

# 알루미늄 합금 용접材의 疲勞破壞에 미치는 殘留應力의 影響에 關한 研究

차용훈\*, 김하식\*\*, 김덕중\*\*\*

## A Study on the Influence of Residual Stresses on Fatigue Fracture of Aluminum Alloy Weldments

Cha Yong-Hoon\* · Kim Ha-Sig\*\* · Kim Duck-Joong\*\*\*

### Abstract

This study is to inspect the influence of the initial residual stress on fatigue crack growth behavior after the distribution of the initial residual stress is measured when the crack is growing from the compressive residual stress field to the tensile residual stress field. Also, the influence of the variation of residual stress distribution on fatigue crack growth behavior at the crack tip is studied when the initial crack occurs on weld metal, bead interface and HAZ (Heat Affected Zone), respectively.

For this purpose, CT-type specimen that crack parallel to the welding bead were manufactured by butt welding on the Al. Alloy 1100-O plate.

### 1. 서 론

금속의 접합방법중 한 분야인 용접은 현대 산업의 발전에 큰 역할을 담당하고 있다. 용접에 의한 접합은 단조나 리벳이음 등 다른 접합방법에 비하여 높은 이음효율, 재료의 절감, 공수의 감소, 뛰어난 유밀성, 기밀성 등의 많은 장점들이 있어 그의 적용이 확대되어 왔다. 그리하여 현재 원자력 발전소와 같은 거대한 설비를 비

롯하여 자동차, 조선, 압력용기등의 기계공업분야에 널리 이용되고 있으며, 특히 항공기, 미사일, 로켓등 항공 우주산업에 필수적 수단이 되고 있다.<sup>(1)-(3)</sup>

그러나 용접은 짧은 시간에 국부적으로 고열을 수반하는 복잡한 야금적 접합이기 때문에, 제작 과정에서 상당한 결함을 초래하게 된다. 이러한 결합에는 용입불량(lack of penetration), 기공(blow hole), 불순물혼입(foreign inclusion) 및 균열(crack) 등이 있고, 이것들

\* 조선대학교 기계공학과(수송기계부품 공장자동화 연구센터)

\*\* 조선대학교 병설공업전문대학 기계공학과

\*\*\* 동아전문대학 자동차정비과

의 영향으로 용접부위에 균열이 발생되어 취성과파괴를 초래하기도 한다. 또한 단시간의 국부적인 가열에 따라 용접부위 근방에는 열응력, 냉각시의 수축(shrinkage during cooling)으로 인한 잔류응력 및 뒤틀림의 발생 등이 주요 문제가 되고 있다.<sup>(4)</sup> 이 중에서도 특히 잔류응력은 피로균열의 성장거동에 상당한 영향을 미치는 것으로 알려져 파괴역학적인 해석의 주요 대상이 되고 있다. 용접이음된 구조물에는 반드시 잔류응력이 존재하게 되는데 이 잔류응력은 응력부식균열, 좌굴강도의 저하, 파괴강도의 저하 등의 원인이 된다.<sup>(5-7)</sup>

용접부에 존재하는 용접잔류응력이 피로균열성장거동에 미치는 영향에 관한 연구들에서, 대부분의 연구자들은 예균열의 위치가 용착부, 열영향부에 위치한 경우에 대해 연구해 왔다.<sup>(8-12)</sup> 따라서 예균열의 위치가 용착부 및 열영향부 뿐만 아니라 비드경계부에 위치한 경우에 대해서도 그 연구가 필요하다고 생각된다.

본 논문에서는 용접잔류응력이 피로균열성장거동에 미치는 영향을 효율적으로 예측하기 위해 응력비 R를 변화시키면서 용접잔류응력이 피로균열 성장에 미치는 영향을 검토하고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1 시험편

본 실험에 사용된 시험편의 재료는 내산성에 강한 장점이 있어 화학장치산업의 압력용기, 저장탱크 및 열교환기 제작에 많이 사용되는 Annealing 상태의 알루미늄합금 Al.1100-O 판재이며 8mm두께의 판재를 사용하였다. 재료의 기계적 성질과 화학적 성분은 각각 Table 1 및 Table 2와 같다.

Table 1 Mechanical properties of Al. 1100-O

Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Longitudinal Modulus (kg/mm <sup>2</sup> )	Shear Modulus (kg/mm <sup>2</sup> )
34	90	35	7031	2637

Table 2 Chemical compositions of Al. 1100-O (Wt %)

Chemical Composition	Si+Fe	Copper	Mn	Zinc	Other Element		Al
					Each	Total	
Content	0.95	0.05-0.20	1.05	0.10	0.05	0.15	99

용접 판재로부터의 피로시험용 시험편의 제작은 ASTM E647-83(13)에 제시된 CT(Compact tension) 시험편에 준하여 제작하였다. Fig.1은 각 시험편의 용접위치를 나타낸 그림이며, Fig.2는 피로시험용 시험편의 형상과 치수이다.

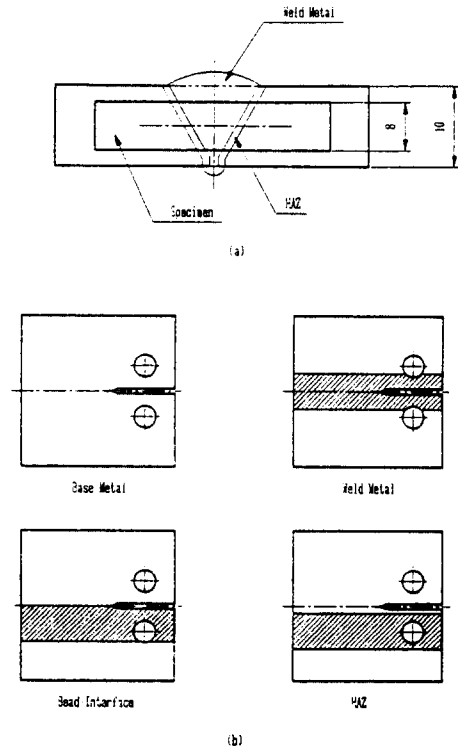


Fig. 1 Orientation of fatigue test

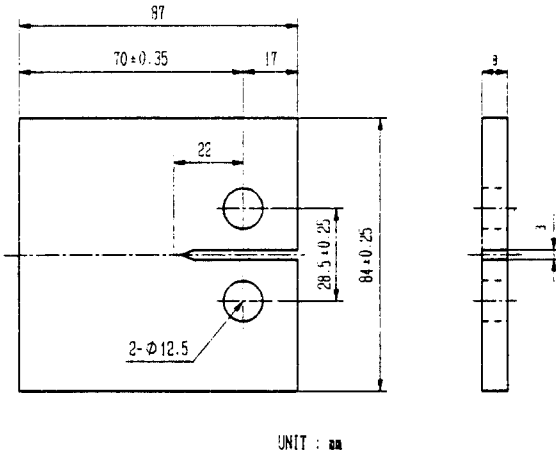


Fig.2 Dimensions and configuration of specimen

예균열은 황동 와이어를 사용하여 Wire cutting machine으로 가공하였다.

균열길이의 측정을 위해 기계가공된 시험편의 표면을 Sand paper #1200 까지 연마하고 산화알루미늄 ( $Al_2O_3$ )분말을 사용하여 최종연마를 했다. 하이트 게이지를 사용하여 예균열선단으로 부터 직각 방향으로 0.5mm 간격으로 Slip marking하였다.

시험편용접은 용접시 용접에 따른 변형을 최소화하기 위하여 모재와 같은 재질의 지그(Jig)를 사용하여 시험편에 구속을 준 상태에서 맞대기 용접(Butt Welding)을 수행하였다.

용접은 비용극식 불활성가스아크용접(Gas Tungsten Arc Welding: GTAW)으로 하였다. 용가재(Filler Metal)는 모재와 같은 재질의  $\varnothing 2.4$  및  $\varnothing 4.7$ mm의 AWS(American Welding Society) ER 1100 용접봉을 사용하였으며, 용가재의 화학적 성분은 Table 3과 같다.

Table 3 Chemical compositions of filler metal

(Wt.%)

Material	Composition(%)			
	Cu	Mn	Zn	Al
Al.1100-0	0.05~0.20	0.05	0.1	99.00

알루미늄 합금판재를 100mm × 900mm로 절단하여 Milling Machine으로 Groove 가공을 하였다. 모재 표면의 이물질이 용접 결함의 원인이 되지 않도록 Stainless Wire Brush와 Cloth Paper(#240)로 용접부위를 깨끗이 하고, 기공의 원인이 되는 습기를 방지하기 위해 온도 200°C 정도에서 1 시간이상 용접봉 건조로에서 충분히 용접봉을 건조시켰다.

용접은 Table 4와 같이 AWS D1.2-83의 Code(14) 규정에 따라 행하였으며 Shielding Gas는 아르곤 가스를 사용하였고, 그 성분은 Table 5와 같다.

Table 4 Conditions for GTA butt welding

Electrode Dia. (mm)	Filler Metal Dia. (mm)	Welding Position	Current (A)	Voltage (V)	Welding Speed (mm/min)	Argon Flow (cm <sup>3</sup> /min)
$\varnothing 3.2$	1 Pass $\varnothing 2.4$	FLAT	260	25.3	200	20
	2 Pass $\varnothing 4.7$					

Table 5 Compositions of argon gas

Composite (%)	Degree of Purity	Moisture	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	N
	99.9	0.02	1.002	0.003	0.1

맞대기용접의 제 1층은 용입부족이 되기 쉬워 후판에 균열 혹은 기공이 생기기 쉽다. 따라서 모재와 같은 재질의 Back plate를 부착시켜 완전히 용입시켰으며 또한 Cutting wheel로 기계적 이면각기(Grinding)를 한 후, 1층 이면용접을 하였다.

용접이 끝난 판재는 비파괴시험법의 방사선투과시험을 실시하여 KS-D-0242 합격 기준에 따라 용접결함이 없는 시험편을 채취하였다.

용접시 발생한 잔류응력을 제거하기 위해 용접후 일부 판재를 풀림처리를 하였다. 용접후열처리(PWHT)는 용접상태의 시험편을 가열 속도 180°C/hr로 450°C까지 가열한 후 30분 동안 유지한 다음 노냉하였다.

## 2.2 잔류응력 측정

초기잔류응력측정은 Strain Gage Sectioning Method(SGSM)를 이용하여 측정하였으며, 본 실험에서는  $\epsilon_x$ ,  $\epsilon_y$  의 2축 방향을 측정하였다.

측정 방법은 Fig.3와 같이 시험편의 용접비드를 제거



의 잔류응력 측정결과 잔류응력은 상당히 완화되었지만 완전히 제거할 수는 없었다. 용접 잔류응력의 분포는 용접재와 비슷한 양상을 보였다.

### 3.2 a-N 관계 고찰

피로균열성장거동의 해석은 피로를 받는 구조물의 최소피로수명을 예측해야 할 중요한 특성으로, 피로파손량이 균열 길이 양으로 직접 표시되고 있다.

Fig.5~Fig.7는 각각 용착부, 비드경계부, 열영향부에 대한 응력비 R=0.1 및 R=0.3인 경우 용접시험편과 용접후 열처리 시험편에 대하여 a-N 관계를 나타냈다. 여기에서 응력비 R=0.1인 경우가 R=0.3인 경우에 비하여 대체로 피로수명이 크게 나타났으며, 특히 용접후 열처리재 시험편의 경우 용접시험편보다 피로수명이 큰 것을 알 수 있다. 이것은 Fig. 5에서와 같이 모

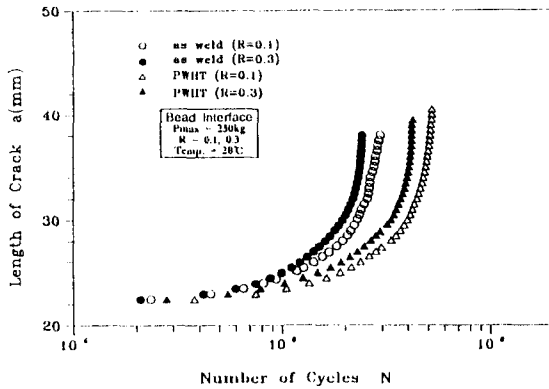


Fig. 5 Experimental a-N curves(Weld Metal)

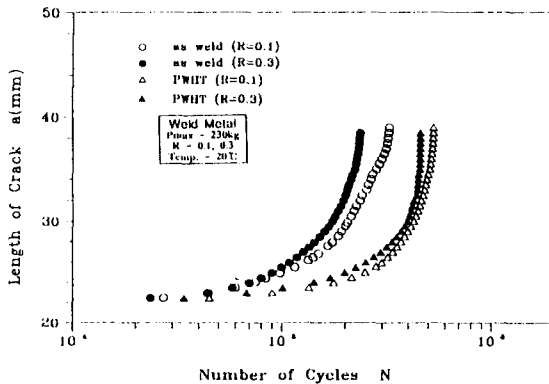


Fig. 6 Experimental a-N curves(Bead Interface)

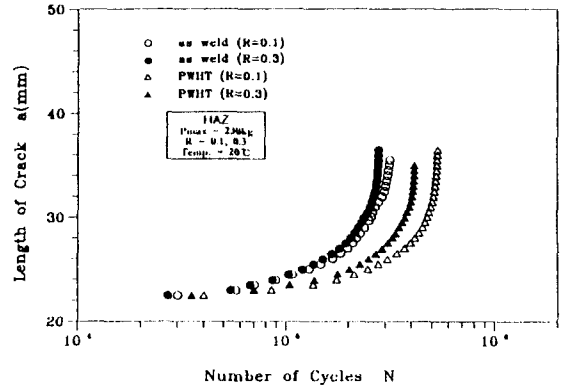


Fig. 7 Experimental a-N curves(HAZ)

든 용접 시험편의 경우 초기 균열 선단 부위에 압축 잔류응력이 균열 성장 전방에 분포되어 있는 데에 기인하는 것으로 생각된다.

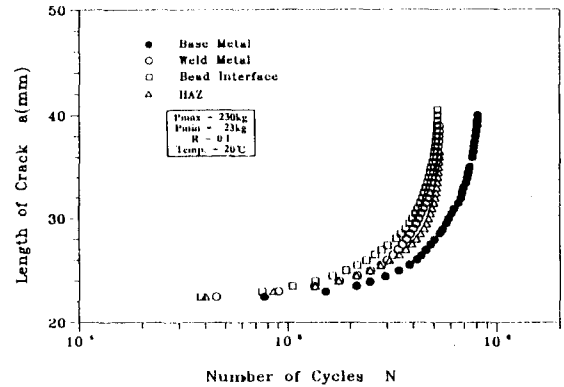


Fig. 8 Experimental a-N curves(PWHT, R=0.1)

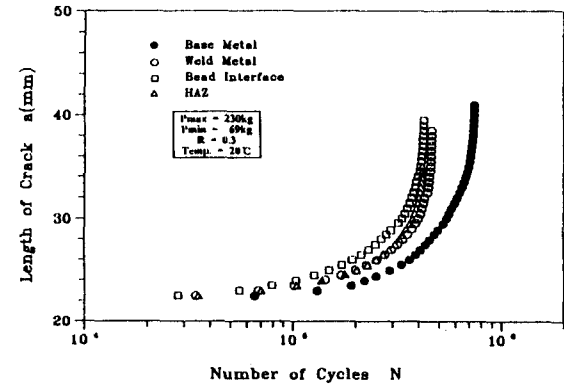


Fig. 9 Experimental a-N curves(PWHT, R=0.3)

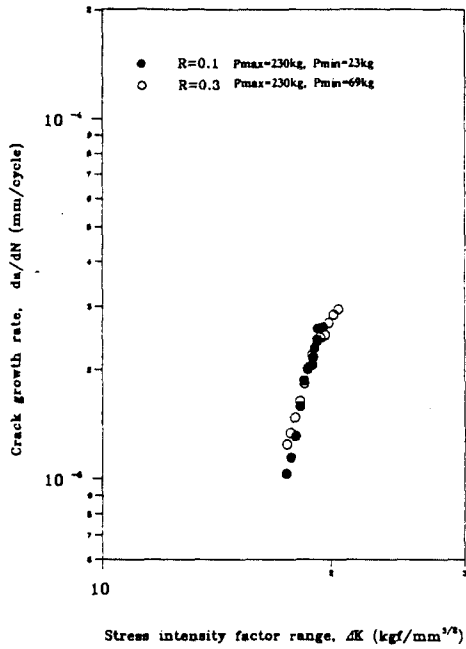


Fig. 10  $da/dN-\Delta K$  relations of base metal

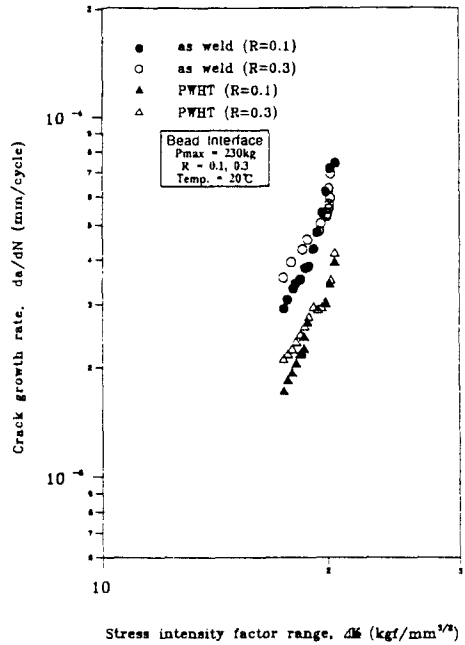


Fig. 12  $da/dN-\Delta K$  relations of bead interface

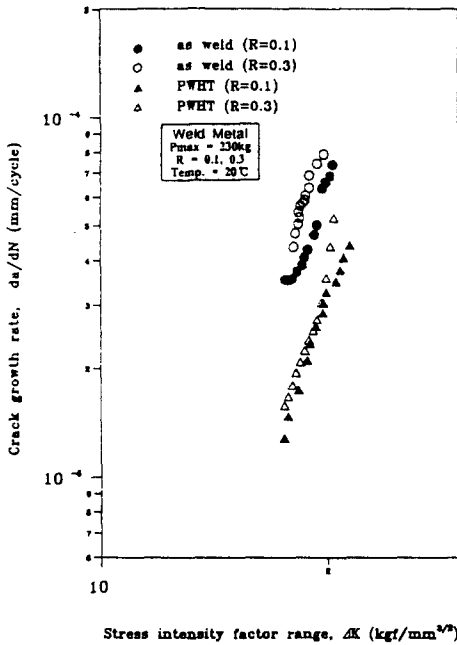


Fig. 11  $da/dN-\Delta K$  relations of weld metal

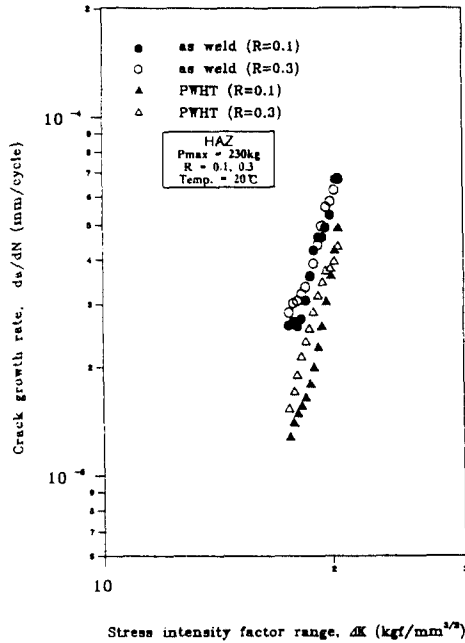


Fig. 13  $da/dN-\Delta K$  relations of HAZ

Fig.8 및 Fig.9은 응력비  $R=0.1$  및  $R=0.3$ 에 대한 용접후열처리시험편에서 모재, 용착부, 비드경계부, 열영향부에 대한  $a-N$ 관계를 나타냈다. 여기에서 모재 시험편의 경우, 다른 각각의 용접후열처리시험편에 비하여 피로수명이 약간 크게 나타났으나 용접시험편에서와 같이 큰 차이를 보이지는 않았다.

이와 같이 거의 비슷한 선도를 나타내는 것은 열처리에 의한 용접잔류응력이 거의 제거되어 용접전의 모재와 비슷한 양상을 나타내기 때문으로 생각된다.

### 3.3 $da/dN$ - $\Delta K$ 관계 고찰

Fig.10은 모재 시험편에 대해 피로시험을 하여 얻어진  $a-N$  관계로부터 구한 피로균열성장속도( $da/dN$ )를 응력확대계수 변동범위( $\Delta K$ )에 대하여  $\log$ - $\log$ 좌표로 나타내었다. Fig.10에서와 같이 모재의 경우 응력비  $R=1$  및  $R=0.3$ 에서는 피로균열성장속도  $da/dN$ 이 거의 비슷한 양상을 나타냈다. Fig.11~13은 용접시험편 및 용접후열처리 시험편에 대한 각각의 용착부, 비드경계부 및 열영향부에 대하여 응력비  $R=0.1$  과  $R=0.3$ 에서의  $da/dN$ - $\Delta K$  선도를 나타냈다. Fig.11과 같이 용착부에서는 용접후열처리 시험편 보다 용접시험편의 경우 동일한  $\Delta K$ 영역에서 피로균열성장속도  $da/dN$ 이 크게 나타남을 알 수 있다. 이것은 Fig.12 및 Fig.13인 비드경계부와 열영향부에서도 비슷한 양상을 보여 주고 있다. 또한 응력비  $R=0.3$ 의 경우  $R=0.1$ 인 경우에 비하여 동일한  $\Delta K$ 영역에서 피로균열성장속도  $da/dN$ 이 약간 크게 나타나고 있다. 피로균열성장속도는  $8 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-4}(\text{mm/cycle})$ 에서 Power Law인  $da/dN = C(\Delta K)^m$ 을 잘 만족하고 있다.

동일한  $\Delta K$ 영역에서 모재에 비하여 용착부에서 피로균열성장속도  $da/dN$ 이 아주 크게 나타났다. 이러한 사실은 용접잔류응력의 분포에서도 시험편의 끝 부분에서 압축잔류응력이 조금 나타났지만 시험편의 중간부위에 인장잔류응력이 존재하여 피로균열 성장속도  $da/dN$ 이 높게 나타나는 것으로 볼 수 있다.

여기에서 모재, 용착부, 비드경계부 및 열영향부에서  $\Delta K$ 의 증가에 따라 피로균열성장속도 ( $da/dN$ )는 거의 직선적으로 비슷하게 증가하고 있다.

본 연구에서는 알루미늄 합금(Al.1100-O)판재를 용접하여 용접재에 대해 초기잔류응력을 측정 한 후, 응력비  $R=0.1, 0.3$ 으로 피로시험을 행하여 피로균열성장거동에 미치는 초기잔류응력의 영향을 파괴역학적으로 고찰하여, 아래와 같은 결론을 얻었다.

1.  $a-N$ 곡선의 관계에 있어서 용접재의 경우 응력비  $R=0.1, 0.3$ 에 관계없이 피로수명은 용착부, 비드경계부, 열영향부는 거의 같았으나 모재는 이들보다 훨씬 큰 피로수명을 나타내었다. 또한 용접후열처리재에서의 피로수명은 용접재와 비교하여 각각 큰 폭으로 증가하였지만 모재보다는 약간 작게 나타났다. 이는 용착부, 비드경계부, 열영향부에서 인장잔류응력의 영향으로 생각된다.
2.  $da/dN$ - $\Delta K$  관계에 있어서 동일한  $\Delta K$ 값 범위에서 용접재의 경우 용착부, 비드경계부, 열영향부는 비슷한 경향을 보이고 모재는 이들보다 훨씬 빠른 균열진전율을 보였다. 또한 용접후열처리재에서는 용접재와 비교하여 상당히 빠른 진전율을 보였지만, 모재보다는 느리게 나타남을 알 수 있었다.

「이 논문은 한국과학재단 지장 지역협력연구센터인 조선대학교 수송기계부품 공장자동화 연구센터의 연구비 지원에 의해 연구되었음.」

### 참 고 문 헌

- (1) J.F.Lancaster, "Metallurgy of Welding", Third Edition, PP.1-5, 1980
- (2) 鈴木春義, "改訂最新銲接工學", コロナ社, PP.1-3, 1980
- (3) K.Masubuchi, "Analysys of Welded Structures", International Series on Materials Science and Technology, Vol.33, PP.1-10 1980
- (4) 이광주, "疲労強度에 미치는 銲接缺陷의 影響", 大宇造船工業株式會社 技術紙(大宇造船 技術), Vol.3, No.10, PP.19-32, 1986
- (5) 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

### 4. 결 론

- (6) D.V.Nelson, "Effect of Residual Stress on Fatigue Crack Propagation"ASTM STP 776, PP.172-194, 1982
- (7) H.M.Westergaard, "Bearing Pressures and Cracks", Trans. ASME, J. Appl. Mech., Vol.6, pp.49-53, 1939
- (8) 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(9) R.J.Bucci, "Effect of Residual Stresses on Fatigue Crack Growth Rate Measurement", ASTM STP 743, PP.28-47, 1981
- (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 Weldment of Aluminum Alloy 5456 Plate", ASTM STP 776, PP.42-62, 1982
- (12) B.M.Kapadia, "Influence of Residual Stresses on Fatigue Crack Propagation in Electroslag Welds", ASTM STP 648, PP.244-260, 1978
- (13) Standard Test Method for Constant-Load Amplitude Fatigue Crack Growth Rate Above 10<sup>-8</sup>mm/Cycle, ASTM E647-83, PP. 765-783, 1985
- (14) ASME, Material Specifications, Part C - Welding Rods, Electrodes, and Filler Metals, SFA-5.10, PP.165-166, 1986