

칩 마운터용 리니어 모터 스테이지의 열저항 모델링

장창수* · 김종영* · 김영준*

Thermal Resistance Modeling of Linear Motor Driven Stages for Chip Mounter Applications

Changsoo Jang, Jongyoung Kim and Yungjoon Kim

Key Words : Linear motor(리니어 모터), chip mounter(칩 마운터), heat transfer(열전달), thermal resistance (열저항)

Abstract

Heat transfer in linear motor driven stages for surface mounting device applications was investigated. A simple one-dimensional thermal resistance model was introduced. In order to reduce three-dimensional nature to one-dimensional, a few assumptions and simplifications were employed suitably. A good agreement with a finite element heat transfer analysis in temperature profile was obtained. For validation, the analysis was compared with the measurement with respect to motor driving power. Overall discrepancy was less than 7°C. The influence of two high thermal resistance parts, insulation sheet and thermal contact between the coil assembly and the mounting plate, was examined through the analysis. Additionally, the thermal resistance analysis was applied to another stage including an internal cooling-air passage, and was found available for this system as well. After validation, the cooling effect was surveyed in terms of motor power, and cooling-air flow rate.

기호설명

A	area, m ²
c1, c2	constant
E _b	heat dissipation rate, W
h	film coefficient, W/m ² K
k	thermal conductivity, W/mK
L	length, m
Q _a	air flow rate, m ³ /sec
q	heat generation or dissipation, W/m ³
q"	heat flux rate, W/m ² sec
R	thermal resistance, K/W
r	radius, m
T	temperature, K
η	heat dissipation efficiency
ρ _a	air density, kg/m ³

1. 서론

코어 형 리니어 모터(core type linear motor)는 기존의 로타리 모터의 반을 잘라서 그대로 평면에 펼쳐놓은 것과 동일하다. 직선 운동이고, 자석부(stator)를 얼마든지 확장할 수 있기 때문에 운동 범위에 제한을 받지 않는 편의성을 지니고 있다. 따라서 그 적용분야가 전자 장비와 공작 기계 등을 중심으로 확장되어가고 있는 추세이다.⁽¹⁾

한편, 리니어 모터는 기존의 이송방식에 비해 뛰어난 정확도, 제어성, 속도 등으로 인해 최근에는 실장장비인 칩 마운터에의 적용 연구가 활발히 진행되고 있다.⁽²⁾ 현재 리니어 모터가 적용되고 있는 다른 장비와는 달리 칩 마운터에서는 지속적인 고속 고부하 운동을 필요로 하기 때문에 모터에서 발생하는 열 문제가 실용화 단계에서 가장 걸림돌이 되고 있다. 모터의 코일부에서 발생한 열이 모터에 부착되는 헤드의 성능이나 베이스 프레임의

* 삼성테크윈 정밀기기연구소

열변형을 일으키기 때문이다.

열 관련 특성 파악 및 냉각구조 개발에 있어 최근에는 해석을 통한 접근이 일반화되고 있다. 리니어 모터의 경우 기존의 자료들은 개발 측면에서 모터 자체를 중심으로 자기장, 열-자기장, 전기장 해석 등이 이루어진 바가 있다.⁽³⁻⁴⁾ 하지만, 실질적으로 리니어 모터는 구동이 되어야 하는 시스템과 함께 설계가 되어지고 연결되기 때문에 자기장이나 전기장과 달리 열전달 문제는 시스템 전체를 다루어야 한다. 이러한 어려움으로 인해 아직까지 리니어 모터 적용 시스템과 관련된 해석 자료가 거의 없는 상황이다.

한편, 근래에 복잡한 시스템의 FEM 모델링의 대안으로 열저항을 고려한 단순 모델링 접근법이 도입되고 있다. 적용 분야는 주로 모델링이 복잡하고 변수가 많아서 다양한 해석이 필요한 시스템인 경우가 많은데, 로타리 모터⁽⁵⁾, 전자장치 내의 보드⁽⁶⁾, 파워 서플라이⁽⁷⁾ 등이 있다. 본 연구에서는 전단계에서 수행된 리니어 모터 스테이지의 FEM 열전달 해석 결과⁽⁸⁾를 기초로 하여 열저항 모델을 개발하고, 이를 냉각구조 관련 변수의 영향을 파악하는 데 응용하였다. 저부하용(Stage 1) 및 고부하용(Stage 2) 두 종류의 스테이지가 모델링 되었다. Stage 1에서는 FEM 해석과의 비교가 이루어졌으며, Stage 2에서는 공기에 의한 냉각 효과가 파악되었다.

2. 실험 장치 및 열저항 모델

2.1 리니어 모터

Fig. 1은 테스트에 사용된 철심 코어형(iron core type) 리니어 모터의 단면을 보여주고 있다. 코일이 감겨져 있고, 그 위에 에폭시가 몰딩되어 있다. 철 재질의 요크와의 절연을 위해 거기에 절연지로 감싼 다음 요크 내부에 설치하고, 마지막으로 에폭시로 외부를 다시 몰딩하여 코일부를 조립한다. 코일부의 외장은 22mm(H)×250mm(L)× 66mm(W)이며, 코일부와 자석부 간의 공기 틈새는 0.8mm로 세팅 되어있다.

리니어 모터가 적용된 스테이지 시스템을 해석하는데 있어 다음의 두 가지 문제가 대두된다.

1. 어디까지 모델에 포함시킬 것인가?
 2. 코일부의 운동을 어떻게 모델링할 것인가?
- 모델링의 범위는 코일부, 코일 상부에 부착되어 있는 상판, 그리고 자석 베이스까지로 하였다. 실제로 무게의 감소를 위해 베이스의 두께를 얇게 하기 때문에 자석이 있는 부분 바깥으로는 온도가

급격하게 감소하여 상온에 가깝게 된다. 코일부의 운동은 실제로는 왕복동 운동이지만, 이를 FEM 모델링할 수 없기 때문에 제곱 평균값을 적용하여 필름 계수를 계산하였다. Fig. 2는 저부하용으로 제작된 Stage 1의 FEM 열전달 해석용 메시를 보여주고 있다. 그림에서 P1, P2, P3는 각각 온도가 측정된 부위를 나타낸다. 코일의 경우 밀봉되어 있기 때문에 열전대를 이용하여 온도를 직접 측정하지 않고, 저항값으로부터 간접적으로 측정하였다. 정상 조건에서의 측정을 위해 1~3시간 정도 운전 후 측정이 수행되었다.

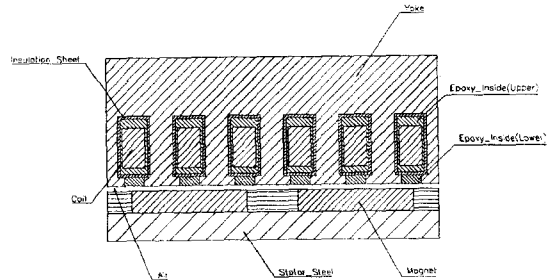


Fig. 1 Cross-section of iron-core type linear motor

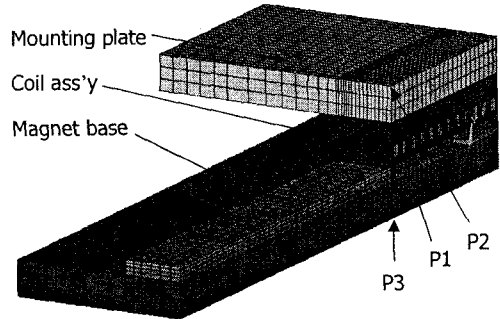


Fig. 2 Mesh setup of 1/4 part of Stage 1 for FEM analysis

2.2 열저항 모델

상판으로부터 코일부를 지나 자석과 베이스까지의 온도구배는 Fig. 3과 같이 FEM 해석으로부터 얻어진다. 이를 열저항 모델로부터 구하기 위해서는 3차원 모델을 1차원화 하는데 있어 다음과 같은 가정 및 단순화가 필요하다.

- 길이 방향(코일부의 운동방향)으로의 온도구배는 무시한다. 실제로 1~4°C 정도의 구배가 양 끝단 사이에 존재하지만, 열저항 관점에서는 이러한 부분을 모델링 할 수 없다.
- 모델링이 복잡한 베이스에서의 열전달을 제외시키고, 대신 코일부 바닥 온도와 베이스 온도 사이의 관계식을 도입하였다.

나라 온도 측정 상의 직접 측정법과 간접 측정법 사이의 일관성 결여에 의한 부분도 있는 것으로 생각된다. 일례로, 31W 조건에서는 코일 온도가 오히려 외부 온도보다 더 낮게 계산되었다.

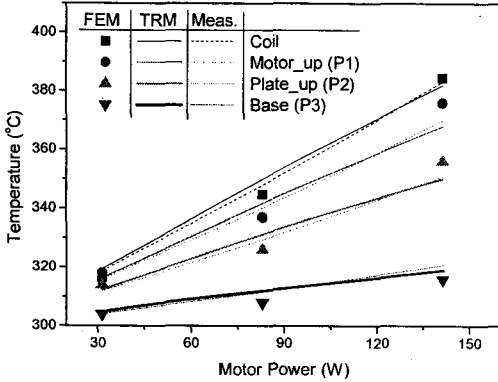


Fig. 6 Temperature variation with respect to motor power by measurement, FEM analysis and thermal resistance analysis

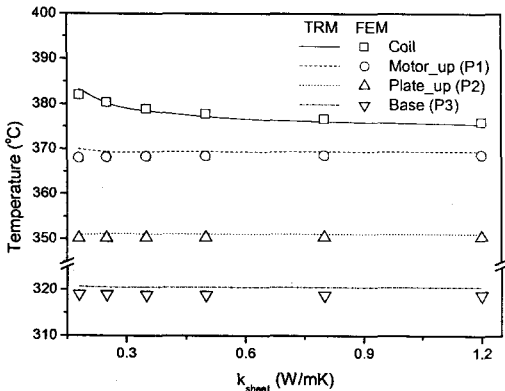


Fig. 7 Computed temperature variation with respect to sheet conductivity under motor power of 142W

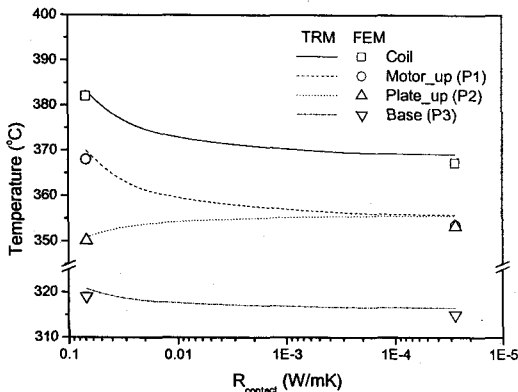


Fig. 8 Computed temperature variation with respect to contact resistance under motor power of 142W

Fig. 3 에서 보이는 바와 같이 절연지나 접촉 부위과 같이 열저항이 큰 부분에서 급격한 온도 변화 구간이 나타난다. 이것은 이 부분에서 개선이 이루어질 경우 성능 향상을 얻을 수 있다는 것을 암시하기도 한다. 이를 보기 위해 절연지의 열전도 계수와 접촉 열저항의 영향을 FEM 해석과 열저항 해석을 통해 파악하였다.

Fig. 7 은 절연지의 열전도 계수에 따른 온도 변화 해석 결과를 보여주고 있다. 열전도 계수를 0.18 부터 1.2 까지 변화시켰을 때, 다른 부분의 온도는 거의 변화하지 않으면서 코일 온도가 6°C 까지 낮아지는 것으로 나타났다. 코일부 윗면과 상판 아래면 사이의 접촉 열저항의 영향 파악 결과는 Fig. 8 에 나타나 있다. 열저항을 줄여나가면, 코일 온도를 최대 14°C 까지 낮출 수 있는 것으로 나타났다. 테스트된 리니어 모터는 코일 상부를 추가 가공을 하지 않고 거친 상태 그대로 사용했는데, 표면 가공을 하고, 서멀 그리스(thermal grease)와 같은 충전재를 사용하면, 접촉 열저항을 효과적으로 줄일 수 있다. 접촉 열저항을 줄이는 것이 코일 온도를 줄이는데는 효과적인 반면, 상판의 온도가 증가하기 때문에 적용 시에는 상판에 연결되는 부품에의 영향을 고려해야 할 것으로 생각된다.

구동부에서의 리니어 모터는 자체 무게와 출력 간의 타협이 있어야 하기 때문에 가벼운 리니어 모터에서 큰 출력을 얻기 위해서는 높은 출력 조건에서 자연 냉각으로는 한계가 있기 때문에 코일 온도를 충분히 낮출 수 있도록 추가적인 냉각장치를 필요로 하게 된다. 이러한 냉각의 효과는 Stage 2 에 대해서 다음 장에 논의될 것이다.

3.2 Stage 2

고부하용으로 제작된 Stage 2 에 사용된 리니어 모터 코일부의 외장은 25mm(H)×380mm(L)×66mm(W)이다. Stage 2 에서는 열저항 해석만 수행되었다. “U”자 형 공기관이 가공된 냉각 판이 코일부와 상판 사이에 설치되었다. 냉각 판 내 공기유로의 냉각 효율(η)을 계산하기 위해 CFD 해석이 이루어졌다. Fig. 9 는 CFD 해석 결과의 예를 보여주고 있다. 유량에 따른 냉각 효율의 변화는 Fig. 10 에 나타나있다.

$$\eta = \frac{\text{evaluated heat dissipation rate}}{\text{maximum possible heat dissipation rate}}$$

$$= \frac{\int q'' dA}{c_{p,air} Q_{air} \rho_{air} (T_{wall} - T_{air})} \quad (8)$$

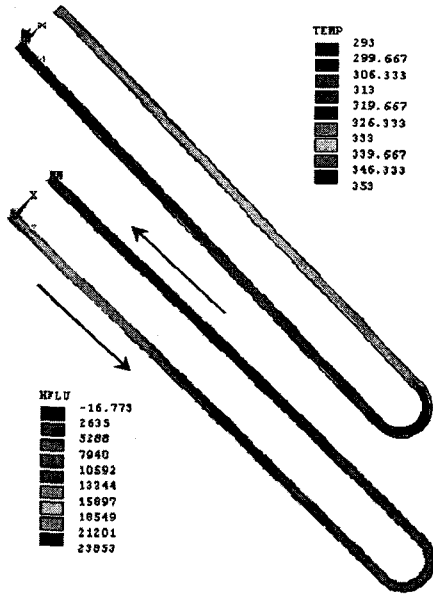


Fig. 9 Temperature (left) and heat flux (right) distributions in cooling-air passage. $Q_a=151$ lpm, $T_{air,in}=293$ K and $T_{wall}=353$ K.

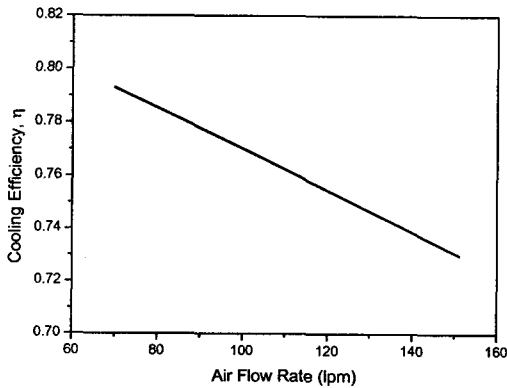


Fig. 10 Cooling efficiency with respect to air flow rate

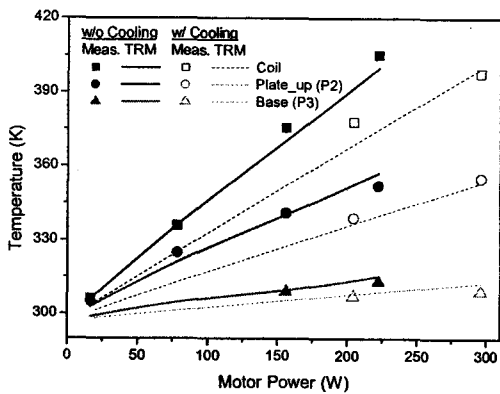
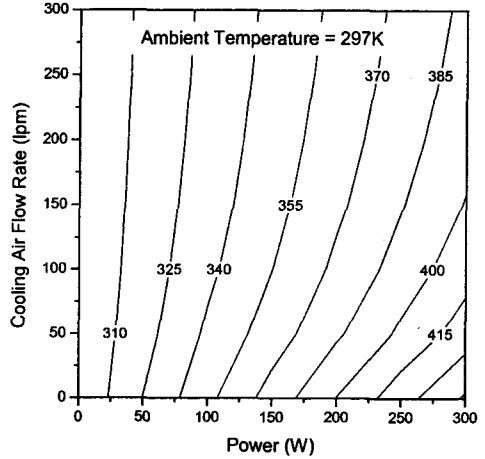
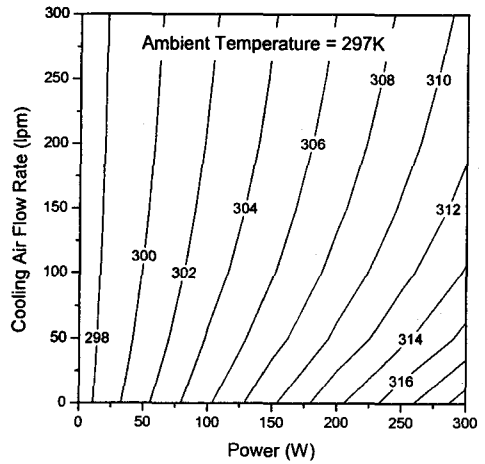


Fig. 11 Temperature variation of Stage 2 with respect to motor power. $Q_a=151$ lpm.



(a) Coil temperature



(b) Base temperature

Fig. 12 Temperature maps with respect to motor power and cooling air flow rate with current cooling efficiency

수행된 열저항 해석과 측정결과와의 비교는 Fig. 11 에 냉각이 이루어진 경우와 이루어지지 않은 경우 모두에 대해 나타나있다. 최대 오차는 코일 온도에서 9°C 까지 나왔다. 코일 온도를 제외할 경우, 최대 오차는 5°C 정도로 감소된다.

냉각의 영향은 모터 파워와 냉각용 공기 유량에 대해 열저항 해석을 통해 파악되었다. Fig. 12 와 13 은 코일과 베이스에서의 온도 변화를 각각 현재의 냉각 효율과 최대 효율($\eta=1$)의 경우에 대해 보여주고 있다. 냉각 효율이 최대일 때는 현재의 효율 조건과 비교하여 고온 조건에서 코일 온도는 6.7°C, 베이스 온도는 1.3°C 까지 낮아진다. 냉각 효율을 높이기 위해서는 유로를 더 길게 하고, 유동 교란이 일어나기 쉬운 구조로 유로를 설계할 필요가 있다.

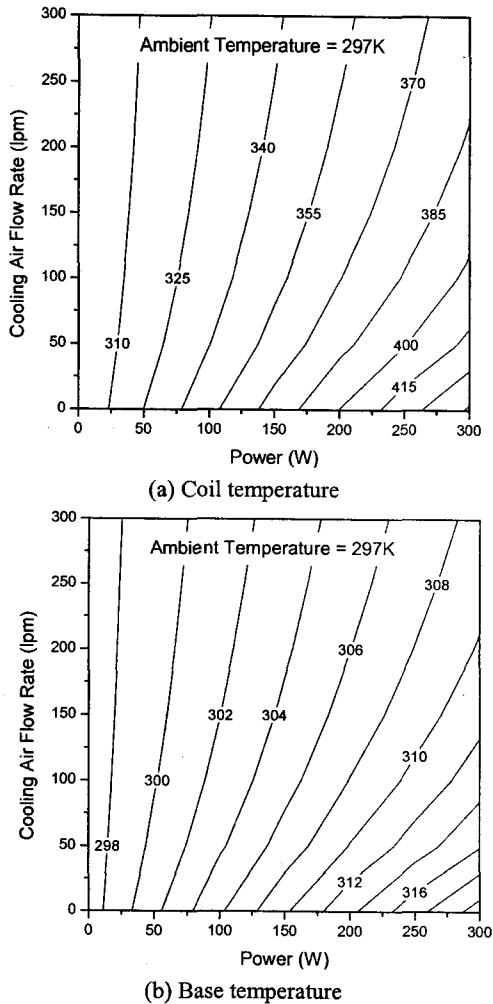


Fig. 13 Temperature maps with respect to motor power and cooling air flow rate with full cooling efficiency ($\eta=1.0$)

한편, 현재 직경 6.35mm 인 냉각 유로 조건에서는 150ipm 의 유량에서 마하 수가 0.3 을 넘어가기 때문에 유체 소음이 문제가 될 수 있다. 현재의 시스템에서는 온도 한계, 필요한 출력, 유체 소음 등을 고려하여 시스템적인 최적화- 무게, 운전 조건 등 -가 이루어져야 할 필요가 있는 것으로 생각된다. 그 외에 고려될 수 있는 대안으로는 수냉 방식이 있을 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 리니어 모터가 적용된 스테이지 시스템의 열전달 해석이 이루어졌다.

저부하용으로 제작된 Stage 1 에 대한 FEM 해석 결과를 기초로 하여 1 차원적인 열저항 모

델이 도입되었다. 열저항 해석은 FEM 결과 및 측정 결과와 각각 2°C, 7°C 이내의 차이를 보이며 경향을 잘 따라갔다.

가장 큰 열저항 값을 생성시키는 절연지 열전도 계수와 코일부와 상판 사이의 접촉 열저항의 영향이 해석을 통해 파악되었다. 절연지 열전도 계수가 0.18 에서 1.2 까지 증가할 때 다른 부위의 온도는 거의 변화하지 않으면서 코일 온도는 6°C 까지 감소하며, 접촉 열저항이 감소될 때는 14°C 까지 코일 온도가 감소하는 것으로 나타났다.

고부하용으로 제작된 Stage 2 의 열해석에 열저항 모델을 적용하였다. 결과는 추가적인 냉각 장치의 유무에 상관없이 측정치와 차이 9°C 이내에서 잘 맞았다.

냉각 공기유량에 따른 냉각 효과를 보기 위해 열저항 모델을 적용하였다. 냉각 효율이 최대가 될 때 코일과 베이스의 온도는 동일 유량조건에서 현재의 냉각 시스템보다 각각 6.7°C, 1.3°C 까지 감소하는 것으로 나타났다.

참고문헌

- (1) G. W. McLean, 1988, "Review of Recent Progress in Linear Motors", IEEE Proc. B, Vol. 135, No. 6, pp. 380~416.
- (2) G. P. Widdowson, L. Youyoung, A. S. Gaunekar and N. Srikanth, 1998, "Design of a High Speed Linear Motor Driven Gantry Table", Proc. PEDES '98.
- (3) B. Kwon, K. Woo, S. Rhyu and S. Park, 1998, "Analysis of Direct Thrust Control in Permanent Magnet Type Linear Synchronous Motor by FEM", The 2nd Int. Symp. on Linear Drives for Industry Appl., pp. 404~407.
- (4) G. Abdou and W. Tereshkovich, 2000, "Performance Evaluation of a Permanent Magnet Brushless DC Linear Drive for High-Speed Machining Using Finite Element Analysis", Finite Elements in Analysis and Design, Vol. 35, pp. 169~188.
- (5) D. A. Staton and E. So, 1998, "Determination of Optimal Thermal Parameters for Brushless Permanent Magnet Motor Design", 33rd IAS Annual Meeting, Vol. 1, pp. 41-49.
- (6) M. Ishizuka, S. Hayama and H. Iwasaki, 2000, "Application of a Semi-Empirical Approach to the Thermal design of Electronic Equipment", IThERM 2000, pp. 99-106.
- (7) G. Refai-Ahmed and S. Basit, 2000, "Thermal Characterization of Point of Used Power Supply", IThERM 2000, pp. 372-377.
- (8) 장창수, 김종영, 김영준, 오정석, 2001, "칩 마운터용 리니어 모터의 열전달 해석", 2001 춘계 기계학회 논문집, Vol. D, pp. 396~401.