

## 매입형 센서를 활용한 시멘트 풀의 응결 시간 측정

# Setting Estimation of Cement Paste Using New-type Embedded Sensor

신경준<sup>1\*</sup> · 이도근<sup>1</sup> · 서동완<sup>1</sup> · 유철민<sup>1</sup> · 임민혁<sup>1</sup> · 임성환<sup>1</sup>

Kyung-Joon Shin<sup>1\*</sup> · Do-Keun Lee<sup>1</sup> · Dong-Wan Seo<sup>1</sup> · Chul-Min Yoo<sup>1</sup> · Min-Hyuk Lim<sup>1</sup> · Sung-Hwan Lim<sup>1</sup>

(Received December 5, 2016 / Revised December 21, 2016 / Accepted December 22, 2016)

The present study proposes an economical embedded ring-sensor that can measure a strain behavior of cement paste and mortar in early age. Using the proposed ring-sensor, the experimental method is proposed that can measure the setting time of the cement paste and mortar conveniently. The experimental study has been conducted using the mixtures of which W/C are 0.30, 0.35, 0.40, and 0.45. From the test result, the setting times measured by convectional test methods such as vicat method and penetration resistance method are compared with the setting time proposed by this study. The result reveals that the proposed ring-sensor can effectively measure the early age behavior so that can evaluate the time when the contraction starts. In addition, the contraction starting time can be regarded as a rational setting time, which is similar to the initial setting of convectional test methods.

**키워드 :** 응결, 수축, 매입센서, 링센서

**Keywords :** Setting, Shrinkage, Embedded sensor, Ring sensor

## 1. 서론

시멘트풀, 모르타르 및 콘크리트와 같은 시멘트 기반 재료들은 물과 반응하여 시간에 따라 굳어지는 수경성 재료들이다. 시멘트 계열 재료들은 이러한 굳어지는 특성을 정의하기 위하여 응결 (setting)의 개념을 사용한다. 시멘트풀, 모르타르 및 콘크리트는 비빔으로부터 운반, 타설, 다짐이 종료할 때까지 소정의 반죽질기를 가져야 하고, 또한 타설 후 굳지 않은 콘크리트의 표면 마감작업은 응결 이전에 완료되어야 하는 등 때문에 재료의 응결 시간은 시멘트계 재료를 사용하는데 있어서 중요한 성질이다(Kim et al. 2009; Mehta and Monteiro 2014).

응결 시간을 측정하기 위해서는 비빔을 수행한 이후에 일정간격으로 시편의 응결 정도를 지속적으로 확인해야 하며, 이러한 과정은 많은 시간과 노력이 소요되는 작업이다. 이러한 수고를 덜기 위하여 자동화된 응결 시험 장비가 개발되어 사용되고 있으나, 장비의 가격이 매우 고가이기 때문에 누구나 쉽게 활용하기는 어려

운 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 응결과정에서 나타나는 재료의 수축 특성을 응용하여 응결시간을 측정할 수 있는 방법에 대하여 연구하고자 한다.

## 2. 시멘트의 응결 시간

### 2.1 시멘트의 응결

시멘트에 물을 가하여 반죽하면 일정시간동안은 유동성을 지니고 있으나, 시간이 경과함에 따라 수화반응이 진행되어 유동성이 없어지며 굳어지게 되며, 이 과정을 응결과정이라고 한다. 응결을 규정 시에 유동성을 상실하기 시작한 상태와 거의 소멸된 상태를 정해, 전자를 초결이라고 하고, 후자를 종결이라고 한다(Kim 2001; Kim et al. 2009).

응결시간을 측정하기 위해서 사용되는 방법은 주로 응결에 따라 발생하는 물리적 특성의 변화를 측정하여 응결시간을 추정하는 원리에 기반한 비카침 시험방법, 관입 저항침 시험방법, 길모아침

\* Corresponding author E-mail: kjshin@cnu.ac.kr

<sup>1</sup>충남대학교 토목공학과 (Department of Civil Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 34134, Korea)

방법 등이 많이 사용된다. 이런 시험법들은 시료가 경화되는 특성을 이용한 방법으로, 특정한 굳기에 대한 기준값을 임의로 설정하여 응결시간을 구하는 등 시험결과 해석이 정확한 물리적 현상에 대한 정의로부터 유도된 것이 아니라는 단점을 지닌다. 이런 단점들을 극복하기 위해 핵자기 공명법, 전기적 방법, 초음파법, 음향방출법, 성숙도법 등의 다양한 비파괴 시험법들이 개발되고 있다(Mehta and Monteiro 2014).

## 2.2 비카침 시험방법

비카침 시험 방법은 비카침을 시멘트 반죽에 침입시켜 시간에 따른 관입깊이를 측정함으로써 시멘트의 응결을 판단하는 방법이다(KS L 5108). 표준시험체를 제작하여 직경 1mm의 침으로 침입도를 측정하여, 25mm의 침입도가 되었을 때까지의 시간을 초결 시간으로 하고, 완전히 침의 흔적이 나타나지 않을 때를 종결 시간으로 한다.

## 2.3 관입 저항침 시험 방법

시멘트 풀 및 모르타르의 응결시간을 측정하는 다른 방법으로 관입 저항침 시험 방법이 있다(KS F 2436). 이 방법은 관입시 침에 작용하는 저항값이 응결이 진행됨에 따라 증가하는 원리를 이용하여, 관입저항 압력을 기준으로 초결과 종결 시간을 산정하도록 정의되어 있다.

관입 저항-경과 시간 곡선을 얻을 수 있는 시간 간격으로 6회 이상 시험하며, 관입 저항 측정값이 적어도 28MPa 이상이 될 때까지 시험을 한다. 일반적으로는 관입 저항이 3.5MPa를 기록하였을 때를 초결시간으로 하고, 28MPa에 기록할 경우를 종결시간으로 결정한다.

## 2.4 초음파 속도 측정 방법

지금까지의 모르타르, 콘크리트의 응결은 주로 비카침, 관입 저항침 시험에 의해 이루어져 왔으나, 이 방법은 응결 시간이 길어질 경우 장시간 측정하기가 힘들며, 시험 결과가 실험자의 숙련도에 따라 다소 달라질 가능성이 있다(Lee et al. 2002). 따라서 균일한 실험결과를 취득하기 위해 초음파를 활용하여 시멘트의 응결시간을 측정하는 방법이 현재 여러 연구자들에 의해 개발이 되고 있다(Kim and Yim 2014).

초음파 속도법은 Fig. 2(a)와 같이 시편의 양쪽에 각각 Transmitter와 Receiver를 부착하거나, Fig. 2(b)처럼 반사파를 활용하여 초음파의 전달속도를 측정하여 매질의 특성을 간접적으로 평가하는 방

법이다. 초음파의 전달속도는 매질과 내부의 수분량에 지배적이다. 따라서 시멘트의 수화과정에서 매질이 치밀해지고, 내부의 수분이 수화 반응에 사용되면서 수분의 양이 변화하는 특성을 통해 시멘트의 응결시간의 추정할 수 있다(Lee et al. 2014).

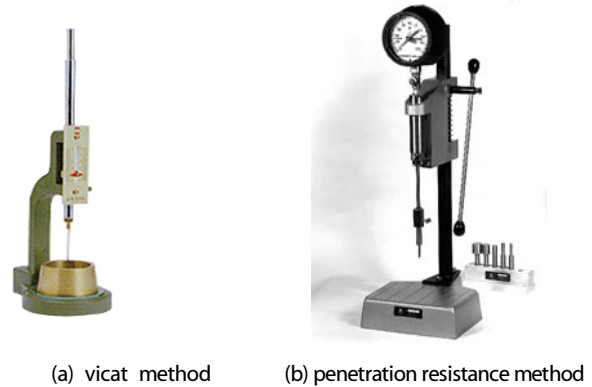


Fig. 1. Typical test equipments for setting time measurement

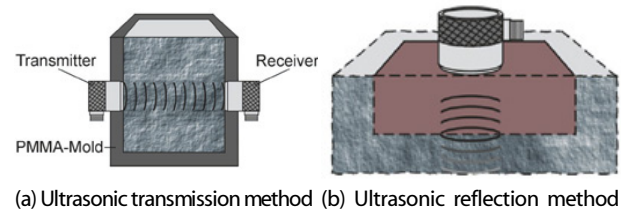


Fig. 2. Schematic of ultrasonic pulse velocity measurement

## 3. 실험 계획 및 방법

### 3.1 개요

시멘트 재료의 자기 수축을 측정하기 위해서는 시멘트풀 및 모르타르가 굳기 이전의 상태부터 부피(길이)변화를 측정하여야 하며, 또한 수축의 기준(time zero)이 되는 응결 시간을 측정하여야 한다. 지금까지의 자기수축에 대한 연구 결과 및 경험에 따르면 시멘트 계열 재료의 수축 특성과 응결 시간은 밀접한 관련이 있는 것으로 가설을 세워볼 수 있다.

배합 직후부터 밀폐된(sealed) 조건의 시멘트풀의 부피 변화를 측정하면, 처음에는 소성침하와 블리딩 등의 효과에 의하여 부피가 팽창하는 경향을 나타내며 어느 정도 시간이 경과하면 수시간 이내에서부터 부피 수축이 시작된다. 이러한 부피 수축은 시멘트가 경화되기 시작하면서 나타나는 자기수축(autogenous shrinkage)에 의한 것이다. 이는 초기에 시멘트가 물과 반응하여 급격한 초기

반응을 일으킨 후에 나타나는 휴지기가 지나고, 시멘트의 수화가 본격적으로 시작되는 시점을 의미하며, 또한 동시에 시멘트의 경화가 본격적으로 시작되는 시점이라고 판단할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 이러한 수축이 시작되는 시점을 측정하여, 이와 시멘트의 응결 특성과의 관계를 분석하는 실험 연구를 수행하였으며, 이를 기반으로 응결시간을 추정할 수 있는 새로운 방법을 제안하고자 한다.

### 3.2 배합 및 실험 계획

실험에는 다양한 물-시멘트비를 가지는 4가지 시멘트풀 배합이 사용되었다. 사용된 물-시멘트비는 각각 0.30, 0.35, 0.40, 0.45이다. 이를 통하여 수축 특성이 다른 여러 배합에 대하여 제안된 방법을 검증하였다.

초결 및 종결 시간 측정을 위해서는 현재 표준으로 가장 많이 사용되고 있는 비카침과 관입압력 측정 방법을 사용하였으며, 이를 기준으로 이 연구에서 제안된 방법의 정확성을 비교하였다.

### 3.3 매입센서를 이용한 응결 시간의 측정

시멘트의 배합 초기에 발생하는 자기수축을 측정하는 여러 가지 시험방법이 연구되어 왔다. 대표적인 방법으로 매입형 게이지를 활용하는 방법, 주름관을 사용하는 방법(ASTM C1698-09 2014) 등이 사용되고 있다. ASTM 주름관 방법은 비교적 최근에 개발된 방법으로 초기재령의 부피변화를 정확하게 측정할 수 있는 방법으로 알려져 있으나, 시험방법의 특성상 배합후 응결 전에 나타나는 부피 팽창 및 수축 변화를 측정하기는 어려운 것으로 판단된다. 콘크리트용 매립형 스트레인 게이지를 사용한 경험에 따르면 경화전 부피변화를 정확히 모니터링 할 수 있는 것으로 나타났으나, 기성품인 매립형 스트레인 게이지는 가격이 상당히 고가이기 때문에 비용적인 측면에서 단지 응결 측정용으로 활용하기에는 어려운 실정이다.

따라서 본 연구에서는 응결 전후의 수축변화를 효과적으로 측정할 수 있는 매립형 링센서를 고안하여 사용하였다. Fig. 3은 고안된 매립형 링센서의 형상을 나타내고 있다. 매립형 링센서는 PVC 재질의 0.2mm 두께의 얇은 판으로 지름 120mm이고 높이 20mm의 원형 링을 만들고, 옆면에 스트레인게이지를 부착하였다.

원형의 스테인레스 용기를 시멘트 풀로 채운 후에 개발된 매립형 링센서를 중앙부에 매입하였다. 데이터 로거를 사용하여 스트레인 변화를 타설 이후부터 지속적으로 측정하였다.

링센서는 시멘트풀속에 완전히 묻힌 상태로 설치가 되며, 링을

구성하고 있는 재료는 주위의 시멘트풀과 비교하여 두께가 매우 얇고 탄성계수가 낮기 때문에, 시멘트풀에 대한 링센서의 구속도는 1% 미만으로 평가된다. 따라서, 부착 특성과 관계없이 시멘트풀과 일체 거동하는 것으로 가정할 수 있으며, 개발된 센서를 활용하여 시편의 부피변화 추세를 정확히 모니터링 할 수 있을 것이다.

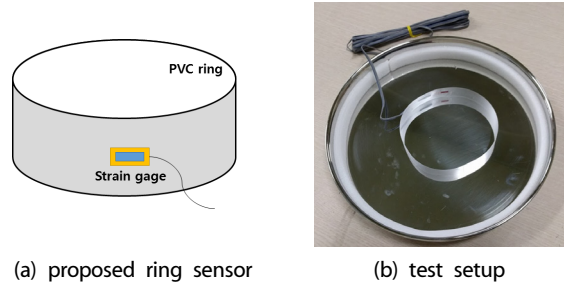


Fig. 3. Schematic of ring sensor and test setup

## 4. 실험 결과 및 분석

### 4.1 기존 방법에 의한 실험 결과

비카침을 사용한 응결 측정 실험결과를 Table 10에 나타내었다. KS L 5108에 제시된 종결의 기준은 완전히 침의 흔적이 나타나지 않을 때로 규정되어 있다. 그러나 침의 흔적 유무에 대한 판단은 상당히 주관적이기 때문에, 본 연구에서는 유사 국제규격인 ISO 9597의 종결 기준을 참조하여, 침이 0.5mm 관통하였을 때를 기준으로 종결을 측정하였다. 측정된 관입 깊이 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 4의 실험결과에 따르면 물-시멘트비가 낮을수록 응결이 빨리 발생하는 일반적인 특징을 관찰할 수 있다. 초결은 물시멘트비가 0.3인 배합은 배합 이후 5시간에 나타났으며, 물시멘트비가 0.45인 배합은 8시간 이후에 나타났다. 종결은 물시멘트비가 0.3인 배합은 배합 이후 7시간에 나타났으며, 0.45배합은 11시간에 나타났다. 초결과 종결시간의 차이는 물시멘트비가 클수록 증가하였으며, 그 차이는 2~5시간 정도로 관찰되었다.

KS F 2436의 관입 저항침 방법으로 측정된 실험결과를 Fig. 5에 나타내었고, 계산된 초결 및 종결시간을 Table 1과 Fig. 6 및 Fig. 7에 나타내었다. KS 규격에 따라 초결과 종결은 각각 관입압력이 3.5MPa과 28MPa인 경우로 결정하였다. 응결 시간은 비카침에 의한 결과와 유사한 경향을 나타내었으며, 각 방법으로 측정된 응결 시간은 공통적으로 물시멘트의 증가에 따라 응결시간 또한 같이 증가하는 일관된 경향성을 나타내었다. 그러나 정확한 응결시간은 시험 방법에 따라 차이를 보이는 것으로 나타났다.

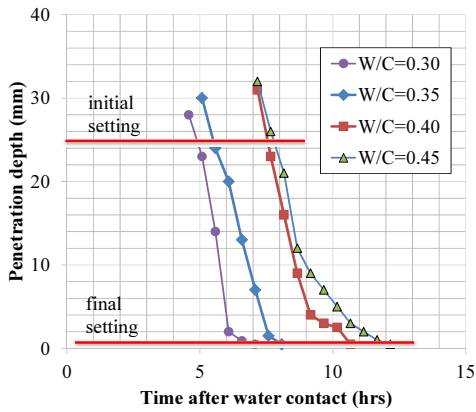


Fig. 4. Measured penetration depth

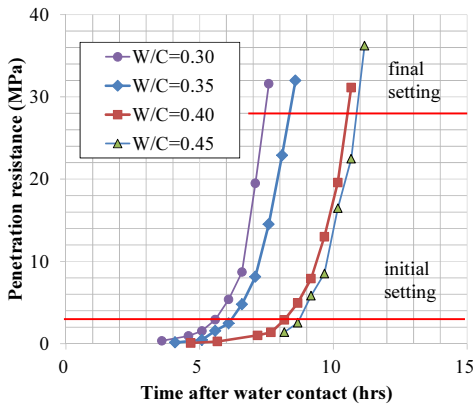


Fig. 5. Measured penetration resistances

Table 1과 Fig. 7에 따르면 비카침과 관입저항침에 따라 측정된 초결값은 1시간 이내의 차이를 보였으며, 종결값은 최대 2시간까지의 차이를 보였다. 초결시간은 관입저항침의 결과가 비카침 실험결과와 비교하여 다소 빠르게 나타났으며, 종결시간은 두 시험 방법간의 뚜렷한 경향 차이가 나타나지는 않았다.

Table 1. Setting time using vicat method and penetration resistance method

Method	Type	Set time(hrs)			
		W/C 0.30	W/C 0.35	W/C 0.40	W/C 0.45
Vicat test	Initial set.	4.89	5.66	7.60	7.82
	Final set.	7.04	8.56	11.18	12.69
Penetration resistance	Initial set.	5.73	6.32	8.42	8.91
	Final set.	7.47	8.33	10.49	10.79
Proposed ring sensor	-	5.52	5.76	6.96	7.8

## 4.2 수축 변형률 측정 결과

제안된 매립형 링게이지를 시멘트풀 배합에 매입하여 수행한 변형률 측정 결과를 Fig. 8 에 나타내었다. Fig. 8의 x축은 배합시

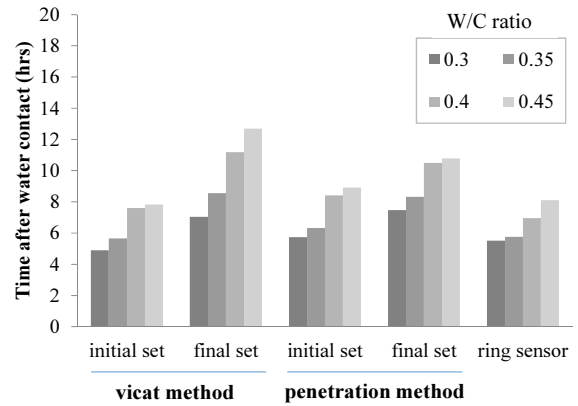


Fig. 6. Effect of water cement ratio on setting times

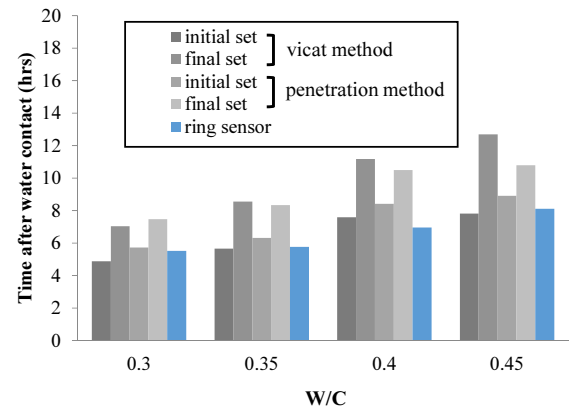


Fig. 7. Effect of test method on setting time

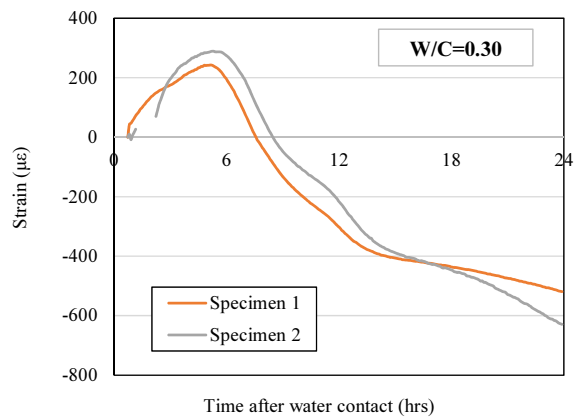


Fig. 8. Measured strain using embedded ring sensors

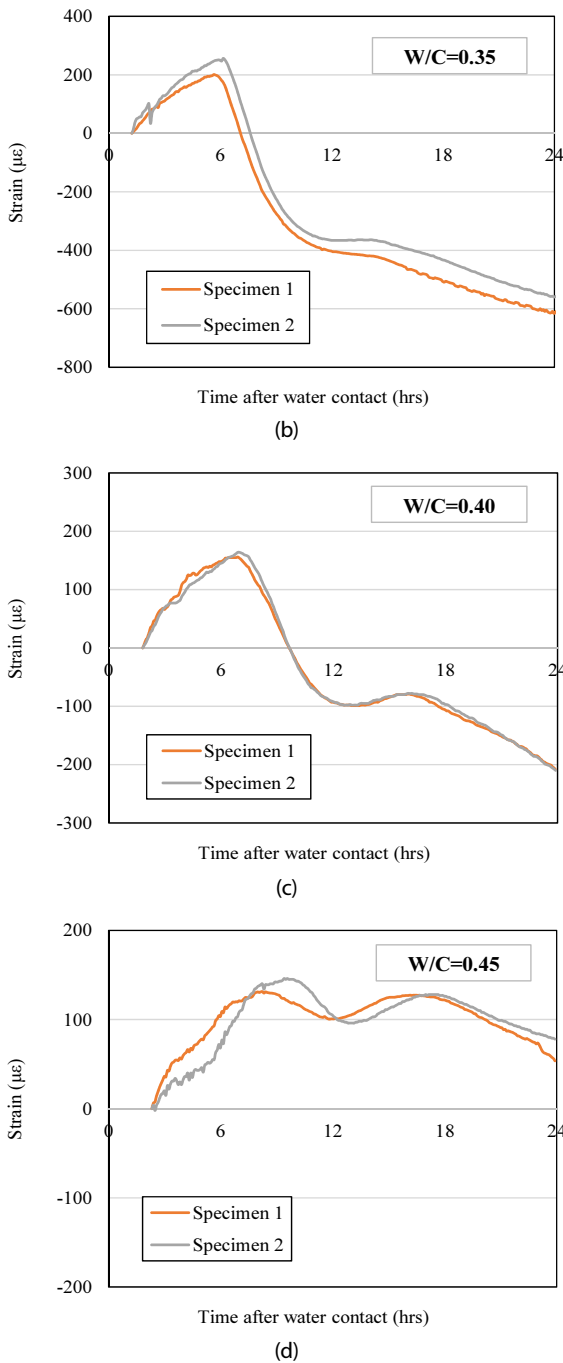


Fig. 8. Measured strain using embedded ring sensors(Continued)

물과 시멘트가 혼합된 시간을 0점의 기준으로 계산된 값이다. 실험 결과에 따르면, 배합 변수에 따라 정도의 차이는 있으나, 최초에는 부피가 증가하는 팽창 거동을 보였다. 이는 배합 초기에 발생하는 소성침하 및 블리딩의 영향으로 추정된다.

이어 타설후 5~8 시간이 지난후에 변형률의 변화 방향이 반대

로 바뀌었다. 즉, 인장 방향으로 팽창하던(+) 변형률이, 반대인 압축방향의 수축(-)으로 바뀌면서 점차 변형률이 감소하는 경향을 보였다. 이는 본격적으로 시멘트의 수화가 진행되면서 시멘트와 물의 수화반응에 의한 부피감소가 시작되는 시점을 의미하는 것으로 해석할 수 있을 것이며, 이를 공학적으로 응결시간과 연관 지을 수 있을 것이다.

따라서 시멘트의 수화반응이 본격적으로 시작되어 수축이 시작되는 시점을 응결시간의 또 다른 기준으로 가정하여, 시멘트풀의 변형률이 증가에서 감소로 기울기가 바뀐 시점을 찾아서 Table 10에 정리하였다. 기존의 측정 방법들은 강도적인 기준으로 응결을 평가하는 원리를 활용하기 때문에 수축특성을 활용하는 링센서로 추정된 응결시간과 직접적으로 연관시키기는 어려운 것으로 판단된다. 그러나 실험결과를 비교하여 경향을 평가하여 볼 수는 있을 것이다.

링센서로 추정된 응결 시간을 기존 방법과 비교하여 보면, 초결과 유사한 성질을 보이는 것으로 관찰되었다. 비카침에 의한 초결 시험결과와는 0.6시간 이내의 차이를 보였으며, 관입 저항침에 의한 초결 시험결과와는 최대 1.5시간 가량의 차이를 보이는 것으로 나타났다.

따라서 굳지않은 시멘트풀의 초기 거동을 분석하여 초기의 팽창거동이 수축거동으로 변화하는 시점을 수축의 시작을 기준으로 하는 응결시간으로 고려할 수 있을 것이며, 이는 기존 방법의 초결 시점과 유사한 것으로 평가되었다.

## 5. 결론

이 논문에서는 시멘트풀의 초기 변형률 거동을 모니터링하여 새로운 기준의 응결시간을 측정하는 방법에 대한 실험과 그 분석 결과를 다루었다.

1. 시멘트풀의 초기 변형률 거동을 모니터링 할 수 있는 경제적인 매입형 링센서를 제안하였다. 제안된 센서를 활용하여 다양한 범위의 물시멘트비를 가지는 시멘트풀 배합에 적용하였으며, 초기에 발생하는 배합의 부피팽창과 수축거동을 모니터링 할 수 있었다.
2. 배합 초기에 팽창거동이 수축거동으로 변화하는 시작 시점을 측정할 수 있었으며, 이러한 수축이 시작되는 시점을 또 다른 형태의 응결의 기준으로 제안하였다. 본 연구의 실험결과에 따르면, 제안된 응결의 기준은 기존 방법의 초결시간과 유사한 것으로 평가되었다.

3. 제안된 매입형 링센서는 여러번 사용할 수 없는 1회용 센서이지만, 기존의 매입형 센서와 비교하여 약 1/6 내의 비용으로 제작하여 사용할 수 있다. 따라서 데이터로거와 같은 고가의 장비를 사용해야 하지만, 센서 자체의 비용적인 측면에서는 기존 센서에 비하여 유리한 것으로 평가할 수 있다.

### 감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술연구사업의 연구비지원(16SCIP-B103706-02)에 의해 수행되었습니다.

### References

ASTM C1698-09. (2014). Standard Test Method for Autogenous Strain of Cement Paste and Mortar, ASTM International, West Conshohocken, PA.

Kim, C.H. (2001). Chemistry Dictionaries, Sehwa pub.

Kim, J.H., Yim, H.J. (2014). "Ultrasonic wave reflection technique to evaluate the initial setting of cement paste," Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection Autumn Conference, Jeju, Korea, **18(2)**, 252-253.

Kim, S.S., Ryu, J.S., Lee, S.T., Jung, H.S. (2009). Materials for Civil Engineering, Third edition, Gumi Publication, Korea [in Korean].

KS F 2436. (2012). Testing Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance, Korean Agency for Technology and Standards, Korea.

KS L 5108. (2012). Testing Method for Setting Time of Hydraulic Cement by Vicat Needle, Korean Agency for Technology and Standards, Korea.

KS L 5109. (2012). Testing Method for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency, Korean Agency for Technology and Standards, Korea.

Lee, H.K., Lee, K.M. (2002). Setting assessment of high strength concrete using the ultrasonic pulse velocity monitoring, Journal of the Korea Concrete Institute, **14(6)**, 973-981 [in Korean].

Lee, H.K., Lee, K.M., Kim, Y.H., Yim, H.J. (2002). Estimation of setting time and early-age strength of concrete using the ultrasonic pulse velocity, Journal of the Korean Society, **22(3)**, 292-303 [in Korean].

Lee, S.B., Yang, J.M., Choi, S.H., Kim, S.H., Shin, K.J. (2014). "Measurements of setting time for fiber reinforced mortar," Korean Society of Civil Engineers Annual Convention, Daegu, Korea, 1205-1206 [in Korean].

Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M. (2014). Concrete, Microstructure Properties and Materials, Third edition, McGraw-hill, NewYork.

#### 매입형 센서를 활용한 시멘트 풀의 응결시간 측정

본 연구에서는 시멘트풀 및 모르타르의 초기재령 변형률 거동을 측정할 수 있는 경제적인 매입형 링센서를 고안하였고, 이를 활용하여 시멘트 풀 및 모르타르의 응결시간을 편리하게 측정할 수 있는 방법을 제안하고자 하였다. W/C가 0.30, 0.35, 0.40, 0.45인 배합들에 대하여 실험 연구를 수행하였다. 기존의 비카침과 관입저항침에 의해 측정된 응결시간과 제안된 방법에 의한 응결시간을 비교하였다. 실험결과에 따르면 개발된 링센서는 초기의 팽창거동이 수축거동으로 변화하는 수축의 시작시점을 정확하게 측정할 수 있었다. 또한, 수축 시작 시점을 응결에 대한 합리적인 기준으로 간주할 수 있었으며, 이는 기존 방법의 초결시간과 유사한 것으로 평가되었다.