

세탁기 드럼 내부의 습기 방출 메커니즘에 대한 수치 연구

정충효^a, 손덕영^b, 라선욱^a, 최윤호^{b*}Numerical Study on the Discharge of Humidity in the Drum of
a Washing MachineChung-Hyo Jung^a, Deok-Young Sohn^b, Seon-Uk Na^a, Yun-Ho Choi^{b*}^a Samsung Electronics Co., Ltd.,

129, Samsung-ro, Yeongtong-gu, Suwon, Gyeonggi-do, 443-742, Korea

^b Department of Mechanical Engineering, Ajou University,

206, Worldcup-ro, Yeongtong-gu, Suwon, Gyeonggi-do, 16499, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	8	December	2015
Revised	31	December	2015
Accepted	5	January	2016

Keywords:

Washing machine
Relative humidity
Mass fraction
Vent
Convection-diffusion
Computational fluid dynamics

ABSTRACT

Washing machine manufacturers typically advise consumers to maintain the relative humidity in the drum less than 80% for three days after the termination of a washing cycle in order to prevent bacteria proliferation. A vent installed in the back of a washing machine is used to release moisture to satisfy this condition. Up to now, the design and installation of the vent have been based on experiments without understanding its roles and physical phenomena. In this study, various CFD results are presented in order to explain the physical mechanism of moisture release in a washing machine. Two methods of moisture release (diffusion and convection) were studied; diffusion was found to be the dominant process in removing moisture. Experiments were also performed to validate this behavior. In addition, this study will aid in the efficient design of vents to keep the relative humidity low inside the drum.

1. 서론

세탁기는 세탁 행정이 종료되면 세탁물을 빼낸 후에 방치하게 된다. 이때 드럼 내부에는 물기가 남아 있게 되고, 동시에 배수 펌프에도 여분의 물이 남아 있게 된다. 한편, 세탁기 사용 중에 드럼 내부는 외부보다 상대적으로 습도가 높으며, 드럼에서 세탁물을 빼낸 후에도 여전히 내부의 습도는 높게 유지된다. 뿐만 아니라 세탁기 드럼에 남아 있는 물기가 공기 중으로 증발하여 상대습도를 더욱 높게 한다. 또한 배수 펌프에 남아 있는 물도 드럼 내부의 상대 습도를 높게 하는데 기여할 수 있다. 이러한

이유로 인해서 세탁 종료 직후의 드럼 내부의 상대 습도는 90%를 상회한다. 이처럼 밀폐된 공간에서 장시간 동안 상대 습도가 높게 유지되면, 세균이 번식하는데 좋은 환경이 된다. 더욱이 집안의 온도가 적절하게 유지되면 세균이 번식하는데 최적의 환경이 조성된다. 세균은 드럼 벽면에 부착되어 있는 세탁물의 찌꺼기를 영양분 삼아 번식하게 되며, 대량으로 번식한 세균은 꽤 쾌한 냄새를 풍기게 하는 요인이 되기도 한다. 드럼에서 검출되는 세균으로는 대장균과 바실러스균, 방선균 등이 있다. 이러한 세균들은 세탁물을 통해서 언제든 인체로 옮겨갈 수 있으며, 이러한 경로를 통하여 어린이나 면역력이 약한 환자가 감염될 수

* Corresponding author. Tel.: +82-31-219-2346

Fax: +82-31-219-1611

E-mail address: ychoi@ajou.ac.kr (Yun-Ho Choi).

있다.

이러한 이유로 인한 세균 발생을 억제할 수 있도록, 세탁기 메이커들은 관리 지침을 정해 놓고 있다. 그것은 세탁 종료 시부터 3일이 경과한 시점에서 80% 이하의 상대습도를 유지할 수 있어야 한다는 것이다. 서두에서 언급한 바와 같이 밀폐된 공간에서 이 수치를 만족하는 것은 현실적으로 불가능하므로 이를 극복하기 위하여 세탁기 뒤편에 의도적으로 벤트(vent)를 설치하여 사용하고 있다. 이와 같은 벤트는 내부의 습도를 외부로 방출하는데 매우 유용한 수단이라고 할 수 있다. 현재 메이커에서는 벤트를 설치할 때 그 역할과 물리적 현상이 규명되지 않은 채 실험에 의존하여 설계를 진행하고 있다. 이와 같이 이론적 근거가 부족한 채 실험에만 의존하여 벤트 설계가 진행되어 많은 시간과 노력이 소모될 뿐만 아니라, 확신을 가지고 정확한 설계가 이루어지고 있지 못하다.

세탁기의 습도 방출과 유사한 사례가 전시 케이스(display case) 연구에서도 확인이 된다^{1,2}. 전시 케이스의 내외부의 습도 이동은 확산(diffusion)과 압력 변화에 의한 것으로 보고되고 있다. 그러나 압력차 보다는 확산에 의한 습기의 이동량이 훨씬 많기 때문에 압력차에 의한 값은 무시하고 있다. 또한, 전시 케이스에 임의의 벤트를 설치하여 이에 따른 공기교환 횟수를 구하여 기밀 성능을 평가하고 있다. 이에 따르면, 벤트의 크기가 커질수록 공기 교환 횟수가 증가하여 내부의 습기가 빠르게 방출(확산)되는 것이 증명되었다. 한편, 저습·항온 상태를 유지시키는 건조실(dry room)에 대하여 강제 대류와 습도의 확산을 동시에 고려하여 수분 배출 효율을 연구한 결과도 보고되어 있다³. 이 보고에서는 유동장과 온도장의 방정식은 정상상태 조건으로 풀고 있으며, 습도는 대류 및 확산 방정식으로부터 비정상상태 조건으로 구하고 있다.

세탁기 내부의 습도는 벤트의 사이즈와 개수, 그리고 위치에 따라 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 먼저 이를 확인하기 위하여 다양한 메이커의 제품을 대상으로 습도를 측정한다. 이와 같은 실험을 통하여 습도 방출의 메커니즘을 이해하고, 이를 토대로 실제 제품에 적용할 수 있는 적합한 수치해석 방법과 이론적 설명을 도출하고자 한다^{4,5}. 이러한 과정을 통하여 세탁기 드럼 내부 습도를 효과적으로 줄일 수 있는 개선 방안을 마련할 수 있는 토대를 구축하고자 한다.

2. 세탁기 내부의 습도 실험

세탁기 사용 직후에 드럼 내부의 상대습도를 알기 위하여 실험을 먼저 수행한다. 실험은 여러 메이커의 세 가지 모델에 대하여 동시에 실시하며, 이를 통해 습도 방출의 이론적인 메커니즘을 정립하는데 필요한 기초 데이터로 활용하고자 한다. Fig. 1은 본 연구에서

사용하는 대표적인 드럼 및 벤트의 구조를 보여준다. 여기서 벤트는 세탁기 내부의 공기가 외부로 출입할 수 있는 통로를 지칭하며 호스 및 세제통 하부의 틈새(혹은 세탁조 내부와 연결되는 모든 틈새)를 포함한다. 예를 들어, Fig. 1(b)의 우측 벤트는 세제 주입구(린스 주입구) 하부에 있는 틈새를 가정한 것이다. 특히 세제 주입구의 배치는 세탁조 내부의 습도를 방출하는 주요 인자 중의 하나이다.

Table 1은 실제 실험 대상 모델과 사용한 벤트의 개수를 나타낸다. 실험은 항온/항습 챔버에서 이루어진다. 이때 챔버에서 배출되는 기류가 세탁기 습도 방출에 영향을 미치지 않도록 세탁기 주변에 공기 차단용 종이 블록을 설치한다. 드럼 내부의 적정 습도는 실험 실시 72시간 이후에 바스켓(spinner basket)의 상대습도가 80% 이하를 유지해야 한다. 습도 측정은 아래의 조건에서 이루어진다.

- (1) 챔버의 운전 조건은 습도 60±5%, 온도 22.2±2.78°C로 유지한다.
- (2) 실험에서 1 사이클은 드럼에 질량 추(AHAM load) 3.63 kg(8 pound)를 부여하고 1 회 세탁을 실시하는 것을 의미한다. 1 사이클 이후에 세탁기의 전원을 off 시킨다.
- (3) 세탁 행정의 코스는 cold wash/cold rinse로 설정한다.
- (4) 온습도 로거(logger)는 normal 사이클 이후 바스켓 바닥에 설치한다.
- (5) 세탁기의 도어는 1 사이클 동작 이후에 72시간 동안 닫힌

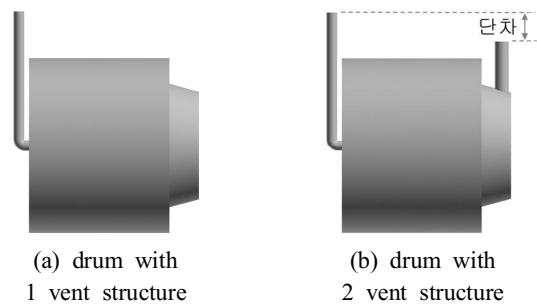


Fig. 1 Typical structure of drum and vents used for the present study

Table 1 Specifications of four test models used in the experiment (relative humidity of air=60.6%)

Maker	Volume capacity (m ³)	Number of vents	Size (mm)	Humidity (%)
A	0.107	2	55	69.5
B	0.113	1	32	94.3
A	0.096	1	30	99.9
C	0.113	1	37	84.2

상태를 유지한다.

(6) 세탁기 주변 환경을 측정하기 위해 한 개의 온습도 로거는 세탁기 위에, 다른 한 개는 세탁기로부터 1.52 m 떨어진 거리에 설치한다.

(7) 실험이 종료되는 시각에 측정 로거의 값을 읽도록 한다.

Fig. 2는 여러 메이커의 드럼 내부의 시간에 따른 상대 습도를 비교하여 보여준다. 그림으로부터 제품별로 습도에 편차가 있다는 것을 알 수 있다. 일반적인 습도 규정인 80%를 만족시키기 위해서는 A사(0.107 m³)와 같은 구조인 2 벤트 구조가 바람직한 것으로 보인다 (Table 1 참조).

만약 습도 기준을 B사와 C사의 수준으로 목표를 낮게 정한다면 1 벤트 구조를 기본으로 하고, 세제통의 밑 부분의 틈새들을 추가적인 통기관으로 활용해야 한다. 특히 C사 제품에서는 세제통 손잡이 밑 부분에 공기가 순환될 수 있는 통기관이 설치되어 있어 비교적 낮은 상대 습도를 보인다. 이처럼 실험 결과로부터 얻을 수 있는 사항은 벤트의 직경이 클수록, 벤트 수가 많을수록 드럼 내부의 상대 습도는 낮아진다는 것이다.

한편, 두 개의 벤트를 사용하는 구조에서, 상대 습도에 영향을 미치는 인자로는 벤트 높이 간의 단차를 지적할 수 있다 (Fig. 1 참조). 더불어 세제통과 벤트 사이의 단차도 함께 지적된다. 이와 같은 단차는 공기의 정수압 차이를 유발시켜 대류를 발생시킬 수 있기 때문이다. 이에 대해서는 4장의 수치해석 계산결과에서 실험 결과와 함께 비교 검토하기로 한다. 또한 벤트의 수를 늘리고, 그 직경을 확대할 경우, 세탁 중에 드럼 내부에서 발생하는 소음이 외부로 많이 방출된다는 단점이 있다. 또한, 벤트의 수를 증가시킬 경우, 재료가 증가하여 바람직스럽지 않게 된다. 최적의 벤트 설계를 위해서는 이러한 점들을 고려하는 것이 필요하다.

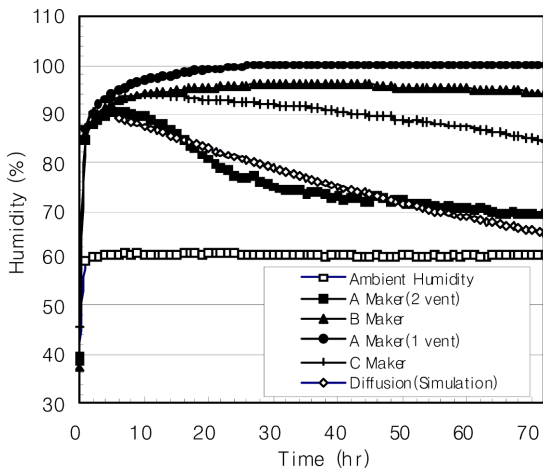


Fig. 2 Comparison of time histories of relative humidities in the four test models

3. 수치해석 방법

본 연구에서는 상용 CFD 코드인 FLUENT^[6]를 이용하여 유동 해석을 수행하였다. 지배방정식은 3차원, 비압축성, 층류 Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) 방정식을 고려하였으며, 특히 드럼 내부의 H₂O 농도의 거동은 아래의 수식으로 기술할 수 있다.

$$\frac{\partial(\rho y_i)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho y_i \vec{v}) = \vec{\nabla} \cdot (D_{ij} \vec{\nabla} \rho y_i) + S_i \quad (1)$$

여기서 대류가 발생하지 않는다면 좌측의 대류항을 무시할 수 있다. 그리고 드럼 내부에서 응축이 일어나지 않는다면 생성항(S_i)을 무시할 수 있다. 따라서 식 (1)은 확산항만이 남게 되고, 궁극적으로 H₂O의 질량 분율(mass fraction)(y_{H₂O})을 구하면 된다. H₂O의 질량 분율을 구하게 되면 아래의 수식을 이용하여 공기의 질량 분율을 구할 수 있다.

$$y_{air} + y_{H_2O} = 1, \quad \eta_{air} + \eta_{H_2O} = 1 \quad (2)$$

한편, 건조 공기와 수증기의 몰 분율(mole fraction)(η_{air}, η_{H₂O})을 이용하여 상대습도를 구할 수 있다.

$$H(\%) = \frac{\eta_{H_2O}}{\eta_{air}} = \frac{P_{H_2O}^*}{P_{saturated-H_2O}^*} = \frac{\eta_{H_2O} \times P_{system}}{P_{saturated-H_2O}^*} \times 100\% \quad (3)$$

식 (3)은 Fluent 코드에 의해서 계산된 질량 분율을 가시화 처리하기 위하여 필요한 수식이다. 벤트의 외부와의 경계면에 적용할 경계조건으로서의 H₂O의 질량 분율은 아래의 수식으로부터 구할 수 있다.

$$x_{H_2O} = \frac{\eta_{H_2O} \times M_{H_2O}}{(\eta_{H_2O} \times M_{H_2O}) + (\eta_{air} \times M_{air})} \quad (4)$$

식 (4)에서 필요한 공기의 분자량(M_{air})과 H₂O의 분자량(M_{H₂O})은 각각 28.966 kg/kmol과 18.01534 kg/kmol이 된다. 또한 H₂O의 몰 분율은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\eta_{H_2O} = \frac{H(\%) \times P_{sat}^*}{101325(Pa) \times 100} \quad (5)$$

식 (5)에서 포화 수증기압은 온도의 함수이므로 에너지 계산이 필요하게 된다. 포화 수증기압과 온도의 상관 관계식은 기존의 문헌^[7]을 참고하여 아래와 같은 근사식(사용 온도 범위: 273.15~

373.15 K)으로 기술할 수 있다.

$$P_{sat}^* (Pa) = 338474.32156 + (4975.5537 \times T) - (114.66949 \times T^2) + (0.69911 \times T^3) - (0.00179 \times T^4) + (1.6937 \times 10^{-6} \times T^5) \quad (6)$$

식 (5)에서 경계조건으로 필요한 드럼 내·외부의 상대습도는 실험에서 구한 값을 이용한다. 또한 대기 및 세탁기 내부의 온도는 실험실 온도인 22°C를 사용하고, H₂O의 확산 계수는 10⁻⁵~10⁻⁷ m²/s로 한다.

4. 계산 결과 및 검토

4.1 드럼 내부 습기의 확산 해석

확산 해석은 드럼을 간략화한 2D 해석으로부터 시작하여 3D 해석으로 확장하기로 한다. 상용코드 FLUENT를 사용하여 비정상 계산으로 20시간까지 수행한다. 계산 case는 Fig. 3의 형상을 기본 모델로 하고, 우측의 통기관이 -y 방향으로 향하는 경우, 그리고 우측 통기관이 없는 경우를 포함하여 3가지이다. 계산은 식 (1)의 H₂O 확산 방정식을 푸는 것이 되며, 드럼 내부 및 벤트의 경계면의 상대습도는 실험 결과를 토대로 각각 90%와 40.9%로 한다.

Fig. 4는 확산 해석에 의한 드럼 내부의 질량 평균 상대습도의 추이를 나타낸다. 앞으로 본 논문에서 제시하는 상대습도의 그래프는 질량 평균 상대습도이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 H₂O의 확산만을 고려할 경우, 두 개의 벤트의 배치(outlet up과 outlet down)에 따라서 상대 습도의 차이가 없다. 또한 상대습도가 정상 상태에 도달하는 전체 시간 중 초기 10시간 동안에 그 값이 절반 이상으로 줄어드는 것을 알 수 있다. 그리고 벤트가 한 개만 있을

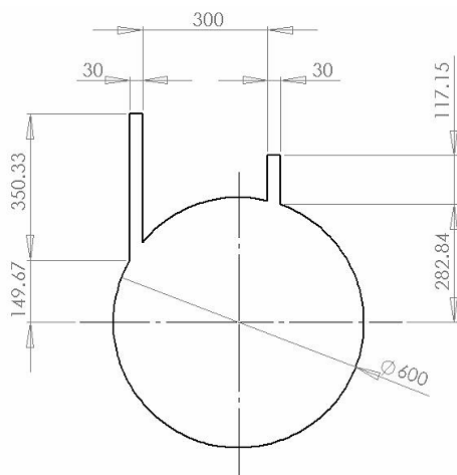


Fig. 3 2D model for diffusion analysis in the drum of a washing machine

경우는 두 개일 경우와 비교하여 20시간 시점에서 습도가 절반으로 밖에 줄어지지 않는다. 이러한 내부 습도의 감소 패턴은 타 연구 결과^{[1,2]}}에서도 볼 수 있다.

3D 확산 해석에는 Fig. 5와 같은 세탁기 드럼 모델을 사용한다. 기본적인 계산 조건은 앞서 기술한 내용과 동일하다. 다만, 드럼 내부와 벤트 경계면의 습도는 각각 89.3%과 41%로 한다. Fig. 6은 3D 확산 해석의 결과로서 1시간이 경과해도 드럼 내부의 습도는 거의 변동이 없는 것을 볼 수 있다. Fig. 7은 앞서의 2D 습도해석 결과(Fig. 4의 경우보다 시간을 연장함)와 3D 습도해석 결과를 비교한 것이다. Fig. 7과 Fig. 2의 실험 결과를 비교하면 해석 결과를 보다 잘 이해할 수 있다. Fig. 2에서 제시한 A사(0.107 m³)의 실험 결과는 Fig. 7의 3D 결과와 유사한 경향성을 보이고 있다. 비교를 위해 Fig. 2에 3D 확산 해석 결과를 같이 도시하였다. 비록 해석 결과가 실험 결과보다는 드럼 내부의 습도가 좀 더 빠르게 감소하고 있지만, 실험 결과를 잘 반영하고 있는 것으로 보인다. 한편, 2D에 의한 해석 결과는 42시간 경과 후에 원통 내·외의 습도가 동일하게 된다.

4.2 드럼 내부 습기의 대류 해석

드럼 내부의 바스켓(spinner basket)에는 액체가 통과할 수 있는 작

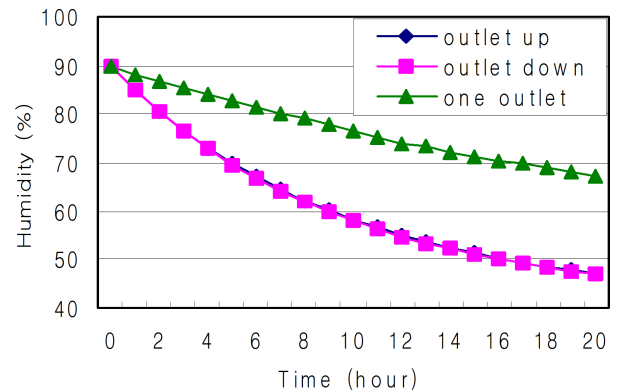


Fig. 4 Time histories of relative humidity inside the drum (2D)

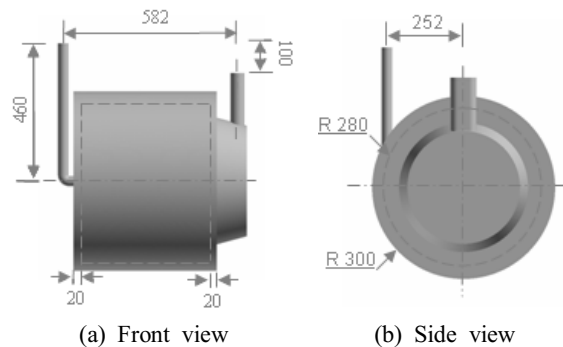


Fig. 5 3D model for diffusion analysis in drum of a washing machine

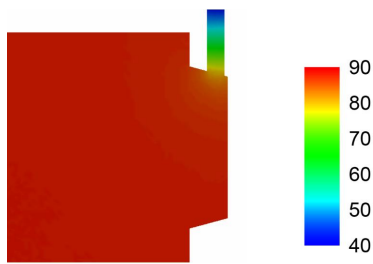


Fig. 6 Moisture distribution for the 3D diffusion analysis (t=1 hr)

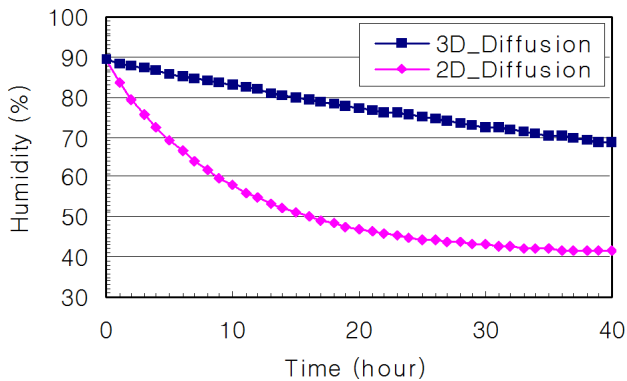
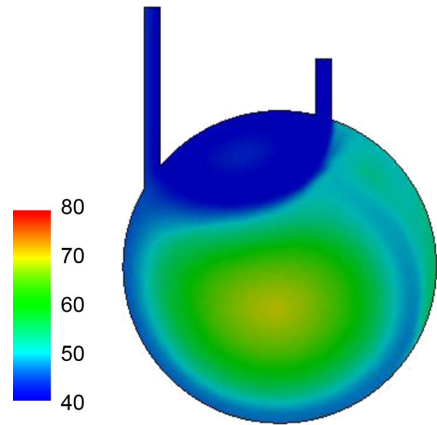


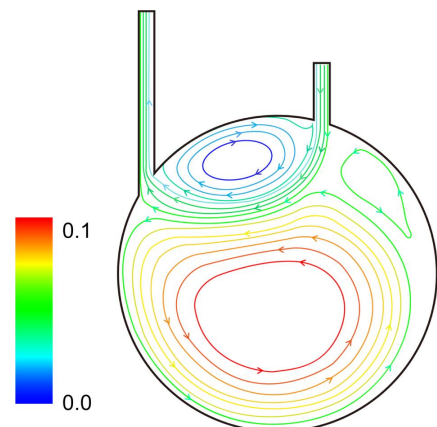
Fig. 7 Time histories of relative humidity inside the drum for 2D and 3D model

은 구멍(직경 3 mm)이 약 2천 개 정도 뚫려 있다. 그런데 바스켓 안에 있는 습기는 구멍을 통과하여 외부로 방출되는데, 바스켓의 개구율이 작아서 습도 방출은 원활하게 이루어지지 않는다. 이러한 특성을 반영하기 위하여 해석 모델에 다공성면을 추가한다. 해석을 위하여 2D 모델로 Fig. 3(다공성 조건 고려)과 3D 모델로 Fig. 5를 사용하되, 원주 외곽 내측에 점선으로 표시된 곳을 다공성 면으로 활용한다 (Fig. 5 참조). 여기서 다공성 면의 전체 개구율은 30%로 하고, 구멍의 간격은 10 mm로 한다. 그리고 드럼 내부의 초기 습도는 81.5%로 하고, 벤트 경계면의 습도는 37%로 한다. 또한 벤트 경계면의 압력 조건으로는 두 벤트의 단차(100 mm)에 의한 정수압의 차이(ρgh)에 따라, 높은 벤트에 대해서는 -1 Pa, 낮은 벤트에 대해서는 0 Pa로 설정한다. 이와 같은 경계 조건은 공기의 대류 현상을 발생시킬 수 있다.

Fig. 8은 다공성 조건을 부여하지 않을 때의 습도와 유선에 대한 2D 해석 결과이다. 외부 공기는 낮은 층의 통기관으로 들어와서 높은 층의 통기관으로 곧 바로 빠져 나가고 있는 것을 볼 수 있다. 이때 드럼 내부의 유속은 비교적 빠른 1 m/s 정도이다. Fig. 9는 다공성 조건을 고려하여 계산한 습도에 대한 2D 해석 결과이다. 시간이 경과함에 따라서 오른 쪽 벤트로 들어온 외부 공기가 원통을 통과하여 왼 쪽 벤트로 배출되고 있다. 원통 내부의 습기는 3분 정도가 경과하면 대부분 방출하는 것을 알 수 있다. 습기 변화에 대한 상세한 데이터는 Fig. 10에서 확인할 수 있다. 이처럼 대류



(a) Humidity distribution (%)



(b) Streamline

Fig. 8 2D computational results for humidities and streamlines inside the drum using a non-porous model (t=30 s)

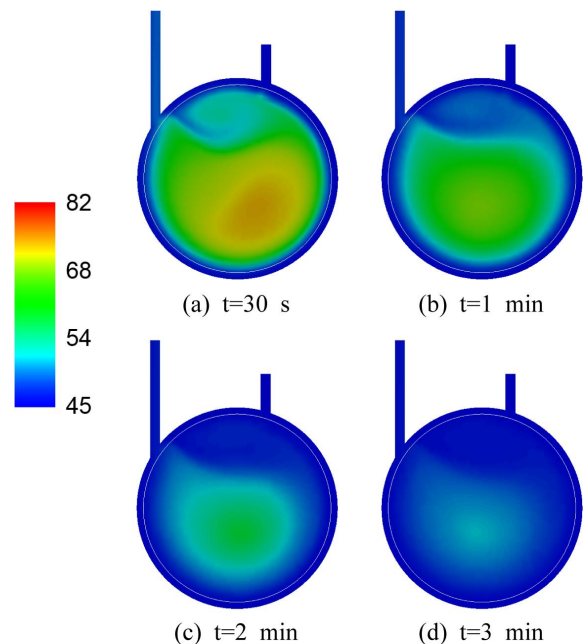


Fig. 9 2D computational results for humidities inside the drum using a porous model (porosity 30%)

효과를 고려하면 2D의 경우 다공성조건을 포함해도 대략 10분 이내에 원통 내·외부의 습도는 평형 상태에 도달한다. 이것은 확산 조건만을 고려한 Fig. 7의 결과와 대조적이다. Fig. 11은 대류(확산 포함) 조건을 고려한 초기 5분 동안의 3D 해석 결과이다. 낮은 쪽 벤트로 들어온 외부 공기는 터브(tub) 밑 부분에서부터 채워져 가는 것을 알 수 있다. 2D 해석 보다는 습기가 느리게 외부로 방출되나, 30분 정도가 경과하면 드럼 내·외부의 습도는 평형 상태에 도달한다 (Fig. 10 참조).

Fig. 10에서 확인되는 바와 같이, 벤트에 압력 경계조건을 부여하면, 대류에 의한 습기 방출 효과가 지배적이 되어서 확산 효과는 미미하게 된다. 그렇지만 실험에서는 내부 습도가 72시간이 경과되어도 크게 줄어들지 않는다 (Fig. 2 참조). 이러한 점을 고려하면, 실제 제품에서는 대류에 의해서 습기가 방출되는 것보다는 확산에 의해서 방출된다고 볼 수 있다. 이와 유사한 연구가 박물관의 전시 케이스의 기밀성능 평가에서 확인된다. Kim 등^[2]은 전시 케이스의

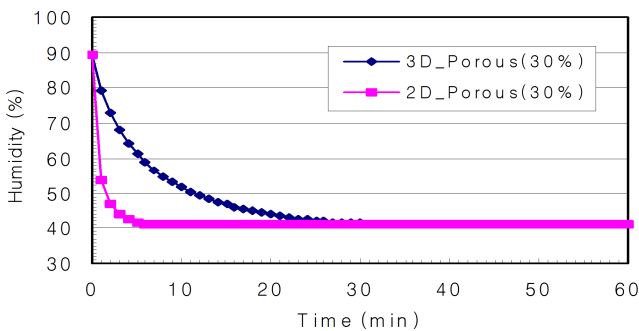


Fig. 10 Time histories of humidities inside the drum for 2D and 3D porous models

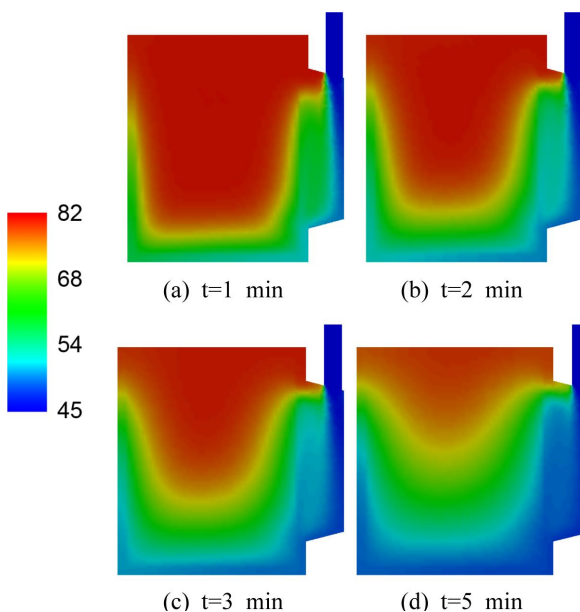


Fig. 11 3D computational results for humidities inside the drum using a porous model (porosity 30%)

공기 교환횟수(벤트 개구율과 동등한 의미)가 증가하면 내부의 가스가 확산에 의해서 방출되는 것을 증명하였다. 이처럼 드럼 내부의 습기는 대류에 의해서 방출된다기보다는 확산에 의해서 벤트나 틈새로 천천히 장시간에 걸쳐서 빠져나가는 것으로 보인다.

4.3 상대습도 차이에 의한 유속 계산

본 절에서는 드럼 내·외의 상대 습도 차이에 의해서 유발되는 공기의 속도를 경계조건으로 이용하여 해석을 수행한다. 해석 모델은 Fig. 5와 동일한 모델을 사용하나 우측 벤트를 Fig. 12와 같이 드럼 상부로 이동시켰다. 이와 같이 드럼 상부에 벤트를 배치하는 것은 세제 주입구를 세탁기 측면에서 상부로 이동시키는 것을 가정한 해석 모델이다. 그리고 바스켓의 개구율은 실제와 동일하게 3%로 하고, 드럼 내부의 습도는 89.3%, 그리고 벤트의 경계면의 습도는 41%로 한다. 드럼 내·외의 상대 습도를 알고, 드럼 내에서 완전 혼합이 이루어지는 것을 가정한다면 아래의 식으로 유속을 구할 수 있다.

$$H(t) = H_i e^{-(Q/V)t} \quad (7)$$

여기서 H_i , Q , 그리고 V 는 각각 초기 습도, 유량과 챔버 체적을 나타낸다. 이 식을 유속에 대하여 전개하면 다음과 같이 된다.

$$v_{inlet} = \frac{V}{At} \ln\left(\frac{H_i}{H(t)}\right) \quad (8)$$

식 (8)을 이용하여 유속을 구하면 약 0.0003527 m/s이 된다. 한편, Fig. 8에서는 유속이 약 1 m/s 전후로 계산이 되었다. 이처럼 압력 조건에 의해서 구해진 유속과 확산 조건에 의해서 구해진 유속에는 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 여기서는 식 (8)에서 구해진 유속을 이용하여 계산을 진행하고자 한다. Fig. 12의 우측 벤트로 유입하는 유속으로 0.003527 m/s와 0.0003527 m/s의 두 가지 경우를 고려하여 해석을 진행한다. Fig. 13은 입구 유속 조건에 따른 유선에 대한 해석 결과이다. 유속 조건에 따라서 드럼 내부의 공기

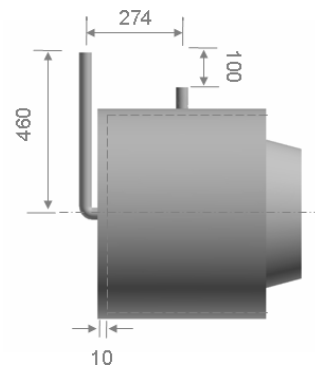


Fig. 12 3D model of a drum with two vents

의 이동 궤적이 확연히 다르다는 것을 알 수 있다. Fig. 14는 시간에 따른 습도의 변동 추이를 나타낸다. 유속이 0.0003527 m/s일 때, 확산 해석에 의한 결과에 근접한 습도 값을 나타내고 있다. 여기서 확산 해석보다 빠르게 습도가 감소하는 것은 벤트에 유속을 강제로 부여했기 때문이다. 반면에 유속 조건을 10배로 크게 하면 습도가 급격하게 감소하는 것을 볼 수 있다. 따라서 유속을 보다 더 크게 가져가면 대류가 지배적으로 작용하게 되어, 실험 결과를 전혀 반영할 수 없게 된다. 한편, 계산 모델에 다공성 조건을 부여하면, 계산 시간은 증가하는 반면, 습도는 실험값에 더욱 근접하게 된다.

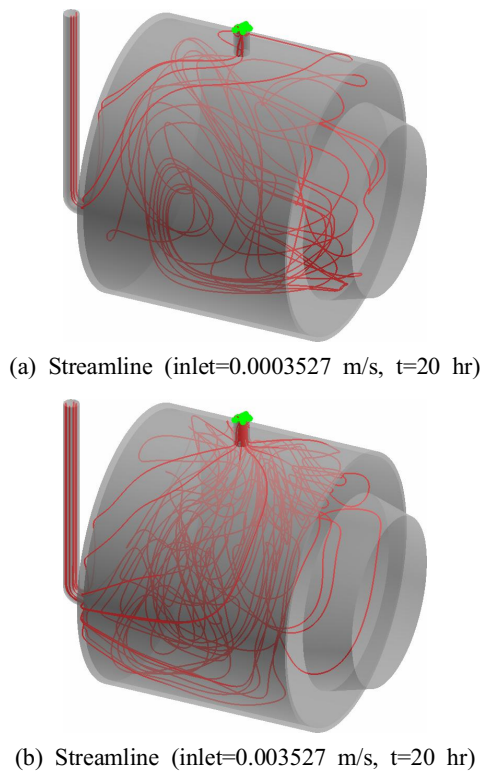


Fig. 13 Comparison of streamlines inside the drum according to inlet velocities

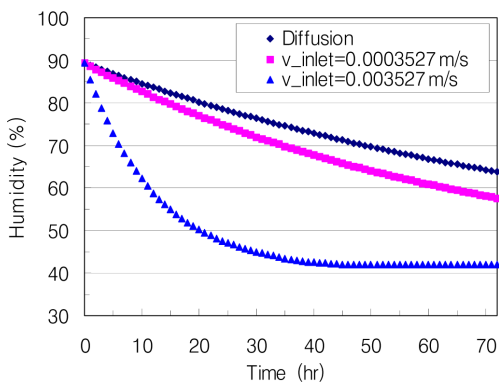


Fig. 14 Comparison of humidities inside the drum according to inlet velocities with those of diffusion analysis (3D)

5. 결론

세탁기는 사용 후 72시간이 지난 후에 드럼 내부의 상대습도가 80% 이하를 유지할 수 있어야 세균 번식을 줄일 수가 있다. 본 연구에서는 이 점을 확인하기 위하여 여러 메이커의 제품들에 대한 벤치 마킹을 실시하였다. 또한 드럼 내부의 습기가 외부로 방출하는 메커니즘을 이해하기 위하여 실험과 수치계산을 병행하여 비교하였다.

드럼 내부의 습기가 외부로 방출하는 현상을 설명하는 데에는 두 가지 관점이 있다. 그 하나는 벤트를 통하여 습기가 확산에 의해 발생하는 이론이다. 다공성 모델에 대하여 3D 확산 조건으로 계산한 결과는 실험 결과를 잘 반영하였다. 드럼 내부의 습도와 벤트 경계면의 습도가 각각 89.3%, 41%일 때, 72시간이 경과한 후에 드럼 내부의 상대습도는 65.3%로 계산이 되었다. 해석 모델과 유사한 2 벤트 제품(A사 모델, 0.096 m³)의 실험에서는 69.5%로 측정이 되었다 (Table 1 참조).

습기 방출의 다른 하나의 관점은 드럼에서 대류에 의해 발생하는 현상이다. 이는 중력 방향으로 단차가 있는 벤트들(틈새 포함)에 정수압 차이가 발생하여 유동이 발생하는 것이다. 이와 같은 대류 효과를 해석하기 위하여 벤트 단차에 의한 정수압을 계산하여 유동 해석의 압력 경계조건에 적용하였고, 또한 바스켓에 뚫려있는 약 2천개의 작은 구멍들을 모사하기 위하여 다공성 모델을 고려하였다. 결과는 대류에 의한 습기 방출 효과가 지배적이 되어서 확산 효과는 미미하게 되며, 3D 계산에서는 30분 만에 드럼 내·외부의 습도가 평형 상태에 도달하여 실험 결과를 반영하지 못했다.

벤트를 통과하는 유속은 실험을 통하여 알고 있는 드럼 내·외의 상대 습도를 가지고 계산되었다. 유속은 0.0003527 m/s로 계산이 되었고, 이 수치보다 큰 유속을 사용하여 해석을 수행하게 되면, 대류가 지배적으로 되어 실험 결과를 반영하지 못하였다.

실험 결과로부터 얻을 수 있는 사항은 벤트의 직경이 클수록(37 mm 이상), 벤트 수가 많을수록 드럼 내부의 상대 습도는 낮아진다. 한편, 벤트 수를 늘리고 직경을 확대할 경우, 세탁 중에 드럼 내부에서 발생하는 소음이 외부로 많이 방출된다는 단점이 있다. 뿐만 아니라 재료비가 증가하게 되는데, 향후 이러한 점을 고려한 최적 설계가 필요하다.

References

- [1] Kim, J. Y., Noh, K. C., Oh, M. D., 2002, Study on the Performance Evaluation of the Air-tightened Exhibition Case in the Museum, Korean Journal of Air-conditioning and Refrigeration Engineering, 14:2 184-190.
- [2] Kim, J. Y., Oh, M. D., 2003, Analysis of Dynamic Humidity Control

- Characteristics of Museum Showcase with Adsorption Material, Korean Journal of Air-conditioning and Refrigeration Engineering, 15:12 1070-1077.
- [3] Lee, K. S., Lim, K. O., Ahn, K. H., Jung, Y. S., 2001, Analysis of Temperature and Humidity Distribution in a Dry Room, Korean Journal of Air-conditioning and Refrigeration Engineering, 13:6 524-532.
- [4] Ji, M. K., Bae, C. W., Chin, J. H., Jeong, H. M., Chu, M. S., Chung, H. S., 2000, Numerical Analysis for Temperature and Humidity in Bed Mattress, Proceeding of the Summer Conference on Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, 56-61.
- [5] Kim, T., 2001, Indoor Cooling/Heating Load Analysis Based on Coupled Simulation of Convection, Radiation, and HVAC System Control for Attaining a Given PMV Value, Proceeding of the Spring Conference on Architectural Institute of Korea, 21:1 673-677.
- [6] ANSYS, 2011, ANSYS FLUENT 13.0 - User's Guide, ANSYS, Inc.
- [7] The Japan Society of Mechanical Engineers, 1997, JSME Data Book: Thermophysical Properties of Fluids, The Japan Society of Mechanical Engineers, Tokyo, 162.