

곡가공을 위한 선상 가열 특성에 따른 변형 거동에 관한 연구

Effects of Line Heating Variables for forming the Curved Plate on the Behavior of Distortion

신상범*, 이동주**, 김경규**, 윤중근**

* 현대중공업(주) 기술개발본부 산업기술연구소/울산대학교

** 현대중공업(주) 기술개발본부 산업기술연구소

ABSTRACT The purpose of this study is to evaluate the effects of line heating variables for forming the curved plate on the behavior of distortion using FEA and experiment. The optimum mixed ratio and standoff for flame heating was established under the heating conditions given in this study. With the heating condition, the predictive equation of angular distortion and transverse shrinkage was established using FEA and verified by comparing the predicted results and experimental results.

1. 서 론

선수 및 선미의 곡 블록 주판은 선상 가열 및 삼각 가열과 같은 열간 가공에 의하여 횡곡 및 종곡을 최종 성형함으로써 완성된다. 그러나, 열간 가공에 의한 성형 작업시 거의 모든 작업이 수 작업에 의해 이루어지고, 작업자의 숙련도에 따라 곡 성형 정도(accuracy)의 의존성이 매우 높을 뿐 아니라 작업자의 고령화 그리고, 소음 등의 작업 환경의 문제 등으로 인해 최근 곡가공 자동 시스템의 개발의 필요성이 증가하고 있다. 이에 본 연구자들은 화염을 이용한 선상 가열시 곡 주판의 단위 가열선에 대한 변형 예측 기법과 “보” 이론을 이용하여 twist 곡 주판의 가열선 생성 알고리즘을 개발하고 이에 대한 타당성을 실험 결과와 비교를 통하여 검증하였다[1]. 그러나, carriage type의 가열 장치와 동일 작업자에 의하여 제작된 성형 곡의 정도는 작업 조건에 따라 다소 큰 차이가 발생함으로써 재현성 문제가 제기되었다. 이는 화염을 이용한 선상 가열시 피가열재로 유입되는 열속의 양 및 분포가 일정 유량 및 속도하에서도 연소 가스의 혼합비와 가열재와 토치의 간극 즉, standoff에 대한 의존성이 매우 크기 때문인 것으로 판단된다.

따라서, 본 연구에서는 화염에 의한 선상 가

열을 이용한 twist 곡 주판의 성형시 가열 변수 즉, 연소 가스의 혼합비 그리고, stand-off에 따른 변형 거동 특성을 유한 요소 해석 및 실험을 이용하여 평가하고, 이를 토대로 단위 가열선에 대한 최적의 가열 조건 및 변형 예측 기법을 제안하고자 하였다.

2. 가열 변수

2.1 입열 모델

선상 가열시 가열 특성에 따른 변형 거동을 예측하기 위하여 일차적으로 가열 변수에 따른 입열 모델을 식(1)과 같이 Tsuji가 제안한 1차 및 2차 화염에 의한 double gaussian heat flux model[2]과 피가열재의 가열부에서 두께 방향으로 2mm 아래에 부착된 K type 열전대를 이용하여 계측된 온도 분포와 비교하여 정의하였다.

$$q(r) = \frac{6\eta Q}{R_1^2 + \beta \cdot R_2^2} \left(e^{-\frac{\eta}{R_1} \cdot r^2} + \beta \cdot e^{-\frac{\eta}{R_2} \cdot r^2} \right) \quad (1)$$

여기서, r은 가열부 중심에서 거리, q(r)은 각 위치에서의 열속, Q는 열 에너지, R1과 R2는 1,2차 화염 길이, β는 2차 화염 계수 그리고 η는 효율이다.

Fig. 1은 동일 가열 조건하에서 측정 및 계산된 가열부재의 온도 분포를 도시한 것이다. Fig. 2와 같이 실험 및 유한 요소 해석 결과는 매우 잘 일치하고 있으며, 이는 기 제안된 Tsuji의 입열 모델의 각 변수를 적정화하는 경우 유한 요소 해석을 위한 보편 타당한 입열 모델의 개발이 가능함을 의미한다. 따라서, 본 고에서는 Tsuji의 입열 모델을 이용하여 혼합비와 standoff에 따른 열속의 분포를 정의하였다.

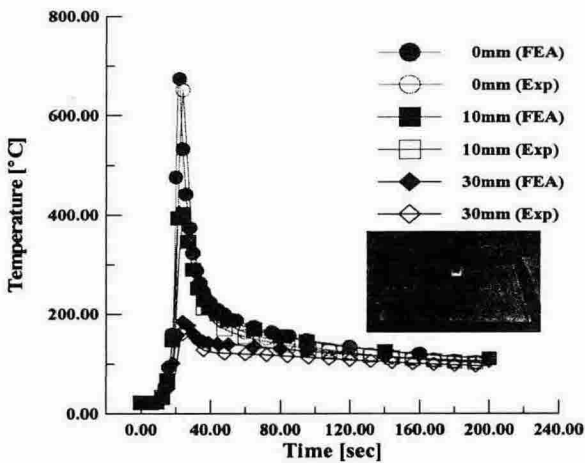


Fig. 1 Comparison results of temperature at the heated plate using experiment and FEA

2.2 변형 특성

개발된 화염 입열 모델을 이용하여 단위 가열선에 대한 변형 예측 기법을 개발하고자 유한 요소 해석 및 실험을 이용하여 가열 조건에 따른 변형 거동 특성을 평가하였다.

Fig. 2는 주판 두께가 15mm, standoff가 20mm, 그리고, 가열 속도가 500mm/min인 경우 가스 혼합비(산소는 일정함)에 따른 횡 수축 및 각 변형 거동에 대한 유한 요소 해석 결과를 도시한 것이다. Fig. 2와 같이 가스 혼합비가 증가함에 따라 횡 수축량과 각 변형량은 감소한다. 그리고, 이러한 감소량은 횡 수축에 비하여 각 변형의 경우 더 크게 발생하였다. 이는 연소 가스의 유량이 증가하더라도 적정량의 산소가 공급되지 않으면, 불완전 연소에 의하여 피가열재로 유입되는 열량이 감소하기 때문이다. 이는 동일 가열 조건하에서 성형 효과를 극대화하기 위해서는 연소 가스의 혼합비에 대한 적정화가 반드시

필요함을 의미한다.

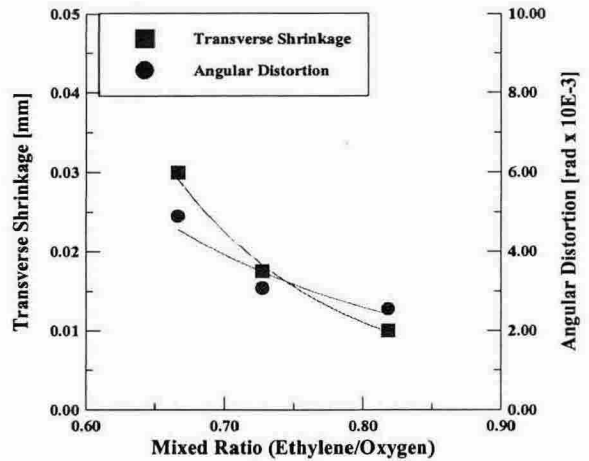


Fig. 2 Changes of shrinkage and angular distortion with mixed ratio

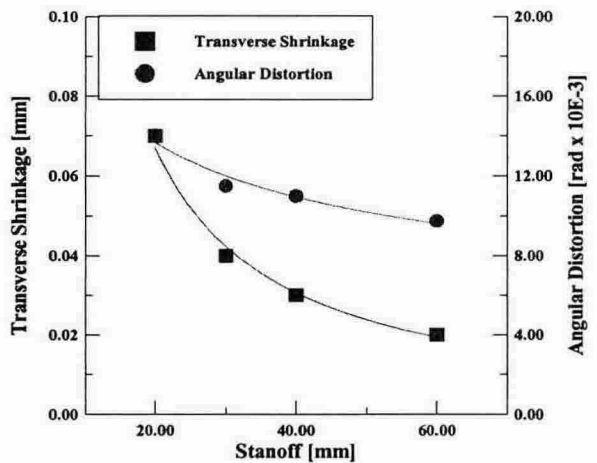


Fig. 3 Changes of shrinkage and angular distortion with standoff

Fig. 3은 주판 두께가 15mm이고, 가스 혼합비와 가열 속도가 각각 0.67(16 : 24L/min)과 150mm/min인 경우 standoff에 따른 횡 수축 및 각 변형 거동에 대한 유한 요소 해석 결과를 도시한 것이다. Figure 3과 같이 standoff가 증가함에 따라 횡 수축 및 각 변형량은 모두 감소하며, 특히 횡 수축의 감소율이 더 크다. 이는 standoff가 증가함에 따라 피가열재로 유입되는 열량의 차이는 작지만 화염의 집속도가 감소함으로써 가열 중앙 이면부의 온도가 낮아 수축에 대한 저항성이 상대적으로 증가하기 때문이다.

이상의 변형 특성 결과로부터 산소와 에틸렌의 연소 가스의 유량이 각각 24와 16L/min이고, 3000번 tip을 이용하여 선상 가열을 수행하는 경

우 최적의 standoff는 20mm로 정의하였다.

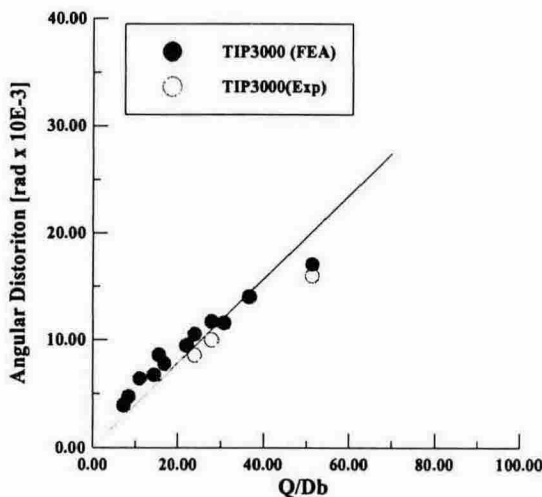
3. 변형 예측 기법

제안된 가열 조건을 이용하여 유한 요소 해석을 이용하여 변형 예측 기법을 개발하고, 이를 실험 결과와 비교하여 타당성을 검증하였다. 이때, 횡 수축 및 각 변형의 주인자는 지난 차원 해석(dimensional analysis)을 통하여 입열량과 주판의 두께에 의한 면내 및 굽힘 강성의 함수로 정의하였다[1].

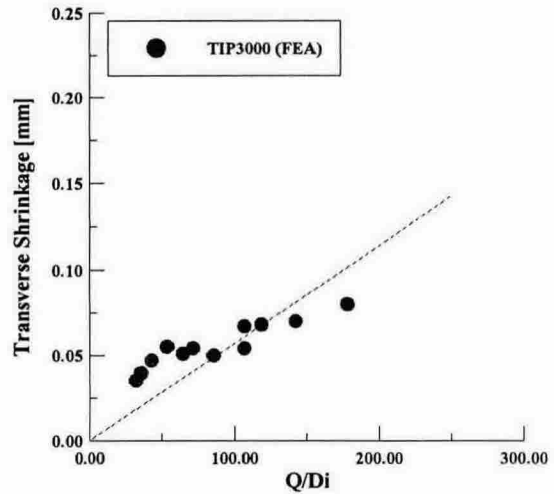
Fig. 4는 화염 즉, 산소(24L/min)와 에틸렌(16L/min)의 연소시 발생하는 열 에너지(Q)와 주판의 두께에 의한 굽힘 강성(Db)의 비에 따른 각 변형과 횡 수축량의 거동에 대한 유한 요소 해석 및 실험 결과를 도시한 것이다. Fig. 4와 같이 각 변형과 횡 수축은 Q/Db 그리고, Q/Di가 증가함에 따라 거의 선형적으로 비례하여 증가하며, 유한 요소 해석 및 실험 결과가 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

이상의 해석 결과로부터 본 고에서는 Table 5에 나타낸 최적의 가열 조건에 의한 각 변형 및 횡 수축의 예측식을 식(2)와 같이 입열량과 굽힘 그리고, 면내 강성의 선형 함수로 정의할 수 있다.

$$\phi = A_1 f\left(\frac{Q}{Db}\right), \quad \delta = A_2 f\left(\frac{Q}{Di}\right) \quad (2)$$



(a) Angular Distortion
(Fig. 4 Continue)



(b) Transverse shrinkage

Fig. 4 Variations of transverse shrinkage and angular distortion with Q/Db and Q/Di

4. 결 론

화염에 의한 선상 가열을 이용한 twist 곡 주판의 성형시 연소 가스의 혼합비 그리고, stand-off에 따른 변형 거동 특성을 평가하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 화염을 이용한 선상 가열시 성형 곡의 정도는 연소 가스의 혼합비와 standoff에 의존성이 매우 크므로, 성형 곡의 재현성을 확보하기 위해서는 이를 일정하게 제어해야 한다.
- 2) 제안된 가열 조건을 이용하여 선상 가열시 각 변형과 횡 수축 유발되는 입열량과 피가열재의 굽힘 및 면내 강성의 함수로 정의하였다.

참고문헌

1. 신상범, 이희태, 윤중근 : 곡가공을 위한 선상 가열 정식화, 2002년 추계학술대회
2. Tsuji et al : A Study on the Line Heating process for plate bending of ship steels, Journal of TWJSNA, Vol. 76, pp149-160