

노치가공에 의한 다층 FCA 용접부의 잔류응력 재분포 특성

방희선* · 방한서*,† · 오익현** · 김준형***

*조선대학교 공과대학 선박해양공학과

**한국생산기술연구원 동력부품센터

***조선대학교 대학원 선박해양공학과

Analysis of Welding Residual Stress Redistributions on Notched Multi-pass FCA Butt Weldment

Hee-Seon Bang*, Han-Sur Bang*,†, Ik-Hyun Oh** and Jun-Hyung Kim***

*Dept. of Naval Architecture & Ocean Eng., Chosun University, Gwangju 501-104, Korea

**Automotive Components Center, Korea Institute of Industrial Technology, Gwangju 500-480, Korea

***Dept. of Naval Architecture & Ocean Eng., Graduate School, Chosun University, Gwangju 501-104, Korea

†Corresponding author : hsbang@chosun.ac.kr

(Received November 16, 2009 ; Revised December 18, 2009 ; Accepted January 29, 2010)

Abstract

In the present study, two-dimensional plane deformation thermo elasto-plastic analysis has been carried out, in order to investigate the thermal and mechanical behaviour (residual stress, plastic strain, magnitude of stress and their distribution and production mechanism) on multi-pass FCA butt weldment of high strength EH36-TMCP ultra thick plate. Moreover, this study can be considered as a basis for analysing the fracture toughness, KIC, and its effect on welding residual stress redistribution with notch on multi-pass FCA butt weldment, in future. The results of welding residual stress obtained from thermo elasto-plastic analysis has been compared and verified with the results measured by XRD

Key Words : FCAW(Flux Cored Arc Welding), Ultra thick plate, EH36-TMCP steel, Thermal elasto-plastic analysis, Notch machined, Welding residual stress, X-Ray diffraction method

1. 서 론

최근 조선산업에서는 선박의 전용선화 및 대형화에 따라 고강도 극후물재의 적용이 증대되고 있다. 특히 8000TEU급 이상의 컨테이너선의 경우 종강도를 만족하기 위해서 상부구조 및 해치코밍 부위에는 355MPa 이상, 70mm이상의 선급용 고장력강 EH36/EH40 강재가 적용되고 있다. 이러한 극후판의 적용은 용접 공수가 증가되므로 용접 생산성 향상을 위하여 기존의 다층용접 FCAW(Flux Cored Arc Welding) 대신, 강재 두께 55mm이하에서는 1Pole EGW (Electro Gas Welding)공정을 적용하고 55mm이상은 1Pole EGW 공정과 FCAW공정의 혼용 적용 또는 2Pole EGW공정 고능률 대입열 용접 공정이 이루어지고 있다. 이와

같이 선박의 대형화에 따른 고강도 극후물재 사용 및 대입열 용접공정 적용에 따른 용접이음부 파괴인성저하 및 피로파괴수명 감소로, 최근 일부 국외선급(NK, GL)에서는 사용강재 두께(65mm이상)에 제한 및 관련규정을 강화하여 엄격한 파괴설계기준을 요구하고 있다. 특히, 용접구조물은 용접열원에 의한 국부적인 가열, 냉각 및 구속 등으로 인해 용접잔류응력이 필연적으로 발생하는데, 이는(용접중심부의 인장잔류응력) 균열 전파력을 증가시켜 피로강도를 감소시키며 취성파괴에 대한 구조물의 저항력을 감소시켜 구조물의 강도적 신뢰성을 저하시킨다. 그러므로 건전한 구조물을 설계하고 제작 및 확보하기 위해서는 용접부에 대한 역학적 특성을 명확히 파악하고 아울러, 용접구조물의 역학적인 지표로서 잔류응력을 고려한 파괴역학적 해석이 필요하다.

따라서 FCAW 공정 적용에 따른 고강도 극후판

EH36-TMCP강 다층용접부의 파괴인성 K_{IC} 을 규명하기 위해, 본 연구에서는 먼저 자체 개발된 2차원 열분포, 평면변형 열탄소성 수치해석용 프로그램¹⁾을 사용하여 FCA 맞대기 용접부의 역학적 거동(용접잔류응력, 소성변형률 등의 크기, 분포, 발생기구)특성을 규명하고자 하였다. 아울러 향후 파괴인성 해석시의 정도 높은 해석을 위해, 용접부의 노치가공 효과 해석을 실시하여 노치가공으로 인한 용접부의 잔류응력 재분포 특성을 고찰하였다. 그리고 수치해석 결과의 타당성을 검증하기 위하여, 실 시험편에 대하여 X-Ray 회절법을 이용하여 잔류응력을 측정하여 유한요소해석법을 이용하여 얻은 다층 용접부의 응력 결과값과 비교하였다.

2. 수치해석방법

2.1 해석모델 및 용접조건

사용한 강재는 조선용 강재 EH36 grade TMCP강이며, 판두께 78mm에 대하여 FCAW을 사용하여 시험편을 제작하였다. 모재 및 용접봉의 화학적 조성과 기계적 성질은 Table 1과 Table 2에 나타내었다. 시험편의 제원은 선급의 WPQT (Welding Procedure Qualification Test) 및 BS 7448¹⁾에 의거하여 길이(L):1200mm, 폭(B):400mm, 판두께(t):78mm로 선정하였으며 x는 판의 폭방향, y는 두께방향, z는 용접선 방향을 나타낸다. 개선형상은 1:1 양면(X)개선, 개선각은 30도, 루트갭은 현장여건을 감안하여 8mm로

Table 1 Chemical composition in EH36-TMCP and wire (wt%)

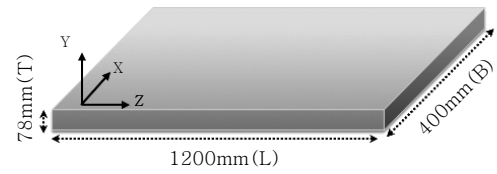
Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cu	Ti
EH36-TMCP	0.18	0.1 ~0.5	0.9 ~1.6	0.035	0.035	0.4	0.35	0.02
Wire	0.04	0.38	1.1	0.012	0.010	1.55	-	-

Table 2 Mechanical properties of EH36-TMCP and wire

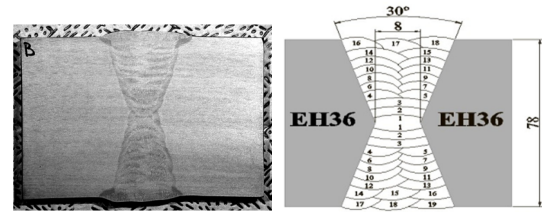
Material	Y.S(N/mm ²)	T.S(N/mm ²)	E.I(%)
EH36-TMCP	355	490~620	21
Wire(1.4 ϕ)	560	620	29

Table 3 Welding condition of specimen for FCAW

Number of Pass (Total/37Pass)	Current (A)	Voltage (V)	Arc Time (S)	Interpass Temp (°C)
Top (1~18Pass)	240 ~300	29~31	117 ~405	114~152
Bottom (19~37Pass)	275 ~300	31~32	176 ~373	111~157



(a) Welded specimen and coordinate axis



(b) Cross section of FCA weldment

Fig. 1 Configuration of welded specimen

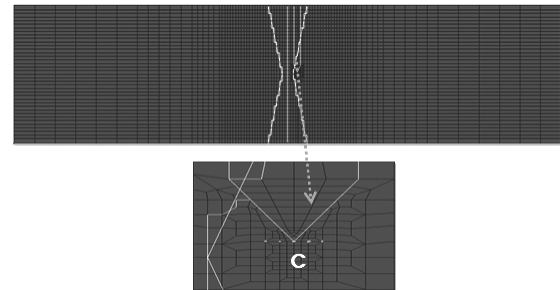


Fig. 2 FE model for numerical analysis

선정하였으며, 전면용접부는 18패스, 후면용접부는 19패스, 총 37패스를 실시하였다.

제작된 용접시험편의 이음부 형상, 용접적층 상태 및 용접조건은 Fig. 1 및 Table 3에 각각 나타내었다. 수치해석 모델 및 요소분할은 열분포 특성 및 응력변화 특성을 고려한 것으로 실험에 사용한 시험편 형상과 동일하게 하였으며, Fig. 2에 나타내었다. 또한, 차후 파괴인성 해석²⁾을 위하여 최저인성부라고 평가되는 용융선(fusion line) 근처의 열영향부의 정량적인 인성값을 산출하기 위해 노치를 BS7448에 의거하여 결정립 조대부위(Coarsened Grain Heat Affected Zone)에 삽입하였다.

2.2 해석방법

본 연구에서는 FCA 용접부에서의 역학적 특성 및 노치가공 효과로 인한 잔류응력 거동을 규명하기 위해, 다음의 세 단계를 통하여 1)용접열전도 2)평면변형 열탄소성(잔류응력) 3)노치가공 효과해석 순으로 유한요소 해석을 수행하였다.

1) 열전도 해석 : 용접열원에 의한 온도분포의 시간에 대한 해석

2) 잔류응력 해석 : 온도분포 결과를 이용한 열응력, 잔류응력 해석

3) 노치가공 해석 : 잔류응력을 초기응력으로 하여 상용프로그램 ANSYS에서 노치가공 해석

실제 용접열원은 열원이 이동하는 이동열원으로 용접 시단 및 종단부에서는 비정상역으로 존재하며 그 외의 전영역에서의 온도분포형태는 준정상역을 나타낸다. 따라서 단면에 대한 온도의 상승 및 냉각의 동일한 열이력을 경험하는 준정상역의 존재는 순간열원으로 치환할 수 있으므로, 3차원 모델의 다층 용접 해석을 준 정상 상태(Quasi-State Stationary State) 열전도문제로 가정하여 2차원 해석으로 모사하였다^{3,4)}.

해석에 사용된 물성치는 온도의 함수로 적용하였으며, 입열은 타원형 가우시안 체적열원(Ellipsoidal Gaussian Volume Flux) 모델⁵⁾을 이용하였다. 그리고 각 패스 별 용착금속의 단면적은 Fig. 1(b)에 도시한바 같이 Table 3의 용접조건으로 제작된 시험편의 단면적을 반영하였다. 또한 용접부의 노치가공 해석시, BS7448에 의거하여 실제 3점 굽힘 실험의 조건과 동일하게 해석시험편에 용접부 노치 형상 및 예비균열을 반영하였다.

3. XRD를 이용한 용접잔류응력 측정

유한요소해석 결과의 타당성을 검증하기 위해 XRD를 이용하여 측정한 용접잔류응력값과 비교 검토하였다.

용접부는 조직에 따라 X-Ray의 회절각($\sin 2\theta$)이 Bragg's Law의 식(2)와 같이 변화하므로 이에 따른 면간거리변화를 측정함으로써, Strain의 차이에 따른 잔류응력을 측정하였다.

$$2d\sin\theta = n\lambda \tag{1}$$

여기서 d: 면간거리이고, θ : 입사각 및 반사각, λ : X-Ray의 파장

4. 결과 및 고찰

4.1 극후판 다층 FCA용접부의 열적 특성

본 절에서는 FCAW공정에 적용에 따른 극후판 용접부의 열거동에 대해 고찰해 보았다. 해석은 다층-다패스(Multi-Layer, Multi-Pass)를 고려하여 수치해석을 수행하였으며, 공정의 용접조건(패스수, 입열량 등)에 따라 시간별, 위치별 열적 특성을 고찰하였다. Fig. 3는 파괴인성 해석시 주목점인 균열선단부의 시간에 따른 온도이력 곡선이다. 균열선단은 용접부 용융선근처의 열영향부 결정립 조대부위의 온도영역에 해당하는

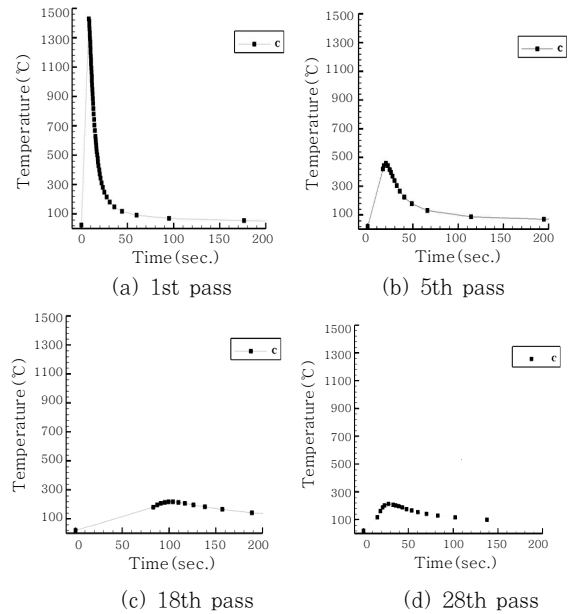


Fig. 3 Temperature history at crack tip of multi-pass FCA butt weldment

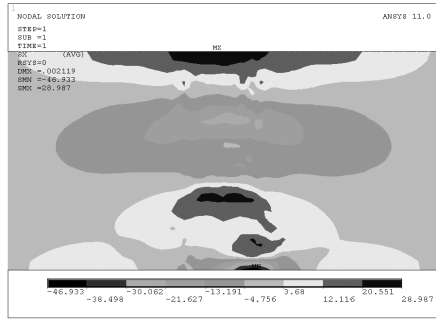
온도 1,400°C영역을 겪고 패스가 증가함에 따라 온도 구배가 다소 완만해지는 열사이클 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

4.2 극후판 용접부의 역학적 특성

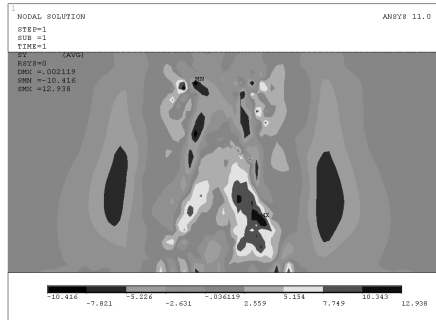
4.2.1 FCA 용접부의 역학적 특성

전 4.1절에서 수행한 연구결과 즉, 용접열원의 크기 및 분포를 열하중으로 하여 용접체에 발생 하는 역학적 메카니즘 및 용접 제현상(용접잔류응력 및 소성변형율의 분포 및 발생기구)을 규명하고자 하였다. Fig. 4 (a)~(c)는 용접부 해석시험편 전 영역에 대한 용접 잔류응력성분을 도시한 것이다. (a)는 용접선 폭 방향 용접 잔류응력성분(σ_x), (b)는 판 두께방향 용접 잔류응력성분(σ_y), (c)는 용접선 길이 방향 용접 잔류응력성분(σ_z)의 분포도이다. 그림에서 용접잔류응력의 특성을 고찰해보면, 선행용접부는 후행용접시 입열로 인한 응력완화로 후행용접부에 비해 보다 작게 발생하였으며, 후면 용접부의 경우 전면용접부의 구속으로 인하여 보다 큰 잔류응력이 생성되었음을 알 수 있다. 또한 최대 응력값은 표면 부근에서 발생하였는데, 이는 상표면의 열전달 효과로 온도가 급격히 변하기 때문이라고 판단 된다.

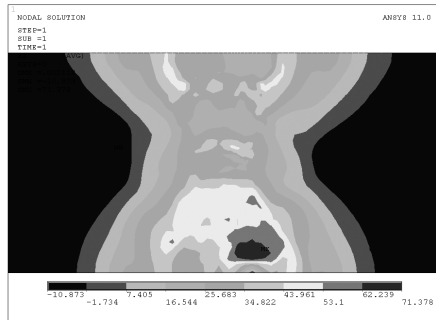
Fig. 5는 시험편 전 영역에 걸쳐 발생하는 소성 변형을 성분($\epsilon_x^p, \epsilon_y^p, \epsilon_z^p$)을 도시한 것이다. (a)는 용접선 폭 방향 소성변형 성분(ϵ_x^p), (b)는 판 두께 방향 소성 변형을 성분(ϵ_y^p), (c)는 용접선 길이 방향 소성 변형을



(a) σ_x

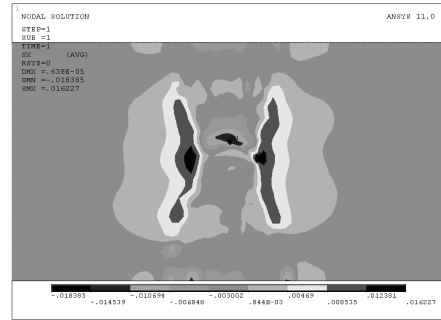


(b) σ_y

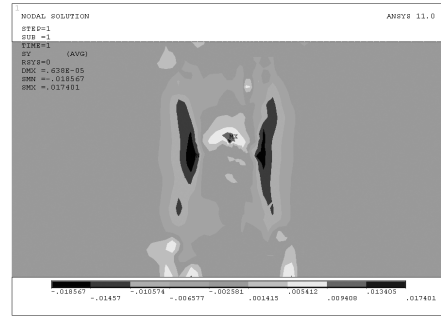


(c) σ_z

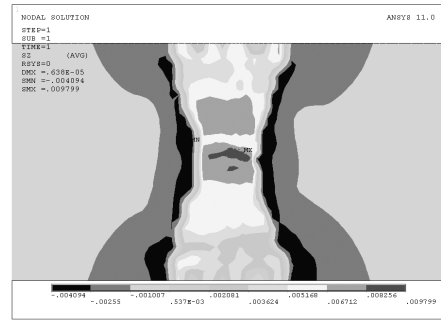
Fig. 4 Residual stress distribution at weldment



(a) σ_x



(b) σ_y



(c) σ_z

Fig. 5 Plastic strain distribution at weldment

성분(ϵ_y^p)의 분포도이다. 각 성분별 특징을 비교해 보면, 용접선 길이방향 소성변형을 성분(ϵ_z^p)은 용착금속 및 열영향부에서 인장성분을 나타내지만 열영향부에 인접한 모재에서는 압축성분으로 변화하고 있다. 그리고 용접선 폭방향 소성변형을 성분(ϵ_x^p)은 용착금속 및 열영향부 전체영역에서 압축성분이 나타나는데, 그 중에서도 전면용접부의 중앙부영역에서 최대치가 발생하고 있으며 열영향부에 인접한 모재에서는 인장을 나타내고 있다. 판두께 방향성분(ϵ_y^p)은 용착금속 및 열영향부에서 커다란 압축성분을 보이고 있으며, 전면 용접부의 중앙부 영역에서 인장성분이 크게 나타나고 있다. 이상의 특징은 역학적으로 구속이 가장 z방향(용접선 길이 방향)에 커다란 인장의 소성변형이 발생되며 소성변형이 비압축성 즉, 체적불변의 조건을 만족하여 역학적 구속의 가장 약한 y방향(판두께 방향)에 커다란 압축의

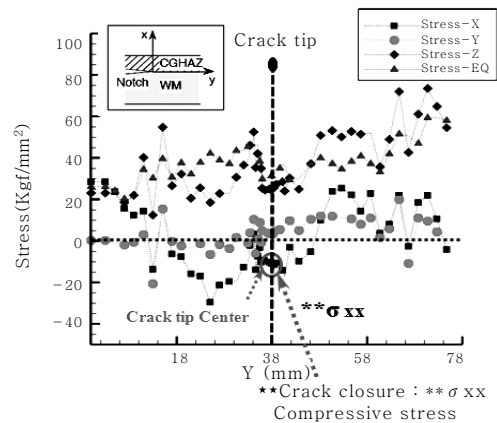


Fig. 6 Stress field near surface crack tip of weldment

소성변형이 발생하는 것으로 사료된다.

Fig. 6은 균열선단의 용접잔류응력 분포도이다. FCAW

용접부의 파괴거동에 미치는 잔류응력의 효과를 규명하기 위해, 균열선단의 용접 잔류응력 분포특성을 고찰하였다. 용접잔류응력 성분 중 균열 개폐거동과 관련 있는 용접선 폭 방향 응력성분(σ_x)을 주목하여 보면, 그림에 도시한 바와 같이 크랙 선단부에 압축잔류응력 성분(Crack Closure Stress)을 나타내고 있다. 이러한 압축 잔류응력은 무부하 상태에서도 크랙면이 닫히게 되어 균열진전을 지연시키는데 크게 영향을 주는 것으로 생각할 수 있다.

4.2.2 XRD를 이용하여 측정된 용접잔류응력 특성

X-Ray 잔류응력 측정기를 이용하여 용접비드의 끝부분을 시작으로 2, 3, 6, 18mm 간격으로 370개의 포인트를 측정하였으며, 측정시 시편의 표면을 화학적으로 부식시켜 표면조도를 균일하게 한 후에 잔류응력을 측정하였다. 용접선에 수직방향(X-방향)에 대한 잔류응력 측정값과 수치해석 결과 비교를 Fig. 7에 나타내었다. 두 결과값을 비교해 보면 정량적으로는 수치해석값이 측정값에 비해 약간 높은 값을 보이나 정성적으로는 유사한 잔류응력 분포를 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

4.2.3 노치가공에 의한 극후판 용접부의 잔류응력 재분포 특성

해석시험편에 실제 3점 굽힘시험과 동일하게 최저 인성부라고 평가되는 용접부 용융선근처의 열영향부 결정립 조대부위에 노치형상 반영시 용접부의 응력분포 재분포 특성을 고찰하였다.

Fig. 8은 FCA 용접시험편의 노치선단부의 노치가공 전·후의 각 응력성분을 도시한 것이다. (a)는 용접선 폭 방향 성분(σ_x), (b)는 용접선 판 두께 방향 성분(σ_y),

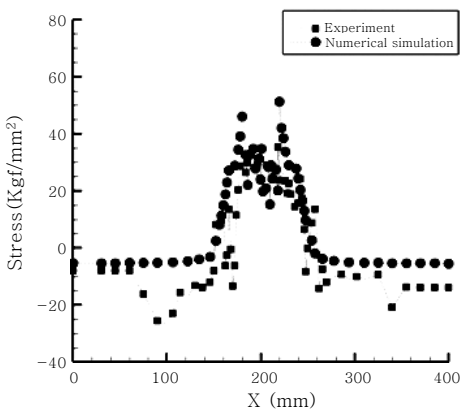
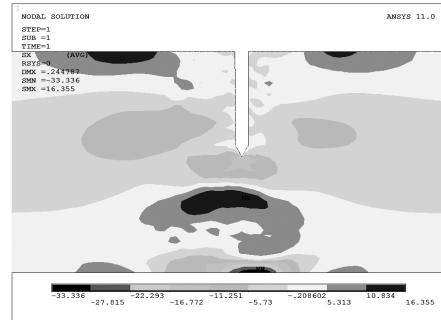
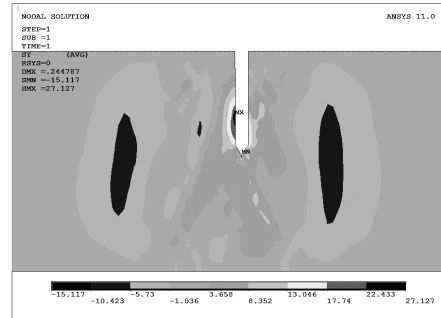


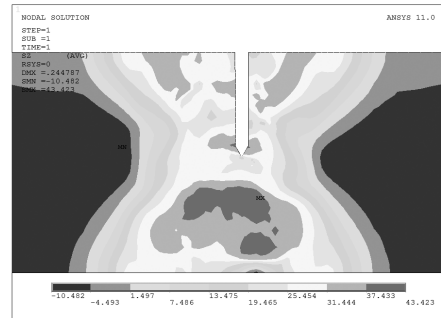
Fig. 7 Comparison of welding residual stress obtained from FE analysis and XRD measurement



(a) σ_x



(b) σ_y



(c) σ_z

Fig. 8 Stress distributions ahead notch tip

(c)는 용접선 길이 방향 성분(σ_z)의 분포도이다. 노치가공 후의 노치선단 근방의 응력분포를 주목하여보면, 노치가공 후 용접선 폭방향 응력(σ_x)는 압축성분이 더욱 증가함을 보이고, 판두께 방향 응력(σ_y)는 인장성분에서 압축성분으로 변화함을 보이고 있다. 그리고 용접선 길이방향 응력(σ_z)는 인장성분 값이 감소함을 보이고 있다. 특히, 균열개폐거동과 관련 있는 응력성분(σ_x)는 노치가공 전 균열진전을 지연시키는 압축 성분에서 노치가공 후 압축성분이 크게 증가하였다.

5. 결 론

1) 용접잔류응력 성분중 용접잔류응력 성분을 주도하는 용접선 길이방향 응력성분(σ_z)을 살펴보면 선행용접부에서 후행용접시 입열로 인한 응력완화로 후행용접부

에 비해 보다 작게 발생하였으며, 후면 용접부의 경우 전면용접부의 구속으로 인하여 보다 큰 잔류응력이 생성되었으며 최대응력값은 표면 부근에서 발생하였다.

2) 잔류응력 성분 중 균열 개폐거동과 관련 있는 용접선 폭 방향 응력성분(σ_x)는 노치가공전 균열진전을 지연시키는 압축성분(Crack Closure Stress)에서 노치가공후 압축성분이 더욱 크게 증가하였다.

참 고 문 헌

1. British Standard 7448-Part 2: Method for determination of KIC, critical CTOD and critical J values of welds in metallic materials (1997)
2. H.S. Reemtsma, H.G. Pisarski and M.G. Dawes: Residual stresses and fatigue precracking techniques for weldment fracture toughness specimens Journal of Testing and Evaluation, **20-6**, (1992), 416-423
3. H.S. Bang and J.M. Kim : A study on the characteristics of heat distribution on the steel structure with thick plate, Proceeding of KWS, **1**, (1994), 115-119 (in Korean)
4. Joo S M, Kim Y S, Kim J M, Hwang W S : "A study of mechanical behaviors in welded parts by numerical simulation", Trans. Tech Publications. **6**(2004), 2871-2876
5. J. Goldak, A. Chakravarti and M. Bibby : A new finite element model for welding heat sources, Metallurgical transactions B, **15-2** (1984), 299-305