

<論 文>

알루미늄 합금의 저항 점 용접시 용접너깃의 형성에 대한 연구

나 석 주* · 오 세 진**

(1986년 4월 22일 접수)

A Study on the Weld Nugget Formation in Resistance Spot Welding of Aluminum Alloy

Suck Joo Na and Sei Jin Oh

Key Words; Resistance Spot Welding(저항점 용접), Weld Nugget(용접너깃), Aluminum Alloy (알루미늄 합금), Contact Resistance(접촉저항), Temperature Distribution(온도 분포), FEM(유한요소법)

Abstract

In this study, the resistance spot welding process of an aluminum alloy was analyzed through the numerical simulation including the electric contact resistance and the heat generation in the electrode. The finite element model was used to solve the electro-thermal responses in weld cycles. The resistance of the contact area was represented as the contact element modelling, but the thermal resistance between the contact surfaces was neglected.

Welding tests of Alclad 2024-T3 aluminum alloy were made not only to get the input data for the numerical simulation, but also to compare the numerical results. The contact resistance was determined initially by the contact resistance tests and assumed to decay exponentially up to the solidus temperature. The temperature distributions and dynamic resistance obtained numerically were in good agreement with the experimental results.

Numerical results revealed that nugget growth depends mainly on the heat generated in the workpiece and its contact area. The heat generated in the electrode has, however, only a little effect on the nugget growth, and the heat generation in the electrode-workpiece interface is initially high but decreases rapidly.

1. 서 론

저항 점 용접은 용접하려고 하는 재료를 전극사이에

놓고 하중을 가한 상태에서 높은 전류를 흐르게 할 때 두 재료의 접촉부에서 전기적 저항에 의해 발생하는 열에 의해서 모재가 응용하여 접합하는 용접방법으로서, Fig. 1, 용접시간이 짧아 작업 속도가 빠르고 자동화가 용이하여 대량생산에 적합한 이점 때문에 불트나

* 정희원, 한국과학기술원 생산공학과

** 정희원, 대전기계창

리벳 체결 방법을 대신하여 산업분야에 널리 사용되고 있다⁽¹⁻³⁾.

특히 알루미늄 합금의 저항 점 용접은 1940년 이후 항공공업의 발달로 인해서 널리 이용되어 왔고, 1970년대 오일충격 이후에는 자동차 산업에서 차량의 경량화로 인한 연료 절약책으로 많은 연구가 진행되어 왔다⁽⁴⁻⁸⁾. 알루미늄 합금은 높은 전기전도도를 갖고 있어 강용접시 보다 약 2.5배의 높은 전류와 짧은 용접시간이 요구되며, 소성변형이 용이하여 표면의 지나친 압입(indentation) 등에 의한 불량 발생하기 쉽다. 알루미늄의 높은 열전도도로 인하여 냉각시 균열이나 기공이 발생하기 용이하며, 알루미늄 합금표면의 산화물은 용접과 전기적 저항이 매우 높은데, 한 판재에서도 위치에 따라 그 특성이 다양하기 때문에 균일한 품질의 용접부를 얻는 것이 문제시 될 수도 있다. 또한 알루미늄은 전극의 재질인 동과의 친화성이 좋아 모재 표면이나 전극의 표면이 매끄럽지 않을 경우 접촉저항에 의한 발생열로 쉽게 반응하여 $CuAl_2$ 의 copper-aluminate를 형성하여 전극의 마멸을 촉진시킨다⁽⁸⁾.

저항 점 용접시 온도분포에 대한 연구는 용접변수인 전류, 용접시간, 전극압력과 모재의 특성 등이 용접현상에 미치는 영향을 규명하기 위해서, 전류나 용접시간을 통해서 용접공정을 제어하기 위해서, 혹은 용접 후 용접부에 생성되는 잔류응력을 해석하기 위해서 수행되어왔다⁽⁹⁻¹³⁾. 지금까지의 연구는 대부분 강에 대한 것이고, 따라서 접촉저항의 가정에서나 용접과정중 전극에서의 내부 발생열을 취급하는데 있어서 모재와 전극의 열 및 전기전도도가 유사한 알루미늄의 저항점 용접공정 해석과는 근본적인 차이점이 존재하고 있다. 따라서 본 연구에서는 전기적 접촉저항, 전극의 내부

발생열 등을 고려한 수치적 상사화(numerical simulation)를 통하여 알루미늄 합금의 저항 점 용접이 진행되는 동안의 용융부의 성장과정과 모재, 전극 및 접촉부에서의 발생열의 변화과정을 규명하고자 한다.

2. 모재와 전극에서의 전위 및 온도분포

2.1 접촉저항

두 개의 순수한 금속이 접촉하면 각 금속표면의 돌출부가 먼저 접촉하며, 적은 하중에서도 극부적인 압력은 매우 크게 되므로 소성변형이 발생하게 되고, 이들 접촉점에 의해서 전류가 흐르게 되는데, 이때 전류의 집중으로 인하여 발생하는 저항을 수축저항(constriction resistance)이라 한다. 또한 모든 금속의 표면은 대기중에서 절연체인 각종 불순물(산화층, 먼지등)에 의해서 덮혀 있으며, 이들에 의해서 발생하는 저항을 표면저항(surface resistance)이라 하는데, 접촉저항은 수축저항 성분과 표면저항 성분으로 구성된다^(14,15).

온도가 증가함에 따라 불순물이 접촉점에서부터 제거될 것이고, 금속이 softening 온도를 넘게 되면 접촉점들이 무더져서 접촉면적이 증가하게 되고, 그 결과 전류의 수축을 감소시키기 때문에 접촉저항은 접촉부의 온도에 크게 의존한다고 볼 수 있다. A.L. Tslaf는 접촉부에서의 수축저항 성분만을 고려하여 접촉저항 R_c 를 다음 식으로 나타내었다.

$$R_c = \beta \sqrt{\frac{H(T)}{H(T_\infty)}} R_\infty \quad (1)$$

- 여기서 β : 접촉저항의 보정합수
- $H(T)$: 온도 T 에서의 경도
- $H(T_\infty)$: 상온에서의 경도
- R_∞ : 상온에서의 접촉저항

위의 관계식은 강등의 저항 점 용접에 대해서는 비교적 적합한 것으로 증명되어 왔으나, 알루미늄 합금의 경우처럼 표면 산화물에 의한 표면 저항을 무시할 수 없는 경우에 대해서는 적용하기가 어렵다. 실제로 1~1.5 mm 두께의 알루미늄 합금을 저항 점 용접할 때 발생하는 표면저항은 수축저항의 1.2~1.8배에 달한다는 연구결과도 보고되고 있다⁽¹⁷⁾.

본 연구에서는 W. Rice 등⁽¹⁶⁾과 D.V. Lindh 등⁽¹¹⁾이 제안한 접촉저항과 온도와의 관계식을 적용하였고, 이에 대한 타당성을 조사하기 위해서 동저항(dynamic resistance)의 측정치와 계산결과를 비교 검토하였다. W. Rice 등은 반도체제작에 사용되는 합금인 얇은 Kovar, Ni 과 스테인리스강들을 저항 점 용접하는데 있어서 접촉저항이 온도의 지수함수적으로 감소한다고

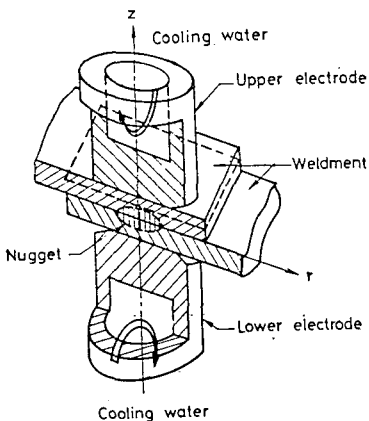


Fig. 1 Schematic diagram of the resistance spot welding

하여 온도 T 에서의 접촉저항 R_c 에 대해서 다음과 같은 실험식을 제안하였다.

$$R_c = a \cdot e^{-b \cdot (T - T_i)} + c \quad (2)$$

여기서 a, b, c 는 재료에 따라서 결정되는 상수이고 T_i 는 모재의 초기온도이다. 먼저 a, b, c 에 대해서 적당한 값들을 가정한 다음 유한요소해석에 의해서 계산되는 등 저항의 변화를 측정된 값과 비교하여 그 오차가 충분히 적게 되는 때의 a, b, c 값을 사용된 재료에 대한 상수로 결정하였다. 이렇게 하여 결정된 접촉 저항과 온도와의 관계를 모재와 모재(σ_{w-w}), 모재와 전극(σ_{el-w})에 대해서 Fig. 2에 도시하였다. 접촉저항은 접촉부의 온도가 모재의 응고온도(solidus temperature)에 도달할 때까지는 지수적으로 감소하고, 응고온도 이상에서는 온도증가에 따라 직선적으로 감소하며, 용융 온도(liquidus temperature) 이상에서는 모재의 저항과 동일하다고 가정하였다.

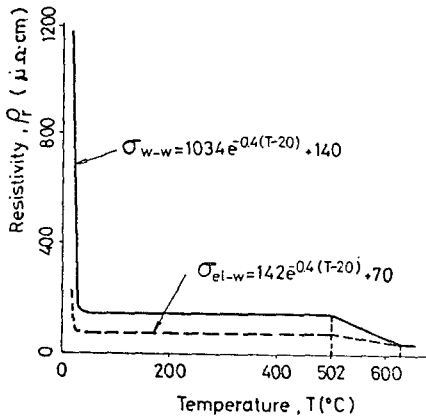


Fig. 2 Electrical resistivity as a function of temperature for the contact interface

2.2 전위장과 열발생

저항 점용접에서 용접열은 Joule effect에 의해 발생하게 되며, 모재 및 전극의 체적저항(bulk resistance)과 접촉면에서의 접촉저항에 의한 열발생이 있으며 단위부피당 발생되는 열 E 는 다음과 같다.

$$E = \sigma \cdot J^2 = \frac{1}{\sigma} (\nabla \phi)^2 \quad (3)$$

여기서 σ : 물질의 전기적 비저항($\Omega \cdot \text{cm}$)

J : 단위면적당의 전류(A/cm^2)

ϕ : 전위(V)

따라서 온도분포를 알기 위해서는 먼저 전위분포를 결정하여야 하는데, 전위분포는 다음과 같은 quasi-Laplace 방정식으로 표시된다.⁽¹²⁾

$$\nabla \left(\frac{1}{\sigma} \cdot \nabla \phi \right) = 0 \quad (4)$$

여기서 재료의 전기적 비저항은 온도의 함수이므로 온도가 계산되면 이에따라 새로운 값의 전기적 비저항을 대입하여야 한다. 저항 점 용접에서는 대부분 원통형 전극이 모재와 접촉하고 있으므로 식 (4)를 축대칭 원통좌표계에 대해서 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{\sigma} \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r\sigma} \left(\frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\sigma} \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) = 0 \quad (5)$$

식 (5)로부터 전위분포를 구하기 위해서는 다음과 같은 가정을 하였다.

- (1) 전극과 모재간의 접촉면적은 공칭접촉면적과 동일하다.
 - (2) 모재간의 접촉면적은 공칭접촉면적의 약 1.2배이다.⁽¹⁸⁾
- 위와같은 가정으로부터의 경계조건은 다음과 같다(Fig. 3).

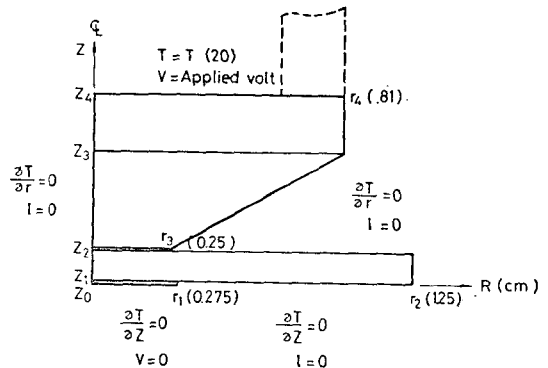


Fig. 3 Simple model and boundary conditions

$$\phi = V \text{ for } z = z_4, 0 \leq r \leq r_4$$

$$\phi = 0 \text{ for } z = 0, 0 \leq r \leq r_1$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial r} = 0 \text{ for } r = 0 \quad (6)$$

그밖의 경계면은 전기적으로 절연되어 있다고 가정하였다.

2.3 온도분포의 해석

알루미늄 저항 점 용접시 전극을 통해 전류가 흐를 때, 모재 및 모재간의 접촉면에서 발생하는 열에 의한 모재의 온도증가는 용융부를 성장시키고, 전극의 접촉면과 전극에서 발생하는 열은 모재의 열이 수냉작용에 의해서 전극을 통해서 유출되는 것을 방지하며 용융부의 성장을 반경방향으로 촉진시킨다. 또한 이 발생된

열로 인한 전극과 용접물 사이의 접촉면 온도 증가는 알루미늄과 전극과의 반응을 촉진시켜서 전극의 마멸을 증가시킴으로서 전극수명 감소의 원인이 된다. 이와같은 용접중의 열전도 현상을 나타내는 방정식은 다음과 같다.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \cdot \nabla T) + 0.24 E \quad (7)$$

여기서 T : 온도($^{\circ}\text{C}$)

ρ : 재료의 밀도(g/cm^3)

c : 비열($\text{cal}/\text{g} \cdot ^{\circ}\text{C}$)

k : 열전도도($\text{cal}/\text{cm} \cdot \text{s} \cdot ^{\circ}\text{C}$)

저항 점 용접을 해석하기 위해서 식 (7)을 축대칭 원통 좌표계에 대해서 정리하면 다음과 같다.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left(k \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{k}{r} \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + 0.24 E \quad (8)$$

윗식에 E 는 식 (3)에서 구해지는 저항열이며 식 (8)로부터 용접과정의 온도분포를 구하기 위해서 다음과 같이 가정하였다.

(1) 접촉면의 열저항은 없다.

(2) 공기와 접촉 면에서의 열의 유출은 무시할 수 있다.

위와 같은 가정으로부터 경계조건은 다음과 같다(Fig. 3).

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial r} &= 0 \text{ for } r=0 \\ -k \frac{\partial T}{\partial z} &= h_w (T - T_{\infty}) \text{ for } z=z_1 \\ \frac{\partial T}{\partial z} &= 0 \text{ for } z=0 \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 h_w : 냉각수에 의한 열대류 상수($\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot ^{\circ}\text{C}$)

T_{∞} : 냉각수의 온도= 20°C

2.4 전위 및 열전도 방정식의 유한요소식

저항 점 용접과정은 전극의 가압(squeeze), 용접(welding), 유지(holding)의 단계로 진행된다. 본 연구에서는 가압시의 탄소성 변형으로 인한 접촉 면적의 변화 및 온도상승에 따른 열변형을 무시하고 전위차에 의한 온도상승 및 냉각만을 고려하였으며, 전위장과 온도장의 해석에 유한요소법을 적용하였다. 따라서 전위장을 나타내는 식 (4)와 온도변화를 표시하는 식 (7)의 형태를 비교해 보면 식 (4)는 식 (7)에서 $\left(\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - 0.24 E \right)$ 가 0이 되는 특수한 경우라고 볼 수 있으므로, 전체적인 유한요소식을 식 (7)을 근거로 하여 작성하면 식 (4)의 해석에도 그대로 응용할 수 있다.

식 (7)을 유한요소법에 의해서 정리하면 다음과 같은 n 노드의 평형방정식을 얻는다⁽¹⁹⁾.

$$C_t T_t + K_t T_t = Q_t \quad (10)$$

여기서 C_t : 시간 t 에서의 열용량 행렬($n \times n$)

K_t : 시간 t 에서의 열전도 행렬($n \times n$)

T_t : 시간 t 에서 노드점의 온도벡터($n \times 1$)

T_t : 시간 t 에서 온도의 시간에 대한 변화벡터($n \times 1$)

Q_t : 시간 t 에서 외부에서 공급되는 열 플럭스 벡터($n \times 1$)

단계적 적분(step-by-step integration)법을 사용하여 윗식을 정리하면 다음과 같은 결과식을 얻게 된다.

$$K_t^* T_{t+\Delta t} = Q_{t+\Delta t}^* \quad (11)$$

여기서 $K_t^* = \frac{1}{\Delta t} C_t + K_t$

$$Q_{t+\Delta t}^* = Q_{t+\Delta t} + \frac{1}{\Delta t} C_t T_t$$

$T_{t+\Delta t}$: $t + \Delta t$ 에서의 노드점의 온도벡터

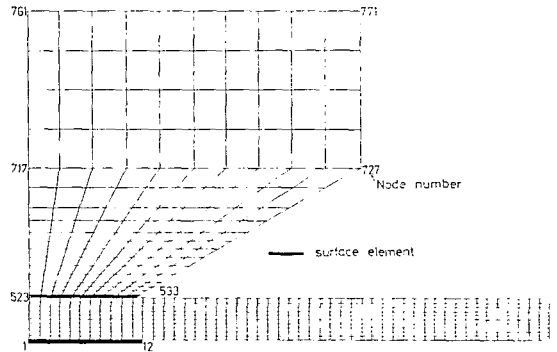


Fig. 4 Mesh generation of the solution domain

위의 적분방법은 초기치 문제에 대해서는 무조건 안정하였으며, 따라서 저항 점 용접공정을 해석하기 위해서 기존의 열전달 프로그램을 본 논문에서 적합하게 수정하였다⁽²⁰⁾.

모재, 전극 및 접촉부는 Fig. 4와 같이 모델링하였고, 접촉비저항은 단위면적당의 비저항이나, 본 연구에서는 접촉요소로 처리하기 위해서 물질의 체적비저항으로 환산하였으며, 초기저항은 측정실험을 통하여 결정하였다. 또한 용접물간의 접촉요소가 갖는 열적성질(비열, 밀도, 열전도도)은 모재의 성질과 동일하고, 전극과의 접촉요소는 전극과 동일한 성질을 갖는 것으로 가정하였다. 전체 노드는 771개로서, 모재의 접촉부는 11개의 요소로, 모재는 500개의 요소로, 전극과 모재의 접촉부는 10개의 요소로 나누었고 전극은 170

개의 요소로 세분하여 계산하였다.

모재의 상변태에 수반되는 잠열의 효과는 용융범위에서의 비열을 증가시킴으로써 고려하였다. 즉 응고온도와 용융온도구간에서의 비열 c_L 은 다음과 같이 정의되었다.

$$c_L = \frac{H_L}{T_L - T_S} + c_s \quad (12)$$

여기서 H_L : 용융잠열 (cal/g)

T_L : 용융온도 (°C)

T_S : 응고온도 (°C)

c_s : 응고온도에서의 고체가 갖는 비열 (cal/g·°C)

3. 실험

본 실험의 목적은 저항 점 용접공정을 수치적으로 해석하는데 필요한 모재와 모재 사이의 초기 접촉저항과 모재와 전극 사이의 초기접촉 저항을 구하고, 동저항과 용접부 금속조직의 변화를 관찰하여 수치해석 방법의 정확도를 확인하는데 있다.

3.1 실험장치 및 실험재료

본 실험에 사용된 용접기는 air spot welding M/C으로 용량은 50 kVA 이고 허용되는 최대전류는 18,000 A이다. 용접중의 저항, 전류, 전압등을 weld checker를 사용하여 측정하였으며, 위의 용접변수들이 시간에 따라 변화하는 과정을 기록하기 위해서 weld checker의 뒷면에 있는 단자들에 oscilloscope를 연결하여 측

Table 1 Electrical properties of material

(a) 0.5% Cr-Copper : electrode

Temp (°C)	Resistivity ($\mu\Omega \cdot \text{cm}$)
20	2.1
250	4.3
450	5.5
1000	10.6

(b) Alclad 2024-T3 : workpiece

Temp (°C)	Resistivity ($\mu\Omega \cdot \text{cm}$)
20	5.75
352	9.40
502	12.60
638	24.69
1000	24.69

Table 2 Thermal properties of material

(a) 0.5% Cr-Copper : electrode

Temp (°C)	Conductivity (cal/cm sec°C)	Specific Heat (cal/g°C)	Density (g/cm ³)
20	0.825	.102	8.96
150	0.75	.103	8.89
260	0.74	.105	8.84
375	0.775	.106	8.78
1000	0.615	.113	8.46

(b) Alclad 2024-T3 : workpiece

Temp (°C)	Conductivity (cal/cm sec°C)	Specific Heat (cal/g°C)	Density (g/cm ³)
20	.29	.22	2.77
97	.325	.23	2.75
207	.41	.244	2.729
252	.435	.249	2.72
317	.45	.258	2.708
427	.415	.28	2.685
502	.365	.318	2.67
638	.233	.259	2.67
1000	.260	.259	2.635

* Latent Heat=92cal/g

정되는 값들을 diskette에 저장하였다.

전극은 알루미늄 합금의 저항 점 용접에 적합한 RW MA class II와 재질이 유사한 크롬-동봉을 가공하여 테이퍼각 30°, 접촉부의 직경은 5 mm를 유지하였고, 전극끝에서 냉각수면까지의 거리는 AWS에서 추천한 7 mm로 하였다. 실험에 사용된 재료는 항공기 등의 제작에 널리 쓰이는 Alclad 2024-T3로서, 수치해석 모델과 동일한 조건을 얻기 위해서 두께가 1mm, 직경이 25 mm가 되도록 시편을 가공하였다. 모재와 전극의 온도에 따른 물성치는 기 발표된 자료⁽²¹⁾를 참고하였고, 자료에 누락된 부분은 외삽법을 사용하여 구하였다. 용융상태의 물성치는 혼합법칙을 적용하여 각각의 성분이 갖는 물성치에 구성비를 곱하여 구하였으며 Alclad 층이 나타내는 물성치의 차이는 고려하지 않았다. 이와 같이 하여 채택된 전극과 용접물의 전기적, 열적성질을 Table 1과 2에 나타내었다.

3.2 실험방법

알루미늄 합금은 대기 중에서 쉽게 산화되어 표면저항이 매우 크기 때문에 저항 점 용접시 모재의 표면상태는 용접성과 신뢰성에 큰 영향을 미친다. 균일한 용

접부의 표면을 얻기 위해서, 모든 시편을 12% 질산, 0.4% HF의 증류수 용액에 30초간 담근 다음 물로 세척하여 건조시킨후 Freon-TF로 degreasing 한 것을 곧 용접하였다.

접촉 저항의 초기치를 결정하기 위해서는 용접시의 조건과 동일하게 전극가압 240 kgf, 초기가압 0.5 초, 유지시간 1 초, 용접시간 1 사이클로 하고, 시편의 온도상승을 극소화하기 위해서 전류는 제일 낮게 조절하여 각각 30 회씩 실험하였다. 먼저 시편 한장만을 전극 사이에 놓고 전체저항을 구하여 전극과 모재 사이의 접촉저항을 결정하고, 다음에는 시편 두장을 포개 놓고 전체저항을 구하여 모재와 모재 사이의 접촉저항을 구하였다(Fig. 5). 30 개의 측정값을 평균한 결과 전극과 모재 사이의 초기접촉저항 $R_{el-w} = 21.62 \times 10^{-6} \Omega$ 이었으며, 모재와 모재 사이의 초기접촉저항 $R_{w-w} = 98.84 \times 10^{-6} \Omega$ 의 결과를 얻었다.

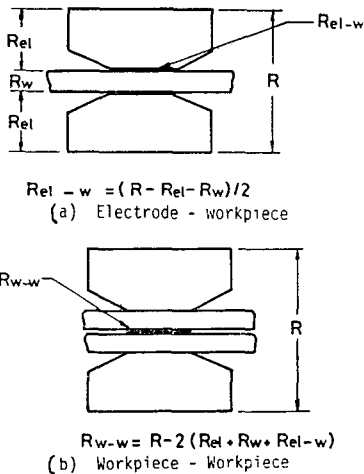


Fig. 5 Specimen configuration for the measurement of initial contact resistances

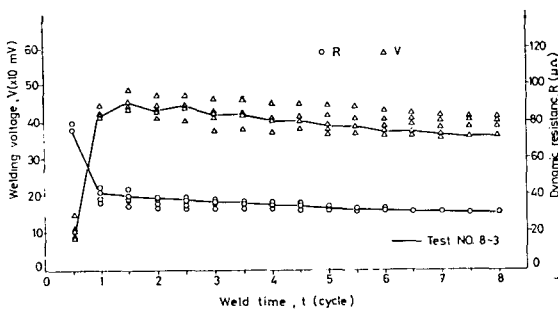


Fig. 6 Test results of the welding voltage and dynamic resistance

Fig. 6에는 알루미늄 합금의 저항 점 용접시 발생하는 전압과 저항의 변화를 용접시간에 대해서 나타내었는데 전압과 저항의 값이 용접초기에는 비교적 넓게 분포되어 있고, 용접이 진행되면서 일정한 크기에 접근하는 경향을 보이고 있다. 이것은 알루미늄 합금의 경우에는 초기의 접촉저항이 일정치 않은 각 시편의 표면상태에 의해서 결정되기 때문이라 여겨지며 각 경우 초기 반 사이클의 측정치 대부분이 이미 saturation 된 상태이었다. Fig. 7은 용접시간이 지남에 따라 용융부가 형성되는 과정을 보기 위해서 각기 다른 용접시간에 대해서 용접부의 단면을 예칭하여 관찰한 사진인데, 동일한 용접시간, 가압, 전류에서도 용접부의 형상이 다르게 나타날 수 있고, 용접 너깃(nugget)은 4 사이클에서부터 생성되기 시작하였으며, 균열과 기공이 발생할 수 있음을 알 수 있다. 양 표면에 하얗게 나타난 부분은 Alclad된 재질을 나타내고, 이 부분이 용융온도 이상으로 가열되면 이 재질이 너깃에 용해되거나 Alclad의 용융온도에 이르지 못하면 그대로 남아서 너깃의 양쪽에 침투된 하얀 선으로 보이고 있다.

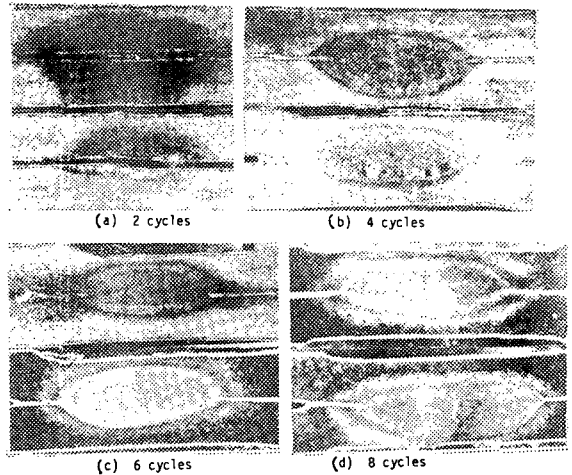


Fig. 7 Macrostructure of the resistance spot welded Alclad 2024-T3, thickness=1mm, 5X, Etch : Tucker's reagent

4. 결과 및 고찰

Fig. 8은 전극 압력을 240 kgf로 놓고 전류조정 스위치를 16 kA로 고정시킨 후 용접시간을 4, 6, 8 사이클로 변화하면서 행한 실험결과와 계산결과를 비교한 것이다. 4 사이클과 6 사이클 용접한 너깃은 수치해석시에

좀 더 크게 나타나고 있고, 8 사이클에서는 수치해석의 결과가 두께 방향으로는 실험치보다 작고, 반경방향으로는 조금 더 크게 나타나고 있으나 전체적으로 보아서, 유한요소법에 의한 해석결과는 실험 결과와 상당히 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. Fig. 9는 모재와 모재, 모재와 전극 사이의 접촉저항이 Fig. 2에서와 같은 온도의 함수로 표시된다고 가정하였을 때 계산되는 등저항과 실험에서 측정된 등저항과를 비교한 것이다. 용접초기에는 약간의 차이가 있으나 두 결과가 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있으며, 따라서 Fig. 8과 Fig. 9의 비교에서 앞에서 가정한 접촉저항과 온도와의 관계가 매우 타당함을 보여주고 있다.

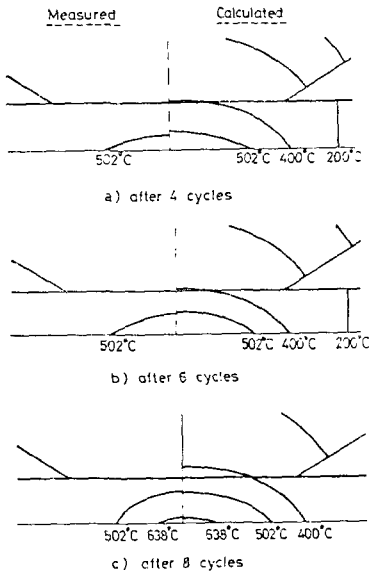


Fig. 8 Measured and calculated isothermal lines, Electrode force=240kgf, Set current=16,000A

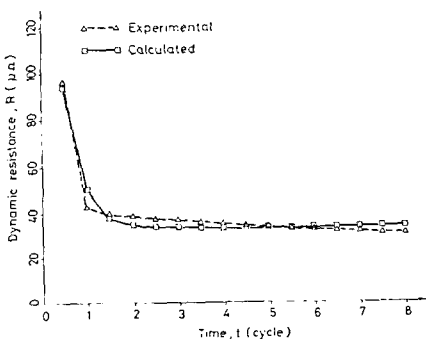


Fig. 9 Change of the measured and calculated dynamic resistance

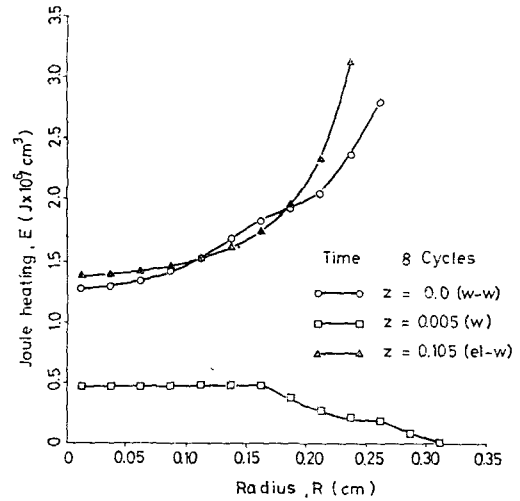


Fig. 10 Calculated joule heating versus radius at various positions

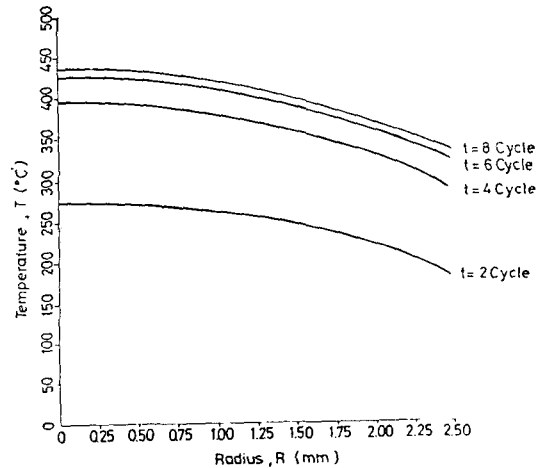


Fig. 11 Calculated temperature distribution at the electrode contact interface for various welding time

Fig. 10은 모재간의 접촉면, 모재, 모재와 전극간의 접촉면에서 발생하는 단위 부피당의 저항열을 반경에 대해서 도시한 것이다. 모재에서의 발열은 반경이 0.16 cm 되는 곳에서 최대가 되고 그보다 더 큰 반경에서는 점차 감소하고 있으나, 접촉면에서는 중심에서 멀어질수록 발열량이 증가하고 있음을 알 수 있다. 특히 용접이 완료되는 8 사이클에서는 전극과 모재와의 접촉면에서 제일 많은 열이 발생하고 있는데, 이것은 모재간의 접촉면은 이미 용융이 되어 접촉 저항이 거의 없어진 결과이며, 이와같이 전극과 모재간의 접촉부에서 많은 열이 발생하게 되면 전극의 마모를 촉진시키

게 되어 전극의 수명을 저하시키는 원인이 될 수 있다.

Fig. 11은 전극과 모재간의 접촉면에서의 온도변화에 대한 수치해석 결과이다. 용접초기에 급격한 온도 상승이 발생하고, 용접후기에는 온도가 완만하게 상승하고 있으며 접촉부에서의 온도는 반경에 관계없이 거의 균일하게 나타나고 있다. 이와 같은 현상은 전극마멸현상이 온도의 높고 낮음과는 직접적인 관계가 없고 오히려 알루미늄 산화피막이 깨어짐으로 말미암아 발생하는 전극 재질과 알루미늄 재질과의 접촉에 의한 것이라는 보고⁽²²⁾와도 잘 일치하고 있다.

Fig. 12는 전극에서의 발생열을 무시하였을 경우와 고려하였을 경우에 용융부 중심과 모재와 전극의 접촉부의 중심에서의 온도변화를 비교한 것으로, 모재가 용융되기 전에는 두가지 경우에서 온도차이가 거의 없으나, 용융이 된 후부터는 전극의 발생열을 무시한 경우에 더 높은 온도가 나타나고 있다. 이 사실로 미루어보아 저항점 용접중 발생하는 전체 열중에서 전극과 전극 접촉부에서 발생하는 열량이 차지하는 비율이 커질수록 용접 너깃의 크기는 감소하게 됨을 유추할 수 있다.

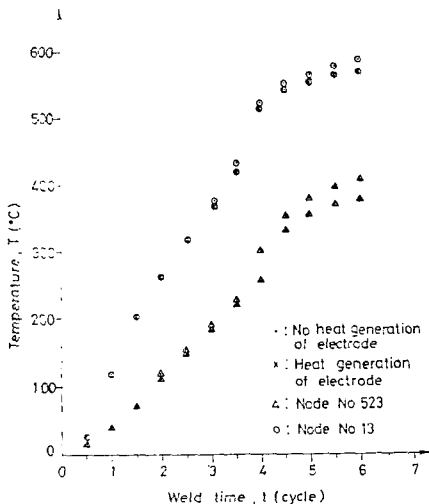


Fig. 12 Influence of the heat generation in electrode on the temperature variation

5. 결 론

알루미늄 합금의 저항 점 용접과정을 유한요소법을 이용하여 상사화(simulation)하고 동저항등 여러 변수들과 용접 너깃의 모양을 측정하여 다음과 같은 결론

을 얻었다.

(1) 알루미늄 합금의 저항 점 용접시 발생하는 모재와 모재간의 접촉저항과 모재와 전극간의 접촉 저항은 온도에 대해서 지수함수적으로 감소한다고 가정할 수 있다.

(2) 알루미늄 합금의 저항 점 용접중의 동저항 및 전압은 용접시작후 반 사이클이 지나면 이미 saturation 된 상태에 도달하였으며, 1사이클 이후에는 변화가 매우 적게 나타났다.

(3) 알루미늄 합금의 Alclad 층은 용융이 어렵기 때문에 알루미늄 합금의 용접 너깃 내부에 노치의 형태로 남아 있을 수 있다.

(4) 알루미늄 합금의 저항 점 용접 초기에는 주로 접촉 저항에 의한 발생열로 너깃이 생성되나, 용융이 시작되면 접촉저항과 용접물 내부의 발생열에 의해서 너깃이 성장한다.

(5) 알루미늄 합금의 저항 점 용접시 전극과 모재의 접촉면에서 나타나는 온도는 반경에 의해서 큰 영향을 받지 않는다.

(6) 알루미늄 합금의 저항 점 용접시 전극이나 전극과 모재간의 접촉면에서의 발생열이 차지하는 비율이 커질수록 용접너깃의 크기는 감소한다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 연구비 지원하에 이루어졌다. 이에 재단과 관계자 여러분께 깊이 감사한다.

참 고 문 헌

- (1) H.A. Nied, "The Finite Element Modeling of The Resistance Spot Welding Process", *Welding Journal*, pp. 123s~132s, 1984
- (2) *Metals Handbook*, 8th ed., Vol. 6, "Welding and Brazing", ASM, 1971
- (3) *Welding Handbook*, 7th ed., Vol. 4, "Metals and their Weldability", AWS, 1982
- (4) F.R. Hoch, "Joining of Aluminum Alloys 6009 & 6010", S.A.E. Transaction No. 780396, pp. 1868~1879, 1978
- (5) G.A. Dorsey, JR. and F.E. Gibbs, "Aluminum Pretreatment to Improve Resistance Spot Weld Tiplife", S.A.E. Transaction, No. 770204, pp.

- 924~934, 1977
- (6) A.H. Lentz, "Welding Aluminum for Vehicles-Progress on Two Fronts", *Welding Design & Fabrication*, pp.122~126, 1978
- (7) N.N., "Welded-Aluminum Truck Cab Offers More Payload, Energy Savings", *Welding Design & Fabrication*, pp.86~89, 1976
- (8) R.D. Dewey and R.S. Mapes, "Spot Welding Aluminum Sheet for Auto Parts", *Welding Design & Fabrication*, pp.72~74, 1977
- (9) G.R. Archer, "Calculations for Temperature Response in Spot Welds", *Welding Journal*, pp.327s~330s, 1960
- (10) W. Rice and E.J. Funk, "An Analytical Investigation of the Temperature Distributions during Resistance Welding", *Welding Journal*, pp.175s~186s, 1967
- (11) D.V. Lindh and J.L. Tocher, "Heat Generation and Residual Stress Development in Resistance Spot Welding", *Welding Journal*, pp.351s~360s, 1967
- (12) A.F. Houchens and R.E. Page, "Numerical Modeling of Resistance Spot Welding", *ASME WAM*, "Numerical Modeling of Manufacturing Processes", pp.117~129, 1977
- (13) P.H. Sindelfingenetal, "Factors Affecting Temperature Distribution and its Calculation in the A.C. and D.C. Resistance Spot Welding of Aluminum Sheet", *Welding and Cutting*, pp.E25~E27, 1984
- (14) W.B. Kouwenhoven and W.T. Sackett, JR., "The Spreading Resistance of Contacts", *Welding Journal*, pp.512s~520s, 1950
- (15) W.B. Kouwenhoven and C.W. Little, "Contact Resistance", *Welding Journal*, pp.457s~465s, 1952
- (16) A.L. Tslaf, "A Thermophysical Criterion for the Weldability of Electric Contact Material in a Steady-State Regime", *IEEE Transaction*, Vol. CHMT-5, pp.147~152, 1982
- (17) V.I. Ryazantsev, "The True Area of Mechanical Contact in the Spot Welding of Aluminum Alloys", *Avt. Svarka*, pp.43~47, 1981
- (18) 송삼홍, 김부등, "접 용접의 너깃지름과 판간접촉 지름의 관련성", *대한기계학회논문집*, 제 7 권, 제 3 호, pp.313~318, 1983
- (19) B AHLQUIST, BJORCK and ANDERSON, "Numerical Methods", *Prentice-Hall*, pp.152~157, 1974
- (20) R.M. Polivka and E.L. Wilson, "Finite Element Analysis of Nonlinear Heat Transfer Problems", Report No. UC SESM 76-2, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley, CALIF., 1976
- (21) Y.S. Touloukian, "Thermophysical Properties of High Temperature Solid Materials", Vol. 2, Thermophysical Properties Research Center, Purdue University.
- (22) D.K. Aidun and R.W. Bennett, "Effect of Resistance Welding Variables on the Strength of Spot Welded 6061-T6 Aluminum Alloy", *Welding Journal*, pp.15~25, 1985