



공학전문석사 학위 연구보고서

용접을 최소화한

각형강관 기둥-H형강 보 내진접합부 개발을 위한 기초연구

2019년 02월

서울대학교 공학전문대학원

김 두 환

응용공학과 응용공학전공

용접을 최소화한

각형강관 기둥-H형강 보

내진접합부 개발을 위한 기초연구

지도 교수 이 철 호

이 프로젝트 리포트를 공학전문석사 학위 연구보고서로 제출함 2019년 02월

> 서울대학교 공학전문대학원 응용공학과 응용공학전공 김 두 환

김두환의 공학전문석사 학위 연구보고서를 인준함 2019 년 02월



국문초록

각형강관 기둥은 압축부재로서 우수한 성능을 가지고 있다. 하지만 폐쇄형 단면의 특징으로 용접을 사용한 접합부가 대부분이며 접합상세가 매우 복잡하며 조립 및 가공에 많은 자원이 필요하고 균일한 성능을 기대하기는 힘들다. 또한 최근에 경주 지진 이후 국내에서도 내진접합부의 관심이 커지고 있으며 취성파괴를 동반한 용접접합이 내진에 취약하다는 문제점이 대두되고 있다.

또 다른 각형강관 기둥 활용 시 문제점은 H형강 보와 함께 접합부로 구성 시 각형강관 플랜지에 면외변형을 유발하여 접합부의 강성 및 강도저하가 일어나는 것이다. 각형강관 기둥에 사용이 일반적인 일본은 다이어프램을 활용하여 문제점을 극복하고 있다. 이와 같은 각형강관 기둥의 문제점들을 보완하기 위하여 일방향볼트와 다이어프램을 활용한 각형강관 기둥 내진접합부를 제안하고자 하였다.

하지만 제안접합부에 대한 반복재하 인증실험을 통해 강접 혹은 반강접 접합부가 아닌 핀 접합부에 가까운 결과를 확인할 수 있었다. 그래서 실험 결과를 토대로 정확한 문제점을 파악하기 위하여 상용구조해석 프로그램을 활용하여 변수해석을 진행하였다. 기둥접합 플레이트의 두께, 접합볼트의 성능, 볼트의 수량, 시공여유의 유무 등 다양한 변수를 통해 수치해석을 진행한 결과 접합볼트의 수량 및 시공여유(Gap)의 유무에 따라 접합부의 성능 향상을 확인하였다. 파악된 문제점 해결을 위해 제안 접합부의 한계상태와 각 접합 부재 간의 강도위계를 설정하고 이를 제어하기 위해 AISC-LRFD와 KBC2017, AISI/AISC 358-16(BEP)를 참고하여 접합부재의 최적값을 도출하였다. 또 기둥과 보의 일체화에 참고할 만한 아이디어를 결합하여 리브 보강 수정접합부를 제안하고 수치해석을 통한 평가를 진행하였다.

그 결과 기둥과 다이어프램의 용접 접합부와 비교하여 접합부 강성이 향상되고 강접에 가까운 결과를 보이는 것으로 확인됐다. 하지만 수정 과정에서 추가된 리브의 위치 및 크기, 두께 등은 추가 연구개발을 통해 보완해야 할 것으로 사료된다.

주요어 : 각형강관, 볼트, 내진, 모멘트접합부, 일방향, 다이아프램, 리브보강

학 번:2017-24768

목	차
폭	자

제	1장서론1
	1.1 연구의 배경 및 목적1
	1.2 연구 방법
제	2 장 국내외 연구동향 및 설계기준
	2.1 기존 연구 동향
	2.1.1 해외 연구동향
	2.1.2 용접을 이용한 각형강관 기둥-H형강 보 접합부7
	2.1.3 볼트를 이용한 각형강관 기둥-H형강 보 접합부9
	2.2 접합부 거동 특성 및 분류11
	2.2.1 접합부 분류
	2.2.2 접합부 강성
	2.2.3 접합부 강도
	2.2.4 접합부 연성14
	2.3 새로운 각형강관 기둥-H형강 보 접합부 제안
	2.3.1 각형강관 기둥-H형강 보 접합부의 문제점
	2.3.2 문제점 해결 방안 제시
제	3자 기두-비 전한부 서누화이 신헌 10
1	이 가 이 그 머머 이 이 다 걸 다
	3.1 1 신허체 개 Q 10
	319 시허체 재차 프리그래 91
	3.1.2 글 6.1.1 이 프로그 6
	 3.1.5 개국 곳 알카
	3.2 고 프 프 프 기
	3.2.1 세요필급필락
	3.2.2 일곱세 가 8 옷 기 4 8 8
	3.2.4 소격 32
	0.2.1 - 2
ત્રો	/ 자 서느 하사으 이하 스키케서 22
~1	4 1 버스 케서 22
	4.1 1 由스 체서 加0 22
	4.1.1 친구 애국 개교
	4.1.2 친구 결정 장법
	113 벼수 채서 결과 27
	4 2 수정정한부 제아 AA
	4 2 1 정한부 하계상태 44
	4 2 2 정한부 구주석계 45
	4.2.3 접합부 디테잌 제안
	4.2.4 리브보강 수정접합부 수치해석

제	5 장	결 론.		52
	5.1 연	구 결론		52
	5.2 추	가 연구	디테일	53

참고문헌	5	•6	6	3
------	---	----	---	---

표 목차

[표3.1] 실험체 부재 일람표	20
[표3.2] KS D 3515 부재 성질	24
[표3.3] 실험결과 정리	24
[표4.1] 해석 변수 일람표	33
[표4.2] 해석 부재 재료성질	35
[표4.3] 해석부재 간 마찰계수	36
[표4.4] 볼트의 설계볼트장력	36
[표4.5] 수정접합부 부재일람표	48

그림 목차

[그림1.1] H형강과 각형강관의 구조적 차이점	1
[그림1.2] 다이어프램 각형강관 기둥-보 접합부 유형	2
[그림1.3] 일본의 다이어프램 방식 별 사용 빈도	3
[그림1.4] 새로운 접합부 구조성능실험 전경	5
[그림2.1] 응력집중 위치의 변형에 따른 접합부	7
[그림2.2] 다이어프램 형식에 따른 제작 상세	9
[그림2.3] 원웨이 볼트시스템의 구성요소	10
[그림2.4] PR접합부의 일반적인 모멘트-변위각 곡선	13
[그림2.5] 접합부의 모멘트-변위각을 통한 분류	13
[그림2.6] 기둥-보 접합부의 변형	15
[그림2.7] 원웨이 볼트 원리 및 설치 조건	16
[그림2.8] 제안 접합부 형상	18
[그림3.1] 실험체 형상	19
[그림3.2] 주요부재 도면	20
[그림3.3] 실험체 세팅도	21
[그림3.4] ANSI/AISC SSPEC-2005 반복재하 프로그램	22
[그림3.5] 계측기 설치도	23
[그림3.6] 1/3 접선법	25
[그림3.7] 실험체 모멘트-회전각 그래프	26
[그림3.8] 기둥 접합부 볼트 미끄럼 항복 거동	27
[그림3.9] 다이어프램 파단	27
[그림3.10] 실험체의 모멘트-회전각 단조화 곡선	28
[그림3.11] 부재별 항복거동 분석 - 인장	30
[그림3.12] 부재별 항복거동 분석 - 압축	31

[그림3.13] 제작성을 위한 시공여유	32
[그림4.1] 제안 접합부의 소성힌지 발생위치	
[그림4.2] 01-T16-D22-A3-G 응력분포	
[그림4.3] 02-T16-D24-A3-G 응력분포	
[그림4.4] 03-T20-D22-A3-G 응력분포	
[그림4.5] 04-T16-D22-A4-G 응력분포	
[그림4.6] 05-T16-D24-A3 응력분포	41
[그림4.7] 06-TH 응력분포	
[그림4.8] 해석된 접합부 모멘트-충간변위각 곡선	
[그림4.9] 접합부 구조해석	
[그림4.10] 리브보강 수정접합부 형상	
[그림4.11] 모멘트-층간변위각 비교곡선	
[그림4.12] 리브보강 수정접합부 응력분포	51
[그림5.1] 리브 보강구를 이용한 접합부 제안	54
[그림5.2] 리브 보강구 개략 도면	54
[그림5.3] 리브보강판의 설치방법	55

제 1장 서론

1.1 연구배경 및 목적

우리나라에서 중·저층 건축물은 대부분이 철근콘크리트 구조로 지어지고 있다. 하지만 철근콘크리트는 습식구조로서 인력위주의 작업환경, 양질의 골재부족, 일회성의 건축환경 등으로 인하여 대량 생산과 현장조립이 양호한 건식구조로 전환되고 있다. 이러한 상황 속에서 대표적인 건식구조물인 철골구조의 기둥으로 사용되고 있는 H형강은 강축과 약축으로 구분되는 단면의 특성으로 합리적인 설계가 힘들었다. 건물에 따라서는 각 방향의 하중에 대한 안전을 위해서 브레이싱(Bracing)이나 전단벽을 별도로 설치하여 약축방향을 보강하여야 하는 번거로움이 발생하였다. 또 강축과 약축 설계 시 축에 따른 각기 다른 접합디테일을 구성해야 함으로 작업시간이 증가되는 단점도 가지고 있었다.[그림1.1] 이러한 약점을 보충하기 위해 해외에서는 기둥으로서 단면성능이 우수한 각형강관에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한 각형강관은 CFT 형식으로 콘크리트를 채워넣어 압축력 보강 공법을 사용하게 되면 강관면이 거푸집 대용으로 사용되어 매우 경제적이다.



[그림1.1] H형강과 각형강관의 구조적 차이점

그러나 각형강관 기둥은 H형강 보를 사용하여 접합부를 구성할 경우 힘의 전달부위와 이를 보강하는 웨브(Web)의 위치가 일치하지 않아 각형강관 플랜지(Flange)면에 면외변형을 유발시켜 보의 휨모멘트에 대한 강성을 충분히 확보하기 어렵다. 또한 상자형 단면으로 인하여 가공 및 조립이 쉽지 않아 철골 프레임에 적용하기 어려움이 있다. 지진 및 자연재해가 빈번하게 일어나 일찍부터 각형강관을 활용하여 기둥으로 활용해 온 일본의 경우 [그림1.2]에서와 같이 보의 휨모멘트를 다이어프램으로 분산시켜 기둥 플랜지 면외변형을 억제하는 방법을 사용해 오고 있다.



(A)관통형 다이어프램 (b)내 다이어프램 (c)외 다이어프램 [그림1.2] 다이어프램 각형강관 기둥-보 접합부 유형

다이어프램 방식 선택은 적용되는 곳의 하중조건이나 경계조건에 따라 다양하게 적용되지만 일본과 같이 강진과 태풍이 자주 발생되는 지역에서는 관통형 다이어프램을 주로 사용하는 것으로 조사되었다. [그림1.3] 그 이유로 관통형 다이어프램이 외관이 단순하고 보를 통하여 전달되는 하중이 가장 명쾌하기 때문이다. 관통형 다이어프램 형식은 강관을 절단하여 완전용입용접(CJP)을 통해 기둥과 다이어프램을 강접한다. 그 후 보 플랜지와 다이어프램을 용접 혹은 볼트를 이용하여 연결, 보에서 전달되는 인장력과 압축력을 효율적으로 소산시킨다.



이처럼 강재끼리 부재 연결이나 접합을 위해 용접을 일반적으로 사용하고 있다. 용접은 부재의 단면 형상, 모양과는 관계없이 사용 가능하고 강력한 접합성능을 지니고 있어 대부분의 강재를 이용한 산업전반에 널리 사용되고 있다.

하지만 용접을 이용하여 부재의 연결 또는 접합을 하는 경우 시공자의 숙련도에 따라 품질이 매우 크게 좌우되며 공장용접과 현장용접 사이에도 매우 큰 성능차이를 보인다. 공장제작의 경우에도 제작을 위한 충분한 공간이 필요하며 용접을 위해 몇몇 추가 공정이 추가로 필요하다. 그리고 용접성능이 접합부 구성에 매우 중요한 요소가 되고 취성파괴 발생요인이 되기 때문에 시공 후 검사가 필수적으로 수반되어 공기 및 공사비에 큰 영향을 미치고 있다.

위와 같은 문제점에도 각형강관이 가지고 있는 폐단면의 특성 상 용접이 아니면 활용할 수 있는 방안이 없었다. 또한 일본은 지진과 태풍이 빈번이 발생되고 그에 따른 피해가 큰 지역이기 때문에 다이어프램의 삽입, 용접과 같이 제작상의 어려움이 발생해도 각형강관 기둥이 매우 활발히 활용되고 있다.

그러나 우리나라는 일본과 비교하여 지진하중 및 풍하중에 대해서 상대적으로 낮은 하중을 외력으로 평가하고 있으므로 외국에서 개발한 기존 접합방식을 그대로 적용시키면 비효율적이다. 이번 연구에서는 부재 간의 접합 시 용접을 최대한 배제하여 제작성 및 시공성을 높이고 에너지 소산능력이 우수한 내진 접합부을 제안 및 평가를 하고자 한다.

1.2 연구방법

본 연구를 위해 기존의 각형강관을 기둥으로 활용한 접합부 사례 및 연구동향을 파악하고 접합부의 거동 및 특성에 대한 기준을 연구하였다. 이를 통해 기존 각형강관 기둥을 활용한 접합부의 문제점 및 해결책을 제시하여 새로운 접합부 타입을 개발하였다.

새로운 접합부의 구조성능 및 제작성, 시공성을 확인하고자 실험체를 제작하고 구조성능실험을 실시하였다. 실험 후 도출된 결과를 분석하여 접합부의 성능을 평가하고 문제점을 확인하였다.

문제점 확인과정 중 해결을 위해 각각의 접합부 구성요소가 구조에 어떻게 작용되며 역할의 확인이 필요하였다. 그래서 각 구성요소 중 몇 가지를 변수로 하여 상용구조해석 프로그램인 ABAQUS를 통해 변수해석을 진행하였다. 이를 통해 얻어진 결과를 종합하여 추후 접합부의 개선방안을 수립하고자 한다.

4



[그림1.4] 새로운 접합부 구조성능실험 전경

제2장 국내외 연구동향 및 접합부 제안

2.1 기존 연구 동향

2.1.1 해외 연구동향

철골구조는 재료적 특성이 철근콘크리트구조보다 연성이 뛰어나고 가벼운 구조이다. 이에 지진에 강한 구조물로 일반적으로 인식되어 왔으나, 1994년에 발생한 노스리지(Northridge)지진과 1995년 효고현 남부지진(한신대지진)에 피해사례 이후 지진에 안전하기만한 구조가 아니라는 것을 연구를 통하여 밝혀 내었다.

상기 지진에 대한 각 나라의 대응과 방안은 서로 달랐다. 미국은 지진으로 인한 응력집중이 열영향을 받는 용접 접합부에서 부재를 항복시키는 것이 아니라 이런 영향이 적은 부위에서 부재의 항복을 유도하는 공법이 제안되었다. 그 예로는 측면 플레이트 형식(Side plate type), 커버플레이트 형식(Cover plate type) 및 단면축소형보(Dog bone type) 등을 들 수 있다.



(a) 측면플레이트 형식(Side plate type)



(b) 커버플레이트 형식(Cover plate type)



(c) 단면축소형보 형식(Dog bone type)

[그림2.1] 응력집중 위치의 변형에 따른 접합부

한편, 일본은 용접부 자체의 성능을 개량하여 취성파괴를 방지하기 위한 많은 연구들이 진행되었다. 또한, 국내에서는 이러한 연구와 별개로 CFT기둥-철골보 접합부 성능에 관한 연구 등이 광범위하게 연구되어 오고 있다.

2.1.2 용접을 이용한 각형강관 기둥-H형강 보 접합부

한신대지진을 분석한 결과 골조 전체가 우선적으로 지진에너지를

흡수한 후 접합부의 취성파괴가 일어난 것으로 보고되었다. 골조에서 에너지의 흡수능력이 우수한 이유가 여러가지 존재하지만 각형강관 기둥의 사용과 용접의 대부분이 공장에서 이루지는 것이 대표적이다. 일본과 같이 지진활동이 활발한 지역에서는, 각형강관 기둥과 H형강보로 조합된 철골 모멘트접합 골조가 일반적으로 가장 많이 사용되어 지며, 강관기둥과 H형강 접합부는 다이어프램으로 불리우는 구조부재를 이용하여 보플랜지에서 기둥으로 응력을 전달하는 방법을 일반적으로 사용하고 있다. 이러한 다이어프램의 사용방법에 따라 크게 관통형 다이어프램, 내 다이어프램 및 외 다이어프램으로 나눠지며, 방법에 따른 특징은 [그림2.1], [표2.1]에 간략히 정리하였다.





(b) 내다이어프램



(c) 외다이어프램

[그림2.2] 다이어프램 형식에 따른 제작 상세

접합 형식	관통형 다이어프램	내다이어프램	외다이어프램		
제작 방법	강관을 자른 후 다이어 프램을 관통시켜 강관 과 다이어프램을 용접	강관내부에 다이어프램 을 삽입하고 강관면에 다이어프램을 용접	강관외부에 다이어프램 을 용접		
특징	-외관 단순 -응력전달 명쾌 -변형능력 낮음	-외관 단순 -균형발생 후 변형 능 력이 낮음	-외관이 복잡 -균형발생 후 변형능력 우수		
시공성	골조가공 작업량 증대	용접성 난이	현장시공성 및 마감재 와 간섭		

[표2.1] 다이어프램 형식별 접합부 특징

2.1.3 볼트를 이용한 각형강관 기둥-H형강 보 접합부

각형강관은 폐단면이라는 특성 때문에 그동안 용접을 이용한 접합이 당연시 여겨지고 있었다. 하지만 최근 들어 국내외 다양한 방법으로 용접을 최소화한 각형강관 기둥접합부가 연구되어지고 있다.

Packer et al.(1998)는 각형강관기둥 볼트접합(blind bolt)이 가능한 방법을 'Mechanics and Design of Tubular Structures, chapter 3: Behaviour and Design of Bolted and Welded Connections'에 가능한 방법을 다양하게 제시하고 있다. 또한 Sadri, S(1994)는 TBB(Twist off blind bolt)를 각형강관 기둥에 적용한 볼트 접합부를 제안하고, 구조성능을 실험적으로 평가하였다. Ochi et al.(1998)은 Lindapter Hollo-Bolt를 적용한 각형강관 기둥 볼트 접합부에 대해 평가하였으며, Kato, B(1988)은 각형강관 기둥 내부에 너트를 용접하여 설치하여 외부에서 볼트로 체결하는 방법에 대한 연구를 진행하여 각형강관기둥 볼트 접합부에 대해 평가하였다.

국내에서도 각형강관 기둥 볼트 접합부에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 특히 각형강관 기둥의 폐단면의 단점을 극복하고자 원사이드 볼트(one-side bolt)를 적용한 연구가 수행되어 왔다. 국내에서 Jang et al. (2010)은 다양한 형태의 접합상세를 구현하여 내진성능을 평가하였다. 또한 Shim et al.(2010)은 원사이드 볼트(oneside bolt)를 이용하여 각형강관 기둥의 절단 및 용접을 하지 않는 접합상세에 대한 구조성능 및 내진성능을 AISC 기준과 Eurocode에 따라 평가하였다. 또한 Jin et al.(2018)은 원웨이 볼트를 이용한 각형강관 기둥 End plate 접합상세를 제안, 구조성능 평가 및 내진성능을 평가하였다.



[그림2.3] 원웨이 볼트시스템의 구성요소

하지만 국내·외 연구 결과 볼트 접합부, 특히 엔드 플레이트를 활용한 접합부의 경우 용접 접합부에 비해 일반적으로 충분한 초기강성과 내력을 확보하지 못 하는 것으로 평가되었다. 그 이유로는 적용된 일부 볼트의 경우 접합부에 전달되는 하중에 대한 내력이 일반적으로 접합에 사용되는 T/S볼트나 HT볼트에 비해 부족한 성능을 지니고 있었다. 또한 다이어프램을 사용한 방식과 달리 각형강관과 엔드플레이트의 접촉을 통해 하중이 전달되는 과정에서 각형강관 플랜지 면에 면외변형을 유발시켜 국부좌굴이 발생되어 보의 휨모멘트에 대한 강성이 충분히 확보되지 않는 것으로 판단된다.

2.2 접합부 거동 특성 및 분류

2.2.1 접합부 분류

철골 접합부는 완전 강접합, 반강접합, 핀접합으로 분류되나 구조설계시에는 대부분 완전 강접합(Fully Rigid) 또는 이상적인 핀접합(Ideally Pinned)으로 가정하여 설계하고 있다. 그러나 실제 거의 모든 구조물에서의 기둥-보 접합부는 작용하는 외력에 대하여 어느 정도의 모멘트 전달능력과 회전저항 능력을 가지고 있기 때문에 실제로는 반강접 접합부로서의 특성을 보이고 있다고 할 수 있다.

AISC Specification for Structural Steel Buildings(2016)에서는 모멘트 접합부를 크게 2가지로 구분하여 기술하고 있다.

- (1) FR (Fully Restrained Moment Connections)
 - "FR"은 부재 간의 회전은 모두 구속되는 것으로 간주되며 그에 따라 모멘트를 전달하는 접합부이다. 구조해석 시 접합부는 상대회전을 허용하지 않는 것으로 가정할 수 있다.
 "FR" 접합부는 강도한계상태에서 각 구성요소 사이의 각도를 유지하기에 충분한 강도와 강성을 가져야 한다.

(2) PR (Partially Restrained Moment Connections)

 "PR"은 부재 간의 회전이 존재하며 모멘트를 전달하는 접합부이다. 구조해석 시 접합부의 하중-변형 관계를 고려하여야 한다. "PR" 접합부의 구성 요소는 강도한계상태에서 충분한 강도, 강성 및 변형 능력을 가져야 한다. 상기에의 두가지 접합부의 특성을 가지지 않는 접합부는 단순 접합부(Simple Connections)로 명명하며 일반적인 핀접합으로 간주한다. 접합부를 분류하기 위해 접합부의 모멘트-회전 곡선을 이용하는 것이 가장 일반적이며 [그림2.3]은 모멘트-회전 곡선 예를 보여주고 있다.

2.2.2 접합부 강성

접합부의 강성을 정의하기 위해서 초기 강성(K_i)은 사용하중 시 접합부 거동의 특성을 충분히 보여주지 못한다. 그렇기 때문에 서비스 하중 시의 강성(K_s)을 접합부 강성으로 보는 것이 매우 합리적이다.

$$K_s = \frac{M_s}{\theta_s} \tag{1}$$

M_s : 사용하중 시 작용모멘트 θ_s : 사용하중 시 회전각 EI : 보의 휨강성 L : 보의 길이

AISC-LRFD에서는 ^{K_sL}/_{EI} ≥ 20 의 조건을 충족한다면 FR접합부로 간주하고 ^{K_sL}/_{EI} ≤ 2의 조건을 충족한다면 단순 접합부로 간주한다. 두 한계상태 사이의 강성을 갖는 접합부를 PR접합부로 보고 설계 시 연결부의 강성, 강도 및 연성을 고려해야 한다. 여기서 L은 보의 길이를 나타내고 EI는 보의 휨 강성을 나타낸다. FR접합부, PR접합부 및 단순 접합부를 확인할 수 있는 모멘트-회전 곡선은 [그림2.4]에 나타내었다.



[그림2.4] PR접합부의 일반적인 모멘트-변위각 곡선



[그림2.5] 접합부의 모멘트-변위각을 통한 분류

2.2.3 접합부 강도

접합부 강도(Mn)는 한계상태모델 또는 실제 테스트를 기반으로 결정할 수 있으며, 모멘트-회전 곡선에서 최대 하중을 나타내지 않을 경우 강도는 0.02 rad의 회전각에서의 모멘트를 접합부 강도로 간주할 수 있다. 또한 단순접합부를 분류할 수 있는 강도 하한값은 0.02 rad의 회전각에서 보 소성 모멘트의 20%미만을 전송하는 접합부로 정의할 수 있다. 이는 설계 시 접합부가 회전강성이 없는 것으로 간주할 수 있다.

2.2.4 접합부 연성

강한 기둥과 강한 패널존을 전제할 때 접합부 강도가 보 소성모멘트를 초과하는 경우 구조 시스템의 연성은 보에 의해 결정되고 접합부는 탄성으로 간주될 수 있다. 또 접합부 강도가 보 소성모멘트와 비슷하면 보가 최대 강도에 도달하기 전에 연결부가 일부 비탄성 변형의 거동을 보인다. 보 소성모멘트보다 접합부 강도가 작다면 변형의 대부분이 접합부로 집중되어 나타난다. 접합부 연성은 상황에 따라 달라지게 된다.

회전 용량 θu는 (a) 연결부 저항력이 0.8 Mn으로 떨어 졌거나 (b) 0.03 rad로 정의할 수 있다.

2.3 새로운 각형강관 기둥-H형강 보 접합부 제안 2.3.1 각형강관 기둥-H형강 보 접합부의 문제점

앞서 언급한 것과 같이 각형강관은 폐단면의 형상을 가지고 있어 대부분의 접합부 구성을 위해 용접이 반드시 필요하고 가장 중요한 접합방법으로 인식되었다. 하지만 용접접합 시 발생하는 문제점을 일본과 같이 품질향상을 통해 해결하기 위해서는 과다한 초기 비용과 연구 인력이 국내 건설환경에는 비효율적이다.

또한 각형강관 기둥은 양면에 두개의 웨브가 있어 H 형강 보의 웨브와 일치하는 중심에는 기둥의 웨브가 존재하지 않는다. 따라서 이러한 접합부는 중심에 웨브가 있는 H형강 기둥을 주로 사용하는 접합부와는 달리 각형강관 기둥 플랜지의 면외변형이 발생하게 된다. 기둥플랜지의 면외변형으로 보에서 유발하는 휨모멘트에 저항하는데



2.3.2 문제점 해결 방안 제시

우선 용접접합의 문제점을 해결하기 위해 여러 연구들이 진행되고 있다. 그 중 단방향에서 체결이 가능한 볼트를 접합부 구성 시 사용하게 되면 용접접합 시 발생되는 문제점들을 상쇄할 수 있을 것이다. 이에 중소기업에서 개발한 원웨이 볼트를 이용하여 접합부 구성을 하고자 한다. 원웨이 볼트를 채택하게 된 이유는 국내 개발로 수급이 원활하며 볼트의 구조성능이 일반 H/T 볼트나 T/S 볼트와 동일하여 구조적 안정성이 우수하기 때문이다.

제안된 원웨이 볼트 시스템은 다음과 같은 특징을 가지고 있다.

- (1) 접합부에 사용된 원웨이 볼트 시스템은 [그림2.7]와 같으며,
 일방향 체결이 가능하도록 개발된 볼트는 4가지 부품으로 구성되어 있다.
- (2) 원웨이 볼트는 토크쉐어형 타입으로 기준 축력에 도달하면 핀테일이 탈락되어 축력 도입을 쉽게 확인할 수 있다.
- (3) 본 연구에 제안하는 접합부는 원웨이 너트를 내부

보강판이라는 판재에 억지끼움 되어 기둥내부에 설치되고 원웨이 볼트를 외부에서 엔드플레이트와 함께 체결하여 마무리한다.



[그림2.7] 원웨이 볼트 원리 및 설치 조건

또한 기둥 플랜지면에 집중되는 휨모멘트의 문제점을 해결하기 위해 외부 다이어프램 방식을 사용하고자 한다. 다이어프램 방식의 경우 보의 휨모멘트를 다이어프램이 부담하여 접합부 강성이 매우 좋은 접합부로 알려져 있다. 하지만 다이어프램을 접합부에 고정시키기 위해서는 용접이 반드시 필요했다. 용접을 위해서 접합상세와 과정이 매우 복잡하여 국내에서는 다이어프램 방식뿐만 아니라 각형강관 기둥의 사용이 매우 저조하였다. 그래서 접합부재를 용접이 아닌 볼트를 이용하여 접합하는 방식을 제시하고자 한다.



[그림2.8] 제안 접합부 형상

제시된 접합부는 [그림2.8]과 같다. 접합부는 볼트연결을 위해 슬롯홀을 지니고 있는 다이어프램(관통형+외다이어프램)과 기둥-기둥 접합을 위한 엔드플레이트(End Plate)와 내부 보강판(Inner Plate). 웨브 전단력을 담당하기 위하여 엔드플레이트에 연결된 전단 보강판으로 구성되어 있다. 볼트를 활용하기 위해 슬롯홀이 천공되면서 발생하는 단면 손실을 보강하기 위하여 외다이어프랙 형태를 채택. 제작과 하중전달의 효과를 극대화하기 위하여 관통형 다이어프램의 조립방식을 채택하였다. 엔드플레이트와 내부보강판은 기둥-기둥 접합뿐만 아니라 기둥 중복의 효과를 통한 보에서 전달되는 압축력과 인장력으로부터 기둥 중복 효과를 통해 보강하는 역할을 하고 있다. 엔드플레이트와 내부 보강판의 형태는 다이어프램과의 조립 시 수월하도록 중간기둥과 맞닺는 부위가 일부 돌출되어 있다. 엔드플레이트와 내부보강판의 너비 역시 다른데 슬롯홀 천공 시 인접되어 있는 천공홀과의 거리를 충분히 유지하기 위해서 각기 다르게 설계하였다. 또한 유일하게 용접을 이용하여 연결되는 전단 보강판은 웨브를 통해 발생되는 전단력과 휙모멘트를 전달하는 역할을 동시에 하고 있다. 보와의 연결은 다이어프램이 일반적인 스플라이스 플레이트(Splice Plate)역할을 하여 일면전단 방식으로 볼트를 통해 연결한다.

17

이를 통하여 공장 제작의 용접을 최소화하고 현장에는 볼트를 이용하여 무용접 접합부를 구성할 수 있다.

제 3장 기둥-보 접합부 성능확인 실험

3.1 실험계획

3.1.1 실험체 개요

접합부 성능확인 실험의 경우에는 접합부의 전체 거동 및 사용성을 확인하는 목적을 가지고 있다. 개발 초기의 접합부 성능확인만을 목적으로 한 실험으로 비교대상군에 대한 실험이 동시에 실시되지 못 하였다. 실험체의 기둥은 각형강관 □-500x500x16으로 결정하였고 그에 따라 보의 사이즈는 H-588x300x12x20을 선택하였다.[그림3.1] 또 각형강관 내부와 외부를 접합을 위한 볼트는 서두에 언급된 원웨이 볼트 M22[L]를 선택하였다. 그리고 보의 연결을 위하여 TS볼트 M22를 사용하였다.



[그림3.1] 실험체 형상

(b) 엔드플레이트, 내부보강판[그림3.2] 주요부재 도면



(a) 다이어프램



[표3.1] 실험체 부재 일람표

ਖੁਟ	키드	ч	리시시꼬킈	엔드	내부	One	T/S
七市	기궁	보	나이어프램	플레이트	보강판	way	bolt
시처	□-	H–	PL-	PL-	PL-	พาก	
·크립 -페	500x500	588x300x	1620x1620x	1168x370x	1168x320x	IVI <i>22</i>	M22
제	x16	12x20	20	16	16	[L]	

3.1.2 실험체 재하 프로그램



[그림3.3] 실험체 세팅도

실험체는 전문 강구조물 가공업체를 통하여 외주 가공/제작을 실시하였다. [그림3.3]와 같이 바닥에 고정된 힌지와 기둥 단부 플레이트를 볼트로 체결하여 양단이 힌지인 기둥을 구성하고 보의 가력점에 2,000kN급 액츄에이터(Actuator)를 볼트를 통하여 연결하였다. 가력 시 보의 횡좌굴을 방지하기 위하여 양단에 좌굴방지 지지대(Lateral support)를 설치하였다.

하중재하는 [그림3.4]에서 와 같이 ANSI/AISC SSPEC-2005 반복 재하 프로그램에 의해 가력하였다. 하중은 층간 변위각에 의하여 조정되도록 변위제어 방식으로 재하하였다. 보의 끝단 변위는 층간 변위각에 따라 보 단부의 가력중심에서 각형강관 기둥 면까지의 거리를 이용하여 정하였다. 하중가력 방식은 층간변위각 0.00375~0.0075 rad까지는 각각 6사이클, 0.01 rad일 때는 4 사이클, 나머지는 2사이클씩 반복하여 가력하는 방식을 취하였다. 가력 속도는 층간변위각

0.01 rad까지는 0.5 mm/s, 0.06 rad까지는 1mm/s, 7~8step은 1.5mm/s, 나머지 step은 2mm/s의 속도로 진행하였다.



[그림3.4] ANSI/AISC SSPEC-2005 반복재하 프로그램

3.1.3 계측 계획 및 설치

변형률계 SG01~04은 보의 소성힌지의 거동을 확인하기 위하여 보 소성힌지 위치에 설치하였고, SG05~11은 다이어프램의 거동 및 항복을 확인하기 위하여 상부 다이어프램에 설치하였다. SG12~17까지는 웨브 연결판의 거동, SG18~27은 엔드플레이트의 거동 및 항복을 확인하기 위하여 각 위치에 설치하였다. 패널존의 영향을 확인하기 위하여 LVDT 설치를 계획하였으나 실험체 셋팅설계의 오류로 설치 공간이 확보되지 않아 설치하지 못 하였다. 보 가력점에는 줄 변위계를 설치하여 측정된 액츄에이터의 수직 변위로 실험체 변위를 조절하였다. 가력하중의 크기는 액츄에이터가 내장하고 있는 로드 셀에 의해 측정하였다.



[그림3.5] 계측기 설치도

3.2 실험결과

3.2.1 재료실험결과

기존적으로 실험전에 재료실험 실시한 후 나온 결과를 바탕으로 실험체의 거동을 분석해야 한다. 하지만 실험의 의도가 성능을 검증하기 위한 것이 아닌 성능 확인 및 개선점을 찾기 위한 실험으로 재료실험이 실행되지 못 하였다. 현재는 KS D 3515에서 제시하고 있는 데이터의 최소값을 적용하여 실험 분석을 하였다. [표3.1]은 KS D 3515의 부재 성질을 정리한 것이다.

	항복점[N/mm ²]					
부재 기호	강재의 뜻	두께[mm]	인장강도[N/mm ²]	연신율[%]			
	16 이하	16 초과 40이하	-				
SM355A	355 이상	345 이상	490~630	22 이상			
 [표3.2] KS D 3515 부재 성질							

3.2.2 실험체 거동 및 파괴 양상

	초기	항복 하중				최대 하중				
분 류	하방향 가력 [+]	상방향 가력 [-]	하방 [*]	향 가력 +]	상방형 [*	향 가력 −]	하방향 🏾	가력[+]	상방향 기	가력[-]
	I	Χ _i	Py	δ,	Py	δ,	P_{max}	δ_{\max}	P_{max}	δ_{\max}
	[kN/	/mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]
제안 실험체	59.45	58.24	3998	62.5	1137	27	4263	117	6580	115
[표3.3] 실험결과 정리										

실험체의 하중-변위 관계를 파악하기 위해 초기강성 기울기(K_i)를 갖는 직선과 초기강성 기울기의 1/3인 직선을 평행이동 시켜 두 직선의 교점을 항복내력 Py로 정하였고 이때의 처짐을 항복변위 δ_y 로 정한다. [표3.2]는 실험체 항복하중(Py) 및 항복변위(δ_y), 최대하중(Pmax), 초기강성(K_i)을 나타낸 결과이다. 가력방향에 있어 '+'는 하방향 가력, '-'는 상방향 가력을 의미한다.



[그림3.6] 1/3 접선법

[그림3.7]은 실험결과를 모멘트와 회전각 곡선으로 표현한 그래프이다. 보의 모멘트(M)은 가력점에서 각형강관 기둥 표면까지의 거리를 하중과 곱하여 계산하였고, 총 회전각(total rotation, θ)은 가력점 위치에서의 수직 변위를 강관의 중심 선까지의 거리로 나누어 구하였다. 보의 소성모멘트(M_p)는 보의 소성단면계수에 보의 항복응력을 곱하여 구하였다.

25

- $\mathbf{M} = \mathbf{P} \times \mathbf{l}$ [2]
- $\boldsymbol{\theta} = \boldsymbol{\delta} \div \mathbf{d}$ [3]
- $\mathbf{M}_{\mathbf{p}} = \mathbf{Z}_{\mathbf{p}} \times \boldsymbol{\sigma}_{\mathbf{y}}$ [4]

여기서, P: 가력 하중

- 1: 가력점에서 각형강관 기둥 표면까지의 거리
- δ : 가력점 위치에서의 수직 변위
- d : 가력점에서 각형강관 중심선까지의 거리
- Zp: 보의 소성단면계수

σy:보의 항복응력



실험값 ____Mp[+] ____My[-] ____0.8Mp[-] ____Mp[-] ____My[-] ____0.8Mp[-]

[그림3.7] 실험체 모멘트-회전각 그래프



(b)







[그림3.9] 다이어프램 파단

실험체는 층간변위각 0.015 rad까지 탄성적으로 거동하였으며, 0.015 rad 이후부터 기둥접합부 볼트의 미끄럼 항복이 발생하여 실험 중 소음이 발생하였다. 0.03 rad이후부터 하중 가력 시 기둥접합부의 좌굴(패널존 항복)이 관찰되었다. 그리고 0.06 rad에서 다이어프램의 파단을 관찰되어 0.07rad에서 실험을 종료하게 되었다.

3.2.3 실험 결과 분석

실험체 설계 시 기둥에 작용되는 축력만을 검토하고 보를 통한 휨모멘트를 간과하여 설계하여 강기둥-약보가 아닌 약기둥-강보로 실험체가 거동하였다. 또한 보의 휨모멘트를 다이어프램이 대부분 해결할 것으로 예상하여 엔드플레이트와 내부보강판의 설계를 최소한으로 하여 기둥 접합부에 큰 결함을 가져오게 되었다.

우선 [그림3.9]의 AISC에서 제시한 접합부 강성을 통한 접합부의 판별의 경우 기둥 강성의 감소로 인하여 단순접합부의 양상을 보여주고 있다.



[그림3.10] 실험체의 모멘트-회전각 단조화 곡선

[그림3.11][그림3.12]는 실험체의 항복 거동을 확인하기 위하여 각 부재별 변형률 게이지를 분석한 그래프이다. 보의 소성힌지[#03], 다이어프램의 슬롯홀[#06], 전단 보강판[#12], 엔드플레이트[#20]의 게이지 Strain값을 나타낸 것이다. 초기 실험체 설계 시 다이어프램, 소성힌지, 전단 보강판, 엔드플레이트의 순으로 항복거동을 보일 것을 예상하였지만 엔드플레이트, 다이어프램, 웨브 이음판, 소성힌지의 순으로 항복거동을 보였다. [그림3.11]와 [그림3.12]를 비교하여 보면 인장 시 보다 압축 시 더 큰 응력이 엔드플레이트에 전달되는 것을 관찰하였다. 이와 같은 실험값이 나온 이유는 엔드플레이트의 두께가 충분히 두껍지 않아 다이어프램을 통해 전달된 압축력과 인장력을 버티지 못한 것으로 판단된다.

또한 그림으로는 확인할 수 없으나 실험 중 기둥의 대변형 및 다이어프램의 거동이 확인되었다. 이는 다이어프램 슬롯홀에 시공 편의를 위한 적용시킨 시공여유(Gap)를 두었고 이로 인해 부재 간의 접촉이 원활하지 못하여 변위를 발생시킨 것으로 확인된다. 그 결과 접합부에 일어난 미세변위가 기둥 접합부의 항복을 부추기게 된 것으로 판단하고 있다.



[그림3.11] 부재별 항복거동 분석 - 인장



[그림3.12] 부재별 항복거동 분석 - 압축

일단 접합부 실험체 파괴모드를 분석한 결과 세 가지의 구조적 문제점을 제시할 수 있다.

일단 파괴모드를 관찰한 결과 기둥과 기둥 접합부 즉, 엔드플레이트와 기둥과 내부보강판을 이어주는 볼트의 내력 부족으로 미끄럼 항복이 발생, 접합부의 강성이 감소한 것으로 판단된다. 또한 엔드플레이트와 다이어프램에 의하여 발생되는 지압력에 충분한 내력이 부족하여 이 또한 강성 저하 요인으로 볼 수 있다. 그리고 조립을 위하여 설계 시 고려한 이격 또한 접합부 강성 저하의 요인으로 판단하였다.



[그림3.13] 제작성을 위한 시공여유

실험을 전체적으로 판단하면 모멘트 접합부의 거동이 아닌 핀접합부와 같은 거동을 보여주고 있고 실험설계 시 의도한 결과와는 차이가 많은 것을 확인하였다. 다음 장에서는 문제점으로 지적된 접합요인들을 변수로 하여 수치해석을 진행하여 최적화된 접합부를 설계하고자 한다.

제 4장 성능 향상을 위한 수치해석

4.1 변수 해석

4.1.1 변수 해석 개요

선행된 기둥-보 접합부 실험에서 다이어프램에 전달되는 하중이 기둥으로 전달되는 과정에서 기둥-기둥 접합부의 강성이 저하에 큰 영향을 미치고 있는 것을 확인하였다. 또한 접합부를 조립하기 위하여 접합부재 사이의 의도된 이격이 존재하는데 이러한 요소들이 복합적으로 접합부에 영향을 미치는 것으로 판단하였다. 그래서 선행한 기둥-보 접합부 실험 결과를 토대로 가장 취약한 네 가지의 요인을 정해 여러 조건들을 검토하여 최적화된 설계를 위한 가정을 해보고자 한다. [표4.1] 이를 위해 대표적인 상용구조해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하였다.

No.	Analytical Model Designation	Plate Thickness [mm]	Bolt Depth [mm]	Bolt Arrangement [Row]	Model Gap
01	T16-D22-A3-G	16	22	3	0
02	T16-D24-A3-G	16	24	3	0
03	T20-D22-A3-G	20	22	3	0
04	T16-D22-A4-G	16	22	4	0
05	T16-D24-A3	16	22	3	Х
06	TH	16	22	-	_

T: 기둥접합부에 사용된 플레이트 각각의 두께

D: 기둥접합부에 사용된 볼트의 크기(볼트장력의 변화 확인)

- A: 기둥접합부에 한 기둥에 사용된 볼트의 열[row]수
- G: 조립을 위해 적용한 시공상의 이격의 존재 유무

TH : 다이어프램과 기둥을 용접으로 접합

[표4.1] 해석 변수 일람표

4.1.2 변수 결정 방법

기존 문헌과 논문들을 참고하여 변수위주로 재설계하였다. 우선 접합부 소요강도 Muc를 구하기 위해 [5], [6]식을 활용하여 구하였다.

$$M_{pe} = 1.1 R_y F_y Z_x$$
 [5]

$$M_{uc} = M_{pe} + V_u L_p \tag{6}$$

Mpe: 보의 소성모멘트

Ry: 보의 Fu/Fy (일반적으로 SM355의 경우 1.1을 사용) Fy: 보의 항복강도 (SM355 = 355 MPa) Zx: 보의 소성단면계수 (H-588x300x12x20 = 4350 Cm⁴) Vu: 접합부의 전단력(2Mpe/Lh) Lp: 기둥 표면에서 접합부의 소성힌지까지의 거리

상기 식에서 소성힌지의 위치는 기둥의 최외곽에 있는 볼트의 위치로 산정한다. 볼트의 크기도 식을 통하여 산정할 수 있지만 현장 사용성과 활용성을 고려하여 M24로 크기를 제한하였다.



[그림4.1] 제안 접합부의 소성힌지 발생위치

4.1.2 모델링 및 조건 설정

해석을 위해 동일한 단면의 기둥과 보를 모델링하고 기둥의 상하부는 핀으로 경계조건을 부여한다. 그리고 동일한 위치에 가력점에 변위제어를 위하여 Boundury Condition를 통하여 하중을 재하한다. 하중의 재하는 해석의 신속함을 위하여 Cyclic Load가 아닌 단방향 하중만을 재하하였다. 부재 간의 접촉조건은 Surface to Surface 조건으로 해석 진행하였고 부재 간의 마찰계수는 0.5로 통일하였다. 부재 마찰계수를 0.5로 설정할 이유는 실험에 사용된 부재 모두 표면처리(Shot Blast)를 완료 후 비도장 상태를 유지하여 동일한 조건 위하여 결정하였다. 접합을 위한 모델링한 볼트는 KS B 2819[표4.2]와 KBC 2017 강구조 설계기준[표4.4]을 참고하여 성질 및 축력에 대한 조건을 부여하였다. 또한 볼트를 제외한 모든 플레이트 및 부재는 KS D 3515의 SM355[표4.2]의 값을 참고하여 부재 조건을 부여하였다. 그리고 최대한 실험과 동일한 조건을 유지하기 위하여 제작을 위한 부재 및 볼트의 공차를 그대로 적용하였다.

부 재	재 질	Fy (MPa)	Fu (MPa)	E (MPa)	υ
RHS	SM355	355	490		
Plate	SM355	355	490	205,000	0.3
Bolt	F10T	900	1000		

Fy: 항복강도, Fu: 인장강도, E: 탄성계수, v: 프아송비

[표4.2] 해석 부재 재료성질

접촉부재	마찰계수				
RHS-PLATE	0.5				
RHS-Bolt	(Shot Blast 처리 후 비도장)				
Plate-Bolt					
[포(이 케거머과 카 카카까오					

[[]표4.3] 해석부재 간 마찰계수

볼트등급	볼트호칭	최소 인장하중 (kN)	설계볼트장력 (kN)	
F8T	M16	125.4	84	
	M20	195.8	131	
	M22	242.7	163	
	M24	282	189	
F10T	M16	156.7	105	
	M20	244.8	164	
	M22	303.4	203	
	M24	352.5	236	
	M27	458.8	307	
	M30	561.3	376	
F13T	M16	203.7	136	
	M20	318.2	213	
	M22	394.4	264	
	M24	458.3	307	

[표4.4] 볼트의 설계볼트장력

4.1.3 변수 해석 결과



[그림4.2] 01-T16-D22-A3-G 응력분포





(b) 정면 [그림4.3] 02-T16-D24-A3-G 응력분포





(b) 정면 [그림4.4] 03-T20-D22-A3-G 응력분포





(b) 정면 [그림4.5] 04-T16-D22-A4-G 응력분포





(b) 정면 [그림4.6] 05-T16-D24-A3 응력분포





(b) 정면 [그림4.7] 06-TH 응력분포

상기 [그림4.2]~[그림4.7]은 ABAQUS를 통해 해석을 진행한 후 각 실험체별 응력분포를 나타낸 그림들이다. 초기 해석을 위한 조건은 층간변위각 0.1rad까지 해석결과를 도출하고자 하중 조건을 주었지만 05번, 06번을 제외한 다른 실험체가 층간 변위각 0.025rad에서 항복으로 인한 해석종료가 되어 층간 변위각 0.025rad을 기준으로 응력분포를 비교하게 되었다.

응력분포 중 평면을 통해 다이어프램을 확인해 보면 01~05번 (기둥무용접 접합부) 모두 기둥 후면, 즉 다이어프램 전반에 걸쳐 응력이 미치는 것을 확인 할 수 있었다. 06번 (기둥용접 접합부)만 하중이 직접 전달되는 전면부 위주 즉, 접합부만이 응력이 분포되는 것을 확인할 수 있다. 01~05번 접합부의 경우 각형강관과 다이어프램이 면 접촉으로만 연결되어 있어 일체화가 되지 않아 접합부의 열림(opening)과 닫힘(closing)이 쉽게 일어나 실험체 전체에 응력이 부담되는 것으로 판단된다. 그에 반해 06번 접합부의 경우 각형강관과 다이어프램이 용접을 통해 일체화가 되어 접합부의 열림(opening)과 닫힘(closing)이 거의 없어 실질적인 접합부위에만 응력이 집중되는 것으로 보인다.

응력분포 중 정면을 비교해보면 03, 05, 06번 접합부의 보만 소성힌지를 형성을 관찰할 수 있었다. 나머지 접합부의 경우 보를 통한 전달되는 하중이 모두 다이어프램과 기둥으로 분산되어 보의 소성힌지 형성될 만큼 접합부 강성이 확보되지 않은 것으로 판단된다. 또한 06번 접합부를 제외한 모든 접합부가 기둥과 다이어프램이 접촉하는 지점에 응력이 집중되고 있다. 이는 하중의 전달이 부재 전체에 고르게 전달되는 것이 아니라 단순 접촉부위에 응력집중이 일어난다고 판단 가능하다. 이를 종합하면 보를 통하여 전달되는 하중이 접합부 강성 저하로 각 부재에 부담이 되고 그에 따라 각 부재에 전달되는 부위의 국부좌굴을 유발시킬 수 있다고 판단된다. 접합부가 아닌 구조부재의 국부좌굴로 인한 항복이 발생하게 되면 구조물 전체의 대변형으로 이어질 가능성이 충분할 것이다.

43



[그림4.8] 해석된 접합부 모멘트-층간변위각 곡선

[그림4.8]은 해석된 접합부의 모멘트-층간변위각 곡선이다. 결과를 살펴보면 응력분포를 분석한 결과와 마찬가지로 05번과 06 접합부만이 이상적인 강재의 모멘트-층간 변위 그래프 양상을 보여 주고있다. 그 외의 접합부들은 0.01rad에서 모두 볼트슬립에 의한 항복양상을 보여주고 있다. 볼트슬립 항복양상을 보이는 접합부 중에서는 그나마 03번 접합부가 볼트슬립으로 인한 강성저하 양상이 적은 것으로 관찰되는데 이는 기둥 접합부 보완을 위해 접합부재의 두께를 최적화가 필요한 것을 보여주고 있다.

4.2 수정접합부 제안

4.2.1 접합부 한계상태

처음 제안되었던 접합부는 실험과 수치해석을 통해 몇가지의 문제점을 도출하였다. 첫번째는 기둥과 기둥의 접합부 강성 부족이다. 앞서 실행된 실험결과와 수치해석 결과를 분석하면 제안된 접합부의 대부분이 기둥 접합부에서 볼트의 슬립이 일어나는 것을 확인할 수 있었다. 그 이유는 일반적으로 철골 프레임에서 접합부 구성이 기둥 접합부, 기둥-보 접합부 각각 구성되는 것과 달리 제시된 접합부의 경우 두 접합부가 동시에 접합부를 이루고 있기 때문이다. 하지만 초기에 접합부 설계 시 기둥의 압축력만을 고려하는 기둥 접합부를 설계하였다. 그로 인해 기둥-보 접합부에서와 기둥 접합부에서 전달되는 모멘트들의 중첩 효과를 간과하여 기둥 접합부의 볼트 슬립항복이 발생, 접합부의 충분한 강성을 확보하지 못하는 결과로 나타나게 되었다. 두번째 문제점 역시 오류로 인하여 기둥 접합부를 설계의 구성하고 있는 접합부재(엔드플레이트, 내부보강판)의 두께상정에 문제가 발생하였다. 마지막으로 철골조립의 용이성을 고려하여 시공여유(Gap)를 설계에 반영한 것이다. 제시된 접합부의 경우 보를 통하여 발생된 모멘트가 다이어프램을 통하여 기둥에 전달되는 과정이 강접이 아닌 단순 접촉에 의한 지압력이 전부이다. 시공여유를 반영을 통해 보에서 전달되는 작은 하중에도 접합부에서는 큰 변위를 일으키게 된 것으로 판단하였다.

처음 두 가지의 문제점의 경우 설계방법 수정을 통하여 해결가능한 문제점이다. 하지만 마지막 문제점의 경우 제안 접합부의 디테일을 수정해야 해결가능한 문제점으로 보인다. 이를 통하여 제안 접합부의 한계상태를 설정하면 다음과 같다.

- 1) Beam yielding
- 2) Panel zone yielding
- 3) Column yielding
- 4) Beam bolted splice slip/bearing
- 5) Column bolted splice slip/bearing
- 6) 시공을 위한 위한 갭의 최소화 또는 기둥-보 일체화

4.2.2 접합부 구조설계

제안 접합부의 한계상태를 제어하기 위해 아래와 같이 구조해석을

진행하였다.



 Mpe: 보소성강도, Muc: 보이음부강도 Mc: 기둥이음부 강도 Mpc: 기둥소성강도

 Vu: 소성힌지위치 소요전단강도, Lp: 기둥플랜지면에서 소성힌지까지의 거리

 Lh: 소성힌지간의 거리, Ry: 예상항복비, db: 보의 춤, dc: 기둥 너비

 Tb,Cb: 보이음부 볼트이음강도, Tc,Cc: 기둥이음부 볼트이음부강도

[그림4.9] 접합부 구조해석

제안 접합부의 이상적인 강도위계는

보 소성강도 < 보이음부 강도 < 기둥이음부 강도 < 기둥소성강도

순으로 정리된다. 보의 소성강도 M_{pe} 를 식[5]를 통하여 구하고 식[6]을 통해 보 이음부 강도 M_{uc} 를 구한다. 보 소성강도를 통하여 구해진 보 이음부 강도이므로 항상 위계는 성립하는 것으로 본다. 또한, 기둥의 소성강도 M_{pc} 와 기둥이음부 강도 $2M_c$ 는 최소 보이음부 강도 M_{uc} 보다 커야한다.

$$M_{pc} = Z_c \times F_{yc} \quad [7]$$
$$M_c \ge \frac{M_{uc}}{2} \quad [8]$$

Fyc: 기둥의 항복강도, Zc: 기둥의 소성단면계수

보 이음부 강도 Muc와 기둥이음부 강도 Mc를 이용하여 각 부재 볼트이음부 강도 Tb=Cb와 Tc=Cc를 구하는 식은 다음과 같다.

$$T_{b} = C_{b} = \frac{M_{uc}}{(d_{b} + t_{d})}$$
[9]
$$T_{c} = C_{c} = \frac{M_{c}}{d_{c}}$$
[10]

td: 다이어프램의 두께

각 부재 볼트이음부 강도를 활용하여 다음 식을 통하여 볼트의 수량을 확인한다.

$$R_{n} = \mu \times D_{u} \times h_{f} \times T_{0} \times n_{s} \quad [11]$$
$$n \geq \frac{T_{b}, T_{c}}{\phi_{n}R_{n}} \quad [12]$$

μ : 부재간의 미끄럼계수, Du : 보정계수 1.13, hf : 필러계수(1.0, 필러존재 시 0.85)
 To: 설계볼트장력[표4.4]참조, ns : 전단면의 수
 θn: 강도저감계수 - 볼트 흘 표준(1.0), 대형/단슬롯(0.85), 장슬롯(0.70)

각 부재 이음부재의 두께는 다음과 같이 산출한다.

$$t_p \geq \frac{T_b, T_c}{\phi_d F_{yd, ycp} b_{fd, cp}}$$
[13]

θ d: 강도저감계수(0.9), Fyd: 다이어프램항복강도, Fycp: 기둥이음판 항복강도
 bfb: 다이어프램 너비, bcp: 기둥이음판 너비

위의 식들을 활용하여 실험체와 동일한 기둥, 보 부재를 사용한 접합부의 설계를 한 결과를 [표4.5]에 간략히 정리하였다.

분류	종류	TT		В		t	볼트	접합개소당	
			п				둥급	볼트수량	
다이어프램	PL	-	1620	х	1620	х	38		28ea
엔드플레이트	PL	-	1168	x	370	x	20	M24	1600
내부보강판	PL	-	1168	x	370	x	20		TUEA

[표4.5] 수정접합부 부재일람표

4.2.3 접합부 디테일 제안

제안 접합부의 가장 큰 문제점인 부재 간의 갭 최소화 또는 기둥-보의 일체화를 해결하기 위한 디테일을 [그림4.10]와 같이 제안하고자 한다.



[그림4.10] 리브보강 수정접합부 형상

기존에 적용되었던 디테일의 문제점은 기둥과 보의 연결방법이 직접연결(강접)이 없이 간접연결(접촉에 의한 지압)만을 적용하고 있다. 그 결과 보에 작용하는 작은 하중에도 접합부 전체에 큰 변위를 유발하는 것을 실험과 수치해석을 통해 확인했다. 기둥과 보의 일체화를 해결하기 위하여 기둥과 다이어프램 사이에 리브를 삽입, 용접을 통한 해결책을 제시하고자 한다. 기존에 제시된 접합부에서도 용접이 일부 적용되고 있고 해결책으로 제시된 용접의 양이 접합부 구성을 위해 큰 변화를 요구하지 않는 범위 내에서 해결할 수 있을 것이라 된다. 또한 삼분절 되어있는 기둥 중 중간기둥과 다이어프램, 엔드플레이트, 내부보강판, 보강리브를 공장에서 제작 후 현장에서는 볼트체결만을 하게되면 최소 현장에서는 용접이 필요치 않아 적용가능한 접합부라 판단하였다. 하지만 추후 목업제작을 통해 제작 및 시공에 대한 디테일 적용가능성을 확인할 예정이다.

4.2.4 리브보강 수정접합부 수치해석

최적 설계와 변경된 디테일을 반영하여 수치해석을 진행하였다. 경계조건 및 하중조건은 4.1절과 동일하게 적용되며 부재 간의 시공여유를 실험과 동일하게 모델링하였다.



[그림4.11] 모멘트-층간변위각 비교곡선





(a) 정면 [그림4.12] 리브보강 수정접합부 응력분포

[그림4.11]은 수정접합부와 1차 해석 시 가장 우수한 접합부 강성을 보인 06-TH의 모멘트-층간변위각 곡선을 비교한 그래프이다. 수정접합부가 비교대상 접합부의 접합부 강성보다 더 우수한 결과를 보여주고 있으며 접합부 전 구간에서 볼트슬립은 확인되지 않았다. [그림4.12]의 응력분포를 확인해 보면 접촉에 의해 발생되는 응력이 줄어들며 새로 보강된 리브로 응력이 분산되는 것을 확인할 수 있다. 또한 다이어프램 전반에 분포된 응력이 접합부 주변에 집중되는 것을 확인할 수 있었으며 그로 인해 기둥 접합부의 국부좌굴에 의한 구조부재 항복 대한 확률이 줄어들 것이라고 보인다.

물론 리브의 두께 및 크기를 최소한으로 제한하여 리브의 항복 양상을 관찰할 수 있었으나 추후 리브의 위치 및 크기에 대한 추가 연구를 통해 접합부의 강성을 향상시킬 수 있을 것이라 판단된다.

51

제 5 장 결론

5.1 연구 결론

본 연구는 압축구조성능이 뛰어난 각형강관을 기둥으로 활용한 접합부를 제안하고자 하였다. 또한 각형강관이 지니고 있는 단점을 극복하기 위해 일방향 볼트와 다이어프램을 접합부에 적용하여 사용하였고 취성파괴를 유발할 수 있는 용접접합을 최소화한 볼트접합 디테일을 적용하였다. 제안된 접합부의 구조성능을 확인하기 위하여 구조성능실험을 실시하였으나 접합부 강성이 기대성능에 못 미치는 결과를 얻게 되었다. 그래서 더욱 정확한 접합부의 문제점을 파악하기 위해 상용구조해석 프로그램을 활용하여 변수해석을 진행하였다. 그 결과 접합부의 강성 저하에 대한 다음과 같은 문제점을 도출하게 되었다.

- 1. 기둥 접합부의 강성부족으로 인한 기둥의 대변형 발생
- 2. 기둥 접합부에서의 볼트 미끄럼 항복 발생
- 기둥과 보의 일체화 부재로 인한 층간변위각 과다 및
 다이어프랚 도입 효과 감소

도출된 문제점의 발생 이유를 분석하면 제안 접합부의 특성을 정확히 파악하지 못하고 설계를 진행하여 발생하게 되었다. 일반적인 기둥-보 접합부의 경우 기둥 접합부와 분리되어 배치되고 설계 시 각 접합부 간의 영향은 거의 없다. 그러나 제안 접합부의 경우 기둥 접합부와 기둥-보 접합부가 동시에 배치되어 각각의 접합부는 밀접하게 영향을 미치고 있다. 그런데 구조성능실험을 위해 설계 시 접합부 간의 영향을 전혀 고려하지 않고 설계되어 문제점이 발생하였다.

그리고 접합부의 제작 편의를 위해 다이어프램에 시공여유(Gap)를 적용하여 접합부재 간의 일체화에 큰 영향을 미치게 된 것으로

52

확인되었다. 용접의 최소화를 위해 접합부재 간의 지압력을 통해 보의 모멘트를 전달하는 것이 제안 접합부의 특징 중 하나인데 시공여유(Gap)를 설계에 적용함으로써 접합부가 작은 하중변화에도 쉽게 변위를 발생시켜 강성저하를 유발시키는 것으로 확인되었다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 접합부의 한계상태를 파악하고 그에 따른 접합부재 간의 강도 위계를 정리하였다. 접합부 한계상태 제어 및 강도위계를 만족시키기 위해 AISC-LRFD와 KBC2017, AISI/AISC 358-16(BEP)을 참고하여 접합부재들의 최적값 도출을 위한 설계과정을 정리하였다. 제안 접합부의 기둥 접합부재와 다이어프램 사이에 리브를 용접을 이용하여 연결하는 방법을 제안하여 기둥과 보의 일체화 성능을 높였다. 그 후 간단한 수치해석 및 비교를 진행하여 접합부 성능향상 효과를 확인하였다. 추후 연구를 통해 리브의 위치 및 두께, 크기 최적화를 통해 접합부 성능을 크게 향상시킬 수 있을 것이라고 사료된다.

5.2 추가 연구 디테일

본 연구는 용접 접합을 볼트 접합으로 대체하는데 가장 큰 의미를 두고 있다. 하지만 앞서 수정 제안된 접합부의 경우 일부 용접을 사용하여 접합부를 완성하고 있다. 그래서 추후 연구과제를 통해 무용접 혹은 현장 무용접을 지향하는 접합부를 개발하기 위한 노력을 하고자 한다.

본 연구에서 수정 제안된 접합부의 경우 이상적으로는 현장에서 무용접이 가능하지만 실제 시공 시 용접에 대한 강재의 변형의 가능성과 조립을 위한 시공의 여유 등의 이유로 현장용접을 통한 리브의 고정이 필요할 것으로 보인다. 그렇게 되면 본 연구를 통해 얻고자 하는 접합부의 특징이 퇴색되어 버리고 말 것이다. 그래서 [그림5.1]의 접합부를 추가 제안하고자 한다. 물론 접합부에 대한 성능은 본 연구 이후 후속연구를 통하여 알아볼 것이다. [그림5.1]의 접합부 디테일의 가장 주목해야 할 점은 리브를 용접으로 접합하기는 하지만 하나의 보강구 형태로 제작하여 현장에서는 볼트접합을 하는 방식에 있다. 보강구의 구성은 기둥과 면하는 철판과 다이어프램과 면하는 철판의 조합으로 이루어지며 접합부와 고정을 위해 단슬롯형 구멍이 천공되어 있다. 이러한 구조에 리브를 사이에 배치하여 하나의 접합부재로 만들어 현장에 제공하는 방식이다.



[그림5.1] 리브 보강구를 이용한 접합부 제안



[그림5.2] 리브 보강구 개략 도면



[그림5.3] 리브보장판의 설치방법

리브 보장구에 단슬롯형 구멍을 천공한 이유는 볼트 접합되는 면의 수가 많아지게 되면 볼트의 체결 난이도가 상승하여 시공저하에 원인이 되기 때문에 이를 해소하기 위해 단슬롯홀을 배치하였다. 보장구의 재질선택 시 용접구조용 철판이 아닌 주물 혹은 주강을 이용하여 제작하게 되면 완전 무용접 접합부도 가능하게 될 것으로 추정된다. 또한 접합부재의 규격화를 통해 대량생산으로 인한 제작비의 이점도 발생가능할 것으로 보인다. 하지만 접합부의 구조성능은 후속 연구를 통하여 확인하여야 할 것으로 보인다.

참고문 헌

- 이장춘, 이종석, 1994, 각형강관 기둥과 H-형강 보 접합부의 휨 거동에 관한 연구, 한국강구조학회 논문집, vol.6, no.3, pp157-164
- 장보라, 심현주, 김용익, 정진안, 오영석, 김상섭, 최병정, 이은택, 2010, 내진각형강관 기둥-H형강 보 접합상세의 구조성능 평가, 한국강구조학회 논문집, vol.22, no.4, pp305-312
- 김선희, 염경수, 최성모, 2014, 관통형 다이아프램을 갖는 조립형 콘크리트 충전 각형 합성기둥-보 접합부의 내진성능, 한국강구조학회 논문집, vol.26, no.5, pp431-439
- 4. 문태섭, 이명재, 오영석, 신경재, 1993, 각형강관을 이용한 기둥-보 접합부에 관한 연구 (1) - 접합부 실험 및 내력의 항복선 이론에 의한 고찰, 대한건축학회 논문집, vol.9, no.6, pp135-142
- 진주호, 김두환, 김현숙, 신진원, 박구연, 이경구, 2018, 각형강관 기둥-H형강 보 신형상 내진접합부의 실험적 평가, 한국강구조학회 논문집, vol.30, no.2, pp77-85
- 정진안, 한석종, 양승일, 2010, 외다이아프램을 사용한 현장용접형 각형강관/H형강보 접합부의 탄소성거동에 관한 연구, 대한한건축학회 논문집, vol.25, no.8, pp21-28
- 7. 심현주, 장보라, 정진안, 이은택, 2010, 원사이드 볼트를 이용한 내진 각형강관 기둥-H형강 보 접합부의 구조성능평가, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, vol.22, no.4, pp.355-363
- 진주호, 김두환, 김현숙, 박구연, 2016, 강관 볼트접합부를 위한 일방향 볼트의 성능 평가, 한국강구조학회, 학술발표대회 논문집,

vol.27, no.1, pp197-198

- 김영주, 오상훈, 유흥식, 2006, 각형강관 기둥을 가진 철골모멘트 접합부의 변형능력, 한국지진공학회 학술대회 논문집, pp.249-258
- 10. 김재건, 신경재, 오영석, 문태섭, 1998, 고력볼트를 사용한 두께중복형 엔드플레이트 형식 충전콘크리트 각형강관기둥-H형강보 접합부의 거동에 관한 실험적 연구, 대한건축학회, 논문집, vol.14, no.6, pp.41-48
- 11. 이철호, 박종원, 1996, 반복재하 실험에 의한 고력볼트 철골
 이음부의 내진거동 연구, 한국지진공학회 논문집, vol.2, no.4,
 pp.115-122
- 12. 이철호, 정종현, 김성용, 2015, RBS 약축 용접모멘트접합부의 내진성능 평가, 한국강구조학회, 논문집, vol.27, no.6, pp.513-523
- 13. 이철호, 박종원, 1998, 반복재하 실물대 실험에 컴럼트리(Column-Tree) 형식 철골 모멘트 접합부의 내진거동 연구,
 한국강구조학회, 논문집, vol.10, no.4, pp.629-639
- 14.Packer, J.A. ,1998, Mechanics and Design of Tubular Structures, Chapter 3: Behaviour and Design of Bolted and Welded Connections. pp.130-132
- Sadri, S. ,1994, Blind bolting. Modern Steel Construction, American Institute of Steel Construction, pp.44–46
- 16.Kato, B. ,1988, Bolted Beam to Column Moment Connections. CDECT Report 6C-88/6
- 17. Ochi, K., Yamashita, Y., Kurobane, Y., Tokutome, K., and Tanaka, M. ,1998, New Bolted Connections between RHS Columns and I-section Beams. Proc. *5th Pacific Structural Steel Conference*, Seoul, Korea, pp.753–758.
- 18. ANSI/AISC 360-16, 2016, Specification for Structural Steel

Buildings, American Institute of Steel Construction

- 19. ANSI/AISC 358–16, 2016, Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications, American Institute of Steel Construction
- 20. Hsieh, S.H. and Deierlein, G.G., 1991, Nonlinear Analysis of Three-Dimensional Steel Frames with Semi-Rigid Connections, Computers and Structures, Elsevier, Vol. 41, No. 5, pp. 995-1,009.
- 21.FEMA, 1997, "Seismic Performance of Bolted and Riveted Connections" Background Reports; Metallurgy, Fracture Mechanics, Welding, Moment Connections and Frame Systems Behavior, Bulletin No. 288, *Federal Emergency Management Agency*
- 22. Steel Design Guide, American Institute of Steel Construction
- 23. Sumner, Emmett Ashworth, 2003, Unified Design of Extended End-Plate Moment Connections Subject to Cyclic Loading, Virginia tech Doctoral Dissertations
- 24. KS B 2819, 2013, 구조물용 토크-전단형 고장력

볼트·6각너트·평와셔의 세트, 기술표준원, 지식 경제부

25.KS D 3515, 2018, 용접 구조용 압연 강재, 기술표준원, 지식 경제부

Abstract

A Fundamental Study on the Development of Seismic Connections for RHS Columns to H-Beam with Minimized Welding

Doohwan Kim

Department of Engineering Practice The Graduate School of Engineering Practice Seoul National University

Rectangular Hollow Section (RHS) has excellent performance. However, the features of closed sections are mostly welded connections, which are very complex, require a lot of resources for assembling and processing, and cannot expect uniform performance. In addition, the recent earthquake in Gyeongju has caused growing interest in seismic moment connections, and the weld joint with brittle fracture is vulnerable to earthquakes.

Another problem with the use of RHS columns is that when composed of H-shaped steel beams, it causes out of plane deformation on the flange of the RHS, resulting in reduction of the rigidity and strength of the connections. Japan, which is commonly used for RHS columns, is overcoming problems by utilizing diaphragm. To compensate for these problems, the purpose of the proposal was to provide a seismic connection to the column of RHS using oneway bolts and diaphragm.

However, the cyclic loading test on the proposed connection showed results close to the pin connection, not the rigid or semirigid one. Therefore, the analysis of variables was carried out using the commercial structure analysis program to identify the exact problem based on the results of the experiment. A numerical analysis was performed through various variables such as thickness of the column joint plate, performance of the joint bolts, quantity of bolts, and presence of construction margin, confirming improvement of joint performance according to the quantity of joint bolts and the presence of construction margin. For the purpose of establishing and controlling the proposed connection limit conditions and the strength hierarchy between each joint member to resolve the identified problems, the optimum value of the joint member was derived by referring to AISC-LRFD and KBC2017, AISI/AISC 358-16 (BEP). In addition, by combining ideas that could be referenced to the integration of columns and beams, the proposed revision of ribs and connections were proposed and the evaluation was conducted through numerical analysis.

The results showed that the connection has improved stiffness and is close to FR connections compared to the weld joint of the column and diaphragm. However, it is said that the location, size and thickness of ribs added in the revision process should be supplemented through additional R&D.

Keywords : Rectangular Hollow Section (RHS), Bolt, Seismic, Moment connection, oneway, Diaphragm, Rib reinforcement Student Number : 2017-24768

감사의 글

늦은 나이에 학업연장이라는 큰 기회를 가지고 대학원에 들어온 지도 벌써 2년이 되었습니다. 비전공자로서 ㈜피에스테크 연구소에 소속되어 부족함을 느껴 늦게 회사에 도움이 되고자 배움에 길을 택하게 도와주신 사장님과 임직원분들께 깊은 감사의 말씀드립니다. 특히, 박구연 소장님을 비롯한 연구소직원들(김현숙 부장님, 진주호 과장님)의 희생과 도움으로 여기까지 올 수 있었다고 생각합니다. 앞으로 더 열심히 연구소에 도움이 될 수 있도록 노력하겠습니다.

구조 전공이 아닌 저를 지도해 주시고 이렇게 한 편의 논문을 완성할 수 있도록 도움을 주신 이철호 교수님과 강현구 교수님께도 깊은 감사의 말씀 올립니다. 또한 입학 초기에서부터 지금까지 한결 같은 관심과 지도를 보내주신 박창우 교수님께도 깊은 감사를 드립니다. 그리고 2년간 서로 경쟁과 격려, 깊은 유대감으로 도움을 준 공학전문대학원 동기, 선배님들께도 감사의 말씀드리며 더불어 앞으로도 서로 가는 길은 다르지만 좋은 인연 이어갔으면 좋겠습니다.

그리고 2년간 제 뒤에서 묵묵한 응원과 육아로 저를 보필해 준 아내 김희정에게 사랑하며 깊은 감사를 드립니다. 힘들고 지칠 때 갖은 애교와 애정표현으로 저의 비타민이 되어준 딸 김민서도 사랑한다고 말하고 싶습니다. 학부생활 6년, 대학원 2년간 묵묵히 응원을 보내주신 아버지와 어머니께 감사드리고, 이제 대학생활을 시작하게 된 동생 다연에게도 응원을 보냅니다.

마지막으로 저를 응원해주신 모든 분들께 감사의 글 올리겠습니다.

감사합니다.

61