



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

광파기를 이용한 도로포장 자동화
시스템의 경제성 분석



2018년 2월 23일

부 경 대 학 교 대 학 원

건설관리공학협동과정

김 정 균

공 학 석 사 학 위 논 문

광파기를 이용한 도로포장 자동화
시스템의 경제성 분석

**Economic analysis of road pavement
automation system using total station**

지도교수 김 수 용

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2018년 2월 23일

부 경 대 학 교 대 학 원

건설관리공학협동과정

김 정 균

김정균의 공학석사 학위논문을
인준함



주	심	공 학 박 사	이 수 용 (인)
위	원	공 학 박 사	김 수 용 (인)
위	원	농 학 박 사	이 영 대 (인)

목 차

표 목 차	I
그림 목차	II
국문요약	III
Abstract	IV

제1장 서 론

1.1 연구배경 및 목적	1
1.2 연구범위 및 방법	2

제2장 건설기계 자동화

2.1 관련문헌 검토	4
2.1.1 건설자동화 연구개발 현황	4
2.1.2 건설자동화 기계의 성능분석 모델 개발 사례	4
2.2 건설자동화 장비의 가동원리	6
2.2.1 ICT 융합 건설자동화 장비 현황	6
2.2.2 자동화 장비의 가동원리	7
2.3 건설자동화 장비의 효과	10
2.3.1 굴삭기 자동화장비의 효과	10
2.3.2 도로포장 자동화장비의 효과	14
2.4 건설기계 자동화 기술의 경제성 분석 사례	16

제3장 자료 및 분석

3.1 GPS를 활용한 굴삭기 시공 자동화에 따른 경제성 분석	18
3.1.1 굴삭기 자동화 시공 투입 비용	18
3.1.2 굴삭기 자동화 시공으로 인한 경제적 효과	19
3.1.3 경제성 분석	22
3.2 광과기를 이용한 도로포장 자동화 시스템의 경제성 분석	24
3.2.1 대안 비교를 위한 조건	25
3.2.2 기존 시공방법의 변동비 산출	25
3.2.3 자동화 시공방법의 고정비, 변동비 산출	28
3.2.4 대안의 비교	31

제4장 분석결과 및 고찰

4.1 자동화 시공의 경제성 분석결과	35
4.2 고찰	36

제5장 결론

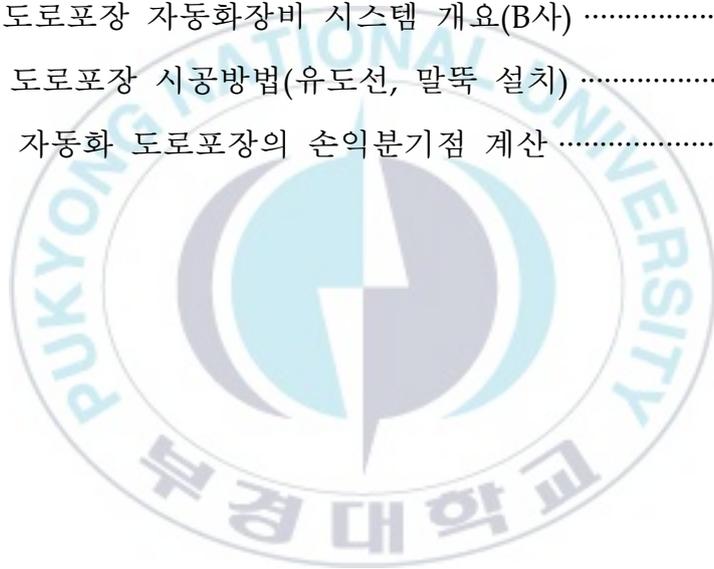
참고문헌	41
------------	----

■ 표 목 차 ■

<표2.1> 자동화시공 건설기계에 사용되는 ICT장비 예시	6
<표2.2> 굴삭기 건설자동화 작업 효율성 분석 결과	11
<표2.3> 굴삭기, 도저, 그레이더의 건설자동화 효과 분석	13
<표2.4> 건설기계 시공 자동화 기술에 의한 원가계산 사례	17
<표3.1> 굴삭기 자동화 장비 임대 비용(1년간)	18
<표3.2> 굴삭기 자동화 시공비 절감 효과	19
<표3.3> 측량인건비 절감 효과(1년간)	20
<표3.4> 고속도로 건설공사 안전사고 현황(2011.01~2016.01)	21
<표3.5> 굴삭기 자동화에 따른 비용과 수익	23
<표3.6> 기존방법과 자동화시공의 비교	24
<표3.7> 기존 시공방법의 변동비(재료비)	26
<표3.8> 측량기술자와 보조인부의 임금 상승폭(3년간)	27
<표3.9> 기존 시공방법의 변동비(인건비)	27
<표3.10> 자동화 포장장비 견적 내역	28
<표3.11> 자동화 시공방법의 변동비(인건비)	30
<표3.12> 각 대안의 단위 시공량에 대한 변동비 환산	31
<표4.1> 도로포장 자동화의 경제성 분석결과(종합)	35
<표4.2> 포장 시공 후 표면 면갈이 보수현황	37
<표4.3> 연도별 포장 면갈이 보수비용 추정	37

■ 그림 목 차 ■

<그림1.1> 연구 흐름도	3
<그림2.1> 건설자동화 기계의 성능분석 모델	5
<그림2.2> 굴삭기 자동화 장비 구성	7
<그림2.3> 굴삭기 자동화시공 작업절차	8
<그림2.4> 도로포장 자동화장비 시스템 개요(A사-1)	9
<그림2.5> 도로포장 자동화장비 시스템 개요(B사)	9
<그림2.6> 도로포장 시공방법(유도선, 말뚝 설치)	14
<그림3.1> 자동화 도로포장의 손익분기점 계산	34



국문요약

광파기를 이용한 도로포장 자동화 시스템의 경제성 분석

부경대학교 건설관리공학협동과정 김 정 균
지도교수 김 수 용

건설공사의 시행에 있어서 건설기계와 ICT(정보화 통신 기술)를 융합한 '건설기계 자동화 시공'은 건설공사를 획기적으로 변화시키는 기술로서, 건설생산 프로세스 전체의 생산성, 시공 품질, 신뢰성 향상 등 다양한 긍정적 효과를 얻을 수 있다. 우리나라는 최근 몇 년 전부터 굴삭기에 GPS 수신장비를 장착한 자동시공이 도입되었고, 현재 여러 분야로 확대를 시도하는 중이지만, 건설경기 침체, 투자회피, 정부기관의 지원과 연구가 부족한 상태이다.

본 연구에서는 광파기를 이용한 도로포장 자동화 시스템에 대한 경제성 분석을 수행하였다. 도로포장 자동화 시공은 초기 설비 투자비용이 크므로 손익분기점에 다다르기까지는 5년 정도의 시간이 소요되어 다소 경제성이 떨어진다는 점이다.

그러나, 건설기계 자동화 시공방법 도입 여부에 대한 의사결정을 할 때 경제성 이외의 다른 장점에 주목할 필요가 있다. 자동화 시공방법은 도로 평탄성과 같은 품질관리 측면에서 매우 유리하다는 점과 작업장 내 장비의 이동로가 확보되어 효율적인 건설공사 관리와 공기 단축에 큰 도움을 줄 수 있다는 점을 주목할 필요가 있다.

Economical analysis of road pavement automation using total station

Jeong-Gyun, Kim

Interdisciplinary Program of Construction Engineering and Management
The Graduate Pukyong National University

Abstract

In the field of construction, "construction machine automation" is a technology that dramatically changes construction. This can result in various positive effects such as productivity, construction quality, and reliability improvement of the whole construction process. In recent years, Korea has introduced an automatic construction system equipped with GPS reception equipment for excavators, and is currently expanding to various fields. However, there is a shortage of construction industry recession, investment avoidance, government support and research.

In this study, economical analysis of road pavement automation using total station construction is performed. Road pavement automation is costly for initial facility investment, and it takes about 5 years to reach break-even point.

However, when deciding whether to apply road pavement automation, it is necessary to pay attention other advantages besides economics. Road pavement automation is very advantageous in terms of quality control such as road flatness. And, since the on-site traffic route is secured, it is very helpful for efficient construction management and shortening the time.

제1장 서론

1.1 연구배경 및 목적

건설공사의 시행에 있어서 건설기계와 ICT(정보화 통신 기술)를 융합한 '건설자동화' 또는 '건설정보화'는 건설공사를 획기적으로 변화시키는 기술로서, 건설생산 프로세스 전체의 생산성, 시공 품질, 신뢰성 향상 등 다양한 긍정적 효과를 얻을 수 있다(建山 和由 외, 2013). 현재 전 세계적으로 백호우, 그레이더, 포장장비 등 다양한 건설장비에 ICT를 융합한 기술들이 도입되고 시도되고 있다.

외국의 사례로는 굴삭기(백호우), 흙 쌓기 다짐장비(로울러), 펴고르기 장비(그레이더), 아스팔트 포장 피니셔 및 콘크리트 포장 페이퍼 등 다양한 장비에 ICT를 도입하여 현장에 적용되고 있다. 일본 국토교통성은 ICT 토공사를 2016년부터 전면적으로 실시하고 있고, 미국 AASHTO(American Association of State Highway and Transportation)는 굴삭기 자동화 시스템 구현을 위한 Quick Reference Guide를 배포하였고, DoT(Department of Transportation)는 IOWA 도로국 포장공사에 자동화 시공 Spec을 반영하는 등 건설기계 ICT 융합에 적극적으로 대처하고 있다.

반면, 우리나라는 최근 몇 년 전부터 외국에서 실행 중인 여러 가지 중초기단계라 할 수 있는 GPS 수신장비를 활용한 굴삭기에 장착한 장비만 일부 현장에 적용되고 있을 뿐, 나머지 다양한 분야는 거의 도입이 되지 않고 있는 실정이다.

이의 원인은 건설경기 침체로 인한 첨단장비 도입 기피현상과, 불확실성에 의한 투자 회피 때문이다. 또, 정부기관의 지원시스템과 연구도 미비하다.

IT 강국인 우리나라의 위상을 감안하면 다소 아쉬운 부분이라고 할 수 있다.

이에 본 연구에서는 건설분야에 ICT를 융합한 건설 기계 자동화 시공의 경제성 분석을 통해 경제적 타당성을 연구하고자 한다.

1.2 연구범위 및 방법

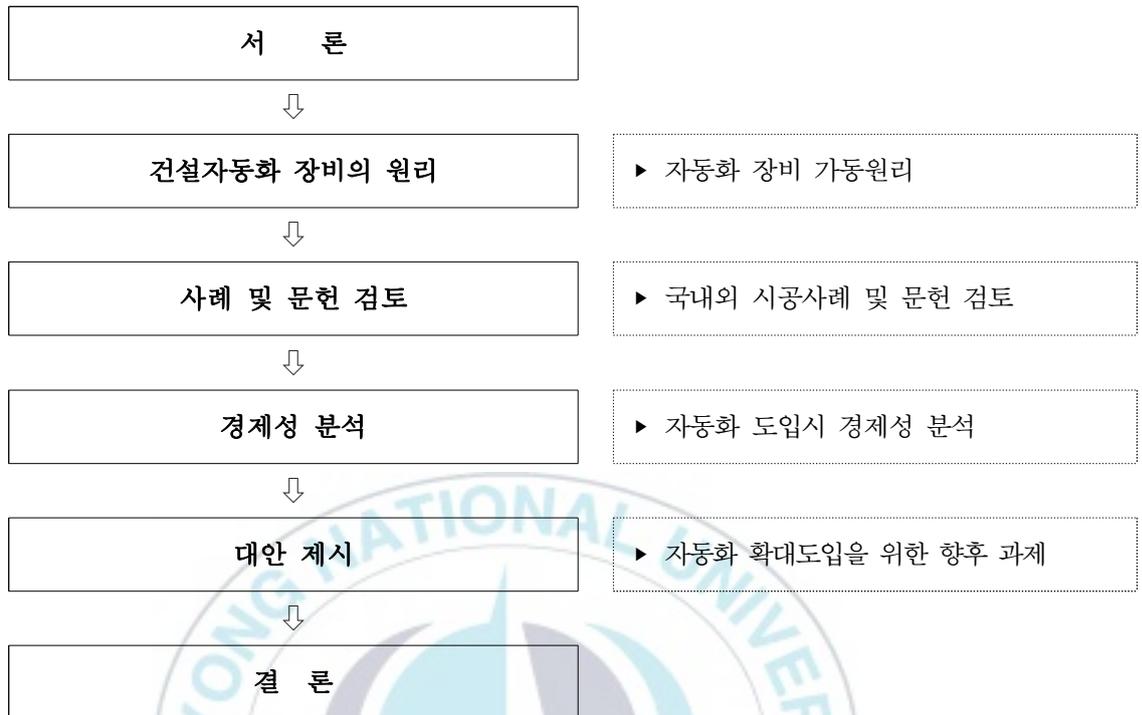
이 논문에서는 국내 건설자동화 시공사례의 효과를 분석하고, 경제적 효과를 추정하고 향후 나아가야 할 방향을 제시하고자 한다.

이 논문에서 경제성 분석 대상은 현재 자동화 시공이 시행되고 있는 장비 중 굴삭기, 해외에서는 시행되고 있으나 국내에서는 도입 초기 단계인 도로포장 장비로 한다. 현장 적용시 공사비 비교를 위한 공사는 고속도로 건설공사를 대상으로 한다.

GPS를 활용한 굴삭기 시공의 자동화에 의한 경제성 분석은 고속도로 건설공사 1개 공구의 흙깎기 물량 1,000,000m³에 대해 자동화 시공방법을 도입했을 때 투입되는 자동화 장비 임대비용과 자동화에 따라 절감되는 시공 비용 및 인건비를 상호 비교하였다.

광과기를 이용한 도로포장 자동화 시스템의 경제성 분석은 도로포장 전문업체를 기준으로 1일 시공연장(편도 2차로 500m), 연간 포장공사 작업 가능일수(200일)를 대안 비교 조건으로 하여, 자동화 시공을 위해 투입되는 비용은 자동화 포장 시스템 구입비용으로 하고, 절감되는 비용은 현재의 시공방법에는 필요하나 자동화 장비를 도입할 경우에는 불필요한 재료비(유도선, 말뚝)와 자동화에 의해 절감되는 인건비(측량기술자 및 보조인부)로 하였다. 그리고, 투입비용과 절감비용에 대한 비김분석과 손익분기점 분석을 통해 경제성을 분석하였다.

이 논문의 연구 흐름은 <그림1.1>과 같다.



<그림1.1> 연구 흐름도

제2장 건설기계 자동화

2.1 관련문헌 검토

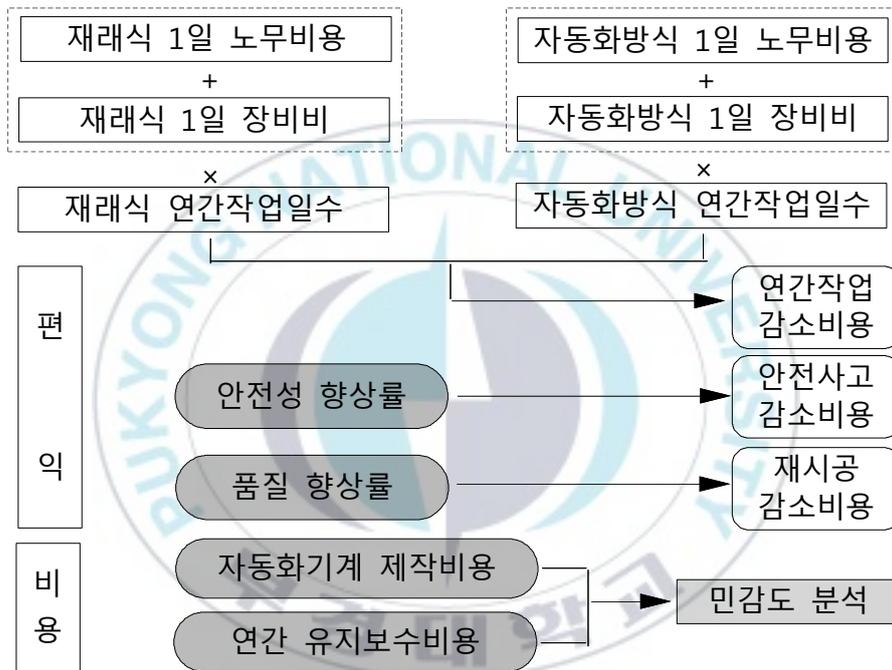
2.1.1 건설 자동화 연구개발 현황

“건설자동화 기술 개발 우선순위 도출 및 기술 로드맵 구축에 관한 연구(2010, 이정호 외)”에서는 건설자동화 연구개발 현황을 소개하고 있다. 해외에서는 International Symposium on Automation and Robotics in Construction(ISARC)에 59건, Automation in Construction(AIC)에 24건, International Journal of Advanced Robotic System(IARS)에 5건으로서 2010년 현재 약 88건의 건설자동화 관련 연구개발 사례가 있는 것으로 분석되었다. 그러나, 이 연구의 대상인 건설자동화는 ‘갱폼 인양작업, 철근 가공, 말뚝 두부정리 작업’ 등 건설공사 중 간단한 일부 작업을 기계가 사람을 대신한 단순 기계화 작업에 대한 연구로서, 이 논문에서 연구하고자하는 ‘ICT와 융합한 건설자동화’와는 거리가 멀다.

2.1.2 건설자동화 기계의 성능분석 모델 개발 사례

“건설자동화 기계의 연구개발에 따른 성능분석 모델 개발(2007, 이정호 외)”에서는 개발 완료된 건설자동화 기계의 성능을 분석하기 위하여 1) 생산성 향상으로 인한 경제적 편익의 정량화 2) 안전성 향상 정도의 정량적 측정 3) 품질향상 정도의 정량적 측정 모델을 개발하였다.(이정호 외, 2007)

생산성 향상으로 인한 경제적 편익의 분석지표는 편익/비용 비율분석, 현재액분석, 연간 순이익 산출, 수익률 분석, 손익분기점 분석, 민감도 분석을 사용하였다. 안전성 향상 및 품질향상 정도의 정량적 측정은 각 단위작업에서 가능한 요인을 브레인스토밍으로 도출하여 정량화하였다.(이정호 외, 2007) (그림2.1)



<그림2.1> 건설자동화 기계의 성능분석 모델(이정호 외, 2007)

2.2 건설자동화 장비의 가동원리

2.2.1 ICT 융합 건설자동화 장비 현황

미국, 독일, 일본 등 해외에서 건설기계와 ICT를 융합한 건설자동화를 선도한 기술은 GPS(Global Positioning System)이고, GPS를 최초로 도입한 장비는 굴삭기(백호우)이다. 이후 건설자동화가 확대된 분야는 로울러, 그레이더, 콘크리트 페이버 및 아스팔트 피니셔 등이다.

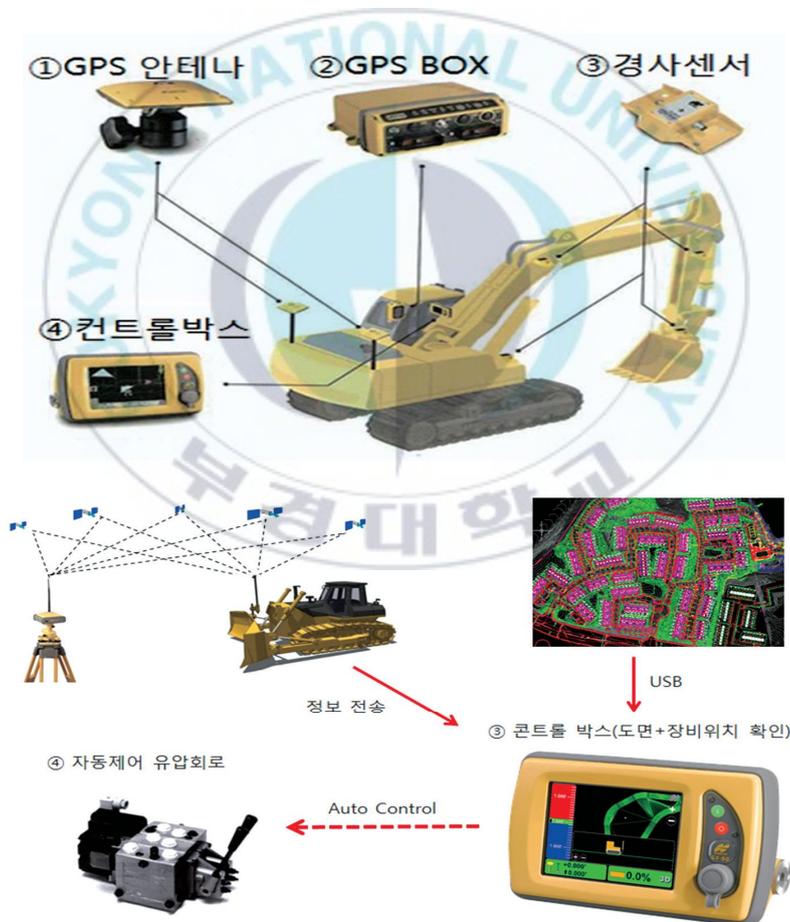
이들 자동화 장비 중 백호우와 도로포장 장비에 현재 사용(장착)되고 있는 ICT 장비는 다음과 같다.

<표2.1> 자동화시공 건설기계에 사용되는 ICT 장비 예시

구 분	ICT 장비	비 고
백호우	GPS수신기, 콘트롤박스	
포장장비	A사-1	GPS수신기, 콘트롤박스, mmGPS
	A사-2	소닉트랙커, 콘트롤박스, 슬로프센서
	B사	광파기, 경사계, 장비PC

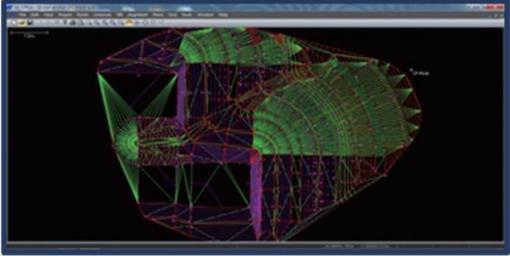
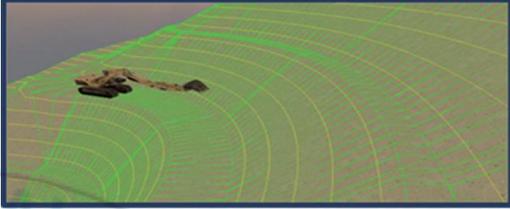
2.2.2 자동화 장비의 가동원리

건설자동화 장비 중 굴삭기의 가동원리는 GPS 수신기를 장착한 굴삭기를 가동하면 장비 운전석 내에 부착된 콘트롤 박스에 현재 백호우 버킷의 위치가 도면상에 나타나 장비 운전원이 측량자나 기준틀의 도움없이 스스로 위치를 인식해서 작업을 진행하게 된다. 이를 위해 사전에 설계도면을 3D로 변환하여 콘트롤 박스에 입력해야 하는데, 장비의 구성과 일련의 작업과정은 다음과 같다.



<그림2.2> 굴삭기 자동화 장비 구성

* 출처 : 최평호(건설자동화를 위한 Machine Control System 4:2017)

<p>① 도면변환 2D → 3D - CAD 평면도, 종단면도 합성</p>	
<p>② 작업전 시뮬레이션</p>	
<p>③ 현장 작업 - GPS수신, 위치 Data 확보 → RTK 통신 및 Data Integration → 붐, 암, 버켓, 바디의 기울기 측정 → 도면과 버켓 Overlap Display</p>	

<그림2.3> 굴삭기 자동화시공 작업절차

* 출처 : 최평호(건설자동화를 위한 Machine Control System 4:2017)

도로포장에 사용되는 건설자동화 장비 중 <표2.1>의 A사-1의 가동원리는 도로선형부 및 설계 데이터를 기초로 3D Data를 작성하고 그 자료를 컨트롤 박스에 입력하여 실행하면 GPS에 의하여 페이버의 위치를 측정하고 페이버 유압회로를 작동시켜 스크리드의 레벨 및 경사를 자동 제어하며 포설하는 시스템(그림2.4)이고, <표2.1>의 B사의 가동원리는 광파기를 포장장비 전, 후에 배치하고 포장장비에 부착된 프리즘을 통해 현재 포장장비의 위치를 인식하면서, 3D도면이 입력된 장비PC를 이용 포장장비 스크리드의 높이와 경사를 조정하면서 시공하는 방법이다(그림2.5).

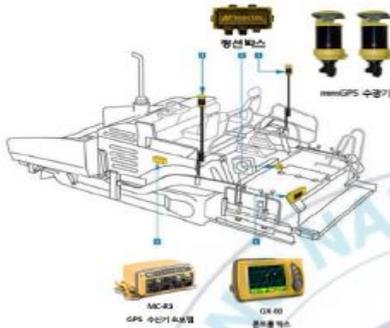
1) 3차원 도면생성 P/G



2) 기준국



3) ROVER SYSTEM



4) mmGPS



좌표 보정



높이 정밀도 유지

<그림2.4> 도로포장 자동화장비 시스템 개요(A사-1)



<그림2.5> 도로포장 자동화장비 시스템 개요(B사)

2.3 건설자동화 장비의 효과

2.3.1 굴삭기 자동화장비의 효과

현재까지 굴삭기를 이용한 토공사는 비탈면 깎기 작업을 실시할 경우 측량 기술자가 현장에서 측량을 통해 토공사 기준점을 확인 후 기준틀을 설치한 후 굴삭기가 깎기 작업을 위에서부터 아래로 실시하고, 굴삭 높이가 5m마다 소단을 설치하며 각 소단마다 다시 측량, 기준틀 설치를 반복하는 작업이다.

이 방법은 측량 기술자와 굴삭기 운전원의 숙련도에 따라 시공의 정확도가 크게 달라진다. 비탈면의 경사가 시방 기준을 초과하는 경우도 있고, 도로의 경우 도로 폭원이 부족하여 재시공하는 사례도 종종 발생한다. 효율성의 측면에서 보면, 측량작업 중에는 굴삭기가 작업을 중지하고 대기해야 하므로 굴삭기를 월 단위로 임대하여 사용하는 현장의 경우에는 경제적으로 불리하다. 안전관리의 측면에서 보면, 가파른 비탈면과 굴삭기 주변에 측량 기술자가 이동하며 작업하므로 안전사고의 위험이 늘고사리고 있다.

건설자동화 시스템을 도입하면 측량 기술자가 현장에서 작업을 할 필요가 없어 안전사고를 줄일 수 있고, 측량 기술자 인건비를 대폭 절감할 수 있다. 또, 측량에 소요되는 시간이 없으므로 공사기간을 대폭 줄일 수 있다. 굴삭기 자동시공 시스템은 시공 정밀도도 높은 것으로 확인되었다. 국내 한 고속도로 현장에서는 굴삭기 자동시공 완료 후 광과기를 이용하여 시공정밀도를 확인측량해 본 결과 최대 5cm이내의 시공오차가 나타났다. 특히 이 현장은 도로터널 입구의 비탈면을 절토하는 작업에 자동화 시스템을 적용하였는데, 터널 입구는 일반적 도로비탈면과 달리 굴곡이 매우 심하여 시공이 어려운 구간이다. 그럼에도 불구하고 5cm이내의

시공오차를 나타내었다는 것은 자동화 시스템의 정밀도가 매우 높다고 볼 수 있다.

굴삭기 자동시공 시스템의 효율성을 정량적으로 비교한 사례는 다음과 표와 같다.

<표2.2> 굴삭기 건설자동화 작업 효율성 분석 결과

3D MC(Machine Control) 굴삭기 독립기초 터파기 실적대비표				
A현장 (수량 870개소)	기존방법 (B/H 1.0M ³ 1대)	MC시공 (B/H 1.0M ³ 1대)	효율대비	비 고
시공일수	79일	51 일	▽28일 단축	64.5%
1일 기초터파기 개소	11개소	17개소	△6 개소/일	154.5%
측량인원 투입	63 명	10 명	▽53명 단축	15.9%
B현장 (수량 375개소)	기존방법 (B/H 1.0M ³ 1대)	MC시공 (B/H 1.0M ³ 1대)	효율대비	비 고
시공일수	25 일	12.5 일	▽12.5일 단축	50.0%
1일 기초터파기 개소	10개소	15개소	△5개소/일	150.0%
측량인원 투입	25 명	5 명	▽20명 단축	20.0%
C현장 (수량 600개소)	기존방법 (B/H 1.0M ³ 1대)	MC시공 (B/H 1.0M ³ 1대)	효율대비	비 고
시공일수	25일	10일	▽15일 단축	40.0%
1일 기초터파기 개소	15개소	24개소	△9개소/일	160.0%
측량인원 투입	25명	7.5명	▽20명 단축	30.0%

* 출처 : 영신디앤씨 시공실적 분석자료

2D MC(Machine Control) 굴삭기 독립기초 터파기 실적대비표

D현장 (수량 370개소)	기존방법 (B/H 1.0M ³ 1대)	MC시공 (B/H 1.0M ³ 1대)	효율대비	비 고
시공일수	34 일	25 일	▽9일 단축	73.5%
1일 기초터파기 개소	11개소	15개소	△4 개소/일	136.4%
측량인원 투입	27 명	8 명	▽19명 단축	29.6%

E현장 (수량 500개소)	기존방법 (B/H 1.0M ³ 1대)	MC시공 (B/H 1.0M ³ 1대)	효율대비	비 고
시공일수	25일	11.5일	▽13.5일 단축	46.0%
1일 기초터파기 개소	13개소	20개소	△7개소/일	153.8%
측량인원 투입	25명	12.5명	▽12.5명 단축	50.0%

F현장 (수량 525개소)	기존방법 (B/H 1.0M ³ 1대)	MC시공 (B/H 1.0M ³ 1대)	효율대비	비 고
시공일수	25일	19.1일	▽5.9일 단축	76.4%
1일 기초터파기 개소	17개소	21개소	△4개소/일	123.5%
측량인원 투입	25명	17.5명	▽7.5명 단축	70.0%

* 출처 : 영신디앤씨 시공실적 분석자료

미국 Caterpillar사에서 에스파냐 남부 말라가주에서 시행한 도로 건설 사업의 건설자동화 효율성 분석 결과는 다음과 같다.

<표2.3> 굴삭기, 도저, 그레이더의 건설자동화 효과 분석

- 작업시간 분석

구 분		기존 방법	건설 자동화	효율성
측량작업		07:31	00:54	6:37 hours saved
도저 (D6N)	Bulk Earthmoving	04:40	04:18	+ 9 %
	Subgrade grading	03:48	01:28	+ 159 %
	Base Course grading	02:24	00:53	+ 172 %
굴삭기 (330D)	Bulk Earthmoving	02:23	01:53	+ 27 %
	Subgrade grading	02:56	02:43	+ 8 %
그레이더 (140H)	Base course fine grading	01:49	00.32	+ 241%
전체 및 평균		24:32	11:50	+ 101%

- 작업횟수(passes) 분석

구 분		기존 방법	건설 자동화	효율성
도저 (D6N)	Earthmoving	259	200	+30%
	Sub Fine Grading	214	60	+257%
	Base course	156	46	+239%
굴삭기 (330D)	Earthmoving	234	176	+32%
	Base course	74	69	+7%
그레이더 (140H)	Base course	62	17	+265%
전체 및 평균		1002	568	+76%

* 출처 : 영신디앤씨

2.3.2 도로포장 자동화장비의 효과

도로포장 분야는 현재까지 국내에서 자동화 시스템을 사용한 사례가 매우 드물다. 대부분 미국, 일본, 독일 등에서 사용되고 있다.

현재 도로포장 시공의 과정은 측량 → 말뚝, 유도선 설치 → 확인측량 → 검측 → 포장시공의 순서로 진행된다. 이 과정에서 말뚝설치와 유도선 설치에 많은 인력과 시간이 소요된다. 또, 포장 시공 중 유도선을 실수로 건드릴 경우 포장장비의 흔들림이 발생하여 포장 평탄성 악화에 크게 영향을 준다. 그리고, 유도선은 포장 시공 구간 좌, 우에 설치되어 작업차량 통행에 큰 지장을 준다.



<그림2.6> 도로포장 시공방법(유도선, 말뚝 설치)

도로포장 자동화 시스템을 사용하면 말뚝, 유도선을 설치할 필요가 없으므로, 유도선 흔들림에 의한 시공품질 저하 우려가 없고, 작업장 효율성 관리에 매우 효과적이다. 그럼에도 불구하고 국내 현장에 적용 실적

이 매우 미미한 이유는 건설자동화 시스템이 우리나라에는 아직 도입 초기 단계이므로, 도로포장 자동화에 의한 시공품질(특히, 도로 평탄성)확보가 가능한지 검증된 바가 없기 때문이다. 만일 시험시공 등 검증을 통하여 도로포장 자동화 시스템이 기존 방법보다 품질확보와 효율성 측면에서 유리하다는 것이 증명되면 국내에서도 본격적으로 도입될 것으로 판단된다.



2.4 건설기계 자동화 기술의 경제성 분석 사례

우리나라에서는 2013년 9월 고속도로 건설공사 현장에서 GPS를 활용한 Machine Control 시스템이 최초로 사용되어 현재까지 약 50개 건설현장에서 사용되어 왔다. 이 중 1개 건설현장의 원가계산 보고서에 의하면 건설자동화 장비를 이용한 흙깎기 및 흙쌓기 공사의 원가 절감률은 9.57%이다.

이 원가보고서는 건설기계 자동화 시공시 장비의 효율이 높아지는 것을 감안하여 단가 산출시 장비의 작업효율에 가산계수(굴삭기 1.29, 그레이더 1.7, 불도우저 1.48)를 곱하여 단순 산출한 것이다. 그러나, 이러한 단순 산출 방법으로는 건설자동화에 의한 경제적 효과의 포괄적 추정이 어렵다.

이 논문에서는 건설자동화 장비를 건설공사 현장에 사용할 경우 원가관리 측면에서 얼마만큼의 경제적 효과가 있는지 추정해 본다. 검토 대상은 국내 사용실적이 가장 많은 굴삭기와 향후 적용 가능성이 높은 도로포장 장비로 한다.

<표2.4> 건설기계 시공 자동화 기술에 의한 원가계산 사례(제잡비제외)

비 목	규 격	단위	수량	자동화시공		당초방법		절감률 (%)
				단가	금액	단가	금액	
흙깎기 (토사)	신설 (도자32ton)	m ³	299,818	553	165,799,354	704	211,071,872	21.44
흙깎기 (리핑암)	신설 (도자32ton)	m ³	60,876	796	48,457,296	1,014	61,728,264	21.49
흙깎기 (발파암)	정밀 깎기	m ³	12,784	18,981	241,704,054	19,516	248,516,744	2.74
흙깎기 (발파암, 진동제어,소)	2~6m ³ /공	m ³	2,476	11,376	28,155,600	11,908	29,472,300	4.46
흙깎기 (발파암, 진동제어,중)	2~10m ³ /공	m ³	86,069	6,739	573,279,991	7,274	618,791,906	7.35
흙깎기 (발파암, 일반발파)	10~20m ³ /공	m ³	18,910	5,208	98,388,730	5,736	108,467,760	9.29
흙쌓기 (토사,노상)	95%이상	m ³	10,682	1,980	21,051,360	2,243	23,847,576	11.72
흙쌓기 (토사,노체)	90%이상	m ³	276,269	1,472	405,181,248	1,649	453,902,091	10.73
흙쌓기 (암성토)	90%이상	m ³	16,148	2,549	41,161,252	2,667	43,066,716	4.42
흙쌓기 (토사)	비다짐	m ³	72,426	921	66,704,346	966	69,963,516	4.65
합 계					1,689,883,231		1,868,828,745	9.57

* 출처 : 건설현장 생산성 향상을 위한 ICT기반 건설기계 시공 자동화 기술 원가계산보고서(사단법인 한국물가협회, 2017.8)

제3장 자료 및 분석

3.1 GPS를 활용한 굴삭기 시공 자동화에 따른 경제성 분석

굴삭기 자동화에 의한 경제성 분석을 위한 공사 기간은 일반적인 고속도로 건설공사에서 실제 토공사가 진행되는 기간(착공년도 및 준공연도 제외)인 3년으로 하고, 흙깎기 공사 물량은 1개 공구의 평균적인 흙깎기 물량인 1,000,000m³으로 가정한다.

3.1.1 굴삭기 자동화 시공 투입 비용

굴삭기 자동화 장비는 현재 우리나라에서는 임대 형식으로 사용되고 있다. 굴삭기에 사용되는 자동화 장비(GPS수신기, 컨트롤박스 등)의 임대료는 일반적으로 월 450,000원이다.

건설공사에서 동계 휴지기간과 비오는 날을 제외한 토공 작업 가능일수는 연 200일 정도이고 3년간 작업 가능일수는 600일이다. 깎기 물량 1,000,000m³를 600일 동안 작업하려면 하루에 1,667m³을 절취하여야 한다. 일반적으로 굴삭기(버킷 용량 1.0m³)는 토질에 따라 다르지만 하루에 250~350m³을 절취할 수 있다. 그러므로, 하루에 1,667m³을 절취하려면 일 평균 5.6대의 굴삭기가 필요하다.

그러므로, 굴삭기 자동화 장비는 600일간 5.6대가 필요하고, 장비의 1년간 임대비용은 다음 표와 같다.

<표3.1> 굴삭기 자동화 장비 임대 비용(1년간)

구 분	내 역	금 액(원)
굴삭기 자동화 장비 임대료	200일×5.6대×450,000원÷30	16,800,000

3.1.2 굴삭기 자동화 시공으로 인한 경제적 효과

1) 시공비용 절감

굴삭기 자동시공에 의한 시공비용 절감은 시공효율 증대로 인해 발생한다. 절감되는 비용은 <표2.4>의 원가보고서 중 흙깎기에 해당하는 부분으로 한다. 원가보고서의 내역서 중 흙깎기의 기존방법 공사비는 1,278백만원이고 자동화 시공의 공사비는 1,155백만원이므로 절감률은 9.57%이다. 흙깎기 1,000,000m³에 대한 토질별 구성 비율과 시공 단가는 <표2.4>의 원가보고서를 준용하여 산출한다.

<표3.2> 굴삭기 자동화 시공비 절감 효과

비 목	규 격	단위	수량	자동화시공		당초방법	
				단가	금액(원)	단가	금액(원)
흙깎기 (토사)	신설 (도자32ton)	m ³	623,409	553	344,745,222	704	438,879,994
흙깎기 (리핑암)	신설 (도자32ton)	m ³	126,579	796	100,756,854	1,014	128,351,068
흙깎기 (발파암)	정밀깎기	m ³	26,582	18,981	504,546,588	19,516	518,767,778
흙깎기 (발파암, 진동제어,소)	2~6m ³ /공	m ³	5,148	11,376	58,567,360	11,908	61,306,269
흙깎기 (발파암, 진동제어,중)	2~10m ³ /공	m ³	178,963	6,739	1,206,028,680	7,274	1,301,773,648
흙깎기 (발파암, 일반발파)	10~20m ³ /공	m ³	39,319	5,208	204,775,468	5,736	225,536,114
합 계			1,000,000		1,689,883,231		1,868,828,745
절감액					3년간 : 255,194,701, 1년간 : 85,064,900		

2) 인건비 절감

굴삭기 자동시공을 도입하면 측량 인건비가 대폭 줄어든다. 일반적으로 건설공사 토공사의 측량작업에는 측량기술자 1인과 보조 2인이 필요하다. 각각의 인건비는 대한건설협회의 2017년 하반기 노임단가 중에서 측량기술자는 지적기사(237,460원), 보조는 보통인부(106,846원)로 하여 산출한다. 자동시공에 의해 측량기술자가 전혀 필요하지 않은 것은 아니고 시공 후 확인측량에만 기술자가 필요하다. 기술자의 투입일수 감소효과는 <표2.2>의 측량인원 투입 인원 감소효과를 준용한다. 이는 6개의 건설현장에서 실제로 산출한 값이다. 6개 현장의 종래 기술에 의한 측량인원 투입 인원은 총 190명이고, 자동시공 적용시 인원은 총 60.5명으로서 단축인원은 129.5명, 단축율은 68.2%이다.

건설공사 중 동계 휴지기간과 우천일을 제외한 측량 작업 가능일수는 연 250로 보면 3년간 측량작업 가능일수는 750일이다.

<표3.3> 측량인건비 절감 효과(1년간)

구 분	내 역	금 액(원)
측량기술자 1인	250일×1인×237,460원×68.2%	40,486,930
보조 2인	250일×2인×106,846원×68.2%	36,434,486
합 계		76,921,416

3) 사고비용 절감

건설현장에서 굴삭기와 관련된 안전사고의 유형은 버킷 탈락으로 인한 주변 작업자 타격, 굴삭기 하부 협착 등이 있다. 고속도로 건설공사 현장의 5년간('11~'12) 안전사고 유형을 살펴보면 '굴삭기 버킷 낙하'로 인한 사고가 매우 큰 비중을 차지하고 반복적으로 발생하는 사고 유형 중 29%를 차지하고 있다.

<표3.4> 고속도로 건설공사 안전사고 현황(2011.01~2016.01)

□ 총괄표

사망사고			부상사고		
재해 유형	계	24건	재해 유형	계	135건
	반복사고	14건		반복사고	16건
	단일사고	10건		단일사고	119건
추락	계	8건	추락	계	37건
	반복사고	4건		반복사고	4건
	단일사고	4건		단일사고	33건
낙하	계	6건	낙하	계	23건
	반복사고	4건		반복사고	5건
	단일사고	2건		단일사고	18건
협착	계	8건	협착	계	31건
	반복사고	6건		반복사고	7건
	단일사고	2건		단일사고	24건
전도	계	2건	전도	계	21건
	반복사고	-		반복사고	-
	단일사고	2건		단일사고	21건
과도한 동작	계	-	과도한 동작	계	19건
	반복사고	-		반복사고	-
	단일사고	-		단일사고	19건
기타	계	-	기타	계	4건
	반복사고	-		반복사고	-
	단일사고	-		단일사고	4건

□ 반복사고 유형

사망사고	부상사고
① 교량 가설물 해체 중 추락(4건)	① 트럭 적재함에서 추락(4건)
② 굴삭기 버킷 낙하(4건)	② 터널굴착 중 막장면 낙석(5건)
③ 건설장비 후진 중 협착	③ 철근 절곡 중 협착(7건)

* 출처 : 한국도로공사

산업재해로 인한 전체 경제적 손실 비용을 계산하기는 쉽지 않다. 따라서 많은 연구와 통계를 통해 간접손실 비용은 직접손실 비용을 활용하여 적정 배율을 산정하려는 시도가 이루어졌다(문명훈, 2015). 이 분야의 개척자인 하인리히는 간접손실비용이 직접손실 비용의 4배, 전체 비용은 직접손실 비용의 5배가 되도록 제안하였으며 우리나라도 이에 따라 산업재해의 경제적 손실 비용을 산정하고 있다(문명훈, 2015). 여기서 직접손실 비용은 요양비, 보상비 등 산업재해 보상보험에서 지출되는 비용이며, 간접손실 비용은 산재보험에서 지출되지 않는 비용으로 기업 자체 보상비인 근로시간 손실, 기계설비 파손 등 물적 손실과 작업 중지와 같은 생산 손실을 포함한다(문명훈, 2015).

산업재해자 1명의 연평균 손실 비용은 약 1억2800만원인데, 굴삭기 자동화로 인해 안전사고 요인이 충분히 감소되긴 하지만, 사고 감소율을 수치적으로 추측하기 매우 어렵다. 그러므로, 사고발생 감소 비용을 경제성 분석에서 반영하지는 않기로 한다.

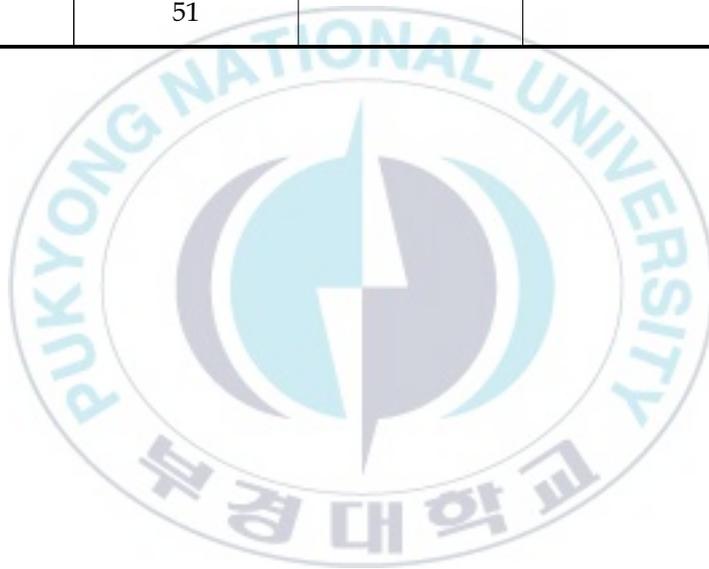
3.1.3 경제성 분석

굴삭기 자동화에 따른 경제성 분석 결과는 <표3.5>와 같다. 고속도로 건설공사 1개 공구에 대하여 1년간 비용 16.8백만원, 경제적 수익 162백만원, 3년간 비용 50.4백만원, 경제적 수익 486백만원으로서, 단순 비교하여도 굴삭기 자동화 도입의 경제성이 매우 좋다는 것을 알 수 있다.

<표3.5> 굴삭기 자동화에 따른 비용과 수익

(단위 : 백만원)

연도	비용	수 익(절감비용)		
	장비임대	시공비 절감	인건비 절감	총 수익
1	17	85	77	162
2	17	85	77	162
3	17	85	77	162
합계	51			486



3.2 광파기를 이용한 도로포장 자동화 시스템의 경제성 분석

도로포장 장비 자동화의 경제성 분석은 기존 시공방법에 대한 대안으로서 <그림2.5>에 나타난 B사의 광파기 사용 자동화 시공으로 변경했을 때, 기존 방법과 변경 방법에 대한 비김분석법을 사용하였다. 고정비용은 없으나 변동비가 상대적으로 큰 기존 방법과 고정비용은 크나 변동비가 작은 자동화 설비에 대하여 두 대안의 분기점을 계산하여 자동화 시공방법의 대안 채택 적정성에 대해 판단한다.

또, 자동화 시공방법에서 투입되는 초기비용(장비 및 소프트웨어)이 어느 시점에서 회수되는지 손익분기점을 계산하기로 한다.

기존 시공방법과 자동화 시공방법에 있어서 달리 적용될 고정비와 변동비는 다음과 같다.

<표3.6> 기존방법과 자동화시공의 비교

구분	기존 시공방법	자동화 시공방법
고정비	-	o 자동화 장비 : 광파기, 장비PC, 소프트웨어 등
변동비	o 재료비 : 와이어, 스틱 o 인건비 : 측량기술자, 보조인부	o 인건비 : 측량기술자

기존 시공방법에 투입되는 고정비는 없으며, 변동비 중 재료비는 콘크리트 패이버 높낮이와 폭 유도를 위한 와이어, 스틱의 비용이 소모되고, 인건비는 와이어, 스틱 설치를 위한 측량기술자와 보조인부가 필요하다. 반면, 자동화 시공방법에는 초기 투입되는 고정비로서 자동화 장비의 구매가 필요하며, 변동비로는 광파기 측량을 위한 기술자 인건비가 투입된다.

3.2.1 대안 비교를 위한 조건

대안의 비교를 위한 도로포장의 조건은 다음과 같다.

1개의 포장공사 전문업체 기준으로

- 포장의 1일 시공연장 : 500m(편도 2차로 기준)
- 연간 포장공사 작업가능일수 : 200일
- 연간 포장공사 시공연장 : 100,000m

3.2.2 기존 시공방법의 변동비 산출

(1) 재료비

기존 방법의 도로포장 시공을 위해서는 콘크리트 포장의 높낮이와 폭의 유지를 위해 슬립폼 페이퍼의 유도를 위한 센서라인이 설치된다. 이 센서라인의 설치는 6m간격으로 강철 말뚝을 설치하여 지지대 역할을 하고 그 말뚝에 와이어를 연결하여 설치한다. 원활한 공사추진을 위해 필요한 와이어는 3km, 스틱은 400개이며, 와이어의 교체주기는 1년, 스틱의 교체주기는 2년이다. 재료비는 와이어 1m당 1,000원, 스틱 1개당 25,000원이다.

기존 시공방법에 있어서 10년간 투입되는 재료비는 다음과 같다. 재료비는 매년 물가상승률 2.5%를 적용하였다.

<표3.7> 기존 시공방법의 변동비(재료비)

연도	와이어	스틱	계
1	3,000,000	10,000,000	13,000,000
2	3,075,000		3,075,000
3	3,151,875	10,500,000	13,651,875
4	3,230,672		3,230,672
5	3,311,439	11,025,000	14,336,439
6	3,394,225		3,394,225
7	3,479,080	11,576,250	15,055,330
8	3,566,057		3,566,057
9	3,655,209	12,155,063	15,810,271
10	3,746,589		3,746,589
연평균			8,886,646
합계			85,119,869

(2) 인건비

기존 시공방법에서 투입되는 인건비는 센서라인 설치를 위한 측량기 술자 1인과 보조인부 3명이 필요하다. 측량기술자와 보조인부의 인건 비는 굴삭기 자동화 비용 산출에서와 같이 대한건설협회의 2017년 하 반기 노임단가 중에서 지적기사(237,460원), 보통인부(106,846원)를 적 용한다.

인건비는 매년 상승하므로 10년간의 대안 비교를 위해서는 인건비 상승분 반영이 필요하다. 지적기사와 보통인부의 인건비 상승폭은 매 년 다르지만, 최근 3년간의 평균 상승폭을 적용하기로 한다. 지적기사 의 평균 임금 상승폭은 5.6%, 보통인부는 평균 9.2%이다.

<표3.8> 측량기술자와 보조인부의 임금 상승폭(3년간)

(금액단위 : 원)

구 분	노임단가			평균 인상율
	'15.하반기	'16.하반기	'17.하반기	
측량기술자 (지적기사)	213,060	223,006 인상율4.7%	237,460 인상율6.5%	5.6%
보조 (보통인부)	89,566	99,882 인상율11.5%	106,846 인상율7.0%	9.2%

인력투입 기간을 연간 포장 작업가능 일수인 200일로 하여 10년간 총 인건비와 연평균 인건비를 산출한 결과는 다음 표와 같다.

<표3.9> 기존 시공방법의 변동비(인건비)

연도	측량기술자(1인)	보조(3인)	투입일수	총금액
1	237,460	320,538	200	111,599,600
2	250,758	350,027	200	120,157,051
3	264,800	382,230	200	129,406,044
4	279,629	417,395	200	139,404,839
5	295,288	455,796	200	150,216,755
6	311,824	497,729	200	161,910,621
7	329,287	543,520	200	174,561,263
8	347,727	593,524	200	188,250,036
9	367,199	648,128	200	203,065,408
10	387,762	707,756	200	219,103,591
연평균				159,767,521
합계				1,597,675,208

(3) 기존 시공방법의 변동비

위에서 산출한 기존 시공방법의 연간 변동비는 다음과 같다.

· 연간 변동비 : 159,767,521 + 8,886,646 = 168,654,167원

3.2.3 자동화 시공방법의 고정비, 변동비 산출

1) 고정비

굴삭기 자동화 시공 장비는 우리나라에서 최근 몇 년간 지속적으로 사용되고 있어 임대 형식으로 사용이 가능한 반면, 도로포장 자동화 장비는 현재 우리나라에서는 도입이 거의 이루어지지 않은 상태로 임대는 불가능하므로 현장에 적용하려면 구입해야 하므로 고정비로서 초기 비용이 투입되어야 한다. 도로포장 자동화 장비(장비PC, 광파기, 프리즘, 소프트웨어)의 구입 초기비용은 해외 제조사에 따라 다르나 230,000,000원 정도이다. 자동화 장비의 견적 금액은 아래 표와 같다.

<표3.10> 자동화 포장장비 견적 내역

○ 견적 금액

구분	공급가	부가세	합계
금액(원)	215,000,000	21,500,000	236,500,000

○ 주요 구성품

구 성 품	수 량	구 성 품	수 량
컴퓨터 시스템 (PC, 윈도우XP, 매뉴얼 등)	1	수신기	1
라이선스 소프트웨어	1	소프트웨어 유지관리1년	4
라이선스 키	1	설치, 사용법 교육	1
케이블	1	토털 스테이션	3
경사센서	1	배터리 등	1

도로포장 자동화 장비는 구매 후 주기적으로 소프트웨어 업데이트, 측량기기 수리 등 유지보수가 필요하다. 유지보수비는 구입 후 매년 5,000,000원 정도로 소요될 것으로 추정하고, 일반적 건설 장비의 내구수명 연한은 약10년 정도이므로, 이 장비의 내구수명 연한은 10년으로 하고, 10년 후 잔존가치는 11,500,000원(구입가의 5%)으로 산정한다.

연간 고정비는 요구수익률에 따라 다음과 같다.

- 연간 고정비(요구수익률 20%) = 230,000,000원(A/P,20%,10)
 - 11,500,000(A/F,20%,10) + 5,000,000 = 59,412,250원
- 연간 고정비(요구수익률 15%) = 230,000,000원(A/P,15%,10)
 - 11,500,000(A/F,15%,10) + 5,000,000 = 50,272,050원
- 연간 고정비(요구수익률 10%) = 230,000,000원(A/P,10%,10)
 - 11,500,000(A/F,10%,10) + 5,000,000 = 41,699,950원
- 연간 고정비(요구수익률 5%) = 230,000,000원(A/P,5%,10)
 - 11,500,000(A/F,5%,10) + 5,000,000 = 33,870,750원

2) 변동비

자동화 시공방법에서 투입되는 인건비는 광파기 2대를 이용한 포장 장비 전·후방 신호 송신을 위한 측량기술자 2인이 필요하다. 측량기술자의 인건비는 대한건설협회의 2017년 하반기 노임단가 중에서 지적기사(237,460원)를 적용한다. 인건비 연평균 임금 상승폭은 5.6%이고, 연간 투입일수는 200일이다.

<표3.11> 자동화 시공방법의 변동비(인건비)

연도	측량기술자(1인)	인원	투입일수	총금액
1	237,460	2	200	94,984,000
2	250,758	2	200	100,303,104
3	264,800	2	200	105,920,078
4	279,629	2	200	111,851,602
5	295,288	2	200	118,115,292
6	311,824	2	200	124,729,748
7	329,287	2	200	131,714,614
8	347,727	2	200	139,090,633
9	367,199	2	200	146,879,708
10	387,762	2	200	155,104,972
연평균				122,869,375
합계				1,228,693,750

3.2.4 대안의 비교

1) 비감점 분석

기존 시공방법과 자동화 시공방법의 생산성이 비감이 되는 생산(시공)수준을 구한다.

생산량은 건설공사에 특성을 감안하여 시공연장(미터) 단위로 산정한다. 이를 위해 위에서 각 시공방법에 대해 산출한 변동비를 1m 시공에 대한 변동비로 환산할 필요가 있다.

<표3.12> 각 대안의 단위 시공량에 대한 변동비 환산

대안	요구 수익률	고정비	변동비	m당 변동비 (변동비/100,000)
기존 방법	20%	-	168,654,167	1,687
자동화 방법		59,412,250	122,869,375	1,229
기존 방법	15%	-	168,654,167	1,687
자동화 방법		50,272,050	122,869,375	1,229
기존 방법	10%	-	168,654,167	1,687
자동화 방법		41,699,950	122,869,375	1,229
기존 방법	5%	-	168,654,167	1,687
자동화 방법		33,870,750	122,869,375	1,229

기존 시공방법과 자동화 시공방법의 각 요구 수익률에 따른 비김점은 다음과 같다.

① 요구수익률 20%일 때

$$- AEC_{\text{기존}} = 0\text{원(고정비)} + 1,687\text{원(1m당 변동비)} \times Q$$

$$- AEC_{\text{자동}} = 59,412,250\text{원(고정비)} + 1,229\text{원(1m당 변동비)} \times Q$$

* Q : 포장 시공연장

두 가지 시공방법의 비김점은

$$AEC_{\text{기존}} = AEC_{\text{자동}}$$

$$0 + 1,687 \times Q = 59,412,250 + 1,229 \times Q$$

$$Q = 59,412,250 / (1,687 - 1,229) = 129,764\text{m}$$

② 요구수익률 15%일 때

$$- AEC_{\text{기존}} = 0\text{원(고정비)} + 1,687\text{원(1m당 변동비)} \times Q$$

$$- AEC_{\text{자동}} = 50,272,050\text{원(고정비)} + 1,229\text{원(1m당 변동비)} \times Q$$

* Q : 포장 시공연장

두 가지 시공방법의 비김점은

$$AEC_{\text{기존}} = AEC_{\text{자동}}$$

$$0 + 1,687 \times Q = 50,272,050 + 1,229 \times Q$$

$$Q = 50,272,050 / (1,687 - 1,229) = 109,801\text{m}$$

③ 요구수익률 10%일 때

$$- AEC_{\text{기존}} = 0\text{원(고정비)} + 1,687\text{원(1m당 변동비)} \times Q$$

$$- AEC_{\text{자동}} = 41,699,950\text{원(고정비)} + 1,229\text{원(1m당 변동비)} \times Q$$

* Q : 포장 시공연장

두 가지 시공방법의 비김점은

$$AEC_{\text{기준}} = AEC_{\text{자동}}$$

$$0 + 1,687 \times Q = 41,699,950 + 1,229 \times Q$$

$$Q = 41,699,950 / (1,687 - 1,229) = 91,078\text{m}$$

④ 요구수익률 5%일 때

$$- AEC_{\text{기준}} = 0\text{원(고정비)} + 1,687\text{원(1m당 변동비)} \times Q$$

$$- AEC_{\text{자동}} = 33,870,750\text{원(고정비)} + 1,229\text{원(1m당 변동비)} \times Q$$

* Q : 포장 시공연장

두 가지 시공방법의 비김점은

$$AEC_{\text{기준}} = AEC_{\text{자동}}$$

$$0 + 1,687 \times Q = 33,870,750 + 1,229 \times Q$$

$$Q = 33,870,750 / (1,687 - 1,229) = 73,978\text{m}$$

앞서 전제 조건으로서 제시한 바와 같이 포장 전문업체의 1년간 포장 시공연장은 약 100,000m이다. 위 검토 분석결과에 따라 자동화 포장 시공시 요구수익률 별로 비김이 발생하는 시기는 다음과 같다.

① 요구수익률 20% : $129,764 \div 100,000 = \text{약 } 1.30\text{년}$

② 요구수익률 15% : $109,801 \div 100,000 = \text{약 } 1.10\text{년}$

③ 요구수익률 10% : $91,078 \div 100,000 = \text{약 } 0.91\text{년}$

④ 요구수익률 5% : $73,978 \div 100,000 = \text{약 } 0.74\text{년}$

2) 손익분기점 분석

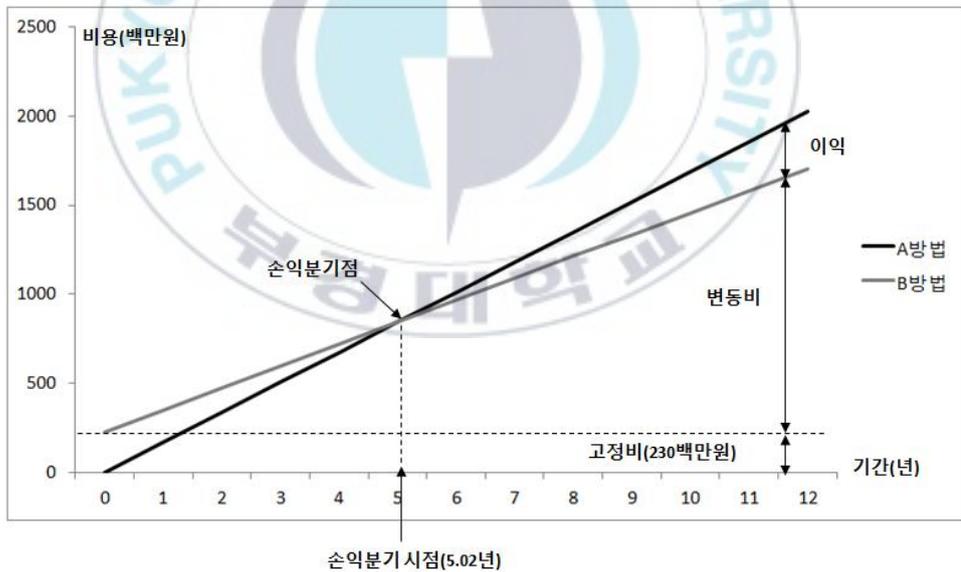
기존 방법과 자동화 시공방법의 손익분기점을 계산하면 다음과 같다.

기존 방법의 연간 변동비는 168,654,167원, 자동화 시공방법의 연간 변동비는 122,869,375원, 고정비(초기 투자비)는 230,000,000원이다. 공사기간을 Y라고 하면

$$\cdot 168,654,167 Y = 230,000,000 + 122,869,375 Y \text{ 이므로}$$

$$Y = 5.02\text{년}$$

즉, 자동화 시공방법의 손익분기점은 5.02년이고, 1년간 100,000m를 시공하므로 편도 2차로 포장공사 205km를 시공했을 때 손익분기점에 다르게 된다.



<그림3.1> 자동화 도로포장의 손익분기점 계산

제4장 분석결과 및 고찰

4.1 자동화 시공의 경제성 분석결과

굴삭기와 도로포장의 자동화 시공에 의한 경제성을 분석한 결과 굴삭기는 현재 국내에서 임대 사용이 가능하여 투자비가 매우 적으며, 사용 즉시 시공 비용과 인건비가 대폭 이 절감되어 경제적 효과가 매우 탁월하다.

도로포장 장비는 굴삭기에 비해 초기 투자비(장비 구입)가 매우 크다. 손익분기점 분석을 통하여 확인한 결과 초기 투자 후 5년 정도가 걸려야 손익분기 시점에 도달할 수 있고, 비김분석 결과로는 요구수익률에 따라 0.74~1.3년이 경과되어야 비김점이 발생한다.

<표4.1> 도로포장 자동화의 경제성 분석결과(종합)

분석방법		손익분기점 분석	비김 분석			
			수익률20%	수익률15%	수익률10%	수익률5%
분석 결과	기간	5.02년	1.30년	1.10년	0.91년	0.74년
	물량	502km	130km	110km	91km	74km

4.2 고찰

도로포장 자동화 시공은 경제성 분석 결과 약 5년 기간이 지나야 손익분기점에 달할 것으로 예측된다. 하지만, 경제성 이외에 자동화 시공의 또 다른 장점에 주목할 필요가 있다.

첫째, 공사현장 내 작업구간 효율적 관리에 유리하다. 기존 시공방법의 최대 단점은 센서라인에 의해 작업구간이 제한된다는 점이다. 포장으로부터 약 50cm 떨어진 지점에 도로 양측 방향으로 센서라인이 설치되어 포장공사에 필요한 콘크리트 운반용 덤프트럭은 물론이고 포장공사 이외의 다른 공종의 작업차량의 통행이 완전히 제한된다. 이는 건설공사 공기 지연의 요인으로 작용한다. 자동화 포장을 시공하는 경우에는 센서라인 설치가 불필요하여 작업 공간 활용에 매우 유리하다. 콘크리트 운반용 덤프트럭의 회전공간(콘크리트 포설 후 회차)이 충분히 확보되어 안전관리에 유리하다. 발주처와 원도급 종합 건설업자의 입장에서는 포장공사와 비슷한 시기에 이루어지는 측구, 다이크, 방음벽, 비탈면 녹화공사 등을 현재와 같이 포장작업 진행 기간 동안 멈추지 않고 연속해서 진행할 수 있어 공기 단축에 아주 유리하다.

둘째, 자동화 포장시공은 도로의 평탄성 확보에 유리하다. 기존 방법은 작업자와 차량의 실수로 인한 센서라인 충격이 종종 발생한다. 그 결과는 포장 평탄성에 크게 영향을 미쳐 센서라인 충격이 발생한 곳은 평탄성이 매우 불량하므로, 시방기준을 초과하는 경우 큰 비용을 들여서 보수작업을 하고 있다. 그러나, 자동화 시공방법은 센서라인이 불필요하므로 실수에 의한 평탄성 저하 우려가 전혀 없다. <표4.2>는 기존 시공방법에 의한 포장면같이 보수 현황이다.

<표4.2> 포장 시공 후 표면 면갈이 보수현황

평탄성조사 일자	공구	보수연장(m) / 전체연장(m)	교량보수연장(m)
총 계		36,700 / 113,000 (보수율 : 32.47%)	
17.02.24	1	3,600 / 17,700	300
17.02.24	2	2,100 / 9,300	100
17.04.24	5	2,900 / 8,700	200
17.05.10	2	3,500 / 4,500	400
17.05.10	3	2,300 / 6,900	200
17.06.02	5	3,000 / 8,400	0
17.06.02	6	10,600 / 10,800	0
17.06.16	4	1,300 / 7,700	300
17.06.16	5	2,200 / 9,600	600
17.07.14	1	2,000 / 6,000	900
17.08.01	6	100 / 13,200	100
17.08.16	4	300 / 2,400	0
17.09.25	2	2,800 / 7,800	0

* 출처 : 한국도로공사 내부 자료

<표4.3> 연도별 포장 면갈이 보수비용 추정

(단위 : 백만원)

연도	보수비용	연도	보수비용
1	102	11	36
2	92	12	32
3	83	13	29
4	74	14	26
5	67	15	23
6	60	16	21
7	54	17	19
8	49	18	17
9	44	19	15
10	40	20	14

이상 본 논문에서 살펴본 바와 같이 건설기계 자동화 시공 도입은 각 장비별로 경제성 분석결과는 다소 차이가 있고, 도로포장 장비의 경우는 손익 분기점에 다다르기까지는 상당기간이 소요된다. 하지만, 초기투자가 잘 이루어진다면, 장기적으로 비재무적 효과가 상당할 것으로 판단된다. 이는 경제적 효과 뿐만 아니라 건설공사 효율성과 품질확보, 안전관리 측면에서 생각할 때 장기적으로 큰 이득이라 할 수 있다. 그럼에도 불구하고 IT 강국인 우리나라가 건설자동화가 외국에 비해 도입이 늦어지는 이유는 건설경기 침체로 인한 신규 장비 확보 부담 때문이다. 본 저자가 근무하는 곳에서도 도로포장 장비 도입을 지난 1년간 검토, 협의했다. 외국 사례를 수집하고 협력업체에서 해외 출장을 통해 장비 도입시 국내 성공 가능성을 사전검토하는 등 다각적 노력을 했다. 그러나 도입은 성공적이지 못했다. 임대 가능한 장비의 신규 구매비용 부담을 해결하지 못했기 때문이다.

최근 일부 대형 건설사에서는 건설자동화를 전국적으로 도입하고 있는 곳이 있다. 장비를 직접 도입하는 전문회사와 수요자인 대형 건설사와 발주자(정부 포함)가 공동적으로 건설자동화 도입을 위해 노력할 필요가 있다. 최근 국토교통부 등에서 도로포장 자동화를 연구과제 선정을 추진하고 있다. 이를 통해 국내 시범 도입과 현장 시험시공으로 시공품질, 안전성, 효율성, 경제성 등을 사전에 검증함으로써, 국내 건설자동화 도입의 촉진할 필요가 있고, 이에 대한 시방기준을 마련하는 등 제도적 뒷받침을 할 필요가 있다.

제5장 결 론

우리나라는 약 5년 전 굴삭기에 GPS 시스템을 장착한 자동화 시공이 도입되었고, 현재 전국 건설현장에 서서히 자동화 시공이 보급되고 있다. 본 연구에서 건설기계 자동화 시공에 대한 경제성을 분석한 결과 굴삭기의 경우는싼 가격에 임대가능하고 인건비를 대폭 줄일 수 있어서 도입 초기부터 경제적으로 큰 이익을 주는 것으로 분석되었고, 반면 광파기를 이용한 도로포장 자동화 시스템은 국내 도입 실적이 없는 도입초기의 장비이므로 초기 설비 투자 비용이 다소 크므로 손익분기점에 다다르기까지는 5년 정도의 시간이 소요된다.

그러나, 건설기계 자동화 시공방법 도입 여부에 대한 의사결정을 경제성 분석에만 의존할 일은 아니다. 직접적인 손익 보다는 금액으로 따지기 어려운 여러 가지 효과에 주목할 필요가 있다. 도로포장 자동화 시공방법은 센서라인 설치가 필요 없어서 포장공사 전 준비작업 시간을 줄일 수 있고, 통행로 확보가 가능하기 때문에 포장공사와 동시에 측구, 방음벽, 낙석방지공, 비탈면 녹화 공사 등 여러 가지 공종을 동시에 수행할 수 있어서 복합적 건설공사의 공기 단축에 큰 도움을 줄 수 있다. 또, 기존 방법과 달리 센서라인 충격에 의한 도로 평탄성 저하의 우려가 없으므로 품질확보에도 매우 중요하다.

이처럼 여러 가지 가능성과 장점을 갖고 있는 도로포장 자동화의 국내 성공적 도입을 위해서는 제도적 뒷받침과 많은 노력이 필요하다. 건설경기 침체 속에 건설업체에서는 불확실하고 검증되지 않은 고가의 장비에 과감한 투자가 어렵다. 먼저 정부기관에서 연구과제 연구를 통해 도로포장 자동화 시스템의 적용성에 대해 연구하고 현장 시험시공과 장기간에 걸친 효과검증을 시도해 볼 만하다.

굴삭기 자동화 시공은 약 5년간 국내 시공 실적에서 효과가 검증되었다. 경제성뿐만 아니라 시공 정확도에서 문제가 없음이 검증되었다. 이러한 성공 사례를 바탕으로 도로포장뿐만 아니라 여러 가지 공사에서 IT를 활용한 자동화 시공을 정부차원에서 지원하고 많은 연구와 시험시공, 검증이 이루어진다면 국내 자동화 시공 도입이 더욱 빨라질 것이라 판단된다.



참고문헌

1. 최평호(2017.2), 건설자동화를 위한 Machine Control System, 한국건설관리학회지, 제18권 제1호 통권 제95호
2. 이정호 외(2010.9), 건설자동화 기술 개발 우선순위 도출 및 기술 로드맵 구축에 관한 연구, 대한건축학회논문집, 제26권 제10호 통권264호
3. 이정호 외(2007.12), 건설자동화 기계의 연구개발 단계에 따른 성능 분석 모델 개발, 한국건설관리학회논문집, 제9권 제2호
4. 건설현장 생산성 향상을 위한 ICT기반 건설기계 시공 자동화 기술 원가 계산 보고서, 사단법인 한국물가협회(2017.8)
5. 유일근(2015.3), 경제성공학
6. 2017년 하반기 적용 건설업 임금실태 조사 보고서(대한건설협회)
7. 문명훈(2015.1), 산업재해와 손실비용, 건설경제
8. 情報化施工推進會議 建山 和由 외(2013.3), 情報化施工推進戰略