박판 용접 변형 수정을 위한 점 가열 및 선 가열 해석

박중구[†]·장경복^{*}·조시훈^{*}·장태원^{*}

Analysis of fairing method of spot and line heating for thin plate

Jung Goo Park, Kyoung Bok Jang, Si Hoon Cho and Tae Won Jang

Key Words: Spot heating(점가열), Line heating(선가열), Thin plate welding(박판 용접)

Abstract

During fabrication of deck house block in passenger ships, the problem of unexpected large deformation and distortion frequently occurs. Hence, amending of these deformation become more important in thin plate welding. The spot heating and line heating methods were very widely employed to amend deformation of thin plate structures. Few papers are available on the working conditions of spot heating method but only little information on deformation control. In this study, evaluation was carried out on the temperature distribution of spot and line heating methods using FEA and practical experiments for various heating time. In FEA, heat input model was established using Tsuji's double Gaussian heat input mode. This model was verified by comparing with experimental data. Also radial shrinkage and angular distortion due to spot heating were determined and compared with experimental results. Thermo elasto-plastic analysis was performed using commercial FE code, MSC/MARC. Radial shrinkage and angular distortion were measured using 3D measuring apparatus. Based on these results, criteria for amending thin plate fairing was established.

기호설명

q(r): Heat flux distribution η : Heat efficiency R_1 : Radius of 99.8% first heat flux frame R_2 : Radius of 99.8% second heat flux frame β : Second heat flux over first heat flux Q: Heat flux due to chemical reaction

1. 서 론

1.1 연구 배경 최근에 고부가가치 선박의 건조에 관심이 높아 져 가고 있으며, 특히 여객선 및 초호화 크루즈 선 건조를 위한 기술 개발에 연구가 많이 진행되

I	삼성중공업 생산기술연구소 용접연구
	E-mail : jgbest.park@samsung.com
<u>ب</u>	TEL : (055)630-6783 FAX : (055)630-8438
Ŷ	삼성중공업 생산기술연구소 용접연구

고 있다. 일반적으로 여객선의 건조 시 높은 운 항 속도를 확보하기 위해 선체의 중량을 최소화 하고 있다. 이를 위해 여객선의 거주구 블록의 경우 최소 5mm 두께의 박판이 많이 사용되고 있다. 박판의 경우는 후판에 비해 변형 양상이 복잡하고 또 많은 변형이 발생하고 있다. 또한 좌굴 변형 등의 심각한 변형이 많이 발생하고 있 다. 박판의 용접을 위한 관련 기술들의 연구는 많이 이루어지고 있으나, 그에 비해 박판 용접 후 발생한 변형 제어에 관한 연구가 많이 이루어 지지 않고 있는 현실이다. 따라서 본 연구에서는 박판의 용접 후 변형을 수정하기 위해 일반적으 로 사용하는 선 가열 법과 점 가열법에 대해 검 토하였다.

1.2 연구 내용

선 가열과 점 가열에 의해 변형이 수정되는 메커 니즘을 이해하고, 수정 작업에 대한 작업 표준 설정을 위한 기초 작업을 수행하였다. 여러 가지 가열 조건에 대해 입열 모델을 정립하였고, 이를 실험 결과와 비교하였다. 정립된 입열 모델을 이 용하여 열탄소성 해석을 통해 가열 시간과 가열 방법에 따른 변형 양상을 검토하였다. 이를 위해 상용 유한요소 해석 코드인 MSC/ MARC 를 이용 하였고, 해석 결과는 실험 결과와 비교하여 그 타당성을 검증하였다. 실험 결과는 3 차원 CMM 장비를 이용하여 측정하였다.

2. 점 가열법

2.1 입열 모델 정립을 위한 기초 실험 가열에 의한 변형 수정 작업을 유한요소 해석에 적용하기 위해 입열 모델을 정립하였다. 입열 모 델 정립을 위해 기본 시험편에 대해 가열 실험을 하였다. 열전대를 시편의 뒷면에 부착한 뒤, 온도 모니터링 시스템을 이용하여 온도 변화를 측정하 였다. 사용한 열전대는 K-type 이며, 열원 중심으 로부터 5mm 간격으로 부착하였다.



Fig. 1 Experiment for temperature measurement

그림 1 은 기본 시험편에 대한 온도 이력 측정 실험이다. 실험은 5mm 두께의 박판에 대해 실시 하였으며, 이는 여객선 거주구 블록에 일반적으 로 사용되는 두께이다. 사용된 가스 유량은 에틸 렌이 20L/min 이고 산소가 70L/min 이다. 이렇게 측정된 값은 입열 모델에서 입열량 계산에 사용 된다. 가열에 사용된 토치 팁은 직경 2mm 의 것 으로 가열 작업에 일반적으로 많이 사용되고 있 는 것을 그대로 적용하였다.

입열 모델은 Tsuji 의 double Gaussian mode 를 사 용하였다. 이 모델은 첫번째 화염과 두번째 화염 의 분포로 결정된다.

$$q(\mathbf{r}) = \frac{6\eta Q}{\pi (R_1^2 + \beta R_2^2)} \left(e^{-\frac{6r^2}{R_1^2}} + \beta e^{-\frac{6r^2}{R_2^2}} \right)$$

각각의 파라메터에 대한 설명은 본 논문의 초기 에 표시한 바와 같다. 실험 결과와 비교하여 정 립된 입열 모델을 이용하여 3 차원 열전달 해석 을 수행하였다. 입열 모델은 MSC/MARC 의 사용 자 정의 subroutine 을 이용하였다. 입열의 시작과 끝 부분의 가열 효과를 고려하기 위해 ramp ratio 를 고려하였다. 입열 효율은 0.4-0.6 의 값을 사용 하였다.

2.1.1 실험 및 해석 결과

그림 2-3 은 점가열에 대한 실험 결과를 나타낸 다. 가열 중심 이면의 온도는 700도 이상으로 나 타나며, 이를 통해 열속이 판 전체를 관통하고 있음을 알 수 있다. 또한 가열 후 급냉이 이루어 져 냉각 속도가 매우 빠르게 나타남을 알 수 있 다. 가열 후의 급냉은 강한 수축력을 발생시키는 원인이 된다.



Fig. 2 Temperature distribution of 4 seconds spot heating



Fig. 3 Temperature distribution of 6 seconds spot heating

그림 4 는 열해석 및 열탄소성 해석을 위한 유한 요소 격자를 나타내고 있다. 두께 방향의 열 분포 를 나타내기 위해 두께 방향으로 3 구간으로 나누 었다. 또한 열전대 부착 위치에 노드를 생성하여 실험 결과와 계산 결과를 비교하였다.



Fig. 4 FEA model of spot heating analysis



Fig. 5 Heat flux distribution for heat input.

그림 5 는 열전달 해석 시 입력 되었던 열속 분포 를 나타낸다. 대부분의 열 유속은 25mm 반경 이 내에 입력되고 있으며, 이는 실험 결과와 잘 일치 하고 있다.



Fig. 6 FEA and Experimental results of spot heating.

그림 6 은 유한 요소 해석 결과와 실험의 단면을 비교하고 있다. 회색으로 표현한 부분은 A1 변태 점 이상의 부분으로 상변태에 의해 나타난 실험 결과와 일치하는 것을 볼 수 있다.

그림 7-9 는 실험 결과와 해석 결과와의 비교를 나타낸다. 해석 결과는 실험 결과를 매우 잘 나타 내고 있음을 볼 수 있다. 이를 통해 입열 모델을 정립하였으며, 열탄소성 해석에 적용하였다. 열탄 소성 해석을 위해 온도 특성이 고려된 물성 값을 사용하였다. 실제 제작 과정에서 핀 지그가 매우 많이 사용되고 있으며, 열탄소성 해석에도 접촉 조건을 사용하여 고려하였다. 접촉 조건(contact)과 함께 자중의 효과도 같이 고려하였다.

그림 10 은 열탄소성 해석 결과를 나타내고 있다. 열탄소성 해석을 통해 radial 방향의 수축량을 계 산 하였고 이를 실험 결과와 비교하였다.

그림 11 은 여러 가지 가열 시간에 따라 가열 실 험을 한 뒤 변형 양상을 3 차원 CMM 장비를 이 용하여 측정한 결과이다. 각각의 시험편에 대해 15 점 이상 측정하였다. 가열 시간은 4-10 초로 그 동안의 입열 조건은 동일하다. 측정 결과를 통해 수축량 및 각변형 량을 계산하였다.



Fig. 7 Compare with experimental and FEA results (4 seconds heating)



Fig. 8 Compare with experimental and FEA results (5 seconds heating)



Fig. 9 Compare with experimental and FEA results (6 seconds heating)



Fig. 10 Radial shrinkage of spot heating by FEA

그림 12는 각변형에 대해 실험 결과와 해석 결과 를 비교하고 있다. 해석 결과는 실험 결과를 잘 나타내고 있다. 이를 통해 각 변형 량을 예측할



Fig. 11 Experimental result of deformed shape of plate by spot heating



Fig. 12 Experimental and FEA results of radial shrinkages

 $u_r = 0.01140 \left(\frac{Q}{t}\right) + 0.04996$

수 있는 간이 예측식을 제안하였다. 간이 예측식 은 실험 결과와 해석 결과를 회귀 분석하여 1 차 식으로 나타내었다.

3. 선 가열법

3.1 실험 및 해석

점 가열법에 대한 고찰과 같은 방법으로 선 가열 법에 대해서도 검토하였다. 선 가열은 일반적인 작업 속도인 10mm/s 의 속도로 진행하였으며, 이 를 위해 3 차원으로 이동이 가능한 캔트리를 이용 하였다. 점가열과 같은 방법으로 선가열에 대한 열 전달 해석 및 열탄소성 해석을 위해 앞서 정립 한 입열 모델을 그대로 사용하였다. 그러나 점 가 열법에서는 정지 열원인 반면, 선 가열에서는 이 동 열원 기법을 사용하여 사용자 정의 subroutine 에 적용하였다. 그림 13 은 캔트리를 이용한 선 가 열 실험 장면을 나타낸다.



Fig. 13 Experiment for temperature measurement for line heating

그림 14 는 선가열 해석을 위한 유한요소 격자를 나타낸다. 가열은 100mm 에 대해 등 속도로 하였 다. 가열 토치가 내려오는 동안 입열이 되는 효과 를 고려하기 위해 ramp ratio 를 고려하여 입열 하 였다.



Fig. 14 FE model for 100mm line heating



Fig. 15 Temperature distribution of 100mm line heating

그림 15 는 선가열에 대해 실험 결과와 해석 결과 의 비교를 나타낸다. 열전대는 0, 20, 50, 100mm 의 4 곳에 부착하였으며, 열전대를 부착한 곳의 실험 결과와 해석 결과는 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

그림 16 은 해석 결과를 나타내고 있다. 점가열에 비해 열속이 판을 관통하지 않고 표면 근처에만 가열되고 있음을 볼 수 있다. 열이 관통되지 못하 면 상, 하면의 온도 구배에 의해 수축력의 차이가 많이 발생하게 되고 이를 통해 각변형이 발생하게 된다. 즉, 점 가열법은 열속의 관통을 통해 수축력 이 매우 크게 나타나는 반면, 선 가열법은 각 변 형이 매우 크게 나타나게 된다.

그림 17 은 실험 결과와 해석 결과의 비교를 나타 낸다. 일반적으로 선 가열법은 수축 변형 보다는 각변형이 크게 나타난다. 해석 결과는 실험 결과 와 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다.



Fig. 16 FEA results of line heating.



Fig.17 Comparison with experimental data and FE result of 100mm line heating

4. 결 론

점 가열법 및 선 가열법에 대한 검토를 통해 다음 과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 점 가열 및 선 가열 해석을 위해 입열 모델을 정립하였고, 실험 결과와 비교하여 그 타당성을 검증하였다.

2. 점 가열법에 대해 각 변형량을 검토하였고, 실 험 결과 및 해석 결과를 이용하여 간이 예측식을 정립하였다.

3. 선 가열법에 대해 실험 결과와 해석 결과는 잘 일치하였다.

참고문헌

(1) I. Tsuji, Y. Okumura (1988). "A Study on line heating process for plate bending of ship steels" J. WJSNA, Vol. 76, pp 149-160

(2) L. Sovila, K. carey, J. Dydo (2001). "An analysis tool for forming complex shapes in ship plate structures by line heating" Ship production symposium and Expo

(3) Y. Shim, S. Lee (1993). "Modeling of welding heat input for residual stress analysis" J. KWS, Vol. 11, No.3, pp 110-123.