

SM570, POSTEN60 및 80 강재의 피로균열성장특성

Characteristics of Fatigue Crack Growth in SM570, POSTEN60, 80 Steel

정영화* 김익겸** 강성립*** 남왕현*** 김은성****
Jeong, Young-Wha Kim, Ik-Gyeom Kang, Sung-Lib Nam, Wang-Hyone Kim, Eun-Sung

Abstract

In this study, a series of fatigue tests are carried out in order to estimate quantitatively the characteristics of fatigue crack growth rate for high strength steels of SM570, POSTEN60, and POSTEN80 steel, that is, the influence on fatigue crack growth rate according to the welding line, the characteristics of fatigue crack growth according to the welding method and the kinds of steel, and the characteristics of fatigue crack growth for base metal, heat affected zone and weld metal.

From the test results, in case that the notch is parallel to welding line, it knows that the retardations of fatigue crack growth rate in crack tip at early stage increase remarkably than in case that the notch is perpendicular to welding line due to compressive residual stress. And the characteristics of fatigue crack growth rate according to welding method are that the dispersion of fatigue crack growth rate in case of FCAW method is smaller than that of SAW method. Also, it knows that the fatigue crack growth rate converges in high stress intensity factor range.

키워드 : 고강도강, 용접일열량, 용접잔류응력, 피로균열성장속도, 응력확대계수범위
keywords : *high strength steel, welding heat input, welding residual stress, fatigue crack growth rate, stress intensity factor range*

1. 서론

용접이음부에 대한 피로안전성 검토에 있어서 파괴역학적 방법에 의한 피로수명평가는 그 유효성이 큰 것으로 알려져 있다. 파괴역학적 방법에 의한 피로수명평가에 있어서는 용접부재의 피로균열 성장에 관한 자료와 비파괴검사에 의한 초기균

열정보가 해석에서의 중요한 인자가 된다.

따라서 강구조물의 피로안전성평가에서는 이음부의 등급분류에 따른 허용피로응력범위와 강재의 피로균열 성장에 관련된 재료상수가 중요한 인자가 되는데, 국내의 경우는 이들 자료에 관한 체계적인 연구가 실시되지 않아서 자료의 통계처리에 기초해서 정량적으로 이들 인자를 평가하기에는 아직 피로실험자료가 부족한 실정이다.

일반적으로 용접이음부의 용접금속 및 열영향부에서의 피로균열성장속도는 전체적으로 강재에서의 피로균열성장속도와 큰 차이가 없는 것으로 알려져 있다.

太田등은 SM490강재를 모재로 한 용접이음부에

* 강원대학교 토목공학과 교수 공학박사
** 강원대학교 토목공학과 박사
*** 강원대학교 토목공학과 박사과정
**** 강원대학교 토목공학과 석사과정

대해서 피로균열성장시험을 실시하고 용접방법, 용접입열량 및 균열성장경로의 재질(용접금속, 열영향부)에 따른 피로균열성장속도의 차이는 매우 작은 것으로 보고하였다.[1]

Maddox는 대입열용접의 경우 열영향부에서의 피로균열성장속도가 높게 될 가능성이 있는 것을 보고하고 있으며[2], 또한 Kappadia는 일렉트로 슬래그용접에 의한 용접이음부의 용접금속부 및 열영향부에서의 피로균열성장속도는 모재에서의 성장속도와 비교해서 낮거나 동등한 정도로 되는 경우가 있는 것으로 보고하였다.[3]

이들 연구 이외에도 용접부의 피로균열성장에 관련된 연구결과에 따르면 용접부의 피로균열성장에는 용접잔류응력이 큰 영향을 미치는 것으로 보고하고 있다.[4]

용접잔류응력은 일반적으로 사용강재의 항복강도와 동등한 것으로 알려져 있는데 그 분포 및 크기는 용접조건, 특히 용접입열량, 구속정도, 개선행상, 적층형태 등에 영향을 받는다.

한편 과거 용접금속부의 피로균열성장에 관한 연구의 대부분은 맞대기이음을 상정하고 피로균열이 용접선 방향으로 성장하는 경우를 대상으로 하고 있다.

그러나 상자형 단면 트러스부재의 모서리이음부와 같이 종방향 용접이음부의 경우에는 용접부에서 발생한 피로균열이 용접선과 직각방향으로 성장하기도 한다.

그리고 횡방향 용접이음부에서도 주응력의 방향이나 결함위치, 방향에 따라서는 반드시 피로균열이 용접선과 평행하게 성장한다고는 할 수 없으므로 피로균열의 성장은 균열성장방향과 용접선 위치에 따라서도 영향을 받을 것으로 생각된다.

이러한 것을 고려해서 본 연구에서는 향후 그 사용성이 증가할 것으로 생각되는 고강도강을 대상으로 균열성장경로의 재질(모재, 열영향부, 용접금속)에 따른 피로균열성장속도의 차이, 용접선과 균열성장방향의 관계, 용접입열량이 용접금속부의 피로균열성장속도에 미치는 영향을 맞대기 용접이음부를 갖는 CT(Compact Tension)시험체를 이용해서 실험적으로 검토하였다.

2. 시험편 및 시험방법

2.1 시험편

본 연구에서 사용한 시험편은 고강도강재인 SM570, POSTEN60 및 80(이하 PST60 및 PST80으로 표기) 강재를 사용해서 제작하였다. 시험체에 사용된 강재 및 용접재료의 물리적 성질 및 화학성분은 표 1 ~ 표 3과 같다.

표 1. 시험편의 물리적 성질 및 화학성분

강종	물리적 성질			화 학 성 분 (%)						비고
	항복응력 (MPa)	인장강도 (MPa)	신장율 (%)	C	Si	Mn	P	S	C _{eq}	
SM570	582	610	27	0.14	0.30	1.39	0.015	0.003	0.40	
PST60	582	610	27	0.14	0.30	1.39	0.015	0.003	0.40	
PST80	770	850	22	0.074	0.30	0.91	0.015	0.004	0.46	

표 2. 용접재료의 화학성분

강종	용접방법	화 학 성 분				
		C	Si	Mn	P	S
SM570	FCAW	0.03	0.35	1.12	0.013	0.017
PST60	SAW	0.11	0.02	1.95	0.014	0.012
PST80	GMAW	0.05	0.44	1.35	0.006	0.001
	SAW	0.12	0.12	2.04	0.005	0.001

표 3. 용접재료의 물리적 성질

강재	용접방법	직경 (mm)	인장시험			흡수에너지	
			Y.S. (MPa)	T.S. (MPa)	EL. (%)	온도 (°C)	CVN (J)
SM570	FCAW	1.2	582	610	27.0	-30	43
PST60	SAW	4.8	504	546	31.2	-29	57
PST80	GMAW	1.2	770	850	22.0	-20	120
	SAW	4.8	760	830	22.0	-20	150

주) PST80 강재의 용접봉은 국내에서 미생산되어 일본에서 수입.

본 연구에서 사용한 시험편은 SM570, PST80 강재의 경우 두께 25mm, PST60 강재의 경우 두께 50mm의 광판을 이용해서 제작하였다.

시험체의 용접은 현재 일반적으로 사용되고 있는 용접법인 FCAW, GMAW, SAW로 제작하였고 용접입열량은 10~40KJ/cm의 입열량조건으로 제작하였으며, 강종별 용접조건은 표 4와 같다.

또한 시험편 내부에서 유의한 결함이 존재하지 않는 것을 확인하기 위해서 용접후 RT 및 UT검사를 실시하였다.

시험편은 ASTM E399에서 규정하고 있는 피로균열성장측정용 CT(Compact Tension) 시험편을 그림 1와 같이 절취해서 그림 2과 같은 형상으로 제작하였다.

시험편은 두께 25mm, 50mm의 두께의 판을 용접한 후 용접에 의한 변형 등을 제거하기 위해서 소정의 규정치까지 연삭하여 13mm의 두께로 시험편을 제작하였다. CT시험편에서는 노치위치를 용접선과 평행 및 직각이 되도록 하였고, 또한 시험

표 4. 시험체의 용접조건

강재	용접 방법	두께 (mm)	용접조건			
			용접재료	예열온도 충간온도	전류(A) 전압(V) 속도(mm/min)	입열량 (kJ/cm)
SM570	FCAW	25	SuperCode81	88 124	218 29 34	12
	SAW	25	S777MX+A3(4.8PI)	83 111	567 36 37	34
PST60	FCAW	50	SuperCode81	125 122	232 28 32	12
	SAW	50	S777MX+A3(4.8PI)	117 135	563 37 37	38
PST80	GMAW	25	MGS-80 (1.2PI)	125 130	250 29 23	19
	SAW	25	PPH-80AK+US-80LT(4.8PI)	125 116	547 34 32	35

체별로 노치위치를 용착금속내, 열영향부에 위치하도록 시험체를 제작하였다. 또한 용접잔류응력은 실제 부재를 고려해서 제거하지 않고 실험을 실시하였다.

시험편은 총 20개를 제작해서 피로시험을 실시하였으며, 시험편에 부여한 약어는 시험편에서 노치가 용착금속부에 있으면 W, 열영향부(HAZ)에

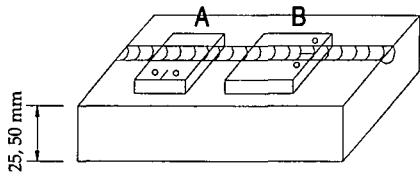


그림 1. 시험편 채취위치

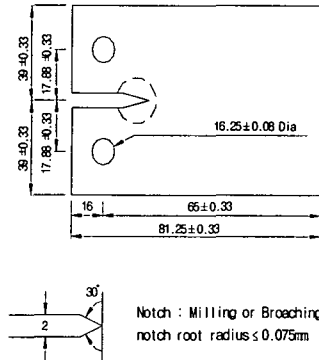


그림 2. 표준 CT시험편의 형상 및 치수

있으면 H, 균열성장방향이 용접부에 직각방향이면 T, 평행방향이면 P로 나타내었고, 또한 이들을 용접방법별로 구분하였다.

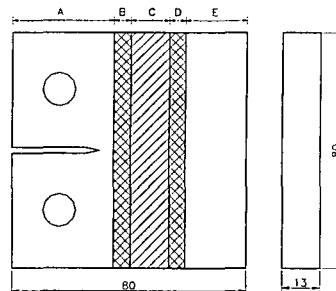
2.2 시험방법

피로균열성장시험에 앞서 시험체에 예비피로균열을 다음과 같은 방법에 의하여 도입하였다. 예비피로균열의 도입은 피로시험하중과 유사한 하중범위를 설정하고, 이를 인장반복하중으로 작용시켜 1.5mm 정도의 예비균열을 도입하였다.

각 시험체별 예비균열도입 하중범위는 노치가 용접선에 수직인 시험체에서는 0.1~2.0tonf, 평행인 시험체에서는 0.1~2.8tonf으로 하였다.

또한 육안으로 모재, 열영향부 및 용접금속부로 구분하기 위해서 시험편 표면을 1,000번까지의 에메리(emery, 일명 sand paper)로 연마하고, 나이탈(nital)과 피크랄(picral)의 1:1 혼합액으로 에칭(etching)을 실시해서 마크로실험을 실시하였다. 마크로 실험결과의 형상을 나타내면 그림 3과 같다.

Welding Metal Zone
Heat Affected Zone



(a) 용접방향과 직각인 경우

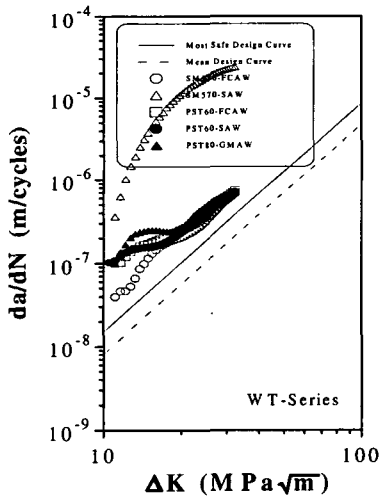


그림 5. WT-Series의 $da/dN - \Delta K$ 선도

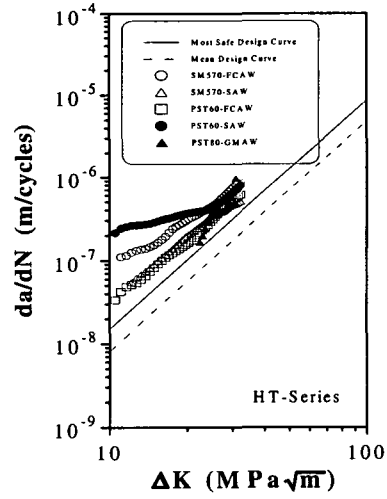


그림 7. HT-Series의 $da/dN - \Delta K$ 선도

그림 4 ~ 그림 12에서 나타난 각 시험편에 대한 $da/dN - \Delta K$ 선도를 이용해서 회귀분석을 실시해서 재료상수 m 과 C 를 산정한 결과를 정리해서 나타내면 표 5와 같다.

그림 4 ~ 그림 12 및 표 5에서 알 수 있는 바와 같이 피로균열성장속도의 기울기는 JSSC에서 제안하고 있는 기울기 2.75보다는 전체적으로는 약간 낮게 나타났다.

그러나 균열성장속도곡선은 JSSC에서 사용하고 있는 곡선보다 윗부분에 존재하고 있어 기존의 일

반강재보다 피로균열성장속도가 빠르게 나타나는 것을 알 수 있었다. 이러한 원인은 고강도강이 일반강재에 비해 경도가 높고, 노치민감도가 높은 것에 기인하는 것으로 생각되나 보다 정량적인 분석을 위해서는 추가시험이 필요할 것으로 판단된다.

3.3 노치위치에 따른 피로균열성장속도

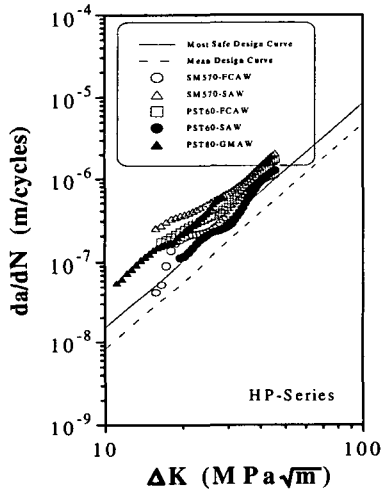


그림 6. HP-Series의 $da/dN - \Delta K$ 선도

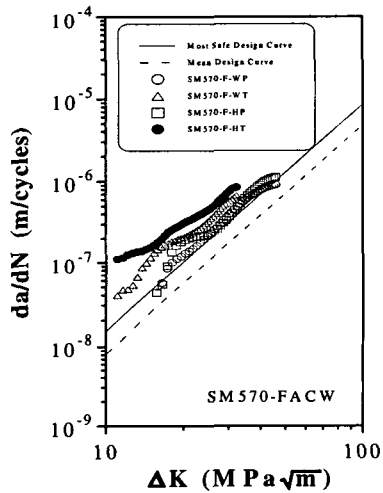


그림 8. SM570-FACW의 $da/dN - \Delta K$ 선도

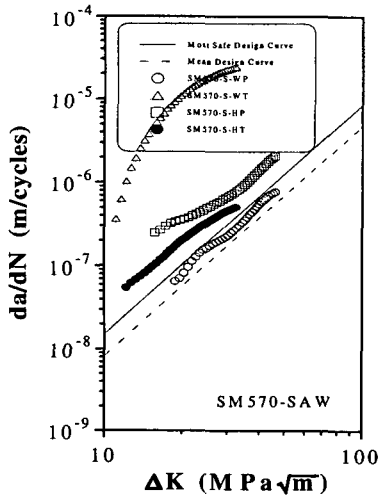


그림 9. SM570-SAW의 $da/dN-\Delta K$ 선도

그림 4 ~ 그림 7에서 알 수 있는 바와 같이 시험체에서의 노치위치가 용접선과 평행한 경우와 직각인 경우 피로균열성장속도가 서로 다른 양상을 나타내었다.

노치가 용접선과 직각인 경우에는 강종에 관계없이 대체적으로 피로균열성장속도는 피로균열 발생초기에는 각 시험체별로 차이를 나타내었지만 피로균열이 용접금속부나 열영향부를 통과해서 모재부에 도달하게 되면 피로균열성장속도가 일정한 값으로 수렴하면서 거의 일치하는 경향을 나타내었다.

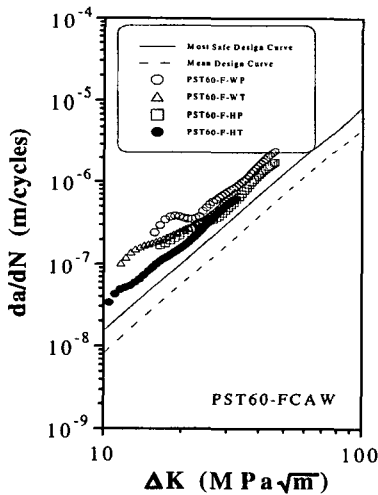


그림 10. PST60-FCAW의 $da/dN-\Delta K$ 선도

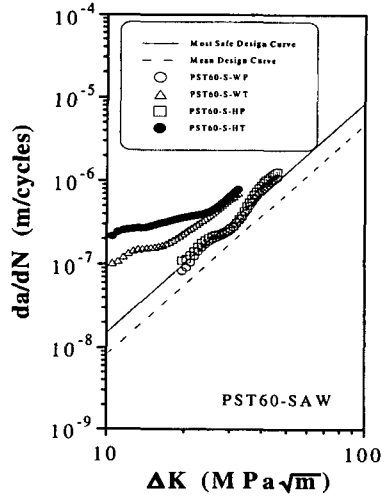


그림 11. PST60-SAW의 $da/dN-\Delta K$ 선도

이와 같은 특성은 시험체의 용접개선형상 및 용접방법에 따라서 노치선단의 전면에 존재하는 용접선 방향의 용접잔류응력 분포특성에 영향을 받기 때문이다. 특히 피로균열성장의 초기단계, 즉 응력확대계수범위가 작은 범위에서는 이러한 잔류응력의 영향이 더욱 현저하게 나타나는 경향을 확인할 수 있었는데, 이는 기존의 연구결과와도 유사함을 알 수 있었다.[5],[6]

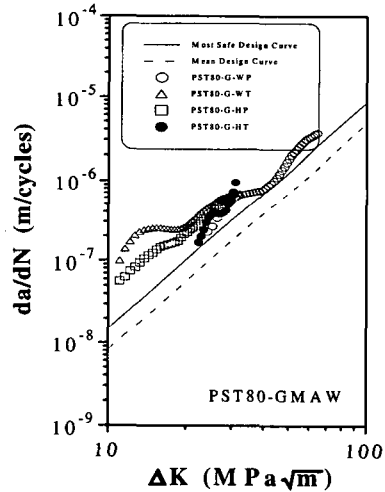


그림 12. PST80-GMAW의 $da/dN-\Delta K$ 선도

SM570 강재의 SAW-HT 시험편의 경우는 다른 시험편과 매우 다른 피로균열성장특성을 나타내

었는데, 이는 시험체 표면에서의 피로균열성장속도가 용접부 개선형상의 영향으로 전면과 후면에서 상당히 차이를 나타내어 피로균열이 한쪽 면으로 편기해서 성장함으로써 전체적으로 피로균열의 성장에 완화현상이 발생하였기 때문인 것으로 생각되지만 보다 정량적인 평가는 파면해석 등의 정량적인 해석이 필요할 것으로 생각된다.

노치가 용접선과 평행한 경우 피로균열은 용착 금속부나 열영향부를 통과하면서 성장하는 것을 알 수 있는데, 이 경우에는 노치선단에 존재하는 압축잔류응력의 영향으로 초기단계의 피로균열성장속도에서 지연현상이 직각방향의 시험편에 비해서 현저하게 나타났다. 이러한 압축잔류응력은 용접방법에 따른 입열량, 용접부의 개선형상에 따라

용접선에 평행하거나 직각인 경우에 있어서 큰 차이는 나타내지 않았으나 피로균열의 발생은 노치선단이 용접선에 직각인 경우가 용접잔류응력의 영향 때문에 비교적 낮은 응력확대계수범위 구역에서부터 균열성장이 발생하는 경향을 나타내었다.

한편, 피로균열성장속도의 지연현상은 전체적으로 열영향부에서 크게 나타났는데 이 현상과 잔류응력간의 관계를 규명하기 위해서는 추가적인 실험이 필요할 것으로 생각된다.

3.4 용접방법에 따른 피로균열성장속도

그림 8 ~ 그림 12에서 알 수 있는 바와 같이 용접방법에 따른 피로균열성장 특성을 보면 강종에 관

표5. 각 시험편별 재료상수 m과 c

강 종	두께(mm)	용접법	실험변수	전 체*		모재부**	
				m	C	m	C
SM570	25	FCAW	WP	2.66	4.27×10^{-8}	2.71	3.66×10^{-8}
		FCAW	WT	2.47	1.26×10^{-7}	2.81	3.92×10^{-8}
		FCAW	HP	2.67	4.58×10^{-8}	3.04	1.21×10^{-8}
		FCAW	HT	1.98	7.98×10^{-7}	2.11	5.35×10^{-7}
SM570	25	SAW	WP	2.71	2.41×10^{-8}	3.08	6.37×10^{-9}
		SAW	WT	3.26	4.59×10^{-7}	3.04	9.44×10^{-7}
		SAW	HP	1.96	9.51×10^{-7}	2.86	3.75×10^{-8}
		SAW	HT	2.34	1.69×10^{-7}	2.42	1.36×10^{-7}
POSTEN60	50	FCAW	WP	2.09	6.58×10^{-7}	2.62	1.02×10^{-7}
		FCAW	WT	1.74	1.49×10^{-6}	2.83	4.03×10^{-8}
		FCAW	HP	2.39	1.63×10^{-7}	3.23	7.96×10^{-9}
		FCAW	HT	2.56	8.04×10^{-8}	2.64	6.38×10^{-8}
POSTEN60	50	SAW	WP	3.04	9.43×10^{-9}	3.71	8.33×10^{-10}
		SAW	WT	1.72	1.56×10^{-6}	2.26	2.70×10^{-7}
		SAW	HP	3.04	1.09×10^{-8}	3.04	1.09×10^{-8}
		SAW	HT	0.98	2.04×10^{-3}	2.55	1.11×10^{-7}
POSTEN80	25	GMAW	WP	2.70	4.60×10^{-8}	3.44	2.43×10^{-9}
		GMAW	WT	1.55	3.24×10^{-6}	2.11	5.20×10^{-7}
		GMAW	HP	2.67	3.35×10^{-8}	2.37	1.95×10^{-10}
		GMAW	HT	2.86	7.16×10^{-8}	4.05	6.67×10^{-13}

* 전구간에 대한 m과 C값. ** 모재부에서의 m과 C값

그 분포가 달라지는 것으로 보고되고 있다.[7] 또한 피로균열의 길이가 증가하여도 잔류응력의 재분포 현상이 직각방향에 비해서 완만하게 진행되어 피로균열성장속도가 다소 수렴하는 경향은 있으나 전체적으로 직각방향의 시험편에 비해서 그 양상은 변화가 적은 경향을 나타내었다. 또한 피로균열성장속도는 노치방향에 관계없이

계없이 FCAW가 SAW에 비해서 피로균열성장속도의 분산이 적게 나타나고 있으며, 또한 높은 응력확대계수범위 영역에서 피로균열성장의 수렴현상이 나타나는 것을 알 수 있었다.

이러한 원인으로는 FCAW가 SAW에 비해서 입열량이 적기 때문이지만 보다 정량적인 평가는 추가적인 피로실험과 잔류응력 등의 측정이 실시되어야

할 것으로 판단된다.

참고 문헌

4. 결 론

고강도강재의 피로균열성장특성을 강종과 용접선 방향 및 노치위치를 변수로 해서 피로시험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 노치가 용접선과 직각인 경우에는 강종에 관계없이 대체적으로 피로균열성장속도는 초기에는 각 시험체별로 차이를 나타내었지만 피로균열이 용접금속부나 열영향부를 통과해서 모재부에 도달하게 되면 피로균열성장속도가 일정한 값으로 수렴하면서 거의 일치하는 것을 알 수 있었다.

(2) 피로균열성장속도는 노치방향에 관계없이 용접선에 평행하거나 직각인 경우에 있어서 큰 차이는 나타나지 않았다. 단, 피로균열의 발생은 노치선단이 용접선에 직각인 경우가 용접잔류응력의 영향 때문에 비교적 낮은 응력확대계수범위구역에서부터 피로균열의 성장이 발생하는 것을 알 수 있었다.

(3) 용접방법에 따른 피로균열성장특성은 강종에 관계없이 FCAW가 SAW이 비해서 피로균열성장속도의 분산이 적게 나타나고 있으며, 또한 높은 응력확대계수범위 영역에서 피로균열성장속도의 수렴현상이 나타나는 것을 알 수 있었다.

- [1] 太田昭彦, 左佐木悦男, 鎌倉將英, 二瓶正俊, 小管通雄, 金尾正雄, 稻垣道男, “SM50突合せ 溶接継手における疲労亀裂しきい値に及ぼす 引張残留應力の影響”, 溶接學會誌, 第50卷, 第2號, pp.35-42, 1981.
- [2] Maddox, S.J., “Assessing the Significance of Flaws in Welds Subject to Fatigue”, Welding Journal, Vol.53, Research Supplement, pp.41s-49s, 1974.
- [3] Kapadia, B.M., “Influence of Residual Stresses on Fatigue Crack Propagation in Electroslag Welds”, ASTM STP 649, pp.244-260. 1978.
- [4] Paris, P.C. and Erdogan, F.; “A Critical Analysis of Crack Propagation Laws”, Tran. of ASME, Jour. of Basic Engrs., Vol.85, Series P, No.3, 1963, pp. 528-534
- [5] 岡村 弘之 “線形破壊力學 入門 ” 培風館, pp.212-222, 1975.11.
- [6] 轟章, 小林英男, “残留應力場の疲労亀裂進展速度の豫測”, 日本機械學會論文集(A編), 第54卷 第497號, pp.30-37, 1988.
- [7] 村上理一, 秋國幸日, “溶接残留應力場での疲労亀裂成長速度の評價”, 溶接學會論文集, 第2卷 第4號, pp. 144-150, 1984.