

## 음향방출(AE)을 이용한 콘크리트의 손상도 평가

이웅종<sup>1)\*</sup> · 조홍동<sup>2)</sup> · 이종열<sup>1)</sup> · 한상훈<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>쌍용양회공업(주) 기술연구소 <sup>2)</sup>충북대학교 토목공학과  
(2002년 4월 28일 원고접수, 2002년 8월 23일 심사완료)

### Damage Evaluation on the Concrete Using Acoustic Emission

Woong-Jong Lee<sup>1)\*</sup>, Hong-Dong Cho<sup>2)</sup>, Jong-Ryul Lee<sup>1)</sup>, and Sang-Hoon Han<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> SsangYong Cement Industrial Co., Ltd Research Center, Daejeon, 305-345, Korea

<sup>2)</sup> Dept. of Civil Engineering, Chungbuk National University, Cheongju, Korea

(Received April 28, 2002, Accepted August 23, 2002)

#### ABSTRACT

Concrete is deformed by load and subjected to micro damage under allowable deformation because of non-homogeneous property. When micro damage is accumulated, it is cracked and finally fractured. Characterization of AE can be demonstrated the micro damage which it is not discovered from visual observation, and it become known to an advantage that was clearly discriminated from the existing NDT method.

This study was carried out the analysis and evaluation of concrete damage by acoustic emission technique. As a results of damage analysis, it was found out that the more concrete strength has increased, the more concrete has subjected to micro damage at lower stress ratio for chylinder specimen, and this is possible only AE method which could be described the brittle properties. Also It was revealed that the kaiser effect and felicity effect were existed in reinforced concrete bending specimens and it is found out that the onset of interface debonding between concrete and steel could be conformed in comparison with felicity ratio, AE activity and load history. From the results of this study, it was conformed that the deteriorative degree of reinforced concrete structure should be evaluated using felicity ratios.

**Keywords :** acoustic emission, Felicity ratio, damage analysis, NDT, concrete

#### 1. 서 론

우리의 일상생활에서 쉽게 접하는 유리, 나무 등은 하중을 받아 파괴를 일으킬 때 소리를 방출한다. 콘크리트재료 역시 파괴시 소리를 동반한다. 이러한 현상을 연구하는 분야가 AE(acoustic emission)이다. 그러나 AE는 공학적인 응용면에서 가청영역을 다루지 않고, 비가청 영역인 20~2000kHz의 주파수 대역을 대상으로 하고 있다. 콘크리트로부터 발생된 AE 데이터는 기존의 계측방법으로는 얻을 수 없는 많은 정보를 갖고 있다. 첫 번째로 균열이 발생하는 위치는 육안관찰 이전 즉, 사전에 예측이 가능하고, 균열진전 상황을 모니터링할 수 있다<sup>1)</sup>. 두 번째로 미세균열 생성시(혹은 미세한 손상) 이에 대한 정보 즉, 균열 발생모드(휨모드, 전단모드 및 혼합모드) 및 균열방향을 평가할 수 있다<sup>2)</sup>. 세 번째로 기존의 평가방법으로는 불가능한 재료의 특성평가가 가능하다. 예를들면, Farahat와 Ohtsu<sup>3)</sup>은 콘크리트의 손상상태 평가시 기존의 측정방

법인 콘크리트의 강도와 탄성계수 측정방법보다 AE 계측방법이 더욱 유용한 방법임을 제안하였다.

한편 Dai와 Labuz<sup>4)</sup>은 손상을 받은 시험체(동결융해 반복에 의한 손상유도)와 손상을 받지 않은 콘크리트 시험체에 대해서 손상도를 분석하였는데, 손상을 받은 시험체는 응력비 95%이전에서 손상받지 않은 시험체에 비해 확률밀도함수가 크게 나타나고 95%이후에는 손상받지 않은 시험체가 확률밀도함수가 크다는 연구결과를 얻었다. 그러나 콘크리트의 강도변화에 따른 손상도 해석은 수행하지 않았다.

한편, 철근콘크리트로 이루어진 중요한 시설 구조물의 경우, 공용기간 동안에 콘크리트의 인장부에 균열이 발생하고, 철근부식이 유발되어 내하력이 저하되는 것을 방지하기 위해서는 균열의 발생시점 혹은 철근과 콘크리트의 계면분리시점을 알아내는 것은 중요한 관심사이다. 기존의 계측방법인 변형률 게이지(strain gauge) 혹은 변위 측정기(LVDT) 등을 이용해서는 철근과 콘크리트의 계면분리 혹은 균열발생시점을 파악하는데는 한계가 있다. Yuyama 등<sup>5)</sup>은 철근콘크리트 휨시험체의 인장부에 보수재료로 보수를 수행한 후에 반복하중을 재하하여 파괴과정동안에

\* Corresponding author

Tel : 042-855-1762 Fax : 042-855-1678

E-mail : woojo@ssrc.ssy.co.kr

발생한 AE를 계측함으로써 초기의 인장균열 발생시점, 콘크리트와 철근의 계면분리, 손상도 평가가 가능함을 제시하였다. 즉, 초기의 인장균열 발생시점은 육안관찰과 AE 활동성(activity)과의 상호비교에 의해 평가하였고, 계면분리는 변위 측정결과와 높은 AE 진폭레벨 및 AE 활동성 분석에 의해서 평가를 하였다. 마지막으로 손상도 평가는 하중 재하이력과 AE 활동성 개시시점을 기준으로 평가하였다. 그러나 계면분리시점의 평가가 단순히 AE활동성이 급격히 증가한다는 점에 초점을 맞추어 평가하는 방법은 객관화 측면에서 취약한 부분이 다소 있다.

따라서 본 연구에서는 기존의 연구에서는 동일한 콘크리트 강도의 수준에서 평가를 수행한 것을 확장하여, 콘크리트의 강도변화에 따른 콘크리트의 손상도 해석을 수행하였으며, 또한 철근콘크리트 휨시험체를 대상으로 계면분리 시점과 손상도 평가를 상호 비교함으로써, 철근과 콘크리트의 계면분리시점을 더욱 객관적인 입장에서 평가가 가능함을 입증하고자 함이 본 연구의 목적이며, 또한 기존의 비파괴검사방법으로는 얻을 수 없는 AE만의 장점을 제시하고자 한다.

## 2. 손상도 평가이론

### 2.1 손상도해석이론

일반적으로 취성재료 내에 형성된 응력이 어떤 레벨 이상으로 증가함에 따라 미세균열의 형태인 내부손상이 재료에서 발생한다. 이러한 미세균열은 AE의 생성에 대응한다. 미세균열이 형성되는 동안에 발생한 AE 활동성을 정량화시키기 위해 AE 발생에 대한 확률밀도함수  $f(V)$ 는 식(1)과 같이 정의된다<sup>4)</sup>.

$$f(V)dV = \frac{dN}{N_0} \quad (1)$$

여기서,  $V$ 는 외부하중에 의해 계산되는 응력비이며, 식(2)와 같다.

$$V = \frac{\sigma}{[\sigma]} \quad (2)$$

여기서,  $[\sigma]$ 는 극한강도이고,  $\sigma$ 는  $N$ 번째 이벤트에 대응하는 응력이다.  $N_0$ 는  $V=1$  또는  $[\sigma] = \sigma$  일 때의 AE 히트의 총 수이다.  $N$ 은 응력비에 대응하는 AE 누적 히트수이다. 물리적으로  $f(V)$ 의 함수는 작용응력의 증분 ( $dV$ )기간 동안 재료내의 미세균열의 발생률을 나타낸다.

$V$ 와  $N$ 사이의 상관관계는 실험데이터로부터 설정될 수 있으며, 일반적으로 식(3)과 같은 형식을 갖는다.

$$V = aN + c \ln(1 + qN) \quad (3)$$

식(3)을 식(1)에 대입하여 풀면, 식(4)와 같이 확률밀도 함수  $f(V)$ 를 얻을 수 있다.

$$f(V) = \frac{1}{N_0} \left( \frac{1 + qN}{a + cq + aqN} \right) \quad (4)$$

여기서,  $a, c$  및  $q$ 는 실험데이터로부터 얻어질 수 있는 계수이다.

한편,  $f(V)$ 는 다음 조건을 만족한다.

$$\int_0^1 f(V)dV = 1 \quad (5)$$

이것은 단순히  $f(V)$ 대  $V$ 의 곡선아래 면적이 1과 같음을 의미한다.

따라서,  $f(V)$ 는 AE 응답에 근거해 적용할 때 재료를 선정하는 방법으로 사용 가능하다. 즉, 주어진 응력비율  $V$ 에 대한  $f(V)$ 의 큰 값은 더 큰 AE 활동성을 갖고 있어야 한다는 것을 지적하고, 이것은 재료가 응력에 의해 야기된 미세균열을 갖고 있음을 의미한다.

### 2.2 펠리시티비(Felicity ratio)를 이용한 손상도 평가이론

콘크리트의 결함존재여부를 평가하는데 활용되는 이론은 카이저효과(kaiser effect)와 펠리시티 효과(felicity effect)이다. 이 두 가지 효과의 개념도는 한 등<sup>5)</sup>의 연구결과에 제시되어 있다. 본 연구에서 사용한  $FR$ (felicity ratio)는 다음 식(6)과 같다.

$$FR = \frac{P_{AE}}{P_{max}} \quad (6)$$

여기서, 선행 최대하중을  $P_{max}$ , 현행 재하과정에서 AE가 발생하기 시작한 하중을  $P_{AE}$ 로 할 때 재료의 손상정도를 나타내는  $FR$ (felicity ratio)이고,  $FR > 1$ 이면 시험편이 안정한 상태이고,  $FR \approx 1$ 이면 카이저 효과가 존재하는 하중레벨이고,  $FR < 1$ 이면 시험편이 손상되어 불안정한 상태를 나타내며, 이는 성능저하 정도의 지표로서 사용 가능하다. 식(6)은 ASME Code Section V, Article 11에 규정되어 있다<sup>6)</sup>. 그러나 이 규정은 FRP(fiber reinforced plastic)구조물에 대한 규정이다. 한편, 1950년대 초 카이저는 금속 구조물과 같이 균질한(homogeneous) 재료는 선행 응력레벨을 초과해야만 AE 활동성이 증가한다는 AE 특성(AE 신호의 비가역성)을 관찰하였다. 그러나 콘크리트

와 같은 비균질 재료는 Tam과 Weng<sup>6)</sup>이 AE 관련 문헌을 조사한 바에 의하면 카이저 효과에 대해 다음과 같은 3가지 상이한 결과를 얻었음을 지적하였다.

첫 번째는 콘크리트 극한강도의 80%까지는 카이저 효과가 존재한다는 것이고, 두 번째로 일부 연구자들에서 카이저 효과는 하중을 제거하는 기간(시간)에 영향을 받으며, 콘크리트 재료에서의 카이저 효과의 존재는 일시적인 현상이라는 것이다. 세 번째로 일부 연구자들은 카이저 효과는 콘크리트 재료에서는 존재하지 않는다는 결론을 얻었다.

그러나 Tam과 Weng<sup>6)</sup>은 플라이애쉬 시멘트를 이용한 모르타르 시편에 대해 하중조건과 양생조건 등을 고려한 카이저 효과에 대해 연구를 수행한 결과 카이저 효과는 분명히 존재함을 제시하였다.

한편, 카이저 효과 및 펠리시티 효과를 이용한 펠리시티 비는 보수된 철근 콘크리트의 손상도 평가가 가능함으로 성능저하 기준으로 활용이 가능함을 Yuyama 등<sup>5)</sup>이 제안하였다.

### 3. 실험내용 및 AE 계측방법

#### 3.1 실험개요

콘크리트가 하중을 받아 파괴되는 동안에 발생한 손상도를 평가하기 위하여 콘크리트의 강도수준은 3수준으로 설정하였다. 손상도 해석 및 평가를 위한 시험체는 원주 시험체( $\phi 10 \times 20$  cm), 각주형 시험체( $15 \times 15 \times 40$  cm) 및 철근콘크리트 휨시험체( $15 \times 15 \times 90$  cm)로 하였다.

#### 3.2 콘크리트 배합

콘크리트의 강도수준 변화에 따른 손상도평가를 위한 시험체 제작용 배합은 Table 1과 같다. 손상도해석에 사용된 시험체의 배합은 MC시리즈이고, 펠리시티비를 이용한 손상도 평가에 이용된 시험체의 배합은 CB시리즈이다. 콘크리트 배합선정 원칙은 압축강도레벨의 차이를 주기 위해 W/C와 S/a를 주 변수로 하여 조정하는 하는 것으로 하였다. 굵은 골재 최대치수는 25mm로 하였고, 골재의 물리적 성질은 Table 2와 같다. 슬럼프 및 공기량을 조절하기 위해 사용된 혼화제는 리그린계 AE 감수제를 모든 배합에 대해 사용하였고, 고강도 배합만(MC3, CB3)은 나프탈렌계 고성능 AE감수제를 추가로 사용하였다.

#### 3.3 시험체 제작 내용

##### 3.3.1 손상도 해석용 시험체

손상도 해석을 수행하기 위한 시험체는 원주형 및 각주

형 시험체 2종류이고, 콘크리트 배합은 Table 1의 MC 시리즈이다. 시험체 명과 시험체의 수는 Table 3에 제시하였다.

##### 3.3.2 FR를 이용한 손상평가용 시험체

FR비를 이용한 손상도 평가용 시험체는 철근콘크리트 휨 시험체이다. 여기서, 콘크리트 배합은 Table 1의 CB 시리즈이고, 철근은 콘크리트 강도수준에 관계없이 KS D 3504에 적합한 SD 30( $f_y = 3000 \text{ kgf/cm}^2$ )의 2-D10을 인장축에 동일하게 배근하였다.

### 3.4 측정 시스템 및 계측방법

#### 3.4.1 AE 측정시스템

본 연구에서 콘크리트가 파괴되기까지 콘크리트에서 발생하는 AE를 검출하기 위한 측정시스템은 2부분으로 구성된다. 하나는 하중 혹은 변위를 제어하여 시험체에 하중을 재하하는 압축강도 시험기(UTM)이고, 다른 하나는 시험체에 부착된 센서로부터 데이터를 처리하는 AE 측정기기로 구성되어 있다. 하중 및 변위제어는 UTM에 장착되어 있는 컴퓨터에 의해 제어가 가능하고, MC시리즈의 콘크리트는 변위제어 방법에 의해 하중을 재하하였으며, CB시리즈의 콘크리트는 하중제어 방법에 의해 하중을 재하하였다. AE 측정기기에서는 시험체에 하중이 재하됨에

Table 1 Mixing proportions of concrete

Series	Slump (cm)	Air (%)	W/C (%)	S/a (%)	Unit weight(kg/m <sup>3</sup> )					
					W	C	S	G	AD(C×%)	
									AD1*	AD2**
MC1	13.5	4.0	71	52	205	289	920	853	0.15	-
MC2	14.5	3.8	50	47	204	410	788	889	0.15	-
MC3	14.0	4.2	33	41	172	521	658	973	0.25	0.5
CB1	14.5	4.5	57	47	195	340	821	937	0.15	-
CB2	16.5	3.8	45	44	201	441	730	930	0.15	-
CB3	13.5	4.4	38	42	209	553	653	895	0.25	0.5

\*AD1 : Lignosulphonate AE water reducer

\*\*AD2 : Sulphonated naphthalene formaldehyde(SNF) high range AE reducer

Table 2 Properties of aggregate

	Specific gravity	Absorption	F.M.	Unit weight
Sand	2.60	1.25	2.65	1.560
Gravel	2.67	1.18	6.75	1.550

Table 3 Index and number of specimen under the monotonic loading

Series	Cylinder specimen	Square specimen	Number of specimen
MC1	CY1	CP1	CY1(3)+CP1(2) = 5
MC2	CY2	CP2	CY2(3)+CP2(2) = 5
MC3	CY3	CP3	CY3(3)+CP3(2) = 5

따라 UTM으로부터 하중 및 변위의 데이터를 실시간으로 전송 받아 손상도 해석 및 평가시 상호 비교할 수 있도록 BNC케이블로 연결하였다. 개략적인 AE 측정시스템은 Fig. 1과 같다. 본 연구에 사용된 AE 센서는 공명주파수가 150 kHz인 R15센서이고, AE 측정장비는 SPARTAN 2000이다.

### 3.4.2 AE 센서의 배치도

콘크리트가 파괴과정 동안에 발생하는 AE 파를 측정하기 위해 MC 시리즈 시험체에 대한 센서의 배치도는 다음 Fig. 2와 같다. 원주형 시험체에는 총 4개의 센서를 설치하였고, 각주형 시험체의 경우는 총 7개의 센서를 설치하였다.

CB시리즈 시험체에 대한 센서의 배치도는 Fig. 3과 같다. 총 10개의 AE 센서를 설치하였으며, 측면에 6개를 설치하였고, 하면에 4개의 AE 센서를 부착하였다.

### 3.4.3 AE 계측시 고려사항 및 계측조건

AE 계측을 실시하기 전에 주변잡음의 영향을 받는데를 확인하기 위해서는 재하전에 AE 파가 발생하는지를 사전에 점검해야 한다. 만일 주변잡음(background noise)의 영향이 크게 발생한다면 임계값(threshold)을 상향조정하여 잡음의 영향을 받지 않도록 계측 조건을 설정하는 것도 한가지 방법이다. 한편, AE 센서와 시험체 표면의 완전한 압착이 잡음을 제거하기 위한 출발점이며, 측정 도중에 시험체의 변형으로 인한 AE 센서와 시험체가 분리되지 않도록 지지대를 설치해야 한다. 또한, 시험체에서 발생한 AE 신호는 미약하기 때문에 신호를 증폭시켜 데이터를 습득하는 것이 일반적이다. 신호를 증폭할 때는 예비증폭기에서 1차로 증폭하고 주증폭기에서 2차로 증폭한다. 현재 콘크리트에 대한 AE 계측시 증폭율은 예비증폭기에서 40 dB로 설정하고 주증폭기에서 20 dB로 설정하며 총 증폭은 60 dB로 하여 본래의 신호를 1000배로 증폭하는 것이 가장 일반적이다<sup>3,7,8)</sup>.

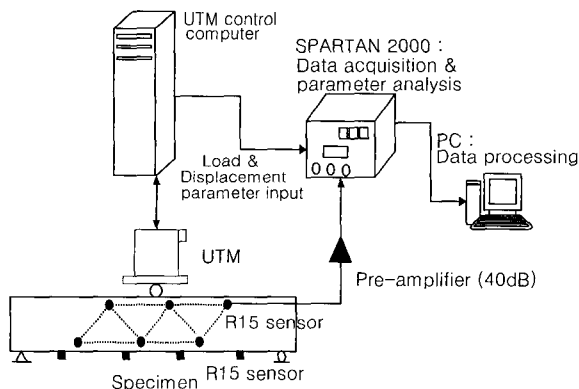


Fig. 1 AE measuring system

본 연구에서는 주변잡음의 영향을 받지 않는 범위에서 임계값을 40~48 dB을 설정하여 AE를 측정하였으며, 측정도중 변형에 의해 AE 센서와 시험체가 분리되지 않도록 고무밴드를 이용하여 완전 부착이 되도록 유도하였다. Table 4은 본 연구에서 수행한 시험체별 임계값 설정치와 증폭율을 정리한 것이다.

## 4. 결과분석

### 4.1 콘크리트 강도수준별 하중변위 특성

CY 및 CP 시리즈의 시험체는 단조증가하중을 재하하였으며, CB시리즈의 시험체는 반복하중을 재하하였다. 하중 증가에 따른 변위응답 특성은 다음과 같다.

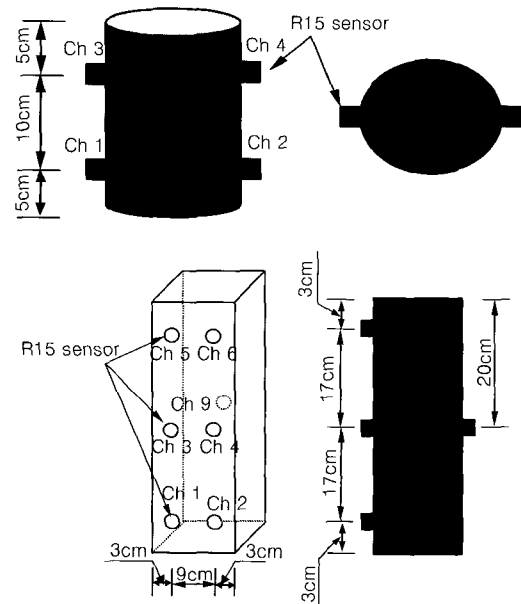


Fig. 2 AE sensor layout in specimen under MC series

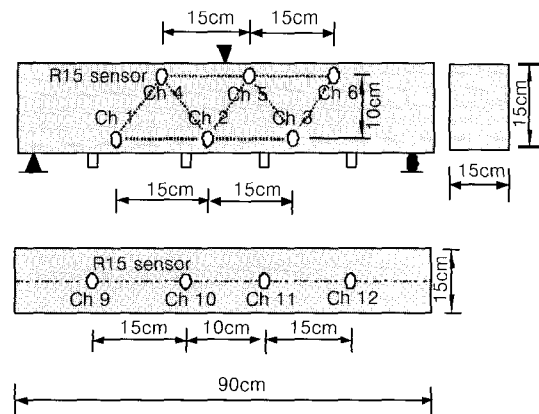


Fig. 3 AE sensor layout in specimen under CB series

#### 4.1.1 MC시리즈 시험체의 하중변위 측정결과

콘크리트 강도수준별 AE 활동성 및 손상도 분석에 사용한 시험체는 원주형 및 각주형 시험체이다. 한편 강도수준별 파괴응력은 Table 5과 같다. 콘크리트 강도측면에서는 원주형시험체의 의 강도수준별 파괴강도 차이는 대략  $70 \text{ kgf/cm}^2$ 의 차이를 나타내었으며 각주형시험체의 파괴강도차이는  $130 \text{ kgf/cm}^2$ 이상의 차이를 나타내었다. 원주형 및 각주형 시험체 모두 동일한 콘크리트 배합이지만, 시험체의 크기가 다른 관계로(3.1절 및 Fig. 2참조) 파괴하중의 값이 다르게 측정되었다. 한편 각주형 시험체에 대한 하중변위 측정결과는 Fig. 4와 같다.

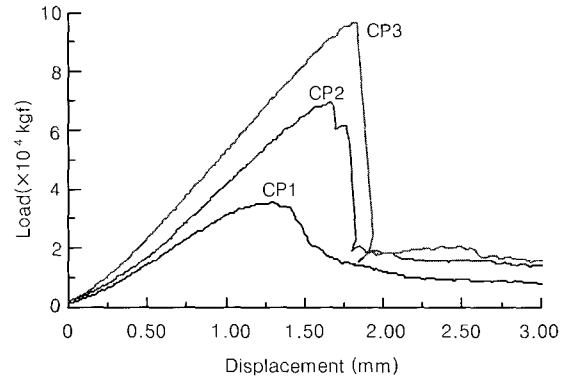


Fig. 4 Load-displacement for CP series

#### 4.1.2 반복하중을 받는 시험체의 하중변위 측정결과

CB 시리즈는 철근콘크리트 휨시험체이며, 시험체 제작시 압축강도 및 휨강도 측정용 공시체를 별도로 제작하여 강도를 측정하였으며, 측정결과는 Table 6과 같다. 콘크리트배합은 본래의 목적대로 28일 압축강도가 대략  $90 \text{ kgf/cm}^2$ 정도의 차이를 나타내었다. 철근콘크리트 휨시험체에 반복하중을 재하하였으며, 파괴시 강도는 차이가 있으나, 하중-변위응답 특성은 거의 유사하기 때문에 Fig. 5와 같이 대표적으로 CB3 휨시험체만을 그래프로 나타내었다.

Table 6 The strengths for specimen CB series

Specimen	Compressive strength*			Flexural strength*
	3 days	7 days	28 days	28 days
CB1	161	255	343	37
CB2	218	343	452	43
CB3	308	430	540	45

\* unit :  $\text{kgf/cm}^2$

#### 4.2 손상도해석 결과

각각의 히트(Hits 혹은 이벤트)에 대응하는 하중은 알려져 있기 때문에 응력을 받고 있는 동안에 재료의 응력비  $V$ 는 식(2)를 이용하여 계산할 수 있다. Fig. 6은 최대하중까지 측정된 재료에 대한 응력비  $V$  대 누적 히트수  $N$ 에 대한 그래프이다. 하중이 증가함에 따라 AE 히트 발생률은 증가하고, 곡선의 접선은 평평하게 되었으며, 콘크리트의 강도수준이 증가함에 따라 곡선의 기울기는 작아지는 경향을 나타내었다. 한편 이 곡선은 식(3)과 같이 표현되고, 실험상수 ( $a$ ,  $c$ ,  $q$ )들은 비선형 곡선 회귀식에 의해 얻어진다. 각 시험체에 대한 식(3)의 계수들이 계산되면, 확률밀도함수  $f(V)$ 은 식(4)로부터 확인할 수 있다.

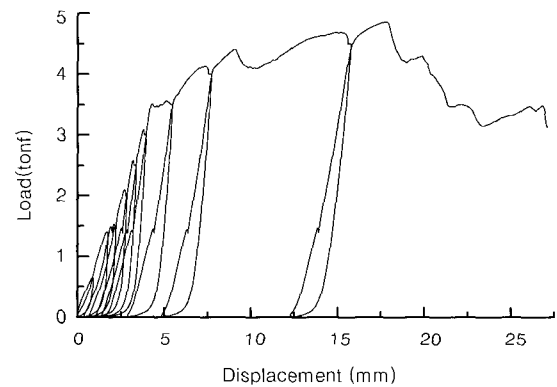


Fig. 5 Load-displacement for CB3 specimen

Table 4 Threshold and gain for specimen

Specimen	Threshold	Gain	
		Pre-amplifier	Main-amplifier
CY and CP	40 dB	40 dB	20 dB
CB	48 dB	40 dB	20 dB

Table 5 Failure stress by concrete strength level

MC Series	CY1	CY2	CY3	CP1	CP2	CP3
Failure strength	170	247	347	157	308	430

비선형 회귀식으로 구한 실험상수는 Table 7에 제시해 놓았다. Fig. 7는 일축 압축하중을 받는 콘크리트의 강도수준별 확률밀도함수의 비교를 위해 제시한 그림이며, 분석 결과는 다음과 같다.

1) 콘크리트 강도수준별 원주형 시험체는 응력비의 대략 82% 이전에는 고강도 일수록 확률밀도함수  $f(V)$ 가 더 높은 값을 나타냈고, 82% 이후에는 저강도일수록 확률밀도함수  $f(V)$ 가 더 높은 값을 나타냈다.

2) 한편, 각주형 시험체는 65% 이전에는 CP2의 확률밀도함수  $f(V)$ 가 높고, 65% 이상에서는 CP2의 확률밀도함수  $f(V)$ 가 제일 낮은 것으로 나타났다. Fig. 6의 각주형 시험체의 그래프로부터 알 수 있듯이 대략 응력비 80%

전에 동일한 응력비에서 CP2의 누적 히트발생수가 CP3에 비해서 더욱 많이 발생하였고, 이 효과로 CP2의 확률밀도 함수  $f(V)$ 가 크게 나타났다. 이러한 CP2와 CP3의 혼전 양상은 3.4.3항에 언급된 AE 센서와 시험체 표면의 압착이 중요한 AE계측조건인데 원주형 시험체(CY시리즈)와 각주형 시험체(CP시리즈)를 상호 비교한다면, 시험체가 압축하중을 받아 변형을 일으킬 때 중앙부위의 횡방향 변형량이 시험체 크기가 클수록 커짐으로서 AE 센서와 시험체 표면의 완전한 압착에 영향을 준 것으로 보이며, 본 실험에서는 이러한 영향을 배제시키기 위한 측정조건을 변경시키기 위한 어떤 대책도 고려하지 못하였다.

3) 본 연구에서는 Dai와 Labuz<sup>4)</sup>가 제안한 손상도 해석이론을 콘크리트 강도수준별 손상도 해석을 실시하였으며, 원주형 시험체의 경우는 콘크리트 강도수준측면에서 본다면, 고강도의 재료가 낮은 응력비(절대강도가 아님)에서 손상을 더욱 많이 받는다는 결과를 얻었다. 추가 실험을 통하여 시험체의 크기에 관계없이 이러한 실험결과를 얻는다면, 이것은 고강도 콘크리트일수록 취성성질을 반영한 것으로 볼 수 있다. 한편, 참고문헌 8에는 균열성장영역과 AE활동성과의 관계규명 연구결과, 고강도 콘크리트일수록 낮은 응력비에서 손상을 더욱 많이 받는다는 연구 결과를 얻은 바 있다.

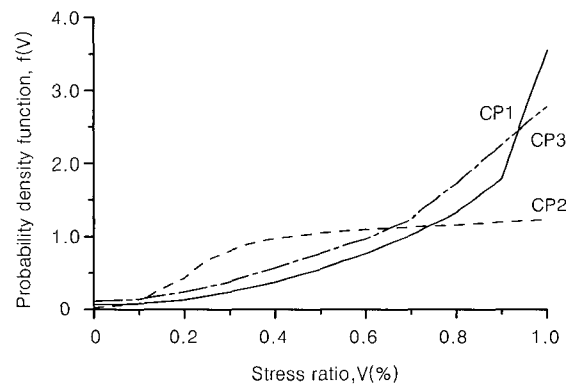
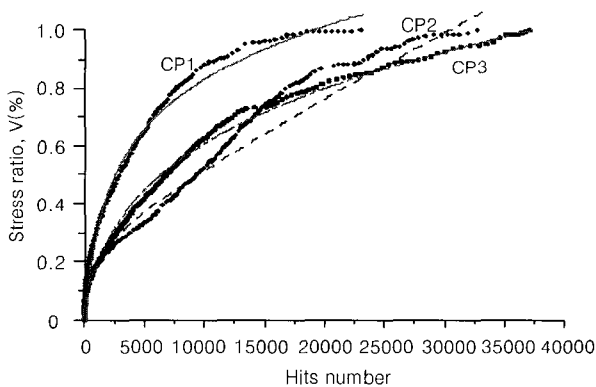
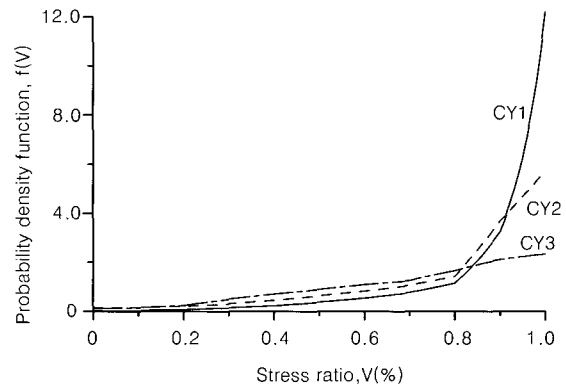
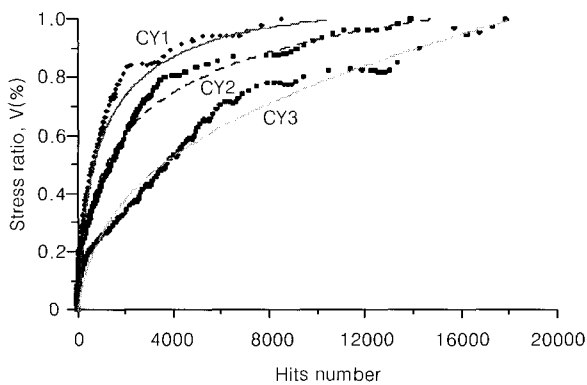


Fig. 6 Curve for stress ratio versus hits number

Fig. 7 Probability density functions by concrete strength levels

Table 7 Nonlinear regression expression of stress ratio versus hits number

MC Series	Nonlinear regression	Experimental coefficient			SE <sup>*)</sup>	R <sup>**)</sup>
		$a$	$c$	$q$		
CY1	$V = aN + c \ln(1 + qN)$	$-1.814 \times 10^{-5}$	0.241	0.013	0.036	0.992
CY2	$V = aN + c \ln(1 + qN)$	$-2.989 \times 10^{-6}$	0.224	0.007	0.041	0.991
CY3	$V = aN + c \ln(1 + qN)$	$1.240 \times 10^{-5}$	0.211	0.002	0.041	0.988
CP1	$V = aN + c \ln(1 + qN)$	$1.403 \times 10^{-6}$	0.253	0.002	0.035	0.994
CP2	$V = aN + c \ln(1 + qN)$	$2.308 \times 10^{-6}$	0.057	0.021	0.041	0.992
CP3	$V = aN + c \ln(1 + qN)$	$3.167 \times 10^{-6}$	0.250	0.001	0.025	0.997

\*) SE : Standard error

\*\*) R : Correlation coefficient

### 4.3 펠리시티비를 이용한 손상도 평가결과

펠리시티비(FR)를 이용한 손상도 평가에 사용된 시험체는 CB시리즈의 철근콘크리트 휨시험체이다. 철근콘크리트 휨 시험체는 콘크리트 강도수준에 관계없이 철근량을 동일하게 배근한 관계로 파괴하중은 콘크리트의 강도수준이 증가함에 따라 약간 상승하는 경향을 나타냈으나, 파괴하중은 철근의 항복응력에 지배를 받기 때문에 사실상 거의 유사하게 나타났다.

펠리시티비를 계산하기 위해 사용된 그래프는 x축에 시간간격을 나타내고, y축에 AE 히트 활동성과 재하하중을 도시하였다. 또한, 그래프 상단에 재하하중에 대응하는 펠리시티비의 경향을 도시하였으며, 콘크리트 강도수준별 그래프는 Fig. 8~Fig. 11과 같다. 각각의 시험체에 대한 FR을 정리한 결과는 Table 8 ~ Table 10이다. 분석결과는 다음과 같다.

1) 철근콘크리트 휨시험체에서는 카이저 효과 및 펠리시티 효과 모두를 확인할 수 있었다.

2) 카이저 효과가 존재할 때는 하중을 제거해도 AE활동성이 나타나지 않았으나 카이저 효과가 붕괴시 즉, 펠리시티 효과가 나타나는 시기는 하중을 제거하는 동안에도 AE 활동성이 나타났다(Fig. 8 ~ Fig. 11의 점선부분). 이 단계(step)은 하중이 재하되면서 휨균열이 발생된 시기이며(육안관찰에 의해 확인됨), 계속해서 철근과 콘크리트가 미세하게 계면이 분리되고, 하중을 제거하면서 인장철근은 탄성 복원력에 의해 수축 하지만 콘크리트는 탄성 복원력이 발생하지 않는 관계로 철근과 콘크리트의 계면에서 미세한 마찰(friction)이 유발되어 AE활동성이 나타난 것으로 볼 수 있다. 이러한 미세한 변형특성을 설명할 수 있는 것은 AE 기법만이 갖는 장점이다.

3) 펠리시티 효과가 나타난 시기는 CB1과 CB2의 경우는 선행하중이 2.0 tonf 이후에 나타났지만 CB3은 선행하중이 2.5 tonf 이후에 나타나 고강도 콘크리트일수록 콘크리트의 휨강도가 크기 때문에 나타난 효과로 볼 수 있다.

4) 본 연구에서 수행한 철근콘크리트 휨 시험체는 콘크리트의 강도수준에 관계없이 철근의 항복응력에 의해 파괴가 지배되기 때문에 반복하중을 받음에 따라 펠리시티비가 감소하는 경향은 콘크리트의 강도수준에 관계없이 유사한 양상을 나타내었다.

5) 재료의 손상정도를 나타내는 펠리시티비(FR)가 1이하의 값은 나타내는 시기는 파괴하중의 약 33~44% 사이에 나타났으며, 휨시험체의 휨인장균열이 발생한 시기

Table 8 FR(felicity ratio) of specimen CB1

Step	P <sub>max</sub> (tonf)	P <sub>AE</sub> (tonf)	FR	Note
1	0.5	0.28		
2	1.0	0.83	1.66	Kaiser effect
3	1.5	1.39	1.39	Kaiser effect
4	2.0	1.44	0.96	Felicity effect
5	2.5	1.55	0.78	Felicity effect
6	3.0	1.65	0.66	Felicity effect
7	3.5	1.87	0.62	Felicity effect
8	4.0	2.00	0.57	Felicity effect
9	4.5	2.27	0.57	Felicity effect

Table 9 FR(felicity ratio) of specimen CB2

Step	P <sub>max</sub> (tonf)	P <sub>AE</sub> (tonf)	FR	Note
1	0.5	0.30		
2	1.0	0.77	1.54	Kaiser effect
3	1.5	1.08	1.08	Kaiser effect
4	2.0	1.15	0.77	Felicity effect
5	2.5	1.46	0.73	Felicity effect
6	3.0	1.75	0.70	Felicity effect
7	3.5	1.87	0.62	Felicity effect
8	4.0	2.05	0.59	Felicity effect
9	4.5	1.94	0.49	Felicity effect

Table 10 FR(felicity ratio) of specimen CB3

Step	P <sub>max</sub> (tonf)	P <sub>AE</sub> (tonf)	FR	Note
1	0.5	-		
2	1.0	1.05	2.10	Kaiser effect
3	1.5	1.37	1.37	Kaiser effect
4	2.0	1.50	1.00	Kaiser effect
5	2.5	1.47	0.74	Felicity effect
6	3.0	1.48	0.59	Felicity effect
7	3.5	1.48	0.49	Felicity effect
8	4.0	1.50	0.43	Felicity effect
9	4.5	1.58	0.40	Felicity effect

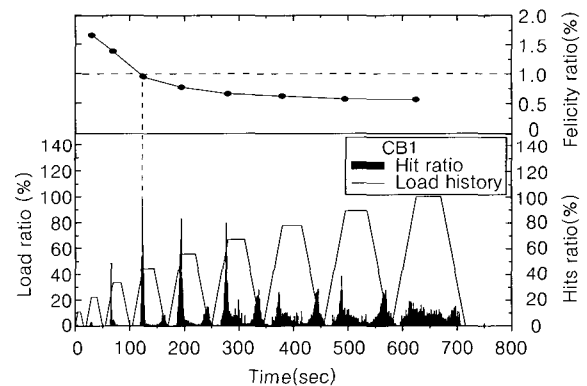


Fig. 8 Felicity, hits and load ratios versus time history for CB1 specimen

일치하고 있다. 따라서 펠리티비(FR)는 철근콘크리트 구조물의 성능저하 단계를 평가할 수는 있는 지표로 활용 가능할 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 콘크리트 강도수준별 하중을 재하하여 파괴과정 동안에 발생된 AE데이터를 분석하여 손상도 해석을 수행하였으며, 펠리티비(FR)를 이용한 철근콘크리트 휨시험체에 대한 손상도 평가를 실시하여 얻은 연구결과는 다음과 같다.

1) 본 연구에서는 Dai와 Labuz<sup>4)</sup>가 제안한 손상도 해석 이론을 콘크리트 강도수준별 손상도 해석을 실시하였으며, 원주형 시험체의 경우는 콘크리트 강도수준측면에서 본다면, 고강도의 재료가 낮은 응력비(절대강도가 아님)에서 손상을 더욱 많이 받는다는 결과를 얻었다. 한편, 각주형 시험체에서는 횡방향 변형량이 원주형 시험체에 비해 크게 증가하여 AE 계측조건에 영향을 주게 된 관계로 원주형 시험체와 유사한 결과를 얻지 못하였다.

2) 콘크리트의 손상도 평가시 중요한 특성치인 카이저 효과 및 펠리티비 효과는 저강도, 보통강도 및 고강도 콘크리트 모두에 대해서 확인할 수가 있었다.

3) 철근콘크리트 휨 시험체에서 카이저 효과가 소멸하는 시기는 펠리티비 효과가 나타내는 시기이고, 특히, 이 시기는 철근과 콘크리트의 미세한 계면분리가 발생된 이후 하중을 제거시 AE활동성이 나타났으며, 펠리티비(FR)가 1이하의 값을 갖는 것을 확인할 수가 있었다. 이런 미세한 변형특성을 설명할 수 있는 것은 기존의 비파괴검사방법으로는 확인할 수 없는 AE기법만이 갖는 장점이다.

4) 본 연구에서 수행한 철근콘크리트 휨 시험체는 콘크리트의 강도수준에 관계없이 철근의 항복응력에 의해 파괴가 지배되기 때문에 반복하중을 받음에 따라 펠리티비(FR)가 감소하는 경향은 콘크리트의 강도수준에 관계없이 유사한 양상을 나타내었다.

5) 재료의 손상정도를 나타내는 펠리티비(FR)가 1이하의 값을 나타내는 시기는 파괴하중의 약 33~44%사이에 나타났으며, 휨시험체의 휨인장균열이 발생한 시기와 일치하고 있다. 따라서 펠리티비(FR)는 철근콘크리트 구조물의 성능저하 단계를 평가할 수는 있는 지표로 활용 가능할 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. 한상훈, 이용중, 조홍동, 김동규, "음향방출을 이용한 무근콘크리트 보의 균열 발생원 탐사기법," 한국콘크리트학회 논문집, 제13권 2호, Apr., 2001, pp.107~113.
2. Ohtsu, M., "Acoustic Emission Theory for Moment

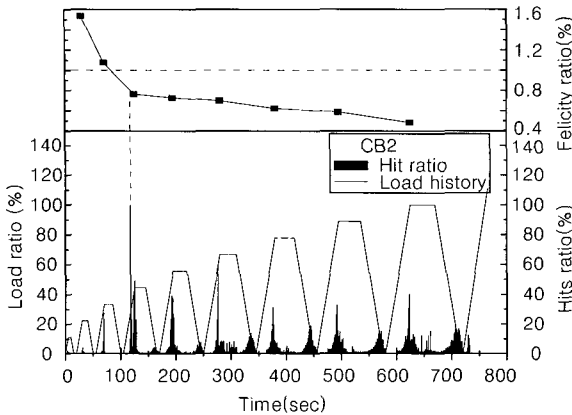


Fig. 9 Felicity, hits and load ratios versus time history for CB2 specimen

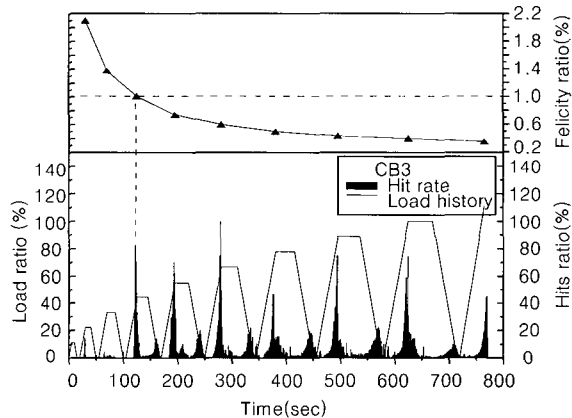


Fig. 10 Felicity, hits and load ratios versus time history for CB3 specimen

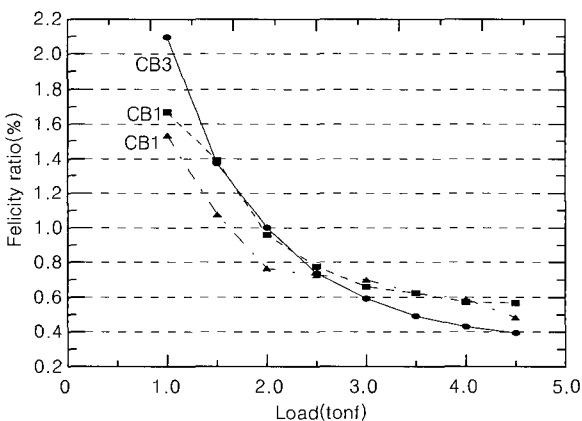


Fig. 11 Felicity ratios versus loading history for CB series



- Tensor Analysis," *Research on Nondestructive Evaluation*, No.6, 1995, pp.169~184.
3. Farahat, A. M. and Ohtsu, M., "Evaluation of Plastic Damage in Concrete by Acoustic Emission," *Journal of Materials in Civil Engineering*, Aug., 1995, pp.148~153.
  4. Dai, S. T. and Labuz, J. F., "Damage and Failure Analysis of Brittle Materials by Acoustic Emission," *Journal of Materials in Civil Engineering*, Nov., 1997, pp.200~205.
  5. Yuyama, S., Okamoto, T., and Nagataki, S., "Acoustic Emission Evaluation of Structural Integrity in Repaired Reinforced Concrete Beams," *Materials Evaluation*, Vol. 52, No. 1, Jan., 1994, pp.86~90.
  6. Tam, M. T. and Weng, C. C., "Acoustic Emission Kaiser Effect in Fly-Ash Cement Mortar under Compression," *Journal of Materials in Civil Engineering*, Nov., 1995, pp.212~217.
  7. Maji, A. and Shah, S. P., "Process Zone and Acoustic Emission Measurements in Concrete," *Experimental Mechanics*, Mar., 1988, pp.27~33.
  8. 이웅중, "콘크리트의 음향방출(AE)특성 및 균열발생원 음원위치결정," 충북대학교 토목공학과, 박사학위논문, 2002. 2., p. 38, pp.57~62.

## 요 약

콘크리트가 하중에 의해 변형을 일으키고, 변형이 허용범위에 있어도 콘크리트 자체가 비균질한 재료이기 때문에 미세한 손상을 받는다. 미세한 손상이 누적되면, 균열로 나타나고 최종적으로 파괴된다. AE의 핵심특성은 육안관찰로 확인할 수 없는 미세한 손상을 검출하고 평가할 수 있으며, 이는 기존의 측정방법으로부터 확연히 구분되는 강점이다.

본 연구에서는 AE기법을 이용하여 콘크리트의 손상도 해석 및 평가를 수행하였다. 손상도 해석결과에 의하면, 원주형 시험체의 경우, 고강도 콘크리트일수록 낮은 응력비에서 손상을 더욱 많이 받음을 확인할 수 있었고, 이것은 취성성질을 반영한 AE기법만의 평가결과이다. 또한, 철근콘크리트 휨시험체에서는 카이저효과 및 펠리티효과가 분명히 존재함을 확인할 수 있었고, 철근과 콘크리트의 계면분리시점은 펠리티비, AE활동성 및 재하이력을 상호비교함으로써 평가 가능함을 확인하였다. 본 연구 결과로부터 펠리티비(FR)를 이용하면, 철근콘크리트 구조물의 성능저하정도 평가가 가능할 것으로 판단된다.

**핵심용어** : AE기법, 펠리티비, 손상도 해석, 비파괴검사, 콘크리트