

고주파 유도가열을 이용한 선상가열 시 각 변형 예측에 관한 연구

박동환^{*,†} · 진형국^{**} · 박성식^{**} · 신상범^{**}^{*}울산대학교 자동차선박대학원^{**}현대중공업 생산기술연구소**A study on the prediction of the angular distortion in line heating with high frequency induction heating**Dong-Hwan Park^{*,†}, Hyung-Kook Jin^{**}, Soung-Sig Park^{**} and Sang-Beom Shin^{**}^{*}Institute of e-Vehicle Technology, University of Ulsan, Ulsan 682-192, Korea^{**}Industrial Technology Institute, Hyundai Heavy Industries, Ulsan 682-060, Korea[†]Corresponding author : dhpark@ulsan.ac.kr

(Received January 9, 2015 ; Accepted February 27, 2015)

Abstract

The purpose of this study is to establish the predictive method of the angular distortion caused by the line heating process with high frequency induction heating. In order to do it, the heat input model for the high frequency induction heating system was established through comparing the temperature evaluation results obtained by both FEA and experiment. The critical heating conditions to prevent the degradation of the work piece with various thicknesses were identified by FEA and microstructure test results. Under the critical heating conditions, the extensive line heating tests were performed. According to the test results, it was found that the angular distortion behavior of the heated plates could be defined as the function of heat intensity and the rigidity of heated plate. In addition, it was clarified that the angular distortion strongly depended on the size of test specimen such as the length and the width of the heated plate. Based on these results, the predictive equation for the angular distortion was established with the function of heat intensity, bending rigidity and size of heated plate.

Key Words : Line heating, High frequency induction heating, Angular distortion, Size effect

1. 서 론

선체의 선수미는 Fig. 1과 같이 다양한 곡률반경 (curvature radius)을 갖는 곡 블록들로 구성되어 있으며, 이러한 곡 블록을 구성하기 위해 필요한 곡 주판 (curved plate)은 크게 2단계의 성형공정을 거쳐 제작된다. 우선 프레스를 이용한 냉간가공 (cold bending)으로 초기 곡을 형성한 후 가스 화염을 열원으로 한 선상(line heating) 및 국부(local heating) 가열 작업을 거쳐 최종 곡의 형상을 갖추게 된다¹⁾. 기존의 가스 화염을 열원으로 한 가열작업은 입열이 낮은 단점이 있으며 주로 작업자에 의해 수동으로 작업이 이루어지기

때문에 피 가열재에 투입되는 열속의 불균일성으로 인한 변형량의 차이 발생, 작업자 숙련도에 따른 품질 및 생산성 차이 등에 의하여 곡 성형 정도의 균일성과 관련된 잠재적인 문제를 야기한다. 예를 들면, 가스 화염을 이용한 가열작업은 Fig. 2와 같이 가스 혼합비 또는 피 가열재와 팁(tip) 간의 거리(standoff) 등이 변화할 때 최종적인 변형량의 편차가 크게 발생하므로 열속의 균일성을 확보할 수 있는 대체 열원의 필요성은 항상 대두되어 왔다²⁾. 이에 최근에는 입열이 크고 자동화 시스템 구성을 통해 피 가열재에 균일한 열속을 인가하는 것이 용이한 고주파 유도가열이 대체열원으로 주목받고 있다.

본 논문에서는 고주파 유도가열을 이용한 선상가열



Fig. 1 Bow structure of commercial ship

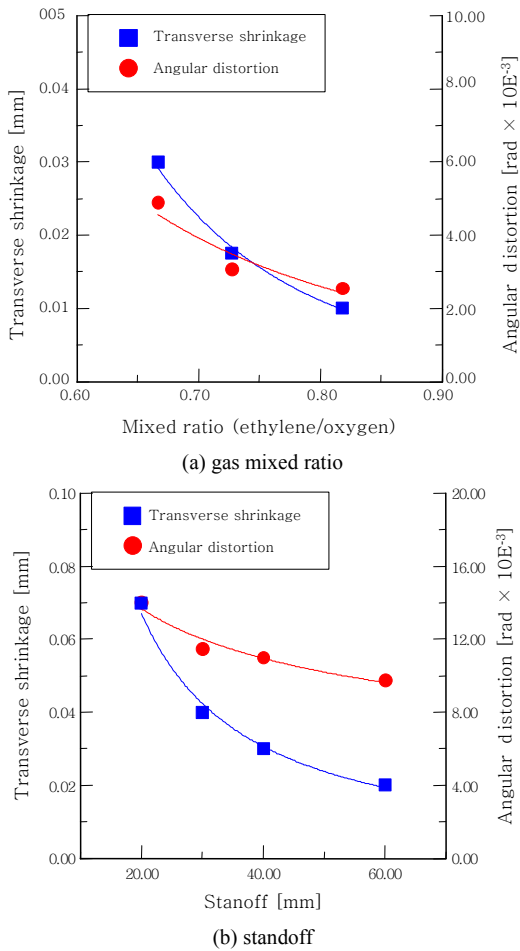


Fig. 2 Effect of gas mixed ratio and standoff on angular distortion and shrinkage

시 발생하는 각 변형 거동 특성 분석을 통해 피 가열재 크기를 고려한 각 변형 예측 기법을 제안하고자 하였다. 이를 위해 유한요소해석을 이용한 전자기장 해석, 열전달 해석 결과와 실험을 통해 얻은 피 가열재의 온도이력 결과를 비교하여 본 연구에 사용한 유도가열 시스템의 효율을 결정하고 고주파 유도가열용 입열 모델의 유효성을 검증하였다. 우선 선상가열 실험 속도를 결정하기 위하여 입열 모델을 이용한 열전달 해석을 통

해 피 가열재 용융 및 물성 저하를 방지할 수 있는 선상가열 한계 속도를 결정하였으며, 결정된 속도로 실무재를 가열한 후 기계시험 및 미세조직 관찰을 통해 타당성을 확인하였다. 그리고 결정된 선상가열 한계 속도 범위 내에서 속도, 피 가열재 두께 및 크기에 의한 영향을 평가하고, 이 결과를 토대로 변형예측 기법을 제안하였다.

2. 해석 및 실험 방법

본 연구에 사용한 고주파 유도가열 시스템은 Fig. 3과 같이 구성되어 있으며, 4줄의 장형 코일을 사용하였다. 가열 시 부재에 발생하는 온도이력 계측을 위하여 추가로 온도기록계를 설치하였다.

고주파 유도가열은 코일에 고주파 전류가 흐르게 되면 금속 주위의 표면에 와전류(eddy current)가 발생하고 이로 인해 발생하는 금속의 저항열을 이용하여 금속을 가열하게 된다. 즉, 전자기 유도효과를 이용하여 금속을 가열하는 원리이므로, 고주파 유도가열을 이용한 열전달 해석을 위하여 전자기장 해석을 수행하고 가열 조건에 해당하는 전자기장 분포를 평가하였다. 전자기장 및 열전달 해석을 위하여 사용된 요소망은 Fig. 4의 (a)와 (b) 같이 4절점 요소를 이용하여 구성하였다.

고주파 유도가열 입열의 효율을 평가하기 위하여 Table 2와 같은 조건으로 두께 20mm의 AH36 강재를 가열하였으며 Fig. 5와 같이 피 가열재 이면에서 코일 중심으로부터 5mm 위치(A), 17.5mm 위치(B) 및 45mm 위치(C)에 K 타입 열전대를 부착하여 열이력을 계측하였다. 계측한 열이력과 유한요소해석을 통한 열전달 해석 결과를 비교하여 본 연구에 사용한 고주파 유도가열 시스템의 효율을 결정하였다. 유한요소해석 시 가열 및 냉각 과정 중 주변의 대기로 발생하는 열손실은 Fig. 4의 (b)와 같이 피 가열재 모든 영역에서 상온(20°C)의 공기와 자연 대류에 의하여 발생하는 것으로 가정하였다. 또한 피 가열재 용융 및 물성 저하

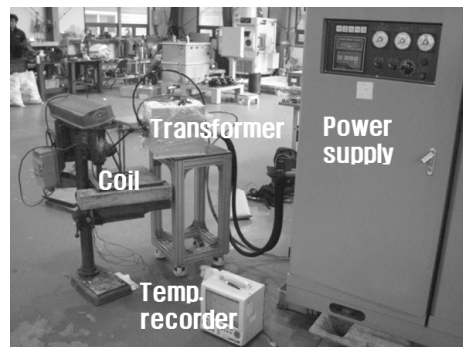


Fig. 3 High frequency induction heating system

Table 1 Chemical compositions of AH36 steel plate (unit : wt%)

C	Si	Mn	P	S
Max. 0.18	0.5	0.9 ~ 1.6	0.035	0.035

Table 2 Heating conditions for calculating the efficiency of induction heating system

Power [kW]	Frequency [kHz]	Gap [mm]	Heating time [sec.]
100	18	5	10

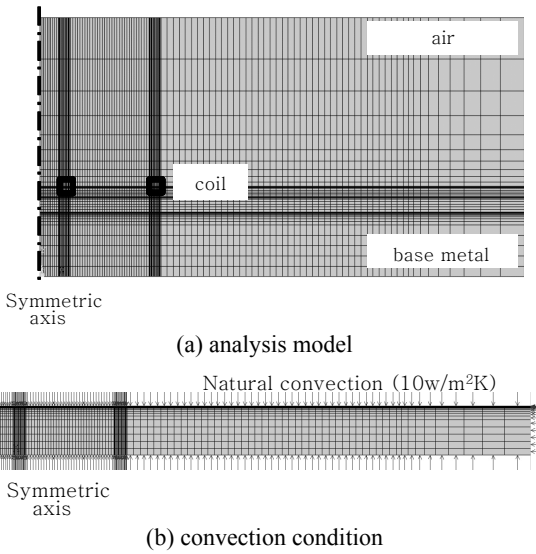


Fig. 4 Schematic configurations of FE analysis model

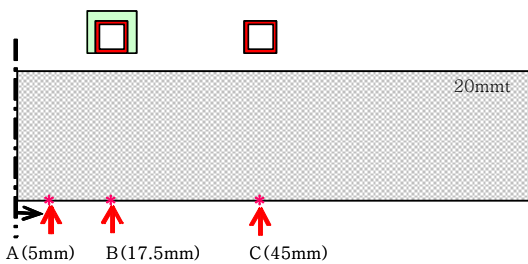


Fig. 5 Recording locations of temperature

방지를 위한 선상가열 한계 속도를 결정하기 위해 입열 모델을 이용하여 가열시간을 변수로 한 열전달 해석을 수행하였다. 최소 가열속도는 열전달 해석 결과를 이용하여 피가열재 온도가 강(steel)의 용융점인 1530°C에 가장 근접한 조건으로 결정하였으며, 최대 가열속도는 열전달 해석 결과를 토대로 800°C에서 500°C까지의 냉각속도를 계산하고 이를 Fig. 6과 같이 선급용 강재의 CCT 선도를 이용하여 마르텐사이트 생성 방지 및

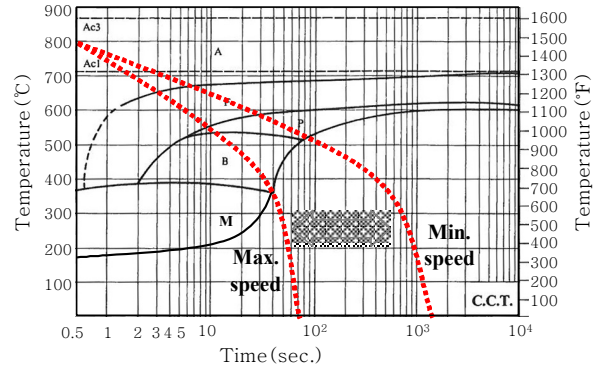


Fig. 6 CCT diagram with range of heating speed

Table 3 Experimental conditions

Power[kW] & Gap[mm]	100 & 5	
Thickness [mm]	15, 18, 22	
Heating Speed [mm/min]	300, 450, 600	
Dimension of heated plate [mm]	Width	1,000 ~ 2,500
	Length	1,000 ~ 2,500

선급 (classification society)에서 규정하고 있는 최대 경도(Hv10)가 350을 초과하지 않는 조건으로 선정하였다.⁴⁾ 그리고 한계 속도의 타당성을 검토하기 위해 두께 15, 18, 22mm의 AH36 강재에 계산된 한계 속도로 가열을 실시한 후 가열영역에 대한 기계시험 및 미세조직 분석을 수행하였다.

고주파 유도가열을 이용한 선상가열 시 각변형 거동 특성을 평가하기 위해 Table 3과 같이 선상가열 한계 속도 범위 내의 가열속도 내에서 선정한 속도, 피 가열재 두께 및 크기를 변수로 실험을 수행하였다. 시험 시 사용된 고주파 유도가열 출력은 100kW이며, 피 가열재와 코일의 간격은 5mm로 일정하게 제어되도록 높이 제어 센서를 이용하여 시험 장치를 구성하였다.

3. 유한요소해석 및 실험 결과

3.1 입열 모델과 효율

고주파 유도가열을 위한 입열 모델의 적합성을 평가하기 위해 전자기장 및 2차원 열전달 해석을 수행하였다. Fig. 7은 입열 효율이 25%인 경우, 전자기장 해석을 통해 얻은 줄열(joule heat)을 이용한 열전달 해석 결과와 온도계측 위치를 도시한 것이다. Fig. 8과 같이 입열 효율이 25%인 경우 A, B, C 위치에서의 열전달 해석 결과와 온도기록계를 이용해 측정된 각 위

치에서 최대 온도의 열이력이 잘 일치하고 있다. 따라서 본 논문에서 사용한 입열 모델은 고주파 유도가열을 이용한 선상가열 한계 속도 평가를 위한 입열 모델로 적합함을 알 수 있다.

3.2 선상가열 한계 속도

고주파 유도가열을 이용한 선상가열 시 피가열재 용융 및 물성 저하를 방지하기 위한 한계 가열속도 즉, 최소, 최대 가열속도를 결정하기 위하여 두께가 15mm, 18mm, 22mm인 강재에 가열시간을 변수로 열전달 해석을 수행하였다. 열전달 해석을 통해 평가된 최소, 최대 가열속도를 Table 4에 나타내었다.

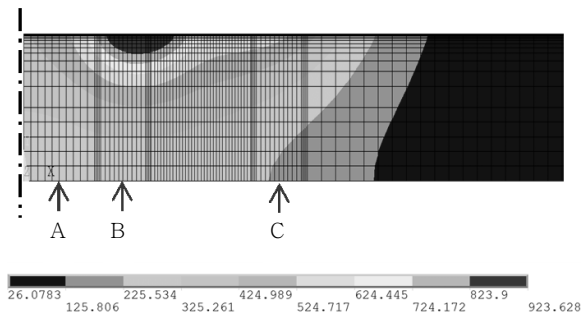


Fig. 7 Example of temperature distribution

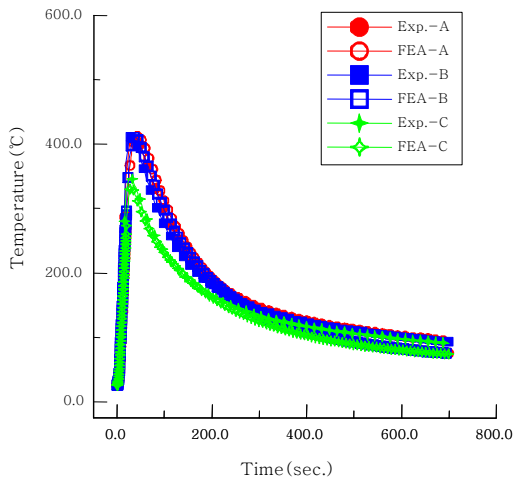


Fig. 8 Temperature histories at bottom side of heated plate

Table 4 Limited heating speed

Thickness [mm]	Min. speed [mm/min]	Max. speed [mm/min]
15	140	1,580
18	130	1,600
22	120	1,620

Table 4의 가열속도로 각 두께의 시험편을 가열한 후 가열부에 대해 충격(0°C) 및 경도시험(HV10)을 수행하였고 미세조직을 관찰하였다. 경도는 Fig. 9와 같이 가열부 표면에서 두께방향 2mm 아래 위치의 중앙에서부터 모재 방향으로 5mm 간격으로 측정하였으며, 위치에 따른 경도분포를 Fig. 11에 도시하였다.

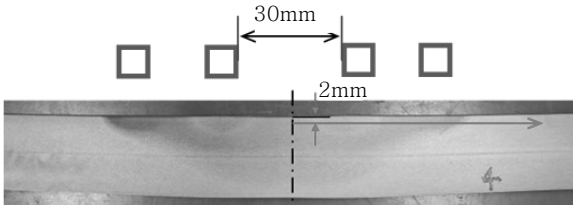
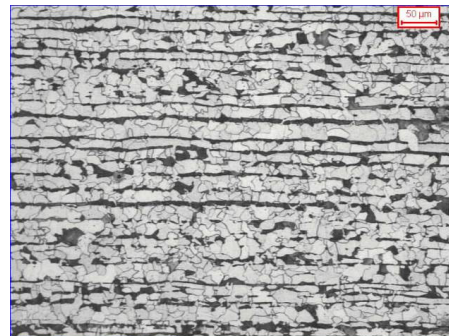
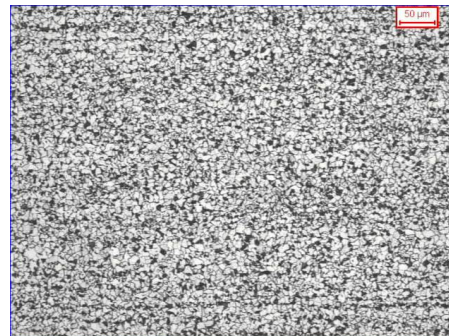


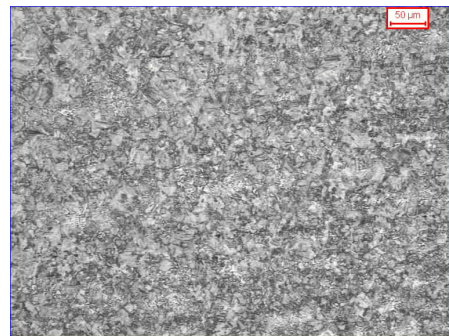
Fig. 9 Hardness measurement location



(a) base metal

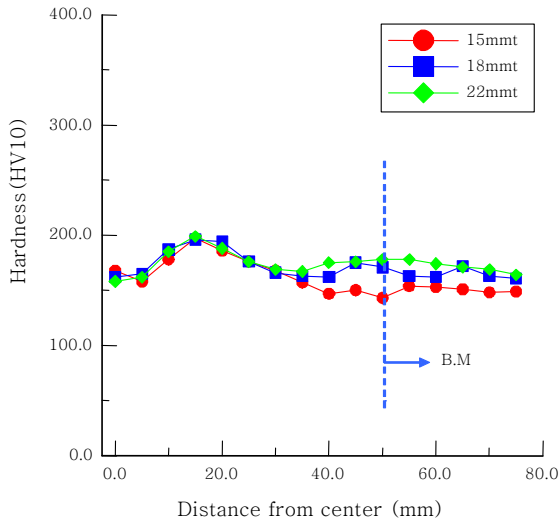


(b) minimum speed

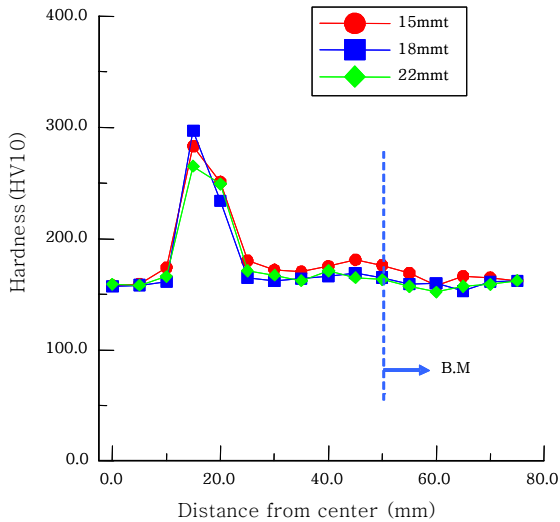


(c) maximum speed

Fig. 10 Microstructures with limited heating speed



(a) minimum speed



(b) maximum speed

Fig. 11 Hardness distribution with limited heating speed

과 Table 5와 같이 모재보다 큰 인성을 갖는 것으로 확인되었으며, 최대 경도치(Hv10)는 약 200으로 선급 규정인 350 이하를 잘 만족하였다. 반면 최대 가열속도로 가열한 시험편의 경우 빠른 냉각속도로 인하여 인성이 저하되었고 선급 규정을 만족하기는 하나 최대 경도치가 300으로 비교적 높게 확인되었다. 미세조직 관찰 결과 최소 가열 속도로 가열한 시험편의 가열부는 노멀라이징 효과로 인하여 전체적으로 조직이 미세화되었으며 이로 인해 증가한 인성은 충격시험 결과에서도 확인할 수 있다. 반면 최대 가열속도로 가열한 시험편의 가열부는 베이나이트가 생성되었으며 이로 인해 경도가 증가하고 인성이 다소 저하된 것을 확인할 수 있다. 이상의 실험 결과로부터 피 가열재 용융 및 물성 저하 방지를 위해 열전달 해석 결과를 이용하여 계산한 선상가열 한계 속도의 범위가 타당함을 확인할 수 있다.

3.3 피 가열재 크기를 고려한 각 변형 예측 기법

고주파 유도가열을 이용한 선상가열 시 각 변형 거동 특성을 평가하기 위하여 Table 4에 나타난 선상가열 최소, 최대 가열 속도 범위 내에서 Table 3과 같이 두께, 속도 그리고 피 가열재의 크기를 변수로 하여 가열 실험을 수행하였다. 실험을 통해 측정된 각 변형을 식 (1)과 같이 입열량과 피 가열재 굽힘강성의 비에 대한 함수로 정의하였다.

$$\phi = f\left(\frac{Q}{D_b}\right) \quad (1)$$

여기서, Q는 입열량(heat intensity), D_b 는 피 가열재의 굽힘강성 (bending stiffness)을 의미한다.^{1,2)} 실험을 통해 얻은 조건 별 각 변형량을 식 (1)에 따라 입열량과 굽힘강성의 비로 각 변형을 정의하는 경우, 근사식을 통해 예측한 각 변형과 실험을 통해 측정된 각 변형 사이의 비례상도 기울기는 0.96, 표준편차는 0.0041 radian으로 Fig. 12와 같이 산포가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 즉, 고주파 유도가열을 이용한 선상가열 시 발생하는 각 변형은 입열량과 두께를 고려한 피 가열재의 굽힘강성 만으로 정의하는 경우 큰 오차가 발생함을 의미한다.

Fig. 13은 피 가열재의 두께가 18mm인 경우, 피 가열재의 폭(W)과 길이(L)에 따른 각 변형의 비를 도시한 것이다. Fig. 13과 같이 각 변형량은 피 가열재의 크기에 따라 변형량에 차이를 보이고 있으나, 피 가열재의 길이가 일정 수준 이상으로 증가하면 일정한 값으로 수렴함을 알 수 있다. 이에 본 연구에서는 피 가열재

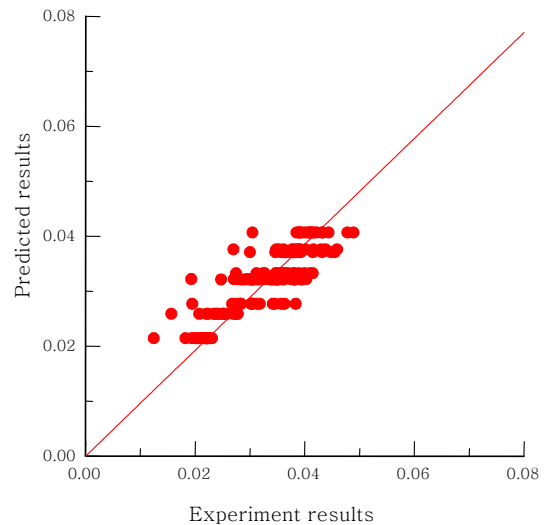


Fig. 12 Relationship between predicted and experiment results

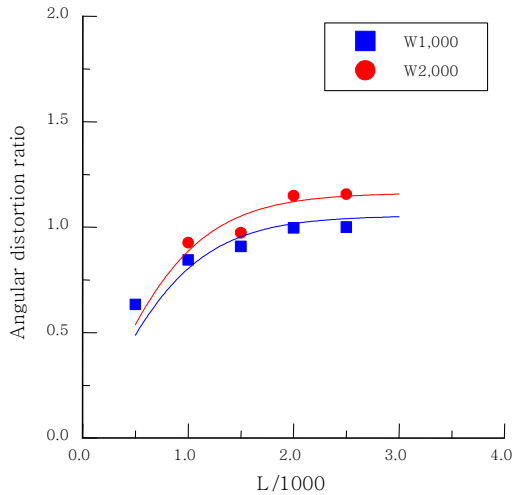


Fig. 13 Angular distortion ratio with the length and width of heated plate

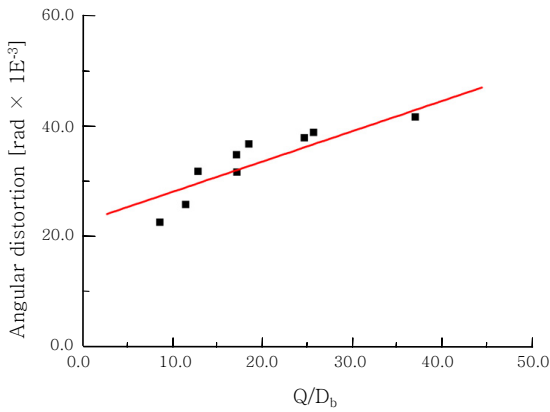


Fig. 14 Distribution of angular distortion in reference specimen

크기와 무관하게 일정한 각 변형량을 갖는 표준 시험편을 선정하였으며, 표준 시험편의 크기는 2,000mm(W) × 2,000mm(L)이었다. 표준 시험편의 각 변형 분포를 식 (1)에 따라 표현한 결과를 Fig. 14에 나타내었다.

표준 시험편을 이용해 정의한 식 (1)의 함수에 피 가열재의 폭과 길이의 영향을 고려하기 위해 참조 길이 (L_r)와 참조 폭(W_r) 개념을 이용하였다. 참조 길이와 참조 폭은 다양한 입열량과 굽힘강성의 비에 따라 각 변형량이 일정하게 수렴하는 길이와 폭을 의미하며, 입열량과 굽힘강성의 비에 대한 관계를 Fig. 15와 Fig. 16에 도시하였다.

Fig. 15와 Fig. 16에 도시한 참조 길이와 참조 폭은 입열량과 굽힘강성의 비에 대한 함수로 식 (2)와 식 (3) 같이 정의할 수 있다.

$$f(L_r) = f\left(\frac{Q}{D_b}\right) \tag{2}$$

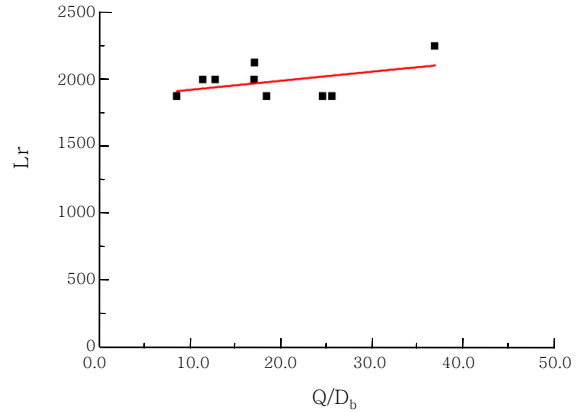


Fig. 15 Relationship between reference length and a ratio of heat intensity and bending stiffness

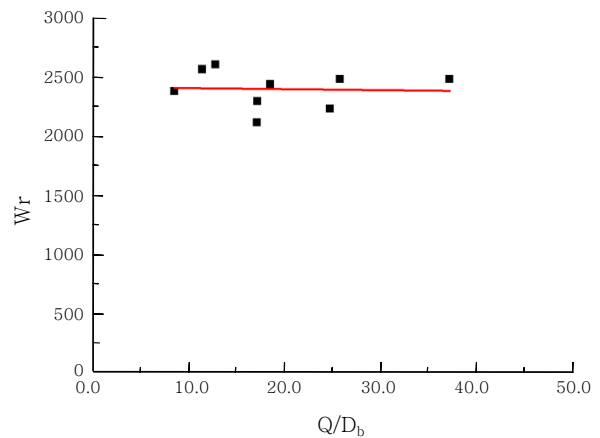


Fig. 16 Relationship between reference width and a ratio of heat intensity and bending stiffness

$$f(W_r) = f\left(\frac{Q}{D_b}\right) \tag{3}$$

본 연구에서는 식 (2)와 식 (3)에 나타낸 참조 길이와 참조 폭을 식 (1)에 대한 보정계수로 반영하여 피 가열재의 크기를 고려한 각 변형 예측식을 식 (4)와 같이 최종 제안하였다.⁵⁾

$$\phi = f\left(\frac{Q}{D_b}\right)g(L)h(W) \tag{4}$$

여기서, $g(L)$ 과 $h(W)$ 는 각각 $f(L_r)$ 과 $f(W_r)$ 의 함수이며, Fig. 17은 식 (4)의 수정된 각 변형 예측식을 이용하여 예측한 결과와 Fig. 12의 실험 결과를 비교하여 도시한 것이다. Fig. 17과 같이 예측 및 실험 결과 간의 비례상도 기울기는 0.99, 표준편차는 0.0022 radian으로, 피 가열재의 크기를 고려한 예측 결과는 실험 결과를 매우 잘 예측하고 있음을 확인할 수 있다.

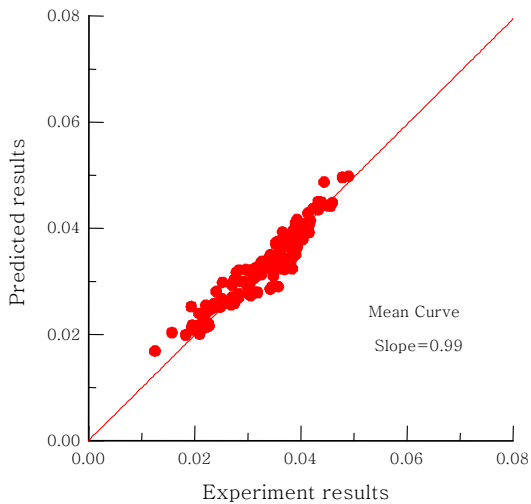


Fig. 17 Relationship between predicted and experiment results

4. 결 론

본 연구에서는 고주파 유도가열을 이용한 선상 가열 시 발생하는 각 변형 거동 분석을 통해 피 가열재의 크기를 고려한 각 변형 예측 기법을 제안하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 유한요소해석을 이용한 전자기장과 열전달 해석을 통한 온도 분포 해석 결과와 실험 결과와의 비교를 통하여 본 연구에서 사용한 고주파 유도가열 시스템의 효율을 정의하였다.

2) 고주파 유도가열을 이용한 선상가열 시 피 가열재의 용융 및 물성 저하 방지를 위한 한계 가열속도를 결정하였으며, 기계 시험 및 미세조직 분석을 통해 타당성을 검증하였다.

3) 입열량, 굽힘강성 및 피 가열재의 크기를 고려하여 각 변형 예측기법을 제안하였으며, 예측 및 실험 결과간의 기울기는 0.99로 예측 결과가 실험 결과와 매우 잘 일치하였다.

References

1. H. T. Lee, S. B. Shin : A Study on the angular distortion and shrinkage by line heating, *Proceedings of the 2010 Annual Meeting of KWJS*, 162-163 (in Korean)
2. S. B. Shin, D.J. Lee, K. K. Kim, J. G. Yoon : Effect of line heating variables for forming the curved plate on the behavior of distortion, *Proceedings of the 2005 Annual Meeting of KWJS*, 291-293 (in Korean)
3. D. J. Lee, S. B. Shin : A Study on inductive coil design to control longitudinal distortion of built-up T bar, *Proceedings of the 2001 Annual Meeting of KWJS*, 260-262 (in Korean)
4. Vander Voort, George F.: Atlas of time-temperature diagrams for iron and steels, (1991), 309
5. S. B. Shin, H. K. Jin, D.J. Lee : A study on effect of the heated plate size on the distortion caused by line heating, *Proceedings of the 2010 Annual Meeting of KWJS*, 148 (in Korean)