

研究論文

공기분사식 강제대류-적외선 Reflow 솔더링 과정 열전달해석

손 영 석*

Heat Transfer Analysis of Forced Convection-Infrared Reflow Soldering Process with Air Injection

Young-Seok Son*

Key Words : Multimode Heat Transfer (다중모드 열전달), Forced Convection-Infrared Reflow Soldering (강제대류-적외선 Reflow 솔더링), Air Injection (공기분사), Electronics Assembly Thermal Response (전자조립품 열반응), 2-D Numerical Model (2차원 수치모델), Finite Volume Method (유한체적법)

Abstract

Forced convection-infrared reflow soldering process with air injection for attaching electronic components to printed circuit boards is simulated using a 2-dimensional numerical model which accounts for multimode heat transfer and is capable of predicting large and small scale thermal phenomena. Soldering is performed in a process oven that is equipped with porous panel heaters through which air is injected to the reflow environment. The air is injected selectively through top or bottom infrared panel heaters in order to dampen temperature fluctuations in the oven which can be established by thermal buoyancy forces. With selective injection, it is shown that high frequency convective heating and cooling of the card assembly can be eliminated. The results reveal the utility of general process models of the reflow operation as applied to oven design. The effects of mixed convection on heat transfer in the oven are also revealed, and the potential impact on the solidification process is discussed.

* 1998년 3월 31일 접수

* 정회원, 동의대학교 기계공학과

1. 서 론

전자조립품의 제조과정중 인쇄회로기판 (printed circuit board; PCB)에 부품 (components)을 장착하는 데는 다양한 방법이 있다. 종래에는 인쇄회로기판에 구멍을 뚫고 여기에 장착하고자하는 각 부품의 리드 (lead)를 삽입하여 기판의 아래쪽에서 솔더링 (soldering)하는 through-hole기법이 주로 사용되어 왔으나, 근래에는 한정된 인쇄회로기판 표면에 많은 부품을 장착할 수 있도록 표면 위쪽에서 솔더링하는 표면실장기법 (surface mount technology; SMT)이 널리 사용되고 있다^{1, 2)}. Through-hole기법에서는 wave 솔더링이나 vapor phase 솔더링이 주로 사용되어 왔으며, 표면실장기법에서는 적외선 reflow 솔더링이 일반적으로 사용되고 있다³⁾. 최근에는 표면실장기법에서 적외선 reflow 솔더링보다는 강제대류-적외선 reflow 솔더링이 전자조립품의 가열 및 냉각을 조절하기가 더 용이하다고 알려지고 있다⁴⁾. 이러한 reflow 솔더링 과정동안 오븐 (oven) 내부의 온도조절은 각각의 새로운 전자조립품 설계마다 적절한 솔더링을 수행하고 전자부품의 리드와 솔더 (solder)의 불량 정렬 및 전자조립품의 손상을 초래할 수 있는 열용력을 최소로 하기 위해서는 상당히 중요하다.

전자부품의 패키징 (packaging) 및 솔더링 기술이 급속히 발전하므로 다양한 공정조건에서 다양한 전자조립품의 열반응을 예측할 수 있는 수치모델을 개발하는 것이 필요하다. 이를 위하여 적외선 reflow 솔더링 과정에서 복사열전달 효과와 대류열전달 상관관계식을 이용하여 열반응을 예측하는 단순모델^{5, 6)}이 개발되었다. 단순모델의 부정확성을 개선하기 위하여 연관된 전도 및 복사열전달, 에너지 및 Navier-Stokes 방정식의 해를 구하여 열전달 현상을 예측하는 상세모델^{7, 8)}이 개발되었다. 그러나 reflow 솔더링 과정에서의 열전달 현상을 모델화하려는 노력에도 불구하고, 온도 변동 (fluctuation)을 최소화하여 솔더의 온도조절을 용이하게 하는 강제대류 reflow 솔더링에 대한 모델은 아직 미미한 실정이다. 그러므로 본 연구에서는 적외선 reflow 솔더링 해석 모델⁹⁾을 수정하여 강제대류의 효과를 예측하는 모델을 개발하고, 이를 이용하여 강제대류-적외선 reflow 솔더링 과정에서의 열전달 현상을 해석하고자 한다.

Fig. 1은 전자부품을 적외선 reflow 솔더링으로 인쇄회로기판에 장착할 때 사용되는 전형적인 적외선 오븐을 보여준다. Reflow 솔더링하고자 하는 카드조립품 (card assembly)들은 양쪽 끝단에서 컨베이어 (conveyor)에 의해 지지되며 상하부에 복사 가열판이 장착된 적외선 오븐을 통과한다. 카드조립품이 적외선 오븐을 통과하는 동안 복사가열판으로부터 전달된 에너지는 솔더를 녹이고, 적외선 오븐 출구 근처의 냉각영역에서 에너지를 상실하며 솔더를 응고시켜 전자부품을 인쇄회로기판에 영구 부착시킨다. 적외선 오븐을 통과하는 동안 카드조립품의 열반응은 전도, 대류, 복사 3가지의 복합된 열전달 방식에 의해 지배된다. 복사열전달은 오븐의 상하부에 설치된 복사가열판과 카드조립품 표면사이에서 일어나며 지배적인 열전달 방식으로 사료된다. 대류열전달은 오븐 내부 고체와 공기사이에서 일어나며, 열적으로 불안정한 부력에 의한 자연대류와 유해가스를 배출하는 배기구의 송풍기 및 카드조립품의 이동으로 인한 공기의 유동에 의한 강제대류가 혼합된 복합대류가 일어난다. 또한 카드조립품 내부에서는 전도에 의하여 열전달이 일어난다.

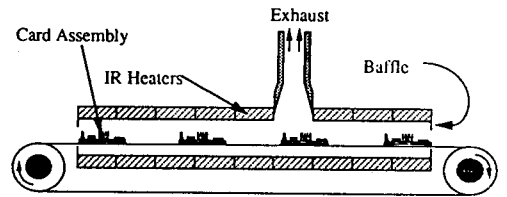


Fig. 1 Schematic of a typical infrared reflow oven

본 연구에서는 강제대류-적외선 reflow 솔더링 과정의 열전달 현상을 해석하기 위하여 Fig. 2와 같은 수정된 형상의 강제대류-적외선 오븐을 고려하고자 한다. 이러한 형상의 오븐에서는 적외선 오븐의 상하부 복사가열판이 다공가열판 (porous panel heater)으로 대체되고, 이를 통하여 오븐 내부로 공기가 분사되거나 오븐으로부터 공기가 추출된다. 이렇게 함으로서 적외선 오븐에서와 달리 카드조립품은 복사 및 강제대류 열전달이 동시에 일어나며 가열 및 냉각이 되게 된다. 특히 공기분사의 방향을 선택적으로 상향 및 하향으로 조절하여 오븐 내부에서 자연대류에 의한 부력과 강제대류에 의한 관성력을 같은 방향으로 만들 수 있

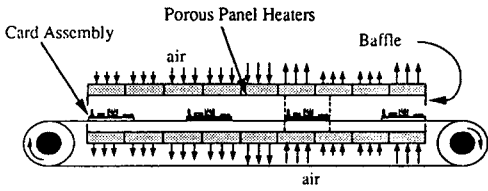


Fig. 2 Schematic of a modified forced convection-infrared reflow oven

며, 이는 오븐 내부 공기유동을 안정화시키고 복잡한 상호작용에 의하여 솔더링과정동안 카드조립품의 온도 변동을 최소화할 수 있다.

Reflow 솔더링 과정중 각각의 새로운 전자조립품에 맞는 적절한 솔더링을 수행하고 열응력을 최소화 하기 위해서는 오븐 내부 온도조절이 중요하다. 이를 위한 오븐 작동조건을 설정하기 위해서는, 오븐 내부에서의 복잡한 열전달을 상세히 해석하고 카드조립품이 오븐에서 reflow 솔더링되는 과정동안 열반응을 예측하는 것이 필요하다. 특히 강제대류 효과에 의한 오븐 내부 공기유동의 안정화 및 카드조립품의 온도 변동 최소화를 확인하고 이에 따른 열반응을 예측하여야 한다. 그러므로 본 연구에서는 카드조립품들이 공기분사식 오븐에서 강제대류-적외선 reflow 솔더링되는 과정동안 공기분사의 방향을 조절하며 i) 오븐 내부의 속도 및 온도분포, ii) 카드조립품의 온도분포, iii) 카드조립품의 오븐에서의 위치에 따른 열전달량 및 온도이력 (temperature history), 그리고 iv) 각 부품의 리드와 인쇄회로기판을 연결하는 솔더의 온도이력 등을 수치해석적인 방법으로 예측하고자 한다.

2. 수치해석 모델 및 방법

2.1 수치해석 모델

공기분사를 동반하는 강제대류-적외선 오븐 및 오븐 내부에서 이동하는 카드조립품의 기하학적 모델링에 있어서 가장 먼저 고려해야 할 사항은 그와 관련된 길이 스케일이다. 길이가 긴 스케일에서는 상하부 다공가열판과 오븐 내부 공기 및 카드조립품을 포함한 오븐 내부 표면들 사이에 에너지가 교환된다. 길이가 짧은 스케일에서는 대류 및 복사뿐만 아니라 부품의 리드와 솔더 패드(pad)를 통한 전도에 의하여 솔더로 에너지가 전달되거나

제거된다. 전형적인 reflow 오븐의 길이는 수 m에 달하나, 카드조립품의 리드와 인쇄회로기판을 접합하여주는 솔더의 길이는 수 mm에 불과하다. 즉 한 기하학적 모델 내에 길이 스케일이 10의 3승 내지 4승 정도의 차이가 나므로, 한 개의 모델로 전과정을 모델링하면 솔더와 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 길이가 긴 스케일에 적용될 오븐모델과 길이가 짧은 스케일에 적용될 카드모델이라는 두 모델을 개발하였다.

Fig. 3과 4는 각각 공기분사식 강제대류-적외선 reflow 솔더링에 사용될 오븐모델과 카드모델을 보여준다. 오븐모델에서는 reflow 오븐이라는 길이가 긴 스케일에서 일어나는 열전달 현상을 모의하고, 각각의 카드조립품에 대해 오븐내의 위치에 따른 속도 및 온도 경계조건을 계산한다. 카드모델에서는 오븐모델에서 제공하여 준 경계조건을 이용하여, 솔더의 용융 및 응고를 포함한 카드조립품내에서의 온도분포를 구하는 길이가 짧은 스케일에서의 열전달 현상을 모의한다. 각 모델에 대한 상세한 설명은 적외선 reflow 솔더링 해석 모델⁸⁾에

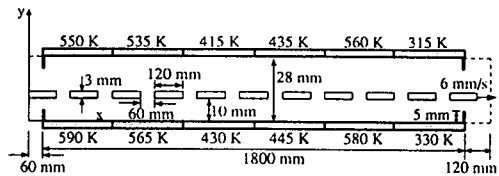


Fig. 3 Coordinate system and geometry used in the oven model

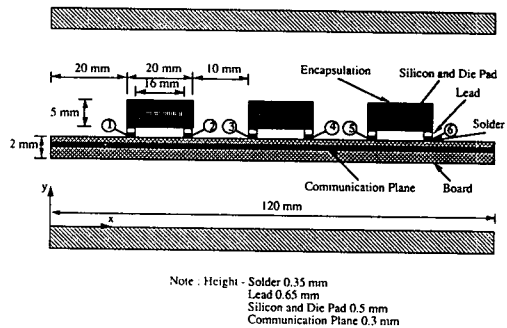


Fig. 4 Coordinate system and geometry used in the card model

기술되어 있다. 따라서, 본 논문에서는 일반적인 사항과 강제대류-적외선 reflow 솔더링 과정의 열전달해석에 필요한 강제대류의 효과를 예측하기 위해 수정된 부분만 기술하고자 한다.

오븐모델에서는 큰 (오븐) 스케일의 열반응이 예측되고, 카드조립품의 상세한 열반응을 예측하는 카드모델의 경계조건이 생성된다. 오븐모델에서는 카드조립품의 상세한 기하학적 형상을 고려하지 않고, 카드조립품을 실제 부품이 장착된 카드조립품과 동등한 치수와 열물리적 물성치(thermophysical property)를 갖는 평면 카드로 가정한다. 즉, 평면 카드에 실제 카드조립품과 똑같은 열질량(thermal mass)과 면적-방사율 곱을 부여한다. 실제 FR4 카드내에 있는 구리전달면(copper communication plane, Fig. 4 참조)은 평면 카드에서 열전도율을 이방성 열전도율로 부여함으로써 모델되었다. 이와 같이 일관된 방법으로 유효 열물리적 물성치를 정의함으로써 체적평균 카드온도의 관점에서 일관된 오븐모델과 카드모델의 계산결과를 얻을 수 있다. 오븐모델에서는 계산영역인 전체 오븐 내부의 속도 및 온도분포, 카드조립품에 전달되는 대류 및 복사 열전달량, 평면 카드의 오븐내 위치에 따른 온도이력이 계산된다. 또한 Fig. 2에서 수직 점선으로 보인 것처럼, 평면 카드의 선단 및 후단 수직면에서의 속도 및 온도분포가 계산되어 카드모델에 대한 경계조건이 생성된다.

카드모델에서는 Fig. 4에 보인 것처럼 2차원적으로 실제 카드조립품의 형상을 고려하여, 솔더의 용융 및 응고를 포함한 카드조립품 내부와 표면에서의 온도분포를 구하는 작은 (카드) 스케일에서의 열반응이 예측된다. 카드모델에서는 오븐모델에서 제공하여 준 경계조건을 이용하여 대표되는 1개의 카드조립품에 대해 주위 오븐 내부의 상세한 속도 및 온도분포, 카드조립품에 전달되는 대류 및 복사 열전달량, 카드조립품의 온도분포, 각 부품의 오븐내에서의 온도이력, 그리고 각 부품의 리드와 인쇄회로기판을 연결하는 솔더의 오븐내에서의 위치에 따른 온도이력 등이 계산된다.

2.2 지배방정식 및 경계조건

공기분사식 강제대류-적외선 reflow 오븐내에서는 전도, 대류, 복사 3가지가 복합된 열전달이 일

어나며, 솔더가 용융되었다가 다시 응고되는 상변화도 일어난다. 그러므로 대류열전달을 계산하기 위해 Navier-Stokes 방정식 및 에너지방정식의 해를 구하여야 한다. 동시에 전도 및 복사열전달을 계산하기 위해 열전도방정식 및 복사 열전달방정식의 해도 구하여야 한다. 또한 솔더가 용융온도 이상으로 가열되거나, 역으로 용융된 솔더가 용융온도 이하로 냉각될 때 상변화를 기술하는 모델도 필요하다. 오븐모델 및 카드모델에 적용되는 지배방정식은 동일하며, 단지 각각의 경우에 적용되는 경계조건만 다르다.

오븐내 공기의 속도 및 온도분포, 그리고 카드조립품의 열반응을 구하기 위하여 질량, 운동량 그리고 에너지보존법칙을 적용한다. 즉 2차원, 과도상태, 압축성, 가변물성치의 Navier-Stokes 방정식과 에너지방정식, 2차원 과도 열전도방정식⁹, 그리고 2차원 확산회(diffuse gray) 복사 열전달방정식¹⁰을 Fig. 3 및 4에 보인 각 모델 영역에 적용한다. Navier-Stokes 방정식과 에너지방정식이 계산영역 내부 유체영역에 적용되고, 열전도방정식이 고체영역 및 모듈과 기판사이의 공기 간격에 적용된다. 그리고 복사열전달량을 결정하기 위해 복사 열전달방정식을 계산영역안에 있는 모든 노출된 표면에 적용한다. 카드모델에서 솔더의 용융 및 응고는, 솔더가 완전히 상변화되는동안 솔더가 용해(fusion) 온도로 유지되도록 하는 엔탈피방법으로 모델링되었다. 오븐모델의 경우 계산결과를 유입 및 유출 경계조건에 둔감하게 하기 위해, Fig. 3과 같이 계산영역을 오븐의 입구 및 출구에서 확장하였다¹¹. 상세한 지배방정식은 적외선 reflow 솔더링 해석 모델⁸에 기술되어 있다.

공기분사식 강제대류-적외선 reflow 오븐의 상하부는 표면 방사율이 0.95이고 길이가 300 mm인 6개의 다공가열판으로 구성되어 있다. 오븐의 전체적인 형상 및 치수, 상하부 다공가열판의 온도분포등은 Fig. 3에 나타나있으며, 이들 값은 실제 산업체에서 이용되고 있는 reflow 오븐의 설정치를 기준으로 하였다. 길이 120 mm의 카드가 300 K의 온도에서 6 mm/s의 속도로 오븐으로 들어오며, 오븐 내부에는 항상 10개의 (계산영역에는 11개의) 카드가 있다. 오븐 입구 및 출구의 확장면에서의 온도는 300 K이며 불침투성(impermeable) 조건을 주었다. 오븐모델에서 사용되는 평면 카드의 질량, 열질량, 면적평균 방사율, 방향 열전도율을

실제 FR4 카드조립품과 같게 놓음으로서 유효 치수와 열물리적 물성치를 실제 카드조립품과 동등하게 하였다. 즉, 평면 카드의 유효 열물리적 물성치는 밀도 3700 kg/m^3 , 비열 634 J/kgK , x방향 열전도율 38.2 W/mK , y방향 열전도율 0.29 W/mK , 방사율 0.9 이다. Eutectic 솔더의 열물리적 물성치는 밀도 7300 kg/m^3 , 비열 114 J/kgK , 열전도율 25 W/mK , 방사율 0.82 이며, 용융온도는 453 K 이고 잠열은 31.4 kJ/kg 이다⁷⁾.

각 다공가열판을 통하여 오븐으로 유입 및 유출되는 공기분사속도는 임의의 유입측 다공가열판에 속도를 부여한 다음, 전체적인 질량보존이 만족될 때까지 반복계산하여 결정하였다. 이렇게 하여 결정된 다공가열판의 공기분사속도를 Table 1에 나타내었다. 본 연구에서는 i) 상향 공기분사, ii) 하향 공기분사, iii) 혼합 공기분사 (오븐의 입구측 반은 하향 공기분사, 출구측 반은 상향 공기분사)의 3가지 경우를 고려하였다. 전체적인 오븐의 공기 질량유동율은 약 0.092 kg/s 이며, Fig. 1에 보인 적외선 reflow 오븐보다 약 10배 더 크다. 이러한 선택된 공기분사속도는 추후 결과에서 보듯이 복합대류의 온도변동을 제거한다. 즉, 적외선 reflow 오븐과 같은 공기 질량유동율로는 온도변동을 제거하지 못하고, 약 10배 더 큰 질량유동율의 분사로서 오븐내 유동을 안정화시켜 온도변동을 제거할 수 있다.

Table 1. Porous panel heater injected air velocity distributions (mm/s)

Heater	Injection Up	Injection Down	Mixed Injection
1 Top	55.1	-55.1	-58.0
1 Bottom	56.5	-56.5	-56.5
2 Top	56.1	-56.1	-59.1
2 Bottom	58.2	-58.2	-58.2
3 Top	67.2	-67.2	-70.8
3 Bottom	70.4	-70.4	-70.4
4 Top	64.9	-64.9	68.4
4 Bottom	68.7	-68.7	68.7
5 Top	54.4	-54.4	57.3
5 Bottom	57.2	-57.2	57.2
6 Top	82.8	-82.8	87.2
6 Bottom	85.9	-85.9	85.9

2.3 수치해석 방법

카드조립품이 오븐내에서 강제대류를 동반한 적외선 reflow 솔더링되는 동안의 열반응을 예측하기 위하여, 본 연구에서는 이상에서 언급한 지배방정식을 오븐모델 및 카드모델에 적용한다. 오븐모델 및 카드모델에 적용되는 지배방정식중 연속방정식, Navier-Stokes 방정식, 그리고 에너지방정식은 유한체적법 (finite volume method)¹²⁾을 이용하여 수치해석적 방법으로 그 해를 구한다. 상세한 설명은 참고문헌⁸⁾에 기술되어 있으며, 복사열전달률을 계산하기 위하여 사용되는 카드조립품의 표면 온도는 Beckermann과 Smith¹³⁾의 방법을 이용하여 결정하였다. 2차원 확산회 복사 열전달방정식은 Navier-Stokes 방정식과 에너지방정식의 차분화에 사용된 격자와 동일한 격자의 작은 요소로 나눈 각 표면에 적용되며, 그로부터 생성되는 연립방정식을 successive over-relaxation 기법을 이용하여 수치해석적으로 푼다.

3. 결과 및 고찰

2차원 수치해석 모델 및 수치해석 방법을 검증하기 위해, Fig. 1과 같은 오븐 형상에서 불연속적인 재료가 있을 때 열반응을 측정하는 실험을 수행하여 실험결과와 계산결과를 비교하였다. 실험을 통하여 측정된 온도와 본 연구의 수치모델이 예측한 온도를 비교한 결과, 국소공기온도 및 카드조립품 온도는 각각 최대오차 15% 및 7% 이내로 잘 일치하였다¹⁴⁾. 오븐모델의 경우 x방향으로는 528개의 균일한 격자가 사용되었고, y방향으로는 공간적인 해상도를 높이기 위해 고체표면 근처에서 격자크기가 작아지며 매끄럽게 변하는 56개의 격자를 사용하였다. 카드모델의 경우 120×33 개의 격자가 사용되었다. 격자크기에 대한 계산결과의 의존성을 확인하기 위해 격자수에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 오븐모델의 경우 격자수가 264×32 개에서 약 2배가 되어도 체적평균 카드온도, 카드로 전달된 복사열전달률 및 시간평균 대류열전달률 등의 계산결과와 변화율은 2% 이내로 전체적인 계산결과는 격자크기에 무관하였다. 카드모델의 계산결과도 격자크기에 무관하였다. IBM RISC 6000 Model 320 Workstation에서 계산을 수행하였으며, 오븐모델 및 카드모델의 경우 각각

약 7일 및 9시간의 CPU 시간이 소요되었다.

Fig. 1과 같은 상부 배기구가 있는 재래식 적외선 reflow 오븐에서의 상세한 열반응 수치해석 결과는 참고문헌⁸⁾에 기술되어 있다. 그 결과에 의하면 오븐 입구에서 상대적으로 찬 공기가 유입되면 고온의 복사가열판에 의하여 가열되어 높은 주파수의 변동을 초래하는 부력을 야기하며, 이는 오븐 내부로 전파되어 간다. 이러한 오븐내 공기 유동장의 급격한 변동은 특히 오븐 입구 및 출구 근처에서 카드로의 대류열전달률 및 카드 표면온도의 급격한 변화를 가져온다. 카드조립품 열반응의 급격한 변동은 솔더링 과정을 포함하여 제품의 열제어 (thermal control) 를 어렵게 하므로, 본 연구에서는 Fig. 2와 같은 강제대류-적외선 reflow 오븐을 고려하게 되었다.

오븐을 통과하는 각각의 카드들은 초기 과도기적인 열반응을 보인 후, 반복적으로 똑같은 가열 및 냉각에 대한 열반응을 보인다. 카드들이 오븐을 통과하며 동일한 온도이력을 보이는 준정상상태에 도달하기 위해서는 적어도 15개의 카드가 초기에 낮은 온도에 있는 오븐을 통과하여야 함을 계산으로 확인하였다. Fig. 5는 본 연구에서 고려한 i) 상향 공기분사 (Fig. 5(a)), ii) 하향 공기분사 (Fig. 5(b)), iii) 오븐의 입구측 반은 하향 공기분

사, 출구측 반은 상향 공기분사인 혼합 공기분사 (Fig. 5(c))의 3가지 경우에 대해 오븐모델로부터 계산된 오븐내 온도분포를 보여준다. 그림에서 구별을 명확하게 하기 위해 수직방향으로는 오븐 높이를 10배 확대하였으며, 300 K에서 590 K를 16개의 등간격 등온선으로 표시하였다. 5번째 벽면까지는 벽면으로부터 카드로 열이 전달되므로 벽면 쪽이 고온의 등온선이고 중심의 카드 쪽이 저온의 등온선이며, 6번째 벽면에서는 카드가 벽면으로 열을 상실하므로 반대이다. 오븐의 입구측 반의 온도분포는 Fig. 5(b)와 5(c)가 거의 동일하고, 출구측 반의 온도분포는 Fig. 5(a)와 5(c)가 거의 동일함을 알 수 있다. 각각의 경우에 카드의 온도는 상하 다공가열판 및 주위 공기와 비교하여, 오븐 입구측에서는 저온이고 출구측에서는 고온이다. 그러므로 입구측에서는 저온의 카드로부터 고밀도의 공기가 하강하고, 출구측에서는 고온의 카드로부터 저밀도의 공기가 상승한다. 이러한 자연대류에 의한 오븐 내부 공기 유동을 고려하여, Fig. 5(c)와 같은 혼합 공기분사에서는 부력과 같은 방향으로 공기를 분사한다. 즉, 오븐의 입구측 반은 하향 공기분사, 출구측 반은 상향 공기분사를 함으로서 분사에 의한 관성력이 카드 주위 부력을 증대시키는 효과를 가져온다.

Fig. 6은 혼합 공기분사인 경우 오븐모델로부터 계산된 오븐내 속도 및 온도분포를 15초 간격으로 30초 동안 보여준다. 이 시간은 카드가 6 mm/s의 속도로 1개의 카드 (120 mm)와 카드사이의 간격 (60 mm) 길이의 합인 180 mm를 이동하는 시간이다. 상대시간 30초에서의 계산된 속도 및 온도분포는 0초에서의 분포와 거의 동일한 주기적인 분포를 보인다.

인쇄회로기판 위에 3개의 모듈이 있는 경우에 대해 카드모델로부터 계산된 속도 및 온도분포가 Fig. 7에 나타나 있다. 오븐모델 결과에서와 같이 수직방향으로 10배 확대하지 않고, 그림은 스케일대로 그려졌다. 온도장은 15 K 간격으로 10개의 등온선으로 표시하였으며, Fig. 7(a)와 7(b)에서는 카드조립품의 온도가 상하 벽면보다 상대적으로 낮고, Fig. 7(c)에서는 상대적으로 온도가 높다. Fig. 7의 (a), (b), (c) 각각의 시간에서 카드 조립품의 오븐내 위치는 Fig. 6(c)에 나타나 있다. Fig. 7(a)는 카드조립품 중심이 4번째와 5번째 다공가열판의 경계선 바로 아래에 있을 때, Fig. 7(b)는

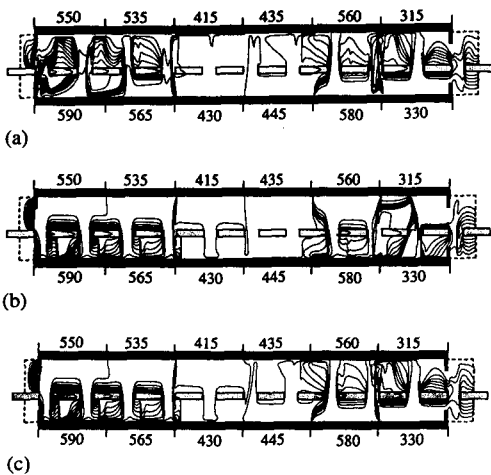


Fig. 5 Predicted temperature distributions within the forced convection-infrared reflow oven for (a) air injection up, (b) air injection down, and (c) mixed air injection. 16 equally-spaced isotherms spanning 300 to 590 K are shown.

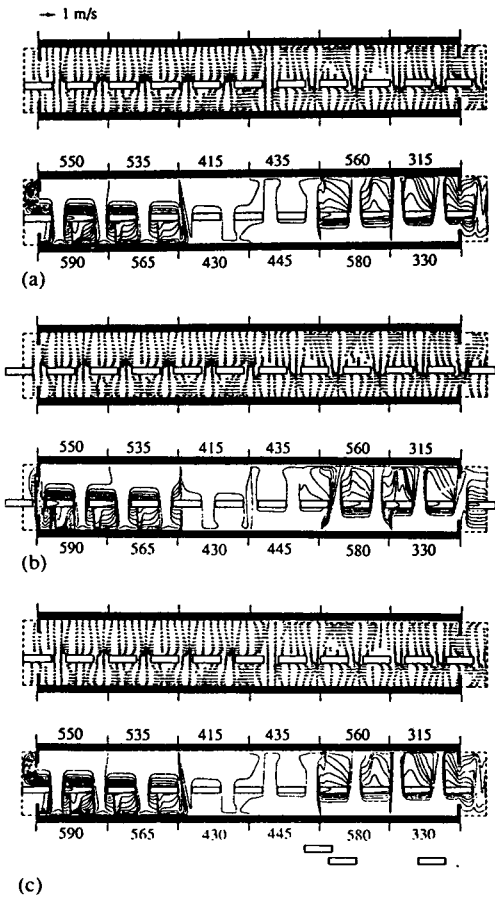


Fig. 6 Predicted velocity and temperature distributions within the forced convection-infrared reflow oven for the mixed air injection case at relative times of (a) 0, (b) 15, and (c) 30 s. 16 equally-spaced isotherms spanning 300 to 590 K are shown.

최우측 솔더가 용융을 완료했을 때, Fig. 7(c)는 최우측 솔더가 응고를 완료했을 때에 해당한다. 하부 다공가열판으로부터 공기가 상향 분사되므로, 분사된 공기는 카드조립품 주위를 돌아서 카드조립품 상부 영역으로 재유입된다. 카드조립품의 모듈 사이에는 약한 재순환 유동이 존재하며, 상향 공기 분사에 의한 상향 유동대류는 카드조립품 하부와 상부 다공가열판 주위의 온도분포를 압축한다.

Fig. 8은 카드조립품이 오븐 내부를 통과하는 동안 카드로 전달된 대류 및 복사열전달률을 보여주며, 그림에서 x는 카드중심의 오븐내에서의 위치

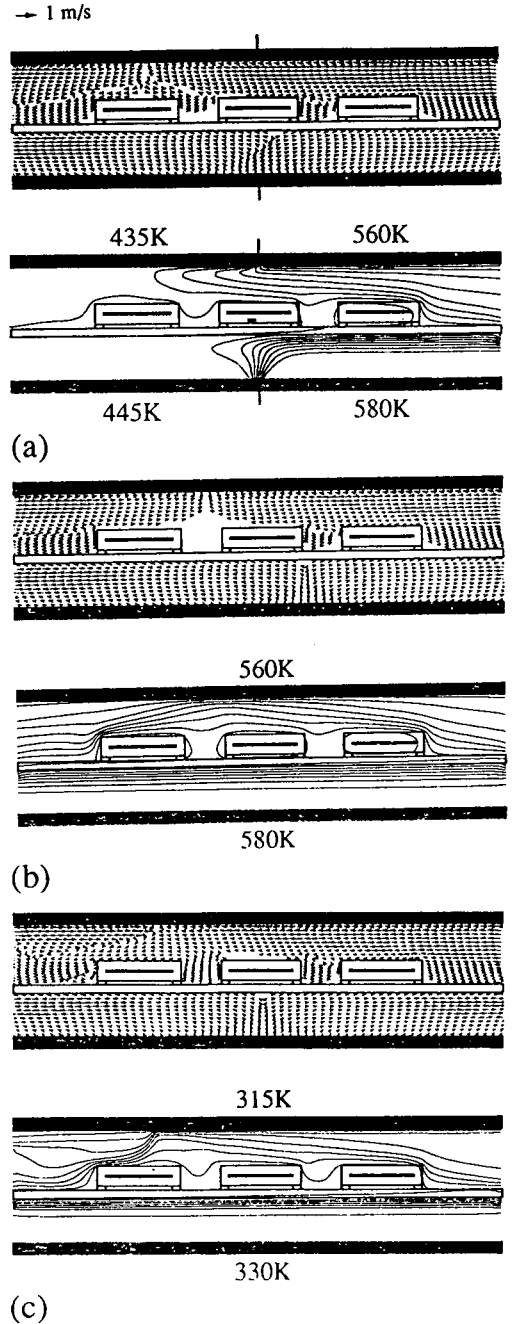


Fig. 7 Predictions of the card model showing velocity and temperature distributions about one card assembly at the locations indicated in Fig. 6(c). 10 equally-spaced isotherms are shown at 15 degree increments.

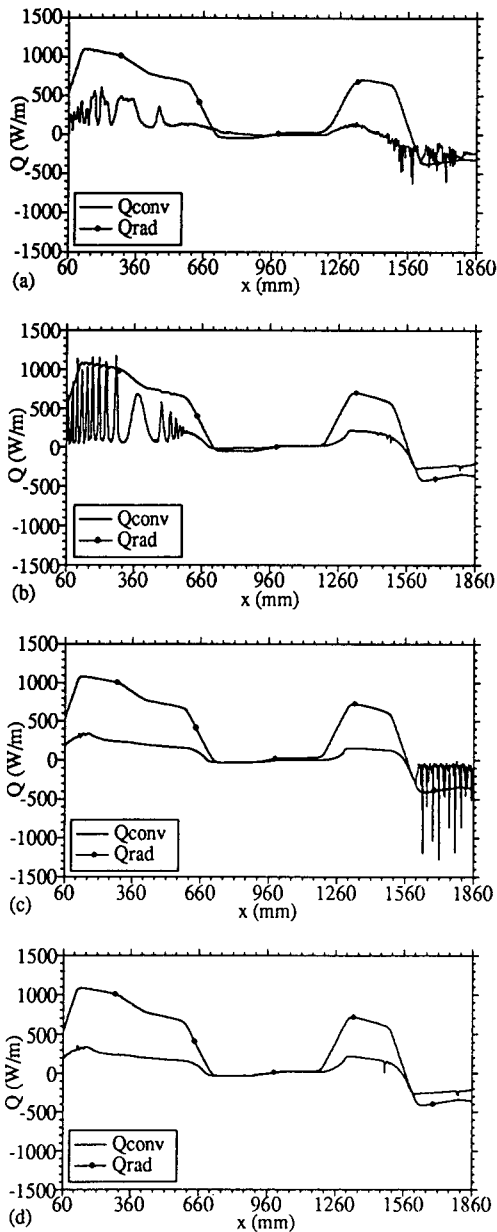


Fig. 8 Predicted convective and radiative heat transfer rates to the card assembly for (a) conventional processing, (b) air injection up, (c) air injection down, and (d) mixed air injection

를 나타낸다. 비교를 위하여 참고문헌⁸⁾에서 수행한 재래식 적외선 reflow 오븐에서의 결과도 함께

나타내었다. Fig. 8(a)에서 보듯이 재래식 적외선 reflow 오븐의 경우 복합대류의 효과가 오븐의 입구 및 출구 근처에서 현저하게 나타나, 부력에 의한 온도장의 변동으로 인해 대류열전달률도 변동하고 있음을 알 수 있다. 이러한 변동은 강제대류-적외선 reflow 오븐에서는 다공가열판으로부터 공기분사의 방향에 따라 증폭되거나 감소된다. Fig. 8(b)의 상향 공기분사의 경우 오븐 입구측에서는 카드로부터 하향하는 저온의 공기와 반대방향으로 공기가 분사되므로, 공기유동의 변동이 증폭되어 대류열전달률의 변동도 증폭된다. 그러나 오븐 출구측에서는 카드로부터 상향하는 고온의 공기와 같은 방향으로 공기가 분사되므로, 공기유동 및 대류열전달률의 변동이 감소된다. Fig. 8(c)의 하향 공기분사의 경우 상향 공기분사와 반대로, 오븐 입구측에서는 변동이 감소되고 출구측에서는 변동이 증폭된다. 이러한 결과로부터 Fig. 8(d)와 같이 오븐의 입구측 반은 하향 공기분사, 출구측 반은 상향 공기분사인 혼합 공기분사를 이용하면, 공기유동 및 대류열전달률의 변동을 감소시켜 카드조립품의 열제어를 용이하게 할 수 있음을 알 수 있다.

카드조립품이 오븐 내부를 통과하는 동안 카드 중심의 상부 및 하부 국소표면온도를 Fig. 9에 나타내었으며, 솔더가 응고되는 지점 근처에서는 확대하여 보여준다. Fig. 8의 대류열전달률 변동에서 살펴본 바와 같이, Fig. 9(a)의 재래식 적외선 reflow 오븐의 경우, 오븐의 입구 및 출구 근처에서 부력에 의한 온도장의 변동으로 인해 입구측에서는 하부, 출구측에서는 상부 표면온도가 변동한다. Fig. 9(b)의 상향 공기분사의 경우, 오븐 입구측에서는 카드로부터 하향하는 저온의 공기와 반대방향으로 공기가 분사되므로 하부 표면온도가 변동하며, 오븐 출구측에서는 카드로부터 고온의 공기가 상향하므로 상하부 표면온도의 변동이 없는 열반응을 보인다. Fig. 9(c)의 하향 공기분사의 경우에는, 오븐 출구측에서 카드로부터 상향하는 고온의 공기와 반대방향으로 공기가 분사되므로 상부 표면온도가 변동한다. Fig. 9(d)의 혼합 공기분사인 경우는, 오븐의 입구 및 출구측에서 각각 카드로부터의 부력에 의한 공기유동과 같은 방향으로 공기를 분사하여, 카드조립품의 상하부 표면온도의 변동이 없는 열반응을 얻을 수 있다. 솔더가 응고되는 지점 근처에서의 확대 그림에서 보듯이, Fig. 9(a)와 9(c)의 경우에는 제어되지 않은

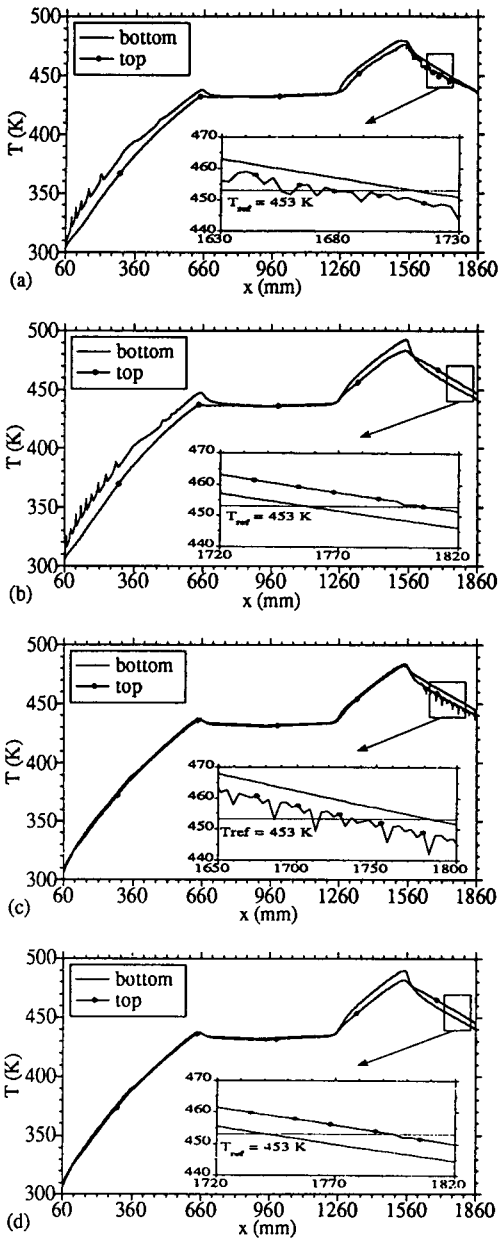


Fig. 9 Predicted local card assembly surface temperatures for (a) conventional processing, (b) air injection up, (c) air injection down, and (d) mixed air injection

복합대류의 변동에 의해 야기되는 표면온도의 변동으로 인하여, 여러 번 솔더의 상변화가 일어날

가능성이 있음을 보여준다.

Fig. 10은 reflow 솔더링이 일어나는 부근에서 솔더의 상세한 온도이력을 체적평균 카드온도와 함께 보여준다. 그림에서 솔더의 번호는 Fig. 4에서 보인 바와 같으며, 솔더의 용융 및 응고는 온도곡선에서 솔더의 용해온도인 453 K에서 불연속선으로 표시된다. 그림에서 보듯이 각 솔더가 상변화를 하여 용융 및 응고되는데는 각각 약 5초의 시간이 요구된다. 카드의 선단(우측)에 있는 솔더가 후단(좌측)에 있는 솔더보다 오븐 내부에서 먼저 가열 및 냉각 공정을 거치므로, 각 카드조립품상의 솔더는 선단에서 후단의 순으로 용융 및 응고된다. 카드조립품이 오븐으로 유입될 때 선단으로부터 후단으로 전도에 의한 열전달이 발생하므로, 후단에 있는 솔더는 선단에 있는 솔더보다 더 오랜 시간 가열된다. 그러므로 후단에 있는 솔더의 최고온도는 선단에 있는 솔더보다 높게 나타난다.

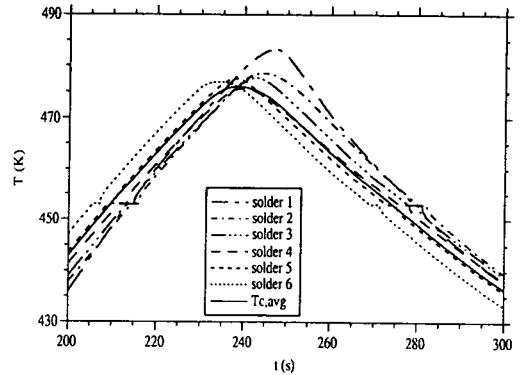


Fig. 10 Predicted temperature histories of solder joints in the vicinity of the reflow for mixed air injection. The solder joint number is shown in Fig. 4, and the volume-averaged card temperature is also shown.

4. 결 론

재래식 적외선 reflow 오븐의 경우, 오븐 입구 및 출구 근처에서는 높은 주파수의 변동을 초래하는 부력을 야기하며, 이는 오븐내 공기 유동장의 급격한 변동을 가져와 카드로의 대류열전달 및 카드 표면온도의 급격한 변동을 야기한다. 이러한 카드조립품 열반응의 급격한 변동은 솔더링 과정

을 포함하여 제품의 열제어를 어렵게 한다. 그러므로 본 연구에서는 강제대류 효과에 의한 오븐 내부 공기유동의 안정화 및 카드조립품의 온도 변동 최소화를 위해, 강제대류-적외선 reflow 오븐을 고려하여 이에 따른 열반응을 예측하였다. 특히 자연대류에 의한 오븐 내부 공기유동을 고려하여, 다공가열판으로부터 공기분사의 방향을 오븐의 입구측 반은 하향 공기분사, 출구측 반은 상향 공기분사를 하는 혼합 공기분사 방식을 이용하였다. 이렇게 함으로서 오븐 내부에서, 자연대류에 의한 부력과 강제대류에 의한 관성력을 같은 방향으로 만들 수 있었다. 이는 공기분사에 의한 관성효과가 부력에 의해 야기되는 변동을 억제하여, 오븐 내부 공기유동을 안정화시키고 복잡한 상호작용에 의하여 솔더링 과정동안 카드조립품의 온도 변동을 최소화할 수 있었다. 그리고 혼합 공기분사를 함으로서, 재래식 적외선 reflow 오븐에서와 같이 제어되지 않은 복합대류의 변동에 의해 야기되는 표면온도의 변동으로 인해, 여러 번 솔더의 상변화가 일어날 가능성을 제거할 수 있었다. 또한 reflow 솔더링되는 과정동안 카드조립품의 상하부 온도는 균일하게 분포되어, 과도한 온도차에 의한 열응력으로 인하여 인쇄회로기판이 휘는 문제는 발생하지 않을 것임을 확인할 수 있었다. 복사, 복합대류, 전도열전달의 복합된 효과가 reflow 조건 하에서 카드의 선단(우측)부터 솔더의 용융 및 응고를 일으켰다. 각 솔더가 상변화를 하여 용융 및 응고되는데는 각각 약 5초의 시간이 요구되었으며, 후단에 있는 솔더의 최고온도는 선단에 있는 솔더보다 높게 나타났다.

본 연구에서는 오븐 상하부로부터 하향 및 상향 공기분사를 동반하는 강제대류-적외선 reflow 솔더링 과정중 오븐내에서 일어나는 복합열전달 현상을 해석하였다. 이러한 결과들은 오븐의 적절한 설계 및 작동조건을 제시하여, 불량 솔더링 및 열응력으로 인한 카드조립품의 불량률을 최소화하고 제품의 생산율을 향상하는데 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 동의대학교 학술연구조성비의 지원을 받았으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. H. H. Manko, Soldering Handbook for Printed Circuits and Surface Mounting, Van Nostrand Reinhold, (1986)
2. A. Rahn, The Basics of Soldering, John Wiley & Sons, Inc., (1993)
3. C. Capillo, Surface Mount Technology, McGraw-Hill Publishing Co., (1990)
4. J. H. Lau, Handbook of Fine Pitch Surface Mount Technology, Van Nostrand Reinhold, (1994)
5. D. C. Whalley, A. Ogunjimi, P. P. Conway and D. J. Williams, The Process Modeling of the Infrared Reflow Soldering of Printed Circuit Board Assemblies, Journal of Electronics Manufacturing, Vol. 2, (1992), pp. 23-29
6. M. A. Eftychiou, T. L. Bergman and G. Y. Masada, Thermal Effects During Infrared Solder Reflow - Part II. A Model of the Reflow Process, ASME Journal of Electronic Packaging, Vol. 114, (1992), pp. 48-54
7. M. A. Eftychiou, T. L. Bergman and G. Y. Masada, A Detailed Thermal Model of the Infrared Reflow Soldering Process, ASME Journal of Electronic Packaging, Vol. 115, (1993), pp. 55-62
8. 손영식, 전자부품의 인쇄회로기판 부착시 적외선 Reflow Soldering과정 열전달 해석, 대한용접학회지, 제15권, 제6호, (1997), pp. 591-601
9. F. P. Incropera and D. P. DeWitt, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 4th ed., John Wiley & Sons, New York, (1996)
10. R. Siegel and J. R. Howell, Thermal Radiation Heat Transfer, 3rd ed., Hemisphere Publishing Corporation, (1992)
11. B. H. Kang and Y. Jaluria, Conjugate Heat Transfer from a Continuously Moving Material in a Parallel Channel Flow for Cooling in Forming Manufacturing Process, Transport

- Phenomena in Materials Processing, edited by P. J. Bishop et al., HTD - Vol. 146, (1990), pp. 25-35
12. S. V. Patankar, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw-Hill, New York, (1980)
 13. C. Beckermann and T. F. Smith, Incorporation of Internal Surface Radiation Exchange in the Finite Volume Method, Numerical Heat Transfer, Part B, Vol. 23, (1993), pp. 127-133
 14. T. L. Bergman and Y. S. Son, Mixed Convection in Horizontal Channels with Discrete Material and Top Exhaust, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 38, No. 14, (1995), pp. 2519-2527