공작기계 스핀들용 유도전동기의 용량-속도에 따른 손실 및 발열특성 해석

Power Loss and Thermal Characteristic Analysis of Induction Motors for Machine Tool Spindle according to the Rated Power-Speed

성 기 현* · 조 한 욱[†] · 황 주 호** · 심 중 업**

(Ki-Hyun Seong · Han-Wook Cho · Joo-Ho Hwang · Jong-Yeob Shim)

Abstract - This paper deals with the power loss and thermal characteristics of induction motor for machine tools according to the rated power and speed. To reduce the fabrication error by thermal strain in rotational machine tools, we calculated the power loss and thermal behavior of induction motors. Firstly, the inverse design of general induction motors for machine tool spindle has been performed. The inverse design results are compared with the torque-speed characteristic curve in motor's catalog. The power loss are calculated by finite element method(FEM) at rated condition. Secondary, the transient thermal characteristics of induction motors are calculated by equivalent thermal resistance model from Motor-CAD S/W. The inverse design, power loss and thermal behavior calculation for induction motors with various rated power and speed has been performed. Finally, to verify the design and calculation process of induction motor, we implemented the experimental set with 0.4kW 1710rpm class industrial induction motor model. The obtained thermal characteristics of experimental model confirmed that the design and power loss calculation processes are appropriate to the prediction of thermal strain in rotational machine tools.

Key Words : Induction motor, Machine tool, Loss calculation, Thermal characteristic

1. 서 론

회전 주축과 회전 테이블로 대표되는 기계장비, 즉, 공작 기계용 회전운동 유니트는, 축(샤프트)을 중심으로 정속운동 혹은 회전 위치결정의 기능을 수행한다. 이 때, 운동 명령이 주어진 회전 방향을 제외한 나머지 5 자유도 방향에서의 운동오차를 회전정밀도로 나타낸다. 회전 주축의 경우 운동 오차는 공작물의 가공 시 형상오차 및 표면조도에 영향을 주게 되므로 운동오차의 정밀예측은 매우 중요하다[1]-[4].

기계장비의 시뮬레이션 기반 정밀도 예측이 중요한 이유는, 설계자가 시스템에 대한 전체적인 이해와 성능을 해석해야 하는 번거로움이 따르고, 시스템 전체에 대한 해석이 상대적으로 매우 어려우므로, 현재 대부분의 산업 현장에서는 경험을 바탕으로 한 가공오차의 보정을 시행하고 있다. 기존의 연구는, 정밀 주축을 회전체의 관점에서 진동 안정성이나 강성 등을 해석하는 선행연구가 대부분이며, 가공정밀도에 직접적인 영향을 주는 회전 정밀도의 예측에 관한 연구

는 거의 찾아볼 수 없다[1]-[4].

전동력에 의해 구동되는 회전운동 공작기계 유니트는 베어링, 회전샤프트, 유도형 또는 동기형 전동기, 동력전달요소, 위치검출센서 등으로 구성되어 있다. 이들 구성요소 각각에서의 조립오차와 가해지는 외력(주축에 주어지는 부하)의 변화에 따라 정밀도가 달라질 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 회전운동 공작기계를 구성하는 여러 가지의 구성요소들 중, 유도전동기를 구동기로 적용하는 회전운동 공작기계의 구동계의 해석, 즉, 유도전동기의 손실과 부하 특성이 고려된 가공 오차의 예측을 위한 발열량(Watt)의 계산을 다룬다. 특히, 공작기계의 스핀들 구동용 전동기의 경우, 새롭게 개발되는 전동기를 공작기계 시스템에 적용하는 것이 아니고, 정해진 용량과 속도영역에서 양산된 전동기를 적용하는 사례가 대부분이므로, 가공오차를 적용하여야 하는 실제 사용자는 제작자에 의해 공급되는 다양한 용량-속도를 갖는 전동기들에 대한 데이터베이스(Database, DB)를 보유하고 있는 것이 유리하다.

본 논문에서는 데이터베이스 대상으로 선정된 여러 가지 형태의 속도-토크 특성을 갖는 공작기계용 상용 유도전동기 모델들의 정보를 분석하고, 각각의 모델에 대한 형상예측설계, 속도-토크 특성 및 손실의 계산, 열등가회로를 이용한 발열특성 해석을 수행하고 실험대상 유도전동기의 발열특성 실험을 통해 예측설계 결과 및 손실특성, 발열특성에 대한 검증을 수행하였다.

[†] Corresponding Author : Dept. of Electric, Electronic and Comm. Eng. Edu. Chungnam National University, Korea

E-mail : hwcho@cnu.ac.kr

* Dept. of Electric, Electronic and Comm. Eng. Edu. Chungnam National University, Korea

** Principal Researcher, Korea Institute of Machinery and Materials

Received : October 4, 2013; Accepted : November 28, 2013

2. 용량-속도에 따른 공작기계 스펀들용 유도전동기의 선정

본 논문에서 설계 및 해석을 수행하고자 하는 공작기계용 상용 유도전동기 모델은 표 1과 같이 선정되었다. 전동기 기지 데이터 즉, 용량, 속도, 토크, 등의 성능 데이터와 외경, 내경, 적층 길이 등을 먼저 형상예측 설계에 고려할 수 있다. 형상예측 설계는 유도전동기의 설계이론에 의해 수행되며, 설계결과는 제작자에 의해 제공된 카탈로그에서의 속도-토크특성의 비교를 통해 적절한 성능검증이 가능하다.

표 1 용량-속도별 유도전동기 선정모델

Table 1 Selected induction motor models according to the rated power and speed

Model	Power (W)	RPM	Torque (Nm)	Power Factor	Ploes	Winding connection
1	1500	3000	4.7	0.68	4	Delta
2	5500	1600	32.8	0.77	4	Wye
3	11000	10000	10.5	0.70	2	Delta
4	15000	650	220	0.64	4	Wye
5	15000	10000	14.3	0.73	4	Wye
6	22000	8000	26.2	0.76	4	Delta
7	22000	5500	38.2	0.75	4	Delta
8	25000	2500	95.4	0.84	4	Wye
9	3700	1500	23.5	0.68	4	Delta
10	18500	3500	50.4	0.72	4	Wye
11	11000	800	131	0.82	4	Wye
12	18500	9000	19.6	0.67	4	Wye
13	11000	9000	11.6	0.82	2	Delta
14	2200	1500	14	0.75	4	Delta

3. 공작기계 스펀들용 유도전동기의 예측설계 이론

3.1 예측설계이론

상용 유도전동기 제작자에 의해 주어지는 카탈로그 (Catalog / Data Sheet)의 기본 형상 치수(고정자 외경, 고정자 내경, 축방향 길이)를 알 수 있기 때문에 예측설계에 고려되는 설계요소는 고정자, 회전자의 슬롯 형상 예측과, 권선설계가 주가 된다. 가장먼저 예측설계 모델의 형상 치수 및 목표설계 사양 확인을 한다. 카탈로그를 통하여 정격 출력, 역률, 입력전압, 극, 상수 등 사양을 결정하고, 기본 형상 치수를 알기 때문에 장하분배법을 이용하여 슬롯형상과 권선설계가 가능하다. 공극자속밀도(B_g)를 가정하고, 고정자와 회전자 각각의 치, 요크에서 전류밀도와 자속밀도를 가정한다. 자속밀도는 포화를 고려하여 최대 자속밀도 아래로 유지한다. 일반적으로 60[Hz]동작에서 요크에서는 1.4~1.7[T] 사이의 값을 가지고 공작기계 스펀들용 유도전동기라고 효율임을 감안하여 1.7[T]로 가정하겠다. 치에서는 1.55~2.0[T] 사이의 값을 가지고 요크에서의 자속밀도와 같이 2.0[T]로 가정하겠다. 또한, 치 포화계수($1+K_{st}$)로 가정하고, 치 포화를 고려한 최대값과 평균값에 대한 비 a_t , 치 포화를 고려한 평균값과 실효값의 비 K_f 를 경험적인 값을 이용하여 정한다. a_t 는 0~1 사이의 값으로 하고, K_f 는 1.02~1.12

사이의 값을 이용한다[5]~[7].

그림 1 권선설계 Flowchart

Fig. 1 Flowchart for the winding design

3.1.1 권선설계

권선설계에서는 턴수, 점적률, 전류밀도 등 여러 가지 변수를 고려한 설계를 수행한다. 그림 1은 권선설계 Flowchart이다. 슬롯수 결정을 시작으로 코일피치, 권선계수, 극당자속, 상당턴수, 슬롯당 도체수 계산을 한 뒤, 도체수가 짝수 인지 확인하고 슬롯당 도체수의 변화, 턴수의 변화를 확인하여 턴수와 공극자속밀도 계산을 완료 한다. 권선직경 설계는 정격전류가 계산되고 전류밀도가 가정된다면 쉽게 설계 할 수 있는 파라미터이다. Flowchart 순서에 따라 결정할 수 있는 파라미터를 결정하면 슬롯수 결정을 한다. 특히, 슬롯과 밀접한 관계를 갖기 때문에 슬롯수의 결정은 가장 우선되는 설계이다. 3상 유도전동기에서 고정자 슬롯수는 3의 배수이며, 6극, 12극을 갖는 전동기에서는 9의 배수가 된다. 슬롯수 N_s 는 식(1)로 나타낼 수 있다[5][6].

$$N_s = 2p_1 q m_1 \quad (1)$$

여기서, p_1 은 극 쌍수, q 는 매극 매상당 슬롯수, m_1 은 상수를 각각 나타낸다. 극당 상당 슬롯수 결정할 때, 공작기계 스펀들용 유도전동기는 소형기부터 대형기까지 다양한 사이즈를 가지기 때문에 사이즈에 따라 소형기에서 2, 대형기에서 3 으로 정하면 되겠다. 또한, 회전자의 슬롯수의 경우도 경험적으로 성공적인 슬롯 조합을 사용하는 것이 좋

다. 예를 들어 4극 고정자 36슬롯에서는 28, 30, 32, 33, 34, 45, 48 슬롯을 사용한다[3]. 슬롯수가 계산되면 코일피치 결정 후 권선계수를 계산 한다. 코일 피치 τ 는 식(2)로 나타낼 수 있다.

$$\tau = \frac{N_s}{2p_1} [\text{slot}] \quad (2)$$

권선계수 K_{w1} 는 식(3)으로 나타내고, 권선계수를 구성하는 K_{q1} 과 K_{y1} 은 각각 식(4), (5)로 나타낼 수 있다.

$$K_{w1} = K_{q1} K_{y1} \quad (3)$$

$$K_{q1} = \frac{\sin \frac{\pi}{6}}{q \sin \left(\frac{\pi}{6q} \right)} \quad (4)$$

$$K_{y1} = \sin \left(\frac{\pi}{2} \frac{y}{\tau} \right) \quad (5)$$

여기서, K_{q1} 은 분포계수, K_{y1} 는 단절계수를 나타내고 4극 3상 $q=3$ 전동기에서 분포계수는 0.96 코일피치 6일 때 단절계수는 0.87 이다. 슬롯수, 극피치, 권선계수가 결정되면 극당자속과 상당턴수를 계산한다. 극당자속은 식(6)과 같고 이때, τ_p 는 식(7)로 나타낼 수 있다[5].

$$\phi = a_i \tau_p L B_g \quad (6)$$

$$\tau_p = \frac{\pi D_{is}}{2p_1} \quad (7)$$

한편, D_{is} 는 고정자 내경으로 제작자에 의해 주어지는 기본 데이터이다. 따라서, 상당턴수는 식(8)로 나타낼 수 있다.

$$W_1 = \frac{K_E V_{1n}}{4f_1 K_{w1} \phi} \quad (8)$$

여기서, V_{1n} 는 상전압, K_E 는 공극에서 유기전압과 인가전압과의 관계 E_1/V_{1n} 로 극수에 따른 경험식(9)로 나타 낼 수 있다[5].

$$K_E \approx 0.98 - 0.005p_i \quad (9)$$

슬롯당 도체 수 n_s 는 위에서 계산된 전체 상당턴수에 상당 슬롯수를 나누어 식(10)으로 나타낼 수 있다.

$$n_s = \frac{a_1 W_1}{2p_1 q} \quad (10)$$

여기서, a_1 은 병렬회로수 이고, 2층권인 경우 슬롯당 도체수는 짝수가 되기 때문에 n_s 값을 조정하고 턴수를 다시 식(11)로 나타낼 수 있다. 턴수가 변경되면 최초 가정한 자속 밀도를 턴수에 따라 재조정 해준다. 식(12)로 나타낼 수 있다.

$$W_1' = \frac{n_s' p_1 q}{a_1} \quad (11)$$

$$B_g' = B_g \frac{W_1'}{W_1} \quad (12)$$

슬롯 당 도체수가 결정되면 권선 직경 설계를 한다. 권선 직경 설계는 슬롯 오프닝보다 작아야 하고 너무 크게 되면 제작에 불편함이 있기 때문에 표준 권선 직경과 유사하게 설계를 한다. 권선 직경은 소선가닥수와 병렬 회로수 등으로 조정 할 수 있다. 권선 직경을 계산하기 위해 먼저 정격전류를 계산하고, 전류밀도를 가정한다. 전류밀도는 전동기 냉각과 절연등급을 고려하여 가정한다. 공작기계 스피들용 유도전동기는 수냉 또는 냉각유로 냉각하기 때문에 최대 전류밀도를 $9.0[A/mm^2]$ 으로 정하고 이를 넘지 않도록 설계한다. 정격전류는 식(13)으로 나타낼 수 있다.

$$I_n = \frac{P_n}{\eta_n \times \cos \varphi_1 \times \sqrt{3} V_1} \quad (13)$$

여기서, η_n 는 효율로 목표효율과 카탈로그의 역률을 최대한 정확하게 예측하여 설계의 오차를 줄일 수 있다. 정격전류를 계산하면 요구되는 권선의 면적을 계산 할 수 있다.

$$A_{co} = \frac{I_n}{J_s a_1} \quad (14)$$

$$d_{co} = \sqrt{\frac{4A_{co}}{\pi}} \quad (15)$$

$$d'_{co} = \sqrt{\frac{4A_{co}}{\pi a_p}} \quad (16)$$

여기서, a_p 는 소선가닥수이다. 식(14)는 권선면적을 나타낸 식으로 정격전류에 가정한 전류밀도와 병렬회로수를 나누어 구한다. 식(15)는 권선 직경을 나타낸 식이고 식(16)과 같이 소선가닥수로 나누어 적합한 권선 직경 설계를 할 수 있다 [6].

3.1.2 슬롯형상 설계

고정자 슬롯의 형상은 여러 가지가 적용되고 있다. 사다리꼴 형상, 사각 형상, 둥근 형상 등이 있지만 공작기계 스피들용 유도전동기에서는 슬롯바닥이 둥근 타입 형상을 적용하여 예측설계를 수행하였다. 그림 2는 고정자 슬롯형상설계 Flowchart이다. 슬롯 면적 계산을 시작으로 고정자 치설계, 슬롯 위 폭 설계, 슬롯 바닥 폭 설계 슬롯 높이 설계 순으로 설계한다. Flowchart 순서대로 가장 먼저 슬롯 면적 계산한다. 슬롯의 점적율을 경험적 산정을 통해 결정해야 하는데, 본 연구에서 점적율은 분포권에서 0.4로 하여 설계를 진행하였다. 점적율이 정해지면 슬롯의 면적을 식(17)로 나타낼 수 있다.

$$A_s = \frac{\pi d_{co}^2 a_p n_s}{4K_{fill}} \quad (17)$$

그림 2 고정자 슬롯형상설계 Flowchart

Fig. 2 Flowchart for the shape design of the stator slot

여기서, K_{fill} 은 점적율이다. 슬롯면적이 정해지면 치 설계를 한다. 그림 3은 고정자 슬롯 형상을 나타낸다. 그림 3에서 보면 많은 변수들이 있고, 전부 설계하는 것이 어렵기 때문에 제작에 관련된 변수인 슬롯 오프닝 등은 경험적인 값으로 설계한다. 경험적인 방법에 의해 얻어진 식(18)~(20)으로 나타낼 수 있다[8].

$$N_s = 24, w_{os} = 0.027 + 0.0175D_{is} \quad (18)$$

$$N_s = 36, w_{os} = 0.015 + 0.0175D_{is} \quad (19)$$

$$N_s = 48, w_{os} = 0.0175D_{is} \quad (20)$$

고정자 수의 크기를 결정하는 변수인 h_{os}, h_{ws} 또한 경험적인 값으로 설계한다. 본 연구에서는 h_{os} 는 1.0~3.0[mm], h_{ws} 는 1.0~3.0[mm] 사이값으로 설계하였다. 슬롯면적이 계산 되고 고정자 치 폭을 설계한다. 치 폭의 경우 모든 자속이 지나가는 곳이기 때문에 최대 자속 밀도 값을 이용하여 치를 설계한다. 미리 가정해둔 치에서 최대 자속밀도 값을 이용하여 식(21)로 나타낼 수 있다[6].

$$b_{ts} = \frac{B_{gm}}{B_{ts}} \frac{\pi D_{is}}{N_s} \quad (21)$$

고정자 치 폭이 결정되면 슬롯 위 폭 w_{1s} 를 계산한다. 원주길이에 치 폭을 빼서 나타 낼 수 있다.

$$w_{1s} = \frac{\pi(D_{is} + 2(h_{os} + h_{ws}))}{N_s} - b_{ts} \quad (22)$$

슬롯 위 폭이 결정 되면 슬롯 바닥 폭 w_{2s} 와 슬롯 높이 h_{ss} 를 구한다. 치를 평행하게 하여 부분적인 포화를 방지 하려면 w_{2s} 에 대한 식을 식(22)로 나타낼 수 있고, 슬롯 면적을 구

그림 3 고정자 슬롯 형상

Fig. 3 Shape of the stator slot

그림 4 회전자 슬롯 형상

Fig. 4 Shape of the rotor slot

하는 식(24)를 통하여 두 식의 연립방정식으로 값을 계산할 수 있다[6].

$$w_{2s} = \frac{\pi(D_{is} + 2(h_{os} + h_{ws} + h_{ss}))}{N_s} - b_{ts} \quad (23)$$

$$A_s = \frac{\pi}{8} w_{2s}^2 + \frac{1}{2} (w_{1s} + w_{2s}) \cdot h_{ss} \quad (24)$$

그림 4는 회전자 슬롯 형상을 나타낸다. 회전자 형상 또한 여러 가지 형상이 사용되고 있다. 심구바 형상, 슬롯 오픈 형상, 물방울형상, 원형상등이 있고, 본 연구에서는 고속 모델 10000rpm 이상에서는 원형상으로 설계하고 그 외의 10000rpm 이하의 유도전동기에서는 물방울형상을 설계한다. 10000rpm이하의 모델이 많기 때문에 본 논문에서는 물방울 회전자 바의 형상 설계를 논한다. 회전자 형상 설계는 고정자 형상설계와 비슷한 순서로 설계를 진행한다. 슬롯면적을 계산하기 위해 회전자에 흐르는 전류를 식(25)로 나타낼 수 있다.

$$I_b = K_f \frac{2m_1 W_1 K_{w1}}{N_r} I_{1n} \quad (25)$$

$$K_f \approx 0.8 \cos \varphi_{1n} + 0.2 \quad (26)$$

여기서, K_f 는 자화 리액턴스를 고려한 값으로 식(26)으로 나타낼 수 있다. 전류 값이 결정되면 슬롯면적을 계산한다. 먼

저, 회전자 전류밀도를 가정하는데, 본 연구에서는 $4.0[A/mm^2]$ 으로 정하고, 식(27)로 나타낼 수 있다.

$$A_b = \frac{I_b}{J_b} \quad (27)$$

여기서, J_b 는 전류밀도이다. h_{or} 은 경험적인 값을 통하여 설계 하고 본 연구에서는 $0.5 \sim 4.0[mm]$ 치 폭을 설계 한다. 먼저 가정했던 회전자 치 자속밀도 b_{tr} 를 이용하여 식(28)로 나타낼 수 있다.

$$b_{tr} = \frac{B_{gm}}{B_{tr}} \frac{\pi D_{is}}{N_r} \quad (28)$$

회전자 위 폭 w_{1r} 은 식(29)으로 나타낼 수 있고, 회전자 바닥 폭 w_{2r} 과 h_2 는 식(30)과 식(31)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\pi \left(D_{ro} - 2 \left(h_{os} + \frac{1}{2} w_{1r} \right) \right)}{N_r} = w_{1r} + b_{tr} \quad (29)$$

$$w_{2r} = \frac{\pi \left(D_{ro} - 2 \left(h_{os} + \frac{1}{2} w_{1r} + h_2 \right) \right)}{N_r} - b_{tr} \quad (30)$$

$$A_b = \frac{\pi}{8} (w_{1r}^2 + w_{2r}^2) + \frac{1}{2} (w_{1r} + w_{2r}) \cdot h_2 \quad (31)$$

3.2 토크-속도 특성 해석 결과

전동기 제작자에 의해 주어지는 카탈로그의 기본 형상 치수(고정자 외경, 고정자 내경, 축방향 길이)와 설계이론을 통한 권선설계, 형상설계를 바탕으로 약계자 제어가 고려된 토크-속도 특성을 도출하였다. 그림 5은 선정된 Model-1, 3, 6, 8 전동기의 토크-속도 특성결과를 나타낸다.(유사한 결과인 Model 2, 4, 4, 7, 11-14은 생략하였음) 고성능 인버터로 구동되는 약계자 제어가 적용되는 예측설계 대상 유도전동기의 토크-속도 특성해석을 수행은 상용 S/W인 Ansys Maxwell 2D v.16과 RMxpert를 사용하였다.

전동기의 운전은 정격슬립 V/f 제어로 동작되는 저속영역과 슬립 조정을 통해 얻을 수 있는 고속영역에서의 약계자 제어영역, 최대토크 운전점에서 최대슬립으로 운전되는 특성영역이 고려되었다. 그림 5에서 보여 지는 바와 같이, 제작자로부터 주어진 토크-속도 특성곡선과 예측설계된 대상 전동기들의 특성곡선이 매우 유사하게 설계되었음을 확인할 수 있다.

3.3 용량-속도별 해석 모델 손실 해석

전동기에서 발생하는 손실은 전기적으로 고정자와 회전자의 동손과 철손, 기계적으로는 베어링 마찰손, 풍손 등의 손실들이다. 이러한 손실들이 발열특성에서 전동기 각부의 온도가 상승하는 원인인 열원이 된다. 이 중 주된 손실은 동손과 철손이며, 가장 큰 비중을 차지하는 손실은 동손이다. 유도전동기에서 동손은 고정자 권선부와 회전자 도체 바의

그림 5 토크-속도특성 예측설계 결과

Fig. 5 Results of the NT characteristics

저항 손실이며 철손은 고정자와 회전자의 철심에서 발생하는 와전류손과 히스테리시스손 등의 자기적 리액턴스 손실이다. 특히 동손의 전기저항 R 은 온도변화의 영향을 받기 때문에 식(32)로 나타낼 수 있다[9][10].

$$R = R_0 [1 + a(T - T_0)] [\Omega] \quad (32)$$

여기서, T_0 는 초기온도, R_0 는 초기온도에서의 전기 저항값 a 는 저항의 온도 계수이다. 온도 상승률에 어느 정도 비례함을 알 수 있다. 따라서 발열특성을 해석하기 위해서는 정확한 손실 값 예측이 필요하다.

다양한 용량-속도를 갖는 다수의 공작기계 스펙들용 유도전동기의 예측 설계 결과를 토대로 유한요소해석을 사용하여 손실(발열량, Watt) 값을 도출하였다. 그림 6은 유도전동기의 총 손실을 1로 하여, 각 부위별 손실을 비율로 나타낸 그래프이다.

4. 유도전동기 발열량 실험 및 해석 비교

앞서 예측된 다양한 용량-속도를 갖는 유도전동기의 발열량 데이터의 신뢰성을 검증하기 위해 0.4kW 1710rpm 유도전동기를 실험모델로 선정하여 반(Half) 부하 실험으로 진행되었다. 반 부하 시 1.1Nm 토크로 발열 측정 실험을 진행하고 열 특성 해석결과와 비교했다. 발열량 계산은 집중정수회로 해석기법이 적용된 Motor Design Ltd.社의 Motor-CAD S/W v7.1.8를 사용하였다.

4.1 발열 특성

열원에 의한 발열과 인접한 부분에서 열전달 되어 더해진 발열을 두고 어떤 특정 온도변화를 이끌어내는 데 필요한

그림 6 용량-속도별 유도전동기 손실 분포

Fig. 6 Loss distribution of Selected induction motor according to the rated power-rated speed

열량을 산정하는 정수가 열용량이다. 열용량은 어떠한 물체의 온도를 1℃ 올리는 데 필요한 열량을 나타내며, 열량과 온도변화량의 관계를 알 수 있는 요소가 된다. 열용량(C)과 열량(Q) 및 온도변화량(ΔT)의 관계식은 식(33)으로 나타낼 수 있다. 열용량은 물질의 종류에 따라서 달라지며, 또한 같은 물질이어도 그 양에 따라서도 달라진다. 열적 과도상태 해석에 필수적인 열용량은 전동기 모든 부분에서 고려되는 것으로 물질의 질량, 비열 용량, 물질의 밀도에 의하여 식(34)로 나타낼 수 있다.

$$C = \frac{Q}{\Delta T} \quad (33)$$

$$C = mcp [J/^\circ C] \quad (34)$$

여기서, m 은 물질의 질량[kg], c 는 비열용량[J/kg · °C] ρ 는 물질의 밀도[kg/m³]이다. 열용량을 산정하기 위해 필요한 열량은 해당 열원에서 발생하는 발열뿐만 아니라 인접한 열원이나 매질에서 열전달 되는 발열도 포함하게 된다. 각 절점마다 열용량이 다르게 정해지고, 매질이 가지는 열전도도가 다르므로 시간이 경과함에 따라 절점 간의 온도 차가 발생하게 되고, 발열 전력이 전달되게 된다[11]~[13].

그림 7은 구조적 열저항 배치도를 나타낸다. 열전달 방식에 따라 매질 전도 열저항, 간극 전도 열저항, 대류 열저항, 방사 열저항으로 분류할 수 있는데, 방사 열저항은 전자기와 형태로 전달되고 주된 열전달방식에 포함되지 않기 때문에 고려하지 않겠다[11]~[13].

그림 8은 매질 전도 열저항의 등가회로를 나타내며, 전동기를 구성하는 각각의 매질 내에서 전도성 열전달에 대해서만 고려되는 열저항으로, 전달되는 발열 전력과 관계식은 식(35)으로 나타낼 수 있다.

그림 7 구조적 열저항 배치도

Fig. 7 Map of the structural thermal resistance

그림 8 매질 전도에 따른 열저항

Fig. 8 Thermal resistance of material conduction

그림 9 간극 전도에 따른 열저항

Fig. 9 Thermal resistance of gap conduction

$$P_t = k(\Delta T_i - \Delta T_j) \frac{S}{l} [W/m] \quad (35)$$

여기서, k 는 매질의 열전도도 [W/m² · °C], S 는 전도 매질의 단면적 [m²], l 는 전도 매질의 길이 [m], $\Delta T_i - \Delta T_j$ 는 두 절점 간 온도변화 차분[°C]이다.

그림 9은 간극 전도 열저항의 등가회로를 나타내며, 전동기 제작 시 매질과 매질 사이를 억지끼움하는 과정에서 겹보기에는 붙어있지만 실제로 미세한 틈이 존재하고 틈 사이에서 열전도가 발생하는 열저항 성분이다. 통과하는 발열 전력에 대하여 각 매질의 열전도도가 다르므로 하나의 매질로 간주하기 위해 평균 열전도도를 k_a 로 정의하면 매질 전도 열저항과 마찬가지로 식(36)으로 나타낼 수 있다.

$$P_t = k_a(\Delta T_i - \Delta T_j) \frac{S}{(l_1 + l_2 + l_0)} [W/m] \quad (36)$$

여기서, k_a 는 평균 열전도도 [W/m² · °C], S 는 간극의 단면적 [m²], $l_1 + l_2 + l_0$ 는 전도 매질의 총 길이 [m]이다.

그림 10은 대류 열저항의 등가회로를 나타내며, 어떤 물질에서 발열이 전달되는 대상이 통풍공기가 되는 부분에서의

그림 10 대류 열저항

Fig. 10 Thermal resistance of the convection

열저항으로, 고정자 권선의 엔드턴이나 회전자 엔드링부로 전달된 발열과 내기 사이, 하우징으로 전도된 발열과 외기 사이에서 직접적인 열전도에 대한 저항이다. 방열되는 발열 전력과의 관계식은 식(37)으로 나타낼 수 있다.

$$P_t = hS(\Delta T_i - \Delta T_{air}) [W] \quad (37)$$

여기서, h 는 열전달율 [$W/m^2 \cdot ^\circ C$], S 는 방열 단면적 [m^2], $\Delta T_i - \Delta T_{air}$ 는 방열 절점과 공기 간 온도변화 차분 [$^\circ C$]을 나타내며, 고정자와 회전자 사이의 공간은 강제 대류에 의한 열전달율을 산정하여 대류 열저항으로 등가화 하였다 [11]~[13].

각 열원과 열용량, 그리고 열저항들을 실제 주어진 유도전동기의 구조적인 치수와 매질에 따라 여러 열적 상수들로 계산하여 전기 회로적 해석을 하기 위해 등가회로망을 구성할 수 있다. 그림 11은 Motor-CAD S/W의 형상입력에 의해 얻어지는 열 등가 회로 모델이며 3차원 모델의 열 저항을 축 방향과 반경 방향의 2차원 모델로 등가화 하였다 [14][15].

4.2 0.4kw 유도전동기 발열 실험

앞서 기술된 공작기계의 스피들용 유도전동기 예측설계 이론 및 손실, 발열량 해석과정 및 결과의 검증에 위하여 발열실험을 수행하였다. 실제 공작기계 스피들용 유도전동기

의 용량과 속도가 상대적으로 크거나 높기 때문에, 실험실 수준에서의 부하시험을 수행하기 매우 어렵다. 따라서 본 논문에서는 0.4kW 1710rpm급의 산업용 유도전동기를 실험 대상 모델로 선정하고 부하에 따른 발열특성실험을 수행하였다. 표 2는 발열량 실험을 위한 유도전동기의 사양을 나타낸다. 정격용량 0.4kW 정격속도 1710rpm 으로 각 부위에서의 손실은 유한요소해석을 통해 도출하였다. 그림 12는 유도전동기를 실험을 나타낸다. 그림 12(a)와 같이 다이내모 미터 시험기에 전동기를 연결하고 부하기에 Thermometer (Fluke 54IIB)를 연결하여 부하에서 발생하는 열을 실시간으로 확인할 수 있고 과손을 방지하였다. 온도측정을 위하여 NI Labview와 NI DAQ9174의 온도측정 모듈을 이용하여 발생온도를 실시간 자동 측정 할 수 있게 하였다[16].

표 2 실험모델 사양

Table 2 Specification of the test model

Item	Value	Item	Value
정격 용량	0.4 kW	고정자 외경/내경/축	115.5/69.97/55.4
정격 토크	23.5 Nm	회전자 외경/내경/축	114.5/17.5/55.4
정격 스피드	1710 rpm	고정자 슬롯 수	24
극수	4	회전자 슬롯 수	34
고정자 동손	55.78 W	고정자 철손	6.57 W
회전자 동손	5.64 W	회전자 철손	0.89 W

부하기를 통하여 반 부하 조건을 만족시키고, 특정부위의 열 측정을 위하여 그림 12(b)와 같이 전동기 내부의 고정자 권선, 고정자 철심에 Thermocouple(열전대)를 부착 하였고 대기온도를 동시에 측정 했다. 발열특성 측정실험은 7200초 (120분) 동안 진행하였다[16].

그림 11 Motor-CAD S/W에 의한 열 등가회로 모델링

Fig. 11 Modeling of the thermal equivalent circuit by Motor-CAD S/W

(a) 유도전동기 Thermocouple 위치

(b) 유도전동기 실험 시스템

그림 12 유도전동기 실험 및 Thermocouple 부착위치

Fig. 12 Experiment of the induction motor and Attachment location of the thermocouple

4.3 발열특성 해석 및 시뮬레이션 결과

발열특성 해석 및 시뮬레이션을 위해 Motor-CAD S/W를 이용하여 실험모델의 형상설계, 권선설계, 열용량, 열저항계산, 열등가 회로 구성, 과도상태, 정상상태 발열특성 등을 설정한다. 그림 13는 해석모델 반경방향 단면 형상을 나타낸다. 정확한 형상예측을 위해 해석모델 전동기 내부의 고정자와 회전자를 절단하여 치수를 확인 했다. 그림 14(a)는 해석 모델의 3D 형상을 나타낸다. 그림 14(b)와 비교하였을 때 매우 유사하게 형상을 예측함을 확인 했다. 권선설계는 발열특성 시뮬레이션이기 때문에 권선직경과 점적률을 통한 저항 값 예측이 전부이고, 큰 비중을 차지하지는 않는다. 권선설계가 마무리 되면 열용량, 열저항등의 파라미터를 결정한다. 파라미터 결정 시 계산된 손실값, 냉각 방식 등은 결정 할 수 있지만 전동기의 내부를 구성하는 구조의 매질이 갖는 전도도나 비열 등의 값과 각각의 전도로 인하여 발생하는 열저항 값을 계산하는 것은 불가능에 가깝다. 따라서 Motor CAD S/W에서 제공되는 기본값이나 자동으로 계산해주는 값으로 파라미터를 결정한다[17].

그림 15는 실험모델의 발열량 실험결과 및 시뮬레이션 결과이다. (a)는 고정자 권선에서의 결과 비교이다. 열적 정상

그림 13 반경방향 단면 형상

Fig. 13 Shape of the radial direction

(a) 해석 모델 3D 형상 예측

(b) 해석모델 실제 형상

그림 14 해석모델 3D 형상

Fig. 14 Shape of the 3D analysis model

상태에서 실험과 시뮬레이션 모두 동일한 조건으로 대기온도 25 ℃를 유지하고 고정자 권선(엔드턴)에서 발열량을 실험 및 시뮬레이션을 통해 확인 하였다. 실험결과 92.89 ℃의 온도가 발생하는 것을 확인했고, 시뮬레이션에서는 90.8 ℃의 온도가 발생하는 것으로 확인했다. 약 3.7% 오차가 발생했다. (b)는 고정자 철심에서의 결과 비교이다. 고정자 권선에서와 마찬가지로 동일한 조건으로 열적 정상상태에서 대기온도 25℃를 유지하여 실험 및 시뮬레이션을 진행 했다. 실험 결과 81.4 ℃의 온도가 발생하는 것을 확인 하였고, 시뮬레이션에서는 78.7 ℃의 온도가 발생하는 것을 확인했다. 약 5% 오차가 발생됐다. 비교결과 정상상태에서는 각 영역에서 5% 미만의 오차가 발생되었고, 과도상태에서는 각 영역에서 12% 미만의 오차가 발생하는 것을 확인 했다.

5. 결 론

본 논문에서는 스핀들 구동용 유도전동기의 발열에 의해 발생 가능한 조정밀 공작기계의 가공오차 예측을 위하여, 유도전동기에서 발생하는 손실, 즉, 발열량의 해석 및 실험적 검증을 수행하였다. 전동기 제작자에 의해 공급되는 다양한 용량-속도를 갖는 전동기들에 대하여 발열량 데이터베이스(DB)가 구축을 위하여 다수의 용량-속도 대역을 갖는 유도전동기를 선정하였다. 더하여, 제작자에 의해 주어진 토크-속도 특성곡선을 만족하는 전동기의 형상을 설계이론을 바탕으로 예측설계하고, 각각의 모델에서 발생하는 손실의 양을 계산하였다. 각각의 유도전동기에 손실 및 발열량을 실

(a) 고정자 권선(엔드턴)에서 발열특성

(b) 고정자 철심에서 발열특성

그림 15 유도전동기 실험 및 시뮬레이션 결과

Fig. 15 Results of the induction motor experiment and simulation

험을 통해 검증 할 수 없는 한계점이 있었지만, 데이터베이스 용량-속도에 따른 유도전동기의 발열량 DB 구축 고려요소를 제시하였고, 상용 S/W를 이용하여 발열특성 해석을 위한 열 등가회로, 열 저항, 열용량 해석 요소를 분석하였다. 특히, 실험 모델의 발열특성 실험결과와 시뮬레이션 결과를 비교하여 5% 미만의 오차를 나타내는 것을 확인하여 공작기계 스피들용 유도전동기의 예측설계 및 발열특성 계산과정의 타당성을 검증하였다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 산업원천기술개발사업인 “기계장비 정밀도 시뮬레이션 플랫폼 기술개발” 과제의 지원으로 수행되었습니다.(No. 10033528)

References

- [1] Joo-Ho Hwang, Jong-Youp Shim, Seong-Wook Hong, Deug-Woo Lee, “Accuracy Simulation of Precision Rotary Motion Systems,” *Journal of the Korean Society for Precision Engineering* Vol. 28, No. 3, pp. 285-291, 2011.03.
- [2] Ki-Hyun Seong, Ju-Sung Yu, Han-Wook Cho, Joo-Ho Hwang, Jong-Youp Shim, “Power Loss Analysis in Induction Motors according to the Rated Power-Rated Speed for Rotational-Motion Machine Tool Spindle,” *KIEE EMECS Society Annual Spring Conference Proceeding*, pp.74-76, 2013.04.
- [3] Ki-Hyun Seong, Ju-Sung Yu, Han-Wook Cho, Joo-Ho Hwang, Jong-Youp Shim, “Thermal characteristic Analysis in Induction Motors according to the Rated Power-Rated Speed for Rotational-Motion Machine Tool Spindle,” *KIEE Annual Summer Conference Proceeding*, pp.889-890, 2013.07.
- [4] Dong-Jun Kim, Do-Kwan Hong, Jae-Hak Choi, Yon-Do Chun, Byung-Chul Woo, Dae-Hyun Koo, “Development of a High Speed Induction Motor for Spindle Systems,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 49, no. 7, pp.4088-4091, 2013.07.
- [5] Kwang-Soo Kim, “Deduction of design method for high efficiency and verification on induction motor correspond to minimum energy performance standard,” Ph.D. Dissertation Hanyang University, 2011.
- [6] Pil-Wan Han, “A study on the optimal design and loss analysis for cost reduction of high efficiency induction motor,” Ph.D. Dissertation Hanyang University, 2013.
- [7] Jong-Soo Won, *Electric Machinery Design Theory*, Dongilbook, 1994.
- [8] Ministry of Knowledge Economy, *The Development of Premium Efficiency Three Phase Induction Motor*, 2008.
- [9] Seok-Myeong Jang, Han-Wook Cho, Kyoung-Jin Ko, “Analysis on the Core Loss and Windage Loss in Permanent Magnet Synchronous Motor for High-Speed Application,” *The Tran. KIEE (Korean)*, Vol55B, no.10 pp.511-520, 2006.10.
- [10] Pil-Wan Han, Ju Lee, “The Study of Efficiency and Characteristics Comparison between Aluminum and Copper Die Casting Induction Motor for Improving Efficiency,” *The Tran. KIEE (Korean)*, Vol61, no.1, pp.70-74, 2012.01.
- [11] Jang-Sung Chun, Hyung-Sup Kim, Cheol-Gyun Lee, Song-Yop Han, Jong-Soo Won, “A Study on the Thermal Transient Analysis of Induction Motors,” *KIEE EMECS Society Annual autumn Conference Proceeding*, pp.889-890, 2013.07.,

pp.59-62, 1993.

- [12] Cassiano Antunes Cezario, Marcelo Verardi, Samuel Santos Bores, Jonny Carlos da Silva, Amir Antonio Martins Oliveira, "Transient thermal analysis of an induction electric motor," *Proceedings of COBEM 2005, 18th International Congress of Mechanical Engineering*, pp.1-8, 2005.
- [13] S.K.Chowdhury, P.K.Baski, "A simple lumped parameter thermal model for electrical machine of TEFC design," *2010 Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, pp.1-7, 2010.
- [14] Motor-CAD Manual : Motor Tutorial, Magsoft Corporation, 2005.
- [15] Dave Staton, Aldo Boglietti, Andrea Cavagnino, "Solving the More Difficult Aspects of Electric Motor Thermal Analysis in Small and MediumSize Industrial Induction Motors," *IEEE Trans. Energy Conv.*, vol. 20, no. 3, pp.620-628, 2005.
- [16] Jun-Won Lee, Won-Cheol Shin, Han-Wook Cho, "Implementation of a Monitoring System for Thermal Characteristics according to Load using LabVIEW," *KIEE EMECS Society Annual Spring Conference Proceeding*, pp.355-357, 2013.04.
- [17] Deaconu, D.I. Ghita, C. Chirilă, A.I. Navrapescu, V. Popescu, M, "Thermal study of induction machine using Motor-CAD," *2010 3rd International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEEE)*, pp.23-27, 2010.

저 자 소 개

성 기 현 (成 耆 顯)

1988년 5월 27일생. 2013년 한밭대학교 전기공학과 졸업, 2013년 3월~ 현재 충남대학교 교육대학원 전기전자통신공학 교육과 석사과정
 Tel : 042-821-8860
 E-mail : sungkh6994@cnu.ac.kr

조 한 욱 (趙 漢 旭)

1976년 12월 3일생. 2002년, 2004년, 2007년 충남대학교 전기공학과 공학사, 공학석사, 공학박사 졸업. 2007년 9월~2010년 8월 한국기계연구원 선임연구원, 2010년 8월~현재 충남대학교 전기전자통신공학 교육과 조교수
 Tel : 042-821-8581
 E-mail : hwcho@cnu.ac.kr

황 주 호 (黃 宙 豪)

1969년 8월 1일생. 1993년 인하대학교, 1995년, 2006년 KAIST 기계공학과 공학사, 공학석사, 공학박사 졸업. 1995년 3월~현재 한국기계연구원 책임연구원
 Tel : 042-868-7119
 E-mail : jooho@kimm.re.kr

심 종 엽 (沈 鍾 燁)

1973년 9월 3일생. 1996년 한양대 정밀기계공학과 공학사. 1998년, 2004년 KAIST 기계공학과 공학석사, 공학박사. 현재 한국기계연구원 책임연구원
 Tel : 042-868-7112
 E-mail : jyshim@kimm.re.kr