

## 음향방출과 초음파 C-scan을 이용한 AISI 4130 균열재의 파괴거동 연구

옹 장 우\*, 문 순 일\*\*, 정 현 조\*\*

\*충남대학교 기계설계과

\*\*국방과학연구소

**요 약** AISI 4130 금속재를 사용한 균열 컴팩트 인장시편의 파괴거동이 음향방출(AE) 및 초음파 C-scan을 이용하여 조사되었다. 모든 시편들을 특정 수준의 하중까지 증가시키면서, 크랙 개구변위 (COD)와 더불어 여러가지의 음향방출 인자들을 얻었다. 크랙 선단의 크랙 개구변위와 손상(소성)역을 계산하기 위하여 탄소성 유한요소 해석이 수행되었다. 펄스-반사, 침수형으로한 초음파 C-scan은 손상역 크기와 상사시키기 위하여 행해졌다. 유한요소 해석 결과와 측정된 크랙개구변위는 만족할 정도로 일치하였다. 음향방출 결과에서, 시험시편들은 연성거동을 나타내었다. 총 사상수대 크랙 개구변위의 기울기는 크랙 개시점을 결정하는데에 유용하였다. 예비 시험적인 C-scan 화상은 손상역의 초음파 진폭변화를 보여주었고, 손상역의 형상 및 크기가 유한요소 결과와 정성적으로 부합되었다. 손상역 크기에 관한 추가적인 연구가 요구되었다.

### 1. 서 론

음향방출법(AE)의 감시체계의 적용은 고압용기 또는 구조물의 사용중 손상의 발생, 진전 및 파열등을 감지함으로써 가능하다. 이를 위한 수단으로 기존의 파괴역학 이론을 토대로 하여 재료특성(파괴인성)과 AE 파라미터 사이의 상관관계에 관한 연구가 많이 진행되었다.<sup>(1, 2, 3)</sup> 그러나, 고 인성재료를 사용하는 금속 구조재의 경우 일반적으로 AE 발생이 적기 때문에, 연성재료에 대한 크랙 안정 성장시의 AE 검출을 재료특성과 매우 성공적으로 관련시킬 수 없었다. 그러나, 컴팩트 인장시편(CT시편)을 이용한 균열부의 general yielding에 대한 AE의 적용 가능성에

조사되었으며, 소성거동을 수반하는 한계 하중과 AE의 관련성이 있음이 보고되었다.<sup>(3)</sup> 또한 재료의 파괴인성은 크랙선단의 소성구역의 크기와 관련되고 그 크기가 에너지 흡수량과 관련된다.

이러한 손상역의 크기 및 양상의 조사를 위해 광탄성 방법과 홀로그래픽 또는 moire 간섭계의 이용이 가능하다.<sup>(4, 5)</sup> 최근에는 초음파의 감쇠와 C-scan 기법을 이용한 손상역의 크기 평가에 관한 연구결과가 보고되었다.<sup>(6, 7)</sup>

본 논문은 고강도 저합금강인 AISI 4130으로 제작된 CT 시편의 크랙선단에서 파괴거동을 관찰하기 위한 해석 및 실험적 방법을 다루고 있으며 그 결과를 수록하고 있다. 먼저 인장시편의 시험결과를 이용, 유

한요소 탄-소성 해석을 수행하여 크랙 개구변위 (COD)와 손상역의 크기를 계산하였다. AE 자료가 궁극적으로 균열을 갖는 연성소재의 파괴거동 확인 용으로 사용 가능한 가를 검토하기 위하여, 하중 증가에 따른 CT 시편 크랙 선단부의 소성역 전파 및 COD 증가시에 AE 발생현상을 조사, 분석하였다. 파괴 이전의 여러 하중 단계에서 소성역의 크기 및 형상을 초음파 C-scan 방법으로 구하고 그 결과를 유한요소 해석치와 비교하였다.

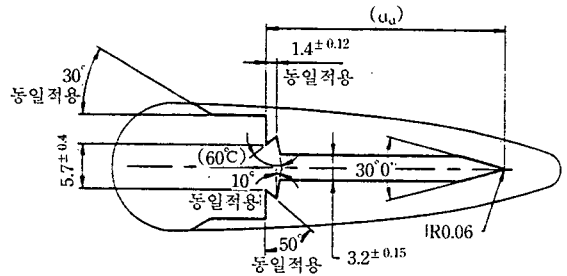
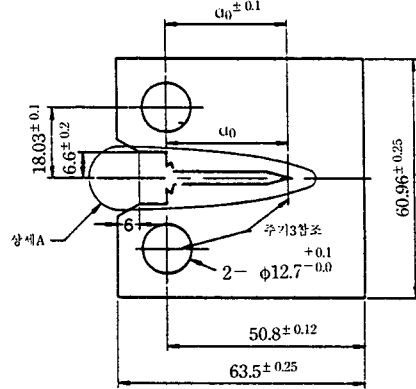
2. 시편 및 실험방법

사용한 시편의 형상은 인장시편의 경우 해석을 위한 소재 특성 조사를 위하여 ASTM E 8에 따른 표준형 (게이지길이 50mm) 평판시편을 사용하였으며, 컴팩트 인장시편 (CT시편)은 두께 3.0mm를 제외하고는 ASTM E 1290-89<sup>(8)</sup>에 따랐고 Fig. 1과 같다. 그림에서  $a_0$ 를 25.4mm로 기계 가공한 후 피로균열을 ASTM E 399의 조건에 따라 생성시켰으며, 크랙길이는 1.5mm로 하였다.

시험은 5개의 동일한 CT시편을 제작하여 MTS 시험기에 의하여 인장시편 및 CT시편의 파괴하중(100% 하중)을 구한 후 CT시편은 파괴하중의 40, 60, 80%에서 정지시켜 하중을 제거하였다. AE 자료는 하중 작용시의 AE특성과 COD특성을 조사하였고 C-scan 자료는 하중제거 후의 시편을 이용하여 관찰하였다.

C-scan 시험은 미국 Panametrics사의 multiscan system을 사용하였다. 시험 조건은 pulse-echo mode에서 중심 주파수 20MHz, 직경 3mm(0.12인치), 초점 거리 25.4mm(1인치) 탐촉자를 사용하였으며, scan size는 5mm×5mm, pixel size는 0.5mm로 하였다. 저면 반사파의 video signal에 진폭(amplitude) 및 주행시간(time-of-flight) gate를 설치하여 각 시편을 C-scan하였다.

AE시험은 AET 5000A 장비를 사용하였고 공진주파수 375kHz 센서, total gain 100dB, threshold level 0.2V로 하였다. ringdown counts와 events를 시간의 함수로 측정하였고, 또한 이들 parameter와 COD, total ringdown counts 및 total events와 COD 사이의 관계를 구하였다. AE 센서는 Fig. 1의 크랙 선단의 우측 상면에 부착하였다.



상세A(척도: 2/1)

Fig. 1. Configuration of compact tension specimens

3. 유한요소 해석 및 결과

CT시편의 하중단계별 해석은 ANSYS 프로그램을 이용하여 2차원 삼각형 6 node 요소, 평면응력 상태 하에서 탄-소성 해석을 수행하였으며, 해석시에 사용한 재료의 변형-변형율 선도는 인장시험 결과에서 얻은 Fig. 2의 결과를 이용한 비례한도와 인장강도 사이에서 5점의 응력 및 변형율을 사용하였다. 또한 재료의 기계적 성질은 Table 1과 같다.

Table 1. Mechanical properties of tensile specimen

Elastic Modulus : 209.44 Gpa
Tensile Strength : 1265.98 Mpa
Elongation : 7.86%
Poisson's Ratio : 0.33

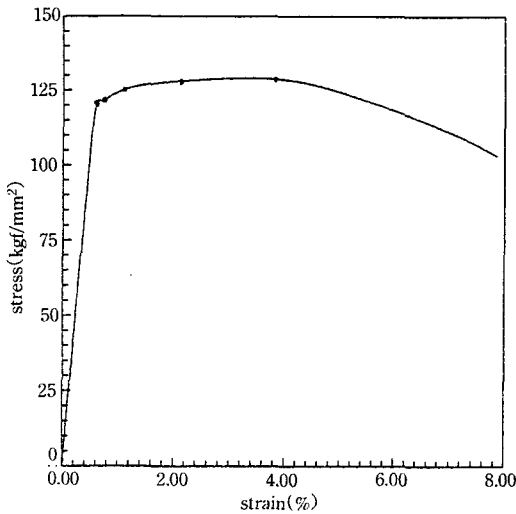


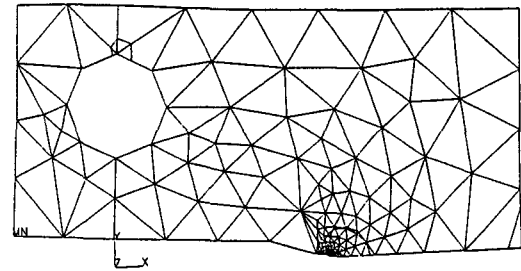
Fig. 2. Typical stress-strain curve of tensile specimen

100%하중(9810 N)에 대한 해석 증가응력이 소재의 항복영역 (Fig. 2의 비례한도점) 이상을 표시한 증가곡선을 Fig. 3(a)에 나타내었으며, 크랙선단을 확대한 결과를 Fig. 3(b)에 나타내었다.

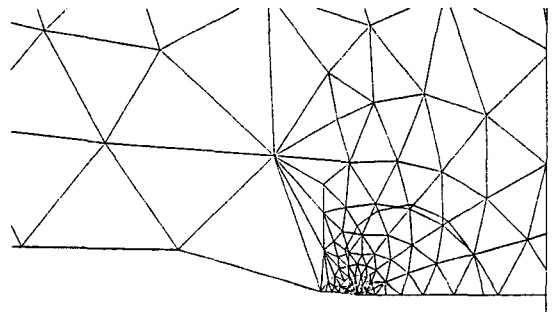
유한요소 해석시 각 하중 단계별 증가응력이 Fig. 2의 비례한도 강도이상일 때의 크랙선단으로 부터 손상영역의 크기와 Fig. 3(a)의 크랙 개구변위 (COD) 측정점(x=0, y=1.6mm)에서의 변형량을 시험결과와 함께 Table 2에 나타내었다.

COD의 경우 CT시편 실험결과와 해석결과와의 오차는 7848 N이내에서는 10% 이내의 오차를, 파괴하중 (9810 N)에서는 30~50%의 큰 오차를 갖고 있음을 알 수 있다.

이상의 결과에서 해석결과의 손상영역은 하중이



(a) Equivalent yielding contour



(b) Crack tip detail

Fig. 3. Finite element analysis results

증가하여 파괴하중 부근에서는 실제보다 과소평가됨을 알 수 있고 손상영역이 발생한 후부터 상당히 진행된 후에 파열이 발생함을 알 수 있다.

#### 4. 시험결과

##### 4.1. AE 시험결과

Fig. 4에는 CT시편 (No. 2)의 파괴시 COD에 대한 2초 간격으로 획득한 ringdown counts와 events의 결과를 나타내었으며 파괴하중단계 (Table 2의 1.07

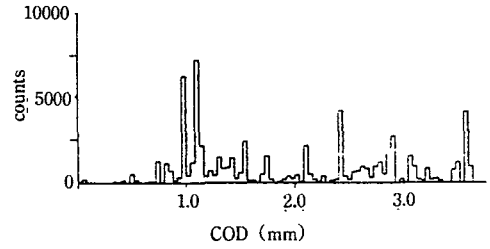
Table 2. Comparison between analytical and experimental results

Load step (N)	Damage zone size		COD (mm)					
	x (mm)	y (mm)	Analysis	Experiment				
				No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
3924	0.85	0.65	0.276	0.304	0.286	0.279	0.279	0.273
5886	2.03	1.50	0.430	0.471	0.451		0.441	0.442
7848	3.33	2.36	0.602	0.683	0.669			0.662
9810	4.85	3.42	0.810	1.260	1.074			

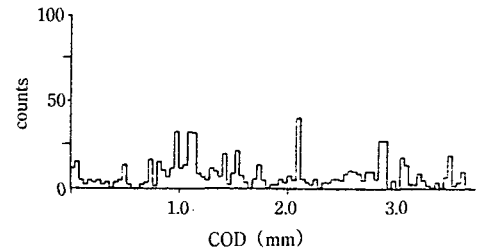
mm COD)에서 AE가 집중적으로 발생되고 있는 점 및 전반적인 거동은 유사하다고 판단되지만 events의 경우 발생량이 너무 적고 total counts의 기울기의 구분이 선명하지 못하기 때문에 본 시험소재는 ring-down counts의 자료를 이용하여 관찰하였다. 여기서 최대하중점 (COD 1.0mm 부근) 이후는 하중이 감소하는 구간으로 크랙의 진전시 AE의 증가, 감소가 번갈아 발생하고 있다. 이러한 현상은 문헌 [2]와 [3]에서의 결과와 비슷한 거동을 나타내고 있으며, 연성 재료의 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다.

2초 간격으로 획득한 ringdown counts의 하중단계별 정밀분석을 위한 자료를 Fig. 5에 나타내었으며 COD가 1.0mm 이내의 범위에서 하중이 증가할수록 counts가 증가하는 경향은 나타나고 있으나 파괴하중 부근의 counts에 비하여 상당히 적게 발생하고 있음을 알 수 있다.

이상의 현상은 A533 소재에서의 AE 발생기구 결과<sup>(9)</sup>에서 설명한 현상으로 설명할 수 있다. 초기의 microcrack 생성은 계재물(주로  $M_nS$ )의 분리에 의한



(a) Ringdown counts vs. COD



(b) Events vs. COD

Fig. 4. Behavior of AE (specimen No.2)

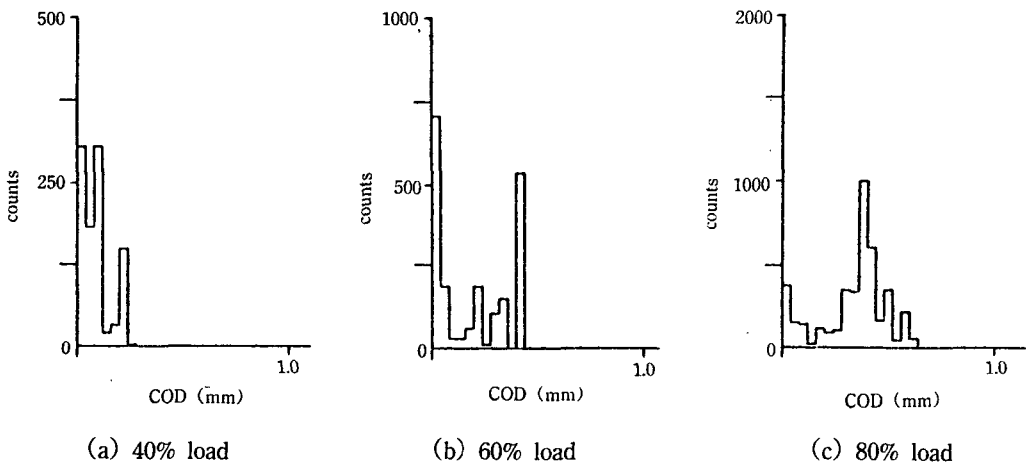


Fig. 5. Acoustic emission counts at various load steps

것으로서 크랙선단의 소성역 밖에서 넓게 발생한 후 microcrack의 합체현상인 주요 crack 성장시 크랙선단에서 AE가 많이 발생하게 된다.

AE의 궁극적인 목적은 구조물이 하중을 받고 있을 때 감시체계의 응용성이므로 어떤 구조물이 failure 단계인지 아닌지를 판단하는 것이 중요하게 된다. 이

를 위하여 total counts의 자료를 분석하는 것도 필요하다. Fig. 6에 COD에 대한 하중단계별 total ring-down counts의 결과를 나타내었으며 Fig. 4에서의 결과와 마찬가지로 파괴하중점 부근에서 counts의 기울기가 급격히 증가함을 알 수 있다.

이상의 total counts의 결과를 정리하면 Table 3과

같이 요약되고 재료의 파괴하중에 상당하는 COD 1.26mm(시편번호, 1) 및 COD 1.07mm(시편번호, 2)일 때의 total counts가 급격히 증가하고 있다.

Table 3. Total counts vs. load

Load(N)	시편번호	Total counts
3924	3	1000
5886	4	2000
7848	5	4300
9810	1	17000
	2	13000

본 시험시편의 경우 파괴하중의 40~80%범위에서 크랙선단에서의 실제적 손상영역이 상당히 생성되었

음에도 불구하고 AE가 적게 발생하고 있다. 하중증가에 따라 AE 발생이 완만하게 증가하는 구역은 소성변형에 따른 크랙선단 둔화구역이고 AE의 급격한 변화구역은 크랙진전 개시구역으로 알려져 있다.<sup>(1)</sup> 시편 1 및 2에 대하여 최대하중(파괴하중) 지점까지 total counts에 대한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 B점들은 Table 2의 최대하중(파괴하중)에 해당하는 COD의 값과 일치하고 있다. 일반적으로 연성 재료는 크랙의 개시점 이후 안정 성장을 동반하며 Fig. 7에서 A점이 크랙 개시점이고 B점까지의 크랙이 안정성장한 것으로 판단된다. 결과적으로 failure 기준의 지점은 A점으로 하는 것이 합당하며, AE에 의하여 측정된 크랙 개시점은 Table 2의 해석결과에 더욱 접근되고 있음을 알 수 있다.

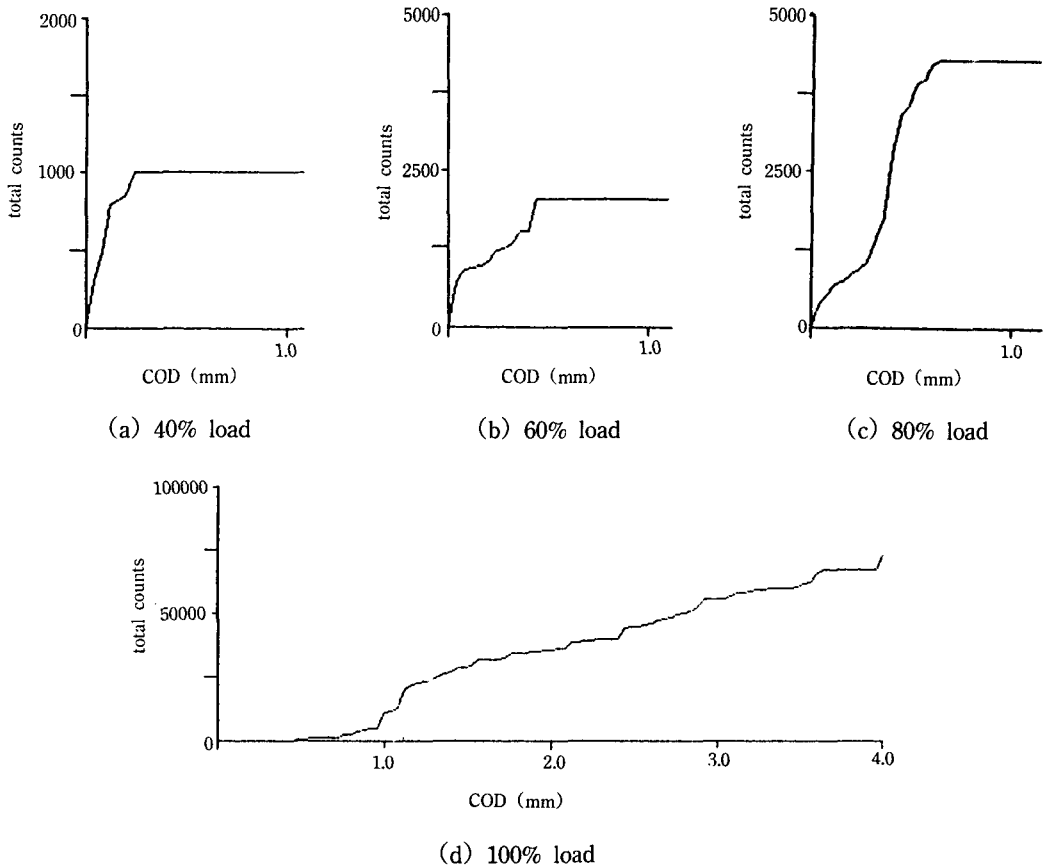
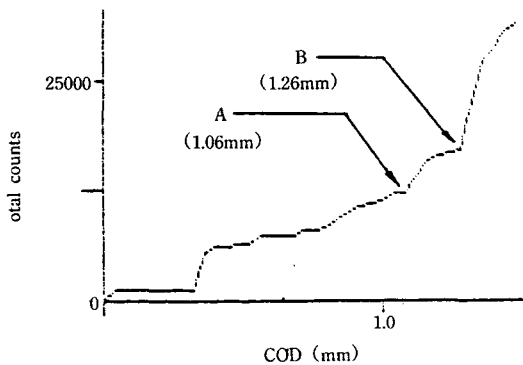
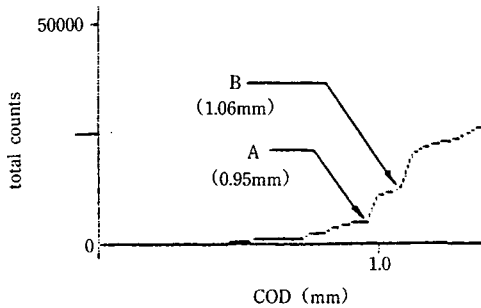


Fig. 6. Total ringdown counts vs. COD



(a) Specimen No.1



(b) Specimen No.2

Fig. 7. Total ringdown counts vs. COD

4.2. C-scan 시험결과

Fig. 8은 파괴하중의 80%까지 하중이 가해진 CT시편에 대한 amplitude C-scan 결과를 보여주고 있다. 이 시편을 육안 또는 현미경으로 관찰해 보면 크랙 선단에 심한 necking 현상의 발생으로 급격한 두께변화가 생기며, 크랙 선단부에서 멀어질수록 그 정도가 약해짐을 알 수 있다. Fig. 8의 초음파 C-scan 결과는 먼저 이런 현상을 정성적으로 잘 표시하고 있다. 이 화상면에서 타원형으로 보이는 손상영역의 크기는 대략  $x=3.2\text{mm}$ ,  $y=1.4\text{mm}$ 로서 Table 2의 유한요소 탄소성 해석에서 구한 비례한도점 이상의 소성영역의 크기와 x방향은 거의 일치하고 있으나 y방향은 시험결과가 훨씬 낮은 값을 나타내고 있다. 이러한 경향은 40% 하중과 60%하중 시편에서도 관찰되었다.

이러한 차이는 초음파 C-scan 결과가 하중제거 후

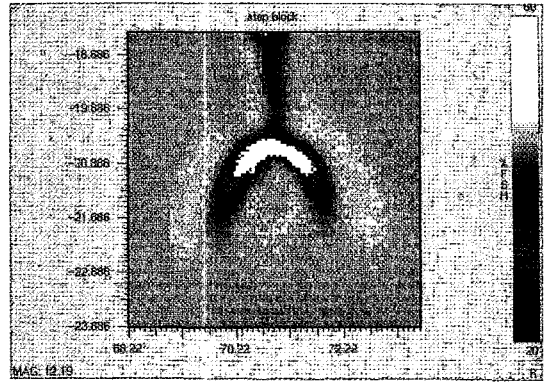


Fig. 8. C-scan image of damage zone for 80% loaded specimen

의 결과이며 necking으로 인한 표면변형에 의해 항복 영역의 분명한 구역을 찾지 못하였음에 기인한 것으로 판단된다. 해석 결과와의 정량적 비교를 위하여, 시편의 표면조건이 일정하도록 만든 후 진폭 또는 주행시간의 변화가 표면상태에 기인된 것이 아니라 순전히 재료내의 성질변화에 의한 것이 되도록 해야 할 것이다. 이에 관한 연구가 현재 진행중에 있다.

5. 결 론

유한요소 해석, AE 및 C-scan 기법을 이용하여 균열이 있는 AISI 4130 CT시편의 파괴거동 연구 결과는 다음과 같이 요약될 수 있다.

- (1) 유한요소 탄-소성 해석에서 얻은 COD 값은 failure 직전까지 시편 실험결과와 잘 일치하였다.
  - (2) 시험시편은 AE의 총 발생량, AE 발생량이 완만한 구역과 급격한 두 구간으로 분리 가능한 점, 최대하중 이후의 파괴시 AE의 증, 감이 교차하고 있는 점 등으로 미루어 연성재료의 거동을 보였다.
  - (3) AE의 total counts의 기울기가 급격한 지점을 통하여 크랙의 개시점을 발견할 수 있었고 재료의 failure 지점을 정확히 결정할 수 있었다.
- (1) 초음파 C-scan으로 구한 손상역의 크기는 해석시에 failure 판단을 위한 보조자료로 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

- 1) H. Takahashi, M. A. Khan, M. Kiuchi and M. Suzuki, *Experimental Mechanics*, March 1981, pp.89~99.
- 2) Y. Blanchette, J.I. Dickson and M.N. Bassim, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.20 (1984), pp.359~371.
- 3) Y. Blanchette and J.I. Dickson, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.17 (1983), pp.227~234.
- 4) A. S. Kobayashi, "Photoelastic Technique," *Experimental Techniques in Fracture Mechanics*, Ed. A. S. Kobayashi, Iowa State University Press, Ames, Iowa, (1973), pp.126~145.
- 5) T. D. Dudderar, *Experimental Mechanics*, Vol. 9 (1969), pp.281~285.
- 6) C. C. Poe, Jr., W. Illg and D. P. Gerber, Review of progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, D. O. Thompson and D. E. Chimenti Eds., Plenum Press, Vol. 5B (1985), pp.1215~1226.
- 7) Vinay Dayal, Jawad D. Mokhtar and David K. Hsu, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, D. O. Thompson and D. E. Chimenti Eds., Plenum Press, Vol.11 (1992), pp.1547~1554.
- 8) ASTM E 1290-89, Feb. 24, 1989 pp.946~961.
- 9) Takanori Ohira and Yih-Hsing Pao, "The Second International Conference on Acoustic Emission," October 1985, pp.274~s285.

## Fracture Behavior of Pre-cracked AISI 4130 Specimens by Means of Acoustic Emission and Ultrasonic C-scan Measurements

J. W. Ong\*, S. I. Moon\*\* and H. J. Jeong\*\*

\* Chungnam National University

\*\* Agency for Defense Development

**Abstract** Fracture behavior of pre-cracked compact tension specimens made of AISI 4130 steel was investigated using acoustic emission (AE) and ultrasonic C-scan measurements. While each specimen was loaded up to a certain level, various acoustic emission parameters were recorded together with the crack opening displacement (COD). An elastic-plastic finite element analysis was performed to calculate COD and the damage (plastic) zone size ahead of crack tip. Ultrasonic C-scans, in a pulse-echo, immersion mode, were done for mapping the damage zone size. The agreement between the finite element results and the measured COD was satisfactory. Based on AE results, the test specimens were found to show ductile behavior. The slope of the total ringdown counts vs. COD curve was useful to determine the crack initiation. The preliminary C-scan images showed evidence of changes in the amplitude of ultrasonic signal in the damaged region, and the shape and size of the damage zone matched qualitatively with the finite element results. A further work on the damage zone sizing was also pointed out.