

## 콘크리트 구조물의 건전성 모니터링을 위한 초음파 기반의 비파괴검사 기술

신성우\*

(부경대학교 안전공학부)

### 1. 머리말

잘 알려져 있다시피 콘크리트는 시공성, 경제성, 내화성 및 내구성이 매우 우수한 건설 재료로써, 교량, 빌딩, 댐 등을 포함한 대다수의 토목/건축 구조물 건설에 이용되었으며, 콘크리트를 대체할 수 있을 만큼 우수한 건설 재료를 찾기 어렵기 때문에 향후에도 지속적으로 사용되리라 예상된다. 그러나, 콘크리트가 건설 재료로써 아무리 우수하다고 하더라도, 환경 변화와 같은 다양한 요인들에 의한 열화(deterioration)나 손상을 피할 수는 없으며, 이러한 열화와 손상은 자연적으로 구조물의 성능을 저하시켜 구조물의 사용성과 안전성에 심각한 문제를 발생시킬 수 있게 된다. 따라서, 구조물의 사용 기간 동안 발생하는 콘크리트의 열화와 손상으로부터 구조물의 사용성과 안전성을 확보하기 위해서는, 콘크리트 구조물의 건전성을 지속적으로 모니터링하여 현재 상태를 평가하고 이로부터 유지/관리에 필요한 정보를 획득하여, 필요 시에는 신속하게 보수 또는 보강을 실시하여야 한다.

콘크리트 구조물의 건전성을 모니터링하기 위해서 구조물의 현재 상태를 알 수 있는 다양한 검사 기법이 연구/개발 되었으며, 그 중에서도 초음파를 이용한 콘크리트 구조물의 비파괴검사 기술은 40년 이상의 기간을 통해 많은 발전이 이루어졌

다. 초창기에는 초음파를 이용한 콘크리트의 비파괴 검사에 대한 연구의 관심이 매우 높았는데, 이 시기의 주요한 목표는 콘크리트에서 전달되는 종파의 속도와 감쇠를 측정하여 이 값들이 콘크리트의 압축 강도와 같은 특성 값들과 어떠한 상관 관계가 있는가를 알아내는데 있었다. 그러나, 상대적으로 균질한 금속 재료와는 달리 내부에 골재, 공극 등을 포함한 콘크리트는 그 비균질성으로 인하여 초음파의 산란 등에 의한 영향이 커서 비파괴 검사 기법으로서의 유용성이 낮다는 인식이 확대되어 한동안 침체기를 가지게 되었다. 근래에 들어 우수한 성능을 가진 첨단 센서의 개발과 고도화된 신호 처리 기법의 적용, 그리고 구조 건전성 모니터링(structural health monitoring; SHM)에 관한 활발한 연구로 인하여, 최근에 다시 초음파 기법의 콘크리트 비파괴 검사에의 적용에 대한 관심이 높아지고 있다. 이에 따라, 현재는 콘크리트의 손상/결함 탐지 및 위치 추정, 철근의 부식 모니터링 등과 같은 분야에 초음파 기법을 적용하고자 하는 노력이 많은 연구자들에 의하여 이루어지고 있으며, 비록 기계/항공/전자부품 분야에서 적용되는 초음파 응용 기술에 비하여 발전의 속도가 느리긴 하지만, 콘크리트 구조물의 비파괴 검사 분야에서도 초음파 기술이 점진적인 발전을 이루고 있을 뿐 아니라 앞으로 더욱 각광받을 것으로 예상된다.

이 글에서는 최근에 활발하게 연구가 이루어지

\* E-mail : shinsw@pknu.ac.kr / (051) 629-6473

고 있는 콘크리트의 손상 탐지 및 손상 위치 추정 분야와 철근 모니터링 분야를 중심으로 초음파 기술이 어떻게 응용되고 있는지를 알아봄으로써, 초음파 기반의 콘크리트 구조물 비파괴검사 기술에 대한 최근 연구 동향을 소개하고자 한다.

## 2. Air-coupled Sensing을 이용한 비접촉 손상 탐지 및 위치 추정

### 2.1 Air-coupled Sensing 기법

초음파 기술에서는 통상 매질 내에서의 신호의 전달 시간이나 감쇠(attenuation) 특성을 측정하여 비파괴검사에 이용한다. 콘크리트 구조물의 비파괴검사에서 많이 사용하는 초음파의 주파수 대역은 20~100 kHz이고, 이 주파수 대역을 접촉형 센서로써 계측하고자 할 때에는 센서와 대상 구조물을 연결하기 위한 연결재(couplant) 사용하여야 한다. 그러나, 이 같은 접촉식 계측의 경우, 센서의 접촉 또는 연결 상태에 따라 측정 결과에 변동이 발생할 수 있으며, 특히 감쇠 특성을 측정 변수로 하는 경우에는 센서의 접촉 상태가 일정하게 유지되지 않으면 측정 결과가 크게 왜곡될 수 있는 단점이 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여, 최근에 비접촉 방식 계측(non-contact measurement)에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다.

초음파 신호를 비접촉 방식으로 계측하기 위한 방법에는 레이저 등을 이용한 광학적 계측법과 air-coupled 센서 등을 이용한 음향학적 계측법이 있다. 광학적 계측법은 표면에 위치한 한 점의 움직임을 레이저를 이용하여 계측하는 것으로서, 매우 높은 정확성을 가지고 있다. 그러나, 이러한 비접촉 광학적 계측법을 콘크리트 구조물에 적용하는 것에는 여러 가지 어려움이 있다. 즉, 콘크리트와 같이 표면이 매끄럽지 못한 경우에는 빛의 반사가 매우 약해지고 이는 측정의 감도와 정확성을 낮추게 된다<sup>1)</sup>. 뿐만 아니라, 측정 장비의 구성이 매우 복잡하고 가격도 고가여서 실용적으로 사용하기에는 아직까지 무리가 있는 실정이다.

한편, air-coupled 센서를 이용한 음향학적 계측법은, 생성된 초음파가 매질에서 전파되는 과정에서 매질과 대기의 음향학적 임피던스(acoustic impedance) 차이에 의해서 발생하는 누설파(leaky waves)를 air-coupled 센서를 이용하여 비접촉식으로 계측하는 방법이다. 즉, 그림 1에서 나타낸 바와 같이 매질의 표면에 충격 등을 이용하여 생성된 초음파는 매질을 따라 전파하는 과정에서 에너지의 일부분이 대기 중으로 누설되게 되며, 이렇게 누설된 파동은 마이크로폰과 같은 air-coupled 센서 등을 이용하면 계측이 가능하게 된다. 그림 2는 구조체와 유체가 경계면( $z=0$ )을 중심

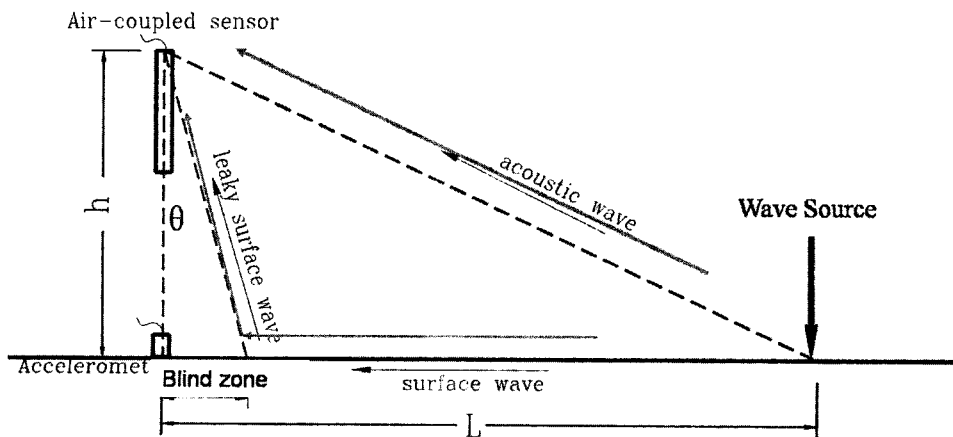


그림 1 Air-coupled 센서를 이용한 음향학적 계측법

으로 서로 맞닿아 있을 때, 구조체 표면의 한 점을 점가진원(point explosive source)으로 가진한 경우에 발생하는 파동의 전파 양상을, 탄성동력학적 유한적분기법(elastodynamic finite integration technique<sup>(2)</sup>)을 이용하여 해석한 결과를 나타내며<sup>(3)</sup>, 그림 3은 콘크리트 구조체 표면의 한 위치에서 충격을 이용하여 가진한 후, 가진원으로부터 1m 떨어진 위치에서 마이크로폰을 이용하여 누설된 음향 초음파를 계측한 실험 결과를 나타낸다<sup>(4)</sup>. 수치해석 결과에서 예측한 바대로, 실제 실험에서도 누설된 표면파가 마이크로폰 등에 의하여 잘 계측될 수 있음을 알 수 있으며, 이에 따라 콘크리트 구조물에서도 air-coupled sensing이 비파괴검사에 유효하게 적용될 수 있음을 알 수 있다. 또한

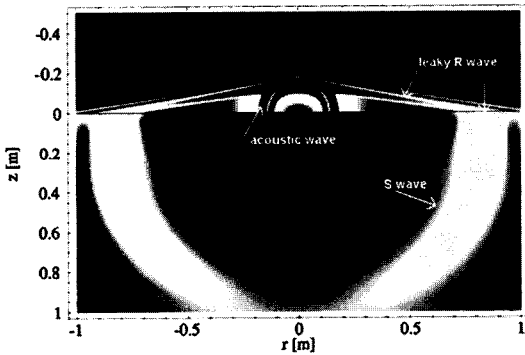


그림 2 유체-구조체 복합 매질에서 점가진원에 의한 초음파의 전파 해석 결과

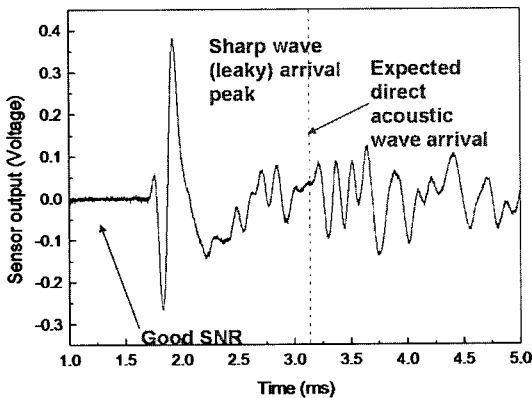


그림 3 마이크로폰을 이용한 콘크리트에서의 누설표면파 계측 실험 결과

air-coupled sensing이 광학적 계측법에 비하여 유리한 점은 측정 장비의 구성이 간단할 뿐만 아니라, 센서의 가격도 레이저 장비에 비하여 매우 저렴하다는 점에 있으며, 이러한 장점은 비파괴검사에서 air-coupled sensing이 레이저를 이용한 광학적 계측법보다 널리 사용될 수 있는 가능성을 높여 준다.

### 2.2 Air-coupled 충격-반향 기법을 이용한 콘크리트 구조물의 박리 탐지 및 영상화

그림 4에서 나타낸 바와 같이 콘크리트 구조물에서는 부식에 의해 팽창된 철근이 주변 콘크리트에 균열을 발생시켜 콘크리트가 박리(delamination)되는 손상을 야기할 수 있다. 이러한 박리 손상은 콘크리트 구조물의 안전성과 사용성에 큰 영향을 미칠 수 있으며, 따라서 이러한 손상을 조기에 탐지하고 필요한 경우에는 적절한 조치를 취하도록 하는 것은 구조물의 유지/관리에 있어서 매우 중요한 문제이다. 그러나 이러한 박리 손상

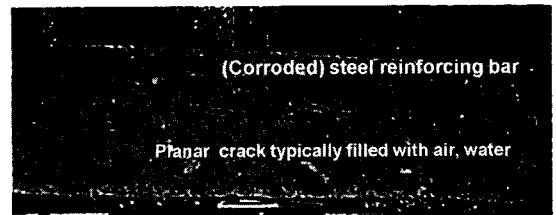


그림 4 철근 부식에 의한 콘크리트 구조물에서의 박리 균열

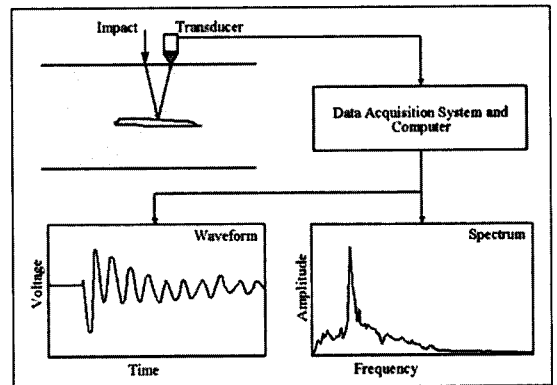


그림 5 충격-반향 기법의 원리

특집 : 초음파 신기술과 응용

의 경우 손상이 콘크리트 구조물의 내부에 위치하기 때문에 육안으로는 탐지가 불가능하며, 따라서 이러한 손상의 탐지에 비파괴검사 기법을 적용하는 것은 매우 유효한 접근법이라고 볼 수 있다. 콘크리트의 박리와 같은 내부 손상 탐지를 위해 다양한 기법들이 제안되었으며, 그 중에서도 가장 널리 알려진 기술로는 1980년대 중반에 미국 표준 연구소(NIST)와 코넬대학교가 공동 개발한 충격-반향(Impact-Echo) 기법이다<sup>6)</sup>. 충격-반향 기법은 그림 5에서 나타낸 바와 같이 표면에 강구(steel ball) 등을 낙하하여 발생시킨 충격 초음파가 손상이나 경계면에서 반사되면, 이러한 반사파를 표면

에서 계측하고, 계측된 신호를 주파수 영역에서 분석하여 이로부터 손상의 유무와 손상의 위치를 알아내는 방법으로, 박리 손상 탐지뿐만 아니라 내부 공극 및 공동 탐지, 구조물의 두께 측정, 콘크리트 강도 추정 등의 분야에서도 널리 응용되는 기법이다.

Air-coupled 충격-반향 기법은 기존의 충격-반향 기법을 보다 빠르고 효율적으로 수행하는 한편, 앞서 언급했던 연결상태에 따른 변동성을 제거하여 측정 결과의 신뢰성을 높이기 위한 목적으로 최근에 일리노이 주립 대학교(University of Illinois at Urbana-Champaign) 토목 및 환경공학과에서 개발한 방법으로서, 그림 6과 같이 접촉형 센서 대신에 마이크로폰을 이용하여 충격-반향 기법을 수행할 수 있도록 한 것이다. 그림 7은 슬래브형 콘크리트 구조물의 표면 부근에 박리형 손상이 존재할 경우에 대하여, air-coupled 충격-반향 기법과 기존의 충격-반향 기법에 의한 손상 탐지를 비교 실험한 결과를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 박리형 손상이 표면 부근에 위치한 경우에 발생할 수 있는 저주파 횡 진동 성분이 마이크로폰을 사

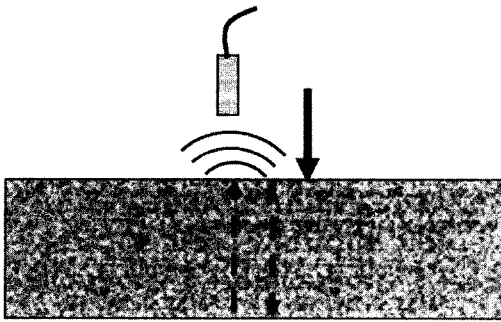


그림 6 Air-coupled 충격-반향 기법의 개념도

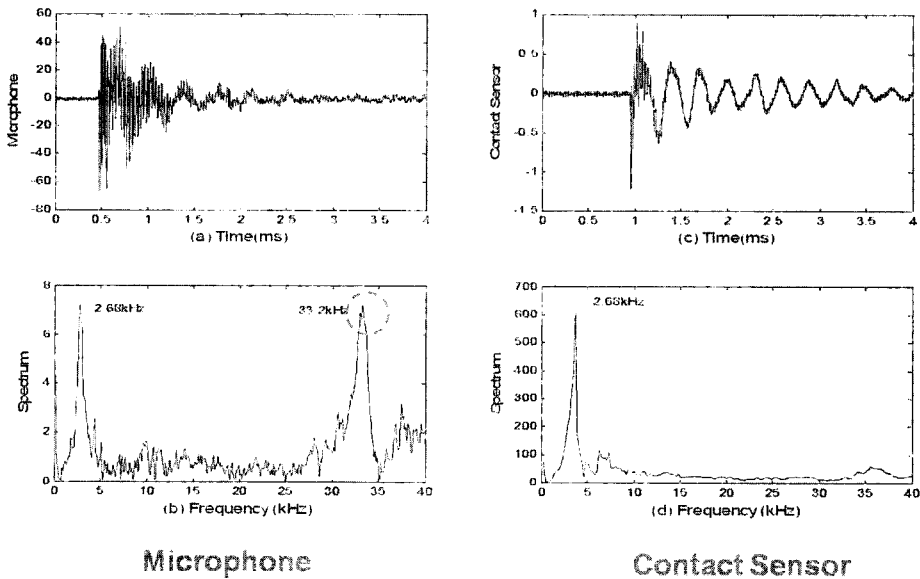


그림 7 충격-반향 기법 결과 비교(마이크로폰과 접촉형 변위센서)

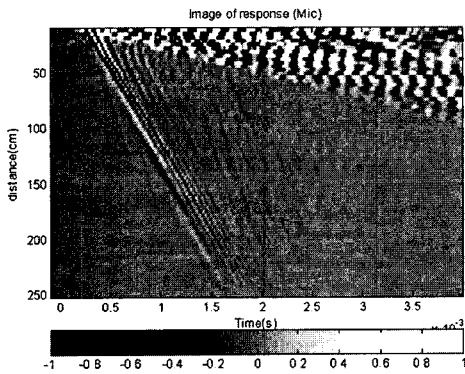
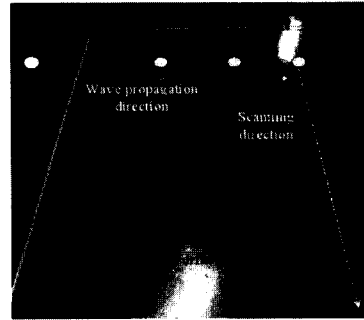
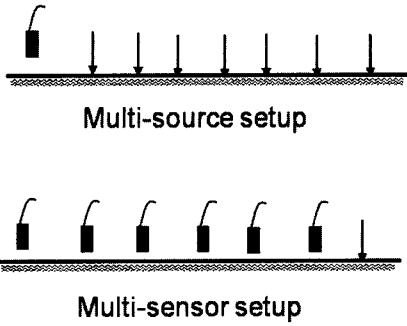


그림 9 Air-coupled MASW

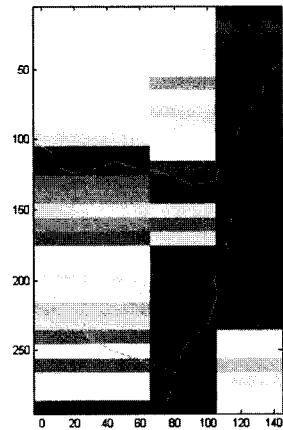


그림 10 Air-coupled Sensing을 이용한 콘크리트 표면 균열 탐지

용하면 기존에 상용화된 변위형 센서에서는 잘 계측되지 않았던 상대적으로 고주파 영역에 있는 박리에 의한 반사 성분까지도 계측되어, 얇은 위치에 존재하는 박리 손상의 깊이까지도 측정 가능한 것을 알 수 있다<sup>6)</sup>. 한편, 이 연구팀은 그림 8(a)와 같이 구조물의 여러 위치에 다양한 손상을 모사한 실험체를 제작하고, air-coupled 충격-반향 기법을 적용하여 콘크리트 구조물의 내부 영상화를 시도하였으며, 영상화 실험 결과의 일부를 그림 8(b)에 나타내었다<sup>6)</sup>. 이 결과로부터 구조물의 손상 영역 영상화에 air-coupled 충격-반향 기법이 유효하게 적용될 수 있다는 것을 알 수 있다.

### 2.3 Air-coupled Sensing 기법의 다양한 응용

Air-coupled sensing 기법은 콘크리트 구조물의 박리 손상 탐지 및 영상화를 위한 충격-반향 기법 뿐만 아니라, 최근에는 콘크리트 포장체의 건전

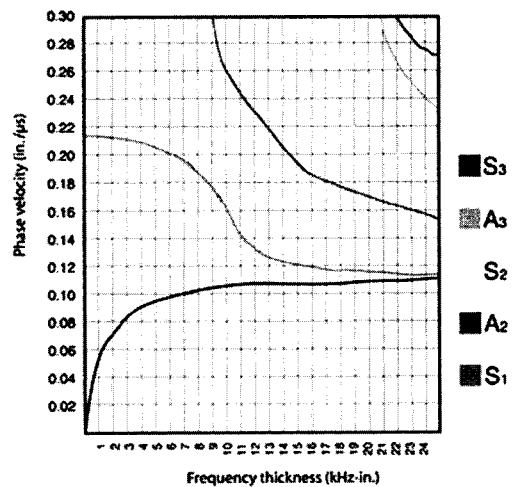


그림 11 알루미늄 판에서의 램파의 분산 곡선

성 평가와 지반 영상화에서 많이 이용되는 다중 채널 표면파 기법과(multiple channel analysis of

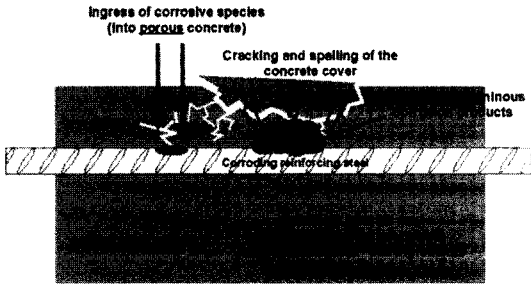


그림 12 철근 콘크리트 구조물에서의 철근 부식 과정 및 효과

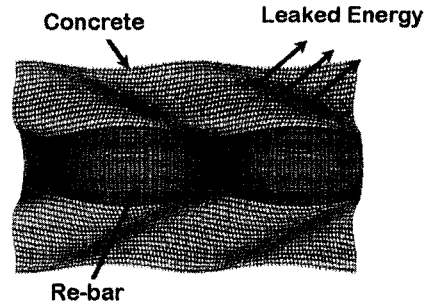


그림 13 철근 콘크리트에서의 실린더 유도파의 거동

surface waves; MASW - 그림 9) 콘크리트의 표면 균열 탐지(그림 10) 등에도 적용하고자 하는 시도가 유럽과 미국에서 계속 되고 있으며<sup>(7,8)</sup>, 앞으로도 콘크리트의 균열 깊이 측정 등과 같이 콘크리트 구조물의 건전성 평가를 위한 다양한 비파괴 검사 기법에 많은 적용이 이루어질 것으로 예상된다. 그러나, 안타깝게도 국내에서는 아직까지 이 기술에 대한 체계적인 연구가 부족한 상태이며, 따라서 이 기술 분야에 대한 국내 발전을 위하여 앞으로 관련 연구자들의 많은 관심이 필요한 실정이다.

### 3. 유도 초음파를 이용한 철근 모니터링

3.1 유도 초음파 기술의 토목 구조물에서의 적용  
기계/항공 분야의 비파괴검사 등에서 많이 이용되는 램파(Lamb waves)와 같은 유도 초음파(guided waves)를 토목 구조물의 건전성 모니터링에 응용하는 연구가 최근에 각광을 받고 있다. 유도 초음파란 파동이 전파되는 매질의 특수한 성질에 의하여 파동의 회절(diffraction)이 억제되어 파동의 전파 경로가 도파경로(waveguide)에 한정되어 전파되는 파동을 말하며, 램파와 같이 파동의 전파 속도가 주파수에 따라 달라지는 분산(dispersion) 특성을 가지고 있는 경우가 많다(그림 11). 토목 분야에서는 강 트러스 교의 피로 균열 탐지 등과 같이, 주로 강구조물의 손상 탐지에 램파를 적용하는 등의 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 한편, 콘크리트 구조물에 대해서는 이의 재료

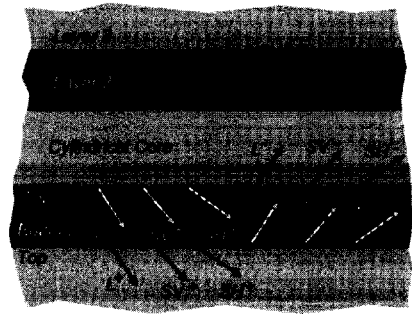


그림 14 다층 실린더 구조에서의 파동의 전파 해석

및 구조적 특성으로 인하여 강구조물에서의 적용에 비하여 아직까지 연구가 많이 활성화 되어 있지 않으나, 철근의 손상 탐지나 섬유 강화 복합 플라스틱으로 접착 보수된 구조물에서 보수재의 박리 탐지 및 접착 성능 평가에 유도초음파를 응용하려는 연구가 최근에 시작되어 앞으로 이 분야에 있어서 많은 발전이 기대되고 있다. 이번 장에서는 유도 초음파의 토목 분야에서의 적용과 관련한 다양한 연구 중에, 특히 연구자들 사이에서 관심이 높은 유도 초음파의 철근 부식 모니터링에의 응용에 관하여 중점적으로 다루도록 하겠다.

### 3.2 철근의 부식 문제

철근 콘크리트 구조물에서 철근의 부식은, 그림 12와 같이 콘크리트의 균열, 박리 및 박락(spalling) 등과 같은 손상을 발생시켜 내구성을 저하시킬 뿐만 아니라, 철근의 유효단면적 감소를 유발하여 구조물의 강도를 저하시키고, 최악의 경

우에는 구조물이 파괴에 이르도록 만드는 매우 심각한 손상이다. 이러한 이유로 많은 연구자들이 철근의 부식과 관련한 연구에 매진해 왔다. 그러나, 철근의 부식 현상과 같은 재료 과학적 연구나 철근의 부식이 구조물의 내구성과 강도에 미치는 영향 등과 같은 구조 해석적 연구에는 많은 발전이 있었으나, 부식의 탐지/모니터링/평가 등과 같은 측정 과학적 연구는, 많은 연구자들의 노력에도 불구하고, 현장에서 신뢰성 높은 기술로 인정받을 만큼 유효한 탐지 기술 등이 아직 개발되지

못한 상태에 있어 앞으로 많은 발전이 요구되는 실정이다. 특히, 철근의 비파괴적인 부식 탐지 및 모니터링 기술에 대한 많은 발전이 필요한데, 이는 ASTM 등에 규정되어 있는 기존의 하프셀 방법(half-cell potential method)과 같은 부식 측정법이 철근의 노출을 필요로 하기 때문에, 이러한 방법의 사용 시에 철근 노출을 위해 콘크리트 표면을 부수어야 하는 등의 또 다른 문제점이 대두되고 있기 때문이다. 따라서, 이러한 문제점들을 해결하고, 신뢰성 있는 철근 부식 탐지 및 모니터링 기술

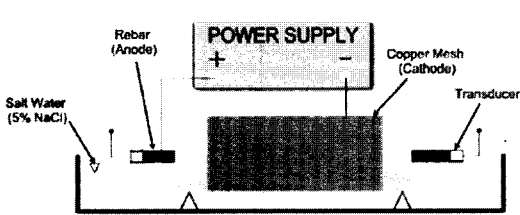


그림 15 가속 부식 테스트를 이용한 철근의 부식 도입 및 실린더 유도파 전파 실험 구성



그림 16 철근의 부식 형태(건전한 철근 / 균일 부식된 철근 / 국부 부식된 철근 : 위로부터)

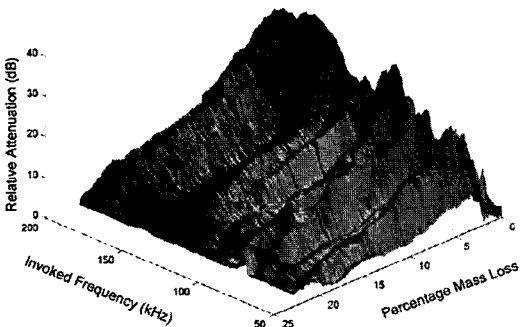


그림 17 균일하게 부식된 철근에서의 L(0,1) 모드의 부식 정도에 따른 dB 감쇠율

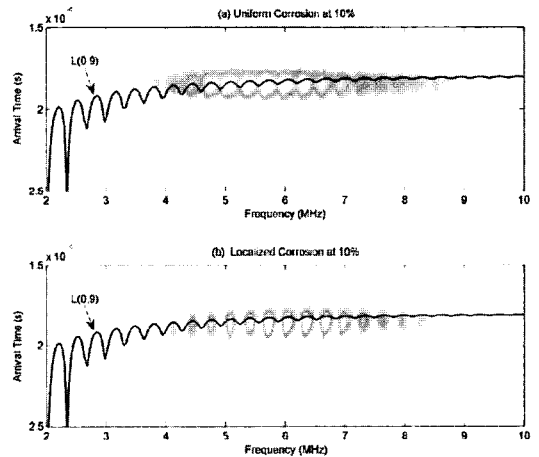


그림 18 균일 부식된 철근과 국부 부식된 철근에서의 L(0,9) 모드의 거동

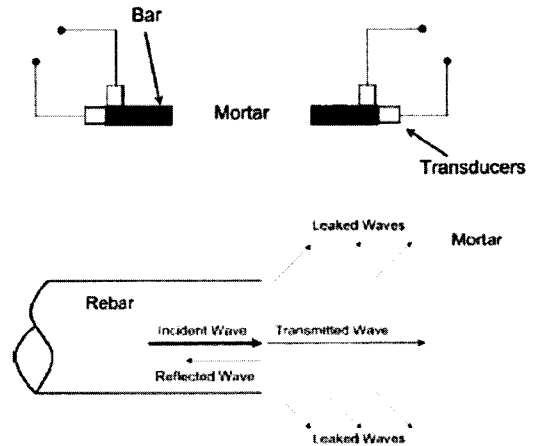


그림 19 철근 부식 모니터링 실험 구성과 실린더 유도파의 경계면에서의 거동

특집 : 초음파 기술과 응용

로서 유도 초음파 기술에 관한 연구가 최근에 많은 관심을 받고 있다.

### 3.3 유도 초음파를 이용한 철근의 부식 모니터링에 관한 연구

철근의 부식과 같은 손상을 모니터링 하기 위해 사용하는 유도 초음파는, 철근의 기하학적 특성상 실린더 유도파(cylindrical guided waves)가 주로 사용된다. 실린더 유도파는 단면의 모양이 원형 또는 원통형인 경우에 많이 사용되며, 전파 과정에서 에너지의 손실이 크지 않기 때문에 매우 먼 거리까지 전파되는 등의 장점이 있어, 송유관과 같은 파이프라인의 손상 탐지 등에 적용되어 왔다. 그러나, 송유관과 같이 외부 경계면이 대기에 노출되어 있는 경우와는 달리 철근의 경우는 콘크리트 내부에 매립되어 있기 때문에, 철근에서의 실린더 유도파의 거동은 외부 경계면이 대기에 노출되어 있는 구조물과는 다른 특성을 가지게 된다. 일례를 들자면 그림 13에서 나타낸 바와 같이 파동 에너지의 일부가 콘크리트로 누출되어 파동이 빠르게 감쇠되는 현상 등이 있다. 이에 따라, 초기 단계의 연구에서는 실린더 유도파의 모드(mode) 분석을 통하여, 어떠한 모드가 철

근에서 가장 효율적으로 전파되는지를 알아 내 고자 하였으며, 이를 위하여 그림 14와 같이 다층 실린더 구조체(multi-layered cylindrical structure)에서의 파동 전파 특성 분석과 같은 연구를 주로 수행하였다<sup>9)</sup>.

한편, 연구자들은 철근에서의 파동 전파 특성에 관한 해석적/실험적 연구를 통하여 얻어진 유효 모드를 이용하여, 이러한 모드들이 철근의 부식 정도에 따라서 어떠한 특성을 나타내는지 알아

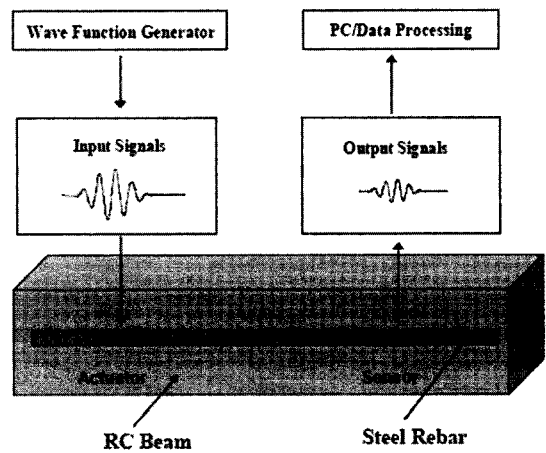


그림 20 패치형 압전체를 이용한 매립형 모니터링 시스템<sup>(11)</sup>

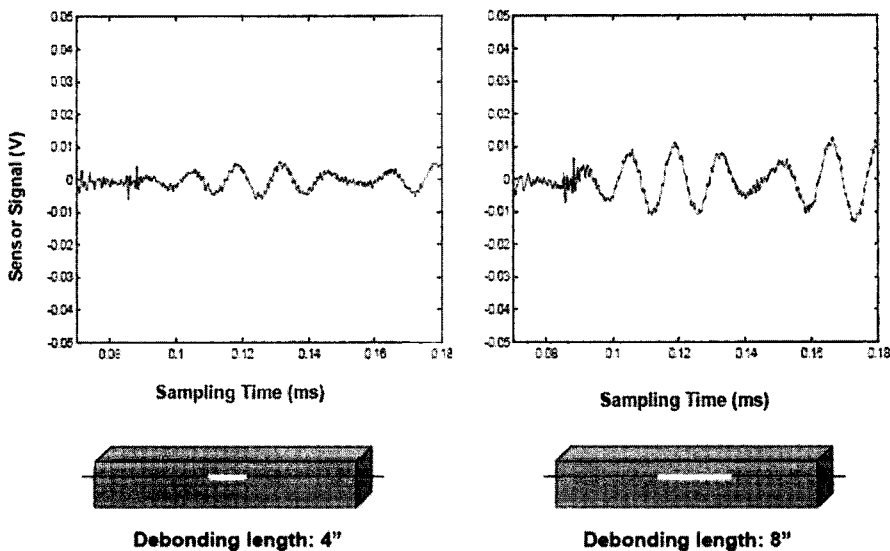


그림 21 콘크리트의 바리 결함 탐지 실험 결과<sup>(11)</sup>



내고자 하였으며 그림 15와 같이 가속 부식 테스트(accelerated corrosion testing) 기법을 이용하여 철근을 빠르게 부식시킨 후에 실험적인 연구를 수행하였다<sup>(10)</sup>. 또한, 부식의 형태에 따라(그림 16) 실린더 유도파의 거동이 어떻게 달라지며, 이로 부터 각각의 부식 형태에 유효한 실린더 유도파의 모드는 어떤 것인지를 알아내어, 이를 부식 모니터링에 적용할 수 있는지를 알아보고자 하였다<sup>(10)</sup>. 그림 17은 가속 부식 테스트를 이용하여 철근 전체를 균일하게 부식시킨 후에 L(0,1) 모드를 이용하여 dB 감쇠율을 측정 한 결과를 나타내며, 그림 18은 전체가 균일하게 부식된 철근과 국부적으로 부식된 철근에서의 L(0,9) 모드의 거동을 실험한 결과이다<sup>(10)</sup>.

마지막으로, 실린더 유도파를 이용한 철근 부식 모니터링에 관한 연구의 대부분은 그림 19에 나타낸 바와 같이 파동의 도입과 측정을 위하여 철근 부위를 노출 시킨 후에 실험을 수행하였다. 이렇게 실험을 수행한 이유는, 철근에 측정 센서를 부착한 후에 콘크리트를 타설하게 되면 추후의 실험에서 센서의 재사용이 불가능할 뿐만 아니라, 센서 위치를 교정할 수 없기 때문에 다양한 모드의 생성이 제한되기 때문이었다. 그러나, 이러한 형태의 구성은 결국 현장에서의 측정을 위해서는 또 다시 철근을 노출시켜야 하는 문제점을 내포하고 있을 뿐만 아니라, 설령 센서를 콘크리트와 같이 매립하였다고 하더라도, 노출된 철근에서 생성된 실린더 유도파는 그림 19에 보여진 바와 같이 경계면에서 반사가 발생하기 때문에, 매립된 센서에 의해서 생성된 파동과는 다른 거동을 보일 가능성이 존재하게 된다. 이러한 문제점을 인식한 미국 스탠포드 대학교의 연구팀은 가격이 매우 저렴한 패치형 압전세라믹을(PZT patch) 철근에 부착하고, 콘크리트의 시공시에 함께 매립하여 철근의 노출 없이 모니터링을 수행할 수 있는 매립형 모니터링 시스템을(embedded monitoring system) 그림 20과 같이 제안하였다<sup>(11)</sup>. 이 연구팀은 철근의 부식에 의한 콘크리트 박리 결합 탐지에 제안된 시스템을 적용

하고자 시도하였으며(그림 21), 현재는 이를 무선 시스템과 결합하여 원격 모니터링 시스템으로 확장하는 연구를 수행하고 있다.

#### 4. 맺음말

최근 미국 토목공학회(American Society of Civil Engineers)에서 보고된 자료에 의하면 미국 내의 교량, 댐 등과 같은 사회 간접 자본 시설물의 전체 평균이 'D+' 등급으로 상당수가 보수/보강이 필요한 상태에 있으며 이를 위하여 직접 비용만 1조 6천억 불의 금액이 필요할 것으로 예상하였다<sup>(12)</sup>. 한편, 우리나라도 급격한 산업 발전 기간 동안 건설된 구조물 중, 특히 60년대와 70년대에 건설된 구조물의 상당수는 보수/보강이 필요한 주기에 있다고 보고되었을 뿐만 아니라<sup>(13)</sup>, 지난 1994년의 성수대교 붕괴 사고와 1995년의 삼풍백화점 붕괴 사고 이후, 구조물의 안전성과 유지/관리에 대한 사회적 관심이 매우 높아져 이를 반영하고자 '시설물 안전관리에 관한 특별법'을 제정하여 시행하고 있는 상황이다.

구조물의 유지/관리를 통하여 안전성과 사용성을 담보하기 위해서는, 무엇보다도 구조물의 건전성을 모니터링 하여 구조물이 현재 어떠한 상태에 있는지를 평가하는 것이 매우 중요하다. 특히, 건전성 평가에 있어서 손상이나 열화의 유무 및 위치 판단이 육안으로 불가능한 경우나 검사자의 접근이 불가능한 위치에 있는 경우, 비파괴검사 기술은 더욱 중요한 역할을 차지한다. 이 글에서는 콘크리트 구조물의 건전성 모니터링을 위한 비파괴검사에 관한 많은 노력들 중에, 특히 초음파를 이용한 콘크리트의 손상 탐지와 철근 부식 모니터링에 관한 최근 연구 동향을 중점적으로 살펴보았다. 비록 토목 분야에서의 초음파 기반 비파괴검사 기술 중에서도 매우 국한된 내용만을 주제로 다루었지만, 앞서 언급한 내용 이외에도 초음파를 이용한 콘크리트 비파괴검사는 콘크리트 균열 깊이 측정, 콘크리트 강도 추정과 같은 분야에서도 이용되고 있으며, 또한 초음파 기술은 강구조물의

손상 탐지 및 모니터링 등에도 적용이 되는 등, 토목 분야에서도 매우 다양하게 응용되고 있다. 구조물 모니터링과 유지/관리에 대한 연구 노력이 고조되고 있는 현재의 상황에서 초음파를 이용한 비파괴검사 기술이 토목 분야에서 차지하는 중요성은 향후 더욱 커질 것으로 예상되며, 따라서 앞으로 연구자들의 높은 관심을 바탕으로 이 분야에 큰 발전이 있길 희망한다. ▣

### 참고문헌

- [1] Popovics, J. S. and Wiggenhauser, H., 2002, "Non-contact Laser Vibrometer Wave Sensing on Concrete", in 15th ASCE Engineering Mechanics Conference, Columbia University, New York.
- [2] Schubert, F., Peiffer, A., Koehler, B. and Sanderson, T., 1998, "The Elastodynamic Finite Integration Technique for Waves in Cylindrical Geometries", Journal of Acoustical Society of America, Vol. 104, pp. 2604~2614.
- [3] Zhu, J., Popovics, J. S. and Schubert, F., 2004, "Leaky Rayleigh and Scholte Waves at the Fluid-solid Interface Subjected to Transient Point Loading", Journal of Acoustical Society of America, Vol. 116, pp. 2101-2110.
- [4] Zhu, J. and Popovics, J. S., 2001, "Non-contact Detection of Surface Waves in Concrete Using an Air-coupled Sensor", in Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Edited by D.O. Thompson and D.E. Chimenti, Vol. 20B, pp. 1261~1268.
- [5] Sansalone, M. and Streett, W. B., 1997, IMPACT-ECHO: Nondestructive Testing of Concrete and Masonry, Bullbrier Press.
- [6] Zhu, J. and Popovics, J. S., 2008, "Non-contact NDT of Concrete Structures Using Air-coupled Sensors, NSEL Report Series(Report No. NSEL-010), Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, USA.
- [7] Ryden, N., Low, M. J. S., Cawley, P. and Park, C. B., 2006, "Multichannel Microphone Array for Non-contact NDT of Concrete Slabs", in 6th International Symposium on NDT in Civil Engineering, St. Louis, MO.
- [8] Zhu, J. and Popovics, J. S., 2005, "Non-contact Imaging for Surface-opening Cracks in Concrete with Air-coupled Sensors", Materials and Structures, Vol. 38, pp. 801~806.
- [9] Beard, M., 2002, "Guided Wave Inspection of Embedded Cylindrical Structures", Ph.D. Dissertation, Mechanical Engineering Department, Imperial College, London, UK.
- [10] Ervin, B. L., 2007, "Monitoring Corrosion of Rebar Embedded in Mortar Using Guided Ultrasonic Waves", Ph.D. Dissertation, Department of Systems and Entrepreneurial Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, USA.
- [11] Wu, F. and Chang, F. K., 2006, "Debond Detection Using Embedded Piezoelectric Elements in Reinforced Concrete Structures - Part I: Experiment", Structural Health Monitoring, Vol. 5, pp. 5~15.
- [12] ASCE, 2003, "2003 Progress report for America's Infrastructure", <http://www.asce.org>
- [13] 한국건설기술연구원, 2004, "노후 교량의 성능향상 기술 개발", 건기연 연구보고서 (2004-060).