

1차곡을 갖는 판의 곡가공을 위한 유도가열 시뮬레이터의 개발

이영화^{†*}, 하윤석^{**}, 장창두^{**}

동양공업전문대학 자동화시스템과^{*}
서울대학교 조선해양공학과^{**}

Development of Induction Heating Simulator for the Bending of Plates with Primary Curvature

Young Hwa Lee^{†*}, Yun Sok Ha^{**} and Chang Doo Jang^{**}

Dept. of Automation Systems, Dong Yang Technical College^{*}
Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University^{**}

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 torch. In this study, a more efficient method was proposed for the prediction of plate bending. The existing analysis method using the axi-symmetric coil model could not handle the varying temperature during the heating and the forming process for curved plates like a saddle or a concave type curvature. The proposed method using some discrete steps in this study could overcome these difficulties and show more accurate, reasonable results in temperatures and deflections of flat or curved plates. This method is composed of multi-disciplinary analyses such as an electro-magnetic analysis, a heat transfer analysis and a deformation analysis based on inherent strain approach.

※Keywords: Induction heating(유도 가열), Electro magnetic analysis(전자장 해석), Heat transfer analysis(열전달 해석), Inherent strain(고유변형도), Curved plate bending(곡면판 굽힘)

1. 유도 가열의 고찰

고주파가열은 피가열체의 물리적 성질에 따라

크게 유도 가열과 유전 가열로 나누어지며 유도 가열은 도전성 금속을 가열하는데 사용하며 유전 가열은 유전 손실이 있는 재료 즉, 물, 종이, 플라스틱 등을 가열하는데 주로 이용된다. 유도 가열은 교번자계 중에 놓여있는 도전성 물체 내에 발생하는 와전류손 혹은 히스테리시스손을 이용하여 피가열체를 가열시키는 방식이다. 이때 피가열체가

접수일: 2004년 12월 3일, 승인일: 2005년 3월 3일

† 주저자, E-mail: yhlee@dongyang.ac.kr

Tel: 02-02-2610-1836



Fig. 1 The classification of coil shape

금속과 같은 도전체일 때는 피가열체에 직접 열이 발생하지만, 비전도체인 경우에는 피가열체 둘레에 코일을 감아 구성한 후 먼저 도전성 용기에서 발생하는 열을 이용하여 피가열체를 간접적으로 열을 전달하여 가열시키게 된다.

1.1 코일

고주파응용 가열에서 가열 코일이 차지하는 비중은 매우 크므로 용도에 따른 코일의 선택이 매우 중요하다. 일반적인 가열 코일의 설계 기준은 가열 코일이 최대의 에너지를 피가열체에 전달하기 위하여 부하에 최대한 가까이 부착되어 많은 자려건(自勵健)이 가열되는 부분에 교차되도록 설계하여야 한다. 국가공용으로 사용되는 코일의 형상은 Fig. 1의 단권코일이나 팬케익코일이다.

1.2 주파수

고주파 유도 가열에서 피가열체에 교전류가 흐르면 피가열체의 표피층에 전류가 집중적으로 흐르며 피가열체의 속으로 갈수록 전류가 작아지므로 가열효과가 적어지게 된다. 이러한 현상을 표피효과라 하며 전류밀도가 표면의 1/e(e=2.718..., 약 37%)로 줄어드는 점의 깊이를 침투 깊이라 한다. 이러한 침투 깊이는 주파수와 피가열체의 재료의 성질에 의해 다음식과 같이 결정이 되는데 주파수의 제곱근에 반비례하므로 주파수가 클수록 침투깊이가 줄어드는 것을 알 수 있다. 일반적으로 국가공용으로는 10KHz 이상의 주파수를 사용한다.

$$\delta = 5.033 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r \cdot f}} \quad (1)$$

δ : 전류침투깊이(cm),
 ρ : 재료의 고유저항($\mu\Omega cm$)

μ_r : 비투자율
 f : 주파수(Hz)

위의 식에서 볼 때 침투 깊이는 비투자율과 주파수의 제곱근에 반비례함을 알 수 있다.

1.3 냉각과정

고주파 유도 가열에 의한 국가공의 원리는 피가열체를 강의 내부 조직을 변화시키는 상변태를 일으키는 임계온도 이상으로 가열한 후 다시 냉각시킴으로써 판에 국부적인 소성 잔류 변형에 따라 판을 변형시키는 것이다. 일반적으로 강은 상온에서 페라이트(Ferrite) 상태에서 임계온도 이상으로 가열하면 오스테나이트(Austenite)로 변한 후 냉각 과정을 통하여 각각 페라이트(Ferrite), 세멘타이트(Cementite), 퍼얼라이트(Pearlite) 혹은 마르텐사이트(Martensite)로 변하는데 이는 냉각 속도에 따라 다르다. 일반적으로 아주 느린 속도로 냉각이 되면 오스테나이트는 페라이트로 변하나 급랭시키면 오스테나이트가 모두 마르텐사이트로 변한다. 본 시뮬레이터에서는 냉각을 가열과 동시에 최대의 냉각수 투입에 의해 이 과정에서 피가열체의 가열부의 전체가 마르텐사이트로 변하는 것을 가정으로 냉각을 처리하였다(김호경 2002).

2. 유도 가열 시뮬레이터

2.1 기존의 유도 가열 해석 방법

현재 고주파 유도 가열에 대한 연구는 그리 많지 않은 실정이다. 최근의 연구(김호경 2002)에 의하면 가열 코일의 전자장 해석을 축대칭 모델에 의해 실시한 후 이 결과를 이용하여 판의 열전달 해석을 실시한다. 여기에서 구한 고유변형도 영역과 냉각과정을 변수로 이용하여 고유변형도 및 등가 절점력을 구한 후 이를 근거로 판의 변형 해석을 수행하였다(장창두 등 1997). 그러나 이러한 방법은 가열 코일을 축대칭으로 처리함으로써 코일 형상에 제한이 가해져 효율적인 코일 형상의 설계에 이용될 수 없으며 또한 가열 코일과 판의 간격도 일정한 경우 밖에 해석이 되지 않음으로써 안장형(Saddle type)이나 오목형(Concave type)

과 같이 2차곡을 생성시키는 경우의 해석이 불가능하다. 왜냐하면 축대칭 모델 해석 방법에서는 가열 코일이 원형인 경우와 가열코일의 하단부와 피가열 판의 간격이 일정한 경우 즉 평판에만 해석이 가능하므로 이미 일차곡이 있는 안장형, 오목형 혹은 비틀림형과 같은 2차곡의 가공의 경우 해석이 불가능하다. 반면에 본 해석 방법은 이에 반해 본 방법에서는 가열코일과 판의 간격을 일차곡에 따라 형상의 입력이 가능하다. 또한 기존의 방법에서는 전자장 해석을 전체 코일의 형상에 대해 한번만 실시하여 가열코일이 지나가는 중에 변하는 온도장을 열전달 해석에 전혀 고려하지 못한다.

2.3 개선된 시뮬레이션 프로그램

축대칭 가열 코일의 모델을 개선하여 코일을 위에서 보았을 때, Fig. 2에서와 같이 몇 개의 영역으로 분할하여 분할된 단위 길이에 따라 이송속도를 고려한 시간에 대한 전자장해석을 수행한 후 이 결과를 판에 온도로서 입력 조건으로 입력하여 열전달 해석을 수행한다.

각각의 분할된 영역에 따라 순차적으로 전자장 해석과 열전달 해석이 이루어져 시간에 따라 변화하는 온도의 변화의 고려 즉, 완전한 온도장의 갱신이 가능하게 된다. 이렇게 함으로써 축대칭에서 고려하지 못한 온도에 따른 판의 비저항이나 비투자율을 계속 갱신해 줌으로써 보다 정밀한 상변태의 반응이 가능하다. 또한 축대칭 모델은 가열 코일이 원형인 경우에만 해석이 가능한데 비하여 본

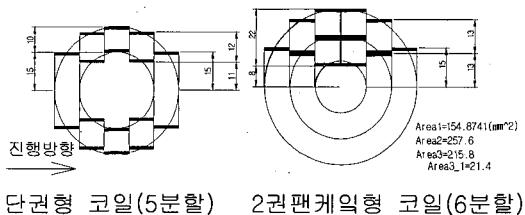


Fig. 2 The models of single coil(5 stages analysis) and double pancake coil(6 stages analysis) used in experiments

논문에서 고안된 방법은 임의의 형상을 갖는 코일의 해석이 가능함으로써 형상에 대한 최적 설계가 가능하다. 그리고 축대칭 모델에서는 코일과 판의 간격이 일정하므로 1차곡을 갖는 곡면의 가열에 대한 정확한 해석이 불가능한데 반하여 본 시뮬레이터는 임의의 곡면을 갖는 판의 해석이 가능했다. 참고로 본 시뮬레이터는 ANSYS 8.1을 이용하여 구성되었으며 이의 전체 및 국부 흐름도를 Fig. 3, 4, 5, 6에 나타내었다.

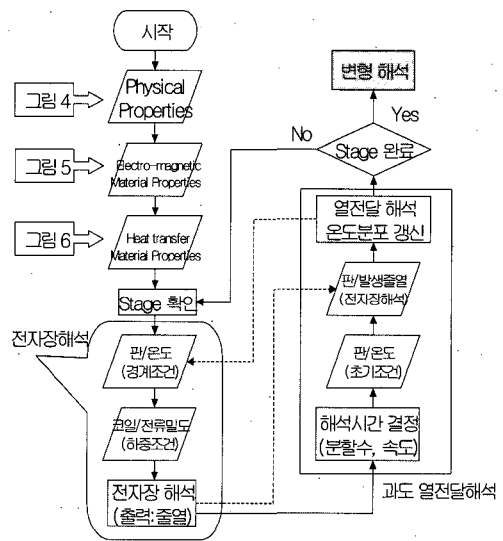


Fig. 3 The flow chart of simulator

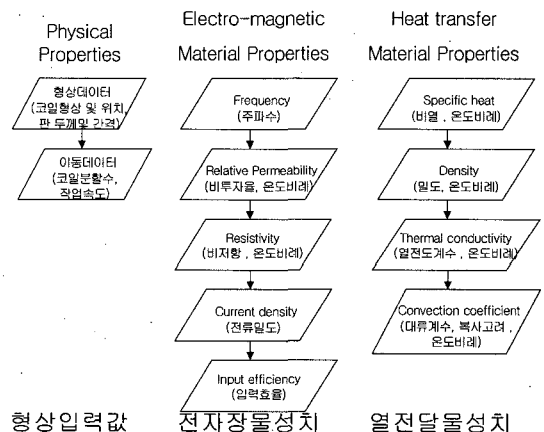


Fig. 4 Input parameters of coil and plate

Fig. 5 Material properties of EMI analysis

Fig. 6 Material properties of Heat transfer

3. 시뮬레이터 입력 인자

3.1 전자장 해석 관련 입력 인자

1) 주파수(Frequency)

저주파를 이용하는 경우 침투 깊이가 깊기 때문에 매우 빠르게 가열을 해야 하며 큰 전력이 요구되므로 설비의 제조비가 비싸지고 가열속도에 매우 민감하므로 정밀한 속도제어가 요구된다. 반면에 고주파를 이용할 경우는 침투 깊이가 작으므로 일정한 침투 깊이를 위해서는 느린 속도로 제어해야 하며 제어 면에서 용이하고 사용 전력이 저주파에 비해서 작으므로 설비의 제조비가 저렴하다.

2) 비투자율(Relative permeability, μ_r)

비투자율은 가공재질의 투자율(μ)을 진공에서의 투자율(μ_0)로 나타낸 것으로 다음과 같이 정해진다.

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (2)$$

μ_0 :진공투자율(= $4\pi \times 10^{-7} [Wb \cdot m/A \cdot t]$)
 μ :가공재질의 투자율

이는 자성 물질로서의 우수성을 나타내는 척도로서 서로 다른 자성 재료들의 비투자율을 알고 있을 때 이들을 자화시킬 수 있는 정도를 비교할 수 있다. 강판과 같은 강자성체의 투자율은 $\mu_r \gg 1$ 로 매우 큰 값을 갖는다. 이때 투자율은 자기장의 세기 H에 대한 자속밀도 B의 비율로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mu = \frac{B [Wb/m^2]}{H [A \cdot t/m]} \quad (3)$$

비투자율을 정확히 유추하는 것은 매우 중요한 문제인데 본 프로그램에서는 Fig. 7에 나타난 강판의 자화곡선과 비투자율 곡선(Hubert 2003)에서 비투자율 실험 주파수인 $f=19.3[KHz]$ 에서 비투자율을 변화시켜가며 전자장 해석을 한 후 이에 해

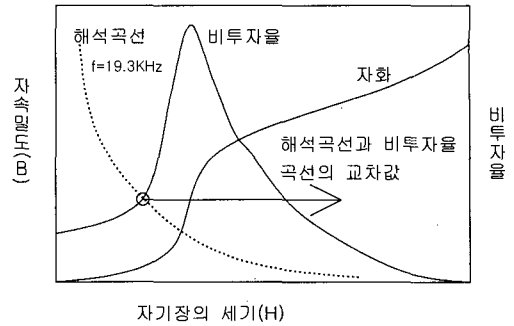


Fig. 7 The curve of relative permeability (USX Corp., Hubert 2003)

당하는 자기장의 세기(H)를 구하여 점선과 같이 플로팅하여 강판의 비투자율 곡선과 만나는 점에서의 상온의 비투자율(3,427)로 사용하였다.

3) 비저항(Resistivity)

저항률이라고도 하며 단면적 1m²당의 저항을 길이로 나눈 값 즉, 단위길이당 단위면적에 존재하는 저항을 의미한다. 이는 다음과 같이 정의된다.

$$\rho [\Omega m] = \frac{R [\Omega] \cdot A [m^2]}{l [m]} \quad (4)$$

비저항은 온도가 올라가면 값이 커져 그만큼 발열량이 커지는 효과를 나타낸다.

4) 전류밀도(Current density, P)

가열코일이 발생시키는 단위면적당 전류[A/m²]를 말하며 코일의 단면적과 전력량에 의해 결정되며 팬케익 형상 가열 코일의 입력 효율은 0.35를 사용하였다(김호경 2002).

3.2 열전달 해석 관련 입력 인자

1) 비열(Specific heat)

재료 1[kg]을 1[°C] 올리는데 필요한 열량[J]을 의미하며 본 프로그램에서는 상온에서 일반적인 강판의 상온에서의 비열값인 436[J/kg° C]을 사용하고 온도에 따라 값이 커지다가 상변태 영역에서 값이 매우 커지다가 그 이후 온도에서 크게 떨어진 후 다시 조금씩 증가 후 용융점이상에서는 값이 크게 증가한다.

2) 밀도(Density)

강의 단위 체적당 질량[kg/m^3]을 말하며 온도가 올라갈수록 작아진다.

3) 열전도계수(Thermal conductivity)

강의 열전도 계수로 온도가 올라감에 따라 값이 감소한다.

4) 대류계수(Convéction coefficient)

공기의 대류 계수로서 온도가 올라감에 따라 값이 증가한다. 단 이때 자연대류와 더불어 복사도 고려한 계수를 사용하였다(Incropera and DeWitt 2001).

4. 해석 결과 비교

본 프로그램의 결과인 판의 중앙 부위의 하면(가열면의 반대)의 폭방향으로의 중앙값(측정점A), 25[mm] 떨어진 곳(측정점B) 및 50[mm] 떨어진 곳(측정점C) 등 세 곳의 최고 온도를 계측하여 판의 변형실험 결과 및 기존의 축대칭모델 해석 결과와 비교 하였다.

4.1 실험 조건

실험에 사용된 판의 형상 및 측정 위치, 가열코일의 형상 그리고 실험 가열조건은 Fig. 8, Fig. 9 및 Table 1과 같다.

4.2 최고 온도 비교

Table 1의 세 가지 모델에 대한 본 프로그램의 결과와 실험 및 기존의 축대칭 해석 결과를 아래의 Table 2에 비교하였다. 참고로 본 실험은 김호경(2002)의 연구에서 이루어진 실험의 일부이며 실험 및 해석상의 온도 측정 시간은 가열 코일이 측정부위를 지나간 후 각 지점에서의 최고 온도이며 실험치 두 방법의 해석치 경향과 유사함을 알 수 있었다. Table 2의 결과에서 볼 때 두께와 관계없이 본 프로그램의 결과는 실험 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

시편 S1의 온도 분포, 가열 중 코일의 중앙부에서의 모델형상, 자속밀도(B)를 Fig. 10, 11, 12에

나타내었다.

4.3 변형 비교

전자장 해석과 열전달 해석을 종료하면 이 결과를 이용하여 고유변형도 영역을 상변태가 일어났던 영역이라 가정하고 기타 냉각조건을 고려한 고

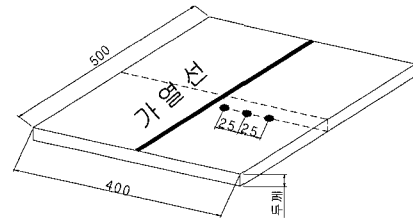


Fig. 8 The measuring points of plate

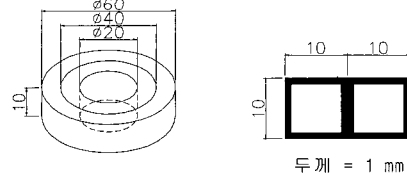


Fig. 9 The shape and cross section of heating coil

Table 1 The heating condition

시편번호	두께(mm)	가열속도 (mm/sec)	가열전력량 (kW)
S1	19	8	56
S2	23	8	56
S3	30	8	56

Table 2 Comparison the results of analysis with experiment(The highest temperatures)

시편	측정점 A			측정점 B			측정점 C		
	실험	축대칭 해석	본 해석	실험	축대칭 해석	본 해석	실험	축대칭 해석	본 해석
S1	264.58	325.54	291.1	195.12	216.94	196.3	135.17	134.46	128.6
비율	1	1.23	1.10	1	1.11	1.01	1	0.99	0.95
S2	219.72	257.55	228.2	162.92	182.68	161.8	80.37	115.81	109.4
비율	1	1.17	1.04	1	1.12	0.99	1	1.44	1.36
S3	178.99	180.09	178.5	132.40	140.31	136.6	92.85	94.25	99.4
비율	1	1.01	1.00	1	1.06	1.03	1	1.02	1.07

유변형도 해석방법(장창두 등 2002)을 이용하여 변형을 구하여 실험 및 기존의 해석 방법과 비교하였다. Fig. 13, 14, 15에서 볼 때 19mm 두께의 판에서는 기존의 방법과 본 프로그램의 결과가 실험과 비교하여 유사한 정도를 보였으나 23mm 두께의 판과 30mm 두께의 판에서는 본 프로그램이 실험치에 보다 근접함을 알 수 있다.

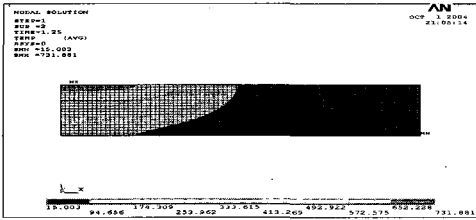


Fig. 10 Temperatures after coil passed(19t)

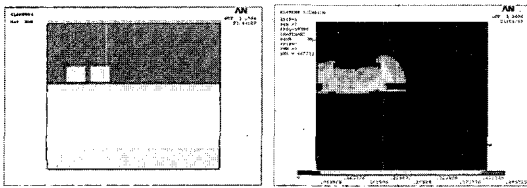


Fig. 11 Coil model Fig. 12 Magnetic flux density

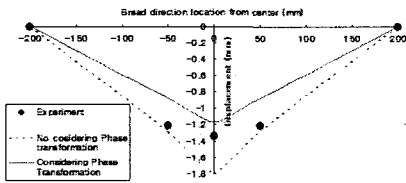


Fig. 13 Comparison of deflections(19t)

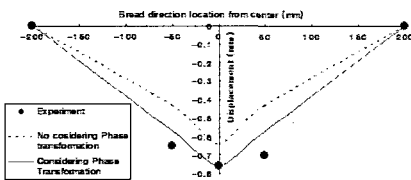


Fig. 14 Comparison of deflections(23t)

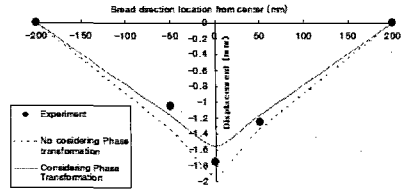


Fig. 15 Comparison of deflections(30t)

5. 곡면 가공 해석 비교

가열할 곡면이 곡률 반경 $r = 300\text{mm}$ 인 안장형(Saddle type)과 오목형(Concave type)에 대한 전장 해석 및 열전달 해석 결과를 평면의 결과와 함께 Table 3에 나타내었다. 참고로 평판인 경우 코일과 판의 간격은 6분할 동안 계속 $3.0[\text{mm}]$ 인 데 비하여 안장형인 경우 4.6, 3.6, 3, 3, 3.6, 4.6의 값을 적용하였고 오목형인 경우는 1.5, 2.5, 3, 3, 2.5, 1.5의 값을 적용하였다. 이는 코일의 중심의 간격이 $3[\text{mm}]$ 로 일정하게 유지한다는 가정에서 계산한 값이다. 판과 가열 코일의 단면을 Fig. 16에 나타내었다.

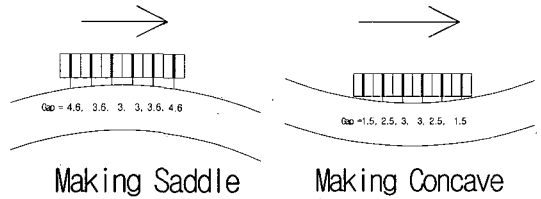


Fig. 16 The coil and plate in saddle and concave type

Table 3 Comparisons of results in curves

판의 형상	고유변형도(상변태 발생영역)		각분할별 코일과 판의간격
	폭	깊이	
안장형	56.0	5.3	4.6,3.6,3,3,3.6,4.6
평판	54.0	5.3	3,3,3,3,3,3
오목형	53.2	5.3	1.5,2.5,3,3,2.5,1.5

위의 결과에서 볼 때 고유변형도 영역의 깊이는 세 가지 모두 동일하였으며 고유변형도 영역의 폭은 오목형(Concave)의 경우가 가장 크게 나타났는데, 오목형의 경우 코일의 양끝부위에서 코일과 판

의 간격이 줄어들므로 많은 열이 전달되어 상변태가 발생하는 영역인 고유변형도 영역의 폭이 늘어날 것으로 생각할 수 있지만 결과는 오목형에서 고유변형도의 영역의 폭이 줄어들고 반대로 코일 양끝 부분의 간격이 큰 안장형에서는 고유변형도 영역의 폭이 늘어나는 결과를 보인다. 이는 오목형인 경우 열전달의 관점에서 볼 때 코일과 판의 간격이 작은 코일의 양끝에서 초기에 많은 열이 전달되어 그 밑 부분의 판이 상변태가 발생하여 자성을 잃어버림으로써 비열이 증가하고 판의 비투자율이 감소되어 판의 온도증가를 방해하여 상변태의 진행을 감소시킴으로써 고유변형도 영역의 폭이 감소된 것으로 보여진다. 열전달 관점에서는 가능하면 늦게 상변태에 도달시키는 것이 효과적인 고유변형도 영역의 생성에 유리함을 알 수 있다.

6. 단권, 다권 및 팬케익 코일 해석 비교

단권, 다권 및 팬케익 형상 코일들의 가공 능력을 비교해 보았다. 참고로 동등 비교 조건을 위해 코일의 효율은 동일하게 처리하였다. 비교 모델들의 외곽형상 및 코일 단면형상들을 Fig. 17에 나타내었고 고유변형도 영역의 비교는 Table 4에, 변형 및 절점력은 Table 5에 나타내었다.

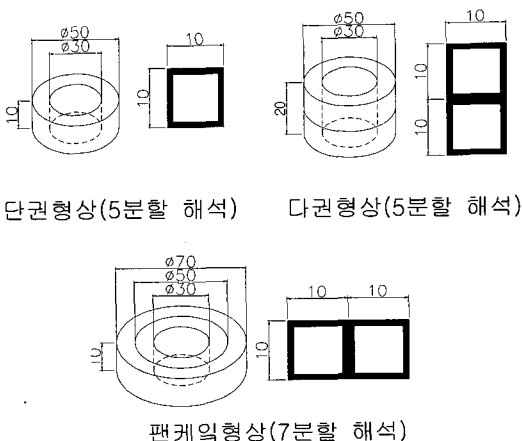


Fig. 17 Modeling of coils(single, double and double pancake)

Table 4 Comparisons of results in coil shapes(Inherent strain region)

코일 형상	고유변형도(상변태 발생영역)		용융점(1426°C)
	폭(mm)	깊이(mm)	이상 가열 부위
단권 형상	48.0	3.0	나타나지 않음
다권 형상	54.0	7.0	판 상부에 나타남
팬케익형상	63.0	5.5	나타나지 않음

Table 5 Comparisons of results in coil shapes(deflection and nodal forces)

코일 형상	m_y (kgmm/mm)	M_x (kg/mm)	slope θ (°)	처짐(mm)
단권 형상	4498.7	265213	1.054	0.919
다권 형상	6969.2	552525	1.890	1.650
팬케익형상	6444.0	555862	2.000	1.760



Fig.18 Equivalent nodal forces according to heating line(m_y , M_x)

Table 4의 해석 결과에서 볼 때 단권형상에 비해 다권형상은 고유변형도 영역이 폭과 깊이 모두 늘었으나 깊이 방향으로 많이 늘었다. 반면 철이 녹는 용융점 이상의 온도가 판의 상면에 광범위하게 나타난 것으로 볼 때 곡가공면에서 볼 때 가공 효율이 떨어짐을 알 수 있다. 반면에 팬케익 형상은 폭과 깊이 모두 늘었으나 폭 방향으로 많이 늘었고 용융점 이상의 온도 발생 부위가 나타나지 않음으로 가공 효율이 단권이나 다권 형상에 비해 좋을 수 있다.

고유변형도 영역을 상변태가 일어났던 영역이라 가정하고 기타 냉각조건을 고려한 고유변형도 해석방법(장창두와 서승일 1998, 고대은 등 1999)을 이용하여 변형을 구하기 위한 등가의 절점력을 구하여 가열에 의한 각변위(slope)와 처짐량을 Table 5에 나타내었다. Fig. 18에는 가열선에 따른 등가의 절점력 m_y , M_x 를 나타내었다.

위의 결과에서 변형 및 절점력을 살펴보면 다권형상이나 팬케익 형상이 단권에 비해 변형이 많이 발생하고 다권 형상보다는 팬케익 형상이 더 변형

이 많이 발생하여 효율이 줄음을 알 수 있다. 그러나 다권 형상은 철이 녹는 용융점 이상의 온도까지 철의 상판에 나타나므로 팬케익 형상보다는 비효율적인 구조임을 알 수 있다.

7. 결론

고주파 유도 가열에 있어 기존의 축대칭 코일 모델에 의한 해석에서는 열전달 해석시 시간에 따라 변화하는 온도장을 판에 적용하기가 어려운데 반하여 본 프로그램에서 제안된 분할 모델 방법을 이용하면 실시간으로 변화하는 온도장을 판의 열전달 해석에 적용함으로써 보다 근접한 해를 찾는 데 도움을 준다. 또한 축대칭 모델은 안장형이나 오목형과 같은 곡면판에 적용이 불가능한 반면 본 프로그램은 적용이 가능해 졌다. 평판에 대한 해석 결과를 실험 및 기존의 축대칭 모델에 의한 해석 결과와 비교하여 우수한 결과를 보였고, 곡면판에 대한 해석 결과를 통하여 안장형이 오목형보다 열전달 관점에서는 변형에 유리하다는 것을 보였으며 마지막으로 단권코일보다는 다권 코일이, 다권 코일보다는 팬케익 형상의 코일이 가공에 유리함을 보였다. 또한 유도 가열에서는 다양한 냉각 조건에 따른 별도의 연구가 필요할 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 국가지정실험실(NRL) 프로젝트 재원의 도움을 받아 수행하였으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

• 고대은, 장창두, 서승일, 이해우, 1999, “곡가공

자동화시스템을 위한 선상가열에 의한 변형의 실시간 시뮬레이션,” 대한조선학회 논문집, 제 36권, 제 4호, pp. 116-127.

- 김호경, 2002, 고주파 유도 가열에 의한 선상 가열 시뮬레이션, 서울대학교 대학원 박사논문.
- 장창두, 서승일, 1998, “고유변형도법에 의한 잔류응력의 계산,” 대한용접학회지, 제 7권, 제 1호, pp. 36-41.
- 장창두, 서승일, 고대은, 1997, “간이 열탄소성 해석을 이용한 선상가열에 의한 판의 변형 예측에 관한 연구,” 대한조선학회 논문집, 제 34권, 제 3호, pp. 104-112.
- 장창두, 하운석, 고대은, 문성춘, 2002, “선상가열 판변형 해석을 위한 고유변형도 영역의 결정법,” 대한조선학회 논문집, 제 39권, 제 1호, pp. 82-89.
- Hubert, C.I., 2003, *Electric Machines Theory, Operation, Application, Adjustment, and Control*, Prentice Hall.
- Incropera, F.P. and DeWitt, D.P., 2001, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, WILEY.



< 이 영 화 >

< 하 운 석 >

< 장 창 두 >