

도저 정지작업 시 머신 가이드 시스템 적용에 따른 토공성과 향상 사례분석

문성우¹ · 김상태^{2*}

¹부산대학교 사회환경시스템공학과 교수 · ²부산대학교 사회환경시스템공학과 석사과정

Performance Effectiveness Case Study of the Machine Guidance System for Dozer Earthwork Grading Work

Moon, Sungwoo¹, Kim, Sangtae^{2*}

¹Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University
²Graduate student, Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University

Abstract : Dozer is an expensive construction equipment and has a significant performance impact on earthwork performance. A machine guidance system has been applied to dozer equipment as a solution that can improve the performance. The system can provide earthwork-related information to equipment operators so that earthworks can be carried out with minimum support from surveyors. Construction Equipment Machine guidance has the function of supporting earthwork according to an earthwork plan by providing excavation-related information to machine operators. The objective of this study is to evaluate the performance improvement of a machine guidance system for an dozer earthwork operation, and to compare the machine guidance method with the traditional method. The performance has been evaluated in two folds: 1) productivity and 2) accuracy. The productivity shows the quantity of earthwork for a given unit time. The accuracy shows the deviation of grading level from the designed level on the construction drawing for earthwork. The machine guidance system has been applied to a testing bed in a construction site. Data comparison analysis showed that the earth earthwork had 46.59% improvement in productivity as well as 46.96% improvement in accuracy, and is expected to provide a tool for applying smart construction to the earthwork operation.

Keywords : Construction Equipment, Dozer, Earthwork, Grading Work, Machine Guidance, Machine Control, Productivity Improvement, Accuracy Improvement

1. 서론

1.1 연구 배경

토공작업이 지연되면 전반적인 공사기간이 지연될 수 있으므로 건설 공사에 있어 토공작업은 높은 생산성을 가지고 예정공정에 맞추어 수행되어야 하는 중요한 역할을 한다(Moon, 2018). 이와 같이 건설공사에서 토공작업은 약 20% 정도를 차지하는 중요한 공정임에도 불구하고(Ministry of Land of KOREA, Infrastructure and Transport, 2014), 토공작업 현장의 생산성은 개인의 숙련도에 크게 의존하고 있는

실정이다(Han et al., 2005).

일반적으로 건설현장은 위험하면서도 육체적으로 힘든 업종으로 인식되고 있어 숙련된 기능 인력이 줄어들고 있으며(Lee et al., 2006.), 계약자의 95%가 숙련공을 구하는데 어려움을 겪고 있다(Careers America's Infrastructure Fortune. 2017). 필연적으로 비숙련공의 시공 오류, 재작업 발생, 측량 오차의 누적, 작업정보의 부족, 안전사고 발생 등이 증가하고 결과적으로 품질저하 및 건설 생산성 감소와 같은 문제를 발생시키고 있다(Ministry of Land of KOREA, Infrastructure and Transport, 2014).

이러한 문제를 극복하기 위해서는 여러 분야의 신기술을 융합시켜 시공 품질, 생산성, 안전성 등을 동시에 확보할 수 있는 새로운 전략 수립이 필요하다(John & Alexander, 1994).

일반적으로 건설 생산성을 향상시키기 위해 작업속도를

* **Corresponding author:** Kim, Sangtae, Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University, Busan 46241, Korea
E-mail: fasko27@pusan.ac.kr

Received September 17, 2019; **revised** November 21, 2019

accepted December 4, 2019

높이게 되면, 건설기계가 반응할 수 있는 시간이 줄어들고 결과적으로 작업의 정확도는 감소한다(Pavana et al., 2015). 같은 맥락으로 도저(Dozer)의 정지작업은 넓은 지역의 흙을 신속하게 운반하고 개략적인 평탄화를 진행할 수 있다는 장점이 있는 반면에 정지작업의 정밀도가 떨어진다는 단점이 있다.

또한, 토공작업 현장에서 대규모 프로젝트를 제외하고는 관리자가 항상 작업지점에 머무르지 않기 때문에, 목표로 하는 시공기면에서 심각한 편차가 발생하고 재작업이 자주 일어난다. 이로 인하여 비용과 시간이 많이 낭비된다(Han et al., 2005). 따라서 생산성을 향상시키고 동시에 신뢰범위 내의 품질을 제공하는 것은 전체 프로젝트의 성공유무를 결정하는 중요한 기준이 되며 공정에 따른 유기적인 토공작업을 수행하는데 중요한 역할을 한다(Paradhananga & Teizer, 2013). 이때 유기적인 토공작업은 건설산업에 로봇 및 자동화 시스템을 도입하여 실현할 수 있다(John et al., 1994).

건설 자동화 시스템의 일환인 머신 가이드 시스템은 건설기계 조종원에게 계획도면, 현지반고 등의 토공정보를 3차원 형태로 제공한다. 건설기계 조종원은 3차원 기반의 토공정보를 이용하여 작업하고자 하는 위치의 절도 및 성토고, 비탈면 경사 등과 같은 속성 정보를 실시간으로 파악하고, 측량지원을 최소화한다.

또한, 레벨에 대한 측량이 불필요하기 때문에 머신 가이드 시스템은 작업의 유휴시간을 최소화하여 작업의 생산성 향상시킨다(Bradley et al., 1995). 뿐만 아니라 머신 가이드 시스템은 컴퓨터에 사전에 입력된 데이터를 바탕으로 건설장비의 블레이드를 자동 및 반자동으로 제어하기 때문에 건설장비를 제어할 때 발생하는 휴먼에러를 최소화하여 토공작업의 정확도를 높이도록 지원한다.

건설 기계장비의 시공 의존도가 날로 높아지고 있는 흐름 속에서 토공작업 공정을 단순화시키면서도 발주자의 요구를 충족시킬 수 있는 새로운 시스템의 개발 및 적용은 필수적이다. 머신 가이드 시스템은 기존 방식의 토공작업 프로세스가 가진 공정의 복잡화, 원가증가, 공기증가 그리고 생산성 감소 등의 문제점을 해결하고 동시에 높은 품질의 시공단면을 생성할 수 있을 것이다. 그러나 원천기술의 부족, 고가의 비용, 70% 이상이 산으로 둘러싸인 지리적 특성 등의 원인 때문에 머신 가이드 시스템은 도저에 적용하여 생산성 및 품질 측면의 성과를 분석한 연구는 거의 진행되지 않았다. 따라서 효율성과 성능을 동시에 갖춘 머신 가이드 시스템을 개발하여 국내 토공 현장에 적용하고, 분석하여 성능 향상을 분석하는 사례 연구가 필요하다.

1.2 연구목적 및 방법

머신 가이드 시스템 기술은 정부의 스마트 시공 도입정책에 따라 최근에서야 국내 현장에 시범적으로 도입하고 있다. 머신 가이드 시스템을 도입하여 현장 토공작업에 적용할 때는 토공작업의 특성에 맞추어 머신 가이드 시스템을 적절하게 적용하여 생산성뿐만 아니라 시방기준에 부합하는 품질을 확보할 수 있어야 한다. 여기서 생성되는 생산성 및 시공단면의 정밀도 향상은 도저 머신 가이드 시스템의 성능을 가늠하는 중요한 척도가 된다.

본 연구의 목적은 도저 특성에 따른 매커니즘을 분석하여 독자적으로 개발한 도저 머신 가이드 시스템을 토공 정지작업에 적용했을 때 기존 토공작업 방법에 대비하여 성능 향상을 생산성 및 품질 측면에서 분석하는 것이다.

연구 목적을 달성하기 위해 도저의 작업성과는 생산성 및 시공단면의 정확도 두 가지 관점에서 평가했다. 여기서 생산성은 단위시간에 도출되는 작업량을 나타내며, 정확도는 계획도면 상의 계획고에서 벗어나는 정도를 나타낸다. 이러한 관점에서 본 연구는 표준품셈에서 제시하는 생산성을 기준으로 시스템의 도입효과를 정량적으로 검증했으며, 실증 테스트에서 기존의 토공 프로세스와 분석하여 품질향상의 정도를 검토했다.

〈Fig. 1〉은 본 연구의 수행절차를 나타낸다. 도저의 블레이드를 제어하는 방식에 따라 정지작업 성과향상을 확인하기 위해 본 연구는 1) 토공작업 프로세스 분석, 2) 머신 가이드 시스템 프로토타이핑, 3) 도저 머신 가이드 시스템 적용을 위한 절차 수립, 4) 도저 굴삭작업에 대한 데이터 수집, 그리고 5) 데이터 비교분석 등 5단계로 진행했다.

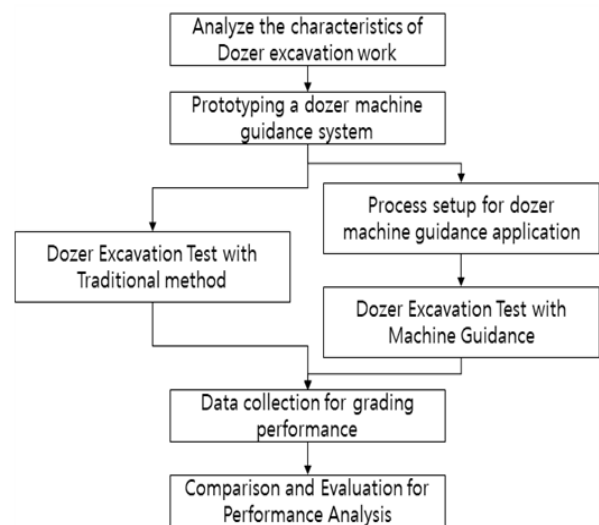


Fig. 1. Research Procedure

2. 관련연구

2.1 국내 외 머신 가이드런스 기술동향

미국, 일본, 유럽 등과 같은 선진국에서는 건설산업 생산성 증대를 위해 국가 주도 하에 머신 가이드런스 시스템을 건설현장에 정착시키고자 노력하고 있다. 또한 지역마다 차이는 있지만 입찰조건이나 기술요구사항에 머신 가이드런스 적용 의무화를 반영시킬 만큼 중요한 기술로 분류된다(Choi & Chung, 2017).

해외사례와 비교하여 국내 건설자동화 시스템은 주요 선진국의 40% 수준으로 평가되고 있다. 정부에서는 2025년까지 스마트 건설기술 활용기반을 구축하고, 2030년 건설자동화를 실현하는 가이드라인을 제시했다. 건설현장의 생산성을 50%이상 향상시키고, 사망 만인율을 1.66에서 1.0으로 줄이기 위한 건설 안전성 향상 전략을 수립했다. 또한, 발주기관에서는 건설현장의 스마트화 및 자동화를 활성화하기 위해 머신 가이드런스 시방 가이드라인을 설정하고, 시범사업을 시행하여 발생할 수 있는 문제점을 파악하고 해결방안을 모색하고 있다(Ministry of Land of KOREA, Infrastructure and Transport, 2018.).

미국의 경우 'Construction 2025'를 제시하여 건설 산업의 스마트화를 강조하고 있으며, 각 주별로 다소의 차이가 있긴 하지만 대다수의 주에서는 시방서에 명기하여 머신 가이드런스 시스템을 적용하도록 규정하고 있다(Choi & Chung, 2017). 특히 AASHTO에서는 머신 가이드런스 가이드 라인을 제공하여 제조 회사 및 정보를 공유하는 방법으로 민간의 자체기술개발을 유도하고 있다.

일본의 경우 '정보화 시공'이라는 이름으로 국토교통성에서 법제화 하여 운용하고 있으며, 건설장비 숙련인력 감소현상에 대비하여 2025년도까지 생산성 20% 향상을 목표로 건설과정에 3차원 정보 기반의 데이터 구축, ICT(Information and Communications Technologies) 등과 같은 신기술을 활용해 건설 자동화 및 무인화를 위한 정책을 국가 프로젝트에 부분적으로 적용하여 추진하고 있다. 실제로 2010년 북해도 도시중앙도로 노반공사에 3D 머신 컨트롤 시스템을 실제로 적용하여 시공일수 단축, 1일 노반공사 면적증가, 작업인원 감소 등의 효과를 검증했다(Construction general catalog, 2009.). 앞서 살펴본 바와 같이 각국에서는 건설현장의 효율을 증대시키기 위해 건설 자동화 시스템 도입에 관한 연구가 다양하게 진행되고 있다.

2.2 머신 가이드런스 연구사례

전통 방식의 토공작업은 계획된 시공기면을 정확하게 생성하기 위해 정보를 수집하고, 전달하는데 많은 시간이 소요

된다. 또한 작업자에게 토공작업에 관한 정확한 속성정보를 전달하여 토공작업을 지원 및 수행하는 기술은 매우 부족하다(Navon, 2005). 이에 비해 머신 가이드런스 시스템은 작업자에게 작업현장의 속성정보를 빠르고 정확하게 전달하여 시공 품질의 정확도를 향상시키고, 생산성을 증대시킬 수 있는 아주 효율적인 기술이다(Azar et al., 2015).

머신 가이드런스 시스템에 관한 선행 연구를 살펴보면 Sun et al. (2016)은 위치센서 GPS와 자세센서 IMU를 이용하여 블레이드의 Roll, Pitch, Yaw값을 추정해 내는 알고리즘을 제시했다. 추가적으로 IMU센서를 설치하여 GPS 측정 오차를 보정하는 방법을 사용함으로써 블레이드의 정확한 자세 추정의 필요성을 언급했다. 제시된 알고리즘 검증에 위해 제어 모듈과 센서모듈을 구성하여 도저 블레이드 하단의 위치 오차를 $\pm 5\text{cm}$ 이하로 측정했다(Lee, 2018).

하지만 많은 흙을 절토 및 운반하는 경우에는 도저에 부하가 발생하기 때문에 블레이드의 이론적 움직임과 실제 움직임이 다르게 나타나게 된다. Hayashi et al. (2013)은 도저의 이론적 이동속도와 실제 이동속도를 비교하여 도저에 걸리는 부하를 분석하는 매커니즘을 제시하고, 평탄화 작업을 위한 컨트롤 방식 및 굴삭, 운반을 위한 컨트롤 방식 두 가지로 제어할 수 있는 연구를 진행했다. 이를 이용하여 건설장비 운전기사는 토공 작업량에 따라서 최적의 조건으로 정지 작업을 진행할 수 있는 정보를 얻을 수 있으며 약 13%의 생산성 향상의 결과를 나타냈다.

Azar et al. (2015)은 기후나 토양조건에 따른 도저 머신 가이드런스 시스템의 생산성을 분석했고, 6%에서 34%까지 향상된다고 보고했다. 이는 강수에 따라 흙이 교란되어서 장비의 주행성이 변하기 때문이다.

현재 머신 가이드런스 시스템에 대한 연구는 건설 현장에서 필요에 의해 지속적으로 이루어지고 있다. 특히 Shovel류 건설기계에 적용한 연구는 이미 상용화 수준에 도달했으며, $\pm 2\text{cm}$ 오차범위의 정확도 및 30% 이상의 생산성 향상 효과를 나타낸다고 보고된다(Kim et al., 2018). 하지만 Shovel류 건설기계에 비해 도저에 관련된 연구는 크게 공개되어 있지 않다(Sun et al., 2016). 그마저도 품질관리 측면이 아닌 생산성과 같은 상대적인 척도에 중점을 둔 연구(Jonasson et al., 2002; Navon, 2005; Hayashi et al., 2013; Azar et al., 2015) 또는 시뮬레이션을 활용한 연구(Mostafa et al., 2012; Gary et al., 2013)가 대부분을 차지하고 있으며, 실제 토공현장에서 테스트 부지를 구축하여 진행된 연구는 거의 찾아보기 힘든 실정이다. 이러한 원인으로서는 도저는 주로 흙의 단거리 운반 작업 및 개략적인 평탄화 작업을 위한 공정에 사용되는 도저 장비운용의 특징에서 찾아볼 수 있다. 일반적으로 개략적인 평탄작업 이후 모터 그레이더와 같은 정밀 레벨링

을 위한 공정이 추가로 이루어지기 때문에 시공기면의 품질 측면 관점에서 진행된 도저 머신 가이드 시스템에 관한 연구는 거의 찾아보기 힘든 것으로 추측된다.

3. 도저 머신 가이드 시스템 적용 프로세스

3.1 전통적 방식의 토공작업 프로세스

전통적으로 진행되는 토공작업은 1) 토공측량, 2) 절토, 성토 및 운반 그리고 3) 검수측량의 순서에 따라서 진행된다. 토공작업을 위한 측량은 종단면도, 횡단면도 등의 2D 설계도면을 바탕으로 굴착경계면의 좌표를 확인하고, 기준틀과 말뚝을 사용하여 설계도면과 관련한 경사도, 깊이, 폭 등의 토공정보를 제공한다. 건설기계 운전기사는 육안으로 기준틀과 말뚝에 제시되어 있는 굴삭 정보를 수집하고 절토 또는 성토를 한다. 동시에 작업이 진행됨에 따라 측량인원이 계획도면에 도달했는지 지속적으로 확인하며 목표로 하는 시공기면을 생성한다. 즉, 토공작업과 측량작업은 기본적으로 함께 이루어진다.

토공작업이 완료된 후에는 발주자 및 감리단에서 검수측량을 하여 시공기면이 설계도에 따라서 작업이 완료되었는지를 확인하고, 재작업 여부를 결정한다. 검수측량은 광과기(Total Station), RTK-GPS (Real Time Kinematic-Global Positioning System) 등과 같은 정밀도 높은 측량기기를 이용한다.

3.2 머신 가이드 시스템 토공작업 프로세스

머신 가이드 시스템은 건설장비의 특성과 토공 작업방법에 따라 절토와 성토에 필요한 토공정보를 제공하고, 인력에 의한 시공 중 측량을 대체하는 기능을 가진다. 머신 가이드 시스템이 가지는 기능을 제공하기 위해서는 도저의 위치를 정확하게 추적(Tracking)하는 기술과 블레이드의 끝점을 계산하기 위한 센서 등의 하드웨어 개발, 기구학적 계산, 그리고 계산결과를 사용하여 토공정보를 보여주기 위한 소프트웨어 개발 등 융합기술이 필요하다.

머신 가이드 시스템에서 도저의 위치는 RTK-GPS 시스템을 사용하여 추적한다. GPS 데이터는 도저 블레이드에 부착된 2개의 GPS 수신 안테나와 RTK-GPS 기지국을 이용하여 수신한다.

도저에 부착되는 RTK-GPS는 수평 0.9cm, 수직 1.8cm 이내의 정확성을 가진다. 수신된 데이터를 기반으로 도저 블레이드 끝점의 X, Y, Z 좌표를 2cm 이내의 정확도로 추적할 수 있으며, 사용자 화면에서 실시간으로 이를 확인할 수 있다.

또한, 블레이드 끝점의 위치와 계획고의 상대적인 좌표를 계산하여 정지작업을 위한 굴삭위치, 굴삭깊이 등의 굴삭정

보를 실시간으로 제공한다. 도저를 조종하는 건설기계 운전기사는 머신 가이드 시스템이 제공하는 굴삭정보를 이용하여 별도의 측량도움 없이 정지작업을 수행할 수 있으므로 높은 정확도와 생산성을 동시에 확보할 수 있다.

4. CASE STUDY : 도저 정지작업 테스트

4.1 전통적 방식의 토공작업

머신 가이드 시스템의 도입효과를 검증하기에 앞서 양산시 00지구 단지 조성현장을 방문하여 전통적 방식의 도저 정지작업 테스트를 진행했으며 그 절차는 <Fig. 2>와 같다.

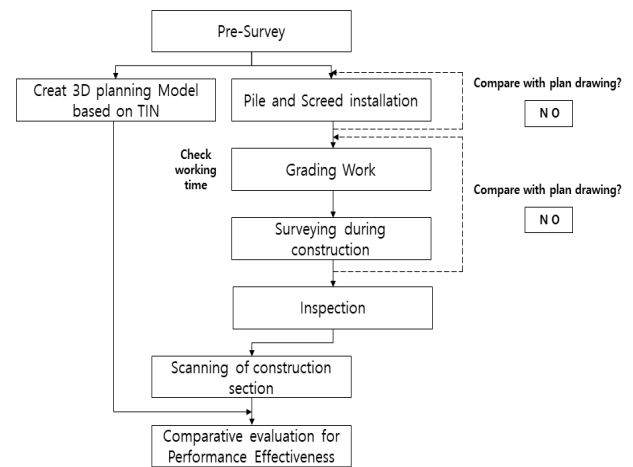


Fig. 2. Process for dozer grading test with a traditional method

사전 측량을 실시하여 계획도면에 대한 정보를 기준틀과 말뚝에 제시한 후 장비기사의 경험과 숙련도를 바탕으로 정지작업을 시행했다. 정지작업을 위해 사용된 장비는 캐터필러사의 D3C LGP를 사용했으며, 토양의 조건은 흐트러진 상태의 자갈 섞인 흙으로 나타났다(Fig. 3).



Fig. 3. General dozer grading work

4.2 머신 가이드 시스템 도저 정지작업

도저 머신 가이드 시스템의 성능평가를 진행하기 위해 실제 토공현장에서 테스트를 진행했으며, 최종 성능분석을 위한 단계적 절차는 <Fig. 4>와 같다.

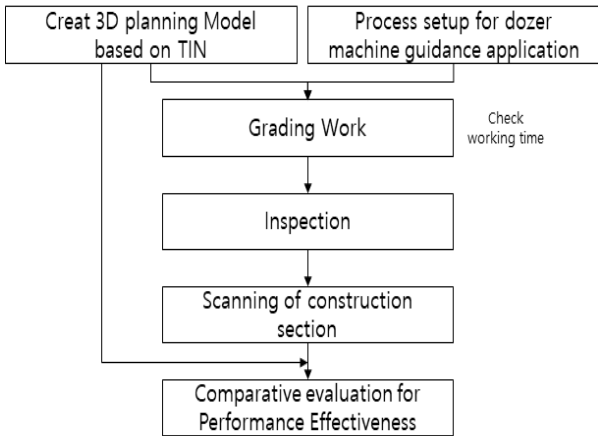


Fig. 4. Process for dozer grading test with a machine guidance system

머신 가이드 시스템의 객관적인 성능 분석을 위해 다음과 같은 노력을 통해 테스트 조건을 최대한 동일하게 설정했다(Fig. 5). 1) 도저 출력에 대한 영향을 배제하기 위해 전통적 방식과 동일한 기종의 캐터필러 D3C LGP 모델을 사용했으며, 2) 흙의 조건에 따른 영향을 배제하기 위해 두 가지 방식 모두 흐트러진 상태의 양호한 자갈 섞인 흙에서 진행했다. 여기서 함수비와 같이 세부적인 부분까지는 동일하게 설정하는데 한계가 있기 때문에 현장 기술자의 판단하에 건설공사 표준품셈에서 제시하는 기준을 근거로 토질조건을 동일하게 설정했다. 또한 3) 작업 난이도에 대한 영향을 배제하기 위해 설계도면 내 2~3%의 낮은 경사를 포함한 비교적 작업이 쉬운 구간으로 설정했으며, 4) 건설 장비 운전기사의 숙련도에 대한 영향을 배제하기 위해 운전기사는 20년 이상의 경력자를 투입했다.



Fig. 5. Machine guidance dozer grading work

4.2.1 3D 계획모델 생성

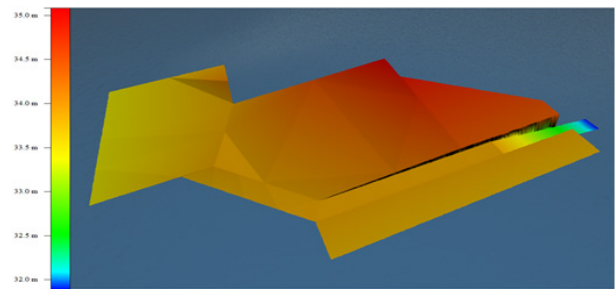
일반적으로 토공현장에서는 측량기사가 현장에 상주하여 2D 형태의 횡단면도, 종단면도를 바탕으로 절토와 성토 경계면의 계획고를 확인하고, 굴착길이, 경사도 등을 바탕으로 수작업으로 계산하여 경계면 내부의 계획고를 확인한다.

그러나 머신 가이드 시스템을 토공작업에 적용할 경우 기존의 일반적인 방식과는 다르게 측량을 대신하여 격자 형태의

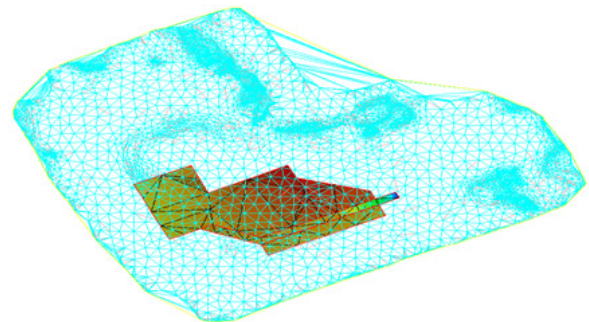
3D 계획도면을 사용하게 된다(Fig. 6(a)). 3차원 형태의 계획도면은 격자 형태로 구성된 TIN (Triangulated Irregular Network) 형식 기반의 DEM (Digital Elevation Model) 모델이다. 생성된 DEM 모델은 토공작업을 진행하고자 하는 대상지역의 모든 X, Y, Z 좌표정보를 포함하고 있다. 이는 기구학적으로 계산된 도저 블레이드 끝점의 위치좌표와 3D 계획도면과의 상대적 위치를 계산하여 절토 및 성토고와 같은 굴삭정보를 추출하기 위한 정보로 사용되며, 머신 가이드 시스템 적용하기 위한 가장 기본적인 데이터가 된다. 이를 이용하여 장비 운전기사는 경계면 내부 계획 단면의 특정 X, Y 지점에 대한 Z 좌표를 어느 지점에서나 확인할 수 있도록 하는 기능을 제공할 수 있다. 이러한 기능은 시공 후 최종적으로 완성되는 시공기면의 형상을 시각적으로 표현할 수 있어 관리자 및 건설기계 조종원의 작업 의사 결정에 큰 도움을 준다.

4.2.2 현지반고 모델 생성

정지작업 종료 후 작업구간에 대한 스캐닝을 진행했다(Fig. 6(b)). 얻어진 점군 데이터를 활용하여 3차원 현지반고 지형모델, 정사영상 등을 생성할 수 있으며, 3차원 계획도면과의 중첩을 바탕으로 적분을 이용하여 토공량을 산출해 낼 수 있다. 이는 측점과 측점사이의 간격을 기준으로 거리에 따른 보간법을 적용하여 토공량을 산출하는 기존 측량 방식과는 다르게 훨씬 많은 점군 데이터를 확보할 수 있기 때문에 보다 정확한 토공량을 구할 수 있다는 장점이 있다.



a) 3D planned model



b) 3D planned model matched with current terrain point clouds

Fig. 6. 3D planned model

5. 머신 가이드 성능 분석

5.1 생산성 비교 분석

5.1.1 표준품셈에 따른 도저 생산성 분석

머신 가이드 시스템의 장착 유무에 따른 토공작업 생산성 분석에 앞서 건설공사 표준품셈(KICT, 2019)에서 제시한 계산식을 근거로 예상되는 생산성을 도출했다(Eq. 1; Eq. 2). 각 계수의 값은 테스트 현장과 도저 장비의 제원을 고려하여 결정했다(Table 1). 삽날의 용량(q)의 경우 도저의 급수 및 종별, 토사 운반거리를 고려하여 적용했으며, 체적환산계수(f)값은 현장에서 제공받은 값을 사용했다. 또한 토양의 조건을 고려하여 작업효율(E), 1회 사이클시간(Cm)을 설정했다. 위 값들을 사용하여 산출된 단위 시간당 작업량은 61.39m³/hr이다.

$$Q = \frac{60 \times q \times f \times E}{C_m}, \quad q = q' \times e \quad (1)$$

$$C_m = \frac{L}{V_1} + \frac{L}{V_2} + t \quad (2)$$

Table 1. Factor of capacity of dozer according to Korean Standard

Division	Value	Description
Blade capacity without distance(q')	1.1	D3C LGP (7ton, Caterpillar tire)
Carry distance coefficient(e)	0.96	Carrying distance (10m-20m)
Volume conversion factor(f)	1.2	Disheveled & graveled
Work efficiency(E)	0.65	Disheveled & graveled parallel grading work
Cycle time(min)	0.8049	L:20m, V ₁ :67(m/s), V ₂ :78(m/s), t:0.25(min)

5.1.2 Case study를 통한 생산성 분석

앞서 언급한 바와 같이 머신 가이드 시스템은 위치에 따른 굴삭 정보를 실시간으로 확인할 수 있기 때문에 별도의 측량 지원없이 균등한 시공기면을 생성할 수 있다. 따라서 기존 방식에 비해 높은 생산성을 확보할 수 있다는 장점이 있다. 객관적인 생산성 분석을 위해 현장 테스트가 진행되는 동안 소요된 시간을 1) 직접작업시간, 2) 간접작업시간, 3) 비생산시간으로 구분하여 측정했으며(Table 2), 비생산 시간은 생산성 분석에 영향을 미치지 않기 때문에 제외했다.

Table 2. Classification according to task

Division	Contents
Direct Time	Work, rework
Idle Time	Survey, pile & screed Installation,
Indirect Time	Work instruction, waiting for work

소요된 시간을 확인한 결과 머신 가이드 시스템을 적용했을 때 소요된 시간은 374초이다. 이에 비해 전통적 방식의 경우 총 1,247초가 소요되었으며, 실제 표토 정지작업에 소요된 시간은 527초, 사전측량 483초, 기준틀 및 말뚝을 설치하기 위해 소요된 시간은 237초이다.

생산성 분석 결과 전통적인 방식의 경우 단위 시간당 작업량은 81.95m³/hr가 도출되었으며, 머신 가이드 시스템의 경우 120.13m³/hr로써 전통적 방식 대비 46.59%가 향상되었다. 이는 앞서 산출한 건설공사 표준품셈 대비 95.68% 향상되었음을 확인했으며, 각각에 대한 측정값은 아래와 같다(Table 3).

Table 3. Comparative evaluation of productivity

Method	Direct Time		Indirect Time		Volume (m ³)	Productivity (m ³ /hr)	Improvement (%)
	Grading work (s)	Survey (s)	Pile & screed installation (s)				
Korean standard	-					61.39	74.91
Traditional method	527	483	237		28.39	81.95	100
Machine guidance	374	0	0		12.48	120.13	146.59

5.2 정확도 비교 분석

도저 머신 가이드 시스템 정지작업의 정확도를 분석하기 위해 전통적 방식 및 머신 가이드 시스템 방식의 두 가지 작업 후 시공기면에 대해 스캐닝을 진행했다. 대상 지역에 대하여 600

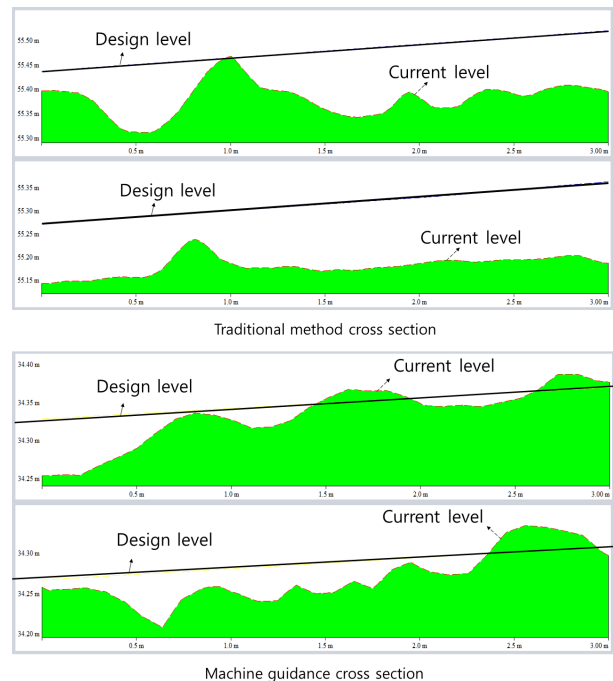


Fig. 7. Cross section view of the dozer grading area

만개 이상의 점군 데이터를 획득했으며, 이를 활용하여 이루어진 작업 후 생성된 시공기면과 계획도면을 비교 및 분석했다. <Fig. 7>은 생성된 시공기면과 3차원 계획모형을 중첩시킨 후 도저 정지작업 구간에 대한 횡단면의 일부를 나타낸 모습이다.

Surface-Surface Method를 사용하여 계획도면 대비 단위 면적당 토공량 오차를 도출해 냈으며, 이를 바탕으로 시공기면의 품질을 평가할 수 있다. 확인된 성토량 및 절토량 모두 생성된 시공기면과 계획도면과의 오차로 볼 수 있기 때문에 절대값으로 환산하여 분석했다<Table 4>.

Table 4. Result of quality of volume and area

Method	Area (m ²)	Cut (m ³)	Fill (m ³)	Difference of volume(m ³)	Quality of surface (m ² /m ³)	Improvement (%)
Traditional method	247.45	1.17	27.22	28.39	0.115	100
Machine guidance	203.74	1.30	11.18	12.48	0.061	146.96

시공기면과 계획도면과의 작업 면적 대비 토공량 차이를 분석한 결과 머신 가이드를 적용한 경우 계획된 굴착고를 맞추기 위해 추가로 성토해야하는 토공량 11.18m³, 절토해야 하는 토공량은 1.30m³로써 총 12.48m³의 토공량 차이가 발생했다. 머신 가이드를 사용하여 정지작업을 했을 때, 203.74m²에 대한 단위 면적당 토공량 오차는 0.061m³/m²으로 나타났다.

동일한 방식으로 전통적인 도저 정지작업에 대한 시공기면을 분석했을 때, 추가로 성토해야하는 토공량 27.22m³, 절토해야 하는 토공량은 1.17m³로써 총 28.39m³의 토공량 차이가 발생했다. 전통적인 도저 정지작업의 면적 247.45m²에 대한 단위 면적당 토공량 오차는 0.115m³/m²으로 나타났다.

분석한 결과를 바탕으로 토공 정지작업에 머신 가이드 시스템을 사용하면 전통적인 도저 정지작업에 비하여 전체 작업구간에 대해 평균적으로 5.4cm의 오차를 줄일 수 있으며, 전체 시공기면에 대하여 46.96% 품질을 향상시킬 수 있다는 것을 확인했다.

6. 결론

머신 가이드 시스템의 현장 적용성을 높이기 위해서는 토공작업 중 토공작업 시간단축, 비용절감 등의 효과뿐만 아니라 시방서에서 요구하는 시공 정밀도 및 높은 생산성을 동시에 확보할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 도저 머신 가이드 시스템을 실제 토공현장에 적용했을 때 생산성

및 정확도를 정량적으로 분석하여 시스템의 도입효과를 검증하기 위해 수행됐다. 이러한 관점에서 도저 머신 가이드 현장 테스트 결과를 진행하며 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 생산성 분석을 위해 테스트를 진행하는 동안 소요된 시간을 분석한 결과 건설공사 표준품셈에서 제시한 시간당 작업 기준량에 대비하여 95.68%가 향상되었음을 확인했다. 또한, 전통적 도저굴삭 방식에 대비하여 46.59%의 생산성 향상을 확인했다. 도저 머신 가이드 시스템은 사전 측량, 시공 중 측량, 재작업 등에 소요되는 시간에 줄여 생산성을 획기적으로 증대시킬 수 있다. 선정된 도저 굴삭 테스트 부지에 비해 실제 토공작업이 진행되는 현장은 매우 넓은 점을 감안한다면 실제 토공현장에서의 전체 작업시간 대비 직접작업시간, 간접작업시간 및 비생산시간의 비율은 현장에 따라서 다소 차이가 발생할 수 있다. 측량 범위가 넓고, 시공 난이도가 높은 현장일수록 생산성은 더욱 증가할 것이라고 판단되며 일반화된 생산성 향상도를 도출하기 위해서는 다양한 현장에서의 사례연구가 추가적으로 진행되어야 할 것이다.

2) 실제 테스트 결과 도저 머신 가이드 시스템 적용 시 토공 정지작업에서 전통적 방식 대비 46.96%의 정확도 향상을 이루어 냈다. 이는 측량 단계에서 발생하는 휴먼에러를 소거시킬 수 있기 때문이라고 유추할 수 있다. 또한, 실시간으로 제공되는 굴삭정보를 바탕으로 건설 장비 조종원이 현재 시공된 정도를 쉽게 파악하고 오시공이 일어난 부분에 대해 즉각적으로 재작업을 진행할 수 있기 때문에 더욱 정확하고 균등한 시공이 가능한 것으로 판단된다. 본 연구에서 실시한 도저 머신 가이드 현장 테스트는 흐트러진 상태의 자갈 섞인 토양조건에서 진행됐다. 토양조건이 블레이드 작동에 영향을 줄 수 있다는 점을 고려하면 흐트러진 상태의 자갈 섞인 토양이 아니라면 다른 결과를 가질 수 있다는 점을 시사한다.

본 연구를 통해 머신 가이드 기술을 도저에 적용했을 때 생산성 및 품질 측면에서 만족할 만한 성능향상을 나타낸다는 것을 확인했다. 본 사례분석 연구에서 얻은 경험과 교훈은 머신 가이드 시스템을 토공현장에 적용하기 위한 새로운 프로세스를 수립하고 추후 모터 그레이더, 진동롤러 등과 같은 다양한 건설장비에서의 스마트 시공을 위한 연구의 사전정보로 활용될 수 있을 것이다. 향후 연구에서는 다양한 건설장비 및 토공현장에서 실증 테스트를 꾸준히 진행하여 머신 가이드 시스템 적용에 따른 성능분석에 대한 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술 연구사업의 연구비지원(17SCIPB07969004000000)에 의해서 수행되었습니다.

References

- Azar, E.R., Agnew, G., and Parker, A. (2015). "EFFECTIVENESS OF AUTOMATED MACHINE GUIDENCE TECHNOLOGY IN PRODUCTIVITY IMPROVEMENT: CASE STUDY." *Proceeding of the International Construction Specialty Conference*, Canadian Society for Civil Engineering, CSCE, 5th : 2015, Vancouver, B. C.
- Bradley, D.A., and Seward, D.W. (1995). "Developing real-time autonomous excavation-the LUCIE story." *Proceedings of the 34th IEEE Conference on Decision and Control*, New orleans, LA, USA, 3, pp. 3028-3033.
- Donnelly, G. (2017). "Infrastructure spending could be hindered by a shortage of skilled labor." *Careers Amarecia's Infrastructure Fortune.*, <<https://fortune.com/2017/06/19/infrastructure-spending-could/>>.
- Choi, P.H., and Chung, G.Y. (2017). "Smart Construction with Automated Machine Control System." *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, 62(9), pp. 77-79.
- Construction General Catalog (2009). IT automation construction catalog for TOPCON Corporation, <https://www.sokkia.co.kr/html/board.php?template=bizdemo44440&com_board_basic=file_download&com_board_id=15&com_board_idx=12&com_board_file_seq=0>.
- Gary, M.B., Scott, G.O., and Graham, E.A. (2013). "AUTONOMOUS ROBOTIC DOZING FOR RAPID MATERIAL REMOVAL." *Proceedings of the 30th ISARC*, Montreal, Canada.
- Han, S.W., Lee, S.Y., and Halpin, D.W. (2005). "Productivity Evaluation of the Conventional and GPS-Based Earthmoving Systems Using Construction Simulation." *Construction Research Congress 2005*, ASCE, San diego, California, United States.
- Hayashi, K., Shimada, K., Ishibashi, E., Okamoto, K., and Yenezawa, Y. (2013). "Development of D61EXi/PXi-23 Bulldozer with automatic control system of work equipment." *Komatsu Technical Reprot*, 59(166).
- John, G.E., and Alexander, H.S. (1994). "AUTOMATION AND ROBOTICS OPPORTUNITIES : CONSTRUCTION VERSUS MANUFACTURING." *Journal of Construction Engineering and Management*, ASCE, 120(2), pp. 443-452.
- Jonasson, S., Dunston, P.S., Ahmed, K., and Hamilton, J. (2002). "Factors in Productivity and Unit Cost for Advanced Machine Guidance." *Journal of Automation in Construction*, 128(5), pp. 367-374.
- Kim, W.B., Park, S.I., Lee, R.H., and Seo, J.W. (2018). "A Case Study on the Application of Machine Guidance in Construction Field." *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, 38(5), pp. 721-731.
- Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (2017). 2017 Standard Production Unit System.
- Lee, B.N., Woo, S.K., Chang, C.K., and Koo, B.S. (2006). "Using Next Generation Technologies to Resolve Construction Labor Shortage Problems." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, 26(6D), pp. 969-9740.
- Lee, Y.S. (2018). "Development of Automatic bulldozer Blade control System based on the Track Slip Ratio." Ph.D thesis, Hanyang Univ.
- Ministry of the Land, Infrastructure and Transport of KOREA (2014). Plan for Smart Construction System based on Operation of Carbon Reduction Type Construction Equipment.
- Moon, S.W. (2018). "Effectiveness of a Business Model for Adopting a Construction Machine Guidance System." *Journal of KIBIM*, 8(1), pp. 24-32.
- Mostafa, M.S., Hesham, A.K., and Mohamed, A.H. (2012). "Simulation Analysis for Productivity and Unit Cost by Implementing GPS Machine Guidance in Road Construction Operation in Egypt." *Proceedings of International Conference on Sustainable Design, Engineering, and Construction 2012*, ASCE, Texas, USA.
- Navon, R. (2005). "Automated project performance control of construction projecets." *Journal of Automation in Construction*, 14(4), pp. 467-476.
- Paradhananga, N., and Teizer, J. (2013). "Automatic spatio-temporal analysis of construction site equipment operations using GPS data." *Journal of Automation in Construction*, 29, pp. 107-122.
- Pavana, K.R.V., David, J.W., and Charles, T.J. (2015). "Impacts of Automated Machine Guidance on Earthwork Operations." *Proceeding of the 2015 Conference on*

Autonomous and Robotic Construction of Infrastructure,
AMES, Iowa, pp. 207-216.

Sun, D.I., Han, C.S., Lee, Y.S., Kim, S.H., and Lee, S.H. (2016).
“A study on Sensor Fusion Algorithm for Dozer’s Blade
position and Attitude Estimation.” *Proceedings of the
2016 KSPE Spring Conference*, JeJu, KOREA.

요약 : 도저는 고가의 건설장비로서 건설토공현장 정지작업에서 커다란 영향을 가져온다. 이러한 중요성에 따라서 머신 가이드스 시스템이 도저에 적용되어 토공 정지작업의 성과를 올리기 위한 노력이 진행되고 있다. 머신 가이드스 시스템은 정지작업 시 장비기사에 게 정지작업에 필요한 굴삭깊이, 경사각도 등 정보를 제공하며, 장비기사는 제공되는 정보를 이용하여 측량기사의 도움을 최소화 하면서 정지작업을 진행할 수 있다. 이와 같이 머신 가이드스 시스템은 장비기사가 계획도면 상의 계획고에 맞추어 정지작업을 수행할 수 있도록 돕는 기능을 제공한다. 본 논문의 목적은 머신 가이드스 시스템이 기존 토공 정지작업과 비교하여 토공 정지작업에 가져오는 성과향상을 분석하는 것이다. 성과분석은 1) 생산성과 2) 정확도 2가지 관점에서 수행됐다. 여기서 생산성은 단위시간에 도출되는 작업량을 나타내며, 정확도는 계획도면에서 요구하는 계획고에서 벗어나는 정도를 나타낸다. 본 연구목적을 달성하기 위해 도저 머신 가이드스 시스템을 테스트 현장에 적용했으며, 적용결과 머신 가이드스 시스템이 전통적인 방법과 비교하여 생산성의 경우 46.59%, 정확도의 경우 46.96%만큼 증가되는 성과향상을 확인할 수 있었다.

키워드 : 건설장비, 도저, 토공작업, 정지작업, 머신 가이드스 시스템, 생산성 향상, 정밀도 향상
