



03

콘크리트 NDT의 실용성 향상을 위한 Advanced Sensing 기술

Advanced Sensing Technologies for Improving Practical Use of Concrete NDT

신성우 Sung Woo Shin
부경대학교 안전공학과 교수

1. 머리말

콘크리트는 매우 우수한 건설 재료로써 교량/빌딩 등을 포함한 대다수의 시설물 건설에 사용되었으며 향후에도 지속적으로 사용되리라 예상된다. 그러나 콘크리트가 건설 재료로써 아무리 우수하다 하더라도 시공 과정에서 조건과 방법에 따른 품질 변화와 완공 후 공용 과정에서 환경과 외력 변화에 의한 열화나 손상을 피할 수는 없으며, 경우에 따라 이러한 요인들은 콘크리트의 내구성과 안전성에 심각한 문제를 발생시킬 수 있다. 따라서 시공 과정에서 콘크리트 품질의 적절성을 판단하고 완공 후 공용 과정에서는 콘크리트의 열화와 손상 정도를 판단할 수 있는 정보의 확보는 콘크리트의 안전과 경제적인 시공 및 유지 관리에 있어서 매우 중요한 부분이다.

시공 또는 공용 중 콘크리트의 역학적/내구적 상태를 평가할 수 있는 정보를 획득하기 위한 다양한 현장 및 실내 시험 방법이 제안되었으며, 그 중에서도 시험 대상 콘크리트에 손상이나 파괴를 유발하지 않고 콘크리트의 상태에 관한 정보를 빠르게 획득할 수 있는 비파괴검사(Nondestructive Testing; 이하 NDT) 기술에 대한 실무적인 관심이 매우 높다. 그러나 콘크리트 NDT 기술에 대한 실무에서의 높은 관심과 수요에 비하여 현재의 콘크리트 NDT 기술은 실무에서 보편적으로 사용되는 현장 및 실내 시험 방법을 완전히 대체할 수 있을 만큼의 신뢰성과 실용성이 아직 확보되지 않아 단지 보조적인

수단으로만 활용되고 있는 상황이다. 이러한 이유로 많은 연구자들이 실무에서 보편적으로 사용할 수 있는 신뢰성과 실용성이 향상된 콘크리트 NDT 기술 개발을 위해 매진하고 있으며, NDT 이론의 발전과 우수한 성능을 가진 첨단 센서 및 고도화된 신호처리 기법의 적용을 바탕으로 콘크리트 NDT 기술은 현재 빠른 속도로 발전하고 있다. 특히, 최근에는 콘크리트 NDT 기술이 구조 건전성 모니터링 시스템 개발과 정보화 시공 기술 개발에 있어 핵심 요소 기술로 부각되면서 앞으로 더욱 큰 발전과 기술 향상이 기대되고 있다. 본 고에서는 신뢰성과 실용성이 향상된 콘크리트 NDT 기술 개발과 관련한 다양한 연구 중에서도, 콘크리트 NDT의 실용성 향상을 위한 Advanced Sensing 기술과 이를 이용한 콘크리트 NDT의 최근 연구에 대해 소개하고자 한다.

2. Non-contact Air-coupled Sensing 기술 및 응용

2.1 Non-contact Air-coupled Sensing 기술

초음파(ultrasonic waves)는 콘크리트 NDT에서 강도 평가나 내부 손상 및 결함 탐지 등에 많이 이용된다. 통상 초음파를 이용한 콘크리트 NDT에서는 매질 내에서의 특정 초음파 모드의 전파 속도나 초음파 신호의 감쇠 정도 등을 측정하고, 측정된 값은 강도 평가나 내부 손상 및 결함 탐지의 인자로 활용된다. 초음파를 이용한 콘

크리트 NDT에서 주로 사용하는 초음파의 주파수 대역은 골재나 미소 공극 등에 의한 초음파의 산란과 같은 영향을 줄이기 위하여 통상 20~100(kHz) 정도의 대역을 사용하며, 일반적으로 고주파 대역의 초음파 신호의 계측 시에 사용하는 초음파 센서(탐촉자)는 접촉형이며, 접촉형 초음파 센서는 초음파 신호의 측정 과정에서 센서와 검사 대상체 사이의 경계면에서 초음파 반사를 없애기 위해 그리스(grease)와 같은 연결재(couplant)를 반드시 사용해야 한다. 그러나 이 같은 접촉식 계측의 경우, 연결재의 종류와 센서와 검사 대상체 사이의 연결재 도포 두께에 따라 측정 결과가 변동이 발생할 수 있으며, 특히 감쇠를 측정 변수로 하는 경우 연결재의 상태가 일정하게 유지되지 않으면 측정 결과가 크게 왜곡되어 신뢰성이 매우 저하되는 문제점이 있다. 뿐만 아니라 접촉식 초음파 계측은 센서의 설치를 위한 표면 처리 등과 같은 검사 준비 시간이 많이 소요되기 때문에 도로 구조물과 같이 차량 통행의 차단이 필요한 경우 검사 시간 증가에 따른 비용 증가 및 민원의 제기와 같은 현실적인 문제점이 증대 된다. 이에 따라 접촉식 계측의 이러한 문제점을 극복하기 위해 최근에 비접촉 방식의 급속 계측(non-contact rapid measurement)에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 초음파 신호를 비접촉 방식으로 계측하기 위한 방법으로는 레이저 등을 이용한 광학적 계측법과 air-coupled 센서 등을 이용한 음향학적 계측법이 있다. 광학적 계측법은 측정 대상의 표면 위에 위치한 한 점의 움직임을 레이저를 이용하여 계측하는 것이며 매우 높은 정확성을 가지고 있다. 그러나 콘크리트와 같이 표면이 매끄럽지 못한 경우 레이저의 난반사로 인해 측정의 감도와 정확성이 낮아질 수 있기 때문에 표면 처리 과정이 필요할 뿐만 아니라 측정 장비가 매우 고가여서 콘크리트 NDT에서 실용적으로 이용하기는 아직까지 어려운 실정이다. 한편, 매질을 전파하는 초음파의 일부는 매질의 경계 외부로 누설이 발생하게 되며, 음향학적 계측법은 매질 경계 외부의 대기로 누설된 누설파를 마이크로폰이나 음압센서와 같은 air-coupled 센서를 이용하여 비접촉적으로 계측하는 방식이다. <그림 1>에는 air-concrete

coupled media에서 콘크리트 표면의 한 점을 충격 가진하였을 때의 초음파 파동장(wave field)을 수치해석적으로 구한 결과를 나타내며¹⁾, <그림 2>는 콘크리트 표면 충격 가진에 의한 누설표면파(leaky surface wave)를 마이크로폰을 이용하여 비접촉으로 계측하는 실험의 구성과 계측 결과를 나타낸다²⁾. 그림으로부터 콘크리트 표면을 충격 가진하여 생성한 초음파의 일부가 대기로 누설되는 현상을 확인할 수 있을 뿐만 아니라 누설파의 계측도 실제적으로 가능한 것을 알 수 있다.

2.2 Air-coupled Sensing 기술의 콘크리트 NDT 응용

콘크리트 구조물 내부에는 큰 공극과 같은 결함이나 콘크리트 박리 균열과 같은 손상이 존재하며, 이러한 결함과 손상은 콘크리트 구조물의 내구성과 안전성을 크게 저하시키는 요인으로 작용하기 때문에 이에 대한 탐지가 유지 관리에서 매우 중요하다. 그러나 이러한 내부 결함이나 손상은 구조물 표면으로 그 영향이 진전되지 않는 이상 육안으로는 탐지가 어렵기 때문에 육안 관찰이나 간단한 시험에 의존하는 현행 안전 점검 과정에서는 이를 조기에 탐지하기가 매우 어렵다. 이에 따라 내부 결함이나 손상을 조기에 탐지할 수 있는 다양한 비파괴검사 기법이 제안되었으며, 그 중에서도 충격-반향(Impact-Echo; 이하 IE) 기법이 실용성 높은 방법으로 많이 적용

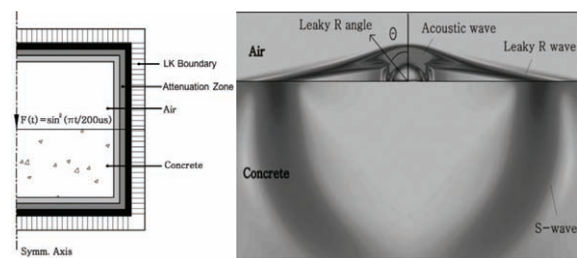


그림 1. Impact Induced Ultrasonic Wave Field in Air-Concrete Coupled Media¹⁾

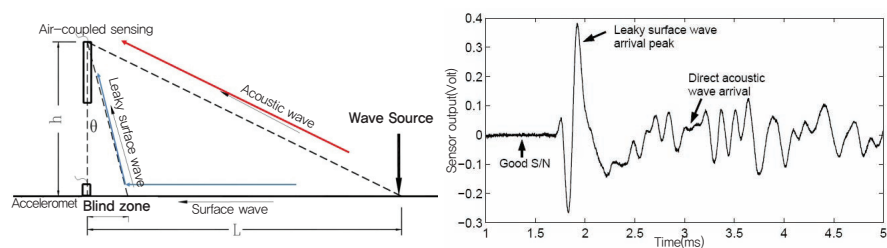


그림 2. 마이크로폰을 이용한 콘크리트에서의 표면파 비접촉 계측²⁾

되고 있다. Non-contact IE 기법은 기존의 접촉형 센서를 이용한 충격-반향 기법을 보다 빠르고 효율적으로 수행하는 한편 센서의 연결 상태에 따른 변동성을 제거하여 측정 결과의 신뢰성을 높이기 위한 목적으로 개발된 방법이다. <그림 3>은 콘크리트 슬래브 실험체에 내부에 모사된 여러 형태의 손상들을 빠르게 탐지할 뿐만 아니라 손상 영역의 위치와 크기를 시각적으로도 확인할 수 있도록 개발된 scanning non-contact IE 기법의 결과를 나타낸다³⁾. 최근에는 scanning non-contact IE 기법을 보다 경제적으로 수행할 수 있는 방법이 개발되었을 뿐만 아니라, 차량 통행 차단을 최소화하기 위해 이동하면서 구조물을 scanning 할 수 있는 non-contact IE moving platform이 개발되어 이 방법의 실무적 활용이 현실화되고 있다<그림 4>⁴⁾. 한편, Air-coupled Sensing 기술은 콘크리트 포장체의 건전성 평가와 지반 영상화에서 많이 이용되는 SASW와 MASW 방법의 급속 계측에도 적용되었을 뿐만 아니라 구조물 진동 모드의 급속 추정과 콘

크리트 균열 깊이 평가에 이용되는 표면파 투과법의 급속 계측 등에도 적용된 바 있는 등 기존 콘크리트 NDT의 실용성 향상 기술 개발에 빠르게 응용되고 있다. 또한, Air-coupled Sensing 기술은 연결재를 이용하지 않고 비접촉적으로 초음파 신호를 계측하기 때문에 연결재의 연결 상태에 따른 신호 왜곡을 반드시 제거해야 정밀한 평가가 가능한 콘크리트 NDT(예를 들어 초음파 감쇠를 이용한 콘크리트 공극 구조 분석과 같은) 분야에서 신뢰성 향상 기술로서 적용될 수 있는 등 콘크리트 NDT 분야에서의 다양한 활용과 큰 발전이 기대되고 있다.

3. Electro-mechanical Impedance Sensing 기술과 응용

3.1 Electro-mechanical Impedance Sensing 기술

압전 물질이란 응력이나 변형과 같은 역학적 작용을 가하면 물질의 표면이 전기적으로 대전되는 직접 압전 효과와 역으로 전기적 작용에 의해 물질이 변형되는 역압전 효과가 나타나는 물질로서 가속도계와 같은 다양한 센서 제품과 액츄에이터 제품의 개발에 압전 물질이 이용되었다. 한편, 최근에 압전 물질의 이러한 특성을 응용한 electro-mechanical impedance(EMI) sensing 기술이 개발되어 구조물 손상 탐지와 같은 구조 건전성 모니터링 분야에서 활발하게 이용되고 있다.

EMI Sensing 기술은 압전 물질의 압전 효과와 역압전 효과를 동시에 이용하는 방법으로, 압전 물질로 만든 압전체를 구조물에 부착하고 이 압전체의 전기적 impedance 응답을 계측하여 압전체가 부착된 구조물의 역학적 impedance를 간접적으로 추정할 수 있는 기술이다. <그림 5>는 역학적 impedance가 $Z_{mach-str}$ 인 SDOF 구조물에 부착된 압전체(PZT)의 전기적 impedance 응답인 $Z_{elec-PZT}$ 에 대한 모델을 나타내며, <그림 6>은 구조물의 손상 전후에 대한 EMI Sensing 실

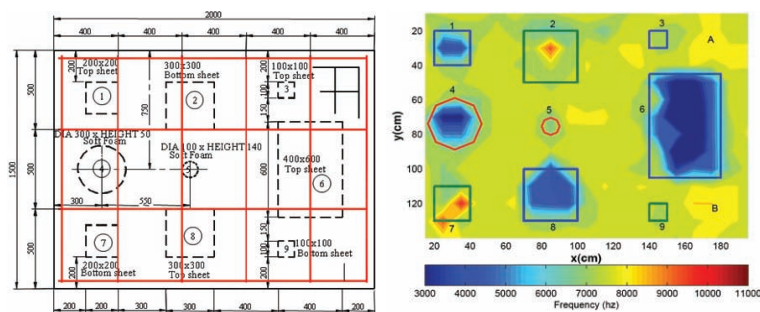


그림 3. Scanning Non-contact IE 기법을 이용한 손상 탐지 및 영상화³⁾

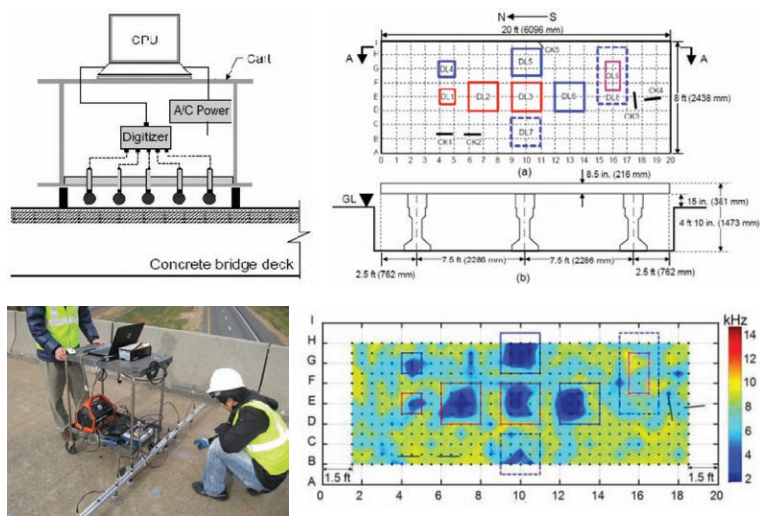
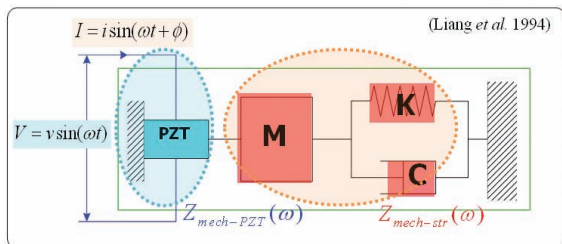


그림 4. Scanning Non-contact IE Moving Platform과 이를 이용한 실 교량 내부 손상 영상화⁴⁾

힘을 나타낸다⁵⁾. 압전체가 부착된 구조물에 균열과 같이 구조물의 역학적 impedance에 영향을 미치는 어떠한 손상이나 변화가 발생하면 구조물에 부착된 압전체의 전기적 impedance 값에도 변화가 발생하는 것을 <그림 5>와 <그림 6>에서 알 수 있다. 또한, 이러한 결과로부터 구조물에 부착된 압전체의 EMI 응답을 지속적으로 계측할 경우 구조물의 역학적 impedance에 영향을 미치는 변화의 연속적인 모니터링이 가능할 것으로 예상할 수 있다.

3.2 Electro-mechanical Impedance Sensing 기술의 콘크리트 모니터링 응용

콘크리트는 배합 직후에는 유동 상태이며, 이후 시멘트 입자와 물의 화학적 반응 과정인 수화 과정을 통하여 점차적으로 굳으며 강도가 증가하는 수경성 재료가



$$Z_{elec-PZT}(\omega) = \frac{V(\omega)}{I(\omega)} = [j\omega C(1 - \kappa_{31}^2 \frac{Z_{mech-str}(\omega)}{Z_{mech-PZT}(\omega) + Z_{mech-str}(\omega)})]^{-1}$$

그림 5. EMI Response Model of PZT-Structure(SDOF) Coupled System

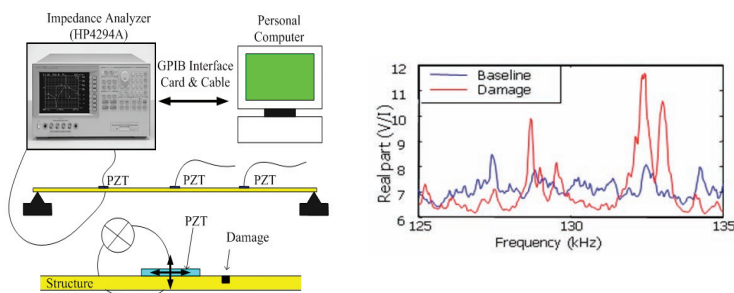


그림 6. 구조물 손상 전후의 EMI 응답 측정 실험⁵⁾

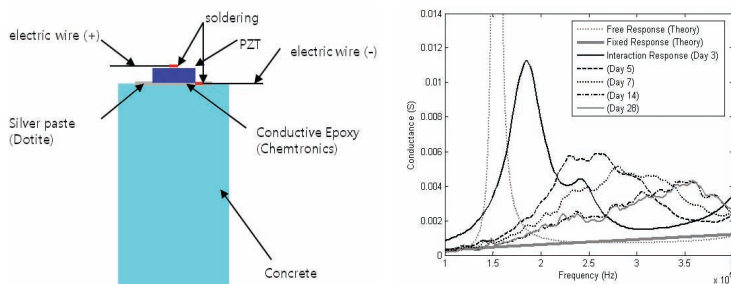


그림 7. EMI Sensing 기술을 이용한 콘크리트 강도 발현 모니터링⁶⁾

다. 따라서 콘크리트의 강도나 강성 등과 같은 역학적 특성은 수화 반응의 진행에 따라 시시각각 변화하며, 현장에 타설된 콘크리트의 수화에 따른 역학적 특성의 변화를 파악하는 것은 콘크리트의 품질 확보를 위한 양생 관리 측면이나 콘크리트의 안전한 시공을 위한 시공 안전 관리 측면에서도 매우 중요하다. 콘크리트 수화에 따른 역학적 상태 변화를 판정하기 위한 현장 NDT 기법이 다양하게 제안되었지만, 역학적 인자를 직접적으로 측정하는 방법이 아니거나(Maturity법 등), 굳지 않은 상태 또는 굳은 상태의 콘크리트에 대해서만 적용할 수 있거나 (penetration resistance 법, rebound hammer test 등) 하는 등의 문제점이 있어 많은 연구자들이 이를 개선할 수 있는 기술 개발에 주력하고 있다. 특히, 콘크리트의 수화 반응은 굳지 않은 상태에서부터 시작하여 굳은 상태 이후에도 지속적으로 반응이 이루어지는 연속적인 과정이기 때문에 콘크리트 수화에 의한 역학적 상태 변화를 배합 직후부터 시작하여 양생 종료 시점까지 현장에서 연속적으로 비파괴적으로 모니터링 할 수 있는 기술은 연구자뿐만 아니라 실무에서도 관심이 매우 높은 분야이다. 최근에 EMI Sensing 기술이 콘크리트 강도 발현 연속 모니터링에도 효과적으로 적용할 수 있음이 입증된 바 있으며<그림 7>⁶⁾, 이후 EMI Sensing 기술을 이용한 콘크리트 수화 강도 모니터링의 실용화에 대한 연구가 많은 연구자들에 의해 빠른 속도로 이어지고 있다.

한편, EMI Sensing 기술은 콘크리트 수화 강도와 같은 재료 특성 모니터링뿐만 아니라 PSC 구조물의 텐던 긴장력 변화에 대한 모니터링, 콘크리트 보의 휨 균열 모니터링, 철근 부착 상태 모니터링 등에도 적용되는 등 콘크리트 구조물 건전성 모니터링 분야에서도 다양한 연구가 지속적으로 이어지고 있어 앞으로 큰 발전이 기대된다.

4. 비선형 초음파 센싱 기술과 콘크리트 미세 구조 평가

재료의 미소 변형에 대한 동역학적 거동 해석 및 특성 분석 시에서는 거시적 관점의 고전적 선형 탄성 이론이 주로

적용되었다. 그러나 미소 변형에 대한 재료의 동역학적 거동의 미시적 분석 결과에 따르면 많은 재료들이 미시적으로는 미소 변형의 크기와 변형 속도에 따라 비선형 거동을 나타내는 nonlinear fast dynamics 현상을 보이는 것으로 나타났다. Nonlinear fast dynamics 현상은 재료의 구조에 큰 변화가 있을 때 더욱 선명해지는 것으로 알려져 있으며, 재료공학 분야에서는 이러한 현상을 재료의 미세 균열 평가나 미세 구조 분석에 응용하는 연구가 매우 활발히 이루어지고 있다. Nonlinear fast dynamics 현상을 관찰하기 위해서는 선형 미소 변형 응답과 비선형 미소 변형 응답을 동시에 측정하여야 하며, 이를 동시에 측정할 수 있는 비선형 초음파 센싱 기술에 대한 연구가 재료 비파괴 평가 분야에서 많이 개발되었다. 한편, 콘크리트와 같은 시멘트계 재료도 nonlinear fast dynamics 현상이 나타나는 재료로 알려져 있으며⁷⁾, 이를 바탕으로 선형 미소 변형 응답을 측정하는 기존의 초음파 센싱으로는 수행하기 까다로웠던 시멘트계 재료에 대한 공극 구조 분석이나 미세 균열 평가에 비선형 초음파 센싱 기술을 적용하는 연구가 최근 들어 증가하고 있다.

비록 아직까지는 비선형 초음파 센싱을 이용한 시멘트계 재료의 미세 구조 분석에 대한 연구가 얼마만 단계에 있지만, 콘크리트의 내구성 평가 등에 있어서 큰 활용이 기대되기 때문에 이 분야에 대한 연구가 더욱 활발해질 것으로 예상된다.

5. 맺음말

콘크리트 NDT 기술이 구조 건전성 모니터링 시스템 개발과 정보화 시공 기술 개발에 있어서 핵심 요소 기술로서 부각되면서 앞으로 더욱 큰 발전과 기술 향상이 요구되고 있는 상황이지만, 기존의 콘크리트 NDT 기술은 아직까지 실무에서 보편적으로 사용할 수 있을 만큼의 신뢰성과 실용성이 확보되지 못한 상태이다. 이에 따라 콘크리트 NDT 기술의 신뢰성과 실용성 향상을 위한 기술 개발에 많은 국내/외의 연구자들이 주력하고 있으며, 본 고에서는 이러한 노력들 중 콘크리트 NDT의 실용성 향상을 위한 Advanced Sensing 기술과 이에 대한 콘크리트 NDT 응용에 관한 연구의 일부를 소개하였다. □

담당 편집위원 : 양근혁(경기대학교) yangkh@kyonggi.ac.kr

참고문헌

1. Oh, T., Popovics, J.S., Ham, S., Shin, S.W., "Practical Finite Element Based Simulations of Nondestructive Evaluation Methods for Concrete", Computers and Structures, 2012, Vol. 98 ~ 99, pp. 55 ~ 65.
2. Zhu, J. and Popovics, J.S., "Non-contact Detection of Surface Waves in Concrete Using an Air-coupled Sensor", Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 2001, Vol. 20B, pp. 1,261 ~ 1,268.
3. Zhu, J. and Popovics, J.S., "Imaging Concrete Structures Using Air-coupled Impact-Echo," ASCE Journal of Engineering Mechanics, 2007, Vol. 133, No. 6, pp. 628 ~ 640.
4. Kee, S.H., Oh, T., Popovics, J.S., Arndt, R.W., Zhu, J., "Nondestructive Bridge Deck Testing with Air-coupled Impact-Echo and Infrared Thermography", ASCE Journal of Bridge Engineering, In press.
5. Park, S., Lee, J.J., Yun, C.B., Inman, D.J., "A Built-in Active Sensing System-Based Structural Health Monitoring Technique Using Statistical Pattern Recognition", Journal of Mechanical Science and Technology, 2007, Vol. 21, No. 6, pp. 896 ~ 902.
6. Shin, S.W., Qureshi, A.R., Lee, J.Y., Yun, C.B., "Piezoelectric Sensor Based Nondestructive Active Monitoring of Strength Gain in Concrete", Smart Materials and Structures, 2008, Vol. 17, 055002.
7. Johnson, P. and Sutin, A., "Slow Dynamics and Anomalous Nonlinear Fast Dynamics in Diverse Solids", Journal of Acoustical Society of America, 2005, Vol.117, No. 1, pp. 124 ~ 130.



신성우 교수는 한국과학기술원 토목공학 과에서 콘크리트 강도 및 내구성의 비파괴 평가에 관한 연구로 박사학위를 취득한 후, 미국 일리노이 주립 대학교(IUC)에서 Research Fellow로 재직하다가 2008년에 부경대학교로 부임하였다. 주 관심 분야는 콘크리트 시공 안전 및 품질 관리 기술과 콘크리트 특성 및 내구성의 현장 비파괴 평가 기술이며, 현재 우리 학회 국제위원회 위원으로 활동 중이다.
shinsw@pknu.ac.kr