

<論 文>

SCM 4 의 크랙開始點에 관한 研究

邕 章 祐* · 朴 贊 國** · 金 載 勳***

(1984年 8月 11日 接受)

A Study on the Crack Initiation of SCM 4

Jang-Woo Ong, Chan-Gook Park, Jae-Hun Kim.

Abstract

A J_{Ic} test procedure by ultrasonic method was performed to observe the crack opening behavior of fatigue precrack and detect the initiation of crack propagation of compact tension specimen in this paper.

Pulse-echo method with 5 MHz transducer was used on the Cr-Mo steel quenched and tempered at 593 °C. We obtained the following results in the elastic-plastic fracture toughness test by ultrasonic method.

Echo height is a little increased linearly and rapidly at the early stage of loading. Then it is decreased considerably, finally at the unstable crack growth stage, it is rapidly increased at an unpredictable rate. The initiation of crack propagation is supposed to be at the stage deviated from linearly decreased region and then blunted. J_{Ic} value(10.15-12.15 Kgf/mm) by ultrasonic method is lower than that(12.2 Kgf/mm) by R -curve method.

But, it is required that the research for the more exact evaluation about correlation between echo height and the crack opening behavior of precrack tip will be continued.

1. 緒 論

機械 및 構造物에 사용되는 많은 材料는 破壞時 相當한 塑性變形을 隨伴하기 때문에 K_{Ic} 의 適用은 不適하여, 彈塑性破壞靱性試驗이 材料의 強度評價에 必要하게 되었다. 이것이 設計에 사용되어야만 한다는 觀點에서 最近 수년동안 線型破壞力學을 彈塑性領域까지 擴大시키기 위한 많은 努力이 있었다. 그 解析方法으

로는 現在 J 積分⁽¹⁾과 COD試驗 등이 있다.

J 積分값을 求하는 方法에는 現在 ASTM E 813-81⁽²⁾에 規定되어 있는 Multiple Specimen Method⁽³⁾와 勸獎되어 있는 Single Specimen Method^(4,5) 등이 있으며 前者는 크랙比가 서로 다른 여러개의 試片을 必要로 하는 Stretch Zone 法과 R 曲線法이 있다. 이들 方法은 比較的 信賴性이 높은 方法으로 評價되고 있으나 많은 試片을 必要로 하며 測定의 어려움이 있다. 한편, 後者は 한개의 試驗片만으로 크랙開始點을 찾는 方法으로써 Unloading Compliance 法^(6,5), 電位差法^(6,7), Acoustic Emission 法^(8,9), 超音波法⁽¹⁰⁾ 등이 있으나, 아직 높은 信賴性이 確立되지 못하여 現在 널리 研究

*正會員, 忠南大學校 工科大學 機械工學科

**忠南大學校 大學院

***正會員, 忠南大學校 大學院

開發되고 있는 중이다. 이중 超音波法에 의한 研究結果는 크랙進展에 따른 에코出力變化로부터 크랙傳播開始點을 檢出할 수 있다고 研究發表되고 있다^(10,11,12). 그러나, 實際의 크랙先端面은 平滑치 않고, 塑性化된 變形表面으로 이루어진 延性破面으로 이는 超音波에너지를 反射할 뿐만 아니라 吸收 또는 散亂시키는 傾向이 있어, 이들은 超音波特性에 큰 影響을 미칠 것으로 생각되고 있다. 따라서, 超音波法에 의한 方法의 有效性은 評價되고 있으나 現在까지 그 解析이 確立定着되지 못한 實情이다.

本 論文에서는 이러한 點을 감안하여 SCM 4(KS 規格)材에 대해서 Unloading Compliance 法 및 超音波法에 의한 크랙開始點檢出을 試圖한 結果로부터 破壞靱性試驗에 있어서 超音波法의 有效性을 밝히고자 한다.

2. 實驗方法

2.1. 材料 및 試驗片

本 實驗에서 使用된 材料는 SCM 4(KS 規格)으로써 化學的 成分 및 機械的 性質은 Tables 1, 2와 같다. 그리고 試驗片 採取方向은 T-S 方向으로 하였다. 試驗片 製作은 816°C(±5°C)에서 어닐링처리後 機械加工하고, V노치加工은 放電加工機로 하였다. 加工後, 試驗片은 질소가스 雰囲気爐에서 843°C(±5°C)까지 加熱, 1時間 동안 維持後 油冷하고 다시 593°C(±5°C)에서 1時間 維持시켜 템퍼링하였다. Fig. 1은 ASTM E813-81⁽²⁾에 따라서 製作한 試驗片의 形態 및 치수를 나타낸 것이다.

노치 先端의 疲勞豫크랙의 插入은 SHIMADZU SERVOPULSER(Model EHF-20)을 使用하였다. 加해준 反復最大荷重은

$$P_{max} = Bb^2\sigma_0 / (2\omega + a) \quad (1)$$

로 계산된 P_{max} 의 40%荷重이다. 여기서 B 는 試片 두께, b 는 $(\omega - a)$, ω 는 荷重點에서 측정된 試片너비, a 는 크랙길이, σ_0 는 降伏應力과 極限應力の 平均 $[(\sigma_y + \sigma_u) / 2]$ 이다. 사이클은 6~8 Hz, 波形은 正弦波, 사이클수는 6,000 사이클 內外로 하였으며, 最大應力擴大係數는 $K_{I,max} < 117.80 \text{ Kgf/mm}^2$ 로 되게 하였다. 또한 疲勞豫크랙의 길이는 表面에서 2.3 mm, 中央部에서 最大길이 3.4 mm 以內로 하여 노치 影響이 없도록 하였다.

2.2. 實驗裝置 및 方法

Unloading Compliance 法에 의한 J_{Ic} 의 測定檢出은

Table 1 Chemical composition of SCM 4(wt%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Fe
0.40	0.61	0.73	0.025	0.027	0.98	0.17	balance

Table 2 Mechanical properties of SCM 4(Tempering at 593°C for 1 hour after oil quenching at 843°C)

Properties Material	Yield stress (Kgf/mm ²)	Ultimate stress (Kgf/mm ²)	Elongation(%)	Hardness (H _{RC})
SCM 4	67.3	87	16	25.5

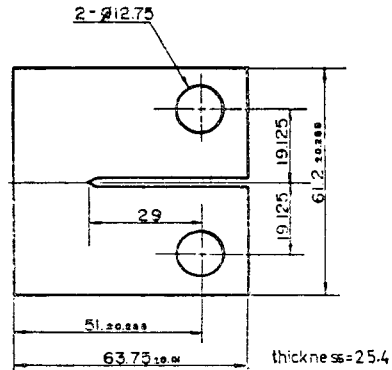


Fig. 1 Specimen configuration

SERVO-PULSER를 使用하여 로드셀과 클립게이지에 의해 처음 荷重—CGD(試驗片背端面上的 變位)曲線을 求한후, 荷重線 CGD를 Robinson, Tetelman⁽¹³⁾이 提示한 方法을 使用하여 CGD로부터 환산 산출하여, 荷重—荷重線 CGD 曲線을 求하였다. 荷重除去線(Unloading line)의 기울기는 荷重—荷重線 CGD 曲線에서 구하였다. 이때, 引張速度 및 荷重除去速度는 0.125 mm/min, 除去荷重은 크기를 荷重除去開始點荷重의 10%以內로 하여, 20~25회 行하였으며, 特別 크랙開始點에 主眼을 두어 實驗을 하였다. 좀더 正確한 荷重除去線의 기울기를 求하기 위해 O.P Amp.를 利用한 DC offset 裝置를 製作, 기록계에 插入하여 荷重除去時에 荷重 및 CGD를 25倍 擴大시켰다. 크랙進展量 Δa 를 求하는 實驗式은 Saxena와 Hudak의 관계식⁽¹⁴⁾

$$\frac{a}{\omega} = 1.000196 - 4.06319 U_x + 11.242 U_x^2 - 706.043 U_x^3 + 464.335 U_x^4 - 650.677 U_x^5 \quad (2)$$

$$여기서 U_x = \frac{1}{\left(\frac{BE'\delta}{P}\right)^{\frac{1}{2}} + 1},$$

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

를 使用하였다. B 는 시편의 폭, δ 는 荷重線變位, P 는 荷重, ν 는 프와송比이다.

超音波法에 依한 J_{IC} 의 測定檢出은 超音波探傷器(三菱電機製 FD 210)와 探觸子(三菱電機製 PS-5 Q 20 ϕ)를 利用하였다. 探觸子の 位置는 疲勞豫크랙 끝部分의 試驗片 上端에 位置시켰으며 接觸媒質은 그리스를 使用하였다. 探傷面으로부터 豫크랙까지의 距離를 測定하여 에코높이를 직접 使用토록 하여 反射에코의 出力變化로부터 破壞의 開始點을 測定토록하였다. 實驗裝置의 블록線圖는 Fig. 2와 같다. 이때 使用한 試驗機는 油壓式 疲勞試驗機이며 引張速度는 0.125 mm/min로 하였다. 또한 破壞靱性試驗後, 破面은 아세톤으로 초음파 세척기에 의해 세척한 뒤에 走査型 電子顯微鏡(AKASHI ISI-130)으로 觀察하였다.

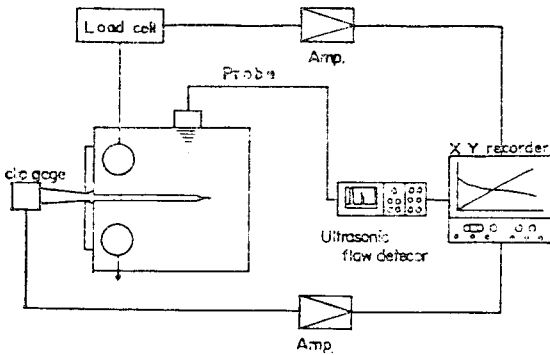


Fig. 2 Elastic-plastic fracture toughness test block diagram

3. 實驗結果 및 考察

3.1. Unloading Compliance法에 의한 크랙 開始點 評價

初期크랙길이 $a_0=32.3$ mm, 크랙比 $a_0/w=0.63$ 인 CT 試片을 3回 反復實驗한 結果, Fig. 3과 같은 荷重-CGD 曲線을 얻었다. 實驗이 끝난 試片을 Heat Tinting 한 後, 破面의 크랙길이를 9點 測定法에 依해 測定한 結果, 初期크랙길이는 式 (2)에 의해 豫測한 값과 1% 정도의 誤差가 있었으며 破斷面의 크랙길이는 약 13% 정도의 誤差가 있었다. 그러므로 이는 AS-

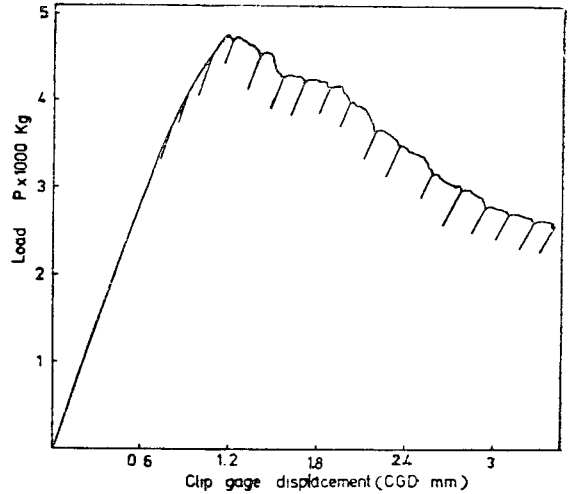


Fig. 3 Load-clip gage displacement curve

TM E 813-81⁽²⁾의 測定誤差 15%以內인 規定을 充足하고 있었다.

Fig. 4는 Unloading Compliance法에 依하여 求한 Δa 와 J 積分과의 關係를 나타낸 R 曲線과 鈍化直線의 그림이며, 이때 J 값은 Modified Merkle-Corten 式⁽¹⁵⁾

$$J = \left(\frac{1+\alpha}{1+\alpha^2}\right) \frac{2A}{Bb} \tag{3}$$

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

를 使用하였다. 여기서 A 는 荷重-荷重線 CGD 曲線에서 曲線 밑부분의 面積이다. Fig. 4에서 크랙傳播開始

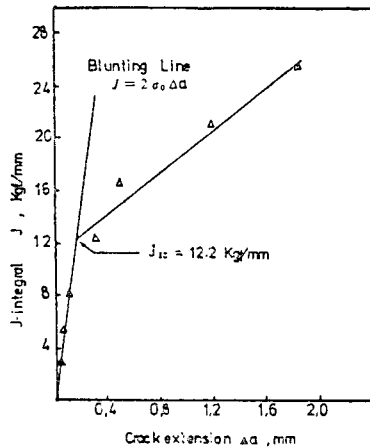


Fig. 4 J-Resistance curve

點인 交點의 J_{Ic} 값은 12.2 Kgf/mm 로 나타났다. 本 實驗에서의 B, b 값은 8.7 mm 以上이 되고 있어 試片 치수에 대한 提案式⁽¹⁶⁾

$$B, b > (25 \sim 50) \frac{J_{Ic}}{\sigma_0} \quad (4)$$

의 條件式을 滿足함으로 Fig. 4 에서 求한 $J_{Ic} = 12.2$ Kgf/mm 는 驗片두께에 依한 影響을 받지 않는 材料 定數로써 有效한 J_{Ic} 값이 될 수 있다.

3.2. 超音波法에 의한 크랙開始點 評價

Fig. 2 의 實驗裝置에 CT 試驗片을 가지고 3 회 反復 實驗한 結果, Fig. 5 와 같은 ΔE -CGD 및 荷重-CGD 曲線을 각각 얻었다.

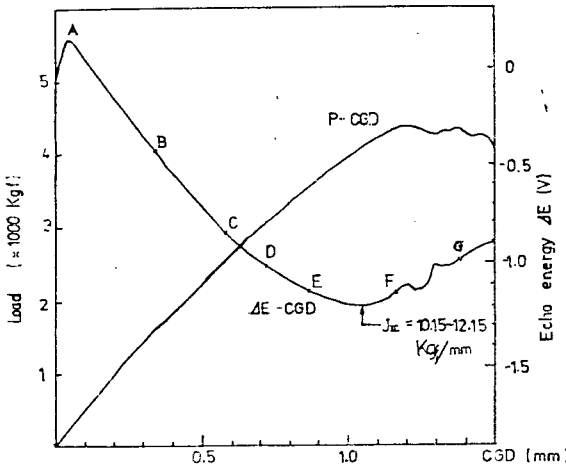


Fig. 5 Load CGD curve showing ultrasonic voltage output and applied load

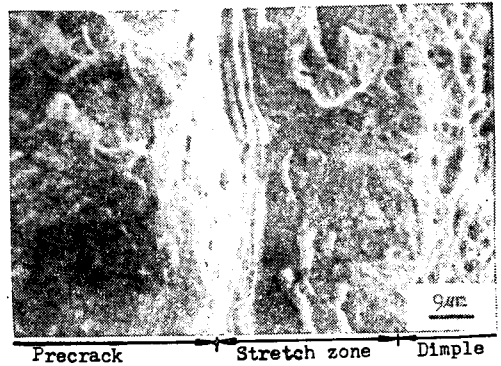
Fig. 5 에서 ΔE -CGD 曲線은 荷重을 加하는 初期에 에코에너지가 일시 急増하고, 漸進的으로 減少한 後, 크랙이 進展되면서 動的變化와 함께 非線形的으로 增加하였다.

S.J. Klima⁽¹¹⁾ 등은 20 MHz 深觸子를 使用한 300 grade maraging 鋼의 韌性試驗報告에서 에코에너지가 1次 急増後, 緩慢하게 增加한 다음에 急激한 增加가 發生하며 이 急激한 增加點이 크랙開始點이라고 主張하였고 平野 等⁽¹⁰⁾은 5MHz 深觸子를 使用한 實驗報告에서 2次 增加가 始作되는 點이 크랙開始點이라고 主張하였다. 또 安中 等⁽¹²⁾은 PFNP(點集中 垂直 深觸子)와 NP(垂直 深觸子)를 使用한 實驗報告에서 深觸子의 種類에 依하여 에코에너지의 높이變化는 相異하나 曲線의 모양은 同形으로 1次 急増後 약간의 減少가 있고 다시 2次 增加가 일어나며 이 領域에서 에코높

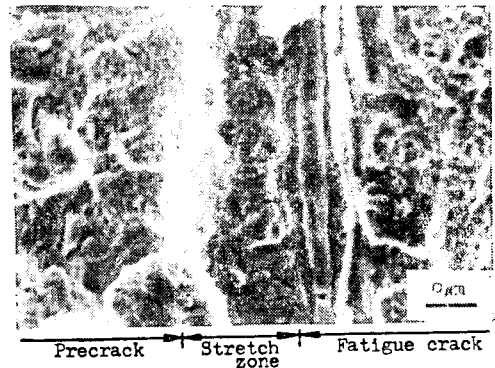
이 變化率($n=dE/da$)이 零인 點이 크랙開始點이 될 것이라고 主張하고 있어 本 實驗結果와 比較할 때 相異한 點이 있으나 에코에너지의 初期增加와 크랙傳播에 依한 動的增加는 實驗의 正確性을 證明하고 있었다.

또 Fig. 5 의 A, B, C, D, E, F, G 點 附近에서 疲勞豫 크랙과 그 先端部의 舉動을 檢討하고자 荷重을 除去한 後 反復荷重을 加해 마크(Mark)한 後 過荷重으로 破斷하여 크랙先端部를 SEM 에 依하여 관찰한 破面寫眞은 Fig. 6 과 같다.

實驗結果에서 에코에너지가 처음에 急増하는 이유는 疲勞豫 크랙이 開口되면서 더 많은 에너지가 反射되기 때문이라고 생각되며, B點 附近에서 豫크랙先端에 stretch-zone의 形成을 發見할 수 있었으며, 또 C點에 D點 附近에서 stretch zone이 形成成長된 것을 觀察할 수 있었다. 따라서 A點부터 D點까지 에코에너지가 減少하는 區間은 크랙先端의 不均一 및 鈍化, 塑性變形의 發生, 材料特性 등과 關聯이 있는 것으로 생각되며 F點 附近에서 stretch zone의 成長과 dimple



(a)



(b)

Fig. 6 SEM fracto graphs

의 發生을 觀察할 수 있어 D點부터 E點까지는 크랙先端에 塑性純化, micro的인 보이드(void) 및 크랙의 發生開始 等に 影響을 받고 있는 것으로 생각된다. FG區間은 完全크랙의 傳播에 依하여 에코에너지가 動的으로 增加하는 領域이다.

따라서 크랙開始點은 EF區間으로 推定된다. 이에 따른 CGD는 0.9~1.17 mm, J_{IC} 값은 10.15~12.15 Kgf/mm의 범위에 있다고 본다. Fig. 6에서 (a) 및 (b)는 C, G點 附近의 走査電子顯微鏡寫眞이다. 本實驗의 結果는 많은 文獻의 實驗結果^(10, 11, 12, 17)와 一部 傾向에 있어 相異 하나 實驗方法의 錯誤가 없고 Unloading-Compliance法에 依한 J_{IC} 값 12.2 Kgf/mm와 一致하고 있었다. 그러나 보다 正確한 糾明은 계속적인 研究가 必要하다고 본다.

4. 結 論

本實驗에서는 593°C에서 Tempering한 SCM 4材에 대한 超音波法, Unloading Compliance法을 利用하여 彈塑性破壞의 크랙傳播開始點을 考察하여 다음과 같은 結果를 얻었다.

- (1) Unloading Compliance法에 依한 J_{IC} 값은 12.2 Kgf/mm이었다.
- (2) 超音波法에 依한 彈塑性破壞靱性試驗舉動의 에코에너지는 初期急増後 相當한 減少를 한 後 增加하여 文獻과 相異한 傾向을 發見하였다. 크랙開始點은 直線的 減少區間에서 벗어나서 減少가 純化되는 領域으로 推定되며, 이 때의 J_{IC} 값은 10.15~12.5 Kgf/mm이었다.

참 고 문 헌

- (1) J.R. Rice, "A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of strain Concentrations by Notches and Cracks", J. of Applied Mechanics, 35, pp. 379~386, 1968
- (2) " J_{IC} , A Measure of Fracture Toughness", ASTM E 813-81 Annual Book of ASTM Standards, Part 10, pp. 810~828, 1982
- (3) G.A. Clarke, et al., "A Procedure for the Determination of Ductile Fracture Toughness Value Using J-Integral Techniques", J. of Testing and Evaluation, Vol. 7, No. 1, pp. 49~56, 1979
- (4) G.A. Clarke, W.R. Andrews, et al., "Single Specimen Tests for J_{IC} Determination", ASTM STP 590, pp. 27~42, 1976
- (5) D.G.H. Latzko, "Post Yield Fracture Mechanics", Applied Science Publishers, pp. 211~253, 1979
- (6) W.H. Bamford and A.J. Bush, "Fracture Behavior of Stainless Steel", ASTM STP 668, pp. 553~577, 1979
- (7) 松下久雄, 三好俊郎, "電位差法による A 533 B 鋼의 破壞じん性値 δ_i, J_i について", 日本機械學會論文集 46(406), pp. 613~620, 1980
- (8) R.S. Williams, "Modeling of Elastoplastic Fracture Behavior Using Acoustic Emission Method", J. Metals, Vol. 31, No. 9, pp. 21~25, 1979
- (9) M.A. Khan, T. Shoji and H. Takahashi, "Application of Acoustic Techniques to the Study of Crack Instability", 5th Acoustic Emission Symposium, pp. 395~410, 1980
- (10) 平野一美, 小林英男, 中澤一, "彈塑性破壞靱性試驗への超音波法の適用", 非破壞検査, 29-3, pp. 198~204, 1980
- (11) S.J. Klima, et al., "Monitoring Crack Extension in Fracture Toughness Tests by Ultrasonics", J. of Testing and Evaluation, Vol. 4, No. 6, pp. 397~404, 1976
- (12) 安中等 "超音波による 破壞靱性試驗片のき裂傳播開始點の檢出", 非破壞検査, 31-7, pp. 455~461, 1982
- (13) J.N. Robinson and A.S. Tetelman, "Measurement of K_{IC} on small Specimens Using Critical Crack Tip Opening Displacement", ASTM STP 559, pp. 139~158, 1974
- (14) J.R. Merkle and H.T. Corten, "A J-Integral Analysis for the Compact Specimen, Considering Axial Forces as well as Bending Effects", J. of Pressure Vessel Technology, 96, pp. 286~292, 1974
- (15) J.D. Landes, et al., "Evaluation of Estimation Procedures Used in J-Integral Testing", ASTM STP 668, pp. 266~287, 1979
- (16) J.D. Landes and J.A. Beyley, "The Effect of Specimen Geometry on J_{IC} ", ASTM STP 514, pp. 24~39, 1972
- (17) JSME S 001~1981, 彈塑性破壞靱性 J 試驗方法, pp. 87~88, 1981