

고속 주축계의 자켓의 유량 변화에 따른 냉각 특성

A Study on the Cooling Characteristics of Cooling-Jacket in High-Speed Spindle according to the Flow Rate

김태원(창원대 대학원), 김수태(창원대), 최대봉(KIMM), 김태형(대우중공업)

Tae-Won Kim, Soo-Tae Kim, Dae-Bong Choi, Tae-Hyong Kim

ABSTRACT

Cooling characteristics of cooling jacket for spindle system with built-in motor are studied. For the analysis, three dimensional model for the cooling jacket is built by using finite volume method. The three dimensional model includes the estimation on the amount of heat generation of bearing and built-in motor and the thermal characteristic values such as heat flux on the boundary.

Numerical results show that flow rate are important factors for cooling characteristics of cooling jacket.

1. 서론

원형곡관내에서의 열전달은 2차 유동의 발생으로 인해 큰 효과를 나타내는 것으로 연구되고있다. 따라서 이 2차 유동의 영향을 이용하여 각종 냉각장치, 열교환기 등 매우 다양한 산업장치에 응용되고 있다.

본 연구에서는 고정밀도를 요구하는 모터내장형 주축계의 냉각을 위해 스테이터와 케이싱 사이에 나선형 냉각자켓을 설치하여 냉각오일의 유동을 통한 냉각 방식에 대한 해석을 수행하였고 모터내장형 고정밀 선반의 주축계를 대상으로 주축의 회전 속도와 냉각오일의 유량에 따른 온도 분포에 대한 수치적 해석을 수행하여 주축의 무

부하 회전 시 모터내장형 주축계에서의 냉각특성 해석 방법을 제시하고 실제 제작되는 주축계의 냉각자켓 해석에 적용하여 해석 방법의 타당성을 확인한다.

2. 해석 이론

사각단면의 덕트 내부를 흐르는 일정유속을 가진 오일을 수치해석 하기 위해서 유한체적법을 사용하였다.

이산화방정식은 변수의 격자점을 포함하는 각 미소 검사체적에 대하여 지배방정식을 적분해서 유도되며, 식(1)과 같이 표시된다.

$$a_p \phi_p = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + c_{sb} \quad (1)$$

하첨자 nb는 검사체적주위의 인근 격자점을 나타내며 p는 중심 격자점을 나타낸다. 한편 압력은 운동량방정식과 연속방정식을 만족하도록 간접적으로 구해야 하는데 본 연구에서는 Patankar-Spalding의 SIMPLE (Semi-Implicit Pressure Linked Equation)해법을 사용하였으며 이산화방정식은 TDMA(Tri-Diagonal Matrix Algorithm)과 다중격자법(Multigrid method)을 이용하여 계산하였다.

수렴성을 향상시키기 위하여 하향완화(under-relaxation)를 시켰으며, 각 항의 완화계수로는 Table 1의 값을 사용하였다. 또한 수렴조건은 각 이산화방정식의 잔사량(residual)의 값으로 정하였으며 기준량의 0.1 %내에서 수렴을 판정하였

다.

Table 1 Under-relaxation factor

Pressure	Momentum	Turbulent kinetic energy	Turbulent dissipation rate
0.3	0.7	0.8	0.8

이산화방정식의 해석에 사용된 연속방정식과 운동량방정식은 다음과 같이 나타내어진다.

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu_l + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \delta_{ij} \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) - \rho u_j u_i - \delta_{ij} p \right] = 0 \quad (3)$$

에너지방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\Gamma_l + \frac{\mu_t C_p}{\sigma_\tau} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} - \rho u_j C_p T \right] + \mu_t \Phi_v + \rho \epsilon = 0 \quad (4)$$

난류운동에너지식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu_l + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} - \rho u_j k \right] + \rho P - \rho \epsilon = 0 \quad (5)$$

난류운동에너지의 소산율은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu_l + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} + \rho u_j \epsilon \right] + C_{\epsilon 1} \frac{\rho \epsilon P}{k} - C_{\epsilon 2} \frac{\rho \epsilon^2}{k} = 0 \quad (6)$$

그리고 난류점성계수 μ_t 는 점도와 같은 물성치가 아니라 난류운동의 양상이나 유동의 이력에 따라 변하는 값이다. 이 난류점성계수는 현재까지 난류에 관해 많은 계통적인 실험이나 고찰로부터 난류운동의 특성길이(characteristic length)와 특성속도(characteristic velocity)에 의해 결정되는 값이다.

본 연구에서는 $k-\epsilon$ 모델을 택하여 난류점성계수를 결정하였다. 이것은 난류운동에너지 k 로부터 특성속도를 구하고 점성 소산율의 크기 ϵ 을 이용하여 간접적으로 특성길이를 구하는 모델이다. 난류점성계수는 식(9)과 같다.

$$\mu_t = \frac{C_\mu \rho k^2}{\epsilon} \quad (9)$$

여기서,

$$P = \frac{\mu_t}{\rho} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (7)$$

$$\Phi_v = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \quad (8)$$

난류모델에서의 주요 상수값은 다음과 같다.

$$C_\mu = 0.09, \quad C_{\epsilon 1} = 1.47, \quad C_{\epsilon 2} = 1.92, \\ \sigma_\tau = 0.7, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\epsilon = 1.3$$

3. 냉각자켓의 모델링

Fig. 1은 주축계의 전체 형상을 간략화해서 도시한 것이고 Fig. 2는 본 연구의 해석대상인 모터내장형 주축의 스테이터부와 냉각자켓, 베어링부 그리고 케이싱을 나타낸 것이다.

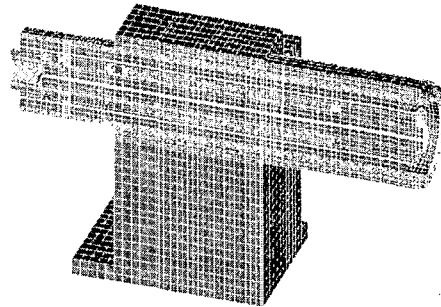


Fig. 1 Model of the spindle system

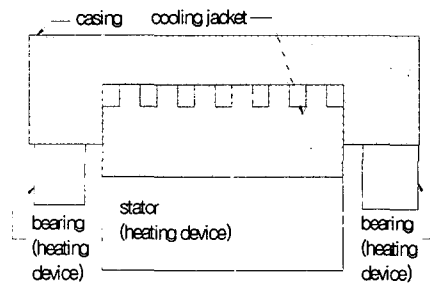


Fig. 2 Schematic diagram of system in analysis

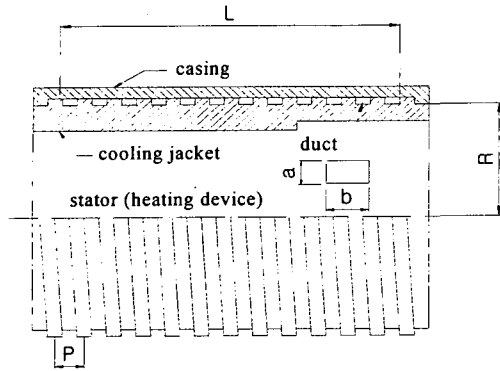


Fig. 3 Schematic diagram of cooling jacket

냉각자켓은 하우징에 억지끼워맞춤으로 설치되었다. 냉각자켓에 대한 상세한 개략도를 Fig. 3에 제시하였다. 냉각자켓의 유로는 하나의 관으로 구성된 것이 아니고, 자켓 상부에 나선으로 골을 파고 그 위를 케이싱으로 덮고 있는 형태이며 냉각자켓의 나선형 덕트에서 모터의 회전축으로부터 덕트까지의 거리인 나선의 반지름을 R, 냉각자켓의 축방향 길이를 L, 덕트의 너비를 b, 높이를 a, 그리고 한 덕트의 중심에서 축방향으로 다음 덕트의 중심까지의 거리인 피치를 P로 하였다.

해석 대상인 주축계 냉각자켓의 형상은 가로(b) 10mm, 세로(a) 5mm의 사각의 유로 단면을 가지며 나선 반경(R)이 93.5mm이고 피치의 길이(P)는 20mm 이다.

4. 경계조건

유한체적해석 모델에 사용된 냉각오일의 상태량을 Table 3에 나타내었으며 온도의존성이 없이 일정하다고 간주한다.

Table 1 Properties of cooling oil

Density ρ (kg/m ³)	Viscosity μ (kg/m s)	Thermal conductivity k(W/m k)	Specific heat C_p (J/kg k)
866	8.68×10^{-3}	0.145	1888

해석에 사용된 경계조건은 다음과 같이 가정하였다.

- ① 사각 덕트 내로 유입되는 냉각오일의 입구조건은 일정속도로 한다.
- ② 출구에서는 압력고정조건으로 하며 덕트의 끝단면은 대기 중에 열려 있는 것으로 한다.
- ③ 덕트 내의 벽면 부위에서의 온도는 일정하다고 본다.
- ④ 케이싱과 접하는 덕트의 위쪽 면은 외부 대기와 접촉, 자연대류가 발생한다고 본다.
- ⑤ 벽면에서는 no-slip 조건을 적용한다.
- ⑥ 비압축성, 정상 유동으로 해석한다.

그외에 해석에 사용된 초기조건 및 경계조건은 Table 2에 제시하였다.

Table 2 Initial and boundary condition

	Type1	Type2	Type3	Type4
Rotational speed (rpm)	10000	20000	10000	20000
Flow rate (l/min)	10	15	10	15
Inlet temperature (°C)	20	20	20	20
Constant temperature (°C)	31	30	27	26.5
Natural convection heat transfer Coefficients (w/m ² K)	5	5	5	5
Outlet pressure (Pa gage)	0	0	0	0

주축계의 경계조건은 발열면에 주축의 회전 속도(10000 rpm, 20000rpm)에 따른 두가지의 평균 온도 값을 주었고 유량의 변화는 10 l/min, 15 l/min으로 변화를 주어 4가지 경우에 대한 해석을 수행하였다.

Fig. 4는 실제 주축계의 해석에서 냉각자켓의 벽면에 주어지는 경계조건을 도시한 것으로 로터 쪽의 3면은 전 면적을 통해 균일한 온도를 가지는 것으로 설정하였고 케이싱 쪽 면은 20°C인 외부 공기로 자연대류가 일어난다고 설정하였다.

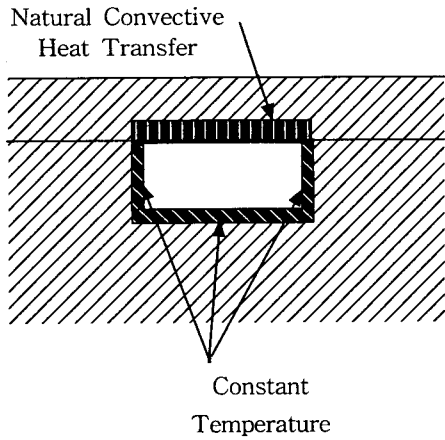


Fig. 4 Boundary condition of cooling jacket

5. 수치해석 결과

주축의 회전속도와 냉각유량의 변화를 주어 4 가지 경우의 주축계 냉각자켓에 대한 수치해석을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

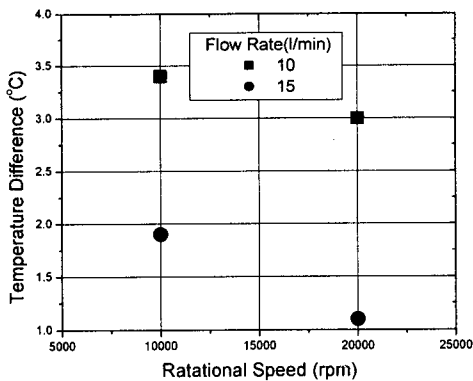


Fig. 5 Temperature differences of inlet and outlet

Fig. 5에 유량변화에 따른 입출구 온도 차이를 나타내었다. 냉각유량이 적을수록 입출구의 온도차는 커지고 있음을 알 수 있으며, 높은 회전수에서 입출구온도차가 작게 나타나는 이유는 모터 발열이 높은 회전수에서 적게 나타나기 때문이다.

Fig. 6은 냉각자켓 벽면에서의 열전달 계수값을 나타내고 있다. 냉각유량이 클수록 열전달 계

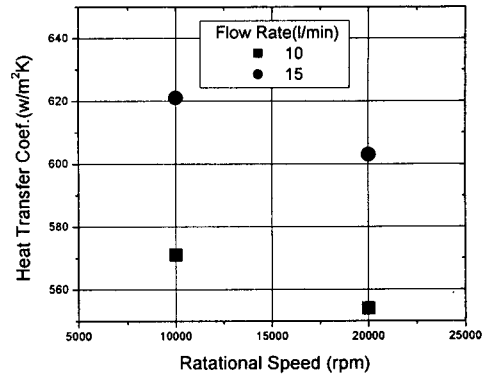


Fig. 6 Heat transfer coefficients at wall of cooling-jacket

수값은 커지고 있으며, 낮은 회전수에서 높은 열전달 계수값을 나타내는데 이는 Fig. 5의 결과에 기인한다. 그리고, 이 해석결과는 주축 냉각자켓의 냉각특성해석에 바로 적용시킬 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 공작기계의 모터내장형 주축계의 냉각자켓의 냉각특성을 유한체적법을 이용하여 냉각 오일의 온도분포를 해석함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 실제 주축계에 적용하여 해석한 결과, 냉각유량이 15 l/min일 때 오일의 입출구 온도차이는 낮게 나타나고, 열전달 계수는 크게 나타났다.
2. 냉각유량의 변화에 따라 구해진 냉각자켓의 열전달 계수는 냉각 성능 판단의 기준이 될 수 있고, 주축계의 열특성해석시 경계조건으로 적용 가능하다.

후기

본 연구는 한국과학재단 지정 창원대학교 공작기계기술연구 센터의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

1. A. Muramatsu, S. Nakamura, H. Yoneyama, O. Iwasaki ; Heat Conduction Analysis for Motor Integrated Spindle, NSK Technical

- Journal, No.658, pp.32-39, 1994.
2. C. J. Bolinder ; Curvilinear Coordinate and Physical Components : An Application to the Problem of Viscous Flow and Heat Transfer in Smoothy Curved Ducts, Journal of Applied Mechanics, Vol.63, pp.985-989, 1996.
 3. B. K. Rao ; Turbulent Heat Transfer to power-law Fluids in Helical Passages, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.6, pp.189-203, 1993.
 4. FLUENT User's Guide, Vers. 5.0, Fluent Inc., Lebanon, NH, July, 1998.