

공작기계 고속이송용 리니어 모터의 열 특성에 관한 연구

정일용*, 강은구, 이석우, 최현중(한국생산기술연구원)

A study on thermal characteristics of linear motor for high speed machining tools

I. Y. Chung, E. G. Kang, S. W. Lee, H. Z. Choi(KITECH)

ABSTRACT

Linear motor feature a direct connection to the machine tool, therefore a direct route for heat transfer. The heat dissipation of linear motor machine is affected by the maximum temperature rise of the primary part, coil and the cooling method. To minimize temperature induced dimension changes and decrements of performance, linear motor machine require effective cooling mechanism. To evaluate cooling performance of existing linear motor machine, some experiments about temperature profile are performed using thermocouple recorder. Due to the lack of information about internal structure, only some finite element modelling is prepared and analyzed.

Key Words · linear motor(리니어 모터), heat transfer(열전달), FEM(유한요소법), thermocouple(열전대)

1. 서론

리니어 모터는 회전형 모터의 원형구조를 직선으로 전개하여 전기에너지를 직선운동에너지로 변환하여 추력을 발생시키는 장치이다. 그러므로 회전형 모터의 직선변환기구에 비해 기계적인 변환장치가 필요없으므로 구조가 간단하며 신뢰성이 좋을 뿐만 아니라 기계적 백래쉬가 발생하지 않아 고속 고정밀 위치제어가 가능하다. 또한 공극(air gap)에 있어 가동부 및 고정부가 비접촉구동을 하므로 마찰이 없으며 소음이 적다. 그러나 기계적 구조가 개방적이므로 공극을 일정하게 유지해야 하며, 회전형 모터에 비해 역률 효율이 낮으며 누설자속이 많이 발생한다.

특히 전기적 모터에는 부산물로 수반되는 것이 열발생 문제이다. 리니어 모터는 공작기계 구조물과 직접 결합되어 구동되므로 이는 곧 리니어 모터에서 발생하는 열전달의 직접적인 경로가 되는 것이다. 이러한 열 발생은 리니어 모터의 성능을 저하시키며 특히 고속 고가감속시 위치정밀도를 저하시키게 된다. 그러므로 리니어 모터의 성능을 극대화시키고 온도변화에 대한 위치정밀도를 향상시키기 위해서는

리니어 모터에서 발생하는 열에 대한 방열대책이 필수적이며, 회전형 모터의 공작기계에 비해 고비용의 냉각시스템이 필요하게 된다.

리니어 모터에서 발생하는 열을 효과적으로 분산시키기 위해서는 리니어 모터에 대한 냉각체질의 구조 및 냉각판 등의 방열대책이 필요하다. 최근에는 리니어 모터의 열적거동의 최적화를 위해 실험 및 유한요소법을 이용하여 리니어 모터의 코일부분의 열적 거동에 대해 냉각체질의 설계 및 배치를 최적화하는 연구가 있었다¹⁾. 또한 유한요소법을 이용하여 전압 및 공극에 변화에 대한 영구자석 BLDC 리니어 모터의 자기장해석, 전자기-열적, 정적 해석에 대한 연구도 수행되었다²⁾.

본 연구에서는 동기식 리니어 유도 모터에 대한 특성을 파악하고 리니어 모터에 수반되는 열 특성을 실험과 해석을 통하여 분석하고자 한다. 본 연구에서는 독일 KRAUSS MAFFEI에서 제작한 LIMES 800/240시리즈 리니어 모터를 대상으로 리니어 모터의 온도변화를 측정하였으며, 유한요소해석을 수행하였다.

2 열 특성 실험

2.1 실험 개요

리니어 모터의 온도를 변화시키는 원인으로는 대기의 온도 변화, LM 가이드의 마찰운동, 모터의 전기적인 에너지손실, 유도전류에 의한 열 발생등을 들 수 있다. 이러한 리니어 모터의 온도변화로 위치정밀도를 떨어뜨리며, 과열로 인한 모터 효율의 감소나 심하게는 손상까지 유발시킨다.

일반적으로 고속, 고가속속 조건에서 온도변화는 모터를 구동시킬 때의 전기적인 에너지의 소모와 LM 가이드에서의 볼의 구름접촉에서 발생하는 열을 고려하게 된다. 본 논문에서는 리니어 모터의 고속 운전시의 위치에 따른 열 발생 분포와 시간에 따른 열 발생의 경향성을 파악한다.

리니어 모터의 온도측정을 위한 실험 장치구성은 Fig. 1에 보여지며, 측정대상인 리니어 모터의 기술적 사양은 Table 1에 나타내었다. 실험은 측정이 가능한 리니어 모터의 표면에 직경이 0.127mm, K type의 열전대를 부착하여 30캐널 타점식 기록계로 온도를 측정하였으며 상업용 리니어 모터 내부에 열전대를 삽입하기에는 어려움이있어 외부 표면에만 열전대를 부착하였다.

2.2 이송속도 및 위치에 따른 온도분포

이송속도의 변화는 전기적인 에너지의 변화를 가져오며, 이로 인해 코일 주변에 열이 발생하게 된다.

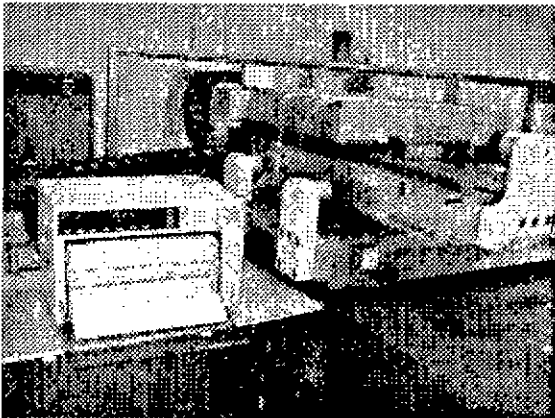


Fig. 1 Photograph of experimental setup
(Linear Motor : KRAUSS MAFFEI, Germany)

Fig. 2는 이송속도 50m/min와 100m/min일때의 최종온도분포를 나타낸 그림이다. 실험결과 primary part 좌우측의 molding part의 온도가 가장 큰 값을

보였으며, 이는 core부의 전기적인 에너지의 변화로 발생한 열에 기인한다. Cooler plate에서는 급격한 온도 변화를 볼 수 있었으며, table에서의 온도와 큰 차이를 보이지 않았다.

Secondary part에서의 온도는 primary part와는 달리 온도가 높게 측정되지 않았으며, 온도 분포가 중앙에서 높고 측면으로 갈수록 낮은것으로 보아 primary part에서의 대류 열전달의 영향이 크게 나타난 것으로 판단된다. 대체적으로 중앙을 기준으로 좌우측의 온도분포는 대칭성을 보이나 바깥 온도는 그다지 큰 변화를 보이지 않았다. 그림에서 보듯이 이송속도를 증가시켰을시 primary part 최고점에서 온도는 10℃, 그외 부분에서는 5℃정도의 온도변화를 확인할 수 있었다.

Table 1 Technical Data of LIMES 800/240

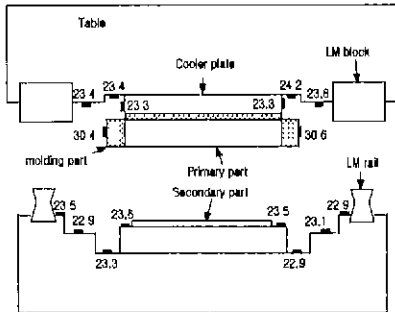
Specification	value
Nominal Thrust	6600 N
Maximum Thrust	14.5 kN
Force Constant	197 N/A _{eff}
Primary Resistance at warming up	1.62 Ω
Max. Speed at Nominal Thrust	140 m/min
Max. Speed at Maximum Thrust	60 m/min
Mass of Primary	60 kg
Mass of Secondary per Meter	55 kg/m
Coolant	Water
Max. Coolant Inlet Temp.	35 ℃
Coolant Flow Rate	5.2 l/min

Primary part와 cooler plate 주위의 온도를 세밀하게 측정하기 위해 열전대를 새로이 부착하여 온도측정 실험을 수행하였으며 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 실험결과 그와 동일하게 molding part에서 최고 온도값이 측정되었다. Primary part 끝단에서의 온도는 높지않았으며 좌우측의 molding part에서 중앙으로 갈수록 온도가 떨어지는 경향을 보이는데 이는 primary part 내부에 있는 냉각수 채널 및 주위와의 대류열전달에 기인한 것으로 보인다. LM block은 table 부위에서 보다 2℃정도 상승한 값을 가졌다.

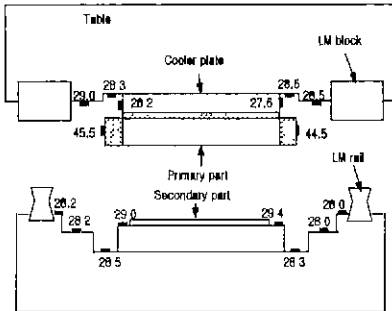
Secondary part에서의 온도분포로 보아 뚜렷하지는 않지만 중앙부에서 바깥쪽으로의 열전달이 보인다 Fig. 3(b)에서는 깊이방향에 따른 molding part와 cooler plate의 온도분포를 측정하였다. molding part에서는 깊이에 대해 중심부에서 최고온도가 측정되었으며, 중심에 대해 앞뒤쪽 온도의 대칭성이 보였다. 그러나 cooler plate에서는 뚜렷한 온도 변화가 나타나지 않았다.

2.3 시간에 따른 온도 변화

Fig. 4는 시간에 따른 온도의 상승 변화를 나타내었다. 측정 부위는 primary part 끝단 중앙부, molding part의 측면의 중앙부, LM block 그리고 테이블의 대표적인 측정점에서의 온도 변화이다. 그림에서 보듯이 리니어 모터 구동후의 정상상태에 도달하는 온도 시정수가 짧음을 알 수 있는데 이는 냉각 채널을 갖춘 리니어 모터에서 냉각 효과가 적절하게 유지되고 있음을 보여준다.

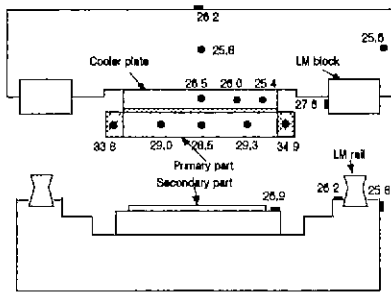


(a) Feedrate = 50m/min

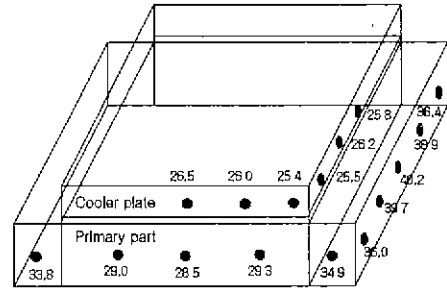


(b) Feedrate = 100m/min

Fig. 2 Results of temperature measurement [°C]



(a) Front view



(b) Primary part and cooler plate

Fig. 3 Results of temperature measurement [°C] (feedrate = 100m/min)

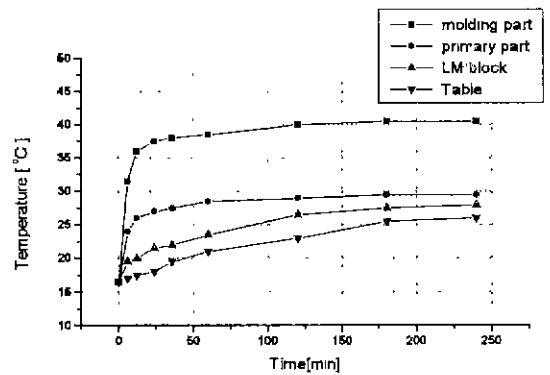


Fig. 4 Temperature profile of linear motor [°C] (feedrate = 100m/min)

3. 유한요소해석

3.1 유한요소 모델링

리니어 모터의 primary part와 secondary part의 열전달 경로 및 온도분포를 해석하기 위해 유한요소법을 이용하였다. 동기식 리니어모터의 primary part는 코어와 코일권선 및 코일(Cu)이 감기는 부분의 몰딩부분(Epoxy), 그리고 냉각플레이트(Al)로 구성되어 있으며, secondary part는 영구자석과 LM레일로 구성되어 있다. 해석을 위한 유한요소모델링 및 재질은 Fig 5과 Table 2에 나타내었다. 여기서 primary part의 코어 적층부분은 코일 권선후 eddy current의 손실을 줄이기 위해 절연을 시킨다. 이는 코일권선 주위에서 발생하는 열전달에 이방성을 갖게 하므로 열전도도를 고려하여 열전도도에 있어 이방성을 갖도록 하여야 한다. 유한요소모델링은 ANSYS를 이용하였으며, 형상의 대칭성을 고려하여

1/4만 모델링하였으며 요소는 3차원 brick 8절점요소를 사용하였다. 현재까지 내부구조가 모두 파악되지 않았으므로 내부구조는 대략적으로 모델링하였다. 특히 코일권선 및 냉각수채널에 대한 내부구조가 파악되지 않았으므로 이것으로 유한요소해석을 수행하기에는 어려움이 있다. 그러므로 이후 내부구조가 모두 파악되면 보다 상세하게 모델링하여 유한요소해석을 수행할 계획이다.

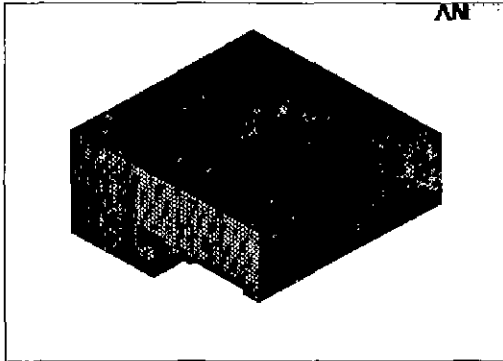


Fig. 5 Finite element modelling of Linear motor

Table 2 Material properties for analysis

재료	열전도도 (W/mK)	탄성계수 (GPa)	밀도 (kg/m ³)	비열 (J/kgK)
Steel	41	210	7850	434
Core	1-5/40-60	119	7600	460
Cu	8933	128	8400	385
Al	238	70	2700	903
Epoxy	0.3	13-15	1700	1600

4. 결론

리니어 모터 구동시 발생하는 열은 공작기계 이송계의 위치정밀도 및 성능저하에 영향을 미치므로 효과적인 방열대책이 필요하다. 그러므로 기존의 리니어 모터 이송계에서 발생하는 열발생 분포와 시간에 따른 온도변화를 측정하여 이를 유한요소해석과 비교하고자 하였다. 온도 실험 측정 결과, 리니어 모터 이송계의 기하화적인 대칭성에 따라 온도분포도

대칭성을 보이며 primary part주위가 상대적으로 높은 온도를 기록하였다. 또한 LM가이드의 마찰력에 의한 온도는 primary part주위의 온도에 비해서 상대적으로 이송계의 열문제에 영향이 적음을 알 수 있었다. 유한요소해석을 위해서는 현재까지 내부구조를 파악되지 않았으므로 이것으로 유한요소해석을 수행하기에는 어려움이 있다. 그러므로 이후 내부구조가 상세하게 파악되면 이에 대한 유한요소해석을 수행할 계획이다.

후기

본 연구는 원격운용 초고속 HMC 개발사업의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. In-Ung Eun, Optimierung des thermischen Verhaltens von elektrischen Linearmotoren für den Einsatz in Werkzeugmaschinen, Shaker Verlag, 1999
2. George Abdou, W. Tereshkovich, "Performance evaluation of a permanent magnet brushless DC linear drive for high-speed machining using finite element analysis", Finite Elements in Analysis and Design, 35, (2000), 169-188,
3. 리니어 모터를 이용한 고속비진원 가공용 공구이송장치의 특성연구, 한국정밀공학회, 1997 추계학술대회, 985-990.