

## 매장 후 사람 머리털의 풍화과정에 대한 투과전자현미경적 연구

황규성, 남용석<sup>1</sup>, 김정래<sup>2</sup>, 서윤경<sup>3</sup>, 백두진<sup>3</sup>

을지대학교 보건산업대학 장례지도학과, <sup>1</sup>가톨릭대학교 의과대학 해부학교실 · 응용해부연구소,

<sup>2</sup>을지대학교 보건과학대학 의료공학과, <sup>3</sup>한양대학교 의과대학 해부 · 세포생물학교실

(2011년 11월 18일 접수, 2011년 12월 19일 수정접수, 2012년 1월 20일 게재승인)

**간추림** : 본 연구는 매장 후 풍화작용으로 머리털에서 나타나는 형태학적 변화를 시간경과에 따라 투과전자현미경을 통해 관찰하고 법의학적 기초자료로 제공하기 위하여 실시하였다.

사용된 머리털은 정상대조군으로 정상인의 머리털과 실험군인 매장 머리털로 구분하고, 총 51구의 머리털을 대상으로 매장 후 시간경과에 따라 10년 단위로 분류하여 관찰하였다. 실험군은 사망 나이 및 시간경과가 명확히 밝혀진 봉분에서 이장 · 개장시 유가족의 동의를 받아 현장에서 수집한 머리털을 비교 · 분석하였다.

매장 후 풍화된 머리털에서는 털껍질의 연속적 탈락, 털겉질내 거대원섬유 막의 응집현상 심화, 털겉질 내 공동화 현상이 시간경과에 따라 심화되었으며, 시간경과에 따른 머리털의 형태학적 변화양상은 유사하였다.

본 연구의 결과는 법의학적 자료로 유용하게 사용될 것으로 생각된다.

**찾아보기 낱말** : 풍화, 사람 머리털, 매장, 투과전자현미경, 법의학

### 서 론

머리털은 인체 조직 중에서 빠와 치아 다음으로 생물학적 분해가 서서히 진행되는 조직으로 머리털 내에 수 많은 화학적 및 생물학적 성분을 오랫동안 저장할 수 있고, 쉽게 채취할 수 있으며, 실온에서도 보존이 쉽고 소량으로 다양한 분석이 가능하여 중요한 법의학적 자료로 사용되고 있다(Lin 등 1995, Linch와 Prahlow 2001, Shin 등 2003).

또한 매장 후에도 풍화에 대한 저항성이 높아 토양 내에 오래 잔류하여 쉽게 채취할 수 있기 때문에 시신의 매장 경과시간을 추측할 수 있는 매우 중요한 재료이다(Daniel과 Piraccini 2004, Amory 등 2006, Hwang 등 2008).

풍화(weathering)란 털줄기(hair shaft)가 지속적 물리적 · 화학적 노출에 의해 점진적으로 손상되는 현상을 의미하며, 털줄기의 바깥을 둘러싸고 있는 털겉질(cuti-

cle of hair)이 손상되면서 털겉질(cortex of hair)이 노출되는 일련의 과정이다. 머리털의 가장자리부터 조금씩 깎여나가는 국소적 털껍질 손실은 틈새를 일으켜 결과적으로 손상된 부분이 부러지게 되며, 장력감소 및 광택 소실 등이 일어나는 것이 관찰된다고 보고되었다(Tobin 등 1997, Ratnaphndian 등 1998, Noueira와 Joekes 2004, Lee와 Chang 2005).

매장된 머리털의 연구는 주로 미라 머리털을 통해 사망당시 성 감별, 미생물총 연구, 대사물에 관한 연구 등 문화적, 환경적 배경을 유추하기 위한 연구가 대부분을 이루고 있으며, 최근에는 미라 머리털을 대상으로 풍화과정에 따른 머리털의 부패원인, 머리털 채취시 주의 사항, 토양 내 무기질이 머리털에 미치는 영향 등 매장 상태에서 머리털의 손상기전에 대한 연구가 진행되고 있다(Du 등 1996, Báez 등 2000, Kempson 등 2003, Cotte 등 2005).

한편 미라 머리털이 아닌 자연 매장 상태에서 진행되는 사람 머리털의 풍화현상에 대한 연구가 시도되고 있으나, 매장 후 머리털의 시간경과별 형태학적 변화 등 세부적 연구 및 분류는 미라 머리털이라는 연구재료의 제한성과 추정기간의 불확실성 때문에 미진하였다. Bradford 대학에서 매장 후 시간경과별 머리털 변성에 대한

저자(들)는 '의학논문 출판윤리 가이드라인'을 준수합니다.

저자(들)는 이 연구와 관련하여 이해관계가 없음을 밝힙니다.

교신저자 : 백두진 (한양대학교 의과대학 해부 · 세포생물학교실)

전자우편 : paikdj@hanyang.ac.kr

연구를 실행하고는 있으나, 사람 머리털이 아닌 사람과 조식이 유사한 돼지를 대상으로 하는 것이기에 매장 후 시신에서 발생하는 연속적인 머리털의 풍화 현상이라고 할 수 없다(Wilson 등 2001).

최근 Hwang 등(2008)에 의해 매장 후 풍화에 의한 사람 머리털의 시간경과별 형태변화에 대한 연구가 진행되었으나, 주사전자현미경을 통한 머리털의 형태학적 변화관찰로 한정되어 있어 투과전자현미경에 의한 머리털의 털껍질 및 털겉질의 내부 형태변화에 대한 연구는 미진하다. 매장 후 경과시간에 따른 사람 머리털의 투과전자현미경을 통한 형태관찰은 매장 후 시간경과에 따른 머리털의 연구에 더욱 구체적이고 명확한 법의학적 기초 자료를 제공해 줄 수 있을 것이다.

본 연구는 매장 후 시간경과에 따라 시신 머리털의 풍화 정도를 투과전자현미경을 통해 현대 정상인의 머리털과 비교 분석하여 매장 후 시간경과에 따른 머리털의 형태변화에 대해 법의학적 자료를 제공하고자 하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 대상자 선정

2005년부터 2011년까지 국내 전역에 산재되어 있는 무덤에서 머리털을 수집하였다. 일반적 한국형 봉분내 매장된 목관에 안치되었던 시신을 대상으로, 사망일자, 사망시 연령 및 매장 후 경과시간 등이 명확한 머리털만을 유가족에게 머리털 채취 승낙을 얻은 후 수집하였다. 무연고로 정보가 정확하지 않은 머리털은 제외하였다.

시신은 대부분 오동나무 재질의 관에 넣어져 지하 1~2미터 아래에 위치해 있어, 시신 머리털의 자연적인 풍화현상은 오직 무덤 주변의 환경에 의해서만 일어난 것임을 확인하였다. 총 58구에서 수집한 머리털 중 형태가 육안적으로 구별이 가능한 51구의 머리털을 선정하여 조사하였다(Table 1).

채취된 머리털은 노출환경에서 일어날 수 있는 머리털의 부패를 방지하기 위해 Wilson 등(2001)의 방법을 이용하여 수집 즉시 냉동보관하였다.

### 2. 머리털의 분류

연구에 사용된 머리털은 정상대조군으로 정상인의 머리털과 실험군으로 국내 전역의 공동묘지 또는 매장지에서 수집한 매장 머리털을 대상으로 하였다. 매장 후 경

**Table 1.** An analysis of duration of burial (unit: year, number)

Duration of burial	~10	11~20	21~30	31~40	41~50	Total
Sample	13	13	15	6	4	51

**Table 2.** Summary of the Grades of burial hair damage

<ul style="list-style-type: none"> <li>Summary of the Grades of the hair cuticle layers (CuLa)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>Grade Criteria                                     <ul style="list-style-type: none"> <li>- CuL0: Intact cuticle layer, cuticle layer <math>\geq</math> 6 layers</li> <li>- CuL1: Cuticle layer <math>\geq</math> 5 layers</li> <li>- CuL2: Remaining cuticle: 3~4 layers</li> <li>- CuL3: Remaining cuticle <math>\leq</math> 2 layers</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>Summary of the Grades of the damage (vacuoles) of endocuticle (EnVa)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>Grade Criteria                                     <ul style="list-style-type: none"> <li>Encu 0: No damage of endocuticle</li> <li>Encu 1: few vacuoles of endocuticle</li> <li>Encu 2: several vacuoles of endocuticle</li> <li>Encu 3: severely several vacuoles of endocuticle</li> <li>Encu 4: severely several vacuoles of endocuticle, The cuticle layer is rarely seen.</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>Summary of the Grades of the aggregation of macrofibril (MaAg)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>Grade Criteria                                     <ul style="list-style-type: none"> <li>Elecu 0: No damage of macrofibril</li> <li>Elecu 1: weak aggregation of macrofibril</li> <li>Elecu 2: moderate aggregation of macrofibril</li> <li>Elecu 3: severe aggregation of macrofibril</li> <li>Elecu 4: severe aggregation of macrofibril, hollow formation in cortex.</li> </ul> </li> </ul> </li> </ul>
Final grade: CuLa grade+EnVa grade+MaAg grade (eg, CuLa 1/EnVa 1/MaAg 2). (eg, CuLa 3/EnVa 4/MaAg 4).

과시간에 따른 머리털의 풍화양상을 관찰하기 위하여 매장 후 10년 단위로 분류하여 관찰하였다(Table 1). 매장 후 경과시간에 따른 머리털의 풍화양상은 털껍질 층 수의 변화, 속껍질 내 손상(공포)정도, 털겉질의 거대원섬유의 응집정도를 기준으로 분류하여 관찰하였다(Table 2).

### 3. 투과전자현미경적 관찰

발굴현장에서 바로 채취한 머리털의 표면에 붙어 있는 물질과 머리털 구조를 관찰하기 위해 채취 후 전처리 과정을 거치지 않은 시신 머리털과 생체의 정상 머리털을 실험재료로 사용하였다. 각각의 시료를 2.5% paraformaldehyde-4% paraformaldehyde (4°C, phosphate buffer, pH 7.4)에 2시간 전고정하고, 인산완충용액 (4°C, 0.1 M phosphate buffer, pH 7.4)으로 15분씩 3회 세척한 다음, 1% OsO<sub>4</sub> (4°C, phosphate buffer)로 1시간 후 고정

하였다. 고정이 끝난 시료는 동일완충용액으로 3회씩 세척한 후, 에탄올 농도 상승 순으로 탈수하고, propylene oxide로 치환하여 Epon-812 mixture에 포매한 다음, 60°C vacuum drying oven (Yamato, Japan)에서 48시간 동안 열중합을 하였다. 60 nm 두께로 초박절편을 제작하여 copper grid에 부착시킨 다음, uranyl acetate와 lead citrate로 이중 염색하여 투과전자현미경 (H-7600, Hitachi, Japan)으로 80 kV에서 관찰하였다.

## 결 과

### 1. 정상대조군

투과전자현미경상에서 정상 털줄기의 털겉질 층은 전자밀도가 매우 높은 A-layer, 전자밀도가 비교적 낮은 바깥겉질(exocuticle) 및 전자밀도가 비교적 높은 속겉질(endocuticle)로 뚜렷하게 구분되어 나타났으며, A-layer는 털겉질 층의 먼쪽 부위의 세포막을 따라 약 0.1 μm의 두께로, A-layer 바로 밑의 바깥겉질(exocuticle)과 속겉질(endocuticle)은 0.4~0.45 μm의 두께로 일정하게 배열되어 있었다. 편평무핵세포 사이에는 전자밀도가 매우 낮은 섬유성분의 접착(cement) 물질로 구성된 세포막복합체(cellular membrane complex, CMC)가 균열

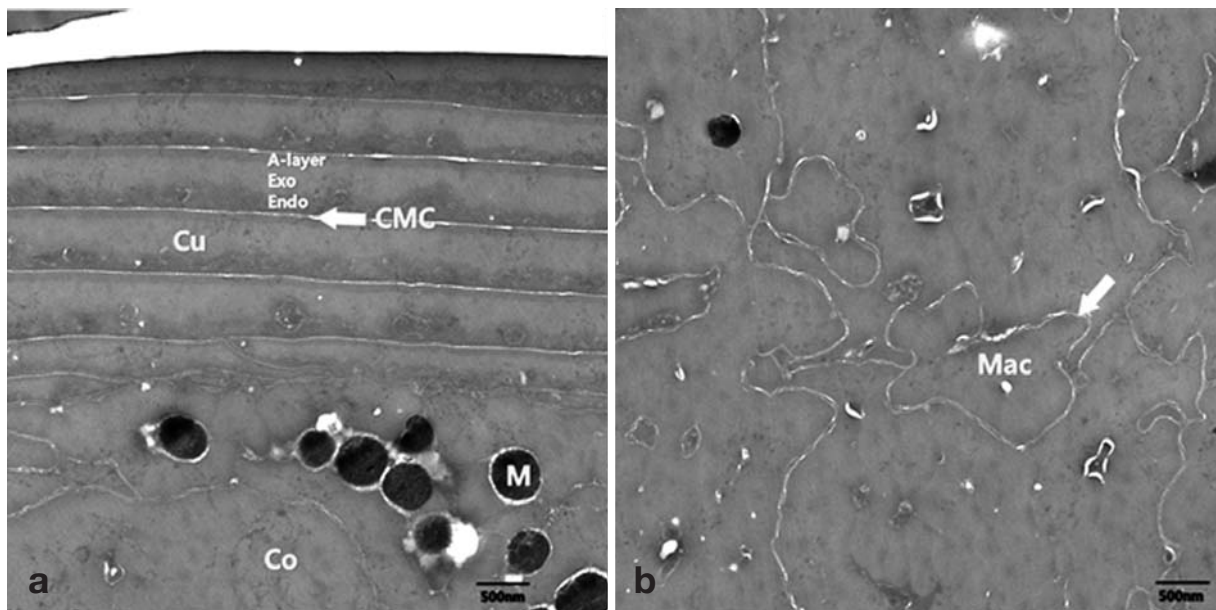
없이 단단하게 부착되어 있었고, 그 간격은 약 50 nm 정도로 관찰되었다(Fig. 1a).

털겉질에서 각각의 거대원섬유(macrofibril)는 뚜렷이 관찰되는 막에 둘러싸여 있었고 직경은 1.4~10 μm까지 다양하였으며, 불규칙한 타원형의 형태를 하고 있었다. 거대원섬유 사이에 산재되어 있는 멜라닌 과립은 전자밀도가 높고 균일한 구형 또는 타원형의 형태로 관찰되었으며, 주로 털겉질 쪽에 가까운 털겉질 층에서 과립 수가 증가함을 관찰할 수 있었다(Fig. 1b).

### 2. 실험군

#### 1) 매장 후 ~10년 군

뚜렷한 A-layer, 바깥겉질(exocuticle), 속겉질(endocuticle) 및 세포막복합체 층을 관찰할 수 있었다. 최외각 1~2층 털겉질의 속겉질 내에서 공포가 나타나는 것을 관찰할 수 있었다. 특징적으로 세포막복합체 층의 전자밀도가 급격히 증가되어 진하게 관찰되었다(Fig. 2a). 털겉질에서는 거대원섬유(macrofibril)간 경계부위의 전자밀도가 증가되면서 각각의 막이 서로 연결되어 합쳐지는 응집(aggregation) 현상이 관찰되기 시작하였다. 멜라닌 과립은 전형적인 타원형 형태로 길이 0.7~1.0 μm, 넓이 0.4~0.5 μm이었다(Fig. 2b).

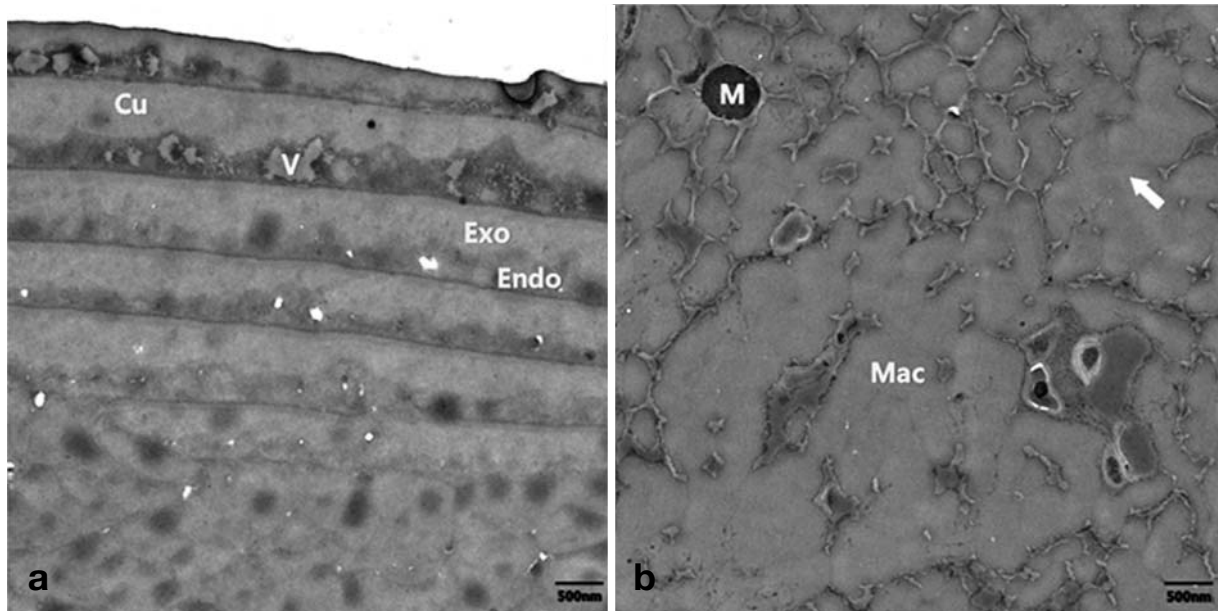


**Fig. 1.** Transmission electron micrograph (TEM) of a normal hair shaft (Control group). (a) The cuticle layer was composed of A-layer, exocuticle, endocuticle and CMC (A: A-layer, Exo: exocuticle, Endo: endocuticle, CMC: cell membrane complex, Cu: Cuticle, Co: Cortex, M: Melanin granule), (b) The macrofibril was irregular in diameter (about 1.4~10 μm) and definite boundary (Mac: macrofibril, White arrow: boundary of macrofibril).

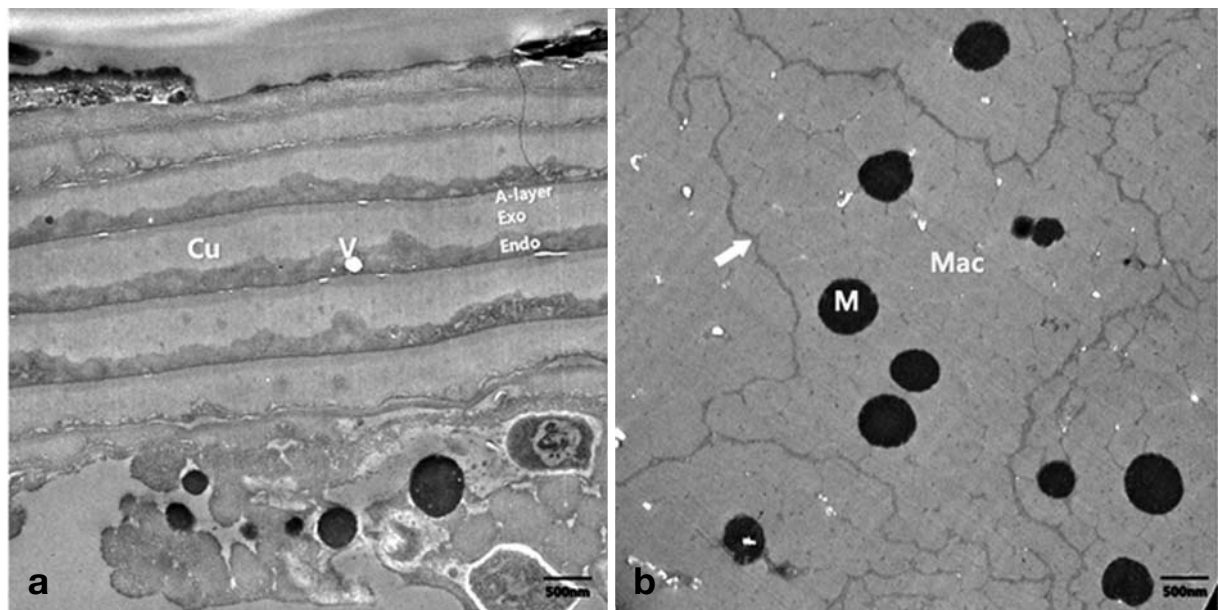
2) 매장 후 11~20년 군

A-layer와 바깥껍질에서는 특이한 변화가 발견되지 않았으나, 털껍질 전 층에서 속껍질의 전자밀도가 증가

됨을 관찰할 수 있었고 속껍질 내 공포발생 부위는 최 외각에서부터 4~5층까지 확대되어 있는 것을 볼 수 있었다. 세포막복합체 층의 전자밀도가 증가되어 진하



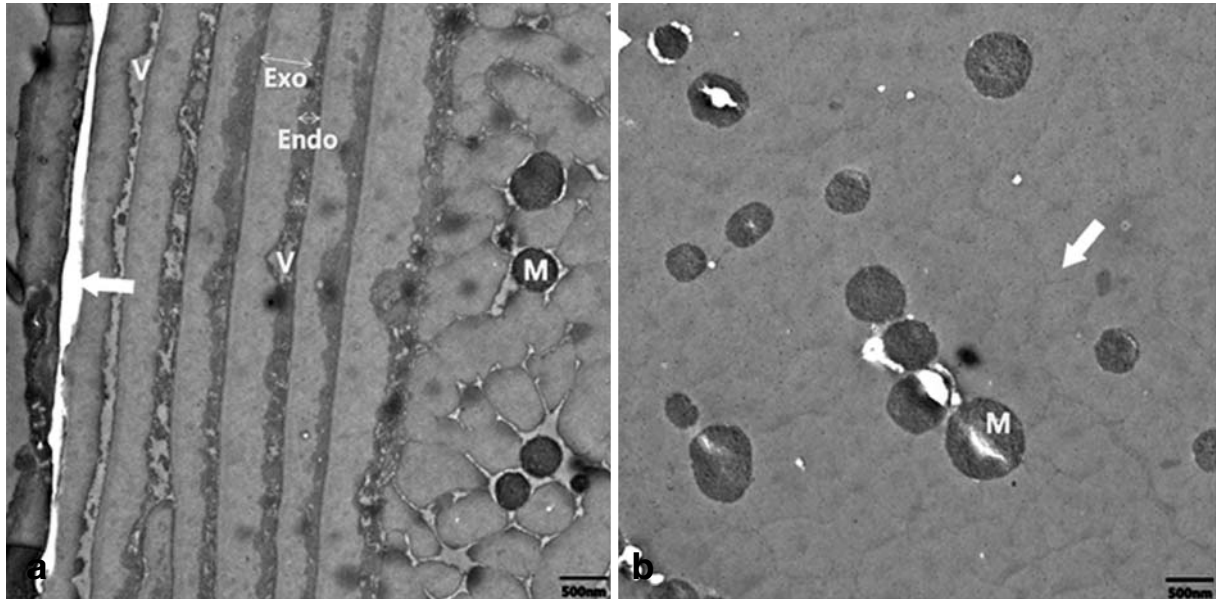
**Fig. 2.** TEM of weathered hair shaft, until 10 years after burial. (a) The endocuticle had started to exhibits fewer vacuole and gradually electoron-dense appearance (Cu: cuticle, Exo: exocuticle, Endo: endocuticle, v: vacuole), (b) The aggregation of macrofibril membrane had weakly started in cortex (M: melanin granule, Mac: macrofibril, White arrow: boundary of macrofibril).



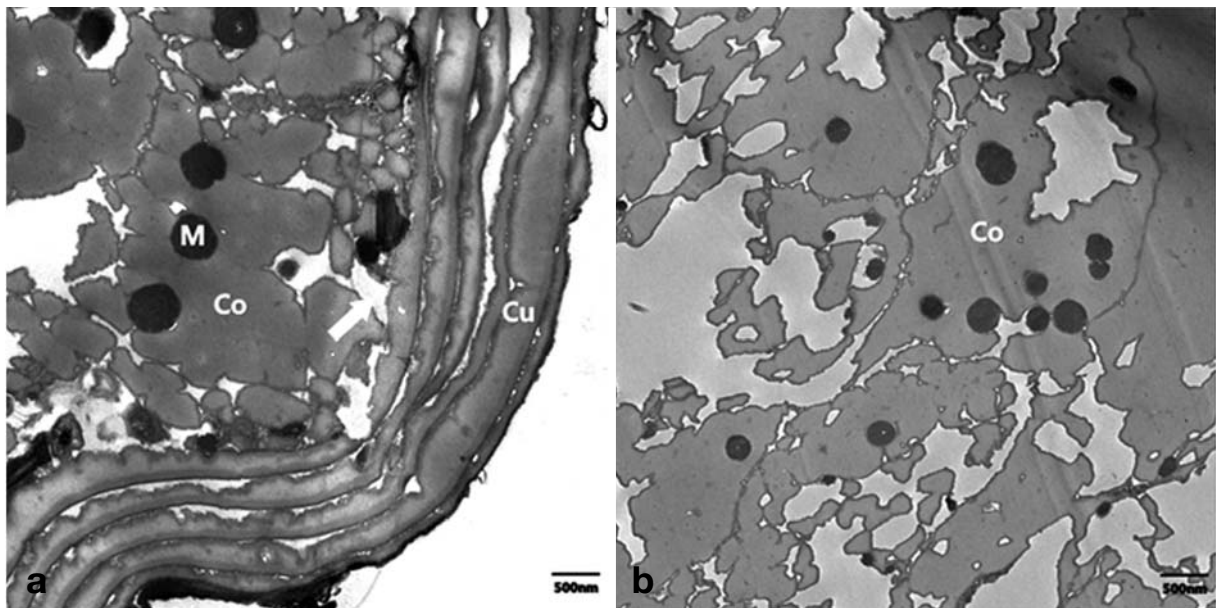
**Fig. 3.** TEM of weathered hair shaft, from 11 to 20 years after burial. (a) Every endocuticle exhibits several vacuole, strong electoron-dense appearance (A: A-layer, Exo: exocuticle, Endo: endocuticle, v: vacuole), (b) Extended aggregation of macrofibril membrane was seen in cortex and unclearly observe the boundary of macrofibril (M: melanin granule, Mac: macrofibril, White arrow: boundary of macrofibril).

게 관찰되어 뚜렷한 경계를 나타내었다(Fig. 3a). 털겉질에서 거대원섬유의 응집 현상의 심화로 각각의 경계가 불분명하게 관찰되었고 몇몇의 경우에는 광범위한

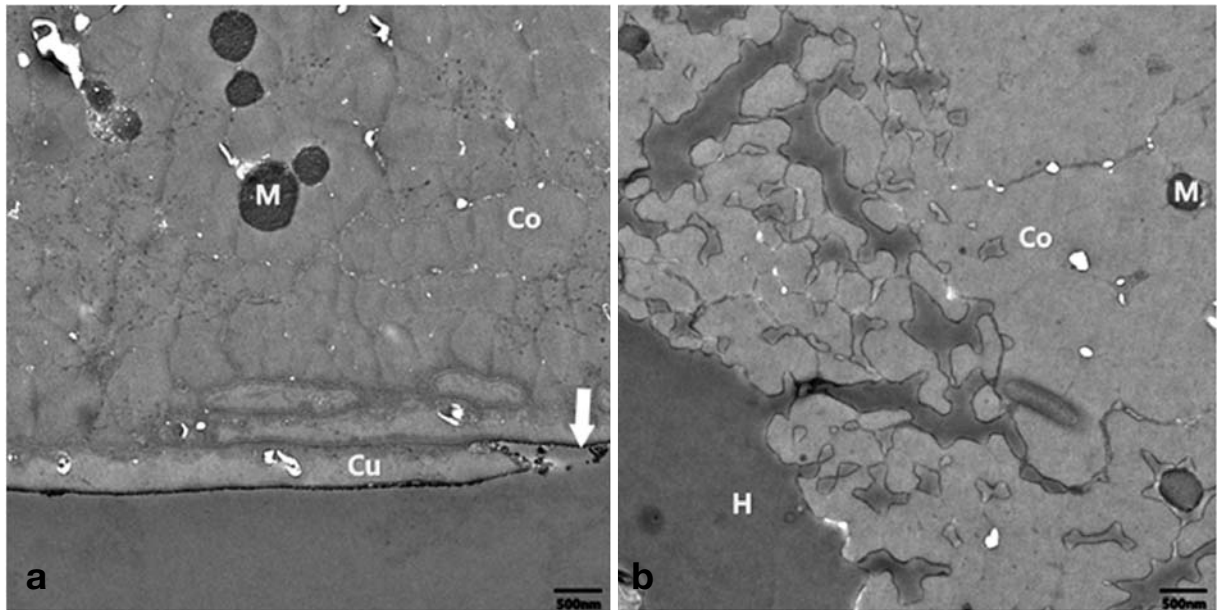
부위까지 합쳐지는 현상이 관찰되었다. 거대원섬유의 경계 부위의 전자밀도는 매장 후 ~10년 군에 비해 낮아져있는 것을 관찰할 수 있었다(Fig. 3b).



**Fig. 4.** TEM of weathered hair shaft, from 21 to 30 years after burial. (a) The thickness of cuticle was decreased by separation of its layer. The endocuticle exhibits severely several vacuole, very strong electron-dense appearance (Exo: exocuticle, Endo: endocuticle, v: vacuole, White arrow: detached appearance of cuticle layer), (b) Extended aggregation of macrofibril membrane was seen in cortex and observation of boundary is impossible (M: melanin granule, White arrow: Aggregation of macrofibril).



**Fig. 5.** TEM of weathered hair shaft, from 31 to 40 years after burial. (a) The cuticle layer were severely damaged. A dubitable boundary, irregular thickness, severe cavities and separation of cuticle was seen (Cu: Cuticle, Co: Cortex, M: Melanin granule, White arrow: Hole in the cortex), (b) The spaced between macrofibrils broadly increased (Co: Cortex).



**Fig. 6.** TEM of weathered hair shaft, over 41 years after burial. (a) The cuticle layer is rarely seen (Cu: Cuticle, Co: Cortex, M: Melanin granule, White arrow: The edge of a cuticular cell are exfoliated), (b) The holes between microfibrils increased up to the cortex (Co: Cortex, M: Melanin granule, H: Hole).

3) 매장 후 21~30년 군

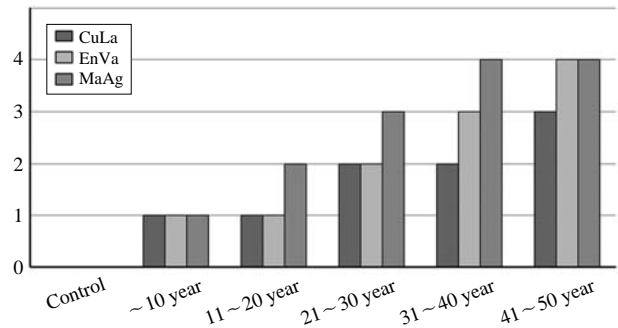
속껍질 전 층에서 전자밀도 증가와 공포 발생이 관찰되었으며, 특징적으로 털겉질 (hair cuticle)의 최외각 층부터 떨어져 나가는 탈락현상과 탈락된 털겉질 아래에 위치하는 털겉질에서도 공포현상의 심화로 곧 속껍질 (endocuticle)과 세포막복합체 부위에서 탈락현상이 발생될 것이라 예상할 수 있었다. 털겉질 각각의 두께가 불규칙하게 나타나는 것을 볼 수 있었다 (Fig. 4a). 털겉질에서는 거대원섬유 (macrofibril) 막의 응집현상이 매우 심화되어 경계를 확인할 수 없었다 (Fig. 4b).

4) 매장 후 31~40년 군

털겉질 층의 탈락현상 심화, 털겉질 두께의 불규칙 및 공포현상이 복합적으로 관찰되었다. 대부분의 속껍질이 탈락되어 각각의 털겉질 각각의 두께는 매우 불규칙하게 관찰되었으며, 곧 털겉질 대부분의 층에서 탈락현상이 발생될 것이라 예상할 수 있었다 (Fig. 5a). 털겉질에서는 공동화 (cavitation) 현상이 털겉질의 중심부위부터 털겉질과의 연결부위까지 광범위하게 진행되어 있음을 관찰할 수 있었다 (Fig. 5b).

5) 매장 후 41~50년 군

털겉질 층의 탈락현상에 의해 대부분의 털겉질 층을 발견할 수 없었으며, 중간 중간에 탈락직전의 1~2층의 털겉질 층만을 관찰할 수 있었다 (Fig. 6a). 털겉질에서는



**Fig. 7.** Classification of the morphological changes of burial hair. CuLa: The cuticle layers of human scalp hair. EnVa: The damage (vacuoles) degrees of endocuticle. MaAg: The aggregation degrees of macrofibril membrane.

공동화 (cavitation) 현상이 털겉질의 최외각부위까지 광범위하게 진행되어 있는 현상을 관찰할 수 있었다 (Fig. 6b).

3. 매장 후 시간경과에 따른 사람머리털의 변화양상

매장 후 사람머리털은 시간경과에 따라 털겉질과 털겉질에서 형태학적 변화를 나타내며, 이 중 털겉질 층수의 변화, 속껍질 내 손상 (공포) 정도, 털겉질의 거대원섬유의 응집현상이 뚜렷이 관찰되었다. 형태학적 손상 정도에 따라 기준을 정하고 기준에 따라 분류한 변화 양상의 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

## 고 찰

사람 머리털은 털줄기(hair shaft)는 털껍질(hair cuticle), 털겉질(hair cortex) 및 털속질(hair medullar)의 3층으로 이루어져 있으며, 털껍질은 A-layer, 바깥껍질(exocuticle) 및 속껍질(endocuticle)의 3개의 주요 층과 세포막복합체(cell membrane complex; CMC)로 구성되어 있다(Hong 등 2000, Chang 2003, Bhushan 등 2005, Wei 등 2005, Bhushan과 Chen 2006, Stout 등 2007). A-layer는 강하게 결합된 지질구조로 수증기는 통과하지만 물은 통과하지 못한다고 알려져 있으며, 30% 이상의 높은 시스틴(cystine) 함량을 가지고 있는 화학적 저항이 가장 높은 층으로 외부 물질의 침투를 방어하는 역할을 수행한다고 보고되어 있다(Wei와 Bhushan 2006). 바깥껍질(exocuticle)은 털껍질의 약 2/3을 차지하고 있으며, 파마액과 같은 시스틴(cystine) 결합을 절단하는 약액의 작용을 받기 쉬운 곳이다(Casperson 1994). 속껍질(endocuticle)은 낮은 시스틴(cystine) 함량을 가지고 있으며, 화학물질이 가장 침투하기 좋은 조직이다(Dawber와 Comaish 1970).

털겉질은 세로로 길게 나열되어 있는 방추형의 털겉질세포(cuticular cell)와 세포결합 복합체로 구성되어지며 머리털 면적의 약 75~90%를 차지한다. 겉질세포는 두께 1~6  $\mu\text{m}$ , 길이 100  $\mu\text{m}$ 로 머리털을 따라 종축으로 길게 연결되어 있으며, 소량의 멜라닌 색소를 함유하고 중앙에 거대원섬유(macrofibril)라 불리는 방추형을 한 섬유상 구조와 핵의 잔사, 색소과립으로 구성되어 있다. 거대원섬유 내에는 여러 개의 미세원섬유(microfibril)와 무정형 기질(amorphous matrix)로 구성되어 있다(Wei와 Bhushan 2006).

본 연구에서 정상 털줄기의 투과전자현미경 관찰 결과, 털껍질 층은 전자밀도가 매우 높은 A-layer, 전자밀도가 낮은 바깥껍질(exocuticle)과 전자밀도가 비교적 높은 속껍질(endocuticle)로 뚜렷하게 구분되어 나타났으며, A-layer는 털껍질 층의 바깥쪽 세포막을 따라 약 0.1  $\mu\text{m}$ 의 두께로, A-layer 바로 밑의 바깥껍질(exocuticle)과 속껍질(endocuticle)은 0.4~0.45  $\mu\text{m}$ 의 두께로 균일하게 배열되어 있었다. 털껍질 층 사이에는 전자밀도가 매우 낮은 섬유성분의 접착(cement) 물질로 구성된 세포막복합체(CMC)가 균열없이 단단하게 부착되어 있었고, 그 간격은 약 50 nm 정도로 관찰되었다. 털껍질 층의 관찰 결과가 Bhushan과 Chen (2006), Wei 등 (2005), Bhushan 등 (2005)의 연구와 동일하였으나, 털껍질 층을

전자밀도가 높은 바깥껍질 층과 낮은 속껍질 층만으로 구분한 Chang 등 (2005), Hong 등 (2000)의 연구와는 상이한 부분이 있었다. 이는 Chang 등 (2005), Hong 등 (2000)이 전자밀도가 매우 높은 A-layer 부분을 바깥껍질 층으로 판단하여 발생한 결과로 보이며, Wei 등 (2005)의 분류한 방법대로 본 연구에서는 A-layer, 바깥껍질, 속껍질, 세포막복합체로 구분하여 관찰하였다. 투과전자현미경결과, 털겉질에서 각각의 겉질세포는 명확히 확인이 가능한 막에 둘러싸인 상태로 직경은 1.4~10  $\mu\text{m}$ 까지 다양하였으며 불규칙한 타원형의 형태를 하고 있었다. 거대원섬유(macrofibril) 사이에 산재되어 있는 멜라닌 과립은 전자밀도가 높고 균일한 구형 또는 타원형의 형태로 관찰되었으며 주로 털껍질 쪽에 가까워질수록 털겉질 내 멜라닌 과립수가 증가함을 관찰할 수 있었는데, 이는 Hong 등 (2000), Lee와 Chang (2005)의 연구와 동일한 결과로, 실험에 사용된 머리털이 물리적 및 화학적 손상을 받지 않았기 때문으로 생각된다.

자연 상태에서 머리털의 풍화 현상은 크게 병리학적인 질환에 의한 경우와 물리화학적 작용에 의한 경우로 나눌 수 있다. 머리털의 유전적 요인 또는 대사 및 신경학적 이상에 의한 병리적 현상과 치료에 대한 연구는 여러 학자들에 의해 심도있게 진행되어져 왔다(Dawber와 Comaish 1970, Lantis와 Pepper 1978, Gillespie와 Marshall 1983, Messenger와 Bleehen 1984, Venning 등 1986, Whiting 1987, Tobin 등 1997, Bergfeld 2001, Giehl 등 2004, Itin과 Fistarol 2005). 머리털의 후천적 풍화작용에 관한 연구는 주로 머리털의 자외선, 열, 빗질 등과 같은 물리적 자극에 의한 손상과 파마액 등에 의한 화학적 손상에 대한 연구가 다수를 차지하고 있다(Venning 등 1986, Lindelöf 등 1988, Gallagher와 Jones 1993, Nishikawa 등 1998, Vecchio 등 2002, Kim과 Jeon 2006).

이번 연구에서 관찰된 머리털에서도 매장 후 시간경과에 따른 특징적 풍화현상이 나타났다. 털껍질층의 손상은 매장 후 지속적으로 발생되어지며 탈락현상은 21년 이후부터 발생하여 41년 이후에는 털껍질이 거의 탈락됨을 관찰할 수 있었다.

한편, 자연 상태에서 머리털의 풍화현상이 아닌 매장 후 같은 특수한 풍화환경에서 채취한 머리털의 부패원인, 머리털 채취시 주의점, 토양내 미세랄이 머리털에 미치는 영향 등 미라 머리털의 손상기전에 대한 연구가 시도되어지고 있지만(Du 등 1996, Chang 등 2006), 미라 머리털이라는 연구재료의 제한성과 추정기간의 불확실성 때문에 매장 후 시간경과에 따른 관찰되는 연속적인 풍화과정의 자료로 참고하기에는 어려움이 있

어왔다.

매장 후 시간경과에 따른 머리털의 풍화 정도는 시신이 묻힌 깊이, 방법 등과도 밀접한 관계가 있으며, 따라서 동일한 조건의 머리털을 대상으로 매장 후 시간경과에 따른 부패정도를 파악하는 것이 엄밀한 의미의 매장 시신의 머리털 변성 (hair degradation)을 관찰하는 것이라 할 수 있을 것이다.

최근 Hwang 등(2008)은 주사전자현미경을 통해 매장 후 시간경과에 따른 사람 머리털의 변성 정도를 관찰한 결과 매장 후 시간경과별로 거의 유사한 형태를 나타내는데, 이와 같은 결과는 실험 재료가 일반적으로 깊이 1~2m 정도의 토양에서 채취한 머리털을 대상으로 하였고, 채취 장소가 한국과 같이 유사한 기후조건과 토양환경을 가지고 있기 때문으로 유추해 볼 수 있다고 하였다.

매장에 따른 머리털 풍화에 대한 연구는 머리털 표면의 형태학적 변화를 관찰하기 위한 주사현미경적 연구가 대부분이나 매장 후 머리털 변화에 대한 법의학적 근거를 마련하기 위해서는 투과전자현미경에 의한 머리털의 털겉질 및 털겉질의 내부 형태변화에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서 머리털을 투과전자현미경으로 관찰한 결과 머리털의 풍화현상은 매장 후 10년까지는 별다른 변화를 보이지 않았으나, 11년 이후부터 털겉질의 점진적 마모, 털겉질 내의 무정형 기질(amorphous matrix) 감소로 인한 거대원섬유(macrofibril)의 분리, 털겉질의 공동화 현상이 가속화됨을 볼 수 있었다. 또한 매장 후 11년 이후부터 털겉질 내 거대원섬유의 응집(aggregation) 현상이 심화되어 21년 이상에서는 거의 경계를 확인할 수 없었다. Hong 등(2000)의 연구와 동일하게 우선적으로 털겉질의 속껍질(endocuticle) 층이 가장 손상이 쉽게 발생하면서 탈락현상이 보였으며, 속껍질 내에 공포현상이 심화되면서 세포막복합체와 털겉질의 탈락현상이 동시에 진행됨을 관찰할 수 있었다.

본 연구의 결과에서 머리털은 매장 후 시간경과에 따라 풍화과정을 겪게 되며, 매장된 머리털은 시간경과에 따라 구조물별로 다르게 나타남을 관찰할 수 있었다. 털겉질의 손상은 매장 후부터 부분적으로 발생되어 지며 탈락현상은 21년 이후부터 발생하여 41년 이후에는 털겉질이 거의 탈락됨을 관찰할 수 있었다. 털겉질 내 거대원섬유(macrofibril) 막의 응집현상은 30년까지 점차 심해져 경계를 구분할 수 없었으며, 이 후 31년부터는 공동화(cavitation) 현상이 발생되어 것을 관찰할 수 있었다(Fig. 7).

결론적으로 매장된 머리털은 시간경과에 따라 구조적 및 형태학적으로 특징적인 풍화과정이 발생되므로 머리털의 손상정도에 따라 매장 후 경과시간을 진단할 수 있을 것으로 사료된다. 본 연구의 결과는 머리털을 통한 매장 후 경과시간을 추정할 수 있는 법의학적 기초자료로 유용하게 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

- Amory S, Keyser-Tracqui C, Crubézy E, Ludes B : Multi-substrata analysis on Siberian mummies: A different way for validation in ancient DNA Studies? International Congress Series 1288: 834-836, 2006.
- Báez H, Castro MM, Benavente MA, Kintz P, Cirimele V, Camargo C, Thomas C : Drugs in prehistory: chemical analysis of ancient human hair. Forensic Science International 108: 179-179, 2000.
- Bergfeld WF : Hair Loss: An overview. Fabiane Mulinari-Brenner. Dermatology Nursing 13: 269-278, 2001.
- Bhushan B, Chen N : AFM studies of environmental effect on nanomechanical properties and cellular structure of human hair. Ultramicroscopy 106: 755-764, 2006.
- Bhushan B, Wei G, Haddad P : Friction and wear studies of human hair and skin. Wear 259: 1012-1021, 2005.
- Casperson S : Men's hair coloring. A review of current technology. Cosm & Toil 109: 83-87, 1994.
- 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.
- Chang BS, Hong WS, Lee E, Yeo SM, Bang IS, Chung YH, Lim DS, Mun GH, Kin J, Park SO, Shin DH : Ultramicroscopic observation on morphological changes in hair during 25 years of weathering. Forensic Science International DTD 5: 1-8, 2005.
- Chang BS, Uhm CS, Park CH, Kim HK, Lee GY, Cho HH, Chung YH, Shin DH : Ultramicroscopic study on the hair of newly found 15<sup>th</sup> century mummy in Daejeon, Korea. Ann Anat 188: 439-445, 2006.
- Cotte M, Walter P, Tsoucaris G, Dumas P : Studying skin of an egyptian mummy by infrared microscopy. Vibrational Spectroscopy 38: 159-167, 2005.
- Daniel CR, Piraccini BM : The nail and hair in forensic science. J Am Acad Dermatol 50: 258-261, 2004.
- Dawber R, Comaish S : Scanning electron microscopy of normal and abnormal hair shafts. Arch Derm 101: 315-322, 1970.
- Du AY, Mangelson NF, Rees LB, Matheny RT : PIXE elemental analysis of South American mummy hair. Nuclear

- Instruments and Methods in Physics Research B 109/110: 673-676, 1996.
- Gallagher KF, Jones RT : Emerging technology in protein copolymerization. *Cosmet & Toiletries* 108: 97-104, 1993.
- Giehl KA, Ferguson DJP, Dawber RPR, Pittelkow MR, Foehles J, Berkertt DAR : Update on detection, morphology and fragility in pili annulati in three kindreds. *JEADV (European Academy of Dermatology and venereology)* 18: 654-658, 2004.
- Gillespie JM, Marshall RC : A comparison of the proteins of normal and trichothiodystrophic human hair. *Journal of investigative dermatology* 80: 195-202, 1983.
- 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.
- Hwang KS, Lim DS, Ahn DC, Lee SW, Paik DJ : SEM observation on the weathering human hair after burial. *Korean J Phys Anthropol* 21: 181-190, 2008.
- Itin PH, Fistarol SK : Hair shaft abnormalities-clues to diagnosis and treatment. *Dermatology* 211: 63-71, 2005.
- Kempson IM, Skinner WM, Kirkbride PK, Nelson AJ, Martin RR : Time-of-Flight secondary ion mass spectrometry analysis of hair from archaeological remains. *Eur J Mass Spectrom* 9: 589-597, 2003.
- Kim KS, Jeon DW : Effect of absorbed metal ion concentration by after-treated mordanting on the color and fastness in human hair and wool fiber dyed with African marigold petals extract. *Journal of Fashion Business* 10: 45-57, 2006.
- Lantis SDH, Pepper MC : Woolly hair nevus. *Arch Dermatol* 114: 233-238, 1978.
- 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.
- Lin Z, Kondo T, Minamino T, Ohtsuji M, Nishigami J, Takayasu T, Sun R, Ohshima T : Sex determination by polymerase chain reaction on mummies discovered at Taklamakan desert in 1912. *Forensic Science International* 75: 197-205, 1995.
- Linch CA, Prahlow JA : Postmortem microscopic changes observed at the human head hair proximal end. *Journal of Forensic Science* 46: 15-20, 2001.
- Lindelöf B, Froskind B, Hedblad MA, Kaveus U : Human hair form. *Arch Dermatol* 124: 1359-1363, 1988.
- Messenger AG, Bleehe SS : Alopecia areata: light and electron-microscopic pathology of the regrowing white hair. *British J Dermatol* 110: 155-162, 1984.
- Nishikawa N, Tanizawa Y, Tanaka S, Horiguchi Y, Asakura T : Structural change of keratin protein in human hair by permanent waving treatment. *Polymer* 39: 3835-3840, 1998.
- Nogueira ACS, Joekes I : Hair color changes and protein damage caused by ultraviolet radiation. *Journal of Photochemistry and Photobiology B. Biology* 74: 109-117, 2004.
- Ratnaphndian S, Warner SB, Kamath YK : Photodegradation of human hair. *J Cosmet Science* 49: 309-320, 1998.
- Shin DH, Youn MY, Chang BS : Histological analysis on the medieval mummy in Korea. *Forensic Science International* 137: 172-182, 2003.
- Stout PR, Roper-Miller JD, Baylor MR, Mitchell JM : Morphological changes in human head hair subjected to various drug testing decontamination strategies. *Forensic Science International Article* 1-7, 2007.
- Tobin DJ, Hann SK, Song MS, Bystry JC : Hair follicle structure targeted by antibodies in patients with alopecia areata. *Arch Dermatol* 133: 57-61, 1997.
- Vecchio F, Guarrere M, Rebora A : Perception of baldness and hair density. *Dermatology* 204: 33-36, 2002.
- Venning VA, Dawber RPR, Ferguson DJP, Kanan MW : Weathering of hair in trichothiodystrophy. *British J of Dermatology* 114: 591-595, 1986.
- Wei G, Bhushan B : Nanotribological and nanomechanical characterization of human hair using a nanoscratch technique. *Ultramicroscopy* 106: 742-754, 2006.
- Wei G, Bhushan B, Torgerson PM : Nanomechanical characterization of human hair using nanoindentation and SEM. *Ultramicroscopy* 105: 248-266, 2005.
- Wilson AS, Dixon RA, Dodson HI, Janaway RC, Pollard AM, Stern B, Tobin DJ : Yesterday's hair-human hair in archaeology. *Biologist (London)* 48: 213-217, 2001.
- Whiting DA : Structural abnormalities of the hair shaft. *J Am Acad Dermatol* 16: 1-23, 1987.

# TEM Observation on the Weathering Human Scalp Hair after Burial

Kyu-Sung Hwang, Yong-Seok Nam<sup>1</sup>, Jeong-Lae Kim<sup>2</sup>, Youn-Kyoung Seo<sup>3</sup>, Doo-Jin Paik<sup>3</sup>

*Department of Funeral Science, College of Health Industry, Eulji University*

<sup>1</sup>*Department of Anatomy, Catholic Institute for Applied Anatomy, College of Medicine, Catholic University*

<sup>2</sup>*Department of Biomedical Engineering, College of Health Science, Eulji University*

<sup>3</sup>*Department of Anatomy and Cell Biology, College of Medicine, Hanyang University*

---

**Abstract** : This study was undertaken to investigate the morphological changes of scalp hair according to weathering after burial and to offer basic data for forensic science.

To examine the effect of weathering degree, the 51 human scalp hairs buried after death were taken from deceased individuals in tombs in Korea. The morphological changes in weathering hair shafts of the scalp were investigated using the transmission electron microscopes (TEM).

There were little morphological differences of weathering depending on the burial period. The weathering changes includes detachment of cuticle layer, aggregation of macrofibril and hollow formation in the cortex according to the burial period.

These results could provide basic data to the field of forensic medicine.

---

**Keywords** : TEM, Human scalp hair, Morphology, Weathering, Forensic science