

## AE에 의한 SK-5강의 파괴기구 구명

김 상철\*, 이 억섭\*, 함 경춘\*\*, 오 범석\*\*\*

## On Fracture Mechanism of SK-5 Steel by AE Method

S. C. Kim\*, O. S. Lee,\* K. C. Ham,\*\* B. S. Oh\*\*\*

## Abstract

It is well known that mechanisms of fracture and crack growth depend upon material characteristics such as fracture toughness, environmental condition, crack geometry and mechanical properties. It seems to be very important to investigate the effects of the above factors on the behavior of structural components which contain flaws for the detailed evaluation of their integrity.

In this experimental research, fracture behaviors of SK-5 high carbon steel was investigated by using Acoustic Emission(AE) technique. Fracturing processes of materials were estimated through both the tension test with nominal specimens and the fracture test with compact tension specimens.

The critical applied load which corresponds to the crack initiation and propagation is very important for the determination of yield strength of fracture toughness. The critical applied load( $P_0$ ) was determined through AE method and the source of AE signal was estimated by fractography analysis. The experimental results may contribute to the safety analyses and strength evaluation of structures.

\* 인하대학교 기계공학과 (총신회원)

\*\* 인하공업전문대학 기계설계과 (총신회원) 130

\*\*\* 천안공업전문대학 용접기술과

## Nomenclatures

<p>B : Thickness</p> <p>da : Crack extension</p> <p>E : Young's modulus</p> <p>G : Crack driving force</p> <p>K : Stress intensity factor</p> <p><math>J_{ICAE}</math> : <math>J_{IC}</math> determined by AE</p> <p>J : J-integral</p> <p><math>K_{IAE}</math> : <math>K_{IC}</math> determined by AE</p>	<p><math>K_{IC}</math> : Plain strain fracture toughness</p> <p>m : Material constant</p> <p><math>N_T</math> : Total number of AE event</p> <p><math>P_{ys}</math> : Load at yield point</p> <p><math>P_5</math> : 5% offset load</p> <p><math>P_{AE}</math> : Load at increasing AE event</p> <p>W : Width of specimen</p> <p><math>\sigma</math> : Stress</p>
--	--

### 1. 서 론

각종 기계나 구조물은 사용도중 예기치 못한 상태에서 갑작스런 파괴를 일으켜 인적, 물적피해를 가져오는 경우가 종종 있다. 취성 및 피로파괴는 재료를 제조할 때 생기는 부재내에 미소한 크랙과 사용중에 어떤 원인에 의해서 발생하는 미소 크랙이 외력이나 주위의 환경에 의해서 점차로 또는 급속하게 성장하는 결과로 일어나게 된다. 압력용기의 사용, 해상구조물 및 고장력강의 사용이 확대됨에 따라 이들의 대형사고를 방지하기 위해서 파손원인에 대한 정확한 해석을 통하여 더욱 더 높은 안전성의 평가가 요구되고 있다. 그러나 이러한 파손해석에서 기본이 되는 재료내의 미시적인 크랙성장기구를 구분하고 감지하는 실험적인 기술이 아직 완전하게 정립되어 있지 않고 있다. 재료내의 손상량을 정량화하기 위해서는 미시적인 파괴거동을 측정하는 것이 필요하므로, 현재 AE(Acoustic Emission) 방법에 의한 파괴기구의 해석에 대한 연구가 활발히 진행 중이나, 이에 대한 정량적, 정성적인 파괴역학해석은 아직도 많은 연구를 필요로 하고 있다.

본 연구와 관련되어 있는 주된 연구 동향을 개괄적으로 살펴보면 다음과 같다.

Dunegan과 Harris는 AE기술을 파괴역학에 최초로 적용시켰으며 AE발생량은 소성역의 체적에 비례한다고 발표하였으며<sup>(1)</sup>, 파괴인성치( $K_{IC}$ )를 결정하는데

AE의 유용성에 대한 연구가 활발히 진행되어 Pop-In을 감지할 수 있음을 제시하였다.<sup>(2-3)</sup> Hartbower 등은 AE 특성과 크랙의 불안정성에 대하여 연구하였는데 일반적으로 평면변형 상태하에서 Pop-in은 AE의 진폭(Amplitude)을 증가시켰으며, 평면응력 상태하에는 AE의 진폭과 발생율을 증가시킨다고 보고하였고<sup>(4)</sup>, Blanchette, Dickson와 Bassim은 7075-7651 AI 합금에 대해서 C-T(Compact tension) 시편으로 파괴인성치 결정시험에 AE기술을 이용하여서 ASTM 규정에 의한 파괴인성치( $K_{IC}$ ,  $J_{IC}$ )와 AE에 의해서 결정된 파괴인성치( $K_{ICAE}$ ,  $J_{ICAE}$ )를 비교하였으며, 대체적으로 AE에 의해서 결정된 파괴인성치가 ASTM 규정에 의해서 결정된 파괴인성치보다 6~10% 정도 낮게 나타났다고 보고하였다.<sup>(5)</sup> Kishi 등은 미시크랙이 성장할 때의 AE신호를 해석함으로써 상세한 파괴기구를 연구 규명 중에 있으며<sup>(6-7)</sup>, 비균질 재료인 주철, 콘크리트 및 암석 등에 대한 미시크랙의 진전을 예상하는데 AE를 이용한 연구가 적절한 방법임이 판명되었다.<sup>(8-9)</sup> 그러나, 이러한 유용적인 측면외에 아직도 어려운 점이 많이 남아 있다. 예를 들어서 AE의 연구는 Digitizing되는 전기신호에 의해서만 연구될 수 있고, AE신호는 발생되는 시간과 전기신호가 Digitizing되는 시간 사이의 차이가 발생되며, Digitizing된 많은 정보를 처리할 수 있는 기억용량이 큰 Data 처리장치가 필요하게 된다.<sup>(10)</sup>

본 연구에서는 AE 기술(Acoustic Emission Technique)을 이용하여 평활재 시편에 대한 인장시험과 크랙을 갖는 시편에 대한 파괴시험을 하여 재료에 하중을 작용시켰을 때 발생하는 AE 발생량을 측정하여 재료의 파괴과정을 마이크로 컴퓨터를 사용하여 평가하였다. 아울러 AE 발생량과 응력확대계수 K와 상호관계에 대하여도 비교 검토하였으며, 시험 후 파면을 전자현미경으로 관찰하여서 AE 발생원을 추정하였다.

## 2. 이론적 배경

AE는 재료가 외력을 받아서 변형시 탄성변형에너지의 갑작스런 방출에 의해서 나타나는 일시적인 탄성응력파이며, 전위의 Pile-up, 상변환(Phase transformation), Twinning, 입자경계면에서의 Slippage와 크랙의 발생과 전파등이 AE발생의 주원인으로 알려져 있다.<sup>(11-12)</sup> 재료내에서의 변형에 의한 AE발생은 다른 외부에서 하중 등이 작용되어져야 한다는 점이 다른 비파괴 검사기술과는 다른 특이한 특성이다.

거시적인 측면에서 보면 고체에서의 AE의 주된 발생원은 소성변형과 크랙의 발생과 전파 등이다. 시간영역(Time domain)에서의 AE신호는 여러가지 변수로서 처리되는데, 이러한 변수는 Signal amplitude, Duration time과 Rise time, AE계수 등으로 정의되며, 일반적으로 Threshold 수준을 계에서 Background noise 수준보다 약간 높은 전압 수준으로 고정하여서 필요없는 잡음신호를 최소화할 수 있다.

AE 신호를 발생형태에 따라 2가지로 구분하면, 첫 번째로 소성변형 등에 의한 연속적인 방출형태(Continuous type emission)로서 방출에너지가 작기 때문에 측정시 높은 증폭도가 요구되며 또한 방출주파수도 높아서 100KHz 이상에서 감지되고, 두 번째로 폭발적인 형태(Burst type emission, SWE)로 크랙의 진전 등에 의해서 생기는 진폭이 큰 탄성과라서 대체적으로 낮은 증폭도에서도 감지되므로 3~40KHz의 범위에서 측정될 수 있다.<sup>(13)</sup>

크랙을 내포한 무한판에서 크랙이 da만큼 진전할 때 방출되는 에너지는 선형파괴역학에서 단위두께에 대하여 탄성에너지 해방율, 또는 Crack driving force(G)로서 다음과 같이 표시된다.<sup>(14)</sup>

$$G = \pi \sigma^2 da / E \quad (2-1)$$

여기서,  $\sigma$  는 무한판에서의 작용응력

da는 크랙진전길이

E 는 재료의 탄성계수이다.

식 2-1에서 볼 수 있는 바와 같이 전체 탄성에너지 해방율은 작용응력의 크기와 크랙의 길이에 의존하며, G와 AE량은 서로 관련성이 있다. 이러한 원리를 이용해서 결함을 갖는 시편에 대한 AE거동을 Dunegan, Harris와 Tatro등이 파괴역학에 적용시켜 전체의 AE 발생량  $N_T$ 와 응력확대계수와의 관계를 유도한 최초의 모델을 제시하였다.<sup>(11)</sup> 즉, 전체의 AE 발생량  $N_T$ 는 K의 4승에 비례한다고 제안하였으며, 그후 많은 연구자들이 지수(m)에 대해서 연구하였으며, 재료에 따라서  $m=2\sim 8$  사이의 값을 갖는다고 발표되었다.<sup>(15)</sup>

평활재를 인장시험할 경우에는 소성변형의 시작점은 AE 거동이 시작되는 응력  $\sigma_{AE}$ 로 추정되어질 수 있고, 실제로 MC25베이나이트 재료의 인장시험시  $\sigma_{AE}=300 \text{ MNm}^{-2}=0.5\sigma_0$ 로서 항복강도보다 매우 낮게 판명되었으며, 소성변형은 비교적 에너지가 큰 AE를 발생시키는 ( $7 \times 10^{-9}$  Joule) 재료 내부에 전위작용과 Multiplication에 의하며, 항복 후에 가공경화가 됨에 따라서 전위작용의 감소로 AE 거동은 완화된다. 즉 가공경화도가 커질수록 더욱 더 낮은 에너지( $10^{-11}$  Joule)를 갖는 AE가 발생된다. 취성이 큰 재료의 파괴시험시 크랙의 성장은 작용응력이 재료의 벽개응력(Cleavage stress)에 도달했을 때 발생된다고 보고하였으며, 이것은 크랙선단의 미시적인 크랙형성으로 설명되어질 수 있고, 파괴인성치( $K_{Ic}$ )보다 매우 낮은 응력확대계수에서 생성되어지며 특히 퍼얼라이트-웨라이트 미시조직에서는 층상흑연의 크랙킹에 의한 것으로 설명되어질 수 있다.

## 3. 인장시험에서 AE의 발생양상

재료의 기계적 성질을 평가하기 위해 인장시험이 행하여지고 있다. 본 연구에서는 인장시험시 재료의 변형거동 특성을 검토하기 위해서 비파괴시험에 사용되는 AE 측정기술을 이용하였고, 시험재료로써는 SK-5 종의 고탄소 공구강을 사용하였다. 정적하중 작용에 따라서 재료가 변형되는 과정 중에 발생하는 AE를

마이크로 컴퓨터를 이용하여 Data를 처리하였으며, 전자현미경에 의한 파면관찰을 통하여 AE 발생양상과 파면과의 관계를 해석하였다.

3-1 시험편 및 시험방법

인장시험의 채취방향은 압연방향과 평행하게 하였으며, 840°C에서 16분간 유지후 80°C의 기름에 담금질한 후, 340°C에서 뜨임열처리를 실시하였다. 재료의 기계적 성질과 화학적 성분을 Table 1과 Table 2에 각각 나타내었고, 인장 시험편의 규격은 ASTM E8-85의 규격을 따랐으며, 시험편의 폭은 12mm, 두께는 2.25mm 그리고, 평행부의 길이는 50mm짜리를 가공하였다. 파괴인성치 결정 시험용 시험편으로 ASTM E399-83<sup>(16)</sup>에 규정된 C-T 시험편을 채택하였고, 시험편은 압연 방향과 크랙 방향이 수직하게 되도록 채취하였고, 피로 크랙은 ASTM E617-83<sup>(17)</sup>의 규정에 따라서 피로시험기로 예비 크랙이 2.5mm 이상이 되게 가공하였다.

Table 1. Mechanical Properties

탄성계수 GPa	포아송비	연신율 %	인장강도 MPa	항복강도 MPa
215.8	0.30	8.83	1629.6	902.9

Table 2. Chemical Compositions (Wt %)

C	Si	Mn	P	S	Mg
0.83	0.18	0.40	0.03	0.01	1.50

시험기로는 만능재료 시험기를 사용하였고, AE 발생 감지기로는 소형 시험편의 경우 실험실에서 많이 사용되는 Resonance주파수가 1MHz인 pick-up으로 감지한 AE를 Pre-Amp로 40dB로 증폭하여 크래킹 모니터에 내장된 Main-Amp로 다시 40dB로 증폭시켜 전체의 Gain이 80dB가 되도록 하였다. 크래킹 모니터에서 Threshold 수준을 0.07V로 하고, 10~300 KHz의 범위에서 filtering 한뒤, 0.2~1.6V 사이의 진폭을 0.2V 간격으로 8등급으로 구분하여 개수하였고, 이 등급별로 1초 동안 누적 개수된 AE 발생량을 GPIB 인터페이스를 통해서 컴퓨터로 전송하여 Data를 기록하였다. 시험중 부하하중을 0.5mm/min.의 인장속도를 시험하였으며, 하중과 크랙개구변위(COD)를 X-Y 기록계에 자동기록하였고, 크랙개구변위와 하중은 A/D 변환기로 변환하여 컴퓨터로 처리하였다. 인장시험시 실험장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다.

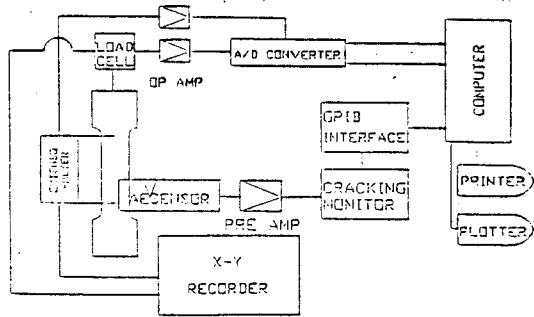


Fig. 1 Block diagram of instrumentation for acoustic emission analysis

3-2 시험결과 및 고찰

인장시험시 작용 하중에 따른 AE 발생양상을 확인하기 위하여 전술한 방법으로 시험을 실시하였다. AE 감지기 장착후 시험시 외부잡음을 없애기 위해서 Threshold 수준을 0.07V로 고정하여 시험을 실시하였으며, 탄성영역인 490N의 하중을 가하여 Grip과 시험편에서의 미끄러짐에 의한 잡음을 제거시켰다.

Fig. 2는 하중-변위 곡선을 컴퓨터에 입력된 Data에 의해 그려진 그림이다. 이 그림에서 탄성부에서 변위가 일정하게 나타나는 이유는 A/D 변환기의 Digitizing Resonance의 resolution의 한계가 0.039mm이기 때문이며, 하중 P는 최대치 49KN을 128등분함으로써 382N 미만은 컴퓨터가 읽지 못하는데 그 원인이 있다. Fig. 3는 하중의 변화에 따라서 초당 발생한 AE 발생량을 나타낸 그림으로 작용 하중초기에 80개의 발생량 정도로 거의 일정하게 발생하고 하중-변위곡선의 한계점인 12KN 이후 약간 증가하여 120개 정도의 발생량을 유지하다가 24KN 이후에서는 AE는 발생량이 급속히 감소하며, 31KN 이후 거의 AE가 발생하지 않고, 38KN 이후 급진적으로 증가하는 양상을 띄고 있다. Fig. 4는 AE 발생량을 하중의 변화에 따라서 누적하여서 나타낸 것으로 하중이 26KN까지 점차로 증가하다가 이후 거의 일정한 값을 유지하며 38KN 이후 급진적으로 AE 발생량이 증가한다. Fig. 5은 AE 발생량을 변위의 증가에 따라서 진폭을 8등급으로 구분하여 AE발생 분포를 나타낸 그림으로 0.2V와 1.2V 진폭의 AE 발생량이 거의 유사한 양상을

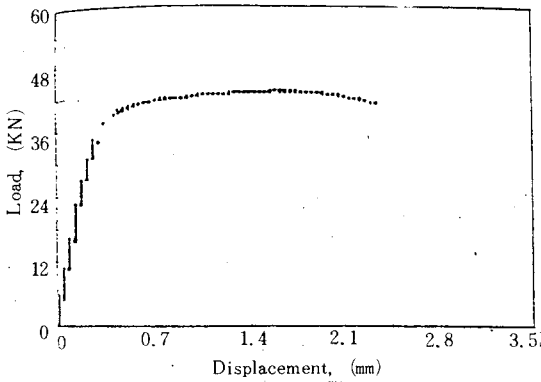


Fig. 2 Load vs. displacement by tension test

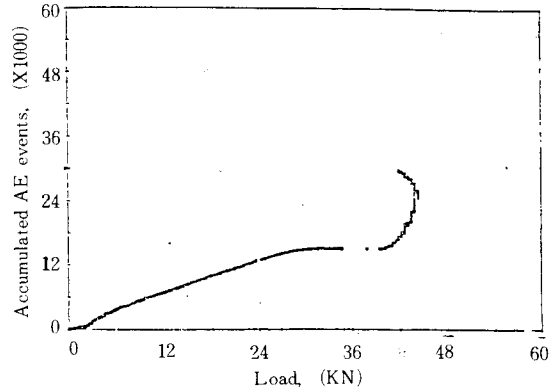


Fig. 4 Load vs. accumulated AE events by tension test

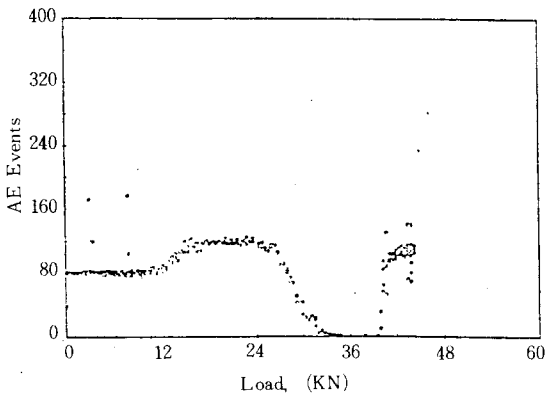


Fig. 3 Load vs. AE events by tension test

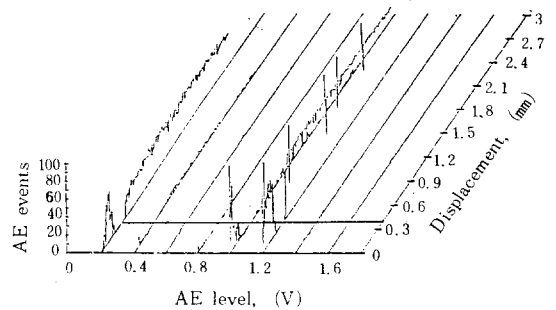


Fig. 5 Distribution of AE amplitude vs. displacement tension test

나타내고 있다. Fig. 6은 변위의 증가에 따라서 AE 발생량을 누적한 것으로, 누적한 AE 발생량은 초기 탄성부에서 거의 직선적으로 증가한 후 Fig. 2에 나타난 하중-변위 곡선의 만곡부에서는 거의 일정하게 유지되고, 변위의 증가에 따라 선형적으로 증가하나 변형 말기에 증가율이 다소 감소한다.

하중-변위곡선인 Fig. 2와 작용하중의 증가에 따라서 발생된 AE를 나타낸 Fig. 3을 살펴보면 AE는 하중-변위곡선의 직선부의 상한계점인  $P_{0.1}$  12KN까지 거의 일정하게 80개 정도로 발생되고 있으며, AE 발생량이 증가되는 점을 소성변형이 시작되는 점으로 간주할 때 AE 발생량이 증가되는 점  $P_{AE}$  (12KN)가 0.2% Offset에 의해서 결정된 항복하중  $P_{ys}$  (26KN)보다 54% 정도 낮다. 이 결과는 Mirabile 등의 연구와 일치한다.<sup>18)</sup>

탄성변형후 소성변형 상태에서는 전위 작용의 활성

화에 따라 AE 발생량이 증가되어서 Fig. 3에서와 같이 120개 정도의 AE가 발생된다. 하중이 더욱더 증가하여서 항복점(26KN)이 되면 AE 발생량이 완화된다. 이는 재료 내부에서 가공 경화의 증가에 의한 전위작용의 둔화에 따라서 AE량은 감소하게 되며, 항복점후 극한하중( $P_{ys} < P < 35KN$ ) 사이에서는 가공경화의 정도에 따라 AE의 발생이 더욱 낮아지기 때문이다. 38KN 이후, ( $38KN < P < P_{ult}$ )에서는 소성변형기구가 변화되어서 Kölher와 Gilmen에 의해서 제안된 Multiple-cross-glide 기구로 전환되므로 전위운동의 증가로 AE의 발생량은 증가된다. 극한하중을 지나서는 ( $P > P_{ult}$ ) 새로운 동적인 전위형성과 기공의 형성 등에 의해서 AE의 발생량이 급격히 증가하는 것을 Fig. 2와 Fig. 4를 통해서 확인하였다. Fig. 5에서 0.39 mm 변위후 0.2V와 1.2V 수준의 AE의 발생이 급격히

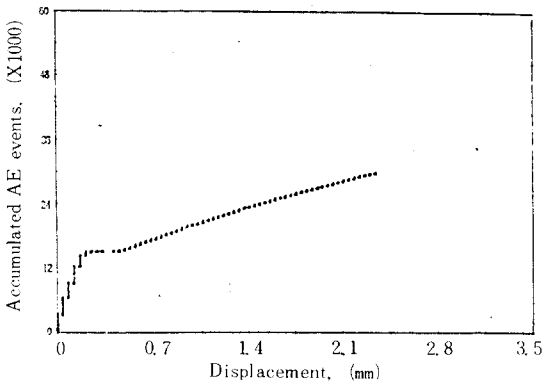


Fig. 6 Displacement vs. accumulated AE events by tension test

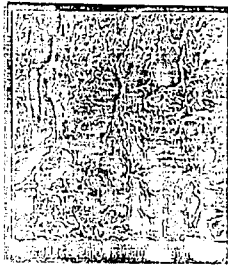


Photo. 1 Scanning electron micrograph of fractures surface by tension test

증가된다. 즉, 이 시기에 입자 사이의 슬립과 조직내부에서의 미소결합 등으로부터 미시크랙의 형성 및 이들의 부분적인 합체에 의해서 AE가 발생되는데, 취성 재료일수록 AE의 방출 커지는 사실로 미루어보아, 미소크랙 및 미소딤플의 발생은 낮은 0.2V 수준의 AE로 나타나며, 이들의 합체에 의한 AE는 1.2V 수준의 AE로 발생된다고 생각된다. 또한 Photo. 1의 파면에서 미소딤플을 동반한 섬유상의 파면과 입자내의 미시크랙의 성장과 합체에 의한 파단의 경계인 아벽개파면의 양상을 통해서 위의 결과를 확인하였다.

#### 4. 파괴인성치 결정시험에서 AE의 발생양상

재료의 파괴강도를 파괴인성치인  $K_{Ic}$ ,  $J_{Ic}$ 와 CTOD 등으로 평가하려 할때 정확한 크랙진전 개시점의 측정이 요구된다. 근년까지 파괴시험에서 크랙진전 개시점을 감지하려는 수많은 방법이 제안되었다.<sup>(19-20)</sup> 그중에서 특히 전위차법은 금속재료에서 널리 사용되고 있

다.<sup>(21)</sup> 본 연구에서는 파괴인성치 결정시험에서 크랙진전에 따른 AE의 발생양상을 비교, 검토하였고, 파괴시험후 전자현미경으로 파면을 관찰하여 AE의 발생원을 추적하였다.

#### 4-1 시험방법

본 실험에서는 CT시편을 사용하여 앞에서 설명한 방법으로 실험한 후, ASTM에 제시되어 있는  $P_Q$  점을 크랙진전 개시점의 하중으로 보고 이의 적합 여부를 검토하여 Srawley식에 의해 파괴인성치를 다음과 같이 결정하였다.<sup>(16)</sup>

$$K_I = (P / B W^{1/2}) f(\alpha) \quad (4-1)$$

$$\alpha = a/W$$

$$f(\alpha) = [ (2 + \alpha) (0.886 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4) ] / (1 - \alpha)^{3/2}$$

여기서, W는 C-T 시편의 크랙길이

W는 C-T 시편의 폭.

B는 C-T 시편의 두께

P는 작용하중이다.

#### 4-2 시험 결과 및 고찰

앞 절에서와 같은 방법으로 파괴인성치 결정시험을 하였다. Fig. 7에서는 COD의 증가에 따라서 하중과 AE 발생량을 나타낸 그림으로 COD가 0.16mm 이후 AE 발생량이 급격히 증가됨을 알 수 있으며, COD가 0.16mm까지 작용하중은 선형적으로 변화됨을 알 수 있다. 이때, P-COD 곡선의 형태는 ASTM 규정의 I형에 속함을 알 수 있고, 여기서, 5% Offset한 하중  $P_5$ 가 32KN이다. Fig. 8에서는 COD의 증가에 따라 작용하중의 변화와 누적된 AE 발생량을 나타낸 그림으로 AE의 발생량이 COD가 0.16mm까지 다소 증가하다가 이후  $P_5$ 의 COD인 0.49mm까지 기울기가 급격히 커지면서 증가하며 COD가 0.49mm 이후 기울기가 전보다 작게 증가한다. Fig. 9에서는 COD의 증가에 따라서 발생된 AE의 진폭을 8등급하여 각 진폭마다의 AE 발생량을 나타낸 그림으로 COD가 0.16mm까지 진폭이 0.2V인 AE가 발생되다가, COD가 0.27mm까지 0.2V 수준의 AE의 발생량이 증가하면서 0.4V 수준의 AE도 발생되고, 이후 COD가 0.49mm까지 0.2V

와 0.4V 수준의 AE가 점차적으로 증가된 후 COD가 0.49mm 이후 AE 발생량의 증감 폭이 크게 변동되며, AE 발생량은 다소 낮아지는 것을 0.2V의 진폭 수준을 갖는 AE 발생양상에서 확인할 수 있다. Fig. 8, Fig. 9에서 COD가 0.16mm 이후 1단계로 크랙선단에서 미시 크랙의 형성에 의해서 AE의 발생량이 다소 증가하다가 0.49mm 이후 2단계로 미시크랙의 합체에 의해서 파손된다고 예측할 수 있다. Photo. 2는 시편의 파단면을 촬영한 사진이며, Photo. 3은 파단면을 전자현미경으로 관찰한 사진으로, ←는 크랙의 진전방향이고, a)는 피로 크랙부, b)는 경계, 그리고, c)는 불안정 크랙진전부이다. 여기에서 피로 크랙부에서 나타난 선들은 압연방향을 나타내며, 피로크랙부와 불안정한 파단면 사이에 여러 개의 미시크랙이 합체된 형태로 구분된다. 즉 Mirable의 이론에서 취성과파괴 기구는

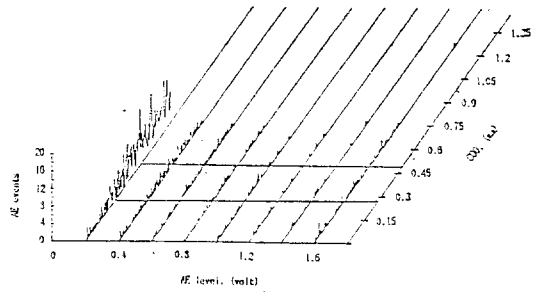


Fig. 9 Distribution of AE amplitude vs. COD by compact tension test

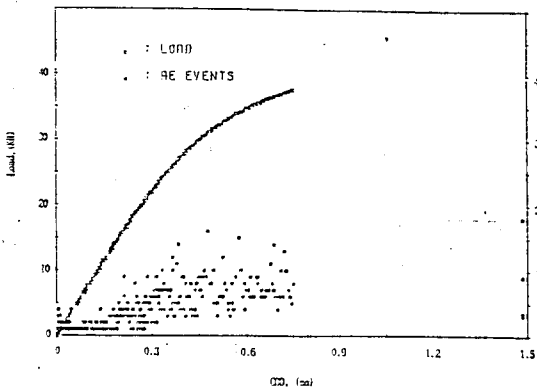


Fig. 7 COD-load-AE events by compact tension test

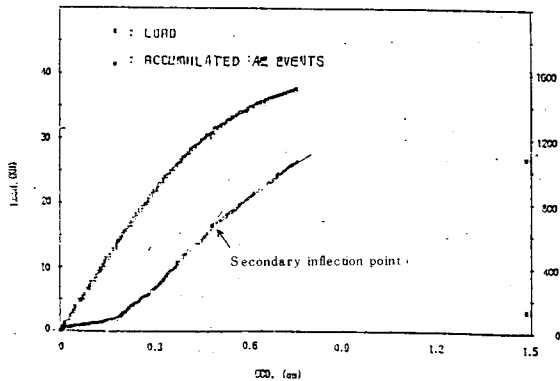


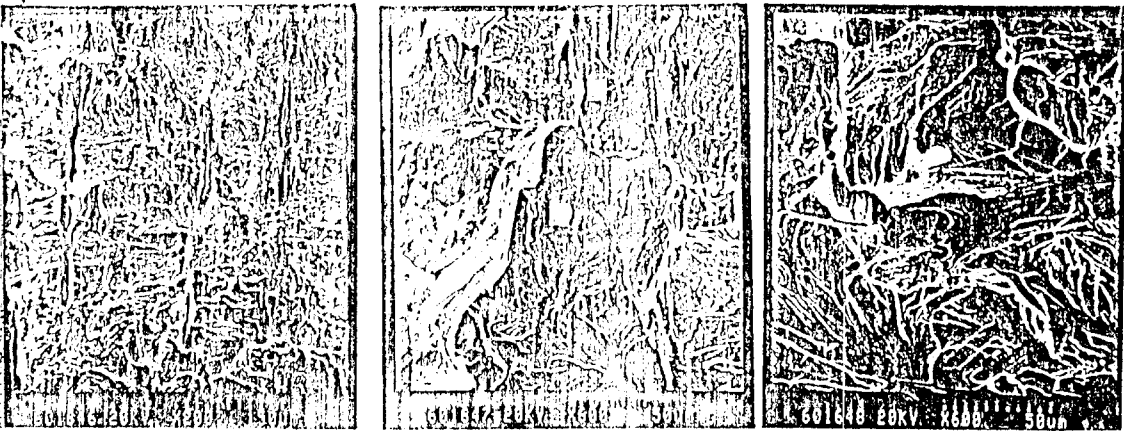
Fig. 8 COD-load-accumulated AE events by compact tension test



Photo. 2 Macro-fractograph of the fractures surface by compact tension test



Photo. 3 Scanning electron micrograph of fractures surface by compact tension test



(a) Fatigue crack zone                      (b) Boundary zone                      (c) Crack propagation zone

**Photo. 4** Zoomed scanning electron micrograph of fractures surface by compact tension test

작용응력이 조직의 벽개응력(Cleavage Stress)을 넘어서면서 미시크랙이 형성되며 이 미시크랙의 합체에 의해서 파괴되어 나간다<sup>(18)</sup>는 가정을 뒷받침한다. Photo. 4는 시편의 파면사진인데, Photo. 4-a는 피로크랙부, Photo. 4-b는 경계부, Photo. 4-c는 크랙 진전부의 전자현미경으로 확대하여 관찰한 사진이다.

본 실험에서 사용한 SK-5와 같은 재료는 Fig. 8에서 누적된 AE발생량이 초기 증가되는 부분이 벽개형태의 미시크랙이 형성되는 시기를 나타내며, 다시 기울기가 다소 둔화되는 부분은 미시크랙과 미시크랙의 합체에 의해서 새로운 파면을 형성하는데, 이것은 미시크랙이 연결되는 면적이 작기 때문에 AE 발생량이 작기 때문이다. 초기에 누적된 AE 발생량의 기울기가 변화하는 점을 크랙진전 개시점으로 보면 본 연구결과와 같이 5% Offset 하중 P<sub>5</sub>보다 62%나 낮게 판정이 된다. 따라서 Fig. 9에서 누적한 AE 발생량의 기울기가 2차적으로 변화하는 점(COD=0.49mm, P=32KN)을 미시크랙의 합체에 의한 불안전 파괴시작점으로 볼 때 P<sub>5</sub>와 일치함을 알 수 있다. 따라서 본 시험재료와 같은 재료에서는 COD의 변화에 따라서 누적한 AE발생량의 기울기가 2차적으로 변화하는 점을 불안정한 크

랙진전 개시점이라고 보아도 괜찮으리라고 생각된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 SK-5 재료를 택하여 인장, 파괴시험을 하면서, 파괴거동을 AE 기술을 이용하여 규명하였다. 전자현미경으로 파면을 관찰하여 재료내부의 거동 및 크랙진전 양상을 AE 발생양상과 비교하여 AE 발생원인을 추정하였다.

본 연구에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 인장시험에서, AE는 낮은 전압(0.2V level) 준위와 높은 전압(1.2V level) 준위에서 많이 발생하였는데, 이를 주사현미경사진과 연관시켜 생각하여 보면 재료내의 탄, 소성 변형과 미시크랙의 발생에 의한 2차 크랙의 영향에 의한 것임을 확인할 수 있었다.

2) 하중-변위곡선의 비례한도까지 AE는 계속 발생하며, AE의 발생량이 최고치에 도달한 후 급격히 감소하는 점이 0.2% offset 항복하중과 일치함을 확인하였다.

3) 파괴인성치 결정시험 결과 P-COD곡선에서, 하중의 증가에 따르는 AE의 누적량의 기울기가 변하는 점을 P<sub>5</sub>점으로 결정할 수 있다.



## 참고문헌

- 1) H. L. Dunegan, D. O. Harris and C. A. Tatro, "Fracture analysis by use of acoustic emission", Eng. Frac. Mechs., vol. 1, 1968, pp. 105~122.
- 2) Y. Blanchette, J. I. Dickson and M. N. Bassim, "The use of acoustic emission to evaluate critical value of K and J in 7075-T652 aluminum alloy", Eng. Frac. Mechs., vol. 20, No. 2, 1984, pp. 359-371.
- 3) M. A. Hamstad and A. K. Mukherjee, "The role of acoustic emission in fracture toughness testing", Fracture 1977, vol. 3, ICF4, 1977, pp. 525~530.
- 4) C. E. Hartbower, W. W. Gerberich and etc., "Stress-wave characteristics of fracture instability in constructional alloys", AD-674-881, Aorojet-General Co., Sacramento Calif., Jul., 1968.
- 5) Y. Blanchette, J. I. Dickson, and M. N. Bassim, "Detection of general yielding in A 156 steel by acoustic emission", Eng. Frac. Mechs., vol. 17, No. 3, 1983, pp. 227~234.
- 6) T. Kishi, "Microcracking and microfracture mechanisms in metal and ceramics", Proc. of the 2nd Conf. of APCS-86, pp. 23~34.
- 7) S. Yamaoka, K. Wakita and T. Kishi, "Acoustic emission signal analysis of microfracture process in C-1/2 Mo steel", Progress in acoustic emission II, Proc. of the 7th Inter. Acoustic Emission Sym., 1984, pp. 16~23.
- 8) J. C. Lenain and A. R. Bunsell, "The resistance to crack growth of asbestos cement", J. Mater. Sci., vol. 14, 1979, pp. 321~332.
- 9) K. Kuribayashi, T. Kishi and etc., "Elastic-plastic toughness in modular cast iron", 鐵と鋼, vol. 69, No. 6, 1983, pp. 157~164.
- 10) C. A. Tatro, "Experimental considerations for acoustic emission testing", Mater. Research and Standards, 1971, pp. 17~20.
- 11) K. N. Tandon and K. Tangri, "Acoustic emission during deformation of polycrystalline Silicon-Iron", Mater. Sci. Eng., vol. 20, 1975, pp. 47~54.
- 12) A. G. Evans, M. Linzer and L. R. Russell, "Acoustic emission and crack propagation in polycrystalline alumina", Mater. Sci. Eng., vol. 15, 1974, pp. 253~261.
- 13) J. D. Desai and W. W. Gerberich, "Analysis of incremental cracking by the stress wave emission technique", Engr. Frac. Mechs. 1975, pp. 153~165.
- 14) A. A. Griffith, "The phenomena of rupture and flow in solids", Phil. Trans., Roy. Soc. of London, A221, 1921, pp. 163~197.
- 15) Y. Blanchette, M. N. Bassim and J. I. Dickson, "Acoustic emission associated with fracture of A 516-70 steel", Proc. of the 5th Canadian Frac. Conf. Winnipeg, Canada, 1981, pp. 191~198.
- 16) "Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials", Annual Book of ASTM Standards, E366-83, 1983.
- 17) "Standard Test Method for Constant-Load-Amplitude Fatigue Crack Growth Rate  $10^{-8}$ m/cycle", Annual Book of ASTM Standards, E647-83, 1983.
- 18) M. Mirabile, "Acoustic emission energy and mechanism of plastic deformation and fracture", Nondestructive Testing, Apr., 1975, pp. 77~85.
- 19) J. J. Gilman, Proc. Crack Propagation Symposium., Cranfield Sept., 1961.

- 20) A. J. Kinloch and R. J. Young, Fracture Behaviour of Polymer, Applied Science Pub., 1983, pp. 43~73.  
21) M. A. Khan, T. Shoji and etc., "Combined

elastic potential and acoustic emission methods for the evaluation of tearing and cleavage crack extension", ASTM STP 803, 1988, pp. II508~II528.

## 제 2 차 국제학술 심포지움 안내

당 학회는 한·일협력사업에 의한 한·일 공동심포지움으로서 "첨단정형가공 기술에 관한 한·일 공동심포지움"을 개최하기로 하였습니다. 세계적으로 유명한 일본인 강사 10분과 국내의 산·학·연구소에서 활발히 활동하시는 전문가를 모시고 아래와 같이 제 2 차 국제심포지움을 개최하오니 회원여러분의 적극적인 참석을 바랍니다.

- 장 소 : 서울 중소기업회관(서울·영등포구 여의도동 소재) (2층 국제회의실)
- 일 시 : 1991년 3월 21일~22일
- 주 최 : 한국정밀공학회, 한국과학기술원 제품 기술장려연구 혁신 센터(공동 주최)
- 후 원 : 한국과학재단, 매일경제신문사

(본 심포지움은 동시 통역으로 진행합니다.)

첨단정형가공기술에 관한 한·일 심포지움의 내용으로는 소성가공, 고분자가공, 복합재료가공, 분말성형, 액상성형, 세라믹스성형 등의 정밀가공기술을 포함한다.