

## 철근 콘크리트 빔의 노화도 평가를 위한 음향방출 기술의 응용

### Application of Acoustic Emission for Assessing Deterioration in Reinforced Concrete Beams

윤동진\*, 박휘립\*, 이승석\*  
 Dong-Jin Yoon\*, Philip Park\* and Seung-Seok Lee\*

초 록 콘크리트 구조물의 노화도 평가를 위한 기초 연구로서 철근 및 무근 콘크리트 빔의 4점 굽힘 시험시 발생하는 음향방출 신호의 발생 거동을 관찰하였다. 본 연구는 미세 균열의 전개, 국부 균열의 전진, 부식, 철근의 박리 등 균열 발생 및 손상기구에 대한 AE 특성 고찰에 주안점을 두었다. 이들 각각의 손상 메카니즘을 모사하기 위해 무근 콘크리트, 노치를 가공한 무근 콘크리트, 정상적인 철근 콘크리트 그리고 부식된 철근 콘크리트 빔을 제작하였다. 손상 정도 및 펠리시티 효과(Felicity effect)를 관찰하기 위해 4점 굽힘 시험시 단계별 하중 증가 방식을 택하였다. AE 파형은 물론 AE event에 대한 발생 특성을 분석하였으며, 노화도 평가에 주요한 영향을 미치는 주요 변수들에 대해 조사하였다. AE event 발생의 누계치 및 Felicity ratio값 등은 손상의 정도에 따라 민감하게 변하는 것을 관찰하였으며, 노화도와도 상관관계가 있음을 확인하였다. 결과적으로 본 연구에서 얻은 AE 분석 기술은 철근 콘크리트 구조물의 균열이나 부식 손상과 같은 노화도 평가를 위해 적용할 수 있는 가능성을 제시하였다.

주요용어: 음향방출, 철근 콘크리트, 노화도, 부식손상, 파손기구, 펠리시티 효과

**Abstract** The acoustic emission (AE) behavior of reinforced concrete beams tested under flexural loading was investigated to characterize and identify the source of damage. This research was aimed at identifying the characteristic AE response associated with micro-crack development, localized crack propagation, corrosion, and debonding of the reinforcing steel. Concrete beams were prepared to isolate the damage mechanisms by using plain, notched-plain, reinforced, and corroded-reinforced specimens. The beams were tested using four-point cyclic step-loading. The AE response was analyzed to obtain key parameters such as the time history of AE events, the total number and rate of AE events, and the characteristic features of the waveform. Initial analysis of the AE signal has shown that a clear difference in the AE response is observed depending on the source of the damage. The Felicity ratio exhibited a correlation with the overall damage level, while the number of AE events during unloading can be an effective criterion to estimate the level of corrosion distress in reinforced concrete structures. Consequently, AE measurement characterization appears to provide a promising approach for estimating the level of deterioration in reinforced concrete structure.

**Keywords:** acoustic emission, reinforced concrete, deterioration, corrosion damage, failure, mechanism, Felicity effect

#### 1. 서 론

최근 수십년된 교량 및 도로가 노후화 됨에 따라 안

전진단에 대한 관심이 높아지고 있다. 이들 구조물들은 콘크리트 표면을 침투하는 외부 물질에 의해 내부의 철근이 심하게 부식되고 있다는 사실이다. 콘크리트 구조물

에서는 철근이 부식됨에 따라 팽창하게 되어 콘크리트 외부 두께를 통해 균열이 진전되어 점차 부식이 가속되게 된다. 빈번한 일이지만 심한 경우 이 노화 현상은 철근을 덮고 있는 커버 콘크리트가 철근에서 완전히 떨어져 나가 외부에 노출될 때까지 진행이 된다. 엔지니어의 입장에서는 구조물의 외부에서 콘크리트 내부에 있는 철근의 부식이나 손상 정도를 알 수 있는 기술이 요구되며, 이는 이들 정보로서 사전에 보수나 예방을 함으로써 향후의 엄청난 손상을 막을 수가 있기 때문이다.

음향방출 기술은 재료의 파손기구를 연구하거나 내부에 존재하는 결함을 검출하는 기술로 최근 많은 관심을 끌고 있다. 이는 광범위한 부분에 대해 표면에서는 검출되지 않는 재료의 내부 손상을 검출할 수 있다는 큰 장점이 있기 때문일 것이다. 콘크리트 및 토목 분야에서는 다른 분야에 비해 적은 수이지만 최근 많은 연구자들에 의해 음향방출 기술이 콘크리트 재료나 구조물에 적용이 되어 왔다[1-17]. 대체적으로 이전의 연구 분야들은 크게 두 부류로 나눌 수 있다. 첫째는 균열 선단에서 전개되는 파괴 진행 영역(fracture process zone, FPZ)에 대해 파괴 메커니즘을 규명하거나, 균열의 위치 또는 균열의 전파과정을 설명하는 것이었다[5-9]. 이들 연구에서는 균열의 진전을 알아내기 위해 기존의 위치표정 방법이 쓰였을 뿐 아니라, 균열의 발생원이나 방향을 설명하기 위해 모멘트 텐서 분석(moment tensor analysis)이 많이 사용되어져 왔다[2-7, 17]. 두 번째 연구 분야는 음향방출 기술을 실제 구조물의 안전성 진단의 개념에서 구조물의 진전성을 평가하거나 손상을 검출하는데 초점이 두어졌다[10-15]. 예를 들어, 콘크리트 구조물의 노화도 평가를 위해 카이저 효과와 같은 특수한 AE 변수를 제안하였다[7,14,15]. 그러나 이전의 연구에서는 콘크리트 구조물의 노화 정도와 연관시켜 음향방출을 이용한 사례는 매우 적으며, 아직까지 체계적인 진단 기준이 없는 상태이다.

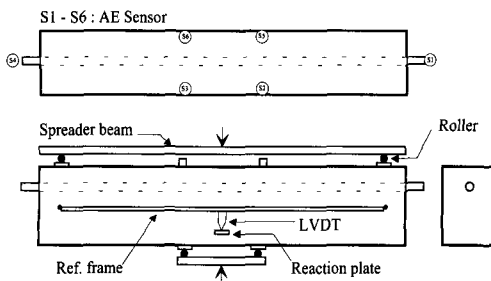


Fig. 1 Beam geometry and AE sensor location

따라서 본 연구에서는 콘크리트 구조물에서의 철근 부식에 따른 노화의 정도를 평가하는데 음향방출 기술의 적용성을 검증하고, 또한 부식된 철근 콘크리트의 노화 정도를 평가하는데 필요한 가장 효율적인 변수가 무엇인지를 결정하는 것이 본 연구의 목적이라 할 수 있다.

## 2. 실험

### 2.1. 시편

본 실험에서는 일반 강도의 콘크리트(normal strength concrete, NSC) 빔을 4점 굽힘 시험으로 수행하였다. 물/시멘트 비율은 0.5로 하였으며, 65%의 골재 부피를 사용해 표준 미세 콘크리트 혼합(28일 압축 강도가 35MPa)을 하였다. 미리 설계된 틀에 타설한 후 상온에서 24시간 방치한 다음 거푸집을 제거해서 습윤실(상대습도 95% 이상)에서 28일 동안 양생하였다. 시편의 크기는 폭이 100mm, 높이가 150mm, 그리고 길이가 1150mm가 되게 하였으며 시편의 모습은 Fig. 1에 센서의 부착위치와 함께 나타내었다. 서로 다른 형태의 손상 기구를 모사하기 위하여 Fig. 2에서 보는 바와 같이 모두 6종류의 시편을 만들어 사용하였다. 3개의 무근 콘크리트 빔과 3개의 노

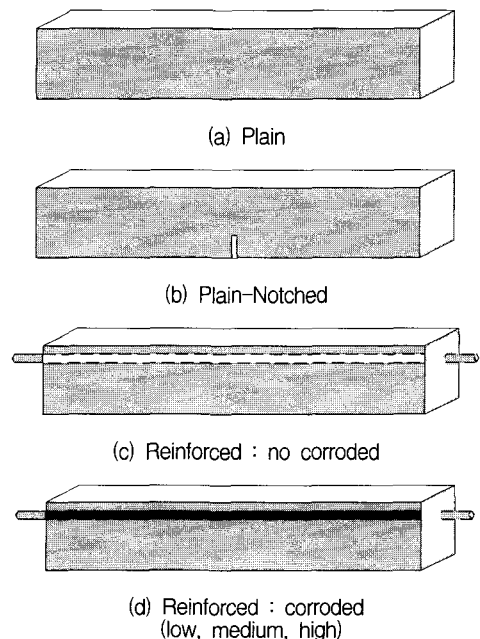


Fig. 2 Type of concrete beam specimen

치 가공된 무근 콘크리트 빔 그리고 3개의 철근 콘크리트 빔을 만들었으며, 마지막으로 철근 부식의 모사를 위해 철근 콘크리트 빔은 다시 3종류로 나누어 만들었다. 즉 부식된 철근의 무게 감소비가 전체 중량에 대해 각각 0.7 : 3.5 : 7.0% 되도록 콘크리트 내부의 철근을 부식시킨 후 실험을 하였다. 철근의 부식은 철근 콘크리트 빔을 제작하고 28일 양생 후 부식 가속화 과정을 통해 원하는 만큼의 부식 정도를 이루었다. 부식 시험을 위해 빔 상단에 수조를 만든 후 3% NaCl 용액을 채우고 그 안에 구리판을 일정 간격을 두어 설치하였다. 즉 구리판과 철근이 각각 anode 및 cathode 극이 되며, DC 전원 공급기를 이용해 전류를 조절함으로써 철근의 부식 정도를 조절하였다[18].

## 2.2. 실험 장치 및 방법

실험 방법은 각 시편에 대해 4점 굽힘 시험을 하였으며, 하중은 단계별로 하중/정지/제하의 세 단계를 미리 예측한 최대 하중의 10% 단계로 파손시까지 각각 적용하였다.(Fig. 3) 시험기로서는 450kN 용량의 MTS를 사용하였으며, 4점 굽힘 시험을 위해 치구를 따로 제작하여 수행하였다. 초기 하중 사이클에서는 하중 제어(load control)를 통한 폐쇄 루프(closed-loop) 시험을 하였으며, 마지막 하중 사이클에서는 시편의 급작스런 파손을 막기 위해 변위 제어(displacement control)를 사용하였다. 최대 하중의 값은 시편의 최대 용량에 따라 달리 설정하였으며, 각 하중 단계에 적용되었던 하중 값을 Table 1에 나타내었다. 시편 중앙 부분의 처짐량을 측정하기 위하여 시편 양측에 각각 지지 프레임 설치하였으며, 센서는 2개의 2.5mm 용량 LVDT를 사용하였다. AE 센서는 Fig. 1에 보여진 바와 같이 6개를 사용하였다. 이 실험에서는 시편의 인장 부위가 위쪽으로 향하게 함으로써 인장부 표면의 균열 및 센서 관찰이 용이하도록 하였다. 즉 하부의 압축부 표면에는 225mm 간격의 로울러를 사용하였고, 상부 인장부에는 1025mm 간격의 로울러를 사용하여 4점을 지지하도록 하였다. 시험 시작 전 먼저 LVDT를 제로(영) 교정한 다음 연필심 파괴로 AE 센서의 감도 및 위치표정을 교정하였다. 노치가 있는 무근 콘크리트 시편의 경우에는 균열 개구 변위를 측정하기 위해 2개의 0.508mm 용량의 LVDT가 추가로 사용되었다. 하중 절차로는 각 사이클별 최대 하중까지는 225N/min으로 하중을 가한 후 1분간 정지하였으며, 제하시에는 450N/min으로 하중을 제거하였다. 그리고 마지막 사이클에서는 8.25mm/min로 변위 제어를 하였다.

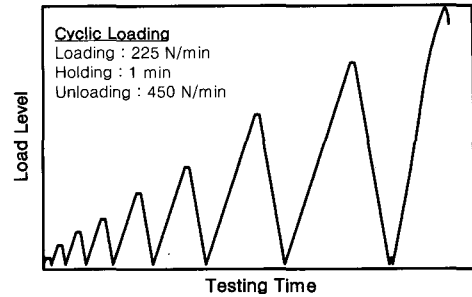


Fig. 3 Beam loading history

Table 1 Load applied at each loading step

Loading (cycles)	Plain & Notched (kN)	Reinforced (kN)
1	1.51	2.2
2	1.51	4.4
3	2.26	6.7
4	3.02	8.9
5	3.78	13.3
6	4.54	17.8
7	5.29	26.7
8	6.05	35.6
9	6.81	-

## 2.3. AE 측정

AE 측정 장치 및 시편에 대한 개략도를 Fig. 4에 나타내었다. 본 실험에서는 6개의 AE 센서, 6개의 프레임프, AE 측정을 위한 장비, 그리고 AE 장비에 연결된 휴대용 컴퓨터가 사용되었다. 6개 센서 중 4개는 광대역형 센서(SE9215-M, 100-1000kHz)였으며, 나머지 2개는 공진형 센서(SE150-M, 공진주파수 150kHz)가 사용되었다. 즉 Fig. 1에서 보았듯이 4개의 센서(S2, S3, S5, S6)는 콘크리트 빔의 상부 표면에 부착하였으며, 2개의 센서(S1, S4)는 노출된 철근의 양단에 부착하였다. 한편, 무근 콘크리트 시편의 경우에는 6개 센서 모두 콘크리트 표면에 부착하였다. 콘크리트 표면에 부착된 센서에서의 출력은 전치증폭기(Model 20AP by Vallen Systeme)를 거쳐 AE 측정 장비(Model AMS3 by Vallen Systeme GmbH)에 입력되어 휴대용 컴퓨터에 의해 신호 취득 및

분석을 행하였다. 측정장비의 한계로 인해 4개의 광대역형 센서 중 2개 센서에 대해서만 파형 저장이 이루어졌다. 콘크리트 표면에 부착된 센서(S2)를 트리거 센서로 사용하였으며, 철근에 부착된 센서(S1)와 동시에 파형을 저장하였다. 프리앰프에서 49dB로 증폭하였으며 100kHz - 1000kHz의 범위를 가진 대역 필터를 사용하였다. 각 파형은 5MHz의 샘플링으로 4096 포인트로 저장되었다.

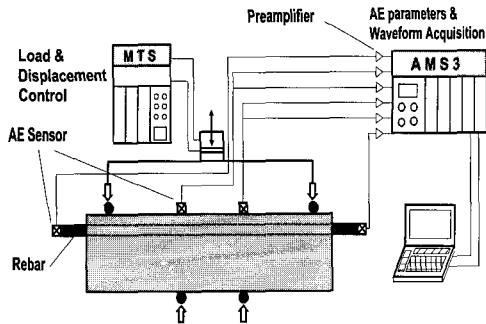
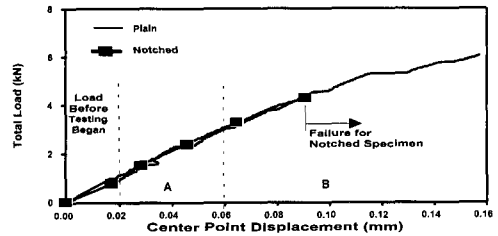


Fig. 4 Schematic diagram of AE measurement system

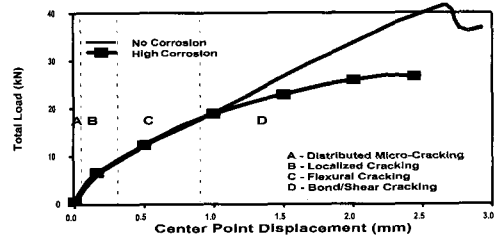
### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 균열 및 AE 발생 기구

무근 콘크리트와 노치가 있는 무근 콘크리트 시편에 대한 전형적인 하중-변위 곡선을 Fig. 5a에 나타내었으며, 철근 콘크리트 시편 중 부식이 안된 시편과 부식이 심하게 된 시편에 대한 하중-변위 곡선을 Fig. 5b에 나타내었다. 무근 콘크리트 빔의 경우에는 그림에서 보는 바와 같이 빔 전체에 분포된 미세 균열(distributed micro-cracking)을 나타내는 Region A와 국부 균열 전개(localized crack development)를 나타내는 Region B로 크게 두 단계로 나눌 수 있다. 반면, 철근 콘크리트 빔 시편의 경우에는 그림에서와 같이 네 단계로 나눌 수 있었다. Region A는 앞의 경우와 마찬가지로 분포된 미세 균열을 나타내며, 역시 Region B는 4점 굽힘 시험의 경우 시편 중앙부의 일정한 모멘트 지역에서의 국부 균열 진전을 나타낸다. Region C는 계속되는 미세 균열 및 국부 균열의 전개 그리고 철근을 따라 발생하는 콘크리트와 철근간의 박리를 나타낸다. 반면, Region D는 빔에서의 전단형 균열(shear crack) 또는 철근을 따라 발생하는 접합부 파단 균열(bond-splitting cracking)의 전개를 나타내고 있다. 이 두 하중-변위 곡선에서 얻은 흥미 있는



(a) for unreinforced beams



(b) for reinforced beams

Fig. 5 Load displacement envelope

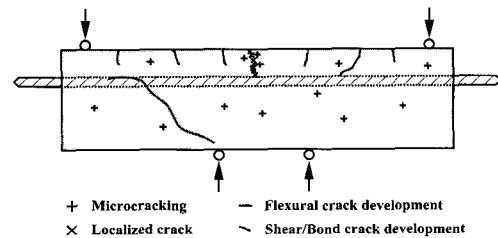


Fig. 6 A schematic representation of the typical damage mechanisms for the beams

하나의 사실은 철근 콘크리트 시편의 경우 처음 세 단계 Region A, B, C에서는 각 시편에서 비슷한 특성을 보였으나, 반면 Region D에서는 매우 다른 양상을 보였다는 점이다. 즉 부식된 시편에서의 강성의 저하를 뚜렷이 볼 수 있었다. Fig. 6에서는 앞서 설명한 네 단계의 파손 기구에 대하여 본 연구에서의 빔 시험에 대한 전형적인 파손 메커니즘을 그림으로 나타내었다.

#### 3.2. AE 위치표정 및 손상 기구

Fig. 7은 철근 콘크리트 시편의 경우 4점 굽힘 시험 후 관찰된 전형적인 균열 진전 형태를 보여주고 있다. 예

측한 바와 같이 균열은 빔의 인장 측 표면, 즉 균일 모멘트 지역에서 출발하여 압축부로 향하여 진전됨을 볼 수 있었다. 무근 콘크리트 시편의 경우는 균열이 압축부를 향해 불안정하게 진행하다가 파손이 일어남을 관찰하였다. 반면, 철근 콘크리트 시편의 경우는 응력이 철근을 가로지른 균열로 전달되었으며 철근의 영향으로 인해 여러 곳에서 균열 진전을 관찰할 수 있었다. 최종적으로는 철근 콘크리트의 모든 시편에 대해 Fig. 7에서 보는 것처럼 전형적인 전단 파괴 양상을 나타내었다. 그러나 철근의 부식이 심한 시편일수록 철근을 따라가는 접합부 파단(bond splitting) 균열의 길이가 증가함을 관찰하였다.

Fig. 8과 Fig. 9는 부식이 안된 철근 콘크리트 빔에 대한 전형적인 AE 위치표정의 결과를 보여 준다. Fig. 8은 빔의 상부 인장측 부분의 균일 모멘트 지역에 부착된 4개의 센서(S2, S3, S5, S6)를 이용해 계산된 1차원 평면 위치표정 결과이며, Fig. 8(a)는 앞에서 언급한 전체 시험 구간 중 Region A에 발생한 신호에 대한 결과를 Fig. 8(b)는 Region B에서 발생한 결과를 보여 준다. 이 이후에 대한 위치표정은 균열이 이미 깊이 방향으로 많이 진전해 있기 때문에 표면에서의 균열 위치표정은 의미가 없게 된다. Region A에서 중앙부에 균열에 대한 위치표정이 대략적으로 보이기 시작하여 Region B에서는 그 집중도가 뚜렷해짐을 볼 수 있었다. 비록 콘크리트의 불균질한 재료 특성에 의해 탄성파의 전파 속도가 일정하지 않고 경로에 따른 파형의 분산 특성이 있음에도 불구하고 전체적으로 만족할 만한 위치표정 결과를 얻었다. 즉 Fig. 7의 상부 표면에 나타난 균열의 위치와 잘 일치함을 보였다.

Fig. 9는 동일 시편에 대하여 철근의 양단에 부착된 2개의 센서(S1, S4)를 이용하여 얻은 1차원 위치표정 결과를 보여 준다. 즉 철근과 콘크리트 계면은 물론 빔 내에서 발생된 AE신호에 대해 철근을 따라 전파해 오는 신호를 이용해 위치표정을 시도해 보았다. Fig. 9(a)에서 Fig. 9(d)까지는 Region A에서 Region D까지 각각의 영역에 대한 결과를 나타내었다. 실험의 초기 단계인 Region A의 경우는 미세 파괴 과정으로 인해 AE 신호가 상대적으로 약하기 때문에 위치표정 결과가 거의 없었으며, Region B부터 중앙부를 중심으로 균열의 위치와 동일한 위치에 표정을 하기 시작하였다. 즉 이들 단계에서는 주로 균일 모멘트 지역에서 주로 표정이 되어지며 이는 이 부분에서 응력이 가장 집중되기 때문이다. Region C에서는 깊이 방향으로 균열이 진행되면서 표정되는 갯수가 많아졌으며 Region D까지 진행되면서 중앙

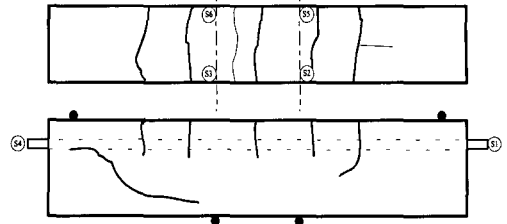
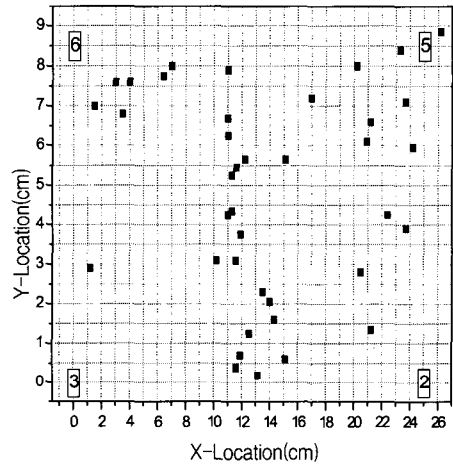
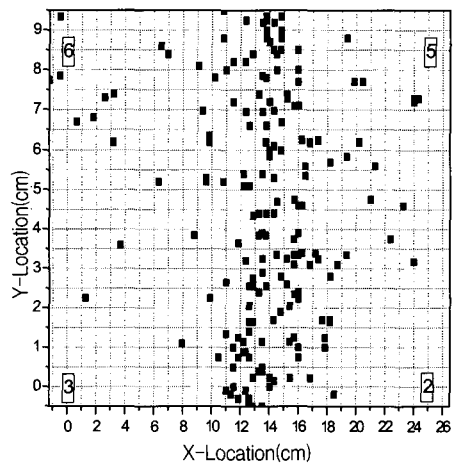


Fig. 7 Crack patterns after test for reinforced concrete specimen



(a) Region A



(b) Region B

Fig. 8 AE events location (2-D location plot for constant moment area)

부를 중심으로 철근의 전체 지역에서 골고루 분산되어 표정이 되어짐을 볼 수 있었다. 이는 하중이 증가함에 따라 철근 전체에 걸쳐 콘크리트와의 박리 현상에 따른 균열 발생이 많아진다는 것을 의미한다. 만약 실제 콘크리트 구조물에서의 철근으로부터 AE 위치표정에 대한 결과를 얻을 수 있다면 철근과 콘크리트 사이의 계면 손상에 대한 정보를 얻을 수 있을 것이라 사료된다.

### 3.3. AE 발생 특성

Fig. 10과 Fig. 11은 각각 다른 시편에 대한 사이클 하중에 따른 AE events의 발생을 보여주고 있으며, 각 실험에 적용된 하중은 가는 실선으로 동시에 표시하였다. Fig. 10(a)는 무근 콘크리트 빔에 대한 경우로써 앞에서 언급한 Region A의 상황을 모사한 것으로 대부분 분포된 미세 균열 및 파단 직전에 발생한 국부 균열 진전에 의한 AE 발생으로 이루어져 있다. 전반적으로 단계별 하중이 증가함에 따라 AE 발생도 증가하는 양상을 보였으며, 하중을 정지시킨 후부터는 감소하는 양상을 보였다. 전체적으로 매우 적은 양의 AE가 발생되었다. Fig. 10(b)는 무근 콘크리트 빔 중 노치가 있는 것으로 Region B의 국부 균열의 진전을 모사한 것으로 AE 발생 정도는 Fig. 10(a)의 양상과 유사하였다. 반면 AE 발생 수에서는 더 적게 나타났으며, 신호의 크기 면에서는 상대적으로 더 큰 신호가 많이 발생되었음을 확인하였다[18]. 이는 균열 발생의 에너지 면에서는 국부 균열의 진전이 더 크지만 초기에 넓게 산재한 미세 균열의 경우 AE 발생 수가 더 많았다는 사실을 알 수 있었다.

Fig. 11은 철근 콘크리트 시편에서의 AE events 발생을 보여준다. Fig. 11(a)는 정상적인 철근 콘크리트 빔에 대한 것이며, Fig. 11(b)에서 Fig. 11(d)까지는 부식된 철근 콘크리트 빔에 대한 것으로써 세 단계의 부식 정도에 따라 각각 실험한 결과이다. 전체적으로 철근의 영향으로 인해 강성이 증가함으로써 가해 주는 하중이 높게 되고 따라서 무근 콘크리트 빔에 비해서 상당히 많은 AE가 발생했음을 알 수 있다. 그리고 이들 결과중 흥미 있는 사실은 그림에서 보는 바와 같이 철근 콘크리트 시편의 경우 대략 네 번째 사이클 단계 이후부터 하중을 제거하는 단계에서 AE 발생의 두 번째 피크가 존재한다는 것이다. 그러나 이 현상은 Fig. 10에서 보는 바와 같이 무근 콘크리트 시편에서는 나타나지 않는다는 점이다. 이는 콘크리트 내에 철근이 존재함으로써 어느 정도 하중이 가해진 이후부터는 철근과 콘크리트 사이의 계면에서

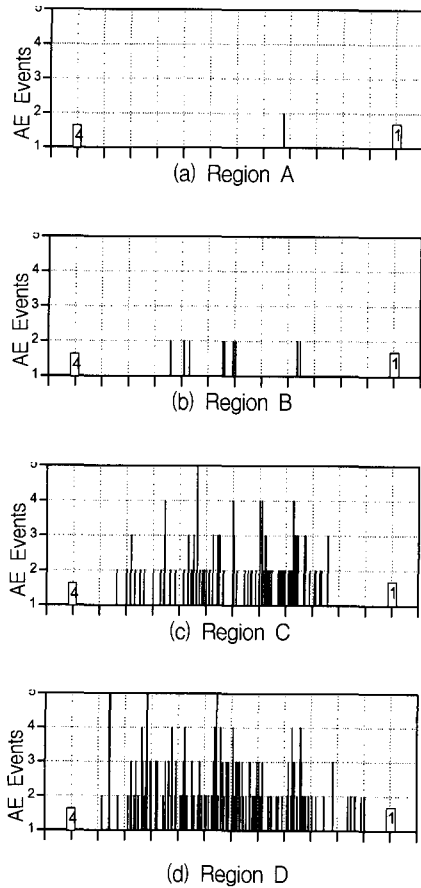


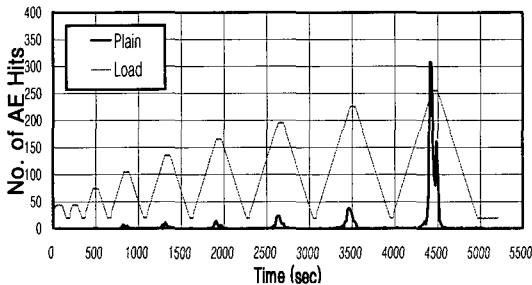
Fig. 9 AE events location (1-D location plot along the reinforcing bar)

생기는 추가적인 AE가 발생하기 때문에 간주할 수 있다. 그리고 하중 사이클 단계가 증가할수록, 다시 말해 손상이 점점 심해질수록, 이들 두 번째 피크의 AE 발생 수가 하중이 증가하는 첫 번째 피크보다 점점 증가하고 있다는 점을 관찰할 수 있다. 즉, AE 발생의 두 번째 피크의 시작 시점 및 발생 정도는 철근과 콘크리트 사이의 손상 정도와 관계가 있음을 알 수 있었다. 다시 말해 하중 제거시의 두 번째 AE 발생 피크는 콘크리트 시편에서의 손상 정도를 분석하는데 주요한 변수로 사용될 수 있음을 의미한다고 볼 수 있다.

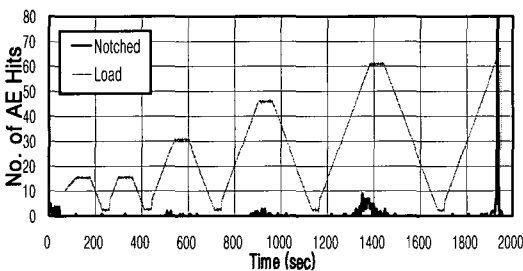
Fig. 11(a)에서 Fig. 11(d)까지의 결과를 보면, 부식이 안된 철근 콘크리트 시편의 경우 상당한 수의 AE가 발생되고 있는 반면 부식된 시편에서는 훨씬 적은 수의 AE가 발생되고 있다는 점도 흥미 있는 결과라 할 수 있다. 이것은 대부분의 미세 균열 및 철근을 따라 발생하는

종방향 균열(longitudinal cracking)이 부식 과정에 기인한 손상 과정에서 이미 소멸되었다는 사실로 설명이 될 수 있다[12]. Fig. 11에서는 단지 AE 발생의 경향을 보아서 부식된 시편과 부식이 안된 시편 사이의 뚜렷한 차이점을 쉽게 발견 할 수 없었다. 따라서 이들 각 결과에 대해 AE events의 누적치를 조사해 보았으며 철근 콘크리트 시편에 대한 결과를 Fig. 12에 나타내어 보았다. 다행히 각 단계별 하중에 따른 AE 발생의 누적값에서는 철근 콘크리트 빔 시편의 부식 정도에 따라 뚜렷한 경향을 보이고 있음을 볼 수 있었다. 즉 시편에서의 부식의 정도가 증가함에 따라 총 AE 발생 수는 뚜렷이 감소하고 있음을 알 수 있었다. 이 사실은 앞서 언급한 바와 같이 부식 과정에 의해 생겼던 이전 손상으로 인한 에너지 소멸에 기인하는 것으로 설명이 될 수 있다. 따라서 누적 AE 발생수의 경향은 콘크리트 구조물의 손상 정도를 평가하는데 또 하나의 주요한 변수가 될 수 있음을 알 수 있었다.

또한 이전 연구의 결과에서 AE 개별 신호의 특성이 단계별 손상 정도에 따라 잘 구별이 되었으며, 신호의 주파수 특성도 좋은 정보가 됨을 확인하였다[18]. 따라서 앞에서 언급한 각 Region에 대한 AE 신호의 형상이나 주파수 특성 등에 대해 추가적인 분석을 한다면 균열 및 부식에 따른 노화도 평가에 신뢰성 있는 자료를 제공할 수 있으리라 생각된다.

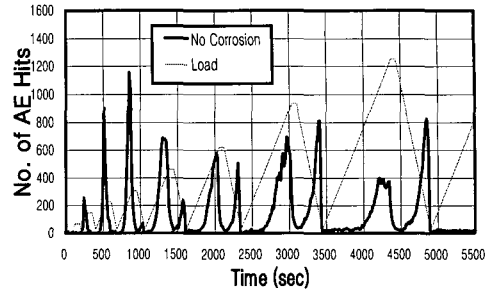


(a) plain

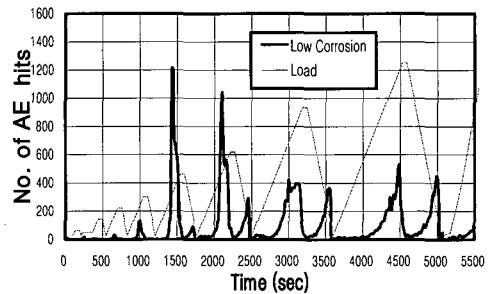


(b) notched

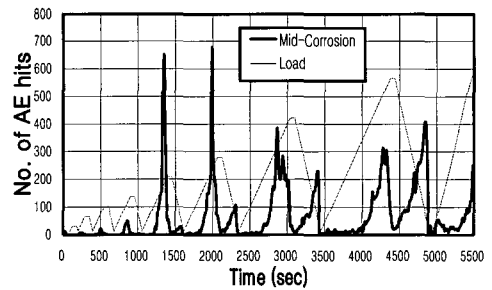
Fig. 10 AE hits vs. cyclic loading for unreinforced beams (plain and notched)



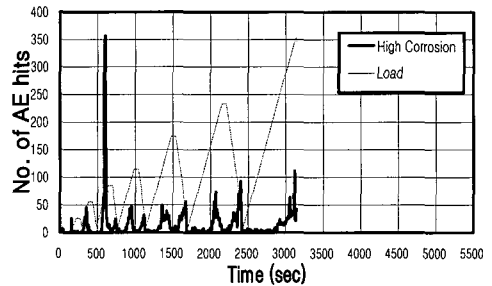
(a) uncorroded



(b) low corroded



(c) mid-corroded



(d) high-corroded

Fig. 11 AE hits vs. cyclic loading for reinforced beams (corroded and uncorroded)

### 3.4 Felicity ratio

일반적으로 Felicity ratio는 콘크리트와 같은 복합재료에서 사용되는 손상평가 지수로서 이전 하중 사이클 이력에서의 최대 하중에 대한 다음 하중 사이클에서의 AE가 발생되기 시작하는 시점에서의 하중의 비로 정의 되어진다. 잘 알려진 카이저 효과 (Kaiser effect)는 금속과 같은 재질에서 적용이 되어지며, 이전에 가했던 하중보다 항상 큰 값으로 가해야만 AE가 발생한다는 것과 달리 펠리티 효과(Felicity effect)는 복합재료와 같은 재질에서 적용이 된다. 이 값은 섬유강화 복합재료(FRP)나 이런 재질로 제작된 구조물에서의 손상의 정도를 평가하는 기준으로 많이 사용되어져 왔다. 본 연구에서는 부식 손상에 기인한 콘크리트 빔에서의 변화를 관찰하기 위하여 이 효과를 적용하여 보았다. Fig. 13은 각 시편에 대해 계산된 Felicity ratio 값을 보여주고 있다. 각각의 점은 각 사이클 단계에서 계산한 값을 나타낸다. 이 계산을 위하여 재 하중시 불규칙하게 발생하는 간헐적인 AE 발생을 고려하여 5 초 기간 내에 지속적으로 AE 발생이 있는 시점에 대해 가장 낮은 하중 값을 구하여 계산에 이용하였다. Fig. 13(a)는 무근 콘크리트 빔에 대한 결과이며, Fig. 13(b)는 철근 콘크리트 빔에 대한 결과를 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 두 경우 모두 하중 단계가 증가함에 따라, 즉 시편의 손상이 증가할수록, Felicity ratio 값이 점차 감소함을 볼 수 있다. 무근 빔의 경우는 철근 빔에 비해 순간적으로 빨리 파손이 되며, 상대적으로 단계별 손상 정도가 미약하다고 볼 수 있다. 따라서 파단시의 Felicity ratio 값도 약 0.8 정도에서 머무르는 것으로 관찰되었다. 반면 철근 빔의 경우 사이클 단계가 증가함에 따라 손상의 정도가 심해지면서 Felicity ratio 값은 전체적으로 급격히 감소함을 알 수 있다. 또한 덜 부식된 시편에 비교하여 심하게 부식된 시편의 경

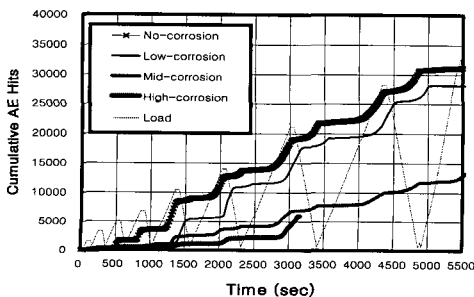


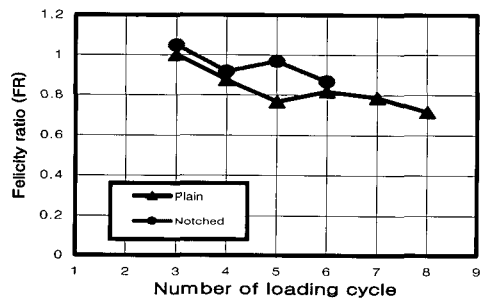
Fig. 12 Cumulative AE hits vs. cyclic loading

우 Felicity ratio 값이 더 감소하고 있는 것도 볼 수 있다. 이는 부식이 심할수록 또는 손상이 심할수록 철근과 콘크리트 계면과의 상태가 상대적으로 불안정하기 때문에 하중 제거시나 재하중을 가할 시에 상대적으로 일찍 AE가 발생하는 것으로 추정할 수 있다. 이 결과로부터 Felicity ratio 값의 변화 역시 콘크리트 구조물의 부식이나 손상에 의한 노화도를 예측하는데 아주 효과적인 변수로 사용될 수 있음을 알 수 있었다.

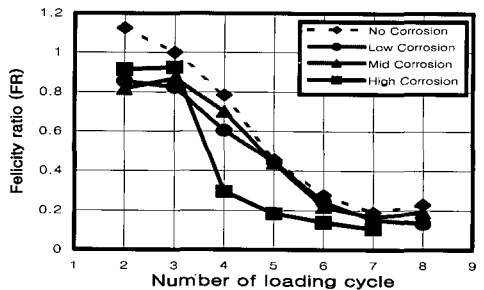
### 4. 결 론

콘크리트 구조물의 노화도 평가를 위한 기초 연구로서 철근 및 무근 콘크리트 빔의 4점 굽힘 시험시 발생하는 음향방출 신호의 발생 거동을 관찰하였으며, 본 실험의 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 철근 콘크리트 시편의 경우 처음 세 단계 Region A, B, C 에서는 각 시편에서 비슷한 특성을 보였으나, 반면 Region D에서는 매우 다른 양상을 보였으며, 즉 부식된 시편에서의 강성의 저하를 뚜렷이 볼 수 있었다.



(a) unreinforced beams



(b) reinforced beams

Fig. 13 Change of Felicity ratio with damage



2. 철근콘크리트 빔의 경우, AE 발생의 두 번째 피크의 시작 시점 및 AE 발생 수는 철근과 콘크리트 사이의 계면에 대한 손상 정도와 관계가 있음을 알 수 있었다. 다시 말해 하중 제거시의 두 번째 AE 발생 피크는 콘크리트 시편에서의 손상 정도를 분석하는데 주요한 변수로 사용될 수 있음을 의미한다고 볼 수 있다.

3. 콘크리트 빔에서 철근의 부식 정도가 증가함에 따라 총 AE 발생 수는 뚜렷이 감소하고 있음을 알 수 있었으며, 누적 AE 발생수의 경향은 콘크리트 구조물의 손상 정도를 평가하는데 주요한 변수가 될 수 있음을 알 수 있었다.

4. Felicity ratio 값의 변화 역시 콘크리트 구조물의 부식이나 손상에 의한 노화도를 예측하는데 아주 효과적인 변수로 사용될 수 있음을 알 수 있었다.

## 참 고 문 헌

- [1] A. Maji and S. P. Shah, "Process Zone and Acoustic Emission Measurement in Concrete, Experimental Mechanics", March, pp. 27-33, (1988)
- [2] A. K. Maji, C. Ouyang, and S. P. Shah, "Fracture Mechanisms of Quasi-Brittle Materials Based on Acoustic Emission", J. Mater. Res. Vol. 5, No. 1, pp. 206-217, (1990)
- [3] E. N. Landis, S. P. Shah, and Z. Li, "Application of Quantitative NDE to Basic Fracture Research of Concrete", Review of Prog. In QNDE, Vol. 13, pp. 2123-2130, (1994)
- [4] M. Ohtsu, T. Okamoto, and S. Yuyama, "Moment Tensor Analysis of Acoustic Emission for Cracking Mechanisms in Concrete", ACI Structural Journal, Mar.-Apr., pp. 87-95, (1998)
- [5] Z. Li and S. P. Shah, "Localization of Microcracking in Concrete Under Uniaxial Tension", ACI Materials Journal, Jul.-Aug., pp. 372-381, (1994)
- [6] Z. Li, "Microcrack Characterization in Concrete Under Uniaxial Tension", Mag. Of Conc. Res. Vol. 48, No. 176, pp. 219-228, (1996)
- [7] S. Yuyama, T. Okamoto, M. Shigeishi, and M. Ohtsu, "Quantitative Evaluation and Visualization of Cracking Process in Reinforced Concrete by a Moment Tensor Analysis of Acoustic Emission", Materials Evaluation, June, pp. 751-756, (1995)
- [8] 이준현, 이진경, 윤동진, "음향방출을 이용한 콘크리트 부재의 미시적 파괴특성의 온라인 모니터링", 비파괴검사학회지, Vol. 19, No. 1, pp. 25-33, (1999)
- [9] 이준현, 이진경, 장일영, 윤동진, "음향방출을 이용한 mortar 재료의 미시적 거동에 관한 연구", 콘크리트 학회지, Vol.10, No. 6, pp. 203-211, (1998)
- [10] T. Uomoto, "Application of Acoustic Emission to the Field of Concrete Engineering", J. of Acoustic Emission, Vol. 6, No. 3, pp. 137-144, (1987)
- [11] 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)
- [12] Z. Li, F. Li, A. Zdunek, E. Landis, and S. P. Shah, "Application of Acoustic Emission Technique to Detection of Reinforcing Steel Corrosion in Concrete", ACI Materials Journal, Jan.-Feb., pp. 68-76, (1998)
- [13] M. K. Lim and T. K. Koo, "Acoustic Emission from Reinforced Concrete Beams", Mag. of Conc. Res. Vol. 41, No. 149, pp. 229-234, (1989)
- [14] 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)
- [15] 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)
- [16] 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., New York, (1995)
- [17] C. Ouyang, E. Landis, and S. P. Shah, "Damage Assessment in Concrete Using Quantitative Acoustic Emission", ASCE J. of Engineering Mechanics, Vol. 117, No. 11, pp. 2681-2688, (1991)
- [18] 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)