

철근 콘크리트 부재의 균열 깊이 측정을 위한 표면파 투과기법의 적용 및 개선

Application and Improvement of Surface Wave Transmission Technique for Measuring the Crack Depth in Reinforced Concrete Members

민지영*, 김재홍*, 곽효경*[†], 윤정방*

Jiyoung Min*, Jae Hong Kim*, Hyo-Gyoung Kwak*[†] and Chung-Bang Yun*

초 록 기존 사회기반 시설의 안전성 평가를 위해서는, 콘크리트 부재에 존재하는 균열에 대해 정량적인 평가가 필요하다. 이 논문에서는 균열의 깊이를 측정할 수 있는 비파괴검사 중 표면파 투과기법에 대해 고찰하였다. 특히, 콘크리트 부재 내부에 위치하는 철근이 표면파에 미치는 영향을 분석하여, 표면파 투과기법을 통한 균열 깊이 추정 시 철근에 의해 발생하는 오차가 크지 않음을 확인하였다. 또한, 콘크리트 부재의 형상에 따라 발생하는 여러 반사파의 영향을 최소화하기 위해 최적의 윈도우 크기를 제안하여 그 타당성을 검증하였다.

주요용어: 철근 콘크리트, 균열 깊이, 표면파 투과기법, 비파괴검사

Abstract In order to assess the existing infrastructures, it is required to measure the crack depth of concrete members. This paper considers the surface wave transmission technique to measure the crack depth. In special, we demonstrate the effect of reinforced bar on surface wave propagation and conclude that the surface wave transmission technique has only the minor error by the reinforced bar. In addition, we propose and validate the optimal window size for eliminating various reflection waves from the boundary of members.

Keywords: Reinforced Concrete, Crack Depth, Surface Wave Transmission, Nondestructive Testing

1. 서 론

압축에 비해 인장에 취약한 콘크리트 재료의 특성으로 인해 콘크리트 구조물에는 다양한 균열이 존재한다. 구조물의 연성과파괴를 유도하기 위한 과소철근 콘크리트 부재에서는 기본적으로 구조 균열이 유발될 수 있고, 콘크리트의 초기재령에서 소성수축 및 건조수축으로 인해 비구조 균열 또한 발생할 수 있다. 여러 인자로 인해 발생한 균열은 콘크리트 내부의 철근 부식을 촉진하여, 콘크리트 구조

물의 내구성을 급속히 저하시키는 요인이 된다. 따라서 기존 콘크리트 구조물의 평가(assessment)를 위해서는 균열의 정량적인 측정이 중요하다.

콘크리트 균열의 깊이는 주로 탄성파를 이용하는 비파괴검사(nondestructive testing)를 통해 측정하고 있으며[1], 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 첫 번째 기법은 균열로 인해 초음파의 전달 시간이 지연되는 특성을 이용하는 비행시간(time-of-flight, TOF) 기법이다[2]. 그러나 비행시간 기법은 콘크리트 내부의 골재 등으로 인해 초음파의 전달 경로에

변동이 있을 때 신뢰성이 떨어지는 단점이 있다. 두 번째 기법은 표면파에 대해 일종의 필터(filter) 역할을 하는 균열의 특성을 이용한 표면파 투과(surface wave transmission) 기법이다. 표면파 투과 기법은 주파수 영역에서 균열을 투과한 표면파의 에너지를 측정하여 균열 깊이를 추정한다[3].

자기보정 기법(self-compensating technique)을 통해 측정된 표면파 투과함수(transmission function)는 표면파로 전달되는 에너지를 의미하며, 주파수 및 균열 깊이에 큰 영향을 받는다[4]. 표면파 투과함수에서 콘크리트 재료 및 기하학적 감쇠특성을 제거한 표면파 투과계수(transmission coefficient)는, 이론적으로 콘크리트 균열과 같이 표면에서부터 발생한 균열(surface-breaking crack)의 정규화된 깊이와 포아송비의 함수로 결정된다[5]. 이와 같은 원리를 이용하여 표면파의 투과계수를 측정함으로써 균열 깊이를 추정할 수 있다[3].

표면파 투과 기법에 관한 기존의 연구는 무근 콘크리트에 초점을 두고 진행되어 왔으며, 콘크리트 구조물에 필수적으로 존재하는 철근의 영향에 대한 고려가 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 철근이 표면파 투과함수 및 투과계수에 미치는 영향을 분석하고, 결과적으로 균열 깊이 추정에 있어 그 영향을 고찰하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1. 자기보정 기법

(Self-Compensating Technique)

표면파의 투과함수는 가진원에 의해 생성된 파동(입사파, induced wave)과 균열면을 투과한 파동(투과파, transmitted wave)의 에너지 비율로 정의된다. 이 비율은 Fig. 1과 같이 가진원과 동일선상에 위치한 두 센서로부터 획득된 신호를 푸리에 변환(Fourier transform) 등 주파수 영역 해석을 통하여 얻을 수 있다. 투과함수 측정을 위해 접촉식 센서를 사용하여 측정하는 경우, 측정대상에 가속도계(accelerometer)를 마운팅(mounting)하는 방법 또는 탐촉자(transducer)를 커플링(coupling)하는 방법에 따라 측정 결과에 변동이 발생할 수 있다. 자기보정 기법을 이용하면, 가진 및 측정의 대칭성을 이용하는 신호처리의 기본 원리에 따라 보정함으로써 신뢰성 있는 투과함수를 산정할 수 있다. 이 기

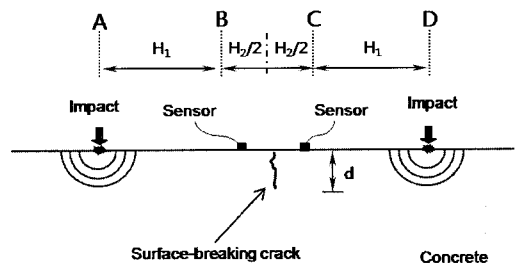


Fig. 1 Test setup for self-compensating technique

법은 강판 부재의 균열 깊이 측정[6] 및 콘크리트 부재의 균열 깊이 측정[3,4,7]을 위해 적용되어 검증된 방법이다.

측정 대상의 표면에 Fig. 1과 같이 균열면을 중심으로 동일한 거리($H_2/2$)만큼 떨어진 곳에 두 개의 센서가 위치하고 있을 때, 동일선상의 A지점에 충격을 가해 가진된 파동은 탄성체 내부와 표면을 따라 진행하여 가진 위치와 가까운 B점에 위치한 센서와 균열면을 거쳐 C점에 위치한 센서에 도달한다. 이 때 B점과 C점에서 획득된 신호의 주파수 영역 응답은 식 (1,2)와 같이 표현된다.

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

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

여기서, $Y_{AB}(f)$ 는 A지점에서 가진하여 B지점에서 획득된 신호의 푸리에 변환이고, $S_A(f)$ 는 가진원 A에 의해 발생한 파동의 주파수 함수이며, $R_B(f)$ 와 $R_C(f)$ 는 각각 B지점과 C지점에 위치한 센서의 주파수 응답함수이다. 따라서 $S_i(f)$ 와 $R_j(f)$ 은 가진 시 미지의 변동에 따른 효과와 센서의 종류 및 센서와 측정 대상 사이의 접촉상태에 따른 효과를 포함하고 있다. 한편, $T_{AB}(f)$ 와 $T_{BC}(f)$ 는 A지점과 B지점(Fig. 1) 사이, B지점과 C지점 사이의 투과함수이며, 파가 진행함에 따라 재료적 및 기하학적 감쇠(attenuation)에 대한 정보를 포함하고 있다. 균열면에서의 투과특성을 판단하기 위해서는 위의 식에서 $S_i(f)$, $R_j(f)$, $T_{AB}(f)$ 을 제거해야 하므로, 동일 가진원을 이용하여 D지점에서 가진하여 C지점과 B지점에서 신호를 획득함으로써 식 (3,4)와 같은 대칭 세트를 구성한다.

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

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

대칭 세트는 A지점에서 가진하였을 때와 D지점에서 가진하였을 때의 대칭조건에 의하여 동일한 파동 경로와 동일한 감쇠특성을 가진다. 그러므로 B지점과 C지점 사이의 투과함수인 T_{BC} 와 T_{CB} 를 동일하다고 가정하여, 투과함수 $|T_{BC}(f)|$ 을 식 (5)와 같이 구할 수 있다.

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

이와 같은 일련의 자기보정 기법 과정을 거쳐, 식 (5)와 같이 가진기의 미지 변동이나 강도, 센서의 접촉상태 등에 독립적인 투과함수를 산정할 수 있다. 투과함수 $|T_{BC}(f)|$ 는 BC 구간에서의 주파수 성분 별 투과한 파동의 비율을 나타내는 함수로서, 이때 재료는 균질한 등방성 재료로 가정한다. 모든 주파수 성분의 파동이 완전히 전달될 때에는 투과함수가 1.0의 값을 갖는 반면, 투과되는 파가 전혀 없을 때에는 0이 된다.

표면파의 투과함수는 균열이 깊어짐에 따라 감소하므로, 표면파의 투과함수를 측정하여 균열 깊이를 추정할 수 있다. 실제로는 측정 대상의 감쇠특성에 의해서도 투과함수가 감소하게 되므로, 균열이 없을 때에 투과함수가 완전하게 1.0의 값을 가지는 것은 아니다. 따라서 투과함수를 균열 깊이의 직접적인 함수로 표현하기 위해서는 식 (6)과 같이 균열이 없을 때의 투과함수로 정규화(normalization)시키는 과정이 추가적으로 필요하다[3].

$$d_{BC}(f) = \frac{T_{BC}(f)}{T_{BC_0}(f)} \quad (6)$$

여기서, $T_{BC_0}(f)$ 는 균열이 없을 때의 투과함수이다. 결과적으로, 표면파 투과계수, $d_{BC}(f)$ 는 균열을 투과하는 주파수 성분과 균열이 없을 때 투과하는 주파수 성분의 비율이다. 따라서 표면파 투과계수는 균열이 없을 때에는 1.0의 값을 갖고, 매질을 관통하는 균열이 존재할 때에는 0의 값을 갖게 된다.

표면파 투과계수와 마찬가지로 관계식의 일반화를 위해 균열 깊이도 정규화할 필요가 있다. 정규화된 균열 깊이(normalized crack depth, d^*)는 식 (7)과 같이 실제 균열 깊이를 가진된 파장(λ_R)으로 나눠 단위를 무차원화 시킴을 의미한다.

$$d^* = \frac{d}{\lambda_R} = \frac{d \cdot f}{V_R} \quad (7)$$

2.2. 주파수 영역의 결정

신호의 길이가 무한한 이상적인 조화파(harmonic wave)의 경우에는 푸리에 변환을 거친 후에도 신호의 정보가 완벽히 보존된다. 그러나 일반적으로 획득되는 신호의 길이는 유한하므로 정보의 누락 또는 왜곡이 발생한다. 뿐만 아니라 실제 측정되는 표면파에는 콘크리트 부재의 기하학적인 형상에 따라 여러 가지 형태의 반사파가 존재한다. 따라서 획득된 표면파로부터 정보의 왜곡을 최소화하면서 입사파와 투과파를 추출하기 위한 최적 윈도우 기법(optimal tapering or windowing technique)을 제안하고자 한다.

윈도우 기법 적용 시, 획득한 신호에 맞는 윈도우 함수(window function, $W_{t_{wl}}(t-t_{wc})$)의 종류와 중심 위치(position, t_{wc}) 및 크기(size, t_{wl})를 결정해야 한다. 본 연구에서는 다른 윈도우 함수에 비해 스펙트럼 누수(spectral leakage)가 상대적으로 적은 해닝(Hanning) 윈도우를 선택하였다. 그리고 윈도우 함수의 중심 위치는 과도파의 중심과 일치시키기 위해, 레일리파에서 처음으로 나타나게 되는 음의 피크로 설정하였다.

한편, 윈도우 함수의 크기는 다음과 같은 원리를 바탕으로 결정하였다. 반사파가 존재하지 않는 이상적인 과도파(transient waves)의 경우 표면파의 전달 전후 상태에서 에너지 보존 법칙이 성립한다. 즉, 표면파 파형의 평균진폭(average amplitude along the time axis)이 시간축을 따라 0으로 수렴한다. 반사파가 존재할 경우, 평균진폭은 과도파가 빠져 나감에 따라 0으로 접근하다가 반사파의 출현으로 인해 다시 증가하게 된다. 따라서 식 (8)과 같이 윈도우 함수의 크기(t_{wl})를 평균진폭이 0으로 수렴하는 값으로 정한다면, 윈도우 기법으로 인한 정보의 왜곡을 최소화하여 주파수 영역 해석을 수행할 수 있다. 또한, 평균진폭이 0이 된다는 것은 파의 주기적 성분이 최대한 보존되어 있음을 의미하므로, 신호처리에서 발생할 수 있는 절단(truncation) 문제를 최소화할 수 있다.

$$t_{wl} = \arg \min \left(\int W_{t_{wl}}(t-t_{wc})X(t) dt \right)^2 \quad (8)$$

투과함수로부터 신뢰성 있는 투과계수를 추출하기 위한 주파수 영역을 선정하기 위해 Popovics 등 [4]이 제안한 신호 일관성 지수는 식 (9)에서 보듯이 동일한 균열 깊이에서 획득된 투과함수 (transmission function)들 사이의 일관성을 산술평균과 기하평균을 이용하여 수치적으로 보여주는 개념이다. 그러므로 반사파 성분이 일관적으로 입력될 경우 반사파의 주파수 성분뿐만 아니라 가진된 주파수 범위 밖의 불필요한 정보를 포함시키게 되어 큰 오차를 수반하게 된다. 즉, 신호 일관성 지수는 획득된 신호 사이의 일관성을 판단하기에는 충분하나, 역으로 일관성을 기준으로 균열 깊이와 관련된 주파수 영역을 설정하기에는 무리가 있다. 따라서 본 연구에서는 식 (10)과 같이 균열을 통과한 후에 획득된 신호에 대해서, 중심 주파수에서의 자기스펙트럼 밀도 $G_{yy}(f_c)$ 의 -3 dB에 해당하는 주파수 f_R 에 대해 분석하여 신뢰성 있는 결과를 얻고자 하였다. 여기서, $G_{yy}(f)$ 에 해당하는 조건은 식 (8)의 윈도우 기법에 의해 미처 제거되지 못한 반사파 성분에 의한 영향을 주파수 영역에서 일괄적으로 감소시키는 역할을 한다. 주파수 영역 설정에 관한 고찰은 3장에서 보다 자세히 다루고자 한다.

$$SC(f) = \frac{\sqrt[5]{\prod_{i=1}^N T_{BC_i}(f)}}{\sum_{i=1}^N T_{BC_i}(f)/N} \quad (9)$$

$$f_c = \operatorname{argmax} G_{yy}(f) \quad (10)$$

$$\{f_R\} = \{f | G_{yy}(f) > G_{yy}(f_c) - 3dB \text{ and } SC(f) > 0.99\}$$

3. 해석 및 실험 방법

3.1. 해석적 연구

3.1.1. 재료상수 결정

콘크리트 내부에 위치하는 철근에 따라 표면과 투과계수와 균열 깊이의 관계 변화를 살펴보기 위하여 Table 1에서 보듯이 두 가지 종류의 실험체를 준비하였다. 직경 10 mm의 철근이 표면으로부터 5 cm 깊이에 매설된 콘크리트 실험체(ER) 3개와 무근 콘크리트 실험체(EP) 4개를 동일한 크기 (400×400×150 mm)의 거푸집을 이용하여 제작하였다. 모든 실험체는 타설 후 28일간 수중 양생을 실시하였으며, 이후 기건 상태로 보관하였다. 또한, 인공균열(notch)을 생성시키기 위해 타설 중 1 mm 두께의 투명용지(transparency film)를 중앙부에 삽입하고, 탈형 시 거푸집과 함께 제거하였다.

철근의 재료상수는 밀도, 탄성계수, 포아송비가 각각 7850 kg/m³, 250 GPa, 0.3으로 일정한 값을 가지나 콘크리트의 경우 배합 및 환경적인 요인에 따라 재료상수가 변화한다. 따라서 실험체의 현재 재료상수를 구하기 위해 종파 속도(V_L)와 레일리와 속도(V_R), 밀도(ρ)를 측정하였고, 기본적인 탄성과 전달 이론에 의거한 식 (11)과 (12)를 이용하여 탄성계수와 포아송비를 결정하였다.

$$E = \rho \times V_L^2 \times \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad (11)$$

$$\frac{V_L}{V_R} = \frac{(1+\nu)}{(0.87+1.12\nu)} \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{(1-2\nu)}} \quad (12)$$

Table 1 Configuration of concrete specimens

Specimen Label	Mix-Proportion (w:c:fa:ca:sp)*	Age (month)	Crack Depth (mm)
EP00	0.38:1:1.55:2.11:0	34	0
EP05			5
EP21			21
EP44			44
ER00	0.54:1:2.13:2.96:0.001	4	0
ER20			20
ER40			40

* w: water, c: cement, f: fine aggregate, c: coarse aggregate, sp: super plasticizer.

** max aggregates size : 19 mm

여기서 종파 속도는 초음파속도법(ASTM C597-02)에 따라 상용 초음파속도 측정 장비(PUNDIT6)를 이용하여 획득하였다. 그리고 발생 시간(rise time), 피크 시간(peak time) 등 도달 시간(arrival time)의 기준에 따라 변동이 있는 레일리파 속도는 Shin 등[8]이 제안한 최대 에너지 도달 시간을 이용하여 측정하였다. 이는 Kim 등[9]이 유도하였듯이, 표면파에 포함된 체적파의 성분이 레일리파에 비해 현저히 작다는 가정 하에, 표면파의 최대 에너지 성분만을 복원함으로써 레일리파의 균속도를 측정하는 방법이다. 측정된 탄성파 속도와 계산된 재료상수 값을 Table 2에 정리하였다.

3.1.2. 유한요소 모델링

실험에 앞서, 해석적인 결과를 바탕으로 (1) 철근이 표면파 전달 특성에 미치는 영향과 (2) 철근 콘크리트와 무근 콘크리트에서 균열이 발생하였을 때 표면파 전달 특성의 변화를 파악하기 위해 상용 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 유한요소 해석(finite element method)을 수행하였다. 동적해석의 수치적분은 중앙차분법(central difference method)을 이용하여 명시적(explicit)으로 수행하였으며, 콘크리트 및 철근은 8절점 솔리드 요소(8-node linear brick element)를 사용하였다[10].

수치해석 시 동적모드를 정확히 표현하기 위해서는 적절한 분해능, 즉 유한요소의 크기(element size)와 수치적분의 시간간격(time increment)을 결정해야 한다. 기존의 검증된 분해능을 바탕으로[9], 탄성파의 최단 파장을 20개의 요소로 표현하도록 2 mm의 요소크기와 최저 주기를 20개의 간격으로 구분되도록 0.1 μs의 시간간격으로 결정하였다. 이

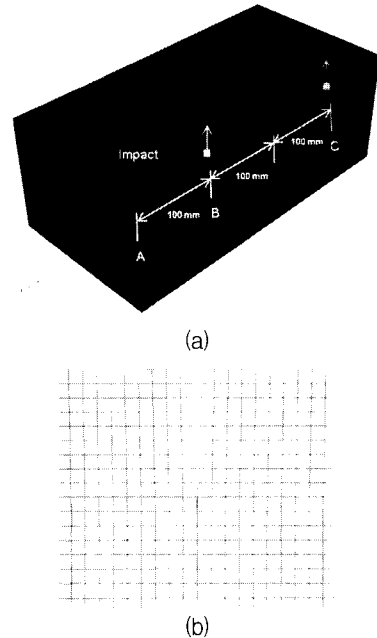


Fig. 2 Finite element model for simulation (a) Finite element model, (b) Modeling of the artificial notch

와 같은 탄성파 전달 해석은 많은 계산량이 요구되어 클러스터 컴퓨터(cluster computer)를 활용하여 병렬처리(parallel processing) 해석이 필요하다[11].

유한요소 모델의 크기는 실험에서 사용될 콘크리트 시편과 동일하게 가로 400 mm, 세로 400 mm, 높이 150 mm로 결정하였으며, 효율적인 해석을 위하여 1/2 대칭모델로 구성하였다. 철근의 영향을 살펴보기 위해 Table 3에서 보듯이 다양한 철근 직경을 설정하였다. 즉, 무근 실험체와 직경이 10 mm 또는 22 mm인 철근을 사용 시, 각각 0-40 mm의 균열 깊이에 따른 총 12가지 경우를 선정하였다. 여기서, 피복두께는 일반적인 철근 콘

Table 2 Test specimen description for determining the material properties

Label	$l \times w \times h$ (mm)	ρ (kg/m ³)	V_L (m/s)	V_R (m/s)	ν (-)	E (GPa)
EP	404×400×152	2300	3940	2250	0.171	33.2
ER	402×400×147	2440	4100	2300	0.194	37.2
Re-bar	diameter = 10 mm	7850	-	-	0.300	200

Table 3 Numerical configuration for considering the effect of a reinforced bar

diameter (mm)	crack-free	crack depth			
		d = 10 mm	d = 20 mm	d = 30 mm	d = 40 mm
-	NP00	NP10	NP20	NP30	NP40
10	NR00	NR10	NR20	NR30	NR40
22	NT00	NT10	NT20	NT30	NT40

크리트 구조물을 대상으로 고려하여 50 mm로 설정하였다. 또한, 1 mm 정도의 작은 균열 폭은 표면파 투과계수에 큰 영향을 미치는 않으므로 Fig. 2(b)와 같이 인공균열(notch)의 형상을 단순화하여 모델링하였다.

충격가진은 점하중으로 모사하여, 식 (13)과 같은 사인함수의 상수(n) 제곱 형태로 시간-하중 곡선을 표현할 수 있다. 이에 따라, 충격가진 하중곡선에 영향을 주는 인자는 발사체와 콘크리트 표면의 접촉시간(t_c)과 하중곡선의 진폭(a)이다.

$$F(t) = a \cdot \sin^n\left(\frac{\pi}{t_c}t\right) \quad (13)$$

여기서, Kim 등[9]은 시간간격이나 요소크기 축소로 해결될 수 없는 기브스 현상(Gibbs phenomenon)에 의한 오차를 줄이기 위해서는 충격가진의 제곱 차수를 4 이상으로 가정하도록 추천하고 있다. 따라서 충격가진에 의한 표면파 전달 해석을 위해 4 제곱 사인함수를 이용한 충격가진 하중을 사용하였다. 접촉시간은 실제 측정되는 신호의 주파수(약 15 kHz의 중심 주파수)와 유사한 주기를 가지도록 예비 실험을 통해 조율시켜 100 μ s로 결정하였다. 마지막으로, 보다 현실적인 시뮬레이션을 위해서 유한요소의 재료상수도 실제 사용하는 재료에 상응하도록 Table 2에 따라 설정하였다.

3.2. 실험적 연구

3.2.1. 표면파 측정 실험

본 연구에서는 Fig. 3에서 볼 수 있는 장비를 이용하여 표면파 측정 실험을 수행하였다. 우선, 장난

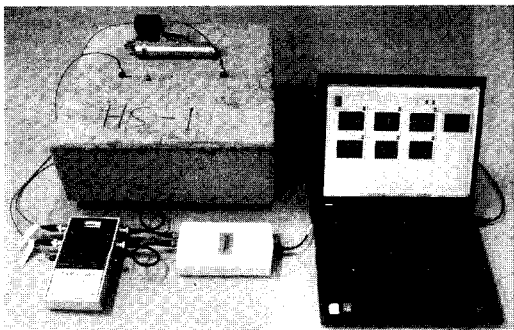


Fig. 3 Experiment setup for measuring transmission coefficient

감충을 이용하여 지름 6 mm의 플라스틱 볼(plastic ball)을 발사시킴으로써 충격 가진시킬 수 있다. 이와 같은 충격가진은 매질의 표면에서 15-45 kHz의 주파수 대역을 가지는 가속도를 유발 하므로, 보통 두께가 15 cm 이상의 콘크리트 부재에서 램파(Lamb wave)의 기본모드에서 구별할 수 있는 레일리파를 쉽고 재현성 높게 발생시킬 수 있다. 가진된 표면파는 공진 주파수가 95 kHz 이상이고, ± 3 dB 주파수 응답 범위가 5-60 kHz인 가속도계(accelerometer; PCB 352A60)와 이를 구동시키는 신호 조절 장치(signal conditioner; PCB480B12)를 사용하여 측정하였다. 측정된 아날로그 신호는 100 MS/s 속도와 8 bits 해상도로 디지털화할 수 있는 디지털라이저(digitizer; NI-USB5133)를 이용하여 저장되었다.

충격가진의 위치는, 후면 반사파의 영향을 없애기 위해 Fig. 2에서와 같이 실험체의 모서리에서 가진하였으며, 센서는 가진점으로부터 100 mm와 300 mm 떨어진 위치에 부착하였다. 이와 같은 실험 구성을 바탕으로 A 지점과 D 지점을 각각 5회씩 가진하여 20 MHz 샘플링 주파수로 250 μ s동안 획득하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 해석적 방법의 결과 및 고찰

가속도 신호는 실험과 동일하게 가진 위치로부터 동일선상으로 100 mm(B지점)와 300 mm(C지점) 떨어진 절점에서 획득하였다. 표면파 투과계수 산정에 앞서, 표면파 전달특성에 미치는 철근의 영향을 살펴보기 위하여 균열이 없는 무근 및 철근 콘크리트 부재에서 표면파의 파형(NP00, NR00, NT00)을 Fig. 4에 나타내었다.

세 가지 경우 모두, 기하감쇠(geometric damping)로 인해 가진점에서 멀리 떨어진 표면파의 진폭이 일정하게 감소함을 확인 할 수 있다. 또한, 철근이 표면으로부터 레일리파의 한 파장

$$\left(\lambda = \frac{V_R}{f} = \frac{2300m/s}{15kHz} = 150\text{ mm}\right)$$

내에 위치함에도 불구하고, 신호의 전체적인 파형에는 큰 차이를 보이지는 않는다. 다만, 철근으로 인해 발생하는 콘크리트 내부 체적파의 산란(scattering)으로 인해 NR00 및 NT00 신호의 진폭이 무근 실험체 보

다 약간 감소하였다. 또한, 철근의 직경이 커질수록 피복두께가 작아지면서 철근에 의한 반사파의 영향이 커지고 도달 속도도 빨라짐을 확인할 수 있다.

전체 표면파 파형을 분석하면 다음과 같다. 가진점과 가까운 위치에 있는 B지점 센서의 경우 체적파(종파 및 횡파)와 레일리파로 구성된 입사 표면파가 약 50 μ s에 먼저 도달한다. 이후 측면 및 저면, 그리고 철근에서 반사된 체적파가 전체 표면파 파형에 간섭된다. 체적파의 경우 진폭이 작고 감쇠 속도가 빠르므로 약 180 μ s에서 보이는 비교적 큰 반사파는 주로 측면에서 반사된 레일리파로 추정된다. 마찬가지로 C지점에서 획득된 신호에서도 약 350 μ s 부근에서 측면 반사파의 간섭이 발생한다.

가진된 표면파가 콘크리트 균열을 투과하면서 파동의 에너지가 크게 감소한다. 한편, 두 센서 사이, 즉 가진원으로부터 200 mm 지점에 30 mm 깊이의 균열이 위치할 때 무근 및 철근 콘크리트 부재에서의 표면파 파형은 Fig. 5와 같다. 균열이 없을 때와 마찬가지로 다양한 반사파 성분이 존재하며, Fig.

4(b)와 비교하였을 때 C지점에서 획득된 투과파의 진폭이 현저히 감소함을 알 수 있다.

표면파 성분 이외의 반사파 성분의 영향을 감소시키기 위하여 2.2 절에서 제안된 윈도우 기법을 적용한 예를 Fig. 6에 나타내었다. 철근이 없는 NP00과 비교하면, 비록 NR00과 NT00의 B지점 신호에 철근 반사파 성분이 포함되어 있으나 그 양이 작으며, 원래 신호(Fig. 4)에서 나타났던 측면 반사파가 크게 감소하여 입사파와 투과파가 확연히 드러났음을 알 수 있다.

주파수 영역에서의 해상도를 증진시키기 위해서 원래 신호 길이의 10배까지 제로패딩(zero-padding)을 수행한 후, 최종적으로 고속 푸리에 변환(fast Fourier transform)을 통해 투과파의 자기스펙트럼 밀도(auto-spectral density)를 각각 구하게 된다. 충격가진 함수의 중심 주파수가 약 15 kHz이나, 파동이 C지점으로 진행함에 따라 고주파수 대역(약 40 kHz)으로 에너지가 분배되는 현상이 발생한다. 따라서 이러한 에너지 분배를 고려

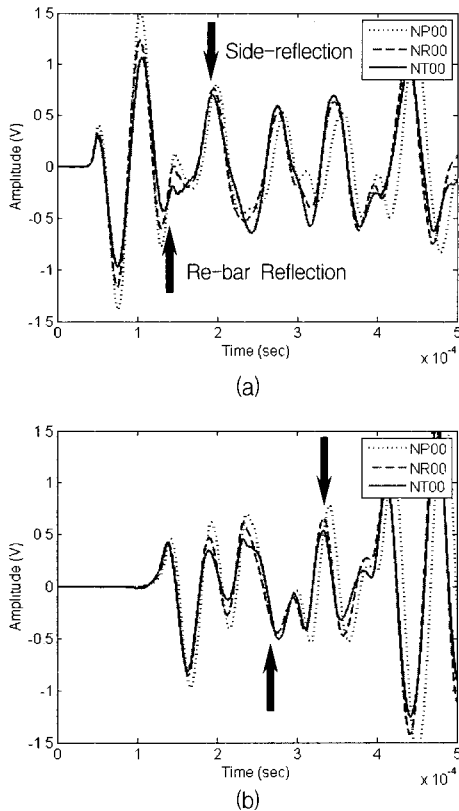


Fig. 4 Obtained signals on crack-free condition (NP00, NR00 and NT00) (a) location B, (b) location C

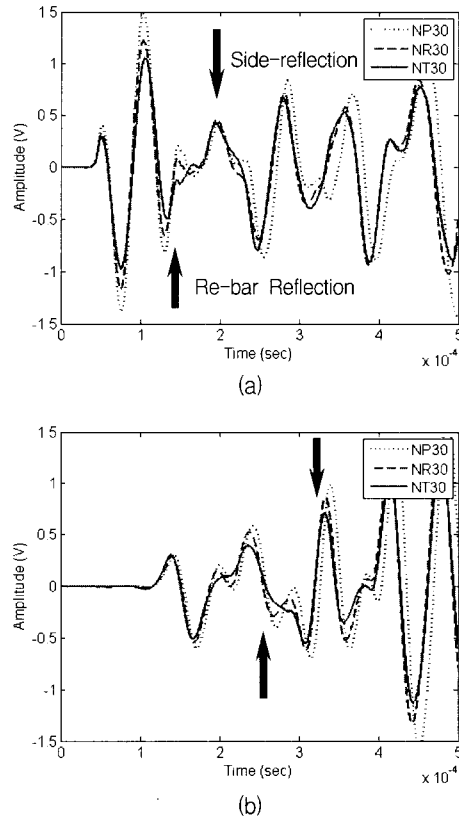


Fig. 5 Obtained signals on cracked condition with the crack depth of 30 mm (NP30, NR30 and NT30) (a) location B, (b) location C

하여 균열에 관한 정보를 포함하는 주파수 영역을 선정하는 방법이 중요해진다. 저주파수 대역과 고주파수 대역 중에서 균열에 관한 정보를 포함하고 있는 주파수 대역을 선정하기 위해서는 우선적으로 균열 깊이에 따른 투과함수의 변화를 살펴볼 필요가 있다.

수치해석에서는 가진기의 강도 또는 센서의 접촉 상태 등에 발생하는 투과함수의 변동이 없으므로 자기보정 기법이 필요하지 않다. 즉, 두 센서에서

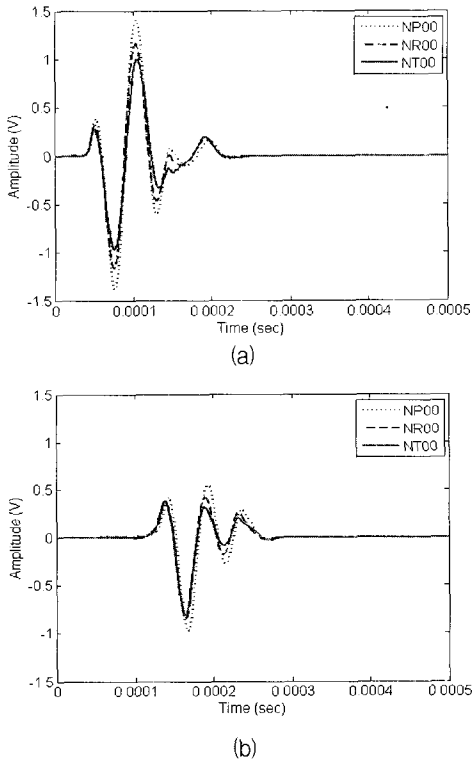


Fig. 6 Windowed signals on crack-free condition (a) location B, (b) location C

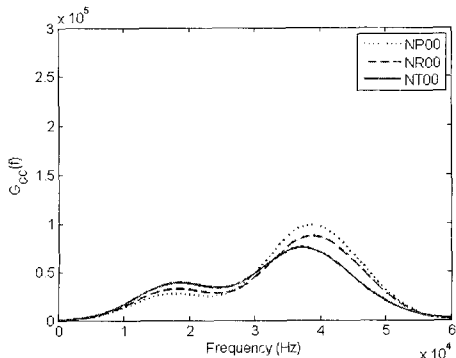


Fig. 7 Auto-spectral density of incident waves and transmitted waves

측정된 입사파와 투과파의 자기 스펙트럼 밀도의 비율로 투과함수를 산정할 수 있다. Fig. 8은 균열이 없는 NP00과 NR00, NT00의 자기스펙트럼 밀도(Fig. 7)를 바탕으로 구한 투과함수이다.

탄성파가 전달되면서 에너지가 확산되므로 1.0 이하의 값을 갖는 투과 함수가 정상적이나, Fig. 8의 8-15 kHz 부근과 48 kHz 이상의 주파수 대역에서는 1.0 이상의 비정상적인 값을 보이고 있다. 이는 B지점에는 존재하지 않았던 해당 주파수 대역의 탄성 에너지가 C지점에서 추가되었음을 의미한다. 8-15 kHz 대역에서는 철근량과 관계없이 투과 함수가 거의 동일함을 미루어 볼 때, 저면 또는 측면 반사파에 의한 영향으로 판단된다. 한편, 48 kHz 이상의 고주파수 대역에서는 철근량이 증가함에 따라 투과함수가 증가하므로 철근 표면에서 반사된 체적파 또는 철근을 따라 전달된 레일리파에 의해 증가된 에너지로 판단할 수 있다.

Fig. 9는 NP, NR, NT 세 가지 경우 균열 깊이에 따른 투과함수의 변화를 도시한 것으로, 철근의 유무, 철근의 직경에 상관없이 반사파 등의 간섭이 없는 약 15-48 kHz 대역에서 균열 깊이가 증가함에 따라 투과함수가 감소하는 동일한 경향을 보임을 알 수 있다. 약 8-15 kHz, 48 kHz 이상의 주파수 대역에서 나타나는 비정상적인 투과함수는 원도우 기법을 통해 제거되지 못한 반사파 등에 의한 영향으로 판단되며, 주파수 영역을 설정할 때에 이러한 영향을 고려해야 할 것이다.

Fig. 10은 NR의 경우 C지점에서의 균열 깊이에 따른 주파수 성분의 밀도 변화를 나타낸다. 그림에서 보듯이 균열이 깊어짐에 따라서 고주파수 대역의 밀도가 감소하는 반면, 저주파수 대역의 밀도는 증가한다. 균열 깊이에 따라 자기스펙트럼 밀도 및

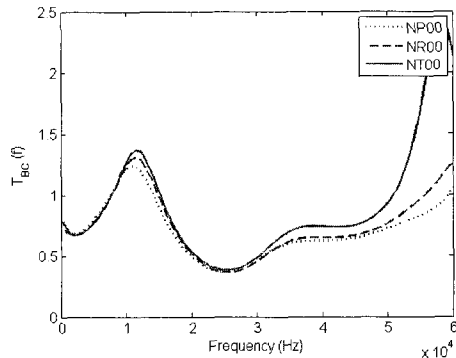


Fig. 8 Transmission functions depending on a reinforced bar (crack-free condition)

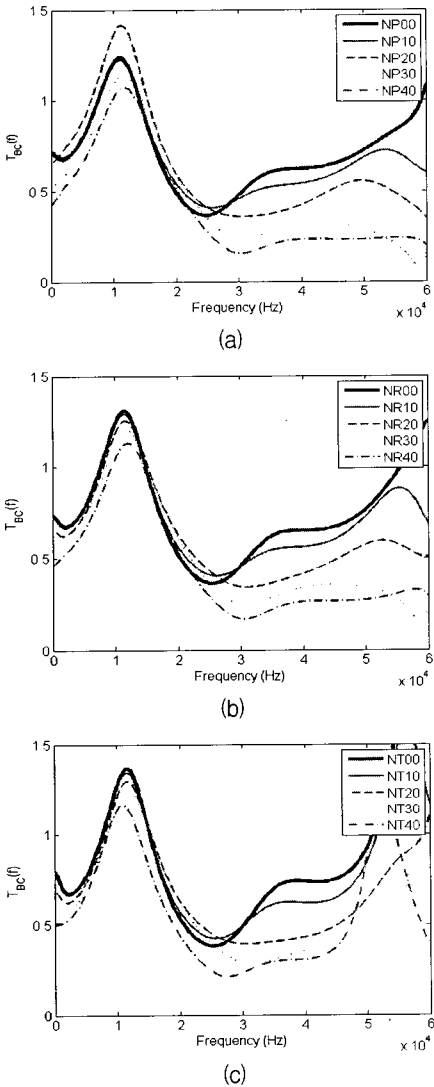


Fig. 9 Transmission functions depending on the crack depth (a) NP (plain concrete), (b) NR (diameter of re-bar = 10 mm), (c) NT (diameter of re-bar = 22 mm)

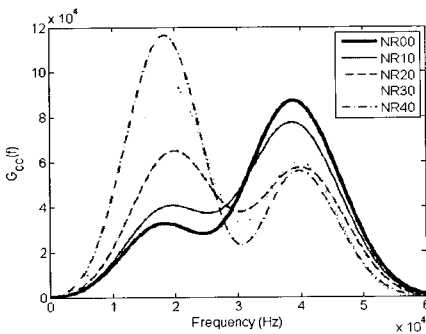


Fig. 10 Auto-spectral density depending on the crack depth obtained at location C on NR

투과함수가 함께 감소하는 고주파수 대역을 선택하여 투과계수를 구하는 것이 물리적으로 타당하므로, 저주파수 대역이 아닌 고주파수 대역의 최대 자기스펙트럼 밀도 값과 식 (10)을 이용함으로써 반사파의 영향을 최대한 감소시키고자 하였다.

투과계수를 구하기 위한 신호처리 과정에 있어 윈도우의 크기는 매우 큰 영향을 미친다. 이는 획득된 파의 주요 성분을 결정하는 문제로서, 주요 성분을 어떤 범위까지 인정할 것인지에 관한 문제에 해당한다. 본 절에서는 Fig. 11과 같이 세 가지 종류의 윈도우 크기, (a) 첫 번째 음의 방향 피크만을 포함하였을 경우, (b) 제한된 윈도우 크기 결정을

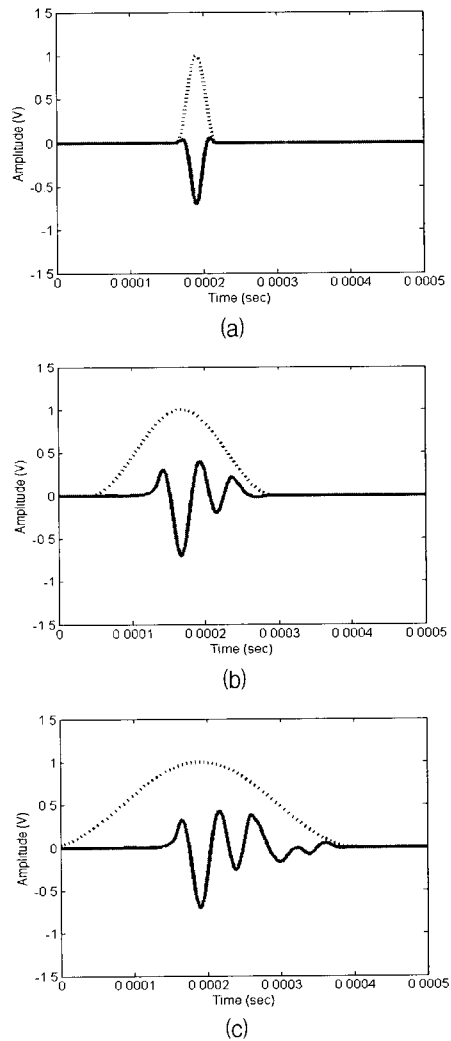


Fig. 11 Three types of window size for solving the transmission coefficient (a) smaller than the optimal window size, (b) the optimal window size, (c) larger than the optimal window size

과정을 사용하였을 경우, (c) 반사파를 포함하였을 경우에 대해 살펴보았다. 세 가지 경우에 해당하는 표면파의 투과계수와 정규화된 균열 깊이의 관계를 Fig. 12에 도시하였다.

Fig. 11(a)와 같이 윈도우 크기가 작아 과도파의 일부분만을 포함할 경우, 모든 경우에 대해서 $G_{yy}(f)$ 의 최대값에 해당하는 중심 주파수 $f_c = 0 \text{ kHz}$ 로 나타난다. 윈도우된 신호의 스펙트럼 밀도에서 0 kHz 성분은 신호의 시간평균값으로써, 물리적으로 특별한 의미를 갖지 않는다. 따라서 이에 해당하는 투과계수도 단지 평균값의 비율일 뿐이다. 반면, Fig. 11(c)와 같이 윈도우의 크기가 커

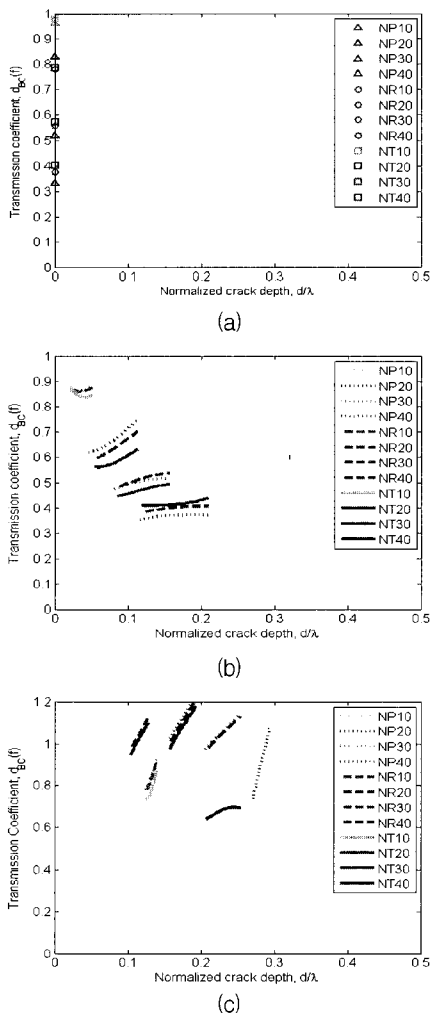


Fig. 12 Transmission coefficient vs. normalized crack depth depending on window size (a) smaller than the optimal window size, (b) the optimal window size, (c) larger than the optimal window size

반사파 성분을 다수 포함할 경우 균열 깊이와 투과계수의 경향이 크게 산포됨을 알 수 있다. 본 연구에서 제안한 식 (8)을 이용하여 윈도우 크기를 정하였을 때, Fig. 12(b)와 같이 d^* 에 따라 투과계수가 감소하는 경향을 보임을 확인할 수 있다. 균열 깊이가 20 mm인 경우 철근이 없을 때의 투과계수가 철근이 있을 때에 비해 더 큰 값을 가지나 균열이 깊어짐에 따라 철근이 있을 때의 투과계수 값이 크게 나타난다. 즉, 무근 콘크리트에 비해 철근 콘크리트에서, 그리고 철근의 직경이 커질수록 d^* 에 따른 투과계수의 변화가 더 작게 나타난다. 그러나 각 경우의 투과계수 값 자체의 차이는 0.02-0.1로 매우 작기 때문에 철근의 유무나 직경에 구애받지 않고 무근 콘크리트의 d^* 와 투과계수 사이의 관계를 이용할 수 있는 가능성을 확인할 수 있다.

4.2. 실험적 방법의 결과 및 고찰

각 균열 깊이에서의 투과함수를 구하기 위해 Fig. 13과 같은 표면파 신호를 획득하였다. 수치해석과는 다르게 실제 실험을 통해 획득한 신호에는 내부의 비균질성에 의한 영향으로 고주파수 성분과 잡음이

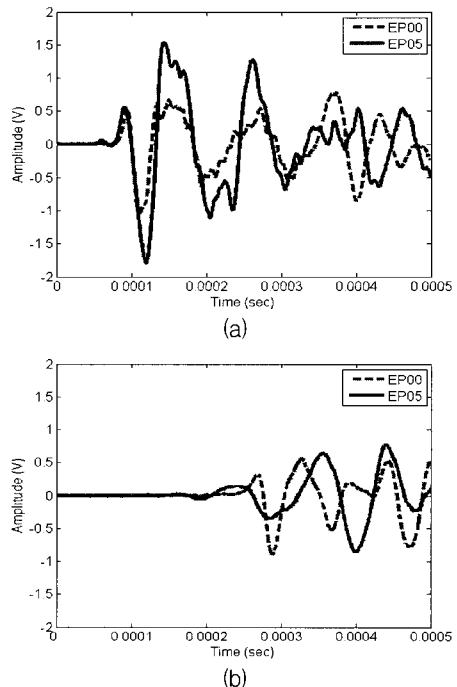


Fig. 13 Obtained Signals on EP01 and EP05 when the impact is applied at A (a) location B, (b) location C

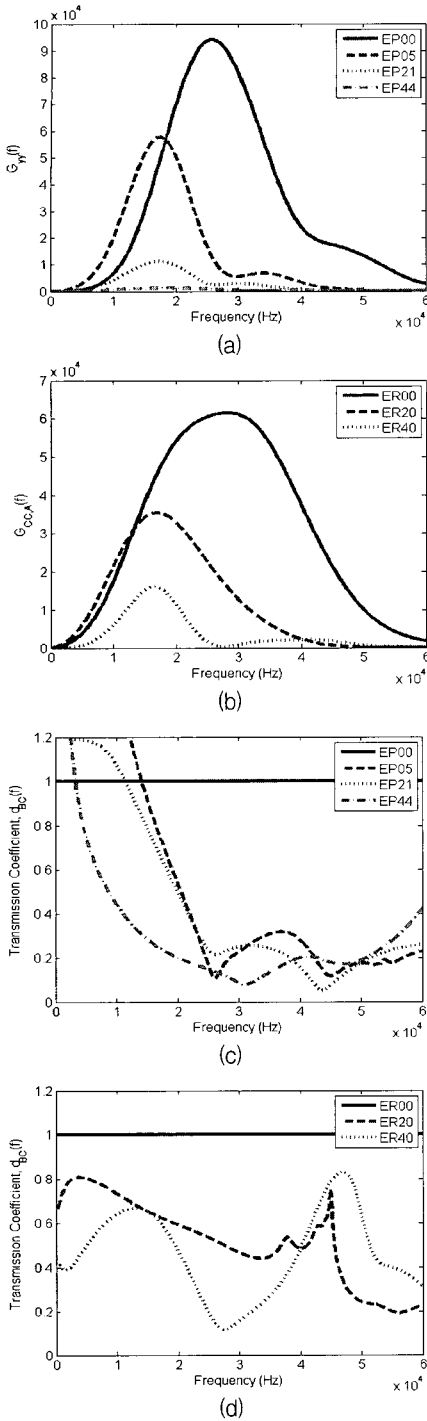


Fig. 14 Auto-spectral density function and transmission coefficient depending on the crack depth when the impact is applied at A (a) auto-spectral density function(EP), (b) auto-spectral density function (ER), (c) transmission coefficient (EP), (d) transmission coefficient (ER)

많이 섞여 있음을 알 수 있다. 게다가 EP05의 경우, 균열 깊이가 5 mm로 작음에도 불구하고 진폭의 감소가 크고, 주기가 길어지는 모습을 보인다.

앞서 설명한 윈도우 기법을 사용하여 EP와 ER에서 균열 깊이에 따른 자기스펙트럼 밀도와 주파수별 투과계수를 산정하여 Fig. 14에 나타내었다. 비록 주파수별 밀도의 값 자체에는 차이가 있지만, 철근의 유무에 상관없이 최대 밀도가 나타나는 주파수의 범위에는 큰 차이가 없다. 또한 전 주파수 영역에서 투과계수의 변동이 심하지만, 최대 밀도가 나타나는 주파수 영역에서는 균열 깊이에 따라 투과계수가 감소하는 것을 알 수 있다.

최종적으로, 정규화된 균열 깊이에 따른 투과계수의 변화를 Fig. 15에 도시하였다. 식 (10)을 이용하여 주파수 영역을 설정하였을 때와 신호 일관성 지수만을 이용하여 설정하였을 때를 함께 비교해보았다. Fig. 15(b)에서 보듯이 신호 일관성 지수만을 이용하여 주파수 영역을 설정하였을 때 다양한 반사파 성분으로 인한 영향을 다수 포함하게 되어 투과계수가 분산되어 나타난다. 한편, 자기스펙트럼

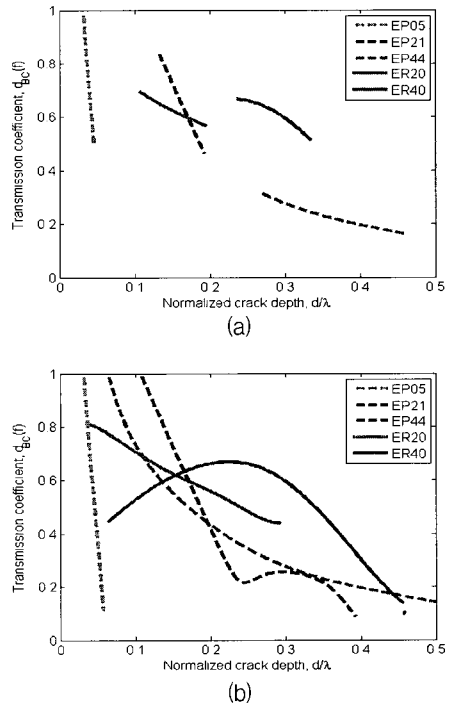


Fig. 15 Transmission coefficient vs. normalized crack depth on reinforced concrete (ER) and plain concrete (EP) (a) including the auto-spectral density, (b) only with the signal consistency

밀도를 이용하여 유효 주파수 대역도 함께 고려할 경우에는 윈도우 기법에 의해 미처 제거되지 못한 반사파 성분을 제외시켜 보다 신뢰성 있는 결과를 확인할 수 있다.

4.3. 균열 깊이 추정을 위한 모델식의 구성

수치해석(Fig. 12(b))과 실험(Fig. 15(a))을 통하여, 철근이 표면과 투과계수에 미치는 영향이 비교적 크지 않다는 점을 4.1 절과 4.2 절에서 확인하였다. 일반적으로 사용되는 철근의 양(1-2% 정도의 철근비)이 콘크리트 부재의 전체 크기에 비해 상대적으로 적어서 표면파로 전달되는 탄성 에너지에 큰 영향을 주지 않는 것으로 판단된다. 한편, 실제 철근 콘크리트 구조물에 적용하기 위해서는 철근의 지름뿐만 아니라 배근된 철근의 개수 등이 표면파 전달에 미치는 영향에 대한 분석이 추가적으로 필요하며, 현재 이에 관한 연구가 진행 중에 있다.

철근 콘크리트 구조물에 발생하는 균열 깊이를 추정하기 위하여, 앞서 설명한 무근 콘크리트 모델에 균열 깊이 60 mm, 80 mm, 100 mm의 세 가지 경우를 추가함으로써 정규화된 균열 깊이(d^*)와 투과계수(d_{BC}) 사이의 모델식을 구성하였다. 선형 3차 다항식 모델을 사용하여 회귀분석을 수행한 결과는 식 (14)와 같으며, 이 때 결정계수(R^2)는 0.962이다.

$$d_{BC}(f) = -20.86d^{*3} + 19.44d^{*2} - 6.107d^{*} + 1 \quad (14)$$

Fig. 16에서 보듯이 수치해석 결과를 바탕으로 한 회귀식과 실험 결과의 투과계수 값 자체에는 차

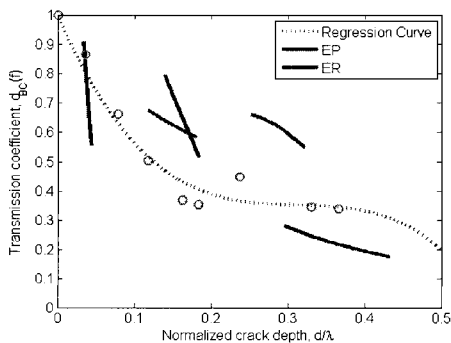


Fig. 16 Regression for the relation between transmission coefficient and normalized crack depth

이가 발생한다. 그러나 정규화된 균열 깊이에 따른 경향성은 무근 콘크리트와 철근 콘크리트에서 모두 유지하고 있음을 알 수 있다. 만약 다양한 균열 깊이에서의 실험 결과를 바탕으로 데이터베이스를 구축해 나간다면, 보다 신뢰성있는 균열 깊이 추정이 가능할 것으로 판단된다.

5. 결론

이 논문에서는 자기보정 기법을 이용하여 구한 표면파 투과계수를 바탕으로 철근 콘크리트 구조물에서의 균열 깊이를 추정하는 방법에 대해 고찰하였다. 특히, 기본적인 표면파 투과계수와 정규화된 균열 깊이의 관계에 철근이 미치는 영향에 대해 수치해석과 실험을 통해 분석하였다. 먼저, 유한요소 해석을 통하여 철근의 유무 및 철근의 직경에 따른 투과계수의 변화를 살펴본 결과, 철근의 직경이 커짐에 따라 투과계수가 감소하였다. 그러나 균열 깊이에 따른 투과계수의 감소에 비해 그 변화량이 상대적으로 매우 작아 철근이 없을 때와 동일한 경향을 보인다. 이와 같이 철근에 독립적인 관계는 실험을 통해서도 확인할 수 있다.

또한, 실제 콘크리트 구조물에서 표면파를 측정하면 구조 부재의 형상에 따라 여러 종류의 반사파가 존재하므로, 신뢰성 있는 투과계수를 구하기 위해서는 원래 신호에서 입사파와 투과파를 추출하는 과정이 중요하다. 따라서 본 논문에서는 과도파의 전달 특성을 이용하여 최적 윈도우 크기를 결정하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법을 이용하여 투과계수를 구할 경우, 균열의 깊이에 따라 투과계수가 감소하는 일관된 결과를 얻을 수 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부/한국과학재단 우수연구센터 육성사업(스마트 사회기반시설 연구센터: 과제번호R11-2002-101-03001-0)의 지원 및 건설교통부 건설핵심기술 연구개발 사업(과제번호: 05건설핵심-C19)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] V. M. Malhotra and N. J. Carino, Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, 2nd

- Edition, CRC Press, (2004)
- [2] 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 technique," *ACI Materials Journal*, Vol. 93, pp. 494-505, (1996)
- [3] W.-J. 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)
- [4] J. S. Popovics, W.-J. 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)
- [5] J. D. Achenbach, L. M. Keer and D. A. Mendelsohn, "Elastodynamic analysis of edge crack," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 47, pp. 551-556, (1980)
- [6] 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. 103-108, (1980)
- [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] S. W. Shin, C. B. Yun, J. S. Popovics and J. H. Kim, "Improved Rayleigh wave velocity measurement for nondestructive early-age concrete monitoring," *Research in Nondestructive Evaluation*, Vol. 18, No. 1, pp. 43-66, (2007)
- [9] J. H. Kim and H.-G. Kwak, *Nondestructive Evaluation of Elastic Properties of Concrete Using Simulation of Surface Waves, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, (Accepted)
- [10] ABAQUS, Inc., *ABAQUS 6.5 Analysis User's Manual*, (2004)
- [11] 광효경, 박준호, 김재홍, 병렬처리 시스템의 구축 및 활용, 구조설계 연구실 보고서, SDLAB-0601, (2006)