

전기선형모터의 공작기계에의 적용

은인웅*(창원대 공작기계기술연구센터), 정원지, 이춘만, 최영휴(창원대 기계설계과)

Application of Electrical Linear Motors to Machine Tools

I.-U. Eun* (Machine Tool Research Center, Changwon National Univ.), W. J. Chung, C. M. Lee, Y. H. Choi
(Dept. of Mechanical Design & Manufacturing, CNU)

ABSTRACT

Linear motor is characterized by its high velocity, high acceleration and good positioning accuracy. In recent years, linear motor is often used as a fast feed mechanism for high-speed machine tools. For the effective application of linear motors to machine tools, many demands on machine conceptions must be fulfilled. In this paper, some important construction concepts such as bending deformation of machine table, frictional force on the linear guidance and thermal behavior of linear motors are presented.

Key Words : Linear motor (선형모터), Machine tool (공작기계), Feed mechanism (이송기구), High speed machining (고속가공)

1. 서론

전기선형모터 (Electricai linear motor, 이하 선형모터)는 모터의 기본이 되는 Primary part (회전모터의 Stator 에 상당)와 Secondary part (회전모터의 Rotor 에 상당) 사이에서 일어나는 유도기전력에 의해서 모터자체가 직선운동을 한다. 선형모터를 공작기계의 이송장치로 적용할 경우 서보모터의 회전운동을 직선운동으로 전환시키는 기구. 예를 들면 Ball screw 혹은 Lack pinion 기구, 가 생략되어 고속·고가속운동이 가능하고 구동부의 관성모멘트가 줄어들어 높은 위치제어 능력을 가진다.^(1,2) 이와 같은 선형모터를 사용한 이송시스템은 지금까지 공작기계의 이송장치로 많이 사용된 Ball screw 시스템과는 근본적으로 다르기에 설계단계에서 고려해야 될 사항이 달라진다. Fig. 1 은 선형모터를 사용한 공작기계 이송장치의 기본적인 요소들을 보여주고 있다.

공작기계의 이송장치로 사용되는 선형모터는 Secondary part 가 베드에 고정되어 있고 Primary part 가 테이블과 함께 직선운동하는 소위 말하는 Short stator linear motor 이다.⁽³⁾ Primary part 와 테이블 그리고 Secondary part 와 베드는 볼트로 연결되어 있다. Primary part 와 테이블 그리고 Secondary part 와 베드 사이에는 모터에서 발생한 열을 밖으로 배출 시켜

모터를 과열로부터 보호하고 전 시스템을 일정한 온도로 유지하기 위해 수냉장치가 있다. 선형모터의 고속직선운동을 가능하게 하고 Primary part 와 Secondary part 사이에서 발생하는 자기력을 흡수하기 위해 Linear roller guidance 가 사용된다.

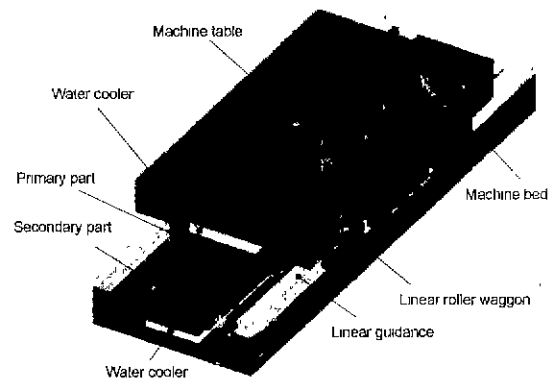


Fig. 1 Basic components for feed mechanism with linear motor

현재 공작기계의 이송장치로 사용되고 있는 선형모터는 모터의 작동원리에 따라 Asynchronous

linear motor 그리고 Synchronous linear motor로 구분할 수 있다. 두 모터는 1 차 권선이 들어 있는 Primary part의 구조는 동일하나 Secondary part에 큰 차이가 있다. Asynchronous linear motor의 경우 Secondary part는 철심 내에 2 차 권선이 들어 있으나 Synchronous linear motor는 Secondary part가 영구자석으로 되어 있다. 따라서 Asynchronous linear motor는 유도과정에서 Secondary part 내에서 큰 열손실이 따르고 Synchronous linear motor와 비교하여 효율도 낮다. 90년대 중반 이전에는 Asynchronous linear motor가 주로 공작기계의 이송장치로 사용되었고 그 이후로는 효율과 추력에서 뛰어난 Synchronous linear motor가 공작기계의 이송기구로 많이 사용되는 추세이다.⁽⁴⁾ 본 논문에서는 선형모터의 공작기계에 적용 시 고려되는 테이블의 급험변형, 안내면의 마찰 그리고 열문제 등에 대해서 고찰한다.

2. 선형모터의 사양과 실험장치

2.1 선형모터의 사양

Table 1은 본 연구에 사용된 Asynchronous linear motor 그리고 Synchronous linear motor의 전기적 그리고 기계적인 사양을 보여주고 있다. 두 모터의 외형적인 크기는 같고 동일한 회사(Krauss Maffei) 제품이다. Asynchronous linear motor의 연속추력은 1800 N, 최대추력은 5000 N, 연속속도는 60 m/min, 최대속도는 120 m/min이다. 반면에 Synchronous linear motor의 연속추력은 3200 N, 최대추력은 7000 N, 연속속도는 90 m/min, 최대속도는 170 m/min이다. 이와 같은 추력과 속도를 가진 이송장치를 공작기계에 적용할 경우 고속·중절삭(High speed and middle heavy machining) 이송기구로써 적합하다.

정격전류 하에서 최대 열손실은 Asynchronous linear motor가 3900 W(Primary part 2600 W, Secondary part 1300 W) 그리고 Synchronous linear motor가 2600 W이며 Synchronous linear motor의 Secondary part의 열손실은 무시할 만하다. Primary part와 Secondary part 사이의 작용하는 자기력(Magnetic attraction)은 Asynchronous linear motor가 11800 N 그리고 Synchronous linear motor가 14600 N이다. 유도과정에서의 열손실을 줄이기 위해 Asynchronous linear motor의 Primary part와 Secondary part 사이의 Air gap은 Synchronous linear motor에 비해서 작게 유지한다.

Table 1 Technical data of asynchronous and synchronous linear motors (* with water cooling)

| Technical data | Unit | Asynchronous motor | Synchronous motor |
|---|-------|--------------------|-------------------|
| Continuous force | N | 1800 | 3200 |
| Maximal force | N | 5000 | 7000 |
| Magnetic attraction | N | 11800 | 14600 |
| Continuous velocity | m/min | 60 | 90 |
| Maximal velocity | m/min | 120 | 170 |
| Nominal current | A | 25 | 22.6 |
| Maximal current | A | 70 | 57 |
| Force constant | N/A | 72 | 141 |
| Mass of primary part | kg | 30 | 30 |
| Mass of secondary part | kg/m | 40 | 33 |
| Power loss in the primary part (at nominal current) | W | 2600 | 2600 |
| Power loss in the secondary part (at nominal current) | W | 1300 | 20 |
| Air gap between primary and secondary part | mm | 0.6 | 1.5 |

2.2 실험장치

Fig.2는 Synchronous linear motor를 장착한 실험장치를 보여주고 있다. 모터의 크기가 같기에 높이나 폭의 큰 변경이 없이 Asynchronous linear motor를 동일한 실험장치에 적용하여 실험할 수 있다. 실험장치로 사용한 베드는 수평면에 대해 60°경사진 선반용 베드이다. 선형모터는 작동 중 기전력에 의해 z 방향으로 직선운동을 한다.

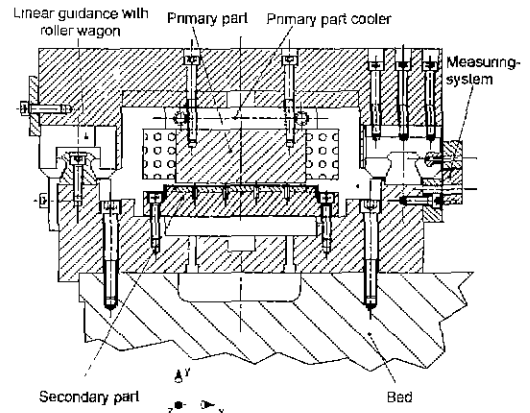


Fig. 2 Experimental set-up with the synchronous linear motor

3. 테이블의 굽힘변형

테이블은 선형모터의 Primary part 와 함께 직선 운동을 한다. 선형모터의 Primary part 그리고 Secondary part 사이의 자기력은 모터의 크기, 종류 그리고 생산회사에 따라 약간씩 차이가 있으나 일반적으로 연속추력의 5-10 배에 달한다. 이 자기력으로 인해 작동 중 테이블의 굽힘변형이 일어날 수 있기에, 충분한 굽힘강성을 가져야 한다. 테이블의 굽힘강성을 높이기 위해서는 두께를 두껍게 해야 하지만 그럴 경우 테이블의 질량이 높아져 가속능력이 저하하고 관성모멘트가 높아져 위치제어 능력이 떨어진다. 또한 테이블의 질량이 커지면 운동부의 질량중심이 상부로 이동하게 되고 Primary part 와 Secondary part 사이에서 작용하는 기전력과 함께 저속 직선운동 중 직선 안내면 상에서 Stick slip 현상을 유발한다.⁽⁵⁾

Fig. 3 은 Asynchronous linear motor 의 작동 중 발생하는 굽힘변형을 FEM 으로 계산한 결과를 보여주고 있다. 최대의 굽힘변형은 테이블의 중앙에서 발생하고 그 값은 8 μm 이다. 이 굽힘변형은 테이블과 직선안내장치에서 생기는 변형의 합이다. 이 변형량은 선형모터의 조립 시 중요하게 고려되는 Primary part 와 Secondary part 의 공기간극을 결정하는데 큰 영향을 미치지 않는 양이다. 이 굽힘변형은 Asynchronous linear motor 의 경우 작업 중에만 발생하나 Synchronous linear motor 의 경우 Secondary part 가 영구자석으로 되어 있어 항상 존재한다.

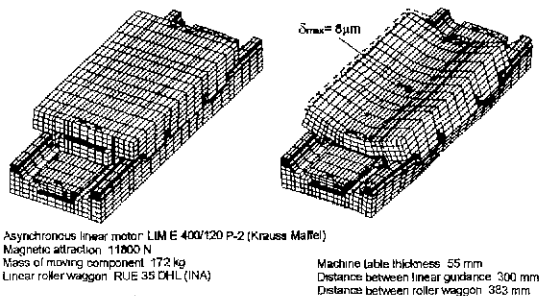


Fig. 3 Bending deformation of machine table with linear motor in operation

테이블의 굽힘변형문제는 높은 직선정밀도가 요구되는 측정기가 그리고 초정밀이송장치에서 그 중요성이 크다.⁽⁶⁾ 위 실험장치와 같은 공작기계의 이송장치의 경우 테이블의 굽힘변형은 자기력에 의한 변형보다는 열에 의한 열변형량이 훨씬 크고 y 방향으로의 변형은 이 자기력과 열에 의한 변형량의 합이 된다.⁽⁷⁾

4. 직선 안내면에서의 마찰

선형모터를 공작기계의 이송장치로 효과적으로 사용하기 위해서는 고속직선운동을 가능하게 하고 Primary part 와 Secondary part 사이의 자기력을 흡수할 수 있는 Ball / Roller linear guidance(직선안내기구)를 사용한다. 선형모터는 두 직선안내기구 사이에 위치 하고 자체가 열원이기 때문에 운동 중 열팽창에 의하여 두 직선안내기구 사이에서 조임(clamp) 현상이 일어날 수 있다. 본 연구에서는 이 조임 가능성을 테스트하기 위해 냉각할 경우와 냉각하지 않을 경우에 대해서 마찰력의 변화를 측정하였다. Fig.4 는 Asynchronous linear motor 의 온도에 따른 마찰력의 변화를 보여주고 있다. 마찰력은 냉각을 할 경우와 하지 않을 경우 실험장치의 온도가 오르면 전원을 끈 상태에서 테이블을 앞뒤로 운동시키며 측정하였다.

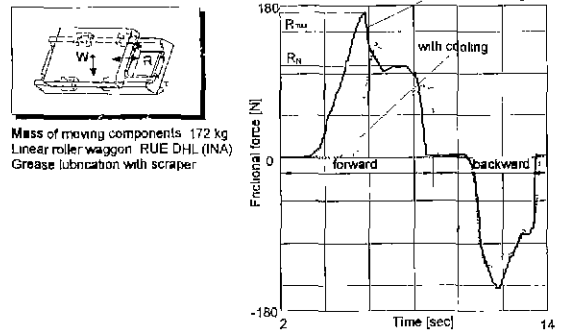


Fig. 4 Frictional force in dependence on temperature

Fig. 4 가 보여주는 바와 같이 냉각을 할 경우가 하지 않을 경우에 비해서 약간 높은 마찰력을 보인다. 그러나 실험장치가 냉각을 하지않는 경우와 냉각된 경우 마찰력의 변화는 근본적으로 큰 차이가 없으며 선형모터가 가열됨으로 인해 두 직선안내기구 사이에서 조임 현상은 일어나지 않는다.

5. 온도특성

공작기계의 이송기구로서 선형모터의 가장 큰 취약점은 열문제이다. 선형모터가 공작기계에 적용될 경우 다른 서보모터와는 달리 공작기계의 중앙부에 위치하게 된다. 따라서 선형모터의 열특성의 해석과 최적화는 중요한 과제이다. 선형모터를 공작기계에 적용할 경우 열원은 모터의 전기손실이며 직선안내면에서의 마찰손실은 무시할 수 있다.⁽⁷⁾ Fig. 5 는 Asynchronous linear motor 의 모터와 기계구조물의 온도변화를 보여주고 있다. 선형모터는 1800 N 의 Counter force 에 의하여 부하를 받고 이에

상응하는 손실동력은 3900 W이다. 작동 중 Primary part cooler 는 10-2 l/min 범위에서 그리고 Secondary part cooler 는 7.5-2 l/min 범위에서 유량을 변화시켰다 Primary part 의 측면에서의 온도(θ_{pr})는 유입온도의 변화에 따라 100 - 110 °C 사이에서, Secondary part 의 측면(θ_{sec})은 42-50 °C 사이에서 변화하였다. 테이블 상부중앙의 온도(θ_{26})는 유량의 변화에 따라 24-32°C 를 보이고 있다. 작동 중 선형모터와 테이블은 큰 온도차를 보인다.

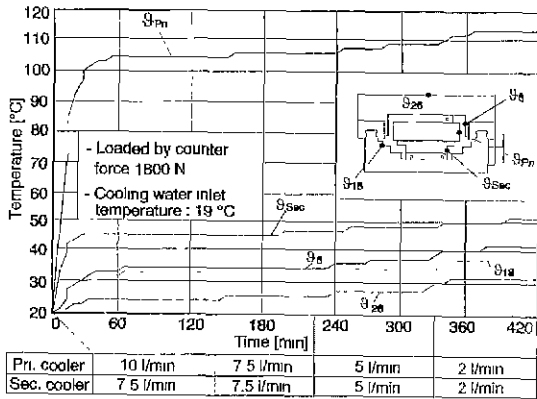


Fig. 5 Temperature on the asynchronous linear motor and structure in dependence on the water flow rate

Fig. 6 은 Synchronous linear motor 의 온도특성을 보여주고 있다. 선형모터가 3200 N 의 Counter force 로 부하를 받고 2600 W 의 손실동력이 발생할 경우 Primary part 의 측면(θ_1)의 온도는 105 °C 로써 Asynchronous linear motor 와 비슷하나 Secondary part(θ_2)는 수냉을 하지 않음에도 26 °C 의 온도를 보이고 있어 Asynchronous linear motor 와 차이를 보이고 있다. 테이블의 중앙의 온도(θ_3)는 24.5 °C 이다.

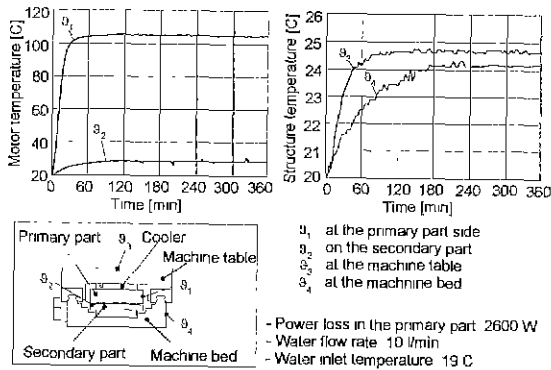


Fig. 6 Temperature on the synchronous linear motor and structure

6. 결론

본 연구에서는 선형모터를 공작기계의 이송기구로 적용할 경우 자기력에 의한 테이블의 굽힘변형, 온도에 의존한 직선안내기구에서의 마찰력 그리고 온도 특성에 대해서 고찰하였다. 연구의 대상으로 사용된 선형모터는 Asynchronous 그리고 Synchronous linear motor 이며 연속추력범위가 1800 - 3200 N 그리고 연속속도가 60 - 90 m/min 이다 자기력에 의한 테이블의 굽힘변형은 수 μ m 범위이고 선형모터의 Air gap 에 미치는 영향은 무시할 수 있다. 선형모터의 가열과 테이블의 열팽창으로 인한 직선안내기구사이에서 조임(clamp) 현상은 나타나지 않는다. 선형모터의 운전 중 모터자체는 수냉에도 불구하고 충분히 냉각되지 아니하여 Primary part 의 권선의 온도가 100 °C 이상에 이른다. Asynchronous linear motor 의 Secondary part 는 45 °C 이상이 되고, 반면 Synchronous linear motor 는 Secondary part 의 과열은 없다. 선형모터와 구조물 사이에는 큰 온도차를 보인다.

후기

본 연구는 한국과학재단 지정 창원대학교 공작기계기술연구센터의 지원에 의한 것입니다

참고문헌

1. Weck, M., "Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme," Band 3-2, VDI-Verlag, pp. 79-82, 1995.
2. Eversheim, W., Weck, M., Klocke, F., Pfeifer, T., "AWK Aachener Werkzeugmaschinen Kolloquium-Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik." pp. 223-226, 1996.
3. 은인용, "Linear motor 를 이용한 위치결정 기술," 한국 정밀공학회지, 제 17 권, 제 12 호, pp. 20-25, 2000.
4. Eversheim, W., Weck, M., Klocke, F., Pfeifer, T., "AWK Aachener Werkzeugmaschinen Kolloquium-Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik." pp. 339-346, 1999.
5. Weck, M., Wiencrs, A., "Technical report for the thermal test on the linear motor," WZL RWTH Aachen, 1992.
6. Niewind, M., "Linear motor for high speed machine," Proceeding document, WZL & IPT RWTH Aachen, 1999.
7. Eun, I.-U., "Optimierung des thermischen Verhaltens von elektrischen Linearmotoren fuer den Einsatz in Werkzeugmaschinen," Dissertation RWTH Aachen, pp. 21-28, 1999.