

<論 文>

J-積分을 利用한 低炭素鋼의 破壞 靱性值 決定

安 得 滿* · 郭 柄 晚**

(1979年 5月 26日 接受)

Fracture Toughness of Low-carbon Steel Using J-integral Principle

Deuk-Man An and Byung-Man Kwak

Abstract

The fracture toughness of a hot rolled 100 mm thick SS41 steel plate was investigated for various crack ratios and thicknesses using the method of J-integral.

The experiments were performed on an MTS machine and the crack initiation point was detected by using an electrical impedance method.

The J-integral computed at the initiation point of the slow stable crack growth was almost constant within the range of crack ratios tested. The fracture toughness thus obtained was $J_{1c} = 27.0 \text{ kgf/mm}$ for specimens having fracture plane parallel to the rolling direction and 35.5 kgf/mm for those perpendicular to the rolling direction. The J-integral computed at maximum load point was found to be unsuitable for fracture toughness determination, because of large variation depending on the crack ratio and thickness. It was also found that the slow stable crack growth increases as the thickness and/or crack ratio of the specimen decrease.

기호해설

- a crack length
- B specimen thickness
- b ligament width
- c half the ligament width
- E modulus of elasticity
- G elastic strain energy release rate
- K stress intensity factor
- K_{1c} fracture toughness (mode I)
- L displacement vector
- n unit normal vector
- P load per unit thickness
- R strain energy
- r distance from the crack tip

- s arc length
- T traction vector
- U potential energy per unit thickness
- W strain energy density
- ω width of a compact specimen
- α ratio of the width of the internal stress block equilibrating the applied load at plastic collapse, to the ligament width
- δ displacement
- ϵ_{ij} strain tensor
- Γ arbitrary integral path including crack tip
- Γ' integral path along crack tip
- θ angle between X-axis and the line from the crack tip to the arbitrary point
- η_c complementary energy coefficient
- η_r real energy coefficient
- σ_y yield strength
- σ_{ij} stress tensor

* 正會員, 釜山大學校 工科大学 機械工學科

** 正會員, 韓國科學院 機械工學科

- ϕ : complementary energy per unit thickness
- ϕ_0 : real energy per unit thickness, for a point on the linear portion of the load-displacement curve
- ϕ : real energy per unit thickness
- ν : Poisson's ratio

I. 序 論

크랙(crack)을 內在하고 있는 材料 또는 構造物에 있어서 正確한 破壞의 豫測은 材料의 選擇과 構造物의 工學的 設計에 있어서 매우 重要하다.

破壞力學의 目的은 設計에 必要한 그 材料의 固有한 性質(property)인 破壞 靱性值(fracture toughness)를 求하여 破壞의 豫測을 正確히 하는데 있다.

이와같은 要求에 따라서 線形彈性 破壞力學¹⁾ (linear elastic fracture mechanics)이 發達되었고 設計에 貢獻한 바가 크다.

線形彈性 破壞力學은 破壞靱性值를 求하기 위하여 有限한 降伏強度를 가진 材料에서 크랙의 크기나 試片의 幅 등의 크기가 크랙끝 部分에서의 塑性領域의 크기보다 相對적으로 매우 클때에 이 塑性領域의 크기는 無視되어 크랙 周圍에서의 應力狀態를 線形彈性的으로 解析하는데, 그 應力狀態는 크랙끝으로 부터의 거리의 平方根에 逆比例하는 特異性을 가진다.^{2, 3)} 이 特異性的의 크기를 應力擴大係數(K)라고 부른다. 그리고, 破壞가 일어나는 瞬間에서의 應力擴大係數의 값은 實驗에 依해서 求해지는데 이를 臨界應力擴大係數(critical stress intensity factor)라고 부른다. 그런데 臨界應力擴大係數는 試片의 두께에 따라서 變化를 보이는 데 이것이 材料의 固有한 性質을 나타낸다면 두께에 따라서 變化하지 않아야 한다. 두께가 얇아질수록 臨界應力擴大係數는 커지는데 이를 ASTM(American Society for Testing and Materials)에서 많은 實驗資料를 土臺로 주어진 材料의 固有한 臨界應力擴大係數를 求하기 위한 試片의 두께와 線形으로 解析할 수 있는 試片의 크기를 規定하고 있다.⁴⁾ 위에서 言及한 試片의 두께는 平面變形應力狀態를 滿足하는 두께이다. 그리고 가장 問題가 되는 應力狀態가 크랙을 垂直으로 벌리는 Mode I 이므로 이때의 平面變形應力狀態(plane strain)를 滿足하는 두께에서의 臨界應力擴大係數를 K_{Ic} 라고 하고 이것을 破壞靱性值라고 부른다.

ASTM 規定에 의하면 試片의 크기는 $(K_{Ic}/\sigma_y)^2$ 에 比例해서 커지게 되는데 이것은 크랙끝 部分의 塑性領

域의 크기⁵⁾에 關係되는 項이기 때문이다.

따라서 ASTM에서 規定하고 있는 K_{Ic} 를 求하는 實驗은 塑性領域이 작은-경우(small scale yielding)에만 適用할 수 있다. 따라서 延성이 매우 높은 材料 즉, 破壞靱性值가 降伏強度에 比해서 큰 材料에서는 ASTM 規定에 依해서 破壞靱性值를 求하려고 한다면 엄청난 크기의 試片과 이에 따르는 試驗機의 容量, 材料의 費用 등이 問題가 된다.

이러한 問題를 解決하기 위해서는 조그만 試片에서도 ASTM의 規格에 맞는 큰 試片에서의 똑 같은 값의 破壞靱性值를 計算할 수 있는 어떤 量을 求할 수 있으면 될 것이다. 이러한 意圖에서 出發된 것이 非線形 破壞力學이다.^{6, 7)}

非線形 破壞力學 中에서 現在 가장 注目을 받고 있는 것이 크랙 끝에서의 deformation field에 着점을 맞춘 J-積分 方法이다.

J-積分의 方法은 Rice에 依해서 처음으로 公式化되었고^{8, 9)} 實驗적으로는 Begley와 Landes에 依해서 처음으로 試圖되었다.^{10, 11)} Begley와 Landes의 實驗方法은 破壞靱性值 K_{Ic} 를 求하는 量인 J_{Ic} 를 求하는데 있어서 크랙의 길이를 달리한 여러개의 試片을 必要로 하였다. 그뒤, Rice, Paris, Merkle에 依해서 한 개의 試片으로도 J_{Ic} 를 求할 수 있게 되었고,¹²⁾ 이것은 다시 Merkle, Corten에 依해서 修正되었다.¹³⁾

J-integral의 方法에서 重要한 假定은 크랙이 傳播하는 瞬間까지 만이 適用할 수 있다는 事實이다. 따라서 實驗에 있어서 重要한 것이 크랙이 傳播하는 瞬間을 찾는 方法이다. 이들 方法에는 Acoustic Emission¹⁴⁾, Eddy current, Optical Measurement¹⁵⁾ 등을 利用하는 것이 있다.

본 論文에서는 市中에서 生産되는 構造用壓延鋼을 가지고 方向성에 따른 破壞靱性值를 J-積分의 方法을 適用해서 求하고자 한다. 低炭素鋼을 택한것은 延성이 크고 降伏強度가 낮으므로 線形彈性破壞力學(LEFM)으로는 K_{Ic} 를 求할 수 없다. (考察참조)

그리고, 크랙의 傳播가 시작되는 瞬間은 electrical impedance의 方法으로 찾고 安定된 크랙의 成長이 試片에서의 크랙길이와 두께에 따라서 어떤 變化를 보이는가를 最大荷重에서의 J-積分의 값으로써 알아 보고자 한다.

II. J-integral의 意味

J-integral은 2次元 問題 즉 平面變形(plane strain)

혹은 平面應力(plane stress) 일때 다음과 같이 定義된다.⁸⁾

$$J = \int_{\Gamma} W dy - \mathbf{T} \cdot \frac{\partial \mathbf{L}}{\partial x} ds \quad (1)$$

Γ 는 反시계 方向으로 Fig.1에서와 같이 크랙 끝을 包含하는 任意的 積分經路(integral path)이다. 여기서

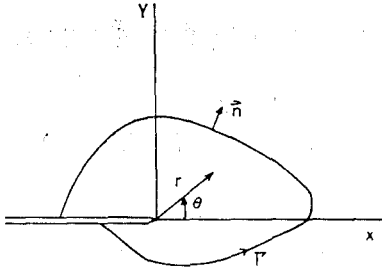


Fig. 1. Crack tip coordinate system and integral contour

W 는 strain energy density를 나타낸다. 즉,

$$W = W(\epsilon_{mn}) = \int_0^{\epsilon_{mn}} \sigma_{ij} d\epsilon_{ij} \quad (2)$$

이다. 그리고, \mathbf{T} 는 traction vector, \mathbf{L} 은 displacement vector, s 는 P 상에서 弧의 길이를 나타낸다.

식(1)의 物理的 意味는 크랙의 增加분에 대한 potential energy U 의 감소량이다.⁹⁾ 즉,

$$J = -\frac{dU}{da} \quad (3)$$

이다. 따라서 Fig.2의 荷重—變位 曲線에서 보면 び금 部分의 面積은

$$-\Delta U = J \Delta a \quad (4)$$

로서 表現된다.

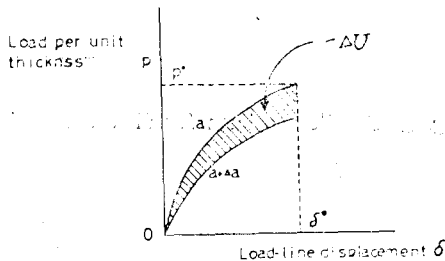


Fig. 2. Load-deflection diagram

線形彈性 破壞力學에서 平面 變形條件을 滿足하기 위해서는 두께가

$$B \geq 2.5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_y} \right)^2 \quad (5)$$

를 滿足해야 한다.⁴⁾

위에서 平面 變形條件을 滿足한다는 말은 K_{IC} 의 값이

一定 이상의 두께에서는 一定하다는 것을 意味한다. 이와 마찬가지로 J-積分의 方法에서도 J_c 의 값이 一定 이상의 두께에서는 一定한데 이 두께를 아래와 같은 조건을 滿足하는 것으로 보고 있다.^{16,17)}

$$B \geq (50 \sim 25) \frac{J_{IC}}{\sigma_y} \quad (6)$$

J-積分을 利用하여 破壞靱性值 K_{IC} 를 求하기 위해서는 塑性領域이 큰 境遇(large scale yielding)에도 塑性領域이 작아서 線形的으로 생각할때처럼 크랙 끝 部分에 特異性이 存在해야 한다. 이는 Rice와 Rosengren¹⁸⁾, Hutchinson¹⁹⁾ 등에 의해서 塑性區間에서의 stress-strain 關係를 塑性變形理論(deformation theory of plasticity)을 쓰면 다음과 같은 特異性을 보인다고 했다. 즉,

$$\sigma_{ij} \epsilon_{ij} \rightarrow \frac{\text{a function of } \theta}{r} \text{ as } r \rightarrow 0 \quad (7)$$

와 같이 된다고 했다. 따라서 large scale yielding 時에도 크랙 끝 部分에 特異性을 가진다. 그리고 식(1)은 材料가 彈性이면 線形이든 非線形이든 크랙 끝을 包含하는 積分經路에 관계없으므로 塑性變形理論을 쓰면 unloading이 없을 때에 stress-strain 關係가 彈性を 벗어나 塑性으로 가더라도 非線形 彈性으로 볼 수 있으므로 積分經路에 關係없게 된다. 그러나, 塑性領域에서 unloading이 일어나면 非線形 彈性理論을 適用할 수 없다. 따라서, 크랙이 傳播하는 境遇에는 이미 크랙 끝 部分에서는 unloading이 일어나므로 J-積分의 값이 크랙 끝을 包含하는 積分經路에 關係없다는 事實은 適用될 수 없다. 즉, J-integral의 方法은 크랙의 傳播가 일어나는 瞬間까지만 適用될 수 있다. 그리고 소성 舉動을 Prandtl-Reuss式을 써서 Hayes는 單純增加荷重(monotonic increasing loading)에서 식(1)이 積分經路에 關係없음을 보였다.

J-積分의 積分經路를 바로 크랙 끝으로 잡으면 식(1)은 다음과 같이 된다.

$$J = \int_{\Gamma_c} W dy \quad (8)$$

Γ_c 는 크랙 끝을 따르는 積分經路이다. 따라서, 任意的 積分經路를 따르는 J-積分의 값은 크랙 끝에서의 deformation field를 나타낼을 알 수 있다. 그리고 Be gley와 Landes에 의해서 크랙이 傳播하는 瞬間에서의 J-積分의 값이 試片의 形狀에 關係없이 一定함을 보였다.¹¹⁾ 또 J-積分이 식(3)에서와 같이 表現됨으로 線形彈性으로 破壞가 일어날때는 strain energy release rate, G ,와 같게 된다. 즉,

$$J_{IC} = G_{IC} = \frac{1-\nu^2}{E} K_{IC}^2 \quad (9)$$

와 같이 된다. 그런데, J_{IC} 는 試片의 形狀에 關係없이 크랙이 나가는 순간의 크랙 끝부분의 deformation field를 나타내므로 식 (9)에 의해서 선형탄성 파괴역학으로 求해야 하는 K_{IC} 를 J_{IC} 로부터 求할 수 있다. 즉, 작은 試片에서 塑性領域이 너무 커서 線形的으로 解析이 不可能할 때 J-積分의 方法을 利用하면 크랙 끝의 deformation field에 適合점을 맞추므로 큰 試片으로 求해야 할 하는 K_{IC} 를 작은 試片에서도 求할 수 있게 된다.

III. J-積分 값의 計算

J-積分 값의 計算은 有限要素法을 使用하여서 任意의 積分經路를 따라서 求하는 方法과^{20,21,22} 實驗으로 얻어지는 荷重—變位 曲線으로 求하는 方法이 있다. 後者の 方法은 式 (3)으로 부터 出發하여 크랙의 길이를 달리하는 여러 개의 試片으로부터 求하는 方法과^{10,11,23} 荷重을 받는 部分(ligament)의 應力狀態가 균형일 때에는 다음과 같이 간단하게 表現되어 하나의 試片으로써 求할 수 있게 된다.¹² 즉,

$$J = \frac{2}{b} \int_0^{\delta} P d\delta \quad (10)$$

와 같이 된다.

式 (10)은 compact tension 試片에서 크랙이 길게 나 있을 때에는 應力狀態는 主로 굽힘이므로 式 (10)을 쓸 수 있다.

그러나, 純粹한 굽힘상태가 아니고 軸方向 힘(axial force)에 의한 影響도 있다. 이것은 Merkle, Corten에 의해서 式 (11)에서와 같이 表現되어 고려되었다.¹⁵

$$J = \frac{\eta_r + \eta_c \left(\frac{\phi_c}{\phi_r} \right)}{b} \phi_r \quad (11)$$

여기서

$$\eta_r = \frac{2(1+\alpha)}{1+\alpha^2} \quad (12)$$

$$\eta_c = \frac{2(1-2\alpha-\alpha^2)}{(1+\alpha^2)^2} \quad (13)$$

$$\phi_r = \int_0^{\delta} P d\delta \quad (14)$$

$$\phi_c = \int_0^{\delta} \delta dP \quad (15)$$

$$\alpha = \left\{ \left(\frac{a}{c} \right)^2 + 2 \left(\frac{a}{c} \right) + 2 \right\}^{1/2} - \left(\frac{a}{c} + 1 \right) \quad (16)$$

$$C = \frac{b}{2} \quad (17)$$

이다.

IV. 實驗 및 結果

1. 材料 및 試片

(i) 材料

본 論文에 使用된 材料는 市中에서 構造用으로 쓰이는 鋼으로써 SS41種이라는 이름으로 生産되는 것을 使用했다. 試片은 熱間壓延으로 된 100mm 厚板을 使用하여서 만들었다. 이 材料의 化學成分造成은 表 1에서와 같다.

表 1. SS41 種鋼의 化學成分造成

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Al
Wt%	0.13	0.20	0.72	0.013	0.015	0.022	0.011	0.005	0.01	0.03

* KISCO(한국 종합 특수강 주식회사)에서 분석

(ii) 引張 試片

引張試片은 지름이 12.5mm인 棒材로 ASTM 規格에 맞게 加工했다.²⁴ 材料가 壓延製品이므로 引張 試片을 Fig. 3에서와 같이 荷重의 作用 方向이 壓延 方向에 平行인 試片과 垂直인 2가지로 만들었다.

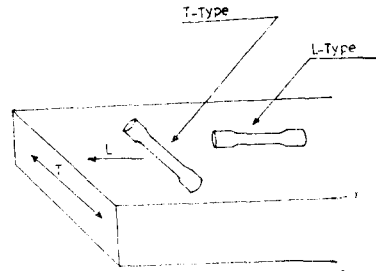


Fig. 3. Tensile specimen for different rolling direction

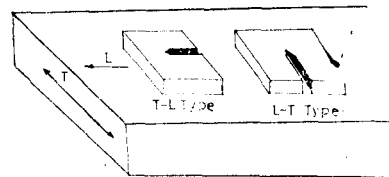


Fig. 4. Fracture toughness specimen for different rolling direction

(iii) 破壞 試片

破壞 試片은 引張 實驗이 끝난후 降伏強度, 引張強度, 延率 등을 考慮하여 $J_{Ic}=30\text{kgf/mm}$ 로 豫測하여서²⁵⁾ 두께를 平面 變形度 要求 條件인 式 (6)에 맞추어서 A形은 條件을 맞게 40mm로 B形은 20mm로 했다. 또, 크랙의 進行 方向이 壓延 方向에 垂直이나 平行이나에 따라서 다시 L-T形과 T-L形 2가지로 加工했다. 첫 글자는 試片에서 荷重의 作用 方向이고 둘째 글자는 크랙의 進行 方向이다. 따라서 試片은 A形과 B形에 各各 L-T形 T-L形의 4種이 있게 된다. 破壞 試片의 결에 따른 모양은 Fig. 4에서와 같고, 크기 및 值數는 Fig.5에서와 같다. A形試片에서 Fig.5에서 보이는 것처럼 試片 가운데에 있는 구멍은 荷重이 加해지는 點이 얼마나 移動했느냐를 알기위한 clip on gage를 附着하려고 任意로 만든 것이다.²⁶⁾

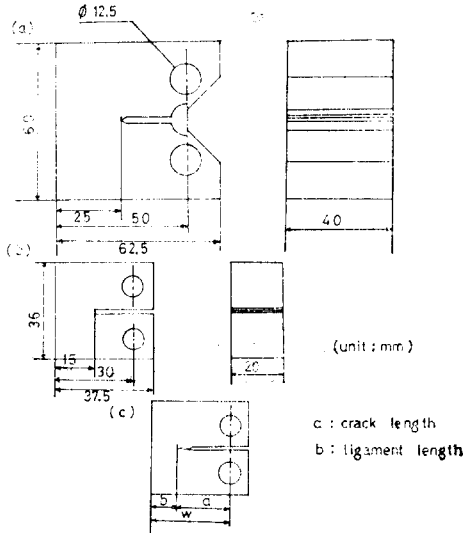


Fig. 5. Fracture toughness specimen

2. 實驗 機器

破壞 實驗과 引張 實驗은 50ton 用量의 MTS 油壓式 萬能 試驗機를 使用했다. 疲勞 크랙의 長이를 測定하기 위해서 14" optical comparator를 使用했다.

크랙이 傳播하는 瞬間을 찾기 위해서 DC power supply, 20A 容量, X-Y recorder, amplifier, digital microvoltmeter, travelling microscope 등을 使用했다. 實驗 裝置는 Fig. 6. 에서와 같다. 破壞 實驗後 試片에 加해진 일의 量을 測定하기 위해서 compensating planimeter를 使用했다.

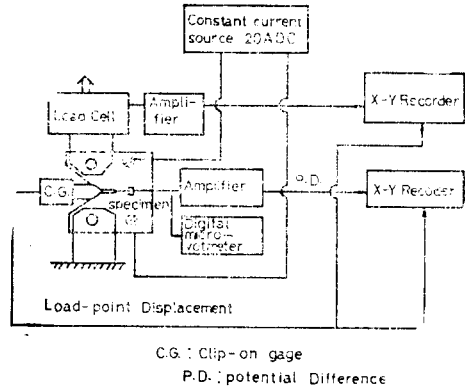


Fig. 6. Schematic diagram of experimental apparatus

3. 引張 實驗

L形과 T形 2가지 試片을 各各 變形度 10%까지는 25mm gage length extensometer를 附着하여 荷重 變形度 曲線을 얻어서 彈性係數, 降伏強度를 求하고 最大荷重으로부터 引張 強度를, 延率 및 斷面收縮率은 50mm 표점거리를 試片에 표시하여 破斷된 試片에서 測定 計算했다. 引張 試驗 速度는 0.2mm/min로 했다.²⁴⁾ 引張 試驗 結果는 표 2와 같다.

표 2. SS41 種鋼의 機械的 性質

	항복강도	인장강도	연율	단면수축율
L형	24 kg f/mm ²	41 kg f/mm ²	46%	71.6%
T형	22.5 kg f/mm ²	40 kg f/mm ²	42%	68%

$E=21000 \pm 100\text{kg f/mm}^2$

4. 疲勞 크랙

모든 破壞 試片에서의 疲勞크랙은 最大 荷重과 最小 荷重의 比가 10인 20 Hz의 Haversine wave를 加해서 약 15만~20만 cycle에 疲勞 크랙이 3~6mm정도 나가게 했다.

5. 크랙이 傳播하는 瞬間을 찾는 方法

20A를 試片에 흘려서 크랙끝 部分에서의 電位差를 Fig. 7. 에서처럼 연결하여 X-Y recorder의 Y-入力으로 使用했다.

여기서 X-入力은 試片에 附着된 clip on gage를 통한 荷重이 加해지는 點의 移動거리이다. 試驗結果電

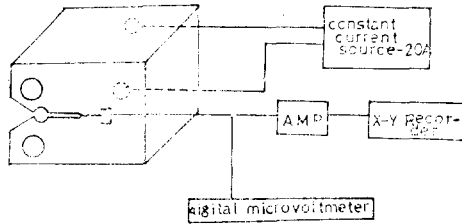


Fig. 7. Line diagram to detect potential difference

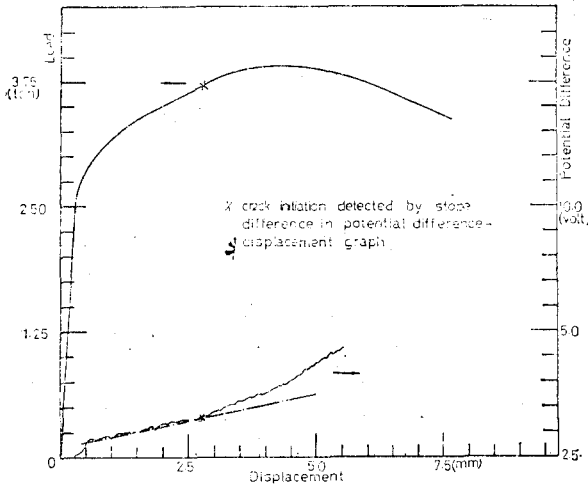


Fig. 8. Potential difference-deflection and load-deflection curves

位差變位 曲線은 Fig.8에서와 같다. Fig.8에서 크랙이 전파하는 순간은 기울기가 변화하는 점이다.²⁵⁾

6. 破壞 試驗

모든 實驗은 大氣中 室溫에서 行하여졌다. 크로스헤드의 速度는 0.05mm/sec로서 充分하게 安定된 크랙의 成長을 얻을 수 있었다. 파괴 시험으로 A形시편에서는 荷重—變位 曲線과 電位差—變位 곡선을 얻고 B形시편에서는 荷重과 crack edge에서의 변위가 얻어진다.

A形시편에서의 荷重—變位 曲線에서 크랙이 전파하는 순간까지의 시편에 加해진 일의 量은 곡선 아랫부분의 面積이 된다. 이 面積은 式 (10)에 代入하여서 方向性에 따른 J_{Ic} 를 求했다.

그리고 式 (11)로서 굽힘효과 뿐만아니라 軸方向의 힘을 고려할때의 J_{Ic} 값을 求했다. 그 結果는 표 3에서와 같다.

安定된 크랙 成長의 量을 알기 위해서 최대하중까지

의 面積을 구해서 式 (10)에 代入하여 크랙의 길이에 따라서 安定된 크랙 成長의 量을 定量的으로 비교할 수 있었다. B形 試片에 加해진 일의 量을 알기 위해서 crack edge에서의 변위를 크랙 끝을 기점으로하는 3각형으로 보아서 荷重이 加해지는 點의 변위를 求했다.

표 3. 破壞 試驗 結果

Specimen A

	Crack length (mm)	crack ratio (a/w)	J_{Ic} -with bending effect only (kgf/mm)	J_{Ic} -with axial and bending force effect	J calculated at max. load
L-T Type	28.2	0.564	34.3	39.3	68.2
	29.0	0.580	28.4	32.5	60.4
	29.5	0.590	31.2	34.0	55.4
	30.6	0.612	32.7	35.5	45.4
	31.8	0.636	32.9	36.2	45.3
T-L Type	29.4	0.588	24.6	27.1	45.3
	30.5	0.610	25.3	27.5	42.6
	32.0	0.640	24.2	26.3	38.3

Specimen B

L-T Type	17.8	0.593			94.0
	18.2	0.607			82.4
	18.4	0.613			64.8
	18.6	0.620			62.7
	18.7	0.623			54.2
T-L Type	17.3	0.577			48.2
	18.1	0.603			43.3
	18.8	0.627			40.8
	18.8	0.627			41.4

B形 시편에서는 최대하중 까지의 일의 量을 測定하여 安定된 크랙 成長의 量을 크랙 길이에 따라서 알아 보았다. 이 結果는 표 3. 에서와 같다. Fig. 8.에서는 A形 시편에서 얻어진 荷重—變位 曲線을 같은 graph로 옮긴 것이다. Fig. 9. 는 A形 시편에서 J_{Ic} 값의 방향성 및 crack ratio (a/w)에 대한 변화이고 Fig. 10. 은 L-T形 시편에서 A形과 B形 즉 두께에 따른 J-積分의 값의 crack ratio에 대한 변화이다. Fig. 11. 은 T-L形에 대한 것이다. Fig. 12~15은 方向性에 따른 破壞 斷面을 보여주고 있다. 破面을 보면 壓延方向에 垂直인 破面이 平行인 破面에 比해서 收縮이 큼을 볼 수 있다.

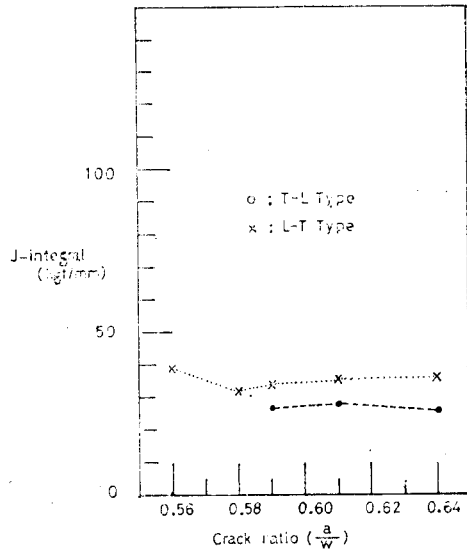


Fig. 9. J-integral at crack initiation point for A-type specimens

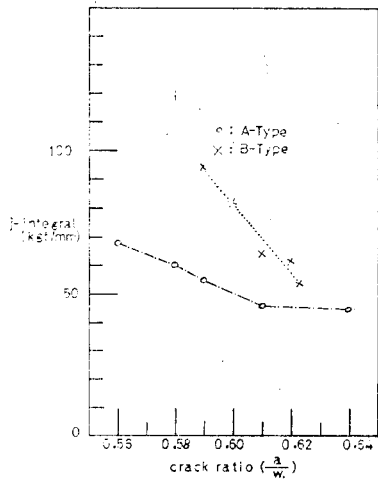


Fig. 10. J-integral at maximum load for L-T type specimens

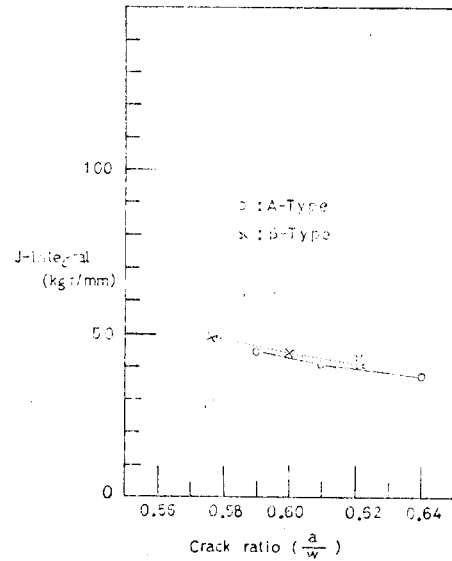


Fig. 11. J-integral at maximum load for T-L type specimens

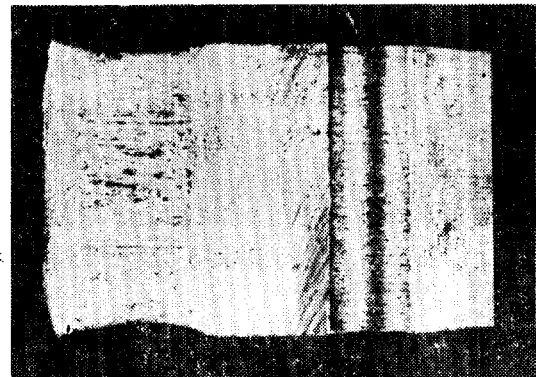


Fig. 12. Fracture plane(A-type) parallel to rolling direction

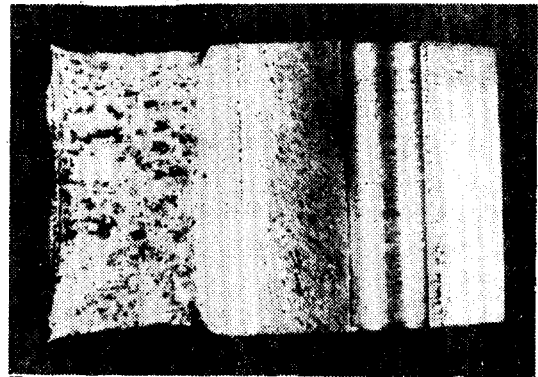


Fig. 13. Fracture plane (A-type) perpendicular to rolling direction

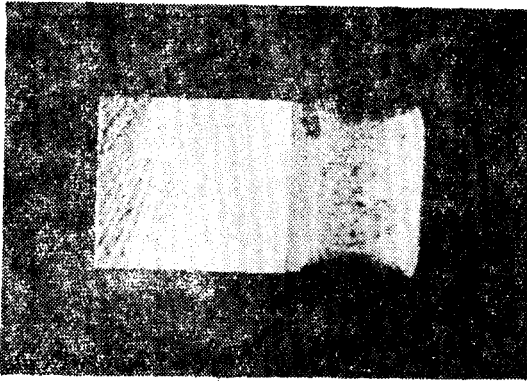


Fig. 14. Fracture plane(B-type) parallel to rolling direction

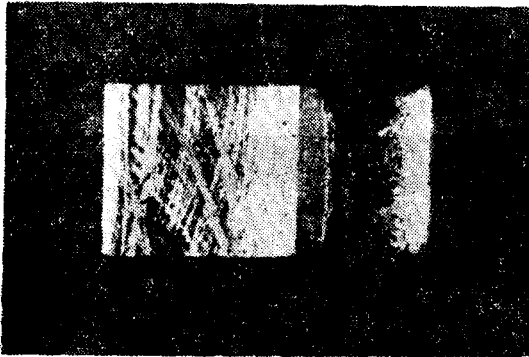


Fig. 15. Fracture plane (B-type) perpendicular to rollure direction

V. 考 察

크랙이 전파하는 순간에서의 J-積分의 값 J_{IC} 는 방향성을 갖지만 같은 방향에 대해서는 Fig. 9에서 보는 것처럼 實驗한 crack ratio의 범위 0.55~0.65에서 거의 一定한 값을 보여 주고 있다.

L-T 형에서는 $J_{IC}=35.5\text{kgf/mm}$, T-L 형에서는 $J_{IC}=27.0\text{kgf/mm}$ 를 얻었다.

破壞靱性値가 方向에 따라서 틀리게 되는데 SS41 種의 熱間壓延된 100mm 厚板은 약 1.3배 정도의 J_{IC} 값의 차이를 보이고 있다.

引張力을 無視하고 單純한 굽힘효과만으로 보았을 때는 L-T 형에서는 $J_{IC}=32.0\text{kgf/mm}$ T-L 형에서는 $J_{IC}=24.7\text{kgf/mm}$ 이다.

따라서, 軸방향의 힘을 무시하고 式(10)을 쓰면 J_{IC}

값의 誤差는 약 10%정도로 적은 값을 얻게 된다.

크랙이 전파하는 순간의 J-積分의 값이 實驗한 範圍에서 一定하다는 것은 크랙 끝에서의 deformation field가 같음을 보여 주고 있다. 이에 反하여 最大荷重에서 計算된 J-積分의 값은 crack ratio에 敏感하게 變함을 알 수 있다. 이는 crack ratio에 따라서 安定된 크랙 성장의 量이 틀려짐을 보여 주고 있다. Fig. 10, 11에서 보면 crack ratio가 작을수록 安定된 크랙 성장의 量이 커짐을 알 수 있다. 그런데 T-L 形 試片에서는 두께에 따라서 크게 變化하지 않음을 보이고 있다. 이것은 式(6)을 볼때 L-T, T-L 形이 평면 變형도 條件을 만족할 두께는 35.2mm, 27.4mm 이상이어야 한다. 따라서 두께 40mm인 A 形 시편에서는 L-T, T-L 形 모두가 平面 變形도 條件인 式(6)을 만족하지만 20mm인 B 形 試片에서는 그렇지 못하다. 試片의 두께에 따라서 보면 양옆 部分은 응력상태가 불균일 하게되고 가운데로 들어 갈수록 平면 變형도 상태가 될 것이다. 따라서 시편이 平面 變形도 條件을 滿尼하는 두께라는 것은 양옆부분의 불균일 응력상태의 영역을 무시할 수 있는 두께이다.

그런데 시편의 두께를 정하는 양이 J_{IC} 에 관계되므로 B 形 시편에서 보면 L-T 形 試片이 T-L 形 試片에서 보다 불균일 응력 상태의 領域이 클을 알 수 있다. 즉 平면 變형도 상태에서 멀어질수록 安定된 크랙 성장의 양이 많음을 알 수 있다.

그리고, ASTM 規格에 의해서 이 材料의 K_{IC} 를 求하려고 한다면 式(5) 및 (9)를 利用하여 L-T 形에서는 두께가 3.57m 이상이어야하고 T-L 形에서는 2.88m 이상 이어야 하므로 이 規格에 의한 방법으로는 實現이 不可能함을 알 수 있다.

VI. 結 論

(1) SS41 種 鋼의 破壞靱性値를 方向性에 따라서 J-積分의 原理를 適用하여서 求했다. 그 결과 파괴단면이 압연 방향으로 된 시편은 $J_{IC}=27.0\text{kgf/mm}$ 이고 파괴단면이 압연 방향과 垂直인 시편은 $J_{IC}=35.5\text{kgf/mm}$ 이었다.

(2) 크랙이 전파하는 순간은 20A의 전류를 흘려서 크랙끝에서의 電位差를 測定하여 電位差—變位 曲線으로부터 求했다.

(3) 크랙이 전파하는 순간에서의 값 J_{IC} 는 實驗한 crack ratio의 범위 0.55~0.65에서 거의 일정한 값을 보인 반면에 최대 하중에서의 J-積分의 값은 crack

ratio에 敏感하게 變했다.

(4) J_{Ic} 값은 재료의 압연 방향에 따라 다르며 저자의 실험에 의하면 SS41 종강의 열간 압연된 100mm 厚板에서는 파괴 단면이 압연 방향에 수직인 시편이 파괴 단면이 압연 방향에 평행인 시편에서보다 1.3배 높은 J_{Ic} 값을 가지고 있다.

(5) Compact tension 시편에서 축방향힘을 고려하지 않고 순수 굽힘만으로 보면 실험한 crack ratio 범위에서는 J_{Ic} 값이 10% 정도 낮게 얻어진다.

(6) 안정된 크랙 成長의 量은 crack ratio 뿐만 아니라, 응력 상태가 평면 변형도 條件을 얼마나 滿足시키느냐에 關係되고 이에서 멀어질수록 安定된 크랙 성장의 量이 커졌다.

參 考 文 獻

- Knott, J.F., *Fundamentals of Fracture Mechanics*, London Butterworths, 1973, pp. 94-113.
- Westergaard, H.M., "Bearing Presses and Cracks", *Journal of Applied Mechanics*. ASME, Vol. 6, No. 2, 1939.
- Paris, P.C. and Sih, G.C., "Stress analysis of Cracks," ASTM STP 381, 1964, pp. 30-83.
- "Method of Test for Plane-strain Fracture Toughness of Metallic Materials," ASTM E-399-74, Annual Book of ASTM Standards, Part 10, 1974, pp. 432-451.
- McClintock, F.A. and Irwin, G.R., "Plasticity of Fracture Mechanics," ASTM STP 381, 1964, pp. 84-113.
- Broberg, K.B., "Crack-growth criteria and nonlinear fracture mechanics," *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 19, 1971, pp. 407-418.
- Jones, D.L. and Poulos, P.K. and Liebowitz, H., "A comparison of the effect of specimen thickness and subcritical crack growth on several nonlinear fracture toughness parameters," 2nd International Conference on Mechanical Behavior of Materials, 1976, pp. 1252-1257.
- Rice, J.R., "A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks," *Journal of Applied Mechanics*, Trans. ASME, June 1968, pp. 379-386.
- Rice, J.R. in *Fracture*, Liebowitz, H., Ed., Vol. 2, Academic Press, 1968, pp. 191-311.
- Begley, J.A. and Landes, J.D., "The J-integral as a fracture Criterion," ASTM STP 514, 1972, pp. 1-20.
- Landes, J.D. and Begley, J.A. "The effect of specimen geometry on J_{Ic} ," ASTM STP 514, 1973, pp. 24-39.
- Rice, J.R., Paris, P.C., and Merkle, J.G., "Some Further Results of J-integral analysis and estimates," ASTM STP 536, 1973, pp. 231-243.
- Merkle, J.G. and Corten, H.T., "A J-integral analysis for the compact specimen, Considering Axial Forces as well as Bending effects," *Journal of Pressure Vessel Technology*, Trans. ASME, November 1974, pp. 286-292.
- Kishi, T., Saito, S., Mishima, Y. and Horichi, R., "Acoustic Emission signals of Ti Alloy and Maraging steel during plane strain fracture toughness testing," Proceedings of the 3rd Acoustic Emission Symposium, Tokyo, Japan, Sep. 16-18, 1976.
- Hickerson, Jr. J.P., "Experimental confirmation on the J-integral as a thin section fracture criterion," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 9, 1977, pp. 75-85.
- Griffis, C.A., "Elastic-plastic Fracture Toughness; A Comparison of J-integral and crack Opening Displacement Characterizations," *Journal of Pressure Vessel Technology*, Trans. ASME, November 1975, pp. 278-283.
- Paris, P.C., Written discussion to reference (15), pp. 21-22.
- Rice, J.R. and Rosengren, G.F., "Plane Strain deformation near a crack tip in a power-law hardening material," *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 16, 1968, pp. 1-12.
- Hutchinson, J.W., "Singular behaviour at the end of a tensile crack in a hardening material," *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 16, 1968, pp. 13-31.
- Atluri, Satya, N. and Nakagaki, M., "J-integral Estimates for strain-hardening materials in ductile fracture problems," 17th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, 1976,

21. Andersson, H., "Finite-Element Analysis of a Fracture Toughness test specimen in the nonlinear range," *Journal of Mechanics of Solids*, Vol. 20, 1972. pp. 33-51.
22. Kobayashi, A.S. and Chiu, S.T., "A numerical and experimental investigation on the use of J-integral," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 5, 1973, pp. 293-305.
23. Bucci, R.J., Paris, D.C., Landes, J.D. and Rice, J.R., "J-integral Estimation Procedures," ASTM STP 514, 1972, pp. 40-69.
24. "Tensile Testing of Metallic Materials," Spec. E-8, Annual Book of ASTM Standards, Part 10, 1975, p. 90.
25. Hiroshi Miyamoto; Toshiro Miyoshi and Mashi Shiratori, "Study on J_{Ic} fracture criterion," 2nd International Conference on Mechanical Behavior of Materials, 1976, pp. 1063-1067.
26. Tobler, R.L. and Reed, R.P., "Fracture Mechanics Parameters for a 5083-0 Aluminum Alloy at low Temperatures", *Journal of Engineering Materials and Technology*, Trans. ASME, Vol. 99, October 1977. pp. 306-312.