



서보건을 이용한 알루미늄 합금의 저항 점용접

임 창 식* · 장 희 석**

*명지대학교 기계공학부 대학원(현, 주식회사 나우테크 용접기 설계팀 주임)

**명지대학교 기계공학부

Spot Welding of Aluminum Alloys Using Servogun

Chang-Shik Lim* and Hee-Seok Chang**

*Graduate Student, Department of Mechanical Engineering

(Currently, Assistant Manager, Division of Welder Design, Nawootec Co.,Ltd., Incheon 402-205, Korea)

**Professor, Department of Mechanical Engineering, Myong Ji University, Yong-Inn 449-728, Korea

Abstract

Conventional method for electrode force application in resistance spot welding(RSW) processes is to use pneumatic cylinder. However, due to its inherent problems in pneumatic power system such as compressibility of air and poor transient response characteristics, new electrode force system with servo control are recently introduced in RSW machine. This machine is called "servogun".

The purpose of this study is to evaluate performance of servogun in case of spot welding of aluminum alloy. Aluminum alloy(A5052) sheets are spot welded using pneumatic gun and servogun. Both results are compared by means of macro cross-section etching test and tensile shear strength test.

Numerous previous research have reported nugget with many voids and cracks are not uncommon defects in spot welds with aluminum alloy. The experimental results show similar defects in case of pneumatic gun. In contrast, use of servogun considerably reduced generation of voids and cracks. In case of step-wise increased forging force at the end of welding cycle with servogun, crack-free and void-free nuggets have been observed.

The performance of servogun has been also verified by series of tensile shear test. Higher strength values have been achieved with servogun in comparison to that of pneumatic gun.

* Corresponding author : hschang@mju.ac.kr

(Received June 28, 2004)

Key Words : Servo gun, Pneumatic gun, Aluminum alloys, Resistance spot welding, Void, Crack

1. 서 론

최근 서보모터의 토크제어를 통하여 전극 가압력을 조절하는 서보건(servogun)이 차체용접라인에 도입되고 있고 일본의 T사와 H사에서는 공기압 건에서 서보건으로 90%이상 교체되었다. 그 이유는 서보모터, 볼스크류, 리니어가이드 등의 부품으로 이루어진 기계식 가압장치이기 때문에 유지보수는 공기압 건보다 까다롭지만 우수한 동특성과 정확한 가압력을 보장하여 높은 용접품질을 얻을 수 있기 때문이다.

현재 에너지 절감을 위한 차량 경량화 작업도 진행되

고 있고 대기 오염 문제로 인하여 전기자동차를 실용화 시키려는 연구도 진행되고 있다. 이러한 추세에 따라 현재 차체제작에 사용되는 강판대신 가볍고 우수한 강도를 가지는 알루미늄 합금을 저항 점용접을 해야 하는 상황이 곧 전개될 것이다. 알루미늄 합금은 연강보다 약 3배정도 높은 열전도율을 가지고 있어 용융 후 너깃이 응고될 때 체적 수축률이 6-7%로 알려져 있다¹⁾. 따라서 수축으로 인한 용접불량을 방지하려면 용융부가 급격히 수축될 때 전극이 수축발생 방향으로 신속하게 움직여 줄 수 있는 우수한 동특성을 가진 저항 점용접 가압장치가 필요하다²⁾. 현재 사용되는 공기압 실린더를 이용한 정치식이나 건(gun)타입의 저항 점용접장치에

서는 동력원 자체가 압축성 유체이고 실린더의 관성도 크므로 가압력의 속응성에 한계가 있어 너깃내부의 기공(void) 및 크랙 발생을 피할 수 없었기 때문에 국내외에서 진행된 많은 연구에서 밝혀졌다³⁻¹⁰⁾. 특히 P. H. Thornton³⁾의 연구에서는 알루미늄 용접 시 너깃내부에 존재하는 기공을 피할 수 없었기 때문에 기공의 빈도 및 분포상태 보다는 너깃의 크기에 따라 용접강도가 좌우된다는 결론을 낸 바 있다. 또한 Kang⁹⁾의 연구에서는 급냉에 의한 유핵조직(cored structure)이 발생하기 쉬우므로 너깃경이 정해져도 단시간 통전에 기인하는 내부결함을 없애기 위한 수단으로 후열처리를 하든지 유지가압력(holding force)으로 조절해야 한다고 기술하고 있다. 현재까지 알루미늄 점용접시 유지가압력을 용접도중 조절함으로써 너깃 내부의 기공 및 크랙 발생을 억제하여 이에 따른 용접강도의 변화를 분석한 연구는 국내에서는 아직 보고 된 바 없다.



Fig. 1 Servogun

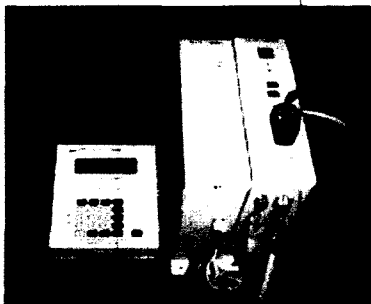


Fig. 2 Servogun controller

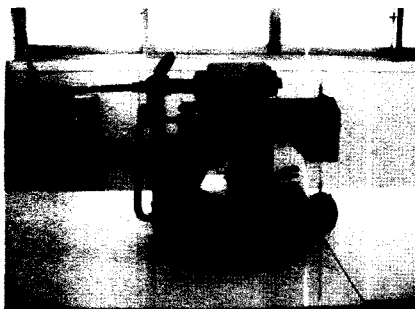


Fig. 3 Pneumatic gun

이에 본 연구에서는 서보건의 우수한 가압동특성을 이용하여 알루미늄(A5052) 합금판재의 점용접 품질을 향상시키는 실험을 수행하였다. 현재 차체용접 현장에서 사용되는 서보건을 이용하여 용접도중 가압력을 실시간으로 변화 시켜가면서 너깃 내부 기공 및 크랙의 변화를 관찰하였다. 그리고 이 결과를 현재 기존 차체용접라인에서 많이 쓰이고 있는 공기압 건을 이용한 용접결과와 비교 분석함으로써 알루미늄 합금판재의 저항점용접 시 서보가압의 필요성을 검토하였다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

2.1 실험 장치

저항용접장치는 현재 차체용접라인에서 사용되고 있는 주식회사 나우테크의 350kgf 용량의 C형 서보건을 사용하였고 서보건 제어기는 서보건 전용 1축 제어기를 이용하였다. 이 제어기는 일종의 상위제어기로 서보드라이브를 제어하여 전극 가압력을 발생시키고 또한 타이머(T/C)를 제어하여 용접전류를 전극 가압력과 연동시키며 용접부에 가하게 된다. 전극 가압력은 스크즈가압력, 용접가압력, 유지가압력 3단계로 가압력을 사용자가 임의로 프로그램 할 수 있고 2단 가압은 물론 프로그래밍가압도 가능하다.

본 실험에서 타이머(T/C)는 나우테크 D-70(정전류 제어방식)을 사용하였으며, 용접 트랜스는 알루미늄의 경우 일반 연강 용접 전류 보다 2~4배 정도의 큰 용접 전류가 필요하므로³⁾ 일반 내장형 TR을 사용하지 않고 150kVA 용량의 포터블 TR을 사용하였다. 2차 케이블은 단면적이 150mm² 이고, 길이가 2m인 것을 사용하였으며, 전극팁은 분산동 R형(호칭지름 $\Phi=16\text{mm}$, 팁선단 곡률 $r=100\text{mm}$)을 사용하였다.

공기압 건은 공기압 5kgf/cm²으로 가압력 290kgf을 가할 수 있는 C형 로봇 건을 사용하였다. 냉각수의 경우 자체 냉각 장치를 이용하여 냉각수 온도는 항상 22°C가 되도록 유지하였다.

알루미늄 합금시편은 내식성이 우수하고 용접성 및 성형성이 좋아 선박 및 차량용으로 많이 쓰이는 두께가 0.8mm인 A5052 시편을 사용하였다. 표면처리는 별도로 하지 않고 있는 그대로 용접을 하였다. Table 1에 알루미늄 A5052 시편에 대한 화학 성분이 나타나 있고 Fig. 7에 그 크기가 도시되어 있다.

2.2 실험방법

서보건 및 공기압 건으로 이루어진 가압부, 용접 전

Table 1 Chemical compositions of test specimen(wt-%)

	Cu	Si	Mg	Zn	Mn	Cr	Fe	Ti	Ni	Al
5052	0.10	0.25	2.2~2.8	0.10	0.10	0.15~0.35	0.40	-	-	balance

류 및 가압력을 측정하기 위한 측정부와 서보건 및 용접 전류를 제어하기 위한 제어부로 실험 장치를 구성하였다. 실험 장치 구성 블록도가 Fig. 4에 도시되어 있다.

본 실험에서는 저항 점용접의 대표적 제어변수인 용접 전류, 용접 시간, 가압력 중 용접 전류와 시간은 고정하고 가압력이 용접 품질에 미치는 영향을 분석하기 위하여 가압력만 변화 시켜가며 실험하였다. 본 연구에서 수행한 실험 조건이 Table 2에 나와 있다. Table 2에서 실험조건은 가압력 설정치 130kgf, 180kgf, 230kgf에 따라 크게 3가지로 분류되며 각각의 가압력 설정치에서 1단 가압실험과 2단 가압실험 2종류로 분류된다. 1단 가압실험은 공기압 건과 서보건 모두 사용하였고 2단 가압실험에서는 서보건만 사용하였다.

가압 스케줄의 경우 Fig. 5에서와 같이 총 3단계 가압구간 중 용접가압력 구간에서만 용접 전류가 흐르게 되며 마지막 유지가압력 구간에서는 전 구간의 가압력을 그대로 유지하는 1단 가압과 스텝함수(step function)

로 증가시키는 2단 가압을 가하여 실험을 진행 하였다. 용접 전류는 24kA로 설정하였고 용접 시간은 업슬로프(upslope) 사이클과 주열사이클을 각각 3사이클과 6사이클로 하였다.

공기압 건을 이용한 실험에서는 가압 안정화 시간을 충분히 줘야 하므로 22 사이클의 충분한 스퀴즈시간을 주었고 유지시간은 서보가압과 동일한 가압시간을 유지하기 위하여 9 사이클로 하였다.

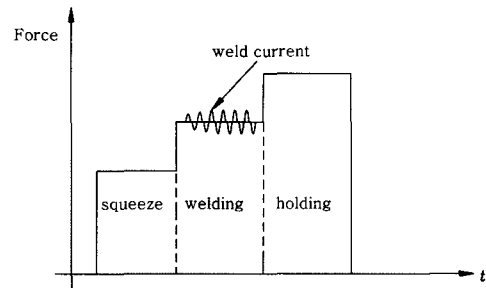


Fig. 5 Typical electrode force schedule

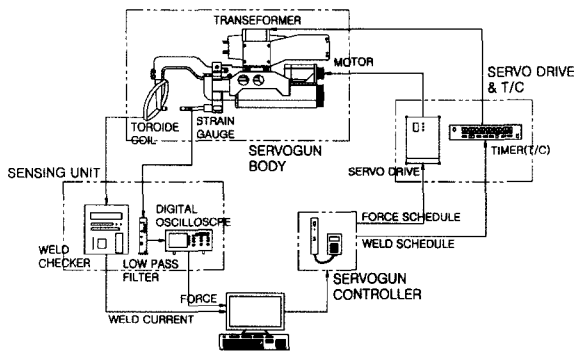
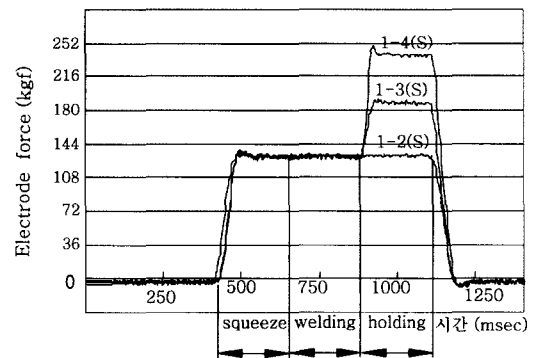


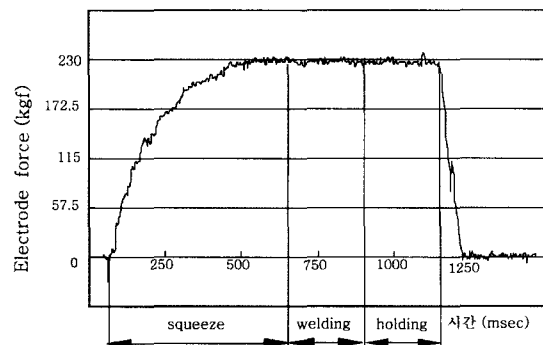
Fig. 4 Block diagram of experimental system

Table 2 Experimental conditions for various electrode force schedules(kgf)
(squeeze force - welding force - holding force)

Exp. 1-1(P)	Exp. 2-1(P)	Exp. 3-1(P)
130-130-130	180-180-180	230-230-230
Exp. 1-2(S)	Exp. 2-2(S)	Exp. 3-2(S)
130-130-130	180-180-180	230-230-230
Exp. 1-3(S)	Exp. 2-3(S)	Exp. 3-3(S)
130-130-180	180-180-230	230-230-280
Exp. 1-4(S)	Exp. 2-4(S)	
130-130-230	180-180-280	



(a) Electrode force applied by servogun



(b) Electrode force applied by pneumatic gun

Fig. 6 Electrode force curve

Fig. 6에는 본 실험에서 용접전류가 흐르지 않는 상태에서 측정된 가압력 파형이 도시되어 있다. Fig. 6(a)에는 Table 2의 실험 1계열에서 서보건을 이용한 가압력 파형인 1-2(S), 1-3(S), 1-4(S)가 도시되어 있다. 여기서 서보건으로 가압을 하는 경우는 스텝함수와 같이 2단 가압이 가능함을 알 수 있다. Fig. 6(b)에는 실험 3계열에서 공기압 건을 이용한 실험 3-1(P)의 가압력 파형이 도시되어 있다. Fig. 6(a)와 Fig. 6(b)를 비교해 보면 가압력의 속응성이 서보가압인 경우 공기압 건 보다 상당히 우수함을 알 수 있다.

2.3 용접 품질 검사

2.3.1 조직 검사

각각의 용접 조건에 의해 실험한 시편에 대하여 거시적 금속조직을 보기 위해 마크로 단면검사를 시행하였다. 용접부의 정중앙을 절단하여 마운팅 작업 후 0.05 μ m의 알루미늄(Al_2O_3)로 폴리싱 한 후 에칭을 하였다. 에칭 작업은 수산화나트륨 1~2g을 증류수 100ml에 용해시킨 에칭액에 약 3~4분간 담근 후 흐르는 물에 에칭액을 세척한다. 에칭된 시편은 에틸알코올로 씻어낸 후 물기가 완전히 제거 되도록 건조시킨다. 시편의 단면마크로 사진은 금속현미경과 CCD 카메라를 이용하여 촬영하였다.

2.3.2 인장 시험

Table 2의 각 용접조건에서 10개씩 용접 시편을 채취하여 인장시험 하였다. 본 연구에서는 유압작동식 만능재료시험기(SMV-10)로 인장시험을 수행하였고, 시험편의 크기는 가로세로 25mm \times 140mm이며 Fig. 7에 도시되어 있다. 인장속도(cross-head speed)는 5mm/min 으로 하였다.

3. 실험 결과

Fig. 8의 단면 마크로 조직사진을 관찰해 보면 공기압 건을 사용하여 알루미늄을 점용접 할 경우 너깃 내부 기공 및 크랙이 상당히 많이 발생함을 알 수 있다.

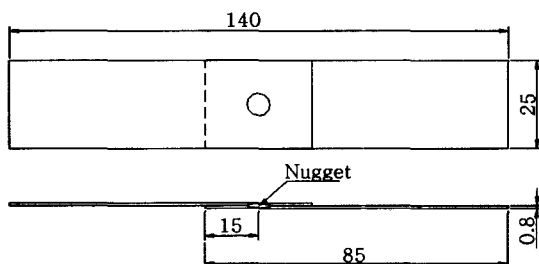


Fig. 7 Dimensions of test specimens

특히 시편의 두께방향(종방향)크랙이 현저히 많이 나타남을 알 수 있다. 이는 알루미늄에서 용융부가 너깃으로 응고될 때 수축률이 다른 금속 보다 월등히 높아 전류(종방향)방향 및 시편의 길이방향(횡방향) 수축이 급격히 일어나는데 속응성이 낮은 공기압 건의 가동전극이 순간적으로 일어나는 시편의 수축을 추종할 수 없어서 시편을 충분히 가압해 주지 못하기 때문이다(실험 1-1(P)).

한편 서보모터를 이용하여 동일한 가압력 130kgf를 가한 결과 얻어진 조직인 Fig. 9의 서보건의 경우 Fig. 8과 비교해 보면 내부 기공은 완전히 제거되지 않았으나 크랙은 존재하지 않는 것을 알 수 있다. Fig. 8과 같은 심한 크랙이 발생하지 않은 이유는 서보모터를 이용한 기계식 가압방식이므로 시편의 용융부가 응고되며 수축할 때 전극이 시편수축 방향으로 따라서 움직이며 가압력 설정치 130kgf를 그대로 유지했기 때문인 것으로 판단된다.

이상은 1단 가압으로 용접한 결과이고 용접가압력을 130kgf로 유지하다가 용접 후반부에 유지가압력을 각각 180kgf(실험1-3(S)), 230kgf(실험1-4(S))로 스텝함수로 증가시킨 2단 가압의 결과를 보면, Fig. 10과 Fig. 11에서 종방향 크랙은 발견되지 않고 있다. 내부 기공의 빈도 또한 2단 가압치가 180kgf에서 230kgf로 높아질수록 점차 줄어들고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 11의 조직을 Fig. 9와 비교했을 때 기공이 완전히 없어진 결과를 볼 수 있다.

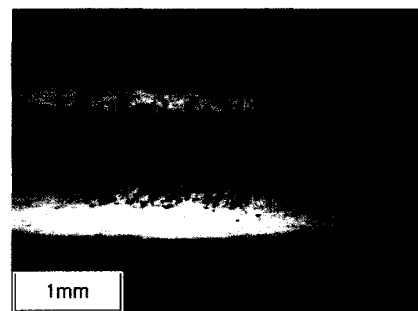


Fig. 8 Weld cross section for Experiment 1-1(P)

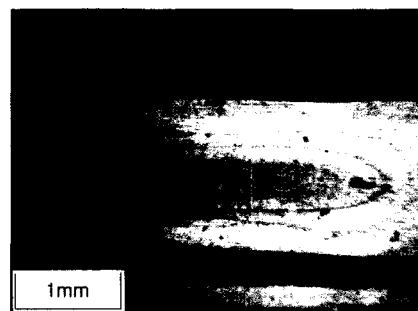


Fig. 9 Weld cross section for Experiment 1-2(S)

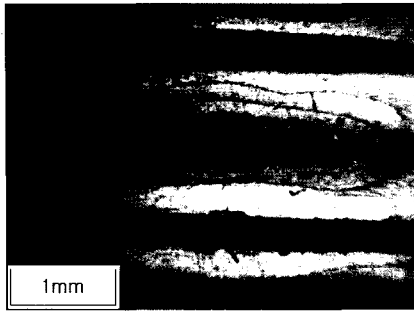


Fig. 10 Weld cross section for Experiment 1-3(S)

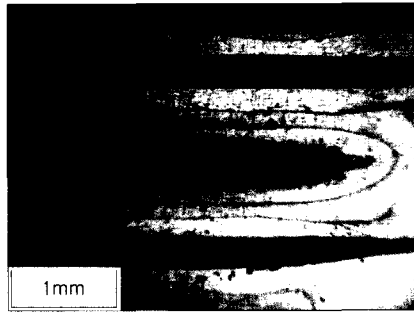


Fig. 11 Weld cross section for Experiment 1-4(S)

여기서 알루미늄 합금을 점용접 할 경우 관찰 가능한 특이한 너깃형상으로, AC 용접 전원을 사용할 때 교류의 특성상 가열과 냉각이 반복되는 과정에서 알루미늄의 높은 열전도도로 인하여, 나이트 모양의 띠가 생성되어 있음을 알 수 있다. 다른 실험 조건 계열 2와 3에서도 마찬가지로의 현상을 볼 수 있었다.

1단 가압치가 180kgf이며 공기압 건을 사용하여 용접한 결과(실험2-1(P))가 Fig. 12에 나타나 있다. Fig. 8의 실험 1-1(P) 결과와 유사하게 종방향 크랙이 발생하였으나 발생빈도가 약간 감소한 것으로 보이며 이는 증가된 가압력에 기인한다고 판단된다.

Fig. 12에서 너깃 중앙부에 큰 기공을 관찰할 수 있었다. 서보 건을 이용하여 동일한 1단 가압력 180kgf를 가한 실험에서는 Fig. 13(실험 2-2(S))에서 보는 바와 같이 종방향 크랙은 발견되지 않았으며 기공이 완

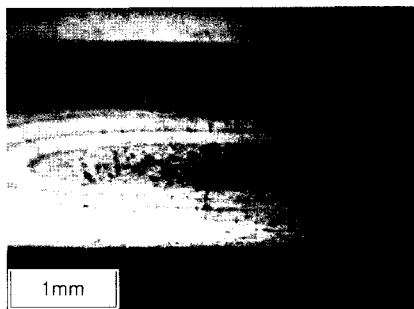


Fig. 12 Weld cross section for Experiment 2-1(P)

전히 없어지지 않는 않지만 Fig. 12의 공기압 건을 이용한 실험결과 보다 많이 감소된 상태를 확인할 수 있다. 가압력을 2단 가압으로 180kgf에서 230kgf로 스텝함수로 가한 Fig. 14(실험 2-3(S))에서 Fig. 13의 1단 가압 결과보다 기공이 많이 제거되었음을 확인할 수 있다. 그리고 Fig. 15(실험 2-4(S))에서는 2단 가압치가 280kgf로 증가된 결과 Fig. 14에 비하여 기공이 완전히 제거되었음을 알 수 있다.

이상과 같이 실험 2계열에서도 전술한 실험 1계열의 결과와 유사한 경향이 나타남을 알 수 있다. 즉, 공기압 건을 이용한 결과보다는 서보건을 사용한 결과에서 내부 기공이 현저히 감소하고 있음을 확인할 수 있다. 특히 공기압 건을 이용한 실험 결과와 가장 큰 차이점은 실험 1계열에서와 마찬가지로 종방향 크랙이 발견되지 않고 있다는 것이다. 그 이유는 용접 후반부 모재가

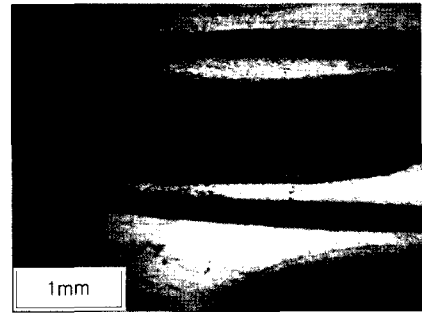


Fig. 13 Weld cross section for Experiment 2-2(S)

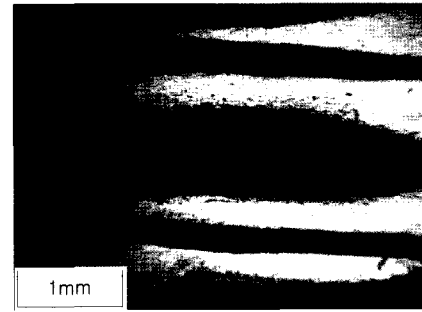


Fig. 14 Weld cross section for Experiment 2-3(S)

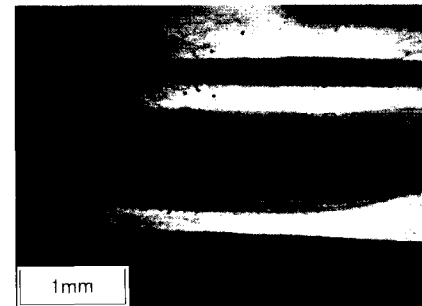


Fig. 15 Weld cross section for Experiment 2-4(S)

급격히 수축하는 순간 가압력 제어기에서 설정한 가압력에 해당하는 토크값보다 작은 토크값이 감지되기 때문에 서보드라이버 회로에서 토크가 피드백(feedback) 제어 되므로 전극이 모재수축방향으로 추종하여 가압력이 순간적으로 감소하지 않도록 제어동작이 가해지기 때문이다. 그리고 서보 건을 사용한 결과에서 1단 가압보다는 2단 가압의 결과에서 기공 제거효과가 탁월한 경향을 보이고 있는데 이는 위와 같은 가압력의 서보제어 효과로 용접후반부에 확실하게 단조가압 되기 때문인 것으로 판단된다.

1단 가압치를 230kgf로 높인 경우에 대한 실험에서도 위와 같은 경향이 관찰되었다. 공기압 건을 사용한 Fig. 16(실험 3-1(P))의 결과에서 낮은 가압력인 실험 1계열이나 2계열 결과와 비교하면 높은 가압력이 가해졌기 때문에 종방향 크랙은 발견되지 않았지만 내

부에 기공이 여전히 존재함을 알 수 있다. 한편 1단 서보가압 실험3-2(S)의 결과인 Fig. 17과 2단 서보가압 실험3-3(S)의 결과인 Fig. 18에서는 Fig. 16과 대조적으로 내부 기공이 전혀 없는 것을 볼 수 있다.

이상의 실험에서 구해진 시편의 단면 마크로 사진을 검토한 결과를 바탕으로 용접 후반부 급격한 모재 수축에 기인한 너깃내부의 크랙이나 기공이 용접 강도에서는 어떤 차이가 있는지 규명하기위해 Table 2에 명시된 각 용접조건에서 10개씩 시편을 취해 인장전단강도(tensile shear strength)를 비교해 보았다. 10개 시편의 인장전단강도값(최대값, 평균값, 최소값)이 도시된 Fig. 19(a)에서 공기압 건이 사용된 시편과 서보건이 사용된 시편의 인장전단강도 값의 차이는 평균적으

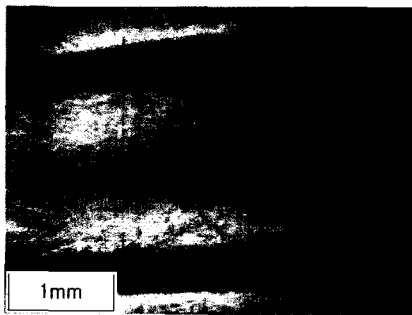


Fig. 16 Weld cross section for Experiment 3-1(P)

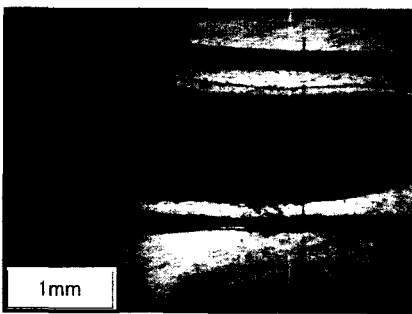


Fig. 17 Weld cross section for Experiment 3-2(S)

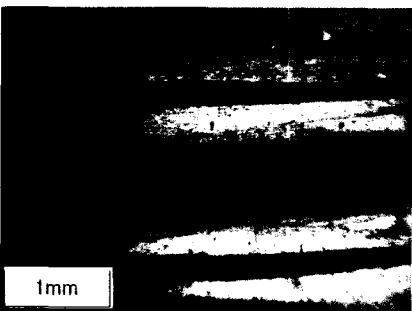
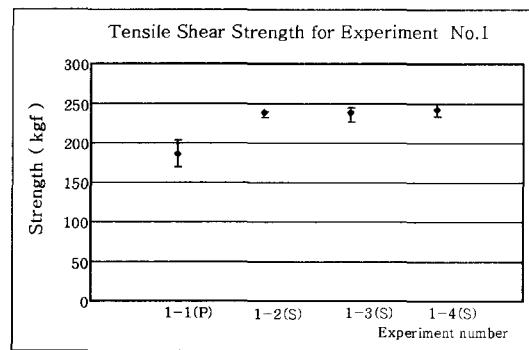
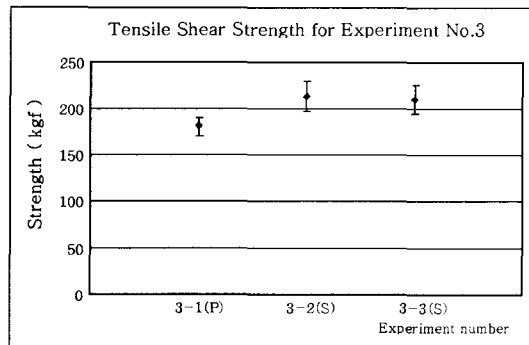


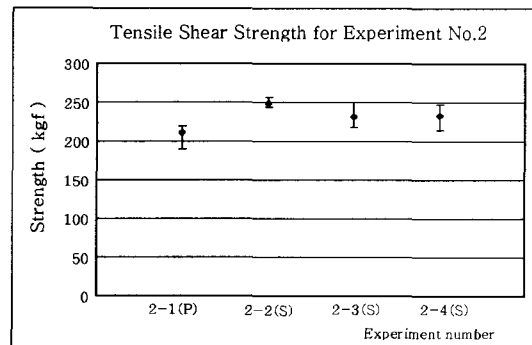
Fig. 18 Weld cross section for Experiment 3-3(S)



(a)



(b)



(c)

Fig. 19 Tensile shear strength of weldments

로 50kgf 정도임을 확인할 수 있으므로 너깃 내부의 크랙이나 기공이 용접강도를 현저하게 저하시킴을 알 수 있었다. Fig. 19(b), Fig. 19(c)의 결과에서도 Fig. 19(a)와 유사한 경향을 볼 수 있다.

4. 결 론

알루미늄 합금의 저항 점용접 시 공기압 건을 이용한 경우와 서보건을 이용한 결과를 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 낼 수 있었다.

1) 용접 후반부 너깃의 응고에 따른 용접부의 수축을 방지하기 위해서 서보건을 사용하여 유지압력(holding force)를 통전 직 후 증가시키면 단조가압효과가 나타나 너깃 내부의 크랙 및 기공이 감소될 수 있음을 시편의 단면 마크로 검사를 통하여 입증하였다.

2) 용접전류가 동일할 경우 공기압 건으로 용접된 시편보다 서보건으로 용접된 시편에서 높은 인장전단강도를 얻을 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 대한용접학회편: 용접·접합 편람, 대한용접학회, 1998, 256 (in Korean)
2. 김명준 : "저항용접", 기문사, 1995, 43 (in Korean)
3. P. H. Thornton, A. R. Krause and R. G. Davies: The Aluminum Spot Weld, *Welding Journal*, **75-3** (1996), 101s-108s
4. L. Xu and J. A. Khan: Nugget Growth Model for Aluminum Alloys during Resistance Spot Welding, *Welding Journal*, **78-11**(1999), 367s-372s
5. M. Hao, et al.: Developments in Characterization of Resistance Spot Welding of Aluminum, *Welding Journal*, **75-1**(1996), 1s-8s
6. Sang-Myung Cho : Resistance Welding and Resistance Joining Technology to Fe-based Material of Al-alloy, *Journal of KWS*, **19-2**(2001), 151-159 (in Korean)
7. S.P. Kim, T.M. Hong, H.S. Chang : A Study on the Resistance Spot Welding of Aluminum Alloy(I), *Journal of KWS*, **12-4**(1994), 127-140 (in Korean)
8. H.I. Shin, S.S. Kang : A Study on the Spot Weldability of Aluminum, *Annual Proceeding of KWS* , **1-11** (1993), 53-57 (in Korean)
9. S.S. Kang : Prospect and Reality of Aluminum Alloy Resistance Welding Technology, *Journal of KWS*, **15-2**(1997), 19-23 (in Korean)
10. J.C. Park, W.W. Jung, S.S. Kang : A Study on the Weldability and the Fatigue Characteristics in Resistance Spot Welding of 5182-O/6061-T6 Dissimilar Aluminum Alloy Sheets, *Journal of KWS*, **17-2** (1999), 44-52 (in Korean)