

매장 후 사람머리털의 풍화과정에 따른 미네랄 변화에 대한 연구

김원규¹ · 김정래² · 남용석³
심윤택⁴ · 황규성⁵

¹한양대학교 의과대학 해부 및
세포생물학과

²울지대학교 보건과학대학
의료공학과

³가톨릭대학교 의과대학
해부학교실 및 응용해부연구소

⁴국립과학수사연구원 법의학부
법의학과

⁵울지대학교 보건산업대학
장례지도학과

접 수 : 2013년 7월 26일
수 정 : 2013년 8월 12일
게재승인 : 2013년 8월 23일

책임저자 : 황규성
(461-713) 경기도 성남시 수정구 양지동
212번지, 울지대학교 보건산업대학 장례
지도학과
전화 : +82-31-740-7224
FAX : +82-31-740-7364
E-mail : hks@eulji.ac.kr

서 론

풍화(weathering)란 지속적인 물리·화학적 환경요인에 의
해 털줄기(hair shaft)의 외부를 둘러싸고 있는 털겍질(hair
cuticle)이 손상되는 현상이다. 특히 머리털은 매장 후 토양 환

A Study on Mineral Changes on the Weathering Human Hair after Burial using EDX

Won Kyu Kim¹, Jeong Lae Kim², Yong Seok Nam³, Yun Teak Shim⁴,
Kyu-Sung Hwang⁵

¹Department of Anatomy and Cell Biology, College of Medicine, Hanyang University, Seoul,
Korea

²Department of Biomedical Engineering, College of Health Science, Eulji University,
Seongnam-si, Gyeonggi, Korea

³Department of Anatomy, Catholic Institute for Applied Anatomy, College of Medicine,
Catholic University, Seoul, Korea

⁴Division of Forensic Medicine, National Forensic Service, Seoul, Korea

⁵Department of Funeral Science, College of Health Industry, Eulji University, Seongnam-si,
Gyeonggi, Korea

This study was undertaken to investigate mineral changes in weathered scalp hair after burial. EDX (energy dispersive X-ray spectroscopy) analysis was performed to measure the presence of minerals on the hair surface. Twelve scalp hairs, buried for 5–40 years, were chosen from deceased individuals buried in tombs in Soha-Ri, Kyonggi-Do, and other regions in Korea. Three normal hairs were used as the control group. EDX data showed that carbon, oxygen, and sulfur were detected in hair collected from all three burial grounds. In contrast, calcium was only detected in hair collected from tombs in Soha-ri. The amounts of calcium and sulfur were found to decrease with time for hair collected from tombs in Soha-ri. Similar results were observed with sodium for hair collected from other regions. These results show region specific mineral detection and a decrease in the concentration of minerals with time. Consequently, it is suggested that changes in minerals concentration in weathered hair could be used as basic data in the field of forensic medicine.

Key Words : Weathering, Human scalp hair, Minerals,
Energy dispersive X-ray spectroscopy, Forensic science

경 등에 의해 지속적인 풍화과정을 겪게 되며, 시간경과에 따
른 머리털의 풍화과정은 시신의 매장 시기 등을 판별하는 법의
학적 및 문화인류학적으로 매우 중요한 연구 재료이다. 머리털
은 매장 후에도 풍화에 대한 저항성이 높아 토양 내에 오래 잔
류하여 쉽게 채취할 수 있고 실온에서도 보존이 쉬우며 소량으
로도 여러 가지 화학적 및 생물학적 검사를 할 수 있기 때문에

www.kci.go.kr

유용한 법의학적으로 사용되고 있다.^{1,2)}

매장된 머리털에 대한 연구는 재료의 한계성과 제한성 때문에 미라에서 한정적으로 연구되어 왔다. Bradford 대학 등에서는 매장 후 머리털의 연속적인 변화에 대해 연구하고자 사람의 머리털과 조직학적으로 유사한 돼지 털을 대상으로 연구하였으나 이는 매장 후 발생하는 사람 머리털의 풍화라 보기는 힘들다.³⁾ 그러나 최근 매장 후 머리털의 풍화현상에 대한 연구가 시도되고 있고,⁴⁾ 시간 경과에 따른 머리털의 풍화과정을 주사전자현미경과 투과전자현미경으로 관찰하고 있다.^{5,6)}

풍화에 의해 머리털에서는 변색과 탈색이 일어나고, 약하고 부서지기 쉬운 머리끝과 거친 느낌, 인장력 감소 등이 관찰되며, 이것은 시스틴(cystine) 단백질의 화학적 손상에 기인한다.⁷⁾ 이러한 풍화작용의 결과 매장 후 털겉질 손상에 의해 털겉질(hair cortex)이 점차 노출되고 털겉질 손상 부위에 주변의 금속이온들이 결합한다.⁸⁾ 미라에서 채취한 머리털 표면에는 주로 칼슘(Ca)과 칼륨(K) 등의 무기질이 관찰된다.⁹⁾ 고대 미라의 머리털 표면을 ToF-SIMS (Time-of-Flight Secondary Ion Mass Spectrometry)를 이용하여 칼슘 분포도를 분석한 결과 털겉질과 털속질(hair medulla)에 칼슘이 높게 분포되어 있고, 특히 내소피(endocuticle), 멜라닌 과립(melanin granule), 핵분절(nuclear fragment) 및 머리털 단백질에서 칼슘 친화도가 높게 나타난다.¹⁰⁾ 그러나 이러한 연구는 특정한 지역과 환경적 특이성을 갖고 있는 미라를 대상으로 하였기 때문에 매장 후 시간 경과에 따른 머리털의 손상과 이에 의한 미네랄의 연속적인 변화에 대한 연구라고 보기 힘들다.

본 연구에서는 EDX (energy dispersive X-ray spectrometry)를 이용하여 동일지역에서 매장 후 풍화에 따른 시신 머리털의 잔존 미네랄 변화를 정상 생체 머리털과 비교 분석하고, 비슷한 매장 기간을 가진 다른 지역의 머리털과 비교함으로써 매장 경과시간에 따른 풍화에 의한 머리털 외부의 미네랄 변화 양상을 분석하여 법의학적으로 기초자료를 제공하고 자 한다.

재료 및 방법

1. 머리털 수집

2005년부터 2011년까지 경기도 광명시 소하리 소재 공동묘지에서 채취한 머리털을 동일지역으로, 이 외 국내에 분산되어 있는 무덤에서 나온 머리털을 기타지역으로 구분하여 수집하였다. 일반적 매장방식의 한국형 봉분 내 목관에 안치된 시신을 대상으로 사망 일자, 사망 당시 나이와 매장 후 시간 경과 등이 명확한 머리털만을 수집하였으며, 반드시 유가족에게 머리털 채취 승낙을 얻은 후 수집하였고, 무연고 등 정보가 명확하지 않은 머리털은 제외하였다.

무덤의 형태는 일반적 한국형 봉분을 가진 형태로 시신은 대부분 오동나무 재질의 관에 넣어져 지하 1~2 m 아래에 있었으며, 머리털의 자연적인 풍화현상은 오직 무덤 주변의 환경에 의해서만 일어난 것임을 확인하였다. 육안으로 머리뼈(skull)에 부착되어 있는 머리털을 확인하여 채취하였으며, 육안으로 구별할 수 없을 경우에는 머리뼈 주위의 토양을 채집한 후 채로 걸러 수집하였다. 수집한 머리털 중 형태가 육안적으로 구별이 가능한 소하리 공동묘지 6구, 기타지역 6구, 총 12구의 머리털을 선정하여 조사하였다(Table 1).

채취된 머리털은 습도 등에 의한 머리털의 부패를 방지하기 위하여 수집 즉시 드라이아이스 상자를 이용하여 냉동 보관하였다.³⁾

2. 머리털의 분류

연구에 사용된 머리털은 정상 성체의 머리털을 정상대조군으로, 매장 머리털을 실험군으로 구분하였으며, 수집 장소에 따라 동일지역(소하리)과 기타 지역으로 분류하였다. 매장 후 10년 단위(~10년, 11~20년, 21~30년, 31~40년)로 머리털의 풍화양상을 관찰하였다(Table 1).

3. EDX 관찰

발굴현장에서 바로 채취한 머리털의 표면에 부착된 물질과 머리털 표면구조를 각각 관찰하기 위해서 채취 후 전처리 과정을 거치지 않은 시신 머리털과 정상 머리털을 실험재료로 사용하였다. 각각의 시료를 2.5% glutaraldehyde - 4% paraformaldehyde (4°C, PBS, pH 7.4)로 2시간 동안 고정하고, 인산완충용액(4°C, 0.1M PBS, pH 7.4)으로 15분씩 3회 세척한 다음, 1% osmic acid (4°C, PBS)로 1시간 동안 고정하였다. 고정이 끝난 시료는 동일한 인산완충용액으로 15분씩 3회 세척한 다음, 에탄올 농도상승 순으로 탈수하여 isoamyl acetate로 치환하였다. 처리된 시료는 임계점 건조기(critical point dryer, SCP-II Hitachi, Japan)에서 건조시킨 후, 이온 침착기(ion coater, E-1030, Hitachi, Japan)를 사용하여 20 nm 두께로 금도금(gold coating)한 다음 에너지분산분광분석기(Energy dispersive X-ray spectrometry, INCA, Oxford Ins., Great Britain)를 사용하여 가속전압 15 kV에서 확인하였다.

실험결과

1. EDX 분석 결과

1) 정상대조군(정상 성인 머리털)

정상인 머리털 표면을 EDX를 사용하여 분석한 결과, 탄소

(67%), 산소(22%), 황(11%)의 성분이 검출되었고, 나트륨이나 칼슘 등 다른 성분은 검출되지 않았다(Table 2).

2) 실험군(동일지역 : 소하리)

매장 후 채취한 머리털의 육안적 검사에서 머리털의 표면에는 많은 무기질이 침착되어 있었다. 머리털 표면의 biogen을 최대한 보존하기 위해 채취한 상태에서 특별한 처리 없이 EDX로 머리털 표면에 부착되어있는 결정체를 분석한 결과 탄소, 산소, 황, 나트륨, 칼슘, 마그네슘, 철, 알루미늄 및 인 등 다양한 성분의 미네랄이 검출되었다. 이 중 탄소, 산소, 황, 나트륨, 칼슘 및 알루미늄은 매장 기간과 관계없이 모든 예에서 검출되었다. 또한, 탄소와 황은 매장 기간이 길어짐에 따라 감소하였다. 특히 매장 후 21~30년 경과군과 31~40년 경과군에서는 20년 이하 경과군에 비해 검사를 시행한 거의 모든 종류의 무기물이 관찰되었다(Table 2).

3) 실험군(기타지역)

기타 지역에서는 탄소, 산소, 황, 나트륨, 알루미늄이 매장 기간과 관계없이 모두 검출되었고, 동일지역과 달리 21~30년 경과군에서 칼슘은 검출되지 않았다. 나트륨은 매장 기간이 길어짐에 따라 점차 감소하였으나, 다른 무기질은 매장 기간에 따른 규칙적인 변화를 나타내지 않았다. 매장 후 10년 이하 경과군에서는 마그네슘, 철 및 칼륨을 제외한 모든 무기질이 검출되었고, 31~40년 경과군에서는 특징적으로 칼륨이 검출되었다. 또

한, 11~20년 경과군과 21~30년 경과군에서는 검출되는 무기질의 종류가 다른 경과군에 비해 적게 관찰되었다(Table 2).

고 찰

머리털의 풍화과정에 대한 연구는 광학현미경이나 주사전자현미경을 통한 형태학적 변화를 관찰한 것이 대부분이며, 머리털은 단단하고 건조한 구조로 이루어져 있기 때문에 주사전자현미경적 연구방법이 더욱 효과적이다.¹¹⁾ 개인에 따라 머리털은 다양한 변이를 나타내므로,^{12, 13)} 머리털의 형태에 따른 이상과 각각의 형태학적 특징을 주사전자현미경을 통해 분류하고,¹⁴⁾ 동일 지역에 매장된 시신에서 매장시기에 따라 채취한 머리털의 형태학적 변화를 주사전자현미경과 투과전자현미경으로 분석한 보고가 있다.^{5, 6)} 머리털의 풍화과정을 주사전자현미경으로 관찰하면 털줄기의 외부를 둘러싸고 있는 털껍질 세포의 가장자리가 조금씩 깎여나가고, 털줄기의 먼 쪽부터 발생하는 국소적인 털껍질 손실은 세로틈새(longitudinal fissuring)를 일으켜 결국에는 손상된 부분이 부러지게 된다.¹⁴⁻¹⁶⁾

미라를 이용한 연구에서 자연 풍화과정에 따른 머리털의 부패원인, 머리털 채취 시 주의점, 토양 내 미네랄이 머리털에 미치는 영향 등 자연 매장상태에서 머리털의 손상 기전에 대한 연구가 시도되고 있다.¹⁷⁾ 토양 환경이 머리털의 부패에 미치는 영향에 대해 연구한 결과에 의하면, 습도가 머리털 변성에 중요한 역할을 하기 때문에 채취한 머리털을 건조시키거나 즉시

Table 1. Classification of Hair Groups according to Duration of Burial

Burial period (years)	Area		Total	Percentage (%)
	Soha-Ri	The others		
~ 10	1	1	2	15.4
11~20	2	2	4	30.8
21~30	2	1	3	23.0
31~40	1	2	3	23.0
Total	6	6	12	100

Table 2. Data of EDX of Hair according to Duration of Burial

Area	Burial period (years)	Minerals (weight, %)									
		C	O	S	Na	Ca	Mg	Fe	Al	P	K
Control	0	67.04	22.28	10.67							
Soha-Ri	~ 10	58.87	28.95	9.56	2.05	1.26			0.42		
	11~20	57.58	32.58	6.07	3.25	0.48				0.42	
	21~30	54.38	32.67	6.85	2.27	0.93		0.94	2.28	1.26	
	31~40	47.20	37.43	5.38	3.03	0.75	0.28	1.74	2.28		
The others	~ 10	56.11	35.01	4.60	2.31	0.50			0.57	2.39	
	11~20	60.21	30.85	6.94	1.47	0.54					
	21~30	57.06	30.48	9.91	1.46				0.85		
	31~40	52.46	31.54	7.52	1.04	0.41		1.15	4.61		1.54

냉동시켜야 한다.³⁾ 또한 미라 머리털 관찰 시, 외부 오염물에 의한 영향을 배제하기 위하여 머리털을 과도하게 세척하면 얻고자 하는 biogen이 제거될 수도 있다.⁸⁾ 고대 미라 머리털 표면에 부착된 여러 성분을 ToF-SIMS를 이용하여 분석한 연구에 의하면 머리털 털겉질과 털속질에 칼슘이 높게 분포되어 있고, 현대인과 미라 머리털의 원소를 비교한 결과, 외부물질이 머리

털 기질내부로는 통과할 수 없다는 것이 입증되었다.^{8, 10)} 또한 미라 머리털을 EDX를 통해 분석한 결과, 머리털 표면에 침착된 물질은 주로 칼슘과 칼륨 등이 주성분인 무기물이다.⁹⁾ 그러나 본 연구에서는 기타 지역 31~40년 경과군에서만 칼륨이 검출되어 선행연구와 다른 결과를 보였다. 한편 micro-PIXE (particle-induced X-ray emission)를 이용한 연구에서 정상

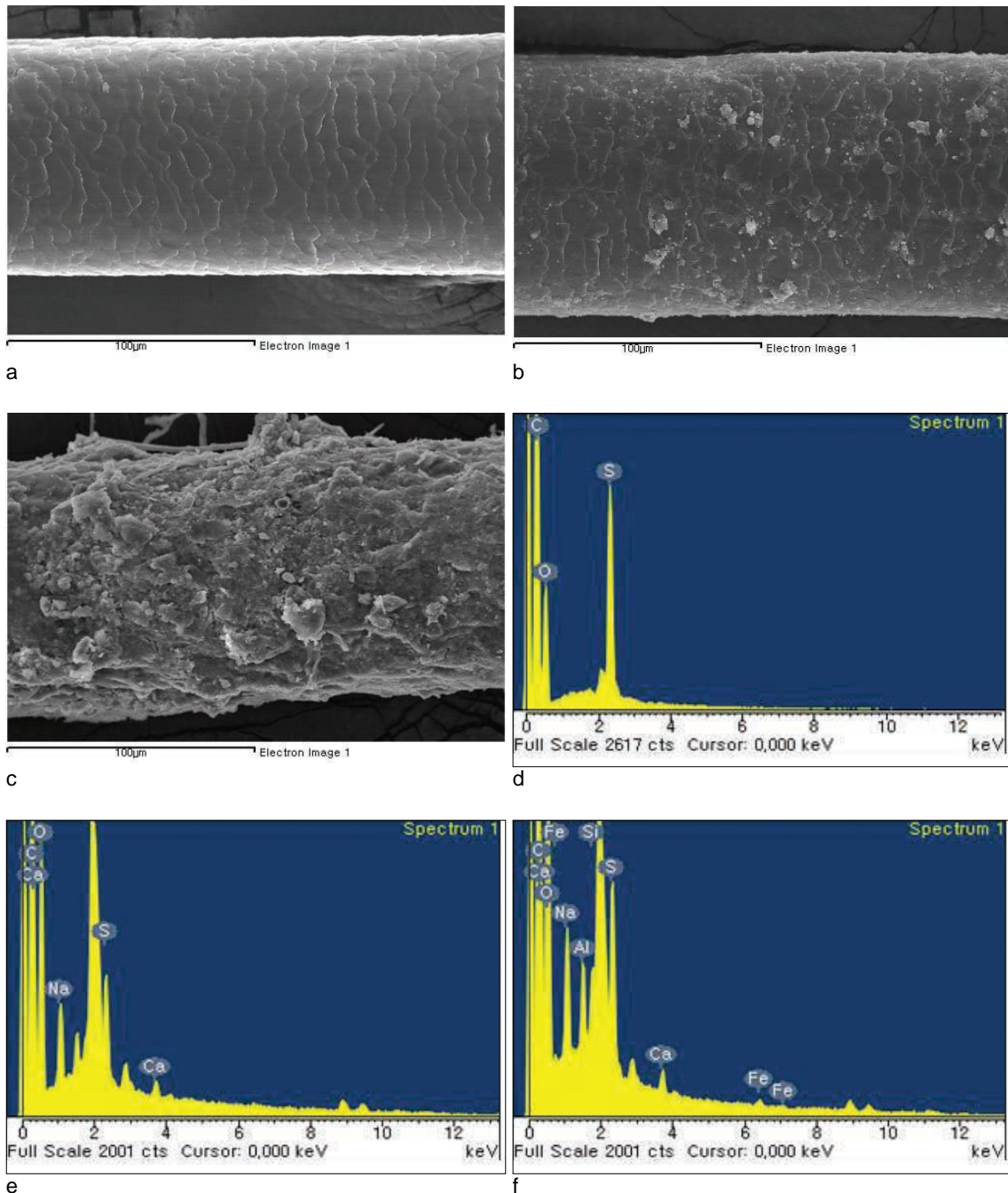


Fig. 1. SEM images of the surface and typical EDX analysis spectra are shown. The morphological changes in weathering hair shafts are investigated by SEM (control hair (a), ≤ 10 years after burial (b) and ≥ 30 years after burial (c)). EDX to analyze the material found in the surface of the control hair (d), ≤ 10 years after burial (e) and ≥ 30 years after burial (f).

C (Carbon), O (Oxygen), S (Sulfur), Na (Sodium), Ca (Calcium), Al (Aluminium) and Fe (iron).

머리털의 외·내모낭초에는 많은 양의 인이, 털줄기에는 황이 주로 분포하고 있고,¹⁸⁾ 미라의 머리털에서는 대부분의 주요 원소들은 현대인과 유사하지만, 마그네슘과 스트론튬은 현대인이 다소 높게 나타난다.¹⁷⁾

본 연구에서 대조군으로서 정상인 머리털에서는 탄소, 산소, 황이 매우 높게 관찰되었다. 이러한 결과는 황 성분이 높게 검출된다는 기존 연구결과와 일치하며,¹⁸⁾ 이는 outer A-layer에 존재하는 많은 양의 시스틴 결합(이황화 결합)에 의한 것으로 추측된다.

한편 매장 기간에 따라 머리털 표면에서 관찰되는 2가 이상 미네랄(Ca, Fe, Al 등)의 종류가 증가하였고, 이러한 현상은 매장 후 털겉질 손상에 따라 털속질이 점차 노출되고 노출된 털속질 부위에 주변의 금속이온들이 결합하여 나타나는 현상으로 생각된다.⁸⁾ 선행 연구에서 매장 후 시간 경과에 따라 털겉질 손상이 심화되어 칼슘의 유의한 증가 양상이 나타난다고 하였으나, 본 연구에서는 매장 시간 경과에 따라 칼슘 축적이 감소하는 선행 연구와 상반되는 결과를 보였다.¹⁰⁾ 나트륨은 매장 후 시간 경과에 상관없이 지속적으로 일정한 비율(2~4%)로 검출되었다. 미라에서 채취한 머리털 표면에서는 주로 칼슘과 칼륨이 관찰되며 이는 매장 시 관 주변을 회벽으로 둘러 매장 후 시간이 경과함에 따라 회벽의 석회질이 녹아들어 나타나는 현상으로 볼 수 있다.⁹⁾ 그러나 본 연구와 같이 자연 매장된 경우 칼슘은 매장 후 시간 경과에 상관없이 동일지역 및 기타지역 모두에서 고르게 검출되어 매장경과시간에 따른 증가는 관찰할 수 없었으며, 칼륨은 머리털 표면에서 거의 관찰되지 않았다. 특이하게 매장 후 31~40년 동일 지역군에서 채취한 머리털 표면에서는 2가 이상 미네랄의 종류가 30년 이하군(2종류)에 비해 증가(4종류, Ca, Fe, Al, Mg)되어 있었다. 이러한 결과는 머리털 내부로 주변의 알루미늄이나 철이 통과할 수 없다는 선행 연구결과¹⁰⁾를 고찰할 때, 털겉질에 존재하는 미네랄이 머리털 표면에서 풍화에 의해 노출되어 검출된 것이 아닌 주변 토양에 있는 미네랄이 머리털에 침착되어 관찰된 결과라고 결론 내릴 수 있었다.

이상의 결과를 종합하면 매장된 머리털은 시간이 경과함에 따라 풍화에 따라 구조적 및 형태학적으로 손상이 일어나고 손상된 머리털에 주변의 금속물질이 결합한다는 것을 관찰할 수 있었다. 그러나 본 연구는 머리털만을 분석한 결과이므로 토양을 같이 분석하여 상관관계를 추적할 필요가 있다고 생각된다. 본 연구의 결과는 머리털을 통한 매장 후 시간 경과를 추정할 수 있는 법의학적 기초자료로 유용하게 활용될 수 있을 것으로 생각한다.

참 고 문 헌

1. Amory S, Keyser-Tracqui C, Crubezy E, et al. Multi-sub-

- strata analysis on Siberian mummies: a different way for validation in ancient DNA Studies? *Int Congr Ser* 2006;1288:834-6.
2. Daniel CR 3rd, Piraccini BM, Tosti A. The nail and hair in forensic science. *J Am Acad Dermatol* 2004;50:258-61.
3. Wilson AS, Dixon RA, Dodson HI, et al. Yesterday's hair-human hair in archaeology. *Biologist (London)* 2001;48:213-7.
4. Chang BS, Uhm CS, Park CH, et al. Ultramicroscopic study on the hair of newly found 15th century mummy in Daejeon, Korea. *Ann Anat* 2006;188:439-45.
5. Hwang KS, Nam YS, Kim JL, et al. TEM Observation on the weathering human scalp hair after burial. *Korean J Phys Anthropol* 2012;25:1-10.
6. Hwang KS, Lim DS, Ahn DC, et al. SEM observation on the weathering human hair after burial. *Korean J Phys Anthropol* 2008;21:181-90.
7. Ratnapandian S, Warner SB, Kamath YK. Photodegradation of human hair. *J Cosmet Sci* 1998;49:309-20.
8. Kempson IM, Skinner WM, Kirkbride PK, et al. Time-of-flight secondary ion mass spectrometry analysis of hair from archaeological remains. *Eur J Mass Spectrom* 2003;9:589-97.
9. 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* 2005;35:211-8.
10. Kempson IM, Skinner WM, Kirkbride PK. Calcium distributions in human hair by ToF-SIMS. *Biochim Biophys Acta* 2003;1624:1-5.
11. Dawber R, Comaish S. Scanning electron microscopy of normal and abnormal hair shafts. *Arch Dermatol* 1970;101:315-22.
12. Giehl KA, Ferguson DJ, Dawber RP, et al. Update on detection, morphology and fragility in pili annulati in three kindreds. *J Eur Acad Dermatol Venereol* 2004;18:654-8.
13. Venning VA, Dawber RP, Ferguson DJ, et al. Weathering of hair in trichothiodystrophy. *Br J Dermatol* 1986;114:591-5.
14. Whiting DA. Structural abnormalities of the hair shaft. *J Am Acad Dermatol* 1987;16:1-25.
15. Rook A. The clinical importance of 'weathering' in human hair. *Br J Dermatol* 1976;95:111-2.
16. Scanavez C, Silveria M, Joekes I. Human hair: color changes caused by daily care damage on ultra-structure. *Colloids Surf B Biointerfaces* 2003;28:39-52.
17. Du AY, Mangelson NF, Rees LB, et al. PIXE elemental analysis of South American mummy hair. *Nucl Instrum Methods Phys Res B* 1996;109/110:673-6.
18. Moretto P, Surleve-Bazeille JE, Licu D, et al. Microanalysis of the human skin structure: preliminary results. *Nucl Instrum Methods Phys Res B* 1999;158:386-92.