

研究論文

## 두께비를考慮한 熔接部の 疲勞龜裂傳播 解釋

차용훈\* · 방한서\*\* · 김덕중\*\*\*

### Analysis of Fatigue Crack Growth with Thickness Ratio in Weldments

Cha Yong-Hoon\*, Bang Han-Sur\*\* and Kim Duck-Joong\*\*\*

#### ABSTRACT

This study aims to analyze the S. I. F. K value upon Mode I cracks in a finite-width plate of varying thickness, which is expressed in terms of width ratio ( $\omega$ ), thickness ratio ( $\beta$ ) and non-dimensional crack length ( $\lambda$ ) by using the 2-dimensional finite element method. Then, by comparing the effectiveness of the results obtained by the two finite element methods, it is seen that the 2-dimensional finite element method can be used in order to analyze the S. I. F. K values upon a various thickness model.

A model is developed in order to analyze the effects of initial residual stress upon the fatigue crack growth behavior in various thickness welded specimens. In this model, crack growth rate  $da/dN$  appears to be come small as the thickness ratio with the same  $\Delta K$  is increased. Also, in the initial step, as  $\Delta K$  is increased with crack growth rate is decreased and then increased because the repeated compressive residual stress retards crack growth rate.

#### 1. 서론

용접에 의한 접합은 선박, 항공기, 자동차등 산업구조물에 널리 이용되고 있는 실정이다. 각종 산업에 적용되는 용접은 균질재료 및 복합재료 또는 보강재 및 두께가 변화하는 부재등 넓은 영역에 걸쳐서 다양하게 사용되고 있다.<sup>1,2)</sup>

또한 여러가지 용접법에서 맞대기용접 및 T형용접 등에 대해서는 용접부위에서의 결함문제, 잔류응력의 문제 등에 관하여 파괴역학적인 해석이 상당히 진행되고 있지만,<sup>3,4,5)</sup> 선박 및 각종 산업구조물 등에 광범위하게 사용되고 있는 두께가 다른 판재의 용접(이하 변후용접재)에 대한 파괴역학적 해석, 즉 이들 접합재 내에 존재하는 균열의 Stress Intensity Factor (SIF) K의 해석에 대해서는

\* 정회원, 조선대학교 기계공학과 (수송기계부품 공장자동화 연구센터)

\*\* 정회원, 조선대학교 선박해양공학과 (수송기계부품 공장자동화 연구센터)

\*\*\* 비회원, 동아전문대학 자동차정비과

정량적인 결과가 나오고 있지 못한 실정이며 최근에는 유한요소법 등의 수치해석으로 연구가 진행되고 있는 실정이다.<sup>6-9)</sup>

용접재에 대한 파괴역학적인 해석의 대상으로는 용접시 발생하는 용입불량(Lack of Penetration), 불순물혼입(Foreign Inclusion), 기포(Blow Hole) 등의 결함 뿐만아니라, 단시간의 국부적인 가열에 따르는 열응력의 문제, 냉각시의 수축(Shrinkage During Cooling)으로 인한 잔류응력 및 뒤틀림의 발생 등이 주요 문제가 되고 있다 하겠다.<sup>10-13)</sup> 같은 두께의 판재 용접재 즉 균후용접재에 대한 연구 결과는 활발히 진행되고 있지만 변후용접판재에서의 피로균열성장거동에 관한 연구가 요구되고 있음에도 불구하고 이 분야에 대한 연구는 거의 없으며, 다만 용접판재가 아닌 변후부재에서의 피로균열성장거동 및 파괴기구에 관한 연구는 거의 없는 실정이다. 최근 Yang<sup>14)</sup>은 CT형 변후판재를 해석대상으로 2차원 이론해석 및 FEM 수치해석과 실험을 통하여 SIF K를 해석한 바 있다.

본 연구에서는 판폭이 유한하고 두께가 불연속적으로 변화하는 판재내에 존재하는 Mode I 균열에 대한 SIF K값을 판폭비(Width ratio)  $\omega$  및 두께비(Thickness ratio)  $\beta$ 와 무차원 균열길이  $\lambda$ 의 함수로 2차원 유한요소 수치해석을 하고, 피로시험의 결과를 초기용접잔류응력을 고려한 SIF K로 해석하여, 반복하중에 따른 피로균열성장거동에 미치는 영향을 고찰해 보고자 한다.

## 2. CT형 변후Model의 SIF 2차원 유한요소 수치해석

유한요소법에 의하여 SIF K를 해석하기 위한 CT형 모델로서는 피로시험에서 사용된 시험편과 같은 재료 및 치수를 가진 SM58 강판재를 대상재료로 설정 하였다.

CT형 모델형상으로는 Fig. 1에서와 같이 두께가 얇은 재료( $t_1 = 4\text{mm}$ ) 내에 있는 균열이 두께가 두꺼운 부분( $t_2$ )으로 성장해가는 thin-to-thick type(S-L형)을 설정했다.

이때 사용한 mesh design의 종류는 Fig. 2에서와 같이 3종류로 하였다.

$t_1 = 4\text{mm}$			
$\beta$	1	2	3
$t_2$	4	8	12

( $\beta = t_2/t_1$ )

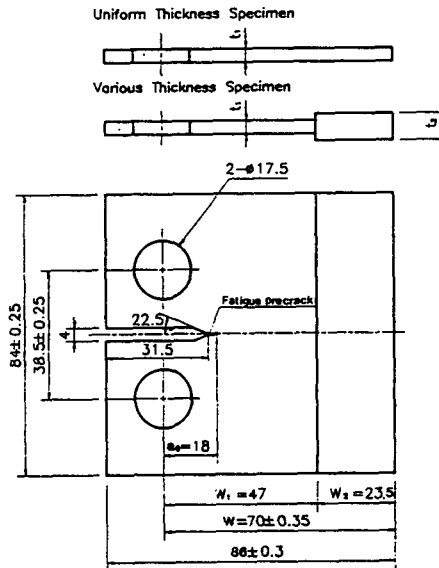


Fig. 1 Geometry of CT specimen

J적분값을 구하여 변후재의  $K_{IV}$ 를 계산하는 방식을 취하였다. 또한 균열 진전에 따른 무차원 크랙 길이( $\lambda = a_0/W_1$ )를 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 및 0.95의 6가지로 선정하였고, J적분값을 계산하기 위하여 탄소성 물체의 2차원 균열에 대한 가상균열진전법(Virtual Crack Extension Method : VCE)을 사용하여 균열선단 근방에서의 Contour에서 J적분하였다. 여기에서 구한 J적분값의 평균을 취하여  $K_{IV}$ 의 관계를 평면변형률 상태에서 다음식으로 표시된다.

$$K_{IV} = \left( \frac{J \cdot E}{(1 - \nu^2)} \right)^{1/2} \quad (1)$$

해석 모델은 Fig. 1에서와 같이 ASTM의 규격으로 하였고, 여기에서 두께가 균일한 CT시험편에 대한 SIF  $K_I$ 는 다음식으로 표시된다.

$$K_I = \frac{P}{t\sqrt{w}} \frac{(2+a)}{(1-a)^{3/2}} (0.886+4.64 a-13.32 a^2 + 14.72 a^3-5.6 a^4) \quad (2)$$

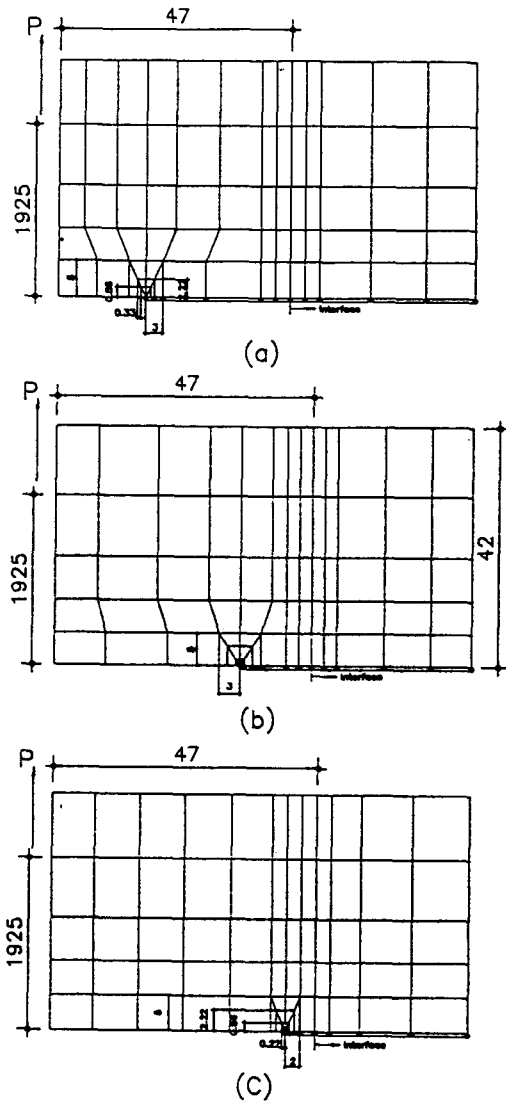


Fig. 2 Mesh design for finite element analysis

여기에서 P는 하중, t는 시험편 두께, W는 하중 점으로부터의 시험편의 폭이고,  $a=a_0/W$ 이다.

본 해석에서 모델링한 시험편은 W=70mm인 ASTM E647-83의 표준시험편을 기준으로 하여, 판폭비  $\omega=0.5$ 로 설정했다.

두께비  $\beta=1, 2, 3, 4$  및 6의 model 각각에 대해 무차원 균열길이 ( $\lambda = a_0/W_1$ )를 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 및 0.95로 변환시켜, 이들 각각의 균열길

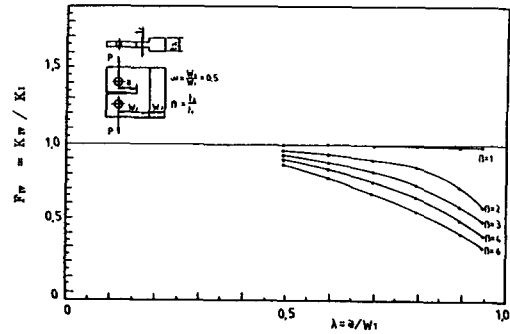


Fig. 3 Non-dimensional S.I.F. values analyzed by F.E.M. and their fitted curves ( $\omega=0.5$ )

이에 대한  $K_{IV}$ 값을 식(1)에 의하여 구하고, 식(2)에 의해서 계산되는  $K_I$ 값(두께가 균일한  $W=70\text{mm}$ 인 표준 CT시험편의 경우)으로 나누어 무차원화하여 얻은  $F_N=K_{IV}/K_I$  값을 Table 1에 보였고, 이 값과 무차원 균열길이  $\lambda$ 와의 관계를 함께 도시한 것이 Fig. 3이다.

각각의 그림에서 보면 변후경계에 가까워짐에 따라 무차원 SIF인  $F_N$ 값의 변화가 다르게 나타나는데,  $\beta=1$ 에서는 변후경계에 가까워짐에 따라  $F_N$ 값의 변화가 거의 1.0에서 고정되어 있는 것으로 보아 본 수치해석법의 유용성이 입증되었다고 보아도 되겠다. 또한  $\beta$ 가 2에서 3, 4 및 6으로 커질 때 균열선단이 변후경계에 가까워짐에 따라  $F_N$ 값이 더욱 더 크게 감소하는 것으로 나타났다.

Table 1 Nondimensional S.I.F. values analyzed by 2-dimensional finite element analysis

	$\lambda$	$\beta$					
		1	2	3	4	6	
$\omega=0.5$	0.5	1.007	0.98	0.94	0.92	0.89	
	0.6	0.998	0.90	0.84	0.80	0.75	
	0.7	0.991	0.87	0.75	0.71	0.65	
	0.8	0.989	0.83	0.72	0.63	0.55	
	0.9	0.993	0.70	0.58	0.47	0.39	
	0.95	0.991	0.58	0.47	0.38	0.32	

(※  $\omega = W_2/W_1$ ,  $\beta = t_2/t_1$ ,  $\lambda = a_0/W_1$  이다)

### 3. 실험

#### 3.1 시험편의 재료 및 형상

본 실험에 사용된 재료는 용접구조용 압연강재인 SM58강으로서, 화학적 성분과 기계적 성질은 각각 Table 2와 Table 3에 제시하였다.

피로시험에 사용한 시험편은 ASTM Standard E 647-83<sup>10)</sup>에 제시된 CT(Compact Tension) 시험편에 준하여 제작하였다.

S-L형 시험편에서  $\omega = 0.5$ 로 일정하게 하여, 박판부의 두께를  $t_1 = 4\text{mm}$ 로 하고, 후판부의 두께를  $t_2 = 4, 8$  및  $12\text{mm}$ 로 하여 두께비  $\beta = 1, 2$  및  $3$ 이 되도록 하였다.

균열길이를 측정하게 될 시험편 표면은 #1200 샌드 페이퍼로 물연마를 행한 후, 마지막으로 산화알루미늄( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )을 사용하여 최종 연마를 했다.

Table 2 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 3 Mechanical properties of SM58 steel

Yield strength ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )	Tensile strength ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )	Elongation (%)	Yong's modulus ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )
42.1	59.9	34.8	$1.94 \times 10^4$

#### 3.2 용 접

용접시험편을 얻기 위하여  $4\text{mm}$  두께의 강판은  $70\text{mm} \times 90\text{mm}$ 로,  $8\text{mm}$  및  $12\text{mm}$  두께의 강판은  $35\text{mm} \times 90\text{mm}$ 로 절단후 가공하여  $\text{CO}_2$ 가스용접기를 사용하여 용접재의 전·후면을 1Pass씩 압연방향으로 용접하였으며, 사용한 용접Wire는 고려용접봉제의 직경  $1.2\text{mm}$ 인  $50\text{Kg}/\text{mm}^2$ 급 고장력강용 KC-28이었고, 용접시 재료의 용접변형을 최소화하기 위하여 구속용접하였다. 용접조건은 Table 4와 같은 조건을 적용하여 Fig. 4와 같이 제작하였다.

Table 4 Welding procedure

Material	Welding Method	Welding current (A)	Welding voltage (V)	Welding Speed ( $\text{mm}/\text{min}$ )	Number of pass	Gas flow (l)
SM58 steel	$\text{CO}_2$ Gas Welding	150	18	120	1	20

용접잔류응력을 제거하기 위한 용접후 열처리(PWHT) 조건은  $650^\circ\text{C}$ 에서 1시간 유지시킨후 노냉하였으며, 냉각속도는 약  $120^\circ\text{C}/\text{hr}$ 로 하였다.

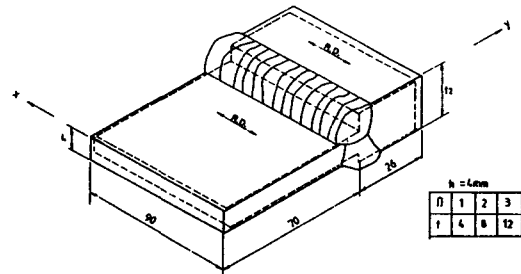


Fig. 4 Welding plate configuration and extraction of specimen

#### 3.3 피로시험

피로시험은  $\Delta P$ -일정 피로시험으로써 ASTM E 647-83에 준하였으며, 하중제어는 정현파형(Sine Wave)으로, 하중비(R)를  $0.1$ 로 하여 수행하였고, 하중반복수는  $20\text{Hz}$ , 실험실 온도는  $22^\circ\text{C}$ (실온)로 하였다.

본 연구에 사용된 시험기는  $15\text{ton}$  용량의 서보유압피로시험기(SHIMADZU Co. JAPAN)이며, 피로 균열길이는 배율이  $\times 50$ 인 이동식 현미경(Traveling Microscope)을 사용하여 전후면에서 균열의 성장을 관찰하고 길이를 측정하였다. 피로시험 조건은 Table 5와 같다.

#### 3.4 잔류응력 측정

측정방법은 균후·변후시험편 다같이 Gage Factor 2.08, 저항값  $120\Omega$ 인(Kyowa Co.의 Type KFC-1-C1-11) Gage Length  $1\text{mm}$ 의 Strain Gage를

Table 5 Experimental conditions of fatigue tests

Specimen Type (CT)	Pmax (Kg)	Pmin (Kg)	$\Delta P$ (Kg)	Load Ratio	Test Freq. (Hz)	Control Mode	Wave Form	Temp. (°C)
$\beta=1$	450	45	405	0.1	20	Load	Sine	22
$\beta=2$	800	80	720	0.1	20	Load	Sine	22
$\beta=3$	900	90	810	0.1	20	Load	Sine	22

Crack 진전방향에 따라 5mm 간격으로 접촉하고, 절단시에 Strain gage에 영향을 미치지 않도록 하기 위하여 절단부와 gage 사이의 거리를 2.5mm 이상 되게 하였다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4. 1 잔류응력 분포

Fig. 5는 변후용접시험편에 대한 초기잔류응력을 측정된 결과로서, 잔류응력의 분포는 일반적으로 항복강도에 거의 근접한 값을 나타낸다는 연구 결과가 보고되어 있는바, 본 실험의 잔류응력분포의 측정결과를 살펴보면 두께비  $\beta=1$ 인 경우 29 kg/mm<sup>2</sup>,  $\beta=2$ 일때 32 kg/mm<sup>2</sup>, 그리고  $\beta=3$ 일때 33.5 kg/mm<sup>2</sup>로서, 두께비가 커짐에 따라 인장잔류응력이 약간 커짐을 알수 있다. 용접 Bead부에서 약 15mm이상 떨어진 모재부에서는 10~14kg/mm<sup>2</sup>의 압축잔류응력의 값을 유지하고 있고, 두께비의 변화에 따른 잔류응력의 분포는 두께비가 커짐에 따라 압축잔류응력의 값이 약간 크게 나타났다. 잔류응력의 분포는 실험값과 FEM이론해석값이 거의 일치하였으며, 다만 인장 및 압축잔류응력의 최대치에서는 양자간에 약 10%내외의 오차를 나타냈다.

##### 4. 2 a-N 관계 고찰

본 연구에서는 일정하중폭 ( $\Delta P = \text{Const.}$ ) 하에 피로시험을 실시 하였으며, 피로시험 결과는 ASTM E647 - 83에 따라 정리하였다.

균열길이 a에 대응하는 하중반복수 N에 대한 a-N곡선을 모재, 용접재 및 용접후열처리재

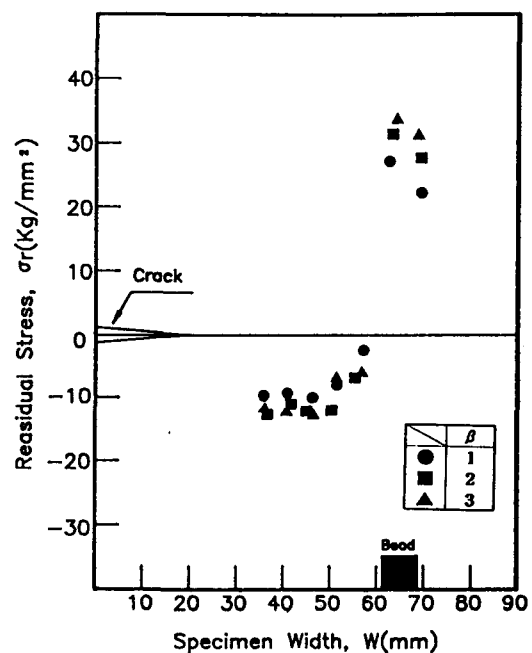


Fig. 5 Initial distribution of residual stress in weld metal specimens

(PWHT)의 시험편에 대하여 Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8에 나타났다.

본 해석의 a-N 관계에서 횡축의 하중반복수 N은 예균열 까지의 하중반복수를 제외하고 측정된 값이다. 그림에서 보면,  $\beta=2, 3$ 인 경우의 a-N곡선은  $\beta=1$ 인 경우와 달리 단순 증가형이 아니고, 변후경계에 도달하기 전에 균열의 진전속도가 감소하는 점, 즉 변곡점이 되겠는데, 이 변곡점의 위치는 두께비에 따라 다르게 나타나고 있다. 즉,  $\beta$ 값이 2일 때 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 균열이 변후경계에 도달하기 까지에 요하는 하중반복수는  $\beta$ 값이 클수록 더 크게 나타나고 있는 것을 볼 수가 있다.

용접후열처리재(PWHT) 시험편의 경우 모재에 비하여 하중반복수는 약간 작게 나타났으나, 거의 비슷한 양상을 보인 반면, 용접시험편과는 상당히 큰 차이를 나타냈으며, 용접시험편의 경우  $\beta$ 값이 커짐에 따라 변후경계에 도달하기 까지의 하중반복수는 크게 나타났다.

4. 3 da/dN -  $\lambda$  관계 고찰

Fig. 9는 변후시험편에 대하여  $da/dN-\lambda(=a/W_1)$

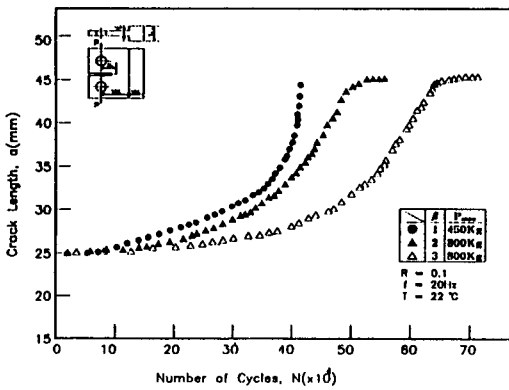


Fig. 6 Experimental a-N curve (base metal)

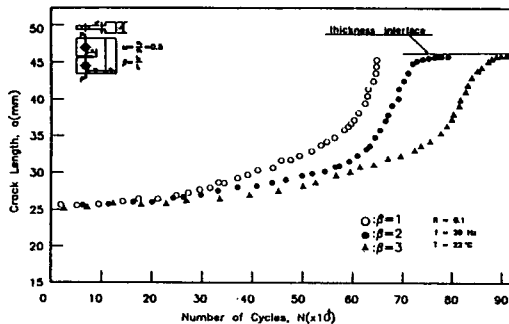


Fig. 7 Experimental a-N curves (as weld state)

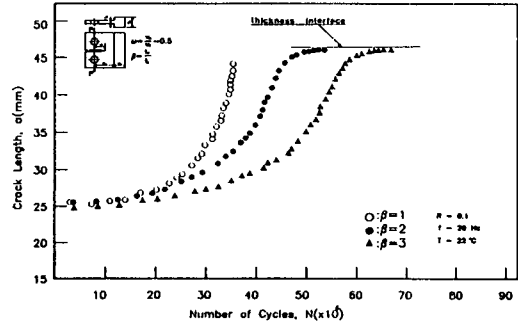


Fig. 8 Experimental a-N curves (PWHT state)

의 관계를 나타냈으며, 균열성장속도가 변후경계 가까이에서 급감해 가는 양상을 볼 수가 있고,  $\beta=2$ 에서 보다는  $\beta=3$ 에서 균열성장속도가 감소하기 시작하는 점이 변후경계에서 먼 지점에 나타나고 있는 것을 알 수가 있다. 이 지점이 a-N Data에서 나타난 변곡점이다. 또한  $\beta$ 값이 클수록 da/dN- $\lambda$  곡선이 아래쪽에 위치하는데 이는  $\beta$ 값이 클수록

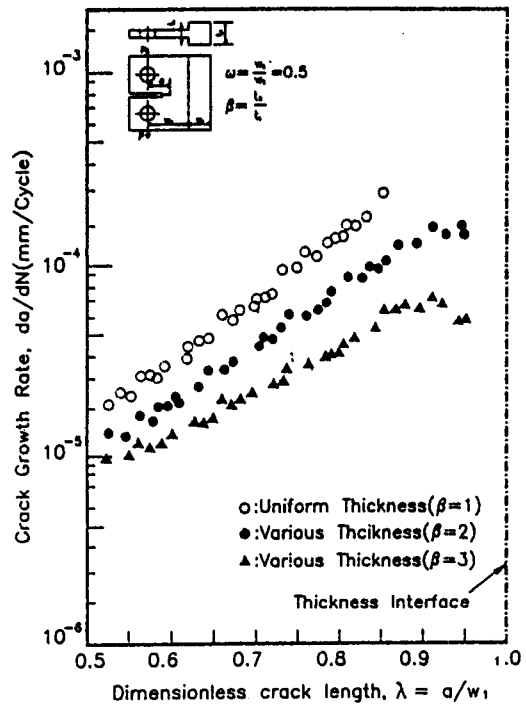


Fig. 9 da/dN- $\lambda$  relationship for base metal

같은 균열길이에서 균열성장속도가 작다는 것을 의미한다.

용접재 및 용접후열처리재 각각에 대하여 무차원 균열길이 ( $\lambda=a/W_i$ )를 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 0.95로 변화시켜  $da/dN$ 과의 관계를 Fig. 10 및 Fig. 11에 나타냈다.

Fig. 10은 용접시험편의 두께비에 따른 균열성장속도 ( $da/dN$ )와 무차원 균열길이  $\lambda(a/W_i)$ 와 관계를 반대수좌표로 나타낸 것이다.

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

변후용접시험편 ( $\beta=1$ )인 경우 대략  $\lambda > 0.75$ 에서 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, 성장

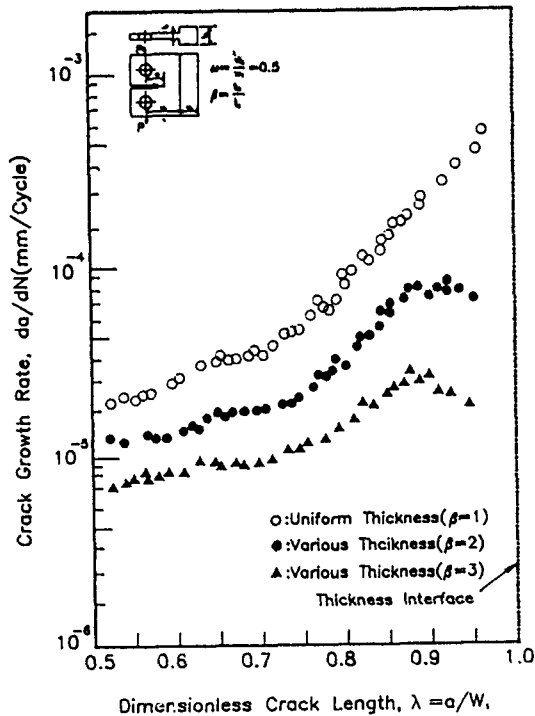


Fig. 10  $da/dN-\lambda$  relationship for weld specimens

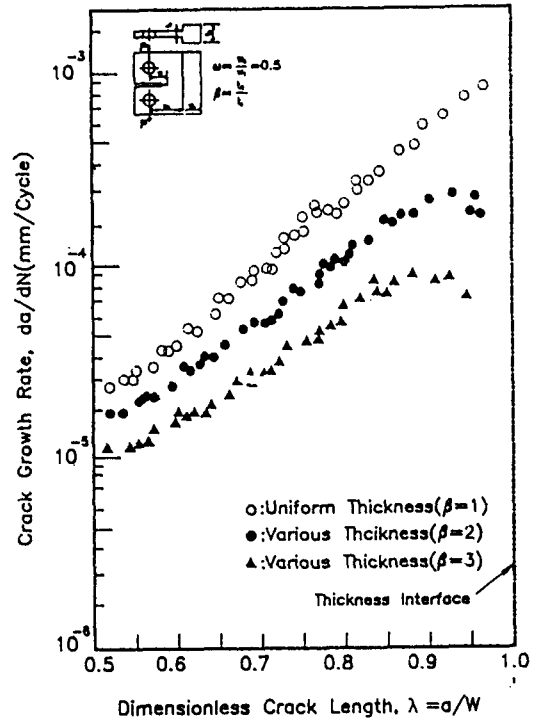


Fig. 11  $da/dN-\lambda$  relationship for PWHT specimens

초기에  $da/dN$ 이 감소하는 것은 압축잔류응력에 기인하는 것으로 생각되나  $\lambda \approx 0.9$ 인 변후경계 가까이에서 균열성장속도가 급감해 가는 양상을 볼 수 있는 것은 변후경계의 영향을 크게 받는 것으로 생각된다.

Fig. 11에는 용접후열처리 시험편의  $da/dN-\lambda$ 의 관계를 나타냈으며, 용접시험편에서 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 성장해 가는 것을 볼 수 있다. 다만  $\beta=2$  및 3인 경우에는 변후경계에서 두께비의 영향으로 균열성장속도가 급감해 가는 것을 볼 수 있는 것은 용접시험편에서와 같다.

#### 4.4 $da/dN-\Delta K$ 관계 고찰

응력확대계수폭  $\Delta K$  값은 유한요소법으로 수치 해석하여 구하였으며,  $a-N$ 관계 결과로부터 구한

피로 crack 성장속도 (da/dN) 를 응력확대계수 변동 범위 ( $\Delta K$ ) 에 대하여 Log-Log좌표로 각각의 두께비에 따른 da/dN- $\Delta K$  관계를 함께 도시한 것이 Fig. 12이다. 각각의 경우 m값은 3.5~3.6으로 거의 비슷하지만 두께비의 변화에 따른 균열성장속도는 두께비가 커짐에 따라 작아지는 것으로 나타났다. 또한  $\beta=1$ 인 두께가 균일한 시험편에서는 da/dN,  $\Delta K$  모두가 증가형상으로 나타났으나, 변후시험편에서는 초기에 증가해 가다가 변후경계 근방에서 감소하는 양상으로 나타났다.

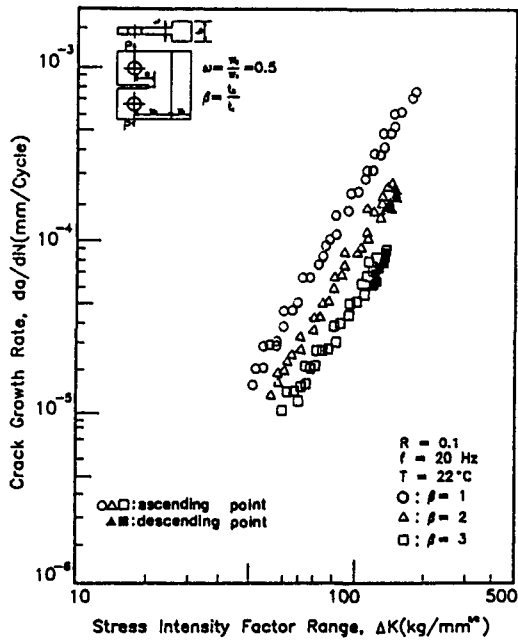


Fig. 12 da/dN- $\Delta K$  relationship for base metal specimens

CT형 변후모델에서 두께비를  $\beta=1, 2$  및 3으로 하고, 무차원 균열길이 ( $\lambda=a/W_1$ ) 를 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 및 0.95로 변화시켜, 이들 각각의 균열길이에 대한 K값을 수치해석하였다. 균후 및 변후용접시험편에서 피로시험을 통하여 구한 a-N 관계 결과로부터 균열성장속도 (da/dN) 를 구하여 응력확대계수 변동범위 ( $\Delta K$ ) 에 대한 안정성장 구간에서의 da/dN -  $\Delta K_{IV}$ 를 Plot하여 Fig. 13에 각각 Log-Log좌표로 나타냈다. da/dN -  $\Delta K_{IV}$ 의 관계에서는 균열성장초기에 da/dN이 감소하다가 다시금

증가하였으며, 동일한  $\Delta K_{IV}$ 에 대하여 두께비가 커짐에 따라 균열성장속도가 작게 나타났다. 변후용접시험편의 경우도 초기단계에서는  $\Delta K_{IV}$ 의 증가에 따라 균열성장속도가 감소하다가 다시금 증가하였다.

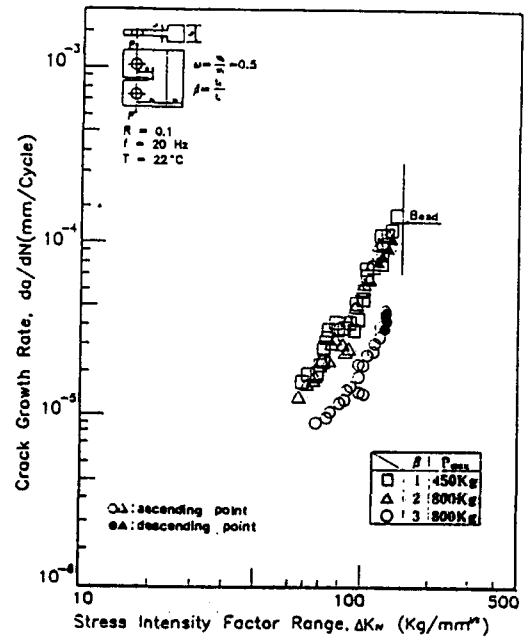


Fig. 13 da/dN- $\Delta K_{IV}$  relationship for as-welded specimens

### 5. 결 론

변후용접시험편에 대한 응력확대계수 K에 대하여 판폭비  $\omega$ , 두께비  $\beta$  및 무차원 크랙길이  $\lambda$ 의 함수로 2차원 유한요소 수치해석을 하고, 피로시험을 실시하여, 비교·검토해 본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. CT형 모델에 대한 2차원 유한요소 수치해석 결과 변후모델에 대한 SIF 해석은 2차원 유한요소 해석으로 충분하다고 판단된다.
2.  $\beta=1$ 인 균일두께 시험편에서 a-N곡선이 단순 증가하는데 비하여  $\beta=2$ 인 변후 시험편에서는 변후



경계에 도달하기까지의 하중반복수가 클 뿐만 아니라 변후경계 가까이에서 변곡점을 가진다.

3.  $da/dN - \lambda$  사이의 관계를 보면  $\beta=1$ 인 경우 균열성장속도( $da/dN$ )가 거의 직선적으로 증가하는 것을 볼 수 있지만,  $\beta=2$  및 3의 경우 균열성장속도가 변후경계 가까이에서 급감해 가는 양상을 볼 수 있다.

4.  $\beta=1$ 인 용접시험편, 용접후열처리 시험편은 균열성장속도가 직선적이지만,  $\beta=2$  및 3인 경우에는 균열성장속도가 변후경계 가까이에서 급감해 가는 양상을 볼 수 있으며 용접후열처리 시험편 보다 변후용접시험편에서  $da/dN - \lambda$  곡선이 아래쪽에 나타나는 것은 압축잔류응력의 영향으로 사료된다.

5.  $da/dN - \Delta K$ 의 양대수 그래프는  $\beta=1$ 인 경우 직선부분의 기울기  $m$ 값은 3.62이며 직선상으로 상승하였으며,  $\beta=2$  및 3인 경우에도 기울기  $m$ 값은 3.5~3.6으로 거의 비슷한 값을 보였다. 다만 두께비의 변화에 따른 균열성장속도는 두께비가 커짐에 따라 낮게 나타났다.

『이 논문은 한국과학재단 지정 지역협력연구센터인 조선대학교 수송기계부품 공장자동화연구센터의 연구비 지원에 의해 연구 되었음』

### 참 고 문 헌

1. K. Masubuchi, "Analysys of Welded Structures", International Series on Materials Science and Technology, Vol. 33, PP. 1-10, 1980
2. J. F. Lancaster, "Metallurgy of Welding", Third Edition, PP. 1-5, 1980
3. Y. W. Shi and B. Y. Chen, "Effects of Welding Residual Stresses on Fatigue Crack Growth Behaviour in Butt Welds of a Pipeline Steel"; Engineering Fracture Mechanics, Vol. 36, No. 6, PP. 893-902, 1990
4. V. Ramamurti and S. Suresh, "Residual Stress Analysis in Weldments", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 38,

- No. 6, PP. 385-391, 1991
5. S. Nair, R. C. Dix, "Residual Stress Generation and Relaxation in Butt-Welded Pipes", Transactions of the ASME, Vol. 104, PP. 188-192, 1982
6. Y. Ueda and T. Yamakawa, "Analysis of Thermal Elastic-Plastic Stress and Strain during Welding by Finite Element Method", Trans. of JWS 2-2, PP. 186-196, 1971
7. k. Ikeda and H. Kihara, "Brittle Fracture Strength of Welded Joints", Welding Journal, Vol. 49, No. 1-6, PP. 106-114, 1970
8. C. Weismam, "Welding Handbook", American Welding Society, Seventh Edition, Vol. 1, PP. 222-268, 1976
9. K. Masubuchi, "Analysis of Welded Structures", International Series on Materials Science and Technology, Vol. 33, PP. 189-327, 1980
10. S. Berge and O. I. Eide, "Residual Stress and Stress Interaction in Fatigue Testing of Welded Joint", ASTM STP 776, PP. 115-131, 1982
11. G. E. Nordmark, L. N. Muller and R. A. Kelsey, "Effect of Residual Stresses on Fatigue Crack Growth Rate in Weldments of Aluminum Alloy 5456 Plate", ASTM STP 776, PP. 44-62, 1982
12. X. R. Wu, "The Effect of Welding Residual Stress on Brittle Fracture of Plates with Surface Cracks", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 19, No. 3, 1984
13. 本田和男 外, "疲勞き裂先端近傍の 残留応力分布とき裂進展", 材料, 31卷, 342 號, PP. 210-214, 1982
14. 梁源鎬, "變厚境界 및 異材結合境界附近에서의 Crack tip Stress Intensity Factor (1)", 成均館大學校 科學技術研究, Vol. 7, PP. 77-85, 1979
15. ASTM Designation: E647-83, "Standard Test Method for Constant-Load Amplitude Fatigue Crack Growth Rate Above  $10^{-8}$  m/cycle", 1985