

研究論文

5182 Al합금판의 전기저항 점용접부 피로거동에 관한 연구

신 현 일* · 박 용 석** · 강 성 수**

A Study on the Fatigue Behavior of Resistance Spot Welded Part of 5182 Aluminum Alloy Sheet

H. I. Shin*, Y. S. Park** and S. S. Kang**

Key Words : Resistance Spot welding(전기저항 점용접), Aluminum Alloy(알루미늄 합금), HAZ(열영향부), Nugget(용융부), Load Deformation Diagram(하중변위 선도), Fatigue Test(피로시험), Fatigue Crack Length(피로균열길이), Fatigue Bending Angle(피로굽힘각)

Abstract

On this study, the variations of hardness and microstructure were observed at the spot-welded part of 5182 aluminum alloy sheets with thickness of 1.2mm. The hardness of spot-welded part of aluminum alloy indicated the lowest value at nugget center. Also, the position where fatigue crack exists was investigated by surveying microstructure of the spot-welded sections. Mean load-deformation diagrams were obtained from static tensile test. fracture was occurred completely within 5mm after transforming elastic into plastic area. Fatigue test was stopped when the specimens of fatigue test had the final displacement of 0.2mm and measured fatigue bending angle and crack length. This study utilized them, investigated the relations between fatigue bending angle and fatigue crack length and made a estimation of the fatigue fracture life of resistance spot welded part of 5182 aluminum alloy sheet. The relative equation of fatigue crack length and fatigue failure life can be represented by $L_C = \alpha N^p$

※ 1997년 11월 24일 접수

* 정희원, 현대자동차(주)

** 정희원, 부산대학교 기계기술연구소

1. 서 론

오늘날 지구환경 보전과 에너지 절감의 측면에서 자동차를 포함한 각종 수송기계의 경량화가 추진되고 있다. 자동차의 경우 경량화를 위해서는 차량구조의 최적화와 차체를 이루고 있는 판재의 박판화 등이 요구되고, 더욱 근본적인 방법은 경량화 재료의 적용이다. 현재 자동차 분야의 경량화 재료로서 Al합금 소재가 강성, 내부식성, 낮은 비중 등의 여러 이점으로 유망한 재료로 주목받고 있다. 특히 차량의 경우 알루미늄 일체형 body 및 골조형의 차체구조가 적용되고 있고¹⁾, 한국의 일부 자동차 생산업체도 알루미늄 차체 시작품²⁾을 제작하였으며 엔진블록은 실용화되고 있는 실정이다. 경량화 재료로서 알루미늄 판재는 강판에 비하여 가격지수 면에서는 2-3배가 높지만 50%가량의 경량화가 가능하고¹⁾, 기존 자동차뿐만 아니라 전기 자동차, 도시형 경전철, 고속 전철 등 차세대 수송기계의 차체 적용과 최근 급격히 대두되고 있는 자동차 배기가스에 의한 대기오염 문제 개선 등 여러 면에서 그 필요성이 증가하고 있다.

이러한 알루미늄 박판 구조물의 접합기술로서 저항 점용접을 이용하면 자동차산업의 경우 경량화뿐만 아니라 기존 강판 저항 점용접의 차체접합 기술의 원용이 가능할 것이고 기존의 차체조립라인을 대부분 그대로 이용할 수 있는 경제적인 성과도 얻을 수 있게 된다.

Al합금의 저항 점용접³⁾은 알루미늄 자체의 열전도율과 전기전도도가 매우 크기 때문에 저항 발열이 작고 열의 소산이 쉽게 되어 단시간에 대전류를 적용시키지 않으면 안된다. 또한 Al합금은 대기 중에서 쉽게 Al_2O_3 산화피막을 생성하여 용접품질에 좋지 않은 영향을 미친다. 이러한 산화피막과 대응접전류는 전극팁의 열적열화를 유발하고 연속타점수명을 떨어뜨리게 된다⁴⁻⁶⁾.

국내외적으로 Al합금 저항 점용접에 대해 연속타점수와 용접강도 및 전극형상과 연속타점수⁷⁾, 전극수명 저하의 원인규명⁸⁾, 교류 및 직류 용접기에 따른 용접품질^{8,9)}, arc 청정작용을 이용한 산화피막의 제거¹⁰⁾, 표면조도와 접촉저항전류¹¹⁾ 등의 용접성과 용접변수에 대한 연구가 진행되어 왔다. 또한 용접후 용융부(nugget) 가장자리에 압축가공

을 행하여 잔류응력을 제거함으로써 피로강도 증가를 꾀하였고, 항공기 분야에서는 전단강도 및 피로강도를 향상시키기 위해 용접후 화학 접착제를 사용하여 모재의 겹친 부분을 접착시키기도 하였다⁸⁾. 그리고 접착제를 이용한 접착법¹²⁾, 리벳과 볼트를 이용한 기계적 접합법, 브레이징, 도금알루미늄판과 철판 용접법, Fe/Al Clad를 인서트재로 사용한 점용접¹³⁾ 등 강판과 알루미늄간의 접합¹⁴⁾도 시도되고 있으나 실제 사용에 있어 생산성 저하와 완전 경량화의 관점에서 많은 문제점이 내재되어 있다. 현재 알루미늄 합금 저항용접에 관련된 많은 기술과 용접기 등의 개발¹⁵⁾이 활발히 진행되고 있어 이에 대한 현황과 전망은 밝은 편이다.

자동차를 위시한 모든 수송기계들은 정적하중 외에 각종 동적 요인에 지배를 받고 있다. 알루미늄 저항 점용접이 이러한 환경 하에서도 구조물의 내구 신뢰성을 확보하고 안정된 용접품질을 실현하기 위해서는 용접부의 정적 및 동적 특성이 요구된다.

따라서 본 연구에서는 Al합금판을 설정된 용접 조건으로 용접을 행한 후 용접부 미세조직과 경도 변화 관찰 그리고 각 조건에 대한 정적인장 특성과 동적 하중에 대한 피로특성을 고려하여, 궁극적으로 Al합금 점용접부 피로강도 향상법 연구와 실제 박판 구조물 용접에 적용하기 위한 기초적 자료로 축적하고자 한다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1 실험 재료

Al합금의 연강에 비해서 고유저항은 1/2~1/4의 범위, 열전도는 2~4배의 범위에 있으며, 고유저항의 온도 의존성이 낮아 온도에 따른 고유저항의 증가는 연강에 비해 훨씬 작다. 또한 Al합금은 다른 재료에 비해서 고온강도가 낮고, 선팅창 계수와 비열은 온도와 함께 증가하는 경향이 있지만 합금의 종류에 의해서 크게 변화하지 않는다⁶⁾.

본 연구에서는 성형성과 용접성이 비교적 좋고 내식성이 높은 5000계열 Al합금¹⁶⁾인 1.2t의 5182-O Al합금판을 사용하였다. 이러한 5000계열 Al합금은 자동차의 차체와 박판부품용 재료¹⁷⁾로 적용되고 있고, Mg이 고용체로서 존재하는 합금이다. Al합금의

Mg은 고용강화에 의하여 Al을 상당히 강화시키며 이 때문에 높은 가공경화 특성을 나타낸다^{16,17}.

본 실험에 사용된 5182 Al합금의 경우는 제품 출고시 비닐코팅 표면처리된 판재를 사용하여 용접 직전에 비닐막을 제거함으로써 산화피막에 의한 영향을 배제하였다.

Table 1은 실험재료의 화학성분을 나타내고 Table 2는 기계적 성질을 나타낸다. 내력(0.2% offset yield strength)이 인장강도의 절반에 미치지 못하며, 연신율은 28%정도로 큰 편이다. 5182 Al합금은 어닐링하고 재결정시키는 O조질로서 변형 발생을 방지하기 위해 SSF(Strain Stretch Free) 처리를 한 재질이다.

Table 1. Chemical composition of 5182 Al alloy(wt-%)

Al	Mn	Cu	Zn	Si	Ti	Fe	Mg	Cr
Bal.	0.2~0.5	0.15	0.25	0.2	0.1	0.35	4.0~5.0	0.1

Table 2. Mechanical properties of 5182 Al alloy

Temper	Tensile properties			Erichsen Value (mm)
	TS (kgf/mm ²)	YS (kgf/mm ²)	EL (%)	
O, SSF	28.9	13.9	28	9.6

2.2 용접조건

Table 3은 본 실험에 사용된 용접조건이며, 용접시의 전류파형은 업 슬로프 제어(Up-slope control) 방식이 사용되었고, 용접시간과 용접전류는 Dengensha 社の의 Weldscope로 가압력은 Spotron社의 RF-31P로 측정하였다. 초기가압시간(squeeze time)은 60cycle이며 유지 시간(hold time)은 12cycle로 하였다.

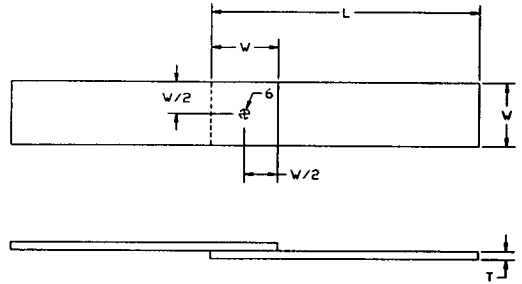
Table 3. Resistance spot welding conditions

Thickness (mm)	Electrode force (kgf)	Welding current (kA)	Welding time (cycle)
1.2	250	27	6
		32	6
	300	28	6
		35	6
	350	32	6
400	33	8	

2.3 시험편 제작

5182 Al합금의 인장전단시험편은 KS B0851, 피로시험편은 KS B0528 규격에 따라 제작되었다. Fig. 1은 인장전단시험편과 피로시험편의 형상과 치수를 나타낸다.

본 실험에 사용된 저항 점용접기는 공압 정치식이며, 용접 전극팁은 선단경이 6mm인 dome type으로 10개의 타점을 찍을 때마다 교환하였다. Table 4는 사용한 용접기와 전극의 사양을 나타낸다.



(a) Shape

Test	T	L	W
Tensile	1.2t	100	20
Fatigue	1.2t	160	40

(b) Size (mm)

Fig. 1 Specimen geometry

Table 4. Specification of spot welding machine and electrode

welding machine	
rated capacity	150kVA
rated frequency	60Hz
max. electrode force	1500kgf
max. welding current	40kA
electrode tip	
material	RWMA CLASS II
(Cu-Cr Alloy)	tip type
dome type	tip diameter
16mm	diameter

2.4 실험 방법

본 실험에서 각 시험편의 인장전단하중은 인장 속도 (loading speed) 를 10mm/min로 하여 KS B 0851규격에 따라 인장시험을 실시하여 측정하였다. 피로강도의 측정은 KS B0528규격에 따른 피로 시험을 통해 이루어졌으며, 응력비 R=0인 편진인장조건의 하중제어방식으로 시험하였다. 변동하중의 반복수는 20Hz로 하였다. 피로시험의 종료시점을 시험편의 최종변위가 0.2mm에 이르는 때로 설정한 후 용접조건 250kgf-27kA-6cycle과 300kgf-28kA-6cycle(이하 단위표기 생략)의 경우에 동일한 최종변위에 대해 하중별, 수명별 피로굽힘각과 피로균열길이 변화를 관찰하였다. 인장시험과 피로시험은 모두 Instron model No. 8516을 이용하여 수행하였다.

점용접부 조직관찰은 알루미늄용 부식액(중류수 90%+질산(HNO₃) 5%+염산(HCl) 3%+불산(HF) 2%)에 부식시켜 금속현미경을 이용하여 단면 미세조직을 촬영하였다.

경도는 마이크로비커스 경도기를 이용하여 측정하였다. 경도측정위치는 Fig. 2에 나타내었으며 판간의 경계면에서 0.25mm떨어진 위치에서 0.5mm간격으로 측정을 하는 것을 기준으로 하고 측정하중은 0.5kgf, 가압시간은 10초로 하였다.

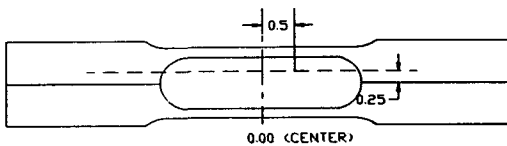


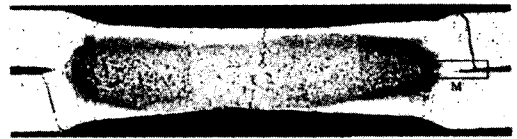
Fig. 2 Position of hardness measurement (mm)

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 점용접부 단면 미세조직 관찰

5182 Al합금의 점용접 피로시험편 단면 미세조직을 촬영하여 Fig. 3에 각각 나타내었다. Fig 3의 (b)는 (a)의 M 부분을 200배율 확대한 조직사진이다. Fig. 3 (a)와 (b)의 조직사진을 관찰하면 용융부는 미세한 등축정(equiaxed grains)으로 구성되어 있고, 이러한 미세 등축정 영역을 좁은 폭의 가

느다란 주상정(columnar grains) 조직이 둘러싸고 있다. 이것은 용융부가 전부 주상정 조직으로만 구성되어 있는 전형적인 강의 점용접부와 구별되는 사실이다. 좁은 폭의 주상정 조직을 벗어나서는 압접부(corona bond)와 열영향부(HAZ)를 관찰할 수 있다. 한편, 주상정조직 외부에는 결정입계를 따라서 불순물이 편석되었고, 나머지 넓은 범위의 열영향부를 걸쳐 결정입계를 따라 석출물이 분포되어 있다. 이러한 열영향부는 용접열량을 공급받은 결정입계근처가 일부 용해되고 이때 Mg 등의 합금원소들이 냉각시 유핵화(coring)현상에 의해 입계로 석출되어 응고된 것이다. 이러한 석출물이 결정입계에 농축(enrichment)되어 냉각되면 너깃선단부 주위에서 용리균열(liquation cracking)의 원인¹⁸⁾으로 작용할 수도 있다.



(a) ΔP=100kgf, 300kgf-28kA-6cycle (×50)



Equiaxed grains Col. HAZ Base metal

(Col. : columnar grains)

(b) M(×200)

Fig. 3 Microstructure of (a) weldment and (b) fatigue crack part near nugget edge for fatigue specimen (×200)

3.2 미세조직을 고려한 피로균열 발생 위치

Fig. 3의 조직사진을 관찰하면 피로균열은 용융부의 가장자리에서 약간 떨어진 곳에 위치하고, 피용접재간 중간비산의 일부가 용접가압력에 의해 상하판재와 기계적으로 압접되어 잔류하는 것이 관찰된다. 비산된 용융금속은 판재사이의 대기와 모재금속을 갑자기 만나 급랭 응고된 것이며, 피용접재와 비산금속의 압접경계부 선단은 피로균열

발생위치로서 중요한 의미를 지닌다. 즉, 시험편이 반복하중을 받을 때 압접경계부 선단은 노치효과에 의해 응력집중점으로 작용한다. 응력집중을 크게 받은 압접경계부 선단은 국부변형이 일어나 미소균열이 형성되고, 이렇게 생긴 균열이 판재 두께방향으로 각 하중사이클마다 조금씩 진전하여 임계 균열크기에 도달한 후 최종파괴에 이르게 된다¹⁹⁾. 특히 판재 두께방향으로 균열이 전파될 때 전과경로는 반복하중 방향에 거의 수직을 이루며 입내를 가로지르는 양상을 보이고 있으며, 비교적 편평하고 특별한 형태가 없이 소성변형이 일어난 흔적이 거의 없는 취성파괴^{18,19)}의 특징을 보이고 있다. AI합금판 내부에서 시작된 피로균열이 판재 표면에 도달한 후 전파된 양상은 Fig. 13과 같다.

3.3 용접조건별 경도변화 특성

Fig. 4와 Fig. 5는 용접조건에 따른 시험편의 경도분포를 나타내며 너깃 중심부로 갈수록 경도가 낮아지고, 이것은 모재보다 용융부의 경도가 훨씬 큰 강(steel)²¹⁾ 점용접부의 경도변화와 비교된다. 이러한 5182 Al 합금의 점용접부 경도 저하는 알루미늄 기지상에 미세하게 석출되어 있던 제2상이 저항발열과 급랭으로 인하여 용체화 현상^{19,20)}과 석출가공경화된 조직의 재결정으로 연화된 결과로 판단된다.

Fig. 4는 가압력과 용접시간이 같고 전류가 변화할 때의 경도변화를 나타내고 있다. 여기서 용접

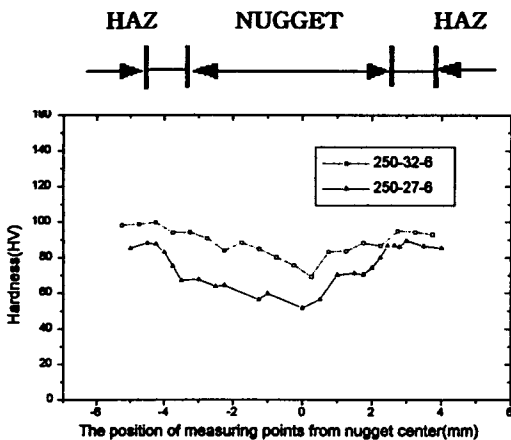


Fig. 4 Vicker's hardness distribution (250-27-6 and 250-32-6 (kgf-kA-cycle))

전류가 큰 경우가 경도저하 폭이 작은 것을 알 수 있고, 이것은 동일 전극경에 대해 전류가 큰 경우 저항발열량이 증가하여 냉각이 늦어진 결과로 판단된다. 용접조건 300-35-6과 300-28-6의 경우도 Fig. 4와 마찬가지로 동일한 경향을 나타내었다. Fig. 5는 용접전류와 시간이 같고 가압력이 변화한 경우로 너깃중심에서 경도차이가 나타나고 250 kgf가 350kgf보다 경도가 낮다. 이는 가압력의 용접조건이 같은 경우 전극 가압력이 낮아 가압효과가 낮은 쪽에서 내부결함 발생이 많고 특히 냉각수에 의한 냉각효과가 큰 용융부 중심부위에는 응고수축 균열이 발생하기 쉬우므로 이러한 내부결함 존재 차이가 용융부 중심부위의 경도차이를 가져온 것으로 판단된다.

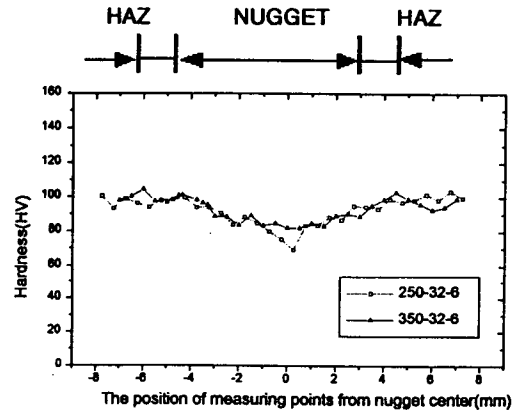


Fig. 5 Vicker's hardness distribution (250-32-6 and 350-32-6 (kgf-kA-cycle))

3.4 용접조건별 인장전단하중

용접상태가 양호한 경우에는 인장시험시 인장전단하중이 최대에 이르면 Fig. 6과 같이 일정한 굽힘각(A)을 가진 후 파괴되며, 본 실험에서는 너깃주위 열영향부에서 파단이 발생하였고 너깃 접합면에서 발생하는 계면파단 (interfacial failure)이나 모재부에 파단이 일어나는 현상은 관찰되지 않았다.

Fig. 7은 각 가압력에 대한 인장전단하중의 평균치를 나타내었다. 가압력 250kg과 300kg의 경우 각각 32kA와 35kA 쪽이 높은 인장전단하중을 나타내고 있다. 이는 입열량의 차이 때문에 나타난다.

Fig. 8은 각 가압력의 평균 하중변위 선도로서

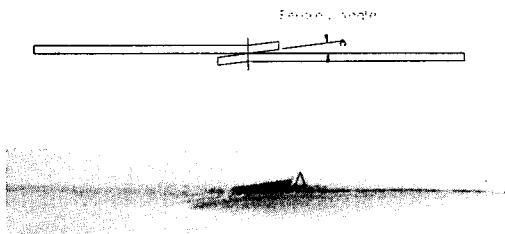


Fig. 6 Shape of statically fractured specimen (250kgf-27kA-6cycle)

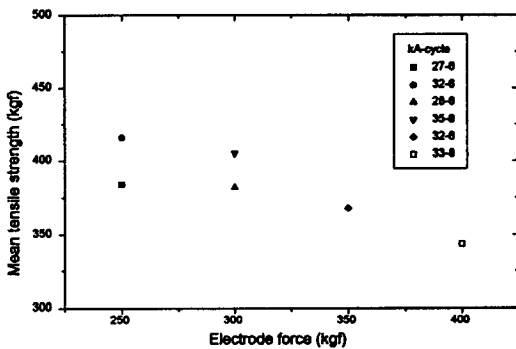


Fig. 7 Mean tensile strength for each welding condition

명확한 항복점을 구별하기 어렵고 강도가 낮을수록 소성변형 구간이 하중과 변위를 차지하는 비율이 적어지고 있으며, 선형변형 구간이 전체하중의 절반이상을 차지하고 있다. 또한 최종파단 도달 전에 선형변형 구간에서 천이영역을 거쳐 소성구간에 이르는 경향이 뚜렷하고 인장전단하중이 클수록 소성변형 구간이 전체변위의 대부분을 차지한다. 그리고, 400-33-8의 경우 다른 조건과 달리 초기변위없이 급격한 하중상승후 바로 소성변형 구간에서 대부분의 변위가 발생후 파단에 이르는 경향을 나타내고 있다. 과도한 가압력은 용접시 상하판재의 굽힘변형을 가져오고 용접이 종료되면 판재가 벌어진 상태로 남게 된다. 따라서 굽힘에 의해 존재하는 잔류응력이 용융부 주위를 약화시키고 하중부과시 벌어진 상하판재의 간격에 의해 큰 굽힘모멘트가 갑자기 작용함으로써 초기변위없이 급격히 하중이 증가한 후 파단한 것으로 보인다.

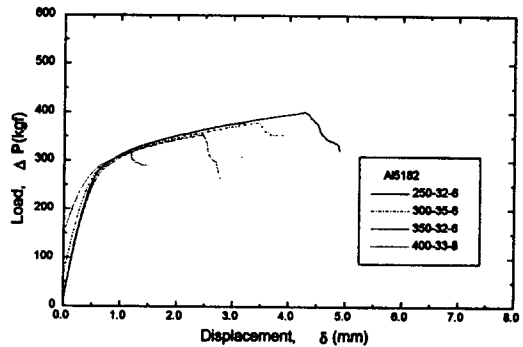


Fig. 8 Mean load-deformation diagram of 5182 Al alloy

3.5 하중 및 피로수명별 용접부 피로 균열 전파거동

Fig. 9는 측정된 피로균열 길이와 굽힘각을 정의하였고, Fig. 10과 Fig. 11은 250-27-6 조건을 피로 시험하여 최종 변위를 0.2mm로 고정하였을 때 하중범위와 파단수명에 따른 시험편의 굽힘각과 표면균열의 길이변화를 표시하였다. 저하중범위의 경우 균열길이는 길게 나타나고 굽힘각은 작게 나타난다. 반대로 고하중범위의 경우 균열길이는 작고 굽힘각이 크게 나타남을 알 수 있다. 이것은 고하중일수록 균열길이는 작아도 상대적으로 굽힘이 많이 발생하여 변위가 크게 되고 저하중일 경우는 굽힘이 작은 대신에 균열길이가 증가하여 변위가 커지게 됨을 의미한다. 또한 파단수명에 대해서는 피로 균열길이와 굽힘각의 변화가 하중범위와 반대의 경향을 보인다. 본 실험에서 용접조건 300-28-6의 경우에도 위와 동일한 경향을 확인 할 수 있었다.

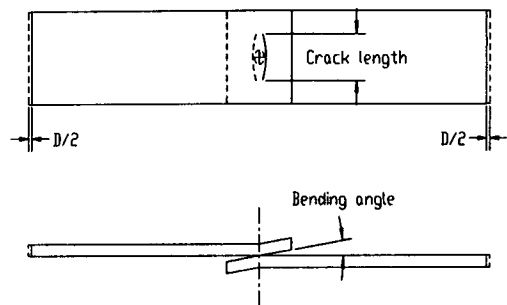


Fig. 9 Definition of crack length and bending angle for fatigue specimen (final displacement: $D=0.2mm$)

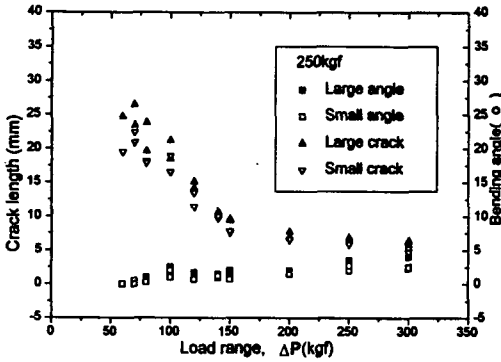


Fig. 10 Variation of bending angle and crack length for each load range in the fatigue test having 0.2mm final displacement (250kgf-27kA-6cycle)

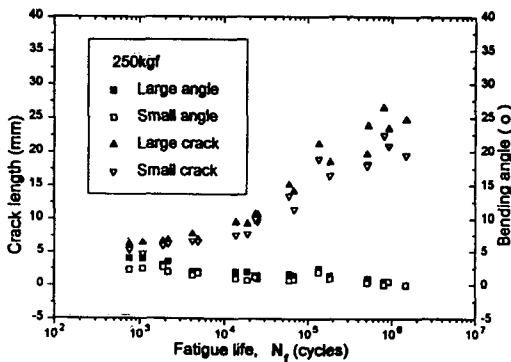
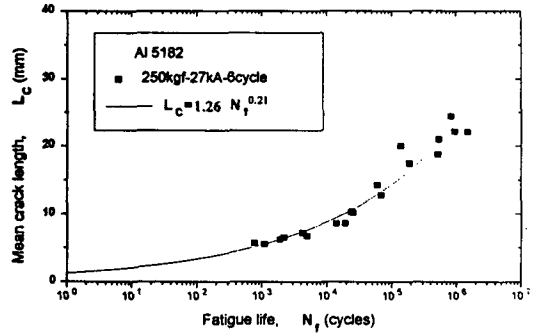


Fig. 11 Variation of bending angle and crack length for each fatigue life in the fatigue test having 0.2mm final displacement (250kgf-27kA-6cycle)

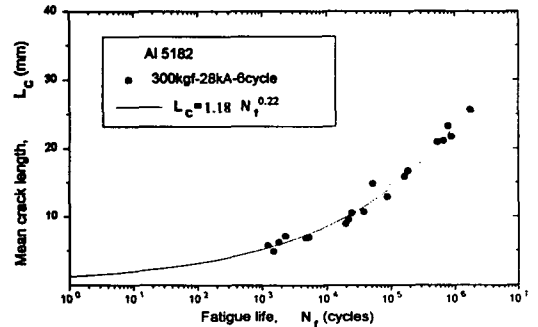
Fig. 12는 250-27-6과 300-28-6 조건의 경우 파단수명 (L_f) 과 평균 균열길이 (L_c) 의 관계를 반대수 좌표 (log-linear) 에 나타내었고, 선형좌표 (linear plot) 에서 다음과 같이 표현된다.

$$(L_c = \alpha N_f^{\beta}) \tag{3.1}$$

여기서 α , β 는 fitting constants이고, L_c 와 N_f 는 모두 linear scale이다. 또한, α 는 $N_f = 1$ 일때 L_c 값으로 이것은 이론적으로 정적 인장시험을 행한 경우의 균열길이를 의미하고, β 는 대수좌표 (log-log plot) 상 직선의 기울기에 해당한다.



(a) 250kgf-27kA-6cycle



(b) 300kgf-28kA-6cycle

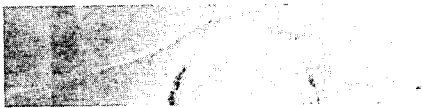
Fig. 12 Relationship between fatigue life and mean fatigue crack length

Table 5는 5182 알루미늄의 250-27-6과 300-28-6 조건에 대해 α , β 값과 $N_f = 1.0 \times 10^6$ (cycles) 인 경우의 L_c (mm) 값을 식 (3.1)로부터 구해 나타내었다. 여기서 $N_f = 1.0 \times 10^6$ (cycles)일 때 300-28-6이 250-27-6에 비해 표면 균열길이가 길게 나타났다. 이로부터 최종변위가 동일할 때 피로성능은 250-27-6의 경우가 더 우수한 것을 알 수 있다.

Table 5. Constants for L_c-N_f curves and L_c (mm) at $N_f=1.0 \times 10^6$ (cycles)

welding conditions (kgf-kA-cycle)	$L_c = \alpha N_f^\beta$		$N_f=1.0 \times 10^6$ L_c (mm)
	α	β	
250-27-6	1.26	0.21	22.93
300-28-6	1.18	0.22	24.65

Fig. 13는 300-28-6 조건인 시험편 표면에 나타난 피로균열의 양상을 나타내었다. 그림에서 저하중의 경우는 균열선단이 날카롭고 균열 끝부분의 경계가 확실하지 않으나 고하중의 경우는 균열선단이 비교적 완만하여 균열 끝부분의 경계가 육안으로 확인된다. 이것은 고하중의 경우가 저하중에 비해 시험편의 굽힘이 크게 발생한 때문으로 생각된다. 판재 내부에서 발생한 균열은 하중범위가 변화하여도 전극 가압력에 의해 발생한 압흔부 내부로 전파되어 나오는 경우는 관찰되지 않고 모재부에서만 관찰된다. 이것은 3.2절에서 고찰한 대로 균열발생 근원으로 작용하는 모재와 비산금속의 압접경계부 선단이 용융부와 약간 떨어진 곳에 위치한다는 사실과 관련이 있다.



(a) $\Delta P=70\text{kgf}$ and $N_f=77 \times 10^4 \sim 88 \times 10^4$



(b) $\Delta P=100\text{kgf}$ and $N_f=16 \times 10^4 \sim 18 \times 10^4$



(c) $\Delta P=150\text{kgf}$ and $N_f=19 \times 10^3 \sim 21 \times 10^3$

Fig. 13 Variation of crack in the fatigue test having 0.2mm final displacement (300kgf-28kA-6cycle)

4. 결 론

5182 Al합금 판재를 전기저항 점용접하여 인장전단 시험편을 제작하여 인장시험, 피로시험, 경도측정 및 조직관찰 등을 실시하여 다음과 같은 연구 결과를 얻었다.

1. 점용접부의 조직관찰 결과, 용융부는 중심의 미세등축정 영역을 주상정 조직이 둘러싸고 그 위로 불순물이 편석되어있으며, 열영향부는 결정입계를 따라 석출물이 분포하는 조직이 관찰되었다.
2. 모재와 비산금속의 압접경계부 선단이 피로균열 발생 근원으로 작용하였고, 이로 인해 시험편 표면에서는 항상 모재부에서 균열이 관찰되고 압흔 내부로의 균열이 전파되어 나오는 현상은 관찰되지 않았다.
3. 5182 Al합금의 용융부 경도는 모재에 비해 낮게 나타났고, 가압력과 용접시간이 동일한 경우 전류가 낮은 쪽이 용융부 경도저하 폭이 크게 나타났다. 또한, 용접전류와 시간이 동일한 경우 가압력이 낮은 쪽이 용융부 경도분포는 용융부 중심부에서만 낮게 나타났다.
4. 각 용접조건에 따른 평균 하중변위 선도에서 명확한 항복점을 구별하기 어려웠고, 선형 구간에서 소성변형 구간으로 완전히 전이한 후 파단이 발생하였으며 인장전단하중이 클수록 소성변형 구간이 전체파단변위의 대부분을 차지하였다.
5. 피로시험 중단 시기를 최종 변위 0.2mm로 고정한 경우 장수명 저하중에서는 피로균열 길이는 길고 굽힘각은 작게 나타났으며, 저수명 고하중일 때 피로균열 길이가 짧고 굽힘각은 크게 나타났다. 이때 파단수명과 평균 균열길이의 관계를 표현할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 이영훈, "자동차의 알루미늄화 기술", 자기연정보, Vol. 2, No. 3, (1993), pp.20-42
2. 박황호, "미래의 자동차 용접기술", 대한용접학회지, Vol. 15, No. 2, (1997), pp.24-35
3. 김상필, 홍태민, 장희석, "알루미늄합금의 저항점용접에 관한 연구(I)", 대한용접학회논문집, Vol. 12, No. 4, (1994), pp.127-140
4. 김명준, "저항용접", 기문사, (1995)
5. 中村孝 其他 2人, "抵抗溶接(溶接全書 8)", 産報出版, (1979)
6. 日本溶接學會抵抗溶接研究委員會編, "抵抗溶接現象とその應用(下)", 日本溶接學會技術資料 No. 8, (1983)
7. 笹部, 誠二, "アルミニウム合金溶接の現状",

- 溶接技術, (1991), pp. 78-79
8. 한용섭, "알루미늄 합금의 저항 점용접", 대한용접학회지, Vol. 8, No. 2, (1990), pp. 1-12
 9. W. Dilay, E. A. Rogala and E. J. Zulinski, "Resistance welding aluminum for automotive production", SAE 770305, (March. 1977)
 10. R. F. Ashton and D. D. Rager, "An Arc-cleaning Approach for Resistance Welding Aluminum", Weld. J., Vol. 55, No. 9, (1976), pp. 750-757
 11. E. P. Patrick, J. R. Auhl and T. S. Sun, "Understanding the Process Mechanisms Is key to Reliable Resistance Spot Welding Aluminum Auto Body Components", SAE 840291, (Feb. 1984)
 12. P. C. Wang, S. K. Chisholm, G. Banas, and F. V. Lawrence Jr., "The role of failure mode, resistance spot weld and adhesive on the fatigue behavior of Weld-bonded Aluminum", Welding Journal, Vol. 74, No. 2, (1995), pp. 41-47
 13. 及川初彦ほか 3人, "鋼とアルミニウムのスポット溶接に及ぼす各種因子の影響(インサト材を用いた鋼とアルミニウムの異種金屬接合(第2報))", 溶接學會論文集, 第14卷 第2, (1996), pp. 267-277
 14. 손병천, 장희석 외 3명, "이종재료(알루미늄 합금 - 강판)의 저항 점용접에 관한 연구", 대한기계학회 춘계학술대회논문집(A), (1996), pp. 722-727
 15. "저항용접 기술의 개발 동향", 대한용접학회지, Vol. 15, No. 2, (1997), pp. 1-35
 16. 한봉희 역, "금속재료(조직과 성질을 주로 한)", 반도출판사, (1994), pp. 178-182
 17. "アルミニウムの組織と性質" 日本輕金屬學會發行, 40周年記念出版部會編集, (1991)
 18. 강춘식 역(Kenneth Easterling 원저), "용접야금학", 반도출판사, (1995), pp. 180-183, 203-224
 19. 김용석외 3인 공역(William callister 원저), "재료과학과 공학", 희중당, (1995), pp. 195-368
 20. Craig R. Barret etc. "The principles of engineering materials", Prentice Hall, (1995)
 21. 佐藤次彦 その他 2人, "多点スポット溶接継手の疲労強度の評価について", 溶接學會誌, 第 50卷 第 5, (1981), pp. 496-503