

## 콘크리트 구조물의 균열 깊이 추정을 위한 스펙트럼 에너지 기법

### Spectral Energy Transmission Method for Crack Depth Estimation in Concrete Structures

신성우\*, 민지영\*, 윤정방\*\*<sup>†</sup>, John S. Popovics\*\*

Sung Woo Shin\*, Jiyoung Min\*, Chung Bang Yun\*\*<sup>†</sup> and John S. Popovics\*\*

**초 록** 콘크리트 구조물에서 발생하는 균열은 구조물의 심각한 성능 저하와 파괴를 유발할 수 있으며, 따라서 이러한 균열 손상의 조기 탐지 및 평가, 보수는 구조물의 건전성에 있어서 매우 중요한 부분이다. 특히, 균열의 평가를 위한 많은 방법들이 제안되었으며, 그 중에서도 자기 보정 표면파 투과 기법을 이용한 균열 깊이 추정법은 다른 방법에 비하여 균열의 깊이 변화에 가장 민감한 장점이 있는 방법이다. 그러나 자기 보정 표면파 투과 기법은 주파수에 따른 투과 함수의 변동성으로 인하여 정량적인 평가는 아직 어려운 실정이다. 본 연구에서는 측정된 자기 보정 표면파 투과 함수의 스펙트럼 에너지를 이용하여 균열 깊이를 추정하는 기법을 제안하고자 하며, 이 기법의 유효성을 판단하기 위하여 다양한 균열 깊이를 가진 콘크리트 슬래브를 이용하여 실험적인 연구를 수행하였다. 연구 결과 제안된 방법이 균열 깊이 평가에 유효하게 사용할 수 있으며, 또한 기존의 방법에 비하여 보다 정확한 균열 깊이를 추정하는 방법임을 알 수 있었다.

**주요용어:** 균열 깊이 평가, 콘크리트 구조물, 표면파, 자기 보정 기법

**Abstract** Surface cracks in concrete are common defects that can cause significant deterioration and failure of concrete structures. Therefore, the early detection, assessment, and repair of the cracks in concrete are very important for the structural health. Among studies for crack depth assessment, self-calibrating surface wave transmission method seems to be a promising nondestructive technique, though it is still difficult in determination of the crack depth due to the variation of the experimentally obtained transmission functions. In this paper, the spectral energy transmission method is proposed for the crack depth estimation in concrete structures. To verify this method, an experimental study was carried out on a concrete slab with various surface-opening crack depths. Finally, effectiveness of the proposed method is validated by comparing the conventional time-of-flight and cutting frequency based methods. The results show an excellent potential as a practical and reliable in-situ nondestructive method for the crack depth estimation in concrete structures.

**Keywords:** Crack Depth Evaluation, Concrete Structures, Rayleigh Wave, Self-Calibrating Technique

#### 1. 서 론

콘크리트의 균열은 구조물의 사용 년한 동안 저항력의 감소를 유발하며 구조물의 요구사항인 안전

성, 사용성, 내구성 모두에 영향을 미치고, 구조 성능 또한 저하시키는 요인이 된다. 이와 같이 균열은 콘크리트 구조물에 미치는 영향이 매우 크므로 국내/외에서 다양한 연구가 진행되어 왔으며, 상당

(접수일: 2007. 2. 27, 심사완료일: 2007. 3. 21) \* 한국과학기술원 건설 및 환경공학과, \*\* Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois at Urbana Champaign, USA † Corresponding author: Department of Civil and Environmental Engineering, KAIST, Daejeon, 305-701, (E-mail: ycb@kaist.ac.kr)

부분에서 큰 성과를 거둔 바 있다[1]. 그러나 균열 깊이를 정량적으로 평가하기 위한 연구는 아직 미비한 실정이다. 한편, 최근에 콘크리트 구조물의 수명 연장과 내구 성능을 향상시키기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있으며[2], 이와 관련하여 구조물의 손상에 대한 정량적 평가 방법에 관한 연구가 큰 관심사가 되고 있다[3]. 이에 따라 본 연구에서는 콘크리트 구조물에서의 균열 깊이를 정량적으로 추정할 수 있는 실험적인 기법을 개발하고자 한다.

콘크리트에서의 균열 깊이를 비파괴적으로 측정하는 통상적인 방법은 초음파의 전달 시간차이를 측정하여 이로부터 균열 깊이를 추정하는 전파시간 기반의 방법(time-of-flight of diffracted wave method; TOFD)이 있으나[4-6], 측정의 신뢰성이 높지 않아 현장에서는 거의 사용하지 않고 있는 실정이다. 한편, 최근에 자기 보정 기법을 이용한 표면파 투과법이 균열 깊이 측정을 위하여 개발되었으며[7-10], 이 방법이 콘크리트에서의 균열 깊이 산정에 있어서 기존의 TOFD 방법보다 결과에 대한 정확성과 신뢰성이 높은 방법임이 입증되었다[11]. 표면파 투과법을 이용하여 콘크리트 균열 깊이를 산정하기 위한 앞선 연구들은 주로 자기보정 표면파 투과 함수의 특정한 계수 값에 해당하는 주파수를 선정하여 해당 주파수와 균열 깊이와의 상관관계식을 구하고, 이를 이용하여 균열 깊이를 평가하는 방법을 사용하였다[7-9]. Hevin et al.[7]은 표면파 투과 함수를 측정하고 이 함수의 계수 값이 주파수에 따라 감소하게 될 때 감소가 끝나는 주파수를 차단 주파수(cutting frequency)라 정의하였으며, 차단 주파수를 이용하여 균열의 깊이를 산정하려고 하였다(cutting frequency method; CF method). 즉, 실험체의 레일리파 속도를 측정하여 이를 차단 주파수로 나눈 후 파장을 구하고, 각 균열 깊이에 대한 차단 주파수의 파장과 실제 균열 깊이와의 상관관계식을 도출하여 균열 깊이를 평가하고자 하였다. 한편, Scala와 Bowles[12]는 항공기에 사용되는 알루미늄 합금 블록의 표면 균열 깊이를 측정하기 위하여 표면파 투과함수의 계수가 급격하게 감소하는 부분을 선형 근사하고, 이 선형 근사된 직선이 주파수축과 만나는 점을 절단 주파수(intercept frequency)로 정의한 후, 절단 주파수와 각 균열 깊이의 상관관계를 구하여 균열 평가에 이용하였다. 그러나, 이와 같이 투과 계수의 특정한 주파수에서의 변화 특성을 이용하는 방법들은 균열과 관련된

주파수를 선정하기 위한 계수 값의 변화가 명확한 경우에만 적용할 수 있다는 단점이 있다. 즉, 측정된 표면파 투과 함수가 측정상의 오차나 잡음의 영향으로 오차가 포함되어 있을 경우에는 절단 주파수나 차단 주파수의 선정이 어렵거나 경우에 따라서는 불가능할 수도 있으며, 만약 선정이 가능하다고 하더라도 이를 이용하여 구한 균열의 깊이는 큰 오차를 수반하게 된다[13].

본 연구에서는 콘크리트 구조물에서 표면 균열의 깊이를 추정하기 위해 스펙트럼 에너지 투과 기법을 제안하고자 한다. 이 기법은 자기 보정 기법을 이용하여 투과 함수를 구한 뒤, 이 투과 함수가 가지는 스펙트럼 에너지를 계산하여 이로부터 균열 깊이를 추정하는 방법이다. 이 방법의 가장 큰 장점은 균열 깊이 산정을 위해 주파수에 의존적인 투과 계수의 변화를 이용하지 않고, 스펙트럼 에너지를 정의함으로써 주파수 의존성을 없애고 간편하게 균열 깊이를 추정할 수 있다는 것이다. 또한, 레일리파 속도가 균열 깊이 추정 과정에서 필요하지 않기 때문에 이를 위한 추가적인 실험을 수행하지 않아도 되는 장점이 있다. 한편, 본 연구에서는 제안된 기법의 유효성을 검증하기 위하여 다양한 균열 깊이를 가지는 콘크리트 슬래브를 제작하여 균열 깊이 추정을 위한 실내 실험을 수행하였으며, 차단 주파수 기법과 비교함으로써 제안된 기법이 균열 깊이 추정에 있어서 유용한 방법임을 입증하고자 하였다.

## 2. 스펙트럼 에너지 투과 기법(Spectral Energy Transmission Method)

균열 깊이 추정을 위한 스펙트럼 에너지 투과 기법은 (1) 자기 보정 기법을 이용하여 표면파 투과 함수를 측정하는 부분과 (2) 측정된 투과 함수로부터 스펙트럼 에너지 투과 비율을 산정하는 부분으로 구성되며, 본 장에서는 이 두 부분에 대하여 소개하고자 한다.

### 2.1. 표면파 투과 함수 측정을 위한 자기 보정 기법

실험을 통한 표면파의 투과 함수 측정은 Fig. 1과 같이, 점가진원에 의하여 생성된 파동을 균열면을 기준으로 전방과 후방의 표면에 부착한 두 개의 센서를 통하여 측정하고 이를 주파수 영역에서

신호 처리 함으로써 얻을 수 있다. 그러나, 이 경우 센서와 구조체 사이에 상대적인 움직임 없이 일체로 거동할 경우에는 일관성 있는 결과를 얻을 수 있지만, 실제로는 센서와 구조체의 접촉상태에 따라 측정 결과에 변동이 있게 된다. Achenbach et al.[14]은 이를 해결하기 위하여 자기 보정 기법을 제안하였으며, 표면파 투과 함수 측정에 있어서 매우 유효한 방법임을 입증하였다. 이후에 이 기법은 Hevin et al.[7], Popovics et al.[8], Song et al.[9] 등에 의하여 콘크리트의 균열 문제로 확장 적용되었다. 본 절에서는 콘크리트에서의 투과 함수를 측정하기 위한 자기 보정 기법에 대하여 간략히 설명하도록 하겠다.

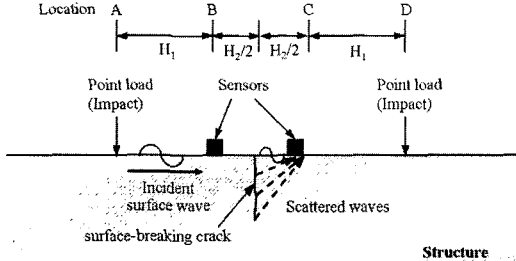


Fig. 1 Experimental setup for self-calibrating method

탄성체의 표면에 두 개의 센서가 Fig. 1과 같이 균열을 중심으로 동일한 거리만큼 떨어져 위치하는 경우를 생각해 보자. 센서들과 동일선상에 위치한 A점에 충격을 가하면 가진된 파동은 고체 내부와 표면을 따라 진행하여 가진 위치와 가까운 센서(B점)와 표면 균열을 거쳐 C점에 위치한 센서에서 탐지된다. 이 때, A점에서 가진되어 B점에서 획득된 신호의 주파수 영역 응답은 다음과 같이 표현된다.

$$Y_{AB}(f) = S_A(f)T_{AB}(f)R_B(f) \quad (1)$$

여기서,  $Y_{AB}(f)$ 는 B점에 위치한 센서로부터 획득된 파형의 푸리에 변환이며,  $S_A(f)$ 는 가진원에 의한 A점에서의 주파수 응답 함수이고,  $R_B(f)$ 는 B점을 지나가는 파동을 B점에 위치한 센서로 측정하였을 때의 센서의 주파수 응답이며,  $T_{AB}(f)$ 는 파동의 A점과 B점 사이에서의 투과 함수(transmission function, TRF)이다[9]. 파가 진행할

때 에너지의 일부가 소산되어 파의 진폭은 감소하게 되며, 투과 함수는 이러한 파의 기하학적 감쇠 특성을 포함하고 있다. 마찬가지로,  $S_A(f)$ 에 의하여 생성된 파동을 C점에 위치한 센서로 측정하였을 때는 다음 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$Y_{AC}(f) = S_A(f)T_{AB}(f)T_{BC}(f)R_C(f) \quad (2)$$

여기서,  $T_{BC}(f)$ 는  $T_{AB}(f)$ 를 정의할 때와 똑같이 B점과 C점 사이의 파동의 투과함수이며, 마찬가지로  $R_C(f)$ 는  $R_B(f)$ 를 정의하는 것과 같은 방식으로 정의되는 C점에 위치한 센서의 주파수 응답 함수이다.

한편, 식 (1)과 식 (2)에서의  $S_i$ 와  $R_j$ 는 각각 충격 가진의 미지의 변동에 따른 효과와 센서의 종류와 구조체와의 미지의 접촉상태에 따른 효과를 포함하고 있으며, 특히 식 (2)의  $T_{BC}(f)$ 를 구하기 위해서는  $S_i$ 와  $R_j$ 뿐만 아니라  $T_{AB}(f)$ 도 제거하여야 한다. 따라서, 이러한 항들을 제거하고 우리가 구하고자 하는  $T_{BC}(f)$ 를 구하기 위해서 동일한 충격 가진원을 이용하여 D점에서 가진하고, 이로부터 생성된 파동을 C점과 B점에서 측정하여  $Y_{DC}(f)$ 와  $Y_{DB}(f)$ 의 상보적인 두 세트를 구성하여야 한다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같이 된다.

$$Y_{DC}(f) = S_D(f)T_{DC}(f)R_C(f) \quad (3)$$

$$Y_{DB}(f) = S_D(f)T_{DC}(f)T_{CB}(f)R_B(f) \quad (4)$$

B점과 C점 사이의 투과함수인  $T_{BC}(f)$ 와 C점과 B점 사이의 투과함수인  $T_{CB}(f)$ 는 대칭 조건에 의하여 동일한 파동 경로와 동일한 기하학적 감쇠를 가지는 상호적인 관계이므로  $T_{BC} = T_{CB}$ 로 가정하고, 식 (1)-(4)를 이용하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} |T_{BC}(f)| &= \sqrt{|T_{BC}(f)T_{CB}(f)|} \\ &= \sqrt{\frac{Y_{AC}(f)T_{DB}(f)}{Y_{AB}(f)Y_{DC}(f)}} \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)는 신호의 강도, 접촉 상태, 거리 등에 대한 정보가 필요 없으므로 이러한 요인에 대한 추가적인 보정 과정이 필요하지 않기 때문에 자기 보정 (self-calibrating)이라 한다[14]. 투과 함수  $|T_{BC}(f)|$  는 B점에 입사된 파동이 B점과 표면 균열 사이를 지나 C점에 투과되었을 때 입사파의 투과파에 대한 주파수별 크기의 비를 나타낸다. 이때 재료는 등방성 재료로 가정하고, 매질을 전파하는 파동은 센서에 의해 영향을 받지 않는 것으로 가정한다.  $|T_{BC}(f)|$  는 완전 투과일 경우는 1의 값을 가지고 투과되는 파가 없을 경우에는 0의 값을 가지므로, 이론적으로는 반드시 0과 1사이에 그 값이 존재하게 된다. 따라서, 이를 균열의 깊이와 연관시켜 생각해보면 균열이 없을 경우에는 1의 값을 가지는 반면에 균열이 깊어질수록 그 값이 1보다 작아지게 됨을 알 수 있다.

2.2. 균열 깊이 추정을 위한 스펙트럼 에너지 기법

측정된 투과 함수에 근거하여 균열 깊이를 추정하기 위해서는 투과 함수 내에서 균열 깊이에 민감한 특성을 추출하여 이 특성치를 균열 깊이와 연관 짓는 과정이 필요하다. 앞선 연구에서 밝혀졌듯이 [7-9,14] 표면파 투과 함수는 균열의 깊이에 따라 변화하는 특성이 있으나, 주파수에 의존적인 성질을 가지고 있다. 즉, 균열 깊이가 깊어짐에 따라 표면파 투과 함수가 일정한 비율로 감소하는 것이 아니라, 주파수 (또는 파장)에 따라서 감소하는 비율이 달라진다. 이러한 표면파 투과 함수의 주파수 의존성은 잡음이나 측정 오차 등에 매우 큰 영향을 받으며, 이에 따라 균열 깊이 추정에 있어서 어려움을 야기하게 된다. 본 연구에서는 이러한 주파수 의존성을 없애기 위하여 에너지 개념을 도입하였다. 표면파 투과 함수는 균열이 깊어짐에 따라 주파수 별로 비율은 다르지만 감소하는 경향이 있으며, 이에 따라 임의의 균열 깊이에서의 투과 함수의 총 에너지는 다른 깊이에서의 에너지와 구별된다고 가정할 수 있다. 본 연구에서는 이 총 에너지를 균열 깊이  $d_1$ 에서 측정된 투과 함수( $T_{BC}$ )의 스펙트럼 에너지( $E$ )로 정의하고 식 (6)과 같이 투과 함수 그래프 아래의 면적으로 구할 수 있도록 하였다.

$$E(d_1) = \int_{f_L}^{f_U} T_{BC}(f; d_1) df \tag{6-A}$$

또는 이산 형태로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$E(d_1) = \sum_{i=N_L}^{N_U} T_{BC}(f_i; d_1) \Delta f \tag{6-B}$$

여기서  $f_U$ 와  $f_L$ 은 스펙트럼 에너지를 구하기 위한 투과 함수의 적분 구간으로 각각  $N_U$ 와  $N_L$ 번째에 해당하는 주파수이다. 이 적분 구간은 스펙트럼 에너지의 크기에 직접적으로 영향을 끼치기 때문에 일관성 있는 결과를 얻기 위해서는 적분 구간의 선택에 있어서 일정한 기준이 있어야 한다. 본 연구에서는 주파수의 상한과 하한 구간을 결정하기 위해 앞선 연구자들이 제안한 표면파 투과 함수의 신호 일관성 지수(signal consistency index;  $SC(f)$ )를 도입하였다.

$SC(f)$ 를 구하기 위해서는 균열이 없는 위치에서 5회의 반복 실험을 수행하여야 하며, 이로부터  $SC(f)$ 는 다음 식을 이용하여 구한다[8,9].

$$SC(f) = \frac{\sqrt[5]{T_{BC1}^{d_0} T_{BC2}^{d_0} T_{BC3}^{d_0} T_{BC4}^{d_0} T_{BC5}^{d_0}}}{(T_{BC1}^{d_0} + T_{BC2}^{d_0} + T_{BC3}^{d_0} + T_{BC4}^{d_0} + T_{BC5}^{d_0}) / 5} \tag{7}$$

이 값은 투과 함수와 마찬가지로 각 주파수에 대해 0과 1 사이의 값을 가진다. 0에 가까운 값을 가질수록 획득된 신호 사이에는 일관성이 존재하지 않음을 의미한다. 한편, 차단 주파수 등을 선택하기 위한 앞선 연구에서는 주파수에 따른 계수 값의 변화에 매우 민감하기 때문에 일관성 지수 값이 0.99 이상이 연속적으로 나타나는 구간만을 분석 대상 영역으로 설정하도록 제안하였으나[8,9], 본 연구에서는 주파수 의존성이 없는 에너지를 이용하기 때문에 주파수 영역 선택에 따른 변화에 상대적으로 덜 민감하므로 0.95 이상인 값에 해당하는 영역으로 주파수 범위를 선택하여  $f_U$ 와  $f_L$ 을 구하였다(Fig. 7 참조). 단, 해석의 일관성을 위하여 주파수 영역의 상한과 하한인  $f_U$ 와  $f_L$ 은 균열이 없는 상태(crack-free)에서 결정하며, 이 값은

동일한 재료적 성질을 가진 구조체 내에서는 일관성 있게 사용하도록 한다. 즉, 균열 부에서의 스펙트럼 에너지 계산시에는 동일한 구조체 내에 균열이 없는 부위에서 측정된  $f_U$ 와  $f_L$ 을 식 (6)에 대입하여 구하도록 한다.

한편, 임의의 깊이에서 측정된 스펙트럼 에너지를 균열 깊이와 연관시키기 위해서는 정규화 과정이 필요하며, 다음과 같이 스펙트럼 에너지 투과비 (spectral energy transmission ratio)를 통하여 정규화를 한다.

$$R(d) = \frac{E(d)}{E(d_0)} = \frac{\int_{f_L}^{f_U} T_{BC}(f; d) df}{\int_{f_L}^{f_U} T_{BC}(f; d_0) df} \quad (8)$$

여기서  $R(d)$ 는 균열 깊이  $d_0$ 를 기준으로 한, 균열 깊이  $d$ 에 대한 스펙트럼 에너지 투과비이며, 이 때 기준이 되는 균열 깊이  $d_0$ 는 균열이 없는 상태에 해당한다. 또한  $f_U$ 와  $f_L$ 은 적분 변수이며 식(7)의  $SC(f)$ 를 분석하여 결정한다. 이론적으로  $R(d)$ 는 0과 1 사이의 값을 가진다. 1은 파가 진행하는 경로에 균열이 없음을 의미하며, 균열의 깊이가 깊어질수록 0의 값으로 접근하게 된다. 한편, 균열 깊이와 스펙트럼 에너지 투과비 사이의 관계가 정해지면, 균열 깊이는 스펙트럼 에너지 투과비의 측정만으로 쉽게 구할 수 있다.

스펙트럼 에너지를 이용하여 균열 깊이를 추정하는 본 방법은 기존의 CF 기법이나 TOFD 기법과는 균열 깊이 추정 과정에서 파동의 속도를 필요로 하지 않기 때문에 파의 속도를 구하기 위한 추가적인 실험이 필요 없는 등의 장점이 있다.

### 3. 실험적 연구

#### 3.1. 실험 준비

제안된 기법의 유효성을 검증하기 위하여 콘크리트 슬래브를 제작하여 실내 실험을 수행하였다. 본 연구에서 사용한 실험체는 Fig. 2에서[16] 보듯이 가로 1.5 m, 세로 2.0 m, 두께 0.25 m의 철근 콘크리트 슬래브로서 다양한 비파괴 기법 연구를 위해 University of Illinois at Urbana Champaign의 토

목/환경공학과 연구팀에 의해 제작되었다[15,16]. 콘크리트의 28일 압축 강도는 42.3 MPa 이며, 초음파 속도 측정에 의해 얻어진 종파(P파) 속도는 4100 m/s이고, 레일리파(R파) 속도는 2250 m/s이다. 균열은 콘크리트를 타설하기 전에 30 mm에서 150 mm까지 선형적으로 증가하는 0.3 mm 두께의 알루미늄 판을 삽입하여 인공적으로 생성하였다. 측정에 사용된 균열 깊이는 균열이 없는 경우와 30 mm에서 150 mm까지 20 mm씩 증가하는 7가지의 서로 다른 균열 깊이를 포함하여 총 8개의 균열 깊이에 대하여 실험을 수행하였다.

실험 장치는 Fig. 3에서 보듯이 가진기와 센서, 오실로스코프, 그리고 데이터의 저장 및 분석을 위한 컴퓨터로 구성된다. 일반적으로 작은 크기의 공이 매질과의 접촉 시간이 짧고 고주파수를 생성시키기에 효과적이라고 알려져 있어[17], 가진 장치의 직경에 따른 차이점을 보고자 직경 8 mm와 12 mm에 해당하는 쇠공을 사용하여 예비 실험을 수행하였다. 그러나 공의 직경에 따른 투과 함수의 차이가 크지 않아, 이에 따라 12 mm 직경의 쇠공으로만 본 실험을 수행하였다. 한편, 센서는 접촉식 초소형 가속도계를 사용하였다. 센서간의 거리( $H_2$ )를 30 cm, 가진 위치와 인근 센서와의 거리( $H_1$ )를 15 cm로 두었다[16].

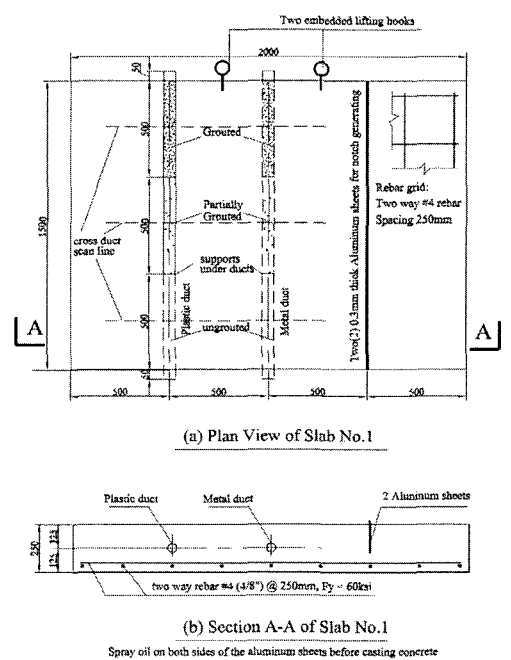
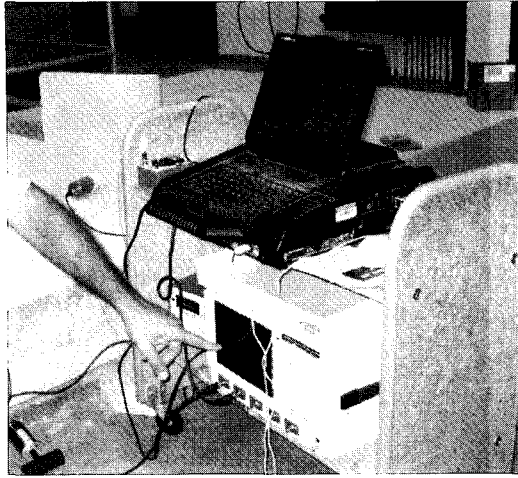
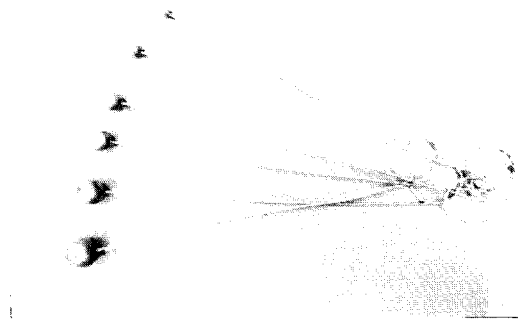


Fig. 2 Configuration of the test concrete slab



(a) Data collection system



(b) Impact balls

Fig. 3 Configuration of the test equipments

3.2. 실험 결과 및 분석

우선 균열이 없는 상태를 포함하여 30 mm에서 150 mm까지 20 mm씩 증가하는 균열에 대해 자기 보정 기법을 이용하여 투과 함수를 구하였다. Fig. 4에서 알 수 있듯이, 0-50 kHz의 범위 내에서 균열이 깊어짐에 따라 투과 함수가 감소하는 경향을 보인다. 임의로 선택된 주파수에 대해 균열 깊이에 따른 투과 정도를 추출한 결과 Fig. 5와 같이 균열이 깊어짐에 따라 감소하는 경향을 보이긴 하나 투과 정도가 주파수에 따라 달라져 기존의 CF 기법을 사용하기엔 어려움이 존재한다. 예를 들어, 10.01 kHz에 해당하는 투과성은 균열 깊이가 깊어짐에 따라 급격한 감소를 보이나 35.89 kHz는 큰 변화를 보이지 않는다. 레일리파 속도가 2250 m/s 일 때 기존의 CF 기법을 이용하여 추정한 균열

깊이의 제곱근오차(root mean square error: RMSE)를 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이, 추정치가 정확한 균열 깊이에 비하여 매우 큰 오차를 나타내고 있는 것을 알 수 있었으며, 이로부터 기존의 CF 기법은 균열 깊이 추정에 있어서 신뢰성이 높지 않음을 알 수 있다. 이는 스펙트럼 에너지 기반의 균열 깊이 추정 기법을 제안하는 계기가 되었다.

본 연구에서 제안하는 스펙트럼 에너지 기반 기법을 수행하기 위해, 우선 균열이 없는 부분에서 5회 반복 투과 실험을 수행하여  $SC(f)$  (Fig 7(a))와 투과 함수의 평균치(Fig. 7(b))를 구하고,  $SC(f)$ 의 값이 0.95 이상의 값이 연속적으로 나타나는 주파수 범위 선정하여 이로부터 주파수의 상한과 하한 경계치,  $f_U$ 와  $f_L$ 를 구하였다. 그 결과  $f_L$ 은 1 kHz였으며  $f_U$ 은 36 kHz였다.

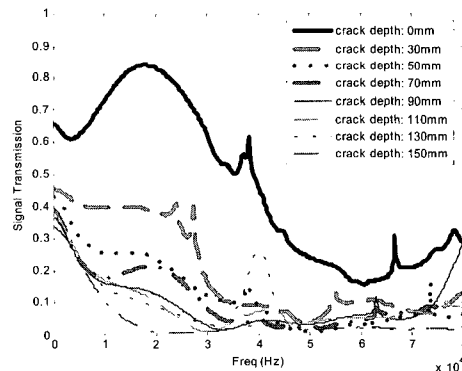


Fig. 4 Measured surface wave transmission functions for various crack depths in slab

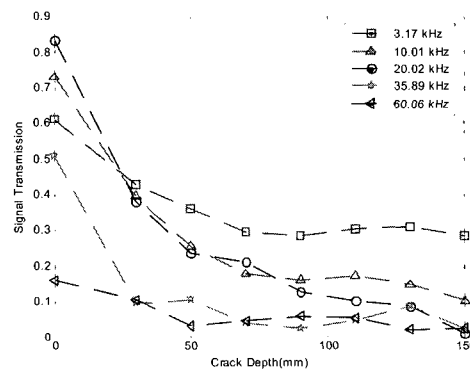


Fig. 5 Signal transmission as functions of crack depth at selected frequencies

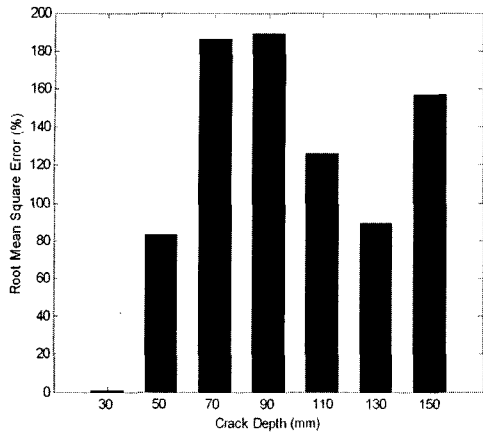
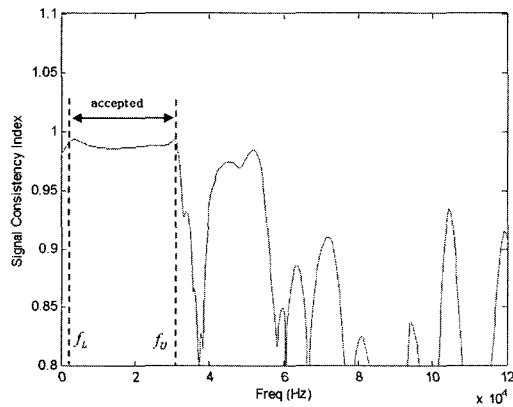
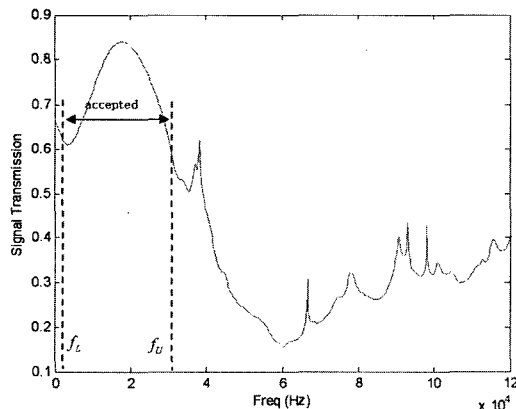


Fig. 6 Estimated errors in crack depth evaluation using the conventional cutting frequency method



(a) Signal consistency index



(b) Averaged signal transmission function

Fig. 7 Determination of frequency range for the calculation of the spectral energy

Fig. 8에 나타난 바와 같이 투과 함수의 스펙트럼 에너지 투과비  $R(d)$ 는 균열이 깊어짐에 따라 뚜렷이 감소하는 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 특히 이 방법은 주파수 의존적인 성질로 인하여 차단 주파수의 선정이 매우 어려운 기존의 방법에 비하여, 그림에서 보듯이 균열 깊이  $d$ 와 스펙트럼 에너지 투과비  $R(d)$ 가 1:1의 상관 관계를 가지고 있으므로 균열 깊이 추정 과정이 매우 간편하게 이루어질 수 있음을 알 수 있다.

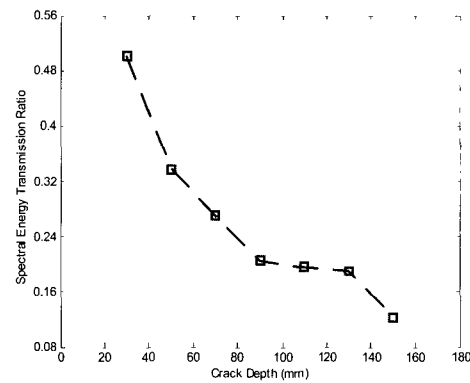


Fig. 8 Calculated spectral energy transmission ratios and corresponding crack depths

#### 4. 결론

본 연구에서는 자기 보정 기법을 이용하여 구한 표면파 투과 함수를 기반으로 균열 깊이를 추정하는 새로운 균열 깊이 평가 기법을 개발하였다. 표면파 투과 함수의 주파수 의존성으로 인하여 균열 깊이의 추정에 어려움이 있었던 기존의 방법을 보완하고자 주파수 의존성이 없는 에너지의 개념을 도입하여 투과 함수의 스펙트럼 에너지를 정의하였으며, 이를 균열이 없는 상태에서의 스펙트럼 에너지로 정규화하였다. 이로부터 균열 깊이와 정규화된 스펙트럼 에너지인 스펙트럼 에너지 투과비가 1대 1 관계를 가질 수 있도록 하여 스펙트럼 에너지 투과비를 균열 깊이가 평가에 직접 이용할 수 있도록 제안하였다. 제안된 기법의 유효성을 검증하기 위하여 30 mm에서 150 mm에 사이에 선형적으로 증가하는 균열을 가지는 콘크리트 슬래브를 제작하여 제안된 방법의 유효성을 검증하는 실험을 수행하였다. 실험 결과로부터 제안된 방법을 이용하여 균열 깊이를 수행할 경우, 표면파 투과

계수의 주파수 의존성으로 인하여 복잡한 분석 과정이 필요한 기존의 기법에 비해, 제안된 방법은 주파수 비의존적이고 스펙트럼 에너지와 균열 깊이가 1:1의 상관 관계를 갖기 때문에 균열 깊이 추정을 간편하게 수행할 수 있는 실용성이 높은 방법임을 알 수 있었다.

한편, 본 연구에서 제안된 간편한 수직 균열 깊이 추정법이 실제 현장에서 적용되기 위해서는 물/시멘트비, 골재의 배합비 및 크기에 따른 영향 등과 같은 콘크리트의 재료적 특성이 변화하는 경우에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단되며, 현재 이를 위한 연구가 진행 중이다.

## 5. 감사의 글

본 연구는 과학기술부/한국과학재단 우수연구센터 육성사업(스마트 사회기반시설 연구센터: 과제번호R11-2002-101-03001-0)의 지원 및 건설교통부 건설 핵심기술 연구개발 사업 (과제번호: 05건설핵심-C19)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다. 또한 실험에 큰 도움을 준 CTL Group (Skokie, Illinois, USA)의 Dr. Jinying Zhu에게도 감사 드립니다.

## 6. 참고문헌

- [1] ACI Committee 215, *Fatigue of Concrete*, S.P. Shah ed., ACI, OH, (1982)
- [2] P. K. Metha, "Durability - critical Issues for the future," *Concrete International*, Vol. 19, No. 7, pp. 69, (1995)
- [3] John S. Popovics, "Nondestructive evaluation of for civil engineering structures and materials," *Review of Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 23, pp. 32, (2004)
- [4] Y. Lin and W. Su, "Use of stress waves for determining the depth of surface opening cracks in concrete structures," *ACI Materials Journal*, Vol. 93, pp. 494-505, (1996)
- [5] M. J. Sansalone, J. Lin, and W. B. Streett, "Determining the depth of surface opening cracks using impact generated stress waves and time of flight techniques," *ACI Materials Journal*, Vol. 95, pp. 168-177, (1998)
- [6] T. T. Wu, J. S. Fang and P. L. Lin, "Detection of the depth of a surface-breaking crack using transient elastic waves," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 97, No. 3, pp. 1678-1686, (1995)
- [7] G. Hevin, O. Abraham, H. A. Petersen and M. Campillo, "Characterization of surface cracks with Rayleigh waves: A numerical model," *NDT & E International*, Vol. 31, No. 4, pp. 289-298, (1998)
- [8] J. S. Popovics, W. Song, M. Ghandehari, K. V. Subramaniam, J. D. Achenbach and S. P. Shah, "Application of wave transmission measurements for crack depth determination in concrete," *ACI Materials Journal*, Vol. 97, pp. 127-135, (2000)
- [9] W. Song, J. S. Popovics, J. C. Aldrin and S. P. Shah, "Measurement of surface wave transmission coefficient across surface-breaking cracks and notches in concrete," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 113, No. 2, pp. 717-725, (2003)
- [10] Y. Yang, G. Cascante and M.A. Polak, "Detection of depth of surface breaking cracks in concrete pipes," *Proceedings of the 1<sup>st</sup> Canadian Conference on Effective Design of Structures*, Hamilton, Ontario, Canada, (2005)
- [11] W. Song, J. S. Popovics and J. D. Achenbach, "Crack depth determination in concrete Slabs using wave propagation measurements," *Proceedings of the 1999 DAA Airport Technology Transfer Conference*, Atlantic City, NJ, USA, (1999)
- [12] C. M. Scala and S. J. Bowles, "Laser ultrasonics for surface crack depth measurement using transmitted near-field Rayleigh waves," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 19, pp. 327, (2000)
- [13] Sung Woo Shin, Chung Bang Yun, Hitoshi Furuta, and Hiroshi Hattori, "Ultrasonic-based concrete crack depth assessment



- incorporating principal component analysis associative neural networks," in proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference on Motion and Vibration Control (MOVIC 2006), Daejeon, Korea, August 27-29, (2007)
- [14] J. D. Achenbach, I. N. Komsky, Y. C. Lee and Y. C. Angel, "Self-calibrating ultrasonic technique for crack depth measurement," *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol. 11, No. 2, pp. 103, (1992)
- [15] A. Gibson and J. S. Popovics, "Lamb wave basis for impact echo method analysis," *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 131 (4), pp. 438-443, (2005)
- [16] Jinying Zhu, "Non-contact NDT of concrete structures using air coupled sensors," Ph.D. Dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois at Urbana Champaign, IL, USA, (2005)
- [17] Mary J. Sansalone and William B. Streett, *Impact Echo: Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry*, Bullbrier Press, PA, USA, (1997)