



## 콘크리트 양생 강도 모니터링을 위한 매립형 지능형 센서의 적용성 연구

박승희<sup>1)\*</sup> · 김동진<sup>2)</sup> · 홍석인<sup>3)</sup> · 이창길<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>성균관대학교 사회환경시스템공학과 <sup>2)</sup>성균관대학교 u-City 공학과 <sup>3)</sup>(주)대우건설기술연구원

### A Study on Applicability of Embedded Smart Sensor for Concrete Curing Monitoring

Seung-Hee Park,<sup>1)\*</sup> Dong-Jin Kim,<sup>2)</sup> Seok-Inn Hong,<sup>3)</sup> and Chang-Gil Lee<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Civil and Environmental Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea

<sup>2)</sup>Dept. of u-City Design and Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea

<sup>3)</sup>Daewoo E&C, Experiment & Research Team, Suwon 440-210, Korea

**ABSTRACT** In this study, a piezoelectric smart sensor that can be embedded inside of concrete structures is developed to investigate the early stage of concrete curing. A waterproof coating is used to protect the piezoelectric sensor from moistures of concrete mixture. Also, a mortar case is utilized to encapsulate the sensor to protect it from impact loads. To estimate the strength of concrete, a self-sense guided-wave actuated sensing technique is applied. In the guided wave, its velocity is varied according to the mechanical properties of concrete such as modulus of elasticity. Because modulus of elasticity directly affects the strength of concrete, the guided-wave's velocity also affects the concrete strength development. To verify the feasibility of using the proposed approach, the smart sensor was embedded into a 100 MPa concrete cylinder and the self-sense guided wave is continuously measured throughout the curing process. The measurements showed that the propagation time (TOF) of the measured guided waves gradually decreased as the curing age increased. Especially, at the early age of the curing process, the variation of the TOF was very significant. Furthermore, the results showed that there is a linear relationship between the TOF of the self-sense guided waves and the strength of concrete existed. It is safe to conclude that the proposed approach can be used very effectively in monitoring of the strength development of high strength concrete structures.

**Keywords :** embedded smart sensor, concrete curing monitoring, guided-wave, piezoelectric sensor, wavelet transform

#### 1. 서 론

최근 들어 우리나라는 물론 세계 각국마다 경제 산업 발전을 위한 사회기반시설의 확충으로 사회 공공핵심 구조물이 늘어나고 있으며 건설의 규모는 계속 대형화 되고 있다. 특히 초장대 교량이나 초고층 건물들의 건설이 활발해지고 있는데, 이러한 대형 구조물의 건설은 막대한 초기 건설 투자는 물론 건설 후 유지 관리에도 많은 비용이 소요되고 있으며 또한 이들 대형 구조물 건설이 늘어남에 따라 기존 강도의 콘크리트보다 압축강도가 높아 부재 단면을 축소시키고 자중이 감소되며 낮은 W/C 비에 따른 콘크리트 구조물의 내구성 향상을 기대할 수 있는 고강도 콘크리트의 사용이 늘어나고 있는 상황이다. 고강도 콘크리트의 효율적인 타설을 위하여 콘크리트 품질 관리 및 거푸집/동바리의 제거 시기 결정에 활용하기

위한 콘크리트 강도 발현 모니터링 기술이 필수적이다.

실제 현장에서 콘크리트 강도를 측정하는 가장 확실한 방법은 강도 테스트를 수행하거나 코어를 채취해 코어 테스트를 하는 것이다.<sup>1)</sup> 하지만 이러한 방법은 대상 콘크리트 구조물을 파괴해야만 하므로 사용 중이거나 양생 중인 구조물에 대해서 적용하기 힘들다. 이에 콘크리트의 강도 발현 비파괴 평가를 위하여 온도, 음파, 전기 특성, 자성, 광학 특성, 방사선 촬영, 물성과 같은 여러 가지 특성들을 이용한 여러 가지 방법이 연구되었다.<sup>2-5)</sup> 이러한 평가 방법들은 수학적 모델링에 의해 제안된 이론식 뿐만 아니라 실제 실험을 수행하거나 경험에 근거한 식의 형태로도 제안되고 있는데, 이들은 고가의 장비가 필요하거나 제안식 자체가 복잡하고 또한 수동적인 계측을 할 수밖에 없어 현장에서 크게 활용되지 못하는 실정이다. 따라서 현장 타설 고강도 콘크리트의 발현 강도 평가를 고려한 효율적인 실시간 상시 계측 모니터링을 통하여 이상 거동을 감지하고, 적절한 조치를 취함으로써 시설물 붕괴를 미연에 방지해야 한다.

\*Corresponding author E-mail: shparkpc@skku.edu

Received November 9, 2010, Revised December 24, 2010

Accepted January 5, 2011

©2011 by Korea Concrete Institute

이에 이 연구에서는 향후 건설 분야에 유비쿼터스 환경에 맞는 IT 융합 기술을 적용한 고강도 콘크리트 강도 발현 모니터링의 가능성 검토를 위하여, 기존 구조물 건전성 평가 방법으로 많이 연구되던 압전 센서를 이용한 유도 초음파 기법을 콘크리트 강도 발현 모니터링에 이용하고자 한다. 유도 초음파는 매질을 따라 초음파가 전달되고 이때, 매질의 상태 변화에 따라 그 신호가 변화된다. 이를 이용하여 기존의 유도 초음파를 이용한 비파괴 검사법은 주로 구조물의 균열이나 파손과 같은 손상 진단을 위한 방법으로 연구되어 왔으며 외부에서의 탐촉자를 사용하여 콘크리트의 강도를 측정하는 방법이 연구되어 왔다. 하지만 기존의 방법인 외부에서의 가진 및 측정을 통한 강도 추정 은 그 정확성이 떨어져 최근엔 압전 센서를 콘크리트 내부에 매립하여 콘크리트의 강도 및 손상을 모니터링하는 연구가 진행되었다.<sup>6,7)</sup> 이에 이 연구는 구조물의 강도와 밀접한 관계를 가지는 탄성 계수에 따라 유도 초음파가 변화되는 것에 초점을 맞추어 매립형 압전 센서를 이용한 유도 초음파 계측 기술을 응용하여 self-sensing을 통한 하나의 센서로 고강도 콘크리트의 발현 강도를 측정하는 기법에 대한 적용 가능성을 연구하기 위한 목적으로 수행되었다.

## 2. 지능형 센서의 제작

### 2.1 압전 소자

압전 소자는 세라믹의 일종으로 기계적 변형이 가해지면 전하가 유도되고, 반대로 압전 소자에 전기장이 가해지면 기계적 변형을 일으키는 압전 효과를 지닌 물질이다. 이 압전 효과는 아래 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$S = s^E T + dE \quad (1)$$

$$D = dT + \epsilon^T E \quad (2)$$

여기서,  $S$ 는 기계적 변형,  $T$ 는 응력,  $D$ 는 전기적 변위,  $d$ 는 유전 변위,  $s^E$ 는 전기장이 작용하지 않을 때( $E=0$ ) 측정된 유연도 계수,  $\epsilon^T$ 는 응력이 없을 때( $T=0$ ) 측정된 유전율이다.

이러한 압전 효과를 이용하여 압전 소자는 구조물을 가진하는 가진기로 사용될 수 있으며 동시에 구조물의 응답을 측정하는 센서로 사용될 수 있다.

### 2.2 지능형 센서 제작

콘크리트 양생 강도 발현 측정 시 초기 재령의 양생 강도 모니터링은 매우 중요한 요소이다. 하지만 기존의 표면 부착형 압전 소자를 사용한 양생 강도 추정법의 경우 콘크리트의 표면이 경화되는 시간과 콘크리트 표면과 압전 소자의 부착 시간 등의 이유로 최초 측정이 양생

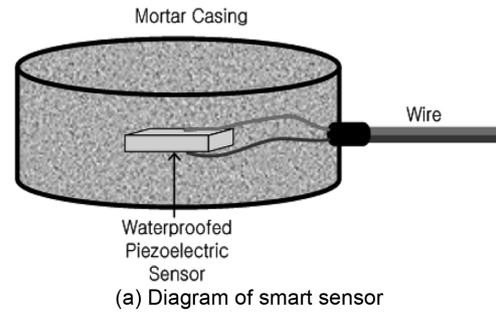


Fig. 1 Development of smart sensor

3일차부터 사용이 가능하였다. 이를 해결하기 위하여 기존 연구를 참고하여 콘크리트 배합물 내부에 직접적으로 압전 소자를 도입하기 위하여 압전 소자와 압전 소자로의 입출력을 위한 전선을 모듈화하여 콘크리트 내부에 삽입할 수 있는 지능형 센서를 제작하였다.<sup>6,7)</sup> 사용된 압전 소자는 P사의 PSI-5A4E type을  $20 \times 20 \times 0.15$  mm 크기로 재단하여 사용하였다.

$50 \times 25$  mm 크기의 지능형 센서는 Fig. 2와 같이 취성 파괴가 일어나기 쉬운 압전 소자를 외부의 충격과 양생 시의 미세 변형으로부터 보호하기 위한 모르타르 케이싱과 콘크리트 내부의 수분으로부터의 보호를 위한 방수 코팅으로 압전 소자를 보호한다. 모르타르는 물/시멘트 비 50%를 사용하였고 방수 코팅은 고무계 수지를 사용하였다.

콘크리트 내부에 삽입하기 위하여 콘크리트와 가장 비슷한 성질을 지니며 내부 골재에 의한 압전 소자의 파괴가 일어나지 않는 모르타르를 외부 충격에 대한 보호재로 사용하며, 모르타르 케이싱에 넣기 전 전선과 모듈화 시킨 압전 소자를 방수 처리하여 압전 소자의 수분에 의한 특성 저하 및 망실을 예방하였다.

## 3. 유도 초음파를 이용한 강도 모니터링 기법

### 3.1 지능형 센서를 이용한 유도 초음파 기법

이 연구에서는 고강도 콘크리트의 강도 모니터링을 위하여 유도 초음파 기법을 사용하였다. 유도 초음파는 매질의 물리적인 특성에 따라 그 전달 시간(time of flight, TOF) 및 전달 강도가 달라지는 특징을 가진다. 초음파의 전파는 종파( $c_L$ ) 및 횡파( $c_T$ ) 성분의 조합으로 이루어지며 각각의 속도 식은 다음과 같다.<sup>8)</sup>

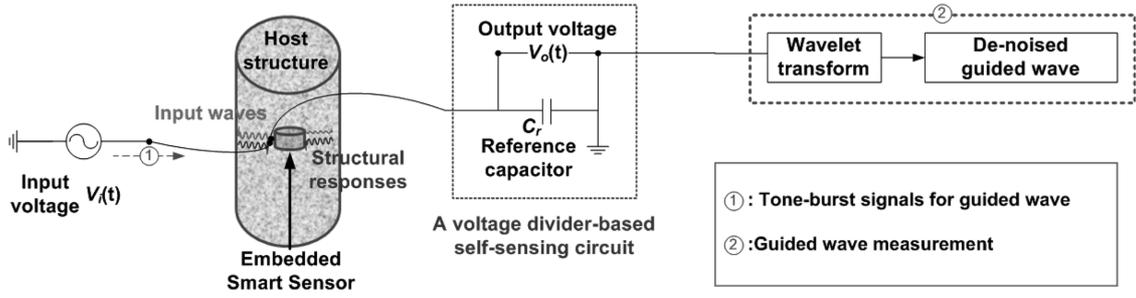


Fig. 2 Scheme of self-sensing based guided-wave measurement

$$c_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}, c_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (3)$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}, \lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (4)$$

여기서,  $E$ 는 탄성 계수,  $\nu$ 는 포아송 비,  $\rho$ 는 밀도를 의미한다. 최종적으로 종파 및 횡파 전달 속도는 아래 식과 같이 매질의 탄성 계수와 포아송 비, 밀도와 같은 매질의 물리적 특성에 따라 변화한다. 이 연구에서는 양생이 진행됨에 따라 증가하는 강도가 탄성 계수의 영향을 지배적으로 받는다는 가정 하에 각각의 파속이 탄성 계수에 의해 변화한다고 가정하였다.

$$c_L = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (5)$$

$$c_T = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad (6)$$

유도 초음파는 종파 및 횡파의 조합으로 이루어져 있으며 주파수에 의해서 그 전달 속도가 변화한다. 콘크리트 내부에서의 유도 초음파 전달 양상은 추후 연구를 통하여 구명될 것이며 이 연구에서는 주파수를 한정 시켰을 경우 콘크리트의 강도 증가에 의해 탄성 계수가 증가하게 되면 유도 초음파의 전달 시간이 빨라지는 점을 통하여 유도 초음파의 전달 시간을 측정하여 콘크리트의 강도를 모니터링의 가능성을 실험적으로 확인하였다.

현장에서의 효율적인 유도 초음파 계측을 위하여 Fig. 2와 같이 저비용의 셀프 센싱 기반의 유도 초음파 계측 시스템을 이용하였다.<sup>9)</sup> 셀프 센싱 기반의 유도 초음파 계측 시스템은 콘크리트 공시체 내부에 매립된 하나의 지능형 센서를 통해 가진과 센싱을 동시에 함으로써 사용되는 센서의 수량을 줄여 계측에 필요한 비용을 절감시킨다. 가진을 위하여 지능형 센서로 입력 신호인 tone-burst 신호를 입력하고 구조물에서의 응답을 다시 지능형 센서가 받아 커패시터로 출력하면 디지털이저가 커패시터에 있는 전압 신호를 출력 받아 유도 초음파 신호를 측정한다. 셀프 센싱 기법의 특성상 계측 초기( $\sim 120\mu s$ )에 입력 신호가 그대로 출력 신호로 나타나므로 이 논문에서는 입력 신호를 제외한 나머지 출력 신호로만 유

도 초음파의 전달 시간으로 측정하였다.

### 3.2 웨이블릿 변환

측정되어진 유도 초음파 신호는 해당 주파수의 유도 초음파 신호가 아닌 다른 잡음이 포함되어 있다. 또한 셀프 센싱 기법을 통하여 계측된 신호는 그 계측 특성상 입력 신호가 신호의 전체 진폭을 지배하게 되는데, 이로 인해 반사파의 진폭은 상대적으로 작게되어 잡음에 대한 영향이 높다. 따라서 신호 대 잡음비(S/N)를 높이기 위하여 특정 주파수의 유도 초음파 신호를 추출해 내야 하는데, 기본적으로 band pass filter를 이용하여 잡음을 제거하였으나, 출력 신호의 진폭이 작고 양생 강도에 따른 유도 초음파 전달 속도를 정확하게 측정하기 위하여 잡음 제거 기법 중의 하나인 웨이블릿 변환을 사용하였다. 웨이블릿 변환은 수학적으로 검증된 한파장의 파형(mother wavelet)을 기본 파형으로 하여 그 크기와 위치를 변화시켜가며 상관관계를 도출하여 mother wavelet과 신호 차이가 큰 잡음을 제거해 준다. 웨이블릿 변환은 다음 식과 같이 처리된다.<sup>10)</sup>

$$Wf(u, s) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi_{u,s}^*(t) dt \quad (7)$$

$$\psi_{u,s}^*(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-u}{s}\right) \quad (8)$$

연속 웨이블릿 변환 함수( $Wf(u,s)$ )는 mother wavelet ( $\psi_{u,s}^*$ )을 위상( $u$ )과 진폭( $s$ )을 변화시키면서 기존 신호와의 상관도를 도출하여 Fig. 3과 같이 mother wavelet과 유사하지 않은 잡음을 제거해 준다.

이 연구에서는 mother wavelet으로 식 (9)와 Fig. 4에서 나타낸 Morlet wavelet을 사용하였다. 이는 구조물이 선형 구조물이라는 가정 하에 Morlet wavelet 형태의 tone-burst 신호를 입력함으로 출력 신호 또한 Morlet wavelet의 형태에 매우 유사하게 출력되어지기 때문이다.

$$x(t) = A \times \exp\left\{-\left(\frac{\omega t}{p}\right)^2 \frac{1}{2}\right\} \times \cos(\omega t) \quad (9)$$

여기서,  $A$ 는 진폭이며,  $\omega$ 는 주파수,  $p$ 는 침투점의 개수이다.

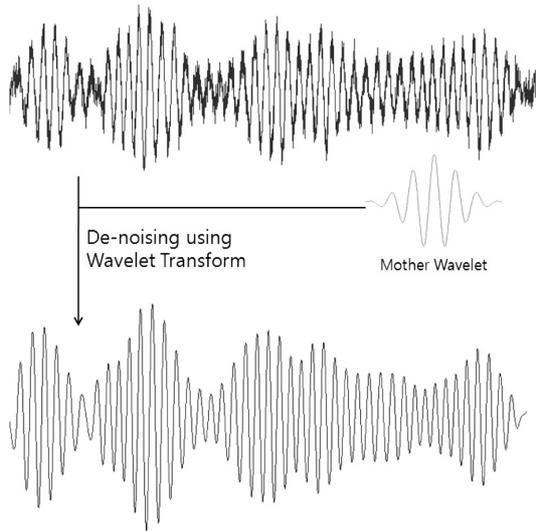


Fig. 3 De-noising using wavelet transform

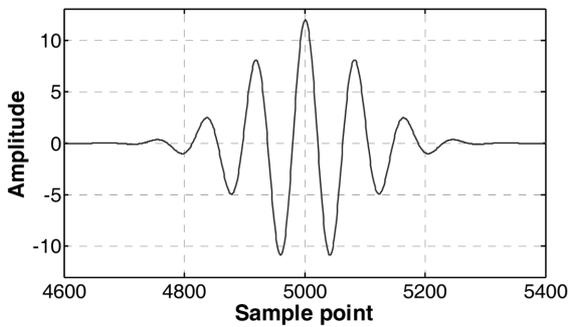


Fig. 4 Morlet wavelet signal

#### 4. 지능형 센서를 이용한 고강도 콘크리트 양생 강도 발현 모니터링 실험

##### 4.1 실험 세팅

시험체는 Table 1의 배합 비율로 타설한 100 MPa 고강도 콘크리트 공시체 내부에 Fig. 5와 같이 20 mm × 20 mm 크기의 압전 센서를 내장한 지능형 센서를 공시체 중심부에 삽입시켜 양생을 진행하며 유도 초음파 응답을 계측하였다. 계측 장비로는 tone-burst 신호를 생성하는 임의 파형 생성기(AWG), 센서에서 출력된 신호를 측정하는 디지털이저(DIG)와 이 둘을 제어하기 위한 컨트롤 유닛이 모

Table 1 Mix proportion

W/B (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )					
		W	B	C	FA	SF	Plasticizer
23	40	160	727	545	109	73	14.55 (2.0%)

Table 2 Test results of slump flow, air concrete and 28-day compressive strength

28-day strength (MPa)	Slump flow (mm)	Air content (%)
93	720	5.0

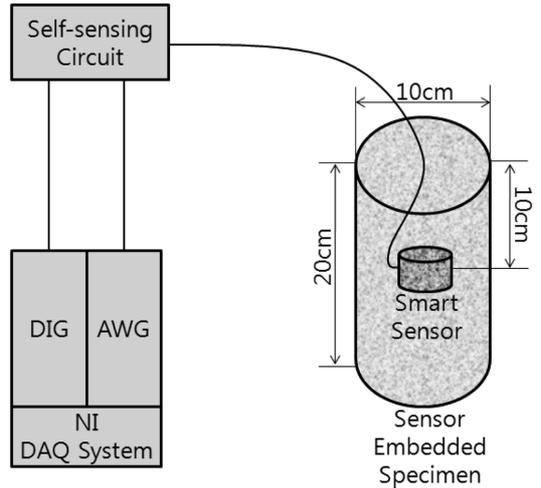


Fig. 5 Guided-wave measurement diagram

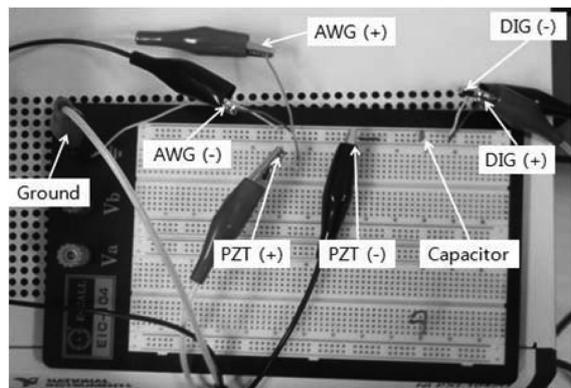
듈화된 NI-PXI DAQ 시스템(Fig. 6(a))을 사용하여 유선으로 유도 초음파 계측을 실시하였으며, 셀프 센싱 기법을 사용하기 위하여 Fig. 6(b)와 같은 셀프 센싱 서킷 보드를 사용하였다.

입력 신호는 70 kHz의 Morlet wavelet 형태의 tone-burst 신호를 입력하였으며 출력된 신호는 웨이블릿 변환을 통해 잡음을 제거하고 70 kHz의 데이터만을 추출하여 양생 강도 해석에 사용하였다.

계측 일자에는 초기 재령의 유도 초음파 신호 변화를 집중적으로 측정하기 위하여 타설 직후부터 5일차까지 일



(a) NI DAQ system



(b) Self-sensing circuit

Fig. 6 Measurement equipments

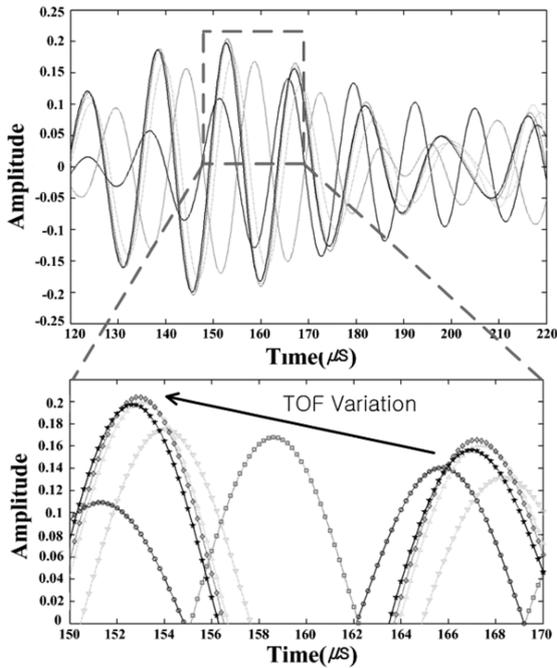


Fig. 7 Guided-wave variation according to the curing age (○: 2nd day, □: 3rd day, ▽: 7th day, △: 14th day, ◇: 21th day, ★: 28th day)

단위로 계측을 실시하였고 이후 7일, 14일, 21일, 28일차 유도 초음파 신호를 계측하였다. 타설 직후부터 몰드를 탈형 시키기 전인 1일차까지는 콘크리트 공시체로부터의 순수한 응답이 아닌 공시체 몰드로 인한 유도 초음파의 반사가 일어나지 않아 유도 초음파 신호가 계측되지 않았다. 몰드 탈형 후 2일차부터의 데이터를 통하여 양생 강도 모니터링을 실시하였다. 또한 실질적인 양생 강도를 측정하기 위하여 센서를 내장시킨 공시체 이외에 강도 측정용 공시체를 같이 만들어 콘크리트 압축강도 해석에서 중요한 양생 3일차, 7일차, 14일차, 21일차, 28일차에 UTM(universal testing machine)을 통하여 압축강도를 측정하였다.<sup>11)</sup>

#### 4.2 양생 일자에 따른 유도 초음파 신호 변화

Fig. 8은 각 양생 일자마다 측정된 유도 초음파 신호를 나타낸 것이다.

셀프 센싱 기법의 특성 상 초기 반사파는 입력 신호에 가려져 계측이 힘들다. 이에 이 실험에서는 입력 신호를 제외한 나머지 파형에서의 첫 번째 웨이브 그룹의 도달 속도를 유도 초음파 전달 시간(TOF)으로 측정하였다. 이는 내부에 삽입된 지능형 센서를 통해 발생한 유도 초음파 신호의 이동 경로를 정확히 알 수 없고 또한 입력 신호에 의해 초기 반사파가 측정이 어려우므로 전달 속도를 측정하는 것이 오차를 증가시킬 수 있기 때문이다. 각 양생 일자에 측정된 유도 초음파 신호를 통해 양생이 진행됨에 따라 유도 초음파의 전달 시간이 빨라지는 것을 볼 수 있다. 이는 양생이 진행됨에 따라 콘크리트

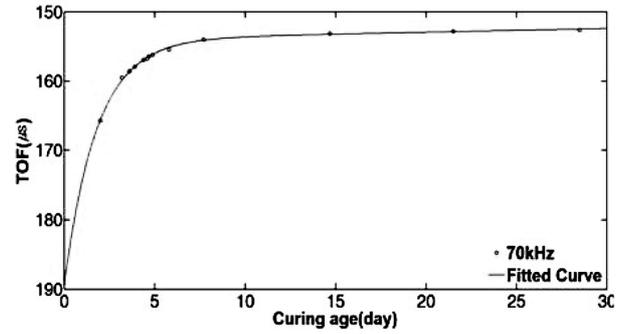


Fig. 8 TOF variation according to curing age

공시체의 강도가 증가하므로 그 증가량 만큼 유도 초음파의 전달 시간이 감소한다고 볼 수 있다. 각 양생 일자에 따른 유도 초음파 전달 시간을 Fig. 8에 나타내었다.

양생이 진행됨에 따라 유도 초음파의 전달 시간의 차이가 줄어들고 있는 것을 볼 수 있다. 이는 초기 재령에서의 비약적인 강도 증가에 의해 유도 초음파의 전달 시간이 양생 시간에 따라 빨리 감소하기 때문이다. 또한 양생 7일 이후부터는 강도 발현이 천천히 이루어지면서 유도 초음파의 전달 시간 차이 또한 천천히 감소한다. 각 양생 일자에 측정된 강도 측정용 공시체들의 측정 강도와 해당 일자의 유도 초음파 도달 속도와의 관계를 Fig. 9에 나타내었다.

유도 초음파의 도달 시간에 따른 콘크리트 강도가 근소한 오차로 선형 상관관계를 띄고 있다. 이를 기준으로 강도와 유도 초음파 전달 시간과의 식을 추론하였다.

$$S = -5.6t_f + 942.1 \quad (10)$$

여기서,  $S$ 는 콘크리트의 강도(MPa)이며,  $t_f$ 는 유도 초음파의 전달 시간( $\mu s$ )이다. 식을 통하여 유도 초음파의 전달 시간을 측정함으로써 직접적으로 콘크리트 공시체의 강도를 추정할 수 있다.

### 5. 결 론

이 연구는 매립형 지능형 센서를 사용하여 콘크리트의 강도를 추정할 수 있는 기술을 연구하였다. 이 연구를

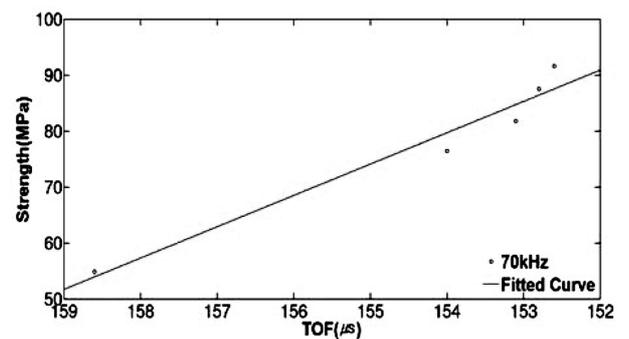


Fig. 9 Relationship between TOF and concrete strength

통하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- 1) 방수 코팅과 모르타르 케이싱을 통하여 취성 파괴가 일어나기 쉬운 압전 소자를 콘크리트 내부에 매립할 수 있는 지능형 센서를 제작하였다.
- 2) 콘크리트 내부에 매립된 하나의 지능형 센서로 셀프 센싱 기법을 사용한 유도 초음파 신호를 가진 및 계측할 수 있다.
- 3) 콘크리트의 강도가 증가할수록 콘크리트의 탄성 계수는 증가하며, 이에 따라 유도 초음파의 전달 시간은 빨라진다.
- 4) 강도와 유도 초음파 전달 시간과의 관계를 해석하여 강도 추정식을 추론함으로써 유도 초음파의 전달 시간을 측정하여 콘크리트의 강도를 추정할 수 있다.
- 5) 매립형 지능형 센서를 이용한 고강도 콘크리트의 양생 강도 모니터링의 적용 가능성을 확인할 수 있다. 추후 대형 슬래브에서의 적용 실험 및 실제 현장에서의 적용 실험을 통하여 지능형 센서를 이용한 유도 초음파 기반 콘크리트 양생 강도 모니터링 기법을 검증할 것이며 실험 데이터의 누적을 통해 보다 오차가 적은 유도 초음파 전달 시간과 콘크리트 강도와의 관계를 도출할 것이다. 또한 온도 및 습도 등 외부 환경에 의한 유도 초음파 전달 양상을 파악하여 이를 보상할 수 있는 기법을 연구할 계획이며 콘크리트 내부에서의 유도 초음파 전달 양상을 구명할 예정이다.

### 감사의 글

이 논문은 국토해양부의 u-City 석·박사 과정 지원사업의 지원, 대우건설, 그리고 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(2010161010004J)입니다.

### 참고문헌

1. Irie, H., Yoshida, Y., Sakurada, Y., and Ito, T., "Non-Destructive-Testing Methods for Concrete Structures," *NTT Technical Review*, Vol. 6, No. 8, 2008, pp. 1~8.
2. ACI Committee 228, *In-Place Methods to Estimate Concrete Strength*, Report No. 228. 1R-03, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2003, pp. 1~35.
3. Mehta, P. K. and Monterio, P. J. M., *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials 3rd ed.*, Mc Graw Hill Companies, New York, 2006, pp. 387~443.
4. Lamond, J. F. and Pielert, J. H., *Significance of Tests and Properties of Concrete & Concrete-Making Materials*, ASTM International, New York, 2006, pp. 125~141.
5. Tawie, R. and Lee, H. K., "Piezoelectric-Based Non-Destructive Monitoring of Hydration of Reinforced Concrete as an Indicator of Bond Development at the Steel-Concrete Interface," *Cement and Concrete Research*, Vol. 40, No. 12, 2010, pp. 1697~1703.
6. Gu, H., Song, G., Dhonde, H., Mo, Y. L., and Yan, S., "Concrete Early-Age Strength Monitoring Using Embedded Piezoelectric Transducers," *Smart Materials and Structures*, Vol. 15, No. 6, 2006, pp. 1837~1845.
7. Song, G., Gu, H., and Mo, Y. L., "Smart Aggregates: Multifunctional Sensors for Concrete Structures-A Tutorial and a Review," *Smart Materials and Structures*, Vol. 17, No. 3, 2008, Art. No. 033001.
8. Joseph, L. R., *Ultrasonic Waves in Solid Media*, Cambridge University Press, Cambridge, 1999, pp. 90~99.
9. Lee, S. J., Sohn, H., and Hong, J. W., "Time Reversal Based Piezoelectric Transducer Self-Diagnosis under Varying Temperature," *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol. 29, No. 4, 2010, pp. 75~91.
10. Park, H. W., Sohn, H., Law, K. H., and Farrar, C. R., "Time Reversal Active Sensing for Health Monitoring of a Composite Plate," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 302, Nos. 1-2, 2007, pp. 50~66.
11. Neville, A. M., *Properties of Concrete. 4th ed.*, John Wiley & Sons, New York, 1996, pp. 269~270.

**요약** 이 논문은 고강도 콘크리트의 양생 강도 발현을 모니터링하기 위하여 콘크리트 내부에 매립이 가능한 지능형 센서를 제작하고 제작된 지능형 센서를 이용하여 콘크리트 내부의 유도 초음파 전달 시간을 측정함으로써, 콘크리트의 양생 강도를 실시간 추정할 수 있는 기법을 보여준다. 압전 소자를 콘크리트 내부에 삽입하는데 있어, 콘크리트의 수화열과 양생 시의 미세 변형으로부터 보호되어야 하므로, 방수 코팅과 모르타르 케이싱을 하였으며 이렇게 제작된 지능형 센서로부터 저비용의 셀프 센싱 기반 유도 초음파를 계측하여 콘크리트 내부의 유도 초음파 전달 시간을 모니터링하는 기법을 제안하였다. 콘크리트의 양생이 진행됨에 따라 콘크리트의 강도가 증가하게 되는데, 이는 즉 콘크리트의 탄성 계수가 증가하기 때문이며 이로 인해, 유도 초음파의 전달 시간이 빨라지는 것이므로, 이를 측정하여 콘크리트 양생 강도를 추정할 수 있게 된다. 제안된 기법의 적용가능성을 검증하기 위하여 설계 압축강도 100 MPa의 공시체 내부에 지능형 센서를 매립하고 양생기간 동안 유도 초음파를 측정, 비교 분석하였다. 유도 초음파 신호는 양생이 진행됨에 따라 더 빠르게 전달되었으며, 특히 강도 변화가 급격하게 일어나는 초기 재령에서의 유도 초음파 전달속도 변화가 가장 크게 나타났고 그 이후로 점차 감소하는 경향을 보여주었다. 또한, 유도 초음파 전달 시간과 강도 사이의 선형 상관관계를 이용하여 유도 초음파의 전달 시간을 이용해 발현강도를 추정하는 콘크리트 양생강도 추정식을 제안하였다. 결과적으로 이 연구를 통해 개발된 매립형 지능형 센서를 이용하여 고강도 콘크리트의 양생 강도를 실시간 모니터링할 수 있음이 검증되었다.

**핵심용어** : 매립형 지능형 센서, 콘크리트 양생 모니터링, 유도 초음파, 압전 센서, 웨이블릿 변환