

TECHNICAL NOTE

## 습식 슛크리트 뿜칠 장비의 급결제 유량 제어 시스템 개발

강태호<sup>1</sup>, 장수호<sup>2</sup>, 최순욱<sup>1</sup>, 김진태<sup>3</sup>, 김봉규<sup>4</sup>, 이철호<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>한국건설기술연구원 지반연구본부 수석연구원, <sup>2</sup>한국건설기술연구원 지반연구본부 선임연구위원, <sup>3</sup>(주)실크로드티앤디 연구개발팀 선임연구원, <sup>4</sup>(주)실크로드티앤디 연구개발팀 주임연구원

# Development of Accelerator Control System for Wet Shotcrete Spraying Equipment

Tae-Ho Kang<sup>1</sup>, Soo-Ho Chang<sup>2</sup>, Soon-Wook Choi<sup>1</sup>, Jin-Tae Kim<sup>3</sup>, Bong-Gyu Kim<sup>4</sup>, and Chulho Lee<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Senior Researcher, Department of Geotechnical Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

<sup>2</sup>Senior Research Fellow, Department of Geotechnical Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

<sup>3</sup>Senior Research Engineer, R&D Team, SILKROAD T&D

<sup>4</sup>Assistant Research Engineer, R&D Team, SILKROAD T&D

\*Corresponding author: [chlee@kict.re.kr](mailto:chlee@kict.re.kr)

Received: November 07, 2022

Revised: November 14, 2022

Accepted: November 16, 2022

### ABSTRACT

The wet shotcrete refers to a method in which all materials are mixed and then supplied to the spraying device, compressed air is added to the nozzle, and the spraying speed is improved to spray on the target surface. In order to reproduce the amount of shotcrete used in the wet method in the field and the situation at the laboratory scale, it is essential to control the discharge amount of the equipment. In this study, in order to increase the reproducibility of field conditions at the laboratory scale, a flow control system for shotcrete mortar spraying equipment was developed and applied to the equipment. To verify the developed equipment, a discharge control test using water and mortar was performed. In the developed control system, the discharge was smoothly controlled according to the user input value for the mono pump, but the discharge was not properly controlled according to the input value for the screw pump because of a reducer. When a speed reducer is attached, it is necessary to adjust the operation rate of the screw pump close to the target flow rate by increasing the operation rate of the screw pump while lowering the operation rate of the mono pump.

**Keywords:** Shotcrete, Spraying system, Accelerator, Flow control system, Mortar

### 초록

습식 슛크리트 공법은 모든 재료를 혼합한 후 분사장치에 공급하여 노즐에 압축공기를 추가하고 분사속도를 향상시켜 타설면에 뿜어 붙이는 공법을 말한다. 현장의 습식 공법에서 사용되는 슛크리트량과 현장 상황을 실험실 규모에서 재현하기 위해서는 장비의 토출량 제어가 필수적으로 요구된다. 본 연구에서는 실험실 규모에서 현장 상태의 재현성을 높이기 위해 슛크리트 몰탈 뿜칠 장비의 급결제 유량 제어 시스템을 개발하여 장비에 적용하였다. 개발된 장비의 검증에 위해 물과 몰탈을 이용한 토출량 제어 시험을 수행하였다. 개발된 제어 시스템은 모노 펌프에 대해 사용자 입력값에 따라 토출량 제어가 원활하게 이루어 졌으나 감속기가 부착된 스크류 펌프에 대해서는 입력값에 따라 원활하게 토출량 제어가 이뤄지지 않았다. 감속기가 부착된 경우, 모노 펌프 가동률은 낮추면서 스크류 펌프의 가동률을 높여서 목표로 하



는 급결제 유량에 근접하게 조절하는 방안이 필요하다.

**핵심어:** 숯크리트, 뽐칠 장비, 급결제, 유량 제어 시스템, 몰탈

## 1. 서론

숯크리트는 콘크리트 및 몰탈 혼합물을 압축공기를 활용하여 노즐을 통해 분사하는 방식으로 타설면에 뽐어 붙이는 공법을 의미한다. 최초 적용은 1919년 Allen Cement Company에서 개발 및 사용되었다고 알려져 있다(Kim and Lee, 2002). 숯크리트 타설 방법에는 크게 건식 공법과 습식 공법으로 나눌 수 있으며 국내 대부분의 터널 현장에서는 습식 공법으로 사용하고 있다(Kim and Lee, 2002). 건식 공법은 분말 상태의 시멘트와 건조상태의 골재를 건식 혼합한 후 급결제를 첨가하여 분사장치에 공급하고 압축공기를 사용하여 노즐을 통해 분사하는 방법이다. 건식 공법에서 배합수는 노즐내에서 골재와 혼합되어 타설면에 뽐어 붙여진다. 분진 감소를 목적으로 배합수 진입 위치를 노즐 전에 위치 시키는 방법도 있으며 이를 반습식 공법이라 부른다(Han, 2001). 습식 공법은 Air 압송식과 스크류 펌프 압송식이 있으며, 배합단계에서부터 물을 첨가하여 모든 재료를 혼합한 후 분사장치에 공급하며 노즐에 공기를 추가 주입하여 분사속도를 향상시켜 타설면에 뽐어 붙이는 방법이다. Air 압송식 습식 공법은 몰탈을 압축공기로 압송하여 노즐부에서 급결제를 첨가하면서 뽐어 붙이는 방식으로 습식 챔버형과 습식 스크류형 등으로 나뉜다. 스크류 펌프 압송식 방법은 몰탈을 스크류 방식의 펌프를 통해 배관으로 압송시켜 노즐에서 압축공기와 급결제를 보조적으로 사용하여 뽐어 붙이는 방식을 일컫는다(Han, 2001). 하지만 챔버형(또는 피스톤형)은 체적 유량 및 압력이 스크류 방식에 비해 더 높은 용량이 필요할 때 사용하는 것으로 알려져 있다(Lannen and Skinner, 2018). 일반적으로 습식 공법이 건식 공법에 비해 상대적으로 정확한 배합을 사용할 수 있고 리바운드율이 낮아서 현장 품질관리에 용이한 것으로 알려져 있다.

우리나라는 숯크리트 시공에 일반적으로 습식 공법을 사용하고 있으며 사용되는 장비들은 대부분 해외 기업 제품들이다. 숯크리트 타설 장비의 일반적인 토출량은 장비 규모에 따라 20 m<sup>3</sup>/hr 내외이고 토출압력은 70 bar 내외이다. 숯크리트 타설 시에 함께 사용되는 급결제는 숯크리트에 요구되는 급결성에 따라 액상 또는 분말형이 사용되며 조기강도 발현과 장기 강도 발현을 목적으로 사용된다. 또한, 급결제는 숯크리트 재료의 관리측면에서 숯크리트의 성능에 가장 큰 영향을 미치는 혼화제로 다른 혼화제에 비해 관리 측면에서도 보다 세밀하게 규정이 제시되어 있어서(Won et al., 2010), 숯크리트 시공에서 주요하게 다뤄진다.

현장에서 숯크리트 토출량의 제어는 숯크리트 시공성과 작업 속도 등 숯크리트 품질에 전반적인 영향을 미친다. 그러나 현장 숯크리트 토출량과 이 때 주입되는 급결제 사용량은 현장 작업자의 경험과 노하우에 따라 달라지며 이를 실험실 규모에서 현장 상태를 재현하기는 매우 어려운 실정이다. 또한, 현장 타설장비에 직접 유량제어 장치를 장착하여 분말형 급결제 투입량을 제어하는 기술(Kim et al., 2014)이 개발된 바 있으나 액상형 급결제의 자동제어에 관한 연구는 찾아보기 어렵다. 본 연구에서는 숯크리트 현장 품질 시험 수행을 목적으로 시험의 정확도와 재현성을 높이기 위해 숯크리트 몰탈의 토출량을 일정하게 조절할 수 있는 장비를 개발하고 시험 평가하였다. 장비 토출량 제어를 통해 균일한 시험체 제작이나 현장 상태를 재현할 수 있는 방식으로 검토되었으며 급결제를 제어하기 위한 모노 펌프 제어 시스템과 몰탈 제어를 위한 스크류 펌프 제어 시스템을 주요 검토내용으로 고려하였다.

## 2. 장비 구성 및 제어 소프트웨어 개발

### 2.1 장비 구성

연구에서 사용된 습식 몰탈 뿜칠 장비는 강섬유 보강 고성능 슛크리트의 급결제 사용량 제어 실험을 재현할 수 있는 장비로 Fig. 1에서 나타난 바와 같이 구성되어 있다. 급결제 유량 제어 시스템은 외부에서 전자식 패널로 화면을 통해 제어할 수 있도록 구성되어 있으며 제어 시스템에서 몰탈과 급결제의 토출량을 각각 조절할 수 있다. 장비는 220 V/60 Hz 기준으로 작동하며 100% 펌프가 동틀일 때 스크류 펌프와 모노 펌프의 RPM이 60 Hz에서 최대치가 된다. 장비 제어 요소 중 급결제 제어 부분은 모노 펌프의 토출량 시험을 통해 검토되었다. 시험에서는 입력된 펌프 가동률에 따라 분당 토출되는 무게를 측정하고 이 때 토출되는 무게를 펌프의 1회전에 해당되는 양으로 계산하였다. 몰탈은 스크류 펌프를 통해 일정하게 토출되는 시스템으로 급결제 모노 펌프와 같은 방식으로 시험을 진행하였다. 즉, 펌프 가동률(%)의 제어는 입력 Hz를 변경한 후 스크류 펌프의 RPM이 결정되어 토출되는 방식이다.

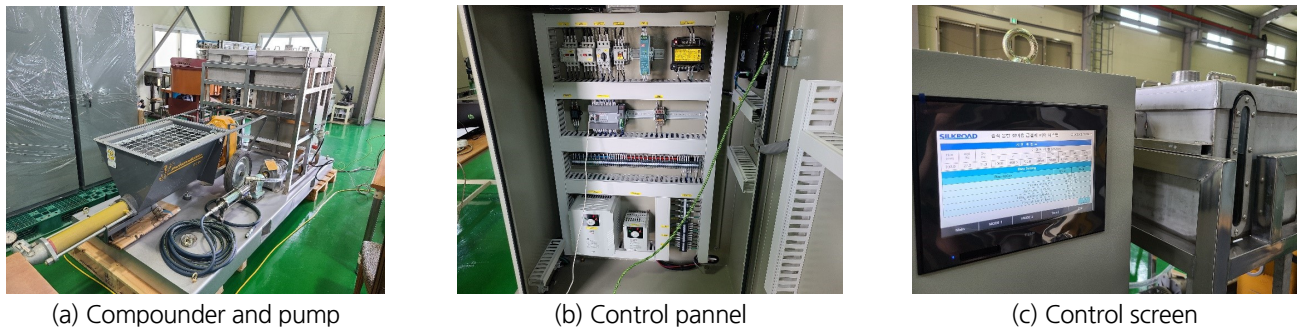


Fig. 1. System configuration of shotcrete equipment in this study

Fig. 2는 습식 몰탈 뿜칠 장비의 개략적인 시스템 구성을 나타낸다. 제어판에서는 에어 컴프레서, 몰탈 스크류 펌프, 급결제 모노 펌프에 장착된 센서 신호를 받아 기록하고 표시하며 각 구성 시스템에 대해 작동 명령을 내리게 된다. 각각의 장비 요소들은 제어 시스템을 통해 작동하며 토출량 제어에 필요한 각종 계산을 실시간 수행한 뒤 화면에 출력하게 된다.

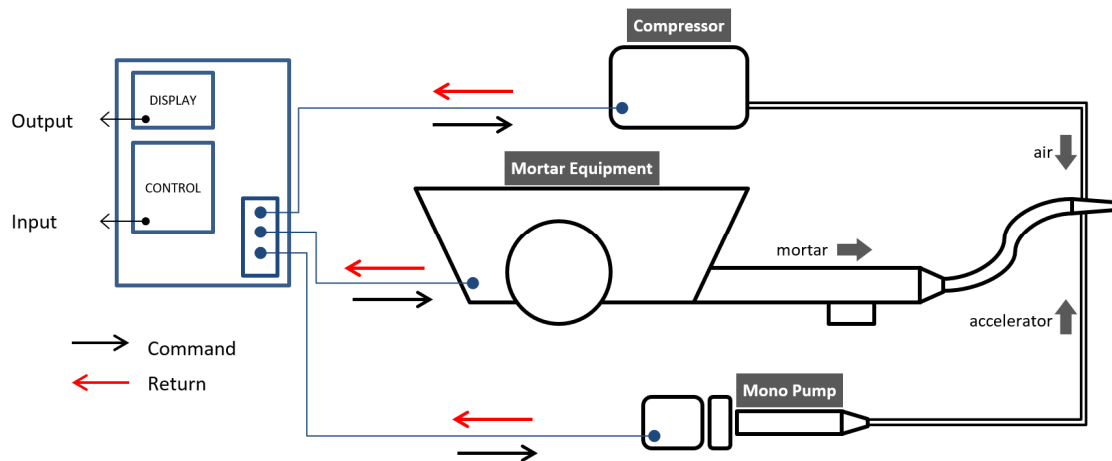


Fig. 2. Schematics of shotcrete equipment in this study

## 2.2 제어 소프트웨어

연구에서 사용된 장비 및 제어 시스템은 현장의 슛크리트 타설 상황을 재현하기 위해 개발되었으며 현장의 조건에 따라 2가지 방식으로 시스템을 구성하였다. 첫 번째는 몰탈과 급결제에 대한 토출량 조절 및 펌프의 RPM 조절을 통해 가동하는 조건(Mode 1)이고 두 번째는 급결제 사용량을 지정하고 이를 통해 몰탈의 배합비에 따라 나머지 시스템이 자동 결정되는 방식(Mode 2)이다. Mode 1은 각각의 요소에 대한 설정에 따라 토출량을 제어하게 되며 이 때 산출된 토출량을 토대로 급결제 사용량을 제어하는 방식이고 Mode 2는 목표로 하는 급결제 사용량을 설정하면, 몰탈의 배합비에 따라 나머지 설정값들이 셋팅되어 시험이 진행된다. Fig. 3은 제어시스템의 각각의 변수에 대한 입력값과 토출량의 계산 방식을 나타낸 것으로 시멘트 대비 급결제 사용량을 조절하기 위함이다.

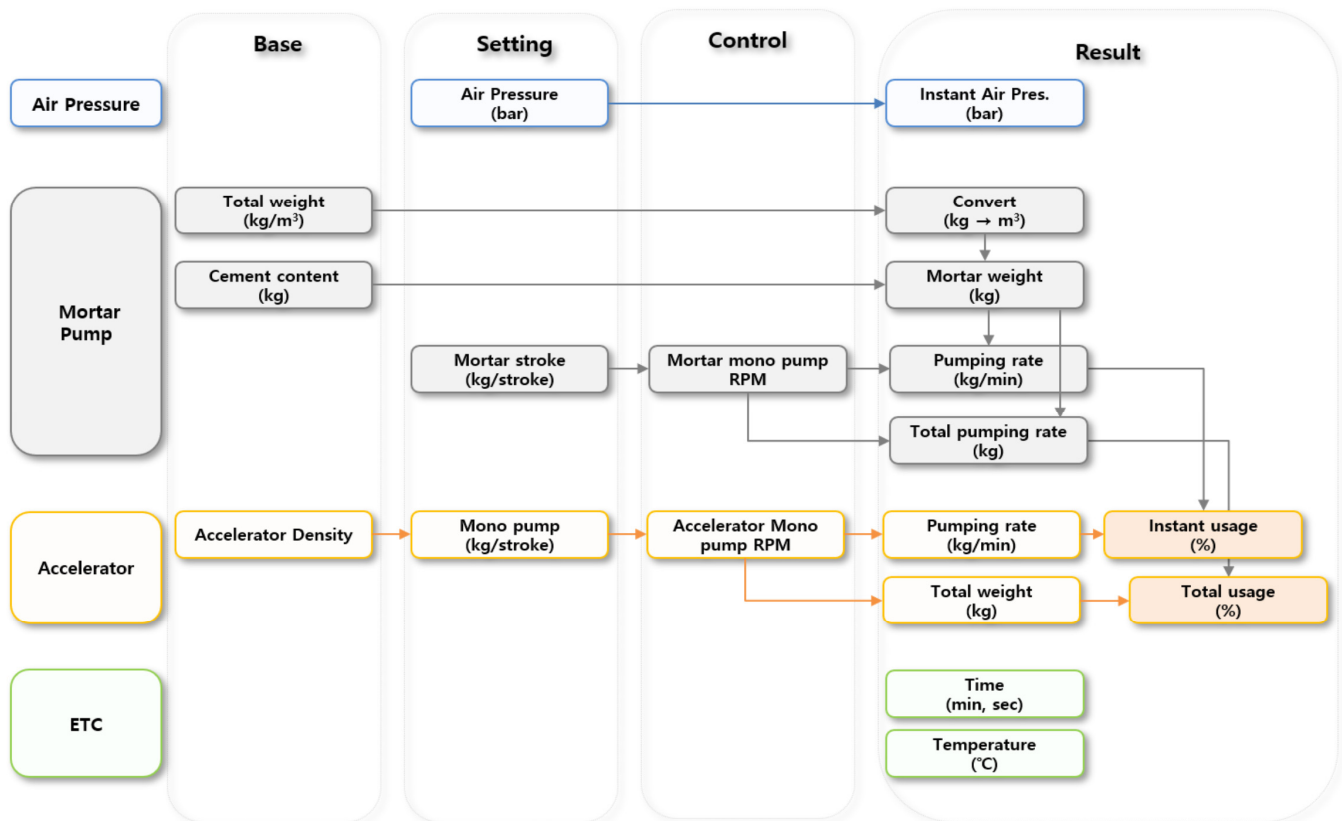


Fig. 3. Flowchart of control system

장비에 적용된 소프트웨어는 PLC XG5000(Ver. 4.27)에 적합하도록 작성되었으며 개발언어는 장비 공급사 자체 소프트웨어를 활용하였다. 장비에 부착된 PLC는 국내기업이 생산하는 것으로 RS-232C/485 통신이 가능하며 15 ns/Step의 연산처리속도를 보유하고 있다. 화면 구성에 사용된 개발 모듈은 해외기업에서 생산한 HMI(Human Machine Interface) 제품과 동회사의 자체 소프트웨어를 사용하였다. HMI는 10.2인치 모니터와 800×480의 해상도를 지니고 있고 터치패드 방식으로 사용자 입력이 가능하다.

Figs. 4-8은 장비에 탑재된 소프트웨어의 화면 구성 중 대표적으로 Mode 1에 대한 화면 구성을 나타낸다. 시험 방식 및 작동 방식에 따라 Mode를 결정하면 Setting 화면을 통해 Mode에 해당하는 설정값을 입력하게 되며 Data와 Trend를 통해 토출량을 확인하는 방식으로 진행된다. 각각의 측정된 모든 데이터들은 제어 패널에 저장되어 분석에 활용된다. Fig. 4는 설정 화면으로 시험에

사용된 배합표와 공기압 등을 직접 입력할 수 있다. Fig. 5는 작동 중 측정되고 있는 측정값들을 나타내며 측정하고자 하는 급결제의 전체 사용량과 분당 사용량을 측정할 수 있다. Fig. 6은 경향 곡선을 나타낼 수 있는 Trend 화면으로 입력된 장비 설정값들에 의해 작동하고 있는 몰탈 장비의 토출량과 급결제 분당사용량이 자동으로 기록되면서 유량 제어 여부를 확인할 수 있다. Fig. 7은 정밀한 실험을 위해 몰탈의 플로우값에 따라 토출량에 영향을 줄 것을 감안하여 보정값을 적용할 수 있는 시스템이다.

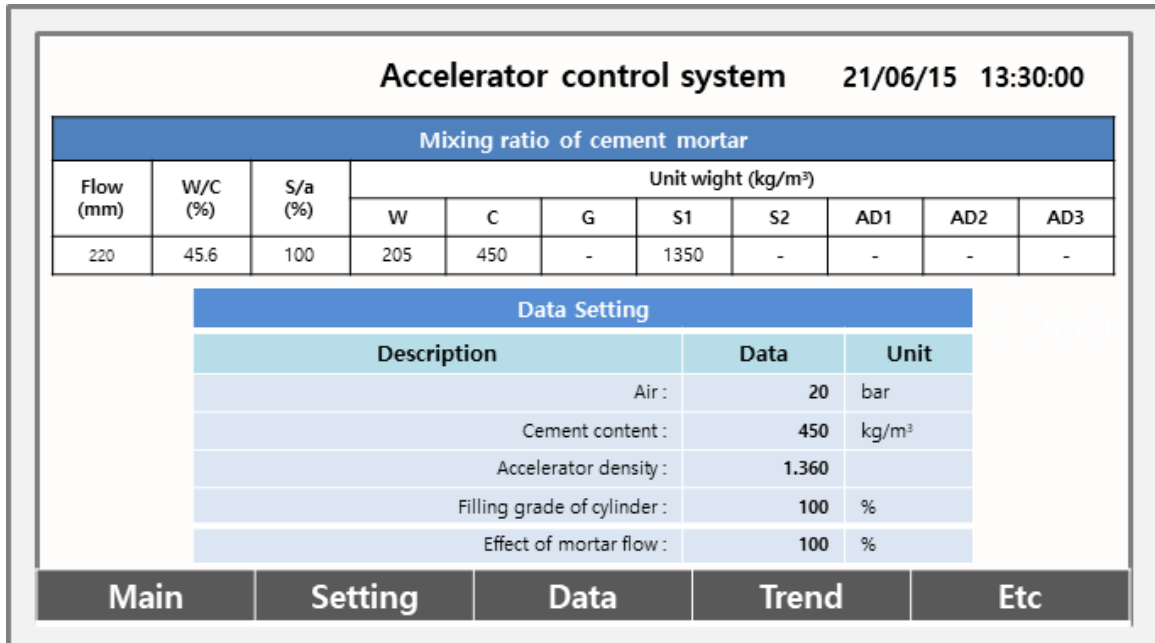


Fig. 4. Setting screen in Mode 1

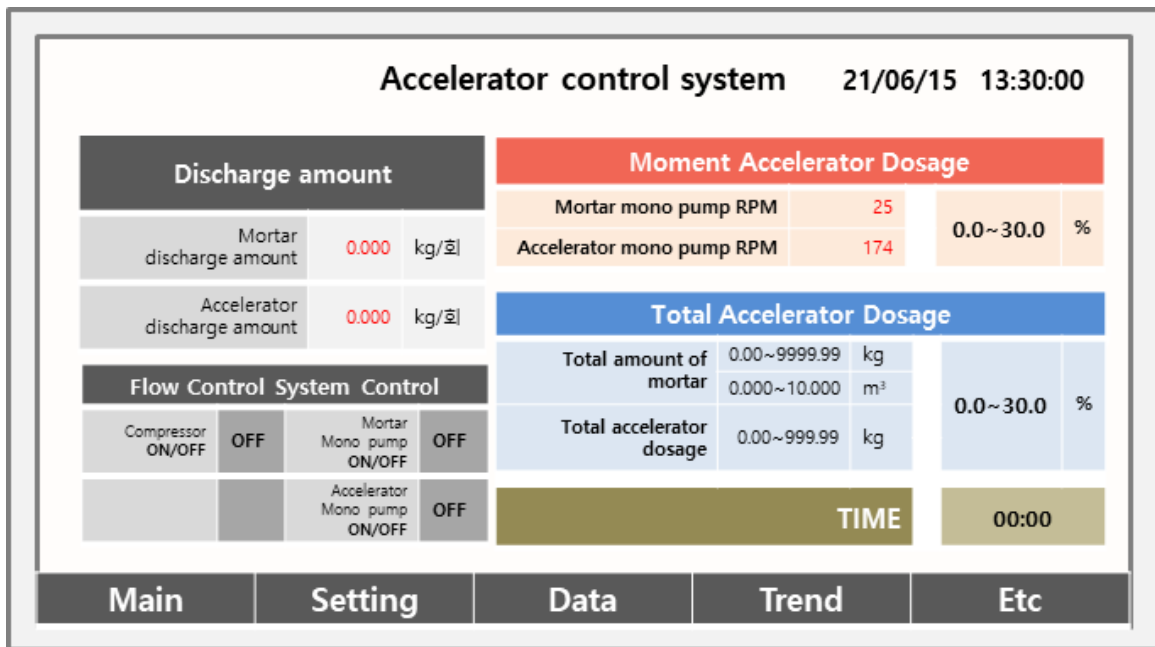


Fig. 5. Data screen in Mode 1

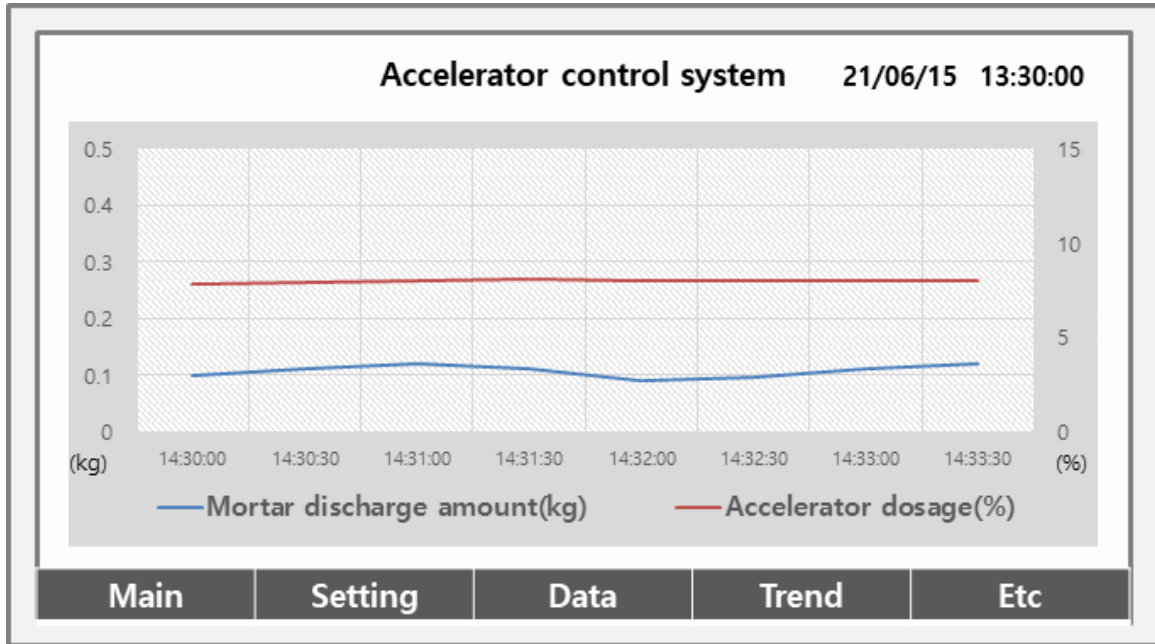


Fig. 6. Trend screen in Mode 1

**Accelerator control system** 21/06/15 13:30:00

Effect of mortar flow								
Description	Unit	Data						
Flow	mm	240	260	280	300	320	340	0~500
Effect	%	94	96	98	100	101	102	0~200

Navigation: Main | Setting | Data | Trend | Etc

Fig. 7. Etc screen in Mode 1

### 3. 토출량 시험 및 결과

본 연구에서 사용된 몰탈 뿜칠 장비의 토출량 제어를 확인하기 위해 Fig. 8과 같이 급결제 모노 펌프와 몰탈 스크류 펌프의 토출

량을 확인하는 시험을 진행하였다. 각각의 시험에서 설정값에 따라 장비 가동률과 RPM 측정값, 토출량을 확인하였다. 물에 대한 토출량 시험을 먼저 수행하여 장비 설정과 그에 따른 작동 여부를 먼저 확인하였다. 토출량은 노즐 또는 관을 통해 토출되는 재료를 직접 채취하여 측정하는 방식으로 진행하였다.



(a) Mono pump test

(b) Screw pump test

Fig. 8. Picture of test environment

### 3.1 모노 펌프 토출량 시험

본 연구에서 사용된 몰탈 뿜칠 장비의 토출량 제어를 위해 가장 주요하게 다뤄지는 요소는 급결제의 양이다. 이를 위해 모노 펌프의 토출량을 제어하는 시험을 먼저 진행하였으며 설정에서 입력된 목표 토출량과 실제 측정량을 비교하는 방식으로 시험을 진행하였다. 시험에서는 설정 판넬에서 입력한 펌프 가동률에 따라 분당 토출되는 무게를 측정하고 이 때 토출되는 무게를 펌프의 1회전에 해당되는 양으로 계산하여 비교하였다. Table 1은 물을 이용한 시험 결과를 나타내고 Table 2는 급결제를 이용한 시험 결과를 나타낸다. 시험에서 사용된 급결제는 국내 알칼리프리계 액상 제품으로 비중은 1.356이다.

Table 1. Test result of stroke test for mono pump with water

Operating rate (%)	Output		Measured RPM	Result	
	Pumping Hz	Pumping RPM		Stroke (kg/min)	Stroke (kg/No)
60	36	108	108	2.89	0.0268
70	42	126	126	3.32	0.0263
80	48	144	144	3.79	0.0263
90	54	162	162	4.23	0.0261
100	60	180	180	4.68	0.0260

**Table 2.** Test result of stroke test for mono pump with accelerator

Operating rate (%)	Output			Result	
	Pumping Hz	Pumping RPM	Measured RPM	Stroke (kg/min)	Stroke (kg/No)
60	36	108	108	3.83	0.0355
70	42	126	126	4.48	0.0356
80	48	144	144	5.13	0.0356
90	54	162	162	5.87	0.0362
100	60	180	180	6.46	0.0359

입력된 펌프 가동률(operating rate)에 따라 장비가 사용하는 전류의 Hz 조절과 모노 펌프의 RPM이 원활하고 정확하게 작동되는 것을 확인할 수 있다. 또한 물과 급결제를 사용한 모노 펌프 토출량을 측정한 결과 RPM에 따라 분당 토출량이 일정하게 증가하였으며 펌프가 1회전 할 때의 토출량도 일정하게 발생하였다. 물과 급결제를 서로 비교하였을 때, 급결제의 비중과 점도가 상대적으로 큰 것을 고려하더라도 크게 영향을 받지 않으면서 토출량을 조절할 수 있었다.

### 3.2 스크류 펌프 토출량 시험

몰탈은 장비의 스크류 펌프를 통해 일정하게 토출된다. 모노 펌프의 토출량 시험에서와 마찬가지로 스크류 펌프 토출량 시험에서도 같은 방식으로 시험을 진행하였다. 펌프 가동률(%)을 조절하면서 전류 Hz를 변경하고 여기에 따라 스크류 펌프의 RPM이 결정된 후 재료가 토출되는 방식이다. 시험에 사용된 몰탈은 Table 3의 배합표에 따라 배합하였으며 펌프 가동률을 변경하면서 분당 토출되는 몰탈의 무게를 측정하고 측정된 무게를 펌프의 1회전에 해당되는 양으로 계산하였다. 시험에 사용된 시멘트 몰탈의 슬럼프는 약 190 mm로 측정되었다.

**Table 3.** Mixing ratio of cement mortar

S/a (%)	W/C (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )		
		W	C	S
100	45.6	205	450	386

몰탈을 이용한 스크류 펌프의 토출량 시험 결과는 Table 4와 같다. 몰탈을 이용한 토출량 확인 시험에서 실제 측정되는 RPM은 설정값과 차이를 보였다. 이는 장비에 부착된 핸들 조정 방식의 감속기에 의해 상대적으로 낮은 RPM이 나타난 것으로 판단된다. 따라서 토출량을 기준으로 RPM 설정값을 증가시켜 측정된 RPM 값이 기존 의도한 RPM 값과 같아지도록 조정하여 시험을 다시 수행하였다. Table 5는 감속기 조절 이후 측정된 RPM 값을 나타낸다. 감속기를 조절한 상태에서 몰탈 장비 RPM 값이 80일 때, 모노 펌프 가동률에 따른 급결제 순간 사용량은 Table 6에 나타났다. 본 장비는 현장에서 사용되는 급결제의 양(C\*5%~12%)을 유동적으로 제어하면서 실험을 진행하기 위함으로 본 시험의 급결제 사용량은 시멘트 대비 8%로 설정하였다. 표에서 알 수 있듯이 몰탈 장비의 실제 스크류 펌프 RPM 값이 80으로 유지될 때, 모노 펌프 가동율을 8%(15 RPM)로 가동한 경우 급결제 순간 사용량이 대략 8%로 토출되어 목표값에 근접하게 운영할 수 있었다.



**Table 4.** Test result of stroke test for screw pump with mortar

Operating rate (%)	Output			Result	
	Pumping Hz	Pumping RPM	Measured RPM	Stroke (kg/min)	Stroke (kg/No)
60	36	108	22	7.92	0.367
70	42	126	25	9.42	0.374
80	48	144	29	10.60	0.368
90	54	162	32	11.32	0.349
100	60	180	36	12.90	0.358

**Table 5.** Measured RPM after modified reducer

Operating rate (%)	Output		Result
	Pumping Hz	Pumping RPM	Measured RPM
60	36	108	48
70	42	126	56
80	48	144	64
90	54	162	72
100	60	180	80

**Table 6.** Accelerator usage with mono pump operating rate at 80 RPM

Mono pump operating rate (%)	6	7	8	9	10
Accelerator usage (%)	5.9	6.9	7.9	9.0	9.9

습식 몰탈 뿔칠 장비의 급결제 유량 제어 시스템 시험결과, 모노 펌프에서 가동률에 따라 작동 RPM 값이 실제 RPM 값과 동일하게 측정되었으며 토출량이 일정하게 유지되는 것을 확인할 수 있었다(Table 1과 2). 하지만 몰탈 스크류 펌프의 경우, 장비에 부착된 감속기의 영향으로 실제 RPM 값이 작동 RPM 값보다 현저하게 낮게 측정되었다. 따라서, 현장 급결제 사용량이 대략 5.0%~12.0%이므로 급결제 모노 펌프의 가동률을 감소시킨 상태에서 몰탈 스크류 펌프의 토출량을 증가시켜 시험에 사용가능한 범위로 조정이 필요하다고 판단된다.

## 4. 결론

본 연구에서는 습식 몰탈 뿔칠 장비의 급결제 유량 제어 시스템 개발을 위해 제어 판넬과 제어 프로그램을 개발하여 시험 장비에 적용하였다. 개발된 장비의 제어 성능을 파악하기 위해 급결제 모노 펌프와 몰탈 스크류 펌프에 대해 작동 범위를 설정하여 실제 토출량을 측정하는 시험을 수행하였다. 모노 펌프의 경우, 시스템에서 설정한 작동 범위에서 원활하게 제어할 수 있었고 스크류 펌프의 경우, 장비에 부착된 감속기로 인해 설정값보다 낮은 RPM 값을 확인할 수 있었다. 기존 장비의 변형을 최소화하면서 개발된 제어 방식을 적용하여 토출량을 조절하기 위해서는 모노 펌프 가동률을 동시에 조절할 필요가 있었으며 스크류 펌프의 토출량을 증가

시키면서 시험에 사용 가능한 범위로 조정이 필요한 것을 확인하였다. 추후 연구에서는 이러한 개선점을 반영할 수 있도록 사용자의 입력 값에 맞게 펌프 가동률의 자동 조절이 가능한 시스템을 구성하여 제어 성능을 향상시킬 예정이다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통과학기술진흥원 ‘지하공간 활용 도시기반 복합플랜트 실증연구 사업’의 “환경 기초 복합플랜트 지하공간 활용 기술(과제번호 21UGCP-B157962-03)” 과제에 의해 수행 되었으며 이에 감사드립니다.

## REFERENCES

- Han, I., 2001, A Study on Improvement of Wet Shotcrete Performance, Ministry Construction & Transportation, R&D No. CE - 99I02.
- Kim, D.-Y., Lee, H.-K., and Jung, J.-H., 2014, Development of Auto-Controlled Injection System of Powder Type Accelerator and its Application, Proceeding of KSCE, 345-346.
- Kim, Y. and Lee, N., 2002, Shotcrete Equipment, J of Korean Tunn Undergr Sp Assoc, 4(4), 54-57.
- Lannen, T. and Skinner, N.D., 2018, Pumping Cement-Based Materials, U.S., Department of the Interior, Final Report, ST-2018-2584-02.
- Won, J.-P., Park, C.-G., Park, H.-G., Chang, S.-H., Shim, J.-W., and Kim, W.-Y., 2010, Shotcrete, Magazine of the Korea Concrete Institute, 22(1), 36-39.