

# 저항 점용접의 3차원 변형 예측에 대한 간이 모델링 기법

## Simplified Modeling for Analyzing 3-D Deformations of Spot-welded Structures

차 병 우\*, 나 석 주\*\*

\* 한진중공업 산업기술연구소

\*\* 한국과학기술원 기계공학과

**ABSTRACT** A simplified analysis method is proposed in this paper, through which the deformation due to spot welding is obtained. In order to analyze the spot welding process, the finite elements are axisymmetrically modeled, and the results from them are used for analyzing the deformation of spot welded structure. It takes more little time in this simplified analysis than the analysis by 3-D continuum elements, and this analysis produces the results that nearly agree with the measured data.

### 1. 서 론

전기 저항 점용접은 판과 판 사이의 접촉 저항을 이용해서 통전시 발열되는 주울 가열에 의해 너겟이 형성되어 용접이 이루어지는 방법으로써 자동차 및 철도 차량에 광범위하게 적용되고 있으며, 최근에는 정밀 접합에도 다양하게 이용되는 용접법이다. 이와 같은 전기 저항 점용접(이하 점용접이라고 칭함)에 대한 공정 해석 연구가 많은 연구자들에 의해 여러 가지 방법으로 이루어져 왔다<sup>1-4)</sup>. 주로 접촉 저항의 구현과 온도에 따른 물성치 변화의 구현, 그리고 너겟의 형상에 대한 연구가 주류를 이루었다.

점용접부를 갖는 구조물들은 접합부가 단속적으로 용접이 되어 있기 때문에, 외력이 작용하는 경우에 응력 집중이 생기게 된다. 이러한 경우에 용접 변형과 잔류응력<sup>6)</sup>은 구조물의 최대 응력을 높이고, 구조물의 조립성을 저하시키므로, 이를 줄이도록 해야한다. 점용접에 의한 변형을 해석하기 위해서 쉘요소로 모델링하는 경우에는 용접공정을 해석하지 못하고, 3차원 연속체 요소(3-D continuum element)로 모델링하면 용접 공정은 해석할 수 있으나, 요소수 및 절점수의 증가로 상당한 해석 시간을 필요로 하며, 점용접 공정의 특성상 온도에 따른 물성치의 비선형성과 소성 해석의 비선형성, 그리고 접촉 요소의 비선형성 등으로 인하여 좀처럼 수렴하는 해

를 얻지 못한다. 본 연구에서는 용접 공정에 의한 축대칭 해석 결과를 이용하여 점용접부가 포함된 쉘구조물의 변형을 해석하는 방법에 대해 소개한다. 그리고 그 방법의 검증을 위해 용접 변형을 직접 측정하여 비교하였다.

### 2. 축대칭 모델링을 이용한 점용접 공정 해석

#### 2.1 축대칭 해석

해석 모델은 1/4 모델로 하였고 전극봉-판재, 판재-판재 사이는 전기-열 해석에서 접촉저항에 의한 주울 가열을 구현하기 위하여 전도 연결 요소를 사용하였다. 그리고 이들 전도 연결 요소들은 구조해석에서 접촉요소로 대치된다. 본 연구에서 사용한 재질은 SUS304이며 온도 변화에 따른 물성치는 Stainless Handbook<sup>5)</sup>을 참고하였고, SUS304는 상온 및 고온에서 오스테나이트계를 유지하는 금속이므로, 본 해석에서 상변화에 의한 체적 변화는 무시하였다. 탄소성 구조 해석을 하기 위해 응력-변형률 선도를 쌍일차 경화(bilinear hardening)로 가정하여 해석하였고, 항복점 이후의 기울기를 앞으로 경화 기울기(hardening tangent)라고 정의하기로 한다. 여러 가지의 물성치들 중에서도 점용접을 하는데 있어서 중요한 역할을 하는 판과 판 사이의 접촉 저항은 Tsai 등<sup>3)</sup>이 제안한 다음의 식(1)을 이용하여 접촉저항값을 구하였다.

$$R_c(T) = \rho_e(T) \frac{l}{A_c} = R_c(20^\circ\text{C}) \sqrt{\frac{\sigma_Y(T)}{\sigma_Y(20^\circ\text{C})}} \quad (1)$$

여기서,  $R_c(T)$ : 온도 $T^\circ\text{C}$ 에서 접촉저항 $[\Omega]$

$\rho_e(T)$ : 온도 $T^\circ\text{C}$ 에서 연결 요소의 비저항 $[\Omega\text{m}]$

$l$ : 연결 요소의 길이 $[\text{m}]$

$A_c$ : 접촉 면적 $[\text{m}^2]$

$\sigma_Y(T)$ : 온도 $T^\circ\text{C}$ 에서 항복응력 $[\text{MPa}]$

실시간 전기-열 해석을 통하여 얻은 온도 분포 결과를 저장하고, 구조해석에서 각 시간대 별로 필요한 온도분포를 불러내어 사용하는 과정을 그림1에 도시하였다. 전기-열 해석이 끝나면 전도 연결 요소는 필요 없게 되어 전체 모델에서 삭제하고, 구조해석에서 전극봉-판재, 판재-판재 사이의 접촉요소를 생성한다. 냉각시간 동안 일어나는 모재의 수축을 전극봉이 방해하지 않도록 전극봉을 모재에서 분리시킨 후, 전극봉의 요소를 비활성화 시켰다.

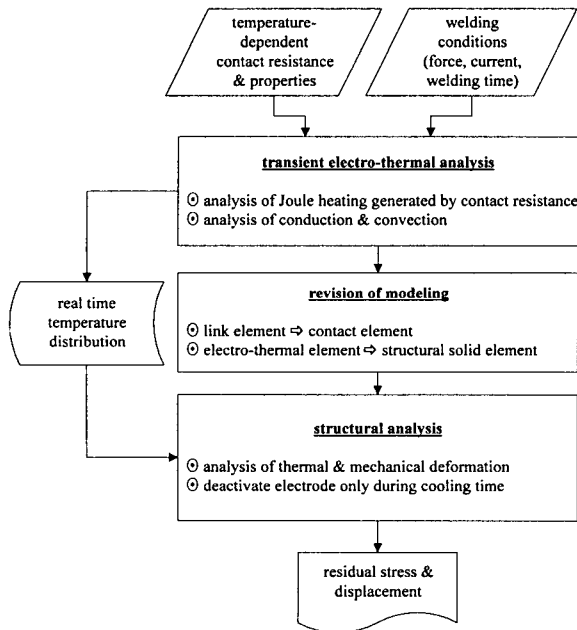


그림1 용접공정 해석 흐름도

## 2.2 축대칭 해석 결과

경화 기술기의 가정값이 용접 변형에 미치는 영향을 살펴보기 위해, 용접 후의 변형 형상을 여러 가지 경화 기술기에 따라 해석한 결과와 실제 측정 결과를 그림2에 비교하여 보았다. 여기서, 측정값은 표면 조도계를 이용하여 얻은 결과이다. 이 결과에서 알 수 있듯이 경화 기술기의 값이 탄성계수의 1%일 때가 해석 결과와 측정

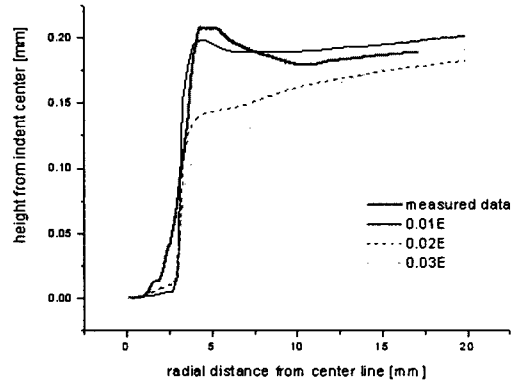


그림 2 점용접부 부근의 용접 변형

값이 가장 잘 일치함을 보인다. 이것은 잔류응력의 해석 결과와 측정값이 잘 일치할 수 있는 경화기술기값과 같다<sup>6)</sup>.

## 3. 점용접부를 갖는 웰구조물의 용접 변형 해석

### 3.1 간이 모델링 기법

웰 요소를 사용하여 접촉저항의 발열에 의한 모재의 두께 방향으로 발생하는 온도 구배를 구현하는 것은 불가능하다. 그러므로, 용접 공정에 대한 변형을 해석하기 위해서는 3차원 연속체 요소를 사용해야 하는데, 이 요소를 사용하면 해석 시간의 기하급수적인 증가와 해의 수렴성이 아주 좋지 않다. 이러한 웰 요소 모델과 3차원 연속체 요소 모델의 한계를 극복하기 위해 앞 장에서 언급한 축대칭 모델의 공정 해석 결과를 이용하는 방법을 제시하려고 한다.

두께 1.5 $[\text{mm}]$  SUS304 판재에 대한 축대칭 모델의 점용접 해석 결과에 의하면 중심선으로부터 반경 20 $[\text{mm}]$  이상의 거리에서는 용접 공정 동안에 소성을 겪지 않고 탄성만을 유지함을 알 수 있다. 이와 더불어 점용접부를 갖는 구조물에서 전체 구조물에 비해 점용접부 너겟의 크기는 국부적이라 할만큼 상당히 작다. 이러한 사실들에 착안하여 소성을 겪지 않는 임의의 반경이상에서의 축대칭 해석의 결과를 경계조건으로 하여 웰 모델에 적용하는 방법을 제안하려고 한다. 먼저 점용접 공정해석을 축대칭 모델을 사용하여 해석을 하고, 그 결과로부터 소성을 겪지 않은 일정 반경( $R_0$ )에서의 변위를 얻는다. 이 변위값들로부터  $r=R_0$ 에서 중립축의 변위  $u_r$ ,  $u_\theta$ ,  $u_z$ 를 계산하고, 중립축의 회전을 계산하여 저장한다. 그 다음으로 점용접부를 갖는 구조물을 웰 요소로 모델링하고 나서 점용접부 중심으로부

터 거리가  $R_0$ 인 경계에서 앞에서 구한 변위와 회전을 경계조건으로 부여한다. 이 때 축대칭 모델에서 해석한 것은 극좌표계의 결과를 쉘 모델에서 사용하는 좌표계로 변환하여 입력한다. 이러한 과정을 흐름도로 표시하면 그림3과 같다.

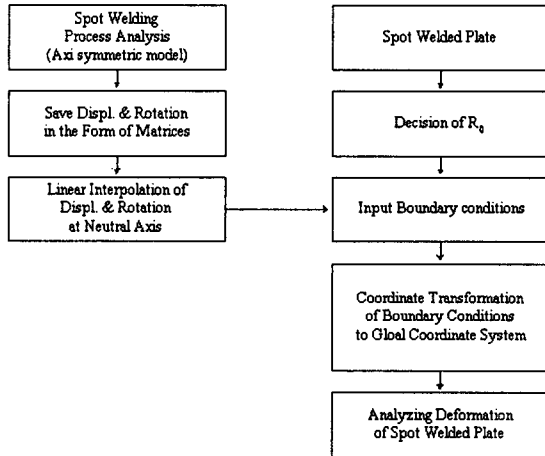


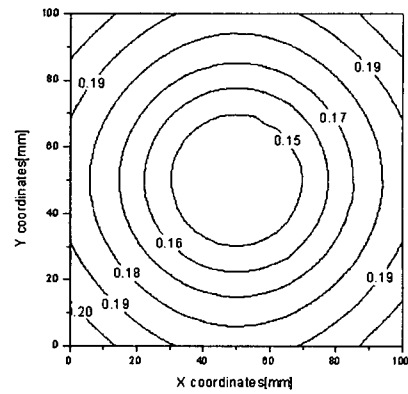
그림 3 간이 모델링 기법

### 3.2 사각형판의 용접 변형

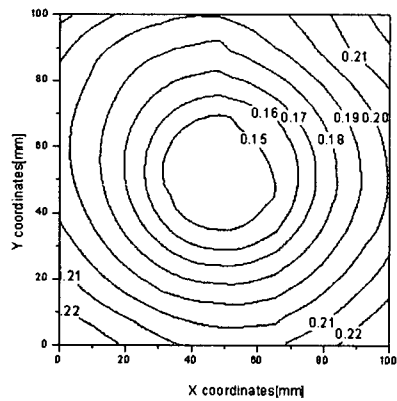
두께가 1.5[mm]이고 크기가 100 × 100 [mm]인 정사각형의 SUS304 판재에 점용접을 하는 경우의 용접 변형을 해석하였다. 용접 변형은 주로 z 방향에서 일어나고 이에 비해 x, y 방향의 변형은 미소하므로, 용접 변형은 z 방향 변위만을 생각하기로 한다. 해석 결과를 실제의 용접 변형과 비교하기 위하여, 3차원 측정기를 이용하여 점용접 전, 후의 형상을 측정하여 z 방향 변위를 계산하였다. 이 측정기는 분해능 0.5 [μm]를 갖는 탐촉식 측정기이다. 해석 결과를 시험 결과를 등고선으로 표시하면 그림4와 같다. 그림4에서 알 수 있듯이 해석 결과의 최대 변위가 측정값과 비교하여 볼 때, 9.5%의 오차를 갖고, 전체적으로 변형의 경향과 분포가 측정 결과와 해석 결과가 비슷함을 알 수 있다. 그러므로, 축대칭 모델의 점용접 공정 해석 결과를 점용접부를 갖는 쉘 모델에 적용하는 그림3과 같은 방법의 사용이 가능하다고 판단된다.

### 4. 결 론

- 1) 용접 변형을 잘 예측하기 위한 경화 기술기는 탄성계수의 1%일 경우이다.
- 2) 점용접부를 갖는 구조물의 변형을 해석하기 위한 간이 해석법을 제시하였다.
- 3) 간이 해석법은 공정 해석 시간을 단축하고



(a) 해석 결과



(b) 측정 결과

그림 4 사각판에서의 용접 변형

수렴성을 좋게 한다.

### 참고문헌

1. H. A. Nied : The finite element modeling of the resistance spot welding process, Welding Journal, 63-4(1984), 123s - 132s
2. J. E. Gould : An examination of nugget development during spot welding using both experimental and analytical techniques, Welding Journal, 65-1(1987), 1s - 10s
3. C. L. Tsai, W. L. Dai, D. W. Dickinson and J. C. Papritan : Analysis and development of real-time control methodology in resistance spot welding, Welding Journal, 69-12(1999), 339s - 351s
4. C. L. Tsai, W. L. Dai, D. W. Dickinson and J. C. Papritan : Analysis and development of real-time control methodology in resistance spot welding, Welding Journal, 69-12(1999), 339s - 351s
5. Handbook of Stainless Steels, Mcgraw-Hill, 1977
6. B. W. Cha and S. J. Na : A Study on the Relationship between Welding Conditions and Residual Stress of Resistance Spot Welded 304-type Stainless Steels, Journal of Manufacturing Systems, 2001 submitted