

단열재에 의한 리니어모터의 열특성의 향상

은인웅*, 이춘만**, 정원지**, 최영휴**

Improvement of the Thermal Behavior of Linear Motors through Insulation Layer

I.-U. Eun, C. M. Lee, W. J. Chung, Y. H. Choi

Key Words : Machine Tools(공작기계), Linear Motors(리니어모터), Thermal Behavior(열특성), Thermal Insulation(단열), Insulation Layer(단열재)

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 stiffness 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.

1. 서론

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·고가속도의 직선운동이 가능하고 위치제어 정밀도가 높아 공작기계 이송계로써 볼스크류 시스템을 효과적으로 대체할 수 있다^(1,2). 반면에 리니어모터는 낮은 효율과 함께 가동 중 나타나는 높은 발열 문제가 그 약점이다. 그리하여 리니어모터를 고속·정밀 공작기계에 효과적으로 적용하기 위해서는 열원인 리니어모터로부터 주변 기계요소로의 열흐름을 감소시키기 위해 단열재를 사용하거나 냉각 시스템의 구조를 변경하여 냉각효율을 높이기도 한다. 또한 Cooler 에 유입되는 냉각수의 온도나 유량 또는 냉각수의 흐름의 방향을 제어하는 기술도 가능하다⁽³⁾. 본 연구에서는 고속 대추력을 보유

한 동기식 리니어모터(Synchronous linear motor)를 공작기계의 이송계로 적용할 경우의 단열에 의한 열특성의 향상을 소개한다.

2. 리니어모터의 사양과 실험장치

2.1 해석과 실험에 사용된 리니어모터의 사양

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 영향을 주는 수직력으로 작용하는 자기력(Magnetic attraction)은 14600 N 이다. 이와 같은 사양의 리니어모터는 공작기계의 고속·중질사의 이송기구로 적합하다⁽⁴⁾.

2.2 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.

* 창원대학교 공작기계기술연구센터

** 창원대학교 기계설계공학과

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
Maximum power loss in primary part (W)	2600
Maximum power loss in secondary part (W)	20
Air gap (mm)	1.5

Primary part 와 테이블 사이에는 판형의 Cooler 가 설치되어 있어 내부의 Cooling pipe 에 흐르는 물에 의하여 모터 내부에서 발생한 열을 외부로 방출하고 전체시스템을 일정한 온도로 유지되게 한다. Primary part 와 Secondary part 사이에 작용하는 자기력을 흡수하고, 고속이송운동을 가능하게 하기 위해 Linear guidance 를 사용한다. 위치측정센서를 테이블의 측면에 부착하고, 위치·속도·가속도·전류·전압 그리고 추력을 CNC-Controller 에 의해 제어한다.

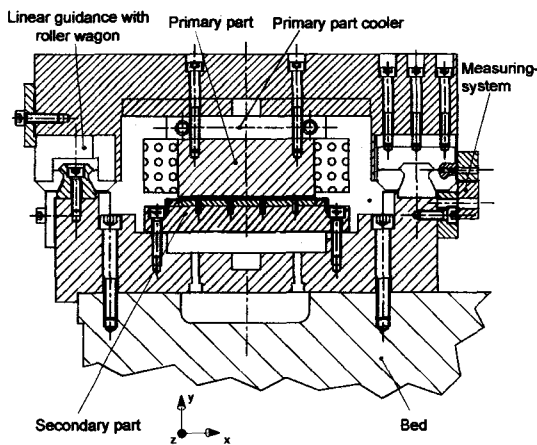


Fig. 1 Experimental set-up.

3. 리니어모터의 열원

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

3.1 모터 내부의 전기적인 손실

다른 전기기계와 마찬가지로 리니어모터의 작동 중 전기적 손실에 의한 열이 발생한다. 이 전기적인 손실은 크게 권선 내의 전기저항에 의한 오음저항손실과 철심에서 발생하는 철손(iron loss)으로 나눌 수 있으며, 철손은 다시 와전류(Eddy current loss) 손실과 이력손실(Hysteresis loss)로 나눌 수 있다⁽⁵⁾.

동기식 리니어모터는 Secondary part 가 영구자석으로 되어 있어 유도식 리니어모터와는 달리 열손실이 거의 없고, 본 연구에 사용된 모터는 Secondary part 의 손실이 20 W 이다. Primary part 의 손실은 정격전류에서 2600 W 이고 주열원이다. 본 연구에서는 리니어모터에 작용하는 힘의 증가에 따른 전기적 손실을 동력계로 측정하였다(Fig.2). 리니어모터가 위치제어 된 상태에서 힘을 연속추력의 범위에 상회하는 3300 N 까지 가하고 손실동력을 디지털 동력계로 측정하였다.

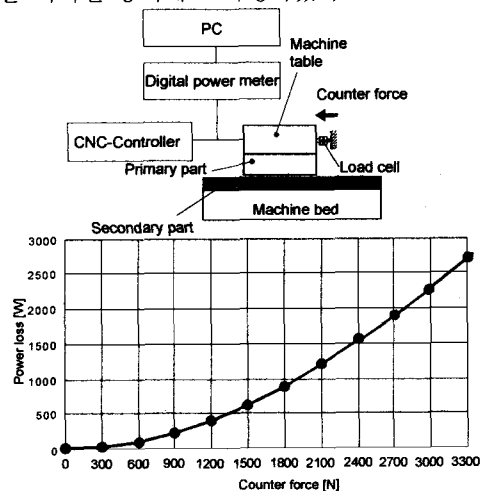


Fig. 2 Electrical power loss related to counter force.

Fig.2 에서 보여주는 바와 같이 리니어모터에 작용하는 힘이 증가할수록 동력손실은 제곱에 비례하여 증가한다. 이것은 힘의 변화에 따라 CNC-Controller 가 공급하는 전류를 제어하고 전류의 제곱에 비례해서 오음저항 손실이 증가하기 때문이

다. 즉 식으로 표시하면,

$$F=ki \quad (1)$$

$$P_{Ohm}=i^2 R \quad (2)$$

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 있다.

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 따른 마찰계수는 Linear guidance 의 제조회사에서 제공한 값을 취하였다⁽⁶⁾.

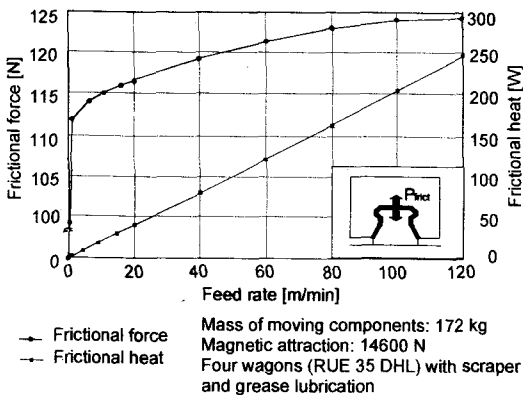


Fig. 3 Frictional force and heat related to feed rate.

마찰력은 정지상태로부터 이송운동이 시작되면서 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⁽⁷⁾.

4. 온도측정

리니어모터에서의 온도측정을 위해 시스템을 구성하였다. 온도센서는 플라틴 PT100 의 금속저항센서를 사용하였으며 측정범위 $-220-750\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서 온도와 저항사이의 뛰어난 선형성을 가지며 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 의 오차범위를 가지고있다⁽⁸⁾. 측정한 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 $19\text{ }^{\circ}\text{C}$ 이다.

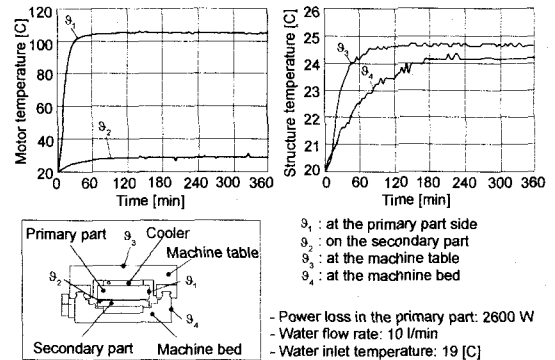


Fig. 4 Measured temperature on the linear motor and structure.

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

따라서 리니어모터를 고속·정밀 동작기계체에 적용하기 위해서 열원인 리니어모터 자체를 더 효과적으로 냉각시키고, 또한 열원으로부터 주변 구조물의 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 단열재를

사용한 열특성의 향상과 그 효과를 분석한다.

5. 단열재의 적용

5.1 단열재의 물리적 특성과 배열

사용된 단열재의 물리적 특성은 강에 비해 열전도계수와 밀도가 낮다. 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 중 힘의 흐름선의 중심에 위치해 있기에 단열재의 사용으로 인하여 정동강성이 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 가진다.

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 ⁻¹ 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 한

다. 만일 단열재가 Cooler 와 Primary part 사이에 배열될 경우 리니어모터는 과열되고 손상을 입게 된다. 본 연구에 사용된 단열재의 두께는 5 mm 이다.

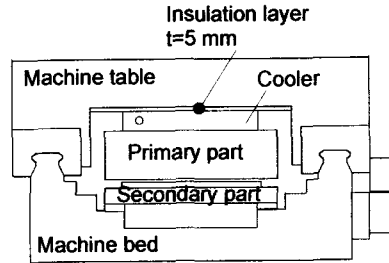
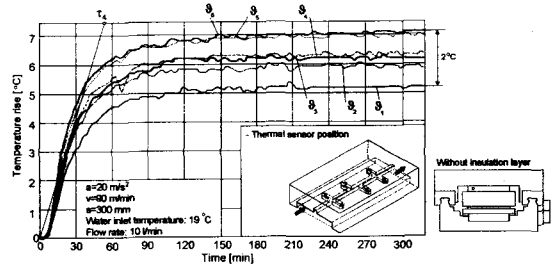


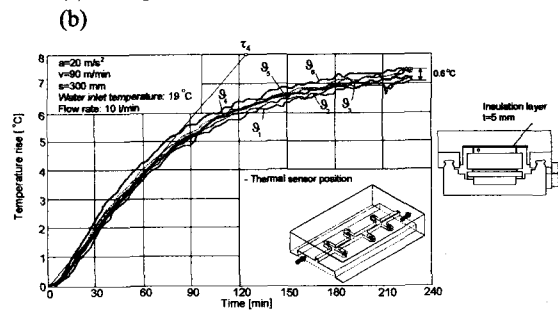
Fig. 5 Arrangement of the insulation layer.

5.2 단열재의 사용 시 온도특성

단열재를 Cooler 와 테이블 사이에 배치할 경우의 효과를 알아보기 위해 본 연구에서는 동일한 냉각과 운전조건에서 단열재를 적용하였을 경우와 적용하지 않았을 경우의 온도를 측정하였다(Fig.6).



(a) Temperature rise without insulation layer



(b) Temperature rise with insulation layer

Fig. 6 Temperature rise without and with insulation layer.

운전조건은 가속도 20 m/s², 속도 90 m/min, 이송거리 300 mm 이며, 이때의 동력손실은 정격전류시의 손실 2600 W 에 상응하도록 운전조건을 정하였다. 냉각조건은 냉각수의 유입온도는 19 °C 그리고 유량 10 l/min 이다. 테이블과 Cooler 사이에

그림에서 보인 것처럼 흡을 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 °C의 온도 상승 그리고 출구에 가까운 위치에서는 7.2 °C에 가까운 온도상승을 보인다. 이 온도 상승치는 위치 1에서 6로 갈수록 커지는데, 이것은 냉각수의 온도상승으로 인해서 테이블의 온도가 상승하기 때문이다. 따라서 리니어모터에서 발생한 열을 밖으로 방출하기 위해서 리니어모터의 생산회사에서 제공되는 판형 Cooler는 냉각수의 온도상승으로 인해 테이블의 온도구배와 불균일을 초래한다. Fig.6의 (a)에서 보인 것처럼 온도구배는 위치 1과 6 사이에서 약 2 °C를 보인다. 그러나 (b)와 같이 단열재를 삽입할 경우 온도구배는 0.6 °C로 줄어드는데 이것은 매우 가치 있는 효과이다. 왜냐하면 테이블의 온도구배는 테이블의 뒤틀림으로 나타나고 이것은 이송계의 테이블로써 바람직하지 않기 때문이다.

그러나 단열재의 사용으로 인하여 테이블의 온도가 저하되지 않고 도리어 그림에서 보이는 것처럼 약간 상승하고 있다. 단열재를 사용하지 않았을 때는 온도상승이 5.2 - 7.2 °C였으나, 단열재를 사용한 경우에는 7.1 - 7.5 °C였다. 이와 같은 현상은 리니어모터를 적용한 시스템의 열평형과 열흐름의 해석으로부터 이해할 수 있다.

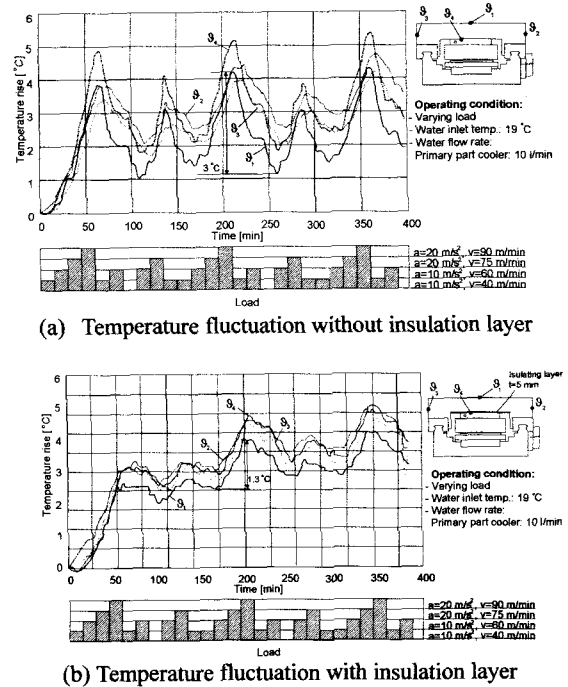
즉, 테이블은 열원인 Primary part로부터 Cooler를 거쳐 열전도에 의해서, 또한 측면으로부터 열대류와 복사에도 의해서 그리고 Linear guidance로부터의 마찰열에 의해서 가열된다. 물론 테이블을 가열시키는 주열원은 Primary part로부터 열전도에 의한 것이나, 테이블의 내측면으로부터 열전달이나 마찰열도 무시할 수 없다. 그리하여 테이블의 양측면은 테이블 중앙보다 온도가 높은 경우가 많은데, Cooler 위에 단열재를 넣으면 이 테이블의 측면의 열을 Cooler가 흡수하지 못하여 도리어 테이블의 전체적인 온도가 상승한다.

Fig.6에서 센서위치 4에서의 열시정수(Thermal time constant) τ_4 를 보면 단열재를 사용하지 않았을 경우 약 55분, 단열재를 사용하였을 경우 약 125분이다. 즉, 단열재를 사용함으로써 테이블이 열평형상태에 이르게 되는 시간이 길어진다.

리니어모터를 동작기계의 이송장치로 사용할 경우 절삭력의 변동이나 가감속으로 인하여 모터의 동력은 수시로 변동하고, 모터의 손실동력은 Fig.2에서 보인 바와 같이 힘의 제공에 비례하여 증가

한다. 또한 테이블은 열원인 모터와 볼트로 직접 연결되어 있어서 모터에 작용하는 힘의 변화에 의하여 테이블의 온도는 수시로 변한다. 따라서 단열재를 사용하여 이송시스템의 열시정수를 크게 하고 테이블을 열적으로 안정화 시키는 것은 매우 중요한 방법이다.

Fig.7에는 모터에 작용하는 힘의 변동에 따라 변동하는 테이블의 온도를 단열재의 사용 유무에 따라 비교하고 있다.



(a) Temperature fluctuation without insulation layer

(b) Temperature fluctuation with insulation layer

Fig. 7 Temperature fluctuation by varying load without and with insulation layer.

모터에 작용하는 힘의 변화는 속도와 가속도의 변화를 통하여 이루어졌고 그림에서 보이는 바와 같이 1 단계는 $a=10 \text{ m/s}^2, v=40 \text{ m/min}$, 2 단계는 $a=10 \text{ m/s}^2, v=60 \text{ m/min}$, 3 단계는 $a=20 \text{ m/s}^2, v=75 \text{ m/min}$ 그리고 4 단계는 $a=20 \text{ m/s}^2, v=90 \text{ m/min}$ 이며, 각 단계에 따른 힘의 변화를 가지적으로 가로축에 막대의 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 °C에 이르고 있다. 반면 (b)와 같이 단열재를 사용한 경우에는 동일한 모터의 힘의 변화에 대해서 테이블의 온도변동은 줄어들고 중앙에서의 온도변동은 약 1.3 °C이다.

단열재의 사용으로 인해서 테이블의 열시정수가

상승하고 모터의 힘의 변화에 따른 테이블의 온도 변동이 저하되는 것은 Table 3 에서 이해할 수 있다.

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

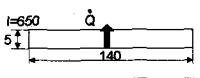
	Steel	Insulation layer	Steel : Insulation layer
			
Thermal resistance [$1/A\lambda$]	0.001	0.27	1:270
Thermal capacitance [ρVc_p]	1633	840	1:0.5
Thermal time constant [$(1/A\lambda) \cdot (\rho Vc_p)$]	1.63	227	1:139

Table 3 에서 사용된 단열재만을 고려하여 열시정수를 결정하는 열저항(Thermal resistance)과 열캐패시턴스(Thermal capacitance)를 제원에 따라 계산하고 강과 비교하였다. 즉, 열저항과 열캐패시턴스는 다음과 같이 정의된다⁹⁾.

$$R_{\text{thermal}} = \frac{1}{A\lambda} \quad (3)$$

$$C_{\text{thermal}} = \rho Vc_p \quad (4)$$

식(4), (5)에서 1 단열재와 동일한 제원을 가진 강의 두께 그리고 A 는 열이 통과하는 단면적 그리고 λ 는 단열재와 강의 열전도계수, ρ 는 밀도, V 는 체적, C_p 는 비열이다. 또한 열시정수는 열저항과 열캐패시턴스의 곱이며 다음과 같다.

$$\tau_{\text{thermal}} = R_{\text{thermal}} \cdot C_{\text{thermal}} \quad (5)$$

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 단열재의 사용으로 열시정수를 높이고 변동하는 모터의 부하에 대하여 시스템을 열적으로 안정화 시킬 수 있다.

6. 결론

본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 리니어모터의 열원은 작동 중 발생하는 모

터내부의 전기적 손실과 직선운동 중 Linear guidance 상에서의 마찰열이고 주열원은 모터의 전기적 손실이다.

2. 단열재를 Cooler 와 테이블 사이에 배치하였을 때 냉각수의 온도상승으로 인해 야기되는 테이블의 온도구배는 현저히 저하한다.
3. 단열재를 사용할 경우 테이블의 온도가 반드시 저하하는 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 있다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 창원대학교 공작기계기술연구센터의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

- (1) Gieras, J. F., Piech, Z. J., 2000, Linear synchronous motors, CRC Press, Boca Raton, pp. 256-263.
- (2) 은인용, 2000, "Linear Motor 를 이용한 위치결정 기술", 한국정밀공학회지, 제 17 권 제 12 호, pp.20-25.
- (3) Eun, I.-U., 1999, "Optimierung des thermischen Verhaltens von elektrischen Linearmotoren fuer den Einsatz von Werkzeugmaschinen", Dissertation RWTH Aachen, pp.33-34.
- (4) 1999, Information sheet of Firm Krauss Maffei, pp.10-16.
- (5) Henneberger, G., Elektrische Maschinen 3, RWTH Aachen, pp.40-45.
- (6) 1999, Catalog of Firm INA, pp. 60-64.
- (7) 은인용, 정원지, 이춘만, 최영휴, "전기선형모터의 공작기계에의 적용", 한국정밀공학회 2001 년도 춘계학술대회논문집, pp.450-453.
- (8) Weck, M., 1996, Werkzeugmaschinen und Fertigungssysteme, Band 4, VDI-Verlag, Duesseldorf, pp.86-88.
- (9) Incropera, F. P., DeWitt, D. P., 1996, Fundamentals of Heat und Mass Transfer, 4th Edition, John Wiley & Sons, New York, pp.212-214.