

# 고속 · 정밀 이송용 리니어모터 개발을 위한 열적 안정성 향상에 관한 연구

황영국\*, 이춘만\*\*, 은인웅#

## A Study on Improvement of the Thermal Stability for Development of Linear Motors with High Speed and Accuracy

Young Kug Hwang\*, Choon Man Lee\*\* and In-Ung Eun#

### ABSTRACT

Linear motors are efficient mechanism that offers high speed and positioning accuracy. By eliminating mechanical transmission mechanisms such as ball screw or rack-pinion, much higher speed and greater acceleration can be achieved without backlash or excessive friction. However, an important disadvantage of linear motor system is its high power loss and heating up of motor and neighboring machine components on operation. For the application of the linear motors to precision machine tools an effective cooling method and thermal optimizing measures are required. This paper presents an investigation into the thermal behavior of linear motors with the objective of deriving the optimum cooling conditions. To reach these goals several experiments were carried out, varying operating and cooling conditions. From the experimental results, this research proposed cooling conditions to improve the thermal characteristics of the linear motors.

**Key Words** : Linear motor (리니어모터), Feed mechanism (이송기구), Thermal stability (열적 안정성), Cooling condition (냉각조건), Full factorial design (완전요인배치법)

### 기호설명

$T_{li}$  = initial temperature of  $l$  position ( $l=1\sim6$ )  
 $T_{lf}$  = final temperature of  $l$  position  
 $\delta T_l$  = temperature deviation of  $l$  position  
 $\delta T_x, \delta T_y$  = temperature deviation of  $x, y$  direction  
 $\tau$  = thermal time constant

### 1. 서론

최근 전 산업 분야에 걸쳐서 고정도, 고속, 고가 감속 및 고추력을 지닌 이송장치의 필요성이 증대되고 있다. 기존의 이송장치는 주로 회전형 전동기의 축에 볼스크류(Ball screw), 타이밍 벨트(Timing belt) 등의 직선변환기구를 결합하여 이용한 것이 대부분이었다. 이러한 이송장치는 직선변환기구의

접수일: 2007년 11월 14일; 게재승인일: 2008년 3월 5일

\* 창원대학교 기계설계공학과 대학원

\*\* 창원대학교 기계설계공학과

# 교신저자: 경기공업대학 금형디자인과

E-mail: iueun@kinst.ac.kr Tel. (031) 496-4764

중속에 따른 마찰, 백래시(Backlash) 등으로 인해 고정밀, 고속, 고가감속 등의 실현에 그 한계가 있다. 이에 최근 직접적인 직선구동이 가능한 리니어모터(Linear motor)를 이용하여 고속, 고정도, 고가감속을 얻기 위한 연구가 많이 이루어지고 있다.<sup>1,5</sup>

리니어모터를 사용할 경우 전기에너지를 바로 직선운동에너지로 변환시켜주고, 비접촉 구동을 함으로서 마찰에 의한 손실이 리니어 가이드스에 한정되어 고정밀도의 구동을 실현할 수 있으며, 이동부를 경량화시킴으로써 높은 속도 및 가속도를 쉽게 실현할 수 있다. 즉 리니어모터를 공작기계 등의 이송장치로 사용할 경우 가공위치로의 접근, 공구교환을 위한 기준위치로의 복귀 등 비 절삭 시간을 줄일 수 있어 생산성을 향상시킬 수 있다. 그러나 리니어 모터는 Primary part와 Secondary part 사이에 높은 자기력이 발생하고, 회전모터에 비해서 효율이 낮고 가동 중 발생하는 열손실로 인해 모터와 주변기계가 가열되는 단점이 있다. 그러므로 리니어모터 시스템을 고속, 고정밀 공작기계 등에 적용하기 위해서는 리니어모터 시스템의 열특성에 대한 연구가 이루어져야 한다.

본 연구에서는 고속, 정밀이송용 리니어모터 시스템의 개발 및 적용을 위해 필요한 리니어모터 시스템의 열특성을 실험적 방법으로 분석하여 리니어모터 시스템의 열적 안정성을 확보할 수 있는 냉각조건 선정과 구조설계에 참고자료를 제공하고자 한다. 실험을 위해 완전요인배치법을 사용하였으며 운전조건과 냉각조건에 따른 이송테이블의 온도분포 및 열시정수를 측정하여 그들의 상관관계를 분석하였다.

## 2. 관련 이론

### 2.1 리니어모터의 열원

리니어모터를 공작기계의 이송장치로 적용할 경우 일반적으로 2개의 열원이 존재한다. 하나는 리니어모터의 작동 중 모터 내부 특히 Primary part에서 발생하는 전기적 손실이고, 다른 하나는 Linear guidance상에서 모터의 직선운동 중 발생하는 마찰열이다.

리니어모터에서의 전기적 손실은 크게 권선 내의 전기저항에 의한 오옴 저항손실과 철심에서 발생하는 철손(iron loss)으로 나눌 수 있으며, 철손은 다시 와전류(Eddy current loss) 손실과 이력손실

(Hysteresis loss)로 나눌 수 있다.

현재 공작기계의 이송장치로 사용되고 있는 선형모터는 모터의 작동원리에 따라 비동기식 리니어모터(Asynchronous linear motor)와 동기식 리니어모터(Synchronous linear motor)로 구분할 수 있다. 두 모터는 1차 권선이 들어 있는 Primary part의 구조는 동일하나 Secondary part에 큰 차이가 있다. 비동기식 리니어모터의 경우 Secondary part는 철심 내에 2차 권선이 들어 있으나 동기식 리니어모터는 Secondary part가 영구 자석으로 되어 있다. 따라서 동기식 리니어모터의 경우 Secondary part에서의 열손실이 거의 없고, 효율도 비동기식 리니어모터에 비해 좋아 90년대 중반 이후로는 비동기식 리니어모터에 비해 동기식 리니어모터가 공작기계의 이송기구로 많이 사용되는 추세이다.<sup>1,4</sup>

리니어모터가 정지하고 있을 경우 Linear guidance상에서의 마찰열은 무시할 수 있으나 고속으로 이송 운동하는 경우 마찰열을 무시할 수 없다. 리니어모터의 적용 시 Linear guidance 상에서의 마찰력은 이송속도와 더불어 수직력을 직접 결정하는 Primary part와 Secondary part사이에 작용하는 자기력(Magnetic attraction)에 영향을 받는다. 일반적으로 마찰열은 리니어모터 내부의 전기적 손실에 비하여 적은 값이며, 리니어모터가 정지상태에 있거나 저속의 경우 무시할 수 있다.<sup>5</sup>

### 2.2 리니어모터의 열전달기구

리니어모터로부터 주변구조물로의 열전달 기구를 Fig. 1에 나타내었다. 주열원인 Primary part로부터 발생한 열은 냉각판(Cooler)에 의해 밖으로 유출되고 나머지 열은 열전도에 의해서 테이블로 유입된다. 또한 Primary part로부터 열은 대류와 복사에 의해 테이블의 내면으로 전달되어 테이블을 가열시

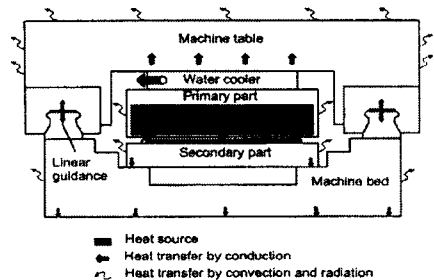


Fig. 1 Heat transfer mechanism in linear motor system

킨다. 동기식 리니어모터의 경우 Secondary part는 자체의 열원은 적으나 Primary part의 밑면으로부터 공극을 통하여 대류와 복사에 의해 가열되고 이 열은 열전도에 의해 베드로 계속 전달된다. 또한 리니어모터의 운동 중 Linear guidance 상에서 발생한 마찰열은 테이블과 베드로 전달된다.<sup>1,2,4</sup>

### 2.3 리니어모터의 열특성 향상 방안

리니어모터의 열특성의 향상 또는 최적화의 목적은 공작기계 이송장치의 위치제어 오차에 직접 영향을 주는 이송테이블로의 열전달을 최소화하고, 냉각판에 흐르는 냉각수의 온도상승에 의하여 야기되는 테이블의 온도 불균일을 낮추며 리니어모터에 작용하는 부하변화에 대한 테이블의 온도변동을 적게 하여 이송시스템을 열적으로 안정화시키는 것이다. 또한 Secondary part도 주열원은 아니지만 정밀이송기구로 사용하기 위해서는 냉각이나 단열에 의한 열특성의 향상이 필요하다.

이 목적을 위해 적용되는 방법은 첫째로는 전기적인 방법으로 동력손실이 적고 효율이 높은 리니어모터를 개발하는 것이다. 현재 출시되는 대추력 동기식 리니어모터의 효율은 85%를 넘기 어렵다.<sup>2</sup> 고효율의 리니어모터를 개발하기 위해서는 현재보다 자속밀도가 더 높은 자성체의 개발이 그 전제조건이 된다.

리니어모터의 열특성을 향상시키기 위해서 적

Table 1 Methods for the optimization of the thermal behavior of linear motors

열특성 향상 원칙	- Primary part로부터 이송테이블로 전도에 의한 열전달의 최소화 - 이송테이블의 온도편차 최소화 - 모터의 부하변동에 따른 이송테이블의 온도변화 최소화 - Secondary part의 구조의 최적화	
	전기적 방법	리니어모터의 고 효율화
열특성 향상 방법	기계적 방법	단열
		냉각기와 모터의 구조 최적화
		내장형 냉각기
		U형 냉각기
	열대칭 냉각기	
이중 냉각기		
냉각조건 제어	유량	
	온도	
	방향	

용되는 기계적 방법으로는 단열에 의한 방법, 냉각판이나 리니어모터의 구조를 변경시키는 방법 그리고 냉각판에 제어기를 부착하여 냉각수의 수온, 유량 그리고 흐름방향을 제어하는 방법 등이 있다.

Table 1은 지금까지 연구되고 제시되어진 리니어모터의 열특성을 향상시키기 위한 방법들을 나타내고 있다.<sup>1</sup>

### 3. 열특성 실험

리니어모터를 공작기계 등의 이송장치로 적용할 경우 필요한 열대책은 모터를 구동시킬 때의 전기적인 에너지 손실과 LM 가이드상의 마찰열을 고려해야 한다. 이를 위해 본 실험에서는 리니어모터의 운전 조건을 달리하면서 이송 테이블상의 위치에 따른 온도 분포와 시간에 따른 열 발생 경향을 냉각조건에 따라 분석하였다.

#### 3.1 실험장치 및 방법

Fig. 2는 리니어모터 시스템의 온도측정을 위한 실험 장치를 보여주고 있다. 실험 장치는 크게 리니어모터 시스템, 냉각장치와 온도측정 장치로 구성되어 있으며, 실험에 사용된 냉각 장치의 사양은 Table 2와 같다.

리니어모터 시스템은 Primary part와 테이블 사이에 수냉식 냉각판이 설치되어 모터 내부에서 발생한 열을 외부로 방출시키는 구조로 되어있다.

냉각장치는 냉각판에 공급되는 온도를 5~25℃ 범위로 조절할 수 있으며, 냉각장치에 재 유입되는 냉각수의 온도를 측정하여 설정된 온도에서 ±1.5℃를 벗어날 경우 냉각기나 히터가 작동하여 설정된 온도를 유지하도록 하는 디지털온도제어식이다. 또한 유량밸브를 이용하여 냉각판에 공급되는 유량을 ~12 l/min까지 조절이 가능한 구조이다.



Fig. 2 Photograph of experimental set-up

Table 2 Technical data of cooling system

Specification	Value
Cooling capability [kcal/h]	3,700 ~ 4,200
Maximum flow rate [l/min]	10 ~ 20
Temperature range [°C]	5 ~ 25

온도는 4~80°C범위에서 측정 가능한 서미스터 센서를 이용하여 측정하였다.

리니어모터의 열특성은 궁극적으로 이송테이블의 열변위로 평가될 수 있고, 이송테이블의 열변위는 열원인 리니어모터로부터 테이블로의 열전달에 의해 야기되는 온도상승에 기인하므로 본 연구에서는 이송테이블의 상면에 5개의 온도 센서를 부착하여 이송테이블 상의 위치에 따른 온도분포를 측정하였다.

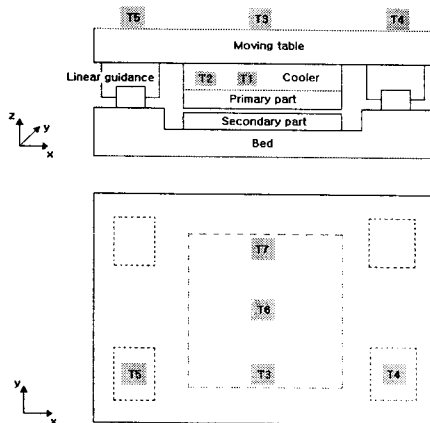


Fig. 3 Measuring points

Fig. 3은 이송테이블상의 센서부착 위치를 나타내고 있다. T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>는 냉각판으로 유·출입 되는 냉각수의 온도를 측정하기 위한 것이며, T<sub>3</sub>, T<sub>6</sub>, T<sub>7</sub>은 냉각판이 부착되어 있는 이송 테이블의 y축 방향 온도분포를 측정하기 위한 것이다. T<sub>4</sub>, T<sub>5</sub>는 LM 블록이 부착되어 있는 위치로 T<sub>3</sub>와 y축 상의 동일한 위치이며, 이송테이블의 x축 방향 온도분포를 측정하기 위한 것이다.

Table 3은 본 연구에서 고려한 실험조건 및 실험결과를 나타내고 있다. 4개의 인자에 대해 2가지 조건을 고려하는 2수준(level)의 Full factorial design을 이용하여 실험배치를 하고 실험을 수행하였다.

Table 3 Experimental conditions and results

실험순서	운전조건		냉각조건		특성치						
	가속도 [G]	이송속도 [m/min]	냉각수 유량 [l/min]	냉각수 온도 [°C]	$\delta T_3$	$\delta T_6$	$\delta T_7$	$\delta T_4$	$\delta T_5$	$\tau_3$	$\tau_5$
1	1.0	120	2	15	10.0	5.2	-0.7	-0.1		32	57
2	1.0	120	2	10	7.4	4.6	0.7	0.3		32	56
3	0.5	60	5	15	4.1	2.7	1.4	0.3		26	44
4	1.0	60	5	10	1.7	1.3	3.0	0.8		13	14
5	0.5	60	2	15	9.0	5.2	-0.2	-0.1		34	61
6	0.5	120	5	10	0.7	0.4	2.7	0.7		13	34
7	1.0	120	5	10	2.5	2.9	3.0	0.9		23	35
8	0.5	120	2	15	9.4	5.3	-0.6	-0.2		36	63
9	0.5	60	5	10	1.1	0.8	3.0	0.7		13	14
10	0.5	120	2	10	4.6	2.8	1.2	0.3		32	51
11	1.0	120	5	15	5.7	3.4	1.8	0.5		24	44
12	1.0	60	2	15	9.9	6.0	-0.5	-0.1		35	60
13	1.0	60	5	15	5.0	2.8	1.9	0.5		23	46
14	1.0	60	2	10	6.4	5.2	1.5	0.3		30	45
15	0.5	60	2	10	5.6	5.7	1.6	0.2		29	41
16	0.5	120	5	15	4.5	2.1	1.3	0.3		24	41

### 3.2 실험결과 및 고찰

운전조건 및 냉각조건이 이송테이블의 온도분포에 미치는 영향을 분석하기 위해 본 연구에서는 얻어진 데이터를 통계적 방법으로 분석해보았다. 통계적 방법으로는 MINITAB을 사용하여 분산분석(Analysis of Variance)을 실시하였다. 분석을 위한 특성치는 이송테이블의 x, y방향 온도편차, 온도상승량 및 열시정수로 하였다. 측정결과 Fig. 4와 같이 모든 조건에서 좌우 대칭의 온도분포를 보이고, T<sub>3</sub>와 T<sub>6</sub>의 온도편차는 무시할 수 있을 정도로 작으므로 본 논문에서는 T<sub>3</sub>, T<sub>5</sub>, T<sub>7</sub>위치에서의 온도를 대표값으로 하여 식 (1), (2), (3)으로 온도상승량 및 x, y방향 온도편차를 구하였다.

열시정수(Thermal time constant)는 3, 5번 센서 위치에 대해 최종 온도의 63.2%에 이르기까지의 시간을 구하였다.

$$\delta T_l = T_{lf} - T_{li} \quad (1)$$

$$\delta T_x = T_{5f} - T_{3f} \quad (2)$$

$$\delta T_y = T_{7f} - T_{3f} \quad (3)$$

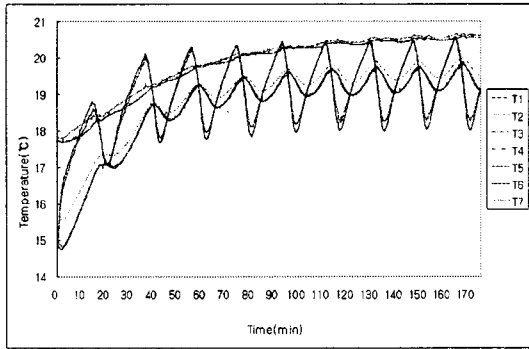


Fig. 4 Temperature rise on the moving table for experimental condition 10

Table 4 Results of ANOVA for  $\delta T_3, \delta T_5, \delta T_x, \delta T_y, \tau_3, \tau_5$

특성치	인자	평균제곱합	F비	P값
$\delta T_3$	이송속도	0.2500	1.25	0.288
	가속도	5.7600	28.70	0.000
	냉각수 유량	85.5630	426.36	0.000
	냉각수 온도	47.6100	237.24	0.000
$\delta T_5$	이송속도	0.5630	0.90	0.364
	가속도	2.5600	4.08	0.068
	냉각수 유량	34.8100	55.53	0.000
	냉각수 온도	5.0630	8.08	0.016
$\delta T_x$	이송속도	0.3306	4.54	0.057
	가속도	0.0056	0.08	0.786
	냉각수 유량	14.2506	195.49	0.000
	냉각수 온도	9.4556	129.71	0.000
$\delta T_y$	이송속도	0.0006	0.22	0.651
	가속도	0.0506	17.47	0.002
	냉각수 유량	1.0506	362.57	0.000
	냉각수 온도	0.6006	207.27	0.000
$\tau_3$	이송속도	10.5600	1.05	0.328
	가속도	1.5600	0.16	0.701
	냉각수 유량	637.5600	63.36	0.000
	냉각수 온도	150.0600	14.91	0.003
$\tau_5$	이송속도	196.0000	4.91	0.049
	가속도	4.0000	0.10	0.758
	냉각수 유량	1640.2500	41.08	0.000
	냉각수 온도	992.2500	24.85	0.000

Table 4는 각 특성치에 대한 분산분석 결과를 보여주고 있다. 분산분석표에서 95%의 유의수준으로 볼 때 p값이 0.05보다 작으면 그 인자는 특성치

에 유의한 것으로 볼 수 있다. 모든 특성치에 대해서 냉각수 유량과 공급온도는 유의한 것으로 나타났다.  $\delta T_3, \delta T_y$ 에는 냉각조건과 함께 가속도가  $\tau_5$ 에는 이송속도가 유의한 것으로 나타났다. 이는 본 논문에서 고려된 리니어모터 시스템의 구조적 특성과 2.2절에서 소개된 열전달 기구의 차이에 의한 영향으로 판단된다. 이에 대한 세부적인 분석을 위해 각 인자들이 특성치와 어떻게 관련되는지를 시각화해 주는 주 효과도(Main effect plot)를 그려 보았다.

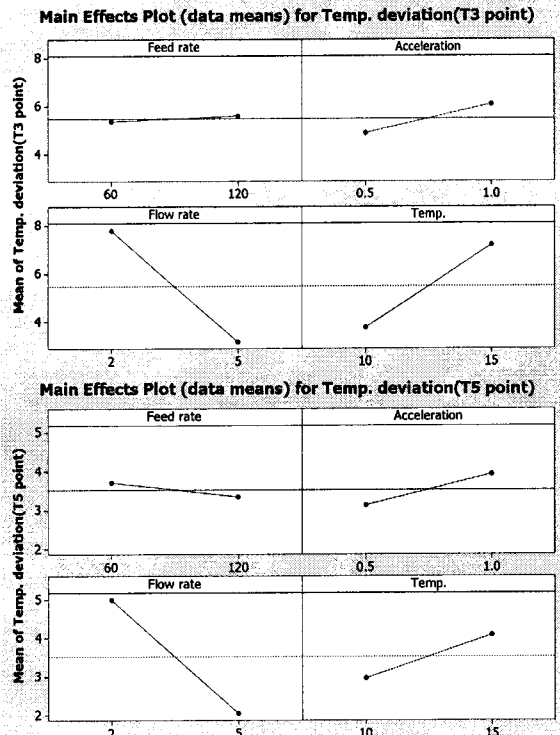


Fig. 5 Main effects plots for  $\delta T_3, \delta T_5$

Fig. 5는 본 논문에서 고려한 위치에서의 온도 상승량( $\delta T_3, \delta T_5$ )에 대한 각 인자들의 주 효과의 크기를 비교하기 위해 그래프를 그려 본 것이다. 여기서 수평선은 총평균을 나타내며, 각 점은 수준에서의 평균을 뜻한다. 그림과 분산분석표에서  $\delta T_3, \delta T_5$  모두 냉각수 유량의 효과가 가장 크고 그 다음은 냉각수 공급 온도, 가속도 순으로 영향을 미치는 것을 확인할 수 있으며, 이송속도가 미치는 영향은 미미한 것으로 나타났다. 또한 냉각수 유량이

많고 공급 온도가 낮으며 가속도가 작을수록 온도 상승량이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 여기서 특이한 점은 다른 인자들에 비해 그 영향은 미미하지만  $\delta T_3$ 와  $\delta T_5$ 에 미치는 이송속도의 영향이 정반대로 나타났다.  $\delta T_5$ 의 경우 이송속도가 커질수록 온도 상승량이 줄어드는 것으로 나타났다. 이는 이송속도가 증가함에 따라 부하가 증가하고 그에 따라 발열량이 증가하여 온도 상승량이 커질 것이라는 일반적인 경향과는 반대의 결과이다. 이는 이송테이블의 위치에 따른 리니어모터부터 이송테이블로의 열전달 기구의 차이에 의한 영향으로 판단된다. 즉 주열원인 Primary part로부터 발생한 열은 냉각판에 의해 밖으로 유출되고 나머지 열은 전도와 대류, 복사에 의해서 테이블로 유입되는데,  $T_5$ 부위에서는 2.2절에서 소개한 바와 같이 Primary part에서 발생한 열이 대류와 복사에 의해서 주로 전달된다. 이송속도가 증가하면 리니어모터와 LM블록 사이의 공기 흐름속도가 증가하고, 그에 따른 열전달률이 높아져<sup>11</sup> 공기에 의한 냉각효과가 커진 결과로 판단된다.

Fig. 6은 이송테이블의 온도편차( $\delta T_x, \delta T_y$ )에 대한 각 인자들의 주 효과의 크기를 비교한 그래프이다. 그래프에서  $\delta T_x$ 에 미치는 효과의 정도는 냉각수 유량, 냉각수 공급 온도, 이송속도의 순으로 나타났다으며, 가속도의 영향은 거의 없는 것으로 나타났다.  $\delta T_y$ 에는 냉각수 유량, 냉각수 공급온도, 가속도 순으로 나타났으며, 이송속도가 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 이송 테이블의 x방향 온도 편차를 줄이기 위해서는 냉각조건으로는 냉각수 유량을 작게, 높은 온도로 공급하고, 운전조건은 가속도를 작게 이송속도를 빨리 하는 것이 유리한 것으로 나타났다. y방향 온도편차를 줄이기 위해서는 냉각조건은 x방향의 결과와 동일하고 운전조건은 이송속도를 느리게, 가속도를 작게 하는 것이 유리한 것으로 나타났다.

이상의 결과에서 이송테이블의 온도편차에 미치는 영향중 냉각조건은 이송 테이블의 방향에 관계없이 냉각수 유량, 냉각수 공급 온도 순으로 동일한 경향으로 지배적인 영향을 미치지만 운전조건은 이송 테이블의 방향에 따라 영향을 미치는 인자의 종류가 다른 것으로 나타났다. x방향 온도편차에는 이송속도가 더 큰 영향을 미치고 y방향 온도 편차에는 가속도가 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이는 이송테이블의 위치에 따른 리니어모터로부터 이송테이블로의 열전달 기구의 차이와 본 연구에서 고려한 리니어모터 시스템의 구조적 특성 때문으로 판단된다. x방향 온도편차의 경우 Fig. 5에서 설명한 바와 같이 이송속도가 증가할수록  $T_5$  위치에서의 온도 상승량이 줄어들어 이송속도가 증가할수록 온도편차가 줄어든 것으로 사료되며, y방향의 경우는 본 연구에서 사용된 리니어모터 시스템의 구조적 특성상 평판 냉각판이 Primary part와 테이블 사이에 위치하므로 수관에 흐르는 냉각수의 온도는 시간에 따라 상승하고 이로 인하여 테이블에는 온도편차가 생기게 되며, 또한 본 연구에서 y방향 온도편차를 분석하기 위해 고려한 위치는 주로 전도에 의해 열전달이 이루어지는 위치로 냉각판의 열배출 특성이 직접적으로 나타나는 위치이다. 따라서 가속도가 클수록 리니어모터에 걸리는 부하가 커져 발열량이 커지고 그에 따라 냉각판의 구조적 특성상 y방향 온도편차가 더욱 커지는 결과를 보이는 것으로 판단된다.

Fig. 5, 6의 결과를 비교해 보면 온도 상승량과 온도편차에 미치는 냉각조건 경향이 정반대로 나

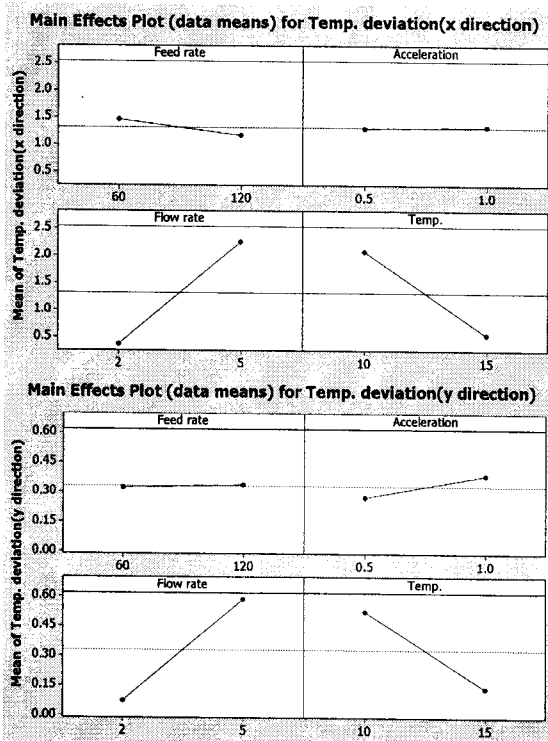


Fig. 6 Main effects plots for  $\delta T_x, \delta T_y$

타났다. 즉 온도 상승량을 줄이기 위해 냉각수의 공급량을 많게 하고 온도를 낮추면 이송테이블의 온도분포는 더 커지는 것으로 나타났다. 이는 이전의 연구결과<sup>8</sup>에서 확인한 바와 같이 냉각능력을 높이면 열전달 기구의 차이에 의해 이송테이블의 위치에 따른 온도편차는 더욱 커지기 때문이다.

이송테이블의 열적 거동을 가공정밀도 측면에서 본다면 온도분포의 불균일에 의한 열변형이 온도상승량 보다 더 큰 문제로 인식될 수 있다. 하지만 역으로 온도 상승량이 많다는 것은 냉각효율이 떨어져 리니어모터에서 발생하는 열을 냉각장치에서 외부로 충분히 배출하지 못한다는 것이다. 이는 리니어모터의 과도한 온도상승을 유발하여 리니어모터 자체의 성능저하를 일으킬 수 있다. 따라서 리니어모터시스템의 열적 안정성을 향상시키기 위해서는 2.3절에서 소개한 리니어모터시스템의 구조적 고려와 함께 적절한 냉각조건 선정이 필수적임을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 고려한 리니어모터 시스템의 경우는 리니어모터 자체의 성능변화에 영향을 미치지 않을 온도 상승량의 수준에서 고려한 범위에서 냉각수 유량은 적게, 냉각수 설정 온도는 높게 하는 것이 이송테이블의 온도분포측면에서는 유리한 것으로 나타났다.

Fig. 7은 이송테이블의 3, 5번 위치에서 열시정수( $\tau_3, \tau_5$ )에 대한 각 인자들의 주 효과의 크기를 비교한 그래프이다.

리니어모터를 공작기계 등의 이송장치로 사용할 경우 절삭력의 변동이나 가감속으로 인하여 모터의 동력은 수시로 변동하고, 모터의 손실동력은 힘의 제공에 비례하여 증가한다.<sup>3</sup> 따라서 모터에 작용하는 힘의 변화에 의하여 테이블로 전달되는 열량이 수시로 변하는 경우 테이블의 열시정수가 낮으면 변동하는 모터의 부하에 대하여 시스템을 열적으로 안정화 시킬 수 없으므로 위치에 따른 이송테이블의 열시정수는 이송테이블의 열적 안정화를 위해 평가되어야 할 부분이다. 일반적으로 이송테이블의 열시정수는 높은 것이 좋다.

실험결과 이송테이블의 열시정수는 위치에 따라 다르게 나타났으며 모든 실험조건에서  $\tau_5 > \tau_3$ 로 나타났다. 이는 열전달기구에서  $T_3$  위치는 냉각판을 통하여 전도에 의한 열전달이 대부분이므로 냉각판의 영향을 직접적으로 받고 빠른 시간에 열적 평형 상태에 도달하기 때문에  $T_3$ 의 위치보다 열시정수가

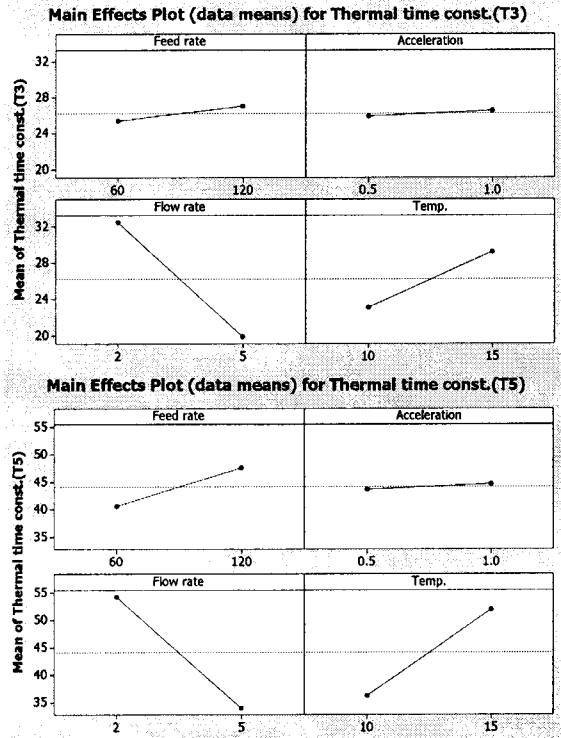


Fig. 7 Main effects plots for  $\tau_3, \tau_5$

낮게 나온 것으로 판단된다. 따라서  $T_3$  위치는 부하의 변동에 따른 열손실량에 대한 냉각능력에 열시정수가 크게 영향을 받는 것으로 판단된다. 즉  $T_3$  위치에서는 냉각능력이 리니어모터에서의 발열량보다 클 경우는 열적평형상태에 도달하는 시간이 냉각조건에 크게 의존하고, 운전조건이 변하여 발열량이 커질 경우는 테이블의 재질과 질량 등 열시정수에 영향을 미치는 시스템 자체의 특성과 냉각조건에 의존하는 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 리니어모터 시스템의 운전조건 및 냉각조건에 따른 열특성을 실험적 방법으로 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 이송테이블의 온도 상승량에는 냉각수 유량의 효과가 가장 크고 냉각수 공급 온도, 가속도 순으로 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 냉각수 유량이 많고 공급 온도가 낮으며 가속도가 작을수록 온도 상승량이 줄어드는 것을 확인할 수 있었다.

2. 이송테이블의 온도편차에 미치는 영향중 냉각조건은 이송테이블의 방향에 관계없이 냉각수 유량을 작게 높은 온도로 공급하는 것이 유리한 것으로 나타났다. 운전조건은 이송테이블의 방향에 따라 영향을 미치는 인자의 종류가 다르며 x방향에는 이송속도가 y방향에는 가속도가 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

3. 실험결과 이송테이블의 열시정수는 위치에 따라 다르게 나타났으며 모든 실험조건에서  $\tau_6 > \tau_3$ 로 나타났다. 또한 운전조건에 따라 이송테이블의 열시정수에 절삭량과 재질 등의 이송테이블 자체 특성 뿐 아니라 냉각조건도 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.

### 후 기

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업(RTI04-01-03) 지원으로 수행되었습니다.

### 참고문헌

- Eun, I. U., "Optimization of the Thermal Behavior of Linear Motors with High Speed and Force [1<sup>st</sup> paper]," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 19, No. 6, pp. 184-191, 2002.
- Eun, I. U., "Optimization of the Thermal Behavior of Linear Motors with High Speed and Force [2<sup>nd</sup> paper]," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 19, No. 7, pp. 163-170, 2002.
- Eun, I. U., "Comparison between Asynchronous and Synchronous Linear Motors as to Thermal Behavior," International Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 2, No. 3, pp. 61-68, 2001.
- Eun, I. U., "Improvement of the Thermal Characteristics of Synchronous Linear Motors Through Insulation," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 19, No. 3, pp. 123-130, 2002.
- Hsue, A. W. J., Yan, M. T. and Ke, S. H., "Comparison on linear synchronous motors and conventional rotary motors driven Wire-EDM processes," Journal of Materials Processing Technology, pp. 478-485, 2007.
- Chung, I. Y., Kang, E. G., Lee, S. W. and Choi, H. Z., "A Study on thermal characteristics of linear motor for high speed machining tools," Proceedings of the Korean Society for Precision Engineering Spring Conference, pp. 98-101, 2001.
- Hwang, Y. K., Eun, I. U. and Lee, C. M., "A Study on the Cooling Parameter Decision of Linear Motor System by Finite Volume Method," Proceedings of the Korean Society for Precision Engineering Spring Conference, pp. 449-450, 2006.
- Hwang, Y. K., Jung, J. W., Eun, I. U., Lee, C. M. and Choi, J. K., "A Basic Study on Improvement of the Thermal Stability for Development of High Speed, Accuracy Linear Motors," Proceedings of the Korean Society for Precision Engineering Autumn Conference, pp. 473-474, 2007.
- Jung, J. H., Shin, S. H. and Lee, S. R., "Optimization of the Design Variables of Linear Motor by FEM," Trans. of KSME, A, Vol. 26, No. 7, pp. 1232-1240, 2002.
- Park, S. H., "Design of Experiments," Minyoungsa, pp. 305-329, 2005.
- Cengel, Y. A., "Heat Transfer A Practical Approach," McGraw-Hill, pp. 362-408, 2002.