

AE를 이용한 콘크리트 구조물 진단 및 감시 방법의 개발

Development of Diagnostic and Monitoring Method for Concrete Structure Using AE

최기상* · 최기흥**

Gi-Sang Choi · Gi-Heung Choi

(1999년 3월 16일 접수, 1999년 6월 8일 채택)

ABSTRACT

The feasibility of using AE for monitoring mechanical failure in concrete structures has been tested. Specifically, the relationship between the fracture and the characteristics of AE signal is theoretically and experimentally investigated. The experimental results manifest that the high sensitivity of AE signal to the fracture of concrete structure makes it a good choice as sensor for monitoring concrete structure.

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 있다¹⁾. 그러나 방사선투과시험법은 방사성 동위원소를 이용하는 위험성이 있으며 초음파 검사법은 방사선투과시험법보다 신뢰성이 낮다.

AE는 고체에서 국부적인 내부구조 변화의 결과로 발생하는 응력파이다. 따라서 AE는 소성 변형, 균열의 발생과 성장, 상변태 등에 관한 중요한 정보를 담고 있으며, 강도, 변형율, 이방성, 비균질성, 결정의 입도 등 재료의 물성과 응력 상태, 온도, 단면의 두께 등 상태에 의해 영향을 받게 된다. AE는 초창기에 항공기의 금속용접에

* 서울시립대학교 전자전기공학부

** 한성대학교 산업시스템공학부

있어서 구조결함을 찾아내는데 주로 이용되었고 70년대부터는 핵발전소 구조물의 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)}.

본 논문에서는 콘크리트 재료의 손상에 의해 발생하는 AE신호에 대하여 연구하였다. AE를 이용한 콘크리트 구조물의 진단방법은 Matsuyama, et al.⁵⁾와 Berthelot et al.^{6,7)}, 그리고 Chichibu⁸⁾ 등이 기본적인 연구를 한 바가 있다. 그러나 노이즈 문제, 적절한 신호처리 및 패턴인식 방법의 결여 등으로 아직 현장에서 이용되지는 못하고 있다. 그들은 AE가 콘크리트 재료의 손상에 민감하다는 것을 실험적으로 보였으나 구체적으로 AE 신호의 특성과 재료의 손상 사이의 연관성을 규명하지는 않았다. 본 연구에서는 콘크리트 재료의 손상에 의한 AE의 발생을 해석하며 실제 환경 조건하에서 AE신호와 콘크리트 재료의 손상 사이의 연관성을 측정한다. 구체적으로 콘크리트 재료의 손상에 의해 발생하는 AE를 시간 영역과 주파수 영역에서 해석하여 재료의 손상과 연관 깊은 인자들을 찾아내고 콘크리트 재료의 파괴에 의해 발생하는 AE의 특성을 분석하여 AE를 이용한 콘크리트 구조물 감시시스템 개발의 가능성을 제시하고자 한다.

2. 콘크리트의 파괴에 의해 발생하는 AE

콘크리트의 파괴는 강한 에너지의 AE 발생원이라고 알려져 있으나 콘크리트의 파괴에 의해 발생하는 AE의 특성에 관해서는 많이 알려지지 않고 있다.

이진경 등³⁾은 mortar 부재의 미시적 파괴기구 및 균열진전에 따른 AE의 특성을 연구했는데, 이에 의하면 mortar 재료에는 굽힘 파괴시험에서 초기하중이 가해짐에 따라 mortar 시편 내의 노치 선단에는 극부적인 응력집중영역이

발생하게 되어, 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 성장하는 단계로 발전된다. 이 때 발생하는 AE는 낮은 에너지와 그리 길지 않은 지속시간, 광범위한 주파수 대역 등의 특징을 가진다. 이어서 이들 미소균열의 합체에 의한 주 균열의 성장에 의해 발생하는 신호들은 높은 에너지 레벨과 긴 지속시간, 그리고 광범위한 주파수 대역을 나타낸다고 보고하였다. 또한 시멘트 입자에서 발생한 크랙 및 노치 선단에서 발생한 균열들이 성장하면서 노치 선단 주위에 분포하는 기공들과의 합체가 일어나면서 발생하는 신호의 특성은 균열 발생, 성장에 의한 신호보다 훨씬 높은 진폭 및 에너지를 나타내지만 주파수 대역은 앞의 신호들과 비슷한 경향을 나타낸다고 하였다.

콘크리트의 파괴에 의한 AE의 원천도 균열의 발생과 진행이며 기본적으로 mortar 부재의 파손에 의한 AE와 비슷한 특성을 가질 것으로 생각된다. 단, mortar에 비해 재질의 구성분자가 크고 불균질하며, 재료의 이종특성으로 인하여 불규칙적인 burst를 많이 발생할 것으로 생각된다.

2.1 균열에 의해 발생하는 AE

콘크리트의 파괴는 대단히 복잡한 현상이기 때문에 파괴에 의한 AE현상의 해석적 모델을 구하는 것은 어렵다^{9,10)}. 단, AE에너지와 파괴에 의해 발생하는 에너지가 비례한다면 무한한 매질에서 균일한 응력을 받는 경우 동전형상 균열(penny-shaped crack)의 형성에 의한 AE에너지는 ΔU , V , σ , ν , r , E 가 각각 균열의 형성에 따라 발생하는 정적 변위에너지(static strain energy), 균열의 체적, 응력, 프와송 비(Poisson's ratio), 균열의 반경, 그리고 Young's modulus 일 때

$$E_{AE} \propto AE_{rms} \propto \Delta U = \sigma V / 2 = \frac{4}{3} (1 - \nu) \frac{\sigma^2 r^3}{E} \dots\dots\dots (1)$$

로 나타낼 수 있을 것이다¹¹⁾. 콘크리트 재료의

파괴와 같이 다수의 균열이 동시에 발생하는 경우에도 AE에너지와 각 파라미터 사이의 관계는 식(1)과 비슷한 경향을 보일 것이다.

2.2 환경 잡음

콘크리트 부재는 대단히 다양한 환경과 사용 조건 하에 놓이게 된다. 따라서, AE 발생원도 매우 다양할 것이다. 콘크리트 구조물의 경우, 외부에서 콘크리트 부재에 가해지는 기계적 충격과 마찰이 주요한 AE 발생원이 될 것이며, 콘크리트와 연결부위에서의 연결부품과 콘크리트 사이의 기계적 마찰 등도 AE를 발생시킨다.

기계적 충격이 가해지면 접촉하는 두 표면의 돌출부 사이의 분자적인 결합이 파괴되고 표면층의 변형이 생기는 등 두 표면의 돌출부간의 동적인 상호작용이 일어난다. 이러한 상호작용은 돌출부와 그 아래층의 변형을 가져올 뿐 아니라 균열, 피로, 미소절삭 그리고 접촉에 의한 마모 부스러기의 생성을 가져오며 결과적으로 강한 AE를 발생시킨다.

또한, 콘크리트 부재의 마찰은

- 1) 표면의 소성변형
- 2) 균열의 발생과 진행
- 3) 부서진 미소재료의 마찰표면 위에서의 미끄러움에 따른 표면 요철의 충돌과 부스러기에 의한 충격
- 4) 경계에서의 접촉과 연이은 미끄러짐에 의한 미소진동

등을 일으키며 이러한 현상들은 복잡한 형태로 상호작용하여 탄성파의 형태로 방출되어 AE를 발생시킨다. 미시적인 관점에서 보면 마찰에 의한 AE의 발생은 대단히 복잡하다. 금속재료 사이의 마찰에 의해 발생하는 AE에 관해서는 연구된 바가 있으나 콘크리트 재료의 마찰에 의한 AE의 발생은 그 구조가 다르고 거의 연구된 바가 없다. 그러나, AE 에너지와 마찰에너지 소산율의 비례관계를 가정한다면

η = 표면조도와 재료탄성의 함수인 상수,
 τ = 접촉면의 전단강도,
 A_n = 실제 접촉면적,
 V = 미끄러짐 속도,
 k, m = AE 측정 시스템과 재료의 물성에 따라 달

라지는 상수일 때, 마찰에 의한 AE 에너지는 식(2)와 같이 나타낼 수 있을 것이다.

$$E_{AE} \propto AE_{rms} = (k \eta \tau_s A_n V)^{m/2} \dots\dots\dots (2)$$

3. AE의 전파

대개 AE는 매질을 통하여 전파되는 동안 크게 변화하기 때문에 채취된 신호의 특성이 발생원에서와는 크게 다르게 된다. 재료에서 응력파는 종파(longitudinal wave), 횡파(transverse wave), 그리고 표면파(surface wave)의 형태로 전달된다. 그런데 탄성재료에서 전파속도는 매질의 탄성계수와 밀도의 함수이며, 모드가 다른 탄성계수가 다르기 때문에 전파속도도 달라진다. 또, 유한한 매질의 경우, 전파속도는 주파수에 따라서도 변화하기 때문에 파의 산란(dispersion)이 일어난다. 더구나, 파가 다른 매질의 경계면을 통하여 전파되는 경우, 반사와 주파수에 따른 감쇠량의 변화에 의한 신호의 부가적인 열화가 불가피하다. 따라서, 발생원으로부터 멀리 떨어져서 감지된 AE의 특성은 많이 변질되게 되며 특히, 파의 전달 경로가 길고 여러 다른 매질의 경계면을 통과하는 경우 크게 변질된다.

4. AE의 신호처리, 특징추출 및 패턴 인식

콘크리트의 파괴에 의해 발생하는 AE신호의 정확한 수학적 모델을 얻을 수 있다면 콘크리트 재료의 거동은 수학적 모델을 이용해 정량적으로 설명될 수 있다. 그러나, 콘크리트는 재질의 구성분자가 크고 불균질하며, 재료의 이종특성으로 인하여 AE센서로부터 검출되는 신호는 산란, 변조되고 감쇠된 복합 중첩파형이므로, 그대로 시스템의 수학적 모델을 구하기 위하여 사용할 수 없다. 이 경우, 신호처리를 통하여 AE신호로부터 콘크리트 파괴에 관련된 의미있는 정량적인 정보를 추출해 내야 한다.

본 연구에서는 샘플된 데이터를 AR 시리즈 모델링(autoregressive time series model)하였다^{12~14)}. p계 AR 시리즈 모델, x(n)은 a(k)가 계

수이고, $u(k)$ 가 제한적 정상분포(wide-sense stationary)를 가지는 잡음이라고 할 때, 다음과 같은 귀환식에 의해 정의된다.

$$x(n) = - \sum_{k=1}^p a(k)x(n-k) + u(n) \dots\dots\dots (3)$$

과거의 연구는 콘크리트의 파괴에 의한 AE 신호를 샘플링해서 얻어진 이산신호가 시간영역과 주파수영역에서 환경잡음과 구별되는 특징을 보이는 것으로 보고 되었으므로⁵⁻⁸⁾ 본 연구에서는 AE신호의 AR 계수벡터를 콘크리트 재료 손상의 척도로 이용하였다.

또, 식(4)와 같이 시간영역에서의 이산신호, $x(n)$ 의 이산된 주파수, f_i 에서의 주파수 스펙트럼 $S(f_i)$ 를 구하였다. 이 경우, 통계적인 안정성을 얻기 위하여 주파수영역을 여러 밴드로 나누고 각각의 밴드평균을 취한 값들을 콘크리트 재료 손상의 척도로 이용하여 그 성능을 AR모델을 이용한 경우와 비교하였다.

$$S(f_i) = \sum_{k=0}^N x(n) \exp(-j k f_i) \dots\dots\dots (4)$$

패턴인식을 위해 큰 크기의 입력벡터를 이용한다고 성능이 향상되지는 않으며, 반면에 많은 학습샘플과 계산량의 증가를 수반하므로, 콘크리트의 파괴에 민감하면서도 외부 환경조건의 영향에 감도가 낮은 적은 숫자의 성분을 골라서 특징벡터(feature vector)로 이용하여야 한다.

D개의 데이터들로부터 콘크리트의 파괴와 환경잡음 두 개의 군 사이에 최적의 분리도를 가져오는 d개의 특징들을 골라내기 위해 군내 분산행렬, S_w 와 군간 분산행렬, S_b 를 다음과 같이 계산한다.^{15,16)}

$$S_w = \sum_{i=1}^2 P_i \frac{1}{n_i} \sum_{k=1}^{n_i} (x_{ik} - m_i)(x_{ik} - m_i)^T \dots\dots\dots (5)$$

$$S_b = \sum_{i=1}^2 P_i (m_i - m)(m_i - m)^T \dots\dots\dots (6)$$

단, x_{ik} 는 k번째 패턴벡터, n_i 는 i번째 군에 속하는 패턴벡터의 숫자, $P_i = n_i / \sum_{i=1}^2 n_i$ 는 i번째 군에 속할 확률, $m_i = \frac{1}{n_i} \sum_{k=1}^{n_i} x_{ik}$ 는 i번째 군 패턴벡터의 평균, $m = \sum_{i=1}^2 m_i P_i$ 는 모든 패턴벡터의 평균이다.

그리고, 콘크리트의 파괴에 가장 민감한 d개의 특징을 골라내기 위하여 순차 전방검색 알고리즘 (sequential forward search algorithm)¹⁶⁾을 적용하였다. 구체적으로 군간 분산을 최대화하면서 각 군내의 분산을 최소화하는 특징(feature)들을 고르기 위해 신호와 노이즈의 비를 나타내는 식(7)과 같은 계수를 계산하고

$$J = \frac{\text{trace}(S_b)}{\text{trace}(S_w)} \dots\dots\dots (7)$$

1차원 공간에서 모든 D개의 특징에 대해서 J가 계산되고, J를 최대화하는 하나의 특징(feature)이 골라진다. 그리고는 나머지 D-1개의 특징이 미리 선정된 특징과 결합되어서 각각의 조합에 관해 2차원 공간에서 J가 계산된다. J를 최대화하는 조합으로부터 두번째의 특징(feature)이 선정되며 이러한 과정은 원하는 d개의 특징들이 선정될 때까지 계속된다.

본 연구에서는 8계 AR모델의 8개의 파라미터 중에서 두 군 사이에 최적의 분리도를 가져오는 4개의 계수(feature)들을 순차 전방검색 알고리즘을 이용하여 선정하였다. 그리고, 이 계수들을 이용해서 콘크리트 재료의 상태를 패턴인식하기 위해 Fig. 1과 같은 4-4-1 역전파 신경회로망(back propagation neural network)을 이용하였다.

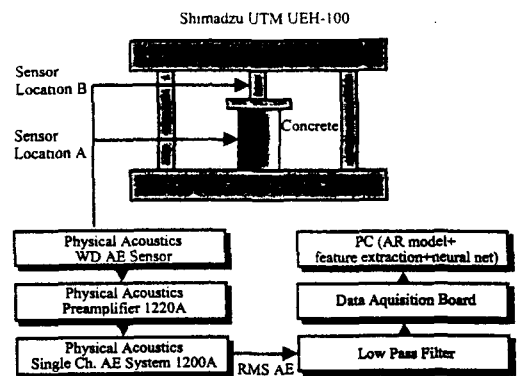


Fig. 1 Experimental setup

4. 실험

콘크리트 재료의 압축파괴에 의해 발생하는

AE를 측정하기 위한 시스템은 Fig.2와 같이 Shimadzu 만능시험기 UEH-100, AE센서와 계측장비, 그리고 데이터 취득장치를 포함한 PC로 구성된다. 구체적으로 실험 중 AE는 재료에 부착된 physical acoustics WD AE 센서에 의하여 측정된다. 그리고, 이 신호는 physical acoustics 1220A preamplifier와 physical acoustics 1200A single channel AE 시스템을 차례로 통과하여 증폭되고, 12-bit A/D 콘버터(NI PCI-MIO-16E-1 board)를 통하여 PC로 샘플링된다. 저장된 데이터는 C 언어와 Matlab으로 소프트웨어적으로 컴퓨터에 구현된 신호처리기와 신경회로망을 통하여 재료의 상태를 판단하게 된다.

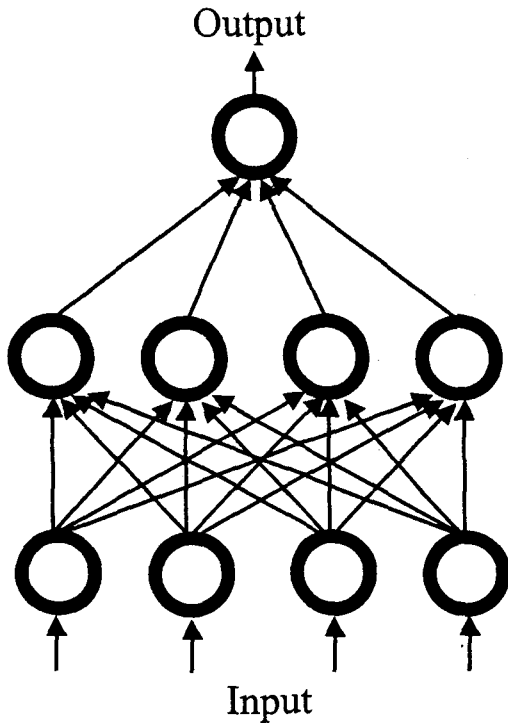


Fig.2 The 4-4-1 back propagation neural network used in this study

콘크리트 시편은 KSL5201과 ASTM C150 규정에 의하여 Table 1과 같이 시멘트, 물, 골재를 일정한 비율로 섞은 후 양생과정을 거친 것을 사용하였다. 또, 그 규격은 $\phi 100\text{mm} \times 1200\text{mm}$ 로

하였다.

Table 1 Composition of test specimens tested (mass of the constituents/ m^3)

1-2mm rolled sand ($\times 100 \text{ kg}$)	cement ($\times 100 \text{ kg}$)	water ($\times 100 \text{ kg}$)
12.52	7.16	3.00

AE센서는 Fig. 2에서와 같이 콘크리트 재료 위(location A)와 재료시험기 위(location B)에 설치하여 신호전달경로가 길어짐에 따른 신호의 열화를 측정할 수 있도록 하였으며, 실린더 형상의 콘크리트 재료 위에 설치한 경우에 대해서는 수신면에 잘 접촉될 수 있도록 시험재료의 측면을 연마하여 평면을 만들고 설치하였다. 또, 연마된 콘크리트 표면은 일반적으로 거칠기 때문에 epoxy 결합제를 이용하여 확실하게 접촉되도록 하였다.

또 콘크리트의 압축파괴에 의한 AE가 환경잡음으로부터 구분될 수 있는가를 평가하기 위하여 콘크리트 재료의 미끄러짐 실험이 행하여졌다. 미끄러짐 실험은 콘크리트 플레이트($40\text{cm} \times 20\text{cm}$) 위에 같은 재질의 콘크리트 블럭($10\text{cm} \times 10\text{cm}$)을 올려놓고 $5\text{cm}/\text{sec}$ 의 속도로 상대운동을 일으켜서 두 접촉면간의 미끄러짐에 의한 AE의 발생을 플레이트 위에 설치한 AE센서를 이용하여 측정하였다

5. 실험결과

제안된 콘크리트 파괴 감시시스템을 평가하기 위하여 $0.01\text{cm}/\text{sec}$ 의 가압속도로 압축파괴 실험이 행하여졌다. 압축파괴실험은 두차례 행하여졌는데, 첫번째 실험은 감시시스템을 학습시키기 위한 데이터를 수집하기 위한 것이었고, 두번째는 시스템의 평가를 위한 것이었다.

Fig. 3은 콘크리트 압축파괴시험에서 각각 센서를 콘크리트 재료 위와 만능시험기 위에 설치한 경우에 대해서 AE신호를 실험의 전 과정에 걸쳐서 기록한 것이다. Fig. 3의 (a)와 (b)를 비교하면 전달경로가 길어짐에 따라 신호의 강도는 약해지지만, 선택적 필터링은 별로 일어나지 않음을 알 수 있다. 콘크리트는 mortar에 비하여

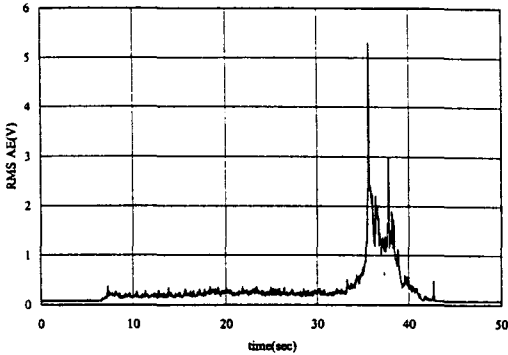


Fig. 3(a) RMS AE recorded during compression test (sensor location A)

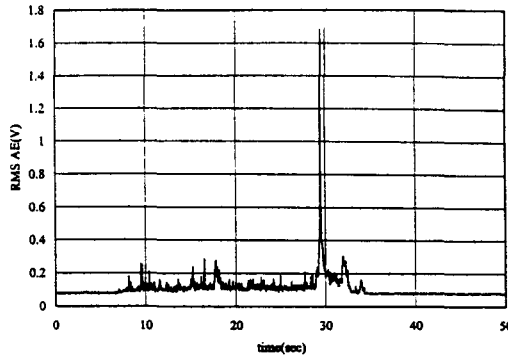


Fig. 3(b) RMS AE recorded during compression test (sensor location B)

재질의 구성분자가 크고 불균질하며, 재료의 이종특성이 있으므로 콘크리트에서 발생하는 AE는 mortar에서 발생하는 AE에 비해 불규칙적인 burst를 많이 포함한다. 따라서, 콘크리트에서 발생하는 AE는 높은 threshold에서 event 숫자가 증가하며, 주파수영역에서는 고주파성분이 증가할 것이다. Fig. 3(a)에서 AE를 살펴보면, 7초 경에 미소균열이 발생하고 진행해가면서 AE 에너지가 아주 완만하게 증가함을 볼 수 있다. 이 영역에서는 하중의 증가와 더불어 여러 취약 부위에 응력집중현상이 발생하고 부분적인 미소균열에 의한 AE event가 여러 곳에서 발생하며, 하중의 증가와 더불어 균열의 크기가 증가하고 이들 주변에 분포하는 기공들로 미소균열이 전파, 합체하여 점차적으로 전파한다. 따라서 RMS AE가 증가한다. 33초 이후의 영역에서는 최대

하중점 근처에서 급격하게 거시균열로 성장함에 따라 RMS AE가 현저하게 증가한다.

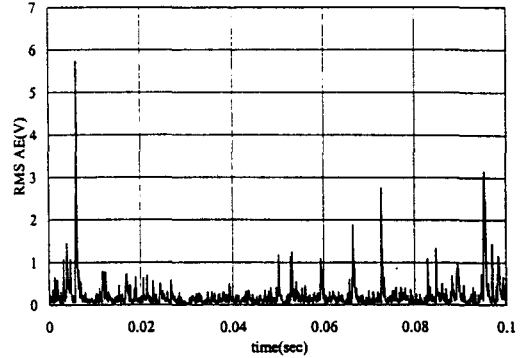


Fig. 4(a) RMS AE recorded during initiation of fracture (sensor location A)

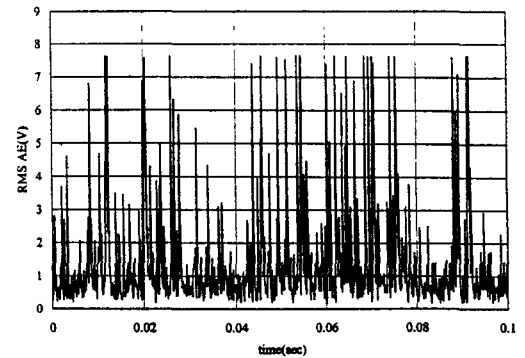


Fig. 4(b) RMS AE recorded during catastrophic fracture (sensor location A)

Fig. 4와 5는 콘크리트 압축파괴시험에서 미소균열들이 성장하는 과정과 파괴가 일어나는 시점에서 발생한 AE를 각각 시간영역에서 기록한 것이다. Fig. 4의 (a)와 (b)를 비교하여 보면, 미소균열이 성장하는 과정에 비해 파괴가 일어나는 시점에서 고주파 성분이 약간 증가한다.

Fig. 6은 콘크리트 압축파괴시험에서 재료에 걸리는 하중을 기록한 것이다. Fig. 3과 Fig. 6을 비교해 보면 하중곡선과 RMS AE곡선은 비슷한 경향을 보인다. 이는 AE에너지가 파괴의 에너지에 대략 비례하는 것을 의미한다.

콘크리트 재료의 압축파괴시험에서 발생한 RMS AE와 콘크리트 재료간의 미끄러짐 마찰

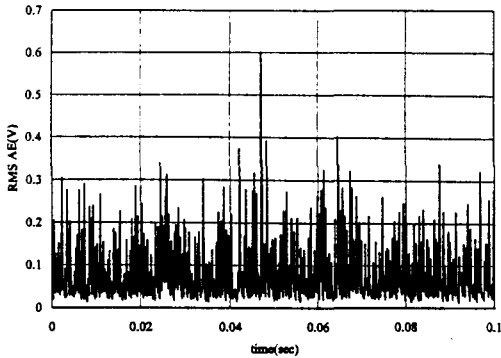


Fig. 5(a) RMS AE recorded during initiation of fracture (sensor location B)

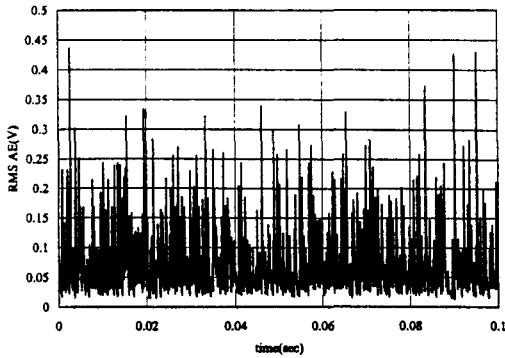


Fig. 5(b) RMS AE recorded during catastrophic fracture (sensor location B)

(미끄러짐 속도 5cm/sec)에 의한 RMS AE를 각각 시계열(time series) 모델링해서 AR계수를 구하고 순차 전방검색 알고리즘을 적용하여 특징공간에서 두 군 사이에 가장 좋은 분리도를 가져오는 계수들을 선정하였다. 그 결과, a2, a4, a6, a3의 순으로 우수한 분리도를 보였다. Table 2는 분리도가 우수한 순으로 1-8개의 특징을 선정했을 때, 특징공간에서 두 군 분리의 척도인 식(7)의 J가 어떻게 변해가는 지를 보여준다. 2개 이상을 선정해도 분리도가 별로 증가하지 않으므로 a2와 a4, 두 개의 계수를 신경회로망 패턴인식기의 입력으로 선정하였다. 2개 이상의 특징이 선정된 경우, 두 군 분리의 척도가 되는 J는 2.7이상이 되어서 두 군이 특징공간에서 비교적 잘 분리되는 것을 볼 수 있다.

Table 2 The separation of the 2 groups in the feature space of the proposed monitoring system

Number of Features	1	2	3	4	5	6	7	8
$J = \frac{\text{trace}(S_b)}{\text{trace}(S_w)}$	1.78	2.86	2.79	2.96	2.93	2.76	2.84	2.87

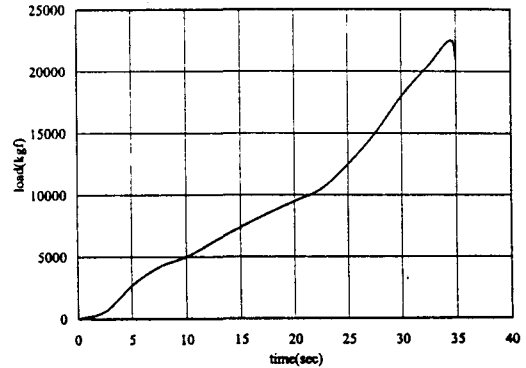


Fig. 6 Load recorded during compression test

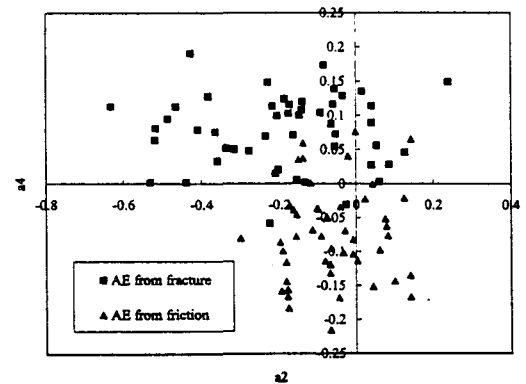


Fig. 7 Separation of the 2 groups in the feature space of AR coefficients

Fig. 7에서는 a2와 a4, 두개의 특징을 선정할 경우에 대해서 압축과피에 의한 RMS AE신호와 미끄러짐 마찰에 의한 RMS AE의 특징공간에서의 분리를 보여준다. 두 군은 분리되어 나타나기는 하나 그 경계가 확실하지 않고 중첩부분이 있다. 이 경우, 선형 패턴 인식기로는 만족할 만한 패턴인식의 성능을 기대하기 어렵고, 여러 특징의 정보를 종합할 수 있고 비선형 패

턴인식기의 역할을 할 수 있는 3층 구조 퍼셉트론형 신경망(4-4-1 네트워크)이 유효할 수 있다.

Fig.8은 두 군(압축 파괴시험에서 발생한 RMS AE신호와 미끄러짐 마찰에 의한 RMS AE)의 주파수영역별로 평균화된 주파수 스펙트럼을 보여준다. 압축 파괴시험에서 발생한 RMS AE신호가 상대적으로 낮은 주파수 성분이 많고 높은 주파수 성분이 적은 것을 알 수 있다.

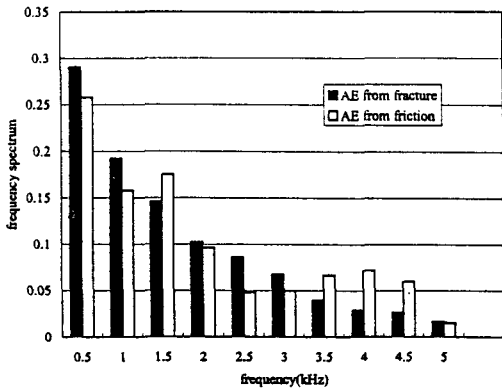


Fig. 8 Averaged frequency spectrum of RMS AE

Table 3은 신호처리방법, 패턴인식기로의 입력 갯수, 센서의 위치에 따른 정인식률의 차이를 보여준다. 신호처리 방법은 AR모델이 주파수 스펙트럼 방법에 비해서 우수한 정인식률을 보였으며, 패턴인식기로의 입력벡터의 크기는 2인 경우와 4인 경우의 성능상 큰 차이는 없었다. 센서의 위치는 콘크리트 위에 설치된 경우(A)가 만능시험기 위에 설치된 경우(B)에 비해서 우수한 성능을 보였다.

Table 3 The correct recognition rates of the proposed monitoring system

Signal Processing Method	8th Order AR Model				Band-averaged Frequency Spectrum			
	2		4		2		4	
Sensor Location	A	B	A	B	A	B	A	B
Correct Recognition Rate (×100%)	43/50	36/50	43/50	34/50	39/50	31/50	41/50	39/50

6. 결론

본 연구에서는 AE를 이용한 콘크리트 구조물 진단 및 감시 방법을 개발하고 그 성능을 실험을 통하여 평가하였다. 이로부터 다음과 같은 결론들을 도출할 수 있다.

- 1) 콘크리트의 압축파괴가 일어날 때, 환경잡음과 구별되는 특성을 지닌 고 에너지의 AE가 발생하므로 AE신호를 모니터링함으로써 콘크리트의 파괴를 감시할 수 있다.
- 2) 콘크리트의 압축파괴에 의한 RMS AE는 미소균열이 진행되는 동안 에너지가 점진적으로 증가하고 낮은 주파수 성분이 많으며, 급격한 파괴가 일어나면서 높은 에너지가 발생하고 이 때의 신호는 높은 주파수 성분을 많이 가지게 된다.
- 3) AE에너지는 파괴의 에너지에 대략 비례한다. 따라서, 파괴를 일으키는 힘이 증가하면 AE 에너지도 비례해서 증가한다.

본 연구의 결과는 AE신호가 감도가 좋고 가격이 비교적 저렴하므로 콘크리트 부재의 파괴 감시에 유용하게 이용될 수 있다는 가능성을 보여주고 있다. 그러나, AE는 환경조건에 민감하므로 보다 광범위한 조건하에서의 연구가 계속될 필요가 있다고 하겠다. 특히, 콘크리트의 파괴와 환경잡음에 의한 AE신호 특성의 차이를 현장에서의 실제적인 적용실험을 통해 좀 더 해석적으로 규명할 필요가 있다고 하겠다. 또한, 여러 개의 AE센서를 이용해서 손상의 위치, 방향 등을 결정하고, 또 파괴의 진행 정도 및 상황을 고도의 패턴인식을 통해 결정하는 문제까지 본 연구를 확장할 수 있다고 생각된다. 또한, 콘크리트 구조물의 열화와 파괴에 의해 발생하는 AE를 측정하는 실험은 비용이 높고 시간이 많이 걸리기 때문에 적은 실험횟수로 신뢰성 높은 데이터를 확보하는 것이 중요하므로 정밀도(accuracy), 반복성(repeatibility), 복제성(reproducibility) 안정성(stability)을 만족시키면서 신뢰성 있고 일관성 있는 결과를 얻을 수 있도록 능력공정능력을 최적화하는 실험조건 하에서 실험이 이루어져야 할 것이다.

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

참 고 문 헌

- 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) Rangwala, S.S., "Machining Process Characterization and Intelligent Tool Condition Monitoring using Acoustic Emission Signal Analysis", Ph.D Thesis, Dept. of Mech. Engg., University of California, Berkeley, CA, Nov. 1988.
- 12) Jones, R., "Identification and Autoregressive Spectrum Estimation", IEEE Trans. Autom. Control, Vol. AC-19, pp. 894~897, 1974.
- 13) Nuttall, A., "Multivariate Linear Predictive Spectral Analysis Employing Weighted Forward and Backward Averaging: A Generalization of Burg's Algorithm", Naval Underwater Systems Center, Technical Report 5501, New London, Conn., 1976.
- 14) Robinson, E., "Multichannel Time Series Analysis", 2nd. Ed., Goose Pond Press, Houston, TX, 1983.
- 15) Devijver, P.A. and Kittler, J., "Pattern Recognition: A Statistical Approach", Prentice-Hall, London, 1983.
- 16) Whitney, A., "A Direct Method of Non-parametric Measurement Selection", IEEE Transactions on Computers, Vol. 20, pp. 1100~1103, 1971.