

마그네트론 구조의 열특성에 관한 해석

고병갑^{1*}

¹인하공업전문대학 기계과

An Analysis on the Thermal Characteristics of a Magnetron Structure

Byung-Kab Koh^{1*}

¹Department of Mechanical Engineering, Inha Technical College

요 약 마그네트론은 마이크로파를 발진하기 위한 부품으로써 전자레인지 등에 사용되는 부품이다. 이러한 마그네트론은 열이 많이 발생하며, 따라서 열특성을 고려한 방열 설계가 반드시 수반되어야 한다. 본 연구에서는 마그네트론을 구성하는 부품에 대하여 열전달 해석을 수행하여 마그네트론의 열특성을 파악하였다. 이를 위하여 상용 소프트웨어인 ANSYS를 이용하여 전도 및 대류를 고려한 열전달 해석을 수행하였다. 마그네트론 부품을 하나씩 추가하면서 해석을 수행하였고 각각의 해석 결과를 실험 결과와 비교하였다.

Abstract Magnetron is applied in microwave ovens for generating microwaves. It is composed of r-fin, yoke, A/F seals, gasket base, filter box. The temperature is occurred highly, when magnetron operate in its systems. Therefore the thermal characteristics must be considered in the design of magnetron. Because of its geometric complex, it is difficult to analysis the thermal characteristics. In this paper, temperature analysis is performed for all components. The commercial software ANSYS is used to consider both conduction and convection. The analysis is carried out by adding each component. An experiment on the thermal characteristics is performed to verify the reliability for simulation.

Key Words : Magnetron, Heat transfer analysis, Thermal characteristics

1. 서론

마그네트론(magnetron)은 마이크로파를 발진하기 위한 진공관의 하나로써 원통형의 양극과 그 중심축에 음극을 가지며, 전자레인지 등에 사용되는 부품이다. 이러한 마그네트론은 열이 많이 발생하며, 이를 위하여 열 특성을 고려한 방열 설계가 반드시 수반되어야 한다.

Kim[1]은 마그네트론 anode에 대하여 온도와 변형률을 상용 해석 프로그램인 NISA[2]를 이용하여 해석하였다. 이때 열전달은 전도만 고려하였고, 대류에 의한 열전달은 무시하였다. 그러나 실제 마그네트론의 열전달은 전도와 함께 대류가 존재하며 이는 마그네트론을 구성하는 전체 부품을 통해서 이루어진다. 따라서 실제 현상을 모사하기 위하여 대류 열전달 현상을 고려하여야 하며, 이

를 위해서 anode 뿐만 아니라 다른 부품을 포함한 마그네트론 전체의 열전달 해석이 수행되어야 한다. Lee 등[3]은 마그네트론을 구성하는 부품인 anode, r-fin, yoke에 대하여 열전달 해석, 구조해석, 피로해석을 수행할 수 있는 전용 해석 프로그램을 개발하고 각각의 해석을 수행하였다. 그러나 anode, r-fin, yoke만을 고려하였기 때문에 실제 마그네트론 구조의 열 분포와 차이가 발생한다.

따라서 본 연구에서는 마그네트론을 구성하는 전체 부품에 대하여 열전달 해석[4-8]을 수행하여 마그네트론 구조의 열특성을 파악하였다. 이를 위하여 유한요소법에 기반을 둔 상용 프로그램인 ANSYS[9]를 이용하였다. 각 부품에 대한 열특성을 파악하기 위하여 pole pieces, A/F-seals, gasket base, magnet, filter box 등의 부품을 하나씩 추가하면서 해석을 수행하였고, 각각의 해석 결과를

본 논문은 2009학년도 인하공업전문대학 교내연구비지원에 의하여 연구되었음.

*교신저자 : 고병갑(bkkoh@inhac.ac.kr)

접수일 11년 02월 07일

수정일 (1차 11년 03월 01일, 2차 11년 03월 09일)

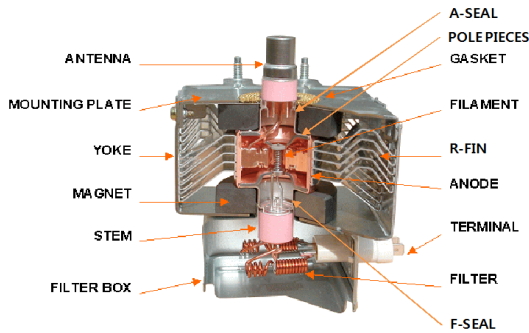
게재확정일 11년 03월 10일

실험 결과와 비교하였다.

2. 마그네트론 열 해석

2.1 형상 모델링

마그네트론은 그림 1에 나타난 바와 같이 anode, r-fin, yoke, pole pieces, A/F-seals, gasket base, magnet, filter box 등으로 구성되며, 특히 anode, pole pieces, A/F-seals, gasket base, magnet 등은 원주 방향으로 그 모양이 반복되는 특징이 있다. 따라서 반복되는 단위 형상만을 모델링하고, 이를 회전이나 대칭 이동시켜서 전체의 형상을 구성한다. 그리고 전체 마그네트론의 구조물은 좌우 대칭이므로 절반만을 모델링하고 여기에 적절한 경계 조건을 가하여 전체 형상의 효과를 나타내도록 하는 것이 효과적이다.



[그림 1] 마그네트론의 구조[10]

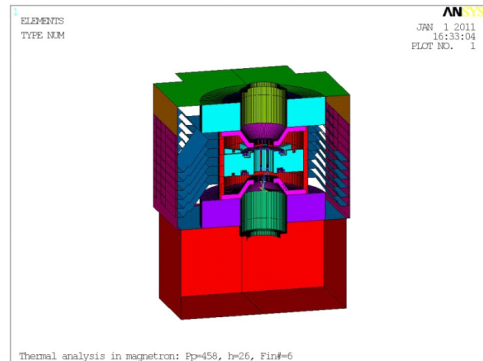
[표 1] 마그네트론 부품의 요소 선정

Parts	Finite Element
anode	brick
r-fin	shell
yoke	shell
pole pieces	brick
A/F-seals, gasket base	shell
magnet	brick
filter box	shell

유한 요소 해석에서 형상을 모델링하기 위해서는 가장 먼저 요소를 선택하여야 한다. anode, magnet 등과 같이 가로, 세로, 높이의 치수가 비슷하거나 해석 시 두께의 영향을 고려하여야 할 필요가 있을 경우는 brick 요소를 선정하고, r-fin, yoke 등과 같이 두께 방향의 치수가 다른 방향의 치수들에 비하여 작을 경우는 shell 요소를 선정

한다. 본 연구에서는 마그네트론 전체 형상을 표 1과 같이 brick과 shell 요소로서 모델링 하였다.

마그네트론의 열 분포를 계산하기 위하여 마그네트론의 각 부품들을 모델링 하였다. 모델링 순서는 anode, r-fin, yoke, pole pieces, A/F-seals, gasket base, magnet, filter box이다. 먼저, anode는 표 1에서 알 수 있듯이 brick 요소로 가정하였고, 36°를 주기로 형상이 반복되지만, 모델링의 편의상 0~180°를 모델링 하였다. R-fin의 형상은 shell 요소로 모델링 하였다. Yoke의 형상도 r-fin과 마찬가지로 shell 요소로 모델링 하였다. Pole pieces는 anode의 상부와 하부에 결합되어 anode부를 밀봉 시켜주는 부품으로 2개로 구성되어 있으며, 2개의 형상은 동일하다. Pole pieces를 모델링하기 위하여 brick 요소를 적용하였다. Pole pieces의 형상은 축 대칭 형상이므로 대칭되는 면을 모델링하고 이를 중심축에 대하여 회전하여 입체의 형상을 구성하였다. 그리고 위쪽 pole piece를 먼저 모델링하고 이를 적절한 평면에 대하여 대칭 이동하여 아래쪽 pole piece를 구성하였다. A-seal, F-seal, gasket base는 shell 요소로 모델링 하였다. Magnet은 brick 요소로 모델링 하였다. 마지막으로 filter box는 shell 요소로 모델링 하였다. 그림 2는 이와 같이 모델링된 마그네트론의 형상을 나타내며, 표 2는 마그네트론 부품들 중에서 shell 요소로 모델링된 부품들의 두께를 나타낸다.



[그림 2] 마그네트론 부품의 형상 모델링

[표 2] 마그네트론 부품에서 shell 요소의 두께

Parts	Thickness (mm)
r-fin	0.6
lower yoke	1.4
upper yoke	1.6
A/F-seals	0.6
gasket base	0.2
filter box	0.2

마그네트론 전체 구조물을 한꺼번에 모델링하는 경우에 형상이 점점 복잡해져서 모델링이 점차로 힘들어지므로 각각의 모델링 시 국소 좌표계(local coordinate)를 정의하여 이를 이용하여 모델링하는 것이 편리하다. 즉, 한 부품을 기준으로 전체 좌표계(global coordinate)를 설정하고, 각 부품들 간의 상대 거리로부터 국소 좌표계를 정의하여 이 국소 좌표계들과 전체 좌표계를 연관시켜서 전체 형상을 구성한다. 본 연구에서는 anode 원점을 전체 좌표계의 원점으로 하고 다른 부품들의 원점들을 국소 좌표계의 원점으로 하여 전체 좌표계와 각 국소 좌표계의 상대 거리를 계산하여 전체 좌표와 국소 좌표계들 간의 관계를 정의하였다. 여러 개의 구조물을 조합하여 전체 형상을 구성할 때 절점들이 공유되어야 한다는 것이므로 이를 유의하여 모델링을 수행하였다.

실제의 마그네트론은 anode와 r-fin, r-fin과 yoke가 접촉에 의해 열을 전달하고 변형이 발생하지만, 접촉에 의한 거동은 이를 해석하기 위한 특별한 요소를 사용하여야 하고 일반적으로 비선형 문제이므로 해석이 복잡하다. 따라서 본 연구에서는 접촉이 아니라 서로 결합되어서 거동한다고 가정하여 형상을 구성하였고 해석을 수행하였다.

2.2 물성치

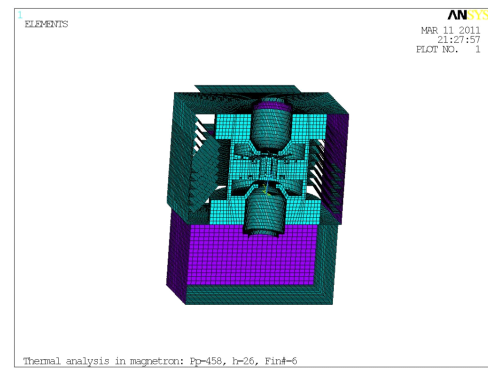
마그네트론의 열전달 해석을 위하여 2.1절에서 언급한 방법으로 마그네트론 부품들을 모델링하고 메쉬(mesh)를 생성하였다. 생성된 메쉬는 그림 3에 나타내었다. 또한, 물성치 데이터는 표 3에 나타내었다. 표 3에서 알 수 있듯이 pole pieces와 filter box는 SPCC로써 동일한 재질이며, A/F-seals과 gasket base도 SPCE로써 동일한 재질이다. SPGC와 SPCE의 물성치는 SPCC와 동일하다고 가정하였다.

2.3 경계 및 하중 조건

Anode에 대한 열전달 해석을 수행하기 위하여 anode 손실(Pp)을 vane의 가장 안쪽 면에 대하여 211 W로 일정하도록 입력하였다. Anode 손실은 식 (1)과 같이 열 유속(heat flux, q)으로 환산하여 계산하였다[3].

$$q = \frac{P_p}{nht} \tag{1}$$

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



[그림 3] 마그네트론 부품의 메쉬

또한 마그네트론 부품의 대류 현상을 모사하기 위하여 대류 경계조건을 적용하였다. 대류 경계 조건이 적용되는 부품은 r-fin, yoke, filter box 등 외부 유동과 접촉하여 열이 방출되는 부품들이고, 이때의 대류 열전달계수 h 는 $26 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ 로 일정하며, 외부 온도 T_∞ 는 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 설정하였다.

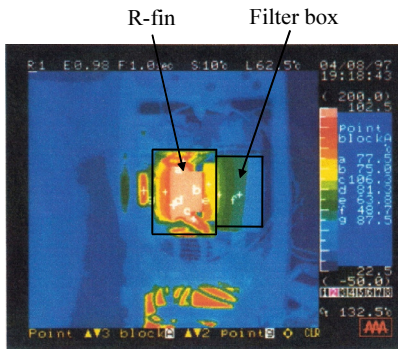
[표 3] 마그네트론의 물성치

Part name	anode	r-fin	yoke	pole pieces, filter box	A/F-seals, gasket base	magnet
Material name	OFHC	Al-1100	SPGC	SPCC	SPCE	Carborundum brick
Young's modulus, GPa	117.2	70.33	70.33	70.33	70.33	70.33
Poisson's ratio	0.34	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
Yield stress, MPa	68.9	35	35	35	35	35
Thermal expansion	16.24e-6	23.6e-6	23.6e-6	23.6e-6	23.6e-6	23.6e-6
Conduction coefficient, W/m·K	374	222	15	15	15	19
Density, kg/m ³	8954	2710	2710	2710	2710	2710
Specific heat, J/kg·K	383	900	900	900	900	900

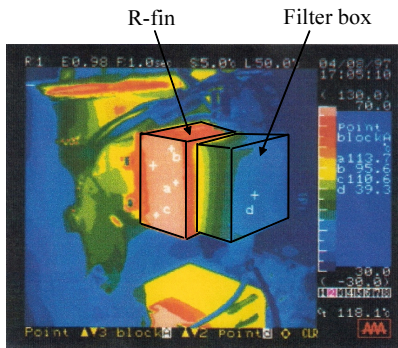
3. 온도 분포 측정

해석 결과의 검증은 위하여 thermocouple을 이용한 온도 측정 실험을 수행하였다. 이때 공기 유량은 1.0 m³/min.이고, 다른 조건들은 해석과 동일하게 가하였다. anode cylinder 부분과 r-fin 끝단에서의 온도를 thermocouple을 이용하여 측정하였다. 측정 결과, anode cylinder에서의 온도는 217 °C이고, r-fin 끝단에서의 온도는 168 °C이다[3].

Thermocouple을 이용한 온도 측정은 정확한 반면에 thermocouple이 부착된 위치에서의 온도만을 측정할 수 있다는 단점이 있다.



(a) 정면에서 측정된 온도 분포



(b) 비스듬히 측정된 온도 분포

[그림 4] 측정된 마그네트론의 온도 분포

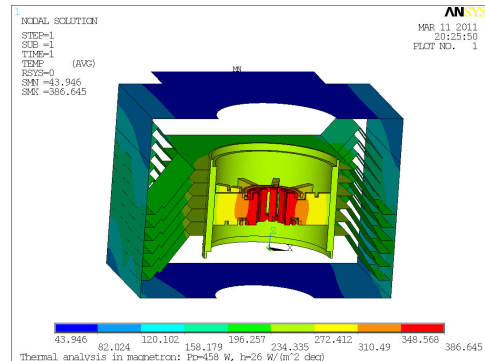
이러한 단점을 보완하기 위하여 마그네트론 전체의 온도 분포를 측정할 필요가 있으며, 이를 위하여 적외선 카메라를 이용하였다. 측정을 위하여 전자레인지의 커버를 연 상태에서 cavity 내부로 들어가는 공기의 가이드인 덕트(duct)를 제거하고 정면의 controller를 제거한 상태에서 1000 cc 비커에 물을 600 cc 정도 넣고, 수동으로 온도 분포가 거의 포화될 때까지 가열하였다. 그림 4는 측정된

열 분포를 나타낸다.

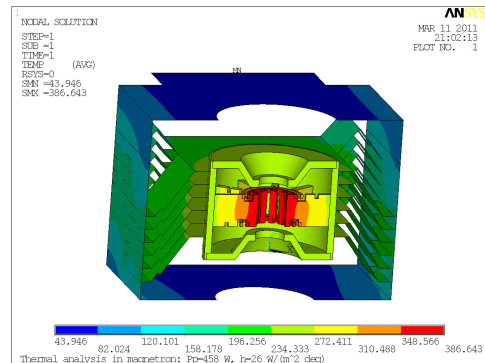
Thermocouple을 이용하여 측정된 anode cylinder, r-fin 끝단의 온도와 적외선 카메라를 이용하여 측정된 마그네트론의 온도 분포를 비교한 결과, 두 가지 결과는 대체로 유사하다고 판단되며, 이로부터 온도 분포 측정은 충분히 신뢰할만하다고 판단된다.

4. 해석 결과 및 고찰

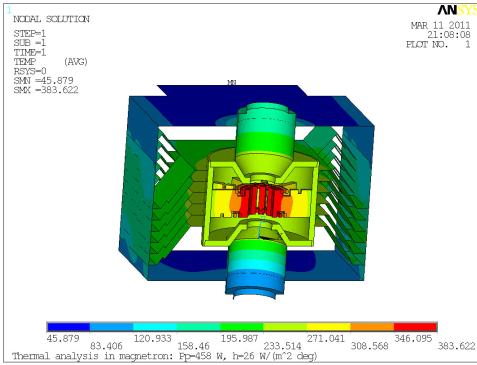
2.1절에서 제시한 방법으로 anode, r-fin, yoke, pole pieces, A/F-seals, gasket base, magnet, filter box를 순서대로 모델링하고, 표 3의 물성치를 입력하였다. 또한 2.3절에서 언급한 경계 및 하중 조건을 입력하여 ANSYS를 이용한 마그네트론 부품에 대한 전도 및 대류 열전달 해석을 수행하였다. 이때 brick 요소로써 SOLID70을 사용하였고, shell 요소로써 SHELL57을 사용하였다. 그림 5는 마그네트론 부품을 하나씩 추가하면서 수행된 온도 분포를 나타낸다.



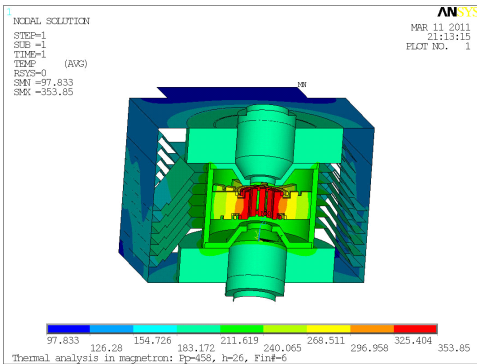
(a) Anode, r-fin, yoke를 포함한 온도 분포



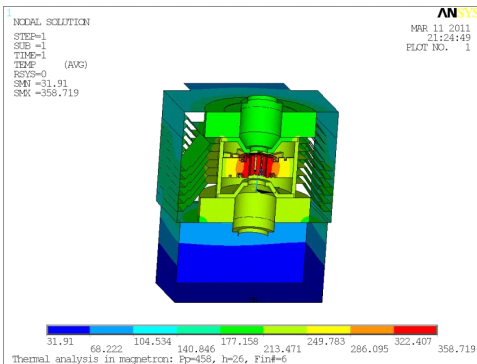
(b) Pole pieces까지를 포함한 온도 분포



(c) A/F-seals, gasket base까지를 포함한 온도 분포



(d) Magnet까지를 포함한 온도 분포

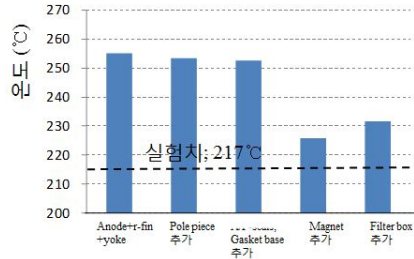


(e) Filter box까지를 포함한 온도 분포

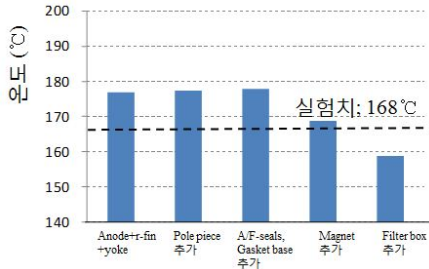
[그림 5] 마그네트론의 온도 분포

그림 5(a)에서 알 수 있듯이 anode에서 최대 온도 386.645 °C가 발생하였고, yoke 상하부분에서 최소 온도 43.946 °C가 발생하였다. 그림 5(b)는 그림 5(a)와 거의 동일한 온도 분포를 나타내고 있다. 이는 그림 5(a)와 그림 5(b)에서 anode의 온도가 r-fin, yoke 좌우부분을 통하여 yoke 상하부분으로 전달되었기 때문에 발생한 결과라

고 예상된다. 그림 5(c)는 anode 최대 온도가 383.622 °C로써 이전 결과와 크게 차이가 없다. 마그네트론 본체는 A-seal, F-seal을 통하여 r-fin의 상하부분과 접촉하고 있으나, A-seal, F-seal의 접촉 면적이 너무 작아서 온도 전달이 거의 없기 때문이라고 판단된다. 그림 5(d)와 그림 5(e)에서 anode의 온도는 각각 353.85 °C, 358.719 °C로 이전에 비하여 상당히 떨어짐을 알 수 있으며, 그 원인은 magnet을 통해서 anode의 높은 온도가 yoke, filter box로 골고루 전달되었기 때문이라고 판단된다.



(a) Anode cylinder 온도 분포



(b) R-fin 끝단 온도 분포

[그림 6] 마그네트론 해석과 실험의 온도 비교

그림 6은 마그네트론 해석과 실험의 온도 비교를 나타낸다. 그림 6으로부터 알 수 있듯이 anode, r-fin, yoke만을 고려한 경우 anode cylinder에서는 해석과 실험 간에 18%의 오차가 발생하며 r-fin 끝단에서는 5%의 오차가 발생한다. Pole pieces, A/F-seals, Gasket base 등을 추가로 고려하여도 해석 결과는 실험 결과와 anode cylinder와 r-fin 끝단에서 각각 16~17%, 6%의 차이가 발생한다.

그러나 magnet을 고려한 열전달 해석의 경우는 해석과 실험 결과의 차이가 4%, 1%로 상당히 줄어든다. Filter box를 고려한 경우는 anode cylinder의 온도는 226 °C에서 232 °C로 오히려 상승하나, r-fin 끝단의 온도는 169 °C에서 159 °C로 내려감을 알 수 있다. 이 결과로부터 마그네트론의 온도를 해석적으로 예측하기 위해서는 최소한 magnet까지는 고려해야 함을 예상할 수 있다.

Anode cylinder에서 측정된 해석과 실험 간의 온도 차이가 r-fin 끝단에서 측정된 온도 차이에 비해서 큰 이유는 대류 열전달 계수의 차이 때문으로 생각된다. 즉 본 연구에서 사용된 대류 열전달 계수는 $26 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ 로 일정한데 비하여 anode cylinder와 r-fin에서의 실제 대류 열전달 계수는 일정하지 않기 때문이다. 또한 filter box의 경우 해석과 실험의 온도 차이가 magnet의 경우에 비하여 증가하는 이유도 역시 해석 시 대류열전달 계수의 불확실성 때문이라고 판단된다.

4. 결론

마그네트론을 구성하는 구조물에 대하여 전도 및 대류를 고려한 열전달 해석을 수행하였다. 각 부품에 대한 열특성을 파악하기 위하여 각각의 부품을 하나씩 추가하면서 해석을 수행하였고, 그 결과를 실험 결과와 비교 하였다. 해석과 실험 결과를 비교한 결과, 부품을 추가함에 따라서 온도 차이가 줄어들을 알 수 있었다. 결론적으로 마그네트론의 온도 분포를 해석적으로 예측하기 위해서는 최소한 magnet까지는 고려해야 함을 예상할 수 있다. 또한 대류 열전달 계수 값을 보다 현실적으로 입력할 경우 실험 결과와 보다 유사한 해석 결과를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

참고문헌

[1] Kim, I.S., "1st Technical report; Thermal analysis for anode in magnetron, LG electronics", 1991

[2] NISA, 1991, NISA User's Manual.

[3] Lee, S.P., Koh, B.K., and Ha, S.K., "Development and Analysis of the Magnetron Analysis Program", Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol. 18, No. 2, pp. 123~129, 2009

[4] 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.

[5] Boley, B. A. and Weiner, J. H., 1962, Theory of Thermal Stresses, John Wiley & Sons, pp. 135~141.

[6] Hsu, T. R., 1986, The Finite Element Method in Thermodynamics, Allen & Unwin, Boston, pp. 23~26.

[7] 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.

[8] 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.

[9] ANSYS, ANSYS User's Manual Ver. 10.0., 2005

[10] Toshiba Hokuto Electronics Corporation, www.hokuto.co.jp/00end/e5500_sm/e5500_sm_guide.html

고 병 갑(Byung-Kab Koh)

[정회원]



- 1995년 8월 : 한양대학교 기계설계학과(공학박사)
- 1997년 2월 : University of Virginia 박사후 연구원
- 1998년 3월 ~ 현재 : 인하공업전문대학 기계과 교수

<관심분야>

구조해석 및 최적설계, 피로해석