

탄소나노섬유를 열원으로 적용한 세탁물 건조기의 개발

(Development of the Dryer with a Heat Source of Carbon Nanofibers)

이 정 환^{1)*}, 원 상 연²⁾

(Lee Jung-Hwan and Won Sang-Yeon)

요 약 본 논문은 세탁물 건조기의 고효율과 건조성능 향상을 위한 탄소나노섬유의 열원(히팅 모듈)을 설명하였고, 이 열원의 적용 가능성을 평가하는데 집중하였다. 제안된 히팅모듈의 설계를 위해, 탄소나노섬유램프의 표면온도와 표면온도분포특성에 관한 실험이 수행되었다. 그 램프의 표면 온도는 램프에 흐르는 전류의 증가와 함께 선형적으로 증가하였고, 그 램프의 길이가 짧을수록 증가하는 패턴을 보였다. 제안된 히팅모듈은 건조효율, 세탁물의 수분증발률, 건조동작 중 드럼의 내부 온도를 기반으로 평가되었다. 건조효율은 KS C 9319의 기준인 45%를 충족하였고, 수분증발률과 드럼의 내부온도는 각각 98.88%와 평균 61.1°C로 S사의 제품과 대등한 건조성능을 보였다. 그 평가와 실제 건조실험 결과로부터, 제안된 탄소나노섬유램프 히팅모듈은 건조효율과 건조성능의 측면에서 세탁물 건조기의 열원으로 적용 가능할 것으로 판단되며, 높은 온도의 열원, 우수한 발열량, 원적외선 방출에 의한 건조성능의 향상과 세탁물의 살균효과를 얻을 수 있다. 추가적으로, 그 건조기들 사이에 건조효율 성능차이가 열원의 소비전력을 기반으로 상세히 분석되었다.

핵심주제어 : 건조성능, 건조효율, 세탁물 건조기, 열원, 탄소나노섬유

Abstract This paper presents a heating source of carbon nanofibers for the efficiency and the drying performance of laundry dryer, and focuses on the applicability-evaluation of its source. To design the proposed heating module, experiments were conducted in terms of surface temperature and surface temperature distribution characteristics of carbon nanofiber lamps. The surface temperature of the lamps increased linearly with increment of a current to flow a lamp and revealing the increasing pattern as the length of the ramps is shorter. The proposed heating source was evaluated based on drying efficiency, moisture evaporation rate at laundry, and internal temperature of a drum during drying process. The drying efficiency satisfied a 45% which is specified in KS C 9319. The moisture evaporation rate and the internal temperature of the drum were respectively 98.88% and 61.1°C, which are similar to that of S's company dryer. From the evaluation and actual drying test results, the proposed carbon nanofiber lamp heating module is considered to be applicable as a heat source for laundry dryer in terms of drying efficiency and drying performance. it is possible to obtain a heat source at a high temperature, an excellent calorific value, an improvement in drying performance, and an effect of sterilizing

* Corresponding Author : virtuepapa@kmu.ac.kr
Manuscript received March 27, 2018 / revised May 28, 2018
/ accepted June 5, 2018

1) 계명대학교 전자공학과, 제1저자, 교신저자

2) ㈜대성기전, 제2저자

laundry due to the emission of far-infrared rays. In addition to the applicability, the difference of the drying efficiency between the dryers was analyzed in detail based on the power consumption of the heat sources.

Key Words : Carbon Nanofiber, Drying Efficiency, Drying Performance, Heat Source, Laundry Dryer

1. 서 론

탄소나노섬유는 굵기 1 μm , 90% 이상의 탄소 함유량을 보유한 섬유상 물질이다. 이 섬유는 높은 전기 전도성과 열전도성, 화학적 안정성, 우수한 강도의 특성을 보유한다. 특히, 이 섬유의 전류밀도와 열전도성은 각각 10^9 A/cm, 6600 W/mK으로 알려져 있어, 이 섬유는 전기와 열을 이용하는 다양한 응용 장치에 유용한 재료이다. 이러한 특성은 섬유의 형상, 미세구조의 변형, 결합에 의존한다[1]. 최근에는 이 섬유의 변형과 결합으로 꼬아서 만든 실 (Yarn Twist)이 외부의 바이어스 전압의 인가 없이 전기에너지를 생성함을 보고하고 있다[2].

탄소나노섬유의 전기 및 열적 특성은 전기 및 열에너지를 활용한 장치에 유용한 응용을 가능하게 한다. 이러한 응용이 가능한 장치들 중 하나는 건조기이다. 건조기는 산업, 공업, 가정에서 취급하는 건조물의 수분을 제거하여 건조를 수행하는 장치이다. 대표적인 건조물은 음식, 섬유 (직물, 옷감), 종이, 나무, 세라믹, 광물, 하수 슬러지, 제약물, 생명공학 제품 등 상당히 광범위하다. 또한 그 건조물의 크기는 nm ~ km 범위로 보고되어 있다[3]. 건조시간은 건조물의 크기의 증가와 함께 장기화 되지만, 그 관계가 명확히 비례하지 않는다. 이는 건조과정 동안 물리적, 화학적, 기계적, 열역학적 요소가 복합적으로 적용되며, 신속한 건조를 위해, 단순히 높은 에너지와 열을 공급할 수 없기 때문이라 추정된다. 각 분야에서 요구하는 건조는 제거하는 수분의 양, 효율적인 에너지 공급, 건조시간, 건조물의 손상과 관련된다. 이상적인 건조는 건조물의 수분을 요구하는 적절한 양만큼 효율적인 에너지와 단축된 건조시간으로

건조물의 손상 없이 제거하는 것이다.

이상적인 건조의 수행과 건조기의 성능을 추정하기 위해서, 전기, 기계, 화학, 재료분야의 엔지니어들은 단순화한 열유동 시뮬레이션과 함께 다양한 건조실험을 수행하고 있다. 시판 중인 의류 건조기의 동작 메커니즘이 건조기의 내부온도, 상대습도, 수분증발률, 공기의 물질전달계수를 이용하여 설명되었다[4]. 이 연구에서, 저자들은 건조시간과 적산전력에서 유량과 열량의 관계를 정량적으로 보고하였는데, 건조시간의 단축은 유량에서 열량을 증가시키는 것이 효과적임을 실험적으로 보고하고 있다. S. J. Park et al.[5]은 열효율을 높이기 위해, 히트펌프를 적용한 세탁물 건조기의 개발과 내부 풍속의 시뮬레이션을 수행하였다. 그리고 세탁물 건조기의 건조성능 예측을 위한 방안도 연구된 바 있는데, 이는 응축식 의류 건조기의 성능 예측을 위해, 열전달, 히터 열용량 변화, 열손실, 질량보존법칙, 에너지 보존법칙, 엔탈피와 관련된 방정식을 수립하여 4계 Runge-Kutta 방법을 이용한 모델링 방안이다[6]. 특히, 의류건조기의 성능평가와 성능예측이 세심한 공학적 설계를 요구하기 때문에, 의류 건조기 및 그 시스템의 모델링과 수치해석 방안이 최근에 활발히 연구되고 있다[7-10]. 의류 및 세탁물 건조기에서 열을 방출하는 열원에 관한 연구는 전기식 히터[11]와 열전소자[12]를 이용하여 보고되었다. 현재 시판중인 세탁물 건조기의 열원은 대부분 코일에 흐르는 전류에 의한 주열을 이용하는 전기식 히터 방식이다. 그 열원에서 성능 실험이 코일의 권선 수, 길이, 권선피치, 지름, 코일 열방사 특성, 히터크기, 공기의 유입 유속의 측면에서 수행되었다[11]. M. -J. Lee et al.[12]는 건조기의 성능, 고효율, 낮은 소음을 위해 p형과 n형 반도체로 구성된 열전소자의 적용을 설

명하였다. 상기의 연구들[4-12]은 동작과정에서 열손실 분석 및 계산, 건조성능에 관한 물리적 파라미터의 추정, 성능 추정 모델링에 관한 것으로, 건조기의 열원보다는 그 동작과정에서 성능 평가와 최적화에 집중하고 있다. 즉, 의류 및 가정용 세탁 건조기에서, 건조과정에 필요한 열을 방출하는 열원에 관한 연구의 부재가 존재한다 [11, 12]. 열원은 건조기의 성능뿐만 아니라 에너지 소비에서 고효율에 지대한 영향을 미치는 본질적인 것이다.

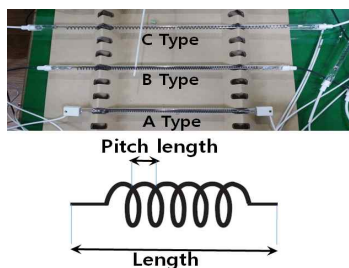
본 논문은 탄소나노섬유를 적용한 새로운 열원(탄소나노섬유 히팅모듈)의 가정용 세탁물 건조기를 제안하여, 그 열원의 적용 가능성을 평가하였다. 그 평가를 위해, 탄소나노섬유의 특성, 제안된 세탁물 건조기의 동작방안, 제안된 건조기의 구성 및 건조실험이 수행되었다. 제안된 탄소나노섬유 히팅모듈의 적용 가능성은 KS C 9319 [13]에서 규정된 건조효율, 세탁물에서 수분증발률, 건조과정 중 드럼 내부온도를 기반으로 평가하였다. 본 논문의 건조실험결과와 고찰은 제안된 건조기와 시판중인 S사의 성능과 비교를 언급하였고, 건조성능 향상을 위한 방안도 함께 검토하였다. 제안된 탄소나노섬유 히팅모듈은 기존 S사의 제품에 비해 더 낮은 소비전력(S사 약 2.3 kW, 히팅모듈 약 1.5 kW), 약 10°C 더 높은 온도에서 건조를 수행할 수 있다는 장점을 가진다. 그리고 기존의 히터열원과 다르게 제안된 히팅모듈은 원적외선 방사에 의한 세탁물의 살균효과를 얻을 수 있다.

본 논문은 2가지 주제에 대한 실험을 수행하였다. 하나는 탄소나노섬유 히팅모듈을 제작하기 위한 탄소나노섬유특성에 관한 실험이고, 다른 하나는 제안된 건조기를 제작한 후 이 건조기의 성능을 확인하는 실험이다. 본 항은 2가지 실험 방법에 대하여 설명한다.

제안된 탄소나노섬유 히팅모듈을 이용한 건조기의 열원성능은 소비전력 1.5 kW 이하, 순환 공기 온도 80°C ~ 100°C를 구현하도록 설계하였다. 이 소비전력과 공기온도는 각각 기존 건조기보다 낮은 소비전력과 건조성능을 확보하기 위한 것이다. 이러한 성능을 얻기 위해, 탄소나노섬유램프의 설계, 그 램프의 표면온도와 표면온도분포특성이 파악되어야 한다. 탄소나노섬유램프의 설계를 위한 파라미터는 코일식 히터의 연구결과[11]를 응용하여 결정하였다. 본 히팅모듈을 위한 탄소나노섬유의 구체적인 인자들은 Table 1에서 확인할 수 있다. 고려된 3가지 탄소나노섬유 (A, B, C 유형)는 지름과 두께가 각각 9 mm, 1 mm인 유리관에 봉입되며, 본 저자는 이러한 구조를 탄소나노섬유램프로 정의하였다. 이 램프의 표면온도특성은 램프에 전압을 인가한 후 전류와 그 표면온도를 측정하여 파악하였다. 그리고 표면온도분포특성은 측정된 표면온도를 기반으로 램프의 가로축 방향으로 온도분포를 파악하여 확인하였다. 이 램프의 표면온도와 표면온도분포는 탄소나노섬유를 봉입하고 있는 유리표면의 상태와 그 표면의 이물질로 인해 오차가 발생할 수 있다. 그래서 표면온도와 표면온도분포 측정 이전에, 램프의 유리표면은 부드러운 헝겊으로 충분히 세척되었다. 램프의 표면온도와 표면온도분포특성은 열화상 카메라를 이용하여 측정된 결과를 기반으로 파악하였다.

2. 실험방법과 재료

Table 1 Three Types of Carbon Nanofibers and Its Parameters



Type	Length mm	Pitch length mm	Number of turns	Resistance Ω
A	280	1	69 ~ 70	143.7
B	360	2.8 ~ 3.0	69 ~ 70	151.4
C	445	3.8 ~ 4.0	69 ~ 70	138.1

제안된 건조기의 성능 실험은 제안된 탄소나노섬유램프 히팅모듈을 포함하는 건조기를 제작하여 수행하였다. Fig. 1은 제안된 세탁물 건조기가 실제로 제작된 외형과 건조실험 수행 장면을 보여준다. 탄소나노섬유램프 히팅모듈은 Fig. 2와 같이 드럼 하부와 상부에 각각 2개, 1개씩 설치되었고, 모든 램프에서 소모하는 전력은 1.5 kW 이하로 설계하였다. 제안된 세탁기의 건조성능시험은 일반적인 건조를 위한 표준모드로 95분간 수행된다. 건조실험 조건은 표준모드에서 공기가 열 시간과 공기 배기시간을 조절하여 3가지 경우로 설정하였다. 이 실험조건은 각각 Set 1 (가열 2분, 배기 5초), Set 2 (가열 3분, 배기 5초), Set 3 (가열 5분, 배기 10초)로 정의하였다. 세탁물은 가로 40 mm, 세로 72 mm, 두께 2 mm, 질량 0.1652 kg의 수건을 이용하였다. 모든 건조실험에서 사용된 수건의 수량은 20장이며, 그 질량은 3.3 kg이다. KS C 9319 [13]의 명시 조건에 따라, 세탁물인 수건은 건조시험 전에 15분간 물로 충분히 적셨다. 수분을 포함한 총 세탁물의 질량(수건 + 수분의 질량)은 항상 일정하지 않았다.

본 논문에서 제작된 건조기와 현재 시판중인 S사의 건조기가 세탁물 건조시험에 사용되었고, 그들의 건조성능 시험이 수행되었다. 건조성능시험의 정량적 평가는 KS C 9319 [13]에 따른 건조효율과 건조도를 이용하였다. 건조실험은 건조이전의 세탁물과 건조 후 세탁물의 질량을 측정하는 방식으로 수행되었다. 이러한 측정은 동일한 실험조건에서 5번 반복측정 하였다.

본 논문에서 저자들은 제안된 히팅모듈의 대체가능성을 평가하기 위해, 건조효율(D)과 수분증발률(R)을 도입하였다. D 와 R 은 각각 식 (1)과 (2)로 계산하였다. 식 (1)은 KS C 9319 [13]의 평가기준이며, 식 (2)는 세탁물에 포함된 수분의 증발량을 확인하기 위해, 저자들이 도입한 것이다. 식 (1)에서 W_w 는 시험 후 세탁물에 포함되어 있던 물의 증발수량 kg, K 는 물의 발열 잠열 (2.46×10^6 J/kg), Q 는 총 소비 에너지 (전력량 $\times 3.6 \times 10^6$ J/kWh)이다. 식 (2)에서 W_s 는 건조시험 전 세탁물에 포함된 물의 질량 kg이다. 건조효율 D 는 KS C 9319 [13]에서 45% 이상을 요구한다.



Fig. 1 The Dryer Fabricated with a Heat Source Using Carbon Nanofiber Lamp

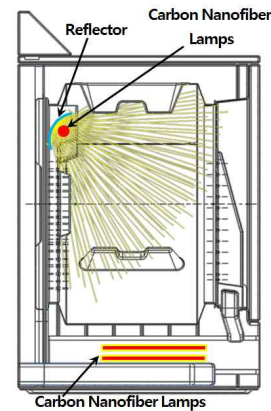


Fig. 2 The Structure of the Proposed Dryer with Carbon Nanofiber Heat Module

$$D = \frac{W_w \times K}{Q} \times 100 \quad (1)$$

$$R = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \quad (2)$$

3. 건조기 성능시험 및 고찰

본 항은 제안된 건조기의 성능시험과 기존 건조기와의 차별성이 상세히 설명된다. 탄소나노섬유 히팅모듈을 결정하기 위해, 탄소나노섬유램프에 관한 특성 실험이 먼저 수행된다. 이 결과를 기반으로 탄소나노섬유 히팅모듈이 결정되고, 이

히팅모듈을 열원으로 포함하는 제안된 건조기에 관한 성능시험이 수행된다. 마지막으로, 제안된 건조기의 차별성과 장점이 분석된다.

3.1 탄소나노섬유램프의 온도특성

Fig. 3은 측정된 탄소나노섬유램프의 표면온도를 보여준다. 그 표면온도는 Fig. 3과 같이 전류의 함수로 표현하였다. 램프에 흐르는 전류의 증가와 함께 탄소나노섬유램프의 표면온도는 선형적으로 상승하였다. 이는 램프의 전류와 램프의 표면온도 사이에 양의 관계가 있음을 의미한다. 이러한 전류-온도의 특성은 실험에서 사용된 모든 Type의 램프에서 유사하게 나타났다. A Type의 표면온도가 가장 높았는데, 이는 피치길이가 짧아져 B와 C Type보다 탄소나노섬유층의 촘촘한 구성으로 인한 것으로 판단된다. 특히, Type B와 C의 전류에 따른 표면온도는 거의 대등하게 나타났다. 이는 표면온도에 영향을 미치는 탄소나노섬유 피치길이의 임계치가 존재하는 것을 암시한다.

고려된 탄소나노섬유램프의 표면온도분포는 램프의 인가전압이 220 V일 때, 램프의 가로방향에 대한 온도분포를 측정하였다. 그 결과는 Fig. 4에서 확인할 수 있다. 이 온도분포는 열화상 카메라를 이용하여 측정하였다. Type A의 온도분포는 오른쪽으로 진행할수록 증가 후 감소하는 경향을 보였고, Type B의 그 분포는 비교적 일정하였다. 반면에 Type C의 온도분포는 증가와 감소를 반복하는 불규칙적인 변화패턴을 보였다. 3개 램프의 온도분포특성은 탄소나노섬유를 봉입한 유리표면과 그 표면의 이물질 등에 의한 변화가 가능하며, C 유형에서 가장 열악하다. 이 온도분포특성을 정량적으로 파악하기 위해, 표면온도변화 정도를 반영하는 상수 T_D 가 필요하다. 상수 T_D 는 식 (3)으로 계산하였고, 그 식에서 T_m , T_L 는 각각 표면의 최대온도, 최소온도이다. T_D 가 낮을수록 표면에 온도분포의 분산이 적으며, 온도분포특성이 우수한 것으로 평가한다. Fig. 4의 결과로부터, 식 (3)의 결과는 A, B, C 유형에 대하여 각각 9.3, 8.7, 15.16% 이다. 즉, B 유형이 가장 우수한 온도분포특성을 보인다.

$$T_D = \frac{T_m - T_L}{T_L} \times 100 [\%] \quad (3)$$

제안된 세탁물 건조기의 제작에서, 저자들은 3가지 유형의 탄소나노섬유램프 중 A 유형을 최종 선정하였다. 이는 높은 표면온도와 컴팩트한 히팅모듈 제작의 관점에서 다른 유형보다 우수하기 때문이다. A 유형의 온도분포특성이 B 유형보다 열등하지만, 그 차이가 다소 낮으며 공기의 가열을 위한 높은 표면온도가 중요할 것으로 판단된다. 탄소나노섬유 히팅모듈은 A 유형의 램프 2개를 병렬로 연결하여 구성된다.

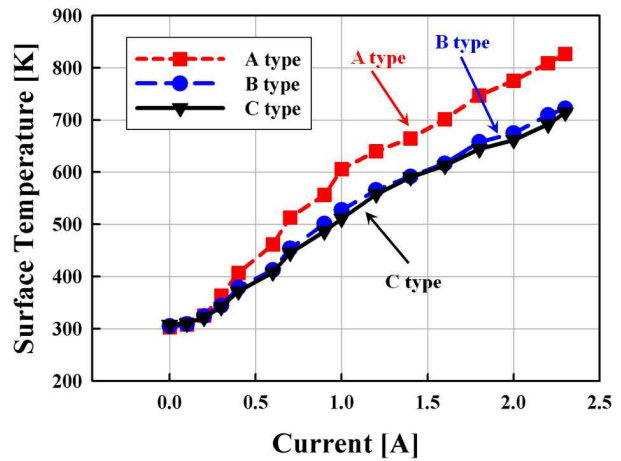


Fig. 3 Surface Temperature of Carbon Nanofiber Lamps as a Function of Current

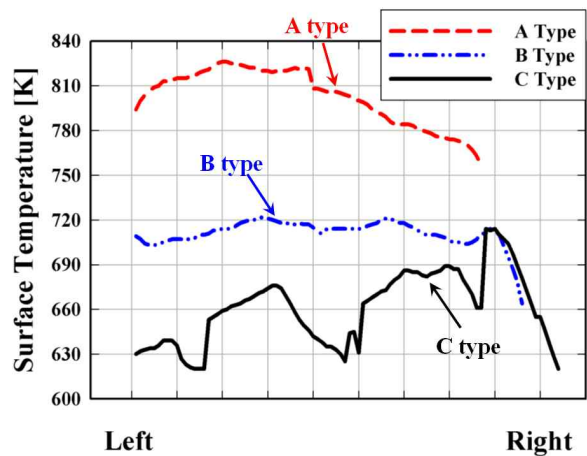


Fig. 4 Surface Temperature Distribution Characteristics of Carbon Nanofiber Lamps

3.2 제안된 건조기의 성능시험 및 시험결과

본 항은 제작된 건조기의 시험결과를 이용하여 KS C 9319에서 규정한 건조효율을 분석하였고, 제안된 탄소나노섬유램프 히팅모듈의 적용 가능성을 평가한다.

Fig. 5는 실험조건에 따른 건조효율 D , 수분증발률 R 을 보여준다. D 와 R 는 Fig. 5에서 좌측의 세로축에 나타내었다. 45%를 표시하는 붉은색 점선은 KS C 9319를 충족기준을 표시한 것이다. 그리고 제안된 건조기의 성능은 Fig. 5의 가로축에서 Set 1~3으로 표현하였고, S사의 성능은 가로축의 other로 명시하였다. 제안된 건조기의 시험조건 중 가장 우수한 건조효율 D 와 수분증발률 R 은 Set 3 (가열 5분, 배기 10초)에서 나타났다. 이 조건 (Set 3)에서 제안된 건조기의 D 는 최대 45.23%, 평균 43.24%로, 제안된 건조기가 [13]에서 제시된 건조성능에 도달함을 확인하였다. 동일한 조건에서 제안된 건조기의 R 은 최대 98.88%, 평균 98.29%로 기존 제품인 S사의 성과 대등하다.

Fig. 5에서 건조효율 D 는 건조 실험조건 (Set 1 ~ 3)에 따라 상이하게 나타남을 확인할 수 있다. 이는 D 가 열원의 동작시간과 드럼 내부의 공기를 순환시키는 시간에 지대하게 영향을 받음을 의미한다. 드럼의 공기를 순환시키는 시간이 일정한 조건에서, 열원의 가동시간이 증가된 경우에서 D 는 오히려 감소한다(Set 1과 2의 비교). 이는 세탁물의 건조가 단순히 열원에서 방출되는 열량에만 의존하지 않음을 의미하며, 드럼 내부의 공기조건이 건조에서 중요한 요소임을 시사하는 것이다. 다시 말해서, 세탁물 건조에서 단순히 높은 온도에만 의존하는 것은 건조효율의 측면에서 바람직하지 않다. 반면에, 열원의 가동시간과 드럼내부의 가동시간이 동시에 증가한 경우에서 (Set 3), D 는 현저히 상승한다. 이러한 결과로부터, 드럼내부의 공기조건과 공기순환이 건조효율에 중요한 요소임을 알 수 있다. Fig. 5에 나타낸 건조시험 결과로부터, 건조효율 D 에서 열원의 동작과 드럼 내부 공기순환 시간의 이상적인 조건이 존재할 것으로 추정된다. 이러한 조건은 추후 건조성능 향상을 위한 최적화 과정에서 도출할 것이다.

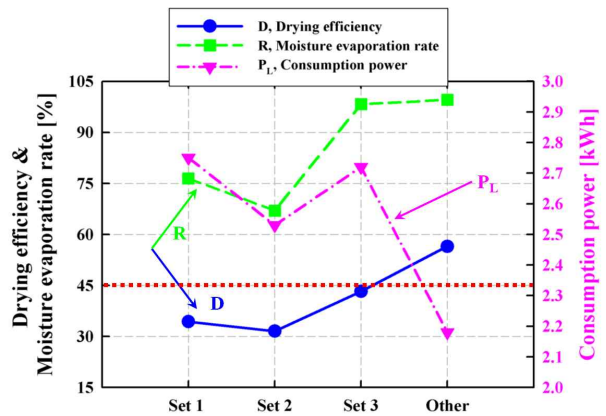


Fig. 5 Drying Efficiency, Moisture Evaporation Rate, and Power Consumption of the Proposed Dryer and the S Company Dryer

Fig. 5에서 주목해야할 결과는 기존 S사 제품의 열원에서 소비전력 Q 와 건조효율 D 의 관계이다. 제안된 건조기는 수분증발률 R 에서 대등한 성능을 보유하나, 건조효율 D 에서 S사의 제품보다 약 13% 열등하다. R 이 대등하기 때문에, 이 차이는 식 (2)에서 소비 에너지 Q 에 영향인 것으로 판단된다. 건조효율 D 는 식 (2)에서 수분 증발량 외에 열원 Q 에 반비례한다. 이는 R 이 일정한 경우에, D 가 Q 에 의존함을 의미한다. S사 제품의 열원에서 소비하는 전력은 Fig. 5 (일점쇄선, P_L)에서 대략 확인할 수 있는데, 이 수치는 건조과정 동안 열원에서 소비된 적산전력이며, S사와 제안된 건조기에서 각각 2.18, 2.72 kWh 이다. 고효율을 위해, 제안된 건조기에서 열원의 용량이 종래의 세탁물 건조기보다 낮게 설계됨에도 불구하고, 건조과정 동안 적산전력은 제안된 건조기에서 더 크다. 이 측정 결과는 건조과정 동안 열원의 동작시간과 관련된다.

S사와 제안된 건조기의 동작과정 동안 전압, 전류, 열원에서 소비전력을 15초 주기로 측정된 결과가 각각 Fig. 6~8에 나타내었다. Fig. 6은 제안된 건조기와 S사의 건조기가 건조 시간동안 소비하는 전력을 보여준다. 제안된 건조기에서 3가지 건조조건 (Set 1~3)에 대한 전력소비는 동작시간동안 1300~1500 W 범위에서 거의 일정하다. 반면에 S사의 건조기는 약 700 W로 동작하여, 특정 구간 (50 ~ 70분 사이, 85 ~ 90분 사이)에서 열원은 동작하지 않는다. 이는 제안된 건조기보다 더 낮은

소비전력으로 더 짧은 시간동안 열원이 동작함을 의미한다. 이러한 전력소모패턴의 차이가 건조효율 D 의 차이에 기여한다. 건조기의 열원이 동작하는 시간구간에서, S사의 건조기의 전력소모가 제안된 건조기의 그 전력보다 50% 정도 낮다. 이는 건조 동안 열원의 전류와 전압을 나타내는 Fig. 6과 7로부터 파악할 수 있다. S사의 건조기는 열원이 작동할 때, 전압은 제안된 건조기와 동등하나, 열원에 흐르는 전류가 약 2배 작다. 전류가 낮은 수 치만큼, 소비전력이 낮게 나타나게 된다.

그 외 추가적으로 세탁물 건조과정 (동작 후 20분)에서 드럼 내부의 세탁물 온도가 비교되었다. 드럼 내부의 세탁물 온도는 열화상 카메라를 이용하여 측정하였다. 그 결과는 Fig. 9에서 확인할 수 있다.

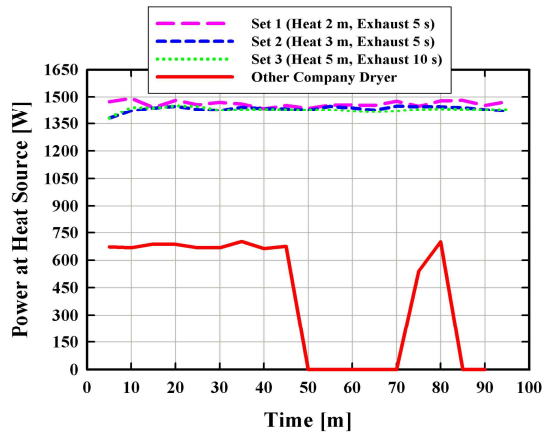


Fig. 6 Power Consumption at the Heat Source for Drying Time

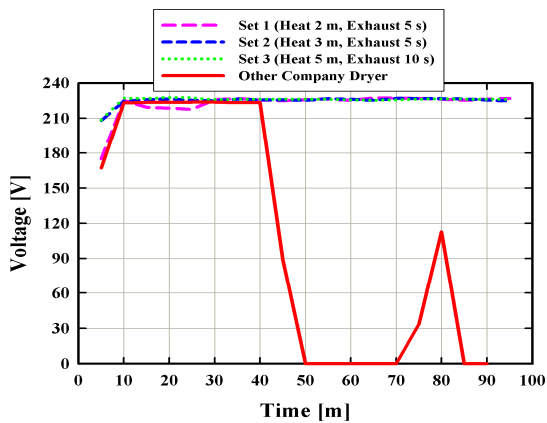


Fig. 7 Voltage at the Heat Source for Drying Time and Current

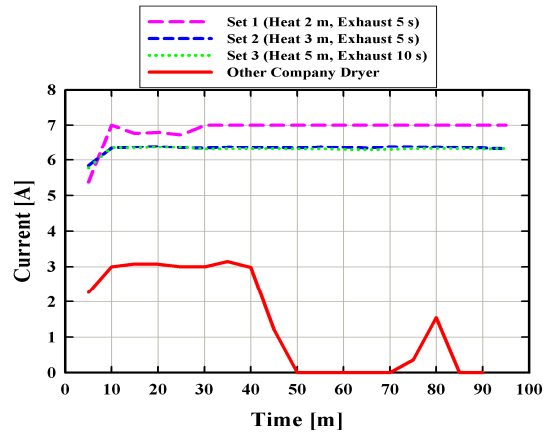


Fig. 8 Current at the Heat Source for Drying Time and Current

Fig. 9는 건조기의 표준모드 동작 후 20분이 경과한 시점에서 촬영한 것이다. 제안된 건조기의 세탁물 온도는 평균 61.1°C이고, S사 건조기 내부의 세탁물 온도는 평균 53.7°C이다. 제안된 건조기에서 세탁물의 온도가 더 높았다. 하지만, 높은 세탁물의 온도가 우수한 건조효율로 귀결되지 않을 것으로 판단된다. 이는 Fig. 5와 같이 세탁물의 온도가 더 높은 제안된 건조기의 건조효율이 더 낮기 때문이다. 건조효율은 열원에서 증가된 열량보다는 그 열원을 낮은 전력으로 짧은 시간으로 동작하여 건조하는 건조메커니즘에 더욱더 의존할 것으로 판단된다.

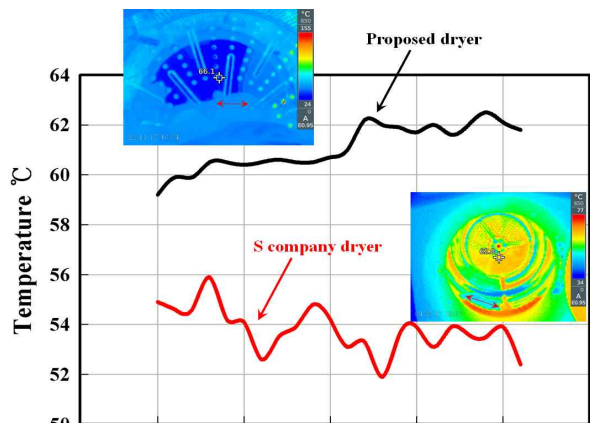


Fig. 9 Laundries Temperature on Internal Drum in the Proposed Dryer and the S Company Dryer (After 20 Minutes of Drying Process)

상술한 결과로부터, 제안된 탄소나노섬유램프 히팅모듈은 KS C 9319에서 제시한 45%의 건조 효율을 충족하며, 수분증발률 R 은 기존 S사의 건조기의 증발률과 거의 대등하였다. 그리고 세탁물 온도는 기존 S사의 제품보다 평균 약 7°C 더 높았다. 이는 탄소나노섬유램프 히팅모듈이 건조를 위한 기본적인 사항을 충족함을 의미한다. 따라서, 탄소나노섬유램프 히팅모듈은 가정용 세탁물 건조기를 위한 열원으로 사용 가능할 것으로 판단된다.

3.3 제안된 건조기의 차별성과 장점

본 논문에서 제안하는 세탁물 건조기의 차별성은 다른 열원, 공기유동 방식, 반사갓, 통공형 드럼이다. 열원은 건조를 위한 공기를 가열하는 장치로 탄소나노섬유램프를 적용한 히팅모듈이다. 이 히팅모듈의 표면온도(Fig. 3)는 램프에 흐르는 전류가 약 2.3 A 일 때, 최대 820 K (약 540°C)이다. 이 표면온도는 세탁물 건조에 요구되는 공기의 가열을 수행하는데 충분하다. 공기유동 방식은 세탁물에 공기를 접촉시키는 방향이다.

이 설명을 위해, Fig. 10은 제안된 건조기 공기유동방식에 따른 동작방안을 보여준다. 공기유동은 드럼 하부에 위치한 탄소나노섬유램프 히팅모듈에 의해 가열된 공기가 세탁물의 하부에서 상부방향으로 확산한다. 히팅모듈을 경유한 공기가 세탁물에 직접 접촉하면 세탁물의 손상을 초래하기 때문에, 드럼 후면으로 그 공기를 유도한 후 드럼 내부로 확산되는 방식이 선택되었다. 반사갓과 통공형 드럼은 탄소나노섬유 히

팅모듈의 발열 시 방사되는 원적외선을 활용하기 위한 것이다. 반사갓은 세탁물의 건조기 내부에 존재하는 원적외선을 세탁물로 집중 조사하기 위한 것으로, 드럼 상부에 위치한다. 통공형 드럼은 반사갓에서 반사된 원적외선을 세탁물에 용이하게 조사하기 위한 것이다. 상술한 바와 같이 탄소나노섬유램프의 적용은 높은 온도의 열원, 우수한 발열량, 원적외선 방출에 의한 장점을 얻을 수 있다. 이 장점은 건조성능의 향상과 세탁물의 살균효과로 나타난다. Table 2는 제안된 건조기와 S사의 건조기에 대한 차이점과 성능을 요약한 것이다.

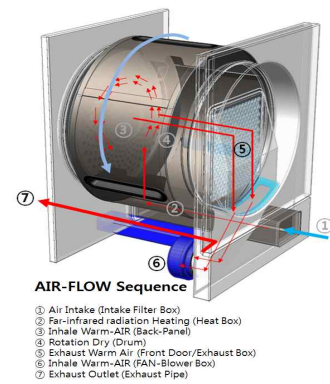


Fig. 10 Air Flow Process of the Proposed Dryer

4. 결론

본 논문은 탄소나노섬유의 열원 (히팅모듈)을 적용한 세탁물 건조기를 제안하고, 히팅모듈의 적용 가능성을 평가하였다. 그 히팅모듈의 설계를 위해, 탄소나노섬유램프의 특성 (표면온도와 표면

Table 2 Comparison of Proposed Dryer and S Company Dryer

Dryer Type	Heat source material	Heat source Property	D %	R %	Heat source power kW	P _L kWh	살균 효과
proposed dryer	Carbon nanofiber	Far-infrared radiation	45.23	98.88	1.5	2.72	○
S company dryer	Copper or aluminum	Joule heat	56.47	99.54	2.3	2.18	×

D: Drying efficiency, R: Moisture evaporation rate

온도분포)을 파악하기 위한 실험이 수행되었다. 그 램프의 표면온도는 램프에 흐르는 전류의 증가와 함께 선형적으로 상승하였고, 표면온도는 그 램프의 길이가 짧을수록 높았다. 실제 적용 가능성은 실제 제작된 건조기의 건조효율, 세탁물의 수분증발률, 드럼 내부의 세탁물 온도를 측정하여 평가하였다. 건조효율은 KS C 9319의 기준을 충족하였고, 수분증발률과 드럼 내부의 세탁물 온도는 시판중인 S사의 제품과 대등한 성능을 보였다. 본 논문에서 제안된 탄소나노섬유램프 히팅모듈은 건조효율과 건조성능의 측면에서 세탁물 건조기의 열원으로 적용 가능할 것으로 판단되며, 높은 온도의 열원, 우수한 발열량, 원적외선 방출에 의한 건조성능의 향상과 세탁물의 살균효과를 얻을 수 있다. 제안된 건조기의 건조성능향상을 위해, 열원의 가동시간과 드럼 내부의 공기순환시간을 결정하는 최적화 연구가 필요하다. 본 논문의 결과는 고효율 및 고성능 건조기를 위한 새로운 열원을 연구하는데 기여한다.

References

- [1] Yang, K. S., Kim, B. H., and Lee, W. J., "Characteristics of Carbon Nano-fibers and Their Applications," *Polymer Science and Technology*, Vol. 21, No. 2, pp. 150-156, 2010.
- [2] Kim, S. H., "Harvesting Electrical Energy from Carbon Nanotube Yarn Twist," *Science*, Vol. 357, Issue. 6353, pp. 773-778, 2017.
- [3] Defraeye, T., "Advanced Computational Modelling for Drying Processes - A Review," *Appl. Energy*, Vol. 131, pp. 323-344, 2014.
- [4] Kim, J. H., Jang, S. P., Choi, C. J., Hwang, K. S., and Lee, H. J., "Thermal Characteristics of an Electric Clothes Dryer," *The Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 33, No. 8, pp. 629-634, 2009.
- [5] Park, S. J., and Lee, Y. L., "Optimal Flow Design of High-Efficiency, Cold-Flow, and Large-size Heat Pump Dryer," *Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, Vol. 20, No. 5, pp. 547-552, 2011.
- [6] Won, K. and Song, S., "Development of a Simulation Program to Predict the Performance of a Cloth Dryer," *The Korean Society of Mechanical Engineers*, 2009 Spring and Autumn, Conference, pp. 1600-1605, 2009.
- [7] Aihua, M., Jie, L., Guiang, L., and Yi, L., "Numerical Simulation of Multiscale Heat and Moisture Transfer in the Thermal Smart Clothing System," *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 40, pp. 3342-3364, 2016.
- [8] Ryu, J. -B., Jung, C. -Y., and Yi, S. -C., "Three-Dimensional Simulation of Humid-Air Dryer Using Computational Fluid Dynamics," *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 19, pp. 1092-1098, 2013.
- [9] Bansal, P., Mohabir, A., and Miller, W., "A Novel Method to Determine Air Leakage in Heat Pump Clothes Dryers," *Energy*, Vol. 96, pp. 1-7, 2016.
- [10] Akcabay, D. T., Dowling, D. R., and Schultz, W. W., "Clothes Washing Simulations," *Computers and Fluids*, Vol. 100, pp. 79-94, 2014.
- [11] Bassily, A. M., and Colver, G. M., "Modelling and Performance Analysis of an Electric Heater," *International Journal of Energy Research*, Vol. 28, Issue. 14, pp. 1269-1291, 2004.
- [12] Lee, M. J., Gong, S. U., and Kim, J. S., "A Study on the Performance of Home Clothes Dryer Using Thermoelectric Module," *The Korean Society of Mechanical Engineers*, 2007 Spring and Autumn, Conference, pp. 1414-1419, 2007.
- [13] Korean Agency for Technology and Standards, "Tumbler Type Electric Clothes Dryers," *KS C 9319*, 2013.



이 정 환 (Lee Jung-Hwan)

- 정회원
- 영남대학교 전자공학과 공학사
- 영남대학교 전자공학과 공학석사
- 영남대학교 전자공학과 공학박사
- 계명대학교 공과대학 전자공학과

조교수

- 관심분야 : 반도체 공정, 고속트랜지스터, 집적 회로 설계



원 상 연 (Won Sang-Yeon)

- 비회원
- 대구자연과학고등학교 입학과 졸업
- (주)대성기전 대표이사
- (주)티에스통신 대표이사

- 관심분야 : 전기 배전, 태양광, 건조기, 전기자동 제어, 기계