

다구찌법을 이용한 유도가열 강판의 입열량에 관한 연구

이윤창, 장상균(전남대 대학원 기계공학과), 양영수(전남대 기계공학과)

A study on Heat Flux of Induction Heating of steel plate using the Taguchi Method

Y. C. Lee, S. G. Chang(Mech. Eng. Dept., CNU), Y. S. Yang(Mech. Eng. Dept., CNU)

ABSTRACT

Induction heating is a process with magnetic and thermal situation. Induction heating of flat metal products has an increasing importance in many applications, because it generates the heat within workpiece itself and provides high power densities and productivity. When the high frequency electric current flows in a coil, the process parameters which are air gap, power density, and heating time have a important roles on induction heating of steel plate. This study investigates an influence of the process parameters by means of experiments using Taguchi method.

Key Words : Induction Heating(유도가열), eddy current(와전류), Joule heat(주울열), surface hardening(표면경화), Taguchi method(다구찌 기법)

1. 서론

유도가열(induction heating)이란 코일에 고주파 전류를 통하여 되면 코일 주변에 시간에 따라 변하는 자기장이 형성되고, 주변의 도전체 표면에는 와전류(eddy current)라고 하는 자기장 변화를 방해하는 방향으로의 자속을 발생하는 전류가 유도되어, 이로 인해 높은 에너지 밀도의 주울열(Joule heat)이 발생하게 된다. 이 와전류의 크기는 금속의 표면으로부터 내부로 들어갈수록 점점 줄어들기 때문에 표면경화(surface hardening)와 같은 열처리에 많이 이용된다. 그리고 충분한 시간동안 가열을 하면 전도 열전달이 일어나서 금속 내부에 균일한 온도분포가 형성이 된다. 따라서, 금속의 열간 가공에도 유도가열이 적용된다. 그 외에도 단조공정의 예열, 브레이징, 강판의 굽힘, 변형교정 등의 산업분야에 광범위하게 적용되어 제품의 품질과 생산성을 높이고 있다. 수요의 증가와 적용범위의 확대에 따라 가열 형태의 변화와 성능 개선이 요구되고 있다.

유도가열방식을 적용한 가열공정에서 수치적 해석을 통해 공정을 개선하려는 연구가 지속적으로 행해져 오고 있다. 2차원 축 대칭 문제와 가열 특징에 따른 다양한 형상의 도체와 전선에 대한 유도가열 시스템에서 전자기장의 해석과 온도분

포의 해석을 가능하게 하는 2차원 프로그램을 개발하였고,^[1] 유도가열로의 정확한 해석을 위해서 유한요소법에 의한 와전류 해석과 와전류에 의한 피가열체 열원의 온도분포 제어를 위한 민감도 해석을 통해 코일의 설계변수의 영향을 규명하고자 한 연구사례도 있다.^[2] 반용융 단조를 위한 유도가열 코일의 설계에서 온도구배를 줄이고 구상화된 조직을 얻기 위한 최적의 코일 길이와 주파수를 유한요소 해석을 통해 선정하여, 실험을 통해 해석모델의 유용성을 보고한 바가 있다.^[3] 그리고, 자기장 및 온도분포의 유한요소 해석과 유도가열 실험을 통해 제안된 인덕터에 의한 가열 특성을 파악하고, 이를 이용하여 주파수 및 공극 등 공정변수의 변화에 따른 영향의 연구도 이루어졌다.^[4] 제품의 국소가열에 유용하게 적용하여 파이프의 벤딩에 응용하고, 시뮬레이션(simulation)을 이용해 장치 설비 및 투자비의 감소에 관한 연구도 보고되었다.^[5]

본 연구는 강판의 표면경화 처리에서 유도가열을 적용할 때 고려되어야 하는 공정변수인 입열량, 공극, 이송속도와 열 유동의 관계를 다구찌 방법을 이용한 실험을 통하여 규명하며, 이를 바탕으로 공정변수의 적절한 수준을 선택하는 것을 목적으로 하였다.

2. 이론적 배경

유도가열은 인덕터 주위의 자기장 변화에 의해 피가열체에 전류가 유도되어 주울열(Joule heat)이 발생하는 과정과 발생된 열이 피가열체 내로 전달되는 과정으로 구성된다. 먼저 인덕터 주위 및 피가열체에 발생하는 자기장의 시간에 따른 크기변화는 Maxwell의 방정식으로부터 유도할 수 있다.

$$j\omega\alpha\vec{A} + \nabla \times \left[\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right] = \vec{J}_0 \quad (1)$$

여기서, A 는 자기벡터 포텐셜, J_0 는 외부전류벡터, μ 는 투자율, α 는 전기전도도, ω 는 전류원의 각주파수이다. 식(1)에서 자기벡터포텐셜을 구한 후, 이를 이용하여 와전류 J_e 를 구하면 ($J_e = -j\omega\alpha A$), 음(Ohm)의 법칙에 의해 주울열 $q (q = J_e^2 / \rho)$ 를 산출할 수 있다.

유도가열에 의한 피가열체 내의 온도변화는 전류유도에 의해 발생된 주울열을 내부 발생열로 고려하면, 다음과 같은 열전도방정식으로 표현될 수 있다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (x \nabla T) + q \quad (2)$$

여기서, T 는 온도, ρ 는 밀도, c 는 비열, x 는 열전도, q 는 발생열이다.

3. 실험

3. 1 실험재료

본 실험에 사용된 재료는 열차의 바퀴와 철로, 기어, 크랭크축, 이외의 기계부품, 고강도 구조재 등으로 사용되는 중탄소강(AISI1045)을 사용하였다. 이러한 강은 오스테나이트화, 급랭, 템퍼링 등의 열처리에 의해 기계적인 성질을 항상 시킬수 있다. 이렇게 열처리된 합금은 저탄소강에 비해 강하지만 연성과 인성을 떨어진다. 중탄소강은 실제로 표면경화처리에 많이 이용되고 있으며, 경화능(hardenability)이 매우 우수한 0.45%C의 재료이다. 가열강판의 크기는 300×200×6으로 하였고, 재료에 대한 화학성분은 Table. 1에 나타나 있다.

Table. 1 Chemical Composition of specimen

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
0.445%	0.225%	0.7%	0.014%	0.005%	0.01%	0.01%	0.02%

3. 2 실험장치

유도가열 장치는 인덕터(Inductor)인 코일이 U자형으로써 선상가열에 적용할 수 있는 형태로 크기는 길이 60mm, 폭 5mm, 높이 10mm, 두께 1mm의 사각채널 형태이고, 구리로 제작되었다. 채널의 중앙에는 과열을 막기 위해 냉각수를 순환시켰고, 코일채널 사이에 0.5mm 두께의 절연재로 둘러 싸여진 폭 6mm, 높이 10mm의 페라이트 코어를 두어 자속이 피가열재에 집중되어 발생하도록 하였다. 선상가열에 적용하기 위해 강판과 가열기(Inductor)가 상대운동 할 수 있도록 3축 이송장치에 피가열재를 높이조절 받침대와 함께 탑재하고, 이송장치의 동작범위내의 한편에 인덕터를 고정하여 수평을 유지하게 하였다. 이송장치는 3축의 직교좌표 형태를 이루고 3차원에서 간단한 프로그램을 이용해 정확한 위치 및 속도제어가 가능하다. 이 장치의 구동과 함께 신호에 따른 유도가열기의 신속한 동작을 위해 계전기(Relay)를 부착하여 정확한 위치에서 가열의 시작과 종료를 가능하게 하였다. 높이조절 받침대를 이용해서 강판과 인덕터 사이의 수평조절 및 간극조절을 용이하게 하였다. 유도가열 장치에 관한 개략도를 Fig. 1에 나타내었다.

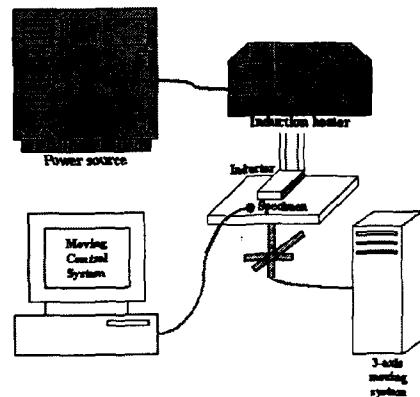


Fig. 1 Schematic diagram of induction heating system

3. 3 실험방법

공정변수와 최종 결과 값 사이의 관계 규명 및 최적화 작업에 사용될 실험방법은 우선 실험 횟수를 최소화하여 시간과 경제적 부담을 줄여야 하며, 실험에서 결정되는 공정변수가 잡음에 대하여 강건해야 하는 요구사항을 만족시켜야 한다. 즉, 최적화 작업을 통해 사용될 공정변수는 외부 교란인자가 작용해도 최종 제품의 품질이 강건하게 유지되도록 해야 한다. 이러한 실험요구조건을 만족시키기 위한 대표적인 실험계획법으로 다구찌 방법을 사용하였다. 다구찌 방법에

서는 교란인자의 영향으로부터 품질을 강건하게 유지하기 위해서 신호 대 잡음의 비인 SN비(signal-to-noise ratio)를 사용한다.^{[8][9]}

인덕터가 강판 위를 진행하면서 가열 시 입력 전력, 코일과 피가열체 사이의 공극, 이송속도가 큰 공정변수로 작용하게 된다. 관계 규명 및 최적 조건을 찾기 위한 최적화 실험을 실시하기 전에 공정변수의 적절한 수준을 정하기 위하여 선행실험을 실시하였다. 3가지 인자를 변화시키면서 실험을 실시하고 가열부 단면을 미세조직 실험하여 열 영향부를 관찰하였다. Fig. 2는 가열단면의 열 영향부의 형상이다.

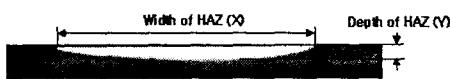


Fig. 2 Heat Affected Zone of specimen

선행 실험의 실시 후 가열부 단면에서의 열영향부의 넓이방향과 깊이방향의 길이를 측정하고 열 영향부의 깊이가 0인 경우와 열영향부의 깊이가 6mm 이상이 되어 측정이 불가한 경우를 제외하고 인자와 수준(level)수를 선정하여 Table. 2에 나타내었고, 총 8회의 실험을 실시하는 3인자 2수준의 $L_8(2^7)$ 형 직교배열표를 Table. 3에 나타내었다.

Table. 2 Levels of experiment factors

	0	1
Power	A 32200 (W)	37500 (W)
Gap Distance	B 2 (mm)	1 (mm)
Moving Speed	C 5 (mm/s)	4 (mm/s)

Table. 3 Orthogonal array table - $L_8(2^7)$

실험 번호	열 번호							테이터
	1	2	3	4	5	6	7	
1	0	0	0	0	0	0	0	
2	0	0	0	1	1	1	1	
3	0	1	1	0	0	1	1	
4	0	1	1	1	1	0	0	
5	1	0	1	0	1	0	1	
6	1	0	1	1	0	1	0	
7	1	1	0	0	1	1	0	
8	1	1	0	1	0	0	1	
기본표시	a	b	ab	c	ac	bc	abc	
군	1	2			3			
배치	A	B	A×B	C	A×C	B×C	e	

4. 결과 및 고찰

유도가열의 중요한 공정변수인 3가지 인자를 Table. 3의 직교배열표의 각 열에 순서대로 배열한 후 2회 반복실험을 실시하여 얻은 넓이방향과 깊이방향의 길이를 측정했다. 유도가열이 표면경화처리에 쓰일 경우 넓이방향의 길이는 클수록, 깊이방향의 길이는 작을수록 좋은 효과를 얻을 수 있다. 그렇기 때문에 깊이/넓이 값의 망소 S/N비를 식 (1)을 이용해서 구하고 Table. 4에 나타내었다.

$$SN = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (3)$$

여기서, n은 실험횟수, y_i 는 결과 값이다.

그리고, Table. 5에는 이에 대한 분산분석 결과가 나타나 있다. 분산분석표에서 입력전력(A), 공극(B), 이송속도(C)의 주요 인자와 오차 값만을 고려하였는데 그 이유는 $A \times B$, $A \times C$, $B \times C$ 인 세 인자 상호간의 교호작용이 결과 값에 큰 영향을 미치지 않기 때문에 오차 항에 폴링(pooling)시켰다.

여기서 각 인자들의 결과 값에 대한 기여도를 나타냈는데 표에서 볼 수 있듯이 C인자인 이송속도가 열 영향부에 가장 큰 요인으로 작용한다.

Table. 4 Results of experiment on the orthogonal array table

No.	Experiment 1		Experiment 2		$\frac{Y_1}{X_1}$	$\frac{Y_2}{X_2}$	SN
	X_1	Y_1	X_2	Y_2			
1	1.15	43.60	0.75	38.10	0.03	0.02	32.66
2	2.70	45.00	2.00	45.40	0.06	0.04	25.57
3	1.60	45.60	1.50	44.60	0.04	0.03	29.28
4	3.90	46.60	3.40	46.40	0.08	0.07	22.09
5	1.45	45.50	1.30	43.20	0.03	0.03	30.17
6	2.70	45.80	3.00	46.50	0.06	0.06	24.18
7	2.65	46.30	2.10	45.70	0.06	0.05	25.70
8	4.50	47.60	4.10	47.10	0.09	0.09	20.83

Table. 5 Results of variance analysis based on the orthogonal array table (ANOVA)

factor	S	Φ	V_0	F_0	$F(0.05)$	$F(0.01)$	p (%)
A	9.5	1	9.5	50	7.71	21.20	8.10
B	26.94	1	26.94	141.79			22.96
C	79	1	79	415.79			67.32
e	1.9	4	0.475				1.62
T	117.34	7					

Table. 4를 이용하여 유도가열장치의 최적 설계인자 및 수준을 산출하기 위하여 SN비의 요인효과 그래프를 나타낸 결과는 Fig. 3과 같다.

Fig. 3 SN ratio, S value for control factors

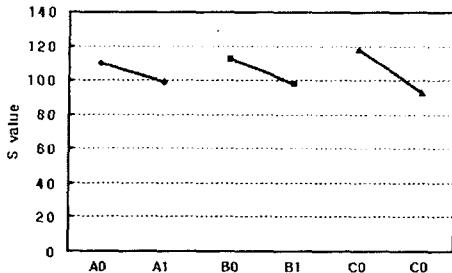


Fig. 3에서 최적조건은 제어인자의 수준별 SN비가 가장 높은 조건인 A₀,B₀,C₀로 나타낼 수 있는데, 여기서 알파벳은 제어인자이고 알파벳 다음의 숫자는 제어인자의 수준을 나타내며, 세 인자 모두 0수준, 다시 말해서 입력전력은 32200 (W), 공극은 2 (mm), 이송속도는 5 (mm/s)에서 깊이 방향으로 작고, 넓이방향으로 넓은 열 영향부를 얻을 수 있었다.

최적의 설계조건을 찾았으므로 그 조건에서의 실제 넓이방향 길이와 깊이방향 길이의 데이터 값을 (2)식에 적용하여 넓이방향과 깊이 방향 길이의 각 모집단 평균값의 추정과 신뢰구간 추정을 할 수 있다. 각각 결과 값은 2회 실험의 평균값을 적용하였다.

$$\begin{aligned}\bar{\mu} &= \overline{A_0} + \overline{B_0} + \overline{C_0} - 2\bar{T} \\ \bar{\mu} &\pm t(\phi_e, \frac{\alpha}{2}) \sqrt{\frac{V_e}{n_e}}\end{aligned}\quad (4)$$

여기서, $\bar{\mu}$ 는 모 평균의 추정 값, t 는 t 분포표 (2.276), ϕ_e 는 오차항의 자유도, α 는 (1-신뢰도), V_e 는 오차항의 분산 값, n_e 는 유효 반복 수이다.

깊이 방향 길이의 신뢰구간을 추정해 보면 모수의 모 평균값이 0.72mm이고 오차가 ± 0.45 (mm)로서 95%신뢰구간은 (0.27, 1.17)이다. 따라서 모수의 참값이 100회 실험에 95번은 0.27mm~1.17mm 범위 내에 포함될 수 있음을 추정할 수 있다.

같은 방법으로 넓이방향 길이의 신뢰구간을 추정해 보면 모수의 모 평균값이 42.25mm이고 오차가 ± 1.96 (mm)로서 95%신뢰구간은 (40.29, 44.21)이다.

4. 결론

본 논문에서는 고주파 유도가열시 주요 공정 변수인 입력전력, 코일과 피가열체 사이의 공극, 이송속도의 세인자가 강판에 미치는 열영향에 관하여 다구찌 기법을 적용하여 공정변수를 최적화시키기 위한 연구를 수행하였다. 여러 가지 잡음

요인을 고려한 SN비를 이용해서 최적조건을 찾고, 그 조건에서 신뢰도가 높은 결과 값을 추정했다. 실험목적인 넓이방향의 길이는 클수록, 깊이 방향의 길이는 작을수록의 좋은 효과를 기대하기 위한 최적의 조건은 입력전력 32200 (W), 공극 2 (mm), 이송속도 5 (mm/s)의 결과를 얻었다. 그리고 그 조건에 따른 실제 값의 범위를 추정했는데 95% 신뢰 구간은 넓이방향 0.27mm~1.17mm과 깊이방향 40.29mm~44.21mm의 실제 값의 범위를 추정할 수 있었다. 실험목적에 따라 실험의 변경된 최적조건을 구하여 각 조건에 따른 실제 결과 값 또한 추론 할 수 있게 되었다.

참고문헌

- [1] 임광섭. “유한요소법을 이용한 유도가열 시스템의 해석”, 서울대학교 석사학위논문 (1996).
- [2] 황승환. “유도가열 시스템에서 코일의 위치 및 폭 최적 설계”, 서울대학교 석사학위논문 (1995).
- [3] 김남석, 정홍규, 강충길. “반용용 단조를 위한 유도가열용 코일 설계의 최적화 및 실험적 연구”, 주조, 19-5(1999), 393~402.
- [4] 배강열, 이태환, 양영수. “강판의 유도가열에서 공정변수가 온도 및 자속 분포에 미치는 영향에 관한 연구”, 대한용접학회지, 19-5 (2001), 526~533.
- [5] Z. Hu and J. Q. Li. "Computer simulation of pipe-bending processes with small bending radius using local induction heating." Journal of Materials Processing Technology, Volume 91, Issues 1-3, 30 June 1999, Pages 75-79.
- [6] Jin, Jianming. "The Finite Element Method in Electromagnetics", New York : John Wiley & Sons, Inc. 1993.
- [7] Kraus, John D. "Electromagnetics" 4th ed, Singapore : McGraw-Hill, Inc. 1992.
- [8] 이상복. “기초부터 현장적용까지 알기쉬운 다구찌 기법”, 상조사 (2000).
- [9] 박성현. “현대 실험 계획법”, 민영사 (1997).