

시공 자동화 시스템에 적합한 부재 디자인 프로세스 개발

Development of Component Design Process for Automated Construction System

진 일 권*

Jin, Il-Guan

신 윤 석**

Shin, Yoonseok

조 훈 희***

Cho, Hunhee

강 경 인****

Kang, Kyung-In

요 약

최근 건설현장에서는 기능인력 수급의 어려움과 숙련공의 노령화의 해법으로 건설 자동화가 추진되고 있다. 현재 국내 건설자동화 연구수준은 작업 단위의 로봇을 통한 부분 자동화의 단계를 넘어 완전한 자동화로 건설할 수 있는 시스템 개발의 단계에 접어들고 있다. 하지만 완전한 건설 장비를 갖춘 자동화 시공 시스템일지라도 시공자의 유연성을 완전히 모방하기 어렵고, 부재 종류의 다양한 변화에 빨리 대처할 수 있는 능력이 부족하다. 따라서 자동화 시공 시스템의 작업 능력을 향상시킬 수 있고, 자동화된 시공 작업에 쉽게 접근할 수 있는 방법 중의 한 가지는 자동화 시공하기에 쉬운 부재를 설계해 주는 것이다. 따라서, 본 연구에서는 자동화 시공 시스템에 적합한 부재를 설계하기 위하여 품질기능전개(QFD)기법을 적용한 디자인 개발 프로세스를 제시하였다. 이를 통해 시공 자동화 시스템의 효율성을 향상시켜 건설자동화 기술 발전에 기여하고자 한다.

키워드 : 자동화 시공 시스템, 자동화를 위한 부재 디자인, 품질기능전개(QFD)

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

최근 건설현장에서는 기능 인력의 수급 불균형 문제가 심각하게 제기 되고 있다. 건설현장에 대한 기피와 숙련공의 노령화로 인하여 2010년에는 42만 3천 명의 기능 인력이 부족할 것으로 예상된다(심규범 2002). 건설현장 기능인력 수급 불균형은 결과적으로 인건비 상승, 시공 품질 저하, 공사 기간 지연, 공사비용 증가, 그리고 건설 현장에서의 안전사고 발생 위험 증가 등 향후 프로젝트 수행에 부정적인 영향을 끼치게 될 것으로 판단된다

(김영석 외 2001). 따라서 최근에 이에 대한 해법 중 하나로 '건설 자동화'가 주목 받고 있다(장현승 외 2003).

국내 건설자동화 연구는 1990년대부터 이미 커튼월공사용 로봇, 콘크리트 바닥 연마로봇 등 단위 작업에서 인력을 대체할 수 있는 자동화 장비 및 로봇 개발이 추진되었고, 일부 현장에 적용되었다(이승열 외 2007). 최근에는 이런 단위 작업에 대한 부분 자동화 연구를 뛰어 넘어 일본의 SMART 시스템(Shimizu, 1993)처럼 건물을 현장에서 완전 자동화로 건설할 수 있는 시스템 개발 단계에 접어들고 있다(신윤석 외 2008). 그러나 부분 자동화에서 완전 자동화로 자동화되는 비율을 높여 인력의 투입을 최소화할수록 기존의 숙련공의 작업을 대체하는 유연성있는 자동화 기술을 구현하는데 어려운 부분들이 발생하게 된다.

시공 자동화 시스템의 작업 유연성과 효율성을 확보할 수 있는 방법으로 자동화 시스템으로 시공하기 쉽도록 부재를 설계해 주는 것이 하나의 대안이 될 수 있다(목학수 외 1994). 하지만 지금까지의 건설 자동화 연구에서는 인력을 대체하는 부분적인 자동화 장비와 로봇에 대한 연구만 진행되었기 때문에 자동화 조립에 적합한 부재 설계(component design)에 대한 연구는 전무한 실정이다.

* 일반회원, 고려대학교 대학원 건축사회환경공학과 석사과정, wis0616@korea.ac.kr

** 일반회원, 고려대학교 대학원 건축공학과 박사수로, yoonseok@korea.ac.kr

*** 중신회원, 고려대학교 건축사회환경공학과 조교수, 공학박사(교신저자), hhcho@korea.ac.kr

**** 중신회원, 고려대학교 건축사회환경공학과 교수, 공학박사, kikang@korea.ac.kr

본 논문은 건설교통부가 출연하고 한국건설기술평가원에서 위탁 시행한 2006년도 첨단 융합건설기술개발사업[과제번호 : 06 첨단융합 D01]의 지원으로 이루어졌습니다.

따라서, 본 연구에서는 시공 자동화 시스템에 적합한 부재를 설계하기 위하여 품질기능전개(QFD)기법¹⁾을 적용한 디자인 개발 프로세스를 제시하였다. 이를 통해 향후 시공 자동화 시스템의 작업 효율성을 향상시켜 건설자동화 기술 발전에 기여하고자 한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구의 범위는 국내에서 널리 사용되고 있는 타워크레인을 개선한 지능형 타워크레인, 볼트 조립 작업 자동화를 위한 볼팅 로봇을 이용하여 건축물 구조체 자동화 시공 시스템을 구현한 '철골 조립 자동화 시스템'에 적합한 부재 개발 프로세스를 제안하는 것으로 한다.

이 자동화 시스템은 고층의 철골구조물에 대한 양중, 조립 등의 작업을 자동화할 수 있는 건설공장(construction factory)에 설치되어 개발하여, 기존의 재래식 철골 조립작업을 개선 할 시공 자동화 시스템의 일부이다.

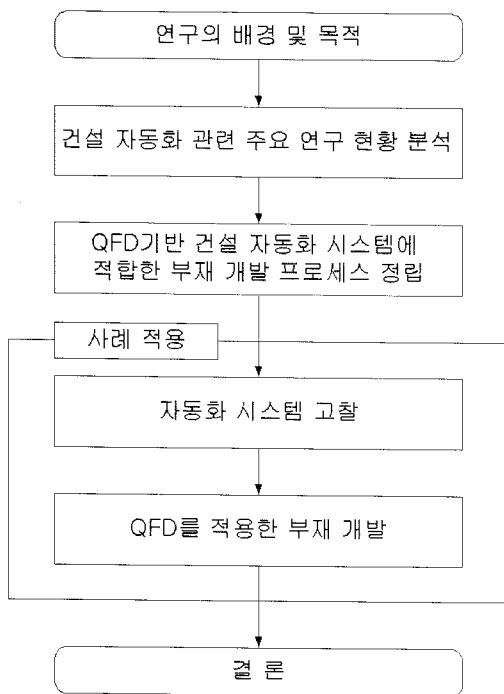


그림 1. 연구의 절차

본 연구에서는 해당 자동화 시스템에 투입되는 철골 부재들 중에서 작업이 가장 복잡하고 고소작업으로 위험도가 높은 보(girder)와 기둥의 접합부로 대상 부재를 선정하였다.

1) Quality Function Deployment(QFD)는 신제품 개념정립, 설계, 부품 계획, 공정계획, 그리고 생산계획과 판매까지 모든 단계를 통해 고객의 요구가 최종제품과 서비스에 충실히 반영되도록하여 고객의 만족도를 극대화하는데 초점을 맞추고 있는 품질경영의 방법론 중의 하나이다.

아직 완성되지 않은 시공 자동화 시스템에 적합한 부재를 개발하기 위해서는 시스템의 기능과 역량과 같은 조건들을 고려하여 이에 적합한 부재 제품을 실체화할 수 있는 방법이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 사용자의 요구를 바탕으로 제품 디자인 개발이 가능한 기법인 QFD를 적용(Sullivan, 1986)하여 부재 디자인 프로세스를 제안하였다. 부재 개발에 필요한 요구 조건들은 시공 자동화 시스템을 개발 중인 전문가들을 대상으로 한 면담조사를 통해 수집하였다. 전체적인 연구의 흐름은 그림 1과 같다.

2. 건설 자동화 관련 주요 연구 현황

건설 자동화 시스템과 건설 자동화를 위한 디자인과 관련된 기존의 연구들을 정리하면 아래 표 1과 같다. 우선, 지금까지의 국내의 건설 자동화 시스템에 대한 연구는 대부분 부분자동화로 단위 작업을 대상으로 하는 장비를 개발하는 연구가 중심이었다.

이에 비하여 일본의 경우 이미 1980년대부터 대형 건설사들의 주도로 완전 자동화 시스템 개발에 대한 연구가 진행되었다. 하지만 다양한 실적에도 불구하고 건설자동화를 위한 디자인과 관련된 연구는 매우 미흡하다.

표 1. 자동화 관련 주요 연구

분류	연구자	연구내용
단위작업 자동화 장비	한국생산기술연구원 (1998)	고기능 콘크리트 바닥 미장로봇의 개발
	유연택 외 4인 (2004)	홈판매설 자동화 장비의 성능분석을 위한 평가모델의 개발
	이정호 외 3인 (2006)	크랙실링 자동화 장비의 개발 및 경제적 타당성 분석
	한재구 외 2인 (2006)	위더젯을 이용한 노면표시 제거장비의 성능평가에 관한 연구
	김영석 외 1인 (2006)	공동주택 외벽 도장 자동화 로봇의 최적 개념 모델 제시 및 기술적,경제적 타당성 분석
	이승열 외 3인 (2007)	국내 건설 내/외장재 설치 로봇
	서종원 외 2인 (2007)	지능형 굴삭 시스템 개발
	이태식 외 3인 (2006)	터널 청소장비의 고찰 및 개선된 모델에 관한 연구
완전 자동화 시스템	Kurita et al (1993)	모듈러 유닛 시공 시스템을 위한 디자인 및 계획
	Tanjiri et al (1997)	날씨에 영향을 받지 않는 건물 자동화 시공 시스템 개발
	Wakisaka et al (2000)	RC구조 콘크리트 건물의 자동화된 시공 시스템 소개
	Maeda (2006)	자동화된 건물 시공 시스템의 개발 및 적용
건설 자동화 디자인	Sacks et al (1997)	자동화된 건물 시스템을 위한 설계 디자인
	Scott Howe (2000)	자동화 시공을 위한 디자인

이것은 건설작업을 추진하는 프로세스가 건축주나 사용자와 직접적인 관계가 없기 때문에 건설자동화 연구의 대부분이 현장엔지니어들을 중심으로 한 상향식(bottom-up) 방식으로 진행되는 특징 때문이다(Sott Howe 2000).

따라서, 본 연구에서는 장비 개발이 아닌 부재를 시공 자동화 시스템에 보다 적합하도록 디자인하는 것에 초점을 두었다.

3. 시공 자동화 시스템에 적합한 부재 디자인 개발 프로세스

3.1 품질기능전개(QFD)의 개념

품질기능전개(QFD)는 고객의 요구가 신제품의 개념정립, 제품계획, 부품계획, 공정계획, 그리고 생산계획과 판매계획까지 모든 단계를 통해 고객의 요구가 최종 제품과 서비스에 충실히 반영되도록 함으로서 고객의 만족도를 극대화 시키는 품질경영의 한 기법이다(인재순 외 2005).

품질기능전개(QFD)는 1972년 일본의 고베조선소에서 처음으로 행렬 형태의 도표인 품질표를 사용한 것을 시작으로 도요타와 그 부품업체들이 QFD를 더욱 발전시켰다. 1980년대에는 QFD가 미국에 소개되어 후지제록사와 포드사에서의 성공을 계기로 널리 활용되기 시작하였다(Sullivan, 1986). 이와 같이 QFD의 목적은 신제품의 개발기간을 단축하고 동시에 제품의 품질을 향상시키는 것이며 다음과 같은 효과를 얻을 수 있다(김광재, 1995)(그림 2).

(1) 설계 변경의 감소 : 제품개발과 관련된 모든 활동이 소비자 요구사항을 근간으로 하여 통합적으로 이루어지므로 전통적인 순차적 개발 방식에서와 같은 부서간 의사소통의 미비로 인한 설계 변경의 필요성이 근본적으로 줄어든다.

(2) 개발 기간의 단축 : QFD 적용시 일반적으로 제품의 개념 정립과 기초 설계 단계에서 약간의 시간을 더 필요로 하나 결과적으로는 이후 단계에서의 설계 변경의 감소로 인해 전체 개발 기간은 33~50%로 단축된다.

(3) 시운전시의 문제점 감소 : 제품의 설계과정에서 공정 및 생산단계에서 발생 가능한 상충관계를 미리 고려하므로 시운전시 문제점 발생의 소지가 줄어든다.

(4) 설계 과정의 문서화 : QFD에서는 설계변수간 상충관계 발생의 근원 및 해결의 논리적 근거, 설계시 특별히 고려되었던 제품의 특성 등을 상세히 기록하게 되므로 향후 유용한 기록으로 남게된다.

3.2 QFD기반 부재 디자인 개발 프로세스 제안

본 연구에서 제시하는 QFD를 적용한 부재 디자인의 개발 절차는 다음과 같다(그림 2).

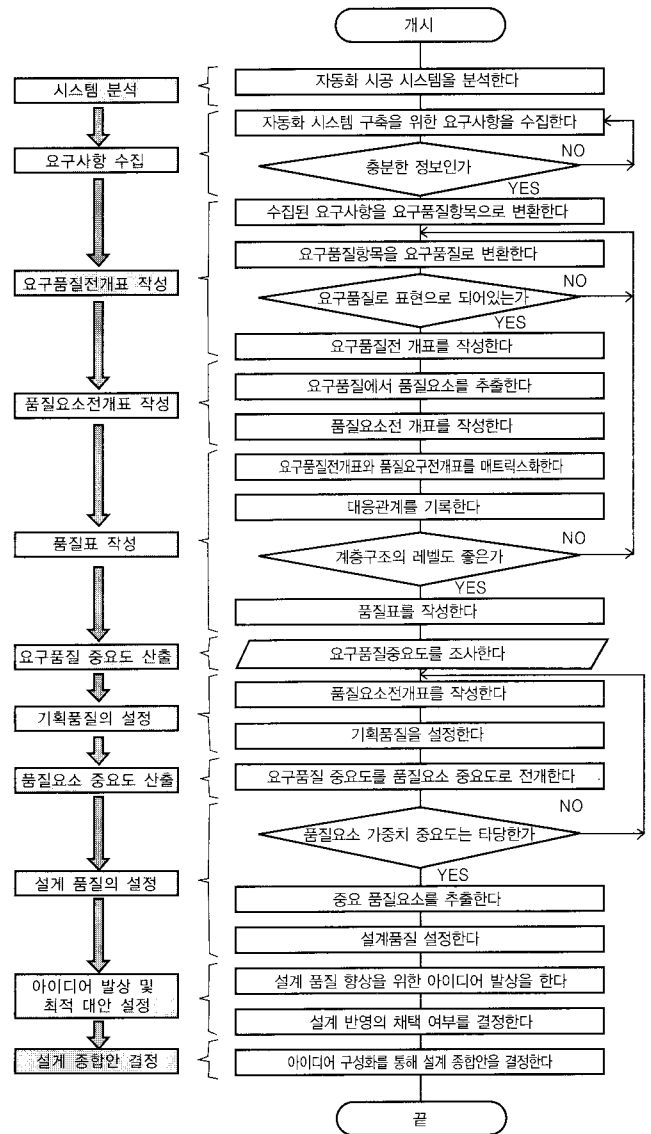


그림 2. QFD를 적용한 부재 디자인 개발 절차

(1) 시스템 분석

QFD기반의 자동화 시스템에 적합한 부재 디자인 개발 프로세스의 첫 단계로 디자인 개발 대상인 시공 자동화 시스템에 대하여 분석한다.

(2) 요구사항 수집

기초 자료를 수집하기 위해 시공 자동화 시스템 개발에 참여하고 있는 전문가를 통해 자동화 시스템을 구축하기 위한 요구사항을 조사한다. 기초 자료를 수집하는 방법으로는 앙케이트 조사, 면접 조사, 그리고 고객의 클레임 정보로부터 수집하는 등

다양한 방법이 있다.

(3) 요구품질전개표 작성

수집된 요구사항들은 세분화하고 재통합하여 요구품질로 변환한 후 계층 구조화한다. 또한 요구사항에 의해 정리된 요구품질항목의 연관관계를 계통별로 분류하여 요구품질전개표를 작성한다.

(4) 품질요소전개표 작성

정리된 요구품질을 기술언어인 품질특성으로 전개시켜 부재 디자인에 반영될 수 있도록 하는 것으로, 요구품을 품질특성으로 변환시키는 것이다. 품질특성이란 품질 평가의 대상이 되는 성질 성능으로 전문가의 요구에 대한 대응특성을 말한다.

(5) 품질표 작성

품질표란 전문가들이 요구하는 품질을 언어표현으로 체계화하여 품질특성과의 관련성을 표시하고, 전문가의 요구를 대응특성으로 변환시켜 품질설계를 실시해가기 위한 표이다. 즉, 추상적인 언어정보를 구체적인 부재 디자인으로 설계할 수 있도록 기술정보로 변환하는 표이다. 품질표는 요구품질전개표와 품질요소전개표와의 상관관계를 평가하여 매트릭스표로 조합시킴으로써 작성된다.

(6) 요구품질 중요도 산출

요구품질 전개표의 각 요구품질에 대해 요구 정도를 나타내는 지표인 요구 품질 중요도를 결정한다. 요구 품질 중요도를 산출하는 방법으로는 전문가의 요구사항을 요구품질로 변환할 때의 중복빈도에 따라 중요도를 산출하는 방법, 새로운 전문가들에게 요구품질전개표에 대한 양케이트 조사를 실시하여 산출하는 방법, 신규 디자인 개발의 경우 계층분석법에 의한 방법 등 여러 가지가 있다.

(7) 기획품질의 설정

기획품을 설정한다는 것은 요구품질별 기획평가 수준을 결정하는 것을 말한다. 요구품질 중요도, 현재의 부재 수준 등을 고려하여 기획품을 설정한 후, 이것을 품질표에 추가하여 기획품질설정표를 작성한다.

(8) 품질요구 중요도 산출

요구품질전개표와 기획품질설정표에 의해 기획된 품질을 실현하기 위해서는 품질표를 이용하여 요구품질 중요도를 품질요소 중요도로 변환시킨다. 요구품질 중요도를 품질요소 중요도로 변환하는 방법으로는 독립배점법과 비례배분법등이 있다.

(9) 설계 품질의 설정

품질요소 중요도를 구한 다음, 중요 품질 요소를 척도화하고 기획 목표치나 목표 규격치인 품질요소의 설계품을 설정한다. 즉, 대상 부재가 요구품을 만족시키고 있는지를 측정할 수 있

는 척도가 필요하며 그 척도를 이용하여 목표값을 설정할 필요가 있는데, 이렇게 설정된 목표값을 바로 설계품질이라 한다.

(10) 아이디어 발상 및 최적 대안 설정

가치 있는 개발 설계안을 발상하는 단계로서 설계품질의 설정 항목에 나타난 품질요소를 토대로 그 기능을 달성하기 위한 기본 구상에 대한 아이디어를 창출하여 아이디어에 대한 경제성, 기술성에 대한 평가를 시행한 후 채택여부를 결정한다.

(11) 설계 종합안 결정

채택된 아이디어들을 설계안에 반영하여 설계 종합안을 결정하고, 이에 적합한 시공 공법을 제안한다.

4. 사례 적용

4.1 자동화 시스템 분석

본 연구의 사례적용 대상인 철골 조립 자동화 시스템은 인력을 이용한 고소작업을 통해 철골을 조립했던 기존의 재래식 시공 방법을 대신하여 자동화된 시스템을 통해 철골 조립작업을 위한 자동화된 시공 시스템이다.

해당 사례에서는 1990년대 일본에서 개발된 건설공장(SMART System, 시미즈건설) 내부의 고비용 천정주행 크레인이 아닌 국내에서 널리 사용되고 있는 타워크레인을 개조한 지능형 타워크레인 구조를 택하고 볼트 조립 작업만을 위한 로봇을 건설공장(construction factory) 내부에 설치하여 시스템을 경량화 함으로써 경제적인 자동화 시공 시스템을 구현하였다(그림 3).

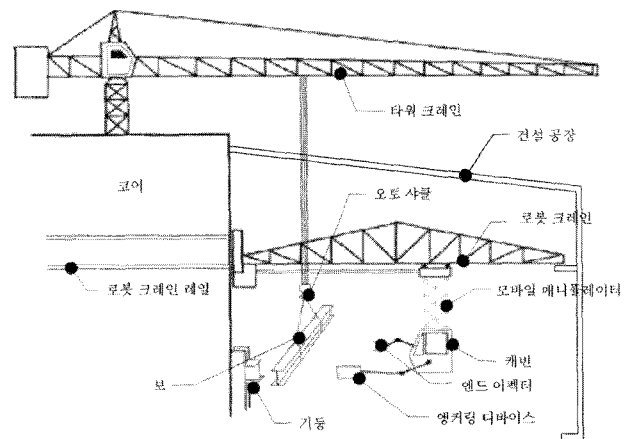


그림 3. 철골 조립 자동화 시스템 구성 단면

특히, 엔드-이펙터에 볼팅 로봇이 부착된 캐빈은 로봇 크레인에 연결되어 로봇 크레인 레일을 따라 이동하게 되며, 지정된 볼트 조립 작업위치에 따른 볼팅 작업 시나리오는 다음과 같다(그림 4).

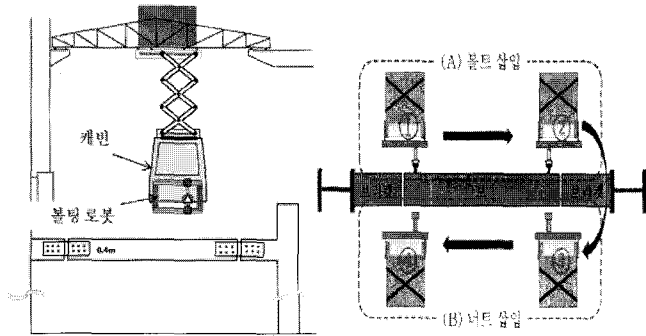


그림 4. 캐빈에 부착된 볼팅 로봇 및 볼팅 작업 시나리오

자동화 조립 시스템의 주요 구성 요소 및 역할을 정리하여 나타내면 다음과 같다(표 2).

표 2. 자동화 시스템의 주요 구성 장치

구 성	역 할
타워크레인(T/C) / 오토 샤클(auto shackle)	직재 장소에서 조립 위치까지 부재를 양중하고(T/C), 조립 후 양중을 위해 T/C에 연결되어있던 와이어를 해제(오토샤클)
로봇 크레인(robot crane)	모바일 매니퓰레이터를 장착하여 로봇 크레인 레일을 이동하면서 부재 조립 위치까지 X-Y평면상에서 로봇 시스템을 이송함
모바일 매니퓰레이터(mobile manipulator)	로봇 크레인의 아랫부분에 부착되어 볼팅 로봇을 볼팅 체결 위치까지 Z축 방향으로 이송하는 장치임
캐빈(cabin)	모바일 매니퓰레이터 아래쪽에 달린 캐빈은 작업자가 작업환경 및 공정을 감독할 수 있는 컨트롤 스테이션임
센서(sensor)	볼팅 구멍 인식 및 로봇 이동시의 위치 추정
앵커링 장치(anchoring device)	캐빈의 옆면에 장착되어 캐빈의 흔들림을 고정해 줌에 따라 볼팅 작업시 작업의 정밀성을 높여줌
엔드-이펙터(end-effector)	볼팅 로봇을 부착하여 부재의 볼트 구멍에 볼트 삽입 및 너트 조립 작업을 수행함

본 연구에서 자동화 시공 시스템을 통해 부재 디자인을 개발하고자 하는 사례 적용 대상은 철골조립 공정 중 중대재해사고 발생률이 제일 높은 철골 보 조립 공정(임현호 2008)²⁾을 대상으로 하였다. 기존의 작업자에 의해 수행되었던 조립 작업과 자동화 시스템을 이용한 조립 프로세스를 비교하면 표 3과 같다.

표 3. 재래식 방식과 자동화 방식의 보 조립 프로세스 비교

공종	프로세스			
	재래식	자동화	자동화장비	
가 조립	양중	보 양중	보 양중	타워크레인
	이동	작업위치로 작업자 이동	작업위치로 캐빈 이동	로봇크레인/캐빈/모바일매니퓰레이터
	타워크레인	로프를 이용하여 보 붙잡기	조립을 위한 보 위치 조절	타워크레인
		로프 해제		
	보 위치 미세 조정			

2) 1997년에서 2006년 사이에 국내 철골공사 현장에서 발생한 중대재해사례를 작업공정별로 분석한 결과, 전체 조사대상 151건의 중대재해사고중에서 56건(37.1%)이 보 설치작업에서 발생한 것으로 다른공정에 비해 가장 높에 나타났으며, 고장력볼트 본체결합작업에서 23.25%, Deck Plate 작업에서 21.2%가 발생한 것으로 나타났다. 따라서 철골 공사중 보 설치 작업이 가장 위험한 공정이며, 안전성 향상을 위한 자동화 개발이 선행되어야 한다고 사료되었다.

표 3. 재래식 방식과 자동화 방식의 보 조립 프로세스 비교(계속)

공종	프로세스			
	재래식	자동화	자동화장비	
가 조립	쇠막대 이용하여 구멍 위치 정렬	조립부 구멍 센싱 및 조절	센서 / 앵커링 장치	
	손으로 볼트 및 너트 체결 (일부)	볼트 삽입 후 반대편으로 이동 하여 동일한 절차에 의해 너트 체결	엔드-이펙터	
	쇠막대 탈착	앵커링 장치 해제	앵커링 장치	
	해체	보 중앙으로 이동하여 크레인에 연결된 와이어를 해제	크레인에 연결된 와이어 해제	오토샤클
이동	작업위치로부터 복귀	작업위치로부터 복귀	로봇크레인/캐빈	
보정	수직도 재 보정	수직도 재 보정	인력	
본 조립	이동	작업위치로 이동	작업위치로 이동	로봇크레인/캐빈
	분 체 결	손으로 볼트 및 너트 체결 (전체)	너트 체결부위로 이동하여 너트 조임	엔드-이펙터
		장치를 통한 너트 조임		
	이동	작업위치로부터 복귀	작업위치로부터 복귀	로봇크레인/캐빈

4.2 요구사항의 도출

기초 자료를 수집하기 위해 시공 자동화 시스템 개발에 참여하고 있는 전문가(표 4)를 대상으로 한 면담조사를 통하여 자동화 시스템을 위해 필요한 요구사항을 수집하였다.

표 4. 면담조사 대상

개발 분야	인원	개발 분야	인원
로봇 크레인	3명	센서	4명
모바일 매니퓰레이터	3명	앵커링 장치	5명
캐빈	5명	엔드-이펙터	4명

면담 조사를 통하여 조사된 철골 보 조립 자동화를 위한 요구사항을 정리한 결과는 다음과 같다(표 5).

표 5. 철골 조립 자동화에 대한 요구사항

NO	내 용	%
1	개발될 부재 디자인이 강도 기준을 만족시킬 것	4.2
2	개발될 부재 디자인이 단순할 것	4.1
3	부재의 조립 공정이 단순할 것	7.2
4	외부 환경에 영향을 받지 않을 것	9.1
5	양중되는 과정에서 보 부재의 회전 제어가 가능할 것	11.3
6	로봇의 조립공간의 확보되어야 할 것	6.4
7	보 부재를 브라켓에 조립시 고정되어야 할 것	12.2
8	볼트 삽입을 위해 정밀도 확보가 가능해야 할 것	9.5
9	앵커링 장치를 통한 보 부재 정렬시 부재의 정렬이 용이할 것	5.1
10	볼팅 로봇을 통한 조립 횟수가 적어야 할 것	5.2
11	볼팅 로봇을 통한 집합 작업이 용이 할 것	6.3
12	보 부재에 연결된 와이어 로프의 해체가 용이할 것	6.4
13	기둥의 수직도가 정밀할 것	5.8
14	볼팅 작업을 위한 보 부재의 가 조립시 결속에 대한 안전성의 확인이 용이할 것	7.2
합 계		100

1차 조사는 응답자가 직접 설문지에 기입하는 자기기입법을 실시하여 총 36개의 요구사항을 수집하였고, 2차 조사는 수집된 요구사항을 5점 리커드 척도로 중요도 평가를 실시하였다. 평균

이상의 점수를 얻은 요구사항만을 선택하여 최종 도출된 요구사항(14개)에 대한 중요도를 백분율(%)로 환산하였다.

4.3 요구품질전개표 작성

수집된 전문가의 주된 요구사항을 살펴보면 보 부재를 브라켓에 조립시 고정되어야 할 것(12.2%), 양증되는 과정에서 보 부재의 회전 제어가 가능할 것(11.3%), 볼트 삽입을 위해 정밀도 확보가 가능해야 할 것(9.5%)등 가 조립시 부재의 위치 조절에 관한 요구사항이 가장 많은 것으로 나타났다. 이것은 본 연구의 자동화 시공 시스템이 건설공장 내부에 부재 운반을 위한 천정주행 크레인을 설치하여 자동화 시스템의 중량이 매우 컸었던 일본 시스템의 단점을 보완하기 위하여 하나의 양중용 크레인을 별도로 외부에 분리·설치하여 경량화 추진하였기 때문에 나타난 결과이다.

면담조사를 통해 수집된 전문가의 요구사항들은 세분화되고 재통합되어 요구품질로 변화한 후 계층 구조화한다. 이 과정을 통해 설정된 1차 요구 품질 항목은 다음과 같다(표 6).

표 6. 요구품질항목

NO	내용	NO	내용
1	구조 성능	4	시공성
2	형태	5	해체
3	조립	6	검사

전문가의 요구사항에 의해 정리된 요구품질항목의 연관관계를 계통별로 분류하여 요구품질전개표를 작성한다. 요구품질전개표는 각각의 요구사항을 연구자의 요구를 만족시킬 수 있는 한 장의 기능 카드에 기입하여 최상의 기능을 선정하고 최상위 기능을 달성하기 위한 하위 기능을 찾아내면서 1차에 대한 2차 기능을 찾아내어 1차, 2차 기능을 배치하고 연결하여 작성한다.

표 7. 요구품질전개표

1차	2차
구조 성능	강도 기준을 만족시킨다.
형태	디자인이 단순하다.
	후크와의 결속이 단순하다.
	로봇의 작업공간이 충분하다.
조립	정렬을 위한 부재의 이동이 가능하다.
	통제가 가능하다.
	회전을 제어한다.
	볼팅작업을 위해 고정되어야 한다.
시공성	정밀도 확보가 가능하다.
	볼트조립 횟수가 적다.
	전할 작업이 용이하다.
해체	로프 해체가 용이하다.
검사	방법이 간단하다.
	기동의 수직도가 정확하다.

시공 자동화 시스템에 대한 요구 품질을 2차 수준까지 전개한 요구품질전개표는 다음과 같다(표 7).

4.4 품질요소전개표 작성

전문가의 추상적인 언어로 정리된 요구사항을 시공 자동화 시스템에 적합한 부재 디자인에 반영될 수 있도록 하기 위해 요구사항을 품질요소로 변환시킨다. 추출된 품질 요소중에서 중복되는 것을 단일화하고 이들을 그룹화 하면 다음과 같은 품질요소전개표가 작성된다(표 8).

표 8. 품질요소전개표

1차	2차
형태	부재 결속
	디자인
	작업 공간
조립	볼팅
	가조립
	접합부
시공	거치
	제어
	부재 양중
	검사

4.5 품질표 작성

작성된 품질요소전개표와 요구품질 전개표를 매트릭스로 작성하여 특성별 상관관계를 파악한 품질전개표를 작성한다(표 9). 상관관계 평가는 시스템 개발에 참여하고 있는 전문가(24명)를 대상으로 중요도를 평가하게 하였고, 그 평균값을 3단계로 나누어 표현하였다. 중요도 표기는 '강한 상관관계가 있다 (● : 5점)', '상관관계가 있다 (○ : 3점)', '약한 상관관계가 있다 (△ : 1점)' 으로 하였다.

4.6 요구품질 중요도 산출

본 연구에서 사용된 요구품질 중요도 결정방법은 요구품질전개표가 완성되었을때 새로운 전문가에 대해 앙케이트 조사를 실시하여 중요도를 산출하는 방법으로, 요구품질 각각의 기준항목에 대하여 새로운 전문가 5명에게 그 중요도를 평가하게 한 후 그 평균값을 기록하고, 그 평균값을 기준으로 하여 전체항목에 대한 기준 항목의 순위를 정하였다.

중요도를 표현하는 척도에는 여러 가지가 있을 수 있으나 본 연구에서는 단순히 5명 전문가의 평균값을 받아들인 것으로 하였다(표 10).

표 9. 품질표

요구 품질		품질 요소		조립		시공			형태		품질계획											
				볼팅	가조립	접합부	거치	제어	부재양중	검사	부재결속	크기	작업공간	요구품질중요도	현재부재	기획품질	수준향상률	웨이트				
																		절대	요구			
자동화 부재	구조 성능	강도 기준을 만족시킨다.				△						●			3	2	3	1	3	4.7		
	형태	디자인이 단순하다.			○	●						△				3	2	3	1.5	4.5	7	
		후크와의 결속이 단순하다.						△				●				3	3	3	1	3	4.7	
		로봇의 작업공간이 충분하다.			△	△	○					○	●			3	2	3	1.5	4.5	7	
		정렬을 위한 부재의 이동이 가능하다.			○	△	○					○				2	2	2	1	2	3.1	
	조립	통제가 가능하다			△	△		●	○							4	2	4	2	8	12.5	
		회전을 제어한다.			△	○		●								4	2	4	2	8	12.5	
		흔들림을 제어한다.			○	●	●			△						4	2	4	2	8	12.5	
		정밀도 확보가 가능하다.			○	●										4	2	4	2	8	12.5	
	시공성	볼트조립 횟수가 적다.			●						○					3	3	3	1	3	4.7	
		접합 작업이 용이하다.				○	●	○								3	4	4	1	3	4.7	
	해체	로프 해체가 용이하다.						●	●		○					4	4	4	1	4	6.3	
		검사	방법이 간단하다.				●		○		△	○				3	4	4	1	3	4.7	
	기둥의 수직도가 정확하다.						△		●						2	4	4	1	2	3.1		
품질요소의 중요도				15	74	94	44	74	32	32	54	9	15									
품질 특성 계수 (%)				3.4	16.7	21.2	9.9	16.7	7.2	7.2	12.2	2	3.4									100

표 10. 요구품질 중요도 산출

기준항목		평균	중요도	순위
1차	2차			
구조 성능	강도 기준을 만족시킨다.	3.3	3	6
형태	디자인이 단순하다.	3.1	3	7
	후크와의 결속이 단순하다.	3.1	3	7
	로봇의 작업공간이 충분하다.	2.9	3	10
	정렬을 위한 부재의 이동이 가능하다.	2.4	2	13
조립	통제가 가능하다	3.7	4	4
	회전을 제어한다.	4.1	4	2
	흔들림을 제어한다.	4.3	4	1
	정밀도 확보가 가능하다.	3.9	4	3
시공성	볼트조립 횟수가 적다.	2.8	3	11
	접합 작업이 용이하다.	3.1	3	7
해체	로프 해체가 용이하다.	3.6	4	5
검사	방법이 간단하다.	2.8	3	11
	기둥의 수직도가 정확하다.	2.4	2	13

4.7 기획품질의 설정

연구자의 요구품질별 기획평가 수준을 결정하기 위해 요구품질 중요도와 현재의 부재 평가 중 가장 높은 점수를 갖는 항목을 기획품질의 개발 포인트로 삼았다.

수준향상률은 관점에 따라 여러 가지 방법으로 사용될 수 있으나, 표 9에서 사용된 수준향상률은 기획품질 수준을 현재의 부재 수준으로 나눈 방법으로, 수준향상률이 1.5이면 현재의 수준에서 50%의 개선이 요구된다는 것을 의미한다. 절대 웨이트

는 '요구품질 중요도'와 '수준향상률'을 곱하여 산출한 것으로, 전문가측에서 본 요구품질 중요도에 따른 개발 전략상의 정책을 반영한 것이다. 요구품질 웨이트는 절대 웨이트를 백분율로 나타낸 것으로, 요구품질 웨이트가 높은 것이 중요 요구품질이 되는 것이다.

4.8 품질요소 중요도 산출

요구품질전개표와 기획품질설정표에 의해 기획된 품질을 실현하기 위해서는 품질표를 이용하여 요구품질 중요도를 품질요소 중요도로 변환시킨다. 표 9는 독립배점법을 이용하여 품질요소의 중요도를 산출한 결과이고, 각 숫자는 표 9의 품질표에서 요구품질과 품질요소간의 상관도를 "품질기획"의 요구품질 중요도에 곱하여 구한 것이다(표 11).

4.9 설계품질의 설정

품질요소 중요도를 구한 다음, 중요 품질 요소를 척도화하고 기획 목표치나 목표 규격치인 품질요소의 설계품질을 설정한다. 즉, 대상 부재가 요구품을 만족시키고 있는지를 측정할 수 있는 척도가 필요하며 그 척도를 이용하여 목표값을 설정할 필요가 있는데, 이렇게 설정된 목표값을 바로 설계품질이라 한다.

표 11. 품질요소 중요도 산출

요구 품질	품질 요소	조립		시공		형태		요구 품질 중요도		
		볼팅	가조립	접합부	거치	부재양중	부재결속		작업공간	
자 동 화 부 재	구조 성능			△			●	3		
	형태	강도 기준을 만족시킨다.			△				3	
		디자인이 단순하다.	○	●				△	3	
		후크와의 결속이 단순하다.				△		●	3	
		로봇의 작업공간이 충분하다.	△	△	○			○	●	3
	조립	정렬을 위한 부재의 이동이 가능하다.	○	△	○			○	2	
		통제가 가능하다.	△	△		●	○		4	
		회전을 제어한다.	△	○		●			4	
		흔들림을 제어한다.	○	●	●			△	4	
	시공성	정밀도 확보가 가능하다.	○	●					4	
		볼트조립 횟수가 적다.	●					○	3	
	해체	접합 작업이 용이하다.		○	●	○			3	
		로프 해체가 용이하다.				●	●	○	4	
	검사	방법이 간단하다.	●			○	△	○	3	
		가공의 수직도가 정확하다.				△	●		2	
	품질요소 중요도		15	74	94	44	74	32	54	9

본 연구에서는 설계품질을 설정하기 위하여 기존의 부재와의 품질 수준을 비교한 후 중요도가 높은 품질요소를 중요 품질요소로 선정하여 설계품질을 적용하는 방법을 사용하였다. 표 12는 설계품질을 설정하기 위해 선정된 중요도가 높은 품질요소와 중요도를 작성하였다.

표 12. 설계품질의 설정 항목


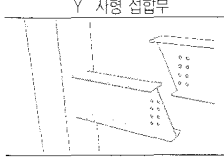
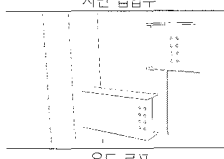
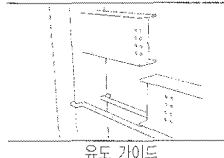
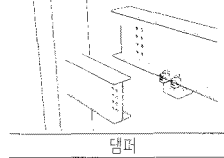


구분	품질 요소	중요도
A	회전 제어기 가능한 시공 방법	230.2
B	스스로 거치 가능한 접합부	183.2
C	접합부 정밀도 확보	152.4
D	부재 양중 후 로프 해체	127.4
E	조립 후 검사의 용이성	110

4.10 아이디어 발상을 통한 다양한 개념 설계의 제시 및 최적 대안 설정

가치 있는 개발 설계안을 발상하는 단계로써 설계품질의 설정 항목에 나타난 품질요소를 토대로 그 기능을 달성하기 위한 기본 구상에 대한 아이디어를 도출(표 13)하여 아이디어에 대한 경제성과 기술성에 대한 평가³⁾를 시행한 후 채택여부를 결정하였다.

예를 들어, 본 연구에서는 “접합 작업이 용이하다”는 요구품질 항목을 키워드로하여 “접합 방식을 브라켓 방식으로 한다”, “접합 방식을 가셋 플레이트 방식으로 한다”, “접합 방식을 브라켓 + 가셋 플레이트 방식으로 한다” 등의 아이디어를 발상하여 아이

표 13. 도출된 접합부 디자인 기본 구상 아이디어

구상 아이디어	기능	고려된 품질요소
	브라켓에 Y자 형의 플레이트를 달아 보 부재 하강시 접합부가 자동으로 조립된다.	(A), (B), (C)
	보의 웹을 사면으로 만들면, 부재 하강시 자동으로 머끄러져 좌우로 정렬된다.	(B), (C)
	유도 로프를 이용하여 부재 하강시 회전을 제어하고 방향을 조정한다.	(A), (C)
	유도 가이드를 이용하여 부재 상승시켜 회전을 제어하고 접합부 정밀도를 확보한다.	(A), (B), (C)
	보의 하부에 댐퍼를 달아 외부영향에 따른 부재의 회전을 제어한다.	(A)
	보의 하단 부위에 뺨기를 달아 조립시 정밀도를 높이고, 검사를 용이하게 한다.	(C), (E)
	연결된 로프를 오토사클을 이용해 해체시킨다.	(D)

디어 카드에 기록하였다. 또한 카드에 기록된 아이디어를 각각의 기능 분야(Alt 1~8)별로 나누어 정리한 후 경제성, 기술성을 평가하여 아이디어 카드에 후 채택여부를 표시하였다(표 14).

하지만 채택된 기본 구상안(아이디어)에는 이점과 결점이 포함되어 있기 때문에 구상안을 그대로 자동화 시스템을 위한 철골 접합부 디자인으로 제안할 수는 없다. 따라서 기본 구상안에 대한 이점과 결점을 조사하여 결점을 극복할 수 있는 아이디어의 최우선안을 도출하였다(표 15).

3) 경제성평가: 도출된 아이디어를 통한 시공방법이 목표 코스트 이내에서 달성될 가능성이 있는가를 판단.
기술성평가: 아이디어를 통해 제안된 기술이 전문가의 요구조건을 충족시킬 가능성이 있는가를 판단.

표 15. 아이디어 구상화 리스트

NO	기능 분야별								아이디어 구성 종합화 방침	아이디어 구성 종합안	아이디어 종합안
	Alt1	Alt2	Alt3	Alt4	Alt5	Alt6	Alt7	Alt8			
1	접합 방식을 브라켓 방식으로 한다.	보 부재의 양중을 위에서 아래로 한다.		브라켓의 플렌지 옆면을 길게 한다.				연결된 로프를 오토사클링을 통해 해제시킨다.	자동화	FA1 - ① FA2 - ① FA3 - ② FA4 - ① FA5 - ③ FA6 - ② FA7 - ① FA8 - ①	1) Y자형의 플레이트가 달린 브라켓에 보 부재 유도를 위한 로프를 연결하여 지상으로 내린다. 2) T/C에 연결된 사면 모양의 보 부재를 바닥면 가까이 내려 준비된 로프에 연결하여 다시 들어 올렸다가 내린다. 3) 로프로 부재를 유도하여 사면 모양의 보 부재가 Y자 형의 플레이트 사이로 들어가도록 거치시킨다. 4) 연결상태를 썬기를 통해 확인하고 연결된 로프를 오토사클링을 통해 해제시킨다.
2			보 부재의 접합면을 사면으로 한다.		플레이트를 Y자 형으로 접합한다.			연결상태를 썬기를 통해 확인한다.			
3						보 부재를 로프를 유도한다.					

표 14. 요구기능의 아이디어 발상

NO	아이디어	개략평가		
		경제성	기술성	채택여부
Alt1	1 접합 방식을 브라켓 방식으로 한다.	○	○	○
	2 접합 방식을 가셋 플레이트 방식으로 한다.	△	X	X
	3 접합 방식을 브라켓 + 가셋 플레이트 방식으로 한다.	X	X	X
Alt2	4 보 부재의 양중을 위에서 아래로 한다.	○	○	○
	5 보 부재의 양중을 아래에서 위로 한다.	△	△	X
Alt3	6 보 부재의 접합면을 직각으로 한다.	○	X	X
	7 보 부재의 접합면을 사면으로 한다.	○	○	○
	8 보 부재의 접합면을 고리형으로 한다.	△	○	X
Alt4	9 브라켓의 플렌지 옆면을 길게한다.	○	○	○
	10 브라켓의 플렌지 옆면을 짧게한다.	△	△	X
Alt5	11 플레이트를 웹의 양면에서 접합한다.	△	X	X
	12 플레이트를 웹의 Y자형으로 접합한다.	○	○	○
	13 플레이트를 웹의 일면에서 접합한다.	△	△	X
Alt6	14 양중시 보 부재에 댐퍼를 연결한다.	△	△	X
	15 양중시 보 부재에 유도 가이드를 연결한다.	X	○	X
	16 양중시 보 부재에 유도 로프를 연결한다.	○	○	○
Alt7	17 연결상태를 육안을 통해 확인한다.	○	X	X
	18 연결상태를 별도의 장치를 통해 확인한다.	○	○	○
Alt8	19 연결된 로프를 오토사클링을 이용해 해제시킨다.	○	○	○

4.11 철골 접합부 프로토타입 모델 제안

본 연구에서는 QFD기법을 적용한 디자인 개발 프로세스를 통해 도출된 시공 자동화 시스템을 위한 철골 접합부 프로토타입의 모델을 제안하고자 한다. 제안된 접합부의 주요 구성 요소(그림 5)와 개발을 통한 철골 접합부 시공공법은 다음과 같다(그림 6).

- (1) 브라켓 방식의 기둥에 “Y” 자형의 플레이트를 사전 시공시 연결하고 썬기 접합부에 로프를 달아 기둥을 설치한다.
- (2) 타워크레인으로 보를 인양하여 설치될 보 위치의 지면으로 이동하여 기둥에 달려져 있는 로프의 한 방향을 보에 달려있는 썬기에 연결한다.
- (3) 타워크레인을 통해 보를 다시 상승시킨 후 재하강 시킨다. 이때 보의 썬기에 연결된 로프를 통해 방향을 유도시킨다.
- (4) 로프 방향조절을 통해 썬기를 썬기 접합부로 유도하여 ‘Y’ 자형 플레이트로 보 이동시키면, 보는 접합부의 사면으로 인해 유도되어 정해진 위치로 브라켓에 안착된다.
- (5) 썬기가 썬기 접합부를 통과함에 따라 나타나는 썬기 색깔로 인해 접합부 접합 유무를 확인하게 된다.
- (6) 로프를 해제하고 준비된 볼팅 로봇의 조립 공정에 따라 보 조립이 이루어진다.

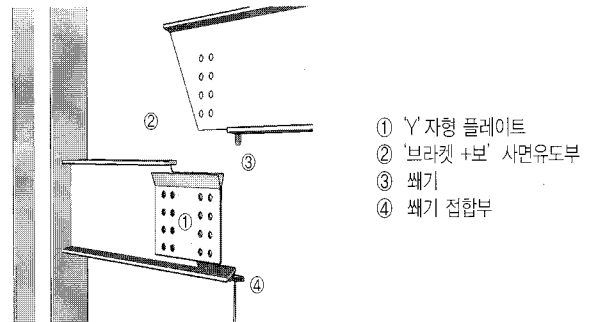


그림 5. 개발된 접합부 주요 구성 요소

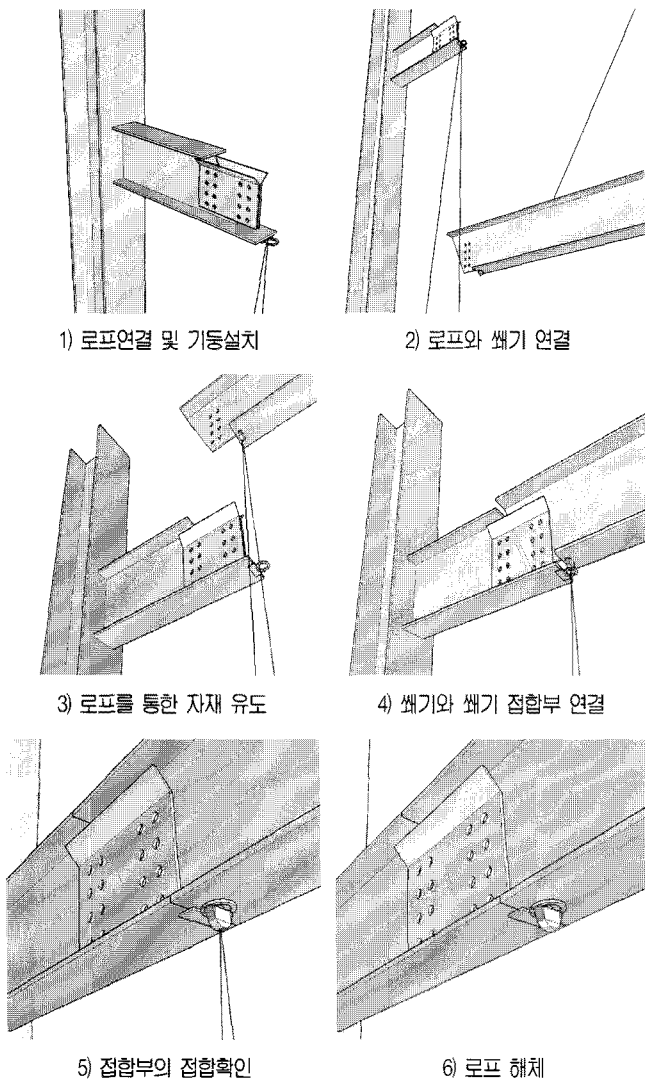


그림 6. 개발된 접합부를 통한 철골 조립 과정

5. 결론

최근 건설현장에 대한 기피와 숙련공의 노령화로 인하여 기능 인력의 수급 불균형의 대안으로 건설 자동화 시스템이 주목 받고 있다. 그러나 자동화 시스템의 자동화 비율이 높아짐에 따라 숙련공과 같은 작업 유연성을 구현하도록 하기 어려운 부분들로 인해 오히려 작업 효율성이 떨어지는 결과가 나타날 수 있다.

따라서 본 연구에서는 시공 자동화 시스템의 작업 유연성과 효율성을 확보할 수 있도록 QFD 기법을 적용하여 자동화 시공 시스템에 적합한 부재 디자인 개발 프로세스를 제안하였다. 제안된 부재 디자인 프로세스의 타당성 검토를 위해 개발 중인 철골 조립 자동화 시스템에 적용하여 자동화 시스템에 적합한 부재의 디자인을 도출하였고 향후 도출된 디자인 검증을 위하여 시험시공을 수행하겠다.

자동화 시스템 개발을 위하여 본 연구에서 제안된 프로세스와 같이 자동화 시스템에 적합한 부재 설계를 자동화 시스템 개발과 병행한다면 자동화 시스템의 효율성 향상과 개발 기간의 단축 등을 이룰 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 한국생산기술연구원, 고기능 콘크리트 바닥 미장로봇의 개발 (최종) 연구보고서, 건설교통부, 1998
2. 김광재, "QFD를 통한 설계단계에서의 품질향상", 대한산업공학회 IE매거진 2권 1호, 1995, pp. 16~21.
3. 김영석, 김현철, 서정희, 오세욱, "국내 건설 산업의 건설 자동화 및 로봇기술 도입 방안에 관한 연구", 대한건축학회 논문집 17권2호, 2001, pp. 111~120.
4. 김영석, 이정호, "공동주택 외벽 도장 자동화 로봇의 최적 개념 모델 제시 및 기술적·경제적 타당성 분석", 대한건축학회 논문집 22권 9호, 2006, pp. 139~150.
5. 목학수, 하재우, 차동균, "조립자동화를 위한 제품설계 기술 개발" 한국정밀공학회지 11권 1호, 1994, pp. 184~191.
6. 서종원, 박창우, 장달실, "지능형 굴삭시스템 개발", 한국건설관리학회 학술발표대회 논문집, 2007, pp. 197~204.
7. 신운석, 진일권, 안성훈, 조훈희, 강경인, "양중작업 자동화를 위한 부재진동에 따른 타워크레인의 작업가능 기준 연구", 한국건설관리학회논문집 11권 2호, 2008, pp. 108~116.
8. 심규범, "건설기능인력의 수급실태 및 대응방안", 건설산업동향, 한국건설산업연구원, 2002.
9. 유연택, 박상준, 이정호, 정명훈, 김영석, "홈매설 자동화 장비의 성능분석을 위한 평가모델의 개발", 한국건설관리학회 논문집 5권 1호, 2004, pp. 157~167.
10. 이승열, 한창수, 이계영, 이상현, "국내 건설 내/외장재 설치 로봇", 대한건축학회 논문집 23권 8호, 2007, pp. 201~212.
11. 이정호, 김영석, 이준복, 정명훈, "크랙실링 자동화 장비의 개발 및 경제적 타당성 분석", 한국건설관리학회 논문집 7권 6호, 2006, pp. 151~164.
12. 이태식, 장경수, 구자경, 박경순, "터널 청소장비의 고찰 및 개선된 모델에 관한 연구", 한국건설관리학회 학술발표대회 논문집, 2006, pp. 669~673.
13. 인재순, "휴대폰 배터리 개발을 위한 QFD 활용 연구", 한국산업경영시스템학회지 28권 3호, 2005, pp. 18~25.
14. 임현호, "안전성 및 생산성을 고려한 자동화 요구도 지수의 개발", 고려대학교 석사학위논문, 2008.

15. 장현승, 우성권, “건설공사의 자동화·기계화의 효과 및 확대 방안”, 건설산업동향, 한국건설산업연구원, 2003.
16. 한재구, 김군태, 권순욱, “워터젯을 이용한 노면표시 제거장비의 성능평가에 관한 연구”, 한국건설관리학회 논문집 제7권 6호, 2006, pp. 79~89.
17. Kurita, H., Tezuka, T., Takada, H., “Robot Oriented Modular Construction System – Part II: Design and Logistics”, Automation and Robotics in Construction, 1993, pp. 309~316.
18. Maeda, J., “Development and application of the automated building construction system in Shimizu,” u-IT based construction automation, Korea University, 2006, pp.280~286.
19. Sacks, R., Warszawski, A., “A project model for an automated building system : design and planning phases”, Automation in Construction Vol. 7, 1997, pp. 21~34.
20. Scott Howe, A., “Designing for automated construction”, Automation in Construction Vol. 9, 2000, pp. 259~276.
21. Shimizu, “Shimizu Manufacturing system by Advanced Robotics Technology (SMART), in R&D product pamplet, Shimizu Tokyo, 1993.
22. Sullivan, L.P., “Quality Function Deployment”, Quality Progress, Vol. 19, No. 6, 1986, pp. 59~65.
23. Tanijiri, H., Ishiguro B., Arai, T., Yoshitake, R., Kato, M., Morishima, Y., Takasaki, N., “Development of automated weather-unaffected building construction system”, Automation in Construction Vol. 6, 1997, pp. 215~227.
24. Wakisaka, T., Furuya, N., Inoue, Y., Shiokawa, T., “Automated construction system for high-rise reinforced concrete buildings”, Automation in Construction Vol. 9, 2000, pp. 229~250.

논문제출일: 2009.01.15

논문심사일: 2009.01.16

심사완료일: 2009.03.26

Abstract

Recently automated construction system is attended in construction domains because of the increase of aged workers and the shortage of the experienced. So, the proportion of automated construction in Korea is expected to be getting higher from partially automated robots to full automation systems. However, it is difficult for the automated system to operate flexibly like the human based on various work condition. In the result, the higher the level of automation in the system is, the less efficient the automated system work in the site. So, it's necessary the development component design to compensate for the flexibility shortage of the system. Therefore, this study proposes the development process to component design suitable for automated construction system using QFD technique.

Keywords : automatied construction system, component design for automation,
Quality Function Deployment(QFD)