



강제대류-적외선 리플로 솔더링시 전자조립품의 열적반응 분석

손영석* · 신지영*

*동의대학교 기계공학부

Analysis on the Thermal Response of Electronic Assemblies during Forced Convection-Infrared Reflow Soldering

Young-Seok Son* and Jee-Young Shin*

*School of Mechanical Engineering, Dong-Eui University, Busan 614-714, Korea

Abstract

The thermal response of electronic assemblies during forced convection-infrared reflow soldering is studied. Soldering for attaching electronic components to printed circuit boards is performed in a process oven that is equipped with porous panel heaters, through which air is injected in order to dampen temperature fluctuations in the oven which can be established by thermal buoyancy forces. Forced convection-infrared reflow soldering process with air injection is simulated using a 2-dimensional numerical model. The multimode heat transfer within the reflow oven as well as within the electronic assembly is simulated. Parametric study is also performed to study the effects of various conditions such as conveyor speed, blowing velocity, and electronic assembly emissivity on the thermal response of electronic assemblies. The results of this study can be used in the process oven design and selecting the oven operating conditions to ensure proper solder melting and solidification.

* Corresponding author : ysson@dongeui.ac.kr

(Received July 18, 2003)

Key Words : Thermal response, Electronic assembly, Forced convection-infrared reflow soldering, Air injection, 2-D numerical model, Multimode heat transfer, Parametric study

1. 서 론

최근 전자기기의 급속한 발전으로 전자부품의 소형화 및 고밀도화가 계속 진행되고 있으며, 이에 따라 한정된 인쇄회로기판 표면에 많은 부품을 장착할 수 있도록 신뢰성 있는 고밀도 실장기술이 요구되고 있다. 이러한 요구조건을 만족하기 위해 근래에는 표면 위쪽에서 솔더링(soldering)하는 표면실장기법(surface mount technology: SMT)이 널리 사용되고 있다^{1,2)}. 적외선 리플로(reflow) 솔더링은 표면실장기법에서 일반적으로 사용되고 있는 방법이지만, 최근에는 강제대류-적외선 리플로 솔더링이 전자조립품의 가열 및 냉각을 조절하기가 더 용이하다고 알려지고 있다³⁾.

Fig. 1은 적외선 리플로 솔더링과 강제대류-적외선

리플로 솔더링에 사용되는 오븐을 보여준다. Fig. 1(a)에 보여진 전형적인 적외선 리플로 오븐에서는 솔더링하고자 하는 카드조립품(card assembly)들은 양쪽 끝단에서 컨베이어에 의해 지지되며 상하부에 복사가열판이 장착된 적외선 오븐을 통과한다. 카드조립품이 적외선 오븐을 통과하는 동안 복사가열판으로부터 전달된 에너지는 솔더(solder)를 녹이고, 적외선 오븐 출구 근처의 냉각영역에서 솔더를 응고시켜 전자부품을 인쇄회로기판에 부착시킨다. 본 연구에서 중점적으로 해석하고자 하는 Fig. 1(b)의 수정된 형상의 강제대류-적외선 리플로 오븐에서는 적외선 오븐의 상하부 복사가열판이 다공가열판(porous panel heater)으로 대체되고, 이를 통하여 오븐 내부로 공기가 분사되거나 오븐으로부터 공기가 추출된다. 그러므로 전형적인 적외선 오븐에서와 달리 카드조립품은 복사 및 강제대류 열전

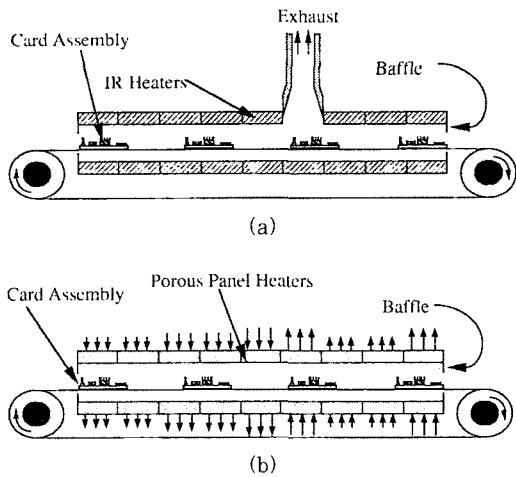


Fig. 1 Schematic of (a) a conventional infrared reflow oven and (b) a forced convection-infrared reflow oven

달을 동시에 겪으면서 가열 및 냉각되기 때문에, 적외선 오븐의 단점인 국부적인 과열을 방지할 수 있다. 특히 공기분사의 방향을 선택적으로 상향 및 하향으로 조절하여 오븐 내부의 자연대류에 의한 부력과 강제대류에 의한 관성력을 같은 방향으로 만들 수 있으며, 이는 오븐 내부 공기유동을 안정화시키고 솔더링 과정 동안 카드조립품의 온도변동을 최소화할 수 있다.

적외선 리플로 솔더링 과정 동안 오븐 작동조건과 열전달 조건에 따른 전자부품의 열적반응을 실험적으로 연구한 결과들⁴⁻⁶⁾이 있으나, 열적거동에 관련된 열전달 기구에 대한 규명이 거의 없었다. 전자부품의 패키징(packaging) 및 솔더링 기술이 급속히 발전하므로 다양한 공정조건에서 다양한 전자조립품의 열적반응을 예측할 수 있는 수치모델을 개발하는 것이 필요하였다. 이를 위하여 적외선 리플로 솔더링 과정에서 복사열전달 효과와 대류열전달 상관관계식을 이용하여 열적반응을 예측하는 단순모델이 개발^{7,8)}되었으나, 실험과 해석 결과를 잘 일치시키기 위해 대류열전달계수를 조절하였다는 단점이 있었다. 이에 따라, 단순모델의 부정확성을 개선하기 위하여 전도, 대류, 복사열전달 방정식의 해를 구하여 열전달 현상을 예측하는 상세모델이 개발^{9,10)}되었으며, 이를 이용한 상세한 분석¹¹⁾도 이루어졌다. 적외선 리플로 오븐의 출구 부근에 환을 부착하여 강제대류의 효과를 일부 반영한 수치해석¹²⁾이 수행되었으나, 강제대류-적외선 리플로 솔더링에 대한 상세한 해석 및 작동조건에 따른 전자조립품의 열적반응에 대한 해석은 아직 미미한 실정이다.

각각의 새로운 전자조립품 설계마다 신뢰성 있는 솔더링을 수행하고, 전자부품의 리드(lead)와 솔더의 불

량 정렬 및 전자조립품의 손상을 초래할 수 있는 열응력을 최소화 하기 위해서는 리플로 솔더링 과정 동안 오븐 내부의 온도조절이 매우 중요하다. 적합한 온도조절을 위해서는 카드조립품이 리플로 오븐을 통과하는 동안 일어나는 전도, 대류, 복사 3가지의 복합된 열전달과 오븐 작동조건에 따른 카드조립품의 열적반응에 대한 정확한 규명이 필요하다. 특히 강제대류 효과에 의한 오븐 내부 공기유동의 안정화 및 카드조립품의 온도변동 최소화를 확인하고 이에 따른 열적반응을 예측하여야 한다. 그러므로 본 연구에서는 카드조립품들이 공기분사식 오븐에서 강제대류-적외선 리플로 솔더링되는 과정 동안 열전달 현상과 전자조립품의 열적반응을 2차원 모델을 이용하여 수치해석적인 방법으로 예측하고자 한다. 이러한 강제대류-적외선 리플로 솔더링의 결과를 기존의 적외선 리플로 솔더링의 결과와 비교하여 장점을 규명하고, 오븐 작동조건 및 카드조립품의 조건변화가 카드조립품의 열적반응에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 수치해석

2.1 수치해석 모델

본 연구에서는 일렬로 배치된 단순한 형상의 전자부품만을 고려하여 강제대류-적외선 오븐 내 유동을 2차원 모델로 가정하였다. 공기분사를 동반하는 강제대류-적외선 오븐 및 오븐 내부에서 이동하는 카드조립품의 기하학적 모델링에 있어서 먼저 고려해야 할 사항은 그와 관련된 길이 스케일이다. 전형적인 리플로 오븐의 길이는 수 m에 달하나, 전자부품의 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 전 과정을 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 도입하였다. 오븐모델 및 카드모델에 대한 상세한 설명은 적외선 리플로 솔더링 해석모델¹¹⁾에 기술되어 있다. 따라서, 본 논문에서는 개략적인 사항과 강제대류-적외선 리플로 솔더링 해석모델에서 공기분사에 의한 강제대류의 효과를 예측하기 위해 수정된 부분을 중점적으로 기술하고자 한다.

Fig. 2는 공기분사식 강제대류-적외선 리플로 솔더링

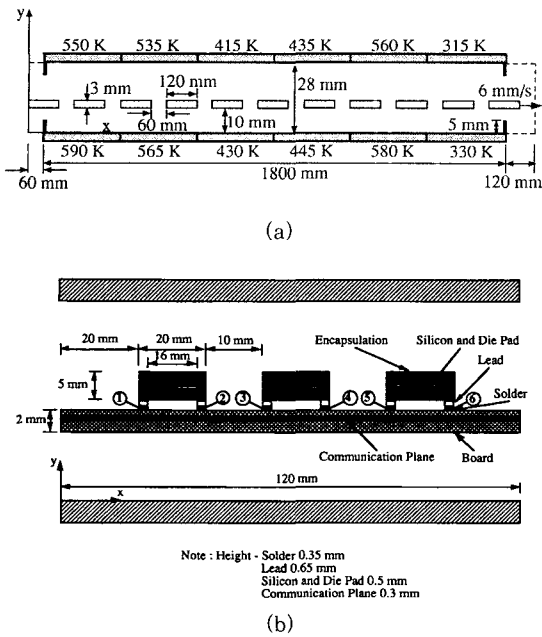


Fig. 2 Coordinate system and geometry used in (a) the oven model and (b) the card model for the forced convection-infrared reflow oven

에 사용될 오븐모델과 카드모델을 보여준다. 오븐모델에서는 카드조립품의 상세한 기하학적 형상을 고려하지 않고, 카드조립품을 실제 부품이 장착된 카드와 동등한 치수와 물성치를 갖는 평면카드로 가정한다. 이와 같은 방법으로 유효 물성치를 정의함으로써 오븐모델과 카드모델의 일관성 있는 계산결과를 얻을 수 있다.

오븐모델에서는 길이가 긴 스케일에서 일어나는 열전달 현상을 모의하고, 각각의 카드조립품에 대해 오븐내의 위치에 따른 속도 및 온도 경계조건을 계산한다. 즉 오븐모델에서는 계산영역인 전체 오븐 내부의 속도 및 온도분포, 카드조립품에 전달되는 대류 및 복사 열전달을, 평면카드의 오븐내 위치에 따른 온도이력을 계산한다. 카드모델에서는 오븐모델에서 제공하는 경계조건을 이용하여 카드조립품 주위 오븐 내부의 상세한 속도 및 온도분포, 카드조립품에 전달되는 대류 및 복사 열전달을, 카드조립품의 온도분포, 각 부품의 오븐내에서의 온도이력, 그리고 각 부품의 리드와 인쇄회로기판을 연결하는 솔더의 오븐내에서의 위치에 따른 온도이력 등을 계산한다.

2.2 지배방정식 및 경계조건

공기분사식 강제대류-적외선 리플로 오븐을 통과하는 동안 전자조립품은 전도, 대류, 복사 3가지의 복합된 열전달에 의해 지배되며, 솔더가 용융되었다가 다시 응

고되는 상변화도 일어난다. 오븐내 공기의 속도 및 온도분포, 그리고 카드조립품의 열적반응을 구하기 위하여 질량, 운동량, 그리고 에너지보존법칙을 적용한다. 즉 2차원, 과도상태, 압축성, 가변물성치의 Navier-Stokes 방정식과 에너지방정식, 2차원 과도 열전도방정식¹³⁾, 그리고 2차원 확산회(diffuse gray) 복사 열전달방정식¹⁴⁾을 Fig. 2에 보인 오븐 및 카드모델에 적용하며, 이들 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,

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

y방향 운동량보존방정식,

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

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 열전도방정식,

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

확산회 복사열전달방정식,

$$\frac{q_k(r_k)}{\epsilon_k} - \sum_{j=1}^N \frac{1 - \epsilon_j}{\epsilon_j} \int_{A_j} q_j(r_j) dF_{dk-dj}(r_j, r_k) = \sigma T_k^4(r_k) - \sum_{j=1}^N \int_{A_j} \sigma T_j^4(r_j) dF_{dk-dj}(r_j, r_k)$$

for $k = 1, 2, \dots, N$ (6)

공기분사식 강제대류-적외선 리플로 오븐의 상하부는 표면 방사율이 0.95이고 길이가 300 mm인 6개의 다공가열판으로 구성되어 있다. 오븐의 전체적인 형상 및 치수, 상하부 다공가열판의 온도분포 등은 Fig. 2(a)에 나타나 있으며, 이들 값은 실제 산업체에서 이용되고 있는 리플로 오븐의 설정치를 기준으로 하였다. 오븐모델에 대한 경계조건으로는 길이 120 mm, 온도 300 K의 카드조립품이 6 mm/s의 속도로 오븐으로 들어오며, 오븐 입구 및 출구의 확장면에서의 온도는 300 K이며 불침투(impermeable) 조건을 주었다.

각 다공가열판을 통하여 오븐으로 유입 및 유출되는 공기분사 속도는 Table 1에 나타내었으며, 분사되는 공기의 온도는 Fig. 2(a)에 나타낸 상하부 다공가열판의 온도와 동일하다. 본 연구에서는 상향 공기분사, 하향 공기분사, 혼합 공기분사 (오븐의 입구측 절반은 하향 공기분사, 출구측 절반은 상향 공기분사)의 3가지 경우를 고려하였다.

2.3 수치해석 방법

오븐모델 및 카드모델에 적용되는 지배방정식 중 연속방정식, Navier-Stokes 방정식, 그리고 에너지방정식은 유한체적법(finite volume method)¹⁵⁾을 이용하여 수치해석적 방법으로 그 해를 구한다. 연속방정식은

Table 1 Velocities of blowing air at porous panel heaters (mm/s)

Heater ID		Blowing up	Blowing down	Mixed blowing
1	Top	55.1	-55.1	-58.0
	Bottom	56.5	-56.5	-56.5
2	Top	56.1	-56.1	-59.1
	Bottom	58.2	-58.2	-58.2
3	Top	67.2	-67.2	-70.8
	Bottom	70.4	-70.4	-70.4
4	Top	64.9	-64.9	68.4
	Bottom	68.7	-68.7	68.7
5	Top	54.4	-54.4	57.3
	Bottom	57.2	-57.2	57.2
6	Top	82.8	-82.8	87.2
	Bottom	85.9	-85.9	85.9

SIMPLEC 알고리즘¹⁶⁾에 따라 압력 및 압력수정방정식을 생성하는데 사용된다. 차분방정식은 TDMA 알고리즘과 함께 ADI 방법을 사용하여 해를 구한다. 2차원 확산회 복사 열전달방정식은 Navier-Stokes 방정식과 에너지방정식의 차분화에 사용된 격자와 동일한 격자의 작은 요소로 나눈 각 표면에 적용하며, 그로부터 생성되는 연립방정식을 successive over-relaxation 기법을 이용하여 수치해석적으로 푼다¹⁴⁾.

2차원 수치해석 모델 및 수치해석 방법을 검증하기 위해, Fig. 1(a)와 같은 오븐 형상에서 불연속적인 재료가 있을 때 재료의 열반응을 측정하는 실험을 수행하여 실험결과와 계산결과를 비교하였다. 온도경계조건 및 공기속도를 변화시켜가며 실험을 수행하여 국소공기 온도 및 카드조립품의 온도를 측정하였다. 실험을 통하여 측정된 평면카드의 온도와 본 연구의 수치모델이 예측한 평면카드의 온도를 비교한 결과, 측정된 평면카드의 온도로 정규화(normalize)된 측정온도와 계산된 온도는 최대오차 7% 이내로 잘 일치하였다¹⁷⁾.

계산결과격자크기에 대한 의존성을 확인하기 위해 132×16, 264×32, 528×56의 3가지 격자로 민감도 분석을 수행하였다. 오븐모델의 경우 격자수가 264×32개에서 약 2배가 되어도 체적평균 카드온도, 카드로 전달된 복사열전달 및 시간평균 대류열전달 등의 계산결과격자크기에 별 영향을 받지 않았으나, 순간적인 대류열전달은 격자크기에 따라 약간의 차이를 보였다. 계산결과격자의 보다 나은 정확성을 위해 528×56의 격자로 계산을 수행하였으며, 더 이상의 조밀한 격자를 사용하는 것은 과도한 계산시간 때문에 수행하지 않았다. 이상의 격자수 및 시간증분에 대한 민감도 분석을 수행하여 오븐모델의 경우 528×56(x×y), 카드모델의 경우 120×33의 격자를 사용하고, 시간증분은 0.05초로 계산을 수행하였다. x방향으로는 균일한 격자를 사용하였고, y방향으로는 공간적인 해상도를 높이기 위해 고체 표면 근처에서 격자 크기가 작아져서 매끄럽게 변하는 격자를 사용하였다. 수렴조건으로는 압력 및 압력수정방정식에 10⁻⁶을 사용하였다. 계산은 Pentium IV 급 PC에서 수행하였으며 오븐모델의 경우 약 12시간, 카드모델의 경우 약 2시간의 계산시간이 소요되었다.

3. 결과 및 고찰

전자조립품이 공기분사식 오븐에서 강제대류-적외선 리플로 솔더링되는 과정동안 먼저 기준 작동조건에 대해 열적반응을 해석하였고, 그 결과를 기존의 전형적인

적외선 리플로 솔더링의 결과¹⁰⁾와 비교하여 공기분사의 방향에 따른 열적특성을 규명하였다. 다음으로 컨베이어 속도, 오븐의 다공가열판을 통한 공기분사 속도, 그리고 카드조립품의 방사율을 변화시켜 오븐 및 카드조립품의 조건변화가 카드조립품의 열적반응에 미치는 영향을 분석하였다. 앞서 언급한 바와 같이 본 연구에서는 강제대류-적외선 리플로 솔더링 과정을 모의계산하기 위해 오븐모델과 카드모델이라는 두 모델을 사용하였으며, 각 모델에 사용되는 평면카드와 솔더의 유효물성치⁸⁾를 Table 2에 나타내었다.

3.1 기준 작동조건에 대한 결과

오븐모델로부터 계산된 기준 작동조건에 대한 각 경우의 오븐내 온도분포를 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 나타난 각 경우는 Fig. 1(a)와 같은 상부 배기구가 있는 전형적인 적외선 리플로 오븐(Fig. 3(a)), 그리고 본 연구에서 고려한 Fig. 1(b)와 같은 공기분사식 강제대류-적외선 리플로 오븐의 전체영역에서 상향 공기분사(Fig. 3(b)), 전체영역에서 하향 공기분사(Fig. 3(c)), 오븐의 입구측 절반은 하향 공기분사, 출구측 절반은 상향 공기분사인 혼합 공기분사(Fig. 3(d))에 대한 결과를 보여준다. 그림에서 구별을 명확하게 하기 위해 수직방향의 오븐 높이를 10배 확대하였다.

먼저 Fig. 3(a)의 전형적인 적외선 리플로 오븐에서의 결과를 보면, 온도분포는 부력의 역할을 선명하게 나타내주는데 특히 오븐의 입구 및 출구에서 현저하게 나타난다. 오븐 입구에서 상대적으로 찬 공기가 유입되면 오븐 하부에 있는 고온의 복사가열판에 의하여 가열되어 수직방향으로 부력을 야기하므로, 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. 오븐 입구에서 부

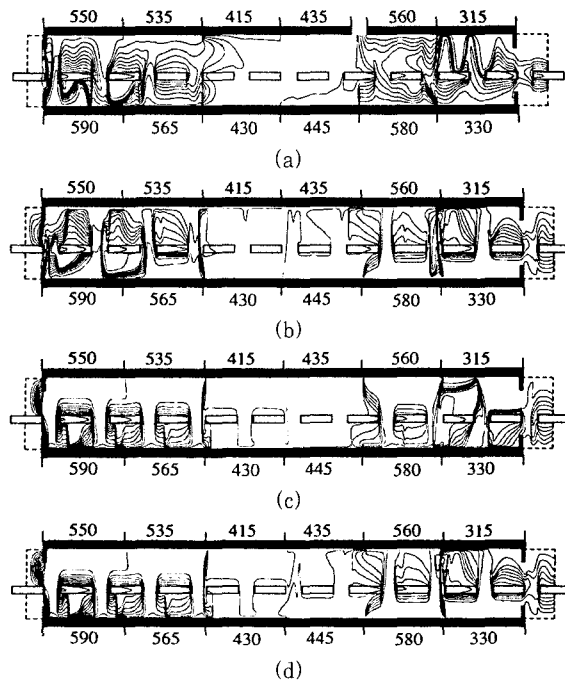


Fig. 3 Predicted temperature distributions within the oven for (a) conventional processing, (b) blowing up, (c) blowing down, and (d) mixed blowing (16 equally-spaced isotherms spanning 300 to 590 K)

력에 의해 따뜻한 공기 꾸러미가 상승하면 그 자리에는 찬 공기 꾸러미가 하강하여 채워지며, 이러한 현상이 짧게 주기적으로 반복하여 계속 일어난다. 이러한 높은 주파수의 변동을 초래하는 부력은 높은 주파수의 온도 변동을 야기하며 이는 오븐 내부로 전파되어 간다. 이러한 오븐내 공기 유동장의 급격한 변동은 특히 오븐 입구 및 출구 근처에서 카드로의 대류열전달율 및 카드 표면온도의 급격한 변화를 가져오며, 이러한 카드조립품 열적반응의 급격한 변동은 솔더링 과정 등에서 제품의 열제어를 어렵게 한다.

공기분사식 강제대류-적외선 리플로 오븐에서의 결과를 보면, 오븐의 입구측 절반의 온도분포는 Fig. 3(c)와 3(d)가 거의 동일하고, 출구측 절반의 온도분포는 Fig. 3(b)와 3(d)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 공기유동을 고려하여, Fig. 3(d)와 같은 혼합 공기분사에서는 부력과 같은 방향으로 공기를 분사한다. 즉, 오븐의 입구측 절반은 하향 공기분사, 출구측 절반은 상향 공기분사를 함으로서 분사에

Table 2 Thermal properties of a plane card and solder

Item	Plane card	Solder
Density (kg/m ³)	3700	7300
Specific heat (J/kg · K)	634	114
Thermal conductivity (W/m · K)	$k_x=38.2, k_y=0.29$	25
Emissivity	0.9	0.82
Melting temp. (K)	-	453
Latent heat (kJ/kg)	-	31.4

의한 관성력과 카드 주위 부력의 방향을 같이하여 유동을 안정화시키는 효과를 가져온다.

Fig. 4는 카드조립품이 오븐 내부를 통과하는 동안 카드로 전달된 대류 및 복사열전달율을 보여주며, 그림에서 x 는 오븐내에서 카드중심의 위치를 나타낸다. Fig. 4(a)에서 보듯이 전형적인 적외선 리플로 오븐의 경우 복합대류의 효과가 오븐의 입구 및 출구 근처에서 현저하게 나타나, 부력에 의한 온도장의 변동으로 인해 대류열전달율이 변동하고 있음을 알 수 있다. 이러한 변동은 강제대류-적외선 리플로 오븐에서는 다공가열판으로부터 공기분사의 방향에 따라 증폭되거나 감소된다. Fig. 4(b)의 상향 공기분사의 경우 오븐 입구측에서는 카드로부터 하향하는 저온의 공기와 반대방향으로 공기가 분사되므로, 공기유동의 변동이 증폭되어 대류열전달율의 변동도 증폭된다. 그러나 오븐 출구측에서는 카드로부터 상향하는 고온의 공기와 같은 방향으로 공기가 분사되므로, 공기유동 및 대류열전달율의 변동이 감소된다. Fig. 4(c)의 하향 공기분사의 경우 상향 공기분사와 반대로, 오븐 입구측에서는 변동이 감소되고 출구측에서는 변동이 증폭된다. 이러한 결과로부터 Fig. 4(d)와 같이 오븐의 입구측 절반은 하향 공기분사, 출구측 절반은 상향 공기분사인 혼합 공기분사를 이용하면, 공기유동 및 대류열전달율의 변동을 감소시켜 카드조립품의 열제어를 용이하게 할 수 있음을 알 수 있다.

3.2 작동조건 변화에 대한 결과

이상의 기준 작동조건에 대한 해석결과에서 보았듯이 혼합 공기분사를 이용하는 강제대류-적외선 리플로 솔더링이 오븐 내부 공기유동 및 온도장의 안정화, 그리고 카드조립품의 열제어 관점에서 볼 때 보다 효과적인 솔더링 방법을 알 수 있다. 이와 같은 혼합 공기분사를 이용하는 강제대류-적외선 리플로 솔더링 과정 동안 컨베이어 속도, 오븐의 다공가열판을 통한 공기분사 속도, 그리고 카드조립품의 방사율의 변화가 전자조립품의 열적반응에 미치는 영향을 분석하였으며, 기준 작동조건 및 변화된 작동조건을 Table 3에 나타내었다.

Fig. 5는 컨베이어 속도변화에 대한 카드조립품의 열적특성 변화를 보여준다. 먼저 Fig. 5(a)와 5(b)의 대류열전달율 및 복사열전달율을 살펴보면 카드조립품의 열적반응은 대류보다는 복사가 지배적이며, 카드조립품으로 전달되는 대류 및 복사열전달율은 컨베이어 속도가 증가할수록 증가함을 알 수 있다. 컨베이어 속도를 3 mm/s로 감소시킨 경우, 카드조립품으로 열이 전달되는 시간이 증가하여 카드조립품으로 많은 열이 전달

되어 카드조립품의 온도가 빨리 상승한다. 그러므로 하향 공기분사를 하고 있는 3번째 다공가열판을 통과하기도 전에 카드조립품으로부터 자연대류에 의한 유동이

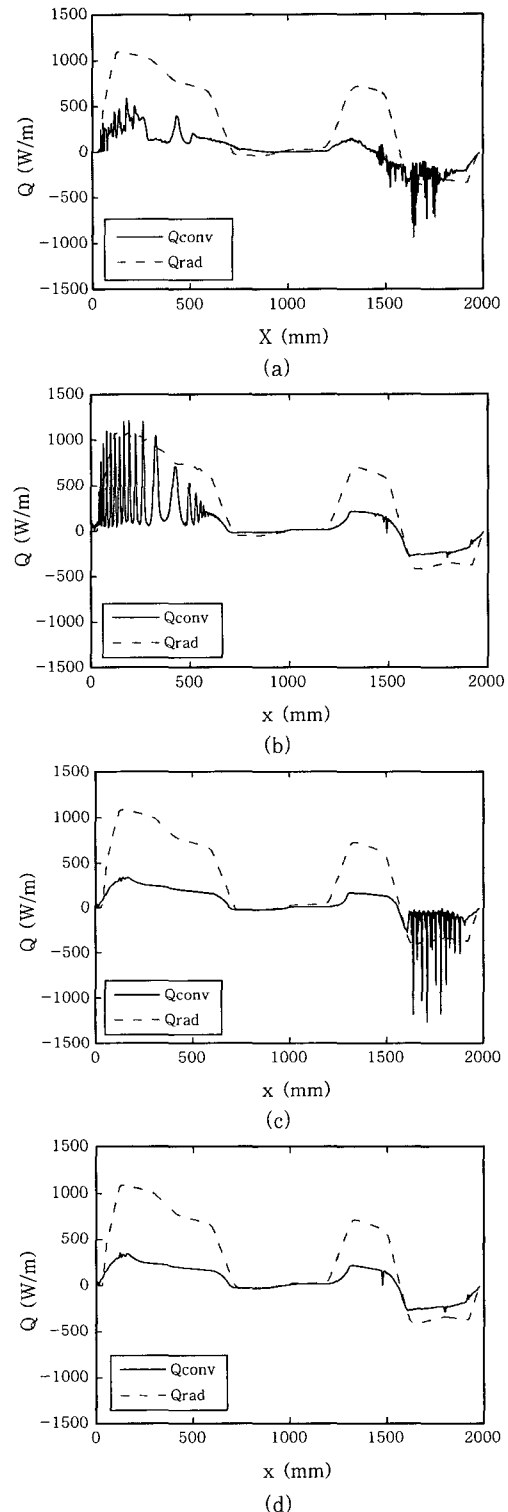


Fig. 4 Predicted convective and radiative heat transfer rates to the card assembly for (a) conventional processing, (b) blowing up, (c) blowing down, and (d) mixed blowing

Table 3 Base and varied operating conditions

Operating condition	Base condition	Varied conditions
Conveyor speed (mm/s)	6	3, 12
Blowing velocity (mm/s)	56.5	28.25, 113
Card assembly emissivity	0.9	0.8, 1.0, 0.5

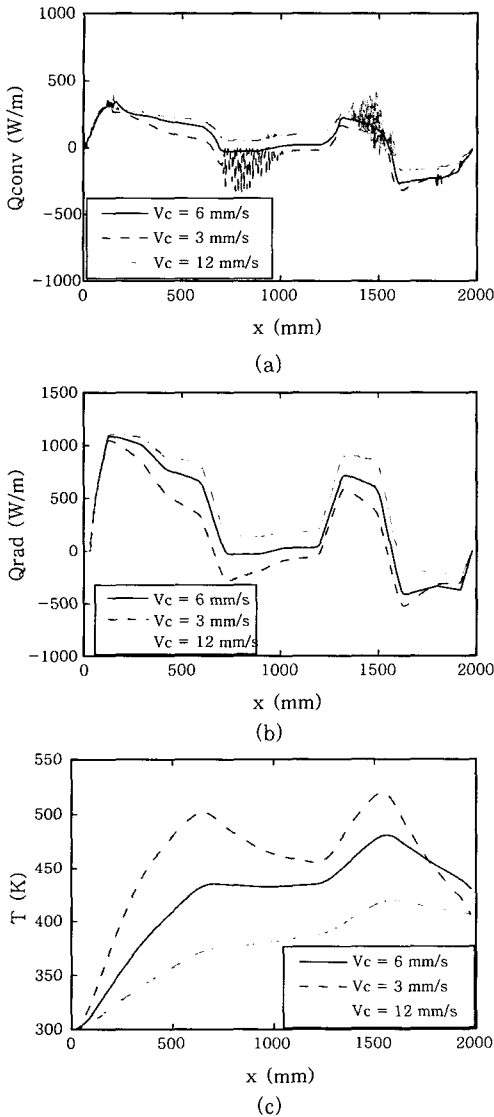


Fig. 5 Effect of the variations in conveyor speed on (a) the convective heat transfer rates, (b) radiative heat transfer rates, and (c) average card assembly temperatures

상승하게 되며, 이는 관성력의 방향과 반대되므로 대류 열전달율의 급격한 변동을 초래하게 된다. 반대로 컨베이어 속도를 12 mm/s로 증가시킨 경우, 카드조립품으로 열이 전달되는 시간이 감소하여 카드조립품의 온도는 늦게 상승한다. 이는 카드조립품으로부터 하강하는 유동을 초래하여 상향 공기분사를 하고 있는 오븐의 후반부 다공가열판의 관성력의 방향과 반대되므로, 오븐

의 후반부에서 대류열전달율의 급격한 변동을 초래하게 된다. 그러므로 혼합 공기분사를 이용하는 강제대류-적외선 리플로 솔더링시 컨베이어 속도에 따라 공기분사의 방향 및 속도를 적절히 잘 조절하여야 공기유동 및 대류열전달율의 변동을 감소시켜 카드조립품의 열제어를 용이하게 할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 5(c)에서 보듯이 기준작동 조건인 컨베이어 속도가 6 mm/s인 경우에는 리플로 영역인 5번째 다공가열판을 통과할 때 카드조립품의 온도가 솔더의 용융온도인 453 K에 도달하여 솔더를 용융시킨다. 그러나 컨베이어 속도가 3 mm/s로 느린 경우에는 카드조립품으로 열이 전달되는 시간이 증가하여 카드조립품으로 너무 많은 열이 전달되어, 예열영역인 2번째 다공가열판에서 이미 솔더의 용융온도에 도달하여 계속 솔더가 용융상태를 유지하게 됨을 알 수 있다. 이로 인해 불량 솔더링이 발생할 수 있으며 카드조립품의 온도가 불균일하게 되어 열응력으로 인한 불량정렬을 초래할 수 있다. 컨베이어 속도가 12 mm/s로 빠른 경우에는 카드조립품으로 열이 전달되는 시간의 부족으로 인하여 온도는 늦게 상승하게 되어, 카드조립품의 온도가 솔더의 용융온도에 도달하지 못하여 리플로 솔더링이 일어나지 않게 됨을 알 수 있다. 따라서, 강제대류-적외선 리플로 오븐 작동조건 설정시 컨베이어 속도는 신뢰성 있는 리플로 솔더링을 결정하는 아주 중요한 요소임을 알 수 있으며 카드조립품에 맞는 적당한 속도를 선택하여야 한다.

오븐 상하부에 있는 다공가열판을 통한 공기분사 속도변화에 대한 카드조립품의 열적특성을 Fig. 6에 나타내었다. 기준 작동조건에서 첫 번째 하부 다공가열판으로 유입되는 속도는 56.5 mm/s이고, 이를 28.25 mm/s 및 113 mm/s로 변화시켰다. 그림에서 보듯이 공기분사 속도를 증가시키면 대류열전달계수가 증가하여 카드로의 대류열전달율이 증가하나 그 증가폭은 그리 크지 않다. 공기분사 속도를 변화시켜도 카드로의 복사열전달율은 거의 변화하지 않는다. 카드조립품의 온도변화에서 보듯이 강제대류-적외선 오븐을 통과하는 카드조립품의 열적반응은 공기분사 속도가 증가하면 대류열전달율의 증가로 인해 약간 증가하지만, 복사열전달이 지배적이므로 대류열전달에 의한 변화는 그리 크지 않다.

솔더링하고자 하는 다양한 재질의 카드조립품에 대한 열적반응을 분석하기 위해, 카드조립품의 방사율 변화에 따른 열적특성 변화를 Fig. 7에서 보여준다. Fig. 7(a) 및 7(b)에서 보듯이 카드조립품의 방사율이 변하더라도 카드조립품으로 전달되는 대류열전달율은 별로

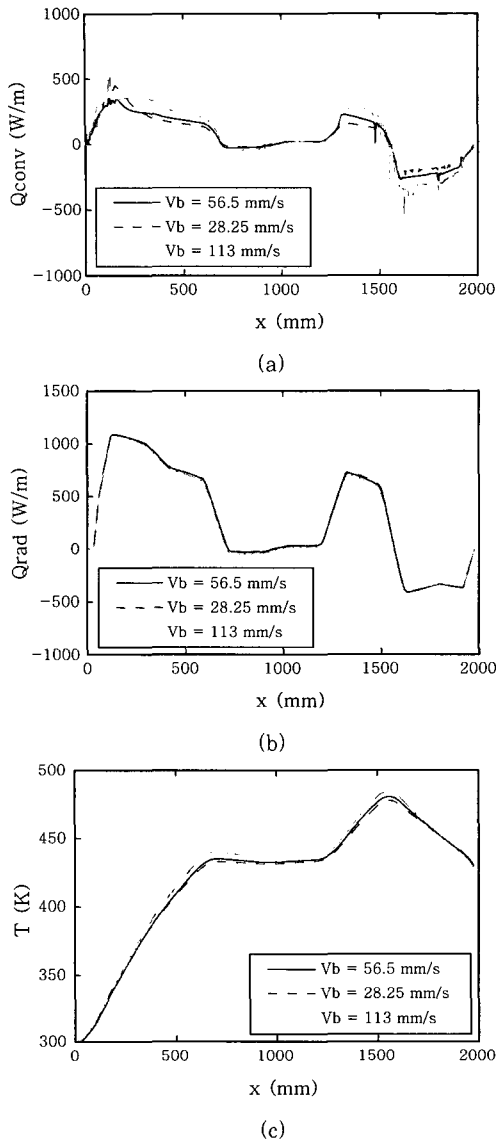


Fig. 6 Effect of the variations in blowing velocity on (a) the convective heat transfer rates, (b) radiative heat transfer rates, and (c) average card assembly temperatures

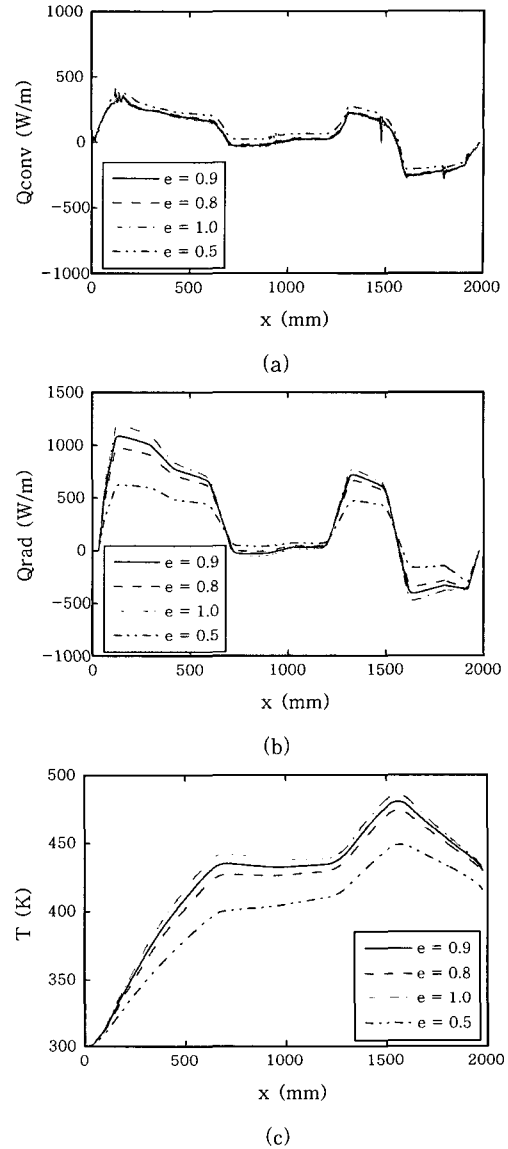


Fig. 7 Effect of the variations in card assembly emissivity on (a) the convective heat transfer rates, (b) radiative heat transfer rates, and (c) average card assembly temperatures

턴하지 않으나, 복사열전달율은 방사율에 따라 변화함을 알 수 있다. Fig. 7(c)의 카드조립품의 온도변화를 살펴보면, 방사율이 증가할수록 카드조립품으로 전달되는 복사열전달율이 증가하여 온도가 높아지고 방사율이 감소하면 그 반대가 됨을 알 수 있다. 본 연구에서 고려한 오븐의 기준 작동조건에서는 카드조립품의 방사율이 0.8 이상이면 신뢰성 있는 리플로 솔더링이 일어나지만, 방사율이 0.5로 낮은 경우에는 솔더의 온도가 용융온도인 453 K에 도달하지 못하여 리플로 솔더링이 일어나지 못하였다. 그러므로 솔더링하고자 하는 각 카드조립품의 방사율에 맞게 컨베이어 속도, 다공가열판

의 온도 및 공기분사 속도 등의 오븐작동조건을 잘 설정하여야 신뢰성 있는 강제대류-적외선 리플로 솔더링이 일어남을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 전형적인 적외선 리플로 오븐의 단점인 오븐 내부 공기유동의 불안정과 이로 인한 카드조립품의 온도변동을 최소화할 수 있는 공기분사식 강제대류-적외선 리플로 오븐을 고려하여 이에 따른 열적반응을 해석하였다. 기준 작동조건에 대한 해석결과로부터

다공가열판으로부터 공기분사의 방향을 오븐의 입구측 절반은 하향 공기분사, 출구측 절반은 상향 공기분사를 하는 혼합 공기분사 방식을 이용하는 강제대류-적외선 리플로 솔더링이 카드조립품의 열제어 관점에서 볼 때 보다 효과적인 솔더링 방법임을 알 수 있었다.

이와 같은 혼합 공기분사를 이용하는 강제대류-적외선 리플로 솔더링시 오븐 작동조건 및 카드조립품의 방사를 변화가 전자조립품의 열적반응에 미치는 영향을 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 컨베이어 속도에 따라 공기분사의 방향 및 속도를 적절히 잘 조절하여야 공기유동 및 대류열전달율의 변동을 감소시켜 카드조립품의 열제어를 용이하게 할 수 있음을 알 수 있었다.

2) 다공가열판을 통한 공기분사 속도는 카드조립품의 표면온도 변화나 카드의 열제어에 중요하지만, 오븐을 통과하는 카드조립품의 온도는 그 변화가 그리 크지 않았다.

3) 솔더링하고자 하는 각 카드조립품의 방사율에 맞게 컨베이어 속도, 다공가열판의 온도 및 공기분사 속도 등 오븐작동조건을 잘 설정하여야 신뢰성 있는 강제대류-적외선 리플로 솔더링이 일어남을 알 수 있었다.

본 연구의 결과는 강제대류-적외선 리플로 오븐의 적절한 설계, 그리고 여러 가지 형상과 방사율의 카드조립품에 대해 다공가열판의 온도 및 공기분사 속도, 컨베이어 속도 등 적절한 오븐 작동조건을 설정하는데 이용될 수 있다. 이는 신뢰성 있는 솔더링을 수행 가능하게 하여 카드조립품의 불량률을 최소화하고 제품의 생산율을 향상하는데 기여할 수 있다.

후 기

이 논문은 2002학년도 동의대학교 교내연구비(과제번호2002AA144)에 의해 조성되었음.

참 고 문 헌

1. C. Capillo : Surface Mount Technology, McGraw-Hill Publishing Co., 1990
2. F. Classon : Surface Mount Technology for Concurrent Engineering and Manufacturing, McGraw-Hill Publishing Co., 1993
3. J. H. Lau : Handbook of Fine Pitch Surface Mount Technology, Van Nostrand Reinhold, 1994
4. L. R. Lichtenberg and L. L. Brown : Component Thermal Management in Infrared Solder Reflow, International Journal of Hybrid Microelectronics, 10-2 (1987), 19-26
5. H. Miura, A. Nishimura, S. Kawai and W. Nakayama : Temperature Distribution in IC Plastic Packages in the Reflow Soldering Process, IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, 11-4 (1988), 499-505
6. N. J. Fernandes, T. L. Bergman and G. Y. Masada : Thermal Effects During Infrared Solder Reflow - Part I. Heat Transfer Mechanisms, ASME Journal of Electronic Packaging, 114 (1992), 41-47
7. 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, 2 (1992), 23-29
8. 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, 114 (1992), 48-54
9. 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, 115 (1993), 55-62
10. Y. S. Son : Heat Transfer Analysis of Infrared Reflow Soldering Process for Attaching Electronic Components to Printed Circuit Boards, Journal of KWS, 15-6 (1997), 591-601 (in Korean)
11. Y. S. Son and J. Y. Shin : Sensitivity Analysis on the Thermal Response of Electronic Components during Infrared Reflow Soldering, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, 14-1 (2002), 1-9 (in Korean)
12. M. R. Kim, Y. K. Choi, G. B. Lee, I. Y. Chung, J. D. Kim and J. H. Lee : Thermal Investigation of an Infrared Reflow Oven with a Convection Fan, KSME International Journal, 12-5 (1998), 972-979
13. F. P. Incropera and D. P. DeWitt : Fundamentals of Heat and Mass Transfer(4th Edition), John Wiley & Sons, 1996
14. R. Siegel and J. R. Howell : Thermal Radiation Heat Transfer(3rd Edition), Hemisphere Publishing Co., 1992
15. S. V. Patankar : Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw-Hill Publishing Co., 1980
16. J. P. Van Doormaal and G. D. Raithby : Enhancements of the SIMPLE Method for Predicting Incompressible Fluid Flows, Numerical Heat Transfer, 7 (1984), 147-163
17. 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, 38-14 (1995), 2519-2527