

PP/Tencel/흡한속건PET/하이브리드 복합사 구조가 고감성 의류용 직물의 물성에 미치는 영향

김현아 · 손 황¹⁾ · 김승진^{2)†}

한국패션산업연구원

¹⁾(주)송이실업

²⁾영남대학교 융합섬유공학과

Effect of Hybrid Yarn Structure Composed of PP/Tencel/Quick dry PET on the Physical Property of Fabric for High Emotional Garment

Hyun Ah Kim, Hwang Son¹⁾, and Seung Jin Kim^{2)†}

Korea Research Institute for Fashion Industry, Daegu, Korea

¹⁾Songi Textile Co., Ltd, Daegu, Korea

²⁾Dept. of Textile Engineering and Technology, Yeungnam University; Gyeongsan, Korea

Abstract : This paper investigated the characteristics of the physical properties of woven fabrics according to the yarn structure and fibre property. It was found that wicking property of woven fabrics made of sheath/core hybrid yarn were better than those of siro spun and siro-fil hybrid yarns, which was caused by platform for transport of moisture vapor by filaments on the core part of sheath core hybrid yarns. In drying property, the fabric specimen woven by PP/Tencel sheath core hybrid yarns as a warp and Coolmax/Tencel spun yarn as a weft showed quick drying property, which was caused by the sheath core hybrid yarn structure as drainage of water moisture and coolmax fibre characteristics as quick dry material. Concerning to breathability and thermal conductivity as heat transport phenomena, it was observed that breathability of fabrics woven with hybrid yarns such as sheath core and siro-fil in the warp and hi-multi filaments in the weft showed the lowest water vapor resistance, which was explained as due to for air gap in the fibres of the spun yarns to restrict the wet heat transport from perspiration vapor. Thermal conductivities of the fabrics woven with PET/Tencel siro-fil yarns in the weft and hybrid yarns such as sheath core and siro-fil in the warp revealed the highest values, which was observed as due to higher thermal conductivity of PET than PP and more contact point between fibres in the siro-fil and sheath core hybrid yarns.

Key words : wicking and drying(흡수 및 건조성), sheath core hybrid yarns(시스코어 하이브리드사), siro-fil yarns(사이로필사), thermal conductivity(열전도도), water vapor resistance(투습저항)

1. 서 론

최근 기능성 의류용으로 사용되는 실은 복합소재가 많이 사용되며 특히, 화섬 필라멘트와 천연 스테이플 섬유를 혼합시킨 하이브리드 복합사가 쾌적 의류용 소재로 많이 사용되고 있다. 그런데 화섬 필라멘트와 천연 스테이플 섬유를 복합한 하이브리드복합사는 기존의 ring 정방기와 siro-spun 방적 시스템에서 만들어지며 이들 복합사들은 sheath/core ring 방적사 혹은 siro-fil 방적사로 불려지고 있다. sheath/core 방적사는 ring 정방기와 siro 정방기에서 모두 생산가능하다. 그러나 siro-fil사는 일반적으로 siro 정방시스템에서 siro component의 한쪽에 필라멘트를 피드시켜 만들어 진다. siro 방적사는 ring 방적사에 비

해 생산비용이 낮은 장점이 있으나 실의 구조 특성 차이에 따른 직편물의 물성에는 어떤 차이가 있는가에 대한 많은 연구가 최근까지도 진행되어 왔다(Bedez & Ureyen, 2007; Icoğlu, 2011; Liu et al., 2012; Soltani & Johari, 2012; Sun & Cheng, 2000; Zhang & He, 2009). 그리고 siro-core사와 siro-fil사의 구조와 직물 물성의 차이에 관한 연구(Liu et al., 2007a; Liu et al., 2007b; Miao et al., 2010; Pourahmad & Johari, 2011a; Pourahmad & Johari, 2011b; Xia et al., 2012)도 최근까지 많이 발표되었다. 한편 구성섬유특성, pore size, 실과 직물의 구조 파라메타에 따른 직물의 열이동 관련 쾌적특성에 관한 연구(McGregor & Naebe, 2013; Nyoni & Brook, 2006; Patil et al., 2009; Tashkandi et al., 2013; Varshney et al., 2010)도 최근 발표되고 있지만 ring과 siro 방적 시스템에서 만들어진 siro-core사와 siro-fil사의 구조와 이들 하이브리드 복합사에 사용된 소재에 따른 열/수분 이동 특성에

†Corresponding author; Seung Jin Kim

Tel. +82-53-810-3890, Fax. +82-53-812-5702

E-mail: sjkim@ynu.ac.kr

관한 연구는 많이 발표되지 않았다. Pourahmad and Johari (2011a, b) 등은 ring과 siro 정방시스템에서 각각 sheath/core 복합사를 제조하고 이들 사의 물성을 비교하는 연구를 수행하였고 Miao et al.(2010)는 ring 정방기에서 제조한 필라멘트 코어사에서 발생하는 흡을 고속 비디오 장치를 사용하여 분석하였다. Liu et al.(2007a, b) 등은 siro-fil복합사에서 로빙과 필라멘트 간의 간격과 장력 조절장치가 이들사의 물성에 미치는 영향을 연구하였다. 그러나 이들 연구들의 복합사 물성분석은 주로 절단강도, 절단신도, 모듈러스 등의 사의 역학특성에만 국한되었다. 한편, 이들 실로 만들어진 직·편물의 물성에 대한 연구도 수행되어졌으며 Icoğlu and Kirecci(2011) 등은 ring과 siro방적 시스템에서 만들어진 실로 만든 면소재 니트의 색상과 견뢰도를 비교한 연구를 수행하였으나 열과 수분 이동특성을 비교한 연구는 많이 수행되지 못하였다. 그러나 구성섬유 섬도와 섬유단면 형상이 직물의 열물리학적 쾌적성에 미치는 영향(Varshney et al., 2010) 직물 wicking에 미치는 구성사의 영향에 관한 연구(Nyoni & Brook, 2006) 싱글니트 조직의 wicking 거동에 관한 연구(Patil et al., 2009), 중동 Abaya직물의 열적 쾌적성 연구(Tashkandi et al., 2013), 그리고 모섬유로 만들어진 편물의 쾌적성에 섬유, 실, 편물구조 특성 등이 미치는 영향에 대한 연구(McGregor & Naebe, 2013) 등이 열과 수분이동과 관련된 가장 최근에 연구된 내용들이지만 역시 sheath/core, siro복합사로 만들어진 직·편물의 쾌적성에 관련된 연구는 발견 할 수 없다. 그러나 직물의 쾌적성에 대단히 중요한 수분의 이동에 관한 기초적 연구(Adler & Walsh, 1984; Hiraku & Yoichiro, 1993; Hsieh, 1995; Lee, 2006; Lee & Kim, 2001; Pack, 1995)는 많이 수행되었다. 이들의 연구에서는 인체에서 발생하는 땀은 기체상태 이동(moisture vapor transfer)과 액체상태 이동(liquid water transfer)으로 분류되고 기체상태의 수분이동은 섬유를 통한 수증기 확산(water vapor diffusion)이나 직물내의 공극을 통한 투습(water vapor transport)으로 구분되며, 반면 액체상태의 수분전달은 습윤(wetting)과 모세관(capillary wicking)현상에 의해 일어난다고 하였다. 한편, 직물의 모세관 현상에 의한 수분이동 연구(Hiraku & Yoichiro, 1993; Hsieh, 1995; Pack, 1995)에서 직물을 구성하는 실의 꼬임의 증가와 섬유팩킹의 증가는 수분전달을 감소시킨다고 하였다. 그리고 섬유사이의 기공의 크기가 작을 때 모세관압이 높아지고 기공을 통한 액체의 이동이 일어나고 기공이 작고 균일할수록 수분이 빠르게 확산되며 액체의 이동과 흡수는 섬유와 액체의 상호작용과 기하학적 형상에 의존한다고 분석하였다. 모세관 흡수에 대한 기초연구(Adler & Walsh, 1984; Ghali et al., 1994)에서는 모세관 흡수가 일어나기 전에 습윤으로 기공내의 섬유가 먼저 채배열되면 기공의 벽과 벽 사이가 좁아지고 수압에 의해 기공내로 액체가 이동하여 모세관 흡수가 된다고 설명하였다. 뿐만 아니라 최근 Lee(2006)는 이러한 수분의 흡수와 탈수 거동 실험에 GATS (gravimetric absorbency testing system)를 사용하였으며 Lee

and Kim(2001)은 면과 폴리에스터 직물의 기공의 크기와 분포가 액체의 수분전달에 미치는 영향을 선행 연구한 바 있다.

그러나 최근 춘추용 조강용 셔츠 혹은 트레이닝용 남녀 외의 용에 사용되는 siro-필사, sheath/core복합사 등에 고감성·고기능소재인 텐셀, 뱀부, coolmax 등의 소재를 사용하여 고감성 직물소재가 많이 개발되고 있으며 특히 폴리프로필렌 필라멘트가 siro-필사 혹은 sheath/core사의 core부분에 삽입되어 의류용 소재로 사용됨으로써 이들 소재의 사용에 따른 직편물의 쾌적성에 대한 분석 연구가 필요한 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 coolmax, 텐셀, 뱀부등의 스테이플 섬유와 PP와 PET 등의 필라멘트를 사용하여 sheath/core 복합사, siro-fil 복합사를 ring과 siro 방적 시스템에서 제조하고 이들 복합사로 제작한 직물의 열/수분 이동 특성을 분석하므로써 최근 고감성 의류용 소재로 사용되는 PP/텐셀/coolmax 하이브리드 복합사의 쾌적특성을 연구하고자 하였다.

2. 실험

2.1. Hybrid 복합사 생산

경사용으로 사용될 3가지 실을 siro ring 정방기에서 제조하였다. Fig. 1은 ring정방기에서 sheath-core 복합사를 제조할 수 있게 개조된 정방기의 개략도를 보인 것이다. PP DTY 30d/24f 필라멘트를 Fig. 1 위의 오른쪽 continuous filament 위치에 놓여지고 여기서 풀려나온 필라멘트를 프린트 롤러 중앙부위로 피드시키고 Fig. 1의 위쪽 왼편에 두 개의 텐셀 로빙을 드래프트 영역으로 내려 보내어 프린트 롤러에서 이 필라멘트와 만나 PP DTY/텐셀 sheath-core 40's를 제조하였다. Fig. 2는 ring 정방기에서 siro사와 siro-fil사를 제조할 수 있게 siro 장치가 부착된 정방기의 드래프트 부분의 개략도를 보인 것이다. PET DTY 55d/216f 필라멘트가 Fig. 2의 위쪽의 로빙부의 한 부분에 장착되어 드래프트부로 풀려나오고 다른 한쪽 로

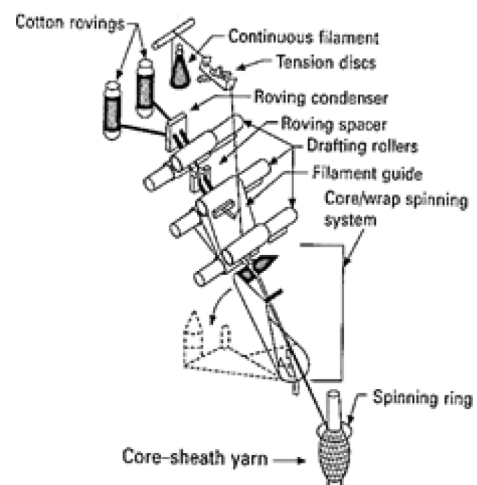


Fig. 1. Spinning frame of sheath-core hybrid yarn manufacturing system (Sawhney et al., 1992).

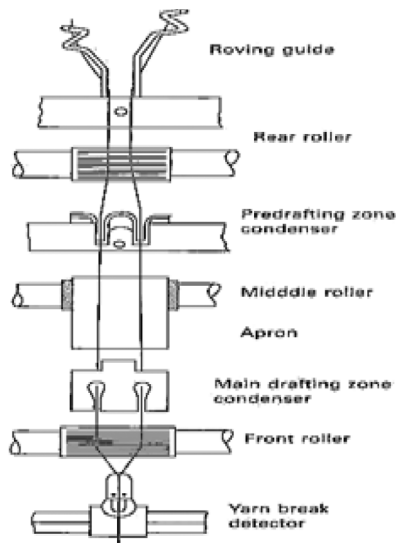


Fig. 2. Schematic diagram of siro-spun apparatus (CSIRO, 2009).

빙에는 텐셀 로빙을 장착하여 풀러나오면서 앞 드래프트 롤러를 지나서 PET DTY 필라멘트와 만나 PET DTY/텐셀 siro-fil 40's를 제조하였다. 또한 Fig. 2에 보인 siro장치 밖에서 텐셀 로빙 두 가닥을 드래프트 영역으로 피드시켜 텐셀 siro사 40's를 만들어 이들 세 가지 복합사를 경사로 사용하였다. 그리고 위사로 사용된 5가지 실은 다음과 같이 제조하였다.

PET coolmax 50d/36f 필라멘트가 Fig. 1의 왼쪽 continuous filament 위치에 놓여지고 여기서 풀러나온 필라멘트는 프런트 롤러 중앙부위로 피드되어 두 개의 텐셀 로빙이 드래프트 영역을 지나 프런트 롤러에서 이 필라멘트와 만나 PET coolmax/텐셀 sheath-core 40's가 제조되었다. 또한 PET DTY 55d/216f 필라멘트를 사용하여 PET DTY/텐셀 siro-fil 40's를 2번째 위사로 사용하였으며 PET coolmax 스테이플 섬유와 뱀부 스테이플 섬유를 혼합하여 ring 정방기에서 만든 40's 방적사를 3번째 위사로, 뱀부 스테이플 섬유를 사용한 40's 방적사를 4번째 위사로 방적하였다. 그리고 PET DTY 75d/144f 하이멀티 필라멘트를 5번째 위사용으로 사용하였다. Table 1에 본 연구에서 제조한 실의 스펙을 정리하였으며 이들 실의 모형을 도시하였다.

2.2. 직물 시료 제작

준비된 8가지 실을 사용하여 래피어 직기(Picanol Gamma, 벨기에)를 이용하여 직물을 제작하였다. Table 1에 보인 복합사 시료 1, 2 그리고 3번 실을 경사로 사용하였으며 각각의 경사에 Table 1에 보인 4번에서 8번까지 5가지 방적사를, 경사 3가지에 각각 위사1로(Table 1에서 yarn 1)로 사용하였으며 위사 2(Table 1에서 yarn 2)로서 PP 100d/48f를 위사 1과 함께 1:1로 교호로 위입시켜 15가지 평직 조직의 직물 시료를 각각 30y씩 제작하였으며 염색과 가공을 진행하였다. 제작한 15가지 생지는 동일한 조건에서 염색과 가공을 하기위해 생지를 연결

Table 1. Specification of yarn specimens

No.	Yarn specimens	Specification	Model
1	PP DTY/tencel Sheath-core 40's	PP DTY 30d/24f + tencel sheath-core for warp yarn	
2	PET DTY/tencel Siro-fil 40's	PET DTY 55d/216f + tencel Siro-fil for warp yarn	
3	Tencel Siro-spun 40's	Tencel + Tencel staple fibres Siro spun yarns for warp yarn	
4	PET coolmax /tencel Sheath-core 40's	PET coolmax 50d/36f + tencel sheath/core for weft yarn	
5	PET DTY/tencel Siro-fil 40's	PET DTY 55d/216f + tencel Siro-fil for weft yarn	
6	PET coolmax /bamboo spun yarn 40's	coolmax/bamboo staple fibres ring spun yarns for weft yarn	
7	Bamboo spun yarns 40's	bamboo staple fibres ring spun yarns for weft yarns	
8	PET DTY filament 75d/144f	PET DTY 75d/144f filament for weft yarns	

Table 2. Specification of fabric specimens

Group	Fabric specimen no.	Warp yarn	Weft yarn		Fabric Wp	Density (/in.) Wf
			Yarn 1	Yarn 2		
A	1	PP DTY 30d/24f + Tencel Sheath-core 40 Ne	P/Coolmax50/36 + Tencel Sheath-Core 40'S		91.5	62.4
	2		P/DTY55/216 + Tencel Siro-Fil 40'S			
	3		P/Coolmax + Bamboo Spun 40'S	PP100/48		
	4		Bamboo 40'S			
	5		P/DTY75/144			
B	6	PET DTY 55d/216f + Tencel Siro-Fil 40 Ne	P/Coolmax50/36 + Tencel Sheath-Core 40'S		91.5	62.4
	7		P/DTY55/216 + Tencel Siro-Fil 40'S			
	8		P/Coolmax + Bamboo Spun 40'S	PP100/48		
	9		Bamboo 40'S			
	10		P/DTY75/144			
C	11	Tencel + Tencel Siro-Spun 40's	P/Coolmax50/36 + Tencel Sheath-Core 40'S		91.5	62.4
	12		P/DTY55/216 + Tencel Siro-Fil 40'S			
	13		P/Coolmax + Bamboo Spun 40'S	PP100/48		
	14		Bamboo 40'S			
	15		P/DTY75/144			

note: PP: polypropylene
P: PET

하여 진행하였다. 호발과 정련을 CPB정련기에서 실시한 후 연속 정련기에서 50m/분 속도로 수세를 거친 후 1차 세팅을 150°C에서 40m/분로 실시하였다. 염색은 래피드염색기에서 120°C에서 60분 처리 후 건조기를 거친 후 최종 세팅을 130°C에서 50m/분 속도로 텐터기에서 처리하였다. 그리고 경사와 위사의 종류와 특성에 따른 열과 수분의 이동특성과 역학 특성 측정을 통한 착용 쾌적성을 분석하였다. 본 연구에서 제조한 8가지 실과 15가지 직물은 최근의 고감성 의류 소재로서 많이 사용되는 소재인 텐셀, 뱀부, coolmax 등의 스테이플 섬유와 PET와 PP필라멘트를 사용하여 만든 siro-fil사, sheath/core사 등의 복합사와 이들로 만들어진 직물 소재 트렌드를 적극적으로 적용하였다. Table 2에 본 연구에서 사용한 직물시료 특성을 보였다. 그리고 Fig. 3에 이들 직물 시료의 모형을 도시하였다.

2.3. 직물 물성측정

1) Wicking 특성

KS K 0815의 흡수성 측정방법 중 적하법(A법)에 의해 흡수 속도를 측정하였다. Fig. 4에 보이는 장치를 이용하여 20×20 cm 시료를 준비하고 27°C±2°C 증류수를 넣은 뷰렛에서 5초마다 1 ml 물방울을 15~25방울 떨어뜨려 특별한 반사를 일으키지 않을 때까지 소요되는 시간을 5회 측정하여 평균 값을 나타내었다.

2) 건조특성

KS K 0815A 법에 의해 측정하였다. 27±2°C 증류수가 담겨있는 수조에 40 cm×40 cm 시료를 침지시켜 충분히 흡수시켰다가 꺼내어 물방울이 더 이상 떨어지지 않을 때 측정장치(INTEC.Co.LTD, 일본)에 시료를 걸고 표준상태에서 자연건조될 때까지 시간(min)을 건조율(drying rate)로 측정하였다.

3) 투습도 특성

투습저항은 ISO 11092 규격을 적용하여 ThermDAC 기계(Measurement Technology, 영국)를 사용하여 아래식을 사용하여 투습저항, R_{et} 를 계산하였다.

$$R_{et} = \frac{(P_m - P_a) \cdot A}{H - \Delta H_e} - R_{et0}$$

where, P_m : 온도 T_m 의 측정기구 표면에서의 포화 수증기 분압(Pa)

P_a : 온도 T_a 에서의 측정실 내부의 수증기 분압 (Pa)

A : 측정 시료의 면적(m^2)

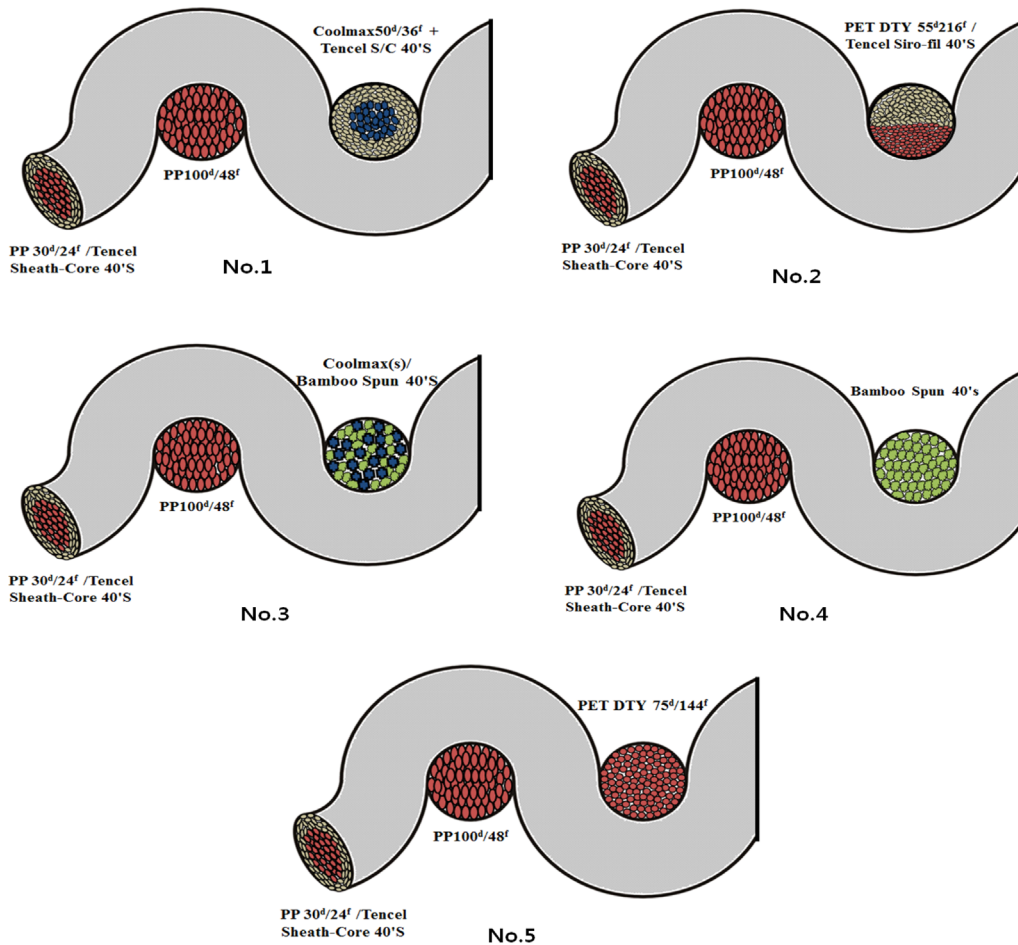
H : 측정 부위에 공급되는 가열전력(W)

ΔH_e : 투습저항 R_{et} 측정시 가열 전력 보정값

R_{et0} : 투습저항 측정 장비와 관련된 보정상수($m^2 \cdot Pa/W$)

R_{et0} 값을 결정하기 위해 계측부의 온도와 공기의 온도를 35°C로 맞추고 공기습도는 40% R.H로 설정하였다. 그리고 공기의 속도는 1 m/s로 설정하고 투습저항장비상수 R_{et0} 를 먼저 결정하였다. 투습저항을 측정하기 위해서는 셀로판 멤브레인을

GROUP A



GROUP B

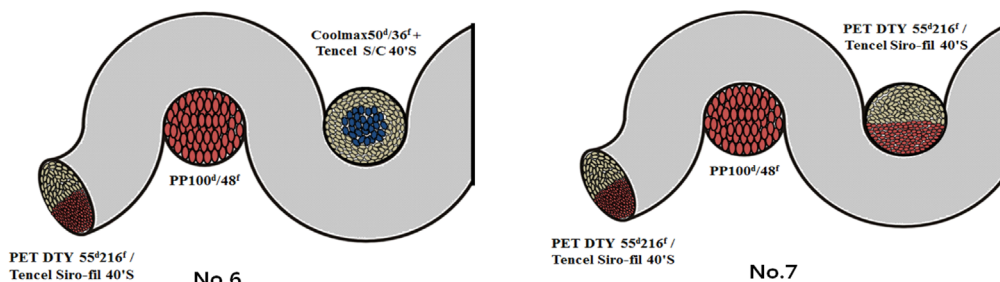


Fig. 3. Schematic diagram on weave structures of fabric specimens.

계측부상에 설치하고 그 위에 시료를 올려서 테이프로 고정시킨 후 측정하였다.

4) 열전도 특성

KES-F7(Thermolabo II, Kato Tech. Co., Ltd., Japan)을 이용하여 열전도도를 측정하였으며 항온항습실(실내온도 22±1°C, 70±5% RH)에서 측정하였다. 5 cm×5 cm 크기의 직물시료를

3개 준비하여 정상 상태에서의 열손실을 측정하여 아래 식에 의해 열전도도(thermal conductivity, K, W/cm°C)를 측정하였다.

$$\text{Thermal conductivity}(K) = \frac{W \cdot D}{\Delta T}$$

where, W : heat loss(W/cm²)

D : thickness of specimen(cm)

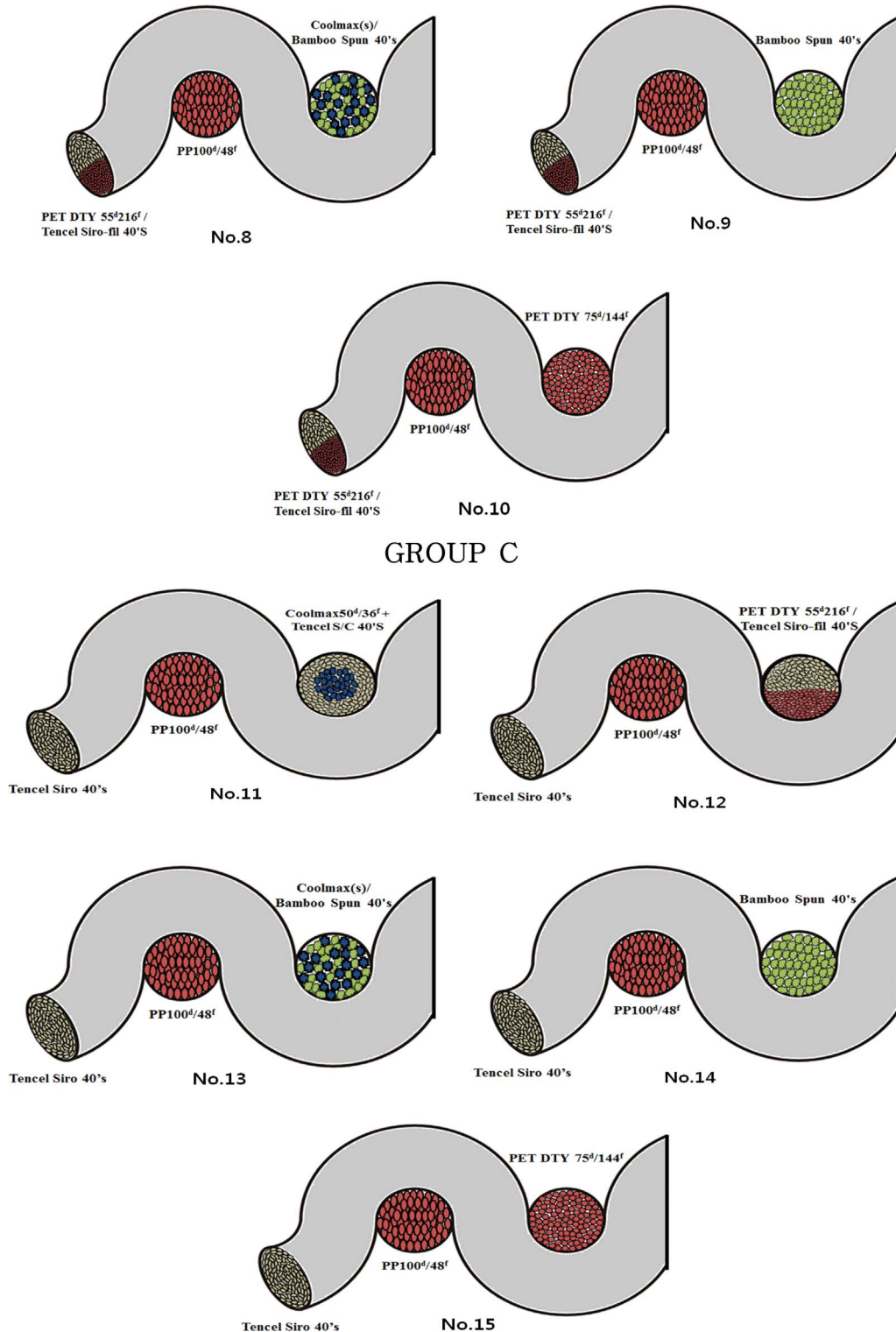


Fig. 3. Continued

ΔT : temperature difference($^{\circ}\text{C}$)

5) 흡수율

KS K 0815의 흡수성 측정방법 중 흡수율을 측정하였다. 7.5 cm×7.5 cm 시험편을 27 $^{\circ}\text{C}$ ±2 $^{\circ}\text{C}$ 의 증류수가 들어 있는 용기 내에 20분 동안 침지한 후 꺼내어 건조 흡수지 사이에 삽

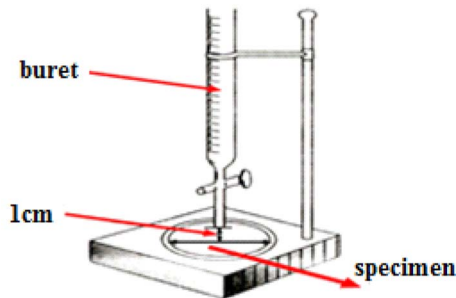


Fig. 4. Wicking test apparatus by drop method (KSK ISO 11092:2009).

입하여 25 cm/초의 표면 속도의 망글에 통과시킨 후 시료의 무게를 측정하여 침지전의 무게에 대한 침수 후의 무게와의 차이를 백분율로 나타낸다.

6) 직물 역학 특성

FAST system을 사용하여 직물의 신장성을 측정하기 위해 13 cm×5 cm의 시료를 준비한 후 5, 20, 100 gf/cm 하중으로 인장하여 신도를 측정하였고, 직물의 전단강성은 FAST-3 시험기로 측정하였다. 시료를 경사 또는 위사 방향의 45°로 취하여 13 cm×5 cm 크기로 준비하여 5 gf/cm 하중으로 인장하여 바이어스 방향의 신도를 측정하였다. 전단강성(G)은 아래 식을 이용하여 계산하였다.

$$G = (I23/EB5) \times 1 \text{ N/m}$$

where, EB5 : bias extension under 5 gf/cm(%)

직물의 굽힘강성은 FAST-2 시험기로 측정하였다. 경사와 위사방향의 굽힘 길이와 직물의 무게로 다음의 식에서 굽힘강성을 계산하였다.

$$B = W \times C^3 \times 9.81 \times 10^6$$

where, B: bending rigidity($\mu\text{N}\cdot\text{m}$)

C: bending length(mm)

W: weight per unit area(gf/m²)

그리고 직물의 압축특성은 FAST-1을 사용하여 2 gf/cm², 100 gf/cm² 하중으로 압축하여 직물의 압축성을 측정하였다.

7) SEM 측정

직물과 실의 단면사진은 FE-SEM(S-4100, Hitachi Co., 일본)을 사용하여 측정하였다.

3. 결과 및 논의

3.1. 수분의 이동 특성

Table 3은 15가지 하이브리드사 복합 직물의 열과 수분 이동 특성치를 보였다.

Table 3. Experimental data on heat and moisture transports of fabric specimens

Specimen no.	Wicking speed	Absorption rate	Drying rate	Water vapor resistance (m ² Pa/W)	Thermal property
	Time(sec)	(%)	Time (min.)	WVR	K
1	249	31	80	1.949	0.0405
2	263	32	100	2.405	0.0426
3	322	31	70	1.743	0.0410
4	399	36	85	2.245	0.0398
5	600	27	90	1.519	0.0391
6	288	27	85	1.571	0.0405
7	405	29	100	1.21	0.0415
8	475	29	65	3.001	0.0397
9	447	32	75	2.733	0.0406
10	610	28	90	1.205	0.0377
11	356	36	115	1.369	0.0390
12	391	37	95	1.315	0.0407
13	418	35	100	1.703	0.0366
14	420	40	115	1.284	0.0385
15	615	32	80	1.534	0.0341

Fig. 5는 Drop법에 의한 직물의 흡수속도 결과를 보였다.

Fig. 5에서 볼 수 있듯이 위사에 PET DTY 75d/144f 하이 멀티 필라멘트를 사용한 5번, 10번, 15번 시료가 최대값인 600 초 이상의 값을 보인 것은 직물 표면위에 떨어뜨린 물방울이 직물내로 스며드는 시간이 가장 오래 걸린다는 의미를 가지며 수분의 흡습 및 이동이 어렵다는 것을 의미한다. 즉 위사가 방적사 혹은 sheath/core, 그리고 siro-fil사일 경우가 100% 필라멘트사 일때 보다는 흡습 및 수분이동이 더 빠르게 일어난다는 것을 말해준다. 이는 Hiraku and Yoichiro(1993)와 Pack(1995)의 연구를 통해 알 수 있듯이 직물에서 액체상태의 수분전달은 습윤과 모세관 현상에 의해 일어나며 이 때 위사가 PET 하이 멀티 필라멘트로 구성된 5, 10, 15번 시료는 PET의 소수성 특

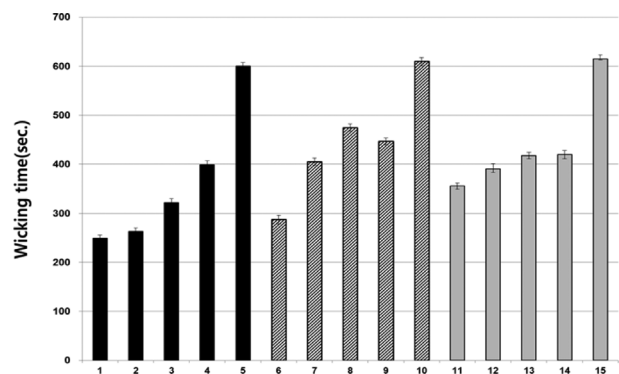


Fig. 5. Wicking diagram of fabric specimens by drop method.

성으로 인해 습윤시간이 오래 걸리게 되며 하이멀티 구조에 의한 높은 팩킹성 때문에 액체의 이동통로가 작아져 모세관 현상에 의한 수분전달성이 감소되어 흡수시간이 오래 걸리는 것으로 해석된다.

그리고 1번에서 5번 시료들의 흡습 및 수분이동이 6번~10번 그룹과 11번~15번 그룹보다 더 우수함을 볼 수 있다. 이는 1번에서 5번 시료들은 경사가 PP와 텐셀의 sheath-core사이며 6번~10번 그룹은 PET 하이멀티 필라멘트와 텐셀의 siro-fil사 직물로서 sheath부의 섬유에 의해 습윤 및 흡수된 수분이 core부에 있는 필라멘트를 따라서 퍼져나가므로 필라멘트와 스테이플 섬유가 꼬여진 사 구조로 인해 높은 팩킹성으로 수분 이동이 느려지는 siro-fil사보다 sheath-core사가 흡습 및 수분이동이 더 빠르게 일어난다는 것을 알 수 있다. 또한 공정수분률이 0.3%인 PET보다 0%인 PP필라멘트가 흡수된 수분이 이동하는 도수로의 역할을 습윤없이 함으로써 수분이동이 더 빠르게 일어난다고 예측된다. 즉 PET 하이멀티와 텐셀의 siro-fil사의 경우 흡습 및 수분이동을 텐셀과 함께 꼬여져있는 하이멀티사가 방해할 하므로서 흡습 및 수분 이동시간이 더 많이 걸리는 것으로 판단된다. 그리고 11번~15번 그룹은 경사가 텐셀 방적사이며 이 경우도 흡수된 수분이 텐셀 방적사내의 스테이플 섬유내에 함몰되어 이동이 늦추어짐으로서 PP와 텐셀의 sheath-core사가 경사인 1번~5번 그룹보다 흡습 및 수분이동시간이 더 많이 소요됨으로서 수분이동 특성이 좋지 못함을 알 수 있다. 그리고 위사의 종류에 따른 3개 그룹의 wicking 시간이 위사의 사종이 sheath-core사와 siro-fil사인 1, 2, 6, 7번 그리고 11, 12번 시료들이 위사가 방적사(3, 4, 8, 9, 13, 14번), 그리고 필라멘트사(5, 10, 15번) 시료보다 우수함을 볼 수 있으며 특히 위사에 coolmax 필라멘트가 들어가 있는 sheath core사 시료, 즉 1, 6, 11번 시료가 가장 우수한 흡습 및 수분이동 특성을 보였다. 이는 coolmax의 이형단면 형상에 의한 흡수-속건 특성(Hsieh, 1995)과 core부분의 필라멘트가 sheath부의 스테이플 섬유가 습윤(wetting)후 wicking에 의해 흡수된 수분을 이동시키는 효과(Ghali et al., 1994; Lee, 2006)가 동반 작용을 한 것으로 사료된다. 이러한 결과는 Hsieh(1995)와 Adler and Walsh(1984), Ghali et al.(1994) 등의 연구에서도 언급되고 있다. 흡습 및 수분이동 특성은 흡수속도 개념으로 단순 흡수율 개념과는 다르다는 것을 보기 위해 Fig. 6에 JIS 규격에 의한 3개 그룹 15개 시료들의 흡수율 실험 결과를 도시하였다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 흡수성이 우수한 뱀부 방적사가 위사로 사용된 4번, 9번, 그리고 14번 시료가 3개 그룹에서 가장 높은 값을 보였으며 반면에 5번, 10번, 그리고 15번 시료가 가장 낮은 값을 보이므로 위사가 필라멘트인 시료의 흡수성이 불량함을 알 수 있다. 이러한 현상은 bamboo섬유는 분자구조에 친수성 셀룰로오즈를 가지는 반면 PET는 소수성의 화학구조를 가짐에 기인하는 것으로 사료된다. 그리고 경사에 방적사가 사용된 C그룹인 11번~15번 시료들의 흡수성이 1번~10번까지의 A, B그룹, 즉 경사가 PP와 텐셀과의 sheath-core사 그룹(시료 no.

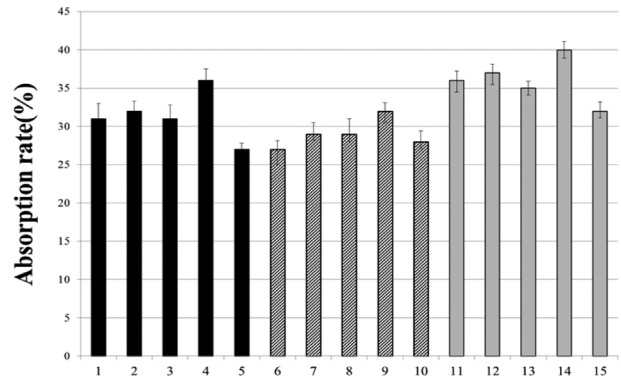


Fig. 6. Absorption rate of fabric specimens.

1~5) 그리고 PET와 텐셀의 siro-fil사 시료들 그룹(시료 no. 6~10)보다 더 높은 흡수성을 보였다. 이러한 현상도 흡수성은 소수성 필라멘트가 core부에 들어가 있는 sheath/core 텐셀복합사보다 100% 텐셀 방적사인 경우가 더 높은 값을 보인다는 사실을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 Fig. 5의 wicking결과와는 다른 결과로서 wicking성과 단순 흡수율과는 다르다는 것을 알 수 있다.

3.2. 건조특성

Fig. 7은 직물시료의 건조특성 실험결과를 도시 한 것이다. Fig. 7에서 볼 수 있듯이 15개 3개 그룹 시료 중에서 경사가 텐셀 siro 방적사인 C그룹(11번~15번)의 건조시간이 경사가 PP와 텐셀과의 sheath-core사인 A그룹(1번~5번)과 PET와 텐셀과의 siro-fil사인 B그룹(6번~10번)의 건조시간보다 더 길므로서 건조특성이 나쁜 것을 알 수 있다. 즉 경사가 방적사일 때 흡수된 수분이 방적사 내부에 스며들어 거시적으로는 물분자가 섬유로부터 빠져나오는 시간이 sheath-core사와 siro-fil사보다 더 어렵게 됨으로써 C그룹의 건조시간이 더 길게 소요되는 것으로 보여진다. Fig. 8에 이들 3개 그룹에 사용된 경사실의 단면과 측면사진을 보였다. Fig. 8(c) SEM사진에서 볼 수 있듯이 C그룹의 텐셀 siro 방적사의 측면을 보면 A그룹인 sheath-

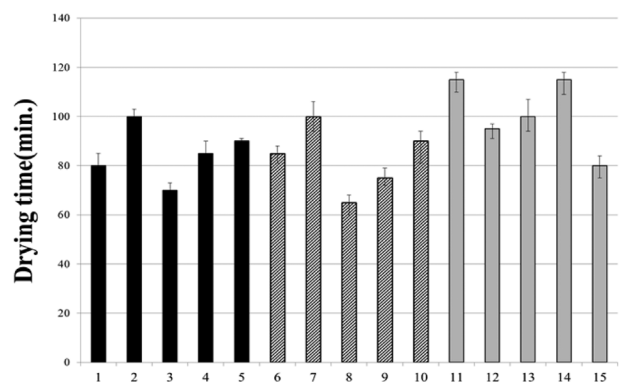


Fig. 7. Diagram of drying time of fabric specimens.

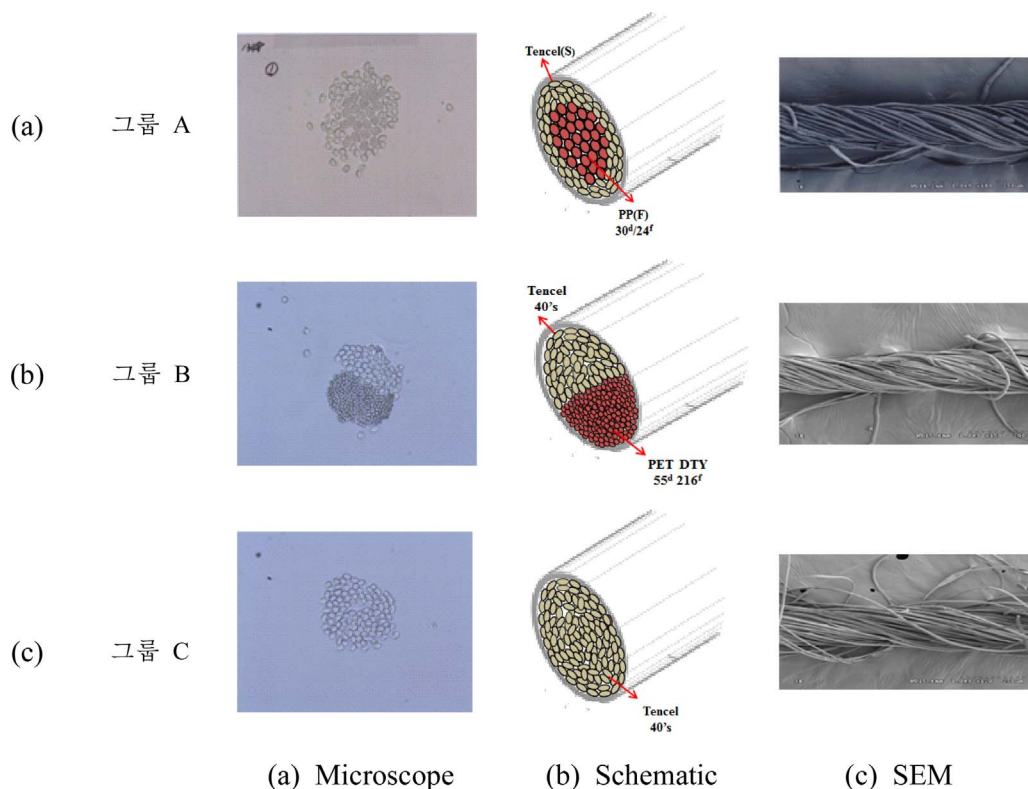


Fig. 8. Cross-section of warp yarns on the fabric specimens.

core사와 B그룹인 siro-fil사 측면보다 더 벌키하며 미세적으로 보면 섬유와 섬유사이의 공기층이 섬유분자로부터 물분자가 증발될 때 수분증기상태로 빠져나가는 것을 방해하는 것으로 보여진다. 그러나 sheath-core사의 경우 거시적으로 볼 때 흡수된 수분이 core부의 필라멘트사이에서 형성된 도수로 형태의 통로를 따라서 빠져나가던지 siro-fil사의 필라멘트와 필라멘트사이의 도수로 형태의 공간을 따라서 빠져나감으로서 건조시간이 단축되며 건조성이 더 우수한 것으로 보여진다.

또한 A그룹(1번~5번)과 B그룹(6번~10번)에서 공히 1번과 2번 그리고 6번과 7번 시료를 보면 위사가 sheath-core사 직물인 1번과 6번 시료가 siro-fil사 시료인 2번과 7번보다 건조특성이 우수하며 또한 위사에 coolmax와 뱀부혼합 스테이플 방적사 시료인 3번과 8번 시료가 뱀부만의 방적사 시료인 4번과 9번 시료 보다 건조특성이 우수함을 알 수 있다. 이는 coolmax 섬유의 단면이 이형단면으로서 속건성이 우수함을 보여주는 결과이며 특히 경사가 sheath-core사와 siro-fil사에 위사가 coolmax 방적사로 구성된 시료의 건조 특성이 가장 우수함을 알 수 있다. 또한 C그룹(11~15번)의 경우에서 14번이 건조특성이 나빠며 경사와 위사가 모두 방적사일 경우 섬유사이에 흡수되어 있던 수분증기의 이동을 방적사내의 영커진 섬유들이 방해하는 정도가 경사와 위사 중 한 가지가 방적사인 직물보다 더 크게 됨으로서 건조특성이 나쁜 것을 알 수 있다. 11번 시료의 건조성이 14번과 같이 나쁜 이유는 경사에 사용된

coolmax가 이형단면형상을 함으로써 섬유간 공간내의 공기층이 수분증기입자의 이동을 방해하는 것이 원인으로 사료된다. 15번 시료가 경사 방적사에 위사는 하이멀티 PET사이며 건조시간이 가장 낮은 값을 보였으며 이는 하이멀티 필라멘트 사이의 공간이 수분증기가 빠져 나가는 도수로 역할을 하는 것으로 보여진다. 따라서 건조특성이 C그룹에서 가장 우수함을 알 수 있다.

3.3. 투습저항 특성

Fig. 9는 15개 직물시료의 투습저항 실험치를 도시한 것이다.

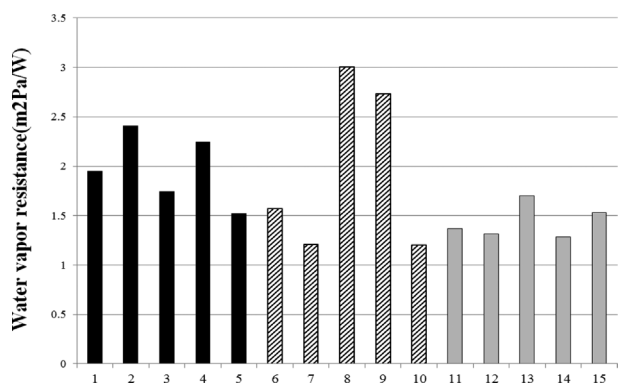


Fig. 9. Water vapor resistance of fabric specimens.

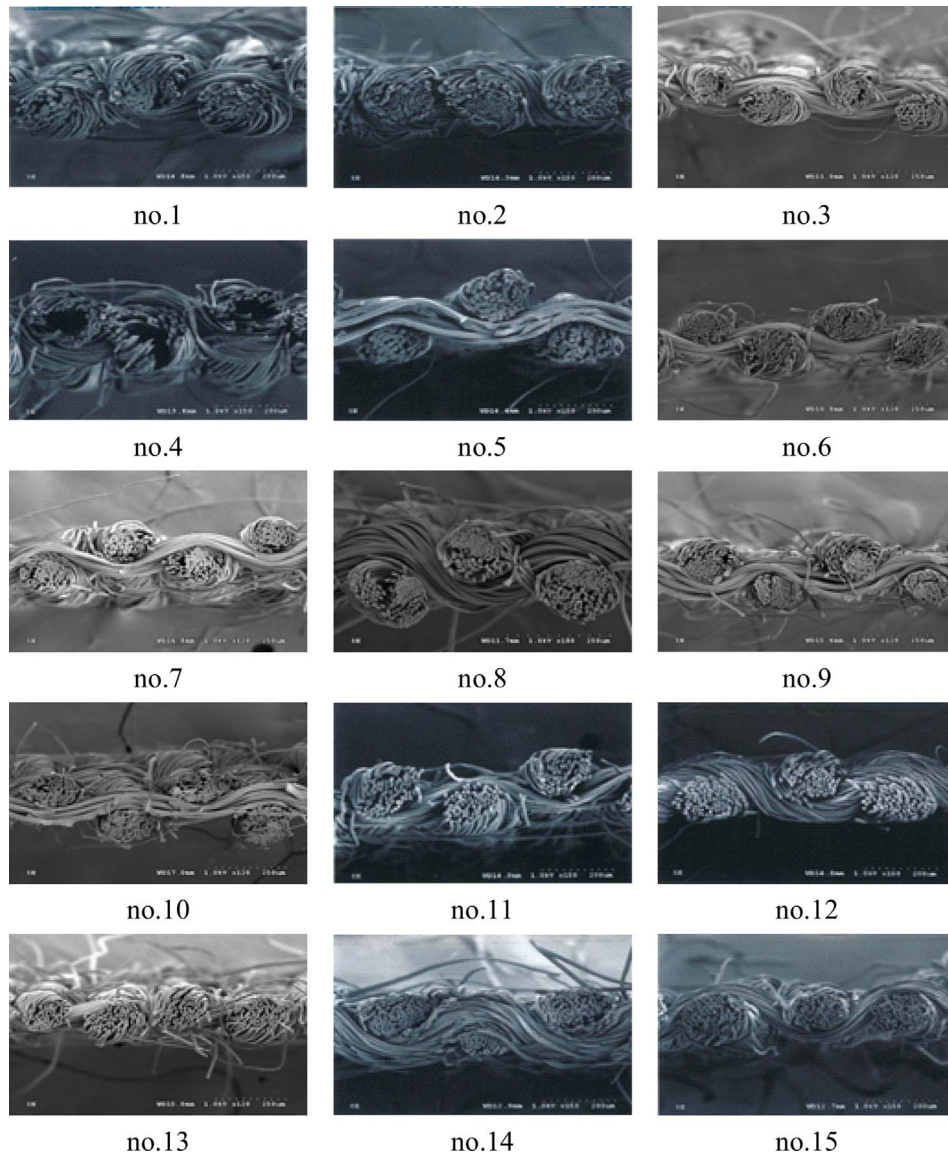


Fig. 10. SEM photograph of cutted section on warp direction of fabric specimens.

Fig. 9에서 볼 수 있듯이 경사가 텐셀 siro spun 방적사로 구성된 C그룹(11번~15번)의 투습저항치가 경사가 sheath-core사와 siro-fil사로 구성된 A그룹과 B그룹의 투습저항치보다 낮은 값을 보였다. 이는 경사가 방적사의 경우 sheath-core사와 siro-fil사보다 벌키하므로서 경사내의 미세공극이 많아지고 이들 미세공극으로 습열 증기입자의 이동이 쉬워져 낮은 투습저항치를 보이는 것으로 사료된다. Fig. 10에 이들 15가지 직물 시료의 경사방향 SEM 사진을 보였다. C그룹(no. 11~15) 시료가 A, B그룹 시료보다 벌키하며 실과 실 사이 섬유와 섬유사이의 미세공극이 많음을 볼 수 있다. 그리고 Fig. 11에 보인 15가지 직물 표면 텍스처에서도 플랫(flat)한 A, B그룹 시료보다 C그룹 시료의 경사와 위사들의 입체성 및 벌키성과 경사와 위사 사이의 미세공극이 더 큰 것을 볼 수 있으며 이것이 습열 증

기 입자의 이동을 쉽게 함으로서 투습성이 우수함을 예측할 수 있다.

그리고 A그룹(1번~5번)과 B그룹(6번~10번)에서 5번과 10번 시료의 투습저항치가 가장 낮은 값을 보였다. 이러한 사실은 경사가 sheath-core사와 siro-fil사일 경우 위사가 하이 멀티필라멘트사인 경우 투습저항이 가장 낮은 값을 보이는 결과를 보여준다. 이러한 사실은 Fig. 10에서 볼 수 있듯이 5번과 10번 시료의 경우 위사에 들어가 있는 필라멘트사의 스티프함 때문에 위사들의 크림프가 없으며 경사들 사이의 공극이 많아져서 습열 입자의 통과가 쉬워져서 투습저항이 낮은 값을 보인 것으로 판단된다. 특히 B그룹 내의 8번과 9번 시료의 투습저항은 특히 높은 값을 보였으며 이는 경사가 PET 하이멀티사와 텐셀의 siro-fil사일 경우 위사로 방적사를 만날 때 방적사의 유연함 때

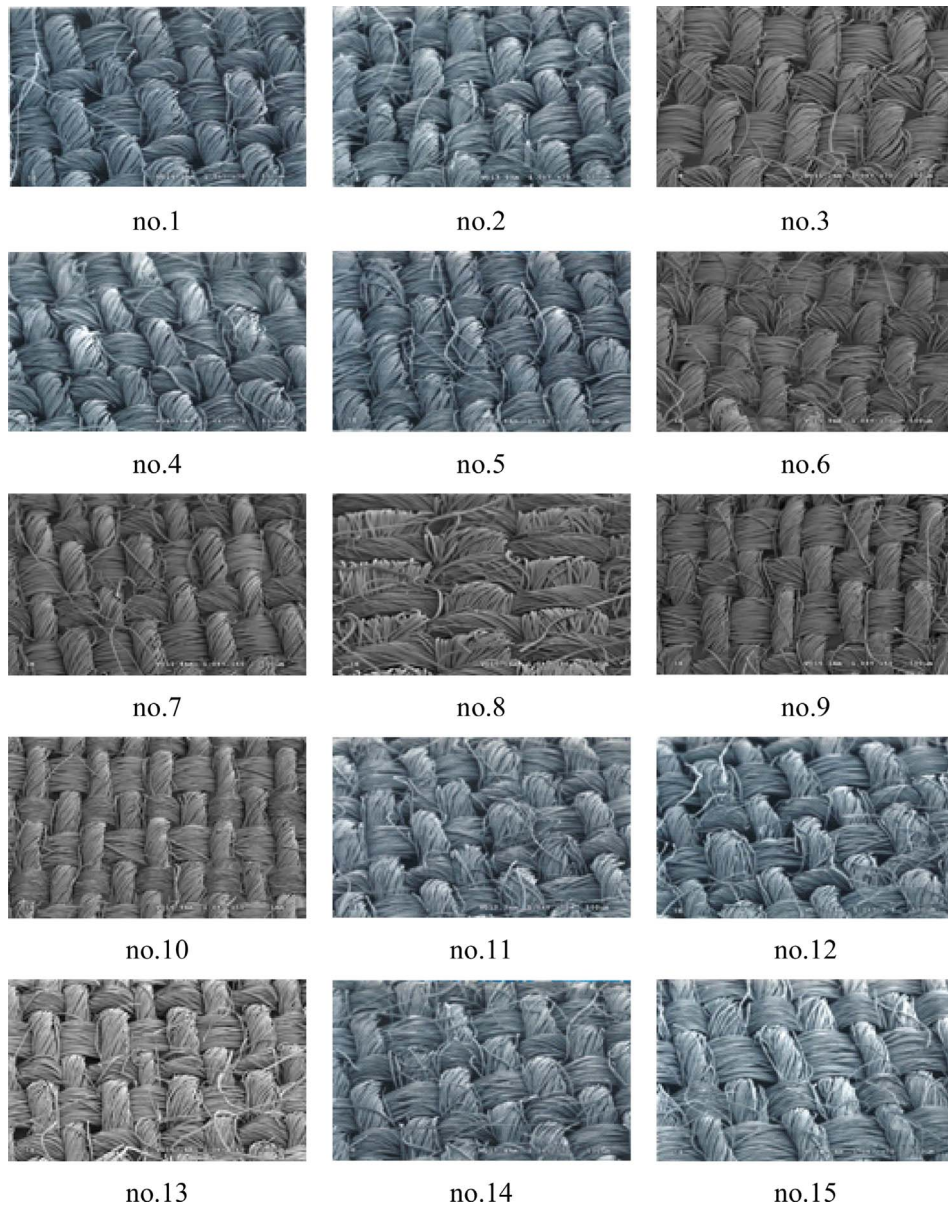


Fig. 11. SEM photograph of surface texture of fabric specimens.

문에 직물에서의 크립프 형성이 쉬워지고 경사는 3차원 크립프 구조를 가짐으로서 습열 증기가 빠져나갈 수 있는 거리가 길어지고 따라서 투습저항이 큰 값을 보이는 것으로 추정된다. 이러한 크립프 구조는 Fig. 11에서 8번과 9번 직물의 크립프 구조가 6번과 7번 시료에 비해 더 긴 구조를 가짐을 볼 수 있다.

3.4 열이동 특성

Fig. 12는 3개 그룹 15개 시료의 열전도도를 도시한 것이다. A, B그룹 시료에 비해 C그룹의 열전도도가 낮은 값을 보였다. 즉 A, B그룹의 경사에 사용된 sheath-core사와 siro-fil 방적사보다 C그룹의 경사에 사용된 siro방적사가 더 벌키함으로서 섬

유들 사이의 공극내에 존재하는 공기층이 열이동을 방해함으로써 낮은 열전도도를 보이는 것으로 보였다. 그리고 각 그룹에서 위사가 하이멀티 PET 필라멘트인 5, 10 그리고 15번 시료들의 열전도도가 가장 낮은 값을 보였다. 이것은 5, 10 그리고 15번 시료들은 위사가 하이멀티 PET필라멘트로 구성되어 있으며 다른 시료들은 텐셀과 뱀부섬유가 함유되어 있음으로서 PET의 열전도도가 텐셀과 뱀부섬유에 비해 상대적으로 낮음에 기인하는 것으로 보인다.

반면 각 그룹에서 위사가 PET 하이멀티 DTY와 텐셀섬유와의 siro-fil사로 제직된 시료인 2번, 7번 그리고 12번 시료들의 열전도도가 가장 큰 값을 보였다. 이는 siro-fil사의 구조가

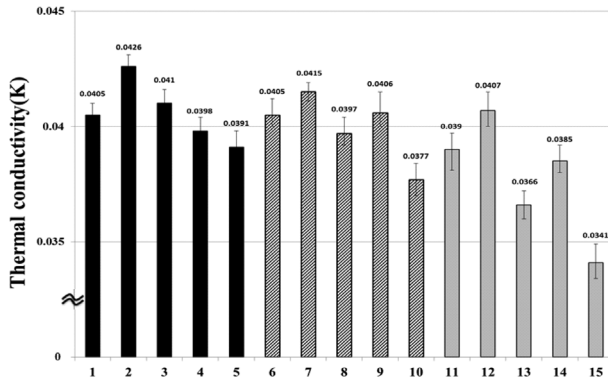


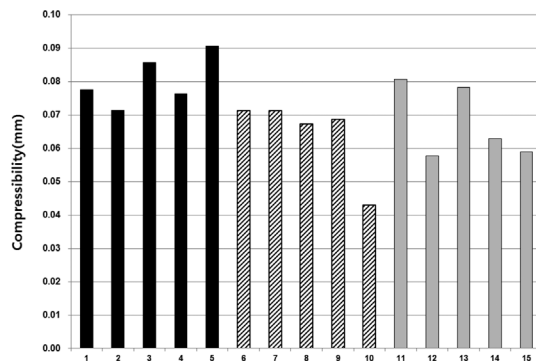
Fig. 12. Thermal conductivity of fabric specimens.

sheath/core사, siro 방적사보다 훨씬 컴팩터함으로서 섬유간 접촉점 수가 더 많아지고 따라서 열전도가 더 쉽게 일어남으로서 더 높은 열전도도값을 보이는 것으로 사료된다. 그리고 위사가 sheath/core사인 1번, 6번, 11번 시료들의 열전도도는 siro-fil사인 2번, 7번 12번 시료들의 열전도도보다 모두 낮은 값을 보임으로서 열전도성이 siro-fil사가 sheath/core사보다 더 크다는 것을 알 수 있다. 이는 PET의 열전도도가 PP보다 큰 값을 가지며 siro-fil사의 구조가 섬유 간 접촉점 수가 많음에 기인된 것

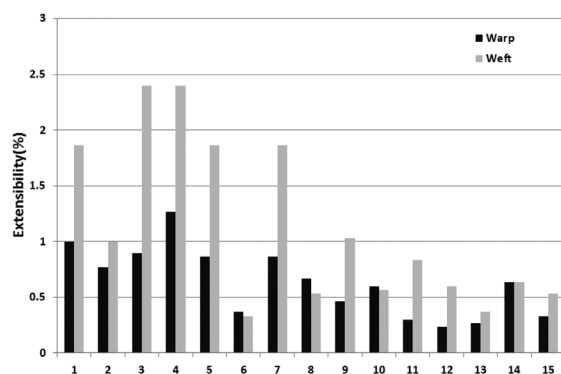
으로 예측된다.

3.5. 복합사직물의 역학특성

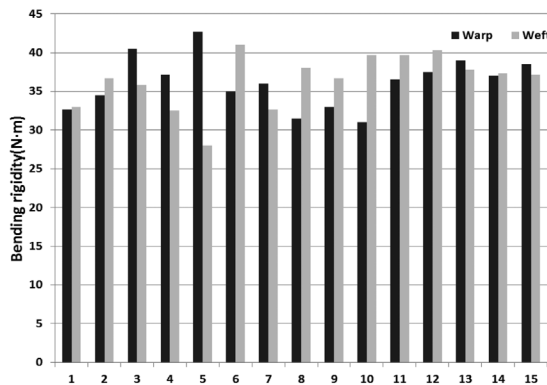
Fig. 13에 FAST 시스템에 의해 측정된 3가지 그룹, 15개 직물시료의 역학 특성을 보였다. Fig. 13(a)에서 볼 수 있듯이 위사에 PET 필라멘트를 사용한 5, 10, 15번 직물의 압축성이 각 그룹에서 가장 낮은 값을 보였다. 이는 sheath-core, siro-fil, siro사로 된 다른 시료들은 모두 방적사임으로써 필라멘트사의 압축저항이 방적사 보다 더 큰 값을 가짐에 기인하는 것으로 보여졌다. 그리고 각 그룹에서 경사와 위사가 모두 스테이플 섬유로서 외곽을 감싸고 있는 시료 즉 sheath/core사 직물시료가 siro-fil사 직물시료보다(2번보다 1번 시료, 7번보다 6번 시료, 12번보다 11번 시료) 압축성이 우수함으로서 촉감 특성이 더 우수함을 보였다. 그리고 Fig. 13(b)에서 볼 수 있듯이 직물의 신축성(extensibility)은 A그룹인 PP와 텐셀 섬유의 sheath-core사를 경사로 사용한 직물들의 신축성이 B그룹, C그룹보다 큰 값을 보임으로써 PP필라멘트의 sheath-core사로 사용 가능성을 보여 주었다. 특히 경사가 PP/텐셀 sheath-core사의 경우 위사가 coolmax/뱀부방적사 그리고 뱀부방적사인 3번과 4번 시료의 신축성이 특히 높은 값을 가짐으로서 다른 시료들에 비해 의류 착용 신축성이 우수함을 예측 할 수 있었다. Fig. 13(c)에



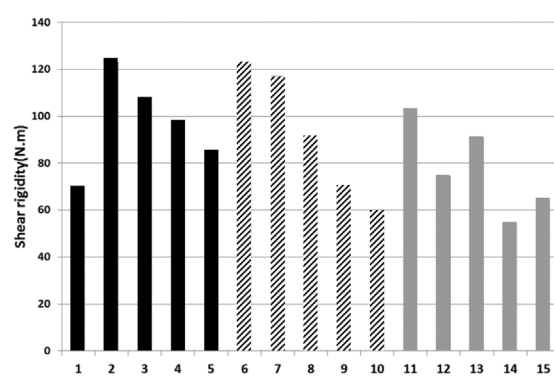
(a) compressibility



(b) extensibility



(c) bending rigidity



(d) shear rigidity

Fig. 13. Diagram of mechanical properties of fabric specimens.

보인 직물의 굽힘강성치는 경사를 방적사를 사용한 C그룹 시료들은 위사를 어떤 실을 사용하더라도 큰 차이를 보이지 않았으나 A그룹과 B그룹은 위사 종류에 따라 차이를 보이므로써 의류에서의 형태안정을 위해서는 경사를 방적사를 사용하는 것이 바람직하게 보였다. Fig. 13(d)에서 보인 전단강성치는 위사를 coolmax/텐셀 sheath-core사, PET DTY 하이멀티/텐셀 siro-fil사와 coolmax와 뱀부 혼합 방적사 등 두 가지 소재를 혼합해서 사용한 시료군이 특히 큰 값을 보임으로서 의류에서의 형태 안정성이 우수한 특성을 보였다. 그러나 1번 시료 전단강성치가 낮은 값을 보인 것은 다른 시료에서는 볼 수 없는 경사와 위사가 모두 sheath/core사로서 경사와 위사의 교차점에서 sheath부의 스테이플섬유가 전단력에 대해 쉽게 변형이 됨으로서 낮은 전단 강성치를 보였다고 사료된다.

4. 결 론

최근 고감성 의류용으로 사용되는 복합사를 사용한 직물소재의 물성과 열과 수분의 이동 특성을 연구하기 위해 PP와 PET 필라멘트 그리고 coolmax, 텐셀, 뱀부 등의 스테이플 섬유와의 sheath-core복합사, siro-fil 복합사, 그리고 siro방적사 등을 제조하고 이들을 사용한 복합직물의 물성을 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 경사가 PP/텐셀 sheath-core복합사인 직물소재가 PET/텐셀 siro-fil사 직물, 텐셀 siro방적사 직물보다 더 우수한 wicking 특성을 보였으며 위사도 coolmax 필라멘트와 텐셀과의 sheath-core 복합사로 만들어진 직물의 wicking이 위사가PET/텐셀 siro-fil, coolmax/뱀부 방적사, 그리고 뱀부 siro 방적사로 만들어진 직물보다 더 우수하였다.

2) 경사가 텐셀 siro 방적사일때 보다 PP/텐셀 sheath-core 복합사 혹은 PET/텐셀 siro-fil 복합사인 직물의 건조 특성이 더 우수하며 이 경우 위사에 coolmax/뱀부 방적사 사용직물과 뱀부 siro 방적사를 사용한 직물의 건조 특성이 우수하였다. 특히, 이 경우 위사에 PET/텐셀 siro-fil 복합사를 사용한 직물의 건조 특성이 불량함을 확인하였다.

3) 경사가 텐셀 siro 방적사인 직물시료가 경사가 PP/텐셀 sheath-core복합사 혹은 PET/텐셀 siro-fil 복합사로 된 직물시료보다 더 낮은 투습저항을 보였다. 그리고 경사가 PP/텐셀 sheath-core복합사 혹은 PET/텐셀 siro-fil복합사인 경우 위사가 PET 하이멀티 필라멘트사로 구성된 직물시료의 투습저항이 가장 낮은 값을 보였다. 특히 경사가 PET/텐셀 siro-fil인 직물의 경우 위사가 coolmax/뱀부 방적사, 그리고 뱀부 siro방적사인 직물시료의 투습저항이 가장 높은 값을 보였다.

4) 경사가 텐셀 siro 방적사인 직물시료가 PP/텐셀 sheath-core복합사와 PET/텐셀siro-fil 복합사로 된 직물시료보다 더 낮은 열전도도를 보였다. 그리고 경사가 PP/텐셀 sheath-core 복합사 혹은 PET/텐셀 siro-fil 복합사 일 때 위사가 PET/텐셀 siro-fil사인 직물의 열전도도가 가장 높은 값을 보였다.

종합적으로 하이브리드 복합사 직물에서 수분이동에 관계되는 wicking성이 우수한 직물의 설계를 위해서는 경사와 위사에 sheath-core사를 사용하는 것이 바람직하며 건조특성은 경사 sheath-core사 구조에 위사를 coolmax/텐셀 방적사를 사용한 직물이 가장 우수하였다. 이것은 core부의 필라멘트가 수분이동을 쉽게 해주는 통로로서 심지역할을 하게 된 것에 기인하는 것으로 추정된다. 반면 습열이동에 관계되는 투습도는 경사가 하이브리드복합사를 사용할 때 위사는 하이멀티 필라멘트사를 사용한 경우 투습도가 가장 우수하며 열전도도는 경사에 하이브리드 복합사, 그리고 위사를 siro-fil사를 사용할 때 가장 높은 값을 보여 착용 쾌적성이 우수한 복합사 직물을 제조할 수 있다는 것을 확인하였다.

References

- Adler, M. M., & Walsh, W. H. (1984). Mechanism of transient moisture transport between fabrics. *Textile Research Journal*, 54(5), 334-343. doi:10.1177/004051758405400510
- Bede, T., & Ureyen, M. E. (2007). Spinning of short staple fibres by siro spun[®] system. *Tekstil ve Konfeksiyon*, 17(1), 31-35.
- CSIRO, Cool light weight wools, Australia. Available from <http://www.csiro.au/files/files/p9u3.pdf> (assessed 14 September 2009).
- Ghali, K., Jones, B., & Tracy, J. (1994). Experimental techniques for measuring parameters describing wetting and wicking in fabrics. *Textile Research Journal*, 64(2), 106-111. doi:10.1177/004051759406400206
- Hiraku, I., & Yoichiro, M. (1993). Water transport along textile fibers as measured by an electrical capacitance technique. *Textile Research Journal*, 62(7), 414-420. doi:10.1177/004051759306300706
- Hsieh, Y. L. (1995). Liquid transport in fabric structure. *Textile Research Journal*, 65(5), 299-307. doi:10.1177/004051759506500508
- İcoglu, H. I., & Kirecci, A. (2011). Investigation of the fastness and color values of cotton fabrics knitted from ring spun and siro spun[®] yarns. *Journal of Textile Institute*, 102(2), 114-119. doi: 10.1080/00405000903549690
- KSK ISO 11092: 2009 <http://www.kats.go.kr>.
- Lee, A. (2006). *Absorption desorption behavior of quick sweat-pick up/dry-fabric and assessment of subjective wetness using JND measurement*. Unpublished master's thesis, Yonsei University, Seoul.
- Lee, D. W., & Kim, E. A. (2001). The relationship between pore size distribution and liquid water transport of cotton and polyester fabrics. *Journal of the Korean Society of Clothing and Textiles*, 25(2), 379-388.
- Liu, W. Y., Yu, Y. P., He, J. H., & Wang, S. Y. (2007a). Effect of strand-spacing between roving and filament on siro-fil yarn properties. *Textile Research Journal*, 77(4), 200-204. doi:10.1177/0040517507080614
- Liu, W. Y., Yu, Y. P., He, J. H., & Wang, S. Y. (2007b). Effect of tension compensator on sirofil yarn properties. *Textile Research Journal*, 77(4), 195-199. doi:10.1177/0040517507080624
- Liu, S., Liu, J., Jia, H., Liu, X., & Xu, B. (2012). Effect of sirospun spinning with a press bar top pin on qualities of flax/cotton blended yarn. *Textile Research Journal*, 82(10), 985-993. doi:

- 10.1177/0040517511427972
- McGregor, B. A., & Naebe, M. (2013). Effect of fiber, yarn and knitted fabric attributes associated with wool comfort properties. *Journal of Textile Institute*, 104(6), 606-617. doi:10.1080/00405000.2013.770596
- Miao, M., Barnes, S., & Vuckovic, L. (2010). High-speed video graphic study of filament-core yarn spinning. *Journal of Textile Institute*, 101(3), 242-252. doi:10.1080/00405000802376179
- Nyoni, A. B., & Brook, D. (2006). Wicking mechanisms in yarns –the key to fabric wicking performance. *Journal of Textile Institute*, 97(2), 119-128. doi:10.1533/joti.2005.0128
- Pack, S. L. (1995). Effect of yarn type and twist on air permeability, absorbancy, and hand properties of open-end and ring-spun yarn fabrics. *Journal of Textile Institute*, 86(4), 581-589. doi:10.1080/00405009508659036
- Patil, U. J., Kane, C. D., & Ramesh, P. (2009). Wickability behaviour of single-knit structure. *Journal of Textile Institute*, 100(5), 457-465. doi:10.1080/00405000801893240
- Pourahmad, A., & Johari, M. S. (2011a). Comparison of the properties of ring, solo, and siro core-spun yarns. *Journal of Textile Institute*, 102(6), 540-547. doi:10.1080/00405000.2010.498170
- Pourahmad, A., & Johari, M. S. (2009b). Production of core spun yarn by three-strand modified method. *Journal of Textile Institute*, 100(3), 275-281. doi:10.1080/00405000701763865
- Sawhney, A. P. S., Robert, K. Q., Ruppenicker, G. F., & Kimmel, L. B. (1992). Improved method of producing a cotton/polyester staple core yarn on a ring spinning frame. *Textile Research Journal*, 62(1), 21-25. doi:10.1177/004051759206200104
- Soltani, P., & Johari, M. S. (2012). A study on siro-, solo-, compact-, and conventional ring spun yarns. Part II: yarn strength with relation to physical and structural properties of yarns. *Journal of Textile Institute*, 103(9), 921-930. doi:10.1080/00405000.2011.628117
- Sun, M. N., & Cheng, K. P. S. (2000). Structure and properties of cotton sirospun yarn. *Textile Research Journal*, 70(3), 261-268. doi:10.1177/004051750007000314
- Tashkandi, S., Wang, L., & Kanesalingam, S. (2013). An investigation of thermal comfort properties of Abaya woven fabrics. *Journal of Textile Institute*, 104(8), 830-837. doi:10.1080/00405000.2012.758351
- Varshney, R. K., Kothari, V. K., & Dhamija, S. (2010). A study on thermophysiological comfort properties of fabrics in relation to constituent fibre fineness and cross-sectional shapes. *Journal of Textile Institute*, 101(6), 495-505. doi:10.1080/00405000802542184
- Xia, Z., Wang, X., Ye, W., Eltahir, H. A., & Xu, W. (2012). Fiber trapping comparison of embeddable and locatable spinning with siro fil and siro core-spinning with flute pipe air suction. *Textile Research Journal*, 82(12), 1255-1262. doi:10.1177/0040517512439918
- Zang, L. N., & He, J. H. (2009). Geometry condition for optimal two-strand yarn spinning part I: Siro spun. *Textile Research Journal*, 79(3), 243-246. doi:10.1177/0040517507080533

(Received 16 February 2015; 1st Revised 13 March 2015;
2nd Revised 14 April 2015; 3rd Revised 29 April 2015;
Accepted 12 May 2015)