

## 다분할 해석법에 의한 장형코일의 곡가공 연구

이영화<sup>†\*</sup>, 장창두<sup>\*\*</sup>

동양공업전문대학 자동화시스템과<sup>\*</sup>  
서울대학교 조선해양공학과<sup>\*\*</sup>

A Study of Bending Using Long Type Coil by Discrete Method

Young Hwa Lee<sup>†\*</sup> and Chang Doo Jang<sup>\*\*</sup>

Dept. of Automation Systems, Dong Yang Technical College<sup>\*</sup>  
Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University<sup>\*\*</sup>

### Abstract

The induction heating is more efficient for a plate bending because of its easy operation and control of working parameters, compared with the heating by a gas torch. The existing axis symmetric analysis method could neither handle initial curved plates nor be used in the optimization of coil shapes because of its limit of an axis symmetric coil shape. But the proposed method using some discrete part models and analysis processes could overcome these difficulties and show more accurate results in temperatures and deflections of flat or curved plates with initial curvature than those in the existing axis symmetric analysis method. This method is composed of the multi-disciplinary analyses such as an electro magnetic analysis, a heat transfer analysis and a deformation analysis based on inherent strain approach per each step. Traditionally, the coil shape in the induction heating is circular shape and it needs the moving process along heating lines. To overcome this, the 'Long Type Coil' with some linear parallel coils was proposed. It did not need the moving process along heating lines and reduced the heating process time. The results of experiments were compared with those of the simulation.

※Keywords: Axis symmetric(축대칭), Induction heating(유도가열), Electro magnetic(전자장), Heat transfer(열전달), Inherent strain(고유변형도)

### 1. 서론

접수일: 2007년 11월 1일, 승인일: 2008년 5월 7일  
† 교신저자: yhlee@dongyang.ac.kr, 02-2610-1836

현재 조선소에서는 판의 곡가공으로 냉간 롤러

가공이나, 열간 가공으로는 가스토치를 이용한 곡가공을 주로 사용하는데 비하여 건축이나 토목분야에서는 열간 가공으로 유도가열을 이용한 곡가공이 광범위하게 사용되고 있다.

유도가열을 이용한 판의 곡가공 과정을 해석하기 위해서는 유도가열과정의 전자장 해석, 열전달 및 냉각과정의 해석 및 변형 해석과정이 필요하다. 이러한 해석의 한 방법으로 축대칭을 이용한 유도가열 해석기법(Kim 2002)이 개발되었으나 축대칭 해석은 가열코일이 원형이며 코일과 가공판의 간격이 일정한 평판의 경우만 해석이 가능한 한계 때문에 평판과 가열코일이 원형인 경우에만 해석이 가능한 단점을 갖고 있다. 이러한 단점을 개선한 다분할 해석방법이 Lee et al.(2005)에 의해 제안되었다. 다분할법은 가열코일이 원형뿐만 아니라 다양한 코일 형상에 대한 해석이 가능하기 때문에 본 논문에서는 장형코일 형상을 개발하여 일차곡이 있는 곡판에 대해 유도가열을 통해 이차곡을 성형하는 실험을 실시하고 이 결과를 다분할법에 의한 해석 결과와 비교하였다.

## 2. 다분할 해석법

### 2.1 해석 과정

앞선 언급한 바와 같이 유도가열을 이용한 곡가공의 변형 해석은 유도가열과정의 전자장 해석, 열전달 및 냉각과정의 해석 및 변형 해석과정이 필요하며 이는 다음의 Fig. 1과 Fig. 2에 도시되어 있다.

해석과정 먼저 코일의 형상에 따라 코일의 길이 방향으로 해석할 분할 수를 결정하여 각 스텝을 모델링한다. Fig 3.과 같은 경우는 원형코일이며 스텝의 수는 모델에 따라 달리할 수 있는데 예제로 사용한 Fig. 3의 경우는 외곽 코일 형상을 고려할 때 다섯 개 이상으로 분할할 수 있는데 그림에서는 다섯 개로 이루어져 있다. Fig 4.와 같은 장형코일의 경우는 코일의 진행방향에 따라 코일의 형상이 일정하므로 스텝을 나누지 않아도 해석이 가능하다. 각 분할 스텝에 따라 모델링이 끝나면 해석을 수행하는데 해석을 위한 데이터로는 먼저 각 스텝의 모델링에 의한 코일의 형상, 위치,

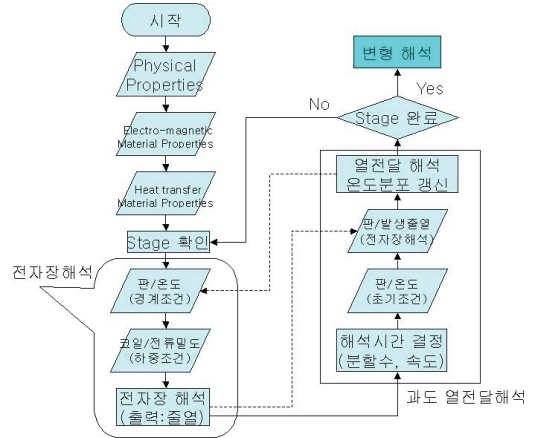


Fig. 1 Flow chart of simulator

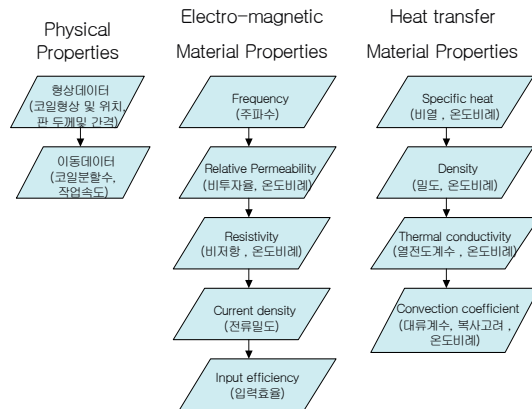
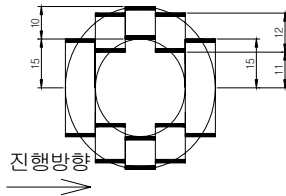


Fig. 2 Input parameters of coil and plate

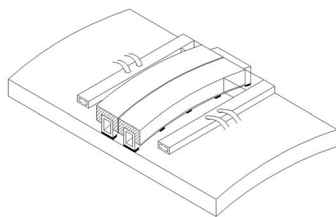
판의 두께 및 간격, 코일의 분할 수 및 이동속도 등이 있다. 전자장 해석을 위한 물성치로는 주파수, 비투자율, 비저항, 전류 및 전류밀도 및 입력 효율 등이며, 열전달 해석의 물성치로는 비열, 밀도, 열전도계수, 대류 및 복사계수 등이 있다. 이 입력된 데이터들에 의해 각 분할 단계에서 전자장 해석 및 열전달해석이 반복적으로 이루어진다. 최종단계에서 얻어진 온도분포가 고유변형도법에 의한 변형해석의 입력 데이터로 작용하여 최종 변형을 계산하게 된다.

**2.2 원형코일과 장형코일**

기존에 국내 조선소에서 부분적으로 사용된 원형코일의 경우 코일이 형상이 원형이고 가열 시, 가스토키 사용 시와 마찬가지로 코일을 가열선을 따라 움직여 주어야 한다. 그러나 장형코일(Lee 2006)의 경우 가열선 위에서 정지한 상태로 동시 가열이 가능하다. 물론 가열선이 가열코일보다 긴 경우 몇 번의 정지 가열을 반복할 수 있다. 다분할 해석법에 따른 모델링의 관점에서 원형코일의 경우 Fig. 3과 같이 코일의 진행방향에 따라 평균화된 단면 형상을 모델링함으로써 시작 부위와 끝 부위의 에러(Fig. 3에서 5분할된 모델을 보면 첫 번째와 마지막 다섯 번째 모델에서 두껍게 표시된 양끝 가장자리의 코일은 실제 동근 원형부분과 차이가 남을 알 수 있음.)를 피할 수 없는데 반하여 장형코일의 경우 Fig. 4와 같이 길이 방향으로의 단면적이 일정하므로 모델링에 기인한 에러가 없어지게 된다. 그러므로 원형코일보다 더욱 정밀한 해석이 가능해진다.



**Fig. 3** Example of single coil modeling



**Fig. 4** Configuration of long type coil

**3. 곡판의 가열실험 및 해석**

**3.1 실험 과정**

일차곡을 갖는 곡판에 이차곡을 발생시키기 위한 실험은 다음의 Table 1과 같은 실험 모델에 대

**Table 1** Experimental models

Model	width x length x thickness (mm)	Radius(mm)	Material
S12-10k	400x400x12	10,000	Mild steel
S16-10k	400x400x16	10,000	Mild steel
S12-5k	400x400x12	5,000	Mild steel
S16-5k	400x400x16	5,000	Mild steel

해 실시하였다.

실험 모델은 평판이 아닌, 이미 일차곡이 있는 곡판에서 유도가열을 이용하여 일차곡에 직각 방향으로의 이차곡을 주어 외종곡(saddle)을 형성하기 위한 것으로, 비교적 큰 곡이라 할 수 있는 곡률반경 5,000mm와 이보다 작은 10,000mm의 일차곡이 있는 모델을 사용하였는데, 이는 곡률반경에 따른 이차곡의 가공성을 비교하기 위함이다. 일차곡은 롤프레스를 이용하여 가공하였는데, 롤프레스의 특성상 중앙부위는 곡률이 비교적 잘 맞으나 양 끝부분으로 갈수록 곡률반경이 좀 커지는 경향, 즉 곡이 작아지는 특성이 있다. 실험에서 사용한 유도가열기의 제원으로 전력(power)은 160kW, 전압(voltage)은 400V, 그리고 주파수(frequency)는 4.5kHz이다.

각 모델별 가열시간 및 냉각시간은 두께별로 최적시간을 구하여 적용하고 냉각은 급격한 냉각을 위하여 수냉을 사용하였다. Table 2에 각 모델별 가열 및 냉각 시간을 나타내었다. Fig. 5는 가열 과정 중의 실험 사진으로, 판의 두께에 따라 온도가 타원형으로 올라간 장면이 나타나 있다.

**Table 2** Heating and water cooling time

Model	Heating(sec)	Cooling(sec)
S12-10k	8	24
S16-10k	10	30
S12-5k	8	24
S16-5k	10	30



**Fig. 5** Picture of heating process

3.2 변형 계측

실험 후 각 모델에 대한 변형 계측을 3차원 측정기를 이용하여 계측하였다. 3차원 측정기는 측정가능 범위가 가로x세로x높이 = 800x1,200x700이며, 각 축의 분해능(resolution)은 0.5 $\mu$ m이다. 계측 부위 및 계측 좌표계는 Fig. 6과 같으며 변형 계측 장면을 Fig. 7에 도시하였다.

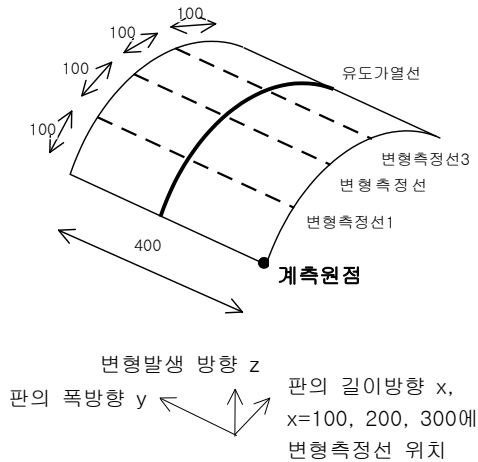


Fig. 6 Measuring lines and coordinate

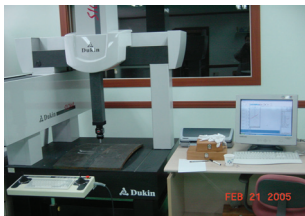


Fig. 7 Picture of measuring process

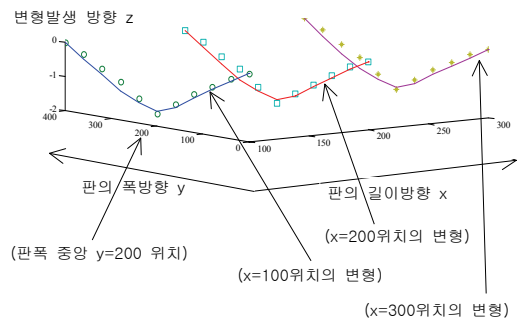
3.3 실험 및 해석 결과 비교

실험 후 각 모델에 대한 변형 계측을 3차원 측정기를 이용하여 계측하였으며, 다분할 해석법에 의한 변형을 Table 3 ~ 6 및 Fig. 8 ~ 11에 도시하였다. 먼저 Table에 각 변형측정선별로 해석값과 실험값을 나타내었으며, 그 다음 그림에서는 이를 선도로 표시하여 변형의 결과를 비교하기 용이하도록 하였다. 그림에서 원형, 사각형 및 별표의 노드 형상은 해석값을 의미하며 선으로 나타낸 부분이 실험결과의 측정값이다. 폭 y가 200mm인

부분이 가열 길이방향의 중앙 부위이며 이곳에서 최대의 변형이 나타남을 알 수 있다.

Table 3 Results of model S12-10k(unit: mm)

Width y	Line 1		Line 2		Line 3	
	Analysis	Experiment	Analysis	Experiment	Analysis	Experiment
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
40	-0.2402	-0.3256	-0.2493	-0.3128	-0.2402	-0.3359
80	-0.5756	-0.6435	-0.6003	-0.6589	-0.5756	-0.6732
120	-0.8793	-0.9897	-0.9560	-1.0048	-0.8793	-1.0026
160	-1.2666	-1.3569	-1.3146	-1.3691	-1.2666	-1.3721
200	-1.6215	-1.5687	-1.6758	-1.5790	-1.6215	-1.5590
240	-1.2666	-1.3985	-1.3146	-1.4120	-1.2666	-1.4256
280	-0.8793	-1.1598	-0.9560	-1.1751	-0.8793	-1.2009
320	-0.5756	-0.7530	-0.6003	-0.8059	-0.5756	-0.8559
360	-0.2402	-0.3987	-0.2493	-0.4159	-0.2402	-0.4398
400	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000



실선 : 실험값  
원형, 사각형 및 별표의 노드 형상은 해석값  
이하 Fig. 9, 10, 11 동일

Fig. 8 Deflection lines of model S12-10k

Table 4 Results of model S16-10k(unit: mm)

Width y	Line 1		Line 2		Line 3	
	Analysis	Experiment	Analysis	Experiment	Analysis	Experiment
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
40	-0.1620	-0.1912	-0.1683	-0.2356	-0.1620	-0.2324
80	-0.3916	-0.4659	-0.4083	-0.4998	-0.3916	-0.5008
120	-0.6263	-0.7598	-0.6520	-0.7751	-0.6263	-0.7895
160	-0.8656	-0.9862	-0.8978	-0.9862	-0.8656	-0.9989
200	-1.1092	-1.0894	-1.1455	-1.1059	-1.1092	-1.0833
240	-0.8656	-0.9363	-0.8978	-0.9568	-0.8656	-0.9129
280	-0.6263	-0.7298	-0.6520	-0.7598	-0.6263	-0.6968
320	-0.3916	-0.4912	-0.4083	-0.5529	-0.3916	-0.4559
360	-0.1620	-0.2556	-0.1683	-0.2785	-0.1620	-0.2698
400	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

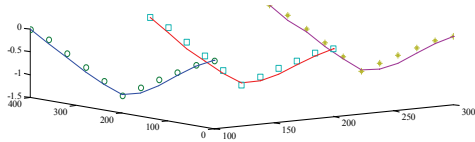


Fig. 9 Deflection lines of model S16-10k

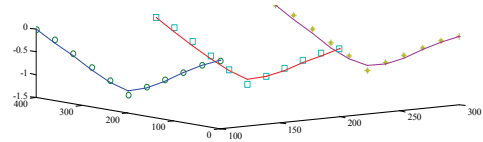


Fig. 11 Deflection lines of model S16-5k

Table 5 Results of model S12-5k(unit: mm)

Width y	Line 1		Line 2		Line 3	
	Analysis	Experiment	Analysis	Experiment	Analysis	Experiment
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
40	-0.2368	-0.3123	-0.2466	-0.3158	-0.2368	-0.3315
80	-0.5633	-0.6709	-0.5899	-0.6987	-0.5633	-0.6965
120	-0.8930	-0.9987	-0.9346	-1.0475	-0.8930	-1.0159
160	-1.2272	-1.3125	-1.2801	-1.3654	-1.2272	-1.3356
200	-1.5665	-1.5319	-1.6273	-1.5611	-1.5665	-1.5435
240	-1.2272	-1.3482	-1.2801	-1.3789	-1.2272	-1.3712
280	-0.8930	-1.0956	-0.9346	-1.0856	-0.8930	-1.1256
320	-0.5633	-0.7187	-0.5899	-0.7233	-0.5633	-0.8001
360	-0.2368	-0.3797	-0.2466	-0.4233	-0.2368	-0.4265
400	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

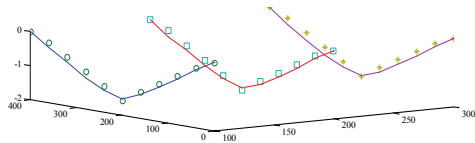


Fig. 10 Deflection lines of model S12-5k

Table 6 Results of model S16-5k(unit: mm)

Width y	Line 1		Line 2		Line 3	
	Analysis	Experiment	Analysis	Experiment	Analysis	Experiment
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
40	-0.1607	-0.1802	-0.1671	-0.2311	-0.1607	-0.1978
80	-0.3867	-0.4123	-0.4042	-0.4453	-0.3867	-0.4256
120	-0.6164	-0.6751	-0.6434	-0.6999	-0.6164	-0.6853
160	-0.8499	-0.8753	-0.8841	-0.8865	-0.8499	-0.8859
200	-1.0872	-1.0089	-1.1262	-1.0236	-1.0872	-0.9896
240	-0.8499	-0.8875	-0.8841	-0.8957	-0.8499	-0.8995
280	-0.6164	-0.6892	-0.6434	-0.7129	-0.6164	-0.7314
320	-0.3867	-0.4365	-0.4042	-0.4869	-0.3867	-0.4912
360	-0.1607	-0.2356	-0.1671	-0.2569	-0.1607	-0.2571
400	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

두께 및 초기 곡이 다른 네 종류의 모델에 대한 실험 결과의 변형과 다분할 해석법에 의한 변형이 잘 부합함을 알 수 있다. 전체적으로 최대 변형값은 잘 일치하며 실험에 의한 변형은 완만한 곡선을 보이는데 비하여, 해석 결과는 중앙을 중심으

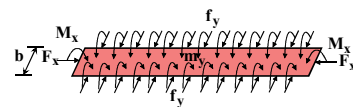


Fig. 12 Equivalent nodal forces and bending moments according to a heating line

로 경사가 있는 'V'자 형상을 보이며 정 중앙부위인 y가 200mm인 곳에서는 해석결과가 실험결과보다 크게 나옴을 알 수 있다. 이는 전자장해석과 열전달해석 후 변형 해석으로 사용한 고유변형도법(Ko et al. 1999, Jang et al. 2002)에 의하면 Fig. 12에서와 같이 가열선에 따른 판의 상변태 영역(폭 b)에 등가의 하중인 힘( $f_y$ ,  $F_x$ )과 모멘트( $M_x$ )를 치환하여 변형을 해석함으로써 해석결과가 거의 'V'자 형상이 나타나며 중앙부위에 집중 배치된 모멘트  $M_x$  때문에 중앙부위의 변형 해석값이 실험값보다 더 큰 값이 나타난 것으로 보인다.

### 3.4 원형코일과 장형코일의 비교

전통적으로 국가공에 사용되는 원형코일과 본 논문에서 제안된 장형코일에 대한 가공시간 및 에너지의 비교를 Table 10에 나타내었다. 여기서 사

Table 10 Comparison of energy efficiency in circular coil and long type coil

Item	Circular coil	Long type coil
Moving speed	V=17mm/sec	-
Length of heating line	2m	2m
Heating time	118sec	10sec
Heating efficiency	1	11.8
Feature	Moving heating	Non moving heating
Power	80kW	450kW
Energy	9,440kJ/ 2.62kWh	4,500kJ/ 1.25kWh
Energy efficiency	1	2.1

용된 각 방법에서 최종 변형량을 동일하게 가공하는 조건으로 비교를 한 것이며 원형코일의 가열은 Kyung(2002)의 논문의 유도가열 실험결과를 이용하였다. 두 경우 모두 판의 폭 500mm, 길이 2,000mm 및 두께 16mm의 평판인 연강이며, 판 폭의 중앙에 한 개의 가열선을 가하여 중앙부의 최대 변위가 1.05mm 발생하는 경우의 실험을 비교하였다.

실험 결과에 의하면 장형코일은 원형코일과 달리 이송이 필요 없는 정지 가열이므로 가열시간만을 비교하면 11.8배가 우수함(1/11.8의 시간 소요 비율)을 알 수 있다.

그러나 코일의 길이 때문에 전력은 장형코일이 원형코일에 비해 크게 소요되었다. 에너지 효율을 비교하기 위해 사용된 전력에 가공시간을 곱한 전력량을 구해보면 장형코일이 가열시간이 짧기 때문에 1.25kWh가 필요한 반면 원형코일은 2.62 kWh가 필요하였다. 결국 장형코일이 가공시간 측면에서는 11.8배가 빠르며 에너지는 약 1/2.1, 즉 0.48배 만큼만 필요함을 알 수 있다.

#### 4. 결론

유도가열을 해석할 수 있는 기존의 해석법은 축대칭 해석법(Kim Ho Kyung 2002)이 있는데 이는 전자장해석과 열전달 해석을 연동하여 실시한 후 최종온도 분포를 이용하여 고유변형도법에 의해 변형을 계산할 수 있었다. 그러나 축대칭기법을 사용함으로써 코일이 원형이며 코일과 판의 간격이 일정한 평판의 해석만 가능하고 이에 따라 다양한 형상의 해석을 통한 가열코일 형상의 최적화가 불가능하다. 이에 반하여 본 논문에서 제안된 다분할 해석법은 코일은 진행 단계별로 분할하여 해석함으로써 코일의 형상 및 코일과 판의 간격에 상관없이 변형 해석이 가능하기 때문에 기존의 원형코일을 개선한 장형코일이 제안되었으며 장형코일에 대해 유도가열실험을 실시한 후, 변형에 대해 실험결과와 해석결과를 비교하여 해석방법의 우수함을 보였다.

또한 동일한 변형을 일으키는 조건으로 원형코일과 장형코일에 대한 가공시간을 비교하여 가공

시간과 에너지 효율 면에서 장형코일이 원형코일보다 우수함을 알 수 있었다. 향후 다양한 소재별 실험과 더 효율이 우수한 가열코일의 형상에 관한 연구가 필요한 것으로 판단된다.

#### 참 고 문 헌

- Ko, D.E., Jang, C.D., Seo, S.I. and Lee, H.W., 1999, "Realtime Simulation of Deformation due to Line Heating for Automatic Hull Forming System," Journal of the Society of Naval Architectures of Korea, Vol. 36, No. 4, pp. 116-127.
- Jang, C.D., Ha, Y.S., Ko, D.E. and Moon, S.C., 2002, "Determination of Inherent Strain Regions to Estimate Plate Deformation by Line Heating," Journal of the Society of Naval Architectures of Korea, Vol. 39, No. 1, pp. 82-89.
- Kim, H.K., 2002, Simulator of Line Heating by High Frequency Induction Heating, Ph. D. Thesis, Seoul National University.
- Lee, Y.H., 2006, Development of the Induction Heating Machine and Analysis Program for a Plate Bending, Ph. D. Thesis, Seoul National University.
- Lee, Y.H., Ha, Y.S. and Jang, C.D., 2005, "Development of Induction Heating Simulator for the Bending of Plates with Primary Curvature," Journal of the Society of Naval Architectures of Korea, Vol. 42, No. 3, pp. 241-248.



< 이 영 화 > < 장 창 두 >