

## 고속·대추력 리니어모터의 열특성 최적화 [2]

은인웅\*

### Optimization of the Thermal Behavior of Linear Motors with High Speed and Force [2<sup>nd</sup> Paper]

In-Ung Eun\*

#### ABSTRACT

This paper presents some measures for the optimization of the thermal behavior of linear motors, which are used as a high speed feed mechanism in machine tools. Thermo-Sandwich-Construction using two cooling circuits and an insulation layer shows an effective cooling system for linear motors. Conducting sheet can be also used to reduce heat flow from linear motor to machine table. Cooling pipe is a simple and effective cooling system for the secondary part of synchronous linear motor. Through the combination of the Thermo-Sandwich-Construction, conducting sheet and cooling pipe the thermally optimized linear motor shows a well improved thermal behavior in comparison with the prototype motor.

**Key Words :** Linear motor (리니어모터), Thermal behavior (열특성), Machine tools (공작기계), Feed mechanism (이송기구), Integrated cooler (내장형 냉각기), U-cooler (U형 냉각기), Thermally symmetrical cooler (열대칭 냉각기), Thermo-Sandwich-Construction (써머샌드위치 구조), Conducting sheet(전도판), Cooling pipe (냉각관)

#### 1. 서론

공작기계의 고속·고정밀화의 기술발전에 따라 고속주축과 고속이송계의 기술은 지난 10 여년간 비약적인 발전을 해왔다. 지난 80년대 이후 고속직선이송기구로써 볼스크류 시스템이 CNC 공작기계에 많이 사용되었으나 1990년대에 리니어모터의 등장으로 이송운동의 고속화는 큰 진보를 이루게 되었다.<sup>(1)</sup>

리니어모터는 모터 자체가 직선운동을 하기

때문에 기존의 서보모터의 회전운동을 직선운동으로 변환시키는 기구가 생략되어 고속·고가속 직선운동이 가능하고 높은 위치제어 정밀도를 가진다. 반면 리니어모터는 가동 중 높은 발열로 인하여 모터 뿐 아니라 주변구조물이 가열되기 때문에 정밀공작기계에 사용되는 리니어모터는 반드시 수냉시설을 필요로 한다.<sup>(2)</sup> 또한 단열재를 리니어모터와 이송테이블 사이에 배치하여 테이블의 열특성을 향상시킨다.<sup>(3)</sup> 그 외에 리니어모터나 Cooler의 구조를 변경시켜 열특성을 향상시키는 방법에는

2002년 2월 5일 접수  
\* 경기공업대 금형설계과

내장형 Cooler, U 형 Cooler 그리고 열대칭 Cooler 등이 있다.<sup>(4)</sup> 이와 같은 방법은 리니어모터의 설계 및 제조단계에서 적용될 수 있는 기술이며, 생산된 리니어모터를 동작기계에 응용하는 과정에서는 Cooler 에 흐르는 냉각수의 유량이나 유입온도 또는 냉각수의 흐름의 방향을 제어하는 기술이 고려될 수 있다.<sup>(5)</sup>

본 논문에서는 본지에서 이미 소개한 단열재와 내장형 Cooler 그리고 열대칭 Cooler 를 조합한 Thermo-Sandwich-Construction 의 구조와 효과를 다룬다. 또한 본 연구에 사용된 고속-대추력 동기식 리니어모터의 열특성을 향상시키는 방안 에 속하는 Conducting sheet 그리고 Secondary part 의 열특성을 향상시키는 Cooling pipe 에 대해서 소개한다. 위의 열특성을 향상시키는 방법들의 조합에 의해 개발되고 현재 생산-적용되는<sup>(6)</sup> 열특성을 최적화한 동기식 리니어모터의 효과를 분석한다.

## 2. Thermo-Sandwich-Construction-단열재와 이중 Cooler 의 조합

본 장에서 소개하는 Thermo-Sandwich-Construction 은 리니어모터를 이용한 동작기계 이송시스템의 열특성을 향상시키기 위한 냉각시스템으로 고안되었다. 본 구조의 근간을 이루는 것은 이중 Cooler 시스템과 그 사이에 위치한 단열재이다. 따라서 Thermo-Sandwich-Construction 에 앞서 본지에 이미 소개한 단열재와<sup>(3)</sup> 리니어모터 그리고 Cooler 의 구조변경에<sup>(4)</sup> 따른 그 효과를 먼저 요약한다.

### 2.1 단열재의 효과

리니어모터의 주열원인 Primary part 와 이송테이블 사이에 열전도계수가 낮은 단열재를 배치하여 열특성을 향상시킬 수 있는 방안이 연구되었다.<sup>(3)</sup> 사용된 단열재는 열전도계수가 0.2 W/m<sup>2</sup> K 로써 단열효과가 크고 단열재가 리니어모터와 이송테이블 사이의 절삭력을 받는 부위에 위치하기 때문에 충분한 강성(80-170 N/mm<sup>2</sup>)을 가지고 있다. 사용된 단열재의 두께는 5 mm 이다.

Fig. 1 에는 단열재의 배열과 효과를 종합하여 보여주고 있다. 단열재는 Cooler 와 이송테이블 사이에 위치하고, 그 효과는 첫째로, Cooler 내

흐르는 냉각수의 온도상승으로 인하여 발생하는 테이블 내의 온도 불균일 현상을 줄이고, 둘째로, 모터의 동력이 변화하는 경우 테이블의 온도변동을 저하시키며, 셋째로, 단열재가 위치하는 부위의 온도( $U_{Motor+Cooler}$ )가 이송테이블의 온도( $U_{Table}$ )보다 높은 경우에 단열재는 모터로부터 테이블로의 열흐름을 저하시키는 열저항으로 작용하여 테이블의 온도를 낮출 수 있다. 반면에 테이블의 온도가 단열재가 위치하는 부위의 온도보다 높은 경우에는 단열재가 테이블로부터 Cooler 로의 열흐름을 방해하는 열저항으로 작용하여 결과적으로 테이블의 온도를 상승시키는 역효과를 유발시킨다. 즉, Cooler 와 테이블 사이에 배치하는 단열재는 테이블의 온도를 저하시키는데 반드시 긍정적인 효과만 있는 것이 아니며 리니어모터의 운전특성 그리고 냉각특성에 의존한다.

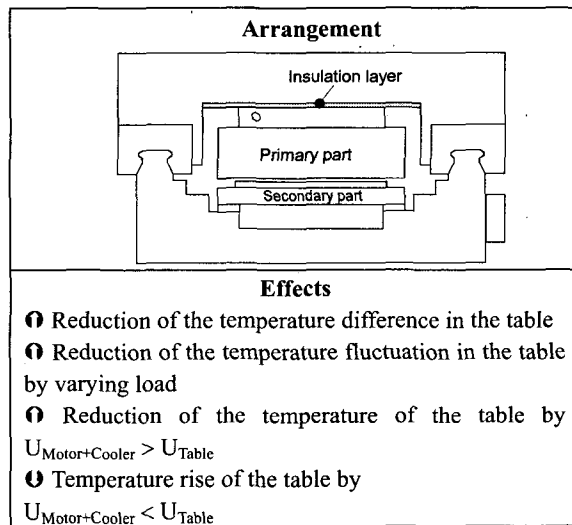


Fig. 1 Arrangement and effects of insulation layer

### 2.2 리니어모터와 Cooler 의 구조변경 효과

리니어모터와 Cooler 의 구조를 변경시켜 열특성을 향상시키는 방법에는 내장형 Cooler, U 형 Cooler 그리고 열대칭 Cooler 등이 있다.<sup>(4)</sup> Thermo-Sandwich-Construction 에 응용되는 내장형 Cooler 와 열대칭 Cooler 의 기능과 효과가 Fig. 2 에 나타나 있다.

내장형 Cooler 는 수관을 Primary part 철심에 직접 설치하는 냉각방식으로 Cooler 가 차지하는 용적을 줄이고 모터를 과열에서 보호하는 효과가

있으나, 칩 내부에 설치하는 수관의 직경을 크게 하는데 한계가 있어, 테이블을 냉각시키는 효과는 저하한다. 열대칭 Cooler 는 냉각수의 유입구와 유출구의 위치를 가까이 배열하여 냉각수의 온도상승으로 인한 테이블 내의 온도차이를 감소시킨다.

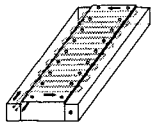
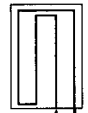
Structure	Advantages and disadvantages
 <p>Integrated cooler</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>① Small space</li> <li>① Small height</li> <li>① Cooling for primary part</li> <li>② Low cooling effect for table</li> <li>② Decrease of force</li> </ul>
 <p>Thermally symmetrical cooler</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>① Reducing temperature difference in table</li> </ul>

Fig. 2 Effects of integrated and thermally symmetrical cooler

### 2.3 Thermo-Sandwich-Construction

위에서 소개한 단열재와 여러 형식의 Cooler 를 서로 조합하고 장점만을 살려 열특성을 향상시킬 수 있다. 그 중의 한 방법이 Fig. 3 에 보인 Thermo-Sandwich-Construction 방식이다. 이것은 이중 Cooler 의 방식이며 내장형 Cooler 와 외부 Cooler(열대칭 Cooler) 사이에 단열재를 배열한 방식이다.

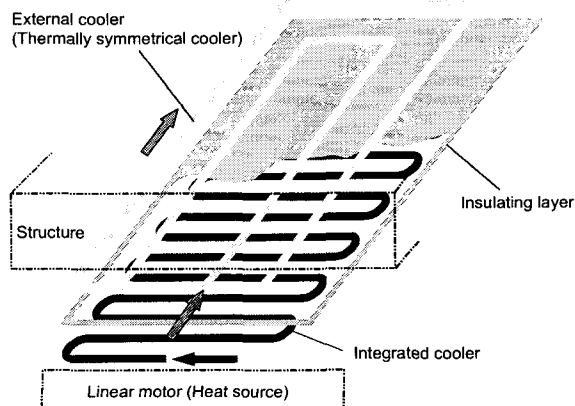


Fig. 3 Thermo-Sandwich-Construction

Fig. 3 에서 보여주는 바와 같이 Primary part 에 내장형 Cooler 가 그리고 테이블 쪽에 외부 Cooler 가 배열되어 있고 냉각수의 흐름방향은 서로 교차하게 되어 있어 열원인 Primary part 로부터 이송테이블로의 열흐름을 최대한 저하시킨 구조이다. 이와 같은 Thermo-Sandwich-Construction 은 냉각회로가 2 개가 되어 구조가 복잡해지고 또한 높이가 기존의 판형 Cooler 에 비해 약간 높아진다는 약점이 있으나 리니어모터의 열특성을 향상시킬 수 있는 효과적인 냉각 시스템이다. 그 효과는 5 장에 있는 온도측정의 결과에서 나타난다.

### 3. Conducting sheet

#### 3.1 Conducting sheet 의 기능

리니어모터를 공작기계의 이송계로 적용하게 되면 구조상 리니어모터와 주위 구조물 사이에 공간(Intermediate space)이 생기게 된다(Fig. 4). 이 공간에는 수냉을 하여도 충분히 냉각되지 않은 리니어모터로부터 열대류와 열복사에 의해 배출되는 열로 인하여 더운 공기가 형성되고 결국 테이블의 내면을 가열시키는 역할을 한다. 이러한 현상은 리니어모터의 이송거리가 짧을수록 두드러진다.

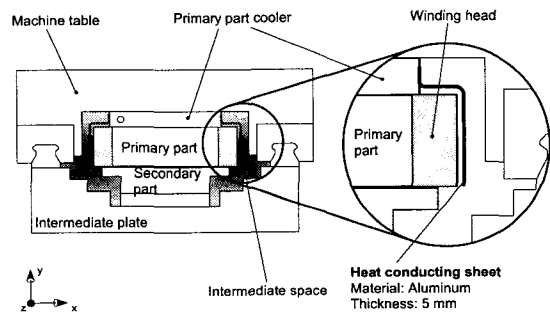


Fig. 4 Arrangement of conducting sheet

리니어모터의 측면으로부터 테이블의 내면으로 전달되는 열흐름을 저하시키는 방법으로 Fig. 4 에서 보여주는 Conducting sheet 가 있다. 이것은 열전도계수가 좋은 알루미늄판을 온도가 높은 Winding head 의 측면 가까이 배열하고 그 끝을 Cooler 에 연결시킨 방법이다.

이 Conducting sheet 는 그 원리에 있어서 Cooler 도 아니고 또한 단열의 방법도 아니다. Conducting

sheet 는 자체 내에 냉각기능이 없으며 또한 단열재처럼 열전도계수가 낮지 않고 반대로 열전도계수가 높은 재료를 사용하여 리니어모터로부터 배출된 열을 열저수지(Thermal reservoir)에 해당하는 Cooler로 보내어 배출시키는 방법이다(Fig. 5). 사용된 Conducting sheet 는 리니어모터와 테이블 사이의 공기의 온도를 저하시키는 역할을 하고 더 나아가 복사판(Radiation shield)의 역할을 한다<sup>(7)</sup>. 이 방법은 작은 구조변경을 통하여 Cooler의 냉각능력을 효과적으로 잘 이용할 수 있다는 장점이 있다.

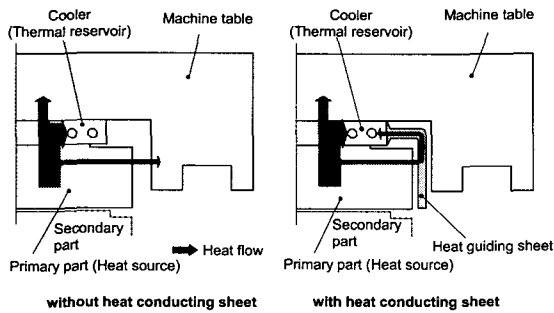


Fig. 5 Heat transfer from primary part side to table inside without and with conducting sheet

### 3.2 Conducting sheet 의 효과

Fig. 6 에는 실험장치에 Conducting sheet 의 부착유·무에 따른 리니어모터와 테이블의 정상상태의 온도를 비교하여 나타낸 것이다. 리니어모터는 3200 N의 Counter force 를 받고 2600 W의 동력손실이 Primary part 에서 발생한다. Cooler 는 냉각수의 유입온도 19 °C 그리고 5 l/min 의 유량으로 시스템을 냉각시킨다.

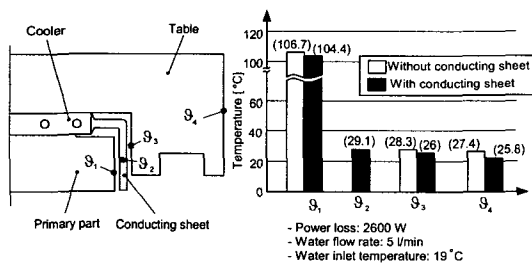


Fig. 6 End temperature with and without conducting sheet

Primary part 측면 ( $\theta_1$ )의 온도는 Conducting sheet 가 없는 상태에서 106.7 °C, Conducting sheet 를 부착하면 104.4 °C로 저하한다. Conducting sheet 에 의해서 테이블의 내면의 온도( $\theta_3$ )는 28.3 °C 에서 26 °C로 테이블의 외측면( $\theta_4$ )의 온도는 27.9 °C 에서 26.2 °C로 각각 낮아지고 Conducting sheet 의 온도( $\theta_2$ )는 약 29.1 °C가 된다.

이와 같은 Conducting sheet 에 의한 열특성의 향상은 Fig. 7 에 나타난 적외선사진으로 설명할 수 있다. 리니어모터의 Primary part 측면에서의 적외선사진 촬영을 위해 리니어모터를 조립하지 않은 상태에서 연속추력 3200 N 에 상응하는 정격전류 22.6 A 를 CNC-Controller 를 통해 공급한다. Cooler 의 운전조건은 냉각수의 유입온도 19 °C 그리고 유량을 5 l/min 이다. Conducting sheet 가 없는 경우 Primary part 측면의 100 °C 이상 되는 고온으로 인해 높은 복사열을 방출하여 사진 색깔이 백색으로 나타나나 Conducting sheet 를 부착한 경우에는 그 온도가 30 °C 이하가 되어 연회색으로 나타난다.

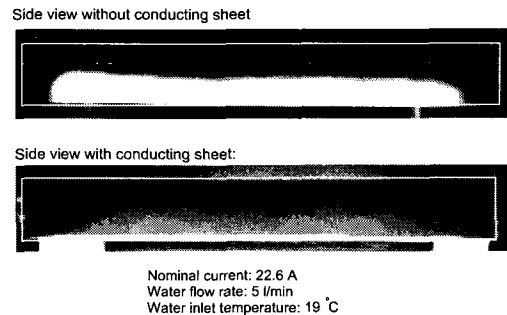


Fig. 7 Infrared photo without and with conducting sheet

### 4. Cooling pipe-Secondary part 의 냉각시스템

동기식 리니어모터의 Secondary part 는 영구자석으로 되어 있고 비교적 중량이 큰 베드에 고정되어 있기 때문에 주열원인 Primary part 에 비해서 열문제가 심각한 편은 아니다. 그래서 Primary part 와 테이블 사이에는 Cooler 를 설치하나, Secondary part 와 베드 사이에는 Cooler 를 따로 설치하지 않는 경우가 많다.<sup>(8)</sup>

지금까지 측정한 Secondary part 의 온도상승은 Primary part 로부터 Air gap 을 통하여 전달되는 열

이 주원인이며 모터의 운동조건이나 냉각조건에 따라 차이가 있으나 Secondary part 의 상면에서 약 6-12 °C 정도의 온도 상승을 보인다.<sup>(3-5)</sup> 따라서 정밀공작기계에 리니어모터가 적용되는 경우 Secondary part 도 냉각시설을 갖는 것이 바람직하다는 의견이 지배적이며 Fig. 8 에 소개하는 Cooling pipe 는 설계상의 단순성과 그 효과에 비추어 리니어모터의 열특성을 최적화하기 위해 사용된다. 이것은 Secondary part 의 자성체 밑에 있는 기판(Basis plate)에 반원형의 홈을 만들고 Pipe 를 설치한 방식이다. 또한 Secondary part 로부터 베드로의 열흐름을 저하시키기 위해 단열재를 그림과 같이 배치하기도 한다. 뒤의 Fig. 14 는 Cooling pipe 를 설치한 경우에 측정된 온도를 보여주고 있다. Secondary part 의 열특성을 최적화하기 위한 구조변경은 지금까지 다른 Primary part 중심의 내용과는 별개이기 때문에 계속되는 논문에서 상세하게 다루고자 한다.

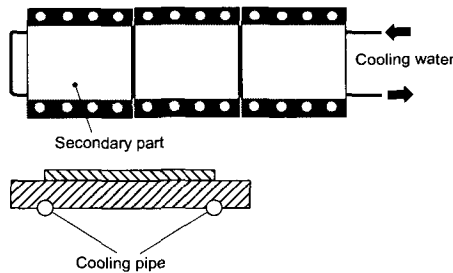


Fig. 8 Cooling pipe for secondary part

### 5. 열특성을 최적화한 리니어모터

#### 5.1 열특성을 최적화한 리니어모터의 개요

지금까지 고속·대추력 리니어모터의 열특성을 종합하여 Fig. 9 에 그 효과를 종합하여 나타내었다.

Fig. 10 에는 위에 소개한 열특성의 최적화 원칙과 기술에 기초하여 생산·판매되고 있는 리니어모터의 기술적인 특성을 보여주고 있다.<sup>(6)</sup> 이 모터는 동기식 모터로써 열특성을 최적화하고 Primary part 에 Thermo-Sandwich-Construction 이 함께 포함되어 있다. 이 리니어모터는 본 연구에 사용된 Prototype 모터에 비해 연속추력이 약간 저하되어 있고 속도 또는 정격전류 등에서 차이

를 보이는데 그 이유는 Primary part 에 설치된 내장형 Cooler 에 의하여 전기적 특성이 변했기 때문이다.

열특성에 직접 영향을 주는 중요한 제원을 보면 Primary part 의 철심부에 직경 6 mm 의 수관이 설치된 내장형 Cooler 가 있고, 외부 Cooler 로는 직경 8 mm 의 4 개의 수관이 병렬로 배치된 판형 Cooler 가 있다. 두 Cooler 사이에는 두께 5 mm 의 단열재가 있고 Primary part 주위에는 Conducting sheet 가 5 mm 의 간격으로 모터로부터 떨어져 배열되어 있다. Secondary part 는 9 mm 의 내경을 가진 Cooling pipe 에 의해 냉각된다.

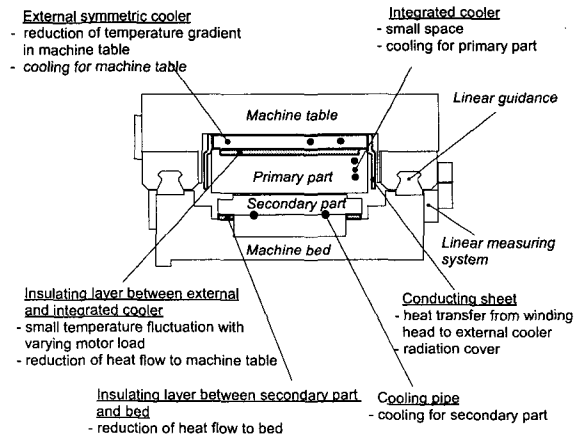


Fig. 9 Assembly of improving measures for the thermal behavior and their effects

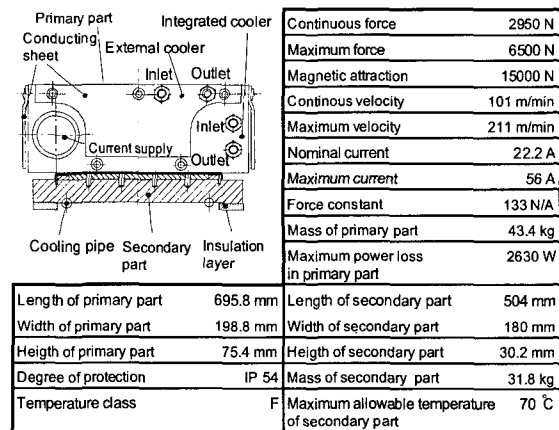


Fig. 10 Appearance and technical data of the thermally optimized linear motor

### 5.2 열특성을 최적화한 리니어모터의 특성

본 절에서는 Fig. 10 에 있는 열특성을 최적화한 리니어모터를 기존의 실험장치에 부착하고 측정된 온도를 보여주고 있다. Fig. 11 은 리니어모터에 연속추력 2950 N 에 상당한 Counter force 를 가하고 테이블에서의 온도상승을 측정된 결과이다. 이 때 발생하는 동력손실은 Primary part 에서 2630 W 이다. 내장형 Cooler 그리고 외부 Cooler 에 흐르는 유량은 5 l/min 이고, Secondary part 의 Cooling pipe 에 흐르는 유량은 7, 5, 2 l/min 그리고 유량이 없는 상태로 변화시켰다. 냉각수의 유입온도는 모든 Cooler 에 동일하게 19 °C 이다.

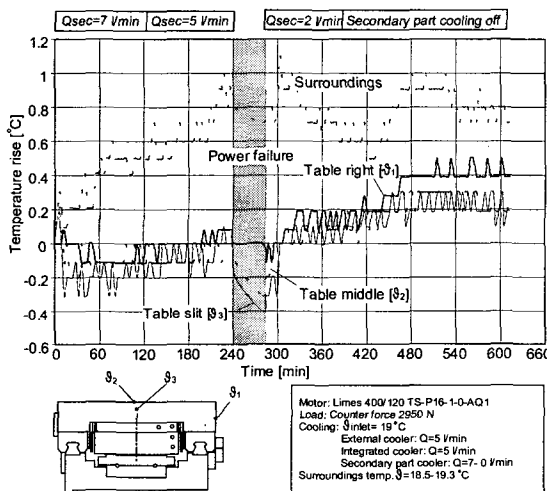


Fig. 11 Temperature rise in the machine table by counter force

온도측정 결과에서 보는 바와 같이 테이블의 온도상승은 전체적으로 0.4 °C 이하로 제한되었고 테이블의 오른편 (θ<sub>1</sub>), 테이블 중앙 (θ<sub>2</sub>) 그리고 테이블 내 (θ<sub>3</sub>)의 온도차이가 약 0.2 °C 이내에 머물러 테이블이 전체적으로 거의 균일한 온도를 보인다. 이것은 최적화 이전의 보통 판형 Cooler 에서 테이블의 온도상승이 약 5-12 °C 에 이른 것에 비하면 열특성을 최적화한 리니어모터의 테이블의 온도상승이 크게 감소하였음을 보여준다. 또한 모터의 동력이 없는 상태에서도 테이블의 온도저하는 약 0.4 °C 가 되어 열적으로 안정되어 있다.

Secondary part 에 설치된 Cooling pipe 의 유량의 변화에 따른 테이블의 온도상승을 보면 유량이 7 l/min 과 유량이 전혀 없는 경우를 비교해 볼때 약 0.4 °C 의 차이가 있어 Cooling pipe 의 유량이 테이블의 온도상승에 미치는 영향은 거의 무시할 수 있다. 즉, Cooling pipe 는 Secondary part 의 냉각에 효과가 있다.

Fig. 12 는 리니어모터에 작용하는 부하의 변화에 따른 테이블의 온도변동, 즉 열적인 안정성을 알아보기 위해서, 모터에 작용하는 부하를 속도와 가속도를 통해서 임의로 변화시키고 테이블의 온도상승을 측정된 결과이다.

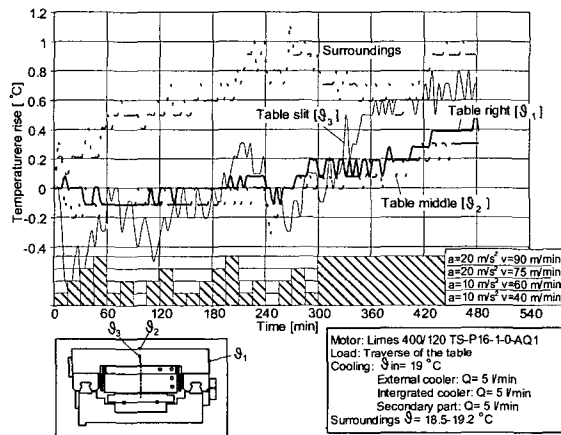


Fig. 12 Temperature rise in machine table by varying motor load

모터에 작용하는 힘의 변화는 속도와 가속도의 변화를 통하여 이루어졌고 그림에서 보는 바와 같이 1 단계는 a=10 m/s<sup>2</sup>, v=40 m/min, 2 단계는 a=10 m/s<sup>2</sup>, v=60 m/min, 3 단계는 a=20 m/s<sup>2</sup>, v=75 m/min 그리고 4 단계는 a=20 m/s<sup>2</sup>, v=90 m/min 이며, 각 단계에 따른 힘의 변화를 가시적으로 보이기 위해 가로축에 막대의 길이로 표시하고 힘을 임의로 변화시켰다. 내장형 Cooler, 외측 Cooler 그리고 Cooling pipe 에 흐르는 유량은 5 l/min 그리고 냉각수의 유입온도는 19 °C 로 동일하다.

온도측정 결과에서 보여주는 바와 같이 테이블의 온도상승이 0.6 °C 이하로 그리고 부하의 변동에 따른 테이블의 온도변동은 거의 없고 일정하게 유지된다. 즉, 열특성을 최적화한 리니어모터를 사용한 이송테이블은 온도상승이 1 °C 이하로 유

지될 수 있으며, 테이블의 온도가 균일하고, 모터에 작용하는 부하가 변화하더라도 열적으로 안정된다.

이러한 열특성의 최적화효과는 궁극적으로 Thermo-Sandwich-Construction 에 의한 효과적인 냉각방식에 기인한다. 이중 Cooler 와 단열재의 조합으로 이루어진 이 냉각방식은 내장형 Cooler 에 의해서 Primary part 가 그리고 외부 Cooler 에 의해서 테이블이 냉각된다. 또한 두 Cooler 사이에 위치한 단열재에 의해서 Primary part 로부터 테이블로의 열흐름이 억제된다. Conducting sheet 에 의해서 Primary part 에서 테이블 내측면으로의 열전달이 감소한다.

Fig. 13 은 리니어모터에 Counter force 가 작용하고 있을 때 Primary part 에서 측정된 온도를 보여주고 있다. 운전과 냉각조건은 Fig. 11 과 동일하다. Winding head 의 밀면 (9<sub>9</sub>)과 Primary part 의 측면의 온도(9<sub>13</sub>)상승은 운전조건에 크게 의존하고 온도상승은 18-29 °C 에 이른다. 반면 동력이 공급되는 소켓부위 (9<sub>10</sub>)나 Conducting sheet(9<sub>11</sub>)의 온도상승은 3 °C 이하이다.

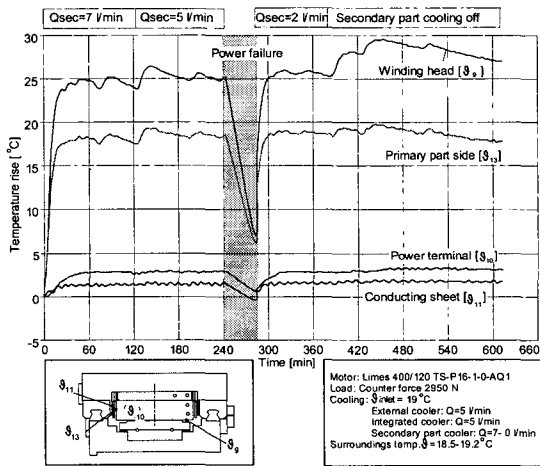


Fig. 13 Temperature rise on the primary part by counter force

Fig. 14 는 Secondary part 와 베드에서 측정된 온도를 보여주고 있다. 운전과 냉각조건은 Fig. 11 과 같이 2950 N 의 Counter force 가 리니어모터에 작용하고, 내장형 Cooler 와 외부 Cooler 에 흐르는 유량은 5 l/min 이고 Cooling pipe 에 흐르는

유량은 0-7 l/min 사이에서 변한다. Secondary part 와 베드에서 측정된 모든 온도는 Cooling pipe 에 흐르는 유량에 의존함을 보인다. Cooling pipe 에 냉각수를 전혀 유입하지 않을 경우 Secondary part 의 온도상승이 10 °C 이상이 된다. 따라서 Primary part 로부터 전달되는 열에 의해 Secondary part 가 가열되는 것을 방지하기 위해 최소한의 유량을 필요로 한다.

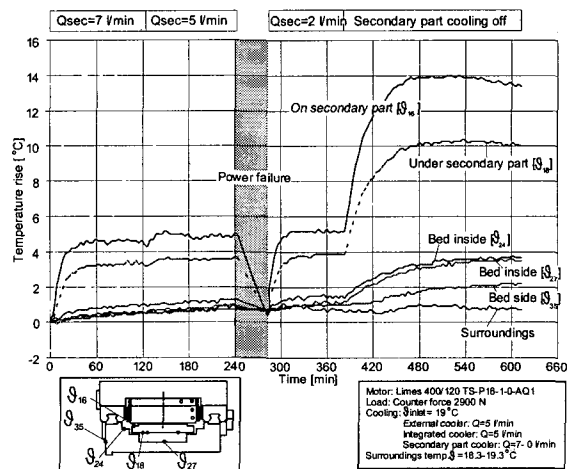


Fig. 14 Temperature rise on the Secondary part and bed by counter force

Fig. 15 에는 열특성을 최적화한 리니어모터의 각 Cooler 를 통해 배출되는 열량을 보여주고 있다. 정격전류에서 최대동력손실 2650 W 가 발생했을 경우 각 Cooler 에 흐르는 냉각수의 온도상승을 측정하여 배출된 열량을 계산하였다. 발생한 열은 내장형 Cooler 를 통해 84.2 %, 외부 Cooler 를 통해 8.4 % 그리고 Cooling pipe 를 통해 6.1 % 가 배출된다. 각 Cooler 를 통해 배출되는 열량은 Cooler 의 냉각조건에 의존하나 가장 많은 열은 내장형 Cooler 를 통해 배출된다. 이것은 외부 Cooler 로의 열흐름이 단열재에 의해 제한되고 또한 내장형 Cooler 가 열원인 권선에 가까이 위치하고 있기 때문이다.

단열재를 통과한 열 그리고 Conducting sheet 를 통해 흐른 열이 외부 Cooler 에 의해 배출된다. 또한 Primary part 로부터 Air gap 을 통해 Secondary part 로 전달된 열은 Cooling pipe 를 통해 배출된다. 그러나 외부 Cooler 나 Cooling pipe 를 통해 배출되

는 열은 내장형 Cooler 를 통해 배출되는 열에 비해 적다. 즉, 주열원인 Primary part 는 내장형 Cooler 에 흐르는 유량을 조절하여 냉각시킨다.

이와 같은 Thermo-Sandwich-Construction, Conducting sheet 그리고 Cooling pipe 를 조합하여 열특성을 향상시킨 리니어모터는 본 연구에서 연구된 크기의 리니어모터 뿐 아니라, 추력이 수십 N 으로부터 수만 N 에 이르는 다른 크기의 리니어모터에도 적용되며 근사하게 향상된 열특성을 가짐이 모터 생산자에 의해 입증되었다.<sup>(6)</sup>

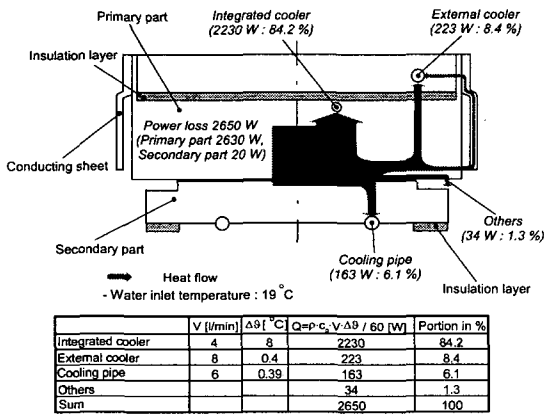


Fig. 15 Heat transported in each cooler

## 6. 결론

본 연구에서는 고속·대추력 리니어모터로 사용되는 동기식 리니어모터의 열특성을 최적화하는 기술을 종합하여 다루고 있다. 이중 Cooler 와 단열재의 조합으로 이루어진 Thermo-Sandwich-Construction 은 리니어모터의 열특성을 효과적으로 향상시킬 수 있는 기술이다. Primary part 의 측면으로부터 테이블의 내측면으로 전달되는 열은 Conducting sheet 에 의해서 감소시키고, Secondary part 는 Cooling pipe 에 의해서 효과적으로 냉각시킬 수 있다. Thermo-Sandwich-Construction, Conducting sheet 그리고 Cooling pipe 을 조합하여 열특성을 향상시킨 리니어모터는 이송테이블의 온도상승이 1°C 이하로 억제되고, 모터의 동력이 변화하여도 테이블의 온도가 일정하게 유지되어 열적으로 안정된다. 따라서 본 열특성을 최적화한 리니어모터는 공작기계의 이송시스템에 적용할 경우 온도보정이나 Cooler 를 제어할 필요가 없으

며, 또한 리니어모터의 가장 큰 취약점인 열특성을 설계단계에서 충분히 해결할 수 있음을 보여준다.

## 참고문헌

1. Eversheim, W., Klocke, F., Pfeifer, T., Weck, M., Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik, Aachen Machine Tool Engineering Colloquium AWK 99, pp. 311-356, 1999.
2. Gieras, J. F., Piech, Z. J., Linear synchronous motors, CRC Press, Boca Raton, pp. 256-263, 2000.
3. 은인용, "단열에 의한 동기식 리니어모터의 열특성 최적화," 한국정밀공학회지, 제 19 권, 제 3 호, pp. 123-130, 2002.
4. 은인용, "고속·대추력 리니어모터의 열특성 최적화 [1]," 한국정밀공학회지, submitted, 2002.
5. Eun, I.-U., "Optimierung des thermischen Verhaltens von elektrischen Linearmotoren fuer den Einsatz in Werkzeugmaschinen," Dissertation RWTH Aachen, pp. 33-34, 1999.
6. "Linearmotoren fuer Servoantriebe in Werkzeugmaschinen," Infotag ZN Stuttgart, Siemens, 1999.
7. Incropera, F. P., DeWitt D. P., Fundamentals of Heat and Mass Transfer, John Willy & Sons, pp. 738-740, 1996.
8. 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.
9. 은인용, "Linear Motor 를 이용한 위치결정 기술," 한국정밀공학회지, 제 17 권, 제 12 호, pp. 20-25, 2000.
10. Information sheet of Firm Krauss Maffei, Linear motors, pp. 10-16, 1998.