

특 집 : AI 합금의 용접기술

알루미늄합금의 저항용접과 철계재료와의 저항접합 기술

조상명

Resistance Welding and Resistance Joining Technology to Fe-base Material of Al-alloy

Sang-Myung Cho

1. 서 언

저항용접은 생산비용이 저렴하고, 고품질을 안정적으로 확보하기가 쉽다는 장점이 있어서 대량 생산 라인에서 부품의 조립을 위한 공정으로 많이 적용되고 있다^{1,2)}.

알루미늄합금의 저항용접은 가압을 한 후, 전극팁에서 통전을 하여 두 피용접재 사이의 접촉저항과 알루미늄자신의 고유저항에 의한 저항발열을 이용해서 가열함으로써 접합을 하게 되는 것은 일반적인 철강에서의 과정과 거의 유사하다.

그러나, 알루미늄합금은 그 표면에 치밀한 산화피막이 형성되어 있는 것과 고유저항이 작은 것, 그리고 열팽창 계수가 큰 것 등으로 인해 철강에 비하여 저항용접이 어렵고, 용접점 한 점당 생산비용이 비싸다고 하는 것은 사실이다. 그럼에도 불구하고 사회 전반적으로 알루미늄합금의 수요는 선진국일수록 많아지고 있으며, 시간이 지날수록 증가하고 있는 추세에 있어서, 그 저항용접에 대한 수요도 따라서 증가하고 있는 것이다³⁾.

여기서는 알루미늄합금의 저항용접과 관련한 각종 특성에 대하여 언급하고, 그 저항용접시의 각종 전원을 비롯한 표면처리 등에 대하여 기술적으로 언급하였

다. 또한 자동차의 경량화 추세에 발맞추어 관심의 대상으로 되고 있는 철계재료와의 접합 기술중 저항접합에 대한 새로운 개발 동향을 검토해 보았다.

2. 저항용접과 관련된 알루미늄합금의 각종 성질

Table 1은 일반 금속재료와 알루미늄합금의 각종 물리적 성질을 비교한 것이다. 아크용접이나 레이저용접의 관점에서 보아도 알루미늄합금은 용접성이 나쁜 것이 사실이지만, 저항용접의 입장에서도 Table 1에 나타낸 각종 물리적 성질은 그 용접성이 나쁘게 되는 근본적인 이유로 되는 것이다³⁾.

- (1) 작은 고유 저항
저항용접에서는 발열량 Q는

$$Q = I^2Rt = \rho \delta^2Vt, \text{ Joule}$$

여기서, I : 전류, R :저항, ρ : 고유저항

δ : 전류밀도(=전류/통전면적)

V : 통전체적,

t : 통전시간(sec.)

Table 1 알루미늄합금과 다른 금속의 물리적 성질의 비교

금속종류	밀도	용융온도 (°C)	고유저항 (Ω /mm ² /m)	도전율 (%)	평균비열 (cal/g/°C)	선팽창 계수(X10 ⁻⁶ /°C)	열전도도 (cal/cm/s/°C)	탄성계수 (kgf/mm ²)	
알루 미늄 합금	A5052	2.68	595-650	0.05	35	0.23	23	0.33	7000
	A6061	2.71	580-650	0.038	47	0.22	24	0.37	7000
	A7075	2.80	640	0.054	33	0.23	24	0.29	7200
SS400	7.86	1500	0.120	16	0.11	12	0.12	21000	
STS304	7.90	1420	0.600	2	0.14	17	0.04	20300	
황동(BsP1)	8.33	885	0.060	23	0.09	19	0.26-0.30	12300	
동(CuPE)	8.92	1083	0.018	98-100	0.092	16.5	0.94	10000	

로 표현할 수 있고, 이것은 바로 작은 고유저항을 가진 금속일수록 발열량이 작아짐을 의미한다.

알루미늄합금의 고유저항은 연강의 40%정도이다. 거의 같은 의미로서 도전율을 사용하기도 하는데, 이 도전율은 순동의 도전율을 100%로 했을 때 그와 상대적으로 비교한 값을 나타낸 것으로서 알루미늄합금은 연강의 2배 정도의 도전율을 가지고 있다. 따라서 알루미늄합금은 같은 전류가 흘러도 발열량은 연강의 40%정도로 되는 것을 의미하고, 이로써 그 저항용접에는 높은 전류가 요구됨을 알 수 있다.

한편, 알루미늄합금은 40%전후의 높은 도전율을 가지고 있지만, 상대적으로 용접용 동전극은 75%전후의 도전율을 가지고 있어서 그 도전율 차이가 적어서 전극의 표면에 알루미늄합금이 쉽게 부착되는 오염현상(Pick up)이 자주 생기게 되므로 전극팁의 관리가 까다롭게 된다.

(2) 높은 선팽창 계수

상용 알루미늄합금의 선팽창 계수는 23-24(X10⁻⁶/°C)로서 연강의 2배나 된다. 이것은 통전에 의하여 저항발열할 때 팽창하는 양이 크게 됨을 의미하고, 이 때 중간날림(splash)이 생기기 쉽고 가압력이 순간적으로 커지는 현상이 심해지게 됨을 의미한다. 또한 용융된 너깃부가 통전후 냉각될 때 응고 수축량이 커지기 때문에 너깃부에 기공과 균열이 생기기 쉽다. 알루미늄합금의 저항용접에서 단조가압을 특별히 고려해야 하는 것도 바로 이 기공과 균열을 효과적으로 방지하기 위한 기술적 조치인 것이다.

(3) 높은 열전도도

알루미늄합금은 열전도도가 연강의 약3배에 이르고, 오스테나이트계 스테인리스강의 약9배에 이른다. 따라서 저항용접시 전류의 통전에 의하여 열이 발생하더라도 쉽게 전도되어 열이 빠르게 퍼지기 때문에 국부적으로 온도가 상승되기 어렵다는 것을 의미한다. 용융온도가 650°C정도로 낮지만 열의 확산이 심해서 집중이 어렵기 때문에, 기본적으로는 통전시간을 짧게 하면서 높은 전류를 통전하는 방식을 채용하게 된다.

(4) 표면의 치밀한 산화막

알루미늄합금의 표면에는 매우 치밀한 산화막(Al₂O₃)이 형성되어 있다. 이 산화막은 비교적 두께는 얇지만 절연체이기 때문에 전체적으로 알루미늄합금의 저항용접시에는 표면의 접촉저항이 크고, 균일하지 않게 된다. 따라서 실제 용접시에 너깃의 형상이 불안정하게

되기 쉽고 용접부 강도의 산포가 심하게 된다.

(5) 낮은 고온강도와 좁은 소성 범위

알루미늄합금은 고온강도가 낮고, 용융되기 전에 소성변형할 수 있는 범위가 좁고, 용융직후에도 소성변형할 수 있는 범위가 좁다. 즉 너깃 생성 전후에 있어서 소성변형을 하기 힘들기 때문에 용접균열이 발생하기 쉽게 된다. 따라서 실제 용접시에는 용접전류와 통전시간의 치밀한 제어가 필요하게 된다.

3. 알루미늄합금 저항용접전의 표면처리 방법

알루미늄합금은 자재를 입고한 상태 그대로는 표면에 산화피막이 상당히 불균일하게 존재한다. 따라서, 용접시 가압에 의해 그 산화피막이 부분적으로 파괴되는데, 그 산화피막 파괴점이 불규칙적으로 흩어지게 되어 그곳에서 통전점이 형성되므로 발열점도 불균일하게 됨에 따라 찌그러진 너깃의 형성 원인으로 된다. 이러한 상태로 저항용접을 하면 너깃 크기에도 심한 산포가 생기고, 날림도 심하게 되며, 전극팁의 오염도 현저해지게 된다.

따라서 알루미늄합금의 저항용접시에는 표면의 전처리를 실시하는 것이 상식으로 되어 있다. 그 구체적인 방법은 Table 2와 같다.

Table 2 알루미늄합금 저항용접 전의 표면처리 방법

표면의 전처리법	1차 탈지처리	표면 산화물 제거	용접전의 표면상태
기계적 전처리	알칼리 세제 또는 트리클로렌 증기 세정	스테인리스강계 가는 와이어 부러시로 문지르기	얇은 산산화막 자연 형성
화학적 전처리	알칼리 세제 또는 트리클로렌 증기 세정	수산화나트륨 등으로 산화물 제거	얇은 산산화막 자연 형성
표면 부식처리	알칼리 세제 또는 트리클로렌 증기 세정	수산화나트륨 등으로 산화물 제거	규불화수소산으로 표면 부식처리⇒얇고 균일한 산산화막 인공형성

저항용접하기 위한 알루미늄합금의 표면에 형성되는 접촉저항은 대략 다음과 같이 구분된다.

- 1) 무처리 상태 : 4000~5000μΩ
- 2) 표면 전처리후의 바람직한 상태 : 100 μΩ이하로서 변동계수=(최대치-최소치)/평균치 의 값이 0.5이하를 유지할 것.

한편, 표면의 전처리후, 용접까지의 사이에 다시 산화 피막이 자연 형성되는데, 그 경우에는 산화피막의

두께가 균일하게 형성되도록 오염에 유의하는 것이 중요하다. 또한 균일하게 자연 형성되는 산화피막은 방치시간이 지남에 따라 접합강도의 산포가 감소하는 쪽으로 작용하며, 새로운 산화막을 인공적으로 균일하게 형성시킨 경우는 시간이 경과하여도 산화피막은 일정하게 되므로 고품질의 용접부를 얻을 수 있다.

4. 알루미늄합금 저항용접 전원의 특징

알루미늄합금 저항용접용 전원에 관련된 두드러진 특징은 높은 전류, 짧은 통전시간이라고 하는 것이다. 따라서 용접 전원으로서서는 철강에 대한 저항용접 전원과는 달리 주로 다음과 같은 것이 사용된다.

(1) 단상교류식 저항용접 전원

Fig. 1은 단상교류 저항용접 전원으로 용접하였을 때, 모니터링한 전류와 전압 파형을 보인 것이다. 출력 전류를 SCR의 통전 위상각으로 제어하기 때문에 전류는 60Hz교류의 반사이클 동안 계속 흐르지 못하고 일부만 흐르게 된다. 따라서 실효전류에 대한 피크전류의 비가 커서 너질을 형성시킬 때 온도가 심하게 변하므로 날림(splash)이 심하게 된다.

단상교류 전원은 철강의 저항용접에 주로 적용되고 있으나, 알루미늄합금의 경우에는 소출력용에 적합하다. 알루미늄합금의 저항용접시에는 소재의 두께가 커지면 수만A~십만A의 대전류가 필요하므로 단상교류식을 쓰면 수전설비가 고가로 되고 상간 불균형 문제가 심각해진다. 또한, 같은 용량의 150kVA 용접전원이라고 하더라도 주파수가 60Hz로 높기 때문에 회로의 인덕턴스로 인한 리액턴스 증가가 심해져서 출력 전류가 크게 흐르지 못하는 특징이 있다.

따라서 대출력이 필요한 대부분의 알루미늄합금의 저항용접용에는 그다지 많이 채용되지 않고 있다.

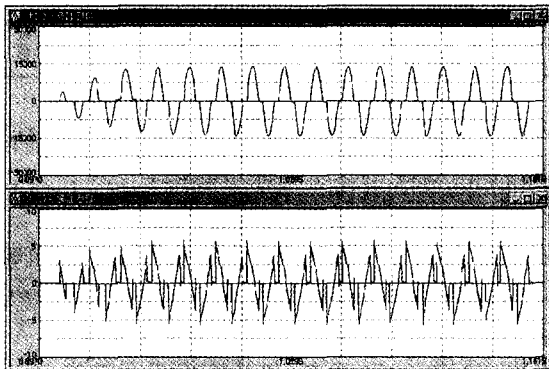


Fig. 1 단상교류 저항용접 전원의 출력 전류와 전압 파형

(2) 삼상저주파식 교류 저항용접 전원

Fig. 2는 삼상저주파식 저항용접 전원을 써서 용접할 때의 전류와 전압 파형을 보인 것이다. Fig. 2에서 보인 파형은 12Hz의 주파수를 가진 저주파 교류를 보인 것이지만, 삼상저주파식 교류 저항용접 전원의 경우는 주파수를 가변할 수 있고, 6-7Hz정도의 저주파수가 되도록 가변할 수도 있는 특징이 있다⁴⁾.

또한, 대출력용 전원으로서 적합하고 정격용량에 비하여 출력 전류가 크게 될 수 있지만, 용접기의 부피가 커지고 장비의 가격이 비싼 것이 단점이다. 특히 출력 주파수를 상당히 자유스럽게 낮출 수가 있고, 이와 같이 주파수 f가 낮아지므로 용접기의 암(arm)이 길거나 암간격(arm space)이 커져서 그 인덕턴스 L이 증가해도 리액턴스 $X_L (=2\pi f L)$ 은 그다지 커지지 않기 때문에 큰 전류를 흘릴 수가 있는 것이다. 따라서 교류를 쓰면서 대형 C건을 적용할 수 있는 장점이 있다. 알루미늄합금의 저항용접에는 아주 적합한 용접 전원인 것으로 알려지고 있다.

(3) 삼상정류식 직류 저항용접 전원

Fig. 3은 삼상정류식 직류 저항용접 전원을 써서 용접하였을 때의 출력 전류와 전압의 파형을 보인 것이다.

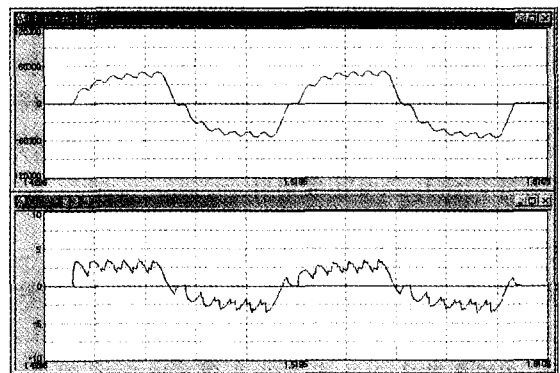


Fig. 2 삼상교류 저항용접 전원의 출력 전류와 전압 파형

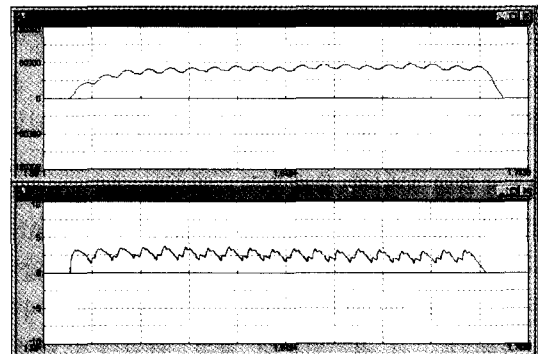


Fig. 3 삼상정류식 저항용접 전원의 출력 전류와 전압 파형

삼상교류로 입력받아서 출력제어는 변압기 1차측의 SCR로 하고, 변압기로 적절하게 전압을 강하시킨 후 정류소자를 이용하여 직류로 변환시켜서 용접을 하게 된다. 즉 삼상교류를 입력으로 채용하기 때문에 대출력에 적합하지만, 2차측의 정류시에 손실이 커지고 정류소자의 가격이 비싸서 경제적으로는 다소 불리한 점이 있다. 그러나 현재 알루미늄합금의 저항용접에 삼상정류회로식 전원과 함께 가장 널리 쓰이는 전원으로 알려져 있다.

(4) 인버터직류식 저항용접 전원

Fig. 4는 인버터 직류 저항용접 전원에 의하여 대출력 직류 저항용접을 하였을 때의 출력 전류와 전압의 파형을 보인 것이다. 삼상교류로 입력을 받아서 일단 직류로 정류한 후, 인버터로 고주파의 교류로 변환하면서 출력을 제어하게 된다. 이 고주파의 교류가 변압기를 거치면서 2차측의 낮은 전압이 얻어지도록 하여 정류소자를 거쳐서 직류로 전환하게 된다. 통상 인버터에는 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)를 채용하므로 상당한 대출력을 얻을 수 있게 되었지만, 아직 삼상정류회로식이나 삼상정류식 전원만큼 큰 출력을 얻을 수가 없다. 그러나 최근 저항용접의 추세는 생산단가가 비싸더라도 고품질을 추구하려는 것이 하나의 흐름으로 되고 있다. 이러한 기술적 수요를 실현시킬 수 있는 좋은 전원이 인버터식 전원이다. 즉 높은 가압력을 가하면서 높은 전류를 매우 짧은 시간에 정교하게 제어하면서 통전해서 좋은 품질을 얻을 수 있는 가장 적합한 전원이다. 그러나 용접 전원의 가격이 비싼 것이 단점이다.

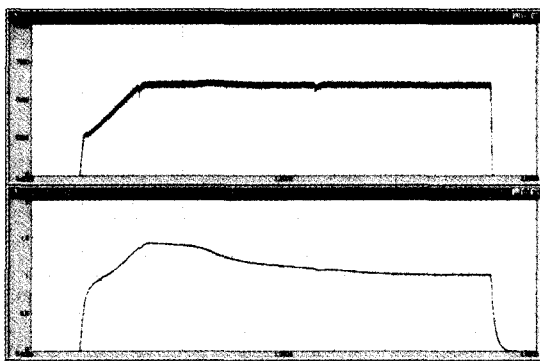


Fig. 4 인버터식 직류 저항용접 전원의 출력 전류와 전압 파형

5. 알루미늄합금 저항용접을 위한 공정의 검토

5.1 2단 가압에 의한 저항용접

알루미늄합금의 저항용접시에는 균열과 기공을 어떻게 효과적으로 방지하는가가 가장 중요한 기술이다.

Fig. 5는 Al-Mg합금 A5052-H32 t1.5 판재 두 장을 저항용접한 것을 절단하여 그 단면에 나타난 기공을 보인 것이다. 용입율(penetration ratio)이 크거나 표면의 오목자국(indentation)이 깊을수록 균열도 함께 생기기 쉽게 된다⁴⁾.

따라서 실제 알루미늄합금에 대한 저항용접 공정에서는 전극 소재와 형상의 선택도 매우 중요한 기술적 사항이지만 통전시의 가압을 2단으로 하면서 단조효과를 충분히 주는 것이 보다 중요한 공정기술이라고 할 수 있다.

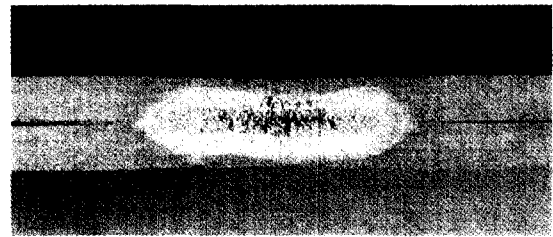


Fig. 5 Al-Mg합금 A5052-H32 t1.5 저항용접부의 단면에서 나타난 많은 기공

Fig. 6은 초기 가압력이 충분히 안정된 후(squeeze time)에 용접전류를 흘리고, 용접전류 종료 전에 단조가압을 높게 하여 가하면서 후열 전류를 완전히 통전시키고 나서 잠시 유지시간이 지나고 가압력을 낮추는 프로그램을 나타낸 것이다⁵⁾. 이렇게 통전 종료 전에 충분히 높은 단조가압을 가하면 너깃 중심부에서 형성되는 기공과 균열을 효과적으로 방지할 수가 있는 것이다. 이와 같이 너깃부에 2단으로 높은 단조가압을 가하는 것은, 알루미늄의 중요한 물리적 성질중 하나인 선팽창계수가 큰 것 때문에 냉각과정중 너깃에서는 과대한 수축이 발생하고 이 수축량이 상당히 크기 때문에 보다 높은 가압력으로 양쪽에서 눌러주지 않으면 기공이 생기기 쉽고, 때로는 응고균열이 발생하기도 하기 때문이다.

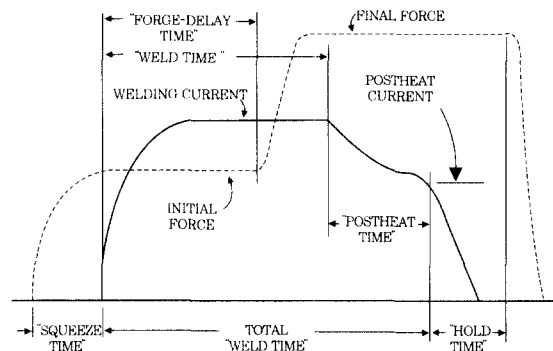


Fig. 6 알루미늄합금 저항용접을 위한 전류 및 단조가압을 포함한 2단가압 프로그램의 개요

한편, 표면에 형성된 산화막을 보다 확실하게 파괴시키기 위하여 초기의 가압력을 전류 통전시의 가압력보다 높게 하는 프로그램도 종종 적용된다. 다소 복잡한 프로그램이 되기는 하지만 항상 표면의 산화막을 확실하게 파괴시킬 수 있으므로 좋은 용접 품질을 안정적으로 얻을 수 있는 방법이라고 할 수 있다.

5.2 단시간 대전류 통전에 의한 용접

알루미늄합금은 낮은 고유저항, 높은 열전도도 등으로 인해 전류는 연강의 3-4배 높게 흘려주어야 하고, 통전시간은 연강의 1/4정도로 짧게 해 주어야 한다¹⁾.

Fig. 7 (a) (b)는 같은 두께 1mm의 연강과 알루미늄

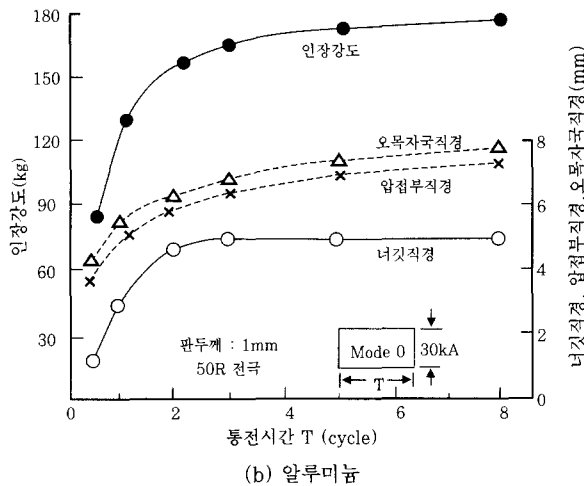
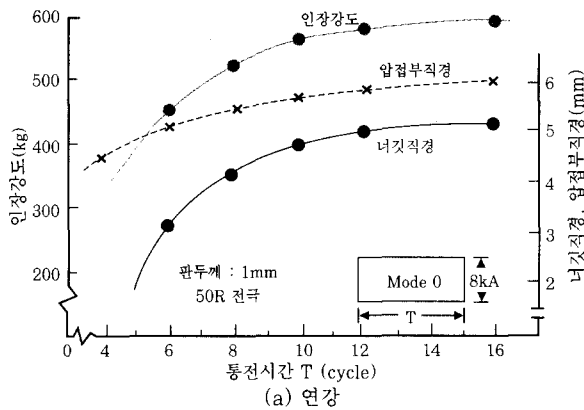


Fig. 7 연강과 알루미늄합금의 저항용접시 통전시간에 따른 강도와 너깃 직경 등의 변화

합금 판재에 대하여 적정 전류로 용접하였을 때, 통전시간에 따른 너깃 직경의 성장과 인장전단강도 (tensile shear strength) 등의 관계를 보인 것이다. 연강에 대해서는 전류 8kA를 흘렸고, 알루미늄합금에 대해서는 같은 두께의 판재임에도 불구하고 거의 4배에 가까운 30kA의 대전류를 흘려서 용접한 것이다.

Fig. 7 (a)의 연강에서는 너깃 직경이 12-13사이클 까지 성장하고, 인장전단강도도 거의 같은 경향으로 증가한다. 13사이클 이상의 통전시간에서는 너깃 직경과 인장전단강도는 거의 포화하여 성장을 멈추는 것으로 나타났으며, 최대의 너깃 직경은 대략 5mm정도로 되었다.

Fig. 7 (b)의 알루미늄합금의 경우는 약3사이클에서 너깃 직경이 5mm정도로 포화되었으며, 인장전단강도는 약간 더 긴 통전시간까지 증가하는 경향을 보였다. 이와 같이 알루미늄합금의 저항용접에서 연강의 1/4정도의 단시간내에 너깃 성장이 포화되는 것은 역시 그 열전도도가 연강의 3배정도로 높기 때문이라고 할 수 있다.

5.3 전극 사용 수명과 그 오염에 대한 대책

알루미늄합금은 고유저항이 작고 열전도도가 높기 때문에 용접 전류를 크게 통전해 주어야 한다. 게다가 이 소재는 대체로 경도가 낮으면서 표면에 산화물이 형성되어 있기 때문에 그 표면과 전극과의 접촉면에서 열이 많이 발생하고 피용접재 표면의 산화물이 전극팁에 쉽게 부착하여 전극을 오염 (pick up) 시키는 사례가 빈번하다.

이와 같이 전극 표면이 오염되면 전극 소모가 가속화되고, 용접후의 피용접재 표면에 오목자국이 깊어지며, 표면날림이 생기고 표면의 버어 (burr)가 발생하여 제품의 외관이 불량해지고, 심하면 표면에 균열이 발생하기도 한다.

알루미늄에 의한 전극의 오염과 심한 오목자국을 효과적으로 방지하기 위한 방법으로서는 다음과 같은 기술적 사항을 고려할 수 있다.

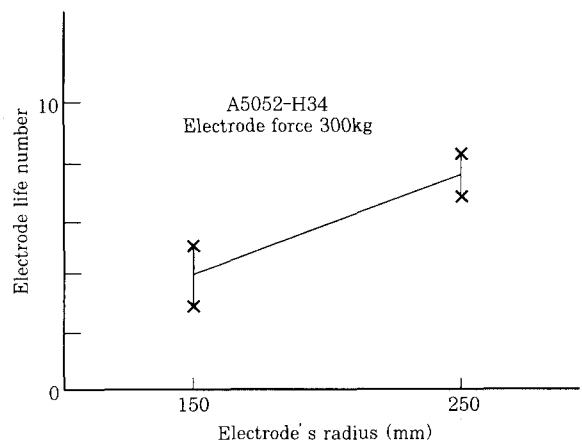


Fig. 8 알루미늄합금 저항용접에서 전극팁의 선단경R과 전극수명의 관계

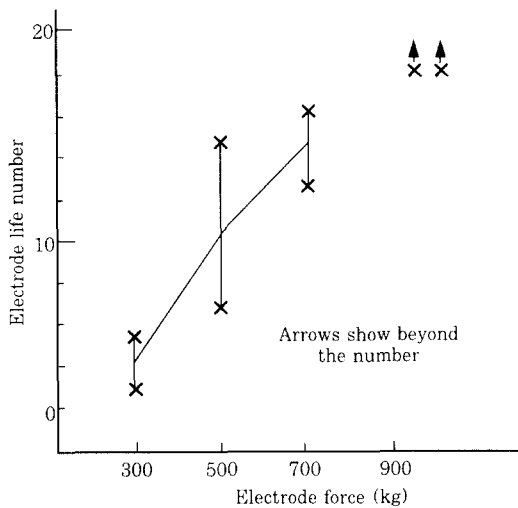


Fig. 9 알루미늄합금의 저항용접에서 가압력과 전극 수명의 관계

- 1) 전극소재의 도전률은 높은 것일수록 유리하다.
- 2) Fig. 8과 같이 전극팁의 선단경 R이 큰 R형 전극일수록 유리하다. Fig. 8에서 세로축의 수명은 전극 팁에 오염이 생기기까지의 용접 타점수를 의미한다.
- 3) 알루미늄 분산강화동과 같이 고온에서 화학적으로 안정된 소재일수록 유리하다.
- 4) 전극팁의 직경이 클수록 유리하다.
- 5) Fig. 9에서 나타내는 바와 같이 가압력이 높을수록 표면의 접촉저항이 작아지고 냉각특성이 좋아져서 전극의 수명은 길어진다.
- 6) 냉각수량이 많을수록 유리하다

6. 알루미늄합금과 철계재료 저항접합 기술의 자동차 엔진에의 적용

6.1 알루미늄합금과 철계재료의 접합 방법

자동차를 비롯한 수송기계의 경량화 추세에 부응하기 위해 알루미늄합금과 같은 경량금속의 적용이 적극 추진되고 있다. 그러나 내열성이나 내마모성 또는 특별히 높은 강도가 요구되는 곳은 철계재료를 적용하고, 주변의 알루미늄합금 구조물과 접합을 해서 사용하는 하이브리드 구조가 적극 연구되고 있다⁵⁻⁶⁾.

지금까지 개발된 알루미늄합금과 철계재료의 접합 방법은 대략 다음과 같은 것이 있다.

- 1) 마찰압접법
- 2) 확산접합법
- 3) 브레이징법
- 4) 저항접합법

5) 폭발압접법

상기의 여러 접합법 중에서도 알루미늄합금과 철계재료의 저항접합법은 단시간의 접합이 가능하면서도 접합 후의 공정도 간단하여, 조립과 가공라인 상에서 접합이 자동으로 가능한 등 다른 공법에 비하여 현저하게 생산성이 높은 방법이라고 할 수 있다⁷⁾. 그러나 이 저항접합법은 일반적으로 접합계면의 반응을 정밀하게 제어하는 것이 어렵고, 취약한 금속간 화합물의 생성을 억제하면서 신뢰성이 높은 이음부 강도를 확보하는 것이 곤란하다고 하는 과제를 가지고 있다.

6.2 알루미늄합금과 강재의 저항접합을 위한 인서트재의 종류

알루미늄합금과 강 of 저항접합을 위해서 통상 인서트재로서 제3의 재료를 삽입하는 방법을 들 수 있다. 이 인서트재로서는 다음과 같은 3종류의 것을 들 수 있다⁷⁾.

- 1) 단일 조성의 판재 인서트를 쓰는 경우 : Fig. 10 (a)
- 2) 알루미늄 클래드 강판을 쓰는 경우 : Fig. 10 (b)
- 3) 한쪽 또는 양쪽 부재에 도금을 하여 막을 형성시켜 쓰는 경우 : Fig. 10 (c)

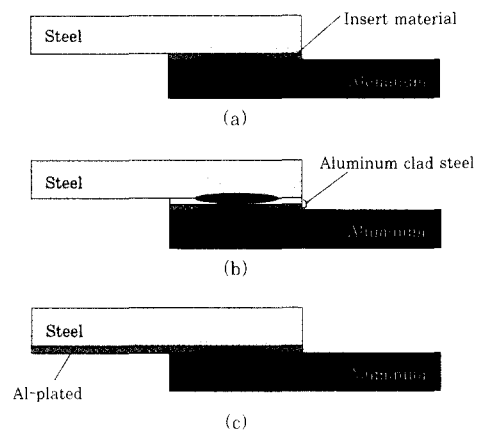


Fig. 10 알루미늄합금과 철계재료의 저항접합을 위한 방법

어떤 접합법을 적용하더라도 각 모재의 특성, 이음부의 사용 환경 및 요구 품질에 적합한 인서트재의 형상과 접합 공법을 별도로 개발하여야 할 필요가 있다. 즉 어떤 알루미늄합금과 강재라도 모두 저항접합할 수 있는 일반적인 인서트재와 접합 방법은 아직 개발되지 못한 실정이라고 할 수 있는 것이다.

6.3 알루미늄 주물 실린더 헤드와 강재 밸브 시트의 저항 접합

6.3.1 종래의 자동차 엔진 실린더 헤드 구조와 압입 방식

자동차 엔진용 실린더 헤드에는 통상 흡기 밸브와 배기 밸브가 작동하여 공기를 흡입하는 흡기 포트와 연소가스를 배출하는 배기 포트가 있다. 밸브 시트는 바로 이들 포트의 연소실 측 끝에 링 형상으로 장착되어 밸브가 작동할 때 항상 접촉하여 기밀을 확실하게 유지하도록 하는 부분이다. 밸브 시트는 밸브가 닫혀있을 때는 가스의 누설을 막는 기밀재로서의 역할을 하는 동시에 연소에 의해 밸브가 받은 열을 실린더 헤드의 냉각계로 빠져나가도록 함으로써 밸브의 과열을 방지하는 역할도 한다⁷⁾.

Fig. 11은 종래에 적용하였던 기계적 압입법으로 밸브 시트를 장착한 예를 모식적으로 보인 것이다. 종래의 밸브 시트는 상당히 두껍고 압입으로 되어 있어서 설계상 여유가 없고 열전도성도 나쁘게 되어 있었다.

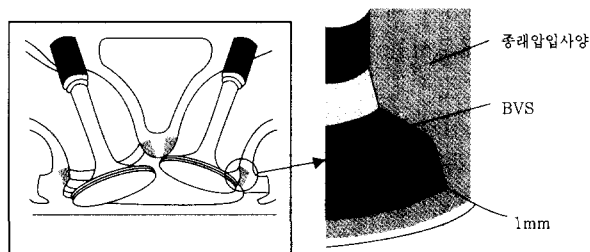


Fig. 11 실린더 헤드의 구조와 종래의 압입 방식 밸브 시트

Table 3 이종재 저항접합에 적용한 알루미늄 주물의 성분

시료 "A"	JIS AC4C	Al-Si7%-Mg0.33%	→ 용체화 시효처리
시료 "B"	JIS AC4B	Al-Si8.5%-Cu3%	

6.3.2 저항접합에 적용한 실린더 헤드와 밸브 시트의 소재

저항접합에 사용한 실린더 헤드 소재는 일반 양산에 적용하고 있는 것으로서 다음과 같은 알루미늄 금형 주조재 2종류이다⁷⁾.

이러한 실린더 헤드 재료와 저항접합할 밸브 시트 재료는 철기 소결합금(Fe-C1.3%-Ni2%-Cr7%-Co7%-W2.3%-Cu14%)으로서, 펄라이트 기지중에 경질입자가 분산된 구조를 가지고 있다. 이 소결합금의 공공에는 동이 합침되어 있어서 양호한 열전도성을 가지면서 높은 강도 및 내마모성을 동시에 가지도록 한 재료이며, 열팽창계수는 탄소강과 거의 같도록 된 것이다.

6.3.3 저항접합의 원리

Fig. 12는 밸브 시트를 실린더 헤드에 저항접합하기 위한 각 부분의 형상과 치수를 보인 것이다.

저항접합에 사용한 저항용접 전원은 3상 정류식 직

류용접기로서 200kVA, 30kN의 용량을 가진 것이다. 전극은 크롬동으로서 시트 링을 원주 전체에서 동시에 가압하면서 전류도 동시에 통전할 수 있도록 고안된 것이다.

Fig. 13은 安達 등이 개발한 접합 프로세스와 그 기구에 대하여 나타낸 것이다.

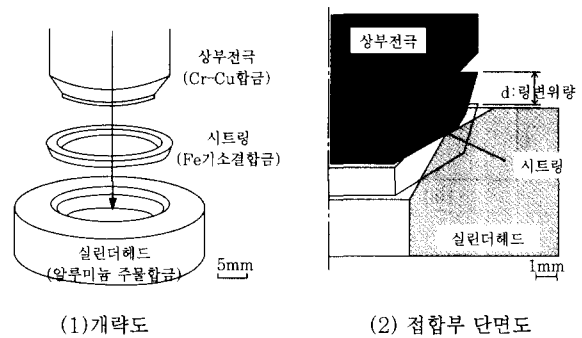


Fig. 12 저항접합부의 형상

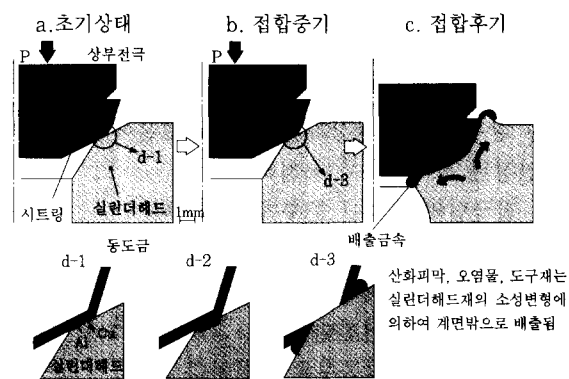


Fig. 13 실린더 헤드와 밸브 시트의 저항접합 기구

1) Fig. 13 a와 같이 링측과 실린더 블록측 각각의 프로젝션 선단부를 가압접촉시킨 상태에서 통전을 하면, 높은 전류밀도로 인해 접촉 계면에 집중적으로 저항발열이 생긴다.

2) Fig. 13 b와 같이 접합 계면에서의 발열과 접촉면의 상호 슬립에 의해 접촉부의 표면 산화막이 파괴된다. 그 후 링 표면의 동도금과 알루미늄 모재와의 사이에서 고상 확산이 생기며, 저융점 합금상이 형성된다(Fig. 13 d-1). 이 계면에 형성된 저융점 합금상은 발열에 의해 액상으로 변화한다(Fig. 13 d-2)

3) 연화한 알루미늄이 밸브 시트 링의 외부 단면 형상에 따라서 마크로적인 소성변형을 일으킨다. 이 변형에 따라서 계면의 동합금과 반응한 액상은 파괴된 산화물과 표면에 부착하여 있던 오염물과 함께 계면 밖으로 배출되기 때문에 남겨진 계면에서 알루미늄과

철계재료의 직접 고상 접합이 완료된다.

여기서 계면에 취약한 금속간 화합물을 형성시키지 않기 위해 계면의 온도가 알루미늄의 고상선을 넘지 않도록 전류치와 시간을 정밀하게 제어하는 것이 중요하다. 또한 표면의 산화피막과 오염물질의 배출에는 알루미늄의 소성변형을 이용하기 때문에 그것에 적합한 링 형상과 전류 및 가압력 패턴의 제어가 필요하다. 이러한 제어기술이 이 저항접합법의 본질적인 특징이라고 할 수 있다. Fig. 14는 이 때의 전류 파형제어를 위한 실례를 보인 것이다.

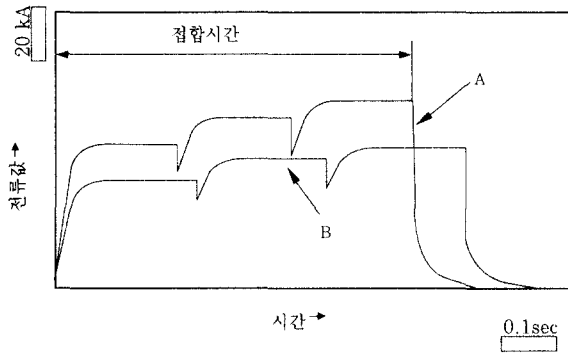


Fig. 14 알루미늄 주물과 철계 밸브 시트 링의 저항접합을 위한 전류 파형의 일례

6.3.4 알루미늄과 철계재료의 저항접합 강도에 영향을 미치는 인자

(1) 계면 이물 배출을 위한 적정 소성배출량

접합 계면의 강도에는 접합과정에 있어서 알루미늄의 소성변형 모드가 크게 영향을 미친다. 특히 접합 계면에서 알루미늄이 소성변형하면서 밖으로 미끄러져나가는 양 즉 소성배출량이 0.5mm이상으로 충분히 커야만 계면 이물의 배출이 제대로 이루어져서 접합부의 강도가 충분히 진다고 할 수 있다. 이 소성배출량은 외관으로 쉽게 측정할 수 있으므로 비파괴로 접합 강도를 판단하는 방법으로 응용할 수가 있다.

(2) 알루미늄 모재의 표면 도금 및 이물질의 영향

알루미늄의 표면에는 산화피막이 있기 때문에 인서트재를 써서 이 피막을 제거하여 접합면을 말착시키는 것이 필요하다.

安達 등은 밸브 시트 링의 표면에 Cu, Zn, Sn 및 Ni 도금을 한 것과 도금없이 저항 접합 한 것을 비교하여 검토하였다. 그 결과 강도가 가장 높은 경우가 Sn이었고, 다음이 Cu와 Zn의 순서로 비슷하였으며, Ni과 도금없이 접합한 경우는 매우 낮은 강도를 보였다. Cu, Zn, Sn은 고상화산에 의해 알루미늄과의 접촉부에 모재보다 저융점인 공정조성역을 형성하므로 온도상승에 따라 접촉계면에 우선적으로 액상이 생겨

서 밖으로 밀려나가면서 이물질이 충분히 제거된다.

그러나 접합부의 온도는 알루미늄 모재의 고상선보다 다소 낮은 온도(예, 40℃)로 유지하면서 충분히 소성변형되어 밖으로 배출되도록 하는 것이 중요하고, 이를 위해서는 전류와 통전시간 및 가압력의 정확한 제어가 필수적으로 된다. 즉 접합계면에는 용융 재응고한 상이 절대로 남아있지 않도록 하는 것이 가장 중요한 포인트라고 할 수 있다.

한편, 알루미늄 표면에 부착한 윤활유, 절삭유와 같은 이물질은 접합 공정이 제대로 이루어지지만 하면 충분히 밖으로 밀려나기 때문에 접합 강도에 영향을 미치지 않는 결과로 나타났다.

Fig. 15는 성공적으로 저항접합이 된 이음부의 단면 사진이다.

이상에서 기술한 알루미늄 주물과 철계 소결합금 링의 저항접합법은 비교적 새로운 시도로서 지금까지 성공적으로 적용되고 있었던 알루미늄합금과 강관의 폭발압접, 마찰압접 등과 유사한 공정을 저항접합이라는 것을 이용하여 성공시킨 예라고 할 수 있다. 금후 보다 적극적인 적용의 사례들이 나타날 것으로 기대된다.

다만, 이러한 성공적인 적용을 위해서는 보다 정교한 저항용접 설비의 개발과 품질제어를 위한 각종 센싱과 피드백 제어 기술이 복합적으로 개발되어야 할 것이다.



Fig. 15 알루미늄 주물과 철계 밸브 시트링이 성공적으로 저항접합된 경우의 단면.

7. 결 론

알루미늄합금의 저항용접은 자동차, 선박, 항공기, 철도차량과 같은 각종 수송기계의 경량화를 추진하는 입장에서는 매우 중요한 조립기술이라고 할 수 있다. 특히 저항용접은 대량 생산 공정에서 한번만 공정조건을 확립해두면 품질관리가 비교적 용이하고, 생산 단가가 저렴하게 되는 특징이 있어서 금후에도 보다 폭넓은 적용이 예상된다. 다만 알루미늄합금의 저항용접을 위해서는 삼상 저주파식이나 삼상 정류식 용접기

와 같은 대용량의 전원 장치가 필요하고, 2단 가압장치등과 같은 가압장치의 구조도 완전히 고급화되어야 한다. 즉 기존의 강관용 저가의 저항용접 설비를 그대로 사용하려는 발상은 전환되어야 하며, 설비에 대한 새로운 개발과 투자가 병행되어야만 공정의 적용이 보다 일반화 될 것으로 기대된다.

한편, 기존 철강재료의 특징인 고강도, 내열성, 내마모성 등의 특성을 살리고, 경량화를 위한 알루미늄합금 적용을 보다 적극적으로 추진하기 위해서는 이중재료의 접합이 필수적이다. 이 경우에도 기존의 폭발압접이나 마찰압접과 같은 접합공법 보다는 대량 생산 체계에 적합한 저항접합법이 유리할 것이라는 판단을 할 수 있다. 그러나 이러한 알루미늄과 철계재료의 저항접합법을 성공적으로 적용하려면 일단 그 접합의 원리를 정확하게 이해를 한 상태에서 각 부품에 맞는 실용 공정이 정밀하게 개발되어야 할 것이다. 이렇게 개발된 공정과 개발용 설비를 근거로 하여 대량 생산용 설비의 사양 결정과 개발을 추진해야 할 것이다.

국내에서도 이러한 저항접합 공정의 개발, 그에 관련된 소재의 개발 및 그 공정에 적합한 장치의 개발이 함께

통합적으로 이루어져서 보다 광범위한 실용화가 가능하도록 기술적 기반을 구축해야 할 시기라고 판단된다.

바야흐로 용접기술도 이제는 정밀한 디지털화와 통합화의 시대이며, 그렇게 되어야만 진정한 국제 경쟁력을 확보할 수가 있을 것이다.

참고 문헌

- 1) 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(I), (1983.3), 東京
- 2) 조상명 : 저항용접의 기초원리와 모니터링 결과의 분석, 대한용접학회지 제15권 제2호, (1997. 4)
- 3) 社團法人輕金屬溶接構造協會 : アルミニウム合金構造物の溶接施工管理 IV, アルミニウム合金の溶接施工, (平4年7月), 東京
- 4) 김윤수 : 알루미늄합금 A5052의 저항 점용접성에 미치는 단조가압의 영향, 부경대학교 석사논문, (2001. 2) 부산
- 5) RWMA : RESISTANCE WELDING MANUAL, 4th Edition, (1999), PA, USA
- 6) 강성수 : 알루미늄합금의 저항용접 기술의 현황과 전망, 대한용접학회지 제15권 제2호, (1997. 4)
- 7) 安達修平, 伊藤壽浩, 稻見純一 : アルミニウム合金と鐵系材料の抵抗溶接技術, 溶接技術, (2000. 6), 東京



- 조상명 (趙相明)
- 1955년생
- 부경대학교 재료공학부
- 용접기의 파형제어, 용접설계, 용접공정 개발 및 품질 모니터링
- e-mail : pnwcho@mail.pknu.ac.kr