한국정밀공학회지 제 28권 4호 pp. 505-512 April 2011 / 505
Journal of the Korean Society for Precision Engineering Vol. 28, No. 4, pp. 505-512

고속·대추력 동기식 리니어모터 세컨더리 파트의 열특성 향상

Improvement of the Thermal Behavior of the Secondary Part of Synchronous Linear Motors with High Speed and Thrust

은인웅[1,✉]
In-Ung Eun[1,✉]

1 경기과학기술대학 금형디자인과 (Department of Die and Mold Design, Gyeonggi College of Science and Technology)
✉ Corresponding author: iueun@kinst.ac.kr, Tel: 031-496-4764

Manuscript received: 2010.9.3 / Revised: 2010.12.28 / Accepted: 2011.1.11

Linear permanent magnet synchronous motors utilize high-energy product permanent magnet to produce high thrust, velocity and acceleration. Such motors are finding applications requiring high positioning accuracy and speed response, for example, machine tools, in the absence of mechanical gears and ball screw systems. A disadvantage of the linear motors is high power loss in comparison with rotary motors. For the application of the linear motors to machine tools, it is required to use water coolers and to improve the thermal behavior through insulation and structure optimization or control strategies. This paper presents the function of the secondary part of the linear synchronous motor as to the thermal behavior and the improving method. The result shows cooling pipe combined with an insulation layer is a suitable design for improving of the thermal behavior.

Key Words: Linear Motor (리니어모터), Machine Tools (공작기계), Feed Mechanism (이송기구), Primary Part (프라이머리 파트), Secondary Part (세컨더리 파트), Cooler (냉각기), Cooling Pipe (냉각관), Insulation Layer (단열재), Finite Element Method (FEM, 유한요소법)

기호설명

$\dot{Q}$ =Heat transferred rate [W]
α = Convection heat-transfer coefficient [W/m^2 K]
A = Surface area [m^2]
ϑ_p = Temperature on the primary part [°C]
ϑ_s = Temperature on the secondary part [°C]

1. 서론

리니어모터(Linear motor)는 모터 자체가 직선운동을 하기 때문에 직선운동을 필요로 하는 기구에 적용하면 기존의 회전모터의 회전운동을 직선운동으로 바꾸는 요소가 생략된다. 리니어모터가 개발 초기에는 수송장치를 위해 개발되고 적용되었으나 1990 년대 이후 생산공작기계의 이송시스템으로 개발되어 고속·정밀공작기계에 사용되고 있다. 리니어모터를 공작기계의 이송시스템으로 사용할 경우 고속·고가속 직선운동이 가능하고 CNC-Controller 와의 조합하였을 때 높은 위치제어정밀도를 얻을 수 있다.[1] 반면 리니어모터의 약점은 낮은 효율과 그로 인해 작동 중 발생하는 고열문제이다.

리니어모터의 열특성에 대한 연구는 리니어모터의 제조업체뿐 아니라 공작기계회사에 의해서도 활발히 행해지고 있다. 최근에 공작기계에 사용되는 리니어모터의 열특성을 향상시키기 위한 연구

도 다수 보고되었다. 리니어모터의 열특성을 향상시키는 목적은 이송테이블의 온도를 낮추고 열변형을 줄여 위치제어오차를 최소화 하는 것이다.[2]

이를 위해서 가능한 방법으로써 단열재를 사용할 수 있다. 단열재를 열원인 모터와 테이블 사이에 배치하면 리니어모터에 작용하는 부하의 변동에 따른 이송테이블의 온도변화를 적게 할 수 있다는 이점이 있다.[3] 또 다른 방법으로는 리니어모터와 사용되는 냉각기(Cooler)의 구조나 형상을 변경하여 열특성을 향상시킬 수 있는데 여기에는 내장형냉각기, U 형 냉각기 그리고 열대칭 냉각기 등이 있다.[4] 더 나아가 단열재와 2 개의 냉각기를 조합한 Thermo-Sandwich-Construction 에 의해 리니어모터를 사용한 공작기계 이송계의 열특성을 효과적으로 향상시킬 수 있음이 보고되었다.[5]

지금까지 발표된 결과는 리니어모터의 주열원인 프라이머리 파트(Primary part)의 열특성과 최적화에 관한 것이었다.[3-7] 본 논문에서는 부열원인 세컨더리 파트(Secondary part)의 열특성과 향상 기술에 관한 것이다.

2. 유도식 및 동기식 리니어모터의 구조 및 열원

2.1 유도식 리니어모터와 동기식 리니어모터의 구조

현재 공작기계의 고속·정밀이송계로 사용되는 리니어모터를 구동원리에 따라 구분하면 유도식 리니어모터(Asynchronous linear motor; Induction linear motor)와 동기식 리니어모터(Synchronous linear motor, 영구자석식 리니어모터)로 구분한다. Fig. 1 은 리니어모터 2 가지 형식의 구조를 보여주고 있다. 유도식 리니어모터는 회전모터의 고정자(Stator)에 해당하는 프라이머리 파트(Primary part)에 1 차권선이 그리고 회전자(Rotor)에 해당하는 세컨더리 파트(Secondary part)에 Short circuit cage 들어 있다. 동기식 리니어모터는 세컨더리 파트가 영구자석으로 이루어져 있다. 따라서 리니어모터의 작동 중에 유도식 리니어모터는 1 차권선이 들어 있는 프라이머리 파트뿐만 아니라 Short circuit cage 로 구성되어 있는 세컨더리 파트에서도 고열이 발생한다. 그러나 동기식 리니어모터의 경우에는 세컨더리 파트가 영구자석으로 되어 있어 유도과정 중 발열량이 거의 없다.[2] 따라서 효율과 열특성의 관점에서 보면 동기식 리니어모터가 유도식 리니어모터에 비해 우수하다.[8]

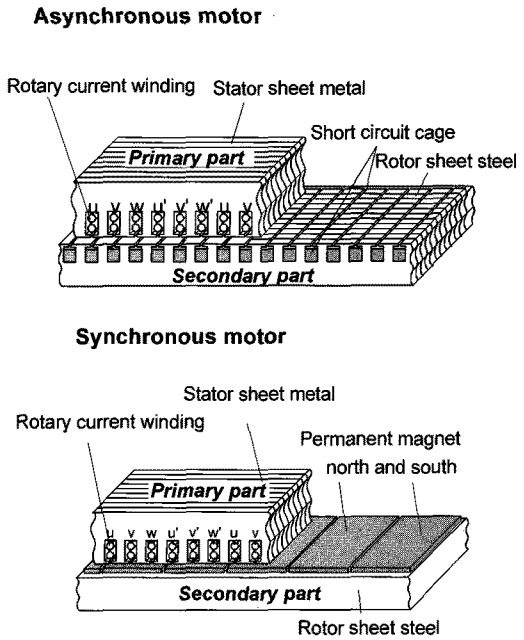


Fig. 1 Construction of asynchronous and synchronous linear motors

2.2 유도식 리니어모터와 동기식 리니어모터의 열원

Fig. 2 는 두 형식의 리니어모터에 작용하는 부하의 형태와 그에 따른 프라이머리 파트 그리고 세컨더리 파트의 열원으로서의 기능을 보여주고 있다.

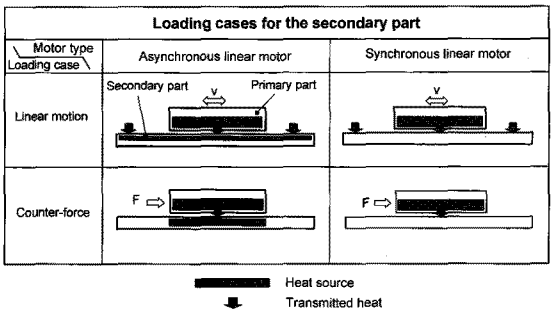


Fig. 2 Different loading cases for the secondary part

리니어모터에 작용하는 부하의 형태는 운동시 가·감속에 따른 운동부하와 정지 상태에서 절삭력과 같은 외력에 의한 정적 부하로 크게 나눌 수 있다. 유도식 리니어모터의 경우 운동상태에서나 정지상태에서 부하가 작용할 때 프라이머리 파트는 주열원으로써 작용한다. 세컨더리 파트는 운동

시에는 운동범위에 걸쳐 유도전류에 의한 열이 발생하고, 정지 시에는 프라이머리 파트의 길이에 대응하는 길이의 범위에서 열이 발생한다. 또한 프라이머리 파트의 온도가 높기 때문에 세컨더리 파트로 열대류와 복사에 의해서 열전달이 이루어진다. 따라서 유도식 리니어모터를 공작기계의 이송계로 적용할 경우 프라이머리 파트뿐 아니라 세컨더리 파트도 각각 독립적인 냉각기가 반드시 필요하다.[8]

동기식 리니어모터는 프라이머리 파트가 주열원이고 세컨더리 파트는 운동시나 정지 시 자체의 열원은 거의 없고 오직 프라이머리 파트로부터의 전달되는 열에 의해 가열된다. 리니어모터가 근래에 공작기계의 이송계로 적용되기 시작한 1990 년대 초에는 유도식이 많이 사용되었으나 1995 년 이후부터는 열효율뿐 아니라 힘의 밀집도에서도 우수한 동기식 리니어모터가 더 많이 사용되고 있다.[6-8] 따라서 본 연구에서는 동기식 리니어모터의 세컨더리 파트의 열특성에 초점을 맞춘다.

3. 리니어모터의 제원 및 실험장치

3.1 리니어모터의 제원

본 연구개발에 사용된 리니어모터는 동기식 리니어모터로써 중요한 기계적·전기적인 제원은 Table 1 에 나타나 있다. 열특성에 직접 영향을 미치는 손실동력은 프라이머리 파트에서 2600 W, 세컨더리 파트에서 약 20 W 이다. 정상추력은 3200 N, 정상속도는 90 m/min 으로, 이와 같은 기계적인 특성을 가진 리니어모터는 고속·대추력 이송장치로 중형(Middle size)의 선반, 밀링, 연삭기 및 머시닝센터의 이송장치로 적합하다.

Table 1 Technical data of the synchronous linear motor (*with water cooling)

Parameter	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
Max. power loss in primary part (W)	2600
Max. power loss in secondary part (W)	20
Air gap (mm)	1.5

3.2 실험장치

Table 1 의 리니어모터를 공작기계의 이송테이블과 베드 사이에 장착한 실험장치가 Fig. 3 에 나타나 있다. 프라이머리 파트는 이송테이블에 세컨더리 파트는 베드에 볼트에 의해 연결되어 있다. 프라이머리 파트와 이송 테이블 사이에 판형 수냉기가(Plate cooler) 설치되어 있고 세컨더리 파트는 발열량이 적어 냉각장치를 연결하지 않았다.

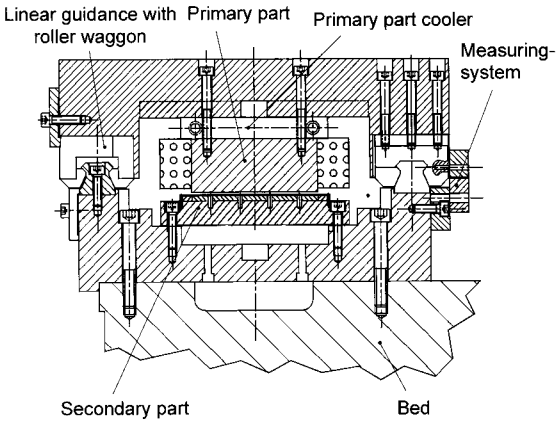


Fig. 3 Experimental set-up with the linear motor

고속직선운동을 가능하게 하기 위해 LM Guide 와 Linear roller wagon(RUE 35 DHL, INA)을 사용하였다. Linear scale 은 Heidenhain LC 181 을 적용하였다. 리니어모터의 위치, 속도, 가속도 등은 리니어모터 제어기(Indramat DDS 2.1)를 사용하여 제어하였다. 또한 냉각수의 유량과 유입온도는 독립된 제어기에 의해 행해졌다.

4. 실험결과

4.1 측정온도

Fig. 4 는 실험장치에서 측정한 온도를 보여준다. 온도센서는 플라틴 PT100 의 금속저항센서를 사용하였다. 그림은 정지상태에서 3200 N 의 추력이 작용하고 2600 W 의 손실동력이 발생할 경우 측정한 온도이다. 냉각조건은 냉각수의 유량이 10 l/min 그

리고 유입온도가 19 °C 이다. 측정 시 실험실의 대기온도는 약 20 °C 가 유지되도록 환경을 조절하였다.

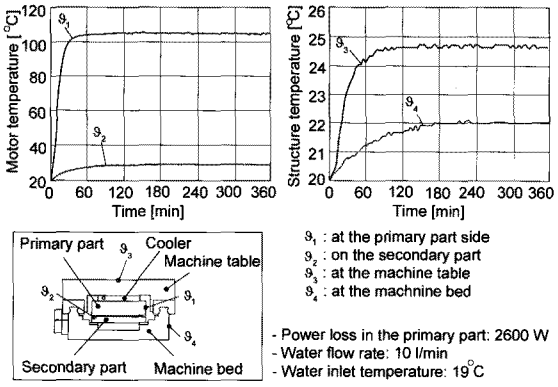


Fig. 4 Measured temperatures with the synchronous linear motor

Fig. 4 에서 보는 바와 같이 정격전류로 작동하는 리니어모터는 수냉에도 불구하고 프라이머리 파트 측면의 온도가 약 105 °C, 세컨더리 파트의 경우 30 °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.

5. 세컨더리 파트의 열특성 향상

5.1 세컨더리 파트의 열적 기능

위의 결과가 보여주듯이 동기식 리니어모터의 주열원은 프라이머리 파트이고 작동 중 고열로 가열된다. 따라서 지금까지의 열특성에 관한 연구는 프라이머리 파트와 그에 연결된 냉각장치 그리고 이송테이블에 관한 것이었다. 그러나 Fig. 4 에서 측정된 결과에서 세컨더리 파트도 주위온도에 비해 약 10 °C 그리고 베드는 5.2 °C 의 온도가 상승한다. 따라서 리니어모터가 고속·정밀이송장치로 사용될 경우 이 온도상승은 무시할 수 없으며, 모터의 제조나 설계단계에서 프라이머리 파트뿐만 아니라 세컨더리 파트도 수냉각장치나 열특성을 향상시키기 위한 방안이 필요하다.

Fig. 2 에서 보인 바와 같이 동기식 리니어모터의 세컨더리 파트는 자체의 열원은 없고 프라이머리 파트로부터 공기간극을 통해 전달되는 열에 의해 가열된다. 이 열은 세컨더리 파트의 온도를 상승시킬 뿐 아니라 Fig. 5 에 보인 바와 같이 연결된 베드로 직접 전달된다. 따라서 동기식 리니어모터를 공작기계의 이송시스템으로 적용할 경우 세컨더리 파트는 열원이 아니라 프라이머리 파트로부터 베드로 열을 전달시키는 열교량(Heat bridge) 역할을 한다.

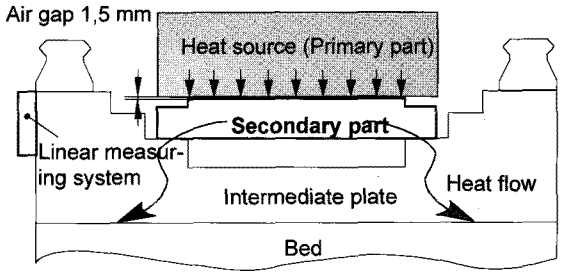


Fig. 5 Heat flow through the secondary part

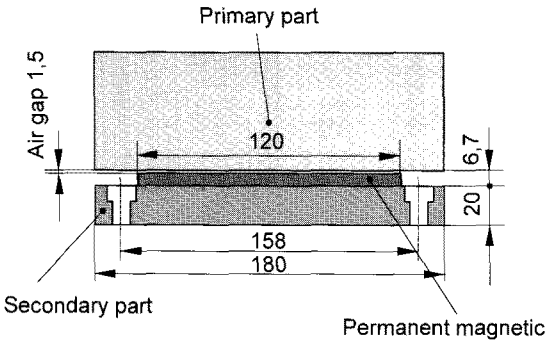
5.2 세컨더리 파트의 제원 및 원시형 판형 냉각기

본 연구에 사용된 리니어모터의 세컨더리 파트의 기하학적인 제원을 Fig. 6 에 나타내고 있다. 영구자석은 희토류계의 NdFeB 를 소결하여 제조되었으며, 기계적인 손상으로부터 보호하기 위해 윗면은 두께 0.3mm 의 스테인레스 강판으로 덮여져 있고, 열복사에 의한 열전달을 최소화하기 위해 유색의 도료를 칠하지 않고 은색의 금속광택을 유지하도록 하였다.

열복사를 무시하면 프라이머리 파트의 밑면으로부터 열대류에 의해서 세컨더리 파트의 윗면으로 전달되는 열량은 모터의 운동상태에 따라 다르지만 다음의 식에 의해 계산된다.

$$\dot{Q} = \alpha A(\vartheta_p - \vartheta_s)[W]$$

여기서, $\dot{Q}$ 시간당 전달율 [W], α는 열대류계수 [W/m^2 K], A 는 열대류가 일어나는 표면적 [m^2], ϑ_p 는 프라이머리 파트(하부)의 온도 [°C], ϑ_s 는세컨더리 파트(상부)의 온도이다[°C].



Length of the secondary part 1008 mm

Fig. 6 Dimension of the secondary part

세컨더리 파트의 기하학적 크기에 고려하여 프라이머리 파트로부터 세컨더리 파트로 열대류에 의해 전달되는 열은 프라이머리 파트와 세컨더리 파트 사이의 간극(Air gap)이 1.5mm 로 크지 않기에 모터의 운동상태, 모터에 작용하는 부하 등에 따라 차이가 있으나 근사값은 계산이 가능하다. 즉, 리니어 모터 정격추력 및 정격전류상태에서 프라이머리 파트의 하부의 온도는 약 120 °C 에 이르고 [3] 이때의 열대류 계수는 약 14 W/m^2 K[9], 세컨더리 파트 상부의 표면적은 A=0.12×1.008=0.12 m^2, ϑ_p-ϑ_s =90 °C 로 하면 $\dot{Q}$=151.2 W 가 된다. 따라서 5.4 에서 유한요소법에 의해 세컨더리 파트의 열해석을 할 때, 프라이머리 파트에서 세컨더리 파트로 전달되는 열 $\dot{Q}$=150 W 로 계산하였다.

5.3 판형냉각기와 냉각관

리니어모터의 개발 초기에는 유도식 리니어 모터가 공작기계에 먼저 적용되었기 때문에, 쉽게 설계하고 조립할 수 있는 판형냉각기가 프라이머리 파트뿐 아니라 세컨더리 파트에도 사용되었다. 다만 세컨더리 파트에 사용될 경우에는 이송길이 따라 세컨더리 파트는 길어지기 때문에 Fig. 7 의 (a)에서 보여 주는 바와 같이 냉각기를 서로 연결하여 사용하였다. 이와 같은 판형냉각기는 세컨더리 파트가 열원인 유도식 리니어모터에 유용하게 사용되고 있다.[8]

반면에 동기식 리니어모터의 경우 세컨더리 파트는 자체 내에 열원이 없기 때문에 판형냉각기 대신 Fig 7 의 (b)와 같은 냉각파이프가 효과적으로 사용될 수 있다. 냉각파이프는 영구자석 밑에 있는 기판(Base plate)의 밑면에 반원형의 홈을 가공하여 설치할 수 있다. 이와 같은 냉각파이프는 이송거리가 긴 세컨더리 파트의 냉각에 특히 유용하다. 기판 하부에 있는 반원형의 홈에 의하여 리니어 모터의 유도과정에서 자력선의 불연속으로 인한 손실이 크지 않다는 것이 입증되었다.[10]

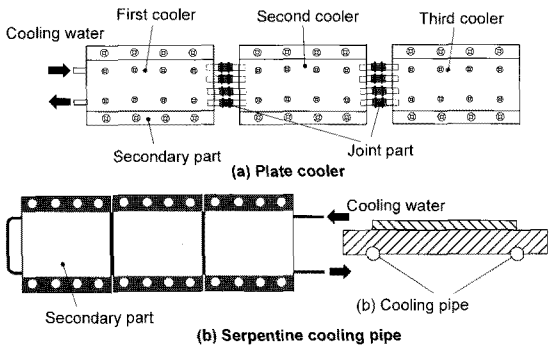


Fig. 7 Plate cooler and cooling pipe for the secondary part

5.4 유한요소법에 의한 세컨더리 파트의 열해석

세컨더리 파트의 열특성을 개선하기 위한 방법으로 유한요소법(Finite Element Method)이 적용되었다. 사용된 프로그램은 I-DEAS Master Series 이다. 열해석에 중요한 영구자석의 물성은 강과 큰 차이가 없어 동일하게 취급하였다. 경계조건으로 세컨더리 파트 상부에 작용하는 열부하(Thermal load)는 150 W, 대기온도는 20 °C, 세컨더리 파트 및 베드 표면의 대류상수 α=8 W/m^2 K 로 입력하였다.[9] Fig. 8 은 초기상태에서 유한요소법으로 계산한 온도분포를 보여주고 있다.

세컨더리 파트 상부중앙의 온도는 26.7 °C, 베드 중심부의 온도는 24.3 °C 이다.

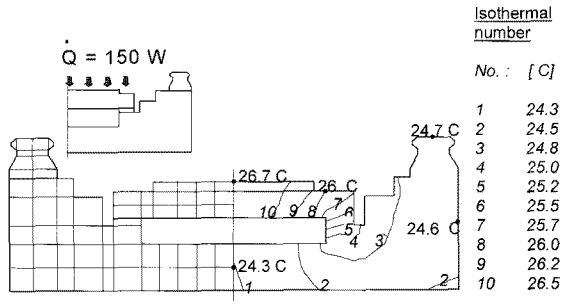
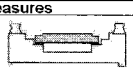
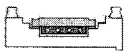
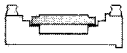
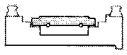
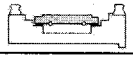
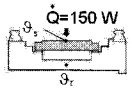


Fig. 8 Temperature analysis in the secondary part and bed with the finite element method

세컨더리 파트의 열특성을 개선하기 위해서 위의 초기 상태에서 4 개의 관을 가진 판형냉각기(Plate cooler), 세컨더리 파트와 베드 사이에 단열재를 배치하기(Insulation layer), 냉각관(Cooling pipe) 그리고 단열재와 냉각관을 조합한 경우(Cooling pipe with insulation layer)에 대해 유한요소 해석을 수행하고 그 결과를 Fig. 9 에 종합적으로 나타내었다. 그림에서 나타낸 ϑ_s 는 세컨더리 상부중앙의 온도를, ϑ_z 는 베드 중심부의 온도를 나타낸다.

Measures		ϑ_s [°C]	ϑ_z [°C]
Initial status		26.7	24.3
Plate Cooler		20.1	20.6
Insulation layer		35.3	22.1
Cooling pipe		23.8	22.2
Cooling pipe with insulation layer		24.6	21.3



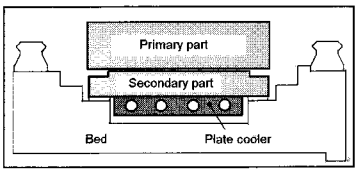
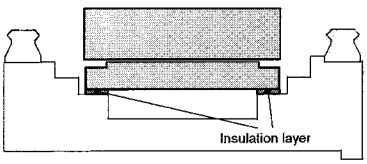
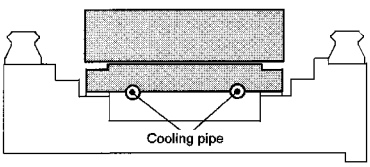
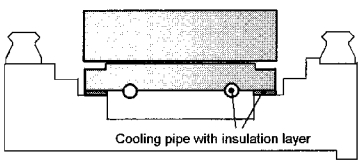
- Thermal load : 150 W
- Water inlet temp. 19°C
- Water flow rate : 2 l/min

Fig. 9 Comparison of the temperature on the secondary part and bed with different constructions

판형냉각기의 경우 높은 냉각능력으로 ϑ_s, ϑ_z, 는 각각 20.1 °C, 20.6 °C 이다. 단열재만 적용한 경우 세컨더리 파트 상부의 온도 ϑ_s 는 35.3 °C 높지만, 베드 중심부는 단열이 되어 ϑ_z 는 22.1 °C 이다. 냉각관만을 사용한 경우 냉각능력은 판형냉각기에 비해 떨어지나, 세컨더리 파트와 베드는 각각 23.8 °C, 22.2 °C 의 온도를 보였다. 냉각관과 단열재를 조합한 경우, 세컨더리 파트는 24.6 °C, 베드는 21.3 °C 의 온도를 보였다. 이상의 유한요소 해석결과에 따라 각 구조에 따른 장단점을 요약하여 Table 2 에 나타내었다.

먼저 일반적인 판형냉각기는 냉각능력은 우수하나, 자체의 열원이 없는 동기식 리니어모터 세컨더리 파트에는 효율적이지 않고, 특히 세컨더리 파트가 길 경우 냉각기를 서로 연결해야 하기에 조립이 복잡하다. 단열재만 적용하는 경우 베드로 흐르는 열전달을 줄일 수 있으나 세컨더리 파트가 가열되는 단점이 있다. 냉각관은 판형냉각기의 대안으로 특히 세컨더리 파트가 긴 경우 간단한 조립으로 설치가 가능하고 충분한 냉각능력을 보유

Table 2 Advantage and disadvantage with the different constructions

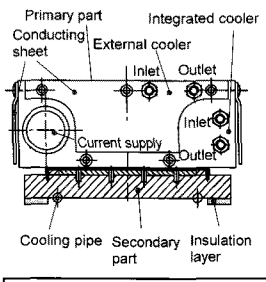
Construction	Advantages and disadvantages
Plate cooler 	+ Sufficient cooling effect for the secondary part - Expensive montage - Inconvenient by long secondary part
Insulation layer without cooler 	+ Simple montage + Reduction of heat flow to machine bed - Heating up of the secondary part
Cooling pipe 	+ Simple montage + Cooling of the secondary part + favorable for long secondary part - Heat flow to machine bed
Cooling pipe insulation layer 	+ Simple montage + Cooling of the secondary part + favorable for long secondary part + Reduction of heat flow to machine bed

하고 있다. 단점은 주열원인 프라이머리 파트로부터 베드로 흐르는 열을 충분히 단열하기 어렵다는 것이다. 이 단점을 보완하기 위해 냉각관과 단열재를 조합하여 사용하면 간단한 설치와 조립으로 특히 길이가 긴 세컨더리 파트를 냉각하고 베드로 흐르는 열전달도 감소시킬 수 있다.

6. 열특성 최적화한 리니어모터

6.1 열특성 최적화한 리니어모터

Fig. 10 에는 열특성을 최적화한 동기식 리니어 모터의 외관과 중요한 기술적인 제원을 나타내고 있다.



Continuous force	2950 N
Maximum force	6500 N
Magnetic attraction	15000 N
Continous velocity	101 m/min
Maximum velocity	211 m/min
Nominal current	22.2 A
Maximum current	56 A
Force constant	133 N/A
Mass of primary part	43.4 kg
Maximum power loss in primary part	2630 W

Length of primary part	695.8 mm	Length of secondary part	504 mm
Width of primary part	198.8 mm	Width of secondary part	180 mm
Heigth of primary part	75.4 mm	Heigth of secondary part	30.2 mm
Degree of protection	IP 54	Mass of primary part	15.9 kg
Temperature class	F	Maximum allowable temperature of secondary part	70 ℃

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

본 연구의 Fig. 2 에 보인 실험장치를 기반으로 프라이머리 파트 그리고 세컨더리 파트의 구조변경 및 단열재의 적용에 의해 열특성을 최적화하여 상용화한 동기식 리니어모터이다.[10] 프라이머리 파트의 열특성 및 최적화한 내용은 참고자료 3, 4, 5 에 소개하였다. 세컨더리 파트는 위에 소개한 냉각관과 단열재를 적용하였다. 열특성을 최적화하는 과정에서 정상추력은 3000 N 을 기준으로 설계가 진행되었으며, 제어 파라메터를 변경하여 정상속도를 기존의 90 m/min 에서 101 m/min 으로 고속화하였다.

6.2 열특성 향상한 리니어모터의 열특성(세컨더리 파트)

Fig. 11 은 열특성을 최적화한 리니어모터의 온도를 세컨더리 파트를 중심으로 보여주고 있다. 리니어모터의 성능평가 시 열특성은 운동상태 보다 정지 상태에서 힘을 받을 때가 더 열악하다.[8] 왜냐하면 Fig. 2 에 보인 바와 같이 리니어 모터가 정지 상태에서 힘을 받을 때 국부적으로 과열될 가능성이 더 높고, 또한 운동 시 보다 외부로 발산되는 열이 적기 때문이다. 따라서 모터는 정상추력에 근사한 2900 N 의 힘으로 부하를 받고 프라이머리 파트의 냉각을 위해 적용된 내·외부 냉각기(Internal and external cooler)의 냉각수는 유입온도가 19 °C, 유량은 5 l/min 하였고, 세컨더리 파트를 냉각하기 위한 냉각파이프의 냉각수의 유입온도는 19 °C, 유량은 0 l/min~7 l/min 로 변화시켰다.

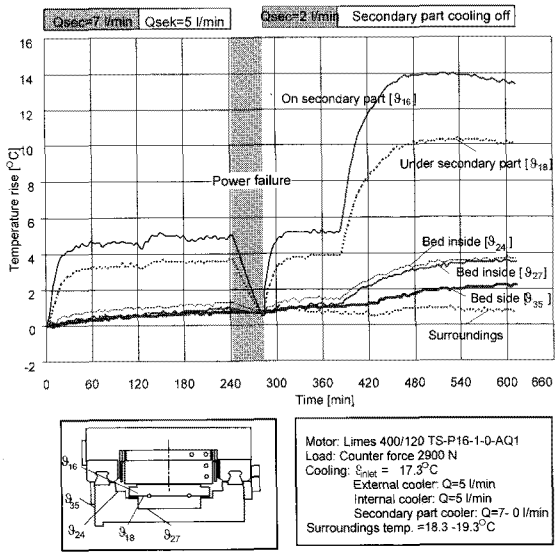


Fig. 11 Temperature rise on the Secondary part and bed by counter force

먼저 세컨더리 파트 상부의 온도(ϑ_{16})는 냉각관 냉각수 유량에 관계없이 약 5 °C 상승하였다. 그러나 냉각수의 유입이 없는 경우에 온도상승은 약 14 °C 였다. 베드 내면의 온도(ϑ_{24}) 상승은 유량이 적을수록 근소하게 높게 나타났으나 2 °C 이하였고 냉각수가 없는 경우 3.8 °C 정도의 온도상승이 있었다.

즉, 정상추력 상태에서 프라이머리 파트 냉각용 냉각기가 운전될 때, 세컨더리 파트도 정밀이송용 공작기계에 적용을 위해서 수냉각이 필요하다. 냉각관과 단열재의 조합은 세컨더리 파트의 냉각과 프라이머리 파트로부터 세컨더리 파트로 열흐름을

차단하기 위한 좋은 구조이다. 냉각수의 유량은 리니어모터의 크기에 따라 다르나 소량(본 연구 2 l/min)으로 가능하다.

7. 결론

본 논문에서는 공작기계 이송계로 적용되는 고속·대추력 동기식 리니어모터 세컨더리 파트의 열특성을 향상시키는 방안에 대해 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 동기식 리니어모터의 세컨더리 파트는 그 자체로써 열원은 아니나, 프라이머리 파트의 하부로부터 열복사와 열대류에 의해 전달되는 열을 베드로 연결시키는 열교량(Heat bridge) 역할을 한다.

2) 고속·정밀 이송계로 동기식 리니어모터를 적용할 경우 프라이머리 파트뿐 아니라, 세컨더리 파트도 최소의 유량에 의한 수냉각이 필요하다.

3) 세컨더리 파트의 냉각을 위한 수냉기로 기존의 판형냉각기 대신 냉각관(Cooling pipe)과 단열재의 조합은 모터의 냉각과 머신 베드로 흐르는 열을 차단하기 위한 효과적인 구조이다.

참고문헌

1. Gieras, J. F. and Piech, Z. J., "Linear synchronous motors," CRC Press, pp. 256-263, 2000.
2. Boldea, I. and Nasar S. A., "Linear Motion Electromagnetic Devices," Tayor & Francis, pp. 103-143, 2001.
3. Eun, I.-U., "Improvement of the Thermal Characteristics of Synchronous Linear Motors through Insulation," J. of Korean Society of Precision Engineering, Vol. 19, No. 3, pp. 123-130, 2002.
4. Eun, I.-U., "Optimization of the Thermal Behavior of Linear Motors with High Speed and Force [1st Paper]," J. of Korean Society of Precision Engineering, Vol. 19, No. 6, pp. 184-191, 2002.
5. Eun, I.-U., "Optimization of the Thermal Behavior of Linear Motors with High Speed and Force [2nd Paper]," J. of Korean Society of Precision Engineering, Vol. 19, No. 7, pp. 163-170, 2002.
6. Hwang, Y.-K., Eun, I.-U., Lee, C.-M., "A Study on the Cooling Parameter Decision of Linear Motor by Finite Volume Method," Proc. of KSPE Spring Conference, pp. 437-440, 2006.
7. Hwang, Y.-K., Lee, C.-M. and Eun, I.-U., "A Study on Improvement of the Thermal Stability for Development of Linear Motors with High Speed and Accuracy," J. of Korean Society for Precision Engineering, Vol. 25, No. 6, pp. 126-133, 2008.
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. VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingieurwesen(GVC), "VDI-Wärmeatlas," Springer-Verlag, pp. Fa1-Fd4, 2006.
10. Siemens AG, http://www.automation.siemens.com/mcms/mc/de/motoren/direktantriebe/linearmotor/Seiten/linearmotor.aspx