

## 고속·대추력 리니어모터의 열특성 최적화 [1]

은인웅\*

### Optimization of the Thermal Behavior of Linear Motors with High Speed and Force [1<sup>st</sup> Paper]

In-Ung Eun\*

#### ABSTRACT

This paper presents the thermal behavior of a synchronous linear motor with high speed and force. Such a linear motor can successfully replace ball lead screw in machine tools because it has a high velocity, acceleration and good positioning accuracy. On the other hand, low efficiency and high heating up during operation are disadvantage of linear motors. For the application of linear motors to machine tools a water-cooling system is often used. In this research, structure of the linear motor and water cooler is changed to improve the thermal behavior of the linear motor. Some important effects of an integrated cooler, an U-cooler and a thermally symmetrical cooler are presented.

**Key Words :** Linear motor (리니어모터), Thermal behavior (열특성), Machine tools (공작기계), Feed mechanism (이송기구), Integrated cooler (내장형 Cooler), U-cooler (U형 Cooler), Thermally symmetrical cooler (열대칭 Cooler)

#### 1. 서론

리니어모터는 모터의 두 기본 요소인 Primary part 와 Secondary part 사이에 작용하는 유도기전력에 의해서 모터자체가 직접 직선운동을 한다. 리니어모터를 공작기계의 이송장치로 적용할 경우 서보모터의 회전운동을 테이블의 직선운동으로 변환시키는 기구가 생략되기 때문에 고속·고가속 직선운동이 가능하고 위치제어 정밀도가 높아 기존의 볼스크류 기구를 효과적으로 대체할 수 있다.<sup>(1)</sup> 그러나 리니어모터의 약점은 낮은 효율과 함께 가동 중 높은 고열로 인해 모터나 주변기계가 가열되는 점이다. 따라서 고추력과 높은 정밀도가 요

구되는 공작기계에서는 리니어모터에 반드시 수냉각장치를 부착하여 사용한다.<sup>(2)</sup>

현재 고속·대추력 리니어모터는 구동원리에 따라 유도식 리니어모터(Asynchronous linear motor)와 동기식 리니어모터(Synchronous linear motor)로 구분할 수 있다. 동기식 리니어모터는 유도식 리니어모터에 비해 효율이 높고 힘의 밀집도가 높아 공작기계용 이송시스템으로 최근에 많이 사용되고 있다.<sup>(3)</sup>

리니어모터의 열특성은 궁극적으로 이송테이블의 열변위로 평가될 수 있으며, 또한 이송테이블의 열변위는 열원인 리니어모터로부터 테이블로의 열전달에 의해 야기되는 온도상승에 기인한다.

2002년 2월 5일 접수

\* 경기공업대학 급형설계과

(4) 따라서 리니어모터를 부착한 공작기계 이송시스템의 열특성의 향상은 리니어모터로부터 이송테이블로의 열전달을 최소화하는 것을 그 원칙으로 한다. 이를 위해 단열재를 사용하는 방법이 있다.<sup>(5)</sup> 또한 Cooler 에 유입되는 냉각수의 유량, 유입온도 또한 냉각수의 흐름의 방향을 제어하는 기술도 있다.<sup>(6)</sup> 본 연구에서는 동기식 리니어모터의 열특성을 분석하고 모터나 Cooler 의 구조변경을 통해 열특성의 향상을 시도하고 그 효과를 소개한다.

## 2. 사용된 리니어모터의 특성과 실험장치

### 2.1 리니어모터의 특성

Table 1 에는 본 연구에 사용된 동기식 리니어모터의 중요한 특성을 보여주고 있다. 수냉 시 연속추력은 3200 N 그리고 연속속도는 90 m/min 이다. 최대추력은 7000 N 또한 최고속도는 170 m/min 에 이른다.

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

열특성에 직접 영향을 주는 전기손실은 Primary part 에서 2600 W 그리고 Secondary part 에

서 20 W 이다. Linear guidance 상의 마찰열에 영향을 주는 수직력으로 작용하는 자기력(Magnetic attraction)은 14600 N 이다. 이와 같은 전기적·기계적인 특성을 가진 리니어모터는 고속·중질삭의 이송기구로 적합하고 최근 머시닝센터나 선반 그리고 연삭기에 가장 많이 적용되는 크기이다.<sup>(7)</sup>

### 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. 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.

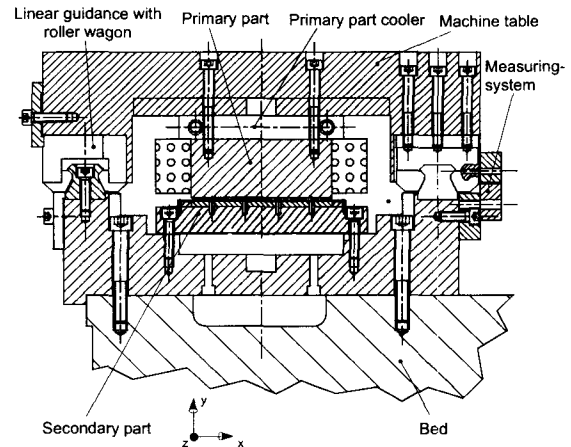


Fig. 1 Experimental set-up with linear motor

## 3. 리니어모터의 열특성

### 3.1 리니어모터의 열원

리니어모터를 공작기계의 이송장치로 적용할

경우 모터 내의 전기적 손실열과 Linear guidance 상의 기계적 마찰열의 2 개의 열원이 있다. 동기식 리니어모터는 권선이 들어있는 Primary part 가 주 열원이고 유도식 리니어모터와는 달리 Secondary part 의 열손실은 거의 없다.<sup>(3)</sup> 이 전기적인 손실 열은 Primary part 의 권선에서의 오옴손실이 대부분이며 리니어모터에 작용하는 힘의 제곱에 비례하여 증가한다.<sup>(5)</sup>

Linear guidance 상에서의 마찰열은 리니어모터 가 이송 운동할 경우에만 발생하고 모터내의 전기 손실에 비하여 일반적으로 낮다.<sup>(5)</sup>

### 3.2 리니어모터의 열특성

Fig. 2 는 리니어모터에 3200 N 의 연속추력에 상당한 Counter force 를 가한 상태에서 유량을 변경시키며 모터와 테이블에서의 온도상승을 측정 한 결과를 보여주고 있다. 주어진 부하상태에서 발생하는 전기적 손실동력은 약 2600 W 가 된다. 리니어모터가 정지상태에서 부하를 받기에 Linear guidance 상에서의 마찰손실은 없다. Cooler 에 유입 되는 냉각수의 온도는 19 °C 로 일정하고 유량을 2, 5, 7.5, 10 그리고 15 l/min 으로 증가시키며 변화 시켰을 때, Primary part 의 측면( $\theta_1$ ), Secondary part 의 상면( $\theta_2$ ) 그리고 Machine table 의 상부 중앙( $\theta_3$ ) 에서의 온도상승을 측정하였다. 측정 중의 주위의 공기온도는 약 20 °C 로 유지하였다.

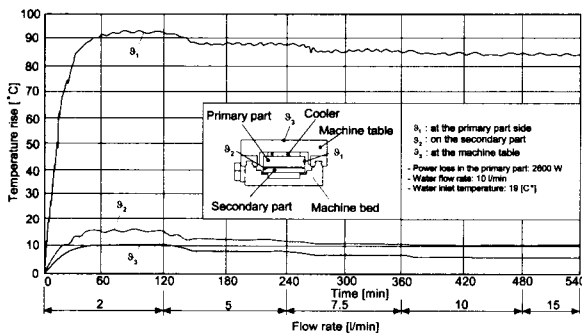


Fig. 2 Temperature rise on the linear motor and machine table related to water flow rate

Fig. 2 에서 보이는 바와 같이 주열원인 Primary part 의 측면에서의 온도상승( $\theta_1$ )은 유량이 2 l/min 일 때 약 95 °C, 5 l/min 일 때 87 °C, 7.5 l/min 일

때 86 °C, 10 l/min 일 때 85 °C 그리고 15 l/min 일 경우도 동일하게 85 °C 이다. 즉, 주열원인 Primary part 는 수냉각에도 불구하고 충분히 냉각되지 아니한다. Secondary part( $\theta_2$ )는 주열원이 아니고 자체 내의 열손실도 무시할 수 있을 정도로 낮으나, 고 열의 Primary part 의 밑면으로부터 Air gap 을 통해 열대류와 열복사에 의해서 가열된다.<sup>(3)</sup> 온도측정 결과에서 보여주는 바와 같이, 유량이 2 l/min 의 경우, 약 15 °C 의 온도상승이 있고, 유량이 증가 할수록 온도상승은 저하하나 10 °C 이상의 온도상승이 있다. 이송계의 열변위에 중요한 이송테이블 의 온도상승( $\theta_3$ )은 주어진 유량의 범위에서 6-11 °C 의 온도상승을 보인다.

이 결과로부터 리니어모터의 사양과 손실동력 이 결정되면 최소, 유효 그리고 최대유량을 결정 할 수 있다. 유량이 2 l/min 에서 5 l/min 으로 증가 하면 리니어모터와 테이블의 온도상승이 큰 폭으로 저하하고, 유량이 5 l/min 에서 7.5 l/min 그리고 10 l/min 으로 증가하면 온도감소율이 점차 감소하고, 유량이 10 l/min 에서 15 l/min 으로 증가하면 온도저하에는 거의 별다른 영향을 미치지 않는다.

즉, 리니어모터를 과열로부터 보호하고, 충분한 추력을 얻으며 주변기계구조물을 어떤 적정한 온도로 유지하기 위해서는 본 연구에 사용된 리니어모터의 경우 최소유량은 2 l/min 이상이 되어야 하고, 적정한 유량은 5-7.5 l/min 의 범위에 있으며, 유량이 10 l/min 이상이 되면 모터나 구조물의 온도를 저하시키는데 효과가 없다. 따라서 리니어모터 자체나 이송테이블의 온도를 더 낮추기 위해서는 리니어모터나 기존의 Cooler 의 구조를 변경하거나 단열에 의한 방법 등에 의존해야 한다.

Fig. 3 에는 리니어모터로부터 주변구조물로의 열전달 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 밑면으로부터 Air gap 을 통하여 대류와 복사에 의해 가열되고 이 열은 열전도에 의해 베드로 계속 전달된다. 또한 리니어모터의 운동 중 Linear guidance 상에서 발생한 마찰열은 테이블과 베드로 전달된다.

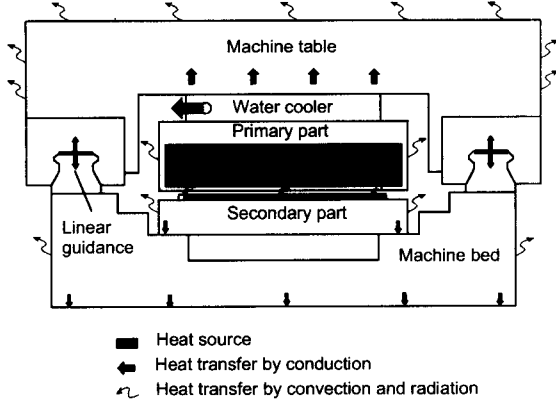


Fig. 3 Heat transfer mechanism in machine structure with linear motor

Fig. 4 는 리니어모터를 사용한 이송장치의 열 특성을 종합하여 나타내고 있다. 리니어모터를 이용한 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 큰 온도차이가 발생한다. 또한 모터에 작용하는 부하가 변할 때 테이블의 온도가 민감하게 변동한다.<sup>(5)</sup>

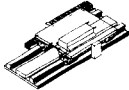
	<b>Thermal characteristics of linear motors</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Great power loss und heating up of linear motors</li> <li>• Locating the heat source in the middle of the machine structure</li> <li>• Great heat transfer from linear motors to machine structure</li> <li>• Water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

Fig. 4 Thermal characteristics of linear motors

#### 4. 열특성의 향상을 위한 방안

2, 3 장에서 고찰한 리니어모터의 고유한 열특성에 기초하여 열특성의 향상 또는 최적화를 위한 목적과 방법들이 Fig. 5 에 나타나 있다. 리니어모터의 열특성의 향상 또는 최적화의 목적은 공작기계 이송장치의 위치제어 오차에 직접 영향을 주는 이송테이블로의 열전달을 최소화하고, Cooler 에 흐르는 냉각수의 온도상승에 의하여 야기되는 테이블의 온도 불균일을 낮추며 리니어모터에 작용하는 부하변화에 대한 테이블의 온도변동을 적게 하여 이송시스템을 열적으로 안정화시키는 것이다. 또한 Secondary part 도 주열원은 아니지만 정밀이송기구로 사용하기 위해서는 냉각이나 단열에 의한 열특성의 향상이 필요하다.

이 목적을 위하여 적용되는 방법은 첫째로는 전기적인 방법으로 동력손실이 적고 효율이 높은 리니어모터를 개발하는 것이다. 현재 출시되는 대추력 동기식 리니어모터의 효율은 85 % 를 넘기 어렵다. 고효율의 리니어모터를 개발하기 위해서는 현재보다 자속밀도가 더 높은 자성체의 개발이 그 전제 조건이 된다.<sup>(1,6)</sup>

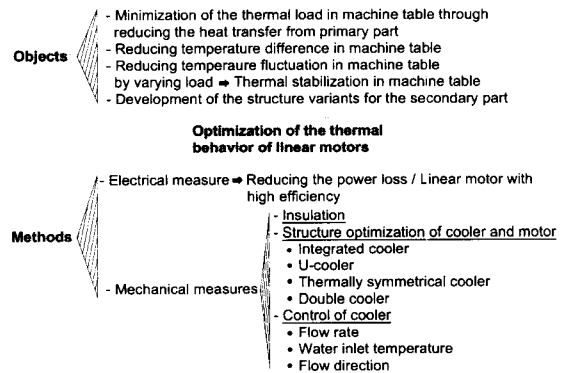


Fig. 5 Objects and methods for the optimization of the thermal behavior of linear motors

이미 사용되고 있는 리니어모터의 열특성을 향상시키기 위해서는 기계적인 방법이 적용되는데 그 원리로는 단열에 의한 방법, Cooler 나 리니어모터의 구조를 변경시키는 방법 그리고 Cooler 에 제어기를 부착하여 냉각수의 수온, 유량 그리고 흐름방향을 제어하는 방법 등이 있다. 단열에 의한

열특성을 향상시키는 방법과 그 효과는 참고문헌 (5)에 소개되어 있다. 또한 단열재와 Cooler 를 조합시킨 이중 Cooler 의 방법과 효과 그리고 Secondary part 의 열특성의 해석과 방법은 계속되는 본지의 논문에 소개한다.

본 논문에서는 공작기계의 이송장치로 적용된 리니어모터의 열특성을 향상시키기 위해 Cooler 와 리니어모터의 구조변경의 몇 가지 가능성과 그 효과를 소개한다 (Fig. 6). Fig. 6 에는 리니어모터에 적용 가능한 Cooler 의 형상을 보여주고 있다. (a)는 리니어모터의 제조회사에서 제공된 본래의 판형 Cooler 이다. 이 판형 Cooler 는 길이가 Primary part 와 같고, 내부에 직경 8 mm 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 의 기본구조와 외관을 보여주고 있다.

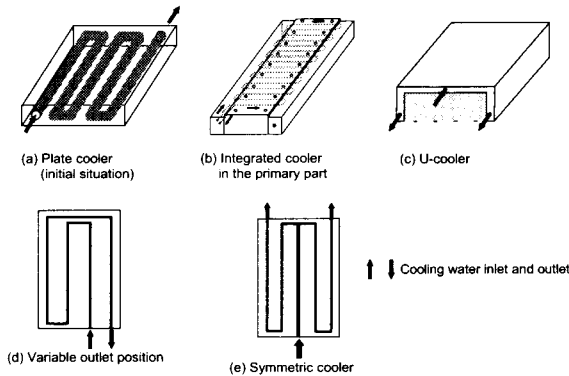


Fig. 6 Cooler configurations

#### 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. 7).<sup>(7)</sup> 사용된 수관의 내경은 6 mm 이다.

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. 따라서 내장형 Cooler 의 사용에 의한 추력저하를 보상하기 위해서는 리니어모터의 길이나 폭을 더 크게 하여야 한다.<sup>(6)</sup>

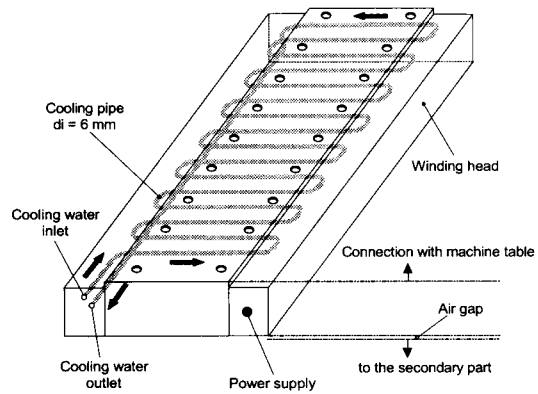


Fig. 7 Integrated cooler in the primary part

Fig. 8 은 내장형 Cooler 를 가진 Primary part 의 온도를 Secondary part 와 조립이 되지 않은 상태에서 측정된 것을 보여주고 있다. 힘은 CNC-Controller 에서 전류를 변화시켜 제어하였고 정격 전류의 50 %, 75 % 그리고 100 % 로 변화시켰다. 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 오유손실이 전부이다. 이와 같이 주열원인 Primary part 만을 가지고 열특성을 검사하는 약식 방법이 모터생산회사에서는 자주 사용된다.<sup>(7)</sup>

Fig. 8 에서 보여주는 바와 같이 Primary part 의 밑면의 온도( $\theta_2$ )는 열원인 권선에 가깝기에 높고, 힘이 증가할수록 증가하여 정격추력 100 % 시에 약 42 °C 의 온도상승을 보인다. 냉각수( $\theta_3$ )는 수관을 흐르는 동안 약 2 °C 의 온도가 상승한다. 중요한 온도는 Primary part 상부의 온도( $\theta_1$ )이다. 이면은 테이블과 직접 연결되고 이송계의 열변형에 영향을 주기 때문에 가급적 낮추는 것이 리니어모터를 설계하는 단계에서 중요하다. 그림이 보여주는 바와 같이 정격전류 100 % 에서 약 17 °C 의 온도가 상승하여 테이블의 온도상승에 직접 영향

를 미친다.

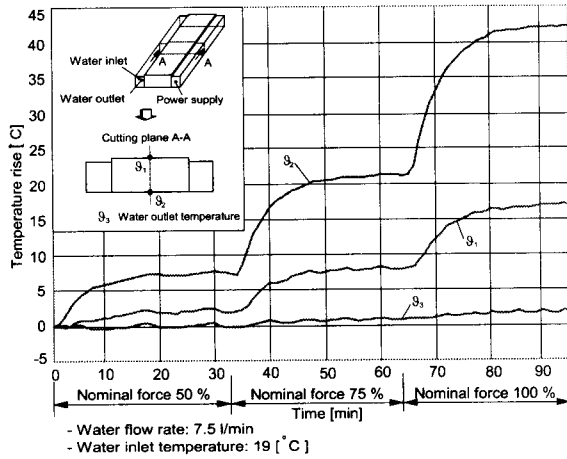


Fig. 8 Temperature rise on the primary part with integrated cooler

Fig. 9 에서는 내장형 Cooler 를 가진 Primary part 를 실험장치에 부착하고 측정한 온도를 보여 주고 있다. 기존의 판형 Cooler 가 설치되지 않기 때문에 Cooler 의 높이와 동일한 강판을 제작하여 Air gap 의 간격을 동일하게 유지하였다.

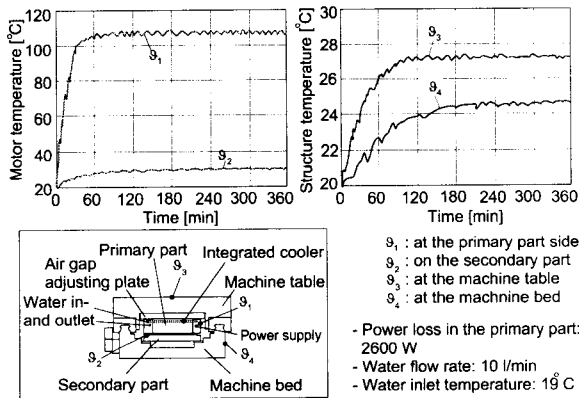


Fig. 9 Temperature with the integrated cooler

내장형 Cooler 의 판형 Cooler 와의 냉각능력과 효과를 비교하기 위해서 정격출력 즉, 리니어모터에 연속추력에 해당하는 3200 N 의 Counter force 를 가하고 이때의 전기적 손실이 2600 W 가 되도록

하였다. Cooler 는 유량 10 l/min 그리고 냉각수의 유입온도 19 °C 로 작동하고 온도를 측정하였다.

Primary part 의 측면 ( $\theta_1$ )의 온도는 약 108 °C 가 되어 판형 Cooler 를 사용할 때의 105 °C 에 비해 약 3 °C 가 증가하였고, Secondary part 의 상면 ( $\theta_2$ )은 온도가 약 27.5 °C 가 되어 1.5 °C 가 상승하였다. 테이블 중앙( $\theta_3$ )에서의 온도는 27.2 °C 가 되어 판형 Cooler 때의 24.6 °C 에 비해 2.6 °C 가 상승하여 내장형 Cooler 자체로는 테이블을 효과적으로 냉각시키는데 한계가 있었다. 베드( $\theta_4$ )의 온도도 24.6 °C 가 되어 판형 Cooler 에 비해 약 0.5 °C 상승하였다. 즉, 내장형 Cooler 는 모터를 과열로부터 보호할 수는 있으나 정밀이송테이블을 냉각시키는 것은 어렵다. 따라서 이 내장형 Cooler 는 또 다른 하나의 외부 Cooler 와 함께 2 중 Cooler 로 사용된다.<sup>(10)</sup>

#### 4.2 U형 Cooler

U 형 Cooler (U-cooler)는 리니어모터의 주열원인 Primary part 의 상면과 Winding head 가 있는 양 측면을 감싸는 Cooler 의 한 방식이다. 이 U 형 Cooler 는 Fig. 10 에 도시한 바와 같이 냉각수의 유입구가 중앙에 위치해 있고 두개의 유출구는 양 측면에 있다.

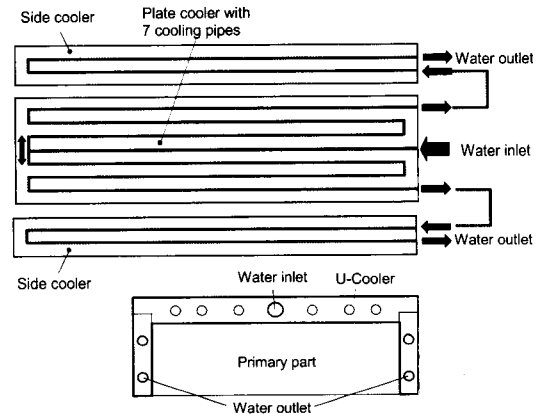
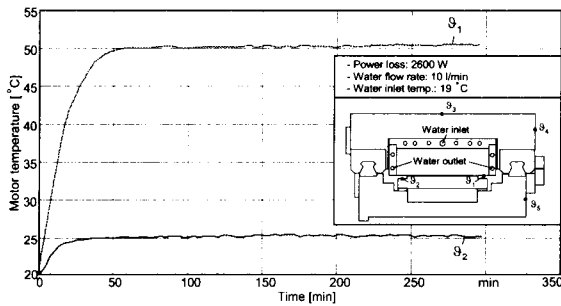


Fig. 10 Configuration of U-cooler

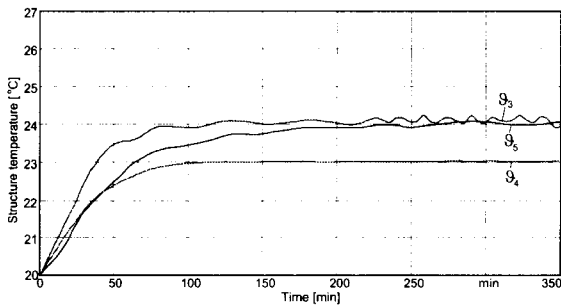
U 형 Cooler 는 중앙에 있는 평판 Cooler (Plate cooler)에 7 개의 수관이 있고 양측면의 Cooler (Side cooler)에는 각각 2 개씩의 수관이 배열되어 있다. Fig. 11 은 Fig. 10 에서 제시한 수관의 배열에

따라 U 형 Cooler 를 제작하고 실험장치에 부착하여 온도를 측정 한 결과를 보여주고 있다.

리니어모터의 손실동력은 2600 W 이고 수관에 흐르는 유량은 10 l/min 그리고 유입온도는 19 °C 이다. Primary part 측면의 밀면(Winding head 의 밀면,  $\theta_1$ )의 온도는 약 50 °C 에 이르고 Secondary part 의 상면( $\theta_2$ )의 온도는 약 25 °C 에 이른다. 테이블 중앙의 온도( $\theta_3$ )는 24.1 °C 그리고 측면( $\theta_4$ )은 23 °C 로 중앙보다 낮다. 이것은 U 형 Cooler 에 의해 테이블 내측면으로의 열전달이 차단되기 때문이다. 베드의 온도( $\theta_5$ )는 약 24 °C 이다. 즉, 원래의 판형 Cooler 에 비해서 U 형 Cooler 는 Primary part 의 온도를 많이 낮추고, 동일한 운전 및 냉각 조건에서 테이블의 온도를 약 1-2 °C 정도 낮게 하는 효과가 있다.



(a) Motor temperature with U-Cooler



(b) Structure temperature with U-Cooler

Fig. 11 Temperature with U-Cooler

따라서 U 형 Cooler 는 Primary part 로부터 테이블 내측면으로의 열전달을 막을 수 있으나 Primary part 의 부피가 커지고 수관이 길어지는 약점이 있다. 또한 양측면의 Cooler (Side cooler)는 열

전도계수가 낮은 에폭시레진로 싸여진 Winding head 에 접하고 있어 냉각효과도 크다고 볼 수 없으며, 또한 중앙으로 유입되는 냉각수가 양 측면으로 흐르기에 유량이 절반으로 나뉘어져 냉각효과도 저하된다. 현재 U 형 Cooler 냉각방식은 모터제조회사에서 Primary part 와 일체형으로 제작되고 공작기계에 자주 사용된다.<sup>(11)</sup>

### 4.3 열대칭 Cooler

평판 Cooler 가 Primary part 와 테이블 사이에 사용될 경우 수관에 흐르는 냉각수의 온도는 상승하고 이로 인하여 테이블에는 온도차이가 생기게 된다. 테이블의 불균일한 온도분포는 테이블의 불균일한 열변형으로 나타나고 이것은 이송계의 테이블에 바람직한 양상이 아니다.<sup>(9)</sup>

Fig. 12 에는 이와 같은 온도 불균일 현상을 최소화 하기 위하여 Cooler 내의 수관을 대칭적으로 배열한 열대칭 Cooler (Thermally symmetrical cooler) 와 그 효과를 보여주고 있다.

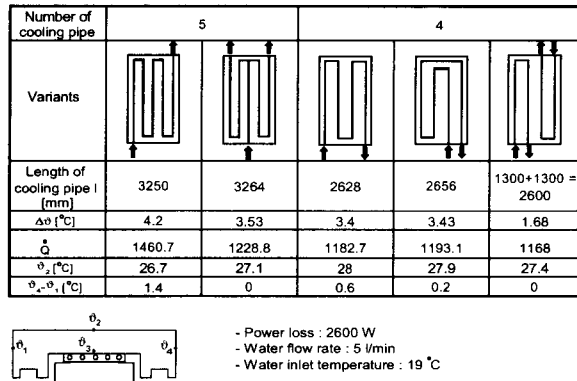


Fig. 12 Thermally symmetrical cooler

수관은 Cooler 의 강성 그리고 Primary part 와 테이블을 연결하는 볼트의 위치를 고려하여 5 개와 4 개의 경우를 설계하였다. 냉각수의 상승온도와 배출열량은 초기의 5 개의 수관이 병렬로 배열된 경우를 기준으로 하여 계산하였다. 수관이 길어지면 냉각효과는 높아지나 그에 따라 냉각수의 수온이 상승하고 테이블의 온도 불균일이 커진다. 즉, 냉각수의 온도상승과 배출된 열은 수관의 길이에 대하여 다음과 같이 정비례한다.

$$\Delta\theta \approx 1 \quad (1)$$

$$Q \approx 1 \quad (2)$$

따라서 그림처럼 수관을 대칭적으로 배열하여 온도 불균일 현상을 줄일 수 있다. 수관을 열대칭이 되게 배열하는 방법은 그림에서 보이는 바와 같이 Cooler 의 중앙에 유입구를 배치하고 유출구를 양측면으로 하는 방법, 유입구와 유출구를 가까이 배치하는 방법 그리고 냉각회로를 2 개로 구성하는 방법 등이 사용될 수 있다. 수관이 길어질수록 냉각수의 온도상승 ( $\Delta\theta$ )과 배출된 열은 증가하고 테이블의 온도는 저하한다. 테이블의 온도차, 예를 들면 ( $\theta_4 - \theta_1$ )은 수관을 Fig. 12 에서 보는 바와 같은 여러 방법에 따라 배열하여 낮게 할 수 있다.

Table 2 에는 지금까지 소개한 내장형 Cooler, U 형 Cooler 그리고 열대칭 Cooler 각각의 장점과 약점을 종합하여 나타내고 있다. 리니어모터의 Cooler 와 모터의 구조를 용도에 따라 변경하여 리니어모터를 부착한 공작기계 이송장치의 열특성을 향상시킬 수 있다.

Table 2 Advantages and disadvantages of coolers

Variants	Advantages and disadvantages
Integrated cooler	<ul style="list-style-type: none"> <li>ⓐ Small space</li> <li>ⓑ Small height</li> <li>ⓒ Cooling for primary part</li> <li>ⓓ Low cooling effect for table</li> <li>ⓔ Decrease of force</li> </ul>
U-cooler	<ul style="list-style-type: none"> <li>ⓐ Cooling for table</li> <li>ⓑ Reducing heat transfer from primary part to table inside</li> <li>ⓒ Large primary part</li> </ul>
Thermally symmetrical cooler	<ul style="list-style-type: none"> <li>ⓐ Reducing temperature difference in table</li> </ul>

### 5. 결론

본 연구에서는 공작기계의 고속·대추력 이송장치로 사용되는 동기식 리니어모터의 열특성을 소개하고 모터와 Cooler 의 구조변경을 통한 열특성 향상의 가능성을 제시하였다. 리니어모터를 사용한 이송시스템은 공작기계의 중앙에 위치하고 작동 중 과열되므로 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 온도차이를 적게 하여 리니어모터를 사용한 이송계의 열특성을 향상시킬 수 있다.

### 참고문헌

1. Gieras, J. F., Piech, Z. J., Linear synchronous motors, CRC Press, Boca Raton, pp. 256-263, 2000.
2. Eversheim, W., Klocke, F., Pfeifer, T., Weck, M., Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik, Aachen Machine Tool Engineering Colloquium AWK 96, pp. 223-228, 1996.
3. 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. 61-68, 2001.
4. 은인용, "Linear Motor 를 이용한 위치결정 기술," 한국정밀공학회지, 제 17 권 제 12 호, pp. 20-25, 2000.
5. 은인용, "단열에 의한 동기식 리니어모터의 열특성 향상," 제 19 권 제 3 호, pp. 123-130, 2002.
6. Eun, I.-U., "Optimierung des thermischen Verhaltens von elektrischen Linearmotoren fuer den Einsatz in Werkzeugmaschinen," Dissertation RWTH Aachen, pp. 33-34, 1999.
7. Information sheet of Firm Krauss Maffei, Linearmotoren, pp. 10-16, 1998.
8. Weck, M., Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme, Band 3.2, 3.auf. VDI-Verlag, pp. 79-82, 1995.
9. "Linearmotoren fuer Servoantriebe in Werkzeugmaschinen," Infotag ZN Stuttgart, Siemens 1999.
10. 은인용, "고속·대추력 리니어모터의 열특성 최적화 [2]," 한국정밀공학회지, 제 21 권 제 7 호, 2002.
11. LAF050-Linearmotoren, Choice & Design, Indramat 1999.