

유한요소해석을 이용한 Channel I butt SA 용접부 변형 해석에 관한 연구

신대희* · 신상범* · 이주성***

* 현대 중공업(주)

** 울산대학교 조선해양공학부

A Study on Welding Distortion of Channel I Butt SA Weld using FE Analysis

DAE-Hee Shin*, SANG-BEOM SHIN** AND JOO-SUNG LEE**

*Hyundai Heavy Industry Co. Ltd., Ulsan, Korea

** Ulsan Univ. Ltd., Ulsan, Korea

KEY WORDS: Heat input model 입열 모델, Combined heat source 혼합 열원, Welding Distortion 용접 변형, Residual stress 잔류 응력, SAW 잠호 용접

ABSTRACT: The purpose of this study is to evaluate the welding distortion at the channel I butt SA weldment. In order to do it, the heat input model for the weldment was defined as combined heat source with the surface heat flux of gaussian mode and volume heat source uniformly distributed within weld groove on the basis of comparing the shapes of molten pool and temperature distribution obtained by FEA and experiment. The arc efficiency of SA welding for 2 dimensional FE analysis was determined as 0.85. The results of welding distortions at the weldment obtained by FEA and heat input conditions proposed have a good agreement with those obtained by experiment. Based on the results, it was suggested that the proper heat input model should be required to evaluate the welding distortion for weldment.

1. 서 론

선체 제작시 발생하는 변형 문제를 보다 효과적으로 제어하기 위하여 매우 많은 연구가 수행되어 왔으나, 변형 발생 기구의 다양성 및 복잡성 그리고, 변형 제어 설비 투자에 따른 비용 문제로 인하여 대부분의 현장에서 선 제작 및 후 교정에 의한 방안에 의존하고 있는 것이 사실이다. 선체와 같은 대형 용접 구조물은 대부분 소조립, 중조립 그리고, 대조립으로 이루어진 내업 공정과 제작된 각 단위 블록의 조립 및 탑재를 위한 외업 공정으로 대별된다. 따라서 선 공정에서 발생하는 용접 변형은 후 공정에서 유발된 용접 수축 하중이나 외부 하중에 의하여 변형량 및 변형 모드가 바뀌므로 보다 효율적으로 변형을 제어하기 위해서는 각 제작 공정별 변형 거동에 대한 이해 및 후 공정에서 유발되는 여러 하중들에 대한 효과를 종합적으로 분석하는 것이 필요하다. 특히, 건조 단계에서 과다 변형이 발생하는 경우 이를 교정하기 위한 열간 교정 작업시 화기 영역의 소지 및 재도장 작업을 유발함으로써 생산성을 저해시키는 주요요소로 작용

한다. 최근 선체 구조는 선박의 안정성 및 재료비의 절감을 목적으로 박판의 사용량이 증가하고 있으며, 박판 구조의 증가는 생산 공정에서 과다 변형에 의한 교정 공수를 증가시킴으로써 생산성 향상을 저해하는 요소로 작용하고 있어 이에 대한 대책 마련이 매우 시급하다. 기존의 미 해군의 보고 자료에서는 구축함(destroyer) 제작시 박판 용접부의 변형 교정 비용이 척당 약 3백만 불에 이르는 것으로 보고하고 있다(Connady C등 1997). 이에 많은 연구 기관에서는 박판 용접부의 변형을 보다 효율적으로 제어하기 위한 다양한 생산 기술 개발과 관련된 많은 연구가 수행되어 왔으나, 과다한 설비 투자 및 변형 제어를 위한 작업 공정 수의 증가 등의 문제들은 아직 해결되지 않고 있다. 따라서 최근에는 단속이나, 일면 연속 용접 그리고, channel을 이용한 박판 판계 용접등과 같이 설계 초기 단계에서 변형 제어를 위한 다양한 노력이 전개되고 있다.

이에 본 연구에서는 박판 용접 변형 제어 설계를 위한 기초 연구 단계로써 유한 요소 해석을 이용하여 박판의 panel 용접 구조물의 channel I butt SA(submerged arc) 용접부의 변형 거동 평가 방안을 제안하고자 하였다. 이를 위하여 channel I butt 용접시 용접부로 유입되는 입열 모델을 유한 요소 해석 및 실험을 이용하여 개발하였다. 그리고 개발된 입열 모델을 이용

신상범: 울산 동구 전하동 1, 현대중공업(주) 산업기술연구소
052-942-2190 str@hhi.co.kr

하여 channel I butt 용접부의 변형 수준을 평가하고 이를 실험 결과와 비교함으로써 타당성을 검증하였다.

2. Chanel I Butt 용접 입열 모델

2.1 해석 모델 및 방법

P. Dong 등은 지난 1996년에 시작된 IIW의 round-robin phase 1에서 각 참여 기관별 잔류응력의 발생 원인을 조사한 결과 부적절한 입열 모델에 기인한 용접부 온도 분포의 차이와 용접부의 소성 거동 및 용융/재 용융에 따른 역학적 고려의 부족을 지적하였다(P. Dong 등 2002). 따라서 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 channel I butt의 SA 용접시 용접 변형의 거동 평가를 위한 입열 모델을 개발하고자 Fig. 2와 같이 K type의 열전대를 부착하고 용접 및 냉각시 온도 변화를 측정하였다. 그리고 용접부의 매크로 단면에서 측정된 용융지 (weld pool) 형상 결과를 유한 요소 해석 결과와 비교함으로써 입열 모델 및 효율을 정의하였다. 본 고에서 사용된 SA 용접 조건과 부재의 치수는 Table 1과 같으며, channel I butt SA 용접부의 gap은 3mm이다.

Table 1 Welding conditions and dimensions for channel I butt SA weld

Welding Conditions		Dimension [mm]	
Electrode Dia [mm]	Heat Input [cal/mm]	Plate	Channel
2.4	477.3	800(W) x 1000(L) x 6(t)	75x75x6 EA

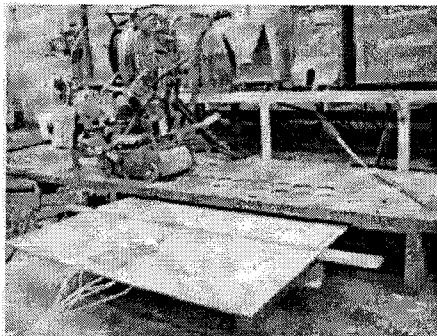


Fig.1 Configuration of test specimen

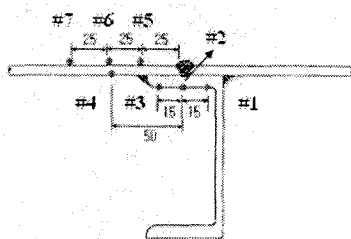


Fig.2 Locations of K type thermocouple attached

용접 입열 모델 개발을 위한 온도 분포 해석은 용접선을 따라 용접 아크의 속도가 일정하고, 용접선 방향으로의 열 손실이 없다는 가정 하에 Fig. 3과 같이 용접선에 수직인 단면에 대한 2차원 열 전달 해석을 이용하여 평가하였다. 해석시 사용된 열원은 가우시안 분포의 열속과 체적 열원이 용접부에 일정 혼합비로 작용하는 combined 열원과 용접 개선 면에서 균일 분포로 작용하는 체적열원으로 가정하였다. 그리고 열원 분포와 아크 효율에 따른 변수별 해석 결과와 용융지와 온도 분포에 대한 계측 결과를 비교하여 용접 입열 모델을 제안하였다. 여기서, 용접 및 냉각시 발생하는 열 손실은 해석 모델의 경계면에서 복사와 자연 대류에 의하여 발생하는 것으로 가정하였으며, 주판과 channel에서는 간극의 크기에 따른 접촉 열 저항에 의한 열 손실이 작용하는 것으로 가정하였다. 이때, 재료의 열적 물성은 온도에 의존하며, 용접 개선면 내의 용착 금속의 온도가 용점(1450°C)을 초과하는 경우 용융지(molten pool)내의 stirring 효과를 위하여 유효 열전달 계수를 도입하였으며, 상변화에 따른 잠열 효과 (latent heat) 또한 함께 고려하였다 (대한용접학회 2005).

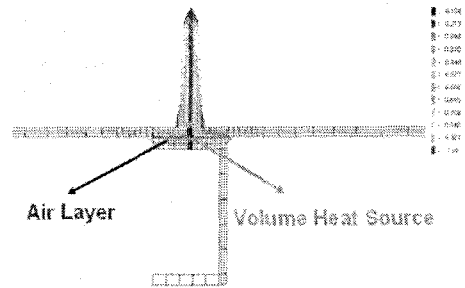


Fig. 3 Heat flux model used for FE analysis

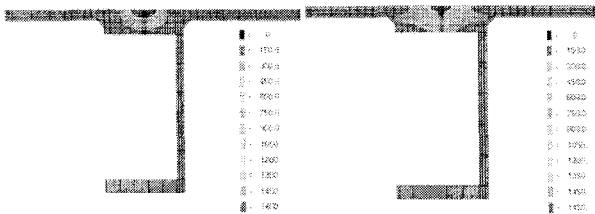
2.2 해석 결과

Fig. 4는 용접 아크의 효율이 0.8이고, 열원이 용접부의 개선 면내에 체적 열원으로 작용하는 경우와 가우시안 분포의 표면 열속과 용접부 개선면내의 체적 열원의 비가 5:5인 combined 열원이 작용하는 경우, 용접 아크가 해석 영역을 지나간 직후 용접부의 온도 분포에 대한 해석 결과와 실 용접부의 macro 단면을 도시한 것이다. Fig. 4의 (a)와 같이 체적 열원만으로 용접 아크가 작용하는 경우에 비하여 Fig. 4의 (b)에 도시한 combined 열원으로 작용하는 경우 용접부의 용융지의 형상이 Fig. 4의 (c)의 macro 단면과 유사함을 알 수 있다. 따라서 본고에서는 먼저, channel I butt SA 용접시 아크에 의한 열속 분포를 가우시안 분포의 표면 열속과 용접부 개선면내의 체적 열원의 비가 5:5로 작용하는 combined 열원으로 정의하였으며, 용접 아크 효율은 다음과 같이 용융지의 형상 및 온도 분포 해석에 대한 해석 및 계측 결과를 토대로 결정하였다.

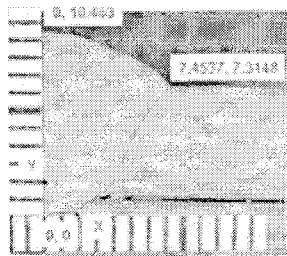
Fig. 5는 용접 아크의 효율이 0.85이고 가우시안 분포의 열속과 체적 열원의 혼합비가 5:5인 경우 용융지에 대한 해석 결과와 용접부의 macro 단면에서 계측된 용융지를 비교하여 도시한 것이다. Fig. 5와 같이 용융지 형상에 대한 해석 및 실험 결과가

매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. Fig. 6은 Fig. 5의 동일 해석 조건하에서 용접 및 냉각시 온도 분포에 대한 해석 결과와 열전대를 이용하여 측정된 온도 분포를 비교하여 도시한 것이다. Fig. 6과 같이 각 위치에서 예측 및 측정된 온도 분포가 매우 유사함을 알 수 있다.

이상의 해석 결과를 토대로 본고에서는 channel I butt SA용접시 아크에 의한 용접 입열 모델로 아크 효율은 0.85, 가우시안 분포의 표면 열속과 용접 개선면내에 체적 열원이 5:5의 비율로 용접부에 작용하는 combined 열원으로 정의하였다.



(a) Volume heat source (b) Combined heat source



(c) macro specimen

Fig. 4 Comparison results of temperature distribution at the channel I butt SA weld with heat input model and macro specimen

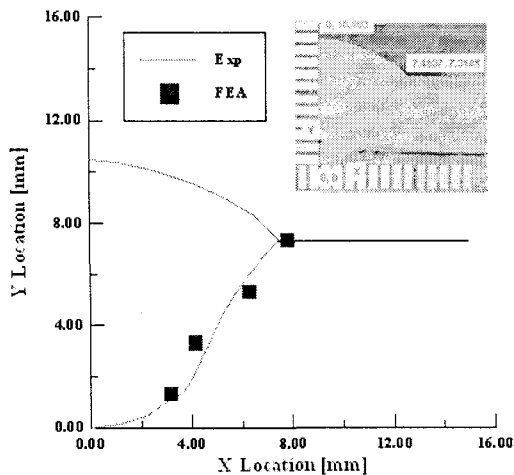


Fig. 5 Comparison of the shape of molten pool at the channel I butt weld obtained by FEA and experiment

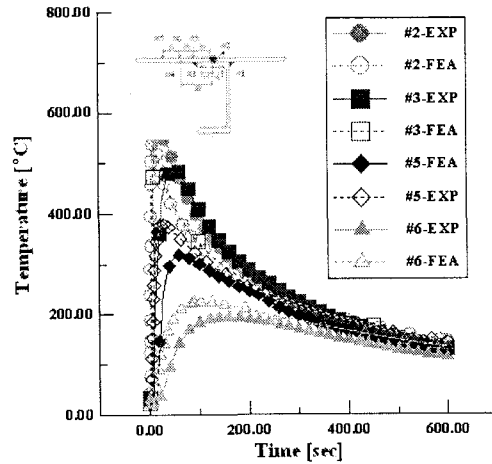


Fig. 6 Comparison of temperature changes at the channel I butt SA weld obtained by both FEA and Experiment

3. Chanel I Butt 용접 변형 해석

3.1 해석 모델 및 방법

Channel I butt SA 용접부의 변형 거동 특성을 평가하기 위하여 비선형 과도 열전달 해석 및 열 탄소성 해석을 수행하였다. 개발된 입열 모델을 이용한 용접부의 온도 구배를 평가하기 위한 열전달 해석시 준 정상 상태 조건(quasi-steady state condition)을 이용하여 3차원 열전달 문제를 2차원 열전달 문제로 단순화하였다. 용접 변형 해석을 위한 열 탄소성 해석시 Table 1의 용접 입열 모델 개발시 사용된 동일한 모델에 대하여 용접선 방향으로의 변형률이 일정하다는 가정 즉, generalized plane strain 조건을 이용하여 8절점 등매개 평면 요소를 이용하여 Fig. 7과 요소망 (mesh design)을 구성하였다. 그리고 용접부의 가열 초기에 발생하는 역 변형에 의한 잔류 각 변형의 감소 효과를 제어하기 위하여 Fig. 7과 같이 해석 모델의 상부에 rigid contact 요소를 이용하여 가열 중 +Y 방향의 변위를 구속하였으며, 용접부의 양 끝단의 절점은 단순 지지 조건을 갖도록 구속하였다. 해석시 사용된 모재 및 용접부의 기계적 물성은 온도에 의존하고 등방성이며 항복 개시 조건으로 von-Mises 조건을 이용하였으며, 가열시 누적되는 plastic strain의 최대 온도는 용착 금속의 용점으로 가정하였다. 그리고 해석 결과의 타당성을 검증하기 위하여 동일 용접 조건과 dimension을 용접 시험편에 대하여 3차원 계측기를 이용해서 측정한 결과와 비교하였다.

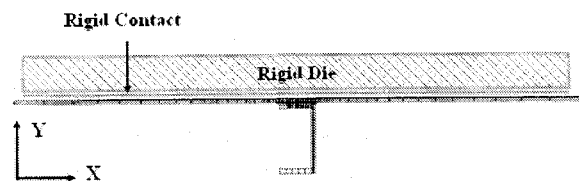


Fig. 7 Analysis model and boundary condition

3.2 해석 결과

Table 2는 Table 1의 용접 조건과 시험편을 이용하여 제작된 I butt channel 용접 시험편에서 용접선의 각 위치 즉, 100, 500 그리고, 900mm에서 계측된 X 및 Y 방향의 변형 결과를 나타낸 것이다. Table 2와 같이 X 방향의 변형 즉, 횡 수축의 경우 시험 중앙부에서 최대치를 보이는 반면에 양 끝단으로 갈수록 감소함을 알 수 있다. 이는 용접 입열량이 많고 속도가 빠른 SA 용접 기법에서 발생하는 전형적인 양상이다. 그리고 Y축 방향의 변형 즉, 각 변형의 경우 용접부의 끝단으로 갈수록 다소 증가하는 양상을 보이지만 그 차이는 X 방향의 수축에 비하여 매우 작음을 알 수 있다.

Table 2 Distortion results of channel I butt SA weld by experiment

Direction	Z-Location [mm]	Distortion [mm]	Average [mm]
X	100	0.4	0.7
	500	1.1	
	900	0.7	
Y	100	7.4	8.4
	500	8.9	
	900	8.9	

Fig. 8은 유한요소해석을 이용하여 Table 2의 실험 결과와 동일한 용접 조건하에서 평가된 channel I butt SA 용접부의 X 및 Y 방향의 잔류 변형의 결과를 도시한 것이다. Fig. 8과 같이 유한 요소 해석에 의한 X 및 Y 방향의 최대 변형량은 각각 0.74와 8.7mm로 Table 2에 나타난 시험 결과와 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이는 본고에서 channel I butt SA 용접부의 변형 해석시 사용한 유한 요소 해석 기법이 타당함을 의미한다.

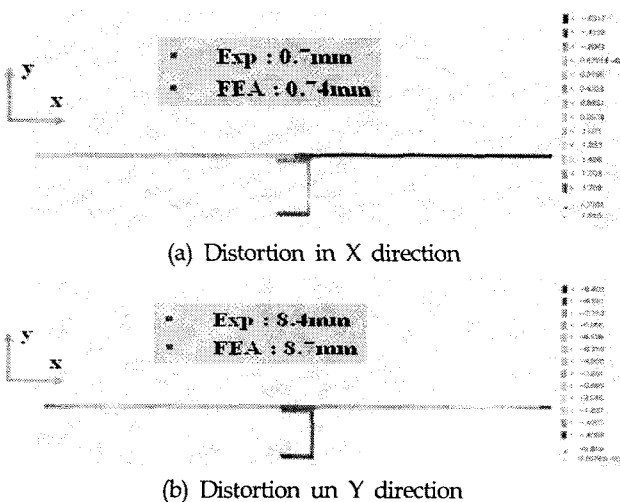


Fig. 8 Contours of welding distortion at the channel I butt SA weldment using FEA (unit:mm)

4. 결 론

박판 panel 용접 구조물의 channel I butt SA 용접부의 유한 요소해석을 이용한 변형 평가 방안을 정립하기 위한 연구를 수행하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Channel I butt SA 용접 변형 해석을 위한 입열 모델을 온도 분포 및 용융지의 형상에 대한 유한요소해석과 계측 결과와의 비교를 통하여 제안하였다. 제안된 channel I butt SA 용접의 열속 분포는 가우시안 분포의 열속과 용접 개선면에 작용하는 체적 열원의 비가 5:5의 combined 열원이며, 2차원 해석을 위하여 제안된 아크 효율은 0.85이다.

(2) 본고에서 개발된 입열 모델을 이용한 channel I butt SA 용접부의 횡 수축 및 각 변형에 대한 해석 결과는 시험 결과와 매우 잘 예측하였다. 이는 용접부의 역학 특성 평가를 위해서는 용접부의 온도 구배에 대한 정량적인 평가가 선행되어야 함을 의미한다.

참 고 문 헌

- Conrady, C. and Dull, R. (1997). "Control Distortion in Thin Ship Panels", Journal of Ship Production, May, 1997, pp. 83-92
- P. Dong and Janosch (2002). "Residual Stress Compendium Compilation: Draft Protocol and Call for Participation", IIW Doc. IIW-X-XII-XV-RSDP-43-02
- 대한용접학회 용접강도연구위원회, "FEA를 이용한 Arc 용접부의 온도 분포 예측 표준" Vol. 23, No. 6, pp 497-508, 2005.12
- K. Masubuchi (1980). "Analysis of Welded Structure", Pergamon Press
- E. Friedman et al (1975). "Thermomechanical Analysis of the Welding Process Using the Finite Element Method", Transactions of the ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, August, pp.206-213.

2000년 0월 0일 원고 접수

2000년 0월 0일 최종 수정본 채택