연 구 논 문

Mg합금판재의 서보가압식 DC점용접에 관한 연구(1)

정 선 녀* · 장 희 석**,† · 이 목 영***

*명지대학교 기계공학과 대학원
**명지대학교 공과대학 기계공학과
***포항산업과학연구원(RIST) 용접센터

A Study on Servo DC Resistance Spot Welding of Mg Alloy Sheet(1)

Sun Nyeo Jung*, Hee Seok Chang**,† and Mok-Young Lee***

*Graduate School, Myongji University
**Department of Mechanical Engineering, Myongji University, Yong-In, 449-728, Korea
***Welding Center, RIST, Pohang, 790-330, Korea

†Corresponding author : hschang@mju.ac.kr
(Received January 30, 2009 ; Revised February 16, 2009 ; Accepted February 21, 2009)

Abstract

Weldability of Mg alloy was investigated using servo-actuated DC resistance spot welder. Due to its uncommon electrical and mechanical properties, lots of voids and cracks were observed inside nugget with conventional weld schedule. Lobe curve was proposed to clarify proper electrode force and weld current, which guarantee reasonable weld strength and fatigue life. Macro structure of sectioned specimen was examined to count total number of void and crack. Post weld schedule is also proposed to reduce micro vickers hardness value of weld zone.

Key Words : Mg alloy, Servo-actuated resistance Spot welder, Lobe curve, Dynamic resistance

1. 서 론

최근 자동차의 경량화를 위해 알루미늄, 마그네슘, 강화 플라스틱 등 많은 재료가 사용되고 있고 그 중에서도 최근에 Mg합금판재의 사용이 급증하는 추세이다. Mg합금판재는 밀도가 알루미늄 합금의 2/3, 철강의 1/5 수준으로 현재까지 개발된 합금 중 가장 낮은 밀도를 가지고 있으며 여타 경량 재료와 비교하여 손색이 없는 강도를 갖고 있다. 이외에 진동, 충격, 전자 파동에 대한 흡진성이 탁월하고 전기, 열전도도, 가공성 및 고온에서의 피로, 충격 특설이 우수하여 자동차, 항공기, 방위 산업 및 일반기계 등에 경량화 소재로서 요구되는 여러 우수한 특성을 지니고 있다. 이러한 마그네슘 합금판재는 여타 경량재료에 밀려 그 사용량이 미미했지만, 세계적으로 에너지 절약 및 환경 공해 규제가 대폭 강화됨에 따라 자동차, 항공기 수송 수단의 소재 경량화가 매우 긴박한 과제로 떠오르면서 마그네슘 합금판재의 사용이 증가하고 있는 추세이다[1].

Mg합금 판재는 경량이고 전자파 차폐기능이 뛰어나 자동차산업에서는 고가이며 점용접이 까다로운 알루미늄 판재를 대체할 가능성이 높다. 또한 컴퓨터 및 IT관련 휴대용 기기/장비의 케이스 재료로 각광을 받고 있는바, Mg합금 판재에 대한 접합기법으로 염가이며 생산성이 높은 저항 점용접 공정을 검증할 필요가 있다.

현재까지 개발된 전신재 Mg합금의 상온 성형성은 매우 낮은 수준으로 자동차 산업을 비롯한 각종 산업에서 요구하는 부품 형상을 성형할 수 없다. 따라서 성형보다는 생산성이 높으며 공정비용이 저렴한 저항 점용접을 적용할 필요가 있다. 그런데 Mg합금에 비저항(specific resistivity)이 철강판재의 60~70% 수준이므로 Joule heating이 쉽지 않고, 또한 선팽창계수가 강판의 2배 이상으로 알루미늄 판재와 비슷하여 너깃 생성 후, 단조

가압을 적절히 하지 않으면 많은 수축기공(shrinkage void)이 발생할 가능성이 높다[2-3].

본 연구에서는 POSCO에서 제시한 Mg합금의 기초 물성에 근거하여 효과적으로 원하는 크기와 품질의 너깃을 보장하기 위한 서보가압식 DC 점용접 시스템을 구성하여 가압 및 통전 스케줄을 개발하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치 및 재료

일반적으로 정치식 저항점 용접기에서는 상부전극에 연결되어 2차 회로를 구성하며 용접전류가 흐르는 온스동판의 탄성에 의하여 항상 편심하중이 발생한다. 본 연구에서는 이를 방지하기 위해 온스동판을 상부전극에 대하여 대칭형상으로 설계, 제작하였다(Fig. 1). 용접전류 제어기는 Bosch사 제품(1kHz MFDC, 최대 32kA)을, 서보제어기는 나우테크사의 NSC-2000을 사용하였다. 전극 팁은 R=200 mm인 RWMA class II dome type을 사용하였다. 용접 시편은 POSCO에서 제공된 두께 1.4mm의 Mg합금판재를 별도의 표면처리 없이 사용하였고 조성wt%는 Al:3.01~9.1, Zn:0.85~1.0, Mn:0.15~0.24, Si:0.05~0.1,Cu:0.001~0.1,Ni:0.005~0.01, Fe:0.0013~0.01이고 나머지는 Mg 이다.

2.2 실험방법

2.2.1 용접조건의 설정

Mg판재의 저항점용접에서 너깃 형성에 미치는 인자로는 융점, 비열, 비저항(specific resistivity), 열전도도, 경도 등이다. 그리고 Mg판재의 표면에 산화피막이 존재하므로 Mg판재의 저항점용접은 가압 및 전원장치의 특성, 용접조건, 피용접물의 전처리, 전극 팁의 드레싱 상태 등에 따라 용접상태가 심하게 변하므로 연강에 비해 매우 까다롭다. 또한 Mg판재는 연성이 풍부하지만, 강도가 낮기 때문에 여러 종류의 합금원소를 첨가하여, 물성이 개선된 Mg합금으로 사용되므로 용접성 판단이 쉽지 않다. Mg합금에서 온도에 대한 저항증가율은 연강에 비교해 매우 작고 다른 재료에 배해 고온강도가 낮기 때문에 저항용접을 적용하기에 적절한 재료는 아닌 것으로 알려져 있다.

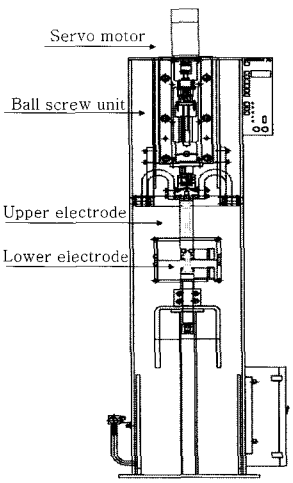


Fig. 1 Servo-actuated resistance spot welder (Courtesy of NAWOOTEC CO.)

Mg판재의 저항점용접성은 높은 열전도도와 낮은 고유저항 때문에 아연도금 강판 용접조건에 준한 전류를 흘려도 발열량이 작고 전극으로 전도되는 열손실량이 크므로 Mg판재에서는 대전류와 짧은 용접시간을 적용해야 할 필요가 있다.

본 연구에서는 먼저 Mg판재의 열전도도, 열팽창계수 등을 고려하여 용접부의 균열과 기공발생 여부, 그리고 인장전단강도 시험, 피로강도 시험, 그리고 경도시험을 통하여 Mg판재의 점용접성을 평가한다.

먼저 가압시간 250ms하고, 유지시간 50ms로 고정하여 용접시간과 전극가압력을 변화시키고 인장전단 실험을 통하여 용접조건을 구한 다음, 마크로 조직검사, 피로시험, 경도측정을 통하여 이를 검증하여 적정 용접조건을 선정하였다. 피로특성을 파악하기 위하여 위에서 구한 적정 용접조건에서 용접한 시편으로 피로특성을 분석하였다. 피로실험은 응력비(R=0, fz=10 Hz)인 완전평진 인장조건의 하중 제어방식으로 시험하였다. 피로수명(Nf)은 피로균열이 내부에서 발생, 성장하여 너겟의 직경을 초과하는 시점으로 설정하였다[4].

2.2.2 동저항(dynamic resistance)파형 측정

동저항파형을 샘플링하기 위하여 Miyachi社의 MM-326B weld checker를 사용하였다. 용접전류와 전압이 각각 toroid coil과 voltage-pick-up 단자로 측정되어 용접이 끝난 후, 반사이클 단위로 출력되는 전류와 전압의 rms값을 사용하여 동저항 파형을 구하였다. 여기서 사용한 용접전원은 SCR제어방식이 아닌 1kHz 스위칭 주파수를 가진 MFDC 전원이지만 측정편의상 60Hz 기준 반사이클 단위로 동저항값을 샘플링하여 파형을 구하였다.

2.2.3 용융부크기 측정

에탄올과 질산을 95:5의 비율로 혼합하여 만든 용액에 10분정도 담갔다가 흐르는 물에 씻는 작업을 2~3회정도 반복한 후 100%의 에탄올에 5분 정도 담갔다가 다시 흐르는 물에 씻는 작업을 반복한 후 건조하였

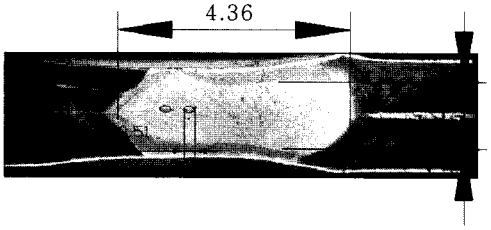


Fig. 2 Measurement of nugget and void size

다. 에칭작업을 통해 나타난 절단부의 조작을 현미경과 디지털 카메라로 촬영하고, Fig. 2에서는 이미지 데이터는 소프트웨어를 이용하여 용융부 판독이 용이하도록 처리한 후, 그 크기를 픽셀단위로 측정한다. 용융부는 타원형상의 너깃 장경을 용융부의 직경으로, 단경을 용융부의 깊이로 측정하였다.

2.2.4 인장/피로 시험 및 경도측정

본 연구에서는 INSTRON 8801을 사용하였고, 인장실험시 Cross Head속도는 50 mm/min, 샘플속도는 20 sample/sec로 하였다. 시편은 Mitutoyo사의 Micro Vickers hardness tester HM-101을 사용하여 모재, HAZ, 너깃부위의 경도를 각각 측정하였다. Fig. 3에 나타난 바와 같이 300kgf의 하중을 가하여 압흔 사이즈를 측정한 후, 내장 소프트웨어를 이용하여 경도(Hv)를 출하였다

3. 실험 결과

3.1 동저항파형

Fig. 4는 용접시간에 따른 동저항 변화를 보여준다. 용접 초기에, 시편 접촉면의 표면 산화막 때문에 절연저항이 수 mega ohm정도로 나타난다. 보통 이러한 현상은 전압이 인가된 후 접촉 절연상태가 파괴되기 이전까지 계속된다. 전류가 흐르기 시작하면 접촉면 절연상태가 급격히 파괴되어 동저항의 매우 빠른 감소현상이 일어난다. 이 구간에서는 시편표면의 산화막 종류와 두께 및 전극 가압력의 크기, 산화피막의 유무에 따라

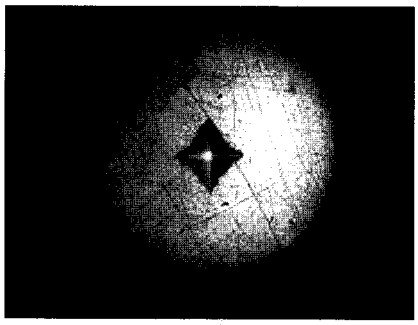


Fig. 3 Indentation mark (Hv)

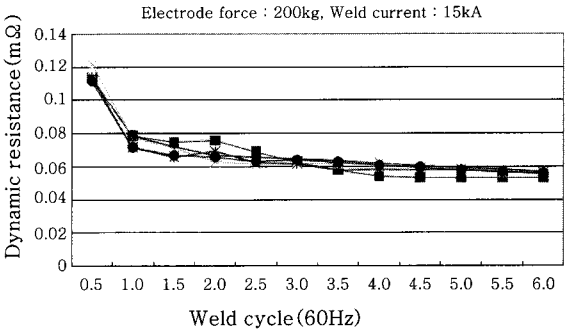


Fig. 4 Typical dynamic resistance patterns

초기 저항치와 저항 감소율이 달라지는 현상을 보인다. 동저항의 변화율은 연성이 풍부한 Mg판재이므로 초기 가압력에 의하여 아연도금강판의 경우보다 표면돌기의 붕괴가 쉽게 일어나서 용접중 동저항의 변화는 전체적으로 완만하게 진행된다.

전류가 흐르면 온도가 상승 하여 접촉면의 연성이 증가하고 접촉면적이 증가하면서, 또한 너깃자체의 저항값은 0이므로 너깃이 성장하면서 나타나는 수축(contraction)저항은 감소하나 온도상승에 의한 체적(bulk)저항은 증가하는 것이 일반적인 현상이다. 강판 용접시 동저항 파형은 두 상반된 효과가 서로 교대로 지배적으로 발생하여 동저항 파형에서 최고값이 나타난 후 계속 감소한다. 그런데 Mg판재의 경우 높은 열전도 때문에 용접부에서 전극 등 주위로 전도되는 열손실이 크므로 용융부 온도상승으로 인한 체적저항 증가효과보다 너깃이 성장하며 나타나는 수축(contraction)저항 감소효과가 지배적으로 나타나므로 동저항은 계속 감소한다. 이러한 동저항 파형은 알루미늄합금의 저항용접에서도 관찰되는데 이는 두 재료의 물성이 유사하기 때문인 것으로 판단된다.

3.2 Mg합금판재의 Lobe선도

Mg판재의 Lobe선도를 구하기 위한 실험결과는 가압력별 용접가능 전류로 Fig. 5에 나타내었다. 낮은 열입력으로 인한 계면파괴(interface failure)의 경우와 피용접물 계면 사이에서 비산이 발생하는 경우를 제외한 조건을 양호한 용접(good weld) 조건으로 선정하였다.

3.3 인장전단강도(TS strength)

용접전류를 변화시키며 용접한 시편의 인장전단강도를 측정한 결과가 Fig. 6에 있고, 가압력을 변화시키며 인장전단강도를 구한 실험결과를 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 6에서 200kgf의 가압력과 100msec 용접시간

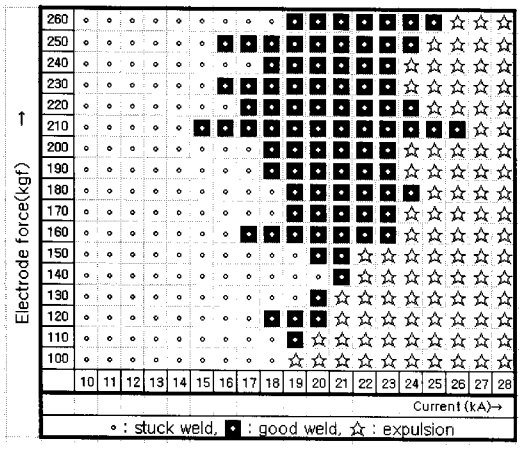


Fig. 5 Lobe curve for Mg alloy sheet

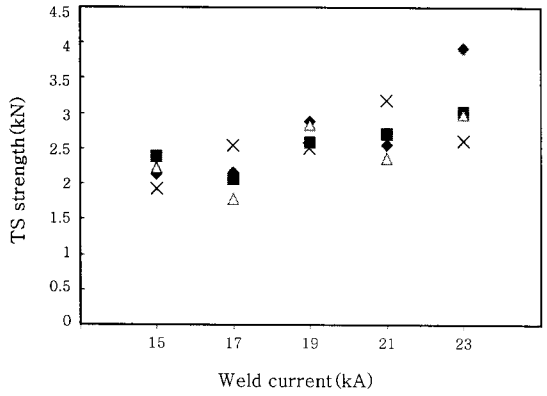


Fig. 6 TS strength vs weld current(Electrode force: 200kgf, Weld time: 100msec)

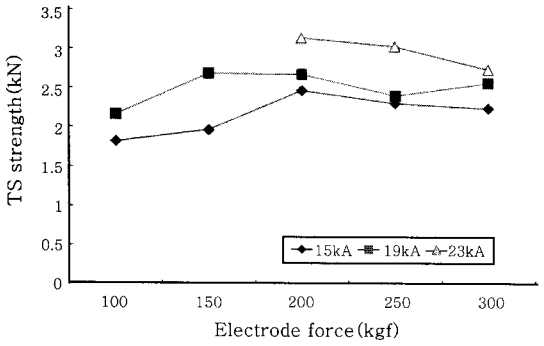


Fig. 7 TS strength vs electrode force (Weld time: 100msec)

조건에서 용접전류를 15kA에서 23kA까지 증가시킨 결과 전반적으로 인장전단강도가 향상되는 경향을 보이는데 이는 충분한 용융부가 형성되어 너깃사이즈가 증가한다는 사실을 의미한다. 다만 23kA에서는 심한 비산이 발생하는 경우가 있어 용접상태가 불안정해 진다고 볼 수 있다.

Fig. 7에서 가압력이 100kgf에서부터 300kgf까지 변화할 때, 용접부의 강도는 가압력이 200kgf일 때 평균 3.2kN으로 최대값을 보인다. 최대강도를 주는 조건 이상의 과다한 가압력은 모재표면에 깊은 함입을 발생시켜 너깃 두께의 감소와 전극과 모재 및 모재와 모재 사이의 통전면적 증가로 인한 입열량이 감소하여 용접부강도는 점차 감소하는 경향을 보인다.

적정 용접시간(통전시간)을 찾기 위한 실험으로 80~120 msec에서 구한 인장전단강도를 Fig. 8에 나타내었다. 용접시간 80msec까지는 인장전단강도의 산포도가 적게 나타난다. 100msec에서는 강도의 산포도가 커지지만 강도는 증가한다. 120msec까지 용접시간을 증가시키면 비산이 심하게 발생하므로 강도는 낮아진다. 따라서 100msec 근방이 적정 용접시간임을 알 수 있다.

3.4 너깃의 마크로조직

적정 가압력 200kgf 에서 최적 용접전류를 구하기 위하여 전류별 단면형상과 너깃 사이즈를 Fig. 9에 나타내었다. 전류가 15kA에서 23kA까지 증가함에 따라 너깃 사이즈가 증가함을 알 수 있다. 이러한 결과는 Fig. 6에 도시된 전류증가에 따른 인장전단강도의 증가 경향과 일치한다.

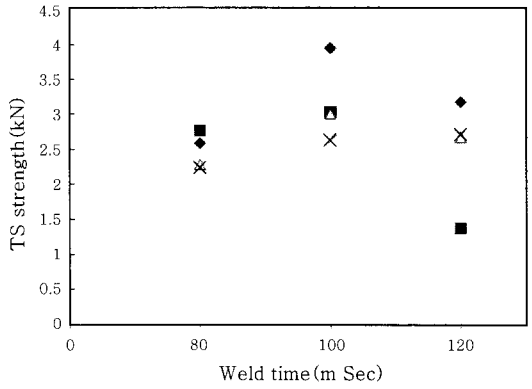


Fig. 8 TS strength vs weld time (Electrode force: 200kgf, Current: 23kA)

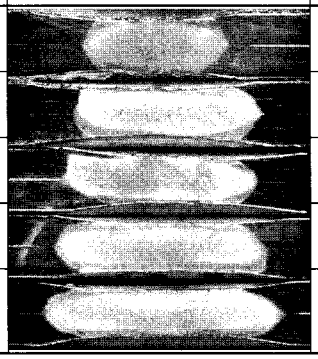
Current	cross section	Nugget size	Depth of Fusion	0.1mm void count	crack
15kA		4.14	1.78	10	2
17kA		5.01	1.68	8	4
19kA		6.08	1.44	1	2
21kA		6.75	1.67	3	1
23kA		7.38	1.55	3	2

Fig. 9 Nugget size vs weld current (Electrode force: 200kgf, Weld time: 100msec)

그런데 Fig. 10에서 가압력이 높아질수록 모재와 모재사이의 계면에서 소성변형량이 증가하여 너깃의 형상과 크기에서 약간 증감이 있는 결과를 얻었으나, 기공과 크랙은 일관된 경향으로 감소한 결과를 얻을 수 있었다. 그런데 인장전단강도는 너깃의 사이즈 추세와 기공과 크랙의 추세와 일관성 있는 경향을 찾을 수 없는데 Fig. 7에서 용접전류 23kA 경우의 그래프에 나타나 있다. 여기서 전극 가압력이 너깃형상에 미치는 영향은 용접전류처럼 일관성 있는 것이 아님을 알 수 있다.

Fig. 11은 가압력과 전류변화에 따른 기공(void) 총 갯수의 변화를 보여준다. 너깃 내부에서 직경 0.1mm 이상의 기공을 찾아서 총 갯수를 나타낸 결과이다. 적정전류(19kA)까지 전류를 높일수록 기공 갯수가 줄어드는 경향을 보이다가 그 이상 전류값에서는 큰 차이 없이 나타난다. 전반적으로 가압력을 충분히 250kgf 이상으로 높이면 기공 개수가 현저히 감소함을 알 수 있다. Mg합금판재의 물성을 고려할 때 열팽창계수가 강판보다 2배 이상이므로 가압력이 충분히 가해지지 않으면 상당히 많은 기공이 발생할 위험이 있다는 사실을 확인 할 수 있었다.

이상의 실험에서 Mg합금판재(1.4t+1.4t)의 적정 가압력, 전류 그리고 용접시간을 구하였다. 가압력 200kgf, 전류 23kA 용접시간 100ms에서 용접이 진행되면, 인장 전단강도는 평균 3.1478kN을 가지며 최대 3.934kN의 값을 나타내었다. 평균 너깃 사이즈는 7mm 정도이며 용입깊이는 평균 1.44mm로 관측되었다.

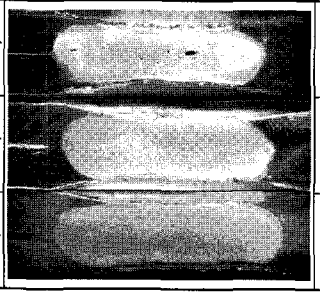
electrode force	cross section	Nugget size	Depth of Fusion	0.1mm void count	crack
200kgf		6.73	1.28	3	2
250kgf		6.38	1.55	2	0
300kgf		7.05	1.55	0	1

Fig. 10 Nugget size vs electrode force (Weld current : 23kA, Weld time: 100msec)

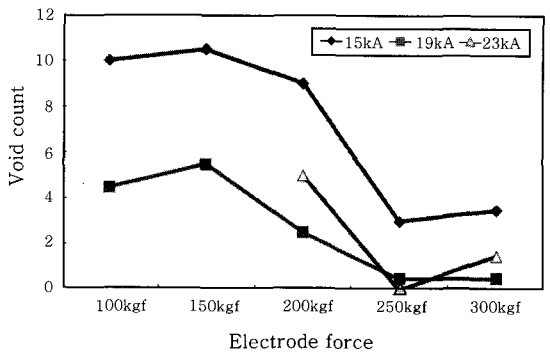


Fig. 11 Variation of void count in nugget (Weld time:100msec)

3.5 용접부의 경도

선정된 용접조건의 평가를 위해 용융부 주위의 경도를 마이크로비커스 경도계를 이용해 측정하였다. Fig. 12에서 모재부위는 평균 경도값 62.8 Hv를 보이며 너깃중심부의 경도가 51 Hv 부근으로 가장 낮고 HAZ부위가 70 Hv 정도로 가장 높게 측정되었다. 이러한 용융부의 경도분포 경향은 강판의 경우와 유사하게 나타나므로 Mg판재에서도 HAZ 부위의 취성을 감소시키기 위한 후열처리가 필요한 것으로 판단된다.

후열처리에 따른 경도변화를 살펴보기 위해 본 통전 후 1초(냉각시간) 경과한 후, 본 통전 전류의 약 30%인 7kA의 전류로 200ms동안 후열처리한 시편의 경도를 Fig. 13에 나타내었다. 후열처리 후 전체적인 경도가 후열처리를 하기 전보다 낮게 나타난 것을 알 수 있

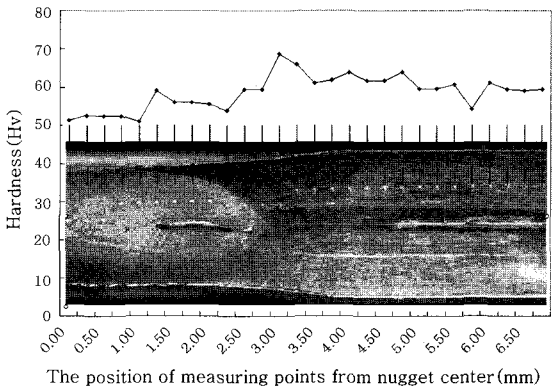


Fig. 12 Micro vickers hardness around nugget (Weld time:100ms, Electrode force: 200kgf, Weld current: 23kA)

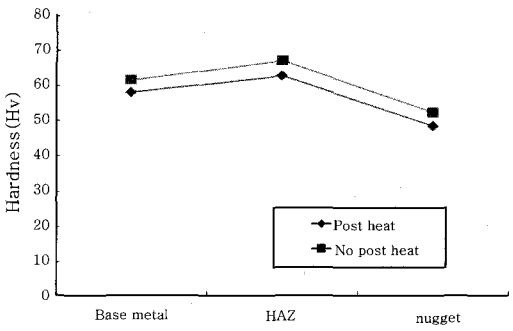


Fig. 13 Effect of post heat treatment on hardness (Weld time:100ms, Electrode force: 200kgf, Weld current: 23kA, Post heat time: 200ms, Post weld heat: 7kA)

으며 점용접 시편의 취성을 감소시켜서 풀림처리 효과를 볼 수 있었다.

3.6 용접부의 피로특성

Mg 합금판재 용접시편의 피로성능 평가를 위하여 응력비 R=0, fz=10Hz인 완전평진 인장조건의 하중제어방식으로 피로시험을 수행하였다. 시험 중 하중, 변위 및 스트레인 값을 데이터 메모리 수집 장치를 이용하여 관찰하였다. 피로시험은 시편이 완전 파단 될 때까지 실시하였고, 파단 되지 않는 경우는 10^6cycle까지 계속 하였다. 이 경우의 반복하중은 약 750N 이며 이는 정적인장강도의 24% 정도이다.(Fig 14.)

고하중에서는 일부 시편에서는 계면파단이 발생하기도 하였으나 전반적으로 하중의 크기에 따라 외부균열이 발생하는 지점은 동일하게 관찰되었다.

Fig. 15는 파괴시편의 단면을 촬영한 사진이다. 위 그림은 하중범위 0~1800N로서 피로수명 37,525 cycle의 파괴단면을 나타낸 사진이고 아래 그림은 하중범위 0~750N으로 피로수명 964,796 cycle의 파괴단면 사진이다. 고하중에서 더 많은 굽힘 현상이 나타났으며 너깃의 내면에서는 파면이 관측되지 않았다. 위 그림 좌측을 살펴보면 균열이 두 판재 사이 코로나본드에서 시작되어 내부 기공부분까지 파단면이 진행된 것을 알 수 있다. 응력집중현상이 내부 기공 때문에 발생

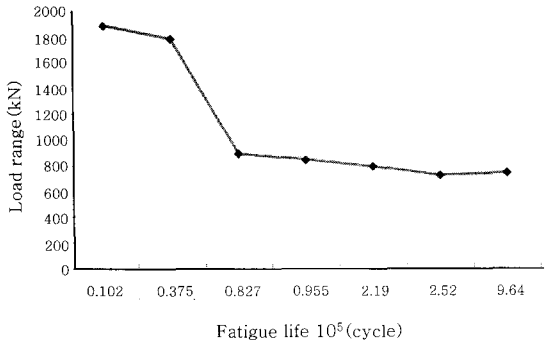


Fig. 14 Fatigue failure life

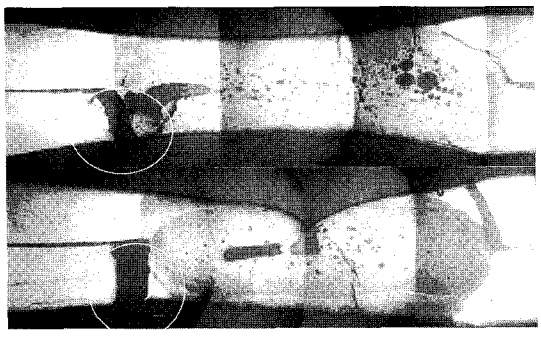


Fig. 15 Specimen with fatigue failure (Upper: 0~1800N, Lower:0~750N)

하므로 피로특성에 영향을 준 것으로 판단된다.

4. 결 론

Mg합금판재의 서보가압식 DC 점용접성에 관한 연구 결과는 다음과 같다.

1) 동저항의 변화는 알루미늄의 경우와 유사하게 용접 초기에 120μΩ 가량으로 높게 나타났으나, 통전시간 경과에 따라 급격하게 감소하였다.

2) 용접변수에서 통전시간을 100ms로 고정한 경우, 가 압력은 160~260kgf, 용접전류19~23kA의 범위에서 적절한 용접부가 형성되었다.

3) 적정한 용접조건 범위에서 용접부의 인장강도는 2.3~3.5kN범위에서 변화하였다.

4) 용접부 단면의 너깃은 용접전류 혹은 통전시간에 비례하여 증가하였으며, 일부 기공 혹은 균열이 형성되었다.

5) 용접부 경도는 50Hv가량으로 모재의경도(60Hv가량)에 비하여 감소하였으며, 후열처리에 의해서도 다소 감소하였다.

6) 용접부를 포함한 시편의 피로한계는 750N(인장강도의 24%)가량이었으며, 기공 혹은 균열을 따라 전파되었다.

7) 용접부 내부에 형성된 기공 혹은 균열에 의하여 용접부 성능 특히 동적성능이 저하되었다. 그러나 산세에 의한 표면세정과 통전 및 가압스케쥴 제어에 의하여 기공 혹은 균열형성을 방지하면 충분한 용접부 성능확보가 가능할 것으로 판단되었다.

후 기

이 논문은 2007년도 POSCO지원 연구비에 의해 수행되었습니다. 관계자 여러분께 감사의 뜻을 표합니다.

참 고 문 헌

1. B. H. Yoon, Woong-Seong Chang "Welding Technology of Magnesium Alloy for Automobile Industry" Journal of KWS **22-3**, June 2004, 23-31
2. Joong-Suk Noh, Heung-Ju Kim, Woong-Seong Chang and Kook-Soo Bang "Evaluation of Joint Properties of Friction Stir Welded AZ31B Mg Alloy" Journal of KWS **22-3**, June 2004, 56-61
3. Chang-Shik Lim and Hee-Seok Chang "Spot Welding of Aluminum Alloys Using Servogun" Journal of KWS **22-4**, August 2004, 43-49
4. Kwang-Sun Shin, Hee-Chul Jung, Young-Ki Na : "State-of-the-art application of Mg Alloy in auto and auto parts industry", The 12th Symposium on Steel Technology, The Korean Institute of Metals and Materials, Korea 2003, 63-80