

후판의 부분용입 다층용접에 대한 잔류응력 및 변형해석

김 석* · 배성인** · 송정일†
 (2001년 4월 16일 접수, 2001년 8월 7일 심사완료)

Residual Stress and Displacement Analysis of Thick Plate for Partial Penetration Multi-Pass Weldment

Seok Kim, Sung In Bae and Jung Il Song

Key Words: Partial Penetration Welding(부분용입 용접), Multi-Pass Weld(다층용접), Hole Drilling Method(천공법), Residual Stress(잔류응력)

Abstract

Partial penetration welding joint defines that groove welds without steel backing, welded from on side, and groove welds welded from both sides but without back gouging, that is, it has an unwelded portion at the root of the weld. In this study we analysed for residual stress and displacement distribution on partial penetration welding condition of thick plate metal. For 25.4mm thick plate, theoretical residual stress and displacement analysis by finite element method using ABAQUS was carried out and compared with the experimental result using hole-drilling method. In results of the condition of partial penetration, it appeared that longitudinal stress at welding area was a little difference and transverse stress did not have any effect by partial penetration multi-pass welding. From a point of welding distortion in partial penetration multi-pass welding, it seemed to be better to control root face smaller than 6.35mm.

기호설명

- $\epsilon_{1,2,3}$: 측정된 스트레인
- σ_{zz} : 종방향 잔류응력
- σ_{xx} : 횡방향 잔류응력
- δ_x : 횡방향 변위
- δ_y : 두께방향변위
- q : 열입력
- σ_{max} : 최대주응력
- σ_{min} : 최소주응력

* 국방품질관리소
 ** 창원대학교 기계공학과
 † 책임저자, 회원, 창원대학교 기계공학과
 E-mail : jisong@sarim.changwon.ac.kr
 TEL : (055)279-7508 FAX : (055)275-0101

1. 서론

후판 다층용접 구조물은 강도특성이 우수한 완전용입 용접이음 방식을 채택하고 있다. 그러나 완전용입 용접이음 방식은 용접 공정의 공수 및 용접관련 부자재 소모가 과다하며, 용접변형이 심해 용접결함이 발생할 가능성이 크고 잔류응력이 크게 발생하고 있다. 최근의 대형 전투차량용 용접구조물에서 이러한 문제를 해결하기 위해 부분용입 용접이음 방식을 선택하고 있으며, 생산성 및 원가절감, 용접자동화에 의한 작업환경 개선 등에서 좋은 평가를 받고 있는 것으로 알려져 있다. 부분용입 용접이음 방식은 백가우징(Back gouging)을 실시하지 않고 용입부족을 포함하는 용접이음으로 정의된다.⁽¹⁾ 부분용입 용접방식의 특징인 가우징작업 생략은 용접 자동화 실

현을 가능하게하는 효과를 얻을 수 있으며, 미국의 General Dynamics사의 M1A1 전차 용접을 부분용입 방식으로 채택함으로써 용접공정의 33%를 로봇에 의한 자동화 용접이 적용된 사례가 있다. 그러나 용접 자동화라는 큰 장점이 있으면서도 부분용입 방식이 광범위하게 적용되지 못하고 있는 것은 완전용입 용접이음 방식에서 결코 허용할 수 없는 용입부족이라는 기계적 결함을 갖고 있으며, 이러한 결함이 구조물 강도 및 안전성을 저해하는 요인으로 작용할 것으로 우려되었기 때문이다. 따라서 부분용입 방식의 용접이음을 채택하기 위해서는 구조강도 및 파괴특성에 대한 연구가 필요하다. 용접부의 인장 잔류응력은 균열전파력을 증가시키고, 파괴에 대한 구조물의 저항력을 감소시켜 용접구조물의 파괴거동에 큰 영향을 미치게 된다.⁽²⁾ 용접 잔류응력의 예측과 잔류응력이 파괴거동에 미치는 영향을 정확히 파악하는 것은 용접 구조물의 안전성과 내구성 예측에 매우 중요하다. 용접부재의 잔류응력 분포 예측은 실험적 방법보다 열탄소성 유한요소법을 이용한 수치해석적 방법이 최근들에 많이 이용되는 추세이다. 유한요소법을 이용한 잔류응력 해석은 L. Tall이 1964년 1차원 해석으로 연구⁽³⁾가 시작되어, 1970년대 이후 Masubuchi, Fujita, Ueda 등이 2차원 해석⁽⁴⁻⁶⁾으로 발전하였으며, 최근에는 1996년 Yasuhisa Okumoto가 Butt용접에 의한 수축변형과 잔류응력계산, 필렛용접에 대한 수축변형 계산을 유한요소법으로 수행하였다.⁽⁷⁾ 특히 심은 다중용접의 2차원 해석에 적합한 입열량 입력모델을 제시⁽⁸⁾하는 등 유한요소법을 이용한 잔류응력 해석 방법이 폭넓게 발전해 왔다.

따라서 본 연구는 다중용접 구조물 부분용입 용접부의 파괴특성 분석을 위한 기초작업으로 FEM을 이용하여 잔류응력 분포를 해석하고, 실험적 확인을 통해 부분용입 용접이음 설계에 필요한 기초자료를 제공하는데 있다.

2. 잔류응력 해석

2.1 잔류응력 측정

잔류응력을 실험적으로 측정하기 위한 방법은 여러 가지가 있으나 대표적인 방법으로는 응력

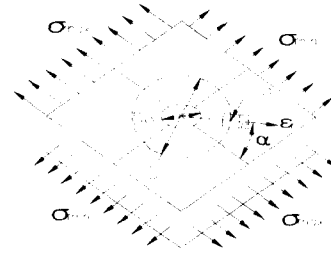


Fig. 1 Stress measurement by using the Hole Drilling Method

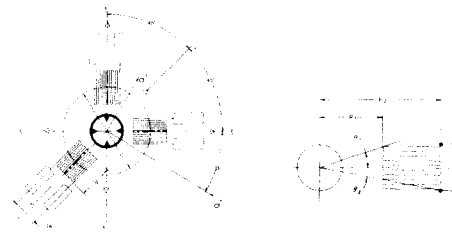


Fig. 2 Strain Gage Rosette and Definition of Symbols

이완법(Stress relaxation technique), X-ray 회절법(X-ray diffraction technique), 균열 진전법(Cracking technique), 응력 민감법(Technique using stress sensitive properties) 등이 있다. 이들 방법중 응력이완법은 원리가 간단하면서 비교적 정확하게 측정할 수 있어 용접부 잔류응력 측정에 주로 사용되고 있다.

본 연구에서는 응력이완법중에서 가장 보편적이고 ASTM에 규정된 천공법(Hole drilling method)⁽⁹⁾을 이용하여 잔류응력을 측정하였으며, 잔류응력은 다음과 같은 순서로 측정하였다. 스트레인 게이지를 잔류응력을 측정하고자 하는 위치에 부착하고 원하는 깊이까지 드릴링 작업을 실시한후 이완된 스트레인을 측정하여 잔류응력을 계산하였다.

Fig. 1과 Fig. 2는 천공법으로 잔류응력 계산을 위한 스트레인 게이지 부착위치 및 부호와 계산상수를 정의한 그림이다.

측정된 스트레인 값으로 잔류응력을 계산하는 공식은 다음과 같다.

Fig. 1의 단면에서 측정되는 스트레인 이완량은 식 (1)과 같은 관계식을 갖는다.

$$\epsilon_r = (\overline{A} + \overline{B} \cos 2\alpha)\sigma_{\max} + (\overline{A} - \overline{B} \cos 2\alpha)\sigma_{\min} \quad (1)$$

여기서, ϵ_r 은 스트레인 게이지 중심 P점에서 측정된 스트레인 값, $\overline{A}, \overline{B}$ 는 보정계수, $\sigma_{\max}, \sigma_{\min}$ 는 구멍뚫기전에 존재한 최대·최소 주응력, α 는 σ_{\max} 방향에서 ϵ_r 방향까지 측정된 각도, D 는 스트레인게이지 직경, D_0 는 뚫린 구멍의 지름을 나타낸다. 따라서 잔류응력은 다음의 식 (2,3)으로 계산된다.

$$\sigma_{\max} = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{4A} - \frac{1}{4B} \sqrt{(\epsilon_3 + \epsilon_1)^2 + (\epsilon_3 + \epsilon_1 - 2\epsilon_2)^2} \quad (2)$$

$$\sigma_{\min} = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{4A} + \frac{1}{4B} \sqrt{(\epsilon_3 + \epsilon_1)^2 + (\epsilon_3 + \epsilon_1 - 2\epsilon_2)^2} \quad (3)$$

여기서 $\overline{A}, \overline{B}$ 는 식 (4,5)와 같이 계산되며, μ 는 포와송의 수, $R_1, R_2, \theta_1, \theta_2$ 는 Fig.2에서 정의된 값이다.

$$\overline{A} = -\frac{D_0^2}{2GW(R_2 - R_1)} \left(\frac{1 + \mu}{2E} \right) (\theta_1 - \theta_2) \quad (4)$$

$$\overline{B} = -\frac{D_0^2}{2GW(R_2 - R_1)} \left(\frac{1}{2E} \right) (C_1 + C_2 - C_3) \quad (5)$$

$$C_1 = 2(1 - \mu)(\theta_1 - \theta_2)$$

$$C_2 = (1 + \mu)(\sin 2\theta_1 - \sin 2\theta_2)$$

$$C_3 = 1/32 \{ (1 + \mu)D_0^2 \} \{ (2 \sin 2\theta_1 + \sin 4\theta_1)/R_1^2 - (2 \sin 2\theta_2 + \sin 4\theta_2)/R_2^2 \}$$

그리고 주응력과 스트레인 게이지가 이루는 각 β 는 식 (6)과 같이 계산된다.

$$\beta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{\epsilon_1 - 2\epsilon_2 + \epsilon_3}{\epsilon_3 - \epsilon_1} \right] \quad (6)$$

2.2 유한요소 해석모델

후판용접은 모재를 예열없이 상온(21℃) 상태에서 용접하고, 다시 상온까지 자연대류 냉각한 후 다음 페이스를 용접하였다. 따라서 각 단면이 같은 온도변화를 갖는다는 가정에서 용접선상에 수직인 단면을 취하여 2차원 해석을 수행하였다.⁽⁸⁾

2차원 요소에 적용하는 용접아크에 의한 입열량은 단위면적당 입열량(q)으로 계산되며 다음식 (7)과 같이 계산된다.

$$q = \frac{\eta EI}{bL} \quad (7)$$

여기서 η 는 용접효율이며, E 는 전압, I 는 전류, b 는 용접비드 폭, L 은 용접길이이다. 2차원 평면요소로 가정하였을 때 L 은 단위길이를 의미한다.

본 연구의 용접 모델은 전투차량 구조물에 가장 많이 사용되고 있는 25.4mm(1inch)후판을 선택하였고, GMAW(Gas-metal-arc weld)조건에서 완전용입과 부분용입 모델을 비교하였다. 완전용입은 6페스 용접, 부분용입은 RF(Root Face)가 6.35mm(이하 RF1/4)와 3.18mm(이하 RF1/8)에 대해 설정하였고, 실험에 사용한 시편과 동일한 길이 228.6mm(9inch)로 설정했다. 해석모델의 용접부 형상과 용접조건은 Fig. 3과 같다.

FEM 해석 모델은 Fig. 4와 같고, 해석 프로그램은 ABAQUS⁽¹⁰⁾를 이용하였으며, 8절점 평면요소를 선택하여 열해석과 응력해석을 순차적으로 계산하였다. 다층 용접조건을 고려하기 위해 용접부위 요소들은 해석 초기에 제거되었다가 해당 층수의 용접이 될때 비드크기 만큼 요소를 생성 활성화 시키면서 해석하였고, 활성화된 요소에 열량을 입력시켜 계산하였다. 초기 온도조건은 상온(21℃)으로 입력하였다.

용접 조건에 대한 잔류응력 실험은 Fig. 5와 같이 천공법(Hole Drilling Method)으로 실시하였으며, 용접 중심선에서 17.8mm(0.7inch), 25.4mm(1inch), 50.8mm(2inch)위치에 스트레인 게이지를 부착하여 측정하였다.

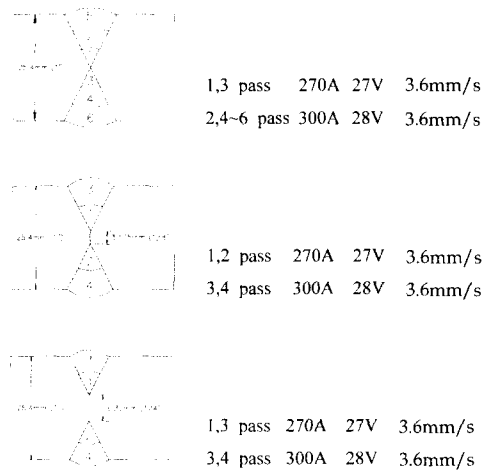


Fig. 3 Penetration shape and welding parameter

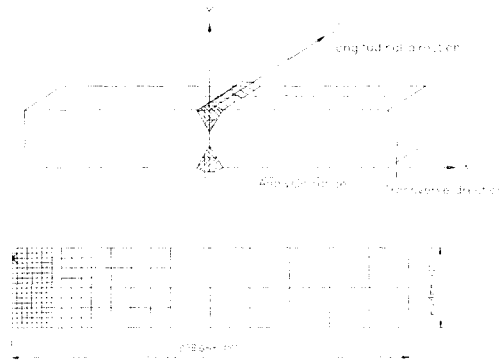


Fig. 4 FEM model

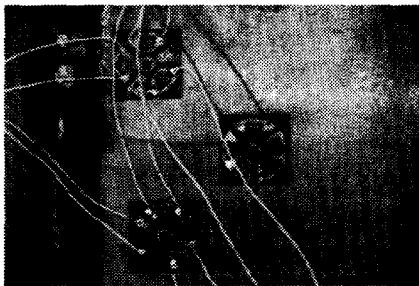


Fig. 5 Measuring residual stress by using Hole-Drilling Method

해석과 실험에는 ASTM A36 강재가 이용되었으며, 기계적 물성치는 Fig. 6와 Fig. 7과 같다.

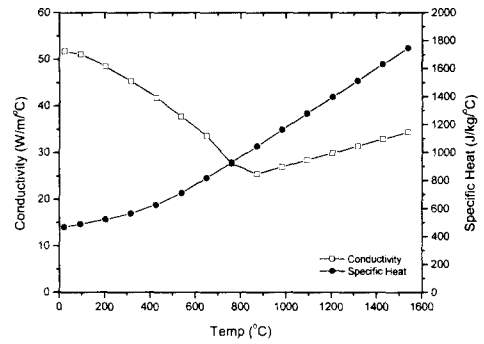


Fig. 6 Conductivity and specific heat of ASTM A36 steel

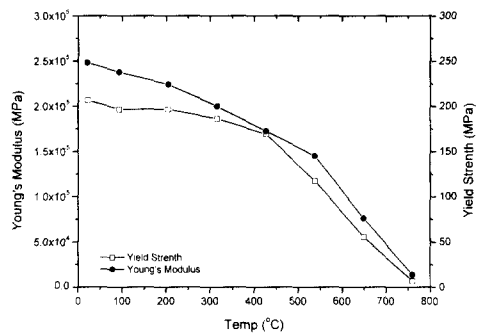


Fig. 7 Mechanical properties of ASTM A36 steel

2.3 해석결과

Fig. 8은 완전용입과 부분용입 용접조건에서 윗면의 길이방향(X축)으로 분포된 용접선 방향의 응력(σ_{22})을 비교한 것이다.

Fig. 8에서 RF1/4과 RF1/8의 부분용입 조건에서 계산된 잔류응력 분포가 완전용입 조건에서보다 대체로 용접중심선 방향으로 이동하는 경향을 나타낼 수 있다.

ABAQUS 계산 결과와 스트레인 게이지 측정값을 비교할 때 대체로 10% 범위 내에서 잘 일치하였다. 용접중심선에서 17.8mm 위치에서 측정된 실험값을 기준으로 비교할 때 완전용입은 부분용입 RF1/4에 비해 약9% 정도 응력이 높게 나타났으며, RF1/8에 비교할 때 약30% 정도 높게 나타났다. 그리고 용접중심선에서 25.4mm 위치에

서 측정된 실험값으로 비교할때는 완전용입이 부분용입에 비교해 약 46% 높은 응력을 나타냈다.

이 결과로 볼 때 부분용입이 완전용입에 비해 용접 패스 횟수를 줄임으로써 잔류응력이 비교적 적게 발생함을 알 수 있다.

Fig. 9은 윗면의 길이방향(X축)으로 분포된 용접선의 직각방향 응력(σ_{xx}) 분포를 나타낸 그림이다. ABAQUS 해석치와 실험치를 비교할 때 최대 12% 범위내에 대체로 일치하였다.

Fig. 9에서 ABAQUS 해석결과로 볼 때 용접선의 직각방향응력(σ_{xx})은 완전용입과 부분용입 조건에 따른 차이없이 대체로 비슷한 분포를 갖고 있음을 알 수 있다. 이는 부분용입 용접방법이 용접선의 직각방향 응력(σ_{xx})분포에 영향을 미치지 않음을 예측할 수 있다.

Fig. 10는 용접선 중심선에서 두께방향(Y축)으로 분포된 용접선 방향의 응력(σ_{xx})을 비교한 것이다. Fig. 10에서 완전용입과 부분용입 모두 윗면에서 인장응력, 밑면에서 압축응력으로 작용하고 있으며, 두께를 3등분하여 응력변화 기울기가 변하는 것을 볼 수 있다.

그러나 완전용입과 다르게 부분용입의 경우 미용착부위가 있는 두께 12.7mm부근에서 인장과 압축이 교차하는 큰 응력차이를 나타냈으며, 부분용입 RF1/4에서 더 큰 응력차이가 나타났다.

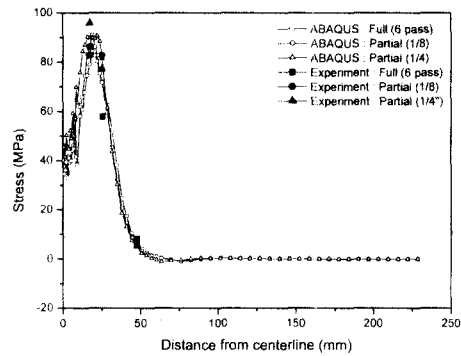


Fig. 9 Transverse residual stress (σ_{xx}) distribution at the top surface

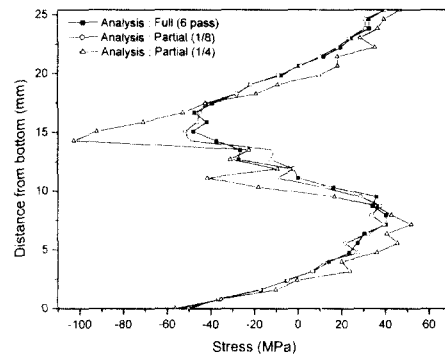


Fig. 10 Transverse through-thickness residual stress (σ_{xx}) distribution

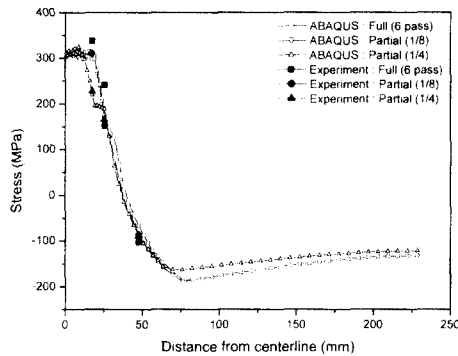


Fig. 8 Longitudinal residual stress (σ_{zz}) distribution at the top surface

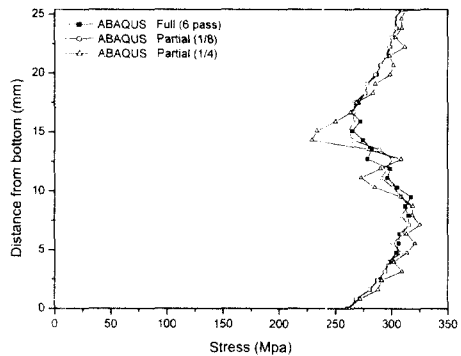


Fig. 11 Longitudinal through-thickness residual stress (σ_{zz}) distribution

이는 용접 진행중 미용착부위가 열변형 영향으로 팽창됨에 따라 압축응력으로 나타난 것으로 예상된다.

Fig. 11은 용접선 중심에서 두께방향(Y축)으로 분포된 용접선 직각방향의 응력(σ_{zz})을 비교한 것이다. 대체로 Fig. 10의 용접선 방향의 응력(σ_{xx})분포와 유사한 형태를 갖고 있으며, 완전용입과 부분용입 모두 매우 높은 인장응력이 작용하고 있음을 알 수 있다.

3. 용접변형 해석

후판 다층용접의 경우 복잡한 열사이클에 의해 소성변형의 축적과 이완이 반복되어 복잡한 소성변형을 갖는다. 또한 용접구조물의 소성변형은 용접조건, 용접순서, 조인트형상, 구속조건등의 영향을 받는다. 따라서 다층용접 구조물의 변형 해석은 열전도 해석이나 잔류응력 해석과는 달리 실제 형상을 모델링해야 하므로 2차원 해석으로 단순화하기가 어려운 경우가 많다.⁽¹¹⁾ 한편 후판용접시 발생하는 변형은 박판에 비교해 그 정도가 미미하며, 용접에 의한 잔류응력 분포보다 그 관심이 적은 편이다. 본 연구에서는 2차원으로 잔류응력을 해석하고 그에 따른 변위 계산결과를 이용하여 부분용입 용접이음의 변형을 간략히 분석해 보았다.

Fig. 12은 용접중심선에서 50mm까지 윗면에 나타난 용접선 직각방향(X축)에 대한 변형량(δ_x)을 나타낸 것이다. 대체로 용접선 중심에서 5.1mm까지 변위가 감소하다가 이후부터 급속히 증가하는 추세를 나타냈다.

부분용입 RF1/8에서는 RF1/4에 비교해 변형이 적게 발생되고, 부분용입 RF1/4에서는 용접선 중심에서 20.3mm위치까지는 완전용입 보다 높은 변형량을 나타내다 이후부터는 적게 나타났다. 이는 변형량 측면에서 25.4mm후판의 부분용입 다층용접에서 RF의 적정조건은 6.35mm보다 적어야 용접변형에 유리함을 알 수 있다.

Fig. 13은 용접선 중심부터 50mm위치까지 윗면에 발생한 Y방향의 변형량(δ_y)을 나타낸 것이다.

대체로 압축 변형을 나타냈고, 특히 부분용입 RF1/8보다는 완전용입과 부분용입 RF1/4에서 더 많은 압축변형이 발생함을 알 수 있었다.

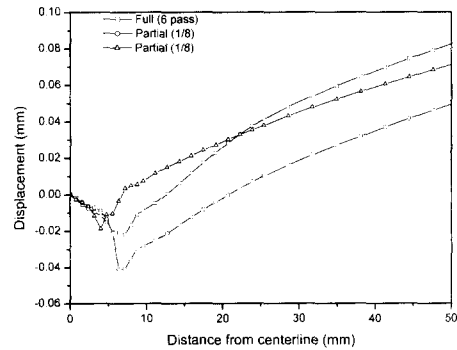


Fig. 12 Transverse displacement(δ_x) at the top surface

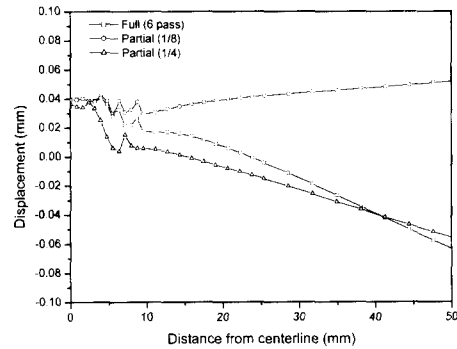


Fig. 13 Through thickness direction displacement (δ_y) at the top surface

4. 결론

완전용입과 부분용입 다층용접 조건에서 잔류응력과 변형에 대한 FEM해석과 실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 용접 윗면의 σ_{zz} 분포를 볼 때 부분용입 조건에서 완전용입보다 용접패스 횟수 영향으로 응력 분포가 다소 적게 나타났으며, σ_{xx} 분포는 완전용입과 부분용입의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

(2) 용접 중심선의 σ_{xx} 분포는 부분용입의 미용

작 부위에서 인장과 압축이 교차하는 응력 변화가 나타났으나, σ_{zz} 분포는 완전용입과 부분용입 모두 높은 인장응력을 나타냈으며 대체로 유사한 것으로 나타났다.

(3) 용접변형 관점에서 25.4mm 후관 부분용입은 RF가 6.35mm 보다 작아야 유리하다.

참고문헌

- 1) AWS D1.1 Structural welding code.
- 2) Koichi Masubuchi, "Analysis of Welded Structures," Pergamon Press, 1980, p. 148.
- 3) Tall, L., "Residual Stresses in Welded Plates - A Theoretical Study," *Welding Journal*, Vol. 43, 1964.
- 4) Masubuchi, K., Kammer, P. A. and Monroe, R. E., "Analysis of Thermal Stresses and Metal Movements of Weldments : A Basic Study toward Computer Aided Analysis and Control of Welded Structure," *SNAME Trans.*, Vol 82, pp. 143 ~ 167, 1974.
- (5) Fujita, Y. and Nomoto, T., "Studies on Thermal Elasto-Plastic Problems," *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, Vol. 130, 1972.
- (6) Ueda, Y. and Yamakawa, T., "Analysis of Thermal Elasto-Plastic Behavior of Metals during Welding by Finite Element Method," *Journal of the Japanese Welding Society*, Vol. 42, No. 6, 1973.
- (7) Yasuhisa Okumoto, "Simulation of Welding Deformation by FEM," *TEAM '96 PUSAN*, pp. 593 ~ 605, July 1996.
- (8) Shim, Y. L. and Lee, S. G., "Modeling of Welding Heat Input for Residual Stress Analysis," *Journal of the Korean Welding Society*, Vol. No 3. Sep., 1993, p. 112.
- (9) ASTM E837-94, "Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole Drilling Strain Gage Method."
- (10) ABAQUS User's Manual, HKS inc., 1998.
- (11) Shim Y. L. and Tsai, C. L., "Dertermination of Residual Stresses in Thick Section Weldment," *Welding Journal*, Vol. 71, No. 9, 1992, pp. 305 ~ 312.