

칩 마운터용 리니어 모터의 열전달 해석

장창수* · 김종영* · 김영준* · 오정석**

Heat Transfer Analysis of a Linear Motor for Chip Mounter Applications

Changsoo Jang, Jongyoung Kim, Yungjoon Kim and Jungsuk Oh

Key Words : Linear motor(리니어 모터), chip mounter(칩 마운터), heat transfer(열전달), finite element analysis (유한요소해석), film coefficient(필름 상수)

Abstract

Heat transfer analysis of a iron core type linear motor for surface mounting device applications was considered in this study. In order to avoid the complex conjugate problem a fluid flow regime and a solid regime were considered separately. First, film coefficients of the moving parts were evaluated from computational fluid dynamic analysis and those of the stationary parts from the existing empirical or analytic correlations. And then, by applying them, internal and external temperatures of the linear motor parts were computed through finite element analysis. Both computation and measurement were carried out with respect to motor driving power. The measurement did not exhibit a linear temperature variation trend with respect to motor power while the computation revealed a linear correlation. Nonetheless, the computations agreed with the measurements within an error range of 20%. It indicates that an adequate heat transfer model for the reciprocative coil assembly may help more exact prediction.

기호설명

c_p	heat capacitance, J/kgK
h_f	film coefficient, W/m ² K
k	thermal conductivity, W/mK
Nu	Nusselt number
P	pressure, Pa
Pr	Prandtl number
q	heat source, W/m ³
Re	Reynolds number
T	temperature, K
u_i, u_j	velocity component
x_i, x_j	Cartesian axis
μ	fluid dynamic viscosity, kg/msec
ρ	density, kg/m ³
τ_{ij}	viscous stress tensor

1. 서론

전자 장치에 들어가는 소자들의 크기는 감소하는 반면 수량은 갈수록 증가하는 추세가 가속화되고 있다. 따라서 이들을 빠르고 정확하게 실장할 수 있는 칩 마운터의 개발 또한 활발히 일어나고 있다. 표면실장 장비의 정확성과 속도는 이송대 구동부와 밀접한 관련을 가지고 있다. 이러한 배경 하에 리니어 모터가 구동부로서 근래에 각광을 받고 있다. 리니어 모터는 기존의 로터리 방식 모터에 비해 출력과 효율이 떨어지는 약점이 있지만, 간편성과 기능성 측면에서 장점을 가지고 있기 때문에 많은 산업용 장비에서 사용되고 있으며,^(1,2) 특히 행정길이가 길지 않은 와이어 본더 등의 반도체 장비에의 적용이 가장 활발하게 일어나고 있다.⁽³⁾ 칩 마운터의 경우 기존의 볼 스크류(ball screw) 방식에 비해 수 μm 까지 제어할 수 있는 정확성과 정속성, 그리고 속도 등의 장점으로 인해 최근에 실장장비에서 적용을 위한 연구가 활발

* 삼성테크윈 정밀기기연구소

** 한국과학기술원 기계공학과

히 진행 중이다.⁽⁴⁾

리니어 모터의 칩 마운터 적용에 있어 가장 큰 걸림들은 코일에서 발생하는 열 문제이다. 운전조건에 따라 심한 조건에서는 100°C 가 넘어가기 때문에 모터 자체의 수명이나 성능 뿐만 아니라 주변 부품들에도 열응력이나 열변형의 문제를 일으키기 때문이다. 안정성이 요구되는 반도체 장비의 특성상 수냉식이 어렵기 때문에 외부 공기 또는 자연 대류를 이용한 냉각이 효과적으로 이루어지기 위해 적절한 냉각구조의 개발이 필요하다.

최근에는 컴퓨터와 해석 도구들이 발달하면서 냉각 구조 개발 및 최적화를 위해 많은 전자장비에 열전달 해석이 적용되고 있다.⁽⁵⁾ 하지만, 전기 모터 분야의 경우 모터 자체의 복잡한 구조, 한 모델 내에 운동부와 고정부가 함께 존재하는 상황 등으로 인해 열전달 해석이 어렵기 때문에 많은 경우 주로 trial & error 방식에 의해서 개발이 이루어지는 상황이다. 기존의 로터리 모터 해석과 관련한 문헌들의 경우 단순 모델링을 사용하거나 단순한 구조의 모터를 고려한 예 등이 있으나,^(6,7) 리니어 모터에 대한 열 해석 자료는 거의 없는 실정이다.

본 연구에서는 리니어 모터의 냉각구조 개발에 있어 코일 및 주변부의 온도분포 경향을 예측하기 위해 열전달 해석을 실시 하였다. 본질적으로 복합 문제(conjugate problem)이지만, 계산 부하를 줄이기 위해 유동 부분을 따로 모델링하여 계산한 후 이로부터 필름 계수(film coefficient)를 산출하고 이를 적용하여 모터 및 주변부의 열 해석을 수행하였다.

2. 실험 장치 및 계산 조건

2.1 리니어 모터

리니어 모터는 일반적인 로터리 모터의 한 면을 잘라서 일렬로 늘어놓은 형태와 동일하다. Fig. 1은 철심 코어형(iron core type) 리니어 모터가 적

용된 단축 이송장치의 예를 보여주고 있다. 방향과 위치제어는 리니어 모터 측면에 부착되어 있는 리니어 엔코더로부터 입력되는 신호에 따라 전류

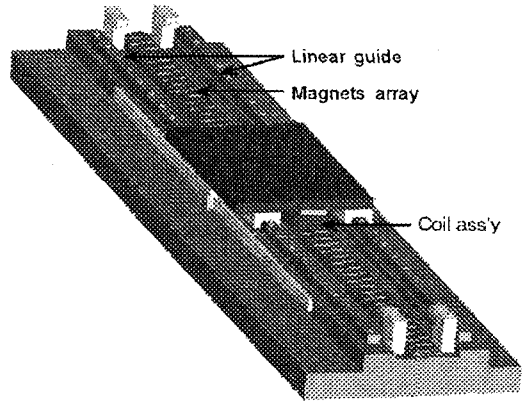


Fig. 1 Example of single-axis stage using linear motor

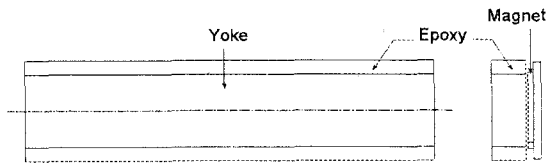


Fig. 2 Whole shape of tested iron core type linear motor assembly

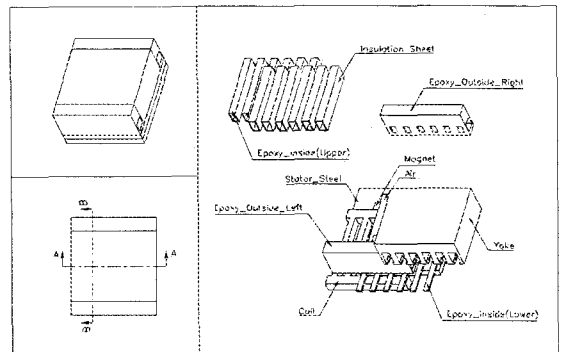


Fig. 3 Modeling of 1/4 part of tested linear motor

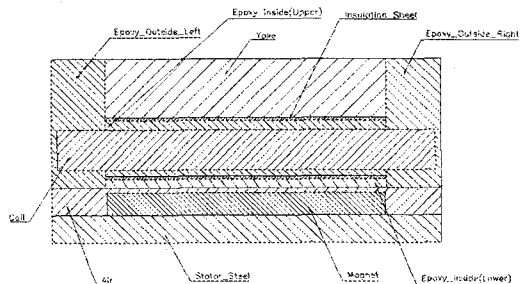
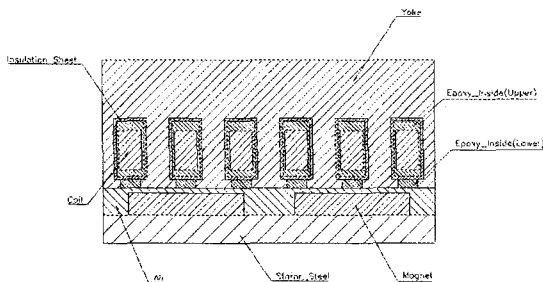


Fig. 4 Schematics of section A-A (left) and B-B (right) in Fig. 3

Table 1. Material properties used in analysis

Material	k (W/mK)	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kgK)
NdFeb	8.949	7500	502
Epoxy	0.8	1800	900
Silicon Steel (4%)	66.1	7800	434
Steel 1018 (C 1%)	45	7800	460
Insulation Sheet	0.18	930	1340
Cu	385	8900	380
Steel (S45C)	51.9	7800	446
Aluminum	175	2700	875

의 방향을 제어함으로써 이루어진다. 칩 마운터에는 이러한 이송대가 3 개에서 6 개까지 들어가게 되며, 이를 통하여 칩 마운터 헤드의 3 축을 구동한다. Fig. 2는 적용된 리니어 모터의 외장을 보여주고 있다. 리니어 모터와 영구자석 면과는 0.8mm 떨어져 있다.

Fig. 3 과 4 는 길이방향으로 1/4 part 만 모델링된 리니어 모터의 내부를 보여주고 있다. 코일은 등가 부피를 가진 구리 재질의 구조물로 모델링되어 있다. 코일 외면은 에폭시로 몰딩되어 있으며, 그 위에 절연지로 감싸서 규소강 재질의 요크(yoke)에 끼워져 있다. 그리고 최종적으로 외면을 다시 한번 에폭시로 몰딩함으로써 조립되어 진다. 폭에 비해 길이가 길며 운동이 양방향으로 주기적으로 이루어지기 때문에 길이방향으로 1/2 part 만 고려되었으며, 폭 방향으로도 대칭 조건을 주어 전체적으로 1/4 part 에 대해서 열 및 유동 해석을 수행하였다. 또한 갠트리 테이블(gantry table) 등의 구조물을 엮을 수 있도록 Fig. 1 에서와 같이 모터 위에 장착되어 있는 플레이트까지 모델링 및 해석에 포함되었다. 사용된 재료의 물성치는 Table 1 에 정리되어 있다.

2.2 계산 조건

비압축성 유체의 유동이 포함된 열전달의 경우 지배방정식은 아래와 같이 continuity, momentum, energy equation 으로 이루어진다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \tag{2}$$

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) = q + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \tag{3}$$

where $\tau_{ij} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_i \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \overline{\rho u_i u_j} \right]$

한편, 고체부만 고려될 경우 advection term 과 viscous dissipation term 이 없어져서 다음과 같이 단순한 전도열전달 식이 된다.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = q + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \tag{4}$$

Fig. 5 는 전형적인 모터의 거동을 보여주고 있다. 리니어 모터의 운동은 단방향 운동이 아니라 주기성을 가지는 양방향 운동이기 때문에 에너지나 속도 개념으로 제공된 평균값(root mean square)을 고려하게 된다. 모터의 평균속도는 120W 출력 조건에서 1.2m/s 정도가 나오게 된다. 이 유동 조건에서는 Re 값이 30,000 이하이기 때문에 층류 조건이지만, 모터 운동의 특성상 경계층 교란이 계속 일어나기 때문에 해석은 난류 모델인 renormalization group k-ε 모델⁽⁸⁾을 사용하였다. 해석은 FEM 코드인 ANSYS 와 FLOTRAN 으로 수행되었다.

Fig. 6 은 리니어 모터 주변을 보여주고 있다. 그

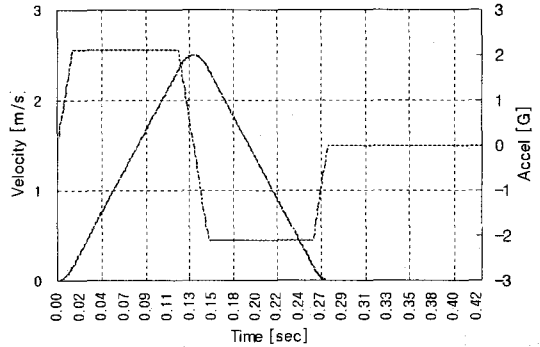


Fig. 5 Typical velocity and acceleration profiles of linear motor

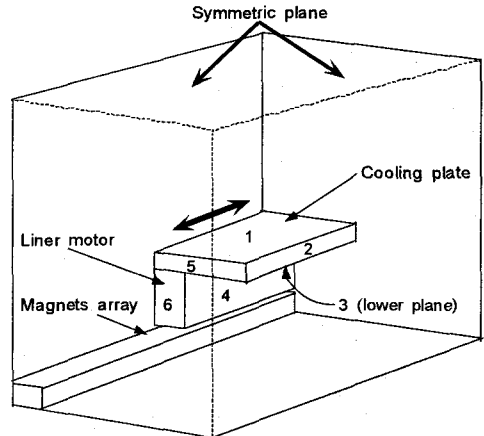


Fig. 6 Simplified schematic of modeled region

3. 결과 및 토의

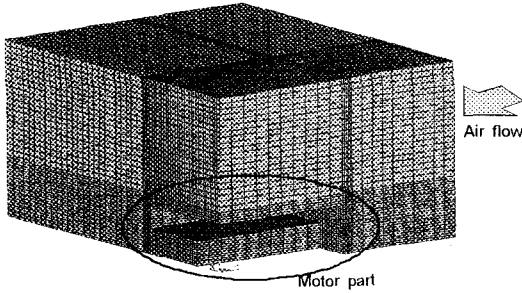


Fig. 7 Mesh setup of 1/4 part of air flow region

림에서 1 부터 6 까지 면에서의 필름 상수를 구하기 위해 열유동 해석을 수행하였다. 해석은 리니어 모터가 움직이는 것이 아니라 공기가 평균 속도로 단방향으로 움직이는 것으로 모사하였다. Fig. 7 은 유동해석용 mesh 를 보여주고 있다. 전체 모델의 요소 수는 64,900 개이다. 온도 조건은 공기 입구 온도를 20°C, 코일 어셈블리와 상판 플레이트 벽면 온도를 80°C 로 설정하였다. 공기의 물성치는 필름 온도(film temperature)가 변화하는 30~50°C 구간에서 10% 정도까지 변화하지만, 계산속도를 고려해서 온도에 대해 변하지 않는 것으로 하였다.

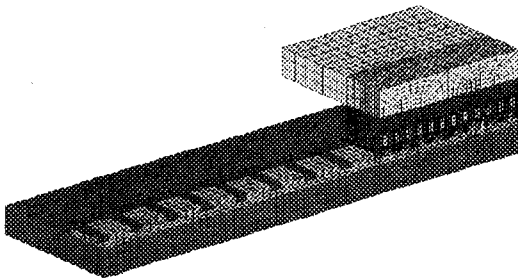


Fig. 8 Mesh setup of 1/4 part of solid region

모터와 주변부의 mesh setup 은 Fig. 8 에 나타나 있다. 전체 모델의 요소 수는 35,800 개였다. 공기와의 접촉이 일어나는 부분의 경계조건은 열유동 해석에서 구한 평균 필름 계수를 적용하여 대류 열전달 조건을 주었으며, 정지부의 경우 기존의 실험식으로부터 필름 계수를 구하였다. 또한 리니어 모터와 영구자석 및 플레이트 사이의 0.8mm 공간에서 일어나는 공기의 혼입 및 방출에 의한 대류 열전달은 내부유동의 이론식으로부터 필름 상수를 구하고 이를 전도계수로 환산하여 입력하였다.

3.1 필름 상수

해석은 120, 240W($u_{rms}=0.6, 1.2$ m/s)조건에서 이루어졌다. 열유동 해석으로부터 구해진 Fig. 6 의 각 면에서의 계산된 필름 계수는 Fig. 9 에 나타나 있다. Fig. 10 은 120W 조건에서 1번 면을 제외한 각 면에서의 필름 상수 분포를 보여주고 있다. 예상되는 바와 같이 공기와 정면으로 맞부딪히는 5, 6 면에서의 값이 가장 크고 유동이 가장 원활하지 못한 4 번 면에서의 값이 가장 작은 것으로 나타났다.

수평 평판 강제 대류 모델에서 층류의 평균 필름 계수는 아래 식과 같이 이론적으로 얻어진다.⁽⁹⁾

$$\overline{Nu}_L = \frac{\bar{h}_x L}{k} = 0.664 Re_L^{1/2} Pr^{1/3} \quad (5)$$

두 조건에서 값을 구해보면 평균 필름 상수는 60W 와 120W 조건에서 각각 7 과 10 정도로서 Fig. 10 의 계산 결과치가 약간 크게 나온 것으로 나타났다. 이는 구조가 단순한 수평 평판이 아니고 또한 경계층 교란을 고려하여 난류 모델을 적용하였기 때문인 것으로 생각된다.

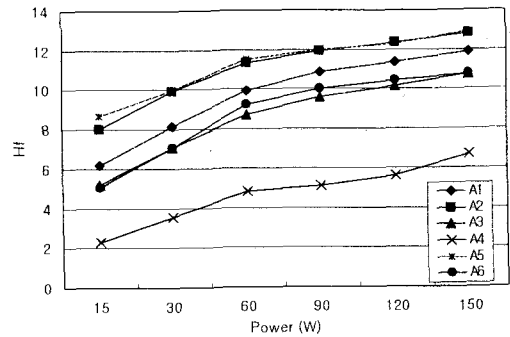


Fig. 9 Film coefficient with respect to motor power

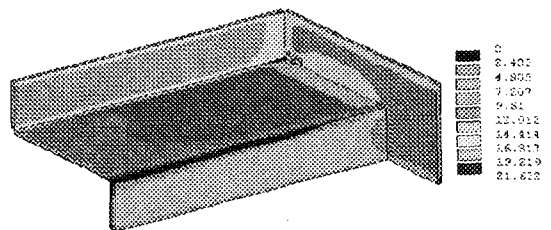


Fig. 10 Distribution of film coefficient along linear motor surfaces under 120W condition

고정부에서는 자연대류가 일어나게 되는데 구조적으로 복잡하지 않기 때문에 기존의 실험식을 이용하여 필름 계수를 얻었다. 수평 및 수직 평판

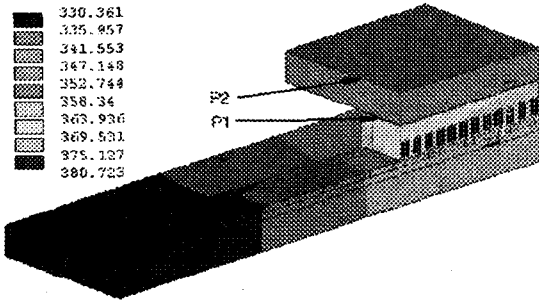


Fig. 11 Computed temperature distribution of whole model under motor power of 120W condition

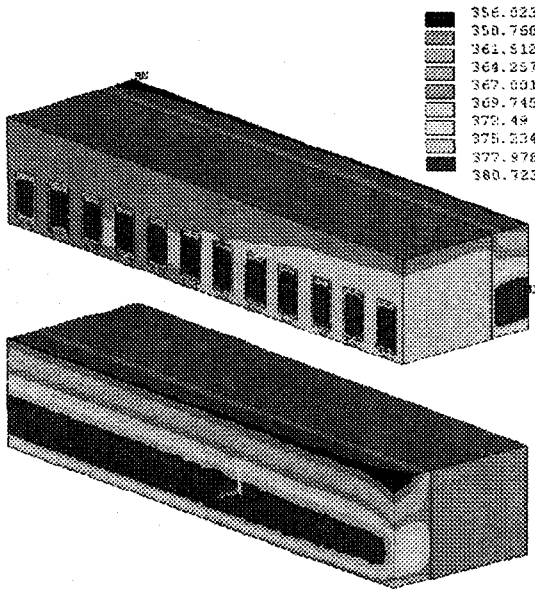


Fig. 12 Computed temperature distributions of coil assembly part under motor power of 120W condition

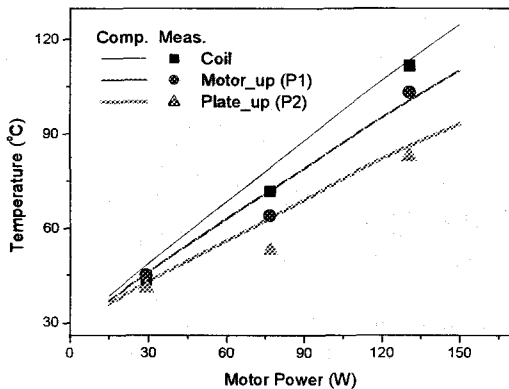


Fig. 13 Computed temperature distributions of coil assembly part under motor power of 120W condition

에서의 평균 필름 계수 실험식은 아래와 같다.^(10,11)

Vertical plate:

$$\bar{Nu}_L = 0.68 + \frac{0.670Ra_L^{1/6}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{4/9}} \quad (6)$$

Flat plate:

$$\bar{Nu}_L = 0.54Ra_L^{1/4} \quad \text{for upper surface} \quad (7)$$

$$\bar{Nu}_L = 0.27Ra_L^{1/4} \quad \text{for lower surface} \quad (8)$$

고정면과 주변 공기와의 온도차이가 20°C 일 때, 평균 필름 계수는 수직면에서 8.2, 상부 수평면에서 5.6, 그리고 하부 수평면에서 2.8 의 값을 나타낸다. 리니어 모터 상하부 틸세의 경우 내부 유동으로 볼 수 있으므로 Nusselt 수는 이론값인 8.23⁽¹²⁾으로 설정하여 필름 상수를 구하고 FEM 열전달 해석을 위해 열전도 계수로 환산하여 적용하였다.

3.2 열 해석 결과

Fig. 11 과 12 는 120W 조건에서의 열해석 결과를 전체 모델과 코일 어셈블리에 대해 보여주고 있다. 온도측정은 코일 어셈블리 상부(P1)와 플레이트 상부(P2)에서 thermocouple 을 이용해서 이루어졌다. 코일의 경우 밀봉 상태에서 직접 측정법이 불가능하기 때문에 저항값으로부터 간접적으로 평균온도가 측정되었으며, 해석에서도 전체 코일의 평균값이 계산되었다. 정상상태에서 측정하기 위해 동일 조건에서 2 시간 이상 운전한 후의 값을 취하였다.

측정치와 해석치의 비교는 Fig. 13 에 보여지고 있다. 해석결과와 비교하여 온도 증가가 모터 파워에 거의 비례하는 경향을 보인 반면 측정치는 약간 비선형성을 나타낼 수 있다. 이러한 차이는 왕복운동을 하는 모터 주변의 유동속도를 평균값(root mean square)으로 설정하고 모터의 위치를 고정하며 온도에 의해 변화하는 공기의 물성치를 상수값으로 적용하는 등의 모델 단순화에서 기인하는 것으로 보인다. 또한, 코일 저항으로부터 온도를 측정하는 것과 열전대로부터 직접 측정하는 것 사이의 일관성 결여로 인한 오차도 존재하는 것으로 나타났다.

한편 계산 및 측정 조건은 실제 모터가 운전할 수 있는 한계범위를 포함하고 있기 때문에 해석의 오차범위는 20% 이내라고 볼 수 있다. 특히 적용 관점에서 가장 중요한 한계 조건(코일 온도 > 100°C) 부근에서는 오차 5% 이내로 잘 예측해 주고 있다. 본 해석에서 사용된 방법론과 상수들은 향후 추가 및 개선되어질 냉각구조 설계의 선행해

석에 그대로 적용될 수 있을 것으로 사료된다. 또한 왕복운동을 하는 코일 어셈블리부에 대한 적절한 열전달 모델이 적용되면 정확성 제고에 도움이 될 것으로 사료된다.

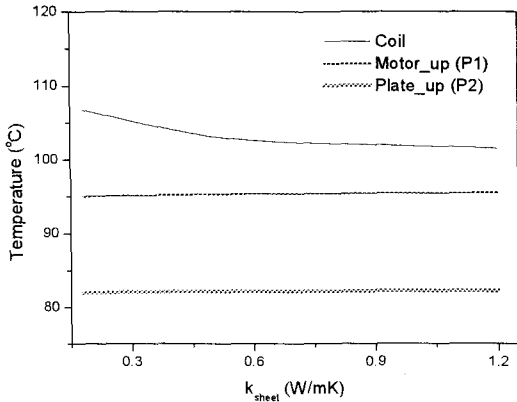


Fig. 14 Computed temperature variation with respect to sheet conductivity under motor power of 120W condition

코일 어셈블리의 경우 온도구배의 80% 이상이 비금속 재질로서 열전도 계수가 낮은 에폭시와 절연지에서 일어났다. 특히 절연지는 열저항이 전체의 50~60%를 차지하기 때문에 해석을 통하여 절연지 열전도 계수의 영향을 파악하였다. Fig. 14는 그 결과를 보여주고 있다. 현재 0.18 인 절연지의 열전도계수를 1.2 까지 증가 시킬 때 주변 온도는 거의 변화하지 않고 코일부 온도를 약 5°C 정도까지 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다.

실제 적용 측면에서는 코일부 온도 뿐만 아니라 주 프레임에 열변형을 일으킬 수 있는 주변 온도도 낮추는 것이 바람직하기 때문에 한계 운전 성능을 확장시키기 위해서는 추가적으로 강제 공랭장치가 필요한 것으로 사료된다.

4. 결론

표면실장장비인 칩 마운터 적용을 위한 리니어 모터의 열전달 해석을 수행하였다.

- 복잡한 구조를 고려하여 유동부와 고체부 해석을 분리하였다. 열유동 해석을 통하여 각 조건에 대한 필름상수를 구하였으며, 이를 적용하여 고체부의 열전달 해석을 수행하였다.
- 해석치는 경향의 선형성 측면에서 측정치와 약간 상이한 결과를 보였지만, 전반적으로 20% 이내의 오차를 나타냈다. 특히 결과가 중요한 한계 운전조건에서는 5% 이내로 상당히 정확

한 결과를 얻을 수 있었다.

절연지 열전도 계수의 영향을 해석을 통하여 살펴보았다. 계수 값을 0.18 에서 1.2 까지 증가시킬 때 코일 온도는 5°C 까지 감소하였다.

참고문헌

- (1) G. W. McLean, 1988, "Review of Recent Progress in Linear Motors", IEEE Proc., Vol. 135, No. 6, pp. 380~416.
- (2) I. Boldea and S. A. Nasar, 1999, "Linear Electronic Actuators and Generators", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 14, No. 3, pp. 712~717.
- (3) G. P. Widdowson, T. H. Kuah, L. Y. Yong and C. J. Vath III, 1997, "Design, Analysis and Testing of a Linear/Theta Motor for Semiconductor Applications", Proc. of 1997 Int. Conf. on Power Electronics and Drive Systems, Vol. 1, pp. 357~364.
- (4) 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.
- (5) P. G. Tucker, 1997, "CFD Applied to Electronic Systems: A Review", IEEE Trans. on Components, Packaging, and Manufacturing Technology - Part A, Vol. 20, No. 4, pp.518~529.
- (6) J. A. D. Pinto and C. F. L. Antunes, 1994, "Transient Heating and Cooling Analysis in an Electromagnetic Device", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 30, No. 5, pp. 3339~3342.
- (7) Y. Bertin, E. Videcoq, S. Thielin and D. Petit, 2000, "Thermal Behavior of an Electronical Motor Through a Reduced Model", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 15, No. 2, pp.129~134.
- (8) V. Yahkot and S. A. Orszag, 1986, "Renormalization Group Analysis of Turbulence - I: Basic Theory", J. Scientific Computing, Vol. 1, pp. 1-51.
- (9) F. P. Incropera and D. P. De Witt, 1985, "Introduction to Heat Transfer", 2nd ed., John Wiley & Sons.
- (10) S. W. Churchill and H. H. S. Chu, 1975, "Correlating Equations for Laminar and Turbulent Free Convection from a Vertical Plate", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 18, No. 1323.
- (11) W. H. McAdams, "Heat Transmission", 3rd ed., McGraw-Hill, New York, 1954
- (12) W. M. Kays and M. E. Crawford, 1980, "Convective Heat and Mass Transfer", McGraw-Hill, New York