

## 전기비저항 측정법을 이용한 유동화 모르타르의 응결 지연 현상 평가

이한주<sup>1</sup>, 임홍재<sup>2\*</sup>

### Evaluation of Setting Delay in Mortar Adding Superplasticizer Using Electrical Resistivity Measurement

Hanju Lee<sup>1</sup>, Hong Jae Yim<sup>2\*</sup>

**Abstract:** According to the development and use of self-consolidating concrete in field, interest in material properties of early-age concrete is rising. Setting time with hydration process of cement is one of significant indicator to evaluate the early-age material properties of concrete, various nondestructive methods including penetration resistance measurement have been proposed to estimate setting time. This study performed an experimental approach to evaluate setting time delay in mortar adding superplasticizer using electrical resistivity measurement. For this purpose, total nine types of mortar samples were prepared, and its electrical resistivity was monitoring during 24h after mixing. From the experimental result, rising time of electrical resistivity was used to evaluate setting delay of mortar, and penetration resistance was also measured for comparison. In addition, dynamic elastic modulus and compressive strength of 1day mortar were measured to investigate a possibility the use of electrical resistivity measurement for evaluation of early-age material properties.

**Keywords:** Electrical resistivity, Mortar, Nondestructive method, Setting time, Superplasticizer

## 1. 서론

고유동 콘크리트의 개발 및 사용 증가에 따라 요구 성능 확보를 위한 유동화제 사용이 필수적이다. 콘크리트에 사용되는 유동화제는 화학구조에 따라 리그닌계, 멜라민계, 폴리카르본산계, 나프탈렌계(Kim et al., 2013) 등으로 구분되며, 유동화제 종류에 따라 그 첨가량이 결정된다. 그러나 유동성 확보를 위한 유동화제 과다 사용 시 배합실패에 따른 콘크리트 재료분리, 블리딩, 응결 지연 등 요구 성능 확보가 어려워질 수 있다. 따라서 대한토목학회 및 한국콘크리트학회에서는 KSCE91-01 및 KCI-AD-101에 따라 유동화제 첨가에 따른 굳지않은 콘크리트의 슬럼프 값 18~20cm 및 공기량 4.5% 이하를 만족하고, 보통콘크리트와 동등한 품질의 압축강도를 가져야 한다고 규정하고 있다. 고유동 콘크리트의 관한 연구는 유동화제 종류 및 첨가량에 따른 유동성 측정 연구(Chandra and Björnström, 2002)를 기반으로 타설 후 응결시간 측정 및 압축

강도 측정을 통한 유동화 콘크리트의 기초 물성 평가(Ryu, 2009) 연구로 확장되고 있다. 선행연구결과 유동화제 첨가량이 콘크리트 응결 및 초기 경화에 영향을 미치는 것으로 보고 되었으며, 최근에는 X-선 회절 분석(X-Ray Diffractometer), 열분석(Differential Scanning Calorimeter), 주사전자현미경(Scanning Electron Micrographs) 등을 이용한 실험 결과 및 미세구조 모델을(Derjaguin-Landau-Verwey-Overbeek, DLVO) 적용하여 유동화제 첨가에 따른 미세구조 변화에 대한 연구결과가 보고되었다(Termkhakornkit and Nawa, 2004; Nakajima and Yamada, 2004; Shin et al., 2005; Chae et al., 2006; Ryu and Song, 2004).

DLVO 이론은 시멘트 입자간의 반발력과 Van der Waals 포텐셜 에너지의 합으로 시멘트 입자의 확산, 분자의 안정성을 설명하고 있으며, 포텐셜 에너지 곡선의 모형 및 범위에 의해 시멘트 페이스트의 유동성을 모사할 수 있다. 시멘트 입자 표면의 제타 포텐셜 에너지(zeta potential energy) 값이 작을수록 포텐셜 에너지는 큰 결과를 가지며, 이는 시멘트 입자의 분산이 크게 발생되어 유동성이 활성화 되는 결과를 나타낸다. 유동화제 첨가에 따른 시멘트 페이스트의 제타 포텐셜 에너지는 10 ~ 20mV 범위안에 변화되는 것으로 보고되고 있다.(Uchikawa et al., 1997; Yoshioka et al., 1997; Sato and Ruch, 1980; Termkhakornkit and Nawa, 2004; Shui et al.,

<sup>1</sup>정회원, 경북대학교 건설방재공학부 석사과정

<sup>2</sup>정회원, 경북대학교 건설방재공학부 조교수

\*Corresponding author: yimhj@knu.ac.kr

Dept. of Construction and Disaster Prevention Engineering, Kyungpook National University, Sangju 37224, Rep. of Korea

•본 논문에 대한 토의를 2018년 12월 1일까지 학회로 보내주시면 2019년 1월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

2016). 즉 유동화제 사용량 증가에 따라 배합 시 시멘트 입자간의 인력 감소 및 입자간의 간격 증가를 유도시킬 수 있으며, 양생과정에서 시멘트 수화 및 응결 지연 현상을 발생시킬 수 있다.

시멘트계 재료의 응결시점 평가를 위한 대표적인 측정법으로는, 시멘트 페이스트 응결측정을 위한 비카트 침 시험(KS L ISO 9597)과 콘크리트 응결측정을 위한 관입저항시험(KS F 2436)이 있다. 콘크리트의 관입저항시험의 경우, 굵은 골재 습식채가름 실시, 샘플링에 의한 측정, 숙련도 및 장기간 시험에 따른 오차 발생 가능성 등 다양한 한계점에 따라 초음파 속도 측정법(Chung et al., 2012), 수화열 측정법(Pinto et al., 1999), 전기 임피던스 분광법(Hamann et al., 1998) 과 같은 다양한 비파괴 시험법들이 제안되고 있다. 최근에는 현장 적용성 및 측정 장비 경제성을 고려한 전기비저항 측정법이 제안되었으며, 이를 이용한 시멘트계 재료의 응결 평가에 관한 연구(Lee and Yim, 2017; Yim et al., 2017) 가 보고되었다.

본 연구에서는 시멘트 미세구조 변화에 따른 재료의 전기 전도성 변화를 이용하여 유동화제 첨가에 따른 모르타르의 응결 및 경화 지연 현상 평가를 위한 실험적 연구를 수행하였다. 폴리카르본산계(PC) 유동화제 첨가량은 샘플의 유동성 측정에 기반하여 결정되었으며, 총 9개의 조건으로 모르타르 샘플을 준비하였다. 전기비저항 측정을 이용한 비파괴 평가법을 이용하여 유동화제 첨가량에 따른 모르타르의 전기비저항 변화를 24시간 모니터링 하였으며, 측정 결과는 동일 샘플의 관입저항시험 응결시점과 비교분석 하였다. 또한 타설 24시간 후 동 탄성계수 및 압축강도 측정을 통해 유동화제 사용량에 따른 초기 경화 및 강도 발현 변화 추이를 분석하였다.

## 2. 실험구성 및 방법

### 2.1 실험개요

본 연구에서는 굳지 않은 모르타르의 전기전도성 변화 측정을 위해 웨너의 4-전극법(Wenner, 1915)에 기반한 시멘트계 재료 내부 전기비저항 측정법을 사용하였다(Lee and Yim, 2017; Yim et al., 2017). 전기비저항 측정을 위해서는 Fig. 1과 같이 일직선상의 동일한 간격으로 4개(전류전극 2개, 전압전극 2개)의 전극을 설치하여, 전류전극을 통해 콘크리트 내부 전류( $I$ )를 측정하고, 전압전극을 통해 두 전극 사이 유도 전압( $V$ )을 측정한다. 측정결과를 옴의 법칙( $V=IR$ )에 의해 접지저항으로 산출할 수 있으며, 전극 사이 간격  $a$  에 따른 콘크리트 내부 전기비저항은  $\rho = 2\pi aR$  을 통해 결정된다. 여기서 산출된 전기비저항은  $a$  깊이까지의 평균 전기비저항을 의미한다.

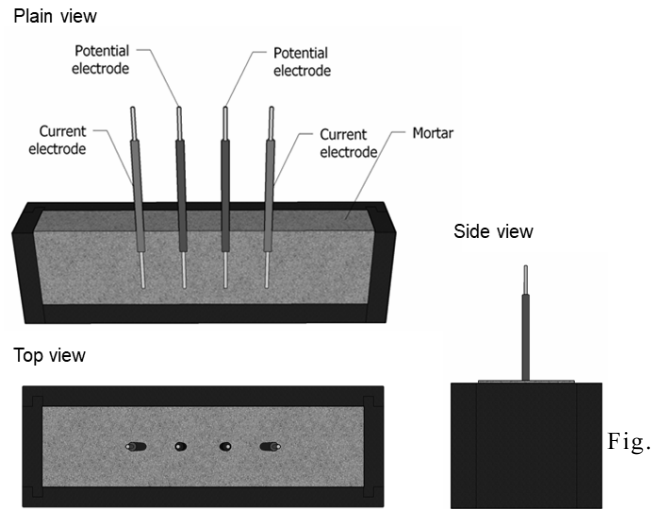


Fig. 1 Schematic of fabricated mold for electrical resistivity measurement using Wenner's four electrode method

### 2.2 샘플 제작 및 유동성 시험

실험에 사용될 모르타르 샘플은 비중 3.15의 1종 보통 포틀랜드 시멘트와 비중 2.6의 강사를 사용해 제작되었다. 샘플 제작에 사용된 시멘트의 물리적, 화학적 성분은 Table 1에 정리하였다. 동일한 물-시멘트-잔골재 비율(0.45:1:2)을 기반으로 모르타르를 배합하였으며, Ether 및 Ester 기반 PC계 유동화제를 시멘트 중량대비 0.045%, 0.135%, 0.225%, 0.315% 첨가하여 유동화 모르타르를 제작하였다. 유동화제를 첨가하지 않은 기본배합 샘플(Ref) 및 총 9 종류의 샘플의 배합비는 Table 2와 같다. 재료 혼합 시간은 유동화제를 첨가하여 총 330초 믹싱 후 샘플을 제작하였다 (120초 저속 믹싱-90초 스크래핑-120초 고속 믹싱). 4-전극법 전기비저항 측정 및 압축강도 측정을 위해, 믹싱 후 샘플은 시멘트강도 시험(KS L ISO 679) 몰드에 따라 제작되었다(40\*40\*160mm). 몰드 타설 후 전기비저항 측정 시 양생 환경에 따른 전기전도성 영향을 최소화하기 위해 온도 20°C, 상대습도 40%의 항온항습기 내에 양생 중 시험을 실시하였다.

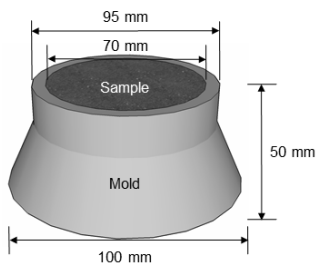
Table 1 Physical properties and chemical compositions of used cement

		Cement
Physical properties	Specific gravity	3.15
	Blaine(cm <sup>2</sup> /g)	3440
Chemical composition (%)	SiO <sub>2</sub>	20.56
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.40
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.68
	CaO	62.14
	MgO	3.08
	SO <sub>3</sub>	2.07
	K <sub>2</sub> O	0.81
Loss on ignition		2.07

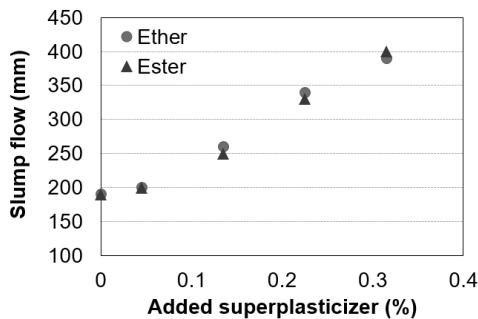
**Table 2** Mix proportions of prepared samples

Mix No.	w/c (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )				
		Water	Cement	Sand	Superplasticizer	
					Ether	Ester
Ref	45	293	651	1301	-	-
A1	45	293	651	1301	0.293	-
A2	45	293	651	1301	0.879	-
A3	45	293	651	1301	1.465	-
A4	45	293	651	1301	2.051	-
B1	45	293	651	1301	-	0.293
B2	45	293	651	1301	-	0.879
B3	45	293	651	1301	-	1.465
B4	45	293	651	1301	-	2.051

유동화 모르타르의 유동화제 배합비율 결정 및 유동화제 첨가량에 따른 샘플의 유동성 확인을 위해 미니 슬럼프 콘 시험(ASTM C230-08)을 수행하였다. 준비된 모르타르 샘플과 동일한 물-시멘트비의 시멘트 페이스트(45%) 샘플에 유동화제 첨가량에 따른 미니 슬럼프 콘 시험 결과, 시멘트 중량대비 0.045%, 0.135%, 0.225%, 0.315%의 유동화제 첨가비율을 결정하였다. 슬럼프 플로우(slump flow) 측정 시험에 사용된 시험 몰드 규격은 Fig. 2와 같으며, 각 샘플 당 10번 시험 평균 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 시험 결과에 나타나듯 유동화제 첨가량 0.05% 이하에서는 유동성이 크게 차이가 없으며, 0.1% 이상 첨가 시 선형적으로 유동성이 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 또한, 유동화제 첨가량 0.32% 이상의 샘플에서는 재료 분리 및 과도한 블리딩 발생이 확인되어 최대 유동화제 첨가량은 0.315%로 결정하였다.



**Fig. 2** Mini-slump test mold



**Fig. 3** Results of mini-slump flow of cement paste with Ether and Ester

## 2.3 시험방법

### 2.3.1 관입저항시험

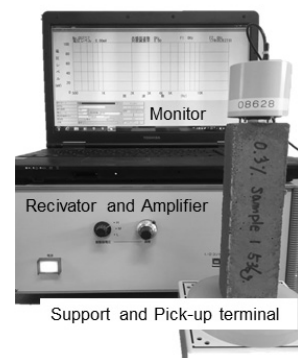
유동화 모르타르의 응결시점 평가를 위해 본 연구에서 적용하고자 하는 전기비저항 측정결과와의 비교 분석을 위해, 동일 샘플의 관입저항시험(ASTM C403-08)을 실시하였다. 전기비저항 측정 및 압축강도 시험을 위한 샘플과 동일한 용적(256ml)의 몰드를 준비하여 각 샘플마다 16mm<sup>2</sup>의 관입침의 25mm 관입결과를 측정하였다. 측정시간은 타설 후 2시간 간격으로 측정하였고, 초결 시점이 지난 뒤 30분 간격으로 종결시점까지 측정하였다. 전기비저항 측정 샘플과 동일한 양생 조건을 맞추기 위해 관입저항시험 역시 온도 20℃, 상대습도 40%의 항온항습기 내에서 측정되었다. 동일한 배합의 3개 샘플로 얻어진 관입 저항 측정 평균 결과의 지수함수 회귀분석을 통해 응결시점을 결정하였다.

### 2.3.2 동 탄성시험 및 압축강도시험

유동화 모르타르 샘플의 24h 전기비저항 측정 후 샘플의 초기 물성 평가를 위해 동 탄성시험(KS F 2437)과 압축강도 시험(KS L ISO 679)을 실시하였다. 동 탄성시험은 500Hz ~ 10kHz 주파수 대역의 진동 발진기 및 100mV의 증폭기를 사용하였으며, 지지대와 픽업단자를 샘플 양 끝단에 위치하여 자유 종진동을 유발하였다. Fig. 4와 같은 시험 구성에 따라 종방향 동탄성계수를 측정할 수 있으며, 산출식은 식 (1)과 같다.

$$E_D = C_1 W f_1^2 \quad (1)$$

여기서,  $C_1$ : 샘플 면적에 대한 보정계수( $400 \times 10^{-5} \times L/A$ ),  $E_D$ : 동 탄성계수(MPa),  $W$ : 샘플의 질량(kg),  $f_1$ : 종진동의 공명진동수(Hz),  $L$ : 공시체 길이(mm),  $A$ : 공시체의 단면적(mm<sup>2</sup>)이다. 동 탄성계수 측정 후 KS L ISO 679에 따라 압축강도 측정을 실시하였다. 40\*40mm 각주형 샘플의 종방향 압축강도 측정을 위해 2400N/s  $\pm$  200N/s의 가압판 속도로 하중을 증가시켜 시험을 실시하였으며, 시험 구성은 Fig. 5와 같다.



**Fig. 4** Measurement of dynamic elastic modulus in accordance with KS F 2437

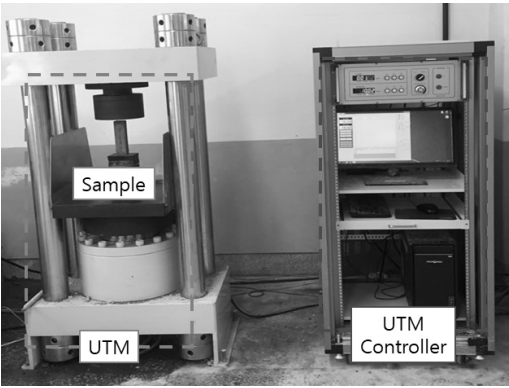


Fig. 5 Measurement of compressive strength in accordance with KS L ISO 679

### 2.3.3 전기비저항 측정

타설 직후 4-전극법을 이용한 모르타르 샘플의 24h 전기비저항 측정을 위해 Fig. 6 과 같은 측정 시스템을 제작하였다. 압축강도 측정용 샘플 몰드와 동일한 규격의 측정 몰드를 제작하였으며, 비전도성 절연 아세탈 중합체를 이용하여 탈형이 쉽게 제작되었다. 측정에 사용된 전극은 지름 1.78mm의 HIV 2.5SQ 로 총 길이 90mm 로 제작되었으며, 위·아래 15mm 피복을 벗겨 악어클립을 이용하여 측정 장비와 연결 할 수 있게 구성하였다. 사전실험을 통해 전극 간격 및 깊이를 20mm로 결정하였으며, 측정 중 전극 고정을 위해 상부 거치대를 제작하였다.

측정 장비로는 NI cDAQ-9178(USB type) 기반 전원발생(NI 9263), 전류계(NI 9227), 전압계(NI 9223)를 사용하여, 전원공급, 측정 전류, 전압 값을 Labview 프로그램을 통해 실시간 모니터링 하였다. 가진 전원 및 주파수는  $\pm 10V$ , 500Hz 의 교류전원을 사용하였으며, 측정시간은 타설 직 후 부터 24h 까지 10분 간격으로 전류 및 전압을 측정하여 모르타르 샘플의 초기 양생에 따른 전기비저항을 산출하였다(Lee and Yim, 2017; Yim et al., 2017).

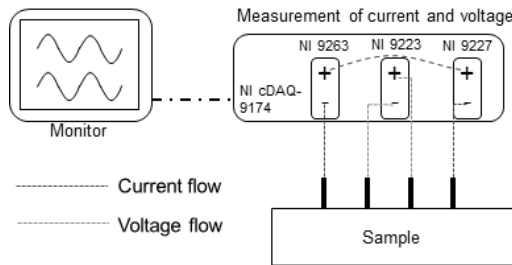


Fig. 6 Experimental setup for measurement of electrical resistivity using four-point electrode method

### 3. 결과분석 및 토의

유동화제 첨가 유무에 따른 모르타르의 대표적인 관입 저항 시험 측정결과는 Fig. 7 과 같다. 각 배합 당 3개의 샘플 측정 평균 결과로부터 회귀분석을 실시하였으며, 얻어진 지수 함수 예측식으로 초결(Initial setting time, 3.5MPa) 및 종결(Final setting time, 27.6MPa) 시점이 결정 되었다. 모든 샘플의 관입 저항 시험 결과에 따른 응결 평가 시점은 Table 3에 정

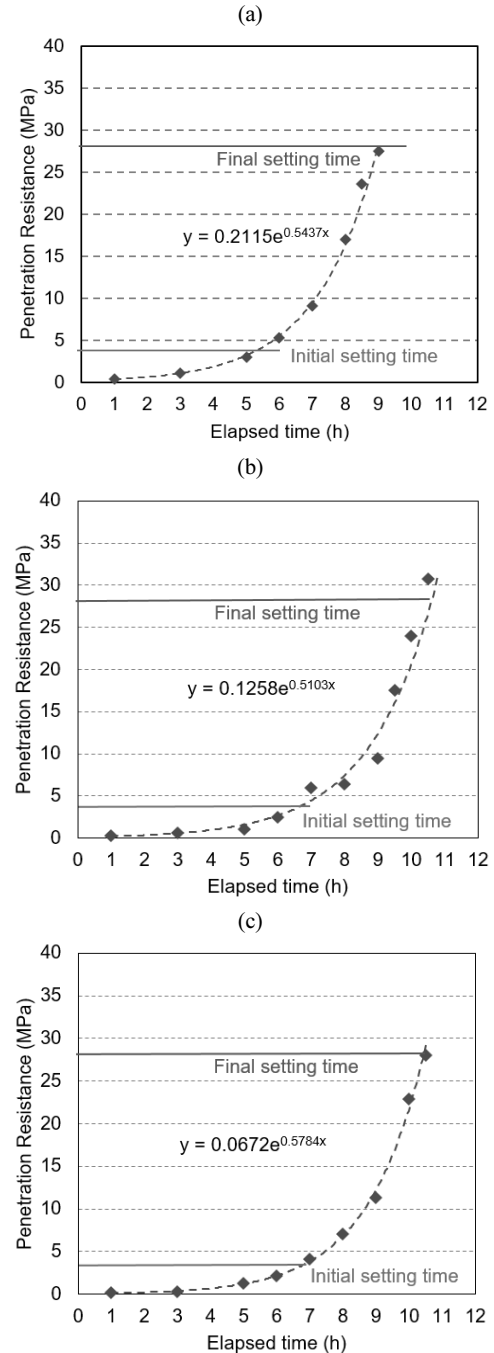
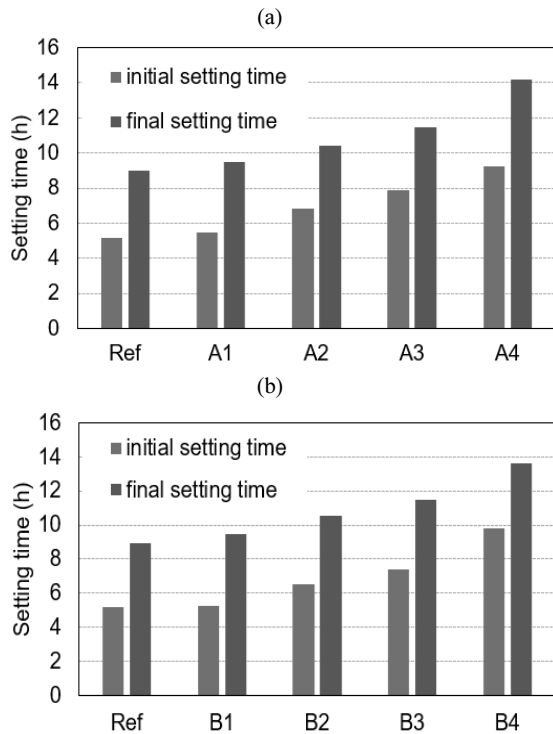


Fig. 7 Measured penetration resistance of (a) Ref, (b) A2, (c) B2

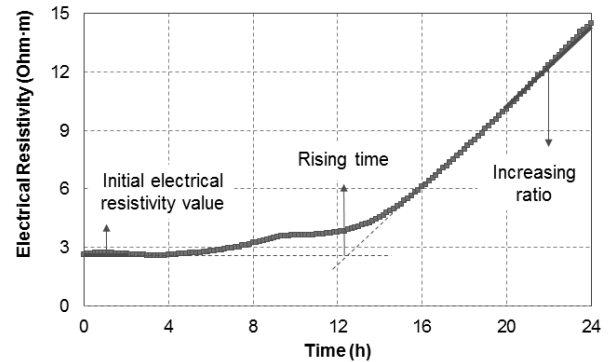
리하였다. 유동화제를 첨가하지 않은 모르타르 샘플의(Ref) 초결 및 종결 시점은 각각 5.16h, 8.96h으로 평가 되었으며, 유동화제 첨가량에 따라 초결 및 종결 시점이 모두 지연됨을 확인 할 수 있었다. 모든 샘플의 관입 저항 시험에 따른 초결 및 종결 예측 결과는 Fig. 8에 비교 정리하였다. 0.045%의 유동화제를 첨가한 모르타르(A1, B1)의 경우 초결 시점은 각각 5.46h, 5.24h 이고, 종결 시점은 9.46h, 9.44h 으로 유동화제 미첨가 샘플에 비해 0.5h 이상 응결 시점이 지연되는 것으로 측정되었다. 또한 유동성을 급격히 증가시킬 수 있을 첨가량의 유동화제가 사용 될 경우 초결은 최대 4h 이상, 종결은 최대 5.5h 이상 지연되는 것으로 나타났다. 폴리카르본산계 유동화제 종류에 따른 응결 시점 비교 결과, 유사한 유동성을 발현할 수 있는 유동화제가 첨가되었을 시(Ether and Ester) 사용 유동화제의 기본구조에 큰 영향 없이 유사한 응결 지연 현상이 발생되는 것으로 판단된다.



**Fig. 8** Estimate initial and final setting time of mortar samples with added superplasticizer

4-전극법을 이용하여 시멘트계 재료 배합 후 24h 전기비저항 측정으로부터 결정되는 대표적인 전기적 변수는 초기 전기비저항 값(initial electrical resistivity), 전기비저항 상승시기(rising time), 전기비저항 상승기율기(increasing ratio) 이다 (Yim et al., 2017). 유동화제를 첨가하지 않은 초기 재령 모르타르(Ref) 샘플의 24h 전기비저항 측정 결과는 Fig. 9와 같이

나타나며, 측정 결과로부터 분석된 주요 전기적 변수는 다음과 같다. 배합 직후 샘플 내부 고체 입자 분포(size distribution of solid particles), 입자 용적률(solid volume fraction), 공극 분포(pore distribution) 등으로 결정되는 초기 전기비저항 값은  $2.69\Omega\cdot m$  로 측정되며, 이 결과는 유동화제 첨가에 따른 시멘트 입자 분산성 증가에 따라 Ref 샘플( $3.11\Omega\cdot m$ ) 대비 감소한 것으로 판단된다. 배합비에 의해 초기 전기비저항 값이 결정된 후 시멘트 수화반응에 의해 내부 미세구조 변화가 발생되며, 이로부터 일정 시간 후 전기비저항 값이 상승하는 결과를 확인 할 수 있다. 초기 전기비저항 값과 전기비저항 상승기율기의 교점으로 Fig. 9 와 같이 전기비저항 상승시기를 결정 할 수 있으며, 굳지 않은 시멘트계 재료의 전기비저항 상승시기는 응결시점을 평가할 수 있는 전기적 변수로 사용될 수 있다 (Yim et al., 2017). 모든 샘플에서 측정 및 결정된 전기비저항 상승시점은 관입저항시험에 따라 예측된 응결 시점과의 비교를 위해 Table 3 에 정리하였다.



**Fig. 9** Representative result of electrical resistivity in mortar sample (Ref)

모든 배합 당 3개 샘플의 평균 전기비저항 측정 결과는 Fig. 10 과 같이 비교 정리 하였으며, 전기비저항 측정결과로부터 결정된 전기비저항 상승시기는 Table 3 에 정리하였다. Ether 유동화제 첨가량에 따른 초기 전기비저항 값은 Ref 샘플( $2.69\Omega\cdot m$ ) 과 유사한 측정결과( $2.65\Omega\cdot m$ )를 나타내지만, 유동화제 사용량 증가에 따라 상승시기 변화를 유발시킨다. 전기비저항 상승시기는 Ref 샘플(13.32h) 대비 A1: 12.76h, A2: 14.03h, A3: 14.75h, A4: 16.25h 로 결정되어, 유동화제 0.315 % 첨가 시 최대 2.93h 응결이 지연되는 결과로 나타났다. Ester 유동화제 역시 Ref 샘플과 유사한 초기 전기비저항 값( $2.67\Omega\cdot m$ ) 을 가지지만, 유동화제 사용에 따라 최대 3.21h 상승시기 지연 현상을 나타내었다(B1: 13.57h, B2: 14.61h, B3: 15.46h, B4: 16.53h). 초기재령 모르타르 내부 공극수 변화 및 응집현상에 따라 발생하는 전기비저항 상승현상은 시멘트계 재료의 수화반응 및 경화정도를 나타낼 수 있는 지표로, 전기비저항 상승

시기 결과가 유동화제 사용에 따른 모르타르의 응결 지연 정도 및 경향을 평가하기 위해 충분한 측정법으로 판단된다.

전기비저항 측정법의 전기적 변수인 전기비저항 상승기울기의 적용성 검증에 위해 24h 전기비저항 측정 이후, 유동화제 첨가에 따른 모르타르의 초기 물성 평가를 위해 측정된 동 탄성계수와 압축강도 측정결과는 Table 3에 정리하였다. 배합 당 3개 샘플의 평균 측정 결과에 따르면 유동화제 첨가에 따라 모르타르의 동 탄성계수는 22.41MPa 대비 최대 8.34MPa(Ether)에서 9.95MPa(Ester)까지 감소하는 것으로 나타났다. 이는 1일 양생 모르타르 샘플이 유동화제 사용에 따라 최대 37~44% 탄성계수 저하 가능성을 나타내며, 전기비저항 측정을 통해 평가 가능할 것으로 확인된다. 압축강도 측정 결과 역시 유동화제를 첨가하지 않은 모르타르의 1일 강도(12.91MPa) 대비 유동화제 사용에 따라 강도 발현이 최대 30% 저하되는 것으로 나타났다. 유동화제 첨가에 따라 전기비저항 상승기울기 역시 감소하는 유사한 결과를 확인 할 수 있었다. 즉 전기비저항 측정법을 통해 유동화제가 사용된 모르타르의 장기적 재료물성 발현까지 평가 할 수는 없으나, 재료 응결시점뿐 아니라 양생 정도에 따른 초기 물성(탄성계수, 강도) 발현을 평가할 지표로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

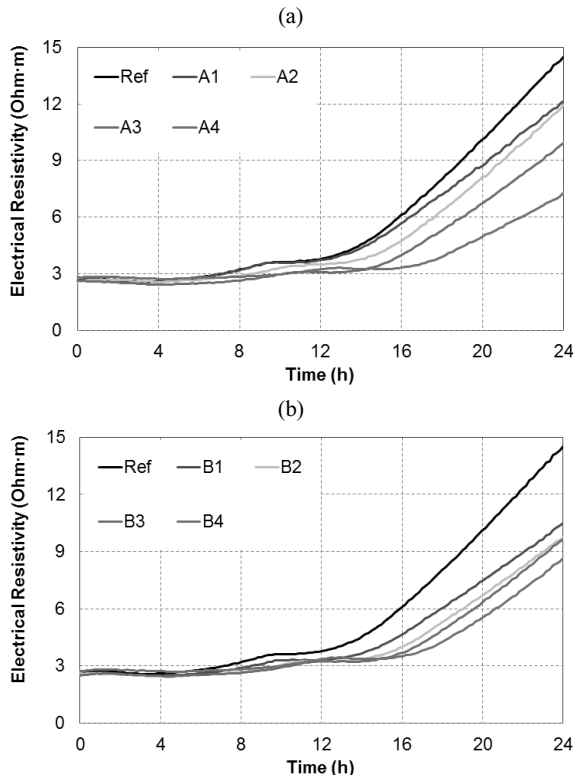


Fig. 10 Compared results of measured electrical resistivity in mortar with (a) Ether and (b) Ester

Table 3 Results of penetration resistance method, electrical resistivity measurement, dynamic elastic modulus, and compressive strength of samples

Mix No.	Setting time (h)		Initial electrical resistivity ( $\Omega \cdot m$ )	Rising time (h)	Dynamic elastic modulus (MPa)	Compressive strength (MPa)
	Initial	Final				
Ref	5.16	8.96	3.11	13.32	22.41	12.91
A1	5.46	9.46	2.64	12.76	21.37	12.17
A2	6.83	10.40	2.59	14.03	21.78	11.31
A3	7.89	11.47	2.57	14.75	17.83	10.89
A4	9.25	14.21	2.79	16.25	14.07	9.96
B1	5.24	9.44	2.57	13.57	20.87	12.27
B2	6.52	10.56	2.66	14.61	16.49	11.50
B3	7.42	11.45	2.58	15.46	15.21	10.47
B4	9.79	13.60	2.83	16.53	12.46	9.15

#### 4. 결론

본 연구는 유동성시험을 통한 유사한 슬럼프 플로우 값을 가진 유동화제 첨가량에 따른 초기 재령 모르타르의 응결 및 경화의 경향을 확인하기 위해 전기비저항 측정 및 다양한 시험에 대한 실험연구를 수행하였다. 동일한 배합에 유동화제 첨가량에 따른 샘플들의 각 시험 결과비교를 통한 결론은 다음과 같다.

- 1) 본 연구에서 관입저항시험 결과와 비교 분석을 통해 전기비저항 상승시기를 모르타르 샘플의 상변화에 따른 응결 시점으로 판단하고 변수로 제안하였다.
- 2) 초기 전기비저항 값은 배합비율에 따른 샘플 내부 입자 분포, 입자 용적률, 공극 분포 등으로 결정되는데, 유동화제 첨가에 따른 입자 분산성 증가에 따라 초기 전기비저항 감소로 나타났다.
- 3) 유동화제 첨가에 따른 모르타르 샘플의 관입저항시험 결과 초결, 종결 시점이 지연되는 현상이 나타났으며, 전기비저항 상승시기 역시 지연되는 경향을 나타내었다.
- 4) 전기비저항 측정을 이용하여 유동화 모르타르의 초기물성(탄성계수, 강도) 발현 지연 현상을 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

이 성과는 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2015R1C1A1A01055474).

## References

- Kim, D. W., Oh, S. H., and Lee, K. M.. (2013), Influence of superplasticizers on fluidity and compressive strength of alkali activated slag mortar, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, 6(4), 485-486.
- Chandra, S., and Björnström, J. (2002), Influence of cement and superplasticizers type and dosage on the fluidity of cement mortars –Part I, *Cement and Concrete Research*, Elsevier, 32(10), 1605-1611.
- Ryu, H. G., (2009), Analysis of concrete characteristic depending on chemical admixture changing component content ratio, *Journal of the Korean Institute of Building Construction*, 9(2), 85-91.
- Termkhajornkit, P., and Nawa, T. (2004), The fluidity of fly ash-cement paste containing naphthalene sulfonate superplasticizer, *Cement and concrete research*, Elsevier, 34(6), 1017-1024.
- Nakajima, Y., and Yamada, K. (2004), The effect of the kind of calcium sulfate in cements on the dispersing ability of poly  $\beta$ -naphthalene sulfonate condensate superplasticizer, *Cement and concrete research*, Elsevier, 34(5), 839-844.
- Shin, J. Y., Kim, J. Y., Hong, J. S., Suh, J. K., and Lee, Y. S. (2005), Effect of various superplasticizers on the hydration of cement paste. *Journal of the Koran concrete institute*, 17(6), 1019-1024.
- Chae, E. J., Shin, J. Y., Suh, J. K., Lee, J. M., and Park. J. W. (2006), Effect of PC(Polycarboxylate) type superplasticizer on the hydration reaction of cement paste, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 18(4), 569-576.
- Ryu, H. S., and Song, J. T.. (2004). Effects of polycarboxylate type superplasticizer on the hydration of ordinary portland cement, *Journal of the Korean Ceramic Society*, 41(5), 417-424.
- Sato, T., & Ruch, R. (1980). Stabilization of colloidal dispersions by polymer adsorption. Dekker.
- Shui, L., Sun, Z., Yang, H., Yang, X., Ji, Y., and Luo, Q. (2016), Experimental evidence for a possible dispersion mechanism of polycarboxylate-type superplasticisers, *Advances in Cement Research*, ICE, 28(5), 287-297.
- Uchikawa, H., Hanehara, S., and Sawaki, D. (1997), The role of steric repulsive force in the dispersion of cement particles in fresh paste prepared with organic admixture, *Cement and Concrete Research*, Elsevier, 27(1), 37-50.
- Yoshioka, K., Sakai, E., Daimon, M., and Kitahara, A. (1997), Role of steric hindrance in the performance of superplasticizers for concrete. *Journal of the American Ceramic Society*, Wiley Online Library, 80(10), 2667-2671.
- Chung, C. W., Suraneni, P., Popovice, J. S., and Struble, L. J., (2012), Setting Time Measurement Using Ultrasonic Wave Flection, *ACI Materials of Concrete Journal*, 109(1), 109-118.
- Pinto, R. C. A. and Hover, K. C., (1999), Application of Maturity Approach to Setting Times, *Materials Journal*, 96(6), 686-691.
- Hamann, C. H., Hamnett, A., and Vielstich, W., (1998), Electrochemistry, Wiley-VCH, USA, 2-31.
- Lee, H. J., and Yim, H. J.. (2017). Setting time evaluation of concrete using electrical resistivity measurement, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 29(4), 361-369.
- Yim, H. J., Lee, H. J., and Kim, J. H. (2017), Evaluation of mortar setting time by using electrical resistivity measurements. *Construction and Building Materials*, Elsevier, 146, 679-686.
- Wenner, F., (1915), A Method of Measuring Earth Resistivity, *Journal of the Franklin Institute*, 180(3), 373-375.

Received : 06/08/2018

Revised : 10/16/2018

Accepted : 10/18/2018

---

**요 지** : 고유동 콘크리트의 사용이 일반화 되면서 유동화제 사용에 따른 콘크리트의 초기 재료물성 발현에 대한 관심이 높아지고 있다. 콘크리트 수화반응에 따른 응결시점은 초기 물성 발현을 나타낼 수 있는 지표 중 하나이며, 이러한 응결시점 평가를 위해 관입저항시험과 함께 다양한 비파괴 평가 기법들이 사용되고 있다. 본 연구에서는 전기비저항 측정법을 이용하여 유동화 모르타르의 응결 지연 현상 평가에 관한 실험 연구를 수행하였다. PC계 유동화제 첨가량에 따른 총 9종류의 모르타르 샘플을 준비하였으며, 4-전극법을 이용한 초기재령 모르타르 샘플의 전기비저항 변화를 24h 측정하였다. 측정결과로부터 결정된 전기비저항 상승시기를 모르타르 응결시점 평가를 위한 전기적 변수로 사용하였으며, 측정결과와의 비교 분석을 위해 동일 샘플의 관입저항시험을 실시하였다. 또한 유동화 모르타르의 1일 동 탄성계수 및 압축강도 측정을 통해 전기비저항 측정을 이용한 유동화 모르타르의 초기 재료물성 평가 가능성을 확인하였다.

**핵심용어** : 전기비저항, 모르타르, 유동화제, 비파괴평가, 응결시점

---