

공작기계 고속이송용 리니어 모터의 열특성 및 운동특성에 관한 연구

최현중, 정일용, 강은구, 이석우 (한국생산기술연구원)

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

H. Z. Choi, I. Y. Chung, E. G. Kang, S. W. Lee(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 and evaluated 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. 서 론

리니어 모터는 회전형 모터의 직선변환기구에 비해 기계적인 변환장치가 필요 없으므로 구조가 간단하며 신뢰성이 좋을 뿐만 아니라 기계적 백래쉬가 발생하지 않아 고속 고정밀 위치제어가 가능하다. 또한 공극에 있어 가동부 및 고정부가 비접촉 구동을 하므로 마찰이 없으며 소음이 적다. 그러나 리니어 모터는 공극을 일정하게 유지해야 하고, 회전형 모터에 비해 누설자속이 많이 발생하는 단점이 있다. 또한 공작기계 구조물과 직접 결합되기 때문에 발생하는 열이 구조물에 직접 전달된다. 따라서 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 필수적이기 때문에 고비용의 냉각시스템이 필요하게 된다.

최근에는 리니어 모터의 열적거동의 최적화를 위하여, 실험 및 유한요소법을 이용한 리니어 모터의 냉각채널 설계 및 배치를 최적화하는 연구를 하였다¹⁾. 또한 유한요소법을 이용한 전압 및 공극에 변화

에 대한 DC 리니어 모터의 자기장 해석, 전자기-열적, 정적 해석에 대한 연구도 수행되었다²⁾.

본 논문에서는 동기식 리니어 모터의 운동 및 열 특성을 평가하기 위하여 속도 및 가속도의 측정실험과 소음 측정, 온도측정 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 기계는 독일 KRAUSS MAFFEI에서 제작한 LIMES 800/240시리즈 리니어 모터이다.

2. 리니어 모터의 열특성

2.1 실험 개요

일반적으로 고속, 고가감속 조건에서 열대책은 모터를 구동시킬 때의 전기적인 에너지의 손실과 LM 가이드에서의 볼의 구름접촉에서 발행하는 열을 고려하여야 한다. 본 실험에서는 리니어 모터의 고속 운전시의 위치에 따른 열 발생 분포와 시간에 따른 열 발생의 경향성을 파악한다.

리니어 모터의 온도측정을 위한 실험 장치구성을 Fig. 1에 나타내었으며, 리니어 모터의 사양은 Table 1에 나타내었다. 온도측정 센서로는 직경 0.13mm K-type 열전대를 사용하였으며, 리니어 모터 표면에 부착하여, 30채널 타점식 기록계로 온도를

측정하였다. 리니어 모터의 내부구조가 명확하지 않기 때문에 열전대를 내부에 설치할 수 없어, 외부 표면 온도만을 측정하였다.

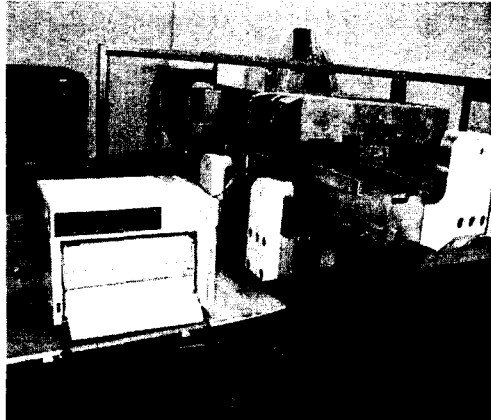


Fig. 1 Photograph of experimental setup (Linear Motor : KRAUSS MAFFEI, Germany)

Table 1 Technical Data of LIMES 800/240

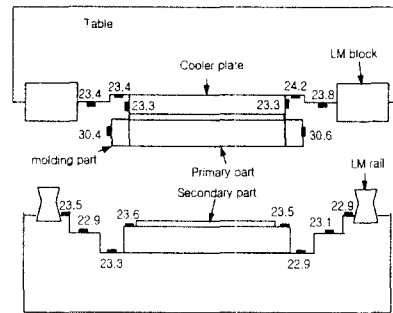
	X axis	Y axis
Weight	675 Kg	230 Kg
Max. Axis Stroke	660 mm	530 mm
Max. Acceleration	15m/s ²	40m/s ²
Max. velocity	116 m/min	116 m/min
Peak Force	14500 N	14500 N
Cont. Force	6600 N	6600 N
Stiffness	26000 N/μm	26000 N/μm

2.2 이송속도에 따른 온도분포

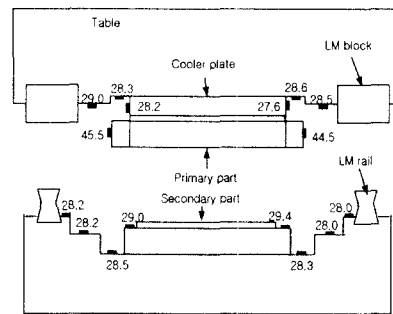
이송속도의 변화는 전기적인 에너지의 변화를 가져오며, 이로 인해 코일 주변에 열이 발생하게 된다. 그러므로 이송속도에 따른 리니어모터의 각 부분에서의 온도분포를 파악하기 위해 앞에서 설명한 실험장치를 이용하여 리니어모터 각 부위의 표면온도를 측정하였다.

Fig. 2는 이송속도 50m/min와 100m/min일때의 온도분포를 나타낸 그림이다. 실험결과 primary part 좌우 양측의 molding part의 온도가 가장 높은 값을 보였다. Primary part 위쪽에 위치한 cooler plate에서는 급격한 온도 변화를 보이지만, 이송테이블에서의 온도변화는 크게 나타나지 않았다. 이는 primary part와 cooler plate의 사이에 온도 절연층이 존재하기 때문인 것으로 생각된다.

Secondary part에서의 온도는 primary part와는 달리 온도가 높게 측정되지 않았으며, 측정온도는 중앙에서 높고 측면으로 갈수록 낮았다. 이는 primary part에서 발생한 열의 대류 열전달과 eddy current의 영향으로 secondary part에 영향을 미친 것으로 판단된다. 대체적으로 중앙을 기준으로 좌우측의 온도분포는 대칭성을 보이나 바깥 온도는 그다지 큰 변화를 보이지 않았다. 또한 Fig. 2에서 보듯이 이송속도가 50m/min에서 100m/min로 증가시켰을 때 primary part 최고점에서의 온도는 10℃, 그외 부분에서는 5℃정도의 온도상승이 있었다. Primary part와 cooler plate부위를 세밀하게 측정하기 위하여 Fig. 3과 같이 새로이 열전대를 부착하여 온도를 측정하였다. 결과 열발생의 대부분은 primary part에서 일어나고 있음을 알 수 있고, LM block에서의 마찰열은 primary part에서 발생하는 열에 비해 상대적으로 미약함을 알 수 있다. 또한 primary part 전후면은 그다지 온도는 높지 않았으며, 끝부분에서 중앙으로 갈수록 온도가 떨어지는 경향을 보이는데 이는 primary part 내부에 있는 냉각수 채널 및 주위와의 대류열전달에 의한 현상으로 생각되어진다.



(a) Feedrate = 50m/min



(b) Feedrate = 100m/min

Fig. 2 Temperature distribution of Linear Motor[℃]

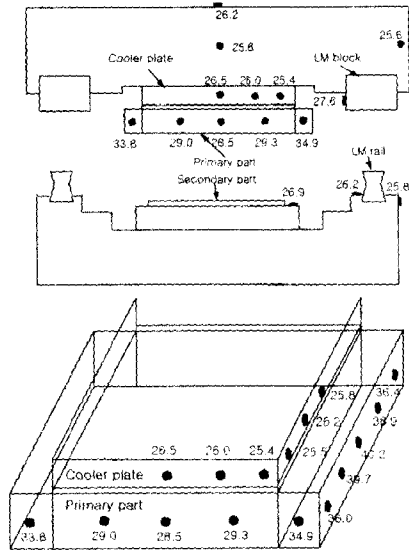


Fig. 3 Temperature distribution on primary part and cooler plate [°C] (feedrate = 100m/min)

2.3 냉각수의 유량변화

냉각수의 유량에 따른 냉각효과를 알아보기 위하여 리니어 모터의 냉각수 입·출구부에 온도센서를 부착하고 디지털 유량계이저를 설치하였다. Table 2 은 유량과 그에 따른 무차원 수를 표시하였다.

Main cooler의 유량을 최대로 하기 위하여 다른 부위로의 냉각수 흐름을 막았으며, 이때 main cooler의 유량이 4.8ℓ/min로 최대 유량을 얻을 수 있었다.

Table 2 Operating conditions of cooling system

	Inner Dia. (Di)	Flowrate (ℓ/min)	R_{eD}	N_{uD}
Main cooler	Φ 6	3	1.0×10^4	82.8
		4	1.4×10^4	103.6
		4.8	1.7×10^4	121.1
Precision cooler	Φ 5	3	1.3×10^4	95.8
		4	1.7×10^4	121.1

냉각수의 대류열전달계수를 구하기 위하여, 식 (1), (2), (3)을 이용하였으며, 냉각열량은 식(4)을 이용하였다. 냉각수의 냉각열량 및 대류열전달계수를 계산하기 위해 상온(20°C)에서의 물성치값을 다음과 같이 나열하였다. 각각의 실험 결과에 따라 열량 및 대류열전달계수의 계산 결과는 Table 3에 나타나있다.

$$\left[\begin{array}{ll} \rho = 998.3 \text{ kg/m}^3, & c_p = 4182 \text{ J/kg} \cdot \text{K} \\ \mu = 10.015 \times 10^{-4} \text{ kg/m} \cdot \text{s}, & \nu = 100.3 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s} \\ k_f = 602 \times 10^{-3} \text{ W/m} \cdot \text{K}, & \alpha = 14.42 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s} \end{array} \right.$$

$$R_{eD} = \frac{4\dot{m}}{\pi D_i \mu}, P_r = \frac{\nu}{\alpha} = 6.96 \quad (1)$$

Dittus-Boelter[4] :

$$N_{uD} = 0.023 R_{eD}^{4/5} P_r^{0.4} \quad (2)$$

$$h_f = N_{uD} \frac{k_f}{D_i} \quad (3)$$

$$q = \dot{m} c_p (T_o - T_i) \quad (4)$$

Table 3 Result of heat quantity evaluation

Flowrate	3 ℓ/min		4 ℓ/min		4.8 ℓ/min
	Main cooler	Precision cooler	Main cooler	Precision cooler	Main cooler
h_f [W/m ² · K]	0.83x10 ⁴	1.15x10 ⁴	1.04x10 ⁴	1.46x10 ⁴	1.21x10 ⁴
q [W]	2024	41	2644	194	2838
ΔT [°C]	9.7	0.2	9.5	0.7°C	8.5

Main cooler의 냉각열량은 precision cooler보다 10배이상을 차지하는 것을 볼 수 있다. 또한 냉각수 유량이 증가함에 따라 온도차는 감소하나 냉각열량은 증가하며 냉각열량의 변화가 작아 짐을 볼 수 있다. 그러나 cooler plate의 경우 유량이 커짐에 따라 온도차가 증가하며, 냉각열량 또한 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 유량이 작은 경우 입구측의 온도가 상대적으로 증가하기 때문이다.

Primary part의 최고점 온도를 유량의 변화에 따라 Fig. 4에 나타내었다. 실험결과 4ℓ/min과 4.8ℓ/min의 경우 primary part의 온도차가 거의 없음을 알 수 있다. 냉각열량의 계산에서 보듯이 4ℓ/min이상의 유량에서는 유량이 증가하여도 냉각효과는 크게 변하지 않음을 알 수 있다. 이 결과로부터 main cooler의 적정유량이 4ℓ/min 정도로 임을 알 수 있다. Fig. 4의 1ℓ/min시 실험에서는 급격한 온도 상승으로 리니어 모터의 손상이 우려되어 실험을 중지하였다.

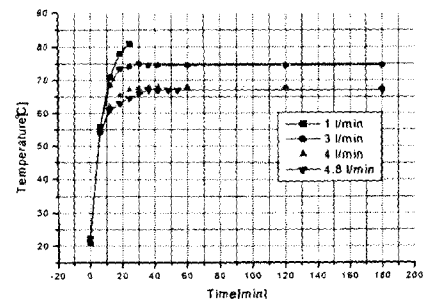


Fig. 4 Temperature profile of primary part

3. 리니어 모터의 열전달 해석

3.1 유한요소 모델링

리니어 모터의 primary part와 secondary part의 열전달 경로 및 온도분포를 해석하기 위해 유한요소법(FEM)을 이용하였다. 유한요소법은 복잡한 구조물에 대한 기계적, 열적 거동을 예측하고 경향을 파악할 수 있는 효과적인 해석방법 중의 하나이다.

동기식 리니어모터의 primay part는 코어와 코일 권선 및 코일권선의 끝부분에서의 몰딩부분(Epoxy) 그리고 냉각롤러로 구성되어 있으며, secondary part는 영구자석과 LM가이드레일로 구성되어 있다.

리니어 모터에 있어 코어부분의 sheet metal의 열적 특성이 이방성을 갖는다. 일반적으로 리니어 모터의 코어부분은 0.5mm두께의 sheet metal을 여러개의 층으로 적층하여 코어슬롯을 형성하게 된다. 각 층은 절연을 위하여 페놀이나 에폭시 수지로 절연층을 구성하고 있다. 이러한 절연층은 열흐름에 있어서의 하나의 열 저항으로 작용하게 되며, 이로 인해 코어부분의 sheet metal부분의 각 방향에 있어서의 열전도 특성이 달라지게 된다. 일반적으로 sheet metal의 평면에서의 열 전도도는 절연층으로 인한 코어슬롯의 두께방향에 비해 약 30배 정도의 열 전도도가 높아지게 된다. 또한 기계적인 충격이나 손실로부터 코일 권선을 보호하기 위하여 에폭시 수지로 코일 권선의 양 끝단부를 보호하게 되는데 이 에폭시 수지는 절연체로 낮은 열전도도를 갖는다.

리니어 모터의 각 부분에서의 물성치를 Table 4에 나타내었다. 정상상태(steady state)의 열전달 해석에는 모든 물성치가 필요한 것이 아니라 재료의 열전도도만이 필요하다. 그러나 과도상태(transient state) 및 열변형 해석까지도 한다면 밀도, 비열뿐만 아니라 열팽창계수에 대한 물성치도 필요하다.

Table 4 Material Properties for Linear Motor

material	heat transfer coefficient (W/mK)	density (kg/m ³)	specific heat (J/kgK)
Sheet metal	1-5/40-60	7600	460
Cu	8933	8400	385
Al	238	2700	903
Epoxy	0.3	1700	1600

유한요소해석을 위한 모델링은 Fig. 5에 나타내었다. 유한요소모델링은 ANSYS 5.5를 이용하였다. 형상의 대칭성을 고려하여 1/4만 모델링 하였으며 요소는 3차원 brick 8절점요소를 사용하였다. 전체 요소수는 12,920개이며 절점수는 15,141개이다. 해석

에 사용된 리니어 모터는 상용 제품이기에 때문에 primary part의 내부형상을 파악하기가 어려웠다. 또한 열이 가장 많이 발생하는 primary part의 코어 슬롯의 위치나 권선에 대한 관련 도면이나 자료가 공개되지 않는 관계로 자세히 모델링 할 수가 없었다. 그러므로 관련 자료를 참조하여 대략적으로만 모델링 할 수 밖에 없었다.

3.2 해석을 위한 경계조건

해석을 위한 가정으로 열해석에 필요한 모든 물성치는 온도 변화에 관계없이 항상 일정한 값을 갖고 있다고 간주하였으며, 복사열에 의한 영향은 무시하였다. 또한 리니어 모터에서의 파워손실은 모두 코일에서 발생하는 손실 열로 변환된다고 가정하였다. 또한 이러한 손실 열은 코일 권선에 고르게 분포되어 있다고 본다. 이는 열특성 실험에서 알 수 있듯이, 리니어 모터의 1차측에 비해 LM가이드 주위의 온도상승은 크지 않았다. 그러므로 마찰력에 의한 마찰열은 상대적으로 무시할 수 있으므로 리니어 모터에서 1차측만 모델링 대상으로 하여 열전달 해석을 수행하였다.

또한 재료의 연결부위에서의 열접촉저항은 고려하지 않았으므로 열은 전 표면에 고르게 전달된다고 간주하였다.

해석을 위한 경계조건으로는 코일에서 발생하는 열원과 대기에 접촉하는 표면에서의 대류경계조건을 고려하여야 한다. 코일에서 발생하는 열은 다음의 관계식에서 구할 수 있다.

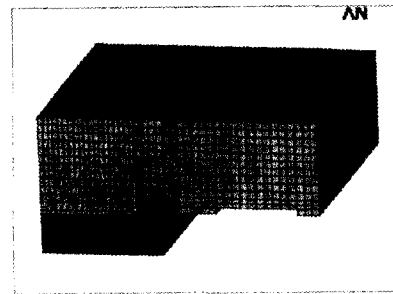


Fig. 5 Finite Element Modeling

파워손실은 모두 코일에서의 발생 열로 간주한다고 가정하였으므로,

$$P(\text{power loss}) = q''' (m / \rho)$$

따라서,

$$q''' = P / (m / \rho) = 3,489,230 \text{ [W/m}^3\text{]}$$

여기서, P : 파워손실[W]

q''': 단위체적당 발생 열[W/m³]

m, ρ: 각각 코일의 질량[kg], 밀도[m³/kg]

파워손실은 해석의 고려대상이 된 Krauss-Maffei

의 사양의 nominal thrust일 때의 파워손실이며, 코일의 질량은 사양에 나와 있지 않아 정확히는 알 수 없었으나 관련자료를 참고하여 설정하였다.

해석을 위한 대기온도는 20℃로 균일하다고 가정하였으며 표면에서의 대류경계조건은 열전달 문헌을 참고하여 유속이 $v=1\text{m/s}$ 인 경우, 대류열전달계수를 16 W/mK 로 가정하였다.

또한 냉각수 쿨러의 관로에서의 대류열전달 계수는 앞의 Table 4에서 계산된 값을 입력하였다. 실제로 냉각수가 쿨러의 관로를 따라 흐를 때 냉각수의 온도는 상승하게 되어 대류열전달계수가 변한다는 것을 의미하나 여기서는 일정하다고 가정하였다. 해석을 위한 대칭면은 모두 단열상태의 경계조건을 부여하였다.

3.3 해석 결과 및 고찰

정상상태에서 리니어 모터 모델링에 대한 열전달 해석을 수행하였으며 Fig. 6에 열전달 해석 결과를 나타내었다. 해석 결과에 의하면 primary part의 코일권선에서 발생한 열은 대기와의 열전달보다 쿨러를 통한 열전달이 크다는 것을 알 수 있다. 그 결과 테이블에서는 온도변화가 거의 없다는 것을 알 수 있다.

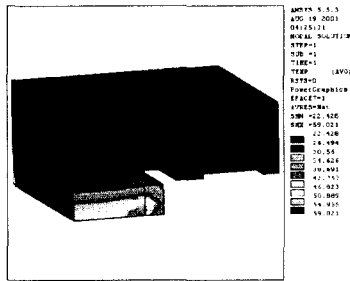


Fig. 6 Temperature distribution in the steady state

또한 sheet metal과 에폭시 몰딩부위와의 접촉면은 재료의 차이로 인해 온도의 변화가 크게 일어나고 있으며 primary part의 측면에서 보다 밀면에서 높은 온도 분포를 보여주고 있다.

Fig. 7은 전체 그림중 primary part부분에서의 열전달 해석 결과의 온도분포를 보여준다.

Fig. 8은 열의 흐름을 보여주는 열유속이다. 그림에서 보듯이 발생 열은 냉각수로 인해 냉각수 관로 쪽으로 대부분 흐르고 있음을 알 수 있다. 이는 냉각수 관로에서의 대류열전달계수가 높기 때문에 주위 대기로의 열전달 보다는 냉각수를 통해서 냉각이 되는 열전달을 보여주고 있다.

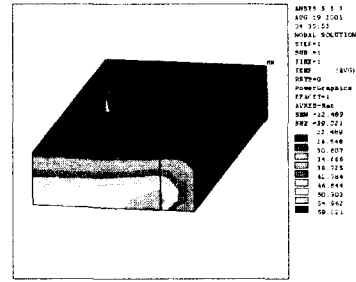


Fig. 7 Temperature distribution on Primary part

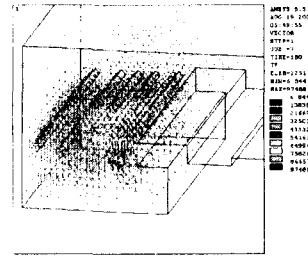
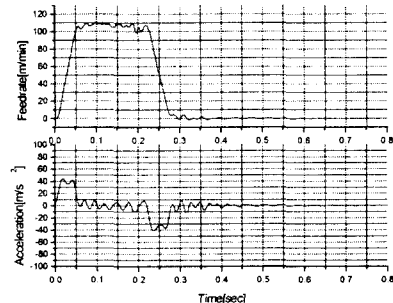


Fig. 8 Heat flux plot around Primary part

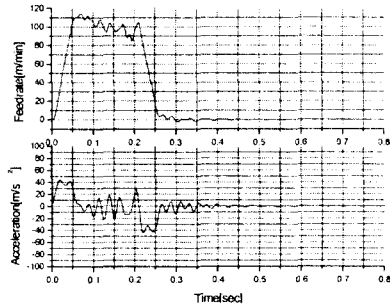
4. 리니어 모터의 운동특성

4.1 테이블의 속도 및 가속도 측정

리니어 모터는 볼스크류와 비교해 볼 때 수배의 이송속도 및 가·감속을 가지므로, 기존의 레이저로는 운동특성 측정이 불가능하다. 따라서 리니어 스케일의 신호를 받아 속도 및 가속도를 측정하였으며, 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9(b)는 이송속도, $F=110\text{ m/min}$ 을 약간 넘으나, 갑작스런 속도의 감속을 보인다. 결국, 최대 가속도는 45m/s^2 이며, 최대 속도는 110 m/min 임을 알 수 있었다. 속도 및 가속도의 경우 제어기의 게인값에 따라 크게 변하며, 추가적으로 제어기의 변경에 따른 최적화 작업이 필요하다.



(a)Feedrate:110 m/min



(b) Feedrate: 120 m/min

Fig. 9 Measurement of feedrate and acceleration

4.2 리니어 모터의 소음 측정

리니어 모터의 소음을 측정하기 위하여, KS B 4010(공작 기계의 소음 레벨 측정방법)을 준수하며 측정을 실시하였다. 소음측정기로 RION사의 정밀 소음측정기인 NA-29E를 사용하였다. Fig. 10은 측정점을 나타내었으며, 측정점의 높이는 1.2m이다. Table 5은 리니어모터의 구동전의 암소음과 운전준비상태에서의 소음을 측정한 결과이다. 결과에서 암소음의 경우 일반 사무실 발생하는 소음(주거지역의 환경기준 설정값:50dB) 정도가 발생하였다. 또한 운전준비 상태에서 소음의 크기는 도로변의 소음 크기로서 72dB정도를 가졌으며, 각각 위치에서의 변화는 크지 않음을 볼 수 있다. Table 6은 이송속도에 따른 소음의 크기 측정 결과로서 최대이송속도인 110m/min의 경우 지하철내의 소음크기인 80dB크기를 가졌으며, 이송속도의 증가에 따라 소음의 크기도 증가하나, 특히 50~55m/min에서의 소음증가가 다른 속도보다 큰 것을 볼 수 있다. 이는 이 속도 부근에서 구조적인 취약함을 보여, 심한 진동을 유발한 것으로 판단된다.

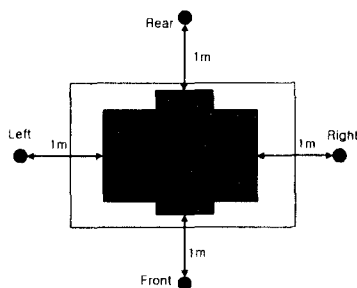


Fig. 10 Locations of sound level measurement

Table 5 Sound level before driving linear motor

	Background noise	Warm-up			
		Front	Rear	Left	Right
Sound level [dB]	51.3	72.4	72.4	71.8	72.5

Table 6 Sound level according to feedrate

Feedrate [m/min]	1	10	30	40	50	55	60	90	110
Sound level [dB]	72.3	72.5	73.6	73.7	74.9	77.2	77.6	78.8	79.6

5. 결론

리니어 모터 구동시 공작기계의 정밀도 및 성능에 영향을 미치는 인자를 파악하기 위해 리니어모터의 열특성 및 운동특성에 대한 연구를 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 온도 실험결과, 대칭면에 대해 온도분포가 대칭이며 primary part부위가 상대적으로 높은 온도를 기록하였다. 또한 LM가이드의 마찰력에 의한 온도는 primary part주위의 온도에 비해서 상대적으로 이송계의 열문제에 영향이 거의 없음을 알 수 있었다.
2. 본 리니어 모터의 경우 4ℓ /min이상의 유량에서 냉각효과가 더 이상 커지지 않기 때문에 4ℓ /min 정도가 적정유량으로 판단되어진다.
3. 최대속도는 110m/min, 최대 감·가속도는 45m/s²으로 측정되었다.
4. 소음 측정결과 운전전의 소음은 도로변에서 나는 소음 크기인 72dB정도가 측정 되었으며, 최대 이송속도인 110m/min에서는 지하철내의 소음크기인 80dB정도의 크기를 나타냄을 알 수 있었다.

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. Frank P. Incropera, David P. DeWitt, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer," Wiley & Sons, Inc., 1981.
4. "Planning Guide of Linear Motors," Siemens.
5. "리니어 모터 응용 핸드북," 세화, 1988.