

銲接이음한 構造用鋼의 疲勞龜裂進展舉動

The Propagation Behaviour of the Fatigue Crack of the Welded Structural Steel

정영화* 김익겸** 이형근*** 정진석***
Jung, Young-Hwa Kim, Ik-Gyeom Lee, Hyung-Koon Jung, Jin Suck

ABSTRACT

In recently, according to increase the construction rate of steel bridge, it is necessary to develop the high strength, high toughness steel. Thus, this study shows to evaluate the fatigue characteristic of SWS 570 B first used within a country

With the weld-joined compact tension specimens compared with each other, that is, transverse and lengthwise about the crack propagation, high and low in the input heat level, the fatigue test were performed. The log-log curves between the fatigue crack propagation rate da/dN and the transition range of the stress intensity factor ΔK ahead the crack tip were drawn, with these data. By using this curve, we obtained C and m which is material constant from Paris-Erdogan power law.

The obtained results from this study indicate that fatigue crack growth rate of SWS 570 B is not influenced by softening effect which occurs in the HAZ(heat-affected zone) when high and low heat input weld is carried out. Softening effects, which affect fatigue properties, are shown that it is not affected to the fatigue growth rates significantly.

1. 서론

최근, 공업기술의 발전과 더불어 강구조물이 점차 대형화, 중량화 및 고기능화(고강도강의 사용등)해지고, 용접이음이 널리 사용됨에 따라 이러한 파괴사고가 실제로 종종 발생하여 막대한 피해를 초래하고 있다.

이에따라 외국에서는 강구조물의 파손 및 파괴에 대한 관심이 높아가고 있거니와, 우리나라에서도 최근 강구조물의 이용확대와 함께 대형화(예로서 두께 40mm 강판의 용접을 시도하려 하고 있다), 고기능화 등의 경향을 따르고 있어, 이제 이의 파괴에 대해

무관심할 수만은 없게 되었다.

구조부재의 용접부에는 용접방법이나 검사능력의 제약 등에 의해 blowhole이나 銲込不良龜裂 등의 결함이 남기 쉽다. 그러한 부재가 진동 또는 交番應력을 받으면 결함을 기점으로 피로균열이 발생하고, 부재의 변형이나 파괴의 원인이 된다. 따라서 용접부의 피로균열 성장을 명확히 파악해야 한다. 외국의 경우에는, Barsom[1]은 미국산 강철들에 대한재료상수(C, m)의 상·하한치를 시험에 의해 구하여 제안하고 있다. 일본에서는 1982년 日本土木學會 本冊一四國 橋梁 上部構造 小委員會 疲勞研究 group이 일본의 강철 및 교량 제작 회사들이 일본산 강철에 대해 개별적으로 획득한 재료상수(C, m) 값들을 수집하여 C 와 m 사이의 관계식[2][3][4]을 이용하여 각종 강철의 母材, 용착금속부 및 열영향부에 대한

* 강원대학교 토목공학과 교수

** 강원대학교 대학원 토목공학과 박사과정

*** 강원대학교 대학원 토목공학과 석사과정

da/dN-ΔK 관계를 분석하여[5]本州一四國連絡橋 이후의 교량의 피로설계에 이용하고 있다. 이후 일본에서는 일본 피로설계지침에 “과피역학의 수법을 이용한 피로균열 진전해석”이 규정되어 있으며[6], 미국서는 ASTM에 피로균열 성장거동 측정법이 규정되어 있을 정도이다[7] 이 외에도 奥村등[6]은 일본에서 행해진 素材 및 횡방향 용접이음부의 피로균열 진전에 관한 각종 실험의 결과를 수집 정리하여 용착금속부 혹은 열영향부에서의 피로균열진전속도 da/dN-ΔK 관계와 거의 차이가 없음을 지적하였다. 太田 등[8]은 SWS490을 母材로 하여 손용접, CO₂ 용접 및 입열량이 다른 3종의 Submerged arc 용접 등의 용접방법을 써서 용접한 횡방향 용접이음부의 피로균열 진전속도를 측정하고, 용접방법이나 용접부내의 위치(용착금속부, 열영향부)에 따라 피로균열 진전속도에 큰 차가 없음을 지적하였다. 이 외에도 橋内,[9][10] 石原[11] 등, Glinka[12], Sandifer[13]등, Kapadia[14], Seely[15]등, Visikovsky[16]등이 銲接部의 피로균열 진전에 가장 현저한 영향을 주는 인자는 용접잔류응력이며, 다른 인자들의 영향은 별로 크지 않음을 지적하였다.

종래의 연구는 균열이 용접방향과 평행으로 진전하는 횡방향 용접이음부에 대한 것이 대부분이었으나 상자형 truss 부재의 각용접부와 같이 균열이 용접방향과 직각으로 진전하는 경우에 대한 연구와 이때의 銲着金屬部, 熱影響部 및 母材에서의 피로균열 진전 성장의 차이 여부, 또는 평행 및 직각 두 경우의 비교 등에 대해서도 명확히 할 필요가 있을 것이다.

또, 두꺼운 판의 용접능을 높이기 위한 목적으로 대입열로 용접하는 경우 용접부의 韌性이 저하될 것

이 예상되나 용접입열량의 차에 따라 피로균열 진전 성장에 어떠한 차가 생기게 될 것인지 연구하는 일도 중요한 일일 것이다.

반면 국내에서의 연구는 장동일, 정영화에 의한 “용접 이음한 구조강의 소인장시험편에서의 疲勞龜裂 進展거동”[17] 정영화, 이승하에 의한, “동질 및 이질 강재를 용접연결 하였을 때의 疲勞龜裂 成長舉動에 關한 研究”[18] 등 극히 제한된 연구가 있을 뿐이다 피로 균열 진전 거동에 관한 시험법조차 규정된바 없으며, 더욱이 피로설계 지침조차 제대로 마련되어 있지 못하다.

따라서 본 연구에서는 최근 광안대교를 비롯한 대형구조물에서 그 사용이 시도되고 있는 SWS 570E 鋼의 피로시험을 통하여 용접부의 연화현상이 피로 균열성장율에 미치는 영향과 모재 및 열영향부, 용착금속의 피로균열성장 거동을 정량적으로 분석하여 SWS 570B 鋼의 기초자료를 제공하고, 피로균열 성장특성을 규명하는데 목적이 있다.

2. 실험내용

2.1 사용재료

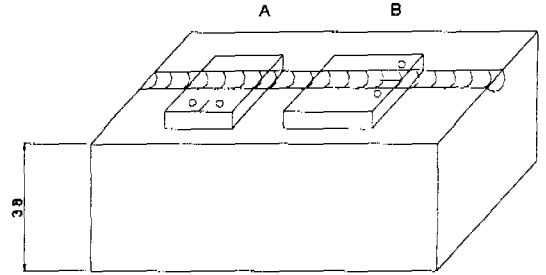
板두께 38mm의 SWS 570 B 기계적성질 및 화학적 성분은 다음과 같다.

표 2.1 母材의 기계적 성질 및 화학성분

강재	기계적 성질			화학적 성분(%)						
	YP kgf/mm ²	TS kgf/mm ²	EL (%)	C	Si	Mn	P	S	Cu	Mo
SWS570	58.8	65.1	28.2	0.08	0.01	1.82	0.013	0.006	0.05	0.50
Guarantee	≥47.8	36.2 ~70.3	≥20	0.07 ~0.17	≤0.20	1.65 ~2.20	≤0.025	≤0.030	≤0.35	0.45 ~0.65

2.2 시험편의 제작

두께 38mm 강판을 그림과 같이 용접하여 절단 제작하고, 균열방향이 용접방향과 평행 및 직각이 되도록 구분하고 모재두께38mm로부터 용접뒷면에는 용접부가 나타나도록 13mm두께로 절단해 내었다.



2.3 용접조건

(1) 용접 방법

별립각 30° 홈깊이 20mm, 선단반경을 각각 8, 5mm의 U형 용입홈용접으로 하여 2전극(tandem) 단층 Submerged arc 용접하였다.

그림 2.1 鎔接 및 切斷

(2) 區分

표 2.2 대입열량과 소입열량의 비교

大入熱量		小入熱量	
wire	US36 ϕ 4.8mm	wire	US49 ϕ 4.0mm
flux	MF38, 20×D	flux	MF38, 20×200
전류	前極 800A	전류	1層 450A
	後極 700A		殘層 450A
전압	前極 35V	전압	1層 30V
	後極 37V		殘層 30V
용접속도	30cm/min	용접속도	1層 38cm/min
*입열량	70KJ/min	*입열량	殘層 40cm/min
			1層 21.3KJ/min
			殘層 20.3KJ/min

* 용접 입열량이 커지면 용접부의 柱狀組織이 粗大化하고 인성이 저하할 우려가 있어 도로교시방서에는 SWS 58에 대해 70KJ/cm를 상한으로 제한하고 있으나 본 연구에서는 용접입열량이 용접부의 피로 균열진전성장에 어떠한 영향을 미치는가를 확인하기 위하여 그 상한치보다 많은 대입열도 취하였다

(3) 鎔接殘留應力消去위한 後處理

용접잔류응력을 제거하기 위하여 90분동안 熱處理 溫度를 580 °C로 하였고, 가열냉각속도는 130 °C/hr로 하였다.

2.4 시험편의 형상 및 치수

시험편의 형상 및 치수는 ASTM E647-95a[Standard Test Method Measurement of Fatigue Crack Growth Rates] 규정에 맞추어 정하였다.

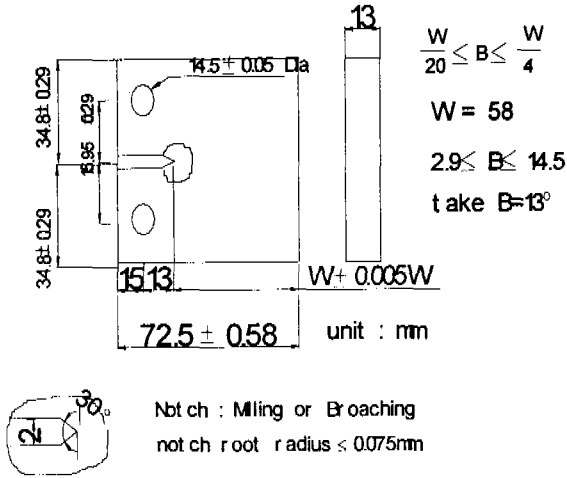


그림 2.2 시험편의 형상

2.5 試驗片의 번호부여

大入熱일 때 H, 小入熱일 때 L, 鑄接方向과 平行일 때 A, 直角일 때 B로 하고 갯수를 1, 2로 하였다.

3. 피로실험방법

3.1 피로시험기

이 연구에 사용한 기계는 강원대학교 토목공학과 구조실험실에 설치되어있는 ShimadzuEUF-UB25-70으로 전기유압 servo식 피로시험기이다. 이것은 수냉식 피로시험기로 load 제어, stroke 제어, strain 제어를 할 수 있으나 이 실험에서는 토목구조물에 가장 일반적인 load 제어를 행하였다. 또한, 부속장치로는 5ton 로드셀(Load cell)을 사용하였다.

3.2 하중

각각의 시험편에 대하여 최대하중을 2ton에서부터 시작하여 최소하중이 1ton에 이르게 하였고 응력비는 0.1로 하였다.

3.3 豫備 疲勞龜裂

균열의 선단을 예리하게 하여 피로균열 진전에 관한 여러 식의 적용을 타당하게 하기 위하여 균열선단에 예비 피로균열을 삽입하였다.

그 방법은 0.1 ton~2 ton 의 引張脈動荷重으로 0.4mm 정도, 0.1 ton~1.75 ton 으로 0.4mm 정도, 0.1 ton~1.55 ton 으로 0.3mm 정도, 0.1 ton~1.35 ton 으로 0.3mm 정도, 0.1ton~1.2 ton 으로 0.1mm 정도, 합계 1.5mm 정도의 예비 균열을 삽입하는 것으로 한다. 균열이 쉽게 발생하도록 하기 위해 처음은 최대하중을 크게 하였으나 점차 최대하중을 줄여 본 시험의 하중과 같은 조건으로 하였다.

3.4 試驗片 研磨

모재에서 절단해 낸 부분에서 육안으로는 母材, 熱影響部 및 鑄着金屬部가 구분되지 않으므로 이를 구분하기 위해서 또 절단표면의 잔류응력을 최소로 줄이기 위해서 표면을 1,000번까지의 에메리(emery, 일명 sand paper)로 연마하고, 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.

3.5 進展龜裂 길이의 測定

진전균열길이 0.04~0.1mm 단위로 진전균열길이 da 와 이때 까지의 하중반복회수범위 dN 을 측정한다 균열길이 측정방법에는 replica 법, 이동 눈금자 현미경 법, crack gauge 법, 균열 개구량 측정 gauge법등이 있지만, 본 실험에 사용한 Krak Gage에 의한 균열길이 측정방법은 지금까지 많이 사용되고 있는 주플라이언스 방법이나, 크랙 게이지(crack gage)에 의한 방법보다 그 신용도가 클뿐 아니라 사용면에 있어 간편하고 많은 노력과 시간이 절약된다는 장점이 있다.

4.1 應力擴大係數의 變動範圍 ΔK의 計算

소형인장시험편의 피로시험시 이미 널리 이용되고 있는 다음과 같은 식[19]을 써서 매 측정점에서 균열 선단부근의 응력확대계수의 변동범위 ΔK를 별도로 계산한다.

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

여기서, ΔP : 하중변동범위
 B : 시험편의 두께
 W : 시험편의 폭
 α : a/W
 a : 균열 길이

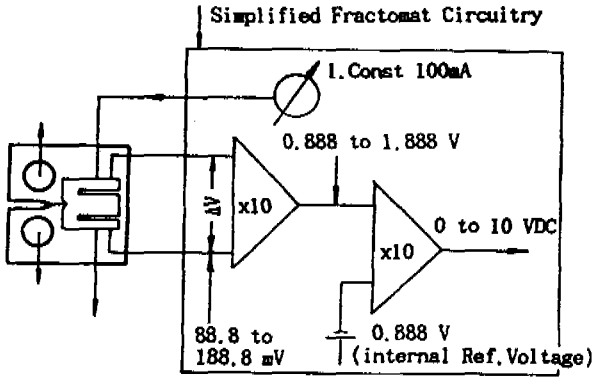


그림 3.1 Connection scheme of Krak gage and Fractomet

균열길이 측정은 Fractomet을 사용하여 측정하였으며 1/100mm까지 읽을 수 있도록 하였고 실제시험에서는 LB1, LB2, HB1은 0.2mm마다 측정회수를 기록하였고 HB2, LA1, LA2, HA1은 0.1mm마다 측정회수를 기록하였다.

4. 피로시험의 결과정리

4.2 疲勞龜裂 進展速度(da/dN)

응력확대계수의 변동범위(ΔK)와의 관계곡선측정에서 얻어진 매 측정점 사이에서의 $\frac{da}{dN}$ 와 계산에서 얻어진 ΔK의 매 측정점 사이의 차값 ΔK를 가지고 양대수 용지에 $\log(\frac{da}{dN}) - \log(\Delta K)$ 의 곡선을 그린다.

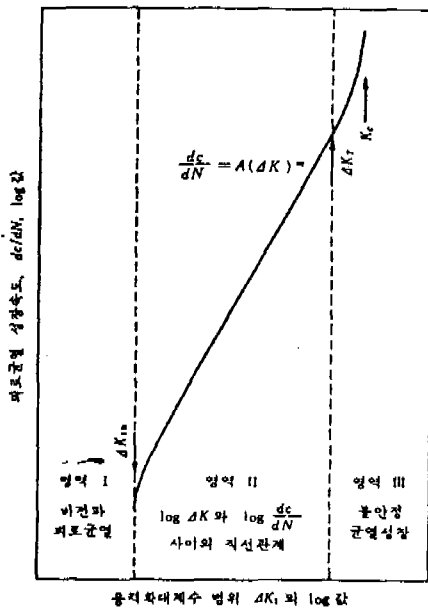
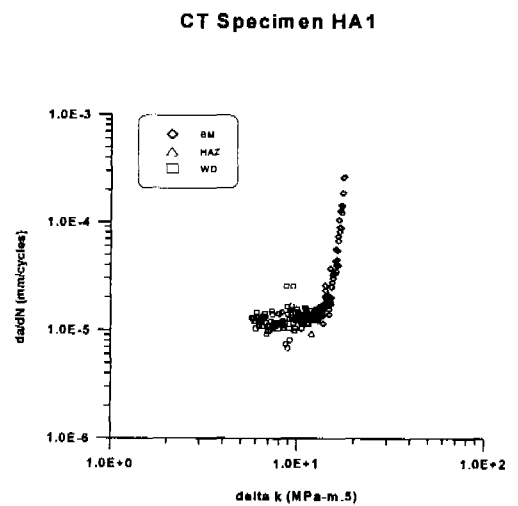
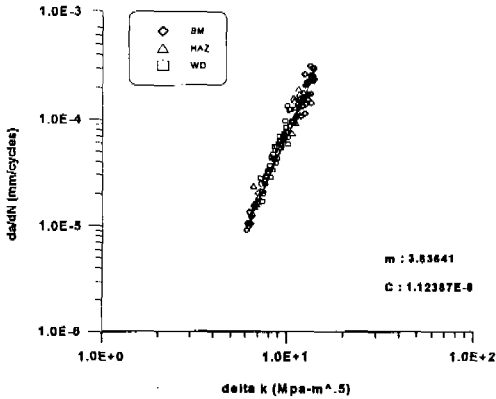


그림4.1 피로균열 성장속도와 ΔK_I의 관계설명도(영역 II Paris'ir)

4.3 실험결과



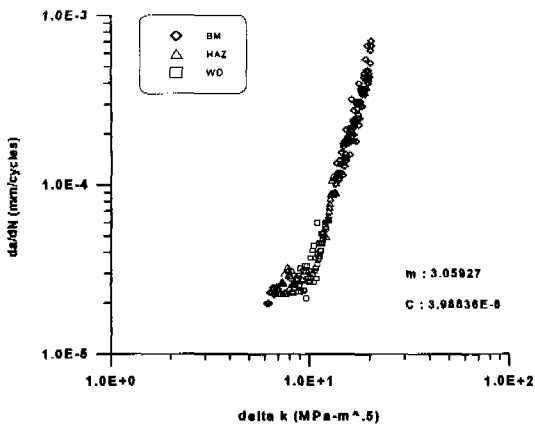
CT Specimen LA1



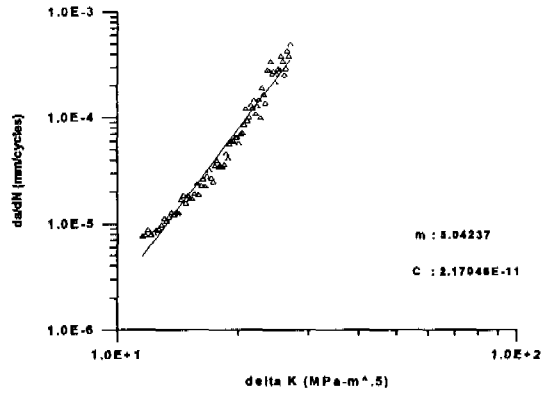
縱方向용접(하중에 대해 縱方向鎔接)에 대한 HA1은 초기크랙 가까이 용접이되어 균열진전이 매우 느리게 진행하였으며, 열영향부를 지나 모재를 관통하면서 매우 빠르게 진전되는 것을 관찰할 수 있었다. HA1시험편은 이전까지의 실험결과와는 차이를 많이 보이고 있다.

LA1과 LA2는 초기균열에서의 da/dN의 차이를 보여주고 있지만, 열영향부, 모재를 지나면서 비슷한 경향을 보이고 있다.

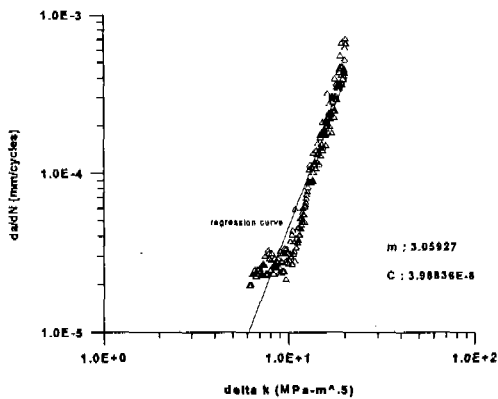
CT Specimen LA2



CT Specimen LB1



CT Specimen LA2



CT Specimen LB2

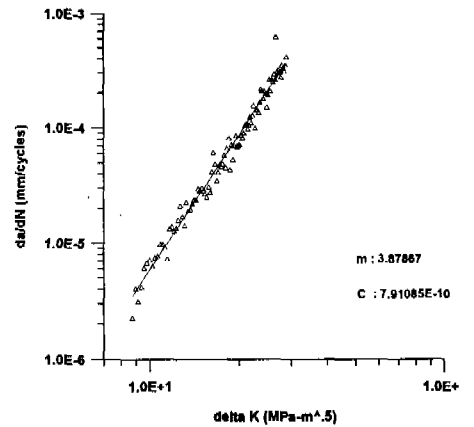


그림4.2 縱方向鎔接, 大入熱, 小入熱

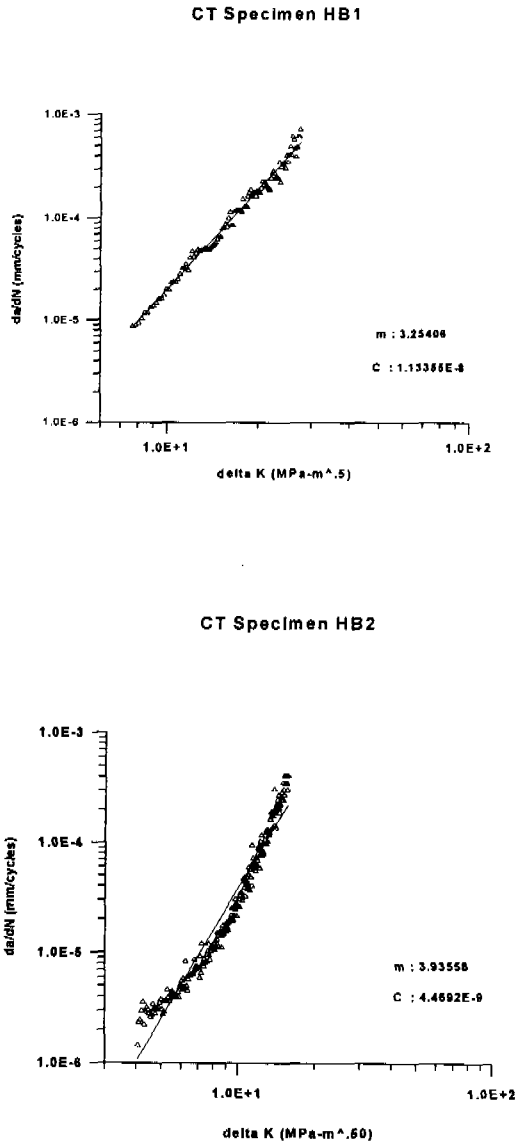


그림 4.3 橫方向鎔接, 大入熱, 小入熱

균열길이 방향과 평행하도록 용접한 경우 LB1과 LB2는 대입열용접쪽보다 같은 ΔK 에 대해서 da/dN 가 다소 낮은 것을 나타내고 있다. 반면 대입열용접의 경우 ΔK 가 낮은 시기에 일찍 저속으로 균열이 시작되어 ΔK 의 큰 증가없이 da/dN 가 빠르게 증가한 다음 다른 경우와 거의 같은 성장으로 진전되고 있다.

LB1과 LB2 시험편에서 m 값의 차이를 보이고 있지만 일반용접구조용강재의 범위를 만족하고 있으며, 이러한 결과는 용접상태에 기인한다고 추정할 수 있

다. HB1과 HB2 시험편에서는 균열의 성장이 비슷한 경향을 나타내고 있다

위 결과 횡방향용접에 대한 대입열용접, 소입열용접한 경우, 용접부에 대한 연화현상은 전체적인 면에서 $da/dN-\Delta K$ 관계에 큰 차이가 없음을 알 수 있었다.

5 결론

SWS 570B강을 사용하여 피로균열 성장시험을 수행하여 이의 결과를 균열성장율과(da/dN)과 응력확대계수범위(ΔK)의 관계로 정리하여 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 용접방향, 용접입열량, 혹은 母材, 熱影響部 및 鎔着金屬部에 따라 서론에서 언급한 다른 연구들에서와 같이 $da/dN-\Delta K$ 관계에 큰 차이가 없음을 알 수 있었다.

(2) SWS 570B강 용접부의 피로균열성장은 모재의 피로균열 성장거동과 유사하여 열영향부의 연화현상은 전체적인 용접부의 균열성장율에 영향을 주지 않는다.

(3) SWS 570B강 용접부의 피로균열 성장지수 m 값과 피로균열 성장계수 C 값은 일반구조용강 용접부의 m 값과 거의 유사한 값을 나타내고 있어 SWS570강 용접부의 연화현상은 유의할 수준은 아니다.

참고문헌

- [1] Rolfe. S.T. and J. M. Barsom: Fracture and Fatigue Controll in Structures, Prentices-Hall, Inc, p. 23 6~239, 1977.
- [2] Kitagawa, H.: Fracture Mechanics Analysis of Fatigue Crack Growth (Part1), Journal of the Society of Materials Science Japan, Vol.26, No. 284, pp.88~99, 1975-5(in Japanese)
- [3] Koshiga, F.and M. Kawahara: A Proposed Design Basis with Special Reference to Fatigue Crack Propagation, Journal of the Society of Naval Architects in Japan, No.133, pp.305~312, 1973-6 (in Japanese)
- [4] Gurney, R. R.: Fatigue of Welded Structures,

- Second Edition, Cambridge University Press, pp.5
3~64, 1979.
- [5] Toshie OKMURA, Toshio NISHIMURA, Chioshi
MIKI, and Kinji HASEGAWA, "Fatigue Crack
Growth Rates in Structural Steels", Proc of
JSCE, No.322, pp.175~178, 1982. 6.
- [6] 日本鋼構造協會, "疲勞設計指針(案)", pp.49~55,
1989. 11.
- [7] ASTM, " Standard Test Method for Measurement
of Fatigue CrackGrowthRates", ASTM E647-78 및
E647-86a (1986.5.25)
- [8] 太田 昭彦, 外 5名, " SM50B突合せ熔接継手における
疲勞き裂傳播しきい値に及ぼ引張殘留應力の影響",
日本熔接學會誌, Vol. 50, NO.2 pp.35~42, 1981.2.
- [9] 橋内 良雄, "突合せ熔接材および母材の疲勞き裂傳
は°舉動", 日本機械學會論文集 (A編), Vol.47, No.
419, pp.677~688, 1981.7.
- [10] 橋内 良雄, "軟鋼突合せ熔接継手の疲勞き裂傳は°舉
動に及ぼす試験片寸法および形状の影響", 材料 Vol.32,
No.354, pp.304~309, 1983. 3.
- [11] 石原守, 平石茂樹, 杉本蔵生, " 高張力鋼母材および 熔
接部の疲勞き裂傳播速度", 材料, Vol.27, No.292,
pp.42~48, 1978. 1.
- [12] Glinka, G., "Effect of Residual Stresses on Fatigue
Crack Growth in Steel Weldments under Constant
and Variable Amplitude Loads", ASTM STP667,
pp.198~214, 1979.
- [13] Sandifer, J.p. and G.E. Bowie, "Fatigue Crack
Propagation in A537M Steel, ASTM STP648.
pp.185~196, 1978.
- [14] Kapadia, B.M., "Influence of Residual Stresses on
Fatigue Crack Propagation in Electro slag
Welds", ASTM STP 648, pp.244~260, 1978.
- [15] Seeley, R.R., L. Katz and J.R.M., Smith, "Fatigue
Crack Growth in Low Alloy Steel
Submerged Arc Weld Metals", ASTM STP648,
pp.261~284, 1978.
- [16] O. Vosikovsky, "Fatigue Crack Growth in HY130
Steel Weldments in Air and Water", Welding
Journal, Vol.59, Research Supplements, pp.255S~
258S, 1980. 9.
- [17] 張東一, 鄭榮和, " 熔接이음한 構造鋼의 小引張試驗片
에서의 疲勞龜裂進展舉動(熔接方向, 入熱量, 熔接
材料의 強度 등이 다를 때)", 大韓土木學會論文集,
Vol.4, No. 2 pp.133~142, 1984. 6.
- [18] 鄭榮和, 李承河, "同質 및 異質鋼材를 熔接連結하였을
때의 疲勞龜裂成長舉動에 관한 研究" 江原大學校
大學院 碩士學位論文, 1986. 8.
- [19] 岡村弘之, "線形破壞力學入門", 培風館, pp.212~222
1975. 11.