

탄성파를 이용한 콘크리트 비파괴시험 현황

김영환*, 이세경*, 김호철**
*한국표준과학연구원 비파괴평가그룹
**한국과학기술원 물리학과

1. 서론

콘크리트는 다른 재료에 비하여 내구성 및 내열성이 우수하고 임의의 형상을 지닌 구조물을 현장에서 용이하게 시공할 수가 있으므로 일반 건축물은 물론 교량, 댐과 같은 산업용 구조물 및 원자력 발전 설비, 군사시설과 같은 특수 구조물에도 널리 사용되고 있다. 그러나 콘크리트 구조물은 다른 구조물에 비하여 자체 하중이 크고 균열이 생기기 쉬워서 붕괴의 우려성을 내포하고 있다. 콘크리트의 균열은 여러가지 원인에 의하여 콘크리트의 경화를 전후로 하여 나타나는데 균열이 표면에서 관측할 수 있을 때면 이미 콘크리트 내부조직에는 미세 균열로 인하여 조직이 상당히 손상되어 있다. 콘크리트내에 균열이 생기면 이 콘크리트의 강도는 기대치에 미치지 못할 뿐만 아니라, 주위의 온습도의 변화, 소금물과 같은 화학성분의 침투로 균열이 점차 성장하고 부식되어 콘크리트의 안전도에 큰 문제를 일으키게 된다.

이들 콘크리트 구조물의 붕괴는 엄청난 재산 피해는 물론이고, 인명 피해도 야기시킬 수 있어서 이들의 안전도 관리는 매우 중요하다. 콘크리트는 다른 재료와 달리 구성 성분, 양생 조건 등 콘크리트의 품질을 결정하는 요소가 많으므로 다변성 재질이다. 따라서 이들의 품질은 몇가지 시험으로 간단히 보증할 수 없게 되고 여러 시험법을 보완적으로 사용하여야 한다. 비파괴 시험은 콘크리트 구조물에 손상을 주지 않고 안전도를 진단하는 중요한 시험

법의 한가지이다.

콘크리트의 강도는 시간이 지남에 따라 변하고 이 변화는 주위의 기후 조건, 사용 환경, 콘크리트의 배합 조건 등에 따라 달라진다. 특히 화재, 지진 등의 외부 충격을 받았을 경우는 콘크리트의 강도는 현격히 떨어지게 되고 이러한 경우는 안전도 진단을 통하여 재사용 여부를 결정해야 한다. 따라서 콘크리트 등의 강도를 측정하고자 많은 방법이 고안되었고, 그 중에서 가장 신빙성이 있는 강도 측정은 구조물로부터 채취된 코어에 대한 압축 강도 시험법[1]이다. 이 방법은 구조물에 손상을 주므로 대개의 경우는 타설시 제작된 공시체에 대한 압축 강도 시험으로 수행되며, 기존의 구조물에 대해서는 가능한 적은 갯수의 코어를 채취하는 것이 바람직하다.

이러한 단점을 보완하기 위해서 압입법[2], 관입법[3], 인발법[4], 반발경도법[5], 공진법[6], 초음파 속도법[7], 등의 방법이 고안되었다. 이 방법들은 각각의 장단점을 지니고 있는데 서로 보완적으로 사용되고 있다. 본문에서는 주로 탄성파를 이용한 콘크리트 비파괴 시험법으로 공진법, 초음파 속도법 및 충격-공진법[8]에 대한 기술 현황을 비교 검토하였다.

공진법은 현재 ASTM에 규격화되어 있는 방법으로 유한한 크기의 공시체의 고유진동수를 측정하여 시험체의 탄성계수를 계산하는 방법이다. 이 방법은 주로 탄성계수로 부터 압축강도의 추정 및 내구성 시험 등에 활용된다. 초음파 속도법은 현재 BS에 규격화되어 있는 방법으로 초음파의 속도를 측정하여 시험체의 탄성계수를 계산하고 이로부터 압축강

도를 추정하는 방법으로 내구성 시험, 균열 깊이 측정 등에 활용되고 있다. 또한 충격 공진법은 최근에 연구되고 있는 기술로 주로 콘크리트 내부의 공동 탐사, 두께 측정, 매립된 철구조물 탐사 등 결함 탐지에 활용되는 기술이다.

2. 이론적 고찰

무한한 크기의 매질내에서의 탄성파의 속도는 매질의 밀도와 탄성계수에 의해 결정되는데 종파의 속도 v_p 는

$$v_p = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}} \dots\dots\dots(1)$$

와 같이 주어진다. 여기서 ρ 는 매질의 밀도, E 는 탄성계수, μ 는 Poisson 비이다. 또한 횡파의 속도 v_s 는

$$v_s = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\mu)}} \dots\dots\dots(2)$$

와 같이 주어진다. 식(1) 및 (2)로 부터 v_p 와 v_s 를 측정하면 시험체의 탄성계수와 Poisson 비를 구할 수가 있다.

매질이 일정한 두께의 무한한 평판이라면 매질 내부의 탄성파는 양쪽 경계면에서 반사하여 매질 내를 왕복하게 되고 이 탄성파들은 서로 간섭을 일으키게 된다. 탄성파가 정상파를 이룰 때에 탄성파는 오랫동안 매질 내에 존재할 수 있으며 이를 공진현상이라 한다. 매질의 두께에 따라서 공진이 일어나는 탄성파의 파장 λ 는

$$\lambda = \frac{L}{2n}, \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \dots\dots\dots(3)$$

과 같이 주어진다. 여기서 L 은 시험편의 크기이다. 일반적으로 $n=1$ 일 경우 가장 큰 공진이 일어나며 이를 기본 모드라 한다. 파장은 주파수에 의해 $\lambda = v/f$ 이므로 기본 모드일 때의 조건은 식(3)으로부터

$$fL = 2v \dots\dots\dots(4)$$

와 같이 표시된다. 따라서 시험체의 탄성계수는 초음파의 속도 또는 공진 주파수로 부터 얻을 수 있다. 또한 속도는 거리에 대한 초음파 도달시간으로부터 주어지므로 초음파의 속도를 알고 있을 경우는 거리의 측정이 가능하고 식(4)의 경우에도 시험체의 크기를 측정할 수 있으므로 탄성파를 이용하여 결함탐지가 가능하다.

3. 탄성파를 사용한 콘크리트 비파괴시험

3.1. 공진법

공진법은 앞에서 고찰한 바와 같이, 시험체의 공진 주파수가 시험체의 크기 및 형상과 시험체의 탄성계수에 의해 결정되는 성질을 이용하여, 시험체의 공진 주파수를 측정하고 그 결과로 부터 시험체의 탄성계수를 계산하는 방법이다. 이 방법을 위하여 Fig. 1과 같은 장치를 사용하게 되는데 이는 외부로부터 특정한 주파수의 진동을 시험체에 가하여 주고 이때의 시험체의 진동의 크기를 측정한다. 구동 주파수를 바꾸어 주면서 시험체의 진동의 진폭이 최대가 되는 때로부터 공진 주파수를 결정하고 이로부터 탄성계수를 계산한다.

이때 구동 장치와 진동 검출기의 위치에 따라서

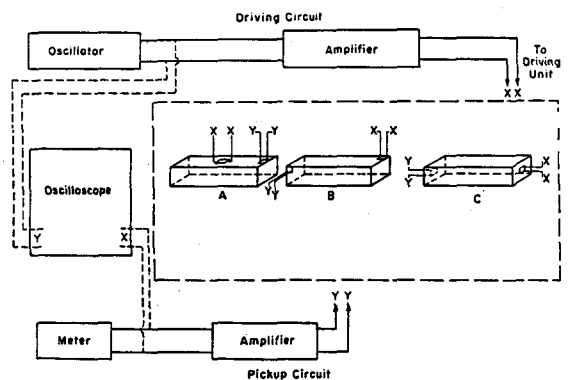


Fig. 1. 공진법 시험장치의 구성도. 구동기와 검출기에 따라서 공진 모드가 달라진다.

A: Transverse, B: Torsional 및 C: Longitudinal 공진모드. (ASTM C215-60)

진동 모드가 달라지는데 Fig. 1에서 A, B, C는 각각 transverse, torsional, longitudinal 공진을 위한 구동 장치와 진동 검출기의 배치도를 나타내고 있으며 각각에 따라서 탄성계수를 구할 수 있다. 이때 사용되는 식은 기본적으로는 식(1)과 식(4)로 부터 얻을 수 있으나 실제의 경우는 시험체의 크기 및 형태에 따라서 보정계수를 포함하는 복잡한 형태의 수식으로 나타내어진다. 이와같이 얻어진 탄성계수는 일반적으로 Fig. 2[9]에 나타낸 바와 같이 정적인 시험에서 얻어지는 탄성계수 보다는 큰 값을 지니고 따라서 공진법에 의해서 구해진 탄성계수를 동탄성계수라 한다.

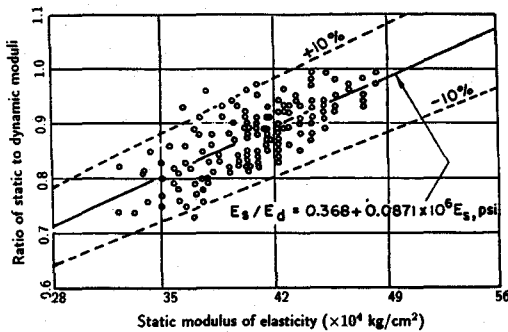


Fig. 2. 정탄성계수와 동탄성계수의 관계.
정탄성계수/동탄성계수.

이 방법은 주로 탄성계수와 압축강도와의 관계를 규명하는데 사용되어 왔고 대표적인 결과는 Fig. 3과 같다. 이 결과로부터 동탄성 계수와 압축강도는 어느 정도의 오차 범위내에서 함수관계를 지님을 알 수 있다. 이 오차의 원인은 압축 강도가 동탄성계수의 어떠한 일정한 함수로 주어지지 않기 때문이다.

공진법을 내구성 연구에 응용한 예를 Fig. 4에 나타내었다[10]. 양생조건이 다른 두 콘크리트 시험편에 동결-융해 과정을 반복하였을 때 동탄성계수의 변화를 측정했던 것으로 습식 양생만을 하였을 경우는 건조된 시험편 보다는 시험편 내부의 수분이 많으므로 동결-융해의 반복 과정에서 인하여 시험편의 열화가 보다 빨리 일어나고, 결과적으로 동탄성 계수의 감소를 나타냄을 알 수 있다.

이와 같이 공진법은 시험방법 및 사용 장치의 표준화도 이루어져 있으며 또한 활용 범위는 넓으나, 일정한 크기의 시험편이 필요하므로 현장 구조물에

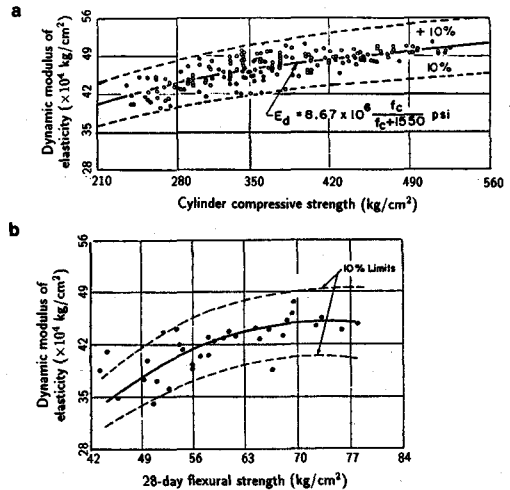


Fig. 3. (a) 압축강도와 동탄성계수,
(b) 휨강도와 동탄성계수.

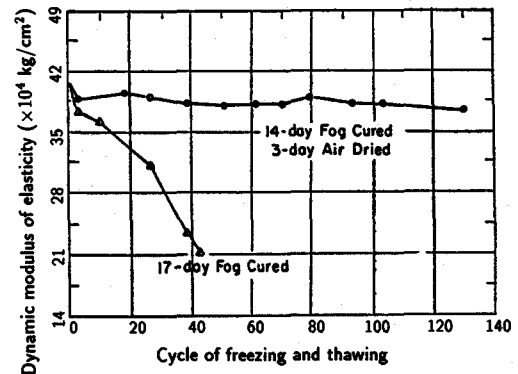


Fig. 4. 동결 융해에 따른 동탄성계수의 변화.

직접 적용하기는 곤란하다. 그러나, 실험실에서의 콘크리트의 양생 과정 감시, 내구성 평가 등에서 비파괴 시험으로서의 중요한 위치를 차지하고 있다

3.2. 초음파속도법

식 (1)에서와 같이 재료내에서의 초음파의 속도는 탄성계수에 영향을 받으므로 초음파의 속도를 측정하여 콘크리트의 강도를 측정하고자 시도되었다. 초기에는 콘크리트의 한쪽 부분을 망치로 두드려서 두 부분에 위치한 센서에 도착하는 탄성파의 시간차를 측정하여 탄성파의 속도를 측정하였으나 그 후로는 Fig. 5와 같이 압전소자를 이용한 탐촉자를 사용하여 초음파를 발생시키고 수신하는 장치를

사용하여 측정하게 되었다. 일반적으로 콘크리트의 내부에서의 초음파의 산란과 초음파의 발생의 기술적인 문제로 주로 50kHz 정도의 낮은 초음파를 사용하여 투과에 의한 시험법을 많이 사용하고 있다.

대표적으로 콘크리트의 재령에 따른 초음파의 속도와 콘크리트의 압축강도 사이의 관계는 Fig. 6과

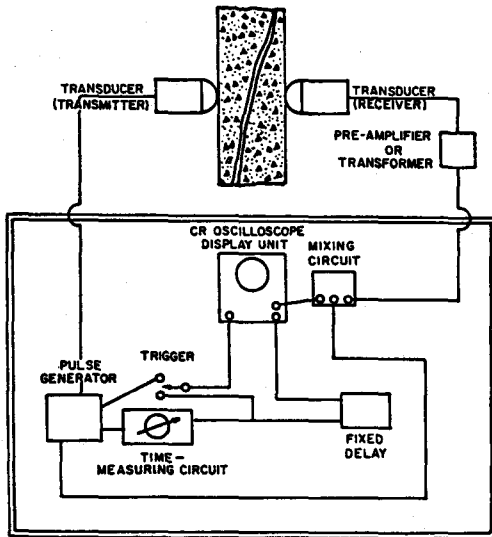


Fig. 5. 초음파 속도 측정장치.

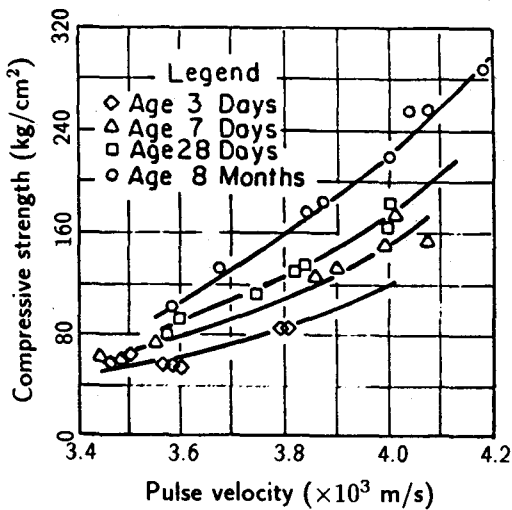


Fig. 6. 콘크리트의 재령에 따른 초음파의 속도와 압축 강도의 관계.

같다. 이 결과에서 보면 초음파의 속도와 압축강도의 전반적인 상관관계는 낮으나, 재령을 결정해 주면 높은 상관관계를 얻을 수 있다. 또한 배합조건을 변화시켰을때의 초음파의 속도와 압축강도와의 관

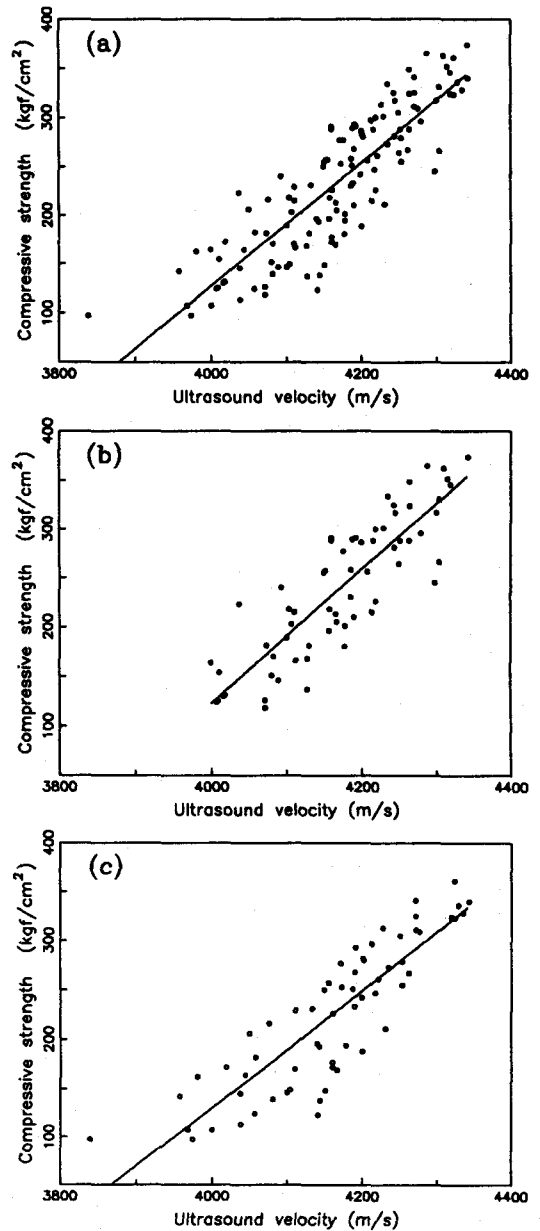


Fig. 7. 초음파 속도와 압축 강도의 관계.

(a) 전체 시험편, (b) 슬립프가 10 cm 이상, (c) 슬립프가 10 cm 이하

계는 Fig. 7(a)와 같다. 이 경우도 상관관계가 낮으나 배합 조건을 제한하면 Fig. 7(b)와 Fig. 7(c)와 같이 되어서 상관관계가 비교적 높아진다. 이와 같이 일반적으로 초음파의 속도와 압축강도 사이의 상관관계가 낮은 이유는 공진법의 경우와 마찬가지로 탄성계수와 압축강도가 일정한 함수관계로 표시될 수 없기 때문이다. 그러나 일반적으로 초음파의 속도가 빠르면 콘크리트의 강도가 높아지는 경향이 있으므로 상대적인 콘크리트 품질에 대한 비교 평가에 활용할 수 있다.

또한, 이 초음파 속도법은 콘크리트의 환경 조건에 의한 열화 정도의 측정에도 활용될 수 있다. 콘크리트에 동결-융해 과정을 반복하였을 때의 초음파의 속도 변화를 Fig. 8에 보였다. 이 결과는 콘크리트가 동결 융해를 반복하였을 때의 열화되는 정도를 초음파의 속도에 의해 결정할 수 있음을 의미한다. Fig. 9에는 콘크리트를 높은 온도에서 1시간 방치한 후에 열처리 온도에 따른 상온에서의 휨강도 변화 및 초음파 속도의 변화를 나타내었다. 이 결과로부터 열처리 온도가 높아질수록 휨강도는 떨어지고 이와 함께 초음파의 속도도 낮아짐을 나타내고 있다. 따라서 화재로 손상된 콘크리트 구조물의 사용 여부 및 보수부위 판별에 활용할 수 있다.

한편 Fig. 10과 같이 콘크리트의 표면에 균열이 존재하면 한 탐촉자에서 발생된 초음파는 균열 끝부분을 돌아서 도착하게 되므로 균열이 존재하지

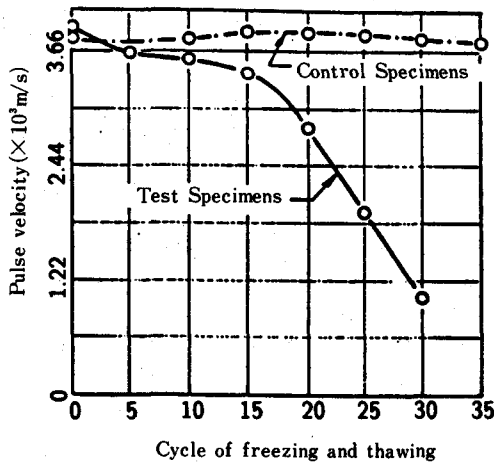


Fig. 8. 동결 융해에 따른 초음파 속도 변화.

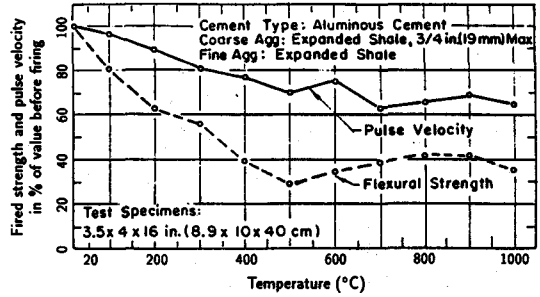


Fig. 9. 열처리 온도에 따른 휨강도 및 초음파속도 변화.

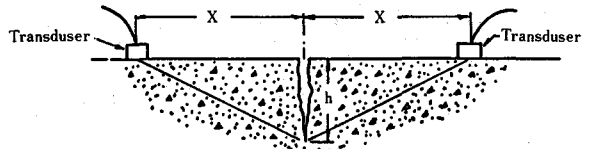


Fig. 10. 균열 깊이 측정을 위한 탐촉자의 배치도.

않는 부위에 비하여 초음파가 도달하는 시간이 길어지게 된다. 균열이 존재하는 부분에서의 초음파의 도달시간을 t_c , 균열이 없는 부분에서의 초음파의 도달시간을 t_0 이라 하면 균열의 깊이 h 는

$$h = \frac{x}{2} \sqrt{(t_c/t_0)^2 - 1} \dots\dots\dots(5)$$

와 같이 주어진다. 여기서 x 는 균열로부터 탐촉자까지의 거리이다. 실제의 경우는 탐촉자 내부에서의 초음파의 지연이나 탐촉자의 유한한 크기때문에 식(5)는 정확하지 않다. 인공 균열을 지니는 콘크리트 시험편에서 균열 깊이와 초음파 도달시간의 관

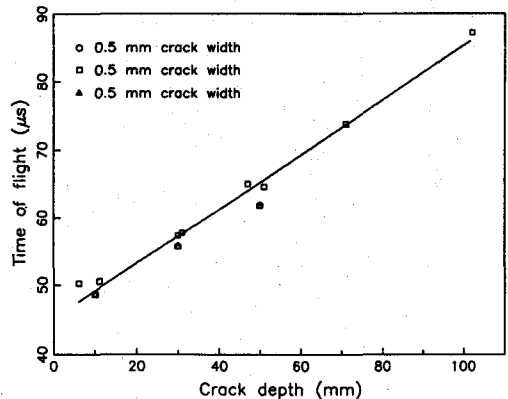


Fig. 11. 균열의 깊이와 초음파 도달 시간의 관계.

계를 Fig. 11에 나타내었다. 그 결과 균열의 깊이와 초음파의 도달시간은 비례하는 것으로 나타나며 관계식은

$$h = 2.49(t_c - t_0) + 8.90 \dots \dots \dots (6)$$

과 같이 주어진다.

이상과 같이 응용범위가 많고 시험편의 크기에 제약을 받지 않으며 초음파 속도법은 휴대용 장치가 상용화 되어 있어서 현장 구조물에 대하여 직접 시험할 수 있으나 콘크리트 내부에서의 초음파의 산란이 크므로 pulse-echo 시험이 곤란하다. 따라서 내부결함 탐지, 철매립물 검출 등에 활용하기는 곤란하다.

3.3. 충격-공진법

이 방법의 기본 원리는 공진법과 같으나, 동탄성계수를 결정하기 보다는 주로 결함 탐지에 이용된다. 콘크리트 내부에서의 탄성파의 산란이 크므로 초음파 pulse-echo 시험을 실시하기 위해서는 골재의 크기보다 훨씬 큰 파장의 초음파를 사용하여야 하는데 저주파 초음파의 경우는 지향성이 적어지고 또한 초음파의 pulse 폭이 넓어져서 반사파 신호를 얻기가 어렵다.

따라서 새로운 결함 탐지법에 대해 최근에 한국 표준과학연구원과 미국립표준기술연구소가 공동으로 콘크리트 시험편의 공진 주파수로 부터 결함을 검출하는 충격-공진법을 개발하였다. 이 방법은 공진법에서 구동 주파수를 변화면서 공진주파수를 찾는 방법과는 달리 짧은 시간 폭의 충격을 가하여 시험편 내부에 광대역 탄성파를 발생시키면 시험편의 공진조건을 만족하는 주파수의 탄성파만 남게 된다. 이 진동 신호를 주파수 분석을 하면 공진 주파수를 알게 되고 속도를 알게 되면 시험편의 크기를 결정할 수 있다.

대표적으로 Fig. 12(a)에 나타낸 바와 같이 전체 두께 50cm인 콘크리트 내부의 깊이 10cm에 있는 직경 50cm인 원판형 결함에서의 충격에 의한 진동 신호의 주파수 스펙트럼을 위치별로 Fig. 13에 나타내었다[8]. Fig. 13에서 보면 (b), (c)는 각각 Fig. 12(a)의 6, 7번 위치에 해당하므로 9.2cm에 해당하

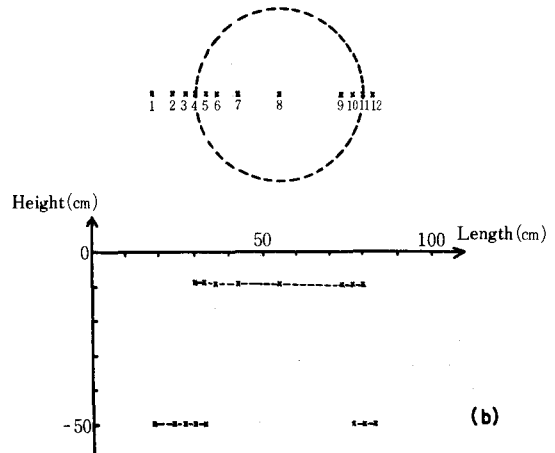


Fig. 12. 결함의 위치. (a) 윗 모습 및 시험위치 (b) 단면 모습 및 시험 결과 결정된 깊이

는 공진 주파수를 나타내고 Fig. 13의 (a), (d)는 Fig. 12 (a)의 3, 12번 위치에 해당하여 결함이 없는 부위로 3.4kHz의 공진 주파수를 나타내는데 이는 두께 50cm로 전체 두께와 같다. 마찬가지로 결함 윗부분에서 위치를 바꾸어서 결정된 깊이를 Fig. 12(b)에 나타내었는데 그 결과 결함의 형상을 파악할 수 있다.

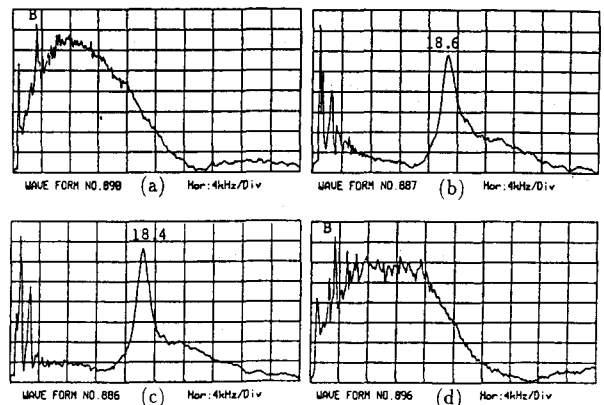


Fig. 13. 충격-공진 시험의 주파수 스펙트럼.

(a) 3번, (b) 6번, (c) 7번, (d) 12번 위치

이 이외에도 경사진 결함, 다층의 결함, 구형 결함 탐지에도 우수한 결과를 얻을 수 있으며, 결함의 직경이 깊이의 절반보다 클 경우에는 결함의 깊이를 결정할 수 있었다. 또한 두께가 1m까지의 시험편에서도 결함 탐지가 가능하였고, 시험편의 크기가

유한한 경우에는 시험편의 공진 모드를 고려하여 두께에 대한 공진 주파수만을 분리할 수가 있었다 [12].

Fig. 14는 가로, 세로가 각각 50cm이고 두께가 27cm인 콘크리트 시험편 내에 깊이 10cm에 직경이 20cm인 원판형 결함에 대하여 위치를 바꾸어 가면

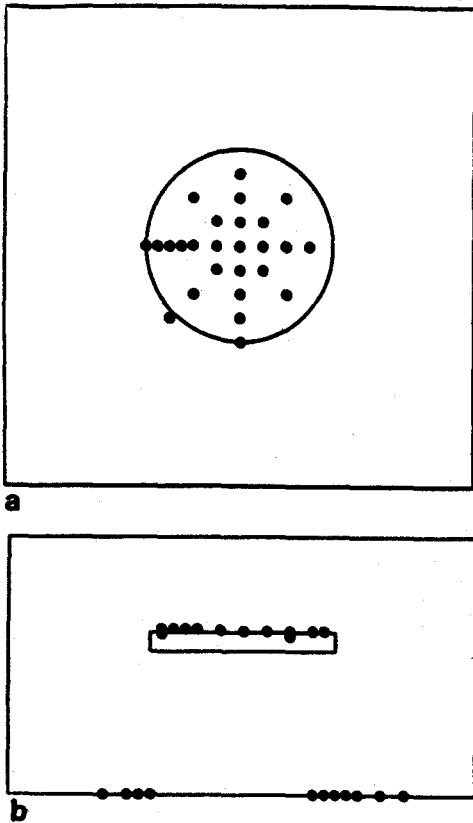


Fig. 14. 유한한 크기의 시험편에서의 충격-공진법에 의한 내부 결함 탐지 결과.
(a) 윗모습, (b) 단면 모습

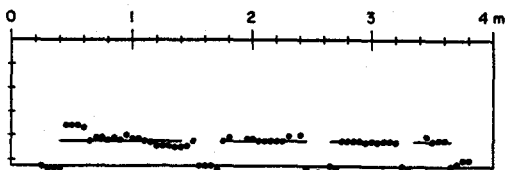


Fig. 15. 두꺼운 시험편에서의 충격-공진법에 의한 내부 결함 탐지 결과.

서 충격-공진 시험에 의하여 결함의 위치를 표시한 결과이다. 또한 두께가 105cm인 콘크리트 시험편 내부에 깊이 85cm에 있는 원판형 결함에 대해 충격 공진 시험에 의하여 결정된 결함의 위치는 Fig. 15와 같다.

또한 이 충격-공진법은 수직균열의 깊이 결정, 철 매립물의 깊이 및 위치 검출 등의 활용에 이용된다. 따라서 충격-공진법은 콘크리트 구조물의 결함 탐지, 두께 측정, 매립물의 위치 탐지 등을 통하여 콘크리트의 안전도에 기여할 수 있다.

4. 결론

이상과 같이 탄성파를 이용한 콘크리트의 비파괴 시험법의 기술현황을 고찰하였다. 탄성파를 이용하는 비파괴 시험법은 다른 방법들과는 달리 완전한 비파괴 시험법으로 실험실이나 현장에서 유용하게 사용될 수 있다. 근래에 들어서 급격히 늘어나는 콘크리트 구조물의 사용을 감안할 때에 이들의 안전 관리는 물론이고 건설단계에서의 철저한 품질관리를 위하여 콘크리트의 비파괴 시험은 필수적이라 하겠다.

참고 문헌

- 1) "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens", ASTM Standards C39-81
- 2) "Ball Impact Test for Normal Concrete", Standard Code DIN 4240, No. 6
- 3) "Test for Penetration Resistance of Hardened Concrete", ASTM C 803-75T
- 4) B. Tremper, "The Measurement of Concrete Strength by Embedded Pull-Out Bars", Proceedings, ASTM, Vol. 44(1994), pp. 880-887
- 5) J. Kolek, "An Appreciation of the Schmidt Rebound Hammer", Magazine of Concrete Research (London), Vol. 10, No. 28(Mar. 1958), pp. 27-36
- 6) "Standard Test Method for the Fundamental Transverse, Longitudinal and Torsional

- Frequencies of Concrete Specimens*", ASTM Standard C215-60 (1976)
- 7) "Measurement of the Velocity of Ultrasonic Pulses in Concrete", Br. Std. Inst., BS4408, Part 5 (1947), p. 20
- 8) J. Koo, S. Lee, Y. Kim and H. S. Lew, "Quantitative Spectral Analysis of the Flaw Detection in Concrete", Proc. 12th World Conf. NDT, Amsterdam (1989)
- 9) M. R. Sharama and B. L. Gupta, "Sonic Modulus as Related to Strength and Static Modulus of High Strength Concrete", Indian Concr. J., Vol. 34, No. 4 (1960), pp. 139-141
- 10) B. G. Long and H. J. Kurtz, "Effects of Curing Methods on the Durability of Concrete as Measured by Changes in the Dynamic Modulus of Elasticity", Proc., ASTM, Vol. 43 (1943), pp. 1051-1065
- 11) 이세경 등저, "콘크리트 구조물의 초음파 탐상법 개발 (2차년도)", KSRI-87-45-IR, 한국표준연구소 (1987)
- 12) Y. H. Kim, S. Lee and H. C. Kim, "Quantitative Vibration Mode Analysis of Mortar and Concrete Blocks Containing Flaws", NDT Int'l. Vol. 23, No. 2 (1990), pp. 67-74