

# 리니어 모터의 냉각 특성에 관한 실험적 연구

\*오정석, 김경호, 박천홍  
한국기계연구원 지능기계연구센터

## Experimental Study on the Cooling Characteristics of Linear Motors

\*J. S. Oh, K. H. Kim, C. H. Park  
Intelligent Machine System Research Center, Korea Institute of Machinery & Materials

Key words : Linear Motor, Cooling, Continuous Force

### 1. 서론

대형 장치산업의 기반이 되는 정밀기계 및 반도체 장비 등의 분야는 그 특성상 기계, 전자, 광학 기술들의 유기적인 결합을 필수로 하고 있으며 압축하여 시스템 기술이라 통칭할 수 있다. 이러한 시스템 기술에는 자동화 및 정밀 위치결정 기술이 시스템의 경쟁력을 좌우하는 기본적인 요소 중의 하나이며 그 핵심에는 모터가 있다. 모터는 전기 에너지를 기계에너지로 변환해 주는 요소로서 다양한 형태로 발전해 왔다. 특히 직선운동시스템에서는 전통적인 회전형 모터와 볼스크류의 조합 대신 백래쉬가 없고, 비접촉이며, 구조가 간단하고, 유지보수가 편리한 리니어 모터(linear motor)를 이용한 직접구동(direct drive)방식이 점점 더 응용범위를 넓히고 있는 추세이며 그 경향은 노광용 스캐너(lithography scanner)나 와이어 본더(wire bonder) 등의 반도체 공정장비 및 전자부품 조립장비인 칩 마운터(chip mounter), 고속 CNC 등 고속의 정밀위치결정을 요구하는 기계시스템들에서 확연히 드러나고 있다.

반면에 리니어 모터는 회전형 모터와는 달리 작업대 근방에 위치하여 구동되며 주로 발열원인 코일부가 움직이는 방식으로 많이 사용되기 때문에 주변 기계요소로의 열 전달에 따른 열 변형 및 정도 악화가 심각하여 사용상의 주의를 요하고 있다.<sup>1</sup> 장비의 duty cycle 이 클 경우에는 발열 문제에 대한 고려가 필수적이며 이에 따른 적절한 냉각시스템이 사용되어야 한다. 모터의 냉각에 관한 문제는 실용적인 문제로 대부분의 연구가 모터 제작회사 및 장비 제작회사들을 중심으로 행해졌고 또한 참고할 수 있는 자료 자체가 모터 냉각에만 국한되어 열 변형에 따른 정도 변화에 대해서는 참고할 수 있는 자료가 거의 없는 실정이다.

본 연구에서는 기본적으로 리니어 모터의 공랭 및 수냉 특성을 검증하였고 이러한 냉각 특성이 스테이지의 위치결정 정도에 미치는 영향에 대한 실험결과를 소개하기로 한다.

### 2. 리니어 모터의 공랭 특성에 관한 실험

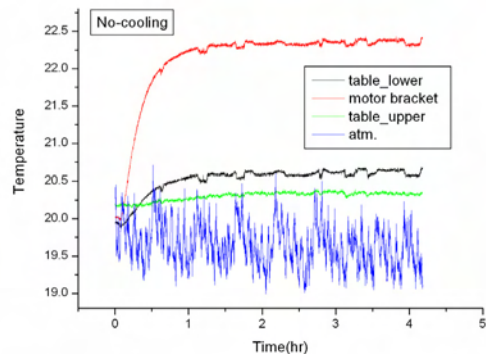
연속추력(continuous force)은 열과 관련된 기본 파라미터이며 기준 운동 싸이클의 각 단계에서 필요한 힘들의 시간에 대한 RMS 평균으로 나타낼 수 있다.

$$F_c = \sqrt{\frac{F_1^2 \times T_1 + F_2^2 \times T_2 + \dots + F_n^2 \times T_n}{\sum_{i=1}^n T_i}} \quad (1)$$

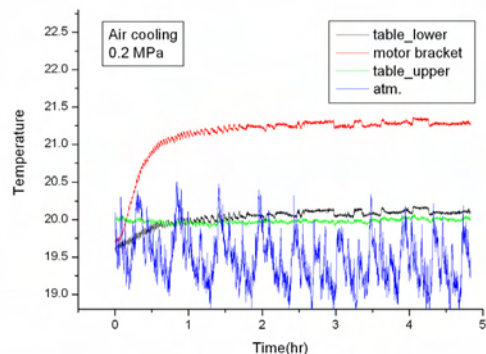
여기서  $F_i$ 는  $i$  단계 운동에서 필요한 힘이고,  $T_i$ 는  $i$  단계 운동에 소요되는 시간이다. 기준 운동 싸이클과 하중, 마찰력 등이 결정되면 식(1)에 의해 필요한 연속추력을 구할 수 있다. 계산된 연속추력을 참고하여 모터를 선정하게 되는데 여기서 일반적인 물은 없지만 저자의 경우 위치결정 정도가 중요하다면 가능하면 모터 연속추력이 필요 연속추력

의 3 배 이상이 되도록 선정하고 있다. 필요한 연속추력과 모터가 선정되면 모터정수(motor constant)에 의해 발열량을 계산할 수 있고 열저항(thermal resistance)으로부터 코일의 온도를 추정하는 것이 일반적인 모터 열 계산의 순서이다. 다만 이 경우에도 모터 코일의 온도만 추정할 수 있을 뿐 이 때의 열 변형에 따른 과도구간에서의 정도 변화에 대한 사항을 추정하는 것이 매우 어렵다는 문제는 존재한다.

공랭 실험은 당 센터에서 보유중인 대면적 미세형상 가공장비를 통해 수행되었으며 사용한 리니어 모터는 무철심형으로 trilogy 사의 410-4M 모델이었다. 이 모델은 공랭이 가능하도록 모터에 냉각 홀이 가공되어 있다. Moving mass 는 300 kg, 속도는 100 mm/s, 가속도는 500 mm/s<sup>2</sup>, 이동거리는 50 mm, delay time 은 0.3 초로 반복 구동하였으며 이 때 걸리는 연속추력은 약 95 N, 발열량은 약 11.8 W로 모터의 연속추력 사양인 449 N 의 약 21 %에 해당하는 구동조건이었다. 이 구동 조건은 일반적인 경우 거의 부하가 걸리지 않은 편에 속하는 조건이다. 이 조건에서 냉각을 하지 않았을 경우와 0.2 MPa 의 압력으로 공랭을 하였을 경우의 온도 특성을 Fig. 1 에 나타내었다.



(a) 냉각을 하지 않은 경우



(b) 공랭을 한 경우(0.2 MPa)

Fig. 1 Comparison of air cooling characteristics

실험결과를 보면 motor bracket 의 경우 냉각을 하지 않았을 때는 2.3°C 상승하였으나 공랭을 하였을 경우 상승폭이 1.5 °C 로 줄어들었고 테이블 하단에서는 0.7 °C 상승에서 0.4 °C 상승으로 대략 30 % 이상 온도 상승을 떨어뜨리는 효과를 가지고 있음을 알 수 있다.

**3. 리니어 모터의 수냉 실험 및 정도 개선 효과**

리니어 모터의 수냉 실험 및 정도 개선 효과 관찰은 일반적인 적층형 XY 스테이지에서 이루어졌다. 아래 축을 Y 축이라 하면 Y 축 구동 시 Y 축 코일부의 발열로 인해 X 축 guide 가 놓이는 Y frame 에 국부적인 열원이 존재하게 되고 이는 Y frame 의 온도 구배를 초래하여 비대칭적인 열변형이 발생하게 된다. 이에 따라 X 축 각도 오차 특히 pitch 오차가 변하게 되어 X 축 위치결정 특성이 온도가 안정될 때까지 변하는 현상을 초래하게 된다. 리니어 스케일을 사용할 경우 작업영역과 스케일의 상호 높이 차가 클수록 아베 원리에 의해 그 변화는 더 커지게 된다. 이와 같은 과도구간의 위치결정 특성 변화는 일반적으로 장비를 공회전시키는 방법으로 억제할 수 있지만 공정특성에 따라 공회전이 불가능한 경우도 있으므로 이러한 경우에는 냉각이 필요하게 된다. 본 연구에서는 수냉을 하였을 경우의 과도 구간의 위치결정 특성 변화를 수냉하지 않았을 경우와 비교하였다. 사용된 리니어 모터는 무철심형으로 Y 축 모터의 경우 660 N의 peak 추력에 220 N의 연속추력 사양을 가지고 있다. 구동 조건을 적절히 조절하여 70 N의 연속추력이 걸리게끔 실험조건을 정하였고 이때 모터의 발열량은 이론적으로 13.2 W 였다. 이 때의 추정 코일 온도는 7 °C 이며 Fig. 2 는 이 때의 Y frame 의 온도변화를 보여 준다.

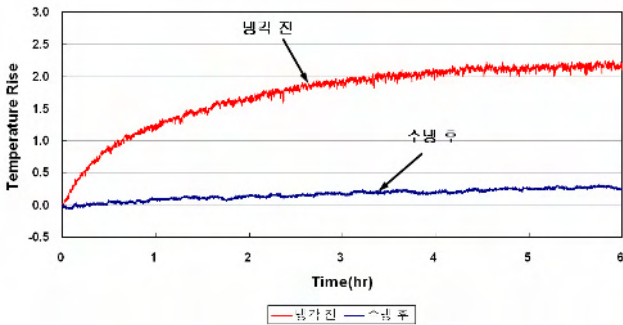


Fig.2 Comparison of water cooling characteristics

사용된 무철심형 리니어 모터의 경우 수냉 장치가 없기 때문에 Y 모터 브라켓에 수냉 장치를 고안하여 제작하였다. 냉각 유량은 분당 3 리터였으며 수냉 전에는 Y frame 의 온도가 2.2 °C 정도 상승하였으나 수냉 후에는 Y frame 의 온도가 0.3 °C 정도 상승하는 것에 그침을 알 수 있다. 즉 온도 상승은 냉각 전에 비해 약 1/7 에 그쳤으며 공랭 방식에 비해 수냉 방식이 월등한 효과를 가지고 있음을 알 수 있다.

이와 같은 두 조건에서의 위치결정 특성 변화를 관찰하기 위하여 스테이지 상부에 기준 패턴이 특정 간격으로 새겨진 glass master 를 놓고 vision 을 이용하여 X 축으로 200 mm 떨어진 두 point 간의 간격변화를 관찰하였다. 이 때 X 스케일과 master glass 간의 상호 높이 차는 약 300 mm 정도 였다.

Fig. 3 은 그 비교 결과를 보여 준다. 냉각을 하지 않았을 경우는 200 mm 간격의 두 point 간의 간격 변화가 13 um

에 이르는 반면에 수냉을 하였을 경우는 그 변화가 3 um 에 그쳐 1/4 이하로 줄어들음을 알 수 있다. 또한 간격 변화의 방향 또한 냉각 전의 경우 간격이 늘어나는 방향이었다면 수냉 후에는 간격이 줄어드는 방향임을 알 수 있다. 이는 리니어 모터 부근보다 주위의 온도가 다른 요인에 의해 더 올라가는 현상에 기인한다.

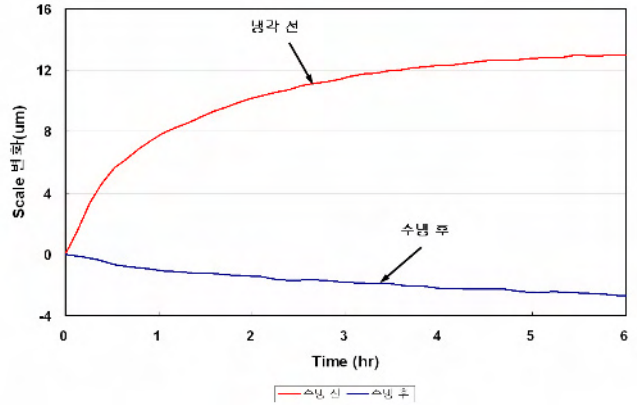


Fig. 3 Comparison of scale variation in transient region

**4. 결론**

리니어 모터는 백래쉬가 없고 고정도 위치결정이 가능하고, 비접촉이며, 구조가 간단하고, 유지보수가 편리한 등 여러 가지 장점으로 인해 폭넓게 사용되고 있지만 가격적인 측면과 함께 스테이지 중앙부에 발열원인 코일부가 장착되는 관계로 열 문제에 민감한 단점을 가지고 있다. 특히 적층형 스테이지의 경우 초기 과도구간에서의 온도 구배의 변화 및 열 변형으로 인해 위치결정 특성이 달라지는 바 공회전을 시켜 열 평형 상태에서 사용하지 못할 경우는 이 과도구간에서의 변화가 큰 문제를 야기시키게 된다. 본 연구에서는 기본적인 공랭 및 수냉 특성 실험을 통해 냉각 효과를 확인하였고 냉각 전과 냉각 후의 위치결정 특성 변화를 관찰하여 냉각을 통해 그 특성을 대폭 향상시킬 수 있음을 보였다. 다만 이와 같은 과도 구간에서의 위치결정 특성 변화는 온도 특성뿐만 아니라 스케일의 위치나 단열 구조에도 큰 영향을 받으므로 이러한 요인들을 설계 시에 동시에 반영하는 것이 바람직하다.<sup>2</sup>

**참고문헌**

1. Pritschow, G, "A Comparison of Linear and Conventional Electromechanical Drives," Annals of the CIRP, **47**, 541-548, 1998.
2. 은인용, "단열에 의한 동기식 리니어모터의 열특성 향상," 한국 정밀공학회지, **19**, 123-130, 2002.