

광학 현미경을 이용한 실에서의 접촉각 측정

오동원, 이광배, 심현주, 홍철재

승실대학교 섬유공학과

Measurement of Apparent Contact Angle in Yarn Using Microscope

Dong-won Oh, Kwang-bae Lee, Hyun-joo Shim, and Cheol-jae Hong

Dept. of Textile Engineering, Soongsil University

ABSTRACT: Authors measured the apparent contact angle in a yarn using microscope because it gives a useful information in the evaluation of comfort factors in fabrics. The mechanical stage of microscope was designed and built to facilitate this measurement. Variables examined were the fiber type, the twisting number, and the fluid type. All produced significant effect most of which could be rationalized based on the known concepts. The methodology used and the results obtained are discussed in detail.

1. 서론

섬유 또는 실의 접촉각 측정은 직물에서 흡수 및 발수성, 증발성, 이와 연관된 열 전달성과 같은 쾌적 성능을 평가하는 데 중요한 정보를 제공한다. 접촉각은 고체-유체-기체 3상이 접촉하는 점에서 정의되며 유체와의 친화성을 나타내는 값으로 접촉각이 90° 이하이면 친수성을, 그 이상이면 소수성을 나타낸다. 접촉각을 나타내는 방법은 측정 상태에 따라 전진 접촉각(advancing contact angle)과 후진 접촉각(receding contact angle)이 있으며 전자는 흡수 성능을 후자는 증발로 인한 건조 성능을 평가하는 지수로 사용할 수 있다.

접촉각의 측정 방법은 크게 동적과 정적 측정으로 나눌 수 있다. 동적 측정의 경우 물질 이동 속도에 따라 유체 점성에 의한 계면에서의 유체 전단력이 증가하며 이는 접촉각에 영향을 준다. 따라서 정확한 해석을 위해 속도별 접촉각 측정과 모델식이 요구된다^{1~3}. 정적 측정의 경우 널리 사용하는 방법으로 평면 물질의 경우 유체 방울 낙하 방법(sessile drop method)과, 섬유와 실과 같은 선형 물질의 경우 2층으로 구분된 소수 및 친수성 용액을 저장통에 준비하고 여기에 섬유 물질을 수직으로 낙하시켜 상층 용액으로부터 섬유 표면에 부착된 소량의 유체를 하층 용액으로 이동시켜 계면 상호간 운동에 의하여 섬유 표면에 형성된 용액 방울의 접촉각을 측정하는 방법 등이 있다^{4,5}. 이들 방법은 대기압 영향에 의하여 불규칙하게 형성된 방울 크기에 따라 접촉각이 변화한다. 접촉각 측정시 대기압 영향을 제거하기 위하여 시료 기울기 법(tilting plate method)이⁶ 개발되었으나 섬유와 실과 같은 선형 물질에 적용할 경우 용액 용기내에 별도 시료의 기울기 장치 설치와 전후진 접촉각 측정을 위한 수면과 현미경 위치 조정이 매우 어렵기 때문에 널리 사용되지 않고 있다.

본 연구에서는 실을 용액에 수직으로 침투하여 고정시킨 후 광학 현미경을 이용하여 접촉각을 간단하

고 신속하게 측정하는 법을 고안하였다. 시료는 꼬임 조건을 달리한 여러 종류의 필라멘트와 방적사를 사용하였고 사용 유체는 농도를 달리한 소금물이다. 연구 목적은 강연사 직물에서의 흡수, 발수, 증발성, 열 전달률과 같은 쾌적 성능을 보다 체계적으로 분석함과 동시에 이들을 수학적으로 모델링하는 데 중요한 기초 자료를 제공하기 위한 것이다.

2. 이론적 배경

평활한 동일 물질로 구성된 고체 평면에 유체가 완전 밀착할 경우 순수 접촉각은 다음과 같이 각 계면 간 표면 에너지 값으로 나타낼 수 있다.

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{sa} - \gamma_{ls}}{\gamma_{la}} \quad (1)$$

여기서 γ_{sa} 는 고체-기체, γ_{ls} 는 액체-고체, γ_{la} 는 액체-기체 계면에서 표면에너지이다.

대부분 물질 표면은 부분적으로 불규칙하기 때문에 겉보기 접촉각은 식 (1)에서의 순수 접촉각 보다 달리 나타난다. Wenzel은 겉보기 접촉각(θ')과 순수 접촉각(θ)과의 관계를 표면 불규칙 요인(surface roughness factor)을 도입하여 다음과 같은 관계식을 유도하였다⁷.

$$\cos \theta' = \phi \cos \theta \quad (2)$$

$$\phi (\text{표면 불규칙 요인}) = \frac{\text{순수 표면 면적}}{\text{겉보기 표면 면적}}$$

식 (2)에서 표면의 불규칙성이 증가함에 따라 물질이 친수성 ($\theta < 90^\circ$)일 경우 겉보기 접촉각은 감소하는 반면에 소수성 ($\theta > 90^\circ$)일 경우 증가한다. 그러나 이는 불규칙한 표면이 유체를 완전히 밀착되어 적시어 져 있을 경우 나타나는 현상으로 표면의 불규칙한 요철이 매우 클 경우 이들 사이에 유체가 완전히 침투하지 못한 기공이 발생하게 되며 따라서 이들 계면에서의 표면장력에 의해 실제 겉보기 접촉각은 증가한다고 보고하였다. Cassie 와 Baxter는 다공성 물질에서 열역학적 이론을 도입하여 겉보기 접촉각을 아래와 같이 유도하였다⁸.

$$\cos \theta' = f_s \cos \theta - f_a \quad (3)$$

여기서 f_s 는 측정 대상 물질의 단위 겉보기 면적당 유체와 완전히 밀착한 고체 면적

f_a 는 측정 대상 물질에서 단위 겉보기 면적당 유체가 침투하지 못한 기공 면적

식 (3)에서 물질 표면에서 유체가 침투하지 못한 부분 (f_a)이 증가할 경우 겉보기 접촉각은 증가하며 유체가 완전히 물질 표면에 침투할 경우 f_a 는 0이 되고 f_s 는 식(2)에서 같이 표면 불규칙 요인 (ϕ)와 동일하게 된다.

본연구에서는 강연사 직물의 쾌적 성능을 체계적으로 고찰하기 위한 전초 연구로 꼬임 조건을 달리한 실에서 접촉각을 측정 고찰하여 보았다. 꼬임에 따라 실 표면의 불규칙성과 또한 섬유내 유체 침투 정도가 달리 나타남으로 기존 이론에 의거 겉보기 접촉각이 달리 나타날 것으로 기대된다.

3. 실험

사용한 시료는 나일론(nylon), 폴리에스테르(PET), 폴리프로필렌(PP) 필라멘트 사와 혼방비를 달리한 면(cotton)/폴리에스테르(PET) 방적사이다. 이들 시료에서 유연제, 왁스와 같은 불순물을 제거하기 위하여 사염화탄소를 사용하여 속슬렛에 3 시간 동안 정련시켜 자연 건조하였고 검연기로 다양하게 꼬임을 주어 Table 1 과 같이 시료를 준비하였다.

Table 1. Experimental Materials

종류	혼방비	섬도	꼬임수 (Twist Per Inch)	제조회사	
필라멘트사	나일론	100	300den./77fil.	10, 15, 20, 25	동양나일론
	폴리에스테르	100	300den./96fil.	10, 15, 20, 25	삼양사
	폴리프로필렌	100	300den./44fil.	10, 15, 20, 25	일진
방적사	면/폴리에스테르	100/0	30 번수	20	방림
	면/폴리에스테르	50/50	30 번수	20	방림
	면/폴리에스테르	35/65	30 번수	20	방림

Fig. 1.은 접촉각 측정을 위한 시료준비, 측정기기, 그리고 측정방법에 대한 요약도이다.

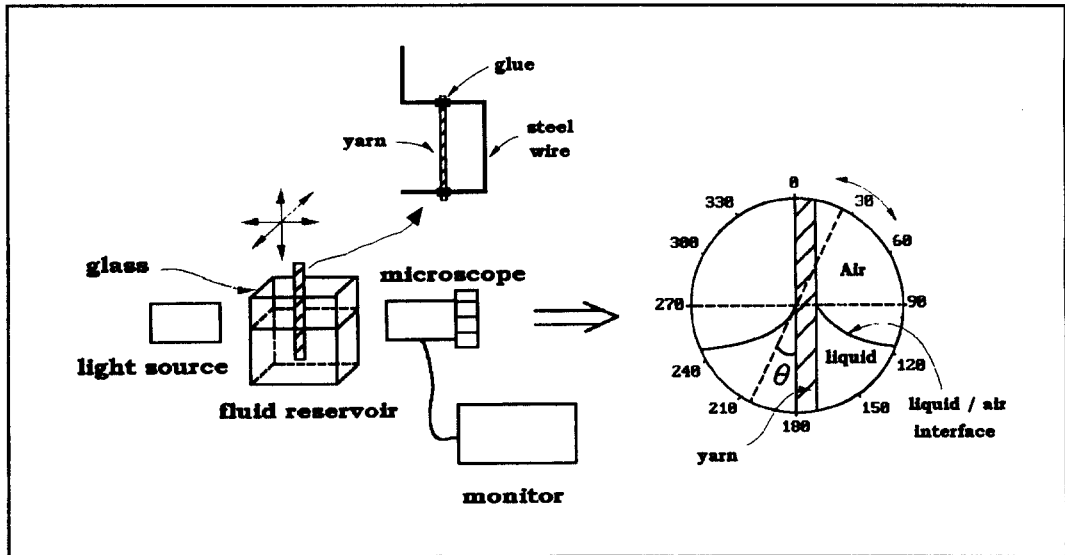


Fig. 1. Equipment for measuring of contact angle

측정중 시료의 꼬임 상태가 변화 없이 일정하게 하기 위하여 검연기에서 가연된 시료를 철사틀에 접착제를 이용하여 고착하였다. 시료가 고착된 철사틀을 좌우 상하 전후로 자유롭게 움직일 수 있는 장치에 부착하여 용액통 속으로 침투시킨 후 현미경에서 얻어진 영상에 기준점을 기체-고체-액체가 만나는 점에 고정한다. 각도가 새겨진 접안렌즈에 기울기 선이 새겨진 자유롭게 회전할 수 있는 렌즈를 부착하여 접촉각을 측정한다. 전진 접촉각은 시료를 액체통에 천천히 침투시킨 후 평형상태에서, 그리고 후진 접촉각은 반대로 시료를 액체에서 상승시킨 후 측정하였다. 사용한 액체는 소금물 0, 5, 10%이다. 각 시료에 대한 접촉각은 50 회 측정하여 평균값을 구하였다.

3. 결과 및 고찰

실 구성 섬유 종류에 따른 물에 대한 접촉각 측정 값을 Fig. 2에 나타내었다. 시료들의 상대적 접촉각을 비교 평가하기 위하여 꼬임조건을 일정하게 하였다. 접촉각은 면, 나일론, 폴리에스테르, 폴리프로필렌 순으로 높아짐을 보여주었으며, 모든 시료에서 전진 접촉각은 후진 접촉각보다 크게 나타났다. 시료별 접촉각 크기의 순서는 섬유의 표면에너지 결정하는 분자쇄에서의 극성 정도를 고찰하여 보면 쉽게 이해할 수 있다. 면(-OH), 나일론 (-NHCO-), 폴리에스테르 (-O-) 경우 분자쇄에 존재하는 극성기에 의하여 시료의 접촉각이 모두 90° 보다 낮게 나타났으며 반면에 폴리프로필렌의 경우 매우 비극성으로 전진 접촉각이 90° 보다 높게 나타났다. 후진 접촉각은 실을 유체에서 빠져 나오게 한 후 실 표면에 일부 유체가 부착된 상태에서 구한 것으로 건조상태보다 유체와 친화력이 높아져 표면 에너지 값을 증가시키고, 이는 식 (1)에서 알 수 있듯이 접촉각을 감소시킨다.

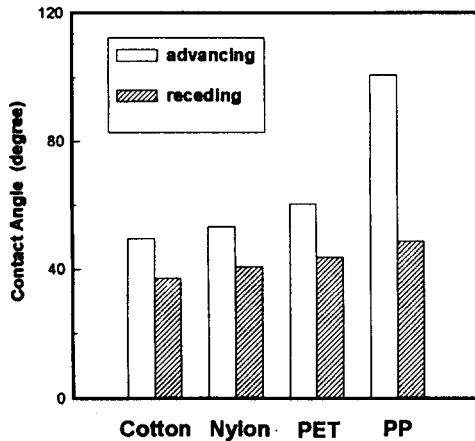


Fig. 2. Contact angle against yarn type (20 tpi, water)

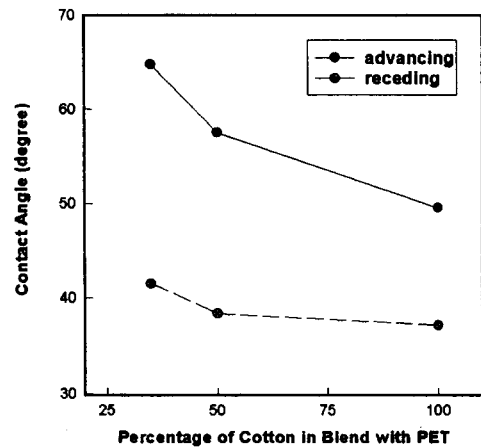
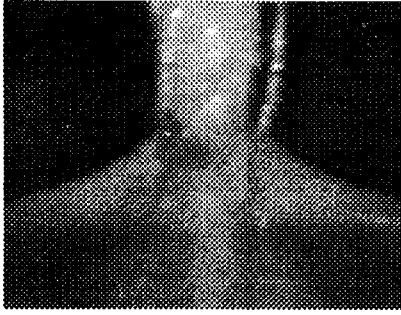


Fig. 3. Contact angle against percentage of cotton in blend with PET (20 tpi, water)

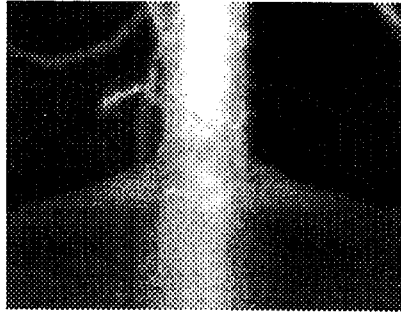
면/폴리에스테르 혼방 강연사는 유체의 흡수 및 증발을 원활히 하는 하절기 의류 및 내의 소재로 널리 사용되고 있다. 이들 실에서 혼방 비율에 따른 유체 친화성을 알기 위한 접촉각 측정 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 면 비율이 증가할 수록 전진 및 후진 접촉각이 모두 작아짐을 보여준다. 이는 앞서 설명한 것과 같이 섬유 분자쇄의 극성기 특성에 따른 것으로 면에서 표면 에너지가 폴리에스테르에서 보다 높기 때문이다. Fig. 4는 면 100%와 면/폴리에스테르 (35/65) 방적사의 접촉각 측정 사진을 보여준다.

각 시료에 대하여 꼬임수에 따른 유체 친화성을 알기 위한 접촉각 측정 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

친수성 물질인 면, 나일론, 폴리에스테르 실의 경우 꼬임이 증가할 수록 전진 및 후진 접촉각이 증가하는 반면에 소수성 물질인 폴리프로필렌의 경우 감소하였다. 일반적으로 실의 꼬임이 증가할 경우 표면의 거칠기(ϕ)가 증가하며 따라서 Wenzel 모델에 의거 유도된 식 (2)에 의하면 전자의 친수성 물질에서, 즉 전진 접촉각 90° 이하의 경우 꼬임수가 증가할 수록 겉보기 접촉각은 감소하여야 하나 실제 측정된 접촉각은 증가하였다. 이는 꼬임이 작을 경우 친수성 섬유간 기공이 커 모세관 활동에 의하여 쉽게 유체가 침투할 수 있으나 꼬임이 클 경우 섬유 밀도와 표면 요철이 증가하여 유체가 쉽게 침투할 수 없는 기공이 증가하게 되고 이는 Cassie 와 Baxter 모델 식 (3)에 의거하여 접촉각을 증가시킨다고 설명할 수 있다.



(a) cotton 100%



(b) cotton / PET : 35/ 65

Fig. 4. Photograph of contact angles in yarns blended with cotton and PET (20tpi)

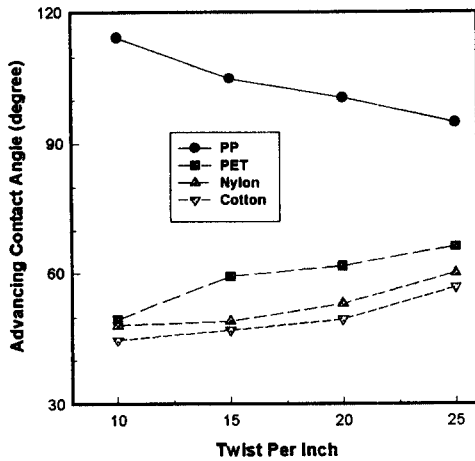


Fig. 5-a. Advancing contact angle against twisting number (water)

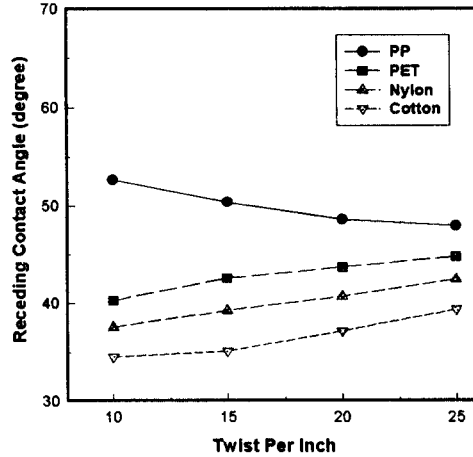
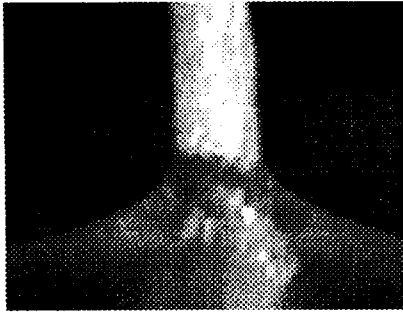


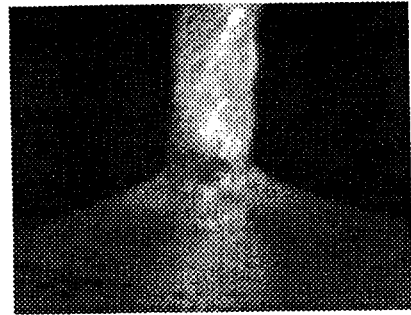
Fig. 5-a. Receding contact angle against twisting number (water)

반면에 폴리프로필렌의 경우 소수성 물질로 유체를 떨쳐내려는 힘이 커서 섬유간 기공을 통하여 모세관 활동에 의한 자연로운 유체 침투가 전혀 불가능하다. 따라서 꼬임수가 작을 수록 실 밀도가 떨어져 유체가 침투할 수 없는 기공이 증가하여 접촉각 값이 크게 되며 반면에 꼬임수가 클 수록 기공이 감소하여 접촉각을 작게 한다. Fig. 6은 친수성 실인 면과 소수성 실인 폴리프로필렌에서 서로 다른 꼬임 조건에서 측정한 접촉각 사진을 보여준다.

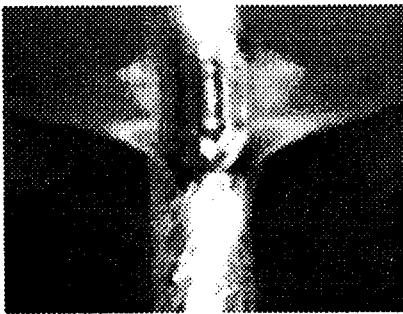
인체에서 발산되는 유체는 소금을 함유한 물질이다. 소금물 농도에 따른 각 시료의 유체 친화성을 알기 위한 접촉각 측정 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 농도가 증가할 수록 모든 시료에서 접촉각이 증가함을 보여준다. 이는 소금의 전해 물질이 섬유의 극성 부분을 감싸 물의 접근을 방해하고⁹ 또한 농도의 증가에 따른 유체 표면 장력의 증가는¹⁰ 식 (1)에서 보여 주는 것과 같이 접촉각을 증가시키게 한다.



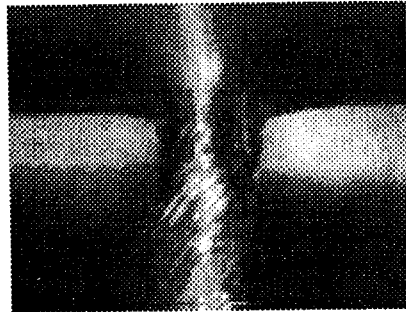
(a) nylon 10 tpi



(b) nylon 25 tpi



(a) PP 10 tpi



(b) PP 25 tpi

Fig. 6. Photograph of contact angles against twisting number in nylon and PP yarns

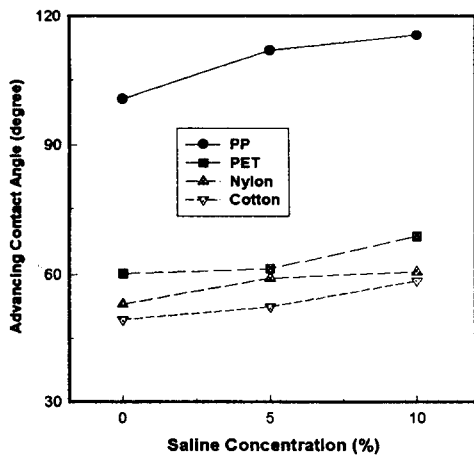


Fig. 7-a. Advancing contact angle against saline concentration (20 tpi)

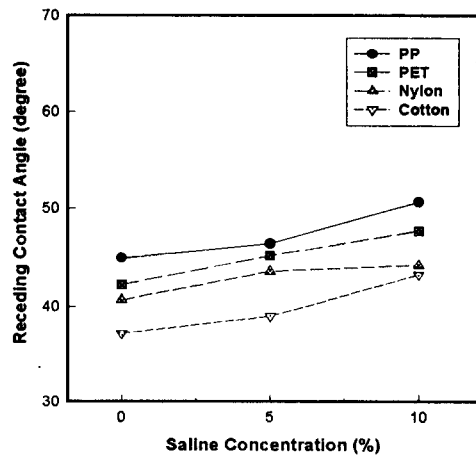


Fig. 7-b. Receding contact angle against saline concentration (20 tpi)

4. 결론

본 연구에서는 광학 현미경을 이용하여 실의 종류와 꼬임 조건에 따른 접촉각을 측정 분석하였다. 측정된 결과는 아래와 같다.

1. 시료의 물리 화학적 표면 특성과 측정 조건은 접촉각에 크게 영향을 주었다.
2. 친수성 및 소수성 시료에서 꼬임수 조건에 따라 접촉각이 달리 나타났다. 친수성일 경우 꼬임수가 증가할 수록 접촉각 값이 증가하는 반면에 소수성일 경우 감소하였다.
3. 극성 용액인 소금물에서 농도가 증가할 수록 모든 시료에서 접촉각이 증가하였다.
4. 측정된 결과들은 기존 이론들에 의거하여 설명할 수 있었다.

이상과 같이 얻어진 결과들은 흡수성, 발수성 증발성, 그리고 이와 연관된 열전달성과 같은 쾌적 성능을 평가하는 데 유용하게 활용할 수 있겠다.

5. 참고문헌

1. G. Storm, M. Fredriksson, P. Stenius, and B. Radoev, *J. Colloid and Interface Sci.*, **134**, 164 (1990)
2. S. Newman, *J. Colloid and Interface Sci.*, **26**, 209 (1968)
3. P. Joos, and P.V. Remoortere, and M. Bracke, *J. Colloid Interface Sci.*, **136**, 189 (1990)
4. R.J. Good and M.N. Koo, *J. Colloid Interface Sci.*, **71**, 283 (1978)
5. A. Kumar and S. Hartland, *J. Colloid Interface Sci.*, **136**, 455 (1990)
6. A. K. Huntington, *Trans. Faraday Soc.*, **1**, 345 (1906)
7. R.N. Wenzel, *Industrial and Engineering Chemistry*, **28**, 988 (1936)
8. A.B.D. Cassie and S. Baxter, *Trans. Faraday Soc.*, **40**, 546 (1944)
9. P.J. Flory, *Principle of Polymer Chemistry*, Cornell University Press, Ithaca, 1967
10. D.W. Kaufman, *Sodium Chloride*, Reinhold Publishing Corporation, New York, 1960