

철근 콘크리트 보의 손상 진전에 의해 발생하는 음향방출 신호 특성

Acoustic Emission Behavior during Damage Development of Reinforced Concrete Beam

박휘립*, 윤동진*[†], 정중채*, 김동진*, 허용학*

Philip Park*, Dong-Jin Yoon*[†], Jung-Chae Jeong*, Dong-Jin Kim* and Yong-Hak Huh*

초 록 콘크리트 구조물의 건전성 평가에 음향방출 기술을 적용하기 위한 기초연구로서, 철근 콘크리트 보 시험편을 대상으로 음향방출실험을 실시하여 다양한 크기의 하중이 가해진 철근 콘크리트 보에서 손상이 진행되는 동안의 음향방출 발생특성을 규명하였다. 철근 콘크리트 보의 파괴거동을 음향방출의 관점에서 단계별로 분석함으로써 콘크리트에서의 음향방출 신호원이 미세균열, 휨 균열, 사인장균열과 균열면간의 마찰 등으로부터 발생함을 추정할 수 있었다. 또한 철근 콘크리트 보 시험편을 이용한 반복재하실험과 파괴실험을 통하여 다양한 하중상태에서의 음향방출 신호를 취득하였다. 신호의 분석은 손상의 진전이 이루어질 때 발생하는 이상신호와 손상진전이 없을 때 발생하는 정상신호의 차이를 규명하는데 주안점을 두었는데, 특히 지금까지는 잡음신호로 간주되었던 균열면간의 마찰에 의한 신호의 발생특성에 관심을 집중하였다. 그 결과 음향방출 신호발생율(AE hit rate), 하중증가시의 음향방출 신호발생빈도(primary AE peak)와 하중감소시의 음향방출 신호발생빈도(secondary AE peak), 그리고 센서 부착위치에 따른 신호 특성 등에서 정상신호와 이상신호간의 차이를 관찰할 수 있었다. 이러한 결과에 근거하는 실용적인 음향방출 적용을 위한 새로운 접근방법은 콘크리트 구조물의 손상과 성능저하를 평가하는데 유망한 새로운 방법으로 제시될 수 있다.

주요용어: 콘크리트 구조물, 음향방출, 신호발생율, 정상신호와 이상신호, 손상 진전, 건전성 평가

Abstract As a preliminary study for applying the acoustic emission(AE) technique to assess the integrity of concrete structures, AE behavior of a reinforced concrete beam under cyclic loads of various loading stage was examined by laboratory experiments. By analyzing failure behavior of a reinforced concrete beam in the AE point of view, it was presumed that major sources of AE signals in concrete were micro-crack initiation, development of flexural and diagonal tension crack, and the friction between crack surfaces. In addition, cyclic loading tests and failure test were carried out to obtain the AE responses under various loading conditions. The analysis of the signal patterns was aimed at discussing the differences between the normal signal and the abnormal signal, which represent the safe condition and the condition of developing damage, respectively. In this study, especially, the behavior of friction signals from crack surfaces, which were usually treated as noises, was considered as a typical pattern of the normal signal. As a result, significant differences between the normal and abnormal signal patterns were observed in the such parameters as the AE hit rate, magnitude of the primary or secondary AE peak, and AE response according to the sensor location. Based on the preliminary results, this new approach for practical AE application may provide a promising method for estimating the level of damage and distress in concrete structures.

Keywords: concrete structures, acoustic emission, hit rate, normal and abnormal signal pattern, damage development, assessing integrity

1. 서 론

콘크리트는 강재와 더불어 토목 구조물에 가장 널리 쓰이는 구조 재료이다. 콘크리트는 불균질하고 취성이 강한 재료이기 때문에 갑작스런 붕괴의 가능성이 있다. 따라서 비파괴적 감시기술을 이용하여 작용 하중에 대한 콘크리트 구조물의 상태를 판정하고 붕괴에 대한 경고를 줄 수 있다면 안전성 확보에 많은 도움이 될 것이다.

음향방출(Acoustic Emission, AE)은 구조물의 결합 탐지 및 손상상태의 평가에 있어서 효과적인 비파괴적 수단으로 평가되고 있다. 음향방출이란 재료의 국부적인 변형으로부터 기인한 탄성파의 방출 및 전파의 과정을 뜻하는 것으로 콘크리트에서는 미세균열의 발달 및 균열성장이 주요한 신호원으로 알려져 있다. AE를 이용한 비파괴적 기술의 가장 큰 매력은 표면에서 검출할 수 없는 재료 내부에서 발생한 손상을 검출할 수 있다는 점이다. 따라서 시멘트를 사용하는 재료의 파괴거동특성을 분석하거나 콘크리트 구조물의 상시감시에 AE기술을 응용하고자 하는 연구가 진행되어 왔다[1,2]. 지금까지 콘크리트에서 AE를 이용하려는 연구는 크게 균열진전 특성에 관련된 연구와 구조물의 감시를 위한 적용 연구의 두 가지로 구분되며, 후자의 경우 다수의 연구자들이 손상도 평가 및 구조 건전성 감시를 위해 AE의 적용방법을 제안한 바 있다[3-7].

본 연구는 콘크리트 구조물의 상시감시 및 안전진단에 음향방출 기술을 적용하기 위한 기초연구로서 음향방출의 관점에서 콘크리트 보의 파괴거동을 고찰하고, 콘크리트 보 시험체를 대상으로 다양한 하중단계별 반복재하시험 및 파괴시험을 통하여 콘크리트 보의 파손 단계별 음향방출 발생특성을 취득하였다. 이 결과로부터 콘크리트 보의 정상적인 거동하에서 발생하는 정상신호와 파손이 진행될 때 발생하는 이상신호를 구분할 수 있는 음향방출 거동특성을 제시하였다.

2. 철근 콘크리트 보의 파괴거동과 음향방출 발생원

콘크리트는 취성이 큰 재료이며, 압축강도는 큰 반면 인장에는 취약한 재료이다. 따라서 대부분의 콘크리트는 취성을 완화하고 인장력에 대한 저항성을 키우기 위하여 철근 또는 프리스트레스트 콘크리트

강선을 삽입하여 사용하고 있다. 콘크리트를 사용하는 구조부재는 크게 보와 기둥으로 분류할 수 있는데, 압축에 강한 콘크리트의 특성상 기둥보다는 보가 상대적으로 취약한 부재형식이라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 건전성 평가 및 안전성 감시를 위한 음향방출 기술의 적용 대상을 철근 콘크리트 보로 한정하였다.

휨 하중을 받는 철근 콘크리트 보의 파괴거동은 가해진 하중의 크기에 따라 5 단계로 구분될 수 있다[8]. 매우 작은 하중이 가해진 1 단계는 인장부 콘크리트가 파손되지 않은 상태로 어떠한 균열도 나타나지 않는다. 2 단계에서는 인장측 콘크리트의 인장응력이 파괴계수에 도달하기까지의 단계로 미세균열의 성장이 이루어지는데, 이때까지는 가해진 하중에 대하여 콘크리트의 전단면이 유효한 상태이다. 3 단계부터는 인장측 콘크리트의 인장응력이 파괴계수에 도달하여 지간 중앙부에서 인장균열이 성장하기 시작한다. 그에 따라 인장측 콘크리트는 인장강도를 상실하고 철근이 전 인장력에 저항하게 되며 중립축은 위로 이동하게 된다. 콘크리트의 미세균열 및 인장균열은 인장에 약한 콘크리트의 특성상 불가피한 현상으로 여기까지는 설계기준하중 이내의 정상적인 거동상태라 할 수 있다. 4 단계부터는 전단력과 휨모멘트의 복합작용으로 인해 양 단부에서 사인장 균열이 성장하게 되며 전단철근이 없는 보는 파괴에 이르게 된다. 전단철근이 있는 대부분의 보는 5 단계에 이르러 철근이 항복에 도달하여 급속한 변형을 증가와 함께 파괴에 이르게 된다.

이러한 철근 콘크리트 보의 파괴거동은 음향방출을 이용한 안전감시 방법을 결정하기 위한 이상거동의 발생시점 및 이를 감지하기 위한 센서위치의 결정에 중요한 정보를 제공한다. 철근 콘크리트 보의 이상거동이 시작되는 것은 4 단계부터라고 할 수 있으며 사인장 균열이 성장하게 되므로 이때부터는 콘크리트 보의 단부에서의 음향방출 발생이 중앙부에 비해 활발해질 것이라는 점을 추정할 수 있다. 따라서 콘크리트의 중앙부와 양 단부에 센서를 부착하고 그 신호를 서로 비교한다면 주어진 하중에 대한 콘크리트 보의 파손단계를 예측할 수 있을 것이다.

철근 콘크리트 보의 파괴거동을 감안하면 콘크리트에서의 음향방출 신호 발생원은 미세균열의 성장, 주균열의 성장 그리고 균열면의 마찰이라는 3가지로 구분할 수 있다. 하중을 받아 본 적이 없는 콘크리트

트에 설계기준하중 이하의 하중을 최초로 부가하게 되면 균열면간의 마찰신호와 함께 그 하중에 해당하는 미세균열과 휨 균열이 성장하게 되며 따라서 많은 수의 음향방출 신호가 발생할 것이다. 이후 동일한 하중이 반복적으로 가해져서 그 하중에 해당하는 미세균열이 충분히 성장하고 난 후에는 미세균열에 의한 음향방출 발생은 줄어들고 균열면의 마찰에서 비롯된 신호들이 주류를 이루게 될 것이다. 한편 과하중에 의해 사인장균열의 성장이 진행된다면 또다시 활발한 음향방출이 이루어 질 것이다. 이 때 미세균열과 마찰에 의한 신호를 정상신호라 간주할 수 있고 사인장균열의 성장에 의한 신호를 이상신호라 볼 수 있다.

금속 재료와 구별되는 콘크리트에서의 음향방출 특성은 하중이 가해지면 정상적인 거동하에서도 음향방출 신호가 발생한다는 점이며 따라서 건전성 평가에 적용하기 위해서는 이를 감안하여 이상신호와 구별되는 정상신호의 특성을 파악할 필요가 있다. 지금까지의 연구에서는 대부분 균열면간의 마찰신호를 잡음으로 간주해 왔기 때문에[9], 정상신호와 이상신호를 구분할 수 있는 기준이 없다. 따라서 본 연구에서는 콘크리트 균열면간의 마찰신호를 정상신호로 간주하고 실험을 통하여 철근 콘크리트 보의 정상상태와 이상상태에 발생하는 음향방출 신호를 취득하여 그 차이를 분석함으로써 정상과 비정상을 구별하는 기준을 세우고자 하였다.

3. 다양한 크기의 반복하중을 받는 콘크리트 보에서의 음향방출 발생 특성

본 연구에서는 콘크리트가 파괴에 이르기까지의 다양한 하중단계에서의 음향방출 발생 특성을 취득하기 위한 실험을 수행하였다. 하중단계별로 반복적으로 재하하는 이유는 실제 구조물의 경우 이미 충분한 횡수의 반복하중을 받아 왔기 때문에 미세균열은 이미 충분히 발달한 상태이며 그 때의 신호가 전형적인 정상신호로 간주될 수 있다고 판단하였기 때문이다. 본 실험에서는 특히 각 하중단계별로 미세균열이 발생하기 시작하는 초기의 신호와 반복하중이 가해져서 균열이 충분히 성장한 이후의 신호를 취득하여 정상상태에서의 신호특성을 분석하고 이를 파손이 진행될 때 발생하는 이상신호의 특성과 비교하여 그 차이점을 제시하는데 주안점을 두었다.

3.1. 실험 장비 및 시험편

Fig. 1은 본 실험을 위하여 제작된 단철근 직사각형 보 시험편의 형상과 제원 그리고 센서부착위치를 나타낸 것이다. 콘크리트는 23.5 MPa의 압축강도(f_{ck})를 갖도록 설계되었으며, 294.3 MPa의 인장강도(f_y)를 갖는 19 mm의 지름을 가진 하나의 철근(1D19)이 삽입되었다. 강도설계법의 설계개념에 따라 0.02392의 철근비(ρ)를 갖는 과소철근보로 제작하였다. 이에 따른 시험편의 극한 휨 모멘트(M_u)는 7.1 kN-m이며 Fig. 1과 같은 하중점을 갖는 4점 휨 시험에서의 설계극한하중(P_u)은 약 36 kN이다.

신호의 취득을 위하여 150 kHz 부근의 주파수를 갖는 신호만을 받아들이는 3개의 공진형 센서(R15)와 100~1,000 kHz 대역의 주파수를 갖는 신호들을 받아들이는 3개의 광대역 센서(WD)가 사용되었으며(Fig. 1) 센서로부터 취득된 신호는 pre-amplifier에 의해 40dB로 증폭되었다. 음향방출 신호의 처리 및 저장을 위하여 6 channel AE system (MISTRAS, PAC)이 사용되었으며 파형 취득을 위하여 2대의 4 channel digital oscilloscope(LeCroy)가 사용되었다(Fig. 2).

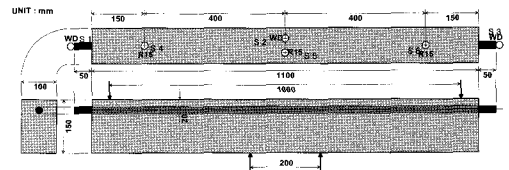


Fig. 1 Specimen and sensor locations

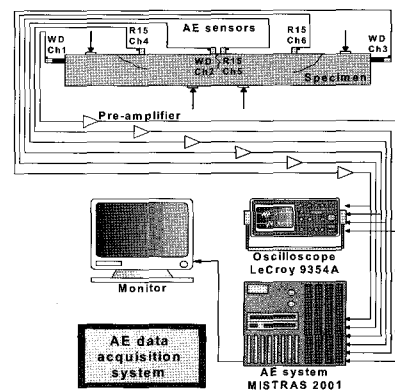


Fig. 2 AE data acquisition system

500 kN 용량의 hydraulic actuator(MTS)를 사용하여 하중을 가하였다. 시험기에 장착된 시험편의 사진을 Fig. 3에 나타내었다.

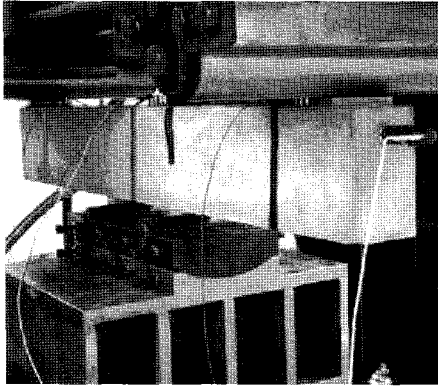


Fig. 3 Four-point bending test set-up

3.2. 실험 절차

실험은 예비실험, 하중단계별 반복재하실험, 파괴 실험의 3단계로 진행하였다. 예비실험은 반복재하 실험의 하중반복횟수를 결정하기 위한 것으로 극한 강도의 1~10% 범위의 하중을 가하여 미세균열 성장 후 신호발생율이 일정한 수준을 유지하여 안정 될 때까지 반복횟수를 측정하였다. 예비실험 결과 300 cycle의 하중 반복 후 안정된 신호발생이 이루어졌으며, 이를 근거로 하중의 반복횟수를 1,000회로 설정하였다.

하중단계별 반복재하실험은 시험편의 설계극한하중을 기준으로 Table 1과 같은 하중단계를 적용하여 실험을 수행하였다. 각 하중단계별로 1,000회의

반복재하가 이루어 졌는데, 반복하중의 처음과 마지막의 5 cycle은 Fig. 4의 (a)와 같이 최대하중이 가해진 상태에서 정지상태를 유지하였으며, 나머지는 Fig. 4의 (b)와 같이 0.5 Hz의 sine 파형을 부가하였다. 처음과 마지막의 5 cycle에 대하여 최대하중이 가해진 상태에서 정지상태를 유지한 이유는, 반복하중에 의한 미세균열 성장이 이루어지기 전과 후의 신호에 대하여 하중증가시 발생한 신호와 하중감소시 발생한 신호를 구분하기 위해서이다.

파괴실험은 변위제어 상태로 파괴가 발생할 때까지 0.5 mm 단위로 반복적으로 변위를 증가시키고, 최대하중점에서 300 초의 휴지기를 두어 Fig. 4의 (c)와 같은 파형으로 하중을 가하였다.

3.3. 실험결과 및 분석

Fig. 5는 극한하중 범위 이내에서 각각 소형, 중형, 대형 트럭을 의미하는 Table 1의 3~5 단계에서 반복하중이 가해지는 동안 보 중앙부에 부착된 센서(S5, R15)에서의 음향방출 신호발생율(AE Hit Rate : number of hits per loading cycle), 즉 하중 반복 횟수당 발생한 음향방출 신호의 수를 나타낸 것이다. 하중단계마다 반복하중이 가해지는 초반에는 상대적으로 많은 수의 신호가 발생하고 있는 반면 후반으로 가면서 신호발생율이 감소하다가 어느 정도에 이르러서는 일정하게 유지되어 신호발생율이 안정화되고 있음을 보여주고 있다. 이러한 현상은 하중이 가해진 초기에는 마찰신호와 함께 미세 균열 또는 휨 균열의 성장이 이루어지면서 활발한 음향방출이 이루어지다가 하중이 반복되면서 미세 균열 또는 휨 균열의 성장이 완료되어 균열면간의

Table 1 Loading scheme of whole experiment

loading step	applied load range (kN)	load vs. ultimate load (%)	Note
pre-test	0.36~3.6	1~10	To determine no. of loading cycles
step 1	0.72~7.2	2~20	Micro cracking
step 2	1.8~18.0	5~50	Flexural cracking
step 3	14.4~21.6	40~60	Dead load considered, simulated small vehicles
step 4	14.4~28.8	40~80	Dead load considered, simulated medium vehicles
step 5	14.4~36.0	40~100	Dead load considered, simulated large vehicles
failure test	displacement control 0→6mm, 0.5mm step		Overload applied to failure

마찰신호만이 발생하게 될 것이라는 예측에 부합하는 결과라 할 수 있다. 따라서 반복하중 적용 후반의 일정한 신호발생율은 정상신호의 특성 중 한가지라 할 수 있다.

한편 Fig. 5에서의 안정화된 신호발생율은 하중범위의 크기가 커짐에 따라 증가함을 확인할 수 있다. 이로부터 정상거동 하에서의 음향방출 신호발생율은 가해진 하중범위에 의해 정의되어야 한다는 것을 알 수 있다.

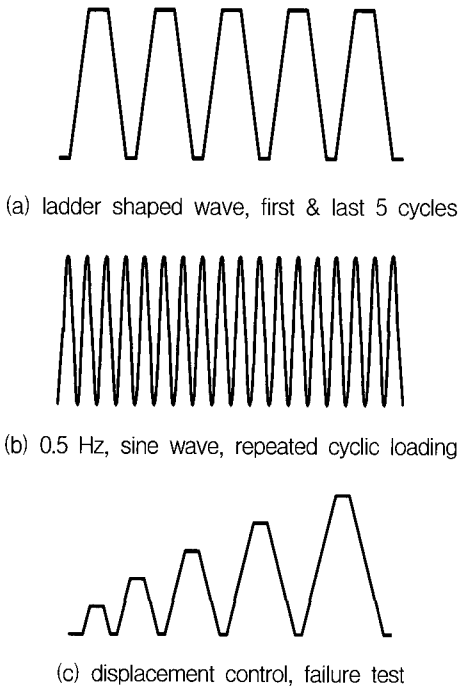


Fig. 4 Wave shapes of applied load

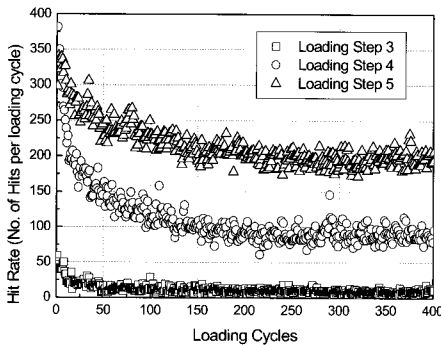


Fig. 5 Stabilization of AE hit rate during repeated cyclic loading

Fig. 6은 Table 1의 3~5 하중단계별로 최초 5회의 사다리꼴 하중(Fig. 4 (a))을 가했을 때 보 중앙부의 센서(S5, R15)로부터 취득한 신호 중 앞부분의 3회의 재하로부터 취득한 음향방출 신호(AE hits)를 나타낸 것이고, Fig. 7은 하중단계별로 1,000회의 반복재하에 의해 음향방출 신호 발생율이 안정화된 이후에 보 중앙부의 센서(S5, R15)로부터 취득한 마지막 3회의 사다리꼴 하중부가(Fig. 4 (a))에 의해 발생한 음향방출 신호를 나타낸 것이다. 세 가지 하중단계에서 모두 최초의 하중에 의한 신호발생빈도(Fig. 6)가 높게 나타나며 안정화된 이후(Fig. 7)에는 신호발생빈도가 상대적으로 낮게 나타나고 있다.

Fig. 6과 Fig. 7에서는 하중증가와 감소의 사이에 휴지기(holding time)를 둠으로써 하중증가시와 하중감소시 발생하는 음향방출 신호가 뚜렷이 구분되고 있다. 우선 Fig. 6과 Fig. 7에서는 하중감소시에도 가해진 하중의 크기에 따라 모두 일정한 정도의 음향방출 신호가 발생하고 있다. 하중감소시에는 균열성장이 이루어진다고 볼 수 없으므로 하중감소시의 신호발생은 열렸던 균열이 닫히면서 균열면간의 마찰에 의한 것으로 생각할 수 있다. Fig. 6과 Fig. 7에서 하중감소시의 신호는 하중범위가 작은 (a)에 비해 하중범위가 큰 (b)와 (c)에서 두드러지게 나타나는데, 이 현상은 하중증가시의 AE 신호 발생(primary AE peak)에 대해 하중감소시 다시 나타나는 AE 신호라는 점에서 secondary AE peak라 칭하고 있다. 처음 하중이 가해져 미세균열 또는 인장균열의 성장이 이루어지는 상태인 Fig. 6의 경우 primary AE peak가 secondary AE peak보다 현저히 높는데 반하여 반복재하에 의해 균열의 성장이 완료되어 신호발생빈도가 안정된 Fig. 7에서는 secondary AE peak가 primary AE peak와 거의 같거나 오히려 크게 나타나고 있는데, 이것은, secondary AE peak가 균열면간의 마찰에 의해 나타난다는 것을 입증하는 결과이다. 즉 균열성장이 완료되면 하중증가시에도 마찰신호만이 발생하게 되므로 primary AE peak와 secondary AE peak가 거의 같게 나타나는 것이다. 한편 Fig. 6과 Fig. 7의 secondary AE peak를 비교해 보면 Fig. 7의 신호가 현저히 적는데 이것은 마찰이 일어나는 균열면의 거칠은 정도가 하중반복에 의해 무디어지면서 마찰 신호 역시 안정화되었기 때문인 것으로 판단할 수 있다.

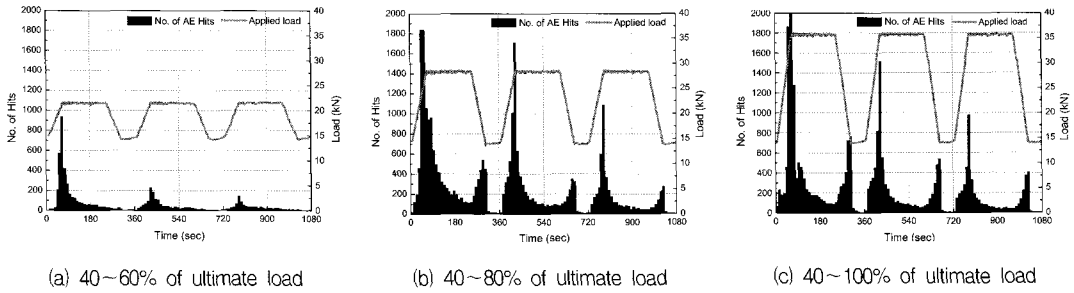


Fig. 6 AE hit rate of first 3 cycles

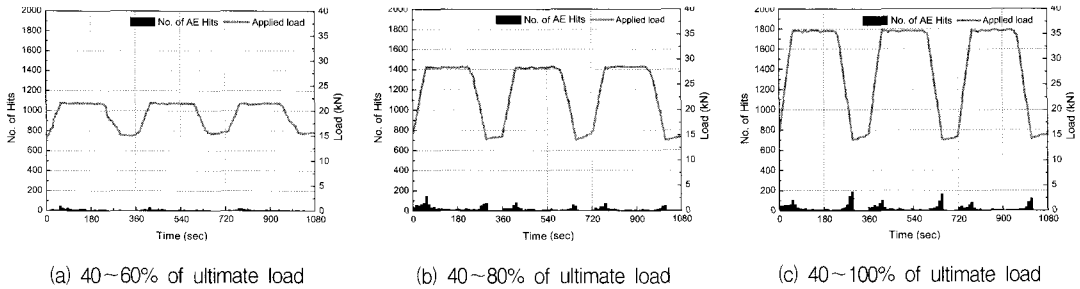


Fig. 7 AE hit rate of last 3 cycles

이러한 현상은 안전성 평가에 있어 중요한 기준으로 적용될 수 있다. 공용중인 콘크리트 구조물에서는 이미 일상적인 하중을 충분히 반복하여 받은 상태이므로 정상적인 상태에서는 Fig. 7과 같은 신호패턴을 나타낼 것이다. 그러나 만약 Fig. 6과 같은 신호패턴, 즉 primary AE peak가 secondary AE peak보다 현저히 크게 나타난다면 그것은 대상 구조물이 지금까지 경험해보지 못한 큰 하중을 받았거나 또는 파괴가 임박했음을 알리는 징후가 될 것이다. 따라서 Fig. 7과 같은 신호패턴을 정상신호의 한 전형으로, Fig. 6과 같은 신호패턴을 이상신호의 한 전형으로 간주할 수 있다.

Fig. 8은 변위제어에 의한 파괴시험을 통해 파괴가 발생된 보 단부에 부착된 센서(S4)로부터 취득된 음향방출 신호와 가해진 하중을 나타낸 것이고 Fig. 9는 파괴된 시험편의 사진이다. 파괴시험은 실제 구조물의 경우와 마찬가지로 극한하중 이내의 범위에서 다양한 크기의 하중이 반복제하된 시험편을 이용하였다. Fig. 8에서 4번째 cycle까지는 파괴시험에 앞서 가해진 최대 반복하중(극한하중) 이내의 하중이 가해졌고 5번째 cycle부터 극한하중을 초과하

는 하중이 가해졌다. 파괴직전에 발생한 최대하중은 대략 50 kN 정도이며 50 kN을 넘어서는 순간 시험편은 S4의 센서가 부착된 보의 단부에서 사인장균열에 의해 파괴되었다. 음향방출 신호는 4번째 cycle까지 Fig. 7과 같은 정상신호의 양상을 나타내다가 5번째 cycle부터 신호발생율의 급격한 증가가 나타나며 primary AE peak가 secondary AE peak보다 현저하게 커지는 것을 확인할 수 있다.

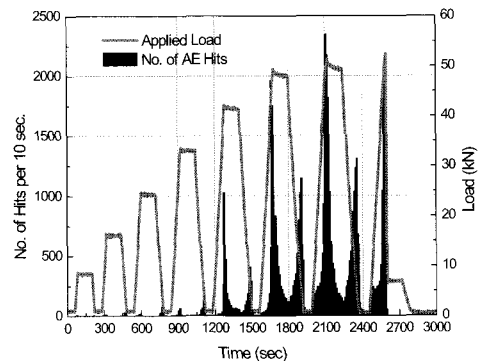


Fig. 8 AE hit rate at the part of failure during the fracture test

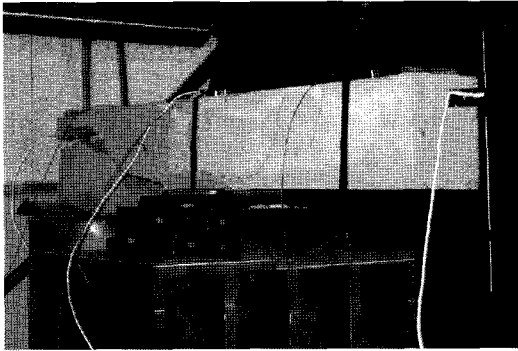
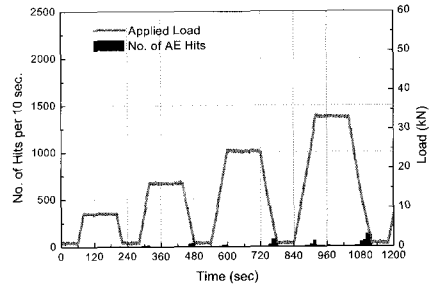
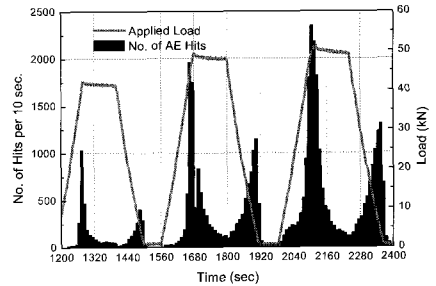


Fig. 9 Feature of specimen after failure

Fig. 10과 Fig. 11은 극한하중을 기준으로 (a)에는 극한하중 이하의 하중이 가해진 4번째 cycle까지의 하중과 신호발생빈도를, (b)에는 극한하중을 초과하는 하중이 가해진 5번째 cycle부터 파괴직전인 7번째 cycle까지의 하중과 신호발생빈도를 나타낸 것이다. Fig. 10은 파괴가 발생한 보 단부에 부착된 S4 센서로부터 취득된 신호를, Fig. 11은 보 중앙부에 부착된 S5 센서로부터 취득된 신호를 각각 표시하였다. 하중을 감안하면 Fig. 10과 Fig. 11의 (a)는 모두 정상신호가 발생되어야 하며 그에 따른 신호취득결과도 Fig. 7과 같이 신호발생빈도가 낮고 primary AE peak가 secondary AE peak보다 작거나 같은 상태를 나타내고 있다. 한편, Fig. 10과 Fig. 11을 비교하면, Fig. 10의 (b)는 primary AE peak가 secondary AE peak보다 현저히 크게 나타나는데 반해 Fig. 11의 (b)는 secondary AE peak가 오히려 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 반복재하실험의 결과와 부합하는데, 보 단부에서 파괴를 유발하는 균열의 성장이 이루어지고 있음을 드러내는 결과이다. 또한 하중의 증가에 따른 보 중앙에서의 신호발생빈도(Fig. 11)의 증가율에 비해 파괴가 발생한 보 단부에서의 신호발생빈도(Fig. 10)가 더욱 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 앞서 고찰한 철근콘크리트 보의 파괴거동으로부터 설명되어질 수 있다. 휨을 받는 콘크리트 보는 정상적인 거동일 경우 보의 중앙부에서 최대 휨 모멘트가 발생하게 되므로 보 단부에 비해 상대적으로 활발한 음향방출이 이루어진 것이며, 파괴에 임박하여서는 보 단부에서 사인장 균열이 발달하면서 급격한 신호발생빈도의 증가가 이루어진 것이다.

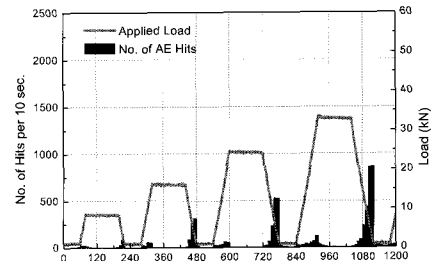


(a) under ultimate load

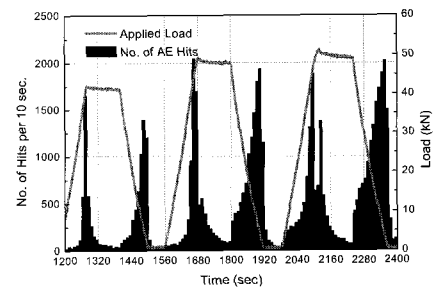


(b) just before the fracture

Fig. 10 AE hit rate at the beam end (S4 sensor - fractured part) during the fracture test



(a) under ultimate load



(b) just before the fracture

Fig. 11 AE hit rate at the beam center (S5 sensor) during the fracture test

따라서 보 중앙부와 단부의 신호발생률 추이를 비교한다면 파괴가 임박하였는지의 여부를 판정할 수 있을 것이다. 특히 음향방출기술의 콘크리트 구조물 적용에 있어서 고무적인 사실은 이상징후를 나타내는 위와 같은 음향방출 신호의 변화가 파괴에 이르기 전부터 나타난다는 점이다. 이는 음향방출 신호발생율을 감시함으로써 콘크리트 구조물의 붕괴를 예상할 수 있다는 것을 시사한다.

철근 콘크리트 보 시험편을 이용한 반복재하실험과 파괴시험 결과를 종합하면 철근 콘크리트 구조물에서 가해진 하중에 대한 건전성 유무를 판정하는데 유용한 세가지 음향방출 특성을 제시할 수 있다. 그것은 가해진 하중에 대한 신호발생률의 변화 추이, primary AE peak와 secondary AE peak의 비교 그리고 보 중앙부와 단부의 신호발생률의 변화이다. 이러한 특성을 고려할 때 Fig. 7 및 Fig. 10과 Fig. 11의 (a)를 정상신호의 전형으로, Fig. 6 및 Fig. 10과 Fig. 11의 (b)를 이상신호의 전형으로 볼 수 있다. 이러한 결과는 음향방출을 이용하는 콘크리트 구조물의 하중이력의 추정, 건전성 평가 및 손상감시를 통한 붕괴 예상 등의 가능성을 보여주고 있다.

4. 결론

- (1) 철근 콘크리트 보 시험편을 대상으로 다양한 하중단계에 대한 반복재하실험 및 파괴실험을 통하여 음향방출 신호를 취득하고, 음향방출 신호의 발생특성을 신호발생률 및 primary AE peak와 secondary AE peak의 비교라는 관점에서 분석하여 손상이 진행될 경우와 손상의 진행이 이루어지지 않을 경우를 구분할 수 있는 음향방출 신호발생 특성을 제시하였다.
- (2) 철근 콘크리트 보의 단계별 파괴거동을 음향방출의 관점에서 분석하여 콘크리트에서의 음향방출 신호 발생원을 미세균열의 성장, 주균열의 성장 그리고 균열면의 마찰이라는 3가지로 구분하였으며 이를 근거로 손상이 진행될 때 나타나는 음향방출 신호의 양상을 제시하였다.
- (3) 콘크리트 보에서 극한하중 이하의 일상적인 사용하중이 반복적으로 가해지면 하중수준에 따라 일정한 신호발생률이 유지되는 반면 한번도 가해지지 않은 큰 하중이 가해져서 균열 성장이 진행된다면 신호발생률이 급격히 증가함을 확인하였다.
- (4) 균열성장이 이루어지지 않은 상태에서는 하중증가시와 하중감소시 신호발생빈도가 유사하거나 하중감소시의 신호발생빈도가 오히려 크게 나타나는 반면 균열성장이 이루어지면 하중증가시의 신호발생빈도가 현저하게 커짐을 확인하였다.
- (5) 철근콘크리트 보가 파괴에 임박하면 보 단부에서의 음향방출이 매우 활발해지며 신호의 양상도 전형적인 이상신호의 양상이 나타남을 알 수 있었으며 이를 보 중앙부에서의 음향방출 신호와 비교함으로써 파괴를 예측할 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

- [1] C. Ouyang, E. Landis, and S. P. Shah, "Damage assessment in concrete using quantitative acoustic emission", *J. of Engineering Mechanics*, Vol. 117, No. 11, pp. 2681-2698, (1991)
- [2] S. P. Shah, S. E. Swartz, and C. Ouyang, *Fracture Mechanics of Concrete: Application of Fracture Mechanics to Concrete, Rock and Other Quasi-Brittle Materials*, John Wiley & Sons Inc., NY, (1995)
- [3] K. Matsuyama, T. Fujiwara, A. Ishibashi, and M. Ohtsu, "Field Application of Acoustic Emission for Diagnosis of Structural Deterioration of Concrete", *J. of Acoustic Emission*, Vol. 11, No. 4, pp. S65-S73, (1993)
- [4] S. Yuyama, T. Okamoto, and S. Nagataki, "Acoustic Emission Evaluation of Structural Integrity in Repaired Reinforced Concrete Beams", *Material Evaluation*, Jan. pp. 86-90, (1994)
- [5] S. W. Hearn and C. K. Shield, "Acoustic Emission Monitoring as a Nondestructive Testing Technique in Reinforced Concrete", *ACI Materials Journal*, Nov.-Dec., pp. 510-519, (1997)

- [6] D. J. Yoon, W. J. Weiss, and S. P. Shah, "Assessing damage in Corroded Reinforced Concrete Using Acoustic Emission", ASCE J. of Engineering Mechanics, Vol. 126, No. 3, pp. 273-283, (2000)
- [7] D. J. Yoon, W. J. Weiss, and S. P. Shah, "Detecting the Extent of Corrosion with Acoustic Emission" , Transportation Research Record, No. 1698, pp. 54-60, (2000)
- [8] H. N. Cho and J. S. Sim, Structural Design of Reinforced Concrete, Gumi Press, pp.57-65, (1991)
- [9] E. G. Nesvijski, "Failure Forecast and the Acoustic Emission Silence Effect in Concrete", Proc. of ASNT Spring Meeting, pp. 108-110, (1996)