

# 평택 희곡리 출토목재 부후형태의 전자현미경적 관찰

김수철<sup>1</sup> · 박원규\*

국립중앙박물관 보존과학팀, \*충북대학교 산림과학부

## Electron Microscopic Observation on the Decay of the Waterlogged Woods Excavated from Higokri, Pyungtaek

Soo-Chul Kim<sup>1</sup> · Won-Kyu Park\*

Conservation Science Team, The National Museum of Korea, Seoul, 140-026, Korea

\*School of Forest Resources, Chungbuk National University, Cheongju, 361-763, Korea

<sup>1</sup>Corresponding Author : oldforest@museum.go.kr

**초 록** 경기도 평택 희곡리 토탄층(약 5,700~5,900년前)에서 수침상태로 출토된 물푸레나무속 1종과 오리나무속 1종을 대상으로 전자현미경 관찰을 통하여 수종에 따른 분해정도와 형태를 조사하였다. 관찰결과 두 수종 모두 연부후와 박테리아에 의한 세포벽 공격형태와 분해형태는 거의 유사하였다. S<sub>2</sub>층부터 복합세포간층 방향으로 점진적으로 불규칙하게 분해하는 침식형 박테리아와 목재세포벽을 분해하여 S<sub>2</sub>층에 터널을 만드는 터널형 박테리아가 관찰되었다. 침식형 박테리아는 종종 연부후균에 의한 공동과 유사하지만 크기가 작은 공동을 형성하였다. 도관요소를 제외한 다른 세포들의 세포벽은 극심히 분해되었지만 세포벽의 외형은 수분으로 인해 그 고유한 형태를 유지하고 있었다. 해양천공충의 식흔 흔적이 발견되지 않고 연부후균과 박테리아에 의한 분해 형태만 발견되어 평택희곡리 토탄지역 형성 당시인 5,700~5,900여년전인 온난화에 의한 홀로세 기후최적기 기간중이기 때문에 서해안 해수면 상승에 의해 해수에 침수되었을 것이라는 가설은 사실이 아닌 것으로 해석되었다.

**중심어** : 분해, 수침목재, 전자현미경, 연부후균, 박테리아, 세포벽

**ABSTRACT** This study was conducted to examine both the type of wood decay and the degree of degradation for the waterlogged woods (*Alnus* spp. and *Fraxinus* spp., about 5,700~5,900 year old), which were excavated at Higokri, Pyungtaek in the west-coastal region of Korea. The transmission electron microscope (TEM) observation indicated the degradations by soft rot and bacteria were common in both woods. Erosion bacteria attacked gradually and irregularly from the secondary layer to compound middle lamella and often produced the cavity which was similar to soft-rot cavity but much smaller ones. Tunneling bacteria decomposed mainly S<sub>2</sub> layer. Though of highly degraded walls, the cells almost kept the original form with intact lignin-rich middle lamella, which were saturated by water. No marine borer's trace indicated that the sealine rise in the western coast of Korean peninsula during the climate optimum period in the holocene might not be high enough to submerge the Higokri area which locates about 2 km from the present sealine.

**Key Words** : Degradation, Waterlogged wood, Electron microscope, Soft rot, Bacteria, Cell wall

## 1. 서론

목재는 자연 상태에서 부후균과 다양한 미생물에 의해 부후가 일어난다. 목재 부후는 부후균이 분비하는 효소 등의 작용에 의해 목재 세포벽 구성성분이 분해되고 세포를 기본단위로서 구성하고 있는 목재 조직의 구조가 붕괴되는 현상이다<sup>2-3</sup>. 매몰된 목재는 환경조건이 적합하면 쉽게 분해될 수 있고 부후 정도는 수중에 따라 다르며 동일 수종 내에서도 구성세포의 종류에 따라 각기 다른 분해형태를 나타내며 각기 다른 부후기작에 의해 분해된다<sup>4-5</sup>. 따라서 각 요인에 의한 부후기작과 그 미세 부후 형태의 특징은 고목재 보존에 기초 자료로 중요하다.

우리나라에서 처음의 수침목재 재질분석은 신안과 완도 해저침몰선에 대한 연구이다.<sup>6-7</sup> 본 연구에서는 평택 희곡리 토탄층에서 출토된 목재의 수종별 분해형태와 분해정도를 관찰하여 그 결과를 바탕으로 동일 유적지에서 출토된 수침고목재의 보존처리 재료와 방법 설정에 자료로 활용하고자 한다. 또한 희곡리 토탄 형성 당시인 5,700-5900년전이 마지막 빙기이후 온난화에 의한 홀로세 기후최적기이기 때문에 서해안 해수면 상승에 의해 현재는 해안에서 약 2km 떨어져 있는 희곡리 지역이 해수에 침수되었을 것이라는 가설을 검증하고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

본 관찰에 공시된 재료들은 경기도 평택 희곡리 토탄층에서 출토된 것으로써 약 5,700~5,900 여년전(방사성 탄소연대)에 매장된 수침고목재이며<sup>8</sup>. 이들 공시재의 수종들은 물푸레나무속(*Fraxinus* spp.) 1종과 오리나무속(*Alnus* spp.) 1종이다<sup>9</sup>.

공시재료의 개략적인 조사를 위하여 5(T)×5(R)×5(L) mm의 시편을 채취하였고 강고성을 주기 위하여 PEG분자량 2,000으로 포매한 후 로터리마이크로톰으로 두께 10~20 $\mu$ m로 절편을 제작하고 샤프라닌으로 염색하여 광학현미경을 관찰하였다.

FAA에 보관되어 있는 공시재료로부터 3(T)×3(R)×10(L)mm의 목재시편을 채취하여 실온에서 2.5% glu-

taraldehyde (0.1M phosphate buffer, pH 7.2~7.4)에 24시간 고정을 시키고 buffer(pH7)로 15~20분 동안 2~3번 씻어주었다. 1% osmium tetroxide(0.1 phosphate buffer)를 사용해 30분에서 1시간정도 고정 시키고 buffer로 15~20분간 세척하였다.

알코올시리즈로 탈수 후 100%에서 10~15분간 2회 정도 탈수하고 propylene oxide로 10~20분간 2회 정도 탈수하여 에폭시수지(Poly/Bed 812)로 포매시켰다. 포매된 시료를 울트라마이크로톰으로 두께 0.3 $\mu$ m의 박편을 제작한 후 uranyl acetate와 lead citrate로 염색하여 투과전자현미경(Hitach H600 : TEM)으로 관찰하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 광학현미경 관찰

주요구성요소인 도관요소, 목섬유, 축방향유세포를 광학현미경으로 관찰한 결과, 물푸레나무의 경우 목섬유 세포벽 대부분이 분리되어 얇게 남아 있는 것으로 보아 세포간층과 1차벽만이 존재하는 것을 알 수 있었으며 도관의 세포벽은 비교적 온전히 남아 있다(Fig. 1). 오리나무의 목섬유 세포벽은 세포간층과 1차벽 그리고 2차벽의 내층이 남아있는 것이 관찰되며, 도관은 세포벽 내부가 분해된 것이 관찰된다(Fig. 2). 횡단면상 도관요소와 목섬유 그리고 축방향유세포의 분포는 대체로 완전한 형태를 유지하고 있는 것을 볼 수 있었다.

### 3.2. 투과전자현미경 관찰

#### 3.2.1. 주요 구성요소의 분해특징

##### 1) 목섬유

발굴된 목재는 주로 토탄층에 혐기성균류가 서식하기에 적합한 환경을 형성하고 있어 목섬유에 일정한 분해선이 형성되지 않고 세포에 따라 거의 완전 분해된 세포가 관찰된다. 그리고 공시된 두 수종 모두 세포벽의 2차벽 중층 대부분에 공극을 형성하며 연부후균에 의한 분해를 관찰할 수 있었다(Fig. 3, 4). 유연벽공 세포벽의 2차벽

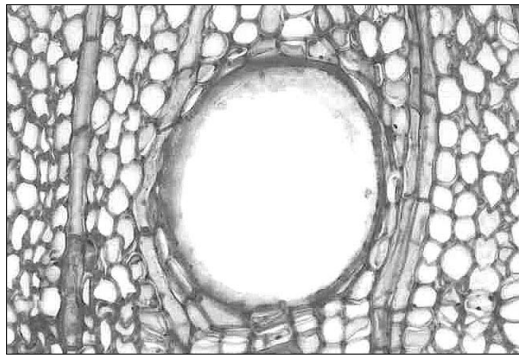


Figure 1. *Fraxinus* spp., cross section( $\times 200$ ).

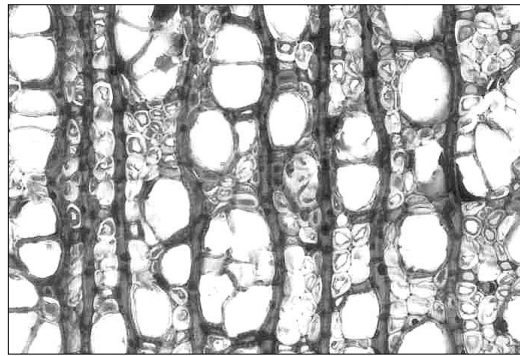


Figure 2. *Alnus* spp., cross section( $\times 200$ ).

중층은 대부분 분해되었으며 이것은 터널형 박테리아(tunnelling bacteria)의한 것으로 보인다(Fig. 5). 그러나 세포간층과 S<sub>3</sub>층 그리고 벽공벽 부분은 거의 분해가 일어나지 않았다(Fig. 5).

## 2) 도관

Fig. 6은 도관과 방사유세포가 접하는 세포벽으로써 도관 2차벽의 중층에 공동을 형성하며 분해하는 침식형 박테리아에 의해 분해가 되고 도관 내부에 여러 분해물질로 차있는 것이 관찰된다. 공동을 형성하는 박테리아를

과거에는 공동형 박테리아로 분류되었으나 침식형 박테리아의 일종으로 간주되고 있다. 이러한 침식형박테리아에 의해 형성된 공동은 세포를 가로지르는 방향으로 공동이 만들어 지나 연부후에 의해 형성되는 공동은 마이크로휘브릴 주행방향 즉 섬유방향과 거의 평행하게 다이아몬드형으로 신장되어 만들어진다<sup>0</sup>. Fig. 7은 오리나무의 횡단면상 복합관공으로 도관 세포벽의 세포간층과 1차벽 그리고 S<sub>3</sub>층은 거의 분해가 되지 않았고 S<sub>2</sub>의 대부분이 분해된 것으로 관찰되었다.

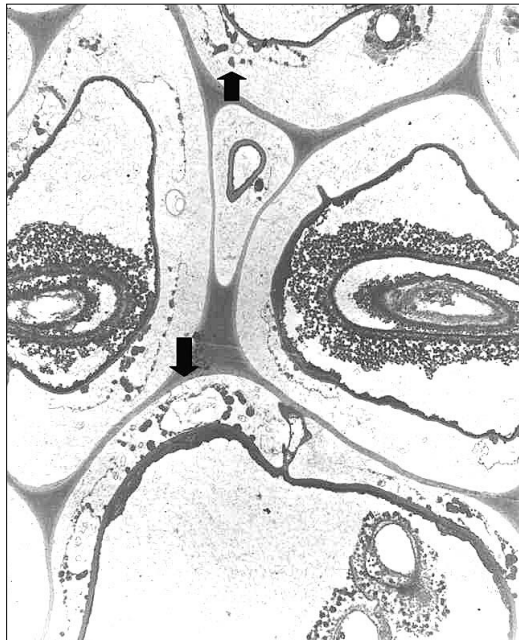


Figure 3. Transmission electron micrographs for cross section of *Fraxinus* spp. ( $\times 3,000$ ), Soft rot cavities(arrow) in wood fiber.

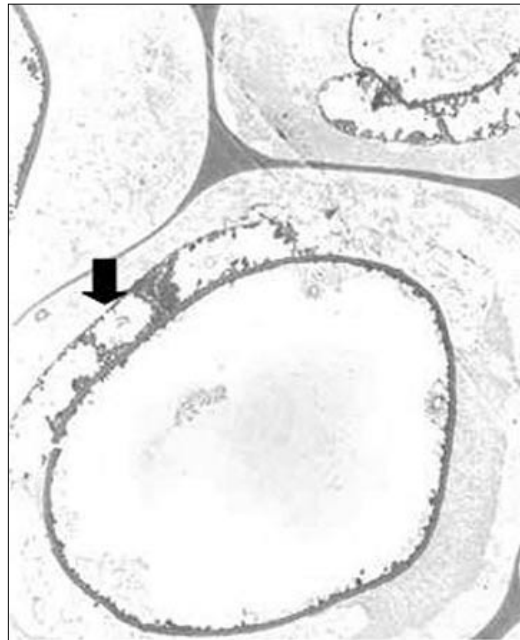


Figure 4. Transmission electron micrographs for cross section of *Alnus* spp. ( $\times 3,000$ ), Soft rot cavities(arrow) in wood fiber.

3) 유세포

방사유세포간의 세포벽은 거의 분해되지 않았으며 터

널형 박테리아에 의한 분해와 침식형 박테리아 의한 분해 흔적이 관찰되었다(Fig. 8).



Figure 5. Transmission electron micrographs for cross section of *Alnus* spp. (×12,000), high decay-resistance of S3 and pit membrane, and extensive degradation of S2 wall.

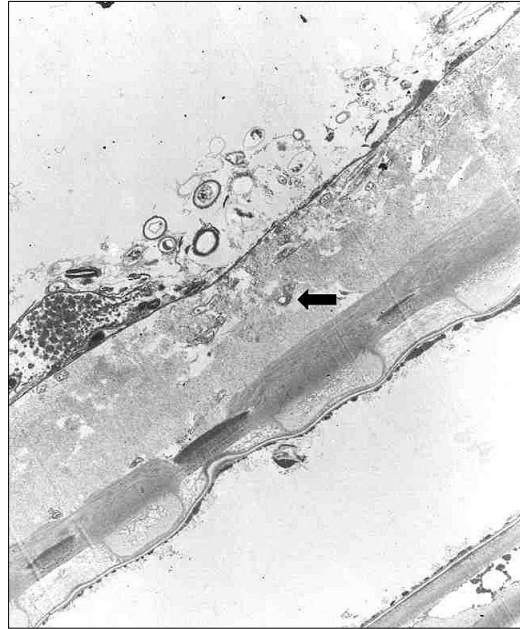


Figure 6. Transmission electron micrographs for cross section of *Fraxinus* spp. (×4,400), Degradation of vessel and parenchyma cell wall by erosion bacteria (arrow).



Figure 7. Transmission electron micrographs for cross section of *Alnus* spp. (×4,400), Degradation of vessel cell wall by soft rot.

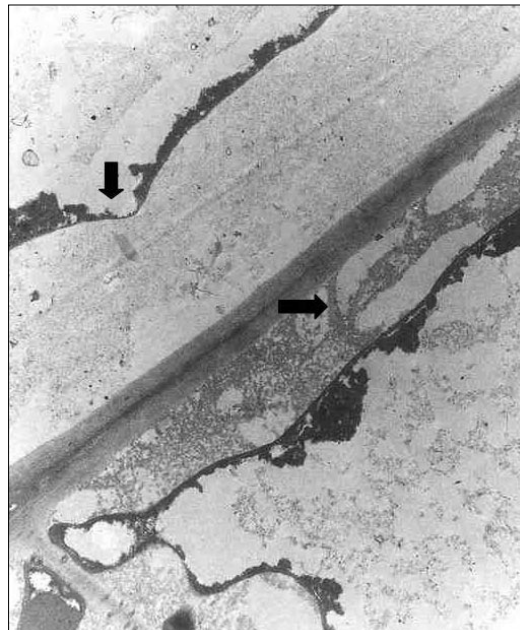


Figure 8. Transmission electron micrographs for cross section of *Alnus* spp. (×4,400), Degradation of parenchyma cell wall by erosion and tunnelling bacteria (arrow).

### 3.2.2. 분해형태

물푸레나무와 오리나무의 분해부위가 거의 균일하고 분해정도가 극심하여 세포벽은 겨우 형상만을 유지할 정도로 취약하였으며, 목섬유와 같이 2차벽 중층(S<sub>2</sub>)이 침해를 받아 공동을 형성하여 망상 형태를 나타낸다. 2차벽 내층(S<sub>1</sub>)은 거의 완전한 형태를 유지하고 있었으며(Fig. 6, 7) 복합중간층은 2차벽과 분리된 형태로 관찰되는 경우가 많았다(Fig. 3). 특히 조재 목섬유보다는 만재 목섬유가 더 심하게 분리되어 있다. 이는 조재부의 세포벽이 만재부의 세포벽보다 두꺼워 2차벽 중층의 분해가 많이 이루어는 한편, 조재와 만재의 리그닌 조성과 양 차이 때문에 만재부가 미생물의 공격을 더 많이 받든 것으로 알려져 있다<sup>1)</sup>. 한편 도관은 주위의 목섬유가 심하게 분해되었음에도 불구하고 도관벽은 거의 분해되지 않았다.

도관벽의 분해는 벽후와도 관계가 있으며 후벽인 도관벽이 박벽보다 분해정도가 심하다. 도관벽에는 과립상의 잔사물이 퇴적되어 있고 후벽의 세포벽이 박벽화되어 있었다. 이와 같이 도관은 만재의 후벽도관에서 분해가 심하였고 박벽의 조재도관이 분해에 대한 저항성이 큰 것으로 나타났다. 유세포는 다른 세포에 비해 박벽이며 영양물질을 포함하고 있지만 비교적 완전하게 남아있어 저항성이 큼을 알 수 있다. 또 방사 유세포의 분해형태는 목섬유와 거의 동일하며 목섬유의 벽과 방사 유세포의 말단벽을 통과하는 균사를 관찰 할 수 있었다.

희곡리 토탄층 목재의 세포벽은 연부후균과 박테리아에 의해 주로 분해되어 있고 침식형 박테리아의 식흔으로 추정되는 공동형태가 확인되었다. 박테리아는 목재 세포 내강에서 성장하고 연부후균과 마찬가지로 2차벽 중층에서 공격이 시작되며 터널형 및 공동을 형성하는 침식형 박테리아에 의한 분해형태도 관찰할 수 있었다. 이는 출토목재의 부후형태인 전면분해형 및 점상분해형에 속하는 것으로 알려져 있으며<sup>2)</sup> 희곡리출토 수종들에서도 동일한 분해특징을 관찰 수 있었다. 비교적 온전히 남아 있는 도관 세포벽을 제외하고는 모든 세포에서 연부후균에 의한 침해가 주축을 이루는 것으로 관찰되었다. 박테리아에 의한 분해는 터널형 박테리아에 의한 2차벽 중층의 나타나는 것이 특징적이며 상당히 분해가 진행된 세포벽에서도 2차벽 내층 (S<sub>2</sub>층)과 도관벽은 거의 완전한 형

태를 유지하고 있는 특징을 가지고 있었다.

## 4. 결론

수침고목재의 경우 수중간에 분해정도 차이가 있으며, 동일 수종 내에서도 조·만재 간, 동일 세포간에 분해 형태가 다르고, 균류에 대한 저항성도 각기 다를 것을 밝혔다. 그리고 물푸레나무와 오리나무에 대한 연구에서는 비교적 리그닌의 밀도가 높은 도관이 분해에 대한 저항성이 있고, 셀룰로오스함량이 많은 2차벽이 먼저 분해되었으며 상대적으로 리그닌이 증가한 것으로 나타났다.

분해의 특징은 2차벽 중층에 공동을 형성하여 망상을 나타내고 2차벽 내층은 거의 분해가 되지 않으며 내강에서 복합중간층으로 향하여 세포벽이 점진적으로 불규칙하게 침식되어 있다. 분해정도는 목섬유가 가장 크며, 그리고 유세포, 도관의 순서이다. 분해 형태는 모든 세포가 균일하게 분해되었고 2차벽 중층에 공동을 형성하여 분해하는 연부후균에 의한 분해가 가장 많이 발생되었다. 또한 박테리아에 의한 분해가 수중에 관계없이 발생하는 것을 알 수 있다. 구성세포간에서 주로 목섬유는 연부후균에 의해 분해되며 도관과 유세포는 박테리아에 의한 분해가 발생하므로 구성세포간의 분해균의 차이를 알 수 있었다. 따라서 수침고목재의 경우 밀폐된 환경 속에서 혐기성 박테리아에 의해 분해되는 것을 확인 할 수 있었으며 각 구성세포간의 분해양식 차이를 확인 할 수 있었다.

이상의 연구 결과에서 해양친공충의 식흔 흔적이 발견되지 않고 연부후균과 박테리아에 의한 분해 형태만 발견되어 평택희곡리 토탄지역 형성 당시인 5700-5900여 년전이 후빙기의 온난화에 의한 홀로세 기후최적기 기간 중이기 때문에 서해안 해수면 상승에 의해 해수에 침수되었을 것이라는 가설은 사실이 아닌 것으로 해석되었다. 연부후균과 박테리아에 의한 분해 형태로 침수가 담수에 의한 것인지 아니면 해수에서 의한 것인지 알아내는 것은 매우 어렵기 때문에 향후 심도있는 추가 연구가 필요하다. 또한 본 연구에서 제시된 것처럼 수침고목재는 매장 환경, 수종 그리고 세포의 종류 등에 따라 분해형태가 각기 다르다, 따라서 부후가 많이 된 수침고목재의 보존처

리를 위해서는 고분자량의 처리약제를 고농도로 처리하여 건조에 의한 수축변형을 방지하는 처리방법의 검토가 필요하다고 생각된다.

### 참고문헌

1. 신동소, 안세희, *목재보존학*, 서울대출판사, 한국 (1996).
  2. Rowell R.M and Barbour R.J.(eds), Mark, *Archaeological Wood*, American Chemical Society, Washington (1990)
  3. SAKAI, H. "목재의 열화과정", *목재학회지*, 37(4), 363-369 (1991).
  4. 강애경, 박상진, "출토고목재의 수종과 조직구조에 관한 연구(II)-출토고목재의 부후형태-", *보존과학회지*, 2, 15-24 (1993).
  5. 김윤수, 최지호, 배현중, T.Nillsson, G.Daniel, "세균에 의한 수침고목재 피해양태의 초미시구조적 관찰", *보존과학회지*, 1, 3-11 (1992).
  6. 김윤수, 최광남, "수침목재의 재질분석에 관한 연구-미시형태적 변화를 중심으로-", *보존과학연구*, 7, p275-298 (1986).
  7. 김익주, "해양에서 열화된 완도선 수침고목재의 화학적 미시경적 변화", *보존과학연구*, 11, p107-262 (1990).
  8. 박원규, 구민정, 전재범, 김병로, 한규성, "나무의 수종식별 및 나이테 분석", 서해안고속도로건설구간 유적발굴조사 보고서(3), 단국대학교중앙박물관 (1995).
  9. 박상진, 이원용, 이화형, *목재조직과 식별*, 향문사 (1987).
  10. Daniel G. "Use of electron microscopy for aiding our understanding of wood biodegradation", *FEMS Microbiology Reviews* 13(2-3), p199-233 (1994).
  11. 김윤수, 김규혁, 김영숙, *목재보존과학*, 전남대학교 출판부 (2004).
-