

저항점 용접에 있어서 Shunt 영향에 대한 연구

부 광석**, 조 형석**, 나 석주**

A study on the shunt effect in resistance spot welding

K.S. Boo** H.S.Cho** S.J. Na**

ABSTRACT

One of the important factors in practical welding situations is shunt effect which deteriorates weld quality due to a shunt current which flows in the existing spot. Previously, this effect has not been analytically investigated, since the mechanism of shunt effect shows very complicated phenomena in the thermal and electrical behavior.

In this paper this effect is extensively studied through theoretical and experimental analysis. The theoretical results obtained from a numerical analysis of the modelling of shunt effect are compared with experimental ones. Both results show good agreement and represent well the mechanism of shunt effect.

1. 서 론

전기적 저항에 의해 발생하는 열로 접촉부를 녹여 접합하는 방법인 저항점 용접은 용접속도가 빠르고 가열범위가 좁아 열에 의한 변형등이 작으므로 박판의 lap-joint에 널리 사용되는 공정이다. 그러나 이 저항점 용접은 공정에 관련된 여러가지 변수들의 작은 변화와 용접 횟수의 증가에 따라 발생하는 진극변형과 같은 외란(disturbance)에 의해 용접부 성능이 크게 영향을 받는다.^{1,2)} 그러므로 용접 변수들의 변화에

대해서도 좋은 용접질을 유지할 수 있는 여러가지 공정제어 방법들이 연구되기도 하며,^{3,4,5)} 용접공정중 발생하는 외란들중의 하나인 진극변형 같은 것이 용접중 어떻게 용접질에 영향을 미치는가에 대한 연구도 이루어져 왔다.

그리고, 여러 용접 변수들이 용접공정에 어떻게 기여하는가에 대한 해석을 하기위해 여러가지 이론적인 해석방법들도 아울러 이루어져 왔다.^{6,7)}

그러나, 위에서 언급한 여러 제어 방법 및 해석들이 실제 용접현장에서는 다소의 제약이 있

다. 그 요인들중에 하나가 shunt에 의한 영향이다. 용접을 행할 때 그 이웃에 이미 용접된 곳으로 가해진 전류의 일부분이 빠져나감으로 인해 용접질이 저하되는 것을 shunt effect라고 말한다. J. HEUSCHKE 등의 연구에 의하면 shunt effect가 있을때의 용접부의 강도가 정상적인 용접부의 강도의 60%수준에 머무르는 것을 보여주고 있다.⁸⁾ 실질적으로 저항점 용접이 사용되는 경우 한 소재의 여러곳에 용접을 하는 경우가 많아 shunt effect에 의한 용접질의 저하가 심각함에도 불구하고 이에 대한 효과적인 대책이 미비한 상태이다. 지금까지 연구된 보상대책들을 shunt effect가 용접부내의 용융부 성장에 어떠한 영향을 미치는가에 대한 근본적인 고려 없이 단지 이 현상을 되도록 회피하기 위한 방법들이 주어져서 그 사용에 한계성이 있다.

그러므로, 본논문에서는 shunt effect가 있을때의 용접부내의 전기적·열적인 현상을 해석함으로써 이 effect가 용융부의 성장에 미치는 영향 및 앞으로의 이의 보상대책에 대한 이론적인 배경을 제공하려 한다. 저항점 용접시 용접부와 전극에서의 복잡한 열 및 전류운동, 온도에 따른 재료의 상질변화 그리고 상변화 분체가 복합된 문제이므로 유한 차분법을 이용하여 수치적으로 해석하려 하며, shunt 현상을 고려하지 않고서 용접부내의 열적, 전기적인 현상을 해석할 때는 전극의 중심축에 대한 축대칭 문제로 이차원화하여 해석할 수 있으나⁹⁾ shunt 현상을 고려할 때는 이 중심축에 대해 대칭적인 경계조건을 제공하지 않으므로 3차원 문제로 확대 해석하여야 한다. shunt가 있을 때 이미 용접된 부분은 재료의 성질이 용접부 소재와 같으며, 용접된 그 부분만 연결되어 있어 용접시 이미 용접된 부분으로 전류가 흐르는 회로가 형성되도록 모델링하여 해석을 하였다. 수치해석시는 열전달 문제에서 주로 이용되는 유한차분법의 ADI (alternating direction implicit) 방법을 사용하였으며, 이때 이미 용접된 부분의 면적은 실험에서 측정된 값을 사용하였다.

용접부내에서의 온도분포 및 전위분포는 용접시간 및 용접간 거리(shunt space)에 따라

Table 1. Chemical Composition of the Weld Material (wt%)

	C	Mn	Si	P	S
SM 20C	0.19-0.21	0.62	0.043	0.012	0.010

계산했으며, 이때 계산된 온도분포의 결과는 실험에 의해 구한 온도분포와 비교를 하였다. 실험에 의해 온도분포를 구하기 위해서, 용접한 시편의 조직을 검사하였다. 표 1 과 같은 화학조성을 가지고 있는 연강의 경우에 대한 A₁ 변태점과 고상온도에 근거하여 그외 시편내 등온선을 구하였다. 이때의 이론적 및 실험적인 결과를 비교하면서, 주된 관점인 shunt effect가 용접부에 미치는 영향을 조사 하였다.

2. 용접부에서의 전위분포 및 온도분포

저항점 용접계에 대한 개략적인 그림은 Fig. 1에 나타내었다. 용접에 요구되는 열은 용접부간의 접촉부와 소재를 통해서 강한 전류가 흐를 때 발생하는 저항열에 의한 것이다. 전극으로 용접물에 가압하여 두 개의 전극과 용접물들이 연결될 때 용접물 내부와 접촉부에서 전위분포가 형성이 되며 이는 전극과 용접물, 그리고 용접물간의 접촉부에서의 전압 강하에 크게 영향을 받는다. 이렇게 하여 형성된 전위분포에 따라 전류의 흐름이 결정되며, 그 전류밀도 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$J = \frac{1}{\sigma(T)} \nabla \phi \dots\dots\dots(1)$$

여기서, J는 전류밀도 벡터, $\sigma(T)$ 는 온도함수로 표현된 소재의 비저항, 그리고 ϕ 는 전위이다.

2.1 용접물의 접촉부에서의 현상

용접물의 접촉부는 표면 거칠기 등에 의해 특성되어지는 미세 접촉점으로 나타낼 수 있다(Fig 2). 이러한 미세 접촉점에서의 전류 집중은 수축저항을 야기시켜 여기서 전압 강하가 발생하

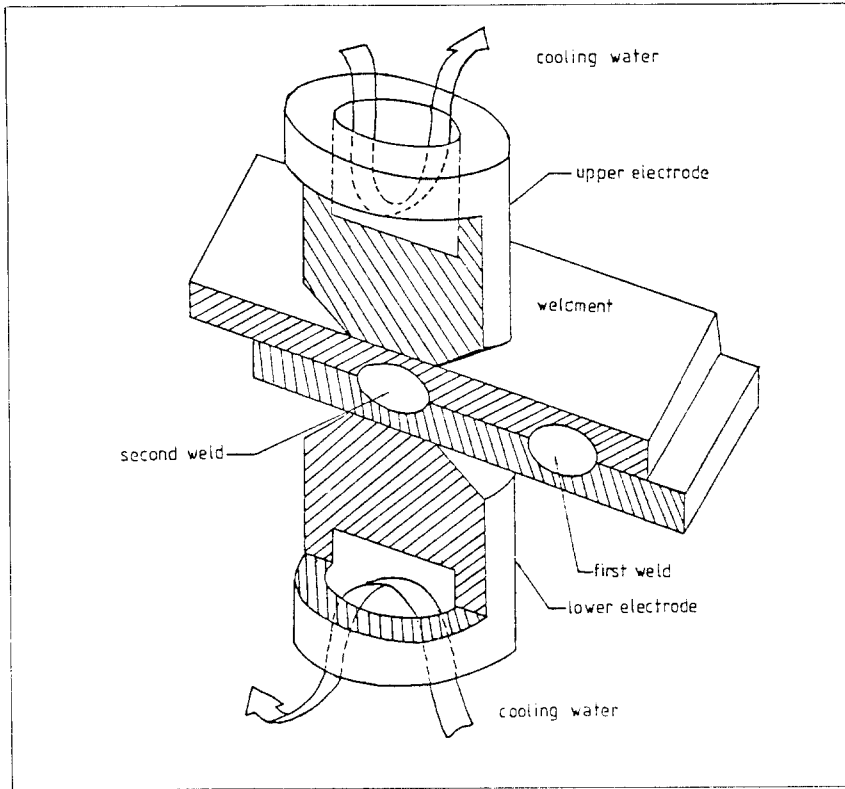


Fig. 1. Schematic diagram of resistance spot welding System with shunt effect

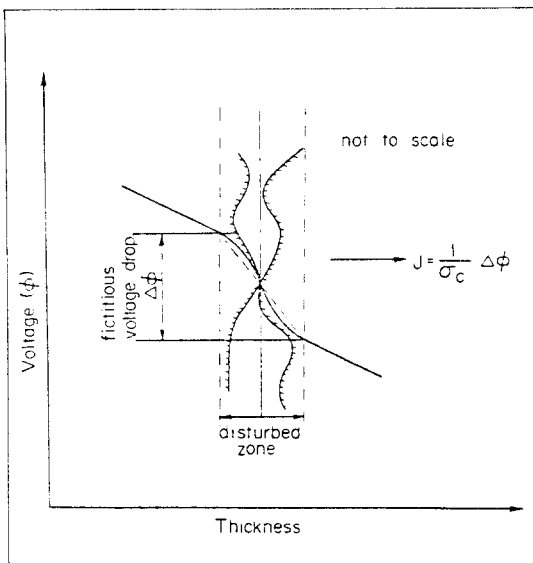


Fig. 2. Model of contact surface (not to scale)

고, 이에따라 용접부를 녹일 열이 생성된다. 이러한 접촉부에서의 전기적인 저항은 가압력 및 온도, 접촉부 이웃에서의 재료의 성질에 따라 변하므로 용접중 크게 변화하게 된다. 접촉부에서의 전기적, 열적 현상이 매우 복잡하므로 다소 이상화된 모형이 필요하다. H.S.Cho 등⁷⁾의 연구에 의하여 접촉면에 대한 모형을 Fig. 2와 같이 나타내면, 접촉부에서의 전압강하를 실제와는 다르게 disturbed zone에서 선형적으로 변화한다고 이상화시킨다. 이러한 결과 접촉부의 단위면적당 전류밀도는 다음과 같이 표현이 가능하다.

$$J = \frac{1}{\sigma} \frac{\partial \phi}{\partial n} = \frac{1}{\sigma_c} \Delta \phi \dots \dots \dots (2)$$

여기서, σ_c 는 접촉비저항, n 은 접촉면에 수직인 벡터, $\Delta \phi$ 는 접촉부에서의 전압강하이다. 접촉비저항 σ_c 는 Tslaf¹⁰⁾의 연구결과에 근거하

어 접촉저항이 경도의 세곱근에 비례하는 형태로 둔다.

$$\sigma_c = \frac{H(T)}{H(T_w)} \cdot \sigma_c(T_w, P) \dots\dots\dots (3)$$

여기서, H는 경도, T는 온도, 그리고 $\sigma_c(T_w, P)$ 는 전극가압력 p와 상온 T_w 하에서의 접촉 비저항이다. 이때의 경도는 온도에 따라 감소하는 함수형태이고 연강과 구리에 대한 온도변화는 참고문헌(11)에 근거를 둔다.

용접공정시 재료를 녹이는 열발생은 재료들간의 접촉저항과 용접물의 내부저항에 따른 Joule effect에 의한 것이며 다음과 같다. 접촉에서의 발생열은,

$$q = \frac{1}{\sigma_c} \Delta \phi^2 \dots\dots\dots (4)$$

로 표시하며, 같은 방법으로 용접부 내부에서의 발생열은

$$q_v = \frac{1}{\sigma_c} \Delta \phi \cdot \Delta \phi \dots\dots\dots (5)$$

다. 여기서 q_v 는 단위체적당 발생열 ($I/s \cdot m^3$) 이고, σ 는 전기적 비저항 ($\Omega \cdot m$) 이며 ϕ 는 전위 (V) 이다.

2.2 전위 분포 해석

저항접 용접에서 양전극으로 가압하여 모재와 연결되는 상태에서 전압을 가하면 모재에 전위분포가 형성되고 이에 따라 전류 흐름이 결정된다. 전위분포는 앞의 2.1에서도 언급한 것처럼 온도변화, 전기전도도의 변화, 그리고 접촉저항의 변화에 영향을 받으며, 이 전위분포에 따라 모재 내부에서의 열발생이 결정된다.

전위분포 결정에 지배 방정식은 전류의 보존 및 ohm의 법칙으로부터 다음과 같이 표시된다.

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{\sigma} \right) \nabla \phi = 0 \dots\dots\dots (6)$$

식(6)을 용접부의 직각좌표를 나타낸 Fig. 3에 근거하여 다시 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\sigma} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\sigma} \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\sigma} \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) = 0 \dots\dots\dots (7)$$

식(7)에 의거하여 전위분포를 해석하기 위하여 다음과 같은 가정을 세운다.

- 1) 가압력에 의한 모재의 성질변화는 무시한다.
- 2) 접촉저항은 2.1 절에 의하여 경도와 관계를 가진다.

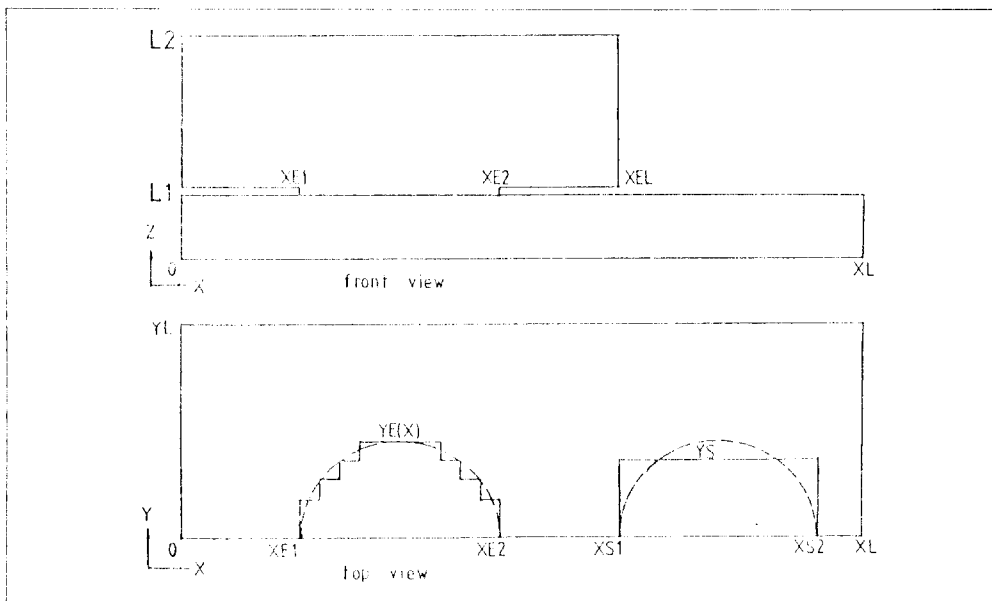


Fig. 3. Projective views of electrode and weldment

3) 용접 전극의 전기 전도도는 모재에 비해 매우 크므로 전극에서의 전위차는 무시한다.

4) 공기와의 접촉면은 절연되었다.

5) 박판 용접에 주로 사용하므로 용접 전극의 압력하에서 용접물간의 접촉면적은 전극과 용접물간의 접촉면적과 같다.

위의 가정을 근거로 하여 Fig. 3에 나타낸 좌표에 대한 경계조건은 다음과 같이 표현한다.

용접물간의 접촉부인 $Z=0$ 에서 가정(5)와 접촉면에서의 전류밀도의 연속성에 근거하여 경계조건은.

$$\frac{1}{\sigma} \frac{\partial \phi}{\partial z} \phi(X, Y, 0) = \frac{1}{\sigma_c/2} [\phi(X, Y, 0) - \phi_n] \dots\dots\dots (8-a)$$

(단, $XE_1 < X < XE_2$ 와 $O < Y < Y_c(X)$ 에서)로 표현한다. 여기서, ϕ 는 용접물에서의 전위이고, ϕ_n 은 용접물 nominal 접촉면에서의 전위이다. σ 와 σ_c 는 각각 용접물의 전기적 비저항과 용접물간의 접촉비저항이다.

용접물과 전극과의 접촉부에서 (8-a)와 같이 전류밀도의 연속성에 근거하여 경계조건은 다음과 같다.

$$\frac{1}{\sigma} \frac{\partial \phi}{\partial z} \phi(X, Y, L1) = \frac{1}{\sigma_e} (\phi_e - \phi(X, Y, L1)) \dots\dots\dots (8-b)$$

(단, $XE_1 < X < XE_2$ 와 $O < Y < Y_c(X)$ 에서) 여기서, σ_e 와 ϕ_e 는 각각 용접물과 전극간의 접촉비저항과 전극에서의 전위이다.

그리고, 이외 공기와의 접촉부는 가정(4)에 근거하여

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \dots\dots\dots (8-c)$$

로 표현한다.

이상의 경계조건은 shunt를 고려하지 않고서 저항점 용접에서의 전위분포 해석시에도 공용되는 사항이나, shunt effect를 고려할 때에는 이미 용접한 부분에 대한 모형화를 필요로 하고, 여기에 근거하여 전위분포에 대한 경계조건을 요한다.

이미 용접한 부분에 대한 모형은 Fig. 3에 나타낸 것처럼 직사각형의 형태로 가정한다. 이는

실제 용접부의 모양인 원형의 경우와는 다른 형태이지만, shunt effect에 끼치는 주요인자는 용접거리와 이미 용접된 부분의 면적이라는 것을 근거하여 모형화 한 것이다.

그리고, 이 영역은 용접전 모재와 같은 성질을 가질 것으로 예상하여, 이 영역에서의 경계조건을 다음과 같이 둔다.

$$Z=0, X_{S1} < X < X_{S2}, \text{ 및 } 0 < Y < Y_S \text{에서} \\ \phi = \phi_n \dots\dots\dots (8-d)$$

2.3 용접물에서의 온도분포 해석

저항점 용접시 전극을 통해서 가해진 전류는 용접물간 접촉부, 그리고 용접물내에서 Joule effect에 의해 열이 발생하고, 이 발생된 열로 용접물을 녹여 접합하는데 쓰이며 일부는 전극을 통해 전도되어 수냉이 된다. 그러므로 용접부내의 온도에 대한 지배방정식은 고체에서의 열전도 방정식에 근거하여 다음과 같다.

$$\rho_m C_m \frac{\partial T_w}{\partial t} = \nabla \cdot (K_m \nabla T_w) + q_v \dots\dots\dots (9)$$

여기서, T_w 는 용접물의 온도, ρ_m, C_m, K_m 은 각각 용접물의 밀도, 비열 및 열전도를 나타내며, q_v 는 용접물내에서의 전기적 열발생으로 식(5)와 같다.

전극에서의 온도지배 방정식은, 전극의 전기 전도도가 용접물의 것에 비해 매우 크다는 2.2 절의 가정(3)에 준하여, 전극 내에서의 전기적 발생열을 무시한

$$\rho_e C_e \frac{\partial T_e}{\partial t} = \nabla \cdot (K_e \nabla T_e) \dots\dots\dots (10)$$

형태로 표현한다. 여기서, T_e 는 전극내에서의 온도, ρ_e, C_e, K_e 는 각각 전극의 밀도, 비열 및 열전도도이다.

식(9)와 (10)을 Fig. 3에 준한 3차원 직각 좌표로 표현하면,

$$\rho_m C_m \frac{\partial T_w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (K_m \frac{\partial T_w}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_m \frac{\partial T_w}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_m \frac{\partial T_w}{\partial z}) + q_v \dots\dots\dots (11)$$

$$\rho_e C_e \frac{\partial T_e}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (K_e \frac{\partial T_e}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_e \frac{\partial T_e}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_e \frac{\partial T_e}{\partial z}) \dots\dots\dots (12)$$

로 각각 표현된다.

식(11)과 (12)로서 온도분포를 해석하기위한 경계조건은 다음과 같은 가정에 근거한다.

- 1) 전극의 가압력에 의한 모재의 성질 변화는 무시한다.
- 2) 전극과 용접물의 접촉부에서 열 저항은 없다.
- 3) 용접 공정시간이 짧고 공기와와의 접촉부의 열전달계수가 매우 작으므로, 공기와와의 접촉부에서 열의 유출은 무시한다.
- 4) 용접물간 및 전극과 용접 물간의 접촉부에서 열의 전달은 단지 접촉부의 수직방향으로만 전달된다.

용접물간의 접촉면에서의 경계조건은, 가정(4)와 열 보존법칙에 근거하여,

$$-K_m \frac{\partial}{\partial z} T_w (X, Y, O) = \frac{1}{2} q_c \dots\dots\dots (13-a)$$

(단, $XE 1 < X < XE 2, O < Y < YC (X)$) 로 표현한다.

전극과 용접물과의 접촉부, 즉 $Z=L 1$ 에서,

$$-K_m \frac{\partial}{\partial z} T_w (X, Y, L 1) + q_e = -K_e \frac{\partial}{\partial z} T_e (X, Y, L 1) \dots\dots\dots (13-c)$$

$$T_w (X, Y, L 1) = T_e (X, Y, L 1) \dots\dots\dots (13-c)$$

(단, $XE 1 < X < XE 2$ 와 $O < Y < YC (X)$)

전극의 수냉 부분에서 경계조건은,

$$-K_e \frac{\partial}{\partial z} T_e (X, Y, L 2) = h_w [T_e (X, Y, L 2) - T_\infty] \dots\dots\dots (13-d)$$

이며, 이외 대기와의 접촉부에서 경계조건은

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0 \dots\dots\dots (13-e)$$

로 표현된다. 이상에서, T_w 는 용접물내의 온도 T_e 는 전극에서의 온도이며, q_c 는 용접물간 접촉

부에서의 열발생, q_e 는 전극과 용접물간의 접촉부에서의 열발생이다. 그리고 K_m 과 K_e 는 각각 용접물과 전극의 열전도도이며, T_∞ 는 상온 h_w 는 물에 의한 열대류 상수를 나타낸다. 이외의 기하학적인 좌표 $XE 1, XE 2, Yc (X), L 1, L 2$, 등은 Fig. 3에 나타내었다.

3. 전위분포 및 온도분포의 수치해석

3.1 유한 차분 방정식

용접물내에서의 전위분포 및 온도분포를 수치적으로 해석하기 위해서는 지배 방정식(7)·(11) 및 (12)와 그때의 여러 경계조건을 유한 차분 방정식 형태로 변환하여야 한다. Fig. 3의 3차원 직각좌표에서의 각 방향에 대한 node수는 X, Y, Z방향으로 각각 i, j, k로 표시한다.

Fig. 3의 용접물 내부에서의 임의의 node에 대한 전류흐름 보존식을 식(7)에 의해서 나타내면 다음과 같다.

$$P_{i-1,j,k} + P_{i+1,j,k} + P_{i,j-1,k} + P_{i,j+1,k} + P_{i,j,k-1} + P_{i,j,k+1} = 0 \dots\dots\dots (14)$$

여기서, P는 전류를 나타내며, 식(14)의 각 항은 다음과 같다.

$$P_{i-1,j,k} = \frac{2}{\sigma_{i-1,j,k} + \sigma_{i,j,k}} \Delta Y(j) \Delta Z(k) \frac{\phi_{i-1,j,k} - \phi_{i,j,k}}{\Delta X(i-1)} \dots\dots\dots (15-a)$$

$$P_{i+1,j,k} = \frac{2}{\sigma_{i+1,j,k} + \sigma_{i,j,k}} \Delta Y(j) \Delta Z(k) \frac{\phi_{i+1,j,k} - \phi_{i,j,k}}{\Delta X(i)} \dots\dots\dots (15-b)$$

$$P_{i,j-1,k} = \frac{2}{\sigma_{i,j-1,k} + \sigma_{i,j,k}} \Delta X(j) \Delta Z(k) \frac{\phi_{i,j-1,k} - \phi_{i,j,k}}{\Delta Y(j-1)} \dots\dots\dots (15-c)$$

$$P_{i,j+1,k} = \frac{2}{\sigma_{i,j+1,k} + \sigma_{i,j,k}} \Delta X(i) \Delta Z(k) \frac{\phi_{i,j+1,k} - \phi_{i,j,k}}{\Delta Y(j)} \dots\dots\dots (15-d)$$

$$P_{i,j,k-1} = \frac{2}{\sigma_{i,j,k-1} + \sigma_{i,j,k}} \Delta X(i) \Delta Y(j) \frac{\phi_{i,j,k-1} - \phi_{i,j,k}}{\Delta z(k-1)} \dots\dots\dots (15-e)$$

$$P_{i,j,k+1} = \frac{2}{\sigma_{i,j,k+1} + \sigma_{i,j,k}} \Delta X(i) \Delta Y(j) \frac{\phi_{i,j,k+1} - \phi_{i,j,k}}{\Delta Z(k)} \dots\dots\dots (15-f)$$

이상에서, $\phi_{i,j,k}$ 는 node (i, j, k)에서의 ϕ 의 근사 값이고 $\sigma_{i,j,k}$ 는 node (i, j, k)에서의 비저항으로서 (i, j, k)에서의 온도에 따른 함수이다. 그리고 ΔX , ΔY 및 ΔZ 는 각각 X, Y 및 Z방향에 대한 step size를 나타낸다. 위 방정식에서 각 node에 대한 $\phi_{i,j,k}$ 는 빠른 수렴특성을 가진 SOR방법(successive over-relaxation method)를 사용한다. ¹²⁾

용접물과 전극에서의 열전도 방정식을 나타내는 (11), (12)식을 용접물과 전극 내부의 임의의 node에 대한 유한차분식으로 표시하면 다음과 같다.

$$\sigma_{i,j,k} C_{i,j,k} \frac{T_{i,j,k,n+1} - T_{i,j,k,n}}{\Delta t} V_{i,j,k} = Q_{i-1,j,k} + Q_{i+1,j,k} + Q_{i,j,k-1} + Q_{i,j,k+1} + Q_{i,j,k} \dots\dots\dots (16)$$

여기서, $\rho_{i,j,k} C_{i,j,k}$ 및 $V_{i,j,k}$ 는 node (i, j, k)에 대한 밀도, 비열 및 체적을 나타내며, $T_{i,j,k,n}$ 는 시간 $t = n \Delta t$ 에서 (i, j, k) 점의 온도를 나타낸다. 그리고, $Q_{i,j,k}$ 는 (i, j, k)에서의 열량을 나타내는 것으로 각항에 대한 표현은 다음과 같다.

$$Q_{i-1,j,k} = \frac{K_{i-1,j,k} + K_{i,j,k}}{2} \Delta Y(j) \Delta Z(k) \frac{T_{i-1,j,k,n} - T_{i,j,k,n}}{\Delta X(i-1)} \dots\dots\dots (17-a)$$

$$Q_{i+1,j,k} = \frac{K_{i+1,j,k} + K_{i,j,k}}{2} \Delta Y(j) \Delta Z(k) \frac{T_{i+1,j,k,n} - T_{i,j,k,n}}{\Delta X(i)} \dots\dots\dots (17-b)$$

$$Q_{i,j,k-1} = \frac{K_{i,j,k-1} + K_{i,j,k}}{2} \Delta X(i) \Delta Z(k) \frac{T_{i,j,k-1,n} - T_{i,j,k,n}}{\Delta Y(j-1)} \dots\dots\dots (17-c)$$

$$Q_{i,j,k+1} = \frac{K_{i,j,k+1} + K_{i,j,k}}{2} \Delta X(i) \Delta Z(k)$$

$$\frac{T_{i,j+1,k,n} - T_{i,j,k,n}}{\Delta Y(j)} \dots\dots\dots (17-d)$$

$$Q_{i,j,k-1} = \frac{K_{i,j,k-1} + K_{i,j,k}}{2} \Delta X(i) \Delta Y(j) \frac{T_{i,j,k-1,n} - T_{i,j,k,n}}{\Delta Z(k-1)} \dots\dots\dots (17-e)$$

$$Q_{i,j,k+1} = \frac{K_{i,j,k+1} + K_{i,j,k}}{2} \Delta X(i) \Delta Y(j) \frac{T_{i,j,k+1,n} - T_{i,j,k,n}}{\Delta Z(k)} \dots\dots\dots (17-f)$$

용접물 및 전극 내부의 node에서,

$$Q_{i,j,k} = \frac{1}{\sigma_{i,j,k}} \left[\left(\frac{\phi_{i-1,j,k} - \phi_{i+1,j,k}}{\Delta X(i-1) + \Delta X(i)} \right)^2 + \left(\frac{\phi_{i,j,k-1} - \phi_{i,j,k+1}}{\Delta X(k-1) + \Delta Z(k)} \right)^2 + \left(\frac{\phi_{i,j-1,k} - \phi_{i,j+1,k}}{\Delta Y(j-1) + \Delta Y(j)} \right)^2 \right] V_{i,j,k} \dots\dots\dots (17-g)$$

용접물과 용접물의 접촉부에서의 $Q_{i,j,k}$ 는

$$Q_{i,j,k} = \frac{2}{\sigma_c} (\phi_{j1} - \phi_{j2})^2 A(i, j) \dots\dots\dots (17-h)$$

단, $5 \leq i \leq 15$
 $1 \leq j \leq 5$
 $K = 1$

용접물과 전극의 접촉부에서의 $Q_{i,j,k}$ 는

$$Q_{i,j,k} = \frac{1}{\sigma_e} (\phi_{j5} - \phi_{j6})^2 A(i, j) \dots\dots\dots (17-i)$$

단, $5 \leq i \leq 15$
 $1 \leq j \leq 5$
 $K = 5$

여기서, $K_{i,j,k}$ 와 $\sigma_{i,j,k}$ 는 각각 node (i, j, k)에서 열전도도와 비저항을 나타낸다. 그리고, σ_c 와 σ_e 는 각각 용접물간 접촉부와 전극과 용접물간의 접촉부에서의 비저항을 나타내며, ΔX , ΔY 및 ΔZ 는 X, Y, Z방향으로의 step size를 나타낸다.

3. 2 시뮬레이션 (Simulation)

저항점 용접에서 용접이 진행되는 과정은 우선 양전극으로 용접물을 가압하고 전압을 걸 때 용접물 및 전극 내부에 형성된 전위차에 따라 전류가 흐르며, 흐르는 전류에 의한 발생열이 온도분포를 형성하며 이에 따라 재질의 성질 역시 변하면서 이런 과정이 연속적으로 발생한다. 이러한 과정을 시뮬레이션 시에도 적용하여 그 과정을 결정했다.

수치해석시 mesh size는 X, Y, Z 방향으로 나아감에 따라 변하는 방법을 선택하였는데, 이것은 shunt를 고려하지 않고 열적 거동 해석을 한 H.S. Cho 등⁷⁾의 연구결과에 의거 용접부의 중심부에서 멀어질수록 온도변화의 정도가 점점 작아진다는 사실에 근거를 둔 것이다. 이렇게 함으로써 인해서, 수치적 error의 작은 범위에서 계산시간에 향상을 가져올 수 있다. 이렇게 함으로써 용접부의 중심부에서 멀어질수록 mesh size가 증가하게 되고 이에 따라 기용접부에 대한 모형은 앞의 2.2 절에서 언급한 것처럼 용접간 거리 및 접촉면적만 같게 두고 원의 형상이 아닌 직사각형으로 가정한다.

온도분포식에 대한 계산은 ADI method에 의했는데, 이때 사용하는 알고리즘은 Douglas Formula를 이용하였다. ADI method는 2차원 또는 3차원의 유한 차분식을 2개 혹은 3개의 matrix로 분리하여 푸는 방법으로 계산량이 작게 되며, time step에 대해 안정하여 직각 좌표에 가장 좋은 것으로 알려졌다.¹²⁾

상온에서의 접촉비저항 $\sigma_c(T_0, P)$, 즉 용접물간 접촉비저항과 용접물과 전극간의 접촉비저항은 참고문헌(13)에 의하였다. 참고문헌(14)에 의하면 연강의 전기 비전전도도, 열전도도 및 비열은 온도에 따라 크게 변하며 그러한 변수에 대한 형태를 Polynomial 방정식으로 표시한 참고문헌(6)을 참고한다. 그리고, 상변화와 관련된 잠열 효과는 참고문헌(15)에 근거하여 이에 상응하는 비열값을 크게하여 보상하였다.

$$C_m = \frac{H_m}{T_1 - T_s} \dots\dots\dots (18)$$

여기서, C_m 및 H_m 을 각각 잠열효과를 고려

한 비열과 잠열을 나타내고, T_s 와 T_1 은 각각 고온상도와 액상온도를 나타낸다.

4. 실험

4. 1 시험편 및 실험장치

실험에서 사용한 시험편은 그 화학적 조성 및 물리적 성질이 표 1 과 표 2 와 같은 연강을 사용했으며, 시험편의 크기는 $1.6 \times 25 \times 75$ (mm³) 이다. 사용전극은 연강 및 저합금 스테인레스 강 등의 저항용접에 적합한 RWMA Class II 로서 tapered-flat한 모양으로 가공하여 사용하였다. 전극팁의 지름은 5mm이며 전극재료는 크롬동으로서 그의 물리적 성질은 표 2 에 나타낸 것과 같다.

사용 용접기는 용량 50KVA의 공기압 작동 저항점 용접기(model SP-AF 50, Cho-Heung Welding Company)로서 열입력은 SCR의 firing angle의 조절에 의해서 제어된다. 가압력은 공기 압력 조절기에 의해 조정되며, time switch로 초기 가압시간(squeeze time), 용접시간(weld time), 유지시간(hold time) 등을 각각 조절할 수 있다. 용접중 전압 및 전류의 변화는 weld checker를 사용하여 측정되며 불사이클에 대한 평균값을 동시에 표시한다.

4. 2 실험방법

용접거리(sopt space)와 용접시간의 변화에 따른 용접부의 온도분포를 보기위해 용접은 전극압력과 두부하시 전류를 각각 360kgf와 11300A로 설정해 두고 용접 거리가 8, 20, 40mm 및 무한대의 경우에 대해서 용접시간을 변화시키면서 행한다. 용접된 시험편은, 내부의 조직검사를 위해서, 절단을 하고, 마운팅 및 폴리싱(polishing)을 행한후에 약 5% nital로 30초간 에칭한후 현미경으로 시험편내의 조직을 검사한다. 조직검사후 알 수 있는 등온선은 표 1과 같은 화학조성을 갖는 연강의 경우, A₁변태점인 723°C 선과, 재료가 용융후 응고되면서 나타나는 고상온도인 약 1493°C 이 된다. 1493°C 선은 용융부의 조직이 dendrite 조직을 이루고 있기 때문

Table 2. Physical Properties of the Weldment and Electrode

Property	Notation (Unit)	Weldment SMzoc	Electrode (1% Cr - 8.3%Cu)
Thermal Conductivity	K (w/m. c)	27.3	171.49
Specific Heat	C (J/kg. c)	0.672×10^3	4.102×10^2
Density	(kg/m ³)	7.86×10^3	8.93×10^3
Latent Heat of Fusion	L _m (J/kg)	2.742×10^5	-
Convective Heat Coeff.	h _w (W/m ² . c)	-	4.187×10^4
Solidus Temperature	T _s (c)	1493	-
Liquidus Temperature	T _l (c)	1525	-

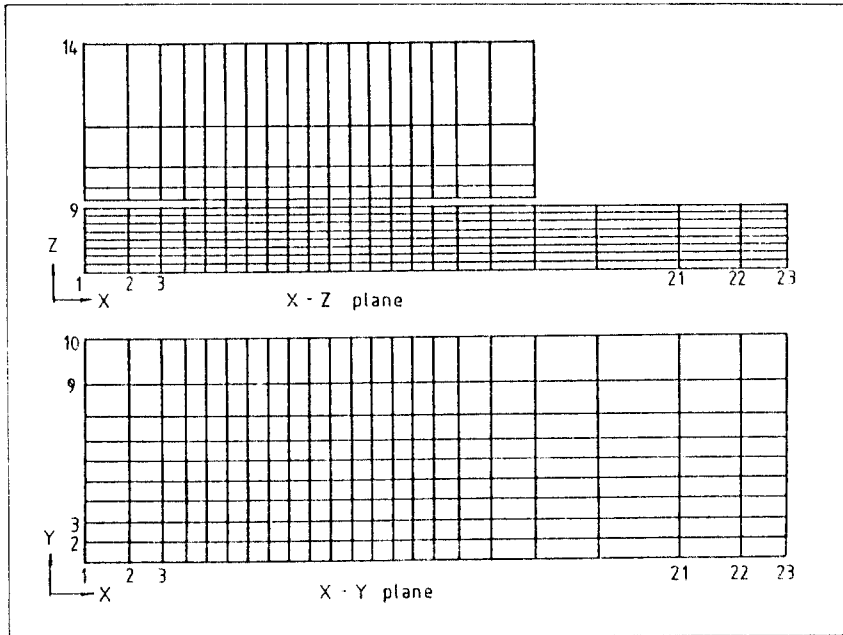


Fig. 4. Grid for numerical calculation

에 쉽게 구별이 가능하다.¹⁶⁾ 조직검사시에는 약 100배로 확대하여 관찰했으며 X-Y 좌표에 따라 약 1 μ m 까지 측정이 가능하므로, 용접된 시편에서 조직변화가 발생한 경계영역의 윤곽을 측정하여 실험에 의한 온도분포를 구하였다.

5. 결과 및 검토

5.1 전위분포

Fig. 5에서부터 Fig. 8까지는 수치해석에 의

하용접물내의 전위분포와 전류흐름 경로를 각계의 용접간거리 (spot space)에서 용접시간에 따라 나타낸다. 여기서의 등전위선은 실선으로서 전극과 용접물간의 접촉부와 용접물간의 접촉부 사이의 전위차를 7등분하여 각 값에 해당하는 같은 전위값의 점들을 선으로 연결한 것이다. 그리고 점선은 전류 흐름의 경로를 나타낸다. 이는 전류의 흐름은 등 전위선에 수직하게 흐른다는 사실에 기인한 것이며 그 양은 등전위선의 밀도에 비례한다.

Fig. 5는 shunt effect가 없는 경우를 나타낸 것으로서 대부분의 전류의 양은 양전극을 직선

으로 연결한 선상에 있고, 나머지 일부만 가장자리로 흐른다. 여기서의 전위분포 및 전류유동 경로는 용접전시간에서 전극의 중심축에 대해 축대칭 현상을 이룬다. 그러나 만일 shunt effect가 있을때에는 이러한 대칭현상은 더이상 나타나지 않으며, 이는 Fig. 6, 7, 8에서 알 수 있다.

Fig. 6, 7 및 Fig. 8은 용접간 거리가 각각 8, 20, 40mm인 shunt effect가 있는 경우의 시간에 따른 등전위분포를 나타낸다. shunt가 없는 경우인 Fig. 5와의 가장 큰 차이점은 전극의 중심축에 대한 비대칭성이며, 이것은 이미 용접을

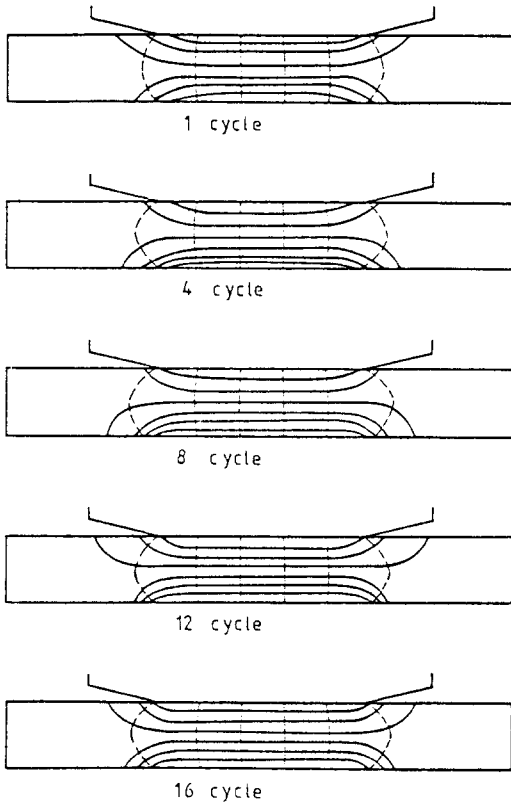


Fig. 5. Voltage distribution and current path with weld time :
 electrode force = 360 kgf, current without load = 11300 A
 and spot space = infinite, as no shunt effect formed.
 Voltage distribution : —————
 Current path : - - - - -

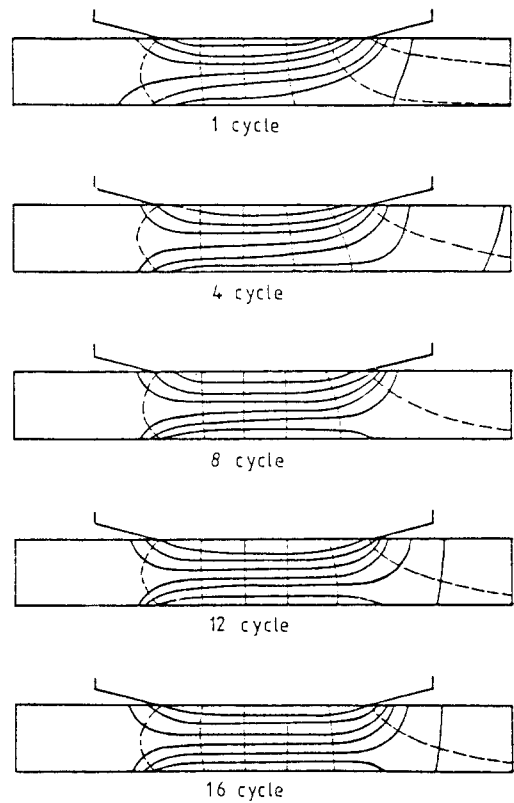


Fig. 6. Voltage distribution and current path with weld time :
 electrode force = 360 Kgf, current without load = 11300 A
 and spot space = 8mm, as shunt effect formed.
 Voltage distribution : —————
 Current path : - - - - -

한곳으로 셉트회로(shunt circuit)가 형성되어 전극을 통해 흐르는 전류의 일부가 이곳으로 흐르기 때문이다. 이상에서 shunt 있는 경우의 전위분포는 일반적으로, 전극과 용접물간의 접촉부에서는 shunt 회로가 형성된 방향에서 전위구배가 급하며, 용접물간의 접촉부에서는 shunt 회로가 형성된 부분보다 그 반대부분이 더 급한 전위구배를 나타낸다. 이 때문에 이렇게 전위구배가 급한 곳에서 열이 많이 발생하여 이 부분의 온도가 상대적으로 높게 나타난다. spot space가 증가함으로 인해 shunt circuit으로 빠져나가는 전류의 양이 상대적으로 감소하여, 위와 같은 경향을 유지하면서 그 정도가 감소하고 있

음을 Fig. 6, 7 및 Fig. 8의 비교에서 알 수 있다.

Fig. 15는 용접시간에 따라 각 spot space에 있어서의 shunt 회로로의 전류유출을 전극간에 흐르는 전체 전류에 대한 백분율로서 계산결과를 나타낸것이다. shunt 회로로의 전류의 양은 측정할수가 없기 때문에 단지 계산에 의한 결과만을 나타내었다. spot space가 8mm 일때는 약 30%정도의 전류가 shunt 회로를 통하여 나감을 알 수 있고, spot space가 증가함에 따라 그 정도가 많이 감소하여 40mm인 경우는 약8%정도로 아주 적은양이 빠져 나간다. 이로 인해 40mm의 spot space 경우는 전위분포 모양이 거의

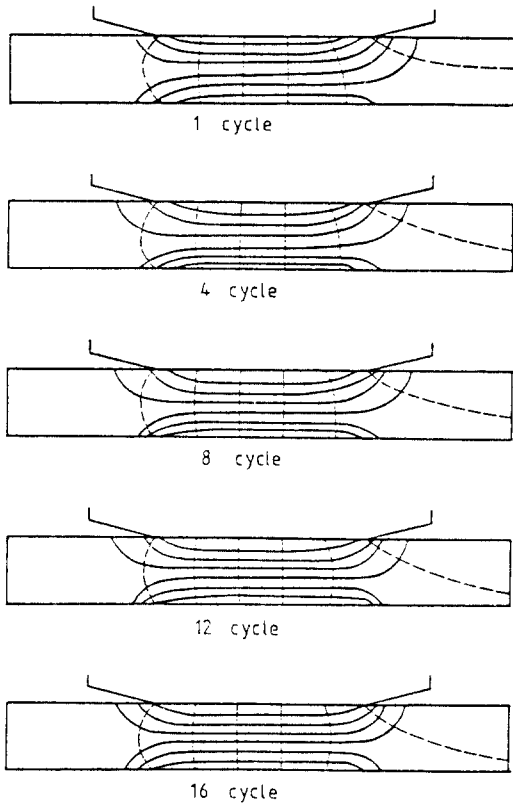


Fig. 7. Voltage distribution and current path weld with time : electrode force= 360 kgf, current without load= 11300A and spot space= 20 mm, as shunt effect formed,
Voltage distribution : _____
Current path : - - - - -

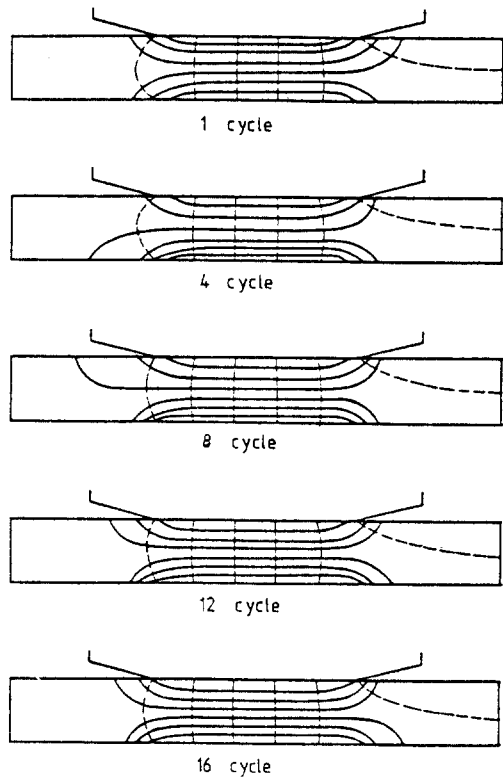


Fig. 8. Voltage distribution and current path with weld time : electrode force= 360 kgf, current without load= 11300 A and spot space= 40 mm, as shunt effect formed
Voltage distribution : _____
Current path : - - - - -

대칭적으로 나타난다.

5.2 온도분포

Fig. 9에서 Fig. 12까지는 용접간 거리가 무한대, 8, 20 및 40mm인 경우에 대해서 시뮬레이션에서 얻어지는 온도분포와 실험에서 측정된 등온선과 비교를 용접시간의 변화에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 윗부분은 계산에 의한 것이고 아랫부분은 실험에 의한 등온선을 나타낸 것이다. 아래의 실험에 의한 등온선은, 실험 후 시편의 조직을 현미경으로 관찰하여 조직변화를 나타내는 경계선의 좌표를 읽어서 나타내었다. 이러한 조직변화에 대한 시편의 조직사

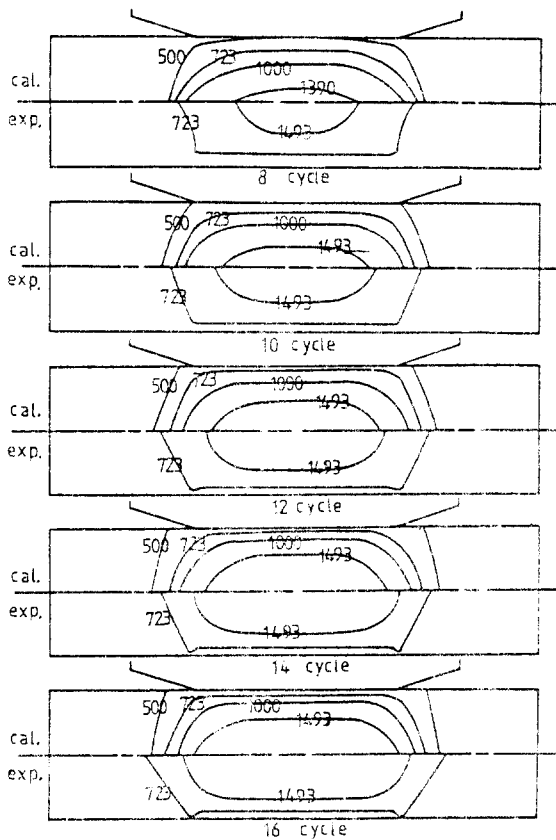


Fig. 9. Temperature distribution with weld time : electrode force = 360 kgf, current without load = 11300A and spot space = infinite, as no shunt effect formed.

진을 shunt가 없는 경우와 shunt가 가장 심한 경우인 용접간 거리가 8mm일 때를 각각 Fig. 13과 Fig. 14에 나타내었다. Fig. 14에서 처음 16 cycle까지 완전히 용접한 것을 1st weld로 하여 오른쪽에 있는 것이고, 다음 8mm 떨어진 곳에서 용접시간을 변화시켜 용접한 것을 2nd weld라 하여 왼쪽에 나타내었다. 이것은 1st weld 쪽으로 shunt 회로가 형성되기 때문에, 그에 따른 온도분포의 영향을 보기 위한 것이다.

Fig. 9는 shunt effect가 없는 경우의 시간에 따른 온도분포를 나타낸 그림이다. 앞의 shunt가 없는 경우의 전위분포를 나타낸 Fig. 5처럼 전극의 중심축에 대해서 대칭의 형상을 나타낸

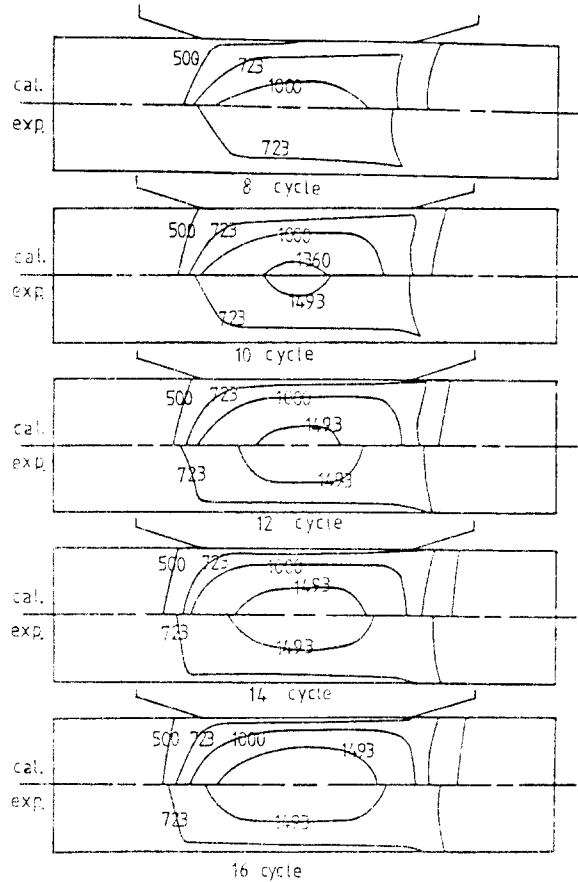


Fig. 10. Temperature distribution with weld time : electrode force = 360 kgf, current without load = 11300A and spot space = 8 mm, as shunt effect formed.

다. 여기서 용융부(nugget)에 해당하는 1493℃ 선은 계산에 의한 것이 실험에 의한 것보다 작게 나타났다. 이러한 사실은 H.S.Cho 등⁷⁾의 연구에서 밝힌 것 처럼 전극에 의한 용접물의 변형이 계산에는 포함되지 않기 때문이라 여겨진다. 실제 공정에서는 두개의 시편이 전극가압에 의해 변형되고, 이에따라 열 생성은 용융부의 중심에 집중된다. 왜냐하면 전류 밀도가 변형에 의해 주변보다도 중심부에 집중되기 때문이다. HAZ를 나타내는 723℃선은 계산결과가 실험에 의한 결과보다 다소 작게 나왔으나 비교적 그 크기나 모양이 서로 잘 일치한다.

Fig. 10, 및 Fig. 12 용접간 거리 (spot space)

가 각각 8, 20, 및 40mm일때의 용접시간에 따른 온도분포를 나타낸다. 이렇게 shunt가 존재하는 경우의 온도분포가 shunt가 없는 경우의 Fig. 9와의 근본적인 차이점은 대칭성의 여부에 있다. 즉, 앞의 전위분포에서와 같이 shunt가 있는 경우는 shunt가 없는 경우와는 달리 온도분포가 전극의 중심축에 대하여 비대칭적인 구조를 나타낸다. 이런 비대칭성은 용접간 거리 (spot space)가 멀어짐에 따라 그 정도가 감소하여 40mm의 spot space 경우에는 거의 대칭적인 모양을 나타내고 있다. 이는 Fig. 15에 나타낸 것처럼 shunt 회로로의 전류유출이 매우 작아 Fig. 8의 전위분포가 거의 대칭으로 나타나기

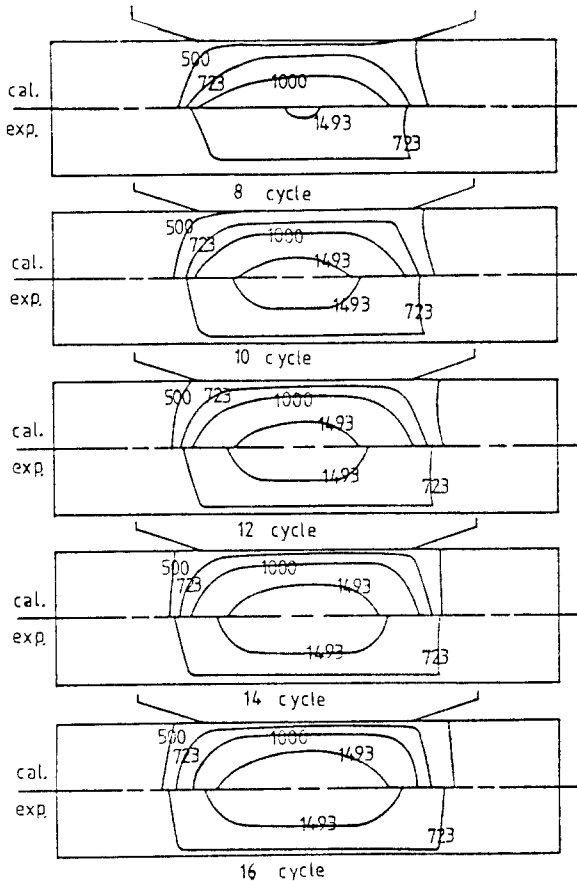


Fig. 11. Temperature distribution Weld time : electrode force = 360 kgf, current without load = 11300 A and space = 20 mm, as shunt effect formed.

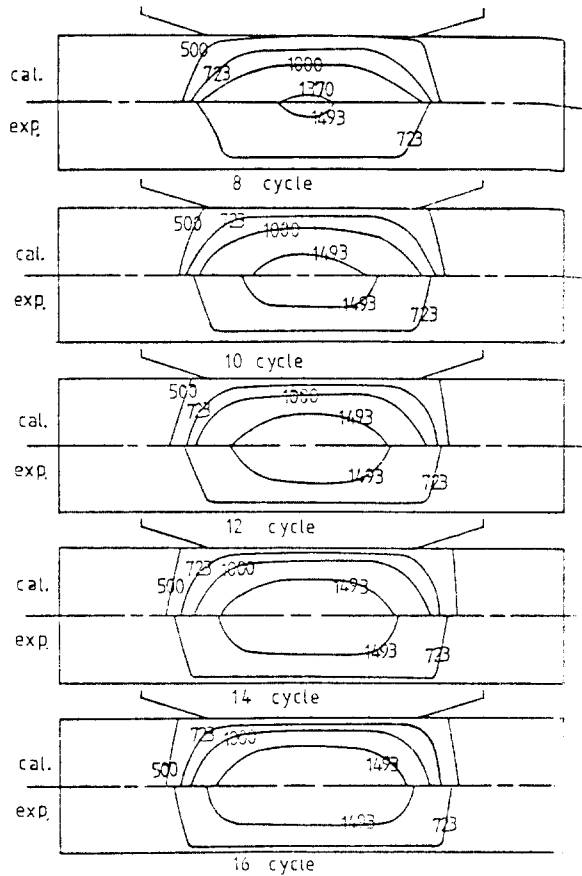


Fig. 12. Temperature distribution with weld time : electrode force = 360 kgf, current without load = 11300 A and space = 40 mm, as shunt effect formed.

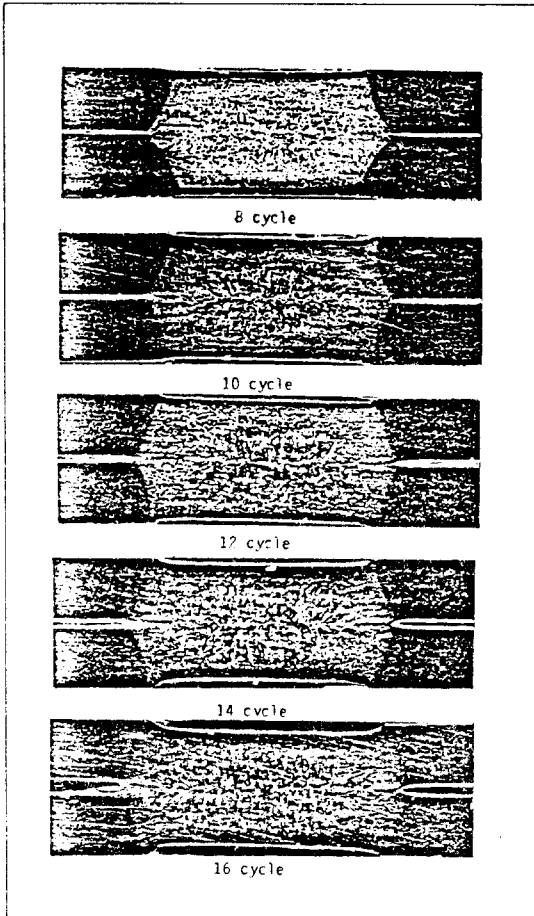


Fig. 13. Macro-photographs of cross-sectioned specimens showing the nugget variations versus weld time : electrode force = 360 kgf, current without load = 11300A and spot space = infinite, as no shunt effect formed.

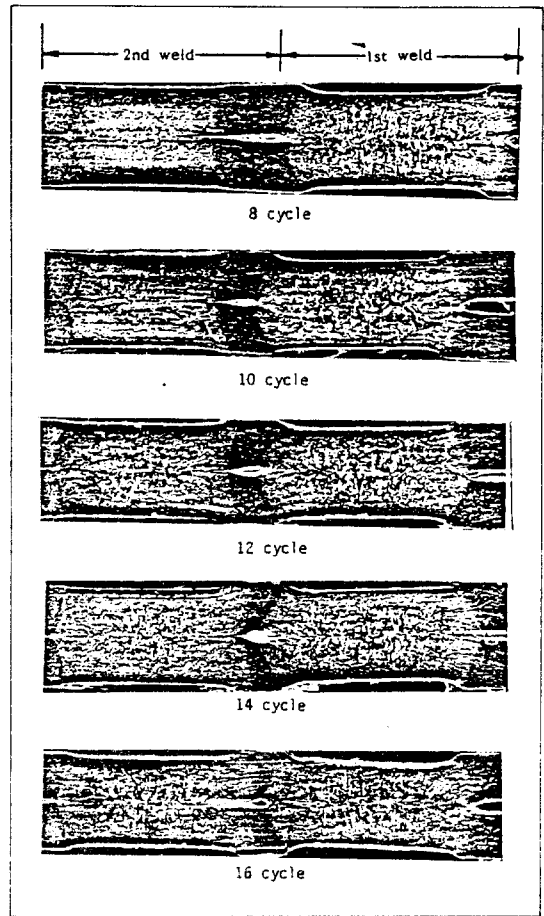


Fig. 14. Macro-photographs of cross-sectioned specimens showing the nugget variations versus weld time : electrode force = 360 kgf, current without load = 11300A and spot space = 8 mm, as shunt effect formed.

때문이다. shunt의 영향이 가장 큰 Fig. 6 과 Fig 10 을 비교하여 보면, Fig. 6 에서 전류밀도가 비교적 큰 shunt 회로 방향의 전극과 용접물 접촉 부분과 shunt 회로 반대 방향의 용접물 간의 접촉부에 해당하는 영역의 Fig 10 에서의 부분이 온도가 높아서 등온선이 그 부분으로 치우친 형상을 하고 있다. 이러한 것을 실험에 의해서 나타난 등온선의 모양도 거의 비슷한 형태를 나타내고 있다. 여기서 용융부를 나타내는 1493℃ 선 이내의 영역은 계산결과가 실험결과보다 작게 나타나 있다. 이것은 앞의 Fig. 9 의 경우

와 같이 해석이 가능하다. HAZ (heat affected zone) 를 나타내는 723℃ 선은 실험과 계산의 결과가 Fig. 9 와 같이 그 모양이나 크기에 있어서 거의 같은 결과를 보여준다. 같은 용접조건하에서 shunt 있는 경우와 없는 경우에서의 비교에서, 용융부의 초기 생성이 shunt 가 있는 경우가 보다 늦으며 또한 최종크기도 역시 작게 나타났다.

이것은 이미 용접된 곳으로 형성된 shunt 회로로 가해진 전류의 일부가 빠져나감으로 인해 발생열의 크기가 작기 때문이며, 이 빠져나가는

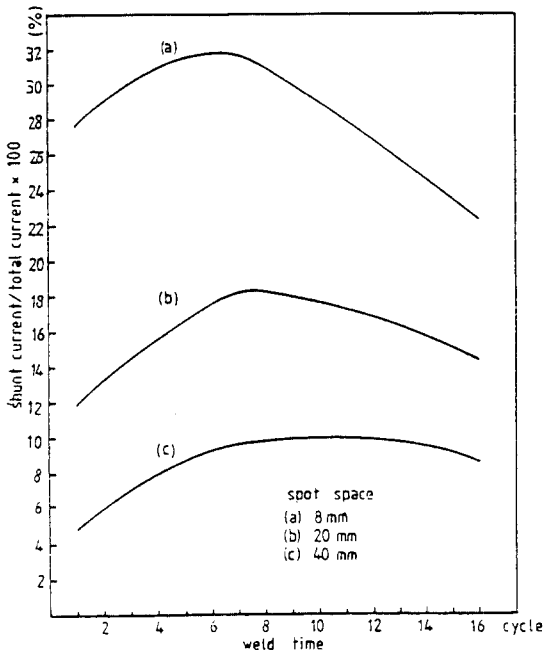


Fig. 15. Variation of the ratio of shunt current to total current for three cases of spot space : electrode force = 360 kgf. current without load = 11300A.

전류량은 Fig. 15에서 보는 것처럼 용접시간 중에 변한다. 뿐만아니라, spot space에 따라서 현격히 변함을 알 수 있다. spot space가 40mm인 경우는 약 8% 정도의 전류만 shunt 회로로 빠져나감으로 그의 영향이 매우 작아서 온도분포 모양이 거의 대칭적인 형상을 하고 있다. 즉, spot space의 증가에 따라 shunt에 의한 영향이 현격히 감소함을 알 수 있다.

6. 결론

저항점 용접시 shunt effect가 용접물에 미치는 영향을 해석하기 위해 전류유동 및 열전도의 복잡성 때문에 수치적 방법을 사용했다. 그리고 해석시의 shunt에 대한 모형화와 이를 이용한 수치적인 해석을 수행했다. 해석의 결과는, 해석 결과의 타당성을 입증하기 위해, 실험에 의한 것과 비교를 하였다. 두 결과는 비교적 잘 일치하였으며, 이에 의해 shunt가 용접물에 끼치는

몇가지 사항을 해석할 수 있었다.

1. shunt effect에 의해 형성된 shunt 회로로의 전류 유출 때문에 shunt가 있는 경우의 용접물내의 전위분포와 온도분포는 shunt가 없는 경우와는 달리 비대칭 형상을 이룬다.

2. 비대칭성은 전극과 용접물과의 접촉부에서는 shunt 회로가 형성된 곳으로 전위분포가 밀집되어 온도가 높고, 용접물간의 접촉부에서는 그 반대쪽의 전위분포가 보다 밀집하여 온도가 높게 나타났다.

3. shunt 회로로의 전류유출에 의해 용융부의 크기가 감소하였으며, 그 정도는 spot space가 증가함에 따라 감소한다.

4. shunt effect에서의 주요인자인 shunt 전류는 용접시간과 용접간 거리에 따라 크게 변한다. 8mm의 용접간 거리에 대해 최고 32%까지 전류가 유출된다.

참고문헌

1. P.M. Knowlson, D.N. Waller, "Quality Control during spot and switch welding sheet material", Sheet Metal Industry, p39-p49, January, 1964.
2. 이철규, "저항점 용접에서의 전극 변형 형상에 관한 연구". KAIST 석사논문, 1985.
3. Y.J. Won, H.S. Cho, C.W. Lee, "A micro-processor based control system for resistance spot welding system", Proc. Acc., P734, 1983.
4. D.W. Chun, H.S. Cho, "A Micro-processor based electrode movement controller for spot weld quality assurance", IEEE Trans. Industrial application, 1985.
5. 조영준, "저항용접 과정의 모델링과 부칙적 제어에 관한 연구". KAIST 박사논문, 1986.
6. T. Yamamoto, T. Okuda, "A study of spot welding of heavy gage mild steels", in the word, Vol.9, No.7-8, P235-P255, welding 1971.
7. H.S. Cho, Y.J. Cho, "A theoretical model for the dynamic resistance in resistance spot welds", Int. Mech. Engrs., Vol.199, No.62, P71-P79, 1985.
8. J. Heuschkel, H. Bitzer, "Spot weld consistency studies", Welding Journal, October, P4775-P4835, 1949.
9. A.R. Hard, "Preliminary test of spot weld shunting in 24sh Alclad", Welding Journal, P4915-P4955, October, 1949.

10. A.L. Tslaf, "A thermophysical criterion for the weldability of electric contact material in a steady state regime". IEEE Transaction, P147-P152, March, 1982.
 11. H. O'Neill, "Hardness measurement of metals and alloys", 2nd edition, P153-P188, Chapman and Hall, London, 1967.
 12. A.R. Mitchell, "Computational methods in partial differential equation", John Wiley and Sons, London, 1969.
 13. J.W. Kim, "A study on thermal behavior and voltage potential field formation of weldment in resistance welding", MS thesis, KAIST, 1984.
 14. American Society for Metals, Metals Handbook, Physical properties of carbon and low-alloy steel, 9th edition, Vol.1, 1978.
 15. C. Bonacina, G. Comini, A. Fasano, M. Primicerio, "Numerical solution of phase-change problems", Int. J. Heat Mass Transfer, P1825-P1832, 1973.
 16. W.F. Savaqe, C.D. Lundin, A.H. Aranson, "Weld metal solidification mechanics", Welding Journal, 44(4), P175s-P181s, 1965.
-