

공작기계용 고속 내장형 스피들 모터의 열 해석

심대곤*, 송승훈**, 조윤희***, 조성훈***

Heat Analysis of Built-In Spindle Motor for High-Speed Machine Tools

Dae Gon Sim*, Seung Hoon Song**, Yoon Hoo Cho***, and Sung Hoon Cho***

ABSTRACT

The built-in spindle motor for high-speed machine tools is designed and developed by Corporate R&D Institute of DAEWOO Heavy Industries, LTD. The heat analysis program for the built-in spindle motor is developed by using lumped method. For the purpose of verification of the program, comparison analyses between experiments and calculations are performed on the three motors; DHL prototype of built-in spindle motor, built-in spindle motor sample A, and sample B. As results, calculated temperature distributions are in good agreement with the test results within the average error of 10%. Calculated results of all the built-in spindle motors show that maximum temperature rise at high speed remains in the operating condition without exceeding the permitted limit, but they exceeded the permitted limit of temperature rise at low speed.

Key Words : Built-in spindle motor (내장형 스피들 모터), Lumped method (집중용량법), Heat transfer equation (열전달 방정식), Heat source (열원), Heat transfer coefficient (열전달계수)

1. 서 론

고속으로 회전하는 공작기계용 내장형 스피들 모터(built-in spindle motor)의 경우 운전시 발생하는 전기적인 손실의 대부분은 열로 환원되어 모터 내부의 온도가 상승하게 되는데, 과도한 온도상승은 모터의 성능과 내구성을 저하시킬 뿐만 아니라 절연물질을 손상시켜 모터의 수명을 단축시키게 된다. 따라서 고속, 고회출력의 내장형 스피들 모터를 설계하는데 있어서 냉각시스템의 설계가 매우 중요하며, 이상적인 냉각시스템의 설계를 위해서는 먼저 모

터 내부의 온도분포를 정확히 예측할 필요가 있다. 온도분포를 분석하는 방법으로는 크게 실기계 실험 또는 모델 실험과 같은 실험적인 방법과 컴퓨터를 이용한 수치해석적인 방법으로 나눌 수 있으며, 수치해석적인 방법은 CFD(Computational Fluid Dynamics; 전산유체역학)와 같은 상세해석법과 열등가회로법, 집중용량법과 같은 단순해석법으로 구분된다.

본 연구에서는 단순해석법 중 하나인 집중용량법을 이용하여 공작기계용 내장형 스피들 모터 및 고속 주축의 내부 온도분포를 분석하기 위한 전용

* 고등기술연구원 동력시스템연구실

** 고등기술연구원 생산기술연구실

*** 대우중공업 중앙연구소

열해석 프로그램을 개발하였다. 이를 이용하여 대우중공업 시제품 스핀들 모터의 고속 및 저속시 열해석을 실시하여 온도분포를 예측하였다.

2. 해석 방법

2.1 해석 대상

본 연구에서 열해석을 수행하고자 하는 대상은 대우중공업에서 자체 개발하여 성능시험을 완료한 시험주축으로 개략도는 Fig. 1과 같다. 이를 유사한 사양을 갖는 A사의 12,000 rpm 내장형 스핀들 모터 및 B사의 12,000 rpm 내장형 스핀들 모터의 해석결과와 비교 분석하였다. 상기 세 가지 스핀들 모터의 주요 사양은 Table 1과 같다.

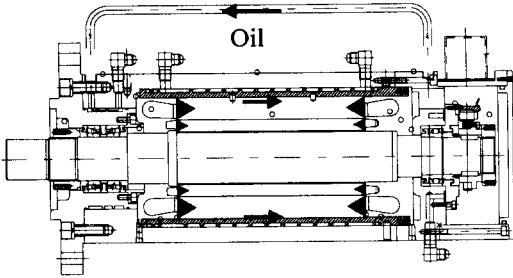


Fig. 1 Schematic diagram of built-in spindle motor

Table 1 Specification of the built-in spindle motors

Model name	A-company		B-company		prototype (DHI)	
	Low (1200)	High (2500)	Low (2000)	High (3500)	Low (1200)	High (3000)
Speed (rpm)	Low (1200)	High (2500)	Low (2000)	High (3500)	Low (1200)	High (3000)
Power	15 kW	18.5 kW	15 kW	18.5 kW	15 kW	18.5 kW
Insulation Class	F		H		F	
Permitted Temp. rise	≤ 105 °C		≤ 125 °C		≤ 105 °C	

2.2 집중용량법

집중용량법은 매우 복잡한 형상을 갖는 실제 모델을 단순화시켜 여러 개의 검사체적(control volume)으로 나누고, 열원(heat source)이 각각의 검사체적내의 절점(nodal point)에 집중되어 있고 검사체적간의 열교환은 대부분 전도(conduction)와 대류(convection)에 의해 이루어진다는 가정하에 전체계의 에너지 평형방정식으로부터 대수연립방정식을 유도하고 이를 수치해석적인 방법으로 풀어 온

도분포를 구하는 방법이다.

내장형 스핀들 모터를 장착한 시험주축은 Fig. 1에 도시한 바와 같이 일부 부품을 제외하고는 대부분의 단면형상이 중심축에 대하여 대칭이므로 이를 집중용량법으로 해석하기 위하여 Fig. 2에 도시한 바와 같이 총 109개의 절점으로 구성된 2차원 모델로 단순화하였다. 모터 내부의 고정자와 코일, 회전자와 회전자 바, 오일 유로와 같은 부품은 원주방향으로 서로 적층되어 있는데, 이러한 부분은 Fig. 3과 같이 부피를 기준으로 전체 원주 2π 중 일정한 부분을 차지하고 있는 것으로 단순화하였다. 이 경우 2차원 축대칭 문제이므로 원주방향으로의 열전달은 무시하고, 반경방향과 축방향으로의 열전달은 전도나 대류에 의해 독립적으로 일어난다고 가정한다.

이와 같은 단순해석법으로는 실제 형상을 그대로 모델링하는데 다소 어려움이 있으나, 온도분포를 예측하는데 필요한 체적 및 표면적은 실제와 최대한 유사하게 모델링하였다.

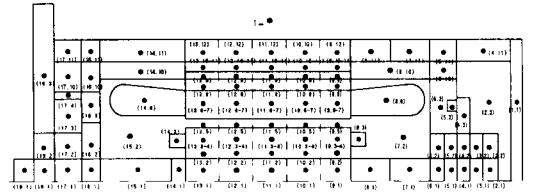


Fig. 2 Simple model of built-in spindle motor

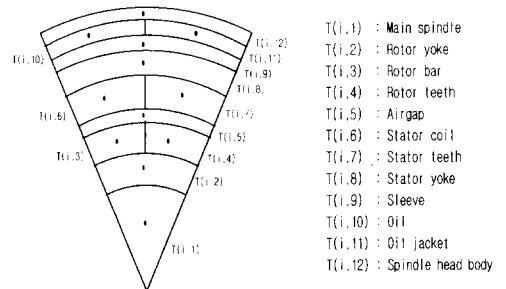


Fig. 3 Diagram of core portion

2.3 열전달 방정식

검사체적간의 열전달은 반경방향과 축방향으로 각각 전도-전도 열전달, 전도-대류 열전달로 이루어지는데 대표적인 반경방향 전도-전도 열전달의 경우에 대해 살펴보면 다음과 같다. 먼저 검사체적내

절점에서의 온도 $T_{i,j}$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$T_{i,j} = \frac{1}{V_{i,j}} \int_{r_{i,j-1}}^{r_{i,j}} T(r) dV \quad (1)$$

여기서, $V_{i,j}$ 는 검사체적의 부피이다. Fig. 4와 같이 인접한 검사체적간의 전도에 의한 반경방향 열전달은 다음과 같은 지배방정식과 경계조건에 의해 기술된다.

$$\frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} + \frac{q'''}{K} = 0 \quad (2)$$

$$-KA \left. \frac{dT}{dr} \right|_{r_{i,j}} = q_{i,j} \quad (3)$$

여기서, K 는 열전도도(conductivity), A 는 단면적, q 는 열전달율(heat transfer rate)을 의미한다.

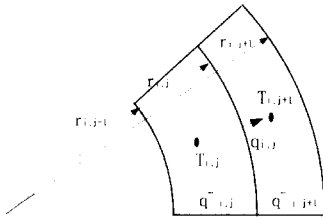


Fig. 4 Heat conduction in radial direction between two control volumes

위의 지배방정식 (2)를 열전달율 q 에 대하여 유한차분화 하면

$$q_{i,j} = \frac{T_{i,j} - T_{i,j+1}}{a_{i,j} - b_{i,j+1}} - q_{i,j}''' \left(\frac{c_{i,j}}{a_{i,j} - b_{i,j+1}} \right) + q_{i,j+1}''' \left(\frac{c_{i,j+1}}{a_{i,j} - b_{i,j+1}} \right) \quad (4)$$

가 되고, 이 때 각 계수는 다음과 같다.

$$a_{i,j} = \frac{\left[(r_{i,j}^2 - r_{i,j-1}^2) + 2r_{i,j-1}^2 \ln \frac{r_{i,j-1}}{r_{i,j}} \right]}{4K_{i,j} \pi (dx)_{i,j} (r_{i,j}^2 - r_{i,j-1}^2)} \quad (5)$$

$$b_{i,j} = \frac{\left[(r_{i,j}^2 - r_{i,j-1}^2) + 2r_{i,j}^2 \ln \frac{r_{i,j-1}}{r_{i,j}} \right]}{4K_{i,j} \pi (dx)_{i,j} (r_{i,j}^2 - r_{i,j-1}^2)} \quad (6)$$

$$c_{i,j} = \frac{\left[(r_{i,j-1}^4 - r_{i,j}^4) + 4r_{i,j}^2 r_{i,j-1}^2 \ln \frac{r_{i,j}}{r_{i,j-1}} \right]}{8K_{i,j} (r_{i,j}^2 - r_{i,j-1}^2)} \quad (7)$$

2.4 에너지 평형방정식

열전달에 의해 검사체적을 출입하는 에너지와 각각의 검사체적의 열용량(heat capacity)에 의해 검사체적내에 축적되는 에너지가 평형을 이루어야 하므로 각각의 검사체적에 대한 에너지 평형방정식은 다음과 같이 표현된다.

1) 열원(heat source)이 없는 검사체적의 경우 :

$$\Sigma q_{in} = \Sigma q_{out} \quad (8)$$

2) 열원이 있는 검사체적의 경우 :

$$\Sigma q_{out} - \Sigma q_{in} = q''' V \quad (9)$$

3) 검사체적이 공기인 경우 :

$$\Sigma q_{in} - \Sigma q_{out} = \dot{m} C_p (T_{out} - T_{in}) \quad (10)$$

여기서, \dot{m} 은 공기의 단위시간당 질량유량(mass flow rate), C_p 는 비열(specific heat)을 의미한다.

이상의 에너지 평형방정식에 식 (4)의 온도에 대해 유한차분화된 열전달율 q 를 대입시키면 온도에 대한 대수연립방정식이 얻어진다. 이렇게 유도된 대수연립방정식을 반복계산법으로 풀면 각 절점의 온도를 구할 수 있다.

3. 해석 조건

3.1 열손실

스핀들 모터 내부의 온도분포를 해석함에 있어서 고정자 코일을 통과하는 전류 및 회전자 바에서 유도되는 전류에 의해 국부적으로 발생한 열원을 어느 요소에 포함시키느냐에 따라 해석결과에 큰 차이가 발생하게 된다. 특히 고속운전시 고정자와 회전자 사이의 상대적인 운동에 의해 발생하는 공기의 유동으로 인한 풍손(windage loss)은 그 분포가 일정치 않아 어느 부분에 배분하느냐에 따라 해석결과가 달라질 수 있다. 본 해석에서는 풍손이 발생하는 부분인 고정자 코일, 고정자 치(teeth), 회전자 바, 회전자 치에 체적 비율로 풍손을 배분하는 방법을 선택하였으며, Table 2는 실제 열해석에 사용한 열손실 데이터이다.

Table 2 Heat losses(heat source) of the built-in spindle motors used in analysis (unit: W)

Parts	A-company		B-company		DHI proto	
	Low (1200 rpm)	High (2500 rpm)	Low (1200 rpm)	High (3500 rpm)	Low (1200 rpm)	High (3000 rpm)
Stator coil	4440.1 (4447.0)	1085.9 (1105.8)	3436.2 (3440.2)	841.9 (867.7)	3959.1 (3965.0)	1019.9 (1045.9)
Rotor bar	497.2 (499.8)	400.9 (406.6)	2132.7 (2135.7)	356.4 (375.7)	935.1 (938.3)	322.9 (336.7)
Rotor endring	51.5	41.2	208.9	33.2	94.1	31.3
Stator yoke	526.6	796.6	188	596.5	597.5	832.3
Stator teeth	773.8 (782.9)	1186.6 (1206.9)	282.7	917.3	407.3 (417.1)	584.5 (627.4)
Left-side Bearing	0.0	87.0	0.0	50.0	0.0	50.0
Right-side Bearing	0.0	87.0	0.0	50.0	0.0	50.0
Rotor teeth	5.6 (11.2)	12.4 (24.8)	3.0 (6.0)	18.7 (37.4)	5.0 (10.0)	21.6 (43.2)
Total Loss	6294.8 (6328.2)	3697.6 (3772.0)	6248.4 (6258.5)	2845.5 (2907.7)	5998.2 (6022.2)	2912.5 (3016.8)

단, ()는 회전자 냉각을 위해 공기를 사용할 경우

3.2 열전달계수

모터 내부의 온도분포를 해석하기 위하여 필요한 열저항값으로는 전도열전달계수와 대류열전달계수를 들 수 있는데, 이들 값은 모터 부품의 다양한 재질과 기하학적 형상의 복잡성으로 인해 실험을 통하지 않고서는 정확히 산출하기 어렵다. 그러나 본 연구에서는 단순해석을 통해 사전에 모터 내부의 대략적인 온도분포를 예측하는 것이 목적이므로

로 지금까지 보고된 여러 문헌의 상관식들을 이용하여 그 값을 추정하였다. 재질과 관련된 전도열전달계수는 등방성 재질의 경우에는 기존에 알려진 전도열전달계수를 사용하였으며, 비등방성인 경우에는 여러 문헌을 참조하여 적절한 값을 취하였다. 대류열전달계수 역시 여러 문헌의 실험식이나 이론식 또는 적절한 가정을 통해 값을 선정하였다. 본 해석에서 사용한 각 부분의 대류열전달계수 상관식을 살펴보면 다음과 같다.

1) 외부표면과 외기

외부표면과 외부공기 사이의 열전달은 자연대류 문제이므로 아래와 같이 실린더 표면에서의 자연대류 상관식과 수직평판에서의 자연대류 상관식을 이용하여 열전달계수를 구할 수 있다.

$$h = 1.42 (\Delta T/L)^{1/4} \quad (11)$$

$$h = 1.32 (\Delta T/d)^{1/4} \quad (12)$$

여기서, ΔT 는 외부표면과 외기와의 온도차를 나타내며, 외부 표면의 온도는 반복계산을 통해 구해진다.

2) 엔드와인딩(endwinding) 하부와 내기

엔드와인딩 부분의 대류열전달계수에 대한 연구는 거의 없으나, Hay 등⁽¹⁾과 윤명근 등⁽²⁾의 연구에서는 아래와 같은 상관식을 추천하고 있다.

$$Nu_{D_{ew}} = 0.035 Re_{D_m} \quad (13)$$

여기서

$$v_{rf} = \frac{\pi N D_{rf}}{60}$$

$$Re_{D_{rf}} = \frac{v_{rf} D_{rf}}{\nu}, Nu_{D_{ew}} = \frac{h D_{ew}}{K} \quad (14)$$

이고, N 은 모터의 회전수, D_{rf} 는 회전자 부분의 직경, D_{ew} 는 엔드와인딩의 내면 직경, Re 는 레이놀즈수(Reynolds number), Nu 는 누셀수(Nusselt number)이다.

3) 회전자 팬과 내기

회전자 팬이란 엔드링과 회전자 바 부분과 함께 회전자 측면으로 돌출되어 있어 회전자가 회전함에 따라 팬과 같은 역할을 하는 부분을 말한다. 이에 대한 연구 역시 많지 않으나, 본 연구에서는 福山長賢 등⁽³⁾이 제시한 아래의 상관식을 사용하였다.

$$Nu_{D_m} = 0.14 Re_{D_m}^{0.67} \left(\frac{b_{rf}}{0.019} \right)^{0.33} \quad (15)$$

여기서, b_{rf} 는 회전자 팬의 폭을 의미한다.

4) 공극

고정자와 회전자의 사이, 즉 공극(air gap)에서의 열전달 문제는 유도 모터의 다른 부분에 비해서는 연구가 많이 이루어진 분야이다. Won 등⁽⁴⁾이 제시한 상관식을 이용하면 다음과 같다.

$$Nu_{D_s} = 0.026 Re_{D_s}^{0.805} Pr^{0.33} \quad (16)$$

여기서, D_h 는 수력직경(hydraulic diameter), Pr은 프란틀수(Prandtl number)이다.

4. 열해석 프로그램

전술한 열해석 기초이론을 바탕으로 포트란(fortran)을 이용하여 내장형 스핀들 모터 전용 열해석 프로그램 "SPINDLE"과 사용자의 편의를 위한 윈도우즈용 전후처리 프로그램 "SMIIA"를 개발하였다. Fig. 5는 해석 결과의 후처리 화면이다.

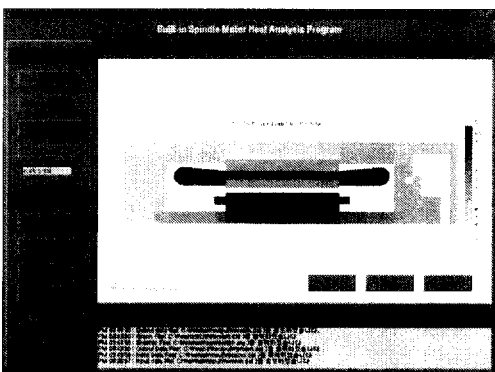


Fig. 5 Heat analysis program for built-in spindle motor

5. 해석결과

5.1 온도상승시험 결과의 비교 분석

개발된 열해석 프로그램의 검증을 위해 대우중공업에서 실시한 온도상승시험 결과를 입수하여 비교 분석하였다. Fig. 6은 온도상승시험을 위한 시험장치로서 사용된 모터는 A사 12,000 rpm, B사 12,000 rpm, 대우중공업 시제품 내장형 스핀들 모터이며, 저속 및 고속운전의 경우에 대해서 시험이 실시되었다. 단, 모든 모터가 저속운전시에는 온도상승 허용치보다 높게 온도가 상승하여 충분히 포화시키지 못하였기 때문에 저속운전인 경우에 대해서는 그 결과를 비교하지 않았다.

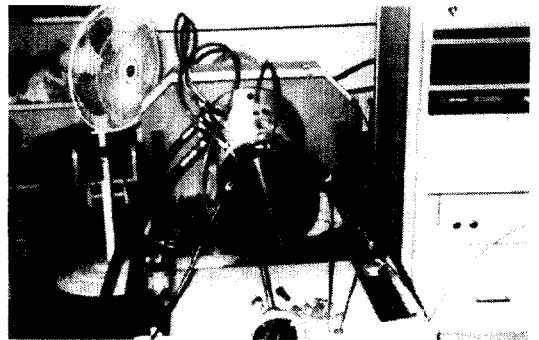


Fig. 6 Photograph of test bench for the temperature rising test.

온도상승시험시 모터 및 베어링 냉각을 위한 오일의 입구부 온도는 19~34 °C, 모터 부분으로 순환되는 오일의 유량은 11 ℓ /min, 베어링 부분으로 순환되는 오일의 유량은 7 ℓ /min의 조건으로 실시하였다. 시험주축 내부의 온도는 오일의 입출구를 포함하여 모두 17개 지점을 측정하였으며, Fig. 7은 온도측정 지점과 해석 지점의 위치를 비교한 그림이다. 해석 지점이 각 부분 체적의 평균온도이므로 측정 지점과 약간의 차이가 있지만 대략적인 결과 비교에는 크게 무리가 없을 것으로 판단된다.

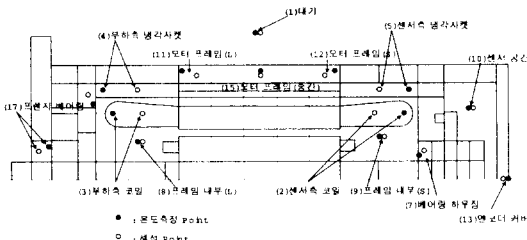
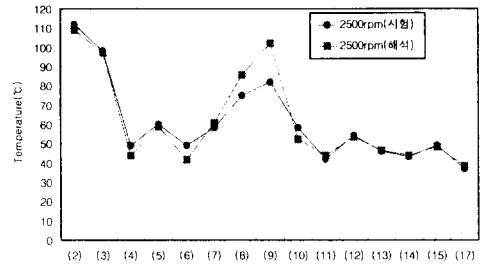


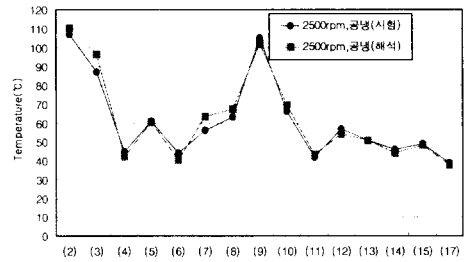
Fig. 7 Comparison of locations for test and analysis

Fig. 8의 (a)와 (b)는 A사 내장형 스핀들 모터를 내장한 시험주축을 고속(2,500 rpm)으로 운전시 공기냉각을 하지 않은 경우와 공기냉각을 적용(압축 공기의 유량은 100ℓ/min)하였을 때의 온도상승시험 결과와 열해석 결과를 비교한 것이다. (c)는 B사 내장형 스핀들 모터를 내장한 시험주축을 고속(3,500 rpm)으로 운전시 온도상승시험 결과와 열해석 결과를 비교한 것이고, (d)는 대우중공업 시제품을 내장한 시험주축을 고속(3,000 rpm)으로 운전시 온도상승시험 결과와 열해석 결과를 비교한 것이다. 고속시 전체적인 시험결과와 해석결과의 온도 분포의 평균오차는 공냉을 하였을 경우에는 약 5.1% 정도로 매우 잘 일치함을 알 수 있으나, 공냉을 하지 않은 경우인 (a)는 오차가 6.5%, (c)는 9.4%, (d)는 18.5% 로 나타나 평균 약 11.5%의 오차를 보임을 알 수 있다.

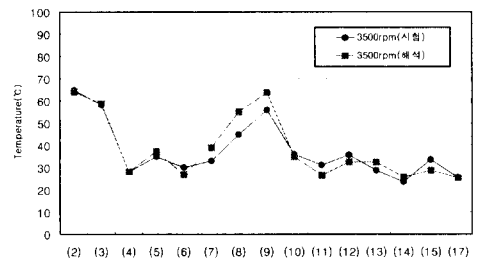
상기의 결과에서 볼 수 있듯이 공냉을 실시한 (b)의 결과를 제외하면 공통으로 오차가 크게 나타나는 부분이 부하축 프레임의 내부공기 (8), 센서축 프레임의 내부공기 (9)와 같이 고체가 아닌 유체 부분이다. 이 부분에서 온도해석 결과가 시험결과보다 10~40 ℃ 정도 더 높게 나타난 것은 해석의 경우 회전자 냉각(강제 공냉)을 하지 않은 경우에는 시험주축 내부의 공기가 밀폐되어 있는 것으로 가정하여 해석을 하였으나 실제 시험시에는 회전자의 파워 케이블 인출 부분을 통해 흘러 나가기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 기초설계 단계에서는 주로 고정자 코일의 온도가 중요하기 때문에 이 부분의 결과를 비교하여 보면 대체적으로 매우 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 따라서 본 열해석 프로그램을 기초설계 단계에서의 온도 예측을 하는데 사용하기에는 충분할 것으로 판단된다.



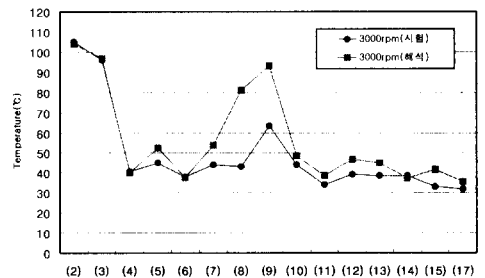
(a) A-company motor(2,500 rpm)



(b) A-company motor(2,500 rpm, air cooling)



(c) B-company motor(3,500 rpm)



(d) DHI prototype(3,000 rpm)

Fig. 8 Comparison of test and analysis results for temperature distributions

5.2 열해석 결과

전술한 온도상승시험 결과와의 비교를 통해 열해석 프로그램의 보완 및 검증을 실시하였다. 이를 토대로 내장형 스핀들 모터 시제품을 시험주축에 적용하여 고속 및 저속 운전시 열해석을 실시하여 온도분포를 예측하였다.

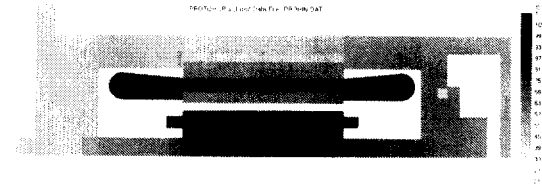


Fig. 9 Temperature distribution of prototype of DHI built-in spindle motor(High, 3,000 rpm)

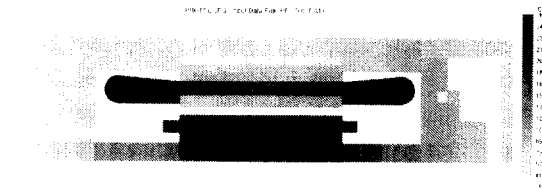


Fig. 10 Temperature distribution of prototype of DHI built-in spindle motor(Low, 1,200 rpm)

Fig. 9는 시험주축에 시제품을 내장하고 고속권선(3,000 rpm)으로 운전하였을 경우 온도분포를 나타낸 것이다. 모터 부분은 11 ℓ /min, 28 ℃로, 베어링 부분은 7 ℓ /min, 28 ℃로 오일을 순환시켰을 때를 해석한 결과이다. 해석결과를 살펴보면 최고온도는 센서측 엔드와인딩 부분에서 103.9 ℃(주변 온도 대비 74.4 ℃ 상승)까지 상승함을 알 수 있는데, 이는 고정자 코일 부분에 열손실이 상대적으로 많이 발생하고 특히 풍손이 다른 모터의 경우에 비해 차지하는 부분이 커서 엔드와인딩 부분에 많이 배분되기 때문이다. 이 상승 온도는 모터의 온도상승 허용치 105 ℃ 보다 작은 값이므로 고속권선시에는 온도상승으로 인한 문제는 없을 것으로 판단된다.

Fig. 10은 시험주축에 내장형 스핀들 모터 시제품을 내장하고 저속권선(1,200 rpm)으로 운전했을 경우 온도분포를 나타낸 것이다. 냉각방식은 고속권선시와 동일하며, 해석결과를 보면 최고온도는 고속권선시와 마찬가지로 센서측 엔드와인딩 부분

에서 263.2 ℃까지 상승함을 알 수 있다. 이는 Table 2에서 볼 수 있듯이 저속인 경우 고속에 비해 열손실이 훨씬 크고 고정자 코일 부분에 열손실이 집중되어 있기 때문에 이 부분의 온도가 다른 부분에 비해 상대적으로 높게 올라감을 알 수 있다.

6. 결론

개발한 내장형 스핀들 모터 열해석 프로그램의 검증을 위하여 대우중공업에서 실시한 온도상승시험 결과와 비교하였으며, 그 결과 온도분포는 평균 약 10% 정도의 오차범위내에서 잘 일치하는 것으로 나타났다. 이는 본 연구에서 개발한 프로그램이 내장형 스핀들 모터의 기초설계 단계에서 내부 온도분포를 쉽고 빠르게 예측하기 위한 목적으로 사용하는데 충분함을 의미한다. 그리고 열해석 프로그램을 이용하여 대우중공업 시제품 모터가 내장된 경우에 대해 고속 및 저속 운전시 열해석을 실시하여 온도분포를 예측하였다. 고속권선으로 운전시에는 과열로 인한 문제는 없을 것으로 예측되었으나, 저속시에는 일부 부분에서의 온도가 온도상승 허용치보다 높게 올라가는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. Hay, N., Lampard, D., Pickering, S.J., and Roylance, T.F., "Heat Transfer from Stator End-Winding of a Low-Wound Electric Motor," 10th Int. Heat Transfer Conference, Brighton, UK, pp. 197-202, 1994.
2. 윤명근, 고상근, "여러 가지 파라메타가 전폐형 유도전동기의 온도상승에 미치는 영향에 관한 연구," 대한기계학회 추계학술대회논문집 B, pp. 781-785, 1996.
3. 福山長賢, 古谷和久, "電動機の冷却技術(三相 導 電動機の熱解析)," 第3卷 通卷131號 安川電機, No. 3, pp. 179-188, 1970.
4. Won, S.P., and Lee, H.H., "Analysis of Air-Flow Cooling for a Large Induction Motor," Proceedings of the 3rd KSME-JSME Thermal Engineering Conference, pp. 571-578, Oct. 1996.