

초음파 도달시간에 의한 콘크리트에서의 수직 균열의 깊이 측정에 관한 연구

Determination of the Vertical Crack Depth in Concrete
by the Ultrasonic Time of Flight

○ 김 영 환*
Young H. Kim

이 세 경**
Sekyung Lee

김 호 철***
H. Chul Kim

ABSTRACT

Depths of the vertical cracks in the concrete were determined by the time of flight of the ultrasonic waves. The ultrasonic waves are diffracted at the crack tip, and the arrival time of ultrasonic waves are dependent on the crack depth and separation distance between transmitting and receiving ultrasonic transducers. The vertical cracks with 0.2-2mm width and 10-100mm depth were examined by multi-layered ultrasonic transducers. It was found that the time of flight of ultrasonic waves were proportional to the depth of vertical cracks. The depth of vertical cracks in the range of 20-100mm depth could be determined by the transient time of the diffracted ultrasonic waves.

1. 서론

콘크리트는 다른 재료에 비하여 내구성 및 내열성이 우수하고 여러 형상의 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. 콘크리트내에 균열이 생기면 이 콘크리트의 강도는 기대치에 미치지 못할 뿐만 아니라, 주위의 온습도의 변화, 소금물과 같은 화학성분의 침투로 균열이 점차 성장하고 부식되어 콘크리트는 손상되게 된다.

콘크리트의 균열은 여러가지 원인에 의하여 콘크리트의 경화후 전후로 하여 나타나는데 균열이 표면에서 관측할 수 있을 때면 이미 콘크리트 내

부조직에는 미세 균열로 인하여 조직이 상당히 손상되어 있다. 균열을 그대로 방치할 경우 균열을 통하여 화학 물질이 침투하는 등으로 인하여 균열이 점차 커지게 되고 따라서 콘크리트의 안전도에 큰 문제를 일으키게 된다. 따라서 균열에 대한 보수가 요구되는데 효율적인 균열 보수를 위하여 균열의 원인을 밝히기 위한 균열 조사가 선행되어야 한다.

균열 조사 중에서 가장 중요한 변수 중 하나는 균열의 폭, 길이 및 깊이이다. 이 중에서 균열의 폭과 길이는 콘크리트의 표면에서 육안으로 관측이 가능하나 균열의 깊이를 직접적으로 결정하기는 어렵다. 따라서 본 연구에서는 콘크리트의 균열이 표면에서 관측될 경우 이 균열의 깊이를 초음파를 사용한 비파괴 시험에 의하여 결정하는 방법에 대하여 연구하였다.

초음파를 사용한 균열 깊이 측정은 J.R.Leslie 및 W.J.Cheesman[1] 등 여러 사람에게 의하여 연구가 되었는데 이들은 탐촉자의 크기, 탐촉자 내부에서의 초음파의 지연 등을 고려하지 않아 수식에

* 정희원 한국표준연구소 비파괴시험연구실
** 한국표준연구소 비파괴시험연구실 실장
*** 한국과학기술원 물리학과 교수

의한 계산이 잘 맞지 않고 있다. 또한 사용된 초음파의 주파수가 약 50kHz로 비교적 낮아서 회절에 의한 결함 검출도가 낮다. 본 연구에서는 사용 주파수를 높이기 위한 특수 탐촉자를 사용하여 균열 측정의 정밀도를 향상시키고 또한 균열 깊이 결정을 위한 개선된 방법을 제시하였다.

2. 이론적 배경

초음파가 매질 내부를 진행하다가 날카로운 경계를 만나면 그 경계에서는 초음파의 모드 변환, 반사 및 회절이 일어난다[2]. 균열의 깊이를 결정하기 위해서는 그림1과 같이 콘크리트의 표면에 수직인 결함이 존재할 때에 균열을 중심으로 같은 거리에 양쪽으로 두 탐촉자를 놓고 한 탐촉자에 전기적인 pulse를 가하면 탐촉자로부터 초음파가 발생하게 되는데, 이 초음파가 균열의 끝부분에 도착하게 되면 초음파는 회절하여 구면파로 전파하여 반대편에 놓인 탐촉자에 도착하게 된다.

초음파가 균열 끝에서 회절하여 도달하므로 이때 초음파의 도달시간은 균열의 깊이 H 와 탐촉자 사이의 거리 D 에 의하여 결정된다. 초음파의 도달시간 t_c 는

$$t_c = \sqrt{\frac{D^2 + 4H^2}{v}} \quad (1)$$

와 같이 주어진다. 여기서 v 는 콘크리트에서의 탄성파의 속도이다. 균열이 존재하지 않는 부위

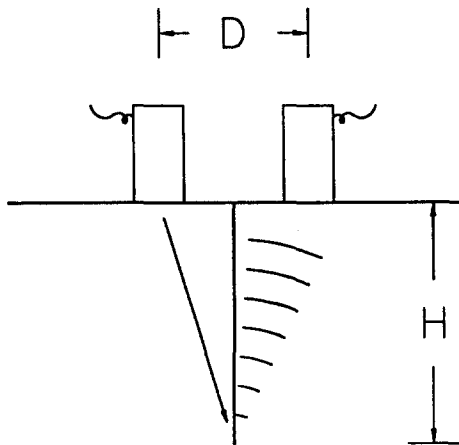


그림 1 표면에 수직인 균열과 탐촉자의 배치도

에서의 초음파의 도달시간 t_s 는

$$t_s = \frac{D}{v} \quad (2)$$

와 같이 주어지므로 균열의 깊이 H 는

$$H = \frac{D}{2} \sqrt{(t_c/t_s)^2 - 1} \quad (3)$$

와 같이 구할수 있다.[1] 식(3)은 식(1)에 비하여 초음파의 속도를 알 필요가 없지만 콘크리트의 표면과 내부에서 초음파의 속도가 같다고 가정하였으나 실제로는 콘크리트에서의 표면파와 내부파의 속도는 달라지므로[3] 식(3)은 정확하지 않고 또한 단순한 기하학적인 계산에서 구해졌으므로 탐촉자 내부에서의 초음파의 지연시간에 대한 고려가 포함되어 있지 않다. 특히 탐촉자 내부에서의 지연시간이 길어지면 식(3)에 의해 결정되는 균열의 깊이는 실제값과 많은 차이를 나타낸다.

한편 균열의 크기가 초음파의 파장보다 작으면 초음파는 회절현상보다는 균열을 그대로 통과하여 전파하므로 도달시간의 변화는 없고 도달하는 초음파의 진폭만 변하게 된다[4]. 진폭의 변화를 측정하는 것은 콘크리트 표면의 상태, 탐촉자와의 접촉상태 등의 영향을 받으므로 이 방법을 사용하여 깊이가 작은 균열에 대해 적용하기는 부적합하다. 또한 콘크리트 내부에서는 초음파의 산란이 심하므로 너무 깊은 균열에 대하여 적용하기도 또한 곤란하다.

3. 실험

본 연구에서는 콘크리트에서의 수직 균열의 깊이를 결정하기 위하여 폭이 0.5-2.0mm, 깊이가 5-100mm인 수직 결함에 대하여 초음파 도달시간을 측정하였다. 시험체는 그림2에 나타난 바와 같이 가로 150mm, 길이 550mm 및 높이 150mm인 각주형 콘크리트 시험편의 중앙에 인공 균열을 만들었다.

콘크리트의 조성은 굵은 골재의 크기가 25mm, 시멘트양은 350kg/m³, S/A=356% 및 W/C=46%이었고 이때 slump치는 8.2cm이었다.

초음파 탐촉자는 표준연구소에서 S/N비를 개선하기 위하여 개발한 공칭 주파수가 250kHz인 다층 탐촉자를 사용하였다[5]. 실제의 탐촉자의 경우 일정한 크기를 지니고 있기 때문에 탐촉자에서 초음파가 발생되어 수신할 때까지 걸리는 시간이 있

으며, 다층탐촉자의 경우는 pulse compression에 의하여 peak가 나타날 때까지 소요되는 시간이 있으므로 [6] 절대적인 시간을 측정하는 데는 문제가 있으며 균열이 없는 부위와 균열이 있는 부위에 대하여 초음파 시험을 실시하여 초음파 도달 시간의 차이를 측정하여 이를 균열의 깊이를 결정하는데 사용하였다.

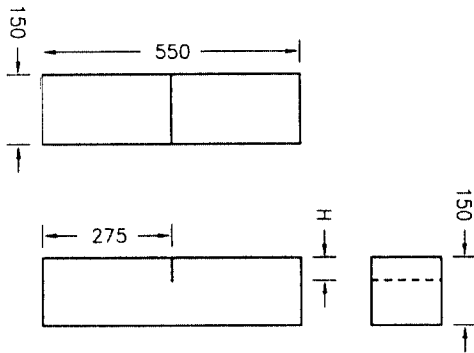


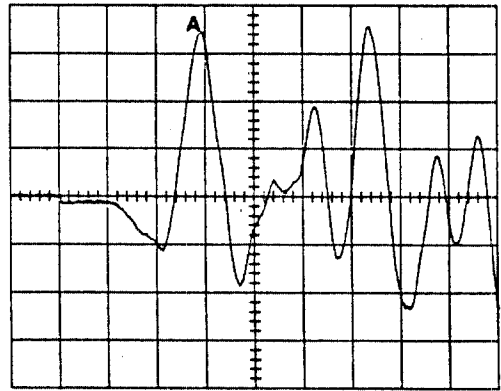
그림 2 수직균열을 지닌 콘크리트 시험편

4. 결과 및 토의

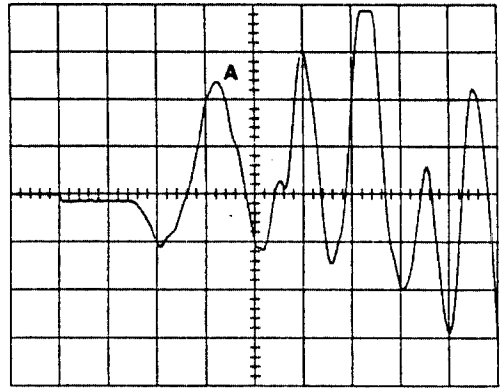
식(1)에 나타난 바와 같이 초음파 도달시간은 균열의 깊이와 탐촉자 사이의 거리에 의하여 결정되는데 본 연구에서는 탐촉자 사이의 거리 D 를 일정하게 유지하고 균열의 깊이 변화에 따른 초음파 도달시간사이의 관계를 조사하였다. 균열이 없는 부위에서의 초음파 도달 시간은 식(2)에 의해 구해지는 값보다는 일반적으로 크게 나타나는데 이는 탐촉자 내부에서의 초음파 지연 등으로 기인하므로 균열의 깊이와는 무관하게 일정한 값을 지닌다.

균열이 없는 부위에서의 초음파 도달 시간은 $48.8 \mu\text{s}$ 로 균열이 존재하는 부위에서의 초음파 도달시간을 측정한 후에 이 시간을 빼면 균열에 의하여 영향을 받는 초음파 도달 시간이다. 대표적으로 균열의 깊이가 3cm 및 5cm 일 때의 수신된 초음파의 파형을 그림 3(a)와 3(b)에 각각 나타내었다. 이 파형에서 알 수 있듯이 균열의 깊이가 깊어짐에 따라서 초음파 도달 시간이 길어짐을 알 수 있다.

균열의 깊이와 측정된 초음파 도달시간 사이의 관계를 그림 4에 나타내었다. 이때 균열의 깊이와 초음파 도달시간은 비례함을 알 수가 있고 이



(a)



(b)

그림 3 $D=7\text{cm}$ 일 때에 수신되는 초음파 신호. $20 \mu\text{s}/\text{div}$. (a) $H=3\text{cm}$ (b) $H=5\text{cm}$

관계식은 최소 제곱법에 의하여

$$H = 2.49(t_c - t_0) + 8.90 \quad (4)$$

와 같이 나타낼 수가 있다. 또한 균열의 폭은 초음파 도달시간에 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.

기존의 균열의 깊이를 산출하는 식(3)과 본 연구에서 구해진 식(4)에 의해 구하여진 균열의 깊이를 실제의 균열의 깊이에 대하여 그림 5에 나타내었다.

기존의 균열의 깊이를 산출하는 식(3)과 본 연구에서 구해진 식(4)에 의해 구하여진 균열의 깊이를 실제의 균열의 깊이에 대하여 그림 5에 나타내었다. 그 결과 기존의 식(3) 보다는 본 연구에서 구해진 식(4)이 보다 정확히 균열의 깊이를 산

출할 수 있었다. 여기서 주의할 사항은 식(4)는 본 연구에서 사용된 다층 탐촉자의 경우에만 성립하는 식으로 다른 탐촉자를 사용할 경우에는 그 탐촉자에 맞는 식을 사용해야 한다.

5. 결론

본 연구에서는 표면에 수직한 콘크리트의 균열의 깊이를 산출하기 위하여 회절하여 도달하는 초음파의 전파시간을 측정하였다. 그 결과 초음파의 도달시간은 균열의 깊이와 비례하는 관계를 나타내었다. 기존의 균열의 깊이를 산출하는 식은 다층탐촉자와 같이 탐촉자 내에서의 초음파의 지연시간이 긴 경우에는 잘 맞지 않음을 알 수 있었고 이 경우 사용할 수 있는 수식을 정의하였다. 이방법의 적용이 가능한 균열의 깊이는 약 2-10cm 범위이었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술처 국제공동연구의 일환으로 수행되었습니다.

참고 문헌

1. Leslie, J.R. and Cheesman, W.J. "An ultrasonic Method of Studying Deterioration and Cracking in Concrete Structures", ACI Journal, Proceedings, V.46, N.1 (1949), pp.17-36
2. Sachse, W. "Scattering of Elastic Pulses and the Nondestructive Evaluation of Materials", Materials Evaluation, V.35, N.10 (1977), p.83
3. Pollard, H.F. "Sound Waves in Solids", Poin, London (1977)
4. Hirao, M., Fukuoka, H. and Miura, Y. "Scattering of Rayleigh Surface Waves by Edge Cracks : Numerical Simulation and Experiment", J. Acoust.Soc.Am., V.72 (1982), p.602
5. 이세경 외, "콘크리트 구조물에 대한 초음파 탐상법 개발", KSRI-87-45-IR, 한국표준연구소 (1987)
6. Sung, K.M., "Piezoelectric Multilayer Transducers for Ultrasonic Pulse Compression", Ultrasonics, V.22 (1984), p.61

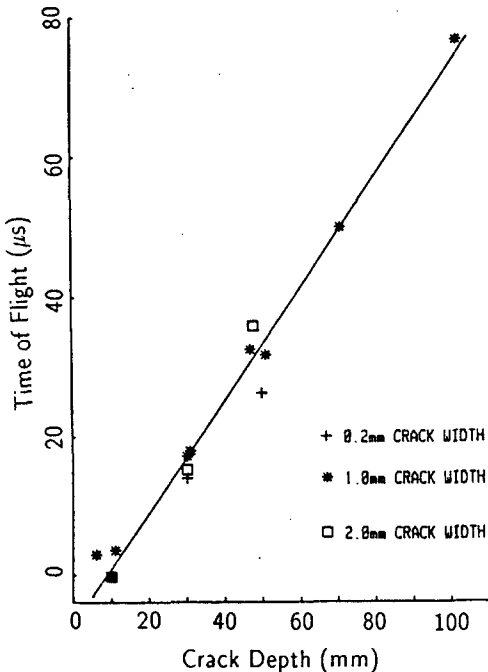


그림 4 균열의 깊이와 초음파 도달시간의 관계

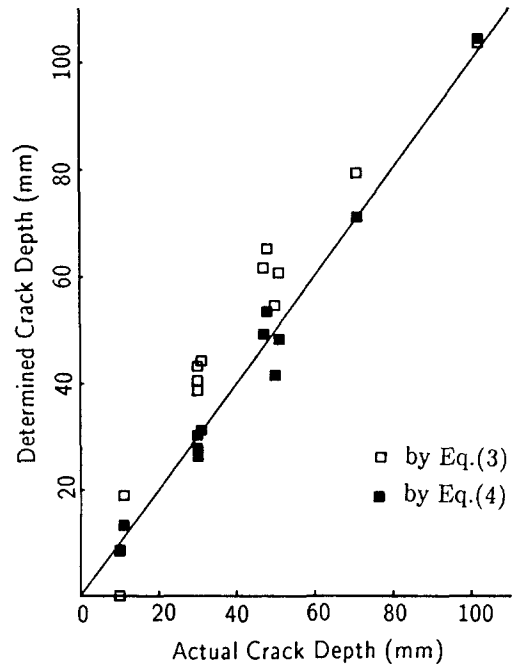


그림 5 실제균열의 깊이와 산출된 균열의 깊이의 관계