

우리나라 超高層用 建設팩토리 開發을 위한 性能評價體系에 關한 基礎的 研究

A Study on the Performance Evaluation System for the Construction Factory System Applied to High-Rise Building Construction in Korea

최 원 준*
Choi, Won-Jun

김 창 규**
Kim, Chang-Kyu

송 인 식***
Song, In-Shick

임 상 채****
Lim, Sang-Chae

Abstract

This study aims to develop a performance evaluation system for the Construction Factory(CF). The CF is a kind of full automation system for building construction which consists of the lifting system for building materials, the built-up unit for steel structural components, the bolting robots, the control center for the site management, and the site covering system. The CF is developing now as a project of the construction automation and robotics. In this study we firstly reviewed the state-of-the-art of the construction automation and robotics in the foreign and the domestic, and investigated the precedent case of the CF such as the SMART System of Shimizu Co., Japan. We believe that without an objective evaluation of the results there won't be growth in technological R&D. Therefore, this study sees the developing CF as an new technology and method in building construction, and proposes the direction and frame of the appropriate evaluation which can be applied into the CF.

키 워 드 : 건설자동화, 건설로봇, 건설 팩토리, 성능평가

Keywords : Construcion Automation, Construction Robot, Construction Factory, Performance Evaluation

1. 서 론

우리나라 건설 산업에서 건설 공사 현장 업무는 3D라 하여서 기피 현상이 오래 지속되면서 젊은 기술 인력의 현장 업무 진입이 낮고, 현장에서의 젊은 기술 인력 비율이 저하되고, 그 결과로 숙련공의 고령화와 숙련공 수의 급감하는 상황이 벌어지고 있다. 이러한 건설 공사 현장의 노령화와 숙련 기술 인력 감소는 건설 생산성 및 품질의 저하되는 문제를 야기하고 있다. 즉, 전통적으로 인력집중 산업으로 알려져 있는 건설 시장에서의 노동 품질 저하는 곧바로 건설 산업의 저효율·고비용로 이어지고 있는 것이다.

건설업의 생산성 측면도 악화되고 있어서 자료에 따르면 연평균 약 4.8%로 산업 평균 생산성인 10.5%의 절반에도 못 미치고 있으며, 국제적 경쟁력을 놓고 볼 때에도 기술 최우위국이라 할 수 있는 미국의 약 60% 수준의 생산성을 보이고 있다¹⁾. 이러한 문제는 국내 특정 건설사만의 문제는 아니라고 보이며,

그동안 우리나라 사회경제에 상당한 기여를 한 건설 산업 측면으로 볼 때, 국가적 차원에서 함께 대처해야할 필요성이 있다.

건설교통부의 첨단융합건설기술개발사업의 일환으로 추진되고 있는 로봇틱 크레인을 활용한 구조체 자동화 시공 기술 개발은 자동화에 의한 건설 노무인력 절감, 전천후 시공 시스템에 의한 생산성 향상, 그리고 공장자동화의 축진을 통한 품질향상을 이루함으로써 건설 산업의 문제들을 해결하고자 하고 있다.

본 연구는 이러한 건설 자동화 기술이 개발되었을 때, 그러한 기술이 건설 과정에 어떠한 영향을 미치는지, 그리고 개발된 시스템이 실제 현장에서 어떤 성능을 발휘하여 당초 기대했던 성과에 어느 정도 충족하는지, 또한 그러한 분석을 통하여 향후 추가적 연구 개발 사항을 도출함에 있어서 구체적이고 계량적인 평가 시스템의 개발하고자 하였다. 본 논문은 그 기초적 연구로 현재의 건설 자동화에 대한 일반 현황과 선진국의 사례에 대해서 검토하고, 현재 개발 중인 시스템의 개발 범위 등을 고려하여 성능평가 시스템의 개발의 기본 방향을 제시하고자 한다.

2. 기존 연구 조사

2.1 건설자동화의 개념

자동화란 기계장치를 활용하여 인력을 최소화하거나 대체하

* (사)IBS Korea 연구원

** (주)IBS기술연구소 연구원, 정회원

*** (주)IBS기술연구소 책임연구원, 정회원

**** (주)IBS기술연구소 대표이사, 정회원

※ 본 연구는 건설교통부 2006년 첨단융합건설기술개발사업(한국건설기술평가원)의 '로봇틱 크레인 기반 고층 건물 구조체 시공자동화 시스템 개발'의 성과 중 일부입니다.

1) 건설교통부, 제1차 건설산업진흥 기본계획, 1999. 1.

는 것이라 할 수 있다. 건설 산업은 인력 및 자원이 집중되는 산업으로 제조업과 달리 현장 단품 생산이라는 특징을 갖고 있으며, 현장의 조건 및 생산 여건 등에 따라 다양한 공사 전략이 요구되기 때문에, 같은 공법이나 공사전략이 재 활용되는 가능성이 그다지 높지 않은 산업이다. 한편, 건설 산업은 대규모 프로젝트로서 대형, 중량의 생산이라는 특징도 갖고 있어서 이미 오래전부터 중장비 등 기계가 널리 도입된 분야이며, 이를 소위 건설 기계화라고 부를 수 있다.

자동화의 개념은 인간의 지적 작업까지 대체하는 활동으로서 단순한 노동력, 육체적 근력을 대신하는 차원을 넘어 반복적으로 처리되는 일련의 작업들을 처리하거나 상당 수준의 지능적 작업을 동반한 기계화라 할 수 있다.

2.2 건설자동화의 연구 동향

건설관련 공종 및 공사가 폭넓고 다양하기 때문에 그동안 건설자동화/로봇화를 위한 연구 개발이 여러 방향에서 진행되어왔고, 또한 현재 진행중에 있다. 건설 자동화 및 로봇 개발 연구는 건설산업 인력난이 심각했었던 일본이 가장 일찍부터 첨단 기술잠재력과 건설업체의 자본력을 바탕으로 추진하여 오다가 1990년 중반 일본의 건설 경기 거품(bubble phenomenon)이 꺼지면서 급속히 수그러든 상황이다.

일본에서는 1980년대 초반부터 소위 슈퍼콘(Super Con.; super general contractor)이라 부르는 대형 건설회사 중심의 적극적인 자동화 기술개발이 이루어져 왔으며, 건축 및 토목 공종에 있어서 다양한 기술 개발 성과를 이루었다. 일본 건설 산업은 기능인력 수급의 불균형, 생산성 저하 및 미래 건설시장에 대비한 막대한 R&D 투자를 통해 건축물 내·외부 마감로봇, 마이크로 터널링 시스템, 콘크리트 마감 및 면처리 로봇, 각종 점검 및 유지보수 로봇, 무인 토공시스템 등 다수의 건설자동화 장비를 개발하여 건설현장에 적용하고 실용화하여 왔다.

미국은 우주개발 프로젝트와 같은 국가적 대형 프로젝트의 구성요소의 하나로서, 1980년대부터 건설자동화 분야의 연구 개발하고 있으며, 우주항공국(NASA) 및 국립표준국(NIST) 등 국가 연구기관 및 몇몇 대학에서 이러한 건설 자동화 연구를 주도하고 있다. MMI 개념의 토공장비, 위험 작업환경에서의 이동 및 작업가능 로봇, 자재의 취급 및 인양을 위한 다목적 매니플레이터 개발, 인간공학적 작업개선을 위한 도구 및 장비의 개발, 미래 우주기지 건설을 위한 인간형 로봇 개발 등이 주요 연구 개발 주제가 되고 있다.

영국의 Bristol 공과대학의 건설용 로봇의 현장도입의 가능성 연구와 로봇화에 적합한 건물의 설계방법에 대해 연구, Nottingham 대학의 인공지능을 이용한 건설공사의 계획방법 연구 및 Lancaster 대학에서는 건설기계의 자동화를 위한 연구 등 영국의 경우 주로 대학에서 연구 개발을 수행하고 있다.

국내에서는 1980~1990년대에 한국건설기술연구원에서 건설자동화의 필요성 및 적용대상 공사 선정을 위한 이론적인 연구, 전동롤러의 자동화, 타워크레인의 반자동화 연구 등 현장적용을 위한 기존 장비의 자동화 방안연구를 수행하였다. 최근 건설 및 로봇 기술개발 분야에 있어 정부의 관심증대, R&D 예산의 증가 및 RT, IT, NT 분야에 있어 국내 기술수준을 고려해 볼 때 향후 국내 건설로봇의 발전 가능성은 매우 클 것으로 기대되고 있다.

3. 건설 팩토리(일본 사례를 중심으로)

건축 건설분야에서의 로봇 및 자동화 개발은 일반적으로 세 가지 유형으로 나눌 수 있는데, ① 개별 작업을 처리하는 단품형 로봇, ② 서로 다른 로봇과 자동화 장비를 조합하여 구성하여 일련의 작업 자동화한 장치, 그리고 ③ 건설의 기본 부분 작업을 자동화한 장치(건물시공자동화시스템)로 대별된다. 건설 팩토리는 세 번째의 건물시공자동화시스템에 속한다. 이 시스템은 건설현장을 일종의 제품생산공장으로 만든 후에 건물을 건설하는 시스템이다. 이러한 건물자동화시공시스템은 1980년대 중반 이후 일본의 주요 건설회사에서 개발, 적용하였다.

3.1 일본의 건설 팩토리 개발 사례

일본에서는 1980년 중반부터 1990년대 말까지 약 10여개의 건설자동화시공시스템이 개발된 것으로 보고되었다. 표 1은 일본의 건설자동화시공시스템을 정리한 것이다²⁾.

3.2 일본 건설팩토리의 성과

일본 건설회사들의 건물시공자동화시스템 개발은 인력절감과 공기 단축, 품질향상, 안정된 생산시스템을 확립하는데 목표를 두었다.

최초로 시공자동화시스템을 적용한 시미즈 건설 기술연구소 J. Maeda(前田 純一郎)에 따르면, 인력절감 및 공기 단축에 있어서 기존 공법 대비 약 30%의 향상 효과가 있었다고 보고하고 있다. 이러한 효과는 건설시공자동화시스템을 위한 제반 장치의 구축 비용을 고려할 경우, 약 10% 내외의 향상 효과가 있을 것으로 보고하고 있다³⁾.

표에서도 보듯이 일본의 건물시공자동화시스템을 충분히 활용을 위해서는 기본적으로 건물 자재의 PC화가 이루어져야 한다. 건물의 기획·기본설계의 초기 단계에서부터 시공성(施工性)에 대한 충분한 고려가 필요하다.

이러한 현장 중심의 건물시공자동화시스템의 도입은 단지 현장에서의 자동화시스템 도입으로는 그 효과를 기대하기 어려우며, 적합한 새로운 생산지원 체제의 확립과 자동화시공을 위한 노무인력의 양성 등, 개별 기업에서 해결할 수 없는 부분도 많으며, 건축 건설 산업구조의 개혁 및 정부차원의 산업정책도 필요하다.

4. 건설 기술의 평가 체계

건설공사 수행에 대한 성과는 안전(safety), 공기(timeliness), 품질(quality), 생산성(productivity)의 4가지 항목으로 측정 가능하다⁴⁾.

2) 長谷川幸男 편저, 建設作業のロボット化, 工業調査會 1999. 3., p.364.
3) J. Maeda(前田 純一郎), "Planning and Development of the Construction Plant for an Automated Building Construction System", 2007 고층건물 시공자동화 연구단 제1차 국제세미나 발표자료, 2007. 7.
4) Oglesby, C.H., Parker, H.W., and Howell, G.A., Productivity Improvement in Construction, Mc-Graw-Hill Book Co., NY, 1989. 이준복(2001)에서 재인용.

표 1. 일본 건설시공자동화시스템 (출처 : 長谷川幸男 편저(1999. 3))

	Takenaka Co. 竹中工務店	Shimizu Co. 清水建設	Taisei Co. 大成建設	Maeda 건설 前田建設	Obayashi Co. 大林組	Fujita 건설 후지타	Obayashi Co. 大林組	Kajima Co. 鹿島	Penta-Ocean Construction 五洋建設	Toda Construction 戸田建設	
시스템 명칭	Roof Push-up 공법	SMART공법	T-up 공법	MCC공법	ABCS	Akatsuki 21	Big Canopy	AMURAD	FECS	Roof Robo 공법	
발표시기	1990년 7월	1990년 12월	1990년 10월	1992년 2월	1989년 8월	1995년 5월	1995년 9월	1995년 4월	1996년 10월	1991년 5월	
가동개시	1990년 9월	1992년 11월	1993년 1월	1993년 3월	1993년 3월	1995년 7월	1995년 9월	1996년 4월	1996년 10월	1995년 8월	
주요 장치	전천후 지붕 구조체	옥상부분+PR층+ 전천후셀터(외주 양생 프레임)	옥탑층(Hat Truss)+외주 양생 프레임	Hat 보(최상층)+전천 후 지붕	최상층 + 전천후 셀터(외주)	최상층 + 전천후 셀터(외주)	최상층+PCa판+ 엄브렐라 유닛(Umbrella unit)	가설지붕 架構	완성(完成) 층+지상설비 (일부 메쉬 시트?)	lift-up frame(지붕 프레임, 지지 기동 프레임, 측벽(側壁) 프레임)	최상층+지붕 구조부
	상승 장치	푸쉬업(push-up) 장치+반력플레 이트(plate) 방식	4개의 가설 마스트+리프트 업(lift-up) 장치	유압 잭을 내장한 가이드(guide) 기동	크라이밍 장치	SCF크라이밍 장치 (rack, pinion)	컴비네이션 재키 (combination jack)	타워 크레인-크라이밍 장치 개조	push-up 장치(전동식) 방식)	lift-up 장치	밀어올리는 시스템이 있는 건물 코어 지지기동 방식
	반송 장치	옥상의 Jib 크레인, 천정 슬라이드 크레인	수직반송장치+ 수평반송장치(작 업층, 지상에 하적)+트롤리 호이스트	주행식 Jib 크레인, 천정 주행식 크레인	회전 Jib 방식 천정 크레인, 자동 리프트	SCF 크레인, 화물 리프트	스테이지 셔틀 (stage shuttle; 화물 리프트), 트레버서+트롤 리 버스(수평 반송), 연동제어	화물리프트, 천정 크레인	구체 설치 장치, 마감재-설비자재 반송장치	셔틀 크레인(shuttle crane)	전방향 수평반송 시스템, 자동 마감재 반송 시스템
	접합	기동-기동 용접 로봇, 기동-보 용접 로봇	기동-기동 용접 로봇, 기동-보 용접 로봇			기동-기동 용접 로봇, 기동-보 용접 로봇	기동-기동 용접 로봇			기동-기동 용접 로봇	
	기타					파지(把持) 장치(기동, 보, 슬래브 용)	AGV(지상반송)+ PCa판 수평반송시스템	회전형 하적 장치	커튼월 반송차체 지지부	양중고리 자동해체 장치, 기동 세우기 조정장치, 보 정리 장치	자동 철골 세우기 조정 시스템, 커튼월 설치 로봇, 내화피복 처리용 로봇, 내장재 설치 로봇
계측 장치	정밀도관리 시스템, 시공관리 시스템	정밀도계측시스 템, 철골연직도 계측 시스템	Hat 보의 거동 계측시스템, 자동 셀프 크라이밍시스템, 철골세우기용 레이저 자동계측 시스템	계측시스템(CF 상승량, 수직변위, 수평변위, 풍향, 풍속)	정밀도 관리 시스템(SCF레벨, 위치변위), 하중스트로크량 계측 시스템, 설비감시시스템, 환경계측	수평연직 정밀도 계측 시스템	풍향풍속계측, 환경계측	계측관리시스템, 구체 응력 계측 시스템, 풍향 풍속계측장치, 진동(지진)감지 계, 철골세우기 정밀도 계측	프레임 계측관리 시스템	자동계측시스템	
적용대상	S구조(10층 이 상, 셋백이 적어 야 함)	S구조(셋백이 적 어야 함)	S구조, SRC구조(30층 이상에 유리, 코어부분 일정)	S구조(각형강관 기동, 셋백이 없 어야 함)	S구조(20층 이 상, 셋백이 적은 공사에 적합)	S구조, SR구조 (20층 이상, 셋 백이 적은 공사 에 적합)	RC구조, SRC구 조, S구조	RC, SRC, S 구 조(9-15층)	S구조	S구조	
적용건수 ('98.5.현재)	2건	2건	1건	2건	2건	2건	4건	2건	1건	2건(부분적용)	

이준복(2001)은 건설공사 성과측정 4개 항목을 근거로 건설공사 자동화장비 개발에 따른 성과측정을 같이 안전, 생산성, 생산량, 품질, 작업원의 수용도 등 5가지 항목으로 구분하여 실시할 수 있다고 제시하였다. 각 항목별로 기준, 지수, 지표의 순으로 계층적 분석기준을 설정하고 이 기준에 근거하여 기존의 방법과 새로이 개발된 장비와의 비교-분석을 통하여 그 성과를 측정하게 된다. 각 기준 및 지수별 지표는 성과측정의 최하위단계로서 개발장비의 특성에 따라 다양하게 설정된다⁵⁾.

일반적으로 평가는 어떤 기준에 비교하여 이루어질 수 있다. 현재 개발되고 있는 한국형 건설 팩토리 시스템도 그 성과는 유사한 건축 공사에 있어서 기존 시공 방식과 대비하여 그 효과를 살펴볼 수 있으며, 또한 향후 시스템의 보안을 위한 방향을 분석할 수 있다.

5. 건설 팩토리의 성능평가 체계 구축 방안

5.1 건설 팩토리의 기본 구상

앞서 일본의 사례에서 건설 팩토리는 크게 다음의 5가지의 기본 요소들로 구성된다.

5) 이준복, 건설자동화 시공 장비개발 및 성과평가에 관한 연구, 대한건축학회 논문집(구조계), v.17 n.7, 2001.7.

표 2. 일본 건설 팩토리의 주요 구성 요소

(출처 : 長谷川幸男 편저, 1999)

구성요소	세부 구성 요소
대형 지붕 구조체 설비	최상층 구조체 프레임, 코어부분 구조체 프레임, 가설 지지기동 방식
자동화 기계화 설비	Push-up장치, Climbing 장치, 양중반송장치(천정 주행 크레인, 트롤리 호이스트, Circle 크레인, Active 크레인 등), 자동 화물 리프트, 용접로봇(기동, 보)
계측 기술	위치-자세계측시스템(레이저 이용 연직 정밀도 계측, 수평정밀도계측시스템 등), 크라이밍 시의 자세, 하중 계측 시스템, 세우기 정밀도 계측 장치, 지진력, 풍력 등 계측시스템 기상관측, 정보 시스템, 각종품질검사, 계측 등
구 공법	슬래브 Full PC공법, 마감재-설비 유니트화 공법(배관 유니트, 내장재 유니트), 외벽 커튼월, 마감용 자재 팔레트(palette)화 원터치 조인트 공법, 가이드(guide)가 달린 낙하인입 접합방식, 지상지하 동시 시공법, 코어부분 선행 공법 등
통합 시공 계획 관리 기법	공사관리 시스템, 설비제어 시스템, 양중자재관리 시스템, 생산진척관리 시스템, 공업용 TV카메라 감시 시스템, 다기능공 등의 작업 팀

표 3. 일본 사례와의 차별성

일본	한국
<ul style="list-style-type: none"> 용접 방식만의 자재 접합 로봇-크레인 일체형 CF 일본식 건축기준 적용 	<ul style="list-style-type: none"> 용접과 볼트의 혼합형태 로봇-크레인 분리형 CF 한국형 시공 시스템

현재 우리나라에서 연구개발되고 있는 건설 팩토리(고층 건

측시공 기술을 융합한 “로보틱 크레인 기반의 고층 건물 구조체 자동화 시공 기술”)는 국내의 상황에 맞추어서 다음과 같은 측면에서 개발의 방향을 설정하고 있다⁶⁾.

- 선택적 자동화를 통한 효율성 극대화
위험작업, 생산성이 낮은 작업 등에 대해 선택적으로 자동화를 실현하고, 기타 작업들에 대해서는 인간-로봇 사이의 인터페이스를 이용
- 경량형 시스템을 통한 경제성 극대화
타워크레인을 개조한 지능형 자동화 타워크레인 구조를 채택, CF(건설 팩토리) 내부에 설치. CF의 무게 경량화하여 설치 및 해체 기간 단축
- 한국적 건설 환경에 적합하도록 실용성 극대화
“코어선행 공법”에 적합하고, ACS Form 및 3개 층 1절 철골 구조를 모델로 설정
- 볼트 체결 방식의 변화
볼트와 용접을 병행하는 방식 채택, 별도의 플레이트가 사용되지 않고, 사용되는 볼트의 수도 절감
- 외부 환경요소의 제어
CF(건설 팩토리)를 통하여 외풍 장애 극복 및 디스플레이트 바닥 설치 시공으로 작업 안전성 확보

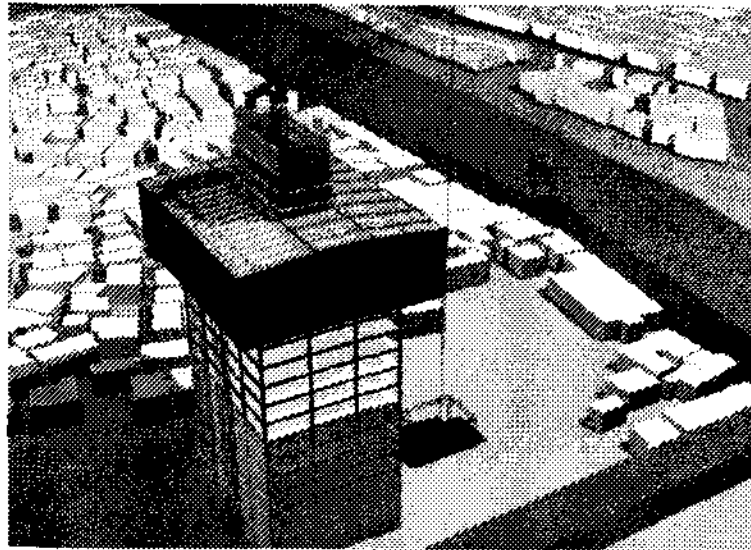


그림 4. 건설 팩토리 기본 모형(안)

5.2 건설 팩토리의 평가 체계

구조체 시공 자동화 시스템의 적용으로 인한 기존 시공과정의 변경 또는 추가 되는 요소항목, 성능평가 기법에서 고려하여야 할 요소 항목, 전문가의 경험, 유사한 시설물의 실적 데이터를 기반으로 한 객관화된 정보 등의 도출과정이 필요하다.

그림 2는 성능평가 요소 세부 도출과정과 개선효과를 정량화시키는 과정을 보여준다.

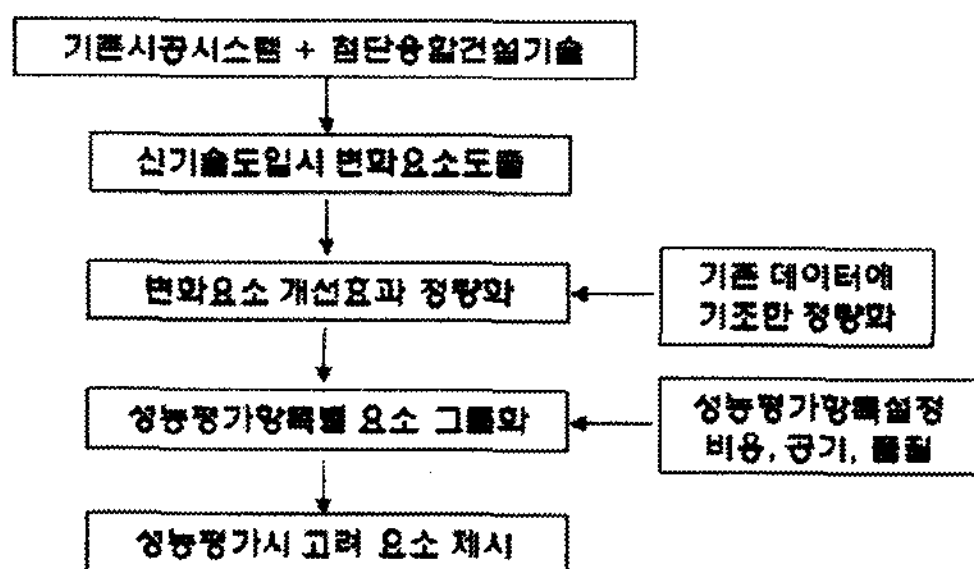


그림 2. 성능평가 세부 요소 도출 과정

성능평가항목은 비용, 공기, 품질을 기본으로 하여 신기술에 수반되어지는 세부요소들을 평가항목별로 분류하였다.

5.3 건설 팩토리의 요소별 성능평가 체계 구축 방안

본 연구에 제시하는 건축 건설 팩토리 시스템의 성능평가는 그림 3과 같이 진행된다. 즉, 비용 항목의 성능평가는 기술 도입에 따른 원가절감액을 전체 공사비로 나누어 비용 절감율을 계산한다. 공기기간에 대한 평가는 기존공사 기간 대비 공사일의 단축시간으로 평가 할 수 있다. 품질 평가는 현장시공 결과에 따른 개선효과 여부로 판단한다.

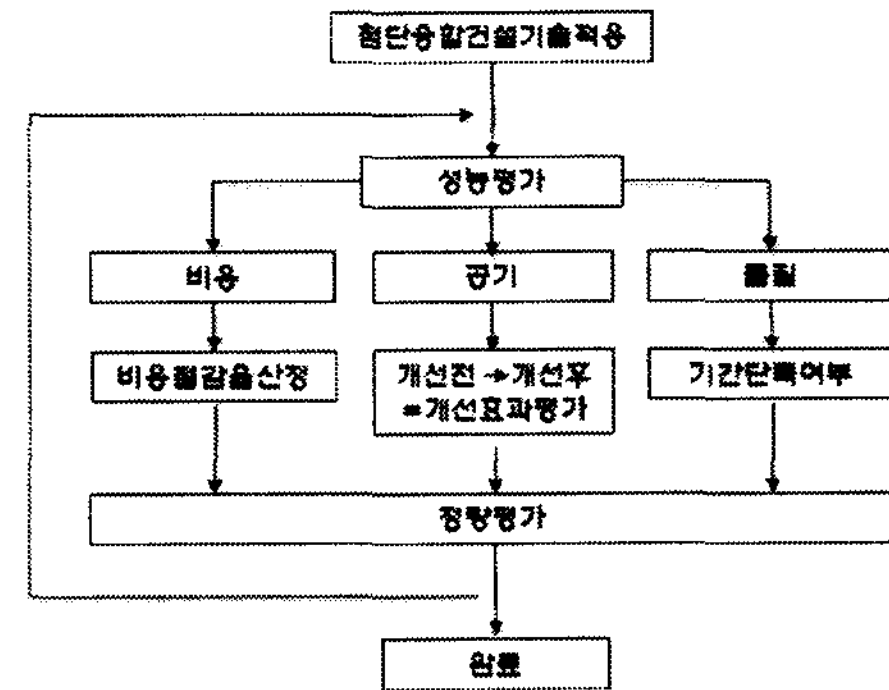


그림 3. 성능평가 프로세스(안)

6. 결론

본 연구는 현재 연구개발중인 한국형 건축 시공 자동화 시스템(건설 팩토리)을 위한 성능평가 체계를 개발하기 위하여 일본의 관련 사례를 살펴보고, 향후 개발될 한국형 건설 팩토리의 성능평가체계의 기본 방향을 제시하였다. 건설팩토리는 건설 팩토리 구조체, 건설 팩토리내 자동화 시스템, 시공 자동화를 위한 자재 등의 공업화와 설계개량으로 구성될 것이며, 광범위하고 복잡한 시스템들이 상호 연동되어 건축 공사의 인력절감, 공기단축, 품질향상을 통하여 공사 현장의 효율성과 경제성을 극대화할 수 있어야 하며, 성능평가 체계도 이러한 측면에서 폭넓고 광범위하게 분석되어야 할 것이다.

참고 문헌

1. 건설교통부, 제1차 건설산업진흥 기본계획, 1999. 1.
2. 고려대학교 고층건물시공자동화연구단, “2007년 고층건물시공자동화연구단 제1차 국제세미나” 자료집, 2007. 7. 6.
3. 김영석, 이정호, 공동주택 외벽 도장 자동화 로봇의 최적 개념 모델 제시 및 기술적 경제적 타당성 분석, 대한건축학회논문집 구조계: 22권 9호, 2006. 9. pp.139~150.
4. 박상준, 기성 콘크리트 파일 두부정리 자동화 장비 개발에 관한 연구, 인하대 석사논문, 2005.
5. 박선영, 특허기술의 기술사업성 가치평가를 위한 범주형 평가지표 모델 개발, 서울대 석사논문, 2005.
6. 송근일, 첨단생산자동화설비의 기술수준 평가에 대한 연구, 성균관대 석사논문, 2005.
7. 이준복, 건설자동화 시공 장비개발 및 성과평가에 관한 연구, 대한건축학회 논문집(구조계), v.17 n.7, 2001.7.
8. Thomas Bock, “Construction robotics”, Autonomous Robots, Vol.22, No.3, 2007., Springer, pp. 201-209
9. 長谷川幸男 편저, 建設作業のロボット化, 工業調査會 1999. 3.

6) 고층건물시공자동화연구단, 1차년도 연구보고서, 2007. 8.