

變厚熔接板材의 疲勞龜裂成長舉動에 미치는 再分布殘留應力の 影響에 관한 研究

A Study on the Influence of Redistributed Residual Stresses on Fatigue Crack Growth Behaviors in the Welded Plate with Various Thickness

차 용 훈*
Yong-Hoon Cha

ABSTRACT

Though the magnitude is decreasing, the compressive residual stress is always distributed during fatigue crack growth near the crack tip. This means that the residual stress is released during fatigue crack growth due to the alternative load.

ΔK_{IV} is modified by using the initial residual stress and the redistributed residual stress in uniform and various thickness welded specimens. The former is denoted by $\Delta K_{IV,eff,i}$ and the latter is denoted by $\Delta K_{IV,eff,r}$.

$\Delta K_{IV,eff,r}$ gives more accurate relations in da/dN vs. ΔK_{IV} curve, however the difference is very small.

1. 서 론

熔接에 의한 接合은 단조나 리벳이음 등 다른 接合方法에 비하여 많은 長點들이 있어 船舶, 航空機, 自動車 등 産業構造物에 널리 이용되고 있는 실정이다. 또한 各種 産業에 適用되는 熔接은 均質材料 및 複合材料 또는 補強材 및 두께가 變化하는 부재등 넓은 領域에 걸쳐서 다양하게 使用되고 있다^{1,2)}.

또한 여러가지 熔接法에서 맞대기熔接 및 T形 熔接 등에 대해서는 熔接部位에서의 缺陷問題, 殘留應力の 問題 등에 관하여 破壞力學的인 解析이 상당히 進行되고 있지만³⁻⁷⁾, 船舶 및 各種 産業構造物 등에 廣範圍하게 使用되고 있는 두께가 다른 板材의 熔接(以下 變厚熔接材)에 대한 破壞力學的인 解析, 즉 이들 接合材내에 存在하는 균열의 應력 확대계수(S. I. F.) K의 解析에 대해서는 정량적인 結果가 나오고 있지 못한 실정이며, 많은 産業에

* 조선대학교 기계공학과

의 應用에 비추어 이 分野에 관한 研究는 극히 미흡하다고 할 수 있겠다.

破壞強度 및 龜裂成長舉動을 評價할때 力學的인 側面에서 제일 먼저 解析되어야 하는 것이 熔接殘留應力(welding residual stress)이 되겠다. 熔接에서의 殘留應力은 다른 어떤 因子들 보다도 疲勞龜裂成長舉動에 影響을 주는 중요한 因子라 볼 수 있기 때문이다.

특히 壓縮殘留應力場(compressive residual stress field)중의 crack은 反復荷重을 받을때 龜裂成長이 지연될 것이며, 引張殘留應力場(tensile residual stress field)중의 균열은 成長이 빨라지는 것으로 報告되고 있다⁸⁾.

반복하중으로 인하여 疲勞龜裂이 성장함에 따라 殘留應力은 再分布될 것이며, 따라서 균열선단 부근의 殘留應力의 분포는 初期殘留應力의 分布와는 다르다고 알려지고 있다⁹⁾. 이로 인하여 疲勞龜裂成長舉動에 주는 影響도 다르게 나타날 것이다.

本 論文에서는 疲勞龜裂을 넣은 시험편에서 구한 각각의 再分布殘留應力값을 유한요소법으로 수치해석하여 구한 K값에 중첩하여 해석하고, 또한 初期殘留應力에 의한 해석결과와 비교, 검토하고자 한다.

2. 실험

2.1 시험편

본 실험에 사용된 재료는 용접구조용 압연강재인 SM58강을 사용하였으며, 재료의 기계적 성질을 파악하기 위해 KS B0801에 따른 제7호 시험편을 제작하여 인장시험을 행하였다.

인장시험편의 형상 및 치수는 Fig. 1에 제시하였으며, SM58강의 화학적 성분과 기계적 성질은

Table 1 Chemical compositions of SM58 steel(Wt %)

C	Si	Mn	P	S	Ni	C	Mo
0.13	0.30	1.27	0.02	0.01	0.12	0.01	0.04

Table 2 Mechanical properties of SM58 steel

Yield Strength (Kg/mm ²)	Tensile Strength (Kg/mm ²)	Elongation (%)	Young's Modulus (Kg/mm ²)
42.1	59.9	34.8	1.94×10 ⁴

각각 Table 1과 Table 2에 제시하였다.

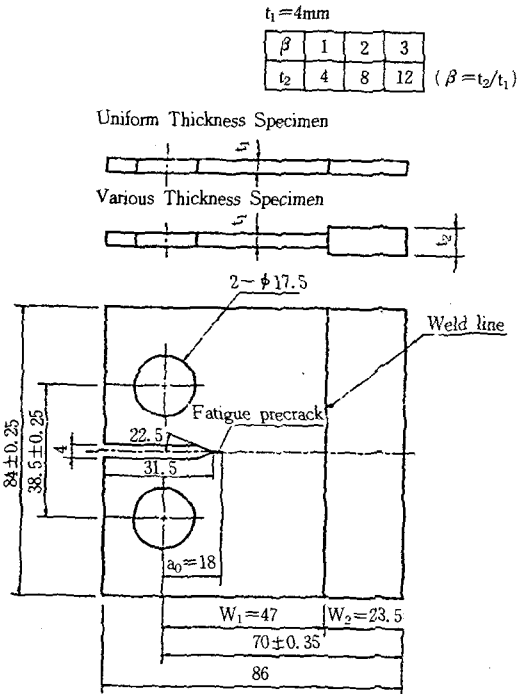


Fig. 1 Geometry of CT specimen(as weld)

피로시험에 사용된 용접시험편은 ASTM Standard E647-83¹⁰⁾에 제시된 CT(compact tension) 시험편에 준하여 제작하였다. 시험편을 얻기 위하여 4mm의 강판은 70mm×90mm로, 8mm 두께의 강판은 40×90mm의 크기로 절단하고 가공한 후에 CO₂ 가스용접기를 사용하여 판재의 전·후면을 각각 1패스(pass)씩 압연방향으로 용접하여 용접시험편을 제작하였다. 용접 와이어는 고려용접봉(주)제의 직경 1.2mm인 50Kg/mm²급 고장력강용 KC-28이었고, 용접 와이어의 화학적 성분은 Table 3과 같다. 용접시 재료의 용접변형을 최소화하기 위하여 구속하여 용접하였다. 모든 시험편은 Table 4에 제시한 조건을 적용하여 제작하였다.

그리고 용접잔류응력을 제거하기 위한 용접후 열처리(PWHT) 조건은 논문(I)¹¹⁾에 제시하였

Table 3 Chemical compositions of welding wire(Wt %)

C	Si	Mn	P	S	Fe
0.08	0.50	1.05	0.013	0.01	Remainder

다.

Table 4 Welding procedure

Welding Method	Weiding Current (A)	Welding Voltage (V)	Welding Speed (mm/min)	Number of Pass	Gas Flow (l)
CO ₂ Gas Welding	150	18	120	1	20

2.2 실험방법

피로시험은 ΔP-일정 피로시험으로서 ASTM E647-83에 준하였으며, 하중제어는 정현파형(sine wave)으로, 하중비(R)를 0.1로 하여 수행하였고, 하중반복수는 20Hz, 실험실 온도는 22°C(실온)로 하였다. 피로시험 조건은 Table 5와 같다.

Table 5 Experimental conditions of fatigue tests

Type (CT)	(Kg)	(Kg)	(Kg)	Ratio	Freq. (Hz)	Mode	Form	(°C)
β=1	450	45	405	0.1	20	Load	Sine	22
β=2	800	80	720	0.1	20	Load	Sine	22
β=3	900	90	810	0.1	20	Load	Sine	22

피로시험시 pre-cracking은 본 실험시의 최대하중보다 20% 큰 하중에서 5%씩 감소시키면서, 기계가공 노치로부터 약 2mm의 예 균열을 넣었다. 전체 초기 균열길이를 하중점으로부터 18mm로 한 다음 본 실험에 들어갔다. 변후용접시험편에서의 피로시험은 변후경계까지만 실시하여 data를 구하였다.

또한 피로균열을 넣은(fatigue cracked) 재분포 잔류응력 측정은, 먼저 피로균열을 넣은 시험편에 대하여 crack이 각각 40mm, 45mm, 52mm 및 57mm가 되도록 성장시킨 후, Fig. 1처럼 crack tip 으로부터 용접선에 수직하게 스트레인 게이지를 접착하여, 반복하중으로 인하여 재분포된 잔류변형을 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 再分布 殘留應力

Fig. 2, 3 및 Fig. 4는 각각 균후용접시험편과 변

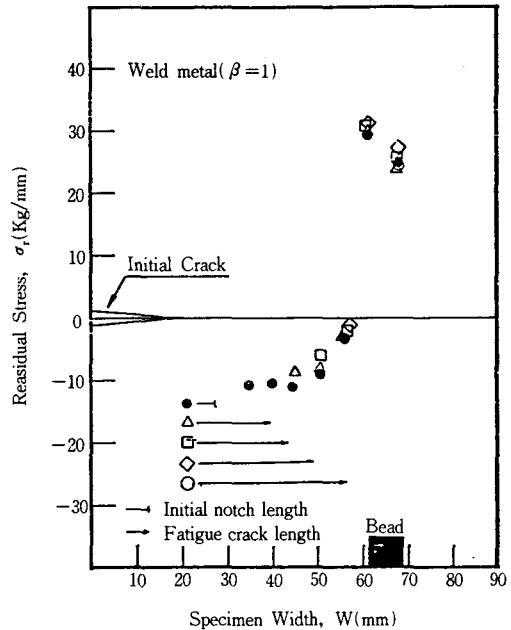


Fig. 2 Redistribution of residual stress caused by fatigue crack propagation(β=1)

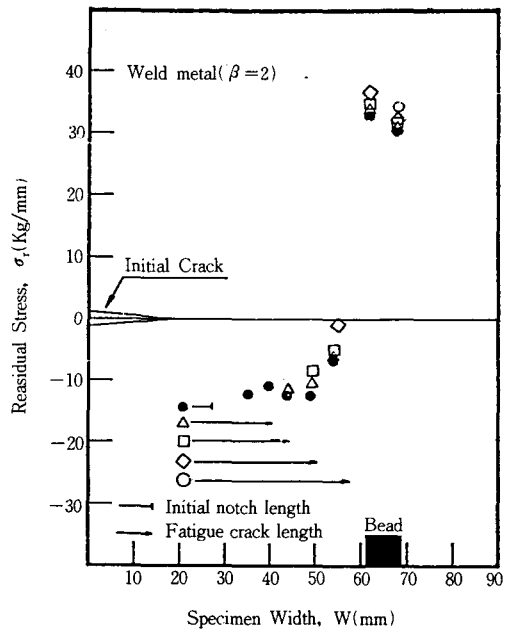


Fig. 3 Redistribution of residual stress caused by fatigue crack propagation(β=2)

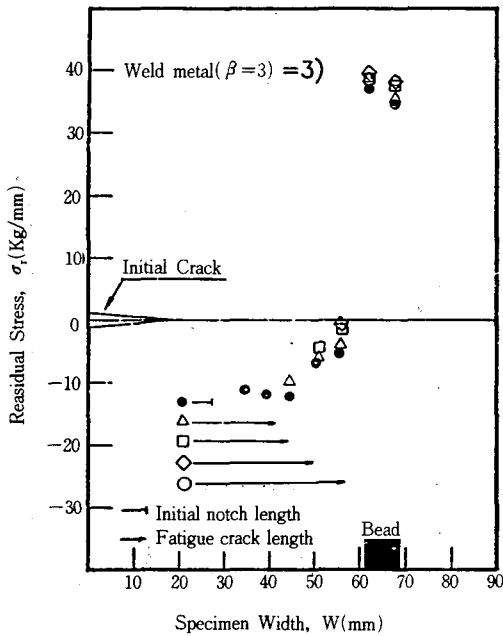


Fig. 4 Redistribution of residual stress caused by fatigue crack propagation ($\beta=3$)

후용접시편에 대하여 반복하중으로 인한 재분포 잔류응력의 측정결과를 plot하여 curve fitting하였다. 초기잔류응력분포와 비교하여, 피로균열이 성장함에 따라 균열선단 주위의 잔류응력이 피로하중으로 인하여 재분포됨을 알 수 있다.

여기에서, 균열은 선단부근의 압축잔류응력장에서 성장하기 시작하고, 균열이 성장함에 따라 균열선단 근방에서는 항상 압축잔류응력이 분포함을 알 수 있으며, 다만 균열이 성장할수록 압축잔류응력의 크기는 감소함을 알 수 있다. 이와같은 이유는 반복하중으로 인하여, 피로균열이 성장함에 따라 잔류응력이 이완되기 때문이라고 생각된다.

3.2 $da/dN-\Delta K_{IV,eff,i}$, $da/dN-\Delta K_{IV,eff,r}$ 사이의關係

Fig. 5는 균후용접시험편에서의 재분포 잔류응력을 감안한 $da/dN-\Delta K_{eff,r}$ 관계를 plot한 것이다.

Fig. 6 및 7은 변후용접시험편에 대하여 초기잔류응력과 재분포 잔류응력을 고려했을 때의

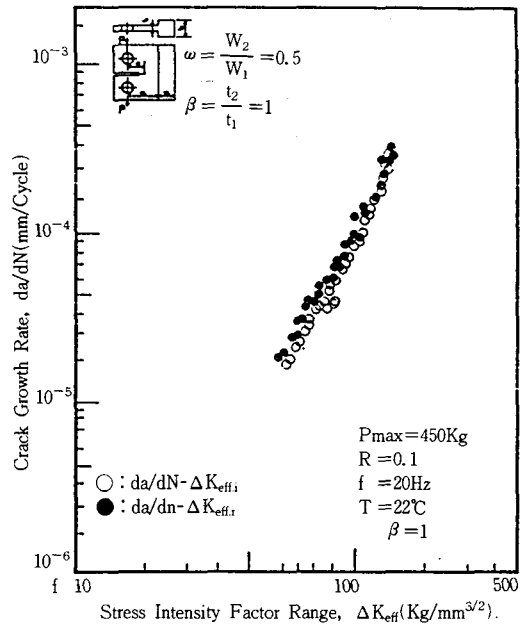


Fig. 5 $da/dN-\Delta K_{eff,i}$, $da/dN-\Delta K_{eff,r}$ relationships for uniform thickness weld specimens ($\omega=0.5$, $\beta=1$, as weld)

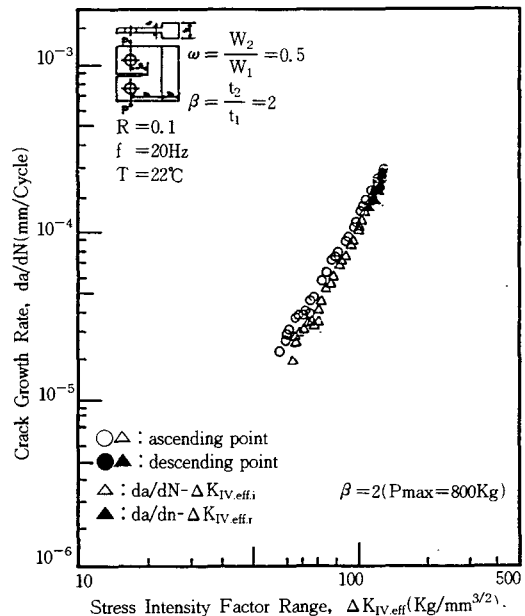


Fig. 6 $da/dN-\Delta K_{IV,eff,i}$, $da/dN-\Delta K_{IV,eff,r}$ relationship for various thickness weld specimens ($\omega=0.5$, $\beta=2$, as weld)

da/dN- $\Delta K_{IV,eff}$ 관계를 plot한 것인데, 이 경우에도 균열성장속도가 균후용접시험편의 결과와 거의 비슷한 양상을 보이지만 변후경계에 가까워짐에 따라 da/dN이 감소하는 것을 볼 수 있다. 여기에서 초기잔류응력으로 ΔK_{IV} 를 수정하였을 때보다 재분포잔류응력으로 ΔK 를 수정하였을 때가 da/dN- ΔK_{IV} 관계에서 깨끗하게 나타난다. 즉 이것은 재분포잔류응력으로 수정하는 것이 초기잔류응력으로 수정하는 것보다 유효하다. 그러나 재분포잔류응력의 측정이 까다롭고, 두 곡선(da/dN- ΔK_{IV} 관계)이 거의 일치한다고 보여지는 점을 감안할 때, 초기잔류응력으로 ΔK_{IV} 를 수정한 $\Delta K_{IV,eff,i}$ 로 da/dN를 정리하여도 큰오차가 없다고 보아야겠다.

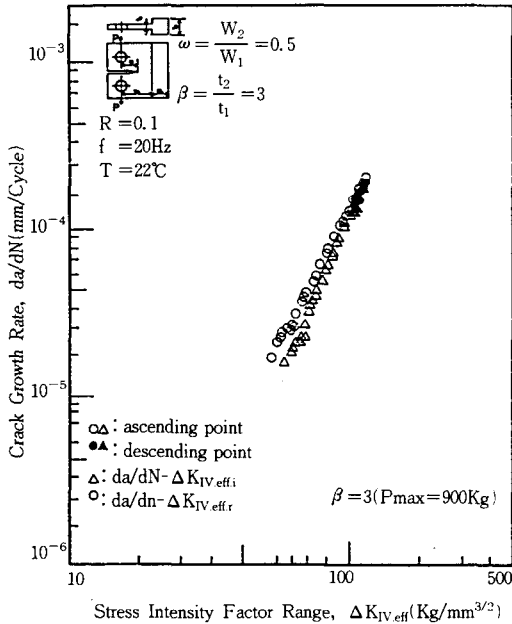


Fig. 7 da/dN- $\Delta K_{IV,eff,i}$, da/dN- $\Delta K_{IV,eff,r}$ relationship for various thickness weld specimens ($\omega=0.5$, $\beta=3$, as weld)

Fig. 8, 9 및 10은 용접후열처리(PWHT)시험편에 대하여 잔류응력을 제거한 상태에서 da/dN- $\Delta K_{IV,eff,i}$ 와 da/dN- $\Delta K_{IV,eff,r}$ 관계를 비교해보기 위하여 plot한 것이다.

여기에서 보는 바와같이 피로균열이 성장함에

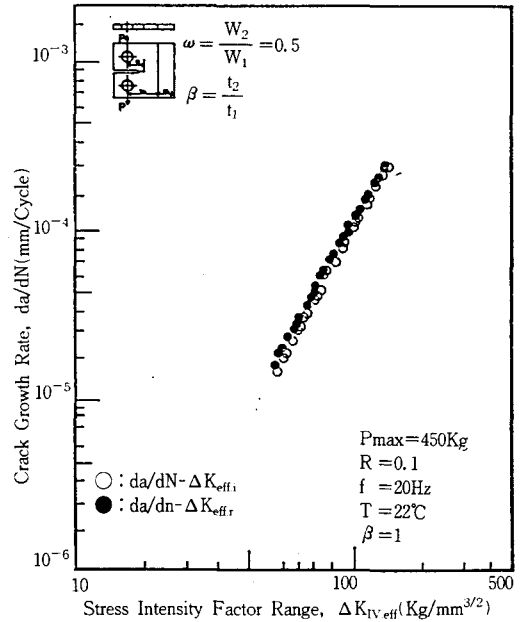


Fig. 8 da/dN- $\Delta K_{eff,i}$, da/dN- $\Delta K_{eff,r}$ relationship for PWHT specimens ($\omega=0.5$, $\beta=1$)

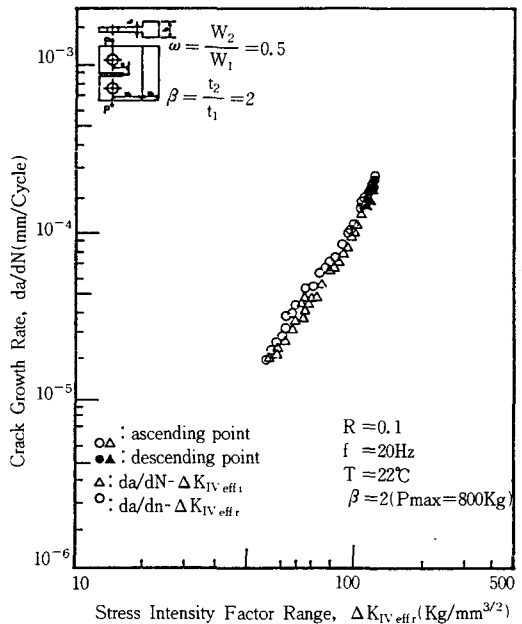


Fig. 9 da/dN- $\Delta K_{IV,eff,i}$, da/dN- $\Delta K_{IV,eff,r}$ relationship for PWHT specimens ($\omega=0.5$, $\beta=2$)

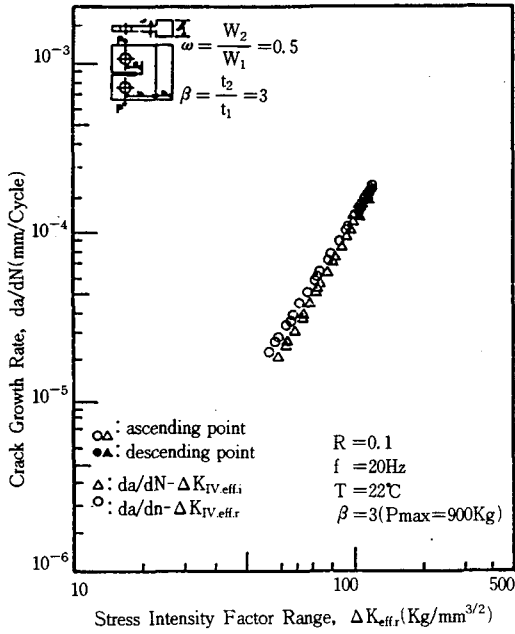


Fig. 10 $da/dN - \Delta K_{IV,eff,i}$, $da/dN - \Delta K_{IV,eff,r}$ relationship for PWHT specimens ($\omega = 0.5$, $\beta = 3$)

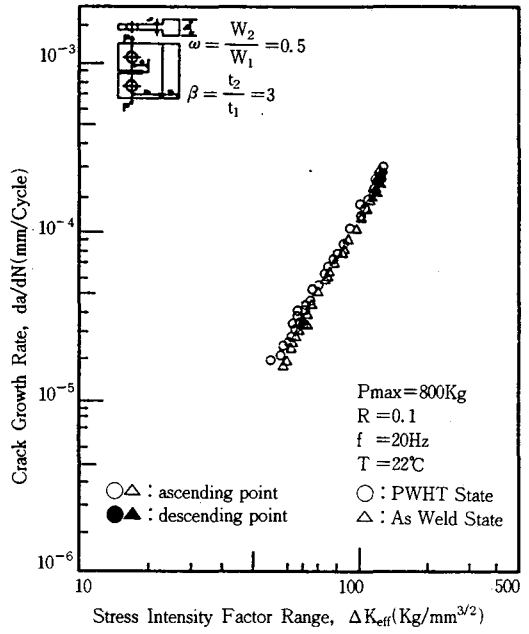


Fig. 12 $da/dN - \Delta K_{IV,eff,r}$ relationship for various thickness specimens ($\beta = 2$)

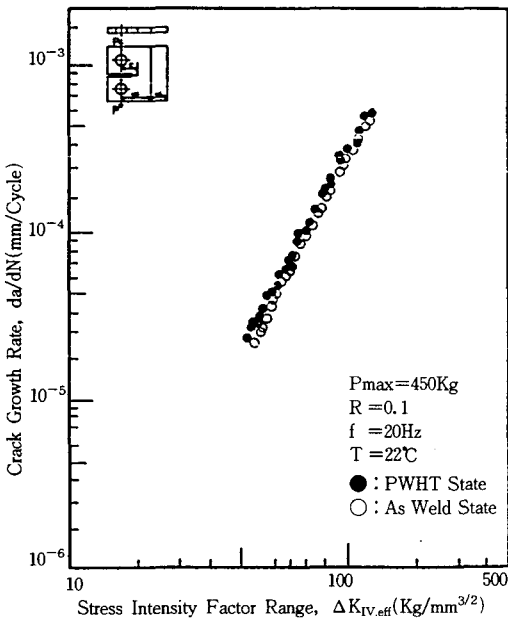


Fig. 11 $da/dN - \Delta K_{eff,r}$ relationship for uniform thickness specimens ($\beta = 1$)

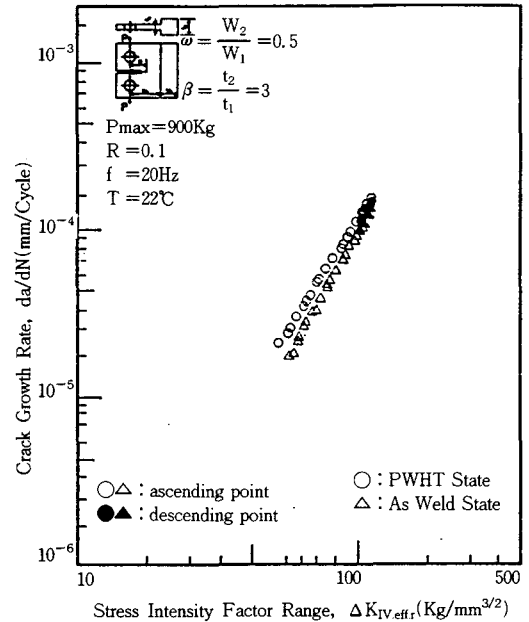


Fig. 13 $da/dN - \Delta K_{IV,eff,r}$ relationship for various thickness specimens ($\beta = 3$)

따라 압축잔류응력의 영향이 거의 작용하지 않은 것을 확인할 수 있었으며, $da/dN-\Delta K_{IV,eff}$ 선도는 균후·변후시험편 다같이 균열성장속도가 거의 일치하는 것을 볼 수 있는데, 이것은 용접잔류응력이 거의 제거되었다는 것을 알 수 있다.

Fig. 11, 12 및 13은 균후용접시험편 및 변후용접시험편에 대하여 각각의 두께비에 따라 as weld 시험편 및 PWHT 시험편의 $da/dN-\Delta K_{IV,eff}$ 관계를 비교하여 plot한 것이다.

여기에서 $\Delta K_{IV,eff}$ 의 증가에 따라 crack 성장속도(da/dN)는 거의 직선적으로 증가하고 있다. 피로 crack의 진전에 따른 잔류응력의 영향은 점차 감소하고 있음을 알 수 있으나 거시적으로는 큰 영향을 주지 않는다고 하겠다.

4. 결 론

균후 및 변후용접시험편의 초기잔류응력을 고려한 $da/dN-\Delta K_{IV,eff,i}$ 와 재분포 잔류응력을 고려했을 때의 $da/dN-\Delta K_{IV,eff,r}$ 를 비교 고찰하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같았다.

- 1) 피로균열이 성장함에 따라 균열선단 근방에서 항상 압축잔류응력이 분포하며, 다만 균열이 성장할수록 압축잔류응력의 크기는 감소한다. 이것은 반복하중으로 인하여 피로균열이 성장함에 따라 잔류응력이 이완되기 때문이라 생각된다.
- 2) 균후 및 변후용접시험편에서 재분포잔류응력으로 ΔK_{IV} 를 수정하는 것이 초기잔류응력으로 수정하는 것보다 effective 하지만, 초기잔류응력으로 ΔK_{IV} 를 수정한 $\Delta K_{IV,eff,i}$ 로 da/dN 을 정리하여도 큰 오차가 없다고 사료된다. 이것은 $da/dN-\Delta K_{IV,eff,i}$ 관계와 $da/dN-\Delta K_{IV,eff,r}$ 관계가 거의 동일한 거동을 나타내는 것에 따르는 것이다.

참 고 문 헌

- 1) 鈴木春義, 改訂 最新熔接工學, コロナ社, pp. 1~3, 1980.
- 2) K. Masubuchi, Analysis of Welded Structures, International Series on Materials Science and Technology, Vol. 33, pp. 1~10, 1980.
- 3) J. F. Lancaster, Metallurgy of Welding, Third Edition, pp. 1~5, 1980.
- 4) 西田新一, 機械機器 破損の 原因と 對策, 日刊工業新聞社刊, pp. 179~201, 1986.
- 5) H. Liebowitz, Fracture-An Advanced Treatise, Vol. 4, pp. 337~370, 1969.
- 6) J. F. Rudy and E. J. Rupert, Effects of Porosity on Mechanical Properties of Aluminum Welds, Welding Journal, Vol. 49, No. 7~12, pp. 322~336, 1970.
- 7) K. Ikeda and H. Kihara, Brittle Fracture Strength of Welded Joint-s, Welding Journal, Vol. 49, No. 1~6, pp. 106~114, 1970.
- 8) K. Masubuchi, Analysis of Welded Structures, International Series on Materials Science and Technology, Vol. 33, pp. 189~327, 1980.
- 9) 村上理一, 秋園幸一, 熔接殘留應力での 疲勞き裂傳ば速度における 殘留應力幾和の 影響, 日本機械學會 論文集, 34券, 377號, pp. 202~207, 1985.
- 10) Standard Test Method for Constant-Load Amplitude Fatigue Crack Growth Rate Above 10^{-8} mm/Cycle, ASTM E647-83, pp. 765~783, 1985.
- 11) 車龍勳, 變厚용접판재에서의 피로균열성장 거동에 미치는 잔류응력의 영향에 관한 파괴역학적 연구, 産業安全學會誌, Vol. 8, No. 1, pp. 71~79, 1993.