

海水環境에서 鋼 熔接部の 環境強度評價에 關한 研究(II)

-Low Cycle 腐蝕疲勞龜裂進展舉動-

羅義均*林載奎**曹圭鍾***鄭世喜**

A Study on the Estimation of Environmental Strength in Welds of Steels in Seawater(II)

-Corrosion Fatigue Crack Growth Behaviours for Low Cycle-

E.G. Na* · J.K. Lim** · K.Z. Cho*** · S.H. Chung**

Key Words : Corrosion Fatigue Crack Growth(부식 피로 균열 진전), Post Weld Heat Treatment(PWHT)(용접후 열처리), Heat Affected Zone(HAZ)(용접열영향부), Environment(환경), Paris Equation(Paris 방정식), Stress Intensity Factor Range(응력확대계수폭)

Abstract

The purpose of this study is to investigate the corrosion fatigue crack growth of PWHT specimens(SS41, SM53B) which are the compact tension ones extracted from the multi-passed weldment and weld block. The corrosion fatigue test was done at the cyclic stress frequency of 3Hz in 3.5% NaCl solution.

The results are as follows.

1. Corrosion fatigue crack growth of as-weld was slower than that of base metal.
2. In the low ΔK region, the effect of corrosion environment on crack growth was obvious. However, the corrosion effect decreased with the ΔK slowly.
3. The behaviour of fatigue and corrosion fatigue crack growth depended on the material, heat treatment as well as experimental conditions.
4. Corrosion fatigue crack growth of PWHT specimens(SS41, SM53B) subjected to 1/4hr, was increased compared with that of as-weld.
5. There was a tendency that the exponent value(m) obtained in 3.5% NaCl solution was decreased in comparison with that in air, and the material constant(C) was increased for Paris equation, $da/dN = C(\Delta K)^m$, compared with that in air considerably.

* 전북대학교 대학원

** 전북대학교 공과대학

*** 전남대학교 공과대학

1. 序 論

熔接構造物の 안전설계를 위해서는 熔接部중에서도 취약한 곳으로 알려진 熔接熱影響部(Heat affected zone; HAZ)에 대한 破壞靱性的의 精量적 평가와 더불어 疲勞舉動 및 環境強度 평가가 필연적이라 할 수 있다. 그런데 熔接部에는 殘留應力, 結晶, 가스상 수소등이 존재하여 실제 불안정 破壞의 근원이 되고 있음은 잘 알려진 사실이다. 이 중에서 熔接部の 殘留應力은 破壞靱性を 저하시키는 근본적인 원인이 될 뿐 아니라, 경우에 따라서는 熔接部の 材料의 항복강도에 상당하는 높은 殘留應力이 존재할 때는 疲勞龜裂의 발생을 용이하게 하고, 疲勞龜裂進展舉動은 마치 높은 應力比에서의 龜裂進展과 같은 結果를 초래하고 있음이 보고 되고 있다.^{1,2)} 또한 이 같은 殘留應力은 腐蝕環境에서 외부하중을 받지 않은 상태에서도 殘留應力 자체만으로 Cracking 현상이 발생되고 있음이 알려져 있다.³⁾ 그 같은 이유 때문에 일반적으로 熔接部の 殘留應力을 제거하기 위해 대개 600°C 이상의 비교적 높은溫度에서 熔接後熱處理(Post weld heat treatment; PWHT)를 실시하게 된다.

PWHT에 대한 研究에 의하면⁴⁾ PWHT는 HAZ의 破壞靱性を 개선시키나 탄화물 형성원소를 포함하는 鋼의 경우, PWHT시 殘留應力은 再熱胞化를 촉진하여 破壞靱性和 疲勞舉動에 상당히 큰 影響을 주고 있음이 破壞力學的 견지에서 규명된 바 있다. 이들 研究를 수행함에 있어서 破壞力學的의 도입은 破壞의 예측과 더불어 그 근원을 밝혀 破壞를 미연에 방지할 수 있다는 점에서 기여한 바 크다. 그러나 실제 공업분야에서 破壞는 발생되고 있으며 이들중 대부분이 疲勞 내지는 環境的으로나 力學的으로 가혹한 條件에 의해 熔接部에서 비롯되고 있음이 알려져 있다. 따라서 熔接構造物에 대한 疲勞 및 環境強度에 대한 精確한 평가를 하지 않으면 안된다.

本 研究에서는 SS41 및 SM53B 鋼에 대해 多層熔接을 실시하고 용접재와 PWHT를 행한 熱處

理材를 대상으로 荷重方式이 Mode I이고 저 주파수 條件에서 疲勞 및 腐蝕疲勞實驗을 실시하여 이들 結果를 破壞力學的 견지에서 考察하고자 한다.

2. 實驗 方法

2.1. 試驗片 및 加工

本研究에 사용된 材料는 SS41 鋼과 Nb가 포함된 SM53B 鋼으로 化學的 成分 및 상온에서의 機械的 性質은 Table 1과 같다.

試驗에 提供된 鋼板은 50×200×30(mm)의 小板으로 절단한 후 압연방향과 직각 방향으로 깊이 25mm로 용융선에 대해 용착금속쪽으로 45° V 홈을 加工하였고, Table 2와 같은 條件으로 잠호 熔接(Submerged arc welding)을 실시했다. 層別 熔接순서는 Fig. 1과 같다. 多層熔接된 HAZ부는 서로 다른 熱履歷 때문에 다양한 組織이 형성되고 있다.

Photo 1은 Fig. 2의 (a)에서 보여주는 Toe HAZ의 組織사진이다. A지역은 페라이트(Ferrite)와 퍼얼라이트(Pearlite)의 網狀結晶組織과 B지역은 중간정도의 結晶組織이며 C지역은 再結晶된 미세한 HAZ組織으로 되어있다.

한편 Fig. 2의 (b)에서 중앙부에서는 層別로 熔

Table 1. Chemical composition and mechanical properties

(a)Chemical composition,(wt%)							
	C	Si	Mn	P	S	Nb	Sol Al
SS41	0.19	0.06	0.64	0.012	0.014	-	-
SM53B	0.16	0.44	1.35	0.02	0.003	0.027	0.047
(b)Mechanical properties							
	Yield strength (kgf/mm ²)		Tensile strength (kgf/mm ²)		Elongation (%)		
SS41	26.5		43.2		42.4		
SM53B	38		54		26.7		

Table 2. Welding condition

Heat input (KJ/cm)	Pre-heating temp.(°C)	Current (A)	Voltage (V)	Welding speed (cm/min)	Wire dia. (mm)
30	200	650	35	49	4.0

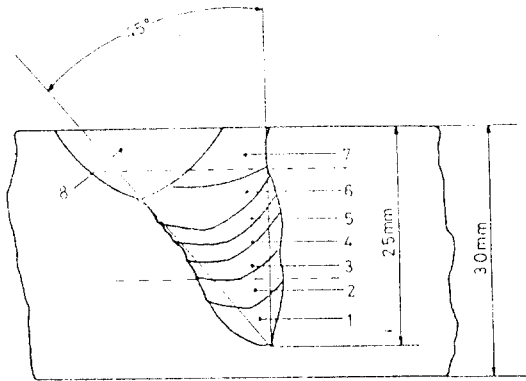
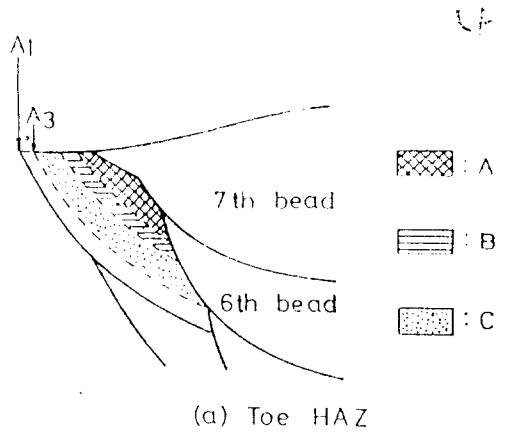
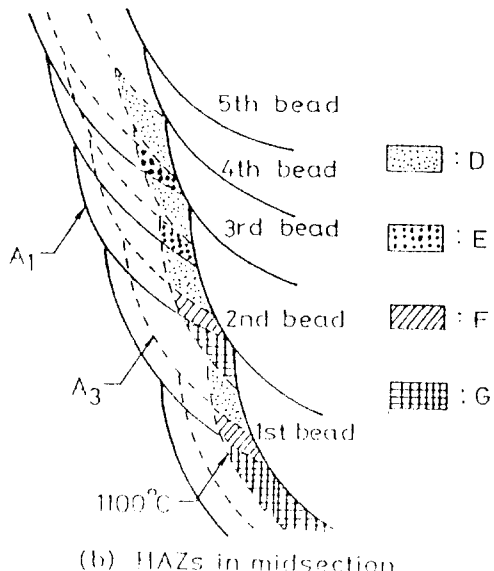


Fig. 1. Welding configuration.

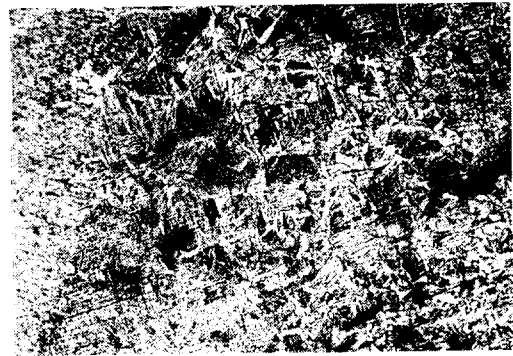


(a) Toe HAZ



(b) HAZs in midsection

Fig. 2. Schematic illustration of HAZs associated with welding thermal cycles.



(a)



(b)

Photo 1. Microstructures in toe HAZs (a)SS41, (b)SM53B

履歷 때문에 다양한 HAZ組織이 나타나고 있다. 이를 層別로 구분하여 관찰해 보기로 한다.

Photo 2는 SS41 및 SM53B 鋼 熔接部에서 板 중앙부의 용융경계에 접한 HAZ組織을 보인 것이다. 첫번째 비이드(1st bead) 근처의 組織을 보면 G區域은 A_3 變態溫度 이상에 의해 組織이 형성된 후 다음 bead에 의해서 일종의 熱處理를 받게 된다. 따라서 마르텐사이트(Martensite) 組織이 템퍼드 마르텐사이트(Tempered martensite) 組織으로 변화되어 나타나고 있다. 즉 A_1 과 A_3 變態 온도 사이에 의해 熱處理를 받은 組織으로서 페라이트와 퍼얼라이트 組織이 주종을 이루고 있으며 약간의 베이나이트(Bainite) 組織도 혼재되어 나타나고 있다. E區域의 組織은 F區域과는 달리 상당히 미세화한 傾向을 보이고 있다. 두번째 비이드 근처의 HAZ組織은 첫번째 비이드 근처의 組織과 유사하게 관찰 되었다. 그러나 세번째, 네번째, 다섯번째로 層別熔接을 실시해 나갈때는 비이드幅이 45° 방향으로 넓어지기 때문에 첫번째, 두번째 비이드의 HAZ 組織과는 현저히 다른 組織을

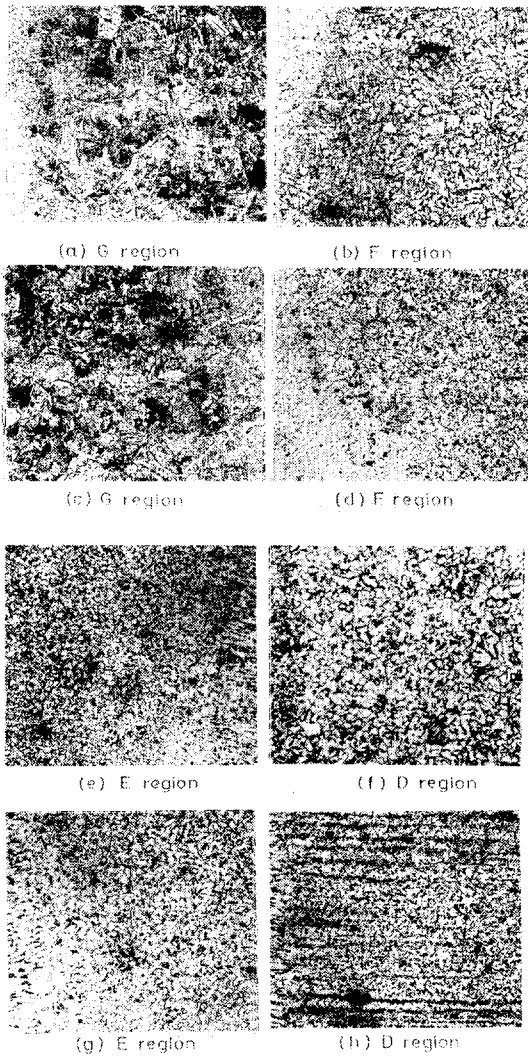


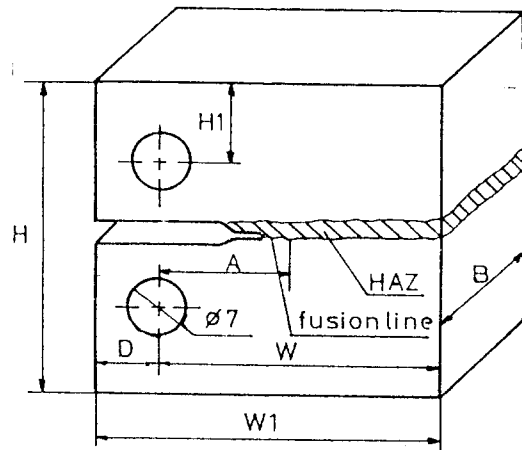
Photo 2. Microstructures of various HAZs in midsection for SS41 and SM53B weldment.

(a),(b)SS41 (c),(d)SM53B
(e),(f)SS41 (g),(h)SM53B

보였다. 즉 지속적인 용접으로 인한 용접열과 비이드간의 간격이 좁아지기 때문에 A₃변태온도 이상에서 발생했던 조직들이 再結晶化하여 微細組織으로 변화한다. 따라서 D, E區域과 같이 미세한 페라이트와 퍼일라이트組織이 주종을 이루고

있다. 試片의 채취는 세번째~여섯번째 사이에서 이루어졌으며 notch의 방향이 압연방향과 직각이되게 하고 垂直용융선이 試片의 중앙부에 위치하도록 한 다음 두께 1.5mm의 금속 톱을 이용하여 길이 14.75mm까지 加工한 후 幅 방향으로 두께 0.14mm의 cut off wheel을 사용하여 길이 2.0mm까지 加工하였다. 이상의 試片에 대해 다시 길이 2.0mm의 예龜裂을 ASTM E-647⁵⁾에 의거하여 생성시켰다.

Fig. 3은 완성된 試片이며 PWHT材는 熱處理를 실시한 후 notch 및 예龜裂을 내었다. 한편 PWHT는 1/2CT試片 및 熔接小板을 각각 220°C/hr의 가열속도로 650°C까지 가열했으며 유지시간은 1/4hr, 40hr이었다. 한편 熱處理로 인한 HAZ의 機械的 性質의 변화를 알아보기 위해 微小硬度試驗을 실시했다. Table 3은 그 結果를 보인 것으로서 PWHT를 실시함에 따라 熔接HAZ의 硬度는 감소하고 있고 材料의 依存性도 있음을 볼 수 있다.



W1=31.25, W=25.0, B=12.5, H=30.0,
H1=8.125, A=12.5, D=6.25

Fig. 3. Compact tension specimen for fatigue test.

2.2. 腐蝕疲勞實驗

本 實驗에 사용된 시험기는 용량 25ton의 전기

Table 3. Hardness(Hmv) in HAZs

	as-weld	PWHT 1/4hr		PWHT 40hr	
		1/2CT	weld block	1/2CT	weld block
Hardness value	250.6	217.3	223.6	195.5	198
Hardness value	294.3	254.4	258.1	225.1	239.9

유압식 피로시험기 이며 疲勞實驗은 실온 大氣中에서 응력비 0.05, 최대하중 390kgf, 최소하중 20kgf, 반복속도 3Hz, sine파형으로 일정하게 하였다. 腐蝕疲勞實驗은 3.5% NaCl 溶液下에서 실시 하였으며 溶液의 순환량은 200 ml/min로 하였고 試片이 腐蝕溶液에 완전히 잠긴 상태에서 실시 하였다. 또한 실험이 진행되는 동안 용액의 pH는 8로 일정하게 유지하였다. 한편 균열이 성장되어 갈때 용융선으로 부터 약 1.5mm이상이 이탈되었을 경우의 시편은 본 실험자료로부터 제외시켰다.

3. 實驗 結果 및 考察

Fig. 4, 5는 SS41과 SM53B鋼의 母材 및 용접재를 대상으로 疲勞 및 腐蝕疲勞龜裂進展舉動을 應力擴大係數幅(ΔK)과 龜裂進展率(da/dN)과의 關係를 보인 것이다.

여기서 이용된 應力擴大係數는 Scrawley⁶⁾식으로서 다음과 같다.

$$K = (P/B\sqrt{w}) \cdot Y$$

$$Y = 29.6(a/w)^{1/2} - 185.5(a/w)^{3/2}$$

$$+ 655.7(a/w)^{5/2} - 1017(a/w)^{7/2}$$

$$+ 638.9(a/w)^{9/2}$$

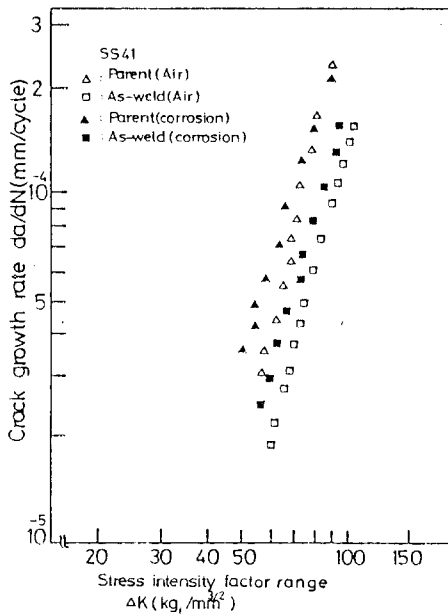


Fig. 4. Crack growth rate versus stress intensity factor range for base metal and as-weld (SS41) in 3.5% NaCl solution, including the air data.

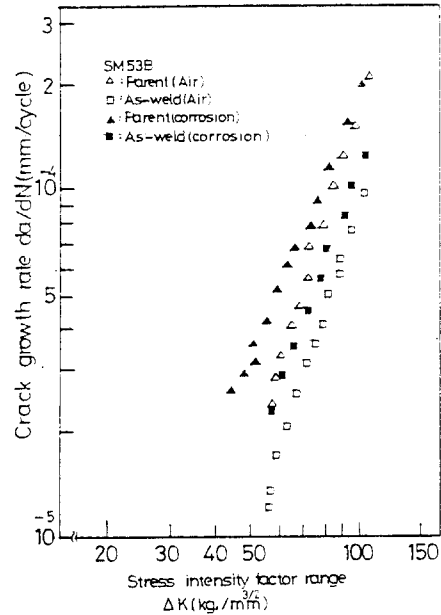


Fig. 5. Crack growth rate versus stress intensity factor range for base metal and as-weld (SM53B) in 3.5% NaCl solution, including the air data.

- P : 작용하중 B : 試片두께
 a : 龜裂길이 w : 하중점에서 이면 가지의 거리

우선 大氣中 및 3.5% NaCl 溶液下에서 龜裂進展舉動을 보면 두材料 모두 용접재의 龜裂進展率이 일정 (ΔK)에서 母材에 비해 감소하고 있다. 그 이유로 생각할 수 있는것은 첫째 : 溶接部에 잔존하는 압축殘留應力の 影響이다. 즉 溶接HAZ의 龜裂進展에 요하는 應力擴大係數가 압축殘留應力에 의해 $K_{eff} = K_{applied} - K_{compressive}$ 가 되어 용접재의 龜裂進展이 母材에 비해 감소하게 된다. 둘째 : 龜裂進展경로의 복잡성이다. 다시말해 溶接HAZ와 같이 組織의 불연속성, 결함등의 影響으로 龜裂進展경로가 복잡하기 때문에 母材에 비해 龜裂進展이 감소하는 것으로 여겨진다.

한편 腐蝕疲勞龜裂進展舉動을 살펴보면 두材料 모두 大氣中에 비해 다소나마 증가하고 있다. 이 같은 傾向은 앞서 보고된⁷⁾ 면외굽힘, 고주파수實驗에서 主龜裂갈림현상 및 主龜裂 주위에서 제2龜裂의 발생등에 의해 腐蝕環境에서 龜裂進展이 大氣中에 비해 지연되고 있었던 양상과는 정반대

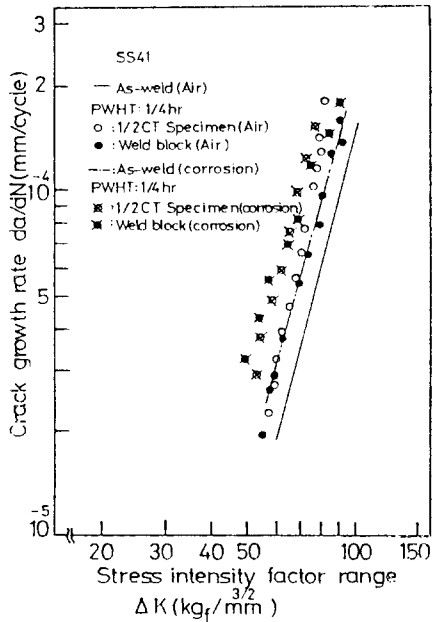


Fig. 6. Crack growth rate versus stress intensity factor range for PWHT specimens and as-weld in 3.5% NaCl solution, including the air data.

이며 이는 腐蝕疲勞龜裂進展이 주파수 및 荷重方式에 依存性이 있음을 시사해 주고 있다. 또한 腐蝕環境이 龜裂進展에 미치는 影響은 (ΔK)가 작은 영역에서 현저하다가 (ΔK)가 증가함에 따라 감소하는 傾向을 보이고 있다. 이는 (ΔK)가 증가할수록 試片의 순 단면부가 작아지기 때문에 環境的 인자보다는 機械的 인자가 더 크게 지배되기 때문으로 풀이할 수 있으며 이러한 傾向은 지금까지의 腐蝕疲勞의 研究와 잘 일치하고 있다.⁸⁾

Fig. 6, 7은 SS41, SM53B鋼 熔接鋼板에서 1/2 CT試片으로 加工한 후 1/4 시간 熱處理를 실시한 PWHT材와 殘留應力이 존재하는 것으로 생각되는 Weld block을 같은 條件으로 熱處理한 후 1/2 CT試片으로 加工한 PWHT材에 대해 疲勞 및 腐蝕疲勞 龜裂進展舉動을 보인 것이다. 大氣中에서의 龜裂進展舉動을 보면 두 材料 공히 용접재에 비해 PWHT材의 龜裂進展이 보다 증가하고 있다. 이는 微小硬度實驗結果에서 확인할 수 있듯이 PWHT로 인해 熔接HAZ가 연화되고 이로 인해 龜裂이 進展되어 갈때 龜裂선단에서 소성장의 형성이 용이하기 때문이며 또한 PWHT로 인해 殘留應力의 풀림현상에 기인하는 것으로 여겨진다.

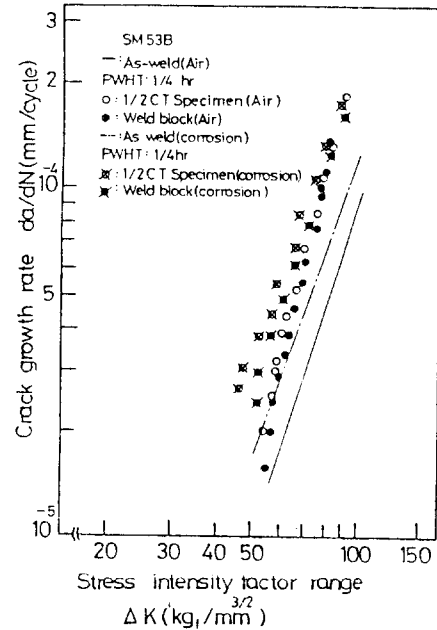


Fig. 7. Crack growth rate versus stress intensity factor range for PWHT specimens and as-weld in 3.5% NaCl solution, including the air data.

한편 3.5% NaCl 溶液下에서 龜裂進展舉動을 살펴보면 우선 SS41인 경우, 腐蝕溶液下에서 1/2 CT 試片 및 Weld block의 PWHT材에 있어서 龜裂進展은 大氣中에 비해 증가하고 있다. 이는 앞선 結果와 같은 傾向이며 Mode I 荷重方式과 저 주파수 腐蝕疲勞에서는 龜裂이 進展해 나갈 때 龜裂선단에서 腐蝕작용이 순수하게 이루어지고 있기 때문으로 考察된다. 또한 PWHT材의 腐蝕疲勞 龜裂進展舉動을 살펴보면, 1/2CT 및 Weld block의 PWHT가 거의 같은 傾向을 보이고 있다. 그러나 만약 탄화물 형성원소를 함유하는 鋼일 경우에는 殘留應力이 더 큰 Weld block의 PWHT材가 PWHT시 殘留應力이 풀리는 과정에서 Temper취화를 초래하여 1/2CT試片에 비해 龜裂進展이 더 증가되리라고 추정된다.⁹⁾

한편 SM53B 鋼의 경우, PWHT材들의 疲勞 龜裂進展은 용접재에 비해 증가하고 또한 PWHT材들의 3.5% NaCl溶液下에서 龜裂進展은 大氣中에 비해 증가하고 있음은 SS41의 경우와 같은 傾向을 보이고 있다. 그러나 3.5% NaCl溶液下에서 龜裂進展을 보면 1/2CT試片의 PWHT材가 Weld block의 PWHT材에 비해 증가하고 있다. 이는

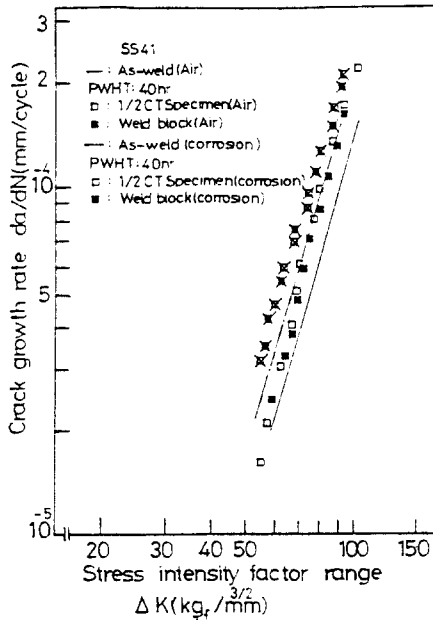


Fig. 8. Crack growth rate versus stress intensity factor range for PWHT specimens and as-weld in 3.5% NaCl solution, including the air data.

本 材料 역시 탄화물 형성원소를 포함하고 있지 않은 점에서 SS41과 같으나 반복하중하에서 龜裂 進展은 材料 依存性이 있음을 시사해주고 있다.

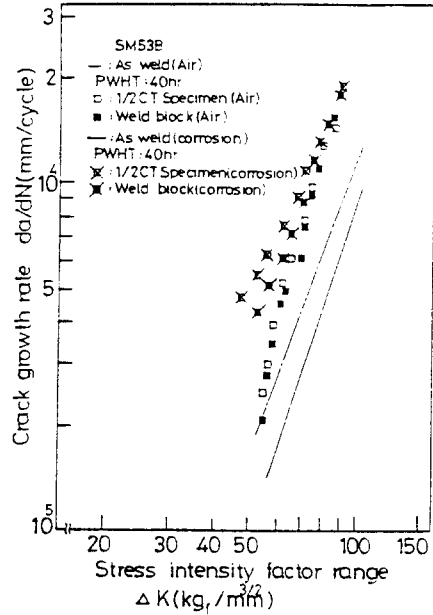


Fig. 9. Crack growth rate versus stress intensity factor range for PWHT specimens and as-weld in 5% NaCl solution, including the air data.

Fig. 8, 9는 SS41鋼 및 SM53B鋼板을 1/2CT 試片으로 加工한 후 40시간 熱處理를 실시한 PWHT 材와 Weld block을 같은 熱處理 條件으로

Table 4. Experimentally determined coefficients for $da/dN = C(\Delta K)^m$

(a)		SS41	
	As-Weld	PWHT(1/4hr)	PWHT(40hr)
		1/2CT	1/2CT
		Weld block	Weld block
	<i>m, C</i>	<i>m, C</i>	<i>m, C</i>
Air	3.1, 9.1×10^{-11}	5.2, 6.1×10^{-11} 4, 2.5×10^{-12}	3.5, 1.8×10^{-11} 3.9, 2.6×10^{-12}
Corrosion	2.9, 5.4×10^{-10}	3.7, 1.1×10^{-11} 3.4, 4.5×10^{-12}	
(b)		SM53B	
	As-weld	PWHT(1/4hr)	PWHT(40hr)
		1/2CT	1/2CT
		Weld block	Weld block
	<i>m, C</i>	<i>m, C</i>	<i>m, C</i>
Air	2.9, 1.3×10^{-10}	3.7, 8.8×10^{-12} 4, 2.2×10^{-12}	3.6, 1.2×10^{-11} 3.6, 1.1×10^{-11}
Corrosion	2.8, 1.8×10^{-10}	3.0, 2.0×10^{-10} 3.0, 1.6×10^{-10}	2.4, 6.0×10^{-10} 2.8, 4.6×10^{-10}

PWHT를 실시한 후 1/2CT 試片을 채취한 PWT 材의 疲勞 및 腐蝕疲勞龜裂進展舉動을 應力擴大係數幅과 龜裂進展率과의 關係를 보인 것이다. 우선 SS41의 경우 大氣中 및 3.5% NaCl 溶液下에서 1/2CT 試片과 Weld block의 龜裂進展은 거의 같은 傾向을 보이고 있다. 이는 Table 3에서 확인할 수 있는 것처럼 1/2CT試片의 HAZ평균硬度는 195.5이고 Weld block은 198.0 으로서 40시간으로 장시간 PWHT를 실시했을 때 熱處理 效果가 거의 같기 때문에 여겨진다. 또한 腐蝕疲勞龜裂進展舉動은 大氣中에 비해 증가하고 있으며 大氣中 및 3.5% NaCl溶液下에서 PWHT材들의 龜裂進展은 용접재에 비해 약간 증가하는 傾向을 보이고 있다.

한편 SM53B鋼의 경우에는 Fig. 9에서 볼 수 있는 것처럼 大氣中 및 3.5% NaCl 溶液下에서 PWHT材들의 龜裂進展은 용접재에 비해 상당히 증가하고 있고 또한 1/2CT試片 및 Weld block의 PWHT材들에 관계없이 3.5% NaCl 溶液下에서의 龜裂進展이 大氣中에 비해 증가의 幅이 SS41에 비해 크다는 것을 알 수 있다. 이는 40시간으로 장시간 동안 熱處理를 실시했다 할지라도 熱處理 效果는 材料의 化學的 成分에 따라 龜裂進展에 미치는 影響이 다르다는 것을 시사해 주고 있다. 이상의 龜裂進展舉動에 대해 Paris방정식($da/dN=C((\Delta K))^m$)을 적용시켜 지수 m값과 材料상수 C값을 구하여 정리한 것이 Table 4이다.

Table 4에서 볼 수 있는 것처럼 3.5% NaCl 溶液下에서 지수 m값은 大氣中에 비해 감소하는 傾向이 있으며 C값은 大氣中에 비해 현저히 증가하였다. 이 같은 사실에서 腐蝕疲勞龜裂進展舉動의 평가는 지수 m값 보다는 材料상수 C값에 의한 것이 보다 타당성이 있으리라고 考察된다.

5. 結 論

1. 용접재의 腐蝕疲勞龜裂進展率은 母材에 비해 감소했다.
2. 腐蝕環境이 龜裂進展에 미치는 影響은 (ΔK) 가 낮은 區域에서 현저하지만 (ΔK) 가 증가함에 따라 감소하는 傾向이 있었다.
3. 疲勞 및 腐蝕疲勞龜裂의 進展舉動은 材料의 化學的 成分, 熱處理 條件, 實驗條件등에 依存性이

있었다.

4. 3.5% NaCl 溶液下에서 SS41, SM53B鋼 용접재를 1/4hr, 40hr로 PWHT를 실시했을 때 PWHT材의 龜裂進展率은 용접재에 비해 증가했다.

5. 腐蝕疲勞實驗에서 얻어진 Paris 방정식의 지수 m값은 大氣中에 비해 감소하며 상수 C값은 증가하는 傾向이 있었다.

謝 辭

本 研究는 1985년도 産學協同財團의 研究費 支授에 의해서 이루어진 研究結果의 일부로서, 이 研究를 수행할 수 있도록 支授하여 주신 財團에 진심으로 感謝를 드립니다.

6. 參考 文獻

1. "Fatigue Testing of Weldment", A Symposium Presented at May Committee ASTM, Toronto, Canada, 1-6 May, 1977, pp. 96.
2. T. R Gurney, "Fatigue of Welded Structures", Cambridge University Press, 2nd ed., 1980.
3. 金屬の割れ破壊 その解析と防止對策, pp.192.
4. 鄭世喜, "高張力鋼 熔接熱影響部の 熔接後熱處理 胞化に關する研究", 日本 東北大學 博士學位 論文(1976).
5. "Standard Test Method for Plane Strain Fracture Toughness of Metallic Materials", Annual Book of ASTM Standards, part 10 E399-78a, (1980).
6. J. F Knott, "Fundamentals of Fracture Mechanics", pp.132.
7. 정세희, 김태영, 나의균, "海水環境에서 鋼 熔接部の 環境強度評價에 관한 研究(I)", 대한용접학회지 6권 2호, 1988.
8. J. G Opdam, "Oceanlogy International 75, Vol 10, 1975, pp. 3-6.
9. G. M Gordon, "Proceedings of International Conf. on SCC and Hydrogen Embrittlement of Iron Base Alloys", Unieux France, 1973.