

PDP용 배기로내 열전달 현상에 관한 해석

박형규*, 정재동, 김찬중, 이준식, 박희재, 조영만**, 조해균***, 박득일****

The Analysis of the Heat Transfer Characteristic in a PDP Ventilation Chamber

Hyung Gyu Park, Jae Dong Chung, Charn-Jung Kim, Joon Sik Lee,
Heui Jae Pakh, Young Man Cho, Hae-Kyun Cho and Deuk Il Park

Key Words: PDP, Heat transfer(열전달), ventilation process(배기과정), numerical simulation(수치모사), tact-type heating and cooling(단속적인 가열·냉각방식)

Abstract

An analysis of the heat transfer in a PDP ventilation chamber has been conducted to investigate the required heat curve and temperature uniformity of the panels. Firstly, experiment in a test chamber has been carried out and compared with the unsteady 3D numerical simulation. Reasonable agreement was found, which suggested that the employed numerical model had its credibility in an actual PDP ventilation process. On this ground, tact-type heating/cooling system was analyzed. The panel temperature was more uniform in the 40°C tact-type system than in the 80°C one. Comparison of full simulation of a cart and simplified simulation of one panel shows the panel pitch, which is closely related to a production rate, can be also predicted.

1. 서론

지난 세기에 인류는 디스플레이 분야에서 TV의 발명으로 비롯된 눈부신 기술적 진보를 이룩하였다. 현대인의 생활에서 이제 필수불가결한 위치를 차지하게 된 이 매체가 새로운 세기에 들어 위성과 케이블방송에 의한 다채널 시대를 맞이하면서 다시금 크게 변모하려 하고 있다. 디스플레이의 개념이 세대당 한 대에서 개인당 한 대씩의 개념으로 바뀌어 가기 때문이다. 그렇게 되면 기존의 브라운관식 디스플레이(CRT, Cathode Ray Tube)는 그 크기와 무게 때문에 한계에 다다르게 된다. 또한 전자총방식도 개선의 여지가 거

의 없다고 보아야 할 것이다. 이에 비해 근래에 주목을 끌고 있는 것이 바로 벽걸이 TV등으로 상징되는 FPD (Flat Panel Display)이다. 이러한 FPD의 대표적인 것으로 LCD(Liquid Crystal Display)와 PDP(Plasma Display Panel)가 있다.

LCD는 이미 노트북 컴퓨터나 비디오 카메라의 모니터 및 실내 각종 정보보드 등으로 많이 보급되어 있다. 이에 비해 PDP는 아직 시장에서의 인지도가 낮은 것이 현실이다. 그러나 LCD가 대형화가 어렵고, 액정의 특징 때문에 고화질화가 힘들며, 무엇보다도 시야각이 좁다는 단점이 있다. 반면, PDP는 40"이상으로 대형화가 쉽고, 자연스런 컬러 동화상이 재현되며, 시야각이 넓고(160°이상), 디지털과의 친화력이 좋다는 장점을 가지고 있다.

이러한 장점을 비롯하여 PDP의 또다른 특징은 그 제조공정이 비교적 간단하다는 것이다. PDP의 제조공정은 크게 기판공정과 패널공정으로 나뉘는데 기판공정은 패널을 구성하게 될 2장의 유리판을 담금질(anneal)하고 여기에 컬러방전을 위한

* 서울대 대학원

** 서울대 기계항공공학부

*** LG전자

**** SDI

각종 전극과 유전체, 형광체 등을 입히는 공정이다. 패널공정에는 기관공정을 통과한 전·배면 2개의 기관을 접합, 봉합하고 기관 사이의 기체를 빼낸 후(배기) 각종 기체(세정용, aging용, 방전용)로 다시 채우는 공정과 예칭, 검사단계로 이루어진다.

PDP의 여러 제조공정들 중에서 배기공정은 일반적으로 자동화가 가장 뒤떨어져 있을 뿐만 아니라 공정 자체의 개량이 필요시 되는 공정이다. 즉, 이 공정 자체의 개량 및 고생산성 설비를 개발해야 할 필요가 있는 것이다. 본 연구는 PDP 배기공정의 설계와 개선을 위해 필수적으로 수행되어야

할 배기공정 내 열전달 특성의 해석을 그 목표로 한다.

연구는 우선 LG전자의 시험배기공정에서 42" 패널에 대해 모델 배기공정 실험을 수행하고 이를 수치해석해와 비교하였다. 이와 같이 실험과의 비교를 통하여 얻어진 수치해석 모델을 양산공정에 적용하기 위해 주어진 온도이력곡선을 $\Delta T = 40^\circ\text{C}$, 80°C 로 거동하는 단속적인 가열·냉각방식(tact type)에 대하여 해석을 수행하였다.

2. 실험 및 수치해석

2.1 실험

배기공정 내에 놓인 패널이 경험하는 실제 열전달 특성을 알아보기 위하여 LG전자의 시험배기공정에서 가로·세로비 16 : 9의 42" 패널에 대하여 모델 배기공정 실험을 수행하였다. 이 실험장치에는 배기장치의 기능인 패널의 가열(350°C), 진공배기, 패널 안으로의 기체주입, 배기 tip-off가 포함된다. 시험배기공정은 Fig. 1에 보인 바와 같이 7개의 패널이 1개의 cart를 이루는 batch로(爐)의 형식을 취하고 있다. Fig. 1(b)에서 볼 수 있듯이 패널은 강철보 위의 세라믹 지지대 위에 5° 가량 holder 쪽으로 기울어져 놓여있다. 패널의 가열은 in-line type 열풍가열방식을 통해 이루어지는데, Fig. 1(a)에 보인 바와 같이 입구로 고온의 공기가 들어가서 패널을 가열한 뒤 출구를 통해 나가는 방식이다. 냉각도 역시 마찬가지로 이루어진다. 이 공정에서 요구되는 열전달 특성은 각 패널이 주어진 온도이력선(heat curve)을 따라서 거동하여야 하며 가열 및 냉각시에 패널면이 균일한 온도분포를 유지하는 것이다.

실험은 1개의 cart(7개 패널)에 대해 주어진 패널의 온도이력선을 따라 가열·냉각과정을 진행하면서 패널면 위 9점에서의 온도분포를 측정하였다. 패널면의 온도분포 측정에는 K-type Sheath형 열전대를, 노로 유입되는 공기의 온도측정에는 K-type 다점온도조절계와 Multi 온도기록계를 각각 사용하였다.

2.2 수치해석

2.2.1 지배방정식

비압축성 뉴턴유체(공기)의 비정상 난류유동과 온도장, 그리고 고체내의 온도장을 해석하기 위

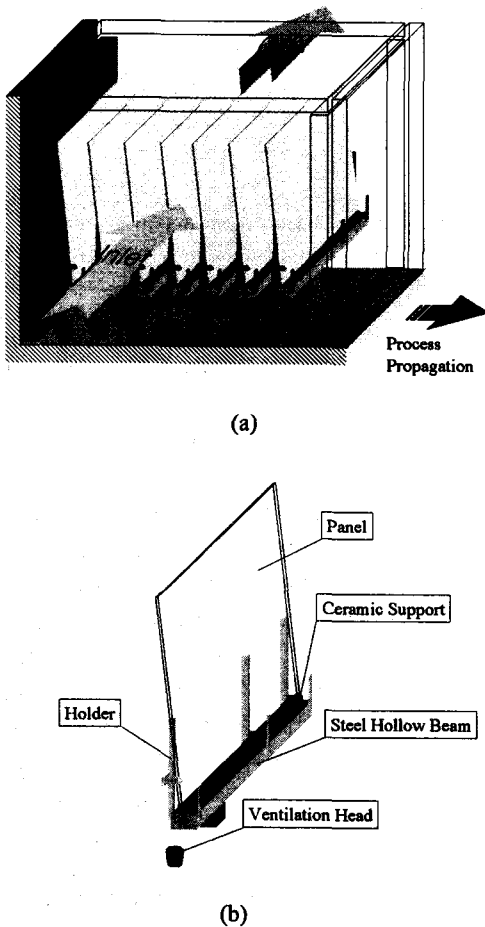


Fig. 1 Schematics of (a) a cart (7 panels) in the ventilation chamber and (b) the components of each panel.

한 지배방정식은 다음과 같다.⁽¹⁻³⁾

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j u_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + b_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j T)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{k_{eff}}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (3)$$

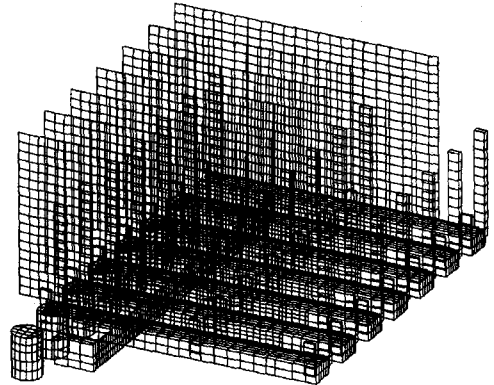
$$\frac{\partial(\rho_s^m T_s^m)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{k_s^m}{c^m} \frac{\partial T_s^m}{\partial x_j} \right) \quad (4)$$

식 (1)은 유체의 연속방정식, 식 (2)는 유체의 운동량방정식, 식 (3)은 유체의 에너지방정식, 그리고 식 (4)는 고체의 에너지(전도)방정식이다. 난류모델은 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다.

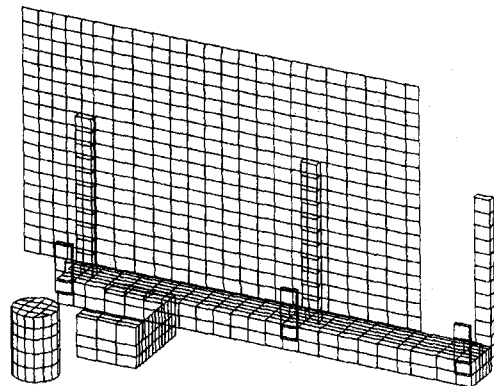
고체는 아래첨자 s 로써 유체와 구별함과 동시에 위첨자 m 으로 여러 가지 고체 재료들을 분리하였다. 각 재료의 물성을 Table. 1에 정리하였다. 고체의 전도 및 유체와의 conjugate heat transfer는 각각의 에너지 방정식을 동시에 풀고 두 상(phase)의 경계면에서 에너지 플럭스가 연속이 되도록 하는 방법을 사용하였다.

2.2.2 격자계와 재료의 물성

본 연구에서는 7개의 패널로 구성된 cart에 대해서 계산을 수행하였다. 계산에 사용된 격자를 Fig. 2에 나타내었다. 그림의 좌측상단에서 우측



(a)



(b)

Fig.2 Grid system used for (a) the case of 1 cart with 7 panels and (b) the case of 1 panel.

하단으로 흐르는 유체 가운데에 위치한 고체 격자는 크게 4가지 재료로 이루어져있다. 각 재료의 물성을 Table. 1에 정리하였다.

고체 격자를 제외한 나머지 계산 영역은 유체 격자로 채워졌으며 공기의 물성을 갖는다. 또한 출구부분의 다공성 강판을 모사하기 위하여 출구 부근에 얇은 다공성 물질을 배치하였다.

한 cart내 7개의 패널 각각의 거동이 오차 범위 내에서 유사하다면 (이는 실제 공정에서의 요구 사항이기도 하다) 한 개의 패널만을 해석함이 보다 효율적일 것이다. 따라서 7개의 패널 전체를 해석(Fig. 2a)하는 것과는 별개로 패널 한 개만을 해석(Fig. 2b)하는 시도가 이루어 졌다. 전체 격자 수는 패널 1개에 대하여 주유동방향으로 45개,

Table 1 Properties used in present study.

Material(m)	ρ kg/m ³	k_s W/m·K	c J/kg·K
Steel	8055	15.1	480
Supports(1)			
Glass	2500	1.4	750
Panel (2)			
Ceramic	1920	0.72	835
Supports(3)			

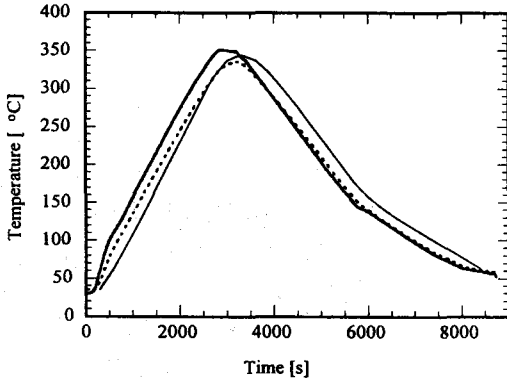


Fig. 3 The imposed temperature and the comparison of the measured and predicted temperatures at the 9 points on panel.

높이방향으로 42개, 폭방향으로 12개 정도를 배치하여 약 23000개이고, 7개의 패널로 구성된 cart 전체의 경우는 약 180000개이다.

2.2.3 수치해석 방법

고체와 유체의 conjugate heat transfer와 다공성 물질내 유동·열전달등이 복합된 비정상 난류유동의 해석을 위하여 상용코드인 STAR-CD를 사용하였다. 공간에 대해서는 1차 정확도의 상류도식과 2차 정확도의 중앙차분도식을 각각 혹은 혼합도식으로 섞어서 사용하였으며, 시간적분에는 1차 정확도의 Implicit Euler 방법을 사용하였다. 비정상 상태의 해석을 위한 알고리즘은 PISO를 사용하였다. 실험과 비교하는 경우에 대략 1~5초의 시간간격으로 140분까지, 그리고 양산로에

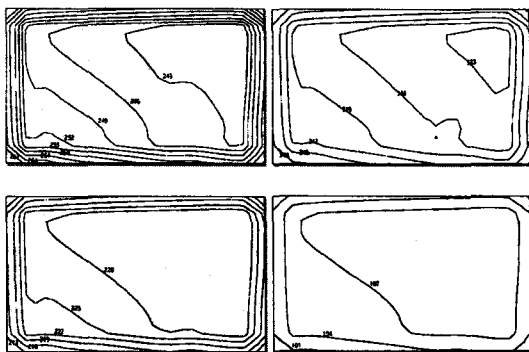


Fig. 5 Temperature pattern on the panel at (a) $t=2100s$ (b) $t=3000s$ (c) $t=5100s$ and (d) $t=7200s$.

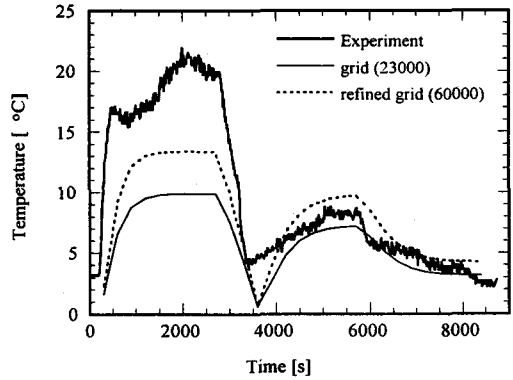


Fig. 4 The comparison of the measured and predicted maximum temperature differences between the 9 points on panel.

대한 실제 공정에 적용할 때는 20초의 시간간격으로 420분까지 계산을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 시험로에 대한 실험과 수치해석 비교

수치모델의 검증은 목적으로 우선 LG전자의 시험 배기로에서 42" 패널에 대해 모델 배기공정 실험을 수행하고 이를 수치해석 결과와 비교하였다. 패널의 온도는 입구로부터 들어오는 열풍으로 제어하며 우선 30°C에서 시작하여 45분 동안 350°C까지 열풍의 온도를 높이는 승온구간, 이후 10분 동안 이 온도를 계속 유지하는 항온구간, 그리고 2단계의 강온구간으로 이루어진다. 전체 모델공정은 총 8100초의 시간이 소요된다.

패널위 9점에 대한 온도측정 결과를 수치해석 결과와 비교하여 Fig. 3에 도시하였다. 굵은 실선은 시간에 따른 입구온도변화이며 실선으로 표시한 수치해석 결과는 점선으로 표시한 실험결과와 매우 잘 일치한다. 강온구간에서 수치해가 실험 자료에 대해 나타내는 시간지연은, 수치해의 정확도와 적절한 난류모델의 선정, 그리고 실제 상황의 정확한 모델링에 기인한 것으로 생각되며, 이것은 앞으로의 연구에서 해결되어야 할 사항일 것이다.

패널내 온도 균일도를 살펴보기 위해 측정된 9점간의 최대 온도차를 시간에 대해 살펴보았다 (Fig. 4). 수치결과의 정성적인 거동은 실험과 잘

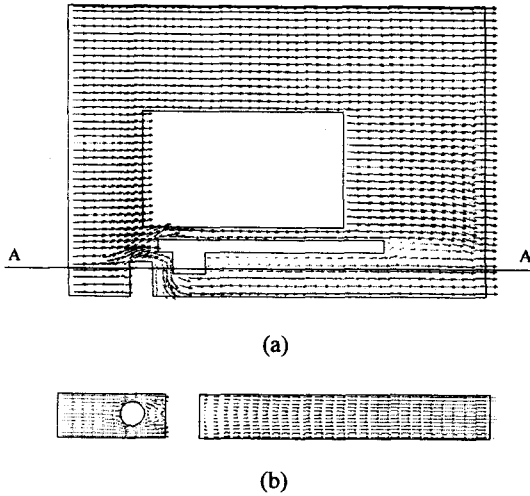


Fig. 6 Velocity vectors of the panel (a) sideview and (b) top view cross section A-A

일치하나 정량적으로 패널내 온도 불균일도를 과소평가하고 있다. 보다 정교한 격자계(60000개 격자)에서 수행된 결과는 조금 더 실험치에 근접하나 아직도 정량적으로 실험치에 이격된 결과를 보이고 있다. 따라서 패널내 온도균일도를 엄밀히 예측하기 위해서는 보다 정교한 격자계가 필요할 것으로 보인다. 하지만 제한된 컴퓨터 용량으로 추후의 계산에서 격자는 한 패널당 23000, 즉 한 cart에서 180000개로 제한한다. 이 경우 시간에 따른 패널내 평균 온도에 대한 해석은 무리없으나 패널내 최대온도차에 관한 해석은 실제보다 과소평가되었음을 고려하여야 할 것이다.

패널내 최대온도차의 거동은 승온구간에서 가장 큰 온도차를 보이다가 항온구간에서 급격히 감소한다. 첫 번째 강온구간에서 다시 증가하다가 두 번째 강온구간에서 감소하는 경향을 보이는데, 공통적으로 각각의 단계에서 일정한 온도차에 이르는 경향을 관찰할 수 있다. 이 때, 각 단계마다 도달하려는 온도는 승·강온률의 크기에 따라 결정되는 것으로 보이며, 그 정도가 클수록 패널면 위에 더 큰 온도차가 형성되는 것으로 이해할 수 있다.

각 단계에서 패널면상의 온도분포를 Fig. 5에 나타내었다. 여기서 유입되는 열풍의 방향은 왼쪽에서 오른쪽이다. 승온(가열)과 강온(냉각) 모두

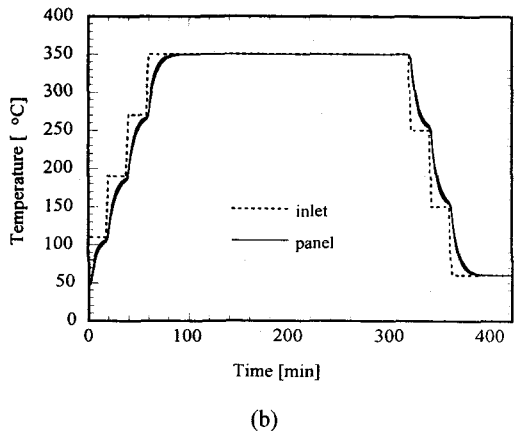
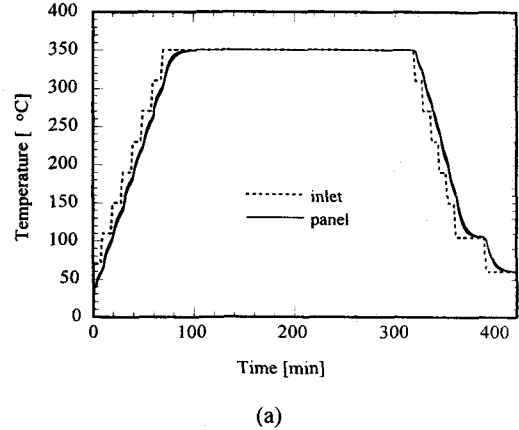


Fig. 7 Temperature variation of a panel for two different tact-type ventilation processes (a) 40°C interval and (b) 80°C interval.

의 경우에 대하여 패널의 왼쪽 아래면이 오른쪽 위면보다 더 빠른 열적 반응을 보이고 있음을 볼 수 있었다. 이것은 유입된 열풍이 노의 하단부에 설치된 ventilation head와 steel beam (Fig. 1(b) 참조)의 방해로 인해 패널 아래 왼쪽으로 집중(Fig. 6)되기 때문에 일어나는 현상으로 볼 수 있다. 왜냐하면, 패널의 상부에서는 평판위의 경계층성장으로 인한 열전달이 지배적인 데에 반해서, 패널 하부에서는 이곳에 집중된 난류유동에 의한 난류 열유속의 영향을 강하게 받기 때문이다. 요컨대 패널면 위에서 온도 불균형은, 유입된 열풍으로부터 이 면이 받는 열전달의 기작이 상·하면에 따라 다른 데에 기인한다.

패널면 위의 열전달에 주로 영향을 미치는 유

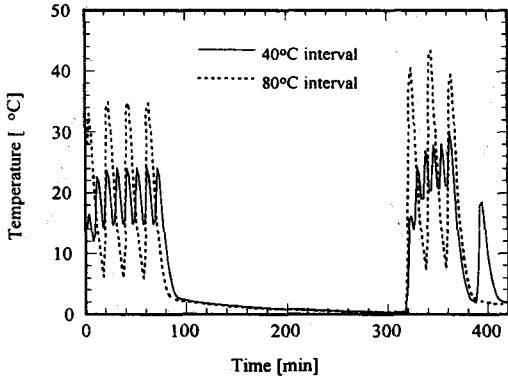


Fig. 8 Maximum temperature difference on the panel.

동의 특성들을 Fig. 6을 통하여 관찰할 수 있다. 앞에서 설명한 바와 같이 그림의 좌측에서 우측으로 진행되는 유동은 노의 하부에 위치한 구조물들의 방해로 인해 패널면 아래쪽으로 집중되었다. 그리고 상대적으로 구조물의 방해 받지 않는 패널 상부의 유동은 평판 위에서 난류경계층이 성장할 때와 같은 유동특성을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 이 사실로부터 ventilation head의 위치를 패널의 후방으로 이동시킴으로써 좀 더 균일한 패널면상의 온도분포를 얻을 수 있다고 예상할 수 있다.

3.2 양산로에 대한 수치해석

실제 공정은 단계별로 일정한 온도를 유지하는

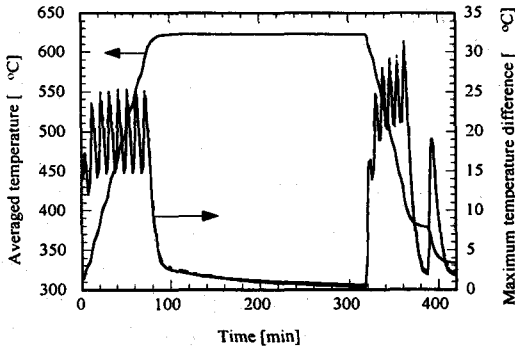
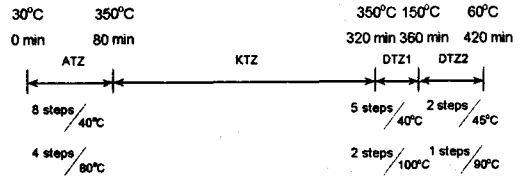


Fig. 9 Comparison of full simulation of a cart and simplified simulation of one panel by the averaged temperature and maximum temperature difference of 1st, 4th and 7th panel in a cart.

노(chamber) 안에 cart가 들어가서 원하는 온도를 얻은 후 다음 노로 진행하는 tact-type과 연속적으로 cart가 진행하면서 열풍으로 승온(가열), 유지, 강온(냉각)하는 방식이 있다. 두 가지 방식 모두 장단점을 가지고 있으며 본 연구에서는 tact-type 배기공정에 대하여 수치해석을 수행하였다.

3.2.1 택트 형식 배기공정의 검토

본 연구에서는 노와 노 사이의 온도차가 각각 40°C, 80°C인 두 가지의 tact-type 공정에 대한 해석을 수행하였다. 공정의 단계는 다음과 같다.



이 때, Cart의 이동속도가 동일하다면, 경우 I (40°C)가 경우 II(80°C)에 비해 더 긴 공정라인을 필요로 한다는 것을 알 수 있다.

경우 I와 경우 II에 대한 패널면 위 9점의 온도 변화를 Fig. 7에 나타내었다. 비록 경우 I이 경우 II에 비하여 더 긴 라인을 필요로 하지만 결과로 얻어지는 온도변화는 훨씬 안정적임을 알 수 있다. 패널면의 최대 온도차가 승·강온률과 관련된다는 시험로에 관한 수치해석결과(Fig. 4)로부터 매 단계의 시작에서 급격한 온도 변화율을 보이는 경우 II가 경우 I에 비해 패널면의 균일한 온도차의 유지를 어렵게 할 것이라는 예상을 할 수 있다.

이 예상을 확인하기 위하여 Fig. 8와 같이 패널면상에서의 최대온도차를 시간에 따라 나타내었다. 실제로 40°C 간격의 tact-type 공정이 30.1°C, 80°C 간격의 공정이 43.3°C의 최대온도차를 보이며, 예상된 바와 같이 경우 I가 경우 II보다 상대적으로 더 균일한 온도차를 보이는 것을 확인할 수 있었다. 또한 전술한 바와 같이 격자수에 대한 제한 때문에 패널내 최대온도차에 관한 해석은 실제보다 과소평가 되었음을 고려하여야 할 것이다.

3.2.2 단순화된 모델(1 패널)에 대한 검토

지금까지의 논의는 모두 패널 하나에 대한 해

석 결과이다. 하지만 격벽의 영향 등에 의한 cart 내 공간적인 불일치를 생각하면 한 개의 패널로 cart 전체를 대표할 수 있을 지는 의문이다. 따라서 7개의 패널로 구성된 cart 전체(Fig. 2a)를 해석하여 패널 한 개만을 해석(Fig. 2b)한 결과와 비교하였다. Fig. 10은 양 격벽 바로 옆에 있는 첫 번째와 7번째 그리고 가운데에 있는 4번째 패널의 평균 온도와 최대온도차를 cyclic 경계조건에 의한 패널 한 개만을 해석한 경우와 비교한 결과이다. 각 경우에 대해 그 차이는 무시할 만하다. 하지만 실제 공정에서는 cart의 이송을 위하여 격벽 주변이 충분히 밀폐되지 않은 상태이다. 따라서 이 틈 사이로 유동이 빠져나가거나 반대로 노내 고속유동으로 인한 압력강하 때문에 외기로부터 유동이 스며드는 가능성을 생각할 수 있다. 이러한 가능성을 고려하여 LG전자의 시험로에서와 동일하게 격벽 상하면에 20mm의 틈새를 주어 cart 전체를 해석하였다. 이 경우에도 격벽 틈새로의 압력강하로 인한 영향은 패널의 온도 불균일도를 증가시키나 그 정도는 그다지 크지 않음을 알 수 있다. 이상의 논의로부터 패널 하나만을 해석함으로써 cart 내 모든 패널을 대표할 수 있을 것이다. 이는 cart 내 패널간의 피치를 줄일 수 있음을 의미하기도 한다. 이는 생산성측면에서 이는 매우 중요한 인자이다.

4. 결론

본 연구는 PDP 배기로의 설계와 개선을 위해 필수적으로 수행되어야 할 배기로내 열전달 특성을 해석하였다. 우선 LG전자의 시험배기로부터

42" 패널에 대해 모델 배기공정 실험을 수행하고 이를 수치해석해와 비교하였다. 정성적·정량적으로 잘 일치하는 결과를 얻었다. 또한 실험과의 비교를 통하여 얻어진 수치해석 모델을 양산로에 적용하기 위해 $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$, 80°C 인 두가지 경우의 tact-type에 대하여 해석을 수행하였다. 전자의 경우가 보다 균일한 온도차를 보이는 것을 확인할 수 있었다.

열풍이 노의 하부에 위치한 구조물들의 방해를 받아 패널면 아래쪽으로 집중되므로 패널의 아래면이 위면보다 더 빠른 열적 반응을 보임을 알았다. 따라서 ventilation head의 위치를 패널의 후방으로 이동시킴으로써 좀 더 균일한 패널면상의 온도분포를 얻을 수 있다고 예상할 수 있다. 주어진 조건하에서 cart내 모든 패널은 동일한 온도를 경험함을 알 수 있고 생산성측면에서 패널 피치를 줄이는 것이 가능할 것이다.

후기

본 연구는 LG전자와 SDI의 PDP사업부 지원하에 이루어졌으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) 김찬중, 1998, 길잡이 전산유체역학, 문운당.
- (2) Ferziger, J. H. and Perić, M., 1996, Computational methods for fluid dynamics, Springer.
- (3) STAR-CD version 3.10, 1999