

초음파 속도를 이용한 콘크리트의 균열깊이 측정에 관한 실험적 연구

Test for Concrete Crack Depth Measurement Using Ultrasonic Pulsevelocity Technique

이 장 화

〈한국건설기술연구원 선임 연구원〉

김 성 욱

〈한국건설기술연구원 연구원〉

1. 서 론

콘크리트 구조물이 건설되면 대부분의 경우 구조물의 용도에 따라 장기간 사용하게 되며 구조물의 종류에 따라 다소의 차이는 있으나 거의 모두가 인간생활과 생명 및 안전과 밀접한 관계를 맺고 있다.

따라서 콘크리트 구조물에 있어서 내구수명이나 구조적 안전성에 영향을 미치는 요인은 조기에 파악하여 신속히 대책을 강구해야 한다. 콘크리트 구조물을 유지관리 및 보수하는데 항상 조사 분석해야 할 가장 중요한 결함 요인은 콘크리트의 균열이다.

콘크리트의 균열은 종합적으로 분석하여 상태를 평가해야 하는데, 균열상태는 폭, 깊이, 방향, 형상의 측면에서 조사 분석하며 구조물의 종류에 따라 항목별 중요도에 다소의 차이는 있을 수 있다. 이중 균열깊이가 구조물의 안전거동상 미치는 영향이 큰 경우에는 콘크리트에 발생된 균열의 깊이를 정확히 측정하여 정도에 따른 적절한 대책을 수립해야 할 것이다.

본 연구는 기존구조물에 발생된 균열을 비파괴적으로 측정하는 방법중에서, 초음파 속도를 측정하여 균열깊이를 계산 추정할 수 있는 초음파 속도측정기(PUNDIT, V-METER)의 적용성과 적용시의 측정신뢰도를 검증하기 위해 수행되었으며 검증시험의 개략적인 절차는 아래와 같다.

- (1) 실제 구조물의 균열상태 분석
- (2) 실제 구조물의 유사 균열도입을 위한 시편 제작
- (3) 균열도입
- (4) 도입된 실제 균열깊이 측정(육안검사)
- (5) 초음파를 이용한 균열깊이 계산 및 측정
- (6) 실제깊이와 초음파를 이용한 측정깊이의 비교 분석

2. 시편 제작

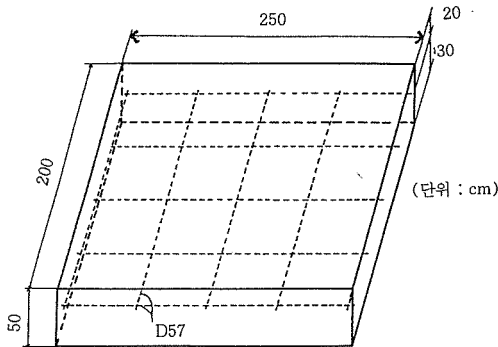
2. 1 콘크리트 시편 개요

- (1) 슬래브 시편

슬래프 시편에 대한 개요는 (표 1), 철근을 배근한 시편은 (그림 1)과 같다.

(표 1) 슬래브 시편 개요

시편의 종류	규격(cm)	수량 (개)	σ28 (kg/cm ²)	철근 배 근 유무
수직균열 슬래브	250×200×50	1	280	D57 이형철근
수직균열 슬래브	250×200×50	1	280	무 근
경사균열 슬래브	250×200×50	1	280	D57 이형철근
경사균열 슬래브	250×200×50	1	280	무 근



(그림 1) 슬래브 시편(철근 배근)

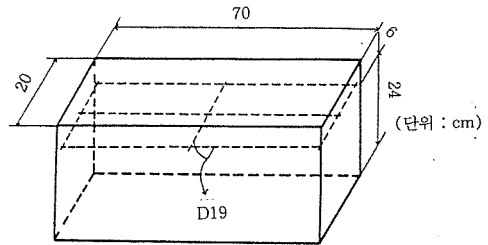
(2) 빔 시편

빔 시편에 대한 개요는 (표 2) 및 (그림

2)와 같다.

(표 2) 빔 시편 개요

시편의 종류	규격(cm)	수량 (개)	σ28 (kg/cm ²)	철근 배 근 유무
빔 시편(철근)	70×20×30	18	280	D19 이형철근
빔 시편(무근)	70×20×30	2	280	무 근



(그림 2) 빔 시편(철근 배근)

(3) 콘크리트 배합설계

본 시편제작에 사용된 콘크리트의 배합표 및 압축강도는 (표 3)과 같다.

(표 3) 콘크리트 배합표 및 압축강도

시멘트	W/C (%)	슬럼프 (cm)	S/A (%)	물 (kg)	시멘트 (kg)	모래 (kg)	굵은골재		공기량 (%)	압축강도(kg/cm ²)		
							38mm	19mm		3일	7일	28일
보통 포틀랜드 시멘트	46	5	41	176	385	759	548	548	3.5	93	243	447

(4) 균열도입용 강판 설치

시편제작에 사용된 균열도입용 강판의 제원은 (표 4)와 같다.

2. 2 균열도입

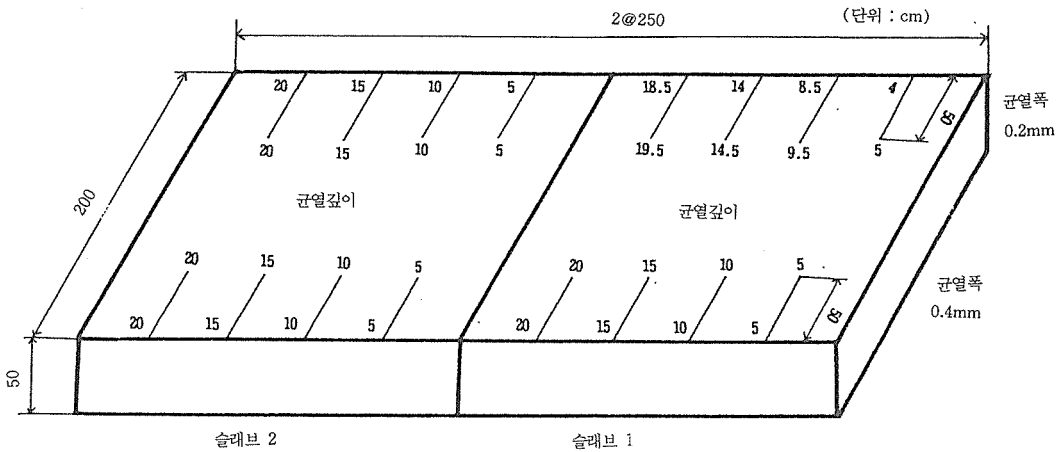
슬래브 시편의 균열도입은 슬래브 시편의 거푸집내에 콘크리트를 타설한 직후 미리 제작된 강판을 소요위치에 매설하고 콘크리트가 경화된 후 강판을 제거하는 방법으로 실시하였다. (그림 3)은 수직균열 슬래브 시편의 균

열도입 후 측정된 균열깊이이다.

빔 시편은 빔 시편 거푸집내에 콘크리트를 타설하고 다짐을 한 후 표면을 잘 마무리 하고 빔 시편 중앙부에 노치를 형성시키기 위해 미리 제작된 강판(0.2×40×200mm)을 빔 시편 중앙에 매설하였다. 매설된 강판은 콘크리트 타설로 부터 24시간 후에 제거하였다. 빔 시편의 균열도입은 빔 시편을 약 14일 대기양생한 후 콘크리트 압축시험기를 이용하여 실시되었고, 그 결과는 (표 5)와 같고 (그림 4)는 빔 시편의 균열도입 예이다.

(표 4) 균열도입용 강판의 제원

강판의 두께(mm)	강판폭(cm)	강판길이(cm)	수량(개)	비 고
0.2	50	5	4	슬래브 시편의 수직 및 경사 균열도입용
		10	4	
		15	4	
		20	4	
0.4	50	5	4	
		10	4	
		15	4	
		20	4	
0.2	20	2	20	빔 시편 균열도입을 위한 Notch 제작용

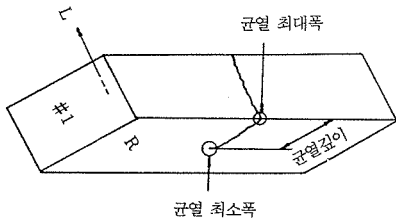


(그림 3) 수직균열 슬래브 시편에 도입된 균열깊이

(표 5) 빔 시편에 도입된 균열 상세

시 편 번호	측 면 구분	균 열 제 원			시 편 번호	측 면 구분	균 열 제 원		
		깊이 (cm)	폭(mm)				깊이 (cm)	폭(mm)	
			최 대	최 소				최 대	최 소
1	L	16.5	0.25	0.02이내	6	L	18.5	0.20	0.02이내
	R	20.0	0.29	0.02이내		R	21.5	0.20	0.02이내
2	L	19.5	0.28	0.02이내	7	L	19.0	0.34	0.02이내
	R	16.5	0.26	0.02이내		R	20.0	0.30	0.02이내
3	L	19.5	0.21	0.02이내	8	L	18.0	0.16	0.02이내
	R	21.0	0.20	0.02이내		R	19.0	0.14	0.02이내
4	L	20.0	0.25	0.02이내	9	L	16.5	0.18	0.02이내
	R	24.0	0.21	0.02이내		R	16.5	0.16	0.02이내
5	L	20.0	0.29	0.02이내	10	L	17.0	0.20	0.02이내
	R	21.0	0.30	0.02이내		R	17.0	0.18	0.02이내

주) 균열깊이는 육안검사, 균열폭은 EYE GAGE로 측정된 것임.



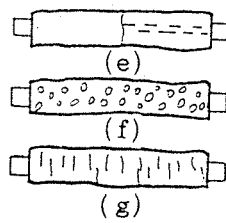
(그림 4) 빔 시편의 균열도입 예

3. 균열깊이 측정

3. 1 초음파 측정장비의 기본 원리

초음파 속도측정기로 콘크리트 내부를 탐사하는 기본원리는 20kHz이상의 초음파 종파 Pulse를 콘크리트 중에 방사하여 그 전파시간 t 로 부터 얻어지는 전파속도($V_c=L/t$, L : 전파거리)로써 콘크리트의 내부상태를 평가하는 방법이다.

여기서, 방사된 초음파는 통과 가능한 매질을 타고 최단거리로 전달되며, 내부매질의 상태에 따라 전달에 영향을 받게 된다. 콘크리트의 내부를 탐사할 때 초음파의 전달에 영향을 미치는 몇가지 조건과 전달형태를 보면 (그림 5)와 같다.



T_R : 초음파 발진자
 R_C : 초음파 수신자

(d) 좁은 균열이 있을 경우 : 음파의 일부가 반사되고 일부는 증폭량이 손실되어 전달됨. 전달시간이 약간 증가됨.

(e) 넓은 균열이 있을 경우 : 음파가 전부 반사되어 통과하지 않음.

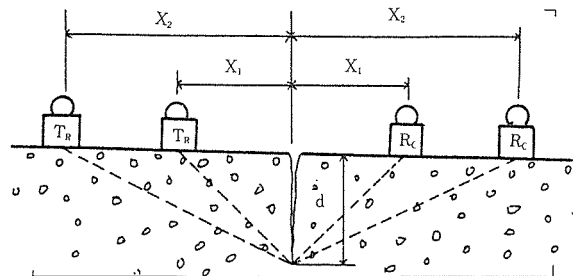
(f, g) 공극이 많은 미세균열이 있을 경우 : 음파가 공극이나 미세균열을 우회하거나 가로지르는데(공극에 물이 차 있을 경우) 통과시간이 길어짐.

(그림 5) 콘크리트내에서 음파전달에 영향을 주는 조건 및 전달형태

3. 2 균열깊이 측정방법 및 계산식

초음파 속도측정기의 기본원리(전달시간)를 이용하여 균열깊이와 균열의 경사여부를 측정·판단할 수 있으며, 각 방법에 대해서 기술하면 아래와 같다.

<방법 1(직접법)>



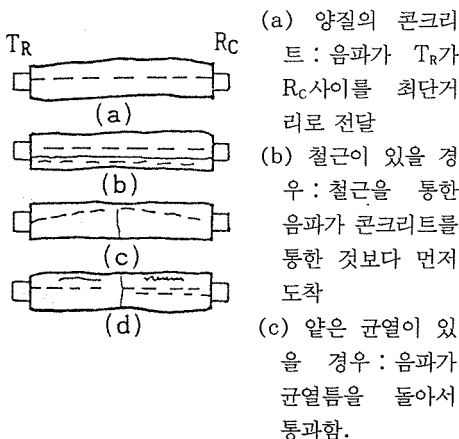
(그림 6) 직접법을 이용한 균열깊이 측정도

$$\text{균열깊이 } d(\text{mm}) = X_1 \sqrt{\frac{4t_1^2 - t_2^2}{t_2^2 - t_1^2}}$$

t_1 : 균열중심에서 양측으로 X_1 거리에서 측정시 전달시간

t_2 : 균열중심에서 양측으로 X_2 거리에서 측정시 전달시간

(BS4408, Part5에서 $X_1=150\text{mm}$, $X_2=300\text{mm}$ 로 함)

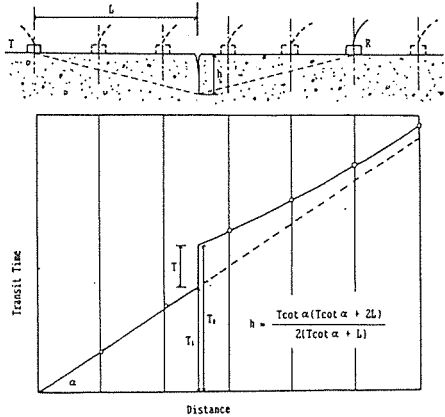


(a) 양질의 콘크리트 : 음파가 T_R 가 R_C 사이를 최단거리로 전달

(b) 철근이 있을 경우 : 철근을 통한 음파가 콘크리트를 통한 것보다 먼저 도착

(c) 얇은 균열이 있을 경우 : 음파가 균열틈을 돌아서 통과함.

<방법 2(간접법)>

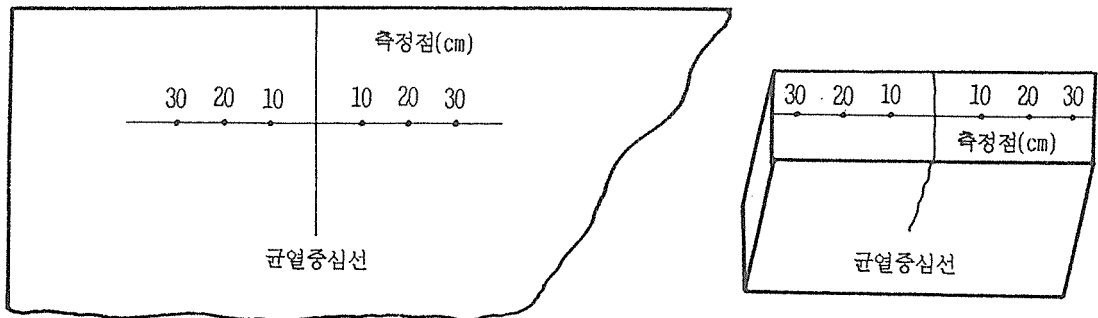


(그림 7) 간접법을 이용한 균열깊이 측정도

(그림 7)내의 균열깊이 h 를 구하는 근사적인 간편식으로 아래의 식을 사용한다.

$$h = \frac{L}{2} \left(\frac{T_2}{T_1} - \frac{T_1}{T_2} \right)$$

본 시험에서는 균열깊이를 측정하는 위의 2가지 방법을 모두 적용 검토하였으나 방법 1(직접법)보다는 방법 2(간접법)가 실제 깊이와 유사하게 측정되는 효율적인 방법으로 분석되어 주로 방법 2를 적용하였다. 방법 1과 방법 2에 차이가 있는 것은 콘크리트 내부의 균질성과 관련이 있는 것으로 판단되며 내부가 철근과 같이 균질성이 좋은 재료의 경우에는 방법 1이 효율적인 것으로 사료된다.



(그림 8) 각 시편의 측정점 표시

3. 3 균열깊이 측정 및 계산

(1) 초음파 전달시간 측정절차

균열깊이를 계산·측정하기 위해서는 초음파 속도측정 장비(V-METER, PUNDIT)로 방법 2(간접법)에 따라 초음파의 전달시간을 측정하여 균열깊이를 계산하며 그 과정은 아래와 같다.

a. 균열에 수직인 양쪽 방향으로 초음파 전달시간 측정점을 (그림 8)과 같이 일정 간격으로 표시한다.(본 시험에서는 10cm 간격으로 표시함)

b. 측정점에 발진자(T_R)와 수신자(R_C)가 잘 접촉되도록 그리이스(Grease)를 바른다.

c. 어느 한쪽 끝점(30cm)에 발진자(T_R)를 접촉시키고 수신자(R_C)를 각점마다 옮겨가면서 초음파의 전달시간을 측정한다.

d. 측정값(T)을 이용하여 (그림 7)과 같이 그래프상에서 T_1 과 T_2 값을 구하여 균열깊이를 계산한다.

(2) 슬래브 시편의 수직균열

무근콘크리트 슬래브 시편의 초음파 전달시간을 측정한 결과는 아래 (표 6)과 같다. 이 측정값은 균열이 발생되지 않은 부분의 초음파 전달시간을 측정하는데 참고값으로 한다.

슬래브에 강판을 매설하여 도입된 수직균열에 대하여 방법 2(간접법)에 따라 초음파 전

달시간을 측정하고 이 값을 이용하여 균열깊이를 계산한 결과는 (표 7)과 같다.

(표 6) 무근슬래브 기준시편의 초음파 전달시간

측정 회수	통과거리별 전달시간(μsec)						비 고
	10cm	20cm	30cm	40cm	50cm	60cm	
1회	21.9	46.1	69.5	94.6	121.4	146.7	
2회	22.1	45.6	69.1	93.6	120.2	146.4	
3회	21.1	45.3	70.3	93.1	121.4	146.3	
평균	21.7	45.7	69.6	93.8	121.0	146.5	

(3) 빔 시편의 균열

빔 시편은 총제작 시편중에서 표면상태와 균열이 도입된 위치상태 등을 고려하여 10개 시편에 대해 초음파 전달시간을 측정, 균열깊이를 계산하였다. 이 경우에도 간접법을 적용하였으며, 균열 직전의 초음파 전달시간은 측정용 시편과 동일한 조건에 보관한 무근 빔 시편의 측정값을 참고로 이용하였다. <(표 8), (표 9) 참조>

(표 7) 슬래브 시편의 균열깊이 측정값

시 편 구 분	통과거리별 전달시간(μsec)							균 열 설 치 깊 이 (cm)	측 정 계 산 깊 이 (cm)
	10cm	20cm	30cm *		40cm	50cm	60cm		
			균열 전	균열 후					
철근배근 0.2mm 수직균열	21.4	46.8	69.6	80	101.4	127.1	151.2	4.5	4.2
	22.1	47.9	69.6	98	115.8	134.6	158.4	9.0	10.5
	21.8	47.0	69.6	110	129.2	144.1	167.3	14.3	14.2
	22.4	48.6	69.6	128	143.6	158.8	178.4	19.0	19.4
철근배근 0.4mm 수직균열	20.4	46.3	69.6	82	102.1	125.1	149.5	5	4.9
	21.5	48.3	69.6	97	114.4	132.3	153.8	10	10.1
	21.7	46.6	69.6	112	130.1	147.0	165.8	15	14.8
	20.1	46.1	69.6	127	142.7	157.1	175.1	20	19.2
무 근 0.2mm 수직균열	20.7	46.8	69.6	81	103.2	128.4	151.7	4.8	4.6
	20.5	46.8	69.6	90	109.4	130.4	153.6	9.8	7.8
	20.3	45.1	69.6	113	129.4	145.2	163.4	13.8	15.1
	20.6	47.6	69.6	120	134.8	152.8	175.6	19.6	17.2
무 근 0.4mm 수직균열	20.6	46.5	69.6	81	101.2	124.8	149.0	5	4.6
	20.4	46.3	69.6	97	114.0	132.0	155.8	10	10.1
	20.9	47.1	69.6	110	122.1	139.3	165.8	15	14.2
	21.5	46.2	69.6	122	135.9	151.6	171.8	19.8	17.7

* 균열직전 값은 무근슬래브 기준시편 값을 적용하고 균열직후 값은 회귀분석하여 결정함.

(표 8) 무근 빔 시편의 초음파 전달시간

구분	통과거리별 전달시간(μsec)						비 고
	10cm	20cm	30cm	40cm	50cm	60cm	
1회	19.0	43.6	67.9	91.8	115.4	139.0	
2회	18.9	43.6	68.0	92.0	115.6	139.3	
3회	18.7	43.6	67.4	91.8	115.2	139.3	
평균	18.9	43.6	67.8	91.9	115.4	139.2	

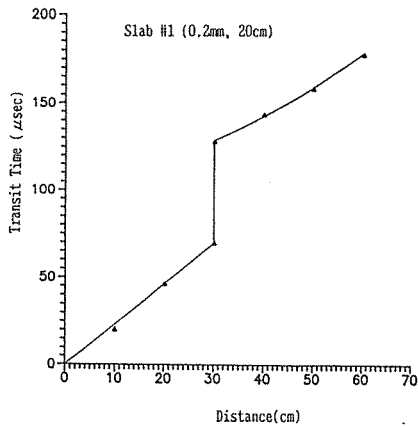
(4) 통과거리별 전달시간 관계도

앞에서 슬래브 시편과 빔 시편의 균열 깊이를 계산하기 위해 사용된 균열직후 초음파 전달시간 값은 각 측정값별로 회귀분석(Regression)하여 결정하였으며 슬래브 시편의 통과거리별 전달시간 관계도 일례는 (그림 9)와 같다.

(표 9) 빔 시편의 균열깊이 측정값

측정값 시편 번호	통과거리별 전달시간(μsec)							실 제 깊 이 (cm)	측 정 계 산 깊 이 (cm)	
	10cm	20cm	30cm *		35cm	40cm	50cm			60cm
			균열 전	균열 후						
1	19.9	44.6	67.8	134	136.7	139.1	148.4	169.8	18.3	22.1
2	19.2	44.7	67.8	112 ~121	117.3	131.3	146.4	181.2	18.0	15.7 ~18.4
3	19.8	44.8	67.8	124	132.2	142.4	167.5	182.7	20.3	19.2
4	21.6	46.4	67.8	127 ~141	134.6	154.4	169.6	186.4	22	20.1 ~24
5	19.3	45.2	67.8	133	138.3	145.6	162.4	182.4	20.5	21.8
6	20.3	44.4	67.8	131 ~143	138.0	148.8	156.4	172.3	20	21.2 ~24.5
7	19.0	44.2	67.8	130	136.0	143.2	160.4	179.0	19.5	21.2
8	20.0	44.8	67.8	126	134.7	144.0	164.2	181.5	18.5	19.8
9	19.6	44.0	67.8	120	129.3	140.7	155.7	179.4	16.5	18.1
10	19.5	45.6	67.8	129	138.3	143.3	160.2	176.8	17.0	20.7

* 균열직전 값은 무균 빔 시편 값을 적용하고 균열직후 값은 회귀분석하여 결정함.

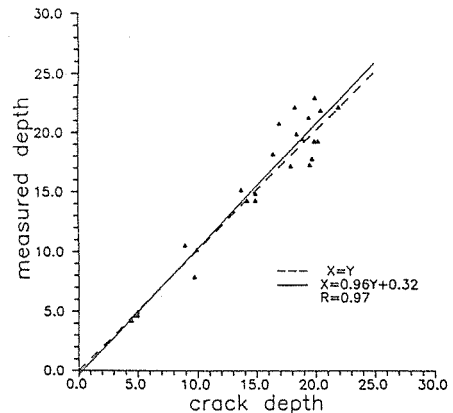


(그림 9) 슬래브 시편의 통과거리별 전달시간 관계도 예

· 추정하였는데 그 결과를 종합하면 다음 (표 10) 및 (표 11)과 같다.

4. 2 시험결과 분석

(그림 10)은 균열깊이와 측정깊이의 상관 관계를 분석하기 위해 슬래브 시편과 빔 시편에서의 결과를 함께 도시한 것이다. 관계식과



(그림 10) 균열깊이와 측정깊이의 상관관계

4. 시험결과 종합분석

4. 1 시험결과 종합

앞에서 시편을 제작하여 균열을 도입하고 초음파 전달시간을 측정하여 균열깊이를 계산



(표 10) 슬래브 시편의 균열깊이

구 분		균열값	균 열 깊 이(cm)							
			0.2mm 균열				0.4mm 균열			
#1 슬래브 배근 · 수직 균열	설치깊이	4.5	9.0	14.3	19.0	5	10	15	20	
	측정깊이	4.2	10.5	14.2	19.4	4.9	10.1	14.8	19.2	
#2 슬래브 배근 · 경사 균열	설치깊이	5	10	15	20	5	10	15	20	
	측정깊이	2.2	7.2	14.9	22.5	3.2	9.8	15.4	28.8	
#3 슬래브 무근 · 수직 균열	설치깊이	4.8	9.8	13.8	19.6	5	10	15	19.8	
	측정깊이	4.6	7.8	15.1	17.2	4.6	10.1	14.2	17.7	
#4 슬래브 무근 · 경사 균열	설치깊이	5	10	15	20	5	10	15	20	
	측정깊이	5.1	7.8	26.1	30.7	2.4	6.8	15.3	18.0	

(표 11) 빔 시편의 균열깊이

시편번호 구분	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10
육안검사 깊이 (cm)	18.3	18.0	20.3	22.0	20.5	20.0	19.5	18.5	16.5	17.0
초음파측정 깊이 (cm)	22.1	15.7 ~ 18.4	19.2	20.1 ~ 24	21.8	21.2 ~ 24.5	21.2	19.8	18.1	20.7

높은 상관계수(0.97)에서 알 수 있듯이 측정 깊이의 정확도가 매우 높으며 대부분 측정치가 균열깊이 보다 크게 나타나고 있다. 그럼에서 균열이 깊어질수록 측정치의 분산이 커지는 경향이 나타나는데 이는 콘크리트의 재료 특성(비균질체)을 고려할 때 타당한 것으로 판단되며, 분산정도도 우려할 수준이 아니다. 본 연구에서 철근의 영향을 받지 않은 것으로 나타났는데 이것은 균열깊이가 철근까지 도달하지 않기 때문에 발생한 결과이며 균열이 철근에 도달된 경우에는 철근의 피복두께가 균열깊이로 측정된다.

5. 결론

본 시험 연구결과에 기초하여 초음파속도

측정장비를 이용한 콘크리트 균열깊이 측정에 대해 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

(1) 초음파속도 측정장비(PUNDIT, V-METER 등)를 이용한 균열깊이 측정은 신뢰성이 높은 측정기법으로 현장에서 효과적으로 사용될 수 있다.

(2) 측정 오차범위는 일반적으로 $\pm 5\%$ 정도이며, 균열이 특히 깊어지거나 경사진 경우에는 실제 균열보다 다소 깊게 측정된다.

(3) 콘크리트 내부의 배근시에 균열이 철근 깊이까지 발생되지 않은 경우에는 철근의 영향을 받지 않는 것으로 판단된다. 그러나 균열이 철근 피복두께를 초과한 경우에는 단순히 피복두께가 균열깊이로 나타나므로 사전에 배근 위치를 파악해 두어야 한다.