

정밀저항시리즈 점용접에서 너깃의 대칭성에 미치는 공정변수의 영향

조 상 명* · 김 송 미**

*부경대학교 재료공학부 생산가공공학전공

**부경대학교 대학원 생산가공공학과 (현, 태성전자 기술연구소)

**The Effect of Process Parameter on the Symmetry of Nugget
in Micro-resistance Series Spot Welding**

Sang-Myung Cho* and Song-Mi Kim**

*Course of Production & Joining Eng., Div. of Materials Science & Engineering, Pukyong National University,
Busan 608-739, Korea

**Dept. Production & Joining Eng., Graduate School, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

Abstract

The aim of this experiment is to establish the method that obtains symmetrically two nuggets in micro-resistance series spot welding.

The sheets of austenite stainless steel STS304 applied to various electronic parts were experimented by the inverter welding power source of polarity controllable type and by the twin head for left and right electrode force to be controlled separately.

The experimental results were obtained as follows :

1) When series spot welding was carried out by DC 1 pulse as welding current with same electrode force at left and right, the asymmetry of nuggets was resulted from the larger nugget of the (-) pole because of the Peltier effect. The dynamic resistance of weld spot at left and right was appeared differently according to the growth of nuggets.

2) When AC 1 cycle by welding power source of polarity controllable type was applied, the nuggets were almost symmetrically formed.

3) In a twin head, if the electrode force of (-) pole was larger than that of (+) pole, the diameters of two nuggets became to same. It was confirmed that the dynamic resistance of (-) pole was decreased to the same level as it of (+) pole.

4) Although the forces of left and right electrode were same, and only DC 1 pulse was applied, symmetric nuggets were obtained if the conductivity of (+) pole was lower than it of (-) pole.

(Received June 26, 2001)

Key Words : Micro-resistance welding, Series spot welding, Polarity control, Nugget, Peltier effect, Twin head, Dynamic resistance, Electrode force.

1. 서 론

저항용접은 압력을 가한 상태에서 큰 전류를 흘려주어 금속끼리의 접촉면에서 생기는 접촉저항과 금속 고유저항에 의하여 열을 얻고, 이로 인하여 금속이 가열

또는 용융하면서 가해진 압력에 의하여 접합이 이루어지도록 하는 것이다. 또한 접합하고자 하는 부분에 직접 고전류를 통전하고 그 전류에 의한 저항발열로 용접부의 온도를 상승시켜 용접하는 것으로서 극히 짧은 시간에 용접을 이룰 수 있어 용접 후의 열변형이 적고, 대부분 자동 용접이기 때문에 작업자의 숙련도가

거의 필요 없고, 소재의 특성에 따른 전극의 선택과 용접조건 설정 이외는 기기(器機)의 특성에 의존하는 경향이 강하다.

최근, 전자부품이나 소형 자동차 부품의 조립을 위해서 적용되는 정밀저항 점용접에는 주로 인버터 DC 용접전원이 사용된다. 이 용접전원은 기존의 사이리스터 AC 전원에 비해 용접 중 날림이 적게 생기고 용접 품질이 우수하기 때문에 장치비가 고가임에도 불구하고 점차 그 적용이 확대되고 있다^{1,2)}.

저항시리즈 점용접은 한면에서 용접작업이 가능하며, 1개의 용접전류회로에서 2개의 너깃을 동시에 형성하는 통전방법으로 다수의 용접부를 얻고자 할 때 사용된다^{3,4)}.

한편, 저항시리즈 점용접에 DC 용접전류를 흘리면 (-), (+)극성에 따른 발열의 차이로 2개의 너깃이 비대칭으로 형성되므로 품질이 불안정해진다. 즉 펠티에르 효과(Peltier effect) 때문에 (-)극에서는 발열량이 크고 너깃이 크게 생기지만 (+)극 쪽의 너깃은 상대적으로 작게 되어 비대칭의 너깃이 발생한다.

본 연구는 정밀 저항시리즈 점용접시 생기는 비대칭 너깃을 대칭형으로 개선시키는데 그 목적을 두었다. 이를 위하여 통전방식을 변화시킨 경우와 가압력을 변화시킨 경우로 나누어 검토하였다. 이때 파단형상 및 용접부 중심을 절단하여 너깃 단면형상과 동저항의 변화를 관찰하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 실험재료 및 시험편

본 연구에서 사용된 용접 시험편은 오스테나이트계 스테인리스강 STS 304, 두께 0.2mm의 박판이었다. 이 STS 304는 매우 널리 사용되며 내식성이 우수하고 연성 및 내열성이 우수할 뿐 아니라 용접성도 양호하므로 박판은 전자부품에 많이 활용된다¹⁾.

Table 1과 Table 2에 실험재료의 화학적 성분과 기

Table 1 Chemical compositions of base metal(wt. %)

Cu	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe
0.053	0.480	1.050	0.022	0.002	8.230	18.170	Balance

Table 2 Mechanical properties of base metal

Material	Tensile strength (MPa)	Hardness (Hv)
STS 304	714.4	170.0

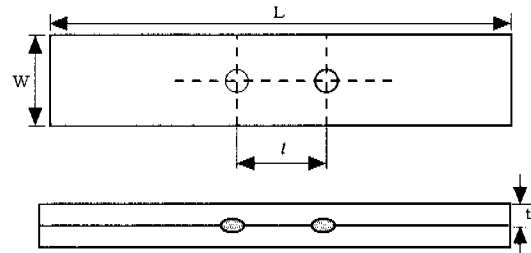


Fig. 1 Dimension of specimen (L:25, W:4, t:0.2, l:5)

계적 성질을 나타내었다. 용접시험편의 형상은 길이 25mm, 폭 4mm, 두께 0.2mm인 판으로 겹치기 저항시리즈 점용접을 하였으며, Fig. 1에 그 형상을 나타내었다.

2.2 실험방법

2.2.1 직류 1펄스 통전방식에 따른 시리즈 점용접 실험

Fig. 2는 정밀저항시리즈 점용접시 두 개의 전극을 나타내고 있다. 왼쪽의 전극을 L전극이라 하고, 오른쪽의 전극을 R전극이라 한다.

용접전원장치는 극성가변형 인버터 전원(최대전류 3000A)이었다.

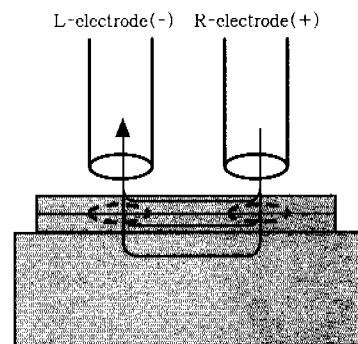


Fig. 2 Schematic diagram of electrode

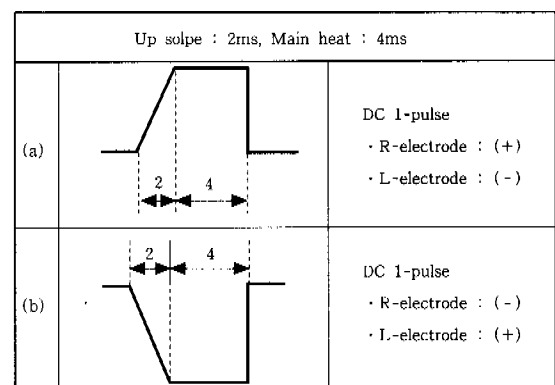


Fig. 3 Schematic diagram of DC 1-pulse for series welding

Fig. 3은 DC 1펄스의 통전방식을 나타낸 것으로 (a)는 전류를 R전극에서 L전극으로 DC 1펄스, (b)는 L전극에서 R전극으로 DC 1펄스로 통전시키는 방식을 나타내고 있다. 전류 파형은 업 슬롭(Up slope) 2msec, 주가열(Main heat) 4msec로 설정하였다.

두 개의 상부전극형상은 직경 $\phi 3$, 팁직경 $\phi 1.5$ 인 F형(선단평탄형) 전극으로 하였고, 도전을 75%의 크롬지르코늄동(CuCrZr)을 사용하였다. 하부의 백전극은 순동블럭($30 \times 50 \times 15$ mm)으로 하였다.

본 실험에서는 시험편에 가압력을 34.3N으로 일정하게 하고, 통전시간은 Fig. 3(a),(b)와 같이 DC 1펄스로하여 용접실험을 실시하였다. 용접후 필시험(Peel test)을 실시하여 용접부의 파단형상을 관찰하였고, 용접부 중심을 절단하여 사포 2000번까지 연마하고, 천연마 후 옥살산 10%에 의한 전해부식(5~10초)을 실시하여 너깃단면 형상을 관찰하였다. 각 용접부의 동저항 변화는 스폿 모니터링 시스템을 사용하여 전류와 전압의 관계를 써서 연속적으로 측정하였다.

2.2.2 극성가변 통전방식에 따른 시리즈 점용접 실험

Fig. 4는 L전극과 R전극의 가압력을 동시에 같게 설정할 수 있도록 설계되어 에어실린더로 구동되는 밸런스 헤드의 외관을 보인 것이다.

Fig. 5는 극성을 가변시켜 교류 1사이클로 통전시키는 방식을 나타내고 있다. 즉 상기와 같이 DC 1펄스로 통전시킨 후 (+)(-)극성을 바꾸어서 반대로 다시 한번 통전시킴으로서 교류파형 1사이클이 되도록 한 것이다. 본 실험에서는 시험편에 가압력을 34.3N으

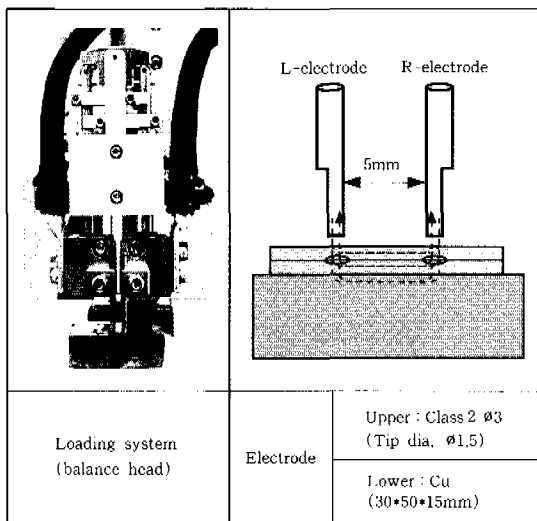


Fig. 4 Appearance of balance head and schematic diagram of electrode for series welding

로 일정하게 하였고, 앞쪽 반사이클과 뒤쪽 반사이클의 용접전류는 같게 하였으며, 950A에서 1,500A까지 50A씩 증가시켰다.

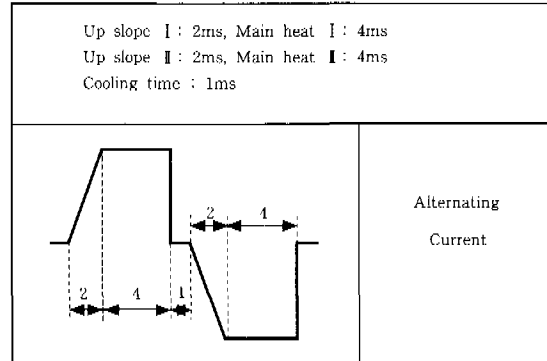


Fig. 5 Schematic diagram for alternating current

2.2.3 가압력 조절에 따른 시리즈 점용접 실험

Fig. 6은 L전극과 R전극의 가압력을 별도로 설정할 수 있도록 설계되어 에어실린더로 구동되는 트윈헤드의 외관을 보인 것이다.

본 실험에서는 (+)전극의 가압력을 34.3N으로 일정하게 하고, (-)전극의 가압력은 가압노브를 조절하여 대략 2N씩 증가시켜 최대 42.1N의 가압력으로 용접하여 너깃의 형태를 검토하였다. Fig. 3(a)와 같이 전류를 R전극에서 L전극으로 DC 1펄스로 통전하였다.

2.2.4 전극도전을 변화에 따른 시리즈 점용접 실험

본 실험에서는 (+),(-)전극의 가압력은 동일하게

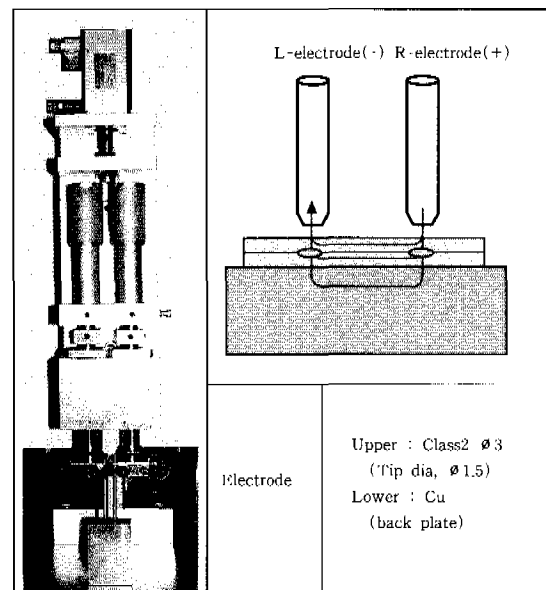


Fig. 6 Appearance of twin head and schematic diagram of electrode for series welding

34.3N으로 하고, 전극의 소재를 달리하여 실험하였다. 즉 (-)전극의 소재는 도전을 75%의 크롬지크로 늑동을 사용하였고, (+)전극의 소재는 도전을 45%의 저베릴륨동으로 변경하였다. Fig. 3(a)와 같이 DC 1펄스로 통전하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 DC 1펄스 통전방식에 따른 너깃의 비대칭성 검토

Fig. 7은 DC 1펄스 통전시 너깃의 좌우, 상하 비대칭과 쓸림을 보여준다. 가압력을 R, L 각각 34.3N로 하였고, 전류는 1200A가 (+)극인 R전극으로부터 시험편을 지나 (-)극인 L전극으로 흐를 때의 너깃형상이다. 너깃의 비대칭성은 다음과 같은 3종류로 구분된다⁴⁻⁷⁾.

1) R 너깃과 L 너깃의 좌·우 비대칭성 : 펠띠에르 효과(Peltier effect)로 (+)극 보다 (-)극의 너깃이 크게 형성됨으로 인한 비대칭성

2) 각 너깃의 좌·우 비대칭성 : 상판에 흐르는 무효분류(Shunt current)로 인해 두 용접점 사이의 발열량 증가로 안쪽으로 너깃이 크게 성장하는 비대칭성

3) 각 너깃의 상·하 비대칭성 : 하판 시험편보다 상판 시험편으로 흐르는 무효분류가 큼으로 인해 상판쪽의 발열량이 크고, 상부전극팁은 $\phi 1.5$ 인데 비해 하부백전극(back plate)은 평판이므로 접촉면적이 커서 백전극 쪽으로 열을 많이 뺏기므로 하판의 두께방향으로 너깃성장이 곤란하여 생기는 비대칭성

Fig. 8은 DC 1펄스의 전류가 L전극에서 R전극으로 흐르므로 (-)극인 R전극에서 너깃이 크게 형성된 것을

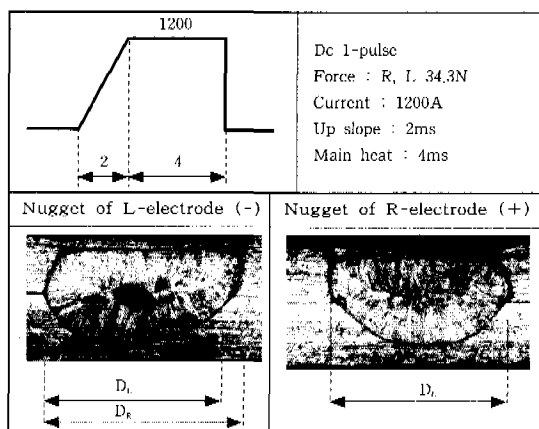


Fig. 7 Asymmetry nugget shape by DC 1-pulse (Welding current flow from R-electrode to L-electrode)

보인 것이다. 그리고 Fig. 7 및 Fig. 8의 좌·우 너깃 중심부에 보이는 검은 것은 기공이다. STS 304는 연강에 비해 열팽창계수가 1.3배정도 높고, 열전도계수가 작아서 너깃부의 냉각시 수축량이 크며 주변의 구속이 심하기 때문에 기공 발생이 용이하다.

Table 3은 DC 1펄스로 통전시 용접전류와 파단형태와의 관계를 나타낸 것이다. 동일 전류와 가압력일 때 쉬어파단은 (+)극, (-)극 둘 다 750A이하에서 형성되었다. 플러그파단만 생기는 영역은 (-)극은 850A 이하로 되었지만, (+)극은 1000A이하에서 형성되었다. 플러그파단과 테어파단이 동시에 형성되는 구간은 (-)극은 1100A이하에서 (+)극은 1250A이하에서 형성되었으며, 테어파단은 (-)극은 1100A이상이면 형성되지만, (+)극은 1250A 이상이 되어야만 형성되었다. 따라서 (+)극보다 (-)극쪽이, 더 낮은 전류영역에서 용접강도가 높게 되어 테어파단이 형성됨을 알 수 있다.

Fig. 9는 가압력을 34.3N으로 일정하게 하고, DC 1펄스로 용접전류를 750A, 950A, 1250A로 증가시켜서 얻어진 용접부에 대한 필시험 후의 외관이다. 필시험을 한 결과 750A에서는 쉬어파단(Shear fracture), 950A에서는 플러그파단(Plug fracture),

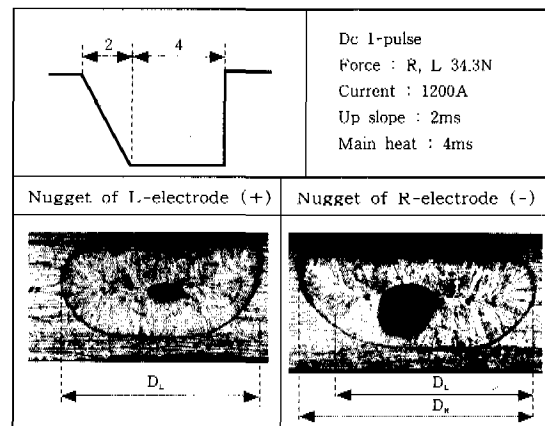


Fig. 8 Asymmetry nugget shape by DC 1-pulse (Welding current flow from L-electrode to R-electrode)

Table 3 Fracture pattern by welding current(DC1-pulse)

Fracture pattern	(+)	Shear	Plug				
	(-)	Shear	Plug				
Current(A)		600	700	800	900	1000	1100 1200 1300

1250A에서는 테어파단(Tear fracture)이 형성되었다^{1-3,15-18)}. 따라서 바람직한 용접품질을 얻기 위해서는 (+)극쪽도 테어파단이 형성되어야 하며, 이를 위해서는 적어도 1250A이상의 전류가 요구된다.

Fig. 10은 Fig. 9와 같은 조건으로 용접하여 얻어진 너깃부의 마크로 단면을 보인 것으로써, (+)극보다 (-)극에서 너깃이 크게 성장하고 있으며, 전류가 증가할수록 너깃의 직경과 용입률이 증가하고 있음을 볼 수 있다.

결국, 좌·우 전극의 가압력을 같게 하여 DC 1펄스 통전에 의해 시리즈 점용접을 하면 (-)극의 너깃이 크게 형성되어 너깃의 비대칭성이 나타났고, 좌·우 용접점의 품질을 일정하게 유지하기가 곤란하게 되었다.

Fig. 11 (a)는 DC 1펄스로 R전극에서 L전극으로 전류가 흐를 때, L전극 쪽인 (-)극의 저항 파형이다. 너깃이 성장함에 따라 저항이 감소하고 있음을 보여주고 있으며, 통전이 끝난 뒷부분의 저항값은 1.10mΩ이다. (b)는 R전극 쪽인 (+)극의 파형으로 (a)와 마

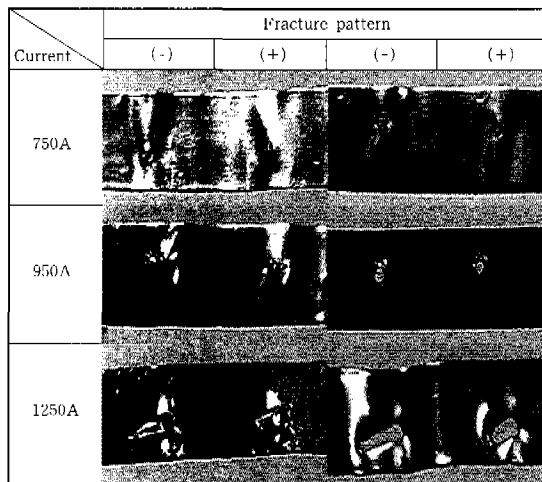


Fig. 9 Fracture pattern by welding current(34.3N)

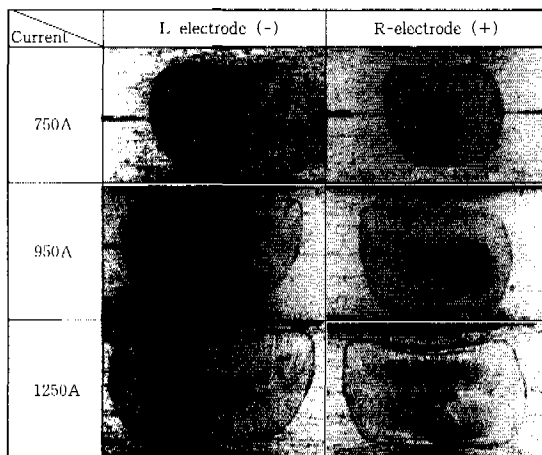
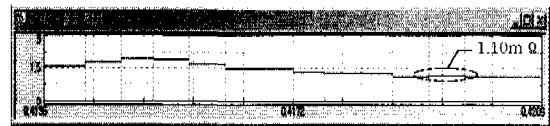


Fig. 10 Growth of nugget by increasing current (34.3N)

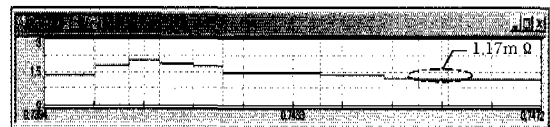
찬가지로 너깃이 성장함에 따라 저항이 감소하고 있음을 보여주고 있으며, 저항값은 1.17mΩ이다.

Fig. 12는 Fig. 11 (a), (b)의 L전극 쪽과 R전극 쪽의 종료 저항에 대해 10번의 반복시험을 통하여 얻어진 평균값을 나타낸 것이다. (-)전극 쪽의 평균 저항값은 1.078mΩ이고, (+)전극 쪽의 평균 저항값은 1.153mΩ으로 (-)극 쪽에서 너깃이 보다 크게 형성된다고 하는 것을 이 동저항의 종료값을 통하여 확인할 수 있었다.

다시말해 좌·우 전극의 가압력을 같게 하여 DC 1펄스 통전시 좌·우 용접점의 동저항은 너깃성장애 따라 다르게 나타났다. 따라서 동저항으로 너깃의 비대칭성을 확인할 수 있었다.



(a) Negative electrode resistance (L-electrode)



(b) Positive electrode resistance (R-electrode)

Fig. 11 Variation of resistance during direct current

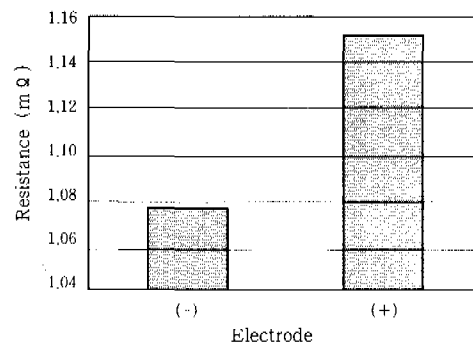


Fig. 12 Comparison of resistance for two welding point (L/R)(Up slope 2ms, Main heat 4ms)

3.2 극성가변 통전방식에 따른 너깃의 대칭성 검토

Fig. 13은 R전극에서 L전극으로 DC 1펄스 통전시킨 후 극성을 바꾸어서 L전극에서 R전극으로 DC 1펄스 통전시킴으로써 교류 1사이클로 하여 용접한 너깃이다. 앞쪽 DC 1펄스 통전에 의해 앞쪽의 너깃이 형성되며, 뒤쪽 DC 1펄스 통전에 의해 바깥의 너깃이 형성된다. 이때 R과 L의 너깃이 유사하게 성장하였음을 보여준다.

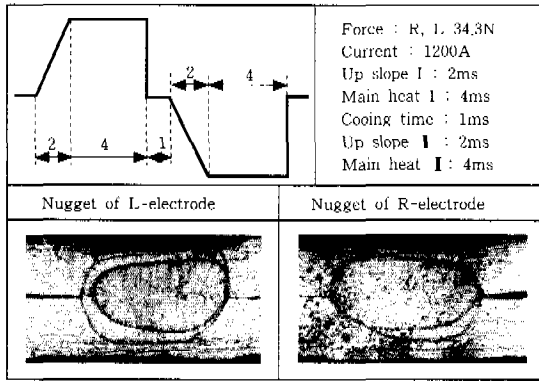


Fig. 13 Nugget shape by alternating current

Table 4 Result of peel test(AC 1-pulse)

Fracture pattern	(R)	Shear	Plug		Tear
	(L)	Shear	Plug		Tear
Current(A)		900 1000 1100	1200 1300 1400	1500	

의 동저항 값이 감소하고 있음을 알 수 있다.

따라서, 좌·우 전극의 가압력을 같게 하여 DC 1 펄스 통전만에 의해 시리즈 점용접을 하면 (+)극의 너깃이 작게 되지만, 극성가변 통전에 의한 교류 1사이클로 시리즈 용접하면 거의 대칭으로 너깃이 성장한다.

결국, 직류인버터 전원으로 좌·우 전극의 가압력을 같게하여 시리즈 점용접을 할 때는 극성을 가변시켜 교류파형을 생성하여 대칭형 너깃을 형성시킬 수 있음을 확인하였다.

Table 4는 전극 가압력을 양쪽 모두 34.3N으로 하면서 950A에서 1500A까지 50A씩 증가시켜 용접한 후 필시험한 결과이다. 양쪽 용접부 모두에서 1100A 이하에서는 쉬어파단이 형성되고, 1150A에서 1350A까지는 플러그파단, 1400A이상에서는 테어파단이 형성된다.

Fig. 14는 교류 1사이클 통전시 전류의 증가에 따른 너깃 성장을 보인 것이다. 950A, 1200A, 1400A로 전류가 증가할 때, 너깃의 직경과 용입률이 증가하고 있음을 보여준다.

3.3 가압력 조절에 따른 너깃의 대칭성 검토

Fig. 15는 950A에서 (+)전극의 가압력은 34.3N으로 일정하게 하고, (-)전극의 가압력을 증가시켰을 때 용접부 중심을 절단하여 너깃형상을 나타낸 것이다. (-)전극의 가압력이 34.3N일 때의 너깃 직경을

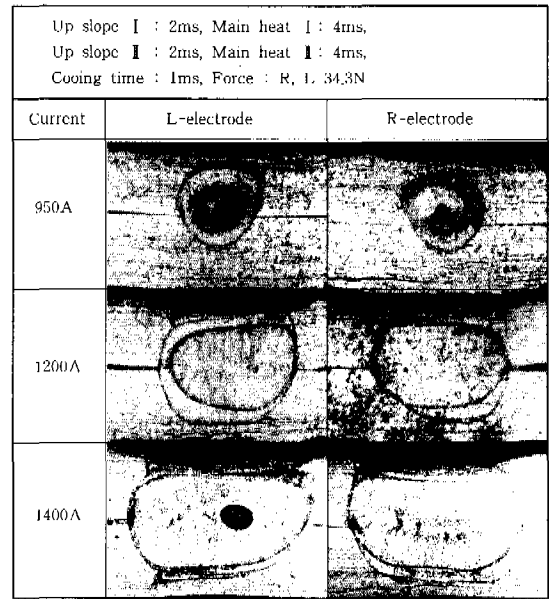


Fig. 14 Growth of nugget by increasing current

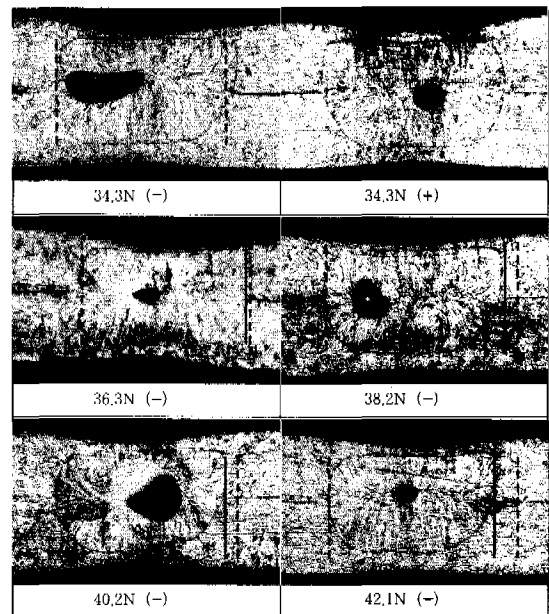


Fig. 15 Macro-section of nugget by increasing force (950A)

파선으로 표현하였고, (-)전극의 가압력이 증가함에 따라 너깃 직경이 감소하는 경향은 실선으로 표시하여 그 직경의 감소 특성을 알 수 있게 하였다.

결과적으로 (-)전극의 가압력을 (+)전극보다 크게 줄 수 있는 트윈헤드를 사용하면 (-)전극의 동저항이 감소하게 되고 (+)극과 (-)극의 너깃 직경이 동일하게 되도록 할 수 있음을 확인하였다.

Fig. 16은 (+)전극의 가압력은 34.3N으로 일정하게 하고, (-)전극의 가압력을 34.3N에서 42.1N으로 증가시키면서 시리즈 점용접 하였을 때의 종료저항 값

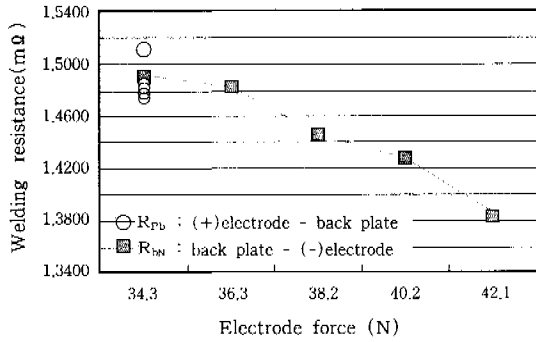


Fig. 16 Relation of force and resistance (The force of positive electrode is constant)

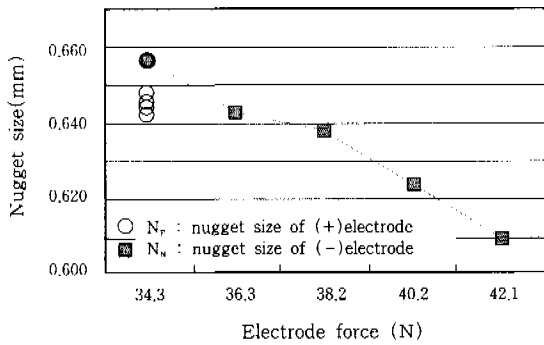


Fig. 17 Relation of force and nugget size (The force of positive electrode is constant)

의 변화를 나타낸 것이다. 가압력이 증가할수록 (-)극 Fig. 17은 (-)전극에서의 가압력 증가에 따른 너깃의 변화를 나타낸 것으로 가압력이 증가할수록 너깃 직경이 감소함을 알 수 있다. 이것은 통전 전류는 같지만 가압력이 증가하여 접촉면적이 커지므로 전류밀도와 접촉저항이 감소하여 너깃 직경이 작게 형성하는 것을 의미한다.

3.4 전극 도전율에 따른 너깃의 대칭성 검토

Fig. 18은 전류를 950A, 가압력을 34.3N으로 좌·우 같게 설정 한 후, (+)전극의 소재를 도전율 45%의 저베릴륨동으로 변경하여 용접한 후 너깃의 단면을 보인 것이다. (-)전극은 도전율 75%인 크롬지르코늄동을 사용하였고, (+)전극은 도전율 45%인 저베릴륨동을 사용하였다. 도전율 45%인 (+)전극에서, (-)전극보다 너깃이 크게 성장하였음을 알 수 있다.

이것은 이 저베릴륨동은 도전율이 낮으므로 전극팁과 시험편 사이의 발열량이 커져 너깃쪽의 열이 냉각되기 어렵고, 또한 전극소재의 도전율이 낮으므로 열전도성도 나쁘기 때문에 전극팁과 시험편 표면 사이에서 발생된 열을 전극의 뒤쪽으로 전달하여 냉각시키기 어렵기 때문에 발생하는 현상이다.

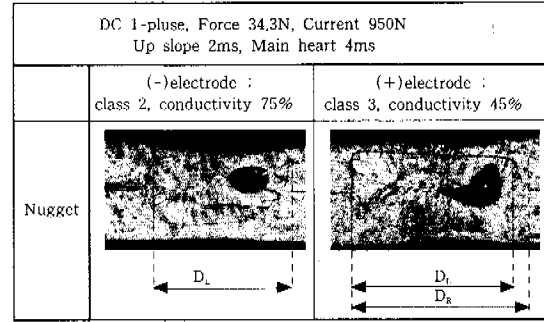


Fig. 18 Nugget's asymmetric property by conductivity of (+)electrode

따라서 좌·우 전극의 가압력을 같게 하여 DC 1펄스 통전만 하더라도 너깃 직경이 작은 (+)전극에 도전율이 낮은 소재를 사용하면 너깃 직경을 증가시킬 수 있음을 확인하였다^{1,3)}.

4. 결 론

전자부품에 다양하게 적용되는 오스테나이트계 스테인리스강 STS 304 박판을 사용하여 극성가변형 인버터 용접전원과 좌·우 가압력을 조절할 수 있는 트윈헤드에 의해 정밀저항시리즈 점용접 실험을 행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 좌·우 전극의 가압력을 같게 하여 DC 1펄스 통전에 의해 시리즈 점용접을 하면 빨띠에르 효과에 의해 (-)극의 너깃이 크게 형성되어 너깃의 비대칭성이 나타났다. 따라서 좌·우 용접점의 품질을 일정하게 유지하기가 곤란하게 되었다.
- 2) 좌·우 전극의 가압력을 같게 하여 DC 1펄스 통전할 때 너깃이 크게 형성되는 (-)극쪽의 동저항이 작게 되었다. 따라서 동저항으로 너깃의 비대칭성을 확인할 수 있었다.
- 3) 극성가변 통전에 의한 교류 1사이클로 전류를 흘려주면 거의 대칭으로 너깃이 성장한다. 따라서 직류 인버터 전원으로 좌·우 전극의 가압력을 같게하여 시리즈 점용접을 할 때는 극성을 가변시켜 교류파형을 생성하여 대칭형 너깃을 형성시킬 수 있음을 확인하였다.
- 4) DC 1펄스로 용접하더라도 (-)전극의 가압력을 (+)전극보다 크게 줄 수 있는 트윈헤드를 사용하면 (-)전극의 동저항이 감소하게 되고 (+)극과 (-)극의 너깃 직경이 동일하게 되도록 할 수 있음을 확인하였다.
- 5) 좌·우 전극의 가압력을 같게 하여 DC 1펄스 통전만 하더라도 너깃 직경이 작은 (+)전극에 도전율이 낮은 소재를 사용하면 너깃 직경을 증가시켜서 좌·우

대칭의 너깃을 얻을 수 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. 대한용접학회 : 용접·접합 편람(1998), 153, 576, 580
2. 김영식 : 최신용접공학, 형설출판사(1990), 55~57
3. 김명준 : 저항용접, 기문사(1998), 25, 11-119, 130-132, 202, 228
4. 전자공학 사전편찬 위원회 : (최신)전자공학용어 대사전, 가남사, 514
5. 溶接學會抵抗容接研究委員會編 : 抵抗溶接現象とその應用 (I), 溶接學會技術資料, No.7(1982), 150-156, 174
6. 溶接學會抵抗容接研究委員會編 : 抵抗溶接現象とその應用 (I), 溶接學會技術資料, No.8(1983), 113~116
7. RWMA : Resistance Welder Manual, 4th Edition, (1999), PA, USA, 2-3~2-4
8. 대한용접학회 : 용접·접합 용어사전, 326
9. 조상명 : 저항용접의 기초원리와 모니터링 결과의 분석, 대한용접학회지, Vol.15, No.2 (1997), 1-10
10. 김용식·임태진 : Spot 용접 전원 장치, 대한용접학회지, Vol.14, No.3 (1996), 12-19
11. 최민한·박은희, 저항용접기의 종류와 신개발 동향, 대한용접학회지, Vol.15, No.2 (1997), 13-14
12. Kinya Ichikawa : Spot Welding and Projection Welding, Journal of Japan Welding Society, Vol.64, No.2 (1995), 10-13
13. Shigeru SUZUKI·Kazuyoshi HASEGAWA : Spot Welding of various materials, JWS, Vol.67, No.3 (1998), 6-11
14. K.C.WU, Resistance Spot Welding of High Contact-Resistance Surfaces for Weldbonding, AWS, Vol.54, (1975), 436-s~443-s
15. 日本溶接學會, 溶接·接合技術, 産報出版(1993), 99-105