

동적 상태에서 주관적 착용감에 영향을 미치는 직물의 수증기상태의 수분전달 특성

유 신 정 · Roger L. Barker

노스캐롤라이나 주립대학교

Moisture Vapor Management Properties of Fabrics Determining Human Sensorial Comfort in Transient Conditions

Shin Jung Yoo · Roger L. Barker

College of Textiles, North Carolina State University
(2000. 5. 18 접수)

Abstract

Moisture transfer property of fabrics has known as one of the most important factors deciding wearer's subjective comfort not only thermally but also of sensorial.

As a decisive property of fabric materials in determining human sensorial comfort, moisture vapor management property of heat resistant workwear material was examined in terms of increasing and decreasing rate and maximum value of relative humidity in the microclimate under the sweat pulse situation. An unique moisture regulation index, B_i , was calculated from the measurements using a novel dynamic sweating hot plate apparatus and was used to assess the buffering capacity of fabrics against a moisture vapor sweat pulse.

Key words: moisture transfer, vapor buffering capacity, vapor regulation index, heat-resistant workwear material, dynamic sweating hot plate;
수분전달, 습기완충효과, 수분처리능력, 방열직물, 동적 수분전달측정

I. 서 론

활동과 휴식이 계속되는 일상의 cycle 에서 우리 몸에서 생성되는 신진대사열의 차이는 최고 4배에 달한다고 알려져 있다. 이러한 상황에서 인체의 피부는 쉽게 땀에 노출된다. 땀은 항온 시스템인 체내에 과도한 열이 쌓이게 되었을 때 남아도는 열을 배출하기 위한 인체의 반응이기 때문이다. 의복을 착용한 인체는 그 움직임에 따라 의복중량이나 의복

을 구성하는 직물의 변형에 따른 압력 등 다양한 형태로 외부의 영향을 받게 되는데 이러한 영향은 의복과 인체의 접촉면을 통하여 인체로 전달되게 되어 있으며 이는 착용자의 주관적 착용 쾌적감에 있어서 중요한 판단 요소가 되는 차이점을 제공하는 역할을 한다. 인체로부터 발생하는 불감증설 (insensible perspiration)과 발한(perspiration)등으로 인해 인체와 의복사이의 의복기후(microclimate)내의 수증기의 농도는 주변공기보다 높다. 이러한 수증기들은 섬유나 기공을 통해 신속히 의복 밖으로

방출되어야 하며 이 작용이 원활하게 이루어지지 못할 경우 습기는 인체 피부와 의복사이에 축적되어 착용자의 불쾌감을 유발시킨다.

인체의 피부를 통해 방출되는 수분은 크게 확산과 발한의 두 가지 형태로 이동한다. 만일 수분이 피부에서 증발하여 수증기 형태로 피복재료의 기공을 통해 의복 밖으로 배출된다면, 그 피복재료의 기공은 여전히 공기를 함유할 수 있으므로 피복재료의 보온성은 유지된다. 그러나 다른 한편 수분이 액체상태로 피복재료를 통과하여 의복의 최외층에서 증발이 일어나는 경우 착용자의 쾌적성은 현저히 떨어진다. 이는 피부의 신경세포들을 통해 감지되는 '촉촉한 느낌(clammy feeling)' 뿐만 아니라 기공의 공기가 수분으로 대체되면서 피복재료의 보온성을 저하시키기 때문이다.

피복재료를 통한 수분전달은 크게 네 가지 경로를 갖는다. 첫째, 확산의 법칙에 의해 섬유내의 기공을 통해 이동하는 것인데 이것은 직물의 기공도나 두께, 그리고 의복의 통기성여부에 의해 크게 영향을 받는다. 둘째, 섬유자체의 표면을 통해서, 혹은 섬유에 의해 흡수되어 이동하는 경로이다. 섬유내의 수분 확산속도는 대기중에 비해 크게 떨어지지만 밀도가 높은 직물의 경우 이러한 경로가 중요한 역할을 한다^{4, 23)} 섬유의 이러한 흡습성(hygroscopicity)이 평형상태(steady state)에서는 피복재료를 통한 수분전달에 있어서 큰 이점을 갖지 않지만 동적 상태(transient condition)에서는 급격한 수증기압의 변화에 대한 수분 완충작용(buffering effect)으로 인해 그 중요성이 커진다고 알려져 있다²⁴⁾. 셋째, 실 사이의 기동을 통한 이동인데 이 메카니즘은 실 사이의 모세관의 크기나 섬유 표면의 친수성(hydrophilicity)여부에 영향을 받는다. 넷째, 섬유표면을 통한 액체상태의 수분의 이동으로, 이 현상은 Weiner²⁵⁾의 폴리아미드(polyamide)섬유의 다발실험을 통해 발견되었다. 그는 이 실험에서 섬유와 공기의 확산 계수를 가지고 예측할 수 있는 수분의 이동 양보다 거의 2배에 가까운 양의 수분이 섬유의 다발을 통해 이동한 것을 확인하고 섬유표면을 통한 수분의 이동이 피복재료를 통한 수분 전달의 중요한 메카니즘(mechanism)중의 하나임을 주장하였다.

많은 연구들이 피부의 습윤감이나 의복 기후내 수증기압의 초기 변화율이 착용시 불쾌감을 나타내는 생리학적인 지수임을 보고해 왔으며^{2, 6, 10, 13, 16, 17)} 이에 따라 피복재료의 수분전달 특성을 기술하기 위한 다양한 시도^{6, 12, 19, 22, 24, 25)}가 있어 왔다. Woodcock^{24, 25)}은 평형상태에서의 열과 수분 전달을 기술하기 위해 vapor permeability index (i_m)를 사용하였다. 그러나 i_m 지수가 가정하고 있는 평형상태는 피복재료로 제작된 최종상품인 의복이 착용되는 실제 환경에서는 항상 충족되기 어려운 한계가 있다. 뿐만 아니라 피부표면의 습윤 정도를 측정하는 방법으로 사용되어 왔던 Sweat-Wetted-Area (SWA) (피부 표면전체가 땀으로 젖는 상태를 최대 값으로 하는 백분율) 또한 실제 사용에 있어서의 피복 재료의 착용 쾌적성을 설명하지 못하는 단점이 있어 왔다.

이에 따라 동적 상태에서의 직물의 수분전달특성을 고찰하는 것이 습윤감과 관련된 주관적 착용 쾌적성을 예측하고 설명하기 위해 필수적인 역할을 담당하게 되었다. 실제로 많은 실험실 테스트에서 가정하는 평형상태는 실생활에서 거의 일어나지 않는 조건인데 이는 실제 착용시에는 착용자의 움직임으로 끊임없이 인체의 자세와 활동이 변하고 있으며, 이에 따라 인체 내에서 생산되는 에너지의 양과 착용자가 경험하는 환경조건 등이 다양하게 변하기 때문이다. 이러한 동적 상황에서 피복재료의 수분 처리능력은 피부에 접촉하게 되는 최내층의복기후의 수분의 양에 영향을 미쳐 의복기후내의 급격한 변화를 지연시키거나 안정화하는 등 의복의 착용 쾌적성 관점에서 볼 때 중요한 역할을 한다.

흡수성 섬유로 제작된 의복에 대한 수분완충작용(buffering effect)의 개념은 1939년 Cassie²⁶⁾등에 의해 주창되었다. 모섬유는 대표적인 수분완충(buffering) 섬유로서 상당한 양의 수증기를 흡수한다. 이러한 모섬유의 특성은 의복환경 내에서 갑자기 외부환경 조건이 바뀔 때 완충작용을 하여 착용자로 하여금 쾌적한 느낌을 갖게 하는 것이다. Wehner²⁷⁾등은 동적상황에서 직물의 흡습성과 투습성을 연구한 결과 평형상태에서는 폴리에스테르직물이 더 좋은 투습성을 보인 반면 동적 상태에서는 흡

습성(hygroscopic)직물이 폴리에스터 직물보다 더 많은 수분을 제거 할 수 있음을 고찰하였다. 반면에 다른 연구들은 주관적인 쾌적성과 관련하여 흡수성 섬유와 소수성 섬유의 뚜렷한 차이를 보고하지 못하고 있다^{2, 11, 18, 20}.

본 연구에서는 피복재료를 제작된 최종 상품이 다양한 착용 환경 내에서 착용되었을 때 착용자의 쾌적성을 이해하고 설명하는데 필요한 통찰력을 제공하기 위해 동적 상태에서의 피복재료의 수증기 상태의 흡습, 투습성을 고찰하였다. 이것을 위해 아라미드 소재 작업복재료(aramid workwear material)가 선택되었다. 작업복은 기능성과 함께 작업시의 착용 쾌적성이 작업능률에 크게 영향을 미칠 뿐만 아니라 작업자들은 고온 다습한 작업 환경과 여러 가지 다양한 육체적 활동에 노출되기 쉬워서 발한 가능성이 크며 따라서 수분관련 불쾌감을 초래할 가능성이 크므로 재료의 수분전달특성을 고찰하고 이해하는 것이 쾌적성 향상을 위해 중요하기 때문이다.

II. 실험

1. 실험 재료

직물 시료로서 다섯가지의 서로 다른 섬유와 직조, 후처리로 구성된 아라미드(aramid) 직물과 한 종류의 면직물이 사용되었다. 직물 무게의 차이로 인한 영향을 최소화 하기 위해 모든 시료의 평량

(basis weight)은 4.5에서 5.5 oz/yard²로 통제되었으며 본 연구를 위하여 Dupont사를 통해 특별히 제작되었다. 모든 시료는 실험 전, 생산 과정 중 처리된 첨가물과 오염을 제거하기 위해 AATCC방법으로 세 차례 세탁되었다. 직물에 사용된 원사와 직물의 기본구성 및 wicking 처리 여부를 Table 1에 나타내었다.

2. 실험 방법

동적상태의 수증기 전달을 측정하기 위해 NCSU의 Dynamic Sweating Hot Plate 가 사용 되었다. Fig. 1에 나타나듯이 이 시스템은 다섯 개의 부분으로 구성되었다: 1) Amico-Aire unit; 2) guarded hot plate; 3) diffusion cell; 4) computer interface unit; 5) data acquisition 프로그램. Amico-Aire unit은 실험 cell 내의 온도와 습도를 각각 5도에서 70도, 10%에서 100%까지 콘트롤 할 수 있으며 hot plate는 항온(35°C)을 유지하도록 구성되어 있다. Diffusion cell은 water container와 Goretex[®] membrane으로 구성되어 있는데 세 겹의 Goretex[®] 를 사용하여 발한시의 피부를 시뮬레이트하였고 시료에 분포되는 수증기의 양과 정도를 고르게 조절하였다. 실제 동적 상황에서 활동 상황이나 주위환경의 변화로 발생하는 발한기전을 모사하기 위하여 셔터(shutter)를 이용하였다. 온도 5°C와 습도 2%의 정확도를 가진 센서(sensor)를 이용해 의복기후(microclimate) 내의 온도와 습도를 측정, 분석하였다.

Table 1. Description of test materials

Fabric	Fiber Contents	Fabric Construction	Fabric Density (1/inch)	Basis weight (oz/yd ²)	Air Permeability ¹ (m ³ /m ² /min)	Optical Porosity ² (%)
T1	Developmental Nomex [®] , fine denier fiber	2/1 right hand twill	72×54	5.30	100	1.59
T2	Developmental 75/25 Nomex [®] /FR rayon Blend, w/o wicking finish	Plain weave	68×48	4.62	146	2.36
T3	Nomex [®] III, w/o wicking finish	Plain weave	67×43	4.71	147	2.14
T4	Nomex [®] III, with wicking finish	Plain weave	67×43	4.78	154	2.07
T5	Developmental 75/25 Nomex [®] /FR rayon Blend, with wicking finish	Plain weave	67×47	4.62	138	2.35
T6	100% preshrunk cotton	2/1 left hand twill	100×52	5.58	44	0.90

¹Air permeability measured using ASTM Test Method D 737 75

²Optical porosity measured as % transmitted light.

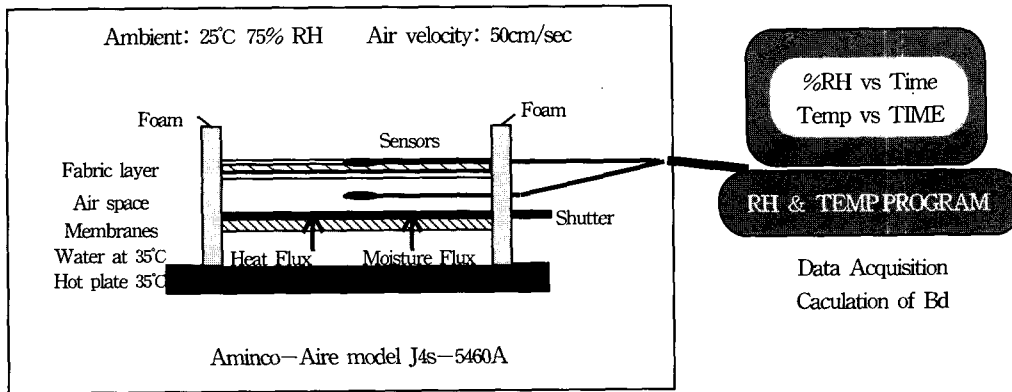


Fig. 1. Dynamic Heat and Moisture Measurement System

Dynamic Sweating Hot Plate를 사용하여 얻을 수 있는 그래프를 통해 다음의 세 가지 요소들이 측정, 산출되었다.

a. 셔터가 열린 후 10분 동안 빠르게 증가하는 의복기후내의 상대습도의 변화(S_{10}):

$$S_{10} = \tan \alpha = \frac{\Delta RH_{10}}{10} \quad (1)$$

b. 셔터(shutter)가 닫히기 직전, 상대습도의 최고 증가치

$$\Delta RH_{max} = RH_{max} - RH_0 \quad (2)$$

c. 셔터(shutter)를 닫은 후 상대습도가 처음상태로 돌아오는데 걸리는 시간(T_d).

위의 세 가지 특성은 각각의 요소가 작은 값을 가질 수록 시료의 수분 처리능력은 뛰어나다고 할 수 있다. 즉 발한이 시작된 후 피부와 접한 의복기후내의 상대습도가 서서히 증가할 수록, 최고 증가치가 적을 수록, 또한 수분 공급이 멈춘 후 원래의 습도 상태로 회복되는 건조시간이 짧을 수록 동적 상태에서의 그 직물의 수분처리능력이 뛰어나다고 말할 수 있다. 이 세 가지 작용의 복합적인 효과를 통합하여 비교하기 위해 지수 B_d 가 산출되었다.

$$B_d = \frac{D}{S_{10} \cdot \Delta RH_{max} \cdot T_d} \quad (3)$$

여기서 D 는 상수 (1000)로서 B_d 의 값을 일정한 범위 안에 두기 위해 설정되었다.

Fig. 2에 Dynamic Sweating Hot Plate를 통해 얻을 수 있는 일반적인 그래프형태와 수분처리지수, B_d 의 개념을 설명하였다.

III. 실험결과 및 고찰

1. 수분 처리 지수, B_d

인체의 움직임이나 환경변화로 피복 내에 여분의 에너지나 수분이 축적되었을 때 이들은 피복재료를 통해 신속히 배출되어야 한다. 피복재료의 흡습, 투습성이 뛰어난 경우 의복내 상대 습도는 가능한 작은 증가를 보인 후 발한이 멈추면 가급적 빨리 정상시의 상태로 회복되어야 한다. Table 2에 각 시료에 대한 수분 처리지수 B_d 와 세 가지 구성 요소, 즉 10분 뒤의 상대습도의 증가율(S_{10}), 상대습도의 최대증가량(Max)과 건조 시간(T_d)을 비교하였다. 수분처리지수, B_d 는 직물의 기공을 통한 투습, 구성 섬유흡습성(hygroscopicity of the fiber)과 건조시간(T_d)을 하나의 지수에 통합하여 복합적인 상호 작용에 의해 나타나는 결과를 비교해 볼 수 있게 해준다. Fig. 3~6에 각 요소의 결과를 나타내었다. 그래프의 기본 눈금을 LSD(least significant difference) 값으로 설정하여 시료간의 비교를 용이하게 하였다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 fine denier 섬유를 사용한 Nomex® twill(T1)이 흡습성 섬유인

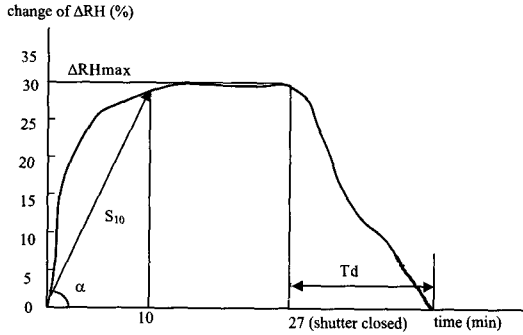


Fig. 2. Dynamic relative humidity change in microclimate and definition of the moisture regulation index, B_d

cotton twill(T6)이나 Nomex®III(T3, T4)시료보다 더 좋은 수분 처리능력을 갖는 것으로 나타났다. 이는 Nomex® twill(T1)이 실험을 시작한 후 10분이 경과 될 때까지 의복 기후내의 상대습도(S_{10})가 비교적 서서히 증가하고 그 최대값(R_{max})이 적으며, 셔터(shutter)가 닫힌 후 수분 공급이 중단되었을 때 원래의 습도로 회복되는 시간(T_d)이 빠르기 때문인 것을 Fig. 4~6을 통해 확인할 수 있다.

2. 직물의 특성이 수분 처리 능력에 미치는 영향

1) 기공도(Fabric Openness)

시료의 기공도가 수분 처리능력에 미치는 영향을 보기 위해 공기투과도(air permeability)와 투시기공률(optical porosity)과의 관계를 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 7은 시료의 공기투과도와 의복기후내의 최대 상대습도 증가치를 비교한 그래프로

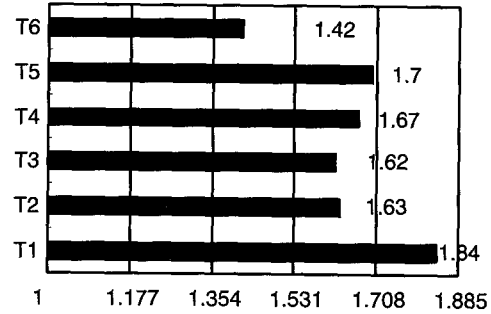


Fig. 3. Moisture Vapor Regulation Index(B_d)

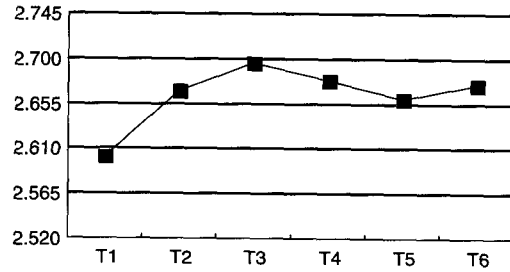


Fig. 4. RH% change after 10 min. (S_{10})

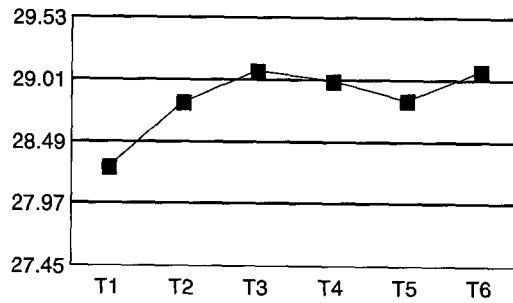


Fig. 5. Maximum change of RH% (ΔRH_{max})

Table 2. Moisture vapor regulation index, B_d and its components

Sample	S_{10}	RH_{max}	T_d	B_d
LSD*	0.045	0.518	0.721	0.177
T1	2.60	28.28	7.40	1.843
T2	2.67	28.82	8.00	1.634
T3	2.69	29.08	7.85	1.633
T4	2.68	29.00	7.70	1.681
T5	2.66	28.84	7.65	1.710
T6	2.67	29.08	9.05	1.429

* number of specimens: 5

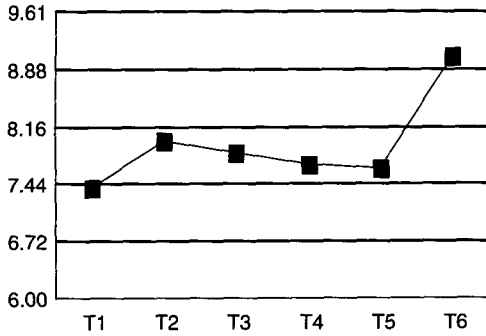


Fig. 6. Drying time(Ta)

100% cotton twill(T6)을 제외한 다른 시료들의 경우 공기투과도(air permeability)가 큰 시료일수록 수분전달이 늦어 의복기후내의 상대습도의 증가가 더 크게 나타나고 있다. 이것은 일반적으로 기대할 수 있는 결과와는 상반된 경향이며, 이는 선행연구에서도 보여지듯이(4, 5, 7, 14, 15) 직물의 공기투과도가 투습성과 뚜렷한 상관관계를 갖지 않는다는 것을 뒷받침한다. 시료의 수분 조절특성과 투시기공률과의 관계를 나타낸 Fig. 8에서도 두 특성간의 유의한 상관 관계를 발견할 수 없었다. 따라서 본 연구에서 사용된 것과 같은 보통 밀도의 직물(woven fabric)의 경우 가시적 openness로써 그 시료의 수분 조절 능력을 판단하기 어렵다고 할 수 있겠다.

2) 흡습성(Hygroscopicity)

Fig. 9은 시료들의 수분율이 나타낸다. Nomex®III에 FR 레이온을 첨가한 시료 (T2 와 T5)의 수분율은 크게 향상 되어(5.9 에서 7.5) 시료의 수분율이 100% 면직물(T6)의 수준 으로 증가된 것을 볼 수 있다. 그러나 FR 레이온의 첨가로 향상된 흡습성(hygroscopicity)이 동적상태에서 의복내의 급격한 습도 상승을 완화하는 수분 완충작용(buffering effect)에 있어서 100% Nomex®III시료와 비교해 볼 때 약간의 이점을 갖는 것으로 보이나 그 차이가 통계적으로 유의한 수준에 미치지 못하였다(Table 2의 S₁₀ 과 RH_{max}). 섬유유의 흡습성(hygroscopicity)여부가 수분전달에 미치는 영향에 대해서는 많은 논란이 있어 왔으나 면과 양모로 대표되는 흡습성 섬유유 동적상태에서 급격한 습도의 변화를 방지하는

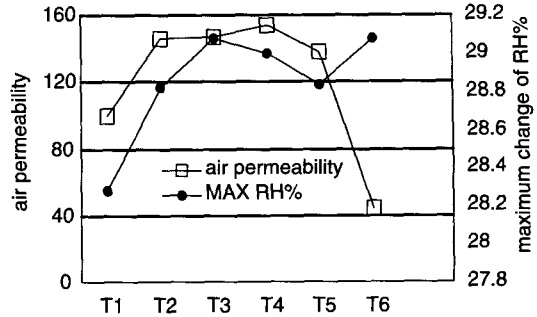


Fig. 7. Relationship between air permeability and moisture buildup

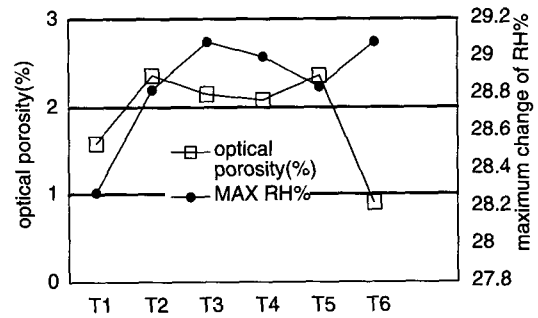


Fig. 8. Relationship between optical porosity and moisture buildup

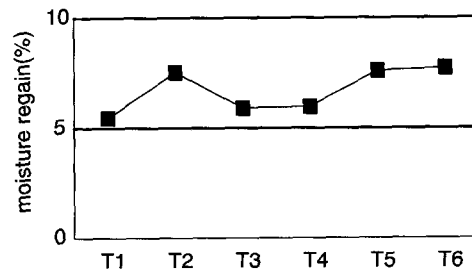


Fig. 9. Moisture Regain(%)

완충 효과는 Cassie³⁾이후 널리 받아들여지고 있다. 그러나 본 연구에 사용된 아라미드(aramid) 직물에서 수분 전달을 향상시킬 의도로 첨가된 흡습성 섬유유(FR 레이온)의 경우 뚜렷한 수분완충효과(buffering effect)를 갖지는 않는 것으로 고찰되었다. 오히려 fine denier Nomex® twill(T1)과 100% cotton twill(T6)을 비교해 볼 때 Nomex® twill(T1)

이 더 작은 S_{10} 과 RH_{max} 의 값을 가짐으로서 cotton의 수분 완충작용 효과가 떨어지는 것처럼 보이는데, 이는 cotton twill의 직물 밀도가 다른 직물에 비해 훨씬 큰 값을 가지기 때문인 것으로 해석 될 수 있다. 특히 이 cotton시료(T6)의 경우 수분처리지수(B_d)가 다른 모든 시료보다 적은 값을 나타내는데 이 결과에 크게 영향을 준 것은 수분의 원인(source)이 제거된 후 원래의 습도로 돌아가기 위해 걸리는 시간인 건조시간(T_d)의 측정값으로(Fig. 6), 다른 시료에 비해 유의하게 큰 값을 가짐으로서 cotton시료의 느린 건조 속도가 수분조절능력을 저하시키고 있음을 알 수 있다.

3) 표면 친수성(Hydrophilicity)

시료의 수분처리능력에 미치는 표면 친수성(hydrophilicity)의 영향을 고찰하기 위해 wicking 처리를 한 시료(T4, T5)와 wicking 처리를 하지 않은 시료(T2, T3)를 비교하였다. FR레이온을 혼방한 두 시료(T2 vs. T5)와 100% Nomex® III 시료들(T3 vs. T4) 모두에서 wicking 처리를 한 시료의 경우(T5 와 T4) 수분처리능력이 약간 상승했으나 처리하지 않은 시료와 비교해 볼 때 수분처리능력(B_d)이나 수분완충효과(S_{10} , RH_{max})에 있어서 통계적으로 유의한 차이를 보이지는 않았다 (Fig. 3).

IV. 요약 및 결론

직물의 착용 쾌적성에 영향을 미치는 중요한 요소로서 아라미드(aramid) 소재 방열 작업복 직물과 100% 면직물의 수증기 상태의 수분전달 특성을 고찰하였다. Dynamic Sweating Hot Plate를 사용하여 동적(transient)상태에서 의복 내 습도증가에 대한 완충작용(buffering capacity, S_{10} 과 RH_{max})과 회복속도(건조속도, T_d)를 통합하여 수분 조절 지수(Moisture management index, B_d)를 산출하여 구성 섬유 흡습성(hygroscopicity)여부, 직물 표면의 친수성(hydrophilicity) 여부 등이 수분전달에 미치는 영향을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

직물의 수분전달 특성과 이에 영향을 미치는 직물의 여러 가지 요소들에 대한 많은 선행 연구들이 있

어 왔으나 연구자와 연구조건에 따라 상반된 결과를 보고하기도 하는 등 명백한 결론에 도달하고 있지 못한 현실이다. 많은 선행 연구에서 보여주었듯이 일정한 압력과 함께 측정되는 공기투과도는 측정된 직물의 투습성과 전혀 상이한 경향을 보였으며 이로써 직물의 공기투과도(air permeability)는 직물의 수증기 투과정도를 예측하는 특성으로 사용될 수 없다는 것을 확인할 수 있었다. fine denier 섬유로 구성된 Nomex® twill 시료(T1)의 수분 처리능력(B_d)이 가장 좋은 것으로 나타났으며 이는 동적상태에서 의복내 습도의 완충작용(buffering capacity, S_{10} 과 RH_{max})과 회복능력(건조시간, T_d)이 뛰어난 것으로 의복으로 제작되어 착용 되었을 때 수분전달과 관련된 쾌적성 실험에서 좋은 평가를 받을 것으로 예측할 수 있다. 아라미드(aramid) 작업복 착용자들에게서 빈번히 불만 사항으로 발견되는 수분전달 관련 착용불쾌감을 향상시키기 위해 흡습성(hygroscopicity)섬유인 FR 레이온을 첨가 한 혼방직물의 경우(T2와 T5), 수분율은 증가하였으나 기대했던 직물의 수분완충작용(buffering capacity, S_{10} 과 RH_{max})이나 수분처리능력(B_d)면에서는 뚜렷한 향상을 보이지 않았다. 직물 표면의 친수성(hydrophilicity)을 증가시킨 wicking 처리 또한 수증기 상태의 수분처리능력에 뚜렷한 영향을 미치지 않는 것이 고찰되었다. 100% 면직물의 경우 수분공급이 멈춘 후 의복내의 상대습도가 원래의 상태로 돌아오는데 걸리는 시간(T_d)이 길고 이에 따라 동적 상태에서의 수분처리능력(B_d)에 있어서는 가장 낮은 값을 가져, 전체적으로 수증기상태의 수분 전달과 관련된 착용자의 쾌적성에서 낮은 평가를 받을 것으로 예측되었다.

감사의 글

이 논문을 위해 시료를 제공해주신 E.I. du Pont de Nemours & Co. Inc.의 Dr. J. Rappaport와 Ms. S. L. Lovasic께 감사드립니다.

참고 문헌

1. Adler, M. M. and Walsh, W. K., Mechanisms of

- Transient Moisture Transport Between Fabrics, *Textile Research Journal*, **54**, 334, 1984.
2. Andreen, J. H., Gibson, J. W., and Wetmore, O. L., Fabric Evaluations Based on Physiological Measurements of Comfort, *Textile Research Journal*, **23**, 11, 1953.
 3. Cassie, A. B. D., Atkins, B. E., and King, G., Thermostatic Action of Textile Fibers, *Nature*, **143**, 162, 1939.
 4. Fourt, L. and Harris, M., Diffusion of Water Vapor Through Textiles, *Textile Research Journal*, **17**, 256, 1947.
 5. Fourt, L. and Hollies, N. R. S., Clothing Comfort and Function, Marcel Dekker, New York, 1970.
 6. Gagge, A. P. and Gonzalez, R. R., Physiological and Physical Factors Associated with Warm Discomfort and Sedentary Man, *Environmental Research*, **7**, 230, 1974.
 7. Gregory, J., The Transfer of Moisture Through Fabrics, *Journal of Textile Institute*, **21**, T66, 1930.
 8. Hatch, K. L., et al., In vivo Cutaneous and Perceived Comfort Responses to Fabric, *Textile Research Journal*, **60**, 405, 1990.
 9. Hollies, N. R. S., The Comfort Characteristics of Next-To-Skin Garments, Including Shirts, Paper Presented at the Third Shirley International Seminar, June, 1971.
 10. Hollies, N. R. S., et al., A human Perception Analysis Approach to Clothing Comfort, *Textile Research Journal*, **49**, 557, 1979.
 11. Holmer, I., Heat Exchange and Thermal Insulation Compared In Woolen and Nylon Garments During Wear Trials, *Textile Research Journal*, **55**, 511, 1985.
 12. Hong, K., The Influence of Fiber and Finish on Dynamic Moisture Transfer in Textiles, Ph. D. Dissertation, University of Maryland, 1985.
 13. Kim, J. O. and Spivak, S. M., Dynamic Moisture Vapor Transfer Through Textiles, *Textile Research Journal*, **64**, 112, 1994.
 14. Mecheels, J. H., Demeler, R. M., and Kachel, E., Moisture Transfer Through Chemically Treated Cotton Fabrics, *Textile Research Journal*, **36**, 375, 1966.
 15. Mecheels, J., Basic Study to Determine the Significance of Air Permeability and Moisture Uptake Potential of Textile for Thermophysiological Wearer Comfort Under Differing Wearing Conditions, *Melliand Textiberichte*, **71**, 718, 1990.
 16. Plante, A.M., Holcombe, B.V., and Stephens, L.G., Fiber Hygroscopicity and Perceptions of Dampness: Part 1. Subjective Trials, *Textile Research Journal*, **65**, 293, 1995.
 17. Scheurell, D. M., Spivak, S. M., and Hollies, N. R. S., Dynamic Surface Wetness of Fabrics in Relation to Clothing Comfort, *Textile Research Journal*, **55**, 394, 1985.
 18. Umbach, K. H., Synthetics Worn Close to the Skin with Good Wear Comfort, *Chemiefasern/Textilind*, 628-636, August 1980.
 19. Umbach, K. H., Measurement of the Buffering Capacity of Textiles with the Thermoregulatory Model of Human Skin, Standard-Test Specification, BPL 1, 2, March, 1994.
 20. Vokac, Z., Kopke, V., and Keuz, P., Physiological Responses and Thermal, Humidity, and Comfort Sensations in Wear Trials with Cotton and Polypropylene Vests, *Textile Research Journal*, **46**, 30, 1976.
 21. Weiner, L. I., Moisture Vapor Transmission in Textile Fabrics, Paper Presented at the Third Shirley International Seminar, June, 1971.
 22. Wehner, J. A., Miller, B., and Rebenfeld, L., Dynamics of Water Vapor Transmission Through Fabric Barriers, *Textile Research Journal*, **58**, 581, 1988.
 23. Whelan, M. E., Machattie, L. E., Goodings, A. C., and Turl, L. H., The Diffusion of Water Vapor Through Laminae with Particular Reference to Textile Fabrics, *Textile Research Journal*, **25**, 197, 1955.
 24. Woodcock, A. H., Moisture Transfer in Textile Systems, Part 1, *Textile Research Journal*, **32**, 628, 1962.
 25. Woodcock, A. H., Moisture Transfer in Textile Systems, Part 2, *Textile Research Journal*, **32**, 719, 1962.