

研究論文

## 전자부품의 인쇄회로기판 부착시 적외선 Reflow Soldering과정 열전달 해석

손 영 석\*

### Heat Transfer Analysis of Infrared Reflow Soldering Process for Attaching Electronic Components to Printed Circuit Boards

Young-Seok Son\*

**Key Words** : Infrared Reflow Soldering (적외선 Reflow Soldering), Electronics Assembly (전자조립품), 2-D Numerical Model (2차원 수치모델), Finite Volume Method (유한체적법), Multimode Heat Transfer (다중모드 열전달), Card Assembly Thermal Response (카드조립품 열적반응)

#### Abstract

A numerical study is performed to predict the thermal response of a detailed card assembly during infrared reflow soldering. The card assembly is exposed to discontinuous infrared panel heater temperature distributions and high radiative/ convective heating and cooling rates at the inlet and exit of the oven. The convective, radiative and conduction heat transfer within the reflow oven as well as within the card assembly are simulated and the predictions illustrate the detailed thermal responses. The predictions show that mixed convection plays an important role with relatively high frequency effects attributed to buoyancy forces, however the thermal response of the card assembly is dominated by radiation. The predictions of the detailed card assembly thermal response can be used to select the oven operating conditions to ensure proper solder melting and minimization of thermally induced card assembly stresses and warpage.

※ 1997년 9월 10일 접수

\* 정회원, 동의대학교 기계공학과

## 1. 서 론

전자부품의 조립과정중 부품을 인쇄회로기판(Printed Circuit Board ; PCB)에 부착하는 방법에는 여러 가지가 있다. 과거에는 인쇄회로기판에 구멍을 뚫고 여기에 부착하고자하는 각 전자부품의 리드(lead)를 삽입하고 기판의 아래쪽에서 Wave Soldering<sup>1)</sup>하는 방법이 주로 사용되어 왔고, 국내에서는 아직도 이 방법을 사용하는 작업장이 많이 있다. 최근에는 전자부품의 크기가 점점 작아지고 또한 완성품이 소형화됨에 따라, 한정된 인쇄회로기판 표면에 많은 부품을 부착할 수 있는 표면장착기법(Surface Mount Technology; SMT)<sup>2)</sup>이 널리 사용되고 있다. 적외선 Reflow Soldering은 표면장착기법에서 가장 널리 사용되는 일반적인 Soldering방법이다.

Fig. 1은 적외선 Reflow Soldering에 사용되는 전형적인 적외선 오븐(oven)을 보여준다. 인쇄회로기판에 부착되어야 할 전자부품들은 아직 Soldering되지 않은 상태로 기판위의 정해진 위치에 놓여진다. 이러한 Soldering되지 않은 상태의 카드조립품(card assembly)들이 양쪽 끝단에서 컨베이어(conveyor)에 의해 지지되며 상하부에 복사가열판이 장착된 적외선 오븐을 통과한다. 카드조립품이 적외선 오븐을 통과하는 동안 복사가열판으로부터 전달된 에너지는 Solder를 녹이고 적외선 오븐 출구 근처의 냉각영역에서 에너지를 상실하며 Solder를 응고시켜 전자부품을 인쇄회로기판에 영구 부착시킨 다음, 오븐을 나와 계속되는 청소 및 시험공정으로 옮겨진다. 이러한 Reflow Soldering과정동안 복사가열판의 온도가 너무 낮으면 Soldering이 일어나지 않는 부품을 생기고, 반대로 온도가 너무 높으면 부품중 열에 약한 부위가 손상될 수 있다. 또한 Solder가 녹을 정도의 적당한 온도를 유지하더라도 적외선 오븐 내부의 온도분포를 잘 조절하지 못하여 카드조립품의 온도분포가 불균일하게되면 열응력이 발생하여 인쇄회로기판이 휘게되고, 이는 전자부품의 리드와 Solder의 불량 정렬 및 부품이 기판에 미부착되는 카드조립품의 손상을 초래할 수 있다. 그러므로 각각의 새로운 카드조립품 설계마다 적절한 Soldering을 수행하고, 전자부품의 리드와 Solder의 불량 정렬

및 카드조립품의 손상을 초래할 수 있는 열응력을 최소로 하기 위해서는 적절한 적외선 오븐의 작동조건이 명시되어야 한다.

적외선 오븐을 통과하는 동안 카드조립품의 열적반응은 전도, 대류, 복사 3가지의 복합된 열전달 방식에 의해 지배된다. 복사열전달은 오븐의 상하부에 설치된 복사가열판과 카드조립품 표면사이에서 일어나며 지배적인 열전달 방식으로 사료된다. 대류열전달은 카드조립품과 오븐 내부 공기사이에서 일어나며, 유해가스를 배출하는 배기구의 송풍기 및 컨베이어에 놓인 카드조립품의 이동으로 인한 공기의 유동과 열적으로 불안정한 부력에 동시에 존재하기 때문에 강제 및 자연대류가 혼합된 복합대류가 일어난다. 또한 카드조립품 내부에서는 전도에 의하여 열전달이 일어난다.

적외선 Reflow Soldering과정동안 IC Package의 온도분포를 실험을 통하여 측정하고 이를 이용하여 수치적으로 내부 온도분포를 구하였으나<sup>3)</sup> 열적 거동에 관련된 열전달 기구에 대한 규명이 전혀 없다. Fernandes et al.<sup>4)</sup>은 전자부품이 장착된 전자조립품이 적외선 Reflow Soldering되는 동안 열적거동을 실험적으로 연구하였으며, Eftychiou et al.<sup>5)</sup>은 열전달 상관관계식을 이용하여 간단한 수치해석모델을 개발하였다. Whalley et al.<sup>6)</sup>은 상업용 Reflow 오븐에서 적외선 Reflow Soldering을 모의하는 모델을 개발하였으나 실험과 해석결과를 잘 일치시키기 위해 대류열전달계수를 조절하였다는 단점이 있다. 적외선 Reflow Soldering에 관한 상세 열전달 모델이 개발되었으나<sup>7)</sup> 균일 온도의 단일 가열판이 있는 단순한 형상의 적외선 오븐과 Solder 용융까지만 모델이 되었다. 그러므로 실제 산업체에서 사용되고 있는 상업용 적외선 Reflow 오븐에의 적용과 Solder의 용융 및 응고를 포함한 전 과정을 예측하는 수치해석적 연구는 아직 이루어지지 않고

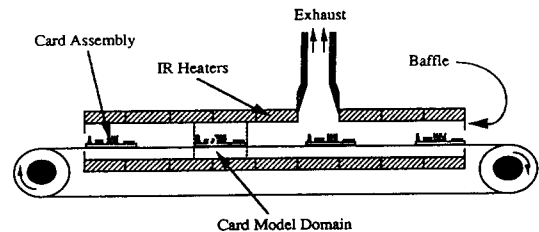


Fig. 1 Schematic of a typical infrared reflow oven

있다.

적외선 Reflow Soldering과정중 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 Soldering되는 과정동안 열적반응을 예측하는 것이 필요하다. 그러므로 본 연구에서는 서로 다른 전자부품의 배열을 가진 카드조립품들이 적외선 오븐에서 Reflow Soldering되는 과정동안 i) 오븐 내부의 속도 및 온도분포, ii) 카드조립품의 온도분포 및 오븐에서의 위치에 따른 온도이력(temperature history), 그리고 iii) 각 부품의 리드와 인쇄회로기판을 연결하는 Solder의 온도이력등을 수치해석적인 방법으로 예측하고자 한다. 이러한 해를 구함으로써 적외선 Reflow Soldering과정중 신뢰성 있는 Soldering이 이루어졌는지 또 카드조립품내에 과도한 온도차로 인한 열응력이 발생하지 않았는지를 확인할 수 있고, 이는 불량 Soldering 및 열응력으로 인한 카드조립품의 불량률을 최소화하는데 기여할 수 있는 근거를 제공하여 준다.

## 2. 수치 해석

### 2.1 수치모델

적외선 오븐내 유동은 인쇄회로기판에 부착하고자 하는 전자부품의 복잡한 형상 및 배치 그리고 일반적으로 2차유동 불안정성으로 인하여 3차원 유동으로 특성지워지는 복합대류가 일어나므로 3차원 유동일 것이다. 그러나 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 Soldering과정동안 일어나는 관련된 열전달 현상은 모의 가능하며, 실험을 통해 Fig. 1과 같은 오븐 형상에서 불연속적인 재료가 있을 때 2차원 수치모델의 적용

가능성을 검증하였다. 실험을 통하여 측정된 온도와 본 연구의 수치모델이 예측한 온도를 비교한 결과 최대오차 7% 이내로 잘 일치하였다<sup>8)</sup>.

적외선 오븐 및 오븐 내부에서 이동하는 카드조립품의 기하학적 모델링에 있어서 가장 어려운 점은 그와 관련된 길이 스케일이다. 큰 길이 스케일에서는 상하부 복사열판은 대류에 의해 오븐 내부 공기와 그리고 복사에 의해 카드조립품과 에너지를 교환한다. 작은 길이 스케일에서는 대류 및 복사뿐만 아니라 부품의 리드와 Solder Pad를 통한 전도에 의하여 Solder접합부로 에너지가 전달되거나 제거된다. 전형적인 적외선 오븐의 길이는 수 m에 달하나 카드조립품에 있는 Solder의 길이는 수 mm에 불과하다. 즉 한 기하학적 모델 내에 10의 3승 내지 4승의 정도의 차이가 나므로 한 개의 모델로 전 과정을 모델링하면 Solder와 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. 오븐모델에서는 적외선 오븐이라는 큰 스케일에서 일어나는 열전달 현상을 모의하고 각각의 카드조립품에 대한 오븐내의 위치에 따른 속도 및 온도 경계조건을 제공하여 준다. 카드모델에서는 오븐모델에서 제공하여 준 경계조건을 이용하여 Solder의 용융 및 응고를 포함한 카드조립품내에서의 온도분포를 구하는 작은 스케일에서의 열전달 현상을 모의한다.

### 2.2 오븐모델

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. 즉, 평면 카드는 실제 카드조립품과 똑 같은 열질량(thermal mass)과 면적-방사율 값을 가진다. 이와 같이 일관된 방법으로 유효 물성치를 정의함으로써 일관된 오븐

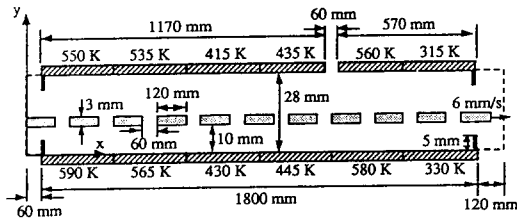


Fig. 2 Coordinate system and geometry used in the oven model

모델과 카드모델의 계산 결과를 얻을 수 있다.

오븐내 공기의 속도 및 온도분포 그리고 평면 카드의 열적반응을 구하기 위하여 질량, 운동량 그리고 에너지보존법칙을 적용한다. 즉 2차원, 과도 상태, 압축성, 가변물성치의 Navier-Stokes 방정식과 에너지방정식, 2차원 과도 열전도방정식<sup>9)</sup>, 그리고 2차원 확산회(diffuse gray) 복사열전달방정식<sup>10)</sup>을 Fig. 2에 보여진 오븐 영역에 적용한다. 먼저 대류열전달을 계산하기 위해 공기에 적용되는 지배방정식은 다음과 같다.

질량보존방정식,

$$\frac{\partial(\rho_f)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_f u_f)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_f v_f)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

x방향 운동량보존방정식,

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho_f u_f)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_f u_f u_f)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_f v_f u_f)}{\partial y} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_f \frac{\partial u_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( u_f \frac{\partial u_f}{\partial y} \right) - \frac{\partial p}{\partial x} \\ &+ \frac{1}{3} \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \mu_f \left( \frac{\partial u_f}{\partial x} + \frac{\partial v_f}{\partial y} \right) \right\} + \frac{\partial \mu_f}{\partial y} \frac{\partial v_f}{\partial x} - \frac{\partial \mu_f}{\partial x} \frac{\partial v_f}{\partial y} \end{aligned} \quad (2)$$

y방향 운동량보존방정식,

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho_f v_f)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_f u_f v_f)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_f v_f v_f)}{\partial y} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_f \frac{\partial v_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_f \frac{\partial v_f}{\partial y} \right) - \frac{\partial p}{\partial y} - g(\rho_f - \rho_{f,ref}) \end{aligned}$$

$$+ \frac{1}{3} \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \mu_f \left( \frac{\partial u_f}{\partial x} + \frac{\partial v_f}{\partial y} \right) \right\} + \frac{\partial \mu_f}{\partial x} \frac{\partial u_f}{\partial y} - \frac{\partial \mu_f}{\partial y} \frac{\partial u_f}{\partial x} \quad (3)$$

에너지보존방정식,

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho_f T_f)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_f u_f T_f)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_f v_f T_f)}{\partial y} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{k_f}{c_{p,f}} \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{k_f}{c_{p,f}} \frac{\partial T_f}{\partial y} \right) \\ &+ \frac{1}{c_{p,f}} \left( u_f \frac{\partial p}{\partial x} + v_f \frac{\partial p}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

카드조립품에 적용되는 열전도방정식은

$$\rho_s \frac{\partial T_s}{\partial t} + \rho_s u_s \frac{\partial T_s}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{k_{s,x}}{c_{p,s}} \frac{\partial T_s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{k_{s,y}}{c_{p,s}} \frac{\partial T_s}{\partial y} \right) \quad (5)$$

이고, 복사열전달계산에 사용되는 확산회 복사열전달방정식은

$$\begin{aligned} & \frac{q_k(r_k)}{\epsilon_k} - \sum_{j=1}^N \frac{1 - \epsilon_j}{\epsilon_j} \int_{A_j} q_j(r_j) dF_{ak-dj}(r_j, r_k) \\ &= \sigma T_k^4(r_k) - \sum_{j=1}^N \int_{A_j} \sigma T_j^4(r_j) dF_{ak-dj}(r_j, r_k) \end{aligned} \quad (6)$$

for  $k = 1, 2, \dots, N$

이다.

오븐모델의 계산영역은 계산결과를 유입 및 유출 경계조건에 둔감하게 하기 위해 오븐의 입구와 출구에서 확장되었다<sup>11)</sup>. 오븐모델에 대한 경계조건으로는 먼저 오븐영역의 좌우 입구에서는  $T_\infty$  (300 K)의 공기가 배기구로 나가는 유량과 균형을 이루는 유량의 평균속도로 유입된다고 하였다. 온도는 300 K의 카드조립품은 6 mm/s의 속도로 오븐영역으로 들어오며 오븐 상하부 복사가열판의 온도분포는 Fig. 2에 주어져 있다. 오븐 상부에 있는 배기구에서는 포물선 속도분포 즉,  $\partial T / \partial y = 0$ 을 경계조건으로 주었으며 모든 고체 표면에서의 속도는 no slip 조건을 주었다.

오븐모델은 계산영역 전체 내부 공기의 속도 및 온도분포, 평면 카드의 오븐내 위치에 따른 온도 이력을 계산한다. 또한 Fig. 1에서 수직 점선으로 보여진 것처럼 평면 카드의 선단 및 후단 수직면에서의 속도 및 온도분포를 계산하여 카드모델에 대한 경계조건을 생성한다. 그러므로 오븐모델에서는 i) 적외선 오븐내에서의 속도 및 온도분포, ii) 카드조립품에 전달되는 대류 및 복사 열전달량, iii) 카드조립품의 오븐내에서 평균온도이력, 그리고 iv) 카드모델에 대한 경계조건을 계산한다.

### 2.3 카드모델

카드모델에서는 오븐모델에서 제공하여 준 경계조건을 이용하여 Solder의 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. 오븐모델에서는 카드조립품이 오븐 내부에서 좌측에서 우측으로 이동하고 복사가열판의 온도는 일정하게 유지되는데 반해 카드모델에서는 카드조립품은 정지하고 있고 카드 이동속도에 근거한 관계로부터 열적 경계조건을 시간에 따라 변화게 한다.

오븐모델에서와 마찬가지로 카드모델도 질량, 운동량 그리고 에너지보존법칙을 적용하며 지배방정식은 오븐모델의 지배방정식과 동일하다. 즉

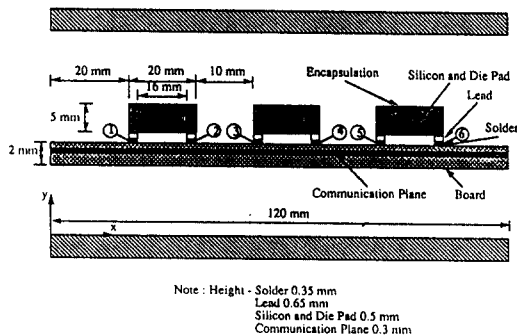


Fig. 3 Coordinate system and geometry used in the card model

2차원, 과도상태, 압축성, 가변물성치의 Navier-Stokes 방정식과 에너지방정식이 계산영역 내부 유체영역에 적용되고, 2차원 과도 열전도방정식이 고체영역 및 모듈과 기판사이의 공기 간격에 적용된다. 그리고 복사열전달량을 결정하기 위해 2차원 확산회 복사열전달방정식을 계산영역안에 있는 모든 노출된 표면에 적용한다. Solder접합부의 용융 및 응고는 Solder가 상변화되는동안 완전히 용융 (응고)되도록 Solder에 충분한 에너지가 공급 (방출)될 때까지 Solder가 용해 (fusion) 온도로 유지되도록 하는 엔탈피방법으로 모델되었다. 카드모델에서는 i) 카드조립품의 온도분포, ii) 각 부품의 오븐내에서의 온도이력, 그리고 iii) 각 부품의 리드와 인쇄회로기판을 연결하는 Solder의 오븐내에서의 위치에 따른 온도이력을 계산한다.

### 2.4 수치해석 방법

오븐모델 및 카드모델에 적용되는 지배방정식중 Navier-Stokes 방정식과 에너지방정식은 유한체적법 (Finite Volume Method)<sup>12)</sup>을 이용하여 수치적으로 그 해를 구한다. 기하학적 모델이 복잡하고 카드는 영역 내에서 이동하므로 수치해석을 쉽게 하기 위하여 비엇갈림 (nonstaggered) 격자를 사용하며<sup>13)</sup>, 복사열전달 계산으로부터 구한 정미표면복사열전달 및 가변물성치 효과들은 차분방정식에서 생성항으로 취급한다. 연속방정식은 SIMPLEC 알고리즘<sup>14)</sup>에 따라 압력 및 압력수정방정식을 생성하는데 사용된다. 차분방정식은 TDMA 알고리즘과 함께 ADI 방법<sup>15)</sup>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 (Successive Over-Relaxation) 기법을 이용하여 수치해석적으로 푼다<sup>10)</sup>.

모의계산은  $\Delta t = 0.05$ 초와 오븐모델의 경우  $528 \times 56$  ( $x \times y$ ), 카드모델의 경우  $120 \times 33$ 의 격자로 수행되었다. 수렴조건으로는 압력 및 압력수정방정식에는  $10^{-6}$ 을 사용하였고<sup>14)</sup>, 계산시간 진행 시에는 각 변수의 오차의 절대값 중 최대값이  $10^{-3}$  이하일 때 수렴된 것으로 하고 다음 시간으로 계산을 진행시켰다. 계산은 IBM RISC 6000 Model 320

Workstation에서 수행되었으며, 오븐모델의 경우 약 7일, 카드모델의 경우 약 9시간의 CPU 시간이 소요되었다. x방향으로는 균일한 격자가 사용되었고 y방향으로는 고체표면 근처에서 격자크기가 작아지는 매끄럽게 변하는 격자를 사용하였다. 즉,  $y/H = 0.2$ 와  $0.7$  근처에서 격자크기를 크게 하고 고체 표면 근처에서는 격자크기를 작게 하며, 격자크기가 매끄럽게 변하도록 Stretching 변환시 Stretching변수  $\beta = 1.15$ 를 사용하였다<sup>15)</sup>. 계산결과와 격자크기에 대한 의존성을 확인하기 위해  $132 \times 16$ ,  $264 \times 32$ ,  $528 \times 56$ 의 3가지 격자로 민감도 분석을 수행하였다. 체적평균 카드온도, 카드로 전달된 복사열전달률 및 시간평균 대류열전달률 등 전체적인 계산결과는 격자크기에 별 영향을 받지 않았으나, 순간적인 대류열전달률은 격자크기에 따라 약간의 차이를 보였다. 계산결과와의 보다 나은 정확성을 위해  $528 \times 56$ 의 격자로 계산을 수행하였으며, 더 이상의 조밀한 격자를 사용하는 것은 과도한 계산시간 때문에 수행하지 않았다.

### 3. 결과 및 고찰

오븐의 형상 및 치수, 카드조립품의 이동 속도, 상하부 복사가열판 온도분포등은 Fig. 2에 나타나 있다. 복사가열판의 방사율은  $0.95$ 이고 배기구에서의 평균속도는  $200 \text{ mm/s}$ 이다. 길이  $120 \text{ mm}$ 의 카드가  $300 \text{ K}$ 의 온도에서  $6 \text{ mm/s}$ 의 속도로 오븐으로 들어오며, 오븐 내부에는 항상 10개의 (계산 영역에는 11개의) 카드가 있다. 평면 카드의 치수와 물성치는 실제 카드조립품과 동등하게 하였다. 즉, 평면 카드의 질량, 열질량, 면적평균 방사율, 방향 열전도율을 실제 FR4 카드조립품과 같게 놓음으로서 평면 카드의 유효 물성치는  $\rho = 3700 \text{ kg/m}^3$ ,  $C_p = 634 \text{ J/kgK}$ ,  $k_x = 38.2 \text{ W/mK}$ ,  $k_y = 0.29 \text{ W/mK}$ ,  $\epsilon = 0.9$ 이다<sup>5)</sup>.

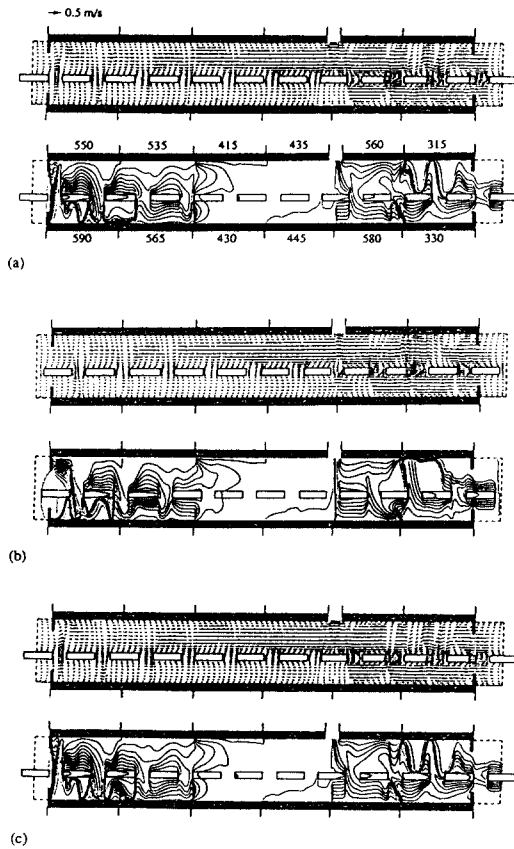
3개의 전자부품 (모듈)으로 이루어진 기본 경우의 카드조립품 형상 및 치수가 Fig. 3에 나타나 있다. Eutectic Solder의 물성치는  $\rho = 7300 \text{ kg/m}^3$ ,  $C_p = 114 \text{ J/kgK}$ ,  $k = 25 \text{ W/mK}$ ,  $\epsilon = 0.82$ 이며 용융온도는  $453 \text{ K}$ 이고 잠열은  $31.4 \text{ kJ/kg}$ 이다<sup>5)</sup>. 인쇄회로기판에 부착하여야 할 전자부품의 수가 2개, 3개 (기본 경우), 4개가 있는 3가지 다른 형상의

카드를 고려하였다. 3가지 카드 모두 동일한 열질량 및 면적평균 방사율을 부여함으로써 카드모델의 경계조건을 생성하기 위해 오븐모델은 한번만 계산해도 되도록 하였다. 모듈의 수가 2개인 경우  $24 \text{ mm}$  길이의 실리콘 칩을 내장하고 있는 길이  $30 \text{ mm}$ , 높이  $5 \text{ mm}$ 의 모듈이 폭  $3 \text{ mm}$ 의 리드에 의해 지지되며  $20 \text{ mm}$  간격으로 인쇄회로기판에 놓여 있다. 모듈의 수가 4개인 경우 모듈과 실리콘 칩의 길이는 각각  $15 \text{ mm}$ ,  $13 \text{ mm}$ 이며 모듈사이의 간격은  $10 \text{ mm}$ , 리드의 폭은  $1 \text{ mm}$ 이다.

#### 3.1 오븐모델 결과

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.

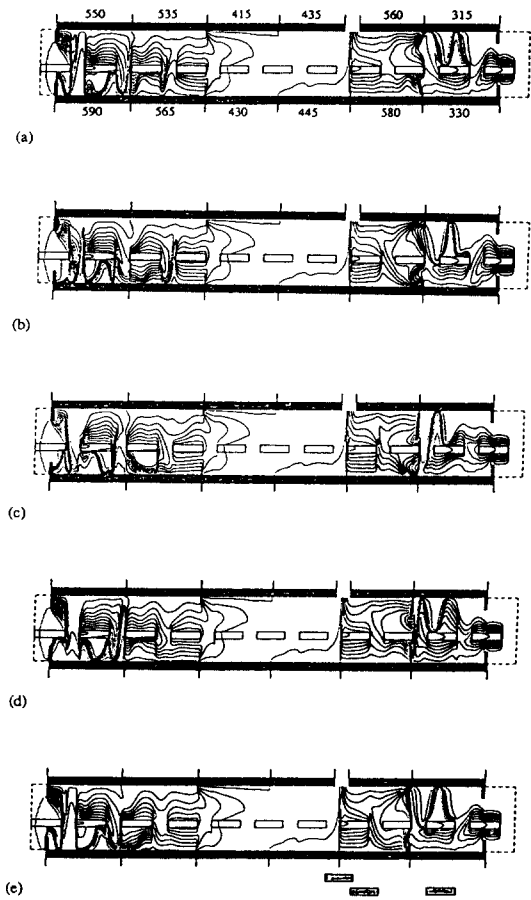
Fig. 4는 오븐모델로부터 계산된 오븐내 속도 및 온도분포를  $15\text{초}$  간격으로  $30\text{초}$  동안 보여주는데 이 시간은 카드가  $6 \text{ mm/s}$ 의 속도로 1개의 카드와 카드사이의 간격 길이의 합인  $180 \text{ mm}$ 를 이동하는 시간이다. 그림에서 구별을 명확하게 하기 위해 수직방향으로는 오븐 높이를 10배 확대하였으며, 속도장에서는 참조 속도벡터를 표기하였고 온도장은  $300 \text{ K}$ 에서  $590 \text{ K}$ 를 16개의 등간격 등온선으로 표시하였다. 5번째 벽면까지는 벽면으로부터 카드로 열이 전달되므로, 벽면쪽이 고온의 등온선이고 중심의 카드쪽이 저온의 등온선이며, 6번째 벽면에서는 카드가 벽면으로 열을 상실하므로 반대이다. 상대시간  $30\text{초}$ 에서의 계산된 속도 및 온도분포는  $0\text{초}$ 에서의 분포와 거의 동일한 주기적인 분포를 보인다. 공기의 속도는 배기구 쪽으로 갈수록 온도의 증가로 인한 밀도의 감소로 가속된다. 카드와 오븐 표면사이에 포물선적인 속도분포가 발달되며, 카드사이의 간격에 의한 유동저항 때문에 카드 상부의 속도가 하부의 속도보다 더 크다. 온도분포는 부력의 역할을 선명하게 나타내주는데 특히 오븐의 입구 및 출구에서 현저하게 나타난다. 오븐 입구에서는 상대적으로 찬 공기가 유입



**Fig. 4** Predictions of the oven model showing the velocity and 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.

되며 오븐 하부의 복사가열판에서 가열되어 수직 방향으로 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.

Fig. 5는 오븐내 온도분포를 0.2초 간격으로 0.8초 동안 보여주며 높은 진동수의 대류거동을 나



**Fig. 5** Predictions of the oven model showing the temperature distributions within the reflow oven at relative times of (a) 0, (b) 0.2, (c) 0.4, (d) 0.6, and (e) 0.8 s. 16 equally-spaced isotherms spanning 300 to 590 K are shown.

타낸다. 온도장은 300 K에서 590 K를 16개의 등간격 등온선으로 표시하였으며, 짧은 시간동안 온도장은 많은 변화를 하며 특히 오븐 입구 및 출구 근처에서 급격히 요동하는 거동을 보임을 알 수 있다. 높은 진동수의 거동은 카드로의 대류열전달에 중요한 역할을 한다. 짧은 시간 간격동안 온도장이 급격히 변화하는데도 불구하고 Fig. 5(a)의 온도장은 Fig. 5(e)의 온도장과 유사하므로 약 0.8초의 작은 시간 스케일에도 주기성이 존재함을 알 수 있다.

### 3. 2 카드모델 결과

인쇄회로기판 위에 3개의 모듈이 있는 기본 경우에 대해 카드모델로부터 계산된 속도 및 온도분포가 Fig. 6에 나타나 있다. 그림은 스케일대로 그려졌으며 속도장에서는 참조 속도벡터를 표기하였다. 온도장은 15 K 간격으로 10개의 등온선으로 표시하였으며, Fig. 6(a)와 6(b)에서는 카드가 상하 벽면보다 상대적으로 낮은 온도에 있으며 Fig. 6(c)에서는 상대적으로 높은 온도에 있다. Fig. 6의 (a), (b), (c) 각각의 시간에서 카드의 오븐내 위치는 Fig. 5(e)에 나타나 있으며 이는 i) 카드 중심이 배기구 중심선 바로 아래에 있을 때 (190.0초), ii) 첫 번째 Solder접합부가 용융을 완료했을 때 (209.5초), iii) 첫 번째 Solder접합부가 용고를 완료했을 때 (262.7초)의 시간을 나타낸다. 카드모델의 속도 및 온도분포는 오븐모델의 결과와 유사하지만 모듈 높이에 의한 장애때문에 카드조립품 상부의 속도는 평면 카드로 가정된 오븐모델의 결과보다 더 크게 나타난다. 또한 모듈 사이의 약한 재순환 유동을 확인할 수 있다. 190초일 때 (Fig. 6(a)) 카드 하부의 속도 및 모듈 사이의 재순환 유동은 아주 약하나, 209.5초일 때 (Fig. 6(b)) 모듈사이의 재순환 유동이 나타나며 카드 상하부의 온도는 균일하게 분포된다. 262.7초일 때 (Fig. 6(c)) 오븐의 출구로부터 유입되는 저온의 공기는 고온의 카드와 접촉하여 팽창함을 알 수 있다.

카드조립품의 가열 및 냉각 특성이 Fig. 7에서 보여진다. 그림은 카드조립품이 오븐 내부를 이동하는 동안 체적평균 카드온도와 카드로 전달된 복사 및 대류열전달률을 보여준다. 그림에서 x는 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. 카드조립품

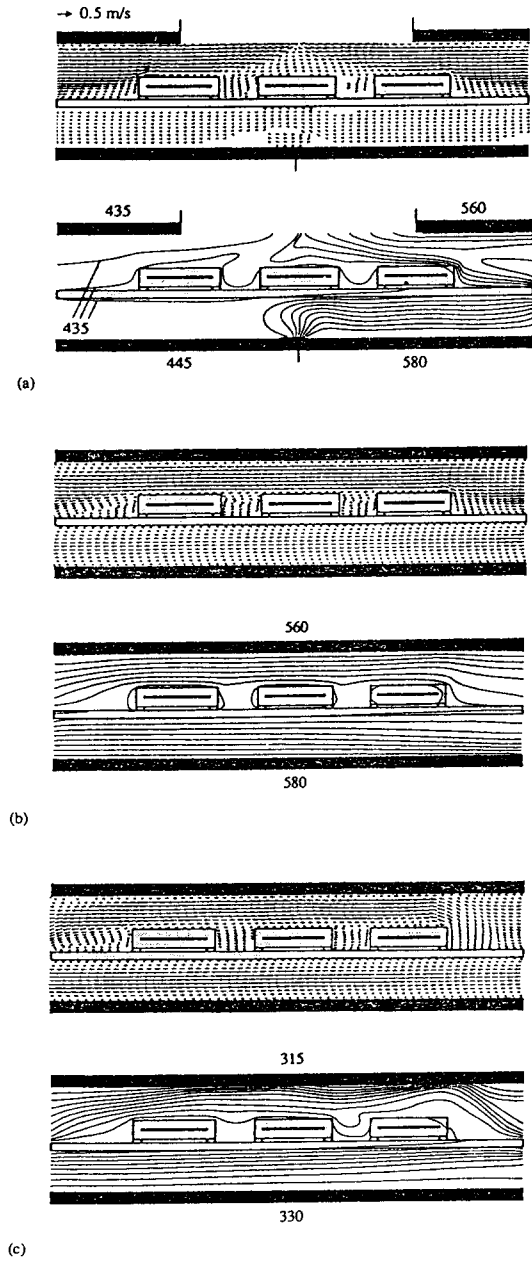


Fig. 6 Predictions of the card model showing the velocity and temperature distributions about one card assembly which is composed of 3 modules at times of (a) 190.0 s, (b) 209.5 s, and (c) 262.7 s. 10 equally-spaced isotherms are shown at 15 degree increments.



은 오븐 내부를 계속 통과하며 5번째 가열판을 통과할 때 온도가 다시 상승하며 Solder의 용융온도에 도달하여 Solder를 용융시키고, 마지막으로 오븐의 출구 근처에서 냉각되며 Solder접합부가 응고되어 전자부품을 인쇄회로기판에 부착하는 적외선 Reflow Soldering공정을 완료한다. 카드조립품의 열적반응은 복사에 의해 지배되며 카드가 오븐으로 들어올 때 최대 복사가열이 일어난다. 오븐의 입구와 출구 근처에서는 대류에 의한 가열 및 냉각도 상당히 일어난다.

Fig. 8은 3가지 다른 형상의 카드조립품에 대해

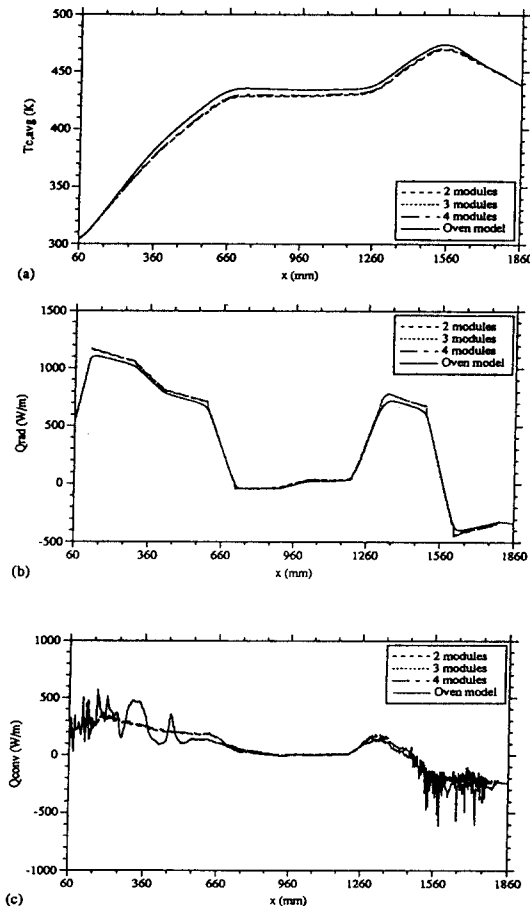


Fig. 7 Comparison of the oven and card model predictions for (a) the average card temperature, (b) radiative heat transfer rates, and (c) convective heat transfer rates

Reflow Soldering이 일어나는 부근에서 Solder접합부의 온도이력을 보여준다. 그림에서 Solder접합부는 Fig. 3에서 보여준 바와 같이 좌측에서 우측으로 번호가 부여되었으며 체적평균 카드온도도 함께 표기하였다. Solder의 용융 및 응고는 온도곡선에서 불연속선으로 표시되며, 카드의 선단(우측)에 있는 Solder가 후단(좌측)에 있는 Solder보다 오븐 내부에서 먼저 가열 및 냉각 공정을 거치므로 각 카드조립품상의 Solder는 우측에서 좌측의 순으로 용융 및 응고된다.

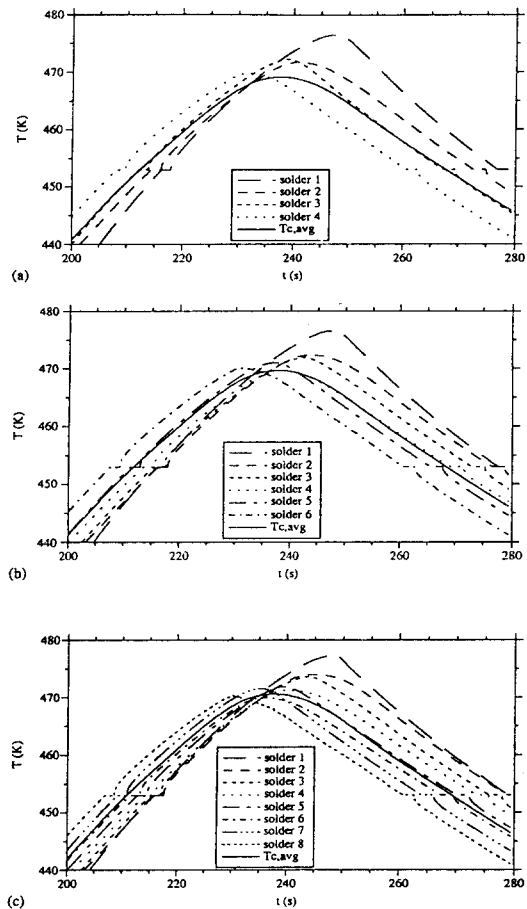


Fig. 8 Predictions of the card model showing the temperature histories of solder joints in the vicinity of the reflow for (a) 2-module case, (b) 3-module case, and (c) 4-module case

## 4. 결 론

전자부품을 인쇄회로기판에 부착하는 방법으로 최근에 가장 널리 이용되고 있는 표면장착기법에서 사용되는 적외선 Reflow Soldering과정동안 카드조립품의 상세한 열적반응을 예측하기 위해 수치해석적 연구가 수행되었다. 카드조립품은 오븐 내부를 통과하는 동안 상하부에 있는 적외선 복사 가열판의 불연속적인 온도분포에 노출되며 복사 및 대류열전달에 의해 가열 및 냉각을 하게된다. 기하학적 모델 내의 커다란 길이 스케일 차이 때문에 단일 모델로 전 과정을 모델링하기에는 부적당하므로 큰 스케일의 오븐모델과 작은 스케일의 카드모델이 사용되었다.

오븐모델 및 카드모델의 계산결과로부터 적외선 오븐의 배기구 근처에서는 균일한 온도분포를 가지며 입구 및 출구 근처에서는 온도변화가 심하고 약 0.8초의 주기로 급격히 요동하는 거동을 보임을 알 수 있었다. 또한 Reflow Soldering되는 과정동안 카드조립품의 상하부 온도는 균일하게 분포되어, 과도한 온도차로 인한 열응력으로 인하여 인쇄회로기판이 휘는 문제는 발생하지 않을 것임을 확인할 수 있었다. 카드조립품이 적외선 오븐을 통과하는 동안 카드조립품으로 전달된 복사열전달량이 대류열전달량보다 3 4배 크므로 카드조립품의 열적반응은 복사에 의해 지배되나, 복합대류도 오븐의 입구 및 출구 근처에서 부력에 의한 상대적으로 높은 진동수의 효과와 함께 중요한 역할을 하였다. 인쇄회로기판에 부착하여야 할 전자부품의 수가 2개, 3개, 4개가 있는 3가지 다른 형상의 카드조립품에 대해 카드모델로부터 각 Solder의 용융 및 응고를 포함한 상세한 열적반응을 예측하였다. 그 결과 복사, 복합대류, 전도열전달의 복합된 효과가 Reflow 조건하에서 카드의 선단 (우측)부터 Solder의 용융 및 응고를 일으켰다. 3가지 다른 형상의 카드조립품 모두 유사한 시간에 Solder가 용융 및 응고되었으며, 최후단의 Solder가 가장 높은 온도이력을 보였다.

본 연구에서는 전자부품을 인쇄회로기판에 부착할 때 적외선 Reflow Soldering과정중 열전달 현상을 해석함으로써, 그 연구결과는 각각의 다른 카드조립품에 대해 신뢰성 있는 Soldering을 수행하

고 카드조립품의 열응력을 최소화하기 위해 적외선 오븐을 보다 효율적으로 설계하거나 복사가열판 온도, 컨베이어 속도, 전자부품의 인쇄회로기판에 대한 배치, 배기구 송풍기의 속도 등 적절한 오븐 작동조건을 설정하는데 이용될 수 있다. 그러므로 본 연구의 결과는 적외선 Reflow 오븐의 적절한 작동조건을 제시하여 불량 Soldering 및 열응력으로 인한 카드조립품의 불량률을 최소화하는데 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

## = 기 호 설 명 =

A : 면적  
 $C_p$  : 정압비열  
 F : 형태계수 (view factor)  
 g : 중력가속도  
 H : 오븐 높이  
 k : 열전도율  
 p : 압력  
 q : 열전달률  
 r : 위치벡터  
 T : 온도  
 t : 시간  
 u, v : x방향, y방향 속도  
 x, y : 수평좌표, 수직좌표

## 그리스문자

$\beta$  : Stretching변수  
 $\epsilon$  : 방사율  
 $\mu$  : 점성계수  
 p : 밀도  
 $\sigma$  : Stefan-Boltzmann상수

## 하첨자

avg : 평균  
 c : 카드  
 conv : 대류  
 f : 유체  
 rad : 복사  
 ref : 참조  
 s : 고체  
 $\infty$  : 주위

## 참 고 문 헌

1. A. Rahn, *The Basics of Soldering*, John Wiley & Sons, Inc., (1993).
2. J. H. Lau, *Handbook of Fine Pitch Surface Mount Technology*, Van Nostrand Reinhold, (1994).
3. H. Miura, A. Nishimura, S. Kawai and W. Nakayama, "Temperature Distribution in IC Plastic Packages in the Reflow Soldering Process", *IEEE Trans. on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, Vol. 11, No. 4, (1988), pp. 499-505.
4. N. J. Fernandes, T. L. Bergman and G. Y. Masada, "Thermal Effects During Infrared Solder Reflow - Part I. Heat Transfer Mechanisms", *ASME J. Electronic Packaging*, Vol. 114, (1992), pp. 41-47.
5. 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 J. Electronic Packaging*, Vol. 114, (1992), pp. 48-54.
6. 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", *J. Electronics Manufacturing*, Vol. 2, (1992), pp. 23-29.
7. M. A. Eftychiou, T. L. Bergman and G. Y. Masada, "A Detailed Model of the Infrared Reflow Soldering Process", *ASME J. Electronic Packaging*, Vol. 115, (1993), pp. 55-62.
8. 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.
9. F. P. Incropera and D. P. DeWitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 3rd ed., John Wiley & Sons, New York, (1990).
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, HTD - Vol. 146*, edited by P. J. Bishop et al., (1990), pp. 25-35.
12. S. V. Patankar, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw-Hill, New York, (1980).
13. T. M. Shin and A. L. Ren, "Primitive-Variable Formulations using Nonstaggered Grids", *Numerical Heat Transfer*, Vol. 7, (1984), pp. 413-428.
14. 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.
15. D. A. Anderson, J. C. Tannehill and R. H. Pletcher, *Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer*, Hemisphere, Washington, DC, (1984), pp. 247-255.