

학술기사

Air-coupled 센서를 이용한 비접촉 콘크리트 비파괴 검사법

Using Air-coupled Sensors (ASC) for Non-contact Non-destructive
Evaluation of Concrete in Structures



기 성 훈^{1)*}

Kee, Seong Hoon

1. 서 론

건축/토목 구조물에 사용된 콘크리트는 다양한 열화 메커니즘에 취약성을 갖는다. 실제 거의 모든 콘크리트 구조물은 정도에 차이는 있지만 균열 및 내부 동공과 같은 결함을 포함하고 있다고 볼 수 있다. 일반적으로 콘크리트 구조물에서 어느 정도의 결함은 구조적 성능에 큰 영향을 주지 않을 수도 있다. 하지만 이러한 크고 작은 결함은 구조물의 강성을 저하시키고, 사용성 및 내구성을 떨어뜨리는데 큰 영향을 줄 수 있기 때문에 각별한 관심이 요구된다. 특히 외부 환경에 노출된 구조물의 경우 수분 및 유해 물질의 침투, 동결 융해, 철근 및 강선의 부식 등을 유발하여 열화 메커니즘을 가속 시킬 수 있기 때문에 결국 구조물의 수명을 단축시키는 주요 원인이 될 수 있다.

북미, 일본, 유럽의 산업화 선진국에서는 기존 구조물의 건전성 평가, 보수/보강, 교체와 같은 유지 관리 업무에 상당한 예산을 편성하고 있는 실정이다. 하지만 현재 세계적 경기 불황에 따른 국가 재정의 어려움으로 사회간접자본을 건전한 상태로 유지 관리하기 위하여 필요한 충분한 예산 확보가 어려운 실정이다. 현재 각 국가의 구조물 관리 담당 기관에서는 주어진 예산과 인력으로 최대의 효과를 거두기 위한 노력으로 구조물 유지 관리 업무에 ‘첨단 비파괴 검사 기술의 개발 및 응용’을 장려하고 있다. 미국의 경우 연방 및 주 정부의 교통부, 연방 도로청(FHWA: Federal Highway Administration), 국가표준기술연구소(NIST: National Institute of Standards and Technology)등에서 첨단 비파괴 검사법의 개발, 응용, 교육에 관한 다양한 연구 과제를 주관하고 있다. 첨단 비파괴 검사 기술의 적용을 통하여 유지 관리 업무의 우선 순위화, 보수/보강 업무를 위한 최적 타이밍 결정 및 필요한 보

1) 럿저스, 뉴저지 주립 대학, 포닥 연구원

* E-mail : shkee0505@gmail.com

수/보강 범위의 결정, 최적 교체 시점 결정에 있어 경제성과 효율성을 최적화 할 수 있는 장점을 예상할 수 있다.

지금까지 콘크리트 구조물의 건전성을 평가하기 위한 목적으로 다양한 비파괴 검사 기술이 개발되었으며 실제 현장 구조물에 다양하게 응용되고 있다. 그 중 ‘응력파에 기반한 검사법’은 다른 비파괴 검사법 (지반 침투 레이더, 적외선 써모그래피, 전기 저항법, 방사선 검사등)과 비교하여 실험 절차 및 필요한 장비가 단순하고, 인체에 해가 없으며, 비용이 저렴한 장점을 갖는다. 특히 탄성 계수, 포아송비와 같은 콘크리트의 기계적 성질을 직접적으로 얻을 수 있다는 특성이 있다. 따라서 건축/토목 구조물의 비파괴 검사에 매우 효과적인 방법으로 알려져 있다. 미국 콘크리트 학회의 비파괴 검사법에 관한 위원회 (ACI 228)에서 정리한 보고서에 따르면 응력파의 기반한 검사법은 초음파 검사, 충격반향기법 (IE: Impact-echo), 표면파측정기법 (SASW: Spectral Analysis of Surface Waves), 충격 응답법 (Impulse response), 진동실험법을 포함한다. 응력파에 기반한 검사법은 먼저 입력원 (변환기 또는 직접타격)을 통하여 콘크리트에 응력파를 발생시키고, 콘크리트를 통하여 전파된 응력파를 다양한 종류의 센서를 통하여 측정하는 과정을 포함한다. 측정된 응력파의 분석을 통하여 전파된 매질의 기계적 성질 및 내부의 결함과 같은 유용한 정보를 얻을 수 있다. 하지만 기존의 가속계, 변위계, 지오폰과 같은 대상 매질에 부착하여 측정값을 얻는 ‘부착 센서’를 사용할 경우 표면 처리, 센서의 부착 및 이동에 따른 추가적인 시간이 소요되고, 센서와 구조물의 불완전한 커플링으로 인한 측정 결과의 신뢰성 및 일관성을 유지하기 어렵게 한다.

최근 응력파에 기반한 비파괴 검사법의 측정 속도 제약 및 커플링에 관한 단점을 해결하기 위

하여 비접촉 센서의 사용이 주목받고 있다. 현재 실무에서 선택할 수 있는 비접촉 센서는 크게 ‘레이저 바이브로미터’와 ‘Air-coupled sensor (ACS)’로 나눌 수 있다. 하지만 일반적으로 레이저 바이브로미터는 고가의 민감한 장치를 포함하고, 표면이 거친 콘크리트 구조물에서는 자동초점의 어려움과 표면에서 발생하는 강한 산란 현상으로 충분한 반사파를 얻기 힘들다는 단점 때문에 아직까지 실무에 적용은 어려운 실정이다. 반면에 최근 ACS는 콘크리트에서 표면파나 램파를 측정하는데 성공적으로 적용한 사례가 꾸준히 발표되고 있으며, 기존 접촉센서의 단점을 극복하기 위한 대안으로 연구자 및 실무자들에게 많은 관심을 받고 있다. 기존의 접촉센서와 비교하여 ACS를 사용했을 때 얻을 수 있는 가장 큰 장점은 센서의 커플링 문제를 근본적으로 해결하여 신뢰도 및 일관성을 높일 수 있고, 음향 스캔 기술을 이용하여 신속한 측정을 바탕으로 결과를 실시간으로 시각화 할 수 있다는 점이다. 이러한 특성은 특히 대형 건축/토목 구조물에 적용 시 시간을 절약할 수 있어 매우 유용하다.

본고에서는 콘크리트에 적용할 수 있는 응력파 기반 비파괴 검사법에 ACS 적용에 관한 이론적 배경 및 지금까지 연구된 연구 결과, 응용 사례, 최근 연구되고 있는 향후 기술에 관하여 간단하게 소개하고자 한다.

2. ACS를 이용한 응력파 측정

2.1 이론적 배경

콘크리트 내부에 응력파를 발생시키기 위한 효과적인 방법으로 ‘타격 해머’나 ‘포인트 임팩터’ 등을 이용한 직접 타격법이 있다. 콘크리트 표면에 수직으로 타격을 가하였을 때 콘크리트

내부의 응력 및 콘크리트와 접촉한 공기중의 압력 분포를 이론적으로 구할 수 있다. Fig. 1은 수치해석을 통하여 계산된 결과의 한 장면을 보여주고 있다. 먼저 구체 표면을 갖는 벌크파 (P 파, S파)와 원통형 표면을 갖는 표면파가 콘크리트 내부로 전파된다. 동시에 콘크리트와 공기의 접촉면에서 변위에 관한 연속성 조건에 따라 콘크리트를 통하여 전파되는 응력과 에너지의 일부가 공기로 전달되며 이는 공기중에서 누설파 (leaky wave)의 형태로 전파된다. 한편 Fig. 1을 통하여 타격한 지점의 콘크리트변위가 공기입자를 직접 변형시켜 발생한 음파 (direct acoustic wave)가 공기중으로 전달되고 있음을 확인할 수 있다. 이론적으로 누설파는 콘크리트 내부에서 전달되는 응력과 동일한 성질을 갖는다. 따라서 공기중으로 전파되는 누설파를 측정함으로써 콘크리트의 성질이나 내부의 결함을 평가할 수 있다. 공기의 압력은 공기입자의 속도와 비례 관계에 있기 때문에 측정된 누설파 크기는 응력파의 속도 성분과 비례관계에 있으며, 같은 위상을 갖는다.

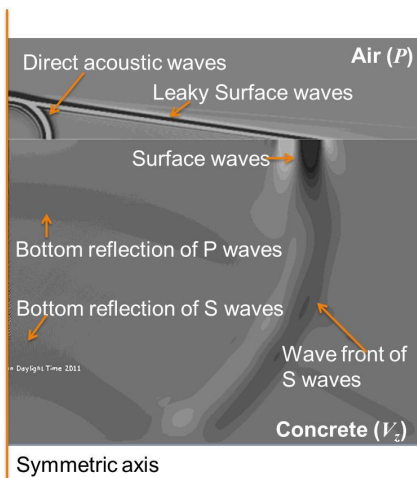


Fig. 1 콘크리트 표면에 수직으로 타격을 가하였을 때 콘크리트 내부의 응력 및 콘크리트와 접촉한 공기중의 압력 분포 (수치해석결과)

2.2 센서의 선택

이론적 연구에 따르면 일반적으로 50~200 μ s의 길이를 갖는 충격파는 약 0.1~1.0 Pa/kN의 공기압을 발생시킨다. 이를 음압레벨로 환산하면 75~95 dB 값으로 일반적으로 실내에서 소음레벨이 40~60 dB라고 가정했을 때 충격파에 의한 공기중 누설파의 압력은 음향 마이크를 이용하여 측정 가능한 범위에 있다고 볼 수 있다. 콘크리트 비파괴에서 주로 사용되는 100 kHz 이하의 저주파 대역에서는 누설파를 측정하기 위하여 ‘콘덴서 마이크’가 유용하다. 콘덴서 마이크는 커패시티브 센서 디자인에 기반을 두고 있으며 기본적인 구조는 Fig. 2에서 보이는 것과 같다. 공기 입자의 진동에 의한 압력은 작은 박막을 움직이고 이는 정적 금속판과 박막의 거리를 변화시키게 된다. 이는 결과적으로 콘덴서에서 전압의 변화를 발생시키며, 그 값은 입력된 공기의 압력에 비례한다. 정적 금속판에서 발생하는 압력은 크게 두 가지 방법으로 유도할 수 있다. 외부 전압에 의한 외부 편극 마이크 디자인에 의한 방법과 외부 편극 없이 사전 편극 마이크 디자인이다. 이는 정적 금속판에 일렉트릿 (절연체 속에 영구적으로 전하를 갖는 전계를 만든 것) 레이어를 부착하여 편극에 필요한 전하

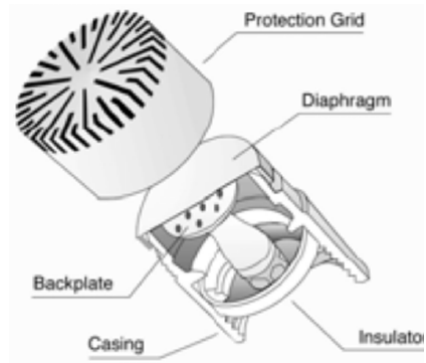


Fig. 2 콘덴서 마이크의 구조

를 제공함으로써 얻을 수 있다.

2.3 누설파의 측정

Fig. 3은 콘크리트와 공기의 접촉면에서 발생하는 누설파를 ACS로 측정하기 위한 실험적 도식을 보여주고 있다. 먼저 콘크리트 표면 A지점을 타격하였을 때 Fig. 1에서 보이는 바와 같이 콘크리트 내부에서 벌크파와 표면파가 발생한다. 콘크리트 표면을 따라 전파된 에너지 일부는 공기중으로 전파되어 누설파가 발생한다. 이론적으로 누설파는 고체에서 전파되는 응력파와 같이 벌크파(누설 P파, S파)와 표면파의 성분을 갖는다. 하지만 공기의 음향 임피던스는 콘크리트와 비교하여 매우 작기 때문에 응력파의 극히 일부분만 공기중의 누설파의 형태로 전달된다. 일반적으로 수직 타격으로 대부분의 에너지가 표면파로 전달되기 때문에 실제로 누설 벌크파의 측정은 누설 표면파의 측정과 비교하여 다소 어려운 점이 있다. 실용적인 관점에서 Fig. 3은 누설 표면파의 측정에 초점이 맞추어져 있다. 누설 표면파의 입사각은 Fig. 3에서 보는 바와 같이 ‘스넬의 법칙’에 따라 콘크리트에서 표면파의 속도 C_R , 공기중에서 음파의 속도 C_{air} 에 따라 결정된다. 일반적으로 구조용 콘크리트의 C_R 은 2000m/s ~ 2300m/s의 범위를 갖고, 상온에서 C_{air} 을 340 m/s라고 가정했을 때 누설 표면파의 입사각을 약 6~8°를 갖는다. Fig. 3에서와 같이

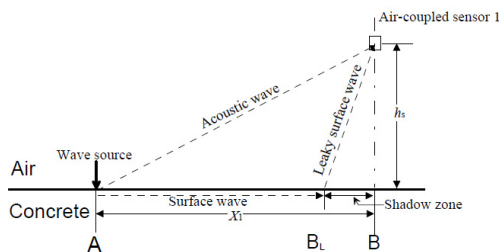


Fig. 3 누설 표면파를 ACS를 이용하여 측정하기 위한 개략도

ACS를 콘크리트 표면 위치 B에서 높이 h_s 에 위치하게 되면 실제로 표면의 B_L지점에서 입사된 누설파를 측정할 수 있다. 콘크리트 표면을 타격하였을 때 누설파와 함께 전달되는 음향파 (Fig. 1 참조)는 콘크리트의 성질을 파악하는데 특별한 정보를 주지 못한다. 하지만 상황에 따라서 시간영역에서 누설파 성분과 간섭을 일으켜 해석을 어렵게 할 수 있다. 간단한 방법으로 타격원과 ACS의 거리가 충분히 크게 하여 센서에 도달하는 시간차를 이용하여 응력과 성분을 시간영역에서 따로 분리해 낼 수 있다. 누설표면파와 음향파의 센서에 도달되는 시간 t_{LR} 과 t_{air} 는 각각 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$t_{LR} = \frac{X_1}{C_R} + h_s \sqrt{\frac{1}{C_{air}^2} - \frac{1}{C_R^2}} \quad (1)$$

$$t_{air} = \frac{\sqrt{X_1^2 + h^2}}{C_{air}} \quad (2)$$

2.4 ACS와 가속계 비교

Fig. 4는 가속도계와 비교를 통하여 ACS의 성능을 평가하기 위한 실험 도식 및 결과를 보여주고 있다. Fig. 4(a)에서 보이는 바와 같이 실제 크기의 콘크리트 보 (길이 8280 mm 폭 530 mm 깊이 1060 mm)의 옆면에 표면파를 설치하기 위한 입력원과 센서를 위치하였다. 입력원으로 지름 13mm의 쇠구슬을 이용한 콘크리트 면의 직접타격을 이용하였으며, ASC와 가속계 각각 두개를 지점 B와 C에 설치하였다. 가속도계는 강력본드를 이용하여 콘크리트에 부착하여 커플링에 의한 효과를 최소화할 수 있도록 하였다. Fig. 4(b)-(c)는 ACS 및 가속계를 이용하여 표면파가 지점 B에서 C로 이동하는 동안 표면파의 전달율 (Tr_{BC})을 주파수 영역에서 표현된 결

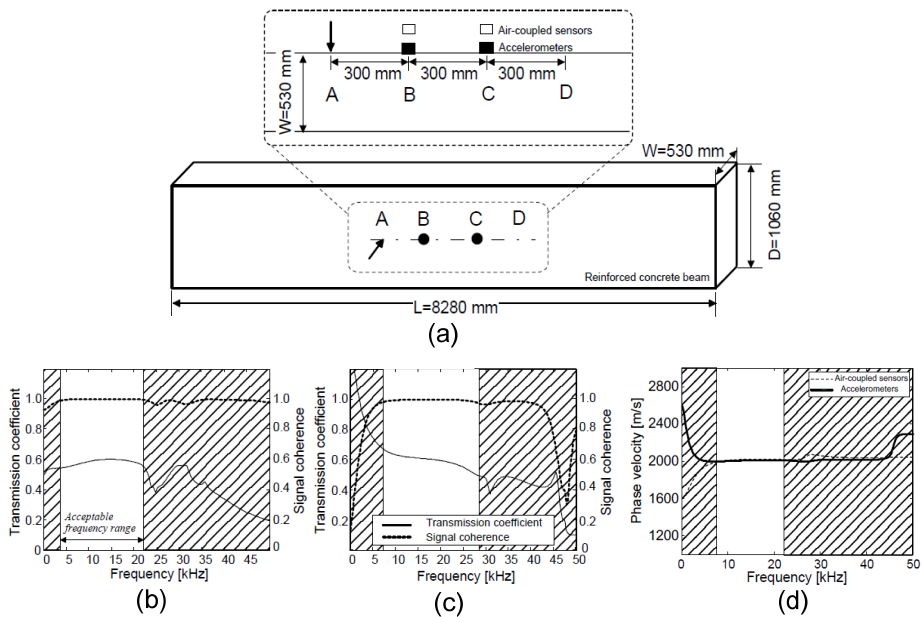


Fig. 4 ACS의 성능을 평가하기 위한 실험 도식 및 결과

과를 보여주고 있으며 식 (3)을 이용하여 구할 수 있다.

$$Tr_{BC} = \sqrt{\frac{S_{AC}S_{DB}}{S_{AB}S_{DC}}} \quad (3)$$

여기서 S_{ij} 는 지점 i 에 위치한 입력원으로 발생된 표면파를 j 지점에 위치한 센서로 측정된 주파수 영역의 응답을 나타낸다. Fig. 4 (d)는 ACS 및 가속도계를 이용하여 경로 BC에 대한 표면파의 위상속도를 보여주고 있으며 식 (4)를 이용하여 구할 수 있다.

$$C_{ph} = 2\pi f \frac{BC}{(\Delta\phi_L + \Delta\phi_R/2)} \quad (4)$$

여기서 BC는 경로 BC의 거리, $\Delta\phi_L$ 및 $\Delta\phi_R$ 은 왼쪽 (지점 A) 및 오른쪽 (지점 D)에 위치한 입력원으로 발생된 표면파의 경로 BC에서 측정하

위상차를 의미한다. 13mm 지름의 쇠구슬을 이용하여 발생된 입력파의 특성상 중심주파수 17 kHz 근방에서 가장 좋은 결과의 일관성을 보이고 있다. 좋은 일관성을 보이는 유효주파수 영역에서 ACS에서 얻은 에너지 감쇠와 위상속도의 값은 가속도계에서 얻은 값과 좋은 일치도를 보이는 것으로 나타났다. 이러한 실험적 결과를 통하여 ACS의 정확도는 커플링의 효과를 최소화 했을 때 가속도계에서 얻을 수 있는 정확도와 유사한 값을 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

3. ACS를 이용한 비접촉 비파괴 검사법의 응용

3.1 SASW와 MASW

표면파는 서로 다른 물체의 접촉면에서 전파되는 응력의 일종으로 표면파의 침투깊이는 진폭에 비례하는 성질을 갖는다. 이러한 성질에 따

라 표면파를 측정하여 콘크리트 내부의 깊이 방향의 성질을 평가하고, 표면 근처 또는 표면의 결함을 탐지하고 평가하는데 유용하게 사용되고 있다. SASW나 MASW와 같은 표면파 측정에 기반한 비파괴 방법은 고속도로 콘크리트 포장의 상/하부층의 강성 및 두께를 평가하는데 매우 유용한 방법으로 알려져 있다. 특히 최상부층의 강성 및 두께를 결정할 때는 하부층들을 평가하기 위한 복잡한 역변환 절차의 전체 과정이 필요하지 않기 때문에 단순하면서 매우 정확한 값을 얻을 수 있다. 하지만 표면파의 측정은 주로 가속계와 같은 한 지점에 고정된 센서를 이용하기 때문에 전체 구조물의 넓은 면적을 측정하는데 많은 시간이 걸리고, 센서와 콘크리트 사이의 일정하지 않은 커플링 문제는 결과의 신뢰도 및 일관성에 영향을 준다. ACS의 이용은 이러한 단점을 극복하기 위한 좋은 해결책을 제공할 수 있다.

Zhu는 ACS를 이용하여 콘크리트 포장 도로의 상태를 평가하기 위하여 MASW를 수행하였다. 두 개의 고정된 ACS와 타격점의 위치를 변화시키면서 얻는 MSOR방식을 이용하였다. ACS를 이용하여 얻은 램파의 분산 곡선은 가속계로 얻은 결과 및 이론치와 매우 좋은 일치도를 보임으로서 ACS를 MASW에 적용 가능성을 보여주었다. 최근 Ryden 등은 7개의 센서로 구성된 ACS배열을 이용하여 고속도로 콘크리트 포장 표면에서 표면파를 측정하였으며 MASW를 이용하여 램파의 분산곡선을 얻었다. Fig. 5에서 보이는 바와 같이 ACS 배열을 이용하여 얻은 결과는 가속도계를 이용한 결과와 매우 높은 일치도를 보였다. ACS 배열을 이용할 경우 일반적인 성인의 걷는 속도 정도의 측정 속도가 나오는 것으로 나타났으며 이는 ACS 배열을 카트나 차량에 실어 콘크리트 표면을 음향스캔할 수 있다는 것을 의미한다. 또한 ACS를 이용할 경우 매우 일관적인 결과를 얻을 수 있음을 실험적으로

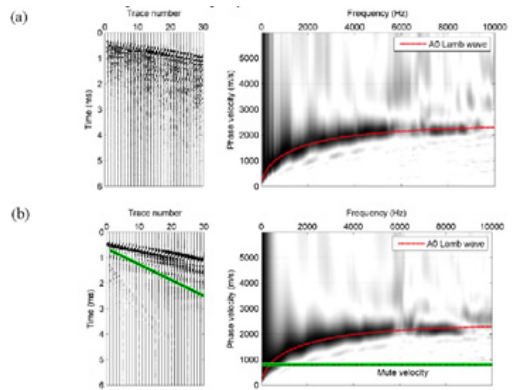


Fig. 5 콘크리트 포장 도로에서 MASW를 수행한 결과 얻은 시간응답 및 램파의 분산곡선: (a) 가속도계, (b) ACS를 이용하여 얻은 결과

확인할 수 있었다.

3.2 표면파 전달법 (Surface Wave Transmission)

표면파는 주파수 대역에 따라 물체에 침투할 수 있는 깊이가 다르다. 즉 파장이 큰 성분 (저주파)일수록 깊은 곳까지 침투할 수 있는 특성을 갖는다. 이러한 특성으로 표면파를 이용하여 물체 표면 혹은 표면 근방에 위치한 결함을 탐지하고 평가하는 연구가 광범위하게 이루어졌다. 기존 연구자들은 콘크리트의 표면 균열의 깊이를 측정하는데 표면파전달법이 매우 유용하다는 사실이 실험을 통하여 증명되었다. 표면파전달법이란 Fig. 4(a)에서와 같이 보통 2개의 센서를 이용하여 표면파를 측정하여 경로 B에서 C를 지나는 표면파의 에너지 감소를 측정하는 방법이다. 표면파의 전달율은 식 (3)을 이용하여 계산할 수 있다. 하지만 불균질재료인 콘크리트에 표면파 전달법을 적용할 때 측정 시 개입되는 높은 실험적 불확실성이 결과의 신뢰도 및 일관성에 큰 영향을 주는 것으로 나타났다. 실험적 불확실성은 주로 결함의 모서리(균열의 경우 균열의 끝)에서 발생하는 탄성파의 근거리장 산란

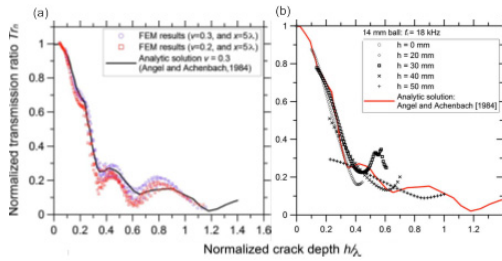


Fig. 6 표면 균열의 깊이와 표면파의 전달율의 관계: (a) 수치해석 및 이론 결과, (b) 실험 및 이론 결과

현상과 불규칙한 콘크리트 표면에서 일관적이지 않은 센서의 커플링에 기인한다. 위상속도에 근거한 SASW나 MASW와 달리, 표면파 전달법은 변위 (혹은 에너지) 측정에 기반으로 하기 때문에 표면의 거친 정도 및 불완전한 센서의 커플링 문제는 결과에 매우 큰 영향을 주게 된다. 최근 실험적 연구를 통하여 ACS를 이용함에 따라 커플링에 의한 실험적 불확실성이 현저히 줄어들을 확인할 수 있었다. Fig. 6에서 보이는 바와 같이 ACS를 이용하여 얻은 결과는 수치해석 및 이론적 해석 결과와 상당히 높은 정확성을 보였다.

$$H = \frac{C_p T}{2} = \frac{C_p}{2f} \quad (5)$$

필자는 기존 연구를 통하여 ‘비접촉 표면파 전달법’을 이용하여 실제 현장에서 타설된 프리스트레스 콘크리트 보 표면에 알칼리 실리카 반응/에트린자이트 지연 형성으로 발생한 다양한 종류의 표면 균열의 깊이 및 패턴을 평가하였다 (Fig. 7 참조). Fig. 7(c)에서 보이는 것과 같이 결과는 표면 균열의 패턴을 정확하게 평가하는 것으로 나타났다. 또한 평가된 균열의 깊이는 코어 샘플을 통하여 얻은 결과와 좋은 일치도를 보임을 확인하였다. ACS를 이용한 표면파 전달법이 대형 콘크리트 구조물 표면에 발생한 균열을 현장에서 신속하고 정확하게 측정하는데 효과적

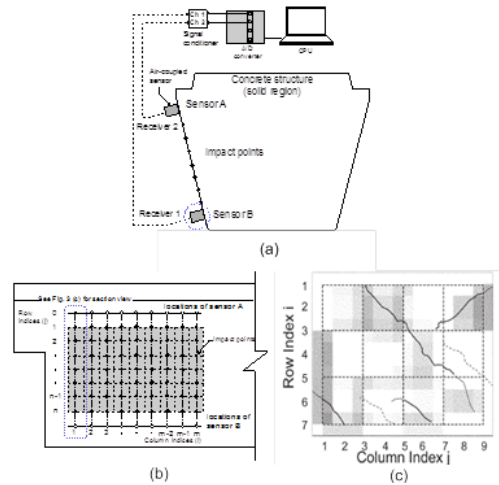


Fig. 7 비접촉 표면파 전달법을 이용하여 실제 현장의 프리스트레스 콘크리트 표면의 표면 균열의 패턴 및 깊이를 평가하기 위한 실험 절차 및 결과: (a) 장치 구성도, (b) 센서 및 입력원의 위치, (c) 표면파 전달율 그래프 및 균열 패턴

인 방법임을 확인할 수 있다.

3.3 충격 반향 기법 (Impact echo: IE)

충격반향기법은 직접 타격법에 기반한 콘크리트 비파괴 검사법의 하나로 주로 슬래브나 벽체와 같은 판형 콘크리트 구조물의 두께를 측정하고 내부의 결함 (수평균열 또는 공동 등)을 탐지하고 평가하는데 유용한 방법으로 알려져 있다. 판형 콘크리트 표면을 쇄구슬이나 해머로 타격하면 콘크리트 내부에서 벌크파 (P파, S파)와 표면파가 발생된다. 이때 표면파는 원통형의 파면을 갖고 타격점을 중심으로 외부로 콘크리트 표면을 따라 에너지가 전파된다. 하지만 P파와 S파 (타격을 표면에 수직을 하였을 때는 주로 SV파의 형태로 전달)는 판형 구조물의 바닥과 표면에서 반사를 반복하게 된다. 표면에서 출발한 입력파가 바닥에 도달하여 반사되어 다시 표면에 도착하는 시간을 T라고 했을 때 P파를 기

준으로 속도 C_p 를 알게 되면 판의 두께와 주기 $T (=1/f)$ 는 다음과 같은 관계를 갖는다.

f_n 는 일반적으로 충격반향주파수라고 불린다. 사실 충격반향기법에서 사용되는 위의 식은 오류가 있으며 보다 정확한 설명을 위해서는 판내부에서 형성되는 램파의 공진과 관련된 좀더 복잡한 부연설명이 필요하다. 결과적으로 위의 식에서 f_n 는 이론적으로 램파의 S₁모드의 공진주파수를 의미한다. 실용적으로 위의 식의 우변에 보정계수 β 를 곱하여 오차를 줄일 수 있다. β 는 콘크리트의 포아송비와 관련된 값으로 일반적인 콘크리트의 경우 0.95~0.97의 값을 갖는다.

실험적으로 콘크리트 속도와 공진주파수를 구하게 되면 판의 깊이 H 를 측정할 수 있다. 공진주파수는 콘크리트의 과도시간응답을 주파수 영역을 변환하여 간단하게 얻을 수 있다. 만약 판 내부에 박리나 공동과 같은 결함이 있다면 응력파의 경로에 영향을 주어 공진 주파수는 건전한 콘크리트에서 측정된 값과 다른 값을 갖는다. 비교적 넓고 깊은 결함의 경우 위의 식의 f_n 는 결함의 깊이를 나타낸다. 또한 비교적 얇은 균열일 경우 (표면에서 결함 면까지 거리가 짧은 경우, 대략 5~7cm 미만) 복을 칠 때 소리를 발생시키는 원리와 같은 횡진동에 의한 공진현상이 지배하게 된다. 이때 공진 주파수는 콘크리트의 건전한 콘크리트의 충격반향주파수보다 훨씬 낮기 때문에 주파수 영역에서 쉽게 구분할 수 있다.

지금까지 많은 연구자 및 실무자들은 콘크리트의 과도응답을 측정하기 위하여 변위계나 가속도계와 같은 접촉센서를 이용하였다. 하지만 응력파에 기반한 방법의 특성상 속도가 느리다는 단점은 충격반향기법을 실무에서 규모가 크고 넓은 표면을 갖는 건축/토목 구조물에 사용을 어렵게 하고 있는 실정이다.

이에 대한 대책으로 Zhu와 Popovics는 판형 콘크리트에 형성된 램파를 측정하는데 ACS의

사용을 제안하였다. 실험실에서 축소 실험체를 제작하여 내부의 다양한 깊이와 크기의 박리를 탐지하고 평가하는데 ACS를 이용한 충격반향기법을 수행하였고, 그 결과를 바탕으로 ACS 사용의 효율성 및 실용성을 실험적으로 증명하였다. 또한 최근에는 ACS를 이용한 충격반향기법을 콘크리트 교량 상판의 내부 결함을 탐지 및 평가를 위한 보다 실용적인 문제에 적용한 연구 결과가 있다. 실험의 결과는 Fig. 8에서 보이는 바와 같이 2차원 진동수 그래프로 표현되었으며 콘크리트 내부의 다양한 크기 및 깊이의 박리를 정확하게 평가하는 것으로 나타났다. 실험 결과의 일관성 및 균열에 대한 민감도 해석을 통하여 ACS를 이용할 경우 매우 높은 신뢰도를 얻을 수 있음을 확인하였다.

4. 현재 진행 중인 연구 과제

지금까지 발표된 연구결과를 통하여 대부분의 응력파에 기반한 비파괴 검사법에 ACS를 사용할 수 있음을 확인할 수 있었다. 하지만 대부분의 연구는 아직 잘 통제된 실험실 환경에서 이루어졌다. ACS의 실제 구조물의 실용성을 높이기 위한 몇몇 연구가 진행 중에 있다.

4.1 음향반사판을 이용하여 ACS의 Sensitivity 향상을 위한 기술개발

접촉센서와 비교하여 결과의 정확도 및 일관성, 실험속도면에서 ACS는 탁월한 성능을 보이고 있다. 하지만 ACS로 주로 사용되는 콘텐서 마이크의 낮은 민감도 (sensitivity)는 ACS의 현실적 문제의 적용성 및 실용성에 한계를 주고 있다. 특히 충격반향기법에서 주로 관심이 있는 벌크파는 표면파와 비교하여 매우 작은 에너지를 갖기 때문에 ACS의 낮은 민감도는 결과의

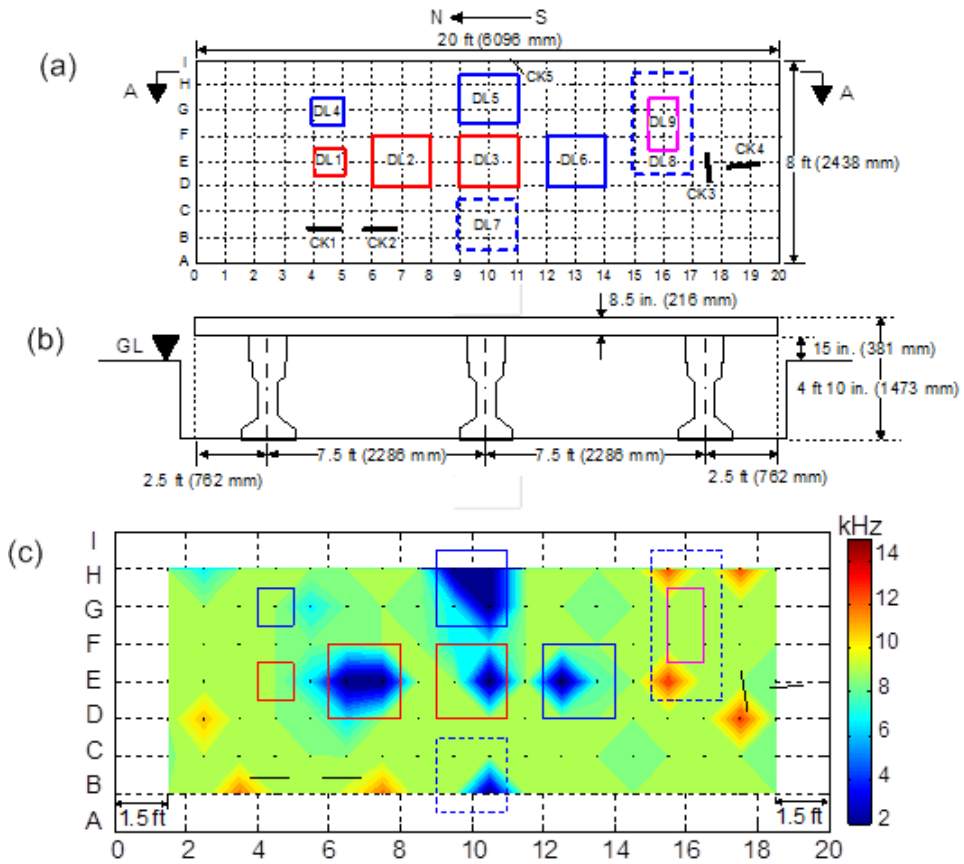


Fig. 8 Air-coupled 충격반향기법을 이용한 콘크리트 교량 상판 평가: (a) 교량상판 평면 및 내부 결함도, (b) 교량상판 단면, (c) 결과

신뢰도를 높이는데 중요한 문제가 될 수 있다. 공기는 콘크리트와 비교하여 매우 작은 음향임피던스를 갖기 때문에 공기중에서 누설과를 측정하는데 있어 많은 에너지 손실이 수반된다. 특히 측정 지점 근방에 소음원이 있을 경우 시간영역에서 누설과와 소음의 영향이 복합적으로 반영되어 누설과의 분석을 어렵게 한다.

최근 이러한 문제를 해결하기 위하여 적절하게 설계된 반사판을 포함하여 충격반향기법을 위한 ACS의 설계에 관한 연구가 진행되고 있다. 평면과가 포물선 단면을 갖는 반구형태의 반사판에 축 방향으로 입사하게 반사면에 반사되어 반사판의 초점에 집중되어 에너지가 증폭되는

기본 원리에 바탕을 두고 있다. 최근 충격반향기법에서 발생하는 누설과와 포물선 단면을 갖는 반사판의 상호작용에 관한 연구를 진행되고 있다. 다음 Fig. 9는 균열이 없는 콘크리트 판과 내부에 폭 30cm 깊이 6cm의 박리를 갖는 콘크리트 판에서 충격반향기법으로 발생된 누설과와 포물선 단면을 갖는 반사판의 상호작용 보여주는 수치해석 결과이다. 콘크리트 표면의 타격으로 발생된 충격반향모드의 에너지가 공기중으로 누설될 때 입사각은 매우 작다. 즉 공기중에서 누설충격반향 모드는 평면과와 유사한 거동을 하게 된다. 결과적으로 입사된 누설충격반향 모드는 반사판의 초점에 집중하는 것을 볼 수 있

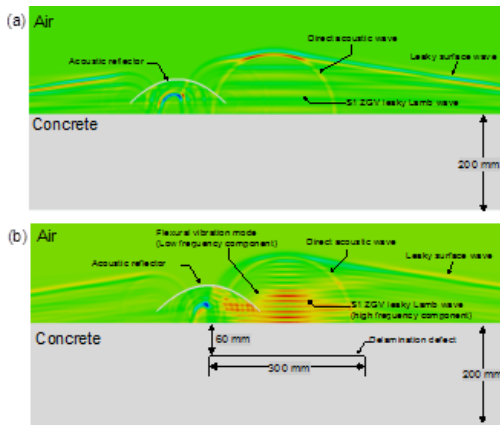


Fig. 9 충격반향기법으로 발생된 누설파와 포물선 단면을 갖는 반사판의 상호작용을 보여주는 수치해석 결과: (a) 균열이 없는 콘크리트 판, (b) 폭 30cm 길이 6cm의 박리를 갖는 콘크리트 판

다. 반사판의 기하학적 형상에 관한 변수 해석을 통하여 충격반향기법에 관한 최적화된 형태의 반사판을 찾아낼 수 있었다.

4.2 다채널 센서 배열 구축 및 분석을 위한 알고리즘 개발

일반적으로 측정 시 소요되는 시간은 채널의 수에 비례하여 줄어들게 된다. 이는 단순한 형태가 반복되어 광범위한 표면을 갖는 구조물의 비파괴 검사시 매우 중요한 요소이다. 또한 채널수가 증가함에 따라 다양한 채널에서 얻은 결과 조합을 통하여 한개의 채널로 얻을 수 없는 정보를 얻을 수 있다. 따라서 대형 구조물의 신속하고 정확한 비파괴 검사에 관한 현실적 요구는 다채널 센서 배열 및 통합 데이터 분석을 위한 새로운 알고리즘에 관한 연구를 필요로 하고 있는 실정이다. 실제로 미국의 국가표준기술연구소 (NIST)의 연구 프로젝트의 일환으로 여러가지 응력파에 기반한 방법 (표면파측정에 기반한 방법, 충격반향법, 충격응답법)을 통합하기 위한 ACS 다채널 배열 구축 및 데이터 통합을 위한 알고리

즘의 개발이 연구 중에 있다.

4.3 자동화 및 로봇기술과 결합

대형 건축/토목 구조물의 건전성 검사를 할 때 공간상 제약이나 안전상 문제로 사람이 직접 검사를 수행할 수 없는 경우가 종종 발생한다. 또한 넓은 표면의 구조물을 사람이 직접 검사하는 작업은 경제적으로 비효율적이다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 로봇을 이용한 비파괴 검사 기술의 적용이 현재 활발히 연구 중에 있다. 최근의 화성의 환경 및 지질학적 조사를 위해서 'Curiosity'라는 로봇에는 시편 채집 및 분석을 자동으로 수행하여 그 데이터를 지구로 전송할 수 있는 각종 장비 및 시스템을 싣고 화성 표면에서 임무를 수행하고 있다. 같은 원리로 현재 연방 도로청 (FHWA)과 국가표준기술연구소 (NIST)에서는 각종 비파괴 검사를 위한 센서를 장착한 로봇을 이용하여 자동으로 구조물의 비파괴 검사를 수행하기 위한 연구를 위한 연구 프로젝트를 지원하고 있다. 로봇은 응력파에 기반한 비파괴 기법 뿐만 아니라 고해상도 카메라, 열화상 카메라를 이용한 시각적 방법, 전자기파를 이용한 GPR, 전기-화학적 방법등의 다양한



Fig. 10 화성에서 표면 및 대기탐사를 위하여 작업 중인 로봇 'Curiosity'

센서를 포함할 예정이다. 응력파를 이용한 검사를 수행하기 위해 필요한 센서로 기존의 접촉센서가 갖는 단점은 전체 로봇 시스템의 속도를 현저히 떨어뜨리고, 또한 커플링에 의한 효과는 결과의 신뢰도 및 일관성에 큰 영향을 줄 수 있다. 따라서 현재 연구자들은 이러한 문제의 해결책으로 ACS를 차세대 센서로서 연구를 진행하고 있다. 이제 Curiosity와 같은 각종 센서를 장착한 무인 로봇이 대형 건축/토목 구조물의 건전도를 평가를 위해 활약이 멀지 않은 미래에 현실화될 것이라 기대한다.

5. 요약

응력파의 기반한 비파괴 검사법은 비교적 실험 절차 및 실험에 필요한 장비가 단순하고, 인체에 해가 없으며, 비용이 저렴한 특성을 갖고 있다. 따라서 건축/토목 구조물의 비파괴 검사에 매우 효과적인 방법으로 알려져 있다. 하지만 기존의 가속도계, 변위계, 지오폰과 같은 부착 센서를 사용할 경우 표면 처리, 센서의 부착 및 이동에 따른 추가적인 시간이 소요되고, 센서와 구조물의 불완전한 커플링으로 인한 측정 결과의 신뢰성 및 일관성을 유지하지 어렵다는 문제를 발생시킨다. 최근 이러한 문제의 해결책으로 Air-coupled sensor (ACS)의 사용이 각광받고 있으며, 여러 연구자들에 의해 ACS의 가능성 및 실용성이 증명되고 있다. 기존의 접촉센서와 비교하여 ACS를 사용했을 때 얻을 수 있는 가장 큰 장점은 센서의 커플링 문제를 근본적으로 해결하여 신뢰도가 높고 일관적인 측정이 가능하고, 대형 건축/토목 구조물의 표면을 음향스캔하여 결과를 신속하게 처리하여 실시간으로 시각화 할 수 있다는 점이다.

이론적으로 ACS를 이용하여 측정하는 물리값은 콘크리트 내부에서 발생된 응력파의 일부가

공기중으로 전파된 누설파 (Leaky wave)이다. 콘크리트 비파괴 검사에 주로 사용하는 100 kHz이하의 저주파를 측정할 경우 일반적으로 콘텐서마이크가 ACS로 사용될 수 있다. 기존 연구자들은 실험 및 이론적 연구를 통하여 응력파에 기반한 비파괴 방법에서 ACS가 기존의 접촉 센서를 대체할 수 있다는 점을 보여주고 있다. 현재 미국에서는 연방 도로청 (FHWA) 및 국가표준기술연구소 (NIST)의 연구비 지원으로 ACS의 실용성을 높이기 위하여 최적화된 음향반사판의 설계를 통한 ACS의 민감도를 높이기 위한 연구, 다채널 센서 배열 및 데이터 통합을 위한 새로운 알고리즘 개발, 자동화 및 로봇 기술과 융합과 같은 연구가 활발히 진행되고 있다.

멀지 않은 미래에는 ACS를 장착한 무인 로봇이 다양한 종류의 건축/토목 구조물의 건전도를 평가하기 위하여 중형무진 활약하는 모습을 현실 속에서 볼 수 있을 것이라 기대한다.

참고문헌

1. ACI committee 228, "Nondestructive test methods for evaluation of concrete in structures", Report ACI 228.2R-98, Farmington Hills, MI, 1998.
2. Gibson, A. and Popovics, J. S., "Lamb wave basis for impact-echo method analysis", Journal of Engineering Mechanics-ASCE, 131(4), 2005, 438-443.
3. Kee, S. H. and Zhu, J., "Using air-coupled sensors to determine the depth of a surface-breaking crack in concrete", The Journal of the Acoustical Society of America, 127(3), 2010, 1279-1287.
4. Kee, S. H., Eulalio, F. G. and Zhu, J., "Air-coupled surface wave transmission measurements to evaluate surface-breaking cracks in concrete structures: Field application", ACI Materials Journal, 108(5), 2011, 558-565.
5. Kee, S. H., "Evaluation of crack-depth in concrete using non-contact surface wave transmission measurement", Doctoral dissertation, Univ. of Texas Austin, Austin, TX, 2011.

6. Kee, S. H., Gucunski, N. and Fetrat, F. A., "Developing an optimal acoustic reflector for air-coupled impact-echo sensor", Proc. SPIE 8347, Nondestructive Characterization for Composite Materials, Aerospace Engineering, Civil Infrastructure, and Homeland Security 2012, 834706 (April 26, 2012).
7. Kee, S. H., Oh, T., Popovics, J. S., Arndt, R. W. and Zhu, J., "Nondestructive bridge deck testing with air-coupled impact-echo and infrared thermography", Journal of bridge engineering-ASCE, 17(6), inpress, 2012.
8. Oh, T., Kee, S. H., Arndt, R., Popovics, J. S. and Zhu, J., "Comparison of NDT Methods for Assessment of a Concrete Bridge Deck", Journal of Engineering Mechanics-ASCE, doi: 10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000441.
9. PCB Piezotronics INC, "Microphone Handbook: Test and Measurement Microphones [Online]", Available: www.pcb.com/Linked_Documents/Vibration/Microphone_handbook.pdf (last accessed Oct. 8 2012).
10. Potter, N., "Mars rover on final approach for landing tonight [online]", Available: <http://abcnews.go.com/Technology/mars-curiosity-r-over-landing-nasa-prepares-minutes-terror/story?id=16917187> (last accessed Oct. 8 2012).
11. Ryden, N., "Surface wave testing of pavements", Doctoral dissertation, Lund University, Lund, 2004.
12. Ryden, N., Lowe, M. J. S. and Cawley, P., "Non-contact surface wave scanning of pavements using a rolling microphone array", Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, vol. 27a and 27b, 975. Thompson DO, Chimenti DE, eds., Amer Inst Physics, Melville, 1328-32, 2008.
13. Zhu, J. "Non-contact NDT of concrete structures using air-coupled sensors", Doctoral dissertation, Univ. of Illinois Urbana-Champaign, Urbana-Champaign, IL, 2005.
14. Zhu, J. and Popovics, J. S., "Imaging concrete structures using air-coupled impact-echo", Journal of Engineering Mechanics-ASCE, 133(6), 2007, 628-640.
15. Zhu, J., Popovics, J. S., Schubert, F., "Leaky Rayleigh and Scholte waves at the fluid-solid interface subjected to transient point loading", The Journal of the Acoustical Society of America, 116(4), 2004, 2101-2110.

담당 편집위원: 하상수
 (강남대학교 건축공학과 교수)
 knuhss@kangnam.ac.kr