

유한요소법을 이용한 유도가열 해석 Analysis of Induction Heating by Using FEM

윤 진오*, 양 영수**

* 전남대학교 대학원 기계공학과

** 전남대학교 기계시스템 공학부

ABSTRACT Induction heating is a process that is accompanied with magnetic and thermal situation. When the high-frequency current flows in the coil, induced eddy current generates heat to conductor. To simulate an induction heating process, the finite element analysis program was developed. A coupling method between the magnetic and thermal routines was developed. In the process of magnetic analysis and thermal analysis, magnetic material properties and thermal material properties depending on temperature are taken into consideration. In this paper, to predict the angular deformation, temperature difference and the shape of heat affected zone were discussed. Also appropriate coil shape for maximum angular deformation were proposed.

1. 서 론

유도가열은 기존의 가열방식에 비해서 동일한 시간에 훨씬 높은 열을 발생시키고 온도의 제어와 자동화가 용이하며 국부가열이 가능해 산업적 유용성이 뛰어나다. 이러한 장점들로 인해 금속의 열처리, 예열, 브레이징, 강판의 변형교정 등에 널리 쓰이고 있다¹⁾. 유도가열시스템을 해석하기 위해서는 전자기장 해석과 열 전달 해석이 수반되어야 한다. 도체의 자기 물성치가 온도에 따라서 변화하므로 유도가열 해석은 전자기장(electro-magnetic field) 해석과 열전달 해석이 연관된 문제로 해석되어야 한다²⁾.

본 연구에서는 평판의 유도가열에 대한 연구를 수행 하였다. 그 방법으로 전류가 흐르는 코일의 단면적을 일정하게 유지시킨 상태에서 코일의 폭과 높이를 변화시켜 각각의 case에 대한 수치해석을 수행하여 온도분포와 열영향부(heat affected zone)를 관찰하였고 코일의 이송속도, 코일과 시편의 간극에 대한 영향도 고려하였다. 전자기장 해석과 열 전달 해석을 위해 유한요소 프로그램을 개발하였으며, 전자기장 해석을 수행하여 와전류를 구하고 와전류를 열원으로 하여 온도분포 해석을 수행하였다. 전자기장 해석

을 위한 물성치와 온도분포해석을 위한 물성치는 온도에 따라 변화하게 하였다. 수치해석으로 구해진 온도해석 결과는 실험시편에 열전대를 부착하여 수행한 실험결과와 비교하였으며 수치해석으로 구해진 열영향부의 형태는 실제로 시편을 절단하여 얻어진 단면의 열영향부와 비교하였다.

2. 전자기장 해석과 온도분포 해석

맥스웰 방정식으로부터 유도된 2차원 주파수 영역에서의 와전류 지배방정식은 다음과 같이 표현된다³⁾.

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 A + j\omega\sigma A = J_s \quad (1)$$

여기서 A 는 자기벡터 포텐셜, J_s 는 외부전류원, μ 는 투자율, ω 는 각속도, σ 는 전기 도전율이다. 위의 식을 유한요소 방정식으로 유도한 후 유한요소방정식을 풀어 A 를 구하고 와전류를 계산 하였다. 또한 구해진 와전류로부터 시간의 평균열원은 다음과 같다.

$$q_{ave} = \frac{1}{2} \omega^2 \sigma A^* A \quad (2)$$

여기에서 *는 공액 복소수를 의미한다. 와전류에 의한 줄(Joule)열을 내부 발생열로 고려하면 다음과 같은 열전도 방정식을 얻을 수 있다.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + q_{ave} \quad (3)$$

여기서 ρ 는 밀도 c 는 비열, k 는 열전달 계수이다.

3. 유한요소 해석과 실험

본 연구에서 강판의 가열에 사용된 유도 가열 장치의 개략적인 그림은 Fig. 1에 나타내었다. 유한요소 모델링은 주파수 50kHz의 일정한 전류밀도 $5.7 \times 10^7 A/m^2$ 을 가정하였다. 좌우 대칭(symmetry) 구조이므로 대칭 단면 한쪽만을 해석의 대상으로 고려하였다. 가열코일의 대칭 단면은 Fig. 2의 그림과 같이 사각 채널형태로 되어 있으며 코일 가운데 부분에는 냉각수가 통과하게 되어있다. 실험에 사용된 코일의 b값과 h값은 각각 5mm, 10mm, z방향으로의 길이는 60mm 이다. 유한요소 해석 단면은 아래 그림 Fig. 3과 같고 온도측정을 위해서 아래면 중앙의 위치에 열전대를 부착하였다. 초기 온도가 20 °C인 상태의 전자기장 해석결과가 Fig. 4에 보여지고 있다. 코일과 강판의 간극은 1mm로 설정하였다. Fig. 6은 간극이 1mm 이고, 이송 속도 10mm/s 일 때의 온도 값에 대한 유한요소 해석과 실험의 결과를 보여주고 있다. 대체적으로 유한요소 해석과 실험의 결과는 유사한 경향을 보이고 있다. 특히, 온도가 760 °C부근에서는 Curie 포인트의 영향으로 인해서 온도의 증가가 다소 완만한 경향을 보이다가 다시 증

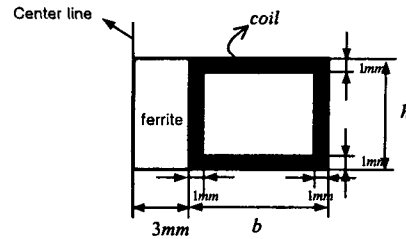


Fig.2 Half coil shape

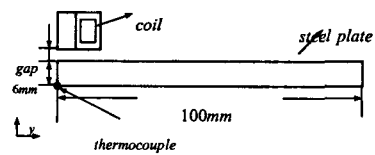


Fig.3 Two dimensional half model

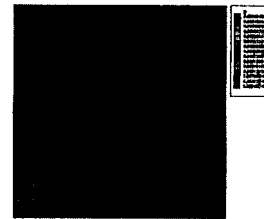


Fig.4 Isolines of magnetic vector potential (gap=1mm)

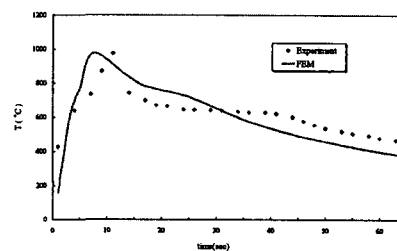


Fig. 6 Temperature history at bottom center of steel plate. (gap=1mm, v=10mm/s)

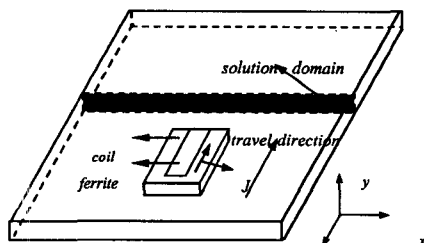


Fig.1 Configuration of induction heating

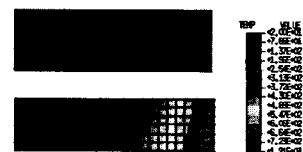


Fig. 7 Heat affected zone inside workpiece (gap=1mm, v=10mm/s)

가하는 양상을 보여 주고 있다. 단면영역의 열영향부를 관찰하기 위해서 Fig. 3에서 열전대가 부착된 부분을 절단한 부분과 수치해석으로 계산된 열영향부의 모습을 Fig. 7에서 보여주고 있다. 열의 유입이 과다하여 깊이방향 전체로 상변태가 일어나는 것을 보여주고 있다.

4. 코일형태에 대한 영향

코일의 형태에 따른 상 변태 영역의 크기에 대한 영향을 관찰하기 위해서 Fig. 2의 사각채널 형태의 코일형상을 두께는 1mm로 고정한 상태에서 h와 b를 변화시켜 가면서 해석결과를 관찰하였다.

Table. 1 Coil shape

case	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
b(mm)	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
h(mm)	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3

유한요소 해석결과 case증가에 따른 열영향부 영역의 폭과 깊이는 모두 증가하였다. 이는 case 번호가 증가할수록 코일 폭이 증가 하므로 코일에 가까운 거리에 위치하고 있는 도체의 영역이 늘어나게 되고 자기벡터 포텐셜값이 상대적으로 큰 값이 존재하는 영역이 늘어나게 되어 발열량이 늘어난 것이다. 선상가열 공정에서 발생되는 각변형을 일으키는 주요인자중 하나는 판 두께방향의 온도구배이다. Gap이 2mm이고 $v=20mm/s$ 일때의 두께방향의 온도구배의 영향을 관찰하기 위하여 시편의 상면과 하면의 온도를 Fig. 8에 나타내었다. 상면과 하면의 온도를 살펴보면 case3에서 case6까지는 온도의 차이가 비슷한 경향을 보여주고 있으며 case4에

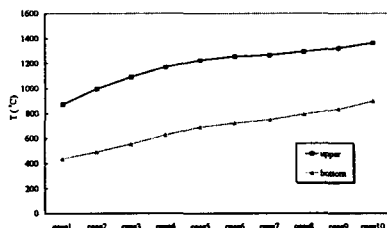


Fig. 8 Temperature at upper and bottom face for the variation of case. (gap=2mm, $v=20mm/s$)

서 온도차이가 가장 큰것을 알 수 있다. 그러므로 case4가 모든 case들 중에서 가장 많은 각 변형을 유도한다고 예상할 수 있으나 온도차이가 다른 case들과 비교해 상대적으로 크지않아 각 변형은 큰 차이가 없을 것으로 추측된다.

5. 결 론

유도 가열현상을 해석하기 위해서 전자기장 해석과 열 전달 해석이 연관된 유한요소 프로그램을 개발하였다. 해석의 타당성을 위해 가열부의 밀면 중앙에 열전대를 부착하여 실험을 수행하고 단면을 절단해 열영향부의 크기를 관찰한 결과 온도 분포해석과 실험이 유사한 경향을 보였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 온도분포 해석과 실험에서 코일과 시편의 간극이 1mm 이고 10mm/s로 가열시 온도분포 해석 결과가 실험과 비교적 잘 일치 하였다.
- 2) Case 번호가 증가함에 따라서 열영향부의 폭과 깊이가 증가하였다.
- 3) 간극2mm,속도 20mm/s로 가열시 case4가 상면과 하면의 온도차이가 가장 크게 나타났으나 온도차이에 의한 각변형은 다른 case들과 비교해 큰 차이가 없을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R05-2001-000-01108-0)지원으로 수행되었음.

참고문헌

- (1) Ueda, Y., Murakawa, H., Mohamed, R.A., Neki, I. Kamachika, R., Ishiyama, M. and Ogawa, J., "Development of Computer Aided Process Planning System for Plate Bending by Line Heating(Report 3)-Relatin Between Heating Condition and Deformation," Journal of Ship Production, Vol. 10, 1994, pp. 248-257.
- (2) Sadeghipour, K., Dopkin, J. A. and Li, K., "A Computer Aided Finite Element/Experimental Analysis of Induction Heating Process of Steel," Computers in Industry, Vol.28, 1996, pp. 195-205.
- (3) Bae, K. Y., Lee, T. H. and Yang, Y. S., "A Study of the Effects of Process Variables on Temperature and Magnetic-Flux Distribution Heating of Steel plate," J. Korean Welding Society, Vol. 19, 2001, pp. 78-85.