

기술혁신을 위한 건설자동화의 현재와 미래

Today and Tomorrow of Construction Automation for Technological Innovation

이준복* 김영석**
Lee, Junbok Kim, Young-Suk

Abstract

Technology innovation is critical for the construction industry in order to stay competitive in the global market for the 21st century. It is obvious that construction automation and robotics is an emerging topic for technological innovation. This paper reviews the construction automation and robotics R&D projects successfully performed by Japan, the United States, and European countries as well as Korea, and discusses current trends and future. Four issues are proposed in order to expedite the innovative construction automation technologies.

Keyword: 건설자동화, 자동화기술, 기술혁신, 로봇, 연구개발
construction automation, automated technology, technological innovation, robot, R&D

1. 서론

20세기말 컴퓨터 및 정보통신기술의 발달에 힘입어 많은 변화와 새로운 도전의 기대를 가지고 시작된 21세기에 건설산업의 두드러진 변화의 모습은 정보화·지식화·기술집약화·고효율화 등이다. 전통적으로 3D업종인 건설산업은 젊은 기능인력의 기피현상으로 숙련된 기능인력 확보가 더욱 힘들어지고 있는 현실이다. 또한 수요자의 요구에 따른 시설물의 첨단화 및 복잡화되는 추세에 기술력의 확보가 경쟁력의 관건이 되고 있다. 건설시장의 전면 개방으로 기술력을 바탕으로 한 고부가가치 창출이 건설업계의 경쟁력 확보를 위한 지상 목표라 할 수 있다. 건설기술력 향상 분야를 언급할 때 빠지지 않는 항목 중의 하나가 “건설자동화(construction automation)”라고 할 수 있다. 건설자동화를 통하여 작업현장의 안전성을 제고하고 품질 및 생산성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대하기에 언제나 그 중요성이 강조되고 있다. 그러나, 기계, 전기, 컴퓨터 등이 포함된 복합기술로서 건설자동화에 대한 전문지식 부족, 건설업의 특성상 연구개발 결과에 대한 불확실성과 이에 따른 위험 부담 등의 복합적인 요인에 의해 자동화의 필요성은 강조되고 있지만 이에 대한 활발한 연구·개발은 이루어지지 않고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 미국, 일본, 유럽에서 지난 20여년간 꾸준히 연구개발을 수행하고 있는 건설자동화분야의 접근방법 및 성과를 살펴보고 국내에 있어 기술혁신

을 통해 건설자동화 분야를 활성화를 위한 다각적인 제언을 하고자 한다.

2. 국내외 건설자동화 연구개발 동향

2.1 건설자동화 개념 및 의의

건설자동화(construction automation)라 함은 컴퓨터 및 전산기술을 이용한 정보화, 통합관리시스템화 등 소프트웨어적인 기술과 시공의 성력화, 기계화를 위한 자동반자동 형태의 로봇 개발 등 하드웨어적인 기술을 포함한다. 현재 건설 CALS, CIC 구축 등을 목표로 건설프로세스별(기획, 설계, 시공, 유지관리 등) 업무의 전산화, 프로세스 간의 정보의 교류 및 공유를 위한 시스템 구축 등 소프트웨어적인 자동화 분야의 연구개발이 활성화되고 있으며 이러한 노력으로 공사관리의 효율성 및 투명성이 제고되고, 기술 및 실적자료의 데이터베이스화를 통한 지식의 교류, 공유, 재활용이 이루어지고 있다.

본 연구에서는 고소작업 및 중량물 취급 등 열악한 작업환경과 인력의존도가 높은 건설공사의 근로자 안전문제 및 작업환경 개선과 생산성 정체문제 등을 해결하기 위한 방안으로 인력지원 또는 인력대체 하드웨어적인 건설자동화 분야를 설명하고자 한다. 이와 같은 건설자동화는 원격조종, 통신, 수치제어 등 콘트롤, 다양한 센서에 의한 자료수집 등의 기능을 포함한 인력대체형(robotic) 또는 인력과 장비가 협력하는 형태(man-machine interface)의 건설장비의 개발을 의미하고 있으며, 개발된 장비는 건설자동화장비 또는 건설로봇이라고 한다.

건설자동화는 1980년대 후반부터 일본, 미국, 유럽에서

* 정희원, 홍익대학교 건축공학과 전임강사, 공학박사

** 정희원, 인하대학교 건축공학과 조교수, 공학박사

부분적으로 진행되었으며 그 실적도 상당수 보고되고 있다. 일본은 미장용 로봇과 같은 개별 공정에 대한 로봇화, 무인화의 연구와 동시에 대형 건설회사에서 공장식 자동화시스템의 개발적용을 통하여 도심에서의 전자동고층 건축물 구축도 실시하여 건설자동화의 가능성을 보여 주었다. 미국은 우주개발 프로젝트와 같은 국가적 대형 프로젝트의 구성요소로서 건설용 로봇을 개발하는 등 꾸준한 연구개발을 이루었다. 유럽에서도 조적, 굴착, 미장 등 개별 공종에 대한 로봇의 연구개발이 진행되고 있다.

산업용 로봇이 반복작업을 기계화하고자 하는 목적으로 매니플레이터(manipulator)를 개발하는 것으로부터 시작되었고, 이에 인공지능 등 첨단기술의 접목을 통하여 현재 고도의 지능형 로봇의 개발에 관한 연구가 진행 중에 있다. 건설산업에서의 로봇개발은 아직 초보적인 단계로서 인간과 장비와의 공동작업 형태 또는 원격조종형 로봇의 형태인 매니플레이터의 개발단계로 판단된다. 건설자동화장비 또는 건설로봇의 구성은 본체, 매니플레이터, 말단기기(end-effector) 등의 구동부, 조종, 피드백, 수치제어 등의 제어부, 시각, 촉각 등을 통한 감지능력의 센싱부의 요소기술로 이루어지고 있다.

하드웨어적인 건설자동화분야의 연구·개발은 이와 같은 복합적인 요소기술이 요구되고 있으며, 실물규모(full scale)의 현장적용 가능시스템의 구축을 통한 타당성 분석을 실시하여야 하기에 학제적(multi-disciplinary) 및 다양한 전문가로 이루어진 산학연 공동조직 형태의 연구·개발팀을 구성운영하여야 한다.

2.2 국내 동향

국내에서는 1980-1990년대에 한국건설기술연구원에서 건설자동화의 필요성 및 적용대상 공사 선정을 위한 이론적인 연구를 수행하였다. 또한 진동롤러의 자동화, 타워크레인의 반자동화 연구 등 현장적용을 위한 기존장비의 자동화 방안 연구를 수행하였다. 일본에서 개발된 미장로봇을 도입하여 국내에 적용한 사례 발표도 있었고 거꾸집 자동화 공법도 소개되었다. 최근 미장로봇의 국내 개발이 성공적으로 수행되었고 교량유지관리를 위한 교량하부 안전 점검용 로봇이 개발되어 활용되고 있다. 또한, 흙관매설 자동화 장비의 연구개발이 진행 중에 있으며 도로면 유지보수를 위한 크랙실러의 개발에 관한 연구, GPS와 머신비전(machine vision)을 활용한 타워크레인 작업 효율성 향상에 관한 연구, 기성 콘크리트 말뚝의 두부정리 자동화 방안에 대한 연구도 착수되었다. 이와 같이 국내의 경우 과거 20여년에 걸쳐 건설 자동화 기술 개발에 많은 연구노력을 기울여 왔던 미국, 일본, 유럽의 R&D 투자 규모, 로봇 개발 및 상용화 건수에 비교해 볼 때 그 수준은 매우 미약하다고 볼 수 있으나 국내에서도 안전, 생산성 문제, 경제성 확보, 품질향상을 위해 자동화 분야의 연구개발이 간헐적으로 진행되어 왔으며 최근 건설 및 메카트로닉스 전문가 집단을 중심으로 건설 자동화 기술개발에 관한 연구가 다시 활기를 찾고 있는 모습이다.

2.3 국외 동향

지금껏 건설자동화 연구는 북미, 일본, 유럽을 중심으로 기술개발이 이루어져 왔다고 볼 수 있으며 본 논문에서는 1984년부터 국제 건설자동화 협회인 IAARC (International Association for Automation and Robotics in Construction)에서 매년 개최하고 있는 ISARC (International Symposium on Automation and Robotics in Construction) 컨퍼런스에 발표된 북미, 일본, 유럽 및 기타 지역의 논문 게재 편수를 살펴봄으로써 건설자동화 분야의 지역별 기술개발 현황을 간접적으로 비교해 보고자 한다(그림 1).

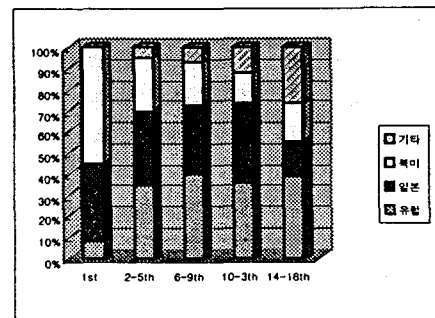


그림 1. 북미, 일본, 유럽의 건설자동화 로봇 기술개발 현황(1984년-2001년)

(1) 미국

미국은 1980년대부터 20여년 동안 건설자동화 분야의 연구개발이 이루어지고 있다. 초기 건설자동화 분야의 연구개발에 가장 큰 장애요인으로 보여졌던 노동조합(labor union)의 부정적 시각도 이제는 많이 달라지고 있다 (Skibniewski 2000). 즉, 건설로봇과 같은 인력대체 장비의 개발이 단순히 현 노무인력의 직업을 빼앗을 수도 있다는 부정적인 시각에서 개발 장비가 궁극적으로 인명피해를 줄일 수 있고 human-robot collaboration interface로의 접근이 가능하며 이는 결국 노무자의 작업환경 개선, 숙련도, 기술력 등을 향상시킬 수 있다는 긍정적인 시각으로 전환된 것을 의미한다. 또한, 개발 로봇 또한 첨단 컴퓨터 및 전자통신기술(wireless sensors, micro and nano-technology)의 기술 발달에 힘입어 보다 정밀하고 소형화되는 추세이다. 미국에서는 우주항공국(NASA) 및 국립표준국(NIST) 등 국가 연구기관 및 몇몇 대학교에서 이러한 건설 자동화 연구를 주도하고 있는 실정이며 주요 연구개발 항목은 다음과 같이 요약되어질 수 있다.

- 자동화 토공 장비의 개발(그림 2)
- 위험 작업환경에서의 이동 및 작업가능 로봇 개발
- 자재의 취급 및 인양을 위한 원칙(full-scale)의 다목적 매니플레이터 개발
- 도로면 및 교량 유지보수 자동화 로봇개발
- 인간공학적 작업개선을 위한 도구 및 장비의 개발
- 우주개발을 위한 자동화기술 개발 및 우주탐사 로봇개발 프로그램

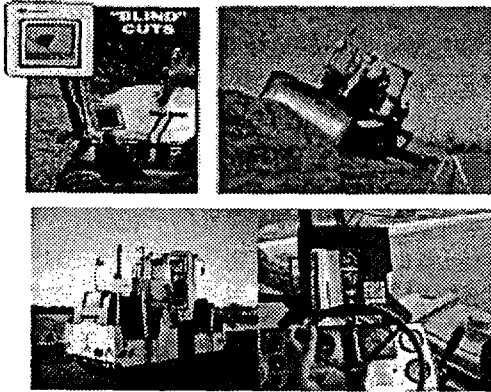


그림 2. 다짐(compaction) 및 구배조정(grading)을 위해 미국에서 개발된 자동화 토공장비(Kim, 2000)

이와 같은 연구개발은 관련 핵심기술(core technology)의 급속한 진전 즉, 소형화기술(micro and nano-technology), 센싱기술(vision, microwave and ultrasonic 등), 통신기술(wireless communication, GIS, GPS, PDA 등)의 기술진보가 있었기에 가능하였으며 현재 그 개발속도는 더욱 빨라지고 있는 실정이다.

(2) 일본

1970년대 후반부터 시작한 일본의 건설자동화 연구는 이미 오래전부터 제조업에서 자동화시스템의 개발, 적용을 통한 안전 및 생산성에 획기적인 성과를 보였고 핵심기술 또한 보유하고 있다고 판단하였기에 미국이나 서구 유럽과는 형태가 다른 대기업(big 5) 중심의 보다 적극적인 자동화 기술개발이 이루어져 왔으며 민간기술이전을 통해 단기간에 많은 개발 실적을 보여 왔다. 일본 건설산업의 경우 지금껏 다양한 건설자동화 로봇이 연구 개발되어 현장에 적용되고 상용화되어 왔으나 대표적인 자동화 연구개발 실적은 다음과 같다.

- 전자동 고층 건축물 구축시스템 (Roof push-up, SMART, T-up, ABCS 등) 개발
- 터널굴착시스템 개발
- 콘크리트 마감 및 면 처리 로봇개발
- 무인 원격조종 토공 자동시스템 개발(그림 3)

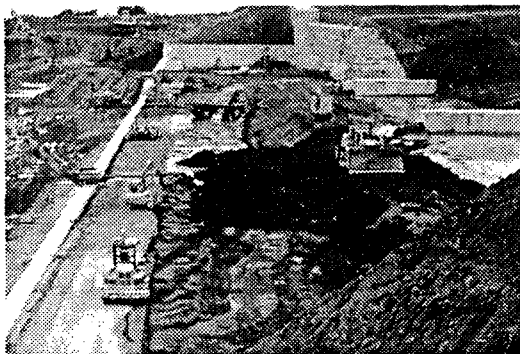


그림 3. 일본 Fujita 건설의 무인시공자동화 시스템(unmanned tele-earth work system)

이 중 대표적인 예로서 1990년대 들어 전자동시스템에 의한 건축물 구축이 대형 건설회사로부터 성공적으로 시행되고 있다. 이를 통해 건설 작업환경의 개선 및 안전도를 향상시켜 왔으며 외부의 기후환경에 영향을 받지 않는 전천후 공사가 가능하게 되었다. 또한, 공장자동화(factory automation)의 개념을 도입하여 개별 자동화 로봇의 이동문제를 해결하게 되었으며 생산성 향상을 도모하게 되었고 건설자재의 낭비를 획기적으로 감소시키는 결과를 도출하였다. 또한 전자동 고층 건축물 구축 시스템을 비롯한 다양한 건설로봇의 성공적 개발을 통하여 최근 일본에서는 여전히 21세기를 선도할 건설기술로 자동화기술을 포함하고 있는데 지금까지의 기술개발을 통하여 얻어진 경험을 토대로 앞으로 해결해야 할 과제(Hasegawa 2000)를 다음과 같이 제시하고 있다.

- 시공작업의 개선: 설계와 시공 프로세스의 연계 및 정보의 통합, 공업화 건축 및 표준화를 통한 건설로봇의 적용성 확대
- 건설산업 구조의 재조명: 실제 시공을 담당하는 영세한 하도급업체 들의 기술개발 유도를 통한 기술력 확보
- 새로운 혁신기술의 원격활용 (full scale utilization): 무선 인터넷 및 무선 정보통신 기술, GPS, GIS,, CAD와 각종 컴퓨터 시뮬레이션(computer-aided simulation) 기술 등 오늘날 급속도로 발전하고 있는 첨단 혁신기술을 건설산업에 적극 활용하여 건설자동화 분야의 시장성 확대

(3) 유럽

유럽에서는 주택건축을 위한 조적로봇(그림 4)의 개발, 타워크레인의 자동화 등 단일 공중에 적합한 로봇의 개발을 제조업의 CIM 개념을 이해하면서 접목시키려는 노력을 경주하고 있다 (Balaguer 2000). 유럽에서는 개발된 각종 건설로봇 및 자동화장비가 활용되지 못하는 이유를 다음과 같이 분석하고 있다.

- 로봇 도입에 의해 파생되는 높은 추가 비용
- 로봇 조종 장치의 복잡한 기능
- 로봇작업의 편의를 위한 특별한 자재의 사용 및 로봇의 원활한 작업수행을 위한 연속적 자재 공급의 문제

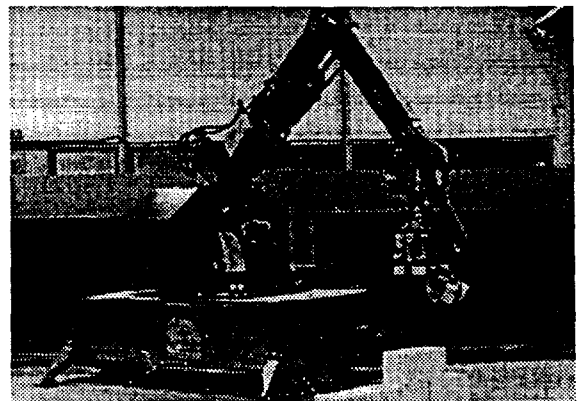


그림 4. 독일에서 개발된 조적 로봇 ROCCO

이러한 문제를 해결하기 위해서는 작업 프로세스의 개선, mass production을 위한 부재의 표준화, 단순하면서 정밀한 로봇조종 장치의 개발이 요구된다고 분석하고 있다.

3. 건설자동화를 통한 기술혁신

3.1 기술혁신

'기술'이라 함은 우발적으로 파생된 것이 아닌 교육되어지고 축적된 체계적인 연구의 결과물이라고 정의된다 (Denis Goulet, 1976). 또한 기술은 단순한 지식적 고찰이나 이론적 모델링이 아닌 자연사회적인 환경을 지배하고자 인간능력의 범위를 확대하고 수준을 향상하기 위한 프로세스, 도구, 또는 목적물(Object) 등 생산방식으로 변환되는 노하우(know-how)로 정의되고 있다. 기술혁신(Technological Innovation)은 인간이 주변 환경여건과 상호 작용함으로써 파생되는 새로운 아이디어를 도입하거나 자체적으로 개발하여 이를 새로운 제품, 공정, 서비스 등에 적용하여 실용화하는 과정을 의미한다 (Tornatzky and Fleischer, 1990). 기술혁신은 크게 제품혁신과 공정혁신으로 구분되는데 본 연구에서는 건설자동화를 위한 장비의 개발이라는 제품혁신에 초점을 두고 논의하고 있으며 제품의 혁신을 통한 공정의 혁신도 도모할 수 있게 됨을 강조하고자 한다.

산업과 사회에서 기술혁신의 중요성은 이미 오랫동안 강조되었다. 기술혁신은 거시적으로는 국가 경제 성장과 국민 생활기준의 향상을 도모하고, 미시적으로는 산업과 개별 기업의 경쟁력의 향상을 위한 주요 요소로 인식되어지고 있다 (Alder, 1989). 모든 산업에서의 이와 같은 기술혁신의 중요성에 대한 인식에도 불구하고 건설산업은 생산성과 혁신성파에 있어서 부정적인 인식으로 인해 새로운 기술을 도입하는 것이 타 산업에 비해 뒤쳐지고 있는 현실이다(Mitropoulos and Tatum, 1999). 건설산업에 있어서 기술혁신을 저해하는 원인이 무엇인가에 대한 조사 및 연구가 다각적으로 수행되었다 (Bernstein and Lemer, 1999). 건설산업에서 기술혁신을 저해하는 주요 요인으로는 보수적인 성향, 기술혁신의 필요성 인식 부족, 혁신결과에 대한 불확실성으로 인한 위험 부담 등이므로 파악되었다.

건설경영자 또는 기업측면에서의 건설기술혁신에 대한 조사 및 연구는 1980년대 중반부터 지속적으로 이루어지고 있다 (Tatum, 1986, 1988, 1999). 반면, 건설기술의 연구개발에 있어서 미국 대학들의 중대한 역할 및 실적 (ISARC, 1997, 1998, 1999)은 불행히도 건설산업으로부터 인정받지 못하고 있는 실정이다. 이는 대학에서의 연구활동이 이론적인 분야의 한계를 벗어나지 못하고 있으며, 기술혁신의 결정권을 가지고 있는 기업의 최고 경영자가 장기적인 목표보다는 단기적인 수익성에 목적을 둔 기술혁신 드라이브 정책으로 기인한다고 여겨진다. 또한, 건설기술 혁신을 위하여 수행되는 개별 활동에 대한 가이드라인을 제공하는 체계적인 연구개발 프로세스 모델의

부재로 성과의 미흡이 그 원인이 될 수도 있다. 기술혁신은 정의에서도 언급하였듯이 성과물에 대한 결정이 아니고 과학적 프로세스이다. 즉, 기술혁신은 단순한 경영 및 관리측면에서의 의사결정이 아니고 당면한 문제, 이의 명확한 해결을 위한 창의적 아이디어, 그리고 혁신적인 해결책의 유효성을 증명하기 위한 연구개발의 전개와 이의 결실로 파생되는 새로운 제품, 공정, 서비스의 질적 개선을 의미한다. 따라서, 기술혁신은 생산물 및 생산과정의 변혁을 포함하고 있으며, 이를 위한 조직, 경영전략 등의 변화를 유발시키고 있는 등 시스템적 변혁을 도모하게 된다.

3.2 기술혁신 프로세스

기술혁신의 주요 요소는 1) 연구개발을 위한 재원 확보 능력, 2) 명확한 문제의식 및 기회, 3) 창의적 아이디어, 4) 과학적 문제해결 방법, 5) 학제적(interdisciplinary) 전문지식 등이다. 기술혁신 프로세스는 주어진 예산범위 내에서 가능하기 때문에 자금의 확보가 무엇보다 중요한 것이다. 기술혁신의 성공적 수행을 위한 필요한 재정의 확보를 위해서 정부, 기업 모두의 관심과 투자가 필요하다. 즉, 공통핵심기술의 기술혁신에 대한 위험부담과 중복투자를 줄이기 위해 정부, 국책연구기관, 대학연구소, 기업 등 관련 기관들의 적극적 참여를 통한 공동연구를 추진하여 국가적인 요소기술을 향상시키고, 개별적인 세부기술에 대한 기술혁신의 초석을 이루어야 한다. 다양한 주체의 공동참여의 가장 큰 장점은 다양한 전문가의 활용과 이에 따른 위험부담의 공동분담이다. 이와 같은 막대한 투자와 불확실성으로 인한 높은 위험부담이 있는 만큼 문제를 명확히 파악하고 이를 통한 혁신적인 기회를 만들어야 한다. 기술혁신의 성패는 사물을 보는 관점 및 의식의 대전환이 필요하기 때문에 창의적 사고(creative thinking)가 요구되고 있으며 이의 구체적인 실천계획(action plan)의 수립이 수반되어야 한다. 기술혁신 과정은 객관적인 자료에 의한 과학적 방법과 경험과 지식을 응용한 주관적인 직감 또는 판단의 조화를 통하여 성과를 나타내고 있다. 기술혁신을 위한 필요지식이 다양할 경우 각 분야의 전문가들의 협력(team effort)을 통하여 시너지효과를 창출하게 되며 공동의 목표를 달성하게 되는 것이다.

일반적으로 기술혁신 프로세스는 크게 다음의 두 가지 형태로 구분된다. 첫째, 선형모델(linear model)로서 연구, 개발, 생산, 판매 등의 4단계 선형과정을 이루고 있으며 특징으로는 연구단계가 시작단계로서 이후 단계로부터의 피드백이 없다. 즉, 연구단계의 성패가 해당 기술의 개발 프로세스에서 차지하는 중요도가 가장 큰 반면 다른 단계로부터의 개선이 불가능하여 자연과학분야의 연구개발 등에 주로 활용되어 왔다. 둘째, 사슬연결모델(chain-link model)로서 마케팅조사단계, 설계, 생산, 마케팅 및 판매, 사용단계로 이루어져 있으며 특징으로는 기술혁신 과정의 시작은 여러 형태로부터 시작될 수 있음과 다양한 피드백이 이루어진다는 것이다. 즉, 연구단계가 반드시 기

술혁신 프로세스의 시작이 아님을 알 수 있다. 이와 같은 유연성과 개방성의 특성으로 인해 최근 각종 산업에서 연구개발 모델로 활용하고 있으며 건설산업에서의 기술혁신도 이와 같은 사슬연결모델이 적합하다.

본 연구에서 제시하고 있는 건설자동화 기술혁신 프로세스는 사슬연결모델과 유사한 형태로써 그림 5와 같이 1) 창의적 발견, 2) 연구 및 프로토타입 구축, 3) 현장 실험, 4) 사업화의 4단계로 구분될 수 있다.

일반적으로 2-3단계의 과정이 새로운 기술의 개발에 있어 가장 위험부담이 많은 단계로서 '죽음의 계곡(valley of death)'이라고 까지 불려지고 있다. 기술혁신과정에서 1-3단계를 대학연구소에서 담당하게 되며, 4-5단계는 기술이전을 통한 기술혁신의 사업화단계를 나타내고 있다.

기술혁신을 위한 아이디어는 첫째, 건설현장에서 문제점의 해결을 위한 방법으로 도출되는 수요(demand pull)에 의한 기술혁신, 둘째, 타 산업의 첨단기술의 활용(technology push)을 통한 기술혁신으로부터 출발할 수 있다(Everett and Saito 1996). 전자의 경우는 일반적으로 연구용역에 의해서 수행되고 있으며 확실한 성과를 기대하게 된다. 반면, 후자의 경우는 새로운 기술의 개발을 통하여 기존 방법 및 프로세스의 개선을 도모하게 되는 것으로서 민간기업에서 신기술, 신공법의 개발노력이 이에 해당한다고 할 수 있다. 그러나, 그 과정이 장기간이 소요되며 결과에 대한 불확실성으로 인하여 초기 연구단계는 대학에서 담당하는 것이 유리한 경우가 많다. 선도기술의 개발을 통하여 산업의 전반적인 기술혁신활동을 유도할 수 있는 엔진(engine)으로서의 대학의 역할이 중요한 것이다.

기술혁신의 대상은 기계 및 장비, 공법, 자재 등이 될 수 있으며 이의 혁신을 통하여 프로세스 혁신까지도 유도된다. 효율적인 기술혁신을 위해서 초기단계부터 관련된 모든 전문가들의 의견을 수렴하고 참여하도록 유도하여 성공적인 기술혁신 과정을 전개해 나아가야 하며 또한 위험부담도 분담하여야 한다.

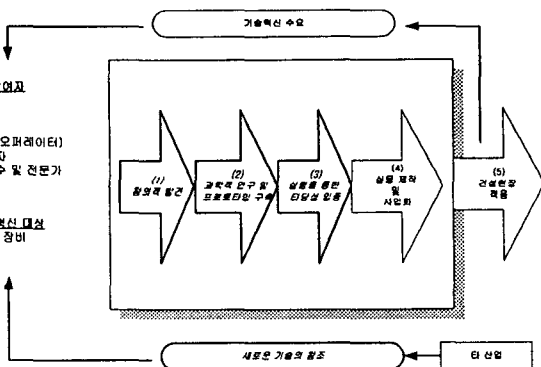


그림 5. 기술혁신 프로세스

3.3 건설자동화 기술혁신 모델

건설자동화 기술혁신에 있어 대학 연구소의 역할이 중

요한데 최대 강점으로는 과학적 연구를 수행할 수 있는 능력을 갖추고 있는 것 뿐 아니라 연구업무의 자율성과 독립성, 창의성 등을 꼽을 수 있다. 대학연구소의 특징으로는 1)학제적 조직, 2)다양한 변화의 수용 가능, 3)저렴한 투자비, 4)방대한 전문 지식 및 정보의 보유, 5)실험실 확보 및 첨단 기자재 보유 등이 있다. 이와 같은 특징과 아울러 민간기업에 비하여 상대적으로 위험부담이 적은 장점이 있어 기술혁신 초기단계의 역할을 담당하는 것이 바람직하다.

그림 6은 대학연구소에서의 건설자동화 기술혁신 모델을 제시하고 있다. 이 모델은 크게 1) 연구 및 프로토타입 구축, 2) 현장 실험 등 2단계로 구분된다. 1단계는 다시 1) 모델링, 2) 설계/재설계, 3) 제작 및 시스템 연계, 4) 실험실 실험 등 4단계로 세분된다. 기술혁신과정에 필요한 인력들을 포함한 모든 자원들의 확보 및 역할이 중요하다. 그 자원들은 1) 창의적인 문제해결 능력, 2) 전문적인 시스템설계 능력, 3) 재정적 뒷받침, 4) 지속성, 5) 창의적 기술 및 기능인력, 6) 건축 및 토목 등 전문분야의 엔지니어링 능력, 7) 유압, 전기 및 전자, 컴퓨터제어 등 건설자동화에 대한 전문지식이다.

기술혁신 대상의 설정 및 이의 해결을 위한 새로운 아이디어를 구축하고 이의 모델링과 평가가 이루어진다. 다음으로는 개념설계 및 상세설계를 하고, 이에 따른 하드웨어 제작 및 시스템 연계를 통한 새로운 작업 가능 장비의 프로토타입(prototype)을 구축하게 되는 것이다. 필요에 따라 재설계는 언제든지 이루어 질 수 있도록 유연성을 지니고 있어야 한다. 엔지니어가 늘 생각하여야 하는 것은 "언제나 보다 나은 해결책이 있다"는 도전의식과 창의적 신념으로서 지속적인 연구 및 탐구의 자세가 필요한 것이다. 실험실 실험은 실제 현장에서의 적용 이전에 새로운 기술의 성능 및 타당성을 1차로 검증하기 위한 기초 자료를 제공하는 중요한 단계이다. 이 단계를 통하여 모든 단점 및 보완사항을 사전에 찾아내어서 재설계 및 시스템(하드웨어 및 소프트웨어)의 변경을 통하여 구체화시켜 나아가게 된다. 또한 공인된 실험실은 반복적인 실험을 가능하게 하고 실험결과도 통계학적 분석이 가능할 만큼 일관성을 갖게 되는 장점이 있다. 따라서 실험실 실험은 새로운 기술을 개발하는데 있어서 구성되는 모든 하드웨어 및 소프트웨어의 기능을 현장 적용전에 충분히 검증할 수 있는 매우 중요한 단계인 것이다.

현장실험은 다음의 두 단계, 즉 1) 기능실험(operational test)과 2) 비교실험(comparative test)으로 구분된다. 기능실험이 현장실험과 유사한 조건하의 현장에서 작업원에 의해 이루어지는 최종 기능 점검을 위한 실험이라면, 비교실험은 기존 기술과 새로운 기술의 직접비교를 통한 종합적 성능 평가를 실시하는 단계라 할 수 있다. 비교실험은 새로운 자동화기술의 연구개발 결과를 기술적 타당성, 요구 품질의 달성도, 기술혁신의 생산성 및 경제성을 입증하게 되는 결정적 단계라 할 수 있다. 비교실험은 작업내용, 기후, 동일한 장비 및 기능인력 등 여러 가지 조건들이 동일한 상태에서 작업방법만을 달리하여 직접비

교를 통하여 새로운 기술의 다각적인 타당성을 검토하여야 한다. 일반적으로 품질, 안전, 생산성 등의 정성적인 기술적 타당성분석, 대체기술로 인한 정량적인 경제적 타당성분석, 그리고 인력절감으로 인한 실업문제 및 건설산업의 이미지 제고 등 사회적 파급효과 등에 대한 평가가 이루어진다. 이러한 과정을 통하여 1차적으로 개발 프로토타입의 기술적, 경제적 가능성을 입증하고 향후 기술적 보완사항을 점검함으로써 산업으로의 기술이전 가능성을 타진해 보게 된다.

또한 건설자동화 분야의 연구개발 성과에 대한 평가는 다른 건설기술과 마찬가지로 수익자인 발주자, 시공자의 요구와 만족 정도, 사용자인 현장 노무자의 만족도, 사회적 요구에 대한 만족도로 구분되어 평가되어야 한다. 일반적으로 성과에 대한 평가는 기술적 타당성, 경제적 수익성 측면에서 이루어진다. 첫째, 발주자 및 시공자측면에서는 안전 및 생산성 향상을 통한 비용절감효과, 품질의 향상이 주요 관점이 될 것이다. 둘째, 현장 노무자 입장에서는 작업환경의 개선 여부, 자신의 작업에 대한 기계대체효과로서의 불안감, 기계 및 장비의 작업안이도 등이 주요 관심일 것이다. 사회적 측면에서는 끝없이 대형화, 고층화되어 가고 있는 건설공사의 실현기술에 대한 욕구, 도심에서의 공사 현장 환경 개선 및 안전도 고취에 대한 갈망 등이 주요 사항일 것이므로 장비 개발시 이에 대한 세심한 고려가 필요할 것이다.

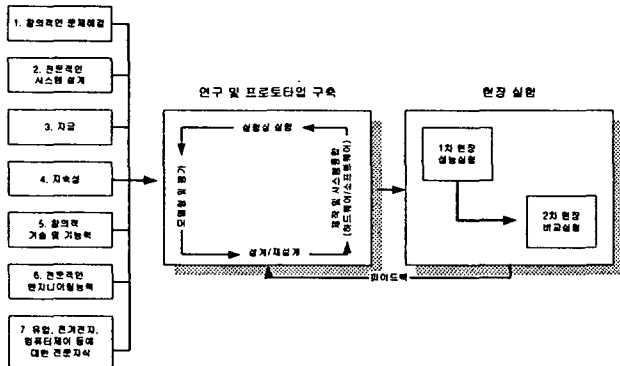


그림 6. 건설자동화 기술혁신 모델

4. 건설자동화 분야의 성공적 기술혁신을 위한 제언

전 세계적인 경제 불황이 건설산업을 더욱 어렵게 하고 있다. 그러나, 건설시장의 개방에 따른 경쟁력 심화는 자명하고 경쟁력 확보를 위한 기술혁신 노력은 매우 중요한 시점이다. 건설산업에서 건설자동화를 통한 기술혁신은 새로운 분야로서 단기적으로는 작업원의 안전사고 예방 및 안전한 작업환경의 조성이 최우선 목표가 되고 있으며 그 외에도 생산성 향상, 비용 절감, 품질향상 등을 목적으로 한다. 또한, 장기적으로는 우주공간의 개발, 인공섬 개발, 지하공간 개발 등 새로운 건설분야의 개척이 가능하게 될 것이다.

전행적인 3D업종으로 인식되어 있는 건설산업은 안전사고의 위험, 숙련공의 부족, 생산성의 저하 등의 문제점을 해결하여야 하고, 세계화를 통한 무한경쟁시대의 기술력 확보와 고부가가치 창출을 위하여 기술혁신의 노력이 절실하다. 기술혁신 분야 중 건설자동화 분야의 중요성이 부각되고 있다. 따라서 본 논문은 향후 건설자동화의 성공적 연구개발을 위한 몇 가지 제언을 하고자 한다.

(1) 위험부담 분산 및 성공적 수행을 위한 산학연 공동 연구개발 체계 구축

복합적인 요소기술로 이루어진 건설자동화 분야의 성공적 기술개발을 위해서는 정부, 국책연구기관, 대학, 기업 등이 공동으로 참여하는 컨소시엄 형태로 연구개발을 추진하는 것이 바람직하다. 이와 같은 컨소시엄의 구성은 다음과 같은 장점을 지니고 있다.

- 학계, 산업계, 연구계의 상호 실질적인 연구협력 계기와 기반 조성 및 연구주체간의 연구활동 연계체제 마련이 가능하다.
- 장기간에 걸쳐 막대한 투자재원이 소요되는 건설자동화 분야의 연구개발에 대한 위험분산의 효과가 있다. 또한 각 주체가 지니고 있는 지식과 정보의 공유가 가능하고 이를 통한 자원의 효율적 배분 및 활용이 가능하며 연구성과의 극대화가 기대된다.
- 각 참여 구성 집단의 특성상 명확한 역할분담과 책임 할당이 가능하고 이에 따른 효율적인 R&D 프로세스의 규명 및 절차가 확립되고 사업의 성공적 완수를 위한 보다 효율적인 업무 추진체계의 정립이 가능하다.
- 동일목적으로 구성된 다양한 분야의 전문가 집단의 컨소시엄으로 원활한 업무 협력과 역할분담을 통하여 자동화기술의 성공적 개발, 상용화 및 공동 마케팅 전략 수립을 통한 수익 창출의 가능성이 극대화 될 수 있다.

(2) 단기적 안목에서의 현장 수요조사 및 요소기술 분석

지금껏 건설자동화 연구개발이 미흡하였던 국내 건설산업의 경우 단기적으로 건설자동화 기술개발의 효율성을 증진하기 위해서는 현재 급속도로 발전하고 있는 로봇 관련 요소기술(state-of-the-art technologies)의 조사 분석 및 지속적인 현장 수요조사를 통해 우선적으로 자동화 기술개발이 필요한 가능 작업 대상을 도출하는 일일 것이다. 자동화 가능 대상작업에 대한 수요조사의 주요 내용으로는 흔히 건설 엔지니어, 노무자 등에 대한 설문 및 인터뷰, 현장 작업 여건 및 작업별 안전사고에 관한 사례조사, 노동집약적 작업 및 향후 숙련공 부족에 따라 품질저하가 예상되는 작업에 관한 조사·분석 및 현장 작업관측을 통한 생산성, 경제성 분석 등이 포함되며, 도출된 자동화 가능 대상작업의 개발 우선순위(priority)를 결정하기 위하여 생애주기비용(LCC) 분석기법, cost-concern matrix (CII 1992), 다기준 의사결정 기법(analytical hierarchy process), 자동화 선호지수 및 진척지수(김영석 외 3인 2001) 등이 사용될 수 있다. 이러한 개발 순위는 다시 각 작업의 자동화를 위해 요구되는 기

술적 타당성 검토(technical and physical feasibility analysis)를 통하여 정제되어질 수 있으며 이를 위해서는 건설 및 메카트로닉스 전문가간의 명확한 업무 추진체계의 정립 및 역할 분담에 따른 지식과 정보의 공유가 있어야 할 것이며 또한 상호간의 심도 있는 브레인스토밍이 필요할 것이다.

(3) 중장기적 안목에서의 건설자동화 핵심기술 파악을 통한 기술적 로드맵(technology roadmap) 작성 및 마스터플랜 구축

본 논문을 통해 국내 건설자동화 연구개발의 방향 제시 및 효율성 증진을 위한 보다 궁극적인 제언을 하자면, 국내의 경우에도 현 시점에서 향후 20-30년 미래의 건설산업을 내다보는 중장기적 안목에서 현재 그리고 앞으로의 건설자동화 핵심 요소기술을 파악하고 또한 지금껏 건설자동화 기술개발이 활발하였던 선진 외국의 자동화 사례에 관한 벤치마킹을 통하여 국내 건설자동화 기술개발의 활성화를 위한 로드맵의 작성 및 장기적인 마스터플랜을 구축할 필요성이 있다고 사료된다.

하나의 예로써 일본의 경우 미래 건설산업에 있어 건설자동화 기술개발의 필요성을 인지하고 1978년 일본 산업로봇 협회(Japan Industrial Robot Association)의 지원하에 건설 및 기계/전기/전자 관련 학계(universities), 로봇 제조업체(robot manufacturers), 건설업체(general contractors) 등 다양한 전문성을 지닌 전문가 집단을 중심으로 건설로봇 협동 연구(construction robot co-operative research)회가 조직되어 건설자동화 연구가 시작되었다. 이 연구의 주요목적은 건설자동화 기술개발의 초기단계에서부터 산·학·연간의 충분한 의사교환 및 협의 그리고 동의(consensuses) 하에 중장기적 안목에서 향후 일본 건설산업이 주력해야할 건설자동화 기술개발 분야(roadmap)를 도출함으로써 미래의 연구개발 방향(future research direction)을 제시하고 이에 대한 마스터플랜을 구축하기 위한 것이었다. 앞서 언급된 일본 대형 건설업체(big 5)를 중심으로 한 전자동 고층 빌딩 구축시스템(automated weather-unaffected building construction system), 터널 굴착시스템, 콘크리트 마감 및 먼 처리 로봇, 무인 시공자동화시스템 등의 성공적 개발은 이러한 일본의 장기적이고도 체계적인 연구개발 노력의 훌륭한 성과라고 하겠다. 따라서 국내의 경우에도 현재와 같이 학계나 업계 중심의 산발적인 과제 도출을 통한 연구개발을 시도하는 것보다는 건설자동화 관련분야를 주축으로 산·학·연 연구 교류회를 구성하여 보다 중장기적인 안목에서 건설자동화 기술을 개발하는 것이 바람직할 것으로 사료된다. 또한 연구개발의 효율성을 극대화할 수 있도록 건설자동화 분야에 관해 국가적인 R&D 방향을 제시할 수 있는 마스터플랜의 작성 및 지속적인 R&D 재원 확보, 건설자동화 연구개발 프로세스의 정립이 필요한 시점이 되었다고 판단되며 건설자동화 연구개발의 활성화를 위한 인프라 구축의 필요성 또한 절실하다고 하겠다. 최근 한국과학재단이 진행 중에 있는

'국가 지능로봇 공학육성 사업 기본계획 수립'에 건설 분야가 포함되어 있는 것 또한 국내 건설자동화 분야에 대한 기술적 로드맵 작성 및 마스터 플랜 구축을 위한 좋은 기회라 생각된다.

(4) 민간부문 활성화 유도 방안 강구

국내 건설산업에 있어 건설자동화 기술에 관한 연구개발을 활성화하기 위해서는 정부가 민간부문의 적극적인 기술개발을 유도할 수 있도록 R&D 투자에 대한 세제혜택과 같은 정부의 과감한 정책적, 제도적 장치의 마련이 중요할 것으로 사료된다.

일본의 경우 1980년대 초반 자국 건설기업의 기술개발을 적극 유도하기 위하여 건설자동화 기술개발을 비롯한 신 건설기술 개발에 적극적인 업체에게 각종 세제 혜택을 부여하고 신 기술개발에 관한 R&D 투자실적이 있는 업체들에게 입찰시 가산점을 부여하는 등 업체의 기술력을 우선시한 사례를 우리는 잘 알고 있다. 이러한 일본 중앙/지방 정부의 제도적, 정책적 노력은 대외적으로는 세계 건설시장에 있어 일본 건설기술의 수준을, 대내적으로는 3D산업이라 여겨져 왔던 일본 건설산업의 이미지(industrial or corporate images)를 한 차원 높이 상승시키는 긍정적 결과를 가져왔다는 것을 우리 정부는 간과해서는 안 될 것이다. 따라서 우리 정부도 타 산업에 비해 보수적이라 할 수 있는 국내 건설산업이 자동화 기술개발에 관한 보다 확고한 의지를 지니고 지속적인 R&D 재원 확보를 통해 신 건설 기술개발을 이루어 나갈 수 있도록 이에 대한 제도적 장치를 마련하고 보다 장기적 안목에서 지속적이고도 전략적인 연구지원 노력을 아끼지 말아야 할 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 급변하는 건설환경에서의 건설산업에 오랫동안 내재해 있는 안전, 생산성, 품질문제의 해결, 세계화 및 무한경쟁시장에서의 기술경쟁력 확보, 대형화·복합화되고 있는 건설수요에 대한 적극적 기술대응 방안, 우주개발 및 지하개발 등 새로운 도전이 예측되는 미래 건설 선도형 기술로서 건설자동화의 필요성 및 의의를 살펴보고 이미 20여년 이 분야에서 꾸준히 성과를 보이고 있는 일본, 미국, 유럽의 발전과정과 성과를 조사하였다. 또한 우리의 현실을 인식하고 기술혁신을 위한 건설자동화 미래를 향한 몇 가지 제언을 하였다.

본 연구에서 제시한 건설자동화를 통한 기술혁신 활성화 내용을 요약하면 다음과 같다.

첫째, 막대한 투자비와 기간의 경감, 높은 위험부담의 분산을 위하여 다양한 전문가의 협력체계가 필요하고 이를 위한 산학연 공동협력체계를 구축하여야 한다.

둘째, 단기적인 측면에서의 자동화가능분야 도출을 위한 수요조사와 로봇 요소기술의 파악을 실시하여 수요와 기술이 결합된 단일작업을 위한 자동화기술의 성공적 연

구개발 성과를 이룩하여 노하우를 집적하여야 한다. 이를 통하여 다목적(multi-purpose) 자동화기술의 연구개발이 진행될 수 있다.

셋째, 중장기적 안목에서는 각계 전문가들이 함께 기술적 로드맵과 마스터 플랜의 작성을 하여야 한다. 이에 따른 중장기 목표가 명확히 설정될 수 있을 것이며 체계적이고 효율적인 실천계획이 수립될 것이다.

넷째, 기술혁신의 주체는 궁극적으로 그 기술의 최종 사용자가 될 건설기업이다. 따라서, 건설자동화의 필요성은 인식하면서도 상대적으로 높은 위험부담과 가시적 성과의 확산부족으로 말미암아 투자 및 참여를 기피하고 있는 민간부문을 적극적으로 유도할 수 있는 범국가적인 다각적인 방안이 필요하다.

전 세계 건설산업에서 현재 우리나라의 위상은 선진국과 개발도상국 사이 정도로 생각된다. 건설선진화를 위한 많은 분야에 있어서 정보화, 첨단화를 위한 노력을 경주하고 있으나 건설자동화를 통한 시공의 무한한 가능성을 실현시킬 수 있기를 기대한다.

참고문헌

1. Alder, P.S. (1989). Technology Strategy: A Guide to the Literature. Res. on Technology Innovation, Management and Policy, 4, 25-151.
2. Balaguer, C., Open Issues and Future Possibilities in the EU Construction Automation, Automation and Robotics in Construction XVII, pp. K21-K27, 2000.
3. Bernstein, H. M., and Lemer, A.C. (1999). Solving the Innovation Puzzle. Challenges Facing the U.S. Design & Construction Industry, ASCE, New York.
4. CII, Need assessment for Construction Automation, CII Publication 16-1, 1992
5. Everett, J.G., Saito, H., Construction Automation: Demands and Satisfiers in the United States and Japan, ASCE Journal of Construction Engineering and Management, pp. 147-151, June 1996.
6. Goulet, D.(1976). The Uncertain Promise, Value Conflicts in Technology Transfer. IDOC/North America, Inc. New York, NY.
7. Hasegawa, Y., A New Wave of Construction Automation and Robotics in Japan, Automation and Robotics in Construction XVII, pp. 15-K19, 2000.
8. Kim, Y., Haas, C., Peyret, F., and Cho, Y. (2000). "Automation in Transportation System Construction and Maintenance", TRB/NRC, Transportation Research Circular, April.
9. Mitropoulos, P. and Tatum, C.B. (1999). Technology Adoption Decisions in Construction Organizations. J. Constr. Engrg. and Mgmt., ASCE, 125(5), 330-338.
10. Skibniewski, M. J., New Directions and Developments in Robotics and Site Automation in the U.S.A., Automation and Robotics in Construction XVII, pp. K3-K14, 2000.
11. Tatum, C.B. (1986). Potential Mechanisms for Construction Innovation. J. Constr. Engrg. and Mgmt., ASCE, 112(2), 178-191.
12. Tatum, C.B. (1988). Winning with Advanced Construction Technology. Impact of International Competitiveness on Construction Technology, Proc., ASCE National Convention, C.B. Tatum, ed., ASCE, New York, 14-23.
13. The Robotics Institute. (1997). Automation and Robotics in Construction XIV, Proceedings of the 14th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC), Pittsburgh, Pennsylvania, June 8-11, 1997, Carnegie Mellon University.
14. Tornatzky, L.G., and Fleischer, M. (1990). The Processes of Technological Innovation, Lexington Books, D.C. Heath and Company.
15. 김영석, 김현철, 서정희, 오세욱(2001). "국내 건설산업의 건설자동화 및 로봇틱스 도입 방안에 관한 연구", 대한건축학회 논문집, Vol.17, No.2, February.