

적외선 Reflow 납땜과정중 전자조립품의 열적반응 수치해석

Numerical Study on the Thermal Response of Electronics Assemblies During Infrared Reflow Soldering

손영석

동의대학교 기계공학과

1. 서론

최근에 전자부품의 크기가 점점 작아짐에 따라 한정된 인쇄회로기판 (Printed Circuit Board) 표면에 많은 부품을 부착할 수 있는 표면장착기법(Surface Mount Technology)¹⁾이 널리 사용되고 있으며, 적외선 Reflow 납땜은 표면장착기법에서 가장 널리 사용되는 일반적인 납땜방법이다. Fig. 1은 적외선 Reflow 납땜에 사용되는 전형적인 적외선 오븐(oven)을 보여준다. 인쇄회로기판에 부착되어야 할 전자부품들은 아직 납땜되지 않은 상태로 기판위의 정해진 위치에 놓여지며, 이러한 납땜되지 않은 상태의 카드조립품(card assembly)들이 양쪽 끝단에서 컨베이어에 의해 지지되며 상하부에 복사가열판이 장착된 적외선 오븐을 통과한다. 카드조립품이 적외선 오븐을 통과하는 동안 복사가열판으로부터 전달된 에너지는 땀납 (solder)을 녹이고 적외선 오븐 출구 근처의 냉각영역에서 에너지를 상실하며 땀납을 응고시켜 전자부품을 인쇄회로기판에 영구 부착시킨다. 적외선 오븐을 통과하는 동안 카드조립품의 열적반응은 전도, 대류, 복사 3가지의 복합된 열전달 방식에 의해 지배된다.

이러한 Reflow 납땜과정동안 복사가열판의 온도가 너무 낮으면 납땜이 일어나지 않는 부품을 생기고 반대로 온도가 너무 높으면 부품중 열에 약한 부위가 손상될 수 있다. 또한 적외선 오븐 내부의 온도분포를 잘 조절하지 못하여 카드조립품의 온도분포가 불균일하게 되면 열응력이 발생하여 인쇄회로기판이 휘게되고 이는 전자부품의 리드 (lead)와 땀납의 불량 정렬 및 부품이 기판에 미부착되는 카드조립품의 손상을 초래할 수 있다.

적외선 Reflow 납땜과정중 적외선 오븐을 보다 효율적으로 설계하고 각각의 조립하고자 하는 전자부품의 카드조립품에 맞는 오븐 작동조건을 설정하기 위해서는 적외선 오븐 내부에서의 복합된 열전달을 상세히 해석하고 카드조립품이 오븐에서 적외선 Reflow 납땜되는 과정동안 열적반응을 예측하는 것이 필요하다. 그러므로 본 연구에서는 서로 다른 전자부품의 배열을 가진 카드조립품들이 적외선 오븐에서 Reflow 납땜되는 과정동안 오븐 내부의 속도 및 온도분포, 카드조립품의 온도분포 및 오븐에서의 위치에 따른 온도이력, 그리고 각 부품의 리드와 인쇄회로기판을 연결하는 땀납의 온도이력등을 수치해석적인 방법으로 예측하고자 한다.

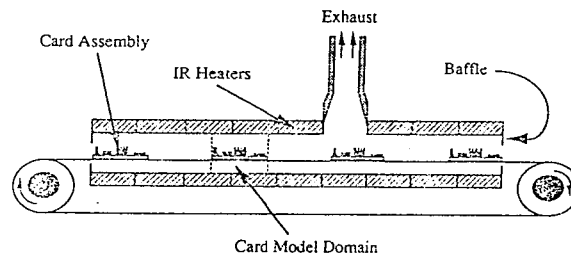


Fig. 1 Schematic of a typical infrared reflow oven

2. 수치해석

본 연구에서는 3차원 모델로 계산할 경우 방대한 계산시간이 소요되기 때문에 단순한 형상 및 일렬로 배치된 부품만을 고려하고, 불연속적인 카드조립품의 이동으로 인한 카드조립품 사이의 유동으로 3차원 Longitudinal Roll은 2차원 유동으로 수정될 것이기 때문에 2차원 모델로 가정하였다. 2차원 모델로 가정하더라도 오븐 내부에서 적외선 Reflow 납땜과정동안 일어나는 관련된 열전달 현상은 모의 가능하며, 실험을 통해 Fig. 1과 같은 오븐 형상에서 불연속적인 재료가 있을 때 2차원 수치모델의 적용 가능성을 검증하였다²⁾.

적외선 오븐 및 오븐 내부에서 이동하는 카드조립품의 기하학적 모델링에 있어서 가장 어려운 점은 그와 관련된 길이 스케일이다. 전형적인 적외선 오븐의 길이는 수 m에 달하나 카드조립품에 있는 땜납의 길이는 수 mm에 불과하다. 즉 한 기하학적 모델 내에 10의 3승 내지 4승의 Order 차이가 나므로 한 개의 모델로 전 과정을 모델링하면 땜납과 같은 미세한 부분의 상세 열전달을 정확히 모의할 수 없거나 이를 정확히 모의하기 위한 엄청난 수의 수치해석 격자로 인해 방대한 계산시간이 소요될 것이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서는 큰 길이 스케일에 적용될 “오븐모델”과 작은 길이 스케일에 적용될 “카드모델”이라는 두 모델을 개발하였다.

Fig. 2는 오븐모델을 보여준다. 오븐모델은 큰 (오븐) 스케일의 열적반응을 예측하고, 카드조립품의 상세한 열적반응을 예측하는 카드모델의 경계조건을 생성한다. 오븐모델에서는 카드조립품의 상세한 기하학적 형상을 고려하지 않고 카드조립품을 실제 카드조립품과 동등한 치수와 물성치를 갖는 평면 카드로 가정한다. 오븐내 공기의 속도 및 온도분포 그리고 평면 카드의 열적반응을 구하기 위하여 질량, 운동량 그리고 에너지보존법칙을 적용한다. 즉 2차원, 과도상태, 압축성, 가변물성치의 Navier-Stokes 방정식과 에너지방정식, 2차원 과도 열전도방정식³⁾, 그리고 2차원 확산회(diffuse gray) 복사열전달방정식⁴⁾을 Fig. 2에 보여진 오븐 영역에 적용한다. 오븐모델에서는 적외선 오븐내에서의 속도 및 온도분포, 평면 카드에 전달되는 대류 및 복사 열전달량, 평면 카드의 오븐내 위치에 따른 온도이력, 그리고 Fig. 1에서 수직 점선으로 보여진 것처럼 평면 카드의 선단 및 후단 수직면에서의 속도 및 온도분포를 계산하여 카드모델에 대한 경계조건을 계산한다.

카드모델에서는 오븐모델에서 제공하여 준 경계조건을 이용하여 땜납의 용융 및 응고를 포함한 카드조립품내에서의 온도분포를 구하는 작은 (카드) 스케일에서의 열적반응을 예측한다. 카드모델은 Fig. 3에 보여진 것처럼 2차원적으로 실제 카드조립품의 형상을 고려하며 적외선 복사가열판의 온도분포와 함께 오븐모델의 결과를 경계조건으로 이용하여 카드조립품의 열적반응을 야기시키는 대류 및 복사열전달량을 결정한다. 오븐모델에서와 마찬가지로 카드모델도 질량, 운동량 그리고 에너지보존법칙을 적용하며 지배방정식은 오븐모델의 지배방정식과 동일하다. 땜납접합부의 용융 및 응고는 땜납이 상변화되는동안 완전히 용융(응고)되도록 땜납에 충분한 에너지가 공급(방출)될 때까지 땜납이 융해(fusion) 온도로 유지되도록 하는 엔탈피방법으로 모델되었다. 카드모델에서는 카드조립품의 온도분포, 각 부품의 오븐내에서의 온도이력, 그리고 각 부품의 리드와 인쇄회로기판을 연결하는 땜납의 오븐내에서의 위치에 따른 온도이력을 계산한다.

오븐모델 및 카드모델에 적용되는 지배방정식중 Navier-Stokes 방정식과 에너지방정식은 유한체적법(Finite Volume Method)⁵⁾을 이용하여 수치적으로 그 해를 구한다. 기하학적 모델이 복잡하고 카드는 영역 내에서 이동하므로 수치해석을 쉽게 하기 위하여 비엇갈림(nonstaggered) 격자를 사용하며⁶⁾, 복사열전달 계산으로부터 구한 정미표면복사열전달 및 가변물성치 효과들은 차분방정식에서 생성항으로 취급한다. 연속방정식은 SIMPLEC 알고리즘⁷⁾에 따라 압력 및 압력수정방정식을 생성하는데 사용된다. 차분방정식은 TDMA 알고리즘과 함께 ADI 방법⁸⁾을 사용하여 반복계산으로 해를 구한다. 복사열전달방정식은 각 표면을 Navier-Stokes 방정식과 에너지방정식의 차분화에 사용된 격자와 동일한 격자의 작은

요소로 나누어 적용하고 그로부터 생성되는 연립방정식을 SOR 기법을 이용하여 수치해석적으로 풀다⁴⁾.

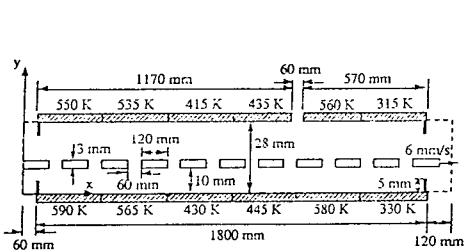


Fig. 2 Coordinate system and geometry used in the oven model

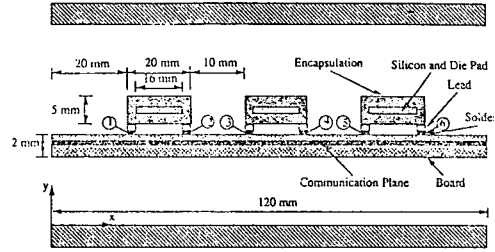


Fig. 3 Coordinate system and geometry used in the card model

3. 결과 및 고찰

오븐의 형상 및 치수, 카드조립품의 이동 속도, 상하부 복사가열판 온도분포등은 Fig. 2에 나타나있다. 복사가열판의 방사율은 0.95이고 배기구에서의 평균속도는 200 mm/s이다. 길이 120 mm의 카드가 300 K의 온도에서 6 mm/s의 속도로 오븐으로 들어온다. 평면 카드의 치수와 물성치는 실제 카드조립품과 동등하게 하였다. 3개의 전자부품 (모듈)으로 이루어진 기본 경우의 카드조립품 형상 및 치수가 Fig. 3에 나타나 있다. 땀납의 용융온도는 453 K이고 잠열은 31.4 kJ/kg이다. 인쇄회로기판에 부착하여야 할 전자부품의 수가 2개, 3개 (기본 경우), 4개가 있는 3가지 다른 형상의 카드를 고려하였다.

오븐을 통과하는 각각의 카드들은 초기 과도기적인 열적반응을 보인 후 반복적으로 똑같은 가열 및 냉각에 대한 열적반응을 보인다. 이러한 준정상상태에 도달하기 위해서는 적어도 15개의 카드가 초기에 낮은 온도에 있는 오븐을 통과하여야 함을 계산으로 확인하였다. 그러므로 카드모델 계산에 사용되는 경계조건은 15번째 카드의 선단 및 후단 수직면에서의 속도 및 온도분포를 이용하였다.

Fig. 4는 오븐모델로부터 계산된 오븐내 온도분포를 15초 간격으로 30초 동안 보여주는데 이 시간은 카드가 6 mm/s의 속도로 1개의 카드와 카드사이의 간격 길이의 합인 180 mm를 이동하는 시간이다. 그림에서 구별을 명확하게 하기 위해 수직방향으로는 오븐 높이를 10배 확대하였다. 상대시간 30초에서의 계산된 온도분포는 0초에서의 분포와 거의 동일한 주기적인 분포를 보이며, 온도분포는 부력의 역할을 선명하게 나타내주는데 특히 오븐의 입구 및 출구에서 현저하게 나타난다. 오븐 입구에서는 상대적으로 찬 공기가 유입되며 오븐 하부의 복사가열판에서 가열되어 수직방향으로 부력을 야기시키므로 오븐 하부벽면으로부터 따뜻한 공기의 꾸러미가 상승한다. 오븐 출구에서는 오븐으로 유입되는 공기가 오븐을 통과하여 나가는 상대적으로 따뜻한 카드에 의해 예열된다. 이렇게 예열된 공기는 상대적으로 낮은 온도 (315 K)로 유지되고 있는 오븐 상부벽면에서 냉각되므로 상부벽면으로부터 찬 공기의 꾸러미가 하강한다. 전체적인 온도분포는 오븐의 입구 및 출구 근처에서 온도변화가 심하고 배기구 근처에서는 거의 균일하게 된다. 또한 오븐내 온도분포를 0.2초 간격으로 확인해본 결과 약 0.8초의 작은 시간 스케일에도 주기성이 존재하며 높은 진동수의 대류 거동을 나타내었다. 짧은 시간동안 온도장은 많은 변화를 하며 특히 오븐 입구 및 출구 근처에서 급격히 요동하는 거동을 보임을 알 수 있었으며 이러한 높은 진동수의 거동은 카드로의 대류열전달에 중요한 역할을 한다.

인쇄회로기판 위에 3개의 모듈이 있는 기본 경우에 대해 카드모델로부터 계산된 온도분

포가 Fig. 5에 나타나 있다. 그림은 스케일대로 그려졌으며, Fig. 5(a)와 5(b)에서는 카드가 상하 벽면보다 상대적으로 낮은 온도에 있으며 Fig. 5(c)에서는 상대적으로 높은 온도에 있다. Fig. 5의 (a), (b), (c) 각각은 i) 카드 중심이 배기구 중심선 바로 아래에 있을 때 (190.0초), ii) 첫 번째 땀납 접합부가 용융을 완료했을 때 (209.5초), iii) 첫 번째 땀납 접합부가 응고를 완료했을 때 (262.7초)의 시간을 나타낸다. 190초일 때 (Fig. 5(a)) 카드 하부의 속도 및 모듈 사이의 재순환 유동은 아주 약하나, 209.5초일 때 (Fig. 5(b)) 모듈사이의 재순환 유동이 나타나며 카드 상하부의 온도는 균일하게 분포된다. 262.7초일 때 (Fig. 5(c)) 오븐의 출구로부터 유입되는 저온의 공기는 고온의 카드와 접촉하여 팽창함을 알 수 있다.

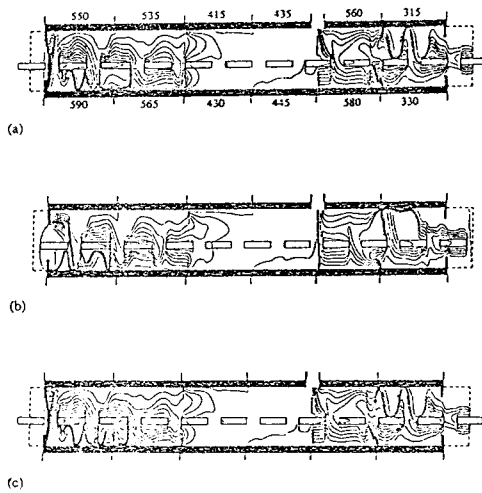


Fig. 4 Predictions of the oven model showing the temperature distributions within the reflow oven at relative times of (a) 0, (b) 15, and (c) 30 s. 16 equally-spaced isotherms spanning 300 to 590 K are shown.

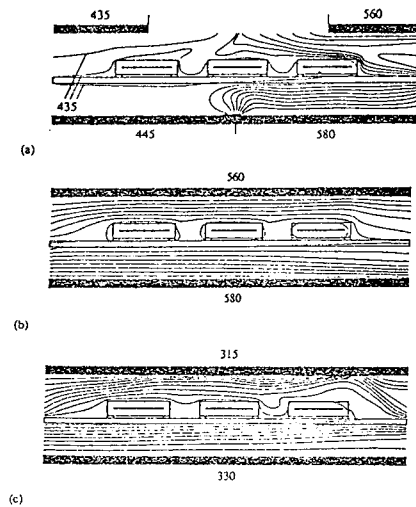


Fig. 5 Predictions of the card model showing the temperature distributions about one card assembly which is composed of 3 modules at times of (a) 190.0, (b) 209.5, and (c) 262.7 s. 10 equally-spaced isotherms are shown at 15 degree increments.

카드조립품의 가열 및 냉각 특성이 Fig. 6에서 보여진다. 그림은 카드조립품이 오븐 내부를 이동하는 동안 체적평균 카드온도와 카드로 전달된 복사 및 대류열전달률을 보여준다. 그림에서 x 는 카드중심의 오븐내에서의 위치를 나타낸다. 오븐모델과 카드모델의 계산결과는 순간적인 대류열전달률에서 차이를 보이지만 시간평균 대류열전달률은 잘 일치하며 전체적으로 잘 일치한다. 그러므로 계산된 큰 스케일과 작은 스케일의 열적반응은 오븐모델과 카드모델이라는 근사적인 계층적 모델 접근방식을 이용하였음에도 불구하고 잘 일치한다. 카드조립품은 처음 2개의 고온 가열판 사이를 통과하면서 급격히 가열된 후 카드조립품의 열응력을 제거하기 위해 가열판이 상대적으로 낮은 온도로 유지되고 있는 오븐의 다음 부분 (3, 4번째 가열판)을 통과하며 적당히 가열된다. 카드조립품은 오븐 내부를 계속 통과하며 5번째 가열판을 통과할 때 온도가 다시 상승하며 땀납의 용융온도에 도달하여 땀납을 용융시키고, 마지막으로 오븐의 출구 근처에서 냉각되며 땀납접합부가 응고되어 전자부품을 인쇄회로기판에 부착하는 적외선 Reflow 납땀공정을 완료한다. 카드조립품의 열적반응은 복

사에 의해 지배되며 카드가 오븐으로 들어올 때 최대 복사가열이 일어난다. 오븐의 입구와 출구 근처에서는 대류에 의한 가열 및 냉각도 상당히 일어난다.

Fig. 7은 3가지 다른 형상의 카드조립품에 대해 Reflow 납땜이 일어나는 부근에서 땜납접합부의 온도이력을 보여준다. 그림에서 땜납접합부는 Fig. 3에서 보여진 바와 같이 좌측에서 우측으로 번호가 부여되었으며 체적평균 카드온도도 함께 표기하였다. 땜납의 용융 및 응고는 온도곡선에서 불연속선으로 표시되며, 카드의 선단(우측)에 있는 땜납이 후단(좌측)에 있는 땜납보다 오븐 내부에서 먼저 가열 및 냉각 공정을 거치므로 각 카드조립품상의 땜납은 우측에서 좌측의 순으로 용융 및 응고된다.

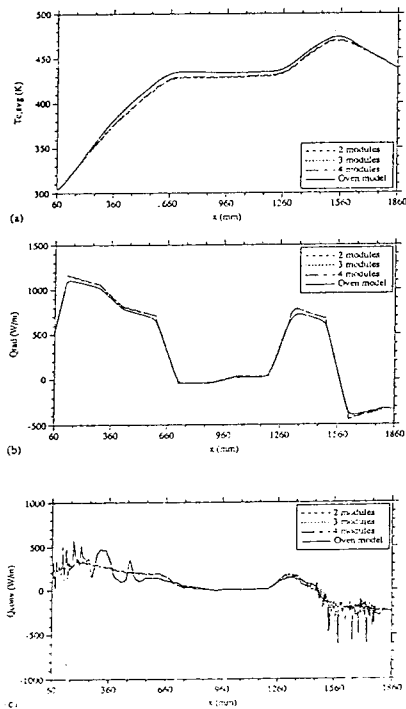


Fig. 6 Comparison of the oven and card model predictions for (a) the average card temperature, (b) radiative heat transfer rates, and (c) convective heat transfer rates

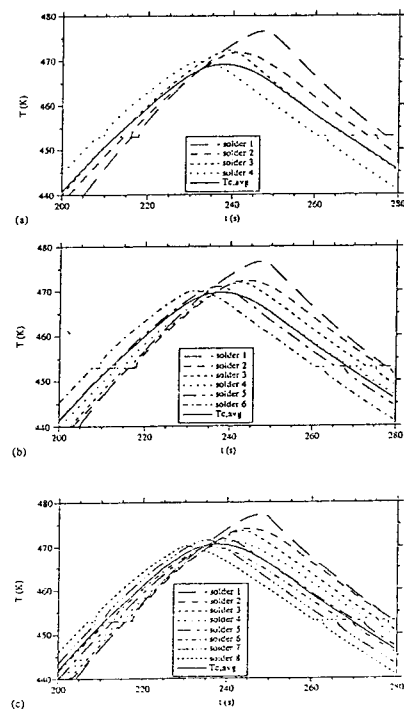


Fig. 7 Predictions of the card model showing the temperature histories of solder joints in the vicinity of the reflow for (a) 2-module case, (b) 3-module case, and (c) 4-module case

4. 결론

전자부품을 인쇄회로기판의 표면에 부착하는 표면장착기법에서 사용되는 적외선 Reflow 납땜과정동안 카드조립품의 상세한 열적반응을 예측하기 위해 수치해석적 연구가 수행되었다. 카드조립품은 오븐 내부를 통과하는 동안 상하부에 있는 적외선 복사가열판의 불연속적인 온도분포에 노출되며 복사 및 대류열전달에 의해 가열 및 냉각을 하게 된다. 기하학적 모델 내의 커다란 길이 스케일 차이 때문에 단일 모델로 전 과정을 모델링하기에는 부적당하므로 큰 스케일의 오븐모델과 작은 스케일의 카드모델이 사용되었다. 오븐모델과 카드모델의 계산결과로부터 카드조립품의 열적반응은 복사에 의해 지배되며 복합대류도 부력에 의한 상대적으로 높은 진동수의 효과와 함께 중요한 역할을 함을 알 수 있었다. 인쇄회로기

판에 부착하여야 할 전자부품의 수가 2개, 3개, 4개가 있는 3가지 다른 형상의 카드조립품에 대해 카드모델로부터 각 땀납의 용융 및 응고를 포함한 상세한 열적반응을 예측하였다. 그 결과 복사, 복합대류, 전도열전달의 복합된 효과가 Reflow 조건하에서 카드의 선단(우측)부터 땀납의 용융 및 응고를 일으켰다.

본 연구결과는 각각의 다른 카드조립품에 대해 신뢰성 있는 납땀을 수행하고 카드조립품의 열응력을 최소화하기 위해 적외선 오븐을 보다 효율적으로 설계하거나 적절한 오븐 작동조건을 설정하는데 이용될 수 있으므로 본 연구의 결과는 적외선 Reflow 오븐의 적절한 작동조건을 제시하여 불량 납땀 및 열응력으로 인한 카드조립품의 불량률을 최소화하는데 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. J. H. Lau, Handbook of Fine Pitch Surface Mount Technology, Van Nostrand Reinhold, 1994.
2. T. L. Bergman and Y. S. Son, "Mixed Convection in Horizontal Channels with Discrete Material and Top Exhaust", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 38, No. 14, 1995, pp. 2519~2527.
3. F. P. Incropera and D. P. DeWitt, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 3rd ed., John Wiley & Sons, New York, 1990.
4. R. Siegel and J. R. Howell, Thermal Radiation Heat Transfer, 3rd ed., Hemisphere Publishing Corporation, 1992.
5. S. V. Patankar, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw-Hill, New York, 1980.
6. T. M. Shin and A. L. Ren, "Primitive-Variable Formulations using Nonstaggered Grids", Numerical Heat Transfer, Vol. 7, 1984, pp. 413-428.
7. J. P. Van Doormaal and G. D. Raithby, "Enhancements of the SIMPLE Method for Predicting Incompressible Fluid Flows", Numerical Heat Transfer, Vol. 7, 1984, pp. 147-163.
8. D. A. Anderson, J. C. Tannehill and R. H. Pletcher, Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer, Hemisphere, Washington, DC, 1984, pp. 247~255.