

Synchronous Linear Motor 의 구조변경에 의한 열특성의 개선

은인웅*(창원대 공작기계기술연구센터), 이춘만, 정원지, 최영휴(창원대 기계설계과)

Improvement of the Thermal Characteristics of Synchronous Linear Motors through Structure Change

I.-U. Eun(Machine Tool Research Center, Changwon National Univ.), C. M. Lee, W. J. Chung, Y. H. Choi
(Mechanical Design Dept., CNU)

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, the thermal behavior of a synchronous linear motor with high velocity and force is analyzed. To improve the thermal characteristics of the linear motor, structure of linear motor and cooler is changed. Some effects of an integrated cooler, an U-cooler and a thermal symmetrical cooler are presented.

Key Words : Synchronous linear motor (동기식 리니어모터), Machine tool (공작기계), Feed mechanism (이송기구), Thermal characteristics (열특성)

1. 서론

1990년대 초 리니어모터를 부착한 선반이 출시된 후 지난 10여년 동안 리니어모터를 부착한 연삭기 그리고 머신닝센터의 출시 빈도는 해가 지날수록 증가하는 추세이다. 리니어모터의 원리는 회전모터의 Stator 에 상응하는 Primary part 와 회전모터의 Rotor 에 상응하는 Secondary part 사이에 작용하는 유도기전력에 의해서 모터자체가 직선운동을 한다. 리니어모터를 공작기계의 이송장치로 적용할 경우 서보모터의 회전운동을 테이블의 직선운동으로 변환시키는 기구가 생략되기에 고속·고가속 직선운동이 가능하고 위제제어 정밀도가 높아 기존의 볼스크류 기구를 효과적으로 대체할 수 있다. 반면에 리니어모터의 약점은 낮은 효율과 함께 가동 중 높은 고열로 인해 모터나 주변기계가 가열되는 점이다. 따라서 고추력과 높은 정밀도가 요구되는 공작기계에서는 리니어모터에 반드시 수냉각장치를 부착하여 사용한다.^(1,2)

현재 고속대추력 공작기계용 리니어모터는 구동원리에 따라 구분하면 유도식 리니어모터(Asynchronous linear motor)와 동기식 리니어모터(Synchronous linear motor)이다. 동기식 리니어모터는

유도식 리니어모터에 비해 효율이 높고 힘의 밀집도가 높아서 최근에 많이 사용되고 있다.⁽³⁾ 본 연구에서는 동기식 리니어모터의 모터나 Cooler 의 구조변경을 통해 열특성을 향상을 시도하고 그 효과를 소개한다.

2. 리니어 모터의 사양과 실험장치

2.1 리니어모터의 사양

Table 1 에는 본 연구에 사용된 동기식 리니어모터의 사양을 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 고속 중절삭의 이송기구로 적합하다.⁽⁴⁾

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

2.2 실험장치

Fig. 1 에는 위에서 소개한 리니어모터를 부착한 실험장치를 보여주고 있다. 베드 위에 Secondary part 가 볼트로 고정되어 있고 Primary part 는 테이블과 함께 유도 기전력에 의해서 z-방향으로 직선이송운동을 한다.

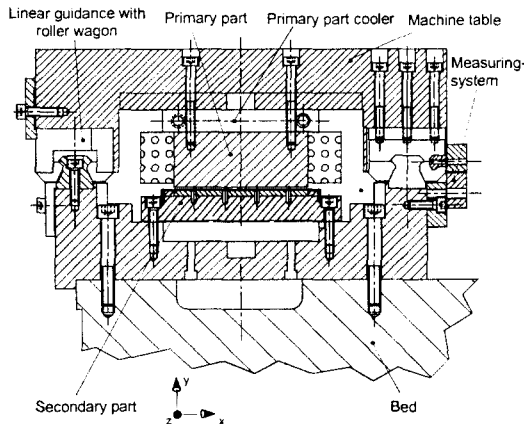


Fig. 1 Experimental set-up with linear motor

Primary part 와 테이블 사이에는 관형의 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, 위치속도가속도전류전압 그리고 추력을 CNC-Controller 에 의해 제어한다.

3. 리니어모터의 열원과 열특성

3.1 리니어모터의 열원

리니어모터를 공작기계의 이송장치로 적용할 경

우 모터 내의 전기적 손실열과 Linear guidance 상의 기계적 마찰열의 2 개의 열원이 있다.

①전기손실: 모터의 작동 중 권선내의 오옴저항에 의한 동손과 철심에서 발생하는 철손이 있고, 철손은 다시 와전류손실과 이력손실로 구분된다. 동기식 리니어모터는 권선이 들어있는 Primary part 가 주열원이고 유도식 리니어모터와는 달리 Secondary part 의 열손실은 거의 없다.⁽³⁾

②마찰손실: 리니어모터가 고속 이송운동하는 경우 Linear guidance 상에서 마찰열이 발생한다. 이 마찰손실은 리니어모터가 정지해 있거나 속도가 낮은 경우에는 무시할 수 있으나 고속이 될 경우에는 무시할 수 없다. 그러나 이 마찰열은 모터내의 전기손실에 비하여 일반적으로 낮다.^(3,5)

3.2 리니어모터의 열특성

Fig. 2 에는 리니어모터를 사용한 이송장치의 열특성을 종합하여 나타내고 있다.

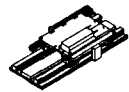
	Thermal characteristics of linear motors
	<ul style="list-style-type: none"> • Great power loss and heating up of linear motors • Locating the heat source in the middle of the machine structure • Great heat transfer from linear motors to machine structure • Water cooling is necessary • Temperature gradient in machine table due to the temperature rise in the cooler • Great temperature difference between linear motors and machine structure • Temperature fluctuation on machine table by varying motor load

Fig. 2 Thermal characteristics of linear motors

리니어모터를 장착한 공작기계의 이송장치는 작동 중 많은 열손실이 발생하고 열손실에 의하여 주변 구조물이 가열되고 열변형을 하게 된다. 리니어모터는 지금까지 이송계에 적용되던 서보모터가 공작기계의 외부에 위치했던 것과는 달리 공작기계의 가공 중심부에 위치하며 반드시 수냉장치를 필요로 한다. 또한 Cooler 에 흐르는 냉각수의 온도상승으로 인하여 테이블에 온도 불균일이 생기고 열원인 리니어모터와 주변 구조물 사이에 온도와 열시정수(Thermal time constant)에 큰 차이가 있다.

Fig. 3 에는 리니어모터로부터 주변구조물로의 열전달의 기구가 나타나 있다. 주열원인 Primary part 로부터 발생한 열은 Cooler 에 의해 밖으로 유출되고 나머지 열은 열전도에 의해서 테이블로 유입된다. 또한 Primary part 로부터 열은 대류와 복사에 의해 테이블의 내면으로 전달되어 테이블을 가열시킨다. Secondary part 는 자체의 열원은 적으나

Primary part 의 하면으로부터 Air gap 을 통하여 대류와 복사에 의해 가열되고 이 열은 열전도에 의해 베드로 계속 전달된다. 또한 Linear guidance 상에서 발생한 마찰열은 테이블과 베드로 전달된다.

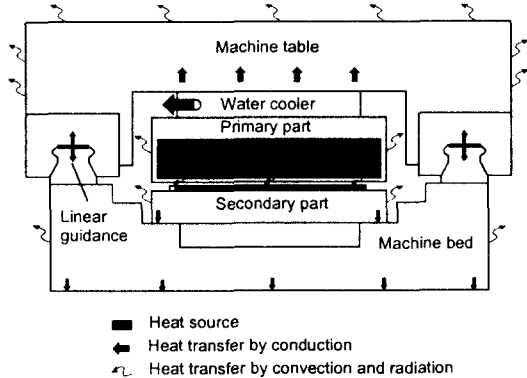


Fig. 3 Heat transfer in machine structure with linear motor

4. 열특성의 향상을 위한 구조 변경의 가능성

본 장에서는 공작기계의 이송장치로 적용된 리니어모터의 열특성을 향상시키기 위해 Cooler 와 리니어모터의 구조변경의 몇 가지의 가능성과 그 효과를 소개한다.

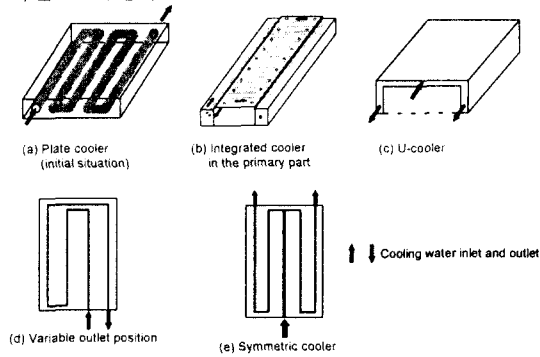


Fig. 4 Cooler configurations

Fig. 4 에는 리니어모터에 적용 가능한 Cooler 의 형상을 보여주고 있다. (a)는 리니어모터의 제조사에서 제공된 본래의 판형 Cooler 이다. 이 판형 Cooler 는 길이가 Primary part 와 같고, 내부에 직경 8mm 의 수관이 5 열 병렬로 배열되어 있으며 재질은 알루미늄이다. (b)는 내장형 Cooler, (c)는 U-Cooler, (d)와 (e)는 수관의 배열을 바꾼 열대칭형 Cooler 이다.

4.1 내장형 Cooler(Integrated cooler)

리니어모터의 Primary part 는 권선과 철심 그리고 Winding head 를 감싸고 있는 에폭시레진으로 구성되어 있다. 내장형 Cooler 는 Primary part 의 철심에 수관을 직접 설치하는 방식이다(Fig. 5). 내장형 Cooler 는 리니어모터 내부에 수관이 있기에 따로

Cooler 를 사용할 필요가 없다. 그리하여 이송시스템의 높이를 낮게 할 수 있고 수관이 열원인 권선에 가까이 위치해 있어 모터를 과열로부터 보호할 수 있다는 장점이 있다. 반면에 철심에 수관을 설치하기에 수관의 직경을 크게 할 수 없고 테이블의 온도를 저하시키는 냉각능력에 한계가 있다. 또한 수관에 해당하는 철심의 체적이 줄어들어 결국 추력의 저하가 생긴다.⁽⁶⁾

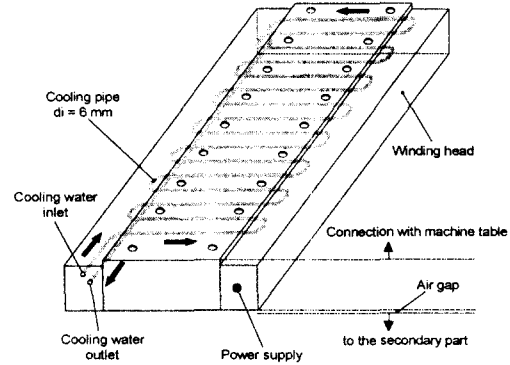


Fig. 5 Integrated cooler in the primary part

Fig. 6 은 내장형 Cooler 를 가진 Primary part 의 Secondary part 와 조립이 되지 않은 상태에서 측정된 온도를 보여주고 있다. 힘은 CNC-Controller 에서 전류를 변화시켜 제어하였고 정격전류의 50%, 75% 그리고 100%로 하였다. 내장형 Cooler 에 흐르는 냉각수의 유입온도는 19 °C 이고 유량은 7.5 l/min 이다. Secondary part 와 유도되지 않기에 철손은 없고 열손실은 권선에 흐르는 오염손실이 전부이다. 이와 같이 주열원인 Primary part 만을 가지고 열특성을 검사하는 약식방법이 모터생산회사에서는 자주 사용된다.

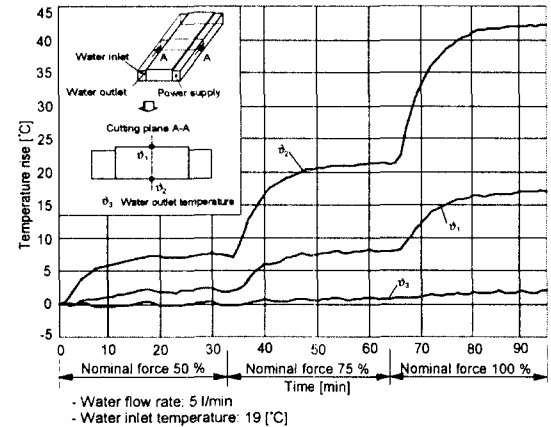


Fig. 6 Temperature rise on the primary part with integrated cooler

Fig. 6 에서 보여주는 바와 같이 Primary part 의 하면의 온도(θ_2)는 열원인 권선에 가깝기에 높고 힘이 증가할수록 증가하여 정격추력 100%시에 약

42 °C 의 온도상승을 보인다. 냉각수(θ_3)는 수관을 흐르는 동안 약 2 °C 의 온도가 상승한다. 중요한 온도는 Primary part 의 상부의 온도(θ_2)이다. 이 면은 테이블과 직접 연결되고 이송계의 열변형에 영향을 주기때문에 가급적 낮도록 하는 것이 리니어모터를 설계하는 단계에서 중요하다. 그림이 보여주는 바와 같이 정격전류 100%에서 약 17 °C 의 온도가 상승한다. 즉, 내장형 Cooler 는 모터를 과열로부터 보호할 수는 있으나 정밀이송테이블을 냉각시키는 것은 어렵다. 따라서 이 내장형 Cooler 는 다른 하나의 외부 Cooler 와 함께 2 중 Cooler 로 사용된다.

4.2 U 형 Cooler

U 형 Cooler 는 리니어모터의 주열원인 Primary part 와 Winding head 가 있는 양측면을 감싸는 Cooler 의 한 방식이다. 이 U 형 Cooler 는 Fig. 7 에 도시한 바와 같이 냉각수의 유입구가 중앙에 위치해 있고, 유출구는 양 측면에 있다.

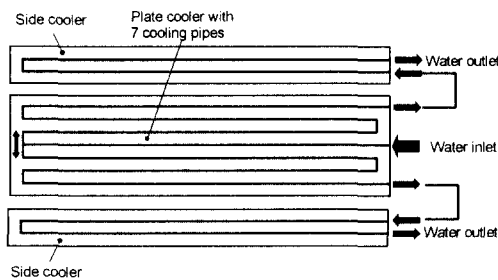


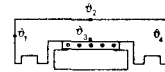
Fig. 7 Configuration of U-Cooler

U 형 Cooler 는 중앙에 있는 평판 Cooler 에 7 개의 수관이 있고 양측면의 Cooler 에는 각각 2 개씩의 수관이 배열되어 있다. 따라서 Primary part 로부터 테이블의 내측면으로의 열전달을 막을 수 있으나 Primary part 의 부피가 커지고 수관이 길어지는 약점이 있다.

4.3 열대칭 Cooler

평판 Cooler 가 Primary part 와 테이블 사이에 배열될 경우 수관에 흐르는 냉각수의 온도는 상승하고 이로 인하여 테이블에는 온도차이가 생기게 된다. 테이블의 불균일한 온도분포는 테이블의 불균일한 열변형으로 나타나고 이것은 이송계의 테이블에 바람직한 양상은 아니다. Fig. 8 에는 이와 같은 온도 불균일 현상을 최소화 하기 위한 열대칭 Cooler 와 그 효과를 보여주고 있다. 수관이 길어지면 냉각효과는 높아지나 그에 따라 냉각수의 수온이 상승하고 테이블의 온도 불균일이 커진다. 따라서 그림처럼 수관을 대칭적으로 배열하여 온도 불균일 현상을 줄여야 한다.

Number of cooling pipe	5		4		
Vanants					
Length of cooling pipe l [mm]	3250	3264	2628	2656	1300+1300 = 2600
$\Delta\theta$ [°C]	4.2	3.53	3.4	3.43	1.68
\dot{Q}	1460.7	1228.8	1182.7	1193.1	1168
θ_2 [°C]	26.7	27.1	28	27.9	27.4
θ_{s-0} [°C]	1.4	0	0.6	0.2	0



- Power loss : 2600 W
 - Water flow rate : 5 l/min
 - Water inlet temperature : 19 °C

Fig. 8 Symmetrical cooler

5. 결론

본 연구에서는 고속대추력에 사용되는 동식 리니어모터의 열특성을 소개하고 모터와 Cooler 의 구조변경을 통한 열특성 향상의 가능성을 제시하였다. 리니어모터를 사용한 이송시스템은 공작기계의 중앙에 위치하고 작동 중 과열되어 수냉시설과 함께 모터나 Cooler 의 구조변경을 필요로 한다. 내장형 Cooler, U 형 Cooler 그리고 열대칭 Cooler 를 통하여 Primary part 를 과열로부터 보호하고 테이블 내면으로의 열전달을 저하시키며 테이블의 온도구배를 적게 하여 리니어모터를 사용한 이송계의 열특성을 향상시킬 수 있다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 창원대학교 공작기계기술연구센터의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

- Gieras, J. F., Piech, Z. J., Linear synchronous motors, CRC Press, Boca Raton, pp. 256-263, 2000.
- 은인웅, "Linear Motor 를 이용한 위치결정 기술", 한국정밀공학회지, 제 17 권 제 12 호, pp.20-25, 2000.
- Eun, I.-U., "Comparison between Asynchronous and Synchronous Linear Motors as to Thermal Behavior", International Journal of Korean Society of Precision Engineering, Vol.2, No.3, pp. pending, 2001.
- Information sheet of Firm Krauss Maffei, pp.10-16, 1998.
- 은인웅, 정원지, 이춘만, 최영휴, "전기선형모터의 공작기계에서의 적용", 한국정밀공학회 춘계학술대회논문집, pp.450-453, 2001.
- Eun, I.-U., "Optimierung des thermischen Verhaltens von elektrischen Linearmotoren fuer den Einsatz in Werkzeugmaschinen", Dissertation RWTH Aachen, pp.33-34, 1999.