

< 응용논문 >

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2015.39.9.947>

ISSN 1226-4873(Print)  
2288-5226(Online)

## 최적의 타공판을 통한 열풍건조로 성능향상 연구<sup>§</sup>

서응수<sup>\*,\*\*\*</sup> · 김용식<sup>\*</sup> · 황중국<sup>\*\*,\*\*\*</sup> · 채영석<sup>\*</sup> · 심재술<sup>\*\*†</sup>

\* 영남대학교 기계공학부, \*\* 동아대학교 융합과학기술학과, \*\*\* ㈜프로템

### Performance Improvement of Hot-Air Dryer Through Optimum Round-Hole Plate

Eung Soo Seo<sup>\*,\*\*\*</sup>, Yongsik Kim<sup>\*</sup>, Joong Kook Hwang<sup>\*\*,\*\*\*</sup>, Young Suck Chai<sup>\*</sup>, Jaesool Shim<sup>\*\*†</sup>

<sup>\*</sup> School of Mechanical Engineering, Yeungnam Univ.,

<sup>\*\*</sup> Dept. of Convergence Science and Technology, Dong-a Univ.,

<sup>\*\*\*</sup> Protem Co.,Ltd.

(Received March 27, 2015 ; Revised May 14, 2015 ; Accepted May 18, 2015)

**Key Words:** Computational Fluid Dynamics(전산유체해석), Hot Air Dryer(열풍건조로), Temperature Distribution(온도 분포), Mass Flow Rate(질량유량), Round-Hole Plate(타공판)

**초록:** 염료감응형 태양전지용 플렉시블 필름에 도포된 코팅물질의 균질한 코팅은 제품의 성능과 내구성과 매우 밀접한 관계가 있고, 균질한 코팅은 열풍건조로 노즐에서의 균일한 온도분포와 질량유량에 의해 얻어질 수 있다. 본 연구에서 열풍건조로의 성능향상에 영향을 주는 다양한 인자들에 대한 수치해석을 수행함으로써 열풍건조로 출구의 균일한 온도분포와 질량유량을 얻고자 하였다. 수치해석 모델은 유동방정식과 에너지방정식으로 구성되었고, 수치해석을 모델의 검증에 위해 수치해석 결과값과 실험결과를 비교하였다. 연구결과로서 열풍건조로의 타공판이 균일한 온도분포 및 질량유량에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다.

**Abstract:** The homogeneous coating of a flexible film that is applied to dye-sensitized solar cells is related to the performance and durability of the product. The applied coating is obtained from the uniform temperature distribution and the mass flow rate in the nozzle of the hot air dryer. In this study, we determine the uniform temperature distribution and mass flow rate of each nozzle by performing numerical simulations to understand how various factors affect the performance of the hot air dryer. The numerical model is composed of the momentum equation for flow motion and the energy equation for temperature. In addition, we compare the numerical results to the experimental results to validate the model. Based on the results, the round-hole plate inside the hot air dryer significantly affects the uniform temperature and the mass flow rate.

### 1. 서 론

현재 전자인쇄 기술은 종래의 전기, 전자 산업에서 구현하기 힘든 유연성을 지닌 기판을 구현할 수 있어서 OLED(organic light emitting diodes), RFID(Radio Frequency Identification) tags, 태양전지

(solar cell), 메모리(memory)등 여러 산업분야에서 적용되고 있다. 여러 가지 인쇄 기술 중에 그라비아(gravure)방식의 하나인 롤투롤(roll to roll)방식은 연속공정을 통하여 높은 생산성과 종래의 기술과 달리 생산비를 절감 할 수 있어서 전 세계 여러 산업분야에서 각광받고 있는 기술이다.

롤투롤 시스템에서 정밀코팅 공정은 최종제품의 품질과 밀접한 관계가 있다. 정밀코팅 공정에서 코팅물질을 건조하는 방법은 코팅물질에 따라 NIR건조, UV건조, 열풍건조 방식으로 연구되어왔다. 그 중에서 열풍건조로는 가스보일러를 열원으

<sup>§</sup> 이 논문은 2015년도 대한기계학회 신뢰성부문 춘계학술대회(2015. 2. 25-27., 제주대) 발표논문임.

<sup>†</sup> Corresponding author, jshim@ynu.ac.kr

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

로 사용하여 열매유인 공기를 분사하여 건조공정 전 단계에서 코팅물질이 도포된 웹(web)이라는 플라스틱 필름을 건조하는 방법이다. 열풍건조방법에는 여러 가지 방법이 있지만 크게 직접열풍건조방법과 간접열풍건조방법으로 나눌 수 있다.

직접열풍건조방법은 보일러에서 가열한 공기를 코팅된 웹(web)에 바로 분사하여 건조하는 방법이고 큰 범위로 건조를 할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 간접열풍건조방법은 보일러에서 가열된 공기를 덕트(duct)를 통해서 건조로로 이동시켜 건조로의 각 노즐(nozzle)출구로 특정온도의 공기를 분사하여 코팅된 웹을 건조하는 방법이고 높은 정밀도와 품질이 우수하다는 것이 장점이다. 현재 전자인쇄가 적용되는 산업분야에서는 높은 정밀도와 우수한 품질을 중요시하기 때문에 많은 업체와 연구 기관에서는 열풍건조로 에 관한 연구를 꾸준히 진행하고 있다.

1997년 김명배<sup>(4)</sup>는 앞으로의 건조기 시장에 대한 전망과 건조기 부품 국산화에 대한 필요성을 주장하였고, 2008년 김동규 등<sup>(5)</sup>은 폐열회수장치 도입으로 열풍건조로의 열효율 향상시키는 방안에 대한 연구를 진행하였고, 2009년 강우정 등<sup>(6)</sup>은 CFD코드인 Fluent를 이용하여 대형 하·폐수 슬러지 건조로 열·유동을 수행하여 건조 플랜트 건설의 기초 설계 자료를 확보하였다. 그리고 2009년 홍승찬 등<sup>(7)</sup>은 Oven형 건조 장치와 열풍건조장치를 비교 분석하여 현재 사용하는 Oven형 건조 curing을 conveyer형으로 바꿔 대량생산을 가능하게 할 수 있다는 결론을 얻었으며, 2010년 김영모 등<sup>(8)</sup>은 전자인쇄의 롤(roll) 패턴의 깊이에 따른 분석과 열풍건조방식과 적외선건조방식을 비교 분석하여 두 가지 건조방식을 병용한 건조방식을 사용하여 대량생산과 건조성능 향상에 대한 연구를 진행하였고, 2010년 서용호 등<sup>(9)</sup>은 롤투롤 장비 중 건조기에서 웹 이송 방법인 공기부양 방법의 압력패드 에어 바의 공기역학적 특성을 실험과 수치해석을 통하여 분석하였다. 그리고 2013년 김승욱 등<sup>(10)</sup>은 열풍건조기의 건조 조건을 정의하고 히터 개수에 따른 전력소비량과 내부 온도를 측정하여 매개변수 연구를 통하여 에너지 소비가 적은 건조기 형상을 제안하였다. 이처럼 많은 연구진들이 건조로 에 대해 많은 연구를 진행하였다. 하지만 많은 연구들이 건조로 에 대해서는 연구를 진행하였지만 수치해석을 통해서 실제로 열풍건조로의 성능을 향상시키고 예측시키는 연구가 거의 진행되지 않았다.

기존의 연구는 건조방법이나 대량생산 방법에 관한 연구와 식품건조의 연구가 주로 이루어지고 있으나 건조로 성능 향상을 위한 연구는 미비한 상태이다. 본 논문에서는 타공판의 유무가 건조로의 성능에 얼마나 영향을 끼치는지 수치해석적으로 해석하였고 이를 검증하기 위해 실험적으로 얻은 데이터와 비교 검증하였다. 그리고 타공판의 구멍의 직경과, 구멍의 개수를 바꿔가면서 최적의 조건을 찾으려 한다.

## 2. 열풍건조로 실험

### 2.1 실험장치

실제 롤투롤 시스템의 건조공정에서 사용하는 열풍건조로는 Fig. 1과 같이 간단하게 열풍건조로(a)에서 가열된 열매유가 롤러(c)를 통해 이송되는 코팅된 웹(b)을 건조시키는 장치이다. Fig. 2는 열풍건조로 1개에 크게 노즐 출구가 3개로 나뉘고 각 출구를 다시 작게 4개씩 나누어 온도를 측정할 수 있는 센서를 통하여 노즐에 총 12개의 위치에서 온도분포를 측정하는 장치이다.

### 2.2 실험방법

본 논문에서 실험은 수치해석과 비교하기 위하여 열풍건조로 노즐출구에서의 온도분포를 실험을 통하여 측정하였다. 우선 열풍건조로의 열원인 가스보일러로 공기를 가열하여 덕트를 통하여 뜨거운 공기는 열풍건조로로 이동하는데 이때 건조

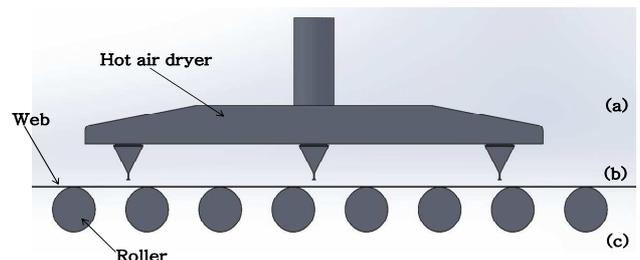


Fig. 1 Hot air dryer schematic diagram



Fig. 2 Experimental equipment and measurement positions

Without round hole plate- outlet1 (left side)

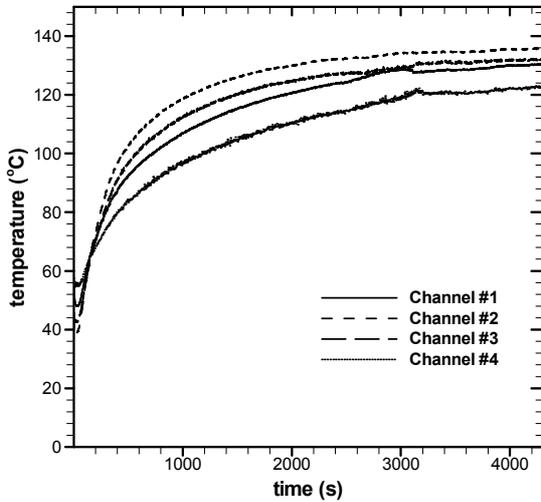


Fig. 3 Temperature change at the outlet1 without round-hole plate

Without round hole plate- outlet3 (right side)

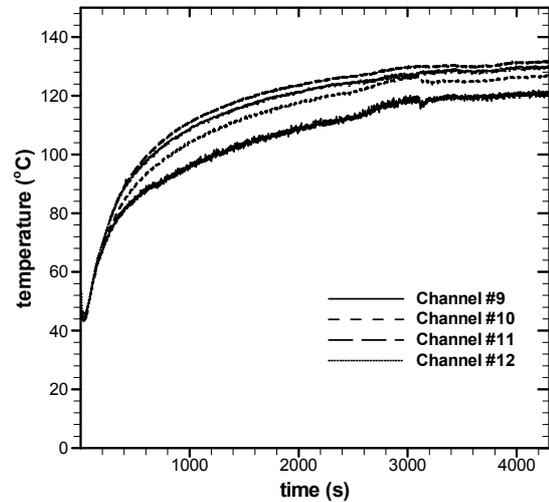


Fig. 5 Temperature change at the outlet3 without round-hole plate

Without round hole plate - outlet2 (middle side)

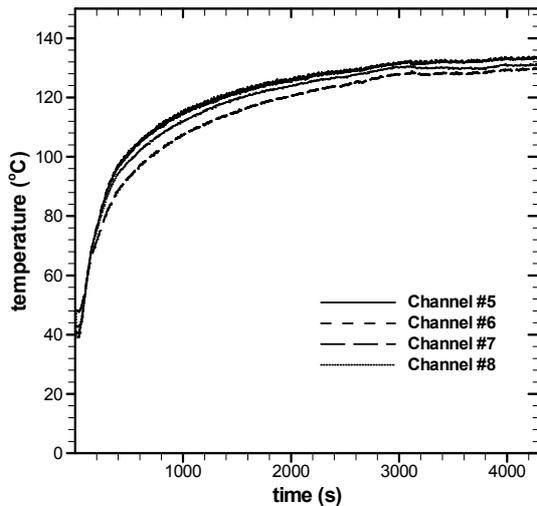


Fig. 4 Temperature change at the outlet2 without round-hole plate

With round hole plate - outlet1 (left side)

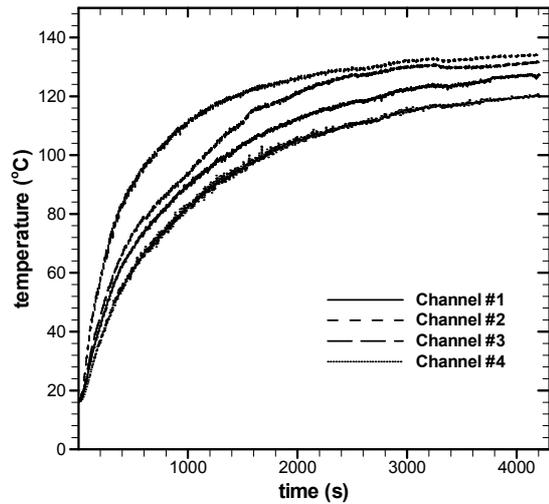


Fig. 6 Temperature change at the outlet1 with round-hole plate

로 입구에서 온도를 측정하고 Fig. 3과 같이 1개의 열풍 건조로 안에 노즐을 3개로 나누고 각 출구 노즐에서 측정 포인트를 4개로 설정하여 각 포인트에서의 온도분포를 측정하였다. 그리고 실험은 타공판을 사용하였을 때와 타공판을 사용하지 않았을 때로 하여 총 2번을 측정하였다.

### 2.3 실험결과

Fig. 3은 타공판을 사용하지 않았을 때의 열풍 건조로의 왼쪽 노즐에서 측정지점을 4개로 나누었을 때의 각 지점에서의 온도변화를 보여주는 그래프이다. Fig. 4는 중간 노즐의 각 지점에서의 온도

변화를 보여준다. Fig. 5는 오른쪽 노즐의 각 지점에서의 온도변화를 보여준다. Fig. 6은 타공판을 사용하였을 때의 열풍 건조로의 왼쪽 노즐의 각 지점에서의 온도변화를 보여주는 그래프이다. Fig. 7은 중간 노즐의 온도변화를 보여주며, Fig. 8은 오른쪽 노즐의 온도변화를 보여준다. Table 1은 열풍 건조로 입구 온도가 142°C이고 외부 온도가 20°C일 때의 측정 포인트에서 측정된 온도 값이다. 실험을 통해 타공판을 사용하였을 때의 각 노즐출구에서 실험결과를 평균해서 온도분포를 확인하면 온도분포가 향상된 결과로 보이는 것을 확인할 수 있다.

With round hole plate - outlet2 (middle side)

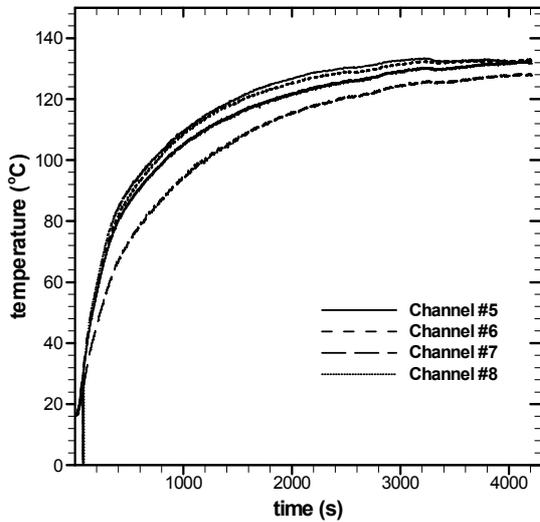


Fig. 7 Temperature change at the outlet2 with round-hole plate

With round hole plate - outlet3 (right side)

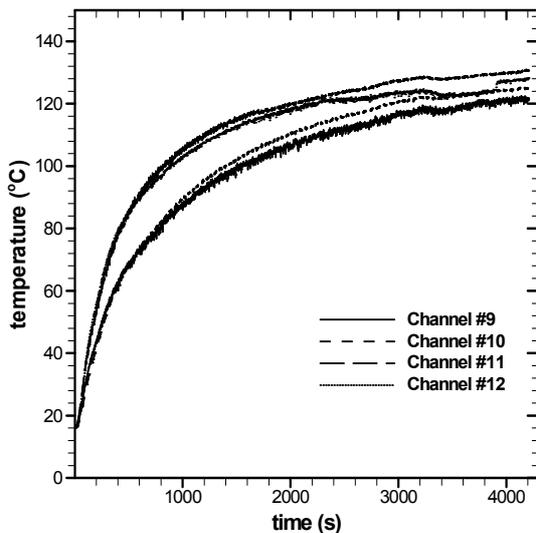


Fig. 8 Temperature change at the outlet3 with round-hole plate

### 3. 열풍건조로 수치해석

#### 3.1 건조로 모델링

본 논문은 COMSOL Multiphysics4.3a 를 이용하여 수치해석을 진행하였으며, Fig. 9 와 같이 열풍건조로 입구의 직경(d), 각 노즐간의 거리(B1), 노즐의 너비(W1), 열풍건조로의 폭(B2), 열풍건조로의 너비(W2), 높이(H)로 모델링 하였다. 건조로 모델링의 치수 정보는 Table 2 에 기술하였다. 수치해석에 사용되는 열매유는 공기의 물성치를 사용하였고, 전산유체해석을 위한 격자 모델의 요소 수는 약 250,000 개로 하였다.

Table 1 Experimental temperature at positions of each nozzle

Channel	Without round hole plate(°C)	With round hole plate(°C)
1	129.2	127.2
2	134.9	133.7
3	131.6	131.7
4	121.2	120.1
5	132.3	132.5
6	132.3	132.7
7	128.5	128
8	129.9	131.9
9	119.8	121.8
10	125.1	124.9
11	130.3	130.7
12	128.9	128.2

Table 2 Dimensions of dryer parameters in Fig. 9

Variable	Value
d	71.5mm
H	280mm
W1	366mm
W2	251mm
B1	330mm
B2	814mm

Table 3 Input data of boundary condition

Variable	Value
Inlet velocity	0.3 m/s
Inlet temperature	142.2 °C
External temperature	20 °C
Outlet1	Outflow
Outlet2	Outflow
Outlet3	Outflow

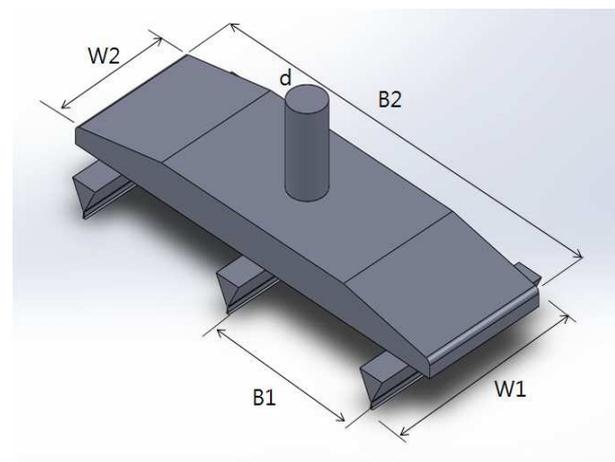


Fig. 9 Schematic of the hot air dryer

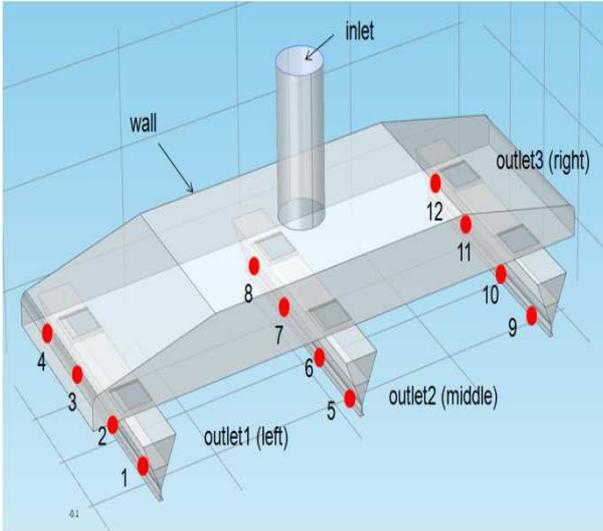


Fig. 10 Measurement points at each nozzle

3.2 지배방정식

열풍건조로 내부 유체는 정상상태이고, 비압축성유체로 가정하였다. 열풍건조로 쪽 유동을 층류 유동(laminar flow)으로 고려하였다.

열 문제를 동반하는 유체의 지배방정식은 연속 방정식(continuity equation)과 나비에-스톡스 방정식(Navier-Stokes' equation), 에너지 방정식(energy equation)으로 표현할 수 있다. 위의 지배방정식을 유한요소법(FEM: Finite Elements Method)을 사용하여 유체의 유동문제를 해석하였다. 다음 주어진 (1)~(3)이 본 논문에서 사용된 지배방정식이다.

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \tag{1}$$

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = \nabla \cdot (-p + \mu \nabla \mathbf{u}) + F_g \tag{2}$$

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) T \right) = -(\nabla \cdot \mathbf{k} \nabla T) \tag{3}$$

여기서,  $\nabla$ 은 미분자 (gradient)를 의미하고,  $\mathbf{u}$  는 속도의 벡터,  $\rho$  는 유체의 밀도,  $p$  는 유체의 압력,  $\mu$  는 점성계수,  $F_g$ 는 중력 항,  $C_p$ 는 정압비열,  $T$  는 절대온도,  $\mathbf{k}$  는 열전도율을 나타낸다. 경계조건은 Fig. 10 과 같이 도식화하여 표현하였고, 경계조건은 Table 3 과 같이 주어졌다.

3.3 매개변수해석

본 논문은 열풍건조로의 성능향상을 결정짓는 요소를 타공판으로 선정하였다. 우선 타공판의 존재유무에 따라서 수치해석의 타당성을 판별하기 위하여 타공판을 Fig. 11과 같이 가로 폭(a), 세로 폭(b), 두께(t), 구멍의 직경(D), 구멍의 개수(c)로 모델링 된다. 변수 값은 Table 4에 작성하였다. 성

Table 4 Round-hole plate dimension

Variable	Value
a	150mm
b	258mm
t	2mm
D	10mm
c	13EA

Table 5 Parametric study of factors

Case	Variable D (mm)	Variable c (EA)
1	5	13
2	5	17
3	5	23
4	10	13
5	10	17
6	10	23
7	15	13
8	15	17
9	15	23

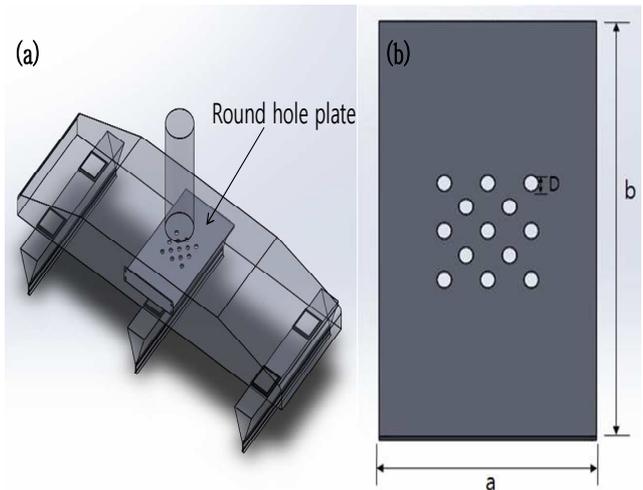


Fig. 11 Round-hole plate in the simulation: (a) Hot-air dryer assembly with round hole plate. (b) Round hole-plate

능향상에 미치는 인자를 타공판으로 선정하고 타공판의 구멍의 직경(D)과 구멍의 개수(c)를 변경하면서 총 9개의 경우를 비교하여 최적의 조건을 찾으려 한다. 조건은 Table 5와 같다.

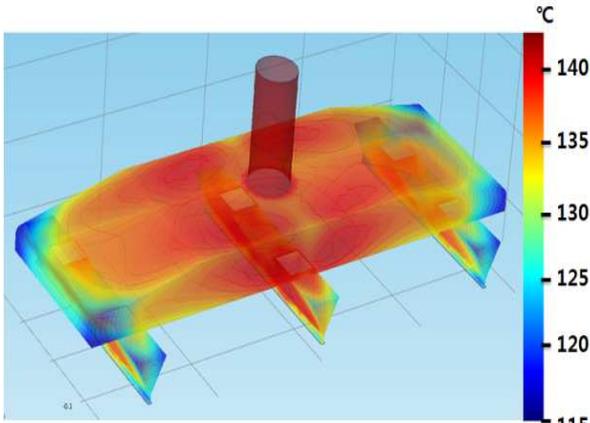


Fig. 12 Temperature distribution without round-hole plate

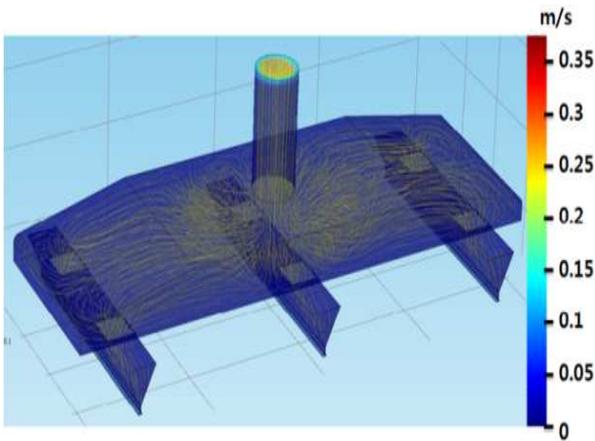


Fig. 13 Streamline without round-hole plate

#### 4. 결 과

##### 4.1 실험 및 수치해석

Fig. 12는 타공판을 사용하지 않을 때의 열풍건조로의 온도분포를 수치해석적으로 보여지는 결과이다. Fig. 13은 타공판을 사용하지 않을 때의 열풍건조로의 유선(streamline)을 보여준다. Fig. 14는 타공판을 사용하였을 때의 열풍건조로의 온도분포를 수치해석적으로 보여준다. Fig. 15는 건조로의 유선을 보여준다. Fig. 12, Fig. 13을 보면 타공판을 사용하였을 때의 온도분포가 타공판을 사용하지 않았을 때의 온도분포보다 더 균등하게 분포가 되었음을 알 수 있다. 타공판을 사용하였을 때는 타공판을 사용하지 않았을 때 보다 각 노즐출구의 온도 분포가 균등해진 것을 확인할 수 있다. Table 6은 타공판 사용유무에 따른 실험값과 수치해석 값을 수치적으로 나타낸다. 수치해석과 실험의 결과는 약간의 차이가 있지만 상당 부분 일치하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 타공판을 사용하였을 때 중간부분 노즐과 좌, 우 노즐의 온도차이는 약 2℃

Table 6 Comparison of experiment and simulation

			Inlet	Outlet1	Outlet2	Outlet3
Without round hole plate	실험 결과	T (°C)	142.2	127.3	131.3	127.3
Without round hole plate	수치해석	T (°C)	142.2	127.9	131.5	127.9
With round hole plate	실험 결과	T (°C)	142.2	127.6	130.9	127.6
With round hole plate	수치해석	T (°C)	142.2	128.7	130.5	128.7

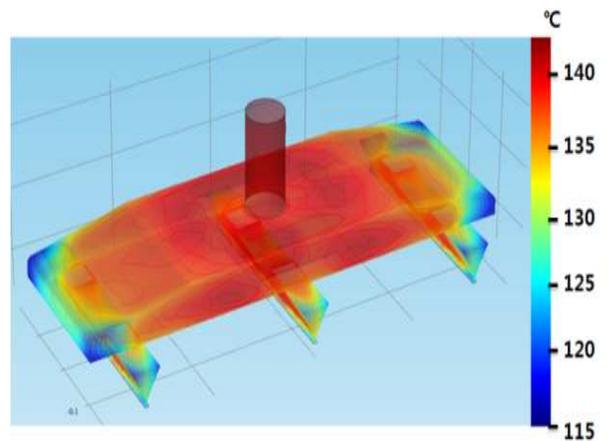


Fig. 14 Temperature distribution without round-hole plate

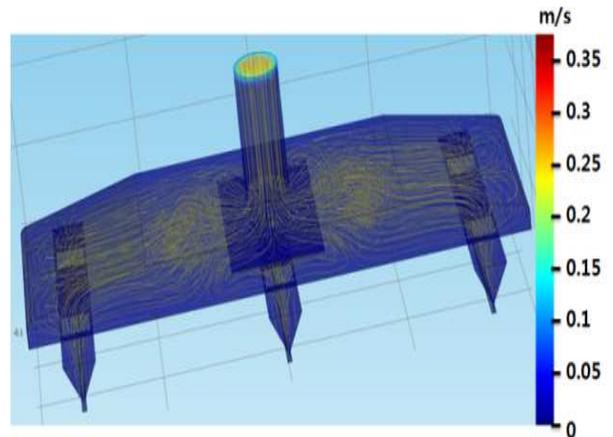


Fig. 15 Streamline without round-hole plate

차이를 보이고, 질량유량은 약 1.3%의 차이를 보이는 반면에 타공판을 사용하지 않았을 때는 온도 차이는 약 3.6℃, 질량유량은 약 1.7%의 차이를

보인다. 이때 타공판을 사용하였을 때가 성능이 향상된 것을 확인할 수 있다.

4.2 매개변수해석결과

Table 7은 모든 경우에서의 수치해석결과를 보여 준다. Case1, case2, case3은 타공판의 구멍의 직경을 실제실험에 사용한 구멍의 직경보다 작을 때 구멍

Table 7 Parametric study results

case		Inlet	Outlet1	Outlet2	Outlet3
1	T (°C)	142.2	128.93	130.55	128.93
	$\dot{m}$ (kg/s) [e-4]	9.36	3.1403	3.0831	3.1403
2	T (°C)	142.2	129.09	130.85	129.09
	$\dot{m}$ (kg/s) [e-4]	9.36	3.1384	3.0787	3.1384
3	T (°C)	142.2	128.9	130.43	128.9
	$\dot{m}$ (kg/s) [e-4]	9.36	3.139	3.0874	3.139
4	T (°C)	142.2	128.71	130.53	128.71
	$\dot{m}$ (kg/s) [e-4]	9.36	3.1411	3.081	3.1411
5	T (°C)	142.2	128.69	130.76	128.69
	$\dot{m}$ (kg/s) [e-4]	9.36	3.1384	3.085	3.1384
6	T (°C)	142.2	128.67	130.78	128.67
	$\dot{m}$ (kg/s) [e-4]	9.36	3.1384	3.085	3.1384
7	T (°C)	142.2	128.38	131.31	128.38
	$\dot{m}$ (kg/s) [e-4]	9.36	3.1428	3.0776	3.1428
8	T (°C)	142.2	128.54	131.87	128.54
	$\dot{m}$ (kg/s) [e-4]	9.36	3.1426	3.0689	3.1426
9	T (°C)	142.2	128.34	131.54	128.34
	$\dot{m}$ (kg/s) [e-4]	9.36	3.1411	3.08	3.1411

의 개수를 다르게 하여 수치해석을 진행한 결과이고, case4, case5, case6는 실제실험에서 사용한 구멍의 직경과 같게 하고 구멍의 개수를 다르게 하여 수치 해석한 결과이고, case7, case8, case9는 타공판 구멍을 실제 실험에서 사용한 구멍의 직경보다 크게 하고 구멍의 개수를 다르게 하여 수치 해석한 결과이다. 모든 결과가 타공판을 사용하지 않았을 경우보다는 양쪽노즐의 출구부의온도가 1°C이상 향상된 결과를 보였으나 타공판 구멍의 직경이 15mm로 실제실험에 사용된 구멍의 직경보다 큰 경우에는 모든 경우 중에서 온도차이가 가장 큰 결과를 얻었고, 타공판 구멍의 직경이 5mm로 실제실험에서 사용된 구멍의 직경 보다 작을 경우의 타공판의 온도차이가 가장 작은 결과를 얻을 수 있었다. 그 중에서도 case2에서 구멍의 개수가 17개 일 때의 온도차이와 질량유량의 결과가 모든 출구부에서의 분포가 균등해지는 결과를 확인할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 물루를 시스템의 건조공정의 하나인 열풍건조로 에서 코팅물질이 도포된 웹의 품질을 향상시키기 위하여 실험과 전산유체해석을 이용하여 분석하였다. 실험과 수치해석에서 총3개의 출구 중 양쪽 끝의 출구의 온도가 서로 대칭되게 분포되어 상당부분 일치하는 결과를 얻었고, 타공판을 사용하였을 때 열풍건조로의 입구아래에서 유동의 저항을 주어3개의 출구에서의 온도분포와 질량유량의 차이가 타공판을 사용하지 않았을 때 보다 좀 더 일정하게 분포되는 것을 확인하였다. 그래서 타공판을 사용하였을 때 건조로의 성능이 향상되는 것을 알 수 있었다. 타공판의 구멍의 직경과 구멍의 개수를 다르게 하여 여러 경우의 수치해석결과에서 구멍의 직경이 5mm, 구멍의 개수가 17개 일 때 건조로의 성능이 가장 향상된 것을 확인하였다. 추후 타공판의 크기를 변화시키면서 건조로의 성능을 보다 더 최적화할 계획이다.

후 기

본 연구는 중소기업청의 기술혁신개발사업의 일환으로 수행하였음. [S2901285, 고투명 유연성을 가진 유-무기 하이브리드 초고경도 하드코팅 PET 필름개발]

참고문헌  
(References)

(1) Mujumdar, A. S., 1987, "Handbook of Industrial Drying," Marcel Dekker, Inc.

- (2) Strawinski, A., 1991, "Analysis of Paper Dryers Heat Consumption," *Drying'91*, pp. 567~590.
- (3) Stubbing, T. J., 1993, "Airless Drying: It's Invention, Method and Applications," *Trans IchemE*, Vol.71, Part A, pp. 488~495.
- (4) Kim, M.B., 1997, "Technology Status and Outlook for Domestic Dryers," *KICHE*, Vol.15, No.5, pp.398~403.
- (5) Kim, D.K., Kum, J.S., Kim, J.R., Kim, S.J., Chung, Y.H., Kim, D.K. and Kong, K.B., 2008, "Economic Evaluation Through Thermal Efficiency Elevation in Hot Air Drying Tower," *KSFME, Jour. Fish. Mar. Sci. Edu.*, Vol.20, No.3, pp.500~507.
- (6) Kang, W.J. and Hwang, J., 2009, "Study on CFD Analysis of Dying Plant with Rotary Kiln Type for Eco-Industrial Park," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol.8, No.4, pp.61~68.
- (7) Hong, S.C., Lee, J.H. and Jung, G.Y., 2009, "A Study on the Drying Characteristics of Conductive Ink by oven Drying System and the Hot-air Drying System," *Proceedings of the SAREK*, pp.1429~1434.
- (8) Kim, Y.M., Hong, S.C. and Lee, J.H., 2010, "An Experimental Study on the Drying and Curing Characteristics of Conductive Metallic Ink Using Combined IR and Hot Air Type in the Roll-to-Roll System," *Journal of the Semiconductor & Display Technology*, Vol. 9, No.2, pp. 73~78
- (9) Seo, Y.H., Chang, Y.B. and Kim, C.W., 2010, "Analysis on Aerodynamic Characteristics of Drying Process in R2R Printed Electronics," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol.27, No.3, pp.95~103.
- (10) Kim, S., Cho, S.W., Park, E.G. and Lee, K.B., 2013, "Geometric Optimization of Industrial Dryer for Reduction of Energy Consumption," *Proceedings of the Korean Society of Precision Engineering Conference*, Vol. 13, pp.1521~1522.