

표면탄성파를 활용한 콘크리트 균열 보수 성능 평가 기법

Evaluation of Crack-Repairing Performance in Concrete Using Surface Waves

안은종¹ · 김현준¹ · 권성우¹ · 심성한¹ · 이광명² · 신명수^{1*}

Eunjong Ahn¹ · Hyunjun Kim¹ · Seongwoo Gwon¹ · Sung-Han Sim¹ · Kwang Myong Lee² · Myoungsu Shin^{1*}

(Received November 13, 2017 / Revised November 21, 2017 / Accepted November 24, 2017)

The purpose of this study is to investigate the applicability of surface-wave techniques for the evaluation of the crack-repairing performance of an epoxy injection method in concrete. In this study, box-shaped concrete specimens with four different crack depths were made with identical mix proportions. The specimens with different crack depths were completely repaired using the same epoxy injection method. The spectral energy transmission ratio of surface waves is used as an index to differentiate the effects of crack depth and crack-repairing performance. The decrease of spectral energy transmission ratio in accordance with the increase of crack depth was identified before repairing. Furthermore, the spectral energy transmission ratio increased after the crack-repairing process in all specimens. The spectral energy transmission ratio is considered as a great indicator for estimating the crack-repairing performance of the epoxy injection method; the ratio was recovered up to almost 95% of the uncracked condition.

키워드 : 표면탄성파, 균열 깊이, 보수 성능, 비파괴 평가

Keywords : Surface wave, Crack depth, Repairing performance, Non-destructive evaluation

1. 서론

최근 미국토목학회(ASCE)에서 발표한 사회기반시설물 현황 보고서에 따르면, 미국 내 존재하는 교량을 비롯한 사회기반시설물의 종합 등급이 D+로 평가되었다(ASCE 2017). 또한, 한국건설산업연구원에 따르면 C등급 이하로 평가된 국내 노후 교량도 200개 이상으로 조사되었다. 이러한 결과의 주된 요인은 현재 사용되고 있는 대부분의 사회기반시설물들의 노후화로 분석되었으며, 이들의 구조물 안전성 확보를 위한 즉각적인 유지관리가 필요하다고 판단되고 있다. 특히, 콘크리트 구조물 내에 발생하는 균열은 내구성 및 사용성 문제를 야기함과 동시에 노후화를 앞당기고 있기에, 구조물의 균열 탐지 및 평가는 구조물의 현재 안정성을 판단하고 그에 따른 유지 및 보수작업을 하는데 매우 중요하다. 이를 위하여,

균열의 폭, 깊이 등을 수치적으로 파악하고 보수하는 연구가 수행되고 있다.

콘크리트 구조물의 균열을 평가 하는 방법으로는 크게 디지털 영상 처리를 통해 외부의 균열 정보를 측정하는 방법과, 초음파를 활용하여 내부의 균열을 추정하는 기술로 구분된다. 디지털 영상 처리 기법은 콘크리트 표면을 촬영한 사진으로부터 균열 폭 및 길이를 계산하며, 높은 편의성과 정확도로 널리 연구되고 있다(Kim et al. 2017a; Kim et al. 2017b). 하지만, 2D 영상 정보를 이용하는 특성 상, 균열 깊이 등의 종합적인 균열 상태 평가를 하기에는 한계점을 가지고 있다. 반면에, 초음파 기반의 회절파 시간 측정법(TOFD법: Time of flight diffraction method), 표면탄성파 투과 기법, 확산초음파 등의 초음파 기반의 방법들이 연구되고 있는 실정이다(Ahn et al. 2017).

* Corresponding author E-mail: msshin@unist.ac.kr

¹울산과학기술원 도시환경공학부 (School of Urban and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST), Ulsan, 44919, Korea)

²성균관대학교 건설환경공학부 (School of Civil, Architectural and Environmental Engineering, Sungkyunkwan University, Gyeonggi-do, 16419, Korea)

회절파 시간 측정법은 콘크리트와 같이 균열 선단이 잘 정의되지 않는 비균질성 재료에서 깊이가 10cm 이하의 균열을 평가하는데 변동성이 큰 단점이 있고, 확산초음파 기법은 실험체에서 측정하는 위치마다의 변동성이 큰 단점이 있다. 반면에, 표면탄성파 기법은 가진원으로부터 연직 방향으로 한 파장 이내에 에너지가 집중되어 있는 성질을 가지고 있어, 표면탄성파의 투과 현상은 균열 깊이에 밀접하게 영향을 받는다(Ahn et al, 2017; Angel and Achenbach 1984; Graff 1991). 이를 바탕으로 많은 연구자들이 표면탄성파를 활용하여 균열 깊이 추정 및 균열 특성을 평가하는 연구를 수행하였다(Popovics et al, 2000; Shin et al, 2008; Shin et al, 2009).

이 뿐만 아니라 균열면에 입사하는 표면탄성파의 파장의 길이 특성을 활용하여 보수 성능 평가 연구가 수행되었다(Aggelis and Shitoni 2007; Aggelis et al, 2009). 또한, 표면탄성파의 투과현상을 활용하여 콘크리트 균열면 자기치유 과정 평가에도 활용되고 있다(Aldea et al, 2000). 이에 본 연구에서는 균열 깊이 변화와 보수 및 자기치유 성능에 활용되고 있는 표면탄성파 기법을 서로 다른 균열 깊이를 가진 실험체의 균열 보수 성능 평가에 관한 실험적 연구를 수행하고자 한다.

2. 균열에서 표면탄성파의 거동

표면파 가진을 통한 투과계수 산정은 균열면에 입사한 파와 균열면을 통과한 파의 비율로 표현할 수 있다. Fig. 1의 위치 A에서 물리적 충격을 가하여 발생한 표면탄성파는 위치 B(균열 통과 전)와 위치 C(균열 통과 후)에 부착되어 있는 센서에서 계측할 수 있다. 이 때, 가진원 A 위치에서의 충격에 의한 위치 B와 C의 센서에서 계측한 신호는 주파수 대역대에서 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$X_{AB}(f) = I_A(f) T_{AB}(f) R_B(f) \tag{1}$$

$$X_{AC}(f) = I_A(f) T_{AB}(f) T_{BC}(f) R_C(f) \tag{2}$$

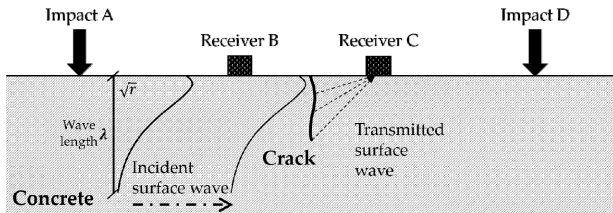


Fig. 1. Surface wave transmission across a crack(Ahn et al. 2017)

일반적으로 센서와 콘크리트 표면 또는 가진원과 콘크리트 표면 사이의 접촉 상태에 의해 계측된 표면탄성파 신호의 다양성이 존재한다. 이를 해결하기 위하여, 많은 연구자들이 자기 보정기법을 연구에 적용하였다. 자기보정기법은 균열면을 기준으로 대칭위치에서 가진한 표면탄성파는 같은 경로를 따라서 이동한다는 가정에서 시작된다.

가진원 A의 반대편 위치인 가진원 D 위치에서의 충격에 의한 위치 C와 B에서 계측한 신호는 식 (1)과 식 (2)와 같은 형식으로 유도할 수 있다. 이때, 위치 C와 B사이의 표면탄성파의 투과계수 $T_{CB}(f)$ 는 $T_{BC}(f)$ 와 동일한 값을 가진다고 가정하기 때문에, 균열면 주위에서 위치 B와 C사이의 투과계수는 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$T_{BC}(f) = \sqrt{T_{BC}(f) T_{CB}(f)} = \sqrt{\frac{X_{AC}(f) X_{DB}(f)}{X_{AB}(f) X_{DC}(f)}} \tag{3}$$

이론적으로는, 위치 B와 위치 C사이에서 표면탄성파의 완전 투과가 이루어지게 되면 투과계수는 1을 나타내고, 반면에 완전 반사가 이루어지면 투과계수는 0을 나타낸다.

하지만, 투과계수는 주파수 의존적인 특성이 있어, 정량적인 균열 깊이 평가에 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여, 일정 주파수 영역에서의 투과계수를 적분한 스펙트럼에너지라는 개념을 도입되었다(Shin et al, 2008). 하지만, 스펙트럼에너지는 센서의 거리에 의존하는 특성이 있어, 이를 정규화 시켜주기 위하여 특정 깊이에서 측정한 스펙트럼에너지와 무균열 실험체에서 측정한 스펙트럼에너지의 비율로 식 (4)와 같이 정의한 스펙트럼에너지투과비를 정의하였다. 스펙트럼에너지는 특정 주파수 영역에서 투과계수를 적분하여 정의하기 때문에, 투과 계수 적분 구간을 신뢰성 높은 주파수 대역대의 선정이 필요하다.

$$SETR(d_i) = \frac{SE(d_i)}{SE(d_0)} = \frac{\int_{f_L}^{f_U} |T_{BC}(f, d_i)| df}{\int_{f_L}^{f_U} |T_{BC}(f, d_0)| df} \tag{4}$$

여기서, $SETR(d_i)$ 는 균열 깊이 d_i 에서 측정한 스펙트럼에너지 투과비이며, $SE(d_i)$ 는 균열 깊이 d_i 에서 측정한 스펙트럼에너지다. f_L 과 f_U 은 각각 스펙트럼에너지를 구하기 위한 투과계수의 하한 및 상한 주파수다. 이를 위하여, 기존의 연구자가 도입한 신호 일관성 계수를 사용하여, f_L 과 f_U 를 정의하였다(Shin et al, 2008).

신호 일관성 계수는 실험체에서 5번 반복하여 측정된 투과계수의 산술평균과 기하평균의 비로 나타낸다(Popovics et al, 2000).

3. 실험 연구

3.1 실험체 제작

본 실험에서는 표면탄성파가 균열을 투과할 때, 밀면, 옆면 및 뒷면에서 돌아오는 반사파의 영향을 최소화하기 위하여 실험체의 형상은 Fig. 2에 보이는 것 과 같이 250(길이)×250(너비)×100(두께)mm 크기로 설정하였다. 표면탄성파의 투과계수가 균열 종류 (e.g., 노치, 실제 균열)에 크게 영향을 받지 않는 것을 확인하고 (Popovics et al, 2000), 실험체 각각 중앙부에 1mm 두께와 15, 30, 45mm 높이를 가지는 스테인리스 스틸 노치(notch)를 사용하여 0, 15, 30, 45mm 깊이의 균열을 가진 콘크리트 시편을 총 4개 제작하였다. 콘크리트의 배합표는 Table 1과 같고, 굵은 골재의 최대 골재 치수는 19mm를 사용하였다. 모든 시편은 콘크리트를 타설하고 1일 후에 몰드에서 탈형하였고, 이후 28일 간 수중 양생

을 마친 뒤에 시편 중앙에 삽입된 노치를 제거하였다. 사용한 콘크리트의 역학적 특성 파악을 위하여, 콘크리트 공시체 3개의 28일 압축강도와 탄성계수를 ASTM C 39에 따라 측정하였다. 탄성계수는 Fig. 3 압축강도 실험 결과 그래프에서 50 마이크로 스트레인과 하중의 40% 지점의 Chord modulus 값으로 계산하였다. 압축강도는 40.1MPa, 탄성계수는 30.9GPa로 나타났다.

3.2 균열 보수

본 실험에서는 일반적으로 현장에서 사용되고 있는 건식씰링제 (대화정밀공업회사, DH-400S)와 저점도 에폭시(대화정밀공업회사, DH-150)를 구매하여 보수 작업을 진행하였다. 먼저, 에폭시의 누출을 막기 위하여 건식씰링제의 주재와 경화제를 1:1 비율로 섞어서 일반 균열 보수작업과 동일하게 마감재를 균열 면과 실험체 옆면에 도포 하였다. 씰링제를 도포하고 24시간 후에 완전히 씰링제가 표면에서 경화되었을 때, 에폭시 주재와 경화제를 2:1 비율로 섞어서 고무줄 주사기를 이용하여 에폭시를 Fig. 4와 같이 주입하였다.

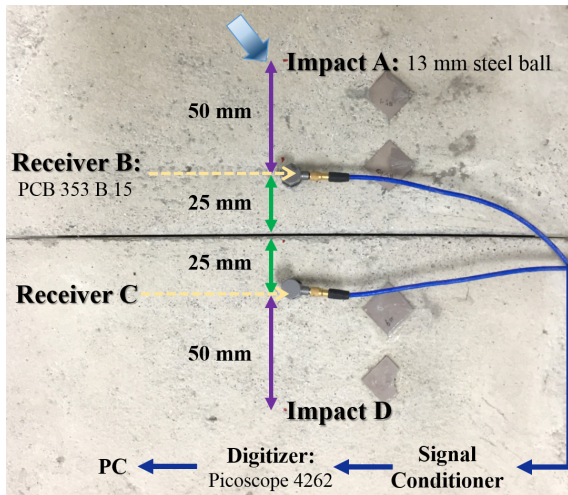


Fig. 2. Experimental setup for surface wave transmission

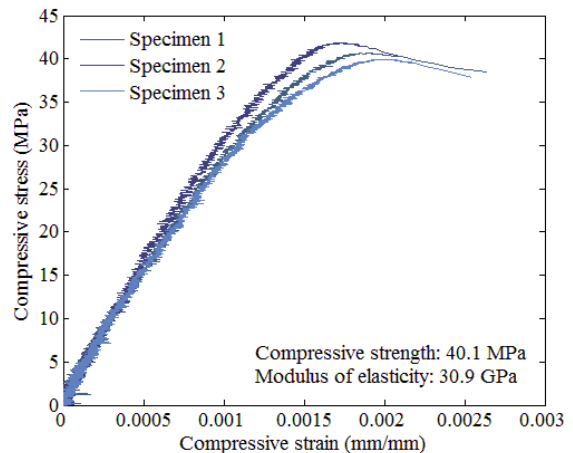


Fig. 3. Compressive stress-strain test results

Table 1. General descriptions of test specimens

Specimen label	Crack depth (mm)	Specimen dimensions(mm)			Mix proportions(kg/m ³)					Mechanical Properties	
		Length	Width	Height	Cement	Water	Fine aggregate	Coarse aggregate	Super-plasticizer	Compressive strength (MPa)	Modulus of elasticity (GPa)
C0	0	250	250	100	374 (1)	168 (0.45)	935 (2.5)	935 (2.5)	1.5 (0.004)	40.1	30.9
C15	15										
C30	30										
C45	45										



Fig. 4. Crack repairing process using epoxy

3.3 표면탄성파 투과 실험 및 데이터 처리

표면탄성파 투과 실험은 각 실험체마다 균열 보수 전/후로 5번씩 반복하여 측정하였고, 투과계수를 통해 도출한 스펙트럼에너지 투과비를 통하여 균열 보수 성능 평가를 진행하였다. 본 실험에서는 Fig. 1에 설명되어 있는 자기보정기법을 적용하기 위하여, Fig. 2에 보이는 것과 같이 균열면을 기준으로 대칭인 위치에 양초를 이용하여 센서를 부착하고 표면파 신호를 계측하였다(Popovics et al., 2000; Shin et al., 2008; Shin et al., 2009). Fig. 2에 위치 A와 D에서 13mm 지름의 강구를 30cm 높이에서 자유 낙하시켜 표면탄성파를 가진하였다. 위치 B와 C에 두 개의 초소형 가속도계(PCB 353 B15)를 시편에 부착하여 신호를 계측하였고, 가속도계는 균열로부터 각각 25mm 떨어진 곳에 부착하였다(Shin et al., 2009). 가속도계에서 받아들인 아날로그 신호는 PCB사의 482C 모델 Signal conditioner에서 10배 증폭하였다. 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환시키기 위하여 16bits 수직분해능을 갖는 PICO Technology사의 Picoscope 4262 모델을 디지털타이저로 사용하였다. 디지털타이저의 샘플링 레이트는 수집한 표면탄성파 신호의 적절한 시간 분해능을 얻기 위하여, 2MS/s/ch로 설정하여 신호를 수집하였다. 디지털타이저에서 디지털 신호로 변환된 모든 신호는 Picoscope 6 소프트웨어를 사용하여 저장하였고, 모든 데이터는 MATLAB R2013a 소프트웨어를 사용하여 분석하였다.

계측한 신호에서 유효한 표면탄성파 신호를 추출하기 위하여, Fig. 5에 보이는 것과 같이 제일 먼저 도착하는 레일리파 정점을 기준으로 좌우로 50 μ s를 유효한 표면파 신호라고 판단하고 데이터 분석을 진행하였다(Popovics et al., 2000). 표면탄성파 구간을 추출 후, 밀면 또는 옆면에서 반사되어 도착하는 P파의 영향을 줄여주기 위하여, Hanning window를 사용하여 신호처리를 하였다(Popovics et al., 2000; Shin et al., 2008; Shin et al., 2009). 주파수

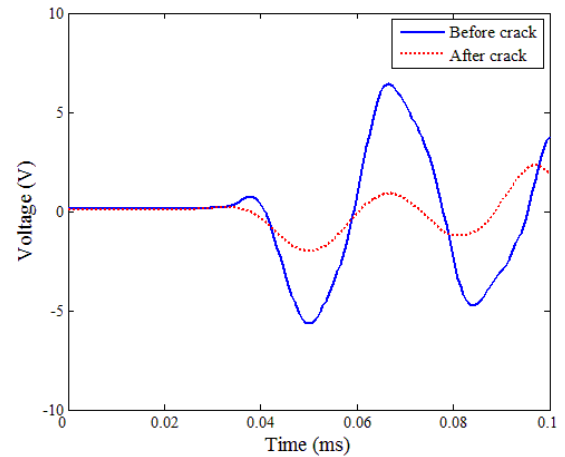


Fig. 5. Surface wave signals for 45mm deep crack specimen in time-domain

대역대에서 해상도를 높여주기 위하여, Hanning window를 씌운 신호 뒤에 2300개의 0을 추가하는 zero-padding 작업을 하였고, 신호는 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform, FFT)을 통하여 시간 영역에서 주파수 영역으로 변환하였다. 마지막으로, 표면탄성파 투과계수는 식 (3)에 따라서 계산하였다.

4. 실험 결과

4.1 신호 일관성 계수

센서에서 계측한 투과계수 중 신뢰성 높은 주파수 대역대를 선정하기 위하여, 모든 실험체에서 5회 반복하여 투과계수를 측정하였고, 신호 일관성 계수는 Fig. 6과 같다. 신호 일관성 계수는 모든 실험체에서 5kHz 이하와 45kHz 이상 범위에서 급격하게 감소하는 것을 확인 할 수 있었다. 따라서, 모든 실험체에서 공통적으로 0.99 이상의 신호일관성계수 값을 가지는 5~45kHz 범위의 신호를 신뢰성 높은 신호라고 할 수 있어, 이를 표면탄성파 투과 시험 데이터 결과 분석에 활용하였다.

4.2 균열 깊이 변화에 따른 투과 계수

디지털타이저를 통해 수집한 시간 영역 데이터는 Fig. 5와 같다. Fig. 5에서 파란 실선은 균열 통과 전(센서 위치 B)에서 계측한 신호고, 빨간 점선은 균열 통과 후(센서 위치 C)에서 계측한 신호다. 입사한 표면탄성파가 균열을 투과하지 못하고 반사되는 표면파의 영향으로 계측된 볼트 값이 균열 통과 후 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 시간 데이터를 3.3장에 소개된 데이터 처리

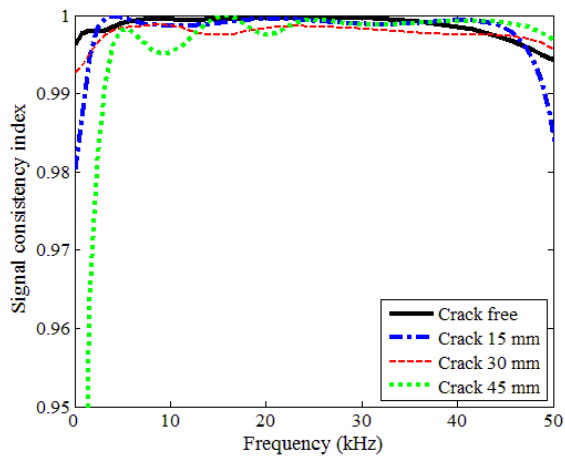


Fig. 6. Signal consistency index

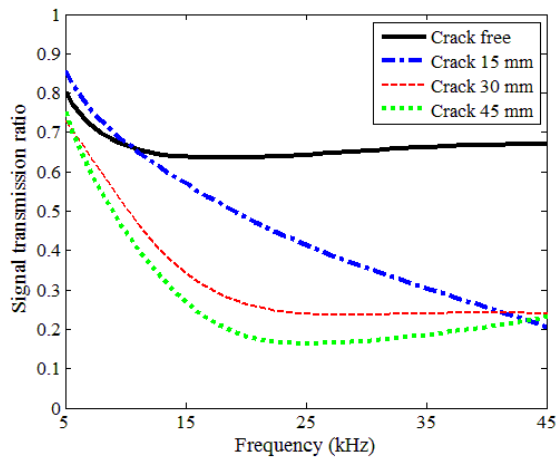


Fig. 7. Signal transmission ratios for different crack depths

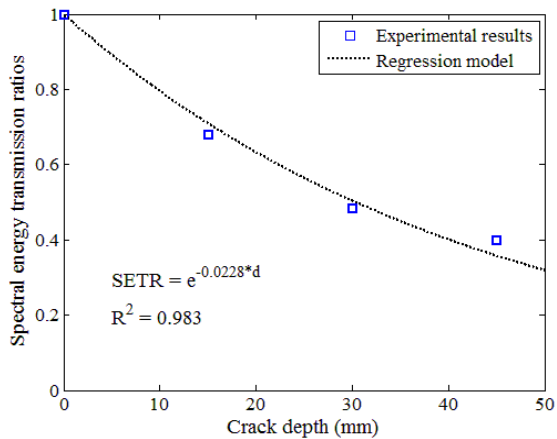


Fig. 8. Spectral energy transmission ratios for different crack depths

방법을 통하여 투과계수로 변환하였다. 투과계수는 신호의 신뢰성을 높여주기 위하여 5번 반복하여 측정하였고, 4.1장에서 신호 일관성 계수 값이 모든 시편에서 0.99 이상을 가지는 주파수 대역대인 5~45kHz 범위에서 측정된 값의 평균으로 Fig. 7과 같이 나타났다.

균열 깊이 증가에 따라 대부분의 주파수 대역대에서 투과계수가 감소하지만, 특정 주파수에서는 균열 깊이와의 상관성을 보기 어려운 경우도 확인할 수 있다. 따라서, 균열 보수 성능에 대한 정량적인 평가가 어려워 스펙트럼에너지투과비를 식 (4)에 따라 5~45kHz 범위에서 Fig. 8과 같이 계산하였다. 기존의 문헌들에서도 출현한 회귀 분석 모델과 유사하게 균열깊이 증가에 따라 스펙트럼에너지투과비 감소 현상을 확인할 수 있었고, 회귀분석 모델의 결정계수, R^2 값은 0.983로 회귀분석 모델의 매우 높은 신뢰성을 나타내었다.

4.3 균열 보수에 따른 스펙트럼에너지투과비 변화

콘크리트 균열면에 에폭시를 주입하고 24시간 후, 균열 보수 전과 동일한 방법으로 표면탄성파 투과 실험을 실시하였다. 모든 균열 깊이에서 균열 보수에 따라 표면탄성파 파라미터인 스펙트럼에너지투과비가 Fig. 9와 같이 무균열 실험체와 거의 같은 수준으로 회복함을 확인하였다. 회복된 스펙트럼에너지투과비 값은 15, 30, 45mm 깊이 실험체에서 각각 0.990, 0.978, 0.948로 나타났으며, 이는 무균열 실험체와의 5% 내외의 차이로 균열면을 채운 에폭시와 콘크리트 사이의 물성 차이에 의한 투과하는 표면탄성파의 감쇄 또는 표면탄성파 실험에서 발생할 수 있는 허용 가능한 오차로 추정된다. 따라서, 에폭시 주입에 따라 콘크리트 균열면이 완전

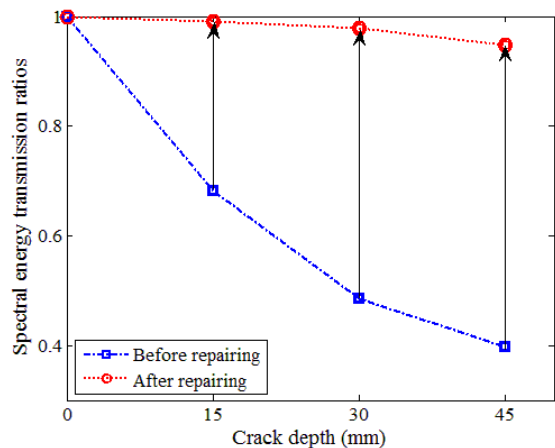


Fig. 9. Change of spectral energy transmission ratios in process of repairing

히 채워졌다고 볼 수 있으며, 콘크리트 구조물 내에 존재하는 일반적인 균열 깊이 범위에서는 에폭시의 보수 성능을 표면탄성파 투과 기법으로 평가 가능하다고 볼 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 다양한 균열 깊이를 가진 콘크리트 실험체를 보수하고, 보수 전/후 표면탄성파 투과시험을 실시하여, 계측한 스펙트럼에너지통과를 통한 균열 깊이 및 보수 성능을 평가하는 연구를 수행하였다. 본 실험 결과로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 균열깊이가 증가함에 따라 표면탄성파의 투과계수 및 스펙트럼에너지투과비가 감소하는 것을 확인하였다. 또한, 스펙트럼에너지투과비를 활용한 균열깊이 추정 모델은 0.983의 높은 결정계수 값을 가져 유효한 기술임을 확인하였다.
2. 에폭시 주입을 통해 콘크리트 균열면을 완전히 보수한 후에 측정된 스펙트럼에너지투과비는 초기 균열 깊이와 상관없이 모두 0.95 내외를 나타냈다. 무균열 실험체와 보수한 실험체에서 측정된 스펙트럼에너지투과비의 차이의 최대 값은 5%로써, 이는 에폭시와 콘크리트 사이의 매질 차이로 인해 감소된 표면탄성파의 영향으로 보인다.
3. 추후, 균열을 완벽하게 보수한 실험체가 아닌, 부분적으로 보수한 실험체에 대해 표면탄성파 투과 실험 연구를 실시하여, 보수 성능 평가에 대한 정량적인 가이드라인을 제시해줄 필요가 있다.
4. 하중 실험을 통해 생성한 실제 균열에 대하여 본 실험 결과를 검증하고 발전시킨다면, 실무조물의 균열 보수 성능 평가 기법으로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술연구사업의 연구비지원(17SCIP-B103706-03)에 의해 수행되었습니다.

References

Aggelis, D.G., Shiotani, T. (2007). Repair evaluation of concrete cracks using surface and through-transmission wave measurements, *Cement and Concrete Composites*, **29**, 700-711.

Aggelis, D.G., Shiotani, T., Polyzos, D. (2009). Characterization of surface crack depth and repair evaluation using Rayleigh waves, *Cement and Concrete Composites*, **31**, 77-83.

Ahn, E., Kim, H., Sim, S.H., Shin, S.W., Shin, M. (2017). Principles and applications of ultrasonic-based nondestructive methods for self-healing in cementitious materials, *Materials*, **10(3)**, 278.

Aldea, C.M., Song, W.J., Popovics, J.S., Shah, S.P. (2000). Extent of healing of cracked normal strength concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, **12(1)**, 92-96.

American Society of Civil Engineers (2017). Report Card for America's Infrastructures.

Angel, Y.C., Achenbach, J.D. (1984). Reflection and transmission of obliquely incident Rayleigh waves by a surface-breaking crack, *The Journal of the Acoustical Society of America*, **75(2)**, 313-319.

Graff, K.F. (1991). *Wave Motion in Elastic Solids*, Dover Publications, New York, NY, USA.

Kim, H., Ahn, E., Cho, S., Shin, M., Sim, S.H. (2017a). Comparative analysis of image binarization methods for crack identification in concrete structures, *Cement and Concrete Research*, **99**, 53-61.

Kim, H., Lee, J., Ahn, E., Cho, S., Shin, M., Sim, S.-H. (2017b). Concrete crack identification using a UAV incorporating hybrid image processing, *Sensors*, **17(9)**, 2052.

Popovics, J.S., Song, W.J., Ghandehari, M., Subramaniam, K.V., Achenbach, J.D., Shah, S.P. (2000). Application of surface wave transmission measurements for crack depth determination in concrete, *ACI Materials Journal*, **97**, 127-135.

Shin, S.W., Min, J., Lee, J.Y. (2009). Effect of concrete compositions in energy transmission of surface waves for nondestructive crack depth evaluation, *Journal of Materials in Civil Engineering*, **22(7)**, 752-757.

Shin, S.W., Zhu, J., Min, J., Popovics, J.S. (2008). Crack depth estimation in concrete using energy transmission of surface waves, *ACI Materials Journal*, **105**, 510-516.

표면탄성파를 활용한 콘크리트 균열 보수 성능 평가 기법

본 연구의 목적은 콘크리트 구조물에 존재하는 균열의 깊이 및 보수 성능 평가에 표면탄성파 기반 비파괴 성능 평가 기술의 적용 가능성 및 유효성을 검토하는데 있다. 이를 위해, 콘크리트 배합비의 영향을 최소화하기 위하여 동일한 배합비와 서로 다른 균열 깊이(0, 15, 30, 45mm)를 가지는 사각형 모양의 표면탄성파 투과 시험용 실험체를 준비하였다. 투과계수와 스펙트럼에너지투과비는 표면탄성파 파라미터로서 본 연구에 균열 깊이 변화 및 보수 성능 평가에 활용하였다. 이 때, 균열 보수 성능 평가를 위하여 실험체 균열면에 에폭시 주입 전/후로 각 5회씩 반복하여 표면탄성파 실험의 신뢰성을 높여주었다. 균열 깊이 증가에 따라 스펙트럼에너지투과비의 감소를 명확하게 확인하였다. 균열면이 완전하게 보수된 콘크리트 실험체에서 측정된 스펙트럼에너지투과비는 무균열 실험체에서 측정된 값에 대비하여 95% 수준으로 계측되어, 표면탄성파 기반 비파괴 시험 기법이 균열 보수 성능 평가 기술로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.