

저항 다점용접부의 역학적 특성에 관한 연구

방한서* · 방희선**

*조선대학교 선박해양공학과

**조선대학교 기계공학과 대학원

A Study on the Mechanical Characteristics of the Resistance Multi-spot Welded Joints

Han Sur Bang* and Hee Sun Bang**

* Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering, Chosun University, Kwangju 501-140, Korea

**Graduate school, Dept. of Mech. Eng., Chosun University, Kwangju 501-140, Korea

Abstract

In order to clarify the mechanical phenomena of thermal elasto-plastic behavior on the multi-spot welded joints, this study has tried to carry out three-dimensional thermal elasto-plastic analysis on them.

However, because the shape of multi-spot welded joints is not axi-symmetric, unlike the case of single-spot welded joint, the solution domain for simulation should be three dimension.

Therefore, in this paper, firstly, the three-dimensional thermal elasto-plastic program is developed by an iso-parametric finite element method. Secondly, from the results analyzed by developed program, this has clarified mechanical characteristics and their production mechanism on single and multi-spot welded joints. Moreover, it has been intended to make clear effects of pitch length on welding residual stresses, plastic strain of multi-spot welded joints.

(Received March 24, 2001)

Key Words : Resistance multi-spot welded joints, Heat conduction, Finite element method, Pitch, Thermal elasto-plastic analysis, Plastic strain

1. 서 론

저항 점용접(resistance spot welding)은 짧은 시간에 용접이 가능한 고능률의 접합수단으로 대량 생산 체제인 자동차를 위시하여 내구성과 신뢰성이 요구되는 철도차량 및 항공기 등과 같은 많은 산업분야에서 광범위하게 적용되고 있다.

그러나, 용접열원에 의한 국부적인 가열, 냉각 및 구속 등으로 인해 용접 구조물에 잔류응력과 변형이 생성되는데, 이들은 점용접부의 균열의 발단이 될 뿐만 아니라 외력에 의한 응력집중원이 되어 구조물의 안전성을 현저히 감소시킨다^{1,2)}. 실제 점용접 구조물은 다점 점용접에 의해 이루어짐에도 불구하고 다점 점용접에 대한 해석적 연구는 국내·외적으로 미흡한 실정이

므로 연구의 필요성이 매우 크다고 본다^{3,4)}. 또한, 단점 점용접부의 해석시 2차원 축대칭 해석으로 가능하지만, 다점 점용접부의 경우는 불가능하므로 3차원 열탄소성 해석이 불가피하다.

따라서, 본 논문에서는 용접부에 발생하는 잔류응력 및 변형정도를 사전에 정확히 예측하고 역학적 거동을 규명^{4,9)}하기 위해, 다점 점용접부의 점용접 현상을 정도 높게 해석할 수 있는 3차원 열탄소성 프로그램을 자체 개발하였다. 그리고 이를 이용하여, 기 검증된 2차원 축대칭 해석결과⁴⁾와 3차원 열탄소성의 해석결과를 비교, 검증하였다.

아울러, 용접성에 영향을 주는 주된 인자중 피치간격을 변화시켜 다점 점용접에 대하여 다양한 해석을 수행하여, 다점 점용접부에 발생되어지는 용접잔류응력과 소성변형율의 분포특징 및 이들의 역학적 현상을

규명하고자 하였다.

2. 열탄소성 이론 유한요소 정식화⁶⁾

용접잔류응력 해석을 위하여 재료가 등방성임을 고려하여 탄성 및 소성 전 영역에서 재료의 기계적 성질(항복응력, 탄성계수, 열팽창계수, 비저항)의 온도의존성을 고려하였다. 또한, 소성역에서는 선형 등방경화법칙을 고려한 Von-Mises의 항복조건을 항복함수로 사용하였으며, 변형률-응력(Strain-Stress)의 관계식을 소성 flow이론에 따라 증분식으로 나타내었다⁵⁻⁹⁾.

2.1 2차원 축대칭 열탄소성 이론

열은 등방성(Isotropic)이므로 열에 의한 전단변형은 발생하지 않으므로, 축대칭체의 원통좌표계에서 (r,z) 열응력 문제의 변형률-변위 관계를 다음식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \epsilon_r &= \frac{\partial u}{\partial r}, \epsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \\ \gamma_{rz} &= \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r} = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

응력-변형률 관계식은 다음과 같이 구성된다.

$$\begin{aligned} \epsilon_r &= \frac{1}{E} [\sigma_r - \nu (\sigma_z)] + \alpha T \\ \epsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu (\sigma_r)] + \alpha T \\ \gamma_{rz} &= \frac{1}{G} \tau_{rz} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, $\epsilon' = \{\alpha\} T$ 열변형률, T : 온도($^{\circ}C$)
 α : 순간 선팽창계수

2.2 3차원 열탄소성 이론

3차원 직교좌표계 (x,y,z) 에서 열응력 문제의 변형률-변위 관계는 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x}, \epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \epsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = 0, \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} = 0 \\ \gamma_{zx} &= \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

응력-변형률 관계식은 다음과 같이 구성된다.

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu (\sigma_y + \sigma_z)] + \alpha T \\ \epsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu (\sigma_z + \sigma_x)] + \alpha T \\ \epsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu (\sigma_x + \sigma_y)] + \alpha T \\ \gamma_{xy} &= \frac{1}{G} \tau_{xy} = 0, \gamma_{yz} = \frac{1}{G} \tau_{yz} = 0 \\ \gamma_{zx} &= \frac{1}{G} \tau_{zx} = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

2.3 응력-변형률 관계

탄성역

재료가 탄성거동을 할 때 전변형률의 증분은 다음과 같이 탄성 및 소성 변형률의 합이 된다.

$$\{d\epsilon\} = \{d\epsilon^e\} + \{d\epsilon^p\} \quad (5)$$

여기서, $\{\epsilon^e\}$: 탄성 변형률, $\{\epsilon^p\}$: 열 변형률

탄성역에서의 응력증분에 대한 구성방정식은 다음과 같다.

$$\{d\sigma\} = [D^e]\{d\epsilon\} - [D^e] \left(\frac{\partial [D^e]}{\partial T} \right) \{\sigma\} + \{\alpha\} dT \quad (6)$$

여기서, $[D^e]$: 탄성 응력-변형률 매트릭스

소성역

재료가 소성거동할 때 전변형률 증분은 다음과 같이 탄성, 소성 및 열변형률의 합이 된다.

$$\{d\epsilon\} = \{d\epsilon^e\} + \{d\epsilon^p\} + \{d\epsilon^t\} \quad (7)$$

여기서, $\{\epsilon^p\}$: 소성 변형률

소성역에서의 응력증분에 대한 구성방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \{d\sigma\} &= [D^e]\{d\epsilon\} - [D^e] \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\} \lambda - [D^e] \{\alpha\} dT \\ &\quad + \frac{d[D^e]}{dT} [D^e]^{-1} \{\sigma\} dT \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, $\{d\epsilon^p\} = \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}, \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}$: 편차응력

λ : 양(+)의 스칼라양이다.

2.4 절점력-절점변위 관계

용접에 의한 열응력 해석에서는 외력의 작용이 고려되지 않으므로, 각 요소에 의한 평형방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\sum [K]\{dU\} - \sum \{dL\} = \sum \{dF\} = 0 \quad (9)$$

여기서, $[K]$: 요소의 강성매트릭스

$\{dL\}$: 열에 의한 등가 절점력

따라서, 용접잔류응력 해석용 열탄소성프로그램은 상기의 식으로 구성되었으며, 수치 시뮬레이션의 용접 잔류응력은 식(9)에 의거하여 해석하였다.

3. 해석모델 및 해석방법

저항 점용접 시험편의 형상 및 좌표는 Fig. 1에 도시한 바와 같이 x는 용접선 방향, y는 용접선 직각 방향, z는 판두께 방향을 나타내고, 시험편의 체원은 길이(L)=140mm, 폭(B)=200mm, 판두께(t)=1mm, 겹침(w)=30mm로 하였다. 사용한 재료 SWS490B의 화학적 성분 및 RWMA규격을 적용한 용접조건은 Table 1 및 Table 2에 나타내었다.

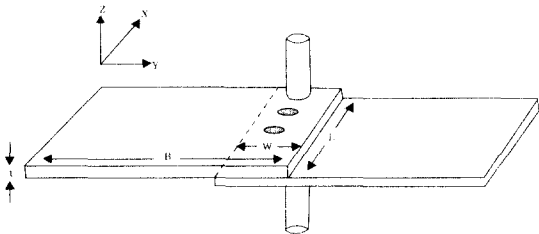


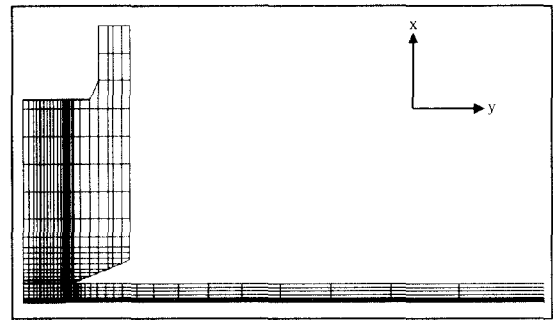
Fig. 1 Configuration of spot welded specimen and coordinate

Table 1 Chemical compositions of specimen (wt %)

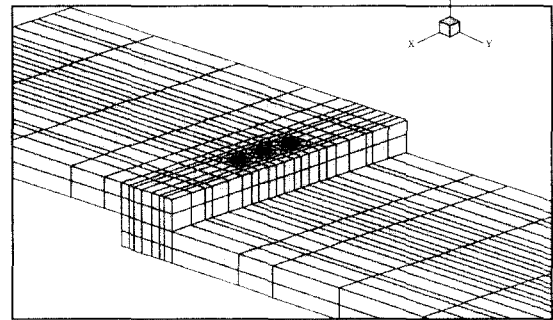
Chemical composition	C	Mn	Si	P	S	Cu	Al
Base Metal	0.13	1.36	0.35	0.24	0.11	-	0.31

Table 2 Resistance spot welding condition of mild

Plate thickness (mm)	Electrode force (kgf)	Welding current (A)	Squeeze time (cycle)	Welding time (cycle)	Holding time (cycle)
1	220	9,400	10	10	10
Welding speed (point/sec)	Number of point (point)	Welding method	Pitch (mm)	Lap (mm)	Nugget dia. (mm)
1/2	2	Direct	15 30	30	48



(a) 2-D axial-symmetric analysis,



(b) 3-D analysis

Fig. 2 Finite-element mesh for numerical analysis

먼저, 개발된 저항 점용접용 3차원 열탄소성 수치해석 프로그램의 타당성을 검증하기 위해 단점 점용접부에 대하여 개발된 프로그램을 사용하여 얻은 결과치와 검증된 2차원 축대칭 열탄소성 해석 결과치를 비교·검토한 후, 다점 점용접부의 피치 변화(15mm, 30mm)에 대하여 3차원 열탄소성 해석을 수행하였다. 또한 열탄소성 해석시 열전도해석의 온도이력값이 열하중으로 사용되었다.

단점용접시 2차원 축대칭 및 3차원 해석모델의 좌표 및 유한요소 분할을 Fig. 2(a),(b)에 도시하였다. Fig. 2(a),(b)에 도시한 바와 같이, r은 반지름 방향, z는 판두께 방향을 나타내며, 2차원 축대칭 해석의 경우 해석모델의 축대칭성을 고려하여 점용접되는 시편 단면의 1/4을 모델링하였다

단점 및 다점 점용접시의 선행타점부는 용접선 방향 x=55mm인 지점에 용접을 수행하고, 다점 점용접시의 후행 타점부는 피치가 15mm일 때는 x=70mm인 지점에, 피치가 30mm일 때는 x=85mm인 지점에 각각 용접을 수행하는 것으로 하였다.

4. 해석결과 및 고찰

4.1 단점 점용접부의 역학적 특성

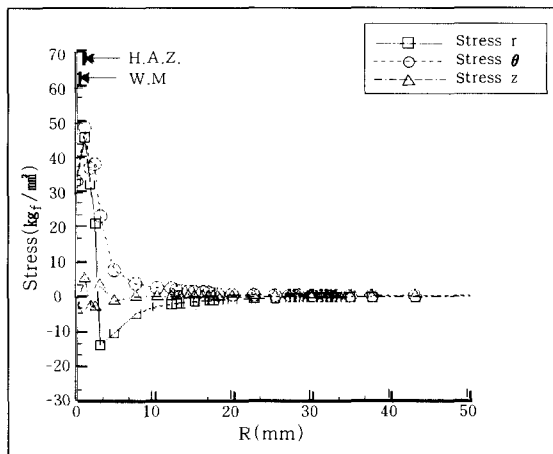
단점 점용접부의 2차원 축대칭 및 3차원 열탄소성

해석에 의하여 얻어진 용접선 방향에 따른 용접 잔류 응력을 Fig. 3(a), (b)에 도시하였다.

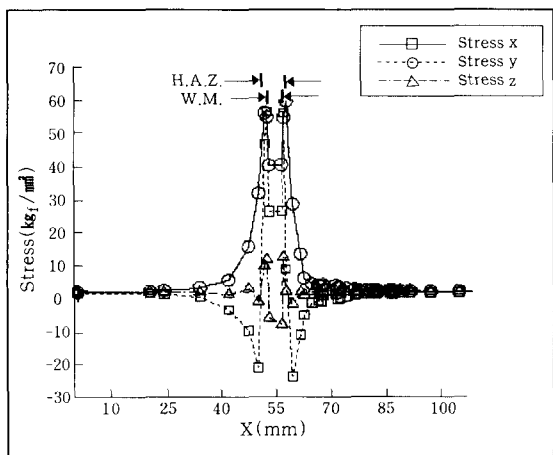
Fig. 2(a), (b)의 용접잔류응력을 각 성분별로 살펴 보면, 반경방향의 응력성분 σ_r 와 용접선방향의 σ_x 는 용접금속 및 열영향부에서 인장을 나타내는데 최대값은 열영향부에서 발생하였고, 열영향부에 인접하는 모재에서 압축으로 변화하였다.

용접선의 원주(円周)방향 σ_θ 와 용접선 직각방향 σ_y 는 전 영역에서 인장이 발생되는데, 그 중에서도 열영향부에서 최대가 되고 모재로 갈수록 점차 작아지다가 일정해짐을 알 수 있다. 그리고 판두께 방향의 응력성분 σ_z 는 용접금속에서 압축이 되고 열영향부에서 인장성분을 나타내지만, 점차 작아져 열영향부에 인접하는 모재에서 압축으로 변화하는데 그 크기는 작게 나타나고 있다.

저항 단점 용접부의 잔류응력값의 크기를 각 성분별로 살펴볼 때, $\sigma_\theta, \sigma_y > \sigma_r, \sigma_x > \sigma_z$ 순으로 발생하였는데, 이는 역학적 구속의 크기가 y방향 > x방향 > z방향임을



(a) 2-D axial-symmetric analysis



(b) 3-D analysis

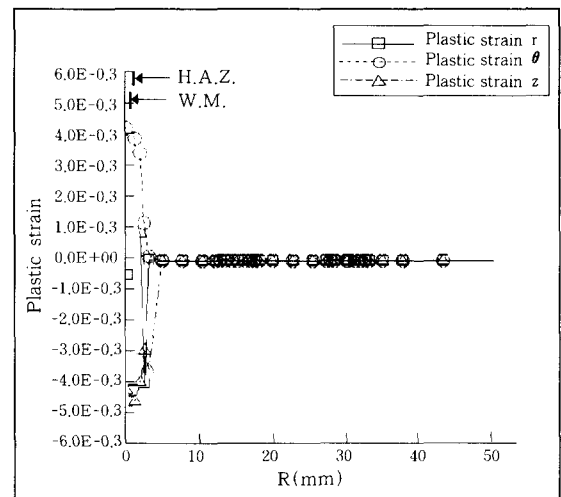
Fig. 3 Distribution of welding residual stress in the single-spot welded joint

을 알 수 있다. 또한, 각 응력성분 모두 너깃주위의 열영향부에서 최대값이 발생함을 알 수 있다.

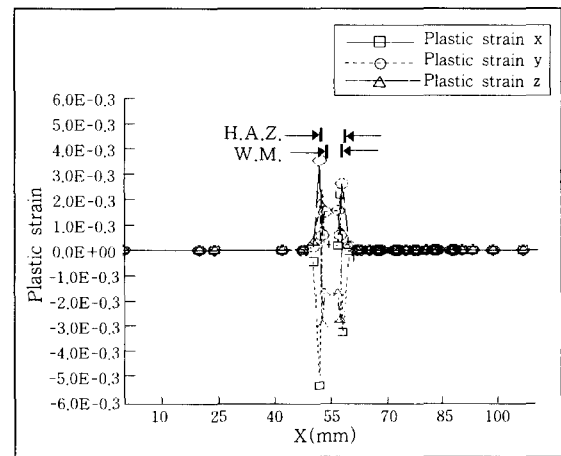
단점 점용접부의 2차원 축대칭 및 3차원 열탄소성 해석에 의하여 얻어진 용접선 방향에 따른 소성변형율을 Fig. 4(a), (b)에 도시하였다.

각 성분별 소성변형율을 Fig. 4(a), (b)에서 살펴 보면, 반경방향의 성분 ϵ_r^p 와 용접선 방향 ϵ_x^p 성분은 용접금속 및 열영향부에서 인장성분이고, 열영향부에 인접한 모재에서 압축성분을 나타내고 있으며, 용접선의 원주(円周)방향 ϵ_θ^p 와 용접선 직각 방향 성분 ϵ_y^p 는 전 영역에서 인장성분이 나타나는데 열영향부에서 최대치가 발생하였다. 그리고 판두께 방향 성분 ϵ_z^p 는 용접금속 및 열영향부에서 커다란 압축성분이 발생하고, 열영향부에 인접한 모재에서는 인장성분이 나타나고 있음을 알 수 있다.

단점 용접부의 소성 변형율 분포는 역학적으로 구속

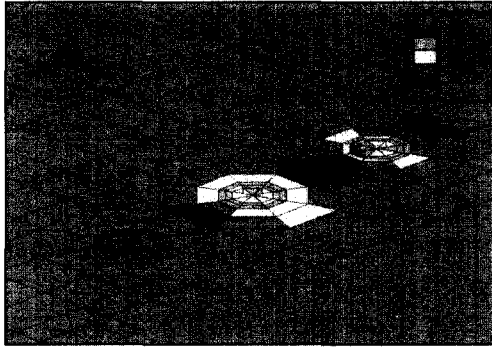


(a) 2-D axial-symmetric analysis

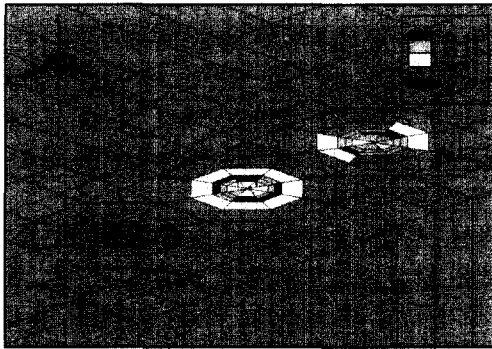


(b) 3-D analysis

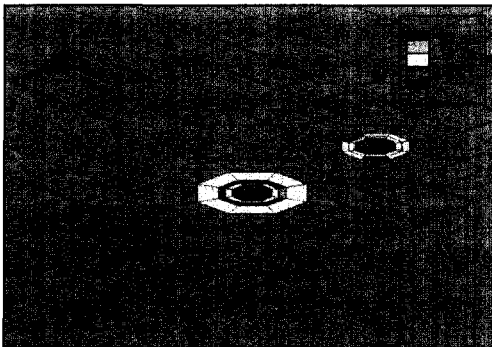
Fig. 4 Distribution of plastic strain in the single-spot welded joint



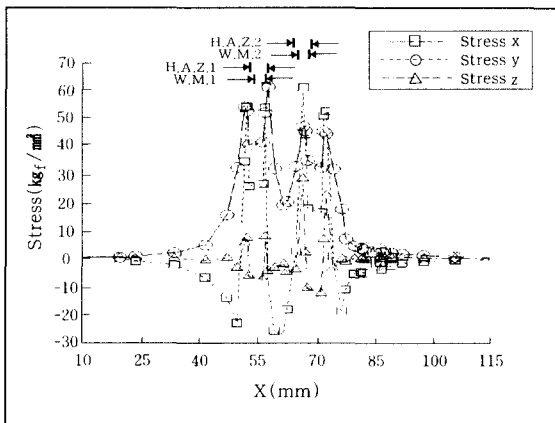
(a) $\sigma_x(\text{kgf/mm}^2)$



(b) $\sigma_y(\text{kgf/mm}^2)$



(c) $\sigma_z(\text{kgf/mm}^2)$



(d) weld line direction

Fig. 5 Distribution of welding residual stress in the multi-spot welded joints on pitch 15mm

이 가장 큰 방향 (y)에 커다란 인장의 소성변형이 발생되며, 역학적 구속이 가장 약한 방향 (z)에 커다란 압축의 소성변형이 발생하였는데, 이는 체적불변의 조건을 만족하기 때문이라 판단된다.

따라서, 개발한 프로그램 해석결과와 기 검증된 2차원 축대칭 프로그램을 해석결과를 비교하여 보면, 응력의 분포양상 및 그 크기가 거의 동일하고 열영향부의 크기가 거의 일치하므로, 정량적 및 정성적인 면에서 동일한 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다.

4.2 다점 점용접부의 역학적 특성

다점 점용접시 피치가 15mm일 때 용접잔류응력 분포를 Fig. 5(a)~(d)에 도시하였다. 여기서, (a)~(d)는 각 방향의 응력성분이며, (d)는 용접선 방향을 따라 응력성분 전체를 도시한 것이다.

Fig. 5(a)~(d)의 후행타점 용접부에 발생된 용접 잔류응력을 살펴보면, 용접선 방향 σ_x 와 용접선 직각 방향 σ_y 는 용접금속 및 열영향부에서 인장응력 성분이 단점 점용접부에 비해 약간 작아지고, 판두께 방향 σ_z 는 압축성분이 더욱 커졌다.

그리고 모재에서는 용접선 방향 가 열영향부에 인접하는 모재에서 인장응력값이 더욱 커지는 반면에 모재에서는 압축응력이 더욱 증가하고, 용접선 직각방향 는 인장응력 성분이 더욱 증가하였다.

그리고 후행타점 용접부에 발생된 잔류응력은 최대 응력값의 변화는 없었으나, 선행타점 용접부와 후행 타점 용접부사이의 모재구간에서 모든 응력성분이 단점 점용접부에 비해 더욱 커졌다. 이는 모재구간에서

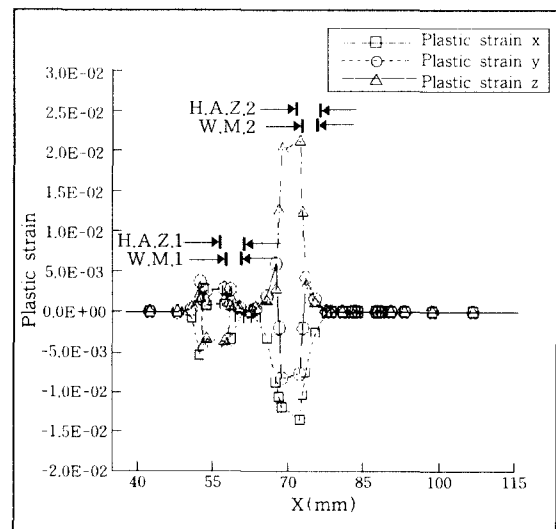
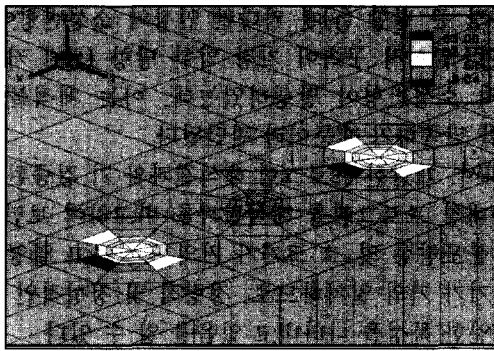
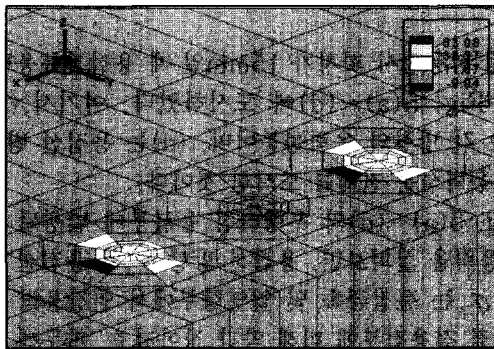


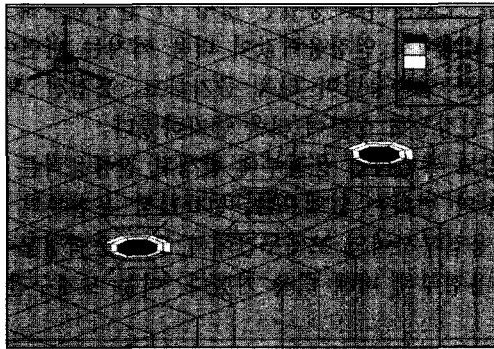
Fig. 6 Distribution of plastic strain in the multi-spot welded joints on pitch 15mm



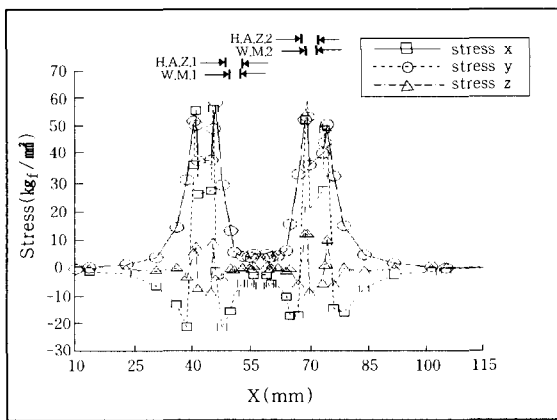
(a) σ_x (kgf/mm²)



(b) σ_y (kgf/mm²)



(c) σ_z (kgf/mm²)



(d) weld line direction

Fig. 7 Distribution of welding residual stress in the multi-spot welded joints on pitch 30

선행타점시의 시험편의 응력분포가 후행타점시에 중첩되어 재분포됨에 기인한다.

따라서, 후행타점 용접부는 단점 점용접부의 경우와 정성적으로 동일한 양상이 나타나지만, 정량적 측면에서 보면 후행타점 용접부의 용접 잔류응력값의 크기가 단점 점용접부에 비해 더욱 커짐을 알 수 있다. 다점 점용접시 피치가 15mm일 때 용접선 길이방향에 따른 소성변형율을 Fig. 6에 도시하였다.

Fig. 6의 소성변형율을 살펴보면, 후행타점 용접부의 소성변형율은 단점 점용접부와는 반대성분값이 발생하는데, 용접선 길이방향 성분 ϵ'_x 와 용접선 직각방향 성분 ϵ'_y 는 용접금속 및 열영향부에서 커다란 압축성분이 발생하고, 판두께 방향은 커다란 인장성분이 나타나는데 최대치는 열영향부에서 발생하였으며 특히, 판두께 방향 ϵ'_z 의 절대값 크기가 다른 성분에 비해 매우 크게 나타났다.

따라서, 후행타점 용접부의 용접 잔류응력 및 소성변형율은 단점 용접부의 값과 비교해 볼 때, 현저하게 증가할 수 있는데, 이는 후행타점 용접부에 선행타점 용접부의 응력 및 변형율이 고려되어 그의 영향으로 판단된다.

다점 점용접시 피치가 30일 때의 용접잔류응력의 분포를 Fig. 7(a)~(d)에 도시하였다.

여기서, (a)~(c)는 각 방향의 응력성분이며, (d)는 용접선 방향을 따라 응력성분 전체를 도시한 것이다.

용접잔류응력을 살펴보면, Fig. 7에서 나타낸바와 같이 피치가 30mm일 때의 후행타점 용접부의 용접 잔류응력은 피치가 15mm일 때의 후행타점 용접부의 용접 잔류응력의 경우와는 달리 단점 점용접부의 용접잔

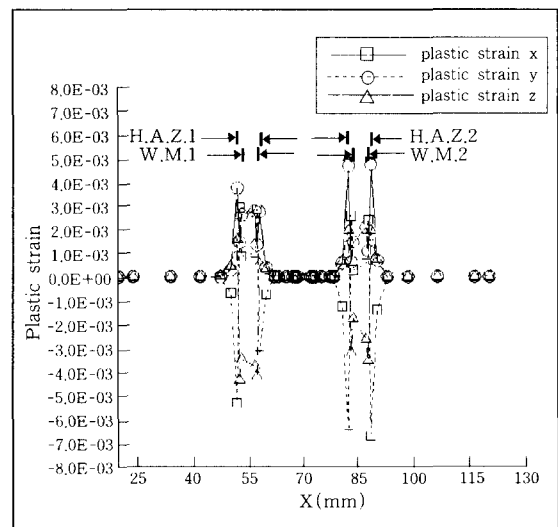


Fig. 8 Distribution of plastic strains in the multi-spot welded joints on pitch 30

류응력과 분포양상 및 크기가 거의 동일하게 나타났다.

다점 점용접시 피치가 30mm일 때의 용접선 길이방향에 따른 소성변형율을 Fig. 8에 도시하였다.

각 성분별 소성변형율을 살펴보면, 후행타점 용접부의 소성변형율은 단점 점용접부에 비해 미소하게 증가하나 피치가 15mm일 때의 경우에 비해 매우 미소하다. 따라서, 피치가 30mm일 때 후행타점 용접부의 용접 잔류응력 및 소성변형율은 선행타점 용접부의 값과 비교해볼 때, 분포양상 및 크기가 거의 동일하게 나타남을 알 수 있다. 이는 후행타점 용접부가 단점 점용접부의 영향을 그다지 받지 않기 때문이라 판단된다.

5. 결 론

저항 다점 점용접부의 해석을 위해 개발된 3차원 열탄소성 프로그램과 기 검증된 2차원 축대칭 프로그램의 수치시뮬레이션 결과가 동일하였으며, 피치변화시 저항 다점 점용접부의 역학적 특성을 고찰을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 2차원 축대칭 및 3차원 수치해석을 통하여 동일한 결과를 도출함으로써, 단점 점용접부의 해석시에는 시간 및 효율성 측면에서 2차원 축대칭 해석이 보다 적합하다고 사료된다.

2) 단점 점용접부의 잔류응력값의 크기를 각 성분별로 살펴볼 때, $\sigma_{\theta}, \sigma_y > \sigma_r, \sigma_x > \sigma_z$ 순으로 발생하였으며, 각 응력성분 모두 너깃주위의 열영향부에서 최대값이 나타났다.

3) 단점 점용접부의 소성 변형율 분포는 역학적으로 구속이 가장 큰 방향에 커다란 인장의 소성변형이 발생되고, 역학적 구속의 가장 약한 방향에 커다란 압축의 소성변형이 발생하였다.

4) 다점 점용접시 피치가 15mm일 때, 후행타점 용접부는 단점 점용접부의 경우와 정성적으로 동일한 양상이 나타나지만, 정량적 측면에서 보면 후행타점 용접부의 용접 잔류응력값의 크기가 단점 점용접부에 비해

더욱 커졌다.

5) 다점 점용접시 피치가 15mm일 때, 후행타점 용접부의 소성변형율은 단점 용접부 성분값의 반대성분값이 나타나는데, 그 크기는 현저하게 커지며 특히, ϵ_{θ} 가 다른 성분에 비해 매우 크게 증가하였다.

6) 다점 점용접시 피치가 30mm일 때, 후행타점 용접부의 용접잔류응력 및 소성변형율은 단점 점용접부의 경우와 동일한 분포양상을 나타내고, 그 크기는 아주 미소하게 증가하였다.

따라서, 저항 다점 용접시의 피치변화시 피치가 15mm일 때 보다 피치가 30mm일 때 잔류응력 및 소성변형율 분포측면에서 더욱 유리할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 1999년도 조선대학교 학술연구비 지원에 의해서 수행되었습니다. 관계자 여러분께 깊은 감사로 드립니다.

참 고 문 헌

1. 澤井善三郎 : 抵抗熔接, 株式會社 産報(第8版)(1973)
2. 佐藤, 向井, 豊田 : 溶接工学, 理工學社(第1版)(1979)
3. Z. Han, J. Orzoco : A heat transfer study in resistance spot welding, Journal of welding research(1989) 363-371
4. Bowers, R. J., Sorensen, C. D. and Eagar, T. W. : Electrode geometry in resistance spot welding, Welding Journal(1990) 45-51
5. 방한서 외 4인 : 유한요소법에 의한 저항 점용접부의 역학적 특성에 관한 연구, 대한용접학회지, 17-5(1999) 24-30
6. 失川元基 外1人 : 有限要素法による熱應力・クリープ熱傳導解析, (株)サイエンス(1985)
7. 방한서 : 유한요소법에 의한 박판용접의 2차원 비정상 열전도 해석, 대한조선학회지, 27-4(1990) 44-50
8. 방한서 : 후판용접부의 역학적 특성, 대한용접학회지, 10-4(1992) 250-258
9. 방한서, 김유철 : 유한요소법에 의한 후판용접시의 3차원 비정상 열전도해석, 대한용접학회지, 9-2(1991) 37-43