

# 콘크리트 품질관련 표준 및 관련 비파괴 시험법 기술동향

-콘크리트 품질관리를 위한 초음파 탐사방법의 활용 및 전망-

An Introduction to Korea Standards and Relevant  
Nondestructive Testing for Concrete

- Utilization and Prospect of Ultrasonic Method for Concrete Quality Control -

오테근 Tae-Keun Oh  
인천대학교 안전공학과 교수

이병재 Byung-Jae Lee  
(주)제이엔티아이엔씨 선임연구원

## 1. 머리말

콘크리트의 탄성계수, 밀도, 푸아송비, 강도, 응결시간 등 콘크리트 물성값의 정확한 측정은 품질관리 및 품질보증 측면에서 중요하다. 대부분의 콘크리트 물성값 측정은 실험실 내에서 표준공시체에 대해서 이루어지고 있으나 현장에서의 주변 환경, 양생 조건, 재령 등을 고려한 콘크리트 물성값의 정확한 예측은 어려운 실정이다. 이를 해결하기 위하여 다양한 위치에서의 현장 코어 채취를 이용해야 하지만, 이는 구조물의 손상을 줄 수 있고 비용과 인력이 많이 투입되어 합리적인 선택이 될 수 없다. 따라서 현장과 실험실에서의 측정값의 차이를 최소화하기 위해 적용될 수 있는 다양한 비파괴 방법 중 초음파 탐사법은 가장 효과적인 방법으로 알려져 있다. 초음파 탐사법은 철근콘크리트 또는 프리스트레스 콘크리트의 물성값뿐만 아니라 다양한 위치와 형태를 가지는 내부 공동, 균열, 박리 등을 파악하는 데 많이 이용되고 있다. 초음파의 종류에는 압축파(P파, Pressure Wave), 전단파(S파, Shear Wave), 표면파(R파, Rayleigh Wave) 등이 있으며 일반적으로 초음파 속도 또는 반사파를 이용하여 콘크리트의 물성값, 치수, 균열 등을 파악하는데 적용되고 있다. 국내에서는 초음파 펄스 속도를 이용한 강도 예측이 KS F 2731에 언급되어 있으며 미국에서는 ACI 228.2R-98 Recommendation에서 다양한 초음파 탐사법에 관하여 기술하고 있다. 이 글에서는 콘크리트 품질관리를 위한 초음파 탐사방법의 활용 및 전망을 소개하고자 한다.

표 1. ACI 228.2R-98에 의한 초음파 탐사법의 종류

장, 절	방법과 원리	적용
2.2.1	Ultrasonic Pulse Velocity-주어진 경로에서의 초음파 펄스의 이동시간을 측정	균열, 박리, 박락, 침식 등의 열화를 측정
2.2.2	Ultrasonic Echo - 내부 균열 또는 반대 면에서의 반사파를 측정하여 균열 탐지 및 치수 측정. 초음파 속도가 알려졌을 때 주파수 분석을 통해 이동 거리를 확인할 수 있음.	주어진 펄스 속도를 통해 강도, 탄성계수 등의 콘크리트 상태를 평가함
2.2.4	Spectral Analysis of Surface Wave-표면에서의 가진을 통해 생성된 표면파가 두 개의 수신자에 측정됨. 파장의 함수에 대한 표면파 속도를 결정하여 내부의 탄성계수를 측정	포장층에서의 탄성계수의 분포, 또는 열화된 콘크리트의 깊이를 측정
2.3.1	Sonic-Echo-표면에서의 충격하중을 통한 반대 면에서의 반사파를 측정함. 시간 영역에서의 이동 시간을 계산함	기초에서의 깊이, 균열을 측정함

## 2. 초음파 탐사방법의 활용

### 2.1 초음파의 종류

일반적으로 초음파 탐사방법을 이용한 콘크리트의 물성 값 및 내부상태평가는 초음파 속도, 주파수 성분, 감쇠비, 반사파의 도달시간 등을 활용하지만 가장 널리 쓰이는 것은 초음파 펄스 속도이다. 많은 실험을 통해서 검증된 콘크리트 초음파 속도 대비 시험 대상체에 대한 초음파 속도의 차이를 통하여 콘크리트 물성값을 판단하며 초음파의 3가지 종류 중 생성하고 가진하기 쉬운 P파가 일반적으로 가장 많이 쓰이고 있다. 하지만 P파의 성분은 S파, R파에 비하여 에너지 진폭이 작으므로 S파, R파의 적용이 확대되고 있다(그림 1). 게다가 P파는 콘크리트 내 수분에 영향을 받기 때문에 그 오차가 S파, R파에 비하여 다소 큰 편이다.

한편, R파에 대해서는 표면에서 내부로 갈수록 급격히 에너지가 감소하는 단점이 있어 최근 S파를 이용한 초음파 탐사방법의 적용이 확대되고 있다. 초음파 탐사방법은 다양한 시험 위치에서의 통계학적 데이터 분포를 기반을 통하여 물성값 측정 및 분석을 하며 콘크리트의 물성값은 콘크리트를 탄성체로 가정하였을 때 탄성계수 밀도, 푸아송비와 초음파 속도의 관계를 이용한다(식 (1), (2), (3)).

$$V_P = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (1)$$

$$V_S = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{2\rho(1+\nu)}} \quad (2)$$

$$V_R = \frac{0.87 + 1.12\nu}{1 + \nu} \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2(1 + \nu)}} \quad (3)$$

여기서,  $V_P$ ,  $V_S$ ,  $V_R$ 는 P파, S파, R파의 속도이며  $E$ ,  $\rho$ ,  $\nu$ 는 동탄성계수, 밀도, 푸아송비이다. 일반적으로 건전한 보통 콘크리트(21~27MPa)에 대한 P파 속도는 3,500 m/s ~ 4,500 m/s, S파 속도는 2,200 m/s ~ 2,800 m/s, R파 속도는 1,800 ~ 2,500 m/s의 범위를 갖는다.

### 2.2 초음파속도 측정원리

콘크리트 품질은 표면과 내부에 차이가 있지만 보통 콘크리트를 균질하다고 가정하고 있다. 초음파의 속도를 측정하는 방법은 <그림 2>에서와 같이 펄스-에코(Pulse-

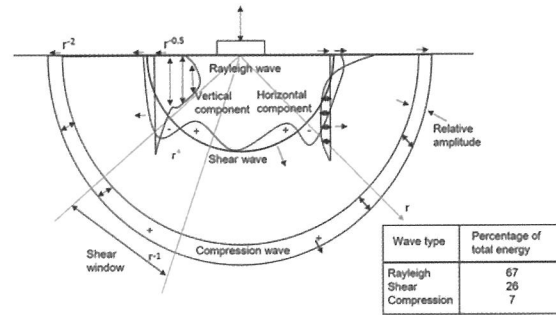


그림 1. 푸아송비  $\nu=0.25$ 인 탄성체에서의 충격하중에 의한 P파, S파, R파의 변위와 에너지 분포

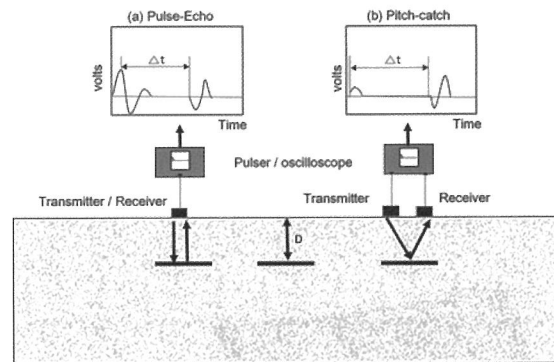


그림 2. 펄스-에코 반사법과 피치-캐치 투과법의 개요

Echo) 반사법과 피치-캐치(Pitch-catch) 투과법으로 나눌 수 있으며 펄스-에코 방법은 발신자(Transmitter)와 수신자(Receiver)를 한 위치에 두어 내부에서의 반사파를 이용한 방법이며 피치-캐치 방법은 발신자에서 발생한 초음파를 다른 면(직접법) 또는 같은 면에서(간접법) 수신자를 이용한 방법이다. 보통 50~200kHz의 주파수 성분의 짧은 지속시간을 갖는 초음파가 생성되어 적용된다. 에너지의 진폭이 충분히 크면 펄스-에코 방법을 쓰지만, P파를 사용할 경우 콘크리트에서 진폭의 감쇠가 크므로 주로 발신자와 수신자를 따로 두는 피치-캐치 투과법을 주로 쓴다.

초음파를 이용해 콘크리트 강도나 열화 정도를 평가하는 경우, 대부분 방법은 <그림 3>과 같이 피치-캐치 투과법을 이용하여 측정 거리(두께)에 대해 평균적인 초음

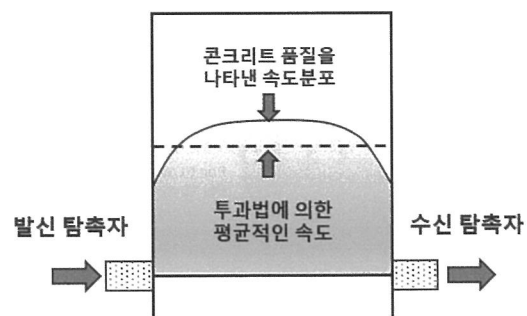


그림 3. 피치-캐치 투과법에 의한 음속분포와 평균속도

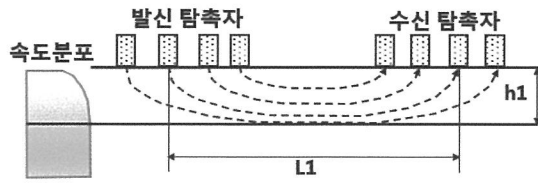


그림 4. 피치-캐치 간접법에 의한 최속 전파 경로



그림 5. S파를 활용한 상용 장비

파 속도를 평가하고 있다. 그런데 콘크리트 품질은 표층과 내부에서는 다르고 표층은 내부보다 못하다. 이로 인해 콘크리트 내부의 초음파 속도는 <그림 4>의 곡선과 같이 표층의 음속이 느리고 내부로 감에 따라 빨라져서 어느 거리부터는 거의

일정하게 된다. 그림과 같이 동일 평면에 설치한 탐촉자 간 초음파의 최속 전파경로는 콘크리트 내부를 굽어져 휘어 전파된다. 이 같은 경우 전파특성으로부터 콘크리트 내부의 음속분포를 추정하고, 강도와 치밀성을 평

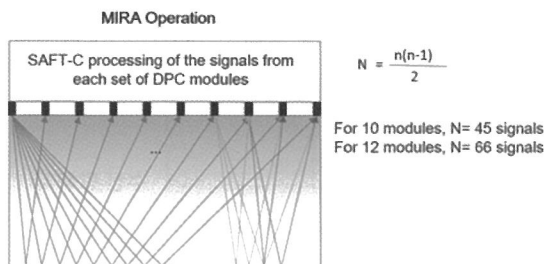


그림 6. 수신탐촉자의 다중배열을 통한 신호 측정

가한다.

한편 2000년대 초기부터 P파를 대신하여 진행파의 감쇠 또는 에너지 소산 손실을 최소화하는 S파를 이용한 콘크리트 구조물의 비파괴 진단이 활성화되어 가고 있다. 특히 미국 및 유럽에서는 S파를 이용한 대표적인 비파괴 상용화 장비인 Mira와 Eyecon를 이용하여 콘크리트의 치수나 내부의 결함을 찾는 연구가 활발히 진행 중이다(그림 5). 이들 기기의 기본적인 원리는 기존의 P파를 이용한 초음파 조사방법과 유사하게 20kHz 이상의 주파수 영역 대를 사용하여 시험체에 S파를 보내고 내부 결함이나 기하학적 경계면에서의 반사파를 측정하는 단일 면에서의 송·수신을 통한 전통적인 초음파 펄스-에코 반사법이다. Mira와 Eyecon은 초음파 신호의 효율적인 전달을 위한 접촉 매질(couplant)이 필요하지 않으며 시험체 표면의 상태에 상관없이 스프링 로드 타입으로(spring-loaded design) 현장에서도 실용적으로 사용할 수 있게 구성되어 있다. 또한, 실험 데이터 측정 뒤 후처리 과정으로 집속 신호 합성 기법(Synthetic aperture focusing technique, SAFT) 알고리즘을 이용하여 최종적으로 2D 또는 3D의 결과를 제공하여 기술자들에게 구조물의 결함이나 상태를 정확히 판단할 수 있는 근거를 제시해 주고 있다(그림 6).

### 2.3 콘크리트 치밀성 및 강도

앞 절에서 소개한 방법에 따라 <그림 7>과 같은 초음파 속도 분포가 얻어진다. 표층의 초음파 속도가 변화되고 있는 부분은 콘크리트 품질(치밀성)의 변화를 나타내고 있는 것으로 판단된다. 압축강도는 <그림 7(a)>의 일정하게 된 부분의 초음파 속도(내부일정음속)를 이용해 <그림 7(b)>의 압축강도와 초음파 속도의 관계로부터 내부일정음속에 일치하는 음속인 때의 강도를 구함으로써 추정한다. <그림 7(b)>의 강도와 초음파 속도의 관계는 콘크리트의 시험배합을 통한 표준공시체의 압축강도와 압축강도 시험 전의 측방향 초음파 투과법에 따라서 압축강

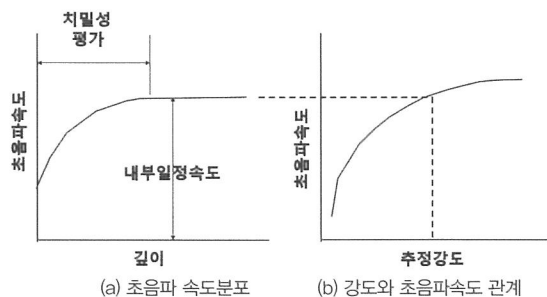


그림 7. 강도, 표층의 치밀성 추정방법

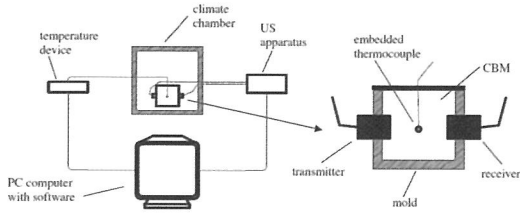
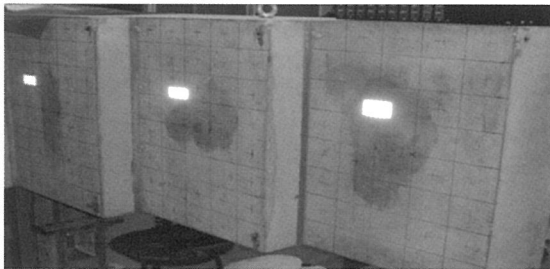


그림 8. 콘크리트 응결시간 측정을 위한 초음파 투과법 시험장비

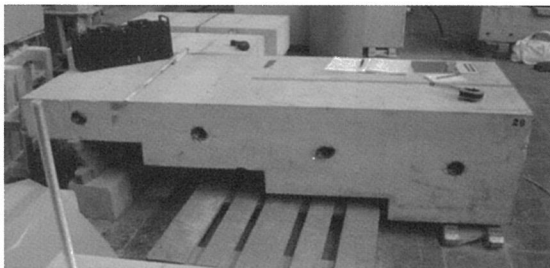
도와 초음파 속도와의 관계를 구해야 한다. 강도를 추정하기 위해서는 콘크리트 내부 일정 음속을 이용해야 하며 이는 콘크리트 내부 함수상태는 표층은 건조 영향을 받지만, 수십 mm 내부는 거의 봉함(封函)과 같은 상태여서 함수율은 거의 일정하기 때문이다. 이와 같은 이유에서 내부 음속을 이용함으로써 표층의 함수율 차이에 따른 음속 변화를 고려할 필요가 없어지고 일정 조건으로 강도를 추정할 수 있다.

## 2.4 콘크리트 응결시간

시멘트의 응결시간 측정 방법은 초음파 투과법(Ultrasound Wave Transmission, USWT), 초음파 반사법(Ultrasound Wave Reflection, USWR), 2가지로 구분되며 관입 시험에 의한 방법은 칼로리미터에 의한 방법 등 표준시험법에 비해 시험자의 기술과 정확도에 영향을 적게 받으며 시험 결과의 해석이 객관적인 장점을 지닌다. 이 외에도 핵자기 공명법, 전기적 방법, 초음파법, 음향방출법, 성숙도법 등의 다양한 비파괴 시험법들이 개발되고 있으나 가장 시험하기 쉽고 정확한 방법이 초음파를 이



(a) 3개의 계단형 플레이트



(b) 내부에 덕트를 포함한 4개의 계단형 플레이트

그림 9. 계단형 플레이트 시험체

용한 방법이다.

초음파 투과법의 기본 원리는 시멘트 시편을 통과하는 초음파(압축파) 펄스의 신호를 분석하여 초음파 속도를 계산하는 데 있다. 즉, 시편의 한쪽에서는 송신기에 의해 초음파 신호를 발생하고 다른 쪽에서는 그 신호를 받아들이며 신호의 시간 이력을 기록하고 분석하여 초음파 속도를 계산하는 것이다. 시멘트가 수화반응을 일으키는 동안 초음파 속도는 시간에 따라 변하며 재료 결정 구조의 변화를 모니터링 할 수 있다. 일반적인 초음파 투과법의 시험장비 구성은 <그림 1>과 같다.

한편 초음파 반사법의 기본 원리는 시편 접촉면에서의 S파의 반사를 측정하는 것이며 시멘트 수화반응으로 고상이 형성됨에 따라 재료의 음향임피던스 및 초음파 속도가 증가하게 되며 이는 전단파의 반사계수의 증가를 일으킨다.

## 2.5 콘크리트 내부 공동 및 균열 탐지

콘크리트 내부 공동 및 균열탐지를 위해서는 앞에서 소개했듯이 P파보다는 S파가 주로 이용되고 있으며 대표적인 상용 장비인 Mira와 Eyecon가 콘크리트 구조물의 상태평가를 위해 사용되고 있다. 한 가지 사례로 <그림 9(a), (b)>에서와 같이 3개의 계단형 플레이트와 속이 빈 내부 덕트를 지닌 4개의 계단형 플레이트에 대한 Mira와 Eyecon의 적용결과를 소개하도록 하겠다. 각 계단형 플레이트 구조물은 대략 0.5m×0.5m의 면적을 가지고 있으며 각 계단형 플레이트는 단차가 100 mm이다. 각 플레이트는 Mira와 Eyecon을 이용하여 플레이트 평면 위에서 50 mm 간격으로 S파를 측정하였다.

우선, <그림 10>은 3개의 계단형 플레이트에서 Mira를 이용해 측정된 데이터를 이용해 구현된 이미지를 4개의 다른 뷰로 보여주고 있다. 왼쪽, 오른쪽 상단 이미지는 각각 평면뷰(C-scan) 및 횡방향 단면뷰(B-scan)를 보여주고, 왼쪽, 오른쪽 하단은 종방향 단면뷰(D-scan) 및 3개

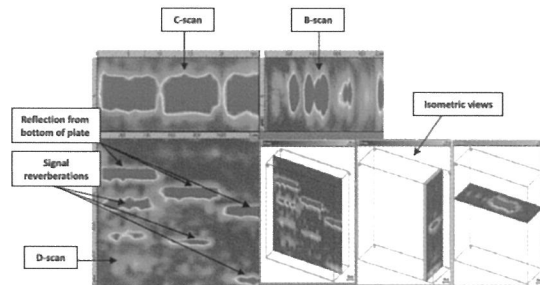


그림 10. 3개의 계단형 플레이트에 대한 Mira 시험결과.

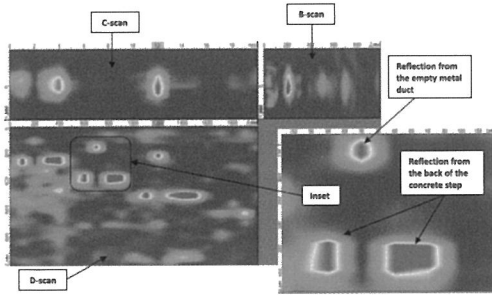


그림 11. 속이 빈 내부 덕트를 지닌 4개의 계단형 플레이트에 대한 Mira 시험결과

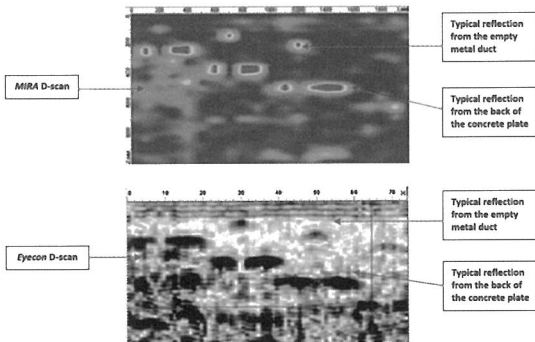


그림 12. 내부 덕트를 지닌 4개의 계단형 플레이트에 대한 Mira와 Eyecon 시험결과와의 비교(D-scan)

의 수직축을 기점으로 하는 3차원 등방부를 나타내고 있다. 모든 뷰에서 밝은 적색은 플레이트의 경계면로부터의 반사파를 보여주고 있으며 B-scan 및 C-scan에서는 외측 경계면으로부터 반사파에 연이어서 2배, 3배의 추가 반향들이 보인다.

내부에 속인 빈 금속 덕트를 포함한 4개의 계단형 플레이트로부터 수행된 시험 결과는 계단의 외측 경계면과 속인 빈 덕트로부터 반사파들을 <그림 11>처럼 분명하게 보여주고 있다.

Eyecon도 Mira 시스템으로부터의 결과와 비교하기 위해 적용되었으며 <그림 12>는 4개의 계단형 플레이트로부터 얻어진 D-scan의 상호비교를 보여주고 있다. 그림에서 보듯 두 개의 시스템 모두 각 계단의 외측 경계면과 덕트에서의 반사파를 확인할 수 있었다.

### 3. 맺음말

이 글에서는 다양한 비파괴 방법 중 초음파 탐사법을 이용한 콘크리트 물성값 및 내부 상태파악을 위한 적용 기술 및 사례를 소개하였다. 초음파 탐지기술의 개발 및 디지털 이미징 프로세스의 진보를 통해 현장에서의 콘크리트 탄성계수, 강도, 응결시간 등의 물성값 파악 및 대상체의 내부적 결함 및 상태에 대한 보다 정확한 예측이 가

능해지고 있다. 물론 콘크리트 강도 추정을 위한 비파괴 검사 방법은 이론적으로도 많은 문제점과 한계를 내포하고 있지만 새로운 탐지기술의 개발 및 해석 기술의 발전을 통하여 더욱 신뢰성이 향상된 비파괴검사기술이 되어 가고 있음은 분명한 사실이다. [4]

담당 편집위원 : 오태근(인천대학교) tkoh@incheon.ac.kr  
이병재(주)제이엔티아이엔씨 lbjae80@hanmail.net

### 참고문헌

1. 한국표준협회, "한국표준정보망 디지털라이브러리" <http://www.ks.or.kr>
2. ACI Committee 228, Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures, 2013.
3. 일본콘크리트공학협회, 콘크리트공학지, Vol. 44, No. 5, 2006.
4. De La Haza, A.O., Samokrutov, A.A., Samokrutov, P.A., "Assessment of concrete structures using Mira and Eyecon ultrasonic shear wave devices and the SAFT-C image reconstruction technique", Construction and Building Materials, Vol. 38, 2013
5. Trtnik, C. & Gams, M., "Recent advances of ultrasonic testing of cement based materials at early ages," Ultrasonics, Vol. 54, 2014.



**오태근 교수**는 University of Illinois at Urbana-Champaign 토목공학과에서 콘크리트 구조물에 대해서 초음파를 활용한 균열탐지 및 손상파악에 대한 연구로 2012년 박사 학위를 취득하였다. 현재 인천대학교 안전공학과에 재직하고 있으며, 관심분야는 토목 및 건축 구조물에 있어서 다양한 비파괴 방법을 이용한 구조물 건전성 모니터링이다.  
tkoh@inu.ac.kr



**이병재 책임연구원**은 충남대학교 토목공학과에서 복합슬래그를 활용한 연안해역 복원용 친환경콘크리트의 특성에 관한 연구로 2011년 박사학위와 토목품질시험기술사를 취득하였다. 현재 (주)제이엔티아이엔씨 기술연구소에 재직하고 있으며, 관심분야는 건설재료에 있어서 산업부산물의 활용기술, 친환경 콘크리트 및 포장 기술 분야이다.  
lbjae80@hanmail.net