

特輯 : 저항용접 기술의 개발 동향

저항용접의 기초원리와 모니터링 결과의 분석

조 상 명

Principle of Resistance Welding and Analysis of Monitoring Results

S. M. Cho



조상명 / 부경대학교 생산가공공학과 / 1955년생 / 아크 및 저항용접 생산현장의 불량감소 건설팀, 펄스MAG 용접기 설계, 아크 및 저항용접 장치의 모니터링 시스템 개발에 관심이 있음.

1. 서 론

저항용접은 줄(Joule)의 법칙을 발견한 영국의 줄이 1875년에 최초로 시도한 것으로 알려지고 있으나, 당시에는 대형 전원장치가 없어서 실용화에는 실패하였다. 그 후 1886년 미국의 톰슨(E. Thomson)이 전원문제를 해결하여 업셋용접기의 특허를 취득하였다. 점용접(Spot welding) 장치의 최초 발명특허는 1900년경 미국의 해머드(Hamad)가 얻어서 실용화를 추진하였다.

오늘날 저항용접은 자동차, 가전 분야를 비롯하여 대형 강구조물에 이르기까지 폭넓은 적용범위를 가지고 있으며, 그 종류도 매우 다양하지만 용접부의 형상에 따라 대략 다음과 같이 간단하게 나눌 수 있을 것이다.

- 점용접 (Spot welding)
- 프로젝션용접 (Projection welding)
- 저항심용접 (Resistance seam welding)
- 업셋용접 또는 저항벗용접 (Upset welding or resistance butt welding)

- 플래시용접 또는 플래시벗용접 (Flash welding or flash butt welding)
- 벗심용접 (Butt seam welding)
- 고주파 저항용접 (High frequency resistance welding)

상기의 저항용접법은 모든 경우에 저항발열을 주로 이용하여 용접하는 기법이라고 할 수 있다. 그 중에서도 가장 많이 적용되는 용접법이 점용접이다.

한편 자동차용 아연도금 강판의 도금층이 두꺼워지고 용접부에 오목자국이 없는 것이 요구되며, 금형과 프레스 기술이 발달함에 따라 프로젝션용접의 적용도 점차 확대되고 있는 추세이다. 또한 자동차 차체 조립에 적용되는 테일러드 블랭킹 공법의 핵심기술중에 하나인 머시심용접 (Mash seam welding)도 관심의 대상이라고 할 수 있다.

저항용접에 적용되는 소재를 보면, 초기에는 철강재료(스테인리스강 포함) 위주였으나, 최근에는 알루미늄합금과 동합금 등에 대해서도 다양한 적용이 실현되고 있다. 다만 알루미늄합금과 같이 높은 전도성을 가진 소재를 용접하기 위해서는 별

도의 전원 장치가 개발되어야 했었다.

저항용접용 전원 장치에 있어서는 인버터의 발달로 전원의 고급화가 급속히 추진되고 있을 뿐만 아니라, 출력의 초대형화가 쉽게 될 수 있어서, 그 적용 범위가 TV전자총용 텅스텐 히터와 같이 아주 정밀한 부품에서부터 대형 강구조물의 조립에 이르기까지 넓어지고 있다. 또한 용접전류의 통전을 정밀하게 제어하여 보다 우수한 용접 품질을 얻을 수 있도록 하기 위한 용접 타임머가 다양하게 개발되어 생산성과 품질의 향상에 큰 기여를 하고 있다.

저항용접에 관련된 다양한 기술중에서 본 특집호에서는 1) 기초원리와 용접 모니터링, 2) 전원장치, 3) 알루미늄합금의 저항용접 4) 자동차분야에의 적용 등 4개분야를 선택하여 그 기술동향에 대한 해설을 게재하기로 하였다.

본보에서는 저항용접시의 발열원리와 너깃의 생성과정 등에 대하여 해설하고, 점용접의 3대 요소와 그에 대한 모니터링 결과를 분석하여 간단한 불량 대책에 관하여 기술하였다.

2. 저항용접의 발열 원리

저항용접에서는 기본적으로 압력을 가한 상태에서 금속의 고유저항열과 금속끼리의 접촉면에서 발생하는 접촉저항열에 의하여 열을 얻고, 이로 인하여 금속이 가열 또는 용융하게 되면 가해진 압력에 의하여 접합되도록 하는 과정을 거친다. 따라서 이 저항발열의 원리는 모든 저항용접의 가장 기본이 되는 이론으로서 공정개발이나 현장에서의 전극관리 또는 품질관리를 위해서는 반드시 필요한 개념이라고 할 수 있다.

저항을 가진 금속에 전류가 흐를 때 발생하는 열량 즉 저항열(또는 줄열)Q는 다음과 같다.

$$Q = I^2Rt \quad (J)$$

$$= 0.24I^2Rt \quad (cal)$$

단, I : 전류 (A)

R : 저항 (Ω)

t : 통전시간 (second)

$$1 \text{ cal} = 4.2 \text{ J}, \quad 1 \text{ J} = 0.24 \text{ cal}$$

또한 저항발열량Q는 다음과 같이 전류밀도의 항

으로 표현할 수도 있다.

$$Q = I^2Rt = I^2 \rho \frac{L}{A_s} t \quad (J)$$

$$= \rho \delta^2 LA_s t \quad (J)$$

$$= \rho \delta^2 Vt \quad (J)$$

단, ρ : 고유저항 (Ω-cm)

L : 도체의 길이 (cm)

A_s : 도체의 단면적 (cm²)

V : 도체의 체적, V=L A_s (cm³)


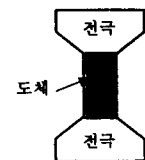
δ : 전류밀도, δ=I/ A_s (A/cm²)

따라서 고유저항ρ인 도체 1cm³당 매초 ρδ² (J) 또는 0.24ρδ² (cal)의 열이 발생한다. 즉 용접을 위하여 기여하는 저항발열은 다음과 같을 때 증가함의 의미한다.

- 고유저항이 클수록
- 전류밀도가 높을수록

특히 두 번째의 전류밀도에 대해서는 점용접과 프로젝션용접시의 여러현상과 깊은 관계가 있으므로 좀더 상세히 검토하기로 한다. 즉, 도체의 길이가 일정할 때 같은 크기의 전류가 흐르는 경우라도 그 통전면적을 작게하면 전류밀도가 증가하여 표 1과 같이 발열량이 증가하게 된다.

표 1 도체(피용접재) 통전면적의 감소가 발열량에 미치는 영향

도체(피용접재) 조건 - 같은 전류 I통전 - 같은 고유저항 ρ - 같은 길이 L cm - 다른 통전면적		
도체 통전면적	A _s cm ²	A _s /k cm ² : 1/k배 작은 단면적
도체 체적	A _s L cm ³	A _s L/k cm ³ : 1/k배 감소
도체의 전류밀도δ	δ=I/A _s	kI/A _s : k배 증가
단위체적당의 발열량	ρδ ²	k ² ρδ ² : k ² 배 증가
전체 도체의 발열량	A _s Lρδ ²	kA _s Lρδ ² : k배 증가

즉 같은 전류가 흐를 때라도 점용접이나 프로젝션용접에서와 같이 전류의 통전면적이 작아지도록 전극을 뾰족하게 하거나 피용접재에 돌기(Projection)를 만들어주면 그 부분에서는 큰 저항열이 발생하여 용접이 쉬워짐을 알 수 있다. 이 관계가 저항용접에서 가장 중요한 기초 원리를 나타내는 것이다.

그림 1은 점용접부에 10,000A를 흘렸을 때, 각 부분의 단위체적당 발열량을 개략적으로 예시한 것이다. 단 $1\text{ W} = 1\text{ J/sec}$ 이다.

- 전극홀더 : 4.5 W/cm^3 발열
- 전 극 : 102 W/cm^3 발열
- 전 극 팁 : 5 KW/cm^3 발열
- 피용접재 : 30 KW/cm^3 발열(접촉면의 통전 면적은 더욱 작아지므로 큰 $\rho \delta^2$ 값이 되어 발열)

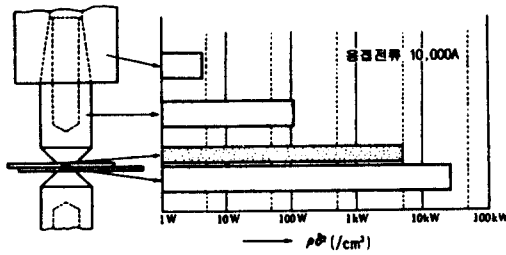


그림 1 점용접부 근방의 발열 상태 (용접전류 10,000A)

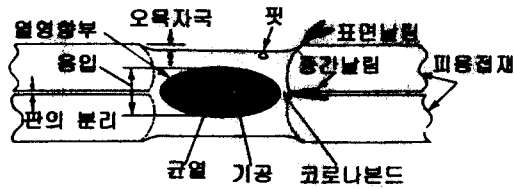


그림 2 점용접부 단면을 통하여 본 각부의 명칭

3. 저항용접부의 각부 명칭

저항용접에 관한 구체적이고 기술적인 내용을 설명하기 전에 저항용접부 각부의 명칭에 관하여 미리 기술하기로 한다.

그림 2는 저항용접부의 대표적인 형상으로서 점용접부 단면의 각부 명칭을 나타낸 것이다.

1) 너깃(Nugget) : 용접결과로 접합부에 생기는 용융 응고한 부분으로서 일반적으로 접합면을 중심으로 바둑돌 모양으로 형성되어 있다.

2) 코로나 본드(Corona bond) : 너깃 주위에 존재하는 링형상의 부분으로서 실제 용융하지는 않고 열을 받은 상태에서 압력을 받아서 고상으로 압접된 부분을 말한다. 이 부분은 접합부의 강도에는 기여하지 않고 비파괴 검사시에 너깃치수를 크게 평가하기 쉽게 하는 부분이다.

3) 오목자국(Indentation) : 전극팁이 가압력으로 모재에 파고 들어가서 오목하게 된 부분을 말한다. 이와 같은 깊이를 오목깊이라고 한다.

4) 용입(Penetration) : 피용접재가 녹아들어난 깊이로서 너깃의 한쪽 두께와 같다고 할 수 있다.

5) 기공(Blow hole) : 너깃 내부에서 용융중에 발생한 기포가 응고시에 이탈하지 못하고 남아있는 공동을 말한다. 일반적으로 너깃의 중앙부에 발생하며 과도한 전류나 부족한 가압력으로 인하여 용융금속이 날아나간 자리에 형성된다.

6) 중간날림

용융금속이 코로나 본드를 파괴하고 외부로 튀어나가면서 날리는 것을 말한다. 흔히 Expulsion이라고 하는 것은 이 중간날림을 의미하며, 일본에서는 中散り(なかり, nakatiri)라고 한다. 점용접이나 프로젝션용접에서 가장 해결하기 어려운 문제 중 하나라고 할 수 있다.

7) 표면날림

전극과 피용접재의 접촉표면에서 피용접재나 전극이 용융해서 튀어나가는 것을 말한다. 흔히 Surface Flash라고 하며, 일본에서는 表散り(おもてちり, omotetiri)라고 한다. 중간날림보다는 자주 생기지 않지만 주로 점용접에서 도전율이 나쁜 전극소재를 사용하거나 냉각부족 또는 전극팁 직경이 과소한 경우에 자주 생기고 전극팁의 손상에 가장 큰 영향을 미친다. 한편 "Splash"는 중간날림과 표면날림을 포괄하는 일반적인 용어로 사용되고 있다.

8) 오염(Pick up)

전극과 모재의 접촉부가 과열되어 전극의 일부분이 모재에 부착하거나 전극과 모재 부분이 오염되는 현상을 말한다. 도금강판을 용접할 경우 도금층이 전극에 부착되어 이러한 현상이 자주 일어나므로 별도의 주의를 요한다.

4. 저항용접의 진행 과정

4.1 용접부 고유저항의 변화

연강이나 스테인리스강은 온도가 상승하면 그림 3과 같이 저항이 현저하게 증가하기 때문에 피용접재의 접촉면에서 큰 접촉저항으로 인하여 온도가 먼저 상승하면 접촉저항은 소멸하지만 온도상승에

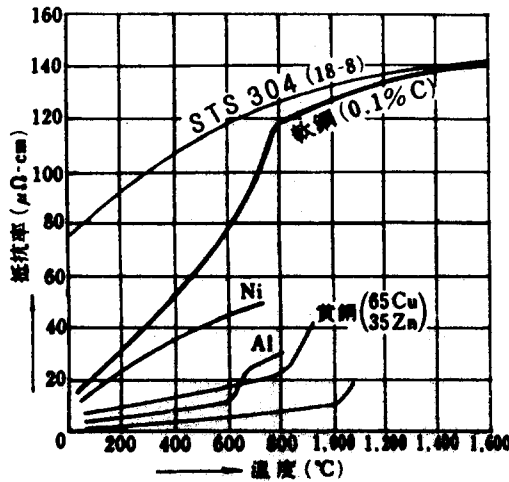


그림 3 각종금속의 온도에 대한 저항의 변화

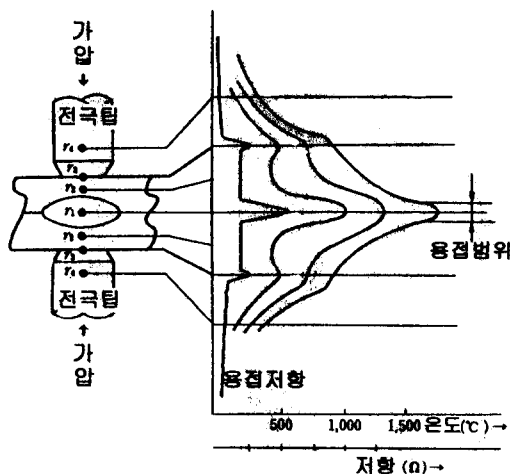


그림 4 점용접부의 저항값과 용접시의 온도분포

따라 고유저항도 함께 증가하므로 온도는 더욱 급상승하게 된다.

그림 3에서 보면 연강은 상온에 비하여 고온에서 약7배나 저항이 증가하고, 오오스테나이트계 스테인리스강은 상온에서 이미 저항이 크기 때문에 저항의 증가는 그다지 심하지 않지만 고온에서 2배정도로 저항이 증가함을 알 수 있다.

그림 4는 점용접시 각부위의 저항과 용접시의 온도변화를 모식적으로 나타낸 것이다. 금속의 용융점이상으로 온도가 상승한 접촉부 일부에만 용접이 된다.

4.2 가압력과 접촉저항의 관계

접촉저항은 두 피용접재사이에 존재하는 접촉면에 존재하는 전기저항으로서 용접이 되면 소멸한다. 접촉저항은 전저항발열에 비하면 그다지 크다고는 할 수 없지만, 용접과정에 미치는 영향은 매우 복잡하다.

접촉저항은 접촉면의 미소한 요철과 산화물 등으로 인하여 전류통로가 제한되기 때문에 생기는 집중저항이다. 따라서 가압력이 크게 되면 접촉면적이 증가하여 접촉저항은 작게 된다.

그림 5는 동전극 선단에서 작용하는 가압력과

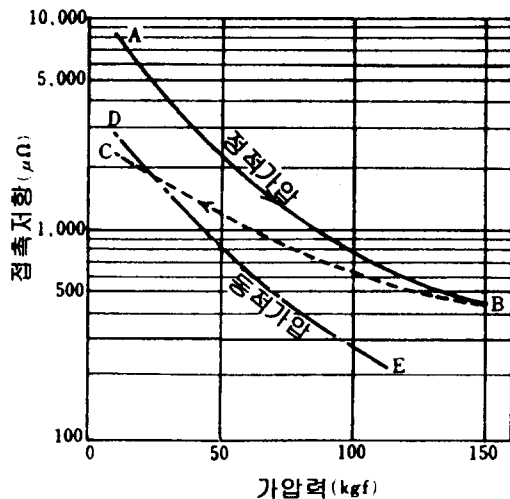


그림 5 가압력에 따른 접촉저항의 변화 (아연도금 강판)

접촉저항사이의 관계를 나타낸 것으로, 일반적으로 접촉저항 R_c 는 다음과 같이 지수법칙으로 표현된다.

$$R_c = KF^n$$

여기서, K, n : 재료와 표면상태에 의해 결정되는 상수
 F : 가압력

접촉저항의 크기는 가압력의 증가에 따라서 감소하지만 실제 접촉면에는 산화피막등이 개재하여 있고, 접촉면적 자체도 더 이상 증가하지 않으므로 포화하는 경향을 보인다. 또한 실제 접촉면적의 증대는 대부분 표면의 미소요철이 소성변형하여 일어난 것으로서 그대로 가압력을 감소시켜도 그림 5의 파선BC에서 볼 수 있듯이 접촉저항은 완전히 회복하지 않는다.

접촉저항이 크다고 하는 것은 전류통로 면적이 작다고 하는 것으로서 전류밀도가 증가하여 그만큼 발열량이 커짐을 의미한다.

4.3 너깃 생성과정

그림 6은 점용접에서 통전의 초기부터 너깃이 생길 때까지의 과정을 모식적으로 나타낸 것이다.

(a) 전극팁 주변에 전류밀도가 높은 부분이 생겨서 그 부분에서부터 온도가 상승하기 시작한다.

(b) 먼저 온도가 상승한 부분은 저항이 높게 되므로 그 부분에서 한층 온도가 높게 된다. 그러나 전극과 접촉한 피용접재의 표면은 전극에 의해 냉

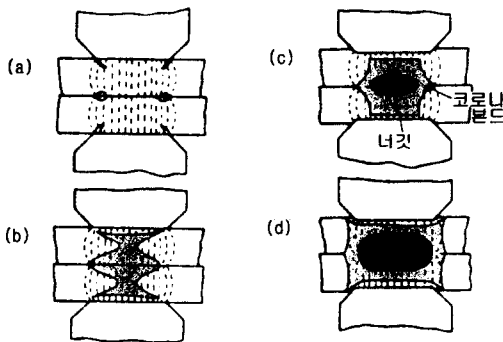


그림 6 점용접시의 너깃 생성과정

각이 되기 때문에 온도상승이 크지 않다.

(c) 중심부는 마침내 용융하여 너깃이 생성된다. 너깃주위에는 코로나 본드라고 하는 압접부가 생성된다.

(d) 용융부의 저항률은 약2.5배로 급등하므로 전류는 주변부로 퍼져서 너깃이 성장하지만, 마침내 평형상태에 달하여 너깃은 전극 방향으로의 열전도와 판폭 방향으로의 열전도의 영향을 받아서 바둑돌 모양을 띄게 된다.

4.4 용접부의 저항변화

일반 냉간 압연강판에 대한 점용접부의 저항변화를 전극팁간 전압의 변화로부터 관찰하여 보면, 그림 7과 같다. 여기서 용접중에 전류의 변화가 거의 없도록 하면 팁간전압의 변화는 바로 용접부 저항의 변화로 볼 수 있다. 그림 7에서 초기의 점선 부분은 통전에 따라 바로 접촉면의 미소요철이 연화, 소실하여 접촉저항이 소멸하는 기간으로서 불안정한 현상이다. 이어서 AB기간에는 통전로의 온도상승과 함께 저항이 증대해 가는 것을 나타낸다. B점에 이르면 처음으로 접촉면 일부가 용융하여 너깃을 생성하여 통전로의 면적이 커지기 시작하여 온도증가로 인한 저항증가와 서로 상쇄되어 전압은 정점을 나타낸다. 그 후 BC에서는 너깃이 급속하게 증대하여 온도는 더 이상 상승하지 않기 때문에 저항은 하강한다. CD기간에는 너깃성장이 둔하게 되고, DE에서는 너깃은 성장하지 않고 평형상태에 이르며, 다소의 코로나 본드가 성장하므로 저항은 더욱 감소한다. 이렇게 하여 전류통로

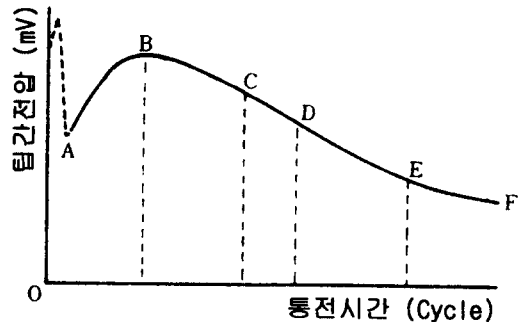


그림 7 전극팁간 전압변화에 의한 점용접부 저항변화의 고찰

가 지나치게 퍼져서 전류밀도가 낮아지게 되면, 통전중에도 주위로부터 냉각되어 응고를 시작하는 수가 있다. 이러한 경우는 용접부 단면에 링모양이 생기게 되어 용접부의 인장강도가 현저하게 감소하게 된다. 실제로 용접은 C점 또는 D점근방에서 통전을 마쳐야 하며, E, F점까지 장시간 전류를 흘리는 경우는 없다.

5. 저항용접의 3대요소와 그 모니터링

저항용접의 3대요소는 용접전류, 통전시간, 전극가압력이라고 할 수 있다. 점용접에서는 전극의 소재와 형상도 매우 중요하지만 3대요소에는 포함시키지 않는다. 여기서 용접시에 필요한 열량은 전류의 제곱에 비례하고, 통전시간에 비례하며, 전극의 가압력에 대략 반비례하는 관계를 가진다. 따라서 가장 민감하고 중요한 변수는 역시 용접전류라고 할 수 있다. 이하에서는 저항용접 3대요소에 대하여 각각 설명하고 실제용접시 각각의 변화 특성에 대하여 모니터링하여 그 파형에 대하여 기술하기로 한다.

5.1 용접전류

전류가 저항용접 조건중에서 가장 중요한 것은 발열량이 전류의 제곱(I^2) 또는 전류밀도의 제곱(δ^2)에 비례하여 커지기 때문이다.

용접시의 전류가 부족하면 너깃의 충분한 형성이 곤란해져서 용접부에 대한 인장전단시험을 실시하면 전단파단(Shear fracture)이 생기면서 강도가 떨어진다.

전류가 과대해지면 판표면에 오목자국이 크게 형성되거나 끝타가 남고 전극팁 표면의 오염도 현저하게 된다. 또한 중간날림(Expulsion)이 생겨서 너깃에 기공이 남기도 한다. 더욱 과대한 전류가 흐르거나 전극과 피용접재 표면에서 과대한 발열이 되면 표면날림(Surface Flash)까지 생기고 끝타가 심하게 된다.

한편, 피용접재의 접촉면이 평탄하지 않거나 접촉상태가 불안정하면 초기에 날림이 심해져서 강도가 불안정해지는 수가 있는데, 이러한 경우에는 전류를 서서히 증가시키는 통전 파형 즉 업슬롭

(Up slope) 파형을 선택하면 좋다.

저항용접시에 적용되는 전류는 주로 단상교류이지만, 최근에는 인버터의 적용으로 직류용접을 하는 경우도 많아지고 있다.

그림 8은 단상교류 전원을 적용하여 점용접을 실시할 때 전류와 전압(전극팁 양단)의 변화 파형을 보이고 있다. 전류는 통전 개시에서부터 서서히 증가하도록 하는 업슬로프(Up-slope) 기능을 가지게 하여 작업시에 초기날림을 방지할 수 있도록 한 것이다. 이 교류의 주파수는 상용주파수인 60Hz인 것을 가로축의 시간과 비교하여 보면 알 수 있을 것이다. 위상각 제어에 의하여 전류 파형을 제어하며, 통전 초기에는 상당히 작은 통전각이 되도록 하다가 후기에는 통전각이 150° 전후로 크게 되도록 제어하고 있다. 한편 전류가 최대되어 일정하게 흐르는 후반 구간에서 전압이 오히려 감소하고 있는 것은 용접부에서의 너깃 성장으로 인하여 동저항이 감소하기 때문이라고 할 수 있고, 이 동저항의 변화 경향을 정량화 시켜서 용접부의 품질(너깃 치수)을 모니터링하는 것이 최근의 큰 관심사라고 할 수 있다.

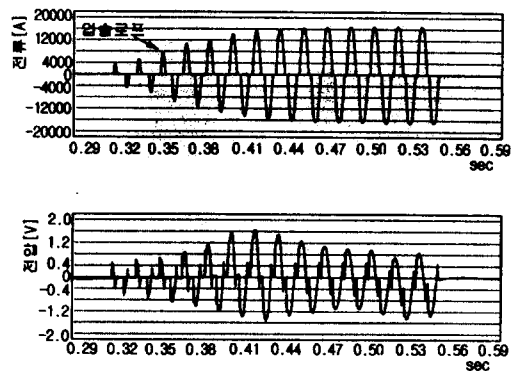


그림 8 단상 교류 전원에 의한 점용접시의 전류와 전압의 변화

그림 9는 대전류용 인버터 저항용접 전원에 대하여 전류와 전압을 모니터링하여 나타낸 파형으로서 2단 통전으로 용접하였으며, 약간의 업슬로프 기능을 쓰고 있다. 1단에서는 2단보다 다소 낮은 전류로 통전하고, 2단에서는 큰 전류로 장시간 통전하도록 하여 매우 확실한 너깃 형성 및 성장을 도모하여 용접부의 품질을 거의 완벽하게 얻을 수

있도록 시도한 파형설계이다. 그런데 전압파형의 화살표에서 볼 수 있듯이 2단 통전 중간에서 중간 날림이 다소 생겼다. 즉 이 모니터링 결과로 보아 2단 통전시간이 지나치게 길게 설정된 것으로 판단할 수 있으나 용접부의 강도에 대한 산포는 그다지 심하게 되지 않았다.

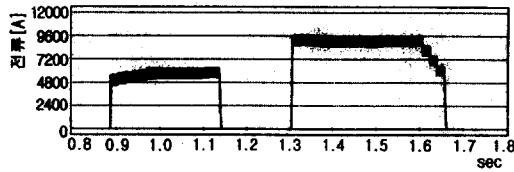


그림 9 대용량 인버터 전원에 의한 점용접시의 전류와 전압 변화

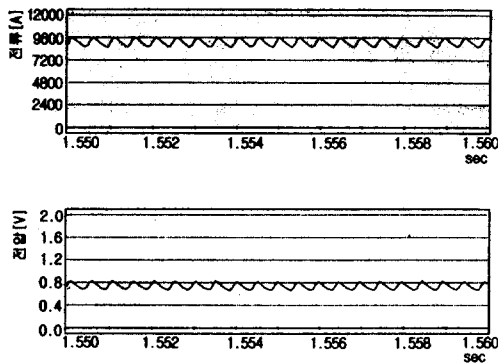


그림 10 시간축을 확대하여 나타낸 대용량 인버터 전원의 전류와 전압 파형

그림 10은 그림 9의 인버터 전원 파형에서는 높은 주파수 때문에 파형을 관찰할 수 없으므로 시간축을 확대하여 나타낸 것이다. 즉 출력전류는 기본적으로는 직류이지만 상당한 맥동파가 남아있으나 교류에 비하면 현저하게 그 변동이 적다. 전류의 주파수는 2,000Hz이다. 이것은 변압기 1차측의 인버터 출력주파수가 1,000Hz인 것을 2차측의 정

류기로 정류하여 얻은 파형이기 때문에 얻어진 결과이다. 이와 같은 대출력 인버터 저항용접기를 개발하기 위해서는 대용량 IGBT(97년 3월: 국내의 S전자가 개발한 것으로 보도됨)를 포함한 인버터, 고주파 전원용 변압기, 대용량 정류기(97년 3월: 국내의 H전자가 개발한 것으로 보도됨) 등의 기술이 충분히 확보되어야 하며, 이들의 제어를 위한 제어기와 그 제어 알고리즘 등이 용접 현상에 근거하여 개발되어야 할 것으로 판단된다.

5.2 통전시간

저항용접에 필요한 저항 발열은 I^2Rt (t : second)에 비례하기 때문에 대전류 단시간에서도, 소전류 장시간에서도 비슷한 열량은 얻어진다. 그러나 열전도에 의하여 잃는 열량도 시간에 따라 증가하기 때문에 전류를 작게 하고 시간만 증가한다고 용접이 되는 것은 아니고, 적당한 전류와 통전시간을 선택하여야 한다.

전류를 높여서 통전시간을 지나치게 짧게 하면 열전도의 여유가 없기 때문에 용접부는 그림 6의 (d)와 같이 원통형의 너깃으로 되어 용융금속의 날림과 기포등이 생기기 쉬우며, 건전한 용접부가 얻어지기 곤란한 경우가 있다.

일반적으로 판두께가 얇을수록 통전시간의 증가에 따라 너깃 직경의 증가가 빨리 포화한다. 그러나 판두께가 커지면 상당히 긴 통전시간 동안에도 너깃 직경이 증가하는 경향을 보인후 포화하게 된다. 즉 같은 전류를 흘리면서 통전시간만 증가시킬 때는 너깃직경의 성장 한계치가 거의 판두께에 비례하여 증가함을 의미한다.

판표면에 생기는 오목자국은 용접전류에도 크게 의존하지만 통전시간이 커지면 거의 비례하여 증가하므로 오목자국을 작게 하기 위해서는 대전류 단시간 통전의 원리를 적용하는 것이 기본적으로 유리하다. 그러나 이러한 경우에는 다음 절에서 기술하는 가압시스템의 추종성에 대한 요구가 까다로워진다.

또한 통전시간이 지나치게 커지게 되면 통전중에도 불구하고 냉각, 응고를 개시하여 너깃 주변부에는 링모양이 생기며, 이 때는 오히려 인장전단강도가 저하하게 된다.

통전시간과 전류의 크기를 엄격하게 제어하기

위하여 다양한 타이머가 개발되어 시판되고 있다. 전류의 통전 프로그램이 여러 개가 저장되어 용접 상황에 따라 적절한 프로그램을 선택하여 사용하는 경우와 저장된 프로그램을 차례로 적용하면서 용접하는 경우, 전극팁의 마모에 따른 직경 증가를 고려하여 전류 크기를 일정한 타점수마다 증가시키는 모델 등 여러 가지의 타이머가 사용되고 있다. 한편 최근에는 전극팁의 상황을 스스로 모니터링하여 일정한 너깃 직경이 얻어지도록 전류와 통전시간을 제어하는 지능형 타이머들도 속속 개발되고 있어서 이 분야의 국내외의 기술 동향에 관심이 집중되고 있다.

5.3 전극가압력

저항용접에서는 전술한 바와 같이 강력한 가압력을 가하여 전류의 통전면적을 작게하여 전류밀도를 크게함으로써 저항발열을 집중시켜서 너깃을 얻는다. 따라서 저항용접에 있어서 전극가압력은 전류밀도를 결정하는 매우 중요한 인자임에도 불구하고 종래에는 용접현상 연구에서 무시되기 쉬운 인자이었다. 그러나 오늘날과 같이 품질을 100ppm수준으로 관리하기 위해서는 가압력의 안정적인 작용을 모니터링하는 것은 매우 중요한 관리대상의 하나라고 할 수 있다.

전극 가압력은 저항용접에 있어서 자율작용의 가장 큰 지배인자로서, 용접전류를 크게 하면 그에 따라 가압력도 크게 하여야 한다. 그런데 초기부터 낮은 가압력을 가하거나 통전도중에 가압력이 낮아지는 경우는 가열되어 팽창하는 용융금속이 외부로 튀어나가는 것을 억제하면서 너깃의 성장을 촉진하는 작용을 하지못한다. 이와 같이 가압력이 낮거나 통전중에 갑자기 가압력이 낮아지는 때에는 용융금속의 날림이 생기기 쉽게 되고 이로 인하여 과대한 오목자국 및 기공과 같은 결함이 생긴다.

그림 11은 공기 실린더로 가압하는 소형 인버터 용접기에 있어서 가압력의 파형을 보인 것으로서 가압 초기의 가압특성이 불안정함을 볼 수 있다. 전류는 가압력이 상승한 직후에 통전되기 시작하여 가압력이 낮아진후에까지 흐른 후 종료되기 때문에 가압력이 낮아지는 후반부에서 날림이 자주 생기게 되었다.

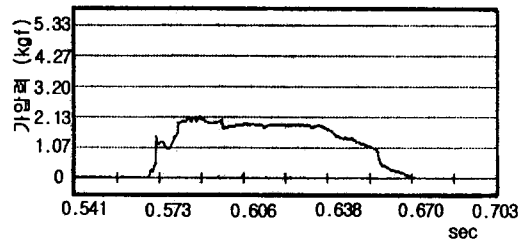


그림 11 소형 인버터 용접용 가압헤드의 가압력 특성곡선

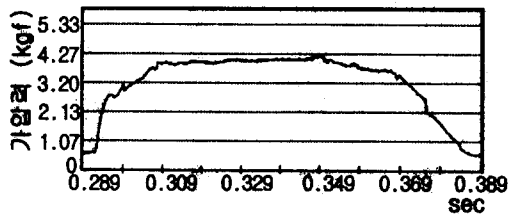
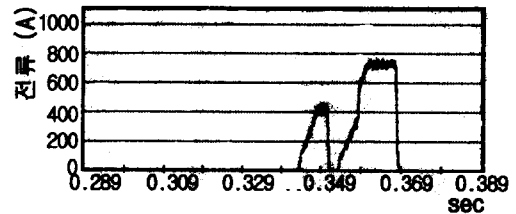


그림 12 소형 인버터 용접시의 전류와 가압력의 동시 모니터링 결과

그림 12는 소형 인버터 점용접 전원과 공기 실린더 가압 시스템을 조합하여 용접할 때에 모니터링한 전류와 가압력의 파형을 보인다. 초기 가압시간(Squeeze time)을 지나치게 길게 설정한 것 때문에 통전개시가 상당히 늦어졌으며, 가압력이 떨어지는 도중까지 통전이 되어서 심한 후기날림이 생기므로 용접부의 품질이 불안정하게 된 예를 보인다.

그림 13은 2회 연속 점용접을 자동으로 실시하는 공정의 가압력 파형을 모니터링하여 표시한 것이다. 여기서 두 번째 가압력 파형은 가압 유지 시간이 앞의 가압력 파형에 비해 짧게 되어 있으나, 전류의 통전은 앞의 파형을 기준으로 하여 같은 통전시간을 설정하여 두었기 때문에 두 번째 통전 후반부에서 전류가 흐르고 있음에도 불구하고 가압력이 낮아져서 심한 날림이 항상 두 번째 용접점에

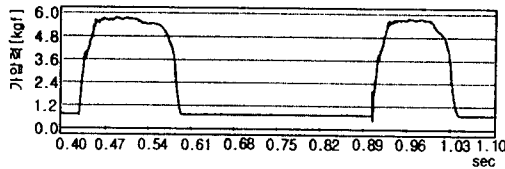


그림 13 자동 2회 연속 점용접시의 가압력 파형 모니터링 결과

서 발생하고 있었던 것을 개선한 예이다.

반면에 전류를 일정하게 통전하면서 가압력만 지나치게 크게 하면 통전면적의 증가로 전류밀도가 낮아져서 발열량은 감소하지만 냉각효과는 증가하여 너깃형성이 불가능하거나 전단파단하여 강도가 부족한 예가 가끔 발생한다.

저항용접에 있어서 용접전류(I)와 전극가압력(F(kgf))와의 사이에는 일반적으로 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$F = kI^n \quad n : 상수$$

그림 14는 각종 저항용접에 있어서 용접전류와 전극가압력의 관계를 나타내는 것이다. 적정 용접 조건은 이들 곡선상에 놓이게 된다. 저항용접에서는 이들 곡선을 날림한계곡선이라고 부른다. 이들 곡선보다 위쪽에 있으면 전류 과소의 조건으로 되어 충분한 강도를 얻기 어렵고, 곡선의 하부에 오면 전류 과대의 조건이 되어 날림과 기공 그리고

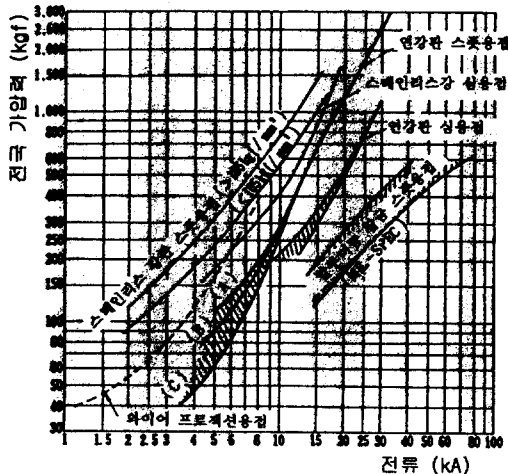


그림 14 다양한 금속재료에 대한 적당한 용접전류와 전극가압력의 관계

오목자국이 심해지게 된다.

연강의 저항용접에서는 다음식과 같은 관계가 성립하는 것으로 알려지고 있다.

$$F = 2.75 \times I^2 \times 10^{-6} \text{ (kgf)}$$

한편, 전극에 가압력을 부여하기 위해서는 수압, 족압, 공기압, 유압, 전동가압, 전자가압등이 있지만, 여기서는 가장 많이 쓰이는 공기 실린더에 의한 가압에 관하여 검토한다. 가압 실린더의 패킹(Packing)과 이동가이드부의 습동저항등에 의하여 가압력 F_a 는 다음식과 같이 계산치보다 감소된다.

$$F_a = (p \cdot A + W) - \mu a p$$

단, p : 공기압,

A : 피스톤 면적,

W : 가동부 중량,

μ : 마찰계수,

a : 상수

즉 전극가압력은 계의 마찰계수가 크면, 원래의 계획 가압력보다 작게 될 뿐만 아니라 전극 가압력의 상승에 시간이 걸리게 된다.

일반적인 점용접에 있어서 마찰계수가 큰 시스템을 적용하면 용접중 용접부 팽창에 즉응하여 자연스럽게 밀려나기 어렵기 때문에 용접중 전극가압력이 비정상적으로 증대하여 전류밀도가 감소한다. 따라서 심한 경우에는 발열량의 감소로 용접부의 강도가 현저하게 떨어지는 수가 있다.

반면에 프로젝션용접에서는 적응성 즉 추종성이 나쁜 가압 시스템을 적용하면 돌기(Projection)가 가열되어 찌그리드는 순간에 가압헤드가 즉응하여 자연스럽게 밀어주지 못하므로 가압력이 심하게 낮아지는 경우가 생겨서 돌기의 끝부분이 모두 날려가버리게 된다. 이러한 경우에는 초기날림이 자주 생기고 심하면 용접강도가 거의 얻어지지 않는 경우가 생긴다.

동적현상을 고려하면, 용접부의 가열과 연화에 따라서 용접부는 다소 오목해지려고 한다. 이러한 현상에 수반하여 항상 전극가압력을 즉응(即應)시켜서 가열, 용접부를 누르고 있어야 한다. 이 때 만약 전극의 즉응성(即應性)이 나쁘면 날림, 기공 등의 결함이 생기기 쉽다. 여기서 가압 실린더가 수직으로 고정되어 있어서 하부로 가압을 하는 경우, 즉응성은 다음식과 같이 표시되는 전극의 가속도 a에 의하여 나타낼 수 있다.

$$a = (F/W)g + g$$

단, F : 전극가압력

W : 가동부의 중량

g : 중력가속도

상기 식에서 우변의 중력가속도g는 피스톤이 하부로 작동하기 때문에 고려하는 것으로서 수평방향으로 가압하면 0으로 된다.

일반적인 가압 헤드의 가속도a는 15~40g정도의 큰 값을 가지므로 연강의 점용접과 같이 비교적 낮은 현상의 용접에서는 그다지 문제가 없다. 그러나 프로세스용접중에는 가압과 가열에 의하여 돌기가 찌그러지면 전극의 이동이 심하게 되므로 높은 가속도 특성이 요구된다. 또한 알루미늄합금의 저항용접에서는 통전시간이 짧고 가압 헤드의 추종성이 우수해야 하지만, 가압력F는 작기 때문에 그 가속도는 심각한 고려의 대상이 된다.

6. 결 론

높은 생산성과 우수한 품질 확보가 가능한 저항용접은 깨끗한 환경에서 작업할 수 있다는 장점까지 더해져서 최근에는 새로운 자리매김이 이루어지고 있다. 특히 전력전자공학의 발전과 마이크로 프로세서의 다양한 적용에 힘입어서 용접장치의 대용량화와 고속제어화가 가능해졌고, 이로 인하여 저항용접 장치 분야에서는 커다란 발전의 계기가 구축되고 있다.

한편 저항용접 분야에 있어서도 100ppm 수준의 품질을 유지하기 위해서는 종래의 전원장치 제어 즉 전류파형과 통전시간을 제어하는 타이머만에 의해서는 품질수준의 한계가 보이고 있다. 따라서 가압 시스템의 엄격한 적용과 제어 및 모니터링에 대한 필요성이 대두되고 있으며, 이에 대한 필요성은 프로세스용접이나 알루미늄합금의 저항용접시에 더욱 크게 부각된다고 할 수 있다.

국내의 용접장치 산업 시장 규모는 조선, 자동차, 가전 및 건설 시장 규모를 고려할 때 세계5위 이내의 수준을 유지하고 있지만, 국내 용접장치

제조기업의 생산 규모는 저조한 형편이다. 특히 고부가가치의 용접장치 분야에서는 더욱 기술 수준의 낙후성을 엿볼 수 있어서 용접장치 분야의 공동대처에 대한 필요성이 절실한 실정이다.

이를 위해서는 다음과 같은 국가적 대책과 학계 및 산업계의 공동 대책이 요구된다고 할 수 있을 것이다.

1) 용접관련 분야간 협동 연구의 적극적인 추진 : 용접분야를 중심으로 하여 조선분야, 기계분야, 전기, 전자분야, 소재분야, 건설분야, 플랜트분야, 컴퓨터분야, 계측분야, 정보분야 등과 다양하고 조화로운 협동 연구 추진.

2) 젊고 유능한 신규 기술 인력의 적극적인 유치 : 다양한 전공을 가진 신규 기술 인력을 용접 장치 산업에 유치하기 위한 대책 마련. 예를 들면 작업환경의 개선, 기술적 비전의 창조와 제시, 부드러운 기술 문화의 형성, 전문성을 가진 여성 인력의 적극적인 유치 등.

3) 용접 현상과 장치에 관련된 기초 기술의 공동 향상 : 용접학계와 산업계가 협동하여 기술 인력의 기초 이론과 원리 이해를 위한 세미나, 기술 교류회, 기술 위원회 등의 적극적인 개최.

4) 값싼 장치 분야에서 제살 깎기식의 경쟁 지양 : 저가 장치 분야에서 지나친 가격 경쟁을 회피하여 기술 수준 향상과 장치 사용 환경에서의 품질과 생산성 향상을 도모할 수 있는 환경조성.

5) 용접 장치 산업계에서의 공동 기술 개발 : 업계에서 공동으로 애로를 겪는 인버터용 대출력 변압기 개발, 대출력 인버터 부품의 개발, 대용량 정류기의 개발, 용접 제어용 알고리즘 개발 등 공동 애로 기술의 도출과 개발 방안 모색

6) 용접 부품 산업의 전문화와 표준화 추진 : 용접 장치에 공동으로 쓸 수 있는 부품수를 증가시키고, 이의 개발과 생산을 전문화 하여 세계적 수준의 부품 제조업체가 많아지도록 추진.

7) 용접 장치 산업에 관련된 통계 자료의 확보 : 통계청, 통산산업부, 협동조합 및 각 업계 등과 협조하여 수출입량 및 국내 판매량 등 정확한 통계자료의 확보와 그 정보의 제공.