

研 究 論 文

大韓熔接學會
第6卷, 第2號, 1988年6月
Journal of the Korean
Welding Society
Vol. 6, No. 2, Jun., 1988

海水環境에서 鋼 熔接部の 環境強度評價에 관한 研究(I)

—High Cycle 腐蝕疲勞—

鄭世喜* · 金台永* · 羅義均**

Study on the Environmental Strength Evaluation of Welded Steel Joint in Seawater(I)

—Corrosion Fatigue for High Cycle—

S.H. Chung, T.Y. Kim, E.G. Na

Key Words : PWHT(용접후열처리), HAZ(용접열영향부), Corrosion Fatigue(부식피로), Singularity(특이성), Sensitivity(민감도), Crack Branching(균열갈림), Corrosion Products(부식생성물), Acceleration Factor(가속계수), Retardation Phenomenon(지연현상).

Abstract

The effects of PWHT (post weld heat treatment) and stress simulating the residual stress during PWHT in weld HAZ of low and high strength steels on corrosion fatigue crack growth were evaluated.

The obtained results are summarized as follows.

1. Fatigue crack growth rate of HAZ in air and 3.5% NaCl solution was slower than that of parent due to the singularity in weld HAZ.
2. In the case of HT-80, 3.5% NaCl solution acts to accelerate the crack growth for all specimens, and the sensitivity of as-weld to corrosion environment was the greatest among other PWHT specimens.
3. Corrosion fatigue crack growth of parent, as-weld and PWHT specimens for SS41 as well as SM53B was retarded in comparison with the fatigue crack growth in air.
4. There was a tendency that crack growth of PWHT specimens subjected $10kgf/mm^2$ was faster than that of PWHT specimens without stress during PWHT.
5. The retardation phenomenon of crack growth in corrosion environment is attributed to the crack branching, decreased ΔK due to the corrosion products and multi-cracks

* 전북대학교 공과대학 정밀기계공학과

** 전북대학교 대학원

1. 緒 論

海低의 資源開發이 世界的으로 活發해지고 있어서 海洋構造物에 대한 設計 및 技術의 開發과 研究가 絶실해지고 있다. 특히 이들 構造物은 近年에 大型化, 高速化 및 效率化를 지향하고 있어서 이에 使用되는 材料도 高強度, 高靱性, 耐蝕성과 더불어 때로는 輕量性이 要求되고 있다.

따라서 이와같이 力學的으로나 環境的으로 가혹한 조건하에서 機械나 構造物이 장기간에 걸쳐 충분한 신뢰성을 갖게하기 위해서는 金屬材料에 미치는 環境效果의 해명과 環境強度 設計基準이 시급히 要求되고 있다.

한편, 海洋構造物의 파손은 많은 경우 熔接部에서 시작되고 있다. 熔接部 특히 熔接熱影響部 (heat affected zone: HAZ)는 熔接熱cycle의 상이와 熔接시의 여건등에 의해서 매우 복잡하고 다양한 組織이 생성되어 強도와 靱性等 機械的 性質이 복잡하게 변화되고 있다. 뿐만아니라, 熔接部에는 熔接시에 發生하게 되는 三軸性的 불균일한 殘留應力과 수소의 吸收 그리고 熔接 變形이 복합적으로 작용하고 있어서 이들은 熔接 HAZ의 破壞靱性を 저하시키는 因으로 되고 있다. 일반적으로 HAZ의 機械的 性質의 改善과 破壞靱性的 向上을 위하여 熔接後熱處理(post weld heat treatment: PWHT)를 실시하게 된다. 지금까지의 研究에 의하면,¹⁾²⁾ HAZ의 破壞靱

性은 PWHT에 의해서 개선 되지만 경우에 따라서는 temper脆化와 비슷한 再熱脆化가 發生되고 있으며, 더우기 熔接部에 잔존된 殘留應力은 PWHT시에 炭化物的 粒內, 粒界析出을 유발하여, 脆化를 촉진하고 있음이 靜, 動的 破壞靱性實驗을 통해서 밝혀지고 있다. 그러나 PWHT材를 대상으로 하여 破壞의 주요 原因의 하나로 되고 있는 腐蝕疲勞에 관해서 살펴본 研究報告는 그 수가 많지 않다.

따라서 본 研究에서는 이에 관한 基礎的 研究의 일환으로 構造物鋼材의 熔接HAZ를 대상으로 하여 PWHT가 腐蝕疲勞龜裂進展舉動에 미치는 影響을 high cycle 疲勞實驗을 통해서 考察하고자 한다.

2. 實驗 方法

實驗에 使用된 材料는 SS41, SM53B, HT-80鋼으로서 각각의 化學的 成分과 상온에서의 機械的 性質은 Table 1과 같다.

熔接試片을 얻기 위해 150×600(mm)의 크기로 절단된 소판에, Fig.1에서 볼 수 있는 바와 같이 압연 방향과 직각으로 길이 5mm와 75°의 V홈을 加工한後 潛弧溶接(submerged arc welding)으로 一層溶接을 실시하였다. 이때 入熱量은 약 30KJ/cm이며 熔接條件은 Table 2와 같다. 疲勞試驗에 使用된 試驗片의 採取는 Fig.1에 도시한 바와 같으며, 採取된 試片은 소정의 PWHT에 제공되었다. 處熱理조건은

Table 1. Chemical compositions and mechanical properties
(a) Chemical compositions (wt. %)

	C	Si	Mn	P	S	Nb	Sol Al				
SS41	0.19	0.06	0.64	0.012	0.014	—	—				
SM53B	0.16	0.46	1.44	0.02	0.05	—	0.29				
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Ti
HT80	0.106	0.26	0.83	0.016	0.05	0.2	0.74	0.46	0.43	0.04	0.018

(b) Mechanical properties

	Yield strength (kgf/mm ²)	Tensile strength(kgf/mm ²)	Elongation (%)
SS 41	26.5	43.2	42.4
SM 53 B	42.2	57.2	27
HT 80	77.6	84.5	24

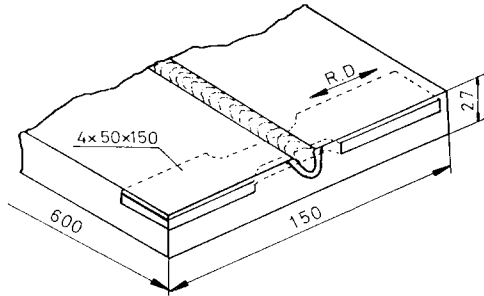


Fig. 1. Welding plate configuration and extraction of specimen

Table 2. Welding condition

Heat input (KJ/cm)	Preheating temperature (°C)	Current (A)	Voltage (V)	Welding speed (cm/min)	Wire diameter (mm)
30	200	450	33	30	4.0

加熱速度 220°C/hr로 650°까지 加熱, 1/4시간동안 유지시킨 다음 노냉시켰다. PWHT과정에서는 熔接部に 잔존된 殘留應力을 0의하여, 一軸引張應力 $\sigma_n = 10\text{kgf/mm}^2$ 을 加하면서 熱處理를 실시하였다.

한편 노치는 試片의 側面을 腐蝕시킨 後, 소정의 組織을 확인하고, 다음 Fig.2에서 볼 수 있는 바와 같이, 노치진행방향이 熔融線근처의 HAZ 粗大組織을 따르도록 하여, 試片의 양측면에 폭 0.15mm, 길이 2mm가 되게 加工하였다.

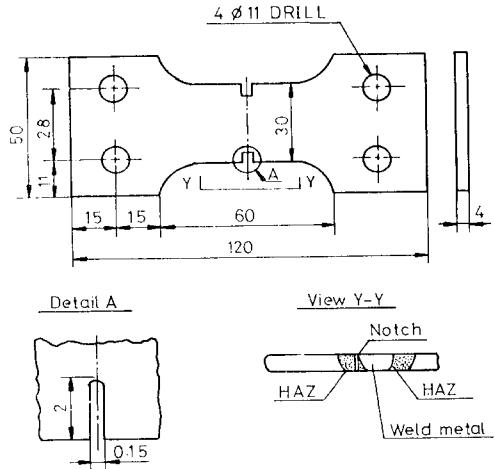


Fig. 2. Specimen dimensions and notch position for fatigue test

이상의 절차에 따라 준비된 試驗片은 疲勞 및 腐蝕疲勞試驗에 제공되었다. 使用된 試驗機는 용량 5 kg·m의 面外굽힘疲勞試驗機로서 反復速度는 30Hz이다. 實驗條件은 一定應力振幅으로 최대굽힘應力이 20kgf/mm², 應力比는 0으로 하였다. 한편 腐蝕疲勞實驗은 순환되는 3.5% NaCl溶液중에서 실시했으며 이때 溶液의 온도는 27~30°C범위였다.

3. 實驗結果 및 考察

Fig. 3, 4, 5는 SS41, SM53B, HT-80鋼의 母材와 as-weld材의 HAZ組織에 대한 大氣中에서의 龜裂進展速度를 應力擴大係數幅 ΔK 로 정리한 것이다. 여기서 應力擴大係數의 계산은 荷重方式이 面外굽힘이고 노치가 양면에 있으므로 Bowie가 제안한³⁾ 다음식에 의해 계산 하였다.

$$K = 1.005\sigma_b \sqrt{a}$$

σ_b : 굽힘應力(kgf/mm²)
 a : 龜裂成長길이(mm)

이들 선도에서 세 鋼모두 HAZ에서 龜裂進展速度가 母材에 比하여 遲延되고 있음을 볼 수가 있다. 이러한 現象을 종래의 研究結果⁴⁾들을 종합하여 판단할 때, HAZ에서는 壓縮殘留應力이 존재하고 또한 노치가 위치한 HAZ粗大組織이 母材에 比하여 정도가 높고 組織의 微細構成이 복잡하여 龜裂이 약간씩 정체될 뿐만아니라, 곧바로 성장하기보다는 選擇의으로 進로를 택하는데 그 원인이 있다고 생각된다.

한편 3.5% NaCl溶液 중에서의 疲勞龜裂進展舉動을 살펴 보면 다음과 같다. Fig.6은 HT-80鋼의 母材및 HAZ에 대한 腐蝕疲勞龜裂進展舉動을 大氣中에서의 것과 더불어 나타낸 것이다. 腐蝕疲勞環境에서의 龜裂進展速度는 母材나 HAZ 다같이 大氣中에 比하여 증가하고 있어서 龜裂進展速度의 腐蝕依存性을 보이고 있다.

여기서, $(da/dN)_{\text{Collision}} / (da/dN)_{\text{air}}$ 를 腐蝕으로 인한 龜裂進展速度의 加速係數⁵⁾라고 할 때, HAZ는 그 값이 약 2-2.5인데 比해서 母材의 경우는 약 1.5로 낮다. 이것은 熔接熱에 의해서 組織의 微視成分의 구성과 結晶粒子의 크기가 다양하게 變化된 HAZ組織이 母材에 比하여 腐蝕에 보다 더 민감하다는 것을 말해주고 있다. 그러나 선도에서 볼 수 있는 것처럼 HAZ의 腐蝕疲勞龜裂의 進展速度가 大氣中에서의와 마찬가지로 母材에 比해 늦어지고 있는데 이는 앞에서 설명한 바와 같이 HAZ의 組織이 母材

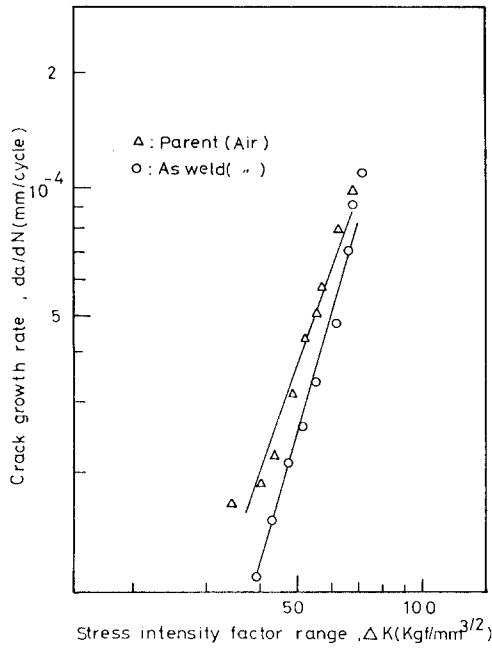


Fig. 3. Crack growth rate versus stress intensity factor range for parent and as-weld of SS41

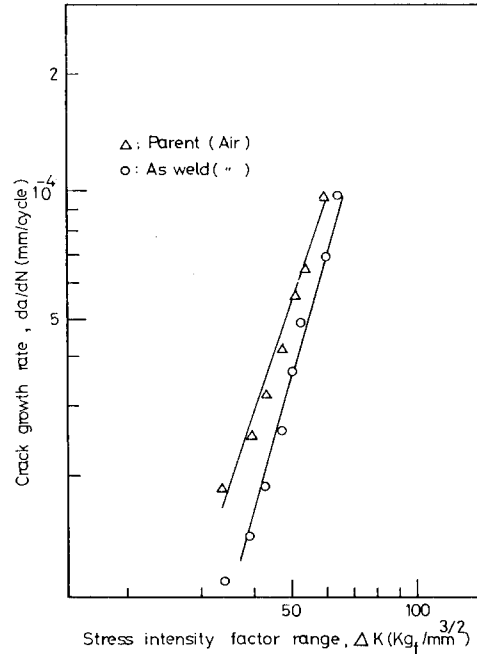


Fig. 4. Crack growth rate versus stress intensity factor range for parent and as-weld of SM53B

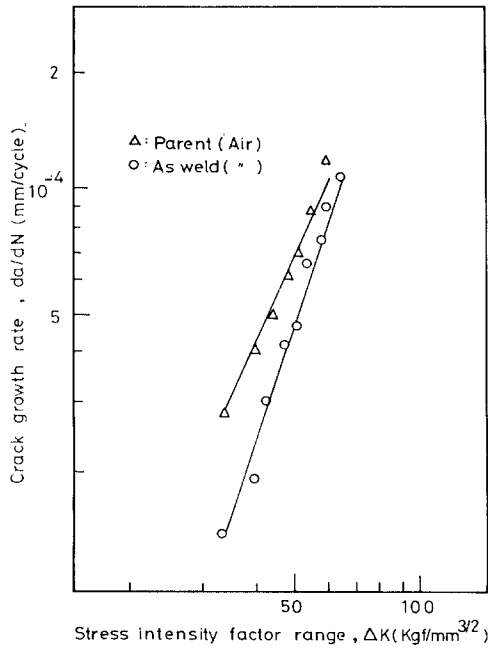


Fig. 5. Crack growth rate versus stress intensity factor range for parent and as-weld of HT 80

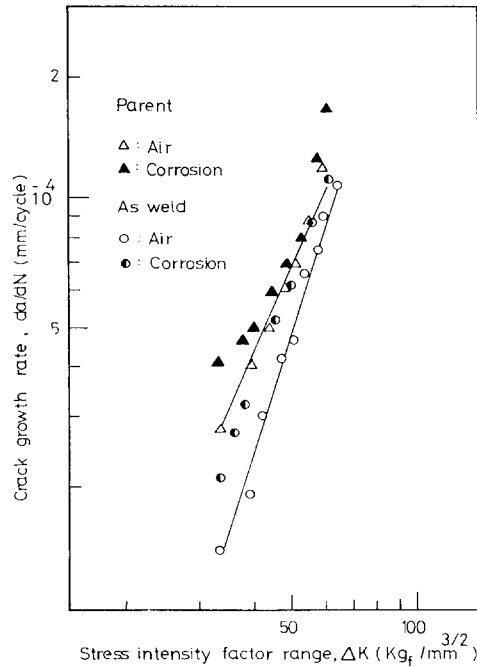


Fig. 6. Behavior of corrosion fatigue crack growth for parent and as-weld of HT80, including the air data

에 비하여 복잡하게 변화되어 있어서, 龜裂의 進展 徑路가 불규칙해지는데 그 원인이 있다고 본다.

Fig. 7은 SS41鋼과 SM53B鋼의 HAZ에 대한 腐蝕 疲勞 舉動을 $a-N$ 곡선으로 나타낸 것이다. 여기서 疲勞 舉動을 앞선 HT-80鋼의 경우와는 달리 $a-N$ 곡선으로 나타낸 것은, 腐蝕溶液중에서 龜裂의 發生과 進展 舉動이 photo.1에서 볼 수 있는 바와 같이 大氣中에서의 舉動과 상이하기 때문이다. 그것은 主 龜裂의 불규칙한 갈림(branching) 現象 및 主 龜裂 주변에 副 龜裂(subcracks) 등이 형성되고 있는 사실이다. 이와같은 상태에서 龜裂進展 舉動을 應力擴大係數를 써서 평가한다는 것은 무의미하기 때문에, 이들 材料의 腐蝕 疲勞 舉動은 壽命과 이에 대응하는 반복 회수로 평가하는 것이 보다 타당성이 있다고 본다. 따라서 이들 $a-N$ 곡선을 살펴보면 大氣中에서는 두 材料(SS41, SM53B鋼) 모두 母材에 비하여 as-weld의 疲勞 壽命이 길어지고 있음은 HT-80鋼의 경우와 같다. 이를다시 大氣中과 腐蝕溶液중에서 疲勞 舉動을 비교해 보면 두 材料 모두 母材의 경우에는 腐蝕 疲勞 壽命이 다소 길어지나 큰 차이가 없는데 반하여 HAZ의 경우는 腐蝕溶液중에서 疲勞 壽命이 현저하게 증가하고 있다. 이같은 결과는 腐蝕環境에서의 龜裂

進展이 大氣中에 비해 증가한다고 하는 종래의 研究 結果와는 상이함을 알 수가 있다.

다음으로 이와같은 腐蝕 疲勞 舉動을 갖는 熔接材를 PWHT했을때의 疲勞 및 腐蝕 疲勞 舉動을 살펴보기로 한다.

Fig. 8은 HT-80鋼 熔接部에 殘留應力이 존재하지 않는 즉 無應力상태에서 PWHT한 경우의 $da/dN-\Delta K$ 선도이다. 腐蝕溶液중에서 龜裂의 進展速度가 大氣中에 비해서 약간 증가하고 있으나 as-weld材에 비해서는 거의 변화가 없다. 이는 PWHT로 인해서 轉位 密度가 낮아지는등 組織의 개선이 이루어지기 때문에 腐蝕環境에 대한 민감도가 감소된 것으로 생각된다.

한편 SS41 및 SM53B鋼의 경우는 Fig. 9와 같다. 우선 SS41鋼의 경우 as-weld材를 기준으로 하여 疲勞 壽命을 살펴보면, 大氣中에서는 PWHT材의 疲勞 壽命이 감소되고 있으나, NaCl溶液중에서는 PWHT材가 as-weld材에 비하여 疲勞 壽命이 길어지고 있다. 또한 腐蝕溶液下에서 PWHT材의 疲勞 壽命은 大氣中에 비해 증가되고 있음은 앞선 SS41鋼의 as-weld材의 腐蝕 疲勞 舉動과 유사함을 알 수 있다.



(a) SS41 $N = 1 \times 10^5$ cycles



(b) SM53B $N = 1 \times 10^5$ cycles

Photo. 1. Crack growth behaviour for as-weld in corrosion environment.

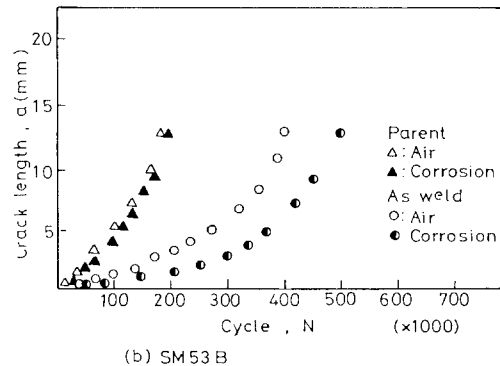
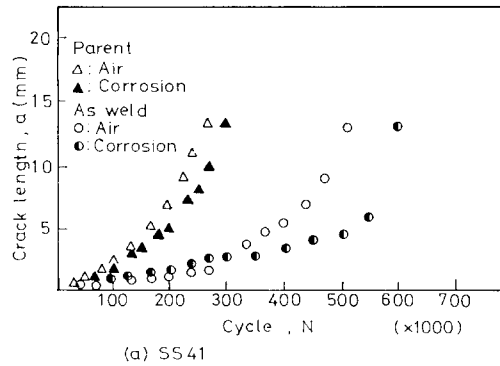


Fig. 7. Crack length versus a number of cycles for parents and as-welds in 3.5% NaCl solution, including the air data

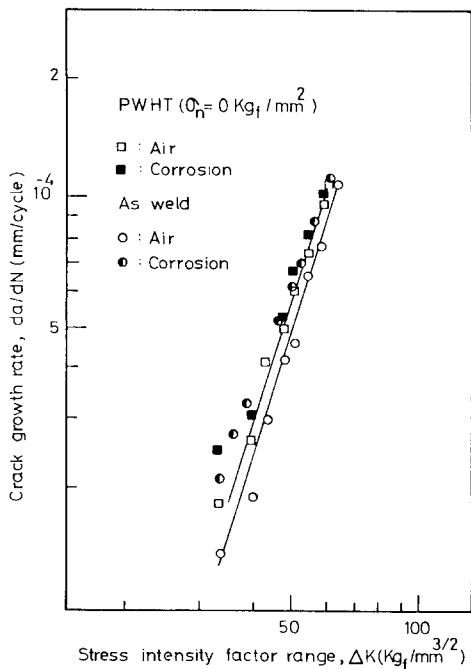


Fig. 8. Behaviour of corrosion fatigue crack growth for as-welds and PWHT specimens of HT-80, including the air data

다음으로 SM53B鋼의 경우는 $a-N$ 선도에서 볼 수 있는 바와같이 SS41鋼과 비슷한 경향을 보이고 있다. 다시말해 腐蝕溶液중에서 PWHT材의 疲勞壽命은 大氣中에 비해 증가하고 있다.

Fig. 10은 HT-80鋼 熔接材를 10kgf/mm^2 의 應力이 작용된 상태에서 PWHT를 한 경우로 大氣中에서나 腐蝕溶液중에서의 龜裂의 進展速度는 熔接材에 비해 빨라지고 있다. 또한 大氣中과 腐蝕溶液중에서의 舉動을 살펴보면, 특히 $\Delta K = 50\text{kgf/mm}^{3/2}$ 이하의 영역에서는 溶液중에서의 進展速度가 大氣中에서의 進展速度에 비하여 현저히 증가하고 있다. 다시 말하여 PWHT 중에 작용된 應力은 腐蝕溶液下에서 龜裂의 進展舉動에 影響을 미치고 있음을 시사해 주고 있다.

Fig. 11은 SS41, SM53B鋼 熔接材에 대해 PWHT중 作用應力 10kgf/mm^2 을 加한 PWHT材의 腐蝕疲勞舉動을 $a-N$ 선도에 표시한 것이다. SS41 및 SM53B鋼의 PWHT시 應力이 作用된 試驗片이 大氣中의 熔接材에 비해 疲勞壽命이 감소하고 있으며, 그 정도는 無應力材보다 더 크다는 것을 확인할 수 있다. 이는 殘留應力을 모형화한 作用應力이 龜裂 進展에 影響

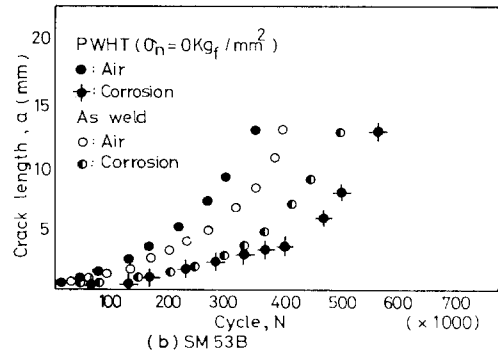
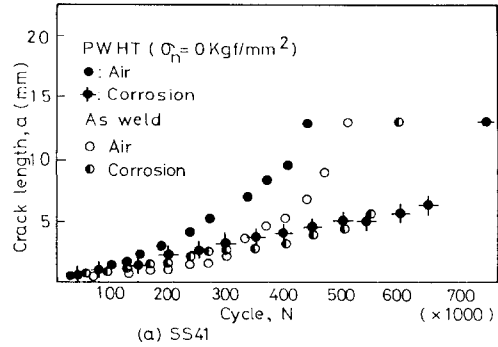


Fig. 9. Crack length versus a number of cycles for as-welds and PWHT specimens in 3.5% NaCl solution including the air data

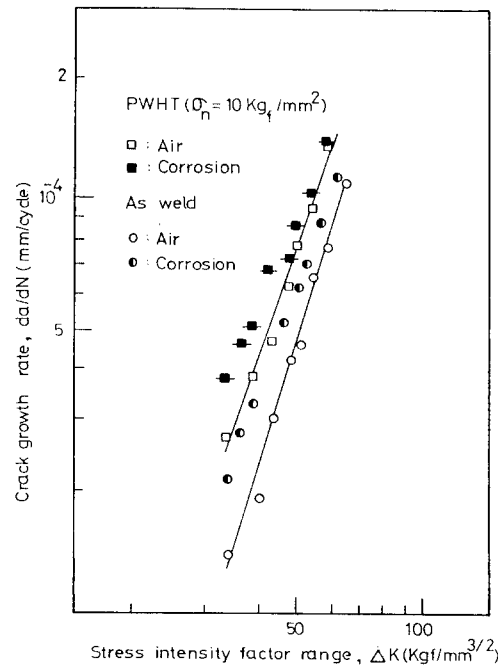


Fig. 10. Behaviour of corrosion fatigue crack growth for as-weld and PWHT specimen(HT-80) subjected to 10kgf/mm^2 during PWHT, including the air data

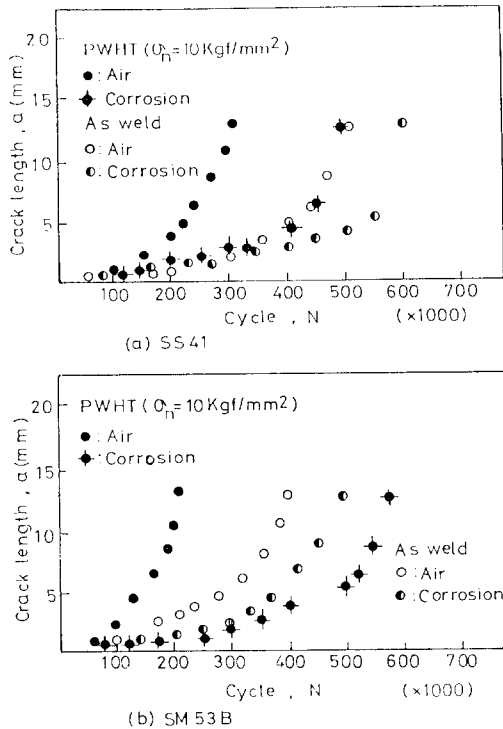


Fig. 11. Crack length versus a number of cycles for as-welds and PWHT specimens subjected to $10\text{kgf}/\text{mm}^2$ during PWHT in air and 3.5% NaCl solution

을 주고 있음을 의미한다.

또한 선도에서 볼 수 있는 바와 같이 두 재료의 PWHT材 모두 腐蝕溶液下에서 龜裂進展은 大氣中에 비해 감소하고 있음은 앞선 結果와 유사하다. 이상의 結果에서 고찰한 바와 같이 3.5% NaCl 溶液下에서 疲勞龜裂進展學動은 材料에 따라 다르게 나타났으며, 특히 SS41 및 SM53B鋼의 경우에는 오히려 大氣中에 비해 主 龜裂의 進展速度가 감소하였다. 이와같은 경향은 종래 腐蝕疲勞實驗結果에 상반되는 것으로서 이하에서 그 원인은 다음과 같이 설명된다.

첫째는 Photo. 1에서 확인할 수 있는 主 龜裂의 갈림(branching) 現象이다. 3.5% NaCl溶液下에서 本實驗에서와 같은 腐蝕疲勞實驗을 실시하면 노치선단에서 변형상태가 대단히 빠르고 HAZ組織의 특이성으로 인해 龜裂갈림現象이 야기된다. 이같은 龜裂갈림現象이 發生하면 龜裂進展에 지배적 역할을 하는 K_{max} 의 값이 다음식에 의해 감소한다.

즉

$$K_{eff} = K_{max}(1-n)$$

여기서 n 은 갈림계수(branching factor)로서 龜裂現象이 發生했을때 $0 < n < 1$ 라고 할 수 있다.

둘째는 腐蝕生成物에 의한 龜裂무뎀(crack blunting)으로 인한 ΔK 의 감소이다. 상기의 原因에 의해 龜裂이 서서히 進展되는 과정에서 腐蝕溶液과 材料의 성분등과 반응하여 腐蝕生成物이 생긴다.

이같은 腐蝕生成物의 양은 주파수가 높을수록 龜裂선단근처의 局部溶液(local solution)과 용기안의 腐蝕溶液(bulk solution)과의 혼합이 잘 이루어지게 되고 또한 大氣中과 접한 상태이기 때문에 산소공급이 훨씬 잘 이루어진 結果, 산화물(Fe_3O_4 , H_2O) 즉 腐蝕生成物이 보다 많이 생성된다.⁶⁾

이들 腐蝕生成物은 應力比가 0인 조건하에서 龜裂 경로에 침전되어 쌓이게 되어, 따라서 龜裂무뎀이 야기되고 아울러 ΔK 의 감소를 초래하게 된다.

세째로 主 龜裂 주위에서 제2龜裂의 發生이다. 龜裂갈림 및 ΔK 의 감소에 의해 龜裂進展速度는 더욱 감소하게 되므로 熔融線외의 다른 熔接部에서 제2龜裂의 發生이 용이하게 된다. 왜냐하면 面外굽힘상태에서는 熔接部 主 龜裂 주위의 변형영역이 넓기 때문이다.

따라서 3.5% NaCl溶液下에서 主 龜裂의 위치인 熔融線주위의 熔着金屬, HAZ등에 존재하는 아주 작은 熔接缺陷, 氣孔등에서 제2龜裂등이 발생하게 된다. 이같이 發生된 제2龜裂등은 試片表面에서 發生하여 表面龜裂의 進展學動과 유사하게 龜裂이 성장하게 된다. 이상에서 龜裂進展의 遲延現象은 龜裂갈림, 腐蝕生成物에 의한 ΔK 의 감소 및 제2龜裂등에 의한 K 의 분산에 기인한다고 요약할 수 있다.

그러나 이같은 現象등에 의해 腐蝕疲勞龜裂進展이 遲延된다 할지라도 溶接部에서 龜裂發生이 된다는 것은 매우 중대한 사실이다. 다시말해 제2龜裂이 發生하게 될 때 溶接構造物의 破壞의 근원이 될 수 있다는 점과 특히 주위環境 이틀테면 온도저하, 충격하중등이 복합적으로 받게되면 불안정 脆性破壞를 유발할 수 있기 때문이다. 이같은 이유때문에 腐蝕溶液下에서 疲勞를 받는 溶接構造物의 안전을 위해서는 設計 및 安定性 검사에 세심한 주의가 필요하다고 생각된다.

4. 結 論

1. 大氣中 및 3.5% NaCl 溶液下에서 鋼 熔接 HAZ의 龜裂進展은 熔接部の 특이성으로 인해 母材보다

낮다.

2. HT-80鋼의 경우, 腐蝕溶液은 龜裂進展을 加速化시켰으며 腐蝕環境에 대한 민감도는 熔接材가 다른 PWHT材에 비해 가장 크게 나타났다.
3. SS41 및 SM53B鋼의 경우, 溶接材 및 PWHT材를 막론하고 腐蝕疲勞龜裂進展은 大氣中에 비해 遲延되었다.
4. PWHT시 作用應力을 받은 PWHT材는 無應力의 PWHT材에 비해 龜裂進展이 빨라지는 경향이 있었다.
5. 腐蝕環境에서 龜裂進展의 遲延現象은 龜裂갈림, 腐蝕生成物에 의한 ΔK 의 감소 및 제2龜裂등에 기인한다.

謝 辭

본 研究는 1985년도 産學協同財團의 研究費 支援에 의해서 이루어진 研究結果의 일부로서 이 研究를 수행할수 있도록 支援하여 주신 財團에 진심으로 感謝 드립니다.

5. 參考文獻

1. 鄭世喜, “高張力鋼 熔接熱影響部 熔接後熱處理脆化에關する研究,” 日本 東北大學 博士學位論文 (1976).
2. 林載奎, “Cr-Mo鋼 熔接熱影響部の 破壞靱성에 미치는 熔接後 熱處理의 影響,” 全北大學校 博士學位 論文(1984).
3. R. Robert et al, “Stress intensity factor for plate bending”, Applied Mech., Vol.34, pp. 777-779, (1967).
4. B. M. Kapadia, “Influence of residual stresses on fatigue crack propagation in electroslog weld”, ASTM, STP648.
5. 中島等, 材料, 第31卷, 第346號, pp.710-716 (1982).
6. R. Van der Velden. “Anomalous fatigue crack growth retardation in steels for offshore applications”, ASTM, STP801, pp.64.