

로드셀을 이용한 STS304 박판용접부의 굽힘구속력과 잔류응력 측정에 관한 연구

김재온*, 고준빈**, 박희상⁺

(논문접수일 2007. 8. 21, 심사완료일 2007. 10. 18)

A Study on the Measurement of Bending Constraint Force of STS304 Thin Plate Using The Load Cell

Jae-On Kim*, Jun-Bin Ko**, Hee-Sang Park⁺

Abstract

The restraint force is required for the accurate measurement and analysis to protect weldment from residual stress. Also, this residual stress caused by cracks in weldments is often observed in the weldments of large size nozzles or radial tanks after welding. This paper is preformed to evaluate the welding restraint forces using load cell with STS304 thin plate which is used as the pressure vessel steel in the industry field. As a result, as the welding currents are higher and the welding speeds are more slowly, the magnitude of restraint force in process of the flat plate welding shows to be more large.

Key Words : restraint force(구속력), strain gauge(스트레인 게이지), load cell(로드셀), thin plate welding(박판용접)

1. 서론

용접은 접합의 한 영역으로 결합하는 재료들이 국부적으로 용해, 응고함으로써 결합되는 금속학적 현상이다. 용접부의 조직과 성능은 모재와 용접재료의 화학성분, 용접방법, 용접조건 등에 의해 결정되지만, 공통적인 현상으로 박판의 용접시 불규칙한 온도 분포로 인하여 비선형적인 변형이 발

생하고, 이로 인하여 용접부의 결함을 일으킨다.

용접시 발생하는 구속력과 잔류응력의 측정은 이러한 불균일한 용접변형을 이해하기 위한 기본적인 방법이다^(1,2). 또한 구속력은 용접 후 발생하는 잔류응력에 많은 영향을 주는 것으로 알려져 있기 때문에 정확한 구속력과 잔류응력의 측정과 해석이 필요한 실정이다⁽³⁾. 대형 노즐이나 구형 탱크의 원주 용접부 혹은 대형 압력용기의 용접부 등과 같이 자체

* 한밭대학교 건축공학과 겸임교수

** 교신저자, 한밭대학교 기계공학부 (kjb1002@hanbat.ac.kr)

주소: 305-719 대전광역시 유성구 덕명동 산16-1

+ 충남대학교 기계공학과 대학원 BK21 메카트로닉스 사업단

구속력과 잔류응력의 존재가 의심되는 높은 용접부에서는 모재의 조성과 다양한 용접 조건을 제어하여 용접을 하여도 균열은 빈번하게 관찰 된다⁽⁴⁾.

이는 실제 구조물의 용접부에 작용하는 구속 응력과 잔류 응력에 대한 평가가 미흡하기 때문이다. 지금까지 용접부에 작용하는 구속력을 계산하는 방법은 고정 구속된 용접균열 테스트(RRC-test)⁽⁵⁾를 사용하였으나 이는 용착부의 중앙부에 작용하는 것으로 실제 열영향부의 균열에는 적용이 어려우며 잔류응력은 구속조건이나 열영향에 따라서 다양하게 발생하므로 정확한 해석 및 측정이 어려운 상태이다⁽⁶⁾.

따라서 본 연구에서는 구속력에 대한 정량적인 평가를 위하여 로드셀(load cell)과 로제트 스트레인게이지(rossette strain gage)를 이용하여 구속력 측정장치를 제작하여 압력용기로 많이 사용되는 STS 304 박판을 구속하여 용접하였을 때 구속력과 잔류응력을 측정하였다.

2. 실험재료 및 실험방법

2.1 실험재료 및 용접조건

본 연구에 사용된 재료는 일반적인 열처리 온도에서 오스테나이트 조직으로서 내식성뿐만 아니라 고온 및 극저온에서도 성능이 우수하여 적용범위가 매우 넓은 STS304로 Table 1과 2에 자세히 기술하였다. 시편의 두께는 3mm이고, 크기는 300mm×120mm이다. 이를 절단하는 과정에서 발생한 굽힘에 의하여 구속력과 잔류응력에 영향을 주기 때문에 판의 평형을 위하여 유압기로 압축한 후 용접하였다. 용접비드에서 가장 가까운 곳으로부터 일정한 간격으로 잔류응력 측정위치를 선정하였다. 용접은 7.9kW TIG 용접기를 사용하였고, 용접조건⁽⁷⁾은 Table 3에 나타나 있다.

Table 1 Chemical composition of STS304(wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe	N
0.03	0.46	1.27	0.04	0.01	9.42	18.71	69.24	0.01

Table 2 Mechanical properties of STS304

Yield strength (MPa) 0.2% offset	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Rockwell Hardness (HRB)
375	769	47.2	88

Table 3 Welding parameters

Diameter of electrode(mm)	2.3		
Distance of electrode(mm)	3		
Pressure of Ar gas(kgf/cm ²)	15		
Angle of touch(°)	90°		
Welding voltage(V)	20		
Welding speed(cm/min)	2.5	3.0	3.5
Welding current(A)	180	180	180
	200	200	200
	220	220	220

2.2 구속력 실험장치

2.2.1 로드셀(load cell) 제작

구속력을 측정하기 위하여 스트레인 게이지(strain gauge)⁽⁸⁾를 이용한 로드셀(load cell)을 제작하였다. 순수 굽힘력(pure bending)을 측정하기 위하여 스트레인 게이지를 Fig. 1과 같이 구성하였다. 출력을 최대도 하기 위하여 Full-bridge 회로⁽⁹⁾를 사용하였고, 각각의 출력 전압은 순수굽힘의 경우 식(1)과 인장은 식(2)와 같다.

$$e_0 = \frac{1}{4} F(\epsilon' + \epsilon + \epsilon' - \epsilon) e_i \quad (1)$$

$$= \frac{1}{4} F \cdot 2\epsilon' e_i$$

$$= F \cdot \epsilon' \cdot e_i$$

$$e_0 = \frac{1}{2} \cdot F \cdot \epsilon \cdot (1 + \nu) \cdot e_i \quad (2)$$

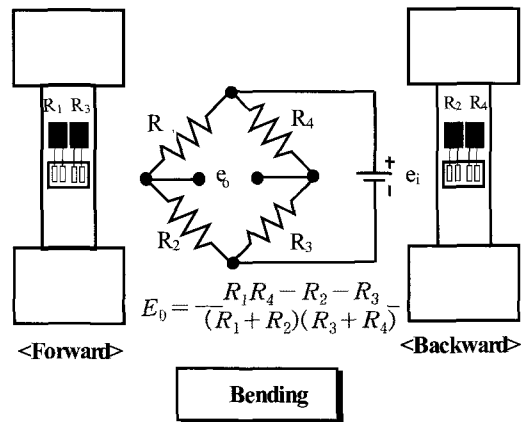


Fig. 1 Schematic diagram of bridge circuit organization for measuring bending force

여기서, F 는 게이지 인자를 나타내고, ϵ 은 스트레인을 나타내며, v 는 포와송 비를 나타낸다.

식(1)은 순수 굽힘만을 측정할 경우 축 스트레인 ϵ 과 굽힘 스트레인 ϵ' 가 공존할 경우에는 저항 R_1 이 받는 스트레인은 $(\epsilon + \epsilon')$ 이고, 저항 R_2 가 받는 스트레인은 $(-\epsilon + \epsilon')$ 이다. 따라서 입력전압을 e_1 라고 하고 대칭일 경우 출력전압을 $e_o(E_0)$ 라 할 수 있다.

2.2.2 구속력 측정장치 제작

평판 용접시 실시간으로 구속력을 측정하기 위하여 Fig. 2, Fig. 3과 같은 용접 시스템을 구성하였다. 각각의 로드셀은 용접의 시작점과 끝점에서 내부로 60mm 떨어진 지점에 설치하였고, 비드에 수직한 방향으로는 중앙에서 100mm 지점에 설치하였다. 또한 용접을 균일하게 하고, 정량적인 이동속도를 얻기 위하여 자동 이송장치에 용접전극을 체결하였다.

2.2.3 구속력 측정

용접방향에서 가까운 부분을 전방으로 뒤쪽을 후방으로 하여 용접전류의 변화를 주면서 일정속도로 용접을 진행해 가면서 전방과 후방의 인장력과 굽힘력의 변화를 측정하였다. 구속력은 가접의 유무에 따라 상당한 영향을 받는데 예 비실험에서 가접을 하지 않았을 경우 일정한 측정값이 불규칙하여 가접을 하였다. 가접의 위치는 용접의 시작점, 끝점, 중앙에 실시하였다.

용접을 하기 전에 시편을 로드셀에 고정시킬 때 불균일한 힘은 출력에 영향을 미치므로 토오크 제한형 렌치를 이용하여 일정한 힘으로 체결하였다. 또한 용접시 로드셀과 모재에서 전달되는 열의 영향을 최소화하기 위하여 로드셀과 모재 사이에 절연재를 삽입하였다.

각 조건으로 용접을 실시하게 되면 용접열에 의하여 모재에 변형이 발생하고, 이러한 변형에 해당되는 응력은 스트레인 게이지에 전압의 변화를 가져온다. 이렇게 발생된 전압은 Dynamic Amplifier에 의해 증폭되고, A/D 변환을 통하여 컴퓨터에 수집된다. Fig. 3은 이러한 일련의 과정을 나타내고 있다.

2.3 잔류응력 해석

2.3.1 막힌 구멍(blind hole)의 해석

일반적으로 많이 사용되는 구멍뚫기방식에 사용되는 관계식은 식(3)이다. 이 관계식은 측정된 스트레인으로부터 두

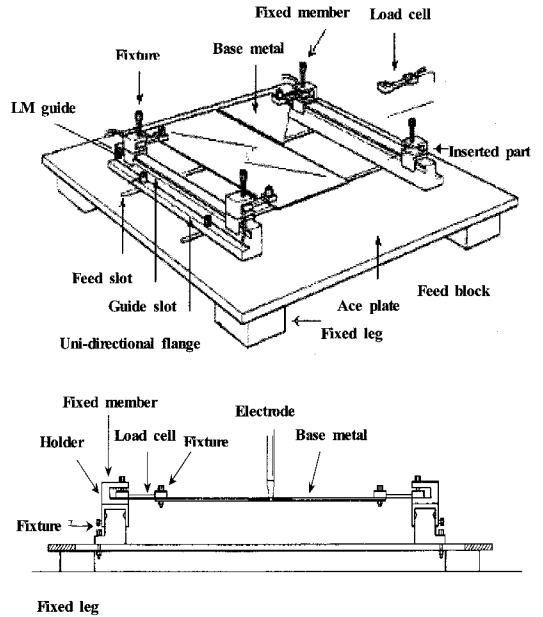


Fig. 2 Schematic diagram of experimental device

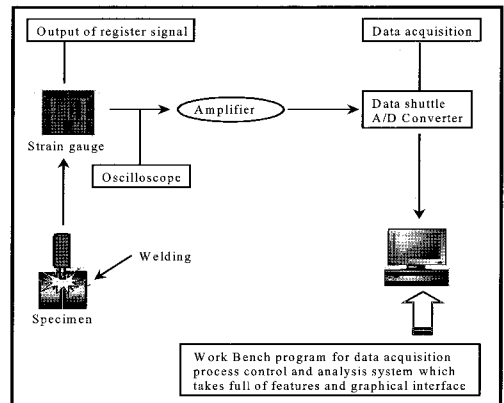


Fig. 3 Procedure for measuring the restraint force

주응력과 각 α 를 얻기 위한 식으로 바뀌게 된다. 세 개의 미지수가 있기 때문에 세 개의 독립적인 스트레인의 측정이 이루어져야 하고, 식(4)과 같이 나타난다. Fig. 4에서 α_1 은 게이지①과 가까운 쪽에 있는 주축이 이루는 각이고, $\alpha_2 = \alpha_1 + 45^\circ$, $\alpha_3 = \alpha_1 + 90^\circ$ 가 된다. 로제트(rosette) 스트레인게이지 각각의 게이지 위치에 식(3)을 적용하여 정리하면, 식(4)와 같이 각 게이지 위치에서의 이완변형률(relieved strain)을 구할 수 있다.

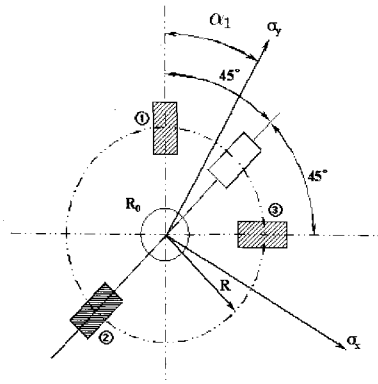


Fig. 4 Strain gage rosette arrangement for determining residual stress

$$\epsilon_r = A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y)\cos 2\alpha \quad (3)$$

$$\epsilon_1 = A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y)\cos 2\alpha$$

$$\epsilon_2 = A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y)\cos 2(\alpha + 45^\circ)$$

$$\epsilon_3 = A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y)\cos 2(\alpha + 90^\circ)$$

식(4)는 주응력 방향에 대해 정리하면 식(5)와 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{\max} = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{4A} - \frac{\sqrt{2}}{4B} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2} \quad (5)$$

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

단, α 는 게이지①과 이루는 각을 말한다. 게이지①을 기준으로 주축과 이루는 각을 표현하면 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tan 2\alpha = \frac{\epsilon_1 - 2\epsilon_2 + \epsilon_3}{\epsilon_1 - \epsilon_3} \quad (7)$$

A와 B는 변형률 이완상수이며, 관통구멍 해석의 경우 반경 방향으로 이완되는 응력과 변형률 사이의 관계를 나타내는 값이다.

실제적인 문제에 있어서는 임의의 크기와 두께를 가진 기거나 구조물인 경우가 대부분이기 때문에 잔류응력의 측정은 주로 막힌 구멍(blind hole) 풀기를 수행한다⁽¹⁰⁾. 평면응력을 받고 있는 물체에 막힌 구멍의 도입은 매우 복잡한 국부 응력 상태를 만들어 내기 때문에 지금까지도 정확한 해답이 나오지 않고 있다. 그러나 Rendler 와 Vigness⁽¹¹⁾에 의해

이 경우도 응력 분포의 일반적인 경향이 관통 구멍과 유사하다고 입증되었다. 따라서 막힌 구멍 때문에 노출된 스트레인은 식(3)과 유사한 삼각함수로 표현된다. 그래서 적절히 막힌 구멍 계수 \bar{A} 와 \bar{B} 를 구해내면 식(5)와 식(6)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 일반 함수 형태로 표현하면 식(8)과 같다.

$$\bar{A} = f_A(E, \nu, y, Z/D_0) \quad (8)$$

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

현재 식(8)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, Schajer⁽¹²⁾는 재료 물성치에 무관한 새로운 무차원 상수 \bar{a} 와 \bar{b} 를 도입하여 \bar{A} 와 \bar{B} 를 식(9)와 같이 나타내었다.

$$\bar{A} = -\frac{(1+\nu)a}{2E} \quad (9)$$

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

한편, ϵ_r 에 응력 σ_c 를 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(10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_1 = \sigma_c(\bar{A} + \bar{B}) \quad (10)$$

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

이 식을 \bar{A} 와 \bar{B} 에 대하여 풀어쓰면 식(11)과 같다.

$$\bar{A} = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{2\sigma_c} \quad (11)$$

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

따라서, 실험적인 방법이나 유한요소해석을 통하여 \bar{A} 와 \bar{B} 를 구하고, 이 값을 식(9)에 대입하여 무차원 상수 \bar{a} 와 \bar{b} 를 구할 수 있다. 이와 같은 방법으로 Schajer⁽¹³⁾는 깊이에

다른 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 D0와 같거나 약간 클 때까지 계속된다. 그러므로 스트레인 신호를 최대도 하기 위해서 구멍 깊이와 구멍 지름의 비 $Z/D0 \approx 1$ 만큼 풀려져야 한다. ASTM E873-85에서 구멍 지름에 대한 최대 구멍 깊이의 비를 1.2로 규정하고 있다⁽¹⁴⁾. 실제 기존 실험에서는 $Z/D=0.4$ 일 때 잔류응력의 대부분 이완되었고, $Z/D=0.2$ ($Z=1.0\text{mm}$)일 때 완전히 이완된 변형량의 약 80%가 이완되는 것을 알 수 있었다⁽¹⁵⁾. 이러한 결과로 본 실험에서는 게이지 지름(D)이 5.13mm이고 구멍 깊이(Z)가 1.0mm일 때 변형량을 측정하여 잔류응력으로 환산하였다.

2.3.2 잔류응력 측정장치

본 실험에 구멍을 가공하기 위한 장비로는 Micro-Measurement사의 RS-200밀링가이드(Milling Guide)를 이용하였다. 잔류응력 측정에는 시편의 두께에 적합한 동일한 회사에서 생산된 로제트(rossette) 스트레인 게이지 EA-06-062RE-120을 사용하였다⁽¹⁰⁾. 밀링 가이드에 사용된 드릴의 지름은 게이지에 맞추어 1.6mm를 사용하였고, 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(5)~(7)에 대입하면 주응력방향과 응력의 크기를 구할 수 있다.

용접하기 전에 잔류응력 측정용 3축 로제트 게이지의 부착 위치를 선정하고, 하이트 게이지를 이용하여 표시하였다. 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 발생할 것으로 예상되는 시편의 중앙부부를 선정하였다. 직사각형 모양의 시편의 크기는 용접부 방향의 거리 300mm, 용접부를 중심으로 한쪽 폭은 120mm이며 스트레인게이지는 비드중심에서 폭방향으로 10mm, 15mm, 35mm, 55mm, 75mm 떨어진 일직선상에 설치하였다. 설치 후 구멍 뚫기법에 사용되는 기본 관계식에 측정된 스트레인 값을 대입하여 주응력과 응력의 크기를 산출하였다⁽¹⁶⁾. 구속력 및

잔류응력의 측정은 3번 이상 반복실험 후 평균값을 사용하였다.

3. 구속력 측정 결과

3.1 용접속도, 전류에 따른 전방 굽힘력 특성

Fig. 5~Fig. 7은 각각 용접전류의 변화에 따른 전방의 굽힘 구속력의 특성을 보여주고 있다. 전체적인 구속력의 형태는 아크의 발생과 보호가스의 주입에 의한 힘 및 중력에 의해 모재가 용융되면 모재는 아랫방향으로 처지고, 응고하면서 모재가 위쪽 방향으로 변형하는 형상을 보이고 있다. 속도가 3.5mm/s의 경우에는 전체적으로 유사한 형태가 나타나고 있으나, 특히 180A의 경우에는 굴곡이 거의 없는 밋밋한 형태를 나타내고 있음을 볼 수 있다. 속도가 3.0mm/s의 경우에는 200A와 220A의 경우 상당히 유사하고 그 크기도 비슷하나 180A의 경우는 모양은 유사하지만 그 크기가 상

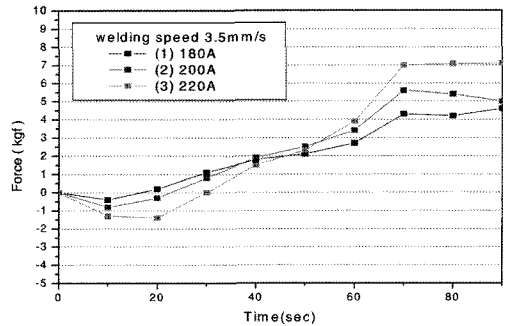


Fig. 5 Forward bending force on various welding currents at welding speed 3.5mm/s

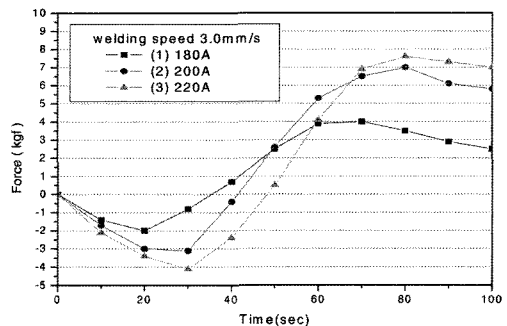


Fig. 6 Forward bending force on various welding currents at welding speed 3.0mm/s

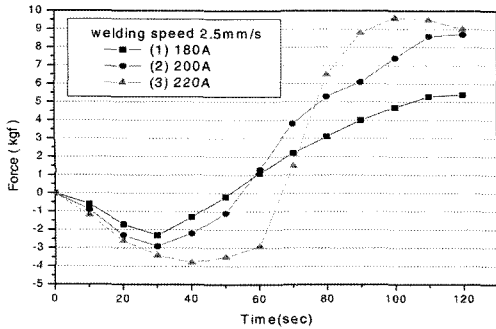


Fig. 7 Forward bending force on various welding currents at welding speed 2.5mm/s

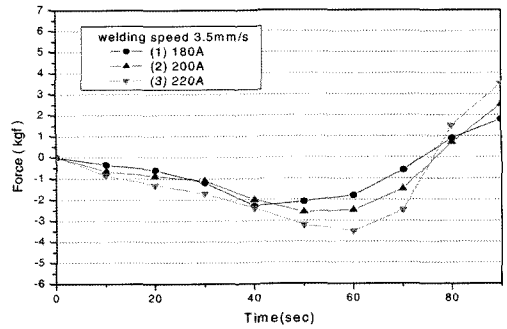


Fig. 8 Backward bending force on various welding currents at welding speed 3.5mm/s

당히 작게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 속도가 3.5mm/s이고, 전류가 220A일 경우 다른 조건들에 비해 변화가 상당히 급격하고 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 용접이 중앙부까지 진행된 상태를 살펴보면 전체적으로 약간 위쪽 방향으로 구속력이 나타나고 있다. 굽힘의 구속력이 위쪽의 방향을 보이는 것은 열원의 위치가 위쪽에 있으므로 아래쪽에서 위쪽으로 응고가 진행되어 모재 전체가 위쪽 방향으로 들어 올려 지기 때문이다.

3.2 용접속도, 전류에 따른 후방 굽힘력 특성

Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10은 용접전류의 변화에 따른 후방의 굽힘 구속력의 거동형태를 보여주고 있다.

후방의 굽힘력의 형태는 용접초기에는 천천히 아래쪽 방향으로 처짐이 발생되기 시작하고 일정시간이 지난 어느 시점에서 초기보다 급격한 처짐의 형태를 보이다가 다시 윗방향으로 전환됨을 보인다. 또한 용접을 종료하는 시점에서는 위쪽방향으로의 거동을 보이고 있다. 속도가 빠른 3.5mm/s의 경우에는 용융이 짧은 시간에 일어나고 빠르게 응고가 시작되므로 아래쪽에서의 처짐은 작게 나타나게 된다. 따라서 전체적인 곡선이 완만한 형태를 나타내고 있다. 속도가 3.0mm/s의 경우에는 전반부에서는 200A와 220A의 구속력의 형태가 유사하고 후방부는 180A와 200A의 변화의 형태가 유사하게 나타난다. 즉 200A의 경우 전방의 변화가 후방에 미치는 영향은 220A의 경우와 유사하게 나타나지만 재료자체가 변화하는 힘은 180A와 유사한 경향을 나타내고 있음을 볼 수 있다. 속도가 2.5mm/s의 경우에는 180A와 200A가 전체적으로 유사한 경향을 나타내고 있으나 220A의 경우에는 매우 급격한 변화를 나타내고 있다. 후방의 굽힘력은 초기에는 전방의 구속력과 같은 방향으로 더 작은

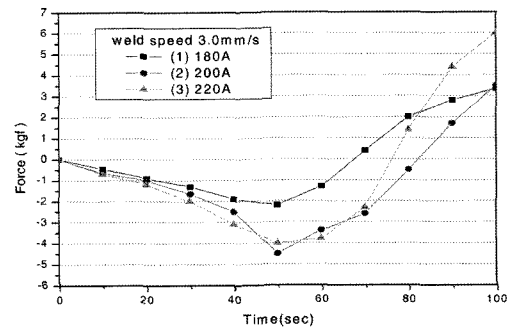


Fig. 9 Backward bending force on various welding currents at welding speed 3.0mm/s

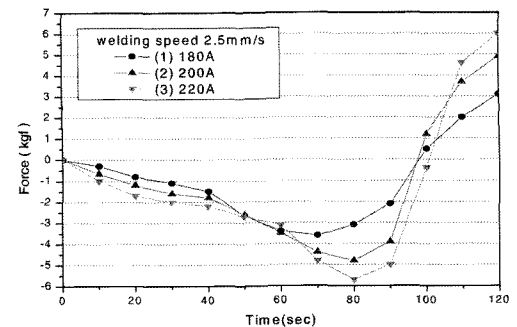


Fig. 10 Backward bending force on various welding currents at welding speed 2.5mm/s

값의 변화를 보이기 시작해 전방의 굽힘 구속력이 상방향으로 변화하는 동안 급격하게 아래방향으로의 구속력을 갖게 되며, 전방의 굽힘 구속력이 안정되어 가는 지점에서 급격하게 상방향으로 전환한다. 또한 전방의 굽힘 구속력의 변화하

는 기울기에 비해 더 급격한 변화의 과정을 거치는 특징을 지니고 있다. 전방에서의 상방향으로의 굽힘의 영향을 받아 더 급격한 변화를 갖고 있으나, 전방의 굽힘구속력에 비해 전체적인 굽힘 구속력의 크기는 더 작게 나타나고 있다. 이는 전방의 굽힘 구속력은 계속적으로 후방 굽힘 구속력의 영향이 나타남을 알 수 있다. 또한, 용접의 진행에 따라 중앙부에서는 전, 후의 구속력이 반대로 나타나므로 비틀림에 의한 험도 간접적으로 확인되고 있다.

3.3 용접속도에 따른 잔류응력 분포의 변화

Fig. 12, Fig. 13, Fig. 14는 각각의 용접속도에서 용접전류에 따른 폭 방향 잔류응력의 분포를 보여주고 있다.

그림에서처럼 속도가 일정할 때 용접전류가 높을수록 잔류응력이 높게 나타났다. 이와 같은 결과는 용접전류가 높을수록 용융부에서 발생하는 입열량이 크고, 이에 따른 용접부의 전체적인 온도구배가 커지기 때문이다.

용접전류가 220A일 때는 180A, 200A일 때보다 인장잔류응력구간이 길게 나타나고 있다. 또한 속도에 따른 잔류응력의 분포와 비교해 볼 때 용접전류에 따른 잔류응력의 차이가 두드러지게 나타나는 것으로 보아 잔류응력은 용접속도 보다는 전류에 더 큰 영향을 받는다고 할 수 있다.

이와 같은 현상은 용접시 발생하는 입열량은 용접속도보다 전류에 기인하고 있기 때문이다.

4. 결론

본 연구에서는 자체적으로 구축한 평판 용접 시스템에 스트레인 게이지형 로드셀과 스트레인게이지를 이용하여 용접시 발생하는 굽힘구속력과 용접속도, 용접 속도와 전류를 변수로 하여 잔류응력의 크기와 방향을 측정하였다. 구멍깊이에 따른 이완변형량 및 용접 비드에 평행한 방향과 수직인 방향에 따른 주응력의 크기와 방향에 대하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 본 연구에서 구축한 스트레인 게이지형 로드셀의 평판 용접시스템은 효율적으로 굽힘 구속력을 측정할 수 있었다.
- (2) 굽힘 구속력의 크기는 용접전류가 높고, 용접속도가 느릴수록 높게 나타나며, 구속력 변화의 기울기 폭이 점차 확대되었다.
- (3) 용접시 온도가 상승함에 따라 압축 구속력을 나타내며, 반대로 냉각과정에서는 인장의 구속력을 나타낸다.

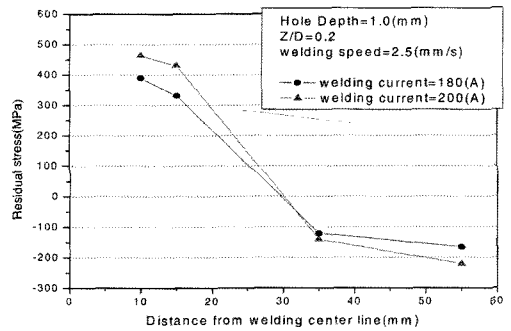


Fig. 12 Residual stress distribution on various welding currents at welding speed 2.5mm/s

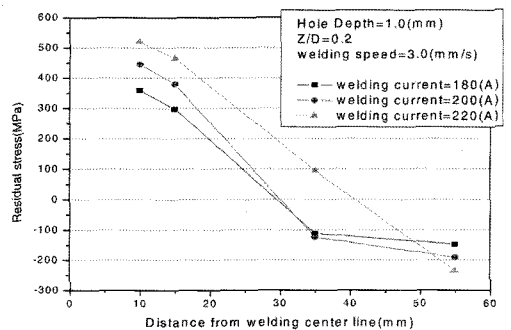


Fig. 13 Residual stress distribution on various welding currents at welding speed 3.0mm/s

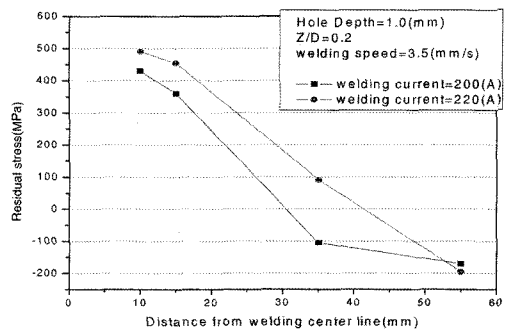


Fig. 14 Residual stress distribution on various welding currents at welding speed 3.5mm/s

- (4) 잔류응력은 용접전류가 높고 속도가 느리게 용접을 하였을 때 넓은 영역에서 크게 형성되며 이송속도 3.0mm/s, 3.5mm/s, 용접전류 220A에서 압축과 인장의 교차는 용접비드에서 40mm 떨어진 부근에서 발생한다.

참고 문헌

- (1) Lee, J. S. and Kim, S. H., 2000, "A Study of Weld Fusion Zone Phenomena in Austenitic Stainless(2)," *Journal of KWS*, Vol. 18, No. 1, February, pp. 59~69.
- (2) Bae, K. Y. and Choi, T. W., 1999, "An Analysis of Thermal Stress and Angular Distortion in Bead-on-Plate Welding Incorporating Constrained Boundary Conditions," *Journal of KWS*, Vol. 17, No. 1, pp. 104~115.
- (3) Shin, S. B., Yoon, J. G. and Kwun, O. J., 1995, "Proposal on a welding cracking susceptibility evaluation method," *Proceedings of the KWS Conference*, pp. 142~144.
- (4) Masubuchi, K. 1980, *Analysis of Welded Structure*, Pergamon Press.
- (5) Satoh, K. and Matsui, S., 1967, "Development of Reaction Stress and Weld Cracking under Restraint," *Journal of the Japan Welding Society*, Vol. 36, No. 10, pp. 1096~1109.
- (6) Kwon, J. W. and Yang, H. T., 2001, "Effect of Residual Stress on Fatigue Characteristics at the Welds of Stainless Steel," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 10, No. 5, pp. 110~117.
- (7) Kujanpaa, V. P., 1985, "Weld defects in austenite stain- less steel sheet-effect of welding parameters," *Welding Journal*, pp. 129.
- (8) Han, E. K. and Ko, J. B., 2001, "The measuring method for a strain gauge," *Intervision*, pp. 8~31.
- (9) Distelhoff, M. F. W., Laker, J., Maquis, A. J. and Nouri, J. M., 1995, "The application of a impellers," *Experiments in Fluids* 20, pp. 56~58.
- (10) Measurement Group, 1993, *Measurement of Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain Gage Method*, Measurement Group Tech, Note, TN-503-5, pp. 1~15.
- (11) Rendler, N. J. and Vigness, I., 1966, "Hole-drilling Strain-gauge Method of Measuring Residual Stresses," *Proc., SESA XXIII*, No. 2, pp. 577~586.
- (12) Schajer, C. S. and Tootoonian, M., 1997, "A new Rosette Design for More Reliable Hole-drilling Residual Stress Measurements," *Experimental Mechanics*, pp. 299~306.
- (13) Schajer, G. S., 1981, "Application of Finite Element Calibrations of Residual Stress Measurement," *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 110, pp. 338~343.
- (14) Redner, S. and Rerry, C. C., 1982, "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.
- (15) Ko, J. B., 2001, *A Study on the Estimation of Thermal Deformation and Residual Stress Characteristics in Welded Joint of Steel Plate by External Restraint Force Measurements*, Chungnam national university, doctors thesis for a degree.
- (16) Edlameter, W. R. and Mamaros, T. C., 1977, "measurement of Residual Stress by the Hole-drilling Method," *Sandia National Laboratories Report SAND -77-8006*.