

이동하는 유도가열 코일에 의한 강판의 열 유동 해석

Heat transfer analysis of steel plate by moving coil in induction heating process

윤 진오*, 양 영수*, 강 대현**

* 전남대학교 기계시스템 공학부

** 위아 차량부품 연구부

ABSTRACT This paper presents a 3-D finite element analysis of a magneto-thermal coupled problem with moving conductor. In the magnetic and thermal analyses, temperature-dependent magnetic and thermal material properties were considered. Transient finite element method for analysis of moving conductor needs many number of elements and much time to make calculation. Therefore, in this paper, finite element formulation derived from quasi-state is adopted. Finite element results were compared with the experimental results. The results demonstrate that this approach is suitable to solve the magneto-thermal coupled problem.

1. 서 론

유도가열 공정은 전자기장과 온도장이 동시에 연관된 문제로서 이해를 필요로 한다. 실험적인 유도가열 해석은 유도가열현상에 대한 폭넓은 데이터를 제공하지 못하고 시행착오적인 방법으로 결과를 도출해 내므로 수치해석적인 일은 필수적이며 매우 유용한 일이다. 이러한 유도가열 해석을 수행하기 위해서는 전자기장 해석과 열유동 해석이 수반되어야 한다. 가열되는 피가열체의 온도가 변화하게 되면 전자기장 해석시 필요한 자기 물성치가 변화하게 되며 온도장 해석시 필요한 온도 물성치도 변화하게 된다. 따라서 두가지 해석을 따로 할 수 없고 동시에 전자기장과 온도장을 해석하여야 한다¹⁾. 유도가열의 해석을 위해서는 해석대상에 공기영역과 가열되는 피가열체등이 포함됨으로 해석영역이 상대적으로 크게 된다. 또한 공기와 강판의 경계층에서는 조밀한 요소를 필요로 하므로 3차원으로 확장되면 과도한 cpu time과 비용이 들며 코일의 이동을 고려할 경우 이동방향의 조밀한 요소의 필요 때문에 해석이 불가능해지는 경우도 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 효율적인 해석을 위해 이동 좌표계를 도입한 유한요소해석으로 정상상태에서의 해석을 수행하였다.

2. 유도가열 해석과 실험

유도가열 공정을 해석하기 위해서 맥스웰 방정식으로부터 유도된 주파수 영역에서의 와전류 지배방정식은 다음과 같이 표현된다^{2,3)}.

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

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

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

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

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

유도가열이 일정한 속도로 진행한다고 가정하면

이동좌표계를 도입하여 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$-\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z}\right) + \dot{q} = \rho c \left(-v \frac{\partial T}{\partial \xi}\right) \quad (4)$$

여기서 ρ 는 밀도 c 는 비열, k 는 열전달 계수이다. 위의 식을 유한요소 방정식으로 정식화 하면 유한요소 법으로 온도분포를 구할 수 있다.

3. 실험과 유한요소 해석

본 연구에서 시편의 가열실험에 사용된 유도 가열장치의 개략적인 그림은 Fig. 1에 나타내었다. 유도가열기의 이송속도는 6mm/s로 설정하였다.

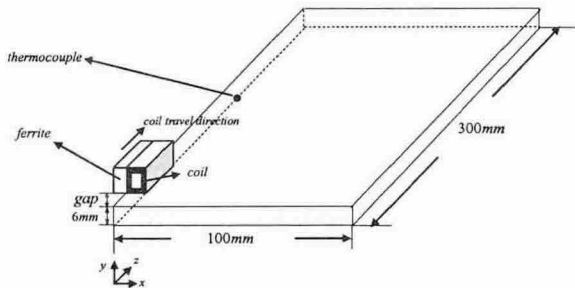


Fig. 1 Schematic half diagram for experiment

온도측정을 위해서 아래면 중앙의 위치에 열전대를 부착하였다. Fig. 2에서는 유한요소 해석을 위한 해석영역을 보여주고 있다. 해석 대상은 좌우 대칭조건이므로 한쪽만을 해석 하였다. 전자기장 해석을 수행하기 위한 공기영역과 시편영역이 해석영역에 포함되어 있다. 공기영역이 해석 대상에 포함되기 때문에 3차원 해석은 매우 많은 요소의 수가 필요하게 된다. 또한 시편과 공기의 경계에서 조밀한 요소가 필요하고 유도가열기의 이동을 고려하기 위해서는 유도가열기의 진행방향으로도 조밀한 요소를 필요로 하기 때문에 요소의 수는 급격하게 증가 하게 된다. 이러한 과도한 요소의 수는 해석의 비효율성을 초래하게 된다. 이러한 비효율성을 해소하기 위한 방법으로 정상상태의 해석은 매우 효과적이다. 실제적으로 코일의 이동을 요구하지 않으므로 코일의 진행방향으로 조밀한 요소를 필요로 하지 않기 때문에 요소의 수를 대폭 줄일 수가 있다. 따라서 본 연구에서는 정상상태에서의 유도가열 해석을 수행하였다.

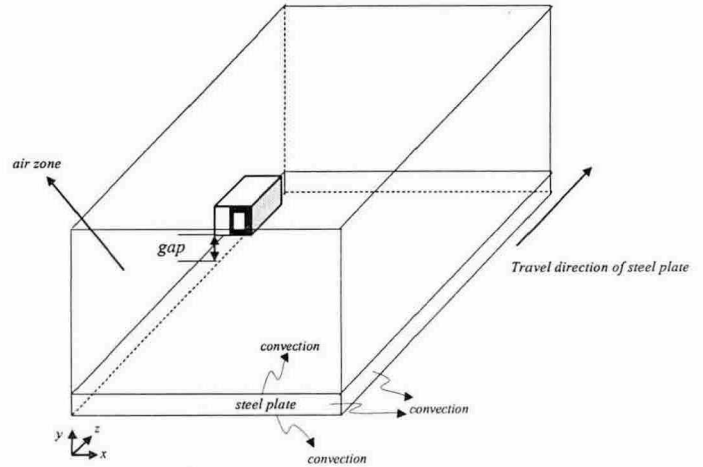


Fig. 2 Three dimensional half model for FEM in moving coordinate.

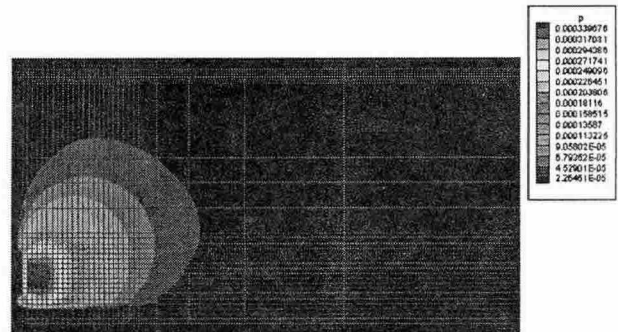


Fig. 3 Isolines of magnetic vector potential for three dimensional analysis.

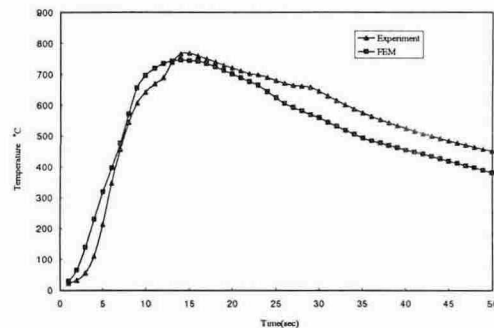


Fig. 4 Temperature history at bottom center of steel plate.

초기 온도가 20 °C인 상태의 전자기장 해석결과가 Fig. 3에 보여지고 있다. 코일주변에 자기벡터 포텐셜 값이 집중되어 있고 해석결과에서 밀면에 존재하는 시편영역은 작은 값의 자기벡터 포텐셜 값이 존재함을 알 수 있다. 시편표면에서 시편내부로 갈수록 침투깊이의 영향으로 자기벡터 포텐

설 값이 작아짐을 알 수 있다. Fig. 4에서는 실험과 유한요소 해석 결과를 비교하고 있다. 열전대를 부착해서 얻은 실험결과와 유한요소해석 결과가 잘 일치하고 있는 경향을 보여주고 있다. Fig. 5에서는 실제로 가열한 시편을 절단하여 열영향부를 관찰한 그림과 유한요소 해석결과를 비교한 그림이다. 실험에서 관찰된 열영향부와 723°C 라인을 비교한 결과 실험에서 관찰된 영역과 유한요소 해석에서 구한 열영향부가 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. Fig. 6에서는 정상상태에서의 시편의 온도분포를 나타낸 그림이다. 속도로 인한 온도의 분포형태를 잘 나타내 주고 있는 것을 알 수 있다.

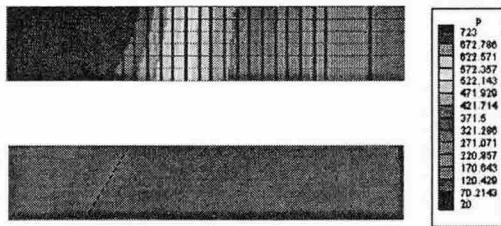


Fig. 5 Heat affected zone inside workpiece



Fig. 6 Three dimensional temperature analysis for quasi-state.

4. 결 론

이동하는 유도가열코일에 의한 열 유동을 해석하기 위하여 3차원 정상상태에 대한 유한요소 해석 프로그램을 개발하고 열 유동 해석을 수행하였다. 해석결과는 실험과 비교하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 유한요소 해석결과와 열전대를 부착한 온도

측정 실험결과가 잘 일치 하였다.

2) 실제로 시편을 절단하여 관찰한 열영향부와 유한요소 해석에 의한 열영향부가 비교적 잘 일치 하였다.

3) 유한요소법을 이용한 정상상태 해석은 3차원 전자기장 해석의 비효율성의 개선에 매우 효과적이다.

후 기

"이 논문은 2005년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임"(KRF-2005-202-D00041)

참 고 문 헌

1. Sadeghipour, K., Dopkin, J. A. and Li, K. : A Computer Aided Finite Element/Experimental Analysis of Induction Heating Process of Steel, Computers in Industry, 28 (1996), 195-205.
2. 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, 19 (2001), 78-85.
3. Dughiero, F., Lupi, S. and Ponchiroli, S. : The Prediction of Thermal Transients in the Induction Heating of Rectangular Billets, The Int. J. Comp. Math. Electr. Electr. Engng, 19 (2000), 712-717