

구멍뚫기법(HDM)에 의한 STS 304 용접부의 잔류응력 해석에 관한 연구

고준빈* · 최원두* · 이영호**

*충남대학교 대학원 기계공학과

**충남대학교 기계공학과

A Study on the Analysis of Residual Stress of STS 304 Weldment Using Hole Drilling Method

Joon-Bean Ko*, Won-Doo Choi* and Young-Ho Lee**

*Graduate School of Mechanical Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

**Mechanical Engineering, Chungnam University, Daejeon 305-764, Korea

Abstract

The HDM(Hole Drilling Method) is a relatively simple and accurate method in measuring residual stress of weldment. Various method of evaluating residual stress are studied in welding field. The method of cutting holes on the plate much affects the accuracy of result. Especially for the hard material like stainless which is difficult to cut precisely is difficult to measure residual stress of weldment. Because heat conduction of stainless steel is lower than other general steel, the magnitude of residual stress might be different as to changing of welding conditions.

Therefore, the distribution of residual stress on the STS304 steel after welding using HDM is evaluated in this paper.

(Received August 6, 2001)

Key Words : Residual stress, Strain gage, TIG welding, STS304, Hole Drilling Method

1. 서 론

용접에 의해 발생하는 잔류응력은 각종 금속 가공시 발생하는 잔류응력과는 다른 특징을 갖는다. 용접에 의한 잔류응력의 발생은 국부적으로 급속하게 고온으로 가열된 용접부분에 발생하는 열응력에 의한 것이다¹⁾. 실제 잔류응력의 발생은 용접이 행해지는 재료, 형상, 치수, 시행법 및 용접법 등에 의해 상당한 차이를 보인다²⁾. 또한 잔류응력의 영향은 크기, 방향, 분포 상태에 따라 구조물에 이점을 주기도 하지만 치명적인 결함이 될 수 있다³⁾. 일반적으로 이미 존재하고 있는 잔류응력에 외부 응력이 부과되었을 때 피로파괴나 다른 구조적인 결함을 유발시키는 것으로 알려져 있다⁴⁾. 따라서 잔류응력을 고려하지 않은 상태로 구조물을 설계

했을 경우 구조물의 안전성에 심각한 문제를 일으킬 수도 있으므로, 체계적이고 정확한 측정이 요구된다.

잔류응력을 측정하는 방법 중에서 많이 사용되고 있는 응력 이완법 중 구멍뚫기법(Hole Drilling Method)은 다른 방법에 비하여 간단한 시험으로 비교적 정확한 잔류응력의 측정이 가능하다⁵⁾. 하지만 구멍(hole)을 가공하는 방법과 정밀성은 잔류응력의 정확성에 상당한 영향을 미치고 있다⁶⁾.

구멍을 가공하는 방법에는 여러 가지가 개발되어 있으나 스테인레스와 같은 난삭재의 재료는 구멍을 정밀하게 가공하는데 상당한 어려움이 있어 잔류응력의 측정이 정확히 이루어지지 않고 있다. 또한 열전도도가 일반적인 강에 비해 낮기 때문에 용접조건에 따라 잔류응력의 분포는 판재의 위치에 따라 다르게 나타난다.

따라서 본 연구에서는 STS304의 용접부에 발생하

는 잔류응력을 구멍뚫기법으로 측정하여 용접조건과 판재의 위치에 따라 잔류응력을 비교하였다.

2. 관통구멍(through-hole)해석

균일한 잔류응력을 받고 있는 얇은 판이 Fig. 1에 나타나 있다. 임의의 점 $p(r, \alpha)$ 에서의 초기 응력 상태를 극좌표로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \sigma_r' &= \frac{\sigma_x}{2} (1 + \cos 2\alpha) \\ \sigma_\theta' &= \frac{\sigma_x}{2} (1 - \cos 2\alpha) \\ \tau_{r\theta}' &= \frac{\sigma_x}{2} \sin 2\alpha \end{aligned} \quad (1)$$

Fig. 2는 관통구멍(through-hole)이 뚫린 후의 형상을 보여준다⁷⁾. σ_r 과 $\tau_{r\theta}$ 는 구멍면에서 0이 되므로 구멍 근처의 응력은 구멍이 없을 때와는 상당히 다르게 나타난다. 이 경우에 대한 $p(r, \alpha)$ 에서의 응력은 G.Kirsch⁸⁾에 의해 다음과 같이 발표되었다.

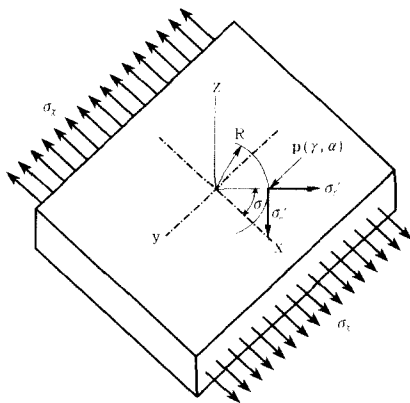


Fig. 1 Stress states at $P(r, \alpha)$ before drilling a hole

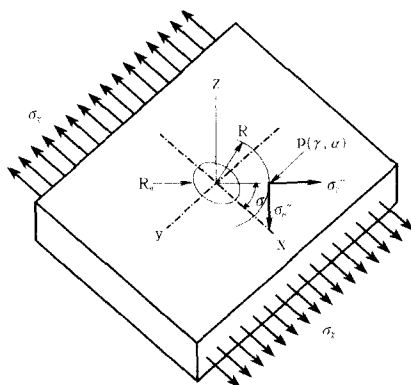


Fig. 2 Stress states at $P(r, \alpha)$ after drilling a hole

$$\begin{aligned} \sigma_r'' &= \frac{\sigma_x}{2} \left(1 - \frac{1}{\gamma^2}\right) + \frac{\sigma_x}{2} \left(1 + \frac{3}{\gamma^4} - \frac{4}{\gamma^2}\right) \cos 2\alpha \\ \sigma_\theta'' &= \frac{\sigma_x}{2} \left(1 + \frac{1}{\gamma^2}\right) - \frac{\sigma_x}{2} \left(1 + \frac{3}{\gamma^4}\right) \cos 2\alpha \\ \tau_{r\theta}'' &= -\frac{\sigma_x}{2} \left(1 - \frac{3}{\gamma^4} + \frac{4}{\gamma^2}\right) \sin 2\alpha \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $\gamma = \frac{R}{R_0}$ ($R \geq R_0$) 이고, 구멍을 뚫은 후의 응력 (2)에서 초기 응력 (1)을 빼면, 구멍으로 이완된 응력 (relieved strain)을 구할 수 있고, 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_r &= \sigma_r'' - \sigma_r' \\ \Delta\sigma_\theta &= \sigma_\theta'' - \sigma_\theta' \\ \Delta\tau_{r\theta} &= \tau_{r\theta}'' - \tau_{r\theta}' \end{aligned} \quad (3)$$

2축 응력 상태에서 노출된 스트레인의 일반적 표현은 다음과 같다.

$$\epsilon_r = A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\alpha \quad (4)$$

식(4)은 구멍뚫기법에 사용되는 기본 관계식이다. 이 관계식은 측정된 스트레인으로 부터 두 주응력과 각 α 를 얻기 위한 식으로 바뀌게 된다. 세 개의 미지수가 있기 때문에 세 개의 독립적인 스트레인의 측정이 이루어져야 하고, 식(5)와 같이 나타난다. Fig. 3에서 α_1 은 게이지 ①과 가까운 쪽에 있는 주축이 이루는 각이고, $\alpha_2 = \alpha_1 + 45^\circ$, $\alpha_3 = \alpha_1 + 90^\circ$ 가 된다. 로제트 (rosette) 스트레인게이지의 각각 게이지 위치에 식(7)을 적용하여 정리하면, 식(5)와 같이 각 게이지 위치에서의 이완변형률 (relieved strain)을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \epsilon_1 &= A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\alpha \\ \epsilon_2 &= A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2(\alpha + 45^\circ) \\ \epsilon_3 &= A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2(\alpha + 90^\circ) \end{aligned} \quad (5)$$

식(5)를 주응력 방향에 대해 정리하면 식(6)과 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{max} = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{4A} - \frac{\sqrt{2}}{4B} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2} \quad (6)$$

$$\sigma_{min} = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{4A} + \frac{\sqrt{2}}{4B} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2} \quad (7)$$

단, α 는 게이지①과 이루는 각을 말한다. 게이지①을 기준으로 주축과 이루는 각을 표현하면 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

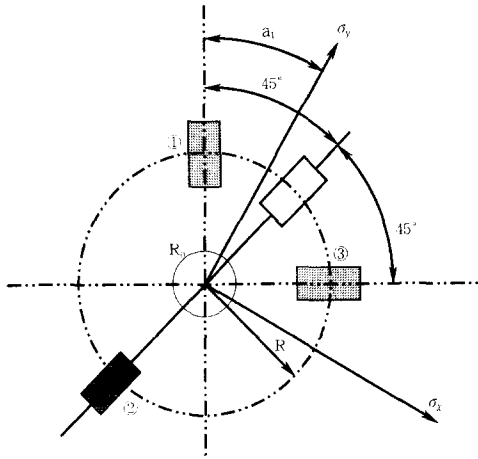


Fig. 3 Strain gage rosette arrangement for determining residual stress

$$\tan 2\alpha = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3}{\epsilon_1 - \epsilon_2} \quad (8)$$

식(4)~(7)에서 A와 B는 변형률 이완상수이며, 관통구멍 해석의 경우 반경 방향으로 이완되는 응력과 변형률 사이의 관계를 나타내는 값이다.

3. 막힌 구멍(blind hole)의 해석

실제적인 문제에 있어서는 임의의 크기와 두께를 가진 기계나 구조물인 경우가 대부분이기 때문에 잔류응력의 측정은 주로 막힌 구멍(blind hole) 뚫기를 수행한다⁹⁾. 평면응력을 받고 있는 물체에 막힌 구멍의 도입은 매우 복잡한 국부 응력 상태를 만들어 내기 때문에 지금까지도 정확한 해답이 나오지 않고 있다. 그러나 Rendler 와 Vigness¹⁰⁾에 의해 이 경우도 응력 분포의 일반적인 경향이 관통 구멍과 유사하다고 입증되었다. 따라서 막힌 구멍 때문에 노출된 스트레인은 식(4)과 유사한 삼각함수로 표현된다.

그래서 적절히 막힌 구멍 계수 α 를 구해내면 식(6)와 식(7)을 막힌 구멍에도 적용할 수 있다. 이 계수들은 이론적으로 계산할 수 없으므로 실험과 유한요소법(FEM)으로 계산되어야 한다.

관통 구멍 해석과 비교해 볼 때 막힌 구멍 해석은 하나 더 많은 독립변수 즉, 게이지 직경 D에 대한 구멍 깊이 Z의 비인 Z/D가 필요하게 된다. 이를 일반함수 형태로 표현하면 식(9)와 같다.

$$\bar{A} = Af_A(E, \nu, y, Z/D_0) \quad (9)$$

$$\bar{B} = Af_B(E, \nu, y, Z/D_0)$$

현재 식(9)의 이완상수 \bar{A} 와 \bar{B} 에 대한 정확한 이론적인 해는 없으며, 실험적 방법이나 유한요소해석을 통하여 구해야 한다. 그런데, 이완상수 \bar{A} 와 \bar{B} 는 일단 측정 재료가 결정되면 단순히 변형 게이지 형상에 의해 결정되는 값이기 때문에, Schajer¹¹⁾는 재료 물성치에 무관한 새로운 무차원 상수 \bar{a} 와 \bar{b} 를 도입하여 \bar{A} 와 \bar{B} 를 식(10)과 같이 나타내었다.

$$\bar{A} = -\frac{(1+\nu)}{2E} \bar{a} \quad (10)$$

$$\bar{B} = -\frac{1}{2E} \bar{b}$$

한편, 식(4)의 ϵ_r 에 σ_c 응력을 가한 경우, 게이지①의 방향($\alpha=0^\circ$)과 게이지③의 방향($\alpha=90^\circ$)의 이완 변형률은 막힌 구멍 이완상수 \bar{A} 와 \bar{B} 를 적용하여 식(11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_1 = \sigma_c(\bar{A} + \bar{B}) \quad (11)$$

$$\epsilon_3 = \sigma_c(\bar{A} - \bar{B})$$

이 식을 좌에 대하여 풀어쓰면 식(12)와 같다.

$$\bar{A} = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{2\sigma_c} \quad (12)$$

$$\bar{B} = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_3}{2\sigma_c}$$

따라서, 실험적인 방법이나 유한요소해석을 통하여 \bar{a} 와 \bar{b} 를 구하고, 이 값을 식(10)에 대입하여 무차원 상수 \bar{A} 와 \bar{B} 를 구할 수 있다.

이와 같은 방법으로 Schajer⁷⁾는 깊이에 따른 균일 응력에 대한 상수 \bar{a} 와 \bar{b} 를 구하였다.

일정한 구멍지름에 대해 이완된 스트레인은 구멍깊이가 증가함에 따라 증가하게 된다.

이 과정은 구멍 깊이 Z가 구멍 지름 D_0 와 같거나 약간 클 때까지 계속된다. 그러므로 스트레인 신호를 최대를 하기 위해서 구멍 깊이와 구멍 지름의 비 $Z/D_0=1$ 만큼 뚫려져야 한다. ASTM E873-85에서 구멍 지름에 대한 최대 구멍 깊이의 비를 1.2로 규정하고 있다¹²⁾.

4. 실험 시편 및 장치

4.1 시험편 및 용접조건

잔류응력을 측정하기 위한 시편은 폭이 120mm, 길이 300mm, 두께가 3mm인 STS304를 TIG용접으로 맞대기 용접하여 제작하였고, 용접조건은 Table 1과 같다. 시편은 절단기에 의해 일정한 치수로 절단되었다. 예비 실험 결과 절단시 생긴 시편의 굽힘은 용접 후 잔류응력에 영향을 주므로 판의 평면성을 유지하기 위해 유압기로 압축한 후 용접하였다. 용접 비드는 형태상 게이지 부착이 용이하지 못하기 때문에 용접비드에서 가장 가까운 곳으로부터 일정한 간격으로 잔류응력 측정위치를 선정하였다. 일반적으로 비드에서 가까운 부분일수록 용접시 열에 의한 영향이 좁은 구간에서 크게 변화하는 경향을 보인다. 따라서 비드에 가까운 지점에서 그 측정위치를 좁게 선정하였다. 비드 방향으로는 잔류응력이 가장 크게 발생될 것으로 예상되는 시편의 중앙부를 선정하였다.

Table 1 Welding parameters

Diameter of electrode(mm)	2.3		
Arc length(mm)	3		
Flow rate of Ar gas(l/min)	4~5		
Angle of touch(°)	90°		
Welding speed(mm/s)	2.5	3.0	3.5
Welding current(A)	180 200 220	180 200 220	180 200 220

Table 2 Mechanical properties of ST304

Yield strength (MPa)	Tensile stress (MPa)	Elongation(%)
375	769	0.29

4.2 실험장치

본 실험에 구멍을 가공하기 위한 장비로는 Micro-Measurement사의 RS-200 밀링 가이드(Milling Guide)를 이용하였다. 잔류응력 측정에 사용된 스트레인 게이지는 동일한 회사의 로제트 스트레인 게이지(rosette strain gage)로서 시편의 두께에 적합한 EA-06-062RE-120을 사용하였다⁹⁾. 밀링 가이드에 사용된 드릴의 지름은 게이지에 맞추어 1.6mm를 사

용하였고, 드릴 작업으로 발생하는 열에 의해 게이지가 손상되는 것을 막기 위하여 구멍을 뚫는 시간을 길게 하였다. 구멍을 뚫어 이완된 응력은 스트레인 게이지에 의해 검출되고, 이는 브릿지 박스(SB-1)를 통하여 스트레인 인디케이터(P-3500)로 출력된다. 이렇게 출력된 3개의 스트레인을 식(9)~(11)에 대입하면 주응력과 방향을 구할 수 있다.

5. 실험결과

5.1 구멍 깊이에 따른 스트레인의 변화

Fig. 4는 Z/D가 0.05씩 증가할 때 대응되는 구멍 깊이(Z)에서 측정된 이완 변형율을 보여주고 있다.

측정된 변형량을 볼 때 ϵ_1 은 변형량이 양의 값으로 출력되었고, ϵ_2, ϵ_3 는 음의 값으로 나타난다. 변형량이 양일 때는 압축응력의 이완으로 인한 변형이고, 음일 때는 이와 반대인 인장응력의 이완에 의한 변형이다.

Z/D가 0.3(Z=1.5mm)이하에서는 각각의 게이지 변형량의 증가율이 매우 높은 반면 그 이상의 값에서는 증가폭이 매우 작아진다. 0.4(Z=2.0)에서 이완된 변형량이 최대가 되고, 그 이상에서는 조금 감소하였다.

여기서 알 수 있듯이 Z/D=0.4일 때 잔류응력의 대부분 이완되었고, Z/D=0.1(Z=1.0mm)일 때 완전히 이완된 변형량의 약 80%가 이완되는 것을 알 수 있다. 이러한 결과로 본 실험에서 구멍 깊이가 1.0mm 일 때 변형량을 측정하여 잔류응력으로 환산하였다.

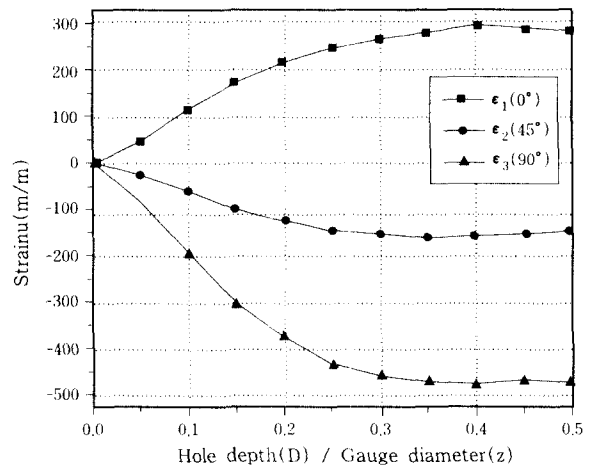


Fig. 4 Variation of strain according to hole depth

5.2 용접전류에 따른 잔류응력 분포의 변화

Fig. 5~Fig. 7은 각 용접조건에서 비드에 수직방향의 거리에 따른 잔류응력의 분포 나타낸다.

용접 전류가 일정할 때 용접속도가 느릴수록 잔류응력은 크게 나타났고, 10mm 지점에서는 항복강도보다 크게 나타났다. 이는 입열량에 따른 최고온도의 차이에 의한 것으로 사료된다. 또한 용접아크에 의해 국

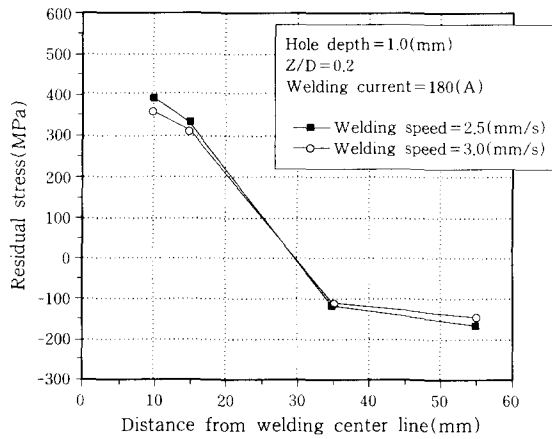


Fig. 5 Residual stress distribution on various welding speeds at welding current 180A

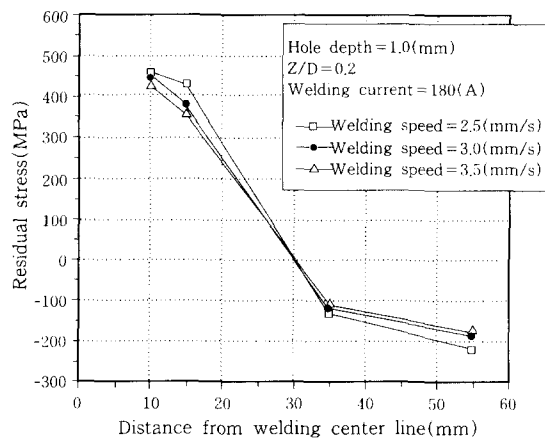


Fig. 6 Residual stress distribution on various welding speeds at welding current 200A

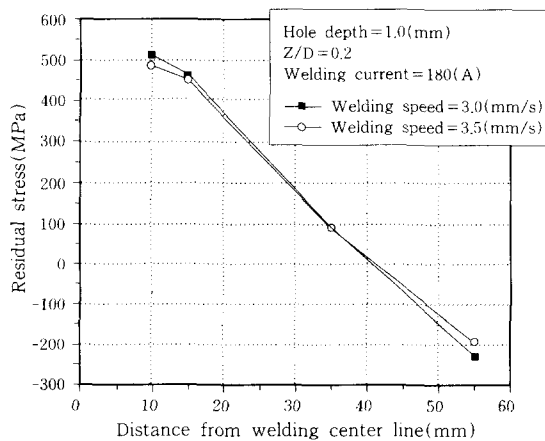


Fig. 7 Residual stress distribution on various welding speeds at welding current 220A

부적인 입열의 결과로 가열 및 냉각시 온도구배가 발생하여 불균일한 체적의 변화는 물론 모재의 탄성계수, 열팽창계수, 항복응력 등이 위치에 따라 달라지기 때문에 비드에서의 거리에 따라 잔류응력이 다양하게 분포하게 된다. 비드에 가까운 지점은 수축으로 인한 인장잔류응력이 존재하게 되고, 이 힘의 반작용으로 비드에서 먼 부분은 압축잔류응력이 남게 된다.

용접전류가 180A, 200A일 때는 비드에서 약 30mm 떨어진 지점을 기점으로 해서 압축잔류응력으로 전환되는 것을 볼 수 있다. 그러나 용접전류가 220A일 때는 비드로부터 더욱 멀어져 약 40mm정도임을 볼 수 있다.

5.3 용접속도에 따른 잔류응력 분포의 변화

Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10은 각각의 용접속도에서 용접전류에 따른 폭방향 잔류응력의 분포를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 속도가 일정할 때 용접전류가 높을수록 잔류응력이 높게 나타났다. 이는

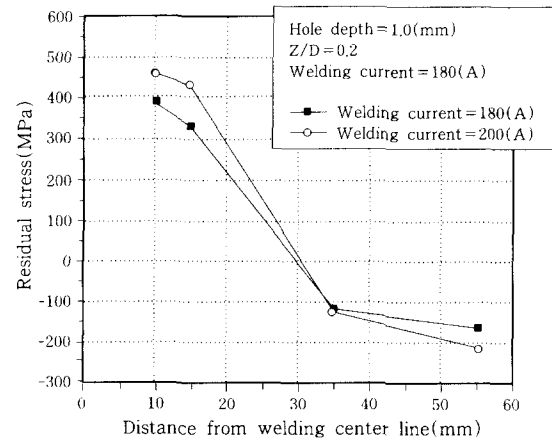


Fig. 8 Residual stress distribution on various welding currents at welding speed 2.5mm/s

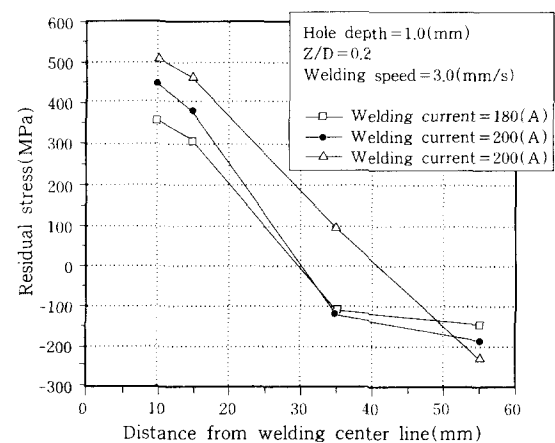


Fig. 9 Residual stress distribution on various welding currents at welding speed 3.0mm/s

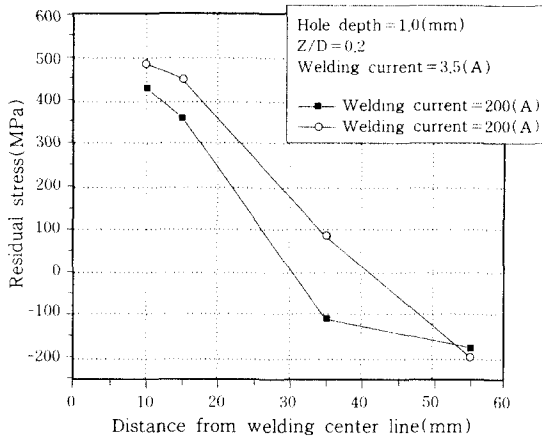


Fig. 10 Residual stress distribution on various welding currents at welding speed 3.5mm/s

용접 전류가 높을수록 입열량이 크고, 이에 따라 용융부 폭이 넓어지며, 결국 소성변형량이 많아졌기 때문으로 사료된다.

용접전류가 220A일때는 인장잔류응력구간이 180A, 200A일때보다 길게 나타나는 것을 볼 수 있다. 또한 속도에 따른 잔류응력의 분포와 비교해 볼 때 용접전류에 따른 잔류응력의 차이가 두드러지게 나타나는 것으로 보아 잔류응력은 용접속도보다는 전류에 영향을 받는 것을 알 수 있다. 이는 입열량이 용접속도보다 전류에 의존하기 때문이다.

5.4 비드방향의 위치에 따른 잔류응력 분포

Fig. 11은 비드에서 10mm 지점에서 용접진행방향의 잔류응력 분포를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 시편의 중앙부에서 가장 높은 잔류응력이 측정되었고, 용접이 시작되는 지점과 끝나는 지점에서는 중앙부 보다 낮은 잔류응력이 측정되었다. 또한 용접이 끝나는 지점에서 시작점보다 높은 잔류응력이 측정되었다. 또한 비드에 평행한 방향이 0°일 때, 시편의 중앙부에서는 최대 주응력 방향이 -10°~10°의 값으로 나타났다. 용접 시작지점에서는 음(-)의 값으로, 끝지점에서는 양(+)의 값으로 나타났고, 그 크기는 18°~25°로 거의 비슷하였다. 이는 용접 모재의 가장 자리와 내부의 용접조건이 다르기 때문에 나타나는 현상으로 사료된다. 즉 모재의 양 끝단에서는 중앙부와 다르게 한쪽 방향의 구속이 없는 용접조건이기 때문에 양 끝단의 주응력 방향은 구속이 없는 방향으로 치우쳐진 것으로 생각된다. 또한 중앙부에서는 구속조건이 폭방향으로 대칭이지만 용접진행 방향으로 비대칭이기 때문에 주응력 방향은 진행방향으로 형성된다.

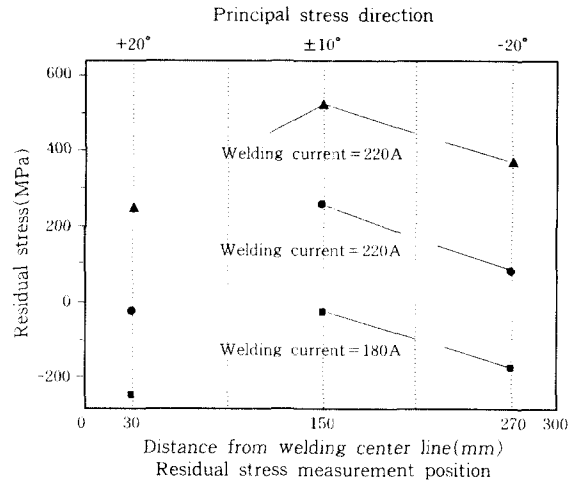


Fig. 11 Variation of residual stress on welding position and various welding currents at welding speed 3.0mm/s

6. 결 론

본 연구에서는 STS 304계열의 평판을 실험재료로 선택하여 용접속도, 용접전류를 변수로 하여 용접한 후 구멍뚫기법으로 잔류응력의 크기와 방향을 측정하였다. 구멍깊이에 따른 이완변형량 및 용접 비드에 평행한 방향과 수직인 방향에 따른 주응력의 크기와 방향에 대하여 다음과 같은 결과를 얻었다..

- 1) 잔류응력 측정시 응력 이완에 따른 스트레인은 구멍깊이(Z)와 게이지 직경(D)의 비 Z/D에 따라 변화한다. 스트레인은 Z/D가 0.2~0.4일 때 보다 0.0~0.2에서 큰 폭으로 증가하고, 0.4일 때 대부분의 응력이 이완된다. 또한 Z/D=0.2일 때, 스트레인은 Z/D=0.4의 80%에 해당된다.
- 2) 용접 전류가 크고, 용접속도가 느릴수록 인장, 압축잔류응력의 전환점이 비드에서 멀게 나타나고, 잔류응력은 용접전류에 의해 더 큰 영향을 받는다.
- 3) 유한 평판에서 잔류응력의 주응력 방향은 모재의 위치에 따라 달라진다. 모재의 내부에서 비드와의 거리에 관계없이 주응력의 방향은 비드에 거의 수직인 방향이고, 양 끝지점에서 주응력 방향은 모재의 바깥쪽으로 작용한다.

참 고 문 헌

1. 寺崎俊夫 : 構造用 材料の 溶接殘留應力, 溶接變形 及び 溶接 條件의 影響に 關する研究, 大阪大, 博士學位論文 (1976)
2. K. Masubuchim, N. T. Ich : Welding J., Vol. 49, (1970), 166
3. N. N. Prokhorov, V. S. Ignst : Avtomaticheskia Svarka, No. 4 (1962)

4. 殘留應力の發生과 對策, 養聲堂, 日本 (1975)
5. Mathar, J. : Determination of initial Stresses by Measuring the Deformation Around Drilled Holes. *Trans. ASME, Iron & Steel*, Vol 56, (1934), 245-249
6. Tootoonian, M., Schajer, G. S. : Enhanced Sensitivity Residual stress Measurements Using Taper-hole Drilling, *Experimental Mechanics*, (1995), 124-129
7. Schajer, G. S. : Application of Finite Element Calibrations of Residual Stress Measurement, *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 110, (1981), 338-343
8. Timoschenko, S. P., Goodier, J. N. : *Theory of Elasticity*, 3rd McFraw-Hill, 90-97
9. Measurement Group : Measurement of Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain Gage Method. *Measurement Group Tech. Note*, TN-503-5, (1993), 1-15
10. Rendler, N. J. and I. Vigness : Hole-drilling Strain-gauge Method of Measuring Residual Stresses, *Proc., SESA XXIII*, No. 2, (1966) 577-586
11. Schajer, C. S., Tootoonian, M. : A new Rosette Design for More Reliable Hole-drilling Residual Stress Measurements, *Experimental Mechanics*, (1997), 299-306
12. Redner, S. and C.C. Rerry : Factors Affecting the Accuracy of Residual Stress measurements Using the Blind-Hole Drilling Method, *Proc., 7th International Conference on Experimental Stress Analysis*. Haifa, Israel : Esrael Institute of Technology (1982)