

FEM 을 이용한 동기식 리니어모터 열특성의 해석

은 인웅*

(2001년 1월 22일 접수, 2002년 6월 8일 심사완료)

Analysis for the Thermal Behavior of Synchronous Linear Motor by FEM

In-Ung Eun

Key Words : Machine Tool(공작기계), Feed Mechanism(이송장치), Linear Motor(리니어모터), Thermal Behavior(열특성), FEM(유한요소법), Water Cooling(수냉), Orthotropic Physical Property(정방성 물성), Winding(권선), Sheet Metal(철심)

Abstract

Linear motor has a lot of advantages in comparison with conventional feed mechanisms: high velocity, high acceleration, good positioning accuracy and a long lifetime. An important disadvantage of linear motor is its high power loss and heating up of motor and neighboring machine components in operation. For the application of the linear motors to precision machine tools an effective cooling method and thermal optimizing measures are required. In this paper Finite-Element-Method for the thermal behavior of synchronous linear motor is introduced, which is useful for the design and manufacturing of linear motors. By modeling the linear motor the orthotropic physical properties of the sheet metal and windings were considered and convective coefficient in the water cooler and to the surroundings was defined by analytical and experimental method. The calculated isothermal lines could analyze the heat flow in the linear motor.

1. 서 론

리니어모터(Linear motor)는 모터의 기본이 되는 두 요소인 프라이머리 파트(Primary part: 회전모터의 Stator에 해당)와 세컨더리 파트(Secondary part: 회전모터의 Rotor에 해당) 사이에 작용하는 유도기전력에 의해서 모터자체가 직접 직선운동을 한다.^(1~3) 서보모터의 회전운동을 직선운동으로 변환시키는 기구가 생략됨으로써 리니어모터가 공작기계의 이송장치로 사용될 때 높은 위치제어, 높은 속도 및 가속능력을 가진다.^(4~6) 반면 리니어모터의 기술적인 약점은 낮은 효율과 함께 가동 중에 발생하는 열손실로 인해 주변기기들이 가열되는 것이다. 리니어모터를 고속정밀공작기계에 적용하기 위해서는 반드시 열문제의 해석과 함께 효과적인 냉각시설을 갖추어야 한다.⁽⁷⁾ 리니어모터의 열문제의 해석에는 온도센서를 이용해 모터 및 주변기기의 온도를 직접 측정하거나, 적외선카메라로

온도분포를 분석하기도 한다.⁽⁸⁾ FEM 을 이용하면 온도센서나 적외선카메라로 온도측정이 불가능한 모터내부의 권선이나 철심의 온도분포를 해석할 수 있기에 리니어모터의 설계 및 제조 시 많이 사용되는 방법이다. 본 논문에서는 고속·고출력 동기식 리니어모터(Synchronous linear motor)의 정상상태(Steady-state condition)에서의 열특성을 FEM 을 사용하여 해석한다.

2. 모델링에 사용된 리니어모터 특성

2.1 모델링에 사용된 리니어모터의 사양

모델링에 사용된 리니어모터의 사양은 부록의 Table 1에 보여주고 있다.⁽⁹⁾ 리니어모터는 수냉각 시 정격출력이 3200 N 그리고 연속속도가 90 m/min에 이르는 독일 Siemens 사의 동기식 모터이다. 최고 출력은 7000 N, 최대속도는 170 m/min이다. 이 사양을 가진 리니어 모터가 공작기계의 이송장치로 적용될 경우 중절삭(Middle heavy cut-

* 회원, 경기공업대학 금형설계과

E-mail : iueun@kinst.ac.kr

TEL : (031)4964-764 FAX : (031)4964-636

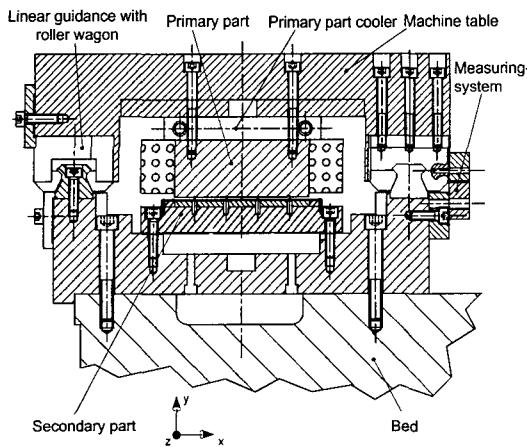


Fig. 1 Experimental set-up with the synchronous linear motor

ing). 고속이송장치로 적합하다. 프라이머리 파트와 세컨더리 파트 사이에 작용하는 자기력은 14600 N이며 리니어모터의 효율에 직접 영향을 주는 추력 상수 (Force constant)는 141 N/A이다. 정격전류 하에서 최대 열손실은 프라이머리 파트에서 2600 W 그리고 세컨더리 파트에서 20 W이다.

2.2 실험장치

Fig. 1은 리니어모터를 장착한 실험장치를 보여주고 있다. 리니어모터의 프라이머리 파트는 테이블과 볼트로 연결되어 있고, 세컨더리 파트는 베드에 볼트로 고정되어 있어서 프라이머리 파트와 세컨더리 파트 사이에 작용하는 유도기전력에 의해 테이블이 z 방향으로 이송운동을 한다. 프라이머리 파트와 테이블 사이에는 모터와 테이블의 냉각을 위해서 냉각기가 있고, 냉각기는 물의 유입온도와 유량을 조절할 수 있는 냉각장치에 연결되어 있다. 세컨더리 파트는 열손실이 적기에 냉각기를 따로 장착하지 않았다.

프라이머리 파트와 세컨더리 파트 사이에 수직으로 작용하는 높은 자기력을 받고 고속 이송을 가능하게 하기 위해 롤러 리이어 가이던스를 사용하였다.⁽¹⁰⁾ 길이측정장치로는 분해능 1μm의 Heidenhein 사의 LC181 이⁽¹¹⁾ NC 제어기는 Indramat 의 DDS 2.1⁽¹²⁾이 사용되었다.

3. 모델링과 경계조건

3.1 모델링

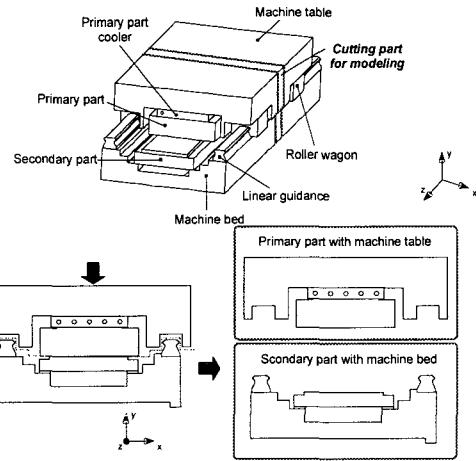


Fig. 2 FEM-Modeling for the experimental set-up

3.1.1 실험장치의 모델링

리니어모터는 그 내부 구조가 권선과 철심 그리고 단열재로 구성되어 있어 복잡하며, 실험장치 전체를 모델링 하려면 많은 요소와 절점이 필요하고 계산상 많은 시간이 필요하기에 Fig. 2 와 같이 실험장치의 중간부위에서 한층 만을 취하여 모델링 한다.

모델링을 위한 z 방향으로의 최소한의 층의 길이는 u, v, w 3 권선을 포함할 수 있는 길이여야 계산 후에 권선내의 정확한 온도분포를 얻을 수 있다. 실험장치의 중앙 부위에서 모델링할 층을 취하면 리이어 가이던스가 생략되는데 이것은 리니어롤러 운동부의 질량이 테이블의 질량에 비해 적고, 리이어 가이던스 상에서의 마찰에 의한 기계적인 열량은 리니어모터의 전기적인 열손실에 비해 무시할 정도로 작기에 결과에 큰 영향을 미치지 않는다. 또한 리니어모터의 운동부, 즉 프라이머리 파트와 테이블, 그리고 고정부, 즉 세컨더리 파트와 베드는 서로 분리하여 따로 모델링 할 수 있다. 그 이유는 리니어모터에 냉각장치가 있을 경우 테이블과 베드의 온도차가 작아 리니어롤러 운동부를 통한 열흐름이 거의 없고, 세컨더리 파트는 열원인 프라이머리 파트로부터 열대류나 복사에 의해 가열되기에 적절한 경계조건에 의하여 모델링이 가능하기 때문이다.

3.1.2 프라이머리 파트와 테이블의 모델링

리니어모터의 프라이머리 파트는 크게 권선, 철심 그리고 권선머리(Winding head)를 보호하는 에폭시 레진으로 구성되어 있고 그 외관은 Fig. 3 과 같다. 리니어모터를 FEM 모델링하고 계산하는 과정에서 중요한 점은 철심과 권선이 정방성 물성

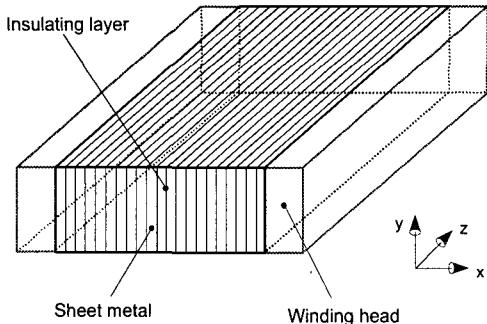


Fig. 3 Construction of the primary part

(Orthotropic physical property)을 가지는 것을 고려하는 것이다. Fig. 3에서 보여주는 바와 같이 두께 0.5 mm의 철심이 x 방향으로 수 백장이 평행하게 배열되어 있고 그 사이에 와전류에 의한 전기적인 손실을 줄이기 위해서 페놀이나 에폭시 기반의 단열재가 들어있다.⁽¹³⁾ 그리하여 철심은 배열된 방향에 따라서 열전도계수(λ)의 큰 차이를 보인다. 리니어모터의 이송방향(z 방향) 그리고 수직방향(y 방향)으로는 상대적으로 좋은 열전도계수를 가지며, 그 값은 철심의 재질에 따라 다르나 본 모터의 경우 48 W/mK이다. 반면에 수평방향인 x 방향으로는 열흐름의 방향으로 단열재가 위치해 있어 열전도계수가 낮아 그 값이 2.5 W/mK이다. 즉, y, z 방향으로의 열전도계수는 x 방향에 비해 약 19 배가 높다.⁽¹³⁾

권선을 외부의 기계적인 손상으로부터 보호하기 위해 권선머리를 에폭시 레진으로 싸는데, 이에 폭시 레진의 열전도계수는 단열재와 비슷하고 그 값은 0.25 W/mK이다.

Fig. 4는 프라이머리 파트의 단면을 보여주고 있다. 권선은 에나멜 구리선으로 되어있고 철심의 슬롯에 들어있다. 권선을 철심의 슬롯에 넣은 다음 모터에 기계적인 강성을 주기 위해 진공상태에서 폴리우레탄이나 폴리에스테르 수지를 녹여 부어 프라이머리 파트를 완성한다. 구리선을 감싸고 있는 에나멜이나 폴리우레탄의 열전도계수는 차이가 없고 단열재이다. 그러나 이 단열재의 열전도계수는 구리에 비해 약 1000 배 가량이 낮아서 모터 권선의 열전도계수는 방향에 크게 의존한다.

철심내의 구리선과 단열재는 전류방향(x 방향)으로 열저항의 병렬연결로 해석할 수 있다. x 방향으로의 결과적인 열전도계수(Resultant conducting coefficient, $\lambda_{Result,x}$)는 다음과 같이 표시된다.

$$\lambda_{Result,x} = \frac{\lambda_{Copper} \cdot A_{Copper} + \lambda_{Insul} \cdot A_{Insul}}{A_{Slot}} \quad (1)$$

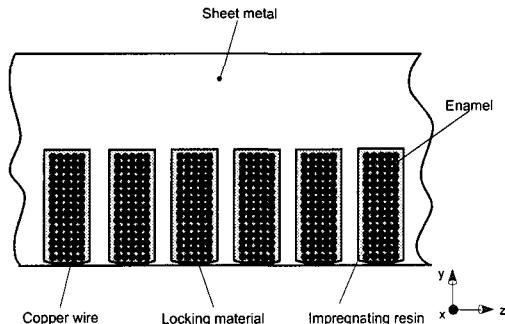


Fig. 4 Sectional view of the primary part

식 (1)에서

A_{Slot}	슬롯의 단면적
A_{Copper}	구리선의 단면적
A_{Insul}	단열재의 단면적
λ_{Copper}	구리선의 열전도계수
λ_{Insul}	단열재의 열전도계수

구리상수(Copper factor, k_{Copper})는 구리선 단면적의 슬롯단면적에 대한 비율로써 다음과 같이 정의된다.⁽¹⁴⁾

$$k_{Copper} = \frac{A_{Copper}}{A_{Slot}} \quad (2)$$

구리상수를 사용하여 식 (1)을 다시 쓰면

$$\lambda_{Result,x} = k_{Copper} \cdot \lambda_{Copper} + \lambda_{Insul} \cdot (1 - k_{Copper}) \quad (3)$$

y 와 z 방향으로의 결과적인 열전도계수를 Forkmann⁽¹⁵⁾의 등식에 따라 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{1}{\lambda_{Result,y,z}} = (1 - k_{Copper}) \cdot \left(\frac{1 - k_{Resin}}{\lambda_{Air}} + \frac{k_{Resin}}{\lambda_{Insul}} \right) + \quad (4)$$

$$k_{Copper} \left[1 - \left(\frac{d_{without\ enamel}}{d_{with\ enamel}} \right)^2 \right] \cdot \frac{1}{\lambda_{Insul}} \quad (4)$$

리니어모터의 제조시 슬롯내의 구리선을 넣은 다음 용융된 레진을 진공상태에서 슬롯에 채우기에 일반적으로 기공이 없고 레진상수 $k_{Resin} = 1$ 이 된다. 식 (4)의 두 번째 항은 순수한 구리선과 에나멜선의 직경비에 따른 열전도계수의 차이를 나타내며, 보통 에나멜막의 두께는 무시할 수 있기 때문에 $d_{with\ enamel} = d_{without\ enamel}$ 이다. 이에 따라 식 (4)를 다시 쓰면 식 (5)가 된다.

$$\lambda_{Result,y,z} = \frac{\lambda_{Insul}}{1 - k_{Copper}} \quad (5)$$

구리상수는 모터의 제조회사와 크기에 따라 차이가 나는데 본 실험과 모델링에 사용된 리니어모터의 구리상수는 0.43 이다. 또한 사용된 $k_{Copper} =$

350 W/mK, $\lambda_{\text{Insul}} = 0.25 \text{ W/mK}$ 이며 식 (3)과 식 (5)에 따라 x 방향의 결과적인 열전도계수를 구하면 150 W/mK 그리고 y, z 방향의 값은 0.44 W/mK가 된다.

열원이 되는 구리선의 양은 Fig. 5에 보여 주는 바와 같이 식 (2)에 따라 결정할 수 있다. Fig. 5에서 슬롯내의 권선과 철심간의 간격 l_1 은 1 mm이고, 에나멜과 에폭시 레진의 열전도계수는 동일하다. 결과적인 구리단면적을 결정함에 있어서 권선과 철심의 단열재의 열저항은 불변해야 한다. 이것은 다음과 같이 식 (6)에 따라 계산할 수 있다.

$$R_{\text{Insul}} = \frac{l_1}{\lambda_1} = \frac{l_2}{\lambda_2} \Rightarrow \lambda_2 = \lambda_1 \cdot \frac{l_2}{l_1} \quad (6)$$

리니어모터를 FEM 모델링 하는 과정에서 복잡한 부분은 권선의 권선머리부분이다. 권선이 정방성의 물성을 유지하면서 x, y, z 3 방향으로 꼬이면서 서로 연결되기에 복잡하다. 권선이 권선머리부분에서 꼬이면서도 정방성의 물성을 유지시키기 위해서는 해당하는 요소의 좌표변환에 의해서 가능해진다.⁽¹⁶⁾

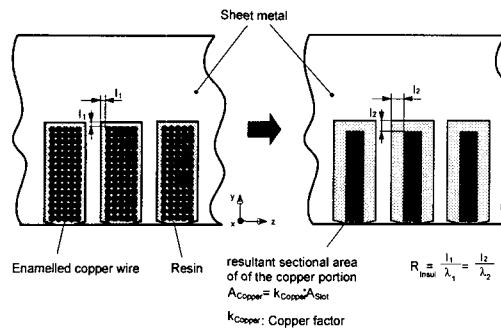


Fig. 5 Resultant sectional area of the copper portion

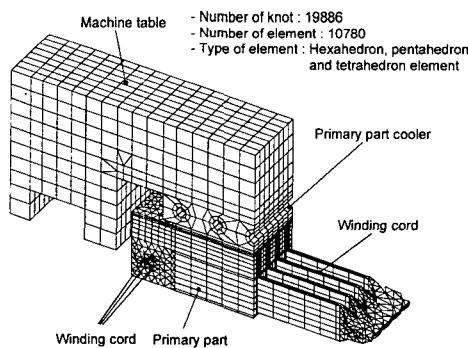


Fig. 6 FEM-Model for the primary part and machine table (presented only half the model)

Fig. 6은 리니어모터의 운동부, 즉 프라이머리파트와 테이블 그리고 냉각기를 포함한 FEM 모델을 보여 주고 있다. 모델링에 사용된 FEM 프로그램은 I-DEAS Version 7이다.

3.1.3 세컨더리 파트와 베드의 모델링

동기식 리니어모터의 상부는 영구자석으로 되어 있고 그 밑에는 자석을 바치고 있는 기판이 있다. 영구자석이나 기판의 물성을 강파 비슷하다.^(9,14) Fig. 7은 세컨더리 파트와 베드의 FEM 모델이다.

3.2 경계조건

3.2.1 열원(Heat source)

리니어모터를 공작기계에 적용할 경우 작동 중 모터 내부의 전기적 손실에 의한 열, 그리고 모터가 이송운동을 할 경우 리이어 가이던스 상에서 발생하는 기계적인 마찰열 크게 두 가지로 나눌 수 있다.

● 리니어모터 내의 전기적 열손실

Fig. 8은 리니어모터의 전기적 열손실을 측정하는 장치와 결과를 보여주고 있다. 위치제어 된 상태에서 이송방향으로 힘을 가하고 로드셀로 측정하였으며 연속추력의 최대치보다 약간 높은 약 3300N 까지 힘의 변화에 따른 열손실을 CNC 제어기와 리니어모터 사이에 설치한 동력계(Digital power meter)로 직접 측정하였다.

Fig. 8에서 나타낸 바와 같이 리니어모터 내의 전기적 열손실은 힘의 제곱에 비례하여 증가한다. 이것은 리니어모터의 추력에 비례하여 전류가 증가하고 전류의 제곱에 비례하여 오음저항손실이 증가하기 때문이다. 연속추력의 최대치인 3200 N에서 약 2620 W의 열손실을 보인다.

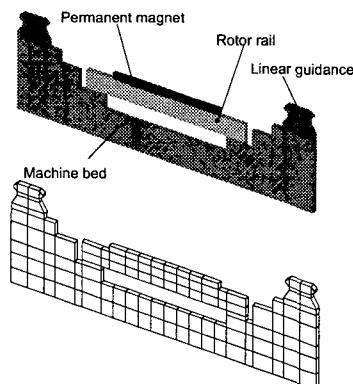


Fig. 7 FEM-Model for the secondary part and machine bed

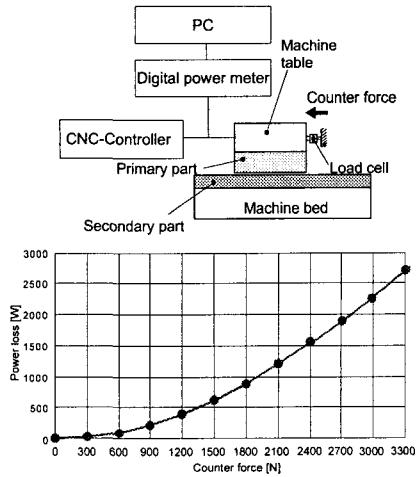


Fig. 8 Electrical power loss in dependence on the counter force

이 값은 프라이머리 파트에 들어 있는 권선저항과 정격전류 22.6 A 를 측정하여 계산한 오음저항순실 2600 W 와 세컨더리 파트의 손실 20 W 의 합이며, 부록 Table 1 에 있는 리니어모터의 생산회사로부터 제공된 자료와 잘 일치하고 있다. 즉, 현재 공작기계에 적용되고 있는 고속 대추력의 동기식 리니어모터의 열원은 구조에 따라 약간의 차이가 있으나 회전모터와 달리 철손이나 와전류에 의한 손실은 거의 없고 전체 전기적인 손실의 99.8%가 권선 내의 오음저항에 의한 열손실이다.^(9,14)

FEM 모델링 과정에서 권선에 해당하는 요소에 오음저항에 의한 열손실을 열원으로 입력한다. 정격전류시의 열손실 2600 W 가 프라이머리 파트의 구리권선중량 6.4 kg ($\rho=8500 \text{ kg/m}^3$)에 고르게 분포하여 발생하는 것으로 보고, 구리권선의 단위 체적 당 발생하는 열 $\dot{\Phi}$ 은 식 (7)에 따라 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\dot{\Phi} = \frac{P}{m/p} = \frac{2600}{6.4/8500} = 3453125 \text{ W/m}^3 \approx 3.45 \times 10^{-3} \text{ W/mm}^3 \quad (7)$$

세컨더리 파트 자체의 열손실은 부록 Table 1에서 보는 바와 같이 20 W 로써 무시할 수 있다. 그러나 세컨더리 파트와 베드의 온도상승의 주열원은 프라이머리 파트의 밑면으로부터 1.5 mm 의 공기간극을 통하여 열대류나 열복사에 의하여 세컨더리 파트의 상부로 전달되는 열이다.

● 리이어 가이던스 상의 마찰열

리니어모터가 직선 운동하는 경우 리이어 가이

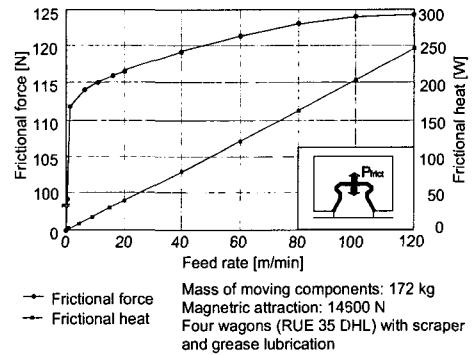


Fig. 9 Frictional force and heat on the linear guidance (RUE 35 DHL)

던스 상에서 마찰에 의한 열이 발생한다. 마찰열은 마찰력과 속도에 의하여 결정되며, 마찰력에 직접 영향을 주는 요소는 프라이머리 파트와 세컨더리 파트 사이에 작용하는 자기력과 운동부의 질량, 사용된 리이어 가이던스의 형상, 스크레이퍼의 부착 유무, 이송속도 그리고 사용된 윤활유의 종류 등이다.⁽¹⁰⁾ 본 실험에 사용된 4 개의 RUE 35 DHL 은 롤러 리이어 가이던스이고 운동방향으로 스크레이퍼가 부착되었으며 그리이스 윤활방식을 채택하여 약 2000 m 의 주행 후에 마찰력을 측정하였다. 본 연구에 사용된 리니어모터의 자기력은 14600 N (부록 Table 1 참조)이고 프라이머리 파트를 포함한 운동부의 중량은 172 kg (1687 N)이다. 즉 수직력은 16287 N (운동부 당 4072 N)이고, 이 때의 생산회사에 의해 주어진 마찰계수는 속도 범위 1 ~ 2 m/s 에서 0.0045 ~ 0.0052 이다.⁽¹⁰⁾

Fig. 9 에서 보는 바와 같이 마찰력과 마찰열은 리니어모터의 이송속도에 비례하여 증가한다. 마찰력은 운동이 시작됨과 동시에 약 112 N 에 이르고 속도에 비례하여 점진적으로 증가한다. 마찰열은 마찰력과 속도의 곱이며 속도에 선형적으로 비례한다. 리이어 가이던스의 마찰열을 리니어모터의 전기손실과 비교하면 이송속도 60 m/min 의 경우 약 118 W 가 되어 정격전류시의 최대 전기손실 2620 W 에 비해 낮고 무시할 수 있다. 즉 리니어모터가 리이어 가이던스와 조합되어 공작기계의 이송장치로 사용되었을 때, 주 주열원은 모터의 전기손실이며; 리이어 가이던스 상에서의 마찰열은 무시할 수 있다. 본 연구의 FEM 모델링 과정에서 이 마찰열은 열원으로 고려하지 않는다.

3.2.2 냉각기수관 내의 열대류계수

리니어모터에서 발생한 열을 밖으로 방출하고 모터를 과열로부터 보호하기 위하여 프라이머리 파트와 테이블 사이에 냉각기를 설치한다. 냉각기

는 내부에 설치된 수관에 흐르는 물에 의하여 모터를 냉각시키는데, 이 때 방출된 열은 다음 식 (8)으로 구할 수 있다.⁽¹⁷⁾

$$\dot{Q} = \alpha_m A \Delta \theta_{in} \quad (8)$$

여기서 α_m 은 평균열대류계수, A는 관 내의 대류면적, $\Delta \theta_{in}$ 은 수관벽과 물의 대수평균 온도차이며 식 (9)와 같이 정의된다.⁽¹⁷⁾

$$\Delta \theta_{in} = \frac{(\theta_{Wout} - \theta_{Fout}) - (\theta_{Win} - \theta_{Fin})}{\ln \frac{\theta_{Wout} - \theta_{Fout}}{\theta_{Win} - \theta_{Fin}}} \quad (9)$$

여기서

θ_{Fin} 물의 유입온도 [°C]

θ_{Win} 유입구의 관벽온도 [°C]

θ_{Fout} 물의 유출온도 [°C]

θ_{Wout} 유출구의 관벽온도 [°C]

관내에서 흐르는 물에 의하여 방출된 열은 다음과 같이 식 (10)에 따라 계산된다.

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p (\theta_{Fout} - \theta_{Fin}) \quad (10)$$

식 (8)과 (10)은 동일하고 수관 내의 평균열대류계수(Mean convection coefficient)는 다음 식 (11)에 의해 결정된다.

$$\alpha_m = \frac{\dot{m} c_p (\theta_{Fout} - \theta_{Fin})}{A \Delta \theta_{in}} \quad (11)$$

측정된 수관과 유입구와 유출구의 물의 온도차에 의해 수관 내의 평균열대류계수를 식 (11)에 따라 구할 수 있다. Fig. 10은 온도측정과 계산에 의해서 구한 냉각기의 대수평균 온도차와 평균대류계수를 나타내고 있다.

Fig. 11은 FEM 모델링 과정에서 냉각기의 경계조건으로 입력되는 평균열대류계수 α_m 과 모델링하는 수관부위의 물의 온도이다. 냉각기 내의 물

의 온도상승은 관의 길이에 따라 직선적으로 비례하는 것으로 간주한다.

3.2.3 실험장치로부터 공기로의 열전달계수

열원인 리니어모터로부터 발생한 열은 열대류나 복사에 의해 주변공기로 그리고 냉각기에 의해 외부로 방출된다. 공기로 방출되는 열대류의 형태는 리니어모터의 정지시에는 자연대류에 의해서 그리고 직선이송운동시에는 강제대류에 의해서 일어난다.

● 리니어모터의 정지 시

자연대류에 의한 열전달계수는 다음과 같이 정의된다.⁽¹⁸⁾

$$Nu = \frac{\alpha_c \cdot l}{\lambda} \quad (12)$$

여기서 Nu는 무차원의 Nusselt 수, λ 는 공기의 열전도계수 [W/mK], l은 흐름의 길이[m]이다. 또한 Nusselt 수 Nu는 Grashof 수 Gr과 Prandtl 수 Pr의 함수이고, Gr과 Pr은 각각 다음과 같이 정의된다.

$$Nu = K \cdot (Gr \cdot Pr)^n \quad (13)$$

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot (\theta_w - \theta_f) \cdot l^3}{v^2} \quad (14)$$

$$Pr = \frac{v \cdot c_p}{\lambda} \quad (15)$$

식 (13), (14), (15)에서 K와 n은 열대류가 이루어지는 면의 기하학적 형상에 따라 결정되는 상수이고, β 는 공기의 열팽창계수 [K^{-1}], g는 중력가속도 [m/s^2], v는 공기의 동점성계수 [m^2/s], θ_w 는 구조물의 온도 [°C], θ_f 는 공기의 온도 [°C], c_p 는 공기의 비열[J/kg K]을 나타낸다. 자연대류에 의하여 공기로 전달되는 열은 다음과 같이 구해진다.

$$\dot{Q}_c = \alpha_c \cdot A \cdot (\theta_w - \theta_f) [W] \quad (16)$$

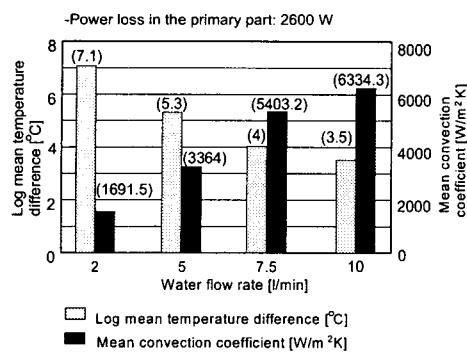


Fig. 10 Log mean temperature difference and mean convection coefficient in the cooler

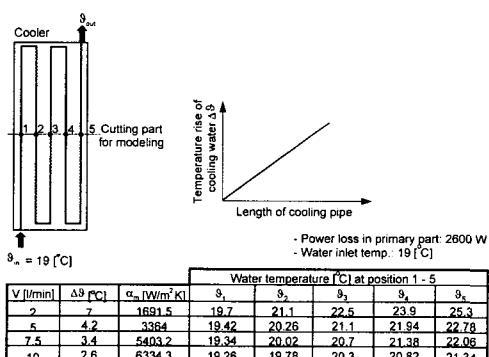


Fig. 11 Boundary conditions in the cooler

리니어모터의 속도에 관계없이 구조물에서 공기로 열복사가 발생하며, 이 복사량은 구조물과 공기의 온도 그리고 구조물의 표면상태에 따라 달라지고 다음과 같이 표시된다.

$$\dot{Q}_r = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_w^4 - T_f^4) [W] \quad (17)$$

식 (17)에서 ε 는 복사계수이며 완전 흑체의 경우 그 값이 1이고 실제물체의 경우 1 보다 작다. 본 실험에 사용된 리니어모터와 구조물은 흑색으로 도장되어 있고 이 경우 $\varepsilon=0.97$ 이다.⁽¹⁸⁾ σ 는 Stefan-Bolzmann 상수로써 그 값은 $5.67 \cdot 10^{-8} [W/m^2 K^4]$ 이고 식 안의 온도는 절대온도를 의미한다. 식 (17) 를 다른 형식으로 쓰면,

$$\dot{Q} = \alpha_r \cdot A \cdot (\theta_w - \theta_f) [W] \quad (18)$$

이고 α_r 은 복사에 의한 열전달계수로서 다음과 같이 표시된다.

$$\alpha_r = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_w^3 + T_w^2 T_f + T_w T_f^2 + T_f^3) \quad (19)$$

실제적인 열해석에서 열대류와 열복사의 계수를 합하여 계산하면 간편해지며 구조물의 표면에서 공기로의 열전달계수와 열량은 다음과 같이 표시된다.

$$\alpha_{ctr} = \alpha_c + \alpha_r \quad (20)$$

$$\dot{Q}_{ctr} = \alpha_{ctr} \cdot A \cdot (\theta_w - \theta_f) [W] \quad (21)$$

● 리니어모터의 직선운동 시

리니어모터가 직선 운동할 때 구조물의 표면에서는 자연대류 대신에 강제대류가 발생하며 열대류계수는 속도에 의존하고 식 (13)의 Nusselt 수는 다음 식으로 표시되고,

$$Nu = f(Re, Pr) \quad (22)$$

Re 는 Reynolds 수로써 다음과 같이 정의된다.

$$Re = \frac{v \cdot l}{\nu} \quad (23)$$

식 (23)에서 v 는 리니어모터의 속도 [m/s], ν 는 공기의 동점성계수 [m^2/s], l 은 리니어모터의 길이 [m]를 나타낸다. Reynolds 수로써 층류가 난류로 변화되는 임계점을 나타낼 수 있는데 대류가 일어나는 구조물의 형상과 표면상태에 따라 달라지고 공기와 접촉하는 평판의 경우 $R_{crit} = 5 \cdot 10^5$ 이다.⁽¹⁸⁾ 직선 운동하는 리니어모터의 구조물은 평판이고 층류유동의 경우 Nusselt 수는 다음과 같다.

$$Nu_{lam} = 0.664 \sqrt{Re} \cdot \sqrt{Pr} \quad (24)$$

난류유동의 경우는 다음과 같이 표시할 수 있다.⁽¹⁸⁾

$$Nu_{turb} = \frac{0.037 Re^{0.8} \cdot Pr}{1 + 2.443 Re^{-0.1} \cdot (Pr^{2/3} - 1)} \quad (25)$$

실제의 많은 경우에 있어서 평판의 끝 단의 영

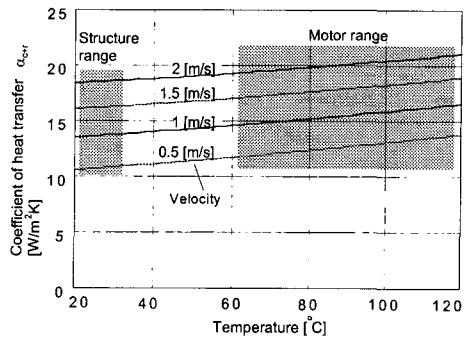


Fig. 12 Coefficient of heat transfer by linear motor

향과 유체의 깨어진 층으로 인하여 전 길이에 걸쳐 층류가 형성되는 경우는 드물고, Krischer 와 Kast 에 의해 고안된 공기가 유체인 경우 다음과 같은 층류와 난류의 평균값이 사용된다.⁽¹⁹⁾

$$Nu_{l,t} = \sqrt{Nu_{lam}^2 + Nu_{turb}^2} \quad (26)$$

따라서 리니어모터의 직선운동시의 강제대류에 의한 열전달계수는 식 (12)를 다시 쓰면 다음과 같다.

$$Nu_{l,t} = \frac{\alpha_c \cdot l}{\lambda} \quad (27)$$

리니어모터의 직선운동 시의 열복사는 정지 시의 경우와 동일하다. Fig. 12 는 속도에 따른 리니어모터와 구조물의 표면에서의 강제대류와 열복사에 의한 열전달계수를 나타내고 있다.

그럼에서 보여주는 바와 같이 열전달계수 α_{ctr} 는 구조물의 온도와 속도에 따라 증가한다. 구조물의 열전달계수는 $11 \sim 18 W/m^2K$ 그리고 리니어모터 표면에서의 열전달계수는 $13 \sim 21 W/m^2K$ 이다. 종합적으로, 리니어모터와 운동하는 구조물로부터 공기로의 열전달계수는 낮은 편이며, 예를 들어 리니어모터가 $1.5 m/s$ 의 고속직선운동을 할지라도 열전달계수는 $20 W/m^2K$ 이하가 된다. 회전모터의 경우에는 모터가 정격전류 하에서 회전하게 되면 모터자체 내에서 공냉효과(Ventilation effect)가 있으나, 리니어모터의 경우는 자체 내의 냉각효과가 없기에 공냉을 기대할 수 없고 반드시 수냉이나 유냉을 통하여 내부에서 발생한 열을 외부로 방출해야만 한다.

Fig. 13 에는 실험장치의 경계조건을 보여준다. 모델링에 필요한 경계조건은 열전달계수 α_{ctr} 와 공기의 온도이다. 열전달계수 α_{ctr} 는 정지시와 속도 $1 m/s$ 로 운동할 경우 본 절에서 해석한 과정에 따라 계산한 결과를 나타내었다. 주변의 공기온도는 $20 ^\circ C$, 모터와 구조물 사이 ②와 ⑤ 그리고 프라이머리 파트와 세컨더리 파트 사이의 공기간극 ③

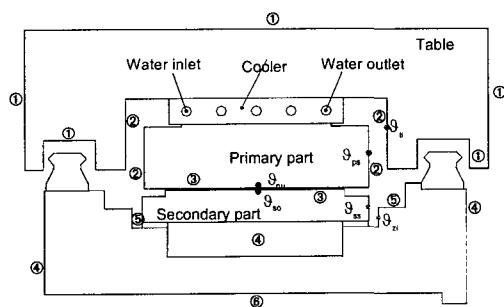
의 공기온도는 측정된 두 벽 온도의 평균값을 취하였다. 이것은 모델링을 위해 절취한 부분이 리니어모터의 중간 부위이고, 본 실험장치의 이송길이가 리니어모터의 길이보다 짧아 리니어모터와 주변구조물 사이에 높은 공기온도가 형성되기 때문이다. 또한 위치⑥은 열대류가 아니라 열전도에 의해 베드로 열이 전도되는 부분이기에 등가열전달계수 α_{equi} 를 구하여 경계조건을 정할 수 있다.

즉,

$$\dot{Q} = \lambda A (\vartheta_0 - \vartheta_{\text{earth}}) / h = \alpha_{\text{equi}} A (\vartheta_0 - \vartheta_{\text{sur}})$$

$$\Rightarrow \alpha_{\text{equi}} = \lambda / h \quad (28)$$

식 (28)에서 λ 는 베드의 열전도계수로써 45 W/mK이고, A는 ⑥의 열흐름의 면적, h는 베드의 높이로 약 1.05 m이다. ϑ_{sur} 와 ϑ_{earth} 은 공기와 베드가 고정된 바닥의 온도로써 20 °C로 동일하다. 식 (28)에 의하여 등가열전달계수 α_{equi} 를 구하면 43 W/m²K가 된다.



Heat transferred surface	Heat transfer coefficient α_{ctr} [W/m ² K] in stoppage / motion with $v=1$ m/s*	Surroundings temperature [°C] in nominal current and water cooling
①	9/13*	20
②	$14/16^*$	$65: \left(\frac{\vartheta_{\text{pi}} + \vartheta_{\text{hi}}}{2} \right)$
③	$12/15^*$	$45: \left(\frac{\vartheta_{\text{pu}} + \vartheta_{\text{so}}}{2} \right)$
④	8	20
⑤	9.5	$25: \left(\frac{\vartheta_{\text{is}} + \vartheta_{\text{zi}}}{2} \right)$
⑥	43	20

Fig. 13 Boundary conditions on the experimental set-up

4. FEM에 의한 계산결과

4.1 프라이머리 파트와 테이블의 온도

Fig. 6의 FEM 모델에 식 (7)에서 구한 열원 그리고 Fig. 11과 Fig. 13의 경계조건을 써서 온도분포곡선을 구할 수 있다. Fig. 14에는 프라이머리 파트의 열손실이 2600 W, 냉각기에 유입되는 수량이 10 l/min, 유입온도 19 °C 일 때의, 프라이머리 파트와 테이블의 y-z 단면에서 등온곡선이다. 모터나 구조물로부터 공기로의 열전달은 리니어모터가 1 m/s의 속도로 이송 운동할 경우에서 계산하였다. 그림에서 보여주는 바와 같이 권선의 중앙부에서의 온도는 약 95.5 °C, 테이블의 상부중앙에서는 24.3 °C 그리고 철심내의 온도는 25 ~ 65 °C에 이르고 있다.

계산된 등온선이 보여주는 바와 같이, 테이블과 철심의 상부는 수냉에 의하여 충분히 냉각되나, 슬롯 사이의 철심하부는 충분히 냉각되지 않는다. 또한 슬롯내의 권선은 수냉에도 불구하고 거의 냉각되지 않는데, 이것은 방향에 따라 큰 차이를 가진 권선의 물성에 기인하기 때문이다. 즉 슬롯내의 단열재와 권선의 y, z 방향으로의 낮은 열전도계수로 인하여 권선과 철심사이에 큰 열저항과 더불어 온도차가 생긴다. 그리하여 슬롯 내에 조밀한 등온곡선이 생기고 냉각기를 설치하여도 열원인 권선은 충분히 냉각되지 않는다. 반면에 철심의 z 방향으로의 열전도계수는 약 48 W/mK으로 열이 냉각기로 잘 흐르게 된다.

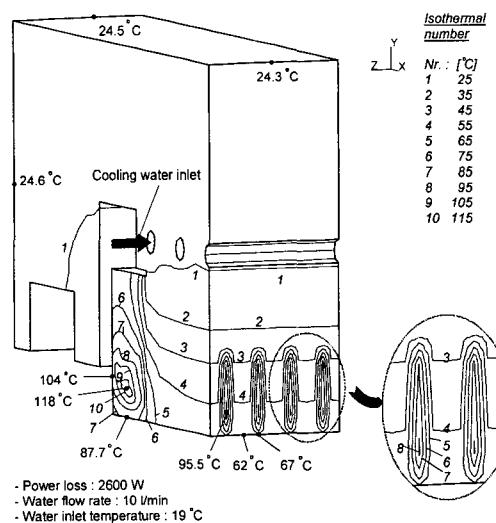


Fig. 14 Isothermal lines in the primary part and machine table

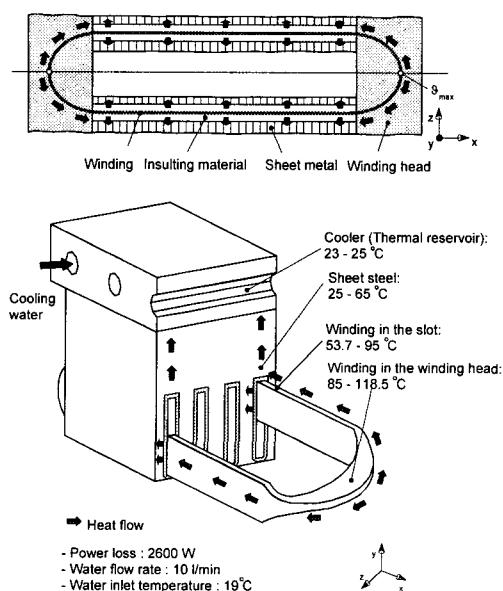


Fig. 15 Heat flow in the primary part and machine table

FEM 계산에 의한 온도분포곡선에 기초하여 프라이머리 파트 와 테이블 내의 열의 흐름을 Fig. 15 에 나타내었다. 3 권선 내의 손실열과 온도분포는 동일하기에 한 권선의 열 흐름만을 나타내었다. 권선머리부위의 권선에서 발생한 열은 권선을 따라 냉각기가 있는 철심부위로 흐른다. 그 이유는 에폭시 레진의 자체 내에 냉각기능이 없고 권선을 싸고 있는 에폭시 레진의 낮은 열전도계수로 인하여 에폭시 레진 내로의 열흐름은 거의 없고, 상대적으로 높은 열전도계수를 가진 권선의 x 방향으로 열흐름이 생긴다. 따라서 권선 내의 최고의 온도는 권선머리의 권선이 변곡되는 부분이며 그 온도는 약 118.5 °C에 이르고 있다.

권선 내에서 발생한 열은 온도가 낮은 철심 부위로 흐르고, 슬롯 내의 단열재를 지나 냉각기가 설치된 상부로 흘러 결국 외부로 방출된다. 프라이머리 파트를 구성하는 각 부품 내의 온도분포를 보면 열원인 권선의 권선머리부위에서의 온도는 85 ~ 118.5 °C, 슬롯부위에서의 온도는 53.7 ~ 95 °C, 철심의 온도는 25 ~ 65 °C 이르고, 냉각기의 온도는 23 ~ 25 °C이다.

리니어모터가 공작기계의 이송장치로 적용될 때 위치정밀도에 영향을 미치는 방향은 테이블의 이송방향으로의 열변위이다. 온도 해석에 의한 결과로 테이블의 이송방향으로의 위치변위를 계산할 수 있다. 본 연구에 사용된 리니어모터의 길이는 650 mm(부록 Table 1 참조)이고 정격전류 하에서

10 l/min로 수냉시에 온도상승으로 인한 테이블의 열변위는 다음과 같이 계산된다.

$$\delta = \varepsilon \cdot \left(\frac{1}{2}\right) \cdot \Delta \theta = 11.5 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{650}{2}\right) \cdot 4.3 = 16 \mu\text{m} \quad (29)$$

식 (29)에서 ε 은 강의 열팽창계수, $\Delta \theta$ 은 주변온도 20 °C를 기준으로 한 테이블 중앙의 온도상승 그리고 1은 테이블의 길이이며 이송방향에서 양방향으로 구속이 없이 열변위가 발생하기에 위치제어에 영향을 주는 것은 절반길이의 변위 값에 해당한다. 이 16μm의 열변위는 고속정밀 이송계로써 볼스크류 시스템에 비해 큰 편이 아니다. 즉, 리니어모터 자체의 열원은 크지만 수냉을 하였을 때 테이블의 열변위는 그다지 크지 않다. 본 연구에 사용된 고속·중저작용 리니어모터의 경우 모터로부터 테이블로의 단열 또는 구조변경을 통하여 테이블의 온도상승과 열변위를 16μm 이하로 충분히 감소시킬 수 있다.⁽⁸⁾

4.2 세컨더리 파트와 베드의 온도

이미 언급한 바와 같이 동기식 리니어모터의 열원은 프라이머리 파트의 밀면에서 공기간극을 통해 세컨더리 파트의 상부로 전달되는 열이다. 정격전류 상태에서 프라이머리 파트의 철심밀면의 온도는 약 65 ~ 80 °C 그리고 권선머리 밀면의 온도는 약 90 °C에 이르고, 열전달계수는 정지시 12 ~ 13 W/m²K, 0.5 ~ 1.5 m/sec의 속도로 운동시 13 ~ 18 W/m²K이다.

예를 들면 프라이머리 파트가 1 m/sec의 속도로 전 길이의 세컨더리 파트 상에서 직선운동을 한다고 할 때에, 실험에 사용된 세컨더리 파트 상부의 면적은 0.18 m², 열전달계수 15 W/m²K, 프라이머리 파트 하부온도 약 75 °C, 세컨더리 파트 20 °C 일 때, 세컨더리 파트에 전달된 열은 다음과 같이 계산된다.

$$Q = \alpha \cdot A \cdot \Delta \theta = 15 \cdot 0.18 \cdot (75 - 20) = 150 \text{ W} \quad (30)$$

Fig. 16 는 세컨더리 파트 상부에 전달된 열이 150 W 일 경우 FEM에 의해 계산한 온도분포이다. 세컨더리 파트의 온도는 26 ~ 27 °C 그리고 베드의 온도는 24 ~ 25 °C에 이르고 있다. 본 결과가 말해주는 것은 동기식 리니어모터의 세컨더리 파트가 자체 내에 무시할 만한 열원을 가진다 할지라도, 주 열원인 프라이머리 파트로부터 전달된 열에 의해 충분히 가열될 수 있다는 것이다. 따라서 리니어모터를 정밀고속공작기계에 적용할 경우 프라이머리 파트뿐 아니라, 세컨더리 파트도 합리적인 냉각방법을 강구해야 한다.

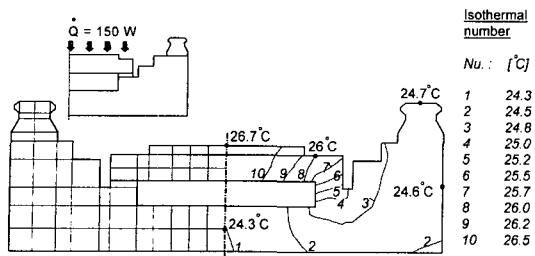


Fig. 16 Isothermal lines in the secondary part and machine bed

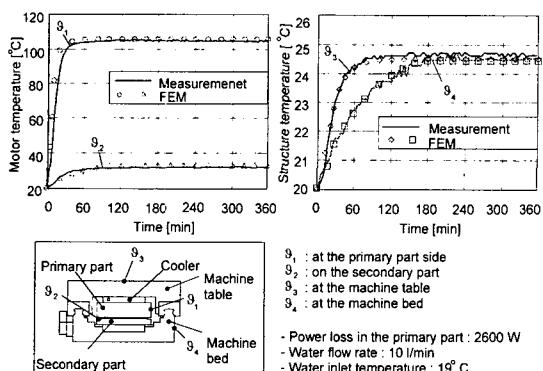


Fig. 17 Comparison between measuring value and FEM calculation

5. FEM 계산과 실험치의 비교

위의 FEM에 의한 계산치와 온도센서에 의한 측정값을 비교한다. 온도측정에는 플라틴(PT 100) 금속저항 센서가 사용되었으며, 이 온도 센서는 측정 범위 $-220 \sim 750^{\circ}\text{C}$ 사이에서 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 의 오차한계를 가지고 있다.⁽²⁰⁾ 온도를 측정하는 구조물과 센서 사이의 열저항을 줄이고 열전도를 높이기 위해 열전도제를 첨가하였다. 측정한 온도는 병렬 인터페이스를 통하여 PC에 저장되었다. Fig. 17는 정격전류에서 프라이머리 파트의 열손실이 2600 W, 냉각기의 유량 10 l/min 그리고 유입온도가 19°C 일 때의 측정값과 계산값을 비교한 것이다.

프라이머리 파트의 측면은 측정치와 계산치 모두 약 105°C , 세컨더리 파트의 상부는 약 27°C , 테이블의 중앙상부에서는 24.5°C 그리고 베드의 측면은 24.6°C 의 온도를 보여주고 있다. 온도가 정상상태에 이르는 온도시간상수는 열원인 프라이머리 파트의 측면에서 약 30 분, 세컨더리 파트의 상면에서 약 60 분, 테이블의 상면에서 약 120 분 그리고 베드의 측면에서 약 180 분에 이르고 있다. 리니어모터를 공작기계의 이송장치로 적용할 경우

모터자체와 주변구조물 간의 큰 온도차 그리고 온도시간 상수차를 보인다. 측정치와 FEM에 의한 계산치는 비교적 잘 일치함을 보여준다.

본 연구에서 제시된 FEM 모델링은 그 대상이 철손이 거의 없고 열손실이 권선내의 오음저항손실에 국한되는 동기식 리니어모터로 제한된다. 손실동력과 수관내의 평균열대류계수 α_m 그리고 냉각수의 온도상승 $\Delta\theta$ 의 정확한 측정은 신뢰성 있는 FEM 해석의 전제조건이 된다. 이 외에도 모터의 본체를 구성하는 철심, 권선 그리고 단열재의 실제적인 물성이 필요하다. 해석에 의해서 구해지는 공기로의 열전달계수도 리니어모터의 온도분포에 적지 않은 영향을 미친다. 권선 내의 온도는 상당히 높고 재료의 물성, 열원 그리고 냉각조건에 의해서 민감하게 변하기에 권선에 부착된 온도센서에 의해 CNC 제어기에서 읽어지는 측정온도와 FEM에 의한 계산된 결과의 비교는 필수적이다. 이와 같은 사항을 고려하여 본 연구에서 시도된 방법은 다른 생활회사나 크기의 동기식 리니어모터 열해석을 위한 일반적인 자료로 사용될 수 있다. 본 자료는 여기에 소개된 리니어모터의 열특성의 해석뿐 아니라, 궁극적으로 냉각기의 형상, 모터의 구조변경 그리고 단열재의 사용과 같은 방법을 통하여 리니어모터의 열특성을 최적화하는 효과적인 도구로써 사용될 수 있다.⁽⁸⁾

6. 결 론

본 연구는 고속·중저속 이송장치로 적합한 동기식 리니어모터의 열특성을 유한요소법(FEM)을 사용하여 해석하였다.

연구에 사용된 리니어모터의 열원은 프라이머리 파트의 권선 내에서의 오음저항손실로써 약 2600 W에 이르고, 리이어 가이던스의 마찰열은 60 m/min의 속도에서 118 W가 되어 전기손실에 비해 무시할 수 있다. 프라이머리 파트는 수냉각에도 불구하고 권선이 가지는 정방성의 물성으로 인하여 충분히 냉각되지 않는다. 또한 권선머리는 예전시 레진의 낮은 열전도계수 때문에 정격전류 하에서 100°C 이상의 높은 온도를 보이고 있다. 세컨더리 파트는 자체의 열원은 적으나 프라이머리 파트로부터 공기간극을 통하여 전달되는 열로 인하여 $26 \sim 27^{\circ}\text{C}$ 의 온도를 보이기에 프라이머리 파트뿐 아니라 세컨더리 파트도 열특성의 향상이 필요하다. FEM 계산결과는 리니어모터 내부의 열흐름을 잘 보여주고 있으며 측정치와 잘 일치한다.

본 연구에서 소개된 FEM 모델링은 모터의 전기손실이 철손은 거의 없고 권선 내의 오음저항손실인 동기식 리니어모터의 열해석에 유용하게 사용될 수 있다.

참고문헌

- (1) Weck, M., 1995, *Werkzeugmaschinen Fertigungssystem*, Band 3.2, VDI-Verlag, Düsseldorf, pp. 79~82.
- (2) Sogabe, M., 1994, "High speed machining and linear motor," 6th IMEC.
- (3) Pritschow, G., Philipp, W., 1990, "Direct Drives for High-Dynamic Machine Tool Axes," *Annals of the CIRP*, Vol. 39, No. 1, pp. 413~416.
- (4) Eversheim, W., Klocke, F., Pfeifer, T., Weck, M., 1999, *Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik*, AWK Aachner Werkzeugmaschinen-Kolloquium, pp. 338~348.
- (5) Choi, J.-T., Hong, G.-S., Kim, J.-W., Kim, J.-S., 1999, "Control of Linear Motor Machine Tool Feed Drives for End Milling: Robust MIMO Approach," *KSME International Journal*, Vol. 13, No. 10, pp. 727~737.
- (6) Geras, J. F., Piech, Z. J., 2000, *Linear synchronous motors*, CRC Press, Boca Raton, pp. 256~263.
- (7) Eun, I.-U., 2000, "Positioning Technology by Linear motor," *Journal of Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 17, No. 12, pp. 20~25.
- (8) Eun, I.-U., 1999, Optimierung des thermischen Verhaltens von elektrischen linearmotoren für den Einsatz in Werkzeugmaschinen, *Dissertation*, RWTH Aachen, pp. 21~31.
- (9) 1999, Information sheet, Krauss Maffei.
- (10) 1998, Catalog and information sheet, Firm INA.
- (11) 2001.1.5, Information of the Firm Heidenhein, <http://www.heidenhein.com>.
- (12) 1998, LAF050-121 Linearmotoren, Indramat.
- (13) Gerbert, K., 1997, Ein Beitrag zur thermischen Modellbildung von Schnelldrehenden Motorspindel, *Dissertation*, TH-Darmstadt, pp. 109~128.
- (14) Henneberger, G., 1992, *Elektrische Maschinen 3*, RWTH Aachen, pp. 201~203.
- (15) Forkmann, H., 1957, "Die resultierende Wärmeleitfähigkeit getränkter Wicklungen aus Runddraht mit Lackisolation," *Deutsche Elektronik* 12, pp. 533~535.
- (16) 1996, I-DEAS Master series 3, onWord Press.
- (17) Incropera, F. P., DeWitt, D. P., 1996, *Fundamentals of heat and mass transfer*, 4th. edition, John Wiley & Sons, New York, pp. 586~590.
- (18) Holman, J. P., 1981, *Heat Transfer*, McGraw-Hill, New York.
- (19) Krischer, O., Kast., W., 1978, *Die wissenschaftliche Grundlagen der Trocknungstechnik* 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin.
- (20) Weck, M., 1992, *Werkzeugmaschinen Fertigungssystem*, Band 4, VDI-Verlag, pp. 86~88.

부 록

Table 1 Technical data of the used linear motor
(* with water cooling)

Technical item	Value
Continuous force (N)*	3200
Maximum force (N)	7000
Magnetic attraction (N)	14600
Continuous velocity (m/min)	90
Maximum velocity (m/min)	170
Nominal current (A)	22.6
Maximum current (A)	57
Force constant (N/A)	141
Mass of primary part (kg)	30
Mass of secondary part (kg/m)	33
Length of primary part (mm)	650
Maximum power loss in primary part (W)	2600
Maximum power loss in secondary part (W)	20
Air gap (mm)	1.5