

단열에 의한 동기식 리니어모터의 열특성 향상

은인웅*

Improvement of the Thermal Characteristics of Synchronous Linear Motors Through Insulation

In-Ung Eun*

ABSTRACT

Linear motors can drive a linear motion without intermediate gears, screws or crank shafts. Linear motors can successfully replace ball lead screw in machine tools because they have a high velocity, acceleration and good positioning accuracy. On the other hand, linear motors emit large amounts of heat and have low efficiency. In this paper, heat sources of a synchronous linear motor with high velocity and force are measured and analyzed. To improve the thermal characteristics of the linear motor, an insulation layer with low thermal conductivity is inserted between cooler and machine table. Some effects of the insulation layer are presented.

Key Words : Machine tools (공작기계), Feed mechanism (이송장치), Synchronous linear motor (동기식 리니어모터), Thermal characteristics (열특성), Insulation (단열)

기호설명

- C_{thermal} = thermal capacitance
- R_{thermal} = thermal resistance
- k = force constant of linear motor
- ρ = density
- τ_{thermal} = thermal time constant
- λ = thermal conductivity
- ϑ = temperature

1. 서론

1990년대 초반부터 리니어모터가 공작기계의 이송장치로 적용된 후 해가 지날수록 EMO 나

JIMTOF 와 같은 국제공작기계전시회에서 리니어모터를 부착한 고속선반, 연삭기 그리고 머신닝센터는 출시 빈도는 높아지고 있다. 개발 초기의 유도식 리니어모터(Asynchronous linear motor)는 1994년을 기점으로 동기식 리니어모터(Synchronous linear motor)로 기술개발과 적용의 방향전환이 이루어졌고, 현재 공작기계의 고속 정밀 이송장치로 사용되는 모터는 대부분 동기식 리니어모터이다.⁽¹⁾

리니어모터(Linear motor)는 두 기본 요소인 Primary part(회전모터의 Stator 에 해당)와 Secondary part(회전모터의 Rotor 에 해당) 사이의 유도 기전력에 의해 모터 자체가 직선운동을 한다. 서보모터의 회전운동을 직선운동으로 변환시켜 주는 요소가 생략되기 때문에 리니어모터는 고속·고가속

* 2001년 9월 7일 접수

* 장원대학교 공작기계기술연구센터, 정회원

도의 직선운동이 가능하고 위치제어 정밀도가 높아 동작기계 이송계로써 볼스크류 시스템을 효과적으로 대체할 수 있다.⁽²⁾ 반면에 리니어모터는 낮은 효율과 함께 가동 중 나타나는 높은 발열문제가 약점이다. 그러나 리니어모터의 약점인 열특성이나 발열문제에 대해서 모터의 생산회사에 의해서 자료의 공개가 많이 제한되어졌고, 열문제에 대한 분석이나 열특성의 향상에 대한 자료는 극히 적은 실정이다. 독일 아헨공과대학의 동작기계연구소에서 상기 문제에 대한 연구가 1993-1999 기간에 활발히 이루어 졌으며^(3,4) 이를 기초로 하여 기존의 리니어모터의 열특성을 상당히 향상시킨 Prototype 동기식 리니어 모터가 독일 Krauss Maffei사와 Siemens 사에 의해 1998 년에 출시되었다.⁽⁵⁾

리니어모터를 고속 정밀 동작기계에 효과적으로 적용하기 위해서는 열원인 리니어모터로부터 주변 기계요소로의 열흐름을 감소시키기 위해 단열재를 사용하거나 냉각시스템의 구조를 변경하여 냉각효율을 높이기도 한다. 또한 Cooler 에 유입되는 냉각수의 온도나 유량 또는 냉각수의 흐름의 방향을 제어하는 기술도 가능하다.^(4,6)

본 연구에서는 고속 대추력을 보유한 동기식 리니어모터(Synchronous linear motor)를 동작기계의 이송계로 적용할 경우 열원의 분석과 함께 단열에 의한 열특성의 향상을 소개한다.

2. 사용된 리니어모터의 사양과 실험장치

2.1 리니어모터의 사양

본 실험에 사용된 리니어모터는 동기식 리니어모터(Synchronous linear motor)이다. 동기식 리니어모터란 기계적인 직선운동이 자기장과 동기인, 즉, 기계적인 운동속도가 이동하는 자기장의 속도와 동일한 모터의 한 구동방식이다.⁽²⁾ 동기식 리니어모터는 유도식 리니어모터에 비해 열손실이 적고 단위체적에서 나오는 힘의 밀집도가 높아 현재 출시되는 고속 대추력의 정밀공작기계의 이송장치로 많이 사용되고 있다.⁽⁷⁾

Table 1 에는 본 연구에 사용된 동기식 리니어모터의 기술적인 사양과 성능을 보여주고 있다. 수냉 시 연속추력은 3200 N 그리고 연속속도는 90 m/min 이다. 열특성에 직접 영향을 주는 전기손실은 Primary part 에서 2600 W 그리고 Secondary part 에서 20 W 이다. Linear guidance 상의 마찰열에 영

향을 주는 수직력으로 작용하는 자기력(Magnetic attraction)은 14600 N 이다. 또한 이송테이블의 길이와 동일하고 테이블의 온도상승으로 인하여 온도변위에 직접 영향을 미치는 Primary part 의 길이는 650 mm 이다. 이와 같은 사양의 리니어모터는 동작기계의 고속, 중절삭의 이송기구로 적합하다.⁽⁸⁾

Table 1 Technical data of the used synchronous 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
Length of secondary part (mm)	1300
Maximum power loss in primary part (W)	2600
Maximum power loss in secondary part (W)	20
Air gap (mm)	1.5

2.2 리니어모터의 실험장치

Fig.1 에는 사용된 실험장치를 보여주고 있다. 베드 위에 Secondary part 가 볼트로 고정되어 있고 Primary part 는 테이블과 함께 유도 기전력에 의해서 z-방향으로 직선이송운동을 한다. Primary part 와 테이블 사이에는 판형의 Cooler 가 설치되어 있어 내부의 Cooling pipe 내에 흐르는 물에 의하여 모터 내부에서 발생한 열을 외부로 방출하고 전체시스템을 일정한 온도로 유지되게 한다.

Primary part 와 Secondary part 사이에 작용하는 자기력(Magnetic attraction)을 흡수하고, 테이블의 고속이송운동을 가능하게 하기 위해 Linear guidance 를 사용한다. 위치측정센서를 테이블의 측면에 부착하고, 위치 속도 가속도 전류 전압 그리고 추력을 CNC-Controller 에 의해 제어한다. 이 외에도 Cooler 에 유입되는 수온과 유량을 조절하는

냉각시스템이 있다.

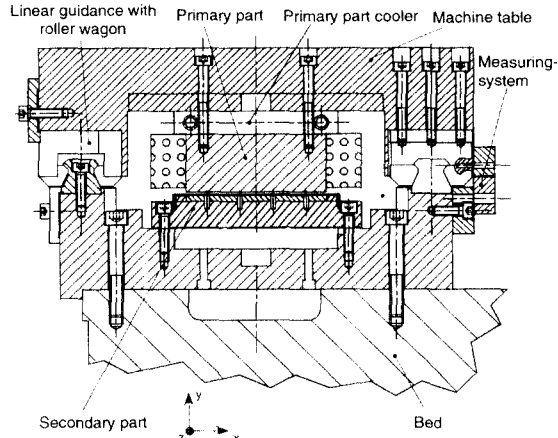


Fig. 1 Experimental set-up including linear motor

3. 리니어모터의 열원

리니어모터를 공작기계의 이송장치로 적용할 경우 2 개의 열원이 존재한다. 하나는 리니어모터의 작동 중 모터 내부 특히 Primary part 에서 발생하는 전기적인 손실열이고, 다른 하나는 Linear guidance 상에서 모터의 직선운동 중 발생하는 기계적인 마찰열이다.

3.1 리니어모터의 전기적 손실

다른 전기기계와 마찬가지로 리니어모터의 작동 중 전기적 손실에 의한 열이 발생한다. 이 전기적인 손실은 크게 권선 내의 전기저항에 의한 오옴저항손실과 철심에서 발생하는 철손(iron loss)으로 나눌 수 있으며, 철손은 다시 와전류(Eddy current loss) 손실과 이력손실(Hysteresis loss)로 나눌 수 있다.¹⁹⁾

동기식 리니어모터는 Secondary part 가 영구자석으로 되어 있어 유도식 리니어모터와는 달리 열손실이 거의 없고, 본 연구에 사용된 모터는 생산회사의 자료에 따르면 Secondary part 의 손실이 20 W 로 거의 무시할 수 있다. Primary part 의 손실은 정격전류에서 2600 W 이고 주열원이다.¹⁸⁾ 본 연구에서는 리니어모터가 위치제어 된 상태에서 힘을 연속추력의 범위에 상회하는 3300 N 까지 가하고 손실동력을 디지털 동력계로 직접 측정하였다(Fig.2). 리니어모터가 위치제어 상태에서 정지하고

있기에 기계적인 일은 하지않고 공급된 동력은 열손실로 소비된다.

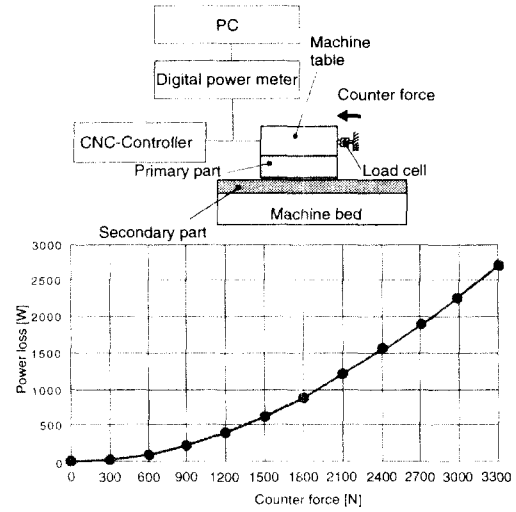


Fig. 2 Electrical power loss in the linear motor related to force

Fig.2 에서 보여주는 바와 같이 리니어모터에 작용하는 힘이 증가할수록 동력손실은 제곱에 비례하여 증가한다. 이것은 힘의 변화에 따라 CNC-Controller 가 공급하는 전류가 제어되고, 전류의 제곱에 비례해서 열손실이 가장 큰 오옴저항 손실이 증가하기 때문이다. 이 관계는 다음과 같다.

$$F=ki \tag{1}$$

$$P_{ohm} = i^2 R \tag{2}$$

식 (1), (2)에서 F 는 리니어모터에 작용하는 힘이며, i 는 전류, k 는 추력상수(Force constant, 단위 N/A)이며 본 연구에 사용된 리니어모터의 경우 141 N/A 이다(Table 1 참조). R 는 권선저항이다. 정격전류 하에서 연속추력 3200 N 에서의 동력손실은 약 2600 W 에 이르고 이것은 모터제조회사에서 제시한 Table 1 의 값과 거의 잘 일치하고 있었다.

3.2 Linear guidance 상의 마찰열

리니어모터가 정지하고 있을 경우 Linear guidance 상에서의 마찰열은 무시할 수 있으나 고속으로 이송운동하는 경우 마찰열을 무시할 수 없다. 리니어모터의 적용 시 Linear guidance 상에서의 마찰력은 이송속도와 더불어 수직력을 직접 결정하는 Primary part 와 Secondary part 사이에 작용하는

자기력(Magnetic attraction)이다. Fig.3 에는 스크레이퍼가 부착된 4 개의 Linear wagon 을 사용하고, 그리이스 윤활을 하였을 때의 이송속도에 따른 마찰력의 변화를 나타내고 있다. Linear guidance 에 작용하는 수직력은 모터의 자기력과 운동하는 요소의 중량의 합이며, 속도와 수직력에 의존하는 마찰계수는 Linear guidance 의 제조회사에서 제공한 값을 취하였다.⁽¹⁰⁾

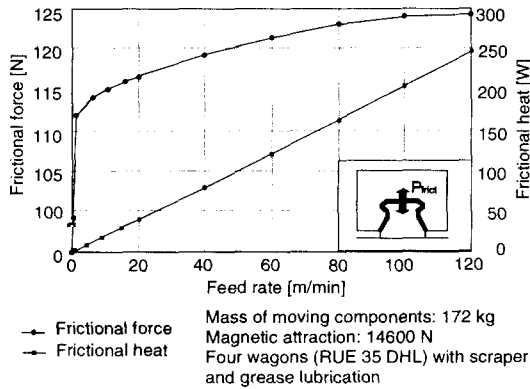


Fig. 3 Frictional heat on the linear guidance related to feed rate

마찰력은 정지상태로부터 이송운동이 시작되면서 비약적으로 증가하여 약 112 N 이 되며, 속도가 증가할수록 점진적으로 증가한다. 마찰열은 속도에 비례하여 직선적으로 증가하며 속도 60 m/min, 120 m/min 에서 각각 124 W 그리고 245 W 가 된다. 이 마찰열은 리니어모터 내부의 전기손실에 비하여 적은 값이며, 리니어모터가 정지상태에 있거나 저속의 경우 무시할 수 있다.⁽¹¹⁾

4. 온도측정

리니어모터에서의 온도측정을 위해 시스템을 구성하였다. 온도센서는 플라틴 PT100 의 금속저항센서를 사용하였으며 측정범위 -220-750 °C 에서 온도와 저항사이의 뛰어난 선형성을 가지며 ±0.3°C 의 오차범위를 가지고있다.⁽¹²⁾ 측정된 온도는 병렬 Interface 를 통하여 컴퓨터에 저장되고 분석을 위해 사용되었다. 온도측정은 리니어모터의 정지 및 운동 시 측정가능하며, 운동 시에는 온도측정을 위해 모터의 운동을 약 30 초간 정지하고

측정한다. Fig.4 는 정지상태에서 3200N 의 추력이 작용하고 2600W 의 손실동력이 발생할 경우 측정된 온도를 보여주고 있다. 냉각조건은 냉각수의 유량이 10 l/min 그리고 유입온도가 19 °C 이다. 측정 시 실험실의 대기온도는 약 20 °C 가 유지되도록 측정환경을 조절하였다.

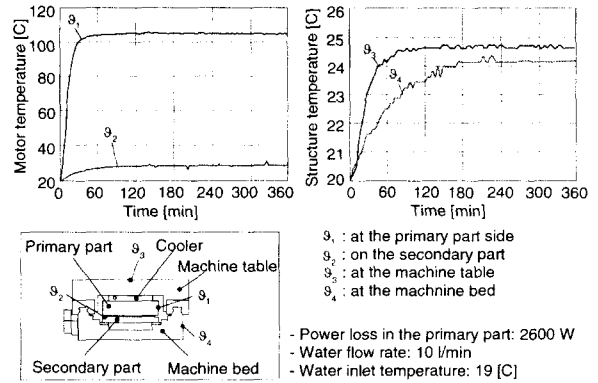


Fig. 4 Temperature on the linear motor and machine structure

Fig.4 에서 보는 바와 같이 정격전류로 작동하는 리니어모터는 수냉에도 불구하고 Primary part 의 경우 측면의 온도가 약 105 °C, Secondary part 의 경우 26 °C 에 그리고 테이블과 베드의 온도는 각각 24.6 °C 와 24.2 °C 에 이르고 있다. 온도분포는 리니어모터의 운전조건 그리고 냉각조건에 따라 다르나, 리니어모터는 열원으로써 100 °C 이상의 고온을 보이고 주변의 구조물들도 열원으로부터 열전도나 열대류 또는 열복사에 의해 가열되는 양상을 보이고 있다.

고속공작기계 테이블의 온도상승에 의한 열변위 중 이송방향(본 연구에서는 z-방향)으로 열팽창이 위치제어의 정밀도에 가장 큰 영향을 주고 중요하다. 리니어모터를 이송장치로 하는 공작기계는 테이블이 실제적으로 x-, y-, z-방향으로 부피팽창을 한다. 그러나 리니어모터의 구조상 z-방향으로의 변위가 가장 크고, 수냉을 하는 경우 온도상승이 적고 이 방향으로 테이블의 온도상승에 따른 열변위를 선형적으로 간주하여 간략하게 계산할 수 있다. 또한 z-방향으로는 열팽창을 구속하는 요소가 없어 이송방향으로 양 방향으로 팽창하나 위치제어 오차에 영향을 주는 것은 테이블 길이의

절반에 해당하는 길이의 온도팽창이다. 즉 정격전류와 Fig.4 에서 보인 냉각조건 하에서 테이블의 이송방향으로의 열변위는 다음과 같다.

$$\delta_L = \varepsilon \cdot \frac{1}{2} \cdot \Delta\theta = 11.1 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{650}{2} \cdot 5.6 \quad (3)$$

$$= 0.02\text{mm} = 20\mu\text{m}$$

식(3)에서 ε 은 강의 열팽창계수, l 은 Primary part(테이블의 길이, Table 1 참조), $\Delta\theta$ 는 냉각수 유입온도를 기준으로 한 테이블 중앙의 온도상승이다. 따라서 리니어모터를 고속 정밀 공작기계에 적용하기 위해서 열원인 리니어모터 자체를 더 효과적으로 냉각시키고, 또한 열원으로부터 테이블로 열전달을 저하시키는 시도가 필요하다. 이를 위해 Cooler 나 리니어모터 자체의 구조를 변경하여 냉각효과를 증대시키는 방법도 있고, 단열재를 사용하여 열원으로부터 테이블로의 열전달을 저하시키는 방법도 있다. 본 연구에서는 가장 간단하고 쉽게 적용할 수 있는 단열재를 사용한 열특성의 향상과 그 효과를 분석한다.

5. 열특성 향상을 위한 단열재의 적용

5.1 사용된 단열재의 물리적 특성과 배치

리니어모터를 사용한 이송계의 열특성을 향상시키기 위해 요구되는 단열재의 물리적 특성은 열전도계수가 낮아야 한다. 따라서 단열재를 열원인 리니어모터와 테이블 사이에 배열할 경우, 단열재는 열저항으로써 작용한다. 단열의 효과는 단열재의 열전도계수가 낮을수록 크다.

또한 단열재는 충분한 굽힘강성을 가져야 한다. 이송계로 사용되는 리니어모터는 절삭가공 중힘의 흐름선의 중심에 위치해 있기에 단열재의 사용으로 인하여 정. 동강성이 저하되지 말아야 한다.

Table 2 에는 본 연구에 사용된 단열재의 물리적 특성을 강과 비교하여 보여주고 있다. Table 2 에서 보여주는 바와 같이 사용된 단열재는 강에 비해 영계수(E)는 30 분의 1, 밀도(ρ)는 6 분의 1 이나 열전도계수(λ)는 225 분의 1 이어서 뛰어난 단열효과를 가지고 있다.

열특성의 시험에 앞서서 단열재를 삽입하고 테이블의 굽힘변형을 테스트하였고, 본 실험에 사용된 단열재의 사용으로 인해 테이블의 굽힘변형은 거의 무시할 수 있었다.

Table 2 Mechanical und thermal properties of the insulation layer and steel

Properties	Insulation layer	Steel	Insulation layer : Steel
E module E (N/mm ²)	7000	210000	1:30
Density ρ (kg/m ³)	1300	7800	1:6
Stiffness range σ (N/mm ²)	80-170	400-1300	1:2.3-16.3
Specific heat c_p (J/kg K)	1420	460	1:0.3
Thermal conductivity λ (W/m K)	0.2	45	1:225
Thermal expansion coefficient ε (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	20-40	11.1	1:0.3-0.6
Maximum temperature (°C)	110	-	-
Heat class	E	-	-

또한 단열재를 리니어모터에 적용할 때 그 배열에 주의하여야 한다. 리니어모터를 Cooler 와 조합하여 사용할 경우 단열재는 Fig.5 에서 보이는 바와 같이 Cooler 와 테이블 사이에 배치되어야 한다. 만일 단열재가 Cooler 와 Primary part 사이에 배열될 경우 리니어모터는 과열되고 열손상을 입게 된다. 본 연구에 사용된 단열재의 두께는 5 mm 이다.

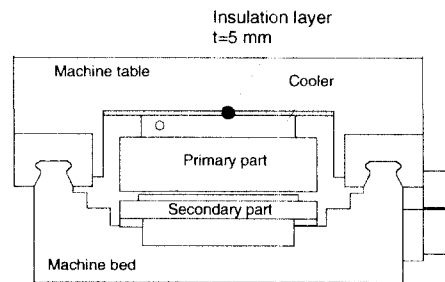


Fig. 5 Arrangement of the insulation layer

5.2 단열재의 효과

단열재를 Cooler 와 테이블 사이에 배치할 경우

의 효과를 알아보기 위해 본 연구에서는 동일한 냉각과 운전조건에서 단열재를 적용하였을 경우와 적용하지 않았을 경우의 온도를 측정하였다(Fig.6).

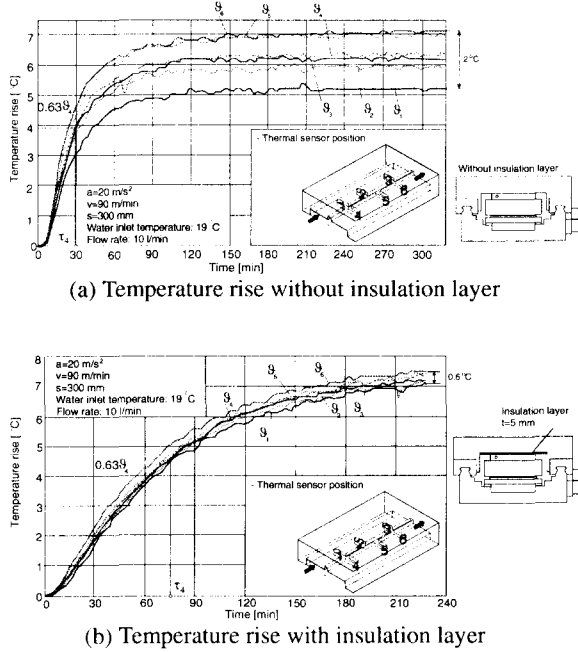


Fig. 6 Temperature rise without and with insulation layer

연속운전조건은 가속도 20 m/s^2 , 속도 90 m/min , 이송거리 300 mm 이며, 이때의 동력손실은 정격전류 시의 손실 2600 W 에 상응하도록 운전조건을 정하였다. 냉각조건은 냉각수의 유입온도는 $19 \text{ }^\circ\text{C}$ 그리고 유량 10 l/min 이다. 테이블과 Cooler 사이에서 보인 것처럼 홈을 파고 6 개의 온도센서를 부착하였다. 센서 1의 위치는 냉각수의 유입구에 근접하게 그리고 센서 6의 위치는 출구에 가깝게 설치하였다.

단열재를 설치하지 않았을 경우 냉각수의 유입구에 가까운 위치 1에서 $5.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 의 온도 상승 그리고 출구에 가까운 위치에서는 $7.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 에 가까운 온도상승을 보인다. 이 온도 상승치는 위치 1에서 6로 갈수록 커지는데, 이것은 냉각수의 온도 상승으로 인해서 테이블의 온도가 상승하기 때문이다. 따라서 리니어모터에서 발생한 열을 밖으로 방출하기 위해서 리니어모터의 생산회사에서 제공되는 환형 Cooler는 냉각수의 온도상승으로 인해 테이블의 온도차이와 불균일을 초래한다. Fig.6의 (a)에서 보인 것처럼 온도차이는 위치 1과 6 사이

에서 약 $2 \text{ }^\circ\text{C}$ 를 보인다. 그러나 (b)와 같이 단열재를 삽입할 경우 온도차이는 $0.6 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 줄어드는데 이것은 매우 중요한 효과이다. 왜냐하면 테이블의 온도차이는 곧바로 테이블의 뒤틀림으로 나타나고 이것은 이송계의 테이블로써 바람직하지 않기 때문이다.

그러나 단열재의 사용으로 인하여 테이블의 온도는 저하되지 않고 도리어 그림에서 보이는 것처럼 약간 상승하고 있다. 단열재를 사용하지 않았을 때는 온도상승이 $5.2 - 7.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 였으나, 단열재를 사용한 경우에는 $7.1 - 7.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 였다. 이와 같은 현상은 리니어모터를 적용한 시스템의 열평형과 열흐름의 해석으로부터 이해할 수 있다(Fig.7).

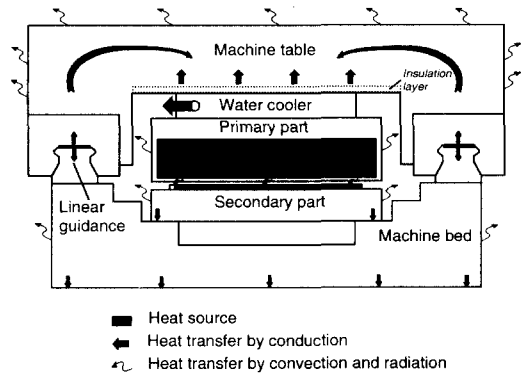
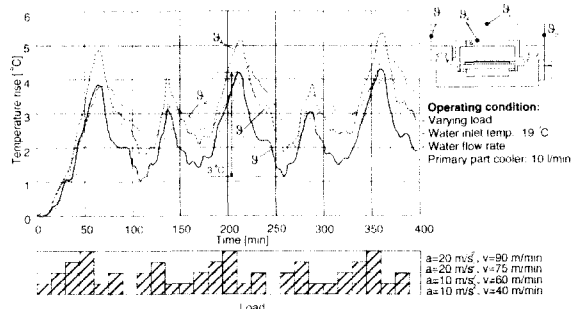


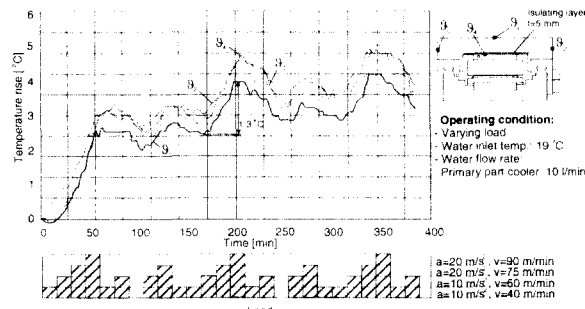
Fig. 7 Heat sources and transfer in the experimental set-up

Fig.7에서 보이는 바와 같이 테이블은 열원인 Primary part로부터 Cooler를 거쳐 열전도에 의해서, 또한 측면으로부터 열대류와 복사 에 의해서 그리고 Linear guidance로부터의 마찰열에 의해서 가열된다. 물론 테이블을 가열시키는 주열원은 Primary part로부터 열전도에 의한 것이나, 테이블의 내측면으로부터 열전달이나 마찰열도 무시할 수 없다. 그리하여 테이블의 양측면은 테이블 중앙보다 온도가 높은 경우가 많은데, Cooler 위에 단열재를 넣으면 테이블의 측면의 열을 Cooler가 흡수하지 못하여 도리어 테이블의 전체적인 온도가 상승한다. 즉 Cooler와 테이블 사이에 배열한 단열재는 테이블의 온도저하에 반드시 효과가 있는 것이 아니며, 온도저하의 효과는 시스템전체의 열평형에 영향을 주는 인자들, 즉, 모터의 전기손실, Linear guidance의 마찰열, 냉각수의 온도와 유량, 모터의 이송속도 그리고 대기의 온도에 의존한다.

Fig.6 에서 센서위치 4 에서의 열시정수(Thermal time constant) τ_t 를 보면 단열재를 사용하지 않았을 경우 약 30 분, 단열재를 사용하였을 경우 약 75 분이다. 열시정수는 한 시스템이 열평형상태에 이르는 온도의 약 63% 에 도달할 때까지 과도기의 시간이다. 열시정수는 공작기계시스템의 열안정성(Thermal stability)를 결정하는 중요한 성질이다. 단열재를 사용함으로써 테이블의 열시정수가 길어지고 열평형상태에 이르게 되는 시간이 길어진다. 즉, 단열재를 사용하여 테이블의 열시정수가 높아진 효과는 모터의 동력변동에 대하여 테이블을 열적으로 안정화 시키는데 유용하게 사용될 수 있다.



(a) Temperature fluctuation without insulation layer



(b) Temperature fluctuation with insulation layer

Fig. 8 Temperature fluctuation by varying load without and with insulation layer

리니어모터를 공작기계의 이송장치로 사용할 경우 절삭력의 변동이나 가 감속으로 인하여 모터의 동력은 수시로 변동하고, 모터의 손실동력은 Fig.2 에서 보인 바와 같이 힘의 제곱에 비례하여 증가한다. 또한 테이블은 열원인 모터와 불트로 직접 연결되어 있어서 모터에 작용하는 힘의 변화에 의하여 테이블의 온도는 수시로 변한다. Fig.8

에는 모터에 작용하는 힘의 변동에 따라 변동하는 테이블의 온도를 단열재의 사용 유무에 따라 비교하고 있다.

모터에 작용하는 힘의 변화는 속도와 가속도의 변화를 통하여 이루어졌고 그림에서 보는 바와 같이 1 단계는 $a=10 \text{ m}^2/\text{s}$, $v=40 \text{ m}/\text{min}$, 2 단계는 $a=10 \text{ m}^2/\text{s}$, $v=60 \text{ m}/\text{min}$, 3 단계는 $a=20 \text{ m}^2/\text{s}$, $v=75 \text{ m}/\text{min}$ 그리고 4 단계는 $a=20 \text{ m}^2/\text{s}$, $v=90 \text{ m}/\text{min}$ 이며, 각 단계에 따른 힘의 변화를 가시적으로 보이게 하기 위해 가로축에 박대의 길이로 표시하고 힘을 임의로 변화시켰다. 그림(a)에서 보여주는 바와 같이 단열재를 사용하지 않을 경우 힘의 변화에 따른 온도변화는 상당히 크고 테이블 중앙에서의 온도 θ_1 의 변동은 약 $3 \text{ }^\circ\text{C}$ 에 이르고 있다. 반면 (b)와 같이 단열재를 사용한 경우에는 동일한 모터의 힘의 변화에 대해서 테이블의 온도변동은 줄어들고 중앙에서의 온도변동은 약 $1.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 이다. 단열재의 사용으로 인해서 테이블의 열시정수가 상승하고 모터의 힘의 변화에 따른 테이블의 온도변동이 저하되는 것은 Table 3 에서 이해할 수 있다.

Table 3 Thermal resistance, capacitance and time constant of the insulation layer and steel

	Steel	Insulation layer	Steel : Insulation layer
Thermal resistance [$t/A\lambda$]	0.001	0.27	1:270
Thermal capacitance [ρVc_p]	1633	840	1:0.5
Thermal time constant [$(t/A\lambda) \cdot (\rho Vc_p)$]	1.63	227	1:139

Table 3 에서 사용된 단열재만을 고려하여 열시정수를 결정하는 열저항(Thermal resistance)과 열캐패시턴스(Thermal capacitance)를 크기에 따라 계산하고 강과 비교하였다. 즉, 열저항과 열캐패시턴스는 다음과 같이 정의되다.⁽¹³⁾

$$R_{\text{thermal}} = \frac{t}{A\lambda} \quad (4)$$

$$C_{\text{thermal}} = \rho Vc_p \quad (5)$$

식(4), (5)에서 t 는 단열재와 동일한 크기를 가진 강 의 두께 그리고 A 는 열이 통과하는 단면적 그리고 λ 는 단열재와 강의 열전도계수, ρ 는 밀도, V 는 체적, c_p 는 비열이다. 열시정수는 열저항과 열캐패시턴스의 곱이며 다음과 같다.

$$\tau_{\text{thermal}} = R_{\text{thermal}} \cdot C_{\text{thermal}} \quad (6)$$

열시정수는 열저항이나 열캐패시턴스의 증가할수록 커지고 환경의 온도 변화에 늦게 반응하며 열평형상태에 이르는 시간은 길어진다. Table 3 에서 보이는 바와 같이 단열재의 열저항은 강에 비해 270 배 크고 반면 열캐패시턴스는 오히려 강의 반이다. 단열재의 열시정수는 궁극적으로 열캐패시턴스가 아니라 열저항에 의해 지배되며 강에 비해 약 139 배 크다. 테이블의 열시정수는 위치에 따라 다르며 테이블의 재질과 질량에 크게 의존하지만 열전도계수가 낮은 단순한 단열재의 사용으로 열시정수를 높이고 변동하는 모터의 부하에 대하여 시스템을 열적으로 안정화 시킬 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 고속 대추력의 동기식 리니어모터의 열원을 분석하고 Cooler 와 테이블 사이에 열전도계수가 낮은 단열재를 삽입하여 테이블의 열특성에 영향을 미치는 단열재의 효과를 제시하였다. 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 리니어모터의 열원은 작동 중 발생하는 모터내부의 전기적 손실과 직선운동 중 Linear guidance 상에서의 마찰열이고 주열원은 Primary part 에서의 전기적 손실이다.
2. 단열재를 Cooler 와 테이블 사이에 배치하였을 때 냉각수의 온도상승으로 인해 야기되는 테이블의 온도불균일 현상은 감소한다.
3. 단열재를 사용할 경우 테이블의 온도가 반드시 감소하는 것은 아니며 테이블의 온도는 모터의 운전조건이나 냉각조건과 같은 시스템의 특성에 의존한다.
4. 단열재의 사용으로 테이블의 열시정수는 상승하고 모터에 작용하는 힘이 변할 경우 테이블의 온도변동을 줄일 수 있어 시스템을 열적으로 안정화시킬 수 있다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 창원대학교 공작기계기술연구센터와 BK 사업단의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

1. Weck, M., Werkzeugmaschinen und Fertigungssysteme Band 3, VDI-Verlag, Duesseldorf, 1996.
2. Gieras, J. F., Piech, Z. J., Linear synchronous motors, CRC Press, Boca Raton, pp. 256-263, 2000.
3. Weck, M., Herbst, U., "Zwischenbericht ueber Optimierung des dynamischen und thermischen Verhalten von Linearmotoren," WZL RWTH Aachen 1997.
4. Eun, I.-U., "Optimierung des thermischen Verhaltens von elektrischen Linearmotoren fuer den Einsatz in Werkzeugmaschinen," Dissertation RWTH Aachen, pp. 33-34, 1999.
5. "Lineare Direktantriebe fuer schnelle Maschinen." Workshop document, Laboratory for Machine Tools and Manufacturing Engineering(WZL) RWTH Aachen, 1999.
6. 은인용, "Linear Motor 를 이용한 위치결정 기술," 한국정밀공학회지, 제 17 권 제 12 호, pp. 20-25, 2000.
7. Eun, I.-U., "Comparison between Asynchronous and Synchronous Linear Motors as to Thermal Behavior." International Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 2, No. 3, pp. 61-68, 2001.
8. Information sheet of Firm Krauss Maffei, pp. 10-16, 1998.
9. Henneberger, G., Elektrische Maschinen 3, RWTH Aachen, pp. 40-45, 1997.
10. Catalog of Firm INA, pp. 60-64, 1998.
11. 은인용, 정원지, 이춘만, 최영휴, "전기선형모터의 공작기계에의 적용," 한국정밀공학회 춘계 학술대회논문집, pp. 450-453, 2001.
12. Weck, M., Werkzeugmaschinen und Fertigungssysteme Band 4, VDI-Verlag, Duesseldorf, pp. 86-88, 1996.
13. Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 4th Edition, John Wiley & Sons, New York, pp. 212-214, 1996.