

후판 부분용입 다층용접의 잔류응력 및 파괴 해석

김 석* · 심용래** · 배성인*** · 송정일***

*국방품질관리소

**Dept. of Welding Engineering, The Ohio State University

***장원대학교 기계공학과

Residual Stress and Fracture Analysis of Thick Plate for Partial Penetration Multi-pass Weldment

Seok Kim*, Yong Lae Shim**, Sung In Bae*** and Jung Il Song***

*Defence Quality Assurance Agency of Changwon 641-600, Korea

**Dept. of Welding Engineering, The Ohio State University of U.S.A. 43221

***Dept. of Mechanical Engineering, Changwon national University, Changwon 641-773Korea

Abstract

Partial penetration welding joint defines the groove welds that applies the one side welding which does not use steel backing and both side welding without back gouging, that is, the partial penetration welding joint leaves an unwelded portion at the root of the welding area.

In this study, we analyzed the residual stress and fracture on the thick metal plates that introduced the partial penetration welding method. As results of using above mentioned welding method, we could draw a conclusion that longitudinal stress and traverse stress occurred around the welding area was so minimal and did not affect any influence. We also performed the fracture behavior evaluation on the partial penetration multi-pass welding with 25.4mm thick plate by using the \hat{J} -integral, which finally led us the conclusion that the partial penetration multi-pass welding method is more applicable and effective in handling the root face with less than 6.35mm.

(Received June 4, 2001)

Key Words : Partial penetration welding, Multi-pass weld, Residual stress, \hat{J} -integral, Fracture analysis

1. 서 론

후판 다층용접 구조물은 강도특성이 우수한 완전용입 용접이음 방식을 채택하고 있다. 그러나 완전용입 용접이음 방식은 용접 공정의 공수 및 용접관련 부자재 소모가 과다하며, 용접변형이 심해 용접결합이 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 작업 환경 개선 등에서 좋은 평가를 받고 있는 것으로 알려

져 있다. 부분용입 용접이음 방식은 백가우징(Back gouging)을 실시하지 않고 용입부족을 포함하는 용접이음으로 정의된다¹⁾. 부분용입 용접방식의 특징인 가우징작업 생략은 용접 자동화 실현을 가능하게하는 효과를 얻을 수 있으며, 미국의 General Dynamics사의 M1A1전차 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 저해하

는 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 된다²⁾. 따라서, 용접 잔류응력의 예측과 잔류응력이 파괴거동에 미치는 영향을 정확히 파악하는 것은 용접 구조물의 안전성과 내구성 예측에 매우 중요하며, 용접부재의 잔류응력 분포 예측은 실험적 방법보다 열탄소성 유한요소법을 이용한 수치해석적 방법이 최근들어 많이 이용되는 추세이다^{3,7)}.

또한, 용접부재는 잔류응력으로 인해 J-적분⁸⁾이 경로에 관계없이 일정한 값을 갖는 경로의 독립성을 잃게 된다^{9,10,11)}. 따라서 용접부의 파괴특성을 해석하기 위해서는 용접에 의한 소성변형을 고려한 해석 방법이 필요하다. Kishimoto는 열응력이 포함된 복합응력 상태에서 적용할 수 있는 \hat{J} -적분을 제시⁹⁾하였으며, 심¹²⁾은 Kishimoto가 제시한 \hat{J} -적분을 용접열에 의한 잔류응력과 소성변형이 발생한 용접에 적용하고자 하였다.

따라서 본 연구는 부분용입 다층용접 구조물의 파괴 특성 분석을 위해 FEM을 이용하여 잔류응력 분포를 해석하였고, 잔류응력 해석 결과와 \hat{J} -적분을 이용하여 부분용입 RF(Root Face) 크기에 따른 파괴특성을 해석 하였다.

2. 잔류응력 해석

2.1 유한요소 해석모델

후판 용접은 모재를 예열없이 상온(21℃) 상태에서 용접하고, 다시 상온까지 자연대류 냉각한후 다음 패스를 용접하였다. 따라서 각 단면이 같은 온도변화를 갖는다는 가정에서 용접선상에 수직인 단면을 취하여 2차원 해석을 수행하였다¹³⁾.

2차원요소에 적용하는 용접아크에 의한 입열량은 단위면적당 입열량(q)으로 계산되며 다음 식(1)과 같이 계산된다.

$$q = \frac{\eta EI}{bL} \quad (1)$$

여기서 η 는 용접효율이며, E 는 전압, I 는 전류, b 는 용접비드 폭, L 는 아크 입열이 작용한 길이이다.

본 연구의 용접 모델은 전투차량 구조물에 가장 많

이 사용되고 있는 25.4mm 후판을 선택하였고, GMAW(Gas-metal-arc weld)조건에서 완전용입과 부분용입 모델을 비교하였다. 완전용입은 6패스 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 정했다. 해석모델의 용접부 형상과 용접조건은 Fig. 1과 같다.

FEM 해석 모델은 Fig. 2와 같고, 해석 프로그램은 ABAQUS¹⁴⁾를 이용하였으며, 8절점 평면요소를 선택하여 열해석과 응력해석을 순차적으로 계산하였다. 다층 용접조건을 고려하기 위해 용접부위 요소들은 해석 초기에 제거되었다가 해당 층수의 용접이 될때 비드 크기만큼 요소를 생성 활성화 시키면서 해석하였고, 활성화된 요소에 열량을 입력시켜 계산하였다. 초기 온도조건은 상온(21℃)으로 입력하였다.

용접 조건에 대한 잔류응력 실험은 ASTM에 규정

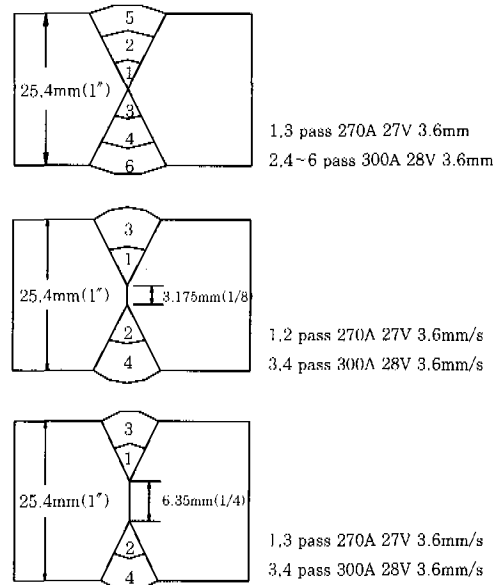


Fig. 1 Penetration shape and welding parameter

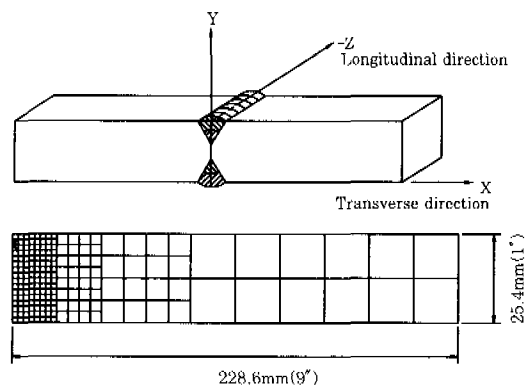


Fig. 2 FEM model of partial penetration weldment

된 천공법(Hole Drilling Method)¹⁵⁾으로 실시하였으며, 용접 중심선에서 17.8mm(0.7inch), 25.4mm(1inch), 50.8mm(2inch) 위치에 스트레인 게이지를 부착하여 측정하였다.

해석과 실험에는 ASTM A36 강재가 이용되었으며, 기계적 물성치는 Fig. 3,4와 같다.

2.2 해석결과

Fig. 5는 완전용입과 부분용입 용접조건에서 윗면의 길이방향(X축)으로 분포된 용접선 방향의 응력(σ_x)을 비교한 것이다.

Fig. 5에서 RF1/4과 RF1/8의 부분용입 조건에서 계산된 잔류응력 분포가 완전용입 조건에서보다 대체로 용접중심선 방향으로 이동하는 경향을 나타냄을 볼 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, RF1/8

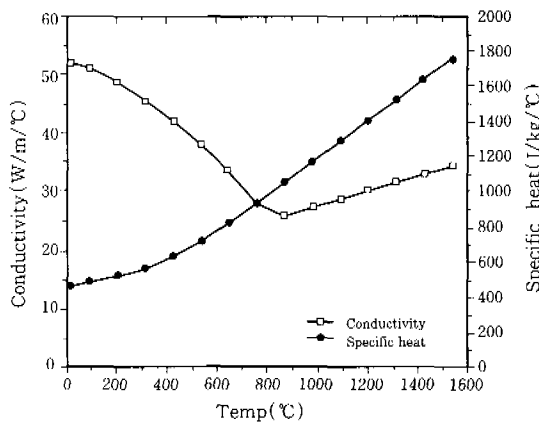


Fig. 3 Conductivity and specific heat of ASTM A36 steel

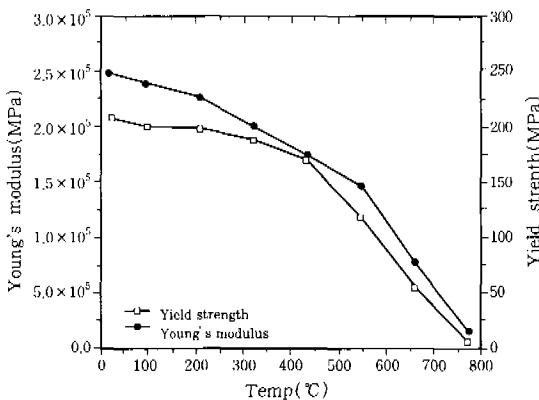


Fig. 4 Mechanical properties of ASTM A36 steel

에 비교할 때 약30% 정도 높게 나타났다. 그리고 용접중심선에서 25.4mm위치에서 측정된 실험값으로 비교할때는 완전용입이 부분용입에 비해 약 46% 높은 응력을 나타냈다.

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

Fig. 6은 윗면의 길이방향(X축)으로 분포된 용접선의 직각방향 응력(σ_y)분포를 나타낸 그림이다. ABAQUS 해석치와 실험치를 비교할 때 최대 12% 범위내에 대체로 일치하였다.

Fig. 6에서 ABAQUS 해석결과로 볼 때 용접선의 직각방향응력(σ_y)은 완전용입과 부분용입 조건에 따른 차이없이 대체로 비슷한 분포를 갖고 있음을 알 수 있다. 이는 부분용입 용접방법이 용접선의 직각방향 응력(σ_y)분포에 영향을 미치지 않음을 예측할 수 있다.

Fig. 7은 용접선 중심선에서 두께방향(Y축)으로 분포된 용접선 방향의 응력(σ_x)을 비교한 것이다. Fig. 7에서 완전용입과 부분용입 모두 윗면에서 인장응력, 밑면에서 압축응력으로 작용하고 있으며, 두께를 3등

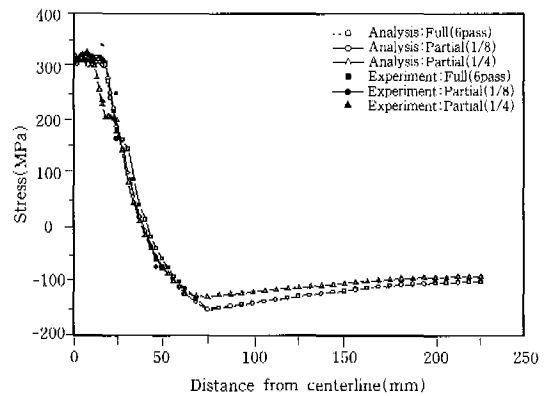


Fig. 5 Longitudinal residual stress(σ_x) distribution at the top surface

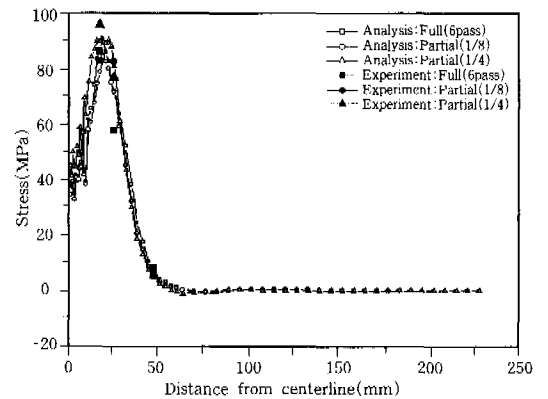


Fig. 6 Transverse residual stress(σ_y) distribution at the top surface

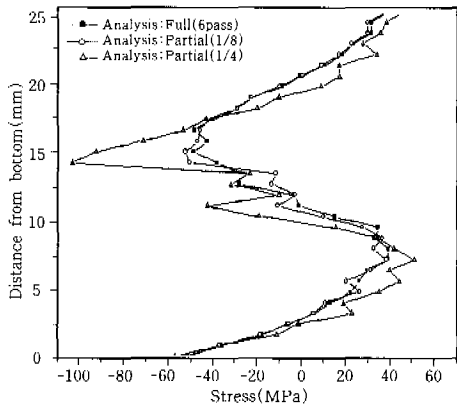


Fig. 7 Transverse through-thickness residual stress(σ_{xx}) distribution

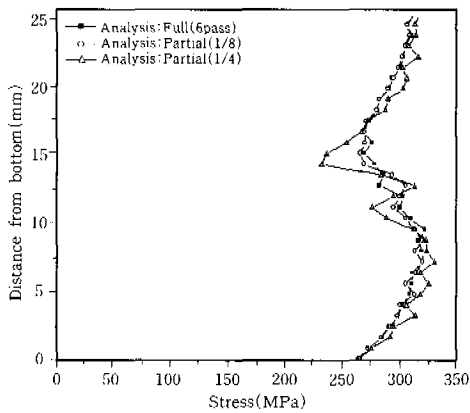


Fig. 8 Longitudinal through-thickness residual stress(σ_{zz}) distribution

분하여 응력변화 기울기가 변하는 것을 볼 수 있다.

완전용입과 부분용입 RF1/8는 유사한 응력분포를 나타냈으나, 부분용입 RF1/4는 미용착부위에서 큰 압축응력이 작용하는 것으로 나타났다.

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

Fig. 8은 용접선 중심에서 두께방향(Y축)으로 분포된 용접선 직각방향의 응력(σ_{zz})을 비교한 것이다. 대체로 Fig. 7의 용접선 방향의 응력(σ_{xx})분포와 유사한 형태를 갖고 있으며, 완전용입과 부분용입 모두 매우 높은 인장응력이 작용하고 있음을 알 수 있다.

3. 파괴 해석

3.1 \hat{J} -적분 이론

적분은 파괴가 진행된 구간으로 연속체 역학이 적용되지 않는 영역의 에너지 변화율을 의미하며, Kishimoto는 식(2)의 에너지 평형원리를 이용하여

유도⁵⁾하였다.

$$\sigma_{ij,j} + F_i = \rho \dot{u}_i \quad (2)$$

균열선단 및 파괴진행 영역의 형상이 Fig. 9와 같을 때, \hat{J} -적분은 식(3)과 같이 표현된다.

$$\hat{J} = - \int_{\Gamma_{end}} T_i \frac{\partial u_i}{\partial x_1} d\Gamma \quad (3)$$

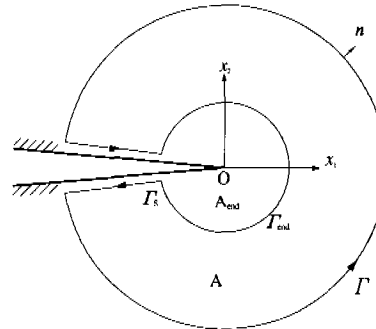


Fig. 9 Configuration of crack tip and fracture process region

여기서 σ_{ij} 는 응력텐서, T_i 는 표면 인장력, u_i 는 변위를 나타내며, A_{end} 는 파괴진행 영역이고, Γ_{end} 를 둘러싸는 적분경로를 나타낸다.

또한, 식(3)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{J} = \int_{\Gamma + \Gamma_i - \Gamma_{end}} T_i \frac{\partial u_i}{\partial x_1} d\Gamma - \int_{\Gamma + \Gamma_i} T_i \frac{\partial u_i}{\partial x_1} d\Gamma \quad (4)$$

식(4)의 우변을 divergence 정리를 이용하면, 식(5)와 같이 정리된다.

$$\hat{J} = \int_A \left(\sigma_{ij} \frac{\partial \epsilon_{ij}}{\partial x_1} \right)_{,j} dA - \int_{\Gamma + \Gamma_i} T_i \frac{\partial u_i}{\partial x_1} d\Gamma \quad (5)$$

식(2)의 에너지 평형 방정식, 외력에 의한 소성 변형(ϵ_{ij}^p)과 용접열에 의한 소성변형(ϵ_{ij}^w)을 고려한 식(6)의 변형을 관계식, 식(7)의 변형을 에너지 밀도(Strain energy density)를 적용하면 식(5)는 식(8)과 같이 정리된다.

$$\epsilon_{ij} = \epsilon_{ij}^e + \epsilon_{ij}^p + \epsilon_{ij}^w \quad (6)$$

$$W_e(d\epsilon_{ij}^e) = \sigma_{ij} d\epsilon_{ij}^e \quad (7)$$

$$\hat{J} = \int_A \left\{ W_{e,1} - \sigma_{ij} u_{i,1} + \sigma_{ij} (d\epsilon_{i,j}^p + \epsilon_{ij}^w) \right\} dA \quad (8)$$

식(8)을 용접부재에 적용하기 위해선 유한요소 계

산식으로 변환해야 한다. \hat{J} -적분 계산을 위해 Fig. 9에서 정의한 적분경로 Γ'_{end} 에서 1, Γ' 에서 0의 값을 갖는 임의의 연속함수 q 를 이용하여 식(8)을 정리하면 식(9)와 같다.

$$\hat{J} = \int_A \left\{ \frac{\partial W_c}{\partial x_i} q - \sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} q_{,i} + \sigma_{ij} \frac{\partial (\epsilon_{ij}^p + \epsilon_{ij}^e)}{\partial x_i} q \right\} dA \quad (9)$$

그리고, 자코비안 행렬식(Jacobian matrix)을 D , 가중계수(weight factor)를 w 라 하면, 식(9)는 식(10)과 같이 유한요소식으로 변환된다.

$$\hat{J} = \sum_{Elements} \sum_{Gauss\ points} \int_A \left\{ \frac{\partial W_c}{\partial x_i} q - \sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} q_{,i} + \sigma_{ij} \frac{\partial (\epsilon_{ij}^p + \epsilon_{ij}^e)}{\partial x_i} q \right\} \cdot D \cdot w \quad (10)$$

따라서 식(10)을 이용하여 FORTRAN 언어로 \hat{J} -적분계산 프로그램을 작성하였다.

\hat{J} -적분은 다음과 같은 순서로 계산된다. 앞절의 ABAQUS로 잔류응력 해석하여 얻어진 결과인 요소에 작용하는 응력, 변형을 에너지밀도, 외력에 의한 소성 변형을, 용접열에 의한 소성 변형을, 요소의 절점변위 결과를 식(10)의 \hat{J} -적분 계산 프로그램에 입력하여 \hat{J} -적분값을 계산한다.

3.2 계산 결과

Fig. 1,2의 해석모델을 이용해 ABAQUS로 응력 해석후 재료에 인장 잔류응력이 작용되는 부위인 윗면에 3.18mm(1/8inch) 균열을 적용하였으며, 7개의 적분경로로 \hat{J} -적분을 계산하였다. 균열선단의 형상은 Fig. 10과 같다.

\hat{J} -적분은 외력이 없이 잔류응력만 존재하는 상태와 잔류응력과 외력이 68.9MPa(10ksi), 137.9MPa(20ksi), 206.8MPa(30ksi), 275.8MPa(40ksi) 작용하는 조건에서 계산하였다.

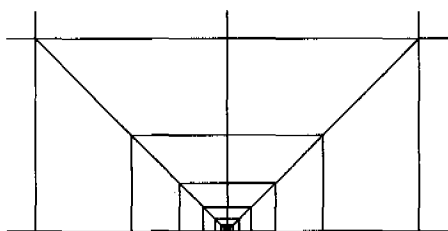


Fig. 10 The shape at the crack tip

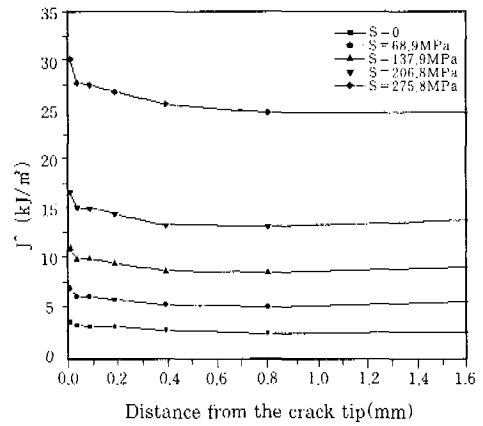


Fig. 11 The \hat{J} -integral values of the 25.4mm thick full penetration joint for combined residual stress and external loads

Fig. 11은 완전용입 상태에서 \hat{J} -적분 계산결과를 나타낸 것이다. 첫 번째 \hat{J} -적분 경로에서 특이값을 나타냈으나 이후 비교적 일정한 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 첫 번째 적분경로에서 특이성을 나타낸 것은 매우 작은 균열요소를 갖는 첫 번째 경로에서 외력에 의한 응력집중과 이에 따른 대규모 소성변형이 발생되어 나타난 것으로 판단된다.

외력이 작용하지 않을 때($S=0$)의 최종 적분경로에서 \hat{J} -적분 값은 2.88kJ/m²를 나타냈는데, 이 값은 잔류응력 없이 159.5MPa(23.13ksi) 크기의 외력만 작용할 때의 \hat{J} -적분값에 해당된다. Fig. 11에서 외력이 68.9MPa(10ksi)에서 206.8MPa(30ksi)까지 증가할 때 \hat{J} -적분값도 서서히 증가 하였으나, 275.8MPa(40ksi)에서 \hat{J} -적분값이 급격히 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 12는 부분용입 RF1/8일 때 \hat{J} -적분 계산결과를 나타낸 것이다. Fig. 11에서와 같이 첫 번째 경로

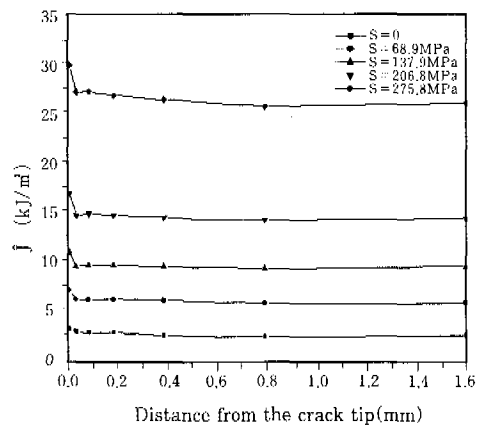


Fig. 12 The \hat{J} -integral values of the 25.4mm thick partial penetration joint(RF1/8) for combined residual stress and external loads

에서 특이값을 나타냈으나 이후 일정한 \hat{J} -적분값을 나타냈다. 외력이 작용하지 않을 때의 최종 적분경로에서 \hat{J} -적분값은 2.85kJ/m²를 나타냈는데, 이 값은 잔류응력 없이 156.9MPa(22.75ksi)의 외력만 작용할 때의 \hat{J} -적분값에 해당된다.

Fig. 11,12를 비교할 때 동일한 외력이 작용할 때 부분용입 RF1/8가 완전용입 보다 \hat{J} -적분값이 대체로 약간 크게 나타났다.

Fig. 13은 부분용입 RF1/4일 때 \hat{J} -적분 계산결과를 나타낸 것이다. Fig. 11,12와 유사한 형태를 보이고 있으나, 동일한 외력에 비교해 높은 \hat{J} -적분값을 나타냈다.

Fig. 13에서 외력없이 잔류응력만 작용할 때의 \hat{J} -적분값은 2.82kJ/m²로 나타났으며, 이는 145.7MPa(21.13ksi)의 외력에 해당된다. 또한, 외력206.8MPa(30ksi)이후부터 \hat{J} -적분값은 급격히 증가하였다.

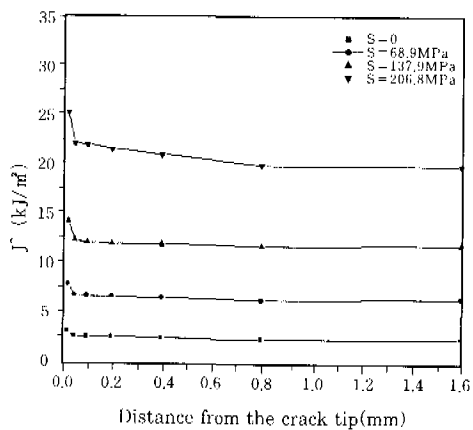


Fig. 13 The \hat{J} -integral values of the 25.4mm thick partial penetration joint(RF1/4) for combined residual stress and external loads

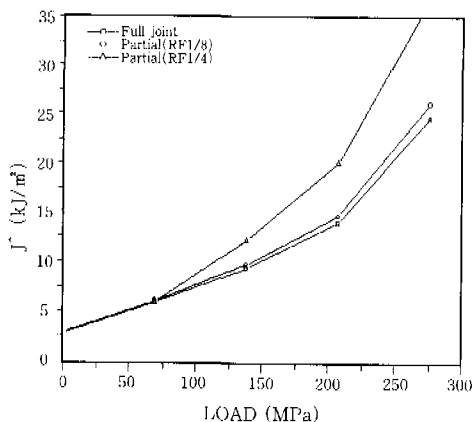


Fig. 14 The \hat{J} -integral values of the 25.4mm thick full and partial penetration joint for combined residual stress and external loads

Fig. 14는 이상의 Fig.11,13에서 최종 적분경로에서 계산된 \hat{J} -적분값을 비교한 것이다.

그림에서 볼 수 있듯이 외력없이 순수 잔류응력만 존재할때의 \hat{J} -적분값은 대체로 완전용입과 부분용입이 유사한 크기임을 알 수 있으나, 외력이 커지면서 부분용입 RF1/8가 완전용입에 비교해 \hat{J} -적분값이 약 3~5% 크게 나타났으나, 부분용입 RF1/4는 외력 68.9MPa(10ksi)이후 급격히 증가하여 외력 206.8MPa(30ksi)에서 완전용입에 비교해 44% 큰 값을 나타냈다.

4. 결 론

25.4mm 후판 다층용접의 완전용입과 부분용입 조건에서 ABAQUS를 이용한 잔류응력 해석과 \hat{J} -적분을 이용한 파괴 해석결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

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

2) 용접 중심선의 σ_x 분포는 부분용입의 미용착 부위에서 인장과 압축이 교차하는 응력 변화가 나타났으나, σ_x 분포는 완전용입과 부분용입 모두 높은 인장응력을 나타냈으며 대체로 유사한 것으로 나타났다.

3) 25.4mm 후판 다층용접에서 외력없이 잔류응력만 존재할때의 \hat{J} -적분값은 완전용입에서 2.88kJ/m²로 이는 약 159.5MPa(23ksi)의 외력에 해당된다.

또한 부분용입의 경우 RF1/8, RF1/4 모두 완전용입과 유사크기의 \hat{J} -적분값을 갖는다.

4) 잔류응력과 외력이 동시에 작용할 때, 부분용입 RF1/8는 완전용입보다 대체로 3~4%의 큰 \hat{J} -적분값을 갖는다

5) 부분용입 RF1/4는 외력 68.9MPa(10ksi)까지 완전용입과 부분용입 RF1/8의 \hat{J} -적분값이 대체로 유사한 크기이나 외력 68.9MPa(10ksi)이상에서 급격히 증가하였다.

따라서 25.4mm 후판 부분용입 용접은 RF가 6.35mm 보다 작아야 파괴 측면에서 안전하다.

참 고 문 헌

1. AWS D1.1 Structural welding code
2. Koichi Masubuchi: Analysis of welded structures, Pergamon Press(1980) 148
3. Tall, L.: Residual Stresses in Welded Plates-A Theoretical Study. Welding Journal, 43(1964) 112-132
4. Masubuchi, K. et al.: Analysis of Thermal Stresses

- and Metal Movements of Weldments : A Basic Study toward Computer Aided Analysis and Control of Welded Structure, SNAME Trans., 82(1974) 143-167
5. Fujita, Y. and Nomoto, T.: Studies on Thermal Elasto-Plastic Problems. *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 130(1972) 149-154
 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*, 42-6(1973) 59-67
 7. Yasuhisa Okumoto: Simulation of Welding Deformation by FEM, TEAM '96 PUSAN (July 1996) 593-605
 8. Rice, J. R.: A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Crack, *Journal of Applied Mechanics*, 35(1968) 379-386
 9. Kishimoto, K., Aoki, S., and Sakata, M.: On the Path Independent Integral. *Engineering Fracture Mechanics*, 13(1980) 841-850
 10. Aoki, S., Kishimoto, K., and Sakata, M.: Elastic-Plastic Analysis of Crack in Thermally Loaded Structures. *Engineering Fracture Mechanics*, 16-3(1982) 405-413
 11. Wilson, W., K. and Yu, I., W.: The Use of the J-integral in Thermal Stress Crack Problems, *International Journal of Fracture*, 15-4(1979) 377-387
 12. Shim, Y.L.: Residual Stress, Distortion, and Fracture Analysis of Welded Structures using Finite Element Method, *Journal of KWS*, 15-1(1997) 15-25
 13. Shim, Y. L. and Lee, S. G.: Modeling of Welding Heat Input for Residual Stress Analysis, *Journal of the Korean Welding Society*, 11-3(1993) 110-123
 14. ABAQUS User's Manual, HKS inc., (2000)
 15. ASTM E837-94: Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole Drilling Strain Gage Method