

초음파에 의한 콘크리트의 균열깊이 측정에 있어서 음파모드에 관한 연구

한응교* 이세형** 김재열**

A Study on the Wave Modes in Measurements of the Crack Depth of Concrete by Ultrasonic Waves

E. K. Han, S. H. Lee and J. Y. Kim

Abstract As the necessity of the safety diagnosis of the concrete structure, more reliable ultrasonic technique to qualify the concrete is required. In this study, the artificial surface crack depth is measured using several types of the ultrasonic probes. As results, the horizontal shear wave probe is most useful to determine the crack depth compared to the other probes. For the surface wave probe, the ultrasonic wave path is changed with the surface crack depth.

— 기호설명 —

A_0 : Amplitude to decide the transit time from received signals.

A_{max} : Maximum amplitude of received signals.

d : Depth of surface crack (m).

E : Modulus of elasticity (N/m^2)

L : Length of the path from transmitting probe to receiving probe (m).

L_1 : Length of the path from transmitting probe to surface crack (m).

L_2 : Length of the path from surface crack to receiving probe (m).

L' : Length of the path from the tip of surface crack to receiving (m).

R : Amplitude ratio of maximum amplitude to A_0 .

t : Transit time along path between probes (sec).

t' : Transit time along path between transmitting probe and the tip of surface crack (sec).

V_L : Velocity of the longitudinal wave (m/sec).

V_r : Velocity of the Rayleigh wave (m/sec).

V_t : Velocity of the transverse wave (m/sec).

ρ : Volume density (kg/m^3).

μ : Poisson's ratio.

1. 서 론

최근들어 非破壞檢査法에 의한 콘크리트 구조물의 안전진단 및 품질검사 등의 필요성이 증가하게 됨에

* 한양대학교 정밀기계공학과 교수

** 한양대학교 대학원

접수 : 1989년 3월 13일

따라 콘크리트 非破壞檢査의 한 방법인 초음파에 의한 콘크리트 탐상에 관한 많은 연구가 진행되고 있는 실정이다. 초음파에 의한 콘크리트 탐상의 응용은 콘크리트의 均一性 평가, 彈性係數의 측정, 펄스속도법에 의한 강도의 평가, 양생기간에 따른 강도의 관찰, 열화의 평가, 균열깊이의 측정, 철근의 검출 등 광범위하다.

그러나 콘크리트의 초음파탐상은 콘크리트의 비균일성과 결정입자가 큰 것으로 인하여 여러가지의 문제점을 가지고 있다. 이를테면, 초음파가 콘크리트내부를 통과할 때 많은 결합경계에서 에코가 발생하며, 콘크리트의 재질과 성분이 균일하지 않기 때문에 초음파의 속도가 변화한다. 또한, 콘크리트의 초음파 탐상은 고주파의 펄스를 이용할 경우, 감쇠가 심하고 결합경계에서 다중반사가 되어 초음파빔이 산란하기 때문에 저주파의 펄스를 이용하고 있으나, 이로 인하여指向性이 없어지게 된다.

따라서 콘크리트의 초음파 탐상은 저주파로 수 백볼트의 전압을 발생시키는 탐상기를 이용하며, 진동자의 면적이 넓은 탐촉자를 이용한다.

지금까지의 연구로서, 1960년 明石¹⁾는 혼합비 및 양생조건을 달리하는 콘크리트를 펄스속도법을 이용하여 콘크리트의 강도, 감쇠정수, 주파수 등의 관계를 연구하였으며, 1971년 R. H. Elvery²⁾는 PUNDIT를 이용하여 초음파속도와 강도와의 관계를 연구하였다. 그리고 1983년 Knab³⁾등은 콘크리트의 내부 균열검출에 관하여 연구하였으며 1984년 Smith⁴⁾는 水浸法에 의한 표면파를 이용하여 표면균열의 검출을 C-scan으로 하였다.

그러나 콘크리트의 균열깊이 측정은 일반적으로 2탐촉자법에 의하여 종파로 전파시간을 측정하기 때문에 측정시 공기중을 전파하는 초음파에 의해서 측정오차가 크게 나타난다.

또한 표면파를 이용할 경우 콘크리트 표면을 통과함으로써 콘크리트 내부를 통과할 때 보다 散亂減衰를 줄일 수 있다. 따라서 종파, 횡파(SH), 표면파 등의 탐촉자를 이용하여 파의 모드에 따른 균열깊이의 測定精度를 비교하였다.

2. 이론적 배경

2-1 초음파모드의 변화

半無限固體에서 가능한 초음파의 전파모드는 Fig. 1과 같다.

Fig. 1에서, (a)의 경우 표면파로 입사하여 콘크리트의 표면을 통과하는 동안 표면파 외의 다른 종류의 파가 발생하지 않는다. (b)의 경우 종파로 입사하여 반사파는 종파와 수직횡파로 변환되어 반사된다. (c)의 수직횡파(SV)로 입사할 경우 반사파는 수직횡파와 종파로 반사되고 있다. (d)의 경우는 전반사가 일어나는 각도에서 수직횡파를 입사시키는 경우로 수직횡파가 반사되고 표면파가 생기는 경우이다. 이 경우는 표면파 탐촉자의 원리이기도 하다. (e)의 경우는 수평횡파(SH)가 입사할 경우로서 다른 종류의 파는 발생되지 않고 수평횡파만 반사된다.

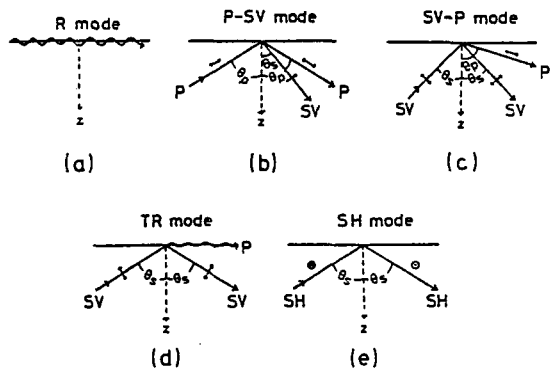


Fig.1. Surface-mode waves. R : Rayleigh wave, P : Pressure wave, SV : Shear wave polarized in the vertical plane, SH : Shear wave polarized in the horizontal plane.

2-2 초음파의 속도⁵⁾

어떤 半無限固體를 等方性均質의 물체라고 가정하면, 이 물체에서의 초음파속도는 탄성계수 E와 프와송의 비로부터 계산할 수 있다.

종파의 속도는

$$V_1 = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \dots\dots\dots(1)$$

횡파의 속도는

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

그리고 표면파의 속도는

$$V_r \doteq \frac{0.87+1.12\mu}{1+\mu} \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\mu)}} \dots\dots\dots(3)$$

이다.

식(1)과 식(2)로 부터

$$V_t = V_i \sqrt{\frac{1-2\mu}{2(1-\mu)}} \dots\dots\dots(4)$$

이고, 식(2)와 식(3)으로 부터

$$V_r = V_i \frac{0.87+1.12\mu}{1+\mu} \dots\dots\dots(5)$$

임을 알 수 있다.

콘크리트의 경우 프와송의 비는 약 0.2이므로 식(4)로 부터 횡파속도는 종파속도의 0.61배 이며 식(5)로 부터 표면파(Rayleigh)는 횡파속도의 0.91배 이다.

2-3 초음파의 전파경로와 균열의 깊이

초음파가 균열이 있는 콘크리트 내부를 통과할 때 가능한 경로는 Fig. 2와 같다.

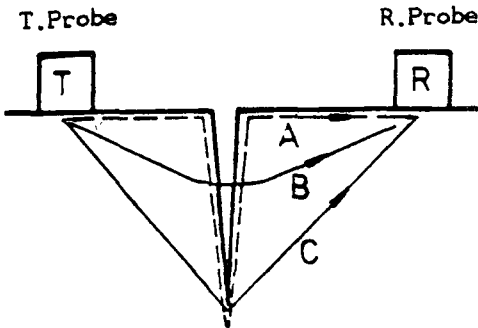


Fig.2. Path of ultrasonic wave in concrete.

경로 A는 표면파에 의한 전파로 콘크리트의 굵은 골재에 의한 영향이 비교적 없는 경우이며 경로 B의

경우는 공기층을 통과하는 초음파, 즉 종파와 수직횡파에 의한 전파이다. 또한 경로 C의 경우는 균열 끝단에서의 회折에 의한 경로로 산란에 의한 감쇠와 회절에 의한 감쇠 등이 있는 경우이다. 이 경우는 종파, 수직횡파와 수평횡파의 전파 경로이다.

따라서 표면파나 수평횡파의 경우가 균열깊이 측정에 적합하다고 할 수 있다.

또한 Fig. 3과 같은 여러 경로에 대하여 전파시간과 균열깊이와의 관계를 살펴보면 다음과 같다.

우선 종파(또는 횡파)의 경우 Fig. 3의 경로 A와 같은 경로로 전파된다고 가정하면 전파거리 L은

$$L = \sqrt{L_1^2 + d^2} + \sqrt{L_2^2 + d^2} \dots\dots\dots(6)$$

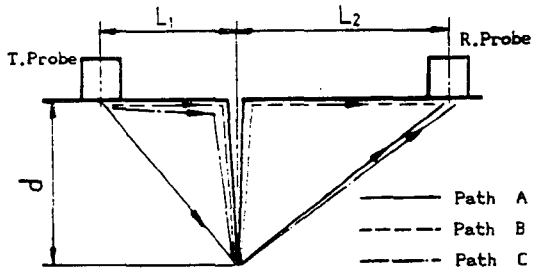


Fig.3. Considered path for calculation of crack depth.

또한 전파시간과의 관계는

$$L = tv_1 \dots\dots\dots(7)$$

이다. 식(6)과 식(7)로 부터 균열의 깊이 d는

$$d = \frac{1}{2L} \sqrt{\{(tv_1)^2 - (L_1 - L_2)^2\} \{(tv_1)^2 - (L_1 + L_2)^2\}} \dots\dots\dots(8)$$

임을 알 수 있다.

다음으로 표면파의 경우 Fig. 3의 B 또는 C와 같은 경로로 전파된다고 가정할 수 있다. 여기서 C의 경로는 표면파로 균열 끝까지 전파된 후 종파로 변환되어 수신 탐촉자까지 전파되는 경우이다.

Fig. 3에서 경로 B의 경우 전파거리는

$$L = L_1 + L_2 + 2d \dots\dots\dots(9)$$

이다. 또한 전파거리와 전파시간의 관계는

$$L = tv_r \dots\dots\dots (10)$$

로 나타난다. 식(9)와 식(10)으로 부터 균열깊이와 전파시간의 관계는

$$d = \frac{tv_r - L_1 - L_2}{V_2} \dots\dots\dots (11)$$

임을 알 수 있다.

그리고 Fig. 3에서 경로 C의 경우 송신 탐촉자로부터 균열 끝단까지의 전파시간 t' 는

$$t' = \frac{L_1 + d}{V_r} \dots\dots\dots (12)$$

이다. 균열 끝에서 수신 탐촉자까지의 거리 L 은

$$L' = \sqrt{L_2^2 + d^2} \dots\dots\dots (13)$$

이다. 또한 전파시간과의 관계는

$$L' = V_1 (t - t') \dots\dots\dots (14)$$

이다. 따라서 식(12), 식(13), 식(14)로부터 균열깊이와 전파시간의 관계는

$$d = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \quad (d > 0) \dots\dots\dots (15)$$

로 표현됨을 알 수 있다. 여기서 a, b, c는 각각

$$a = \frac{1}{V_r^2} - \frac{1}{V_1^2} \dots\dots\dots (16)$$

$$b = \frac{2L_1}{V_r^2} - \frac{2t}{V_r} \dots\dots\dots (17)$$

$$c = t^2 + \frac{L_1^2}{V_r^2} - \frac{2tL_1}{V_r} - \frac{L_2^2}{V_1^2} \dots\dots\dots (18)$$

이다.

3. 실험

3-1. 실험장치

콘크리트 균열깊이를 측정하기 위하여 Fig. 4와 같은 실험장치를 사용하였다.

이때 탐상기에 의한 증폭만으로 부족할 경우 Pre-

Amp를 이용하였다.

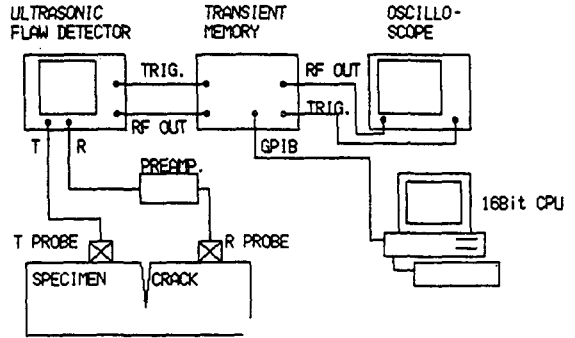


Fig.4. Block diagram of the measuring system.

또한 실험장치의 제원은 다음과 같다.

1. Ultrasonic Flaw Detector. UTC-100, HITACHI.
2. Oscilloscope V-1100A, HITACHI.
3. Transient memory. TMR-80, KAWASAKI Electronics.
4. Ultrasonic Pre-Amp. M3010-2 20kHz-2MHz, 40/60 dB.
5. Computer, 16bit cpu, NEC.

Table. 1에 사용된 각 탐촉자의 특성을 나타내었다.

Table 1. Specification of probes

No.	Type	Size of vibrator(mm)	Wave mode	Central freq. (kHz)
1	0.1 Z40N-SH	40	SH	90
2	0.1 Z40N	40	P	45
3	0.05 Z40N	40	P	40
4	0.1 Z24x35 S	24x35	Rayleigh	99
5	0.1Z24x35A45	24x35	SH	99

실험에 사용한 탐촉자는 5개로, 횡파(SH), 종파(100 kHz, 50kHz), 표면파, 사각파의 탐촉자를 이용하였다. Table. 1의 0.1Z40N의 탐촉자의 경우 중심주파수를 100 kHz로 설계한 것이나 실제로 약 50kHz로 나타나고 있다.

그리고 탐촉자와 시험편의 접촉매질로서 탐촉자에 두께 1mm의 비교적 부드러운 고무판을 부착하여 음파의 전달이 잘 되도록 하였다.

3-2. 실험방법

콘크리트의 균열깊이 측정시 초음파 모드에 의한 영향을 알아보기 위하여 횡파, 종파, 표면파 탐촉자를 이용하여 인공균열이 있는 시험편에서의 전파시간을 측정하였다.

전파시간을 구하기 위해 2탐촉자법에 의하여 수신된 신호를 Pre-Amp와 탐상기에서 증폭하고 이것을 Transient Memory를 통하여 디지털화 한다. 그리고 그 신호를 GPIB에 의하여 컴퓨터에 전송한다. 이때 Transient Memory의 Sampling Point는 1024개이고 Sampling 시간은 0.2~1.0μsec로 하였다. 그리고 Trigger는 콘크리트 탐상기의 송신신호에 의하여 행하였다.

이렇게 하여 얻어진 실험 데이터에서 첫 번째 파형이 시작되는 시간을 Fig. 5와 같이 최대진폭을 기준으로 하여 식(19)에 의하여 구한다.

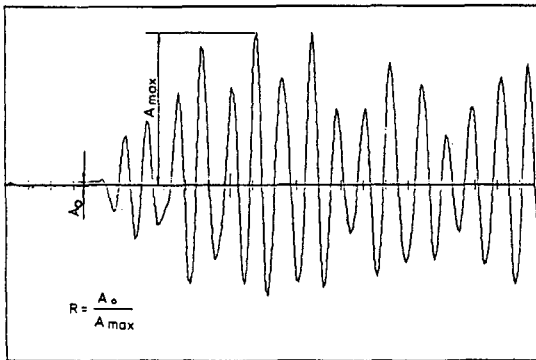


Fig.5. Method of the measurement of transit time.

$$A_0 = R A_{max} \dots \dots \dots (19)$$

여기서 R 값은 첫 번째 진폭이 시작되는 위치를 정하기 위한 것으로 작을 수록 좋으나, 노이즈때문에 제약을 받는다.

또한 탐촉자의 배열은 감쇠가 적도록 Fig. 6과 같이 하였다.⁶⁾

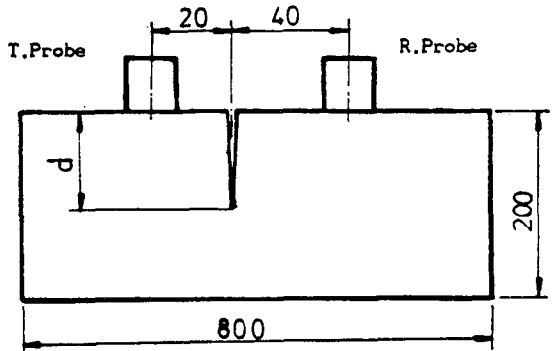


Fig.6. Position of probes to measure the crack depth.

3-3. 시험편

콘크리트 시험편의 주성분을 Table. 2에 표기하였다.

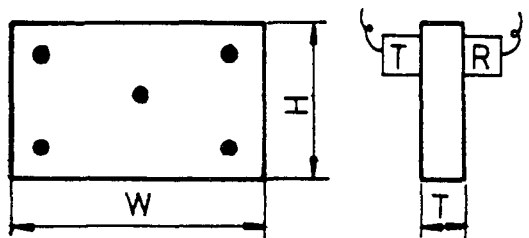
Table 2. Composition of unit cub m of concrete
w/c=0.6 unit : kg

Cement	Aggregate		Sand	Water
	Coarse gravel	Fine gravel		
256	360	637	839	159

또한 균열깊이를 측정하기 위한 기초실험으로 Fig. 7, Fig. 8과 같은 크기의 시험편두께를 측정하였다. 그림 중의 흑점은 측정위치를 표시하고 있다.

그리고 Fig. 9과 같은 시험편에서 균열깊이를 측정하였다. 이 시험편의 균열은 0.2mm의 Polyethylene 필름을 수중 양생전에 삽입하여 24 시간후에 제거한 인공균열이다. 균열깊이는 20, 40, 60, 80, 100mm의 것으로 각각 2개씩과 균열이 없는 것 한 개를 준비하였다. 그리고 각각에 대하여 3번씩 측정하였다.

● : Measured position



Unit : mm

Specimen	W	H	T
DSC-1	260	260	35
DSC-2	300	300	50
DSC-3	600	360	60

Fig.7. Specimen to measure the thickness(plate).

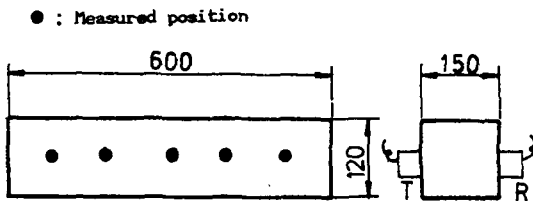
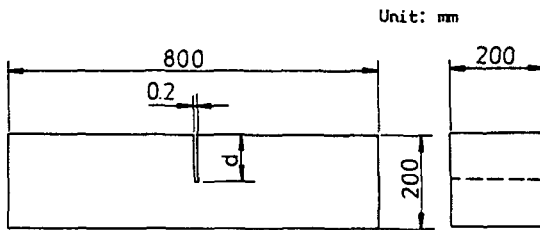


Fig.8. Specimen to measure the thickness(column).



Description of specimen	d(mm)	Number of specimen
DY-0	0	1
DY-20	20	2
DY-40	40	2
DY-60	60	2
DY-80	80	2
DY-100	100	2

Fig.9. Specimen to measure the crack depth.

4. 결과 및 고찰

각 탐촉자에 대한 콘크리트에서 초음파의 음속을 측정 한 결과를 Table. 3에 나타내었다.

Table 3. Measured velocity of ultrasonic wave in concrete

Probe	0.1Z4ON-SH	0.1Z4ON	0.05Z4ON	0.1Z24x35SJ	0.1Z24x35A45
Vel. (m/sec)	3318	3508	3526	2648	2568
S.D.+ (m/sec)	179	70	77	166	250
COV(%)*	5.4	2.0	2.2	6.3	9.7
N#	28	28	28	24	24

+ Standard deviation

* Coefficient of variation in percent

$$= (\text{standard deviation/average}) \times 100$$

Number of the measurement of transit time

4-1. 두께 및 탐촉자간의 거리 측정

두께측정용. 시험편에서 탐촉자 각각에 대한 전파시간을 측정 한 결과 Fig. 10과 같다.

또한 표면파탐촉자와 사각파탐촉자에 의하여 탐촉자간의 전파시간을 측정 한 결과를 Fig. 11에 각각 표시 하였다.

그리고 초음파의 전파거리와 전파시간의 상관관계를 Table 4와 같이 얻었다.

Table 4. Coefficients of the linear correlation between transit time and thickness or distance

No.	Probe	Coefficients of linear correlation
1	0.1Z4ON-SH	0.947
2	0.1Z4ON	0.968
3	0.05Z4ON	0.848
4	0.1Z24X35S	0.988
5	0.1Z24X35A45	0.987

이로부터 횡파탐촉자와 종파탐촉자에 의한 두께측정은 큰 차이가 없는 것으로 나타났으나, 표면파와 사각 탐촉자보다는 낮게 나타나고 있다. 이것은 표면파 탐촉자가 콘크리트의 표면을 전파하여 산란감쇠와 경로의 불규칙성이 감소하기 때문으로 생각된다. 그리고 사각탐촉자에 있어서 전파거리 측정시 정도가 높은

원인은 이 탐촉자에서 표면파가 발생하기 때문인 것으로 보인다.

또한 실제 균열깊이와 측정된 균열깊이 간의 상관계수는 Table 5와 같다.

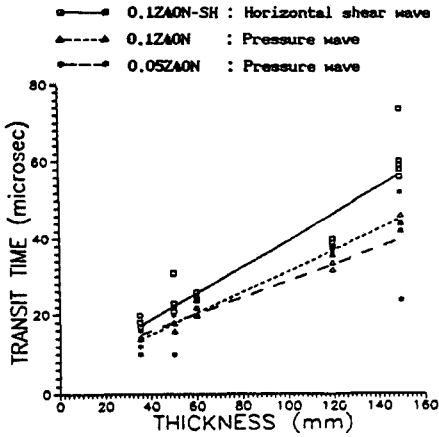


Fig.10. Relationship between thickness and transit time.

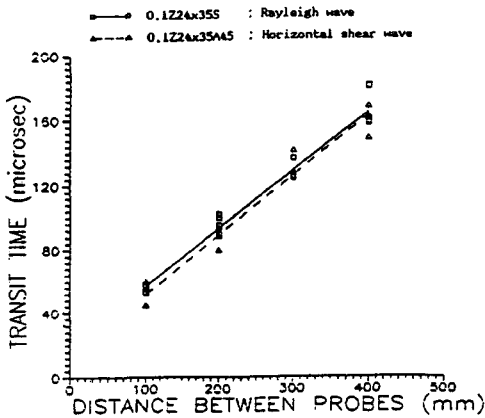


Fig.11. Relationship between distance and transit time.

4-2. 균열깊이 측정

균열깊이를 측정하기 위하여 각각의 시험편에 대하여 측정된 결과를 Fig. 12~16에 나타내었다. 그림 중의 Bar 표시는 그 길이가 표준편차, 중심점이 평균치를 나타내고 있다.

Table 5. Coefficients of the linear correlation between transit time and crack depth

No.	Probe	Coefficients of linear correlation
1	0.1Z4ON-SH	0.824
2	0.1Z4ON	0.528
3	0.05Z4ON	0.629
4	0.1Z24X35S	0.703
5	0.1Z24X35A45	-0.011

이들 결과로부터 횡파를 발생시키는 0.1Z4ON-SH의 탐촉자가 실제 균열깊이와 측정된 균열깊이의 상관계수가 0.824로 가장 높음을 알 수 있다. 그리고 표준편차도 다른 탐촉자에 비하여 작아 균열깊이 측정에 가장 적합함을 알 수 있다. 또한 균열깊이가 깊어짐에 따라 표준편차도 증가하는 경향을 보이고 있다. 이 원인은 초음파의 전파경로가 깊어짐에 따라 굽은 골재에 의한 산란에 의해서 전파경로가 규칙성이 없이 바뀌고 있기 때문으로 생각된다. 그러나 사각탐촉자는 실제 균열깊이와 측정된 균열깊이와의 상관성이 거의 없는 것으로 나타나고 있다. 이 원인은 사각탐촉자에 의해 송신된 파형이 균열사이의 공기중으로 전파되기 때문일 것으로 생각된다. 전체적으로 균열깊이 측정결과는 콘크리트에서의 산란과 균열끝에서의 회절에 의한 감쇠로 인하여 상관계수가 낮게 나타나고 있다.

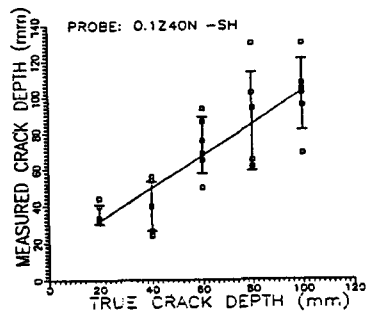


Fig.12. Relationship between true and measured crack depth by 0.1Z4ON-SH.

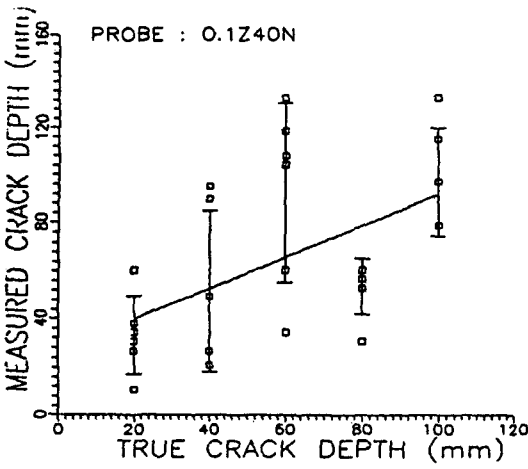


Fig.13. Relationship between true and measured crack depth by 0.1Z40N.

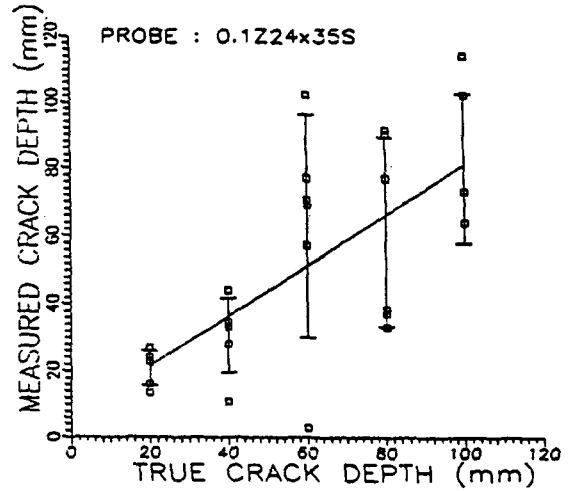


Fig.15. Relationship between true and measured crack depth by 0.1Z24x35S.

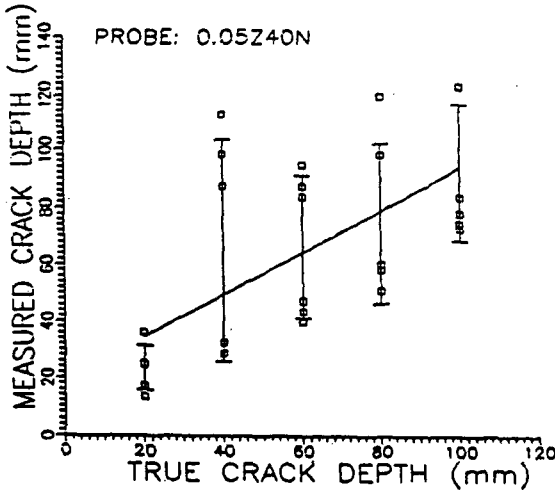


Fig.14. Relationship between true and measured crack depth by 0.05Z40N.

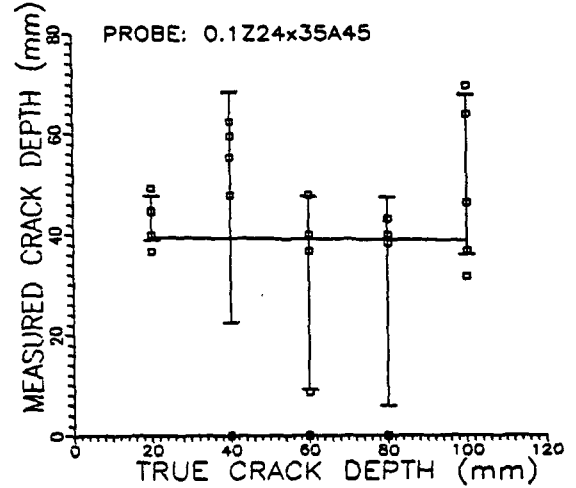


Fig.16. Relationship between true and measured crack depth by 0.1Z24x35A45.

4-3. 표면파(Rayleigh wave)의 경로 변화

표면파 탐촉자에 의하여 균열깊이를 측정할 경우 반사와 투과가 동시에 일어나는 균열의 끝단에서 음파의 모드가 변화된다. Fig. 17에 이것에 대하여 간단히 나타내었다. 여기서 경로 A는 표면파에 의한 전파이고 경로 B는 표면파가 균열 끝에서 종파로 음파모드가 변화되어 전파되는 경우이다.

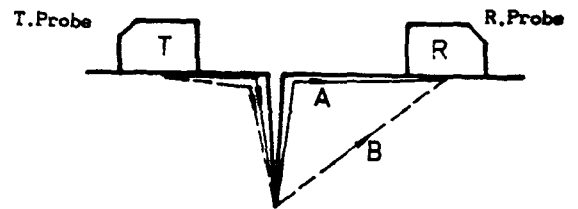


Fig.17. Paths of Rayleigh wave in concrete.

콘크리트에 있어서 표면파의 전파과정을 알아보기 위하여 탐촉자 0.1Z24x35S를 이용하여 측정된 전파시간으로 부터 경로 A와 B에 대하여 계산한 결과 Fig. 18과 같다.

또한 경로에 따른 계산오치는 Fig. 19와 같이 변화하였다. 경로 A의 경우는 깊이가 증가함에 따라 오차가 증가하였으나 경로 B의 경우는 오차가 감소하고 있다.

따라서 균열깊이가 증가함에 따라 초음파의 전파경로가 경로 A에서 경로 B로 변화함을 알 수 있다.

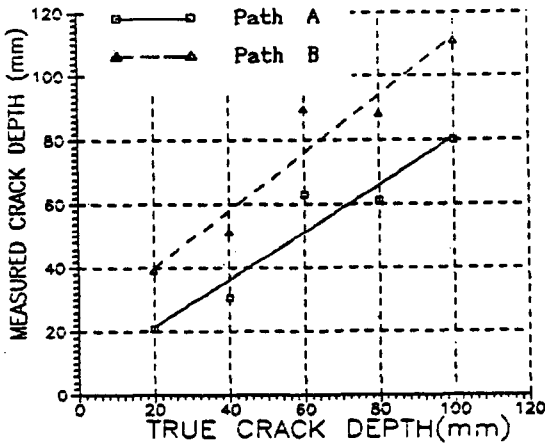


Fig.18. Calculated crack depth for path A and Path B on Rayleigh wave.

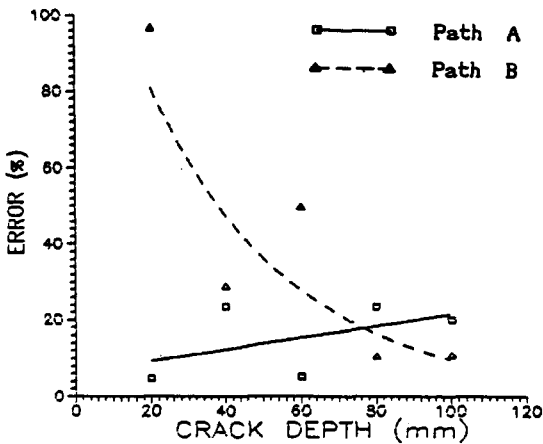


Fig.19. Relationship between error and true crack depth.

5. 결 론

초음파에 의한 콘크리트 균열깊이 측정에 있어서 초음파의 모드에 따른 연구결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 본 실험에 있어서 균열깊이를 수평횡파(SH), 종파, 표면파 탐촉자에 의하여 측정된 결과, 실제 균열깊이와 측정된 균열깊이의 상관계수가 각각 0.824, 0.629, 0.703으로 수평횡파 탐촉자가 가장 높은 상관계수를 보였다. 따라서 콘크리트의 균열깊이 측정시는 수평횡파에 의한 탐상이 바람직하다.
- 2) 균열이 있는 시험편에서 표면파에 의한 초음파의 전파경로는 균열의 깊이가 80mm부터는 Fig. 17의 경로 A에서 경로 B로 변화하였다. 따라서 표면파에 의한 콘크리트의 균열깊이 측정시는 균열 깊이에 따른 전파경로의 변화를 고려해야 한다. 앞으로 지향특성이 좋은 탐촉자를 이용하여 콘크리트에서 산란감쇠가 적은 표면파에 의한 균열깊이 탐상의 개발이 연구과제로 남는다.

References

1. Akashi, T, "On the measurement of velocity and loss of ultrasonic pulse in concrete", Proceedings, 3rd International Conference on NDT., 1960.
2. R. H. Elbery, "Non-Destructive Testing of Concrete and It's Relationship to Specification", J. of the Concrete Society, vol. 5, No. 4, 1971.
3. L. I. Knab, G. V. Blessing, and J. R. Clifton, "Laboratory evaluation of ultrasonics for crack detection in concrete", J. of ACI 80(1), (1983) pp.17-27.
4. L. Smith, "The use of surface scanning waves to detect surface-opening cracks in concrete", NDT Int. 17(5), 1984, pp.273~275.
5. J. Krautkramer, H. Krautkramer, "Ultrasonic Testing of Materials", 1969. pp.15~20.
6. 宮島, 小倉, "SH橫波によるコンクリートの表面開口き裂測定", 非破壊検査, 第37卷2號 1988.