

초음파를 이용한 비접촉식 콘크리트 내구성 진단기술

Air-Coupled Nondestructive Evaluation of Concrete Using Ultrasonic Waves



민지영 Ji-Young, Min
한국건설기술연구원 SOC성능연구소
인프라구조연구실 전임연구원/공학박사
E : amote83@kict.re.kr

1. 머리말

초음파(ultrasonic waves)를 이용한 진단기법은 기본적으로 매질의 물성에 따라 파의 전달속도와 전파·반사되는 특성이 달라지는 것에 기반을 둔다. 표면에 밀착된 발신자에서 생성된 초음파가 콘크리트 매질을 통해 인접한 수신자로 돌아오는 시간을 측정하고 속도를 계산함으로써 콘크리트의 압축강도, 동탄성계수, 내부결함, 콘크리트 두께 등을 진단한다. 콘크리트 품질평가의 결과로서 한 가지 절대값을 명확하게 제공하며, 현장에 대한 적용성도 다른 기법에 비해 높은 편이다. 많은 연구자들이 초음파 기반 콘크리트 진단에 관한 연구결과를 지속적으로 발표하면서 풍부한 데이터베이스를 구축하고 있으며, 일부는 기준으로 채택되고, 이에 따라 상용화 제품도 출시되어 판매되고 있다. 그러나 초음파는 어렵다. 해결해야할 문제들이 너무 많다. 초음파를 이용해서 콘크리트를 진단하겠다는 것은 한편으론 견강부회(牽強附會)같은 느낌이다. 애초에 금속과 같은 균질한 물질을 다루는 기계·항공분야에서 사용하던 것을 콘크리트에 적용하려니 말이다. 콘크리트는 시멘트, 모래, 자갈 등으로 된 복합재료인데다, 조직이 균질하지 않으며, 원자번호가 낮은 물질로 되어 있어 초음파의 흡수산란이 크고, 상의 선명성이 낮다. 게다가 20 kHz 이상의 고주파수 대역을 사용하기 때문에 저주파수 대역에 비해 파의 감쇄가 크며 매질의 영향을 크게 받는다. 따라서 진단 결과의 정확성을 높이기 위해 커플런트(couplants)의 영향을 최소화하는 것이 중요하다. 만약 검사자가 커플런트의 두께를 임의로 조절할 수 있고 커플런트의 물성치를 알고 있다면 충분히 가능할지 모르나 안타깝게도 보고된 연구

결과나 기술이 없다. 초음파의 주파수 성분에 따라 감지 영역과 감도가 달라지기 때문에 발신기와 수신기 타입 및 사양에 대한 주의도 필요하다. 콘크리트 비파괴검사에서 발신기로 많이 사용되는 임팩트 해머나 쇄공의 경우, 넓은 영역의 주파수 성분과 큰 에너지를 가지는 파를 발생시킬 수 있다는 장점이 있으나 기계적이라 검사자에 의존적이고 타격파의 시작지점을 찾는 것이 까다롭다.

압전체(piezoelectric materials)의 특성을 이용하여 초음파를 발생시키는 트랜스듀서의 경우, 자동화가 가능한 장점이 있으나 가진할 수 있는 주파수 영역에 제한이 있으며 에너지도 작은 편이라 대형 시편에서의 적용이 어렵다. 본고에서는 기존의 초음파 시스템이 가지는 복잡하고 어려운 문제들을 해결하기 위한 일환으로 2000년대 이후 미국을 중심으로 연구되고 있는 비접촉식 초음파 진단 시스템을 소개하고 콘크리트에의 적용 가능성을 살펴보고자 한다.

2. 비접촉식 초음파 진단 시스템

IT 및 전자장비 산업이 발달함에 따라 초음파 기반 진단 시스템의 하드웨어적인 한계를 극복하려는 시도가 이루어지고 있다. 비접촉식 초음파 진단 시스템에 관한 연구가 한 예이다. 커플런트 대신 공기층을 파 전달 매질로 사용하기 때문에 ‘air-coupled’라고 한다. 공기와 콘크리트 매질간의 물성 차이로 인해 대부분의 파가 공기-콘크리트 경계면에서 반사되므로, 초음파 발신기는 파 손실을 감안한 큰 에너지를 발생시킬 수 있도록 파워가 커야 하며, 수신기는 작은 압력 변화에도 민감하게 반응할 수 있도록 감도가 높아야 한다.

현재 시중에 나온 몇몇 제품들은-비록 콘크리트 전용 제품은 아니지만-이에 충분한 성능을 가지고 있으며 미국 일부 대학을 중심으로 결과가 보고되고 있다. 비접촉식 초음파 진단 시스템은 (1) 커플런트를 사용하지 않으므로 발신기와 감지기를 부착하는 데에 소요되는 노동력과 시간을 줄일 수 있을 뿐만 아니라, (2) 추가적인 표면 처리가 필요하지 않아 빠른 시간에 많은 양의 신호를 계

측할 수 있어 검사면을 이미징화 할 수 있다. 이러한 점은 (3) 실시간 스캐닝을 가능하게 하므로 이동식 검진 로봇 등 자동화 시스템에 적용할 수 있다는 강점도 있어 주목을 받고 있다.

2.1 임피던스 매칭

초음파가 매질을 따라 진행할 때 다른 매질과의 경계면에서 반사와 굴절이 발생하며, 파의 모드 역시 변화한다. 반사 및 굴절량은 두 매질간의 역학적 특성 차이에 의해 결정되며, 음향 임피던스(acoustic impedance, Z) 차이가 가장 큰 영향을 미친다. 음향 임피던스는 매질의 밀도(ρ)와 해당 매질에서의 압축파의 속도(V_p)의 곱으로 나타나며, 매질 경계면에서 반사되는 파와 투과되는 파의 진폭을 결정하는 반사계수 R 과 투과계수 T 는 식(1)과 (2)로 정의된다[1].

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (1)$$

$$T = 1 + \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} = 1 + R \quad (2)$$

여기서 Z_1 과 Z_2 는 인근 매질의 음향 임피던스이다. 표 1은 콘크리트, 공기, 압전체의 주요 물성치와 음향 임피던스를 보여준다[1]. 각 매질의 음향 임피던스를 식 (1)과 (2)에 대입하면, 콘크리트와 공기 경계면에서의 반사계수는 0.999977이고 투과계수는 2.3×10^{-5} 로 매우 작음을 알 수 있다. 즉, 압전체에서 발생된 초음파의 매우 작은 양만이 공기층을 통해 콘크리트에 입사되고 대

[표 1] 콘크리트, 공기, PZT-4의 주요 물성치[2]

물성치	콘크리트	공기	압전체 PZT-4
밀도(kg/m ³)	2200-2500	1.225	7500
압축파 속도(m/s)	3800-4500	343	4820
음향 임피던스 (MRayl)	8.36-11.3	0.00042	36.15



그림 1. 비접촉식 IE 실험을 통한 내부 손상 탐색[4]

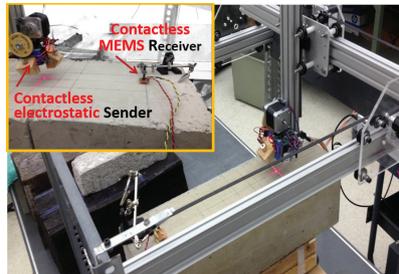
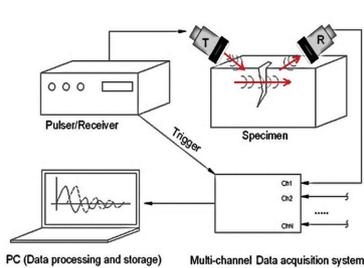
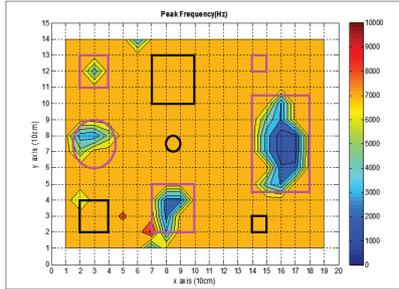


그림 2. One-sided 비접촉식 초음파 시스템 구성[5]

부분은 공기-콘크리트 경계면에서 반사된다는 것이다. Cetrangolo 등(2010)은 콘크리트로의 입사량을 증폭시키기 위하여 임피던스 매칭(matching)을 위한 추가 매질을 제안하였다[2]. 매칭용 매질을 통한 투과파의 양이 최대가 되려면, (1) 매칭용 매질의 음향 임피던스가 압전체와 공기의 음향 임피던스의 기하학적 평균인 0.123MRayl 이어야 하며, (2) 매질 자체적으로 파의 감쇄가 적어야 할 뿐만 아니라, (3) 각 매질의 경계면에서 발생하는 반사파의 양을 최대한 줄이기 위해 같은 위상(in-phase)을 유지해야 한다. 즉, 매칭용 매질의 두께가 발생된 압축파의 파장값 1/4의 정수배가 되어야 하는 것이다. 세 조건을 만족시키는 Balsa wood를 매칭용 매질로 제안하였으며, 실험 결과 입사파의 진폭이 700 % 증가하였다[2].

2.2 비접촉식 초음파 발신 및 수신 시스템

비접촉식 초음파 발신 및 수신 가능한 정전형 (elastostatic) 초음파 트랜스듀서, 감도 높은 수신기가

능한 고사양 동적(dynamic) 마이크로폰과 콘덴서(condenser) 타입 마이크로폰, 반도체 및 휴대폰 요소기술의 발전과 함께 급격히 성장하고 있는 초소형 MEMS 타입 마이크로폰 등을 활용하여 비접촉식 초음파 진단 시스템을 구성할 수 있다.

최근 의료진단 분야에서는 미국 스탠포드 대학을 중심으로 개발되어 상품화 단계까지 와 있는 정전용량형 초음파 트랜스듀서(capacitive Micromachined Ultrasonic Transducer, cMUT)가 큰 주목을 받고 있다. cMUT는 실리콘웨이퍼 위에 얇은 복가

축 모양의 세라믹 진동자를 매달아 놓은 구조로, 웨이퍼와 진동자 사이에 전기적인 신호를 가하면 정전기적인 힘이 진동자에 가해지고 이로부터 초음파가 발생하는 원리이다. 수천 개의 동일한 진동자를 한꺼번에 진동시키기 때문에 초음파의 세기는 원하는 만큼 제조단계에서 조절할 수 있다. 무엇보다도 초음파 트랜스듀서와 달리 광대역 특성을 보이기 때문에 고해상도의 영상작업이 가능하여 3차원 입체영상을 실현할 수 있는 가능성도 함께 가지고 있다[3]. 추후 cMUT 기술의 발전이 초음파를 이용한 콘크리트 비파괴 검사 분야에 큰 영향을 미치리라 기대한다.

미국 일리노이 대학 토목·환경공학과 Popovics 교수팀은 일반 18mm 쇠팅과 동적 마이크로폰을 이용한 Impact-Echo(IE) 기법을 통해 $1.5 \times 2.0 \times 0.25\text{m}$ 크기의 철근보강 콘크리트 슬래브의 품질을 검사하는 실험을 수행하였다[4]. 철근은 60mm와 200mm 깊이에 위치하며, 콘크리트의 28일 강도는 30-40MPa였다. 다양한 형태와 사이즈를 가지는 플라스틱 필름과 폼보드를 서로 다른 깊이에 삽입하여 내부 손상을 인위적으로 모사하

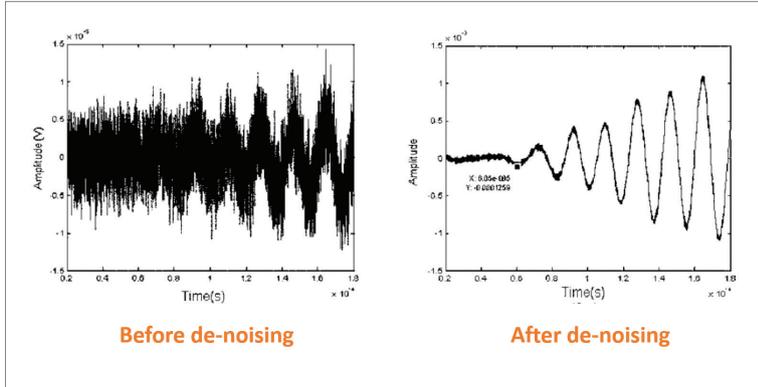


그림 3. 웨이블릿 변환의 디노이징 효과[2]

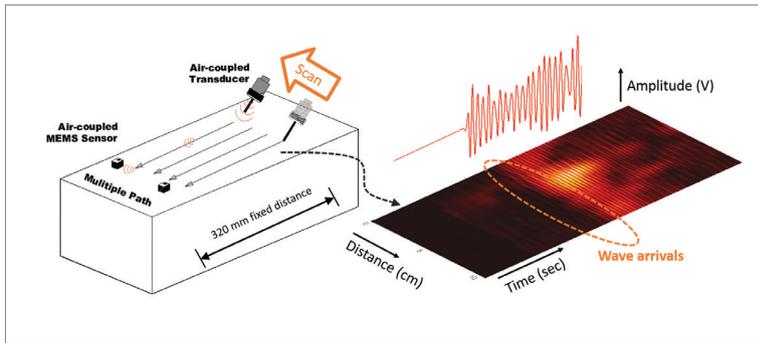


그림 4. 비접촉식 초음파 시스템을 이용한 콘크리트 스캐닝[5]

였다. 슬래브를 100×100mm 그리드로 나눈 후 각 그리드마다 IE 실험을 수행하였으며, 그림 1은 간단한 스펙트럼 해석을 통해 진단 결과를 하나의 이미지로 나타낸 것이다. 피복두께(60mm)보다 깊은 곳에 위치한 손상은 탐지가 어려웠으나 피복두께 내에 위치한 손상은 명확하게 탐지하면서 IE 기법에 동적 마이크로폰을 적용할 수 있음을 보여주었다. 최근에는 200 V의 DC bias가 가능한 고성능 정전형 초음파 트랜스듀서를 발신기로 사용하고, 휴대폰에 사용되는 고성능 MEMS 마이크로폰을 수신기로 사용하여 콘크리트 내부에 발생한 미세균열을 검사하는 실험을 수행하였다[5]. 그림 2는 비접촉식 초음파 시스템의 구성을 보여준다. 발신기는 50kHz의 펄스 신호를 연속적으로 발생시키며 신호획득장치(data acquisition system, DAQ)에 연결되어 트리거 신호로 사용되고,

MEMS 마이크로폰은 최대 100배 증폭이 가능한 시그널 컨디셔너를 통해 DAQ와 연결되어 컴퓨터를 통해 신호를 획득하도록 구성되어 있다. 내부에 손상이 있을 경우 파동의 모드 변환 혹은 속도 변화를 이용하여 손상을 진단할 수 있다.

국내에서는 비접촉식 초음파 시스템을 이용한 콘크리트 진단에 관한 연구가 수행되고 있지 않은 상황이나, 기계·항공 분야에서는 레이저 시스템과 함께 비접촉식 비파괴 검사기술 중 하나로 활발한 연구가 진행 중이다.

2.3 스캐닝을 위한 신호처리기술

콘크리트에서 초음파를 측정할 때 계측되는 신호의 크기가 작으면 시스템에 잠재된 잡음(inherent noise)에 의해 신호 대 잡음비(signal-to-noise ratio, SNR)가 작아져 정확한 분석이

어렵다. 안타깝게도 비접촉식 초음파 감지기는 접촉식에 비해 공기를 타고 들어오는 잡음이 많은 데다 측정되는 신호의 크기도 작기 때문에 SNR이 작은 편이다. 잡음의 영향을 최소화시키기 위한 여러 방안들이 제시되고 있지만 그 중 가장 일반적인 것은 단순히 시간영역에서 평균(time averaging)하는 것이다. 잡음이 정규분포를 따른다고 가정하고 회계측한 신호들을 평균하면 잡음의 평균이 0 혹은 일정한 값이 되면서 제거될 수 있다. 웨이블릿 분석을 통한 시간-주파수 영역 해석을 통해서도 잡음을 제거할 수 있다. 일반적인 웨이블릿 변환 특성에 의해 잡음은 분해 tree의 하위레벨로 갈수록 영향이 작아지는데 여기에 임계화(thresholding)를 적용하고 잡음이 포함된 tree의 신호를 제거한 후 역변환시켜 신호를 재구성하면 잡음이 제거된다[6]. 그림 3은 비접촉식 초음파 감지

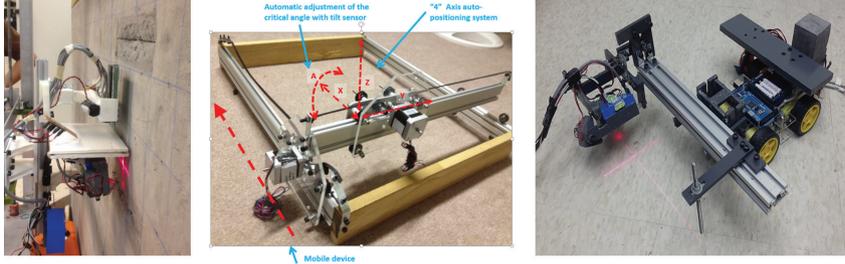


그림 5. 비접촉식 초음파 시스템의 자동화 예시[5]

기에 의해 획득한 신호를 웨이블릿 변환의 디노이징(denoising)을 통해 재구성한 신호의 예이다[2].

한편, 초음파 발신기 혹은 감지기의 선형배열, 2차원 매트릭스 배열, 원형배열 등을 통해 대상 구조물을 스캐닝하여 손상의 위치와 정도에 관한 시각적인 정보를 제공할 수 있다. 발신기와 감지기를 이동시키며 A-스캔, B-스캔, C-스캔의 형태로 이미지화하는 방법이 많이 사용되는데, A-스캔은 임의의 위치에 감지기를 고정시켜 획득한 신호의 시간과 진폭관계를 보여주며, B-스캔은 발신기(혹은 감지기)를 시험체의 축을 따라 이동시켜가며 수직단면에 대한 정보를 제공한다.

C-스캔은 발신기(혹은 감지기)의 매트릭스 배열로부터 2차원 영상을 제공하는 것으로 일반적으로 많이 보는 X-선 사진과 같다. 그림 4는 콘크리트 실험체에 그림 2의 비접촉식 초음파 시스템을 이용하여 B-스캔을 수행한 것으로, 스캐닝 중 파 속도 혹은 에너지가 달라지는 경우 한 눈에 파악할 수 있기 때문에 진단이 용이하다[5].

3. 비접촉식 초음파 진단 시스템의 가능성

초음파 신호로부터 손상에 따른 특성을 추출하고 고해상도 이미지를 구축하여 손상을 진단하기 위해서는 일관적이고 신뢰성 있는 많은 양의 데이터가 필요하다. 이를 위해서는 발신기 및 수신기의 위치, 높이, 각도를 정확하게 조절하고, 설정된 좌표대로 이동시키며 고속으로 데이터를 계속해야 한다. 그림 4와 같은 수준의 해상도의 스

캐닝을 위해 기존 접촉식 시스템을 사용할 경우 약 9시간이 소요되었으나 비접촉식 시스템을 통해 약 1시간으로 단축시킬 수 있었다[5]. 이처럼 비접촉식 시스템은 셋업 및 측정에 소요되는 시간이 적은데다 자동화가 가능하기 때문에 발신기와 감지기의 배열과 적절

한 스캐닝 기법을 통하여 고해상도로 구조물 내부의 상태, 즉 품질을 빠르고 쉽게 진단할 수 있는 것이다. 뿐만 아니라 비접촉식 MEMS 마이크로폰의 경우 시중에 판매되는 접촉식 가속도계 시스템에 비해 약 37배, 콘덴서 마이크로폰에 비해 약 140배 저렴하기 때문에 시스템 측면에서 상당한 비용을 절감할 수 있다. 비접촉식 초음파 시스템은 기존의 시스템이 가지는 여러 문제들, 특히 발신기 및 감지기를 이동시킬 때마다 달라지는 부착 상태로 인한 신호의 품질 및 신뢰성 저하 문제, 매 부착시 수행해야 하는 표면처리 문제, 시스템의 고비용 문제에 대한 해결 방안을 제시한다. 또한 다른 콘크리트 비파괴 검사기술에 비해 넓은 검사 영역, 저렴한 시스템 비용, 손쉬운 사용법, 하드웨어 확장성 등을 고려하면 비접촉식 초음파 시스템은 매우 매력적이라 할 수 있다. 최종적으로 로봇·전자·IT 기술과 융합하여 접목시킴으로써 그림 5와 같이 콘크리트 자동 스캐닝 시스템, 이동형 검진용 로봇 등의 형태로 교량, 건물, 원전 설비·격납구조물, 철도, 도로 등 다양한 사회기반 시설물 진단에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 맺음말

콘크리트 비파괴 검사를 위한 비접촉식 초음파 진단 시스템에 관한 연구는 이제 시작단계로써 지속적인 연구를 통해 검증되어야 한다. 앞서 언급한 기초연구들은 기존의 초음파 기반 콘크리트 진단 시스템이 가지고 있는 시간,

비용 등 여러 문제점들을 극복하고 스캐닝 자동화 시스템으로 발전할 수 있는 가능성을 보여주었다. 비록 공기층과 음향 임피던스 차이로 인한 파의 손실 때문에 접촉식 시스템보다 높은 성능이 요구되지만 이는 하드웨어 기술의 발전을 통해 해결될 수 있을 것이다. 압전체가 가지는 고유 진동수에 기반해 제작된 초음파 트랜스듀서의 경우 해당 고유 진동수에서의 성능은 우수한 반면 광대역의 가진이 어려워 검진 영역에 제한이 있고 다양한 스펙트럼 해석이 불가능한데, 최근 주목받고 있는 cMUT가 이러한 한계를 극복할 수 있는 대안을 제시한 것이 한 예이다. 만약 기계·전자 분야와 공동으로 콘크리트 맞춤형 진단 시스템을 개발해 나간다면 더 정확한 고속 스캐닝 기반 진단이 가능할 것이다. 물론 하드웨어 발전만으로 극복할 수 없는 문제점도 있다. 온도, 습도 같은 외부조건 및 콘크리트 내부 환경, 콘크리트 불균질성 등 초음파에 영향을 미치는 요소들이 매우 많기 때문이다. 이러한 요소들은 콘크리트의 역학적 특성과 초음파 특성 사이의 분석을 통해 해결해나가야 할 것이다.

참고문헌

1. K.S. Hall (2011) "Air-Coupled Ultrasonic tomographic imaging of concrete elements", Ph.D. dissertation thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL, USA.
 2. G.P. Centrangolo and J.S. Popovics (2010) "Inspection of Concrete Using Air-Coupled Ultrasonic Pulse Velocity", *ACI Materials Journal*, 107(2), 155-163.
 3. http://www.kriss.re.kr/2010/standard/02_03_view.html?code_id=17&b_index=174&gotopage=3
 4. S. Ham, J.S. Popovics, M.T. Ghasr, and R. Zoughi (2013) "Comparison of Synthetic Aperture Radar and Impact-Echo Imaging for Detecting Delamination in Concrete", presented at QNDE, Maryland, USA.
 5. S. Ham and J.S. Popovics (2013) "Application of fully contactless ultrasonic surface waves to evaluate concrete", presented at ACI, Minnesota.
 6. 이경주, 권오양, 주영찬 (2000) "웨이블릿 변환 노이즈 제거에 의한 AE 위치표정" *비파괴검사학회지*, 20(6), 490-500.
-