

中炭素鋼의 破壞靱性値에 關한 實驗的 研究

沈 寬 植*

An Experimental Study on the Fracture Toughness of Middle Carbon Steel

Kwan-Sik Shim

Abstract

The fracture of a hot rolled SM 45C steel plate was investigated for various crack ratio, thickness and loading point using the method of J-integral.

It was found that the stable crack growth increased as the thickness and crack ratio of the specimen.

The results are summerized as follows.

1. The more crack ratio increase, the less fracture toughness tend to.
2. Considering fracture toughness, a thin specimen is stronger a thick one.
3. Considering only the bending of specimen without thickenings of the axial direction, we can get J_{Ic} value decreased about 10 percentage within the scope of experimental crack ratio.

1. 緒 論

實在 構造物이 應力을 받고 破壞를 일으킬 때, 塑性의 性質을 包含한 彈性體이므로 이와 같은 境遇 Crack tip에서 應力擴大係數 K로만 定義될 수 없다.

따라서 Crack이 傳播할 때 Crack tip에 形成될 塑性領域을 考慮한 應力場解析에 J-integral 方法^{1,2,3,4,5,6,7)}이 發表되었다.

破壞力學의 目的은 設計에 必要한 그 材料의 固有한 性質인 破壞靱性値(fracture toughness)를 求하여 破壞豫測을 正確히 하는데 있다. 그러므로 J-integral은 應力擴大係數(stress intensity factor)나 에너지 解放率(strain energy release rate)과 마찬가지로 破壞靱性値를 評價하는데 使用한다.

應力擴大係數 K나 에너지 解放率 G는 幾何學的인 彈性 Crack을 實在크기로 解析한데 비해 J-integral은 Crack tip에 形成될 塑性領

* 江原大學校 工科大學 機械工學科 助教

域을 考慮하였다. 塑性領域은 Crack 길이나 試片 크기에 비해 크게 나타난다. 그래서 J-integral은 線形彈性論을 適用시킬 수 없을 境遇에 使用한다.

非線形破壞力學을 土臺로 Crack tip에서 變形場(Deformation field) 問題點을 考察한 것을 보면 다음과 같다.

1968年 Rice⁸⁾가 理論化하여 J-integral 數式을 提案하였고 1972年 Begley 와 Landes^{2, 9)}는 最初로 實驗을 試圖하여 Crack 길이가 다른 境遇에 破壞靱性值 J를 考察하였는데, Crack 길이가 작은 境遇의 臨界값(J_{Ic} : Model)은 Crack 길이가 큰 境遇의 臨界값과 같다는 것을 提案하였다. 이와같은 結果는 試片의 모양에는 關係없음을 提示하므로써 J-integral이 力學的인 量으로 使用할 수 있다는 事實을 指摘했다. 따라서 實驗적으로 J_{Ic} 는 彈塑性領域에서 破壞條件으로 使用해도 좋다는 報告^{4, 9)}를 하였다. 또한 1973年 Rice Paris Merkle¹⁰⁾은 한 個의 試片으로도 Crack tip에서 J_{Ic} 를 求할 수 있음을 보였다.

本 研究에서는 J-integral 方法을 適用하여 材料의 固有한 性質인 J_{Ic} 를 評價하고자 한다.

2. 理論 및 實驗方法

2.1. J-integral의 定義

非線形彈性體를 表示하는 方法으로 J-integral이 破壞靱性을 나타내는 變數로서 使用되었다.

物體力(Body force)이 作用하지 않으며 모든 應力성분이 直角座標($\sigma_{ij} = \sigma_{ij}(x, y)$)에 依存하는 2次元 變形場(deformation field) 즉, 平面 應力平面變形率일 때 彈性舉動을 보여주는 均質物體(Homogeneous body)에 Crack은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 X軸에 平行하게 存在한다. Crack tip 아래쪽면에서 反時計 方向으로 Crack tip을 둘러싸면서 Crack 윗면에서 끝나는 어느 γ (gamma) 經路를 취한 積分은 特定값을 주며 이는 Rice^{8, 10)}가 J로 表示하였고 다음과 같이 定義했다.^{11, 12, 13, 14, 15)}

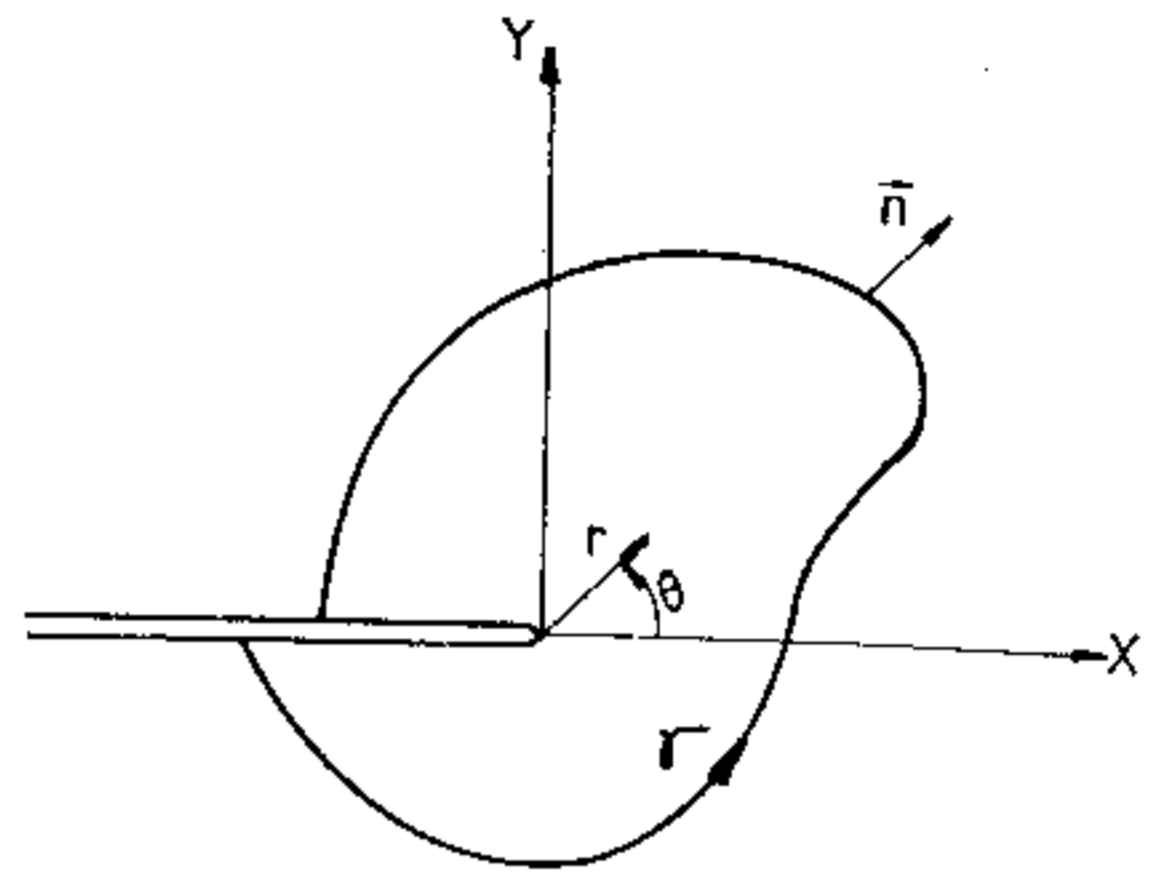


Fig. 1. Crack Coordinate System and Arbitrary Line Integral Contour

$$J = \int_{\gamma} W, d, -T \frac{\partial u}{\partial x} ds \dots\dots\dots ①$$

여기서 γ 은 Fig. 1에서와 같이 Crack tip을 包含하여 아래 Crack의 表面으로부터 위의 Crack 表面에 이르는 임의의 積分經路이다. u 는 變位 Vector, \vec{n} 는 垂直單位 Vector, ds 는 γ 上에서 미소호의 길이이다. \vec{T} 는 γ 에 따라 바깥 쪽으로 作用하는 應力 Vector이다. strain energy density(單位 體積當 strain energy) W_s 는

$$W_s(x, y) = W_s(\epsilon_{ij}) = \int_0^{\epsilon_{ij}} \sigma_{ij} d\epsilon_{ij} \dots\dots\dots ②$$

로 表現된다.

①式의 意味는 單位 Crack 길이當 포텐셜 에너지(Potential energy) 減小量의 物理的 意味를 가지며 다음과 같이 定義된다.^{5, 23, 24)}

$$J = - \frac{du}{da} \dots\dots\dots ③$$

여기서 u 는 포텐셜에너지(Potential energy)이고, a 는 Crack이 da 量 만큼 傳播하였을 때 포텐셜變化를 表示하는데 있다. 應力場解析에는 Crack tip을 包含하는 임의의 閉曲線에 따르는 integral로 주어지며, 따라서 J-integral 經路에는 影響을 받지 않는 積分(Path independent integral)이다.

Fig. 2에서 약간 다른 Crack 길이를 갖는 同

一試片에 對해 荷重點에서의 힘—變位曲線사이의 벗금친 部分의 面積은 $J da = -du$ 로 表現된다.

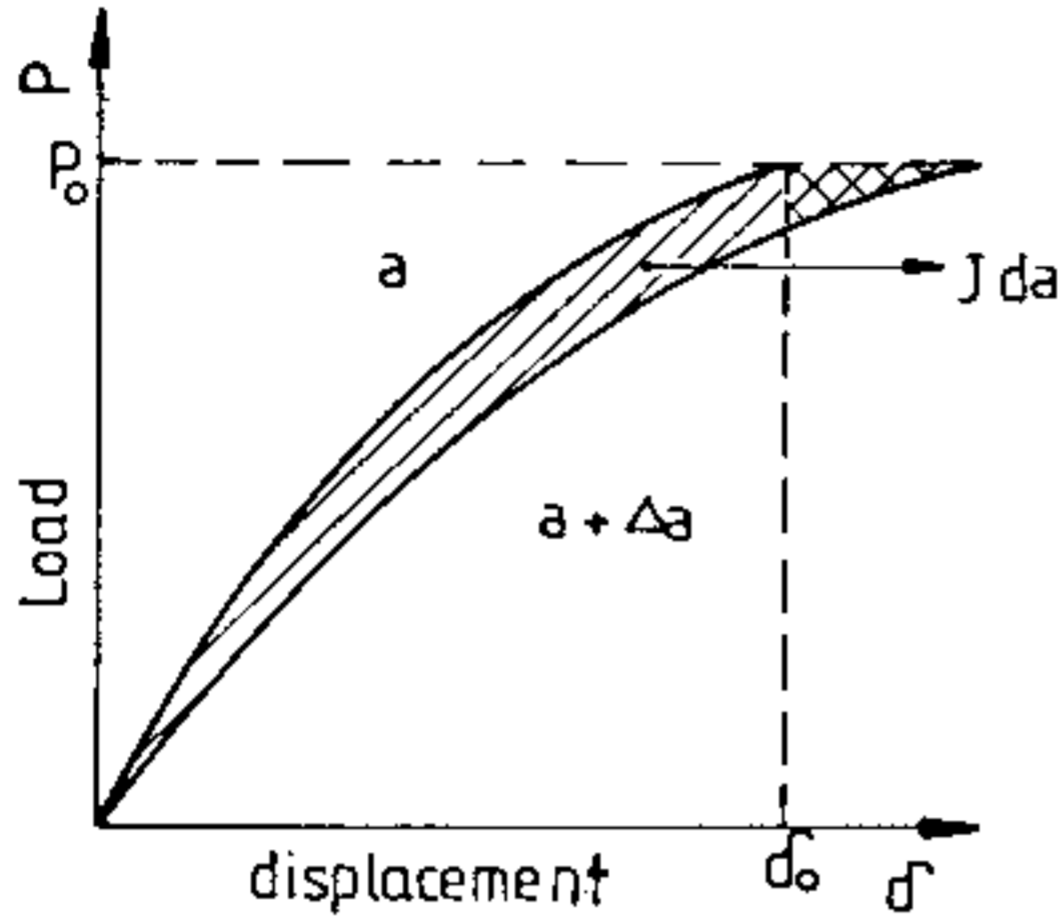


Fig.2. Graphical measurement of J

2.2. Crack tip에서 彈塑性 解析

線形彈性 破壞力學(LEFM)을 彈性領域으로 확장시킨 解析的 研究는 Crack tip 應力—變形度 部分의 特性을 나타내는 媒介變數를 찾기 爲한 勞力이었다. 이러한 媒介變數(parameter)는 線形彈性 破壞力學에 對하여 다음과 같은 關係가 있다.¹⁶⁾

$$J_I = \frac{K_I^2}{E'} \dots \dots \dots \textcircled{4}$$

여기서 平面變形度 狀態에서는 $E' = E/(1-\nu^2)$ 이고 平面應力 狀態에서는 $E' = E$ 이며, ν 는 포아송비(poisson's ratio), E 는 彈性係數이다.

Rice¹⁷⁾ 등에 의하면,

$$\left(\frac{\tau}{\tau_0}\right) = \alpha \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0}\right)^n \dots \dots \dots \textcircled{5}$$

로 舉動하는 材料의 應力—變形度는 Crack tip 부근에서 變形에 너지가 有限하기 爲해서

$$\lim_{r \rightarrow 0} \sigma_{ii} \epsilon_{ii} = \frac{f(\theta)}{r} \dots \dots \dots \textcircled{6}$$

의 關係를 가지며 ⑥式에서

$$\begin{aligned} \sigma_{ii} &= \tau_0 \left(\frac{GJ}{\tau_0^2 r}\right)^{\frac{1}{n+1}} f_{ii}(\theta, n) \\ \epsilon_{ii} &= \frac{\tau_0}{G} \left(\frac{GJ}{\tau_0^2 r}\right)^{\frac{1}{n+1}} g_{ii}(\theta, n) \end{aligned} \dots \dots \dots \textcircled{7}$$

로 주어지며, α 는 상수, τ_0 는 降伏剪斷應力, r 는 Crack tip에서부터의 거리, f_{ii} 와 g_{ii} 는 θ 와 硬化指數 n 에 의해 決定되는 無次元函數 그리고 r 는 n 만의 函數인 常數이다.

⑥式 및 ⑦式에서 材料가 線形彈性材料이건 非線形彈性材料이건 모두 適用되는데 $n=1$ 일때는 J 가 線形彈性 破壞力學의 제어변수(control parameter)인 K 와 같은 Crack 特異性을 나타내며, 또한 r 이 zero에 接近하므로써 應力은 $r^{-\frac{1}{n+1}}$ 의 特異性을 갖고, 變形度는 $r^{-\frac{1}{n+1}}$ 의 特異性을 가지게 되어, 이 둘을 곱한 것이 $1/r$ 의 特異性(singularity)이 나타난다.

2.3. 實驗方法

本 實驗에 使用한 材料는 構造用鋼(SM15C)인 中炭素鋼이며, 50mm 熱間壓延板을 使用하였다. 試片은 63×60mm 크기이며 Crack tip에서 90°의 銳利한 角으로 研磨했다. 試片의 폭(W)은 50.4mm로 加工하였으며, Crack ratio(a/w)를 다르게 製作하였다.

20ton 用量의 MTS 試驗機를 使用하여 破壞 實驗을 하였으며, 初期 疲勞 Crack 進行을 測定하는 Travelling Microscope와 疲勞 Crack 길이를 測定하기 爲하여 optical comparator를 使用하였다.

모든 實驗은 大氣中 室溫에서 進行하였다. Crosshead의 速度는 0.1mm/sec로서 充分하게 安定된 Crack의 成長을 얻을 수 있었다. 材料의 方向性 荷重의 條件, Crack 길이, Crack ratio 등이 實驗的으로 測定된 data를 實在數式에 넣어 計算하고자 하니 경우의 數가 많아서 마이크로컴퓨터(Micro-computer)로 計算하였다.

實驗中 試片의 最大荷重을 지난 곳이나, 不安定 破斷(unstable fracture)이 생겼을 때 끝났다. 材料의 方向性 및 Crack ratio a/w=0.55~0.75 範圍를 갖는 두께 40mm, 20mm의 C.T.S.를 使用하여 J-integral 計算方法에 의해 測定된 實驗結果는 Table. 1~4에 表示하였다.

3. 實驗結果 및 考察

3.1. 굽힘 狀態에서 破壞靱性值 解析

最初 不安定이 先行하여 어떠한 Crack 傳播 라도 試片의 compliance 에 영향이 있으므로 J_{Ic} 는 Crack 發生의 時點에서 測定하는 것이 重要하다.

Rice¹⁸⁾ 등은 다음과 같은 式을 提案하였다.

$$J = \frac{2A}{Bb} \dots\dots\dots \textcircled{8}$$

여기서 B는 試片의 두께, b는 잔여길이(ligament length)의 크기이며, A는 荷重--變位 曲線에서의 面積이다.

實驗的으로 求해진 data 를 Rice 式에 의해 나온 J_{Ic} 값은 TL 方向에서는 $J_{Ic} = 18.4 \text{ Kg f/mm}$ 로 나타나며, LT 方向에서는 $J_{Ic} = 15.1 \text{ Kg f/mm}$ 로 나타난다.

그러므로 TL 方向이 LT 方向 보다 크게 나타난다. Table. 1. Table. 2에 나타난 것은 Fig. 3 과 비교하기 위해 다시 그래프로 表示하였다.

Crack 이 傳播하는 순간 J-integral 의 값이 一定한 範圍內에서 一定한 것은 Crack 끝에서의 變形場(Deformation field)이 같음을 보여 주고 있다.

Table 1.

Type	Thickness (Bmm)	Crack length (mm)	Crack ratio (a/w)	J_{Ic} (kg f/mm)
T L	40	27.6	0.548	14.5
		30.2	0.600	13.2
		33.1	0.658	12.1
		35.6	0.707	11.2
		37.7	0.749	10.6
L T	40	28.3	0.563	13.4
		29.8	0.592	12.3
		32.5	0.646	11.0
		36.2	0.719	10.4
		38.4	0.763	10.0

Table 2.

Type	Thickness (Bmm)	Crack length (mm)	Crack ratio (a/w)	J_{Ic} (kg f/mm)
T L	20	28.3	0.562	28.3
		29.7	0.590	26.9
		33.4	0.664	23.9
		35.8	0.711	22.3
		39.0	0.775	20.5
L T	20	28.6	0.586	22.1
		31.3	0.622	20.4
		34.5	0.685	19.2
		36.1	0.717	17.0
		38.8	0.771	15.5

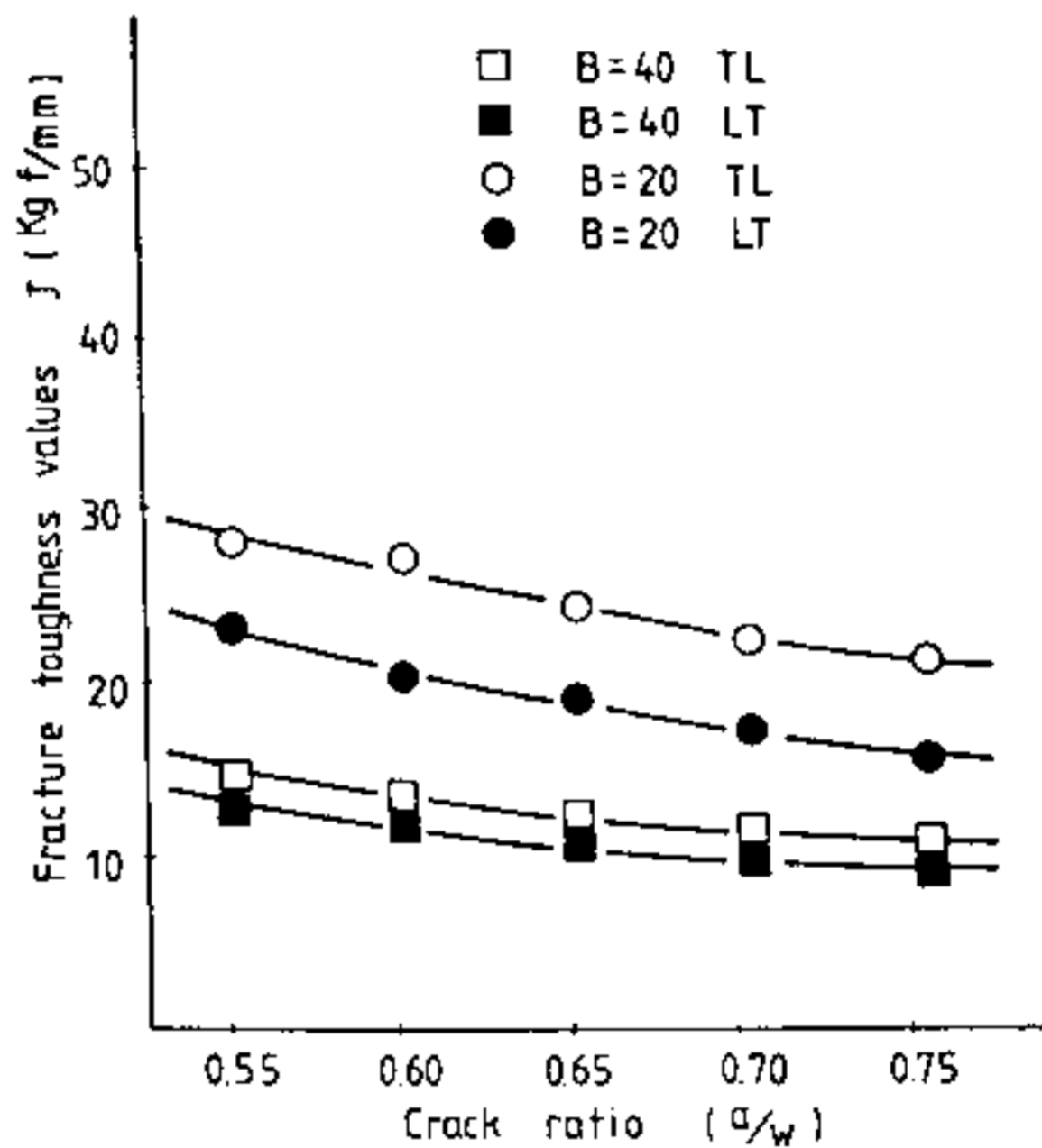


Fig. 3. J_{Ic} for various crack ratios and specimen thickness

4.2. 引張力을 考慮한 破壞靱性值 解析

굽힘 狀態뿐 아니라 軸方向引張力의 영향까지도 考慮하여 $a/w > 0.5$ 일 境遇 Merkle & Corten 은 다음과 같은 式을 제안하였다.^{21,22)}

$$J = \alpha_1 \frac{2A}{Bb} + \alpha_2 \frac{2p\delta}{Bb} \dots\dots\dots \textcircled{9}$$

여기서

$$\alpha_1 = 1.222468 - 0.637295(a/w) + 0.614937(a/w)^2 - 0.2000797(a/w)^3 \quad \dots \textcircled{9}$$

$$\alpha_2 = -0.0006771 + 0.595163(a/w) - 0.940241(a/w)^2 + 0.353779(a/w)^3 \quad \dots \textcircled{10}$$

이다.

⑨, ⑩式에 實驗한 것을 data에 넣으면 다음과 같은 결과가 나온다.

Crack이 傳播하는 순간 J-integral 값과 J_{1c} 方向性은 Table 3~4에서 나타난 것 처럼 實驗한 Crack ratio의 범위가 0.65~0.75 일때 거의 一定한 값을 보여주고 있다. Fig. 4에서도 같은 結果로 나타난다.

TL形에서는 $J_{1c} = 37.2 \text{ kgf/mm}$ 이고 LT形에서는 $J_{1c} = 27 \text{ kgf/mm}$ 를 얻었다.

따라서 軸方向의 힘을 無視하면 J_{1c} 값의 誤差는 約 10%程度 적은 값을 얻게 된다.

Table 3.

Type	Thickness (Bmm)	Crack-length (mm)	Crack ratio (a/w)	J_{1c} (kg f/mm)
T L	40	27.6	0.584	31.9
		30.2	0.600	27.4
		33.1	0.658	23.5
		35.6	0.707	20.3
		37.7	0.749	18.1
L T	40	28.3	0.563	28.6
		29.8	0.592	22.8
		32.5	0.646	19.9
		36.5	0.719	18.6
		38.4	0.763	17.5

Table 4.

Type	Thickness (Bmm)	Crack-length (mm)	Crack ratio (a/w)	J_{1c} (kg f/mm)
T L	20	28.3	0.562	71.1
		29.7	0.590	55.6
		33.4	0.664	47.9
		35.6	0.711	39.2
		39.0	0.775	37.2
L T	20	28.6	0.568	40.5
		31.3	0.622	36.6
		34.5	0.685	32.4
		36.1	0.717	28.5
		38.8	0.771	24.1

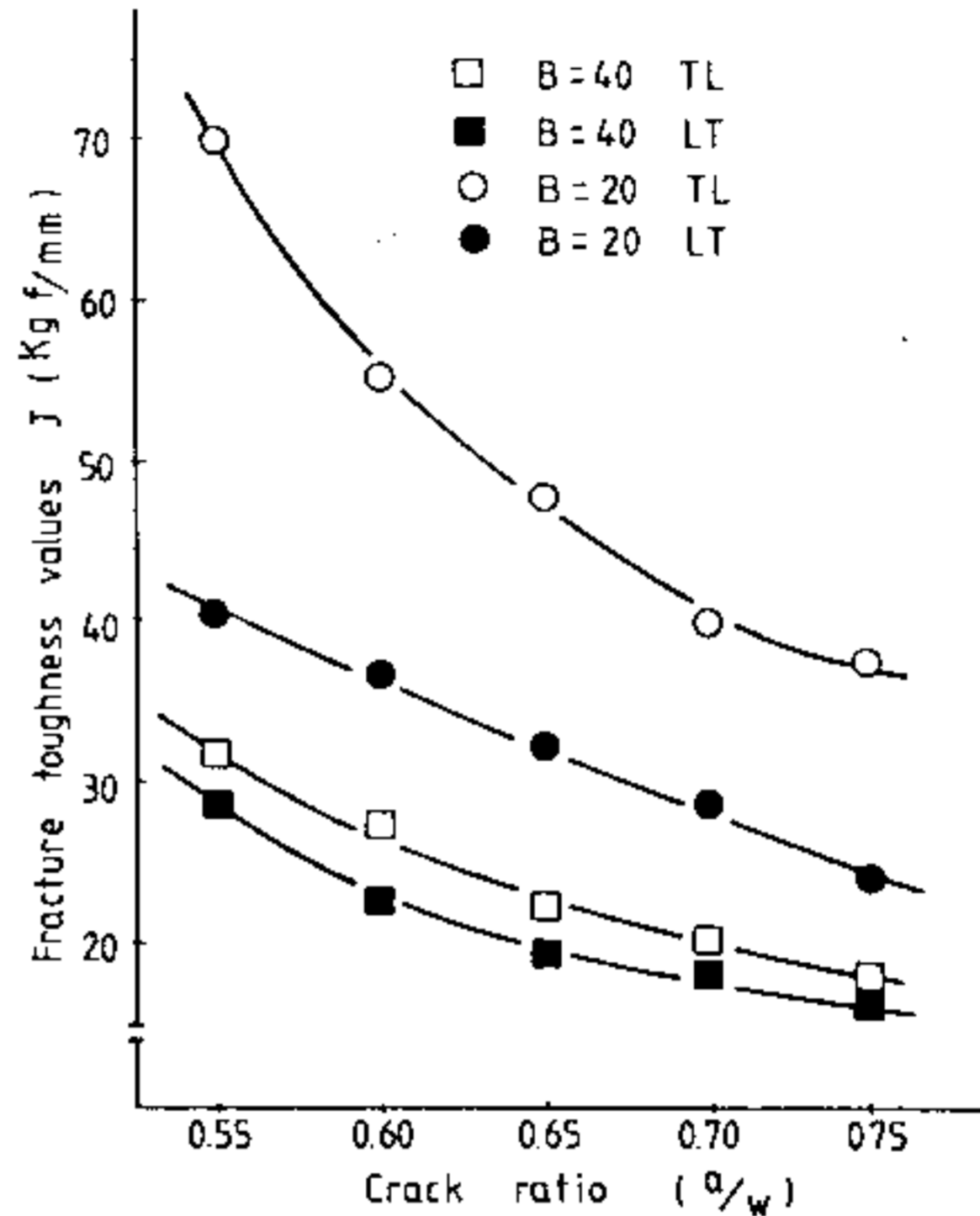


Fig. 4. J_{1c} for various crack ratios and specimen thickness

4. 結 論

熱間壓延 SM45C 鋼板의 破壞靱性은 J-integral 方法을 使用하여 여러가지 Crack ratio와 두께와 荷重點을 調査하였다.

安定 Crack 成長은 試片의 두께와 Crack ratio 증가로 알 수 있다.

1. Crack ratio(a/w)가 증가할 수록 破壞靱性値는 감소하는 경향을 보였다.

2. 破壞靱性値는 試片두께가 얇은 쪽이 두꺼운 試片보다 크다.

3. C.T.S. (compact tension specimen)에 서 軸方向을 고려하지 않고 굽힘만으로 보면 實驗한 Crack ratio 範圍에서는 10%정도 낮게 얻어진다.

参 考 文 献

1. J. A. Begley and J. D. Landes, "The J-integral as a Fracture criterion", ASTM STP 514, 1972, pp. 1-20
2. J. D. Landes and J. A. Begley, "The effect of specimen geometry on J_{1c} ", ASTM STP 514, 1972, pp. 24-39
3. R. J. Bucci., P. C. Paris, J. D. Landes and J. R. Rice., "J-integral Estimation Procedures", ASTM STP 514, 1972, pp. 40-69
4. N. E. Dowling and J. A. Begley, "Fatigue crack growth during gross plasticity and the J-integral", ASTM STP 509, 1974, pp. 82-103
5. R. W. Hertzberg, "Deformation and Fracture mechanics of Engineering materials", John wiley & son, 1976, pp. 229-375
6. S. T. Rolfe, and J. M. Barsom, "Fracture and Fatigue control in structures", Prentice-Hall Inc., 1977, pp. 537-548
7. J. D. Landes, and J. A. Begley, "Recent Developments in J_{1c} testing", ASTM STP 632, 1976, pp. 57-81
8. J. R. Rice, in Fracture, Liebowith, H., vol 2., Academic Press, 1968, pp. 191-311
9. J. K. Knott, "Fundamentals of Fracture Mechanics", London Burrerworths, 1973, pp. 94-113
10. J. R. Rice, P. C. Paris, and J. G. Merkle, "Some Further Results of J-integral analysis and estimates", ASTM STP 536, 1973, pp. 231-243
11. J. A. Begley, J. D. Landes, and W. K. Wilson, "An estimation model for the application of the J-integral", Fracture Analysis, ASTM STP 650, 1974, pp. 155-169
12. Fred. Nilsson, and Borje. Ostensson, " J_{1c} -testing of A-533 B-statistical evaluation of some different techniques", Engineering Fracture Mechanics, vol. 10, 1978, pp. 223-232
13. J. A. Begley, and J. D. Landes, "Test Results form J-integral studies An Attempt to establish a J_{1c} ", ASTM STP 560, 1974, pp. 170-186
14. J. G. KAUF MAN, "Experience in plane-strain Fracture Toughness Testing per ASTM Method E 399", ASTM STP 632, 1976, pp. 3-24
15. C. F. Shir, "J-integral Estimate for strain Hardening Materials in Antiplane shear using fully plastic solution", ASTM STP, pp. 3-26
16. G. G. Chell, "Developnents in Fracture Mechanics", A. S. P, LTD, 1979, pp. 67-182
17. D. G. H. LATZKO, "post-yield Fracture Mechanics", A. S. P. LTD, 1979, pp. 23-254
18. J. A. Begley, and D. F. Hasson, "Characterization of transition temperature toughness parameter", Engineering Fracture Mechanics, vol. 13, 1980, pp. 417-430
19. J. R. Rice, P. C. Paris, and J. G. Merkle, "Some further Results of J-integral analysis and estimates", ASTM STP 536, 1973, pp. 231-243
20. J. Lereim, and J. D. Embury, "A simple method for the determination of J-integral values", Engineering Fracture Mechanics, vol. 11, 1979, pp. 161-164

21. J.G. Merkle, and H.T. Corten, Transactions ASME, Journal of pressure Vessel Technology, Nov, 1974, pp. 286—292
22. C.H. Laforce, and J.Morrison, " J_{1c} Determination using the proposed stanard C-shaped specimen", Journal of Engineering Materials and Technology, Trans. ASME, July, 1978, pp. 248—252
23. R.M. Caddell, "Deformation and Fracture Mechanics", Prentice-Hall Inc, 1980, pp. 193—251
24. G.P. Chere Danov, "Mechanics of Brittle Fracture", McGraw-Hill, 1974, pp.130—311