

<論 文>

AE 法에 의한 高强度鋼(SCM-4)의 應力腐蝕균열進展의 檢出에 관한 研究

徐 昌 敏* · 文 龍 植**

(1982年 8月 1日 接受)

A Study on the Detection of Stress Corrosion Cracking of SCM-4 by Acoustic Emission Method

Chang Min Suh and Yong Sik Moon

Abstract

Acoustic emission (AE) of a high strength steel (SCM-4) was measured under stress corrosion cracking(SCC) test at a constant displacement in 3.5% artificial NaCl solution of 18°C, 45°C and 60°C, respectively. The results are as follows;

During the SCC test, AE is detected and AE count rate is approximately proportional to the crack growth rate. Even though crack is not propagated macroscopically, AE is detected. The crack growth rate of SCC and the AE count rate are higher for the solution of higher temperature, 45°C and 60°C, than for the solution of lower temperature, 18°C.

In the early stage of SCC, AE total counts mostly depend on crack growth. In the later stage, however, AE mostly depends on the film fracture and the dissolution of anode.

1. 緒 論

어쿠우스틱 에미션(Acoustic Emission; AE)이란, 물체가 外力을 받으면 音을 방출하는데, 이 현상을 AE라 한다. 즉, 금속 및 陶磁器가 부서지는 소리와 같이 可聽音波의 경우도 있지만, 일반적으로 超音波領域의 경우가 많아서 우리가 들을 수 없다. 이와같이 AE란, 固體가 塑性變形 혹은 破壞될 때에 저장되어 있던 스트레인 에너지가 放出되면서 彈性波가 생기는 現象이며, 이를 工業의으로 利用하는 技術을 AE法이라고

하며 非破壞試驗法(non-destructive test)의 하나이다. 대부분의 NDT는 과거에 형성된 靜인 손상을 국부적으로 조사하는 방법인데 비하여, AE法은 實際의 構造物에 應用하므로써, 構造部材중에 현재 생기고 있는 動的인 손상 및 균열의 位置확인, 廣範圍한 領域에서의 疲勞破壞過程의 常時監視가 可能하다. 또 原子爐와 같은 大型設備 및 重要한 構造物의 安全性과 信賴性을 確保하기 위한 運轉中の 監視, 監督시스템이 되어, 대단히 効果的인 情報의 採取에 利用可能한 것이 이 AE法의 利點으로 들 수 있다⁵⁾.

일반적으로 鋼의 降伏強度가 높게 되면 應력부식균열(stress corrosion cracking)의 感受性이 增加한다. 더욱이 SCC가 생기는 환경으로는 海水, 증류수등 우

* 正會員, 慶北大學校 機械工學科

**韓國에너지研究所

리 신변근처에 존재하는 것들이 문제가 되며, SCC에 의한 파괴는 균열의 발생, 성장過程으로 되어 있고, 이를 破壞力學的으로 취급되고 있다.

최근의 研究傾向으로는, AE에 의한 재료강도의 평가에 관한 연구¹⁾²⁾, 재료중의 동적인 균열과 AE와의 관계³⁾, AE發生源에 관한 物理的 特性과 SCC균열성장에 관한 연구⁴⁾⁵⁾⁶⁾ 및 AE와 破壞力學에 의한 파괴 파괴의 연구⁷⁾가 수행되었고, 파괴역학과 AE計數値와의 定量的인 관계를 연결지우려는 연구도 진행되고 있다.

本 研究에 使用된 材料는 航空機用部分品, 摩擦壓接用의 보울트 등에 널리 使用되고, SCC에 의한 事故가 특히 問題가 되고 있는 高强度鋼材料 SCM-4이다. 이를 WOL (wedge opening load) 試驗片으로 加工한

후 豫備疲勞균열을 넣어서, 3.5% 人工 NaCl 水溶液에 걸친 定變位應力腐蝕균열試驗을 실시하였다. 이때 균열의 成長과 더불어 發生되는 AE波를 檢出測定하여 AE의 檢出特性과 SCC균열의 成長特性을 조사하여 破壞力學的으로 考察하였다.

2. 實驗方法

實驗에 使用된 試料 SCM-4 鋼의 熱處理는 910°C에서 한시간 로울러 담금질한 후, 380°C에서 30분간 템퍼링을 실시하였다. 이 材料의 化學成分 및 靜的 機械的性質을 Table 1에 나타내며, 또 Fig. 1에 試驗片 形狀을 나타낸다. 試驗片의 두께는 25mm이고, 균열의 成長方向은 壓延方向과 直角이다. $K_{I,SCC}$ (stress in-

Table 1 Chemical composition and mechanical properties.

| Chemical composition (wt, %) | | | | | | | | |
|------------------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|------|
| C | Si | Mn | P | S | Cu | Ni | Cr | Mo |
| 0.43 | 0.26 | 0.69 | 0.012 | 0.005 | 0.002 | 0.004 | 1.02 | 0.20 |

| Mechanical properties | | | | |
|---|--|----------------------------------|----------------|-----------------------|
| Yielding strength (kg/mm ²) | Tensile strength (kg/mm ²) | Elasticity (kg/mm ²) | Elongation (%) | Brinell hardness (Hb) |
| 146 | 157 | 21,300 | 14 | 448 |

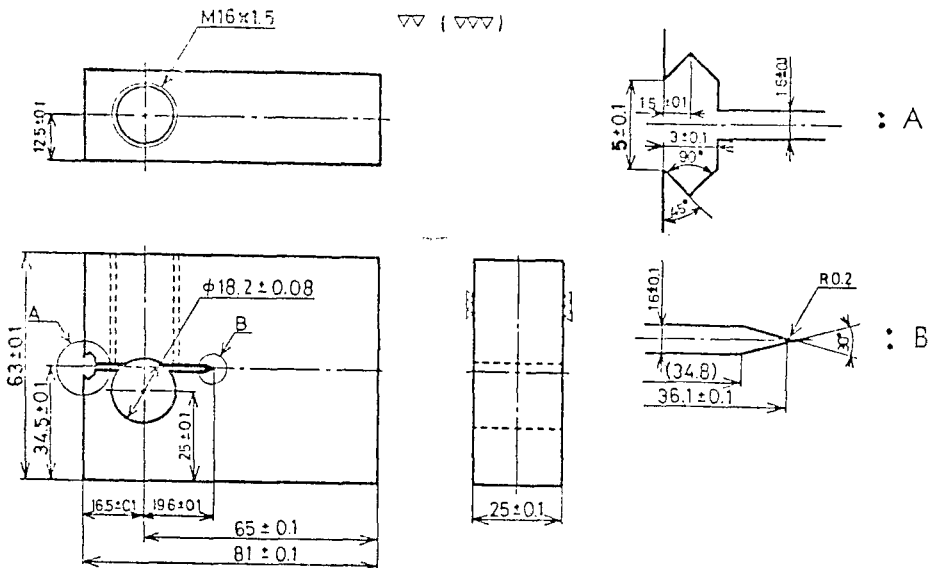


Fig. 1 Configuration of the specimen for stress corrosion cracking test.

tensity factor for SCC under plane-strain) 부근의 균열成長特性的 測定에는 WOL 試驗片에 보울트로 定變位負荷를 가해서 사용했다. 이 경우, 균열의 成長과 더불어 應力擴大係數 K_I 는 漸次的으로 減少한다. 初期負荷는 핀을 넣어서 Fig. 1의 A부분인 나이프 에지(knife edge) 사이에 클립게이지(clip gage)를 삽입하여 스트레인 미터에 연결시키고 보울트를 初期設定 開口變位 V_0 가 되도록 응력을 조심스럽게 조정시켜 定變位應力을 가했다. 이때 V_0 는 式(1), (2), (3)을 利用하여 計算했고⁸⁾, 初期設定 應力擴大係數 K_{I_0} 에 대하여 計算했다.

$$V_0 = \frac{K_{I_0} \sqrt{a}}{E} \left\{ \frac{C_A(a/W)}{C_B(a/W)} \right\} \quad (1)$$

$$C_B(a/W) = 30.96(a/W) - 195.8(a/W)^2 + 730.6(a/W)^3 - 1186.3(a/W)^4 + 754.6(a/W)^5 \quad (2)$$

$$C_A(a/W) = \exp\{4.495 - 16.130(a/W) + 63.838(a/W)^2 - 89.125(a/W)^3 + 46.815(a/W)^4\} \quad (3)$$

균열길이에 대한 荷重은 式(4)에 의해서 計算했다⁸⁾.

$$P_i = \left\{ \left(\frac{a_0}{a_i} \right) \times \frac{a_i + C_1}{a_0 + C_1} \right\} \cdot \frac{EBV_0}{C_A(a_i/W)} \quad (4)$$

단, a : 균열길이(mm)

a_i : i 회의 測定 均열길이(mm)

a_0 : 初期 均열길이(mm)

W : 試驗片 폭(mm)

P_i : a_i 에 對應하는 荷重(kg)

C_1 : 16.5 (mm)

B : 試驗片 두께(mm)

E : 縱彈性係數(kg/mm²)

균열길이 a_i 에 대한 應力擴大係數 K_I 는 式(5)에 의해서 計算했다⁸⁾.

$$K_I = \frac{P_i \sqrt{a_i}}{BW} \{30.96 - 195.8(a_i/W) + 730.6(a_i/W)^2 - 1186.3(a_i/W)^3 + 754.6(a_i/W)^4\} \quad (5)$$

이때 式(5)은 $0.25 \leq \frac{a_i}{W} \leq 0.75$ 에서 오차가 적은 데이터를 얻을 수가 있었다.

豫備疲勞균열은 電氣油壓式疲勞試驗機를 使用하여 片振引張荷重疲勞試驗을 行하여, 슬릿(slot) 밑에서 約 2.5~3.8 mm 크기의 疲勞균열을 넣었다. 이때 피로 시험의 波形은 正弦波, 周波數는 15 Hz, 應力比 $R=0.1$ 로 하였다. 最初 疲勞균열을 넣을때 K 의 最大値는 豫備疲勞균열先端의 塑性域의 影響을 적게 하기 위하여 $K_{max} < 80$ (kg/mm^{3/2})가 되도록, 最大荷重을 式(4)에 의해서 計算해서 調整했다.

SCC 試驗의 腐蝕液은 3.5% 人工 NaCl 水溶液으로 했다. 용액의 온도는 加熱器를 부착한 자동온도 조절

기를 사용하여 所定の 溫度로 調整했다. 보울트에 의하여 定變位로 設定된 試驗片은 腐蝕槽에 넣어서 放置했다. 腐蝕液에 대해서는 특히 人爲的인 脫氣 혹은 通氣를 하지 않고, 液面이 大氣에 接觸하도록 靜止狀態로 유지했다. 균열길이는 移動式顯微鏡을 使用하여 室溫에서는 透明아크릴板을, 45°C와 60°C에서는 시험관을 통해서 試驗片의 한쪽 표면에 대한 균열길이를 精密하게 測定했다. 表面에 있어서 균열이 分岐하는 경우에는 가장 긴 균열의 길이를 a 로 하고, 이 a 에 대하여 單一균열의 應力擴大係數 K_I 를, 이 경우의 應力擴大係數로 했다. 腐蝕槽중의 試驗片의 형태 및 應力腐蝕균열에 걸친 AE 測定블록 선도를 Fig. 2에 나타낸다.

共振周波數 160 KHz 差動型의 AE 센서(sensor)에 의하여, 機械的信號를 電氣的信號로 變換하고, 예비증폭기(pre-amplifier)에서 40 dB, 主增幅器(main-amplifier)에서 50 dB로 增幅한 다음 雜音除去를 위하여 100~500 KHz의 밴드 패스 필터(band pass filter)를 거쳐, 스톱 호울드 레벨(threshold level) V_T 는 입력환산 전압으로 30μV이며, 이 이상의 AE 이벤트(event)를 計數했다. 計數方式은 不感時間(dead time) 방식에 의한 이벤트 카운트(event count) 法을 사용했다. 스톱

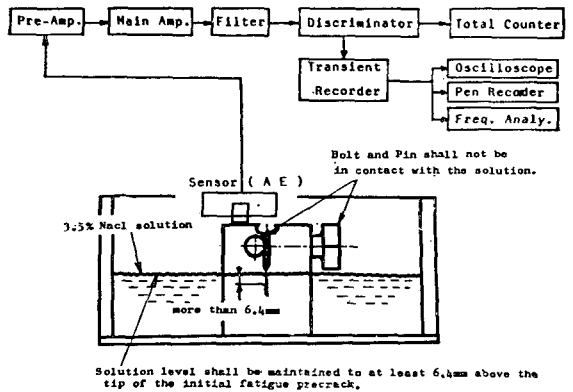


Fig. 2 Block diagram of AE measuring and SCC test.

호울드 레벨 V_T 이상의 信號가 들어오면 이벤트 펄스(event pulse) 1개가 出力되고, 펄스의 時間幅 V_L 은 雜音레벨보다 조금 위에 設定하여 자르도록 하였고, 그뒤 不感時間을 設定하는 방식에 따랐다. V_T 는 人力換算電壓으로 30μV, 不感時間은 1 msec로 했다. 이외의 詳細한 事項은 ASTM E24에 準했다.

그리고 破面觀察은, 試驗片을 腐蝕槽로부터 집어내어서 보울트를 回轉하여, 破斷된 것을 사용했으며, SEM(scanning electron microscope)에 의해서 微視的

인 破斷面觀察를 行했다.

3. 實驗結果 및 考察

3.1. 균열成長特性

試驗片을 開口變位 V_0 로 고정시켜서, 人工 NaCl 溶液에 넣은 後, 時間의 經過와 더불어 成長하는 SCC 균열의 성장특성을 측정하여 그 결과를 Fig. 3에 나타낸다. 균열은 초기에는 급히 成長하지만, 時間의 經過와 더불어 成長速度가 늦어지고 점차 정지하는 傾向을 나타내며, 이와같은 현상은 45°C, 60°C 쪽이 常溫(18°C) 보다 현저하다. 이와같은 균열성장 특성은 北川⁹⁾에 의하여 行해졌던, 실험결과와 비슷한 傾向을 보이고 있다.

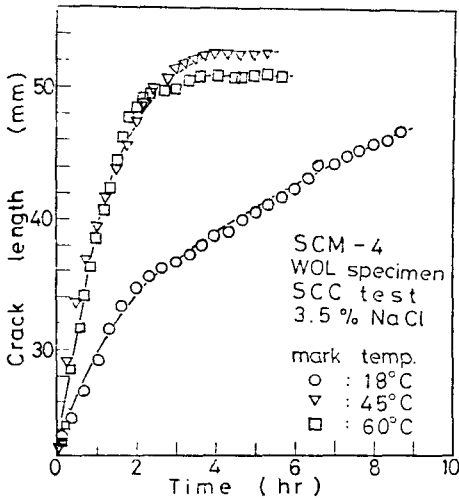


Fig. 3 The growth behavior of SCC at a constant displacement.

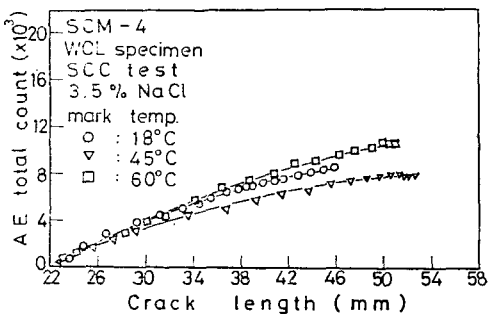


Fig. 4 Relation between AE total count and crack length.

3.2. AE의 發生特性和 振幅分布

Fig. 4는 Fig. 3의 實驗데이터를 측정할 때 AE 센서(sensor)로부터 檢出된 AE 총량(total counts)을 균열길이에 대하여 나타내고 있다. 이에 균열의 길이는 WOL 시험편의 핀 중심으로부터의 길이이다. AE의 총량은 균열의 성장과 더불어 增加하고, SCC 균열의 길이가 35 mm 以前에는 균열길이에 따라 AE 총량이 18, 45, 60°C 용액에 대해 일정한 傾向을 나타내지만, 35 mm 以後에는 그 값이 온도차에 따라 조금 차가 있다.

AE 波의 형을 알아보기 위하여 45°C의 SCC 실험중에 檢出된 AE 波를 오실로그래프에서 촬영한 것을 한 가지 예로서 Fig. 5에 나타낸다. 이는 실험중에 널리 檢출되는 連續形 AE 波形이며, Fig. 6은 동일 조건하의 雜音의 一例를 나타낸다. AE 波와 雜音의 판단은 어렵지만, 스펙트럼 레벨 이상의 AE 이벤트가 檢出되면 본 실험에서는 AE 이벤트가 發生되었다고 自動的으로 計數되된다.

Fig. 3의 균열길이에 대한 식(5)으로 구한 應力擴大係數 K_I 와 균열성장속도(da/dt)와의 관계를 Fig. 7에 나타낸다. 본 실험에서는 $K_{I,SCC}$ 를 구하는 것이 본 연구의 목적이 아니므로 $K_{I,SCC}$ 를 구하는데 추천되고 있는 1000 hr 까지의 데이터는 얻지 않았지만, Fig. 7과 같이 어느정도 균열이 성장하면, 균열成長速度는 서서히 減少하고, K_I 의 어떤값 이하에서 균열의 成長은 停止하는 傾向을 나타내고 있다. 이는 60°C 및 45°C 가 18°C의 常溫보다 현저하다.

Fig. 8은 단위 시간당 AE 양인 카운트율(count rate)과 應力擴大係數 K_I 의 관계를 나타내며, Fig. 8으로

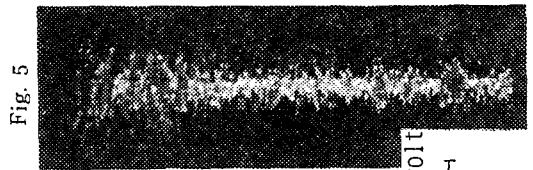


Fig. 5 Typical example of the AE signal wave form observed in the early stage of the SCC test at 45°C.



Fig. 6 Typical example of noise.

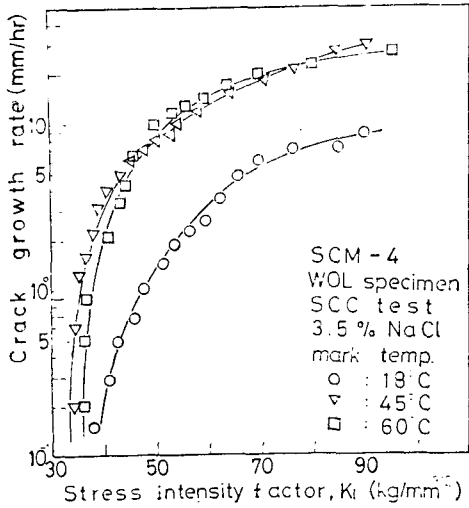


Fig. 7 Relation between crack growth rate and the stress intensity factor.

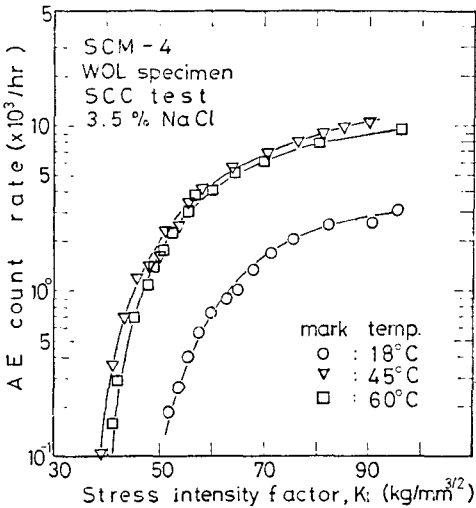
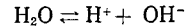
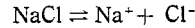


Fig. 8 Relation between AE count rate and the stress intensity factor.

부터 溶液溫度別로 AE와 K_I 사이에는 規則性이 조금 나타나지만, K_I 의 減少에 따른 AE 카운트율의 減少 傾向이 현저하다. 이와같은 SCC에 의한 AE 發生源에 관한考察을 위해서는 水中에 結晶 금속 부식의 本質을 理解하는 것이 必要하므로, 電極反應論을 이용한다⁹⁾. 즉, 陽極部와 음극부는 물을 매개체로 해서 電池가 형성되고 金屬의 溶解, 즉 腐蝕이 進行된다. 그러나 水中에 NaCl을 용해시키면 금속의 境界面에 局部電位の 差가 크게 된다.



즉, 電池의 음극과 양극 사이에 Na^+ , Cl^- 이온이 存在할 때, 보통 中性의 물보다 電流의 흐름이 훨씬 활발하게 되고, 이 때문에 NaCl 水溶液에서는 金屬의 腐蝕速度가 빠르게 된다.

SCC에 의하여 생기는 AE의 要因으로서 岸들¹²⁾이 提案한 것을 보면,

- 가) 水素의 어테크(attack)
- 나) 被膜의 破壞
- 다) 陽極溶解
- 라) 균열先端近傍의 塑性變形
- 마) 균열의 성장
- 바) 반복효과

로 分類하고 있다. 本實驗에서의 環境條件은 自然電位이고, SCC이므로 라) 및 바)의 效果는 거의 無視할 수 있다고 생각된다. 가)의 水素어테크(hydrogen attack)의 경우도 自然電位이기 때문에 다른 AE 레벨보다 상당히 적다고 생각된다. 따라서 本實驗에서 얻어진 AE는 被膜의 破壞 및 陽極溶解에 의한 局部균열과 粒界의 選擇의인 溶解에 의한 균열이 그 原因이라고 생각된다.

Fig. 9는 SCC 試驗중에서 생기는 AE 總量의 振幅分布의 特性을 溶液溫度 18°C, 45°C, 60°C에 대하여 나타낸다. 또한 AE 發生의 時間에 따른 振幅變化를 45°C를 一例로 들면, Fig. 10-a와 같이 初期에는 振幅이

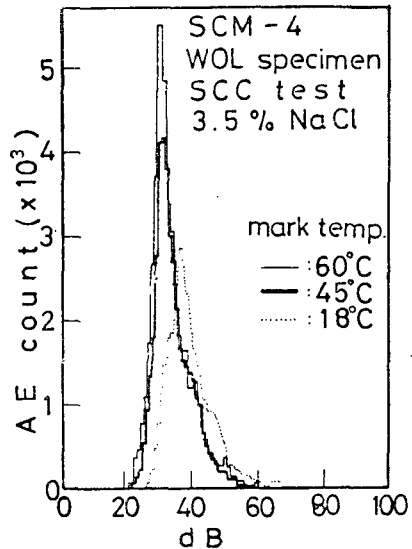


Fig. 9 The characteristics of distribution of AE amplitude.

큰 AE 이벤트가 나오지만 Fig. 10-b와 같이 後期에는 振幅이 작은 이벤트가 많이 나오고 있다. 이와같은 結果를 고려하면, SCC 初期에는 AE가 주로 균열성장애 의하지만, 後期에는 被膜의 破壞 및 양극의 용해가 더욱 많아지는 것을 알 수 있다.

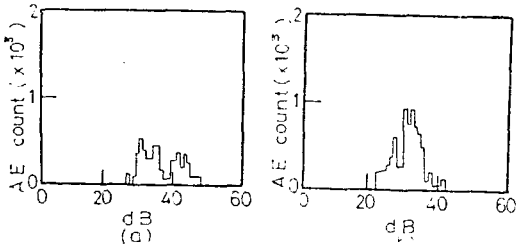


Fig. 10 Examples of amplitude distribution of AE count at 45°C.
(a) in the early stage of SCC test.
(b) in the later stage of the test.

(3) SEM에 의한 破斷面 觀察

本實驗에 사용한 試驗片中에 微視的 破面 觀察의 必要性이 있다고 생각되는 代表的인 試驗片 (60°C)을 一例로서, 巨視的인 破面과 SEM에 의한 破面의 프랙토그로피(fractography)를 대응시킨 사진을 Fig. 11에 나타낸다. Fig. 11(a)는 鋼의 피로파면에서 널리 觀察되는 不明確한 延性縞模樣을 나타내며, Fig. 11(b), (c)는 SCC 破面에서 나타내는 典型的인 粒界(intergranular) 破壞를 잘 나타내고 있다.

4. 結 論

高强度鋼 SCM-4을 사용하여 18°C, 45°C 및 60°C의 세가지 溫度條件下의 3.5% 人工 NaCl 水溶液에서 의 定變位應力腐蝕균열(SCC)과 AE에 대하여 조사한 結果, 다음과 같은 結論을 얻었다.

- 1) SCC 試驗中 AE發生이 確認되었고, AE總量을 조사한 結果, 이는 균열成長과 대체로 비례하며 증가하는 경향을 나타내었다.
- 2) 균열의 성장이 거의 없는 初期, 즉, 潛伏期에도 AE의 발생은 檢出되었다.
- 3) K_I 이 어떤값 이하, 즉, 균열의 성장이 정지했을 때도 AE의 발생은 檢出되었다.
- 4) 溶液雰囲気 45°C, 60°C의 균열성장 속도는 18°C의 것보다 加速했다.
- 5) 初期의 AE는 균열성장애 의하지만, 後期에는 균열성장보다 被膜의 破壞 및 陽極 溶解쪽이 더 크다고 생각한다.

後 記

本 연구를 수행함에 있어 후원하여 주시고, 유익한 조언을 하여 주신 東京大學 生産技術研究所 尾上守夫 教授와 同 研究所의 山田博章氏, 李孝雄氏, 大平壽昭氏, 小島之夫氏에게 심심한 謝意를 表하는 바입니다.

參 考 文 獻

- 1) 岸輝雄, AEによる材料強度の評價(Ⅰ), 材料, 第29卷, 第323號, pp.765~775, 1980
- 2) 岸輝雄, AEによる材料強度の評價(Ⅱ), 材料, 第29號, 第324號, pp.908~915, 1980
- 3) T. Watanabe, et al., A method of evaluating the harmfulness of flaws in structures using AE

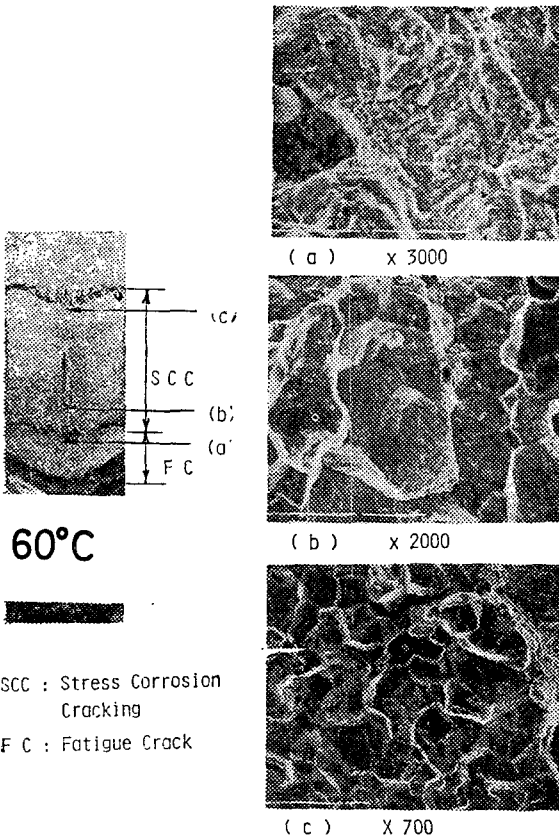


Fig. 11 Fractures modes found on fracture surfaces of SCM-4 SCC specimen. (a) fractograph of fatigue fracture surface of pre-crack; (b), (c) IG (Inter-granular) crack formed.

SCC : Stress Corrosion Cracking
F C : Fatigue Crack

- techniques, Proc. of the 4th AE symposium, Tokyo, pp.5-59~5-69, 1978
- 4) H. Kusanagi, et al., AE monitoring of SCC in type 304 stainless steel pipes under cycle heating and cooling, Proc. of the 5th AE symposium, Tokyo, pp.125~136, 1980
 - 5) 吉田憲一, 三井武良男, AE 法による應力腐蝕割れの檢出, 中國工業技術試驗所報告 No. 9, pp.87~99, 1980
 - 6) H. Kusanagi, et al., AE characteristics during SCC of sensitized type 304 stainless steel pipes, Proc. of the 4th AE symposium, Tokyo, pp.6-19~6-35, 1978
 - 7) H. Kitagawa, et al., Measurement of fatigue crack growth by means of AE (AE of fatigue crack growth in low strength materials), Proc. of the 4th AE symposium, Tokyo, pp.3-1~3-25, 1978
 - 8) A. Saxena and S. J. Hudak, Jr., Review and extension of compliance information for common crack growth specimens, Int. J. of Fracture, Vol. 14, No. 5, pp.453~468, 1978
 - 9) 北川英夫, 小島之夫, 高强度鋼の SCC き裂進展特性における液温依存性の一検討, 日本材料強度學會講演論文集, pp.41~44, 1978