

마그네트론 전용 해석 프로그램의 개발과 해석

이승표*, 고병갑⁺, 하성규⁺⁺

(논문접수일 2008. 6. 16, 심사완료일 2009. 2. 9)

Development and Analysis of the Magnetron Analysis Program

Seung-Pyo Lee*, Byung-Kab Koh⁺, Sung-Kyu Ha⁺⁺

Abstract

Magnetron is a compartment of microwave oven and it generates the microwave. In this paper, the program HUSAP is developed in order to perform the heat transfer, structure, and fatigue analysis of magnetron. By using it we can make the geometry of magnetron and can solve the governing equations which are formulated by finite element technique. In order to achieve the reliability of HUSAP, we compare it with experiment and commercial software ANSYS. And comparisons of observed results show that agreement is remarkably consistent.

Key Words : Magnetron(마그네트론), Finite element analysis(유한요소해석)

1. 서론

마그네트론(magnetron)은 전자레인지에 장착되는 부품으로 전자파를 발진시켜주는 역할을 한다. 이러한 마그네트론은 크기에 비해 상대적으로 열이 많이 발생하므로 구조적으로 방열장치가 필수적이다. 이 문제를 해결하기 위하여 냉각핀을 마그네트론 구조에 삽입하여 형성하는 경우가 일반적이다. 따라서 열에 의한 변형은 마그네트론의 설계 시 중요한 인자가 된다. 또한 전자레인지의 가열, 정지 등의 동작에 의하여 마그네트론은 반복적으로 On-Off 작동을 하며 이로 인하여 열에 의한 피로 현상이 발생하여 궁극적으로 마그

네트론의 성능 저하 및 작동 불능 현상을 초래한다

마그네트론 양극부(anode)의 온도 분포 및 열응력에 대한 수치적인 연구가 수행 되었다⁽¹⁾. 이 연구는 마그네트론을 구성하고 있는 여러 가지 부품들 중 양극부에 대하여 온도장(temperature field)과 변위장(displacement field)을 해석하였다. 이를 위하여 유한요소법에 근거한 상용 프로그램⁽²⁾을 이용하였고, 이때 양극부 내부에서의 열전달 현상은 전도만 존재한다고 가정하였다. 그러나 실제 마그네트론의 열전달은 전도와 함께 대류가 존재하며 이는 냉각핀과 주위의 유체 사이에서 발생한다.

마그네트론의 열 분포 및 변형, 응력, 구조 안전도, 피로

* 한양대학교 기계설계학과 대학원 (chrisl@hanyang.ac.kr)

주소: 426-791 경기도 안산시 상록구 사1동

+ 인하공업전문대학 기계과

++ 한양대학교 기계정보경영공학부

안전도 등을 예측하기 위하여 유한요소법을 적용한 상용 프로그램을 이용하는 것이 일반적이다. 그러나 이런 상용 프로그램들은 탄성론 및 유한요소법 이론 등의 전문적인 지식이 필요하므로 누구나 쉽게 사용하기가 용이하지 않다. 따라서 비전문인이라도 쉽게 사용할 수 있는 마그네트론 전용 해석 프로그램의 개발이 요구되며⁽³⁾, 이러한 전용 프로그램은 사용자 편의성을 충분히 고려하여야 한다.

따라서 본 연구에서는 마그네트론의 열 분포 및 변형, 응력, 구조 안전도 그리고 피로 안전도를 수치적으로 계산할 수 있는 마그네트론 전용 해석 프로그램(HUSAP, Hanyang University Structure Analysis Program)을 개발하였다. HUSAP은 설계 변수들을 파라미터로 정의하여 이들 파라미터를 변경함으로써 손쉽게 설계를 변경하고 이에 대한 해석 결과를 얻을 수 있도록 구성하였다. 또한 파라미터들은 GUI(Graphic User Interface) 기능을 이용하여 비전문인이라도 쉽게 사용할 수 있도록 하였다. HUSAP의 신뢰성을 확보하기 위하여 상용 프로그램의 결과와 비교하였고, 실험 결과와 비교하였다. 개발된 HUSAP을 이용하여 마그네트론 부품인 양극부, r-fin, yokc의 열전달 해석, 구조 해석, 피로 해석을 수행하였다.

2. 전용 프로그램의 이론

2.1 열전달 해석; Brick 요소

전도와 대류 열전달이 동시에 작용하는 온도장을 해석하기 위한 3차원 정상상태 열전달 문제의 지배방정식은 다음과 같다⁽⁴⁻⁷⁾.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = 0 \quad (1)$$

where, \dot{q} ; 매질의 단위 체적 당 발생된 에너지의 비율

마그네트론 양극부 형상과 같이 가로, 세로, 높이의 치수가 서로 비슷한 3차원 형상의 온도장을 해석하기 위한 요소를 개발한다. 유한요소법을 이용한 온도장 해석을 위하여 요소당 8개의 절점과 각 절점에서 1개의 자유도를 가지는 brick 요소를 개발한다. 요소내의 온도 T^e 를 8절점 요소의 형상함수를 이용하여 표현하면 다음과 같다.

$$T^e = \sum_{a=1}^8 N_a T_a^e \quad (2)$$

where, N_a ; 각 절점에서의 등매개 형상함수

T_a^e ; 각 절점에서의 절점 온도

Green Theorem, Galerkin Method를 식 (1)에 적용하고 식 (2)를 이용하면 자연좌표계에서의 열전달 지배방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$K_T^e \cdot T^e = F_T^e \quad (3)$$

$$K_T^e = \iiint_{-1}^1 \bar{B}^T \bar{K} \bar{B} \bar{J} d\xi d\eta d\zeta + \iint_{-1}^1 h N^T \bar{M} \bar{J} d\xi d\eta \quad (4)$$

$$F_T^e = \iiint_{-1}^1 \bar{q} \bar{M} \bar{J} d\xi d\eta d\zeta + \iint_{-1}^1 q^* \bar{M} \bar{J} d\xi d\eta + \iint_{-1}^1 h T_\infty \bar{M} \bar{J} d\xi d\eta \quad (5)$$

where, K_T^e ; 요소 열전도행렬, F_T^e ; 열 흐름 벡터

2.2 구조 해석; Brick 요소

마그네트론 양극부와 같은 형상의 3차원 구조물의 유한요소 해석을 위하여 요소당 8개의 절점과 각 절점에서 3개의 자유도를 가지는 brick 요소를 개발한다. 요소 내의 3차원 변위 d^e 를 8절점 요소의 형상함수를 사용하여 표현하면 다음과 같다.

$$d^e = \sum_{a=1}^8 N_a d_a^e \quad (6)$$

where, d_a^e ; 각 절점에서의 절점 변위

유한요소법의 일련의 과정을 거쳐서 요소의 평형 방정식은 식 (7)과 같이 절점 변위 d^e 의 항으로 표현된다.

$$K^e \cdot d^e = F^e \quad (7)$$

$$\text{where, } K^e = \iiint_{-1}^1 B^T DB \bar{J} d\xi d\eta d\zeta$$

2.3 피로 해석

2.3.1 단축 하중시의 해석

구조물에 단축 하중이 반복적으로 작용하는 경우는 최대 작용하중과 최소작용하중으로부터 식 (8), (9)와 같이 변동 응력(alternating stress, S_a)과 평균응력(mean stress, S_m)을 계산한다.

$$S_a = \frac{S_{\max} + S_{\min}}{2} \quad (8)$$

$$S_m = \frac{S_{\max} - S_{\min}}{2} \quad (9)$$

식 (8), (9)에서 계산된 변동응력과 평균응력에 평균응력의 영향(mean stress effects)을 고려하기 위하여 식 (10)의 Modified Goodman's Method를 적용하고, 평균 응력이 0 인 경우의 피로강도(fully reversed fatigue strength, S_f)를 계산한다.

$$\frac{S_a}{S_f} + \frac{S_m}{S_u} = 1 \quad (10)$$

where, S_u ; 단축 하중시의 극한인장강도(ultimate tensile strength)

식 (10)으로부터 계산되는 피로강도를 S-N 곡선에 대입하여 주어진 하중에서의 피로파괴가 일어나는 내구 회전수를 계산한다.

2.3.2 다축 하중시의 해석

구조물에 다축 하중이 작용하는 경우는 주축(principal axes)이 변하지 않는다는 가정 하에 Sines' method를 적용할 수 있다. Sines' method는 식 (11), (12)와 같이 단축 하중이 가해지는 경우와 같은 내구 회전수를 얻을 수 있는 등가단축 변동응력(equivalent uniaxial alternating stress, S_{qa})과 등가단축평균응력(equivalent uniaxial mean stress, S_{qm})을 구하고 이를 이용하여 S-N 곡선에서 내구 회전수를 계산하는 방법이다.

$$S_{qa} = \sqrt{\frac{(S_{a1} - S_{a2})^2 + (S_{a2} - S_{a3})^2 + (S_{a3} - S_{a1})^2}{2}} \quad (11)$$

$$S_{qm} = S_{mx} + S_{my} + S_{mz} \quad (12)$$

where, S_{a1}, S_{a2}, S_{a3} ; 주변동응력
 S_{mx}, S_{my}, S_{mz} ; 평균수직응력

3. 전용 프로그램의 개발

위의 이론을 바탕으로 마그네트론 전용 해석 프로그램 HUSAP이 개발되었다. 개발된 프로그램은 사용자 편의성을 충분히 고려하여 해석 전문가가 아닌 설계자가 쉽게 사용할 수 있도록 구성하였다. 즉 파라미터를 이용한 모델링 기법을 적용하여 사용자가 GUI를 이용하여 파라미터를 변경함으로써 그에 따른 형상이 자동 생성되도록 하였다.

또한 물성치, 하중조건 등도 GUI 상에서 쉽게 입력할 수 있도록 하여 비전문가도 쉽게 해석을 수행할 수 있도록 구성하였다. 개발된 프로그램은 마그네트론의 열전달 해석,

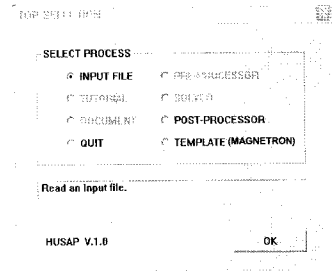


Fig. 1 Top menu of HUSAP

구조 해석, 피로 해석 등의 다양한 분야의 해석을 하나의 프로그램 상에서 용이하게 수행할 수 있다. 또한 HUSAP은 interactive mode와 batch mode의 두 가지 mode로 프로그램을 실행시킬 수 있으며 매크로 기능을 이용하여 사용자가 원하는 명령을 수행시키면서 그 결과를 즉시 확인할 수 있도록 구성할 수 있다. Fig. 1은 HUSAP의 실행 예로서 Top menu이다.

4. 전용 프로그램의 검증 및 해석

개발된 마그네트론 전용 프로그램 HUSAP의 검증을 위하여 HUSAP과 상용 프로그램 ANSYS[®]를 이용하여 각각 마그네트론의 형상을 모델링하고, 적절한 경계조건과 하중 조건을 대입하여 온도 분포를 계산한 후 이들 결과를 비교 검토하였다. 또한 이들 해석 결과를 실험 결과와 비교하여 HUSAP의 신뢰성을 검증하였다.

Fig. 2는 마그네트론의 구조를 나타낸다. Fig. 2에서 알 수 있듯이 마그네트론은 여러 가지의 부품으로 구성되며, 이들 중에서 양극부, r-fin, yoke가 가장 중요한 부품들이다. 따라서 본 연구에서는 개발된 마그네트론 전용 해석 프로그램을 이용하여 이들 세 부품에 대한 열전달 해석, 구조 해석, 피로 해석을 수행하였다.

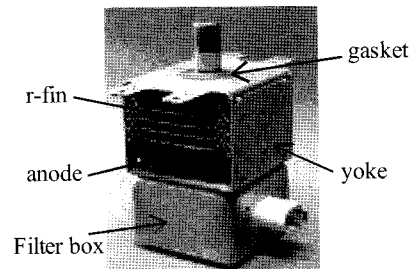


Fig. 2 Structure of magnetron

4.1 열전달 해석

4.1.1 양극부를 고려한 해석

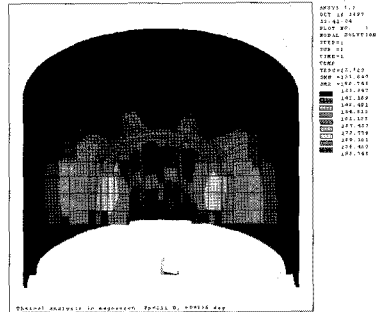
HUSAP을 이용하여 양극부의 전도를 고려한 열전달 해석을 수행하였다. HUSAP은 양극부 해석을 위하여 Fig. 3과 같이 GUI를 이용하여 설계자가 직접 설계변수 값을 지정할 수 있고, 이에 근거하여 형상이 모델링 되도록 구성하였다. 이때 설계변수들은 미리 설계도에 근거하여 설정된 형상 변수들이다. 표 1은 마그네트론 양극부의 물성치 데이터이다.

양극부에 대한 열전도 해석을 수행하기 위하여 양극부 끝단 온도를 실제 측정 온도인 136℃로 지정하고, 양극부 손실 Pp은 베인(vane)의 가장 안쪽 면에 대하여 전자장 이론에 의하여 계산된 값인 211W로 입력하였다. 양극부 손실은 식 (13)과 같이 열 유속(heat flux)으로 환산되어 계산되어진다.

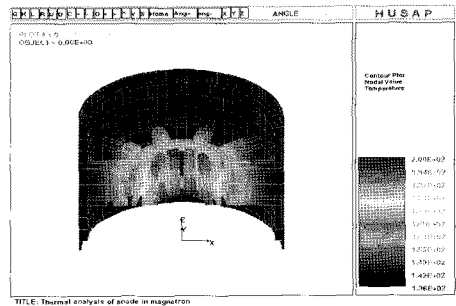
$$heat\ flux, q = \frac{P_p}{n \times h \times t} \quad (13)$$

where, *n*; number of vane, *h*; height of vane
t; thickness of vane

Fig. 4는 ANSYS, HUSAP을 이용하여 마그네트론 양극부 부품에 대한 온도 분포를 계산한 결과이며, 표 2는 이들 결과를 비교한 것이다. 또한, Fig. 5는 표 2의 선정된 위치를



(a) ANSYS



(b) HUSAP

Fig. 4 Temperature distribution for anode

TEMPLATE DATA for ANODE			
GEOMETRY	크기(mm)	변수명	크기(mm)
변수명	크기(mm)	변수명	크기(mm)
모음경	2621.4	베인폭 외측길이	6.76
베인갠수	18	베인폭 길이	6.15
아노드 내경	35.5	안테나폭 위치	8.56
작형길이 외경	36.9	안테나폭 길이	6.1
아노드 안외	26	안테나폭 길이	6.8
아노드 안외	26	안테나폭 길이	6.8
베인 길이	33.3	내소플랜지 내경	13.46
베인 폭	6.8	내소플랜지 외경	15.2
베인 두께	2.9	내소플랜지 두께	1.3
베인 홈 내측길이	11.44	외소플랜지 내경	17.11
작형 경계 조건		외측 상경	
ANODE 손실 (PW)	11	Geometry	
ANODE 끝단 온도	136	수업 전달 해석	
		수행/모델 해석	
		Open the Template Data	
		Save the Template Data	
		OK	Cancel

Fig. 3 Geometric modeling using HUSAP GUI

Table 1 Material properties for anode

Material name	OFHC
Young's modulus	117.2 GPa
Yield stress	68.9 MPa
Poisson's ratio	0.34
Coefficient of thermal expansion	16.24e-6
Conductivity	374 W/m·K
Density	8954 kg/m ³
Specific heat	383.1 J/kg·K

Table 2 Comparison for temperature at anode

Point No.	HUSAP	ANSYS
1	198	192
2	194	195
3	185	185
4	184	184
5	163	163
6	162	162
7	137	137

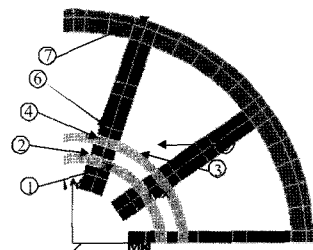


Fig. 5 Temperature calculation positions

표시한 것이다. 표 2에 나타난 바와 같이 두 가지 프로그램들의 결과가 잘 일치함을 알 수 있다. 표 2의 1, 2번 위치에서 ANSYS와 HUSAP의 온도가 차이가 나는 이유는 열 유속 경계조건의 처리 때문이다.

4.1.2 양극부, r-fin, yoke을 고려한 해석

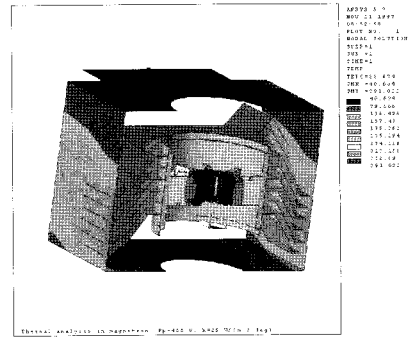
마그네트론의 양극부와 r-fin, yoke를 고려한 열전달 해석을 수행하였다. 이 해석은 전도와 대류를 모두 고려한 해석이며, 양극부와 r-fin, yoke는 서로 밀착되어 있어서 열전달의 손실이 없다고 가정하였다. 양극부 모델링과 마찬가지로 GUI 기능을 이용하여 사용자가 직접 설계변수 값을 지정할 수 있고, 이를 이용하여 r-fin과 yoke의 형상이 자동으로 모델링되도록 구성하였다. 표 3은 r-fin과 yoke의 물성치 데이터이다.

양극부와 r-fin, yoke에 대한 열 해석을 수행하기 위하여 양극부 손실 P_p 을 211W로 가하였다. r-fin과 yoke의 표면은 대류 경계조건이 적용되며, 이때 대류 열전달계수 h 는 $26 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 이고, 외부 온도 T_∞ 는 25°C 이다. Fig. 6은 ANSYS와 HUSAP을 이용한 마그네트론 양극부와 r-fin, yoke의 온도 분포를 계산한 결과이다.

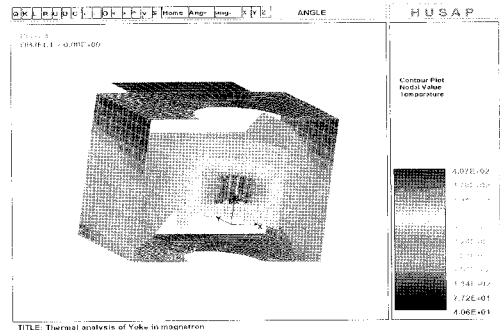
해석 결과의 검증을 위하여 thermocouple을 이용한 온도 측정 실험을 수행하였다. 이때 공기 유량은 $1.0\text{m}^3/\text{min}$ 이고, 양극부 손실과 대류 열전달계수는 해석과 동일한 조건을 유지하였다. 양극부 실린더 부분과 r-fin 끝단에서의 온도를 thermocouple을 이용하여 측정하였다.

표 4는 ANSYS, HUSAP, 실험 결과에 대하여 양극부 실린더 부분과 r-fin 끝단에서의 온도를 비교한 것이다. 표 4로부터 알 수 있듯이 ANSYS와 HUSAP의 결과는 양극부 실린더 부분과 r-fin 끝단에서 잘 일치한다. ANSYS, HUSAP

해석 결과와 실험 결과는 양극부 실린더 부분에서는 다소 차이를 보이며, r-fin 끝단에서는 비교적 잘 일치하고 있다. 이와 같은 차이가 발생한 이유는 마그네트론의 열전달 흐름 때문이라고 예상된다. 실제 마그네트론은 양극부의 열원이 r-fin과 yoke 뿐만 아니라 pole pieces, gasket, magnet, filter box를 통하여 열이 방출되고 있으나, 본 연구에서는 r-fin과 yoke만을 고려하였기 때문에 이와 같은 차이가 발생하였다. 따라서 보다 정확한 해석을 위해서는 pole pieces, gasket, magnet, filter box 등의 부품들을 고려한 해석이 필요하다고 예상된다.



(a) ANSYS



(b) HUSAP

Fig. 6 Temperature distribution for anode, r-fin and yoke

Table 3 Material properties for r-fin, yoke

	r-fin	yoke
Material name	Al-1100	SPGC
Young's modulus	70.33 GPa	70.33 GPa
Yield stress	35.0 MPa	35.0 MPa
Poisson's ratio	0.35	0.35
Coefficient of thermal expansion	23.6e-6	23.6e-6
Conductivity	222 W/m·K	15 W/m·K
Density	2710 kg/m ³	2710 kg/m ³
Specific heat	900 J/kg·K	900 J/kg·K

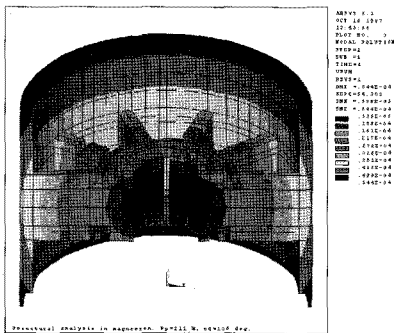
Table 4 Comparison for temperature at anode, r-fin, yoke

	anode cylinder, °C	r-fin end, °C
HUSAP	260	175
ANSYS	255	177
Experiment	217	168

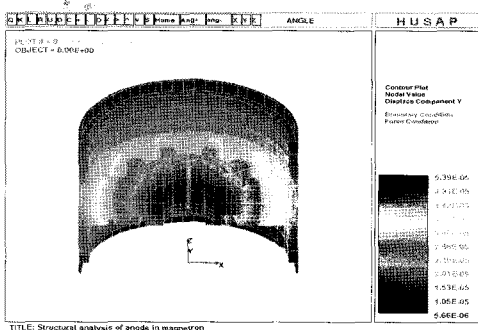
4.2 구조 해석

열전달 해석에 의하여 계산된 온도 분포 값을 이용하여 양극부의 변위와 응력을 계산하였다. Fig. 7은 ANSYS와 HUSAP의 양극부 변위를 나타낸다. 이로부터 알 수 있듯이 마그네트론 전용 해석 프로그램의 변위 분포는 상용 프로그램 ANSYS의 분포와 잘 일치한다.

계산된 변위를 이용하여 양극부에 대한 구조 안전도 평가를 수행하였다. Fig. 8은 ANSYS와 HUSAP의 양극부에 대한 구조 안전도 평가 결과를 나타낸다. 구조 안전도 평가를 위하여 ANSYS에서는 von Mises 항복 조건에 근거한 SEQV값을 적용하며, 전용 프로그램 HUSAP에서는 이 값을 항복 응력값으로 나는 strength ratio를 이용하여 평가하였다⁹⁾. Strength ratio값이 0 이상인 부분에서는 파손, 즉 소성변형이 발생하며 그 위치는 Fig. 8로부터 알 수 있듯이 대부분 inner strap에 존재한다. Inner strap에서는 주어진 조건에 대하여 소성 변형이 발생하므로 그 결과 양극부 일부 부품이 녹아서 심한 변형이 발생되고 궁극적으로 성능 저하를 가져올 수 있다.

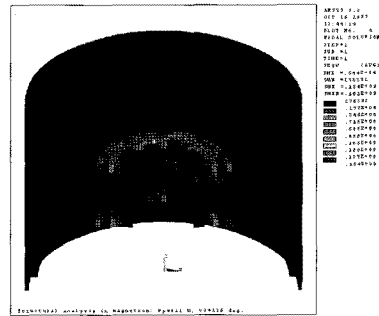


(a) ANSYS

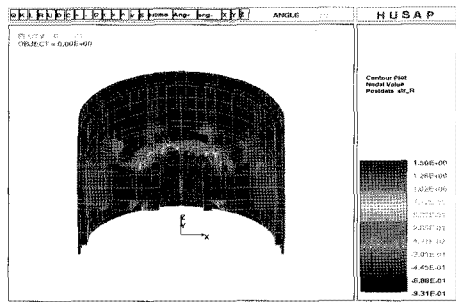


(b) HUSAP

Fig. 7 Displacement distribution for anode



(a) ANSYS; SEQV



(b) HUSAP; strength ratio

Fig. 8 Safety margin for anode

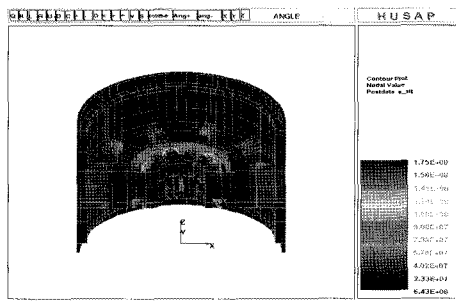


Fig. 9 Fatigue strength for anode

4.3 피로 해석

양극부에서의 구조 해석 결과에 피로 해석 이론을 적용하여 피로 안전도 평가를 수행하였다. 피로 해석을 위한 내구 한도(Endurance limit, σ_a)는 110.3 MPa이다. 양극부의 경우는 다축하중이 작용하는 경우이므로 Sines' method를 적용하여 피로강도와 내구 회전수를 계산한다. Fig. 9와 Fig. 10은 각각 양극부의 피로강도와 내구 회전수를 나타낸다. Fig. 10에서 알 수 있듯이 inner strap 부분에서의 내구 회전

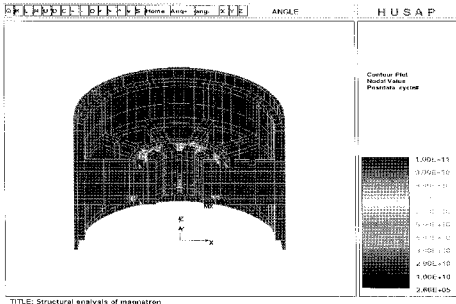


Fig. 10 Number of cycle for anode

수가 266,000회로서 다른 부분들에 비하여 상대적으로 적은 값을 가지므로 100만 회 이상의 마그네트론 운전 시 이 부분에서 열 피로 파괴 현상이 발생할 수 있음을 예측할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 마그네트론 형상에 대하여 온도장과 변위장 해석을 수행할 수 있는 전용프로그램 HUSAP을 개발하였다. HUSAP은 GUI에 기반을 두어 사용자가 쉽게 형상을 형성하고 설계를 변경할 수 있도록 구성되었다. 개발된 프로그램의 신뢰성을 검증하기 위하여 마그네트론의 양극부, r-fin, yoke에 대하여 열전달 해석을 수행하였고, 상용프로그램인 ANSYS, 실험 결과와 비교하였다. 비교 결과, 온도분포가 비교적 잘 일치하였다. 열전달 해석에 의하여 계산된 온도분포를 이용하여 양극부에서 변위와 구조 안전도를 계산하였다. 구조 안전도 평가 결과 inner strap에서 소성 변형이 발생하며 이로 인하여 성능 저하가 우려되므로 설계 변경이 요구되어진다. 계산된 구조 해석 결과로부터 양극부에 대하여 열에 의한 피로 파괴 수명을 계산하였다. 계산 결과, inner strap 부분이 가장 열 피로에 취약하며 약 100만회 이상의 운전에 대하여 피로 파괴가 발생함을 예측할 수 있다. 본 연구로부터 개발된 마그네트론 전용 프로그램을 이용하여 쉽게 마그네트론의 형상을 모델링하고 열 분포, 변위 분포, 피로 파괴 여부를 예측할 수 있을 것으로 예상된다.

참고 문헌

- (1) Kim, I. S., 1991, *1st Technical report; Thermal analysis for anode in magnetron*, LG electronics, Republic of Korea.
- (2) NISA, 1991, *NISA User's Manual*, Cranes Software, MI, USA.
- (3) Park, S. H., Kang, S. H., and Lee, S. S., 2003, "Development of Motorcycle Brake Design Aided Program for Thermal Analysis," *Transactions of the Korean Society of Machine and Tool Engineers*, Vol. 12, No. 1, pp. 101~110.
- (4) Boley, B. A. and Weiner, J. H., 1962, *Theory of Thermal Stresses*, John Wiley & Sons, New York, USA, pp. 135~141.
- (5) Hsu, T. R., 1986, *The Finite Element Method in Thermodynamics*, Allen & Unwin, Boston, USA, pp. 23~26.
- (6) Kim, Y. G., Kim, S. T., and Park, C. H., 1997, "Analysis on the Thermal Characteristics of Spindle of a High Precision Lathe," *Transactions of the Korean Society of Machine and Tool Engineers*, Vol. 6, No. 3, pp. 44~51.
- (7) Yoh, E. G., Lee, Y. S., and Kim, Y. R., 1997, "The Thermal-Elastic Analysis of Die Deformation for Forging Processes and Study of Brittle Damage," *Proceedings of the KSMTE Spring Conference 1997*, pp. 164~169.
- (8) ANSYS, 2005, *ANSYS User's Manual Ver. 10.0*, ANSYS, Inc, PA, USA.
- (9) Stephen W. T. and Hahn, H. T., 1980, *Introduction to Composite Materials*, Technomic, Connecticut, USA, pp. 302~306.