

AE 를 이용한 콘크리트 구조물 진단 및 감시 방법의 개발

최기홍, 최기상*

한성대학교 산업안전공학과, 서울시립대학교 전자전기공학부*

1. 서론

우리나라의 많은 콘크리트 구조물이 장기간의 과중한 사용과 열악한 환경의 영향으로 취약해진 것으로 나타나고 있어서 유지와 보수가 제대로 이루어지지 않을 경우 안전사고로 연결될 수도 있다. 따라서 경제적이고 효과적인 콘크리트 구조물 안전진단법의 개발과 감시 시스템의 구축이 절실히 필요하게 되었다.

콘크리트의 비파괴시험법 중 현재 방사선투과시험법이 가장 광범위하게 이용되고 있으며 초음파 검사법도 많이 이용되고 있다[1]. 그러나 방사선투과시험법은 방사성 동위원소를 이용하는 위험성이 있으며 초음파 검사법은 신뢰성이 방사선투과시험법 낮다.

AE는 고체에서 국부적인 내부구조 변화의 결과로 발생하는 응력파이다. 따라서 AE는 소성변형, 균열의 발생과 성장, 상변태 등에 관한 중요한 정보를 담고 있으며, 강도, 변형율, 이방성, 비균질성, 결정의 입도 등 재료의 물성과 응력상태, 온도, 단면의 두께 등의 상태에 의해 영향을 받게 된다. AE는 초창기에 항공기의 금속용접에 있어서 구조결함을 찾아내는데 주로 이용되었고 70년대부터는 핵발전소의 구조물 신뢰성 진단에 이용되기 시작하였으며 근래에는 복합구조물의 신뢰성 진단에 관한 연구가 많이 이루어지고 있다. 또한 재료시험에서 변형과 파괴의 미세한 메커니즘을 규명하는 도구로서 기계적 구조물의 결함을 감지해 내고 그 위치를 알아내기 위한 테스트 방법으로도 응용되고 있다[2-4].

AE를 이용한 콘크리트 구조물에 대한 진단방법은 Matsuyama, et al.[5]와 Berthelot et al.[6,7], 그리고 Chichibu[8] 등이 기본적인 연구를 한 바가 있다. 그러나 노이즈 문제, 적절한 신호처리 및 패턴인식 방법의 결여 등으로 아직 현장에서 이용되지는 못하고 있다.

본 논문에서는 콘크리트 재료의 손상에 의해 발생하는 AE 신호에 대하여 연구하였다. 구체적으로 콘크리트 재료의 손상에 의해 발생하는 AE를 시간 영역과 주파수 영역에서 해석하여 재료의 손상과 연관 깊은 인자들을 찾아내고 열화손상된 콘크리트 재료에서 발생하는 AE의 특성을 분석하여 콘크리트 구조물의 전전성을 감시할 수 있는 시스템을 개발하고자 한다.

2. 콘크리트의 파괴에 의해 발생하는 AE

콘크리트의 파괴는 강한 에너지의 AE를 발생시킨다고 알려져 있으나 콘크리트의 파괴에 의해 발생하는 AE의 특성에 관해서는 거의 알려진 것이 없다.

이진경 등[3]은 mortar부재의 미시적 파괴기구 및 균열진전에 따른 AE의 특성을 연구했는데, 이에 의하면 mortar재료에는 굽힘 파괴시험에서 초기하중이 가해짐에 따라 mortar 시편 내의 노치선단에는 국부적인 응력집중영역이 발생하게 되며 이 영역 내에 분포하는 시멘트 입자의 파괴가 일어난다. 그리고 하중이 점차적으로 증가함에 따라 시멘트 페이스트와 모래입자의 경계면에서 발생한 균열 및 파괴된 시멘트 입자 사이에서의 균열이 성장이 하는 단계로 발전된다. 이때 발생하는 AE는 낮은 에너지와 그리 높지 않은 duration time, 광범위한 주파수 대역을 보이며 길이가 짧고 일정한 방향을 가지고 있지 않다. 마지막으로 이들 미소균열의 합체에 의한 주균열의 성장에 의해 발생하는 신호들로서 높은 에너지 레벨과 높은 duration time, 그리고 광범위한 주파수 대역을 나타낸다. 또한 시멘트 입자에서 발생한 크랙 및 노치선단에서 발생한 균열들이 성장하면서 노치선단 주위에 분포하는 기공들과의 합체가 일어나기 시작하며 이때 발생하는 신호들의 특성은 균열 발생, 성장에 의한 신호보다 훨씬 높은 진폭 및 에너지를 나타내지만 주파수 대역은 앞의 신호들과 비슷한 경향을 나타낸다.

콘크리트의 파괴에 의한 AE의 원천도 균열의 발생과 진행이며 기본적으로 mortar부재의 파손에 의한 AE와 비슷한 특성을 가질 것으로 생각된다. 단, mortar에 비해 재질의 구성분자가 크고 불균질하며, 재료의 이종특성으로 인하여 불규칙적인 burst를 많이 발생할 것으로 생각된다. 또, 부가적으로 균열면의 마찰 또 콘크리트 구조물의 경우 콘크리트와 연결부위에서의 연결부품과 콘크리트 사이의 기계적 마찰 등도 AE의 원천이 될 수 있을 것이다.

3. AE신호처리 및 패턴인식

콘크리트는 재질의 구성분자가 크고 불균질하며, 재료의 이종특성으로 인하여 AE센서로부터 검출되는 신호는 산란, 변조되고 감쇠된 복합 중첩 파형이다. 이러한 파형으로부터 정량적인 정보를 추출하기 위해서는 신호처리를 통하여 의미있는 특징 파라미터를 얻어내는 것이 중요하다. 본 연구에서는 8계의 AR 모델 (8th order autoregressive model) [11-13] 을 이용하였다.

다시 계산된 AR계수들 중에서도 재료의 거동에 민감하면서 주위 환경의 영향에 감도가 낮은 성분만을 골라서 패턴인식기 (신경회로망) 의 입력백

터로 이용하였다. 본 연구에서는 Sequential forward search algorithm [14,15]을 이용하여 8개의 AR계수 중에서 2 군 사이에 최적의 분리도를 가져오는 4 개의 계수 (feature) 들을 선정하였다.

그리고 계수들을 이용해서 재료의 상태를 인식하기 위해 4-6-1 역전파 신경회로망 (neural network) 을 이용하였다.

4. 실험

제안된 비파괴 평가 및 감시 시스템의 성능을 평가하기 위하여 일련의 실험이 행하여졌다. 콘크리트 재료의 파괴에 의해 발생하는 AE를 측정하기 위한 시스템은 대영 만능시험기, AE센서와 계측장비, 그리고 데이터 취득장치를 포함한 PC로 구성된다.

콘크리트 시편은 KSL5201 과 ASTM C150 규정에 의하여 Table 1과 같이 시멘트, 물, 골재를 일정한 비율로 섞은 후 양생과정을 거친 것을 사용하였다. 또, 그 규격은 230mm x 75mm x 25mm로 하였고 시험편 중앙에 10mm 노치를 도입하였다.

1-2mm rolled sand (x100kg)	cement (x100kg)	water (x100kg)
12.52	7.16	3.00

Table 1. Composition of test specimens tested (mass of the constituents/m³)

AE 센서는 수신면을 잘 접촉되어야 하므로 시험재료의 측면을 연마하여 평면을 만들고 설치하였다. 또 연마된 콘크리트 표면은 일반적으로 거칠므로 epoxy 결합제를 이용하여 확실하게 접착되도록 하였다.

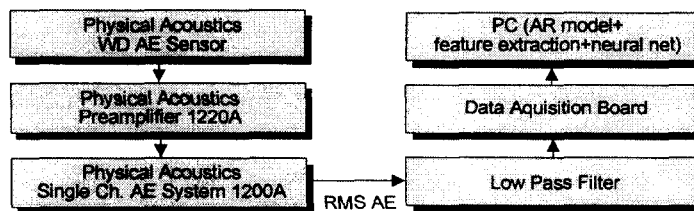


Fig.1 Experimental setup for data acquisition and processing

실험 중 AE는 재료에 부착된 Physical Acoustics WD AE 센서에 의하여 측정된다. 그리고 이 신호는 차례로 Physical Acoustics 1220A preamplifier 와 Physical Acoustics 1200A single channel AE 시스템을 차례로 통과하여 12-bit A/D 컨버터 (NI PCI-MIO-16E-1 board) 를 통하여 PC 로 샘플링된다. 저장된 데이터는 C 언어로 프로그래밍된 소프트웨어에 의해 컴퓨터에 구

현된 신호처리기와 신경회로망을 통하여 재료의 상태를 판단하게 된다 (Fig. 1).

5. 실험결과

제안된 콘크리트 파괴 감시시스템을 평가하기 위하여 2차례의 3 point bending 파괴실험이 0.01cm/sec 의 가압속도로 행하여졌다. 첫번째 실험은 감시시스템을 학습시키기 위한 데이터를 수집하기 위한 것이었고, 두번째는 이 시스템의 평가를 위한 것이었다.

Fig. 2 AE recorded during fracture test

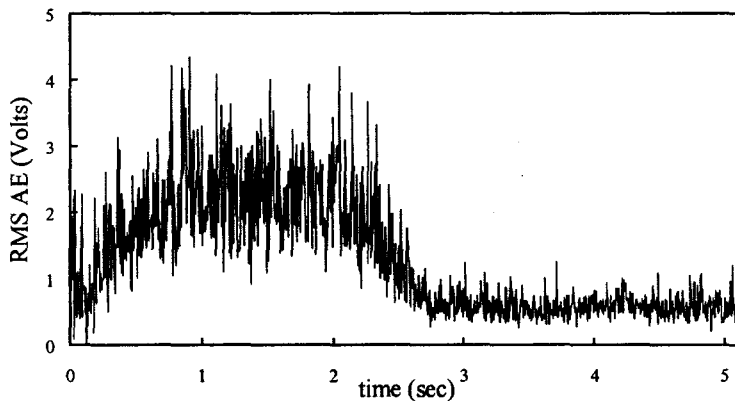
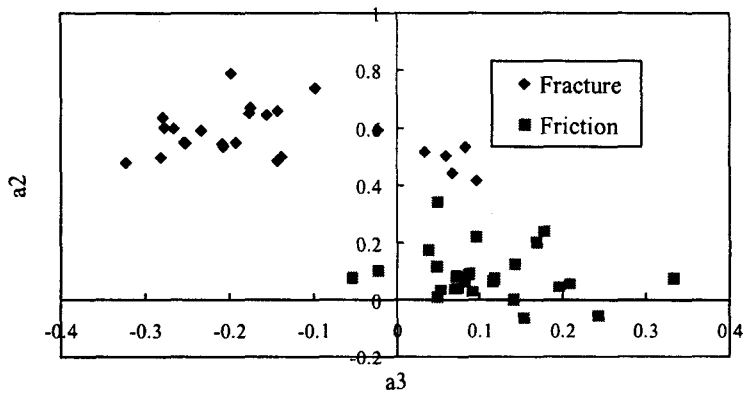


Fig. 2 은 콘크리트 재료 3점 bending 파괴시험에서 발생한 AE를 기록한 것이다. 콘크리트에서 발생하는 AE는 모르타르에서 발생하는 AE에 비해 재료의 구성분자가 크고 불균질하며, 재료의 이종특성으로 인하여 불규칙적인 burst를 많이 포함한다. 따라서 콘크리트에서 발생하는 AE는 높은 threshold에서 event 숫자가 증가하며, 주파수영역에서는 고주파성분이 증가한다. 시간영역에서 AE를 살펴보면 0-1초 사이에서는 파괴가 일어나고 진행해가면서 AE 에너지가 점차로 증가함을 볼 수 있다. 이 영역에서는 하중의 증가와 더불어 노치 선단부 주위에 응력집중현상이 발생하고 fracture 영역 내의 부분적인 미소균열에 의한 AE event 가 발생하기 시작하며 하중의 증가와 더불어 fracture 영역의 크기가 증가하고 이들 주변에 분포하는 기공들로부터의 미소균열이 전파, 합체하여 노치 선단부로부터 미소균열이 시험편 중앙으로 점차적으로 전파한다. 따라서 AE event 와 RMS AE 가 다같이 증가한다. 1초 이후의 영역에서는 최대하중점 근처에서 급격하게 거시균열로 성장함에 따라 AE event 와 RMS AE 가 현저하게 증가한다.

Fig. 3에서는 콘크리트 재료의 3점 bending 파괴시험에서 발생한 RMS AE 신호와 콘크리트 재료의 마찰에 의한 RMS AE를 각각 time series 모델링해서 AR계수를 구하고 그 중 특징공간에서 가장 잘 분리가 되는 첫 번째

AR계수(a2) 와 두 번째 AR계수(a3)를 도시하고 두 군 사이의 분리도를 검사하였다. 파괴에 의한 RMS AE 신호와 마찰에 의한 RMS AE가 a2-a3 공간에서 분리되어 나타남을 볼 수 있다. 그러나 그 경계가 확실하지 않고 두 군간의 중첩부분이 있기 때문에 경계선 근처 영역에서는 두 군이 확실하게 구분되지 않는다. 이 경우 선형 패턴 인식기로는 만족할 만한 패턴인식의 성능을 기대하기 어렵다. 따라서 여러 특징의 정보를 종합할 수 있고 비선형 패턴인식기의 역할을 할 수 있는 3층구조 퍼셉트론형 신경망 (4-4-1 네트워크)을 하였다.

Fig. 3 AE Coefficient of RMS AE



실험의 결과는 Table. 2와 같이 90% 이상의 비교적 우수한 결과를 보였다.

Concrete 종류	Fontainebleleau sand	1-2mm rolled sand	2-3mm rolled sand
정인식률	94%	92%	91%

Table 2 The correct recognition rates of the proposed monitoring system

6. 결론

본 연구에서는 AE를 이용한 콘크리트 구조물 진단 및 감시 방법을 개발하고 그 성능을 실험을 통하여 평가하였다. 이로부터 AE 센서를 이용한 콘크리트 재료파괴의 효과적인 감시가 가능하다고 생각되며 현장에서의 실제적인 적용실험이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 97 한국과학재단 핵심전문연구 (과제번호 971-1004-024-2)에 의해 지원되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 이의중, "콘크리트의 비파괴 시험", 도서출판 골드, 서울, 1996.
- [2] 안희성, "용접부의 결함과 비파괴시험", 대한기계학회지 Vol. 33, no.5, pp. 435-448, 1993.
- [3] 이진경, 이준현, 윤동진, "음향방출을 이용한 mortar의 미시적 파괴거동에 관한 연구," 한국비파괴검사학회 춘계학술대회 논문집, pp.323-332, 1998.
- [4] 김동원, 권오양, "AE에 의한 알루미늄 용접부 피로균열의 전파 특성," 한국비파괴검사학회 춘계학술대회 논문집, pp.314-322, 1998.
- [5] K. Matsuyama, et al., "Field Application of Acoustic Emission for the Diagnostic of Structural Deterioration of Concrete", Journal of Acoustic Emission, Vol. 11, No. 4, pp. S65-73, 1993.
- [6] J.-M. Berthelot, et. al., "Frequency Analysis of Acoustic Emission Signals in Concrete", Journal of Acoustic Emission, Vol. 11, No. 1, pp. 11-18, 1993.
- [7] Berthelot, J. and J. Robert, "Modeling concrete damage by acoustic emission" Journal of Acoustic Emission, 6, pp.43-60, 1987.
- [8] A. Chichibu, "Principal Components Analysis of AE Waveform Parameters for Investigating an Instability of Geotechnical Structures", Journal of Acoustic Emission, Vol. 11, No. 4, pp. S47-56, 1993.
- [9] Labuz, J.F., S.P. Shah, and C. H. Dowding, "Measurement and description of tensile fracture in granite", Journal of Engineering Mechanics, 115, pp.1935-1949, 1987.
- [10] Nomura, N., H. Mihashi, A. Suzuki, and M. Izumi, "Aspects of fracture process zone of concrete", Progress in Acoustic Emission V, The Japanese Society for NDT, 1990.
- [11] Jones, R., "Identification and Autoregressive Spectrum Estimation", IEEE Trans. Autom. Control, Vol. AC-19, pp. 894-897, 1974.
- [12] Nuttall, A., "Multivariate Linear Predictive Spectral Anaysis Employing Weighted Forward and Backward Averaging: A Generalization of Burg's Algorithm", Naval Underwater Systems Center, Technical Report 5501, New London, Conn., 1976.
- [13] Robinson, E., "Multichannel Time Series Analysis", 2nd. Ed., Goose Pond Press, Houston, TX, 1983.
- [14] Devijver, P. A. and Kittler, J., "Pattern Recognition: A Statistical Approach", Prentice-Hall, London, 1983.
- [15] Whitney, A., "A Direct Method of Non-parametric Measurement Selection", IEEE Transactions on Computers, Vol. 20, pp. 1100-1103, 1971.