 최대응력은 증가하며 국부좌굴의 영향으로 좌굴 후 응력이 급격하게 감소하는 거동을 보였다. 최대압축하중에 대한 실험결과와 해석결과의 평균 오차는 약

1.65%로 해석모델의 타당성을 검증하였다.

(6) 변수모델의 P-M상관도 분석결과, 용접 H형강 단주의 경우, 압축력에 대한 비세장 단면은 모두 현행기준의 요구에서 크게 상회하는 결과를 얻었고 축력비가 낮을수록 휨강도비에 충분한 여유를 갖는 것을 확인하였다. 하지만, 압축력에 대한 세장판 단면을 갖는 각형강관의 경우 현행기준의 요구에 못 미치는 결과를 보였다.

IV. 최종 연구성과 및 적용실적

- 최종 연구성과

고성능강재의 건설구조 적용을 위한 휨재 및 압축재의 LRFD 설계기준 표준화 연구과제의 3년간의 연구결과 연구개발 초기에 설정한 양적 및 질적 목표 연구성과를 모두 초과 달성하는 연구성과를 거두었다.

특히 양적 성과목표인 학술회의 및 학술지 게재와 관련한 성과의 경우 목표대비 달성비율이 국내학술대회의 경우 121%(29/24건), 국외 학술대회의 경우 112.5%(9/8건), 국내 학술지 게재논문의 경우 100%(14/14건) 및 국외 학술지 게재논문(SCI급)의 경우 100%(4/4건)으로 모두 100% 이상의 양적 연구성과를 거두었다.

또한 질적 성과목표인 수치해석, 구조실험 및 연구시설 활용 및 설문조사를 통한 기술수준 향상 및 기술격차 축소 성과의 경우 모두 목표 대비 100% 이상의 연구성과를 거두었다.

- 연구성과 적용실적

본 연구개발과제는 고강도로 제작된 휨재, 압축재, 그리고 휨과 압축의 조합력을 받는 보-기둥 부재들의 다양한 한계상태에서의 거동 규명을 통하여 설계목적에 부합되게 제어할 수 있는 설계기준 정립을 목적으로 실험 및 해석연구가 진행되었고 연구결과를 기초로 연구결과가 현행 국내 관련 기준에 적용될 수 있을 것으로 판단되어 현재 개정 작업이 진행 중인 ‘건축구조기준(KBC2014)’ 및 ‘강구조설계기준’의 기준 위원회에 휨재, 압축재 및 조합력을 받는 부재에 HSA800 고성능 강재를 적용할 수 있도록 제안하여 개정된 기준에 이러한 사항이 반영될 예정이다.

V. 연구목표 달성 및 효과

- 연구목표의 달성

본 연구개발 과제의 목표인 고강도로 제작된 휨재, 압축재, 그리고 휨과 압축의 조합력을 받는 보-기둥 부재들의 다양한 한계상태에서의 거동 규명을 통하여 설계목적에 부합되게 제어할 수 있는 설계기준 정립을 달성하기 위하여 다음과 같은 세부목표의 연구

가 진행되어 과제 수행 이전 설정한 목표를 모두 100% 달성한 것으로 판단된다.

- (1) 고성능강 관련 설계기준 개선방안 연구: 100% 달성
- (2) 휨재 LRFD 설계기준 정립을 위한 기반연구: 100% 달성
- (3) 압축재 LRFD 설계기준 정립을 위한 기반연구: 100% 달성
- (4) 휨-압축재 LRFD 설계기준 정립을 위한 기반연구: 100% 달성

- 연구목표 달성효과

본 연구개발 과제의 목표달성과 더불어 현재까지 KS규격에만 규정되어 있는 항복강도 680MPa급의 고성능강이 관련 설계기준에 적용됨에 따라 교량 및 건축물의 휨재와 압축재에 관한 LRFD설계기준의 정립과 초장대교량, 초고층, 초대형 건축물에 고성능강 활용의 기술적 근거 제공을 통하여 강구조 설계기술의 국제 경쟁력 확보할 수 있을 수 있고 향후 건설되는 토목 및 건축구조물에의 고성능강의 수요가 증대될 것으로 예상된다. 또한, 고강도강, 고인성, 고용접성 및 고내후성 등의 성질을 갖는 고성능강의 생산기술을 확보하지 못한 후발 제강국가에 대한 경쟁력 우위를 유지하여 해외기술 수출 및 해외공사 수주를 통해 국가산업경제의 부흥에 일조할 수 있을 것으로 사료된다.

VI. 연구성과 활용계획

본 연구에서 강재의 강도, 인성, 용접성 및 내식성이 개선된 고성능강의 개발과 휨재와 압축재의 LRFD 설계기준의 표준화를 통해 중력하중, 지진하중, 풍하중 등의 다양한 하중조건을 받는 강구조물에 그 활용도가 증대될 것으로 사료된다.

또한, 국제적 선도기술인 고성능강 부재 LRFD 설계법을 확립하여 세계최고 수준의 고효율 강구조 설계기술을 국내외 강구조 설계관련 건설엔지니어링, 건설산업 전반에 활용하고자 하며, 고성능강의 설계기준 정립으로 후발 제강국가에 대한 차별적 우위를 선점할 수 있고 개발도상국에 건설되는 강구조물의 공사를 선점할 수 있을 것으로 예상된다.

SUMMARY

I. Title

LRFD Standardization of Flexural and Compressive HPS Members for the Application to Steel Construction

II. Introduction

- Objectives of Research

The objective of this research is LRFD standardization of flexural and compressive HPS members for the application to steel construction through the investigation of structural behaviors under various limit states.

- Necessities for Research

The research results concerning HPS are expected to be applied to the related standards in developed countries in the near future. However researches for HPS were recently initiated in Korea. For the adaption of research results for HPS to the domestic related standard, further researches to develop the design equations are urgently needed.

In case of application of grade 800MPa steel to current design standard, it has some problems with high yield ratio and less ductility. Therefore it is essential to verify the problems in the application of HPS to current design standard and to analyze the limits for using HPS.

In addition, for the active usages of HPS in construction fields, necessities to establish, the design standard for flexural, compressive, and beam-column HPS members corresponding with the design purposes through the investigation of structural behaviors under various limit states, are recently issued.

- Scope of Research

To achieve the general objective of the research described above, the detailed scopes of research are as followings:

- Development of LRFD design equations for HPS flexural members

- (1) Design equations for positive and negative moments
- (2) Design equations for shear strength considering the tension field action
- (3) Design equations for resistance and hybrid factors
- (4) Design equations considering serviceability

- Development of LRFD design equations for HPS compressive members
 - (1) Development of compact section limit of HPS compressive members
 - (2) Development of compressive strength limit considering the slenderness ratio of HPS compressive members
- Development of LRFD design equations for HPS beam-column members
 - (1) Development of compact section limit of HPS beam-column members
 - (2) Development of unbraced length limit of HPS beam-column members
 - (3) Development of design strength of HPS beam-column members

III. Research Contents and Results

- Research Process

The research processes to achieve the main purpose of this research and development project are as followings:

- Step 1: Preliminary research
 - (1) Collection and classification for existing research and development outputs based on the related projects supported by governmental bodies of Korea
 - (2) Collection and classification for material properties of HPS based on the data obtained from domestic and international steel companies
 - (3) Survey and analyses of design standards for HPS based on the data obtained from domestic and international public organizations and academic societies
- Step 2: Numerical analyses and experimental programs
 - (1) Numerical analyses considering the material non-linearity, differences between tensile and compressive strength of material, effects of initial imperfection and residual stresses from fabrication
 - (2) Test program to verify the ultimate strengths of members
 - (3) Co-work with institution well equipped with the structural testing machines such as RIST for the efficiencies in experimental research
 - (4) Analytical research with various parameters to compensate the experimental results from the limited experimental study
 - (5) Suggestion of design equations through the statistical research
- Step 3: Design standard
 - (1) The first draft of design standard from the research outcomes, after consulting with engineers and researchers
 - (2) Proposals based on the various opinions through the holding a public hearing

with engineers, researches, competent authorities(MOLIT)

(3) Draft of design standard for HPS

- Research Contents

Research contents for flexural, compressive, and beam-column HPS members, which are most widely used structural members, are as followings:

- Development of LRFD design equations for HPS flexural members

- (1) Theoretical research on the compactness limits of HPS girders
- (2) Analytical and experimental researches for the development of flexural design equations under positive and negative moments
- (3) Development of shear strength design equations considering tension field action
- (4) Development of design equations for resistance and hybrid factors
- (5) Analytical and experimental researches on the serviceability
- (6) Design equations on the flexural and shear design equations for LRFD standard

- Development of LRFD design equations for HPS compressive members

- (1) Basic research on the mechanical properties of HPS
- (2) Analytical and experimental researches for the development of design equations for HPS compressive members
- (3) Complementary research on design equations for HPS compressive members
- (4) Design equations on the compression design equations for LRFD standard

- Development of LRFD design equations for HPS beam-column members

- (1) Analytical and experimental researches for the development of design equations for HPS beam-column members
- (2) Complementary research on design equations for HPS beam-column members
- (3) Design equations on the beam-column design equations for LRFD standard

- Research Results

The brief results from the research for LRFD standardization of flexural and compressive HPS members for the application to steel construction are as followings:

- Development of LRFD design equations for HPS flexural members

- (1) In AASHTO LRFD Specifications, the nominal flexural strength and ductility requirements of the composite I-girder using conventional steel in positive bending are specified by the plastic moment and ductility ratio. However, these are not suited for the composite girder made of high performance steel (HSB800) as a tension flange

element because HSB800 has the properties that there is no certain fully-plastic region in the stress-strain curve. In this study, by assuming the fully-plastic region in the idealized stress-strain curves of HSB800, the plastic moment and ductility ratio are defined for the composite hybrid steel I-girder with HSB800 tension flange. By using the numerical analysis results of compact cross-sections with various dimensions, the nominal flexural strength and ductility requirements are proposed for a composite hybrid I-girder with HSB800 applied to tension flange and SM570 applied to web and compression flange.

(2) The ultimate flexural behavior of a composite HSB800 plate girder in negative bending is investigated by nonlinear FEA. Comparative analysis of the flexural strength from analyses and codes shows that strengths by AASHTO Appendix A6 were 12% less than those from FEA whereas AASHTO Article 6.10.8 and Eurocode 3 underestimate the strengths by 22% and 16%, respectively. KHBDC expected the strengths 14% smaller than FEA. It was observed that strength evaluation by KHBDC, Appendix A6 and Eurocode 3 correlate better to FEA than by Article 6.10.8.

(3) Flange local buckling (FLB) strength of plate girders with HSB 800 was evaluated by nonlinear finite element analysis. Parametric study of compression flanges with a compact, noncompact and slender web has shown that AASHTO LRFD Article 6.10.3 (2012) can be conservatively applicable to girders made with HSB 800. In case of AASHTO LRFD Appendix 6 and KHBDC LSD (2012), it has been found that care should be placed on applications of compact section compression flanges that are near the limit slenderness.

(4) Numerical analyses were performed to evaluate the LTB strength of doubly- and mono-symmetric HSB800 steel girders with homogeneous and hybrid section. It was acknowledged that AASHTO LRFD appendix A6 can be applied to most sections with noncompact and compact web, but experimental study will be necessary for the monosymmetric sections with smaller compression flange than tension flange.

(5) The average flexural strength of I-girders fabricated from SM490, SM520, and HSB600 steels by nonlinear FEA was calculated to be 4% and 14% greater than those specified in AASHTO LRFD and Eurocode 3, respectively. In case of HSB800 I-girders with slender web, the average flexural strength by FEA was found to be 9% and 21% greater than those by AASHTO LRFD and Eurocode 3, respectively. Taking into account of relatively poor ductility characteristics of HSB800 steel, the nominal flexural strength formula in current AASHTO LRFD and KHBDC LSD can be applied to predicting the flexural strength of HSB800 I-girders with noncompact or slender web without modification.

(6) The HSB800 that is the high strength steel of the yield strength equal to 690MPa typically shows a lower ductility than the conventional steels. The recent limit-state-design method speculate the web compactness requirements for the effective plastic moment capacity, but these provisions shall be applicable to the steel section with specified minimum yield strength up to 485MPa. Thus, this study has investigated the ultimate bending moment and moment-plastic rotation behaviors numerically and experimentally for a series of prototype model girders. As a result, the applicability of the current provisions is examined for the prototype girders. Based on the study results, it is ascertained that the high moment capacity of HSB800 compact I-girders could be utilized.

(7) It appears that existing shear design equations developed for mild steels are not suitable for HSB800 steel. It was found that the shear design equation (Lee et al. 2008) derived for panels with aspect ratios greater than 3 are able to correctly predict the shear strength of HSB800 plate girders regardless of aspect ratio.

○ Development of LRFD design equations for HPS compressive members

(1) Coupon test results of HSA800 steel showed that most coupons were satisfied with tensile strengths and elongation of KD D 5994 limits, although the yield ratios of several coupons exceeded the limit of 0.85 due to residual stresses from fabrication.

(2) Experimental results of welded H-shaped stub columns showed that increased width-to-thickness ratios were resulted in increased maximum buckling strength. For the case of maximum average stress, specimens, whose maximum strengths were controlled by local buckling, showed decreases in maximum average stress as decrease in width-to-thickness ratios and specimens, whose maximum strengths were controlled by global buckling, vice versa.

(3) Experimental results of welded box-shaped stub columns showed that increased cross sectional areas were resulted in increased maximum buckling strength for the case of specimens with same thickness. However for the case of increases in width-to-thickness ratios due to increases in cross sectional areas, the compressive strengths were rapidly dropped after maximum strengths were reached due to local buckling. For the case of maximum average stress, the more slender showed the less maximum average stresses.

(4) Analytical results of welded H-shaped stub columns well predicted the maximum buckling strengths of experimental results with the average error of 5.3%. Analytical results also well predicted the initial stiffness, load-displacement curves, and stress-strain curves, stress concentration, and shapes of local buckling of

experimental results. Analytical results of welded H-shaped stub columns showed that the larger width-to-thickness ratios, the more maximum compressive strengths, and the less average stresses. For the case of maximum average stress, specimens, whose maximum strengths were controlled by local buckling, the strength was rapidly dropped due to local buckling.

(5) Analytical results of welded box-shaped stub columns well predicted the maximum buckling strengths of experimental results with the average error of 2.3%. Analytical results also well predicted the initial stiffness, load-displacement curves, and stress-strain curves, stress concentration, and shapes of local buckling of experimental results. Analytical results of welded box-shaped stub columns showed that the larger width-to-thickness ratios, the more maximum compressive strengths, and the less average stresses.

(6) Generally, analytical results showed higher strength than required strength by the current design standard. Specifically welded H-shaped stub columns with larger width-to-thickness ratio of web were satisfied with current design standard with enough margins. Welded box-shaped stub columns with slender section were barely satisfied with current design standard.

○ Development of LRFD design equations for HPS beam-column members

(1) Coupon test results of HSA800 steel showed typical characteristics of high strength steel with uncertain yielding point and high yielding ratio. The yield and tensile strength and elongation of all coupons were satisfied with required criteria by KS.

(2) As the width-to-thickness ratio of both flange and web, maximum compressive strengths were decreased. The maximum average stresses of the specimens decreased as with width-to-thickness ratio increased, for the case of maximum average stress, for the cases that maximum strengths were controlled by local buckling.

(3) The stub column specimens, fabricated with HSA800 and designed with non-compact section of flexural stress, were satisfied with P-M interaction requirements of standard with large margins as axial strength ratios decreased. Welded box-shaped column specimens showed larger margins than welded H-shaped column specimens.

(4) In all specimens, local buckling was observed after global buckling except for the H-shaped specimens whose local buckling was observed after flexural buckling. Local buckling of all the H-shaped specimens was observed after 90% of maximum

strength was reached except for SCH-HSA800-8-25-E0.8 specimen.

(5) Decreased stresses by local buckling were observed after yields were reached for both analytical and experimental results and the shapes stress-strain curves of analytical results were generally well matched up with experimental results. As axial strength ratios increased the maximum stresses were increased and rapid stresses decrease were observed after local buckling. Analytical results well predicted the maximum compressive strengths of experimental results with the average error of 1.65%.

(6) P-M interaction curves obtained from the parametric studies showed that compressive strength of non-slender specimens were satisfied with current design standard with enough margins especially for the case with lower axial strength ratio. However compressive strength requirement of the current design standard for slender section specimens was not satisfied.

IV. Final Research Outcomes and Applications

- Final Research Outcomes

Three years research outcomes quantitatively and qualitatively exceeded the research outcome objectives established at the initial stage of research and development.

The quantitative outcome objectives, such as conference proceeding and research paper, were achieved more than 100%: 125%(30/24) for domestic conference proceedings, 112.5%(9/8) for international conference proceedings, 100%(14/14) for domestic paper publications and 100%(4/4) for international paper publications.

The qualitative outcome objectives, such as numerical analyses, structural experiments, usage of experimental equipments, and technical level and gap index, were also achieved more than 100%.

- Applications of Final Research Outcomes

The objective of this research was LRFD standardization of flexural and compressive HPS members for the application to steel construction through the investigation of structural behaviors under various limit states. For this purpose, numerical and experimental programs were designed and performed. From the analyses of research results, it was judged that research results could be applicable current design standard. Therefore adoption of HSA800 for flexural, compressive, and

beam-column members was proposed to the committee of KBC2014 and accepted by the committee. Consequently it is expected that the proposals of this research results will be reflected on the new standard.

V. Research Objective Accomplishments and Effectiveness

- Research Objective Accomplishments

To achieve the research objective, following detailed goals were established and it can be judged that research outcomes exceeded the objectives established at the initial stage of research and development.

- (1) Improvement plan for HPS related design standard: 100%
- (2) Development of LRFD design equations for HPS flexural members: 100%
- (3) Development of LRFD design equations for HPS compressive members: 100%
- (4) Development of LRFD design equations for HPS beam-column members: 100%

- Effectiveness of Research Objective Accomplishments

With the achievements of this research, HSA800 steel, currently regulated in KS only, will be also regulated in design standard and consequently. Consequently it would provide technical base for the adoption of HSA800 for long span bridges, high-rise buildings, and space frames in construction fields. It is expected that international competitiveness of related design techniques could be secured and it is also expected that demands for HPS could be increased. Through the competitiveness superiority of HPS with undeveloped countries in steel manufacturing, increasing the technical trade and winning overseas contracts could be expected.

VI. Research Results Utilization

Through the developments of HPS with improved strength, toughness, weldability, and corrosion-resisting and LRFD standardization of flexural and compressive HPS members obtained from the results of this research, the usages in steel structures, under various loading conditions such as gravity loads, wind loads, and earthquake loads, are expected to be increased.

In addition, through establishing the LRFD design methodology of HPS members, an internationally leading technology, it is intended to be used for overall construction markets including engineering company. Through the establishing the LRFD design method of HPS members, domination the market undeveloped countries in steel manufacturing in advance could be expected and preoccupation of steel construction in

developing countries could also be expected.

CONTENTS

Chapter 1 Introduction	022
1.1 Necessities and Objectives of Research	022
1.2 Definition and Scope of Research	025
1.3 Domestic and International Technical Development	027
1.4 Positions in Related Area of Research Results	033
 제2장 Research Contents and Results	 036
2.1 Research Strategy and Methodology	036
2.2 Research Process and Contents	038
2.3 Research Results and Verification Method	063
 제3장 Final Research Outcomes and Applications	 070
3.1 Final Research Outcomes	070
3.2 Applications	072
 제4장 Research Objective Accomplishments and Effectiveness	 075
4.1 Research Objective Accomplishments	075
4.2 Expected Products and Ripple Effects	076
 제5장 Research Results Utilization and Needs for Further Research	 078
5.1 Research Results Utilization	078
5.2 Needs for Further Research	078
 References	 080

[Appendix]

1. Research Results for LRFD Standardization of Flexural Members
2. Research Results for LRFD Standardization of Compressive Members
3. Research Results for LRFD Standardization of Beam-column Members

목 차

제1장 연구개발과제 개요	022
1.1 연구개발의 필요성 및 목적	022
1.2 연구개발의 정의 및 범위	025
1.3 관련분야의 국내외 기술개발 현황	027
1.4 연구개발결과가 관련분야에서 차지하는 위치	033
제2장 연구개발 수행 내용 및 결과	036
2.1 연구수행 전략 및 방법론	036
2.2 연구수행과정 및 내용	038
2.3 연구수행결과 및 결과의 검증 방법	063
제3장 최종 연구성과 및 적용실적	070
3.1 최종 연구성과	070
3.2 연구성과 적용	072
제4장 연구목표 달성 및 효과	075
4.1 연구개발 최종목표 달성도	075
4.2 기대성과 및 파급효과	076
제5장 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성	078
5.1 연구성과 활용방안	078
5.2 추가연구 필요성	078
참고문헌	080

[부 록]

1. 휨재 LRFD 설계기준 정립을 위한 기반연구 결과
2. 압축재 LRFD 설계기준 정립을 위한 기반연구 결과
3. 휨-압축재 LRFD 설계기준 정립을 위한 기반연구 결과

제1장 연구개발과제 개요

1.1 연구개발의 필요성 및 목적

1. 연구개발 개요

최근 국내에서는 HSB(High performance Steel for Bridges) 고성능강이 개발되어 HSB500, HSB600 및 HSB800 강재가 KS D 3868에 교량구조용 압연강재로 2009년 등록되었으며, 이들 강재는 강도, 내후성, 인성, 용접성 등을 복합적으로 개선된 세계적 수준의 고품질 차세대 강재로 평가된다. 이를 반영하여 강구조설계기준-하중저항계수설계법(2010)에 HSB500 및 HSB600 강재가 포함되었고, 2010년 개정된 도로교설계기준(2010)에는 이들 강재에 항복강도가 690MPa인 HSB800 고성능강이 추가되었다. 아울러, 허용응력법을 적용하는 현 도로교설계기준(2010)의 강교 설계기준을 대체할 신뢰도이론에 근거한 한계상태설계법 도로교설계기준이 2011년 중에 제정될 예정이며 이 기준의 강합성거더 휨부재 설계규정은 AASHTO LRFD 설계기준(2000)에 기초하고 있다. 2010년 강구조설계기준과 현재 제정 중인 2011년 LRFD법에 근거한 도로교설계기준에는 고성능강을 탄성영역의 강도만을 이용하는 비조밀단면으로 설계하도록 규정하고 있어 경제성 때문에 적용이 사실상 불가능하다. HSB800 강재를 적용하는 경우 단면의 치수에 따라서는 얼마든지 항복강도 이상의 비탄성 영역이나 소성영역에 해당하는 휨강도를 가질 가능성이 있으므로 HSB800 강재로 제작된 휨부재의 극한저항강도에 근거한 구조적 거동에 대한 폭넓은 연구가 필수적이다.

국외의 경우 AISC(2010)와 AASHTO-LRFD(2010)에는 항복강도 485MPa급의 HPS485, HPS70, 항복강도 690MPa급의 HPS100를 적용할 수 있도록 사용강재에 포함하고 있다. 그러나 항복강도가 485MPa를 초과하는 강재는 비조밀단면으로 분류하는 예와 같은 단면 조밀성 기준 등의 세부 설계규정에는 이들 고강도강은 상당한 적용상의 제한을 받고 있다. 유럽의 경우 Eurocode에서 항복강도 690MPa급 강재를 허용하고는 있지만, 고강도강을 적용하는 경우 대부분 세장단면인 Class 4단면으로 분류되어 경제적 설계가 불가능하다. 일본 도로교시방서와 Honshu-Shikoku Bridge Spec.에는 항복강도 480-690MPa급 BHS700, HT70, HT80, HW550, HW685, HW885 등과 같은 다양한 고강도강을 강재 규정에 포함시켜 이들 강재를 부분적으로 적용할 수 있도록 하고 있다. 현재의 휨부재 설계 주요 규정은 고강도강에 대한 연구결과를 반영하여 결정된 것들이 아니고 항복강도 485MPa급 이하의 강재를 기준으로 하고 있어서 추가적 연구가 필요한 상태이다.

한편 건축용 강재는 초고층 건물, 장스팬 구조물 등과 같은 대형구조물에 작용하는 외력에 안전하기 위한 고강도화(high-strength), 구조물에 대한 요구가 다양화됨에 따라 그 기대성능을 발휘할 수 있는 고기능화(high-performance)에 대한 요구가 높아지고 있다. 그러나 변형도-응력도 곡선이 일반강재와 상이한 고강도 강재의 경우, 일반강재를 대상

으로 한 현행 기준이 여전히 유효하게 고강도강재에도 확대적용이 가능한 것인지의 여부에 대해서도 아직까지 국내외적으로 체계적으로 검토된 바가 없는 상태로 현장적용을 위한 강재의 특성을 파악하고 이를 근거로 설계기준을 개발해야 한다. 즉, 고강도로 제작된 압축재, 그리고 휨과 압축의 조합력을 받는 보-기둥 부재들의 다양한 한계상태에서의 거동 규명을 통하여 설계목적에 부합되게 제어할 수 있는 설계기준 정립해야 한다.

따라서 본 연구에서는 구조부재 가운데 가장 기본적이고 활용범위가 넓은 휨부재, 압축재 및 휨과 압축의 조합력을 받는 보-기둥 부재들을 대상으로 고성능강을 적용한 LRFD 설계기준 정립을 위한 다음 핵심연구를 수행하였다.

- 항복강도 690MPa급 고성능강 적용 휨부재 휨저항강도 LRFD 설계식 개발
 - (1) 고강도강 강교량 거더의 단면 조밀성 분류를 위한 이론 연구
 - (1) 정/부모멘트부 휨저항강도식 개발을 위한 실험/해석 연구
 - (3) 인장역작용을 고려한 전단강도 설계식 개발
 - (4) 하중저감계수 및 하이브리드계수 설계식 개발
 - (5) 사용성(거더 처짐 및 복부판 국부변형)을 고려한 실험 및 해석 연구
 - (6) 강교량거더 휨강도 및 전단강도 LRFD 설계기준(안) 제시
- 항복강도 690MPa급 고성능강 적용 압축재 LRFD 설계기준 정립
 - (1) 균등 압축재 단면 조밀성 기준 개발
 - (2) 부재 세장비를 고려한 압축강도 기준 개발
- 항복강도 690MPa급 고성능강 적용 보-기둥 부재 LRFD 설계기준 정립
 - (1) 조합력을 받는 보-기둥 단면 조밀성 기준 개발
 - (2) 조합력을 받는 보-기둥 부재의 횡지지 기준 개발
 - (3) 조합력을 받는 보-기둥 부재의 설계강도 기준 개발

2. 연구개발의 중요성

구조물이 초고층 및 초장대화 등 대형화됨에 따라 소비자는 이에 맞는 고강도 건설용 재료를 요구하게 되며, 소비자의 요구사항에 맞추어 철강사들이 연구 및 개발하고 있으며, 소비자들은 구조물의 특성 별로 선택해서 사용하고 있다. 현재 건설용강재의 새로운 동향은 소비자가 직접 강재의 고강도화, 고기능화, 친환경화, 그리고 가격상승의 최소화를 요구하고 있다는 점으로 고강도강을 사용하면 경제성이나 용접 시공성 향상 외에 강재량 저감에 따른 CO₂ 저감이라는 부수적인 효과도 기대해 볼 수 있다.

현행의 강재 인장강도 600MPa급으로 200층 규모의 초고층 건물에 적용할 경우, 기둥 부재의 강도별 부재사이지를 보면 1.5m 이상이나, 강재 인장강도를 1000MPa급으로 하면 기둥부재의 부재사이지는 1.0m 이내로 줄어들게 되어 사용공간이 확대되어 고강도화 효과가 매우 크다(표 1.1).

표 1.1 강재 강도별 기둥부재 단면설계결과

인장강도	600MPa	800MPa	1,000MPa	1,200MPa
부재치수	H-1500×1500×80×80	H-1100×1100×80×80	H-910×910×80×80	H-795×795×80×80
단면적	0.3472 m ²	0.2512 m ²	0.2056 m ²	0.1780 m ²
상대율	100 %	72%	59%	51%

중중 고성능강(HPS, high performance steel)으로도 불리는 고강도강은 일반 강재의 2~3배에 달하는 강도를 지닌 첨단건설소재로써, 특히 초장대교량, 초고층, 초대형 건축물과 미학적으로 경쟁력이 요구되는 구조물 또는 다양한 하중특성에 잘 부합되게 이를 적절히 활용할 경우 최적의 건설재료가 될 수 있다.

최근 국내에서 생산 또는 개발 중인 고강도 강재는 퀀칭, 템퍼링, 합금투입 공정 등을 생략하고 미세립, 석출제어, 변태조직제어기술을 통해 제강과정의 경제성은 물론 상대적으로 낮은 탄소당량을 유지하여 뛰어난 용접성과 노치인성 제공하므로 건설구조물의 응용에 적합한 매력적인 소재로 부상하고 있다. 특히 국내에서 생산 또는 개발 중인 고강도강의 건설구조 적용을 위한 설계기준이 정립될 경우 아직 고강도강 생산기술을 확보하지 못한 후발 제강국가에 대한 차별화 내지는 경쟁력 우위를 유지하는 좋은 계기가 될 수 있다.

고강도 강재의 현장적용이 가능하기 위해서는, 우선 소재레벨에서의 기계적 특성, 용접이음부의 인장특성 등에 대해서 파악되어야 함은 물론이며, 이를 반영한 연구결과에 근거하여 설계기준을 개발해야 한다. 신뢰도기반 강구조설계기준에 국내에서 생산된 HPS 강재를 포함시키기 위해서는 HPS 강재로 제작된 부재의 비선형 극한저항강도에 근거한 구조적 거동에 대한 폭넓은 이해를 위한 실험적 및 해석적 연구의 수행이 필요하고 이들 연구결과에 근거한 설계식이 시급히 정립되어야 한다.

상기 본 연구과제의 중요성을 기술적 측면 및 경제·산업적 측면으로 요약하면 다음과 같다.

- 기술적 측면

고성능강을 적용한 휨부재, 압축재 및 조합력을 받는 부재의 설계기준이 제정되면 초장대 교량이나 초고층 건물 등에 고성능강재의 적용이 일반화될 것으로 판단된다.

- 경제·산업적 측면

최근 연구에 의하면 장대교량에 고강도강을 적용한 경우 약 15% 정도의 경제성이 제고되는 것으로 분석되며 표 1.1과 같이 초고층 건축물에 고강도강을 적용할 경우 부재의 크기가 상당히 줄어들어 사용공간이 확대 및 경제적 효과가 매우 클 것으로 기대된다.

3. 연구개발의 필요성

고강도강을 적용한 국내외 주요 설계기준과 관련하여 선진국에서는 수년 내에 연구결과를 설계기준에 반영할 것으로 예상된다. 국내 관련 연구는 아직 초기 단계로, 설계기준 반영 위한 다양한 설계규정에 대한 연구결과의 도출 및 분석에 의한 설계식 개발 노력이 절실한 것으로 판단된다. 특히 800MPa급의 강재의 특성 중에 높은 항복비와 다소 적은 연성 등은 기존 설계식의 적용성에 무리가 있다. 따라서 고강도강재를 사용하는 경우 현행설계기준의 적용성에 대한 문제점의 파악과 사용한계를 분석함은 필수적이라 할 수 있다. 또한 경제성과 안전성이 확보된 고급강재인 고강도강재의 적극적인 활용을 위하여, 고강도로 제작된 휨재, 압축재, 보-기둥 부재들의 다양한 한계상태에서의 거동 규명을 통하여 설계목적에 부합되게 제어할 수 있는 설계기준 정립할 필요가 있다.

4. 연구개발의 목적

본 연구개발의 목적은 고강도로 제작된 휨재, 압축재, 그리고 휨과 압축의 조합력을 받는 보-기둥 부재들의 다양한 한계상태에서의 거동 규명을 통하여 설계목적에 부합되게 제어할 수 있는 설계기준 정립을 목적으로 하고 이를 위하여 다음과 같은 세부 연구를 진행하였다.

- 항복강도 690MPa급 고성능강 적용 휨부재 휨저항강도 LRFD 설계식 개발
- 항복강도 690MPa급 고성능강 적용 압축재 LRFD 설계기준 정립
- 항복강도 690MPa급 고성능강 적용 보-기둥 부재 LRFD 설계기준 정립

1.2 연구개발의 정의 및 범위

1. 연구개발의 정의

본 연구개발은 “항복강도 690MPa급 고성능강 부재들의 다양한 한계상태에서의 거동 규명을 통하여 설계목적에 부합되게 제어할 수 있는 설계기준의 정립”으로 정의할 수 있으며 이를 위하여 다음과 같은 세부 목표로 연구를 진행하였다.

- 항복강도 690MPa급 고성능강 적용 휨부재 휨저항강도 LRFD 설계식 개발
- 항복강도 690MPa급 고성능강 적용 압축재 LRFD 설계기준 정립
- 항복강도 690MPa급 고성능강 적용 휨과 압축의 조합력을 받는 보-기둥 부재 LRFD 설계기준 정립

2. 연구개발의 범위

상기 정의된 연구개발의 성격을 달성하기 위한 세부 목표별 연구개발의 범위는 다음과 같다.

- 세부목표 1

항복강도 690MPa급 고성능강 적용 휨부재 휨저항강도 LRFD 설계식 개발

- 정·부모멘트에 대한 휨저항강도 설계식 개발
- 인장역작용을 고려한 전단강도 설계식 개발
- 하중저감계수 및 하이브리드계수 설계식 개발
- 사용성을 고려한 설계식 개발

- 세부목표 2

항복강도 690MPa급 고성능강 적용 압축재 LRFD 설계기준 정립

- 균등 압축재 단면 조밀성 기준 개발
- 부재 세장비를 고려한 압축강도 기준 개발

- 세부목표 3

항복강도 690MPa급 고성능강 적용 보-기둥 부재 LRFD 설계기준 정립

- 조합력을 받는 보-기둥 단면 조밀성 기준 개발
- 조합력을 받는 보-기둥 부재의 횡지지 기준 개발
- 조합력을 받는 보-기둥 부재의 설계강도 기준 개발

3. 최종목표의 성격 및 설정근거

가. 최종목표의 성격

본 연구로부터의 결과물의 성격은 국내에서 생산된 항복강도 690MPa급의 고성능강을 사용하는 건설분야의 구조부재인 휨재, 압축재 및 휨과 압축의 조합력을 받는 보-기둥 부재의 다양한 한계상태를 고려한 표준화된 설계기준을 제시하는 것이다.

나. 종목표의 설정근거

강재는 강도, 가공성, 저가격, 신뢰성, 공급안정성 등 폭넓은 분야에서 이용되기 위한 우수한 특성을 가지고 있다. 우리나라에서는 도시의 고밀화로 인하여 1990년대 중반 이후 국내에 30층 이상의 초고층 건축물의 수요가 급격히 증가하였다. 층수가 증가하는 만큼 건축물이 지지하는 하중도 점차 커져서, 고강도 강재에 대한 수요도 증가하게 되었다. 현재 중·저층 강구조물에 널리 사용되는 강재는 SS400, SM490 등이며, 2004년에 이르러서야 SM570TMC강재가 법제화되었다(그림 1.1). 그러나 최근에도 100층이 넘는 건축물이 계획되어 있거나 시공 중에 있으며, 초고강도강재에 대한 수요가 지속적으로 있을 것으로 보인다.

년도	'95	'96		'99	'00		'03	'04	'05	'06
법제화		SM490TMC		SM520TMC				SM570TMC		
적용	POSCO Center (SM490TMC)				Tower Palace I (SM520TMC) 삼성 서초타운 (SM570TMC)					

그림 1.1 구조용 TMC강재의 개발 및 적용

1.3 관련분야의 국내외 기술개발 현황

1. 지금까지의 관련분야 국내외 연구개발 실적

가. 국내

국토해양부 건설핵심기술연구개발사업의 제1세부과제로 (재)포항산업과학연구원 강구조연구소는 500/600/800MPa급 교량 및 건축물용 고성능강의 개발 및 활용기술 실용화를 추진하였으며, 고성능강의 시제품생산이 완료. 이와 더불어 국내 고유의 규격 제정을 위하여 국내 전문가를 대상으로 이름공모를 하여 최종 HSB(High Performance Steel for Bridges & Building)로 결정되었으며, 2007년 8월 “교량구조용 압연강재”로 KS 규격 제정·고시되고 일부내용이 2009년 2월에 개정되었다(KS D3868).

고강도강을 적용한 교량에 대한 국내 연구의 경우 극한강도 600MPa급 정도에 대한 연구가 대부분이며, 구조강도에 관한 연구(김용태 등 2008, 윤석구 등 2007, 주현성 등 2008)는 극히 제한적으로 수행되고 있고, 재료특성 (김종락 등 2004, 이종관 등 2008, 한종욱 등 2008), 소수주형교 등 경제성 평가(이종관 등 2000, 이진형 등 2003, 김상효 등 2002, 박찬희 등 2007, 윤태양 등 2007) 등에 관한 연구가 주류를 이루고 있다.

최근, 조은영 등(2010, 2011)에 의해 해석적인 방법으로 HSB800 고성능강을 적용한 균질 및 하이브리드 강합성거더의 정모멘트부 휨강도산정식이 제안된 바 있다. 본 연구에서 수행하고자하는 고강도강 강교량 거더의 단면 조밀성 분류, 정/부모멘트부 휨저항강도식 개발을 위한 실험 및 해석, 인장역작용을 고려한 전단강도 설계식, 하중저감계수 및 하이브리드계수 설계식, 사용성(거더 처짐 및 복부판 국부변형)을 고려한 해석에 관한 국내외 연구는 거의 수행된 바 없다.

나. 국외

미국에서는 1990년대에 AISI, 미 해군, FHWA 등이 주도하는 HPS 강재에 대한 연구를 시작하였으며 2000년대에 들어 극한강도 690 MPa급 고성능강을 적용한 LRFD 설계기준 개발 연구가 활발히 수행되고 있다. 미국 테네시주 Martin Creek교(72m-72m, 2경

간)에 485MPa급 HPS70W를 적용한 결과에 따르면 Grade 50W를 적용할 때와 비교해서 약 25%의 강중 절약과 약 10%의 건설비 감소가 보고되었다. 고성능강을 적용한 국외 연구는 1) 부모멘트부 비탄성해석 및 설계 2) 정모멘트부 합성거더의 연성 3) 하이브리드 거더 4) 사용성 관련 최대허용처짐 조건 연구가 주를 이루고 있다.

Barth 등(2000), Sause 등(2001), Yakel 등(2004) 등이 HPS 플레이트 거더 부모멘트부에서 조밀단면과 비조밀단면의 연성과 강도검토 연구를 수행하여 HPS485W 조밀단면 플레이트 거더는 소성모멘트까지 도달이 가능하고 HPS485W 비조밀단면 플레이트 거더는 항복모멘트를 초과하는 휨강도를 갖는 결과를 얻었으며 이들 연구결과는 AASHTO(2000)에 반영되었다.

HPS100W 연구결과 HPS70W와 비슷한 결론을 갖는 연구결과 있으나 조밀성 및 브레이싱 요구조건에 대한 추가적인 연구가 필요하여 아직까지 AASHTO 규정에는 포함되지 못하였다. 정모멘트부 합성거더 휨강도에 대한 Mans 등(2001)의 연구결과 AASHTO-LRFD 정모멘트부 휨강도 식의 연성계수에 HPS485W 강재에 $\beta=0.7$ 을 적용하는 것은 과대 안전측의 값으로 추가적인 연구가 필요하며 Yakel 등(2004)은 고강도 강재에 대해 좀 더 합리적이고 단순화된 방법으로 정모멘트부의 휨강도와 연성을 구할 수 있는 방법을 제시하였다.

하이브리드 거더에 관한 AASHTO 규정에는 패널의 탄성좌굴능력을 가진 하이브리드 거더의 전단력을 제한하고 있으나 이 규정은 HPS강재에 대한 특정한 규정이 아니며 Barker 등(2000), Horton 등(2000), Clingenpeel 등(2003)의 유한요소해석과 실험을 통한 연구결과 비조밀단면에서 사인장거동은 하이브리드거더의 계산된 전단력을 허용할 수 있고, 비조밀단면에서 실험결과 휨강도와 전단강도의 상관관계는 없는 것으로 보고하였다. AASHTO 규정에서 대부분의 교량에서 최대처짐을 $\delta=L/800$ 로 규정하고 활하중 최대허용 처짐은 선택적인 규정이나 많은 주에서 의무적인 규정으로 적용하고 있다.

Roeder 등(2000)의 연구에 의하면 항복강도가 345MPa 보다 작은 강재 거더는 이 규정이 설계를 지배하지 않는 반면, 고강도 강재로 이뤄진 거더에서는 상당히 큰 영향을 줄 수 있는 것으로 보고하였다. Roeder 등(2001), Barth 등(2004), Roeder 등(2004)의 연구결과, 사용성에 대한 처짐 보다는 진동에 의한 심리적 영향이 더 크고, 현 규정을 만족하는 교량도 과도한 변형으로 인한 구조적 손상을 경험하고, 처짐 규정은 만족하지 못하나 진동과 구조성능비는 우수한 교량의 경우도 다수가 있음을 보고하였다.

2. 국내외 관련 기술 및 산업 동향

가. 국내 기술 및 산업 동향

국내의 건축용 강재는 국내 유일한 일관제철소인 포스코가 후판시장을 대부분 장악하고 있으며 동국제강이 일부 차지하고 있다. 최근에는 국내외적 강재 수요의 확대에 맞물려 수개의 기업들이 제철소 확장 분위기에 있다.

고강도 강재는 국내의 포스코가 일본의 NSC 및 JFE이 보유한 세계 최고 수준의 기술에 근접하였으며 향후 집중적인 연구개발을 통하여 세계 최고 기술의 보유가 가능하다. 현재, 국내에서 두께 80mm까지 생산하던 고강도강(TMCP강)을 두께 100mm까지 확대 생산을 추진하고 있으며, 2008년에는 극후물(80mm 초과재)재 사용이 가능하다. 현재까지 국내 고강도강 실용화 적용사례는 고강도강(SM570TMC)은 2007년 서초 삼성타운에 적용을 시작하여 초고층 건축물인 동북아 무역센터, 포스코건설 신사옥, 동남권 유통단지 등 점차로 수요가 증가하고 있는 추세이다.

또한, 최근의 국내 교량용 강재에서는 HSB(High performance Steel for Bridges) 고성능강이 개발되어 HSB500, HSB600 및 HSB800 강재가 KS D 3868에 교량구조용 압연 강재로 2009년 등록되었다. 이들 강재는 강도, 내후성, 인성, 용접성 등을 복합적으로 개선된 세계적 수준의 차세대 강재로 평가되고 있다.

강구조설계기준-하중저항계수설계법(2010)에 HSB500 및 HSB600 강재가 포함되었고, 허용응력법에 근거한 도로교설계기준(2010)에는 이들 강재에 항복강도가 690MPa인 HSB800 고성능강이 추가되었다. 2010년 강구조설계기준과 현재 제정 중인 2011년 LRFD 법에 근거한 도로교설계기준에는 고성능강을 탄성영역의 강도만을 이용하는 비조밀단면으로 설계하도록 규정하고 있어 경제성 때문에 적용이 사실상 불가능한 상황이다.

국내 교량건설에서는 극한강도 800MPa급 고성능강 적용 사례가 없다. 현재의 기술수준은 기술 선진국 대비 50% 정도이고 기술격차는 5년 정도로 판단되며, 설계기준이 합리적으로 정비되면 극한강도 800 MPa급 고강도강이 장대교량을 중심으로 본격적으로 적용될 전망이다.

고강도강 실용화 기술의 경우, 연구시설이나 연구인력, 국내 정보화 수준 등은 선진수준과 유사한 것으로 판단되며 현 기술수준을 참고할 때 국제기술 협력기반은 어느 정도 갖춰져 있다고 판단된다. 다만, 기술의 표준화나 산업 기술 인력은 본 기술개발 과정을 통해 보완이 필요한 것으로 판단된다.

표 1.2 국내 고강도 강 실용화 기술 현황

세부기술	업체명	기술수준 및 특징	
고강도 강 실용화 기술 (후판)	포스코 /RIST	보유 기술 및 특허	고성능강재 PILAC-BT45제조기술 (2009)
		기술 수준 (세계최고 기술수준의 80%)	-인장강도: 600MPa 이상 -항복강도: 440MPa 이상 -항복비: 85%이하 -최대두께: 100mm이하 -탄소당량: Ceq=0.38
		기술 효과	-기존 강종 대비 고강도강재 실용화로 사용 공간 확대, 경제성 및 시공성을 향상

나. 국외 기술 및 산업 동향

미국의 경우 이미 1960년대와 1990년대의 말에 고강도강재인 A514 강재(공칭항복강도 690MPa급으로 퀀칭과 템퍼링에 의해 생산), HSLA 80(고강도저탄소합금강으로 선박용강재)를 대상으로 이들 강재의 건축구조 적용을 위한 실험연구가 힘부재 위주로 시도된 바가 있으나, 현재까지 고강도강의 건축구조적용을 위한 충분한 연구가 수행되지 못한 상황이다. 다만 고강도 강재의 회전능력에 우려와 비탄성거동의 제어를 위한 실험근거의 부족으로 현행의 대부분 국내외 강구조 설계기준에서는 항복강도 450MPa를 초과하는 강재에 대해서는 비탄성변형을 통한 힘의 재분배를 필요로 하는 소성설계를 명시적으로 금하고 있다.

1992년부터는 HPS(High Performance Steel)이란 강재를 개발하여 사용하고 있으며, 이 강재는 강도, 내후성, 인성 및 용접성 등을 복합적으로 개선한 고성능 강재로 현재 HPS50W, HPS70W, HPS100W(ASTM A709/A709W-98) 3종류가 개발되었다. 또한, AISC(2010)와 AASHTO-LRFD(2010)에는 항복강도 485MPa급의 HPS485, HPS70, 항복강도 690MPa급의 HPS100를 적용할 수 있도록 사용강재에 포함하고 있다. 그러나, 항복강도가 485MPa를 초과하는 강재는 비조밀단면으로 분류하는 예와 같은 단면 조밀성 기준 등의 세부 설계규정에는 이들 고강도강은 상당한 적용상의 제한을 받고 있다.

일본에서 철강재료는 1990년도를 기점으로 하여 폭넓은 분야에서 이용이 확대되어, 최근에는 연간 약 6천만톤이 소비되고 있으며, 다양한 제품의 소재가 생산되고 있다. 건설 분야는 강재수요의 50%(약 3,000만톤)에 이르는 철강재료의 최대 이용분야로 일본에서의 건축물 중에 철골조 비율은 약 30%에 달하고 있으며, 지금까지의 건축물의 발전을 더듬어보면 건물의 초고층화, 장스팬화 등 건축기술의 고도화는 새로운 철강제품이 있었기 때문에 가능하였다고 해도 과언이 아니다.

또한, 일본은 이미 1960년대에 800MPa급 강재를 개발하였으며 1992년에는 TMCP800MPa급 강재를 개발하였다. 그리고 현재에는 고강도를 유지하면서 용접성과 부식성등을 개선한 BHS(Bridge High performance Steel)라는 강종을 개발하였다. 또한, 일본 도로교시방서와 Honshu-Shikoku Bridge Spec.에는 항복강도 480-690MPa급 BHS700, HT70, HT80, HW550, HW685, HW885 등과 같은 다양한 고강도강을 강재 규정에 포함시켜 이들 강재를 부분적으로 적용할 수 있도록 하고 있다. 이와 같이 일본은 고강도 강재의 역사가 길며 현재에도 건축구조물 및 강교량구조물에 활발히 적용하고 있다.

유럽의 경우 항복강도 690MPa급 강재를 허용하고는 있지만 고강도강을 적용하는 경우 대부분 세장단면인 Class 4단면으로 분류되어 경제적 설계가 불가능하다. 현재 힘부재 설계 주요 규정은 고강도강에 대한 연구결과를 반영하여 결정된 것들이 아니고 항복강도 485MPa급 이하 강재를 기준으로 하고 있어 추가적 연구가 필요한 상태이다.

결국, 미국, 유럽, 일본에서는 일부 특수교량 등에는 고성능강재를 적용하고 있으나,

고성능강재를 본격적으로 적용하지는 못하고 있는 실정이며, 항복강도 485MPa급 이상 강재에 대한 신뢰도 기반 설계 기준(LRFD)은 아직 세계적으로 개발이 미흡한 실정임. 해외 설계엔지니어링 시장에서도 고강도·고성능강 적용은 극히 제한적임. 2015년 이후에는 극한강도 800MPa급 고강도강 적용 신뢰도기반 설계기준이 개발될 전망이고 향후 5년 내에 전면적인 적용이 예상된다.

표 1.3 해외 고강도 강 실용화 기술 현황

세부기술	업체명(국적)	기술수준 및 특징	
고강도 강 실용화 기술 (후판)	U.S. Steel Bethlehem (미국)	보유 기술	High Performance Steel (HPS690W)
		기술 수준	- 항복강도 690MPa - 인장강도 760~895MPa - 판 두께 100mm - 연신율(50mm) 18%
		기술 효과	인성부여로 안전성 확보, 고강도강 적용에 따른 경제성 확보
	NSC (일본)	보유 기술	건축구조용 780N강판 BT-HT620
		기술 수준	- 항복강도 630MPa - 인장강도 780~930MPa - 판 두께 50mm이하 - 항복비 85이하 - 탄소당량 $C_{eq}=0.55$
		기술 효과	건축물의 내진성을 확보하기 위해 필수적인 소재 성능인 항복강도, 용접성 등이 개선되어 초고층 건축에 적용 가능

다. 국내외 기술 및 산업 동향 비교

국내 최대 철강사인 포스코는 2009년 두께 80mm까지의 800MPa급(항복강도 690MPa) 강재를 개발하였고, 미국과 일본의 800MPa급 교량용강재의 요구 항복강도와 인장강도는 각각 690MPa과 780MPa 이다(표 1.4). 이 기준을 적용할 경우 현재 국내에서도 두께 80mm까지는 800MPa급 강재를 생산할 수 있는 기술이 마련되었다고 할 수 있다.

표 1.4 국내·외 800MPa급 강재 요구강도

구분	요구 항복강도	요구 인장강도
국내(HSB800)	690MPa	800MPa
일본(HT780)	690MPa	780MPa
미국(A709)	690MPa	780MPa

국내에서는 고성능강재(항복강도 690MPa급)를 개발 및 제조하는 수준에 머물러 있어서 건설분야에 적극적으로 활용하는 단계에는 이르지 못하였다. 현재 우리나라는 570MPa급까지 건축구조기준에 명시되어 있으며 최근에 이르러 동북아무역센터와 같은 초고층건물에 570MPa급 강재가 적용되고 있다. 토목분야에서는 강교량연구회의 자료(2003년)에 따르면, 600MPa급 강재까지 적용기술이 확보되어있는데 반해, 미국과 일본은 이미 800MPa급 강재까지 적용기술이 확보되어 있다(표 1.5). 따라서 강재의 개발과 함께 강재를 활용할 수 있는 적용기술개발도 함께 이루어져야 한다.

표 1.5 고성능강 교량 적용기술 수준 비교(토목분야, 2003년 기준)

고성능강	적용기술 확보여부			국내생산 가능여부
	한국	일본	미국	
800MPa급 고강도강	×	○	○	○
700MPa급 고강도강	×	○	○	○
600MPa급 고강도강	○	○	○	○
t≤100mm 극후판	○	○	○	○
t≥100mm 극후판	×	○	×	×

표 1.6 고강도강을 적용한 휨재에 대한 국내외 주요 설계기준과 연구동향을 분석

국내 설계기준	국외 설계기준
- 도로교설계기준(2010) 및 강구조설계기준(2010) - SM570, HSB500, HSB600, HSB800 - 항복강도 460MPa 이상은 탄성설계 제한 - 신뢰도기반 도로교설계기준(2011 예정) - SM570, HSB500, HSB600, HSB800 - POSTEN60, POSTEN80은 불포함 - 항복강도 460MPa 이상은 탄성설계 제한	- AISC(2010), AASHTO-LRFD(2010) - HPS485, HPS70, HPS100 - 항복강도 485MPa 이상은 비조밀단면 - Eurocode 3 - S550, S620, S650, S690, S700 - S690 이상은 대부분 세장단면 - 일본도로교 및 Honshu-Shikoku시방서 - BHS500, BHS700 - HT70, HT80, HW550, HW685, HW885
국내 연구동향	국외 연구동향
- 극한강도 600MPa급 연구가 대부분 - 소수주형교 등 경제성 평가 - 재료특성 평가 - 제한적 휨저항강도 평가	- 사용성한계(처짐) 규정 평가 - 부모멘트부 모멘트재분배 및 휨강도 평가 - 정모멘트부 연성거동 및 휨강도 평가 - 사인장거동을 고려한 전단강도 평가 - 단면조밀성 한계 및 브레이싱 규정 평가 - HPS DAG 소위원회 활동 중

3. 특허 동향

고성능강재 제작 기술(유사기술군 포함)의 특허출원동향은 1990년대 초반부터 꾸준한 출원을 보이고 있으며, 2000년대 들어서 국내에서도 본격적인 출원 및 등록이 이루어져 왔다.

전체적으로는 출원 추세가 꾸준히 증가하는 것으로 볼 수 있으며, 이는 활발한 연구 개발이 진행되고 있는 것으로 사료된다. 국가별로 분석 시 전체 284건 중 일본이 가장 많은 출원건수(220건, 77.5%)로 독보적으로 높은 특허점유율을 보이고 있으며, 다음으로 한국이 40건으로 14.1%, 미국 13건으로 4.6%, 유럽 11건으로 3.9%의 점유율을 보이고 있다.

그러나 본 과제에서 수행한 설계기법개발과 관련한 실용화 특허사례는 전무하며, 소재 및 제품 개발과 관련된 특허와는 관련성이 없는 것으로 파악된다.

1.4 연구개발결과가 관련분야에서 차지하는 위치

1. 정부지원정책 현황

가. 관련법령, 정부 정책 및 담당기관

최근 국내에서는 HSB(High performance Steel for Bridges) 고성능강이 개발되어 HSB500, HSB600 및 HSB800 강재가 KS D 3868에 교량구조용 압연강재로 2009년 등록되었다. 이를 반영하여 강구조설계기준-하중저항계수설계법(2010)에 HSB500 및 HSB600 강재가 포함되었고, 2010년 개정된 도로교설계기준(2010)에는 이들 강재에 항복강도가 690MPa인 HSB800 고성능강이 추가되었다.

허용응력도설계법을 적용하는 현 도로교설계기준(2010)의 강교 설계기준을 대체할 신제도 이론에 근거한 한계상태설계법 도로교설계기준이 2011년 중 제정될 예정이지만 국내외 연구결과의 부족으로 HSB800 강재는 비조밀단면으로 설계하도록 규정하여 사실상 HSB800 강재를 경제적으로 적용하기는 거의 불가능한 실정이다.

현행 대부분의 국내외 LRFD기준의 여러 설계조항은 항복강도 450MPa 이하의 일반강재, 즉 분명한 항복점과 항복참이 존재하고 이후 상당한 변형도경화를 통해 낮은 항복비를 보여주는 강재의 물성을 전제하고 있다. 그러나 고강도강재는 변형도-응력도 곡선이 일반강재와 상이하여 비탄성 좌굴거동이 일반강재와 상이하고 항복비가 높아 건설용 강재에 요구되는 중요한 특성인 비탄성 변형능력이 일반강재에 비해 상대적으로 떨어지는 단점이 존재한다.

그러나 일반강재와 변형도-응력도 특성이 전혀 상이한 고강도강재의 국부좌굴 및 횡좌굴 제어를 위한 세장규정이 아직 확립되지 않았고, 현행 기준이 여전히 유효하게 고강도강재에도 확대적용이 가능한 것인지의 여부에 대해서도 아직까지 국내외적으로 체계적

으로 검토된 바가 없다.

나. 정부지원 정책사업 종류와 현황

표 1.7 정부지원정책 현황

구분	내용	세부내용	연구 관련성	담당부처
정책/법	저탄소 녹색성장	▪ 정책적으로 교통혼잡비용의 감소와 폐기물 감소, 재활용을 추진 ▪ 주요 사회간접자본 시설의 탄소집약도와 생태효율성 개선 - 전국 교통혼잡비용 감축 및 지속가능성 제고 (GDP 2.9%→1%이하) ▪ 자원 순환형 인프라구축 : 폐기물 감소, 자원순환을 위한 사회간접자본 확충 및 법적 제도적 기반 마련	▪ 고강도 고성능강 적용 LRFD 휨부재 설계기반 구축 통한 교량자체 및 시공단계의 사용재료 및 폐기물 감소 기술 확보용이	국가과학기술위원회
정책/법	녹색성장 기반구축을 위한 제4차 건설기술 진흥기본 계획수정	▪ 녹색성장 기반 마련을 위한 건설기준 정비 - 건설공사의 녹색기술력 평가와 녹색기술 적용 및 친환경 자재-공법 선정 유도 ▪ 시설물별 녹색성장 성과평가 방법 및 기준 마련 - 시설물 단위 자재생산, 시공과정을 포함한 전 생애에 걸친 온실가스 배출 통계시스템 구축 - 시설물 유형별, 공정별, 건설단계별 온실가스 배출 평가지표 개발 및 지침 마련	▪ 휨부재 LRFD 설계기준 마련 통한 녹색 교량기술의 기본기반 구축 ▪ 녹색건설기술개발을 통한 인센티브 부여	국토해양부 기술정책과
정책/법	국토해양부 건설산업 선진화 비전 2030/건설산업 기본법	▪ 건설산업의 선진화의 일환으로 공공발주시스템의 혁신과 건설프로세스 효율화 추진 - 발주제도의 글로벌 스탠다드화를 통해 기술경쟁 중심과 시장경쟁의 확대 전문화를 유도 - 현 최저가낙찰제 중시의 발주제도에서 주계약자공동도급, CM사업 전문공사 분리발주, 성능계약방식 발주 등으로 다양화를 통해 성능 및 기술중심의 발주제도 적용 확대 유도	▪ 글로벌 수준의 교량 설계기술 기반 향상 통한 건설프로세스 효율화 및 시장경쟁력 제고	국토해양부
기타	신성장동력	▪ 국토해양부 신성장동력의 창출을 위해 해외 건설 수주에 독려	▪ LRFD 휨부재 설계기술 수립 → 해외 교량설계 프로젝트 참여 위한 기반 기술력 확보	국토해양부

2. 연구개발결과가 관련분야에서 차지하는 위치

- 강구조물설계의 코드 이슈, 실험, 해석 그리고 실무적용에 정통한 세부전문가의 폭넓은 참여 및 유기적 연구를 통한 국제수준의 설계기준 정립
- 본 과제는 고강도강재의 국가기준의 정립하는 것이므로 향후 기준의 적용을 받는 제강업체 등 유관산업의 참여를 유도
- 장대교량, 초고층, 초대형 건축물과 미학적으로 경쟁력이 요구되는 구조물에 고강도강 활용의 기술적 근거 제공
- 고강도강 생산기술을 확보하지 못한 후발 제강국가에 대한 경쟁력 우위를 유지

제2장 연구개발 수행 내용 및 결과

2.1 연구수행 전략 및 방법론

본 연구과제의 최종 목표인 “항복강도 690MPa급 고성능강 부재들의 다양한 한계상태에서의 거동 규명을 통하여 설계목적에 부합되게 제어할 수 있는 설계기준의 정립”을 위한 연구과제를 원활하게 수행하기 위해서는 주관연구기관을 중심으로 국내 관련분야의 연구, 기술개발, 실무경험이 풍부한 전문가로 구성된 연구조직 및 역할분담이 필요하며 이를 바탕으로 탁월한 연구성과 달성을 위하여 합리적이며 체계적인 연구 추진전략과 방법이 요구된다.

1. 연구수행 전략

본 연구과제에서는 ‘기반연구’ 단계 → ‘정밀해석 및 실험 연구’ 단계 → ‘설계기준(안) 작성’ 단계로 연구를 진행하며, 성공적인 연구수행을 위하여 연구조직 이외의 전문가활용을 통한 보다 폭넓은 학문분야 및 산업분야의 의견 수렴이 연구기간 동안 지속적으로 요구된다.

- 연구과제를 수행함에 있어 다양한 의견을 수렴하기 위해 관련분야의 실무 및 연구활동을 수행하고 있는 인력과 연구과정 중 중요한 의사결정 사항에 중요한 역할을 담당하고 연구의 완성도를 높일 수 있는 관련분야 해외 전문가를 활용한다.
- ‘기반연구’ 단계에서는 한국건설교통기술평가원 및 한국과학재단 등 국가과제를 중심으로 기존 연구성과 및 기술개발의 성과자료와 POSCO 및 현대제철 등 국내 제철사 및 미국, 일본, 유럽 등 해외 제철사의 고성능강 관련 재료 특성과 관련한 자료 수집 및 분석한다. 또한, 국내·외 관련 공공기관 및 학회의 고성능강 관련 설계법 및 기준 자료를 조사 및 분석하여 그 결과를 본 연구의 최종목표를 달성하기 위한 기초자료로 사용한다.
- ‘정밀해석 및 실험 연구’ 단계에서는 재료 및 기하학적 비선형성, 인장 및 압축영역의 강도특성 차이, 초기결함 및 잔류응력 등 제작 시 발생될 수 있는 주요 요소들을 종합적으로 고려한 정밀해석을 수행한다. 또한 극한강도 특성을 검증할 수 있는 구체적인 구조 실험계획 수립을 하고, 실험연구 수행을 위해서 국내 최대 구조실험 장비를 구축하고 있는 공동연구 기관인 (재)포항산업과학연구소(RIST)의 연구조직과의 유기적인 협력 관계를 구축하여 실험연구를 효율적으로 진행한다. 또한, 제한적인 변수에 의한 실험 연구를 보완하기 위하여 다양한 변수의 구조해석 연구를 수행한다. 최종적으로 신뢰성 및 통계적 의미를 부여하는 작업을 통해 설계 수식의 제안을 수행한다.
- ‘설계기준(안) 작성’ 단계에서는 본 연구로부터의 결과물을 실무에서 사용하게 될 설계

엔지니어링의 실무자와 대학 및 관련 학회의 추천을 받은 연구자들의 유기적인 협조 및 자문 아래 설계기준(안) 초안 작성한다. 또한, 본 연구 결과물 관련 실무자, 연구자 및 건설교통부 등의 유관 기관 관련자 초청 공청회를 통하여 작성 초안에 대한 의견을 교류하고 의견 수렴 단계를 거쳐 고성능강 적용 범주 및 설계기준(안)을 작성한다.

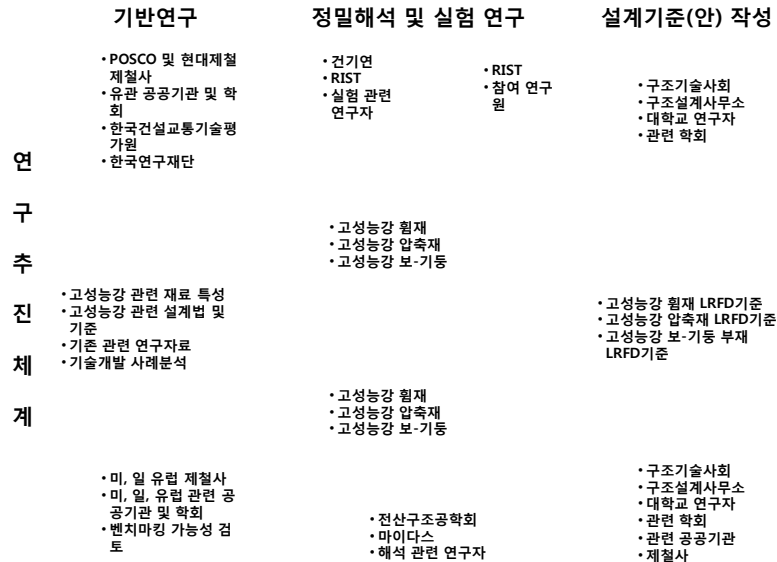


그림 2.1 연구개발 추진전략

2. 연구수행 방법론

본 연구 과제를 수행하기 위하여 고성능강 HSA800 강재가 현행 기준의 적합여부를 판단하고 재료의 화학적 및 기계적 특성이 구조성능에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 실험 및 정밀해석을 실시한다. 실험연구와 해석연구를 통하여 현행기준의 적합여부를 판단하고 강도평가를 실시한다. 실험연구를 통해 고려하지 못한 변수해석연구를 통해 실험연구의 적합성을 검토하고 최종적으로 신뢰성 및 통계적 의미를 부여하는 작업을 통해 설계식을 제안한다.

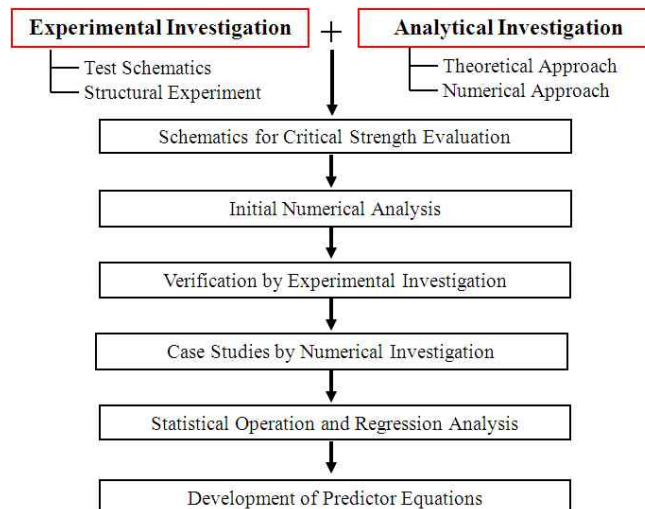


그림 2.2 연구 방법론

2.2 연구수행과정 및 내용

1. 연구수행과정

본 연구과제의 최종 목표인 “항복강도 690MPa급 고성능강 부재들의 다양한 한계상태에서의 거동 규명을 통하여 설계목적에 부합되게 제어할 수 있는 설계기준의 정립”을 위하여 (1) 항복강도 690MPa급 고성능강 적용 휨부재 휨저항강도 LRFD 설계식 개발, (2) 항복강도 690MPa급 고성능강 적용 압축재 LRFD 설계기준 정립, 및 (3) 항복강도 690MPa급 고성능강 적용 휨과 압축의 조합력을 받는 보-기둥 부재 LRFD 설계기준 정립의 세부목표를 설정하고 이 세부목표를 달성하기 위하여 주관 연구기관에서는 각 해당 연차별로 그림 2.3과 같은 성과 로드맵 작성하고 이에 따른 절차를 통하여 최종목표를 달성할 수 있도록 연구를 수행하였다.

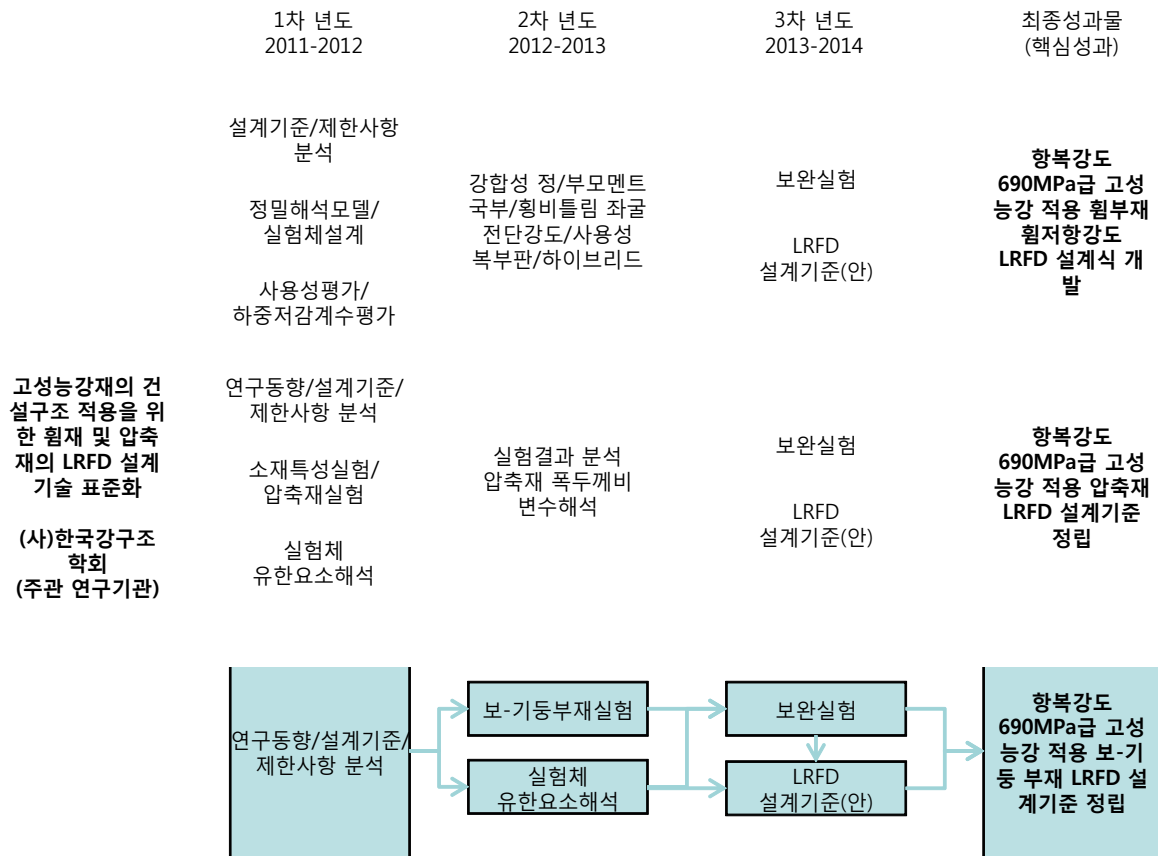


그림 2.3 연구수행 성과 로드맵

2. 연구수행내용

본 연구에서는 구조부재 가운데 가장 기본적이고 활용범위가 넓은 휨부재, 압축재 및 휨과 압축의 조합력을 받는 보-기둥 부재들을 대상으로 고성능강을 적용한 LRFD 설계기준 정립을 위한 연차별 연구수행 내용은 다음과 같다.

가. 1차년도 연구목표

- 국내·외 고성능강 관련 설계기준 및 고성능강 적용을 제한하는 조항의 개선방안에 대한 연구 수행
- 기존 고성능강 관련 연구자료 취합 및 분석 연구 수행
- 압축재 LRFD 설계기준 정립을 위한 기반연구 수행
- 고성능강 적용 강교량거더 휨강도, 전단강도 및 사용성 관련 LRFD 설계기준의 정립을 위한 기반연구를 수행

(1) 1차년도 상세연구내용

(가) 고성능강 관련 설계기준 및 고성능강 적용을 제한하는 조항의 개선방안에 대한 연구

- ① 고성능강 관련 국내·외 연구개발 환경 및 동향 조사
- ② 고성능강 관련 국내·외 설계기준 조사
- ③ 국내 설계기준의 고성능강 적용을 제한하는 조항의 개선방안 연구

(나) 기존 고성능강 관련 연구자료 취합 및 분석 연구

- ① 기존 고성능강 관련 기술환경 조사
- ② 기존 고성능강 관련 문헌정보의 정리 및 분석
- ③ 기존 고성능강 관련 실험자료의 정리 및 분석
- ④ 기존 고성능강 관련 해석자료의 정리 및 분석

(다) 압축재 LRFD 설계기준 정립을 위한 기반연구

- ① 화학성분시험
- ② 인장시험
- ③ 굽힘시험
- ④ 비교소재 SS400 및 SM570TMC포함
- ⑤ 소재특성 검토를 위한 인장시험 해석연구
- ⑥ 균등 압축재 단면 조밀성 기준 설정을 위한 실험연구
- ⑦ 균등 압축재 단면 조밀성 기준 설정을 위한 해석연구

(라) 고성능강 적용 강교량거더 휨강도, 전단강도 및 사용성 관련 LRFD 설계기준의 정립을 위한 기반연구를 수행

- ① State-of-the-art 분석
- ② AISC, AASHTO LRFD, Eurocode, JHBDC 등 주요 설계기준 분석
- ③ 문헌조사를 통한 고성능강 적용 최근 연구결과 분석
- ④ 고강도강 적용을 제한하는 설계규정 개선방안 설정
- ⑤ 플레이트거더 단면 조밀성, 압축플랜지 조밀성, 비지지길이 관련 조밀성 기준 분석
- ⑥ 합성단면 정모멘트부 해석법, 해석대상 모델 선정, 모델링 및 결과 검증에 위

한 실험체 설계

- ⑦ 합성단면 부모멘트부 해석법, 해석대상 모델 선정, 모델링 및 결과 검증을 위한 실험체 설계
- ⑧ 플랜지 국부좌굴을 고려한 정밀해석법, 해석대상 모델 선정, 모델링 및 결과 검증
- ⑨ 횡비틀림좌굴을 고려한 정밀해석, 해석대상 모델 선정, 모델링 및 결과 검증
- ⑩ 전단좌굴 및 후좌굴을 고려한 전단강도 FE 해석대상 모델 선정, 모델 검증을 위한 실험체 설계
- ⑪ 거더 처짐 및 복부판 국부변형 해석방법, 해석대상 모델 선정 및 검증
- ⑫ 복부판 휨좌굴에 의한 하중저감계수 산정을 위한 해석모델 선정 및 검증
- ⑬ 이중 강재 적용에 의한 강도감소 하이브리드 계수 산정을 위한 해석모델 선정 및 검증

나. 2차년도 연구목표

- 보-기둥 부재 설계기준 정립을 위한 연구수행
- 고성능강 적용 강교량거더 휨강도, 전단강도 및 사용성 관련 LRFD 설계기준의 정립을 위한 정밀해석 및 실험 연구 수행

(1) 2차년도 상세연구내용

(가) 보-기둥 부재 설계기준 정립을 위한 연구 수행

- ① 조합력을 받는 보-기둥 단면 조밀성 기준 설정을 위한 실험연구
- ② 조합력을 받는 보-기둥 단면 조밀성 기준 설정을 위한 해석연구
- ③ 조합력을 받는 보-기둥 부재의 횡지지 기준 설정을 위한 실험연구
- ④ 조합력을 받는 보-기둥 부재의 횡지지 기준 설정을 위한 해석연구
- ⑤ 조합력을 받는 보-기둥 부재의 설계강도 기준 설정을 위한 실험연구
- ⑥ 조합력을 받는 보-기둥 부재의 설계강도 기준 설정을 위한 해석연구
- ⑦ 비교소재 SS400 및 SM570TMC포함

(나) 고성능강 적용 강교량거더 휨강도, 전단강도 및 사용성 관련 LRFD 설계기준의 정립을 위한 정밀해석 및 실험 연구

- ① 강합성 플레이트거더 정모멘트부 해석대상 모델의 정밀해석에 의한 연성특성, 파괴거동 해석, 주요 파라미터의 영향 분석
- ② 부모멘트부 합성단면 해석대상 모델의 정밀해석에 의한 연성특성, 파괴거동, 주요 파라미터의 영향 분석, 구조시험 및 결과 분석
- ③ 초기결합 및 잔류응력을 고려한 비선형 정밀 FE해석에 의한 탄성/비탄성 압축플랜지 국부좌굴을 고려한 휨강도, 연성특성, 파괴거동, 주요 파라미터 영향 분석
- ④ 초기결합 및 잔류응력을 고려한 비선형 정밀 FE해석에 의한 탄성/비탄성 단면 횡비틀림좌굴을 고려한 휨강도, 연성특성, 파괴거동, 주요 파라미터 영향

분석

- ⑤ 재료 및 기하학적 비선형 정밀 유한요소해석에 의한 해석대상 단면의 전단강도 산정, 파괴거동, 주요 파라미터의 영향 분석, 구조시험
- ⑥ 사용성 한계상태에서의 거더 처짐 및 복부판 국부변형 해석 및 주요 파라미터의 영향 분석
- ⑦ 초기결합 및 잔류응력을 고려한 비선형 정밀 유한요소해석에 의한 탄성/비탄성 복부판 휨좌굴/후좌굴강도, 연성특성, 파괴거동, 주요 파라미터의 영향 분석
- ⑧ 이중 강재 하이브리드 단면 플레이트 거더 해석대상 단면 정밀해석, 연성특성, 파괴거동, 주요 파라미터의 영향 분석

다. 3차년도 연구목표

- 고성능강 적용을 위한 압축재 및 보-기둥 부재 강구조설계기준(안)의 보완을 위한 해석 및 실험 연구
- 고성능강 적용 강교량거더 휨강도, 전단강도 및 사용성 관련 LRFD 설계기준(안) 제시

(1) 3차년도 상세연구내용

(가) 고성능강 적용을 위한 강구조설계기준(안)의 보완을 위한 해석 및 실험 연구

- ① 압축재 실험 및 해석연구에서 고려하지 못한 변수 도출
- ② 보-기둥 부재 실험 및 해석연구에서 고려하지 못한 변수 도출
- ③ 압축재의 강구조설계기준(안) 내에서 요구하는 추가의 실험 및 해석 연구
- ④ 보-기둥 부재의 강구조설계기준(안) 내에서 요구하는 추가의 실험 및 해석 연구
- ⑤ 강구조설계기준(안) 수정 작성

(나) 고성능강의 건설분야 적용을 위한 범주 및 설계기준(안) 제시

- ① 강교량거더 휨강도 및 전단강도 LRFD 설계기준(안) 제시
- ② 고성능강의 건축구조 적용을 위한 강구조설계기준(안) 제시

(다) 고성능강 적용 강교량거더 휨강도, 전단강도 및 사용성 관련 LRFD 설계기준(안) 제시

- ① 플레이트거더 단면 조밀성, 압축플랜지 조밀성, 비지지길이 관련 조밀성에 따른 휨강도 분석 결과를 종합한 조밀, 비조밀, 세장한계치 기준 제안
- ② 강합성 플레이트거더 정/부모멘트부 설계강도 산정식 제안
- ③ 전단면항복, 국부항복, 탄성/비탄성 압축플랜지 국부좌굴, 탄성/비탄성 단면 횡비틀림좌굴을 고려한 휨강도 산정식 제안
- ④ 전단좌굴 및 후좌굴 인장역작용을 고려한 고성능강 적용 강거더 전단강도 설계식 제안
- ⑤ 고성능강 적용 강거더 사용성한계상태에서의 최대처짐 및 복부판 국부변형 한

계 규정 제안

- ⑥ 비조밀/세장 복부판을 갖는 플레이트 거더의 복부판 휨좌굴에 의한 복부판 세장비에 따른 플랜지 응력감소계수 제안
- ⑦ 이중 강재 하이브리드 단면 정모멘트부 및 부모멘트부 설계식 제안
- ⑧ 유관기관, 관련업계, 해외전문가 등의 자문의견을 종합한 최종 설계식 제안

3. 상세 연구수행내용

본 연구에서 수행한 각 주제별 연구 방법에 대한 상세한 내용은 다음과 같다.

가. 소재시험 및 용접성 성능연구

최근 장대교량 및 초고층 건축물에 다용되고 있는 SM570TMC 강종을 비교대상으로 하여 본 연구의 주요대상 강종인 800M급 고강도강(고성능강)의 소재특성 및 용접성을 파악하기 위해 아래와 같은 성능시험을 수행하였다.

(1) 소재특성 시험

(가) 시험편 구분

강재의 기계적 특성을 파악하기 위해 판두께 30mm, 50mm, 60mm, 80mm의 강판을 사용하여, 화학성분시험, 마크로시험, 굽힘시험, 인장시험 및 충격시험을 계획하였다. 인장시험, 충격시험에서는 강판의 압연방향에 따른 기계적 성질을 알아보기 위하여 압연방향, 압연직각방향으로 구분하여 계획하였다.

(나) 화학성분 분석시험

강재의 기계적 성질, 소재특성 및 용접성을 파악하기 위하여 화학성분 분석시험을 수행하였다. 강재의 화학성분 분석시험은 KS D 3515의 규격에 따라 관리하여 KS D 0001 강재의 검사통칙에 따라 그림 2.4와 같이 시험하였다. 시험편은 800MPa 강재의 시험공시체로부터 절단하여 제작하였다.

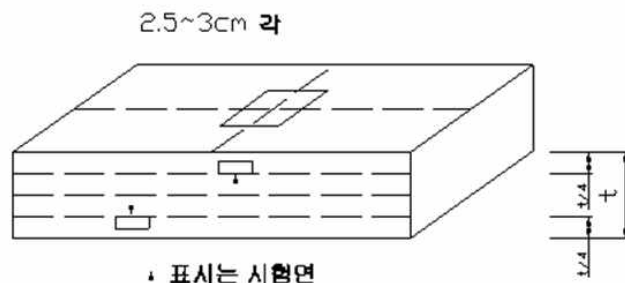


그림 2.4 화학성분조성 시험 재료 채취방법

(다) 매크로시험

강재의 단면의 조직을 육안으로 관찰하여 불순물의 개입여부, 조직균질의 정도 및 라미네이션 발생여부를 확인하는 시험으로, KS D 0210에 따라 그림 2.5과 같이 채취

후 시험하였다.

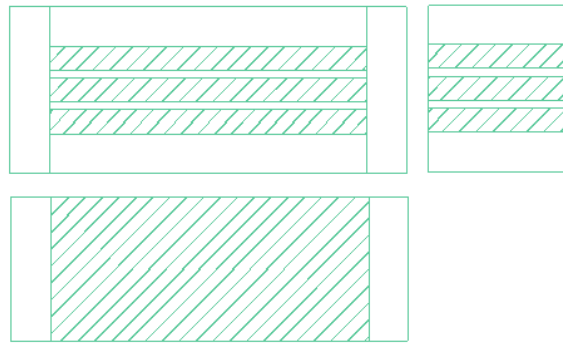


그림 2.5 매크로조식 시험 재료 채취방법

(라) 굽힘시험

강재의 연성을 육안으로 확인하기 위한 굽힘시험은 KS D 0803에 규정되어진 가호시험편을 KS B 0804 금속재료 굽힘시험방법에 따라 그림 2.6와 같이 시험편을 규정의 안쪽 반지름으로 굽힌 각도가 규정의 수치로 될 때까지 구부려, 굽힘 시 표면의 터짐이나 기타 결점의 유무를 확인하였다.

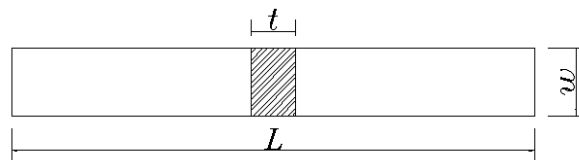


그림 2.6 굽힘시험 시험편

(마) 인장시험

강재의 기계적 성질 및 소재특성을 파악하기 위해 KS B 0802 금속재료 인장시험 방법에 따라 그림 2.7와 같이 시료채취 후 시험을 실시하였다. 인장시험은 강재의 기계적 특성을 파악하기 위한 일반적인 시험방법이며 시험을 통해 항복강도, 인장강도, 항복비 및 연신률 등을 알 수 있었다. 인장시험편 제작방법은 KS B 0801에 의해 4호 시험편을 제작하였다.

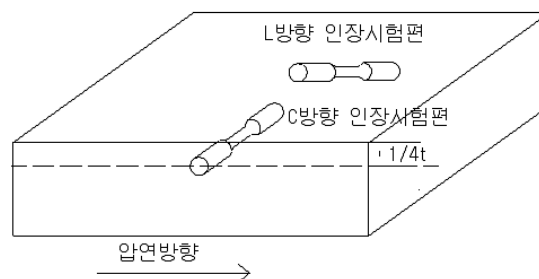


그림 2.7 인장시험 시료 채취방법

(바) 충격시험

강재의 기계적 성질 및 소재특성을 파악하기 위하여 샤르피 충격시험을 실시하였다. 강재의 인성 등을 확인할 수 있는 충격시험은 KS B 0809 에 규정된 금속재료 충격시험편을 그림 2.8과 같이 압연방향(L) 및 압연직각방향(C)으로부터 4호 시험편을 제작하여 강재의 각 방향별 충격특성을 분석하였다.

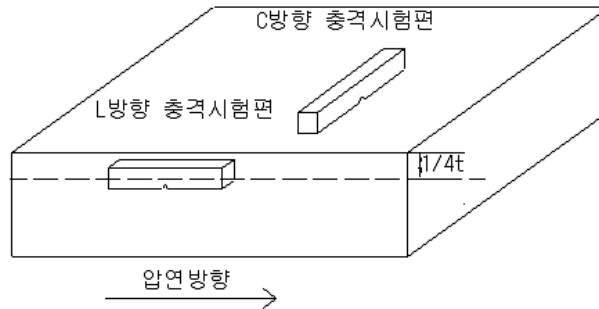


그림 2.8 샤르피 충격시험 시료채취방법

(사) 마이크로시험 계획

강판재의 미세조직을 파악하기 위하여 KS D 0204 강의 비금속 개재물의 현미경 시험방법에 따라 시험하였다. 시험편은 두께별로 나누어 그림 2.9과 같이 시험편 1/4, 1/2, 3/4위치에서 각각 1개씩 채취하여 시험을 실시하였다.

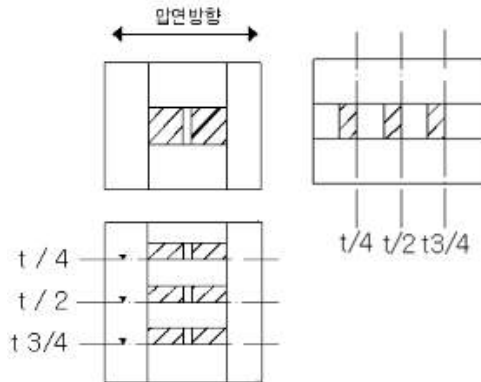


그림 2.9 마이크로조직시험 시료채취방법

(2) 용접부 성능시험

(가) 시험편 구분

800MPa($30 \leq t \leq 50$) 강재의 용접부특성을 파악하기 위하여 용접재 화학분석시험, 용접부 인장시험, 용접부 샤르피 충격시험, 용접부 경도시험, 용접부 매크로 조직시험, 용접부 마이크로 조직시험, 용접부 굽힘시험을 수행하였다.

(나) 용접부 +자 인장시험

기동보 접합부 및 수평 다이어프램 접합부의 인장파단 성향을 파악하기 위한 +자

인장시험으로 그림 2.10과 같이 시험편을 제작하였다.

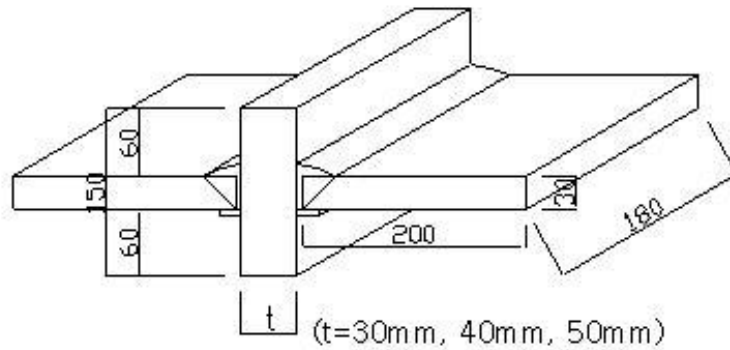


그림 2.10 용접부 +자 인장시험편 채취 방법

(다) 용접부 -자 인장시험

용접부 평판 인장시험은 그림 2.11와 같이 시험편을 제작하였으며, 용접부의 파괴양상을 파악하기 위하여 실시하였다.

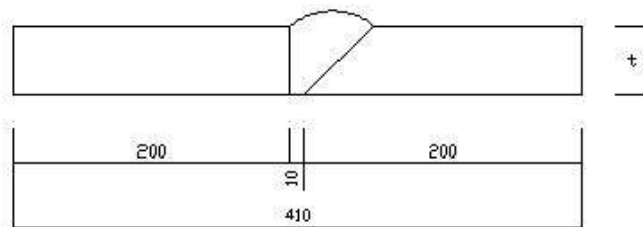


그림 2.11 용접부 -자 인장시험편 채취방법

(라) 용접부 마크로시험 계획

시험의 전반에 걸친 용접부의 결정립 상태, 가공재에 있어서의 조대결정 등 용접부의 육안조사를 위하여 KS D 0210 강의 마크로조직 시험방법에 따라 시험하였으며, 시험편채취는 그림 2.12과 같이 절단 제작하였다.

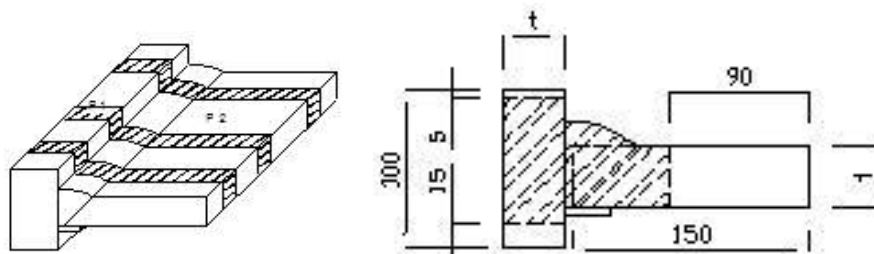


그림 2.12 용접부 마크로시험편 채취 방법

나. 압축재 LRFD 설계기준 정립을 위한 실험연구

압축재를 구성하는 판 요소의 판폭두께비는 압축재의 국부좌굴과 관련한 거동에 큰 영향을 준다. 강구조 설계기준에서는 부재의 국부좌굴 등을 방지하기 위하여 판폭

두께비에 대한 제한치를 설정하여 한계 판폭두께비 이하로 부재를 설계하도록 하고 있다. 이러한 한계판폭두께비는 부재의 형상뿐만 아니라 소재의 항복비와 응력-변형도 곡선의 형상에도 영향을 받는 것으로 알려져 있다.

기존 국내 강구조설계기준은 강구조에 주로 적용되던 강재는 주로 400~500MPa급이고, 소재의 항복비가 약 0.7이하의 강재를 대상으로 제정되었다. 현재까지는 국내에서 사용되던 건축구조용 강재는 주로 400MPa~600MPa급이며, 강도 500~600MPa급의 고강도강의 경우에도 항복비를 0.85이하로 제어하고 용접성능을 향상시키기 위하여 주로 TMCP강을 사용함으로써 설계기준에서 대상으로 하는 강재의 성능을 크게 벗어나지는 않았다. 그러나 800MPa급 고성능강의 경우 항복비가 0.9이상으로 예상되고 응력-변형도곡선이 기존의 강재와 다른 형태로 나타날 가능성이 있기 때문에 기존의 설계기준에서 제시되어 있는 한계판폭두께비가 보다 작아질 가능성이 있다.

따라서 본 연구에서는 고풍복비를 가지는 고성능강의 소재특성이 강부재의 거동에 미치는 영향을 파악하고 설계 한계판폭두께비를 고찰하기 위해 고성능강의 압축실험을 계획하였다.

800MPa급 고성능 강재를 사용한 압축재의 성능을 평가하기 위하여 다음과 같은 설계변수를 사용하여 실험연구를 진행하였다.

- ① 단면의 형상 : 용접 H형강 및 용접 각형강관
- ② 판폭두께비 : 플랜지 및 웨브
- ③ 강종 : SM570TMC 및 항복강도 690MPa급 고성능강

실험의 가력방법은 그림 2.13과 같이 일방향 단조가력으로 하였으며, 실험으로부터 하중-변형관계곡선을 얻기 위하여 엔드플레이트에 2개의 변위계를 설치하였고, 기둥의 중앙부에 스트레인게이지를 부착하여 변형도를 측정하였다.

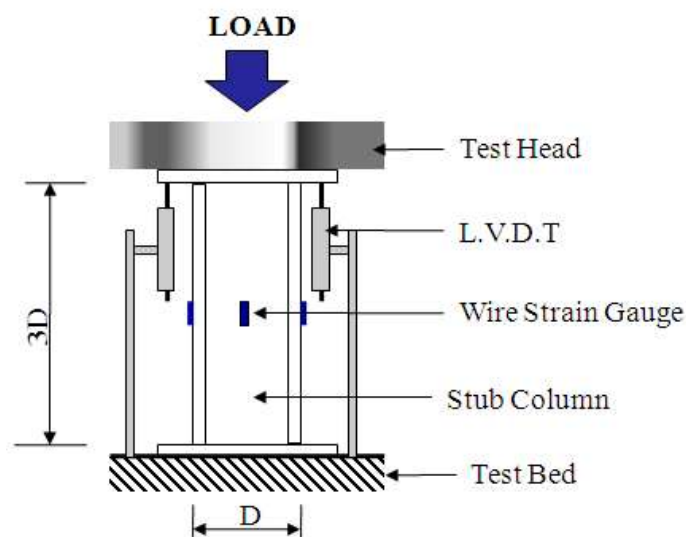


그림 2.13 고성능 강재를 사용한 압축재의 실험

다. 보-기둥 부재 LRFD 설계기준 정립을 위한 실험연구

강구조 설계 시 사용하는 현행 설계기준은 인장강도 600MPa 이하의 일반구조용 강재의 실험 및 해석연구의 결과를 기초로 하고 있다. 하지만, 일반적으로 강재의 강도가 높아지면 일반구조용 강재에 비하여 항복비가 상승하고 연신을 및 인성이 저해된다.

따라서 고강도(고성능) 강재로 제작된 부재의 거동은 일반구조용 강재로 제작된 부재의 거동과 상당한 차이가 있을 것으로 예측된다. 따라서 본 연구에서 사용하고자 하는 항복강도 690MPa급의 고성능 강재를 사용한 압축재가 기둥부재로 사용되기 위해서는 단순 중심압축력을 받는 부재의 거동뿐만 아니라 압축력과 함께 휨모멘트를 받는 보-기둥(beam-column) 부재의 거동에 관한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 고허복비를 갖는 고성능강재를 사용한 보-기둥 부재의 축력에 따른 휨모멘트와 곡률간의 역학적 특성을 고찰하기 위하여 다음과 같은 설계변수를 사용하여 실험연구를 진행하였다.

- ① 단면의 형상 : 용접 H형강 및 용접 각형강관
- ② 판폭두께비
- ③ 부재의 비지지길이(세장비)
- ④ 축력비
- ⑤ 강종 : SM570TMC 및 항복강도 690MPa급 고성능강

실험의 가력방법은 그림 2.14와 같이 압축력과 휨력의 이방향 단조가력을 적용하였으며, 실험으로부터 하중-변형관계곡선 및 변형도를 측정하기 위하여 변위계와 스트레인게이지를 설치하였다.

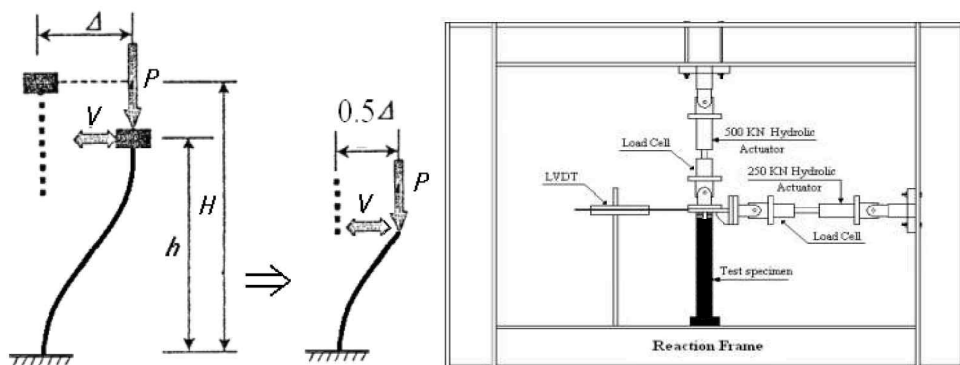


그림 2.14 고성능 강재를 사용한 보-기둥 부재의 실험

라. 800MPa급 고성능강재의 인장강도시험에 대한 유한요소해석

본 연구에서는 압축재 및 보-기둥 부재의 실험결과에 대한 검증과 실험과 해석결과가

동시에 설계기준을 만족하도록 하는 부재의 재료특성을 역으로 추적하기 위하여 범용 프로그램인 ANSYS와 ABAQUS를 이용하여 유한요소해석을 수행하였다. 신뢰할 수 있는 유한요소해석결과를 얻기 위해서는 800MPa 및 570TMC 강재의 정확한 재료특성의 입력이 필수적으로 선행되어야 한다.

실험에 이용된 800MPa 및 570TMC 강재 인장시험체에 대한 3차원 유한요소모델(그림 2.15 참조)을 제시하고, 이에 대한 비선형해석을 우선적으로 수행함으로써 실제 인장시험체의 응력-변형을 곡선과의 비교연구가 진행되었다.

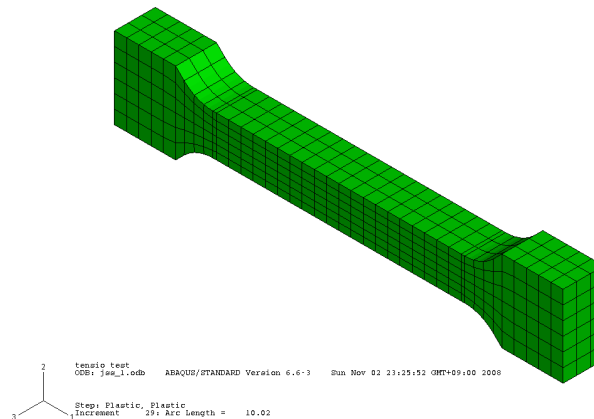


그림 2.15 인장시험체의 3차원 유한요소모델

마. 800MPa급 강재를 사용한 압축재 및 보-기둥 부재에 대한 유한요소해석

일반적으로 구조실험을 통하여 얻어낸 결과의 정확성을 검증하고, 또한 실험비용 측면으로 인해 제한적일 수밖에 없는 부재의 재료 물리적 및 기하학적 파라미터를 더욱 폭 넓게 확장하기 위해서 유한요소해석의 병행이 필수적이다. 압축재 및 보-기둥 부재의 주어진 단면형상, 판폭두께비, 길이, 항복비 및 축력비 등에 대한 좌굴실험결과와 정확성 검증을 위하여 ANSYS와 ABAQUS를 이용한 비선형 좌굴해석을 수행하였다. 또한, 800MPa급 고강도 강재에 대한 새로운 설계기준안과 570TMC와 같은 기존 강재의 압축에 관련한 기존 설계기준식(휨좌굴에 대한 압축강도식, 판폭두께비 제한값 등에 관한)들의 검증을 위한 데이터베이스를 구축하기 위하여 다양한 파라미터를 적용한 유한요소해석이 수행되었다.

바. 고성능강 적용 합성단면 극한 휨강도

AASHTO LRFD(2007)에는 항복강도가 485MPa를 초과하는 강거더의 휨강도 산정시 단면치수에 상관없이 휨설계 시에 비조밀단면으로 분류하고 있다. AASHTO LRFD(2007)의 근간을 이루었던 기존 연구는 항복강도가 485MPa 이하인 강재를 대상으로 이루어졌으며 항복강도가 485MPa를 초과하는 고강도강으로 설계된 합성거더에 대한 연구는 미비한 실정이다.

문헌에 발표된 고강도강 적용 강합성거더에 대한 단면 조밀성이나 휨거동에 관한 연구는 부모멘트부나 사용성한계상태에서의 최대 처짐조건 분석에 편중되어 있다 (Barker 등, 2000; Earls 등, 2002; Sause 등, 2001; Green 등, 2002; Roeder 등, 2004). 국내에서는 HSB 고강도강에 대한 연구가 최근 활발히 수행되고 있으며 HSB600 또는 HSB800 강재를 적용한 휨부재의 구조적 거동에 관한 연구결과가 김용태 등(2008), 윤석구 등(2007), 주현성 등(2008, 2009), 김종민 등(2009)에 의해 발표되었다. 그러나 고강도강을 사용하여 하중저항계수설계법으로 휨부재 설계 시에 가장 기본적이고 중요한 정모멘트부 휨저항강도 설계식을 규정하기 위해서는 합성 및 비합성 강거더 정모멘트부의 연성특성, 휨저항강도 등과 같은 휨거동에 대한 보다 엄밀한 거동에 대한 파악이 필수적이다.

정모멘트를 받는 강합성거더는 극한휨저항강도에서 콘크리트 바닥판이 압축파괴에 도달할 때 강거더가 충분한 항복 또는 변형경화에 도달하여 연성과파괴가 일어나거나, 강거더가 소성변형을 일으키기 전의 탄성영역에 머물 때 콘크리트 바닥판이 극한 압축변형율에 도달하는 취성과파괴가 발생할 수 있다.

강합성거더 정모멘트부는 강거더와 콘크리트 바닥판이 합성되어 압축플랜지의 국부좌굴이 방지되어 있으며, 합성단면 중립축은 강거더 중립축에 비해 훨씬 위쪽에 위치하여 압축을 받는 복부판의 높이가 감소되기 때문에 복부판 휨좌굴이 발생할 가능성은 낮다고 볼 수 있다. AASHTO LRFD에서는 정모멘트를 받는 강합성단면 휨부재가 파괴에 도달할 때 까지 충분한 연성을 확보를 위하여 설계단면에 대한 연성요구조건을 규정하고 있다.

본 연구에서는 HSB600 및 HSB800 고성능 강재를 적용한 정모멘트부 강합성거더의 휨거동을 비선형 모멘트-곡률 해석법(moment curvature analysis) 및 변형률일치법 등을 이용하여 분석하였다. 복합단면 합성거더의 휨저항강도 산정에 적용한 모멘트-곡률 해석법(MCA)은 강거더와 콘크리트 바닥판 단면을 수평방향으로 여러 층으로 분할하여 주어진 곡률에 대응하는 변형율과 응력을 구하고, 강거더 및 콘크리트 슬래브의 작용력에 의한 힘의 평형을 고려하여 중립축의 위치와 단면 휨모멘트를 구하는 방법이다. 이러한 해석법은 AASHTO LRFD 강합성거더 정모멘트부 휨강도 설계식의 기초가 된 Wittry(1993)의 연구, HSB800강재를 적용한 균질단면 강합성거더 정모멘트부 휨강도 설계식을 도출한 조은영 등(2010)의 연구에 적용된 바 있다.

유한요소 프로그램을 이용하여 극한강도를 산정하기 위해 정모멘트를 받는 합성단면의 플랜지, 복부판 및 콘크리트 바닥판은 판 요소로 모델링되고 재료 및 기하학적 비선형성 등 고급의 기능들이 최대한 활용될 수 있다. 이 때 본 연구의 대상인 고성능 강재의 재료물성치를 최대한 실제와 일치하도록 비선형성을 고려하여 입력하는 것이 해석연구에서 정확성을 높이는 방법이다. HSB600 및 HSB800 강재는 그림 2.16에 나타난 이상화된 응력-변형률 곡선이 적용될 수 있다.

그림 2.16에서 Test-t20과 Test-t30은 각각 두께 20mm와 30mm인 HSB600 재료

시편의 인장실험 결과이며, 그림 2.17의 Test-t50, Test-t60 및 Test-t80은 각각 두께 50mm, 60mm 및 80mm인 HSB600 재료시편의 인장실험결과이다. 그림 2.16과 17의 이상화된 응력-변형률 선도는 인장실험결과를 근사화한 것으로 실험결과 보다 다소 안전측이며 단순화된 직선식이라 할 수 있다.

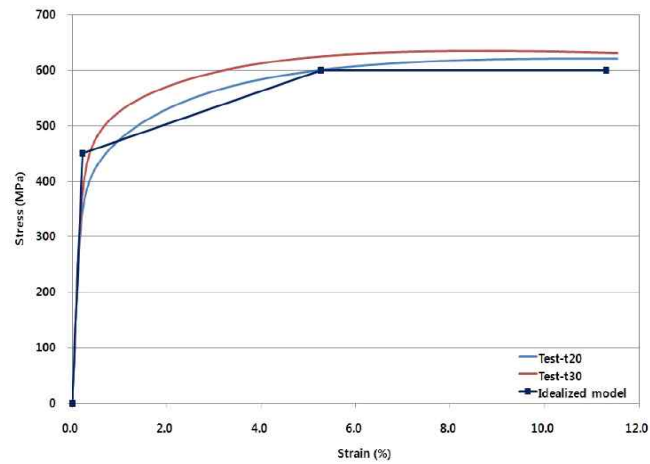


그림 2.16 HSB600 강재의 응력-변형률 곡선

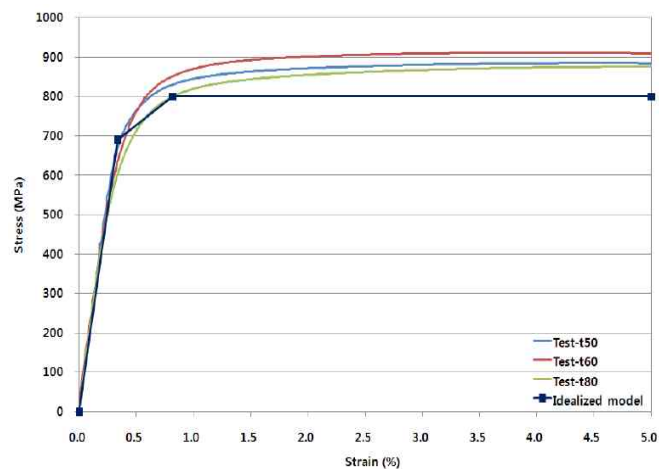


그림 2.17 HSB800 강재의 응력-변형률 곡선

콘크리트 바닥판의 응력-변형률 곡선으로는 CEB-FIP(1990)모델이 널리 이용되고 있는데, 그림 2.18에는 콘크리트 압축강도 30MPa, 45MPa, 및 60MPa인 경우의 응력-변형률 곡선을 나타내었다.

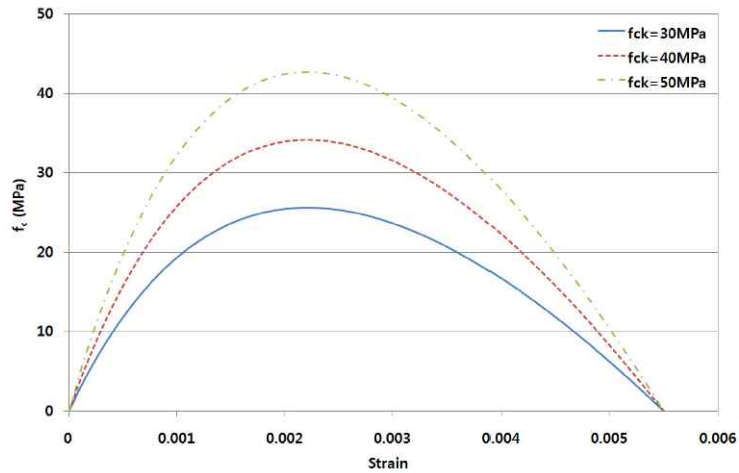


그림 2.18 콘크리트 압축영역 응력-변형률 곡선

AASHTO LRFD에서는 강도한계상태에서 정모멘트를 받는 강합성단면 휨부재는 콘크리트 단면이 먼저 파괴되지 않고 강재 거더의 항복으로 시작되는 연성파괴를 유도하여 충분한 여유성을 갖도록 규정하고 있으며, 연성확보를 위하여 설계단면이 다음 연성요구조건을 만족하도록 규정하고 있다.

$$D_p/D' \leq 5 \quad (2.1)$$

여기서, D_p 는 소성모멘트 상태에서 바닥판 상부에서 중립축까지 거리이고 D' 은 아래 식으로 정의된다.

$$D' = \beta \left(\frac{d + t_s + t_h}{7.5} \right) \quad (2.2)$$

여기서, 식에서 d 는 복부판 높이, t_s 는 콘크리트 바닥판 두께, t_h 는 콘크리트 현치 높이, F_y 는 강재의 항복강도를 나타내며, β 는 특정 강재의 응력-변형률 관계곡선 특성이 반영된 합성단면의 연성과 관계된 계수로 강종에 따라 0.7~0.9 범위의 값을 갖고 연성이 우수한 강재일수록 β 는 큰 값을 갖는다. 위의 연성요구조건은 다양한 강종 및 단면형상을 갖는 합성단면에 대한 수많은 구조시험 및 수치 시뮬레이션 결과에 근거하여 제안되었다.

강합성 단면의 강도결정을 위한 과정으로, 연성특성이 다른 대표적인 강합성거더 기본단면을 선정하여 해석적인 방법에 의해 극한휨저항강도를 구하고 비선형 유한요소해석 프로그램을 이용하여 비교연구를 수행한다. 해석적 연구 수치해석적 연구를 기반으로 실험에 의한 검증을 수행하였다.

사. 정·부모멘트 구간에 있는 강합성 박스단면의 극한 휨강도

AASHTO LRFD (2004; 2007)에서는 박스단면에 대한 휨강도를 정모멘트 및 부모

멘트 구간으로 구분하여 제안하고 있다. 미국에서 주로 채택되는 박스거더는 U타입 강박스 단면(tub section)을 가지는 형식인데, 두 개의 복부판과 하부플랜지를 포함한 3개면은 강으로 구성되고 상부 1개면은 콘크리트 바닥판으로 구성되어 최종 강합성 단면으로 폐합박스단면을 구성한다.

정모멘트 구간에 놓인 박스거더는 합성작용에 의해 극한강도가 결정되는데, 이때 강박스의 대부분 단면은 인장상태에 놓이게 되어 강판의 좌굴강도가 박스거더의 휨강도의 결정에 영향을 거의 주지 못한다. 이러한 정모멘트 구간에 있는 폐합 박스거더는 콘크리트와 강재의 항복응력에 의해 주로 지배된다. 하나의 박스단면에서 두 개로 구성되는 상부플랜지는 그 폭이 하나로 구성되는 하부플랜지보다 작고 또한 콘크리트 바닥판과 압축력을 분산 저항하므로 정모멘트구간 박스단면의 극한강도는 합성 단면을 고려하여 결정되어야 한다.

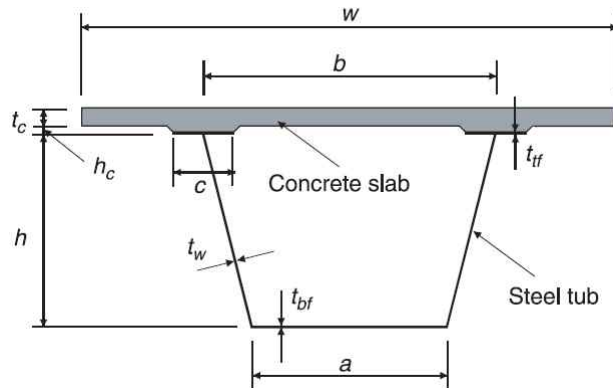


그림 2.19 AASHTO에서 고려되는 강재 및 콘크리트로 구성된 폐합박스거더 단면

부모멘트 구간에 있는 박스거더의 경우, 콘크리트 바닥판은 인장을 받고 있는 상태이므로 극한강도 계산시 콘크리트의 인장강도는 거의 무시된다. 이때는 강재로 구성된 강박스 단면에 의해 그 극한강도가 결정된다. 부모멘트 구간에서 박스거더의 극한 휨강도는 주로 U타입 박스의 하부플랜지가 압축을 받게 되는 상황에서 결정되므로 최종 휨강도는 보강된 판(stiffened plate) 시스템의 압축강도에 의해 지배된다.

AASHTO LRFD에서 박스단면의 극한강도는 앞서 언급하였듯이 정/부모멘트를 구분하여 각각 수식을 제안하고 있다. 정모멘트 구간에 있는 보강형의 공칭휨강도를 결정하기 위해서는 합성단면에 대한 조밀단면 및 비조밀단면에 대한 검토를 먼저 수행해야 하는데, 다음 식으로 검토하였다.

- 조밀단면 및 비조밀단면 검토

$$\text{조밀단면: } \frac{2D_{cp}}{t_w} \leq 3.76 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} \quad (2.3)$$

$$\text{비조밀 단면: } \frac{2D_{cp}}{t_w} > 3.76 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} \quad (2.4)$$

여기서, D_{cp} : 압축상태 복부판 높이

t_w : 복부판 두께

E : 탄성계수

F_{yc} : 압축플랜지의 항복응력

만약 검토대상 단면이 조밀단면으로 판별되었을 경우, 다음 식으로 공칭휨강도가 결정된다.

$$M_n = \begin{cases} M_n = M_p, & D_p \leq 0.1D_t \\ M_n = M_p \left(1.07 - 0.7 \frac{D_{cp}}{D_t} \right), & D_p > 0.1D_t \end{cases} < 1.3 R_h M_y \quad (2.5)$$

여기서, M_p : 소성모멘트

M_y : 탄성모멘트

D_p : 합성단면 소성모멘트 중립축에서 바닥판 콘크리트 상단까지 거리

D_t : 합성단면의 총 높이

R_h : 하이브리드 계수 (hybrid factor)

소성모멘트 및 탄성모멘트를 계산하는 과정은 AASHTO LRFD부록편에 수록되어 있고, 단면의 구성에서 이중의 강재가 채택되는 경우에 적용되는 하이브리드 계수 R_h 는 다음과 같이 정의된다.

$$R_h = \frac{12 + \beta(3\rho - \rho^3)}{12 + 2\beta} \quad (2.6)$$

여기서, $\beta = \frac{2D_n t_w}{A_{fn}}$ 으로 정의되고 이고 나머지 심볼은 다음과 같이 정의된다.

ρ : F_{yw}/f_n 와 1.0 중 작은 값

A_{fn} : 플랜지 단면적의 합

D_n : 하이브리드단면의 탄성중립축에서 양쪽 플랜지 내측면까지의 거리 중 큰 값

f_n : D_n 이 계산된 쪽의 플랜지 덮개판 혹은 종방향 철근 중 처음으로 항복이

발생하는 단면에 대하여 A_m 을 계산하는 항복강도들 중 가장 큰 값

만약 정모멘트 구간에 있는 검토단면이 비조밀단면으로 판별되었을 경우에는 휨강도는 압축 및 인장 플랜지에 작용하는 “응력” 개념으로 그 강도가 제안된다. U타입 단면(tub section)와 폐합 강박스 단면(closed box section)에 대하여 극한 응력은 다음과 같이 결정된다.

- 극한 압축 응력

$$\text{U타입 단면: } F_{nt} = R_h F_{yc} \Delta \quad (2.7)$$

$$\text{폐합박스 단면: } F_{nc} = R_b R_h F_{yc} \Delta \quad (2.8)$$

- 극한 인장 응력

$$\text{U타입 단면 및 폐합박스 단면: } F_{nt} = R_h F_{yt} \Delta \quad (2.9)$$

여기서,

R_b : 복부판 강도감소계수 (Web-load-shedding factor)

R_h : 하이브리드 계수 (hybrid factor)

F_{yc} : 압축플랜지의 항복응력

F_{yt} : 인장플랜지의 항복응력

Δ : 비틀림 전단에 의한 강도감소계수 (reduction factor by Torsional shear stress)

부모멘트를 받는 박스거더의 극한휨강도는 콘크리트바닥판의 인장강도는 무시되고 압축플랜지의 압축저항강도에 의해 결정된다. AASHTO LRFD에서는 압축력을 받는 플랜지가 보강되지 않은 경우 압축플랜지의 폭-두께비를 의미하는 세장비 λ_f 에 따라 세가지 세장비 영역에 걸쳐 각각 다음 산정식으로 극한압축응력 F_{nc} 을 계산하도록 제안하고 있다.

$$\begin{aligned} - \quad \lambda_f \leq R_1 \sqrt{\frac{kE}{F_{yc}}} \quad \text{인 경우:} \\ F_{nc} = R_b R_h F_{yc} \Delta \end{aligned} \quad (2.10)$$

$$- \quad R_1 \sqrt{\frac{kE}{F_{yc}}} < \lambda_f \leq R_2 \sqrt{\frac{kE}{F_{yc}}} \quad \text{인 경우:}$$

$$F_{nc} = R_b R_h F_{yc} \left[\Delta - \left(\Delta - \frac{F_{yr}}{R_h F_{yc}} \right) \left\{ 1 - \sin \left[\frac{\pi}{2} \left(\frac{R_2 - \frac{w}{t_{fc}} \sqrt{\frac{F_{yc}}{kE}}}{R_2 - R_1} \right) \right] \right\} \right] \quad (2.11)$$

- $R_2 \sqrt{\frac{kE}{F_{yc}}} < \lambda_f$ 인 경우:

$$F_{nc} = \frac{0.9ER_b k}{\left(\frac{w}{t_{fc}}\right)^2} - \frac{R_b f_v^2 k}{0.9Ek_s^2} \left(\frac{w}{t_{fc}}\right)^2 \quad (2.12)$$

여기서 사용된 주요 parameter로 수직응력에 판좌굴계수(plate-buckling coefficient for normal stress) k 및 전단응력에 대한 판좌굴계수(plate-buckling coefficient for shear stress)로 도입된 k_s 를 주의깊게 관찰할 필요가 있다. 이 두 계수는 보강되지 않은 플랜지판(unstiffened flange plate)과 보강된 플랜지판(stiffened flange plate)구별하는 주요한 parameter로써 보강되지 않은 플랜지의 경우 k 및 k_s 는 각각 4.0과 5.34를 사용하지만 보강된 플랜지판의 경우 보강재의 개수 n 에 따라 다음과 같이 규정된다.

- 수직응력에 판좌굴계수(plate-buckling coefficient for normal stress) k :

$$n=1 \text{ 일 때} \quad k = \left(\frac{8I_s}{wt_{fc}^3} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.13)$$

$$n=2 \text{ 일 때} \quad k = \left(\frac{0.894I_s}{wt_{fc}^3} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.14)$$

- 전단응력에 대한 판좌굴계수(plate-buckling coefficient for shear stress)로 도입된 k_s :

$$k_s = \frac{5.34 + 2.84 \left(\frac{I_s}{wt_{fc}^3} \right)^{\frac{1}{3}}}{(n+1)^2} \quad (2.15)$$

AASHTO LRFD 규정 및 해설에 따르면 보강재는 한 개까지를 추천하고 있으며 3개 이상 적용된 압축 플랜지는 적용 자체가 불가하다. 이는 보강판의 해석 및 경제성에 근거하고 있는데, 보강되지 않은 판의 경계조건을 단순지지(simply supported

boundary condition)로 가정했을 때 이론적으로 k 및 k_s 는 각각 4.0과 5.34이 된다.

보강재가 위치하는 판에서 종방향으로 단순지지의 기능을 수행하기 위해서는 그 보강재의 단면적 및 단면이차모멘트의 값 등의 강성들이 상당한 수준에 이르러야 한다. 그렇지 않다면 보강재 사이의 판좌굴에 적용되는 k 및 k_s 값은 상당한 수준으로 감소하게 되어 기능성을 확보하기 못하게 된다. 또한 보강재 자체의 강성을 무한정 증가시키기에도 경제성 측면에서 불리하다. 이러한 기능성 및 경제성을 고려하여 현재의 AASHTO LRFD에서는 보강재 하나를 강력히 추천하고 있다. 최근 보강의 최소 강성에 대한 논의는 여러 연구논문에서 확인될 수 있는데, 최신의 연구결과를 아직 채택되고 있지 못한 실정이다.

아. 횡비틀림좌굴(lateral-torsional buckling) 거동을 고려한 강도산정

힘을 받는 I-거더는 크로스프레임이나 다이아프램 또는 가로보에 의해 적절하게 횡방향으로 지지되어 있지 않으면 횡비틀림변형좌굴(lateral-torsional buckling)이 발생하여 휨저항강도가 현저히 감소할 수 있다. 횡방향 지지부재의 간격인 비지지길이(unbraced length)가 지나치게 길면 탄성 횡비틀림변형좌굴이 휨강도를 지배하는 반면에 매우 짧으면 횡비틀림변형이 거의 일어나지 않고 단면의 전부가 항복에 도달하여 소성모멘트(M_p)까지의 휨강도를 가질 수 있으며 비지지길이가 중간 정도인 경우에는 단면의 일부가 항복하는 비탄성 횡비틀림좌굴이 휨강도를 지배한다.

따라서, 강거더 설계에 있어서 비지지길이에 따른 탄성 또는 비탄성 횡비틀림좌굴 안정성에 대한 검토는 압축플랜지 국부좌굴(flange local buckling)과 복부판 휨좌굴(web bend buckling) 안정성에 대한 검토와 함께 매우 중요한 과정이다.

AASHTO LRFD(2007) 설계기준에서는 부모멘트부 또는 비합성단면의 휨강도는 원칙적으로 탄성응력 범위로 설계하도록 규정하고 있으나 복부판의 탄성 휨좌굴이 발생하지 않는 조밀 또는 비조밀 복부판을 갖는 I-거더는 복부판 세장비에 따라 항복모멘트(M_y) 이상의 휨저항강도를 가질 수 있도록 부록에 별도의 규정을 두고 있다. 이 규정으로 조밀 또는 비조밀 복부판을 갖는 I-거더의 휨저항강도를 산정할 때 복부판 소성계수(web plastification factor) 개념을 적용하여 M_y 를 초과하는 최대 M_p 까지 휨저항강도를 갖도록 허용하고 있다. 그러나 부록의 추가 규정은 플랜지와 복부판의 항복강도가 485MPa 이내로 제한하고 있는데, 이것은 고강도강 I-거더의 비탄성 횡비틀림좌굴 거동에 대한 연구결과가 충분치 않기 때문인 것으로 해설에 기술하고 있다.

Eurocode 3(2003)에서는 횡비틀림좌굴을 고려한 휨부재의 휨강도 계산 시 단면등급에 따라 Class 1 및 Class 2는 소성모멘트 이하로, Class 3 및 Class 4는 항복모멘트 이하로 규정하고 있다. 아울러, 탄성좌굴모멘트(M_{cr}), 휨부재 제작방법에 따른 초기변형, 거더높이 대 플랜지 폭 비에 따른 감소계수(χ)를 추가로 고려하여 휨부재의 횡비틀림좌굴에 대한 휨저항강도를 산정하도록 규정하고 있다.

균일모멘트를 받는 강거더의 비탄성 횡비틀림좌굴 거동에 대한 실험적 연구는 Lee와 Galambos(1962), Adams 등(1965), Lay와 Galambos(1965), McDermott(1969) 등에 의해 수행되었다. Lee 등(1962)은 비지지길이(Lb)와 약축에 대한 회전반경(ry)의 비로 정의되는 비지지길이 세장비(Lb/ry)가 35~50인 4개의 일반강재 보시편 휨실험을 통하여 Lb/ry가 45 미만인 보는 파괴 시 탄성 횡비틀림좌굴이 발생하지 않고 보 단면 전부 또는 일부가 항복하는 비탄성 좌굴에 기인하는 결과를 얻었다.

Adams 등(1965)은 항복강도가 345MPa이고 Lb/ry가 24~45인 7개의 보 시편에 대한 휨실험을 수행하고 Lb/ry가 40 이하인 시험단면에서는 보 단면 일부가 항복되는 비탄성영역의 파괴거동을 관찰하였다. Lay 등(1965)은 균일모멘트를 받는 비지지길이가 다른 5개의 A441 강재 WF형강 보에 대한 휨실험을 수행하였으며, McDermott(1969)는 항복강도가 690MPa인 7개의 고강도강을 적용한 보의 휨실험을 수행하고 Lb/ry가 25 이하인 경우에는 소성설계가 가능한 것으로 보고한 바 있다.

비탄성 횡비틀림좌굴에 대한 해석적 연구는 주로 약축에 대한 휨강성, St. Venant 비틀림강성, 뒹(warping)강성이 고려된 접선계수이론(tangent modulus theory)을 적용하였으며 이 방법은 실험에 의한 검증결과 적절한 근사이론으로 받아들여지고 있다 (Galambos, 1998).

탄성좌굴이 발생하기 전에 시작되는 단면일부의 항복은 잔류응력의 크기와 분포형태 및 초기변형에 상당한 영향을 받는 것으로 알려져 있다. Neal(1950)에 의한 해석적 연구 이래로 Galambos(1963)는 최초로 잔류응력의 영향을 고려하였으며, Trahair 등(1972)은 잔류응력과 재료의 변형경화까지 추가로 고려하였고, Linder(1974), Vinnakota(1977), Celigoj(1979) 등은 해석모델에 잔류응력과 초기변형을 포함시켜 해석적 연구를 수행하였다.

비탄성 횡비틀림좌굴에서 단면이 소성모멘트 이상의 휨강도를 갖고 소성메카니즘을 일으키는 소성회전(plastic rotation) 거동을 보장하는 최대 비지지길이에 관한 연구로는 Lay와 Galambos(1965), Nethercot 등(1976), Ojalvo 등(1978), Earls(1999, 2001) 등이 있다.

이상의 비탄성 횡비틀림좌굴에 관한 기존 연구는 McDermott(1969)의 연구를 제외하면 항복강도가 485MPa 이하인 강재를 적용한 경우가 주를 이루고 있으며, 항복강도가 485MPa를 초과하는 고강도강으로 설계된 거더에 대한 연구는 미비한 실정이다.

현 AASHTO LRFD(2007)의 부록 규정을 적용할 수 있는 요구조건 중 하나는 강재 항복강도를 485MPa 이하로 규정하고 있으며, 2011년 제정 예정인 신뢰도이론에 근거한 한계상태설계법 도로교설계기준에서도 HSB800 휨부재를 비조밀단면으로 분류하고 있다. 신뢰도기반 도로교설계기준에 국내에서 생산된 HSB 강재의 본격적인 적용을 위해서는 비선형 극한저항강도에 근거한 HSB강재로 제작된 부재의 구조적 거동에 대한 폭넓은 이해가 선행되어야 할 것이다.

본 연구에서는 교량용 HSB 고강도 강재를 적용한 균일모멘트를 받는 강거더에 대하여 단면의 일부 또는 전부가 항복하는 비탄성 횡비틀림좌굴 거동을 비선형 유한요소해석으로 분석하고, 일반강재에 대한 설계규정과의 비교를 통하여 현 설계규정을 고강도 강거더에 확장 적용 가능한 지를 검토하는 것이다.

대상 강거더는 비탄성 횡비틀림좌굴 강도를 갖도록 횡방향 비지지길이의 범위를 선정하며, 압축플랜지의 국부좌굴과 복부판의 휨좌굴이 휨강도를 지배하지 않도록 플랜지와 복부판은 조밀 또는 비조밀에 해당하는 세장비를 갖도록 고려하였다.

HSB600 및 HSB800 강재로 제작된 균질단면(homogeneous section) 강거더와 HSB800 강재를 대상으로 하이브리드 단면도 고려한다. 비선형 유한요소해석 결과와 기존 문헌의 실험결과를 비교하여 유한요소 해석결과에 대한 검증을 시도하며 초기변형과 잔류응력이 비탄성 횡비틀림변형좌굴 영역에서 휨거동에 미치는 영향을 분석한다. 다양한 비지지길이 세장비(L_b/r_y)를 갖는 강거더의 비선형 FE 해석에 의한 휨저항강도와 AASHTO LRFD 및 Eurocode 3의 설계규정으로 구한 휨강도와 비교하여 이들 설계식의 HSB 강거더에 대한 적용성을 평가하도록 하였다.

자. 복부판 국부좌굴 및 극한 전단강도 평가 기법

플레이트거더의 설계시 고려해야 하는 중요한 사항 중의 하나가 바로 복부판의 국부좌굴이다. 판형에서 플랜지는 휨모멘트에 주로 저항하고 복부판은 전단력의 대부분을 받는다. 일반적으로 휨모멘트에 의하여 플랜지에 발생하는 응력에 비하여 전단력에 의한 복부판의 전단응력은 매우 낮았다.

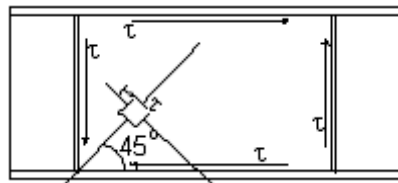
따라서 복부판에는 플랜지의 두께에 비하여 상대적으로 얇은 판이 사용되기 때문에 플레이트거더에서 발생하는 최대휨응력이 허용치에 도달하기 이전에 폭-두께비가 상대적으로 큰 얇은 복부판에서 전단응력에 의한 좌굴이 발생하는가를 검토하는 것이 매우 중요하다. 만일 전단좌굴이 발생한다면 수작보강재를 설치하거나 복부판의 두께를 증가시켜 좌굴강도를 높여야한다. 복부판의 설계방법은 다음 두 가지로 분류될 수 있다.

- 탄성좌굴강도를 기준으로 하는 허용응력설계
- 후좌굴강도(post-buckling strength)를 고려한 극한강도설계

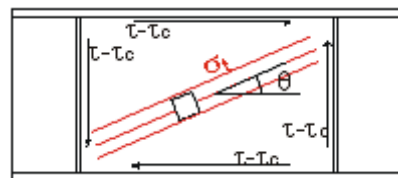
1886년 Wison이 얇은 판의 후좌굴거동을 처음 발견한 후, 1931년 Wagner가 그 거동을 설명하기 위하여 사인장 응력 이론(diagonal tension field theory)을 제시하였다. 그러나 1950년 후반 이전까지는 후좌굴강도의 산정에 관한 대한 연구가 충분하지 못하였기 때문에 탄성좌굴을 한계상태로 보는 허용응력설계가 주로 적용되었다. 그 후 1959년부터 Basler에 의해 본격적으로 플레이트거더 복부판의 극한전단거동에 관한 연구가 체계화되기 시작하였다.

Basler(1961)의 연구결과는 미국의 1963년 AISC 설계기준에서 처음으로 적용되었고 이후 1973년에는 AASHTO에서도 채택되었다. Basler에 의한 복부판의 후좌굴강도 추정에 관한 연구가 시작된 이후 Basler의 이론을 수정한 다양한 복부판의 파괴메카니즘에 대한 이론들이 제시되었다.

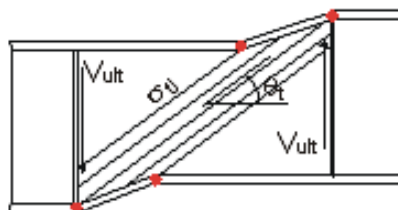
그림 2.20은 복부판의 파괴메카니즘을 보여주고 있다. (a)에서는 탄성좌굴 이전의 응력상태를 나타내고 있다. (a)의 상태에서 전단력이 점차 증가하면 복부판의 전단응력이 탄성좌굴응력에 도달하게 되고 압축을 받는 방향으로 더 이상 저항할 수 없게 된다. 탄성좌굴 이후에 증가하는 전단력은 오직 사인장응력에 의해서만 지지된다. 플랜지가 복부판에서 발생하는 사인장력에 저항할 만큼 충분한 강성을 갖지 못하기 때문에 (b)에서 보인 것 같은 항복영역(yield zone)이 형성되어 파괴에 이르게 된다.



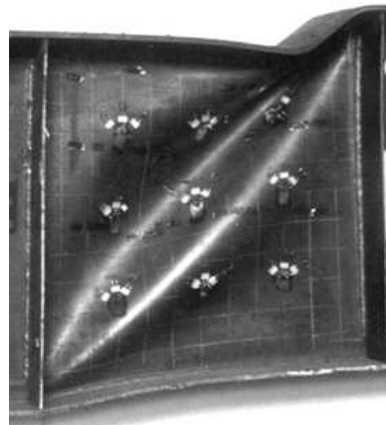
(a) 초기 순수 전단상태



(b) 복부전단좌굴로 인장역 작용발생



(c) 후좌굴거동으로 소성힌지 발생



(d) 복부판의 면외변형

그림 2.20 복부판의 파괴메카니즘

기존의 고전 이론들은 모두 사인장력이 플랜지에 의해서 지지될 수 있을 경우에만 후좌굴강도를 발현할 수 있다고 가정하였다. Balser(1961)는 일반적인 플레이트거더에서 플랜지가 사인장응력을 지지할 수 있을 정도로 충분한 강성을 지니지 못하기 때문에, 그림 2.18(b)에서 보인 바와 같이 플랜지와 접한 부분에서는 사인장응력이 발생하지 않는다고 가정하였다.

한편 Porter 등(1975)은 사인장응력으로 인하여 플랜지에 휨모멘트가 발생하고, 이로 인해 (c)에서 보인 바와 같이 플랜지에 소성힌지가 형성되어 플레이트거더는 sway mechanism으로 파괴된다고 가정하였다. Porter 등(1975)의 이론은 유럽설계기준(BS Code, Euro Code)의 근간이 되었다. 한편 Lee와 Yoo(1998)는 플레이트거더 복부판의 유한요소해석을 통해 플랜지에 의해서 지지되지 않더라도 사인장응력이 복부판 전체에 발생할 수 있다는 사실을 발견하고, 복부판의 극한전단강도를 구하는 새로운 설계공식을 제안하였다.

복부판의 전단파괴이론에서는 전단좌굴강도와 후좌굴강도를 각각 구하여 합하는 방법으로 극한전단강도를 결정하기 때문에 후좌굴강도 뿐만 아니라 탄성좌굴강도도 정확히 산정되어야 한다. 복부판의 전단좌굴강도를 시뮬레이션을 통해 얻기 위해서는 복부판의 경계조건을 명확하게 설정하여야 한다. 복부판의 4변 중에서 수직보강재와 접하는 변에서의 경계조건은 일반적으로 단순지지로 간주하는데, 이는 수직보강재를 설계할 때 단순지지의 조건을 만족하도록 수직보강재의 강성을 결정하기 때문이다.

한편 플랜지와 접하는 변에서의 지지조건은 단순지지도 고정지지도 아닌 탄성적으로 지지된 상태로 볼 수 있다. Basle와 Porter 등은 복부판의 전단좌굴강도의 산정 시 복부판과 플랜지와 접합변에서 경계조를 단순지지로 가정하였다. 그러나 Lee 등(1996)은 복부판과 플랜지가 접하는 변에서의 경계조건을 합리적으로 산정할 수 있는 식을 제안한 바 있다.

Yoo와 Lee(2006)은 플랜지가 없어도 사인장응력장이 형성되는 원인을 규명하였다. Lee 등(2009a, 2009b)은 일반적인 플레이트거더에서 플랜지가 사인장응력을 지지할 수 없는 이유를 명확하게 밝혔으며, Lee와 Yoo(1998)가 제안한 설계식이 Basler(1961)이나 Porter 등(1975)이 제안한 식에 비해 보다 합리적이며 현실적인 거동을 잘 반영한다는 사실을 입증하였다. AASHTO와 AISC 설계기준에서는 수직보강재의 간격이 복부판 높이보다 3배 이상일 경우에는 후좌굴강도를 반영하지 못하는 비보강복부판으로 규정하고 있지만, Lee 등(2008)은 3배 이상이 되어도 후좌굴강도를 반영할 수 있다는 사실을 밝혔다.

이상과 같은 복부판의 극한전단거동에 관한 연구들은 거의 대부분 항복점이 뚜렷하게 나타나고 항복응력이 HSB800급 강재보다 훨씬 낮은 일반강재를 대상으로 하였다. 복부판의 탄성좌굴 이후 후좌굴강도를 발현하게 되면 그림 2.18(d)에서 보인 것처럼 복부판에 면외 휨변형이 발생한다. 항복강도가 일반강재보다 훨씬 높은 HSB800급

강재를 사용하면 극한전단강도에 도달하는 시점에서 상당히 큰 면외변형이 수반되어 이로 인해 기존 설계식에서 평가하는 전단강도보다 낮은 수준의 전단강도를 보일 수도 있다.

본 연구에서 기존의 설계식들에 대한 유효성을 고강도강재의 적용을 전제로 검토하고 검증을 통해 적용성을 평가하였다.

차. 하이브리드 단면의 극한강도

고성능 강재를 적용한 플레이트거더를 하이브리드 단면으로 구성하여 사용하는 것이 보다 경제적인 교량건설을 이룰 수 있다. 이러한 하이브리드 플레이트거더의 경우 휨 거동에 큰 영향을 미치는 플랜지에는 고가의 고강도의 강재를 적용하고, 비교적 단면의 휨 거동에 적은 영향을 미치는 복부판에 저가의 저강도의 강재를 적용하여 강거더를 효율적으로 사용하는 방법이다.

그러나 도로교설계기준 등 국내의 교량설계기준들에서는 이러한 고강도 강재를 포함하는 하이브리드 거더를 설계할 수 있는 설계식이 제시되어 있지 않으며, 관련 연구도 국내에서는 활발하게 진행되지 못한 것이 현실이다. 미국의 경우 저강도 강재를 적용한 복부판의 일부분이 항복되는 것을 허용하는 개념으로 단일강종의 허용모멘트와 하이브리드 단면의 허용모멘트의 비율을 고려하여 간단하게 설계할 수 있는 설계식을 제안되어 현재까지 AASHTO LRFD에 적용되고 있다.

구체적으로 AASHTO LRFD(2007)에서는 복합단면을 적용하는 경우 저강도 강재의 항복강도가 고강도 강재의 70% 이상이어야 하며 강재간 항복강도의 차이는 250MPa 이내로 제한하고 있다. 아울러, 항복강도가 485MPa를 초과하는 강거더는 단면치수에 상관없이 휨설계 시에 비조밀단면으로 분류하고 있어서 휨저항강도는 항복모멘트를 초과하지 않도록 규정하고 있다. 이와 같은 휨저항강도에 대한 제한은 불충분한 연구결과에 기인하며(Barth 등, 2007; Veljkovic 등, 2003) 설계자에게는 항복강도가 690MPa인 고강도강의 적용을 어렵게 하는 주요 요인이 될 것으로 보인다.

최근 수행된 고강도강 적용 강합성거더에 대한 연구는 부모멘트부 단면에 편중되어 있기는 하지만 그 동안의 연구결과에 의하면 현 AASHTO LRFD 설계기준의 휨저항강도 제한은 지나치게 안전측이며 대부분의 제한은 불필요한 것으로 보고되고 있다(Barth 등, 2007; Sause 등, 2001).

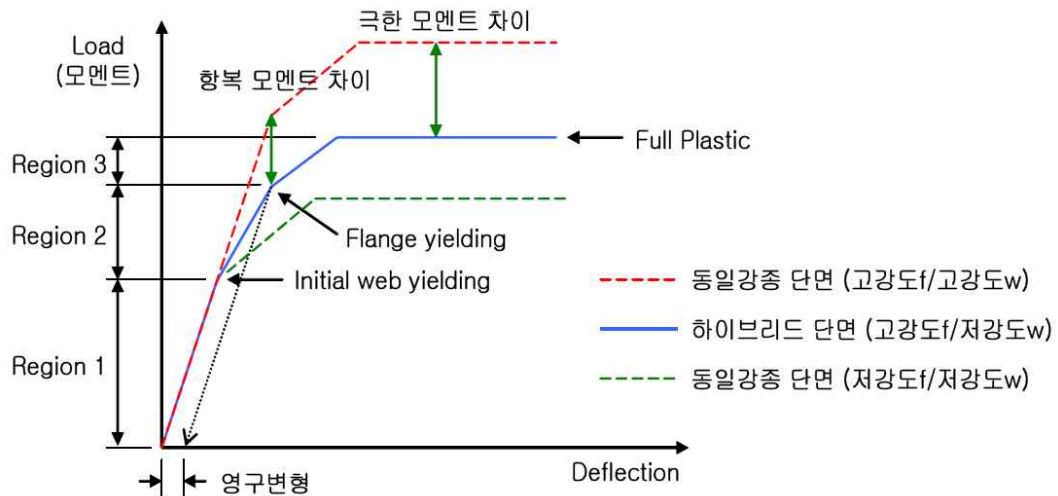


그림 2.21 하이브리드 거더의 하중 변위 곡선

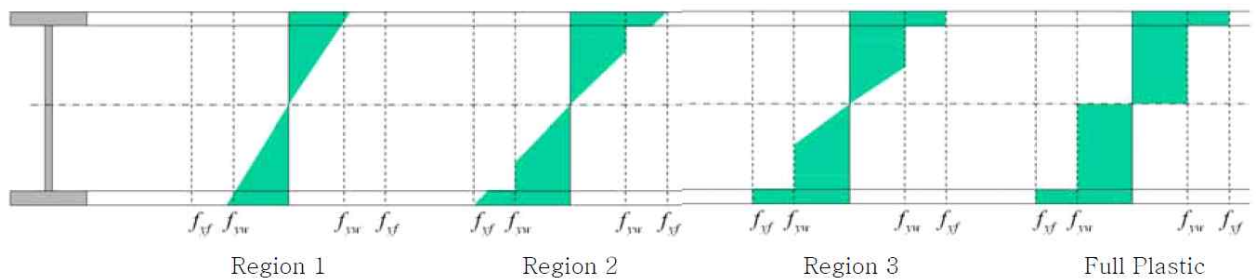


그림 2.22 하이브리드 거더의 하중 단계별 응력 분포

하이브리드 거더는 플랜지와 복부판의 항복강도 차이로 인해 다양한 고려사항이 뒤따르게 된다. 단면의 강도는 물론이고, 피로강도, 서로 다른 강재의 용접 등에 대한 고려 및 검증이 필수적이다. 복부판에 상대적으로 낮은 강도의 강재를 사용함으로써 단면의 휨강도가 전단면 고강도 강재단면에 비해 저하되는 것은 당연한 현상이다.

그림 2.22에서 보는 바와 같이 동일강종을 가지는 단면의 경우 단면의 휨 모멘트가 증가함에 따라서 변위가 선형적으로 변화하다가, 플랜지의 항복이 발생하고, 이후 복부판이 항복되는 영역이 커지면서 강성을 잃게 된다. 이후 복부판의 전단면이 항복에 이르면 하중 증가 없이 변위만 증가하게 되는 전소성 상태가 된다. 하이브리드 단면의 경우 플랜지가 항복하기 이전에 복부판에 항복이 시작되고, 이 때부터 강성이 저하하게 된다. 이후 플랜지가 항복하면서 한번더 강성 저하가 발생하고 전소성 상태로 변화한다.

응력을 고려한 설계시에는 플랜지가 항복하는 순간의 동일강종 플레이트거더와 하이브리드 플레이트거더의 내하력 차이를 반영하면 되지만, 단면의 강도를 평가하는 설계방법에서는 극한상태의 내하력 차이를 반영하는 것이 필요하다. 또한 제시된 그래프의 경우 플랜지 및 복부판에 전소성 상태까지 좌굴이 발생하지 않는다는 가정에 의한 그래프로서, 좌굴을 고려한다면 차이를 보일 수도 있다.

AASHTO LRFD의 설계과정에 의하면, 정모멘트 구간의 조밀단면인 경우 플랜지와 복부판 각각의 항복강도를 적용하여 소성 모멘트를 계산하여 사용하고 있으므로, 그 자체로 하이브리드 단면이 고려된다. 그러나 정모멘트 구간의 비조밀단면, 부모멘트 구간 혹은 비합성단면에 대해서는 플랜지가 조밀할 경우 항복응력에 대한 응력설계를 하도록 하고 있으며, 하이브리드 단면의 경우 하이브리드계수인 R_h 를 적용하여 공칭 저항 응력을 저하시켜 적용하고 있다. 이러한 하이브리드계수는 고강도 강재만으로 구성된 단일강종 단면의 항복 모멘트와 플랜지에는 고강도 강재를 적용하고 복부판에는 저강도 강재를 적용한 하이브리드 단면의 항복 모멘트의 비로서 다음의 식과 같다.

$$R_h = \frac{12 + \beta(3\rho - \rho^3)}{12 + 2\beta} \quad (2.16)$$

여기서 β 는 복부판과 플랜지의 면적비이며, ρ 는 복부판 강종과 플랜지 강종의 항복강도비이다. 본 연구에서는 하이브리드계수의 타당성을 검증하고 고강도 강재의 적용 여부를 결정하였다.

2.3 연구수행결과 및 결과의 검증 방법

1. 휨재 LRFD 설계기준 정립을 위한 기반연구 결과

가. 1차년도 실험 및 해석 결과

플레이트거더의 기존 설계기준에서 사용된 휨-전단 상호작용 평가식에 대해 평가하고 새로운 평가식 및 방법을 제안하였다. 당해년도 연구의 결과는 다음과 같다.

- (1) 비조밀단면에 대한 Basler 모델은 단순한 응력분포 가정으로 인해 상호작용이 전단 강도에 미치는 효과를 과대평가하였다. Basler 상호작용식은 조밀단면에 바로 적용할 수 없다.
- (2) 조밀단면이 소성모멘트 상태가 되더라도 복부패널은 세로방향으로 발생하는 수직응력에 의해 전단강도를 발현할 수 있다. 소성모멘트 상태에서 변형경화가 전단강도에 미치는 영향은 세로방향 수직응력의 효과와 비교할 때 무시해도 좋을 만큼 작다.
- (3) 복부판이 전단좌굴영역에 속하는 이축대칭 일반강재 단면에 대한 새로운 상호작용 평가식이 제안되었다.
- (4) 전단항복영역에 속하는 복부패널에 대한 상호작용식을 전단좌굴영역에 속하는 복부패널에 직접 적용할 수 없다.

- (5) 전단좌굴영역에 속하는 복부패의 공칭전단강도는 순수전단을 받을 때의 전단강도와 전단좌굴을 고려하지 않은 전단강도 평가식 중에서 작은 값을 공칭전단강도로 한다.
- (6) 현재 AASHTO 및 AISC 설계기준에서 상호작용효과를 완전히 무시하고 있다. 그러나 상호작용효과를 무시하게 되면 전단항복영역에 속하는 복부패널 뿐만 아닌 전단좌굴영역에 속하는 복부패널의 경우에도 불안정한 설계를 초래할 수 있다.

나. 2차년도 실험 및 해석 결과

HSB800 적용 비합성 플레이트 거더에 대한 조밀단면 휨강도 및 휨구조연성 평가 및 SM490 및 HSB800 플레이트거더의 횡비틀림좌굴이 고려된 비탄성구간 휨강도 평가 그리고 전단파괴 거동 분석 및 강도평가를 위한 Basler Model 검증 및 휨-전단 상호작용 효과분석에 대한 연구를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) AASHTO LRFD (2007) 에 의거, HSB800 적용 조밀단면 I-형 거더의 극한 휨강도는 파괴 후 연성거동 해석결과와 우수한 상관관계를 나타냈다.
- (2) 단면회전능력은 비교적 낮게 평가되어 기존 강종 거더모델과의 상대적 비교평가 통한 휨연성 규정의 보완 필요성 판단 필요하다.
- (3) 이축대칭 단면에 대해서 조밀 및 비조밀 복부판에 대해 AASHTO LRFD A6 규정을 만족하였으며 HSB800 강재 플레이트 거더의 휨강도 규정으로 적용 가능하다.
- (4) 압축플랜지 단면이 인장플랜지에 비해 작은 일축대칭 단면에 대해서는 AASHTO LRFD A6 적용성에 대한 엄밀한 검증이 필요하다.
- (5) 수평보강재가 설치된 세장복부판 단면은 경제성을 떨어지는 수준으로 보수적 강도 산정을 초래한다.
- (6) 비조밀단면에 대한 Basler 모델은 단순한 응력분포 가정으로 전단강도를 과대평가하고 있다.
- (7) 현재 AASHTO 및 AISC 설계기준에서 휨-전단 상호작용효과를 고려하지 않음으로 불안정한 설계를 초래할 가능성을 확인하였다.
- (8) HSB800강재가 적용된 플레이트거더 복부판은 기존 고전이론에서 가정된 판의 대각선으로 넓게 형성되는 항복구간이 발현되기 전에 파괴됨을 확인하였다.

다. 3차년도 실험 및 해석 결과

본 연구에서는 AASHTO LRFD 설계기준(2012)의 강합성거더 정모멘트부 연성 요구

조건 및 공칭 휨저항강도에 대한 규정을 검토한다. 특히, 고성능 강재 HSB800이 인장 플랜지에 적용되고 일반 강재 SM570이 웹과 압축플랜지에 적용된 강합성 복합단면 I-거더 단면에 대하여 AASHTO LRFD 설계기준(2012) 정모멘트부 연성 요구조건 및 공칭 휨 저항강도에 대한 규정의 적용성을 검토하였다. 그리고 모멘트-곡률 해석법(Moment curvature analysis)을 이용한 수치해석 결과를 바탕으로 HSB800이 적용된 강합성 복합단면 I-거더의 연성 요구조건 및 공칭 휨저항강도 산정식을 제안하였다.

- (1) AASHTO 및 AISC 설계기준에 적용된 Basler의 전단 설계식은 HSB800 강재가 적용된 플레이트 거더에 적용하기에 전체적으로 형상비에 대해 일관성이 없는 결과를 보이기 때문에 적용 불가능하다고 판단된다.
- (2) Lee 등(1998)에 의해 제안된 설계식은 세장비 및 형상비가 작은 거더에 대해서는 비교적 정확한 값을 보이지만, 세장비와 형상비가 증가함에 따라 불안정한 설계를 초래하게 되어 적용 불가능함을 알 수 있었다.
- (3) Lee 등(2008)의 전단설계식은 일반강재가 적용된 플레이트거더 복부판을 대상으로 개발된 설계식이나, 고강도강재 HSB800이 적용된 플레이트거더 복부판에 대해 적용할 수 있음을 확인하였다.
- (4) 재료의 기계적 특성이 일반강재와 매우 다른 고강도강재 (HSB800)가 적용된 플레이트거더 복부판의 전단거동 평가를 위해 기존 설계기준에 적용된 전단설계식을 사용하기에는 무리가 있음이 밝혀졌다. 그러나 Lee 등 (2008)에서 제안한 형상비 3 이상의 긴 패널에 대한 전단설계식이 고강도강재 (HSB800)가 적용된 플레이트거더 복부판의 전단거동을 비교적 매우 정확한 값을 예측하며, 형상비가 3 이하인 거더에 대해서도 적용할 수 있음이 확인되었다.

휨재 LRFD 설계기준 정립을 위한 상세한 실험 및 해석연구 결과는 [부록 1]에 기술하였다.

2. 압축재 LRFD 설계기준 정립을 위한 기반연구 결과

가. 1차년도 실험 및 해석 결과

본 연구에서는 고성능강(HSA800) 용접 H형강 및 용접각형강관 기둥의 폭두께비와 국부좌굴의 관계를 알아보기 위하여 용접각형강관 기둥 단면의 폭과 길이를 변화시켜 실험적·해석적 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다. 또한 향후 다른 강종(SS400, SM570)을 이용한 모델링을 통해 강종에 따른 좌굴거동을 연구하였다.

- (1) HSA800강재의 소재시험결과는 일부시험편에서 절삭가공시 발생한 압축잔류응력에 의해 항복강도가 KS D 5994 제한치를 초과하여 평균 항복비가 0.87로 나타나 기준치인 0.85를 초과한 것으로 나타났지만 인장강도 및 연신율은 KSD 5994 제한치를 만족

하였다. 동일한 강종을 사용한 기존연구(김도환 등 2012)의 재료시험결과(25mm 평판)에서는 KS 제한치를 모두 만족하는 것으로 나타났기 때문에 구조재료상의 문제는 없을 것으로 판단되며, 향후 절삭가공에 의한 판 두께 조절 시에는 별도의 열처리(풀림 등)를 통해 잔류응력을 제거한 후 실험체를 제작할 필요가 있다.

- (2) 플랜지의 판폭두께비 및 웨브의 판폭두께비가 각각 증가하는 경우, 최대 압축좌굴하중이 증가하는 경향을 보였다. 실험최대 평균응력은 국부좌굴에 의한 최대내력이 결정된 실험체에 대해서는 판폭두께비가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였지만, 전체좌굴에 의해 최대내력이 결정된 실험체 SCH-HSA800-4-15와 SCH-HSA800-4-20는 플랜지 판폭두께비가 작은 실험체 SCH-HSA800-6-15와 SCH-HSA800-6-20 보다 낮은 응력을 보였다. 이는 플랜지 폭이 상대적으로 작아 (즉, 압축 방향으로의 단면2차 모멘트가 작음) 단면전체가 충분하게 외력에 저항하지 못하고 압축 방향의 전체좌굴에 의해 종국상태에 도달되었기 때문이다.
- (3) 용접각형강관 단주 압축실험결과, 동일두께(9.0mm)로 구성된 각형강관의 단면크기가 증가함에 따라 최대압축하중은 증가하였다. 반면에 단면크기의 증가(폭과 높이)로 판폭두께비가 증가함에 따라 국부좌굴에 의해 급격한 내력 저하가 관찰되었고, 최대압축하중을 단면적으로 나눈 평균압축응력값은 부재가 세장해지면서 감소하는 경향을 나타냈다. 특히 판폭두께비가 23, 28인 실험체는 재료항복강도값보다 작게 나타났다. 또한, 세장비가 작을수록 전단면이 재료의 항복강도 도달이후에 국부좌굴에 의한 최대내력이 결정되었고, 충분한 소성변형양상을 보였다.
- (4) 용접 H형강 기둥에서 실험결과와 해석결과의 전체적인 비교 결과로써 최대좌굴하중의 평균오차가 약 5.3%로 해석모델이 실험결과를 비교적 정확히 예측했다. 응력-변형도 관계곡선에서는 초기강성은 실험치와 해석치가 정확히 일치하였고, 축하중-축변위 관계 및 응력-변형도 곡선 양상 또한 실험결과와 해석결과가 상당히 유사했다. 국부적인 비교 결과로써 응력 집중과 함께 국부 좌굴 형상도 실험결과와 해석결과가 유사하게 나타났다.
- (5) 용접 각형강관 기둥에서 전체적인 비교 결과로써 좌굴하중의 평균오차가 약 2.3%로 해석모델이 실험결과를 비교적 정확히 예측했다. 초기강성은 실험치와 해석치가 정확히 일치하였고 축하중-축변위 관계 및 응력-변형도 곡선 양상 또한 실험결과와 해석결과가 상당히 유사했다. 국부적인 비교 결과로써 응력 집중과 함께 국부 좌굴 형상도 실험결과와 해석결과가 유사하게 나타났다.

나. 2차년도 실험 및 해석 결과

당해년도 연구에서는 SS400강재에 대한 실험 및 해석결과의 비교 분석을 진행하였으며, 고성능강(HSA800) 용접 H형 단면과 각형강관 기둥의 폭두께비와 국부좌굴의 관계를 알아보고 현행설계기준의 적용성에 대해 검토하기 위하여 기둥 단면의 폭과 길이를 변화시켜 실험적, 해석적 연구를 수행하였다.

- (1) 용접H형단면과 용접각형강관 단주의 경우, 좌굴하중에 대한 실험결과와 해석결과의 평균오차가 각각 약 3.2%와 약 2.5%로 해석모델이 실험결과를 비교적 정확히 예측했다. 초기강성은 실험치와 해석치가 정확히 일치하였고 축하중-축변위 관계 및 응력-변형도 곡선 양상 또한 실험결과와 해석결과가 상당히 유사했다.
- (2) 용접H형단면 모델의 경우, 폭두께비(h/t_w)가 증가함에 따라 압축하중곡선과 최대압축하중(P_{Max})이 증가하고, 평균응력곡선과 최대 평균응력(F_{Max})은 감소하는 경향을 보였다. 모든 변수해석 결과가 판의 국부좌굴에 의해 최대내력이 결정된 경우로 국부좌굴 후 내력이 급속히 감소하면서 종국상태에 도달됨을 알 수 있었다.
- (3) 용접각형강관 모델의 경우, 폭두께비를 증가함에 따라 최대압축하중은 증가하고, 최대내력에 도달한 후 국부좌굴에 의해 내력이 급격하게 저하됨을 알 수 있다. 반면 최대 평균응력은 폭두께비가 증가함에 따라 감소하였다. 이는 폭두께비가 작을수록 판의 국부좌굴 발생 전에 외부하중에 대해 전단면이 충분히 저항하여 단면의 대부분이 재료의 항복강도 이상까지 저항한다는 것을 나타낸다.
- (4) 실험결과와 해석결과의 비교에 의해 검증된 모델을 이용하여 변수연구 수행하였다. 변수연구 결과, 용접H형단면과 용접각형강관 모델 모두 폭두께비가 증가함에 따라 최대내력에 도달한 후 국부좌굴에 의해 내력이 급격하게 저하됨을 알 수 있었다. 반면에 최대압축하중을 단면적으로 나눈 최대 평균응력은 폭두께비가 증가함에 따라 감소하였다.
- (5) 현행설계기준의 요구강도와 비교한 결과, 대부분의 용접H형단면과 모든 용접각형강관 모델에서 요구강도를 상회하는 결과를 보여주었다. 특히 용접H형단면 모델의 경우, 웹의 폭두께비가 커질수록 현행설계기준의 요구강도와의 마진이 점점 커지면서 충분한 여유를 갖고 만족하였고, 용접각형강관 모델의 세장단면의 경우, 현행설계기준에 상당히 근접한 상태로 만족시키는 결과를 나타내었다.

다. 3차년도 실험 및 해석 결과

당해년도 연구에서는 SM570TMC강의 용접 H형강 및 용접각형강관 기둥의 폭두께비와 국부좌굴의 관계를 알아보기 위하여 폭과 길이를 변화시켜 중심압축 실험연구를 수행하였다.

- (1) 응력-변형률 관계에서 전형적인 고강도 강의 특성을 보였다. 인장 시험 결과는 항복 강도 및 인장 강도가 공칭 항복 강도 및 인장 강도보다 약 20 % 더 높은 것으로 나타났지만 항복비는 KS 기준(0.85이하)을 만족하였다.
- (2) 중심압축을 받는 SM570TMC 단주의 실험 결과 H-형강 시험체는 플랜지의 판폭두께비 및 웹의 판폭두께비가 각각 증가하는 경우, 최대 압축좌굴하중이 증가하는

경향을 보였다. 실험최대 평균응력은 국부좌굴에 의한 최대내력이 결정된 실험체에 대해서는 판폭두께비가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다.

(3) 중심압축을 받는 SM570TMC 단주의 실험 결과 용접각형강관 시험체는 동일두께(9.0mm)로 구성된 각형강관의 단면크기가 증가함에 따라 최대압축하중은 증가하였다. 반면에 단면크기의 증가(폭과 높이)로 판폭두께비가 증가함에 따라 국부좌굴에 의해 급격한 내력 저하가 관찰되었고, 최대압축하중을 단면적으로 나눈 평균압축응력값은 부재가 세장해지면서 감소하는 경향을 나타냈다. H-형강 시험체 역시 유사한 경향을 보였다. 또한, 상대적으로 플랜지 판폭두께비가 작은 시험체의 좌굴강도는 전체 좌굴에 의해 결정되었다.

압축재 LRFD 설계기준 정립을 위한 상세한 실험 및 해석연구 결과는 [부록 2]에 기술하였다.

3. 휨-압축재 LRFD 설계기준 정립을 위한 기반연구 결과

가. 3차년도 실험 및 해석 결과

당해연도 연구에서는 인장강도 800Mpa급 건축구조용 고성능강(HSA800)을 현행 설계기준에 따라 축력비가 0.3, 0.5, 0.8이 되도록 용접 각형강관과 용접 H형강 단주실험체를 설계하여 조합력을 받는 편심압축실험 및 해석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) HSA800강재의 소재시험결과는 불분명한 항복점과 항복참, 높은 항복비를 갖는 대표적인 고성능강의 특징이 나타났고, 모든 시험체의 항복강도, 인장강도 및 연신률은 KS의 허용한계기준을 만족하는 것으로 나타났다.

(2) 각 플랜지의 판폭두께비 및 웨브의 판폭두께비가 각각 감소하는 경우, 최대 압축좌굴하중이 감소하는 경향을 보였다. 실험최대 평균응력은 국부좌굴에 의한 최대내력이 결정된 실험체에 대해서는 판폭두께비가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다.

(3) 휨응력에 대해 비콤팩트 단면으로 설계된 HSA800 단 시험체는 P-M 상관관계에서 축력비가 감소할수록 상대적으로 휨강도에 대해 큰 마진을 보였다. 특히 용접 각형강관이 용접 H형강보다 현행 기준의 요구강도에 대해 충분한 여유를 갖고 있는 것으로 나타났다.

(4) 모든 실험체는 휨 좌굴이 일어나기 전에 국부좌굴이 발생하지 않았고, 용접 H형강 단면 실험체에서만 휨 좌굴 발생 후에 국부좌굴이 나타났다. SCH-HSA800-8-25-E0.8를 제외한 모든 H형강 실험체에서 최대압축하중에 90%이상 도달하였을 때 국부좌굴이 발생하는 것을 알 수 있었다.

(5) 응력-변형률 곡선에서 실험결과와 해석결과 모두 항복 후 국부 좌굴에 의해 응력

이 감소되는 현상이 발생했으며 전체적인 거동 및 초기강성은 비교적 일치하였다. 또한, 축력비가 증가할수록 최대응력은 증가하며 국부좌굴의 영향으로 좌굴 후 응력이 급격하게 감소하는 거동을 보였다. 최대압축하중에 대한 실험결과와 해석결과의 평균 오차는 약 1.65%로 해석모델의 타당성을 검증하였다.

(6) 변수모델의 P-M상관도 분석결과, 용접 H형강 단주의 경우, 압축력에 대한 비세장 단면은 모두 현행기준의 요구에서 크게 상회하는 결과를 얻었고 축력비가 낮을수록 휨강도비에 충분한 여유를 갖는 것을 확인하였다. 하지만, 압축력에 대한 세장판 단면을 갖는 각형강관의 경우 현행기준의 요구에 못 미치는 결과를 보였다.

휨-압축재 LRFD 설계기준 정립을 위한 상세한 실험 및 해석연구 결과는 [부록3]에 기술하였다.

4. 연구수행결과의 검증방법

가. 수치해석 검증

본 연구에서는 HSA800 강재 또는 HSB800 강재가 휨재, 압축재, 그리고 휨-압축재로서의 구조용 부재로서의 가능성을 확인하기 위하여 실험연구를 실시하였다. 실험연구에서는 일부의 변수만을 고려하여 진행되었기 때문에 연구의 최종목표인 LRFD 설계기술 표준화를 달성하기 위하여 유한요소 해석연구를 실시하였다.

실험결과를 통해 얻어진 결과와 유한요소해석을 통한 결과 값을 비교하고 고성능 강재의 현행 설계기준에의 적용성을 검토하였다. 이를 위하여 다양한 변수 연구를 실시하였다. 유한요소 해석연구 결과 실험결과와 해석결과의 평균오차가 약 5% 내외로 해석모델이 실험결과를 비교적 정확히 예측하였다.

특히 압축력을 받는 단주의 경우 좌굴하중에 대한 평균오차는 약 1% 이하로 상당히 유사하였다. 또한 전체좌굴 형상을 잘 예측하였고, 압축재의 경우 플랜지의 판폭두께비가 커질수록 플랜지 부분의 현저한 국부좌굴이 발생하는 것을 실험에서 뿐만 아니라 해석연구에서도 확인할 수 있었다. 이를 통해 실험 연구수행결과를 유한요소 해석을 통해 연구수행결과를 검증하였다.

나. 설문조사 검증

본 연구의 질적성과인 기술수준 향상과 기술격차 축소를 평가하기 위하여 관련 전문가에 대한 설문조사를 수행하였다. 설문조사 평가를 통한 연구개발 사업 수행 이전과의 기술수준 향상과 기술격차 축소에 대한 연구결과의 검증을 위하여 다음과 같은 항목에 대하여 관련 연구자, 구조설계 실무 엔지니어 및 건설회사 실무 엔지니어 등을 대상으로 설문조사를 수행하였다.

(1) 설문조사 내용

- 선진국 대비 강재 제조기술 수준
- 고성능 강재 정보수집 매체
- 고성능강 연구개발의 필요성
- 고성능강재 건설분야 적용 필요성
- 설문자 소속사 고성능강재 적용사례
- 설문자 소속사 고성능강 설계기술 수준
- 고성능 강재 사용 경제적 효과 기대여부
- 외국 고성능강 사용의사
- 선진국 대비 고성능강 기술격차 감소
- 국내 고성능강 설계기준 부재로 인한 고성능강재 미적용 경험 여부
- 국내 고성능강 설계기준 등록시기 적합 여부
- 국내 고성능강 설계기준정립의 필요성
- 최근 1년간 고성능강에 대한 인지도 향상에 대한 의견
- 실무 설계시 고성능강이라고 할 때 필요한 인장강도 값

(2) 설문조사 검증결과

상기의 항목에 대한 관련 전문가 설문조사 결과, 연구수행 이전에 계획하였던 질적성과인 기술수준 향상과 기술격차 축소에 대한 목표수준을 달성한 것으로 조사되었다.

제3장 최종 연구성과 및 적용실적

3.1 최종 연구성과

1. 양적 연구성과

본 연구에서는 연구과제의 목표지표로 양적 지표와 질적 목표를 설정하여 해당연구를 수행하였다. 먼저 양적지표로서는 국내외 학술회의 발표논문, 국내외 학술지 게재논문 등이 있다. 각각에 대한 성과는 아래 표(표 3.1)와 같다. 각 성과에 대한 상세한 증빙자료는 성과점검보고서(종합)에 첨부하였다.

표 3.1 양적 성과목표(학술회의 및 학술지 게재)

과제명	성과지표	1차년도 성과지표		2차년도 성과지표		3차년도 성과지표	
		목표치	달성수 준	목표치	달성수 준	목표치	달성수 준
고성능강재의 건설구조 적용을 위한 휨재 및 압축재의 LRFD 설계기준 표준화	국내 학술회의 건수	8건	8건	8건	10건	8건	11건
	국외 학술회의 건수	0건	0건	4건	4건	4건	5건
	국내 학술지 게재논문	2건	2건	6건	6건	6건	6건
	국외 학술지 게재논문	0건	0건	2건	2건	2건	2건

상기의 표에서 확인한 바와 같이 1 ~ 3차년도 연구결과 사업수행 이전에 설정하였던 목표치의 100% 이상 달성한 수준을 보여주었다.

2. 질적 연구성과

질적 지표로서는 수치해석, 구조실험 및 연구시설 활용 실적 등이 있으며, 또한 기술 수준 향상 및 기술축소를 위하여 관련 연구 분야 전문직에 종사하고 있는 대상으로 설문 조사를 실시하였다. 먼저 수치해석, 구조실험 및 연구시설 활용 실적 등을 연차별로 아래의 표와 같이 정리하였다. 각 성과에 대한 상세한 증빙자료는 성과점검보고서(종합)에 첨부하였다.

표 3.2 질적 성과목표(수치해석, 구조실험 및 연구시설 활용)

과제명	성과지표	1차년도 성과지표		2차년도 성과지표		3차년도 성과지표	
		목표치	달성수준	목표치	달성수준	목표치	달성수준
고성능강재의 건설구조 적용을 위한 휨재 및 압축재의 LRFD 설계기준 표준화	수치해석 건수	10건	9건	10건	12건	10건	10건
	구조실험 건수	10건	10건	10건	10건	10건	10건
	연구시설 활용	50시간	56시간	100시간	108시간	100시간	158시간

기술수준 향상 및 기술축소를 위하여 관련 연구 분야 전문직에 종사하고 있는 대상으로 설문조사를 실시하였다. 연차별로 설문조사를 실시하였고, 과제가 진행됨에 따라 과제 홍보 및 각종 연구실적을 통하여 고성능강 HSA800 및 HSB800 강재에 대한 인식이 점점 높아지는 것을 알 수 있었다. 이를 통해 사업 수행전과 비교하여 관련 기술 수준 향상되었고, 과제 수행전과 비교하여 외국과의 기술 격차가 사업수행 이전 설정하였던 목표수준으로 축소되는 성과를 거두었다.

3.2 연구성과 적용

1. 압축재 및 보-기둥 부재 강구조설계기준(안) 제시

본 연구의 최종목표는 HSA800 강재의 압축재 및 보-기둥 부재 사용에 대한 강구조설계기준(안) 수정 작성이다. 현재 HSA800 강재는 한국산업표준(KS)에 등재되어 있지만, HSA800 강재에 대한 건축구조기준(KBC 2009)에는 등재되어 있지 않은 상황이다. 그러나 본 연구를 통한 연구결과의 관련 기준 위원회에 제안하였고 이 제안이 채택되어 현재 개정작업 중인 건축구조기준(KBC 2014 또는 2015)에 반영될 예정이다. 강구조설계기준에도 HSA800 강재의 압축재 및 보-기둥 부재 사용에 대한 설계기준이 반영될 예정이다.

(1) 구조용 강재는 표 2.1.1-1에 나타난 한국산업표준(이하 “KS”라 한다)에 적합한 것을 사용한다.

표 2.1.1-1 구조용 강재의 표준 및 기호

표 준		강 재 기 호
주요 구조용 강재	KS D 3503 ¹⁾	일반 구조용 압연 강재 SS400, SS490, SS540
	KS D 3515	용접 구조용 압연 강재 SM400A, B, C SM490A, B, C, TMC SM490YA, YB SM520B, C, TMC SM570, TMC
	KS D 3529	용접 구조용 내후성 열간압연 강재 SMA400AW, BW, CW SMA400AP, BP, CP SMA490AW, BW, CW SMA490AP, BP, CP SMA570W, P
	KS D 3861	건축구조용 압연강재 SN400A, B, C SN490B, C
	KS D 3866	건축구조용 열간압연 H형강 SHN400, SHN490
	KS D 3868	교량구조용 압연강재 HSB500, L, W HSB600, L, W HSB800, L, W
	KS D 5994	건축구조용 고성능 압연강재 HSA800
강관	KS D 3566 ²⁾	일반 구조용 탄소 강관 STK400, STK490, STK500
	KS D 3568 ²⁾	일반 구조용 각종 강관 SPSR400, SPSR490
	KS D 3632	건축 구조용 탄소 강관 STKN400W, STKN400B STKN490B, STKN540B

그림 3.1 강구조설계기준(안) 내의 HSA800 강재 적용

기준

해설

λ_p : 비콤팩트관요소에 대한 판폭두께비 제한값

비콤팩트플랜지의 한계세장비

$\lambda_{p,w}$: 비콤팩트웨브의 한계세장비

ν : 푸아송비

ρ_{cr} : 길이방향휨근의 최소휨근비

ϕ : 강도감소계수

ϕ_B : 콘크리트의 지압에 대한 저항계수

ϕ_b : 휨저항계수 (0708.1 참조)

ϕ_c : 압축저항계수 (0708.1 참조)

ϕ_k : 인장저항계수 (0708.1 참조)

ϕ_o : 전단저항계수

0701.4 재료

0701.4.1 제철

0701.4.1.1 구조용강재

(1) 구조용강재는 <표 0701.4.1>에 나타난 한국산업규격(이하 “KS”라 한다.)에 적합한 것을 사용하여야 한다.

<표 0701.4.1> 주요 구조용강재의 제철규격

번 호	명 칭	강 종
KS D 3503	일반구조용 압연강재	SS400
KS D 3515	용접구조용 압연강재	SM400A, B, C SM490A, B, C, TMC SM520B, C, TMC SM570, TMC
KS D 3529	용접구조용 내후성 열간 압연강재	SMA400AW, BW, CW SMA400AP, BP, CP SMA490AW, BW, CW SMA490AP, BP, CP
KS D 3861	건축구조용 압연강재	SN400A, B, C SN490B, C
KS D 3866	건축구조용 열간압연 H형강	SHN400, SHN490
KS D 4108	용접구조용 원심취 주강관	SCW490-CF
KS D 5994	건축구조용 고성능 압연강재	HSA800

0701.4 재료

0701.4.1 제철

0701.4.1.1 구조용강재

이 기준에서 건축용강재로 사용할 수 있는 강재의 제철 규격은 <표 0701.4.1>과 같다. 이 강구조설계기준을 적용하여 강구조물을 설계, 제작 및 설치하는 경우 사용가능한 재료에 대하여 규정하고 있다.

구조성능 검증을 거친 KS규격 신강재인 SHN400(KS D 3866) 및 TMCPC 고강도 강재인 HSA800(KS D 5994)이 지난 KBC(2009)의 강구조설계기준에 비교하여 <표 0701.4.1>에 새로 추가되었다.

<표 0701.4.1>에 나타난 강재의 제철규격은 SI 단위기준을 사용하였다. 예를 들어 SMA490AW의 경우는 SMA는 용접구조용 내후성 열간압연강재를 나타내고, 490은 인장강도가 490N/mm², A는 샤르피흡수에너지에 대해서 규정을 두지 않고, W는 녹안정화처리를 한 강재를 나타낸다. 그리고 열처리 및 배라멜라태어링에 대해서는 별도의 표기를 하지 않고 있으므로 이러한 특성들에 대한 보충은 특별히 고려하지 않았음을 의미한다. 다만, 건축구조용 압연강재(SN강) 뒤에 붙는 A, B, C는 샤르피흡수에너지 등급으로 분류된 것이 아니며,

그림 3.2 KBC 2014 기준(안) 내의 HSA800 강재 적용

2. 고성능강 적용 압축 및 휨강도 산정 프로그램 작성

800MPa급 고성능강으로 제작된 합성 및 비합성 거더의 휨강도 산정 프로그램을 Microsoft사의 Excel 쉬트를 이용하여 프로그래밍 하였다. 휨강도는 정모멘트부 및 부모멘트부에 대해 산정하며 가장 최신 설계기준인 2014년판 강구조설계기준-하중저항계수설계법의 설계기준을 적용하였다. 또한, 고성능강을 사용한 압축재의 설계강도 산정 프로그램도 Microsoft사의 Excel 쉬트를 이용하여 프로그래밍 하였다. 이 프로그램은 800MPa급 고성능강을 사용하고자 하는 구조설계 엔지니어링 회사의 요구가 있을 경우 이를 제공하여 실무에서 사용할 수 있도록 할 예정이다.

각 설계프로그램에 대한 상세한 증빙자료는 성과점검보고서에 첨부하였다.

제4장 연구목표 달성 및 효과

4.1 연구개발 최종목표 달성도

본 연구과제의 연차별 연구목표 대비 달성도는 다음과 같다.

연 차	연구목표	달성도	주요 연구내용
1차년도	고성능강 관련 설계기준 개선방안 연구	100%	- 고성능강 관련 국내·외 연구개발 환경 및 동향 조사 - 고성능강 관련 국내·외 설계기준 조사 - 국내 설계기준의 고성능강 적용을 제한하는 조항의 개선방안 연구 - 기존 고성능강 관련 기술환경 조사 - 기존의 고성능강 관련 문헌정보 및 실험자료의 정리 및 분석
	압축재 LRFD 설계기준 정립을 위한 기반연구	100%	- 소재특성(기계적 특성포함, 비교소재 SS400, SM570TMC포함) 시험 (화학성분시험, 인장시험, 굽힘시험 등) - 균등 압축재 단면 조밀성 기준 설정을 위한 실험 및 해석 연구
	고성능강 적용 강교량거더 휨강도, 전단강도 및 사용성 관련 LRFD 설계기준의 정립을 위한 기반연구	100%	- 플레이트거더 기준 분석 - 박스거더 기준 분석 - 합성단면 해석대상 모델 선정, 모델 검증을 위한 실험체 설계 - 플랜지 국부좌굴을 고려한 강도산정 - 횡비틀림좌굴을 고려한 정밀해석 - 전단좌굴 및 후좌굴을 고려한 설계 - 거더 처짐 등 사용성 한계상태 검토 - 하중저감계수 산정 - 이중 강재 적용 기법
2차년도	보-기둥 부재 설계기준 정립을 위한 연구	100%	- 조합력을 받는 보-기둥 단면 조밀성 기준 설정을 위한 실험 및 해석 연구 - 조합력을 받는 보-기둥 부재의 횡지지 기준 설정을 위한 실험 및 해석 연구 - 조합력을 받는 보-기둥 부재의 설계강도 기준 설정을 위한 실험 및 해석 연구
	고성능강 적용 강교량거더 휨강도, 전단강도 및 사용성 관련 LRFD 설계기준의 정립을 위한 정밀해석 및 실험 연구	100%	- 강합성 플레이트/박스거더 정모멘트부 강도평가 - 부모멘트부 합성단면 강도평가 - 초기결함 및 잔류응력을 고려한 비선형 정밀 유한요소해석 - 탄성/비탄성 단면 횡비틀림좌굴거동 - 전단강도 산정, 파괴거동, 주요

연 차	연구목표	달성도	주요 연구내용
			파라미터의 영향 분석, 구조시험 ▪ 사용성한계상태에서의 거더 처짐 및 웹브 국부변형 해석 및 주요 파라미터의 영향 분석 ▪ 탄성/비탄성 웹 휨좌굴/후좌굴강도, 연성특성 분석 ▪ 이중 강재 하이브리드 단면 플레이트 거더 주요 파라미터의 영향 분석
3차년도	▪ 고성능강 적용을 위한 압축재 및 보-기둥 부재 강구조설계기준(안)의 보완을 위한 해석 및 실험 연구	100%	▪ 1, 2차년도 실험 및 해석연구에서 고려하지 못한 변수 도출 ▪ 강구조설계기준(안) 내에서 요구하는 추가의 실험 및 해석 연구 ▪ 강구조설계기준(안) 수정 작성
	▪ 고성능강 적용 강교량거더 휨강도, 전단강도 및 사용성 관련 LRFD 설계기준(안) 제시	100%	▪ 플레이트거더 단면 분석 결과를 종합한 조밀, 비조밀, 세장한계치 기준 제안 ▪ 강합성 플레이트거더 정/부모멘트부 설계강도 산정식 제안 ▪ 탄성/비탄성 단면 횡비틀림좌굴을 고려한 휨강도 산정식 제안 ▪ 전단좌굴 및 후좌굴 인장역작용을 고려한 전단강도 설계식 제안 ▪ 사용성한계상태에서의 최대처짐 및 웹브 국부변형 한계 규정 제안 ▪ 웹브 휨좌굴에 의한 웹브 세장비에 따른 플랜지 응력감소계수 제안 ▪ 이중 강재 하이브리드 단면 정모멘트부 및 부모멘트부 설계식 제안 ▪ 유관기관, 관련업계, 해외전문가 등의 자문의견을 종합한 최종 설계식 제안

4.2 기대성과 및 파급효과

현재까지 항복강도 680MPa급의 고성능강이 KS규격에 교량 구조용 압연강재로 규정되어 있지만, 본 연구를 통해 항복강도 680MPa급의 고성능강재의 건설재료로의 요구성능에 대한 기준을 제시하고 강도 및 사용성 측면에서의 안정성을 확인하였다.

교량 및 건축물의 휨재 와 압축재에 관한 LRFD설계기준의 정립과 초장대교량, 초고층, 초대형 건축물에 고성능강 활용의 기술적 근거 제공을 통하여 강구조 설계기술의 국제 경쟁력 확보할 수 있을 수 있고 향후 건설되는 토목 및 건축구조물에의 고성능강의 수요가 증대될 것으로 예상된다. 또한, 고강도강, 고인성, 고용접성 및 고내후성 등의 성질을 갖는 고성능강의 생산기술을 확보하지 못한 후발 제강국가에 대한 경쟁력 우위를 유지하여 해외기술 수출 및 해외공사 수주를 통해 국가산업경제의 부흥에 일조할 수 있

을 것으로 사료된다. 이를 기술적, 사회·경제적 및 전략적 측면으로 구분하여 요약하면 다음과 같다.

1. 기술적 측면

가. 세계 수준의 고성능 강재에 대한 설계기술 선도

나. 구조물의 실제 거동을 고려한 해석 및 설계에 따른 초고층 건축물 및 장대교량의 합리적 설계

2. 사회·경제적 측면

가. 개발된 세계최고 수준의 고효율 강구조 설계기술을 적용함으로써 신뢰성 있고 경제적인 초고층 건축물 및 장대교량 건설이 가능하고, 국내외 강구조 설계관련 건설엔지니어링, 건설산업, 철강관련 산업의 발전에 기여하고 국제 경쟁력을 확보

3. 전략적 측면

가. 세계 수준의 고성능 강재에 대한 신뢰도기반 부재 설계기술을 보급하여 구조설계 분야 전문가를 양성함.

나. 초고층 건축물 및 장대교량 설계 기술 및 구조 시스템의 해외 수출

다. 고성능강재 생산기술의 향상

4. 연구 결과의 기업 활용 방안

국제적 선도기술인 고성능강 강부재 신뢰도기반 설계기준을 제시하고 설계예제를 개발, 설계실무자 교육을 통한 국내 엔지니어링 설계사에 기술이전으로 세계최고 수준의 고효율 고성능강 부재의 설계기술을 국내외 강구조 설계관련 건설엔지니어링 및 건설산업 전반에 활용 가능할 것으로 예상된다.

제5장 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성

5.1 연구성과의 활용방안

1. 연구성과의 활용방안

최근 건설분야의 강교량이나 강구조 건축물에서 장스팬 및 초고층화의 사회적 요구에 따라 다양한 하중특성에 대한 지지능력 향상과 사용성 증대를 위한 고강도, 고인성, 고내식성을 갖는 고성능강의 개발이 전세계적으로 각광을 받고 있다. 이미 미국이나 일본 등의 선진국에서는 1960년대부터 고강도강을 개발하여 적용하고 있으며, 최근에는 강도뿐만 아니라 인성, 내식성, 용접성을 개선시킨 고성능강의 개발과 함께 설계기준이 정립되어 고성능강의 수요가 급격하게 증가되고 있다.

국내에서도 2004년 SM570TMC강재가 구조용 강재로 규정되고 설계기준이 마련되면서 꾸준히 장스팬교량 및 초고층 건축물에 적용되고 있다. 2008년에는 포스코에서 항복강도 690MPa급(인장강도 800MPa)의 고강도강이 판두께 50mm까지의 강재가 생산되었고 2009년에는 80mm까지의 강재가 개발되기 이르렀다. 그 후, HSB500, HSB600(이상 적용두께100mm이하) 및 HSB800(적용두께 80mm이하)의 고성능 강재가 KS D 3868에 교량 구조용 압연강재로 2009년에 규정되었다.

최근 포항산업과학연구원(RIST)과 강구조학회의 주관으로 800MPa급 고성능강에 대해 판두께 50mm까지의 기초연구가 진행되었으며, 본 연구에서는 80mm까지 확장하여 토목 및 건축분야의 구조용 강재로의 적절성을 평가하고 적용설계기준을 제시하고자 하였다.

본 연구에서 강재의 강도, 인성, 용접성 및 내식성이 개선된 고성능강의 개발과 휨재와 압축재의 LRFD 설계기준의 표준화를 통해 중력하중, 지진하중, 풍하중 등의 다양한 하중조건을 받는 건설구조분야에서 그 활용도가 증대될 것으로 사료된다.

또한, 국제적 선도기술인 고성능강 강부재 LRFD 설계법을 확립하여 세계최고 수준의 고효율 강구조 설계기술을 국내외 강구조 설계관련 건설엔지니어링, 건설산업 전반에 활용하고자 하며, 이를 위하여 추후 기술강습회 등을 통하여 관련 기술을 보급할 예정이고, 고성능강의 설계기준 정립으로 후발 제강국가에 대한 차별적 우위를 선점할 수 있고 개발도상국에 건설되는 강구조물의 공사를 선점할 수 있으리라 본다.

5.2 추가연구 필요성

본 연구는 국내 철강업계에서 기개발된 세계적인 품질의 고성능강을 건설산업에 적용할 수 있도록 현재 미비한 설계기준을 제정하는 연구이다. 고성능강을 적용하는 경우 구

조물의 경량화, 내구성 제고, 경제성 제고, 세계 건설시장에서의 경쟁력 제고 등이 확보 가능하지만, 고성능강을 활용할 수 있도록 설계기준이 시급히 정립되지 않으면 건설실무에 적용할 수 없고 결국 세계적 품질의 고성능강을 국내에서 애써 개발한 성과는 무의미하다.

국내외적으로 고성능강 활용을 위한 연구는 초기단계인 상태로 본 연구에서는 강구조 설계에 가장 기본이 되는 휨부재, 압축재 및 보-기둥부재에 대한 설계기준을 대상으로 우선 설계기준을 제시하고자 한다. 본 연구에서는 제한적인 연구과제의 규모 및 연구비로 인하여 고성능강을 사용한 부재의 LRFD 설계법으로 연구의 범위를 한정하고 있지만, 고성능강재로 제작된 부재를 사용하기 위하여서는 부재설계뿐만 아니라 접합부 및 골조 등의 설계 표준화에 대한 연구도 반드시 수행되어야 할 것으로 사료된다. 따라서 추후에는 고성능강 관련 다음과 같은 후속연구가 필요한 것으로 판단된다.

1. 장경간교량 다격실 단일박스(multi-cell single box)거더 설계기준 개발
2. 볼트 및 용접 연결부 강도 및 피로강도 설계기준 개발
3. 고성능강재를 사용한 골조설계기준 개발
4. 강박스거더 및 플레이트거더 곡선교 설계기준 개발
5. 고성능강 활용 하이브리드 거더 최적설계기술 개발
6. 고성능강 활용 트러스교 및 아치교 설계기준 및 최적 설계기술 개발
7. 고성능강 적용 신형식 교량 및 초고층/초대형 구조물 설계기술 개발

참고문헌

- AASHTO (2000) AASHTO LRFD Bridge Design Specifications- Interlim 2000.
- AASHTO (2010) AASHTO LRFD Bridge Design Specifications.
- AISC (2010) Specification for structural steel buildings. ANSI/AISC 360-10, American Institute of Steel Construction, Chicago, USA.
- Amadeo Benavent Climent, Sang-Hoon OH, Hiroshi Akiyama : Ultimate Energy Absorption Capacity of Slit-Type Steel Plates Subjected to Shear Deformations, 日本建築學會構造係論文集 第 503號, 1998 年 1月.
- American Institute of Steel Construction(AISC), Steel Construction Manual I,II, 2005
- Ansourian, P. (1982) "Plastic Rotation of Composite Beams", Journal of Structures Div., ASCE, Vol. 108, No. 3, pp. 643-659.
- Azizinamini, A, Barth, K. E., Dexter, R., and Rubeiz, C. (2004) "High performance steel: research front - historical account of research activities", Journal of bridge engineering, ASCE, Vol. 9, No. 3, pp. 212-217.
- Barker, M. G. and Schrage, S.D. (2000) "High performance steel: design and cost comparisons", Modern Steel Const., 16, 35-41.
- Barth K.E., Roeder C.W., Christopher R.A., and Wu H. (2004). "Evaluation of live load deflection criteria for I-shaped steel bridge design girders." Proc., Int. Conf. on High performance Materials in Bridges, Kona, Hawaii, ASCE, Reston, Va.
- Barth K.E., White D.W., and Bobb B.M. (2000) "Negative bending resistance of HPS70W girders", Journal of constructional steel research, 53, 1-31.
- Barth, K. E. (1996). "Moment-rotation characteristics for inelastic design of steel bridge beams and girders." PhD dissertation, Purdue University, West Lafayette, Ind.
- Barth, K. E., Righman, J. E., and Freeman, L. B. (2007) Assessment of AASHTO LRFD Specifications for hybrid HPS690W steel I-girders, Journal of bridge engineering, ASCE, Vol. 12, No. 3, pp.380-388.
- Barth, K. E., Yang, L.L., and Righman, J. (2007) "Simplified Moment Redistribution of Hybrid HPS 485W Bridge Girders in Negative Bending", Journal of bridge engineering, 12(4), 456-466.
- Basler, K. 1963 Strength of plate girders in shear, Trans., ASCE, 128(2), 683-719.
- C.G. Salmon, J.E. Johnson, F.A. Malhas, Steel Structures-Design and Behaviors, 2009
- Clingenpeel, B.F., and Barth K.E. (2003) "Design optimization study of a three span continuous bridge using HPS70W", AISC Eng. J., 39(3), 121-126.
- Earls, C. J. and Shah, B. J. (2002) "High performance steel bridge girder compactness" Journal of constructional steel research, 58, 859-880.
- Eurocode 3 (2003) Design of steel structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings, EN 1993-1-1.

- Eurocode 3 (2006) Design of steel structures. Part 1-5: Plated structural elements, EN 1993-1-5.
- Eurocode 3 (2007) Design of steel structures. Part 1-12: Additional rules for the extension of EN 1993 up to steel grades S700, EN 1993-1-12.
- Felkel J.P., Rizio D.C., and Ziehl P.H. (2007). "Structural performance and design evaluation of HPS70W bridge girders", *Journal of constructional steel research*, 63, 909-921.
- FHWA, High Performance Steel Designer's Guide, 2nd ed., Federal Highway Administration, 2002.
- Galambos, T. V. ed : Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures, Fourth Edition, Structural Stability Research Council, John Wiley & Sons, New York, pp.708-717, 1988
- Green P.S., Sause R., Ricles J.M. (2002). "Strength and ductility of HPS flexural members", *Journal of constructional steel research*, 58, 907-941.
- Horton, R., Power, E., Van Ooyen, K., and Azizinamini, A. (2000) "High performance steel cost comparison study", *Proc., Steel Bridge Design and Construction for the New Millennium with Emphasis on High Performance Steel*, Baltimore, USA, 120-137.
- Lee, S. C. and Yoo, C. H.(1998), "Strength of Plate Girder Web Panels under Pure Shear," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 124, No. 2, ASCE.
- Lee, S. C. and Yoo, C. H.(1999), "Experimental Study on Ultimate Shear Strength of Web panels," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 125, No. 8, ASCE, 838-846.
- Lee, S. C. and Yoo, C. H.(1999), "Strength of Curved I-Girder Web Panels under Pure Shear," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 125, No. 8, ASCE, 847-853.
- Lee, S. C., Davidson J. D. and Yoo, C. H.(1996), "Shear Buckling Coefficients of Plate Girder Web Panels" *Computers & Structures*, Elsevier Science, Vol. 59, No. 5, 789-795.
- Lee, S. C., Lee, D. S. and Yoo, C. Y.(2008), "Ultimate Shear Strength of Long Web Panels," *Journal of Constructional Steel Research*, Vol 64, pp 1357-1365.
- Lee, S. C., Lee, D. S., Yoo, C. H.(2009), "Further Insights into Postbuckling of Web Panels I: Review of Flange Anchoring Mechanism," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 135, No. 1, January, pp 3-10.
- Lee, S. C., Lee, D. S., Yoo, C. H.(2009), "Further Insights into Postbuckling of Web Panels II: Experiments and Verification of New Theory" *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 135, No. 1, January, pp 11-18.
- Lee, S.C., Yoo, C. H. and Yoon, D. Y.(2002), "Behavior of Intermediate Transverse Stiffeners Attached on Web Panels," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 128, No. 3, pp. 337-345.
- Lee, S.C., Yoo, C. H. and Yoon, D. Y.(2003), "New Design Rule for Intermediate Transverse Stiffeners Attached on Web Panels," *Journal of Structural Engineering*,

- ASCE, Vol. 129, No. 12, pp.1607-1614.
- Mans, P, Yakel, A. J., and Azizinamini, A. (2001) "Full scale testing of composite plate girders constructed using 485 MPa high performance steel", Journal of Bridge Engineering, ASCE, Vol. 6, No. 6., pp. 598-604.
- Poter, D.M., Rockey, K.C., and Evans, H.R. (1975) The collapse behavior of plate girders loaded in shear, Struct. Eng., 53(8), 313-325.
- Ricles J.M., Sause R. and Green P.S. (1998). "High-strength steel: implications of material and geometric characteristics on inelastic flexural behavior", Engineering structures, Vol. 20, pp.323-335.
- Roeder, C.W., Barth K.E., and Bergman A. (2004). "Effect of live load deflections on steel bridge performance." J. Bridge Eng., 9(3), 259-267.
- Roeder, C.W., Barth K.E., Bergman A., and Christopher R.A. (2001). "Improved live load deflection criteria for steel bridges." NCHRP Interim Rep. No. 20-07/133, National cooperative Highway Research Program, Washington, D.C.
- Ronald, D.Z., Guide to Stability Design Criteria, for Metal Structures, 6th edition, John Wiley & Sons., 2010
- Sause, R. and Fahnstock, L. A. (2001) "Strength and ductility of HPS-100W I-Girders In Negative Flexure" Journal of bridge engineering, 6(5), 316-323.
- Veljkovic, M. and Johansson, B. (2004) "Design of hybrid steel girders", Journal of constructional steel research, 60, pp. 535-547.
- Wagner, H. (1931) Flat sheet metal girder with very thin metal web, Tech Memo. 604-606, National Advisory Committee for Aeronautics (NACA).
- White, D. W., Ramirez, J. A., and Barth, K. E. (1997). "Moment rotation relationships for unified autostress designs of continuous-span bridge beams and girders." Final Rep., Joint Transportation Research Program, West Lafayette, Ind.
- Wilson, J.M. (1886) On specifications for strength of iron bridges, Trans., ASCE, 15(1), 401-403, 489-490.
- Wolchuk, R. and Mayrbaur, R.M. (1980) Proposed design specifications for steel box girder bridges. Report. No. FHWATS 80-205, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, DC.
- Yakel, A. J. and Azizinamini, A. (2005) "Improved Moment Strength Prediction of Composite Steel Plate Girders in Positive Bending", Journal of Bridge Engineering, ASCE, Vol. 10, No. 1, pp. 28-38.
- Yoo, C. H. and Lee, Sung C.(2006), "Mechanics of Web Panel Postbuckling Behavior in Shear", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 132, No. 10, 1580-1589.
- 건설교통부 (2010) "도로교설계기준", 한국도로교통협회.
- 건설교통부 (2010) "하중저항계수설계법에 의한 강구조설계기준", 한국강구조학회.
- 건설교통부 (2011) "한계상태법에 의한 도로교설계기준", 한국도로교통협회.
- 교량핵심기술연구단 (2008) "도로교설계기준-하중저항계수설계법(안)".
- 국토해양부, 건축구조기준(KBC2009), 2009
- 김상호, 장경호, 유승운, 서석구 (2002) "고강도강 교량 적용 방안", 한국강구조학회지, 제

14권 3호.

- 김용태, 박순형, 배두병, 윤석구 (2008) “고강도 강재를 사용한 Hybrid 합성거더의 정모멘트부 극한 휨거동”, 2008년 한국강구조학회 학술대회 발표집. pp.112-115.
- 김현국, 오영석, 이은택, 김종락, 800MPa 고강도 강재에 대한 KBC2009 판폭두께비 제한 식적용에 관한 고찰, 2010년 한국강구조학회 학술발표대회 발표집, 195-196, 2010
- 박찬희, 길홍배, 박정식, 장종환 (2007) “고성능강을 적용한 소수주거터교의 경제성”, 한국강구조학회지, 제 19권 1호.
- 윤석구, 김용태, 류형근, 배두병 (2007) “고성능강재 HSB600을 사용한 Hybrid 합성거더의 극한휨강도 평가”, 2007년 대한토목학회 정기학술대회, pp. 134-137.
- 윤태양, 황민오, 박찬희, 최장렬 (2007) “고성능강 적용 신형식 강교량”, 한국강구조학회지, 제 19권 1호.
- 이명재, 600MPa급 고강도강 압축재의 좌굴강도에 관한 구조특성, 한국강구조학회 논문집 제 22권 6호, 609-616, 2010
- 이종관, 윤태양 (2000) “교량용 고성능강의 현황 및 전망”, 한국강구조학회지, 제 12권 1호.
- 이종관, 황민오, 김기석, 권범필, 윤태양, 박영석 (2008) “교량용 고성능강(HSB)의 KS등록 및 설계기준 개정안 소개”, 한국강구조학회지, 제 20권 1호.
- 이진형, 장경호, 김송희, 이찬호 (2003) “고강도강의 소수주형교에의 적용성에 관한 연구”, 2003년 대한토목학회 정기학술대회. pp. 308-313.
- 임성우, 김요숙, 장인화, SM570TMC 강재의 압축재 특성에 관한 연구, 한국강구조학회 논문집 제 17권 3호, 357-360, 2005
- 조은영, 신동구 (2010a) “HSB 강합성거더 정모멘트부의 휨저항강도”, 한국강구조학회, 제 22권 4호, pp. 389-398.
- 조은영, 신동구 (2010b) “HSB 강합성거더 정모멘트부 휨거동”, 한국강구조학회, 제 22권 4호, pp. 377-388.
- 조은영, 신동구 (2011) “HSB 강재 적용 강합성 복합단면 거더 정모멘트부의 휨저항강도”, 한국강구조학회, 제 23권 3호, 2011년 6월, pp. 385-395.
- 주현성, 차상호, 최병호, 이학은 (2008) “고성능강 적용 교량 부모멘트부의 연성 성능 평가”, 2008년 한국강구조학회 학술대회 발표집, pp. 75-76.
- 지식경제부 기술표준원, KS D 3868 교량구조용 압연강재, 2009
- 포스코, 세립형 고강도 구조용강을 이용한 강구조물 평가 및 설계기술 개발(IV), 2004
- 한국강구조학회 학술대회 특별세션 1, 건축구조용 800MPa급 강재의 개발과 상용화, 한국강구조학회, 2010
- 한국강구조학회, 강구조 내진설계기준, 2008
- 한국강구조학회, 강구조 설계, 2011
- 한국강구조학회, 건설용 고강도강(800MPa) 개발 및 건축구조 적용기준 정비, 한국강구조학회 연구보고서1차, 2008
- 한종욱, 윤채원, 김기석, 이종관, 박영석, “교량용 고성능강재의 재료에 대한 통계적 연구”, 2008년 대한토목학회 정기학술대회, pp. 1251-1254.
- 加藤 勉, 秋山 宏 : 鋼構造部材の耐力(その4), 日本建築學會構造係論文集 第 151號, pp.15-20, 1968 年 9月.

- 加藤勉：建築構造用60キロ高張力鋼の機械的性質の目標値について，日本鐵鋼協會，構造用鋼材の機械的性質に関する調査研究委員會，綱張力鋼ワーキンググループ，1988.3
- 加藤勉：閉斷面部材の局部座屈変形能力，日本建築學會構造系論文情告，No.378，pp.27-36，1987.8
- 山田哲，秋山宏，桑村仁：局部座屈を伴う箱形斷面部材の劣化域を含む終局舉動，日本建築構造系論文情告集，No.444，pp.135-143，1993.2
- 桑村仁：降伏比が異なる鋼材を用いた梁-住の面内弾塑性舉動に関する解析，日本建築學大會學術講演梗概集，No.21165，pp.845-846，1987.10
- 桑村仁：降伏比の異なる高張力鋼を用いたH形斷面短柱の終局強度と変形能力について，構造工學論文集，日本建築學會，Vol.34B，pp.151-160，1988.3
- 桑村仁，鈴木教彦：フランジとウェブの降伏比が異なるH形斷面部材の面内塑性舉動(その1，梁の解析)，日本建築學會關東支部研究情告集，No.15，pp.55-60，1988.3
- 桑村仁，鈴木孝彦：短柱の壓縮舉動に及ぼす鋼材の応力-歪特性の影響(その1. 十字形斷面の場合，その2. 箱形斷面の場合)，日本建築學會大會學術講演梗概集(關東)，No.21270，pp.1099-1102，1988.10
- 城戸雄太，山田哲，桑村仁，秋山宏，上遠野明夫：鋼素材の性質をパラメーターとした短柱壓縮試験(その1. 素材引張試験ならびに箱形斷面短柱壓縮試験)，日本建築學會大會學術梗概集(北陸)，No.21537，pp.1245-1246，1992.8
- 吳榮錫，鋼構造部材の終局耐力及び塑性変形能力，1章1-5.局部座屈を伴う部材の塑性変形能力の評価，東京大學博士學位論文，1989
- 日本建築學會，日本建築用鋼材および金屬系素材に関する技術資料，-5章 素材特性と部材特性，123-140，2002
- 井上哲郎，桑村仁：箱形斷面短柱の応力-ひずみ特性(軟鋼，高張力鋼および低YR高張力鋼，構造工學論文集，日本建築學會，Vol.35B，pp.337-350，1989.3
- 井上哲郎，桑村仁：降伏棚のある低降伏比60キロ高張力斷面短柱の応力-ひずみ特性(十字形および箱形斷面)，構造工學論文集，日本建築學會，Vol.37B，pp.225-238，1991.3
- 井上哲郎，折原信吾，西山功，桑村仁：十字形斷面短柱の応力-ひずみ特性(軟鋼，高張力鋼および低YR高張力鋼)，構造工學論文集，日本建築學會，Vol.35B，pp.323-336，1989.3
- 秋山 宏：建築物の耐震極限設計 第2版，東京大學出版會，1987年.

주 의

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