

變厚 鎔接板材에서의 疲勞龜裂成長舉動에 미치는 殘留應力の
영향에 관한 破壞力學的 研究(Ⅱ)

A Study on the Influence of Residual Stresses on Fatigue Crack
Growth Behaviors in the Weldment Plate with Various Thickness(Ⅱ)

차 용 훈*

Yong-Hoon Cha

ABSTRACT

For the $\beta=1$ specimen with constant thickness, Crack growth rate is smoothly increasing in the a-N curve. On the other hand for $\beta=2$ specimen with various thickness, the inflection point is observed in crack growth rate near the thickness interface.

da/dN before the inflection point is increased. and da/dN after the point is decreased, compared to the $\beta=1$ specimen. da/dN near the thickness interface is approached zero. The descending point was observed earlier as β increased.

Considering the relation between da/dN and λ , the crack propagation rates for the case of $\beta=1$ increased almost linearly, however, the crack propagation rates for $\beta=2,3$ decreased more rapidly near the thickness interface. Additionally, the decreased point in da/dN for $\beta=3$ is farther from the thickness interface than the case for $\beta=2$.

1. 서 론

板材料에서 殘留應力은 壓延, 引拔, 鍛伸, 굽힘, 그리고 鎔接과 같은 製造課程으로부터 생기는 反面에 故意的으로 疲勞 抵抗을 改善하는 많은 方法에 의해서도 發生한다.

鎔接部에서의 強度는 복잡한 要因의 影響을 받으며 그 重要한 要因中的의 하나로 殘留應力을 들 수 있다. 一般적으로 殘留應力은 機械部品 및 構造物 등의 變形과 早期 破壞의 原因이 되며 특히 鎔接部에 있어서의 殘留應力은 鎔接熱에 의한 局部加熱과 不規則的이고 비교적 急速한 冷却으로 誘發되는 熱應力과 構造物의 剛性 및 材料의 特性등에 의

* 조선대학교 기계공학과

하여 발생한다. 용접된 구조물에 대한 파괴 사례는 상당수에 이르고 있으며 특히 잔류응력에 의하여 파괴된 사례는 많이 있다¹⁾.

또한 여러가지 용접법에서 맞대기용접 및 T형 용접 등에 대해서는 용접部位에서의缺陷問題, 殘留應力의 問題 등에 관하여 破壞力學的인 解析이 상당히 進行되고 있지만²⁻⁵⁾, 船舶 및 各種 産業構造物 등에 廣範圍하게 使用되고 있는 두께가 다른 板材의 용접(以下 變厚용접材)에 대한 破壞力學的인 解析, 즉 이들 接合材 內에 存在하는 균열의 Stress Intensity Factor(S.I.F.) K의 解析에 대해서는 定量的인 結果가 나오지 못한 실정이며, 많은 産業에의 應用에 比추어 이 分野에 關한 研究는 극히 미흡하다고 할 수 있겠다.

本 研究에서는 板幅이 有限하고 두께가 不連續的으로 變化하는 板材(以下 有限幅 變厚板材)內에 存在하는 모우드 I 균열에 對한 S.I.F. K값을 판폭비(width ratio) ω 및 두께비(thickness ratio) β 와 無次元 균열길이 λ 의 函數로 2次元 및 3次元 有限要素 數值解析을 하고, 그 結果를 比較 檢討하여 K解析의 效用性을 檢討한 뒤에, 疲勞試驗의 結果를 용접殘留應力을 고려한 S.I.F. K로 해석하였으며⁶⁾, 殘留應力이 疲勞龜裂成長舉動에 미치는 影響을 考察해 보고자 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.

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

인장시험편의 형상 및 치수는 Fig. 1에 제시하였으며, SM58강의 화학적 성분과 기계적 성질은 각각 Table 1과 Table 2에 제시하였다.

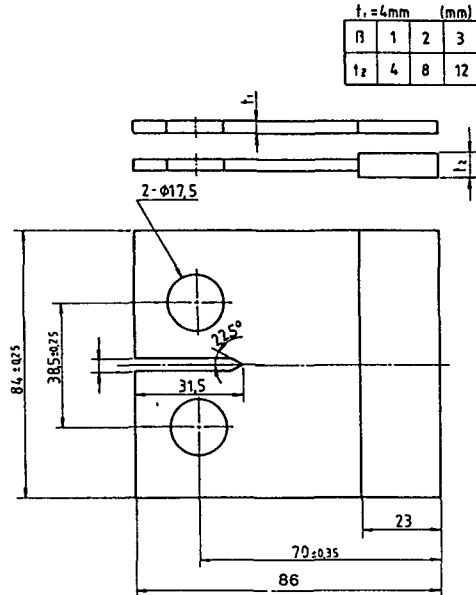


Fig. 1 Geometry of CT Specimen(unit : mm)

피로시험에 사용한 용접시험편은 ASTM standard E647-83⁷⁾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 1패스씩 압연방향으로 용접하여 용접시험편을 제작하였다. 용접와이어는 고려용접봉(주)제의 직경 1.2mm인 50Kg/mm²급 고장력강용 KC-28이었고, 용접와이어의 화학적 성분은 Table 3과 같다. 용접시 재료의 용접변형을 최소화하기 위하여 구속하여 용접하였다. 모든 시험편은 Table 4에 제시한 조건을 적용하여 제작하였다.

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

Table 4 Welding procedure

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

그리고 용접잔류응력을 제거하기 위한 용접후 열처리(PWHT)조건은 논문(I)⁶에 제시하였다.

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℃(실온)로 하였다. 피로시험 조건은 Table 5와 같다.

Table 5 Experimental conditions of fatigue tests

Type (CT)	P _{max} (Kg)	P _{min} (Kg)	ΔP (Kg)	Load Ratio	Test Freq. (Hz)	Control Mode	Wave Form	Tem. (℃)
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 예균열은 본 시험시의 최대하중보다 20% 큰 하중에서 5%씩 감소시키면서, 기계가공 노치로 부터 약 2mm의 피로예균열(fatigue pre-crack)을 넣었다. 전체 초기 균열길이를 하중점으로부터 18mm로 한 다음 본 실험에 들어갔다. 변후용접시험편에서의 피로시험은 변후경계까지만 실시하여 데이터를 구하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 경도분포

피로균열이 용접선에 직각으로 성장하는 경우의 용접시험편과 PWHT시험편의 경도분포는 Fig. 2와 같다. 용접재시험편에서 두께비에 따라 조금 차이는 있으나 용착금속부는 다른 영역에 비하여 대체로 높은 경도분포를 나타냈으며 최고 경도치 H_{RB} = 98을 나타냈다. PWHT 시험편의 경도분포는 모재, HAZ, 용접Bead부가 거의 H_{RB} = 80과

H_{RB} = 85 사이에서 비슷한 경도분포를 보였다.

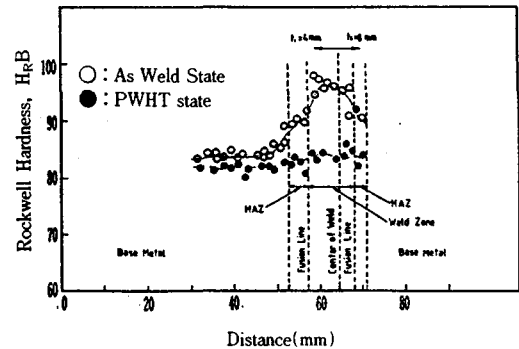


Fig. 2 Hardness distribution in the weldment plate with various thickness

3.2 a-N 관계 고찰

본 연구에서는 일정하중폭(ΔP=Const.)하에서 피로시험을 하였으며, 피로시험 결과는 ASTM E647-83에 따라 정리하였다. 균열길이 a에 대응하는 하중반복수 N을 데이터로 a-N곡선을 Fig. 3에 나타냈다.

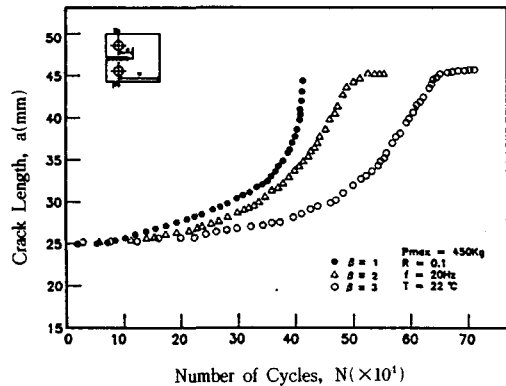


Fig. 3 Experimental a-N curve (base metal)

본 해석의 a-N관계에서 횡축의 하중반복수 N은 비교를 위해 예균열까지의 하중반복수를 제외하고 측정된 값이다. 그림에서 보면 β=2, 3인 경우의 a-N곡선의 특징은 β=1인 경우와 달리 단순 증가형이 아니고, 변후경계에 도달하기 전에 크랙이 진전속도가 감소하는 점, 즉 변곡점(inflexion point)이 나타나는 것이 되겠는데, 이 변곡점의 위

치는 두께비에 따라 다르게 나타나고 있다. 즉, β 값이 2일때 보다는 3일때 변후경계로부터 먼 지점에 나타났다. 이는 두께비가 클수록 균열거동이 변후경계에서 먼 위치에서부터 경계의 영향(경계의 존재 확인)을 받기 시작한다는 것을 의미하고, 또한 경계의 영향을 받기 시작하는 위치가 두께비 t_2/t_1 의 함수가 될 것이란 것을 의미하기도 한다. 예균열 이후부터 크랙이 변후경계에 도달하기 까지 요하는 하중반복수는 β 값이 클수록 더 크게 나타나고 있는 것을 볼 수가 있다.

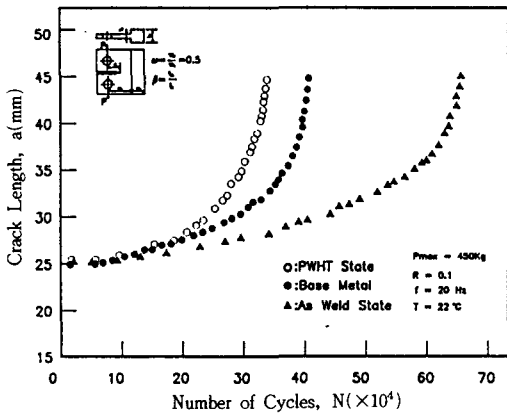


Fig. 4 Experimental a-N curve ($\beta=1$)

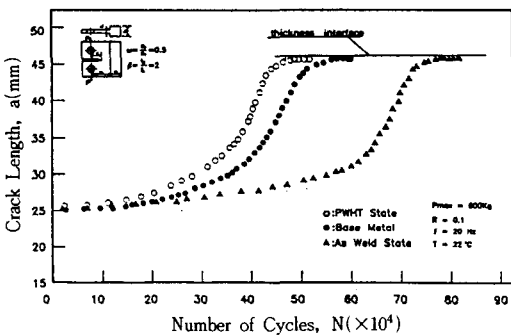


Fig. 5 Experimental a-N curve ($\beta=2$)

모재 용접재 및 PWHT재의 시험편에 대하여 Fig. 4~6에 나타냈다. a-N곡선의 특성을 살펴보면 같은 판폭비($\omega=0.5$)에서 두께비가 커짐에 따라 변후경계에 도달하기까지의 하중반복수가 크게 나타났으며, PWHT시험편의 경우 모재에 비하여 하중반복수는 약간 작게 나타났으나, 거의 비

슷한 양상을 보인 반면, 용접재시험편과는 상당히 큰 차이를 나타냈으며, 용접재시험편의 경우 β 값이 커짐에 따라 변후경계에 도달하기까지의 하중반복수는 크게 나타났다.

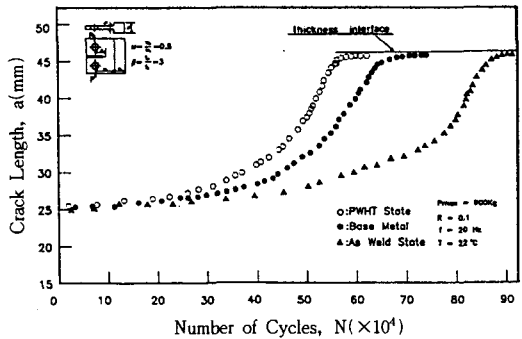


Fig. 6 Experimental a-N curve ($\beta=3$)

또한, $\beta=2$ 및 3인 경우 crack tip이 변후경계에 도달하기 전에 각 a-N곡선상에 변곡점이 나타나고, a의 증가율, 즉, 균열성장속도가 급속히 둔화함을 알 수 있었다. 또한, 변곡점의 위치는 β 값이 클수록 변후경계에서 먼 지점에 나타났다.

3.3 da/dN- λ 관계 고찰

Fig. 7은 변후시험편에 대하여 a-N관계를 Secant method에 의하여 대수 좌표로 균열성장속도 (da/dN)를 구하고, da/dN 과 무차원균열길이 λ ($=a/W$)사이의 관계를 반대수좌표로 나타낸 것으로서, 균열성장속도 (da/dN)가 변후경계 가까이에서 급감해 가는 양상을 볼 수가 있고, $\beta=2$ 에서 보다는 $\beta=3$ 에서 da/dN 이 감소하기 시작하는 점이 변후경계에서 먼 지점에 나타나고 있는 것을 알 수가 있다.

이 지점이 a-N data에서 나타난 변곡점이다. 또한 β 값이 클수록 da/dN - λ 곡선이 아래쪽에 위치하는데 이는 β 값이 클수록 같은 균열길이에서 균열성장속도가 작다는 것을 의미한다.

용접 및 PWHT재 각각에 대하여 무차원 균열길이 ($\lambda = a/W_1$)를 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 0.95로 변화시켜 두께비에 따른 da/dN - λ 의 관계를 Fig. 8, 9, 10에 나타냈다. 그림에서 보면 각각의 두께비에서 용접재시험편의 경우에만 균열성장 초기에 압축잔류응력의 영향이 크게 작용하는 것을 알 수

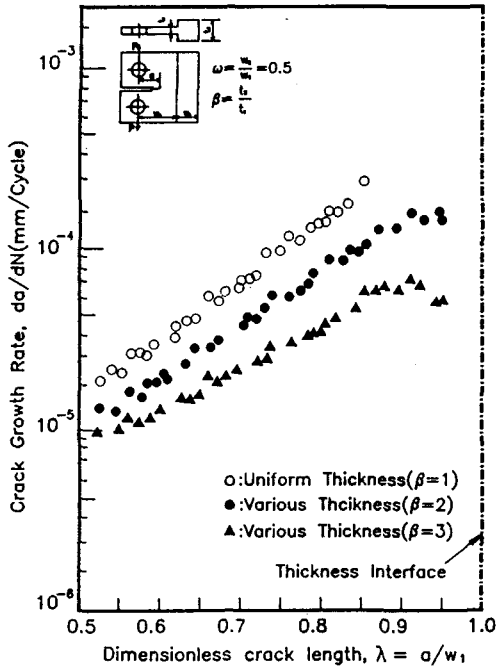


Fig. 7 $da/dN-\lambda$ relationship for base metal

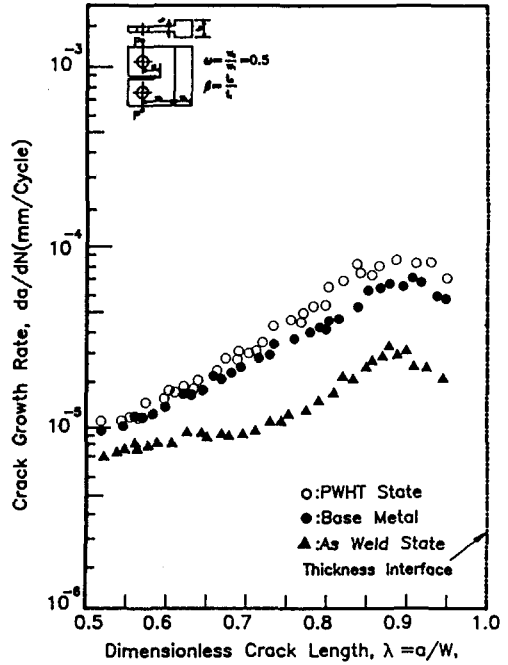


Fig. 9 $da/dN-\lambda$ relationship for various thickness specimens ($\beta=2, \omega=0.5$)

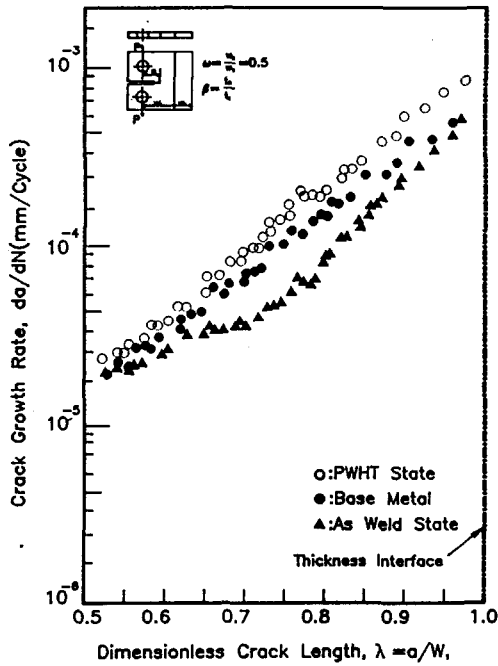


Fig. 8 $da/dN-\lambda$ relationship for uniform thickness specimens ($\beta=1$)

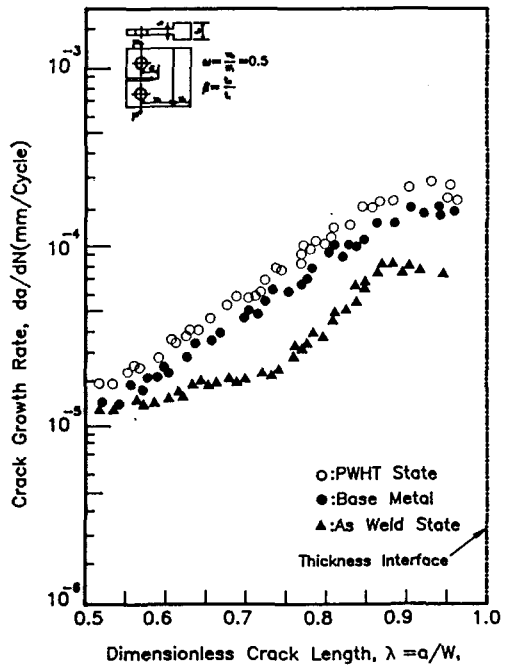


Fig. 10 $da/dN-\lambda$ relationship for various thickness specimens ($\beta=3, \omega=0.5$)

있으며, PWHT시험편의 경우 모재시험편과 거의 비슷한 선도를 나타내는 것은 열처리에 의한 용접 잔류응력이 거의 제거되어 용접전의 모재와 비슷한 양상을 나타내기 때문으로 생각된다.

여기에서 균열성장의 초기엔 da/dN 의 증가가 아주 작거나 혹은 오히려 감소하는 것 같이 나타나고 있는데, 이것은 초기압축잔류응력이 균열성장 전방에 분포되어 있는데에 기인하는 것으로 생각된다. 그러나 균열이 어느 정도 성장하게 되어서는 da/dN 이 증가하게 된다.

균후용접시험편($\beta=1$)인 경우 대략 $\lambda > 0.75$ 에서는 균열성장속도(da/dN)는 다시 직선적인 증가를 보이고 있다. 반면 변후용접시험편($\beta=2, 3$)에서는 $\lambda \approx 0.9$ 인 곳에서 da/dN 의 급감이 시작되는데, 성장초기에 da/dN 이 감소하는 것은 압축잔류응력에 기인 하는것으로 생각되나 $\lambda \approx 0.9$ 인 변후경계 가까이에서 균열성장속도가 급감해 가는 양상을 볼 수가 있는 것은 변후경계의 영향을 크게 받는 것으로 생각된다.

PWHT시험편의 경우 용접재시험편에서 나타난 균열성장초기의 압축잔류응력의 영향으로 인한 균열성장속도(da/dN)의 감소현상은 보이지 않는다. 이는 열처리에 의하여 압축잔류응력의 제거로 인한 영향이라고 생각되며, $\beta=1, 2$ 및 3에서 균열성장속도가 거의 직선적으로 성장에 가는 것을 볼 수 있다. 다만 $\beta=2$ 및 3인 경우에는 변후경계에서 두께비의 영향으로 균열성장속도가 급감해 가는 것을 볼 수 있는 것은 용접재시험편에서와 같다.

4. 결 론

SM58판재를 구속 맞대기용접하여 제작한 변후 용접시험편과 변후시험편에 대한 피로시험을 실시하고 피로균열성장거동을 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) $\beta=1$ 인 균일두께 시험편에서 a-N곡선이 단순 증가하는데 비하여 $\beta=2$ 인 변후 시험편에서는 변후경계에 도달하기까지의 하중반복수가 클 뿐만아니라 변후경계 가까이에서 변곡점을 가진다. $\beta=2$ 및 3인 용접재시험편, PWHT시험편의 경우에는 균열선단이 변후경계에 도달하기 전에 변곡점이 나타났으며, 변곡점 앞에서

는 da/dN 의 증가, 뒤에서는 da/dN 의 감소현상이 나타나고, 변후경계 근처에서는 $da/dN \rightarrow 0$ 의 거동이 나타났다. 변곡점의 위치는 β 값이 클수록 변후경계에서 먼 지점에 나타났다.

- 2) $da/dN-\lambda$ 사이의 관계를 보면, $\beta=1$ 인 경우 균열성장속도(da/dN)가 거의 직선적으로 증가하는 것을 볼 수 있지만, $\beta=2$ 및 3인 경우에는 균열성장속도가 변후경계가 가까이에서 급감해 가는 양상을 볼 수 있으며, $\beta=2$ 보다는 $\beta=3$ 에서 da/dN 이 감소하기 시작하는 점이 변후경계에서 먼 지점에 나타나고 있는 것을 알 수가 있다.

참 고 문 헌

- 1) 小倉信和, 銲接部の破壊, 日本機械學會誌, 73卷 616號, pp.677-683, 1970.
- 2) A. M. Nawwar A. M. and J. Shewchuk, On the Measurement of Residual Stress Gradients in Aluminum-alloy Specimens, Experimental Mechanics, Vol. 49, pp.269-276, 1978.
- 3) R. G. Treuting, and W. T. Read, Jr., A Mechanical Determination of Biaxial Residual Stress in sheet Materials, Jnl. Appl. Phys., Vol. 22 pp.130, 1951.
- 4) 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.
- 5) K. Ikeda and H. Kihara, Brittle Fracture Strength of Welded Joint-s, Welding Journal, Vol. 49, No. 1-6, pp.106-114, 1970.
- 6) 車龍勳, 變厚溶接板材에서의疲勞龜裂成長舉動에 미치는殘留應力の影響에 관한破壞力學的研究(I), 産業安全學會誌, Vol. 8, No. 1, pp.71-79, 1993.
- 7) Standard Test Method for Constant-Load Amplitude Fatigue Crack Growth Rate Above 10^{-8} mm/Cycle, ASTM E 647-83, pp.765-783, 1985.