

박판 용접시 온도변화에 따른 구속력 측정

고준빈*, 이영호**

A Measurement of restraint force during the heating and cooling cycle of the welding process

J.B. Ko*, Y.H. Lee**

Abstract

Distortion is a potential problem with all welded fabrication and should be caused dimensional changes and mismatch of joints during welding fabrication. Correction unacceptable weld distortion is extremely costly and in some case impossible. The aim of the present work is to verify the variation of the compressive force, tensile force and distortion during plastic deformation under Tungsten-inert-gas (TIG) welding, on type 304 stainless steel. Experimental results show that possibility of measuring deformation during welding and a good correlation was found between analytical and experimental result as finite element methods have been used to model temperature analyses.

Key Words : Distortion(각변형), Compressive force(압축력), Tensile force(인장력), Restraint force(구속력)

1. 서론

구조용 강재는 산업현장에서 개발이 미흡해서 발생하는 문제중에 하나가 용접 온도의 해석 부진의 결과이다.⁽¹⁾ 용접 온도는 용접품질에 직접적인 연관이 있고 실제 용접품을 통해 다양한 점에서 보여지는 심한 온도 구배를 동반하며 이로 인해서 열원의 거동은 용접부에서 적지 않은 팽창과 수축의 결과를 가져온다. 이 현상은 특히 용접 열 영향부에서 심하게 나타나며 용접품 전체로는 구속력을 발생하므로 예기치 못한 잔류응력이 발생하기도 한다.

구속력은 용접시 열전도에 따라 판재의 소성 변형에 의해서 발생하며, 그 주요 힘으로는 인장, 압축, 굽힘, 비틀림 등 이라 할 수 있다. 구속력의 불균일 및 과도 집중은 용접부에 심한 잔류응력으로 노출되고 재료의 균열 및 피로 파괴의 원인이 되어 결과적으로, 생산성의 저하의 요소가 된다.⁽²⁾ 이를 위한 효율적인 대처 방안으로는 용접 방법의 개선 측면에서 유용한 방법인 효과적인 구속력의 제어라 생각된다.

현재까지 용접 후 발생하는 구속력 및 잔류응력을 측정 한 기록은 산재해 있으나, 아직 용접 중 실시간으로 구속

* 충남대학교 기계공학과 대학원(kjb1002@hyunam.tnut.ac.kr)
 ** 충남대학교 기계공학과

력을 측정할 연구는 전무한 실정이다.

본 연구에서는 자체 제작한 로드셀을 시험편에 구속시킴으로써 용접 중 실시간으로 구속력 형태 및 크기 측정, 비틀림의 발생부위 와 온도 상승을 비교함으로써 차후, 잔류응력을 예측하는데 기초자료를 제공하고자 하였다.

2. 관련이론

2.1 로드셀의 특징

Fig. 1은 로드셀에서 작용하는 인장과 굽힘 하중을 나타내었다. 사용된 스트레인 게이지⁽⁸⁾는 (저항 : 120Ω, 게이지 팩터 : 2.00) 이면과 배면에 그림과 같이 수검체에 부착하였다.

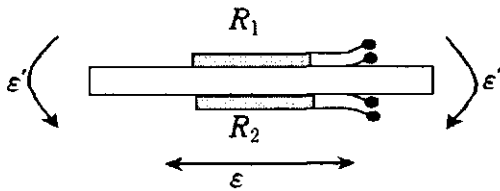


Fig. 1 Direction for loading

각각의 저항은 $R_1 = R_2$ 이며, 평형 방정식은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다. 순인장과 순굽힘을 측정하기 위하여 식(2), (3)과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$F = \frac{\Delta R}{R} / \varepsilon \quad (1)$$

여기서, F : Gauge factor

ε : Strain

R : Resistance

ΔR : Variation of resistance

(a) 순 굽힘을 측정할 경우

$$e_o = F \cdot \varepsilon' \cdot e_i \quad (2)$$

(b) 순 인장의 경우

$$e_o = \frac{1}{4} F \varepsilon (1 + \nu) e_i \quad (3)$$

여기서, ν : poisson's ratio

e_o : output voltage

e_i : input voltage

본 실험에서는 순인장, 순굽힘을 측정하고자 4개의 스트레인 게이지를 수검체에 부착하였고, 실험의 신뢰성을 확보하기 위하여 실제 무게로써 로드셀에 하중을 가하여 실제 변형량에서 실험을 수행하였으며, 그 검출결과와 타당성을 검토하였다.

2.2 온도의 전산해석 기법

용접시 용접부의 열 유동 및 열전달⁽⁹⁾을 해석하기 위한 에너지 방정식을 일반항으로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial(T)}{\partial t} + \frac{\partial(u_i T)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho C_p \left[\frac{\partial(T)}{\partial x_i} \right] \right) + \frac{\dot{q}'''}{\rho C_p} \quad (4)$$

여기서, T : 온도

t : 시간

u : 속도

x : 좌표계

ρ : 밀도

C_p : 정압비열

\dot{q}''' : 용접점의 열용량

아래첨자 i : 좌표의 방향(1:x축, 2:y축, 3:z축)

에너지방정식(4)를 일반항으로 나타내면 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \phi) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \phi) = \frac{\partial}{\partial x_i} (\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_i}) + S_\phi \quad (5)$$

식(5)에서 좌변 첫 번째 항은 검사체적 내의 시간에 따른 물리량의 변화를 나타내며, 두 번째 항은 대류항(convection term), 우변 첫 번째 항은 확산항(diffusion term), 두 번째 항은 생성항(source term)을 나타낸다.

x_i 는 i 값의 변화에 따라서 좌표가 달라지며 $i=1$ 일 때 x , $i=2$ 일 때 y , $i=3$ 일 때 z 를 나타낸다. ϕ 가 엔탈피인 경우는 에너지방정식을 나타내며, 확산계수와 생성항은 다음과 같이 표현된다. 생성항은 일반적으로 $S_\phi = ax+b$ 와 같이 일차함수 형태로 표현될 수 있으며, S_ϕ 는 일차함수의 ax 에 해당하며, 상수값 b 는 S_c 에 해당된다. 유한

체적법(Finite Volume Method)을 사용하여 검사체적에 대한 지배방정식(2)의 차분방정식을 구하면 다음과 같다

$$\phi_p \sum_i (A_i - S_p) = \sum_i (A_i - \phi_i) + S_c \quad (6)$$

본 연구에서는 열유체 해석 프로그램인 FLUENT를 사용하여 차분방정식 (6)의 해를 구하였으며, 수렴판정은 다음의 전 영역 잔류항의 총합이 10^{-6} 이하가 되는 점이다. 식(7)에서 첨자 P는 기준 격자점을 나타내며, E와 W는 기준 격자점을 중심으로 좌 · 우 격자점을 나타내며, N과 S는 상 · 하 격자점을 나타낸다.

$$\begin{aligned} \bar{R} &= [\sum_{nodesP} | [A_E \phi_E + A_W \phi_W + A_N \phi_N \\ &+ A_S \phi_S + S_C - A_P \phi_P] |] \\ | \sum_{nodesP} | (A_P \phi_P) | &\leq 10^{-6} \end{aligned} \quad (7)$$

각 시간에 따른 단계의 초기조건은

$$T = 273k \quad \text{at } t = 0 \text{sec}$$

$$T = T^{n+1}k \quad \text{at } t = n \text{sec}$$

로 하였고, 경계조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial x} &= 0, & \text{at } x = 0 \text{ or } 50mm \\ \frac{\partial T}{\partial z} &= 0, & \text{at } x = 0 \text{ or } 150mm \\ \frac{\partial T}{\partial y} &= 18w/m^2k, & \text{at } x = 0 \text{ or } 50mm \end{aligned}$$

또한 잠열값은 온도의 범위가 1398℃~1421℃의 영역에서 250kJ/kg의 값을 사용하였으며, 전도값은 온도에 따라 대입하였다.

Table 1 Thermal conductivity at various temperature

온도(K)	273	473	673	1073
전도계수 W/MK	16.3	17	19	27

위에서 사용한 모델의 형상은 Fig. 2에 나타나 있다.

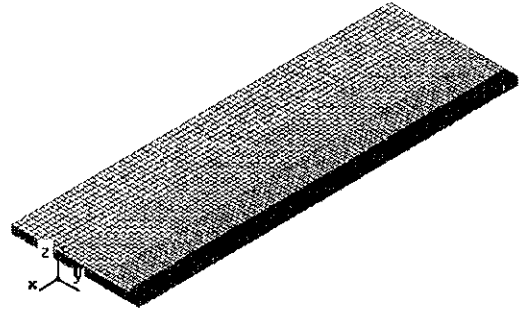


Fig. 2 Model for analysis

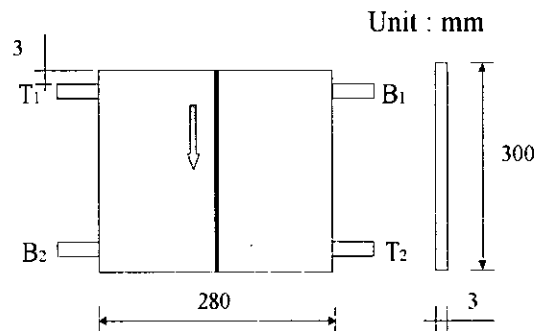
3. 사용재료 및 실험 방법

본 연구에서는 STS 304 강을 시험재료로 사용하였다. 일반적으로 STS 304강은 내열성 및 내식성이 우수하여 압력용기, 화학플랜트 등에 널리 사용되고 있다.⁽⁴⁾ 화학적 조성은 Table 2에 나타났다.

Fig. 3에 나타났듯이 시험재료에 인장 및 굽힘을 측정하기 위하여 4개의 로드셀을 일정한 토크를 유지하여 시험편에 결합하였다.

Table 2 Chemical composition of STS steel wt. %

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fei	N
0.030	0.461	1.270	0.047	0.013	9.42	18.71	69.24	0.01



T1: Forward Tension T2: Behind Tension
B1: Forward Bending B2: Behind Bending

Fig. 3 Test piece

Fig. 4는 스트레인게이지 부착위치 및 회로 구성을 나타내었다. 그림에서 나타나듯이 로드셀의 구성을 달리하여 인장력 및 굽힘력을 측정하였다

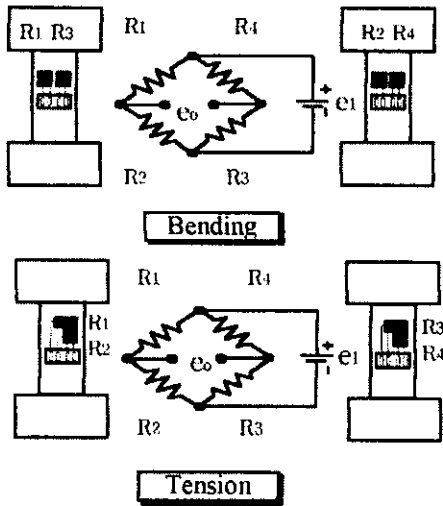


Fig. 4 Wheatstone bridge circuit

사용된 용접기는 삼상 교류 7.9kW TIG (Tungsten inert gas)용접기이며, 일정한 용접 속도를 얻기 위하여 자동 산소 아크절단기의 자동이송기에 용접봉을 부착하여 사용하였다.

Table 2는 본 실험에서의 수행된 용접조건을 나타내고 있다. 용접 조건은 기존 연구된 논문^{5,7)}과 예비시험을 거쳐 결정하였다. 아르곤 가스압력은 10kgf/cm²로 일정하게 유지하였으며, 용접 전에 불순물 제거를 위하여 용접부위를 아세톤으로 세척하였다. 또한, TIG 용접 전극봉은 매 용접시 일정한 각도로 용접을 수행하기 위해서 일정하게 정해진 각도로 그라인딩 하였다.

Fig. 5는 본 실험의 방법의 구성도를 나타낸다. 용접시 일어나는 변형은 스트레인 게이지로 측정되고, 변형 동적

Table 2 Welding condition

Welding Speed	Shielding gas	Distance from test sheet	Torch angle	Welding Voltage(A)
3.4mm/s	Ar	4mm	90°Δ	150
				200
				250

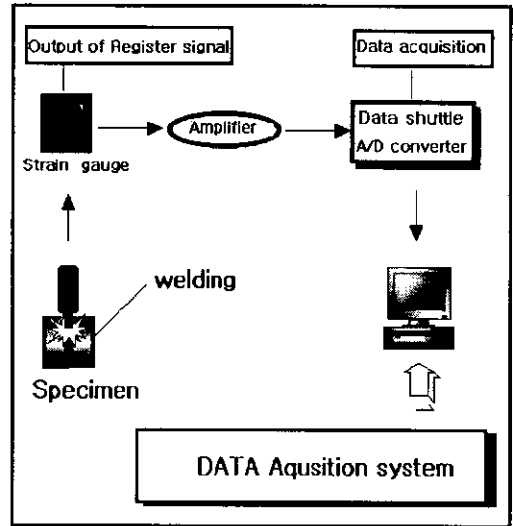


Fig. 5 Schematic diagram of data acquisition processing

증폭기에서 일정한 신호로 증폭된 후 데이터 수집기에서 측정된 값을 얻을 수 있었다.

4. 결과 및 고찰

4.1 구속력측정의 결과

Fig. 6은 용접초기 인장구속력을 측정하기 위하여 Fig. 3에 나타나있는 것처럼 시험편 4곳에 구속을 가하였을 때 일어나는 인장 구속력의 변화를 나타내었다. Fig. 6에서 나타나듯이 용접 전류의 변화(150, 200, 250A)에 따라 현저한 차이가 있음이 관찰되었다

Fig. 6에서 나타나듯이 용접 입열량의 증가와 함께 점차적으로 인장력이 모재의 중앙부까지 증가하였다. 그러나 중앙부를 넘어섰을 때, 다시 감소하기 시작하여 용접이 마무리되었을 때 변화현상이 둔화되었다.

이 현상은 기존 연구된 논문^{6,7)}에서의 연구 결과와 유사한 현상으로 용접초기 용접 모재는 열원으로 인하여 용융되면서 팽창하지만, 열영향이 덜한 주변의 구속력 상대적으로 크기 때문이다. 그러므로 용접초기 점진적으로 인장 구속력이 작용하게 되지만, 일정시간(모재의 중앙부)이 지나면서 주변 모재에도 열원이 공급되면서 구속되는 힘이 감소하는 것으로 생각된다.

또한, 구속력의 증가는 용접부의 냉각으로 인한 수축력보다 열원으로 인한 팽창시 구속력의 증가는 보여진다.

Fig. 7은 시험편 후방부를 구속함으로써 후방부의 인장력을 측정하고자 하였다. Fig. 7에서 나타나는 바와 같이 구속력의 변화는 둔감하지만, 용접이 시편 중앙부에 가까워졌을 때 최대치의 압축 구속력이 발생하였다. 이 부분은 시편의 중앙부에 해당하는 곳으로 약 40초 부근에서는 시편 중앙부가 이미 용접이 완료된 상태에 있기 때문에 더 이상 구속 인장력이 작용하지 못하고 압축력이 작용하는 것으로 생각된다. 이 부분에서 작용하는 압축력은 Fig. 6에서 작용했던 인장력이 동시에 작용하기 때문에 각변형이 두드러지게 나타나고 있다.

Fig. 8은 시험편에 굽힘 로드셀을 사용하여 구속을 했을 때 나타나는 용접 초기 굽힘 구속력을 나타내었다.

Fig. 8에서 나타나듯이 용접 초기에는 용융지의 팽창 및 수축 거동으로 인하여 각변형을 동반한 비틀림 현상이 보여지며 용접이 진행됨에 따라 시편 중앙부에서 아래 방향으로

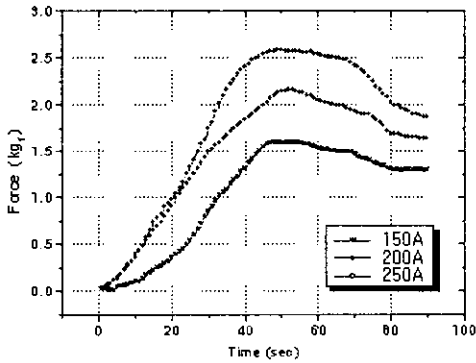


Fig.6 Comparison of forward tension force

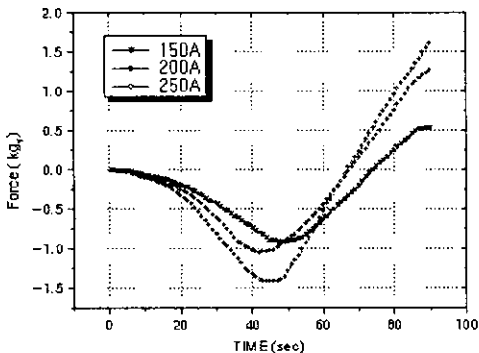


Fig. 7 Comparison of behind tension force

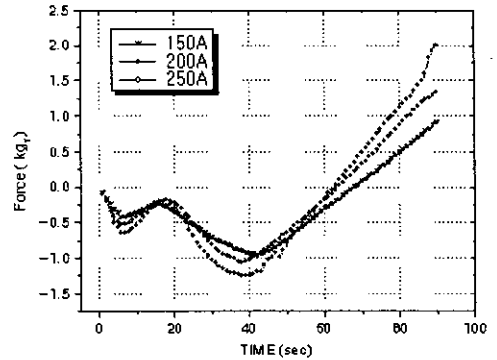


Fig. 8 Comparison of forward bending force

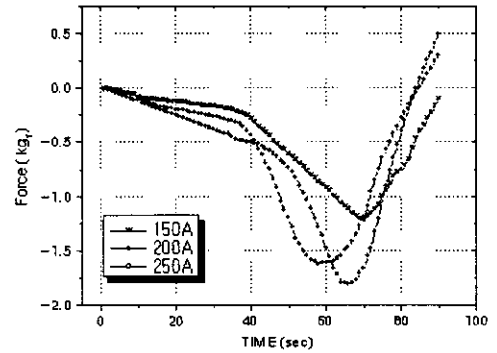


Fig. 9 Comparison of behind bending force

굽힘력이 최대로 작용하는 것이 보여진다. 다시 열원이 증가함에 다시 상방향으로 굽힘력이 반등됨이 보여진다.

여기서 측정된 값은 Fig. 6의 인장값과 비교해 보았을 때 절반정도의 값이므로 용접시 인장력이 용접 구속력에 더 영향을 미치것으로 판단된다.

Fig. 9는 시험편 후방부에서 측정된 굽힘력 값을 나타내고 있다. Fig. 8에서 발생하는 굽힘력과 비교했을 때, 용접 초기에 구속력이 크게 증가함이 보여지며, 인장력과 비교에서는 거의 유사한 값을 나타내고있다.

시편 후방부의 굽힘력 역시 용접진행시 중앙부에서 급격한 변형의 정도가 보여진다. 용접이 완료된 시점에서 계속하여 구속력이 증가하는 양상을 띠므로 용접 후에도 구속력이 증가하여 응력이 잔류하리라 생각된다.

4.2 전산해석결과

용접 전 용접기술자가 용접절차 및 현상을 미리 예측하

고 실제 용접과정에서 적용을 가능하게 하며, 실제 측정된 구속력과 온도의 증가 및 감소에 따른 구속력의 영향을 평가하기 위하여 수치해석이 실시되었다. Fig. 9 는 용접 방향에 따른 각각 다른 지점에서의 온도분포를 나타내고 있다. Fig. 9에서 알수있듯이 열전도계수가 낮은 모재는 용접열원이 위치해 있을 때 온도가 급격히 상승하고 하강하는 모습을 보이며, 용접부의 전·후의 열원에는 큰 영향을 받지 않는 모습을 보이고 있다.

Fig. 10은 유한요소법을 통한 k방향의 온도 분포를 나타내었다. Fig. 10에서 나타나듯이 용접부의 온도는 용접 중 급격한 온도 상승을 가져오고, 급격히 냉각되는 경향을 보이고 있다. 각 용접 구간은 열원이 통과시 거의 유사한 온도 분포를 나타내지만 시간의 경과와 더불어 약 26초 부근에서는 열의 누적의 결과를 더 많은 열원이 집중되리라 생각된다. 그렇기 때문에 본보에서 발생한 구속력의 최

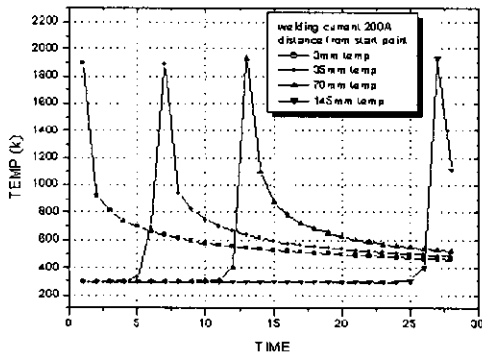


Fig. 10 Temperature distribution

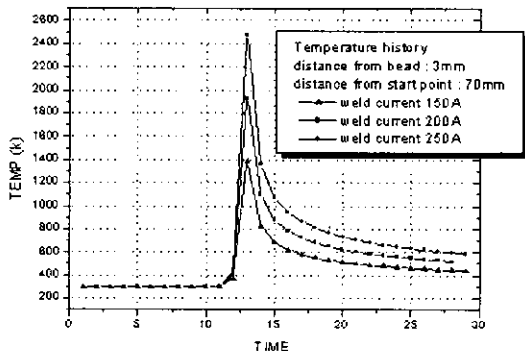


Fig. 11 Temperature distribution

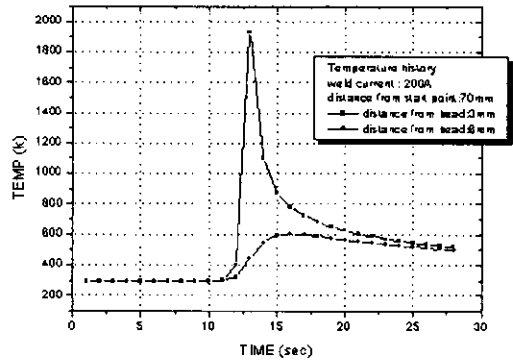


Fig. 12 Temperature distribution

대지점이 중앙부에 미치리란 생각된다.

Fig. 11은 k=27구간에서 전류 150A, 200A, 250A에따르는 온도분포를 나타내었다.

Fig. 11에서 보여지는 것처럼 전류의 증가와 더불어 일정한 온도 상승이 이루어졌으며 냉각은 다소 둔감되었다.

Fig. 12는 시편의 i 방향에 따른 온도 분포를 보여준다. Fig. 12에서 나타나는 것처럼 용접부에서 거리의 차이는 큰 온도의 차이를 보이고 있다. 이는 용접시 상당히 큰 온도 기울기를 보임으로써 용융부의 거동은 매우 좁은 영역에서 일어나고 또한 모재에 의한 구속이 대단히 심하게 나타나고 있음을 보이고 있다.

5. 결론

본 연구에서는 용접 중 실제 작용되는 구속력을 인장력과 구속력으로 나누어 평가하였고, 최대 구속력이 작용하는 부분에서 급격한 온도의 변화를 확인할 수 있었다.

본 연구를 통하여 용접시 구속력은 인장 및 굽힘력으로 시험편에 작용하는 것이 확인되었으며, 특히 중앙부에서 시험편의 비틀림을 유발하는 인장력과 굽힘력 상이하게 작용하였다. 구체적으로, 구속력은 용접초기 보다 후방부에서 더욱 심하였으며, 인장과 굽힘은 동시에 발생하고, 인장력이 굽힘력 보다는 구속력에 영향이 큰 것으로 나타났다.

온도 분포의 흐름에서는, 급격한 온도의 냉각과 가열이 반복됨으로써 시험편에 팽창과 압축을 유발함으로써 구속력에 크게 영향을 주었다.

구속력과 잔류응력은 밀접한 관계가 있는바, 본연구를

바탕으로 차후, 용접중, 용접후 잔류응력 예측의 연구가 기대된다.

참 고 문 헌

- (1) K.Satoh and S. Matsui: J. of the J.of welding Society ,vol. 36, pp. 1096~1109, 1969
- (2) 배강열, 최태완 : Journal of KWS, Vol.17, February, pp.104~115,1999
- (3) 한응교 "스트레인 게이지 이론과 운용", 보성문화사, 1987
- (4) G. Lothongkum : Journal of Materials Processing Technology,pp.410~414,1999
- (5) V.P Kujanpa : "weld defects in austenitic stainless steel sheet-effect of welding parameters", welding J. pp.45-S-52-S,1983
- (6) 신상범,윤중근 : 大韓鎔接學會誌 第15卷 第1號 , pp. 9~14.1997
- (7) Satoh, K. and Terasaki, T. : "Effect of Welding Conditions on Welding Deformation" Welding Society, pp.302~308,1976
- (8) 김일수,김인권,문채주,정영재,안영호, "유한요소법을 이용한 용접부의 열전달 및 잔류응력해석에 관한 연구",한국공작기제학회지 제9권제5호, pp. 96~1104, 2000