

건축물 시공 자동화 시스템을 위한 자립형 철골 접합부의 시공성 분석

Constructibility Analysis of Self-supported Steel Joint for Automated Construction System

김 동 건*	양 성 우**	김 태 훈***
Kim, Dongkeon	Yang, Sung-Woo	Kim, Taehoon
신 윤 석****	조 훈 희*****	강 경 인*****
Shin, Yoonseok	Cho, Hunhee	Kang, Kyung-In

Abstract

Construction automation and robotics are being introduced as an efficient alternative to overcome troubles caused by lack of skilled labors. To accomplish effective automated construction system, design for automation(DFA) should be performed in parallel with the development of core technologies such as control and sensing of robots. In Korea, the development of robotic crane-based construction automation(RCA) system is progressing, and the research group has recently developed newly designed steel joint to improve the efficiency of the system. However, performance of the new system should be examined prior to its application on construction sites. Therefore, This study analyzed performance of the new steel frame focused on its constructibility by carrying out mock-up test. As a result, the steel frame satisfied the standards of allowable stress and deflection. It also enables to reduce the time for installation.

키 워 드 : 시공 자동화 시스템, 자립형 철골 접합부, 시공성 분석, 실물모형실험

Keywords : Automated Construction System, Stand-alone Steel Joint, Constructibility Analysis, Mock-up Test

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

건설자동화(Construction automation and robotics)는 건설기능인력의 부족 문제에 대한 효과적인 대안이 될 수 있으며, 제한된 부지 여건에 따라 지하 및 해상공간 등의 개발이 증가하고 있는 현재의 건축 경향을 반영할 때 미래의 건설 산업은 다양한 산업 기술과 접목되어 건설 자동화추세는 더욱 가속화 될 것이다(이준복, 2007).

최근 국내에서도 단일 공정 혹은 작업용 자동화 장비의 개발을 넘어 건물 구조체의 시공 자동화 시스템 개발을 위한 연구가 진행되고 있다. 이러한 건설 자동화 시스템의 실현을 위해서는 자동화 장비의 작동 및 제어와 관련된 핵심 요소기술

의 개발뿐 아니라 자동화에 적합한 설계(Design for automation; 이하 DFA)가 병행되어야 한다(A. Scott Howe, 2000). 특히, DFA는 부재 설계의 변경 외에도 자동화 장비로 대체되는 작업의 선·후행 공정의 개선을 통해 시공 효율성을 극대화하기 위한 것으로 건설자동화에 있어 투자 대비 효율이 가장 높은 분야라 할 수 있다.

이에 최근 국내 시공 자동화 시스템 개발 연구단에서는 자동화 장비의 효과적인 적용 및 안전성 향상을 위하여 새로운 형태의 자립형 철골 접합부 부재를 개발하였다. 하지만 개발된 부재의 실제 현장 적용을 위해서는 우선적으로 부재 성능에 대한 검토가 반드시 요구된다.

따라서 본 연구에서는 실물모형실험(Mock-up test)을 통해 개발된 철골 접합부의 구조 안전성의 검토 및 단위 작업시간의 측정을 수행함으로써, 개발 부재의 타당성 및 향후 적용 가능성에 대해 고찰하였다.

1.2 연구의 방법 및 범위

본 연구는 철골 구조체 공사를 대상으로 현재 연구가 진행 중에 있는 로보틱 크레인 기반 시공 자동화 (Robotic crane-based construction automation; 이하 RCA) 시스템의

* 고려대학교 건축공학과 학사과정
 ** 고려대학교 건축·사회환경공학과 석사과정
 *** 고려대학교 건축·사회환경공학과 박사과정
 **** 고려대학교 건축·사회환경공학과 박사수료
 ***** 고려대학교 건축·사회환경공학과 부교수, 공학박사
 ***** 고려대학교 건축·사회환경공학과 교수, 공학박사
 본 논문은 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에
 서 위탁 시행한 2006년도 건설기술혁신사업[과제번호:06첨단융
 합D01]의 지원으로 이루어졌습니다.

효율화를 목적으로 개발된 철골 접합부 부재의 시공성에 대한 분석을 범위로 한다. 본 연구에서의 철골 접합부란 기둥과 큰 보(girder), 큰 보와 작은 보(beam)의 접합부를 통칭한다. 철골 접합부의 시공성 분석을 위해 기둥과 보 접합부 1개소를 대상으로 Mock-up test를 수행하였다. 이를 위해 우선 접합부 상세 설계 도면을 기반으로 전문 철골 제작 업체를 통해 기둥, 보 및 부속 철물을 제작하였으며, 기둥 설치 후 보 거치 과정에서 변형 게이지(strain gauge)와 변위계를 이용한 구조 안전성을 측정하였다. 또한 실험 과정에서 보 설치 작업시간을 측정하여 기존 공사 방식의 작업시간과 비교함으로써 개발 부재의 시공성에 대한 분석을 실시하였다.

2. RCA 시스템 및 자립형 철골 접합부 분석

2.1 RCA 시스템 분석

현재 국내에서 연구개발이 진행되고 있는 RCA 시스템은 국내 건설 환경 및 실정에 맞는 고층 건물 구조체의 철골 조립 자동화를 목표로 한다(박귀태 외, 2007). 이를 위해 국내 고층건물 프로젝트에 일반적으로 채택되는 코어 선행방식의 철골철근콘크리트구조 건물을 대상으로 하며, 기존 기술의 활용을 도모한다.

이에 따른 RCA 시스템의 핵심 개발 기술은 그림 1과 같다. 기존 타워크레인을 기반으로 무선인식 기술을 활용한 지능형 타워크레인과 자동화 장비의 작업 공간으로써 외부 환경 요소의 최소화를 위한 건설공장(Construction factory; 이하 CF)의 개발을 추진한다. CF 내부에는 볼트 체결을 위한 로봇 시스템(Robotic crane)만을 설치하여 경량화함으로써 국내 건설 환경에 맞는 실용적이고 경제적인 시스템을 구축한다.

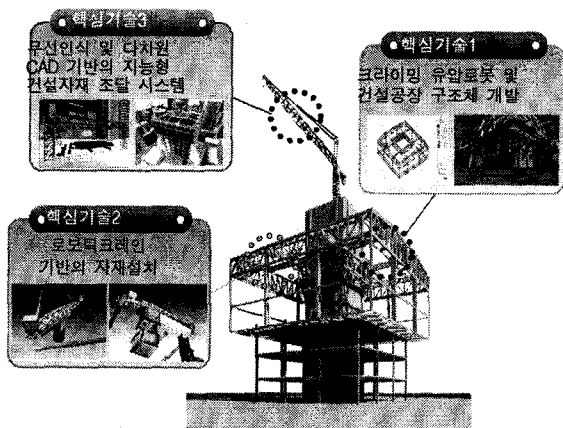


그림 1. RCA 시스템 핵심 개발 기술

이 과정에서 로봇틱 크레인을 이용한 볼트 체결 자동화는 기존 철골 조립 공정 중에서 중대재해 사고 발생률이 가장 큰

보 조립 공정을 대상으로 이루어진다(임현호, 2008). 이 작업의 자동화를 실현하기 위해서는 볼트 작업동안 보 부재의 흔들림이 없어야 하며, 플레이트와 부재간 볼트 구멍의 오차가 거의 존재하지 않아야 한다. 이를 위해 기존 인력에 의해 수행되던 방식과는 다른 접합부 부재 디자인이 요구된다.

2.2 자립형 철골 접합부 분석

자동화 시스템에 적합한 철골 접합부의 부재 디자인을 위해 우선 RCA 시스템 개발 참여자 중 직접적으로 연관을 가진 로보틱 크레인 개발자들을 대상으로 철골 접합부 디자인시 고려가 요구되는 사항에 대한 조사를 실시하였다. 이러한 요구사항들을 바탕으로 접합부 형태, 접합 및 부재 유도 방식 등에 대한 대안들을 도출하였으며, 각 대안들의 경제성 및 기술성에 대한 평가를 통해 가장 적합한 부재 디자인을 선정하였다(진일권 외, 2008). 이를 바탕으로 상세 설계도면을 작성하고 구조 사무소에 구조적 평가를 의뢰하여 볼트 구멍간 간격 및 개수, 플레이트 길이 및 두께를 조정하여 최종적으로 부재를 설계하였다(그림 2).

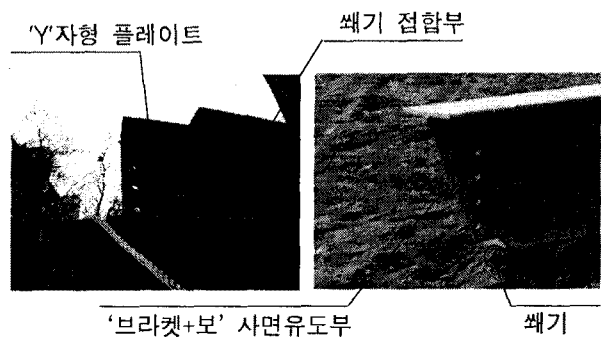


그림 2. 자립형 철골 접합부 부재 구성요소

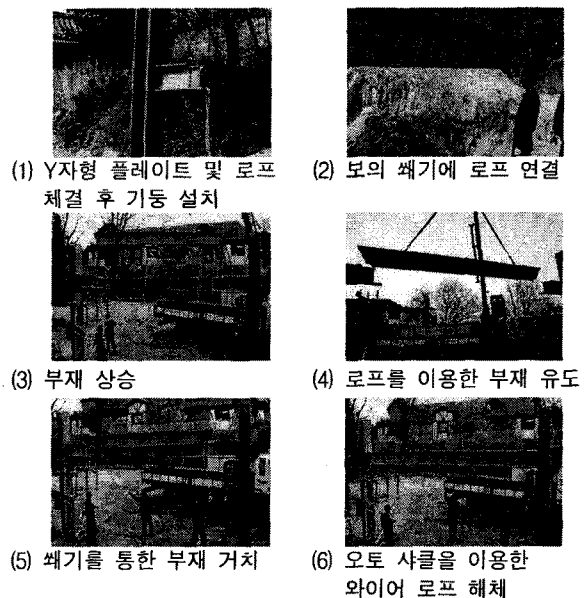


그림 3. 자립형 철골 접합부 부재 설치 프로세스

개발된 철골 접합부 부재는 브라켓 측에 선조립된 Y자형 플레이트, 사면 형태의 접합면과 더불어 로프 유도를 통해 별도의 가이드 없이 보의 자중에 의해 거치가 이루어지며, 썰기 형태의 접합부를 통해 보다 정밀한 부재 거치가 가능하다. 이의 설치 프로세스는 그림 3과 같다.

3. 자립형 철골 접합부의 시공성 분석

3.1 Mock-up test 수행 방법

개발된 자립형 철골 접합부의 성능 평가를 위해 설계도면을 바탕으로 전문 철골 제작 업체를 통해 부재를 제작하여 Mock-up test를 수행하였다. Mock-up test는 기둥 및 보 접합부 1개소만을 대상으로 하였으며, RCA 시스템 연구단의 시험시공 예정 부지 내에서 이루어졌다.

우선 Y자형 플레이트와 유도용 로프의 설치 후 기둥을 양측하여 가조립 상태로 체결하였으며, 보 거치 과정에서 구조적 안전성의 검토를 위해 변형 게이지와 변위계를 설치하였다. 이후 설치 프로세스에 따라 보의 양측, 로프 연결, 거치를 수행하였으며, 변형을 및 변위를 측정하였다. 실험은 총 15회에 걸쳐 보의 재상승과 거치, 측정을 수행하였으며, 각 단위 작업의 시간도 함께 측정하였다.

3.2 Mock-up test 결과 및 시공성 분석

3.2.1 구조 안전성

철골 보 부재는 거치 후 바로 타워크레인의 후크 체결을 해제한 상태로 로보틱 크레인의 볼팅 작업이 이루어지기 전까지 거치 상태를 유지하여야 한다. 이 때 브라켓 및 접합부에 작용하는 응력 및 처짐이 구조적 허용범위 내에 있어야 한다. 따라서 부재에 작용하는 응력 및 처짐 측정을 위해 변형 게이지와 변위계를 설치하였으며, 각각의 설치 위치는 구조 전문가와의 상담을 통해 결정하였다. 보의 거치가 시작되는 시점부터 거치 후 타워크레인의 트롤리를 하강시켜 보의 자중을 브라켓에서 지지하도록 한 상태로 측정값의 변화가 발생되지 않는 시점까지 약 30초~1분간 측정하였으며, 상기 과정을 총 15회에 걸쳐 반복 실시하였다. 측정값은 데이터 자동 기록기(data logger)를 통해 휴대용 컴퓨터에 실시간 저장되도록 하였다.

변형 게이지는 그림 4와 같이 브라켓 상부 내·외측 각 3개소와 썰기 접합부 하부 3개소로 총 9개소에 부착하였으며, 측정된 변형률은 식 (1)을 통해 작용 응력을 산출하였다.

$$E = \sigma / \varepsilon \dots\dots\dots (1)$$

여기에서, E=탄성계수, ε=변형률, σ=응력

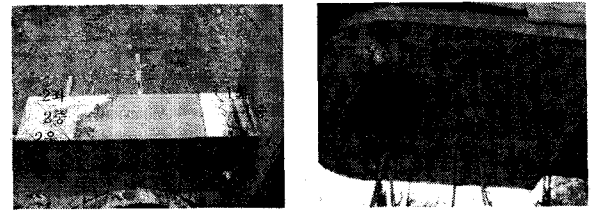


그림 4. 변형 게이지 설치 위치

실험에 사용된 강재는 SS400으로 탄성범위 내에서 최대 허용응력(f_y)은 235MPa, 탄성계수(E)는 2.1×10^5 MPa로 보았다. 표 1은 식(1)에 의해 산출된 9개소 전체의 응력 분포를 나타낸다. 그 결과 실제 발생 응력은 최대 허용응력보다는 충분히 작게 나타나 브라켓 및 썰기 접합부는 보 부재의 자중에 견디기에 충분한 것으로 사료된다.

표 1. 브라켓 및 썰기 접합부 부재 작용 응력 분포

구분	응력 (MPa)								
	1좌	1중	1우	2좌	2중	2우	3좌	3중	3우
1	2.0	4.1	2.6	2.4	15.9	10.4	5.3	4.1	7.5
2	2.2	4.5	4.1	12.9	1.4	-	-	6.5	9.4
3	1.0	2.9	3.3	0.6	1.0	1.4	6.9	4.7	8.6
4	2.2	9.4	21.2	87.5	3.9	11.8	9.2	6.7	10.0
5	28.7	4.9	4.3	7.7	2.6	3.1	5.9	3.7	4.3
6	1.2	2.5	2.0	1.0	0.6	-	2.2	35.3	5.9
7	0.4	2.2	1.8	-	-	-	4.9	5.9	8.4
8	0.6	-	0.8	1.0	0.0	-	1.6	3.9	6.1
9	7.6	20.9	2.2	0.0	20.6	0.0	0.8	46.7	6.7
10	0.8	9.4	11.4	0.0	1.6	0.0	0.4	1.0	4.1
11	18.1	8.4	3.1	-	-	-	2.6	4.3	22.4
12	1.0	4.9	2.1	-	0.2	-	1.0	10.6	5.9
13	0.6	2.2	1.6	-	-	3.5	17.3	5.1	17.7
14	1.2	2.8	4.5	0.4	0.4	22.2	0.8	10.6	11.0
15	2.2	3.0	2.9	2.0	16.9	0.8	16.3	0.2	13.0

* 음영부분은 각 측정 위치에서의 최대 작용응력을 나타냄
** '-' 표시된 부분은 예상되는 응력의 반대 방향의 값으로 나타나 오류로 추정됨

변위계의 경우 브라켓 및 썰기 접합부 하부 각 1개소로 총 2개소에 설치하였다. 최대 허용 처짐 및 이론상 발생하는 처짐을 계산하기 위하여 브라켓 및 썰기 접합부는 기둥과 브라켓의 연결부를 지점으로 하는 캔틸레버 보로 보고, 브라켓의 단부에 보 자중의 1/2크기의 집중 하중이 작용하는 것으로 가정하였다. 이러한 가정하에서 최대 허용 처짐은 브라켓 길이의 1/200로 5.5mm이며, 이론상 발생하는 처짐은 경사면의 형상을 사각형으로 가정하고 모멘트 면적법을 이용하여 계산한 결과 브라켓 및 썰기 접합부 하부에서 각각 0.00083mm, 0.015845mm로 나타났다(그림 5).

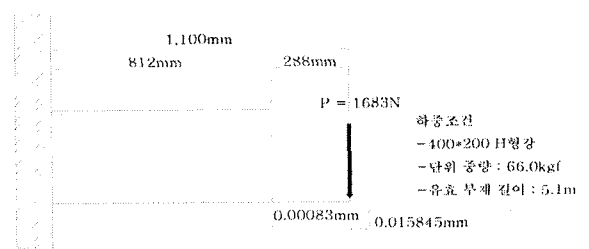


그림 5. 브라켓 및 썰기접합부 하부 이론상 발생 처짐

실제 측정치 중 초기값과의 최대 편차를 보인 값을 최대 발생 변위로 보았을 때, 브라켓 및 썸기 접합부 하부에서는 최대 발생 변위는 각각 2.5mm, 2.8mm로 나타났다. 이는 이론상 처짐값보다는 훨씬 큰 값으로, 실제 실험시의 충격하중, 진동, 게이지 오차 등에 기인한 것으로 보인다. 하지만, 최대 허용 처짐보다는 작게 나타나 결과적으로 구조적 안전에는 문제가 없는 것으로 사료된다.

3.2.2 단위 작업시간 측정 및 기존 방식과의 비교

개발된 철골 부재의 시공성은 보의 양중을 위한 와이어로프 체결부터 부재 거치까지 단위 작업당 소요 시간을 도출하고, 기존 방식에서의 소요 시간과의 비교를 통해 측정 가능하다(표 2). 자립형 철골 부재를 이용한 부재 설치 작업에서 기둥의 경우 기존 방식과는 달리 기둥의 양중 이전에 Y자형 플레이트의 볼트 및 유도로프 체결 시간이 별도로 요구되나, 이는 부재 반입 및 적재 후 작업이 가능하므로 추가 시간이 소요되지 않는 것으로 간주하였다.

표 2. 기존 방식과 자립형 철골 부재를 이용한 방식의 보 부재 설치 프로세스 및 작업시간 비교

기존 부재			자립형 철골 부재		
프로세스	소요시간 (분)		프로세스	소요시간 (분)	
	최소	최대		최소	최대
와이어로프 체결	0.5	1.5	와이어로프 체결	0.5	1.5
양중	2.0	5.0	양중	2.0	5.0
포지셔닝 및 유도로프 해체	2.0	4.5	유도로프 체결	0.5	1.2
볼트 체결	2.0	5.0	재상승 및 거치	1.0	1.8
작업자 이동 및 와이어로프 해체	1.0	2.0	와이어로프 해체	0.1	0.2
계	7.5	18.0	계	4.1	9.7

기존의 보 부재 설치 과정에서는 유도로프의 체결이 양중 이전에 보 부재의 볼트구멍에 체결된 상태로 타워크레인에 의한 양중이 이루어져 브라켓 양쪽에 작업자들이 보의 포지셔닝 후 유도로프를 해체하게 되며, 볼트 체결 후 작업자들이 보 위로 이동하여 타워크레인과 연결된 와이어로프를 해체하게 된다. 반면 자립형 철골부재는 조립층이 아닌 한 개 층 아래에서 유도로프가 썸기 하단의 구멍에 체결되어 거치 직후 해체하지 않아도 되며, 와이어로프 해체시 타워크레인 후크에 오토 샤클(Auto shackle) 장치를 이용해 자동으로 해체가 됨으로써 브라켓 및 보 위로 작업자의 이동이 요구되지 않는다.

기존 방식과는 달리 하부에서 부재의 유도가 가능할 뿐 아니라 Y자형 플레이트와 사면 형태의 접합부를 통해 빠르고 안정적으로 부재 거치가 이루어짐으로써 기존의 부재 포지셔닝 및 유도로프 해체 시간보다 약 0.5~1.5분 정도 작업시간의 단축이 가능한 것으로 나타났다. 또한 와이어로프의 해체가 자동으로 이루어짐으로써 약 1분 이상 작업시간의

단축이 가능하였다. 결과적으로 볼트 체결시간을 제외하면 기존 방식에 비해 약 1.5~3분 정도 보 부재 1개당 설치시간의 단축이 가능할 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 국내 건축물 시공 자동화 시스템을 대상으로 DFA를 통해 개발된 철골 접합부 부재의 시공성에 대한 분석을 수행하였다.

Mock-up test를 통해 우선 부재에 작용하는 응력 및 처짐을 측정한 결과 최대 허용범위를 만족함으로써 구조적으로 안전한 것으로 나타났다. 다만, 볼트 체결이 로봇에 의해 이루어진다는 점을 감안할 때 플레이트와 브라켓간 볼트 구멍의 오차가 로봇의 볼팅이 가능하도록 기계적 허용범위 또한 만족하여야 할 것이다. 실험결과 크기는 약 2~3mm의 오차가 발생하였으며, 이는 브라켓 측 볼트 구멍 크기의 정밀 가공 및 썸기 형태의 개선을 통해 기계적 허용범위 내로 조정이 가능할 것으로 사료된다.

단위 작업시간을 측정하고 기존 부재를 이용한 방식과의 비교를 통해 부재 1개당 약 1.5~3분 정도의 설치 시간 단축이 가능할 것으로 파악되었다. 따라서 규모가 큰 고층 건물의 시공에 적용할 시 전체 공기를 크게 감소시킬 수 있을 것으로 보인다. 또한 비숙련공만으로 설치 작업이 가능하고, 특히 사고 발생 위험성이 높은 고소 작업을 제거함으로써 안전사고를 방지할 수 있다는 측면을 감안할 때 기존 방식과 대비하여 자립형 철골 접합부 부재를 이용한 공사방식은 충분한 시공성을 지닌 것으로 사료된다.

따라서 개발된 자립형 철골 접합부 부재는 자동화 시스템의 효율성에 큰 향상을 가져올 수 있을 뿐 아니라 기존 인력을 이용한 설치 작업에 적용시 안전성을 크게 개선시킬 수 있을 것으로 보여진다.

참 고 문 헌

1. 박귀태 외, 로봇틱 크레인 기반 고층건물 구조체 시공 자동화 시스템 개발, 06첨단융합 D01 건설교통부 중간보고서, 고려대학교, 2007
2. 이준복, 건설자동화 및 로봇화 기술의 현재와 미래, 건축, pp. 25-27, 2007
3. 임현호, 안전성 및 생산성을 고려한 자동화 요구도 지수의 개발, 고려대학교 석사학위논문, 2008
4. 진일권, 신윤석, 이용균, 유위성, 조훈희, 강경인, QFD를 이용한 철골 조립 자동화 시스템의 부재 디자인 개발 프로세스 연구, 한국건축시공학회 학술기술논문발표회 논문집, 8(2), pp. 213-218, 2008
5. A. Scott Howe, Designing for automated construction, Automation in Construction, 9(3), pp.259-276, 2000