

철근 콘크리트 슬래브 구조 손상 평가를 위한 음향방출 신호분석

Acoustic Emission Signal Analysis for Damage Assessment of the Reinforced Concrete Slab Structures

김정희*, 한병희*, 서대철*, 윤동진*†

Jeong-Hee Kim*, Byeong-Hee Han*, Dae-Cheol Seo* and Dong-Jin Yoon*†

초 록 공용중인 콘크리트 구조물의 건전성 평가를 위해서는 하중 증가에 따른 내부의 변형특성 및 손상을 예측하고 비파괴적으로 상시 모니터링 할 필요가 있다. 본 연구에서는 철근 콘크리트 슬래브 시편을 대상으로 단계별 하중 재하(load, holding, unloading)에 따른 음향방출 실험을 실시하였으며 휨 시험하의 인장균열, 전단균열 및 철근 콘크리트의 부착 상태, 반복하중에 의한 AE 신호의 특징과 신호 발생 양상을 분석하였다. 또한 음향방출법(acoustic emission)에 있어 손상 정도를 유추할 수 있는 대표적 인자인 Felicity ratio를 분석하여 콘크리트 구조물의 상시감시 및 안전진단에 음향방출 기술을 적용하기 위한 분석기법을 제시하고자 한다.

주요용어: 철근콘크리트 슬래브, 음향방출, 단계별 하중 재하, 펠리시티 효과, 손상 평가

Abstract The acoustic emission(AE) behavior of reinforced concrete slab under flexural loading was investigated to assess the integrity. This study was aimed at identifying the characteristics of AE response associated with damage development. By applying cyclic loading in various load steps, it was able to differentiate each AE source such as distributed micro crack initiation, friction, flexural crack and localized diagonal tension crack. The secondary peak and the change of AE hit rate gave valuable criteria for assessment. From the analysis of the Felicity ratio, furthermore, it was shown that this values can be used for evaluating the degree of concrete damage. Based on the experimental results, this approach for practical AE application may provide a promising method for estimating the level of damage and distress in concrete structures.

Keywords: Reinforced Concrete Slab, Acoustic Emission, Stepwise Cyclic Load, Felicity Effect, Damage Assessment

1. 서론

최근 콘크리트 구조물이 노후화되고 설계 당시 예측하지 못했던 과하중을 반복하여 받게 되는 경우가 발생하면서 콘크리트 내부에 균열이 생기고 철근이 부식되어 내하력을 저하시키는 문제점이 야

기되고 있다. 특히 공용중인 콘크리트 구조물에 진전하는 균열이 발생할 경우, 최악의 상황에서는 급작스런 붕괴의 위험으로 이어질 수 있어 콘크리트 구조물의 안전성 확보 및 내구성 향상을 위한 감시 기술에 대한 관심이 증대되고 있다.

한편, 콘크리트는 다상(multi-phase)의 재료로 이

루어진 복합재료의 일종으로서 quasi-brittle의 재료적 특성을 가지고 있기 때문에 실제 복잡한 미시적 파괴특성을 나타낸다. 따라서 콘크리트 구조물의 안전성 확보를 위해서는 하중의 증가에 따른 내부의 변형특성 및 미시적 파손을 파악하여야 할 필요가 있으며 실구조물에 있어서 이들의 특성을 고려하여 비파괴적으로 상시 모니터링 할 필요가 있다.

음향방출(acoustic emission) 기술은 재료나 구조물의 파괴시 발생하는 탄성파를 검출하여 그 이상 유무를 판단하는 비파괴 검사법 중 하나로 다른 비파괴 검사법에 비해 상대적으로 넓은 영역의 검사가 가능하고 공용상태에서도 실시간 계측이 가능하다는 장점이 있어 결함탐지에 적합한 비파괴 기법으로 관심이 모아지고 있다[1].

최근 수년간 국내·외의 많은 연구진들에 의해 음향방출 기술이 콘크리트 재료나 구조물에 적용되어 건전성을 평가하고 손상을 검출하는데 초점이 맞춰져 왔다. 예를 들어 국외의 경우 90년대 중반부터 Yuyama 등이 철근 콘크리트 보를 대상으로 휨 실험을 수행하여 인장균열, 전단균열 및 철근 탈락시의 음향방출 신호를 취득하였고 이후 구조안전성 평가에 음향방출 기술을 적용하기 위하여 반복하중을 인가하는 철근 콘크리트 보 실험을 수행하여 구조안전성 평가기법을 제안하였다[2,3]. 또한 Hearn and Shield는 철근 콘크리트 보와 프리스트레스트 콘크리트 보에 대한 음향방출 실험을 수행하여 휨 균열 성장에 의한 음향방출 신호를 취득하였다[4]. 2000년 초반부터 Yoon 등은 철근이 부식된 콘크리트에서의 음향방출 특성에 대한 연구를 수행하였으며 Ohtsu and Watanabe 등은 음향방출을 이용한 콘크리트의 정량적인 손상평가를 위한 연구를 수행하였다. 이후 Shigeishi 등이 교량 현장에서의 장기 감시에 음향방출을 적용하기 위한 연구를 수행하여 파괴의 징후를 예견하는데 있어 음향방출이 적용될 수 있는 가능성을 보여주었다[5-7].

반면, 국내에서의 음향방출 기술은 콘크리트 재료에 대한 균열 진전 및 특성 연구 위주로 진행되어 왔다[8-9]. 최근에 본 연구진은 콘크리트 구조물의 건전성 평가에 음향방출 기술을 적용하기 위한 기초를 마련하고자 철근 콘크리트 보를 대상으로 음향방출 발생특성을 규명하였다[10-12]. 그러나 아직까지 체계적인 진단기준 및 시험기법의 정립이

만족할 만한 수준에 미치지 않은 상태이며 손상의 발생 유무를 모니터링하고, 이를 정량적으로 측정할 수 있는 기술 개발이 필요한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 기존에 콘크리트 보 형식으로 한정되었던 대상범위를 콘크리트 교량이나 빌딩, 주차장과 같은 슬래브 구조로 확대하여 음향방출 실험을 수행하였다. 휨 시험하의 인장균열, 전단균열 및 철근 콘크리트의 부착상태, 반복하중에 따른 영향을 고려하여 AE 신호의 특징과 신호발생 양상을 분석하여 콘크리트 구조물의 상시감시 및 안전진단에 음향방출 기술을 적용하기 위한 분석 기법을 제시하고자 한다.

2. 실험 개요

2.1. 시 편

Table 1은 본 실험을 위하여 제작된 철근 콘크리트 슬래브의 재료적 특성 및 재원을 나타낸 것으로 극한 강도법에 따른 시편의 휨강도는 $74.7 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 이며 그에 따른 극한 하중은 111 kN 이다. Fig. 1의 (a)는 시편의 형상 및 치수와 3점 굽힘 시험을 실시하기 위한 하중 재하 위치를 표시하였으며, (b)에서는 철근의 위치 및 배근 상태를 나타내었다. 시편은 길이 3100 mm , 높이 200 mm , 너비 800 mm 로 설계되었으며 지름이 13 mm 인 철근 11개를 인장측과 압축측에 각각 배치하여 전체적으로 철근비가 1.74%가 되도록 배근하였으며 피복 두께는 50 mm 로 설정하였다.

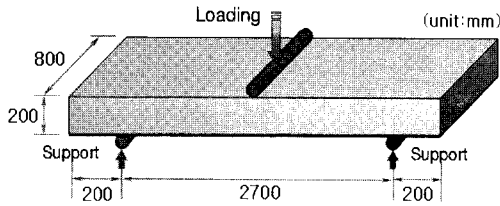
Fig. 2는 시편에 부착된 센서의 위치와 하중재하 위치를 측면에서 나타낸 것으로 강재에 비해 상대적으로 감쇠가 심한 콘크리트의 재료적 특성을 고려하여 전파거리가 긴 낮은 주파수 대역의 센서인 R6와 R15센서를 슬래브의 중앙에 부착하고 이를 중심으로 1 m 간격으로 좌우에 R6(S1,S2,S3) 센서를 각각 1 개씩 부착하였다.

중앙부에 R15(S4) 센서의 추가적인 부착은 주파수의 특성을 분석하기 위한 것으로 본 연구에서는 언급하지 않았다. Fig. 3의 (a)는 실제 시편의 하부모습을 나타낸 사진으로 센서가 부착될 위치에 철판을 부착시킨 모습이며 (b)는 부착시킨 철판에 센서를 고정시키기 위한 마그네틱 홀더의 부착 모습을 나타낸 것이다.

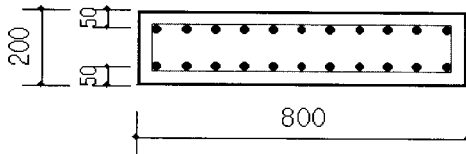
Table 1 Specification of the reinforced concrete slab

	Properties	Value
Concrete	W:C:S:G	0.55:1:3.17:3.51
	Curing age	33 days
	Compressive strength	25.2 MPa
Reinforced bars	Yield strength	400 MPa
	Tensile re-bar area	13.94 cm ²
	Compressive re-bar area	13.94 cm ²
	Total re-bar ratio	1.74%

The mix-proportion is expressed with the weight ratio of water, cement, sand, gravel in sequence(W:C:S:G). The maximum size of aggregate is 25 mm and the mixed AE water reducer is 1.18% of the cement weight.



(a) 3-point bending test



(b) Re-bar arrangement

Fig. 1 Concrete slab specimen

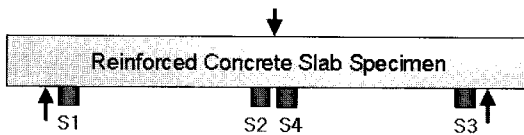
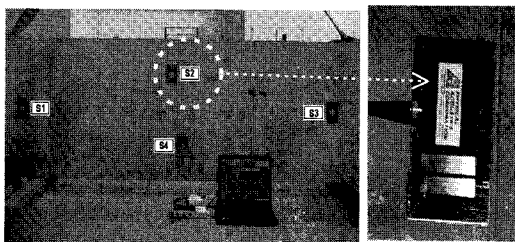


Fig. 2 Sensor location



(a) (b)

Fig. 3 Sensor location & magnetic holder

2.2. 음향방출 실험장치

신호의 처리 및 저장에 사용된 음향방출 장비를 Fig. 4에 나타내었다. PAC사의 DiSP with AE 범용 AE 장비를 사용하였으며 음향방출센서는 프리 앰프가 내장되어 있는 PAC사의 공진형 센서 R6I (60 kHz resonant frequency)를 사용하였다. 센서의 감도 및 장비 확인을 위하여 pencil lead break를 모의 신호원으로 사용하였으며 신호취득을 위한 문턱값(threshold)은 background noise level을 고려하여 45 dB로 설정하였다. 또한 과형 취득 및 분석을 위해 4 channel digital oscilloscope (LeCroy 9354A)를 사용하였다.

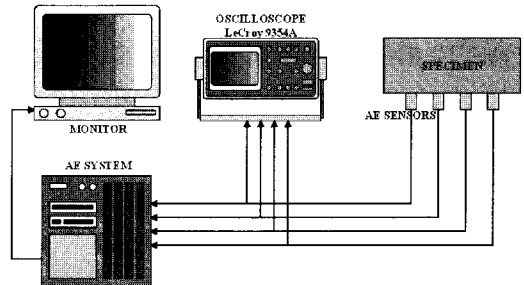


Fig. 4 AE measurement system

2.3. 하중 재하 방법

본 실험에서는 500 kN 용량의 MTS를 사용하여 Fig. 5와 같이 3점 굽힘 시험을 실시하였다. 또한 콘크리트 슬래브 시편의 손상 범위 내에서 음향방출 실험을 실시하기 위하여 시편에 두 차례에 걸친 선행하중(pre-loading)을 가하여 균열을 유도하고 그 이후에 세 번째 단계별 하중을 재하하면서 본 실험을 실시하였다. 3차 실험은 하중제어를 통한 단계별 하중 재하 방식으로 Fig. 6과 같이 9 단계에 걸쳐 최대 110 kN의 하중을 재하한 후 이전과 크기가 동일한 하중인 80 kN, 60 kN, 40 kN을 다시 한 번 재하하는 반복하중 단계까지 분석하였다. 하중절차는 각 단계별로 하중인가-하중유지-하중제거/loading-holding-unloading)의 세 단계로 하중인가 속도와 하중 제거 속도는 20 kN/min 이었고, 하중 유지 시간은 1 min으로 설정하였다. 또한 콘크리트 시편 표면의 3점 굽힘 지점부에 rubber plate를 미리 접촉시킴으로써 지그와 시편의 접촉시 발생하는 마찰 잡음을 최대한 제거하도록 하였

으며 시편의 하부에 부착한 strain gauge를 이용하여 동시에 strain을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. AE Hit 수에 따른 음향방출 특성분석

Fig. 7은 철근 콘크리트 슬래브의 음향방출 실험을 통해 AE 신호의 특징과 신호발생 양상을 분석하기 위해 단계별 하중을 받는 동안 슬래브의 중앙에서 발생하는 AE hit수를 하중 변화와 함께 도시한 그림이다. Step-3까지는 하중을 인가할 때 나타나는 AE 신호 발생(primary AE peak : 인가진폭)이 하중을 제거할 때 나타나는 AE 신호 발생(secondary AE peak : 제거진폭)보다 많았으나 step-4부터는 하중 제거시 나타나는 제거진폭이 인가진폭보다 점점 많아지는 것을 알 수 있었다. 이처럼 실험 초기부터 제거진폭이 많이 나타나는 현상은 이미 시편이 어느 정도의 손상을 받음으로써 건전한 시편에서 초기 하중 재하에 따라 발생하는 미세균열 또는 인장균열의 성장이 완료되어 상대적

으로 인가진폭의 발생빈도가 적게 나타난 것으로 사료된다. 또한 실험 후반부로 갈수록 하중 제거시 AE 신호가 현저히 증가하는 것은 단계별 하중 재하에 따른 새로운 균열의 생성으로 인한 AE 신호이기 보다는 이미 발생한 균열 면간의 마찰 또는 철근과 콘크리트 간의 계면 마찰에 의한 AE 신호로 추정된다.

한편, 100 kN의 하중을 재하한 step-10과 110 kN의 하중을 재하한 step-11에서 하중 인가시 발생하는 AE 신호가 상대적으로 급격히 증가한 것을 볼 수 있었다. 이러한 결과는 본 시편이 이미 두 차례에 걸친 선행 하중 과정을 통해 1차에는 최대 30 kN의 하중을, 2차에서는 최대 90 kN의 하중이 가해진 이후에 본 실험의 step-10과 step-11에서 각각 100 kN, 110 kN의 하중이 재하되어 한 번도 가해지지 않은 큰 하중이 가해짐으로써 새로운 균열 성장이 진행되면서 신호 발생률이 급격히 증가한 것을 확인할 수 있었다.

이처럼 철근 콘크리트 슬래브 구조에서의 하중 재하에 따른 음향방출 신호의 특성 및 발생 양상은

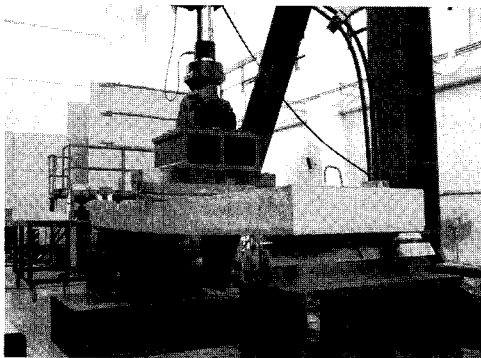


Fig. 5 3-point bending test

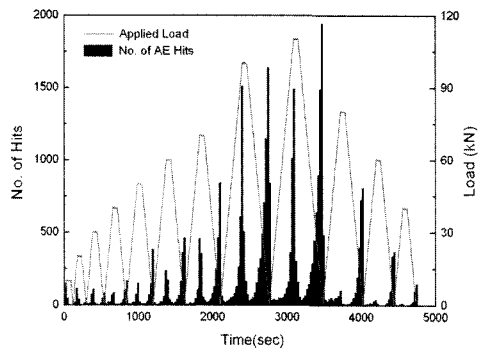


Fig. 7 AE hit rate at the slab center(CH.2 sensor) during the fracture test

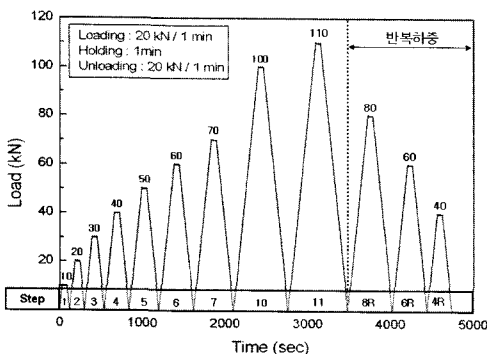


Fig. 6 Load profiles for the cyclic load test

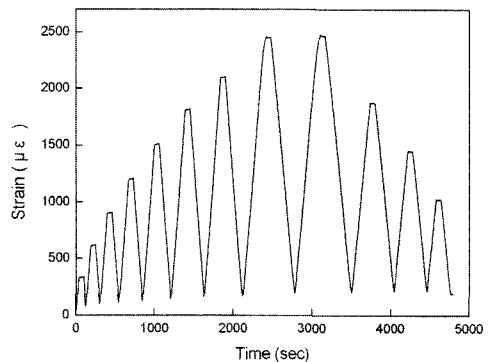


Fig. 8 Strain measurement for each step

이전에 보 형식에서 발표된 결과와 거의 일치되고 있음을 알 수 있었다[10-12].

Fig. 8은 실험을 실시하는 동안 시편에 strain gauge를 부착하여 얻은 결과를 나타낸 것으로 실제 재하한 하중상태와 시편 내부에서 거동하는 변형상태가 거의 일치하고 있음을 알 수 있었다. 이는 교량이나 도로와 같은 실제 현장에서 하중의 재하상태나 크기를 정확하게 알 수 없는 경우에 strain data를 분석함으로써 부재의 하중 이력을 가장 잘 반영해 줄 수 있는 매우 중요한 근거가 될 수 있으며, 이를 이용하여 압축에 의한 AE 신호를 분리하는데 매우 효과적으로 사용할 수 있게 된다.

Fig. 9는 슬래브 구조에서의 음향방출 특성을 분석하기 위한 단계별 하중 재하 시험의 대표적인 세

단계(step-1, 3, 5)를 시간에 따른 AE hit수와 하중 변화로 나타낸 그림이다. 10 kN의 하중을 재하한 step-1은 하중 인가시 AE 신호가 많이 나타났으며 30 kN의 하중을 재하한 step-3에서는 하중 인가시와 하중 제거시에 비슷한 AE 신호발생을 보였다. 50 kN의 하중을 재하한 step-5에서는 하중 인가시보다 하중 제거시에 AE 신호가 훨씬 많이 나타나고 있음을 볼 수 있었다. 즉 하중이력의 증가, 다시 말해 손상의 정도에 따라 하중 인가시 보다 제거시에 더 많은 AE가 발생하는 경향을 잘 나타내고 있었다. 이러한 경향은 보 형식에서 나타나는 AE 신호 발생 양상 및 특징과 거의 유사한 결과를 보여주고 있으며 철근 콘크리트 구조에서 나타나는 전형적인 신호 패턴이라 할 수 있다[5, 10-12].

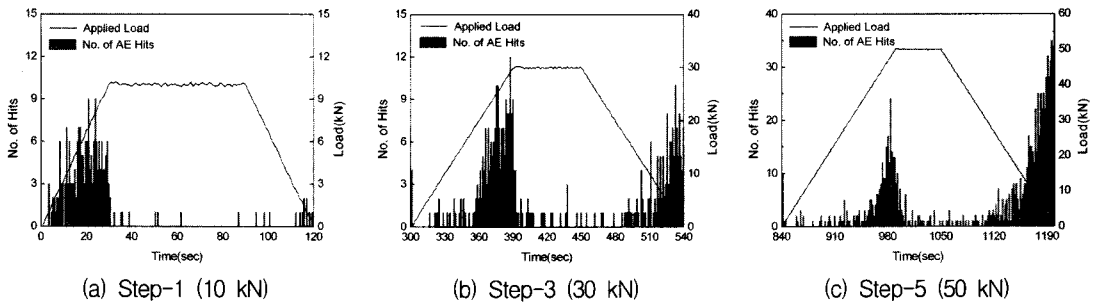


Fig. 9 AE hit occurrence depending each step

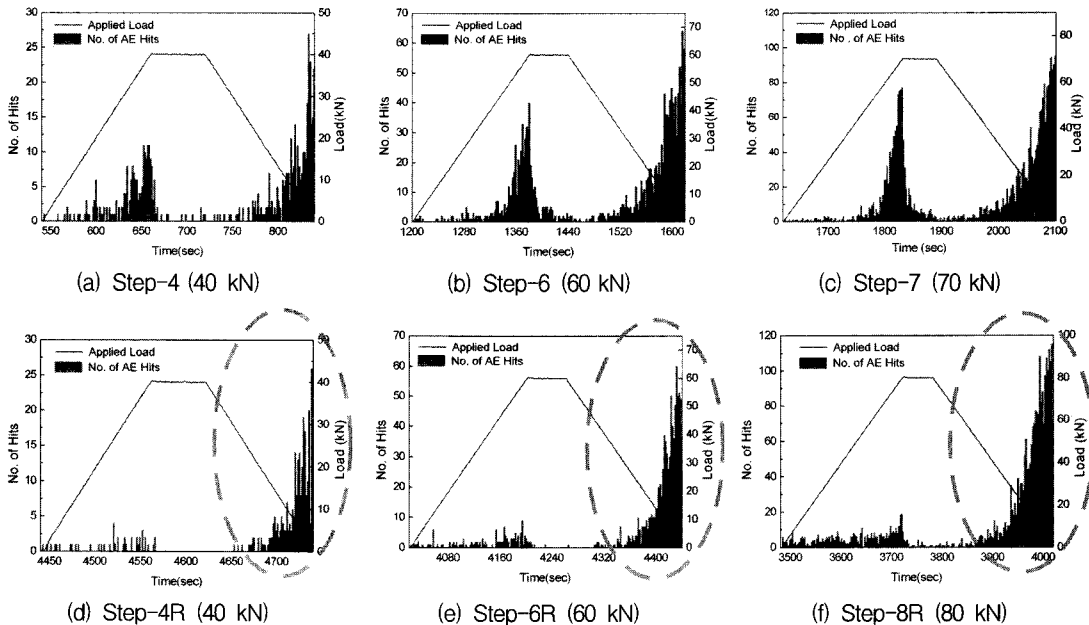


Fig. 10 Comparison of AE hit occurrence depending reloading

3.2. 반복하중에 의한 음향방출 특성 분석

Fig. 10 (a)~(c)는 3차 실험에서 처음 40, 60, 70 kN 세 단계에 대한 AE 발생과 하중 변화를 나타낸 것이며, Fig. 10 (d)~(f)는 이전 최고 하중인 110 kN보다 낮은 하중 조건에서 다시 실시한 반복하중 단계의 AE 발생과 하중을 나타낸 결과이다. 여기서 주목할 만한 사실은 단계별 하중 재하시에는 전형적인 인가진폭, 제거진폭의 신호 발생 양상을 나타내고 있지만 반복하중의 경우, 하중 인가시 나타나는 인가진폭이 상대적으로 줄어들었으나 하중 제거시 발생하는 제거진폭은 여전히 많이 발생하고 있음을 알 수 있었다. 즉, 인가진폭은 이전에 받은 하중의 영향으로 줄어들었지만 손상

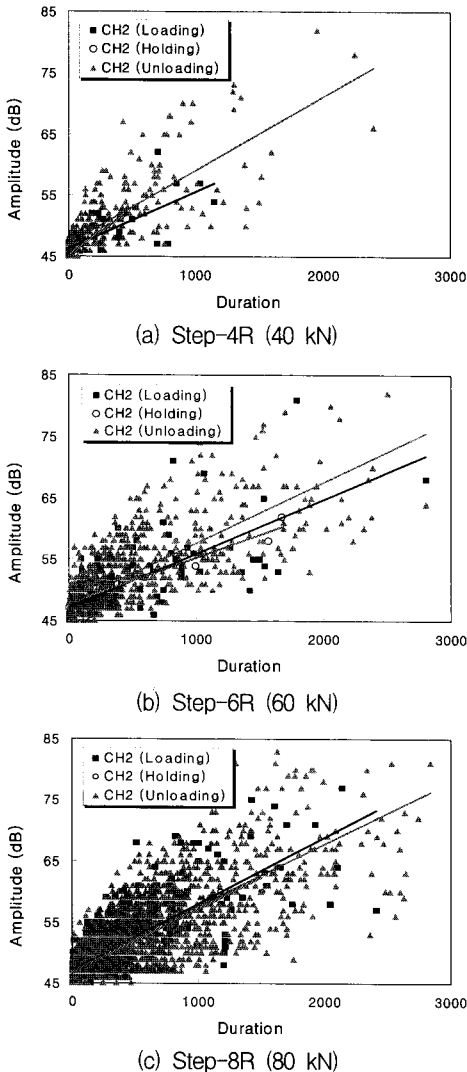


Fig. 11 Cross plot of duration vs. amplitude

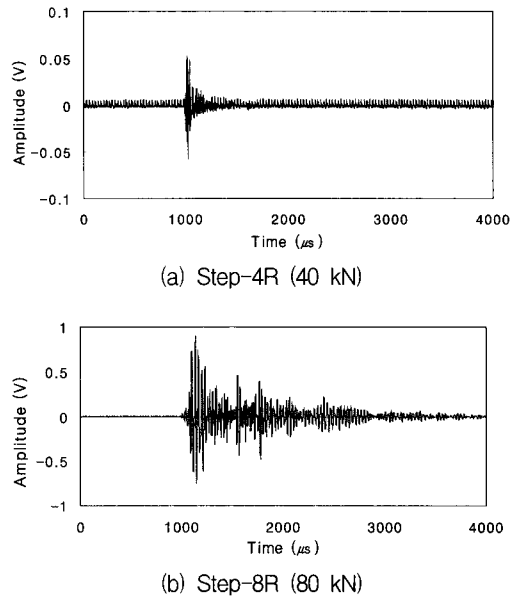


Fig. 12 Typical AE waveform

의 지표가 되는 제거진폭의 특성은 여전히 잘 나타나고 있었다.

Fig. 11 (a)~(c)는 반복하중 단계의 step-4R, 6R, 8R에서 발생한 AE 신호를 신호 길이(duration)와 진폭(amplitude)으로 나타낸 상관그래프(cross plot)이다. 낮은 하중 조건일수록 작은 진폭과 짧은 신호 길이를 가진 낮은 에너지의 AE 신호가 주를 이루었으며(Fig. 11, 12(a)), 높은 하중 조건일수록 큰 진폭과 긴 신호 길이를 가진 높은 에너지의 AE 신호가 상대적으로 많이 발생하는 경향을 보였다(Fig. 11(c), 12(b)). 이에 대한 근거로 Fig. 12의 (a)와 (b)에 각각 낮은 하중조건(step-4R)과 높은 하중조건(step-8R)에서 나타난 전형적인 AE 신호의 파형을 나타내었다. 즉, 이러한 parameter의 분석 역시 구조물에서 손상의 정도를 유추하는 상대적인 지표로 이용될 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 공용중인 교량이나 구조물에서 상시에 단계별 하중(하중인가-하중유지-하중제거)을 적용하더라도 제거진폭의 발생 특성으로부터 손상에 대한 정보를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

3.3. Felicity Ratio를 이용한 손상 평가

음향방출법(AE)에 의한 구조물의 손상 정도를 파악할 수 있는 대표적인 인자로 카이저 효과(Kaiser effect)와 펠리시티 효과(Felicity effect)를

들 수 있다. 이 중 펠리시티 비(Felicity ratio : FR)는 식 (1)과 같이 이전 단계의 최대하중(P_{MAX})에 대한 다음 단계의 AE신호가 발생하기 시작하는 시점에서의 하중(P_{AE})의 비로 나타내어지며 콘크리트와 같은 복합재료에 적용되는 중요한 인자이다.

$$FR = \frac{P_{AE}}{P_{MAX}} \quad (1)$$

따라서, 본 연구에서는 펠리시티 효과를 철근 콘크리트 슬래브 구조에 적용하였으며 그 결과를 Fig. 13에 나타내었다. 여기서 하중 단계 지수(loading step index)는 Table 2에 나타낸 것과 같이 FR값을 얻기 위해 사용된 하중조건에 대해 표기한 것이며, 이는 단계별 하중 재하에 따른 각 step에 대한 비를 수식으로 나타내 서열화한 것이다. 오차를 최소화하기 위해 하중 인가시 발생하는 AE 신호의 시작 시점을 지속적인 AE 신호가 나타나는 최소 하중 값으로 적용하였다. 세 가지 경우 모두에서 시험초기에는 카이저 효과와 같이 전 단계와 동일하거나 비슷한 하중에서 AE 신호를 나타내어 1 부근의 값을 나타냈으나 단계별 하중을 재하하여 시편이 손상될수록 Felicity ratio의 값이 급격히 감소하고 있음을 알 수 있었다. 이는 시편에 큰 하중을 가할수록 철근과 콘크리트 모두 휨 균열이 발생하는데 인장철근은 탄성력으로 인해 복원되려는 성질이 큰 반면, 콘크리트는 탄성력이 거의 없는 재료적 특성상 철근과 콘크리트의 계면사이에 균열이 생기고 서로 마찰을 일으킴으로써 상대적으로 손상 정도에 따라 AE 신호가 빨리 나타나 낮은 FR 값을 나타낸 것으로 사료된다.

또한 단계별 하중 재하를 많이 받은 시편일수록, 즉 손상이 많은 시편일수록 감소하는 기울기가 완만해지며 동일한 하중값에 대해 Felicity ratio가 큰 값을 나타내고 있었다. 임의의 하중이 인가된 이후에 동일한 하중을 다시 가할 경우 신호 발생률이 현저히 줄어들고 신호의 발생시점도 그 이후에 새로운 큰 하중을 받을 경우에 균열의 성장이나 진전 등이 생기면서 신호 발생을 나타내게 된다.

결과적으로 Felicity ratio 분석 결과 역시 앞서 언급한 반복하중 단계의 AE 활동성과 매우 유사한 결과를 도출해 낼 수 있었다. 이처럼 펠리시티 효과는 철근 콘크리트의 내부 균열상태를 예측할 수 있을 뿐만 아니라 콘크리트 구조물에서의 결함 존재 여부를 판단하여 손상 정도를 유추할 수 있는

Table 2 Loading step index

Loading step index	Step (P_{AE} / P_{MAX})		
	1st	2nd	3rd
1	step(10 kN/5 kN)	-	-
1.5	step(15 kN/10 kN)	-	-
2	step(20 kN/15 kN)	step(20 kN/10 kN)	step(20 kN/10 kN)
2.5	step(25 kN/20 kN)	-	-
3	step(30 kN/25 kN)	step(30 kN/20 kN)	step(30 kN/20 kN)
4	-	step(40 kN/30 kN)	step(40 kN/30 kN)
5	-	step(50 kN/40 kN)	step(50 kN/40 kN)
6	-	step(60 kN/50 kN)	step(60 kN/50 kN)
7	-	step(70 kN/60 kN)	step(70 kN/60 kN)
8	-	step(80 kN/70 kN)	-
9	-	step(90 kN/80 kN)	-
10	-	-	step(100 kN/70 kN)
11	-	-	step(110 kN/100 kN)

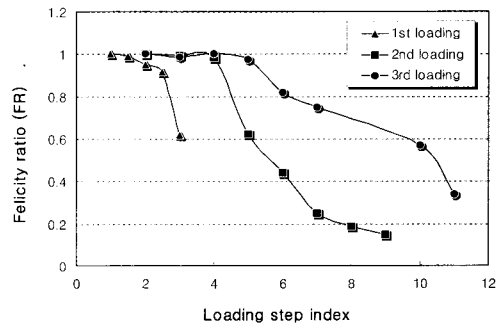


Fig. 13 Felicity ratio

지표가 될 수 있으며 공용중인 교량이나 구조물에서 비교적 간단한 방법으로 균열의 진전, 하중이력 추정, 붕괴예측 등의 모니터링이 가능하리라는 것을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 철근 콘크리트 보 형식에 이어 슬래브 구조에서의 건전성 평가를 위한 음향방출 분석 기법을 제시하였다. 단계별 하중 재하에 따른 하중인가, 하중유지, 하중제거, 반복하중 시의 AE 신호 특성을 분석함으로써 구조물에서의 균열 상태 및 손상을 예측하였다. 또한 음향방출법(AE)에 있어 손상 정도를 유추할 수 있는 대표적 인자인 펠리시티 효과를 분석하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 철근 콘크리트 슬래브 구조의 단계별 하중 재하에 따른 음향방출 특성은 콘크리트 보 형식에서

나타나는 음향방출 특성과 매우 유사한 양상을 보이며 철근 콘크리트 구조에서 나타나는 전형적인 신호 패턴을 나타내었다.

- 2) 동일한 시편에 대해 단계별 하중 재하 시험을 실시한 결과, 손상의 정도를 나타내는 하중단계 지수가 증가할수록 제거진폭이 인가진폭보다 점점 크게 나타나는 경향을 잘 보여주었다. 이러한 경향은 이전에 시편이 받은 하중에 의한 손상 정도에 기인한 것으로 구조물에 작용한 하중 이력과 손상 정도를 유추하는데 지표로 이용할 수 있을 것으로 판단된다.
- 3) 반복하중 실험의 경우, 하중 인가시 보다는 하중 제거시 발생하는 제거진폭의 특성이 손상의 지표로 이용 될 수 있으며 이는 공용중인 교량이나 구조물에서 단계별 하중을 상시 적용하더라도 이에 따른 제거진폭 특성으로부터 손상 정보를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.
- 4) 각 하중 단계별 AE 발생 분석을 통해 얻은 Felicity ratio는 구조물이 손상을 받을수록 그 값이 급격히 감소하며 동일 시편에 대해 재실험을 할 경우 이미 방출된 손상 발생원으로 인해 반복 실험을 할수록 그 기울기가 완만해지는 경향을 나타내었다. 따라서 FR 값은 철근 콘크리트의 균열상태를 예측하고 손상정도를 추정하기 위한 정량적인 지수로 사용될 수 있음을 확인할 수 있었다.

참고문헌

[1] C. Ouyang, E. Landis and S. P. Shah, "Damage assessment in concrete using quantitative acoustic emission," *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 117, No. 11, pp. 2681-2698, (1991)

[2] S. Yuyama, T. Okamoto, M. Shigeishi and M. Ohtsu, "Quantitative evaluation and visualization of cracking process in reinforced concrete by moment tensor analysis of acoustic emission," *Materials Evaluation*, June, pp. 751-756, (1995)

[3] S. Yuyama, "A proposed standard for evaluating structural integrity of reinforced concrete beams by acoustic emission," *Proceedings of the 13th International AE*

Symposium, (1996)

[4] Stephen W. Hearn and Carol K. Shield, "Acoustic emission monitoring as a nondestructive testing technique in reinforced concrete," *ACI Materials Journal*, Vol. 94, No. 6, pp. 510-519, (1997)

[5] D. J. Yoon, W. Jason Weiss and Surendra P. Shah, "Assessing damage in corroded reinforced concrete using acoustic emission," *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 126, No. 3, pp. 273-283, (2000)

[6] Masayasu Ohtsu and Hiroshi Watanabe, "Quantitative damage estimation of concrete by acoustic emission," *Construction and Building Materials*, Volume 15, Issues 5-6, pp. 217-224, (2001)

[7] M. Shigeishi, S. Colombo, K. J. Broughton, H. Rutledge, A. J. Batchelor and M. C. Forde, "Acoustic emission to assess and monitor the integrity of bridges", *Construction and Building Materials*, Volume 15, Issue 1, pp. 35-49 (2001)

[8] S. H. Han, W. J. Lee, H. D. Cho and D. G. Kim, "Crack source location technique for plain concrete beam using acoustic emission," *J. KCI*, Vol. 13, No. 2, pp. 107-113, (2001)

[9] W. J. Lee, H. D. Cho and J. R. Lee, "Damage evaluation on the concrete using acoustic emission," *J. KCI*, Vol. 14, No. 5, pp. 750-758, (2002)

[10] D. J. Yoon, P. Park and S. S. Lee, "Application of acoustic emission for assessing deterioration in reinforced concrete beams," *J. KSNT*, Vol. 20, No. 4, pp. 276-284, (2000)

[11] P. Park, D. J. Yoon and J. C. Jeong, "Acoustic emission behavior during damage development of reinforced concrete beam," *J. KSNT*, Vol. 23, No. 2, pp. 116-124, (2003)

[12] S. I. Lee, P. Park and D. J. Yoon, "Acoustic emission activity under stepwise cyclic loading for damage assessment of reinforced concrete," *Proc. of KSNT Spring Meeting*, pp. 34-39, (2007)