마이크로폰을 이용한 판 구조물 하부의 공동 검측 Detection of Cavities Beneath Plate Structure using a Microphone

강성훈* · 이종섭** · 유정동*** · 김상엽****

Kang, Seonghun*, Lee, Jong-Sub**, Yu, Jung-Doung***, and Kim, Sang Yeob****

Abstract

Failure of plate structures such as pavements can be caused by the occurrence of cavities beneath the structure. In this study, a cavity beneath the plate structure were detected in a laboratory model chamber using a hammer and microphone. Specifically, a chamber was constructed using an acrylic plate and dry soil to simulate the pavement and the subgrade, respectively. A plastic box was placed between the acrylic plate and dry soil to simulate a cavity beneath the pavement. The sound waves generated by impacting the acrylic plate with a hammer were measured using a microphone. The measured area under the rectified signal envelope (MARSE) energy was calculated for the measured sound waves, and the variation in it were analyzed according to the measurement location. The test results show that the signal attenuation was low at the cavity section owing to the conservation of impact energy and that the signal amplitude becomes lower at the soil section owing to the weakened flexural vibration. Therefore, the estimated MARSE energy at the cavity section was larger than that at the soil section. This study demonstrates the effective utilization of microphones for detecting cavities beneath the plate structures.

Key words : Cavity, MARSE Energy, Microphone, Pavement, Plate Structure

요 지

포장층과 같은 판 구조물의 파괴는 구조물 하부에 생성된 공동에 의하여 발생할 수 있다. 본 연구에서는 공동을 모사한 토조를 이용한 모형 실험을 통하여 해머와 마이크로폰을 이용하여 포장층 하부의 공동을 검측하고자 하였다. 모형 토조에 아크릴 판과 건조한 흙을 이용하여 포장층과 지반을 모사하였으며, 플라스틱 박스를 아크릴 판과 흙 사이에 설치하여 포장층 하부의 공동을 모사하였다. 음파 신호는 해머로 아크릴 판을 타격하여 발생시켰으며, 마이크로폰을 이용하여 측정하였다. 획득한 음파에 대하여 MARSE 에너지를 계산하고 측정 지점에 따른 MARSE 에너지의 변화를 분석하였다. 공동 구역에서는 타격 에너지가 구조물 내부에 보존되어 신호의 감쇠가 작은 반면 흙 구역에서는 굽힘 진동 거동이 약해져 진폭이 작게 나타났으며, 이로 인하여 공동 구역에서의 MARSE 에너지는 흙 구역에서의 값보다 크게 나타났다. 본 연구는 마이크로폰이 포장층 하부의 공동 유무에 대한 평가에 효율적으로 이용될 수 있음을 보여준다.

핵심용어 : 포장층, 판 구조물, 공동, 마이크로폰, MARSE 에너지

1. 서 론

최근, 아스팔트 및 콘크리트 포장층과 같은 판 구조물의

파괴가 지속적으로 발생함에 따른 피해가 잇따르고 있다. 이러한 판 구조물의 파괴는 다양한 원인에 의하여 생성된 판 구조물 하부의 공동으로 인하여 발생할 수 있다(Clemen

*정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사수료(E-mail: gshnice@korea.ac.kr)

Member, Ph.D. Candidate, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

**정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수

Member, Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

***정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 연구교수

Member, Research Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

****교신저자, 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 연구교수(Tel: +82-2-3290-3839, Fax: +82-2-3290-5999, E-mail: s3778@korea.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

et al., 1987; Brinkmann et al., 2008). 슬러리 월 공사의 굴착 과정 시 벽체 내외부 간의 수두 차이로 인한 지하수 흐름이 발생할 수 있으며, 이로 인하여 흙 입자가 유실되어 지표면에 공동이 발생할 수 있다(Jo et al., 2016). 또한, 터널 굴착 시 막장 부근의 터널 천장부가 지보재 설치 전 붕괴할 경우, 흙의 유실에 의한 공동이 발생할 수 있다(Song et al., 2012). 특히, 도심지에서 노후화된 매설관이 파손될 경우, 매설관 주변 지반으로의 물의 유출에 의한 흙의 유실에 따라 공동이 발생할 수 있다(Han et al., 2018; Hong et al., 2018). 또한, 파손된 매설관 부근의 흙 입자가 매설관 내부로 유입되어 주변 지반은 상대적으로 느슨해지거나 공동이 발생할 수 있다. 이러한 판 구조물 하부의 공동은 구조물의 파괴 전에는 육안으로 탐지하기 어려우며(Benedetto and Pensa, 2007), 매설관 파손으로 인하여 공동이 생성된 경우 구조물의 파괴는 급격하게 발생하므로 큰 피해를 야기할 수 있다(Jo et al., 2016).

판 구조물 하부의 공동은 임의의 위치에 발생될 수 있으므로, 공동 탐지에는 넓은 범위의 구간에 대하여 신속한 조사가 가능한 비파괴 탐사법이 널리 이용되고 있다. 공동 탐지에 주로 이용되는 비파괴 탐사법으로는 지하투과레이더(Ground Penetrating Radar, Gpr) 탐사법과 표면파(Surface Wave) 탐사법이 있다(Gucunski et al., 1996; Hong et al., 2018; Hong and Lee, 2018). GPR 탐사법은 지반에 대하여 전자기파를 방사하고 지반 내 전기적 임피던스가 서로 다른 경계면에서 반사되어 되돌아오는 전자기파를 분석하는 방법으로 대상 지반을 조사한다(Kang et al., 2017a, 2017b). Hong et al. (2018)은 상대 밀도에 따른 지반 내 전기적 임피던스의 대소관계와 GPR 신호의 위상을 비교함으로써, GPR 신호의 위상을 이용하여 도심지 내 상대 밀도가 낮은 지반을 탐지하였다. Lai et al. (2017)은 공동이 존재하는 포장층에서 측정된 GPR 신호 내 형상 중, 공동으로 인한 형상을 구분하는 기준을 제시하였다. Hong and Lee (2018)는 대상 지반의 비유전율과 GPR 신호를 이용하여 공동의 심도, 길이, 그리고 형상을 예측하였다. 이와 같이 GPR 탐사법은 공동을 검출하는 데에 적합한 것으로 나타났다. 그러나 GPR 탐사법은 전자기파를 이용하는 탐사법의 특성상, 대상 지반에 금속 매설물 및 고압 전선이 매설되어 있을 경우, 이로 인하여 강한 반사파 및 다중 반사 현상이 발생하여 지반 경계면에서 반사된 신호와 중첩될 수 있으며 전류에 의한 잡음이 과도하게 발생할 수 있다(GSSI, 2012; Zeng et al., 2015). 이는 도심지 내 금속 매설물 및 고압 전선 매설 지역의 경우, GPR 탐사법을 통한 분석의 정확도가 저하되거나 GPR 탐사법의 적용이 어려울 수 있음을 의미한다.

표면파 탐사법은 금속 매설물 및 고압 전선의 영향이 적은 탐사법으로서, 주로 측정 지점에 따른 표면파의 변화를 분석하여 공동을 탐지한다. Al-Shayea et al. (1994)과 Ganji et al. (1997)은 분산 곡선을 분석하여 정상 구역에 비하여

표면파의 위상 속도가 변하는 구간을 공동 및 매설물 존재 구역으로 구분하였다. 기존 연구의 경우, 지표면 혹은 구조물 표면에 설치한 수신기를 이용하여 신호를 측정하였으며 이를 분석에 이용하였다. 그러나 표면파 측정을 위하여 지반 접촉식(Ground-coupled) 수신기를 이용할 경우, 수신기의 부착 과정이 필수적으로 선행되어야 하므로 신호를 측정하기까지 많은 시간이 소요될 수 있다. 또한, 수신기의 부착 상태에 따라 측정 신호가 달라질 수 있다는 단점이 있다.

지반 접촉식 방식의 수신기 대신 비접촉식(Air-coupled) 수신기를 이용함으로써 수신기의 부착 과정 없이 신호를 신속하게 측정할 수 있다. 그러나 비접촉식 수신기는 지반에서 공기 중으로 신호가 전파되는 과정에서 공기 중의 감쇠로 인하여 측정 신호의 진폭이 작게 나타날 수 있다는 한계가 있으므로, 감쇠가 적게 발생하는 낮은 주파수 영역의 신호를 이용하여 공동을 탐지해야 한다(Zhu and Popovics, 2008). 낮은 주파수 영역(25 kHz 이하)의 신호를 민감하게 측정할 수 있는 수신기는 마이크로폰이며, 본 연구에서는 마이크로폰을 수신기로 이용하여 금속 매설물 및 고압 전선, 수신기의 부착 상태에 따른 영향을 최소화하고, 감쇠가 적게 발생한 신호를 획득하고자 하였다. 본 연구에서는 공동을 모사한 모형 토조에 대하여 해머와 마이크로폰을 이용하여 음파를 측정하는 실내모형실험을 수행하였다. 획득한 음파 신호에 대한 MARSE 에너지를 계산하였으며, 측정 위치에 따른 MARSE 에너지를 분석하여 공동 존재 여부와 MARSE 에너지 간의 관계를 비교하였다. 본 연구에서 수행된 음파 측정 및 MARSE 에너지 분석 과정을 통하여, 마이크로폰을 이용하여 포장층과 같은 판 구조물 하부의 공동을 효율적으로 검출할 수 있음을 보여준다.

2. 마이크로폰

2.1 마이크로폰의 원리 및 구성

마이크로폰은 음파를 전기적 신호로 나타내는 기기로서, 콘덴서 마이크로폰(Condenser microphone), 다이내믹 마이크로폰(Dynamic microphone), 리본 마이크로폰(Ribbon microphone) 등이 있다. 특히, 콘덴서 마이크로폰은 외부 전자기파에 의한 측정 신호 내 잡음이 적고, 측정 가능한 주파수 대역이 넓으며, 입력된 음파의 진폭 및 주파수에 대하여 출력 값의 정확도가 비교적 높은 것으로 알려져 있다(Bies et al., 2017). 콘덴서 마이크로폰의 측정부(Electret condenser)는 Fig. 1과 같이 내부에 얇은 막 형태의 진동판(Electret diaphragm)과 고정된 상태인 백 플레이트(Back plate)로 구성되어 있다. 입력된 음파의 음압으로 인하여 진동판이 진동함에 따라 백 플레이트와의 간격이 변하게 되며, 정전용량의 변화를 발생시킨다. 이는 입력 전원, 저항, 커패시터로 이루어진 회로(Microphone circuit)를 통하여

전기적 신호로 변환되며, 이를 통하여 입력된 음파를 전기적 신호로 표현한다. 마이크로폰 출력 값인 볼트 [V] 단위의 마이크로폰 신호는 Eq. (1)을 이용하여 파스칼 [Pa] 단위의 음압 (p)으로 변환할 수 있다:

$$p = \frac{M}{S} \quad (1)$$

여기서, M은 볼트 단위의 마이크로폰 신호, S는 마이크로폰의 감도를 의미한다. 마이크로폰의 감도는 기기의 고유한 값이며, 표준 음파의 입력에 대응하는 마이크로폰 신호의 출력 값이다. 표준 음파는 1 Pa에 해당하는 1 kHz의 사인파(Sine wave)를 의미한다(Ballou, 2013).

Fig. 1. Schematic Drawing of Microphone

2.2 마이크로폰의 높이 및 타격 지점과의 간격

해머로 판 구조물을 타격하여 발생시킨 램 파(Lamb wave)를 마이크로폰을 이용하여 측정할 경우, 측정 신호는 마이크로폰의 높이 및 타격 지점과의 간격에 의하여 영향을 받는다(Zhu and Popovics, 2008; Norinah et al., 2019). 해머 타격 시 구조물 표면을 통해 전파되는 램 파 이외에도 타격 지점에서 공기 중으로 전파되어 마이크로폰에 도달하는 직접파(Direct in-air sound wave)가 발생한다. 직접파는 구조물을 거치지 않아 구조물에 대한 정보를 포함하지 않으며, 마이크로폰의 높이가 낮을수록 직접파와 전달된 램 파를 구분하기 용이하다(Zhu and Popovics, 2008). 또한, 마이크로폰의 높이가 증가할수록 측정 신호의 주 주파수는 지반 접촉식의 수신기로 측정된 값에 비하여 낮아진다(Norinah et al., 2019). 마이크로폰과 타격 지점과의 간격의 경우, 값이 작아질수록 측정 신호가 대표하는 구조물 상의 영역이 좁아지게 되고, 이상 신호의 발생 위치를 정확하게 지정할 수 있으므로 검측 결과의 공간적 해상도가 증가한다(Zhu and Popovics, 2008).

3. 실험 구성

3.1 측정 시스템

음파 신호는 Fig. 2와 같이 해머(PCB Piezotronics, 086D05)로 모형 포장층을 타격하여 발생시켰다. 타격 에너지의 편차를 최소화하기 위하여 해머의 손잡이 중앙을 회전축으로 설정하고 해머를 30° 위치에서 낙하하였으며, 타격 시 해머가 모형 포장층과 수직을 이루도록 회전축의 높이를 조절하였다. 해머에는 로드 셀이 설치되어 있어 해머 신호의 최대 진폭을 이용하여 타격 시 모형 포장층에 가해진 하중을 산정할 수 있다. 본 연구에 사용된 해머의 직경은 25 mm이며, 무게는 10.8 N이다.

Fig. 2. Generation and Measurement of Sound Waves

본 연구에서 이용한 마이크로폰의 회로는 9 V의 입력 전원, 3.9 kW 저항, 10 μF 커패시터로 구성되었으며, 마이크로폰 측정부의 직경은 12 mm이다. 해머와 마이크로폰 측정부의 직경(각각 25 mm, 12 mm)을 고려할 때, 마이크로폰과 타격 지점 간의 간격의 최솟값은 18.5 mm (맞닿은 경우)이므로, 타격의 용이함을 위하여 간격은 Fig. 2와 같이 20 mm로 설정하였다. 또한, 직접파의 구분 및 측정 신호에 대한 주 주파수의 저하 최소화를 위하여 마이크로폰의 높이를 10 mm로 설정하였다. 마이크로폰 측정부의 하부에는 Fig. 2와 같이 고무 재질의 집음기(Waveguide)를 부착하여 직접파의 진폭을 약화시키고자 하였다(Larson et al., 2007). 해머 타격 후, 해머에 가해진 하중과 마이크로폰으로 측정된 음파 신호는 오실로스코프(Keysight, DOSX-3014A)를 통하여 나타나며, 컴퓨터에 저장된다.

3.2 모형 토조 조성

아스팔트 포장층 하부에 발생한 공동을 모사하기 위하여 Fig. 3(a)와 같이 토조에 지반과 모형 공동을 조성하였다. 토조의 규격은 길이 800 mm, 높이 800 mm, 그리고 폭 300 mm이다. 토조의 앞면에는 Fig. 3(a)와 같이 아스팔트 포장층을 모사하는 길이 800 mm, 높이 800 mm, 그리고 두께 15 mm인 아크릴 판을 설치하였다. 본 연구에 이용된 아크릴 판의 탄성계수는 약 3 GPa이며, 아스팔트 도로의 탄성계수는 3.1~3.2 GPa

(Nazarian et al., 1983)로써 두 값이 유사하다.

시료는 평균 입경(D_{50})이 0.63 mm이며, 비중과 마찰각은 각각 2.65와 36° 인 건조토를 사용하였다. 시료는 전체 높이가 800 mm인 토조에 100 mm의 8개 층으로 나뉘어 층 다짐을 통해 조성되었으며, 각 층은 무게 24.5 N, 직경 50 mm의 해머를 이용하여 다짐하였다. 모형 공동은 Fig. 3(b)와 같이 길이 120 mm, 높이가 180 mm, 그리고 폭 100 mm인 플라스틱 박스를 아크릴 판과 지반 사이에 설치하여 모사하였다. 여기서, 공동 중앙은 토조 중앙과 일치하도록 하였다.

4. 실험 결과

4.1 공동 및 흙 구역에서의 음파 신호

공동 구역의 평가를 위하여 Fig. 3(b)와 같이 토조 중앙선 상의 총 10개 지점(공동 구역 6개소와 흙 구역 4개소)에서 음파 측정을 실시하였다. 공동 구역 내 측정 지점은 중앙으로부터 0 mm 부터 10 mm 간격으로 총 6개의 지점($L = 0, 10, 20, 30, 40, 50$ mm)이며, 흙 구역의 측정 지점은 중앙으로부터 80, 100, 150, 200 mm에 위치한 곳이다. 마이크로폰은 토조 중앙선 상에서 높이 10 mm에 위치하며, 해머 타격 지점은 Fig. 3(b)와 같이 각 측정 지점에 대하여 토조 중앙선으로부터 20 mm 떨어진 지점이다.

측정된 신호에 대한 타격 에너지의 편차에 의한 영향을 제거하기 위하여 매 타격 시 해머를 통하여 측정된 하중(N)으로 원신호(mV)를 정규화하였다. 모든 측정 지점에서의 해머 타격 하중으로 정규화된 마이크로폰 신호를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에 따르면 모든 측정 지점에서 해머 타격 직후 첫 번째 음파 신호(First distinct wave)가 나타났다. 첫 번째 음파 신호의 진폭(Peak-to-peak amplitude)은 측정 지점 0 mm에서 최댓값을

보였으며 공동 중앙에서 멀어질수록 점차 감소하였다. 즉, 첫 번째 음파 신호의 진폭은 흙 구역보다 공동 구역에서 더 큰 값을 보였다. 또한, 첫 번째 음파 신호가 측정된 이후 측정 지점 0~100 mm에서 두 번째 음파 신호(Second distinct wave)가 측정되었으며, 공동 중앙에서 멀어질수록 두 번째 음파 신호의 도달 시간이 감소하는 것으로 나타났다.

Fig. 4. Normalized Sound Waves according to Measurement Location

Fig. 3. Schematic Drawings of Chamber and Measurement Locations

두 음파 신호의 도달 시간 t_{s1} , t_{s2} 를 Fig. 4에 표시하였으며, 측정 지점에 따른 t_{s1} , t_{s2} 의 값을 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에 따르면 t_{s1} , t_{s2} 는 모두 공동 중앙에서 멀어질수록 감소하였으나 t_{s1} 의 감소 폭은 t_{s2} 에 비하여 무시할 수 있을 정도로 매우 작아 t_{s1} 는 모든 지점에서 거의 유사하다고 고려하였다. 이를 통하여 첫 번째 음파 신호의 전파 속도와 이동 거리는 모든 지점에서 유사한 반면, 두 번째 음파 신호는 공동 구역에서 멀어질수록 전파 속도가 증가하거나 혹은 이동 거리가 짧아진다고 가정할 수 있다. 공동 구역과 흙 구역에서의 파의 전파 속도는 각각 유사해야 하므로, 이동 거리를 고려한 아크릴 판에서의 두 음파 신호의 경로를 Fig 6과 같이 나타내었다. Figs. 6(a), 6(b) 및 6(c)는 각각 측정 지점 0 mm, 100 mm, 200 mm에서의 두 음파 신호의 경로를 나타낸다. Fig. 6과 같이 해머 타격으로 인하여 발생한 램 파는 전 방향에 대하여 전파된다. 그 중 마이크로폰 지점을 향하는 램 파는 곧바로 마이크로폰에 의하여 측정되며, Fig. 6과 같이 모든 측정 지점에서 동일한 이동 거리를 가지게 되므로 유사한 도달 시간 (t_{s1})을 갖는다. 아크릴 판에서의 첫 번째 음파 신호의 전파 속도 v_{s1} 는 Eq. (2)를 이용하여 계산할 수 있다.

$$v_{s1} [m/s] = \frac{s [mm]}{t_{s1} - t_a [ms]} \quad (2)$$

Fig. 5. Measured Travel Times of First and Second Distinct Waves

여기서 s 는 마이크로폰과 타격 지점과의 간격(20 mm)을

의미하며, t_a 는 음파가 아크릴 판에서 마이크로폰의 높이(10 mm)만큼 공기 중에서 343 m/s의 전파 속도로 전파되는 시간(≈ 0.03 ms)을 의미한다. t_{s1} 는 Fig. 5(a)와 같이 약 0.06 ms로 측정되었으며, v_{s1} 는 Eq. (2)를 이용하여 약 667 m/s 정도로 평가되었다. Römmeler et al. (2019)은 각 고분자(Polymer) 재질에 따른 램 파의 주파수 $\times$ 두께와 전파 속도에 대한 분산 곡선을 연구하여 원거리장 영역에서의 램 파 속도를 800~900 m/s 정도로 제시하였다. 근거리장 영역에서의 램 파 속도는 원거리장 영역에서의 속도의 0.6~0.8배이므로(Yoon and Rix, 2009), 본 연구에서 계산된 v_{s1} 는 근거리장 효과(Near-field effect)를 고려할 때 타당한 것으로 판단된다.

Fig. 6. Travel Distance and Time of First and Second Distinct Waves with Respect to Measurement Location

전 방향으로 전파된 신호는 토조 외곽의 모든 지점에서 반사되어 마이크로폰 지점으로 되돌아와 측정될 수 있으며, 신호의 경로 및 이동 거리가 다양하므로 도달 시간 또한 다양하다. 여기서, t_{s2} 는 토조 외곽에서 반사되어 돌아온 신호 중 최단 경로의 신호에 대한 도달 시간이며, 최단 경로 이외의 신호들은 모두 중첩되어 Fig 4의 두 번째 음파 신호로 나타나게 된다. 최단 경로로 반사되어 되돌아오는 램 파의 경로는 Fig. 6과 같이 토조 중앙에서 멀어지는 방향의 토조 외곽에서 반사되는 경로이며, 파의 이동 거리는 지점 0 mm에서 최대(Fig. 6(a)), 지점 200 mm에서 최소값을 갖는다(Fig.

6(c)). 이와 같이 측정 지점이 공동 중앙에서 멀어질수록 짧은 이동 거리를 가지게 되며 도달 시간(t_{s2}) 또한 감소하게 된다. 아크릴 판에서의 두 번째 음파 신호의 전파 속도 v_{s2} 는 Eq. (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$v_{s2} [m/s] = \frac{800 - 2L [mm]}{t_{s2} - t_a [ms]} \quad (3)$$

여기서 L 은 공동 중앙으로부터 측정 지점까지의 거리를 의미한다. 모든 측정 지점에 대하여 Eq. (3)을 이용하여 산정된 v_{s2} 를 Table 1에 정리하였다. Table 1에 따르면 v_{s2} 는 공동 중앙에서 멀어질수록 점차 증가하는 것으로 나타났다. 본 연구와 같이 해머가 수직을 이루며 타격될 경우 A0 모드가 우세하게 발생하며(Ryden et al., 2006), A0 모드의 램 파 전파 속도는 주파수 × 두께에 따라 증가한다(Römmeler et al., 2019). Tong et al. (2006)과 Zhu and Popovics (2007)에 따르면 타격 방식으로 판 구조물 아래의 공동을 검출할 경우, 공동의 가장자리가 힌지(Hinge) 역할을 하며 공동 구역의 상부 판이 굽힘 진동(Flexural vibration) 거동을 보이게 된다. 이러한 굽힘 진동 거동을 보일 경우, 공동 구역의 상부 판에서 측정된 신호는 정상 구역인 흙 구역의 신호에 비하여 주 주파수가 저하된다(Sansalone and Streett, 1997). 즉, 공동 구역에서는 굽힘 진동 거동으로 인하여 A0 모드의 램 파 전파 속도가 감소하므로, v_{s2} 는 공동 구역에서 작게 나타나며 공동 중앙에서 멀어질수록 증가하게 된다(Table 1). 이와 같이 첫 번째 음파 신호는 타격으로부터 곧바로 마이크로폰으로 전파된 신호로서 모든 측정 지점에서 이동 거리 및 도달 시간이 유사한 반면, 두 번째 음파 신호는 토조 외곽에서 반사된 신호로서 측정 지점에 따라 이동 거리, 도달 시간 및 전파 속도가 다르게 나타났다. 이에 따라 첫 번째 음파 신호만을 이용하여 공동 구역을 평가하고자 하였다.

Table 1. Velocities of Second Distinct Wave

Measurement Location [mm]	Second Distinct Wave		
	Travel Length [mm]	Travel Time [ms]	Velocity [m/s]
Cavity Section	0	800	1.20
	10	780	1.16
	20	760	1.10
	30	740	1.01
	40	720	0.94
	50	700	0.91
Soil Section	80	640	0.85
	100	600	0.82
	150	500	-
	200	400	-

두 번째 음파 신호를 분석 대상에서 제외하기 위하여 측정 신호에 윈도우를 적용하여 첫 번째 음파 신호만을 대상으로 분석을 수행하였다. 윈도우 적용의 예시를 위하여 측정 지점 0 mm에서의 정규화된 신호(Normalized signal)를 Fig. 7에 나타내었으며, 이 신호와 Fig. 7의 Tukey 윈도우 함수(Window)를 곱하여 Fig. 7의 윈도우가 적용된 신호(Windowed normalized signal)를 생성하였다. 윈도우 함수의 시점은 모든 측정 지점에 대하여 -0.1 ms로 동일하게 설정하였다. 두 번째 음파 신호의 도달 시간(t_{s2})은 측정 지점마다 다르므로, 윈도우 함수의 종점은 t_{s2} 보다 0.2 ms 앞선 시간($t_{s2}-0.2$) ms로 설정하였으며, 두 번째 음파 신호가 측정되지 않은 측정 지점 150 mm, 200 mm의 경우에는 0.65 ms로 설정하였다.

Fig. 7. Windowing of Sound Wave at Measurement Location $L = 0$ mm

4.2 영역에 따른 MARSE 에너지

해머 타격 하중으로 정규화된 신호의 진폭(Peak-to-peak amplitude)은 Fig. 8과 같이 측정 지점이 공동 중앙에서 멀어질수록 점차 감소하였다. 본 연구에서는 측정 지점에 따른 음파 신호의 진폭 변화를 분석하기 위하여 Fig. 8에 나타낸 음파 신호를 이용하여 Measured Area under the Rectified Signal Envelope (MARSE) 에너지를 산정하였다. MARSE 에너지 산정의 예시를 위하여 측정 지점 0 mm에서의 윈도우된 음파 신호(Windowed normalized signal)를 Fig. 9에 나타내었으며, 이 신호의 절댓값(Rectified signal)을 나타내었다. 또한 신호의 절댓값을 시간에 따라 적분하여 Fig. 9에 나타내었으며(Integrated signal), 최종 적분 값이 MARSE 에너지를 의미한다(Nair, 2006; Dassios et al., 2014). 즉, MARSE 에너지는 다음과 같이 표현된다.

$$ME = \int |g(t)| \cdot dt \quad (4)$$

여기서 ME 와 $g(t)$ 는 각각 신호의 MARSE 에너지와 시간에 따른 진폭을 의미한다. 즉, MARSE 에너지는 신호의 절댓값과 시간 축이 이루는 면적을 뜻하며, 신호의 감쇠 정도를 분석하는 데 사용된다(Gholizadeh et al., 2015).

Fig. 8. Windowed Normalized Sound Waves according to Measurement Location

Fig. 9. MARSE Energy Calculation Procedure at Measurement Location $L = 0$ mm

Eq. (4)를 이용하여 측정 지점에 따른 MARSE 에너지를 계산하였으며, 그 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 여기서, $[V/N]$ 단위의 정규화된 음파 신호를 $[s]$ 단위의 시간 축으로 적분하였으므로, MARSE 에너지는 $[s \cdot V/N]$ 단위로 나타난다. MARSE 에너지는 측정 지점 0~20 mm 구간에서는 완만한 감소를 보였으며, 이후 측정 지점 40 mm까지 급격한 감소를 보였다. 측정 지점 40~80 mm 구간에서는 점차 감소가 완만해졌으며, 측정 지점 80 mm 이후에는 MARSE 에너지 값이 유사한 값을 보였다. MARSE 에너지는 Fig. 10과 같이 공동 구역에서의 MARSE 에너지가 흙 구역에서의 값보다 크게 산정되었다. 이는 공동 구역에서는 타격 시 에너지가 구조물 아래 흙으로 전달되지 않고 구조물 안에 갇히게 되어 에너지가 보존되고 신호의 감쇠가 작아지기 때문인 것으로 판단된다(Nazarian and Reddy, 1996). 또한, 음파 신호는 굽힘 진동 거동의 에너지가 높을수록 최대 진폭이 크게 나타나며(Tong et al., 2006), 공동 구역에서 멀어질수록

굽힘 진동 거동이 약해짐에 따라 흙 구역에서는 음파 신호의 진폭이 작게 나타나는 것으로 판단된다. 신호의 감쇠가 작아짐에 따라 음파 신호의 시간 영역에서의 최대 진폭이 증가하므로(Kee and Gucunski, 2016), MARSE 에너지는 공동 구역에서 크게 나타나게 된다.

Fig. 10. Calculated MARSE Energy according to Measurement Location

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 해머와 마이크로폰을 이용하여 판 구조물 하부의 공동 유무를 평가하고자 포장층을 모사하는 아크릴 판을 설치한 모형 토조를 이용하여 모형 실내실험을 수행하였다. 토조에 건조토를 이용하여 층 다짐으로 지반을 조성하였고, 모형 공동은 플라스틱 박스를 이용하였으며, 포장층은 아크릴 판을 이용하여 모사하였다. 아크릴 판 표면 위를 해머로 타격하여 음파를 발생시켰으며 마이크로폰을 이용하여 측정하였다. 공동 구역의 평가를 위하여 공동 구역 6개소, 흙 구역 4개소에서 음파 측정을 실시하였다. 측정된 신호에 대한 타격 에너지의 영향을 제거하기 위하여 해머를 통하여 측정된 하중으로 음파 신호를 정규화 하였으며, 측정 지점에 따른 음파 신호의 변화를 분석하였다. 해당 실험 결과 및 분석 내용을 바탕으로 아래와 같은 주요한 결론을 도출하였다.

음파 측정 결과, 모든 측정 지점에서 해머 타격 직후 첫 번째 음파 신호가 나타났으며, 일부 구간에서 두 번째 음파 신호가 측정되었다. 두 번째 음파 신호는 공동 중앙에서 멀어질수록 도달 시간이 감소하는 것으로 나타났다. 두 번째 음파 신호의 도달 시간을 이용하여 분석한 결과, 두 번째 음파 신호는 토조 외곽에서 반사된 램 파인 것으로 판단되었으며, 공동 검출을 위한 분석은 첫 번째 음파 신호만을 대상으로 수행하였다.

측정된 음파 신호의 진폭은 측정 지점이 공동 중앙에서 멀어질수록 점차 감소하였으며, 측정 지점에 따른 음파 신호의 진폭 변화를 분석하기 위하여 Measured Area under the Rectified Signal Envelope (MARSE) 에너지를 산정하였다. 그 결과, 공동 구역에서의 MARSE 에너지가 흙 구역에서의 값보다

크게 산정되었다. 이는 판 형태의 구조물 아래에 공동이 존재할 경우, 공동 구역에서는 타격 에너지가 구조물 안에 갇히게 되어 음파 신호의 감쇠가 작아지며, 흙 구역에서는 급침 진동 거동이 약해져 음파 신호의 진폭이 작게 나타나기 때문인 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통과학기술진흥원 ‘지하공간 활용 도시기반 복합플랜트 실증연구 사업’의 “환경기초 복합 플랜트 지하공간 활용 기술(과제번호: 20UGCP-B157962-01)” 과제에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- Al-Shayea, N., Woods, R., and Gilmore, P. (1994). SASW & GPR to detect buried objects. *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 1994*, pp. 543-560.
- Ballou, G. (2013). *Handbook for sound engineers* (4th ed.). Burlington, MA, USA: Focal Press.
- Benedetto, A., and Pensa, S. (2007). Indirect diagnosis of pavement structural damages using surface GPR reflection techniques. *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 62, No. 2, pp. 107-123.
- Bies, D.A., Hansen, C., and Howard, C. (2017). *Engineering noise control* (5th ed.). Boca Raton, FL, USA: CRC Press.
- Brinkmann, R., Parise, M., and Dye, D. (2008). Sinkhole distribution in a rapidly developing urban environment: Hillsborough County, Tampa Bay area, Florida. *Engineering Geology*, Vol. 99, No. 3-4, pp. 169-184.
- Clemen, G.G., Sprinkel, M.M., and Long Jr, R.R. (1987). Use of ground-penetrating radar for detecting voids under a jointed concrete pavement. *Transportation Research Record*, No. 1109, pp. 1-10.
- Dassios, K.G., Kordatos, E.Z., Aggelis, D.G., and Matikas, T.E. (2014). Crack growth monitoring in ceramic matrix composites by combined infrared thermography and acoustic emission. *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 97, No. 1, pp. 251-257.
- Ganji, V., Gucunski, N., and Maher, A. (1997). Detection of underground obstacles by SASW method—Numerical aspects. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 123, No. 3, pp. 212-219.
- Geophysical Survey Systems, Inc. (GSSI). (2012). *RADAN 7*.
- Gholizadeh, S., Leman, Z., and Baharudin, B.T.H.T. (2015). A review of the application of acoustic emission technique in engineering. *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 54, No. 6, pp. 1075-1095.
- Gucunski, N., Ganji, V., and Maher, M.H. (1996). Effects of obstacles on Rayleigh wave dispersion obtained from the SASW test. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 223-231.
- Han, W., Lee, J.S., and Byun, Y.H. (2018). Engineering properties of lightweight foaming grouting materials for underground cavities. *Journal of the Korean Geoenvironmental Society*, Vol. 19, No. 2, pp. 5-12.
- Hong, W.T., and Lee, J.S. (2018). Estimation of ground cavity configurations using ground penetrating radar and time domain reflectometry. *Natural Hazards*, Vol. 92, No. 3, pp. 1789-1807.
- Hong, W.T., Kang, S., Lee, S.J., and Lee, J.S. (2018). Analyses of GPR signals for characterization of ground conditions in urban areas. *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 152, pp. 65-76.
- Jo, Y.S., Cho, S.H., and Jang, Y.S. (2016). Field investigation and analysis of ground sinking development in a metropolitan city, Seoul, Korea. *Environmental Earth Sciences*, Vol. 75, No. 20, 1353. doi:10.1007/s12665-016-6141-0
- Kang, S., Lee, J.S., Lee, S.J., Lee, J.W., and Hong, W.T. (2017a). Detection of abnormal area of ground in urban area by rectification of ground penetrating radar signal. *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 27, No. 3, pp. 217-231.
- Kang, S., Lee, J.S., Lee, S.J., Park, Y.K., and Hong, W.T. (2017b). The effect of directivity of antenna for the evaluation of abnormal area using ground penetrating radar. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 33, No. 11, pp. 21-34.
- Kee, S.H., and Gucunski, N. (2016). Interpretation of flexural vibration modes from impact-echo testing. *Journal of Infrastructure Systems*, Vol. 22, No. 3, 04016009. doi:10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000291
- Lai, W.W., Chang, R.K., and Sham, J.F. (2017). Detection and imaging of city's underground void by GPR. *2017 9th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR)*. doi:10.1109/IWAGPR.2017.7996055
- Larson, G.D., Martin, J.S., and Scott Jr, W.R. (2007). Investigation of microphones as near-ground sensors

- for seismic detection of buried landmines. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 122, No. 1, pp. 253-258.
- Nair, A. (2006). *Acoustic emission monitoring and quantitative evaluation of damage in reinforced concrete members and bridges*. Master's thesis, Louisiana State University, Baton Rouge, LA, USA.
- Nazarian, S., and Reddy, S. (1996). Study of parameters affecting impulse response method. *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 122, No. 4, pp. 308-315.
- Nazarian, S., Stokoe II, K.H., and Hudson, W.R. (1983). Use of spectral analysis of surface waves method for determination of moduli and thicknesses of pavement systems. *Transportation Research Record*, No. 930, pp. 38-45.
- Norinah, A.R., Adnan, F.N., and Hamid, R. (2019). 2D finite element simulation of air-coupled impact echo testing on concrete slab. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 513, 012016. doi:10.1088/1757-899X/513/1/012016
- Römmeler, A., Furrer, R., Sennhauser, U., Lübke, B., Wermelinger, J., de Agostini, A., et al. (2019). Air coupled ultrasonic defect detection in polymer pipes. *NDT & E International*, Vol. 102, pp. 244-253.
- Ryden, N., Lowe, M.J., Cawley, P., and Park, C.B. (2006). Non-contact surface wave measurements using a microphone. *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 2006*, Society of Exploration Geophysicists, pp. 1110-1115.
- Sansalone, M.J., and Streett, W.B. (1997). *The Impact-echo: Nondestructive evaluation of concrete and masonry*. Jersey Shore, PA, USA: Bullbrier Press.
- Song, K.I., Cho, G.C., and Chang, S.B. (2012). Identification, remediation, and analysis of karst sinkholes in the longest railroad tunnel in South Korea. *Engineering Geology*, Vol. 135-136, pp. 92-105.
- Tong, F., Tso, S.K., and Xu, X.M. (2006). Tile-wall bonding integrity inspection based on time-domain features of impact acoustics. *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 132, No. 2, pp. 557-566.
- Yoon, S., and Rix, G.J. (2009). Near-field effects on array-based surface wave methods with active sources. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 135, No. 3, pp. 399-406.
- Zeng, Z., Li, J., Huang, L., Feng, X., and Liu, F. (2015). Improving target detection accuracy based on multipolarization MIMO GPR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 53, No. 1, pp. 15-24.
- Zhu, J., and Popovics, J.S. (2007). Imaging concrete structures using air-coupled impact-echo. *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 133, No. 6, pp. 628-640.
- Zhu, J., and Popovics, J.S. (2008). *Non-contact NDT of concrete structures using air coupled sensors*. NSEL Report No. NSEL-010, Newmark Structural Engineering Laboratory, University of Illinois at Urbana-Champaign.

Received	October 27, 2020
Revised	October 28, 2020
Accepted	November 2, 2020