구조물 손상위치 추정을 위한 판 형태의 시험편에서 탄성파 속도 결정

Determination of Elastic Velocity of Plate-like Specimen for Estimation of Structural Damage Location

김민관* · 오태민** · 김현우*** · 이종원****

Kim, Min-Koan*, Oh, Tae-Min**, Kim, Hyunwoo***, and Lee, Jong-Won****

Abstract

Health monitoring of structures is required when earthquakes occur in urban areas where buildings are highly concentrated, and in such situations, it is very important to estimate the location of structural damage. To improve the accuracy of damage location, proper wave velocities must be determined based on the characteristics of the propagation media. In this study, experiments were performed to measure the P-wave and surface wave velocities of a granite specimen. In addition, the elastic wave velocities of the specimen were measured based on the distance between the sensor and the source location, and these measurements were compared to the P-wave and surface wave velocities. The experimental results were analyzed to determine the accuracy of the source location. The findings of this study will be useful in the field for estimating the source location of structures damaged by earthquakes.

Key words : Structural Damage, Elastic Velocity, Source Location Estimation, Plate-like Structure

요 지

건축물이 밀집되고 집약도가 높은 도심지에서는 지진발생시 막대한 피해가 예상되므로 구조물의 건전도 모니터링이 요구되며, 이러한 건전도 평가 과정에서 구조물의 손상위치를 파악하는 것은 매우 중요하다. 구조물 손상위치 추정의 정확도를 높이기 위해서는 매질의 탄성과 속도를 합리적으로 선정하여야 한다. 본 연구에서는 화강암 시편에 대해 위치추정에 활용되는 P파와 표면파 속도를 실험으로 획득하였다. 또한 센서와 손상위치의 거리에 따라 실제 탄성과 속도를 측정하여 획득된 P파 및 표면파와 비교하였으며, 실험결과로부터 구조물의 손상위치의 정확도를 분석하였다. 본 연구 결과는 향후에 지진 등으로 인해 구조물 손상이 발생했을 때 손상위치 추정에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

핵심용어 : 구조물손상, 탄성과 속도, 음원위치 추정, 판형구조물

1. 서 론

현대 도시에서는 급속한 도시화, 인구 과밀화 등으로 인해

초고층 건축물 및 지하공간 개발이 증가하고 있다(Lee and An, 2001). 한편 최근 세계적으로 지진이 빈번히 발생하고 있으며, 지진 재난에 대한 시나리오 검토 및 대비, 관리에

*정회원, 한국지질자원연구원 복합재난대응연구단 연구원(E-mail: kimminkoan@gmail.com)

Member, Researcher, MDCO, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

**교신저자, 정회원, 부산대학교 토목공학과 조교수(Tel: +82-51-510-7644, Fax: +82-51-513-9596, E-mail: geotaemin@pusan.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Assistant Professor, Pusan National University, Department of Civil Engineering

***정회원, 한국지질자원연구원 복합재난대응연구단 선임연구원

Member, Senior Researcher, MDCO, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

****한국지질자원연구원 복합재난대응연구단 연구원

Researcher, MDCO, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

대한 다양한 연구가 진행 중이다(Koo et al., 2017; Kim et al., 2018). 초고층 건축물의 경우에는 인구가 밀집되어 있기 때문에 지진 발생 시 막대한 피해를 입을 수 있다(Ahn et al., 2017). 대규모 지진이 발생할 경우 일반적으로 지하구조물은 지상구조물보다 영향을 적게 받지만, 구조 형상과 규모에 따라 지하구조물에도 다양한 유형의 손상이 발생할 수 있다. 따라서 지진 발생 후 즉각적 대응을 위해 구조물 손상위치를 파악하는 것은 매우 중요하다.

현재 구조물 건전도 평가를 위해 전문가의 진단검사가 수행되고 있지만 많은 시간과 인력이 요구되며, 객관성 등의 문제로 인하여 대형 구조물에서는 주로 비파괴 평가방법이 사용되고 있다(Shin and Jo, 2009; Hong, 2012; Na, 2015). 비파괴 방법 중에서 음향방출(acoustic emission)과 같은 탄성파를 이용하는 방법은 신호의 도달시차 분석을 통해 손상 위치추정이 가능하다(Ohtsu, 1995). 이러한 손상위치 추정 시 판형 구조물(plate-like structure)은 표면파(surface wave)를 사용하며(Kee, 2015), 두께가 충분한 형상의 구조물에서는 P파가 사용된다(Lee et al., 2013).

신뢰도 높은 손상위치 추정을 위해서는 입력값으로 사용되는 탄성과 속도 결정이 매우 중요하다. 구조물 손상에 의해 방출된 신호가 실제로 다양한 전파특성을 가지기 때문에, 단일 탄성과 속도 입력값을 일괄적으로 적용한다면 정확한 손상위치 추정이 어렵다(Kim et al., 1994; Kim et al., 2008; Zhou et al., 2017). 일반적으로 수치해석 프로그램이나 손상위치추정 프로그램의 경우 일정한 탄성과 속도를 입력값으로 사용하기 때문에 정확한 위치추정에 있어 한계가 있다(Han et al., 2015). 따라서 구조물에서 발생하는 균열의 위치를 정확히 찾기 위해서는 탄성파의 특성(전파모드, 전파 속도)을 파악하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 판형 화강암 시편을 이용하여 센서 배열(가진원-센서 간 거리)에 따른 손상위치 추정실험을 실시하였다. 손상위치 정확도를 분석하기 위해서 일반적으로 손상 위치추정에 활용되는 P파 속도, 표면파 속도, 센서설치 거리에 따른 탄성과 속도를 측정하여 비교분석하였다. 본 연구의 실험결과는 향후 지진에 의한 판형 구조물(벽 구조물 또는 매트기초 구조물)의 손상 시, 건전도 평가에 있어 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

2. 실험방법

2.1 시편의 준비

본 실험에서는 재료의 균질성을 확보하기 위해서 신선한 화강암 시편을 사용하였다. 시편의 형상은 판형상으로 30 cm × 70 cm × 3 cm 크기에 해당한다(Fig. 1). 시편의 양쪽 면에 X축 방향으로 10 cm, Y축 방향으로 6 cm 간격으로 격자를 형성하였다. 총 24개 격자를 구성하여 가진위치와 센서 설치를 위한 좌표로 이용하였다.

2.2 시편의 탄성과 속도측정

위치추정을 위한 탄성과 속도 입력값을 구하기 위하여 사용된 시편의 기본적인 P파 속도와 표면파 속도를 측정하였다. P파와 표면파 속도산정을 위해 신호가진망치(PCB 086C01)를 이용해 일정한 거리에서 충격을 발생시키고 각각의 센서(가속도계, PCB: 352C22)로 신호를 수집하였다. 탄성과 속도는 가진원과 센서 사이의 시간 차이와 거리를 이용하여 산정하였다. 탄성과 신호 도달 지점은 Lee and Santamarina (2005)가 제시한, Fig. 2에서 C점에 해당하는 Zero after first bump 지점을 기준으로 선정하였다.

Fig. 1. Test Specimen

Fig. 2. An Example of the Elastic Wave to Determine the Arrival Time [A: First detection, B: First bump maximum, C: Zero after first bump, D: Major first peak] (after Lee and Santamarina, 2005)

2.2.1 P파 속도 측정

P파는 시편의 측면부에 충격을 발생시키고 반대편 면에서 신호를 획득하였다(Fig. 3). 정확한 P파 속도 측정을 위해 시편 측면에 세 구역을 설정하였으며, 각 구역에서 5회씩 가진하여 총 15번 P파 속도를 측정하였다.

모든 측정구역에서 신호가진망치(source)와 센서(receiver) 간 거리는 70 cm이며, 각 측정구역(X_1 , X_2 , X_3)에서 획득된 평균 P파 속도와 표준편차(SD)는 다음과 같다. X_1 은 3,371 m/s(SD: 67 m/s), X_2 는 3,318 m/s(SD: 116 m/s), X_3 은 3,412 m/s(SD: 87 m/s)이다. 준비된 화강암 시편의 P파 속도의 전체 평균값은 3,367 m/s(SD: 90 m/s)이며 본 연구에서는 이 값을 대표값으로 사용하였다.

Fig. 3. P-wave Velocity Measurement

2.2.2 표면파 속도 측정

표면파 속도는 화강암 시편의 상부표면에서 신호가진망치를 이용하여 충격을 가하고 같은 면 표면에서 신호를 측정하는 방식으로 구하였다. 시편의 방향성을 확인하기 위해서 시편의 X축 방향과 Y축 방향에서 각각 3구역을 설정하였다(Fig. 4). Table 1은 표면파 속도 측정 구역별 가진 위치와 센서 위치를 보여준다. X축 방향(X_1 , X_2 , X_3) 측정은 6 cm 간격으로 측정되었으며, Y축 방향으로 전파되

는 사례(Y_1 , Y_2 , Y_3)는 20 cm 간격으로 측정되었다. 각 구역에서 3회 반복실험을 통해 각 9회씩 표면과 속도를 측정하였다.

Fig. 4. Surface Wave Velocity Measurement

Table 1. Coordinates for Measurement of Surface Wave Velocity

Axial-direction	Source coordinates (unit: cm)			Receiver coordinates (unit: cm)		
		X	Y		X	Y
X-axis	S_1	0	6	X_1	60	6
	S_2	0	12	X_2	60	12
	S_3	0	18	X_3	60	18
Y-axis	S_1	10	24	Y_1	10	0
	S_2	30	24	Y_2	30	0
	S_3	50	24	Y_3	50	0

X축 방향에서는 X_1 2,645 m/s(SD: 90 m/s), X_2 2,543 m/s(SD: 58 m/s), X_3 2,543 m/s(SD: 45 m/s)로 측정되었다. Y축 방향 표면파 속도는 Y_1 에서 2,351 m/s(SD: 10 m/s), Y_2 2,392 m/s(SD: 17 m/s), Y_3 2,370 m/s(SD: 51 m/s)로 측정되었다. 정리하면 X축 방향 표면파 속도 평균은 2,577 m/s, Y축 방향 표면파 속도 평균은 2,371 m/s이며, 탄성파가 전파되는 방향에 따른 표면파 속도 차이는 약 10% 정도로 차이가 크지 않은 것으로 확인하였다. 본 연구에서는 해당 화강암의 표면파 속도로 두 방향의 평균값인 2,473 m/s(SD: 45 m/s)를 사용하였다.

2.3 실험 장비 및 방법

본 연구에서는 센서 배열(가진원-센서 간 거리)에 따라 달라지는 탄성과 속도를 확인하기 위한 실험을 수행하였다. 센서 배열에 따른 탄성과 속도 측정을 위해 Fig. 5와 같이 실험 장치를 구성하였다. 또한 결정된 센서 배열 사례에 따라 가속도계를 3군데 설치하였으며, 일정한 위치(손상 위치로 가정)에서 신호가진망치를 이용하여 음원을 발생시켜 시편에 설치된 가속도계로 신호를 수신하였다. 가속도계에서 획득한 신호는 신호 증폭 장치(PCB: 482C16)에서 40 dB 증폭시켜 데이터 수집장치(DSOX-2014A)에서 저장하였다. 획득된 센서 배열에 따른 탄성과 속도는 미리 확인된 시편의 P파 속도 및 표면파 속도와 비교분석하여 손상위치 추정 정확도를 분석하였다.

Fig. 5. Test Setup for the Measurement of Wave Velocity According to the Sensor Array

2.4 실험 사례 선정

센서 배열(가진원-센서 간 거리)에 따른 실험은 5개 사례(CA1~CA5)이며, 타격면 차이에 따른 탄성과 속도 특성을 확인하기 위해 Fig. 6과 같이 각 사례별로 앞면(동일면)과 앞뒷면(다른 면)에서 가진 실험을 실시하였다.

2.4.1 타격면에 따른 실험군 구분

타격면에 따른 탄성과 속도 특성을 확인하기 위해 실험군을 구분하였다. 가진원과 센서가 같은 면에 있는 실험 사례를 앞면 그룹(G_F , Group of Front)으로 정의하고(Fig. 6a), 가진원과 센서를 서로 다른 면에 설치한 실험 사례를 뒷면 그룹(G_B , Group of Back)으로 정의하였다(Fig. 6b). G_F 실험군의 경우, 가진면과 측정면이 동일하기 때문에 표면파 특성이 주도적일 것으로 가정하였다. 반면 G_B 실험군의 경우 가진면과 측정면이 다르므로 탄성파는 시편 내부를 거쳐 전파되기 때문에 이때 획득되는 탄성파는 P파 특성을 가질 것으로 가정하였다.

2.4.2 센서 배열에 따른 실험 사례

실험 사례는 두 가지 방법으로 나누어 센서 배열을 결정하였다. 첫째는 센서 간의 배열 간격은 일정하게 유지하며 센서와 가진 위치의 거리가 점점 증가하는 경우이며, 둘째는 센서 간의 배열 간격이 증가하며 변화하는 경우이다.

실험 사례 결정에 있어 기준 사례를 CA-1으로 정의하였다. CA-1 케이스의 가진장치 좌표는 (10, 12, 0)이며, 센서의 위치좌표는 $R_1(20, 6, 0)$, $R_2(30, 24, 0)$, $R_3(40, 12, 0)$ 이다. CA-1을 기준으로 센서 간의 배열 간격을 일정하게 유지하며 센서-가진원 간의 거리를 증가시켰다(Fig. 7a). 즉, CA-1 → CA-2 → CA-3 순서로 실험을 진행하였으며, CA-2와 CA-3은 센서 간의 간격이 동일한 조건에서 센서 배열군(array group) 전체가 오른쪽 방향으로 10 cm씩 이동하는 경우이다.

센서 배열 변화에서는 CA-1 사례를 기준으로 R_3 센서만 이동시켰다. 가진 위치(10, 12, 0) 및 R_1 그리고 R_2 센서 위치는 고정이며, R_3 센서는 오른쪽 방향으로 10 cm씩 이동하였다. 해당 실험 사례는 CA-1 → CA-4 → CA-5 순서로 실시하였다(Fig. 7b). 각 실험 사례에서 동일면(G_F)과 앞뒷면(G_B)의 타격 실험군으로 나누어 실험을 실시하였다. 본 연구에서 수행한 실험 사례의 가진원 및 센서 위치 좌표는 Table 2와 같다.

Fig. 6. Experimental Cases Group According to the Source Location

Fig. 7. Test Cases According to the Sensor Array (a) CA-1, 2, 3 (b) CA-1, 4, 5

Table 2. Coordinates for the Source and Installed Sensors According to the Test Cases

G_F	Coordinates (Unit: cm)			G_B	Coordinates (Unit: cm)		
	X	Y	Z		X	Y	Z
Source	10	12	0	Source	10	12	0
CA1-R ₁	20	6	0	CA1-R ₁	20	6	3
CA1-R ₂	30	24	0	CA1-R ₂	30	24	3
CA1-R ₃	40	12	0	CA1-R ₃	40	12	3
CA2-R ₁	30	6	0	CA2-R ₁	30	6	3
CA2-R ₂	40	24	0	CA2-R ₂	40	24	3
CA2-R ₃	50	12	0	CA2-R ₃	50	12	3
CA3-R ₁	40	6	0	CA3-R ₁	40	6	3
CA3-R ₂	50	24	0	CA3-R ₂	50	24	3
CA3-R ₃	60	12	0	CA3-R ₃	60	12	3
CA4-R ₁	20	6	0	CA4-R ₁	20	6	3
CA4-R ₂	30	24	0	CA4-R ₂	30	24	3
CA4-R ₃	50	12	0	CA4-R ₃	50	12	3
CA5-R ₁	20	6	0	CA5-R ₁	20	6	3
CA5-R ₂	30	24	0	CA5-R ₂	30	24	3
CA5-R ₃	60	12	0	CA5-R ₃	60	12	3

3. 센서 배열에 따른 탄성과 속도 측정 결과

센서 배열에 따른 실험에서 탄성과 속도를 측정하였으며, 앞면에서 가진한 그룹(G_F)과 뒷면에서 가진한 그룹(G_B)으로 나누어 결과를 정리하였다(Fig. 8). 앞면에서 가진한 그룹에서 각각의 센서로부터 측정된 탄성과 속도의 평균값은 2,807 m/s이며(Fig. 8a), 앞면 실험군의 최대 탄성과 속도는 3,607 m/s, 최소 탄성과 속도는 2,354 m/s로 분석되었다. 앞면 그룹의 표준편차는 같은 실험 시편체임에도 센서 배열에 따라 336 m/s라는 다소 큰 값이 확인되었다.

뒷면에서 가진한 그룹의 경우, 평균 탄성과 속도는 2,355 m/s로 앞면 그룹과 비교하여 유사한 값으로 분석되었다. Fig. 8b는 뒷면 가진 그룹에서 측정된 탄성과 속도를 보여준다. 여기서 최대 탄성과 속도는 3,056 m/s이고 최소 탄성과 속도는 1,791 m/s로 분석되었다. 뒷면 가진 그룹에서 획득된 탄성과 속도의 표준편차는 404 m/s로 앞면 그룹보다 다소 크다. 이와 같은 결과는 위치추정을 위한 탄성과 속도 결정 시 주의해야 함을 보여준다. 만약 하나의 고정된 값(평균값 등)을 사용한다면 센서 배열에 따른 표준편차가 크기 때문에 정확한 위치추정을 할 수 없을 것으로 판단된다.

(a) Group of front condition (G_F)

(b) Group of back condition (G_B)

Fig. 8. Elastic Wave Velocities Measured from the Sensors (R_1 , R_2 , R_3)

3.1 G_F 조건에서 거리에 따른 탄성파 속도

Fig 8의 탄성파 속도를 가진원-센서 간 거리에 따라 정리하면 일정한 경향성이 있음을 알 수 있다. 앞면에서 가진한 그룹의 실험결과(Fig. 8a)를 가진원-센서 간 거리에 따라 Fig. 9에 나타내었으며, 가진원-센서 간 거리가 증가함에 따라 탄성파 속도가 점차 감소하는 것으로 확인되었다. 해당 실험 값은 지수함수 상관관계에서 높은 상관성을 보였다. 거리에 따른 탄성파 속도의 관계를 지수함수로 정의하면 지수함수의 상수는 2100.4, 그리고 지수는 -0.21 이다. 이때 결정계수(R^2)는 0.82로 상대적으로 높은 상관관계를 보였다.

Fig. 9. Elastic Wave Velocity According to the Distance Between Source and Receiver for G_F

3.2 G_B 조건에서 거리에 따른 탄성파 속도

Fig. 10에 뒷면에서 가진한 그룹의 탄성파 속도와 가진원-센서 간 거리 관계를 나타내었다. 뒷면에서 가진한 실험군 역시 가진원-센서 간 거리가 증가함에 따라 탄성파 속도가 감소하

였다. 상관관계를 지수함수로 나타내면 상수가 1596.4, 지수가 -0.28 일 때 가장 높은 상관관계($R^2=0.66$)인 것으로 확인되었다. G_F 조건에서 가진을 수행한 경우와 비교했을 때 결정계수가 다소 낮는데, 이러한 결과는 뒷면 가진 시 탄성파가 매질(화강암 시편)을 통과하면서 매질의 불균질한 특성이 반영되었기 때문으로 판단된다.

Fig. 10. Elastic Wave Velocity According to the Distance Between Source and Receiver for G_B

4. 가진원과 센서거리에 따른 탄성파 속도 적용

화강암 시편을 대상으로 수행한 실험에서 가진원과 센서 거리에 따라 탄성파 속도가 감소하는 것으로 분석된다(Figs. 9 and 10). 이와 같은 결과는 위치추정 시 단일 속도(P파 속도 또는 표면파 속도)값을 적용한다면 위치추정의 정확도가 감소할 수 있음을 보여준다. 본 장에서는 3가지 탄성파 속도모드(P파 속도, 표면파 속도, 그리고 거리에 따른 탄성파

속도)를 위치추정에 적용했을 때 실제 위치와 얼마나 차이가 발생하는지 분석하였다.

4.1 정확도 지표

본 연구에서는 위치추정의 정확도를 평가하기 위해서 정확도 지표(F_C)를 정의하였다. 정확도 지표는 실제(기준)신호의 도달시간과 입력된 신호의 도달시간의 차이 개념을 이용하여 계산한다. 여기서 입력된 신호의 도달시간은 P파 속도 또는 표면파 속도를 적용하였을 때의 계산된 도달시간이다. 따라서 실제 도달시간에 가까울수록 정확도 지표는 0에 가까운 값을 가지게 된다. Eq. (1)은 3개의 센서를 이용하여 F_C 를 산정하는 식이다.

$$F_C = \sqrt{\frac{1}{N}((\Delta T_{ABm} - \Delta T_{ABi})^2 + (\Delta T_{BCm} - \Delta T_{BCi})^2 + (\Delta T_{CAm} - \Delta T_{CAi})^2)} \quad (1)$$

여기서, ΔT_{ABm} , ΔT_{BCm} , ΔT_{CAm} 은 실제(기준) 탄성과 속도를 이용한 센서간의 시간차, ΔT_{ABi} , ΔT_{BCi} , ΔT_{CAi} 는 입력 탄성과 속도를 이용한 센서간의 시간차, N 은 센서의 개수.

4.2 속도모드에 따른 정확도 분석

4.2.1 가진원과 센서가 같은면에 배치된 경우(G_F)

Fig. 11a는 G_F 조건에서 입력 탄성과 속도를 P파(V_p), 표면파(V_{sur}), 그리고 본 연구에서 제안한 거리에 따른 탄성파(V_m)를 기준으로 했을 때 위치추정 정확도를 보여준다. 정확도 분석 결과, 거리에 따라 변화하는 탄성과 속도를 입력하였을 때 정확도가 가장 높다(3.6~7.7 μs). 표면파 속도를 적용하였을 때의 정확도는 P파 속도를 적용하였을 때보다 높은 정확도(낮은 F_C) 결과를 보여주는 것으로 분석되었다. Fig. 11a에서 P파 속도를 적용하였을 때의 F_C 는 표면파 속도를 적용하였을 때보다 약 2~4배 정도 큰 것으로 확인되었다.

이와 같은 정확도 차이는 해당 실험이 가진원과 센서가 같은 면에 배치되어 있기 때문에 표면파와 모드가 지배적이기 때문으로 분석된다.

센서 간의 배열 간격은 일정하게 유지하며 가진위치의 거리가 점점 증가하는 센서 배열의 경우(CA-1 $\rightarrow$ CA-2 $\rightarrow$ CA-3), 센서 배열에 따른 F_C 값이 전반적으로 비슷한 값을 보인다. 이와 같은 결과는 센서의 간격이 동일한 경우 위치표정에 민감도가 적은 것으로 분석된다. 그러나 P파 속도 적용 시 센서 간의 배열 간격이 변화하는 경우(CA-1 $\rightarrow$ CA-4 $\rightarrow$ CA-5)에는 센서 간의 배열간격이 증가함에 따라 정확도가 감소함(F_C 증가)을 확인할 수 있다.

4.2.2 가진원과 센서가 다른면에 배치된 경우(G_B)

Fig. 11b는 가진원과 센서가 서로 다른 면에 배치된 경우(G_B)의 위치추정 정확도 지표를 보여준다. 가진원과 센서가 같은 면에 배치된 경우(G_F)와 비교하여 모든 속도모드에서 정확도가 감소(F_C 증가)한 것을 확인할 수 있다. 특히 표면파를 입력값으로 지정한 경우 정확도가 확연히 감소하였다. 이는 가진원과 센서가 다른 면에 배치된 경우(특히 두께가 증가할수록) 표면파 특성이 감소하기 때문으로 분석된다. 모델 속도(거리에 따른 탄성과 속도 상관관계)를 입력값으로 설정하면 P파와 표면파를 입력값으로 설정할 때보다 위치표정 정확도가 증가(F_C 감소)함을 알 수 있다. 비록 가진원과 센서가 다른 면에 배치되어 전체적인 위치추정 정확도가 감소하더라도 단일 속도를 적용하는 것보다 모델 속도를 적용하는 것이 정확한 위치추정에 유리한 것으로 분석되었다.

한편 모든 속도모드에서 센서 간의 배열 간격은 일정하게 유지하며 가진원 위치의 거리가 점점 증가하는 센서 배열의 경우(CA-1 $\rightarrow$ CA-2 $\rightarrow$ CA-3) 및 센서 간의 배열 간격이 변화하는 경우(CA-1 $\rightarrow$ CA-4 $\rightarrow$ CA-5)에서 센서 간의 배열간격이 멀어짐에 따라 정확도가 감소(F_C 증가)하였다. 이와 같은 결과는 G_F 조건보다 G_B 조건에서 센서 배열에 따른 정확도가 민감하게 변할 수 있음을 보여준다.

Fig. 11. F_C Comparison Among Velocity Modes (P-wave velocity (V_p), surface wave velocity (V_{sur}), model velocity (V_m)) According to the Sensor Array Under (a) G_F and (b) G_B conditions

4.3 위치추정 오차범위 분석

F_C 는 일정 신호의 표준 오차시간을 의미하기 때문에, F_C 값을 이용하여 실제 매질의 탄성파의 평균 속도를 곱하여 위치추정 오차범위를 산정하였다. F_C 는 배열에 따라 다른 값을 가지고 있기 때문에 평균값을 사용하였다. Fig. 12는 각각 가진원과 센서가 같은 면에 배치된 경우(G_F), 서로 다른면에 배치된 경우(G_B)의 실험으로부터 예측된 위치추정 오차범위를 보여준다. Fig. 12에서 기준점인 (0,0)은 타격 위치를 의미하고 표기된 원은 오차범위를 의미한다. 오차를 산정을 위해 최대 측정거리(가진원-센서)인 50 cm를 기준으로 각각의 오차범위에서 최대 측정거리를 나누어 백분율로 산정하였다.

G_F 조건에서 P와 속도를 입력값으로 적용하면 약 8.82

cm의 오차범위가 발생하는 것으로 분석되었다(Fig. 13a). P와 속도 적용 시 오차율은 최대 측정거리 50 cm 기준으로 약 17.6%로 산정되었다. 한편 표면파 속도와 모델 속도를 위치추정 입력값으로 사용하면 오차범위는 각각 2.24 cm(오차율 4.5%)와 1.44 cm(오차율 2.9%)로 상대적으로 매우 정확한 결과를 보였다. G_B 조건에서는 P와 속도 입력에 따른 위치추정 오차범위는 13.51 cm(Fig. 13a), 오차율 27.0%로 3가지 속도조건에서 가장 큰 오차를 보였다. 표면파 속도 적용 시 오차범위는 5.39 cm이고 오차율은 10.8%이다. 한편, 모델 속도 적용 시 오차범위는 3.45 cm이고 오차율은 6.9%로 가장 낮은 값을 보였다. 가진원과 센서 위치가 다른 경우는 가진원과 센서가 같은 면인 경우와 비교하여 전체적으로 오차율이 약 1.5배에서 2.5배 정도 증가하였다.

Fig. 12. Source Location Error Range According to the Input Velocity Mode

Fig. 13. Comparison of Source Location Error Rate Between G_F and G_B According to the Input Velocity Mode

해당 실험결과로부터 가진위치(손상위치)와 센서가 위치한 면이 다르면 오차율이 커질 것으로 예상된다. 만약 대상구조물의 두께가 증가하게 되면 균질하지 못한 매질의 특성이 반영되어 오차율이 더 커질 수 있다. 이와 같은 오차율을 감소시키기 위해서는 일정한 속도보다는 모델 속도(거리에 따라 변하는 속도값 사용)를 입력값으로 적용하는 것이 위치 추정의 정확성 향상 측면에서 바람직할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 센서 배열 사례가 한정적이고 가진원과 센서의 최대 거리가 50 cm로 제한하였다. 이에 따라, 향후 다양한 센서 배열과 50 cm 이상의 측정 거리에서 실험을 실시하여 보다 일반적인 속도 모델을 보완 및 제시할 예정이다. 또한 대상 매질의 특성에 따른 손상위치 추정실험 및 분석을 통하여 위치추정 오차율을 최소화 하고자 한다.

5. 결 론

본 연구는 지진과 같은 재난에 의한 구조물 손상 위치를 탐지하는데 있어 합리적인 탄성과 속도를 결정하고 속도모드에 따른 음원 위치 추정의 정확도를 분석하고자 하였다. 이에 따라 판형태의 화강암 시편에 대해 가진위치에 따른 실험을 실시하여 P파, 표면파, 그리고 본 연구에서 제안한 속도 모델을 이용하여 손상위치 정확도를 비교 분석하였다.

판 형태의 시편에서 가진원과 센서의 설치가 같은 면에 있는 경우, 가진원과 센서 위치가 서로 다른 경우에 비해 높은 위치추정 정확도를 보였다. 판형태의 시편에서 P파 속도를 이용하면 위치추정 오차가 상대적으로 크게 발생할 수 있음을 확인하였다. 그러나 표면파 속도를 위치추정에 사용하면 P파 속도를 적용하였을 때보다 오차율은 확연히 감소함을 보였다. 그러나 센서의 거리에 따라 실제 탄성과 속도를 측정해보면, 가진원-센서의 거리가 증가함에 따라 탄성과 속도가 감소하는 것으로 분석되었다. 따라서, 이와 같은 결과는 P파, 표면파 속도와 같은 단일 값보다 전파특성에 적합한 속도 모델을 입력값으로 사용할 때 손상위치 예측의 정확도가 높아질 수 있음을 보여준다.

본 연구의 실험 및 분석 결과, 구조물 손상위치 평가에서 센서의 설치 거리마다 값을 검증하여 입력값으로 적용하는 것이 합리적인 것으로 판단된다. 본 연구의 실험결과는 향후 지진에 의한 판형 구조물(벽 구조물 또는 매트기초 구조물) 손상 시, 손상위치 추정에 있어 오차율을 최소화하는데 유용할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국가과학기술연구회 융합연구단 사업(No. CRC-16-02-KICT) 및 한국지질자원연구원(NP2016-055)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Ahn, S.H., Kang, J.W., and Shon, S.D. (2017). A ZigBee-based wireless data transmission device for structural health monitoring, *Journal of the Korean Association for Spatial Structures*, Vol. 17, No. 1, pp. 5-10.
- Han, B.H., Yoon, D.J., Park, C.S., and Lee, Y.S. (2015). Impact source location on composite CNG storage tank using acoustic emission energy based signal mapping method. *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 36, No. 5, pp. 391-398.
- Hong, S.U. (2012). *Prediction of compressive strength and damage of concrete structures using spectral analysis of surface wave • impact echo method and artificial neural network*. Ph.D. dissertation, Hanyang University, Seoul, Korea, pp. 17-19.
- Kee, S.H. (2015). Evaluating the depth of a surface-opening crack in concrete slabs using surface wave measurements. *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 19, No. 3, pp. 104-112.
- Kim, D.H., Park, I.S., Chung, W.Y., and Park, Y.S. (2008). Improvement of acoustic emission signal processing method and source location using wavelet transform. *Journal of the Institute of Signal Processing and Systems*, Vol. 9, No. 1, pp. 10-17.
- Kim, H., Oh, T.M., Kim, M.K., Lee, J.W., and Baek, Y. (2018). Case study on the foundation design of super high-rise buildings. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 18, No. 2, pp. 317-327.
- Kim, Y.H., Yoon, D.J., and Kwon, O.Y. (1994). Acoustic Emission. *The Journal of the Acoustical Society of Korea*, Vol. 13, No. 5, pp. 83-110.
- Koo, W.H., Park, S.Y., and Baek, M.H. (2017). A study for securing the disaster management task function of local governments in the event of earthquake and tsunami. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 17, No. 3, pp. 87-95.
- Lee, C.S., Lee, K.S., Kim, J.S., and Choi, H.J. (2013). A study on the micro-crack development of KURT granite using acoustic emission technique. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 13, No. 2, pp. 49-56.
- Lee, I.M., and An, D.J. (2001). Seismic analysis of tunnel structures. *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 3, No. 4, pp. 3-15.

- Lee, J.S., and Santamarina, J.C. (2005) Bender elements: Performance and signal interpretation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 131, No. 9, pp. 1063-1070.
- Na, J.H. (2015). *Evaluation of the state of the concrete member using Ultrasonic Pulse Velocity method and Impact Echo method*. Master's thesis, Hanbat National University, Daejeon, Korea, pp. 1-2.
- Ohtsu, M. (1995). Acoustic emission theory for moment tensor analysis. *Research in Nondestructive Evaluation*, Vol. 6, No. 3, pp. 169-184.
- Shin, S.R., and Jo, C.H. (2009). Case study on the impact-echo method for tunnel safety diagnosis. *Tunnel & Underground Space*, Korean Society for Rock Mechanics, Vol. 19, No. 1, pp. 19-30.
- Zhou, Z.L., Zhou, J., Dong, L.J., Cai, X., Rui, Y.C., and Ke, C.T. (2017). Experimental study on the location of an acoustic emission source considering refraction in different media. *Scientific Reports*, Vol. 7, No. 1, Article No. 7472.

Received	■	April 19, 2018
Revised	■	April 30, 2018
Accepted	■	May 14, 2018