

강판표면의 유도가열에 관한 연구

윤진오*, 양영수†

(2003년 9월 4일 접수, 2004년 5월 3일 심사완료)

A Study on the Flat-Type Induction Heating of Steel Plate

Jin-Oh Yun and Young-Soo Yang

Key Words : Induction Heating(유도가열), Eddy Current(와전류), Finite Element Method(유한요소법), Angular Deformation(각변형)

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 and 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 and other process variables for maximum angular deformation were proposed.

1. 서론

유도가열기(induction heating)에 고주파 전류가 흐르게 되면 도체 주위의 표면에는 와전류(eddy current)가 발생하고 이로 인해 열이 발생하게 된다. 이열을 이용해 가열하는 방식이 유도가열이다. 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 있다.⁽¹⁾ 본 연구에서는 추후 강판의 변형교정에 유도가열장치를 사용하기 위하여 연구를 수행하였다.

유도가열 장치의 사용을 위해서는 적절한 유도 가열기의 설계와 피가열체의 온도 분포를 예측할

수 있는 열 전달(heat transfer) 해석이 필요하다. 유도가열시스템을 해석하기 위해서는 전자기장 해석과 열 전달 해석이 수반되어야 한다. 도체의 자기 물성치가 온도에 따라서 변화하므로 유도 가열 해석은 전자기장(electro-magnetic field) 해석과 열전달 해석이 연관된 문제로 해석되어야 한다.⁽²⁾ 유도가열에 관한 기존의 연구는 원형 코일을 이용한 원통형 형상의 시편을 가열하는 형태가 많으며 평면인 평판에 유도가열을 수행하여 해석한 사례가 극히 드물다.

본 연구에서는 평판의 유도가열에 대한 연구를 수행 하였다. 그 방법으로 전류가 흐르는 코일의 단면적을 일정하게 유지시킨 상태에서 코일의 폭과 높이를 변화시켜 각각의 case 에 대한 수치해석을 수행하여 온도분포와 열영향부(heat affected zone)를 관찰하였고 코일의 이송속도와 코일과 시편의 간극, 주파수의 변화에 따른 영향도 고려하였다. 전자기장 해석과 열 전달 해석을 위해 유한요소 프로그램을 개발하였으며, 전자기장 해석을 수행하여 와전류를 구하고 와전류를 열원으로 하여 온도분포 해석을 수행하였다. 전자기장 해석을 위한 물성치와 온도분포해석을 위한 물성치는 온도에 따라

† 책임저자, 회원, 전남대학교 기계시스템공학부
E-mail : ysyang@chonnam.ac.kr
TEL : (062)530-1675 FAX : (062)530-1689

* 전남대학교 대학원 기계공학과

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 해석

맥스웰 방정식으로부터 유도된 2 차원 주파수 영역에서의 와전류 지배방정식은 다음과 같이 표현된다.⁽²⁻⁴⁾

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

여기서 A 는 자기벡터 포텐셜, J_s 는 외부전류원, μ 는 투자율, ω 는 각속도, σ 는 전기 도전율이다. 위의 식을 유한요소 방정식으로 유도하면 다음과 같은 방정식을 얻을 수 있다.⁽⁵⁾

$$[K][A] = [J] \quad (2)$$

여기에서 각각의 요소들은 다음과 같다.

$$[K] = \frac{1}{\mu} \int \left(\left[\frac{\partial N}{\partial x} \right] \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right]^T + \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right] \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right]^T \right) dx dy + j\omega\sigma \int [N][N]^T dx dy \quad (3)$$

$$[J] = \int J_s [N] dx dy \quad (4)$$

위의 유한요소방정식을 풀어서 A 를 구하고 와전류를 계산 하였다. 와전류는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$J_c = \sigma E = -j\omega\sigma A \quad (5)$$

구해진 와전류로부터 열원은 다음과 같이 된다.

$$q = \frac{[\text{Re}(J_c)]^2}{\sigma} \quad (6)$$

자기벡터 포텐셜이 주파수 영역에서의 해석이므로 시간의 평균열원은 다음과 같다.⁽⁵⁾

$$\bar{q} = \frac{1}{2} \omega^2 \sigma A^* A \quad (7)$$

여기에서 *는 공액 복소수(complex conjugate)를 의미한다.

3. 온도분포 해석

와전류에 의한 줄(Joule)열을 내부 발생열로 고려하면 다음과 같은 열전도 방정식을 얻을 수 있다.^(6,7)

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + \bar{q} \quad (8)$$

표면에서의 대류에 의한 자연대류 조건은 다음과 같다.

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_\infty) \quad (9)$$

위의 식들로부터 유한요소 방정식을 유도하면 아래식을 얻을 수 있다.

$$[C][\dot{T}] + [K][T] = [Q] \quad (10)$$

여기에서 각각의 요소들은 다음과 같다.⁽⁸⁾

$$[C] = \int \rho c [N][N]^T dx dy \quad (11)$$

$$[K] = k \int \left(\left[\frac{\partial N}{\partial x} \right] \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right]^T + \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right] \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right]^T \right) dx dy + h \int [N][N]^T d\Gamma \quad (12)$$

$$[Q] = \int \bar{q} [N] dx dy + \int h T_\infty d\Gamma \quad (13)$$

여기서 ρ 는 밀도, T_∞ 는 외부온도, c 는 비열, k 는 열전달 계수, h 는 대류열전달 계수이다. (10)식에서 \dot{T} 와 T 는 가중인자 θ 를 도입하여 계산하였다.⁽⁸⁾

$$\dot{T} = \frac{T_{i+\Delta t} - T_i}{\Delta t} \quad (14)$$

$$T = (1 - \theta)T_i + \theta T_{i+\Delta t} \quad (15)$$

수치해석의 안정적 수렴을 위해서 θ 는 implicit method 인 1을 사용하였다. 전자기장 해석시 σ 와 μ 는 주어진 온도에 대한 값을 사용하였고 열원 \bar{q} 값도 주어진 온도에 대한 σ 을 이용해 계산된 값을 사용하였다. 온도분포 석수행에서도 c 값과 k 값을 주어진 시각 t 에서 온도에 대한 값을 사용하였다.

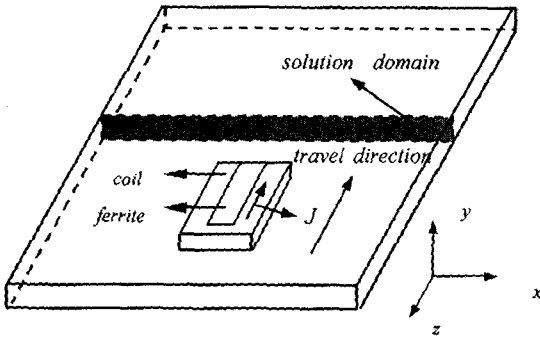


Fig. 1 Configuration of induction heating

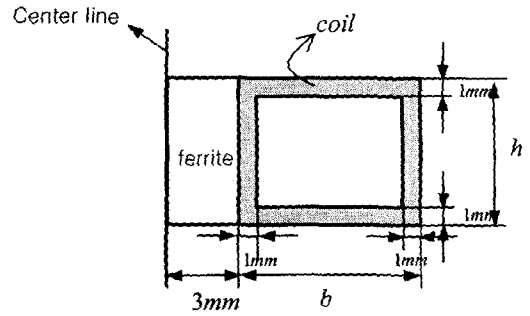


Fig. 2 Half coil shape

4. 유한요소 해석과 실험

본 연구에서 강판의 가열에 사용된 유도 가열 장치의 개략적인 그림은 Fig. 1 에 나타내었다. 유한 요소 모델링은 주파수 50kHz 의 일정한 전류밀도 $5.7 \times 10^7 A/m^2$ 을 가정하였다. 좌우 대칭(symmetry) 구조이므로 대칭 단면 한쪽만을 해석의 대상으로 고려하였다.

가열코일의 대칭단면은 Fig. 2 의 그림과 같이 사각 채널형태로 되어 있으며 코일 가운데 부분에는 냉각수가 통과하게 되어있다. 실험에 사용된 코일의 b 값과 h 값은 각각 5mm, 10mm, z 방향으로의 길이는 60mm 이다. 유한요소 해석 단면은 아래 그림 Fig. 3 과 같고 온도측정을 위해서 아래면 중앙의 위치에 열전대를 부착하였다.

유한요소해석을 실험과 동일한 조건에서 수행하였으며 실험과의 비교를 위해서 열전대가 부착된 단면의 영역을 절단하고 상 변태가 일어나는 영역을 관찰하였다.

전자기장 유한요소 해석을 위한 요소분할 형태는 Fig. 4와 같은 형태이며 강판, 코일, 페라이트, 주변공기를 포함하고 있다. 해석을 위한 경계조건은 대칭면은 대칭조건을 이용하여 자기벡터 포텐셜의 값을 Dirichlet 경계값인 0 으로 주었고 나머지 영역에서도 충분히 먼 외부 경계조건으로써 자기벡터 포텐셜의 값을 0 으로 주었다.⁽⁵⁾

초기 온도가 20 °C 인 상태의 전자기장 해석결과가 Fig. 5 에 보여지고 있다. 코일과 강판의 간극은 1mm 로 설정하였다.

단면해석에 대한 온도분포해석은 코일의 z방향 이송속도에 따라 해석단면에 정해진 시간동안 가열을 하는 것으로 가정하였다. 코일의 z방향 폭 길이는 60mm이므로 가열시간에 대한 z방향의 이

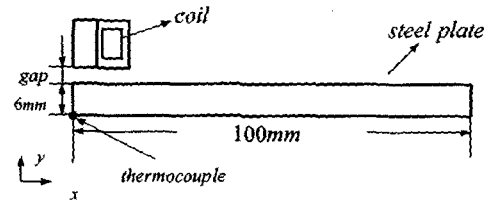


Fig. 3 Two dimensional half model

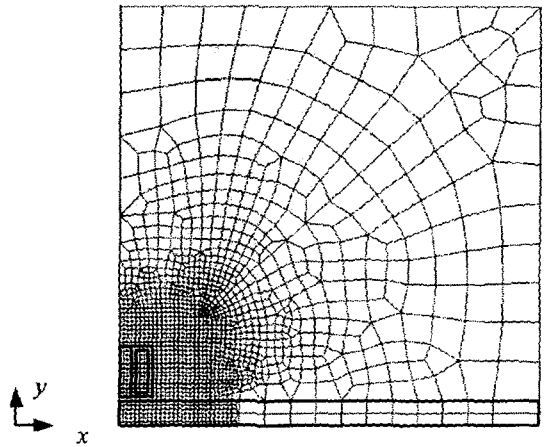


Fig. 4 Solution domain and mesh generation

송 속도를 알 수 있다. Fig. 6 은 간극이 1mm 이고, 이송 속도 10mm/s 일 때의 온도 값에 대한 유한 요소 해석과 실험의 결과를 보여주고 있다. 대체적으로 유한요소 해석과 실험의 결과는 거의 유사한 경향을 보이고 있다. 특히, 온도가 760 °C 부근에서는 Curie 포인트의 영향으로 인해서 온도의 증가가 다소 완만한 경향을 보이다가 다시 증가하는 양상을 보여 주고 있다.

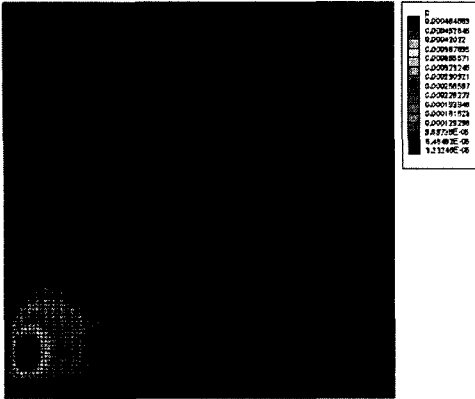


Fig. 5 Isolines of magnetic vector potential (gap=1mm)

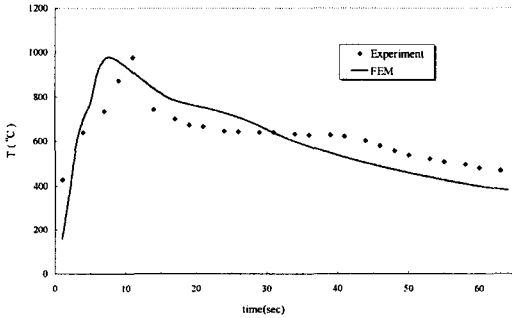


Fig. 6 Temperature history at bottom center of steel plate. (gap=1mm, v=10mm/s)

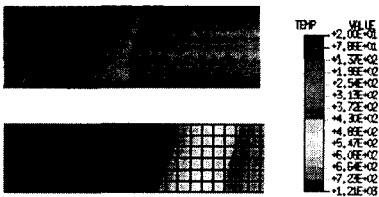


Fig. 7 Heat affected zone inside workpiece (gap=1mm, v=10mm/s)

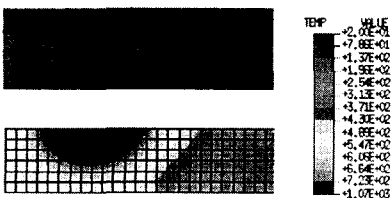


Fig. 8 Heat affected zone inside workpiece (gap = 2mm, v=20mm/s)

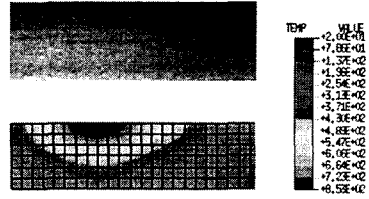


Fig. 9 Heat affected zone inside workpiece (gap=2mm, v=30mm/s)

단면영역의 열영향부를 관찰하기 위해서 Fig. 3에서 열전대가 부착된 부분을 절단한 부분과 수치 해석으로 계산된 열영향부의 모습을 Fig. 7에서 보여주고 있다. 수치 해석상에서 상 변화가 일어나는 온도가 723 °C 라고 가정하고, 상변태가 시작되는 영역을 723 °C로 설정한 온도분포 그림을 보여주고 있다. 열의 유입이 과다하여 깊이방향 전체로 상 변화가 일어나는 것을 보여주고 있다. 깊이를 방향으로의 온도 분포 기울기를 크게 하기 위하여 간극을 2mm로 하고 속도를 더 빠르게 하여 실험과 수치해석을 수행한 그림이 아래 Fig. 8과 Fig. 9에 보여지고 있다.

열 경화 부분의 영역이 이송속도 증가에 따른 입열량의 차이로 상 변화 영역의 폭 방향 크기와 깊이 방향으로의 크기가 상대적으로 줄어들고 있는 양상을 보여주고 있다. 위의 해석과 실험으로써 간극과 이송속도를 조절하게 되면 우리가 원하는 영역에 필요한 만큼의 열을 가하여 산업적으로 이용 가능함을 알 수 있다.

5. 코일형태에 대한 영향

코일의 형태에 따른 상 변화 영역의 크기에 대한 영향을 관찰하기 위해서 Fig. 2의 사각채널 형태의 코일형상을 두께는 1mm로 고정한 상태에서 h 와 b 를 변화시켜 가면서 해석결과를 관찰하였다. 동일한 전류밀도를 주기 위해서 코일 단면적을 같은 크기로 유지하면서 b 와 h 를 변화시켰다. 그에 따른 case가 총 10개이며 모든 경우에 대해서 간극이 1, 2, 3mm 인 경우에 대해서 해석을 수행하였다. 관찰 대상을 열영향부의 크기로 설정한 이유는 추후 유도가열을 이용한 강판의 변형연구에서 변형 예측을 위해서는 소성영역을 결정하여야 하는데 많은 연구에서 소성영역의 크기를 열영향부의 크기와 동일하다고 가정하기 때문이다. (9-11) 또한 열영향부는 강판의 표면경화처리에서 중요한 관찰대상이기도 하다. Fig. 10에서의 그림은 gap=2mm, 속도 20mm/s 일때 열영향부의 폭을 나타낸 그림이다. Case 번호가 증가 할수록 열영향

Table 1 Coil shape

Case	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>b</i> (mm)	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<i>h</i> (mm)	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3

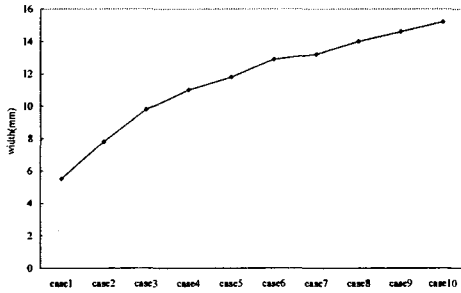


Fig. 10 The width of heat affected zone for the variation of case. (gap=2mm, v=20mm/s)

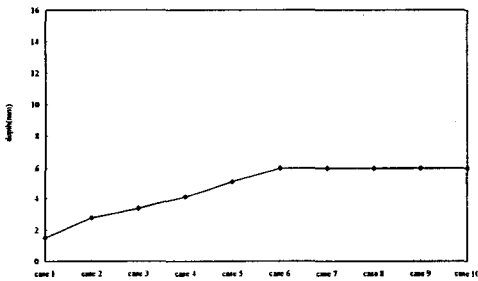


Fig. 11 The depth of heat affected zone for the variation of case. (gap=2mm, v=20mm/s)

부의 폭이 증가하고 있는 양상을 보여주고 있다. 이는 case 번호가 증가할수록 코일 폭이 증가하므로 코일에 가까운 거리에 위치하고 있는 도체의 영역이 늘어나게 되고 자기벡터 포텐셜값이 상대적으로 큰 값이 존재하는 영역이 늘어나게 되어 발열량이 늘어난 것이다. 즉 코일 폭이 늘어나게 되면 발열량이 증가한다고 판단할 수 있다. Fig.11은 case 증가에 따른 열영향부 영역의 깊이를 나타낸 것이다. Case가 증가함에 따라서 열영향부 영역의 깊이가 증가하고 있는 것을 알 수 있다. Case 번호 증가에 따라 위쪽의 코일이 시편쪽으로 접근하기 때문에 코일과 시편의 간극이 감소하는 효과와 동일하게 열영향부의 깊이가 커지고 있다.

선상가열 공정에서 발생하는 각변형은 두께방향의 온도구배, 열영향부의 폭과 깊이의 크기 등에 영향을 받는다. 일반적으로 각변형은 두께방향의

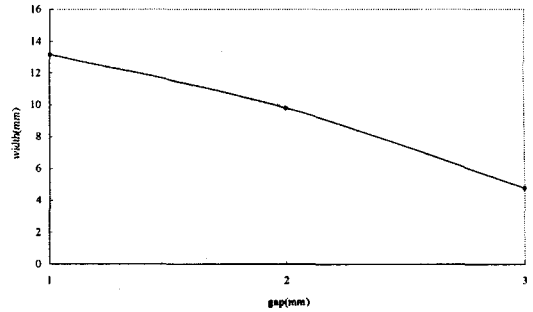


Fig. 12 The width of heat affected zone for the variation of gap. (case3, v=20mm/s)

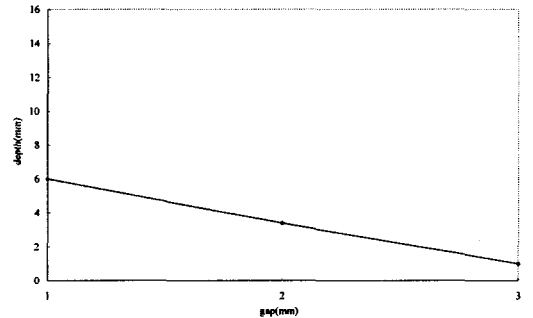


Fig. 13 The depth of heat affected zone for the variation of gap. (case3, v=20mm/s)

온도 구배가 클수록, 또는 열영향부의 폭이 크고 깊이가 작을 수록 변형이 많이 일어난다.

Fig.10과 Fig.11에서 계산된 열영향부의 폭과 깊이로써 소성 영역의 크기를 인자로 하여 각변형량을 구하는 방법에 의해서 각변형량을 예측할 수 있다.⁽¹¹⁾ Fig. 10과 Fig. 11에서 계산된 그림을 보면 case가 증가하면 열영향부의 폭이 증가하지만 그에 따라서 열영향부 영역의 깊이도 증가하므로 어느 case가 가장 큰 각변형을 일으키는지에 대해 위의 그림만으로 판단할 수 없지만 추후에 소성영역으로써 각변형을 예측하는 방법을 이용하면 각변형을 가장 많이 유도하는 case를 알 수 있고 각각의 case에 대한 각변형량을 구할 수 있을 것이라고 판단된다. Fig. 12와 Fig. 13에서는 case3, v=20mm/s 일 때 코일과 시편의 간극의 변화에 대한 열영향부의 폭과 깊이를 보여주고 있다. 간극이 1mm인 경우에 열영향부의 폭과 깊이가 가장 크고 간극이 커질수록 그 크기가 감소하고 있다. 코일과 시편의 거리가 가까울수록 코일과 가까운 영역에 있는 시편의 영역이 넓어져 발열 되는 영역이 넓어지기 때문이다. Fig. 14와 Fig. 15에서는 주파수의 변화에 대한 열영향부의 폭과 깊이를 나타내고 있다.

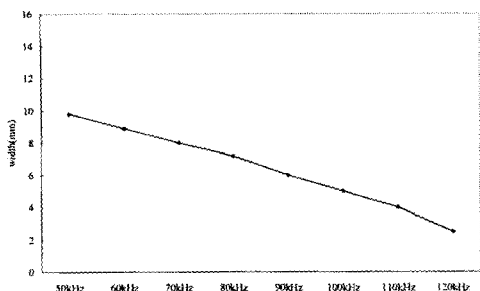


Fig. 14 The width of heat affected zone for the variation of frequency. (case3, gap=2mm, v=20mm/s)

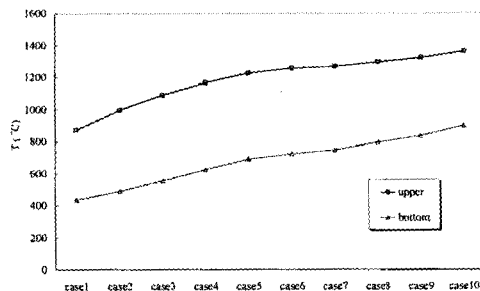


Fig. 16 Temperature at upper and bottom face for the variation of case. (gap=2mm, v=20mm/s)

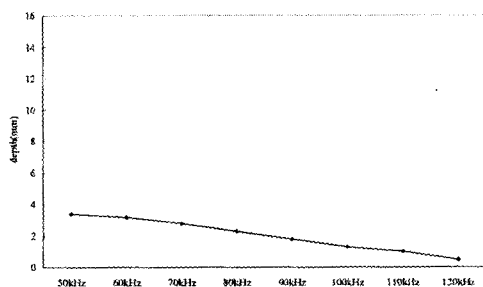


Fig. 15 The depth of heat affected zone for the variation of frequency. (case3, gap=2mm, v=20mm/s)

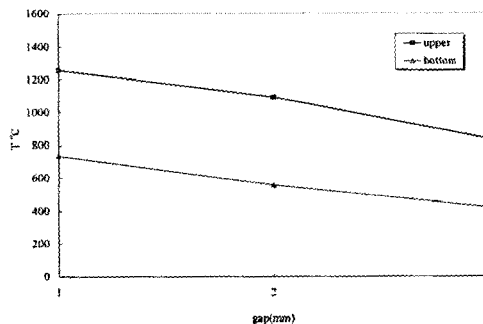


Fig. 17 Temperature at upper and bottom face for the variation of gap. (case3, v=20mm/s)

주파수가 증가할수록 열영향부의 폭과 깊이가 전반적으로 줄어드는 경향을 보여주고 있다. 고주파 유도가열에서 주파수가 커지게 되면 침투깊이가 작아져 발열 되는 영역이 얇아짐으로써 나타나는 현상으로 볼 수 있다. 유도가열시 큰 주파수영역에서는 열영향부의 깊이가 얇아지므로 표면경화 처리에 유리함을 알 수 있다. 각변형을 일으키는 또다른 주요인자는 판 두께방향의 온도구배이다. Gap=2mm, v=20mm/s 일때의 두께방향의 온도구배의 영향을 관찰하기 위하여 시편의 상면과 하면의 온도를 Fig. 16에 나타내었다. 상면과 하면의 온도를 살펴보면 case 3에서 case 6까지는 온도의 차이가 비슷한 경향을 보여주고 있으며 case4에서 온도차이가 가장 큰 것을 보여주고 있다. 그러므로 case 4가 모든 case들 중에서 가장 많은 각변형을 유도한다고 예상할 수 있으나 온도차이가 다른 case들과 비교해 상대적으로 크지않아 각변형은 큰 차이가 없을 것으로 추측된다. Fig. 17 에서는 case 3에서 속도가 20mm/s 일 때 간극의 변화에 대한 시편의 상면과 하면의 온도를 나타내고 있다. Gap이 2mm 일 때 상면과 하면의 온도차가 가장 큰 것으로 나타났다. 주파수의 변화에 따른 상면

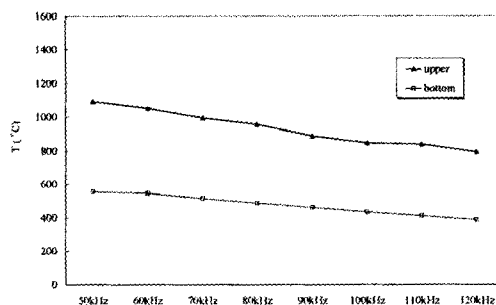


Fig. 18 Temperature at upper and bottom face for the variation of frequency. (case3, gap=2mm, v=20mm/s).

과 하면의 온도를 Fig. 18 에 나타내었다. 그림에서 주파수가 증가할수록 상면과 하면의 온도는 모두 감소하는 경향을 보이고 있다. 상면과 하면의 온도차이도 주파수의 증가에 따라서 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 따라서, 큰 각 변형을 유도하기 위해서는 상대적으로 적은 주파수의 유도가열이 적합하다고 예측할 수 있으나 소성 영역의 크기를 인자로 하여 각 변형량을 계산하면 더 정확한 결

과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 위의 유한요소 해석 결과를 이용하여 추후에 각변형에 관련된 여러 가지 연구수행이 가능할 것으로 판단된다.

6. 결론

유도 가열현상을 해석하기 위해서 전자기장 해석과 열 전달 해석이 연관된 유한요소 프로그램을 개발하였고 전자기장 해석을 위한 물성치와 온도분포해석을 위한 물성치를 온도에 따라 변화시켜서 해석하였다. 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/s 로 가열시 760 °C 부근에서는 Curie point 의 영향으로 온도의 증가가 다소 완만해지는 경향을 보였다.

(2) 간극 2mm, 속도 20mm/s 인 조건에서 case 번호가 증가함에 따라서 열영향부의 폭과 깊이가 증가하였다. 특히 case6 이상이 되면 깊이방향으로 두께 6mm 전체의 영역에 열영향부가 생성되었다.

(3) 간극 2mm, 속도 20mm/s 로 가열시 case4 가 상면과 하면의 온도차이가 가장 크게 나타났으나 온도차이에 의한 각변형은 다른 case 들과 비교해 큰 차이가 없을 것으로 판단된다.

(4) 유도가열장치의 주파수가 증가할수록 시편의 상면과 하면의 온도차이가 감소하므로 큰 각변형을 유도하기 위해서는 상대적으로 적은 주파수의 유도가열이 유리할 것으로 판단된다.

후 기

본 논문은 2002 년도 두뇌 한국 21 사업에 의하여 지원되었습니다.

참고문헌

- (1) Ueda, Y., Murakawa, H., Mohamed, R.A, Neki, I. Kamachika, R., Ishiyama, M. and Ogawa, J., 1994, "Development of Computer Aided Process Planning System for Plate Bending by Line Heating(Report 3)-Relation Between Heating Condition and Deformation," *Journal of Ship Production*, Vol. 10, pp. 248~257.
- (2) Sadeghipour, K., Dopkin, J. A. and Li, K., 1996, "A Computer Aided Finite Element/Experimental Analysis of Induction Heating Process of Steel," *Computers in Industry*, Vol.28, pp. 195~205.
- (3) Bae, K. Y., Lee, T. H. and Yang, Y. S., 2001, "A Study of the Effects of Process Variables on Temperature and Magnetic-Flux Distribution Heating of Steel plate," *J. Korean Welding Society*, Vol. 19, pp. 78~85.
- (4) Dughiero, F., Lupi, S. and Ponchioli, S., 2000, "The Prediction of Thermal Transients in the Induction Heating of Rectangular Billets," *The Int. J. Comp. Math. Electr. Electr. Engng*, Vol. 19, pp. 712~717.
- (5) Hwang, S. H., 1995, *Optimum Design of Position and Width of Coils in the Induction Heating System*, Seoul National University, M.S. Thesis.
- (6) Kang, J. G., Lee, J. H. and Shin, J.G., 2000, "Numerical Analysis of Induction Heating for the Application of Line Heating," *Journal of The Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 37, pp.110~121.
- (7) Kang, J. G., 1997, *Thermo-Elastic Plastic Numerical Simulation of Line Heating Using High Frequency Induction Heating*, Seoul National University, M.S. Thesis.
- (8) Huebner, K. H., Thornton, E. A. and Byrom, T. G., 1995, *The Finite Element Method for Engineers*, A Wiley-Interscience Publication.
- (9) Fujimoto T., 1970, "A Method for Analysis of Residual Welding Stresses and Deformation Based on the Inherent Strain," *Journal of Japanese Welding Society*, Vol. 39, pp. 849~866
- (10) Beom, H. G. and Earmme, Y. Y., 1999, "The Elastic Field of an Elliptic Cylindrical Inclusion in a Laminated with Multiple Isotropic Layers," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 66, pp. 165~171
- (11) Son, K. J., 2003, *A Study on the Plate Deformation of Thermal Processing*, Chonnam National University, Ph.D. Thesis.