고주파 유도가열된 조선용 강판의 기계적 특성 연구

현충민^{*,†} · 이명수^{*} · 조시훈^{*} · 장태원^{*}^{*}삼성중공업 산업기술연구소 용접성능연구

A Study on the Mechanical Properties of Heated Plates by Induction Heating System

Chung Min Hyun^{*,†}, Myung Su Yi^{*}, Si Hoon Cho^{*} and Tae Won Jang^{*}^{*}Welding Research Part, Samsung Heavy Industries CO., LTD., Geoje 656-710, Korea[†]Corresponding author : daedo@postech.ac.kr

(Received July 30, 2013 ; Revised August 20, 2013 ; Accepted February 4, 2014)

Abstract

Due to of high intensity, lower noise and easy controllability of the heat, induction heating system became well known. Induction heating method has been suggested as substitute for the gas heat source and adopted in the automation of curved hull forming system.

In this study, an investigation was accomplished to find the effects on the change of material properties when the induction heating was applied on the mild steel plate. Plates were heated using weaving method to get sufficiently heat affected zone and then cooled with water or in the air. The mechanical properties of the heated plate were evaluated. As results, the tensile test, impact test and microstructures satisfied the class rule.

Key Words : Induction heating, Curved plate, Mechanical property, Gas flame heating

1. 서 론

고주파 유도가열은 열원의 출력 및 입열량 조절이 Gas가열에 비하여 용이하며, 소음이 적게 발생하여 작업환경도 비교적 우수하다고 알려져 있다. 이러한 장점들을 이용하여 선박의 곡면 외판을 가공하는 곡가공 자동화 시스템의 가열 열원으로서 고주파 유도가열 방법이 기존 Gas 가열방법을 대체하여 제안되고 있으며, 실제로 자동화 시스템에 적용되고 있다¹⁻²⁾. 그러나 기존 가스 가열에 의해서 발생하는 강재의 물리특성 변화, 변형 등에 관한 연구는 많이 진행되었으며, 특히 강재 물리특성 변화에 대해서는 최고 도달온도 및 냉각 시작 온도, 냉각 조건 등에 따라 강재의 물리적 특성에 영향을 준다고 알려져 있다³⁻⁴⁾. 하지만 고주파 유도가열에 의한 물리특성변화에 관한 연구는 미흡한 편에 속한다.

고주파 유도가열은 고주파 코일에 고주파 전류가 흐르게 되면 피가열체인 도체 주위의 표면에 와전류

(eddy current)가 발생하고, 이로 인해 열이 발생하는 현상을 말한다⁵⁾. 이러한 도체 내부에서의 발열 특징은 Gas 가열에서와 같이 표면으로부터의 열전달을 통해 내부로 열이 전도되었을 때의 재질 변화와 다른 기계적 성질변화를 보일 가능성이 대두되었다. 따라서 본 연구에서는 고주파 유도가열 열원을 사용하여 가열된 강재의 물리 특성 변화에 대한 실험 및 분석을 수행하였다. 실험은 선박용 강재(Mild A grade)에 대해 실시하였으며, 고주파 유도가열 열원의 출력과 속도등을 고정하여, 강재에 동일한 입열이 가해지는 조건에서 냉각 조건을 달리하여 가열 시험편을 제작하였다. 제작된 시험편은 인장시험, 충격시험, 경도시험, 광학 현미경 조직검사를 통해 물리 특성 변화를 확인하였다.

2. 고주파 유도가열 실험

2.1 실험개요

유도가열 장치의 출력과 가열속도 등의 입열조건은

동일하게 설정하였으며, 강재의 두께 및 냉각조건만을 달리한 시험편을 제작하고, 물리 시험을 진행하였다. 이때 입열조건은 일정 온도 이상에서는 가열효율이 급격히 감소하는 고주파 유도가열의 특징을 고려하였으며²⁾, 특히 선상가열 보다는 삼각가열시의 입열량에 초점을 맞추어 결정하였다.

2.2 강종 및 시험편 치수

실험에 사용된 강재는 선체 외판 제작시 사용 비율이 높은 Mild steel A grade을 사용하였다. 강재의 인장, 항복강도 및 화학조성은 Table 1, 2와 같다. 가열 시험편의 크기 및 가열영역은 Fig. 1에 나타내었다. 이때 강재의 두께는 25mm, 30mm의 2개 종류이다.

2.3 강종 및 시험편 치수

입열량이 선상가열보다 많은 삼각가열의 경우를 가정하여 유도가열 코일부의 회전을 통한 가열을 실시하였다. 강재의 가열영역에 골고루 가열이 되도록 유도가열 코일의 가열경로에 해당하는 특정 패턴을 생성하여 실험하였는데, 고주파 가열코일의 이동 경로는 Fig. 2와 같이 가열영역을 50mm×50mm로 나누었을 때 각 모서리 부분이 고주파 코일의 회전 중심이 되도록 배치하였다. 가열속도는 15mm/s가 되도록 선속도와 각속도

Table 1 Mechanical properties of mild Steel

Y.P.(MPa)	T.S.(MPa)	Elong.(%)
259 ~ 270	432 ~ 450	53 ~ 55

Table 2 Chemical composition of mild steel

Element	C	Si	Mn	P	S
wt%	0.16 ~ 0.18	0.17 ~ 0.2	0.53	0.001	0.005

Fig. 1 Test plate size and heating region

Fig. 2 Photograph of induction heating test

를 조정하였으며 각 회전 중심에서 2회 회전가열을 실시하였고, 출력은 40KW로 하였다. 고주파 유도가열을 할때 회전가열을 실시한 사유는 고주파 열원의 특성과 관련이 있다. 유도전류의 근원인 자기장은 자성체에서만 발생하게 되는데 탄소강의 경우 770℃ 근방의 A₂ 변태점을 넘어서게 되면 자성을 잃어버리게 된다. 이 온도를 큐리 온도(Curie temperature)라고 한다. 따라서 강재의 온도가 큐리 온도 이상으로 가열되었을 경우에는 고주파 유도가열의 효율이 급격히 감소하게 되어, 발열이 미미하게 발생된다. 이러한 고주파 유도가열의 단점을 극복하기 위해 회전가열을 실시하여 가열 코일이 큐리 온도 이상인 지점에서 오래 머물지 않도록 하였다.

냉각방법은 3가지 경우에 대해서 고려해 보았다. 우선, 곡가공 현장에서 주로 사용하는 가열과 동시에 수냉하는 방법과, 가열 후 수냉, 그리고 공냉으로 경우를 나누어 실험을 실시하였다.

가열과 동시에 냉각하는 방법에서는 고주파 코일 40~50mm 뒤에서 일정 유속의 수냉을 실시하였다.

2.4 물리특성 평가항목

모재 및 가열부 시편에 대한 물리적 특성 평가를 실시했다. 가열 시편에서의 시험편 가공 위치와 형상은 Fig. 3과 같다. 물리시험 결과는 선급 Rule⁶⁾에 기초하여 분석하고 평가하였다.

*인장강도 및 항복강도 테스트 : 판상 시편

*충격테스트(Charpy V-notch impact test) : Sub-size(10×5mm) 시편

Fig. 3 Sampling of test specimens in plates

*경도 테스트 : 표면에서부터 0.5mm간격(표면에서 8mm까지), 이후 1mm간격으로 측정

*광학 현미경 조직 분석 : 강재 표면에서부터 조직 변화가 생기는 4개 지점 촬영

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 인장시험 결과

Fig. 4는 모재 두께와 냉각조건에 따른 인장시험 결과이다. 인장강도는 모재에 비하여 공냉, 공냉 후 수냉, 수냉 순으로 값이 증가하는 경향을 보이고 있다. 한편, 항복강도의 경우 30mm 두께에서는 다소 감소되는 것을 확인할 수 있지만 그 양이 매우 작다. 연신율의 경우 모재에 비하여 다소 감소하는 경향을 보이고 있으나, 우려할 만한 수준의 급격한 연신을 저하는 발생하지 않고 있다. 따라서 시험결과를 선급 Rule인 항복강도 235이상, 인장강도 400~520, 연신율 22% 이상을 모두 만족하고 있다.

3.2 충격시험 결과

충격시험은 Charpy V-notch impact Test를 상온에서 실시하였다. 충격시험의 경우 압연 방향에 따라 다른 값이 요구되고 있어, 압연 방향을 고려한 중,횡 방향으로 시험편을 제작하여 실시하였다. 단, 강재 내부의 열영향부 크기가 표준 시험편에서 요구하는 규격

Fig. 4 Results of tensile test

을 충족시키지 못할 것으로 예상되어 Sub-size 규격으로 시험편을 제작하였다. 이것은 Fig. 3에 도시하였다. 이러한 경우 선급 Rule에서는 sub-size 시험편의 충격치는 표준시험편으로 실시한 충격치의 2/3이상으로 규정하고 있다. Table. 2와 같이 충격시험 결과는 모든 조건에서 모재에 비해 충격치가 향상되었음을 보여주고 있다. 충격치의 향상은 가열에 의한 열영향부에서 인성저하가 발생하지 않았음을 의미한다. 기존 Gas 열원을 이용한 실험을 수행하였던 여러 문헌에서는 수냉을 실시할 경우에는 인성저하가 발생한다고 알려져 있는데, 고주파 유도가열을 수행한 Mild Steel 시험편에서는 인성저하가 확인되지 않고 있어, Gas 열원에 의한 가열특성과 유도가열 열원에 의한 발열 및 가열특성의 차이가 이러한 기계적 성질에 영향을 준 것으로 판단된다.

Table 3 Impact Test Results (Absorbed energy(J))

Thickness	Cooling Method	Direction of rolling	Specimen 1	Specimen 2	Specimen3	Avg.	Spec Req.(10×5)
25mm	Base Metal	Longi.	75.1	67.8	83.4	75.4	Sub Size Longi. :18J Trans. :13J
		Trans.	53.6	52.5	51.4	52.5	
	Air	Longi.	76.8	79.9	82.1	79.6	
		Trans.	57.7	55	57.4	56.7	
	Air+Water	Longi.	77.2	91.3	95.7	88.1	
		Trans.	55.4	56.2	54.7	55.4	
	Water	Longi.	79	78.1	89.5	82.2	
		Trans.	56.2	56.6	52.4	55.1	
30mm	Base Metal	Longi.	82.3	72.1	83.6	79.3	(*Standard Size) Longi. : 27J Trans. : 20J
		Trans.	81.9	77.7	87.2	82.3	
	Air	Longi.	92.4	104.2	98.9	98.5	
		Trans.	99.2	96.4	97.1	97.5	
	Air + 수냉	Longi.	102.2	106.1	102.3	103.5	
		Trans.	108.8	105	104.7	106.2	
	Water	Longi.	90.7	96	96.5	94.4	
		Trans.	98.2	73.2	89.7	87	

이러한 인성 증가의 원인은 여러 가지로 고려해 볼 수 있는데, 더욱 상세한 분석은 광학 현미경을 이용한 강재의 미세조직 분석에서 다루었다.

3.3 경도시험 결과

경도시험 결과는 Fig. 5(a),(b)과 같다. 대체적으로 모든 시편에 대해서 모재보다 경도가 증가된 것을 알 수 있다. 특히 수냉에 대한 경우의 경도값은 모재와 다른 시편에 비하여 큰 값을 보이고 있다. 또한 대부분의 경우 가열표면에서부터 내부로 갈수록 경도값이 감소하는 경향을 보이고 있다. 일반적으로 Normalizing된 미세조직의 경우에 경도 및 강도등이 증가한다고 알려져 있으며, Tempering에 의해서는 경도, 강도 등이 저하되는 연화현상이 발생하게 되는데, 경도 시험결과를 유추해보면 일정 깊이까지는 Normalizing 효과가 발생되어 경도 등의 기계적 성질이 향상되었고, 그 이상의

(a) In case of plate thickness = 25mm

(b) In case of plate thickness = 30mm

Fig. 5 Hardness profile of plates

Fig. 6 Position of optical microstructure test

내부로 갈 수록 Tempering 효과로 변화된 것으로 판단된다.

3.4 현미경 조직검사

현미경 금속조직 검사는 표면 근처에서 두께 방향으로 Fig. 6과 같이 0.5mm(a), 5mm(b), 10mm(c), 20mm(d) 위치의 4곳을 검사하였다. Fig. 7 ~ Fig. 9는 25mm 두께 강재에 대한 3가지 냉각조건에 따른 고주파 유도가열된 강판의 금속조직 사진이다.

Fig. 7 Microstructures of air cooling condition (Thickness=25mm)

Fig. 8 Microstructures of air and water cooling condition (Thickness=25mm)

해 실험하고 분석하였다. 사용된 강재는 조선용 Mild Steel A grade 이며, 다양한 냉각 조건(공냉, 공냉 후 수냉, 수냉)과 강재두께(25, 30mm,t)에 대해 항복 및 인장강도, 충격, 경도시험을 실시하였고, 광학 현미경 조직 검사를 실시하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 항복 강도 및 인장 강도에 있어 고주파 유도가열 한 시편은 모두 선급 Rule을 만족할 뿐만 아니라 더 높은 값을 나타내었다.

2) 충격시험 및 경도시험의 결과도 모두 Rule을 만족하였다.

3) 광학 현미경 조직 분석결과는 고주파 유도 가열된 시편 조직이 모재에 비해 미세화 되어 있음을 확인할 수 있었다. 이는 Normalizing 효과와 Tempering 효과가 발생하여 나타난 결과이며, 그 결과로 고주파 유도 가열된 강판의 기계적 성질이 향상되었음을 확인하였다.

4) 다양한 냉각조건에서의 시행된 가열시편의 금속 조직은 급속 냉각시 발생이 예상되는 취성 조직은 발견되지 않았으며, 물리 시험 결과는 이를 잘 뒷받침해 준다.

Reference

1. K.Y. Bae, Y.S. Yang, C.M. Hyun, S.H. Won and S.H. Cho : Derivation of simplified formulas to predict deformations of plate in steel forming process with induction heating. Journal of KWJS, **25-4** (2007) 396-402 (in Korean)
2. K.Y. Bae, Y.S. Yang and C.M. Hyun : Analysis of triangle heating technique using high frequency induction heating in forming process of steel plate. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, **13-4** (2012) 539-545
3. C.D. Jang, D.E. Ko, B.I. Kim, J.U. Park : An Experimental study of characteristic of plate deformation by heating process, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, **38-2** (2001) 62-70 (in Korean)
4. N.H. Chung, B.K. Choi, J.E. Park : Distortion and transformation of high tensile strength steel plate of 50kg/mm² grade due to line heating, Journal of KWS, **3-1** (1985) 11-21 (in Korean)
5. H.K. Kim, C.D. Jang : Simulation of Line Heating by High Frequency Induction Heating, International Journal of Ocean Engineering and Technology, **17-1** (2003) 80-85 (in Korean)
6. LR : Rules and regulations for the classification of ships, Lloyd's register of shipping, (2010)