

유도가열을 이용한 강판성형공정에서 유도코일 형상의 효과

양 영 수* · 배 강 열** · 신 희 윤*

*전남대학교 기계공학과

**진주산업대학교 메카트로닉스공학과

Effects of Inductor Shape in Steel Forming Process with High Frequency Induction Heating

Young-Soo Yang*, Kang-Yul Bae** and Hee-Yun Shin*

*Dept. of Mechanical Engineering, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

**Dept. of Mechatronics Engineering, Jinju National University, Jinju 660-758, Korea

*Corresponding author ; ysyang@chonnam.ac.kr

(Received April 17, 2008 ; Revised June 17, 2008 ; Accepted August 11, 2008)

Abstract

Because of high intensity and easy controllability of the heat source, high frequency induction heating has been concerned and studied for the steel forming process in the ship building industry. However, the heating and forming characteristics have to be further properly modelled and analyzed for the process to be utilized with its optimal working parameters.

In this study, a modelling with thermo-elasto-plastic analysis is performed using the FEM to study heat flow and deformation of the steel plate during the forming process with the electro-magnetic induction heating. The numerical model is then used to study the effect of the inductor shape on the magnitude of angular deformation of the plate during the forming process. It is revealed that the square shape of inductor induces the largest deformation among the rectangular inductors.

Key Words : Steel forming, Electro-magnetic induction, Inductor shape, Heat-flow analysis, Angular deformation, FEM analysis

1. 서 론

선박의 곡블록 제작에서는 일반적으로 가스 플레임을 사용하여 강판을 가열하고 곡률을 생성하게 된다. 플레임 곡가공 공정은 입열의 세기가 낮고 균질한 열원을 얻기 어려워 강판의 곡률을 정밀하게 확보할 수 없어, 생산성이 낮고 품질정도는 숙련된 작업자에 크게 의존하게 된다. 이에 대처하고자 고주파 유도가열을 이용해 강판을 성형하고자 하는 연구가 지속적으로 수행되고 있다. 유도가열은 전기적으로 열원을 얻게 되어 기존의 가스플레임보다 열원의 세기가 일정하고 열원의 제어가 상대적으로 용이하다. 그럼에도 유도가열의 열원에 대한 모델링 연구와 가열특성에 대한 이론 해석이 부족한

실정이라서 아직 광범위한 적용에는 한계가 있다. 특히 가열온도에 따라 재료의 자기적 특성이 변화하기 때문에 유도가열에 대한 공정해석이 용이하지 않다고 알려져 있다. 따라서 유도가열공정을 강판의 곡가공에 적용하기 위해서는, 우선 공정의 모델링을 통해, 열원의 해석과 이에 의한 강판의 열유동 그리고 열변형 등에 대한 연구가 필요하고, 나아가 정확한 곡률을 생성하는 최적의 공정변수를 설정하는 연구가 필요하다. 유도가열 공정을 해석하고자 하는 시도로, 2차원 및 3차원 모델에 대한 온도분포해석이 수행된 사례가 있고^{1,2)} 간이화된 수치해법으로 3차원 열변형해석 등이 수행되었다^{3,4)}. 그러나 이와 같은 연구에서는 강판 가열공정을 정확하게 상사한 모델이 아니었고, 또 온도변화에 대한 재료 및 자기적 특성변화를 충분히 고려하지 못하고 있

다. 나아가 유도 코일의 이동을 고려한 해석 등 강판유도가열공정을 모델링한 연구가 수행되지 못하였다. 한편, 최근에는 이와 같은 유도가열공정의 특성을 고려하고, 유도가열공정에 대한 열원해석과 온도분포해석을 수행하고 있고⁵⁾, 변형량 예측을 위한 3차원 열변형해석⁶⁾ 등이 수행되어 유도가열공정의 특성 해석에 큰 진전이 있었다. 그러나 코일의 형상 등 가열시스템 파라미터에 따른 가열효과의 관계는 여전히 정립이 되지 않아, 열원의 균질성이나 제어의 용이함 등의 이점을 제대로 활용하지 못하는 강판 성형 결과를 얻을 수 있다.

본 연구에서는 강판의 유도가열에 대한 가열, 열유동 및 변형해석 모델을 구축하고, 코일형상변화에 따른 강판의 온도분포와 각변형 크기를 연구하여, 최적의 가열효과를 얻을 수 있는 코일의 형상을 설정하고자 하였다. 강판내의 열유동과 변형해석은 상용유한요소해석프로그램을 활용하였고, 강판으로의 입열과정, 즉 코일에 의한 발열과정은, 유도가열공정을 준정상상태로 가정된 별도의 열유동해석프로그램을 작성하여 규명하였다.

2. 고주파 유도가열에 의한 성형공정의 해석

2.1 발열과정 해석

강판 위에 위치한 유도코일에서 발생하는 자속은 무한개의 동심코일로 구성되었다고 가정할 수 있는 강판에 쇠교를 하게 된다. 이때 자속은 유도코일에 흐르는 고주파의 교류 전류에 의해 발생되는 바, 지속적으로 방향과 크기가 변화된다. 그러면 강판상의 각 코일에는 그 내부로 쇠교하는 자속의 시간당 변화율에 해당하는 만큼의 기전력이 발생하고 이로 인하여 폐회로인 코일에 전류(와전류)가 생성되어, 전류가 흐르는 저항체 강판에는 저항열이 발생한다. 따라서 반경변화에 따르는 각 코일위치에 따라 발생열이 변화되고, 결국 유도코일 윤곽에 해당하는 크기의 반경위치(유도코일 윤곽이 투영된 형상)에서는 유도코일에서 쇠교하는 전체 자속의 시간변화율에 의하여 전류가 결정되고, 회로의 경로도 길어 져, 결국 열이 가장 크게 발생되는 위치가 된다. 이와 같은 발생열을 이용하는 공정을 고주파유도가열이라 하고, 이를 이용하여 강판에 특정한 변형을 유도하는 공정을 강판성형공정이라 할 수 있다.

본 연구에서는 유도코일과 강판 사이에 발생하는 이러한 전자기적 특성을 수치적 해석 방법으로써 규명하여 강판에서 발생되는 열량을 산출하고자 하였다. 강판이 퀴리점 이상으로 가열되면 자성을 상실하는 등 온도에 따라 강판의 투자율이 변화하므로, 온도분포와 동시에 자기장 해석이 수행되어야 정확한 열원의 분포를 해

석할 수 있다. 전자기장 해석에서는 준정상상태의 열전달해석으로써 온도분포를 우선 계산하고 동시에 자기장 해석을 수행하여, 강판에 유도되는 와전류와 이로 인한 발열량을 산출하였다. 고주파유도가열의 전자기장 모델은 맥스웰의 방정식에서 유도된 와전류방정식으로 표현할 수 있고⁵⁾, 이는 수치해석 방법을 이용하여 해를 도출할 수 있다.

와전류방정식을 유한요소해석을 위해 정식화하고 프로그래밍하여 전류를 산출하였고, 또 이를 이용하여 강재 표면에 발생하는 열을 계산하였다. 전자기장해석에서 투자율 등 재료의 물성치는 온도에 따라 변화하게 되어, 와전류의 크기와 발열량을 산출하기 위해서는 강재의 온도변화가 동시에 고려되지 않으면 안 된다. 본 연구에서는, 이와 같은 공정의 특성을 고려하기 위해서 먼저 강재의 초기 온도상태에서 전자기장해석을 수행하여 발열량을 구하고, 이를 이용하여 강재 내의 열유동해석을 수행하여 강재의 온도분포를 계산하였다. 산출된 온도분포 상태에서 즉 온도변화에 따른 재료물성 변화를 고려하여 재차 전자기장해석을 수행하되, 온도분포가 수렴상태에 도달할 때까지 이를 반복하여 계산하였다.

전자기장과 열유동 해석은 Fig. 1과 같이 강판, 코일, 공기층으로 구성된 3차원 해석모델을 활용하되, 유도코일 좌우의 대칭성을 고려하여 유도코일을 중심으로 한 쪽 영역만을 해석대상으로 설정하였다. 강판성형공정의 특성상, 유도코일은 강판 위를 이동하게 된다. 본 연구에서는 유도코일의 이동속도가 강판내의 열전도속도보다 충분히 크다고 가정하여, 유도코일 진행방향으로 준정상상태를 가정하여 열유동 현상을 모델링하였으며⁷⁾, 이를 유한요소방정식으로 정식화하고, FORTRAN 프로그램을 작성하여 해석을 수행하였다. 해석에서는 유도코일이 전류 3750A, 이송속도 15mm/sec로 적용되는 경우를 대상으로 하여, 강판 각 절점 위치에서의 발열량을 산출하였다. 이 때 산출된 발열량을 강판의

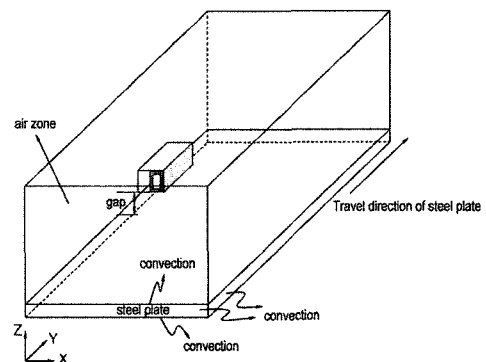


Fig. 1 Solution domain for FEM analysis of induction heating

유도가열공정을 위한 열유동 및 변형 모델의 유한요소 해석과정에서 입열량으로 활용하였다. 입열량은 코일의 위치에 상대적인 거리에 따른 크기로 저장하였다.

2.2 강판 열유동 및 열변형 해석

본 연구에서는 입열량이 주어진 상태에서 열유동과 열변형 해석을 하기 위하여 상용유한요소해석 소프트웨어인 ABAQUS를 활용하였다. 강판 유도가열공정의 유한요소해석을 하기 위하여 Fig. 2와 같은 해석영역과 유한요소모델을 사용하였고, 해석영역의 크기는 길이 1000mm, 폭 500mm, 두께 20mm이고, 재질은 AH32 급 TMCP 강재를 대상으로 하였다. 유도가열 과정에서 강판에 발생하는 변형을 해석하기 위해서는 먼저 강판에서의 열유동 해석이 수행되어야 한다.

열유동 모델은 대칭성을 고려하여 반쪽을 해석 대상으로 하였고, 대칭면에서는 단열조건, 나머지 면에서는 대류조건을 적용하였다. 열변형 모델도 동일한 형태이나, 해석에서의 경계조건으로 대칭면에서는 좌우 변위 구속, 강판 시작부와 종단부에서는 폭의 1/4지점에서 단순지지로 상하방향의 변위를 구속하였다. 열유동해석에서는 시간 경과에 따른 입열량을 저장된 전자기장 해석결과에서 활용하였다. 열유동과 열변형은 서로 연성되어 있어, 이를 고려하기 위하여, 해석에서는 열유동 해석으로 온도분포를 먼저 계산하되, 각 해석시간 단계에서의 열변형은 그 단계에 계산되어 저장된 온도분포를 활용하여, 해석을 수행하였다.

2.3 유도코일의 형상 변화에 따른 해석

유도코일의 형상이 변화되면 강판에서의 발열량이 변화됨을 예상할 수 있다. 본 연구에서는 최적의 가열효과를 얻을 수 있는 코일의 형상을 설정하고자 코일형상 변화에 따른 강판 내의 열유동과 열변형을 해석하고자 하였다. 즉 코일의 형상이 변화한 경우에 대하여, 전자기장 해석으로써 강판에 유입되는 입열량의 변화를 계산하고, 이를 이용하여 각 경우에 대한 열유동 해석과

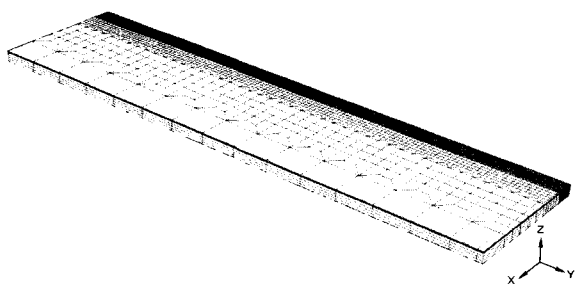


Fig. 2 Mesh for FEM thermo-mechanical analysis

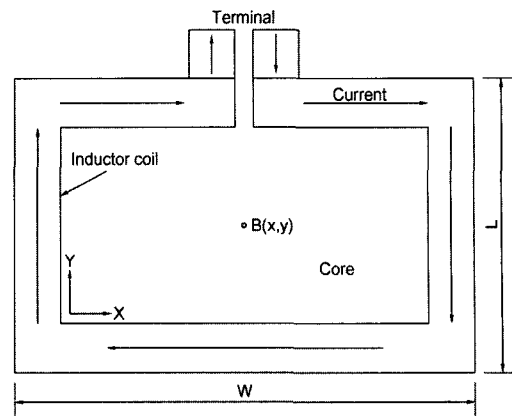


Fig. 3 Plane view of induction coil system

열변형 해석을 수행하였다. 다만 코일과 코어의 제작 문제 등을 고려하여 코일의 형상은 4각의 형태에 한정하였다.

이에 앞서 Fig. 3과 같은 코일모델을 활용하여 코일의 형상에 따른 자속밀도와 자속의 크기를 단순한 이론식으로 계산하고, 이를 수치해석에서 나타나는 결과와 연계하고자 하였다. 간격이 각각 W 와 L 인 도선에 반대 방향으로 같은 전류 i 가 흐르는 경우, x 와 y 인 점에서의 자속밀도 B 는 아래와 같이 각 도선으로부터 발생하는 방향이 동일함으로 크기를 중첩하여 나타낼 수 있다⁸⁾. 여기서 L 은 코일의 길이, W 는 코일의 폭, μ 는 코어의 투자율을 나타낸다.

$$B(x,y) = \frac{\mu i}{2\pi} \left(\frac{1}{x} + \frac{1}{W-x} + \frac{1}{y} + \frac{1}{L-y} \right) \quad (1)$$

코일을 쇠교하는 자속의 크기는 자속밀도를 아래 방정식 (2)와 같이 적분하여 산출할 수 있다. 여기서 a 는 코일의 두께를 나타낸다.

$$\begin{aligned} \phi &= \int_a^{L-a} \int_a^{W-a} B(x,y) dx dy \quad (2) \\ &= \frac{\mu i}{2\pi} [(L-2a)(2\log(W-a) - 2\log a) \\ &\quad + (W-2a)(2\log(L-a) - 2\log a)] \end{aligned}$$

본 연구에서는 코일의 형상 변화를 사각형에 한정하고, 또 코일의 저항을 최소로 유지하고 설정된 전류를 얻기 위하여, 폭과 길이의 합은 120mm로 지정하였다. 열유동 및 열변형 해석에서 코일의 이동속도는 15mm/sec, 전류는 3750A로 일정하게 설정하고, 사각형 코일의 폭과 길이를 Table 1과 같이 5가지 경우로 변화하였다.

Table 1 Variation of width-to-length ratio in shape of induction coil

Index	Width W, mm	Length L, mm	W/L
1	40	80	0.5
2	48	72	0.67
3	60	60	1
4	72	48	1.5
5	80	40	2

3. 결과 및 고찰

Fig. 4는 방정식(1)로 단순히 예측한 자속밀도 분포 형태로 $\mu_i/2\pi$ 에 대한 단위크기의 자속밀도 분포를 보여 주고 있다. 코일 주위에서는 높은 자속밀도를, 코어 중앙으로 갈수록 낮은 자속밀도를 보이고 있다. 코일 주위 중에서도 모서리 부분이 더 높고, 각 변의 중심부위에서는 다소 낮게 나타나고 있다. W/L에 따라 폭 가장 자리에서 자속밀도가 변화되어, W/L이 0.5, 1, 2로 커질 때, L/2의 위치에서, 폭 가장자리 자속밀도는 각각 0.205, 0.21, 0.24로 증가되어 나타나고 있다.

Fig. 5에서는 방정식(2)로 예측한 코일 내부로 쇄교하는 $\mu_i/2\pi$ 에 대한 단위자속의 크기를 보이며, W/L의 비가 증가하면 자속이 증가하나, 비가 1보다 증가하면 자속의 크기가 오히려 감소하고 있음을 알 수 있다. 이는 자속이 분포하는 면적이 줄어들기 때문으로 해석할 수 있다. 즉 W/L이 증가할수록 폭방향 가열폭은 크나, 자속의 크기가 작아진다. 결국 시간에 따른 자속변화율이 낮아, 와전류의 크기가 낮아지고 이로 인하여 표면 가열효과가 감소하게 될 것이 예상된다.

Fig. 6에서는 강판 길이의 1/2 정도 가열한 상태에 강판의 표면에 나타나는 온도분포를 보이고 있다. 가열 폭의 정중앙(X=0)에 나타나는 온도분포로, 유도코일 전 후에 온도피크가 나타나고, 이는 Fig. 4에서 보인 바와 같이 전 후방 코일 근방의 각각 높은 자속밀도로 인한 결과임을 알 수 있다. 한편, Fig. 4에서 전 후 코일 부분과 코어 중심에서는 30% 이상의 자속밀도차가 있었음에도, 두 부분의 온도차는, 가열도중의 열전도로 인하여, 크게 줄어든 결과를 나타낸다. W/L의 비가 다른 유도코일에 의하여 가열되면 서로 다른 피크형태가 나타남을 보이고 있다. W/L의 비가 증가할수록 전후 피크간의 간격이 줄어들고 후 피크의 크기가 증가되어 전후 피크차이가 줄어들고 있다. 이는 전후 코일부의 간격(L)이 커질수록 코일 후반부 주위는 가열효과가 감소되고, 간격이 줄어들수록 표면부의 온도상승효과(가열부 모재의 초기 온도 낮음)로 인해 투자율의 감소가 나타나지 않은 결과로 판단된다. 즉 모재의 가열은 입

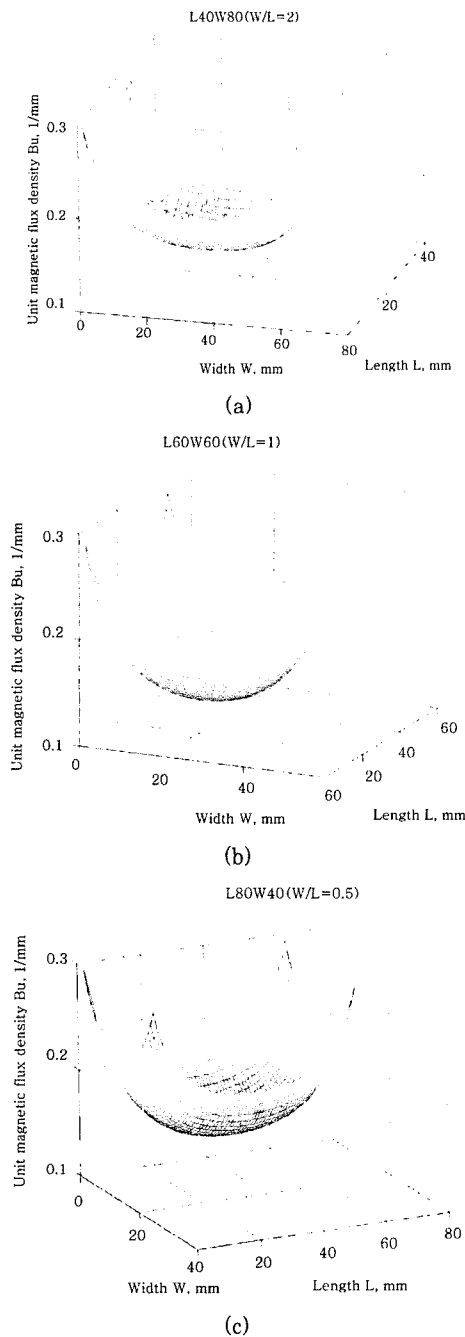


Fig. 4 Magnetic flux density flowing through core in various shapes of induction coil, (a) W/L=2, (b) W/L=1, (c) W/L=0.5

열 후에 점진적으로 이루어져 온도가 상승되나 이보다 이동속도가 빨라지게 되면 모재는 큐리온도 이하에서 입열이 이루어지기 때문에 투자율의 감소 없이 유도 가열이 가능함을 보이고 있다. 그럼에도 L의 크기가 커질수록 전체 온도의 가열은 감소하고 있어, 열집중력은 높으나 전체 입열은 낮아지게 됨을 알 수 있다.

W/L의 비가 작은 경우, 유도코일의 후반부에서는 전 반부의 사전 가열효과가 충분하여 큐리온도 이상으로

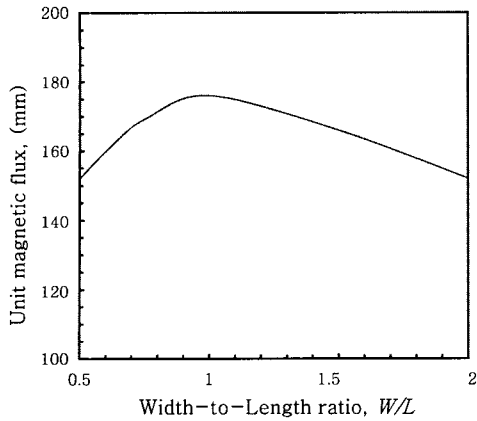


Fig. 5 Magnetic flux flowing through induction coil with coil shape

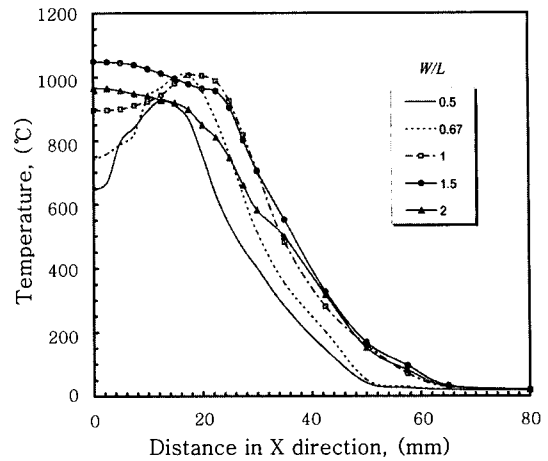


Fig. 7 Temperature distribution along X direction at Y=470mm with induction coil shape

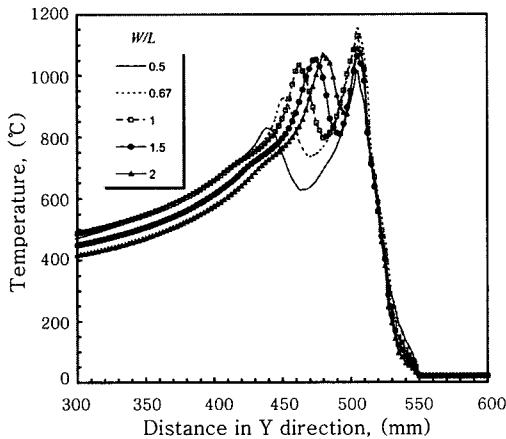


Fig. 6 Temperature distribution on center line of plate along Y direction with induction coil shape

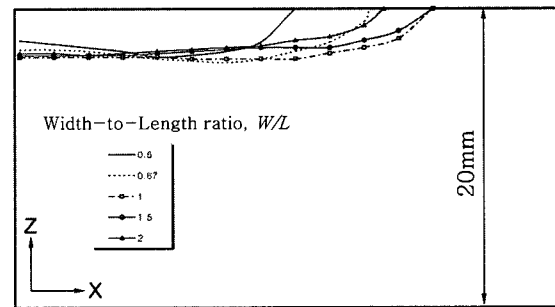


Fig. 8 Shapes of HAZ with induction coil shape

나타나는 시점이 되기 때문에 투자율이 낮게 나타나게 되고, 이로 인하여 표면의 가열효과가 감소되는 것으로 판단할 수 있다. W/L 의 비가 증가하면 유도코일의 전 후반부의 가열이 동시에 나타나, 사전 가열 효과로 인한 자속의 감쇠가 발생하지 않게 되는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 Fig. 6의 분포에서 길이 $Y=470\text{mm}$ 에서 한 쪽 폭방향(X 방향)으로의 온도분포를 나타낸 그림으로, W/L 의 크기가 증가하면 가열 폭이 넓어 졌다가 다시 감소하는 결과를 보이고 있다. 이로써 W/L 이 1에서 입열이 가장 크게 이루어지고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8은 유도코일의 형상을 변화하여 강판을 가열한 경우, 열영향부의 모양을 나타내고 있다. W/L 이 작은 경우, 강판 중앙보다 가장자리가 열영향부 깊이가 깊게 나타나고, W/L 이 증가하면 점진적으로 중앙이 깊게 되는 현상을 보이고 있다. W/L 의 크기가 증가하면 열영향부 폭이 증가하고, W/L 이 1 이후에는 다시 감소하고 있다. 이는 단순 이론식으로써 W/L 의 비가 1인 경

우에서 자속의 변화가 가장 크고, 또 가장 큰 입열이 발생할 것을 예측한 Fig. 4와 Fig. 5의 결과와 일치된 경향의 결과를 보여 주고 있다.

Fig. 9에서는 유도코일 형상에 따라 열영향부의 폭을 비교하여 나타내었다. W/L 의 크기가 증가하면 약 30mm의 폭을 나타내고, 비가 더 증가하면 폭은 완만하게 감소하는 결과를 보이고 있다. W/L 의 크기가 증

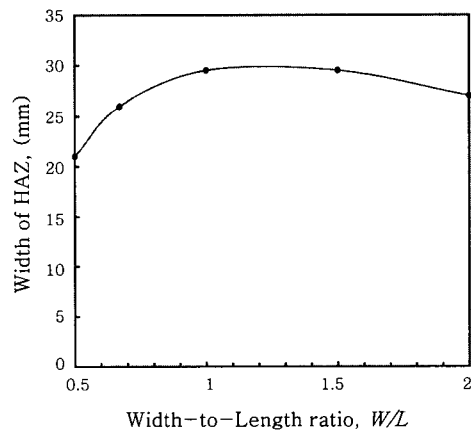


Fig. 9 Width of HAZ with induction coil shape

가하면 코일의 폭이 커져 자속 쇄교 범위가 넓어지고 가열 폭이 커지게 되나, 그럼에도 W/L 이 1보다 크게 되면 쇄교하는 전체 자속이 감소하기 때문에 입열량이 줄어들고, 결국 열영향부의 폭도 줄어들게 된다.

Fig. 10은 열변형 해석의 결과로서 각변형의 크기를 나타내고 있다. 강판길이의 폭 중앙에서 한쪽 폭방향(X 방향)으로 강판이 변형(Z 방향)된 형상으로, 유도코일의 형상에 따라 변형의 양상이 달리 나타나고 있고, W/L 의 비가 1일 때 가장 큰 변형이 발생하며, 0.5일 때 가장 적은 크기를 보이고 있다. 이는 열유동해석의 결과에서, W/L 의 비에 따라 나타난 열영향부 크기와 같은 양상을 보이고 있다. 각변형은 가열부분의 소성변형 크기에 의해 지배되는 바, 가열효과가 가장 큰 $W/L=1$ 의 경우에서 가장 크게 소성변형이 발생하였다고 판단할 수 있다.

Fig. 11에서는 Fig. 10에서 나타난 형상을 기울기로 다시 표현하였다. W/L 의 비가 증가할수록 각변형이 증

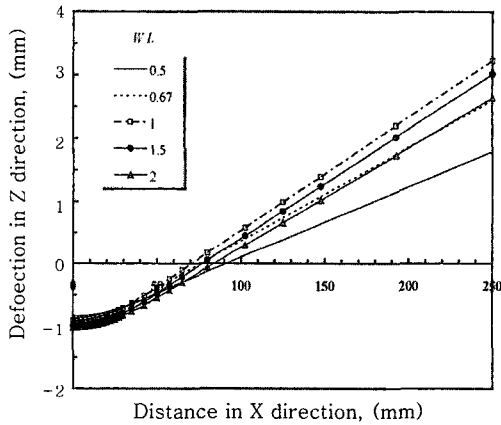


Fig. 10 Deflection in Z direction after induction heating with coil shape

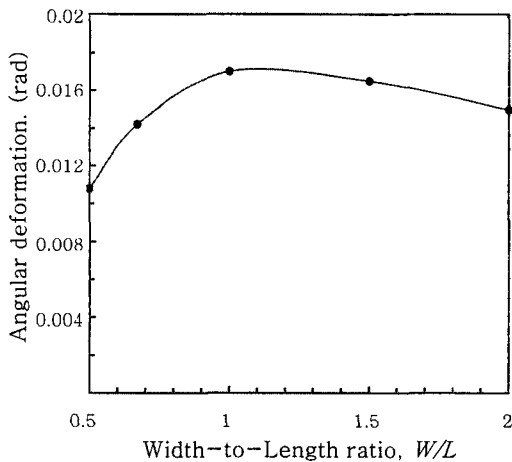


Fig. 11 Angular deformation after induction heating with coil shape

가하다가 W/L 이 1에서 최대가 얻어지고 더 이상에서는 변형량이 다시 감소함을 알 수 있다. 이는 열영향부의 폭을 나타낸 Fig. 9의 경향과 유사함을 보이고 있다. 즉 각변형의 크기가 열영향부의 폭에 비례하고 있어, 열영향부 폭을 크게 하는 형태로 유도코일을 설계 하여야 각변형이 크게 발생할 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

유도가열을 이용한 강판성형공정에서, 유한요소법으로 전자기장해석을 수행하여 열원을 모델링하고, 강판에 나타나는 온도분포와 변형의 크기를 계산하는 유한요소 해석방법과 모델을 정립하였다. 특히 온도에 따른 자기적 특성변화를 고려하여, 퀴리온도 이상의 고온 상태에서는 가열효과가 급격히 둔화되어, 과도한 온도변화와 변형이 예측되지 않도록 하였다. 정립된 모델을 이용하여 유도코일의 형상에 따른 공정해석을 수행하여 변형량을 최대로 하는 유도코일의 최적형상을 결정할 수 있었고, 해석에 의한 최적의 형상은 정사각형의 구조이었다. 이는 유도코일의 구조에 따라 이동방향 전반부와 후반부의 가열효과가 강판표면의 예열로 인하여 달리 나타날 수 있기 때문으로, 유도코일의 간격이 좁을수록 예열 효과를 줄일 수 있으나 전체의 자속이 감소하게 되고, 간격이 커질수록 예열효과로 인하여 후반부 가열 효과가 둔화되는 현상이 나타났다. 유도코일의 형상이 정사각형인 경우에는 예열효과가 다소 있지만, 최대의 자속변화를 얻을 수 있어, 최대의 가열효과를 얻어 최대 변형을 생성할 수 있었다. 이와 같은 결과는 향후 실험적 연구를 수행하여 검증하고자 한다.

감사의 글

이 논문은 2006년도 전남대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었으며 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. H. Shen, Z.Q. Yao, Y.J. Shi and J. Hu : Study on temperature field induced in high frequency induction heating, *Acta Metallurgica Sinica*, **19-3** (2006), 190-196
2. J. Nerg and J. Partanen : Numerical solution of 2D and 3D induction heating problems with non-linear material properties taken into account, *IEEE Transactions of Magnetics*, **36-5** (2000), 3119-3121
3. C.-D. Jang, H.-K. Kim and Y.-S Ha : Prediction of plate bending by high-frequency induction heating, *Journal of Ship Production*, **18-4** (2002), 226-236
4. K. Sadeghipour, J. A. Dolpkin and K. Li : A

- computer aided finite element/ experimental analysis of induction heating process of steel, Computers in Industry, **28** (1996), 195-205
5. J.-O Yun, Y.-S. Yang and H.-Y. Shin : Three dimensional analysis of induction heating process using a moving coordinate, Journ. of KWJS, **25-1** (2007), 24-29 (in Korean)
 6. K.-Y. Bae, Y.-S. Yang, C.-M. Hyun, S.-H. Won, and S.-H. Cho : Derivation of simplified formulas to predict deformations of plate in steel forming process with induction heating, Journ. of KWJS, **25-4** (2007), 58-64 (in Korean)
 7. K. Masubuchi : Analysis of welded structures, Pergamon Press, Ch. 2, 1980, 69-71
 8. B.-N. Seong : Fundamentals of physics, Yiwoo press, 1974, 439-441