

초음파를 이용한 콘크리트 시편의 피복두께 이하에 위치한 균열깊이 탐사

Measurement of Crack Depth Located under Steel Reinforcement
in Reinforced Concrete Specimens using Ultrasonic Method

임 흥 철* 김 연 수** 우 상 균*** 송 영 철****
Rhim, Hong-Chul Kim, Yeon-Su Woo, Sang-Kyun Song, Young-Chul

Abstract

The objective of this study is to determine crack depth located under steel reinforcement in concrete specimens using ultrasonic method. Experimental studies were performed on concrete specimens containing vertical and inclined surface-opening cracks with known depths. The other studies were carried out on specimens with flexural crack.

Experimental results have shown that the crack depth is effectually measured when the distance between the probes is less than the crack depth. The effect of steel on crack depth estimation is studied through a model by considering P-waves diffraction at the tip of crack and steel. In addition, experimental results show that the ultrasonic method is one of useful methods to evaluate the crack depth in reinforced concrete.

keywords : Ultrasonic Method, Reinforced concrete, Crack Depth

1. 서 론

초음파를 이용한 콘크리트에서의 균열깊이 탐사는 현재 충격력을 통해 초음파 영역의 탄성파를 발생하여 균열을 검출하는 충격탄성파법(Impact-echo method)과, 탐촉자(Probe)를 통해 탄성파를 발생시켜

균열을 검출하는 펄스반사법(Pulse-echo method)이 활용되고 있으며, 최근에는 이러한 탄성파의 매질내 전파시간을 통해 시간영역 정보를 이용하거나, 스펙트럼의 분석에 의한 주파수 영역에서의 정보를 이용하여 균열깊이를 측정하는 방법들이 연구되고 있다.⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽¹²⁾⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾

* 정희원, 연세대학교 건축공학과 교수, 공학박사

** 학생회원, 연세대학교 건축공학과, 석사과정

*** 정희원, 한국전력연구원 구조부지그룹, 선임연구원

**** 정희원, 한국전력연구원 구조부지그룹, 책임연구원

E-mail : hcrhim@yonsei.ac.kr 02-2123-2792

• 본 논문에 대한 토의를 2002년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 2003년 4월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

이 중 스펙트럼을 이용한 균열깊이 탐사의 경우는 충격 발생시 발생하는 다양한 주파수를 이용하여 균열로부터 영향을 받는 특정주파수의 변화를 통해 상대적인 균열깊이를 측정하는 것으로, 결함위치나 두께탐사에는 효과적이지만 균열깊이 탐사시에는 내부골재등의 영향으로 인해 주파수 스펙트럼이 복잡하게 나타나기 때문에 균열로부터의 정보를 구분하기가 어려우며, 시간전파법에 비해서도 상대적으로 오차가 크게 발생하고 있다. 따라서, 표면으로부터의 균열깊이를 탐사하는 경우에는 두 개의 탐촉자를 이용한 시간전파법을 사용하는 것이 보다 효과적이며, 이와 관련한 연구가 꾸준히 진행되고 있다.⁽⁷⁾⁽¹¹⁾

시간전파법을 이용한 균열깊이 탐사에 관한 최근 연구는 주파수⁽¹⁾⁽¹⁴⁾, 탐사방법⁽²⁾⁽⁹⁾, 철근간섭⁽¹⁰⁾과 같은 탐사조건을 통해 이루어지고 있으며, 대부분 피복두께 이하에서의 균열깊이 탐사에 관한 연구결과가 나타나고 있다. 따라서, 본 연구에서는 피복두께 이상에서의 균열깊이 탐사를 중심으로 기존 연구에서 다루지 않았던 주파수(50 KHz) 및 탐사방법을 적용하여 (1) 탐사거리와 균열깊이와의 상관관계, (2) 균열깊이 탐사시 미치는 철근영향, (3) 탐사각도와 균열깊이 측정과의 관계, (4) 탐사파형의 비교를 통한 피복두께 이상에서의 균열깊이 탐사, (5) 휨 균열 시편에서의 균열깊이 탐사 등에 관한 연구를 수행하였고, 이를 통해 실제구조물에서의 균열깊이 탐사를 위한 적용성을 검증해 보고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 초음파 음속측정

콘크리트의 균열깊이 탐사를 위해서는 음속에 대한 정확한 탐사가 우선되어야 한다. 현재는 이러한 음속을 측정하기 위해 양 측면에서의 접근을 통한 투과법을 사용하거나, 한 측면에서의 접근이 가능한 경우 표면법을 적용 측정하고 있다. 이 중 표면법을 통한 음속을 측정하는 경우에는 탐사거리에 따라 음속이 측정값에 차이가 발생하기 때문에 정확한 탐사결과를 얻기 위해서는 탐촉자간 측정거리를 탄성파(종파,

횡파, 표면파)중 종파를 구분해 낼 수 있는 15 cm 이상에서 측정하여야 하며, 보다 정확한 음속측정을 위해 투과법을 통해 측정된 음속으로 보정하여 측정한다.⁽¹⁾

식(1)은 초음파를 이용한 균열깊이 측정시 사용된 콘크리트에서의 음속(종파)측정시 사용된 식을 나타낸 것이다.

$$V_p = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \\ = \sqrt{\frac{M}{\rho}} = \frac{L}{T_o} \quad (1)$$

여기서,

V_p : 콘크리트에서의 종파 음속 (cm/s)

M : 구속탄성계수 (kgf/cm²)

E : 영(Young) 계수 (Nf/m²)

ρ : 매질의 밀도 (kg/cm³)

ν : 포아송 비

L : 탐촉자 사이의 측정거리 (mm)

T_o : 초음파 도달시간 (μ sec)

2.2 균열깊이 탐사방법

콘크리트에서 초음파를 이용하여 균열깊이를 탐사하는 경우, 매질 특성상 정확한 측정시점을 판정하는 기준이 모호한 경우가 일반적이다. 본 연구에서는 절대적인 시간을 측정하기 보다는 균열이 없는 부위와 균열이 존재하는 부위에서의 탐사결과를 비교함으로써 상대적인 시간차를 통한 균열깊이를 추정하였다.

콘크리트 표면으로부터 수직한 결함이 존재하는 경우, 균열을 중심으로 같은 거리에 양쪽으로 두 탐촉자를 배치하여 발진자로부터 전기적인 펄스를 가하면 발진자로부터 초음파가 발생하게 된다. 이러한 초음파는 균열의 끝부분에 도착하게 되면 회절하여 구면파로 전파하며 반대편에 놓인 수신자에 도착하게 되며, 이때 초음파의 도달시간은 균열의 깊이(D)와 탐촉자간 측정거리(L)에 의하여 결정되게 된다.

따라서, 균열부를 회절하여 도달한 초음파 도달시간 T_c 는 식(2)와 같다.

$$T_c = \frac{\sqrt{L^2 + 4D^2}}{V_p} \quad (2)$$

또한 균열이 존재하지 않는 부위에서의 초음파 도달 시간 T_o 는 식(3)과 같다.

$$T_o = \frac{L}{V_p} \quad (3)$$

따라서, 균열깊이 D 는 식(4)를 통해 구할 수 있다.

$$D = \frac{L}{2} \sqrt{(T_c/T_o)^2 - 1} \quad (4)$$

여기서,

D : 표면으로부터의 균열깊이(mm)

L : 탐촉자 사이의 측정거리(mm)

T_c : 초음파의 균열부 도달시간(μ sec)

T_o : 초음파의 건전부 도달시간(μ sec)

V_p : 콘크리트에서의 종파 음속(cm/s)

3. 실험시편 및 장비

3.1 시편

제작된 시편은 Table 1 and 2와 같이 실제 구조물(원자력 발전소의 격납구조물)의 적용을 위해 해당 구조물과 동일한 강도인 387.1 kgf/cm²(5500 psi)를 지니도록 제작하였고, 휨 균열 시편의 경우 실제 균열과 유사한 효과를 얻기 위해 허중을 가하여 균열을 생성시켰다.

3.2 실험장비

콘크리트 시편에서의 균열탐사 실험은 최근 상용화되어 사용되고 있는 초음파 탐사장비 및 50 KHz 종파용 탐촉자, A/D converter를 사용하였다.

Table 1 제작시편

시편종류	시편크기 (mm) L × W × D	균열깊이 (mm)	수량 (개수)
수직균열시편 (철근없음)	600×300×100	50	6 (피복두께 40 mm)
	600×300×200	100	
	600×300×300	150	
	600×300×400	200	
	600×300×500	250	
수직균열시편 (철근배근)	800×300×120	20, 40,	2 (피복두께 40 mm)
	800×300×120	80, 100	
경사균열시편 (철근배근)	800×300×120	20, 40,	2 (피복두께 40 mm) (경사각도30°)
	800×300×120	80, 100	
휨균열시편 (철근배근)	600×300×200	118	1 (피복두께 50 mm)
총 시편	11 개		

Table 2 배합비

배합강도 (kgf/cm ²)	Slump (mm)	W/C (%)	S/A (%)	Air (%)	혼화제 (%)
387.1 (5500 psi)	80	54.1	44.0	4.0	시멘트의 0.3
물 (kg/m ³)	시멘트 (kg/m ³)	모래 (kg/m ³)	자갈 (kg/m ³)	물(kgf) : 모래(kgf) : 시멘트(kgf) : 자갈(kgf)	
134	340	782	981	1 : 2.24 : 4.43 : 5.66	

- Center Frequency : 50 KHz
- Pulse Length : 80 mm
- Probe Diameter : 40 mm
- Sonic Speed : 3500-4500 m/s
- Sampling Time : 0.1 μ s
- Measurement Method : $T_c - T_o$

4. 실험 및 결과분석

4.1 탐사거리와 균열깊이와의 상관관계

콘크리트에서의 균열깊이 측정시 건전부에서의 초음파 도달시간은 탐사거리가 멀어짐에 따라 감소하는 경향이 보이고 있으며⁽³⁾, 탐촉자간 측정거리에 따른 균열측정값이 다르게 나타나고 있다. 본 연구에서는 탐사거리에 따른 균열깊이와의 상관관계를 알아보기 위한 연구를 수행하였고, Fig. 2와 같은 50, 100, 150,

200, 250, 300 mm 의 균열을 지나는 시편을 제작, 탐촉자간 탐사거리를 100 - 600 mm로 변화시켜 가며 균열깊이와의 관계를 측정하였다.

탐사 결과, Fig. 2에서와 같이 탐촉자 사이의 측정 거리에 따라 균열깊이 차이가 나타남을 알 수 있으며, 탐사거리가 300 mm 이내에서 정확한 결과값을 나타냈다.

또한, 균열깊이가 200 mm 이내에서는 탐촉자간 측정거리가 균열깊이와 같거나 작은 경우에 실제균열깊이에 근접하게 측정됨을 알 수 있었다. 이는 음파가 매질 내부로 통과할 때에 비해 상대적으로 건전부를 통과할 때의 음속값이 좀 더 많은 감소를 나타내므로, 이로 인한 영향으로 보여지며, 균열깊이가 250 mm 이상에서 오차가 크게 나타나는 만큼, 실제 측정시 50 KHz 탐촉자(지름 40 mm)의 최대 탐촉자간 탐사거리는 200 mm를 넘지 않는 범위에서 측정하는 것이 정확한 결과값을 얻을 수 있다.

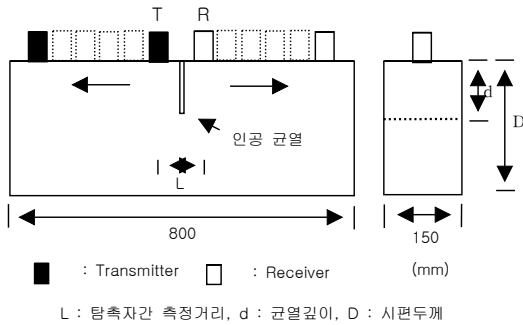


Fig. 1 탐촉자 위치

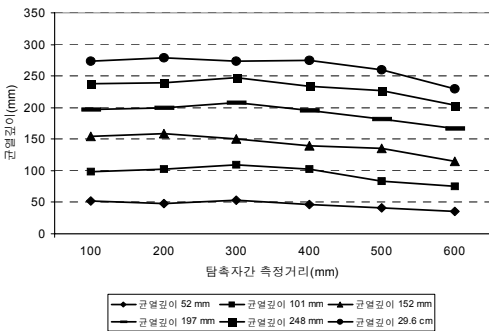


Fig. 2 탐촉자간 거리변화에 따른 균열깊이 측정

4.2 균열깊이 탐사시 미치는 철근영향

피복두께 이상의 균열깊이 탐사시에는 철근의 영향으로 인해 균열깊이 측정시 오차가 크게 발생하게 되므로⁽¹⁰⁾, 실제 구조물에서의 탐사를 위해서는 측정 거리에 따른 철근영향을 분석하는 것이 필요하다. 이러한 점을 고려하여 균열깊이 20, 40, 80, 100 cm 지나는 수직 및 경사균열에 대해 철근과의 수평거리를 각각 40 mm, 80 mm, 120 mm로 변화해 가면서 균열깊이 탐사시 미치는 영향을 측정하였다.

실험결과, Fig. 4와 Fig. 5에서와 같이 피복두께 이하의 균열 20 mm, 40 mm 탐사는 철근과의 거리에 상관없이 수직 및 경사균열 모두에서 정확한 측정값을 얻을 수 있었다. 그러나 피복두께 이상에서의 균열 80 mm, 100 mm 탐상에서는 철근과 탐촉자 사이의 거리에 따라 측정결과가 다르게 나타나고 있으며, 수직 및 경사균열 모두 균열깊이와 철근과의 수평

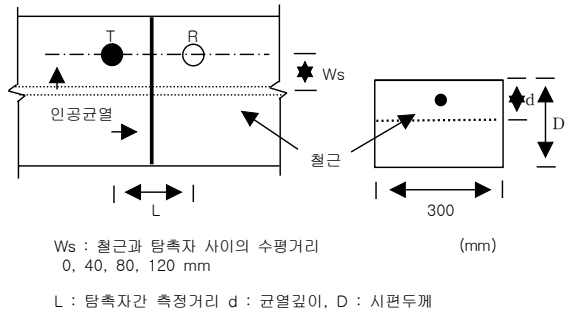


Fig. 3 철근과의 거리에 따른 균열깊이 탐사

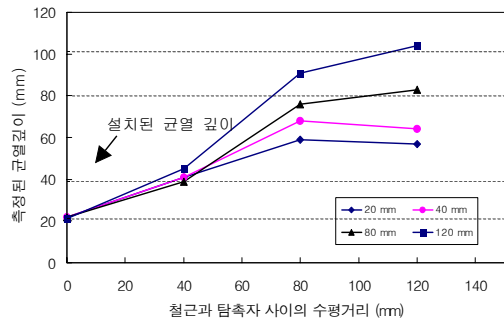


Fig. 4 철근영향을 고려한 수직균열깊이 탐사결과

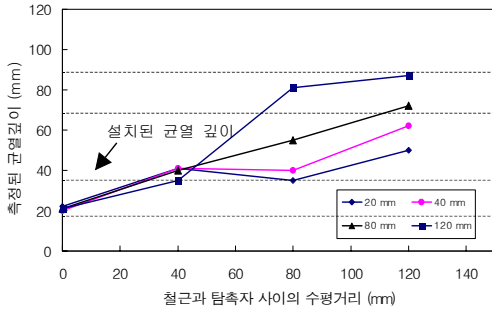


Fig. 5 철근영향을 고려한 경사균열깊이 탐사결과

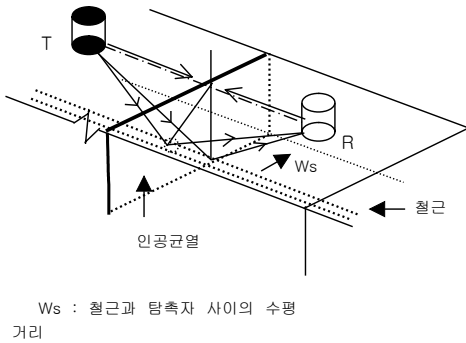


Fig. 6 균열탐사시 초음파의 전파경로

거리가 같거나 그 이상이 되는 경우에 실제 균열깊이에 근접함을 알 수 있었다.

이는 Fig. 6와 Fig. 7에서와 같이 철근에서의 초음파 속도가 콘크리트에서의 속도에 비해 상대적으로 빠르게 나타나기 때문에 피복두께 이상에서의 균열깊이를 측정시에는 균열부로부터의 회절파가 도착하기전에 철근으로부터 음파가 먼저 도착하게 되며, 실제 균열깊이 보다 과소하게 평가하게 되는 것이다. 따라서 실제 구조물에서의 균열깊이 측정시에는 균열깊이를 모르는 경우가 대부분이므로 철근과의 수평거리를 늘려가며 가장 큰 값을 나타내는 균열깊이를 취하여야 한다.

4.3 탐사각도에 따른 균열깊이 측정

피복두께 이상에서의 균열깊이 측정시 활용될 수 있는 대각선 탐사방법의 경우⁽⁴⁾, 탐사각도를 변화하여 측정함에 따라 측정결과가 다르게 나타날 수 있다. 따

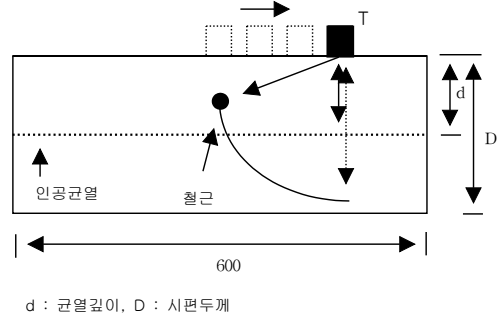


Fig. 7 탐사위치에 따른 철근영향

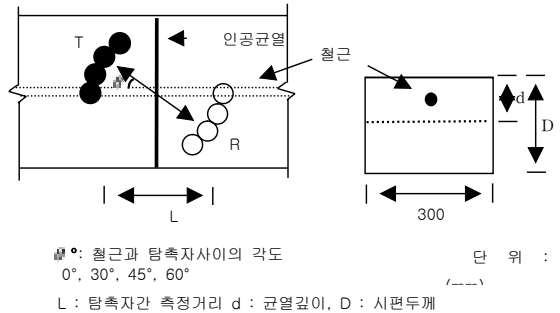


Fig. 8 탐사각도의 변화에 따른 균열깊이 탐사

라서, 실제 측정시 정확한 탐사각을 찾기 위해 탐촉자간 측정거리를 200 mm로 고정할 후, 탐촉자와 철근과의 각도를 0°, 30°, 45°, 60°로 변화시켜 가며, 균열깊이 측정시 적정 탐사각을 도출하기 위한 연구를 수행하였다.

탐사결과, 수직 및 경사균열 모두에서 탐사각에 따른 균열깊이 측정값이 차이를 나타냈으며, 이를 통해 피복두께 이상의 균열깊이 탐사시 대각선 탐사법을 이용할 경우에는 탐사각에 따라 균열 측정값이 다르게 나타남을 알 수 있었고, Fig. 9와 Fig. 10의 결과를 통해 철근과의 탐사각도는 30°로 유지하여 측정하는 것이 효과적임을 알 수 있다.

4.4 탐사파형의 비교를 통한 균열탐사

피복두께 이상에서의 균열깊이를 측정하기 위해 동일 탐사면에서의 탐사파형을 비교하여 측정하는 것으

로, 기존 연구(Kaszynski, 2000)에서 사용된 100 KHz와는 달리 50 KHz 주파수의 탐촉자(지름 40 mm)를 적용, 다양한 균열깊이를 통한 실험을 수행하였다.

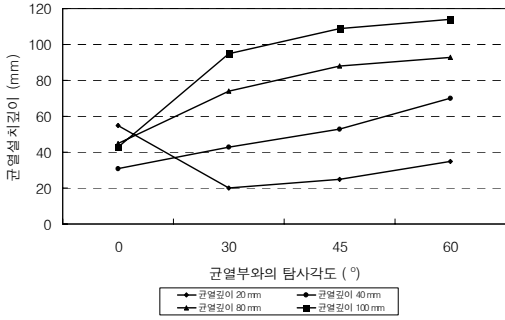


Fig. 9 탐사각의 변화에 따른 수직균열 탐사결과

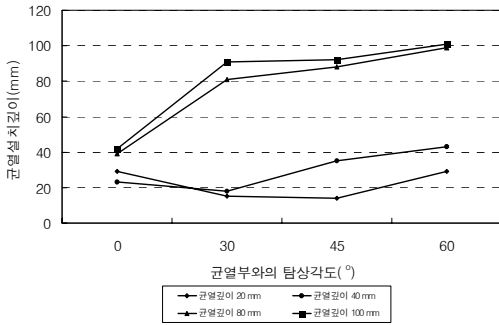
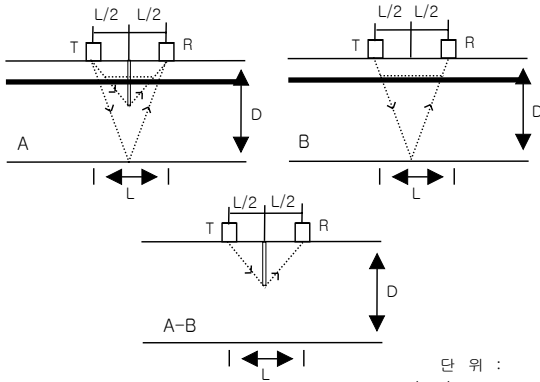


Fig. 10 탐사각의 변화에 따른 경사균열 탐사결과



L : 탐촉자간 측정거리, D : 시편두께

Fig. 11 파형비교를 통한 균열깊이 탐사방법

탐사방법은 균열이 존재하는 부위에서 측정된 파형과 균열이 없는 부위에서의 측정된 파형을 비교하여 동일조건인 철근 및 시편 저면에서의 반사파를 상쇄한 후 균열 끝으로부터 오는 회절파의 반사파만을 구분하는 것으로, 이때의 도달시간을 측정하여 균열깊이를 추정할 수 있다. 탐사결과, Fig. 13에서와 같이 균열 부에서의 탐사파형과 균열이 없는 부위에서의 탐사파형의 차로부터 Fig. 14과 같은 결과를 얻을 수 있으며, 균열 끝으로부터의 회절되어 오는 초음파 도달시

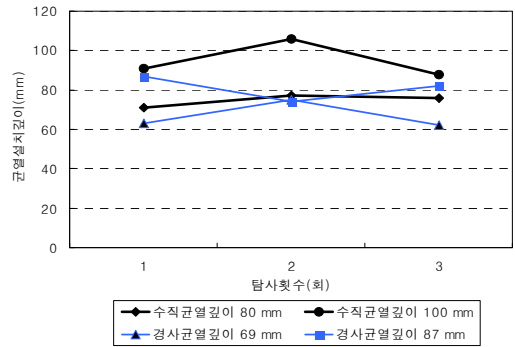


Fig. 12 파형비교를 통한 수직 및 경사균열 결과

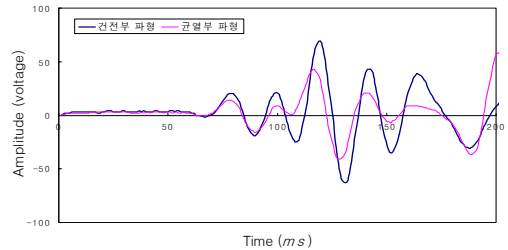


Fig. 13 건전부 및 균열부 탐사파형

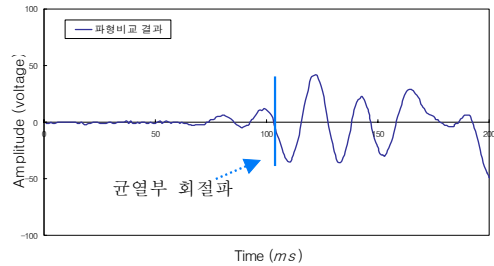


Fig. 14 탐사파형 상쇄후 결과

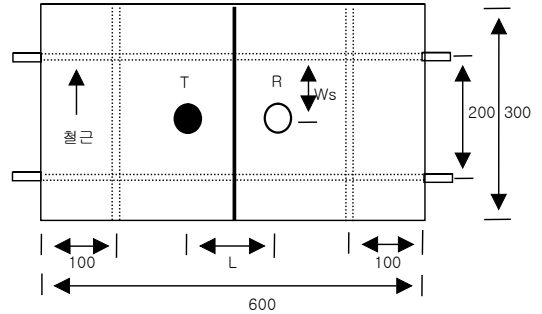
간의 측정은 중첩된 파형을 제거할 경우 동일한 조건에서의 탐사파형은 상쇄되고 건전부와 균열부의 통과 파형은 차이를 나타내기 때문에, 이때 나타나는 진폭이 차이가 최초로 크게 변화하는 시점을 기준으로 도달시간을 측정할 수 있으며, Fig. 12에서의 실험결과와 같이 실제 균열깊이에 근접한 결과를 얻을 수 있었다. 한편, 본 실험에서 사용한 50 KHz 주파수의 경우, 탐사파장(λ)이 큰 관계로 콘크리트 내부골재나 계재물에 의한 영향은 적게 받지만, 고주파에 비해 상대적인 감도는 적게 나타나므로, 주파수를 최대 250 KHz를 넘지 않는 범위에서⁽⁸⁾ 높은 주파수를 적용할 경우 오차를 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

4.5 휨 균열 시편에서의 균열깊이 탐사

실제 구조물에서의 균열깊이 탐사를 위해 유사한 휨 균열 시편을 제작, 하중을 통해 휨 균열을 생성하였고, 철근과의 간섭을 고려하여 철근과의 수평거리(W_s)는 100 mm로 유지한 후, 탐촉자간 탐사거리에 따른 균열깊이를 측정하였다.

Fig. 16과 같이 탐촉자간 탐사거리를 100, 150, 200 mm로 변화해 가며 측정한 결과, Fig. 17에서와 같이 실제 균열깊이 118 mm (Table 1 참조)에 비해 과소 평가하는 경향을 나타내고 있으며, 탐촉자간 측정거리는 150 mm에서 가장 근접한 측정결과를 나타내고 있다.

인공균열 시편에서와는 달리 휨 균열 시편에서의 균열깊이 측정결과는 비교적 오차가 크게 나타나고 있는데, 이는 실제 구조물에서의 발생하는 균열의 경우 내부로의 균열이 진전될수록 균열 폭이 적어지거나 내부골재등을 통해 미세한 음파가 통과하는 경우가 발생하므로, 실제 균열깊이에 비해 과소 평가하는 것으로 보여지며, 정확한 측정을 위해서는 반복된 실험결과에서 얻어진 균열부 및 건전부에서의 탐사파형을 통해 일정 진폭값의 기준을 정하여 불필요한 균열부 통과파를 구분하면, 균열부로부터의 회절파 도달시간을 명확히 구분하여 측정할 수 있다.



단위 : (mm)

W_s : 탐촉자와 철근과의 수평거리 L : 탐촉자간 거리

Fig. 15 탐촉자 배치

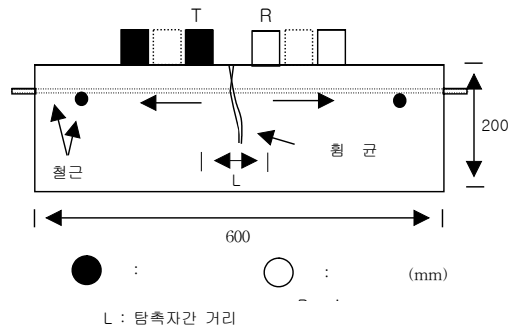


Fig. 16 탐사방법

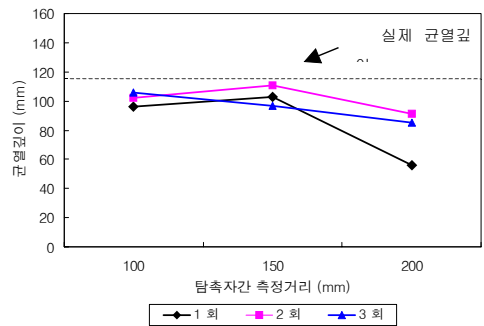


Fig. 17 휨 균열깊이 탐사결과

5. 결론

실험결과를 기초로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 콘크리트의 균열깊이 탐사시에는 탐촉자간 측정거리(L)에 따라 결과값이 다르게 나타날 수 있으며,

- 최대 200 mm이내에서 측정하여야 하며, 균열부로부터 탐촉자간 거리(L/2)가 균열깊이(d)보다 적은 범위에서 탐사하여야 한다.
- 2) 초음파 음속의 철근으로부터 영향을 최소 화하기 위해서는 탐촉자의 철근과의 수평거리(Ws)가 균열깊이(d)보다 같거나 적은 범위에서 측정하여야 한다.
 - 3) 피복두께 이상에서 균열깊이에 대해 대각선 탐사방법을 적용하여 측정할 경우, 탐촉자와 철근과의 탐사각도는 30°를 유지하여 측정하여야 한다.
 - 4) 피복두께 이상에서의 균열깊이 측정시 50 KHz 주파수를 적용할 경우, 탐사파형을 비교하여 균열깊이를 측정하는 것이 가능하며, 250 KHz 이내에서 고주파를 통해 정밀도를 높일수 있다.
 - 5) 실제 구조물에서 균열깊이 탐사시에는 골재 및 균열형태에 따라 파형분석이 용이하지 않으므로, 일정 진폭값을 기준으로 하여 전전부와 균열부에서 측정된 탐사파형을 비교함으로써 균열부로부터 회절되어 오는 종파를 구분해 낼 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국전력연구원(KEPRI)으로부터 연구비와 장비를, 그리고, 지진공학연구센터(KEERC)로부터 연구비 일부를 지원 받았습니다.

참고문헌

1. 김영환, 이세경, 김호철, “초음파 도달시간에 의한 콘크리트에서의 수직 균열의 깊이 측정에 관한 연구”, 한국콘크리트학회 학술발표 논문집, 1990. 5. pp.35-38.
2. 오병환, 김광수, 김세훈, “초음파 속도법을 이용한 콘크리트 구조물의 균열깊이 측정”, 구조물 진단학회 추계 학술발표 논문집, Vol.10, 1999. pp. 61-66.
3. 박석균, “콘크리트 비파괴검사 실용화연구(Ⅲ)”, 쌍용중앙연구소, 1990. 12.
4. 魚本建人, “콘크리트 構造物의 非破壞檢査”, 日本建築學會, 1993.
5. Alexander, A. M., and Thornton, H. T., “Ultrasonic pitch-catch and pulse-echo measurements in concrete”, Nondestructive Testing of Concrete, Ottawa, 1984.
6. Davis, A. G., “Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures”, ACI Manual for Concrete Practice Part 2, by ACI Committee 228, 1999.
7. Kaszynski, J., “An investigation into the depth in a cracks in a reinforced-concrete structure using an ultrasonic method”, 15th World Conference on Nondestructive Testing, 2000.
8. Komlos, K., Popovics, S., Nummergerova, T., Babal, B., and Popovics, J. S., “Comparison of Five Standards on Ultrasonic Pulse Velocity Testing of Concrete”, ASTM, 1996.
9. Kuo, M. K., Lin, T. R., Lin, P. L., and Wu, T. T., “Locating the crack tip of a surface-breaking crack part 1. Line crack”, Ultrasonics 36, 1998. pp.803-811.
10. Lin, P. L., Lee, K. H., Wu, T. T., and Kuo, M. K., “Scan of surface-opening cracks in reinforced concrete using transient elastic waves”, NDT&E International 34, 2001. pp.219-226.
11. Lin, Y., and Su, W. C., “The use of stress waves for determining the depth of surface-opening cracks in concrete structures”, ACI Materials Journal, 1996.
12. Sakata, Y., and Ohtsu, M., “Crack Evaluation in Concrete Members Based on Ultrasonic Spectroscopy”, ACI Materials Journal, V. 92, No. 6, November-December 1995.
13. Sansalone, M., Lin, J. M., and Streett, W. B., “Determining the Depth of Surface-Opening Cracks Using Impact-Generated Stress Waves and Time-of-Flight Techniques”, ACI Materials Journal, V.95, No.2, Mar.-Apr., 1998.
14. Uchida, M., Ohtsu, M., Tsuji, N., and Okamoto, T., “Evaluation of Crack Depth in Reinforced Concrete Structure using Ultrasonics”, JSCE No. 662, Vol. 49, 2000. pp.223-230.

(접수일자 : 2002년 4월 22일)