유한요소해석을 이용한 채널 I 형 잠호 맞대기 용접부의 변형 및 잔류 응력 예측에 관한 연구

신대희*, 신상범**, 이주성^{†***}

현대중공업 선체설계부*, 현대중공업 산업기술연구소**, 울산대학교 조선해양공학부***

A Study on the Prediction of Welding Distortion and Residual Stress for
Channel I Butt SA Weldment Using FE Analysis

Dae-Hee Shin*, Sang-Beom Shin** and Joo-Sung Lee^{†***}

Hull Design Department, Hyundai Heavy Industries, Co., Ltd.*
Industrial Research Institute, Hyundai Heavy Industries, Co., Ltd.**
School of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Ulsan***

Abstract

The purpose of this study is to establish the predictive method of welding distortion and residual stress for the channel I butt SA (submerged arc) weldment using FEA. In order to do it, the heat input model for the weldment was defined as the combined heat source with the surface heat flux of gaussian distribution and volumetric heat source uniformly distributed within weld groove by comparing the shapes of molten pool and temperature distribution obtained by FEA with those of experiments. The arc efficiency of SA welding for two-dimensional FE analysis was evaluated as 0.85. The welding distortion and residual stress of the weldment obtained by FEA and heat input model 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.

※Keywords: Heat input model(입열 모델), Combined heat source(혼합 열원), Welding Distortion(용접 변형), Residual stress(잔류 응력), SAW(잠호 용접)

1. 서론

최근 선체 구조는 선박의 안정성(stability) 및 재료비의 절감을 목적으로 박판 사용량이 증가하고 있다. 그러나 박판 구조의 증가는 생산 공정에서 과다 변형에 의한 교정 공수를 증가시킴으로써

접수일: 2007년 1월 14일, 승인일: 2007년 9월 27일

† 교신저자: jslee2@ulsan.ac.kr, 052-259-2162

생산성 향상을 저해하는 요소로 작용하고 있어 이에 대한 대책 마련이 매우 시급하다(서승일 2005, 이주성 2004, 장창두와 이창현 2000). 박판 용접 부에서 유발되는 주 변형은 각 변형과 좌굴 변형으로 대별된다. 이중에서 각 변형의 경우 선상 가열 및 점 가열과 보편적인 교정 방안에 의하여 교정이 가능한 반면에 좌굴 변형의 경우 변형 모드의 복잡성 및 과도한 변형량에 의하여 교정 작업이 매우 어려울 뿐 아니라 교정 효과 또한 작업자의 숙련도에 대한 의존도가 매우 높다. 이는 박판 용접 구조물의 제작시 정도 관리 및 생산성 확보를 위해서는 좌굴 변형 발생을 제어하는 것이 매우 중요함을 의미한다. 이에 많은 연구 기관에서는 박판 용접부의 변형을 보다 효율적으로 제어하기 위한 다양한 생산 기술 개발과 관련된 많은 연구가 수행되어 왔으나, 과도한 설비 투자 및 변형 제어를 위한 작업 공정 수의 증가 등의 문제들은 아직 해결되지 않고 있다(서승일 2005, Cornady and Dull 1997). 따라서 최근에는 단속이나, 일면 연속 용접 그리고, 채널을 이용한 박판 맞대기 용접 등과 같이 설계 초기 단계에서 변형 제어를 위한 다양한 노력이 전개되고 있으며, 이를 위해서는 박판 용접부의 변형 및 잔류 응력 즉, 역학적 거동의 특성을 정량적으로 예측하는 것이 무엇보다도 중요하다.

이에 본 연구에서는 박판 용접 변형 제어 설계를 위한 기초 연구로써 유한요소해석을 이용하여 자동차 운반선의 카 데크(deck)에 적용되고 있는 채널 I 형 잠호(submerged arc, 이하 SA) 맞대기 용접부의 역학적 거동 특성을 평가할 수 있는 방안을 제안하였다. 이를 위하여 채널 I형 SA 맞대기 용접시 용접부로 유입되는 입열 모델을 유한요소해석 및 실험을 이용하여 개발하고 개발된 입열 모델을 이용하여 채널 I형 SA 맞대기 용접부의 변형 및 잔류 응력 수준을 평가하였으며, 이를 실험 결과와 비교함으로써 타당성을 검증하였다.

2. Chanel I형 잠호 용접 입열 모델

2.1 해석 모델 및 방법

Dong and Janosch(2002)는 1996년에 시작된

Table 1 Welding heat input and dimensions for channel I butt SA weldment

Base Plate (W x L x t, mm)	Channel	Heat Input, Qo[cal/mm]
800x1000x 6	75x75x6 EA	477

Fig. 1 Configuration of test specimen

Fig. 2 Locations of K type thermocouple attached

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 지적한 바 있다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 채널 I형 SA 맞대기 용접시 용접 변형 및 잔류 응력을 보다 정량적으로 평가할 수 있는 입열 모델을 개발하고자 Fig. 2와 같이 K type의 열전대를 부착하여 용접 및 냉각시 온도 변화를 측정하였다. 그리고 용접부의 매크로 단면에서 측정한 용융지(weld pool) 형상 결과를 유한요소해석 결과와 비교함으로써 입열 모델 및

효율을 정의하고자 하였다. 본 연구에서 사용된 SA 용접 조건과 부재의 치수는 Table 1과 같으며, 채널 I butt SA 용접부의 갭(gap)은 3mm이다.

용접 입열 모델 개발을 위한 온도 분포 해석은 용접선을 따라 용접 아크의 속도가 일정하고, 용접선 방향으로의 열 손실이 없다는 가정 하에 Fig. 3과 같이 8절점 등매개 요소를 이용하여 요소망을 구성하고 용접선에 수직한 단면에 대한 2차원 열전달 해석을 수행하여 평가하였다. 해석시 사용된 열원은 식(1)로 정의되는 가우시안 분포의 열속(Anderson 1978)과 식(2)로 정의되는 체적 열원이 용접부에 일정 혼합비로 작용하는 혼합 열원 (combined heat source)이다. 체적열원은 용접 아크에 의한 열원이 용접 개선 면에서 식(2)와 같이 균일 분포의 형태로 작용한다고 가정하였다.

$$q(r) = \frac{3\eta Q}{\pi r^2} \exp(-3(r/\bar{r})^2) \quad (1)$$

$$q(r) = \frac{\eta Q_o}{A_w} \quad (2)$$

여기서, $q(r)$ 은 용접 아크의 중심에서 거리 r 만큼 떨어진 위치에서의 열속이고, Q 와 Q_o 는 각각 아크에 의하여 발생하는 입열량과 용접 아크에 의하여 모재로 유입되는 용접선의 단위 길이당 입열량이다. 그리고 η 와 $\bar{r}$ 는 각각 용접 아크에 의한 효율과 아크의 열원이 표면 열속으로 작용하는 경우 95%이상의 열속이 집중되는 유효 반경(effective radius)으로 본 고에서는 용접부의 비드 폭(15mm)으로 가정하였다. 식(2)에서 A_w 는 채널 I형 SA 맞대기 용접부의 개선면 내의 면적이다. 본 연구에서는 식(1)과 (2)로 주어진 기본 열원 모델을 이용하여 열원 분포와 아크 효율에 대한 용융지 부근에서의 가열 및 냉각시 온도분포를 실험을 통한 계측결과와 비교하여 용접 입열 모델을 제안하였다. 여기서, 용접 및 냉각시 발생하는 열 손실은 해석 모델의 경계면에서 복사 및 McAdams(1954)에 의하여 제안된 수평 평판에서의 자연 대류에 의하여 발생하는 것으로 가정하였으며, 주판과 채널에서는 간극의 크기를 고려한 접촉 열 저항에 의한 열 손실이 있는 것으로 가정하였다. 즉, Fig. 3과 같이 주판과 “C”자형 채널

Fig. 3 Heat flux model used for finite element analysis

Fig. 4 Thermal and physical properties used for FEA (대한용접학회 2005)

간의 0.25mm의 상온(20°C)의 공기층을 모델링하여 이 영역에서 열전도에 의한 열 손실이 존재하는 것으로 가정하였다(Incropera and Dewitt 1990). 그리고 용접부와 모재는 일반 탄소강(carbon steel)의 열적 물성과 동일한 것으로 가정하였으며, Fig. 4와 같이 온도에 의존하며, 용접 개선면 내의 용착 금속의 온도가 용점(1450°C)을 초과하는 경우 용융지(molten pool)내에서의 아크 압력과 용융지 내에서 온도 차에 의한 교반 효과를 고려하기 위하여 용착 금속이 생성되는 영역에서 유효 열전달 계수를 도입하였으며, 상변화에 따른 잠열 효과(latent heat) 또한 기존의 연구 결과(대한용접학회 2005)에서 제시한 방법과 동일한 방법으로 적용하였다.

2.2 해석 결과

Fig. 5는 용접 아크의 효율이 0.80이고, 열원이 용접부의 개선 면내에 체적 열원으로 작용하는 경

우와 가우시안 분포의 표면 열속과 용접부 개선면
 내의 체적 열원의 비가 5:5인 혼합 열원으로 작용
 하는 경우, 용접 아크가 해석 영역을 지나간 직
 후 용접부의 온도 분포에 대한 해석 결과와 실 용
 접부의 매크로 단면을 도시한 것이다. Fig. 5(a)와
 같이 체적 열원만으로 용접 아크가 작용하는 경우
 에 비하여 Fig. 5(b)에 도시한 혼합 열원으로 작
 용하는 경우 용접부의 용융지의 형상이 Fig. 5(c)
 에 보인 매크로 단면과 유사함을 알 수 있다. 따
 라서 본 연구에서는 먼저, 채널 I형 SA 맞대기 용
 접시 아크에 의한 열속 분포를 가우시안 분포의
 표면 열속과 용접부 개선면내의 체적 열원의 비가
 5:5로 작용하는 혼합 열원으로 정의하였으며, 용
 접 아크 효율은 다음과 같이 용융지의 형상 및
 온도 분포 해석에 대한 해석 및 계측 결과를 토대
 로 결정하였다. Fig. 6은 용접 아크의 효율이 0.85
 이고 가우시안 분포의 열속과 체적 열원의 혼합비
 가 5:5인 경우 용융지에 대한 해석 결과와 용접부
 의 매크로 단면에서 계측된 용융지를 비교하여 도
 시한 것이다. Fig. 6과 같이 용융지 형상에 대한
 해석 및 실험 결과가 매우 잘 일치하고 있음을 알
 수 있다. Fig. 7은 Fig. 6과 동일한 해석 조건하에
 서 용접 및 냉각시 온도 분포에 대한 해석 결과와
 열전대를 이용하여 계측된 온도 분포를 비교하여
 도시한 것이다. Fig. 7과 같이 각 위치에서 예측
 및 계측된 온도 분포가 매우 유사함을 알 수 있
 다. 이상의 해석 결과를 토대로 본 연구에서는 채
 널 I 형 SA 용접시 아크에 의한 용접 입열 모델로
 아크 효율은 0.85, 가우시안 분포의 표면 열속과
 용접 개선면내에 체적 열원이 5:5의 비율로 용접
 부에 작용하는 혼합 열원으로 정의하였다.

(a) Volume heat source

(b) Combined heat source

(c) Macro specimen

Fig. 5 Comparison results of temperature distribution at the channel I butt SA weld with heat input model and macro specimen

Fig. 6 Comparison of the shape of molten pool at the channel I butt weld obtained by FEA and experiment

Fig. 7 Comparison of temperature changes at the channel I butt SA weld obtained by both FEA and Experiment

3. Channel I형 SA 용접부의 역학적 거동

3.1 해석 모델 및 방법

채널 I형 SA 맞대기 용접부의 변형 및 잔류 응력 거동 특성을 평가하기 위하여 비선형 과도 열전달 해석 및 열 탄소성 해석을 수행하였다. 용접부의 온도 구배를 위한 열전달 해석은 본 연구에서 제안된 입열 모델과 준 정상 상태 조건(quasi-steady state condition)을 이용하여 수행하였으며, 해석시 사용된 변수는 Table 2와 같다. 용접 변형 및 잔류 응력 평가를 위한 열 탄소성 해석시 Fig. 8과 같이 용접선 중앙부의 단면에 대하여 용접선 방향으로의 변형률이 일정한 것으로 가정하는 일반화된 평면 변형률 (generalized plane strain) 조건을 이용하여 8절점 등매개 평면 요소로 요소망을 구성하였다. 그리고 용접부의 가열 초기에 발생하는 역 변형에 의한 잔류 각 변형의 감소 효과를 제어하기 위하여 Fig. 8과 같이 해석 모델의 상부에 강제 접촉 요소 (rigid contact element)를 이용하여 가열 중 +Y 방향의 변위를 구속하였으며, 용접부의 양 끝단의 절점은 단순 지지 조건을 갖도록 구속하였다. 주판과 채널 사이에서의 접촉 열 저항을 위하여 사용된 공기층의 요소의 강성은 거의 “0” 인 것으로 가정하

Table 2 Variables used for FEA

Base plate (W x L x t, mm)	Channel [mm]	Heat input [cal/mm]
800x1000x 6	75x75x6 EA	477
800x1000x 8	75x75x6 EA	650

Fig. 8 FE Analysis model and boundary condition

Fig. 9 Mechanical properties used for FEA

였다. 해석시 사용된 소재 및 용접부의 기계적 물성은 Fig. 9와 같이 온도에 의존하고 등방성이며 항복 조건으로 von-Mises 조건을 이용하였으며 (Anderson 1978), 가열시 누적되는 소성 변형률 (plastic strain)의 최대 온도는 용착 금속의 용점으로 가정하여 계산하였다. 그리고 해석 결과의 타당성은 해석 모델과 같은 치수의 용접 시험편에 대해 동일한 용접조건으로 실험을 수행하여 3차원 변위 계측기에 의한 변형량과 hole drilling method (ASTM E-837-01)를 이용하여 측정한 잔류 응력을 비교함으로써 검증하였다.

3.2 해석 결과

Table 3은 Table 2에서 주판 두께가 6mm이고, 용접 입열량이 477cal/mm 인 경우 용접 시험편에서 용접선의 각 위치 즉, 100, 500 그리고

900mm에서 계측된 X와 Y 방향으로의 변위를 나타낸 것이다. Table 3과 같이 X 방향의 변형 즉, 횡 수축의 경우 시편 중앙부에서 최대치를 보이는 반면에 양 끝단으로 갈수록 감소함을 알 수 있다. 이는 용접 입열량이 많고 속도가 빠른 SA 용접 기법에서 발생하는 전형적인 횡 수축 거동 양상과 일치하는 것이다(신상범 등 2004). 그리고 Y축 방향의 변형 즉, 각 변형의 경우 용접부의 끝단으로 갈수록 다소 증가하는 양상을 보이지만 그 차이는 X 방향의 수축에 비하여 매우 작으며, 전형적인 각 변형 양상을 보이고 있다. 이는 박판의 맞대기 용접시 채널을 적용하는 경우 좌굴 변형을 효과적으로 제어할 수 있음을 의미한다.

Fig. 10은 Table 3과 동일한 조건에서 채널 I형 SA 맞대기 용접부의 X와 Y 방향의 변형에 대한 해석 결과를 나타낸 것이다. Fig. 10과 같이 X 방향과 Y방향의 최대 변형 값은 각각 0.74와 8.7mm로 Table 3의 계측 결과와 비교적 잘 일치하고 있다. Fig. 11은 주판 두께에 따른 채널 I형 SA 맞대기 용접부의 Y 방향의 변형 분포에 대한 유한요소해석 및 실험 결과를 비교하여 도시한 것이다. 비교 결과에서 보는 바와 같이 주판 두께와 관계없이 해석 결과는 실험 결과와 매우 잘 일치하고 있다.

Fig. 12는 채널 I형 SA 맞대기 용접부의 상부 표면에서 Z축 방향 즉, 용접선 방향의 잔류 응력에 대한 유한요소해석 및 실험 결과를 비교하여 도시한 것이다. Fig. 12에서 보는 바와 같이 용접선 방향의 잔류 응력은 주판 두께에 관계없이 거의 유사한 분포를 보이고 있다. 이는 Table 2에서 주판 두께가 각

Fig. 10 Contours of welding distortion at a channel I butt SA weldment using FEA (unit : mm)

Fig. 11 Distribution of distortion in the Y direction of the channel SA butt weldment with plate thickness obtained by FEA and experiment

Table 3 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	

각 6과 8mm인 채널 I형 SA 맞대기 용접부에 단위 두께당 유입되는 용접 입열량이 각각 $477/6 = 79.5$ 와 $650/8 = 81.2$ 로 거의 동일하기 때문이며, 해석 결과는 실험 결과와 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 유한요소해석을 이용하여 용접부의 역학 거동 즉, 용접 변형 및 잔류 응력 평가

Fig. 12 Distribution of longitudinal welding residual stress in a channel I butt SA weldment

를 위해서는 용접부의 온도 구배를 정량적으로 예측해야 하며, 채널 I형 SA 맞대기 용접부를 위하여 본 연구에서 제안한 가우시안 분포의 표면 열속과 체적 열원이 5:5인 혼합 열원을 이용한 입열 모델과 2차원 해석을 위한 0.85의 아크 효율이 타당함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 유한요소해석을 이용하여 박판 블록 용접 구조물의 채널 I형 잠호 맞대기 용접부의 변형 및 잔류 응력 평가 방안을 정립하기 위한 연구를 수행하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 채널 I 형 잠호 맞대기 용접부의 변형 및 잔류 응력 해석을 위한 입열 모델을 온도 분포 및 용융지의 형상에 대한 유한요소해석과 실험 결과를 비교하여 제안하였다. 제안된 채널 I형 잠호 용접의 열속 분포는 가우시안 분포의 열속과 용접 개선면에 작용하는 체적 열원의 비가 5:5인 혼합 열원이며, 2차원 해석을 위하여 제안된 아크 효율은 0.85이다.
- (2) 본 연구에서 개발된 입열 모델을 이용한 채널 I형 잠호 맞대기 용접부의 횡 수축 및 각 변형 그리고 잔류 응력에 대한 해석 결과는 실험 결과와 매우 잘 일치하였다. 이는 용접부

의 역학 특성 평가를 위해서는 용접부의 온도 구배에 대한 정량적인 평가가 선행되어야 함을 의미한다.

참 고 문 헌

- 대한용접학회 용접강도연구위원회, 2005, "FEA를 이용한 Arc 용접부의 온도 분포 예측 표준," Vol. 23, No. 6, pp. 497-508.
- 서승일, 2005, "박판구조물의 용접 면외변형에 대한 이론 해석적 접근," 대한조선학회 논문집, 제 42권, 제 5호, pp. 466-471.
- 신상범, 김경규, 윤종근, 2004, "자동 용접부 회전 변형에 미치는 가접의 영향," Proceedings of the KWS Conference 2004, pp. 289-291.
- 이주성, 2004, "평블록의 용접변형예측 시뮬레이터," 대한조선학회 논문집, 제 41권, 제 1호, pp. 55-63.
- 장창두, 이창현, 2000, "선체 블록의 용접변형 예측 및 제어를 위한 연구," 대한조선학회 논문집, 제 37권, 제 2호, pp. 127-136.
- Anderson, B.A.B., 1978, "Thermal Stress in a Submerged-Arc Welded Joint Considering Phase Transformations," Trans. of ASME, Vol. 100, pp. 356-362.
- Connady, C. and Dull, R., 1997, "Control Distortion in Thin Ship Panels," Journal of Ship Production, May, 1997, pp. 83-92.
- Dong, P. and Janosch, 2002, "Residual Stress Compendium Compilation: Draft Protocol and Call for Participation," IIW Doc. IIW-X-XII-XV-RSDP-43-02
- Incropera F.P. and Dewitt, D.P. "Introduction to Heat Transfer," 2nd Edition, Wiley
- McAdams, 1954, Heat Transmission, 3rd ed., McGraw-Hill, Chapter 7

< 신 대 회 >

< 신 상 범 >

< 이 주 성 >