

고주파 유도가열에 의한 대상재료의 경화정도 측정을 위한 온도분포 해석

A Study on Analysis of Temperature of Target Material for Hardening in High Frequency Induction Heating

*박민혁¹, #이석순², 강한빈², 백인석², 송주한², 이동욱²

*M. H. Park¹, #S. S. Lee(leess@gnu.ac.kr)², H. B. Kang², I. S. Paek², J. H. Song², D. U. Lee²

¹경상대학교 기계공학과, ²경상대학교 기계공학과

Key words : Induction, High Frequency, FEA(Finite Element Analysis)

1. 서론

기계제품의 경화방법은 현재 매우 다양한 종류가 존재한다. 특히 자동차 부품에서는 일반적으로 정적강도를 확보하기 위한 고강도재료를 주로 사용하는 것이 일반적이며, 현재에는 고주파 유도가열을 이용하여 경화시켜 고강도 화를 만족하고 있는 실정이다. 또한 이러한 유도가열은 직접 실험을 해보거나 경험에 의해 나오는 것이 대부분이다.

따라서 본 논문에서는 유한요소해석 소프트웨어인 ABAQUS를 활용하여 이러한 변수들의 관계를 알아보고 이에 따른 대상재료의 경화 깊이를 정하는 온도분포를 알아 봄 으로서 최적의 유도가열 경화방법을 알아보는데 목적으로 하였다.

2. 유도가열 이론

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

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (3)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (4)$$

여기서 E는 전기장의 세기(Electric field intensity), H는 자기장의 세기(Magnetic field intensity), D는 전속 밀도(Charge density), B는 자속 밀도(Magnetic flux density), J는 전류 밀도(Current density)이다.

$$D = \epsilon E \quad (5)$$

$$B = \mu H \quad (6)$$

고주파 영역에서 식(2)의 변위전류항을 무시할 수 있으며, 이때 식 (7)의 옴의 법칙을 식 (2)에 대입하여 정리하면 식 (8)과 같다.

$$J = \sigma E \quad (7)$$

$$\nabla \times H - \sigma E = 0 \quad (8)$$

한편 자기 벡터 포텐셜 A와 전기 스칼라 포텐셜 V를 도입하면 자속밀도와 전기장의 세기는 아래와 같이 표현된다.

$$B = \nabla \times A \quad (9)$$

$$E = -\frac{\partial A}{\partial t} - \nabla V \quad (10)$$

고주파 유도가열의 경우 교류 전원에 대한 해석이므로 전기 스칼라 포텐셜 V의 영향을 무시하고 식 (9)와 (10)을 식 (8)에 대입하면 아래와 같이 자기 벡터 포텐셜 A에 대한 수식으로 정리된다.

$$\frac{1}{\mu} \nabla \times \nabla \times A - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (11)$$

식 (11)에 대해 유한요소 수식화가 구성되며, 이를 사용하여 전자기장 해석을 수행할 수 있으며, 이로부터 피가열체에 유도된 와전류 값을 계산하고, 그에 따른 줄열(Joule heat)을 계산할 수 있다.

3. 유도가열의 유한요소해석

유한요소해석(FEA, Finite Element Analysis)을 통한 유도가열에 의한 대상재료의 열 분포 확인 방법은 다양하다. 그 중 본 연구에서는 ABAQUS 6.12의 With Electromagnetic Model에서 자기장 해석 수행 후 발생하는 Joule열을 Standard/Explicit

Table 1 Electromagnetic and thermal properties for the induction heating analysis

Material	AISI 1045	Copper
Density (kg/m^3)	7870	8960
Specific heat ($J/kg \cdot K$)	486	385
Thermal conductivity ($W/m \cdot K$)	51.9	385
Resitivity ($\times 10^{-6}/m$)	0.223	0.017
Relative permeability	200	1.0

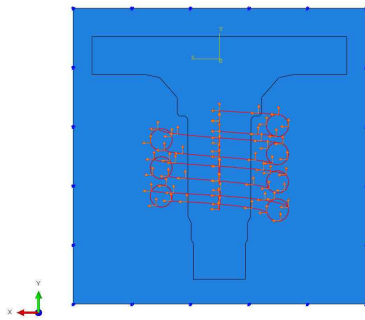


Fig. 1 Load area in Induction Analysis

Model로 Mapping하여 열전달 해석 수행 후 확인하였다. 변수로 주파수를 1kHz, 3kHz, 5kHz로 설정하여 해석을 수행하였다. 재료의 물성치는 아래의 Table 1과 같고, Fig.1에서 Load가 적용된 코일의 위치를 보여주고 있다. 총 해석시간은 3Sec로 짧은 시간을 주었고 전류의 세기로는 6.5kA를 적용하였다.

4. 유한요소 해석 결과

변수로 설정한 주파수 1kHz에서는 최대 온도가 131℃를 나타냄을 볼 수 있고, 3kHz에서는 274℃, 5kHz에서는 375℃를 확인할 수 있다.

또한 주파수의 증가로 인해 온도 분포가 표면 쪽으로 모이는 표피현상을 확인할 수 있다.

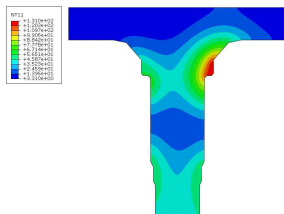


Fig. 2 Induction Result in 1kHz

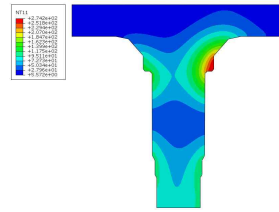


Fig. 3 Induction Result in 3kHz

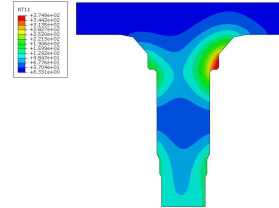


Fig. 4 Induction Result in 5kHz

5. 결론

고주파 유도가열에 의한 대상재료의 경화정도 측정을 위한 온도분포 해석 결과 주파수가 높을수록 표면에 온도분포가 집중되는 것을 확인할 수 있었고 주파수가 높을수록 더 높은 온도를 나타낼 수 있었다.

따라서 경화하고자 하는 대상 깊이 설정 후 이와 같은 유한요소해석을 통한 과정이 선행된다면 최적의 주파수를 찾아 경화과정을 진행 할 수 있을 것으로 예상된다.

후기

본 연구는 2단계 지역대학 육성사업(BK21)과, 교육과학기술부와 한국산업기술진흥원의 지역혁신 인력양성사업으로 수행된 연구결과이다.

참고문헌

1. Abaqus 6.12 Documentation, Theory Manual, 13/2/2012 edition.
2. Sung-Oh Hong, Hong-Bae Kim and Gyu-Jae Cho, 2003, "A Study on Improvement of Workpiece Deformation in High Frequency Heat Treatment", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol.2, No.2, pp. 31-36
2. 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.