

어드미턴스 기반 콘크리트 경화 모니터링의 실험 및 수치적 검증

Experimental and Numerical Validation of the Technique for Concrete Cure Monitoring Using Piezoelectric Admittance Measurements

김완철*, 박규해*†

Wan Cheol Kim* and Gyuhae Park*†

초 록 콘크리트는 건축물에 가장 많이 사용되는 재료 중 하나이다. 건축물 시공 시 적절한 하중 재하시점을 결정하기 위해 콘크리트의 경화 상태의 점검은 매우 중요한 사항이다. 또한 부정확한 경화 모니터링은 건축물의 부실공사 혹은 붕괴로 이어질 수 있다. 본 연구에서는 어드미턴스를 기반으로 한 압전체 센서 자가진단기법을 확장 적용한 콘크리트 경화 모니터링 기법을 개발하였다. 이 기법을 통해 콘크리트의 경화를 모니터링 하였으며 실험 결과 분석을 통해 본 기법의 상대강도 추정 가능성을 확인하였다. 또한 경화 시 발현강도에 따른 어드미턴스 신호 예측을 위해 수치적 모델링을 하였으며 실험 결과와 경화 진행 경향성을 비교하였다. 이를 통해 본 연구에서 개발한 기법의 효용성을 실험 및 수치적으로 확인하였다.

주요용어: 콘크리트 경화 모니터링, 센서 자가진단법, 전기역학적 어드미턴스

Abstract This paper presents a new technique for monitoring the concrete curing process using embedded piezoelectric transducers via admittance measurements. When a piezoelectric transducer is embedded in a structure, the electrical impedance (admittance) of the transducer is coupled with the mechanical impedance of the host structure, which allows monitoring of the structural condition. In this study, the admittance signatures are used for monitoring the concrete curing process. This new method is based on an admittance-based sensor diagnostic process, in which the capacitance values of the piezoelectric transducers are dependent on the strength of the host structure. We numerically and experimentally investigated the variations in capacitive value during the curing process. The results demonstrate that there is a clear relationship between the concrete curing status and the slope, this indicates that the proposed method could be efficiently used for monitoring the curing status of a concrete structure.

Keywords: Concrete Curing Monitoring, Sensor Diagnostic, Admittance

1. 서 론

콘크리트는 시멘트계 재료(콘크리트, 모르타르, 시멘트 페이스트) 중 하나로 일반 건축물을 비롯 댐, 도로, 원자력발전소 등 여러 산업기반시설 시공에 널리 사용된다. 이는 건설산업의 발전과 건축물 시공 시 콘크리트의 내구성, 힘, 그리고 탁월한 위커빌리티 등으로 비롯되며 타 건축재료 대비 높은 경제성을 가지고 있다.

콘크리트 경화 모니터링은 특히 큰 규모의 사회기반시설을 시공할 때 필수적이며, 이를 통해 콘크리트 추가 하중 재하시점을 파악함으로써 신속하고 안전한 건축물 시공을 추진할 수 있다. 경화 모니터링이 수행되지 않았을 시 시공 중 크랙 발생과 더불어 이는 자칫 붕괴로까지 이어질 수 있다. 따라서 건축물 시공 시 콘크리트 경화 상태 점검은 필수적이며 매우 중요하다[1].

실제 현장에서 콘크리트의 경화 상태를 평가하

[Received: April 15, 2016, Revised: May 25, 2016, Accepted: June 10, 2016] *전남대학교 기계공학과, †Corresponding Author: Department of Mechanical Engineering, Chonnam National University, Gwangju 61186, Korea (E-mail: gpark@jnu.ac.kr)

는 방법으로는 비카칩 테스트와 관입저항시험을 가장 많이 사용하고 있다. 이 방법들은 사용의 편리성, 현장 및 실험실 환경에서의 적합성, 시험 장치의 저가 등의 장점을 가지고 있다. 하지만 위 시험 방법은 현장 적용 시 작업자가 매 시간 주기적으로 측정해야 하므로 비효율적이며 번거롭다는 단점이 있다[2,3]. 이와 같은 단점을 극복하기 위해 최근 EMI기법을 활용한 연구가 활발히 진행되고 있다. 구조물에 압전소자(piezoelectric transducer, PZT)를 부착, 삽입하여 압전소자를 통해 측정되는 임피던스 실수 부분의 공진주파수 변화를 추적하여 경화 상태를 평가한다. Shin et al.은 콘크리트 시편 표면에 압전소자를 부착 후 접촉재 영향과 함께 고려하여 경화 과정에 따른 공진주파수 변화를 관찰하였으며, Lee et al.은 시멘트 페이스트 내부에 압전소자를 삽입 후 경화가 진행됨에 따른 공진주파수 변화를 분석하였다. 또한 Bahador and Yaowen은 임피던스 실수 부분 측정을 통해 공진주파수 변화와 임피던스 크기 변화를 통해 경화 상태를 파악하는 연구를 수행하였다[4-6]. 그렇지만 임피던스 실수 부분을 측정하여 경화 상태를 평가하는 EMI기법은 구조물의 손상에 민감하며 다수의 resonant peak가 존재하므로 최종 및 최적의 경화 상태를 파악하기에 어려움이 있다. 또한 구조물의 동특성 및 크기에 따라 resonant peak의 주파수 영역이 다르므로 주파수 영역 선정이 수반된다.

본 연구에서는 압전센서의 capacitive value 변화를 추적하여 센서에 발생된 결함이나 접촉층 파손을 감지하는 어드미턴스 기반 센서 자가진단법[9]을 확장 적용한 콘크리트 경화 모니터링 기법을 개발하였다. 본 기법은 경화 상태를 평가 시 구조물 손상을 고려할 필요가 없을 뿐 아니라 경화도의 정량적 표현이 가능하며 측정 시 관찰 주파수 영역 선정이 불필요하다. 또한 기존 EMI 기법(100 kHz ~ 1 MHz)과 비교하여 훨씬 낮은 주파수 영역(0 ~ 20 kHz)에서 측정하므로 이를 통해 낮은 사양의 측정장치 사용이 가능하다.

본 논문에서는 위 기법을 적용하여 콘크리트의 경화 상태를 모니터링 하였으며 분석을 통해 상대강도 추정 가능성을 확인하였다. 또한 기존 EMI기법을 적용하여 모니터링 하였으며 두 기법의 모니터링 결과를 비교 분석하였다. 더불어 경화 시 발현강도에 따른 어드미턴스 신호 예측을

위해 수치적 모델링을 수행하였으며 실험 결과와 경화 진행 경향성 비교 분석을 실시하였다.

2. 이론

압전체는 전기적 에너지를 기계적 에너지로 변환하거나 기계적 에너지를 전기적 에너지로 상호 변환이 가능한 소자이다. 또한 압전소자의 전기역학적 어드미턴스를 계측하고, 계측된 어드미턴스 신호의 변화를 관찰함으로써 구조물의 상태를 실시간으로 진단할 수 있다[7,8].

본 연구에서 개발한 기법은 Park et al.[9]이 개발한 capacitive value 변화를 추적하여 압전체-구조물의 접촉상태를 진단하는 어드미턴스 기반 센서 자가진단법을 확장, 적용하였으며, 이 때 압전소자의 전기역학적 어드미턴스는 다음 식(1)과 같다.

$$Y(w) = jw \frac{wl}{t_c} (\epsilon_{33}^T (1 - i\delta)) - d_{31}^2 Y_p^E + \frac{Z_a(w)}{Z_a(w) + Z_s(w)} d_{31}^2 Y_p^{E'} \left(\frac{\tan kl}{kl} \right) \quad (1)$$

식(1)에서 나타내는 어드미턴스는 압전소자의 길이, 너비, 두께 등의 기하학적 상수(l, w, t_c)와 압전소자의 유전체 손실계수 및 유전체 상수인 전기적 속성(ϵ_{33}^T, δ)의 함수로 이루어진다. 또한 Z_a, Z_s 는 각각 압전소자와 구조물의 역학적 임피던스이며 Y_p^E 는 압전소자의 복합탄성계수(complex elastic modulus)를 나타낸다. 구조물의 역학적 임피던스, Z_s 가 무한대라고 가정하였을 때 아래 식(3)과 같이 나타낼 수 있다. 이 때 식(3)은 free-free 상태에서의 어드미턴스를 나타낸 식(2)에서 접촉층의 영향값 $d_{31}^2 Y_p^E$ 를 뺀 값으로 나타낼 수 있다.

$$Y_{free}(w) = jw \frac{wl}{t_c} (\epsilon_{33}^T (1 - j\delta)) \quad (2)$$

$$Y(w) = iw \frac{wl}{t_c} (\epsilon_{33}^T (1 - i\delta) - d_{31}^2 Y_p^E) = Y_{free}(w) - iw \frac{wl}{t_c} (d_{31}^2 Y_p^E) \quad (3)$$

이는 압전소자와 구조물간의 접촉층이 계측된 어드미턴스 신호에 영향을 줄 수 있음을 나타낸다.

접착력이 증가함에 따라 기울기로 나타나는 어드미턴스 신호는 감소하며 이를 통해 압전소자와 구조물 간의 접촉상태를 진단할 수 있다.

또한 식(1)에서 계속되는 어드미턴스 신호의 변화는 역학적 임피던스, Z_g 의 함수로 나타낼 수 있다. 콘크리트의 경화가 진행되는 동안 구조물의 역학적 임피던스는 증가하며 이는 어드미턴스의 기울기 감소로 발현된다. 본 연구에서는 이 원리를 통해 콘크리트의 경화 상태를 평가하였다.

3. 콘크리트 경화 모니터링 실험

3.1. 실험 개요

콘크리트 경화상태 평가 실험을 수행하기 위해 Table 1과 같은 배합비로 지름 50 mm, 높이 100 mm의 실린더형 표준공시체를 제작하였으며 (Fig. 1) 경화에 따른 어드미턴스의 변화를 측정하기 위하여 압전소자 (APC 850, disk type)를 공시체 시편 정중앙(높이 50 mm)에 삽입하였다. 구조물 내 물로 인한 압전소자의 쇼트현상이 발생할 우려가 있기 때문에 삽입 전 아크릴 절연코팅제 (AC-100)을 사용하여 압전소자를 절연시켰다. Fig. 2는 절연코팅 전후의 어드미턴스 신호를 나타낸다.

어드미턴스 측정 시 일반적으로 HP4194A와 같은 impedance analyzer를 사용하지만 본 연구에서는 경제적이고 편리하게 사용하기 위해 impedance circuit을 구성하였다[14] (Fig. 3). 이를 dynamic signal analyzer (NI 6366)에 연결한 후 본 기법에 선 구조물의 역학적 임피던스가 압전소자의 역학적 임피던스보다 크다는 전제하에 적용되며, 따라서 local mode 발생에 의한 구조물 임피던스 감소가 발생하지 않는 0-20 kHz 주파수 영역에서 측정을 수행한다[9]. 그렇지만 어드미턴스 실수 부분을 통한 resonant peak의 변화도 동시에 관측하기 위해 0-800 kHz 주파수 범위에서도 chirp 신호로 가진하고 그 응답을 측정하여 재령 28일 간 어드미턴스 측정을 수행하였다. 이 때 콘크리트는 경화 시 내부 수화열이 발생하고 어드미턴스 신호는 일반적으로 열에 민감하므로, 구조물의 임피던스 증가에 의한 기울기 변화를 관찰하기 위해 열 영향에 의한 어드미턴스 신호 데이터 선별을 실시하였다.

Table 1 Concrete mix proportions

Specimen	Cement (kg/m ³)	Water (kg/m ³)	w/c	fa/c	ca/c
A	450	200	0.4	1.30	2.55
B	400	200	0.5	1.50	2.91
C	300	200	0.6	1.7	3.48



Fig. 1 Experiment setup

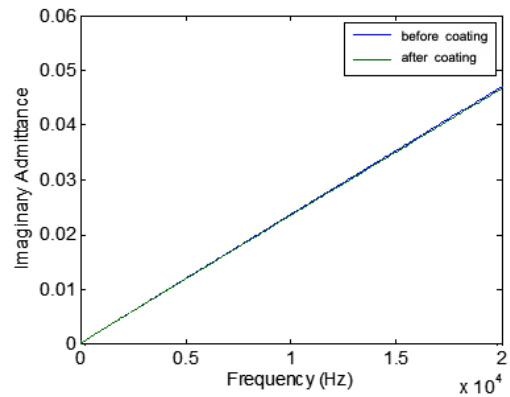


Fig. 2 Imaginary admittance before and after coating in free-free condition

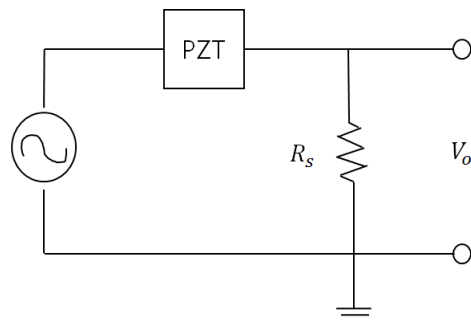


Fig. 3 Circuit of approximating PZT impedance

절연코팅 전후 어드미턴스 신호의 차이는 약 0.7%이며, 이와 같이 매 실험 수행 시 코팅 전후의 어드미턴스 신호 변화가 1% 미만임을 확인하였다.

식(4)는 기울기 변화율 (slope variation ratio)이며, 이를 통해 경화 진행 시 기울기 변화 정도를 정량적으로 파악할 수 있다.

$$Slope\ variation\ ratio = \frac{\Delta Y(\omega)}{Y_{free}(\omega)} \times 100 (\%) \quad (4)$$

$Y_{free}(\omega)$ 는 free-free 상태에서 측정한 어드미턴스이며 $\Delta Y(\omega) = Y(\omega)_{free} - Y(\omega)_{meas}$ 이다. $Y(\omega)_{meas}$ 는 경화 진행 동안 측정된 어드미턴스 신호이다.

3.2. 실험 결과 및 고찰

Fig. 4는 각 시편의 콘크리트가 28일 동안 경화 시 어드미턴스 기울기의 감소율을 나타낸다. 28일째 free-free 상태 대비 어드미턴스 기울기 시편 A는 23%이며, 시편 B, C는 각각 18%, 12% 감소하였다. 콘크리트의 경화가 진행됨에 따라 어드미턴스의 기울기는 재령 7일까지 급격하게 감소하며 재령 28일에 가까울수록 기울기는 완만하게 감소하며 점차적으로 수렴해 가는 것을 확인할 수 있다. 어드미턴스 기울기의 감소는 압전 센서와 구조물 간 접촉강성이 증가할수록 기울기가 감소하는 것과 동일한 맥락이다. 또한 기울기 크기가 작아질수록 이는 콘크리트의 강도가 증대되는 것을 의미하며 실험 결과를 통해 상대강도는 $A > B > C$ 순으로 추정할 수 있다. 또한 일반적으로 시멘트계 재료의 강도는 물-시멘트 비에 영향을 받으며 배합 시 물의 양이 적을수록 강도는 증가한다($0.4 > 0.5 > 0.6$). 이는 실험결과를 통해 추정된 결과와 동일하며 따라서 상대강도 추정이 가능함을 확인할 수 있다.

또한 재령 28일을 초과하여 측정 시 보다 확실한 어드미턴스의 수렴 기울기 변화율 추정이 가능할 것이라 판단되며 이를 수치적 모델, 혹은 압축강도 실험 결과와의 비교를 통해 설계강도에 따른 어드미턴스 신호의 기울기 변화율을 예측할 수 있다는 측면에서 정량적인 경화 시점 판단이 가능하다. 추후 이 기법을 통해 콘크리트의 설계강도에 따른 데이터의 축적이 가능하며, 따라서

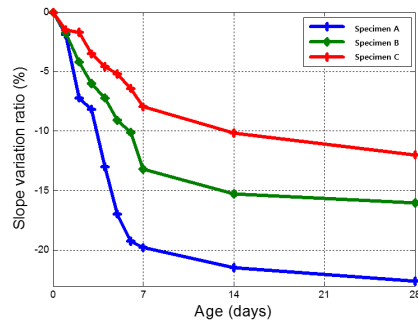
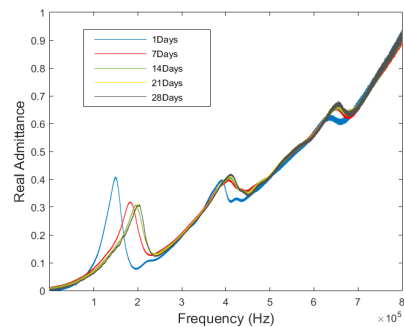
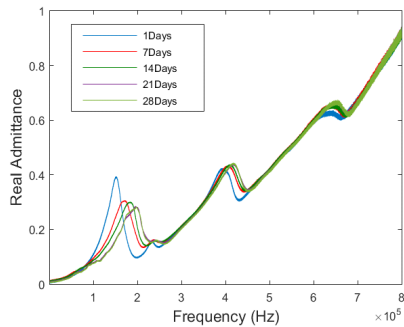


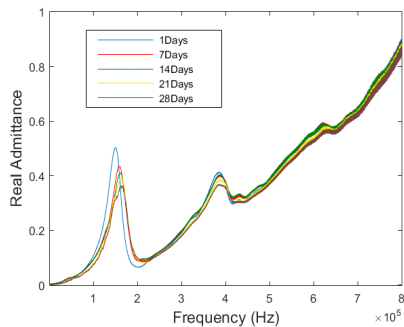
Fig. 4 Experiment results



(a)



(b)



(c)

Fig. 5 Real part of admittance, (a) specimen A (b) specimen B (c) specimen C

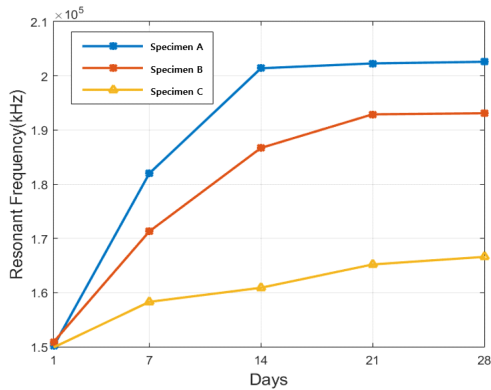


Fig. 6 Resonant frequency shifts of real admittance

보다 효율적인 콘크리트 경화 모니터링이 가능할 것으로 기대된다.

Fig. 5는 재령 28일 간 어드미턴스 실수 부분을 계측한 결과이다. Fig. 5를 통해 resonant peak의 이동을 확인할 수 있지만 resonant peak은 구조물의 손상 및 결함에 민감하다. 또한 콘크리트의 경화상태를 직관적으로 파악하기 힘들며 이로 인해 최적, 혹은 최종 경화 완료 상태를 판단하기에 어려움이 따른다. 비록 이런 문제점을 보충하기 위해 RMSD (root mean square deviation) 등의 신호처리를 사용하지만, 이는 정량적인 경화상태 평가에는 정확성에 한계가 있다.

Fig. 6에서는 재령 28일 간 특정 주파수 영역 (150-210 kHz)의 resonant peak의 이동을 나타낸다. 다수 존재하는 resonant peak는 경화 진행 시 주파수 영역 내 이동량이 각 peak마다 다르며 때문에 가장 지배적으로 이동하는 주파수 영역을 선정해줘야 한다. 이는 주파수 선정 영역에 따른 결과의 차이를 부를 수 있기 때문에 정확한 경화상태를 평가하기에는 애매한 부분이 존재한다. 반면 본 기법은 free-free 상태에서 계측한 어드미턴스를 기준삼아 수렴 기율이 변화율을 통한 최적 경화상태의 예측이 가능하므로 직관적이며 정량적인 장점이 있다. 하지만 이전 연구사례에서 적용된 resonant peak의 변화와 이 연구에서 제시한 기율기 변화를 함께 사용하면 경화도 예측에 정확도를 높일 수 있으리라 판단되며, 현재 이 분야에 대한 연구는 진행 중이다.

또한 본 논문에서는 실험뿐 아니라 경화 시 발현하는 콘크리트의 강도에 따른 어드미턴스 기율

기 예측을 위해 수치적 모델링을 수행하였으며 실험결과와 비교 분석을 수행하였다.

4. 수치적 모델링

4.1. 준정적 어드미턴스

Zagarai and Giurgiutiu[10]는 구조물에 부착된 디스크 형태 압전센서의 EMI 모델링을 수행하였다. 이를 기반으로 Dugnani[11]는 접착층의 영향을 고려한 등가구조강성(equivalent structural stiffness)개념을 추가 확장 하였으며, (Fig. 7) 이를 Park et al[12]의 실험 결과와 비교를 통해 규명하였다. 이 때 준정적(quasi-static) 상태, 즉 압전소자의 1차 공진주파수 미만의 주파수 영역에서 어드미턴스는 식(5)와 같다.

$$\bar{Y}(\omega) = j\omega \cdot \bar{C} \left[1 - k_p^2 + k_p^2 \left(\frac{k_{PZT}}{k_{PZT} + k_{str}} \right) \right] \quad (5)$$

k_p 는 압전소자의 planar coupling factor이며, $k_{PZT} = t_a / [r_a \cdot s_{11}^E (1 - \nu)]$ 로 압전소자의 정적강성(static stiffness)이다. 이때 t_a 는 압전소자의 두께이다. 그리고 k_{str} 은 구조물의 강성(structural stiffness), \bar{C} 는 압전소자의 complex capacitance이다. 식(6)는 압전소자와 구조물 사이 접착강성(bonding stiffness)을 나타낸다(자세한 유도과정은 [11]참조).

$$k_{bond}(\omega) = G_B \left[\frac{r_a}{2 \cdot h_B} \right] \quad (6)$$

G_B 는 접착층의 전단계수(shear modulus)이며, h_B 는 접착층의 두께, r_a 는 압전소자의 반경이다.

접착층을 포함한 등가구조강성(equivalent structural stiffness), \tilde{k}_{str} 은 식(7)과 같다.

$$\tilde{k}_{str}(\omega) = \frac{k_{str}(\omega) \cdot k_{bond}(\omega)}{k_{bond}(\omega) + k_{str}(\omega)} \quad (7)$$

식(7)을 식(5)에 대입하여 접착층의 영향을 고려한 어드미턴스를 나타낼 수 있다.

Fig. 8은 free-free 상태에서 수치적 어드미턴스와 계측한 어드미턴스 신호를 비교한 결과이다.

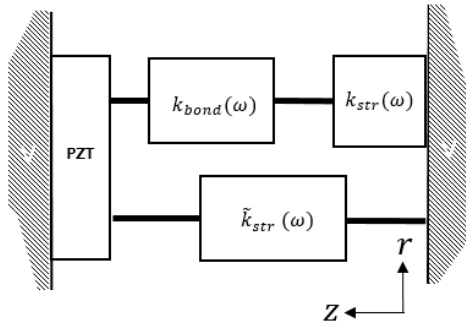


Fig. 7 Schematic view of the equivalent structural stiffness

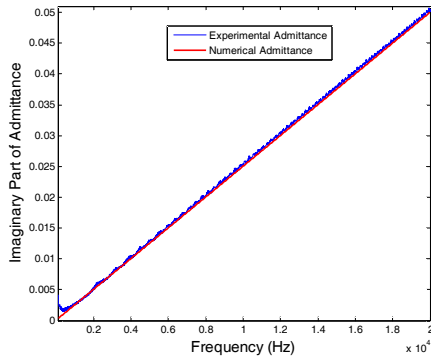


Fig. 8 Comparison of between experimental and numerical admittance in free-free condition

4.2. 경화과정 모사 어드미턴스 모델링

본 연구에서 모델링을 한 압전센서 (APC 850, disk type)의 주요 물성치는 Table 2와 같다.

본 연구에서는 Fig. 9와 같이 구조물의 강성, \tilde{k}_{str} 을 접착층 강성, k_{bond} 을 구하는 식 (6)을 통해 구하였다. 이렇게 가정한 근거로는 시편 내 삽입된 압전소자와 구조물 접착면은 콘크리트이고, 그러므로 접착력을 발생시키는 material은 구조물과 동일하다. 따라서 경화 진행에 따른 강성 증가 경향도 유사할거라 판단했기 때문이다. 그렇지만 구조물의 강성이 곧 k_{bond} 라고 장담하기에는 무리가 있으며, 따라서 추후 콘크리트 구조물에 작용하는 접착강성과 구조물 강성을 구분짓는 모델로 개선하고자 한다.

또한 콘크리트 경화가 진행되는 동안 삽입된 압전소자 상, 하단 면에 작용하는 구조물 강성의 증가는 동일하다고 가정하며, 골재의 영향은 무시하였다.

Table 2 Key properties of APC 850

Property	Symbol	Value	Unit
Dielectric constant	ϵ_{33}^T	10.01	$10^{-9}F/m$
Coupling factor	k_p	0.63	-
Density	ρ	7800	kg/m^3
Elastic compliance	s_{11}^E	16.9	$10^{-12}m^2/N$
Piezoelectric strain coefficient	d_{31}	-175	$10^{-12}m/V$
poission's ratio	ν	0.3	-

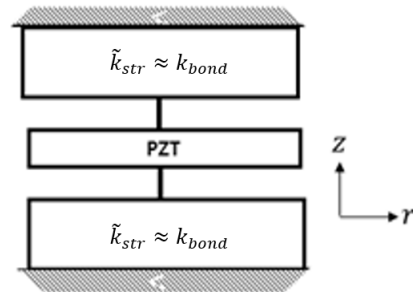


Fig. 9 Schematic view of modified equivalent structural stiffness

4.3. 실험과 수치적 모델 비교

본 논문에서는 경화 진행에 따른 어드미턴스 기울기 예측을 위해 수치적 모델링을 하였으며 [13]의 실험값을 모델에 대입하여 경화 진행에 따른 기울기 변화를 예측하였다. [13]에서는 물-시멘트 비 0.5, 0.6로 배합한 콘크리트 시편을 대상으로 재령 직후부터 28일 동안 impact test를 통해 시편의 dynamic property를 측정하였다.

Fig. 10와 Fig. 11은 각각 콘크리트 경화과정의 수치적 모델링과 실험을 통한 어드미턴스 측정기울기 변화율을 보여준다. 시편 B는 재령 28일째 측정기울기 변화율이 모델링과 실험이 약 2% 차이가 나며 시편 C는 약 4% 모델링과 실험값이 차이가 발생한다. 이는 [13]에서 측정한 시편과 본 실험에서 제작한 시편의 크기 및 재료적, 환경적 차이로 인한 것으로 분석된다.

실험결과와 수치적 결과의 경화에 따른 기울기 변화 경향의 유사성을 파악하기 위해 두 데이터의 상관관계수(correlation coefficient)를 구하였으며

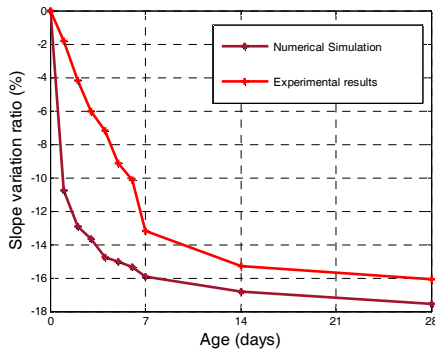


Fig. 10 Comparison between numerical and experiment results (w/c ratio 0.5)

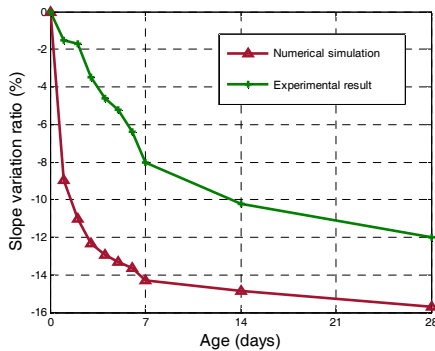


Fig. 11 Comparison between numerical and experiment results (w/c ratio 0.6)

시편 B, C에서 각각 0.8, 0.78로 계산되었다. 이를 통해 두 시편 모두 모델과 비교적 유사한 경향성을 보이고 있으며 경화 진행 경향을 잘 반영하고 있다고 판단할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 어드미턴스 기반 압전체 센서 자가진단법을 확장 및 적용한 콘크리트 경화 모니터링 기법을 개발하였으며 다음과 같이 결론을 내릴 수 있다.

재령 28일간 콘크리트의 경화를 기존 EMI기법 및 본 기법을 적용하여 모니터링 하였으며 두 기법의 비교 시 경화 진행에 따른 resonant peak 변화 및 기울기 변화율의 변화 경향은 유사하지만 기존 EMI기법과 달리 본 기법을 통해 정량적이며 직관적으로 경화 진행 상태를 파악할 수 있으며 본 기법을 통해 상대강도 추정이 가능함을 확

인할 수 있다.

또한 경화 시 발현강도에 따른 어드미턴스 신호 예측을 위해 수치적 모델링을 수행하였으며 실험 결과와 수치적 결과의 상관계수값 도출을 통해서 본 기법의 경화 모니터링 효용성을 수치적으로 검증하였다.

본 기법을 통해 기존 EMI기법이 가지는 한계점을 극복하였으며 이를 통해 정량적인 경화 상태 평가와 경제적으로 경화 모니터링을 수행할 수 있음을 확인할 수 있다.

추후 본 연구에서 제시한 기법을 통한 콘크리트 시편의 전반적인 강도 추정을 확인하기 위해 타 압전소자를 이용 혹은 다수의 압전소자를 통해 계측 결과의 비교 분석을 수행하고 이를 통해서 본 기법을 통한 콘크리트 강도 추정에 대한 검증을 수행할 계획이다. 또한 콘크리트 구조물에 삽입한 압전소자를 이용한 구조 건전성 모니터링 관련 선행연구사례를 참조하여 구조 건전성 모니터링에 대한 연구를 삽입된 압전소자 및 라인이 주는 구조물의 integrity에 대한 영향을 고려하여 수행하고자 한다.

후 기

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2015R1D1A1A01059092).

References

- [1] J. F. Lamond and J. H. Pielert, Eds., "Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials," ASTM International, West Conshohocken, PA, pp. 86-97 (2006)
- [2] ASTM Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cements by Vicat Needle (C 191), Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.04, ASTM International, West Conshohocken, PA, pp. 179-184 (2002)
- [3] ASTM Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance (C 403/C 403M), Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.02, ASTM International,

- West Conshohocken, PA, pp. 228-233 (2003)
- [4] S. W. Shin, A. R. Qureshi, J. Y. Lee and C. B. Yun, "Piezoelectric sensor based nondestructive active monitoring of strength gain in concrete," *Smart Materials and Structures*, Vol. 17, No. 5, 055002 (2008)
- [5] H. K. Lee, K. M. Lee, Y. H. Kim, H. Yim and D. B. Bae, "Ultrasonic in-situ monitoring of setting process of high-performance concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, Issue 4, pp. 631-640 (2004)
- [6] S. D. Bahador and Y. Yaowen, "Monitoring hydration of concrete with piezoelectric transducers," 35th Conference on Our World in Concrete & Structures, Singapore (2010)
- [7] S. Park, S. Ahmad, C. B. Yun and Y. Roh, "Multiple crack detection of concrete structures using impedance-based structural health monitoring techniques," *Experimental Mechanics*, Vol. 46, Issue 5, pp. 609-618 (2006)
- [8] G. Park, H. Sohn, C. R. Farrar and D. J. Inman, "Overview of piezoelectric impedance-based health monitoring and path forward," *The Shock and Vibration Digest*, Vol. 35, No. 6, pp. 451-463 (2003)
- [9] G. Park, C. R. Farrar, A. C. Rutherford and A. N. Robertson, "Piezoelectric active sensor self-diagnostics using electrical admittance measurements," *Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 128, Issue. 4, pp. 469-476 (2006)
- [10] A. N. Zagrai and V. Giurgiutiu, "Electromechanical impedance method for crack detection in thin plates," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 12, No. 10, pp. 709-718 (2001)
- [11] R. Dugnani, "Dynamic behavior of structure-mounted disk-shape piezoelectric sensors including the adhesive layer," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 20, No. 13, pp. 1553-1564 (2009)
- [12] G. Park, C. R. Farrar, F. L. di Scalea and S. Coccia, "Performance assessment and validation of piezoelectric active-sensors in structural health monitoring," *Smart Materials and Structures*, Vol. 15, Issue 6, pp. 1673-1683 (2006)
- [13] X. Jin and Z. Li, "Dynamic property determination for early-age concrete," *Materials Journal*, Vol. 98, Issue 5, pp. 365-370 (2001)
- [14] D. M. Peairs, G. Park and D. J. Inman, "Improving accessibility of the impedance-based structural health monitoring method," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 15, No. 2, pp. 129-139 (2004)