

스폿용접된 자동차 차체용 알루미늄 박판의 피로균열진전의 파괴역학적 평가

박 인 덕* · 남 기 우** · 강 석 봉***
(97년 2월 27일 접수)

A Fracture Mechanics Evaluation on the Fatigue Crack Propagation at Spot Welded Aluminum Joint in Passenger Car Body

In-Duck Park* · Ki-Woo Nam** · Suk-Bong Kang***

Key Words : Fatigue(피로), Fracture Mechanics(파괴역학), Spot Weld Joint(스폿용접부), Fatigue Limit(피로한도), Fatigue Crack Propagation(피로균열진전), Stress Intensity Factors(응력확대계수)

Abstract

The fatigue crack propagation properties and fatigue life of two kinds of Al body panel for automobile were examined experimentally by using the plate specimen and the single spot welding specimen. The fatigue limit of spot welding specimens was lower than that of a plate specimen. The fatigue limit was similar in two kinds of spot welding specimen. The shape and size of crack propagation were observed and measured on beach mark of fracture surface. The crack propagation of surface crack specimen showed almost same tendency to that of a thick plate as almost semi-elliptical. In spot welding specimen, the fatigue crack occurred in inside surface of nugget area was almost semi-elliptical. The crack growth rate can be explained using equation of stress intensity factors.

1. 서 론

자동차의 연비를 향상시킬 수 있는 방법으로는 소재의 경량화, 엔진의 출력 향상, 공기저항을 최대로 작게 하기 위한 몸체 설계 등이 있다. 현재로

서는 자동차의 연비를 향상시킬 수 있는 최적의 방법은 자동차의 소재를 경량화 하는 방법이다. 일반적으로 자동차의 중량과 연비와의 관계는 차중량을 1% 경량화 하면 연료 소비는 거의 1% 정도 줄어든다¹⁾. 또한 최근 들어 자동차의 경량화 문제

* 부경대학교 대학원

** 부경대학교 재료공학과

*** 한국기계연구원 재료기술연구부

는 연비향상인 측면과 이와 관련되는 대기오염적인 환경적 측면에서 상당히 큰 문제로 대두되고 있다.^{2),3)} 이에 각국에서는 미국에서 제정된 연비강화 규제 법안⁴⁾에 준하여 그 대책을 여러 가지로 강구하고 있는 실정이며, 이미 각 선진국에서는 여러해 전부터 자동차의 경량화 소재로 알루미늄 합금을 채택하여 차체 여러 부분에 성공적으로 실용화하고 있다.^{5),6)} 알루미늄의 경우 소재의 원가가 비싸다는 단점이 있지만, 기존 생산설비의 사용가능성과 재활용이 가능하다는 점에서 복합재료보다 더욱 활발하게 연구되고 있다. 자동차 차체용 재료에는 여러 가지 복잡한 형상으로서의 성형이 가능한 성형성, 재료접합을 위한 용접성, 충돌 등에 견딜 수 있는 강도를 지니는 안전성, 운전중에 반복되는 하중에 대한 피로특성등 여러 가지 특성이 요구된다.⁷⁾

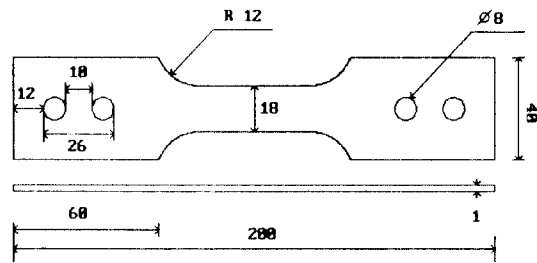
따라서 본 연구에서는 자동차 차체용 알루미늄 합금 2종류(TG25, AC120)를 사용하여 평활재 및 점용접재에 있어서, 피로 한도 및 피로 균열 진전 특성을 파괴 역학적으로 규명하였다.

2. 시험편 및 실험 방법

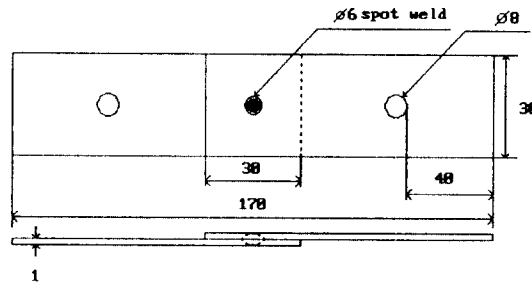
본 실험에 사용한 재료는 자동차 경량화 재료로서 개발된 5000계 알루미늄 합금인 TG25와 6000계 알루미늄 합금인 AC120 두 종류이다. 5000계 (Al-Mg) 알루미늄 합금은 주로 복잡한 형상을 가진 자동차 내판재로 사용되어지고, 6000계 (Al-Mg-Si) 알루미늄 합금은 고강도와 적정한 성형성이 요구되는 자동차 외판재로 사용되어지고 있다. 모든 실험은 냉간압연 후 최종 두께가 1mm이고, 열처리 T4 처리를 실시한 상태로 시판되고 있는 소재(as received)를 사용하여 실시하였다. 이들의 기계적 성질과 화학적 성분을 Table 1에 나타낸다. 여기서 균일한 신장량은 최대 하중까지의 연신율이며, 전신장량은 균일한 신장량과 그 후 파단시까지의 연신율의 합이다.

피로 시험에 사용한 평활재 및 점용접재의 형상 및 치수를 Fig.1의 (a)와 (b)에 나타낸다. 이 때 점용접재는 Table 2와 같은 용접 조건으로 너겟직경이 $\phi 6$ 이 되도록 하였다. 또한, 평활재의 균열형상은 중앙 균열, 편측 균열, 표면 균열의 3종류로 하였으며,

각각의 균열 길이는 $2a_0=1mm$, $a_0=0.5mm$, $2a_0=1mm$ 로 하였다. 균열의 가공은 중앙 균열은 $\phi 0.8$ 의 드릴로 하였으며, 편측균열과 표면 균열은 예리한 컷터를 이용하여 가공하였다. 시험편의 치수 및 시험조건을 일괄하여 Table 3에 나타낸다. 점합부 용접단 내면의 공칭응력 σ_n 은 단면평균인장응력 σ_m 과 편심인장에 의한 굽힘응력 σ_b 의 합으로서 식(1)과 같이 주어진다⁸⁾. 여기서 $2W$ 는 판폭 (mm), P 는 하중 (kg), t 는 판두께 (mm)이다.



(a) Smooth specimen



(b) Spot welding specimen.

Fig. 1 Specimen geometries ; All dimensions in mm.

Table 1 Mechanical properties and Chemical composition(% wt) of the tested materials

Alloy	Tensile Strength (MPa)	Yield Stress (MPa)	Total Elongation (%)	Uniform Elongation (%)				
TG25	269.7	122.2	32.3	29.2				
AC120	235.3	127.5	28.1	24.6				
Alloy	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
TG25	0.07	0.10	-	0.02	5.60	0.01	-	0.01
AC120	1.25	0.25	0.07	0.07	0.40	0.20	0.01	0.01

Table 2 Spot welding condition

Alloy	Total Welding Time (6 Cycle/Sec.)		Welding Current kA	Welding Force N
	Squeeze Time	Welding Time		
TG-25	2	4	24	1961.4
AC-120				

$$\sigma_n = \sigma_m + \sigma_b = \frac{P}{2Wt} + \frac{3P}{2Wt} = \frac{4P}{2Wt} \quad (1)$$

피로시험은 최대하중 10ton의 전기 유압식 피로시험기를 사용하여 실온대기중에서 실시하였다. 또 시험시의 제어는 파형은 정현파, 주파수는 1Hz ~ 30Hz, 응력비 $R=0.1$ 의 하중 제어로 하였다. 이 때 피로 한도 시험시의 변위 및 연신율을 구하기 위하여 평활재의 표점거리는 50mm로 하였고, 점용접재의 표점거리는 30mm로 하였다.

Table 3. Specimen dimensions and condition.

Specimen No.	Specimen Geometry			Nominal Stress $\Delta\sigma_n$ (MPa)	Stress Ratio R	Remark
	t (mm)	2W (mm)	2a _n (mm)			
TG-C	1	18	1.0	112.8	0.1	center crack
TG-S	1	18	0.5	112.8	0.1	single edge crack
AC-C	1	18	1.0	112.8	0.1	center crack
AC-S	1	18	0.5	98.1	0.1	single edge crack
No. 1	1	18	1.0	152	0.1	surface crack(TG)
No. 2	1	18	1.0	156.9	0.1	surface crack(TG)
No. 3	1	30	-	100	0.1	spot weld(TG)
No. 4	1	30	-	100	0.1	spot weld(TG)
No. 5	1	30	-	117.7	0.1	spot weld(AC)
No. 6	1	30	-	105.9	0.1	spot weld(AC)

한편, 중앙 균열 및 편측 균열의 균열 길이 a 는 쌍안 실체 현미경으로 측정하였다. 또한, 표면 균열은 반원 균열을 가공한 측(앞면)과 균열이 관통한 측(뒷면)에서의 균열 길이 $2a_s$ 및 $2a_b$ 는 쌍안 실체 현미경을 사용하여 측정하였다. 또 표면 균열의 균열 깊이는 비치마크법에 의하여 파단후에 측

정하였다. 그리고 점용접재의 균열 진전은 비치마크법에 의하여 파단후에 표면 길이와 깊이를 측정하였다.

3. 응력확대계수의 평가

응력확대계수 변동폭 ΔK 는, 평활재에서 중앙균열의 경우는 Tada의 식으로 구하였고, 편측균열의 경우는 Brown의 식으로 구하였다⁹⁾.

표면균열을 갖는 평활재의 응력확대계수 평가는 균열이 관통하기 전에는 식(2)에 나타내는 Newman-Raju의 식¹⁰⁾을 사용하여 평가하였다.

$$K = (\sigma_m + H\sigma_b)\sqrt{\pi b/Q} \cdot F \quad (2)$$

또한, 표면 균열이 판 두께를 관통한 후의 앞면과 뒷면의 응력확대계수 K_{a_s} , K_{a_b} 는 식(3)과 식(4)와 같은 식으로 평가하였다¹¹⁾.

$$K_{a_s} = \delta(a_e) / \delta(a_s) \sigma \sqrt{\pi a_s} \cdot F(\eta_s) \quad (3)$$

$$K_{a_b} = \delta(a_e) / \delta(a_b) \sigma \sqrt{\pi a_b} \cdot F(\eta_b) \quad (4)$$

점용접재에 있어서 응력 확대 계수를 구하는 방법으로는 Newman-Raju가 제안한 응력 확대 계수 평가식을 사용하여 중첩의 원리에 의한 근사적인 방법에 의하여 식(5)과 같은 식으로 주어진다¹²⁾.

$$K_s = [(2W/D + 1)/2 \cdot \sigma_m + H\sigma_b] \sqrt{\pi b/Q} \cdot F \quad (5)$$

여기서 $2W$ 는 판폭, D 는 너겟부의 직경이다.

4. 결과 및 고찰

4-1. 피로한도

본 실험에서 사용한 재료인 알루미늄 합금의 평활재 및 점용접재의 피로시험 결과를 Fig.2에 나타내었다. 이 그림에서 평활재의 피로한도는 TG25는 1.7KN정도이고, AC120은 1.9KN정도였다. 그리고, 점용접재의 경우, TG25와 AC120의 피로한도

는 0.5KN정도로 비슷하였다. 이 그림에서 기호□는 住友輕金屬工業(株)技術研究所¹³⁾에서 너겟직경 $\phi 6$ 의 GC45($Al-4.5Mg-Cu$)재료에서 실시한 결과를 본 실험과 비교하기 위하여 함께 나타내었다.

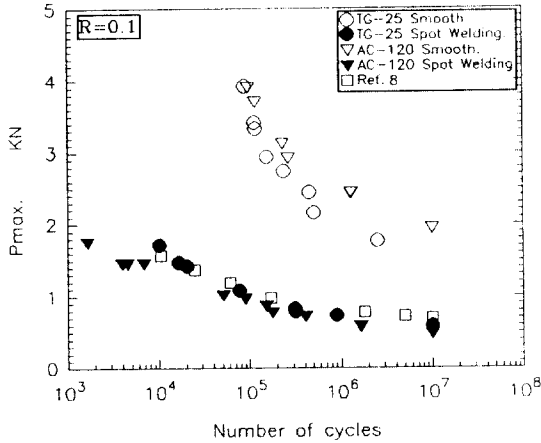


Fig. 2 Relation between load and number of cycles at fatigue tests.

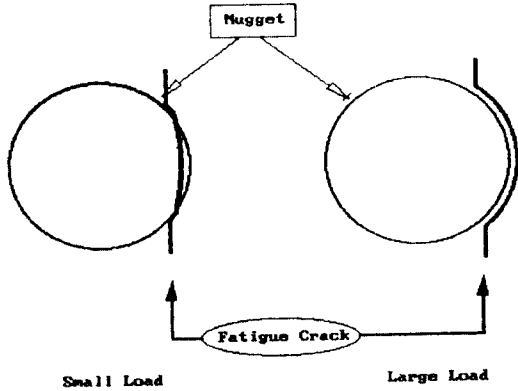


Fig. 3 Schematic outer appearance of fatigue fracture.

피로시험의 결과 파단 양상은, 평활재의 경우는 모두 평탄부에서 파괴되었으며, 균열이 편측에서 발생하여 수 mm 진전한 후 파괴되었다. 따라서 피로 균열이 진전한 곳에서는 평탄한 면을 나타내며 하중선에 대하여 수직하나, 연성형 파괴를 나타내

는 최종파괴 부분은 전단형 파괴를 보였다. 한편 점용접재에서는 너겟단 또는 열영향부에서 균열이 발생하여 너겟을 따라서 둥글게 진파한 후 파단하였다. 점용접재의 경우 하중의 고저에 따라서 점용접부를 중심으로 소성 관절 (*Plastic hinge*)이 다르게 나타나고 있다. 이러한 원인에 의하여 Fig.3에 나타내듯이 저하중의 경우는 너겟단에 균열이 발생한 후 하중방향에 수직하게 균열이 진전하여 파단하였고, 고하중의 경우는 열영향부에서 균열이 발생하여 너겟주위를 둥글게 진전한 후 파단하는 소위 *button and hole*형상을 나타내었다⁸⁾.

4-2. 중앙 및 편측 균열을 갖는 평활재의 균열진전특성

보통의 철강재에서 피로 균열 진전 특성은 응력 확대 계수에 의해서 설명되어지고 있다. 지금까지 피로 균열 진전 특성을 정리하기 위해서 제안된 수많은 식이 있지만, 가장 폭넓게 해석에 응용되고 있는 것은 *Paris*법칙이다. *Paris*법칙은 피로 균열 진전에 선형 파괴 역학이 응용된 초기에 제안된 가장 단순한 식이다. *Paris*법칙은 피로 균열 진전 속도 da/dN 과 응력 확대 계수 범위 ΔK 와의 함수로써 식(6)와 같이 주어진다¹⁴⁾.

$$da/dN = C(\Delta K)^m \quad (6)$$

여기서 C 와 m 은 재료 정수이다.

중앙 균열 및 편측 균열을 갖는 평활재에서 피로 균열 진전 특성을 비교 검토하기 위하여, 피로 균열 진전 시험을 실시하였다. 중앙 균열 및 편측 균열을 갖는 평활재에서 얻어진 $a-N/N_f$ 곡선을 Fig.4에 나타낸다. 여기서 a 는 균열 진전 길이를 나타내고, N/N_f 는 하중 반복수를 파단수명으로 무차원화 한 것이다. 이 그림에서 균열 발생 수명 등의 영향을 제거하기 위하여, 균열 길이가 0.1mm 진전하였을 때의 하중반복수를 0으로 하였다. 피로 균열의 진전은 피로 수명의 95%까지 완만하게 성장하다가, 그 후 급격하게 성장하여 파단에 이르고 있다.

Fig.4와 같은 중앙균열과 편측균열을 갖는 평활재의 $a-N/N_f$ 선도에서 균열 진전 속도 da/dN 를 구하고, Tada와 Brown의 식⁹⁾에서 응력 확대 계수 범위 ΔK 를 구하여 양대수상에 플롯트 한 결과를 Fig.5에 나타낸다.

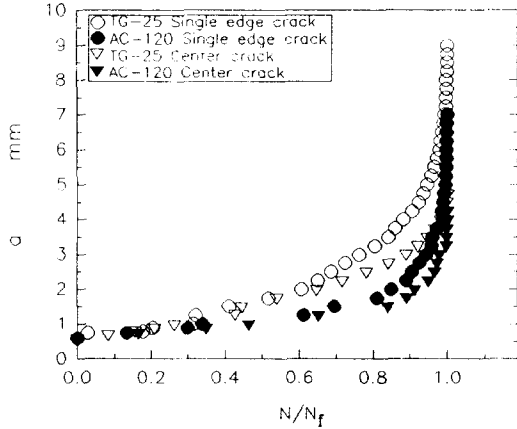


Fig. 4 Fatigue crack growth behaviors at smooth specimen.

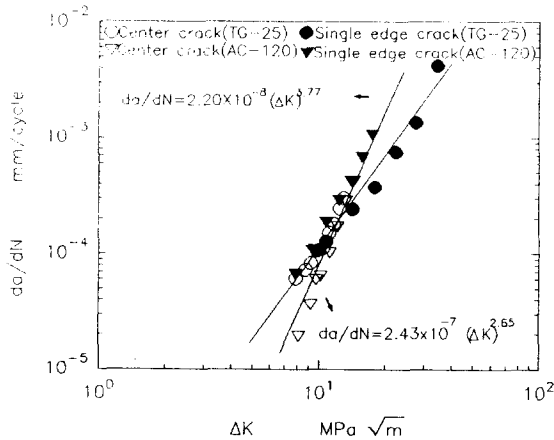


Fig. 5 Crack growth rate vs. stress intensity factor range at smooth specimen with center and single edge crack.

이 그림에서 균열 진전 속도 da/dN 와 응력 확대 계수 범위 ΔK 는 직선 관계가 성립하는 것으로

볼 수 있다. 이 그림에서 기호○, ▽는 중앙 균열을 갖는 평활재를 나타내고, 기호●, ▼는 편측균열을 갖는 평활재를 나타낸다. 동일 재료에서는 균열의 양상이 달라도, 관통균열의 경우에는 각 시험편에서의 da/dN 과 ΔK 의 관계는 식(7)과 식(8)로 정리될 수 있음을 알았다.

$$TG25 \text{ Al alloy : } da/dN = 2.43 \times 10^{-7} (\Delta K)^{2.65} \quad (7)$$

$$AC120 \text{ Al alloy : } da/dN = 2.20 \times 10^{-8} (\Delta K)^{3.77} \quad (8)$$

여기서 단위는 da/dN 는 $mm/cycle$ 이고, ΔK 는 $MPa\sqrt{m}$ 이다.

4-3. 표면 균열을 갖는 평활재 및 점용접재의 균열진전특성

TG25합금의 표면균열을 갖는 평활재 No.2시험편에서 얻어진 $a-N/N_f$ 선도를 Fig.6에 나타낸다. 이 때 종축의 a_s 는 관통전 앞면의 균열 길이이고, a_b 는 관통 후 뒷면의 균열 길이를 나타낸다. 그리고 횡축은 하중반복수를 파단수명으로 무차원화한 것을 나타낸다. 기호○, ▽는 각각 관통전 앞면에서의 좌측과 우측의 균열 길이를 나타내고, 기호●, ▼는 각각 관통후 뒷면에서의 좌측과 우측의 균열 길이를 나타낸다. 표면에서의 균열 진전 특성은 균열이 뒷면에 관통한 후에도 큰 변화는 없고, 거의 연속적인 거동을 나타내고 있다. 이것에 대하여 뒷면에서는 매우 빠른 균열 성장 특성을 나타내고 있다. 즉, 뒷면에서의 균열 성장 속도는 가속하여, 표면에서의 균열 길이에 접근하여 파괴에 이르고 있다. 이러한 거동은 두꺼운 시험편에서 얻어진 결과와 같은 경향을 나타내고 있다.^{15),16)} 또 그림 중의 실선은 계산에서 얻어진 $a-N/N_f$ 선도이다. 이 계산은 Newman-Raju의 평가식 (2)와 식(3), 식(4)로 평가한 ΔK 및 피로 균열 전파 법칙 식(9)가 사용되었다. 이 그림에서 계산에서 얻어진 결과는 실험 결과와 좋은 일치를 보이고 있음을 알 수 있다.

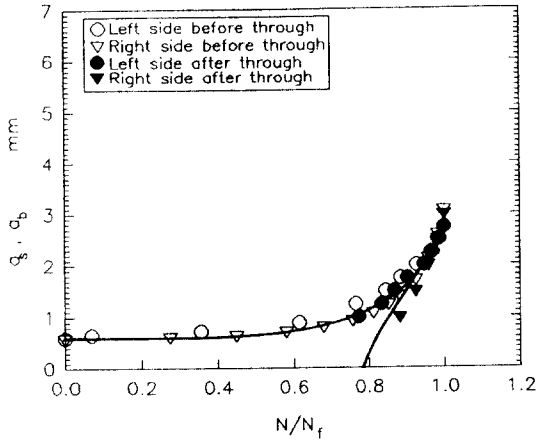


Fig. 6 Relation between crack length and N/N_f at No. 2 smooth specimen with surface crack.

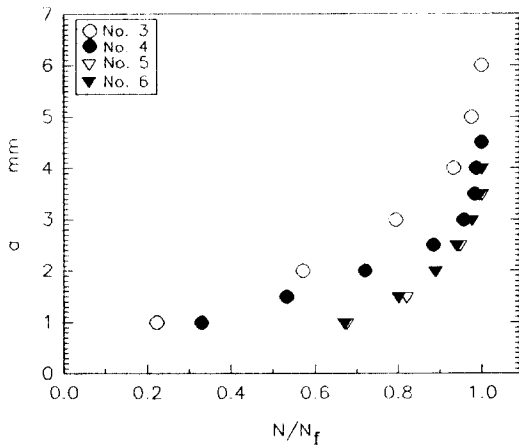


Fig. 7 Fatigue crack growth behaviors at spot welding specimen.

Fig.7은 점용접재에서 얻어진 $a-N/N_f$ 선도이다. 이 그림에서 종축의 균열 길이 a 는 파단면의 비치마크에서 얻어진 것이다. 그리고 횡축은 하중 반복수를 파단수명으로 무차원화한 것이다. Fig.7에서 균열 길이 a 와 하중의 반복수 N/N_f 와의 관계는 평활재와 같이 단조 증가하고 있다. 그러나 점용접재의 경우, 피로 균열은 최초에 판재표면의 너겟원주를 따라 어느 범위에서 발생하고 진전하기 때문에 그 균열 전방은 실제로 3차원이고

복잡한 곡선을 형성하여 이 단계에서는 균열 길이의 연속적인 추정이 곤란하다고 생각된다. 그러나, 어느 정도 균열이 성장하면 판 내표면에서의 피로 균열 선단은 열영향부 내에서의 너겟원주와 모재의 내부에서는 각각 안정한 조건하에서 진전하므로 판 내표면 상태에서의 균열 성장은 안정한 특성을 나타낸다고 생각한다. 하중축방향에서 보면 점용접부에서 너겟원주를 따라 진전한 피로 균열이 너겟부에서 멀어지고 열영향부를 진전하여 하중축방향의 모재측으로 파단한다. 이들 위치에는 점용접에 의하여 조직 변화, 잔류응력, 형상에 의한 응력 집중이 존재한다. 이와 같이 판 내표면에서의 피로 균열 선단은 재료 조직 변화와 응력 환경이 대단히 복잡한 영역을 통과하여 진전하기 때문에 Fig.7의 균열 진전 곡선도 실제적으로 상당히 복잡한 형을 나타내리라 생각한다. 李¹⁷⁾는 2.9mm와 0.8mm두께의 자동차용 열간압연강판의 점용접부 실험에서, 피로균열은 내표면 접합부, 접합부 근방 또는 열영향부에서 발생하는 수가 있다고 하고 있다. 또 이들 균열은 1점 뿐만이 아니고, 어느 범위에서 발생한 후 일정시간 동안 내표면 접합부 원주를 따라서 진전 성장하며, 이와 같은 작은 균열은 판 내표면에서 일정 치수의 표면균열이 될 때까지 성장하여 판 두께방향으로 진전한다고 하고 있다. 한편 藤本¹⁸⁾는 1.6mm두께 냉연강판을 사용하여 실시한 실험에서, 점용접부의 피로균열은 판 내표면 접합부 원주를 따라서 발생, 성장하면서 판 두께방향으로 진전한다고 설명하고 있다.

3절의 식들에서 얻어진 응력 확대 계수 변동폭 ΔK , ΔK_a , ΔK_u 와 피로 균열 전파 속도 da_s/dN , da_b/dN 와의 관계를 Fig.8에 나타낸다. 여기서 ΔK 는 균열이 관통하기 전까지 값이고, ΔK_a 는 관통후 앞면의 값, ΔK_u 는 관통후 뒷면의 값이다. 그리고, da_s/dN 는 앞면의 균열전파 속도이고, da_b/dN 는 뒷면의 균열전파속도이다. 그림에서 기호○는 표면균열을 갖는 평활재의 관통 전후 앞면과 뒷면에서 얻어진 값이고, 기호●, ▼는 TG25 점용접재에서 얻어진 값이고, 기호▽, □는 AC120 점용접재에서 얻어진 값이다. 이 그림에서 점용접

재의 균열성장이 표면균열을 갖는 평활재보다 가속측에 있음을 알 수 있다. 표면균열을 갖는 평활재의 피로 균열 전파 속도는 균열 관통 전후에 관계없이, 점용접재에서도 중첩 모델에 의한 ΔK 계산값을 사용하므로써 피로 균열 전파 법칙은 다음 식과 같이 정리됨을 알 수 있다.

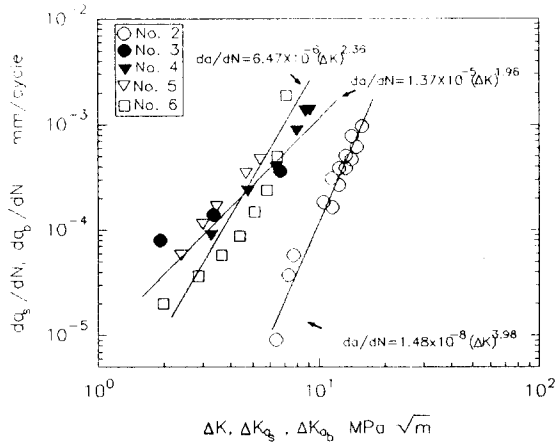


Fig. 8 Crack growth rate vs. stress intensity factor range for surface crack and spot welding specimen

표면균열을 갖는 평활재 :

$$da/dN = 1.48 \times 10^{-8} (\Delta K)^{3.98} \quad (9)$$

TG25 점용접재 :

$$da/dN = 1.37 \times 10^{-5} (\Delta K)^{1.96} \quad (10)$$

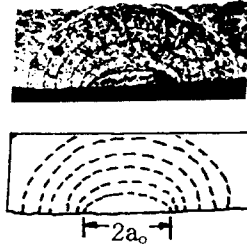
AC120 점용접재 :

$$da/dN = 6.47 \times 10^{-6} (\Delta K)^{2.36} \quad (11)$$

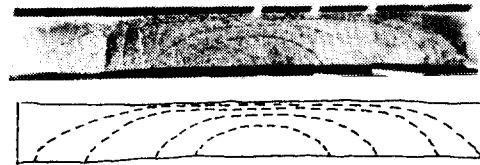
여기서 단위는 da/dN 는 $mm/cycle$ 이고, ΔK 는 $MPa\sqrt{m}$ 이다.

표면균열을 갖는 평활재 및 점용접재에서 얻어진 피로 파면의 거시적 양상을 Fig.9에 나타낸다. 여기서 (a)는 표면균열을 갖는 평활재에서 얻어진 결과이고, (b)는 TG25 점용접재에서, (c)는 AC120 점용접재에서 얻어진 결과이다. (a)에서 피로 균열은 반원형으로 진전하고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 (b), (c)의 점용접재 파단면의 피로

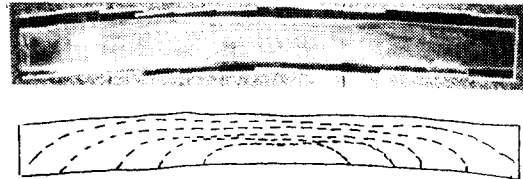
균열은 표면균열을 갖는 평활재보다 균열 진전 형상이 편평화되어 있으며, 반타원 형상을 나타내고 있다. 이것은 점용접에 의하여 시험편이 편심되므로 인장 응력외에 굽힘 응력도 작용한 것이 원인이라 생각한다.



(a) Smooth specimen with surface crack(No.1)



(b) TG25 spot welding specimen(No. 3)



(c) AC120 spot welding specimen(No. 5)

Fig. 9 Fatigue fracture surfaces and its sketch

Fig.9의 파단면에서 균열의 종횡비 (b/a)를 구하여 깊이 (b/t)와의 상관관계를 Fig.10에 나타낸다. 이 그림에서 기호○, △는 표면균열을 갖는 평활재의 종횡비를 나타내고, 기호□, ▽는 점용접재의 종횡비를 나타낸다. 점용접재의 종횡비는 표면균열을 갖는 평활재의 종횡비보다 적은 것을 알 수 있고, 종횡비의 값은 대략 0.2전후의 범위에서 변동하고 있다. 이러한 경향은 0.8mm두께의 강

판에서 얻어진 종횡비(●, ▲)의 성장 특성과 유사한 거동을 나타내고 있다¹⁷⁾. 본 연구에서와 같이 판 두께에 비하여 무시할 수 없을 정도의 긴 표면 균열을 갖는 초기 균열에서의 피로 균열 성장은 Kawahara에 의하여 성장 특성이 제안되어 있다¹⁹⁾. Kawahara의 식에서 얻어진 균열성장특성을 Fig.10에 ▼, ■로 나타낸다. 그리고 그림 중의 ◆, 는 피로 균열 진파 법칙과 Newman-Raju에 의한 응력 확대 계수의 평가식(2)에 의하여 평가된 ΔK 를 사용하여 계산에서 얻어진 균열 성장을 나타낸다. 전체적으로 보아 Kawahara에 의한 피로 균열 성장특성과 Newman-Raju식에 의한 피로 균열 성장특성은 실험 결과와 유사한 성장 거동을 나타낸다고 볼 수 있다.

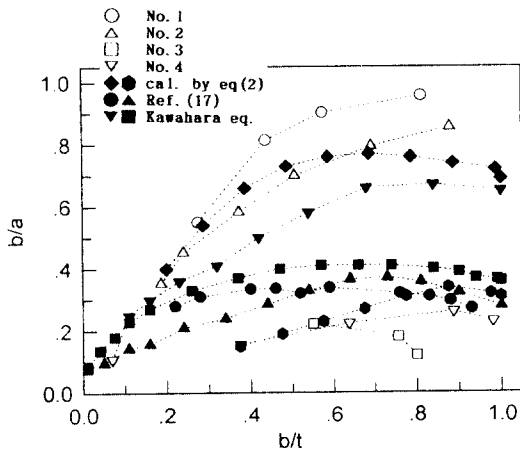


Fig. 10 Aspect ratio

5. 결 론

자동차용 재료인 알루미늄 합금 TG25 와 AC120을 사용하여 피로한도 및 피로 균열 진전 실험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 평활재의 피로한도는 두 재료에서 비슷한 값을 보였으며, 점용접재의 피로 한도도 두 재료에서 비슷하였다.
- (2) 표면균열을 갖는 평활재 및 점용접재에서 균열의 진전형상, 진전속도는 파면의 비치마

크에서 관찰함으로써 피로 균열의 진전 특성과 균열 형상의 특징을 파악할 수 있었다.

- (3) 표면균열을 갖는 평활재 및 점용접재에 있어서 균열진전은 피로 균열 진전 법칙으로 설명할 수 있었고, 점용접재의 균열성장이 평활재보다 가속측에 있음을 알 수 있었다.
- (4) 균열 진전 형상은 표면균열을 갖는 평활재에서는 반타원형의 형상으로 진전하고, 점용접재에서는 내표면의 너겟 근방에서 발생한 피로 균열은 거의 반타원형상을 유지하면서 판두께 방향으로 진전, 성장하였다.

“이 논문은 1996년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음”

참고문헌

- 1) 조원석, “자동차 산업의 신소재 기술”, 대한기계학회지, 3, pp. 351~360, 1994
- 2) Norman G. Gjostein, “Advanced Materials & Processes”, 137, 73, 1990
- 3) Claus Razim “Advanced Materials & Processes”, 138, 75, 1990
- 4) S. Ujihara, et al, “Minimizing the weight of autobody and aluminum sheets”, Proc. of Int. conf. on Recent Advances in Science and Engineering of Light Metals, Tokyo, pp. 1163 ~ 1170, 1991
- 5) H. Yoshida and S. Hirano, “Properties of Aluminum Alloy Sheets for Autobodies”, Sumitomo Light Metal Technical Reports, 32, pp. 20~31, 1991
- 6) 宇野 生, 馬場義雄, 住支輕金屬會報, 21, 32, 1980
- 7) 강석봉, 임차용, “자동차 차체용 알루미늄 합금 박판에 대한 관련 기술의 현황과 전망”, Bull. of the korean Inst. of Met. & Mater., 7, pp. 19~30, 1994
- 8) (社)自動車技術會, “自動車車體スポット溶接構造の疲労強度と壽命推定”, pp. 20~26, 1986
- 9) H. Tada, P. Paris and G. Irwin, “Handbook

- of Stress Intensity Factors for Researchers and Engineers”, Del Research Corporation, 1973
- 10) J. C. Newman, Jr. and I. S. Raju, “An Empirical Stress-Intensity Factory Equation for the Surface Crack”, Engineering Fracture Mechanics, 15, 185, 1981
 - 11) K. Ando, S. Fujibayashi, K. W. Nam, M. Takahashi and N. Ogura, “The fatigue life and crack through thickness behavior of a surface-cracked plate(for the case of tensile load)”, JSME Int. J., 30, pp. 1898~1905, 1987
 - 12) C. Z. Li, K. Ohkura, K. Haranaka, M. Shinozaki and H. Kitagawa, “A fracture mechanics study on the fatigue crack growth at the spot weld joint”, Proceeding of JSME, 28, 1987
 - 13) 難波 圭三, “自動車用アルミニウム合金の接合(1)”, 軽金属溶接, 31, 216, 1993
 - 14) P. Paris, F. Erdogan, “Critical analysis of crack propagation laws”, ASME, J. of Basic Engineering, 85, 828, 1963
 - 15) K. W. Nam, K. Ando and N. Ogura, “The effect of specimen size on the behaviour of penetrating fatigue crack”, Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., 16, pp. 767~779, 1993
 - 16) K. W. Nam, K. Iwase and K. Ando, “Fatigue life and surface crack penetration behaviour an aluminum alloy”, Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., 18, pp. 179~187, 1995
 - 17) 李春植, “薄板接合構造物の破壊力學の適用に関する基礎的研究”, 横浜國立大學學位論文, 194, 1987
 - 18) 藤本正男, “薄鋼板スポット溶接構造の強度と剛性に関する基礎的研究”, 京都大學學位論文, 127, 1975
 - 19) M. Kawahara and M. Kurihara, “A preliminary study on surface crack growth in a combined tensile and bending fatigue process”, J. Sec. of Naval Architects J., 137, 297, 1975