

# 鎔接이음한 構造鋼의 小引張試驗片에서의 疲勞龜裂進展舉動

(鎔接方向, 入熱量, 鎔接材料의 強度 등이 다를 때)

## The Propagation Behaviour of the Fatigue Crack in the Compact Tension Specimens of the Welded Structural Steels

(On according to the difference of the welding direction, the input heat level, the strength of weld material and so on)

張	東	一*
Chang,	Dong	Il
鄭	榮	和**
Chung,	Yeong	Wha

### Abstract

With the weld-joined compact tension specimens compared with each other, that is, transverse and lengthwise about the crack propagation direction, high and low in the input heat level, same as and lower than the base metal in the strength of weld material, the fatigue test were performed.

With these data, the log-log curves between the fatigue crack propagation rate  $\frac{da}{dN}$  and the transition range of the stress intensity factor  $\Delta K$  ahead the crack tip were drawn.

These curves were compared and estimated among each compared specimens, among each zones, that is, the base metal, the heat-affected metal and the weld-mixed metal, and between this study and the past studies.

Basically, Little difference in the slope of the  $da/dN-\Delta K$  relation was showed in all the welded directions, all the input heat levels and all the zones.

But, First, to comparison with in the past studies about the base metals, it was showed that  $da/dN$  started in the much later rate, increased faster and stoped in the little faster rate.

Second, it was showed that, near the time the crack's going from the heat-affected zone to the weld-mixed metal  $da/dN$  decreased a little for a while.

Third, in the lengthwise weld compared with the transverse weld, in the high input heat weld compared with the low input heat weld in the case used the weld material of the same strength as the base metal, in the opposite case in the case used the one of the lower strength than the base metal, in the case used the weld material of the same strength as compared with the lower

\*正會員 · 漢陽大學校 工科學 教授 土木工學科

\*\*正會員 · 江原大學校 工科學 助教授 土木工學科

strength than the base metal beside the high input heat and the lengthwise weld, it was showed that the crack occurred earlier in lower  $\Delta K$  and later  $da/dN$ , the curves went with the same slope.

Forth, in the lengthwise weld compared with the transverse weld in the low input heat weld, in the low input heat weld compared with the high input heat weld, it was showed that  $da/dN$  went with the lower level.

## 要 旨

橫方向과 縱方向, 大入熱鎔接과 小入熱鎔接, 母材와 같은 強度의 鎔接材料 使用과 母材보다 낮은 強度의 鎔接材料 使用 등으로 서로 비교되는 鎔接이음의 小引張試驗片을 만들어서 疲勞試驗을 행하여 疲勞龜裂 進展速度  $\frac{da}{dN}$  와 龜裂先端 부근의 應力擴大係數의 變動範圍  $\Delta K$  와의 關係曲線을 그려서 比較試驗間의 母材, 熱影響部 및 鎔着金屬部로 구분, 혹은 지금까지의 研究資料 등과 비교 검토하였다.

이 결과, 다음과 같은 현상들을 알 수 있었다.

基本的으로, 鎔接方向, 鎔接入熱量, 鎔接材料의 強度, 혹은 母材, 熱影響部 및 鎔着金屬部의 구분 등에 따라  $\frac{da}{dN} - \Delta K$  관계에 큰 차이가 없었다. 다만,

첫째, 素材에 대한 경우에 비해 대개 처음은 같은  $\Delta K$ 에서  $\frac{da}{dN}$ 가 상당히 늦다가 점차 증가하여 중간쯤에서 같아진 후 끝 부분에서 같은  $\Delta K$ 에서  $\frac{da}{dN}$ 가 다소 빨라짐을 알 수 있었다.

둘째, 熱影響部에서 鎔接金屬部로 進展하면서  $\frac{da}{dN}$ 가 다소 늦어지는 것을 알 수 있었다.

셋째, 鎔接方向과 龜裂方向이 평행인 경우가 직각인 경우에 비해, 母材와 같은 鎔接材料를 쓴 경우 小入熱鎔接인 경우가 大入熱鎔接인 경우에 비해, 母材보다 낮은 鎔接材料를 쓴 경우 大入熱鎔接인 경우가 小入熱鎔接인 경우에 비해, 大入熱의 평행鎔接의 경우를 제외한 모든 鎔接에서 母材와 같은 強度의 鎔接材料를 쓴 경우가 母材보다 낮은 強度의 鎔接材料를 쓴 경우에 비해  $\Delta K$ 가 낮은 時期에 일찍 低速으로 龜裂이 시작되어  $\Delta K$ 의 큰 증가없이  $\frac{da}{dN}$ 가 빠르게 증가한 다음 다른 경우와 같은 性狀으로 진전됨을 알 수 있었다.

넷째, 小入熱鎔接의 경우 평행鎔接이 직각鎔接에 비해, 小入熱鎔接이 大入熱鎔接에 비해 같은  $\Delta K$ 에서  $\frac{da}{dN}$ 가 다소 늦은 것을 알 수 있었다.

## 1. 序 論

構造部材의 鎔接部에는 鎔接方法이나 檢査能力의 制約 등에 의해 blowhole이나 鎔込不良 등의 缺陷이 남기 쉽다. 그러한 部材가 脈動 또는 交番應則을 받으면 缺陷을 起點으로 疲勞龜裂이 발생하고, 部材의 變狀이나 破壞의 原因이 된다. 따라서 鎔接部의 疲勞龜裂 性狀을 명확히 파악

할 필요가 있다.

奥村 등<sup>(1)</sup>은 일본에서 행해진 素材 및 橫方向 鎔接이음부의 疲勞龜裂 進展에 관한 각종 실험의 결과를 수집 정리하여 鎔着金屬部 혹은 熱影響部에서의 疲勞龜裂進展速度  $\frac{da}{dN}$  와 應力擴大係數의 變動範圍  $\Delta K$  사이의 관계가 素材의  $\frac{da}{dN} - \Delta K$  關係와 거의 차이가 없음을 지적하였다. 太田 등<sup>(2)</sup>은 SWS 50 을 母材로 하여 鎔接, CO<sub>2</sub>

鎔接 및 入熱量이 다른 3種의 Submerged arc 鎔接 등의 鎔接方法을 써서 鎔接한 橫方向 鎔接이 음부의 疲勞龜裂 進展速度를 測定하고, 鎔接方法이나 鎔接部 內의 位置(鎔着金屬部, 熱影響部)에 따라 疲勞龜裂 進展速度에 큰 差가 없음을 지적하였다. 이 외에도 橋內<sup>(3,4)</sup>, 石原 등<sup>(6)</sup>, Glinka<sup>(6)</sup>, Sandifer 등<sup>(7)</sup>, Kapadia<sup>(6)</sup>, Seeley 등<sup>(6)</sup>, Visikovsky<sup>(10)</sup> 등이 鎔接部の 疲勞龜裂 進展에 관한 연구를 행하여 疲勞龜裂 進展에 가장 현저한 영향을 주는 因子는 鎔接殘留應力이며, 다른 因子들의 影響은 별로 크지 않음을 지적하였다.

종래의 연구는 龜裂이 鎔接方向과 平行으로 進展하는 橫方向 鎔接이음부에 대한 것이 대부분이었으나 箱子型 truss 部材의 角鎔接部와 같이 龜裂이 鎔接方向과 직각으로 進展하는 경우에 대한 연구와 이 때의 鎔着金屬部, 熱影響部 및 母材에서의 疲勞龜裂 進展性狀의 差異與否, 또는 平行 및 直각 두 경우의 比較 등에 대해서도 명확히 할 필요가 있을 것이다.

또, 두꺼운 板의 鎔接能率을 높이기 위한 목적으로 大入熱로 鎔接하는 경우 鎔接部の 靱性이 低下될 것이 예상되나 鎔接入熱量의 差에 따라 疲勞龜裂 進展性狀에 어떠한 差가 생기게 될 것인지 연구하는 일도 중요한 일일 것이다.

뿐만 아니라, 鎔接部の 鎔接性을 改善하는 방법의 하나로 箱子型 truss 部材의 角鎔接部 등에는 母材보다 強度가 낮은 鎔接材料를 쓰는 소위 軟質이음方法이 이용되고 있는 바, 이 때 疲勞

龜裂 性狀에 어떠한 差가 생기게 될 것인지 연구하는 일도 중요한 일일 것이다.

본 연구에서는 종래의 연구에서 나타나지 않거나 연구가 부족한 以上의 여러 가지 疲勞龜裂 進展性狀을 밝힐 목적으로 橫方向鎔接 및 縱方向鎔接, 大入熱鎔接 및 小入熱鎔接, 母材와 같은 強度의 鎔接材料를 쓴 鎔接 및 母材보다 낮은 強度의 鎔接材料를 쓴 鎔接 등에 대한 小型引張(compact tension) 試驗片을 만들어 疲勞試驗을 行하여 연구하였다.

## 2. 試驗片, 試驗機 및 試驗方法

### 2.1. 試驗片

#### 2.1.1 母材

板두께 38 mm의 SWS 58(600 MPa 級) 調質型 鋼材로 그 機械的 性質 및 化學成分은 표 2.1과 같다.

#### 2.1.2 鎔接材料

母材와 같은 強度의 600 MPa 級 鎔接材料와 母材보다 낮은 強度의 500 MPa 級 鎔接材料 2種을 사용하였다. 그 機械的 性質은 표 2.2와 같다.

引張強度는 鎔接入熱量에 따라 거의 같으나 降伏點은 小入熱일 때가 높다.

#### 2.1.3 鎔接方法 및 鎔接條件

별립角 30°의 U型 鎔込용鎔接으로 하여 2電

표 2.1 母材의 機械的 性質 및 化學成分(日本 鋼管株式會社 提供)

鋼材	機械的 性質			化學成分 (%)							비고
	降伏點 (MPa)	引張強度 (MPa)	伸率 (%)	C	Si	Mn	P	S	Mo	V	
SWS 58	580	680	46	0.13	0.27	1.31	0.014	0.002	0.003	0.004	JIS Z 3111 A2號 試驗片使用

표 2.2 鎔接材料의 機械的 性質(NKK, 津研 提供)

等級	鎔接入熱量의大小	降伏點 (kg/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (kg/mm <sup>2</sup> )	伸率 (%)	비고
500 MPa (SWS 50)	大	45.0	58.3	27.1	JIS Z3111 A 2 시험편 사용
	小	51.6	59.1	25.0	
600 MPa (SWS 58)	大	51.3	64.8	26.7	
	小	55.9	64.8	27.9	

표 2.3 용접조건(NKK, 津研 提供)

용접 방법	용접 재료			용접 조건					용접 잔류 응력 力除去 위한 後熱處理
	Wire		flux	마무리	電流(A)	電壓(V)	용접 속도 (cm/min)	入熱量 (KJ/cm)	
	500MPa 級	600MPa 級							
2電極單層 SAW	US36 φ4.8mm	US49 φ4.8mm	MF38 20×D	前 極	800	35	30	107.8	
				後 極	700	37			
1電極多層 SAW	US36 φ4.0mm	US49 φ4.0mm	MF38 20×200	1 層	450	30	38	21.3	
				殘 層	450	30	40	20.3	

極(tandem)單層 Submerged arc 용접(SAW) 및 1電極(single)多層 SAW으로 하였다. 2電極 SAW에서는 홈깊이 20 mm, 先端半徑 8 mm로 1電極 SAW에서는 홈깊이 15 mm, 先端半徑 5 mm로 하였다.

용접入熱량이 커지면 용접부의 柱狀組織이 粗大化하고 靱性이 低下한 우려가 있어 道路橋示方書에는 SWS 58에 대해 70 kg/cm를 上限으로 制限하고 있으나 본 연구에서는 용접入熱량이 용접부의 疲勞龜裂 進展性狀에 어떠한 影響을 미치는가를 확인하기 위하여 그 上限値보다 많은 大入熱도 取하였다.

2.1.4 試驗片의 形狀 및 치수

그림 2.1과 같이 龜裂方向이 용접方向과 平行 및 직각이 되도록 구분하고, 母板두께 38 mm로부터 용접 뒷면에도 용접部가 나타나도록 12.5 mm의 두께로 절단해 내었다.

試驗片의 形狀 및 치수는 그림 2.2와 같다.

2.1.5 試驗片의 번호부여

大入熱일 때 S, 小入熱일 때 M, 龜裂方向과 용접方向이 平行(荷重方向에 대해 橫方向)일 때 L, 直각(荷重方向과 縱方向)일 때 C, 용접材料가 600 MPa 級일 때 60, 500 MPa 級일 때 50 등으로 하여, 예를 들어서 大入熱, 平行, 600MPa 級일 때 "SL 60"과 같이 번호를 부여하였다.

2.2. 試驗機

日本 東京工業大學 土木工學科 構造實驗室에 설치되어 있는 5 ton 電氣油壓式 疲勞試驗機, dynamic strain amplifier, X-Y recorder, optical comparator(擴大投影機)를 사용하였다. 연구자 중 張 東一이 IBRD 차관자금에 의해, 鄭 榮和가

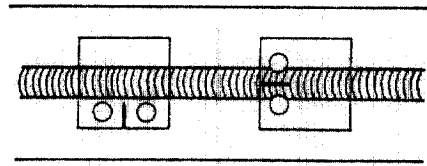


그림 2.1. 母板으로부터의 切斷

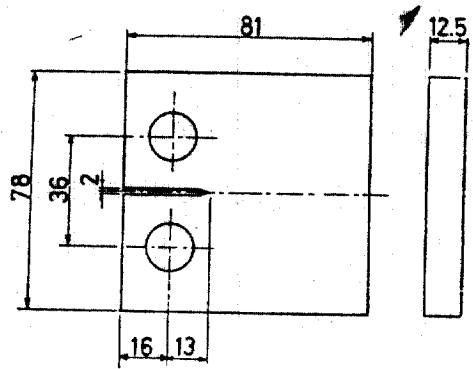


그림 2.2. 試驗片의 形狀 및 치수

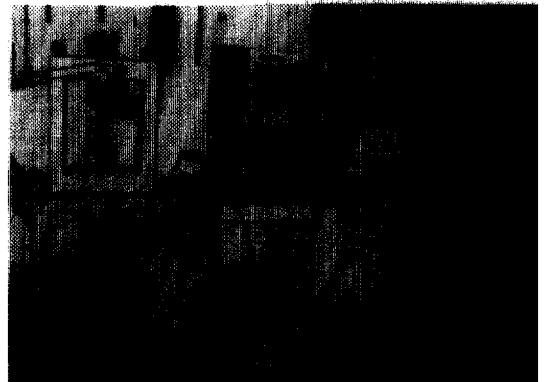


사진 2.1. 5 ton 疲勞試驗機(dynamic strain amplifier, X-Y recorder)

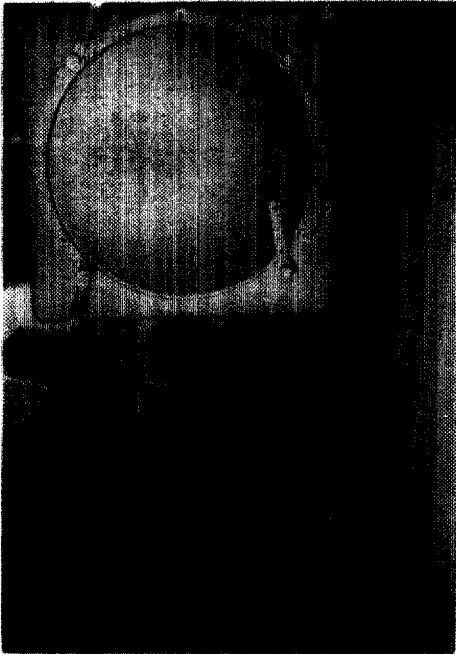


사진 2.2. 擴大投影機 (optical comparator)

文教部 해외파견 연구비에 의해 客員研究員으로 있던 1983. 1.9~1983. 3.4 까지 실험을 행하였다.

### 2.3. 試驗方法

#### 2.3.1 荷重

SL 50 試驗片부터 試驗을 시작하면서 最大 1.0 ton, 最小 0.1 ton 의 引張脈動荷重으로 하였으나 龜裂의 進展이 너무 늦어 46萬回 反復부터 最大荷重을 1.2 ton 으로 증가시켜 試驗하였다.

다만, 이 荷重으로도 龜裂의 進展이 너무늦은 ML 60 및 MC 60 에 대해서는 最大荷重을 조금씩 증가시켜서 ML 60 에 대해서는 25萬回에서 26萬回까지 1.3 ton, MC 60 에 대해서는 8萬回에서 76萬回까지 1.3 ton, 76萬回에서 82萬回까지 2 ton, 82萬回에서 118萬回까지 1.4 ton, 118萬回 以後 1.5 ton 으로 試驗하였다.

#### 2.3.2 豫備 疲勞龜裂

龜裂의 先端을 예리하게 하여 疲勞龜裂 進展에 관한 여러 式의 적용을 妥當하게 하기 위하여 龜裂先端에 豫備 疲勞龜裂을 삽입하였다.

그 方法은 0.1 ton~2 ton 의 引張脈動荷重으로

0.4 mm 정도, 0.1 ton~1.75 ton 으로 0.4 mm 정도, 0.1 ton~1.55 ton 으로 0.3 mm 정도, 0.1 ton~1.35 ton 으로 0.3 mm 정도, 0.1 ton~1.2 ton 으로 0.1 mm 정도, 合計 1.5 mm 정도의 豫備 龜裂을 삽입하는 것으로 하였다. 龜裂이 쉽게 발생하도록 하기 위해 처음은 最大荷重을 크게 하였으나 점차 最大荷重을 줄여 本 試驗의 荷重과 같은 條件으로 하였다.

#### 2.3.3 試驗片 研磨

母材에서 切斷해 낸 부분에서 肉眼으로는 母材, 熱影響部 및 鎔着金屬部가 구분되지 않으므로 이를 구분하기 위해서 또 切斷표면의 殘留應力을 最小로 줄이기 위해서 표면을 1,000 번까지의 에메리(emery, 一名 sand paper)로 研磨하고, 나이탈(nital)과 피크랄(picral)의 1:1 혼합액으로 엔칭(entching)하였다. 이 엔칭에 의해 페라이트(pearlite)는 검게, 페라이트(ferrite)는 희게 보이게 된다.

#### 2.3.4 龜裂進展의 測定

試驗中 龜裂이 約 0.04~0.1 mm 進展 간격마다 載荷를 일시 중단하고 最大荷重의 80~95% 의 靜的荷重을 주어 龜裂을 벌린 후 레푸리카(replica, acetyl-cellulose film 을 paraffine 塗包)에 壓印한 다음 이것을 倍率 50 倍의 擴大投影機(optical comparator)에 비추면서 mm 눈금자로 測定하여 每 測定點 사이의 龜裂 進展길이  $da$  를 구하였다.

또, 疲勞試驗機의 記錄計를 읽어 每 測定點 사이의 荷重載荷回數의 變化  $dN$  을 읽었다.



사진 2.3. 試驗장면



사진 2.4. 試驗片부분



사진 2.5. X-Y recorder 조작

### 3. 結果 整理

#### 3.1. 應力擴大係數의 變動範圍 $\Delta K$ 의 計算

小型引張(compact tension)試驗片의 疲勞試驗時 이미 널리 이용되고 있는 다음과 같은 식<sup>(1)</sup>을 써서 每 測定點에서 龜裂先端부근의 應力擴大係數의 變動範圍  $\Delta K$ 를 별도로 계산하였다.

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \cdot \frac{2+\alpha}{(1+\alpha)^{3/2}} (0.886 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4)$$

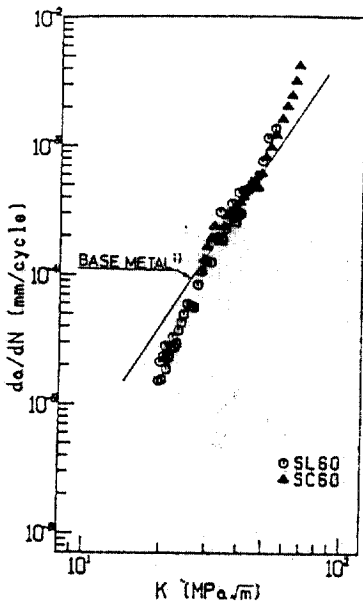
여기서,  $\left\{ \begin{array}{l} \Delta P : \text{荷重變動範圍} \\ B : \text{試驗片의 두께} \\ W : \text{試驗片의 幅} \\ \alpha : \frac{a}{W} \\ a : \text{龜裂 길이} \end{array} \right.$

#### 3.2. 疲勞龜裂 進展速度( $da/dN$ )

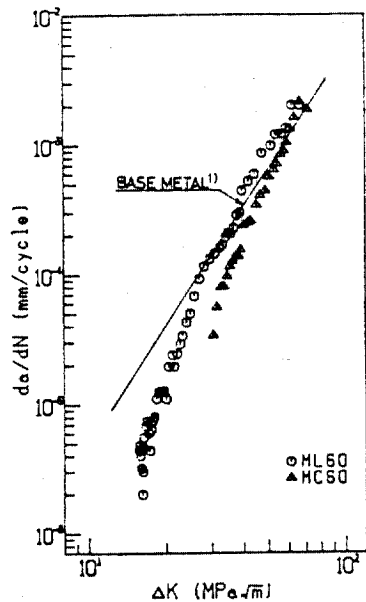
應力擴大係數의 變動範圍( $\Delta K$ )와의 關係曲線測定에서 얻어진 每 測定點 사이의  $\frac{da}{dN}$ 와 計算에서 얻어진  $\Delta K$ 의 每 測定點 사이의 差값  $\Delta K$ 를 가지고  $\log\left(\frac{da}{dN}\right) - \log(\Delta K)$ 의 曲線을 그린다.

### 4. 考 察

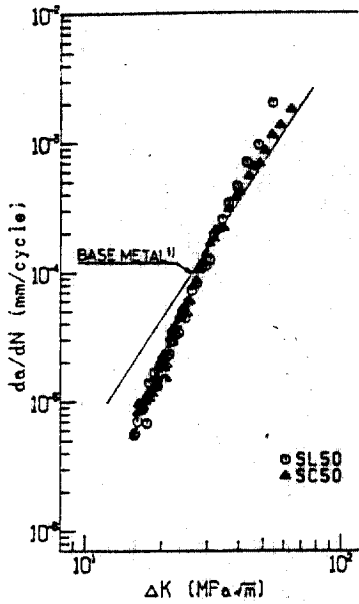
#### 4.1. 鎔接方向에 따른 比較



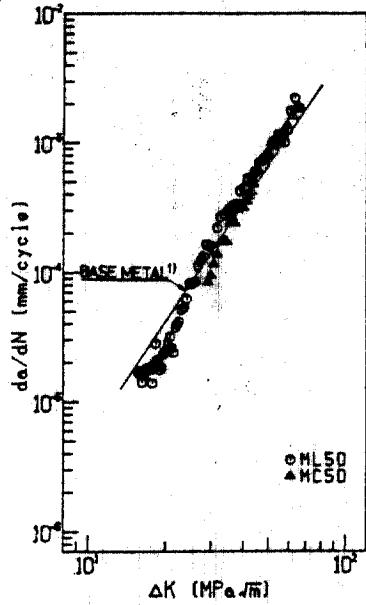
(a) SL60과 SC60



(b) ML60과 MC60



(c) SL 50 과 SC 50



(d) ML 50 과 MC 50

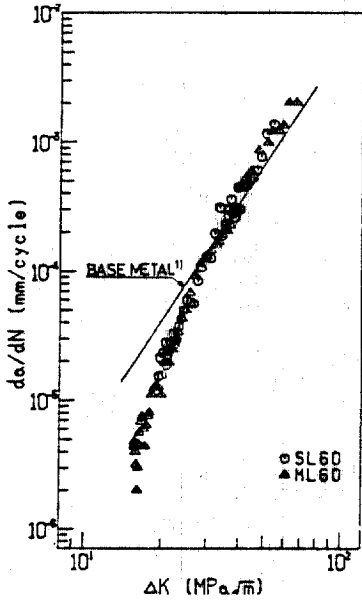
그림 4.1. 용접 방향에 따른  $\frac{da}{dN} - \Delta K$  관계의 비교

용접 방향과龜裂進展方向이 평행(荷重에 대해 橫方向 용접, SL 60, ML 60, SL 50, ML 50)인 경우  $\Delta K$ 가 낮은 時期에 일적 低速으로龜裂이 시작되어  $\Delta K$ 의 큰 증가없이  $\frac{da}{dN}$ 가 빠르게 증가한 다음 용접 방향과龜裂進展方向이 직각인(荷重에 대해 縱方向 용접) 경우와 거의 같은 性

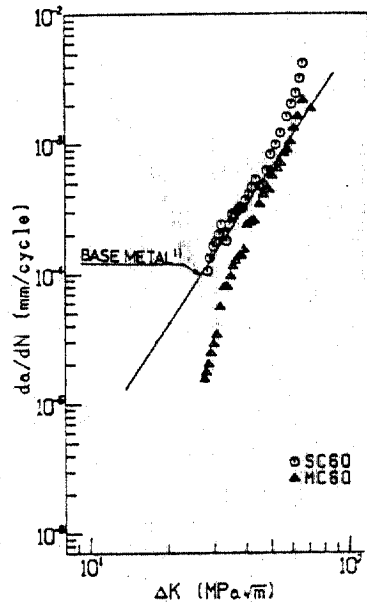
狀으로 進展되고 있다.

또, 小入熱 용접(ML 60, MC 60, ML 50, MC 50)의 경우 평행의 경우(ML 60, ML 50)가 직각인 경우에 비해 같은  $\Delta K$ 에서  $\frac{da}{dN}$ 가 다소 늦은 것을 나타내고 있다.

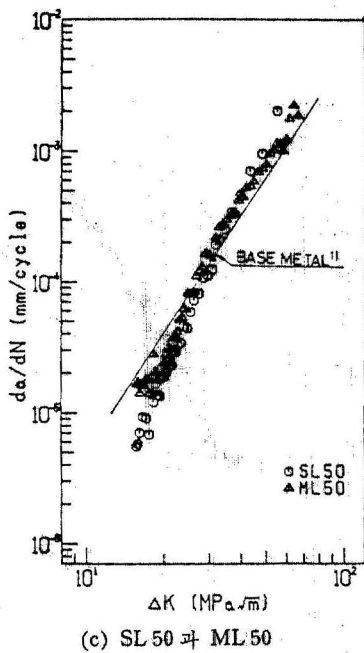
#### 4.2. 용접入熱量에 따른 비교



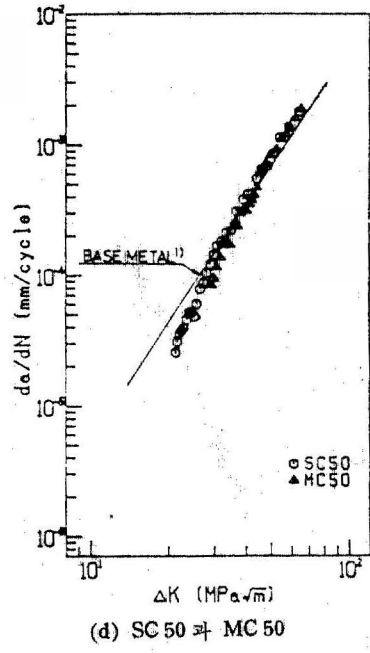
(a) SL 60 과 ML 60



(b) SC 60 과 MC 60



(c) SL 50 과 ML 50



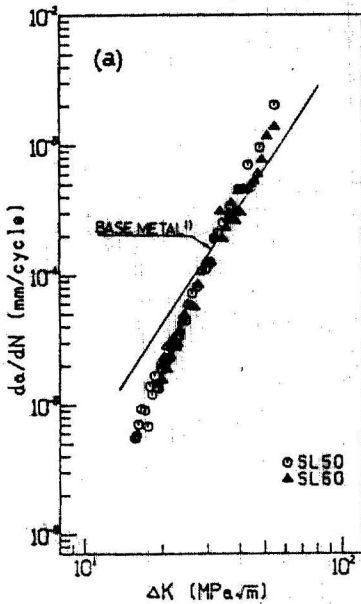
(d) SC 50 과 MC 50

그림 4.2. 용접入熱量에 따른  $\frac{da}{dN}$  -  $\Delta K$  관계의 비교

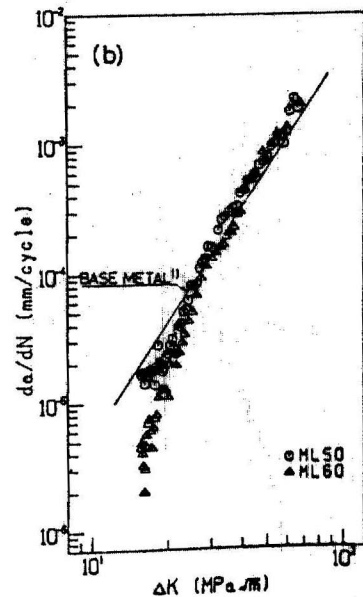
母材와 같은 強度의 鎔接材料를 쓴(SL 60, ML 60, SC 60, MC 60) 경우에는 小入熱鎔接의 경우(ML 60, MC 60)가 母材보다 낮은 強度의 鎔接材料를 쓴 軟質이음의 경우에는 大入熱鎔接의 경우(SL 50, SC 50)가  $\Delta K$ 가 낮은 時期에 일찍 低速으로 龜裂이 시작되어  $\Delta K$ 의 큰 증가없이

$\frac{da}{dN}$ 가 빠르게 증가한 다음 다른 경우와 거의 같은 性狀으로 進展되고 있다.

또, 小入熱鎔接(ML 60, MC 60, ML 50, MC 50)쪽이 大入熱鎔接쪽보다 같은  $\Delta K$ 에서  $\frac{da}{dN}$ 가 다소 낮은 것을 나타내고 있다.



(a) SL 50 과 SC 60



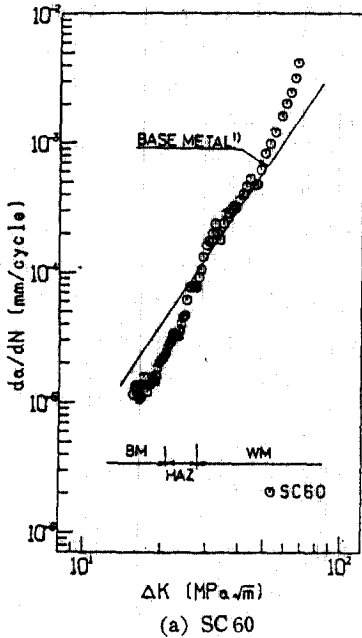
(b) SL 50 과 ML 60

그림 4.3. 용접材料의 強度에 따른  $\frac{da}{dN}$  -  $\Delta K$  관계의 비교



### 4.3. 鎔接材料의 強度에 따른 비교

大入熱평형(橫方向)鎔接(SL 50, SL 60)의 경우 외에는 母材와 같은 強度의 鎔接材料를 쓴 경우(ML 60, SL 60, MC 60)가  $\Delta K$ 가 낮은 時期에 일찍 低速으로 龜裂이 시작되어  $\Delta K$ 의 큰



증가없이  $\frac{da}{dN}$ 가 빠르게 증가한 다음 다른 경우와 거의 같은 性狀으로 進展되고 있다.

### 4.4. 母材(BM), 熱影響部(HAZ), 鎔着金屬部(W-M)에 따른 비교

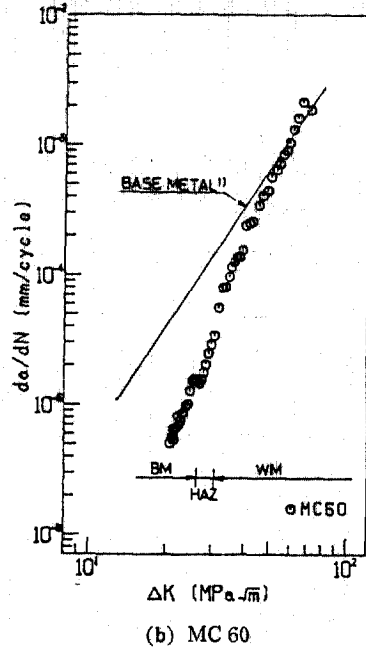


그림 4.4. 母材, 熱影響部, 鎔着金屬部에 따른  $\frac{da}{dN} - \Delta K$  관계의 비교

熱影響部(HAZ)에서 鎔着金屬部(WM)으로 進展하면서  $\frac{da}{dN}$ 가 다소 늦어지는 외에는 다른 경우와 거의 같은 性狀으로 進展되고 있다.

### 4.5. 素材에 대한 경우와 비교

그림 4.1, 4.2, 4.3, 4.4에서 實線은 奥村등<sup>(1)</sup>에 의해 얻어진 SS 58, HT 80 素材에서의 平均的인  $\frac{da}{dN} - \Delta K$  관계(基準  $\frac{da}{dN} - \Delta K$  관계라 부르며, 日本 本州-四國 連絡橋 最初 設計時 등에 적용<sup>(2)</sup>)를 나타낸 것이다.

이 基準  $\frac{da}{dN} - \Delta K$  관계와 비교하여 鎔接方向이 달라지든, 入熱量이 달라지든, 鎔接材料가 달라지든 대개 素材에 대한 경우에 비해 처음은 같은  $\Delta K$ 에서  $\frac{da}{dN}$ 가 상당히 늦다가 중간쯤에서 점차 같아진 후 끝부분에서는 같은  $\Delta K$ 에서  $\frac{da}{dN}$ 가 다소 빨라지는 것을 알 수 있다.

## 5. 結 論

鎔接方向에 따라, 鎔接入熱量에 따라, 鎔接材料의 強度에 따라, 혹은 母材, 熱影響部 및 鎔着金屬部에 따라 서론에서 언급한 다른 연구들에서와 같이  $\frac{da}{dN} - \Delta K$  관계에 큰 차이가 없음을 알 수 있었다.

다만, 素材에 대한 경우에 비해 대개 처음은 같은  $\Delta K$ 에서  $\frac{da}{dN}$ 가 상당히 늦다가 점차 증가하여 중간쯤에서 같아진 후 끝부분에서 같은  $\Delta K$ 에서  $\frac{da}{dN}$ 가 다소 빨라짐을 알 수 있었다.

또, 熱影響部에서 鎔着金屬部로 進展하면서  $\frac{da}{dN}$ 가 다소 늦어지는 것을 알 수 있었다.

또, 鎔接方向과 龜裂進展方向이 평행인 경우가 직각인 경우에 비해, 母材와 같은 鎔接材料를 쓴 경우 小入熱鎔接인 경우가 大入熱鎔接인

경우에 비해, 母材보다 낮은 鎔接材料를 쓴 경우 大入熱鎔接인 경우가 小入熱鎔接인 경우에 비해, 大入熱의 평행鎔接의 경우를 제외한 모든 鎔接에서 母材와 같은 強度의 鎔接材料를 쓴 경우가 母材보다 낮은 強度의 鎔接材料를 쓴 경우에 비해  $\Delta K$ 가 낮은 時期에 일찍 低速으로 龜裂이 시작되어  $\Delta K$ 의 큰 증가없이  $\frac{da}{dN}$ 가 빠르게 증가한 다음 다른 경우와 같은 性狀으로 진전됨을 알 수 있었다.

또, 小入熱鎔接의 경우 平행鎔接이 직각 鎔接에 비해, 小入熱鎔接이 大入熱鎔接에 비해 같은  $\Delta K$ 에서  $\frac{da}{dN}$ 가 다소 낮은 것을 알 수 있었다.

#### 感謝의 말

본 연구는 日本 東京工業大學 土木工學科의 三木 千壽 教授, 助手 森 猛, 大學院生 時田 諸氏의 實驗設備, 試驗片, 消耗品 등의 提供과 指導 및 協助로 行해진 것인 바, 紙上을 通하여 感謝를 드린다.

#### 參 考 文 獻

1. Okumura, T., T. Nishimura, C. Miki and K. Hasegawa, "Fatigue Crack Growth Rates in Structural Steels, *Proceedings of JSCE, No. 322*, pp. 175~178, 1982. 6.
2. 太田 昭彦, 佐々木 悅男, 鎌倉 將英, 二瓶正俊, 小管通雄, 金尾正雄, 稻垣道夫, "SM50B 突合 세鎔接繼手における 疲勞き裂傳播しきい值に及ぼす引張殘留應力の影響", 日本鎔接學會誌, Vol. 50, No. 2, pp. 35~42, 1981. 2.
3. 橋內 良雄, "突合也鎔接材および母材의 疲勞き裂傳播舉動", 日本機械學會論文集(A編), Vol. 47, No. 419, pp. 677~688, 1981. 7.
4. 橋內 良雄, "軟鋼突合也鎔接繼手의 疲勞き裂傳播舉

- 動に及ぼす試驗片寸法および形狀の影響", 材料, Vol. 32, No. 354, pp. 304~309, 1983. 3.
5. 石原守, 平石茂樹, 杉本威生, "高張力鋼母材および鎔接部の 疲勞き裂傳播速度", 材料, Vol. 27, No. 292, pp. 42~48, 1978. 1.
6. Glinka, G., "Effect of Residual Stresses on Fatigue Crack Growth in Steel Weldments under Constant and Variable Amplitude Loads", *ASTM STP 667*, pp. 198~214, 1979.
7. Sandifer, J.P. and G.E. Bowie, "Fatigue Crack Propagation in A537M Steel, *ASTM STP 648*, pp. 185~196, 1978.
8. Kapadia, B.M., "Influence of Residual Stresses on Fatigue Crack Propagation in Electro slag Welds", *ASTM STP 648*, pp. 244~260, 1978.
9. Seeley, R.R., L. Katz and J.R.M. Smith, "Fatigue Crack Growth in Low Alloy Steel Submerged Arc Weld Metals", *ASTM STP 648*, pp. 261~284, 1978.
10. O. Vosikovsky, "Fatigue Crack Growth in HY 130 Steel Weldments in Air and Water", *Welding Journal, Vol. 59*, Research Supplements, pp. 255S~258S, 1980. 9.
11. 岡村弘之, "線形破壞力學入門", 培風館, pp. 212~222, 1975. 11.
12. J. Tajima, H. Shimokawa, K. Takema, C. Miki and F. Ito, "Fatigue Tests of Truss Made of 600 MPa and 800 MPa Class Steels", *IIW Doc. XIII-1045-82*, 1982. 5.
12. 本州四國連絡公團, "鎔接構造部材における鎔接缺陷と疲勞き裂の發生の一例(寫眞集)", 1982. 1.
13. 張東一, 鄭榮和, "最近 日本의 疲勞破壞에 대한 研究動向", 大韓土木學會誌, Vol. 31, No. 4, pp. 25~33, 1983. 8.

(接受: 1984. 4. 2)