〈논 문〉 SAE NO. 98370094

알루미늄 합금의 저항점용접에서의 열전 효과에 대한 연구

A Study of Thermoelectric Effect in Resistance Spot Welding of Aluminium Alloy

한 용 섭*, K. T. Rie**
Y. S. Han

ABSTRACT

The erosion of electrode in spot welding of aluminium alloy by direct current is dependent on the electric polarity. The positive electrode is much more eroded than the negative one. To explain this phenomenon, Peltier effect has been generally accepted as a unique theory.

In this study Peltier effect was evaluated by calculations on the basis of some references and experiments. The difference of heat generated by Peltier effect on both electrode surfaces was, however, only 4% of total heat generated during welding.

Because of insufficient explanation, Kohler theory, which is mainly affected by thin oxide film, was introduced. A theoretical calculation showed 17% of the temperature difference between the positive and negative electrode, in case "surface voltage" resulted from oxide film was 30% of total contact voltage. This revealed that the erosion of electrode could be more affected by Kohler theory than Peltier effect.

주요기술용어 : Spot Welding(점용접), Aluminium Alloy(알루미늄 합금), Electrode Tip(전극팁), Peltier Effect(펠티에 효과), Thomson Effect(톰슨 효과), Seebeck Effect(제벡효과), Thermoelectric Effect(열전 효과)

1. 서 론

알루미늄 합금은 낮은 비중에 비해 강도가 높을 뿐만 아니라, 가공성이 우수하고 내부식성도 우수하기 때문에 경량화 구조물에 많이 사용되고 있다. 특히 자동차 및 객차 등의 수송기계에서는 연료 소비를 줄이기 위한 방법으로 차체의 경량화가 요구되며, 이에 따라 알루미늄 합금의 사용이 증가하고 있다.

저항점용접 방법은 자동차 차체와 같은 얇은 판재의 대량 생산에서 매우 중요한 용접 방법으

* 정회원, 대우중공업
** TU Braunschweig

로 철강 재료뿐만 아니라 알루미늄 합금에도 많이 적용되고 있다. 그러나 알루미늄 합금에 대한 점용접 방법은 강판의 용접과 비교할 때 용접품질이 불균일하고 전극팁의 수명이 짧기 때문에 적용이 제한된다. 전극팁의 수명에 미치는 용접조건으로는 용접가압력, 용접시간, 전극팁 재질, 냉각조건 등 매우 많으며, 용접전류의 형태도 전극팁의 수명에 직접적인 영향을 준다.[1~3]

알루미늄의 점용접시 용접전류 형태가 전극팁의 수명에 미치는 영향에 대한 연구는 매우 많이 보고되었다.[3~5] 이들 모든 보고에서의 공통된 점은 교류용접 시에는 두 개의 전극팁이 균일하게 손상되는데 비해 직류용접 시에는 양극 전극이 음극 전극에 비해 빨리 손상된다는 것이며, 이러한 전류 방향에 따른 손상의 차이는 열전 효과 특히, 펠티에 효과 때문으로 알려져 있다.

점용접에서 발생하는 전류 방향에 따른 전극팁의 손상 현상에 대해서는 Wyant등이 최초로 발표하였으며[6], Balder는 몰리브덴과 니켈의 용접에서 항상 한쪽의 용접부에서만 충분한 용접강도가 얻어짐을 관찰하고 그 원인으로 펠티에 효과를 거론하였다.[7] Hasir는 아연 도금 강판의 점용접 시 발생하는 펠티에 효과에 대해 최초로 측정하였다.[8] 그의 결과에 의하면 양극 전극팁의 표면에는 펠티에 효과 때문에 15%의 열이 음극의 표면에 비해 많이 발생하였다.

이러한 펠티에 효과에 대한 많은 보고에도 불구하고 알루미늄 합금의 직류용접에서 발생하는 전류 방향에 따른 전극팁의 손상 현상을 완전히 설명하기는 불충분하다고 판단된다. 그 이유는 지금까지 발표된 논문들이 비교적 낮은 용접전류를 사용한 점용접부에서의 결과이나, 알루미늄 합금의 용접 시에는 20kA이상의 고전류를 사용하기 때문이다.

따라서 본 논문에서는 알루미늄 합금의 용접 시 나타나는 여러 종류의 열전 효과를 정량적으로 분석하고, 이들 효과가 전극팁의 수명에 미치는 영향에 대해 검토하였다.

2. 여러 종류의 열전 효과[9~11]

2.1 펠티에 효과

온도를 측정하는 방법 중 열전대를 이용하는 방법이 있으며, 이는 그림 1에서와 같이 두 종류의 금속 접합부를 온도가 다른 두 곳에 두면 각각의 온도차에 따라 발생하는 전위차(제벡 효과)를 이용하는 것이다. 이는 여기에너지(Excitation energy)가 다른 두 금속을 접합시키면 접합부위에는 두 금속간의 Fermi 에너지를 동일한 수준으로 유지하기 위해 여기에너지가 낮은 금속의 전자가 여기에너지가 높은 금속으로 이동하는 현상 때문에 발생한다. 이때 발생하는 전위차는 두 접합부위의 상대적인 온도차에 비례한다. 이러한 물리적 현상에 따라 동일한 열전대 조합에 전류를 흘리게 되면 접합부에는 Joule열 이외에 전류의 방향에 따라 두 금속간의 접합부위에서는 전자의 이동에 따른 열이 추가로 발생하거나, 열이 감소한다. 이를 펠티에 효과라 하며, 이 효과에 의해 발생되는 열(Q_p)은 다음 식(1)에 의해 결정된다.

$$Q_p = \int I \cdot P_{ab}\, dt \qquad (1)$$

여기서 P_{ab}는 주어진 금속 A와 B간의 펠티에 상수이며, I는 전류, dt는 시간을 각각 나타낸다.

2.2 톰슨 효과

그림 2와 같이 양 끝단부의 온도가 다른 전도

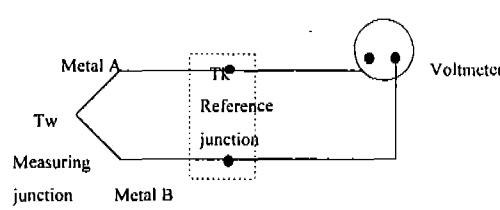
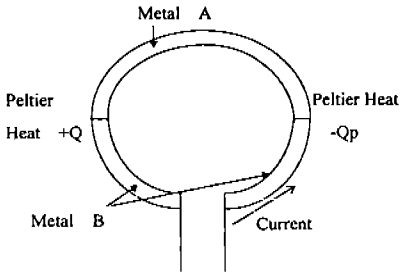
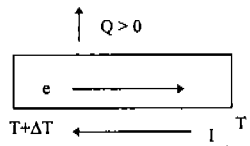


Fig.1 Schematic diagram of thermocouple circuit



(a) Peltier effect



(b) Thomson effect

Fig.2 Schematic diagram of Peltier and Thomson effect

체에 전류를 흘리면 톰슨 효과가 나타난다. 이는 높은 온도 구역의 전자가 낮은 온도 구역으로 이동하면 전자는 주위의 전자와 같은 에너지 수준을 유지하기 위해 자기가 가진 에너지를 방출하며 이에 따라 열이 발생하는 현상을 말한다. 톰슨 효과에 의해 발생하는 열(Q_T)은 다음 식에 의해 결정된다.

$$Q_T = -\mu_T \cdot I \cdot \Delta T \qquad (2)$$

여기서 μ_T는 톰슨 상수이며, 전류 I는 낮은 온도에서 높은 온도방향일 때 양수를 나타낸다.

2.3 여러 열전 효과 사이의 관계

두 종류 금속의 접합으로 이루어진 전도체에 전류를 흘리면 앞에서 설명한 3개의 열전 효과(제벡, 펠티에, 톰슨 효과)사이에는 열역학의 법칙에 따라 그림 3과 같이 다음의 관계가 성립한다.

먼저 열역학 제1법칙에 따라 펠티에 효과와 톰슨 효과에 의해 발생한 열은 제벡 효과로 나타난다.

$$P_s = P_T + P_p \qquad (3)$$

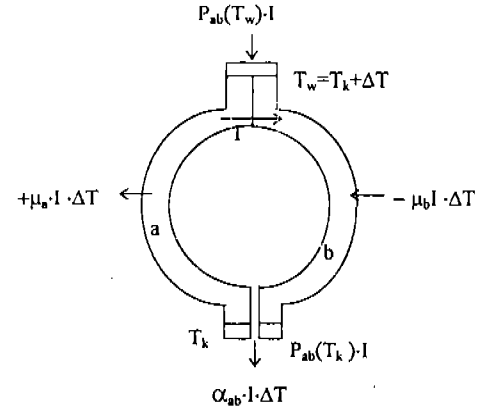


Fig.3 Heat balance of thermoelectric effects

여기서 각각은 다음을 나타낸다;

제벡 효과 : $P_s = U_s \cdot I = \alpha_{ab} \cdot \Delta T \cdot I$ (4)

톰슨 효과 : $P_T = (\mu_a - \mu_b) \cdot \Delta T \cdot I$ (5)

펠티에 효과 : $P_p = (P_{ab}(T_w) - P_{ab}(T_k)) \cdot I$ (6)

$T_w = T_k + \Delta T$: 접합부위 중 높은 온도

T_k : 접합부위 중 낮은 온도

식(3), (4), (5), (6)를 정리하면 다음 식(7)이 얻어진다.

$$\alpha_{ab} = (\mu_a - \mu_b) + \frac{P_{ab}(T_w) - P_{ab}(T_k)}{\Delta T} \qquad (7)$$

식(7)에서 크기가 작은 톰슨 효과를 제외하면 펠티에 상수는 다음 식과 같이 표현된다.

$$P_{ab}(T_w) - P_{ab}(T_k) = \alpha_{ab} \cdot (T_w - T_k) = U_s \qquad (8)$$

즉, 펠티에 상수는 열전대를 이용한 열기전력(U_s)의 측정을 통하여 추정할 수 있다.

3. 알루미늄 합금의 점용접시 열전 효과의 검토

3.1 직류 용접시 전극팁의 표면 손상 실험

사진 1에는 KS D6701-A5154P 알루미늄 합

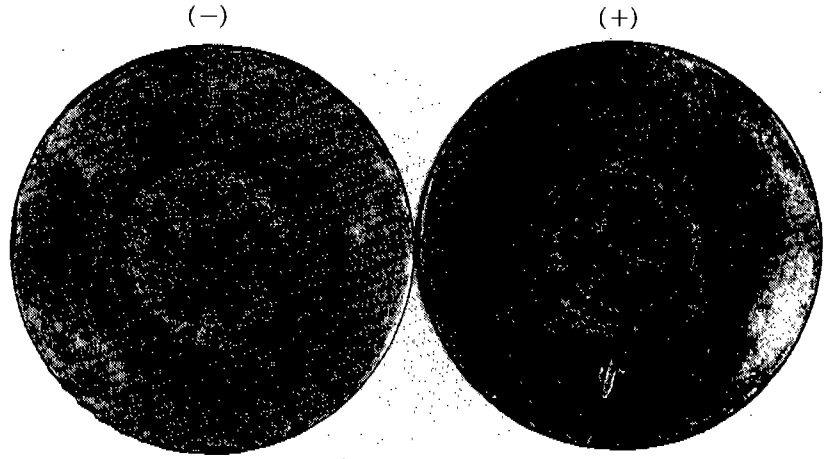


Photo 1 Surface damage of electrode depending on polarity in DC welding

금의 삼상직류 용접시 동일한 용접 전극을 사용하여 1,200회 용접한 후 전극팁의 마모 현상을 나타내었다. 용접전류는 29.5kA이었으며, 용접시간은 120msec, 가압력은 4.0kN이었다. 이 사진에서 보는 바와 같이 양극 전극팁이 음극 전극팁보다 마모가 심하다는 것을 알 수 있다.

3.2 펠티에 효과의 발생

알루미늄 합금의 용접시 전극팁으로는 Cu합금을 이용하기 때문에 이종 금속인 Cu와 Al의 접촉 부위에는 펠티에 효과가 나타난다. 참고문헌(10)에 의하면 Cu가 Al에 비해 열전 효과적으로 양극을 나타내기 때문에 직류용접시 전류가 Cu에서 Al로 흐를 때는 펠티에 효과에 의해 Joule 열 이외에 열이 추가로 발생하고, 전류가 Al에서 Cu로 흐를 때는 추가로 열이 감소된다. 각 전극팁에 발생하는 열량은 다음 식으로 표시된다.

양극에서 발생하는 열량 : $Q_{gp}=Q_J+Q_P$ (9)

음극에서 발생하는 열량 : $Q_{gn}=Q_J-Q_p$ (10)

Joule 열 : $Q_J=\int I\cdot U_c\ dt$ (11)

펠티에 열 : $Q_p=\int I\cdot P_{ab}\ dt$ (12)

여기서 I는 용접전류, U_c는 접촉전압, dt는 용접시간을 각각 나타낸다.

식(9), (10), (11), (12)을 이용하면 펠티에 효과에 따른 두 전극간의 열량 차이는 식(13)으로 나타나며, 전체 열량 중 펠티에 효과의 영향은 식(14)으로 간략히 나타낼 수 있다.

$$\Delta Q=Q_{gp}-Q_{gn}=2Q_p \tag{13}$$

$$\frac{Q_p}{Q_{gp}}=\frac{\int I\cdot P_{ab}dt}{\int(I\cdot U_c+I\cdot P_{ab})dt}\fallingdotseq\frac{P_{ab}}{P_{ab}+U_c} \tag{14}$$

3.3 이론적 계산에 의한 열기전력과 펠티에 상수

일반적으로 열전대에서 나타나는 두 금속간의 온도에 따른 열기전력은 이론적으로 다음 식과 같이 표현된다.[11]

$$U_s=a(T_w-T_k)+\frac{b}{2}(T_w-T_k)^2+\frac{c}{3}(T_w-T_k)^3 \tag{15}$$

참고문헌 (11)에 의하면 알루미늄과 구리 사이의 a, b, c의 값은 다음과 같다;

$a=3.193 \cdot 10^{-6}V/K$, $b=0.0095 \cdot 10^{-6}V/K^2$,
$c=0.000030 \cdot 10^{-6}V/K^3$

용접시 냉각수의 온도를 고려하여 전극팁의 온도를 15℃, 알루미늄과 용접부 접촉온도를 500℃로 가정하면 U_s는 식(15)에 의해 3.8mV가 된다.

한편 식(8)은 다시 식(16)으로 표현된다.

$$P_{ab}(T_w)=P_{ab}(T_k)+U_s \qquad (16)$$

참고문헌(11)에 의하면 15.7℃에서 알루미늄과 구리사이의 P_{ab}(15℃)는 0.695mV이었다. 따라서 P_{ab}(500℃)는 4.495mV가 된다.

3.4 열전대를 이용한 열기전력(Us) 측정

식(15)에 의해 계산된 U_s는 순수 알루미늄과 순수 구리의 값을 기본으로 계산하였기 때문에 실제 합금과는 차이가 있다. 따라서 본 실험에서는 용접 시 발생하는 U_s를 구하기 위해 열전대를 이용하여 온도에 따른 U_s를 측정하여 계산된 값과 상호 비교하였다. 열전대는 사용 모재와 동일 함량의 Mg성분(3%)을 가진 알루미늄 선재와 구리 선재를 냉간가압법으로 접합하여 열전대를 만들어 온도에 따른 U_s를 측정하였다. 그림 4에는 식(15)에 의해 구한 U_s와 실제 열전대에서 측정한 값을 상호 비교하여 나타내었다.

용접시 접촉부위의 온도인 500℃에서 측정된 값은 2.14mV로 식(15)에 따른 이론 값 3.80mV보다는 낮은 값을 나타내었다. 이 그림에서 보면 낮은 온도에서는 두 개의 값이 차이를 보이지 않

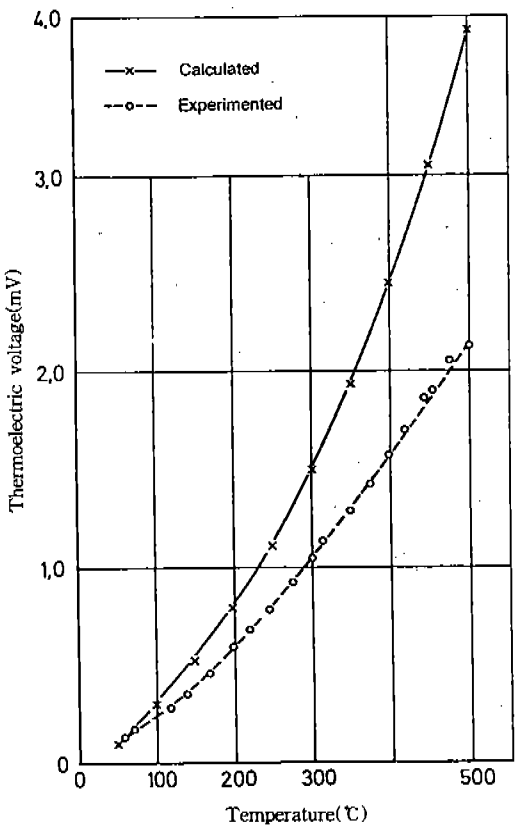


Fig.4 Calculated and measured thermal electromotive force depending on temperature

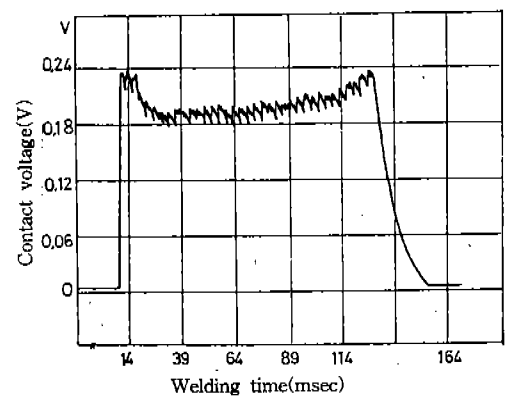


Fig.5 Typical pattern of contact voltage in DC welding

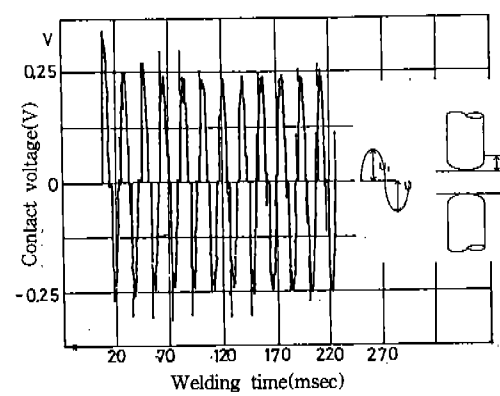


Fig.6 Typical pattern of contact voltage in AC welding

으나, 높은 온도에서는 계산된 값이 높게 나타났다. 이는 식(15)이 순수 알루미늄과 순수 구리에서 적용되기 때문이지만, 또 다른 이유로는 높은 온도에서는 b항과 c항의 영향이 크기 때문이다.

3.5 실제 용접부에서 열기전력 측정

실제 용접부에서 나타나는 U_s를 측정하기 위하여 본 실험에서는 두께 2,0mm인 알루미늄 5154 합금의 판재를 이용하여 교류용접을 하였다. 용접전류는 20kA, 용접시간은 240msec을 사용하였으며, 용접 도중에 상부의 전극팁과 상부의 알루미늄 판재 사이의 전압차를 측정하였다. U_s를 측정하기 위해서는 직류용접 시 발생하는 상부 알루미늄과 상부 전극팁 사이의 전압과 하부 알루미늄과 하부 전극팁 사이의 전압을 동시에 측정하여 상호 비교하는 것이 옳으나, 실제 실험에서는 측정이 불가능하였다. 그 이유는 직류용접 시 그림 5에서 보는 바와 같이 많은 Noise가 발생하여 정확한 측정값을 얻기가 불가능하고, 또한 두 접촉부위의 알루미늄 산화막의 두께가 다르기 때문에 값을 측정하여도 정확한 비교가 안되기 때문이다. 따라서 본 실험에서는 그림 6과 같이 전류의 극성이 변화하는 교류전원을 이용하여 같은 접촉부위에서의 U_s를 측정하였다.

먼저 전류를 전극팁에서 알루미늄 판재로 흘리면서 둘 사이의 전압을 측정하면 전압 U_1은 순수 접촉저항에 따른 전압차(U_{o1})에 열기전력(U_s)이 더해져 나타난다. 이와 반대로 전류가 알루미늄 판재로부터 전극팁으로 흐르면 측정된 전압차 U_2는 U_{o2}에 U_s가 감해져 측정된다. 두 번의 측정은 같은 접촉부위에서 측정하였기 때문에 접촉저항은 동일하며, 이에 따라 접압차 U_{o1}과 U_{o2}는 동일한 값을 가진다. 따라서 두 경우의 전압차를 측정하면 다음 식(17), (18), (19)에 따라 Us가 얻어진다.

$$U_1 = U_{o1} + U_s \tag{17}$$

$$|U_2| = |U_{o2}| - U_s \tag{18}$$

$$U_s = \frac{U_1 - |U_2|}{2} \tag{19}$$

표 1에는 용접 시간 12Cycle에서 이러한 방법에 의해 측정된 전압차를 대표로 나타내었다.

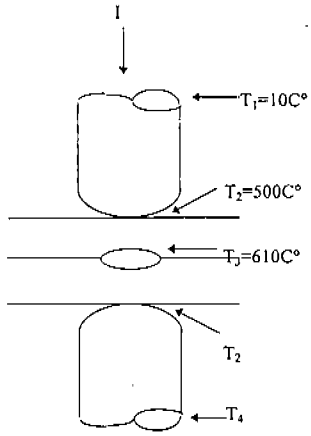
이 표에서 보는 바와 같이 전압차는 용접 첫 Cycle에서 급격히 준 다음, 용접 Cycle이 지나면서 약간 상승한다. 이는 첫 Cycle의 용접 전류에 의해 알루미늄 산화막이 깨어져 접촉저항은 낮아져 전압이 감소하기 때문이다. 한편 용접이 진행됨에 따라 접촉부위의 온도가 상승하고 이에 따라 다시 접촉 저항이 높아지며, 접촉부의 전압도 높아진다. 본 실험에서는 U_s를 용접 후 안정된 상태인 5-6Cycle이 지난 후의 값을 취하였으며, 그 값은 1-5mV이었다.

3.6 실제 용접시 접촉전압 및 전극팁의 온도 측정

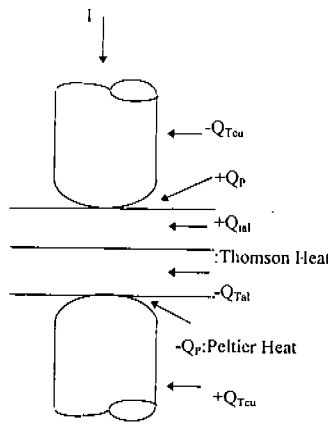
실제 용접시의 펠티에 효과를 평가하기 위해서는 식(14)에서 접촉전압(U_c)과 펠티에 상수(P_{ab})를 결정해야 한다. 먼저 접촉전압을 구하기 위해 2mm 알루미늄 판재를 용접전류 25kA, 용접시간 120msec의 용접조건으로 직류용접을 행하면서 양극 전극팁과 알루미늄 판재 사이의 접촉전압을 측정하였다. 용접시간에 따른 접촉전압의 변화는 앞에서 설명한 그림 5와 같이 얻어졌으며,

Table 1 Voltage drop on contact point between electrode and aluminium plate in AC welding (Welding current 20kA, Welding time 12Cycle)

U_1	349	285	266	247	244	244	245	244	244	250	251	256
U_2	272	275	245	239	238	239	238	235	241	246	247	246
$2U_s$	77	100	21	8	6	5	7	9	3	4	4	10
U_s	38	50	10.5	4	3	2.5	3.5	4.5	1.5	2	2	5



(a) Contact temperature



(b) Thermoelectric heat

Fig.7 Generation of thermoelectric heat in spot welding process of aluminium alloy

동일한 조건에서 3번을 용접한 결과 접촉전압은 평균 211.9mV가 얻어졌다.

앞에서 언급한 바와 같이 펠티에 효과는 접촉부의 온도에 비례하기 때문에 펠티에 효과를 평가하기 위해서는 용접중 접촉부의 온도를 구해야 한다. 이를 위해 본 실험에서는 NiCr-Ni로 구성된 열전대를 이용하여 접촉부의 온도를 측정하였으며, 그 결과 용접이 끝난 직후의 표면 온도는 445-478℃이었다.

따라서 본 논문에서는 접촉부의 온도를 500℃, 전극팁의 냉각수 온도를 15℃로 각각 가정하고 펠티에 효과를 평가하였다.

3.7 용접시 톰슨 효과의 평가

앞 2.2절에서 언급한 바와 같이 온도차가 있는 전도체에 전류를 흘리면 톰슨 효과가 나타난다. 알루미늄 점용접 시에도 각 접촉부위의 온도 차 때문에 톰슨 효과가 나타나며, 이를 고려하여 전극팁의 극성에 따른 손상 현상을 평가하여야 한다. 그림 7에는 용접시 나타나는 펠티에 및 톰슨 효과를 도식적으로 나타내었다.

톰슨 효과에 의해 발생하는 열량은 식(2)을 이용해 계산된다. 이를 위해서는 알루미늄과 구리의 15℃와 500℃ 및 600℃에서의 톰슨 상수(μ_T)가 필요하다. 그러나 참고 문헌에서 얻을 수 있는 μ_T은 27℃와 127℃ 뿐이었다. 따라서 본 논문에서는 이들 값이 온도에 비례한다는 가정하에서 외삽법을 이용하여 15℃, 500℃, 600℃에서의 μ_T 값을 구하여 톰슨 효과를 계산하였다.

이러한 가정하에 양극 전극팁과 음극 전극팁에서의 톰슨 효과를 계산한 결과는 다음과 같다.

양극 전극팁 :

$$Q_{te} = -\frac{(\mu_{500℃} - \mu_{15℃})_{Cu}}{2} \cdot \Delta T \cdot I\ dt$$

$$= -(1.6+5.1)/2 \cdot 485 \cdot I\ dt$$

$$= -1{,}625.8 \cdot I \cdot dt\ (\mu VAsec)$$

양극 판재 :

$$Qtp = \frac{(\mu_{500℃} + \mu_{610℃})_{Al}}{2} \Delta T \cdot I \cdot dt$$

$$= (2.4+2.9)/2 \cdot 110 \cdot I\ dt$$

$$= 291.5\ I\ dt(\mu VAsec)$$

따라서 양극에 발생하는 총 발생열량(Qp)는 다음과 같다 ;

$$Q_p = Q_{te} + Q_{tp} = -1{,}333.3 \cdot Idt(\mu V \cdot A \cdot sec)$$

이 결과를 펠티에 효과와 비교할 때 양극에서 발생하는 톰슨 효과는 오히려 온도를 저하시키는 역할을 한다는 것을 알 수 있다. 이는 다른 금속과 달리 구리의 톰슨 상수는 0℃이상에서는 양수의 부호를 가지기 때문이다.

4. 검 토

알루미늄 합금 판재의 점용접시 발생하는 펠티에 효과를 평가하기 위해서는 앞 3장의 식(14), (15), (16)에서 보는 바와 같이 전극팁과 판재의 접촉부에서의 열기전력 U_s와 펠티에 상수 P_{ab} 및 접촉전압 U_c를 구해야 한다.

본 논문에서는 먼저 U_s를 식(15)를 이용하여 이론값을 계산하였으며, 이를 열전대를 이용하여 실제 온도에서 측정된 U_s와 비교하였다. 또한 실제 용접 시 발생하는 U_s를 측정하기 위해 교류용접을 수행하였다. 그 결과 이론값은 3.8mV, 측정값은 2.14mV, 실제 용접부에서는 0.5-5mV가 얻어졌다. 따라서 펠티에 효과를 평가하기 위한 U_s는 각 값의 중간값인 3.8mV를 가정하였다. 이를 식(16)에 대입하면 접촉부의 P_{ab}는 4.50mV가 된다. 한편 식(14)의 접촉전압 U_c는 용접실험에서 약 211.9mV 가 측정되었다.

접촉전압 U_c(211.9mV)와 펠티에 상수(4.50mV)를 식(14)에 대입하여 구한 펠티에 효과의 영향은 전체 발생 열량의 약 2%정도이었으며, 양극과 음극의 차이도 약 4%정도에 불과하였다. 따라서 알루미늄 합금의 점용접에서 전극팁의 극성에 따른 표면의 손상 현상을 단순히 펠티에 효과만으로 설명하기에는 불충분하다는 것을 알 수 있다. 또한 용접 시 발생하는 톰슨 효과는 오히려 펠티에 효과를 감소시키는 역할을 하였다.

이러한 결과는 기 보고된 논문들과는 차이를 보이고 있다. Hasir는 아연 도금 강판의 용접 시 양극과 음극의 열량 차이는 약 15%에 달하며, 이러한 차이에 의해 전극팁의 수명이 달라진다고 보고하였다. 이와 같은 본 실험의 결과와 Hasir 및 기타 발표된 논문의 차이는 사용한 용접전류의 크기 때문으로 판단된다. 앞에서 설명한 바와 같이 Joule열은 전류의 제곱에 비례하는 반면에 펠티에 효과는 단순히 전류에 비례하기 때문에 용접전류가 높을수록 펠티에 효과는 적어진다. 즉, 알루미늄 합금의 용접에는 약 20-30kA의 용접전류가 필요하나, Hasir경우는 3.6kA의 용접전류를 사용하였다. 따라서 높은 전류를 사용하는 알루미늄 용접에서는 펠티에 효과가 낮게 나타난 것으로 판단된다.

4.1 Kohler 이론

전류 극성에 따라 전기 접촉부의 손상이 차이나는 현상은 점용접 뿐만 아니라 전기스위치의 접점의 손상에서도 관찰되었다. Justi 등은 Zn으로 만들어진 전기스위치에서 양극 접점은 뾰족한 형태의 손상이 발생하며, 음극은 분화구 형태로 손상된다는 것을 발표하였다. 이는 음극의 물질이 접점 동작시 양극으로 이동되어 나타나는 현상 때문이며, 그 원인을 양극과 음극의 온도차로 설명하였다. Justi는 이러한 온도차를 "Kohler 이론"을 이용하여 설명하였다.[12)]

앞에서 설명한 바와 같이 단순히 펠티에 효과만으로는 알루미늄 점용접시 나타나는 전류 극성에 따른 전극팁의 손상 현상을 충분히 설명하지 못하여 본 논문에서는 전류 극성에 따른 접촉부의 온도 차이를 설명하는 Kohler 이론을 이용하여 손상 현상을 검토하였다.

일반적으로 금속의 표면은 항상 매우 얇은 산화막으로 덮여 있으며, 금속을 접촉시켜 전류를 흘리면 산화막이 깨어져 순수 금속간의 접촉부위로 전류가 흐르며 접촉저항에 따라 접촉전압(U_c)이 발생한다. 그러나 산화막의 두께가 매우 얇은 경우에는 전자가 산화막을 쉽게 통과하여 이동할 수 있으며, 이를 "Tunnel 효과"라 한다. 음극의 전자가 그림 8과 같이 산화막으로 단절된 음극면에서 양극 면으로 흐르면 에너지 균형을 위해

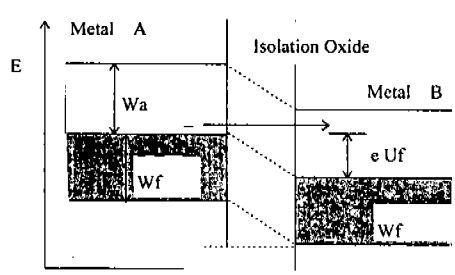


Fig.8 A model of contact interface in spot welding of aluminium alloy(Wf : Fermi energy, Wa : Excitation energy, Uf : Surface voltage)

전자는 자기가 가진 에너지를 방출한다. 이 경우 음극 면에서의 전자에너지(E_n) 와 양극 면에서의 에너지(E_p)는 다음 식으로 표시되며, 방출되는 에너지는 $e \cdot U_f$로 나타난다.

$$E_p = E_n + e \cdot U_f \tag{24}$$

여기서 U_f는 산화막 양면에서의 전압(표면전압, "Surface Voltage")을 나타낸다.

알루미늄 합금은 산소와의 친화성이 매우 좋기 때문에 두꺼운 산화막이 깨어져도 짧은 시간 내에 새로운 얇은 산화막을 형성한다. 따라서 알루미늄 합금의 점 용접시에도 Tunnel 효과가 나타날 수 있다.

Justis는 Kohler 이론을 표면전압 U_f를 고려한 접촉부의 양극과 음극의 온도 관계식(25) 및 (26)을 유도하였다.[13]

$$T_p^2 - T_o^2 = \frac{(U_c^2 - U_f^2)}{4L} + \frac{U_f^2 + \left(1 - \frac{U_f}{U_c}\right)}{2L} \tag{25}$$

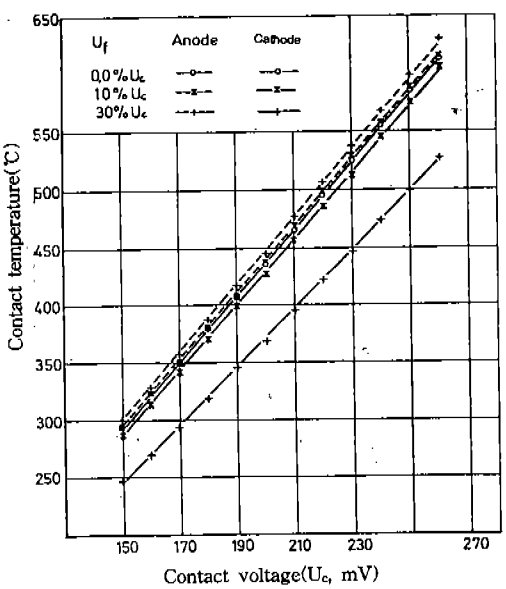


Fig.9 Contact temperature depending on surface voltage(U_f)

$$T_n^2 - T_o^2 = \frac{(U_c^2 - U_f^2)}{4L} - \frac{U_f^2 + (1 - \frac{U_f}{U_c})}{2L} \tag{26}$$

여기서 각각은 다음을 나타낸다 ;

T_p=양극의 표면 온도, T_n=음극의 표면 온도,

T_o=상온, U_c=전체 접촉전압,

U_f=산화막 양단간의 표면전압,

L=Lorentz constant, 약 $2.4 \cdot 10^{-8}$(V/K)

이 식은 동일한 접촉부위에서 양면을 기준으로 유도한 것으로 실제 알루미늄 합금의 점용접과 비교하면 두 전극팁 중 양극에서는 구리 전극팁의 표면온도는 T_p가 되며, 알루미늄 판재의 표면온도는 T_n이 된다. 한편 음극 전극팁에서는 알루미늄판재의 온도가 T_p이며, 전극팁의 온도는 T_n이 된다. 또한 두 극 사이의 온도차이는 전체 접촉전압차에서 산화막에 의한 표면전압차의 분율에 비례함을 알 수 있다. 그림 9에는 전체 접촉전압 중 표면전압 U_f의 분율에 따른 양극 전극팁과 음극 전극팁의 온도 차를 나타내었다.

예를 들어 알루미늄 합금의 용접시 접촉부 표면온도 500℃에서 표면전압 U_f가 전체 접촉전압의 30%를 차지하는 경우 식(25), (26)에서 양극은 511℃, 음극은 425℃를 나타낸다. 즉, 양쪽 전극팁의 온도 차이는 84K로 약 17%차이를 보이고 있으며, 이러한 차이는 전극팁 수명에 충분히 영향을 줄 수 있다. 또한 펠티에 효과를 나타내는 식(14), (15)와 식(25), (26)을 비교하면 펠티에 효과는 높은 온도에서의 영향이 크기 때문에 용접 후반부에서 중요하나, Kohler 효과는 온도에 관계없이 접촉전압과 산화막에 의한 표면전압의 상대 값에 비례하기 때문에 용접 초기 단계부터 전극팁의 발열에 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

따라서 알루미늄 점용접에서 나타나는 전류 극성에 따른 전극팁의 손상 현상은 지금까지 발표된 펠티에 효과와 더불어 Kohler 효과도 상당한 영향을 미칠 수 있다고 판단된다.

5. 결 론

본 논문에서는 알루미늄의 점용접에서 발생하는 용접전류의 극성에 따른 전극팁의 손상 현상을 규명하기 위해 여러 종류의 열전 효과에 대해 검토하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 지금까지 알려진 바와 달리 펠티에 효과는 전체 발생 열에 2% 정도의 영향만 미쳐 용접전류의 극성에 따른 전극팁의 손상 현상을 설명하기는 불충분하였다.
2) 용접시 펠티에 효과이외에 톰슨 효과도 고려되어야하며 구리전극팁에서 나타나는 톰슨 효과는 펠티에 효과와 반대의 영향을 미친다.
3) 용접전류의 극성에 따른 손상현상을 설명하기 위해 Kohler 효과를 검토하였으며, 알루미늄의 산소와의 친화성을 고려할 때 전극팁의 손상에 상당한 영향을 미칠 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. AWS Welding Handbook vol. 3, 8th edition, 1996.
2. R.M. Rivett and S.A. Westgate, "Resistance welding of aluminium alloys in mass production", Metal const., Vol. 12, pp. 510~517, 1980.
3. F.R. Hoch, "Joining of aluminium alloys 6009/6010", SAE Paper 780396, 1978.
4. F. Eichhorn, M. Emonts und B. Leuschen, "Widerstandspunktschweissen tiefzieffaehigeger Al-Werkstoffe", Baeder, Bleche, Rohre, Vol. 21, pp. 464~468, 1980.
5. W. Dilay, E.A. Rogala and E.J. Zubinski, "Resistance welding aluminium for automotive production", SAE Paper 77030, 1977.
6. W.F. Hess, F.J. Winsor and R.A. Wyant, "The spot welding of multiple thicknesses of 0.040 In. Alclad 24s-T", Wdg. J. Res. Suppl., pp. 413s~424s, 1946.
7. T.C. Balder, "Der Einfluss des Peltier-Effects auf das Widerstandsschweissen", Ingenieur Digest, Vol. 5, pp. 31~33, 1963.
8. M. Hasir, "Untersuchungen zum Schweissverhalten von Wolfram- und Moly-baen- Einsatzelektroden beim Widerstandspunktschweissen von elektrolytisch verzinntem Feinst- blech", Fortschritt-Berichte der VDI-Zeitschriften, 1982.
9. C.R. Barrett, W.D. Nix and A.S. Tetelman, The Principles of Engineering Materials, 1973.
10. Bergmann und Schaefer, Lehrbuch der Experimentalphysik, Band II, Verlag de Gruyter, 1971.
11. Handbuch der Experimentalphysik, band IV, Akademische Verlagsgesellschaft M.B.U. Leipzig, 1985.
12. E. Justi und H.Schultz, Neue Versuche zur Deutung der Feinwanderung in electrischen Abhebekontakten, Anhand. der Braunschweig Wiss. Gesellschaft, Vol. 1, pp. 89~100, 1949.