

탈색모발의 인장강도에 관한 연구

이 귀 영¹, 장 병 수*

한서대학교 보건학부 피부미용학과, ¹화학과 미용화학전공

Study on the Tensile Strength of Bleached Hair

Gui Young Lee¹ and Byung Soo Chang*

Department of Cosmetology, ¹Department of Chemistry, Hanseo University,
Seosan, Chungnam 356-706, Korea

(Received August 29, 2008; Accepted September 5, 2008)

ABSTRACT

Human hair experience tensile forces during combing, bleaching and permanent dyeing processes. We have used rheometer to characterize bleached hair tensile response. Also, we investigated to morphological changes after tensile test of virgin hair and bleached hair using scanning electron microscopy. In tensile test, the tensile strength of virgin hair was 14.66 g/cm². They were measured as 12.95 g/cm², 12.61 g/cm² and 11.43 g/cm² for after the first, the second and the third trials of bleaching were done, respectively. Virgin hair had a higher tensile force than bleached hair. Tensile strength got lowered as more bleaching trials were done. In the observation of scanning electron microscopy, the fracture and lift-off of the cuticle outer layer were shown in virgin hair and bleached hair. The bleached hair were more lifted off at the outer cuticle layer than virgin hair. Consequently, chemical damage of bleaching agent caused weakening of the outer cuticle in the hair.

Keywords : Bleached hair, Cuticle, Rheometer, Scanning electron microscopy, Tensile strength

서 론

사람은 머리를 단장하거나 치장을 하면서 모발에 인위적으로 많은 힘을 가하게 된다. 모발은 염색이나 펴 또는 탈색 등의 처리 과정에서 기계적으로 잡아당기는 힘에 저항하게 된다. 이와 같이 모발의 인장 강도(tensile stress) 특성에 관한 연구는 미용 산업의 발전과 함께 과학적으로 많은 관심을 갖게 되었다.

사람들은 아름답고 건강한 모발을 갖기를 원한다. 모발은 복잡한 나노구조물질로 된 단백질 섬유로서 일상적인 머리 손질과 화학적 처리 및 환경요인 등에 의해서 물리화학적 특성과 기계적인 강도 등에 영향을 받는다.

모발의 표면은 육안으로 보았을 때 윤기가 있고 매끄럽게 보이지만 전자현미경 상에서 지붕의 기와장과 같이 큐티클 세포(cuticle cell)의 일부가 일정한 간격으로 돌출되어 형성된 비늘(scale)에 의해서 덮여 있다.

사람의 모발은 손톱, 양모, 동물의 발톱, 새의 깃털과 유사하게 cystine 아미노산이 풍부한 섬유성 단백질인 케라틴 단백질이 주성분이다. Cystine의 이황화 결합은 모발에 유연성을 부여하고 나머지 케라틴 섬유는 모발에 기계적인 강도(mechanical strength)를 부여한다.

모발은 큐티클 층(cuticle layer)과 피질(cortex) 및 수질(medulla)의 3층으로 구성되어 있다. 큐티클 층의 기능은 피질을 둘러싸서 보호해주는 역할을 하는데 건강모발의 손상되지 않은 큐티클은 표면이 매끄러우며, 빛을 굴절시키고,

* Correspondence should be addressed to Dr. Byung Soo Chang, Department of Cosmetology, Hanseo University, Seosan, Chungnam 356-706, Korea. Ph.: (041) 660-1584, Fax: (041) 660-1590, E-mail: bschang@hanseo.ac.kr

머리카락 사이의 마찰력을 줄여주는 역할을 한다(Draeos, 1991; Bolduc & Shapiro, 2001; Chang, 2003).

큐티클층은 사람마다 차이는 있지만 약 5~10개의 큐티클세포(cuticle cell)로 구성되어 있으며 모발의 장축을 따라 납작하게 뻗어 있다. 각각의 큐티클세포는 표면큐티클(epicuticle), A층(A layer), 외큐티클(exocuticle), 내큐티클(endocuticle), 내층(inner layer)으로 구성된 작은 판상구조를 하고 있다. 표면큐티클은 큐티클세포의 세포막으로서 이곳에 부착된 지질막이 모발에 윤기를 갖게 해준다. 이런 층들은 cystine 성분의 차이가 아주 크게 나타난다. A층과 외큐티클은 cystine이 풍부하게 존재하고 있고 높은 교차결합으로 물리적으로 강한 부위이다. 내큐티클은 cystine 함량이 낮으며 기계적으로 약한 부위이다(Wolfram, 2003).

수질은 모발의 중심부에 연속적으로 또는 불연속적으로 존재하며 수질이 없는 경우도 있다. 피질은 모발에 신축성과 강도를 제공하는데 길게 신장된 각화세포(cornified cell)들이 서로 밀착되어 있다. 각화세포는 모발섬유와 같은 방향으로 길게 중주하며 서로 아주 밀착되어 있으며 이들 세포는 무정형의 황함유 단백질과 케라틴세사들로 구성되어 있다. 케라틴은 그 자체가 무색이며 모발의 색깔은 피질에 있는 멜라닌과립(melanin granule)의 존재유무에 따라 나타난다(Wall & Hunter, 1974; Wilk et al., 1995; Hearle, 2000).

인장강도 실험은 모발의 강도를 측정함으로써 모발의 인장강도와 손상도 뿐만 아니라 모발의 물리적인 변형과 관련된 정보를 제공하는 데 중요한 역할을 한다. 일반적으로 두꺼운 모발은 가는 모발보다 인장강도가 높게 나타난다. 또한 곱슬모의 경우 모발 굵기가 꼬임을 가지는데 그 꼬인 부분의 모발직경은 감소하기 때문에 그 위치에서 끊어지기 쉽다. 그러므로 사람들마다 모발의 꼬임과 구부러진 형태의 정도, 모발 굵기의 정도와 모발 손상의 정도에 따라서 확연한 차이가 있다(Kamath et al., 1984; Syed et al., 1995; Franbourg et al., 2003).

본 실험에서는 30대 여성의 건강한 모발에 산화염색제인 탈색제를 적용하여 탈색 회수에 따른 모발의 인장 변화를 관찰하였다. 건강모발과 탈색제를 처리한 모발의 응력(stress)과 인장력(strain)을 인장강도기(Rheometer)를 사용하여 비교 측정하였고, 탈색 회수에 따른 인장강도의 변화 관계를 선형 회귀식을 도출하여 규명하였다. 또한, 인장강도 측정 시 절단된 모발의 외부 형태를 주사전자현미경(Scanning electron microscopy)을 사용하여 관찰하였다.

재료 및 방법

1. 실험 재료

탈색에 의한 모발의 변화 과정을 관찰하기 위하여 물리

적, 화학적 영향을 받지 않은 30대 여성의 건강 모발(virgin hair)을 준비하였다. 탈색에 사용된 모발시료는 후두부의 두피로부터 약 5cm 떨어진 곳에서 20cm 길이로 잘라서 채취하고 일정한 양의 머리카락을 4개의 다발로 나누어 묶어 각각 고정시켰다. 분말타입의 알칼리제인 1제와 농도 6%의 산화제인 2제를 1:2로 섞어서 제조한 탈색제를 모발시료에 골고루 도포한 후 상온에서 30분간 방치하였다. 염색이 끝난 시료는 흐르는 물에 세척하고 자연건조 시켰다. 위와 같은 방법으로 탈색제를 시료에 따라 각각 1회, 2회, 3회 반복 시술하였다.

2. 실험 방법

1) 인장강도 측정

모발의 인장강도는 모발의 양쪽 끝에서 모발이 절단 될 때까지 당기는 힘을 의미하기 때문에 그 값이 클수록 건강한 모발이다. 따라서 모발의 인장강도는 모발의 양쪽 끝에서 모발이 절단 될 때까지 당기는 힘을 증가시키면서 모발을 인장시켜 모발의 인장길이와 절단하는 데 필요한 힘을 측정하는 방법으로 결정한다. 인장강도기(Rheometer, CR-500DX-S II, Japan)의 영점을 조정후 30분 이상 항온, 항습 조건에 방치한 건강모발과 탈색모발을 기기에 장착했다. 실험은 총 10회를 실시하고 얻어진 값을 통계처리 했다.

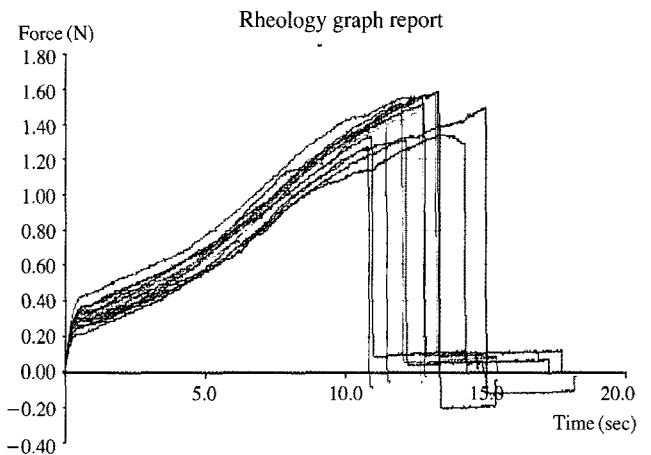


Fig. 1. Stress strain curves of virgin hair. The result of tension tests obtained using 10 measurements of virgin hair samples.

Table 1. Mechanical properties of virgin hair and bleached hairs

Name	Peak stress (g)	Sample height (mm)	Distance (mm)	Tensile energy (erg/cm ²)	Tensile strength (g/cm ²)
Virgin	146.64	1.00	12.29	108.00	14.66
Bleach 1	129.50	1.00	11.48	84.02	12.95
Bleach 2	126.10	1.00	11.66	81.53	12.61
Bleach 3	114.33	1.00	11.50	79.22	11.43

2) 주사전자현미경 관찰

자연모발과 탈색모발의 인장강도를 측정된 후 절단된 모발의 형태적 변화를 관찰하기 위하여 각각의 시료 모발을 적당한 길이로 자른 후 비이커에 넣고 알코올을 채워 넣은 후 초음파세척기(Ultra sonic cleaner, Branson 2510)로 10분간 세척하여 표면의 잔존물을 제거했다. 표면의 잔존물이 모두 제거된 모발을 2.5% paraformaldehyde-glutaraldehyde에서 전고정하였다. 이 때 인산완충용액으로 수회 수세한 다음, 1% OsO₄으로 1시간 후고정 했다. 고정이 끝난 재료는 동일 완충용액으로 수세한 후, 알코올 농도 상승순으로 탈수하여 isoamyl acetate로 치환하고 처리된 재료는 임계점건조기(critical point dryer)에서 완전 건조 시킨 후 세척 건조된 모발을 carbon과 copper tape로 처리된 지지대(stub) 위에 나열했다. 이어서 이온침착기(IB-5 ion coater, Eiko)를 사용하여 20 nm 두께로 백금 도금(platinum coating)한 다음 주사전자현미경(S-4700, Hitachi, Japan)으로 15 kV에서 관

찰했다.

결 과

건강모발과 1회, 2회, 3회 탈색된 모발의 인장력을 인장강도기를 사용하여 측정하였다. Fig. 1은 건강모발의 인장강도를 측정한 그래프이다. 건강모발에서 10개 시료의 전항복부위(pre-yield region)는 2g에서부터 4g의 힘이 가해질 때까지 나타났다. 인장거리는 평균 12.29 mm로 측정되었으며 인장강도는 14.66 g/cm²로 나타났고 최고응력은 146.64 g으로 관찰되었다(Fig. 1, Table 1). 건강모발의 인장강도 실험에서 항복(yield) 그래프 모양은 시료에 따라 큰 차이가 없었으나 끊어지기 직전까지의 거리는 시료별로 차이가 있었는데(Fig. 1), 이는 시료의 굵기가 각각 다른 것이 원인이라

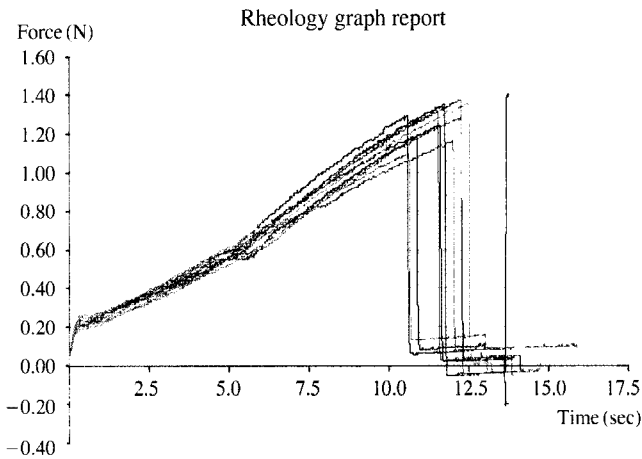


Fig. 2. Stress strain curves of 1 time bleached hair. The result of tension tests obtained using 10 measurements of bleached hair samples.

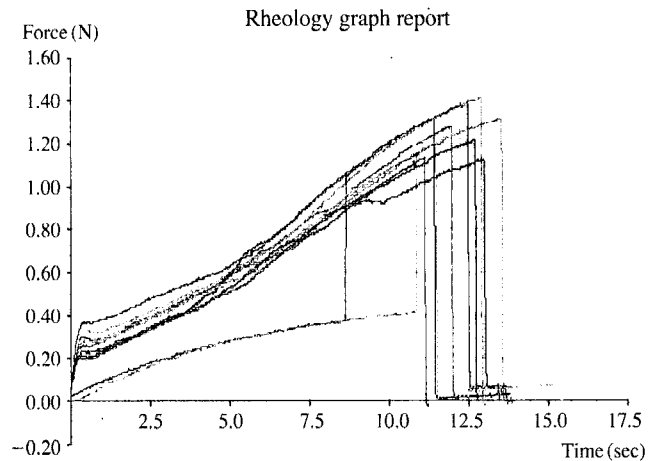


Fig. 4. Stress strain curves of 3 times bleached hair. The result of tension tests obtained using 10 measurements of bleached hair samples.

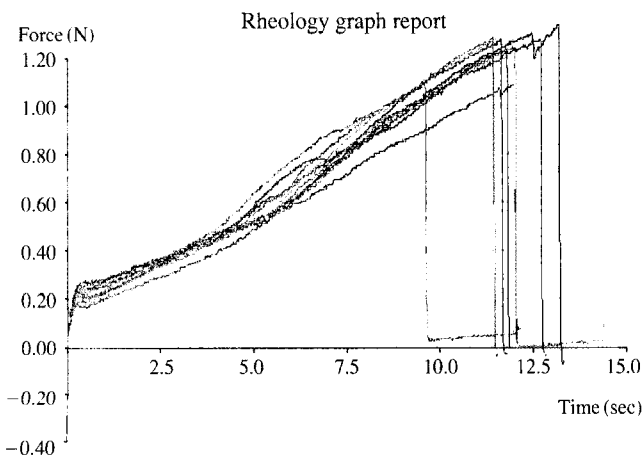


Fig. 3. Stress strain curves of 2 times bleached hair. The result of tension tests obtained using 10 measurements of bleached hair samples.

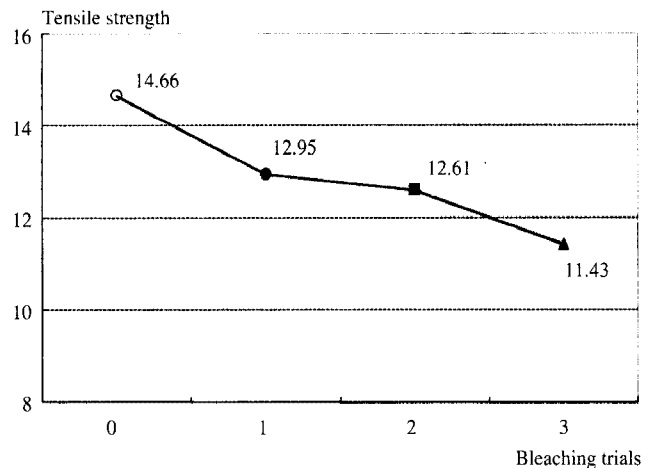


Fig. 5. Average tensile strength after three trials of bleaching. ○ : virgin hair, ● : the first bleached hair, ■ : the second bleached hair, ▲ : the third bleached hair.

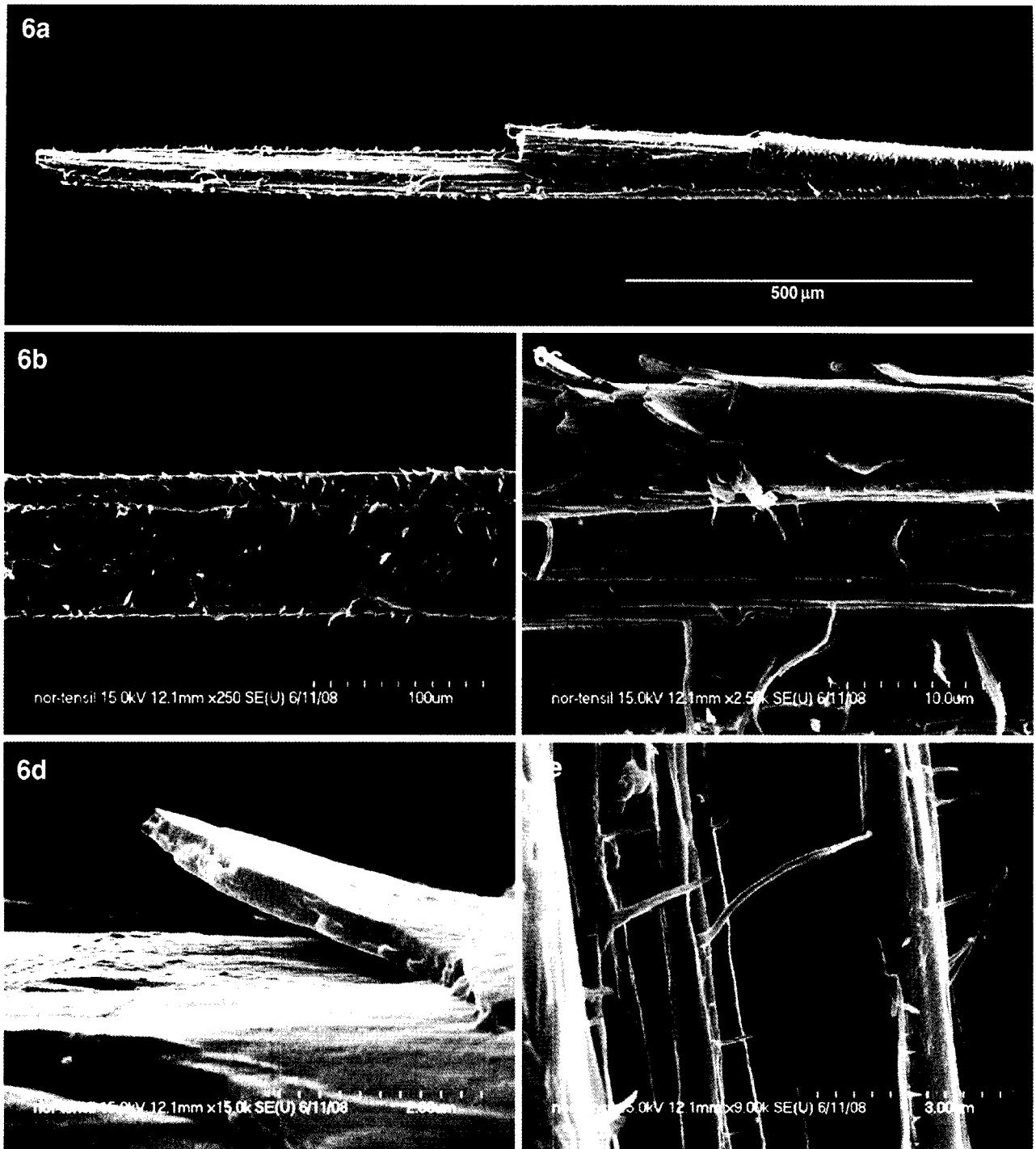


Fig. 6. Scanning electron micrographs show virgin hair after tension test. 6a: Low magnification scanning electron micrograph of fractured virgin hair. 6b: The cuticle and cortex are exposed. 6c: The cuticle lift off is sudden. 6d: High magnification scanning electron micrograph of separated cuticle cell of figure 6c. 6e: Lift off of the macrofibrils in the cortex is seen.

고 추정된다.

탈색 1회 모발의 인장강도 측정 그래프에서 10개의 모발 시료의 전항복부위는 1.8g에서부터 2.8g의 힘이 가해질 때까지 나타났다(Fig. 2). 탈색 1회 모발에서 인장거리는 평균 11.48 mm이었다. 인장강도는 12.95 g/cm²로 나타났고 최고 응력은 146.64 g으로 측정되었다(Table 1). 이와 같은 결과

는 건강모발에 비해서 탈색 1회 모발의 인장강도가 1.71 g/cm² 감소하였고, 최고응력은 17.14 g 감소하였으며, 인장거리는 0.81 mm 감소한 것을 확인할 수 있었다.

탈색 2회 모발의 인장강도 실험 결과 전항복 부위는 탈색 1회 모발과 큰 차이는 없이 관찰되었다(Fig. 3). 탈색 2회 모발에서 인장거리는 평균 11.66 mm이었고 인장강도는

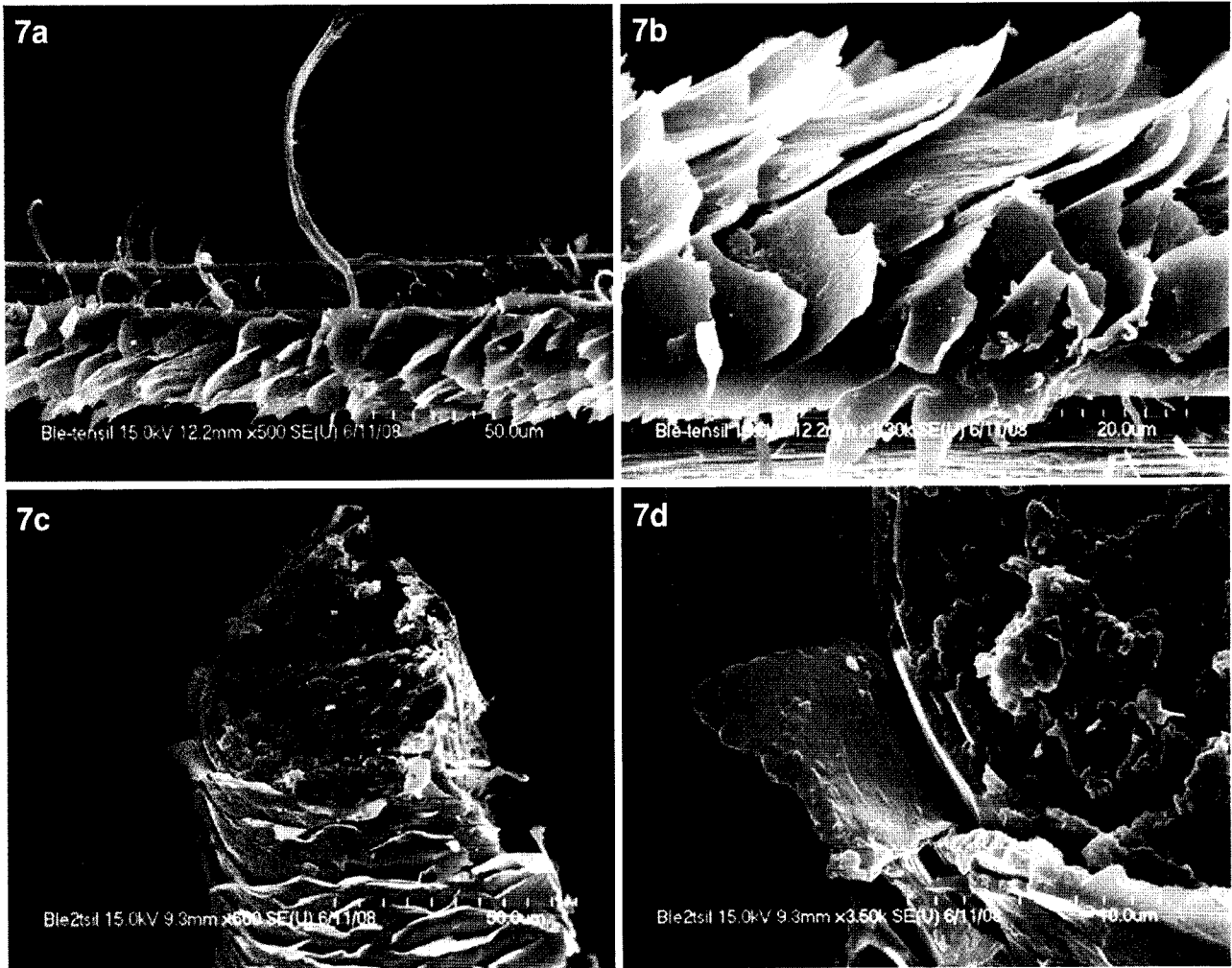


Fig. 7. Scanning electron micrographs show bleached hair after tensile test. 7a: Low magnification scanning electron micrograph of fractured bleached hair. 7b: Both lift-off and cuticle fracture are noticed. 7c: The cross fractured surface by tensile strength. 7d: High magnification scanning electron micrograph of figure 7c shows respectively separated cuticle cells and exposed cortex.

12.61 g/cm²로 나타났으며 최고응력은 126.10 g으로 측정되었다(Table 1). 이와 같은 결과는 건강모발과 탈색 1회 모발에 비해서 탈색 2회 모발의 인장강도가 각각 2.05 g/cm², 0.34 g/cm² 감소하였고, 최고응력은 각각 20.54 g, 3.40 g 감소하였다. 그러나 인장거리는 건강모발에 비하여 0.63 mm 감소하였으나 탈색 1회 모발보다 0.18 mm 증가된 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 3은 탈색 3회 모발의 인장강도를 측정한 그래프이다. 전향복부위는 탈색 1회와 2회를 실시한 모발과 유사한 결과를 나타냈다. 탈색 3회 모발에서 인장거리는 평균 11.50 mm이었고 인장강도는 11.43 g/cm²로 나타났으며 최고응력은 114.33 g으로 측정되었다(Table 1). 이와 같은 결과는 건강모발과 탈색 1회, 탈색 2회 모발에 비해서 탈색 3회 모발의 인장강도가 각각 3.23 g/cm², 1.52 g/cm², 1.18 g/cm² 감소하였고, 최고응력은 각각 32.31 g, 15.17 g, 11.77 g 감소하였다. 또한, 인장거리는 건강모발에 비하여 0.79 mm 감소하였

으나 탈색 1회 모발과 비교하였을 때 0.02 mm 증가되었고, 탈색 2회 모발에 비해서는 0.16 mm 감소된 것을 확인할 수 있었다(Fig. 4, Table 1).

Fig. 5에서 건강모발의 인장강도는 탈색모발보다 높은 것으로 나타났고 탈색 횟수가 증가할수록 인장 강도도 줄어들었다. 탈색 회수를 독립변수로 하고, 인장강도를 종속변수로 하여 선형 회귀식을 구한 결과, Y=14.417-1.003X로 정리되었다. 즉, 탈색 회수 1회에 약 1.003의 인장강도가 줄어드는 결과가 나왔다. p-value는 0.029로 5% 유의 수준에서 회귀식이 유의하였고, 결정계수는 94%로서 해당 회귀식으로 선형 추세가 설명됨을 알 수 있었다(Fig. 5).

건강모발을 인장강도기로 측정한 후 절단된 모발시료 부위를 주사전자현미경으로 관찰하였다(Fig. 6). 건강모발 시료의 절단면은 피질의 중심부위가 두 부분으로 갈라지면서 장작이 쪼개진 것과 같은 모양을 하고 있었으며 한쪽의 절단된 모발에서 노출된 피질의 길이는 약 2.5 mm로 측정되

었다(Fig. 6a, b). 절단된 부위에서 일부 큐티클층이 완전히 떨어져나가 피질의 바깥면이 노출되어 있었다(Fig. 6a). 모발이 신장되면서 큐티클층의 큐티클세포들은 분리가 되면서 모발의 바깥쪽면으로 휘어져 있었으며, 찢어져 노출된 큐티클층은 5개 큐티클세포들로 이루어져 있었다(Fig. 6c). Fig. 6c를 고배율로 확대한 상에서 분리된 큐티클 세포는 세포와 세포 막사이복합체가 분리되면서 떨어져 나간 것을 확인할 수 있었다(Fig. 6d). 피질은 찢어져 노출되면서 각화 세포의 세포질에 존재하는 거대원섬유(microfibril)들이 분리되고 모발의 종축면에 수직에 가까운 상태로 노출되어 있었다(Fig. 6e).

탈색모발을 인장강도기로 측정된 후 절단된 면을 주사전자현미경으로 관찰하였다(Fig. 7). 탈색모발에 인위적으로 인장력을 가한 후 항복점을 지나 부러져 나간 부위는 모발 표면의 큐티클층을 구성하는 큐티클세포가 심하게 분리되어 들떠 있었으며(Fig. 7a, b), 피질은 찢겨져서 거대원섬유들이 분리되어 노출되어 있는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 7a). 또한, 인위적인 힘에 의해서 절단된 모발의 횡단면에서 피질은 미용가위로 잘라낸 것과 같은 모양을 하고 있었고 피질을 둘러싸고 있는 큐티클층은 각각의 큐티클세포들이 분리되어 관찰되었다(Fig. 7c). 큐티클세포의 분리는 큐티클 세포막과 막사이 복합체의 파괴에 의해서 분리되었으며 큐티클세포의 세포질의 파괴에 의한 분리 현상은 관찰되지 않았다(Fig. 7d).

고 찰

현대인의 모발은 빈번한 머리감기나 빗질, 두피 마사지와 같은 기계적인 작용과 펌, 탈색, 염색과 같은 화학적인 작용에 의해서 잡아당기는 힘에 저항하게 된다(Hong et al., 2000; Chang, 2003; Chang & Lee, 2006; Chang et al., 2006).

모발의 인장강도는 인종에 따라 차이가 있다. 인장강도는 모발의 굵기나 길이 단면의 모양과 꼬임 정도에 따라 차이가 있다. 흑인종 모발의 응력과 인장력은 백인종이나 황인종의 모발 보다 낮다. 흑인종의 모발이 인장강도가 적은 것은 모발의 기계적인 특성, 즉, 모발의 장축을 따라 심하게 꼬여 있는 모양이나 모발 표면의 미세한 균열 및 부서짐에 의한 것으로 보고하였다(Franbourg et al., 2003).

모발을 인위적으로 잡아당기게 되면 인장곡선은 뚜렷하게 3개의 부위, 즉 전항복부위, 후항복부위, 절단부위로 나타난다. 전항복부위(pre-yield region)에서 응력과 인장력은 정비례하여 작용하는데, 이 부위에서 잡아당김에 대한 알파케라틴(α -keratin) 단백질의 일정한 반응이 나타난다. 저항력은 안정화된 케라틴단백질의 알파나선구조가 인장력에 의해서 수소결합이 파괴되어 변화되는 시점 사이에서 나타난

다. 이런 항복부위(yield region)는 알파케라틴 단백질의 알파구조가 베타구조로 변하게 되고 베타구조는 다시 잡아당김에 저항한다.

후항복부위에서 응력은 모발이 끊어질 때까지 인장력과 함께 다시 증가한다. 케라틴단백질이 알파구조에서 베타구조로의 변화는 모발의 인장 시험에서 유일하게 나타난다. 전형적으로 전항복은 5%의 인장력이 작용할 때 시작되고 후항복은 약 15%의 인장력에서 나타난다(Seshadri & Bhushan, 2008).

본 연구에서 건강모발의 전항복부위는 Seshadri & Bhushan(2008)의 보고와 같이 인장력이 약 4g 작용할 때 나타났고 탈색모발은 인장력이 2.8g 작용할 때 나타났었다. 이와 같은 결과는 모발이 신장되었다가 자극이 소멸되면 원래상태로 돌아올 수 있는 최소한의 인장력을 의미하는데 탈색모발이 건강모발보다 전항복 부위의 인장강도가 1.2g 정도 감소한 것을 확인하였다.

건조된 상태에서 모발의 인장특성은 피질에 의해서 좌우된다. Robbins(2002)의 보고에 의하면 모발을 dipicrisophthalic acid 로 산화시키면 모발의 큐티클층이 완전히 제거되는데 피질만 남은 상태에서 정상모발과의 인장특성을 비교해보았을 때 어떠한 변화도 관찰할 수 없었다. 모발의 큐티클층에 주로 존재하는 케라틴 단백질에서 cystine이 cysteric acid 잔기로 산화가 일어나고 이황화결합이 끊어지게 된다. 이황화결합은 모발이 건조한 상태에서 인장강도에 영향을 미치지 못한다.

본 연구에서 인장력에 의해서 절단된 건강모발과 탈색모발을 주사전자현미경으로 관찰한 결과 모발 표면의 큐티클층의 큐티클세포들이 분리되어 들떠 있는 것을 확인하였다.

큐티클세포는 납작하고 장방형의 얇은 판의 형태로 두께는 0.5 μm 이고 길이는 50 μm 이며 작은 층판구조(lamellar structure)로 되어 있다. 큐티클세포의 여러층들은 cystine 성분의 함량에 차이가 있는데, 이것은 모발의 물리적 강도에 영향을 주게 된다. 표면큐티클과 외큐티클은 cystine 성분을 많이 가지고 있어서 견고하지만, 내큐티클과 세포막사이복합체(cell membrane complex)는 cystine의 양이 적어서 비교적 쉽게 신장된다.

큐티클층의 가장 안쪽 부위에 있는 큐티클세포는 피질에 견고하게 부착되어 있고 바깥쪽 부위의 큐티클세포의 일부는 모발의 장축방향으로 돌출되어 있다(Lee & Chang, 2005). 큐티클세포들이 일부 표면에 돌출되어 견고하게 붙어 있는 것은 모발을 인위적으로 잡아당겼을 때 개개의 큐티클세포가 힘을 분산시키는 역할을 하고 끊어지게 되면 큐티클세포들이 바깥쪽 방향으로 휘어지게 된다.

본 연구의 인장강도 실험결과에 대한 주사전자현미경 관찰에서 탈색모발 표면의 큐티클세포는 건강모발의 큐티클세포보다 더 많이 바깥쪽으로 분리되어 휘어져 있었다. 이

와 같은 결과는 강알카리 성분이 함유된 탈색제가 탈색 모발의 세포막사이 복합체의 화학변화를 야기시키고 지질성분의 용출을 촉진시켜서 탈색모발의 큐티클세포가 바깥쪽 방향으로 둥글게 휘어지는 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- Bolduc C, Shapiro J: Hair care products (waving, straightening, conditioning, and coloring). *Clinic Dermatol* 19 : 431-436, 2001.
- Chang BS: Fine structure of damaged hair shaft by daily treatment of heat for a beautiful face. *Korean J Electron Microscopy* 33 : 215-222, 2003. (Korean)
- Chang BS, Lee GY: Ultrastructural changes of hair treated with bleaching agent. *Korean J electron Microscopy* 36 : 25-33, 2006. (Korean)
- Chang BS, Na SK, Lee GY: Study on the physicochemical change of human hair shaft following radiation with ultraviolet. *Korean J Electron Microscopy* 36 : 109-118, 2006. (Korean)
- Draeos ZK: Hair cosmetics. *Dermatol Clin* 9 : 19-27, 1991.
- Franbourg A, Hallegot P, Baltenneck F, Toutain C, Leroy F: Current research on ethnic hair. *J Am Acad Dermatol* 48 : 115-119, 2003.
- Hearle JWS: A critical review of structural mechanics of wool and hair fibers. *Int J Biol Macromol* 27 : 123-138, 2000.
- Hong WS, Chang BS, Lim DS, Park SO, Yoe SM: Morphological change of men's hair shaft by weathering. *Korean J Electron Microscopy* 30 : 11-20, 2000. (Korean)
- Kamath YK, Hornby SB, Weigmann HD: Mechanical and fractographic behavior of negroid hair. *J Soc Cosmet Chem* 35 : 21-43, 1984.
- Lee GY, Chang BS: Studies on the preservative condition and the ultrastructure of hair of newly found sixteenth century mummy in Paju. *Korean J Electron Microscopy* 35 : 211-218, 2005. (Korean)
- Robbins CR: Chemical and physical behavior of human hair. Springer-Verlag, New York, pp. 311-344, 2002.
- Seshadri IP, Bhushan B: In situ tensile deformation characterization of human hair with atomic force microscopy. *Acta Materialia* 56 : 774-781, 2008a.
- Seshadri IP, Bhushan B: Effect of ethnicity and treatments on in situ tensile response and morphological changes of human hair characterized by atomic force microscopy. *Acta Materialia* in press, 2008b. www.sciencedirect.com
- Syed A, Kuhajda A, Ayoub H, Ahmad K, Frank EM: African-American hair: Its physical properties and differences relative to Caucasian hair. *Cosmet Toil* 110 : 39-48, 1995.
- Wall RA, Hunter LD: Normal adult hair structure and properties. *Cosmet Perf* 89 : 31-36, 1974.
- Wilk KE, James VJ, Amemiya Y: The intermediate filament structure of human hair. *Biochim Biophys Acta* 1245 : 392-396, 1995.
- Wolfram LJ: Human hair: A unique physicochemical composite. *J Am Acad Dermatol* 48 : 106-114, 2003.

< 국문초록 >

본 연구는 탈색회수에 따른 모발의 인장강도 변화를 측정하여 건강모발과 비교하였으며, 인장시험 결과 절단된 모발의 단면을 주사전자현미경을 사용하여 형태학적 변화 양상을 관찰하였다. 인장시험에서 건강모발은 인장강도가 14.66 g/cm²으로 측정되었고, 탈색 1회, 2회, 3회 모발은 각각 12.95 g/cm², 12.61 g/cm², 11.43 g/cm²으로 나타났다. 결국 탈색모발은 탈색 횟수가 증가할수록 인장강도가 감소하였다. 건강모발과 탈색모발의 인장강도 시험 후 절단된 모발 단면의 주사전자현미경 관찰에서 건강모발은 표면의 큐티클세포들이 들떠서 분리되어 있었으며, 탈색모발의 표면은 건강모발의 표면보다 더 심하게 큐티클세포들이 분리되어 있었다. 탈색모발의 큐티클세포들은 모발표면의 바깥쪽으로 심하게 휘어져 분리되어 있었다. 큐티클세포의 분리는 세포막사이 복합체의 파괴에 의해서 일어났으며 큐티클세포의 세포질의 일부인 내큐티클의 파괴에 의한 분리는 일어나지 않았다.