자연 재해/재난 시 미소 파괴음을 이용한 구조물의 기초 손상위치 추정

Estimation of the Location of Damage Caused by Natural Disasters in Mega-structure Foundation Using Acoustic Emission

김용민* · 노동화** · 권태혁***

Kim, Yong-min*, Noh, Dong-hwa**, and Kwon, Tae-hyuk***

Abstract

Recently, there has been an increasing number of natural disasters such as earthquakes and sinkholes. These disasters can cause a major impact on foundation of the buildings and even collapse the structures. Moreover, as the structures are becoming larger in recent times, it is essential to aware the source of the damage location of the structures. In this paper, we suggest a damage source estimation technique via Acoustic Emission method to detect the locations of cracks in the foundations. To evaluate the developed technique, the cracks on the foundation of the structures were simulated and the 2D and 3D experiments were conducted to detect such cracks.

Key words : Disaster, Nondestructive Inspection, Earthquake, Sinkhole, Foundation

요 지

최근 지진 및 싱크홀 현상과 같은 지반과 관련된 재해가 증가하고 있다. 이러한 재해는 건축물의 기초에 큰 영향을 줄 수 있으며 나아가 구조물의 붕괴까지도 유발할 수 있다. 구조물이 대규모화됨에 따라 기초 손상에 대한 정보 인지는 필수적이다. 본 논문에서는 시설물에 국부적으로 발생하는 균열의 위치를 찾아내는 기술로서 미소 파괴음(Acoustic Emission)을 이용한 기초 손상 위치 추정 기법을 제안한다. 구조물의 기초에 균열이 발생한 상황을 모사하기 위하여 2차원/3차원 실험을 진행하였다.

핵심용어 : 재난, 비파괴탐사, 지진, 싱크홀, 기초

1. 서 론

과거부터 인류의 편의를 위하여 교량, 항만, 공항, 상하수도, 도로, 댐, 전력 발전소와 같은 사회기반시설들이 건설되어 왔으며, 최근에는 건설기술의 발달로 초고층빌딩이 계속해서 늘어나고 있다. 이러한 대규모 시설물의 붕괴는 큰 인명 및 경제적 피해를 미치게 된다. 대규모 구조물의 붕괴 사례를 살펴보면 1994년 성수대교의 상부 트러스가 붕괴하

면서 오전에 출근하거나 등교하던 시민 49명이 한강으로 추락하였고 32명이 사망하였다. 시공사의 부실공사라는 원인도 있었지만, 정부의 미흡한 안전검사로 일어난 사건이다. 또한 1995년 삼풍백화점 붕괴 사례는 수 십초 만에 건물이 완전히 붕괴되면서 502명이 사망하고 937명이 부상하는 인명피해를 낳으며 우리나라 최악의 사건으로 평가받고 있다.

건설기술의 발달 및 안전에 대한 인식개선과 함께 구조물

*정회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정(E-mail: amiamam@kaist.ac.kr)

Member, Ph.D. Candidate, Department of Civil and Environmental Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST)

**한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정(E-mail: dhnoh@kaist.ac.kr)

Ph.D. Candidate, Department of Civil and Environmental Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST)

***교신저자, 정회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수(Tel: +82-42-350-3628, Fax: +82-42-350-3610, E-mail: t.kwon@kaist.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST)

의 붕괴로 인한 인자는 크게 감소하였다. 그러나 지반 관련 재난의 증가와 함께 구조물 안전에 대한 위협도 증가하고 있다. 최근 들어 상하수도관이 노후화되면서 도심지의 싱크홀 현상이 증가하고 있다. 대규모 싱크홀은 인근 건물을 지지하고 있는 지반들의 토압균형을 무너트려 구조물 내 균열을 유발할 수 있다. 싱크홀 뿐 아니라 지진의 위협도 증가하고 있다. 최근 경주에서 발생한 5.8 규모의 지진 발생과 함께 우리나라가 더 이상 지진 안전지대가 아니라는 인식이 증가하고 있으며 한반도 내의 지진발생 빈도 또한 1980년대 이후 지속적으로 증가하고 있다(Koo et al., 2017).

사회기반시설과 초고층빌딩 같은 대규모 구조물의 붕괴로 인한 인명 및 경제적 피해를 최소화하기 위해선 구조물이 외부 충격에 의해 피해를 받았을 경우 피해정도를 예측하는 것이 매우 중요하다(Jang et al., 2007). 최근 들어 국내/외에서는 미소 파괴음(Acoustic Emission)을 이용하여 시설물을 진단하는 기법이 주목 받고 있다(Table 1). 미소 파괴음이란 구조물에 균열이 발생할 경우 내부에 축적된 변형 에너지가 외부로 방출되면서 발생하는 파괴음을 의미하는데 구조물의 붕괴에 앞서 현저해지는 경향이 있다(Hardy, 1977; Ishida, 1999). 미소 파괴음을 이용할 경우 구조물을 파괴하지 않고 구조물의 손상 위치를 파악할 수 있으며 실시간으로 모니터링이 가능하다는 장점이 있다.

본 연구에서는 시설물에 국부적으로 발생하는 균열의 위치를 찾아내는 기술로서 미소 파괴음을 이용한 기초 손상 위치 추정 기법을 제안한다. 싱크홀이나 지진과 같은 재난이 발생할 경우 가장 먼저 구조물의 기초가 영향을 받게 된다. 기초의 손상위치를 파악할 수 있다면 재난이 발생했을 때, 건축물의 붕괴로 인한 2차 피해를 막을 수 있을 뿐만 아니라 해당 위치에 한해서만 유지, 보수 사업을 수행할 수 있어 경제적이기도 하다(Baxter et al., 2007). 구조물의 기초에 균열이 발생

한 상황을 모사하기 위하여 2차원과 3차원의 실험을 진행하였다. 시료에 충격을 가해 발생시킨 신호를 여러 개의 가속도계를 이용하여 측정된 후 최소분산법에 적용하여 균열 발생 위치를 추정하였다. 미소 파괴음을 이용한 기술은 구조물의 상시 모니터링을 가능케 하여 시설물의 수명을 연장시키고 시설물이 효율적으로 활용될 수 있도록 하여 재난 시 국가의 인명재해를 방지하고 나아가 구조물의 유지/보수로 인한 경제적 부담을 완화 시킬 수 있을 것으로 기대된다.

2. 실험 및 해석 방법

2.1 해석 방법: 미소 파괴음을 이용한 최소분산법

구조물에 균열이 발생할 경우 내부에 축적된 변형에너지가 방출되면서 발생하는 파괴음을 미소 파괴음이라 한다. 미소 파괴음을 최소분산법에 적용할 경우 구조물에 발생한 균열의 유무와 위치를 추정할 수 있다. 최소분산법은 구조물에 균열이 발생하면서 발생한 미소 파괴음을 여러 개의 가속도계를 이용하여 측정된 후, 계산을 통해 손상이 발생한 위치를 역으로 추정하는 기법을 말한다(Al-Jumaili et al., 2016). 최소분산법을 식으로 표현하면 Eq. (1)과 같다.

$$X^2 = \sum (\Delta t_{i,obs} - \Delta t_{i,calc})^2 \quad (1)$$

$$\Delta t_{i,obs} = t_i - t_1 \quad (2)$$

$$\Delta t_{i,calc} = [\sqrt{(X_i - X_s)^2 + (Y_i - Y_s)^2} - \sqrt{(X_1 - X_s)^2 + (Y_1 - Y_s)^2}] \times v^{-1} \quad (3)$$

$$\Delta t_{i,calc} = [\sqrt{(X_i - X_s)^2 + (Y_i - Y_s)^2 + (Z_i)^2} - \sqrt{(X_1 - X_s)^2 + (Y_1 - Y_s)^2 + (Z_1)^2}] \times v^{-1} \quad (4)$$

Table 1. Previous Field Applications of AE/MS

Location	Conditions and result	Reference
Japan, Kan-etsu tunnel	[Experiment condition] - Four accelerometers were inserted into the rock to a depth of 1m. - Amplify initial signals to 20dB with preamplifier → Convert into optical signal and transmit it to measurement office [Experiment result] - The generation of rockburst is related to geologic discontinuities.	Hirata et al., 2007
Canada, TSX tunnel	[Experiment condition] - Monitoring was carried out in a 10m × 10m × 10m volume. - During ~6 month, 15,350 AE events were recored. [Experiment result] - The results show many events locate to a depth of less than 1 m.	Young et al., 1999
Korea, Oil storage cavern	[Experiment condition] - Twelve accelerometers installed in boreholes of 10-16m depth. - Event locations are estimated from P-wave and S-wave arrivals. [Experiment result] - Special attention should be given to events occuring beyond 3 hours after the blasts.	Hong et al., 2006

t_1 과 t_i 는 각각 1번 센서와 i 번 센서에 신호가 도달한 시간을 의미하며, v 는 매질 내에서의 전파 속도, X_s, Y_s, X_1, Y_1, X_i 그리고 Y_i 는 각각 균열위치, 1번 센서 위치, i 번 센서 위치를 의미한다. Eq. (1)의 $\Delta t_{i,obs}$ 는 각 가속도계에 실제로 신호가 도달하는데 걸린 시간의 차이이며 Eq. (2)와 같이 표현된다. Eq. (1)의 $\Delta t_{i,calc}$ 는 매질에서의 전파 속도, 가속도계 위치 그리고 손상 발생 추정 위치를 이용하여 계산된 시간차이며 Eq. (3)과 같이 표현된다. 최종적으로 측정된 시간과 계산된 시간 사이의 분산 값을 계산하여 값이 가장 작은 점을 손상 발생 위치로 추정하는 기법이다.

최소분산법을 이용한 기법은 구조물의 안전진단 뿐만 아니라 항공기 및 파이프 등과 같은 구조물의 내부 결함 및 손상도 평가 등을 위한 비파괴검사의 한 종류로서 활발히 사용되고 있다(Chun et al., 2008).

2.2 2차원 실험 방법

2차원 실험은 Fig. 1(a)와 같이 5 cm 간격으로 좌표가 지정된 40 cm × 40 cm 크기의 대리석에서 이루어졌다. 타격은 해머를 이용하여 일정한 높이에서 대리석에 충격을 가해 발생시켰다. 미소 파괴음은 구조물에 균열이 발생하면서 방출되는 파괴음이지만 해당 실험에서는 시료에 직접적인 균열을 발생시키기 어려웠기 때문에 다양한 분야의 비파괴검사에서 이용되는 타격실험으로 대체하여 타격을 발생시켰다. 또한 2차원 실험의 경우 최소분산법의 적용 가능성

(a) Marble plate

(b) Devices for signal analysis

Fig. 1. Setup for 2-D Test

을 살펴보기 위하여 비교적 매질이 일정하여 분석이 용이한 대리석을 선정하였다. 이때 발생한 신호를 가속도계로 수집한 후, 최소분산법을 이용해 해당 신호를 분석하여 손상 발생 위치를 추정하였다. 신호 분석은 Signal conditional를 이용하여 신호를 수집한 후, Oscilloscope를 통해 신호의 파형을 관찰하였다. 신호 분석에 적합한 신호는 Laptop에 저장한 후 분석을 진행하였다(Fig. 1(b)).

분석에 사용된 시료의 전파속도는 두 개의 가속도계를 10 cm 간격으로 일렬로 배치한 후, 가속도계와 동일한 직선상의 지점을 타격해 두 가속도계에 신호가 도달한 시간차를 통하여 계산하였다. 파의 종류는 표면파로 가정하였으며 전파 속도는 약 2296.5 m/s로 추정되었다(Pavlović, 1998).

이를 바탕으로 시료에 4개의 가속도계를 부착한 후 최소분산법을 통해 타격 위치를 추정하는 실험을 진행하였다. 이때 4개의 가속도계는 각각 (5,5), (5,35), (35,5), (35,35)의 위치에 부착되었다.

2.3 3차원 실험 방법

2차원 실험의 경우 센서가 부착된 면과 타격음이 발생하는 면이 동일하기 때문에 비교적 타격음의 발생위치 추정이 용이하나 실제 파괴음의 발생과는 차이가 있기 때문에 3차원 실험을 수행하였다. 3차원 실험은 Fig. 2(a)와 같은 T형 보에

(a) Schematic diagram of T-beam

(b) Arrangement of sensor on T-beam

Fig. 2. Setup for 3-D Test

서 수행되었다. 실험 방법은 2차원 실험 방법과 대부분 동일했으나 보다 정밀한 계측을 위해 시료에 7개의 가속도계를 부착하였다. 이때 부착된 가속도계는 아래에서부터 각각 (0,0), (25,0), (45,0), (25,25), (0,45), (25,45), (45,45)의 위치에 부착되었다(Fig. 2(b)). 전파되는 파의 종류는 P파로 가정하였으며 전파 속도는 약 3,600 m/s로 측정되었다.

3차원 실험 또한 최소분산법을 이용하여 타격 위치를 추정하였다. 3차원 실험의 경우 타격면과 가속도계가 부착된 면이 서로 다른 3차원 실험을 수행하였다. 3차원 실험의 경우 Z축이 추가되어 위에서 사용된 Eqs. (3)이 (4)와 같이 수정되었다. 그러나 Z는 기둥의 두께로 일정한 값을 가졌기 때문에 상수(약 20 cm)를 대입하여 계산하였다.

3. 실험 결과 및 토의

3.1 2차원 실험

해머로 시료의 (15,15) 위치를 타격하였을 때 4개의 가속도계에 도달한 신호의 형태는 Fig. 3(a)와 같다.

(a) Arrival signal of 2-D test

(b) Grid map of variation when hitting (15,15)

Fig. 3. (a) Arrival Signal and (b) Grid Map When Hitting (15,15)

신호는 도달 초기에 가장 큰 진폭을 보였으며 시간이 지날수록 감쇄하였다. 신호의 도달 초기 부분을 확대하여

보면 타격위치로부터 거리가 가까운 순서(4번 가속도계 - 3번 가속도계 - 1번 가속도계 - 2번 가속도계)대로 신호가 가속도계에 도달한 것을 확인할 수 있다. 이때 신호의 Sampling time은 6.4×10^{-7} s이었다.

실험 결과로부터 최소분산법을 이용하여 타격위치를 추정하기 위해 신호가 각 가속도계에 도달하는데 소요된 시간차를 계산하였다. 1번 가속도계에 신호가 도달한 시간과 비교했을 때 각 가속도계에 도달하기까지 걸린 시간 차이는 Table 2와 같다.

Table 2. Arrival Time Differences Among Sensors

	Δt (s)
Sensor 1	0
Sensor 2	2.1760×10^{-5}
Sensor 3	-6.4000×10^{-7}
Sensor 4	-3.8400×10^{-5}

1번 가속도계보다 신호가 먼저 도착한 3,4번 가속도계는 음의 값을 가졌으며 늦게 도착한 2번 가속도계의 경우 양의 값을 가졌다. 계산된 가속도계 간 시간차를 최소분산법에 적용하여 타격 위치를 추정하였다. 분석 결과(15.1,15)이 가장 작은 분산 값을 가져 신호 발생 위치로 추정되었으며 추정위치로부터 멀어질수록 분산이 커지는 결과를 보였다. 오차는 실제 타격 위치와 추정 위치 간의 직선거리로 계산하였으며 실제 신호 발생 위치인 (15,15)와 비교했을 때, 약 0.1 cm의 오차를 보였다. 이는 시료의 크기에 비해 매우 신뢰성 있는 결과로 최소분산법이 현장에 적용될 가능성이 있음을 보여준다. 이 외에도 최소분산법의 신뢰성을 파악하기 위하여 같은 조건에서 타격 위치를 옮겨가며 실험을 진행하였다. 8번의 반복 실험 결과 오차가 평균 약 1.8 cm로 계산되었다. 실험 결과는 Table 3과 같다. Fig. 4에 8번의

Table 3. Results of 2-D Experiments

	Actual location (cm)	Estimated location (cm)	Error (cm)
1	(5,10)	(8.9,10.7)	3.9
2	(10,25)	(12.5,25.2)	2.5
3	(15,15)	(15.1,15)	0.1
4	(15,35)	(15.9,33)	2.1
5	(20,15)	(19.5,16)	1.1
6	(20,30)	(19.2,26.9)	3.2
7	(25,25)	(25.5,25.2)	0.5
8	(30,15)	(31.2,15.1)	1.2

Fig. 4. Result of 2-D Experiments

Fig. 5. Result of 3-D Experiments

실험동안 파괴음의 실제 발생 위치와 추정 발생 위치를 각각 빨간색, 초록색 점으로 표시하였다. 결과를 살펴보면 대체적으로 실제위치와 추정위치가 일치하나 추정 발생 위치를 시료의 크기로 제한했기 때문에 타격 위치가 시료의 중앙에서 멀어질수록 오차의 크기가 증가함을 알 수 있다.

3.2 3차원 실험

3차원 실험의 실험 결과는 Table 4와 같다. 8번의 반복 실험 결과 오차가 평균 약 4.4 cm로 계산되었다. 이는 2차원 실험의 오차 값과 비교했을 때 두 배 이상의 값이다. 이는 단순한 대리석 판에 비해 비교적 복잡한 시료인 T형 보의 특징으로부터 기인한 것으로 보여 진다. Fig. 5를 살펴보면 실험결과가 2차원 실험만큼 정밀하진 않지만 파괴음이 발생한 부분을 추정할 수 있을 정도의 정밀도를 보였다.

Table 4. Results of 3-D Experiments

	Actual location (cm)	Estimated location (cm)	Error (cm)
1	(0,15)	(4.9,14.1)	4.9
2	(0,20)	(7.5,19.3)	7.5
3	(0,25)	(2.3,23.6)	2.6
4	(15,15)	(17,17.9)	3.5
5	(15,20)	(17.2,20.8)	2.3
6	(15,25)	(17.1,26.4)	2.5
7	(30,20)	(35.2,18.6)	5.3
8	(30,25)	(36.7,25.6)	6.7

4. 결 론

본 연구는 싱크홀, 지진 등의 지반 관련 재해에 의한 구조물 기초의 균열 발생 유무 및 발생 위치를 실시간으로 모니터링 하기 위해 수행되었다.

구조물 기초의 실시간 모니터링을 위하여 다양한 분야에서 비파괴검사 기법중 하나로 사용되는 최소분산법을 이용한 2차원, 3차원 모사실험을 진행하였으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

2차원 실험의 경우, 실제 타격 위치와 추정 타격 위치간의 직선거리를 나타내는 오차가 평균 1.8 cm로 비교적 신뢰성 있는 결과를 나타내었다.

3차원 실험의 경우 오차가 평균 4.4 cm로 2차원 실험보다 큰 오차를 보였으나 Grid map으로부터 손상 부위를 추정할 수 있을 정도의 오차를 보였다.

실제로 시료에 균열을 발생시킬 수 없어 타격음으로 미소 파괴음을 대체하였으며 서로 다른 깊이에서 파괴음이 발생하는 완벽한 3차원 실험을 수행하기에는 한계성이 있었다.

보다 신뢰성 있는 실험 결과를 얻기 위해서는 축소 모형실험 또는 현장실험 설계가 필요하다. 또한 추후 보다 나은 현장 적용을 위하여 상시 진동과 같은 소음과 실제 파괴 시 발생하는 신호의 구별을 위한 연구도 수행 되어야 할 것으로 보인다.

감사의 글

이 논문은 2016년 정부(미래창조과학부)의 재원으로 국 과학기술연구회 융합연구단 사업(No. CRC-16-02-KICT)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Al-Jumaili, S.K., Pearson, M.R., Holford, K.M., Eaton, M.J., and Pullin, R. (2016) Acoustic Emission Source Location in Complex Structures using Full Automatic Delta T Mapping Technique. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 72, pp. 513-524.
- Baxter, M.G., Pullin, R., Holford, K.M., and Evans, S.L. (2007) Delta T Source Location for Acoustic Emission. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 21, No. 3, pp. 1512-1520.
- Chun, D.S., Park, E.S., Jung, Y.B., Park, C.W., and Synn, J.H. (2008) Monitoring Technique using Acoustic Emission and Microseismic Event. *Tunnel & Underground Space*, Vol. 18, No. 1, pp. 1-9.
- Hardy, H.R. (1977) Emergence of Acoustic Emission/ Microseismic Activity as a Tool in Geomechanics. In *First Conf. on Acoustic Emission/Microseismic Activity in Geologic Structures and Materials*, pp. 13-31.
- Hirata, A., Kameoka, Y., and Hirano, T. (2007) Safety Management based on Detection of Possible Rock Bursts by AE Monitoring during Tunnel Excavation. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 40, No. 6, pp. 563-576.
- Hong, J.S., and Lee, J.M. (2006) Microseismic Monitoring of Highly Stressed Rock Mass in Underground Oil Storage Caverns. *KSEG Conference*, pp. 155-164.
- Ishida, T. (1999) *An Introduction to Acoustic Emission of Rock*. Kinmirasha Nagoya, p. 213.
- Jang, H.I., Lee, S.D., You, B.O., Park, C., and Chun, D.S. (2007) A Basic Study on Application of Acoustic Emission on Slope Measurement. *Proceeding of Korea Society for Rock Mechanics Conference and Seminar*, pp. 429-434.

Koo, W., Park, S., and Baek, M. (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 (Jun. 2017), pp. 87-95.

Pavlović, V.D., and Veličković, Z.S. (1998) Measurement of the Seismic Waves Propagation Velocity in the Real Medium. *The Scientific Journal Facta Universitatis Series: Physics, Chemistry and Technology*.

Young, R.P., and Collins, D.S. (1999) Monitoring an

Experimental Tunnel Seal in Granite using Acoustic Emission and Ultrasonic Velocity. *Proceedings of the 37th US Symposium on Rock Mechanics, Balkema, Rotterdam*, Rock Mechanics in Industry, pp. 869-876.

Received	December 5, 2017
Revised	December 7, 2017
Accepted	December 21, 2017