

# 鋼構造鎔接連結部の 内部龜裂成長에 관한 實驗的 研究

## An Experimental Study on the Inner Crack Growth of Welded Connections of Steel Structures

閔	彰	東*
Min,	Chang	Dong
金	琪	斗**
Kim,	Ki	Du
張	東	—***
Chang,	Dong	Il

### Abstract

The characteristic of fatigue crack growth in the homogeneous or the soft welded connections used SWS-53 steel and HT-80 steel as base metals is examined by fractographic analysis. As a result of this analysis, the fact that the characteristic of fatigue crack growth which is observed and measured at the surface has wide application to engineering practice is verified. Also, the fact that the welded parts of HT-80 steel have much danger of brittle fracture is proved. Considering that the striations are observed at the welded parts of SWS-58 steel and the spacing of striations has higher numerical value than  $da/dN$ , we can prove that inner fatigue crack growth may develop in zig-zag directions.

### 要 旨

SWS-58 鋼材와 HT-80 鋼材를 母材로 한 等質 또는 軟質鎔接連結의 疲勞龜裂成長特性을 破面解析을 通하여 檢討하여 表面에서 觀測, 測定하는 疲勞龜裂成長特性의 工學的인 應用性이 높은 것을 탐지하였다. 또한 HT-80 鋼材의 鎔接部는 脆性破壞의 危險性이 높은 것을 밝혔다.

SWS-58 鋼材의 鎔接部에는 줄무늬 모양이 발견되며, 줄무늬 간격은  $da/dN$  보다 높은 값을 表示하는데 이것으로 内部疲勞龜裂이 지그재그 方向으로 成長하는 것을 알 수가 있었다.

### 1. 序 論

最近의 鋼構造物의 추세는 工場製作過程은 鎔接連結, 現場連結은 高張力보울트로 이루어지고

있어서 橋梁 또는 크레인 거더 등 反復荷重을 받는 構造物의 鎔接連結部의 疲勞被害程度는 構造物의 安全性에 큰 影響을 주고 있다.

近間의 疲勞舉動段階는 疲勞龜裂의 發生, 疲勞龜裂의 成長과 最終的인 破斷段階로 나누어지고 있는데, 鎔接連結部에는 鎔接特性上 불가피한 缺陷이 存在하며, 이것은 應力集中源이어서 疲勞龜裂의 發生을 促進하는 原因으로 된다. 한

\* 正會員 · 忠州工業專門大學 教授, 土木工學科

\*\* 正會員 · 漢陽大學校 工科大学 助教, 土木工學科

\*\*\* 正會員 · 漢陽大學校 工科大学 教授, 土木工學科

편, 發生된 疲勞龜裂은 낮은 韌性, 殘留變形 등 여러 종류의 有害要因으로 成長舉動이 복잡성을 갖게 된다<sup>(1)</sup>.

한편, 箱子斷面, 트러스部材 등의 경우에는 疲勞龜裂이 鎔接部와 並行치 않고, 鎔接部를 橫斷하는 成長方向을 갖게 되어 母材(B.M.; Base Metal), 熱影響部(HAZ; Heat Affected Zone)와 鎔着金屬(W.M.; Welded Metals)을 橫斷하게 되는데, 이 경우의 龜裂成長舉動은 龜裂이 並行하는 경우와 같은 傾向을 表示하는 것이 알려졌다<sup>(2)</sup>.

이와 같은 鎔接部 疲勞龜裂成長舉動은 構造物部材의 安全性을 支配하는 것으로, 이것을 밝혀 部材의 疲勞壽命을 推定하기 위한 Paris 와 Erdogan에 의해 제창된 應力強度係數와 龜裂成長率 사이의 指數法則의 適用은 線形破壞力學(Linear Elastic Fracture Mechanics; LEFM)의 立場으로 보아 높은 타당성을 갖게 된다<sup>(3)</sup>.

한편, 鎔接連結部의 疲勞破壞舉動을 파악하기 위하여 위의 手法을 考慮한 應力強度係數  $\Delta K$  를 결정하기 위한 有限要素法에 의한 計算結果를 回歸分析하여  $\Delta K$  와 應力擴大係數의 關係를 數式으로 表示하여 工學的인 應用性을 높인 結果가 최근 이루어졌다<sup>(4-6)</sup>.

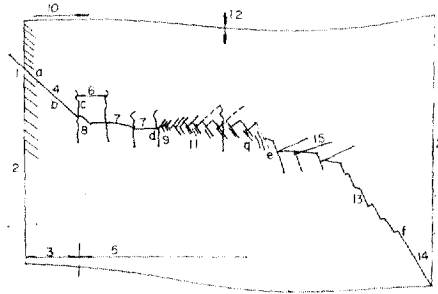
위 사실을 고려한 本稿는 構造用 鋼板 두 材質(SWS 58, HT 80)로 된 세 종류의 鎔接棒(50 kg 급, 60 kg 급, 80 kg 급)으로 入熱量을 大入熱, 小入熱로 하여 製作한 鎔接連結 CT 試驗片에 대해 疲勞龜裂이 鎔接部와 並進 또는 橫斷하는 경우의 낮은 應力比의 脈動應力을 作用시켜 破斷된 破面들을 走査顯微鏡(Scanning Electro Microscope; SEM)으로 觀察하는 破面解析(fractograph)을 實施하여 定性的 또는 定量的인 分析評價하였으며, 또한 試驗片表面에 대해 實施한 鏡보기 龜裂成長舉動과 比較檢討하여 종래에 이루어진 鏡보기 疲勞龜裂을 대상으로 한 여러 研究結果의 타당성을 뒷받침한 것이다.

## 2. 疲勞破面의 特徵

### 2.1 巨視的 特徵

疲勞破面을 巨視的 立場으로 觀察하면 노치,

介在物 또는 空洞 등이 주종을 이루고, 이것으로부터 龜裂이 發生되어 疲勞舉動의 第1段階로 된다. 이것은 殘存슬립(persistent slip bend)으로부터의 슬립면龜裂과 壁開龜裂(cleavage crack)이 뒤섞이어 第2段階로 되어 龜裂成長區域으로 넘어간다. 最終的인 破斷區域은 表面과 45°인 剪斷破斷區域인 第3段階로 된다. 그런데, 疲勞破面의 巨視的인 特徵인 龜裂發生源을 中心으로 하는 beach mark 또는 조개껍질모양의 clam-shell mark 을 이루는데 龜裂發生根源 부위는 fish eye 를 나타내고, 이것으로 방산되는 흔적 ratchet mark 가 發見된다.



From "Strength of Solids, by Hajime Nakazawa and Hideo Kobayashi (2)

### CLASSIFICATION OF FATIGUE CRACK PROPAGATION PROCESS

- |  |   |
|--|---|
| 1. residue slip bands                              | 10. crack propagation direction                                   |
| 2. specimen surface                                | 11. plastic deformation region                                    |
| 3. first stage                                     | 12. maximum tensile stress direction                              |
| 4. slip plane crack in the first stage             | 13. behavior of shear fracture at high degree of strain           |
| 5. secondary of crystal grain                      | 14. latest stage fracture at degrees to the specimen surface      |
| 6. boundary cracks                                 | 15. brittle striations, mostly formed by corrosion of environment |
| 7. cleavage cracks                                 |   |
| 8. slip band cracks and cleavage crack combination |   |
| 9. ductile striation                               |   |

그림 1.

### 2.2 微視的인 特徵

疲勞龜裂의 發生 및 生成過程을 體系的으로 說明한 것이<sup>(7)</sup> 그림 1이다. 第1段階의 疲勞破面은 뚜렷한 特徵은 없으나 龜裂成長方向과 나란한 슬립으로 이루어진 痕跡이 있다. 이 痕跡의 크기는 引張應力, 結晶粒度, 變形樣式에 依存하는 것으로 應力の 크기 또는 분위기 등의 條件에 따라 破面은 river pattern, tongue, 줄무늬(striation), 곰보(dimble) 또는 슬립선 등의 引張力에 의하여 破壞된 破面모양이 發見된다. 條件이  $K_{Ic}$ (破壞韌性值)에 到達하면 第1段階로부터 第2段階로 遷移하는데, 第1段階는 剪

斷에 의하여 일어나는 龜裂發生部に 局限시키는 見解도 있다<sup>(8)</sup>.

第2段階의 特徵은 줄무늬인데 延性 줄무늬와 脆性 줄무늬로 나뉘어진다. 이것의 형성과정은 그림 2와 같은 것이다<sup>(9)</sup>. 즉, 主引張에 의하여 龜裂끝이 鈍化(blunting)되고, 다음의 龜裂開口(closure) 또는 壓縮에 의한 再銳化(resharpening)의 反復으로 龜裂은 成長되며 줄무늬가 형성된다.

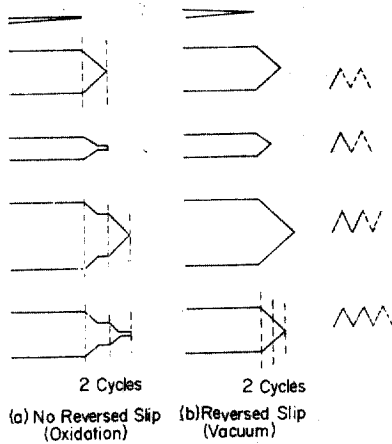


그림 2.

여기서, 두개의 슬립면에서 슬립으로 龜裂끝은 開口(opening) 또는 鈍化가 일어나는데, 큰 壓縮應力에 의하여 完全한 再銳化가 있었다면 잇빨모양 줄무늬가, 불완전하였다면 도랑모양의 延性 줄무늬가 형성된다. 때에 따라서는 큰 塑性슬립에 의해 剪斷帶狀龜裂(shear lip band crack)이 형성되며, 이것은 龜裂進行方向과 垂直方向의 2次龜裂갈림(second cracking)을 형성시킨다. 한편, 壓縮에 의한 두 破面의 接觸으로 타이어자국(tire trace)과 rub mark가 형성된다.

第2段階에서 얻어지는 줄무늬간격(Space of

Striation(S·S))을 龜裂成長率  $da/dN$ 으로 等值하는 (S·S)- $\Delta K$  관계로부터 附加된 荷重이 推定될 수 있는데, 龜裂成長率이 작은 區域에서는 줄무늬의 間격은 험겨운 것이며, 혹시 觀測된 (S·S)도 巨視的인 龜裂成長率보다 작은 값을 表示한다. 모든 工學的인 金屬材料에 대해 (S·S)  $\approx 6 \left(\frac{\Delta K}{E}\right)^2$ 와  $da/dN = 8 \left(\frac{\Delta K}{E}\right)^2$ 의 관계를 表示한 研究도 있다<sup>(10)</sup>. 이것은 材料의 非均質性 또는 龜裂의 停滯(station)가 原因인 것을 研究者는 지적하고 있다.

第2段階에서 遷移하면 줄무늬로부터 品모로 破面의 모양은 바뀌는데, 이것은 微小空洞의 合體化(microvoid coalescence)로 引張에 의한 靜的인 破壞破面과 같은 모양이다.

이 경우 遷移區間은 剪斷破壞區間(shear fracture zone)으로 擴大區間(stretched zone)이라 부르는 區間을 形成하는데, 이 區間의 길이는 10  $\mu m$  전후 값을 가지며, 이 값은 部材의 材料에 대한 相對破壞靱性(relative fracture toughness)와 밀접한 關係를 갖는다<sup>(11,12)</sup>. 그런데, 이 區間은 疲勞破壞 뿐만 아니라 다른 종류의 破壞機構에서도 종종 形成된다<sup>(13)</sup>.

### 3. 實 驗

#### 3.1 試驗片

CT試驗片의 母材는 두께가 38 mm인 SWS58과 HT 80(80 kg 급) 鋼靱이고 그 機械的, 化學的 成分은 表 1과 같다.

鎔接은 30°V 홈 맞대기 鎔接인데 2極 서브머 어지드 아크鎔接(SAW)과 1극 SAW 또한 이나이트 가스 소모 메탈 아크(MIG)鎔接을 表 2와 같이 실시하였다. 한편, 鎔着金屬의 機械的 性質은 表 3과 같다.

表 1. 강재의 기계적 성질 및 화학적 성분

공시강재	기 계 적 성 질			화 학 성 분 (%)									
	항복점	인장강도	신장률	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V
	(MPa)	(MPa)	(%)	×100			×1000		×100				
SWS58Q	580	680	46	13	27	131	14	2	—	—	—	3	4
HT 80	800	860	20	12	24	94	12	4	23	94	52	33	4

表 2. 시험편의 종류

시험편명	모 재	용접방법(일렬)	용접재료
SL 50	SWS 58	2 전극 SAW(대)	500MPa 급강재용
SC 50	SWS 58	2 전극 SAW(대)	500MPa 급강재용
ML 50	SWS 58	1 전극 SAW(소)	500MPa 급강재용
MC 50	SWS 58	1 전극 SAW(소)	500MPa 급강재용
SL 60	SWS 58	2 전극 SAW(대)	600MPa 급강재용
SC 60	SWS 58	2 전극 SAW(대)	600MPa 급강재용
ML 60	SWS 58	1 전극 SAW(소)	600MPa 급강재용
MC 60	SWS 58	1 전극 SAW(소)	600MPa 급강재용
SL 80	HT 80	2 전극 SAW(대)	800MPa 급강재용
SC 80	HT 80	2 전극 SAW(대)	800MPa 급강재용
ML 80	HT 80	MIG 용접(소)	800MPa 급강재용
MC 80	HT 80	MIG 용접(소)	800MPa 급강재용

시험편의 치수는 그림 3과 같으며 용접선이 가공노치 끝에서 노치 방향선과 병행하는 것과 직교하는 두 종류를 제작하였다.

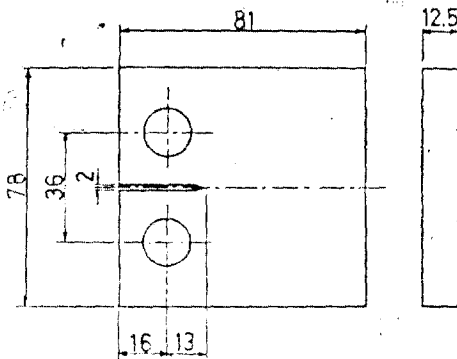


그림 3. 시험편의 형태 및 치수

한편, 시험편에記號를 정하였는데, 첫 英字 S와 M은 S는 大入熱, M은 小入熱 용접이고, 둘째 英字 L.C는 노치 방향과 용접선이 병행하는 것에 L을, 직교하는 것에 C를 부쳤으며, 다음의 숫자는 용접金屬의 強度를 뜻하는 것이다. 예를 들면, ML-60은 小入熱노치와 병행하는 용접선을 가진 60 kg/mm<sup>2</sup> 용접金屬으로 된 시험편이다. 여기서, 강조하고 싶은 것은 50 kg/mm<sup>2</sup> 급, 용접金屬인 SC-50, SL-50, MC-50 및 ML-50 시험편은 연질용접연결(soften welding connection)의 것이다.

### 3.2 試驗方法

完成된 試驗片의 表面을 300번 에멀리페이퍼

로 研磨하고 10% 착산(NaCl)으로 巨視的인 에칭(etching) 腐蝕시켜 母材, 熱影部 및 鍍着金屬部의 區別을 確實히 하여 치수를 測定하여 破面解析 및 龜裂成長의 檢討에 對應하였다.

負荷裝置는 動的 容量이 5톤인 萬能疲勞試驗機이고 應力比가 5% 미만인 높은 動的 引張荷重을 載荷시켜 노치끝에 疲勞龜裂을 發生시킨 뒤 荷重을 每 反復回 2000 회마다 0.2톤씩 減小하여 균열의 長이가 2mm 가 되는 豫備龜裂을 導入하였다. 本 試驗測定은 最低荷重 +0.1톤, 最大荷重 +1.4톤인 部分脈動荷重(partially pulsating load)을 20 Hz의 反復回數로 作用시켜 1스텝(step) 당 0.15~0.4 mm씩 成長하는 表面龜裂을 레프리카(Peplica) 採取하여 100배의 擴大投影機로 測定하였다. 한편, 熱影部 및 鍍着金屬의 微視的인 組織을 파악하기 위한 에칭은 BM, HAZ 및 WM이 포함되는 試驗片의 일부를 10×10×2의 크기로 切斷하여, 1000번 에멀리페이퍼와 비프로 精密研磨 뒤 10ml; 100ml의 比率로 질산과 메틸알콜을 化合한 나이탈(Nital)액과 100ml; 4ml의 比率로 에틸알콜과 피크린산(Pirac acid)을 化合한 피크릴액을 1:1의 比率로 化合시킨 腐蝕液으로<sup>(14)</sup> 부식시켜 走査顯微鏡(S.E.M.)에 固定시키고, 倍率範圍 500~3,000으로 組織을 觀察, 寫眞攝影하였다.

또한, 破面解析用試片은 아래 破面의 破面을 10×10×1의 크기로 1.0 mm 싹톱을 서서히 作動하여 切斷 製作하였다. 試驗片의 座標原點은 노치 바른쪽 끝을 택하였으며, 破面擴大寫眞의 배율은 200~20,000으로 하였다. 이 研究에 使用된 走査顯微鏡은 東京工業大學 土木工學科 所有의 最大倍率 150,000인 히타치사 製作 S405-A형이고 약 1,000개의 破面寫眞에서 確實한 것을 선택하여 定性 및 定量解析을 實施하였다.

### 3.3 應力強度係數와 龜裂成長率의 計算

CT 試驗片에 대한 應力強度係數範圍 ΔK의 算定에 있어서 變數는 龜裂의 長이 a와 荷重 P인데, 荷重을 固定시켜 a만의 變動關係를 擇하였고, 算定式은 ASTM 추천식인<sup>(15)</sup> 아래式을 택하였다.

$$\Delta K = \frac{4P}{B\sqrt{W}} \frac{2+\alpha}{(1+\alpha)^{1.5}} (0.086 + 0.464\alpha - 12.32\alpha^2 + 14.92\alpha^3 - 5.6\alpha^4)$$

여기서  $W$ : 試驗片의 幅,  $B$ : 試驗片의 두께이고,  $\alpha = a/W$ 이다.

疲勞龜裂의 成長率은 各 龜裂길이 差에  $\Delta a$ 에 대한 反復回數의 差  $\Delta N$ 을 計數하였으며, (S·S)는 破面寫眞에서 直接測定하였다.

위 算定過程은 PC-9801 電算機에 入力시켜 算定하고, 結果의 出力은 印刷함과 동시에 ( $\Delta K - da/dN$ ) 또는 ((S·S)- $\Delta K$ ) 曲線도 MIPlot II에 入力시켜 作成하였다.

#### 4. 破面의 定性的 判讀結果

4.1 母材 熱影響部 및 鎔着金屬에서의 疲勞龜裂成長 疲勞龜裂의 成長方向과 鎔接方向이 直角이 試驗片에서 疲勞龜裂은 BM→HAZ→WM→HAZ→BM 순으로 成長된다. 寫眞 1은 SWS-58 母材 및 60 kg/mm<sup>2</sup> 급 大入熱 및 小入熱鎔接試驗片의 HAZ, WM의 微視的인 組織을 표시하고 있다.

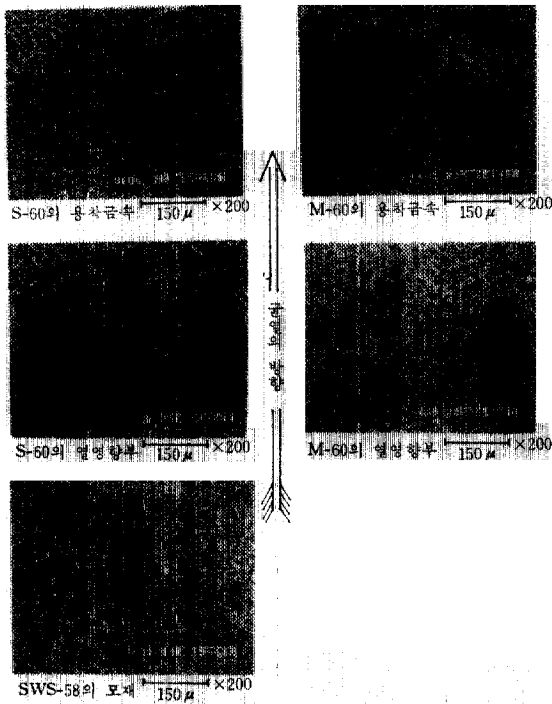


사진 1. 모재, 열영향부 및 용착금속의 미세적 조직

이 寫眞을 觀察하면 小入熱과 大入熱의 鎔接 差異가 가져오는 微視的인 組織은 變動이 없으며, 두 鎔接 모두 WM의 結晶粒의 크기가 HAZ,

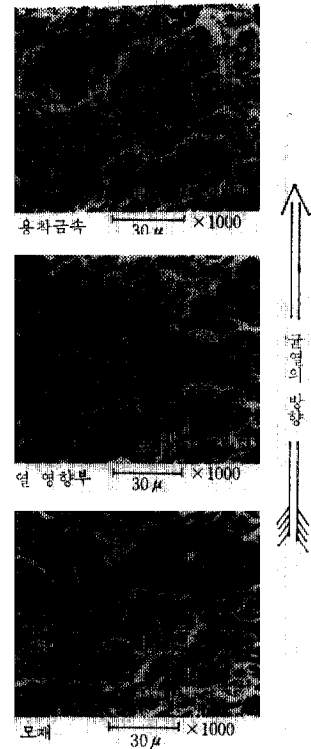


사진 2. MC-60의 균열성장거동의 파면

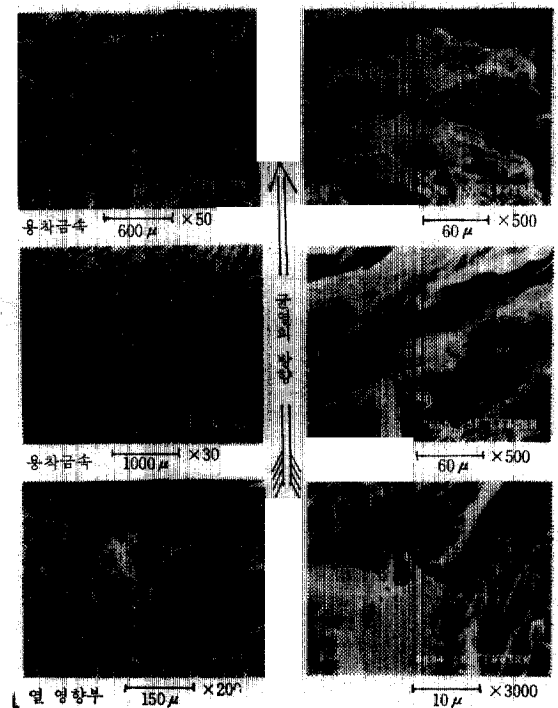


사진 3. SC-80의 균열성장거동 파면

BM의 것보다 몇 배 큰 것을 제시하고 있는데 이것은 WM에서 빠른 疲勞龜裂成長을 뜻한다.

寫眞 2는 MC-60 試驗片의 BM, HAZ 및 WM에 있어서의 疲勞破面이다. BM, HAZ 및 WM 모두 粒內疲勞破壞(transgranular fatigue fracture)에 의한 龜裂의 成長을 하고 있으며, 세 破面의 差異는 거의 없다.

寫眞 3은 SC-80의 HAZ와 WM에 있어서의 疲勞破面이다. BM, HAZ 및 WM 모두 粒界疲勞破壞(intergranular fatigue fracture)의 破面이며, 이 현상은 WM에서 현저하다. 또한, WM의 粒界破壞는 龜裂成長方向과 거의 直角方向으로 놓인 粒界 위에서 주로 일어나고, BM, HAZ의 粒界破壞모양과는 差異가 있다.

이와 같은 規則的인 粒界破壞는 SL-80의 WM에서도 觀察되었는데, 이것은 表面결보기 龜裂만을 대상으로 한 이 研究에 앞서 이루어진 SC-80의  $da/dN-\Delta K$  線圖의 變則性<sup>(16)</sup>을 立證하고 있다.

#### 4.2 軟質이음鎔着金屬에서의 疲勞龜裂成長

表 3에서 보는 바와 같이 SWS-58에 대한 50 kg/mm<sup>2</sup> 鎔接棒을 사용한 鎔着金屬의 引張強度는 60 kg/mm<sup>2</sup>급 接棒을 사용한 것보다 10% 정도 낮은 것을 알 수가 있다. 그런데, 이들 鎔着金屬의 微視的組織을 表示하는 寫眞 4를 관찰하면 이들의 結晶粒子的 尺寸과 組織의 모양은 거의 같은 것을 알 수가 있어서 軟質이음의 타당성을<sup>(17)</sup> 뒷받침하고 있다.

表 3. 용접금속의 기계적 성질

모래	용접재료의 등급	용접입열	항복점 (kg/mm <sup>2</sup> )	인장강도 (kg/mm <sup>2</sup> )	신장률 (%)
SWS58	500 MPa	대 (S)	45.0	58.3	27.1
		소 (M)	51.6	59.1	25.0
	600 MPa	대 (S)	51.3	64.8	26.7
		소 (M)	55.9	64.8	27.9
HT80	800 MPa	대 (S)	73.9	85.2	19.5
		소 (M)	75.3	84.7	20.7

#### 4.3 鎔接入熱量이 疲勞龜裂成長에 미치는 影響

大入熱鎔接과 小入熱鎔接材의 鎔着金屬의 引張強度는 거의 같으나 降伏點은 大入熱에 의한

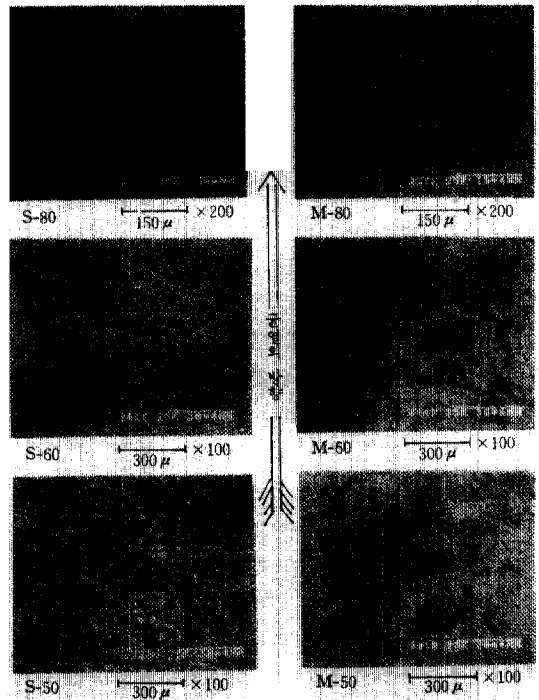


사진 4. 용착금속들의 미세적 조직

것이 높은 것임을 表示하는 것이 表 3인데, 寫眞 4를 고찰하면 S와 M 사이의 結晶粒子的 尺寸차이는 거의 없어서 疲勞龜裂成長舉動은 入熱量

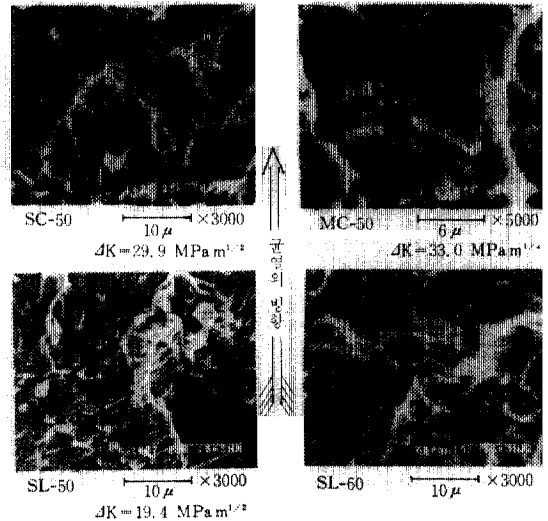


사진 5. 용착금속의 피로파면

의 영향이 거의 없음을 表示하고 있다.

사진 5는 SL-50과 SL-60 또한 SC-50과 MC-50의 破面寫眞이다. 두 破面 모두 줄무늬를 갖는 粒內疲勞破壞學動이 支配的임을 뜻하며, 두 破面의 모양은 差異點은 없다. 이와같은 現狀은 ML-50과 ML-60 사이에서도 볼 수가 있었다.

사진 6은 SL-80과 ML-80의 WM에서의 피로 破面인데, SL-80에서는 ML-80에 비해 粒界疲勞破壞面의 出現率이 높으며, 또한 SC-80에서의 粒界疲勞破壞面의 出現率도 MC-80의 것보다 높았다.

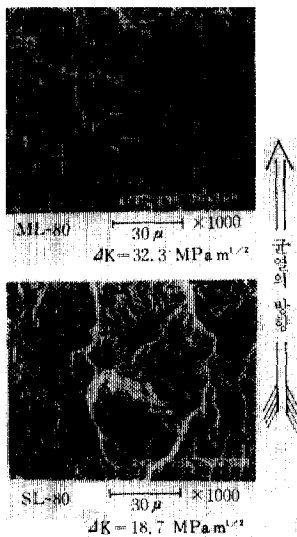


사진 6. 고강도 용접연결 용착금속의 피로파면

#### 4.4 龜裂進行方向이 疲勞龜裂成長에 미치는 影響

사진 4에서 보는 바와 같이 鎔着金屬의 結晶 粒子가 어떤 方向에 대해 평편하든가 規則性을 갖었는가 하는 微觀的 組織上的 方向性을 찾아 볼 수가 있었다. 사진 7은 SL-60과 SC-60의 疲勞破面인데, 줄무늬 모양을 갖는 粒內疲勞破壞로 龜裂은 成長되었고 두 破面 사이에 모양의 差異는 거의 없다.

이와 같은 現狀은 SWS-58을 母材로 하는 다른 試驗片에서도 鎔接方向과 龜裂成長方向의 差異가 가져오는 破面모양의 차이는 없었다. ML-80과 MC-80의 疲勞破面에서는 粒內破壞와 粒界破壞가 뒤섞인 모양이고, 粒界破面의 出現率은

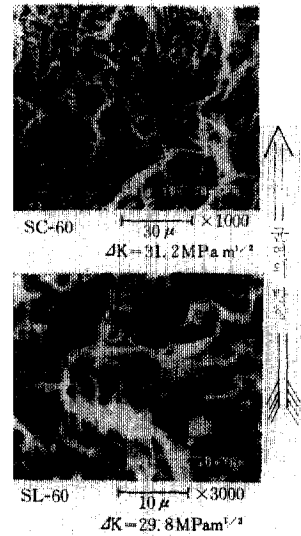


사진 7. 등질용접연결 용착금속의 피로파면

거의 같았다. 사진 3과 사진 6에서 보는 바 粒界破壞에 의한 龜裂成長이 支配的이고 그 出現率의 뚜렷한 差異點은 없었으나 鎔着金屬의 粒界破面의 모양은 전혀 다른 것을 알 수가 있다.

#### 5. 破面解析에 의한 疲勞龜裂成長

破面解析으로 얻어지는 定量的인 값은 줄무늬 間隔과 擴大區域의 길이인데, 本研究에서 主對象은 줄무늬 間隔과 疲勞龜裂成長率의 1對1 對應(one to one corresponding)이다. 破斷面의 走査顯微鏡 觀察로 確認되는 줄무늬는 倍率 3,000의 擴大사진이면 肉眼觀察가 가능하였는데 (S·S)의 測定을 용이하게 하기 위해 倍率 10,000 또는 20,000의 擴大寫眞을 촬영하였다.

12종류의 試驗片中 줄무늬가 確實히 發見되는 것은 ML-50, SL-50, MC-50 및 SC-50인 軟質이음의 WM 부이고 等質이음試驗片 중에서 힘겨운 발견작업으로 줄무늬가 얻어진 것은 SL-60과 MC-80의 WM部 뿐이었다. SL-60의 줄무늬는 粒內延性的 것이고, MC-80은 粒界脆性的 것이었다.

이 試驗片에서 測定된 줄무늬 간격의 最大值 (S·S)<sub>max</sub>와 最小值 (S·S)<sub>min</sub>의 값은 표 4와 같다.

表 4. 줄무늬 간격( $\mu\text{m}$ )

試 驗 片	(S·S) <sub>min</sub>	(S·S) <sub>max</sub>
ML-50	0.25	1.3
SL-50	0.11	0.87
MC-50	0.18	0.59
SC-50	0.16	0.49
SL-60	0.24	0.78
MC-80	0.26	1.56

한편, 軟質이음과 等質이음의 破面차이 중 특기할 것은 軟質이음보다 等質이음에서 많은 폭 넓은 2次龜裂의 發見인데, 이것은 等質이음 또는 硬質이음에서는 에너지의 解放이 2次龜裂成長의 形式으로 이루어지는 率이 많은 것을 뜻한다. 龜裂의 成長方向은 龜裂面의 리아가멘트(ligament) 方向과 平行되어 있는 경향이 있었다. 이 平行 경향은 줄무늬는 언덕(plateau)선과 直交하는 관계로 슬립선을 따르게 되는 언덕의 방향 平行로 믿어진다.

發見된 줄무늬에 의한 (S·S)- $\Delta K$  回歸直線은 그림 4~그림 9이다.

軟質이음에 대한 줄무늬를 갖는 破面을 表示하고 (S.S.)와  $\Delta K$ 의 대수관계를 표시하는 것이

그림 4~그림 7이다. 네 破面사진의 共通性은 복잡한 골을 가진 단조로운 언덕능선 위에 줄무늬가 놓여 있는 것이고 단층(facet)은 거의 불

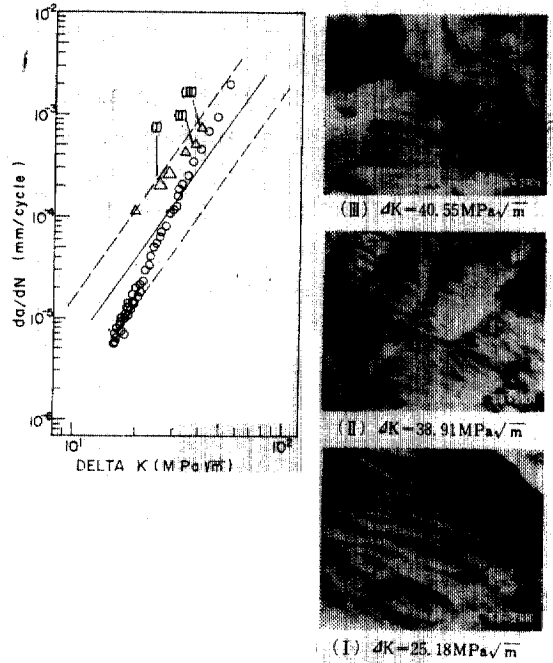


그림 5. SL-50의 S·S- $\Delta K$  관계와 파면사진

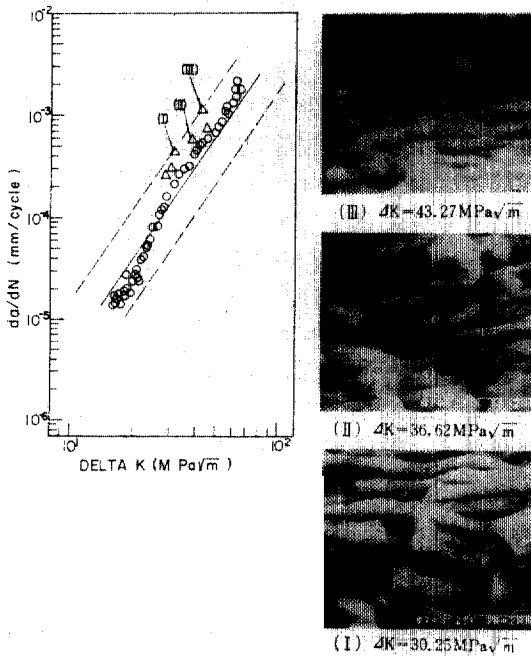


그림 4. ML-50의 S·S- $\Delta K$  관계와 파면사진

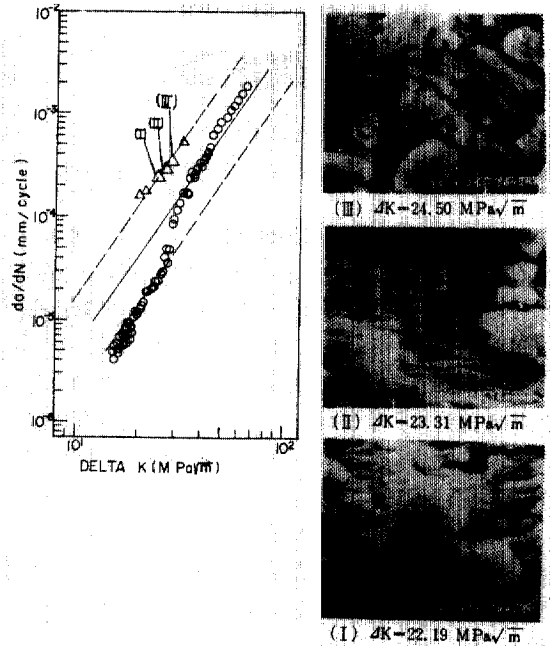


그림 6. MC-50의 S·S- $\Delta K$  관계와 파면사진



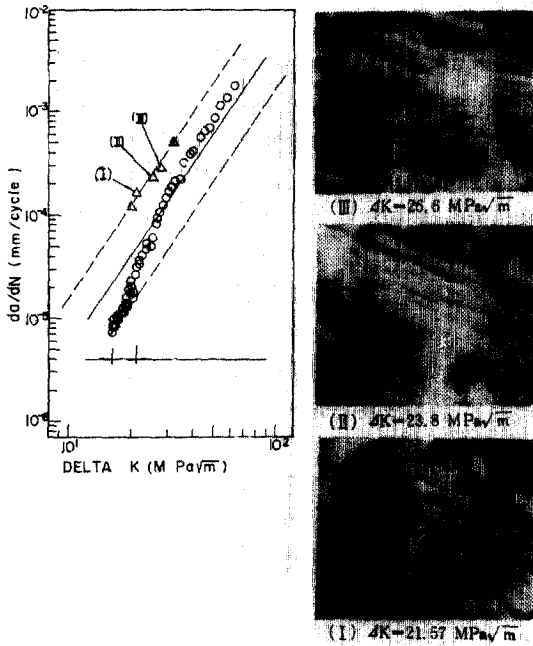


그림 7. SC-50의 S.S.- $\Delta K$  관계와 파면사진

수가 없는 것이다. 또한 줄무늬와 나란하게 갈라진 2차龜裂은 HAZ, WM과 BM의 順으로 많고 폭이 넓은 경향이 있었다.

入熱熱에 따르는 龜裂成長舉動을 고찰하면

**\*軟質鎔接連結\***

1) 龜裂의 成長方向과 리아가멘트方向과의 편기는 大入熱連結의 것이 小入熱連結의 것보다 다소 큰 경향이 있었다.

2) (S.S)- $\Delta K$  回歸直線은 表面결보기龜裂에 의한  $da/dN-\Delta K$  回歸直線<sup>(18)</sup> 위에 놓이는데, 이것은 内部龜裂을 各 粒子境界에서 다소 저지되어 지그재그의 成長性인 것으로 推定된다.

3) (S.S)- $\Delta K$  回歸直線의 구배는 小入熱이 음의 것이 大入熱의 것보다 급한 것은 결보기 表面龜裂을 취급한 것에서는 없었던 경향이다.

4) 鎔接線의 方向이 龜裂成長에 주는 영향이 거의 없는 것은 결보기龜裂을 취급한 것과 같은 경향이다.

5) 4個의 (S.S)- $\Delta K$  回歸直線이 놓이는 位置는 日本에서 이루어진  $da/dN-\Delta K$ 의 測定結果를 종합하여 그어진<sup>(18)</sup> 上限線 부근에 놓여지

는데 결보기 表面龜裂의  $da/dN-\Delta K$  回歸直線이 中間에 위치하는 것과는 대조를 이루고 있으나 결보기 表面龜裂成長을 대상으로 하는 研究結果의 타당성을 입증하고 있다.

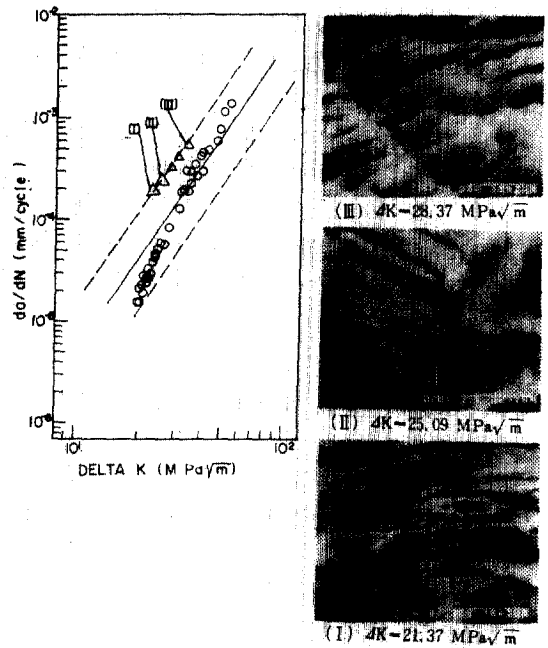


그림 8. SL-60의 S.S.- $\Delta K$  관계와 파면사진

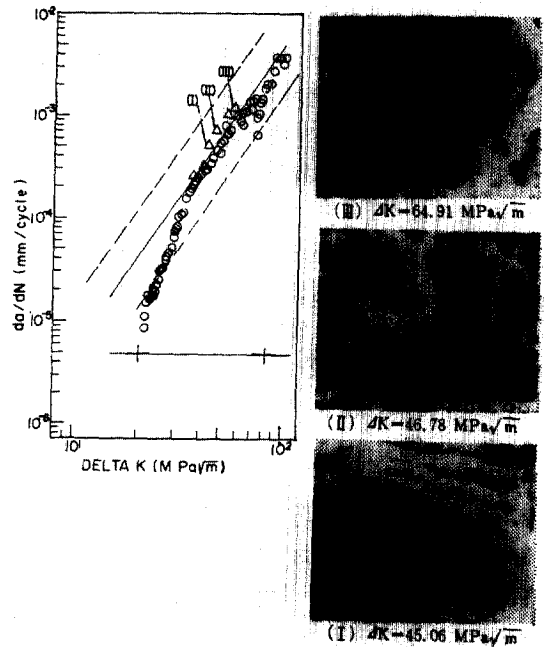


그림 9. MC-80의 S.S.- $\Delta K$  관계와 파면사진

## \*等質鎔接이음\*

SL-60과 MC-80 시험편에 대한 WM의 内部에서 成長하는 疲勞龜裂의 舉動을 表示하는 줄무늬가 관측된 破面寫眞과 (S·S)- $\Delta K$ 의 回歸直線을 그림 7과 그림 8로 綜合하였다.

그 破面解析의 共通性은 軟質鎔接이음의 경우보다 龜裂의 成長方向이 많이 편기되어 있는 傾向과 2次龜裂의 方向이 非規則性을 갖었고, 橫縱方向의 것이 교차가 심한 傾向이다.

한편, MC-80의 破面은 粒界脆性疲勞破壞인 을 明示하여 高強度鋼材의 使用에 앞서 신중한 연구 검토가 이 不完全 破壞舉動을 막을 수 있을 음을 제시하고 있다.

두 等質鎔接이음의 破面解析에서 얻어지는 특기할 傾向은

1) 두 試驗편에 대한 (S·S)- $\Delta K$  回歸直線의 경사는 결보기表面龜裂에 대한  $da/dN-\Delta K$  回歸直線의 것과 거의 같은 傾向이다.

2) 軟質鎔接이음의 경우와 같이 (S·S)- $\Delta K$  回歸直線은 결보기表面龜裂의 것 위에 놓이며 SL-60의 것만은 문헌<sup>(17)</sup>에서 얻어진 上限線 위에 나란하게 놓여 있는  $10^{-4}\sim 10^{-3}$ mm의 값으로 결보기龜裂의  $da/dN$ 의 값보다 한 차수가 높은 것을 表示하고 있다. 定量的이고 破面解析에서 必須條件으로 이루어져야 할 줄무늬의 검출은 알루미늄합금에 대한 것보다 대단히 힘겨운 것이며 (S·S) 또한 不規則的인 것임에 유의할 필요가 있다.

한편, 그려진 (S·S)- $\Delta K$  回歸直線을 綜合하면 알루미늄합금을 대상으로 연구한 문헌 (7)과 같은 手法인 (S·S)와 영계수  $E$ 의 함수 꼴로  $da/dN$ 의 表示는 可能한 것으로 판단된다.

## 6. 結 論

우리 나라의 橋梁設計示方書에 규정된 最大強度의 鋼材인 SWS-58과 80 kg 級 高強度鋼材인 HT-80의 等質 또는 軟質鎔接連結 CT 試驗편의 疲勞破面을 S.E.M을 利用하여 실시한 破面解析 結果를 종합하여 아래와 같은 結果를 얻었다.

1) 表面을 對象으로 하여 얻어지는 鎔接連結部의 疲勞龜裂成長特性은 工學的인 應用性이 높은 것을 알았다.

2) SWS-58 鋼의 等質 또는 軟質鎔着金屬의 疲勞破面에는 줄무늬와 줄무늬 모양이 많이 發見되며, 龜裂은 粒內破壞에 의하여 成長하는 경우가 많고, 이 破面의 모양은 鎔接材料, 入熱量, 鎔接方向과 龜裂의 成長方向에 의한 差異는 거의 없다. 한편 HT-80 鋼의 大入熱鎔接部材의 열영향부에서의 疲勞龜裂成長特性은 다른 部材의 열영향부에서의 成長特性보다 가혹하고 破面은 거의 粒界疲勞破壞面이며 鎔着金屬에서의 粒界破壞는 龜裂成長方向과 거의 直角으로 놓인 粒界위에서 發見된다.

3) 等質 및 軟質鎔着金屬의 入熱量에 의한 組織的인 變化로 오는 粒子의 치수의 差異는 거의 없어서, 龜裂의 成長特性의 差異는 거의 없다.

4) HT-80 鋼을 母材로 한 等質鎔着金屬에서 의 粒界破面의 出現率은 大入熱에 의한 것이 小入熱의 것보다 높아서 脆性破壞의 위험성이 큰 것을 알 수가 있었다.

5) 鎔着金屬의 内部에서의 疲勞龜裂은 部材의 表面에서 觀測되는 결보기疲勞龜裂보다 成長率이 높다. 즉, 内部에서 龜裂은 지그재그 方向性 成長을 함을 알 수가 있었다.

## 謝 辭

이 研究는 東京工業大學 土木工學科 土木構造 第二講座 吉田 教授와 三木 助教授의 배려로 이루어졌다. 이것을 完成하도록 도와 주신 東工大의 콘크리트 講座의 여러분께 甚深한 謝意를 표하는 바이다.

## 參 考 文 獻

- 1) Kapadia B.M., "Influence of residual stress on fatigue crack propagation in electroslog welds", *ASTM STP 648*, 1978.
- 2) 橋內良雄, "突合世溶接材および母材の疲勞き裂傳播舉動" 日本機械學會論文集 (A), Vol. 47~419, July, 1981.
- 3) P.C. Paris, "Stress analysis of crack", *ASTM STP 381*, 1964.
- 4) J.W. Fisher, and N. Zettlemoyer, "Stress

- gradient correction factor for stress intensity at welded stiffness and cover plates," *Welding Research Supplement*, pp. 393-S~398-S, December, 1977.
- 5) N. Zettlemoyer, and J.W. Fisher, "Stress gradient correction factor for stress intensity at welded gusset plates," *Welding Research Supplement*, pp. 57-S~62-S, February, 1978.
  - 6) N. Zettlemoyer, and J.W. Fisher, "Stress gradient and crack shapes effects on stress intensity at welded detail", *Welding Research Supplement*, pp. 246-S~250-S, August, 1978.
  - 7) P.J.E. Forsyth, *Acta Metallurgica*, pp.703, July, 1963.
  - 8) Daniel Eylon, and W.R. Kerr, "Fractographic and metallographic morphology of fatigue initiation sites," *ASTM STP 645*, 1978.
  - 9) R.M.N. Pelloux, "Mechanisms of formation of ductile fatigue striation," *Transaction of ASM Vol. 62*, 1968.
  - 10) L. Albertin and S.J. Hudak, "Effect of compressive loading on fatigue crack growth rate and striation spacing in T851 aluminum alloy", *ASTM STP No. 733*, 1981.
  - 11) R.C. Bates, and W.G. Dark, "Fractography and fatigue mechanics", *Trans. of ASM Vol. 62*, 1969.
  - 12) W.A. Spitzig, "A fractographic feature of plane-strain fractures in D45C-Cr-Mo Steels", *Trans. of ASM, Vol. 61*, 1968.
  - 13) C.D. Beachom, "An electron fractographic study of plastic strain condition upon ductile rupture process in Metals," *Trans. of ASM Vol. 56*, 1961.
  - 14) Günter Petzon, "*Metallographisches atzen*", AGNE Co., pp.68, 1981.
  - 15) "Tentative test method for constant-load-amplitude fatigue crack growth rates above  $10^{-8}$  m/cycle," *ASTM E 647-78 T*.
  - 16) 三木千壽, 張東一, "溶接金屬部の 疲勞龜裂進展速度", 日本土木學會論文集 No. 344-I-1, 1984.4.
  - 17) R.W. Hertzberg, *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*, John Wiley & Son Co., pp.241, 1976.
  - 18) 鄭榮和, 張東一, "銲接이음한 小引張試驗片에서의 疲勞龜裂進展舉動", 土木學會論文集 Vol. 4-2, 1984.2.
  - 19) Okumura, T., and Nishimura, T., "Fatigue crack growth rates in structural steel," *Proc. of JSCE No. 322*, 1981.

(接受 : 1985. 5. 6)