

## 토공사 건설자동화기계 시범적용을 통한 생산성 평가



**이용세**  
 (주)대우건설 기술연구원 디지털건설팀 책임연구원, yongsei.lee@daewooenc.com

### 1. 서론

#### 1.1 연구의 목적 및 필요성

1995~2014년 기준 건설산업의 연평균 성장률은 1%였다. 이 기간동안의 전체 경제성장률은 2.7%였고, 제조업 분야의 성장률은 3.6%로 나타났다. 건설산업의 부진원인으로는 타 산업에 비해 디지털화의 수준이 낮기 때문으로 분석되었다. 또한 노동시간당 부가가치 창출액으로 비교한 한국의 생산성은 13달러로, 선진국 대비 낮은 부가가치 창출능력을 보여주었다. 이러한 낮은 생산성 증대방안으로는 디지털 건설 기술의 강화를 꼽을 수 있으며, 이는 생산성을 14~15% 증대할 수 있는 것으로 보고되었다. 글로벌 산업전반의 디지털 기술 필요성을 바탕으로, 건설현장에서 가장 효과적으로 결과물을 보여줄 수 있고, 공기 및 원가절감에 큰 효과를 거둘 수 있으며, 적용시 효율도 좋을 것으로 생각되는 분야 중의 하나가 바로 토공사에 대한 건설자동화이다. 기존 토공사 시공방법의 문제점으로는 측량등으로 작업시간 손실 발생, 안전사고 우려 및 비용 증가 발생, 시공품질저하 및 공사기간의 지연 발생 등으로 압축할 수 있다. 이러한 문제점을 개선 및 해결하기 위해서 본 연구를 시작하였으며, 생산성 향상효과를 기대할 수 있다.

#### 1) 연구개발의 내용 및 범위

연구개발의 내용으로는 기존 토공작업과 건설자동화기계(MG장비) 토공작업을 실제 시범현장에 적용하고, 적용결과를 비교를 통해 생산성 효율향상을 분석, 제시하도록 한다.

### 2. 토공사 건설자동화기계 시범적용결과

#### 2.1 토공사 건설자동화기계 시범적용 현장테스트

##### 1) 머신 가이드스 적용방법

건설자동화기계 시범적용 현장테스트에서 머신 가이드스는 RTK-GNSS(Real Time Kinematic-Global Navigation Satellite System이하, GNSS라 한다) 기반의 시스템을 적용하였다. GNSS기반 시스템은 고정된 위치에 있는 GNSS 기준국에서 장비에 위치한 GNSS안테나로 X,Y,Z 좌표의 보정값을 전송하여 토공작업 시 현장에 투입된 건설장비의 위치를 실시간으로 추적한다. 건설장비의 위치 좌표값은 대상현장의 측량기준점(CP, Control Point)을 이용하여 지역좌표화(Localization)를 실시하여 현장에서 사용 중인 기준 GNSS 좌표와 일치함을 확인하였다. GNSS 기반의 환경에서 수신된 좌표값을 기준으로 건설장비에 부착된 IMU센서를 이용하여 버킷끝 점의 X,Y,Z 좌표를 추적한다.

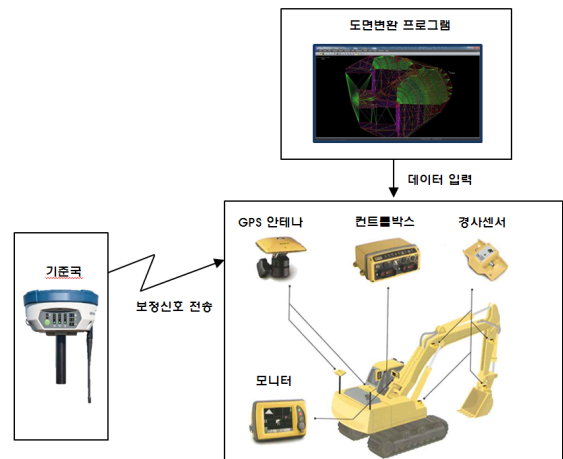


그림 1. MG장비의 구성

이후 캘리브레이션을 실시하는데, 캘리브레이션에는 지역 좌표화(Localization)와 센서 캘리브레이션이 있다. 지역좌표화란 GNSS좌표를 로컬 작업 현장 좌표와 일치시키는 프로세스로 이미 알고 있는 측량기준점(CP, Control Point)의 X,Y,Z 위치에 GNSS의 경위도 좌표를 측정하여 두 개의 좌표시스템을 맞추는 작업을 의미한다.

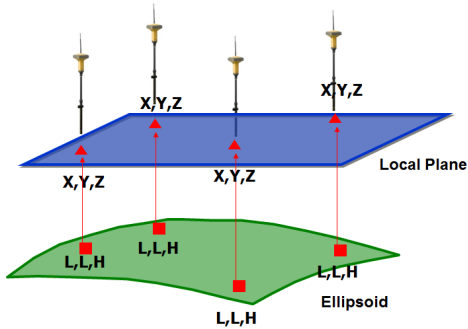


그림 2. 지역좌표화 개념도

지역좌표화 이후 아래와 같이 경사센서 및 GNSS안테나를 장착하고 각 부재의 길이값과 장착된 경사센서에 대한 캘리브레이션을 진행한다.

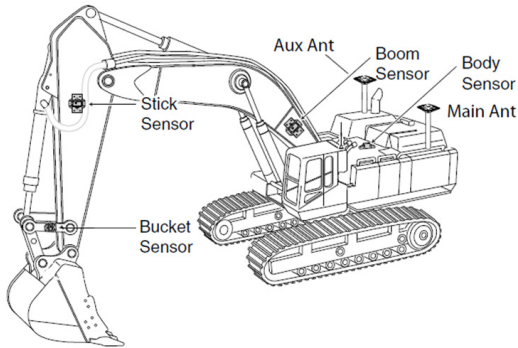


그림 3. MG장비 센서 장착위치

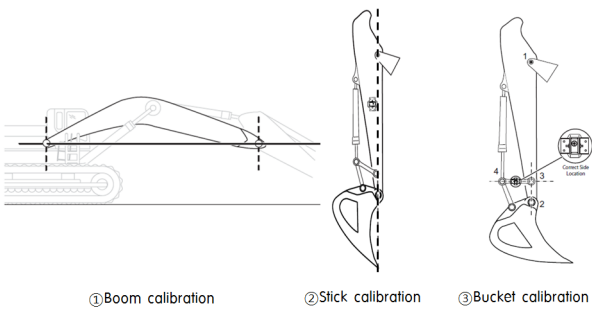
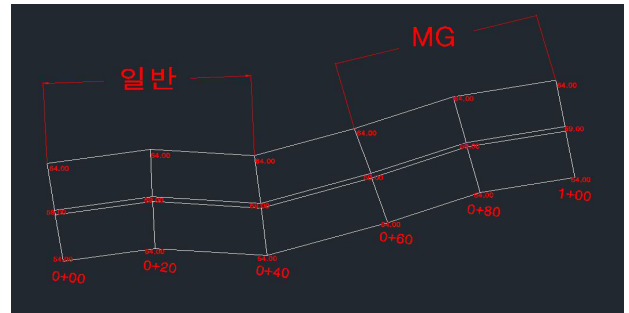


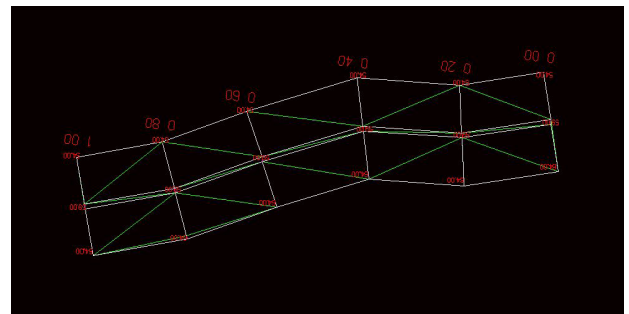
그림 4. 센서 캘리브레이션

2) 3D설계도 작성

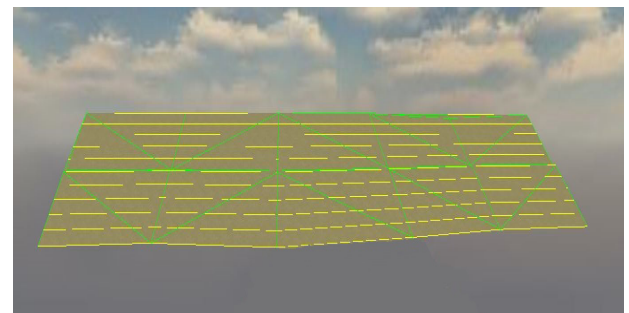
머신 가이드를 적용하기 위해서는 3D설계가 바탕이 되어야 한다. 일반적으로 건설현장의 설계도면은 2D도면으로 제작되며, 본 시범현장도 마찬가지 상황이었다. 본 연구 수행을 위해서 현장의 설계도면을 분석하여 3D도면의 기본이 되는 시공계획고에 대한 데이터를 수집하고, 설계도면간의 오류사항을 확인한 후, 2D도면의 3D도면 변환을 실시하였다. 설계도면 분석은 공사계획 평면도와 횡단면도, 종단면도를 참조하여 변환을 수행하였다. 3D설계도는 머신 가이드스에 입력해서 3D지형을 표현하는 기능을 가지며, 2D설계도면의 선형에 레벨을 부여하여 변환한다. 본 연구에서 3D설계도는 사면절토와 관로터파기 2가지 토공작업을 대상으로 작성하였다.



(a) 2D도면



(b) 도면변환



(c) 3D시뮬레이션

그림 5. 3D설계도 제작과정

3) 생산성 검증항목 및 분석

시범현장 2군데에서 적용한 생산성은 사면절토와 관로 터파기 등 각 구간별 토공량과 투입시간을 고려하여 분석하였으며, 분석항목은 투입자원, 작업횟수, 연료소모량이다.

• 투입자원에 대한 생산성 비교분석

투입자원과 토공작업량을 기준으로 일반구간과 머신 가이던스 구간에 대한 생산성을 비교 검토하였다. 비교 결과, 머신 가이던스시스템을 적용함으로써 사면절토구간의 경우 57.3%, 관로 터파기구간은 180.4% 생산성이 향상되었음을 확인할 수 있었다.

표 1. 사면절토구간에 대한 투입자원 생산성 비교

항목	작업방법		비고
	일반	머신 가이던스	
투입시간 (Hour)	14.15 hr	9.13 hr	
토공작업량 (M³)	1,140 m³	1,157 m³	
생산성 (M³/Hour)	80.57 m³/hr	126.73 m³/hr	생산성 57.29% 증가

표 2. 관로터파기구간에 대한 투입자원 생산성 비교

항목	작업방법		비고
	일반	머신 가이던스	
투입시간 (Hour)	4.43 hr	1.58 hr	
토공작업량 (M³)	166.73 m³	166.73 m³	
생산성 (M³/Hour)	37.64 m³/hr	105.53 m³/hr	생산성 180.37% 증가

• 작업횟수에 대한 생산성 비교분석

작업횟수와 토공작업량을 기준으로 일반구간과 머신 가이던스 구간에 대한 생산성을 비교 검토하였다. 비교 결과, 머신 가이던스시스템을 적용함으로써 사면절토구간의 경우 75.9%, 관로 터파기구간은 50.0% 생산성이 향상되었음을 확인할 수 있었다.

표 3. 사면절토구간에 대한 작업횟수 생산성 비교

항목	작업방법		비고
	일반	머신 가이던스	
토공작업량 (M3)	1,140 m³	1,157 m³	
작업횟수	3,248 회	1,874 회	
생산성 (M3/회)	0.35 m³/회	0.61 m³/회	생산성 75.90% 증가

표 4. 관로터파기구간에 대한 작업횟수 생산성 비교

항목	작업방법		비고
	일반	머신 가이던스	
토공작업량 (M³)	166.73 m³	166.73 m³	
작업횟수	219 회	146 회	
생산성 (M³/회)	0.76 m³/회	1.14 m³/회	생산성 50.00% 증가

• 연료소모량에 대한 생산성 비교분석

연료소모량과 토공작업량을 기준으로 일반구간과 머신 가이던스 구간에 대한 생산성을 비교 검토하였다. 비교 결과, 머신 가이던스시스템을 적용함으로써 사면절토구간의 경우 85.3%, 관로 터파기구간은 58.6% 생산성이 향상되었음을 확인할 수 있었다.

표 5. 사면절토구간에 대한 연료소모량 생산성 비교

항목	작업방법		비고
	일반	머신 가이던스	
토공작업량 (M³)	1,140 m³	1,157 m³	
연료소모량 (ℓ)	358.0 ℓ	196.1 ℓ	
생산성 (M³/ℓ)	3.18 m³/ℓ	5.90m³/ℓ	생산성 85.28% 증가

표 6. 관로터파기구간에 대한 작업횟수 생산성 비교

항목	작업방법		비고
	일반	머신 가이던스	
토공작업량 (M³)	166.73 m³	166.73 m³	
연료소모량 (ℓ)	39.8 ℓ	25.1 ℓ	
생산성 (M³/ℓ)	4.19 m³/ℓ	6.64 m³/ℓ	생산성 58.57% 증가

4) 품질분석

품질관리는 일반시공방법과 머신 가이던스 시공방법이 토공계획도에 따라서 정확히 토공작업을 수행하는가를 비교 검토하였다. 품질분석을 위해서 각 구간별 좌표를 설정하고, RTK-GNSS를 이용하여 검측하였다. 사면절토 구간 시공현장에는 일반방법 작업구간 30개 point, 머신 가이던스 방법 작업구간 30개 point, 총 60개 point에 대해 정밀도를 검증하고 오차를 분석하였다. 관로 터파기 구간 시공현장에는 일반방법 작업구간 10개 point, 머신 가이던스 방법 작업구간 10개 point, 총 20개 point에 대해 정밀도를 검증하고 오차를 분석하였다.

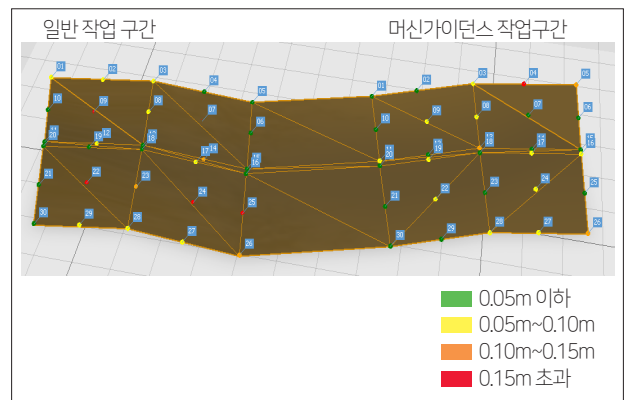


그림 6. 사면절토구간에 대한 구간별 검측좌표 위치

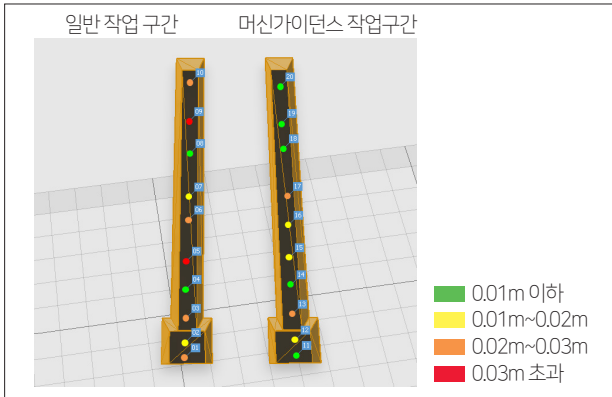


그림 7. 관로터파기구간에 대한 구간별 검측좌표 위치

• 계획고 대비 시공오차

계획고 대비 시공오차는 일반방법과 머신 가이드스 방법을 적용했을 때 오차를 비교하고, 머신 가이드스 적용시 시공품질 향상효과를 검토하였다. RTK-GNSS를 이용하여 검측한 후, 검측 결과값을 계획고와 비교 분석하였다. 사면절토구간과 관로터파기 전구간에서 일반 작업구간 대비 머신 가이드스 방법이 정밀시공 측면에서 우수한 결과가 나타났다.

표 7. 사면절토구간 Elevation 검측 (단위 : m)

구분	일반방법 작업구간					머신가이드스방법 작업구간				
	설계좌표(m)			측정좌표(m)	오차(m)	설계좌표(m)			측정좌표(m)	오차(m)
	X	Y	Z			X	Y	Z		
1	433741.665	198389.353	63.987	64.080	0.093	433734.270	198327.470	63.970	63.964	-0.006
2	433740.165	198379.317	63.978	63.878	-0.100	433731.270	198319.180	63.983	64.020	0.037
3	433738.662	198369.602	63.994	63.910	-0.084	433727.500	198308.670	63.984	63.910	-0.074
4	433739.359	198359.239	63.998	64.037	0.039	433725.830	198298.980	63.960	64.151	0.191
5	433739.999	198349.607	64.000	63.975	-0.025	433724.030	198289.040	63.979	64.082	0.103
6	433744.647	198348.942	61.696	61.682	-0.014	433729.040	198288.140	61.449	61.401	-0.048
7	433743.540	198358.619	61.946	61.529	-0.417	433730.400	198297.600	61.604	61.557	-0.047
8	433743.468	198369.373	61.618	61.558	-0.060	433732.540	198307.320	61.400	61.458	0.058
9	433745.188	198379.883	61.552	61.215	-0.337	433735.530	198316.590	61.555	61.501	-0.054
10	433746.617	198388.609	61.499	61.460	-0.039	433739.100	198325.880	61.444	61.425	-0.019
11	433751.533	198387.870	59.039	59.055	0.016	433743.670	198324.390	59.055	59.151	0.096
12	433749.996	198377.942	59.045	58.958	-0.087	433740.490	198315.600	59.069	59.049	-0.020
13	433748.710	198369.186	59.039	59.022	-0.017	433737.200	198306.150	59.039	59.161	0.122
14	433749.496	198356.993	59.047	58.900	-0.147	433735.460	198296.380	59.039	59.001	-0.038
15	433750.089	198348.521	59.040	59.020	-0.020	433733.830	198287.250	59.039	59.045	0.006
16	433751.047	198348.462	59.001	58.964	-0.037	433734.810	198287.180	58.998	59.065	0.067
17	433750.365	198358.343	59.001	58.933	-0.068	433736.410	198296.380	59.001	59.057	0.056
18	433749.587	198369.105	59.003	58.994	-0.009	433738.150	198306.010	58.994	59.025	0.031
19	433751.041	198379.149	59.006	58.978	-0.028	433741.550	198315.420	58.984	59.044	0.060
20	433752.467	198387.711	59.001	59.009	0.008	433744.640	198324.240	59.001	59.030	0.029
21	433758.603	198386.767	56.525	56.564	0.039	433750.700	198322.270	56.464	56.440	-0.024
22	433756.554	198377.999	56.810	56.629	-0.181	433747.410	198313.290	56.490	56.422	-0.068
23	433755.531	198368.698	56.668	56.524	-0.144	433744.280	198304.370	56.465	56.444	-0.021
24	433756.561	198357.377	56.565	56.325	-0.240	433741.980	198295.100	56.725	56.779	0.054
25	433757.082	198347.832	56.616	56.397	-0.219	433740.880	198286.070	56.528	56.541	0.013
26	433763.557	198346.960	54.049	54.152	0.103	433747.030	198285.040	54.031	54.145	0.114
27	433762.950	198357.853	54.002	54.065	0.063	433748.590	198293.980	54.041	54.112	0.071
28	433762.183	198368.501	54.018	54.110	0.092	433750.229	198302.765	54.008	53.953	-0.055
29	433763.281	198377.486	54.117	54.168	0.051	433753.310	198311.410	54.015	54.040	0.025
30	433764.589	198385.840	54.100	54.130	0.030	433756.500	198320.380	54.025	54.070	0.045

구분	정밀도	오차 합계
13	0.05m 이하	0.025
9	0.05m~0.10m	0.078
3	0.10m~0.15m	0.131
5	0.15m 초과	0.279
point 당 평균오차		0.094

구분	정밀도	오차 합계
15	0.05m 이하	0.027
11	0.05m~0.10m	0.065
3	0.10m~0.15m	0.113
1	0.15m 초과	0.191
point 당 평균오차		0.055

표 8. 관로터파기구간 Elevation 검측 (단위 : m)

구분	일반방법 작업구간					머신가이던스방법 작업구간				
	설계좌표(m)			측정좌표 (m)	오차 (m)	설계좌표(m)			측정좌표 (m)	오차 (m)
	X	Y	Z			X	Y	Z		
1/11	167458.856	371102.139	65.70	65.67	-0.03	167457.307	371090.765	65.70	65.71	0.01
2/12	167460.582	371101.839	65.70	65.68	-0.02	167459.028	371090.534	65.70	65.68	-0.02
3/13	167463.304	371101.439	65.80	65.83	0.03	167462.033	371090.261	65.80	65.83	0.03
4/14	167466.777	371100.896	65.80	65.79	-0.01	167465.559	371089.695	65.80	65.81	0.01
5/15	167470.215	371100.390	65.80	65.85	0.05	167468.959	371089.192	65.80	65.78	-0.02
6/16	167475.607	371099.377	65.80	65.77	-0.03	167473.136	371088.478	65.80	65.78	-0.02
7/17	167478.682	371098.944	65.80	65.78	-0.02	167477.046	371087.790	65.80	65.77	-0.03
8/18	167484.843	371097.894	65.80	65.79	-0.01	167483.796	371086.916	65.80	65.80	0.00
9/19	167489.619	371097.315	65.80	65.76	-0.04	167487.553	371086.387	65.80	65.81	0.01
10/20	167495.590	371096.339	65.80	65.83	0.03	167493.277	371085.482	65.80	65.81	0.01

구분	정밀도	오차 합계
2	0.01m~0.02m	0.020
4	0.02m~0.03m	0.030
2	0.03m 초과	0.045
point 당 평균오차		0.027

구분	정밀도	오차 합계
3	0.01m~0.02m	0.020
2	0.02m~0.03m	0.030
-	0.03m 초과	-
point 당 평균오차		0.016

위의 표에서 나타난 결과를 보면, 일반방법 작업구간의 point당 평균오차보다 머신가이던스 방법을 적용한 작업구간의 point당 평균오차가 약 40%정도 적음을 알 수 있었으며, 이는 머신가이던스 방법의 정밀도가 기존방법보다 높음을 의미한다. 결국 정밀도의 향상은 시공품질의 향상결과를 기대할 수 있으며, 작업의 효율성까지 고려한다면 생산성의 증대에 많은 기여를 할 수 있을 것으로 판단된다.

### 3. 결론

토공사의 생산성 향상을 위해 MG장비를 사용하였으며, 일반장비 적용시와의 효율을 비교 분석하였다. 이를 위해 당사 시공현장 2곳에 시범 적용하였다. 각 항목별로 생산성 향상에 대한 비교를 한 결과, 43~180%의 효율증대 효과를 얻을 수 있었으며, MG장비와 일반장비의 시공품질 비교시, MG장비를 적용한 곳의 품질이 우수하였음을 확인할 수 있었다. 이를 통해 측량, 검측업무 간소화, 건설의 생산성 향상을 통한 원가절감 및 향후 발주처 시방 가이드라인에 부합하는 토공사 건설자동화기계 도입 및 적용이 가능할 것으로 판단되며, 턴키나 기술제한 입찰시 수주경쟁력을 확보할 수 있을 것이다.

### 참고문헌

1. Reinventing construction : a route to higher productivity (february 2017), Mckinsey global institute