

## 반도체 공정용 수직로 설계를 위한 열유동 제어

정원중\* · 권현구\*\* · 조형희\*\*\*

### The Third National Congress on Fluids Engineering: Thermal design for the vertical type oven of soldering process.

Won-Jung Jeong\*, Hyun-Goo Kwon\*\* and Hyung-Hee Cho\*\*\*

**Keywords** : Reflow oven(리플로우 오븐), Temperature uniformity(온도 균일성), SMT(표면실장), Soldering process(용접 공정)

#### Abstract

Because of new requirements related to the employment of SMT(Surface Mounting Technology) manufacturing and the diversity of components on high density PCB(printed circuit boards), Thermal control of the reflow process is required in order to achieve acceptable yields and reliability of SMT assemblies. Accurate control of the temperature distribution during the reflow process is one of the major requirements, especially in lead-free assembly. This study has been performed for reflow process using the commercial CFD tool(Fluent) for predicting flow and temperature distributions. There was flow recirculation region that had a weak point in the temperature uniformity. Porous plate was installed to prevent and minimize flow recirculation region for acquiring uniform temperature in oven. This paper provided design concept from CFD results of the steady state temperature distribution and flow field inside a reflow oven.

#### 1. 서론

최근 전자 산업의 급속한 발전과 이에 부응하여 캠코더, 컴퓨터, 통신기기 등과 같은 첨단 전자기기의 소형화, 경량화가 진행되고 있다.

따라서 과거와 달리 한정된 회로기판(Printed Circuit Board)의 표면에 많은 수의 부품의 실장이 요구되고 있다. 이러한 고밀도 실장을 수행하기 위하여 TH(Through Hole)-type은 DPI(Dual-in-line) 방식에서 PGA(Pin-Grid-Array)방식으로 전환되었다. 현재는 실장 사이즈, 칩층 높이, 무게 등의 제한으로 인하여 천공작업이 필요 없이 PCB 표면에 칩을 직접 실장하는 SMT(Surface Mount Technology)방식이 널리 사용되고 있다.

이러한 SMT 공정을 위한 리플로우 장비에 요구되는 일반적인 성능은 열적 손상없는 균일한 솔더링, 공정 시간의 최소화, 회로 기판의 변화에 쉬운 대응 등을 들 수 있겠다. 이제까지 이러한 성능을 만족시키기 위하여 Whalley와 Hyslop<sup>(1)</sup>은 2차원 수치 해석모델을 사용하여 PCB 기판의 온도를 예측하였고, 실험을 통하여 리플로우 오븐에서의 공기 및 회로기판의 칩 온도를 측정하였으며, Yu와 Kivilathiti<sup>(2)</sup>는 3차원으로 리플로우 오븐을 모델링하여 온도 분포와 유동 패턴을 예측하였다. 이러한 연구의 근본 목적은 오븐 내부의 온도를 제어하여, 솔더링 공정의 안정성을 확보하기 위한 것이다. 이를 위해서는 회로기판의 이송 속도와 작업 공간상의 온도가 중요한 요소<sup>(3)</sup>로 보고되고 있다.

본 연구에서는 이제까지 주로 수행되었던 수평형(컨베이어 벨트) 이송방식 리플로우 오븐의 연구에서 대두되었던, hot spot 과 이송 시 유발되는 진동 등에 의한 Tombstone등의 용접공정에서 유발되는 품질 저하를 저감 시키고, 상대적으로 적은 사용공

#### 기 호 설 명

$P_0$	: 다공률
$P$	: 온도 측정 위치 $P_{1,2,\dots,11}$
$\Delta T_{plate}$	: 측정위치 온도차 ( $T_{max} - T_{min}$ ) at plate
$T_{ave, Pi}$	: 측정위치 평균온도 $i = 1,2,\dots,11$
$\Delta T_{oven}$	: 오븐 내 최대 평균 온도 차 ( $T_{ave, Pi} - T_{ave, Pj}$ ) $i/j = 1,2,\dots,11$
$D$	: 평균 편차, ( $= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N  T_{ave} - T_i $ )
$L_1$	: 오븐 길이
$L_2$	: 오븐 폭 ( $= 2L_2$ )
$W_1$	: 가공영역 길이 ( $= 2W_1$ )
$U_0$	: 오븐 입구 유속
$Re_{Dh}$	: Reynolds 수, ( $= \frac{U_0 D_h}{\nu}$ )

\* 연세대학교 대학원 기계공학과, jungwj@yonsei.ac.kr

\*\* 연세대학교 대학원 기계공학과, hgkwon@yonsei.ac.kr

\*\*\* 연세대학교 기계공학과, hhcho@yonsei.ac.kr

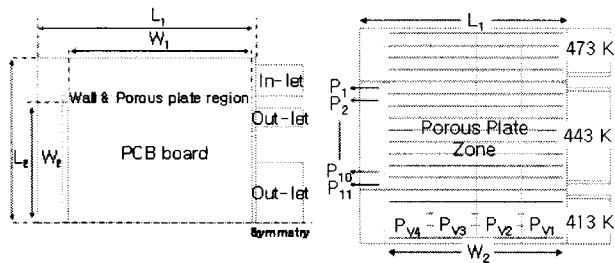


Fig. 1 Schematic view of present study domain.

Table. 1 Details of present domain

$L_1$ [m]	$L_2$ [m]	$L_1/L_2$
0.467	0.271	1.7
$W_1$ [m]	$W_2$ [m]	$W_1/W_2$
0.4	0.2	2

간에서 단위 시간 생산성을 향상 시킬 수 있는 수직형 이송방식을 취하는 리플로우 오븐에 대한 것이다. 작업 공간에 대한 열/유동 현상을 파악하고 다공판 및 격벽을 설치하여 유동 제어를 통한 온도 균일성을 확보하고자 하였다.

## 2. CFD 조건

FVM 방법을 사용으로 사용되고 있는 Fluent 6.1을 사용하여 수치해석을 수행 하였다.

오븐은 3개의 온도 설정 영역을 묘사하였다. 이는 수직형 리플로우 오븐이 기존의 컨베이어 벨트 이송 방식 오븐에서 적용된, 벨트 진행 방향에 따른 온도 설정과 달리 수직 방향의 모듈로 이송되기 때문이다. 따라서 오븐 내부의 경계조건은 각각의 작업공간 입구를 413K, 443K, 473K로 설정하고, 4m/s의 자유유동 속도를 설정하였다( $U_0 = 4\text{m/s}$ ). 입구 수력 직경  $D_h = 0.08\text{m}$ 이며, 입구 유동  $Re_{Dh}$  수는  $1.742 \times 10^4$  였다.

해석모델은 입구 덕트, 입/출구 다공판, 면 대칭 오븐, PCB 가공판, 분리판으로 구성되어 있다.

모델링 및 메쉬 생성은 gambit 2.1을 사용하였으며, 면 대칭으로 1/2만을 모델링하여 symmetry 경계조건을 사용하였다. 총 격자는 약 82만개였다. 220만개의 격자를 생성하여 비교한 결과 평균 오차 RMS 1% 이내, 최대 오차 1.4%를 확인하였으며, 40 만개를 부여한 경우 최대 오차가 1.9%까지 나타나는 것을 확인하였다.

유동을 제어하기 위하여 다공판과 격벽을 설치하였으며, 이에 2가지의 다공률( $P_0 = 50\%$  and  $100\%$ )를 적용하였다.

Fig.1은 전체 모델 제원 및 다공판 설치 위치에 대한 개략도를 나타낸다. 본 장비는 기존의 리플로우 공정에 적용되므로, 기존 장비의 작동조건이 적용되었다.

점선으로 표현된 면 대칭영역에 symmetry조건을 부과하였으며, PCB board를 제외한 영역( $L_1 - W_1$  and  $L_2 - W_2$ )에 덕트 유로가 형성된다. 또 유동을 제어하기 위하여  $W_1$ 을 따라 다공판을 설치하였다.

난류 모델은  $k-\epsilon$  모델을 사용하였다. 또한 작동 구간의 설정온도가 413K에서 30K의 간격으로 상향되므로, 공기의 밀도는 이상기체로 가정하고 점성계수는 Sutherland's law를 비열은 온도에 대한 Third - order Polynomial을 적용하였다. 분리판, 격벽 그리고 회로기판을 통한 열전도를 고려하기 위하여 밀도, 비열, 열전달 계수를 지정하였다(Table. 2, 3).

온도 및 유동 특성은  $P_1$ -Plate에서  $P_{11}$ -Plate까지 평면에서 확

Table. 2 Air property

Ideal gas Law $\rho = \frac{PM}{RT}, M=29$
Sutherland's law $\mu = \mu_0 \left(\frac{T}{T_0}\right)^{3/2} \frac{T_0 + S}{T + S}$ $\mu_0 = 1.716 \times 10^{-5}, C_0 = 273, S = 111$
Second-order Polynomial $C_p = C_0 + C_1 T + C_2 T^2$ $C_0 = 1019.53, C_1 = -0.1561, C_2 = 0.0035$
Thermal conductivity (k) $k = \frac{15}{4} \frac{R}{M_w} \mu \left[ \frac{4}{15} \frac{c_p M_w}{R} + \frac{1}{3} \right]$ $M = \text{universal gas constant } M_w = \text{molecular weight}$

Table. 3 Solid material properties

	Al alloy	PCB board
Density ( $\rho$ -Kg/m <sup>3</sup> )	2770	700
Heat capacity ( $C_p$ -J/Kg-k)	875	2310
Heat conductivity (K)	177	0.173

득하였으며, 온도 균일도는 평균 온도와 평균 편차를 기준으로 제시하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 원형 모델(Original model)에서의 유동 및 온도 분포

오븐 내부의 기본적인 유동 및 온도 특성을 살펴보기 위하여 격벽과 다공판이 설치되지 않은 경우의 해석을 수행하였다.

Fig 2에서는 3단으로 구성으로 모델링된 오븐에서 상/하 단 영향을 고려하여 443K로 설정된 중간단의 작업공간 내의 온도 분포와 평균편차를 제시하였다.

$P_1$ -Plate에서  $P_{11}$ -Plate로 이동 할수록 평균 온도가 상승하였으며,  $P_6$ -Plate서  $P_2/P_{10}$ -Plate로 이동할수록 편차의 상승을 확인 할 수 있었다. 평균 온도의 상승은 저온부(413K) / 고온부(473K)로부터 금속 격벽을 통한 전도 및 틈새유동에 의한 열전달에 기인한다. Fig. 3에서는 입구부에서 급격한 편향 성분이 존재하는 것을 확인하였고, 편향된 유동은 symmetry line에서 충돌하여 2개의 재순환 영역을 발생하였다. 또한 이 재순환 영역에서 온도 불균일성의 문제가 제기된다.

가장 하단에 위치하는  $P_1$ -Plate 경우, 영역 내부에서  $\Delta T_{plate}$ 는 4.92K, 편차는 1.21이며, 상단에 위치하는  $P_{11}$ -Plate 경우  $\Delta T_{plate}$ 가 4.83K, 편차는 1.18이다. 이는 Fig. 3에서 볼 수 있는 것과 같이 상단의 경우 고온부의 영향으로 설정 온도에 비하여 재순환 영역에 높은 온도 영역을 형성하며, 하단의 경우 저온부의 영향으로 낮은 온도 영역이 존재한다. 이 결과는 Fig. 4의 Whalley와 Hyslop<sup>(3)</sup>의 실험 결과에서 볼 수 있는 것과 같이, 오븐 내부의 온도는 이상적인 설정 온도와 실제 온도 사이에는 차이점이 나타나며, 온도 불균일성이 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

오븐 내부 온도 불균일성의 원인이 되는 오븐 내부의 유동 편향 및 재순환영역을 통한 전체적인 유동 특성은 Fig. 3를 통하여 알 수 있다. 입구부에서 유입된 주유동이 급격히 편향하여 충돌 후 분리되며, 각각의 분리된 유동이 재순환 유동을 생성하

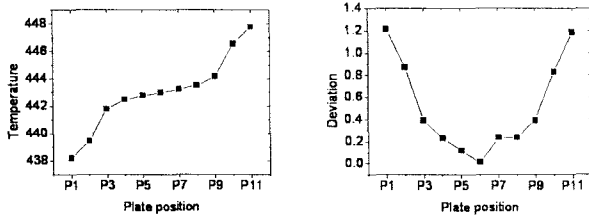


Fig. 2 Temperature and deviation distribution for the original model.

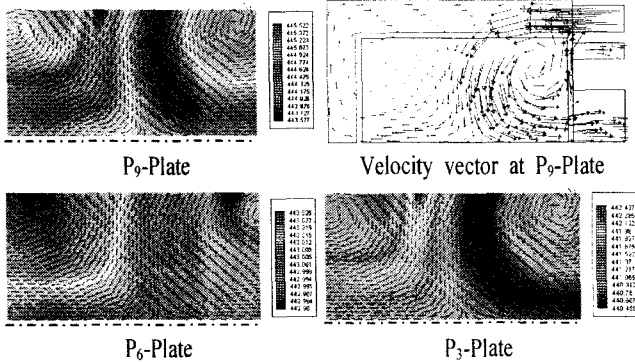


Fig. 3 PCB board temperature distribution for the original model.

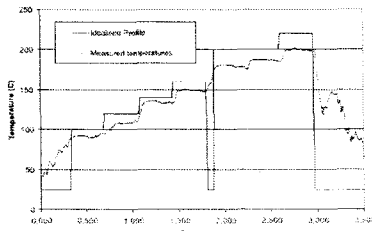


Fig. 4 The temperature profile reflow soldering process(Frahd Sarvar, 1998).

였다. 따라서 유동이 편향하는 덕트 유로를 따라 격벽과 다공판을 설치하여 유동의 편향을 개선하고 재순환 영역의 감소를 통하여 온도 균일성 향상 시키고자 하였다.

### 3.2 다공판 설치 모델에서의 유동 및 온도 분포

원형 모델에서 확인된 유동의 재순환과 온도 불균일성의 문제를 다공판 설치를 통한 개선 여부를 확인하기 위하여, 격벽( $P_0 = 0\%$  &  $50\%$ )을 설치하였다.

Fig. 5에서는 수치해석을 수행하기 위한 다공판 설치에 대한 제원을 나타낸다. Fig. 1에서 제시한 것 같이 가공영역으로 유입되는 유동을 제어하기 위하여 덕트 유로를 4분할( $W/4$ )하여 다공판을 설치하고 V-1 case에서 V-4 case까지 경우를 해석하였다. V-1 case의 경우(Fig. 5), 유동의 편향되는 위치에 격벽( $P_0 = 0\%$ )과 다공판( $P_0 = 50\%$ )을 설치함으로써 원형 모델에서 확인된 주유동의 편향과 출구부에서 형성되는 재순환 영역을 제어하기 위한 것이며, V-4 case의 경우는 기존의 개방형 유로에 격벽을 통하여 주유동이 오븐 후단까지 진행하여 유입되도록 설치하였다.

Fig. 6에서는 격벽의 설치를 통하여 유동의 편향 특성이 달라지는 것을 확인할 수 있으며, 재순환 영역이 천이되는 특성을 확인할 수 있다. V-1 case는 격벽을 통하여 주유동의 편향이 제어되고 재순환 영역이 유로와 가공 영역에 위치하였다. V-2 case

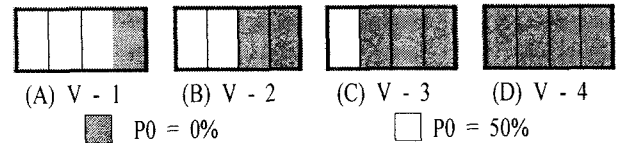


Fig. 5 Cases of porous plate installation

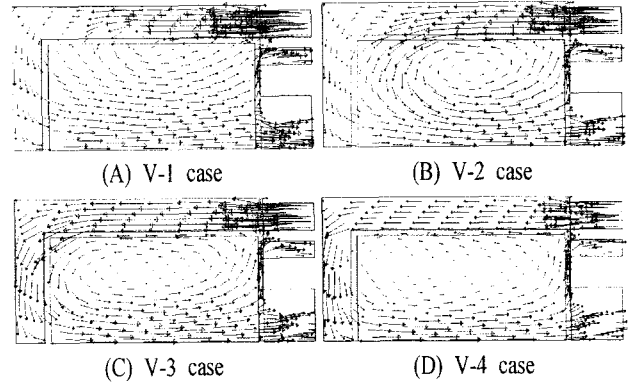


Fig. 6 Velocity vector at P9-Plate.

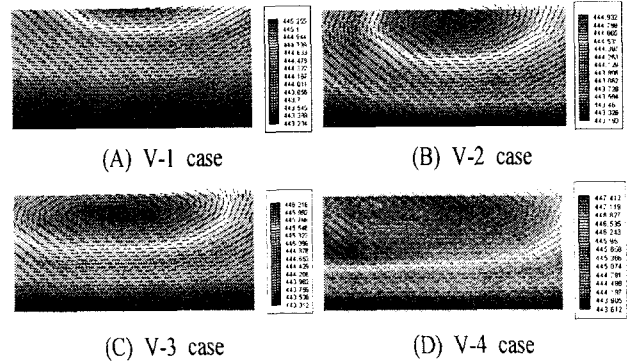


Fig. 7 PCB board temperature distribution at P9-Plate.

에서 V-4 case로 진행하면서 재순환부 중심이 오븐 후단부로 천이되는 것을 확인 할 수 있으며, 영역 또한 확장되었다.

Fig. 8는 각 경우에 대한 온도 분포를 나타내고 있다. Fig. 7에서 확인한 것 같이 순환부가 격벽의 위치에 따라 천이되고 이를 따라서 고온부가 나타난다. 이는 상단에 위치하는 P9-Plate에서 측정된 것으로 고온부로부터의 열전달로 유동이 정체하는 순환영역에 높은 온도대가 형성된다. 이와 반대로 하단부에서는 저온부에서 열전달로 인하여 정체구간에 낮은 온도대가 형성되었다.

원형 모델에서의 유동의 편향과 오븐의 전단과 후단에 발생하는 재순환 영역은 격벽 설치를 통하여 제어하였다. V-1 case 경우 격벽 통과 후 가공영역으로 들어오는 유동의 일부가 유로와 회로기판 사이에서 순환지만 그 영역이 작아 온도 균일성을 대표하는 편차 값( $D = 0.35$ )이 가장 고르게 분포하며 평균 온도의 폭( $\Delta T_{oven} = 5.99^\circ\text{C}$ )도 가장 이상적으로 나타나는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 9). 그러나 V-1 case과 유사한 결과를 보이는 V-2 case( $D = 0.54$ ,  $\Delta T_{oven} = 6.43^\circ\text{C}$ )를 제외한 V-3 case( $D = 1.02$ ,  $\Delta T_{oven} = 9.91^\circ\text{C}$ ), V-4 case( $D = 1.00$ ,  $\Delta T_{oven} = 13.67^\circ\text{C}$ )는 작은 면적비로 토출되는 유동이 갖은 높은 운동량으로 넓은 순환 구간을 형성한다. 그리고 이 영역에서 높은 온도 구간이 형성되어 온도 균일성과 편차가 원형 모델보다 악화되었다(Fig. 9).

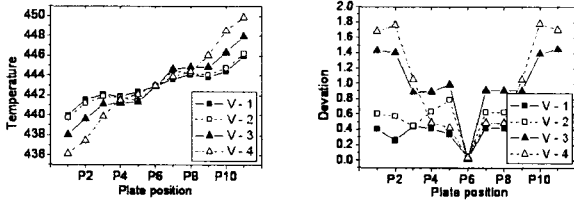


Fig. 8 Temperature and deviation distribution V-1 case to V-4 case.

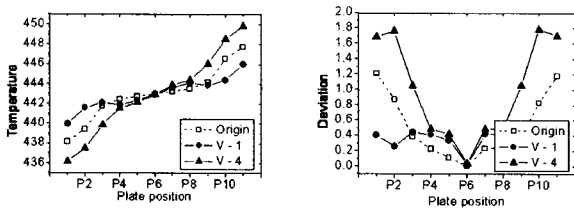


Fig. 9 Temperature and deviation distribution compared with original model (without porous-plate case).

#### 4. 결론

본 연구에서는 반도체 공정에 상용되는 오븐 중, 수직형 리플로우 장비에 대하여, 상용 수치해석 프로그램을 이용하여 내부 온도 및 유동 특성을 해석하였다. 원형 모델에서는 입구부의 편향된 유동이 작업공간에 두 개의 재순환 영역을 형성하며 온도 불균일성을 유발하는 것을 알 수 있었다. 격벽 및 다공판의 설치를 통하여 유동의 편향을 제어하고 온도 균일성도 확보할 수 있었다.

원형 모델에서 측정된 온도 편차( $D = 0.52$ ) 및 평균 온도 분포( $\Delta T_{oven} = 9.57^\circ\text{C}$ )는 V-1 case( $D = 0.35$ ,  $\Delta T_{oven} = 5.99^\circ\text{C}$ )의 격벽과 다공판 설치 순환 영역의 최소화를 통하여 편차에서는 32.2%, 평균 온도 분포는 37.4% 향상 되었다(Fig. 9). 그러나 V-4 case( $D = 1.00$ ,  $\Delta T_{oven} = 13.67^\circ\text{C}$ )의 경우 순환 영역의 확장으로 취약한 결과를 나타낸다.

본 연구를 통하여 리플로우 오븐의 성능을 대표하는 각 가공 영역의 온도 균일성을 향상 시킬 수 있었다. 그러나 정상상태 조건에서의 온도 분포 외 오븐 내부에서 위치와 시간에 따른 온도 분포에 대한 보완이 요구된다.

#### 참고문헌

[1] David C. Whalley, Stuart M. Hyslop, 2002, "A Simplified model of the reflow soldering process", Soldering & Surface Mount Technology, Vol. 1, pp. 30-37.  
 [2] Hao Yu, Jorma Kivilathti, 2002, "CFD modelling of the flow field inside a reflow oven", Soldering & Surface Mount Technology, Vol. 1, pp. 38-44  
 [3] Frahad Sarvar, Paul P. Conway, 1998, "A modelling tool for the thermal optimisation of the reflow soldering of printed circuit assemblies", Finite Elements in Analysis and Design, Vol. 30, pp. 47-63  
 [4] A. Tavaréz, J.E. González, 2003, "Modeling the Thermal Behavior of Solder Paste Inside Reflow Ovens", Journal of Electronic Packaging, Vol. 125, pp. 335-346.

[5] Reena Cole, Mark Davies, 2003, "A Board Level Study of Array of Ball Grid Component-Aerodynamic and Thermal Measurement", Journal of Electronic Packaging, Vol. 125, pp. 480-488.  
 [6] Ning-Cheng Lee, 1999, "Optimizing the reflow profile via defect mechanism", Soldering & Surface Mount Technology, Vol. 1, pp. 13-20.  
 [8] John Weisheit, Dale Roney, Randy Ternes, 2002, "Achieving higher productivity, reducing waste and costs through improved wave soldering technology", Global SMT & Packaging - Lead free Resource Guide, pp. 20-22.