

극후판 다층 FCAW 맞대기 용접부의 잔류응력 특성에 관한 연구

방희선* · 방한서* · 이윤기** · 김현수*** · 이광진****

*조선대학교 공과대학 선박해양공학과

**조선이공대학 자동차학과

***조선대학교 대학원 선박해양공학과

****한국생산기술연구원 동력부품센터

A Study of the Residual Stress Characteristics of FCAW Multi-Pass Butt Joint for an Ultra-Thick Plate

Hee-Seon Bang*, Han-Sur Bang*, Yoon-Ki Lee**, Hyun-Su Kim*** and Kwang-Jin Lee****

*Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering, Chosun University, Gwangju, Korea

**Dept. of Automobile, Chosun College of Science & Technology, Gwangju, Korea

***Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering, Graduate School, Chosun University, Gwangju, Korea

****Automotive Components Center, Korea Institute of Industrial Technology, Gwangju, Korea

KEY WORDS: Container ship 컨테이너선, Hatch coaming 해치코밍, High strength ultra thick plate 고강도 극후판, Flux core arc welding (FCAW) 플럭스코어 아크용접, Welding residual stress 용접잔류응력, Thermal elasto-plastic analysis 열탄소성해석

ABSTRACT: The goal of this work is to establish the reliability of FCA welded joints for high strength EH36-TMCP ultra thick plate. For this, heat conduction and thermo elasto-plastic analyses have been conducted on a multi-pass, X-groove, butt-joint model to clarify the thermal and mechanical behavior (residual stresses, magnitude of the stresses, and their production and distribution mechanisms) of the weld joint. In addition, the results of the welding residual stress obtained from thermo elasto-plastic analysis was verified and compared with results obtained by XRD analysis.

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, 70mm 이상의 선급용 고장력강 EH36/EH40 강재가 적용되고 있다. 극후판의 적용은 용접공수가 증가되므로 용접 생산성 향상을 위하여 기존의 다층용접 FCAW 대신, 강재 두께 55mm 이하에서는 1Pole EGW공정을 적용하고 55mm 이상은 1Pole EGW공정과 FCAW공정의 혼용 적용 또는 2Pole EGW 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(65mm 이상)의 제한 및 관련규정을 강화하여 엄격한 파괴설계기준을 요구하고 있다. 구조물 조립시 용접중 불균일한 온도분포 및 열응력이 발생하고 용접후에는 비선형 소성변형으로 인하여 용접잔류응력이 필연적으로 발생하는데, 이 중 용접중심부의 인장잔류응력은 균열 전파력을 증가시켜 피로강도를 감소시키며 취성파괴에 대한 구조물의 저항력을 감소시

킨다. 그러므로 용접구조물의 역학적인 지표로서, 용접잔류응력이 구조물의 파괴거동에 미치는 영향을 정확히 파악하는 것은 용접구조물의 파괴해석에 있어서 매우 중요하다. 따라서 용접공정별 고강도 극후판 EH36-TMCP강 용접부의 파괴인성 KIC 을 규명하기 위해, 먼저 본 연구에서는 자체 개발된 열분포, 열탄소성 수치해석용 프로그램을 사용하여 FCAW 용접부의 역학적 거동(용접잔류응력, 소성변형률 등의 크기, 분포, 발생기구) 및 균열선단에 분포하는 용접잔류응력분포 특성을 규명하고자 하였다. 아울러 수치해석 결과의 타당성을 검증하기 위하여, 실 시험편에 대하여 X-Ray회절방법(XRD)을 이용하여 잔류응력을 계측하여 유한요소해석을 통하여 얻은 응력 결과값과 비교하였다.

2. 유한요소해석 및 실험방법

2.1 해석모델 및 용접조건

사용한 강재는 조선용 강재 EH36-TMCP강이며, 판두께 78mm에 대하여 FCAW을 사용하여 시험편을 제작하였다. 모재 및 용접부의 화학적 조성과 기계적 성질은 Table 1과 Table 2에 나타내었다. 시험편의 제원은 선급의 WPQT 및 BS7448에 의거하여 길이(L) = 1200mm, 폭(B) = 400mm, 판두께(t) = 78mm로 선

교신저자 이윤기: 광주광역시 동구 서석동 290 062-230-8201, lyk9001@chosun-c.ac.kr

Table 1 The chemical composition and mechanical property of EH36-TMCP steel

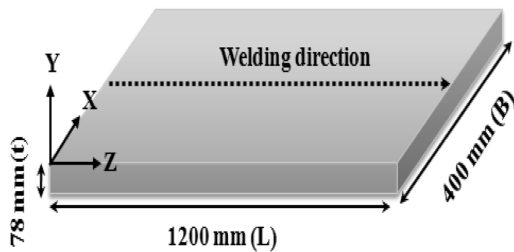
Material	Chemical composition(Wt%)								Mechanical property		
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cu	Ti	Y.S (N/mm ²)	T.S (N/mm ²)	E.I (%)
EH36-TMCP	0.18	0.1~0.5	0.9~1.6	0.035	0.035	0.4	0.35	0.02	355	490~620	21

Table 2 The chemical composition and mechanical property of wire

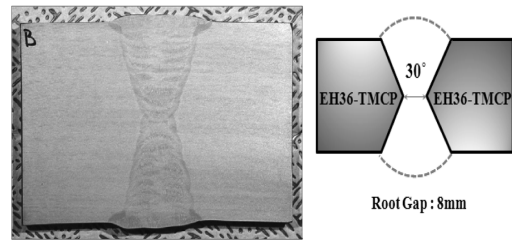
Material	Chemical composition (Wt%)								Mechanical property		
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cu	Ti	Y.S (N/mm ²)	T.S (N/mm ²)	E.I (%)
Wire (1.4∅)	0.04	0.38	1.10	0.012	0.010	1.55	-	-	560	620	29

Table 3 The welding condition of specimen for FCAW

Process	Number of pass (total/37pass)	Current (A)	Voltage (V)	Arc time (s)	Interpass temp. (°C)
FCAW	Top side (1~18Pass)	240~300	29~31	117~405	114~152
	Bottom side (19~37Pass)	275~300	31~32	176~373	111~157



(a) Welded specimen and coordinate



(b) Cross section of FCAW welded specimen

Fig. 1 Configuration of welded specimen

정하였으며 x는 판의 폭방향, y는 두께방향, z는 용접선 방향을 나타낸다. 개선형상은 1:1 양면(X)개선, 개선각은 30도, 루트갭은 현장여건을 감안하여 8mm로 선정하였으며, 제작된 용접시험편의 이음부 형상, 용접적층 상태를 Fig. 1에 나타내었다. 전면용접부는 18패스, 후면용접부는 19패스로 총 37패스로 용접조건 Table 3에 나타난 것과 같이 260A 이상의 고전류 조건의 FCAW로 실시하였다.

수치해석 모델 및 요소분할은 열분포 특성 및 응력변화 특성을 고려한 것으로 실험에 사용한 시험편 형상과 동일하게 하였으며, Fig. 2에 나타내었다. 또한, 최저 인성부라고 평가되는 Fusion line 근처 열영향부의 정량적인 인성값을 산출하기 위해 노치를 BS7448에 의거하여 결정립 조대부위(CGHAZ)에 삽입하였다.

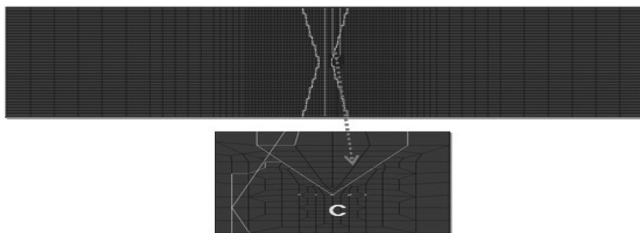


Fig. 2 FE model for numerical analysis

2.2 해석방법

수치해석을 위한 요소의 분할에서는 총 절점수는 2,113개, 총 요소수는 1,920개로 하였다. 시험해석은 2차원 열전도 및 평면변형 열탄소성 이론에 입각하여 자체개발한 열전도, 열탄소성 프로그램(방한서, 1992; 방한서와 김종명, 2000)을 이용하여 유한요소 해석을 수행하였다. 해석시 용접열원의 물리적 정수(열전도, 비열, 밀도 등)의 온도 의존성 및 재료의 기계적 성질(항복응력, 탄성계수, 열팽창 계수 등)의 온도 의존성을 고려(방희선 등, 2009)하여 용접부의 역학적 특성을 규명하였다.

용접부에 대한 용접입열(Q)의 계산은 식 (1)에 의거하여 산정하였으며,

$$Q = \eta_a \frac{EI}{V} \tag{1}$$

여기서, Q: 용접아크의 유효 입열량(J/cm), η_a : 아크효율, E: 아크전압(V), I: 아크전류(A), V: 용접속도(cm/sec)

용착금속의 각 요소에 대한 입열(q)는 식 (1)을 칼로리로 환산한 식 (2)을 이용하였다.

$$q = \frac{Q \times l}{4.19 \times A \times l \times t} \tag{2}$$

여기서, q : 열유속($\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$), l : 용접선길이(cm), t : 용접시간(sec), A : 입열요소면적(cm^2)

2.3 XRD를 이용한 용접잔류응력 측정

Bragg's Law에 의하여 용접부의 조직에 따라 식 (3)과 같이 X-Ray의 회절각($\sin 2\theta$)이 변화하므로 이에 따른 면간거리(Lattice spacing)변화를 측정함으로써, Strain의 차이에 따른 잔류응력을 측정하였다(Keisuke et al., 2006).

$$2d\sin\theta = n\lambda \tag{3}$$

여기서 d : 면간거리이고, θ : 입사각 및 반사각 λ : X-Ray의 파장
XRD 잔류응력 측정위치는 용접비드의 끝부분을 시작으로 2, 3, 6, 18mm 간격으로 370개의 point를 측정하였으며, 측정시 시편의 표면을 화학적으로 부식시켜 표면조도를 균일하게 한 후에 잔류응력을 측정하였다.

3. 해석결과 및 고찰

3.1 극후판 용접부의 열적 특성

본 절에서는 극후판 용접부의 열거동에 대해 고찰해 보았다. 해석은 다층-다패스(Multi-layer, Multi-pass)를 고려하여 수치해

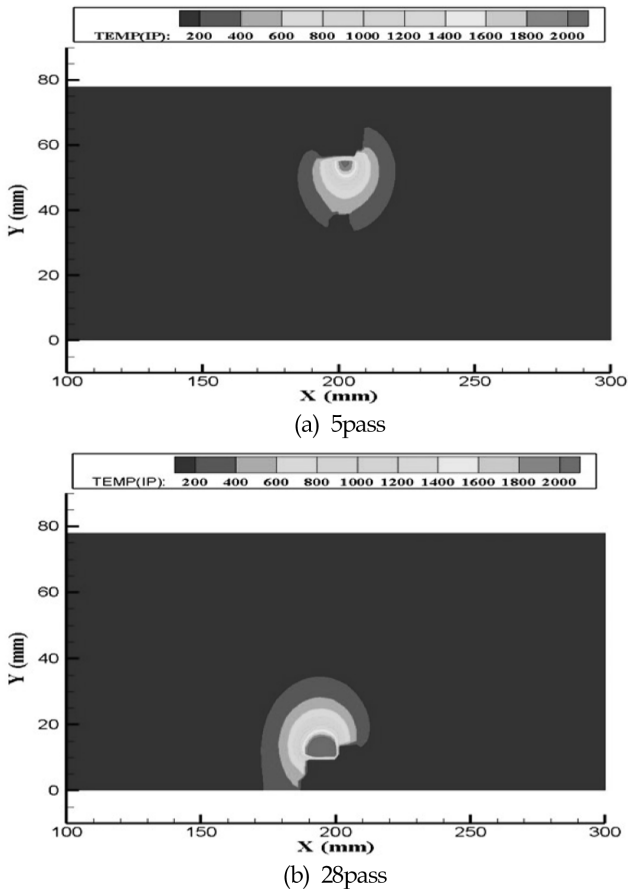


Fig. 3 Temperature fields in the xy plane in heating stage for FCA welded specimen

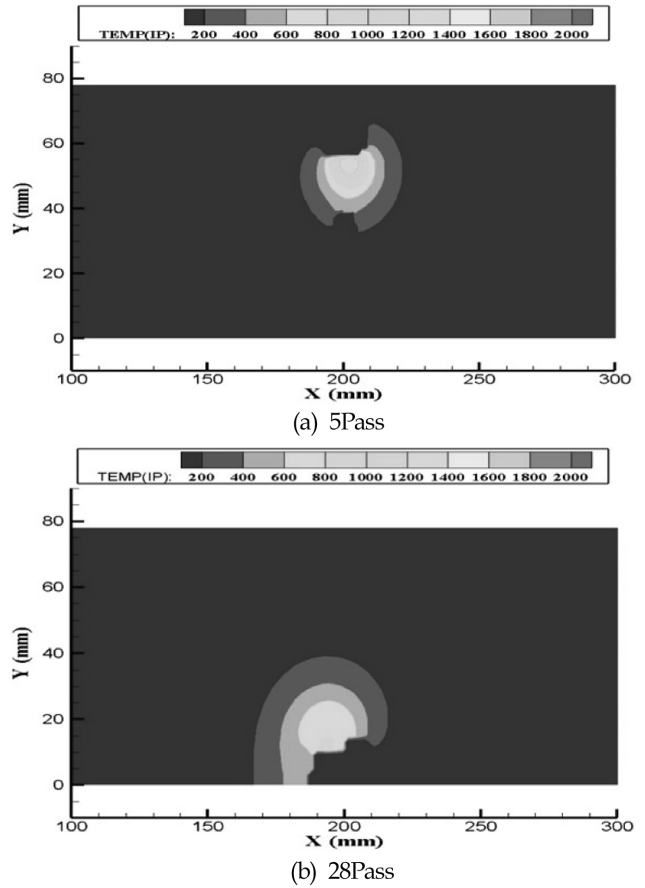


Fig. 4 Temperature fields of the xy plane in cooling stage for FCA welded specimen

석을 수행하였으며, 용접조건(패스수, 입열량 등)에 따라 시간별, 위치별 열적 특성을 고찰하였다.

Fig. 3은 해석시험편 FCAW 용접부의 5, 28 패스시 최고온도를 나타내는 시점, 즉 각 패스의 용접 개시후 8초일 때의 온도 분포이다. (a)는 전면용접부의 용접 5pass 일 때, (b)는 후면용접부의 용접 28pass 일 때의 온도 분포도이다.

Fig. 4는 해석시험편 단면의 5, 28 패스의 냉각과정의 온도분포도로, 용접종료후 10초가 경과한 시점에서의 온도분포이다. (a)는 전면용접부의 용접 5pass 일 때, (b)는 후면용접부의 용접 28pass 일 때의 온도 분포도이다. 용접종료 후 10초가 경과한 시점에서 보면 전 영역에서 열전도로 인해 그 크기가 거의 일정해짐을 보이고 있다.

Fig. 5는 FCAW용접을 수행한 해석시험편의 두께방향($Y = 41\text{mm}$) 지점에서 용접접선 폭방향으로 각각 $X = 190\text{mm}$ 지점은 용착금속부, $X = 194\text{mm}$ 지점은 열영향부, $X = 199.5\text{mm}$ 지점은 열영향부 부근 모재에 해당된다.

FCAW 해석 시험편의 경우, 냉각과정에 있어서 냉각곡선이 용접 후 초기과정에서 가파르게 나타나고 있는데, 이것은 시험편 극후판이므로 열전도가 빨리 이루어지는 결과로 생각된다. 그리고 용접종료 후 20초가 경과한 시점에서 부터는 용착금속부, 열영향부, 모재의 온도 분포 양상 및 그 크기가 일정해지고

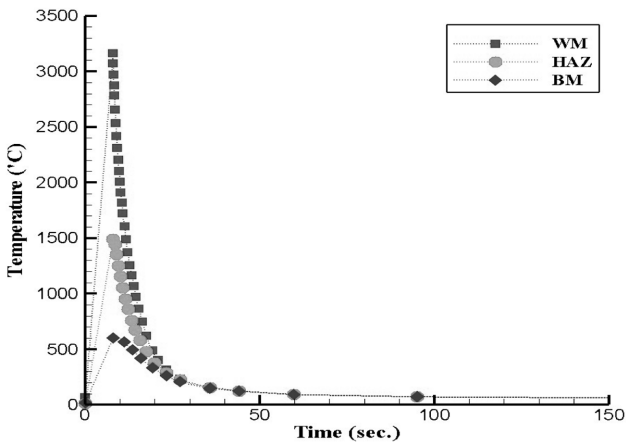


Fig. 5 Temperature history of W.M, H.A.Z and B.M for FCA welded specimen

온도 구배의 차가 거의 발생되지 않음을 보이고 있다.

Fig. 6은 해석시험편의 균열선단에 FCAW 전·후면용접부의 용접 1Pass, 5Pass, 18Pass, 29Pass 시간에 따른 온도이력 곡선이다. 균열선단은 최고온도 750~1,400°C 영역을 겪고 패스가 증가함에 따라 온도구배가 다소 완만해지는 열사이클 영향을 받

고 있음을 알 수 있다.

3.2 극후판 용접부의 역학적 특성

본 절에서는 용접열원의 크기 및 분포를 열 하중으로 하여 용접체에 발생하는 역학적 메카니즘을 해석하고, 용접 체현상(용접잔류응력 및 소성변형율의 분포 및 발생기구)을 분석하여 용접부에 대한 역학적 특성을 규명하고자 하였다. 해석 시험편의 형상 및 크기는 앞절의 용접 열분포 해석과 동일하게 채택하였고, 수치해석은 유한요소법에 의한 평면변형 열탄소성 해석을 수행하였다.

Fig. 7은 FCAW 용접시험편의 두께 방향의 각 위치에서 용접 선 폭방향에 대한 용접 잔류응력 분포도이다. (a) 그림은 상 표 면에서 두께 방향으로 $y=3\text{mm}$ 떨어진 지점, (b) 그림은 상 표 면에서 두께 방향으로 $y=43\text{mm}$ 떨어진 지점, (c) 그림은 상 표 면에서 두께 방향으로 $y=75\text{mm}$ 떨어진 지점의 분포도이다. 용접잔류응력 각 성분의 크기를 비교해 보면 $\sigma_z > \sigma_x > \sigma_y$ 순으로 나타났다. 용접잔류응력이 이러한 분포를 나타내는 이유는, 해석시험편의 역학적 구속력의 크기 때문이다. 그림에서 용접잔류응력의 특성을 고찰해보면, 선행용접부는 후행용접시 입열로 인한 응력완화로 후행용접부에 비해 보다 작게 발생하였으며, 후면 용접부의 경우 전면용접부의 구속으로 인하여 보다 큰 잔

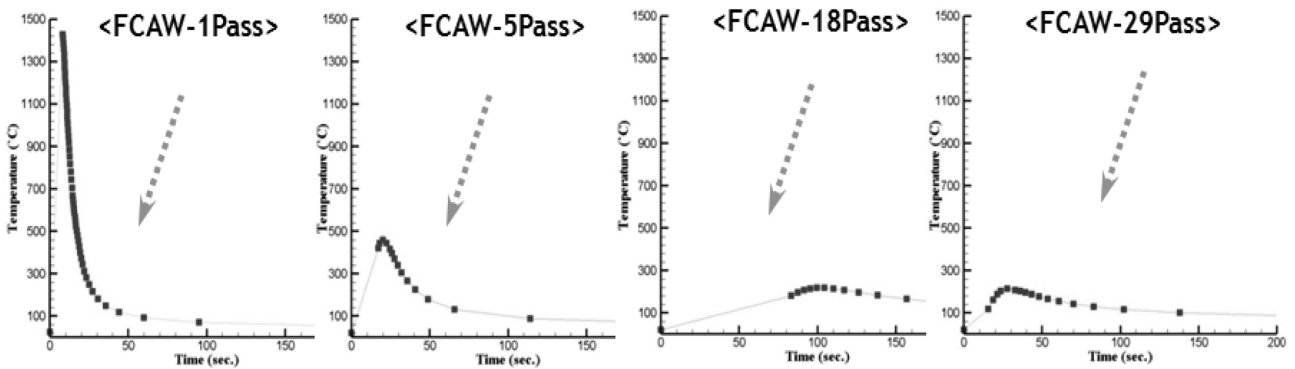


Fig. 6 Temperature history of crack tip for FCA welded specimen

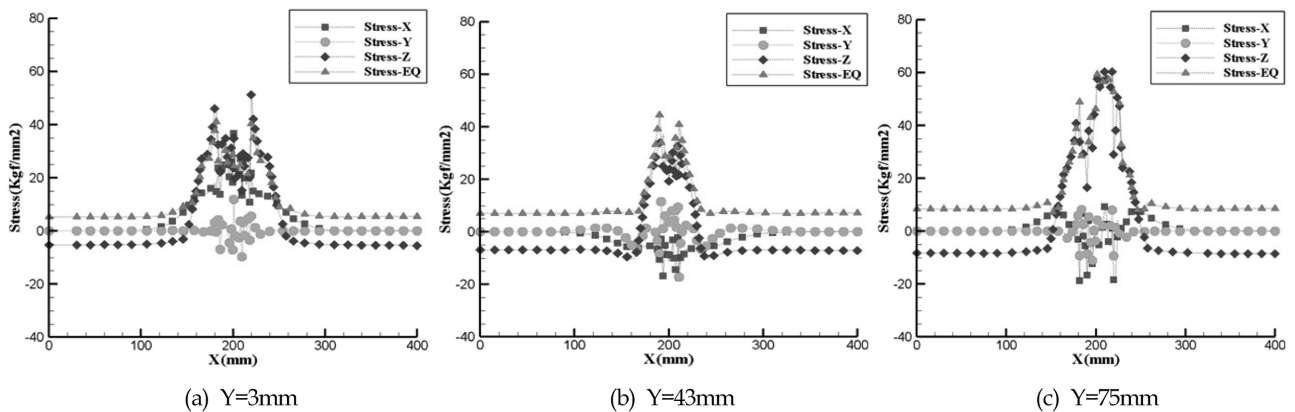


Fig. 7 Residual stress distribution of FCA welded specimen at different thickness locations

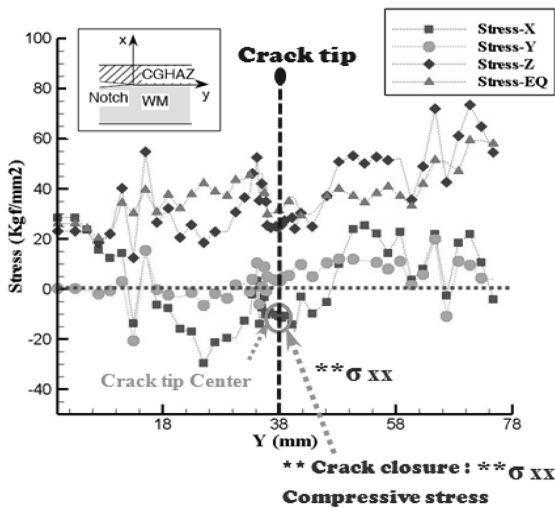


Fig. 8 Stress field near surface crack tip of FCA welded specimen

류응력이 생성되었음을 알 수 있다. 또한 최대응력값은 표면 부근에서 발생하였는데, 이는 상표면의 열전달 효과로 온도가 급격히 변하기 때문이라고 판단된다.

Fig. 8는 균열선단의 용접잔류응력 분포도이다. 용접잔류응력 성분 중 균열 개폐거동과 관련 있는 용접선 폭 방향 응력성분 (σ_x)을 주목하여 보면, FCAW 용접시험편에서는 Fig. 8에 도시한 바와 같이 크랙 선단부에 압축잔류응력성분(Crack closure stress)을 나타내고 있다. 이러한 압축 잔류응력은 무부하 상태에서 크랙면이 닫히게 되어 균열진전을 지연시키는데 크게 영향을 주는 것으로 생각할 수 있다.

3.3 X-Ray 용접잔류응력 측정 결과

X-Ray 잔류응력 측정기를 이용하여 용접선에 수직방향(X-방향)에 대한 잔류응력을 측정하였으며, 측정값과 수치해석 결과 비교를 Fig. 9에 나타내었다. 두 결과값을 비교해 보면 정량적으로는 수치해석값이 측정값에 비해 약간 높은 값을 보이나 정성

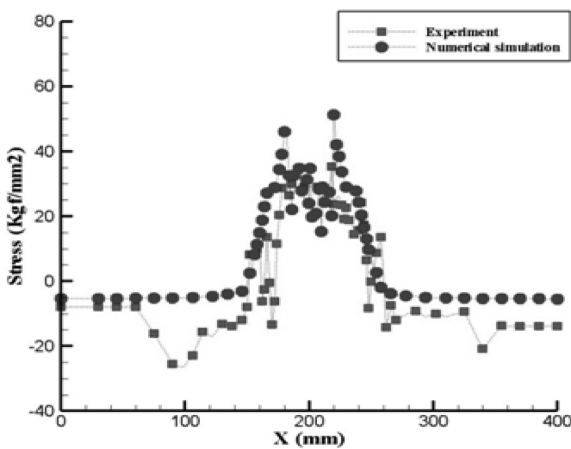


Fig. 9 Comparison of welding residual stress values/top side

적으로는 유사한 잔류응력 분포를 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

4. 결 론

극후판 EH36-TMCP강 FCAW 용접부에 대한 수치해석을 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 용접부의 냉각과정에 있어서 냉각곡선이 용접 후 초기과정에서 가파르게 나타나고 있는데, 이것은 상대적으로 입열량이 작고 시험편이 극후판이므로 열전도가 빨리 이루어지는 결과로 생각된다.

(2) 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 후면 용접부의 용접잔류응력이 전면 용접부에 비해 다소 크게 발생하는데, 이러한 분포양상은 선행 용접된 전면 용접부가 후면용접부를 구속함에 기인한 것이라 사료된다.

(3) 균열선단의 용접잔류응력 성분 중 균열 개폐거동과 관련 있는 용접선 폭 방향 응력성분(σ_x)에서 압축잔류응력이 나타남을 알 수 있고, 균열진전을 지연시키는데 크게 영향을 주는 것으로 사료된다.

후 기

본 논문은 2010학년도 조선대학교 학술연구비의 지원에 의하여 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

방한서 (1992). "후판 용접부의 역학적 특성- 유한요소법에 의한 3차원 열탄소성 해석", 대한용접학회지, 제10권, 제4호, pp 250-258.

방한서, 김종명 (2000). "21/4Cr-1Mo강 압력용기 Nozzle용접이음부의 재열균열에 관한 수치해석적 연구", 한국해양공학회지, 제14권, 제14호, pp 88-94.

방희선, 방한서, 주성민 (2009). "고강도 극후판 EH36-TMCP강 EGW용접부의 역학적 거동 및 파괴인성 KIC에 관한 해석", 한국전산구조공학회지, 제22권, 제6호, pp 565-572.

Keisuke Tanaka, Kenji Suzuki and Yoshiaki Akiniwa (2006). Evaluation of Residual Stresses by X-Ray Diffraction, Yokendo Ltd., pp 121-142.

2009년 11월 13일 원고 접수
 2010년 3월 17일 심사 완료
 2010년 4월 23일 게재 확정