

탄소강의 탄소성과괴인성 J_{IC}
평가에 관한 연구

김 희송*, 안 병욱**

**A Study on the Elasto-Plastic Fracture
Toughness J_{IC} Evaluation of Carbon Steel**

Hei Song Kim,* Byoung Wook Ahn**

Abstract

In this study, J-integral values obtained by various methods, i.e, R-Curve, Unloading Compliance, Stretched Zone Width [SZW], and Acoustic Emission [AE] methods are investigated.

Elasto-plastic fracture toughness[J_{IC}] estimations by R-curve method are overestimated than those by SZW method, and those by unloading compliance method is around middle value of them. And the difference between them is little.

The J_{IC} value by AE method was almost agreed with that by SZW, and then proved to be useful. Crack propagation mechanism on fractography is a stable ductile fracture.

For the identification of ductile fracture, both fractography analysis and AE method were applied to estimate the characteristics more precisely.

* 정회원, 단국대학교 공과대학 기계공학과 교수

**정회원, 대전공업대학 기계공학과 부교수

Key Words

J-Integral (J-적분), Resistance Curve (R-곡선), Acoustic Emission (음향방출)
Unloading Compliance (제하컴플라이언스), Stretched Zone (스트레치 존),

1. 서 론

최근 산업의 발전과 더불어 구조물의 설계는 복잡, 다양화되었고 또한 대형화, 정밀화되면서 구조물의 안전성, 경제성의 향상은 중요한 문제로 제기되고 있다. 특히 재료내부에 결함을 갖고있는 구조물의 파괴거동은 항복후에 파괴에 이른다는 개념만으로는 해석하기 어렵다. 이를 고려한 파괴역학이 도입되어 공학적 수법으로 널리 적용되기에 이르렀다.

파괴역학의 응용범위는 매우 넓어서 취성파괴는 물론 피로, 연성파괴 분야에 이르기까지 확장되고 있으며, 이는 사고의 진단 및 구조물의 안전성을 평가하는데 가장 유력한 수단이다.

균열전단의 소성역이 비교적 작은 소규모항복 상태에서는 선형파괴역학에 입각한 응력확대계수 K 가 균열의 특이성을 대표하게 되고, 이 값이 임계값에 도달했을 때 파괴가 일어남이 밝혀지므로서 그 정량적인 평가법이 확립되었다.^{1,2)}

그러나 평면변형률파괴인성 K_{Ic} 는 재료가 탄성거동을 한다는 가정하에서 유도된 이론이므로 소성변형이 큰 재료에서 K_{Ic} 는 물리적인 의미를 잃게된다. 따라서 안정균열면을 형성하기 전에 대규모항복상태의 균열성장을 표시하는 새로운 파라미터인 COD와 J적분이 제안 되므로써 탄소성영역에서 파괴저항에 관한 정량적 평가법이 확립되었다.³⁻⁵⁾

한편, 최근에 음향방출 (Acoustic Emission : AE)법은 국소적인 변형, 균열진전을 검출하는 방법으로서 이용되어 구조물의 건전성 평가등에 널리 이용되고 있다. 또한 균열진전을 동적으로 검출하고 탄소성파괴인성값을 결정하는데 그 적용이 기대되고 있다.⁶⁻¹¹⁾

본 연구에서는 CT시험편에 대하여 탄소성파괴인성 J_{Ic} 값을 ASTM E813-81¹²⁾ 과 JSME S 001-81¹³⁾ 규정에 의한 R곡선법, 제하컴플라이언스법, 스트레치존법, 음향방출 (AE)법 등을 이용하여 평가하고, 각 측정방법의 상관관계 및 신뢰성을 검토하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 재료 및 시험편

본 실험에서 사용된 재료는 시판재인 구조용 SM45C강이며, 화학적 성분 및 기계적 성질은 Table.1,2 와 같다.

Table 1. Chemical composition (Wt, %)

Material	C	Si	Mn	P	S
SM45C	0.413	0.317	0.691	0.012	0.007

Table 2. Mechanical properties

Material	test temperature (°C)	yield strength σ_y (MPa)	tensile strength σ_u (MPa)	flow stress $(\sigma_y + \sigma_u)/2$ σ_a (MPa)	elastic modulus E (GPa)	poisson's ratio ν
SM45C	18	335.85	697.86	516.85	205.80	0.29

시험편은 균열진전 방향이 판재의 압연방향과 수직이되는 L-T방향으로 채취하고, 열처리 조건을 860°C에서 풀림처리 하였다. CT시험편은 ASTM E 813-81¹²⁾ 규정에 따라 형상 및 치수는 Fig.1과 같다.

시험편은 노치선단에서 약 0.5mm까지 와이어 방전가공 (Wire electro discharge machining) 후 피로시험기를 사용하여 1.5mm 길이의 선피로균열 (fatigue pre-crack)을 내어 실험하였다. 이때 가해진 최대하중은 9.8kN,

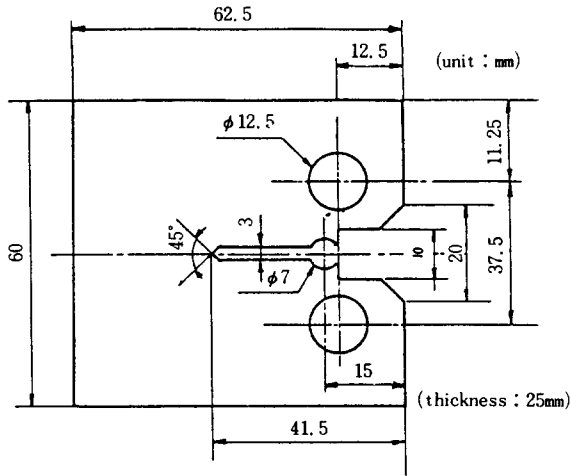


Fig. 1 Configuration and dimension of compact tension specimen

반복속도는 6Hz, 응력비는 0.04, 파형은 정현파(sine wave)로 하여 최대응력확대계수(K_{max}) < 77.11 MPa \sqrt{m} 로 되게 하였다.

2.2 실험장치 및 실험방법

탄소성 파괴인성시험은 전기 유압식(electrohydraulic servo pulser) 피로시험기(SH-IMADZU Co., model EHF 120)와 AE시스템(AET 5000)을 이용하였다. 파단면은 주사형 전자현미경(scanning electron microscope, model ISI-DS 130)으로 관찰하여 사진촬영 하였다.

균열길이 측정은 디지털화된 100배율의 이동식 현미경으로 앞면과 뒷면에서 측정하여 레코더(RIKAENKI electric recoder)에 기록하였다.

R곡선법(R-curve method) 및 제하탄성 컴플라이언스법(unloading compliance method)은 로드셀(load cell) 및 크립 게이지(clip on gage)를 이용하여 하중과 하중선 변위곡선을 구하였다. 이때 보다 정확한 하중제거선의 기울기를 구하기 위해 OP Amp 및 DC offset 장치를 이용하여 하중제거시 하중

(p) 및 크립게이지변위(CGD)를 25배 확대시켜 산출하였다.

스트레치존(stretched zone width:SZW)법은 J-SZW 관계의 둔화직선으로 하였다. 한계스트레치존폭(SZWc)은 시험후 피로파단시키고 주사형 전자현미경으로 파단면을 사진촬영하여 측정하였다. J_{in} 은 각 레벨에서 부하된 실험점들을 최소자승법으로 직선근사시키고 둔화직선과의 교점에서 구하였다. 각 실험점들의 분산한계는 $\pm 25\%$ 로 하였고, 형상의 제한조건이 만족되었을때 유효한 J_{IC} 로 평가하였다.

한편, 음향방출법(acoustic emission method)은 AE신호를 AET 5000 전산화 시스템과 퍼스널컴퓨터로 연결하고 CROSSTALK 소프트웨어를 이용하여 수치화된 AE 데이터를 컴퓨터에 수집, 산출 하였다. AE변환기(transducer)는 375KHz의 공진주파수를 갖는 압전형을 사용하였고, 시험편 상단 중앙에 부착하였으며 신호증폭도는 총 60dB, 신호한계값(threshold level)은 0.05Volt로 하여 실험하였다.

Fig. 2는 본 실험장치에 대한 흐름도이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 R곡선법(Resistance - curve method)에 의한 J_{IC} 평가

균열의 둔화와 진전거동에서 Landes-Begley¹⁴⁾는 J와 Δa 와의 관계를 다음과 같이 나타내었다.

$$J \simeq 2\sigma_{fs} \cdot \Delta a \dots\dots\dots (1)$$

σ_{fs} 는 평균유동응력으로서 항복응력과 인장강도의 평균값이며, Δa 는 둔화과정때의 균열길이 증분이다. 균열길이 증분 Δa 는 JSME S 001-81 규정에 따라 Fig. 3과 같이 시험편 두께의 3/8 ~ 5/8부분을 3점 측정하여 다음과 같이 평균치를 구하였다.

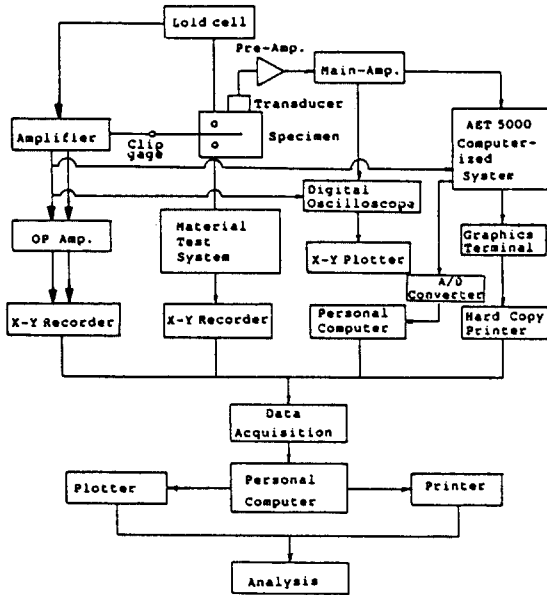


Fig. 2 Block diagram of elasto-plastic fracture toughness test.

$$\Delta a = \{ \Delta a_{(3/8)} B + \Delta a_{(4/8)} B + \Delta a_{(5/8)} B \} / 3 \dots \dots \dots (2)$$

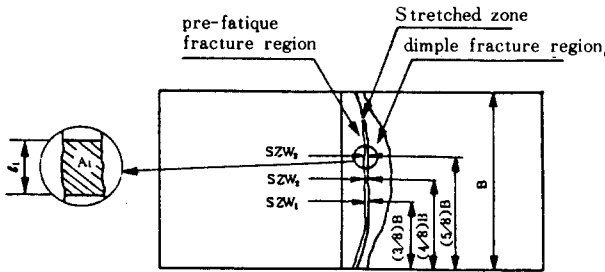


Fig. 3 Schematic diagram of fracture appearance in order to measure Δa and SZW P- δ

탄소성 파괴인성 J 값은 다음과 같은 Rice의 간편식¹⁵⁾ 과 수정 Merkle-Corten¹⁶⁾ 식으로 계산하였다.

$$J_{Rice} = \frac{2A}{B \cdot b} [KN/m] \dots \dots \dots (3)$$

$$J_{Merkle} = \frac{A}{B \cdot b} f(a/W) [KN/m] \dots \dots \dots (4)$$

여기서, A : 하중-하중선 변위곡선 아래의

면적, B : 두께,

$$f(a/W) = 2(1 + \alpha) / (1 + \alpha^2)$$

$$\alpha = \{ (2a/b)^2 + 2(2a/b) + 2 \}^{1/2} - (2a/b + 1)$$

JSME S 001-81 규정에 의하여 측정된 Δa 는 3점 평균에 의하여 산술 평균하였고, CT 시험편의 J 값은 식 (3)과 (4)를 사용하여 구하였다.

Fig. 4와 Fig. 5는 SM45C강에 대한 둔화적선과 R곡선을 ASTM E 813-81 규정을 이용하여 나타낸 것이다.

여기서 둔화적선은 식 (1)에서 구하고 J_R 은 식 (3), J_M 은 식 (4)에서 구하였고 그 결과는 다음과 같다.

$$\text{둔화적선} : J = 1033.72 \Delta a \dots \dots \dots (5)$$

$$R \text{ 곡선} : J_R = 92.12 \Delta a + 110.84 \dots \dots (6)$$

$$J_M = 109.96 \Delta a + 109.47 \dots \dots (7)$$

윗 식에서, 둔화적선과 R곡선의 교차점 J_{in} 값은 $J_{R, in} = 121,68 KN/m$, $J_{M, in} = 122.50 KN/m$ 이었다. 이들 값은 ASTM 규정의 모든 조건식을 만족하므로 $J_{in} = J_{IC}$ 이다.

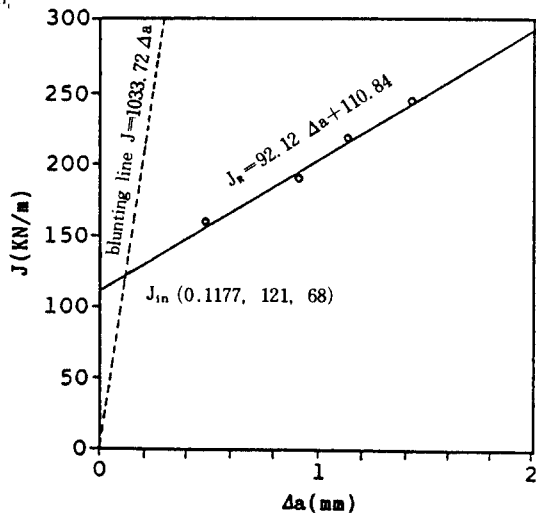


Fig. 4 J_{IC} determination by the R-curve method (J_{Rice})

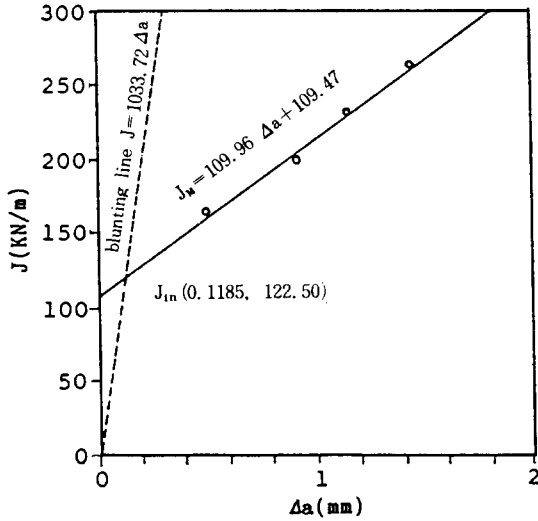


Fig. 5 J_{IC} determination by the R-curve method ($J_{Merkle-Corten}$)

Merkle-Corten의 식에 의한 J_{IC} 값은 Rice의 간편식에 비해 약간 크게 나타났다.

일반적인 공업상 문제에는 Rice의 간편식을 많이 사용하고 있으나 재료의 성질과 제반요인을 고려한 Merkle-Corten의 식을 사용하는 것이 더 정확한 자료가 되리라고 생각된다.

3.2 제하컴플라이언스법 (Unloading compliance method)에 의한 J_{IC} 평가

제하컴플라이언스법은 하중-하중선변위에서 균열진전길이를 간접적으로 산출하고 J_{in} 을 구한다. 단일시험편으로 소정의 변위레벨까지 부하 시킨후 하중을 10% 정도까지 제하하고 Saxena-Hudak¹⁷⁾ 식인 (8)식을 이용하여 균열진전길이를 산출하고 각 점에서의 J 적분과 대응시켜 R 곡선을 구하였다.

$$a/W = 1.000196 - 4.0639U_x + 11.242U_x^2 - 106.0434U_x^3 + 464.335U_x^4 - 650.677U_x^5$$

$$U_x = \frac{1}{(B \cdot E' \cdot V_{LL}/P)^{1/2} + 1} \dots\dots (8)$$

$$E' = \frac{E}{(1 - \nu^2)}$$

Table.3은 실험적으로 구한 균열진전길이 Δa_E 와 실측한 균열진전길이 Δa_M 에 대한 결과이다. 여기서 Δa_E 는 실험에서 산출한 제하컴플라이언스 V_{LL}/P 값을 (8)식에 대입하여 구한 균열길이이다. Δa_M 은 실험을 완료한 시험편을 피로파단하여 JSME S 001-81 규정에 따라 3점법으로 실측한 균열길이이다. 제하컴플라이언스에 의한 실험값과 실측값의 균열 길이비의 차 $\Delta(a/W)_E$ 및 $\Delta(a/W)_M$ 은 0.1116, 0.1186이었으며, 실측한 균열진전길이 $\Delta a_M = 5.104$ 는 $\Delta a_E = 5.002$ 보다 1.9% 크게 나타났다.

Table 3. Value of Δa obtained experiment

Specimen	$\Delta(a/W)_E$	$\Delta(a/W)_M$	$\Delta a(a_r - a_i)(mm)$		error(%) $\frac{\Delta a_M - \Delta a_E}{\Delta a_E}$
			Δa_E	Δa_M	
SM45C	0.1116	0.1186	5.002	5.104	1.9

Fig. 6은 SM45C강의 J - Δa 관계를 나타낸

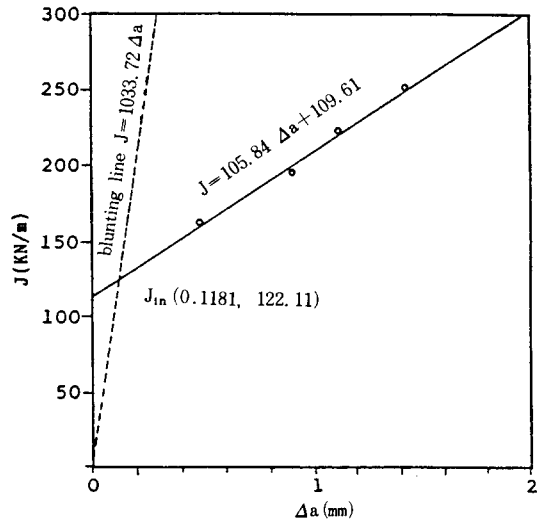


Fig. 6 J vs. Δa by Unloading compliance method

것이다. 여기서 둔화직선은 $J = 2\sigma_{ys} \Delta a$ 를 이용하여 구하였다. 제하컴플라이언스법에 따라 산출된 균열진전길이 Δa 와 하중-하중변위곡선 하의 면적으로 Merkle-Corten식을 이용하여 J 값을 구하고, R곡선법과 둔화직선과의 교점에서 J_{in} 을 구하였다.

Fig 6에서 구한 J_{in} 은 ASTM E 813-81 규정의 조건을 만족하므로 $J_{in} = J_{IC}$ 이다.

따라서 제하탄성컴플라이언스법에 의해 구한 J_{IC} 값은 122.11KN/m이었다. J_{IC} 값은 균열진전시에 나타나는 균일선단의 소성변형에 대하여 포와송 비 ν 를 고려함에 따라 차이가 있음을 알 수 있다.

3.3 스트레치존법 (Stretched zone method)에 의한 J_{IC} 평가

한계스트레치존 폭 (SZWc)을 구하기 위하여 수개의 시험편을 각각 다른 하중레벨까지 부하한후에 피로파단하여 주사형전자현미경으로 파단면을 사진촬영하여 SZWc를 측정하였다.

J_{in} 값은 각 하중레벨에서 부하된 실험점들은 최소자승법으로 직선근사시키고 둔화직선과의 교점에서 구하였다. 각 실험점의 분산한계는 $\pm 25\%$ 로 하였고 이러한 제반 여건이 만족되었을때 유효한 J_{IC} 로 평가 하였다.

균열길이 증분 Δa 와 SZW는 Fig.7 과 같은 파면에서 주사형전자현미경 (SEM)을 사용하여 측정하였다. 그들의 대표적인 사진은 Fig. 8에 나타내었다.

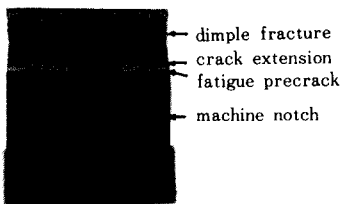


Fig.7 Fractography of fractured specimen.

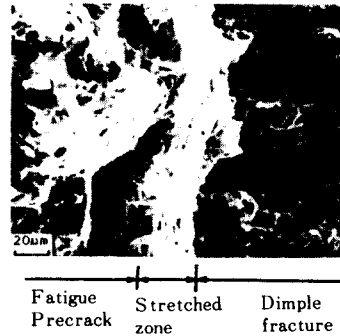


Fig.8 Scanning electron micrograph of the stretched zone

이들 측정값은 $SZW < \Delta a$ 를 만족하거나 또는 각 측정 위치에서 SZW와 그것에 인접하는 연성균열 파단영역의 경계에 대한 길이의 총합 $\sum_{i=1}^n \ell_i$ 의 20%이상인것을 한계스트레치존폭 (SZWc)으로 보았다. 이러한 SZWc를 3점 이상 하중-하중선변위관계에서 결정된 J 적분에 대하여 실험 자료점을 잡았다. 그리고 $SZW = SZWc$ 의 실험자료점이 $\pm 25\%$ 범위에 있음을 확인하였다.

J -SZW 관계에서 둔화직선과 SZWc의 교차점에서 J_{IC} 를 구하였다. SM45C의 SZWc는 $33 \mu m$, $J_{IC} = 111.13KN/m$ 이었다. 이상의 실험치를 Table.4에 정리 하였다.

Table 4. Result of the J_{IC} estimation by the R-curve, Unloading compliance, and Stretched zone method

material	J_{in} & J_{neckle}	A	B	J_{IC} (KN/m)	Unloading compliance (KN/m)	SZW (μm)	J_{IC} (KN/m)
				R-curve			SZ
SM45C	(J_{IC}) _n	92.12	110.84	121.68	122.11	33.0	111.13
	(J_{IC}) _m	109.96	109.47	122.50			

Table.4에서 알 수 있드시 J_{IC} 값은 R곡선법보다 스트레치존법이 Rice 간편식을 기준으로 9.5% 과소평가되었다.

3.4 음향방출 (Acoustic emission)법에 의한 J_{IC} 평가

탄소성 파괴인성값 (J_{IC})의 결정에 대한 AE의 적용은 AE activity인 ringdown count나 AE event와 이들의 누적값이 급격한 증가, AE진폭분포의 변화, J적분값과 이에 상응하는 AE에너지 및 ringdown count와의 대수 선형적 관계에서의 기울기 변화, AE주파수 분포의 변화 등을 해석할 수 있다.

Fig.9,10은 파괴인성 시험시 시간에 따른 ringdown count와 AE event의 결과이다.

Fig.9,10에서 실험초기의 AE activity는 점차적으로 증가하고 균열의 개시가 예상되는 부근 부터는 큰 AE activity를 나타냈다. 급격한 AE activity(ringdown count나 event)증가는 하중을 가하기 시작한 후 약 100초 경과시 부터였다. 또한 이때부터 평균 peak amplitude는 32.0 dB 이상값을 갖기 시작했다. 즉 큰 AE진폭신호가 발생하였다. 따라서 선형탄성 부근에서는 적은 AE activity를 나타내고 항복 이후에는 안전균열성장과 함께 큰 에너지를 갖는 AE 신호가 발생한다. 균열이 급격하게 진전하는 불안정 균열성장 부근에서는 매우 큰 진폭을 갖는 AE신호가 빈번한 activity를 나타내고 점진적으로 AE신호가 줄어

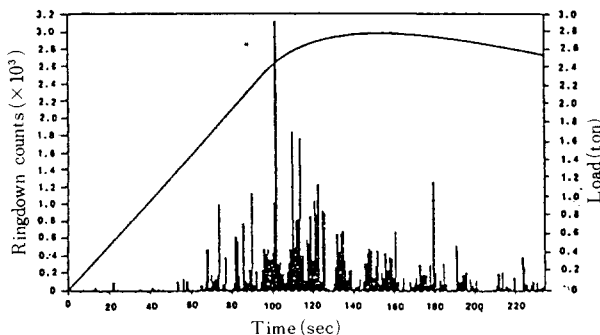


Fig.9 Load Ringdown counts vs. Time

들면서 가끔 큰 AE신호가 발생하는 특성을 알 수 있다.

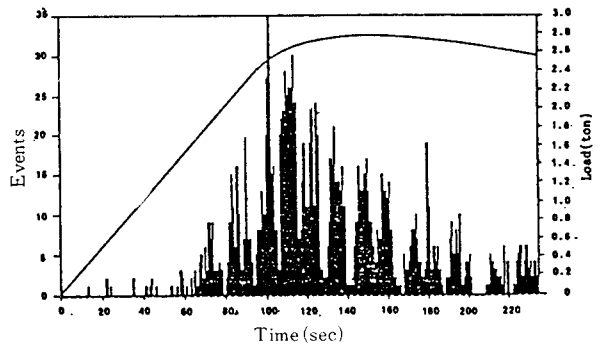


Fig.10 Load and Events vs. Time.

Fig.11은 J값에 대한 AE에너지와 AE count의 누적값이다. AE energy (E_{AE})는 10초 동안의 AE신호의 peak amplitude를 제곱 (V_p^2)을 누적하여 나타낸 값이다.

Fig.11에서 음향방출(AE)은 하중이 증가함에 따라 3.43KN/m 정도에서 부터 발생하여 하중상승이 둔화할때까지 계속되었다. AE 에너지, AE count의 누적값과 J값과의 관계에서 명확한 변곡점이 나타나고 있다. 이 점에 대응하는 J값을 $J_{IC(AE)}$ 라 하면⁷⁾, $J_{IC(AE)} = 110.94$ KN/m이었다. 따라서 파괴인성시험에서 균열개시전에는 AE신호가 정확히 발견되지고 이 결과로부터 한계 스트레치 존값과 J_{IC} 값을 입증할 수 있다. 또한 $J_{IC(AE)}$ 와 J_{IC} (R-curve, 제한탄성컴플라이언스법) 값을 비교해보면 $J_{IC(AE)}$ 가 J_{IC} 보다 약간 작은 값을 갖으나 SZW법과는 거의 일치된다. 이는 균열 진전 개시점의 파괴에 대한 저항력의 값을 미리 예측할 수 있기 때문이다. 그러므로 $J_{IC(AE)}$ 값에 의해 균열진전 개시점을 예견하여, 탄소성 파괴인성 J_{IC} 평가가 보다 정확하고 민감한 탐지가 가능하리라 판단된다.

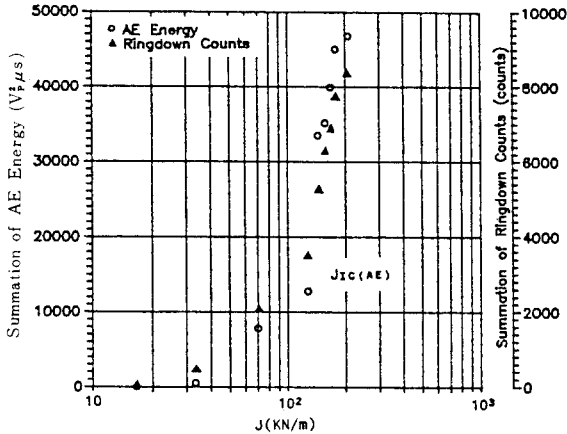


Fig. 11 Summation of AE energy and summation of AE count vs. J

Fig. 12는 균열진전에 따른 AE에너지와 AE계측수의 누적 값이다. 균열이 진전함에 따라 AE 누적값은 균열개시점 부근에서 급격하게 증가한 후, 기울기가 완만하게 증가하고 있다.

AE 누적값이 급격히 증가되는 부근의 균열 길이는 약 0.1 mm부터이고 또한 이 값을 식(4)인 Merkle-Corten식에 대입하여 구한 J_{IC} 값은 Fig. 11에서 변곡점을 이용하여 산출한 $J_{IC(AE)}$ 값과 일치하고 있다.

한편, Fig. 13은 균열성장개시점 부근의 하중과 음향방출(AE)신호의 동시에 출력된 파형이고, 이때의 AE는 돌발형 신호로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 탄소성파괴인성 J_{IC} 평가를 R곡선법, 제하탄성컴플라이언스법, 스트레치존법, 음향방출법등을 이용하여 각 방법의 파괴인성값의 특성, 파괴기구 및 유용성을 비교 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 탄소성파괴인성 J_{IC} 측정에 있어서 R곡선법에 비해 스트레치존법은 과소평가된다. 제하컴플라이언스법은 R곡선법과 스트레치존법의 중간값이었다.
- (2) 음향방출법에 의한 $J_{IC(AE)}$ 값은 AE에너지, AE계

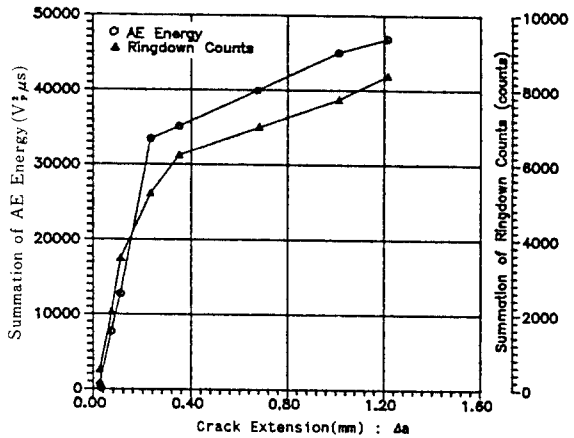


Fig. 12 Summation of AE Energy and Summation of AE count vs. Δa

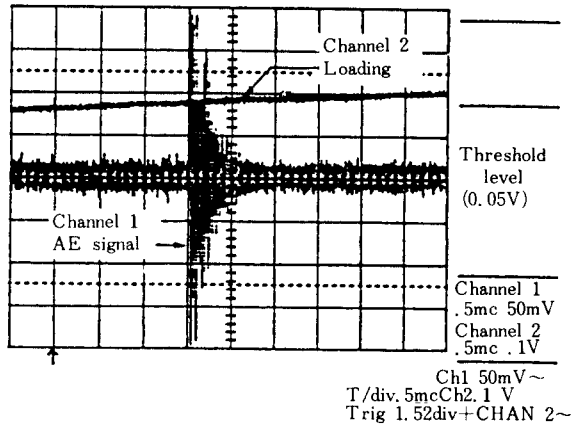


Fig. 13 AE Signal by Loading curve vs. Time.

측수의 누적값과 J값과의 관계에서 명확한 변곡점으로 산출되며, 이 값은 스트레치존법과는 거의 일치되므로 J_{IC} 평가에 유용함을 알 수 있다.

- (3) 탄소성파괴인성과 균열전파곡선에 있어서 연성안정파괴가 진행되고, 둔화진전상에서 벽개파괴와 안정균열이 공존한다.
- (4) 연성파괴특성의 규명은 파단면 관찰과 파괴과정에서 음향방출법을 병행함으로써 재료평가를 보다 정교하게 할 수 있다.

參 考 文 獻

- (1) Paris, P.C., and Shi, G.C., "Stress Analysis of Cracks.", ASTM STP 381, pp.30-81, 1965.
- (2) Jones, M.H., and Brown, W.F., "The Influence of Crack Length and Thickness in Plane Strain Fracture Toughness Tests.", ASTM STP 463, pp. 63-101, 1970.
- (3) Rice, J.R., "A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks.", J. of Applied Mechanics, Trans. ASME. June, pp.379-386, 1968.
- (4) Early, P.W., and Burns, S.J., " J_{IC} Measured with Mechanically Unstable Test Specimens with Finite Difference in Crack Areas.", Int. J. of Fracture, Vol.16, No.5, Oct, 1980.
- (5) Hutchinson, J. W., "Plastic Stress and Strain Fields at a Crack Tip.", J. of the Mechanics and Physics of Solids, Vol.16, No.5, pp.337-347, 1968.
- (6) Albrecht, P., and Andrews, W. R., "Tentative Test Procedure for Determining the Plane strain J_{IC} - R Curve.", J. of Testing and Evaluation, Vol.10, No.6, PP.245-251, 1982.
- (7) Khan, M. A., Shoji, T., and Takahashi, H., "Characterization of the Crack Toughness Behavior of Structural Steels by the Tearing Modulus Parameter and Acoustic Emission.", J. of Testing and Evaluation, Vol. 10. No.1, PP.3-11, 1982.
- (8) Tsuruta, H., Tooyama, A., Higo, Y., and Nunomura, S., "Evaluation of the Crack Starting load on PMMA and Metallic Materials by the AE Technique.", The 5th AE Symposium, Tokyo, PP.175-185, 1980.
- (9) Yamamoto, M., and Ouchi, C., "The Directional Properties of HSLA Steels during Acoustic Emission and Fracture Testing.", The 5th AE Symposium, Tokyo, PP.221-235, 1980.
- (10) Sano, K., Kobayashi, E., and Fujimoto, K., "Detection of Separations with AE in line Pipe Steel During Fracture Toughness Testing.", The 5th AE Symposium, Tokyo, PP.236-247, 1980.
- (11) 이강용, 백충현, "음향방출법에 의한 파괴 인성치 측정 및 파괴안정성 평가에 관한 연구." 대한기계학회 논문집, 제 13권, 제 1호, 1989.
- (12) ASME E 813-81, "Standard Test Method for J_{IC} , A Measure of Fracture Toughness.", 1981.
- (13) JSME S 001-81, 日本機械學會 基準, "彈소성 破壞靱性 J試驗方法.", 1981.
- (14) Landes, J.D., and Begley, J. A., "Test Results from J-Integral Studies, An Attempt to Establish a J_{IC}

- Testing Procedure.”, ASTM STP 560, PP.170-180, 1974.
- (15) Rice, J.R., Paris, P. C., and Merkle, T. G., ASTM STP 536, P.21, 1973.
- (16) Rice, J. R., Paris, P. C., and Merkle, J.G., “Some Further Results of J Integral Analysis and Estimates.”, ASTM STP 536, PP.231-243, 1973.
- (17) Saxena, A., and Hudak, S. J., “Review and Extension of Compliance Information for Common Crack Growth Specimens.”, Int. J. Frac., 14, PP. 453-468, 1978.