

압전센서를 이용한 플라이애시 치환 시멘트 페이스트의 응결 시점 평가

Evaluation of Setting Time in Cement Paste with Fly Ash Replacement Using Piezoelectric Sensors

이준철¹ · 고태용² · 이창용^{2*}Jun-Cheol Lee¹ · Tae-Yong Go² · Chang-Yong Yi^{2*}

(Received May 8, 2024 / Revised May 17, 2024 / Accepted May 21, 2024)

This study investigated the setting characteristics of cement paste with varying proportions of fly ash replacement using the electro-mechanical impedance (EMI) sensing technique. Cement paste samples were prepared with a water-to-binder ratio of 40 %, substituting fly ash for 10 %, 20 %, and 30 % of the cement weight. Piezoelectric (PZT) sensors were embedded in the center of each cement paste sample to continuously monitor the EMI signals. Vicat needle test and semi-adiabatic calorimetry test were conducted to validate the reliability of the EMI sensing technique in monitoring the setting of cement paste. Experimental results revealed notable changes in the magnitude and resonant frequency of the EMI resonant peaks during the setting time. It was confirmed that the setting times measured through the EMI sensing technique were correlated with those determined by the Vicat needle test and semi-adiabatic calorimetry test.

키워드 : 압전센서, 전기역학적 임피던스, 플라이애시, 응결

Keywords : Piezoelectric sensor, Electro-mechanical impedance, Fly ash, Setting

1. 서론

초기 수화과정에서 시멘트는 물과 반응하여 일정시간 동안 유체 상태를 유지하다 특정시점부터 고체 상태로 상전이를 하게 된다. 이러한 시멘트 페이스트의 상전이 과정을 응결(setting)이라고 한다(Mindess and Young 1981). 시멘트의 응결은 콘크리트의 마감시점, 콜드조인트 방지시점, 증기양생 개시시점, 거푸집 탈형 시점 등을 결정하는 중요한 요소이다(Christensen 2006). 따라서 시멘트의 응결시간을 명확하게 파악하는 것은 매우 중요하다.

시멘트의 응결을 측정하는 가장 대표적인 방법은 비카트침 시험과 관입저항시험이다(ASTM C 191-21 2021; ASTM C 403/C 403 M-21 2021). 이 시험방법들은 사용상의 용이성, 장치의 저가라는 측면에서 장점을 가지고 있다. 하지만 이 두 시험방법 모두 실험실 기반에서 응결을 측정하는 시험방법으로 온도, 습도 등 시멘트 응결에 있어서 다양한 외부 환경에 대한 변수가 존재하는

현장타설 콘크리트의 응결을 대변하지 못한다. 특히 플라이애시, 고로슬래그 등을 혼합하여 응결시간이 지연되는 현장타설 콘크리트의 경우 위 시험방법들로 명확한 응결특성을 파악하는데 한계가 있다. 이러한 비카트침 시험과 관입저항시험의 한계를 보완하기 위한 다양한 측정방법에 대한 연구가 진행되고 있으나, 이러한 방법들도 경제성 및 현장적용성의 문제 등이 여전히 해결되어야 할 문제로 남아있다(Uppalapati et al. 2021; Sharma et al. 2020).

최근 이와 같은 문제를 해결하기 위해 Lee et. al.(2016), Lee and Lee(2022), Lee(2023)과 Zhang et al.(2020)은 전기역학적 임피던스(Electro-mechanical Impedance, EMI) 센싱기법을 이용한 시멘트계 재료의 응결 측정방법을 제안하였다. 이 연구들에서는 저가의 압전(piezoelectric, PZT) 센서를 시멘트계 재료에 매립하여 PZT 센서의 EMI 신호거동을 분석하여 응결특성을 평가하였다. PZT 센서를 이용한 EMI 센싱기법은 간단한 원리에 기반한다. PZT 센서가 호스트(host) 구조물과 연결되어 있는 경우, PZT

* Corresponding author E-mail: cyi@knu.ac.kr

¹서원대학교 건축학과 조교수 (Department of Architecture, Seowon University, Chungbuk, 28674, Korea)

²경북대학교 지능형건설자동화센터 연구교수 (Intelligent Construction Automation Center, Kyungpook National University, Daegu, 41566, Korea)

센서에 교류전압을 가하게 되면 PZT 센서의 변형에 의해 호스트 구조물과의 결합영역에서 진동이 발생하게 된다. 이때 호스트 구조물의 기계적 임피던스는 호스트 구조물과 연결된 PZT 센서의 전기적 임피던스 신호를 분석하여 계산할 수 있다. Liang et al.(1997)은 호스트 구조물과 연결된 압전센서의 전기역학적 임피던스 모델을 제안하였다. Liang et al.(1997)이 제안한 모델에서 압전센서의 기계적 임피던스가 변하지 않는다고 가정할 경우, 호스트 구조물의 기계적 임피던스의 변화가 PZT 센서의 전기적 임피던스에 직접적인 영향을 미치게 된다. 따라서 호스트 구조물에 PZT 센서를 연결할 경우 PZT 센서의 전기적 임피던스 변화를 모니터링 함으로써 호스트 구조물의 기계적 물성 변화를 감지할 수 있다.

본 연구에서는 이와 같은 EMI 센싱기법을 이용하여 플라이애시 치환율에 따른 시멘트 페이스트의 응결특성을 평가하고 플라이애시와 같은 혼화재료를 혼입한 시멘트계 재료의 응결시점 측정에 있어서 EMI 센싱기법의 신뢰성과 효용성을 검증하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

본 실험에 사용된 PZT 센서는 상용의 PZT buzzer element (CBC2035BA, Daeyoung Electric, Korea)로 제원은 Table 1 및 Fig. 1과 같다. PZT 센서를 직접 시멘트 페이스트에 매립할 경우 시멘트 페이스트에 용해되어 있는 이온의 영향으로 극성 쇼트닝 현상이 발생하기 때문에 PZT 센서의 EMI 신호를 파악하는데 어려움이 있다. 따라서 시멘트 페이스트 내에 PZT 센서를 매립하기 위해서는 절연처리가 반드시 필요하다. 본 실험에서는 아크릴 절연코팅제를 이용하여 PZT 센서를 절연처리를 하였다.

Table 1. Specification of PZT sensor used in this study

Frequency (kHz)	Resonant resistance (Ω)	Capacity (pF)	Plate material
3.5 ± 0.5	350	$30,000 \pm 30$	Brass

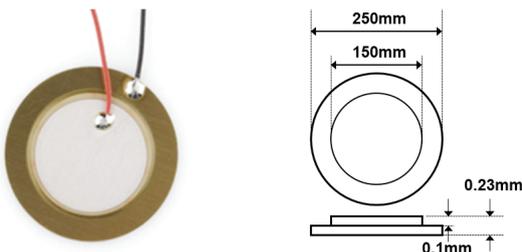


Fig. 1. PZT sensor used in this study

Table 2. Mixing design of cement paste

Designation	Water to binder ratio (%)	Binder	
		Cement (g)	Fly ash (g)
Plain	40	1,000	0
10 %		909	91
20 %		833	167
30 %		769	231

본 실험에서는 플라이애시 치환율에 따른 시멘트 페이스트의 응결시점을 평가하기 위해 KS L 5201의 보통포틀랜드시멘트와 KS L 5405의 플라이애시 2종을 사용하였다. 시멘트 페이스트의 배합은 물-바인더비를 40 %로 하였으며 시멘트 중량 대비 플라이애시를 각각 10 %, 20 %, 30 %를 치환하였다. Table 2는 본 실험의 시멘트 페이스트 배합비를 나타낸 것이다. 시멘트 페이스트의 배합은 KS L 5109에 의거 실시하였다.

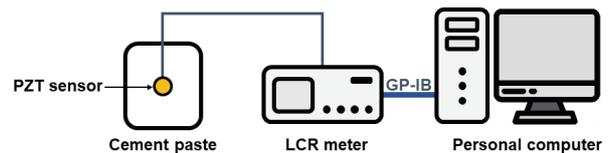


Fig. 2. Test setup for measuring EMI of PZT sensor

배합을 마친 시멘트 페이스트는 지름 60 mm, 높이 72 mm의 비흡습성 용기에 담았으며 중앙부에 아크릴 절연코팅 처리를 한 PZT 센서를 매립하였다. PZT 센서를 매립한 즉시 EMI 신호를 측정하였으며, 최초로 측정된 EMI 신호를 측정시간상 0시간(zero time)으로 설정하였다. PZT 센서의 EMI는 LCR meter(3235-50 LCR HiTESTER, Hioki, Dallas, TX, USA)를 이용하여 측정하였으며, 주파수의 간격을 50 Hz로 하여 50 kHz~250 kHz의 주파수 범위에서 매 10분마다 15시간 동안 측정하였다. Fig. 2는 본 실험에서의 PZT 센서의 EMI신호를 측정하는 장비의 모식도를 나타낸 것이다.

본 실험에서는 EMI 센싱기법을 통한 응결시점의 신뢰성을 평가하기 위해 기존의 응결측정 시험방법인 비카트침 시험과 간이단열 온도시험을 실시하여 상대적인 분석을 실시하였다. 비카트침 시험은 ASTM C 191에 의거 실시하였다. 간이단열 온도시험에서는 EMI 센싱기법에 사용된 샘플과 동일하게 지름 60 mm, 높이 72 mm의 비흡습 용기에 시멘트 페이스트를 담아 중앙부에 K타입 열전대를

매립하였다. 이후 용기를 두께 100 mm의 발포폴리스티렌 박스에 넣어 단열을 실시하고 매 10초 간격으로 15시간동안 시멘트 페이스트의 수화온도를 측정하였다.

3. 실험결과

3.1 비카트침 시험 결과

Fig. 3은 플라이애시를 치환한 시멘트 페이스트의 비카트침 시험 결과를 나타낸 것이다. 비카트침 시험에서는 침의 관입깊이가 25 mm일 때의 시점을 초결로 간주하며 침이 더 이상 관입되지 않을 때의 시점을 종결로 간주한다(ASTM C 191-21 2021).

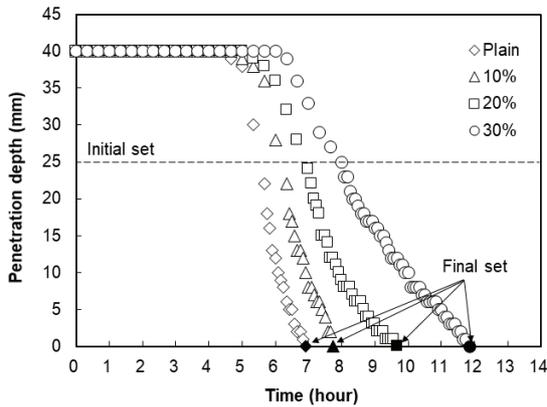


Fig. 3. Needle penetration depth as a function of hydration age

Table 3은 비카트침 시험에 의해 산출된 플라이애시를 치환한 시멘트 페이스트의 응결시간을 나타낸 것으로 플라이애시 치환율이 증가할수록 초결 시간과 종결 시간이 지연되며, 초결과 종결사이의 시간 간격도 증가하는 것으로 나타났다.

Table 3. Setting times determined by the Vicat needle test

Designation	Initial set (min)	Final set (min)	Time gap between initial and final set (min)
Plain	345	415	70
10 %	375	465	90
20 %	420	580	160
30 %	480	710	230

3.2 간이 단열 온도

Fig. 4는 플라이애시를 치환한 시멘트 페이스트의 시간에 따른 수화온도를 나타낸 것이다. 수화초기에는 시멘트 페이스트의 수화온도가 완만한 하강을 나타냈으나 특정시점 이후 급격한 온도상승을 나타냈다. 급격한 온도상승 후 최대 온도에 도달하여 시간이 지남에 따라 수화온도는 다시 하강하는 추세를 나타냈다.

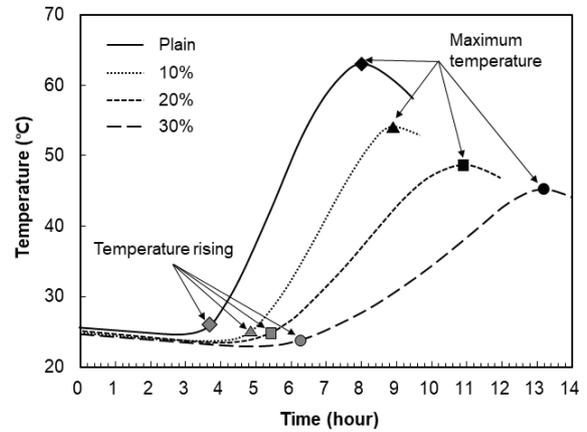


Fig. 4. Temperature of cement paste as a function of hydration age

Table 4는 간이단열 온도시험에서의 수화 온도상승시점과 최대 온도 도달시간을 나타낸 것이다. 플라이애시의 치환율이 증가할수록 수화온도가 급격하게 상승하는 시점은 지연되었으며, 최대 온도에 도달하는 시점도 지연되는 것으로 나타났다. 또한 플라이애시의 치환율이 증가할수록 온도상승시점과 최대 온도 도달시점간의 간격이 증가하고 최대 수화온도는 낮아지는 것으로 나타났다.

Table 4. Specific times determined by the semi-adiabatic temperature test

Designation	Temperature rising time(a) (min)	Time at maximum temperature(b) (min)	Time gap between (a) and (b) (min)
Plain	217	480	263
10 %	288	564	276
20 %	312	654	342
30 %	367	792	425

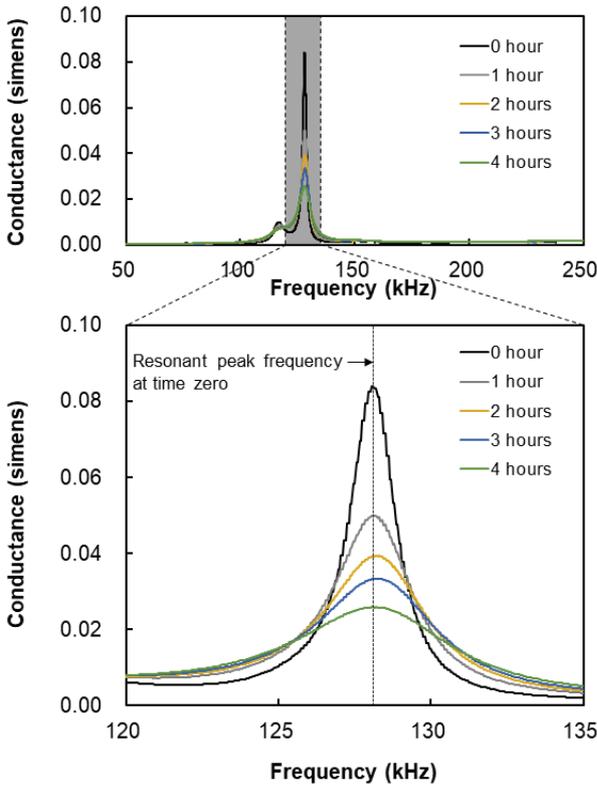


Fig. 5. EMI signal behavior of PZT sensor of Plain sample (0 hour to 4 hours)

3.3 압전센서의 전기역학적 임피던스 변화

Fig. 5와 6은 Plain 시편의 수화시간에 따른 PZT 센서의 EMI 신호 거동을 나타낸 것이다.

PZT 센서의 EMI 공진피크는 초기에는 Fig. 5와 같이 수화시간이 증가할수록 주파수의 변화는 거의 없이 피크의 크기만 지속적으로 감소하는 현상을 나타냈다. 이후 특정시점부터 Fig. 6과 같이 공진피크의 주파수는 고주파수 영역으로 급격히 이동하다 일정 시간 이후 피크가 소멸되는 것으로 나타났다. 플라이애시를 치환한 시멘트 페이스트도 동일한 경향을 나타냈다. 기존 연구에 의하면(Lee et al. 2016; Lee and Lee 2022; Lee 2023) 시멘트 페이스트가 강성을 발현하기 시작하는 시점인 초결 시점에 PZT 센서의 EMI 공진피크는 고주파수 영역으로 이동하며, 강성이 완전히 확보된 시점인 종결시점에서 공진피크가 소멸한다고 하였다. 이를 바탕으로 공진피크의 주파수가 고주파수 영역으로 이동하는 시점을 초결, 공진피크가 소멸하는 시점을 종결로 간주할 수 있다.

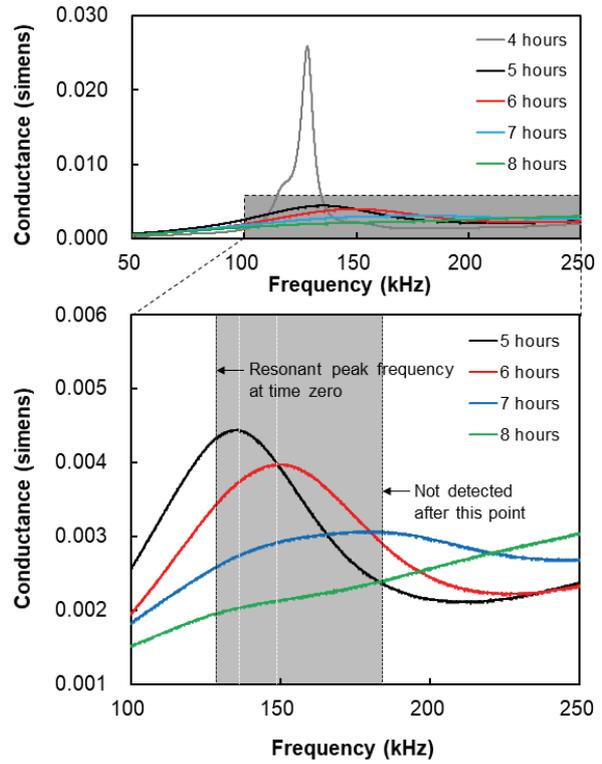


Fig. 6. EMI signal behavior of PZT sensor of Plain sample (5 hour to 8 hours)

Fig. 7은 플라이애시를 치환한 시멘트 페이스트의 수화시간에 따른 PZT 센서의 EMI 공진피크의 주파수 변화를 나타낸 것이다. 플라이애시 치환율이 증가할수록 공진피크의 주파수가 고주파수 영역으로 이동하는 시점과 공진피크가 소멸하는 시점이 지연되는 것으로 나타났다. Table 5는 EMI 센싱기법으로 산출한 각 시편의 응결시간을 나타낸 것이다. 플라이애시 치환율이 증가할수록 초결 및 종결시간이 지연되었으며, 초결과 종결간의 시간차이도 증가하는 것으로 나타났다. 또한 플라이애시 치환율이 증가할수록 초결과 종결간의 시간간격이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

4. 결과고찰

시멘트 페이스트의 응결은 시멘트 수화 단계 중 가속기에 발생하게 된다(Neville 2000). 수화온도 곡선에서 시멘트 페이스트의 수화온도가 상승하는 시점부터 최대 온도에 도달하는 시점은 시멘트의 수화단계 중 가속기에 해당한다. 일반적으로 초결은 가속기의 초기에 발생하며 종결은 최대 수화온도에 도달하기 전인 가속기 말기에 발생하게 된다. 따라서 시멘트 페이스트의 수화온도가

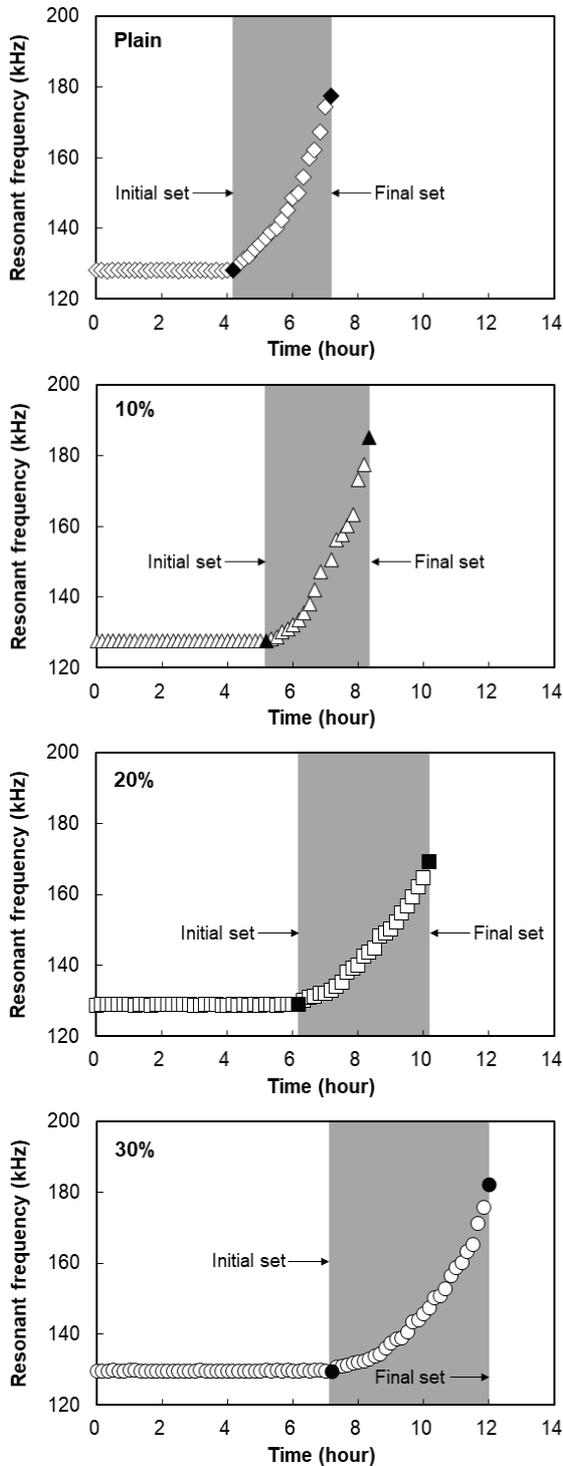


Fig. 7. EMI resonant peak frequency as function of hydration age

Table 5. Setting times determined by the EMI sensing technique

Designation	Initial set (min)	Final set (min)	Time gap between initial and final set (min)
Plain	250	430	180
10 %	310	500	190
20 %	390	630	240
30 %	430	720	290

급격히 증가하기 시작하는 시점과 최대 온도에 도달하는 시점까지의 시간을 시멘트 페이스트의 응결구간으로 간주할 수 있다.

Fig. 8과 9는 각 시험을 통해 산출된 초결 시점과 종결 시점을 나타낸 것이다. 모든 시험에서 플라이애시의 치환율이 증가할수록 초결 시점과 종결 시점이 지연되는 것으로 나타났다. 또한 비카트칩 시험과 EMI 센싱기법에서 측정된 초결 시점 및 종결 시점은 간이단열시험에서 측정된 응결구간 범위 내에 존재하는 것으로 나타났다. 하지만 각 시험에서의 종결과 초결 시점은 상대적인 편차를 나타냈다. 플라이애시 치환율에 따른 시멘트 페이스트의 초결 시점은 EMI 센싱기법이 비카트칩 시험보다 빠르게 나타났다. 반면, 종결 시점은 비카트칩 시험이 EMI 센싱기법 보다 빠르게 나타났다.

비카트칩 시험에서 정의된 초결시점(침의 관입깊이가 25 mm가 되는 시점)은 경험에 의해 임의적으로 선정된 값으로 시멘트 페이스트의 명확한 초결시점을 나타내지 못한다(Mindess and Young 1981). Fig. 3을 살펴보면 실제 시멘트 페이스트가 침에 대한 관입저항력을 갖추는 시점(침의 관입깊이가 40 mm미만이 되는 시점)은 비카트칩 시험에서 정의된 초결시점보다 빠르게 나타난다. Fig. 3과 Fig. 7을 살펴보면 비카트칩 시험에서 시멘트 페이스트가 침에 대한 관입저항력을 갖추기 시작하는 시점은 EMI 공진피크의 주파수가 고주파수 영역대로 이동하기 시작하는 시점과 유사하게 나타난다.

EMI 센싱기법에서 시멘트 페이스트 내에 PZT 센서를 매립할 경우, PZT 센서 주변의 호스트 구조물인 시멘트 페이스트가 응결을 시작하면서 강성을 발현하여 시멘트 페이스트의 기계적 임피던스가 변화된다. 이러한 호스트 구조물의 기계적 임피던스 변화는 PZT 센서의 전기적 임피던스를 유발하게 된다. 시멘트 페이스트가 강성을 확보하게 되는 종결 시점에서는 호스트 구조물과 PZT 센서가 일체화된 구조적 공진을 형성하게 된다(Liang et al. 1997). 따라서 PZT 센서의 공진피크가 고주파수 영역으로 이동하는 시점을 초결 시점, 공진피크가 소멸되는 시점을 종결 시점으로 판단할 수 있다.

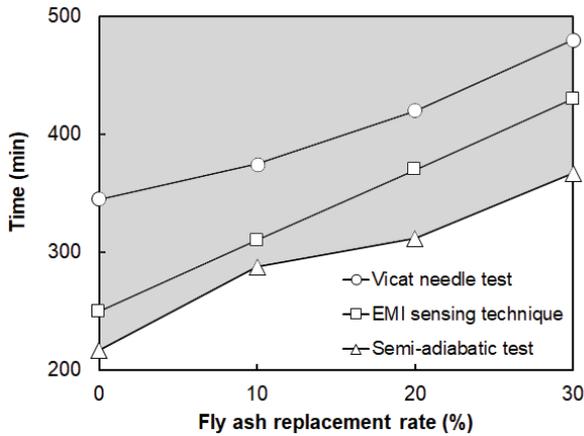


Fig. 8. Initial setting time based on fly ash replacement ratio

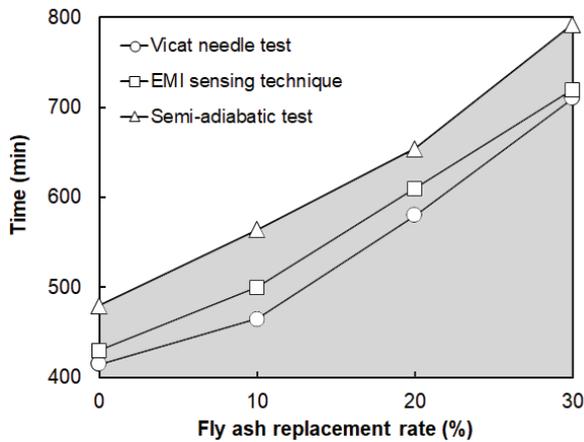


Fig. 9. Final setting time based on fly ash replacement ratio

따라서 EMI 센싱기법에서 산출된 플라이애시를 치환한 시멘트 페이스트의 응결시점은 매립된 PZT 센서를 이용하여 직접적으로 시멘트 페이스트의 물성변화를 모니터링 할 수 있다는 측면에서 응결시간에 영향을 미치는 요소가 많은 현장 적용에 매우 유용한 방법이 될 수 있을 것이라 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 EMI 센싱기법을 이용하여 플라이애시를 치환한 시멘트 페이스트의 응결시점을 평가하였다. 시멘트 페이스트에 PZT 센서를 매립하여 수화시간에 따른 EMI 신호를 연속적으로 모니터링을 실시하였으며 EMI 신호 거동을 이용하여 응결시간을 산출하였다. EMI 센싱기법으로 산출된 응결시간은 비카트침 시험

과 간이온도단열 시험에서 산출된 응결시간과 비교분석하였다. 실험결과, 시멘트 페이스트의 수화가 진행됨에 따라 EMI 공진피크 크기와 공진주파수의 변화가 나타났다. 플라이애시 치환율이 증가할수록 공진피크의 주파수가 고주파수 영역대로 이동하는 시점은 지연되었으며, 공진피크가 소멸되는 시점도 지연되었다. 기존 시험방법들과 비교시 EMI 공진피크의 주파수가 고주파수 영역대로 이동하는 시점은 초결, 공진피크가 소멸되는 시점은 종결과 부합하는 것으로 나타났다.

플라이애시, 실리카폼, 고로슬래그 등과 같은 혼화재를 사용하는 시멘트는 수화반응의 지연으로 응결 시간이 지연된다. 또한 이러한 시멘트를 이용하여 현장에서 타설되는 시멘트계 재료는 외부 환경요소에 의해 응결시간을 명확하게 측정하기가 매우 어렵다. 하지만 본 연구에서의 EMI 센싱기법은 시멘트계 재료 내부에 PZT 센서를 매립하여 시멘트계 재료의 역학적인 특성을 직접적으로 측정한다는 점에서 현장 타설 시멘트계 재료의 응결을 측정하는데 있어서 매우 유용할 것이라 판단된다.

Conflict of interest

None.

감사의 글

이 논문은 2021학년도 경북대학교 국립대학육성사업 지원비에 의하여 연구되었음.

References

ASTM C 191-21 (2021), Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cements by Vicat Needle, ASTM International, Pennsylvania.

ASTM C 403 / C 403 M-21 (2021), Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance, ASTM International, Pennsylvania.

Christensen, B.J. (2006), Time of Setting—Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials, ASTM International, Pennsylvania, 86–97.

Lee, J.C. (2023), Evaluation of setting times of concrete using electro-mechanical impedance sensing technique, *Materials*, **16(16)**, 5618.

Lee, J.C., Lee, C.J. (2022), Electro-mechanical impedance

- technique for assessing the setting time of steel-fiber-reinforced mortar using embedded piezoelectric sensor, *Applied Sciences*, **12(8)**, 3964.
- Lee, J.C., Shin, S.W., Kim, W.J., Lee, C.J. (2016). Electro-mechanical impedance based monitoring for the setting of cement paste using piezoelectricity sensor, *Smart Structures and Systems*, **17(1)**, 123-134.
- Liang, C., Sun, F.P., Rogers, C.A. (1997). An impedance method for dynamic analysis of active material systems, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **8(4)**, 323-334.
- Mindess, S., Young, J.F. (1981). *Concrete* 2nd Edition, Prentice-Hall, New Jersey, 210-213.
- Neville A.M. (2000). *Properties of Concrete* 4th Edition, Wiley, New York, 18.
- Sharma, P., Sharma, N., Singh, P., Verma, M., Parihar, H.S. (2020). Examine the effect of setting time and compressive strength of cement mortar paste using iminodiacetic acid, *Materials Today: Proceedings*, **32**, 878-881.
- Uppalapati, S., Vandewalle, L., Cizer, Ö. (2021). Monitoring the setting process of alkali-activated slag-fly ash cements with ultrasonic P-wave velocity, *Construction and Building Materials*, **271**, 121592.
- Zhang, C., Panda, G.P., Yan, Q., Zhang, W., Vipulanandan, C., Song, G. (2020). Monitoring early-age hydration and setting of portland cement paste by piezoelectric transducers via electro mechanical impedance method, *Construction and Building Materials*, **258**, 120348.

압전센서를 이용한 플라이애시 치환 시멘트 페이스트의 응결 시점 평가

본 연구에서는 전기역학적 임피던스(electro-mechanical impedance, EMI) 센싱기법을 통해 플라이애시를 치환한 시멘트 페이스트의 응결시점을 평가하였다. 시멘트 중량대비 10 %, 20 %, 30 %를 플라이애시로 치환하여 물-바인더비 40 %의 시멘트 페이스트를 제조하였다. 제조된 시멘트 페이스트에 압전 센서를 매립하여 압전 센서의 EMI 신호변화를 연속적으로 모니터링하였다. EMI 센싱기법의 유효성을 검증하기 위해 비카트침 시험과 간이단열 온도시험을 동시에 수행하였다. 실험결과, 시멘트 페이스트의 응결구간에서 압전센서의 EMI 공진피크와 공진주파수에서 주목할 만한 변화가 나타났다. EMI 센싱기법에서 측정된 응결시간은 비카트침 시험과 간이단열 온도시험에서 측정된 응결시간과 상관관계가 있음을 확인하였다.