

# 압전소자를 이용한 시멘트계 재료의 응결 특성 평가

## Setting Characteristic Assessment of Cementitious Materials using Piezoelectric Sensor

이 창 준<sup>1</sup>

이 준 철<sup>2</sup>

신 성 우<sup>3</sup>

김 화 중<sup>2\*</sup>

Lee, Chang Joon<sup>1</sup>

Lee, Jun Cheol<sup>2</sup>

Shin, Sung Woo<sup>3</sup>

Kim, Wha Jung<sup>2\*</sup>

*Department of Architectural Engineering, Chungbuk National University, Seowon-Gu, Cheoungju, 362-763, Korea <sup>1</sup>*

*School of Architecture and Civil Engineering, Kyungpook National University, Buk-Gu, Daegu, 702-701, Korea <sup>2</sup>*

*Department of Safety and Engnieering, Pukyung National University, 45 Yongso-ro, Namgu, Pusan, 608-737, Korea <sup>3</sup>*

### Abstract

The evolution of electro-mechanical impedance (EMI) of the piezoelectricity (PZT) sensor was investigated to determine the setting times of cementitious materials in this study. The PZT sensor coated with non-conductive acrylic resin was embedded in cement paste before casting and the EMI signatures were continuously measured. Vicat needle test and semi-adiabatic calorimetry test were also conducted to justify the validity of EMI sensing technique in setting monitoring of cementitious materials. The results show that significant changes in EMI resonant peak magnitude and frequency during setting process were observed, and that the setting times determined by EMI sensing technique were relevant to the setting times measured by Vicat needle test and semi-adiabatic calorimetry test.

Keywords : setting, electro-mechanical impedance, piezoelectric sensor, cementitious material

## 1. 서 론

시멘트는 물과 접촉하면서 물리적 성질이 순차적으로 강성을 띄는 독특한 재료이다. 시멘트의 초기 수화과정에서 시멘트의 화학성분이 자유수를 소모하면서 시멘트 입자간의 네트워크를 형성하여 강성을 발휘하게 된다. 이후, 응결(setting)이라고 정의되는 경화거동을 일으키게 된다. 일반적으로 시멘트는 물과 접촉하면서 몇 시간 이내에 응결이 발생하게 된다. 시멘트의 응결은 시멘트계 재료(시멘트 페이

스트, 모르타르, 콘크리트 등)의 마감작업이나 양생작업을 개시하는 시점, 증기양생을 적용하는 시점 및 구조물에 하중을 재하하는 시점, 콜드조인트 방지시점 등을 결정하는 중요한 요소이다. 그러므로 시멘트의 응결속도를 정량적으로 측정하는 방법은 매우 중요하다.

시멘트계 재료의 응결을 평가하는 방법으로 비카침 시험과 관입저항시험을 가장 많이 사용하고 있다[1,2]. 이 방법들은 사용의 편리성, 현장 및 실험실 환경에서의 적합성, 시험장치의 저가 등의 장점을 가지고 있다. 하지만 비카침 시험의 경우, 시멘트 페이스트에만 국한된 시험으로 시멘트계 재료 전체의 응결 특성을 파악하는 데에는 한계가 있다. 관입저항시험의 경우도 마찬가지로, 콘크리트의 응결을 측정하기 위해 콘크리트에서부터 추출한 모르타르를 이용하기 때문에 콘크리트 자체의 응결 특성을 평가하기에는 무리가 있다. 또한 실제 현장에 타설된 시멘트계 재료에 이 방법들

Received : April 12, 2016

Revision received : May 2, 2016

Accepted : July 20, 2016

\* Corresponding author : Kim, Wha Jung

[Tel: 82-53-950-5596 E-mail: kimwj@knu.ac.kr]

©2016 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

을 적용하는 것이 현실적으로 불가능하다는 것이다.

위와 같은 비카침 시험과 관입저항시험의 한계를 보완하기 위한 새로운 시멘트계 재료의 응결측정 방법에 관한 연구가 진행되고 있다[3]. 하지만 이러한 방법들도 고가의 장비를 사용한다는 점 또는 현장 적용성의 어려움 등은 여전히 해결해야 될 문제로 남아있다.

최근에는 이러한 문제를 해결하기 위한 일환으로 저가의 압전소자(Piezoelectricity, PZT)를 이용하여 시멘트계 재료의 거동 특성을 파악하고자 하는 연구가 부각을 받고 있다[4,5]. 이 연구들에서는 시멘트계 재료의 거동에 따른 PZT 재료의 전기-역학적 임피던스(electro-mechanical impedance, EMI)를 변화를 통해 재료적인 특성을 분석하였다. 그러나 현재까지 PZT의 EMI기법을 이용하여 응결이 발생하는 초기재령에서의 재료 상태 평가에 대한 연구는 미비한 실정이다.

따라서 본 연구의 목적은 상기 문제점을 보완하기 위해 시멘트계 재료에 매립된 PZT 센서의 EMI 신호분석을 수행하여 시멘트의 수화 개시점에서부터 응결시점까지 연속적인 모니터링을 통해 시멘트계 재료의 응결특성을 파악하고자 한다.

## 2. 전기-역학적 임피던스 센싱기법

최근 구조물의 건전성 평가와 비파괴 검사의 일환으로 압전소자(PZT)를 적용하는 다양한 기술들이 개발되고 있다. PZT는 주파수에 따른 어드미턴스를 측정할 수 있어, PZT를 임피던스 트랜스듀서로 활용하여 구조물의 건전성 평가가 가능하다[6]. 이러한 기술을 일컬어 전기-역학적 임피던스(Electro-Mechanical Impedance, EMI) 센싱기법이라고 한다. EMI 기술은 저가의 PZT 트랜스듀서를 이용하기 때문에 트랜스 듀서를 구조물에 영구히 부착하거나 또는 매립하여 지속적인 모니터링이 가능하다. 또한 데이터 처리의 단순화와 저가의 하드웨어를 사용한다는 장점이 있다.

EMI 센싱기법은 구조물의 건전성 평가뿐만 아니라 재료적 특성을 파악하는 데에도 사용되고 있다. 그 중 콘크리트의 초기재령에서의 강도를 모니터링하기 위한 방법으로 EMI 센싱기법이 사용되고 있다. Soh 등은 콘크리트 표면에 PZT를 부착하여 EMI를 측정하여 콘크리트 강도를 예측하기도 하였으며, Shin 등도 콘크리트 표면에 PZT를 부착하여 콘크리트 재령에 따른 EMI를 신호를 측정함으로써 콘크리트 강도의 지속적인 모니터링을 실시하였다[4,7].

EMI 센싱기법을 활용하여 구조물의 건전성 및 재료의 특성을 파악하는 대부분의 연구는 PZT 트랜스듀서를 구조물에 부착시켜 사용한다는 것이 특징이다. 하지만 구조물의 건전성 평가나 재료적인 특성 평가에 있어서 실제로는 표면 응력과 비교해 구조물의 하중 특성을 반영할 수 있는 내부 응력분포가 더 중요하다. 또한 재료적인 특성 평가에 있어서 특히, 콘크리트와 같은 재료는 콘크리트가 경화된 이후에 PZT 트랜스듀서를 부착할 수 있기 때문에 재료의 초기재령에서의 특성을 모니터링하지 못한다는 단점을 가지고 있다. 이러한 이유로 인해 PZT 트랜스듀서를 재료에 직접 매립하여 EMI를 측정하는 기술들이 선호되고 있다. Gu 등은 스마트 골재라는 PZT 트랜스듀서를 콘크리트에 직접 매립하여 초기재령에서의 콘크리트 강도를 모니터링 하였으며, Wang 등은 콘크리트 내부에 PZT를 매립하여 초기재령에서 콘크리트의 강도 변화를 EMI 센싱기법을 이용해 예측하기도 했다[5,8].

## 3. 실험내용 및 방법

### 3.1 실험계획 및 사용재료

본 실험에서는 압전소자를 이용한 시멘트계 재료의 응결 특성을 평가하기 위해 시멘트 페이스트를 실험시편으로 사용하였다.

본 실험에 사용된 시멘트는 KS L 5201 규격을 만족하는 1종 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 배합수는 시멘트의 응결에 미치는 영향을 최소화하기 위해 증류수를 사용하였다[9]. 시멘트 페이스트의 물시멘트비는 0.4로 하였으며, 응결촉진제로 염화칼슘( $\text{CaCl}_2$ )을 시멘트 질량 대비 2%, 응결지연제로 자당( $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$ )을 시멘트 질량 대비 0.1%를 사용하였다. 시멘트 페이스트의 배합은 KS L 5109에 의거 실시하였으며 실험 배합비는 Table 1과 같다[10].

Table 1. Mixing proportion for cemen pastes

Type	Water to cement ratio	Cement (g)	Calcium chloride (g)	Saccharose (g)
Plain	0.4	1000	-	-
Accelerator	0.4	1000	20	-
Retarder	0.4	1000	-	1

본 실험에 사용한 압전소자는 상용의 Buzzer element (CBC2035BA, Daeyoung Electric)로 동판(지름 20mm, 두께 0.13mm)에 압전재료(지름 15mm, 두께 0.1mm)를 부착시킨 형태이다. 압전소자를 시멘트 페이스트에 매립할 경우, 압전소자의 EMI와 시멘트 페이스트 내에 이온이 용해된 수분에 의한 전기적 임피던스(Electrical Impedance, 이하 EI)가 혼재되어 압전소자의 EMI 신호를 파악하는데 어려움이 발생하게 된다. 따라서 압전소자를 시멘트 페이스트에 매립할 경우 발생하는 극성소트닝에 의한 EMI를 제거할 수 있도록 압전소자를 절연 처리하는 것이 필수적이다. 본 실험에서는 알칼리저항성이 높은 투명 아크릴 절연 코팅제를 이용하여 압전소자를 절연 처리하였다. Figure 1은 본 실험에 사용한 아크릴 절연코팅을 한 압전소자를 나타낸 것이다.



Figure 1. Piezoelectric sensor embedded in cement paste

### 3.2 실험방법

배합이 끝난 시멘트 페이스트는 지름 60mm, 높이 72mm의 비흡습성 플라스틱 용기에 담았으며, 중앙부에 아크릴 절연처리가 된 압전소자를 매립하였다. 압전소자를 매립한 즉시 EMI를 측정하였으며, 최초 측정된 EMI 신호를 측정시간상 0시간(zero time)값으로 설정하였다. 압전소자의 EMI는 LCR meter(HIOKI 3235-50 LCR HiTESTER)를 이용하여 측정하였으며, LCR meter에 연결된 범용 인터페이스 버스(GP-IB)를 이용하여 데이터를 수집하였다. 측정 주파수의 범위는 20kHz~250kHz로 설정하였으며, 측정 주파수의 간격은 500Hz로 설정하여 매 10분마다 12시간동안 압전소자의 EMI를 측정하였다. Figure 2는 본 실험에서 압전소자의 EMI 측정장치를 나타낸 것이다.



Figure 2. Test setup for measuring EMI of PZT sensor

본 실험에서는 압전소자의 EMI 신호거동을 이용한 시멘트 페이스트의 응결특성을 평가하기 위해, 기존의 응결측정 시험방법인 비카트침 시험과 간이단열을 이용한 수화온도 측정을 통해 상대적인 비교를 실시하였다. 비카트침 시험은 ASTM C 191에 의거 실시하였다[1]. 간이단열을 이용한 수화온도를 측정하기 위해서, 지름 60mm, 높이 72mm의 플라스틱 용기에 시멘트 페이스트를 담아 중앙부에 K타입 열전대를 매립하여 두께 100mm의 폴리스티렌 박스에 용기를 넣어 단열을 실시하였다. 시멘트 페이스트의 수화온도는 매 10초 간격으로 12시간동안 측정하였다. Figure 3은 간이단열실험장치를 나타낸 것이다.

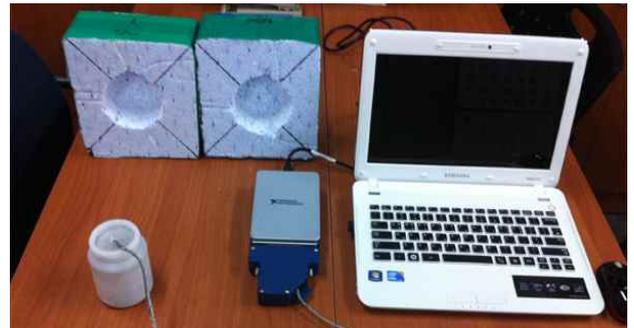


Figure 3. Test setup for measuring hydration temperature

## 4. 실험결과

### 4.1 PZT 센서의 EMI 거동

Figure 4~6은 시멘트 페이스트 내부에 매립된 PZT 센서의 수화시간에 따른 EMI거동을 나타내고 있다.

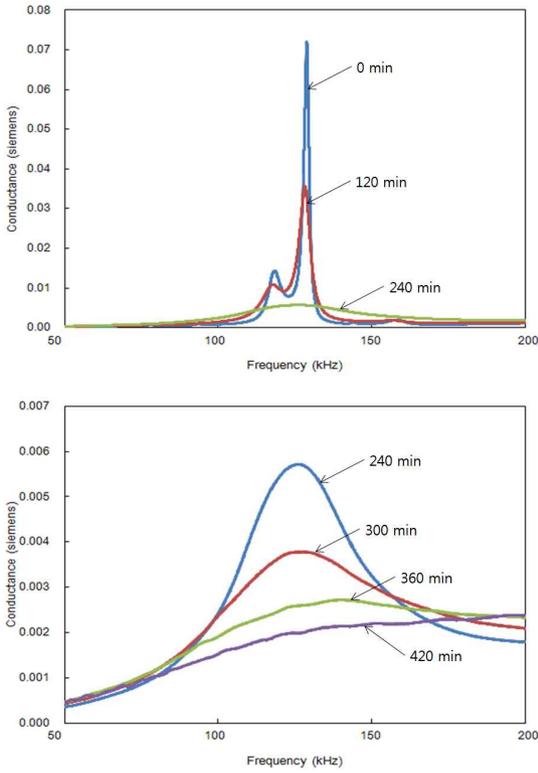


Figure 4. EMI signatures of PZT sensor embedded in plain cement pastes

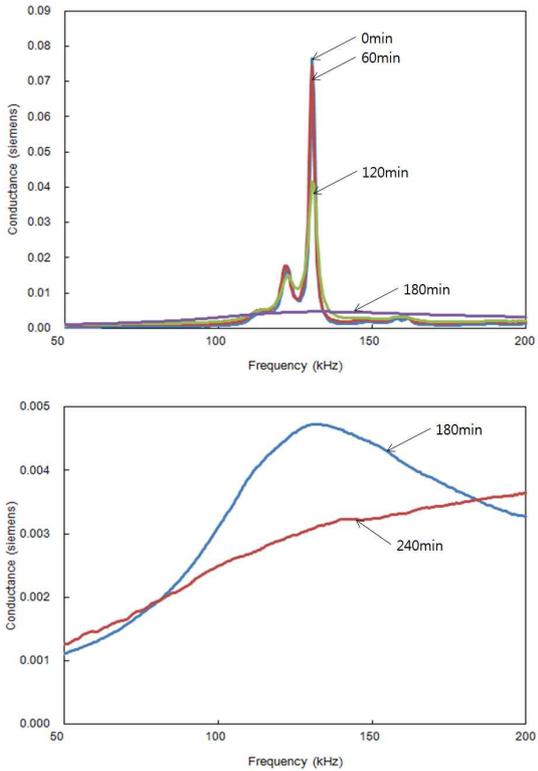


Figure 5. EMI signatures of PZT sensor embedded in cement pastes with accelerator

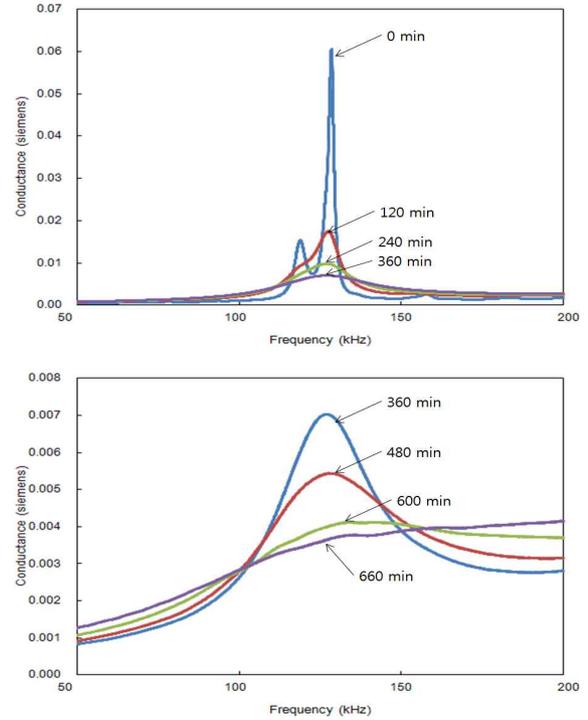


Figure 6. EMI signatures of PZT sensor embedded in cement pastes with retarder

전반적으로 시멘트 페이스트에 매립된 PZT 센서의 EMI 공진피크의 크기는 수화시간이 증가할수록 지속적인 감소현상을 나타냈으며 일정시간 이후에는 피크가 소멸되었다. Plain 시편의 경우 400분, 응결축진제를 혼입한 시편의 경우 220분, 응결지연제를 혼입한 시편의 경우 640분 이후에 EMI 공진피크가 소멸하는 것으로 나타났다.

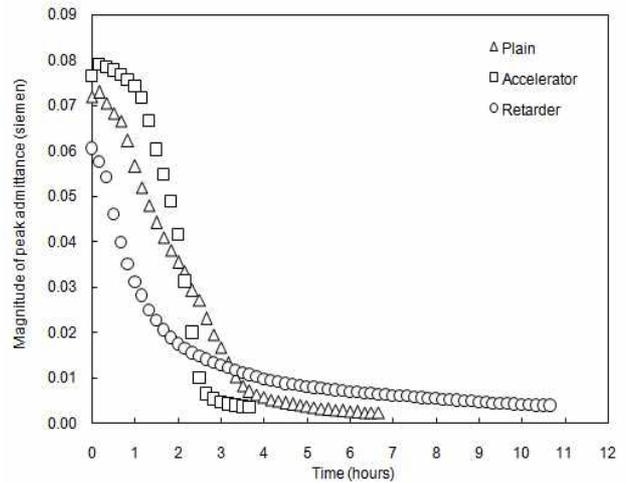


Figure 7. Magnitude of EMI resonance peak as function of material age

Figure 7은 수화시간에 따른 시편의 EMI 공진피크의 변화를 나타낸 것이다. EMI 공진피크는 수화반응 개시점부터 급속하게 감소하는 거동을 나타내다 특정시점부터 공진피크가 소멸되는 시점까지는 상대적으로 완만하게 감소하는 추세를 나타냈다. Plain 시편의 경우 220분, 응결축진제를 혼입한 시편의 경우 150분, 응결지연제를 혼입한 시편의 경우 190분까지 공진피크의 급격한 감소를 나타냈다.

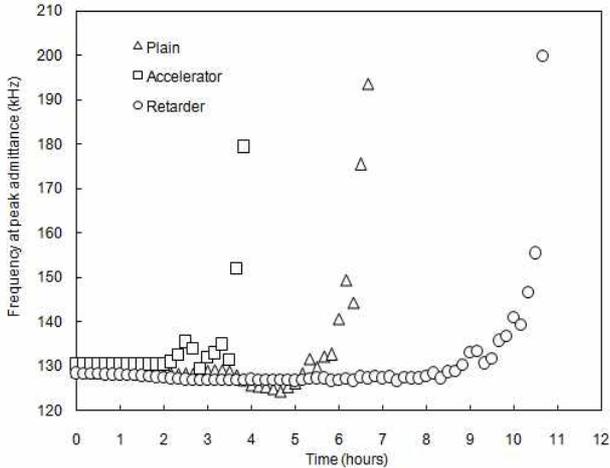


Figure 8. EMI resonance peak frequency as a function of material age

Figure 8은 수화시간에 따른 EMI 공진주파수의 변화를 나타낸 것이다. 공진주파수는 초기 수화반응시에는 큰 변화가 없었으나 특정시점을 기점으로 하여 급격하게 고주파대역으로 이동하였다. Plain 시편의 경우 220분, 응결축진제를 혼입한 시편의 경우 150분, 응결지연제를 혼입한 시편의 경우 470분 이후에 공진주파수의 현저한 증가를 나타냈다.

#### 4.2 비카트침 시험에 의한 시멘트 페이스트의 응결시점

Figure 9는 ASTM C 191에 의거한 각 시편의 비카트침 시험결과를 나타낸 것이다. ASTM C 191에서는 관입하는 침의 깊이가 25mm일 때의 시점을 초결로 보고 침이 더 이상 관입되지 않을 시점을 종결로 본다. 이에 따라 각 시편의 초결시점을 평가할 경우, Plain 시편의 경우 335분, 응결축진제를 혼입한 시편의 경우 220분이며, 응결지연제를 혼입한 시편의 경우 495분으로 나타났다. 또한 종결시점은 Plain 시편의 경우 405분, 응결축진제를 혼입한 시편의 경우 230분, 응결지연제를 혼입한 시편의 경우 645분으로 나타났다.

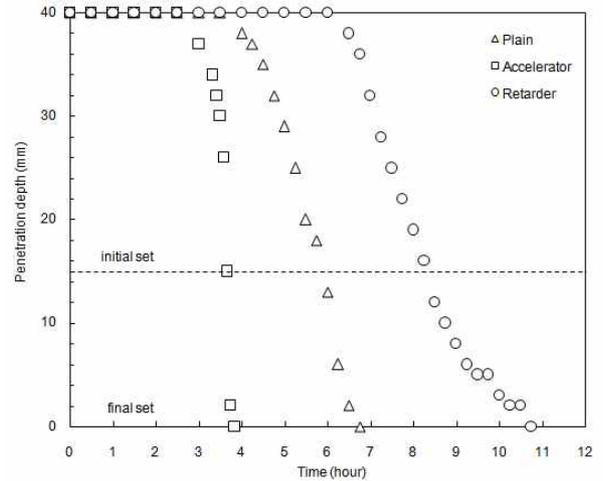


Figure 9. Penetration depth of needle as a function of material age

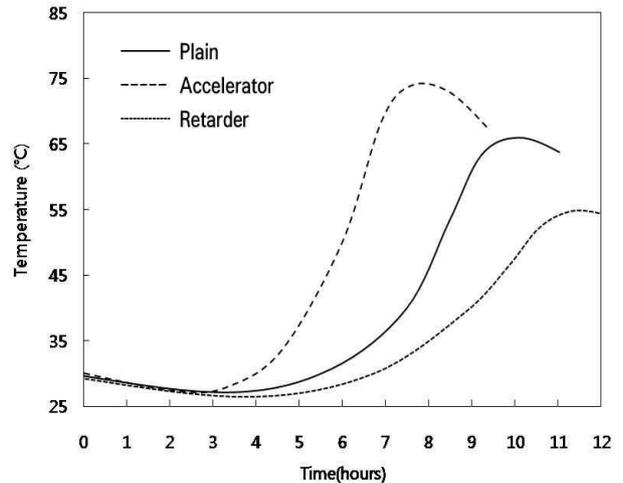


Figure 10. Temperature of cement pastes as a function of material age

#### 4.3 간이단열 시험에 의한 각 시편의 수화온도

Figure 10은 간이단열시험을 통해 측정된 각 시편의 시간에 따른 수화온도를 나타낸 것이다. 시멘트 페이스트의 수화온도는 초기에는 완만한 온도하강을 나타냈으며, 특정시점부터 급격한 온도상승을 나타내다 시간이 지남에 따라 다시 하강하는 경향을 보였다. 온도가 상승하기 시작하는 시점은 Plain 시편의 경우 약 210분, 응결축진제를 혼입한 시편의 경우 약 140분, 응결지연제를 혼입한 시편의 경우 약 240분으로 나타났다. 최대온도에 도달하는 시점은 Plain 시편의 경우 약 600분, 응결축진제를 혼입한 시편의 경우 약 470분, 응결지연제를 혼입한 시편의 경우 약 690분으로 나타났다.

### 5. 결과고찰

Figure 11은 각 시편의 비카트침 실험결과와 간이단열에 의한 수화온도곡선 및 EMI 신호의 거동을 나타내고 있다.

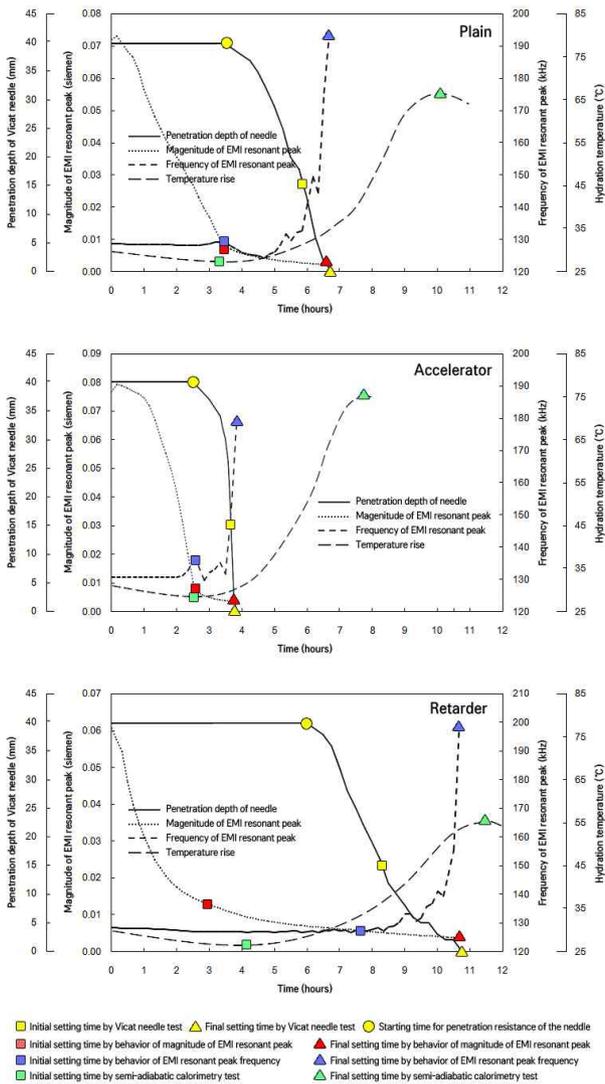


Figure 11. The setting times by various testing method

Figure 11을 살펴보면 각 시편의 공진피크 소멸시점은 비카트침에 의해 평가된 종결시점과 유사하게 나타났다. 하지만 각 시편의 공진주파수의 변화시점은 비카트침 시험에 의해 평가된 초결 시점과는 다소 큰 차이를 나타내고 있다.

ASTM C 191의 비카트침 시험에서는 초결시점을 침이 25mm까지 관입될 때의 시점으로 정의하고 있다[1]. 하지만

ASTM C 191에서 정의된 시멘트 페이스트의 초결시점은 경험에 의해 임의적으로 선택된 값으로 명확한 시멘트 페이스트의 응결시점을 나타내지는 못한다[11]. Figure 8과 같이 실제 시멘트 페이스트가 침에 대한 관입저항력을 갖추는 시점은 ASTM C 191에서 정의한 시점보다 빠르게 나타난다. 비카트침 시험에서 침이 관입저항력을 갖추기 시작하는 시점은 EMI 공진주파수의 변화시점과 유사한 것으로 나타났다.

수화온도곡선에서 시멘트 페이스트 내부의 온도가 상승하는 시점에서부터 최대 온도에 도달하는 시점은 시멘트 수화단계 중 가속기에 해당된다[12]. 일반적으로 시멘트 페이스트의 응결은 시멘트 수화단계 중 가속기에 발생하게 되며, 초결의 경우 가속기의 초기에 발생하게 되며, 종결의 경우 최대 수화온도에 도달하기 전인 가속기의 말기에 발생하게 된다. 따라서 시멘트 페이스트의 응결시간 범위는 온도상승 시점에서부터 최대온도 도달시점까지로 볼 수 있다.

Figure 11을 살펴보면 공진피크의 소멸시점과 공진주파수의 변화시점은 간이단열시험에 의해 측정된 수화온도 곡선에서의 응결시간 범위 내에 존재하는 것으로 나타났다. 따라서 EMI 공진주파수의 변화시점을 시멘트 페이스트의 초결시점, 공진피크의 소멸시점을 시멘트 페이스트의 종결시점으로 정의할 수도 있을 것이다. 그러므로 EMI 센싱기법에 의해 평가된 응결시점은 실제 시멘트 페이스트의 응결을 평가하는 새로운 방법으로 사용될 수 있을 것이라 판단된다.

### 6. 결 론

본 연구에서는 시멘트 페이스트에 매립된 압전소자의 EMI 신호변화를 이용하여 시멘트 페이스트의 응결특성을 평가하였으며, 본 연구의 내용 및 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 시멘트 페이스트가 수화함에 따라 EMI 공진피크의 크기는 지속적인 감소를 나타냈으며 특정시점에서 소멸하였다. EMI 공진주파수는 수화초기에는 큰 변화가 없었으나 특정시점부터 고주파수대역으로 이동하는 경향을 나타냈다.
- 2) 비카트침 시험과 비교시 EMI 공진주파수의 이동시점은 비카트침이 관입저항력을 최초로 발생시키는 시점과 유사하게 나타났으며, EMI 공진피크의 소멸시점은

비카트칩 시험의 종결시점과 유사하게 나타났다. EMI 공진주파수의 변화시점과 공진피크의 소멸시점은 간이단열시험에 의해 측정된 수화온도곡선에서 응결시간 범위 내에 존재하는 것으로 나타났다.

3) 따라서 압전소자를 이용한 EMI 센싱기법을 통해 시멘트계 재료의 응결특성을 효과적으로 평가할 수 있을 것이라 판단한다.

본 연구에서의 PZT센서를 이용한 EMI 기법은 시멘트계 재료에 저가의 PZT 센서를 직접 매립하여 EMI 신호를 모니터링 함으로써 실제 현장조건에서의 시멘트계 재료의 응결 특성을 평가하는 것이 가능할 것이라고 전망한다. 또한 매립된 PZT 센서는 시멘트계 재료의 응결상태 평가뿐만이 아니라 응결 이후의 시멘트계 재료의 물리적인 특성을 지속적으로 모니터링 할 수 있을 것이라 기대한다.

## 요 약

본 연구에서는 압전소자의 EMI 신호변화를 이용하여 시멘트계 재료의 응결특성을 평가하였다. 시멘트 페이스트에 매립된 PZT센서의 수화시간에 따른 EMI 신호변화를 비카트칩 시험과 간이단열시험을 통한 수화온도곡선과 비교하였다. 실험결과, 시멘트 페이스트가 수화함에 따라 PZT센서의 EMI 공진피크와 공진주파수의 변화가 나타났으며, 이러한 변화시점은 비카트칩 시험과 간이단열시험을 통한 수화온도곡선으로부터 획득한 응결시간과 부합하는 것으로 나타났다.

**키워드** : 응결, 전기역학적 임피던스, 압전센서, 시멘트계 재료

## Acknowledgement

This work was supported by the research grant of the Chungbuk National University in 2013 and the Kyungpook National University Bokhyeon Research Fund, 2015.

## References

1. Annual Book of ASTM Standards, ASTM Test Method for Time

of Setting of Hydraulic Cements by Vicat Needle (C 191), West Conshohocken (PA): ASTM International; 2002. 179–84 p.

2. Annual Book of ASTM Standards, ASTM Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance (C 403/C 403M), West Conshohocken (PA): ASTM International; 2003. 228–33 p.

3. Christensen BJ, Time of Setting–Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete–Making Materials, West Conshohocken (PA): ASTM International; 2006. 86–97 p.

4. Shin SW, Qureshi AR, Lee JY, Yun CB, Piezoelectric sensor based nondestructive active monitoring of strength gain in concrete, *Smart Materials and Structures*, 2008 Jul 18;17(5):1–8.

5. Wang D, Zhu H, Monitoring of the strength gain of concrete using embedded PZT impedance transducer, *Construction and Building Materials*, 2011 Sep;25(9):3703–8.

6. Park GH, Assessing Structural Integrity Using Mechatronic Impedance Transducers with Applications in Extreme Environments [Dissertation], [Blacksburg (VA)]: Virginia Tech; 2000. 126 p.

7. Soh CK, Bhalla S, Calibration of piezo–impedance transducers for strength prediction and damage assessment of concrete, *Smart Materials and Structures*, 2005 Jun 29;14(4):671–84.

8. Gu H, Song G, Dhonde H, Mo YL, Yan S, Concrete early–age strength monitoring using embedded piezoelectric transducers, *Smart Materials and Structures*, 2006 Nov 2;15(6):1837–45.

9. KS L 5201, Portland cement, Korean Standard Association, Seoul, 2013.

10. KS L 5109, Testing method for mechanical mixing of hydraulic cement pastes and mortars of plastic consistency, Korean Standard Association, Seoul, 2012.

11. Mindess S, Young JF, Darwin D, Concrete, 2nd rev. ed, New Jersey: Prentice Hall, 2003. p. 212–3

12. Neville AM, Properties of concrete, 4th rev. ed, New York: Wiley; 2000. 18 p.