

<응용논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2016.40.2.207>

ISSN 1226-4873(Print)  
2288-5226(Online)

## 열-전자기 연성해석을 이용한 차축에 대한 최적의 고주파 열처리 주파수 조건에 대한 연구

최진규\* · 남광식\* · 김재기\* · 최호민\* · 이석순\*\*  
\* 경상대학교 기계공학과, ERI

### An Optimal Frequency Condition for An Induction Hardening for An Axle Shaft using Thermal-Electromagnetic Coupled Analysis

Jin Kyu Choi\*, Kwang Sik Nam\*, Jae Ki Kim\*, Ho Min Choi\* and Seok Soon Lee\*\*  
\* Dept. of Mechanical Engineering, ERI, Gyeongsang Nat'l Univ.

(Received July 2, 2015 ; Revised November 3, 2015 ; Accepted November 4, 2015)

**Key Words:** High Frequency Induction Hardening(고주파 유도 경화), Finite Element Method(유한요소법), Hardening Depth(경화 깊이), Axle shaft(차축)

**초록:** 신뢰성 및 반복성을 포함한 장점을 갖고 있는 고주파 유도 경화는 많은 산업분야에 사용된다. 고주파 유도 경화는 화염을 이용하지 않고 최소한의 시간에 에너지-효율적인 가열방법을 제공하는 비접촉식 방법이다. 최근, 유한요소법을 이용한 고주파 유도 경화가 적극적으로 연구되고 있지만, 이들 연구는 단지 분석의 정확도에 초점을 맞추고 있다. 본 논문에서는 코일 및 입력 전원을 동일한 형태의 조건에서 가변 주파수를 적용하여 해석하고 실험결과와 비교하였다. 해석과 실험 결과는 최적의 주파수인 3kHz를 사용하였을 때 경화 깊이가 거의 동일함을 보인다.

**Abstract:** High-frequency induction hardening (HFIH) is used in many industries and has a number of advantages, including reliability and repeatability. It is a non-contact method of providing energy-efficient heat in the minimum amount of time without using a flame. Recently, HFIH has been actively studied using the finite-element method (FEM), however, these studies only focused on the accuracy of the analysis. In this paper, we analyzed HFIH by using a variable frequency based on the conditions of the same shape and input power then comparing the analysis results to experimental results. The analysis and experimental results indicate that the hardening depths are approximately the same using the optimal frequency of 3kHz.

- 기호설명 -

- E : 전자기장 세기,  $V/m$
- H : 자기장 세기,  $A/m$
- D : 전속밀도,  $C/m^2$
- B : 자속밀도,  $Wb/m^2$
- J : 전류밀도,  $A/m^2$
- $\rho$  : 전하밀도,  $C/m^3$
- $\epsilon$  : 유전율,  $F/m$
- $\mu$  : 투자율,  $H/m$
- $\sigma$  : 전도도,  $\Omega/m$

### 1. 서론

전류가 도체를 통하여 흐를 때 주위에 자장이 발생한다. 만약 도체가 코일로 되어 있으면, 코일 내부에 자장이 발생한다. 코일 속에 금속 봉을 삽입했을 경우에도 이러한 자장의 발생이 지속된다. 만약 고주파 교류에 의하여 자속이 생기면 금속봉의 표면에 와전류(eddy current)가 생성되고, 이에 의하여 표면이 가열된다.<sup>(1)</sup>

고주파 유도가열의 대표적인 이용기술인 고주파 담금질은 유도가열에 의한 금속 가열과 표면 가열의 특성이 있어 오스테나이트(Austenite) 결정립의 미세화와 표면부근의 높은 압축잔류 응력으로 여러 기계 부품의 강인성, 내피로성, 내마모성

† Corresponding Author, leess@gnu.ac.kr  
© 2016 The Korean Society of Mechanical Engineers

의 향상에 상당한 역할을 하고 있다.<sup>(2)</sup>

최근 유도가열에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 또한, 고주파 유도가열은 많은 산업 응용분야에 널리 사용되고 있다. 유도가열이 부각되게 된 이유는 이전에 사용하던 가열방식과 다른 많은 장점을 가지고 있기 때문이다. 그 장점으로서는 신뢰성, 반복성, 비접촉성 그리고 불꽃이 없이 최고한의 시간적 이용으로 고효율의 열원을 제공한다는 것이다. 또한, 전기를 이용하여 열에너지를 쓰는 것으로, 기존 가스나 기름을 대체하기 위한 설비잡업이기도 하다. 따라서 직접적인 환경오염이 적고, 가스나 기름에 비해 비교적 경제적 효과를 볼 수 있다. 유도가열 산업에서 열처리 분야는 응용분야가 상당히 많다. 주 수요처는 자동차 산업이고 이외에도 각종 산업부품, 가전기기 등 널리 쓰이기 때문에 흔히 뿌리 산업이라고 일컫는다.

고주파 유도가열은 주파수 세기, 입력파워, 코일의 형상, 시간 등의 여러 가지 변수에 의해 결정이 되고, 고주파 유도가열을 통한 경화에서는 특히 이러한 변수들이 경화를 결정하는데 중요한 역할을 한다. 본 논문에서는 고주파 유도가열을 통한 경화에서 경화 깊이를 결정짓는 표피효과와 관련 있는 주파수에 대하여 집중적으로 연구를 진행하였다.

## 2. 기초이론

도체에 고주파전류가 흐를 경우 표면에 내부보다 많은 양의 전류가 흐르는 현상이 발생하는데, 이를 표피 효과(Skin effect)라 한다. 표피 효과에 의해 전류가 표면의  $1/e(36.8\%)$  만큼 감소하는 침투깊이(Penetration depth,  $\delta$ )는 아래와 같이 정의되며, 주파수가 높을수록 감소하는 경향을 보인다.<sup>(3)</sup>

$$\delta = \sqrt{\frac{\sigma}{\pi f \mu_r \mu_0}} \quad (1)$$

여기서  $\sigma$ 는 도체의 비저항률(Resistivity),  $f$ 는 주파수,  $\mu_0$ 와  $\mu_r$ 은 각각 진공의 투자율(Permeability) 및 피가열체의 상대투자율에 해당한다.

고주파 유도가열을 해석하기 위해서는 일차적으로 유도전류에 의한 전자기장(Electromagnetic field)을 계산해주어야 한다. 전자기장 분포에 관한 지배방정식은 Maxwell 방정식을 사용하여 다

음과 같이 표현한다.

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (3)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (4)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (5)$$

여기서  $E$ 는 전기장의 세기(Electric field intensity),  $H$ 는 자기장의 세기(Magnetic field intensity),  $D$ 는 전속 밀도(Electric flux density),  $\rho$ 는 전하 밀도(Charge density),  $B$ 는 자속 밀도(Magnetic flux density),  $J$ 는 전류 밀도(Current density)이다. 전기장의 세기와 전속 밀도, 자기장의 세기와 자속 밀도와의 관계는 각각 유전율  $\epsilon$ 과 투자율  $\mu$ 를 사용하여 식 (6), (7)과 같이 표현된다.

$$D = \epsilon E \quad (6)$$

$$B = \mu H \quad (7)$$

고주파 영역에서 식 (3)의 변위전류항을 무시할 수 있으며, 이 때 식 (8)의 옴의 법칙을 식 (3)에 대입하여 정리하면 식 (9)와 같다.

$$J = \sigma E \quad (8)$$

$$\nabla \times H - \sigma E = 0 \quad (9)$$

한편 자기 벡터 포텐셜  $A$ 와 전기 스칼라 포텐셜  $V$ 를 도입하면 자속 밀도와 전기장의 세기는 아래와 같이 표현된다.

$$B = \nabla \times A \quad (10)$$

$$E = -\frac{\partial A}{\partial t} - \nabla V \quad (11)$$

고주파 유도가열의 경우 교류 전원에 대해 해석이므로 전기 스칼라 포텐셜  $V$ 의 영향을 무시할 수 있다. 이때 식(10)과 (11)을 식 (9)에 대입하면 아래와 같이 자기 벡터 포텐셜  $A$ 에 대한 수식으로 정리된다.

$$\frac{1}{\mu} \nabla \times \nabla \times A - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (12)$$

식 (12)에 대해 유한요소 수식화가 구성되며, 이를 사용하여 전자기장 해석을 수행할 수 있다. 이때 피가열체에 발생하는 단위체적당 저항열(Joule heat)은 아래와 같이 인가된 전기장의 세기로부터 계산된다.

$$q = \sigma Re(E \cdot E) \quad (13)$$

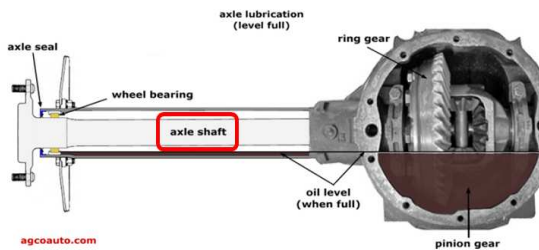
식 (13)으로부터 계산된 저항열 성분을 열원으로 하여 비정상상태 열전달 방정식을 계산해주면 고주파 유도에 의한 피가열체의 온도변화를 계산할 수 있다.<sup>(4)</sup>

### 3. 차축 유도경화 프로세스

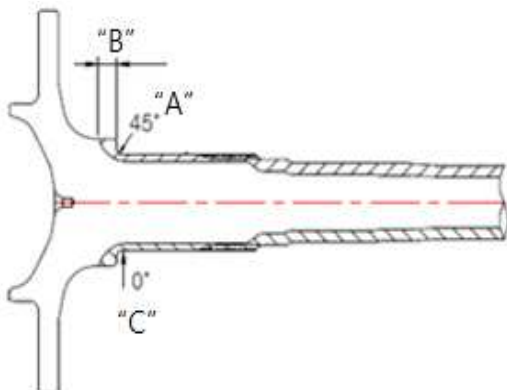
본 연구에서 적용할 모델은 Fig. 1와 같은 자동차 차축을 선정하였다. 자동차 차축은 선행 연구를 통하여 경화 깊이를 미리 선정하였다. 경화의 측정 위치는 Fig. 2와 같고, 수치는 Table 1과 같다. 본 논문에서는 전체의 경화 깊이 중 취약하다고 판단한 “A”, “B” 그리고 “C”에 대하여 집중적으로 연구를 진행하였다.

**Table 1** Target of hardening depth

Position	Depth(mm)
“A”	4.8
“B”	7.5
“C”	6.3



**Fig. 1** Axle shaft



**Fig. 2** Hardening position

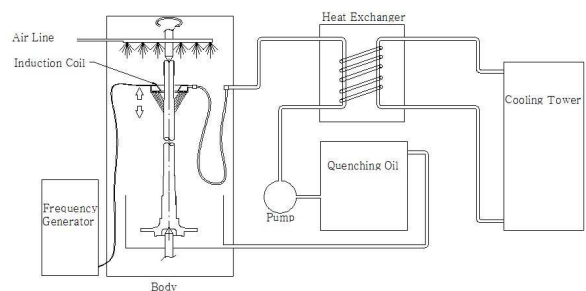
Fig. 3는 고주파 장비의 형상 및 구동형태를 나타내었다. 복열 수직스캔 형태의 고주파 가열 장치로 시료를 삽입하면 상, 하부에서 시료의 센터링 작업부분에 고정구가 삽입되어 고정되고 하부에 설치된 모터에 의하여 시료가 회전 할 수 있는 제품이며 제품의 조건에 따라 고주파 코일의 위치 및 이송속도가 조절가능하고 전력 또한 제어할 수 있는 장비이다. Fig. 4는 고주파 장치 몸체 및 관련설비의 구성을 나타내었으며 몸체와 고주파를 발생하는 주파수 발진기, 유도기전력을 발생시킬 수 있는 고주파 코일, 가열 후 담금질 (quenching)을 위한 소입수 장치, 그리고 구동 및 몸체내부 냉각용 공압시스템으로 구성되며, 소입수의 냉각은 별도의 냉각장치가 설치된다.

### 4. 차축 유도경화를 위한 유한요소 해석

고주파 경화 해석을 위해 상용 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS 6.13을 사용하였고, 전자기 요소인 EMC3D4와 417,602개의 요소를 사용하였다.<sup>(5)</sup>



**Fig. 3** Induction hardening shape and drive the structure



**Fig. 4** Induction hardening equipment configuration

차축 및 코일의 재료는 SAE 1038 과 구리이다. Table 2에서 재료의 전기 전도성 및 투자율을 나타내었다.<sup>(6,7)</sup>

Table 2 Material property

	$\sigma$ , Electrical Conductivity ( $\text{U/m}$ )	$\mu$ , Magnetic Permeability ( $H/m$ )
Air	$3 \times 10^{-15}$	$1.26 \times 10^{-6}$
Copper	$5.96 \times 10^7$	$1.26 \times 10^{-6}$
SAE1038	$6.99 \times 10^6$	$6.3 \times 10^{-3}$

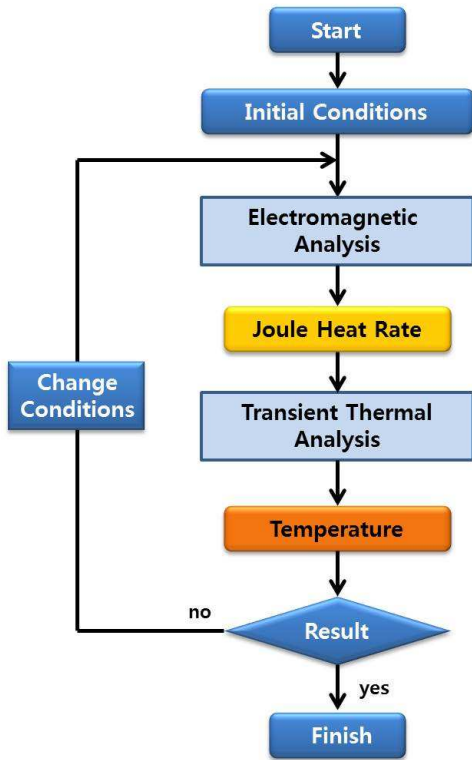


Fig. 5 Analysis process in FEM

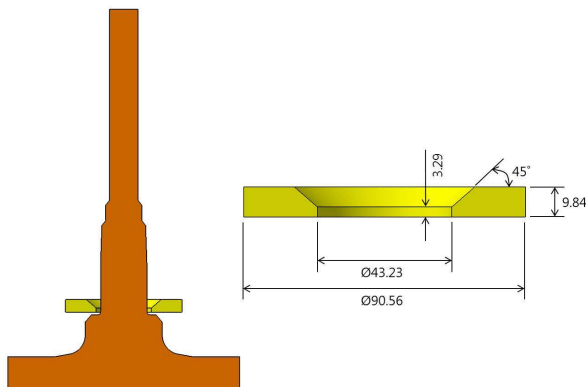


Fig. 6 Coil shape and dimensions

해석 프로세스는 Fig. 5에 나타내었다. 고정 변수는 입력 전원, 코일 형상이고 가변 변수는 주파수이다. Fig. 6는 코일의 형상과 치수를 나타내었다.

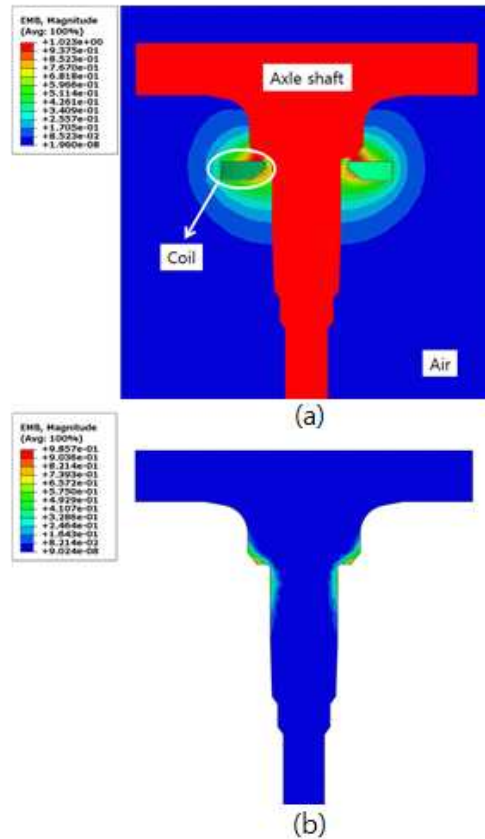


Fig. 7 Distribution of the magnetic flux density calculated from electromagnetic analysis

	Analysis Result	Experiment Result
3 kHz		
4 kHz		
5 kHz		

Fig. 8 Comparison of FEA and experimental result

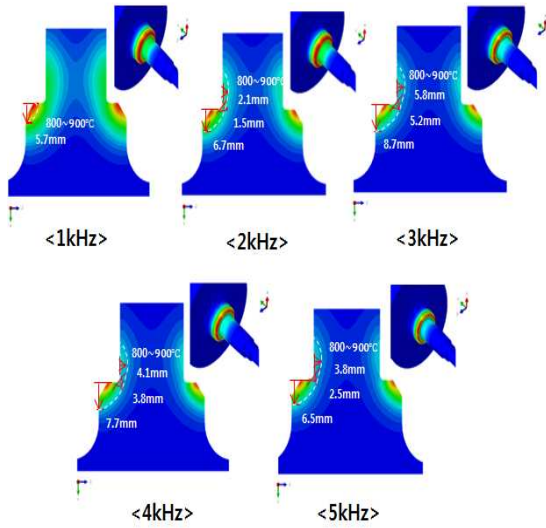


Fig. 9 Temperature depth due to frequency

Fig. 7(a)에 해석 결과로부터 얻어진 자속밀도 (magnetic flux density)의 분포를 표시하였다. 코일과 차축사이 Air 부분에서 1.023T가 나왔고 Fig. 7(b)에서 차축에 대한 자속밀도를 보였고 차축의 목표 경화 부분에 자속밀도가 분포함을 알 수 있다. 자속 코일에서 발생된 자기장이 상대적으로 높은 투자율의 차축을 투과하지 못하고 표면에 분포됨을 알 수 있는데, 분포된 교변자속밀도는 결과적으로 표면부위에 와전류를 형성하여 표면의 온도 상승을 유발하게 된다.

SAE1038의 열처리 온도는 800°C 이상이기 때문에 FEM 해석 결과의 온도분포 깊이를 800°C로 결정하였다. SAE1038은 800 ~ 1145°C에서 냉각될 때 마르텐사이트 조직을 얻을 수 있다.<sup>(8)</sup> Fig. 8은 유한요소 해석결과와 차축을 유도경화 후 에칭(etching)을 하여 유한요소해석 온도분포와 경화 분포 실험 결과를 비교하였다. 표시된 바와 같이 실험 결과와 FEA결과가 비슷한 경향을 나타내는 것을 알 수 있다.

주파수를 1~5kHz 까지 변화시키면서 최적의 주파수를 발견하였다. 차축에 대한 온도 분포는 Fig. 9에 나타내었고 유한요소 해석 결과에서 열처리 온도인 800°C이상 가열된 점을 연결하여 선으로 나타내었다. 유한요소 해석결과와 실험결과 비교는 Table 3에 나타내었다. Table 3을 기초로 하여 오차 삼각형을 만들어 Fig. 10에 표시하였다. 최소 면적을 가지는 주파수는 3kHz로 최적의 주파수를 찾을 수 있었다.

Table 3 Comparison of target depth

No		"A"	"B"	"C"
Target depth		4.8	7.5	6.3
1kHz	Depth (mm)	-	5.7	-
	Error (%)	-	24	-
2kHz	Depth (mm)	1.5	7.4	2.1
	Error (%)	69	1	67
3kHz	Depth (mm)	5.2	8.7	5.8
	Error (%)	8	14	8
4kHz	Depth (mm)	3.8	7.7	4.1
	Error (%)	26	3	54
5kHz	Depth (mm)	2.5	6.5	3.8
	Error (%)	92	15	66

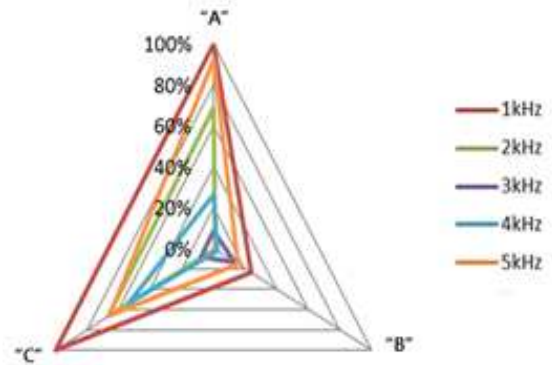


Fig. 10 Error triangles due to induction frequency

### 5. 결론

자동차 차축에 대한 고주파 유도 경화해석을 수행하였다. Fig. 8에서 해석에 의하여 예측한 경화 깊이와 실험에서의 경화 깊이를 비교하여 보인 결과로부터 해석에 의하여 경화 깊이를 예측할 수 있음을 보였다.

또한 전극의 형상과 입력 전력이 동일하고 입력전원의 주파수를 변수로 한 고주파 유도경화

해석으로 자동차 차축의 고주파 유도 가열을 위한 최적의 주파수를 찾아냈다. Fig. 10의 오차삼각형에서 3kHz일 때 “A”의 오차율은 8%, “B”의 오차율은 14%, “C”의 오차율은 8%로 1~5kHz 주파수 중에서 가장 작은 면적을 가진다. 이로 인하여 우리는 차축에 대한 최적의 주파수는 3kHz라는 것을 알 수 있다. 3kHz일 때 경화 깊이가 우리가 목표로 하는 경화 깊이와 가장 비슷하다는 것을 알 수 있었다.

### 후 기

본 연구는 차세대 기계항공 창의인재 양성사업인 BK Plus와 교육부 지방특성화 사업인 CK-I 사업의 지원을 받아 수행되었음.

### 참고문헌 (References)

- (1) Telning, K. E., 1984, *Steel and Its Heat Treatment*, Elsevier, pp. 544~564
- (2) Hong, S. O., Kim, H. B. and Cho, G. J., 2003, “A Study on Improvement of Workpiece Deformation in High Frequency Heat Treatment,” *J. of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 2, No. 2, pp. 31~36.
- (3) Sohn, D. H., Seo, Y. S. and Park, K., 2010, “Three-Dimensional Finite Element Analysis of the Induction Heating Procedure of an Injection Mold,” *Transactions of Materials Processing*, Vol. 19, No. 3, pp. 152~159.
- (4) Park, K., Hwang, J. J., Kwon, O. K. and Yun, J. H., 2007, “Finite Element Analysis of Induction Heating Process for Development of Rapid Mold Heating System,” *Trans. Mat. Proc.*, Vol. 16, pp. 113~119.
- (5) Abaqus 6.12 Documentation, Theory Manual, 13/2/2012 edition.
- (6) Electrical resistivity and conductivity.  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Electrical\\_resistivity\\_and\\_conductivity](https://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_resistivity_and_conductivity).
- (7) Permeability(electromagnetism).  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Permeability\\_\(electromagnetism\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Permeability_(electromagnetism)).
- (8) Kim, W. I., Heo, S. J., 1993, “A Study on the Surface Roughness Influenced by SM45C Hardness in High Frequency Induction Hardening,” *J. of the Korean Society for Heat Treatment*, Vol. 6, No. 1, March, pp.1~8.
- (9) Kang, D. H., Lee, J. Y. and Kim, K. W., 2010, “Study on Torsional Strength of Induction-Hardened Axle Shaft,” *Trans. Korea Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 34, No. 5, pp. 645~649.