

研 究 論 文

大韓熔接學會誌
第8卷第1號 1990年3月
Journal of the Korean
Welding Society
Vol.8, No.1, Mar., 1990

사각형 전극에서의 열유동 해석

신운섭* · 박수웅** · 나석주**

Simulation of Heat Flow for Rectangular Electrodes

Y.S. Shin*, S.W. Park**, S.J. Na**

Key Words : Rectangular Electrode (사각형전극), Resistance Spot Welding (저항 점용접), Nugget(용융부), FDM(유한차분법), Contact Resistance (접촉저항), Faying Interface(모재간 접촉부), Convection(대류), Aspect Ratio (중형비)

Abstract

Being focused on the recent studies that the fatigue strength of resistance spot weldments can be improved by using ellipsoidal weld nuggets, the voltage and temperature distribution in resistance spot weldments were simulated for the various rectangular electrodes which had the different aspect ratio of the contact area.

Because the electrode shape was not axi-symmetric, the solution domain for simulation should be three dimensional. A series of experiments were carried out to verify the analytically obtained temperature distribution in the weldment. From the calculational and experimental results, it could be revealed that the nugget took the form of ellipsoid, while both results showed a considerable discrepancy for the high aspect ratio.

기호설명

J : 전류 밀도 [A/mm²]
 I : 전류 [A]
 ϕ : 전위 [V]

σ_m : 모재의 전기적 비저항 [$\Omega \cdot \text{mm}$]
 σ_e : 전극과 모재 사이의 접촉 저항 [Ω]
 σ_f : 모재 간의 접촉 저항 [Ω]
 ΔV_e : 전극과 모재 간의 전압 강하 [V]
 ΔV_f : 모재 간의 전압 강하 [V]
 \dot{q}_v : 모재 내부에서의 단위 체적당 발생열

* 대우중공업(주)

** 정회원, 한국과학기술원 생산공학과

- [J/sec mm³]
- \dot{q}_e : 전극과 모재 간의 접촉부에서 발생열 [J/sec]
- \dot{q}_f : 모재간의 접촉부에서 발생열 [J/sec]
- ρ_m : 모재의 밀도 [g/mm³]
- ρ_e : 전극의 밀도 [g/mm³]
- T_m : 모재의 온도 [°C]
- T_e : 전극의 온도 [°C]
- C_m : 모재의 비열 [J/g °C]
- C_e : 전극의 비열 [J/g °C]
- K_m : 모재의 열 전도도 [J/mm sec °C]
- K_e : 전극의 열 전도도 [J/mm sec °C]
- $\sigma(T_\infty)$: 상온에서의 접촉 저항 [Ω]
- $H(T_\infty)$: 상온에서의 경도 [kg/mm²]
- $H(T)$: 온도 T에서의 경도 [kg/mm²]
- n : 경계면에서의 수직 방향 [mm]
- T_∞ : 상온 [°C]
- h_w : 물에 의한 대류상수 [J/mm² sec °C]

1. 서 론

전기저항 점용접(electrical resistance spot welding)이란 전극 사이에 용접물을 놓고 압력을 가 하면서 큰 전류를 통과시켜 이때 발생하는 전기 저항열을 이용하여 용접물의 접촉부를 용융시키는 방법이다¹⁾. 이러한 용접방법은 용접시간이 짧고 자동화가 가능하여 대량 생산에 적합한 잇점이 있으나 다른 용접법에 비해 상대적으로 짧은 시간동안에 용접이 끝나므로 각종 용접변수가 용접부의 신뢰성에 큰 영향을 미치게 된다. 용접변수중 전극의 형상은 용접 너겟의 모양에 큰 영향을 주게 되는데, 최근들어 전극의 형상을 사각형 또는 타원형으로 바꾸어줌으로써 용접너겟의 모양을 제어해 용접부의 응력집중 문제를 해결하려는 연구가 보고되고있다^{2,3)}.

본 논문에서는 전극의 형상을 사각형으로 사용할 경우의 용접부 전위분포 및 온도분포를 유한차분법을 이용하여 예측해 보고 이를 실험과 비교해 봄으로써 피로강도 증강 및 응력집중에 대한 해결책으로 연구되고있는 비원형 전극을 사용한 용접에서 용접부의 형상을 예측할수있는 모델을 제시하였다. 전극의 형상은 축대칭이 아니므로 3차원 수치해석을 하였으며 전위분포는 SOR(successive

over relaxation)방법을 사용하여 구하였고, 온도 분포 해석에는 유한차분법중 ADI (alternating direction implicit)방법을 사용하였다. 실험은 접촉부의 중횡비가 각각 다른 4종류의 전극을 사용하였으며 수치계산 결과와 그 결과를 비교하였다.

2. 전위분포 및 온도분포의 이론 해석

2.1. 전위 분포 해석

전기저항 점용접에서 전극 양단에 전압이 걸리게 되면 용접물의 전기적 비저항에 의해 전위장이 형성되는데, 이 전기적 비저항이 온도의 함수이므로 용접 시간에 따라 모재에 형성되는 전위장의 분포는 달라지게 된다. 이러한 전위 분포를 구하는 목적은 모재 내부에서 발생하는 주열, 그리고 모재와 모재, 모재와 전극 사이의 접촉부에서 발생하는 주열을 정확히 구하는데 있는데 전류의 보존 및 오옴의 법칙으로부터 유도되는 다음과 같은 준 조화 라플라스 방정식(quasi-Laplace equation)으로부터 이를 구할 수 있다.

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{\sigma_m} \nabla \phi \right) = 0 \tag{1}$$

상기 식(1)로부터 실제 전위 분포를 계산하기 위하여 다음과 같은 가정을 하였다. 첫째, 접촉면에서의 접촉저항은 그 재료의 경도에 의존하고 접촉면에 균일하여 아래의 관계식을 만족한다⁴⁾.

$$\sigma(T) = \sqrt{\frac{H(T)}{H(T_\infty)}} \cdot \sigma(T_\infty) \tag{2}$$

식(2)는 접촉저항이 재료의 경도와 직결됨을 나타내어주고 있으며 접촉부에서의 용접초기 접촉저항을 알 수 있으면 용접 도중 임의의 온도에서의 접촉 저항값을 온도와 경도사이의 관계표를 사용하여 구할 수 있다. 참고로 구리와 0.08% 탄소강의 온도증가에 따른 경도의 변화는 Fig. 1과 같다⁵⁾. 둘째로, 전극의 전기적 비저항이 모재에 비해 매우 작으므로 전극에서의 전위차는 무시하였으며 전극과 모재간 접촉면은 등전위 면으로 가정하였다. 또한 경계 조건은 아래와 같으며 Fig. 2에 해석영역을 나타내었다.

- 1) Z=0일때
- 0 < X < X1, 0 < Y < Y1 (모재간 접촉부)에서

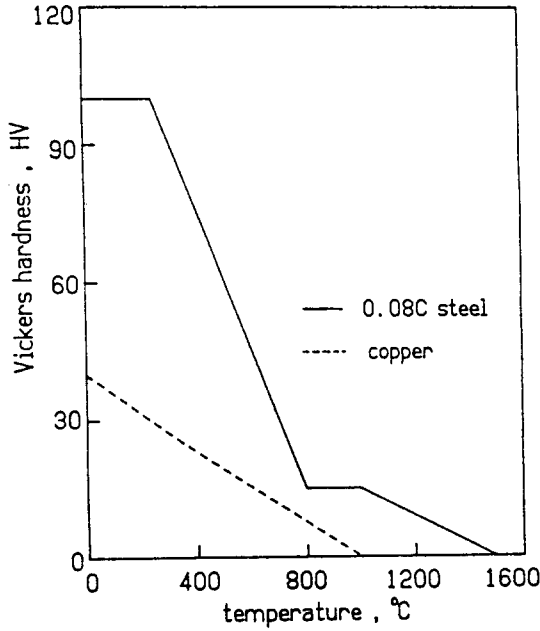


Fig. 1 Vickers hardness vs. temperature

$$\frac{1}{\sigma_m} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial Z} = \frac{1}{\sigma_f/2} \cdot \Delta \phi_f/2 \quad (3)$$

2) Z=Z1일때
 0 < X < X1, 0 < Y < Y1 (전극과 모재간 접촉부)에서

$$\frac{1}{\sigma_m} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial Z} = \frac{1}{\sigma_e} \cdot \Delta \phi_e \quad (4)$$

3) 위의 경계 조건 이외의 경계에서는

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad (5)$$

2.2. 온도분포 해석

전극 사이에 전압이 걸리게 되면 전류가 흐르게 되어 모재 내부 및 접촉부에서 주울열이 발생하게 되는데 일부는 전극을 통해 냉각수쪽으로 전달되어 손실되고 나머지는 모재의 온도를 증가시키는데 이용된다. 이 중에서 모재 내부에서의 발생열은 식(6)으로 표현할 수 있다.

$$\dot{q}_g = \frac{1}{\sigma_m} \nabla \phi \cdot \nabla \phi \quad (6)$$

또한 모재와 전극간 접촉부에서의 발생열과 모재

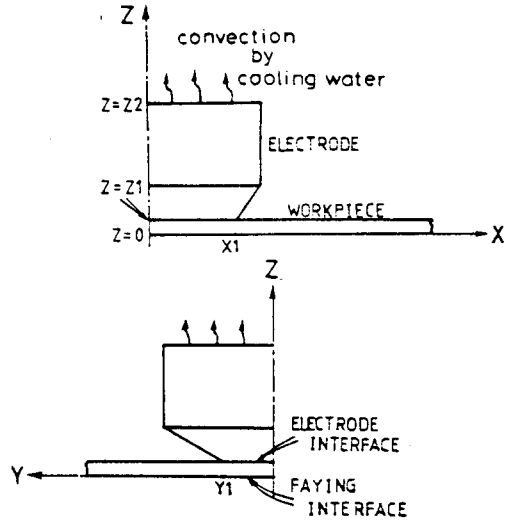


Fig. 2 Solution boundary of electrode and weldment

간 접촉부에서의 발생열은 각각 식(7) 및 (8)과 같다.

$$\dot{q}_e = \frac{1}{\sigma_e} \cdot \Delta \phi_e^2 \quad (7)$$

$$\dot{q}_f = \frac{1}{\sigma_e} \cdot (\Delta \phi_f/2)^2 \quad (8)$$

위와 같은 주울열을 고려하면 용접물의 시간에 따른 온도 분포는 다음과 같은 식(9)로 표현된다.

$$\rho_m C_m \frac{\partial T}{\partial Z} = \nabla \cdot (K_m \nabla T) + \dot{q}_g \quad (9)$$

실제 계산과정에서는 전극의 전기 전도도가 용접물에 비해 매우 크다고 생각하여 전극의 주울열 발생을 무시하고 온도분포를 계산하였으며 접촉면에서의 열저항 또한 없다고 가정하였다. 이러한 가정들을 이용하여 온도 분포를 구하기 위한 경계 조건을 구해보면 다음과 같으며 Fig.2 및 Fig.3(a)~(c)에 해석영역과 그릿을 각각 나타내었다.

1) Z=0일때

0 < X < X1, 0 < Y < Y1(모재간 접촉부)에서

$$-K_m \frac{\partial T}{\partial Z} = \frac{1}{2} \dot{q}_f \quad (10)$$

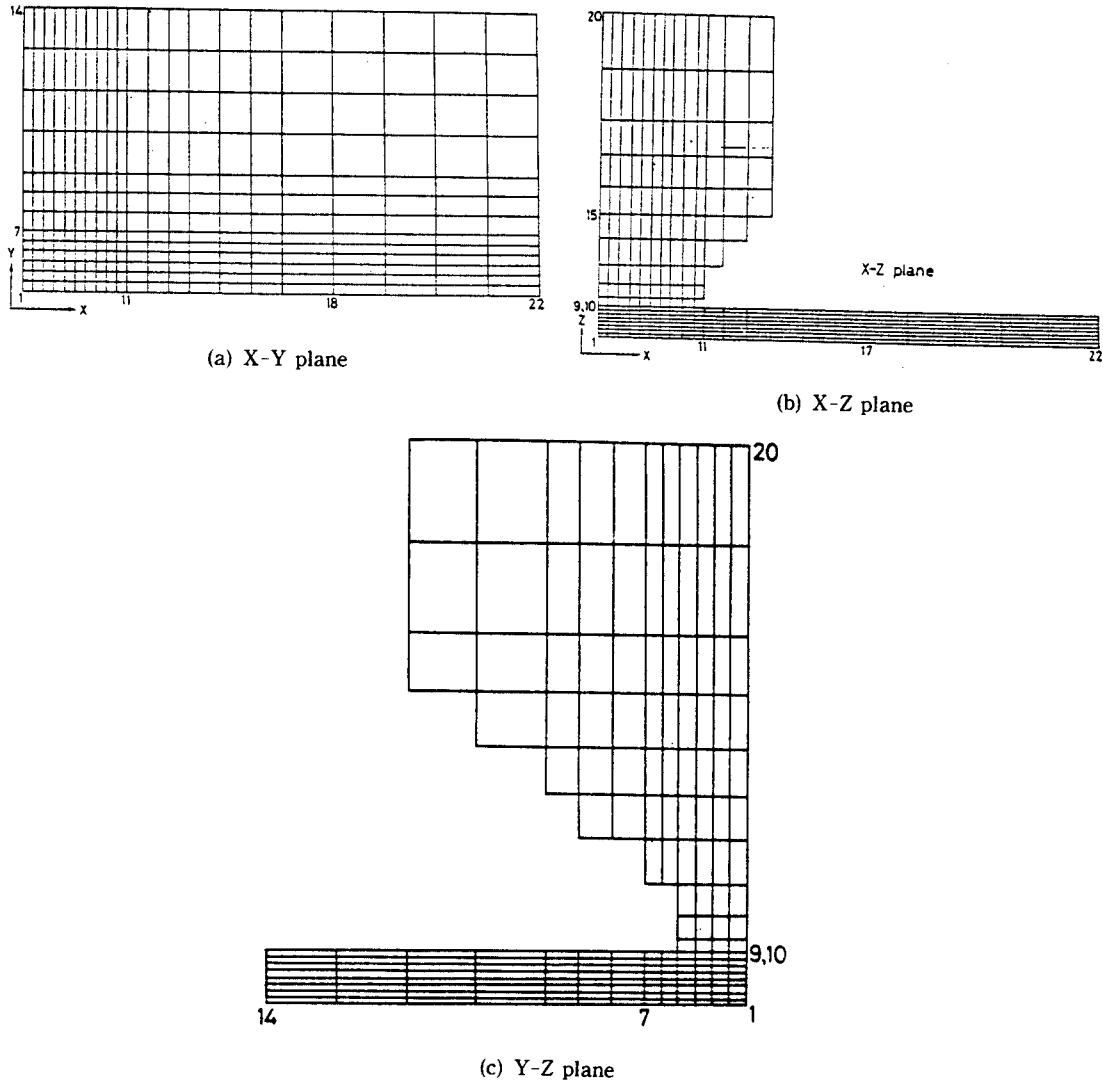


Fig. 3 Grid generation

2) $Z=Z1$ 일때
 $0 < X < X1, 0 < Y < Y2$ (전극과 모재간 접촉부)에서

$$-K_m \frac{\partial T}{\partial Z} + \dot{q}_e = -K_e \frac{\partial T}{\partial Z} \quad (11)$$

접촉면에서 열저항이 없다는 가정으로 부터

$$T_e = T_m \quad (12)$$

3) $Z=Z2$ (냉각수와 전극간 접촉부) 일때

$$-K_e \frac{\partial T}{\partial Z} = h_w (T_e - T_w) \quad (13)$$

4) 위의 조건 이외의 구역에서

$$-K \frac{\partial T}{\partial n} = h_{air} (T - T_w) \quad (14)$$

3. 실험 방법

3.1. 접촉저항 측정실험

온도분포 및 전위분포를 수치계산하는 입력 값으로 사용하기 위하여 용접 초기 상태에서의 접촉저항을 측정하는 실험을 실시하였다. 실험에 사용된

전극의 재질은 0.8% 크롬-동 합금으로서 외경을 선반 가공후 시편과의 접촉면을 밀링으로 가공하였다. 전극의 종류는 Table 1에 나타난 바와 같이 4종류인데, 종류 1, 2, 3, 4 모두 지름 7mm인 원의 면적과 동일한 접촉면적을 갖도록 설계하였으며 Fig. 4에 그모양을 나타내었다. 또한 사용된 용접시편은 탄소 함유량이 0.08% 인 저탄소 강으로서 두께는 1.6mm이고 폭과 길이는 각각 30mm, 50mm 이며, 접촉 표면의 상태를 균일하게 하기 위하여 표면에 묻어있는 기름, 불순물 등을 아세톤으로 닦은후 실험을 실시하였다.

Table 1 This size of electrode contact area

	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4
X(mm)	6.2	7.6	8.7	9.8
Y(mm)	6.2	5.0	4.4	3.9
X:Y	1:1	1.5:1	2:1	2.5:1

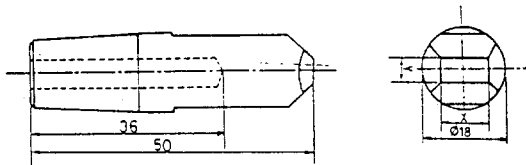


Fig. 4 The shape of electrode

3.2. 용접물의 온도 분포 측정 실험

용접을 할 경우 주울열에 의해 모재의 일부가 용융되고 그 주변에 상변태가 발생하게 되는데 이러한 상변태된 영역을 이용하여 온도분포를 유추한다. 즉, 용접된 시편의 중앙부를 절단하여 내부의 금속 조직이 상변화한 부분의 경계를 하나의 등온선으로 생각하여 이것을 수치적으로 계산하 것과 비교하였다. 실험은 4 종류의 전극에 대해 전극 가압력 484kgf, 용접 전류 8900A로 고정하고 용접 시간을 변화시켜 가면서 용접을 하였으며, 시편의 수직 단면을 관찰하기 위해서는 연삭 휠 절단기 (grinding wheel cutter)로 중앙부를 절단하였고 모재간 접촉부를 관찰하기 위해서는 윗 시편을 엔드밀(end mill)로 절삭하여 제거하였다. 이러한 방법으로 마련된 시편은 연마(polishing) 및 에칭(etching)의 과정을 거쳐 확대 촬영되었으며, 이로부터 용융 및 상변태의 온도를 가지는 위치를

Table 2 Contact resistance at electrode interface and faying interface

	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4
σ_e	21.1	22.2	21.3	20.01
σ_f	37.17	35.04	36.3	32.63

UNIT: $\mu\Omega$

추정했다.

4. 결과 및 고찰

실험한 결과를 살펴 보면 용접한 시편의 조직이 크게 3 구역으로 나뉘어 알 수 있었다. 이 구역 중에서 가장 중심에 위치한 부분이 용융부(nugget)로서 모재가 용융온도를 넘어섰다가 식으면서 생기는 조직으로 열이 빠져 나가는 방향의 반대 방향으로 수지상결정(dendrite)이 형성된다. 또한 용융부의 가장자리에는 열영향부(HAZ)가 형성되는데 이는 모재가 용융점 온도까지는 도달하지 않았으나 상변태 온도 이상으로는 가열되었음을 의미한다. 마지막으로 용접한 부위에서 멀리 떨어진 곳에서는 금속 조직이 용접하기 전과 동일하게 남아있는데 이는 이 부분의 온도가 상변태온도까지 올라가지 않았음을 의미한다.

본 논문에서는 현미경 상으로 관찰되는 용융부의 경계부와 열영향부의 경계부분을 각각 용융부에 해당하는 용융온도선 및 A_{c1} 상변태 온도선으로 생각하여 등온선을 나타내었다. 그런데 상평형 상태에서는 상변태점의 온도가 723°C에 해당하나, 전기저항 점용접 공정과 같이 시간에 대한 온도 상승률이 매우 큰 경우는 평형 상태에서의 상변태 온도를 용접 시편의 온도분포를 추정하는데 바로 적용하는 것이 무리이다. 따라서, 저항 점용접 경우의 온도상승율에 관한 대략적인 정보를 얻기 위해 수치해석의 결과를 분석해 보면, 일반적으로 모재간 접촉부의 중심점에서는 상온에서 1000°C까지 증가하는데 약 6사이클 정도, 전극의 말단부분에서 2mm 떨어진 지점에서는 1000°C까지 증가하는데 약 15사이클 정도가 소요됨을 알 수 있었다. 이것은 용접부 및 상변태가 발생하는 주변영역이 $4-10 \times 10^3 \text{ }^\circ\text{C/sec}$ 정도의 온도상승률로 가열됨을 말해준다.

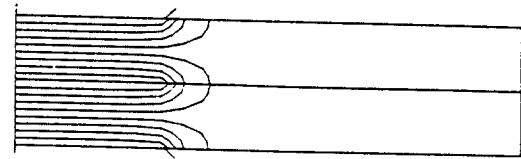
온도 상승률이 $4 \times 10^3 \text{ }^\circ\text{C/sec}$ 일때 펄라이트가

오스테나이트로 변태를 시작하는 온도는 약 850°C에 해당하였는데⁶⁾, 이러한 이유로 본 논문의 경우는 용융온도와 A_{c1} 상변태 온도를 각각 1525°C 및 850°C로 생각하였다.

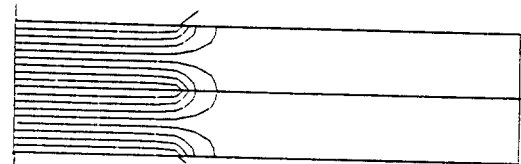
Fig. 5는 4종류의 각 전극을 사용하였을때 모재 내부에서의 전위분포를 X-Z 평면상에 나타낸 것이다. 전극의 형상이 변화하여도 분포의 형태에는 큰 변화가 없는것으로 결과가 나타났는데, 이는 본 논문에서 전극과 모재간 접촉부에서 전위값을 균일하다고 가정했기 때문이라 생각된다. 실제의 경우에는 전극과 모재간 접촉부에서 불균일한 압력 분포⁷⁾를 가지므로 전극 형상의 변화에 따라 상당히 다른 전위분포 형태를 갖으리라 예상된다⁸⁾.

계산에 의한 온도분포와 실험에 의한 온도분포를 Fig. 6(a)~(e)에서 비교하였는데 접촉부의 종횡비(aspect ratio)가 서로 다른 4종류의 전극을 사용하였을때 용접시간 16사이클 후의 시편내부 온도분포를 X-Z 및 Y-Z 평면상에 나타내었다. 이중 특히 Fig. 6(e)는 접촉면에서의 압력분포를 균일하게 하기 위하여 전극의 접촉면 모서리에 약간의 곡률을 준후 실험한 결과를 계산결과와 비교하였다. 종류1및 종류2의 전극을 사용했을때, 즉 접촉부의 종횡비가 크지 않을때 온도분포에 대한 실험치와 계산치는 상당히 일치하는 경향을 나타내었으나 종류3,4의 전극과 같이 종횡비가 커질수록 용융부의 크기및 형상에 차이가 커짐을 알 수 있었다. 그 원인은 접촉부의 종횡비가 커질수록 압력분포의 불균일이 심해지기 때문이라 예상된다. 즉, 접촉부의 둘레 부위에서 압력분포가 크므로 접촉저항은 떨어지게되고 곧 전류 밀도가 커지게되어 이 곳에서 많은 열량이 발생할것이다. Fig. 6(d)와 같이 종횡비가 너무 클 경우에는 실험결과 모재간 접촉부의 내부에서 완전한 용융이 발생하지않고 접촉부의 둘레 부위에서 집중적으로 용융이 발생하여 내부에 비용점이 존재했다.

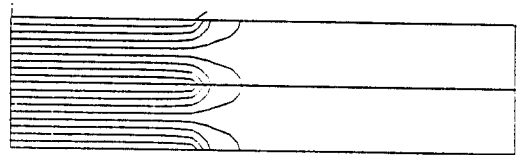
사각형 전극을 사용하는 이유가 응력집중을 완화시킬 수 있다는 점인데 이와 같은 용융부 내부의 비용용점의 존재는 이런 장점을 악화시킬수 있



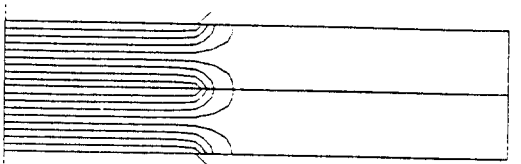
(a) type 1 electrode



(b) type 2 electrode



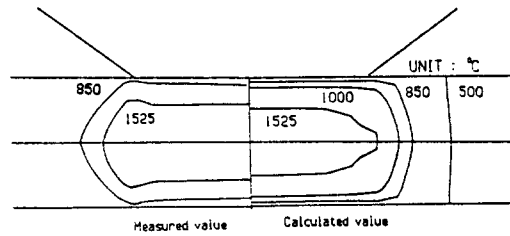
(c) type 3 electrode



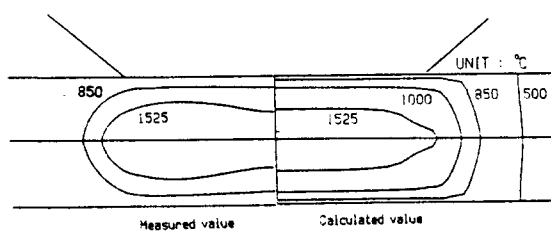
(d) type 4 electrode

Fig. 5 Voltage distribution in weldment

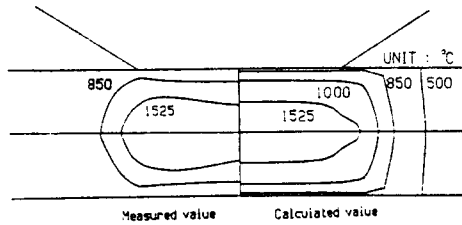
어 용접불량의 원인이 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 전극 접촉면의 모서리에 약간의 곡률을 준 결과 Fig. 6(e)와 같이 용융부 내부에 비용용점이 존재하지않는 용융부를 얻을수 있었다. Fig. 7의 경우는 각 전극을 사용했을때 모재간 접촉부 (flying interface)에서의 용융부와 열영향부의 형상을 X-Y 평면상에 나타낸 그림으로서 종횡비가 적절한 사각형전극을 사용하면 타원형태에 가까운 용융부를 얻을수 있음을 알 수 있다.



(a) type 1, at 16cyc., X-Z plane

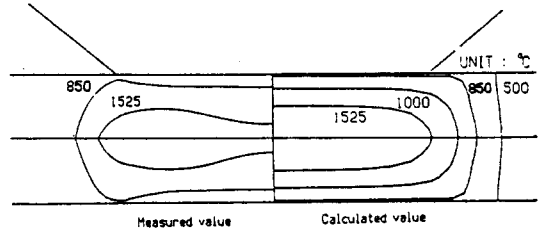


X-Z plane

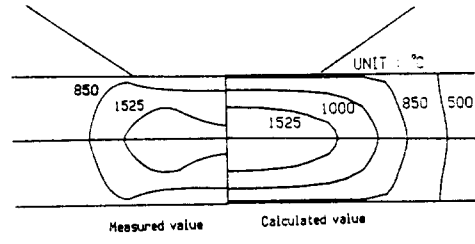


Y-Z plane

(b) type 2, at 16cyc., X-Z and Y-Z plane

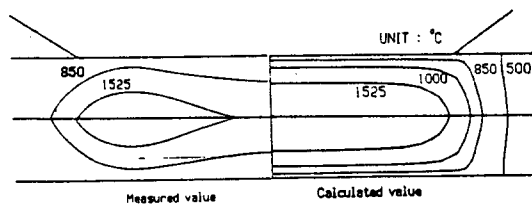


X-Z plane

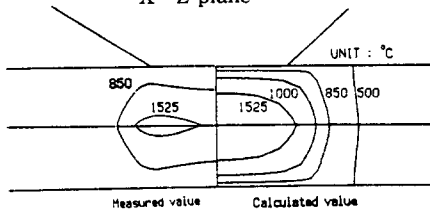


Y-Z plane

(c) Type 3, at 16cyc., X-Z and Y-Z plane

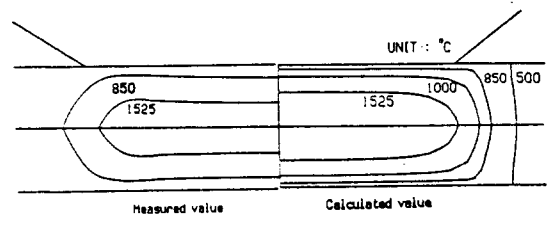


X-Z plane

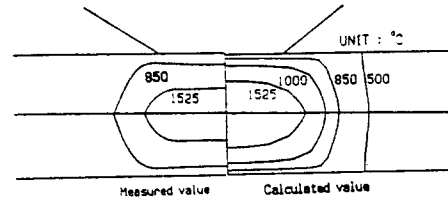


Y-Z plane

(d) Type 4, at 16cyc., X-Z and Y-Z plane



X-Z plane



Y-Z plane

(e) Type 4, edge rounded, at 16cyc., X-Z and Y-Z plane

Fig. 6 Temperature distribution in weldment

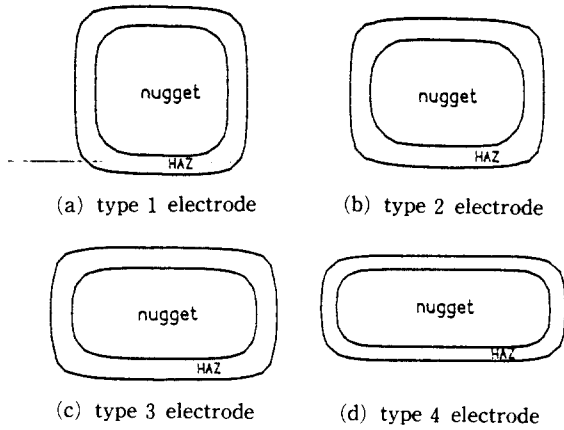


Fig. 7 The calculated shape of nugget and HAZ(heat affected zone) at faying interface (at 16cyc., X-Y plane)

5. 결 론

전극의 형상을 사각형으로 사용할 경우의 용접부 전위분포 및 온도분포를 유한차분법을 이용하여 예측해보고 이를 실험과 비교해본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 사각형 전극의 중횡비를 적절히 조절함으로써 타원과 유사한 형태의 용융부를 얻을수 있다.
- 2) 실험 결과 전극의 중횡비가 커질수록 모재간 접촉부에서 균일하게 용융 되지 않고 접촉부의 둘레에서 용융 현상이 심하게 발생했다.
- 3) 전극 접촉부의 모서리에 약간의 곡률을 주면 모재간 접촉부 전체에 걸쳐 비교적 균일한 용융부를 얻을수 있다.

참고문헌

1) Metals Handbook, 8th ed., vol.6, Welding and Brazing, American Society for Metals, pp.401

-424

- 2) Grybowski, H. and Majchrzak, B. : The effect of electrode geometry on fatigue strength of spot-welded joints, Przegł. Oldlew,(1985), pp. 10-12
- 3) Bae, D.H. and Niisawa, J. : On stress distribution and fatigue strength of single elliptical spot-welded lap joint under tension shear load, 대한기계학회, 87년도 추계학술대회 초록집, (1987), pp.7-11
- 4) Tslasf, A.L. : A thermophysical criterion for the weldability of electrical contact material in a steady state regime, IEEE transactions on components, hybrids and manufacturing technology, Vol.1, CHMT-5, No.1,(1982), pp. 47-152.
- 5) O'Neill, H. : Hardness measurement of metals and alloys, Chapman and Hall Ltd, (1967), pp.191-216
- 6) Nobuhiro, I. and Kiyoshi, Y. : On the transformation in Armco-iron by rapid heating, 일본금속학회지, 제39권, (1975), pp.19-23
- 7) Green, A.E. and Zerna, W. : The theoretical elasticity, Oxford, 2nd edition,(1968), pp.169-174
- 8) 박수용 : 전기접촉저항과 접촉부의 전류밀도분포에 대한 기계적 접촉조건에 영향을 관한 연구, 한국과학기술원 석사학위논문, 1987
- 9) 오세진 : 알루미늄 합금의 저항 점용접시 온도분포에 대한 연구, 한국과학기술원 석사학위논문, 1986
- 10) 신윤섭 : 전기저항 점용접에서 사각형전극의 사용시 전위 및 온도분포의 3차원 해석에 관한 연구, 한국과학기술원 석사학위논문, 1989