

# Tc-To법에 의한 콘크리트 균열측정

## Tc-To Method in Measurement of Concrete Crack

민            정            기\*  
Min,        Jeong        Ki

### Summary

Concrete is said to have a high degree of extensibility when it is subjected to large deformations without cracking. The cracking behavior of concrete in the field may even be more complex. For example, in mass concrete compressive stresses are developed during the very early period when temperatures are rising, and the tensile stresses do not develop until at a later age when the temperature begins to decline.

Actual cracking and failure depend on the combination of factors and indeed it is rarely that a single adverse factor is responsible for cracking of concrete. The importance of cracking and the minimum width at which a crack is considered significant depend on the conditions of exposure of the concrete.

The ultrasonic pulse measurements can be used to detect the development of cracks in structures such as dams, and to check deterioration due to frost or chemical action. An estimate of the depth of a crack visible at the surface can be obtained by measuring the transit times across the crack for two different arrangements of the transducers placed on the surface.

In this paper, the concrete cracks that artificially introduced crack width is 1 and 2mm, crack depth is 2, 4, 6, 8cm were measured by Tc-To Method.

In consequence, the measured depth was increased with increase of measuring distance from concrete crack. The most reliable results were shown when the introduced crack width was 1mm, and the measuring distance was 10cm from concrete crack.

I. 서    론  
콘크리트는 다른 재료에 비하여 내구성이

우수하고 여러 형상의 구조물을 현장에서 용이하게 시공할 수 있는 장점으로 인하여, 일반 구조물은 물론 교량, 댐과 같은 산업용 구

\*충남대학교 농과대학

키워드 : 균열 깊이, 균열 폭, 초음파전달속도, Tc-To method

조물 및 원자력 발전시설과 같은 특수 구조물에도 널리 이용되고 있다. 그러나 콘크리트 구조물은 타구조물에 비하여 자체 하중이 크고 균열이 생기기 쉬운 결점을 가지고 있다.

경화 후 콘크리트에 발생하는 균열은 여러 종류가 있는데, 이것은 콘크리트가 양생된 후 사용중에 일어나는 균열이므로 실제로 그 발생원인도 다양하고 구조물에 미치는 영향도 크다. 균은 콘크리트에 일어나는 균열로는 건조수축균열, 열응력으로 인한 균열, 화학적 반응으로 인한 균열, 설계잘못으로 인한 균열, 외부의 작용하중으로 인한 균열 등 실로 많은 원인들에 의하여 균열이 발생한다.<sup>1,6)</sup>

이는 콘크리트 구조물에 발생하는 가장 큰 문제 중의 하나로, 콘크리트 구조물에 발생하는 균열은 심각한 구조적 문제를 야기시킬 수도 있으며, 내구성의 저하와 외관의 손상은 물론, 균열로 인해 철근이 대기나 습기에 노출될 경우, 부식이 발생할 수도 있다. 콘크리트 구조물에 일단 균열이 발생하면, 그것이 구조물의 안전도와 사용성에 미치는 영향을 분석하여야 하며, 이를 위해서는 우선 그 균열의 정확한 원인을 규명하고, 그에 적절한 대책을 강구하는 것이 바람직하다.<sup>4)</sup>

균열의 위치와 크기 등은 육안검사나 비파괴검사 또는 코아채취시험으로 알아낼 수 있다. 육안검사는 간단히 휴대할 수 있는 균열 측정기를 이용하여 측정할 수 있으며, 코아검사는 의심이 가는 부분의 코아를 채취하여 결함을 알아내거나 균열의 크기 및 깊이 등을 비교적 정확하게 조사할 수 있다. 그리고 비파괴검사는 콘크리트 구조물의 기능에 손상을

주지 않고 균열의 위치를 찾아내는 방법으로, 초음파를 이용하면 내부균열의 위치 및 크기도 어느정도 정확하게 알아낼 수 있다.<sup>3)</sup>

그러나 금속과 같이 균일한 조성을 지닌 재료에 대한 초음파시험법은 이론적으로도 비교적 잘 연구되어 매우 유용한 비파괴 시험법으로 이용되고 있으나, 콘크리트와 같이 입자조성의 크기가 크고 여러 물질이 혼합된 재료에 대한 초음파 시험법은 경험적이고 정성적이며 또한 시험결과 분석이 어려워져 현장에서 쉽게 사용되지 못하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 현재 기존 콘크리트 구조물에 발생된 균열을 초음파에 의한 비파괴적으로 측정하는 방법중에서 가장 보편적으로 사용되고 있는 Tc-To method를 채택하여, 임의적으로 도입된 각각의 균열폭과 균열깊이에 대한 콘크리트의 초음파전달속도를 측정하고, 이 측정된 전달속도로 균열깊이를 계산하고 이를 실제 균열깊이와 비교하여, 콘크리트의 균열측정을 위한 비파괴시험의 적용성 및 측정치의 신뢰성을 검증하기 위하여 실시되었다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 사용재료

#### 가. 시멘트

본 실험에 사용된 시멘트는 KS F 5201에 규정된 국내 S사 제품의 보통 포틀랜드 시멘트이며, 이의 물리적 성질 및 화학성분은 Table-1 및 2와 같다.

Table-1. Physical properties of normal portland cement

Item	S.G	Fineness blaine(cm <sup>2</sup> /g)	Setting time(hrs-min)		Compressive strength(kgf/cm <sup>2</sup> )		
			Initial	Final	3days	7days	28days
Portland cement	3.15	3,240	5-7	7-20	194	216	323

**Table-2. Chemical composition of normal Portland cement** (unit : wt. %)

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
21.09	4.84	63.85	3.32	3.09	1.13	0.29	2.39

**Table-3. Physical properties of aggregate**

Item	Size (mm)	Specific gravity (20°C)	Absorption ratio (%)	Fineness modulus	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )
Natural sand	<4.75	2.63	0.07	2.96	1,550
Crushd gravel	<10	2.62	1.05	6.4	1,672

**Table-4. Mix design and compressive strength**

W/C (%)	Slump (cm)	Water (kg)	Cement (kg)	Sand (kg)	Gravel (kg)	S/A (%)	Compressive strength(kgf/cm <sup>2</sup> )		
							3 days	7days	28days
53.7	12	180	335	875	914	49	153.2	232.7	318.8

**나. 공시체 제작 및 양생**

균열측정을 위한 공시체는 15×15×55cm의 빔볼드를 제작하였으며, 몰드에 타설된 콘크리트는 24시간 정치 후 탈형하여 재령 28일까지 일정온도(20±1°C)에서 수중양생을 실시하였다.

**3. 시험방법**

**가. 초음파법의 측정원리**

초음파법은 20kHz 이상의 초음파 종파 Pulse를 콘크리트 중에 방사해서 그 전파시간 t로 부터 얻어지는 전파속도 Vc에 의해 콘크리트 품질 또는 품질의 오차를 평가하는 방법으로 공시체 구조물의 크기가 10~20m인 것에서 부터 수 cm의 소규모인 것까지 적용될 수 있다. 초음파는 횡파, 표면파 등도 있지만 종파외에는 응용되는 경우가 드물다. 균열, 공극 등이 존재하면 음속이 외관상으로 느껴지는 원리로서 표면균열의 깊이측정 및 내부결함의 조사가 가능해진다.

**나. 골 재**

본 실험에 사용된 세골재는 금강유역에서 채취된 강모래이고, 조골재는 충남 공주군 장기면에서 생산되는 쇄석으로서, 이들의 물리적 성질은 Table-3과 같다.

**2. 공시체 제작**

**가. 콘크리트 배합**

콘크리트 배합은 실제 현장에서 가장 널리 사용되고 있는 국내 레미콘 회사의 배합비를 그대로 채택하였으며, 이의 배합설계는 Table-4와 같다.

콘크리트 속으로 초음파 종파를 방사하는 방법은 일반적으로 직류전압의 충전으로 생기는 전압체의 변형울고속스위치 회로를 이용해서 순간적으로 방사(회수는 10~150pps)시키는 방법으로 한다.

전파시간은 고속스위치 회로의 작동시부터 수신자에 전파된 Pulse에 의해 앞 전체에 생기는 전압변동(수진파)의 시작까지이다. 진동자와 콘크리트의 접촉이 불충분하면 전파시간이 짧게 되기 때문에 같은 위치에서 반복측정한 최소시간을 전파시간으로 한다. 이 전파시간 결정은 파를 증폭시키는 등 파두를 가능한 수직으로 되게 하여 정확성을 개선할 필요가 있다. 전파시간을 측정하여 얻어지는 음속은 반무한 탄성체의 전파속도 V<sub>1</sub>과 같다고 하는 원리에 의해서 전파거리가 크게 되면 음속이 저하하는데 전파거리가 크게 다른 경우 음속비교에 주의해야 한다.

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

여기서,  $E_c$  : Young 계수  
 $\rho$  : 밀도  
 $\mu$  : 포아슨비

나. 균열깊이 측정방법

초음파법에 사용되고 있는 Pulse는 지향성이 나빠 콘크리트의 표면에도 종파가 전파하기 때문에 표면에 직각인 균열의 최소깊이를 측정할 수 있으며, 균열깊이의 대표적인 측정 방법은 Tc-To Method 이다.

Tc-To Method는 발, 수신자를 Fig. 1과 같이 균열로부터의 거리 a에 놓고 측정된 전파 시간 Tc와 균열이 없는 부근 2a 사이의 전파 시간 To로부터 균열깊이 y를 다음 식으로 계산한다.

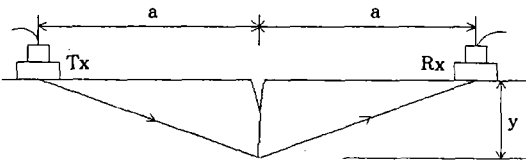


Fig. 1. Tc-To Method

$$y = a \sqrt{(T_c / T_o)^2 - 1}$$

4. 균열도입 및 측정방법

빔볼드의 균열도입은 공시체 내에 콘크리트를 타설하여 다짐을 한 후 표면마무리를 하고, 빔볼드의 중앙부에 미리 제작한 아크릴 판을 소정의 위치에 매설하고 1일 후 콘크리트가 경화한 후 제거하는 방법으로 실시하였으며, 도입된 균열의 종류는 폭 1mm에 깊이가 2, 4, 6, 8cm인 것과 폭 2mm에 깊이는 2, 4, 6, 8cm로 하였고, 측정거리는 균열로부터 5, 10, 15, 20cm로 하였다.

그리고 초음파 전달시간의 측정절차는 다음과 같다.

1) 균열에 수직한 방향으로 초음파 전달시간 측정점을 Fig. 2와 같이 일정간격으로 표

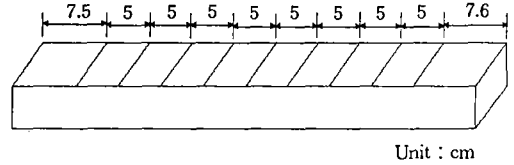


Fig. 2. Measuring point of crack

시한다.

2) 측정점에 발진자와 수신자가 잘 접촉되도록 그리이스를 충분히 바른다.

3) 발진자를 고정시키고 수신자를 각 측정마다 옮기면서 초음파의 전달시간을 측정한다.

4) 측정된 각 전달시간을 가지고 균열깊이를 계산한다.

III. 결과 및 고찰

초음파에 의한 콘크리트 균열측정을 위하여 콘크리트 표면에 초음파 전달속도 측정기를 설치하면, 발신자에서 수신자에 이르는 전파가 콘크리트의 균열부위에서 회절되어 초음파의 전달속도가 균열이 없는 콘크리트의 전달속도보다 늦어지게 된다. 따라서 콘크리트 균열을 찾는데 초음파의 이러한 성질을 이용하는 것은 효과적이다.

표면에 위치한 균열의 측정은 균열부위를 사이에 두고 배치한 발·수신자의 배열을 달리 함으로서 균열까지의 이동시간을 측정하여 알아낼 수 있다. 그러나 이러한 측정은 콘크리트가 균질의 재료라는 가정하에서 이루어져야 하며, 균열로부터 발·수신자의 거리를 정확하게 측정하고 균열부위가 몰로 메워져 있으면 안된다.

따라서, 본 실험에서는 케이블의 길이를 최대한 짧게 하고 콘크리트의 표면을 매끄럽게 연마한 후 그리이스를 충분히 발라서 발·수신자의 밀착이 양호하게 이루어 지도록 하였고, 콘크리트 시편은 양생수조에서 꺼낸 후 24시간 공기중에 방치시킨 후 공시체 표면에 임의

Table-5. Test results calculated by Tc-To Method

Introduced Crack		Transit Time( $\mu$ sec)				Calculated Depth(cm)			
Width(mm)	Depth(cm)	a=5cm	a=10cm	a=15cm	a=20cm	a=5cm	a=10cm	a=15cm	a=20cm
0	0	24.7	49.7	74.3	96.0	0	0	0	0
1	2	26.8	50.9	75.2	96.6	2.12	2.21	2.34	2.24
	4	32.5	53.7	77.3	98.1	4.28	4.09	4.31	4.21
	6	41.2	58.6	80.9	101.2	6.68	6.25	6.46	6.67
	8	51.2	64.6	85.3	104.5	9.08	8.30	8.46	8.60
2	2	28.5	51.2	76.8	97.1	2.88	2.48	3.03	3.04
	4	37.2	55.4	78.4	99.4	5.63	4.92	5.05	5.37
	6	44.1	59.7	82.1	101.9	7.40	6.66	7.05	7.11
	8	53.0	66.3	86.5	105.3	9.49	8.83	8.94	9.01

※ a는 Fig. 1참조

로 도입시킨 각각의 균열 폭과 깊이에 대한 초음파전달속도를 측정하였다.

그리고 측정거리는 균열로부터 각각 5, 10, 15, 20cm의 4종류로 하였으며, 각점에서 측정된 측정치를 가지고 Tc-To법에 의하여 균열깊이를 계산한 결과는 Table-5에 나타나 있고, 각 균열 폭에 대한 균열깊이를 계산한 결과를 그림으로 도시하면 Fig. 3, 4와 같다.

여기서 보는 바와 같이, 균열 폭 1mm에 대하여 계산된 측정치는 도입된 균열깊이별로 측정거리에 상관없이 실제 값과 거의 유사하게 나타났고, 도입된 균열깊이가 깊을 수록 실제 값에 대한 오차는 증가하는 경향을 보였으나, 그 분산의 정도는 대체로 양호하게 나타났다.

그리고 균열 폭 2mm에 대한 실험결과도 도입된 균열깊이 및 측정거리에 상관없이 실제 값과 거의 유사하게 나타났으나, 실제 도입된 균열깊이보다 크게 측정되는 경향을 보였다. 그리고 전체적으로 균열 폭이 1mm인 경우보다는 오차의 범위가 크게 나타나는 경향을 보였다.

따라서, Tc-To법은 실제구조물에 있어서 균열 폭이 작을 수록 초음파 전달속도에 의한 균열깊이의 측정이 실제 값과 유사하게 측정된

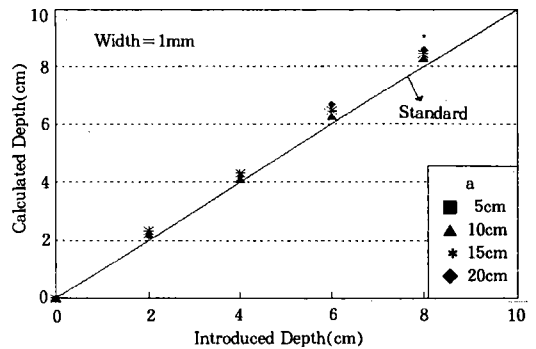


Fig. 3. Comparison of introduced and calculated depth(Crack width : 1mm)

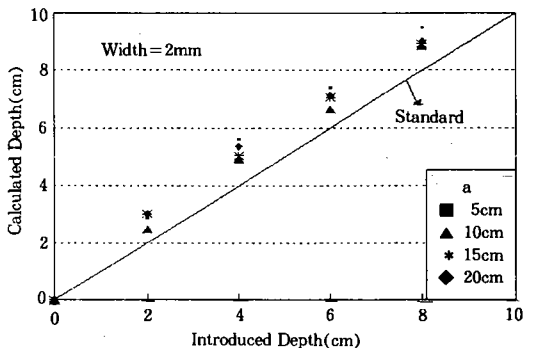


Fig. 4. Comparison of introduced and calculated depth(Crack width : 2mm)

다는 것을 알 수 있었다.

한편, 각 균열 폭에 따른 측정거리별 계산

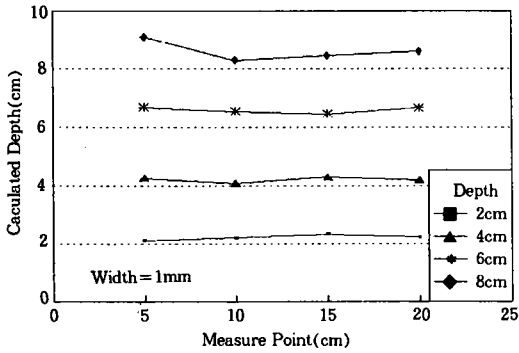


Fig. 5. Comparison of measure point and calculated depth(Crack width : 1mm)

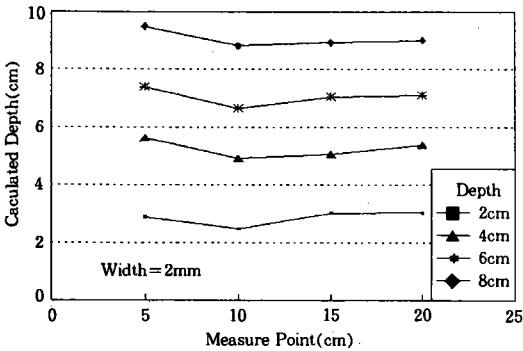


Fig. 6. Comparison of measure point and calculated depth(Crack width : 2mm)

결과를 도시하면 Fig. 5, 6과 같다.

여기서 알 수 있듯이, 균열로부터의 측정점이 가까울수록 실제 값과 유사하게 나타났고, 측정점이 균열에서 멀어질수록 실제 값과 차이가 크게 나타나는 경향을 보임에 따라, Tc-To법은 가급적 균열에서 가까운 거리에서 측정을 하는 것이 유리하다는 것을 알 수 있었으나, 가장 근접한 거리 5cm에서 측정된 값의 오차가 가장 크게 나타남에 따라, 초음파의 전달속도에 의한 Tc-To법은 측정에 있어서 최소한의 측정거리를 유지해야 한다는 것을 알 수 있었다.

따라서, Tc-To법은 측정할 균열의 폭이 작고 그 깊이가 작을수록 측정치는 실제 값과

거의 유사하게 나타남에 따라, 콘크리트가 비균질성의 재료임을 고려하면 상당히 양호한 측정결과임을 알 수 있었고, 균열이 발생된 실제 구조물의 균열깊이를 측정할 수 있는 상당히 신뢰성이 있는 계산법으로 생각된다.

또한 이 방법은 한 점에서 측정이 이루어지기 때문에 측정에 있어서 간단하다는 것이 큰 장점인 것으로 생각된다.

그리고 Tc-To법은 전체적으로 실제값보다 크게 나타나는 경향이 있으며, 측정된 초음파 전달속도에 대한 균열깊이의 계산치는 상당히 민감하게 변화하므로, 측정에 있어서 정밀을 요함을 알 수 있었다.

#### IV. 결 론

본 연구는 균열이 발생된 실제 구조물에 있어서 그 균열깊이를 비교적 용이하게 측정하기 위한 비파괴시험의 일종인 초음파진동속도를 이용한 Tc-To법의 적용성을 검증하기 위하여 실시되었으며, 이의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 도입된 균열 폭이 2mm일 때보다 1mm일 때의 측정치가 실제 값과 유사하게 나타남에 따라, 실제 구조물의 균열 폭이 작을수록 측정결과와 신뢰성이 좋은 것으로 나타났다.

2. 균열로부터의 측정거리가 멀수록 측정치에 대한 오차가 증가하는 경향을 보였으며, 특히 측정거리 5cm일 때의 오차가 10cm일 때의 오차보다 크게 나타남에 따라, 초음파 전달속도 측정시 최적측정거리를 결정하는 것이 중요하다는 것을 알 수 있었다.

3. Tc-To법에 의한 균열 깊이의 측정결과는 실제 균열깊이보다 크게 나타나는 경향을 보였으며, 전달속도에 대한 균열깊이의 변화가 상당히 민감하게 변화함을 알 수 있었다.

## 참 고 문 헌

1. ACI Committee 224, 1989, Control of Cracking in Concrete Structures, ACI, Detroit : 42.
2. 최완철, 1994, 콘크리트 구조물의 균열체계에 따른 균열제어와 대책, 콘크리트학회지, 6(4) : 17~24.
3. 한국건설기술연구원, 1989, 국내 콘크리트 구조물의 내구성 평가를 위한 조사연구 : 110~115.
4. 한국콘크리트학회, 1993, 최신 콘크리트공학, 기문당 : 477~517.
5. Neville., 1981, Properties of concrete, Pitman Publishing Limited, London : 389, 585.
6. P. Kumar Mehta, 1986, Concrete Structure, Properties, and Materials, Prentice-Hall Inc. : 334~342.
7. Swamy, R. N. and A. H. Al-Hamed., 1984, The use of pulse velocity measurements to estimate strength of air-dried cubes and hence in situ strength of concrete, Journal of the ACI, 81(2) : 247~276.
8. 성찬용, 1995, 고성능 경량 폴리머 콘크리트의 역학적 특성에 관한 실험적 연구, 한국농공학회지, 37(3·4) : 72~81.
9. 성찬용·김성완·민정기, 1993, 양생조건이 경량골재 콘크리트의 ASR에 미치는 영향, 한국농공학회지, 35(4) : 38~46.

(접수일자 : 1997년 3월 24일)