

◆특집◆ 공작기계의 열변형

고속 이송계의 열변형특성 및 보정

은인웅*, 이춘만**, 정원지**

Thermal Deformation Characteristics and Compensation of High Speed Feed Mechanism

In-Ung Eun*, Choon Man Lee** and Won Jee Chung**

Key Words : Machine tools (공작기계), Feed mechanism (이송계), Linear motor (리니어모터), Ball screw (볼스크류), Thermal deformation (열변형), Thermal compensation (온도보정)

1. 서론

공작기계의 고속화는 회전 운동하는 주축과 직선 운동하는 이송계의 고속화를 통하여 가능하다. 주축의 고속화가 생산성의 향상, 정밀가공, 세라믹이나 유리와 같은 난삭재의 가공과 같은 가공 특성에 영향을 준다면, 이송계의 고속화는 공구나 공작물을 기준점으로부터 가공위치까지 이송하는 위치조정시간(Positioning time)을 단축하여 결과적으로 생산성을 높인다. 그리하여 공작기계의 기술동향은 주축과 이송계의 고속화로 꾸준한 기술향상을 거듭하여 왔다. 그러나 공작기계의 고속화는 필연적으로 구동부의 마찰증대 그리고 주축이나 이송계의 변속장치가 생략되는 내장형 모터(Built-in motor)나 리니어모터(Linear motor)에 의해서 심각한 열문제를 수반한다. 이 열문제는 궁극적으로 공작기계의 열변형과 함께 위치제어 정밀도를 저하시켜 가공정밀도의 저하 그리고 형상오차를 유발한다.⁽¹⁾

본 연구에서 다루는 고속 이송계는 구동원리에 있어서 볼스크류(Ball screw)나 리니어모터를 기본으로 한다 (Fig. 1). 볼스크류는 서보모터의 회전운동을 테이블의 직선운동으로 변환시키는 기구이며, 이전의 사다리꼴 단면형상의 이송축에 비해 낮은 높은 효율, 마찰계수 그리고 CNC 제어기와 조합하였을 때 얻어지는 높은 위치제어 정밀도로 인하여 CNC 공작기계의 이송축에 가장 많이 사용되는 이송기구이다.

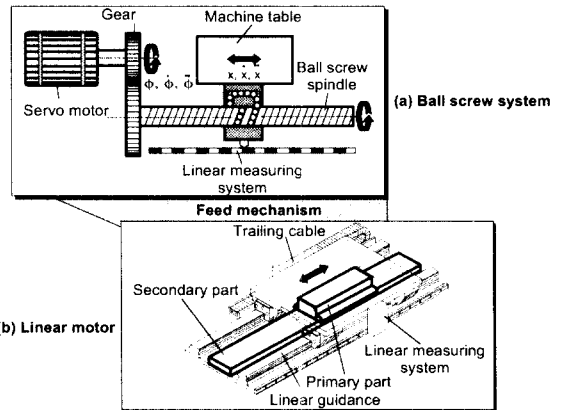


Fig. 1 Two different feed mechanisms for machine tools

* 경기공업대학 금형설계과

** 창원대학교 기계설계과

Tel. 031-496-4764, Fax. 031-496-4636

Email iueun@kinst.ac.kr

공작기계의 구조해석, 성능검사 그리고 리니어모터의 개발과 공작기계의 고속이송계에의 응용 연구.

반면 리니어모터는 모터의 두 요소인 Primary part 와 Secondary part 사이에 작용하는 유도기전력에 의해서 모터 자체가 직접 직선운동을 한다. 따라서 리니어모터를 공작기계의 이송계로 적용할 경우 고속·고가속 운동이 가능하고 높은 위치제어 정밀도를 가진다.

본 논문에서는 볼스크류와 리니어모터를 사용한 고속 공작기계의 열변형 특성을 비교하여 분석하고 열특성을 향상시키기 위한 방안을 다룬다.

2. 볼스크류 시스템의 열변형특성

2.1 볼스크류의 열원과 열변형특성

볼스크류의 열특성은 스크류너트의 수, 볼의 접촉점의 수, 스크류 단면의 형상, 예압의 종류 그리고 볼 순환시스템의 방법 등에 따라 차이가 있다. 볼스크류가 공작기계의 이송계로 사용될 경우 열원은 Fig. 2 에 나타낸 바와 같이 볼과 축 사이의 마찰, 운동하는 전후 볼 사이의 접촉마찰, 오일의 점성에 의한 마찰, 볼 순환부의 마찰, 스크레이퍼에 의한 마찰 등이다. 즉, 볼스크류 시스템의 열원은 구동부의 기계적인 마찰열이며 이것은 고속이 될수록 증가한다.⁽²⁾

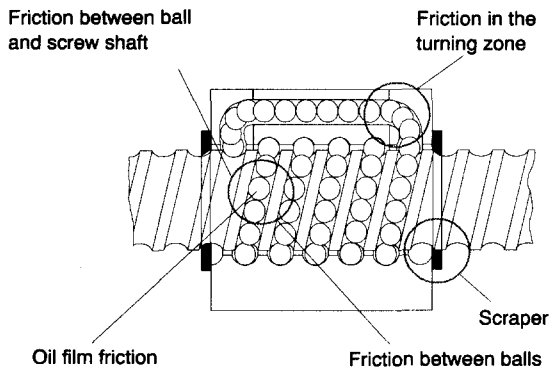


Fig. 2 Heat sources in a ball screw system

볼스크류는 이송계로써 충분한 강성을 유지하고, 백래쉬(Backlash)에 의한 위치제어 정밀도가 저하하는 것을 막기 위하여 예압(Preload)을 주는데, 이 예압은 발열의 중요한 원인이 되고 특히 고속에서 그러하다. Fig. 3 에는 이중너트를 사용하고 스피ndl의 지경 40 mm, 피치가 10 mm 인 볼스

크류 시스템의 회전토크와 회전수 그리고 예압과의 관계를 나타낸 것이다.⁽³⁾ 예압과 회전수가 높아질수록 마찰력의 증가에 의한 볼스크류의 회전토크가 증가하고 결국 이것은 발열과 온도상승 그리고 위치제어오차의 원인이 된다.

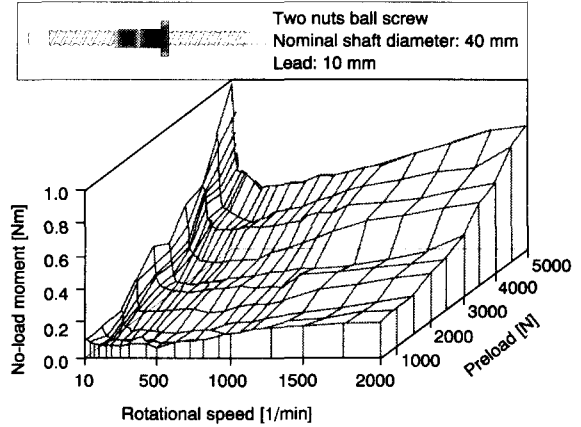


Fig. 3 Torque in dependence on preload and rpm

Fig. 4 는 스피ndl의 지름이 40 mm, 길이 940 mm, 피치 5 mm 인 볼스크류 시스템이 228 kg 의 테이블을 210 mm 의 거리로 이송 운동할 때의 발열특성을 보여주고 있다.⁽⁴⁾ 온도 측정점은 스피ndl, 너트, 베어링의 내륜 그리고 외륜이다. 초기의 정지 상태에서 처음 60 분간은 회전속도 800 rpm 그 다음은 1200 rpm 으로 이송 운동할 때, 처음보다는 회전수가 높은 60 분 후가 모든 측정 위치에서 훨씬 높은 온도를 보인다.

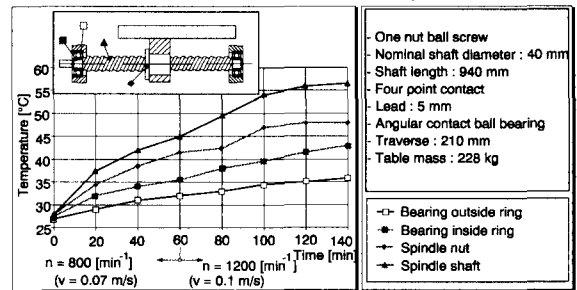


Fig. 4 Temperature rise on ball screw system

측정한 위치별로 140 분 후의 온도를 보면 스피ndl의 온도가 57 °C 로 가장 높고, 그 다음이 너

트로 48 °C, 다음이 베어링 내륜으로 43 °C 그 다음이 베어링 외륜으로 36 °C였다. 이 중 시스템의 요소 중 온도상승이 가장 높고 위치제어정밀도에 직접 영향을 주는 스크류 스피들의 열팽창을 저하시키는 것이 중요하다.

2.2. 볼스크류의 온도보정

지금까지 볼스크류의 온도상승에 따른 위치제어 오차를 줄이기 위한 연구가 많은 연구자들에 의하여 다각도로 행해져 왔다. 이 방법들을 대별하면 설계나 구조변경을 통해 열원인 마찰열을 줄이는 방법 그리고 온도보정에 의한 방법이다. 구조변경이나 설계단계에서 열특성을 향상시키는 방법은 ①세라믹 볼과 같은 신소재의 적용, ②중공 스피들 내에 냉각수를 유입하는 방법 ③작업조건에 따라 예압을 달리하는 예압조절 기구 등이 있다. 또한 온도를 보정하는 방법은 ①직접 온도보정(Direct compensation), ②간접 온도보정(Indirect compensation)이 있으며, 전자는 이송 스피들의 열팽창을 측정하여 제어시스템을 통해 직접 보정하며 후자는 열팽창에 비례하는 물리적인 양 즉, 온도나 회전수와 열팽창의 상관관계를 측정하여 모델링하고 이것을 제어기에 있는 보정테이블을 이용하여 보정하는 방법이다.⁽⁵⁻⁷⁾

3. 리니어모터의 열변형특성

3.1 리니어모터의 열원과 발열특성

리니어모터가 공작기계의 이송기구로 적용될 경우, 열원은 크게 나누어 리니어모터의 내부에서 발생하는 전기적인 손실열, 그리고 리니어가이던스에서 발생하는 기계적인 마찰열의 두 종류이다. 전기적인 손실열은 리니어모터의 구동방법, 제조회사 그리고 크기에 따라 차이가 난다. 그러나 동일한 출력을 가진 리니어모터를 회전모터와 비교하면 낮은 효율을 가지고, 그로 인한 발열현상이 큰 약점이다.

Fig. 5 에는 정상추력 3200 N, 최대추력 7000 N, 연속속도 90 m/min, 최대속도 170 m/min 의 특성을 가진 동기식 리니어모터(Synchronous linear motor)의 효율을 이송속도와 부하에 관하여 측정한 결과를 보여주고 있다. 직선 운동하는 Primary part 를 포함한 테이블의 중량은 172 kg 이고 4 개의 이송 블록이 리니어가이던스 상에서 운동한다. 부하를 변동

시키기 위해 테이블에 달린 추의 중량을 50, 100, 150 kg 으로 증가시키고 또한 직선속도를 0.2, 0.4, 0.6 m/s 로 변화시켰다.

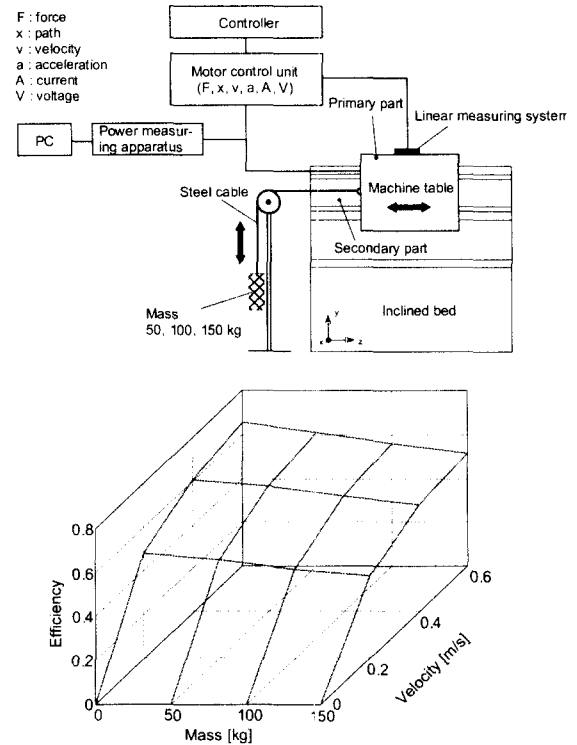


Fig. 5 Efficiency of a synchronous linear motor

그림에서 보는 바와 같이 효율은 속도가 증가할수록 커지고 부하가 증가할수록 낮아진다. 속도가 0.6 m/s, 부하가 테이블의 중량 외에 추가적인 부하가 없는 경우 효율이 약 60 % 이 되었다. 본 연구에서는 실험 장치의 한계 때문에 속도를 연속속도인 90 m/min 까지 올릴 수 없었으나 본 실험에 사용된 동기식 리니어모터는 최대 효율이 약 80 %를 약간 상회한다. 즉, 나머지 손실동력은 작동 중 열로 변한다.

반면 리니어가이던스의 마찰에 의한 열은 리니어모터의 자기력, 구동하는 테이블의 중량 그리고 이송속도 등에 많이 의존하지만, 최근에 낮은 마찰계수와 함께 고속운동이 가능한 롤러 리니어시스템을 적용하면 발열량은 무시할 수 있을 정도로 낮다.⁽⁸⁾

Fig. 6 에는 상기 동기식 리니어모터에서 측정된 온도특성을 보여준다. 리니어모터는 정상추력

에 해당하는 3200 N 의 힘으로 위치제어가 된 상태에서 부하를 받고, 이 때 발생하는 손실동력은 2600 W 이다. Primary part 와 테이블 사이에는 모터에서 발생한 열을 밖으로 배출하기 위하여 판형냉각기가 설치되어 있다. 냉각수의 유입온도는 19 °C 이고 유량은 2, 5, 7.5, 10, 15 l/min 으로 변화시켰다.

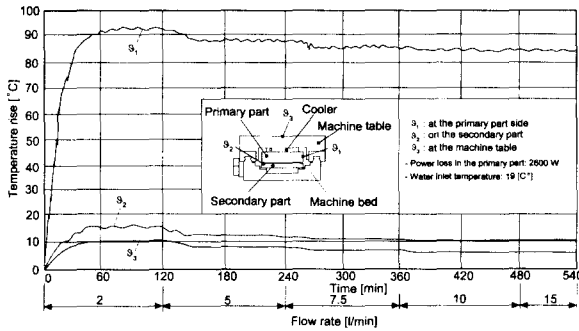


Fig. 6 Temperature rise on the linear motor and the machine table related to water flow rate

Fig. 6 에서 보이는 바와 같이 주열원인 Primary part 의 측면에서의 온도상승(θ_1)은 유량이 2 l/min 일 때 약 95 °C, 10 l/min 일 때 85 °C 그리고 15 l/min 일 경우도 동일하게 85 °C 이다. 즉, 주열원인 Primary part 는 수냉각에도 불구하고 충분히 냉각되지 아니한다. Secondary part(θ_2)는 주열원이 아니고 자체 내의 열손실도 무시할 수 있을 정도로 낮으나, 고열의 Primary part 의 밑면으로부터 공기 간극을 통해 열대류와 열복사에 의해서 가열된다. 온도측정 결과에서 보여주는 바와 같이, 유량이 2 l/min 의 경우, 약 15 °C 의 온도상승이 있고, 유량이 증가할수록 온도상승은 저하하나 10 °C 이상의 온도상승이 있다. 이송계의 열변위에 중요한 이송테이블의 온도상승(θ_3)은 주어진 유량의 범위에서 6-11 °C 의 온도상승을 보인다.

리니어모터를 과열로부터 보호하고, 충분한 추력을 얻으며 주변기계구조물을 어떤 적절한 온도로 유지하기 위해서는 본 연구에 사용된 리니어모터의 경우 최소유량은 2 l/min 이상이 되어야 하고, 유량이 10 l/min 이상이 되는 것은 냉각효과를 증대 시키는데 큰 효과가 없다 따라서 리니어모터 자체나 이송테이블의 온도를 더 낮게 하기 위해서는 리니어모터나 기존의 Cooler 의 구조를 변경하거나 단열에 의한 방법 등에 의존한다.

3.2 리니어모터의 온도보정

Fig. 7 에는 리니어모터의 열특성을 향상시키기 위한 방법들을 보여준다. 그 원리는 강제냉각, 단열, 냉각기의 형상과 구조 그리고 제어의 방법으로 구분할 수 있다.

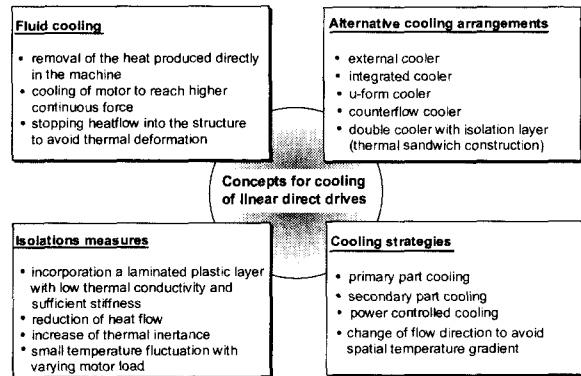


Fig. 7 Concepts for improving the thermal behavior of linear motors

강제냉각은 모터에서 발생한 열을 밖으로 배출하고 높은 연속추력에 도달하고 주변구조물을 적정온도로 유지하기 위해서 반드시 필요하다. 단열재를 사용하면 모터로부터 이송테이블로의 열흐름을 억제하고 열시정수(Thermal time constant)를 크게 하여 결과적으로 변동하는 모터의 부하에 대하여 테이블의 온도변동을 줄일 수 있다.⁽⁹⁾

모터나 냉각기의 구조에 따라 외부 냉각기, 내장형 냉각기, 이중냉각기, U 형 냉각기 등으로 분류한다. 또한 제어에 의한 방법은 Primary part, Secondary part 의 냉각기의 유량, 냉각수의 유입온도 또는 흐름의 방향을 제어하는 방법 등이 있다.

Fig. 8 에는 이중 냉각장치와 단열재를 조합한 리니어모터의 열특성을 보여주고 있다. 리니어모터에 연속추력 2950 N 에 상당한 추력을 가하고 테이블에서의 온도상승을 측정한 결과이다. 내장형 냉각기 그리고 외부 냉각기에 흐르는 유량은 5 l/min 이고, Secondary part 의 냉각파이프에 흐르는 유량은 7, 5, 2 l/min 그리고 유량이 없는 상태로 변화시켰다. 냉각수의 유입온도는 모든 냉각기에 동일하게 19 °C 이다.

온도측정 결과에서 보는 바와 같이 테이블의 온도상승은 전체적으로 0.4 °C 이하로 제한되었고

테이블의 오른편 (θ_1), 테이블 중앙 (θ_2) 그리고 테이블 내 (θ_3)의 온도차이가 약 0.2 °C 이내에서 머물러 테이블이 전체적으로 거의 균일한 온도를 보인다. 이것은 최적화 이전의 보통 관형 Cooler 에서 테이블의 온도상승이 약 5-12 °C 에 이른 것에 비하면 열특성을 최적화한 리니어모터의 테이블의 온도상승이 크게 감소하였음을 보여준다. 또한 모터의 동력이 없는 상태에서도 테이블의 온도저하는 약 0.4 °C 가 되어 열적으로 안정되어 있다.

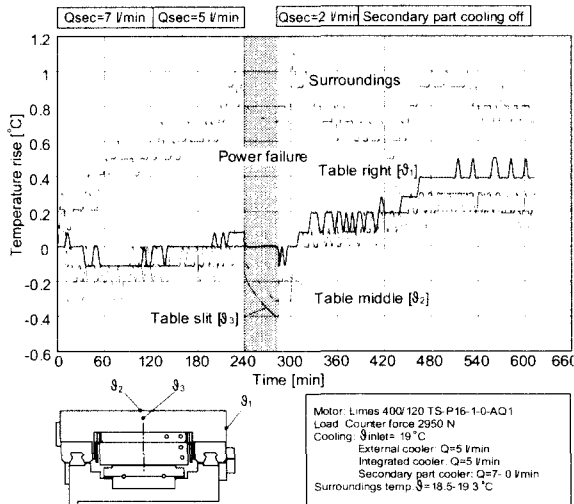


Fig. 8 Temperature rise in the machine table by counter force

4. 볼스크류와 리니어모터의 열특성의 비교

Fig. 9 볼스크류와 리니어모터의 열특성을 요약하여 비교한 그림이다. 볼스크류의 열원은 스크류 너트와 베어링부의 마찰이고 리니어모터의 주열원은 모터 내에서 발생하는 전기손실이다. 위치제어 정밀도에 영향을 미치는 열팽창의 특성을 비교하면 볼스크류는 스피들이 축방향으로 선형적인 팽창하는 반면에 리니어모터는 이송테이블이 부피팽창을 한다고 볼 수 있다. 볼스크류의 경우 양 선단을 지지하는 베어링이 고정된 배열을 갖는 경우 축방향으로 큰 열응력이 발생하나 리니어모터의 경우 수냉각을 할 경우 열응력이 발생할 부위가 없다. 볼스크류는 스피들의 길이에 비례하여 열팽창량이 많아지지만 리니어모터는 베드에 고정되는

Secondary part 를 길게 하면 테이블의 열팽창은 이송거리에 관계없이 긴 이송축에 유리하다. 지금까지 기술적으로 가능한 열특성을 향상시키는 방법으로서는 볼스크류 시스템은 속도와 예압을 줄여 마찰열을 억제하거나, 중공축에 냉각수를 유입하거나 또는 직·간접 온도보정을 하는 방법 등이 있다. 반면 리니어모터는 효과적인 냉각, 단열재의 응용 또는 모터나 냉각기의 구조변경을 통하여 열특성을 향상시킬 수 있다.

Thermal behavior	Ball screw	Linear motor
Heat source	Friction in screw nut and bearings	Electrical power loss in linear motor
Deformation type	Linear displacement of spindle	Spatial expansion of table
Thermal stress	High axial thermal stress in case of two fixed bearings	Low thermal stress with water cooling
Characteristic of deformation	Thermal displacement is proportional to spindle length	Thermal displacement is not dependent on the path
Measures for thermal problem	Reduction of friction → Reduction of speed and preload Hollow spindle with water cooling Thermal compensation	Forced water cooling Isolation Optimization of cooler and motor construction

Fig. 9 Comparison between ball screw and linear motor as to thermal behavior

5. 결론

본 논문에서는 고속·정밀 공작기계의 이송장치로 많이 쓰이고 있는 볼스크류 그리고 리니어모터의 열원, 온도특성 그리고 열특성을 향상시키기 위한 방법을 알아보았다.

볼스크류 시스템은 그 자체가 가지고 있는 적은 마찰계수, CNC 컨트롤러와 조합하였을 때 얻어지는 뛰어난 위치제어 정밀도에도 불구하고 고속 이송에서 나타나는 열팽창과 더불어 위치제어오차는 시스템의 한계이다. 그리하여 구동부위의 마찰을 줄이기 위한 윤활, 신소재 적용 그리고 온도보정의 방법이 사용된다.

리니어모터는 그 역사가 볼스크류에 비해 짧고 고속·고가속의 능력 그리고 고속에서 높은 위치제어 정밀도를 보유하나, 열효율이 낮고 공작기계의 중앙에 시스템이 위치하고 있어 반드시 강제 냉각시설이 필요하다. 리니어모터는 단열을 하거나 모터나 냉각기의 구조변경을 통해 설계단계에서 열특성을 향상시킬 수 있다.

참고문헌

1. Weck, M., Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme, Band 3.2, 3.auf. VDI-Verlag, pp. 79-82, 1995.
2. N. N., Linear motion system, THK, Catalog, 1999.
3. Golz, H. U., "Analyse, Modellbildung, und Optimierung des Betriebsverhaltens von Kugelgewindetrieben," Dissertation, Karlsruhe, 1990.
4. Schmitt, T., "Modell der Waermeuebertragungsvorgaenge in der mechanischen Struktur von CNC-gesteuerten Vorschubsystemen," Dissertation, Darmstadt, 1996.
5. N. N., Precision machine element-Linear motion, NSK, Pr. No. GK 030390 PME, 1990.
6. Schaefer, W., "Steuerungstechnische Korrektur thermoelastischer Verformungen an Werkzeugmaschinen," Dissertation, RWTH Aachen, 1994.
7. Weck, M., Bonse, R., "Indirekte Kompensation thermoelastischer Verformungen bei Einwirkungen mehrerer Waermequellen," VDW Forschungsberichte 8483, 1995.
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. 은인웅, "단열에 의한 동기식 리니어모터의 열 특성 최적화," 한국정밀공학회지, 제 19 권 제 3 호, pp. 123-130, 2002.