

광학 현미경을 이용한 모발 내부 다공성 평가 및 모발 내부 밀도 증가를 통한 윤기 증가 연구

박 현 섭^{*†} · 손 성 길^{*} · 강 내 규^{*} · 이 익 현^{**}

*LG생활건강 기술연구원

**한국공과대학교 메카트로닉스공학부, 교수

(2023년 7월 4일 접수, 2023년 7월 13일 수정, 2023년 7월 18일 채택)

Study on Evaluation of Internal Hair Porosity using Optical Microscopy and Improvement of Hair Luster through Internal Hair Density

Hyun-Sub Park^{1,†}, Seong Kil Son¹, Nae-Gyu Kang¹, and Ik Hyun Lee²

¹R&D Center, LG Household & Health Care, 70 Magokjungang 10-ro, Gangseo-gu, Seoul 07795, Korea

²Department of Mechatronics Engineering, Tech University of Korea

(Received July 4, 2023; Revised July 13, 2023; Accepted July 18, 2023)

요약: 본 연구에서는 모발 내부의 다공성 구조를 광학 현미경을 이용하여 모발의 손상 없이 관찰하였으며, 해당 결과를 이용하여 모발 내부 다공성을 정량적으로 표현하고자 하였다. 모발 내부 밀도 저하가 모발의 굽힘 및 인장 특성에 미치는 영향에 대한 실험을 진행하였으며, 모발 내부의 밀도 저하를 발생시키는 원인에 대하여 알아보고자 내인적 요인과 외인적 요인에 대한 실험을 실시하였다. 내인적 요인으로는 노화의 대표 증상의 하나인 흰머리의 다공성을 평가 정상 모발과 비교하였다. 외인적 요인으로는 일상생활에서 대표적으로 모발의 손상을 유발할 수 있는 요인인 계면활성제와 열에 의하여 모발 내부 밀도가 감소 하는 것을 관찰하였다. 또한, 아미노산과 모발 지질 소질을 방지할 수 있는 소재를 이용하여 모발 내부 밀도를 증가시키고 윤기를 증가시킬 수 있음을 확인하였다.

Abstract: In this study, the porous structure inside the hair were observed using an optical microscope without damaging the hair, and the porosity inside the hair was quantitatively expressed using the results. Experiments were conducted on the effect of the decrease in density inside the hair on the bending and tensile properties of the hair, and experiments on endogenous and extrinsic factors were conducted to find out the causes of the decrease in density inside the hair. As for the endogenous factor, the porosity of gray hair, one of the representative symptoms of aging, was compared with normal hair. As for extrinsic factors, it was observed that the internal density of hair decreased by surfactant and heat, which are factors that can cause hair damage in daily life. In addition, we confirmed whether it is possible to increase the internal density and luster of the hair by using an amino acids and material that can prevent hair lipid predisposition.

Keywords: hair, medulla, porosity, optical microscope, luster

† 주 저자 (e-mail: hyunsub@lghnh.com)
call: 02-6980-1488

1. 서 론

모발의 구조를 크게 나누면 3 가지로 분류할 수 있다. 모발의 가장 외곽을 감싸고 있는 모표피(cuticle), 모발 내부를 형성하고 있는 모피질(cortex), 그리고 가장 안쪽 중심에 위치하는 모수질(medulla)이다. 모수질은 모든 모발에 존재하는 것은 아니며 차지하는 비중이 작아서 상대적으로 관심도가 낮고 연구가 많이 되고 있지 않다. 모발에 존재하는 모수질은 다양한 형태를 가지고 있으며, 사람의 모발에 존재하는 모수질은 형태적으로 3 가지로 분류 가능하다[1]. 첫번째는 연속적으로 모수질이 차 있는 형태이며, 두번째는 모발 길이 방향으로 점선의 형태를 띠는 경우이며, 마지막은 모수질이 존재하지 않는 형태이다. 모수질의 형태와 존재를 확인하는 방법으로 주로 사용되는 방법은 모발 박편을 제작하여 광학 현미경 또는 전자현미경(주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM) 투과전자현미경(transmission electron microscope, TEM))등을 이용하는 것이다. 해당 방법은 모수질 부분의 화학적 물리적 구성이 다르기 때문에 육안으로 쉽게 모피질 부분과 구별하여 관찰이 가능하다. 화학적으로 구성하고 있는 지질과 단백질의 함량과 종류의 차이가 있으며, 물리적으로는 다공성 구조로 인한 밀도의 차이가 있다.

광학 현미경[2] 또는 적외선 현미경을[3] 이용하여 모발 내부에 존재하는 모수질을 확인할 수 있으며, 광학 현미경에 의해서 모발의 모수질이 관찰되는 것은 모수질의 다공성 구조와 관련이 있다. 모발에 빛을 비추면 cuticle층 통과하여 cortex에 도착하게 된다. 멜라닌이 많은 경우 즉 흑발의 경우 cortex에 존재하는 멜라닌들이 빛을 흡수하여 빛의 이동을 방해하지만 멜라닌이 부족한 경우(탈색, 흰머리 등) 그 빛은 모수질까지 도달하며 더 나아가 모발을 통과하여 나아간다(Figure 1). 이때 모발 내부에 존재하는 다공성 구조를 빛이 지나가게 되면 밀도 차이에서 발생하는 굴절률에 의하여 산란이 발생한다. 이로 인하여 투과된 이미지를 관찰하는 현미경은 밀도가 낮은 부분이 더 어렵게 관찰된다. 반면에 반사광을 관찰하는 현미경에서는 산란이 발생하는 부분이 더 밝게 측정된다[4].

이러한 원리를 바탕으로 관측되는 이미지의 밝고 어두운 정도를 측정하여 수치화 함으로써 모발 내부에 존재하는 다공성의 정도를 정량적으로 표현이 가능하다. 해당 방식은 모발 내부를 관찰하기 위하여 모발을 절단을 하지 않아도 된다는 장점이 있다. 모발 단면 시편을 준비하지 않아도 되기 때문에 빠르게 측정이 가능하고 비파괴적 측정

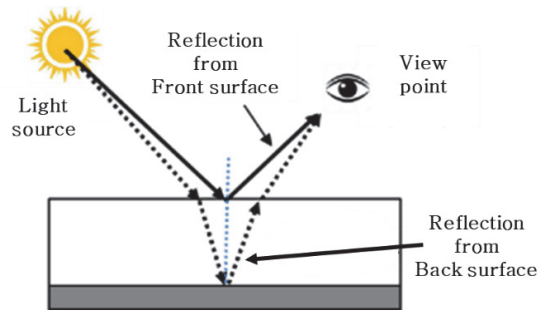


Figure 1. Illustration of reflections at the front and back surface of hair fiber.

이기 때문에 동일 모발의 동일 부위를 측정하여 직접적인 변화 관측이 가능하다.

본 연구에서는 모발 내부 다공성 구조를 광학 현미경으로 모발의 손상없이 관찰하고, 또한 해당 결과를 바탕으로 모발 내부 밀도를 정량적으로 표현하였다. 그리고 모발에 손상을 유발할 수 있는 여러가지 요인과 모발 내부 다공성의 상관관계를 확인하였다. 또한 손상된 모발의 내부 밀도 증가를 통해 모발의 윤기가 증가하는 효과가 있음을 확인하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 물질

모발 트레스는 동양인 흑모(Beaulax, Japan)를 사용하였으며, 표면의 지질 및 불순물을 제거하기 위해서 세정 후 사용하였다. 이중 sodium laureth sulfate (SLES)는 LG생활건강(Korea)의 원료를 사용하였으며, 글라이신(glycine)은 Sigma-aldrich (USA) 제품을 사용 하였으며, hydrogenated castor oil/sebacic acid copolymer (CSA)는 Croda (UK) 제품을 사용하였다.

2.2. 모발 처리 방법

모발 중량 대비 10%의 SLES(15%) 용액으로 1 min 동안 거품을 낸 후 30 s 간 행굼을 하는 과정을 2 회 반복하였다. 종이 수건을 이용하여 물기를 제거한 모발을 25 °C, 상대습도 50%인 항온 항습실에 하룻밤 보관 후 사용하였다. 모발 내부 밀도 증가 효과를 확인하기 위한 샴푸 처리의 경우 샴푸 시료를 10%로 희석하여 준비된 모발 가닥이 충분히 잠기도록 도포 하였다. 30 s 동안 방치 후 10 s 간 4 mL/s 유속의 흐르는 물로 행구고 물기를 제거하였다. 이 과정을 총 7 회 반복 처리 후 실험에 사용하였다.

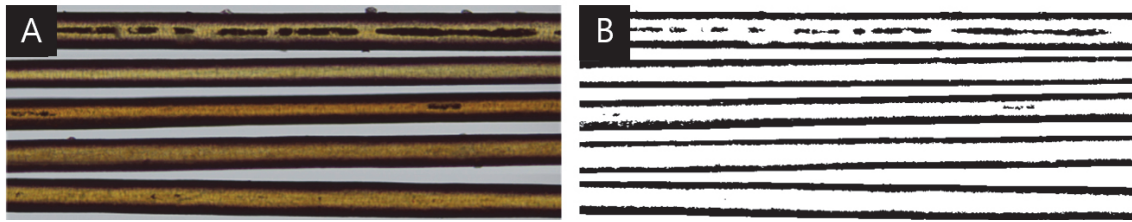


Figure 2. (A) Internal porous structure image of hair fiber using optical microscope, (B) threshold image.

2.3. 굽힘 강도 평가 측정

모발 굽힘 평가기(KES-FB2-S, KATO TECH, Japan)를 사용하여 모발의 굽힘 강성(bending rigidity) 및 이력(hysteresis)을 평가하였다. 굽힘 속도는 0.5 cm¹/s 이었으며 최대 곡률 2.0 cm¹ 까지 측정하였다. 굽힘 강성은 곡률 변위에 따른 돌림힘을 측정하여 곡률 0.5 ~ 1.5 cm¹/ -0.5 ~ 1.5 cm¹ 구간의 기울기를 평균하였다. 이때 곡률 1.0 cm¹ / -1.0 cm¹ 지점의 이력 폭을 평균하여 이력 값을 측정하였다.

2.4. 모발 인장강도 측정

모발 다발에서 한 가닥을 추출하여 모발 굽기 측정 장비(LSM6200, Mitutoyo, Japan)를 이용 모발의 장축, 단축을 측정하고 단면적을 산출하였다. 해당 모발을 모발 인장강도 평가기(MIT175, Diastron, UK)를 이용하여 인장강도를 측정하였다. 측정된 인장 강도를 모발의 단면적을 이용하여 정규화 하고 break stress 및 young's modulus를 측정하였다.

2.5. 모발 밀도 측정

트레스에서 추출된 머리카락을 가닥별로 광학 현미경(BX53M, Olympus, Japan)을 이용하여 모발의 다공성 구조에 의해서 생성되는 음영을 포함한 이미지를 획득하였다. 획득된 모발 가닥 이미지는 Figure 2과 같이 이미지 분석 프로그램(ImageJ)[5] 중 임계값(threshold)을 이용하였다. 또한 모발 내부의 면적 중 다공성 구조가 차지하는 비율, 즉 다공성은 Equation (1)과 같으며, 예를 들어 내부가 전부 다공성이면 측정치(gray intensity)가 255로 다공성 100%이며, 다공성 구조로 인한 밀도의 차이가 없으면 측정치는 0임으로 다공성 0%이다. 이를 이용하여 모발 내부 면적 중 다공성 구조가 차지하는 비율이 높은 수록 모발의 밀도가 낮은 것으로 평가할 수 있다. 모발 내부 다공성이 감소하면 모발의 내부 밀도가 증가하는 효능이 있다고 판단하였다.

Equation 1. Calculation of porosity inside the hair

$$\text{Porosity}(\%) = (\text{Gray intensity} / 255) \times 100$$

2.6. 윤기 측정

윤기 측정기(SAMBA HAIR, Bossa nova vision, USA)를 사용하여 모발의 윤기를 측정하였다. 정렬된 모발 표면에 편광 빛을 조사했을 때 나타나는 반사광 및 분산광의 세기 그리고 반사광 띠의 폭 등을 종합적으로 계산한 값을 윤기 수치(L_{BVT})로 표현하였다. 값이 클수록 윤기가 좋음을 나타낸다[6].

3. 결과 및 고찰

3.1. 모발 내부 다공성 구조 관찰 및 특성

모발 내부의 다공성 구조를 관찰하기 위하여 광학 현미경을 이용하여 측정하였다. 광학 현미경을 이용하여 모발 내부를 관찰한 결과 모발 내부 위치에 음영이 불연속적 혹은 연속적으로 나타나는 경우와 음영이 없이 밝게 나타나는 경우가 있는 것을 확인하였다. 광학 현미경에서 나타나는 음영과 모발 내부 다공성 구조의 상관관계를 알아보고자 해

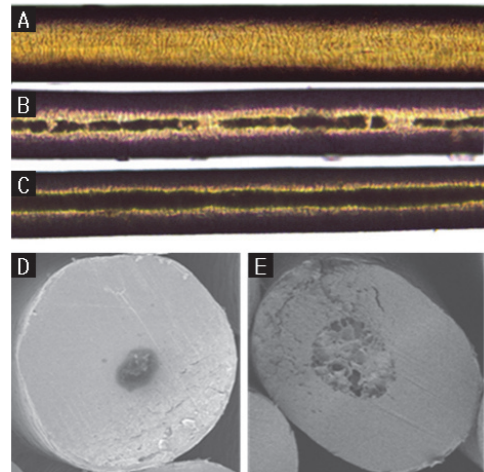


Figure 3. Internal porous structure image of hair fiber. Optical microscope image (A) nonporous hair, (B) discontinuous porous hair (C) continuous porous hair. Cross-sectional SEM image of (D)nonporous hair and (E)porous hair.

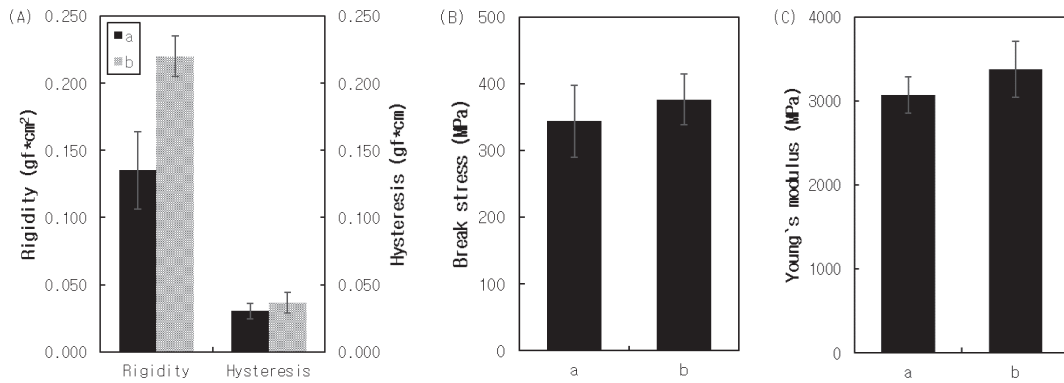


Figure 4. Effect of porous structure on hair properties (a = porous hair, b = nonporous hair). (A) bending rigidity & hysteresis, (B) break stress (C) Young's modulus.

당 모발들의 단면을 SEM을 이용하여 관찰하였다(Figure 3). 광학 현미경 촬영시 모발에 음영이 발견된 모발들의 경우에는 모발 단면의 중앙 위치에 다공성의 모수질이 발견되었다. 반면에 음영이 보이지 않았던 모발들의 경우에는 모발 단면의 중앙 부위가 가득차 있는 것을 확인하였다.

모발 내부의 다공성 구조가 모발 물성치에 대한 영향을 알아보고자 모발 내부 다공성 구조 유무에 따른 모발의 굽힘 특성과 인장 특성에 대한 실험을 실시하였다. Figure 4와 같이 모발 내부에 다공성 구조가 존재하는 모발은 그렇지 않은 모발에 비하여 굽힘 강성이 약하고, 탄성은 유사한 수준으로 평가되었다. 모발 내부에 빈 공간이 발생함으로써 인해서 모발의 강성이 낮아지는 것으로 보인다. 모발 인장 특성에서도 모발 내부에 다공성 구조가 존재하는 모발이 그렇지 않은 모발에 비하여 인장강도와 영률이 낮은 것으로 측정되었다. 상기 결과들을 보았을 때 모발 내부의 다공성 구조가 모발의 물리적 특성에 부정적 영향을 주는 것을 알 수 있다.

3.2. 모발 내부 다공성 증가

모발 모수질은 모발의 다른 부위에 비하여 지질의 함량이 높은 것으로 알려져 있다. 이에 여러가지 손상에 의해서 모발 내부의 다공성이 증가하게 된다. 모발의 경우 모근 부위에서 모끝 부분으로 갈수록 여러가지 요인에 의해서 손상이 증가된다. 모수질의 경우에도 모근 부위에 비하여 모끝 부분으로 갈수록 손상의 기회가 많아져서 다공성이 증가하는 것을 확인할 수 있다(Figure 5). 모근 부위에도 모수질이 존재하지만 다공성 구조가 적어 모발의 밀도가 높은 반면에 모끝 부위의 경우에는 모발 내부 다공성 구조

로 인한 밀도 감소로 광학 현미경 이미지에서 음영이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 모끝 방향으로 갈수록 모발의 손상이 심해지는 원인은 크게 나누면 내인적 요소와 외인적 요소로 나눌 수 있다[7]. 내인적 요소는 노화에 의한 영향이 주를 이룬다. 노화에 의한 다공성 차이를 알아보고자 동일한 모발 중 흑색 모발과 백색 모발의 모발 내부 다공성에 대한 평가를 실시하였다. Figure 6과 같이 평가 결과 흑색 모발과 백색 모발은 모발 내부 다공성에서 통계적으로 유의차가 없는 것을 확인할 수 있었다.

모발에 손상을 유발할 수 있는 외부적인 요인에 대하여 실험하여 모발 내부 다공성에 대한 영향을 확인하였다. 가장 대표적이면서 자주 접하게 되는 외부 손상의 요인 중 하나는 계면활성제이다. 계면활성제는 모발의 과도한 지질과 오염을 씻어내기 위하여 사용하지만 이로 인해서 모발 내부의 단백질과 지질도 손상을 받게 된다[8,9]. SLES 15% 수용액을 이용하여 모발 트레스를 연속적으로 세정하여 세정 횟수별 모발의 내부 다공성을 측정된 결과는 Figure 7과 같다. 세정 이전 모발의 내부 다공성이 33%이었던 것



Figure 5. Optical microscope image of the porous structure inside the hair from the root to the hair tip.

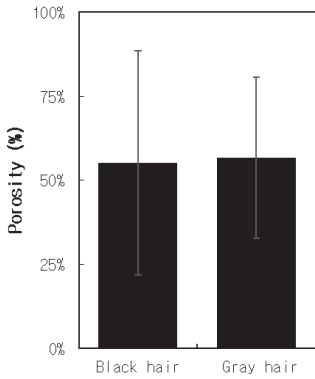


Figure 6. Porosity of black hair and gray hair.

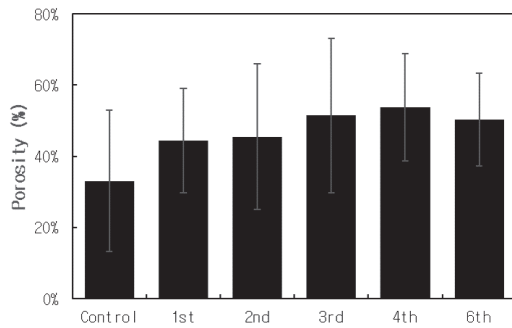


Figure 7. Effect of surfactants on hair porosity.

이 세정 횟수가 증가함에 따라 다공성이 증가하여 세정 6 회차에 이르러서는 50%의 다공성을 나타냈다. 일반적으로 모발은 두피에서 발생하는 피지에 의하여 지속적인 지질의 공급을 받게 된다. 모발에 공급되는 지질은 모발을 보호하고 영양을 공급하는 역할을 한다. 하지만 위와 같이 극단적인 세정 환경에 모발이 노출되면 모발 내부의 지질 및 단백질 용출에 의하여 다공성이 증가 하게된다.

앞서 언급한 바와 같이 모수질은 모발 가장 내부에 존재 하고 있지만 열에 의하여 쉽게 손상 받는 특성을 가지고 있다. 일반적으로 노출되는 열 손상은 헤어 드라이어와 고 데기를 예로 들 수 있다. 이 가운데 헤어 드라이어에 의하여 열 손상을 받을 시 모발 내부의 다공성이 증가하는 것을 확인하였다. 헤어 드라이어를 사용하여 80 °C에서 2 min 건조한 후 모발 내부 다공성 변화를 측정 한 결과는 Figure 8과 같다. 헤어 드라이어를 처리하기전의 모발의 다공성이 27%이었고 헤어 드라이어 사용 후 측정된 모발의 다공성은 36%로 증가하였다. 이러한 결과들은 모발 내부 다공성의 증가가 인체의 노화에 의한 영향 보다는 인체 외부로부터의 영향을 더 많이 받는다고 판단될 수 있는 결과이다.

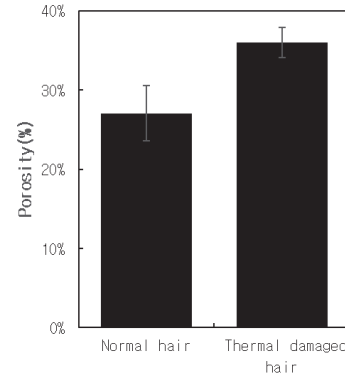


Figure 8. Effect of Thermal Damage on Hair Porosity.

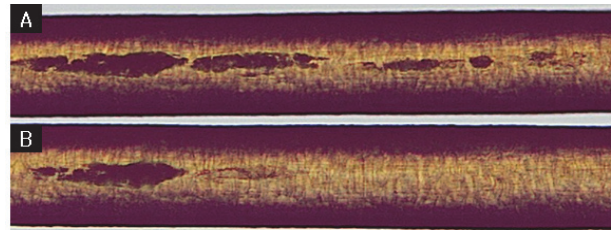


Figure 9. Optical microscope image of hair fiber (A)control, (B)glycine 1% + CSA 1% shampoo.

3.3. 모발 내부 밀도 및 윤기 증가

여러가지 손상 요인들에 의하여 발생된 모발 내부의 밀도 저하를 회복시켜주는 방법을 간구하기 위하여 아미노산을 이용 모발 내부 밀도 증가 효능을 평가하였다(Data not shown). 그 결과 분자량이 가장 작아 모발 내부 침투에 유리한 글라이신이 가장 효과적인 것으로 나타났다. 모발 내부의 손상된 단백질을 위한 글라이신과 지질 소실을 막아주는 CSA를 시중에 판매 중인 샴푸 제품에 첨가하여 평가를 실시하였다.

광학 현미경을 이용한 모발 내부 다공성 측정 결과 글라이신 1%와 CSA 1%를 동시에 적용한 샴푸를 모발에 처리하였을 때 모발의 내부 밀도가 증가 하는 것을 확인하였다(Figure 9). 모발 내부에 보이는 검은 음영 부위가 처리 이후에 사라지는 것을 확인할 수 있다. 모든 음영 부위가 고르게 감소하는 것이 아닌 일부 음영만이 없어지는 것을 보았을 때, 모발 내부로 침투하기 유리한 부위로 먼저 유효 성분들이 침투하는 것으로 보인다.

시판 샴푸에 글라이신 1%를 첨가한 경우에는 다공성이 4.3%p 감소하여 밀도 증가 효과가 있었으며 15.1%의 윤기

Table 1. The Effect of Glycine and CSA on Porosity and Luster

		Control Shampoo	Glycine 1% + Shampoo	Glycine 1% + CSA 1% + Shampoo
Porosity(%)	Before	21.1%	19.7%	22.8%
	After	20.9%	15.4%*	15.2%*
	P value	NS	0.032	0.013
		-0.2% ^{op}	-4.3% ^{op}	-7.6% ^{op}
L_{BNT}	Before	8.49	7.82	8.15
	After	8.45	9.00	9.82***
	P value	NS	<0.001	<0.001
		-0.5%	15.1%	20.5%

*Probability p (paired t -test, NS : not significant)

증가가 나타났다. 글라이신 1%와 CSA 1%를 동시에 적용한 경우에는 다공성 7.6%^{op} 감소로 인한 밀도 증가 효과와 20.5%의 윤기 증가 효과가 나타났다(Table 1). 모발 내부로 침투한 글라이신에 의하여 모발 내부 밀도가 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 모발 코팅 소재로 알려진 CSA 추가 적용시 모발 내부 밀도 증가 효능과 윤기 증가 효능이 더 상승하였다.

4. 결 론

모발 내부의 다공성 구조를 관찰하기 위하여 광학 현미경을 이용한 비파괴적인 모발 내부 다공성 평가 방법을 적용하였다. 기존의 다른 모발 내부 다공성 구조 관찰 방법들은 모발 시편을 절삭하여 단면을 측정하기 때문에 동일한 모발에서 처리 전후를 비교하는 평가가 불가능한 반면에 비파괴적인 광학 현미경 측정 방식은 모발 절삭을 통한 단면 제작이 필요 없으며 동일한 모발의 동일 부위의 변화를 직접 관찰할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 모발 내부 다공성이 계면활성제, 열과 같은 일상적인 요인으로 인해서 증가하였으며, 손상된 모발에 아미노산과 모발 코팅 효능이 있는 성분을 적용시켜 모발의 내부 밀도를 증가시키고 윤기를 증가시킬 수 있음을 확인하였다.

References

1. O. F. Chemova, Scanning electron microscopy of the hair medulla of orangutan, chimpanzee, and man, *Dokl. Biol. Sci.*, **456**, 199 (2014).
2. S. Nagase, S. Shibuichi, K. Ando, E. Kariya, and N. Satoh, Influence of internal structures of hair fiber on hair appearance I. Light scattering from porous structure of the medulla of human hair, *J. Cosmet. Sci.*, **53**(2), 89 (2002).
3. Y. Choi, Y. J. Jeong, J. G. Jeon, S. H. Park, H. R. Choi, and J. K. Kim, Medulla loss of scalp hair in breast cancer patients determined by near-infrared microscopy, *J. Biomed. Opt.*, **24**(9), 096501 (2019).
4. S. Nagase, N. Satoh, and K. Nakamura, Influence of internal structure of hair fiber on hair appearance. II. Consideration of the visual perception mechanism of hair appearance, *J. Cosmet. Sci.*, **53**(6), 387 (2002).
5. <https://imagej.nih.gov/ij/index.html>
6. N. Lefaudeux, N. Lechocinski, P. Clemenceau, and S. Breugnot, New luster formula for the characterization of hair tresses using polarization imaging, *J. Cosmet. Sci.*, **60**(2), 153 (2009)
7. S. H. Song, W. Choi, H. Park, B. T. Lim, K. R. Park, Y. Kim, S. Park, S. K. Son, S. M. Lee, and N. G. Kang, A new attempt to establish the extrinsic aging hair model to evaluate the response to aging in physical property, *J. Soc. Cosmet. Sci., Korea*, **45**(2), 185 (2019).
8. S. H. Song, J. H. Lim, S. K. Son, J. Choi, N. G. Kang, and S. M. Lee, Prevention of lipid loss from hair by surface and internal modification, *Sci. Rep.*, **9**, 9834 (2019).
9. R. C. C. Wagner and I. Joekes, Hair protein removal by sodium dodecyl sulfate, *Colloids Surf B Biointerfaces*, **41**(1), 7 (2005).