

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2010.34.3.219

## 열복사를 적용한 드럼 건조기의 건조 메커니즘 분석 및 성능 예측에 관한 연구

최철진\* · 장정현\*\* · 김종민\*\* · 김만영\*\*†

\* LG 전자 HACC 연구소, \*\* 전북대학교 항공우주공학과

### Numerical Investigation of the Effect of IR Heating on Drying Mechanism in a Tumble Dryer

Chul Jin Choi\*, Jung Hyun Jang\*\*, Chongmin Kim\*\* and Man Young Kim\*\*†

\* HACC Laboratory, LG Electronics

\*\* Dept. of Aerospace Engineering, Chonbuk Nat'l Univ.

(Received March 31, 2009 ; Revised January 4, 2010; Accepted January 6, 2010)

**Key Words :** Tumble Dryer(드럼 건조기), IR Heater (적외선 가열기), Drying Mechanism(건조 메커니즘), Moisture Transport(수분 전달), Drying Time(건조시간)

**초록:** 텀블형 드럼 건조기의 적외선 건조 과정동안의 온도 및 수분량의 변화를 예측할 수 있는 2 차원 수학적 모델을 개발하였다. 본 모델에서는 건조대상 물질의 액체 수분의 이동과 건조공기의 유동 및 열전달을 고려하였다. 유체의 유동과 열전달 현상, 그리고 복사열전달은 유한체적법을 이용하여 해석하였다. 텀블 건조기의 2 차원 모델을 모사하기 위한 지배방정식을 소개한 후 적외선 히터, 히터의 온도, 그리고 가열 패턴에 따른 수치해석을 수행하였고, 적외선 히터를 도입함으로써 건조시간을 감소시킬 수 있음을 제시하였다.

**Abstract:** A two-dimensional mathematical model was developed to predict the temperature and moisture-content profiles of a tumble dryer during infrared drying. The model is based on the movements of liquid water and moisture in the object and on the fluid and heat transfer in the drying air. The model was solved by the finite volume analysis for the fluid, temperature, and radiation intensity fields. After deriving the governing equations and developing the two-dimensional tumble dryer models, numerical investigations were carried out to examine the effects of various parameters such as the heater temperature and the heating patterns on the drying mechanism of the tumble dryer. All the results show that the drying time can be reduced by using the IR heater.

- 기호설명 -

- $I$  : 복사강도
- $j$  : 수분 플럭스
- $T$  : 온도
- $X$  : 수분함유량

### 1. 서론

전통적으로 섬유의 건조는 바람과 실외에서 주로 일어났다. 하지만 실외에서의 건조는 날씨 조건에 크게 영향을 받기 때문에 최근에는 드럼 건조기의

수요가 점차 증가하고 있다. 날씨, 계절의 제약조건에서 자유롭다는 장점 이외에도 드럼 건조기의 사용은 고효율 가스버너에 의한 열풍으로 햇볕으로 말리는 것 이상의 살균 효과를 얻을 수 있다는 장점과 세탁물을 일정하게 회전시키면서, 섬유 한올 한올에 이르기까지 열풍을 불어 넣어 주므로 햇볕에 말리는 것 같은 뻣뻣한 느낌보다는 부드러움을 느끼게 해주는 장점을 갖는다. 뿐만 아니라, 직사광선에 옷이 직접 노출되었을 경우에는 색이 바래는 현상이 나타날 수도 있으며 부분적으로 옷이 건조되는 경우도 있는 반면에 건조기를 사용하면 상대적으로 옷의 손상이 적은 효과를 볼 수 있다. 여기에, 오늘날의 건조시간 단축에 대한 현대인들의 요구와 건조 공간의 부족은 드럼 건조기의 필요성을 강화시키고 있다. 이에 따라

† Corresponding Author, manykim@jbnu.ac.kr

미국이나 유럽 시장에서는 수십 년 전부터 세탁기와 함께 드럼 건조기가 가정 필수품으로 일반화되어 있다. 특히, 유럽에서는 연간 4 백만 대 이상의 드럼 건조기가 팔리고 있으며 판매량이 지속적으로 증가하고 있는 추세이다. 한편, 우리나라에서는 아직까지 드럼 건조기의 사용이 미국이나 유럽에서와 같이 일반화되진 않았지만, 최근 기후 온난화로 인하여 여름 날씨가 고온 다습한 아열대성 기후로 바뀌면서 드럼 건조기의 수요가 점차 증가하고 있는 추세이다.

드럼 건조기의 사용은 자연적인 건조방식에 비해 많은 장점들을 갖는다. 하지만 옷감의 수축 문제와 드럼 건조기의 높은 전기 에너지 소비율 그리고 이와 관련된 환경적인 문제들의 인식은 좀 더 에너지 효율적인 드럼 건조기 개발의 필요성을 대두시키고 있다. 특히, 미국의 경우, 일반 가정에서 사용되는 전기 에너지의 3%가 드럼 건조기에 의해 소비된다고 보고 되고 있다.<sup>(1)</sup> 이에 따라 드럼 건조기의 효율을 개선하기 위한 연구들이 활발히 진행되고 있다.<sup>(2-7)</sup> Ruiter 등<sup>(2)</sup>은 open cycle dryer 의 에너지 소비율을 줄이기 위한 연구를 수행하였고 Bassily and Colver<sup>(3)</sup>는 건조기 내부의 누기(leakage)를 줄이고 건조기 내부에서 수분의 질량 전달 수를 증가시키기 위한 팬(fan)의 속도, 드럼 속도 그리고 가열기의 동력에 대한 최적 조건을 적용함으로써 open cycle dryer 의 효율을 개선시킬 수 있다고 보고 하였다. 또한, Bassily and Colver<sup>(4)</sup>는 건조기에서의 최적 운용 조건이 에너지 소비와 건조시간 측면에서 상당한 향상을 가져다 줄 수 있다고 보고했다. Deans<sup>(5)</sup>와 Bansal 등<sup>(6)</sup>은 그들의 연구를 통해 실내 공기의 온도와 상대습도가 건조기 에너지 소비를 결정하는 중요 인자라고 결론을 내렸다. 또한, Deans<sup>(5)</sup>는 가열기로 공급되는 동력을 증가시키면 드럼 건조기의 에너지 소비와 건조 시간을 단축시킬 수 있다고 보고 하였다. Hekmat and Fisk<sup>(7)</sup>는 내부 공기유동과 가열기로 공급되는 동력을 감소시킴으로써 open cycle dryer 에서 에너지 소비를 8%까지 줄일 수 있다고 보고하였다. Beiron and Brunzell<sup>(8)</sup>의 연구에서는 건조물의 양에 따른 가열기 공급 동력을 조절하여 건조기의 소비동력과 건조시간 사이에서 최적 조건을 발견하였다.

한편, 지금까지 드럼 건조기의 에너지 소비를 줄이기 위한 방법으로 열회수 열교환기(heat recovery heat exchangers)를 설치하는 방법과 건조공기를 재순환시키는 방법이 제시되어 왔다. Conde<sup>(9)</sup>는 closed cycle dryer(100% 재순환)와 partial recirculation dryer 가 open cycle dryer 와 비교하여 비에너지 소비가 더 크다고

보고하였다. 하지만 Conde 의 연구에서 열회수 열교환기의 사용은 에너지 건조 효율(energetic drying efficiency, 건조기로 공급되는 총 에너지에 대한 가열과 증발에 이론적으로 필요한 에너지의 비율)을 증가시킨다는 것을 확인할 수 있었다. Lambert 등<sup>(10)</sup>의 연구는 배출가스의 75%를 재순환 시키는 것이 가장 에너지 효율적임을 보여주었다. 그들의 연구에서는 에너지 효율을 전체 공급 에너지에 대한 증발에 필요한 에너지의 비율로 정의하였다. Hekmat and Fisk<sup>(7)</sup>는 배출가스의 67%를 재순환 시키는 것이 가장 적합하다고 보고 하였다. 하지만 이들의 연구에서도 open cycle dryer 에 비해 closed cycle dryer 의 에너지 소비가 대략 6% 정도 크다고 보고되었다. 또한, Deans<sup>(5)</sup>의 연구에서는 배출 공기의 온도가 너무 낮으면 배출 공기를 부분적으로 재순환 시키는 방법을 사용할 수 없음을 보여주었다. Bansal 등<sup>(6)</sup>의 연구에서는 열회수 열교환기를 설치한 open cycle dryer 가 피건조물의 단위 부하당 공급되는 에너지를 14% 감소시키고 closed cycle dryer 가 open cycle dryer 보다 7% 정도 더 향상됨을 보여주었다. 한편, closed cycle dryer 가 open cycle dryer 에 비해 더 많은 에너지를 소비한다고 결론을 내릴 수 있다. Berghel 등<sup>(11)</sup>은 closed cycle tumble dryer 에 대해 연구하였으며 상당한 양의 누기가 가열기와 드럼 입구에서 발생되고 이로 인해 비에너지 소비가 상당히 증가함을 확인하였다. 또한, 그들은 수증기의 누기(leakage)를 건조기와 비교하여 비에너지 소비가 6.5%에서 9%까지 감소시킬 수 있다고 보고하였다.

본 연구에서는 건조시간과 에너지 소비를 단축시키기 위해 기존의 열 대류형 건조기에 열 복사 메커니즘을 적용한 드럼 건조기의 성능 예측을 하였다. 이를 위해 드럼 건조기 내부의 상단에 적외선 가열기(Infrared heater)를 적용하였다. 적외선은 가시광선보다 긴 파장을 갖는 전자기파로서 가시광선이나 자외선에 비해 강한 열 작용을 한다. 또한, 적외선은 오직 복사(radiation)에 의해 열이 전달되며 열복사(thermal radiation)는 어떤 매질을 거치지 않고 피가열물에 직접적으로 열을 전달하기 때문에 에너지 효율을 높일 수 있다. 또한, 적외선은 파장이 길어 물질의 내부에서 분자운동을 일으켜 스스로 열을 내게 하므로 건조효과가 매우 높고 원적외선 가열기를 사용할 경우 일반 가열기에 비해 전력 소비량이 30~50% 정도 절감시킬 수 있다. 이에 따라 적외선을 이용한 건조 방식은 원적외선 난방기, 원적외선 도장 건조기, 원적외선 농산물 건조기 그리고 원적외선 오븐 등과 같이 여러 분야에서



Fig. 1 A tumble dryer with visible main parts

사용되어 왔다. 하지만 의류 건조기에서는 아직 적용된 사례가 없었으며 이번 연구에서는 적외선을 이용한 건조방식의 적용 가능 여부와 적외선 건조 방식이 적용된 드럼 건조기의 성능을 예측하고자 한다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 의류의 건조

식물의 건조는 산업분야에서 시작하여 현재에는 가정에서도 그 수요가 점차 증가하고 있다. 의류 제조는 많은 양의 에너지 소비를 요구하는 건조 단계들을 포함한다. 산업 분야에서의 의류 건조는 주로 밴드 건조기(band dryer) 또는 드럼 건조기를 통해 이루어지고 있으며 가정에서는 주로 Fig. 1 과 같은 드럼 건조기가 널리 사용되고 있다. 하지만 이러한 건조기들은 건조기로부터 배출된 공기의 열을 회수하는 문제와 건조기 에너지 효율 문제를 갖고 있다. 특히, 건조기의 에너지 효율은 기존 건조기의 가장 큰 단점으로 지적되고 있으며 반드시 해결되어야 할 문제이다.

한편, 직물은 실로 만들어진 섬유로 구성된다. 섬유 길이는 재료에 따라 상당히 다를 수 있으며, 면의 경우 섬유길이는 25~75mm 이고 울(wool)의 경우에는 섬유길이가 100mm 가 넘을 수 있다. 직물은 물을 흡수할 수 있는 흡수성 재료이다. 직물에 포함된 수분의 양은 수분율(moisture content,  $X$ )로 표현될 수 있으며 다음 식과 같이 건조 상태의 직물의 질량( $m_{textile}$ )에 대한 직물 내부에 흡수되어 있는 수분의 질량( $m_{H_2O}$ )비로 정의된다.

$$X = \frac{m_{H_2O}}{m_{textile}} \quad (1)$$

한편, 직물의 구조나 재료 뿐만 아니라 상대 습도에 따라 수분율은 크게 달라질 수 있다. 직물은

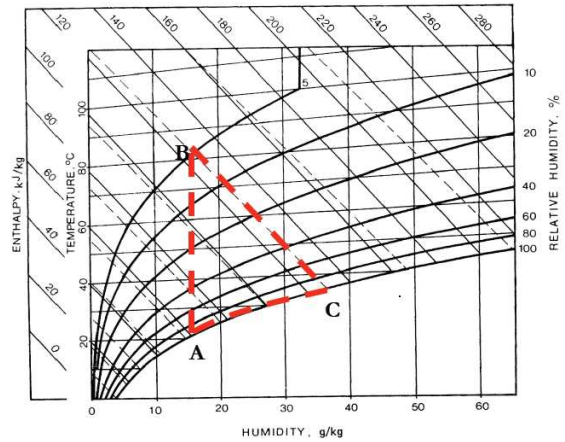


Fig. 2 Water-air mixture with an ideal air path for a closed cycle dryer, indicated as A-B-C in the enthalpy humidity chart<sup>(12)</sup>

친수성(hydrophilic) 또는 소수성(hydrophobic)일 수 있다. 친수성인 섬유들은 수분을 흡수할 수 있지만 공수적인 섬유는 흡수할 수 없다. 이것은 의류 생산에 매우 중요한 정보가 될 수 있다. 피부와 직접 접하는 의류는 수분을 흡수하지 않는 것이 바람직하며 그래야만 피부가 젖었을 경우 수분 증발로 인한 냉각 효과를 얻을 수 있을 것이다. 즉, 수분을 흡수하지 않고 통과시키는 재료의 직물이 피부와 직접 접하는 의류의 재료로 적당하다. 이처럼 건조 동안의 질량 전달, 즉 수분 증발은 섬유 내부에서와 섬유 표면에서의 질량 전달에 따라 결정된다.

Fig. 2 는 응축기(condenser)가 장착된 closed cycle dryer 의 이상적인 건조 과정을 보여주는 엔탈피-절대습도 곡선이다.<sup>(12)</sup> A-B 구간에서는 절대습도가 일정한 상태로 공기의 가열이 이루어진다. 온도가 상승함에 따라 공기의 상대습도는 감소하고 B 지점에서 피건조물과 접하게 되면서 본격적인 건조가 이루어지고 공기는 C 지점까지 냉각이 된다. 공기는 응축기를 지나면서 C 지점에서 A 지점까지 응축되고 상대 압력은 100%로 일정하게 유지되는 반면에 절대 압력은 감소한다. Open cycle dryer 의 경우 C-A 구간이 없고 A-B-C 구간으로 반복된다. 하지만 이와 같은 과정은 이상적인 과정이고 실제 건조기에서는 드럼 내부에서 열손실이 발생하고, 이에 따라 B 와 C 지점 사이의 엔탈피는 감소된다. 내부 시스템으로의 누기(leakage) 또한 A, B, C 지점의 위치에 영향을 미친다. 한편, 건조가 이루어지는 구간인 B 와 C 지점 사이의 절대 습도 차이가 크면 클수록 건조 속도는 더욱 향상될 것이다. 이것은 B 지점에서의 온도를 증가시키거나 closed cycle dryer 의 경우 C-A 구간에서

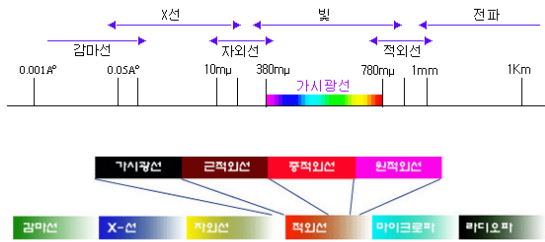


Fig. 3 The electromagnetic spectrum

응축되는 수증기의 양을 증가시키면 실현시킬 수 있다. 따라서 본 연구에서는 적외선 가열기 (Infrared Heater)를 이용하여 B 지점에서의 온도를 상승시키고 중간 매질을 거치지 않고 직접적으로 의류와 의류가 함유한 수분을 빠르게 가열시켜 건조시간과 에너지 소비를 감소시키고자 한다.

2.2 적외선 가열방식의 특징

인간의 생활에 밀접한 영향을 미치는 빛은 전자파나 입자의 형태로 되어 있는 에너지의 일종이며, 파장의 크기가 다른 여러 가지의 빛으로 이루어져 있다. 이 빛의 파장은 백만 분의 1mm의 아주 짧은 것로부터 수 m 이상의 아주 큰 것까지 여러 가지가 있는데 그 파장에 따라 Fig. 3에서와 같이 구분될 수 있다. 눈에 빛의 감각을 일으키는 가시광선은 380~780nm 파장 범위의 전자파이며, 광학에서는 각 파장 영역별로 색상을 구분하고 있다. 가시광선 영역을 중심으로 좌우에 자외선 영역과 적외선 영역이 존재한다. 가시광선의 한계 영역인 380nm 보다 짧은 파장의 자외선은 살균 작용이나 물체의 퇴색 또는 변색과 같은 손상을 일으키는 광화학 작용 등을 한다. 한편, 780nm 보다 파장이 길고 마이크로파보다는 파장이 짧은 적외선은 눈에 빛의 감각을 일으키지 않지만 열적인 효과를 많이 가지고 있으므로 물체를 건조시키거나 가열 작용 등을 한다.

드럼 건조기 내부와 같이 우리가 일상생활에서 접하는 온도 범위는 보통 20~280°C 정도이며, 이를 윈의 변위법칙(Wien's displacement law)으로 복사 파장을 계산하면 5.2~11.5 μm 정도의 원적외선 파장대역으로 집약되고 있다. 원적외선의 경우, 3~30 μm 사이에 상당하는 파장대역 만이 현재 상업적으로 응용되고 있는 실정이며, 화학적 작용은 거의 없는 반면 물리적·생물학적 작용을 한다. 적외선의 물리적 작용으로는 복사작용, 공명흡수작용, 침투작용 등이 있으며, 생물학적 작용으로는 인체나 동물 등의 유기체의 미세혈관의 확장, 신진대사 강화 등이 있다. 특히, 원적외선의 경우 복사에 의해 열에너지를

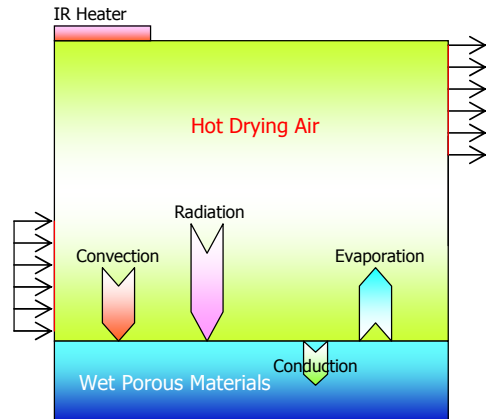


Fig. 4 Schematic of the tumble dryer model

전달하기 때문에 중간 매질 없이 피가열물에 열에너지를 직접적으로 전달할 수 있으므로 손실이 적게 되고 열효율이 높다. 또한, 원적외선의 파장은 고분자 물질의 파장과 일치하여 복사에너지가 쉽게 흡수되어 건조시간을 단축시킬 수 있다. 이에 따라 원적외선 가열기는 자동차 도장, 목재 건조, 난방 등 다양한 분야에서 널리 사용되고 있다.

2.3 드럼 건조기 모델

본 연구에서는 3 차원 형상의 드럼 건조기 내부를 Fig. 4 에서와 같이 2 차원으로 근사하였다. 기존의 드럼 건조기와 유사하게 드럼 입구로부터 가열된 고온의 공기가 유입되면 건조공기는 세탁물의 지속적인 회전이 일어나는 드럼을 거쳐 출구로 배출된다. 하지만 본 연구에서는 앞서서도 언급했듯이 드럼 건조기의 건조 효율에 대한 적외선 열복사의 영향을 확인하기 위해 그림에서와 같이 건조기 왼쪽 상단에 고온의 적외선 가열기를 설치 하였다. 따라서 드럼 내부의 피건조물은 고온의 건조 공기의 대류 열에너지와 적외선 가열기로부터 방사되는 복사에너지에 의해 가열이 이루어지고 피건조물의 표면으로 전달된 열에너지는 전도에 의해 내부로 전달된다. 이때 수분을 포함한 피건조물의 온도가 어느 정도 상승함에 따라 수분 증발이 발생하게 된다. 따라서 건조시간을 단축하기 위해서는 피건조물의 온도를 건조가 일어나는 온도까지 빠르게 가열시켜야 하며 적외선 가열기가 이 역할을 수행한다.

한편, 실제 드럼 건조기 내부의 세탁물은 회전하는 드럼으로 인해 건조가 이루어지는 동안 계속적으로 섞이게 되어 있다. 따라서 본 연구에서는 이를 모사하기 위해 일정 시간 마다 세탁물의 온도가 뒤 바뀌도록 프로그래밍하였다. 즉, Fig. 5 에서와 같이 5 초마다 세탁물 내부의 온도가 두께 중심 축을

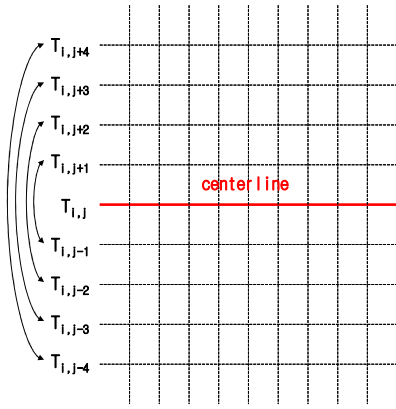


Fig. 5 Description of the method tumbling clothes

중심으로 상부와 하부 온도가 서로 대칭으로 바뀌도록 설정하였다.

### 3. 지배방정식

#### 3.1 드럼 건조기 내부 건조공기의 유동

본 연구에서는 드럼 건조기 내부의 유동장 및 온도장을 예측하기 위해 내부 유동장을 2 차원 비압축성 유동으로 가정하였다. 이에 따라 건조기 내부의 유동장 및 온도장을 계산을 위하여 아래와 같은 지배방정식을 사용한다.

연속 방정식 :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

운동량 방정식 :

$$\rho_a \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu_a \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

$$\rho_a \left( u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu_a \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

에너지 방정식 :

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha_a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - \nabla \cdot q^R \quad (5)$$

여기에서  $\rho_a$  는 공기 밀도,  $\mu_a$  는 공기의 점성계수이다. 그리고  $\nabla \cdot q^R$  는 복사열유속,  $q^R$  의 발산항이며 다음과 같이 표현된다.

$$\nabla \cdot q^R = \kappa_a \left( 4\pi I_b - \int_{4\pi} I d\Omega \right) \quad (6)$$

한편,  $\nabla \cdot q^R$  을 구하기 위해서는 다음과 같은 복사전달방정식(RTE)의 해석이 요구된다.<sup>(13)</sup> 즉,

$$\frac{1}{\beta_0} \frac{dI}{ds} = -I + (1 - \omega_0) I_b + \frac{\omega_0}{4\pi} \int_{\Omega'=4\pi} I \Phi(\vec{s}' \rightarrow \vec{s}) d\Omega' \quad (7)$$

여기에서  $\beta_0 = \kappa_a + \sigma_s$  인 소멸계수,  $\omega_0 = \sigma_s / \beta_0$  인 산란알베도, 그리고  $\Phi(\vec{s}' \rightarrow \vec{s})$  는 입사방향,  $\vec{s}'$  에서 산란방향,  $\vec{s}$  로 산란되는 산란위상함수를 나타낸다. 위 식의 경계조건으로는 아래의 식 (8)과 같이 표현되는 확산 방사 및 반사하는 임의의 온도를 갖는 벽면조건을 적용한다.

$$I(\vec{r}_w, \vec{s}) = \varepsilon_w I_b(\vec{r}_w) + \frac{1 - \varepsilon_w}{\pi} \int_{\vec{s}' \cdot \vec{n}_w < 0} I(\vec{r}_w, \vec{s}') |\vec{s}' \cdot \vec{n}_w| d\Omega' \quad (8)$$

#### 3.2 의류 내부의 열전달 및 수분 증발 모델

드럼 건조기 내 세탁물 내부의 온도변화를 예측하기 위한 2 차원 비정상 열전도 방정식은 다음과 같다.

$$\rho_t C_t \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_t \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_t \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \Phi \quad (9)$$

여기에서,  $\rho_t$  는 의류 소재의 밀도,  $C_t$  는 비열 그리고  $k_t$  는 열전도도(thermal conductivity)이다.  $\Phi$  는 수분의 증발 잠열(latent heat)과 관련된 원천항(source term)이며 다음과 같이 표현된다.

$$\Phi = -\Delta H_{wv} \left( \frac{\partial j_{vx}}{\partial x} + \frac{\partial j_{vy}}{\partial y} \right) \quad (10)$$

여기에서,  $\Delta H_{wv}$  는 수증기의 증발 잠열이고,  $j_{vi}$  는  $i (= x, y)$  방향으로의 water vapor flux 이다.

한편, 세탁물 내부에서의 수분율(moisture content)의 변화를 예측하기 위한 수분 평형 방정식(moisture balance equation)은 다음과 같다.

$$\rho_t \frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial j_x}{\partial x} + \frac{\partial j_y}{\partial y} \quad (11)$$

여기에서  $X$  는 수분 함유량이고  $j_i$  는  $i$  방향으로의 전체 수분 플럭스(moisture flux)이며 다음과 같이 unbound water flux( $j_{fi}$ ), bound water flux( $j_{bi}$ ) 그리고 water vapor flux( $j_{vi}$ )의 합이다.

$$j_i = j_{fi} + j_{bi} + j_{vi} \quad (12)$$

한편, unbound water flux,  $j_{fi}$  는 Darcy' s law 로부터 다음과 같이 표현된다.

$$j_{fi} = E_{li} \frac{\partial p_c}{\partial x_i} \quad (13)$$

위 식에서  $p_c$  는 모세관 압력(capillary pressure),  $E_{li}$  는 액체 유동에 대한 유효 삼투성(effective permeability)이며 다음과 같이 일반적으로 측정된 액체 삼투성( $K_{li}$ )으로부터 알 수 있다.

$$E_{li} = \frac{K_{li} \rho_l}{\mu_l} \quad (14)$$

또한, 본 연구에서는 모세관 압력,  $p_c$  은 포화도의 함수로 표현될 수 있다고 가정하였다.<sup>(16)</sup>

$$p_c = As^{-B} \quad (15)$$

여기서  $A$  와  $B$  는 상수이다. 포화도(saturation),  $s$  는 다음과 같이 표현된다.

$$s = \frac{\text{Liquid volume}}{\text{Void volume}} = \frac{X - X_{FSP}}{X_{\max} - X_{FSP}} \quad (16)$$

위 식에서  $X_{FSP}$  는 섬유 포화점(fibre saturation point)이고  $X_{\max}$  는 물질 내부의 빈 공간이 액체로 모두 채워졌을 때의 수분 함유량이다. 식 (13)에 식 (14), (15) 그리고 (16)을 조합하면 다음과 같이 unbound water flux 를 표현할 수 있다.

$$j_{fi} = -\frac{ABE_{li}(M_{\max} - M_{FSP})^B}{(M - M_{FSP})^{(1+B)}} \frac{\partial M}{\partial x_i} \quad (17)$$

식 (12)의 bound water 확산은 수분 함유량이 섬유 포화점 이하로 떨어졌을 때 일어나며 다음과 같은 형태로 표현될 수 있다.<sup>(15)</sup>

$$j_{bi} = -D_b(1-\varepsilon) \frac{\partial \mu_b}{\partial x_i} \quad (18)$$

여기에서,  $\mu_b$  는 bound water 의 화학적 전위(chemical potential),  $\varepsilon$  은 피열물의 다공도, 그리고  $D_b$  는 bound water 전달 계수를 나타낸다. 열역학적 평형 상태의 경우, bound water 의 화학적 전위는 증기의 화학적 전위( $\mu$ )와 같다.

$$M_v \frac{\partial \mu_b}{\partial x_i} = M_v \frac{\partial \mu_v}{\partial x_i} = -S \frac{\partial T}{\partial x_i} + V \frac{\partial p_v}{\partial x_i} \quad (19)$$

여기에서  $S$  는 엔트로피이며  $M_v$  는 증기의 분자량이다. 증기를 이상기체라고 가정하면, 위 식은 다음과 같이 온도와 압력 구배의 향으로 unbound water 를 표현할 수 있다.

$$j_{bi} = -\frac{D_b(1-\varepsilon)}{M_v} \left\{ \begin{array}{l} \left[ 187 + 35.7 \ln \left( \frac{T}{198.15} \right) \right] \frac{\partial T}{\partial x_i} \\ -8.314 \ln \left( \frac{p_v}{101325} \right) \\ + 8.314 \frac{T}{p_v} \frac{\partial p_v}{\partial x_i} \end{array} \right\} \quad (20)$$

식 (12)의 water vapor flux 가 증기압의 구배에 비례한다고 가정하면, water vapor flux 는 unbound water flux 와 유사하게 Darcy's law 에 의해 표현될 수 있다.

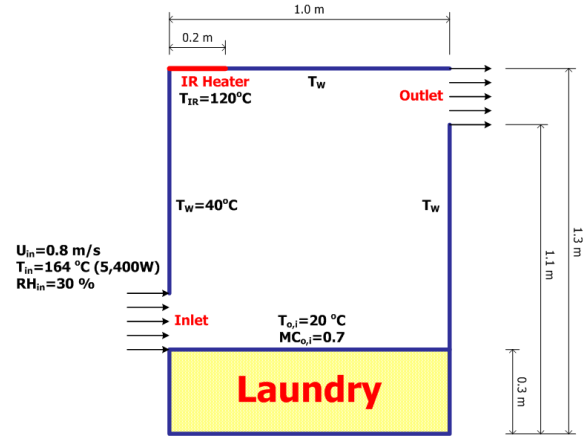


Fig. 6 Schematic of the model tumble dryer for analysis

$$j_{vi} = -E_{vi} \frac{\partial p_v}{\partial x_i} \quad (21)$$

여기서  $E_{vi}$  는 증기유동에 대한 유효 삼투성이며 식 (13)와 유사하게 표현된다.

$$E_{vi} = \frac{K_{vi} \rho_v}{\mu_v} \quad (22)$$

위 식에서  $\rho_v$  와  $\mu_v$  는 각각 증기의 밀도와 점성계수이며  $K_{vi}$  는 일반적으로 측정된 기체 삼투성이다.

한편, 식 (9)와 (11)의 경계조건은 의류 표면과 건조 공기사이의 의류 표면에서 열 및 수분 전달로 주어진다.

$$q = q^c + q^R \quad (23)$$

$$j = \beta(p_{vg} - p_{vs}) \quad (24)$$

여기에서  $q^c$  는 대류 열유속이고  $\beta$  는 표면에서의 질량 전달계수이다.

### 3.3 해석 방법

앞서 언급한 것처럼, 본 연구에서는 3 차원의 복잡한 드럼 건조기 내부의 열유동 연상을 모사하기 위하여 Fig. 4 에서와 같이 2 차원으로 단순화하였으며 Fig. 6 과 같이 계산영역을 단순화하였다. 그림에서와 같이 드럼은 폭 1m, 높이 1.3m 의 사각 형상을 갖는다. 건조 공기는 164 °C 의 온도로 드럼 왼쪽 하단에 있는 입구로 유입된다. 이때 건조 공기의 상대습도는 30%로 가정하였다. 입구로부터 유입된 건조공기는 드럼 내부를 지나 드럼 오른쪽 상단에 존재하는 출구로 배출된다. 적외선 가열기는 드럼

상단 표면에 위치하며 120 °C 의 일정한 온도로 유지되고 이때 가열기의 소비전력은 150W 이다. 적외선 가열기 영역을 제외한 나머지 드럼 건조기 벽면은 40 °C 의 일정한 온도로 유지된다고 가정하였다. 초기에 사용된 섬유량은 8lb(약 3.629kg)이며 건조 전 수분 함유량은 0.7(5.6lb)이며, 세탁물의 초기 온도는 20°C 이다.

한편, 본 연구에서는 계산의 정확성 및 계산시간을 고려하여  $(N_x \times N_y) = (179 \times 71)$  및  $(N_\theta \times N_\phi) = (4 \times 12)$  격자계를 적용하였으며, 모든 지배방정식과 복사전달 방정식은 이전 계산단계에서의 결과값과의 차이가  $10^{-6}$  이하이면 수렴한 것으로 판정하였다.

건조기 내의 열복사를 해석하기 위해서는 복사물성치 및 온도조건과 벽면조건이 필요하다. 드럼 건조기의 공기의 경우, 건조 공기 안에 수증기가 많이 포함되어 있다. 수증기는 파장에 따라 강한 복사 특성을 갖기 때문에 본 연구에서는 이를 고려하여 건조공기의 흡수계수를 계산하기 위하여 WSGGM(Weighted Sum of Gray Gas Model)<sup>(16)</sup>을 사용하였다. 하지만 건조가스의 산란은 무시하였다. (즉,  $\sigma_s = 0$ ) 건조기 벽면, 적외선 가열기 그리고 세탁물의 방사율(emissivities)은 각각 0.7, 0.9 그리고 0.3 으로 가정하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

앞서 언급한 것처럼, 본 연구에서의 가장 큰 목표는 기존의 대류형 건조기 효율에 대한 적외선 가열기의 복사 가열 효과를 확인하는 것이다. 따라서 본 연구에서는 적외선 가열기가 적용된 드럼 건조기의 일반적인 건조 특성에 대해서 알아본 후, 드럼 건조기의 전체 전기에너지 소비율을 5,400W 로 고정하고 적외선 가열기 적용 여부, 가열기의 온도 변화 그리고 적외선 가열기의 표면 방사율에 따른 건조 특성 변화에 대해서 조사하였다. 건조는 세탁물 내 평균 수분함유량이 목표 수치(0.02)까지 감소할 때 종료된다.

##### 4.1 드럼 건조기의 건조 특성

일반적으로 건조 과정은 연속적인(continuous) 타입과 회분식(batch) 타입으로 나뉠 수 있다. 연속적인 타입의 건조는 건조 대상의 물질이 지속적으로 건조기에 투입되는 방식을 의미한다. 반면에, 회분식 건조는 가정용 드럼건조기와 같이 건조 전 건조 대상의 물질이 건조기로 투입이

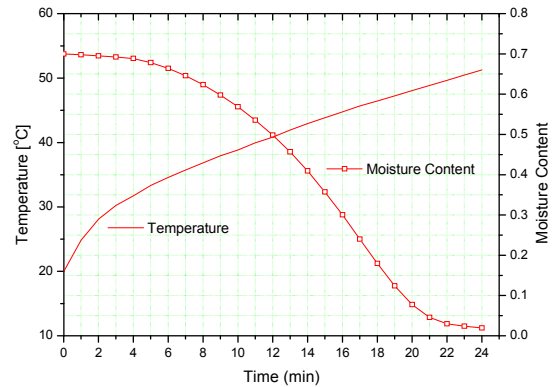


Fig. 7 Average temperature and moisture content variations with drying time

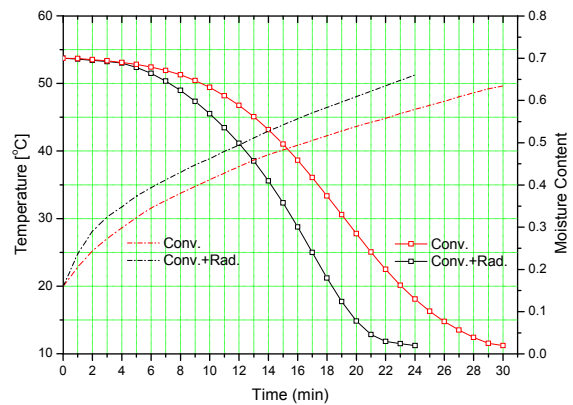
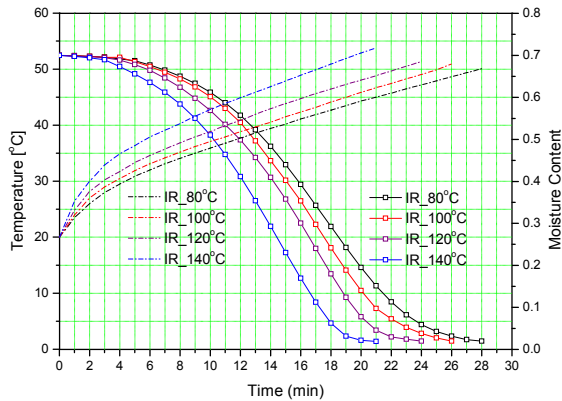


Fig. 8 Effect of infrared radiation on average temperature and moisture content variations with drying time

되고 목표 수분 함유량에 도달하면 건조를 끝내는 방식이다. 건조 속도(drying rate)는 건조 과정 동안 피건조물의 수분 함유량을 직접적으로 측정해서 파악할 수 있다. 일반적으로 건조 시간 동안 건조 속도를 확인해보면 최소 두 가지 단계를 확인할 수 있다. 그 중 하나는 건조 속도가 일정하게 유지되는 단계이고 나머지 하나는 건조 속도가 감소하는 단계이다. 섬유과 같은 친수적 삼투성 물질은 건조 속도가 감소하는 단계에서도 두 가지 단계로 나뉠 수 있다.<sup>(17-19)</sup>

Fig. 7 은 적외선 가열기가 적용된 건조 과정 동안 세탁물의 평균 온도변화와 평균 수분 함유량 변화를 보여준다. 여기에서 적외선 가열기의 표면온도는 120 °C 이고 드럼 입구에서의 건조공기 온도는 160 °C 이다. 시간이 지남에 따라 온도는 상승하고 수분 함유량은 감소된다는 것을 쉽게 확인할 수 있다. 하지만 건조 초기에는 수분 함유량 변화가 상대적으로 매우 작고 온도 변화는 크다. 이는 건조 초기에 세탁물이 어느 정도까지 가열이 된 후 수분의 증발이 활발히 일어나기 때문이다. 한편, 앞서 언급한 것처럼,



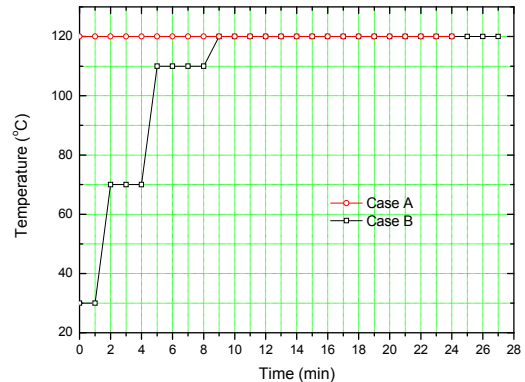
**Fig. 9** Effect of heater temperature on average temperature and moisture content variations with drying time

본 연구의 결과에서도 두 가지 단계의 건조과정이 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 즉, 건조 시작 후 17 분까지는 건조 속도가 비교적 일정하게 나타난 반면에 이 이후부터는 건조속도가 서서히 감소한다는 것을 확인할 수 있다. 주어진 드럼 건조기 운용 조건에서 목표 평균 수분함유량까지 도달하는 데는 대략 23.6 분 정도 걸리는 것으로 확인되었다.

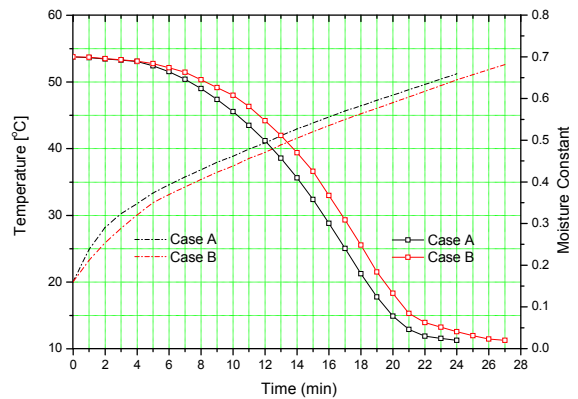
4.2 적외선 가열기의 효과

이번 절에서는 적외선 가열기 적용 여부에 따른 건조특성 변화에 대해서 알아보려고 한다. 이를 위해 본 연구에서는 건조공기를 가열시키는 데 필요한 전력량과 적외선 가열기를 구동시키는데 필요한 전력량의 합이 5,400W 가 되도록 가정하였다. 즉, 적외선 가열기가 적용되지 않은 경우 모든 전기 에너지가 건조 공기를 가열시키는데 사용되고, 적외선 가열기가 적용된 경우 적외선 가열기(150W)를 구동시키고 남은 에너지가 건조공기를 가열(5,250W) 시킨다고 가정하였다. 좀 더 정확한 비교를 위해 두 가지 경우 모두 건조공기의 유량은 같다고 가정하였다. 이에 따라 적외선 가열기가 적용되지 않은 경우(Only Convection)의 드럼 건조기 입구에서의 건조공기 온도는 164 °C 이고 적외선 가열기가 적용된 경우(Convection+ Radiation)의 건조공기 온도는 160 °C 가 된다. 전체 에너지에 비해 적외선 가열기에서 소비되는 에너지가 작아 두 경우에서의 건조공기 온도 차이는 크지 않다.

Fig. 8 은 건조 시간에 따른 세탁물의 온도와 수분함유량의 변화를 도시한 것이다. 여기서 적외선 가열기의 표면온도는 120 °C 로 일정하다. 적외선 가열기가 적용된 경우 적용되지 않은 경우보다 가열이 더 빠르게 이루어지는 것을 확인 할 수 있다.



**Fig. 10** Surface temperature of IR heater for two cases



**Fig. 11** Effect of heating patterns on average temperature and moisture content variations with drying time

이에 따라 평균 수분함유량 또한 적외선 가열기가 적용된 경우에 더 빠르게 감소하고 있음을 알 수 있다. 건조 목표 수분함유량에 도달한 건조시간은 적외선 가열기가 적용된 경우가 23.6 분, 적외선 가열기가 적용되지 않은 경우가 30 분인 것으로 확인되었다. 적외선 가열기의 적용으로 대략 6.4 분의 시간이 감소했다. 이에 따라 건조를 위해 소비된 전기에너지는 적외선 가열기가 적용되지 않은 경우가 9,720kJ, 적외선 가열기가 적용된 경우가 7,646kJ 로 2,074kJ 감소했음을 확인할 수 있다. 여기에 건조공기 이송용 모터(200W)를 구동시키는데 소비된 전기에너지 까지 고려한다면 전체 전기에너지 소비량은 2,151kJ 감소된다. 가열기를 통해 건조시간과 에너지 소비를 모두 감소시킬 수 있다는 것을 확인하였다.

4.3 적외선 가열기 표면온도의 영향

앞 절에서 드럼 건조기에 건조성능에 대한 적외선 가열기의 효과에 대해서 확인하였고 그 효과가 상당함을 확인하였다. 따라서 이번 절에서는 적외선 가열기 표면온도 변화에 따른 건조 특성에 대해서 알아보려고 한다. 여기서



적외선 가열기의 에너지 소비율은 표면온도와 상관없이 150W 로 일정하다고 가정하였고 이에 따라 입구에서의 건조공기의 온도는 160°C 이다.

Fig. 9는 적외선 가열기 표면 온도변화에 따른 평균 온도변화 및 평균 수분함유량 변화를 보여주고 있다. 적외선 가열기 표면 온도가 높을수록 세탁물의 건조가 빠르게 이루어지고, 결국 건조시간도 단축됨을 확인할 수 있다. 가열기 표면온도가 140°C 로 상승하면 에너지 소비는 14.4% 감소되는 반면 가열기 표면 온도가 100°C 와 80°C 로 감소하면 에너지 소비는 각각 8.9%와 17.8 % 증가함을 확인할 수 있다. 이처럼 가열기 표면온도의 영향이 상당하다는 것을 알 수 있고 가열로 인해 세탁물의 재질에 손상을 주지 않는 범위에서 적정온도로 건조가 이루어져야 할 것이다.

추가적으로 본 연구에서는 적외선 가열기가 예열되지 않았을 경우를 확인하기 위해, Fig. 10 에 서와 같이 적외선 가열기의 표면온도가 일정한 경우(Case A)와 시간에 따라 변하는 경우(Case B)에 대해 고려하였다. Case B 의 적외선 가열기 표면온도는 0~1 분 구간에서 30°C , 1~4 분 구간에서 70°C , 4~8 분 구간에서 110°C 그리고 8 분 이후부터 120°C 로 일정하게 유지된다. Fig. 11 은 세탁물의 평균 온도와 평균 수분 함유량 변화를 보여주고 있다. Case B 의 경우 초기에 가열기의 표면 온도가 낮기 때문에 세탁물의 가열이 천천히 일어나고 그에 따라 건조 시간은 Case A 가 23.6 분, Case B 의 경우가 25.8 분으로 약 2.2 분 증가했음을 확인하였다.

## 5. 결론

본 연구에서는 기존의 대류형 드럼 건조기의 에너지 효율을 개선하고 고효율 드럼 건조기 개발을 위해 적외선 가열기를 적용한 드럼 건조기의 건조 성능을 파악하기 위한 전산해석 연구를 수행하였다. 적외선 가열기를 이용한 복사 에너지 전달은 중간 매질의 도움 없이 직접적으로 세탁물을 가열시킬 뿐만 아니라 물질 내심부에 침투하여 분자 운동을 일으키게 하여 열을 발생시키므로 건조 효율 향상에 상당한 도움을 줄 것으로 판단되고 있다. 본 연구에서는 이를 확인하기 위해 본 연구에서 개발된 해석 프로그램을 이용하여 다양한 예제들을 수행하였으며, 기존의 대류형 건조기에 적외선 가열기를 적용함으로써 건조시간의 단축에 따른 에너지 절감효과의 가능성을 확인하였다. 한편, 적외선 가열기의 표면온도는 건조 성능에 영향을 미치는 가장 큰 인자로서 드럼 건조기 적용 시

옷감에 손상을 입히지 않는 범위에서 적외선 가열기의 표면온도를 높이는 것이 필요함을 지적하였다.

한편, 드럼 건조기의 기타변수를 변경함으로써 드럼 건조기 최적 운용 조건에 대한 고찰을 통하여 건조 시간 단축에 따른 에너지 소비 절감 및 균일한 건조에 따른 건조 품질향상에 관련한 응용 연구가 요구된다.

## 참고문헌

- (1) Hekmat, D. and Fisk, W. J., 1983, "Improving the Energy Efficiency of Residential Clothes Dryers," *NTIS report number LBL 16813*.
- (2) Ruiter, J. P., Leentvaar, G. and Zeylstra, A. H., 1978, "Tumbler Dryer with Heat Pump," *Elektrotechnik*, Vol. 56, No. 4, pp. 224~229.
- (3) Bassily, A. M. and Colver, G. M., 2003, "Performance Analysis of an Electric Clothes Dryer," *Drying Technology*, Vol. 21, No. 3, pp. 499~524.
- (4) Bassily, A.M. and Colver, G. M., 2005, "Numerical Optimization of The Annual Cost of a Clothes Dryer," *Drying Technology*, Vol. 23, No. 7, pp. 1515~1540.
- (5) Deans J., "The Modeling of a Domestic Tumbler Dryer," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 21, No. 9, pp. 977~990.
- (6) Bansal, P. K., Braun, J. E. and Groll, E. A., 2001, "Improving The Energy Efficiency of Conventional Tumbler Clothes Drying Systems," *International Journal of Energy Research*, Vol. 25, No. 15, pp. 1315~1332.
- (7) Hekmat, D. and Fisk, W. J., 1984, "Improving the Energy Performance of Residential Clothes Dryers," *The 35th Annual International Appliance Technical Conference*, Ohio State University.
- (8) Beiron, J. and Brunzell, L., 2005, "Energy Efficiency and Drying Capacity of an Unheated or Partially Heated Air Vented Tumble Dryer," *Proceedings of the 3rd Nordic Drying Convergence*, Karlstad, Sweden.
- (9) Conde, M. R., 1997, "Energy Conservation with Tumbler Drying in Laundries," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 17, pp. 1163~1172.
- (10) Kissling, H., 1992, "Computer Simulation of a Clothes Tumbler Dryer," *Department of Mechanical Engineering Report*, University of Auckland.
- (11) Berghel, J., Brunzell, L. and Bengtsson, P., 2004, "Performance Analysis of a Tumble Dryer," *Proceedings of the 14th International Drying Symposium IDS2004*, Sao Paulo, Brazil, pp. 821~827.
- (12) Brunzell, L., 2006, "Energy Efficient Textile Drying," *Universitetstryckeriet*, Karlstad, 2006.
- (13) Byun, D. Y., Baek, S. W. and Kim, M. Y., 2003,

- “Investigation of Radiative Heat Transfer in Complex Geometries using Blocked-Off, Multiblock, and Embedded Boundary Treatments,” *Numerical Heat Transfer, Part A*, Vol. 43, pp. 807~825.
- (14) Spolek, G. A. and Plumb, O. A., 1981, “Capillary Pressure of Woods,” *Wood Science Technology*, Vol. 15, pp. 150~158.
- (15) Stanish, M. A., 1986, “The Roles of Bound Water Chemical Potential and Gas Phase Diffusion in Moisture Transport Through Wood,” *Wood Science Technology*, Vol. 20, pp. 53~70.
- (16) Smith, T. F., Shen, Z. F. and Friedman, J. N., 1982, “Evaluation of Coefficients for the Weighted Sum of Gray Gases Model,” *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 104, pp. 602~608.
- (17) Mujumdar, A. S. and Menon, A. S., 1995, “Drying of Solids : Principles Classification and Selection of Dryers. In Handbook of Industrial Drying,” Mujumdar A. S. Marcel Dekker, Inc. New York, Vol. 2, pp. 1~40.
- (18) Haque. M. N., 2007, “Simulation of Temperature and Moisture Content Profiles in a Pinus Radiata Board during High-Temperature Drying,” *Drying Technology*, Vol. 25, pp. 457~555.
- (19) Pang, S., 1996, “Moisture Content Gradient in a Softwood Board during Drying : Simulation from a 2-D Model and Measurement,” *Wood Science and Technology*, Vol. 30, pp. 165~178.