

로보틱 크레인 기반의 고층건물 구조체 시공자동화시스템

글 | 강경인 | 고려대학교 건축·사회환경공학과 교수 | 전화 02-3290-3336 E-mail : kikang@korea.ac.kr

1 서 언

1990년대 초 일본의 소위 Super Genecon들은 앞을 다투어 건물 시공자동화시스템을 개발하고 그 성과를 알리기 시작하였다. 오바야시구미에서 개발한 ABCS(Automated Building Construction System, 철골구조 적용)와 빅-캐노피(The BIG CANOPY System, RC구조 적용), 시미즈건설의 SMART(Shimizu Manufacturing System by Advanced Robotics Technology), 다이세이건설의 T-UP, 다케나카건설의 Roof Push UP, 마에다건설의 MCCS, 카지마건설의 글로업 등이 바로 그러한 시스템들이다.

이 시기, 일본 건설산업은 세계 최고 수준의 기술력을 바탕으로 안정적인 내수시장과 막대한 해외시장을 확보하면서 최고의 전성기를 구가하였다. 시공자동화시스템은 이러한 일본의 건설기술력을 과시하기에 아주 좋은 수단으로, 대외적으로는 세계 최고의 건설 기술 국가임을 알리는 데 선봉장 역할을 하였으며, 대내적으로는 3D 이미지의 건설산업을 첨단 매력적인 이미지로 변신시키는 데 상당부분 기여하였다. 물론 이 시스템들은 고령화와 젊은 노동 인력의 건설시장 진입 감소를 해결할 수 있는 충분한 가능성을 보여주기도 하였다.

이 시스템들은 각 기업마다 다소간의 차별성은 있으나, 건축물의 상부에 건설공장(Construction Factory, 이하 CF)을 설치하며 CF 안에 여러 대의 천정주행 크레인을 설치하고, 이를 이용하여 자재를 건설공장 안에서 원하는 위치로 이동하는 개념이며, 구조물의 접합을 위한 용접자동화 로봇을 개발하여 활용하였다는 공통점을 가지고 있다. 이 시스템들은 전천후 CF를 이용하여 현장의 작업환경을 마치 공장에서 작업하는 것과 같은 작업환경(안전, 안정, 청결한 환경)을 제공하고, 양중 및 자재운반 공정의 자동화, 현장작업의

간소화를 통하여 노동자에게는 안정적인 전천후 시공환경의 확보를 해주고, 시공자에게는 현장노동력의 절감, 공사기간의 단축, 생산성 향상 등의 장점을 제공하는 효과를 기대할 수 있었다.

그러나 1990년대 후반 일본의 버블경제가 붕괴되면서 이들 시스템들은 바로 '경제성'이라는 측면에서 시장의 외면을 받게 되었고, 현재에는 일부 개량된 모델만이 극히 제한적으로 적용되고 있을 뿐 거의 사장된 실정이다.

그런 건물 자동화시공시스템들이 최근 들어 국내의 건설산업을 혁신시키기 위한 처방전으로 재조명 받고 있다. 국내 건설산업의 미래환경은 Global 무한경쟁체제의 돌입, 삶의 질 향상과 인구 고령화로 대변되는 사회적 환경변화 그리고 IT(Information Technology), BT(Bio Technology), NT(Nano Technology), RT(Robot Technology) 등 주변기술의 환경변화의 영향권에 놓이게 되었으며, 이를 가장 효과적으로 대응하기 위한 수단이 바로 첨단융합 건설기술의 개발이라 할 수 있다.

즉 건축물 시공자동화시스템은 기존의 전통적인 건설산업에 IT, RT 등 첨단기술을 융·복합함으로써 시장지배적인 혁신기술을 개발하는 것으로 기존의 노동집약적인 국내 건설산업을 세계적 수준으로 향상시키는 데 크게 일조할 수 있는 것이다. 이에 본 고에서는 과거 일본의 건축물 시공자동화시스템의 현황과 한계점을 분석해 보고, 현재 국내에서 진행되고 있는 연구개발사업의 개략적인 내용을 소개해 보고자 한다.

2 일본의 시공자동화시스템

1970년대 후반부터 건설 로봇 및 자동화 시장을 주도하고 있는 나라는 일본이다. 일본은 1970년대 후반부터 현재까지 건설 로봇 분야에 있어 많은 연구개발을 통해 가시적인 성과를 거두었으며, 가

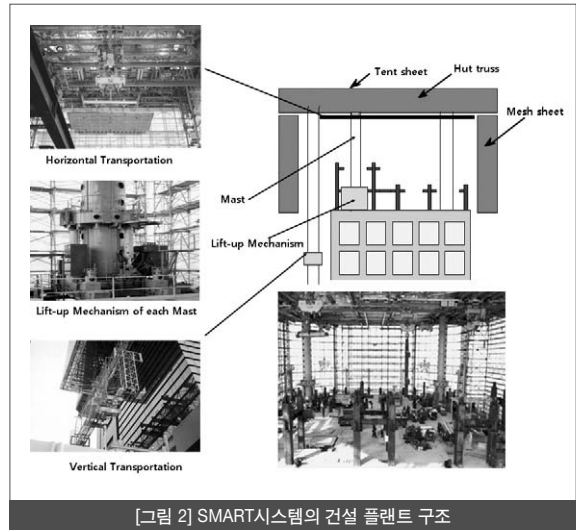
장 진보된 기술을 확보하고 있다. 일본의 건설자동화 장비 개발방향은 슈퍼 제네콘이라 불리는 대기업을 중심으로 발전해왔다는 특징이 있다. 이는 유럽이나 미국 등이 국가 차원에서 개발을 주도했다는 측면에서 차이점이 있는 것이다. 그만큼 일본의 자동화장비들은 건설현장에 직접 적용될 수 있는 장점이 있다.

일본은 콘크리트 미장용 로봇, 외벽 청소 및 용접로봇 등 다양한 자동화 장비들이 개발되어 현장에 적용되고 있는데, 아래 [그림 1]은 과거 일본 건설현장에서 사용되는 콘크리트 바닥표면 마감로봇(Concrete Floor Surface Finishing Robots)과 철골구조 용접로봇(Steel Frame Welding Robots) 등을 보여주고 있다.

1990년대 들어서 과거 현장중심의 개별 요소작업을 대체하기 위한 개별적인 자동화 장비들은 '전자동 건축시스템'이라는 통합된 Frame에 조합되어 적용되기 시작하였다.

이들 시스템 중 현재까지도 개선된 형태로 사용되고 있는 시미즈 건설의 SMART시스템을 대상으로 특징을 살펴보면 다음과 같다. 일본 시미즈 건설의 SMART시스템의 구조는 건설플랜트, 지상플랜트, 지하건설 플랜트와 공정관리 시스템, 자재 정보 관리 시스템으로 나눌 수 있다.

이중 건설 플랜트는 SMART의 가장 핵심적인 요소로 날씨에 무관하게 작업할 수 있는 환경을 만들어주는 ①건설공장(CF)과 보, 기둥 등을 양중 이동시키는 ②천정 크레인 및 호이스트, 건설공장을 상승시키는 ③상승 시스템 및 상승 메커니즘으로 구성되어 있다. [그림 2]는 건설 플랜트의 구조를 보여주고 있다. 건설 플랜트는 트러스트 구조의 외관과 기둥으로 이루어진 밀폐형 타입으로 외부 환경의 영향을 적게 받는 장점이 있는 반면 CF내에 크레인과 상승장치의 거동을 위한 각종 장치들이 설치되어 있기 때문에 상당한 무게가 나가게 되며 한 층의 공사 완료 후 건설공장(CF) 상



[그림 2] SMART시스템의 건설 플랜트 구조

승을 위해서는 별도의 4개의 Mast를 이용하는데 니세끼 요코하마 건설 프로젝트의 경우 각 Mast는 각각 300톤의 무게를 지탱하여 총 1,200톤의 육중한 건설 공장을 상승시킨다.

SMART시스템의 자재 이동방식은 천장 크레인을 이용하여 보나 기둥과 같은 무거운 자재를 양중·이동하는 방식을 택하고 있는데, 여기에는 25개의 천장 크레인을 사용되었다.

마지막으로 인양된 기둥이나 보의 조립을 자동화하기 위해서는 자재의 정확한 접합이 이루어져야 한다.

기둥과 보등의 접합부는 'Design for Automation'의 개념이 반영되어 있으며, 기둥 조립 시 레이저 센서를 이용하여 수직도를 측정하고 조정한 후, 가조립 후 용접로봇에 의해 최종적인 용접이 이루어진다. [그림 3]은 용접로봇이 기둥과 보를 용접하는 모습을 나타낸 것이다.

이 용접로봇은 레일을 따라서 움직이며 4자유도를 가지고 있으며

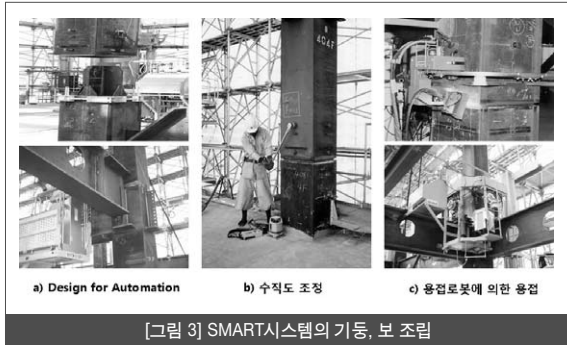


a) 콘크리트 작업용 로봇

b) 철골 용접용 로봇

[그림 1] 일본의 건설자동화 장비 적용 사례

무게는 약 20kg이다. 시미즈 건설은 용접 공정을 이 로봇을 이용하여 자동화하였으며, 일정한 품질의 용접을 가능하게 한다.



3 한국형 시공자동화시스템의 개발방향

일본의 대표적인 전자동 시공시스템인 시미즈 건설의 SMART는 소개 당시에 매우 혁신적인 아이디어를 첨단기술과 막대한 비용을 투입하여 구현함으로써 세계적인 관심을 이끌어 내기에 충분했다. 그러나 이 시스템은 다음과 같은 문제점을 안고 있었다.

우선 이 시스템은 버블경제 최고조기에 건설가능 인력의 확보가 극심할 때 개발되어, 시공방식의 전 자동화를 목표로 추진되었다. CF 내에 25대(각각 13 톤의 중량)의 크레인을 설치하고 이로 인하여 시스템의 구축에 상당한 시간과 비용이 소요되었는데 CF제작을 위해서만 3개월이 소요되어 전체 공기가 지연되고, 시공 후 해체가 어려운 문제점이 있었다. 즉 전자동을 위해 불가피하게 키워진 육중한 CF와 복잡한 알고리즘은 전체적으로 시스템의 경제성을 떨어뜨리는 문제점을 야기하였다.

또한 이 시스템은 로봇과 크레인을 일체형으로 제작하여 CF내부에 설치하였기 때문에, 이로 인해 총 1,200 톤의 육중한 무게를 인양할 장치의 개발을 필요로 하는데, CF 상승을 위한 부대장치의 개발을 위한 비용과 크레인이 수시로 잔고장을 일으켜 유지보수 비용 및 인력이 추가로 소요되는 문제점도 발생하였다.

SMART가 가진 자체적인 문제점 이외에도 이를 국내에 적용하기 위한 또 다른 문제점으로 건축생산 방식의 차이점을 들 수 있다. 즉 일본의 건축구법은 일본의 지진을 대비하여 CFT 각형강관 등 고강도 부재를 사용하였고, 따라서 철골조의 용접을 주 접합방식으로 사용하고 있다는 점이다. 또한 이 시스템은 적층공법을 전제로 사용하고 있기 때문에 코어 선행 방식을 대부분 사용하는 국내의 실정에는 적용될 수 없는 한계점을 갖고 있다.

따라서 일본의 사례를 토대로 국내의 건설환경에 적합한 시공자동화시스템을 개발하기 위해서는 국내 건설 환경에 적합한 시공 자

동화시스템에 대한 접근 전략 및 방향 수립이 요구된다. 기술개발 전략을 수립함에 있어 핵심적인 키워드는 바로 '실용성'이라고 할 수 있다. 즉 일본의 시스템들이 혁신적인 기술을 성공적으로 구현하였음에도 불구하고 지속성을 갖지 못한 것은 바로 '경제성', '실용성'의 결여라고 할 수 있다. 개별적인 자동화 장비에서는 실용성을 강조하였음에도 정작 이를 통합한 자동화시공시스템에서는 바로 '실용성'이 부족하였다. 이에 대한 문제점을 인식하고 시미즈 건설의 SMART시스템의 경우 현재 최초의 시스템(SMART)에 비해 점차 경량화, 단순화하고 있는 추세이나 여전히 '실용성' 측면에서의 문제점을 안고 있다.

일본의 사례를 토대로 제안할 수 있는 한국형 시공자동화시스템의 개발전략은 다음과 같이 제시될 수 있다. 첫 번째 전략은 선택적 자동화를 통한 효율성 극대화이다. 위험작업, 생산성이 낮은 작업 등에 대해 선택적으로 자동화를 실현하고, 기타 작업들에 대해서는 인간 - 로봇 사이의 인터페이스를 이용함으로써, 효율적 자동화 시스템을 구현하는 것이 필요하다.

두 번째 전략은 경량형 시스템을 통한 경제성 극대화이다. 크레인은 국내에서 널리 사용되고 있는 T형 타워크레인을 자동화한 지능형 자동화 타워크레인 구조를 택하고, 로봇은 CF 내부에 설치함으로써, CF의 무게를 일본대비 1/3 수준으로 구현하는 것이 필요하다. 이를 통해 경량 CF를 설치함으로써 공기를 단축하고, 공사 후 해체도 간소화함으로써 경제적인 시스템이 구현될 수 있다.

세 번째 전략은 한국적 건설 환경에 적합하도록 하여 실용성을 극대화하는 것이다. 국내에서 널리 사용되고 있는 '코어선행 공법'에 사용 가능하고, 3층 1절 철골구조를 모델로 불팅로봇을 이용한 접합시공 자동화 등 실용성을 극대화한 시스템을 개발하는 것이 필요하다.

4 한국형 시공자동화시스템의 핵심기술 개발

4-1. 세부 핵심기술의 분류

본 고에서는 건축물 시공자동화시스템 구축을 위한 핵심기술을 (1) 로보틱 크레인 기반 고층 건축물 구조체 자동화시공시스템 기획 및 통합 (2) 크라이밍 유압로봇 및 건설공장(Construction Factory : CF) 구조체 (3) 로보틱 크레인 기반의 자체설치 시스템 (4) 무선인식 및 다차원 CAD 기반의 지능형 건설자재 조달 시스템과 같이 4 분야의 핵심기술을 제시하고자 한다. (그림 4 참조).

4-2. 시스템 기획 및 통합기술

시스템 기획 및 통합기술은 세부 핵심기술간 개발전략을 조율하고

시스템 통합기준과 인터페이스를 제공함으로써 자동화시공시스템이 유기적으로 연동되도록 지원 및 관리하는 것이다.

구체적인 요소기술은 [그림 5]에서 보는 바와 같이 첫째, 세부 핵심 요소기술들의 통합을 위한 인터페이스를 개발하고 개발된 인터페이스를 기반으로 고층 건축물 구조체 시공자동화시스템을 관리, 모니터링 할 수 있는 통합시스템 구축기술과, 둘째 Design for Automation 기술개발 그리고 마지막으로 건물 시공자동화시스템의 정량적 성능평가지표를 개발하고 표준화(모듈화)된 지표를 기준으로 연구결과의 평가 및 개선 방안을 도출하는 성능평가 모듈 기술로 제시할 수 있다.



[그림 4] 한국형 건물 시공자동화시스템의 핵심기술

4-3. 크라이밍 유압로봇 및 경량 CF구조체 개발 기술

본 세부기술의 연구목표는 경량 CF 및 천정 개폐 Slider와 유압로봇용 서보 실린더 및 이동 메커니즘, 단위 유압 모듈 정밀 양중 제어 시스템 등의 개발을 통해 초단기간 내 조립 및 해체가 가능한 CF 모듈을 개발함으로써 공기를 단축하는데 기여하는 것이다. 구체적인 요소기술은 크게 다음과 같이 3가지로 구분할 수가 있다([그림 6] 참조).

첫째, 한국형 고층건물 구조체에 대한 시험시공 및 본시공을 통해, 효율적 자동화와 경제적 자동화 시스템을 구현하기 위한 기술과 둘째, 크라이밍 유압 로봇 기반기술 확보 및 관련 기술 실용화를 통한 생산성을 향상시키기 위한 기술 그리고 셋째, 조립과 해체가 용이한 경량형 CF 및 Slider을 개발하는 것으로 이를 통하여 자동화 시스템의 경제성을 향상시키고 공기를 단축시킬 수 있을 것이다.

4-4. 용접로봇 및 주행장치 개발 및 강인제어 기술

본 세부기술의 연구내용은 다음과 같이 구분할 수가 있다. 첫째, 수직/수평 철골 부재를 유도하여 조정하고 볼트를 체결하는 수직 철골구조 대응 볼트체결 End-effector 기술과 HMI(Human-Machine Interface) 기술을 개발하는 것이며, 둘째 요소기술은 수직/수평 철골구조 대응형 신뢰도 Stable 주행 Carrier 메커니즘 및 Mobile Manipulator 기술이다. 마지막 요소기술은 Network 기반 ITA 및 HMI 시스템의 원격 제어의 문제점인 시간지연에 대한 강한 제어 시스템 개발하는 것이라 할 수 있다 ([그림 7] 참조).

1) 시스템 통합 및 인터페이스 기술	2) Design for Automation 기술개발	3) 성능평가 모듈 개발
<ul style="list-style-type: none"> 세부 핵심 요소기술들의 통합을 위한 인터페이스 개발 개발된 인터페이스를 기반으로 고층 건축물 구조체 시공자동화 시스템을 관리, 모니터링 할 수 있는 통합시스템 구축 시공 Simulation 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 대상공사에 대한 분석을 통한 자동화 단계 및 요소 결정 각 공정 및 핵심 요소기술들에 대한 DFA 수립적 성능평가지표 개발 자동화시공을 위한 자재 및 설계 / 시공단계의 표준화 	<ul style="list-style-type: none"> 현재 건설된 고층 건축물에 대한 연구개발 현황 조사 건물 시공 자동화 시스템의 정량적 성능평가지표 개발 표준화(모듈화)된 지표를 기준으로 본 연구결과의 평가 및 개선 방안 도출

[그림 5] 시스템 기획 및 통합기술

1) 시험시공 및 본시공	2) 크라이밍 유압로봇 및 상하이동 구동 유닛 시스템	3) 경량 CF 구조체 개발
<ul style="list-style-type: none"> 고층 실 건축물에 대한 시공Simulation 지원 7층 300m² 규모의 건축물에 대한 시험시공 및 본시공 건축물의 실제 시공을 통해 전체 시스템을 최적화하고 실용화함 	<ul style="list-style-type: none"> CF 구조체 상층용 유압로봇 시스템 개발 유압로봇 시스템 해석 및 모듈화 크라이밍 유압로봇의 동기제어알고리즘 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 경량CF 구조체 설계/제작 크라이밍 유압로봇과 연결구조 설계 외부 기후환경에 대응한 Roof System 및 개폐 Slider 개발
[그림 6] 크라이밍 유압로봇 및 경량 CF구조체 개발 기술		

4-5. 무선인식 및 다차원 CAD 기반의 지능형 건설자재 조달시스템 기술

본 세부기술의 연구목표는 최근 건설 분야에서 활용도가 높아지고 있는 무선인식 기술과 4D-CAD 기술을 크레인 자동화 장치와 연계함으로써 양중작업의 생산성을 25% 향상시키는 것이다.


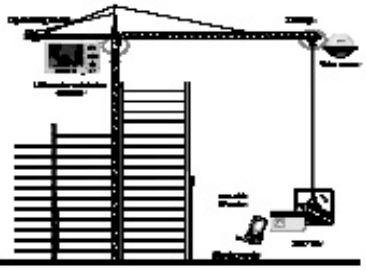

구체적인 연구내용은 크게 [그림 8]과 같이 3가지로 구분할 수가 있다. 첫째, RFID 및 패턴인식 기술 등을 이용하여 건설자재의 인식 및 조작 최적화 기술을 개발하는 것이며, 둘째 무선인식 및 4D CAD 기반의 지능형 로봇틱 크레인 개발하는 것과 마지막으로 작업진행 상황을 실시간으로 확인함으로써 공사진척 상황파악의 신

속성과 투명성을 향상시키기 위한 진도·자재·양중 통합관리를 위한 다차원 모니터링 시스템 개발하는 것이다.

5 결론

건설자동화 및 로봇시스템은 전통적인 건설산업에 첨단기술인 RT 및 IT를 접목함으로써 노동 의존적인 건설 산업을 고부가가치의 차세대 국가 성장동력 산업으로 전환할 수 있는 유효한 수단이 될 수 있다. 그러나 국내의 관련 기술수준은 핵심기술 보유국 대비 약 10년 ~ 15년 가량의 기술격차를 보이는 것으로 추정된다. 이러한 기

1) 수직/수평 철골구조 대응형 볼트체결 로봇 및 제어기 개발	2) 수직/수평 철골구조 대응형 신뢰도 Stable 주행 Carrier 메커니즘 및 Mobile Manipulator 개발	3) 양방향 시간지연 원격 시스템의 감인 제어 기술 개발
<ul style="list-style-type: none"> 수직/수평 철골 부재를 유도하여 조정하고 볼트를 체결하는 수직 철골구조 대응 볼트체결 End-effector HMI(Human-Machine Interface) 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> CF내 수직/수평 철골구조 대응형 신뢰도 Stable 주행 Carrier 메커니즘 및 가이드 레일 개발 수직/수평 철골구조 대응형 Mobile Manipulator 개발 	<ul style="list-style-type: none"> Network 기반 ITA 및 HMI 시스템의 원격 제어의 문제점인 시간지연에 대한 감인한 제어 시스템 개발
[그림 7] 로봇틱 크레인 기반의 자재설치 기술		

1) RFID를 이용한 자재인식과 조작기술	2) 지능형 양중관리 시스템	3) 진도/자재/양중 통합관리를 위한 다차원 모니터링 시스템
<ul style="list-style-type: none"> ● 기존 자재관리 업무분석 및 RFID 적용 자재 관리 기술 ● 철골 골조공사의 자재관리를 위한 인식 및 조작기술 ● 자재인식 Computer Simulation ● 시스템 튜닝 및 시험 시공 기술 	<ul style="list-style-type: none"> ● 4D CAD와 연동된 양중자재의 실시간 경로 추적 기술 ● 크레인 지능화 작동을 위한 머신비전 및 무선 제어기술 ● RFID 및 GPS 등 활용기술 	<ul style="list-style-type: none"> ● 실시간 통합모니터링 시스템과 시공 Simulation 기술 ● 실시간 통합모니터링 시스템을 활용한 자동화 시공 진도관리 기술
 <p>리더기</p> <p>RFID 태그</p>		

[그림 8] 무선인식 및 다차원 CAD 기반의 지능형 건설자재 조달시스템 기술

술격차를 효율적으로 극복하기 위해서는 선진 시스템들을 충분히 이해하고 그 시스템에서 제거되었던 문제점을 개선함으로써 연구 개발에 투입되는 시간과 비용을 줄이면서 최대한의 효과를 이끌어 낼 수 있을 것이다. 특히 최근 우리나라의 RT, IT 인프라는 급속한 속도로 성장하고 있어 이를 효과적으로 접목할 경우 기술격차는 상당수준 줄일 수 있으며, 2000년 이후 해외에서 건설자동화를 전공한 신진과학자들이 국내에 유입되면서 메카트로닉스 전문가 집단과의 산학연 컨소시엄 구성을 통해 건설자동화 기술개발에 관한 연구가 활기를 띠고 있어 향후 수년 이내에 일부 분야에서는 세계적인 경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

다만 이러한 혁신적인 기술의 개발에 있어 최우선적으로 고려되어야 할 점은 바로 '혁신성' 과 함께 '실용성' 이라는 점을 잊지 말아야 할 것이며, 제한된 자원을 최대한 효과적으로 활용하는 전략적인 산·학·연 R&D 추진이 요구된다. **S**

참고문헌

1. 고려대학교 RCA 연구단, "초고층 건축 시공자동화 연구단 국제세미나 자료집", 고려대학교 하나스퀘어, 2007. 7. 6.
2. 박귀태 외, "로봇릭 크레인 기반 고층건물 구조체 시공 자동화 시스템 개발", 06첨단융합 D01 건설교통부 중간보고서, 고려대학교, 2007. 11
3. 이상연 외, "클라이밍 유압로봇 및 건설공장 구조체 기술 개발", 06첨단융합D01 건설교통부 중간보고서, 두산건설, 2007. 11
4. 이준복, "건설자동화 및 로봇화기술의 현재와 미래", 건축 : 대한건축학회, 2007. 06
5. 조훈희, 신윤석, 강경인, 박귀태, "로봇릭 크레인 기반 고층건물 구조체 시공 자동화 시스템 개발", 한국건설관리학회 학술발표대회 논문집, 2007. 12

