



세균에 의한 수침고목재 피해양태의 초미시구조적 관찰

金潤受 · 崔芝昊 · 裴炫鐘* · T.Nilsson · G.Daniel**

*전남대학교 임산공학과

**스웨덴대학교 임산공학과

Ultrastructural Observation of Bacterial Attacks on the Waterlogged Archaeological Woods

Y. S. KIM, J. H. CHOI and H. J. BAE*

T. Nilsson and G. Daniel**

**Dept. of Forest Products & Technology, Chonnam National University, Kwangju
500-757 Korea.*

***Dept. of Forest Products, Swedish University, Uppsala, Sweden.*

ABSTRACT: Micromorphological changes in waterlogged archaeological woods excavated from Sweden and Germany were investigated. Especially bacterial attacks on those wood samples under near anaerobic conditions were examined by transmission electron microscopy(TEM). The major feature of micromorphological alterations in those wood samples was the preferential destruction of secondary wood cell wall. In contrast, the middle lamella was not extensively degraded. Three distinct degradation patterns by bacteria were observed: erosion, cavitation and tunnelling bacteria. Erosion and cavitation bacteria attacked primarily S₂ layer, whereas tunnelling bacteria made the tunnel-like degradation along the S₁ layer. Tunnelling bacteria, in some samples, were able to degrade tunnel in the lignin-rich areas, such as middle lamella, suggesting that these bacteria had the capacity to degrade the lignin.

IR spectra indicate that hemicellulose and cellulose in the waterlogged woods were preferentially decomposed. Breakdown of the lignin, on the other hand, was much slower.

1. 서 론

장기간 민물 또는 바닷물에 침수된 상태로 놓여있는 고목재는 목재세포가 물로 포수(waterlogged)되어 있어서 담자균에 속하는 목재부후균(wood rot fungi)에 의한 피해는 발생되지 않으나, 자낭균과 불완전균류에 속하는 軟부후균(soft rot fungi)에 의해 목재세포벽이 분해되는 것으로 알려져 있다.^{18, 22)} 그것은 연부후균이 고함수를 영역과 산소가 결핍된 상태에서 살아갈 수 있는 특징을 갖고 있기 때문이다.

진균류와 달리 세균은 준혐기성 내지는 혐기성 상태에서 살아갈 수 있는 미생물이며, 또한 목재구성성분에 대한 분해능이 있다고 알려지고 있음에도 불구하고,^{4, 5, 8, 11)} 최근까지 세균에 의한 수침고목재의 피해양태에 대한 보고는 많지 않다. 광학현미경 차원에서 목재세포벽을 공격하는 세포를 확인하기 힘들었던 것도 그 원인의 하나로 생각된다.

그러나 수침고목재의 피해양태에 관한 조사를 위해 전자현미경의 사용이 시작되면서부터 세균에 의한 목재세포벽의 분해가능성 여부는 더 이상 논의의 대상이 되지 않는았다. 오히려 다당류와 리그닌의 분해에 관여하는 특정세균에 관한 보다 확실한 증거가 축적되고 있다.^{6, 7, 13, 21, 23, 24, 27)}

본 연구자는 신안 유물선과 완도 어두리 인양선체 목에 대한 주사형전자현미경(SEM) 관찰을 통해 세균의 존재를 확인하였으나,^{3,16)} 이들 세균에 의한 목재세포벽의 미시형태적 변화와 피해양태에 대한 체계적 연구는 진행하지 못했다. 최근 Sweden의 Thomas Nilsson 그룹과 뉴질랜드의 A. Singh 연구팀은 수침고목재와 방부제 처리목재에서 다양한 형태의 세균에 의한 목재세포벽의 피해양태를 보고해 오고 있다.^{6,20, 25-28)} 따라서 본 연구에서는 우리나라에서 인양된 수침고목재가 세균에 의해 어떻게 열화되는가를 검증하기 위한 전단계로서 우선 스웨덴과 독일에서 인양된 고대목선의 선박재를 대상으로, 이들 선박재가 세균에

의해서 어떻게 공격당했는가를 알아보았다. 또한 이들 수침고목재의 화학적 조성의 변화도 아울러 파악하였다.

2. 재료와 방법

2.1 재료

본 관찰에 공시된 재료들은 스웨덴과 독일에서 인양된 선박에서 채취한 것으로써 이 선박재들은 인양되기 전까지 각각 9,000년 및 6,000년동안 수침상태에 놓여 있었다. 관찰에 사용된 공시재의 수종은 구주적송(*Pinus sylvestris*)와 참나무(*Quercus* spp.)로 추정되었다. (Th.Nilsson, personal communication).

2.2 방법

2.2.1 전자현미경 관찰

공시재료로부터 0.5×0.5×10mm의 목편을 떼어 내어 상온에서 3% glutaraldehyde (in 0.5M sodium cacodylate 완충용액)에 3~4시간 고정시키고 상기 완충용액으로 세척한 뒤 2% osmium tetroxide를 사용, 4℃에서 하룻밤 동안 후고정시켰다. 이어 완충용액으로 세척한 뒤 ethylalcohol로 탈수하여 London resin white에 包埋(embedding)하였다. 포매된 조직은 diamond knife를 사용해 Sorvall ultramicrotome(MT 2-B)에서 초박편을 제작하여 nickel grid에 부착시켰다. 초박편은 uranyl acetate와 lead citrate로 이중염색 또는 염색 직전 제조한 1% KMnO₄로 염색하여 JEOL 투과형 전자현미경(TEM)으로 80KV에서 관찰하였다.

2.2.2 적외선 분광 분석

적외선 분광분석(IR)은 기존의 방법²⁾을 따랐다. 즉, 공시된 재료를 분말화하여 100mesh의 목분을 만들고 목분 1mg에 분광기용 KBr 300mg을 넣어 500Kg/cm²의 압력으로 10분간 압축하여 두께 1mm, 직경 10mm의 disk를 만든 다음 이것들은 Shimadzu IR를 사용하여 400~4000cm⁻¹에서 IR spectra를

측정하였다.

3. 결 과

3.1 전자현미경 관찰

공시된 歐洲赤松의 세포벽 구성은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 만재의 경우 S₂층이 세포벽의 대부분을 차지하고 있으며, 그 폭은 대체로 1.1~1.5 μ 에 달한다. 목재 세포벽을 공격하는 진균류의 균사(hyphae)의 크기는 대체로 0.7~0.9 μ 의 범위 내에 존재한다(Figs. 1, 2). 구주 적송의 경우 피해 양태는 크게 연부후(Fig. 2)와 세균에 의한 피해로 나뉠 수 있다. 연부후의 경우 S₂층만을 선택적으로 공격하는 전형적인 모습을 보여주고 있다(Fig. 2).

수침고목재의 세포벽을 공격하는 세균은 그 크기 대체로 0.5 μ 이하의 것들로서 매우 다양한 형태의 세균들이 세포벽의 분해에 관여하고 있다(Fig. 3). 즉 S₂층에 동공을 만드는 세균과 함께 S₁층과 중간층(middle lamella) 사이에 tunnel을 만들어가는 세균도 존재하였다(Fig. 3).

2차벽에 국부적인 동공을 만드는 소위 동공형 세균(cavitation bacteria)은 고배율 관찰 결과 세균주위에 편모(flagella)가 존재하는 것(Fig. 4내의 화살표)으로 나타났다. 동공형 세균의 크기는 대체로 0.2 μ 의 범위로 매우 작았으며 계란상의 모습을 나타냈다(Fig. 4). 동공세균은 참나무 2차벽에서도 관찰되었는바 이들은 목재 세포벽의 S₂층에 0.2×0.6 μ 의 동공을 만들었으며(Fig. 5), 편모를 갖고 있었다(Fig. 9의 화살표). 동공형 세균은 목재세포의 2차벽을 분해하나 중간층은 공격하지 않았으며 이들 세균 주위는 체외 점액질(extracellular slime layer)로 둘러싸여 있었다(Fig. 4).

목재 세포벽을 침식해 들어가는 형태의 세균 역시 관찰되었다(Figs. 6, 7). 이들의 형태는 대체로 원형을 나타냈으며, 그 크기는 0.5 μ 로서 동공형 세균보다는 2배 정도 컸다. 이들 침식형 세균(erosion bacteria)은 동공형세균과 마찬가지로 목재세포의 2차벽

을 공격하나 리그닌이 많이 함유된 중간층은 공격하지 않았다. 고배율 관찰결과 침식형 세균은 2차벽에 완전히 밀착되지 않고 미세하나마 목재세포벽과 간격을 두고 있었다(Fig. 7). 침식형 세균주위에는 0.1 μ 정도의 또다른 형태의 세균이 존재하였다(Fig. 7 별표).

상술한 동공형 및 침식형 세균 이외에도 S₁과 중간층 사이에 땅굴처럼 파고 들어가는 동굴형 세균(tunnelling bacteria)이 관찰되었다. 이 세균들은 반달 모양의 흔적을 남겨놓는 특징을 나타내었다(Fig. 8). 동굴형 세균은 활엽수의 참나무에서도 관찰되었는바 이것들은 S₁층과 cell corner 사이에 동굴처럼 파고 들어가기도 하며 중간층을 직접 파고 들어가기도 하였다(Fig. 9). 동굴형 세균주위의 분해된 목재 세포벽에는 粒子狀(granular)의 물질이 많이 나타났다(Fig. 8).

세균의 형태에 관계없이 수침목재세포벽은 주로 2차벽 특히 S₂층이 피해를 받았으나 중간층과 cell corner는 대체로 세균의 공격에 대해 저항을 나타냈다. 중간층의 경우 부분적으로 분해(Fig. 10)가 나타났으나 그 정도가 현저하지는 않았다.

목재세포벽과는 달리 세포벽의 유연벽공은 쉽게 분해되지 않았다(Fig. 12). 특히 유연벽공 내의 torus는 다른 어떤 목재세포벽의 구성요소보다도 저항성을 보였다. 정상적인 목재세포벽과는 달리 S₃층이 없고 리그닌이 많은 압축이상재(compression wood)의 경우 세균에 의한 공격은 S₃층 부터 시작되었으나(Fig. 12), 그 공격정도는 동일한 정상세포벽에 비하면 크지 않았다. 또한 분해된 세포벽 주위는 粒子狀의 물질로 현저하게 에워쌓여 있었다.

3.2 IR spectra

수침고목재와 정상적인 목재의 IR spectra는 Fig.13에 나타난 바와 같다. 수침 고목재의 IR은 1730cm⁻¹ band의 완전소멸과 함께, 1610, 1460, 1430, 1270 및 1230에서의 peak의 강도가 현저히 증가하였다. 이것은 수침 고목재의 hemicellulose의

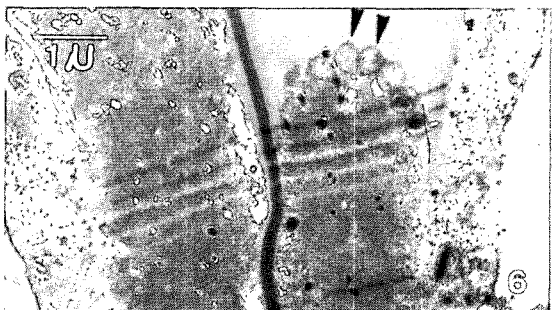
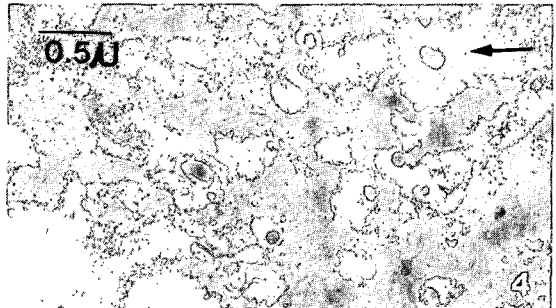
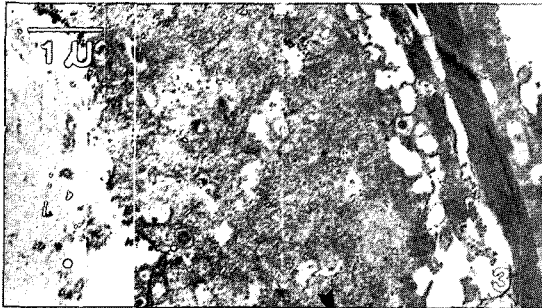
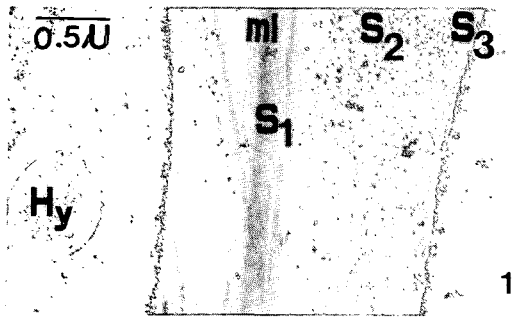


Fig. 1. Tracheid of intact pine wood showing cell wall layers. Note the dimension of cell wall layers and hyphae.

Fig. 2. Soft rot cavities in the pine wood. Hyphae can be seen within the larger cavities that has formed in the S₂ layer.

Fig. 3. Degradation of pine wood tracheids by a consortium of several bacteria forms including cavitation (arrow head) and tunnelling bacteria (arrow).

Fig. 4. Transverse view of secondary cell wall degraded by cavitation bacteria. Secondary cell wall was severely attacked,

whereas middle lamella in quite intact state. Note the flagella (arrow) surrounding the bacteria.

Fig. 5. Degradation of oak wood fiber by cavitation bacteria (arrow) in the secondary cell wall. Middle lamella is intact, while S₂ layer severely degraded.

Fig. 6. Transverse view of pine wood samples latewood tracheid showing attack of the wall by erosion bacteria. The erosion bacteria (arrow heads) are seen attacking the wall from the lumen outward.

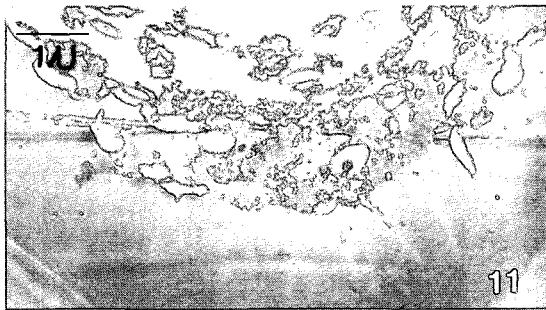
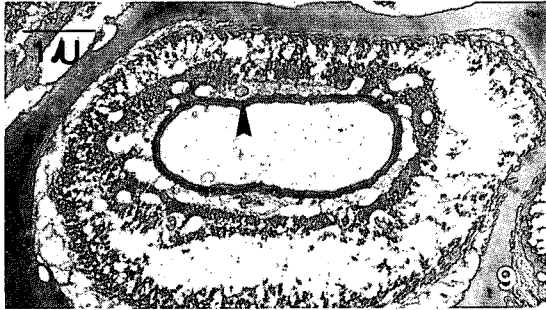
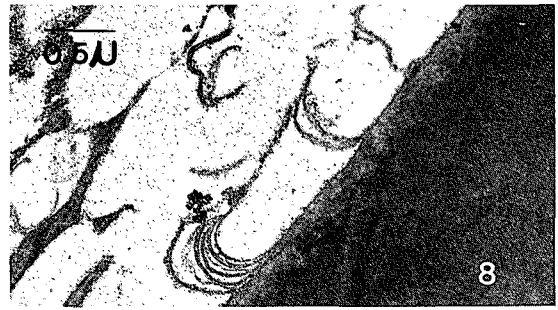


Fig. 7. A group of erosion bacteria attacks the secondary cell wall. Degraded area shows the granular appearance. Note the secondary invaders(stars) between the erosion bacteria.

Fig. 8. Concentric bands formed by tunnelling bacteria in pine wood.

Fig. 9. Tunnelling in the S₁ layer of oak wood samples(arrow). Note the cavitation bacteria(arrow head) with slime layer just below the S₃ layer.

Fig. 10. In some wood samples, middle lamella was eroded.

Fig. 11. Compression wood of pine wood at-

tacked by bacteria from the lumen outward. Note the plenty of granulars around the bacteria, suggesting the degradation product of lignin.

Fig. 12. Relative intact state of bordered pit pairs, especially resistance of torus, in spite of heavily degradation of secondary cell wall.

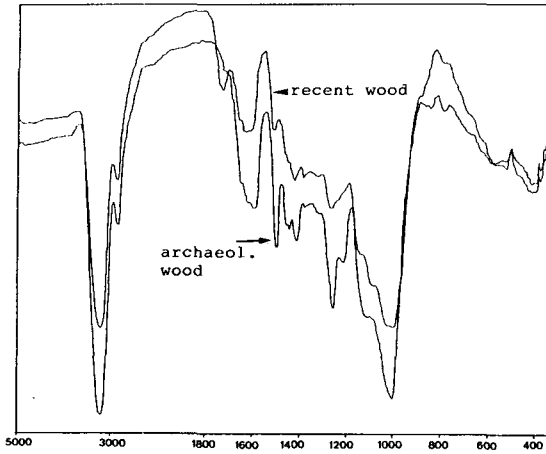


Fig. 13. Comparison of IR spectra of degraded archaeological waterlogged and recent wood taken from *Pinus sylvestris*.

분해(1730cm^{-1} 의 소멸)로 인한 리그닌의 상대적 증가에 따른 리그닌 귀속 band의 증가와, hemicellulose의 우선적인 분해에 따른 잔존 cellulose의 상대적 증가(1460 및 1430)로 해석된다. 수침 목재는 또한 1170 , 1110 , 1060 및 1040cm^{-1} 에서의 peak가 사라진 대신 1050cm^{-1} 부근에 하나의 shoulder가 나타남으로써 본 연구에 공시된 수침고 목재의 경우 결정형 섬유소도 분해되었음을 나타내었다.

4. 고찰

바닷물에서 서식하면서 목재를 공격하는 미생물은 lignicolous fungi와 세균으로 대별된다. 이중 균류는 대부분 자낭균과 불완전균에 속하는 것들로서 섬유소를 영양원으로 하나, 산소 요구수준때문에 해양에 침수된 목재의 내부 깊숙이는 침투하지 않는다.¹⁸⁾ 해양 균류가 목재세포벽에 만들어 내는 전형적인 부후양태는 목재세포벽 2차막에 동공을 형성하는 것이다. 이 같은 연부후는 본 조사에서도 S_2 층에서 쉽게 관찰되었다(Fig. 1).

해양균류와는 달리 해양미생물로서의 세균은 균류가 생활할 수 없는 환경조건 아래서도 성장할 수 있는 특성을 가지고 있으나, 목재 세포벽의 분해능은 균류에 비하면 높지 않다.²⁴⁾ 그럼에도 불구하고 수침고 목재와 같이 수백년 또는 수천년 동안 세균의 침해에 노출될 경우 목재 세포벽의 피해는 심각할 정도에 이른다.²⁷⁾ 세균에 의한 목재의 전형적인 피해 양태는 벽공의 분해로서, 벽공의 파괴로 인해 바닷물이나 민물에 저목된 목재는 침윤성(liquid permeability)의 증가를 나타낸다.^{8,14)}

최근 전자현미경 관찰 결과 세균은 벽공 이외에도 목재 세포벽을 직접 공격할 뿐 아니라 리그린이 구성 성분의 대부분을 차지하고 있는 중간층까지도 공격하는 것으로 밝혀지고 있다.^{5, 11, 13, 21, 27)} 이에 따라 세균피해목재는 낮은 중량감소율에도 불구하고 강도의 저하가 심각한 것으로 보고되고 있다.^{10,28)}

Nilsson 등은 목재 세포벽을 공격하는 세균의 양태에 따라 침식형(erosion), 동공형(cavity) 및 동굴형(tunnelling) 세균으로 분류하였다.^{6,20,27,28)} 본 연구에 공시된 수침고목재에서는 침식형·동공형 및 동굴형 세균이 모두 관찰되었다. 본 연구에서 관찰된 침식형 세균은 주로 S_2 층을 분해하여 group을 지어 2차벽 특히 S_2 층의 분해에 관여하나 중간층은 공격하지 않는 것으로 나타나, 침식형 세균들은 주로 섬유소 분해세균에 속하는 것으로 사료된다. Singh과 Butcher(1991)에 따르면 침식형 세균은 單桿(short rod)상태로서 S_2 층의 microfibril의 주행방향과 동일한 방향으로 침식해 들어간다. microfibril의 각도와 나란히 침식해 들어가는 침식형 세균은 완도 유물선체목의 주사현미경적 관찰에서도 확인되었다.³⁾

Fig. 7로 부터 목재 세포벽의 분해에는 침식형 세균 이외에 또다른 형태의 세균이 관여하고 있음을 알 수 있다. Singh등도 본 연구와 유사한 세균을 수침목재에서 관찰하였는바,²⁸⁾ 그들은 이것들을 제2차 침해세균(secondary invader)로 명명하였으며, 방선균(actinomycetes)일 가능성이 높음을 시사하였다.

지금까지 알려진 세균 이외에도 방선균역시 목재 세포벽의 분해에 관여하는 것으로 알려지고 있다.^{9,25)}

침식형 세균과 마찬가지로 S₂층을 주로 분해하는 동공형 세균은 그 분해양상이 침식형이나 동굴형과는 달리 목재 세포벽에 직접 접촉하지 않고 균체의 점액층으로 에워싼 상태에서 목재 세포벽을 분해하며 분해범위가 넓게 나타났다(Fig. 4). 이같은 분해 형태는 동공형 세균이 목질성분을 분해할 수 있는 강력한 효소체계를 가지고 있으며 이 효소들은 목재세포벽내에서 확산될 수 있음을 시사한다. 동공형 세균은 목재 내에서 대체로 球形을 나타내며 세균 주위의 목재세포벽은 1% KMnO₄로 염색했을 경우 粒子상의 모습이 자주 나타나는 바, 이것은 lignin의 분해산물로 간주된다. 그러나 침식형 세균의 리그닌 분해능은 본 연구에서는 더 이상 확인할 수 없었다.

동굴형 세균은 침식형 세균과는 달리 microfibril의 경사각과 무관하게 세포벽을 침해하며 주로 S₁층과 중간층 사이에 땅굴을 파듯 목재 세포층을 분해해가며 균 주위에는 반달모양의 점액질이 에워싸는 특징을 보였다(Fig. 8). 동굴형 세균은 목질 구조의 분해능이 현저하여 이 세균의 공격을 받은 목재는 미소한 증량감소율에도 불구하고 현저한 강도의 감소를 나타내며, 진균류 특히 연부후균과 공존하는 것으로 보고 되고있다.^{23,28)} 동굴형 세균이 리그닌이 많은 세포간층도 공격한다는 보고는 본 연구에서도 확인할 수 있었다.

흥미로운 사실은 지금까지 유연벽공은 세균에 의해 맨 먼저 공격받고 쉽게 분해되는 것으로 보고되어⁸⁾ 있으나, 본 연구결과 유연벽공은 2차벽보다 세균에 대해 더 큰 저항성을 보였다는 점이다. 이와 같은 차이가 어디에서 연유하는지는 또다른 연구가 필요하다 하겠다.

압축이상재의 세균에 의한 분해 형태는 세균에 의한 리그닌의 분해양식이 어떠한가를 시사해 준다. 즉 대부분의 해양세균은 대체로 섬유소 분해능을 갖고 있는 반면,¹⁵⁾ 리그닌 분해능은 특정 세균을 제외하고는 빈약하다. 압축이상재가 정상적인 목재에 비해 세

균에 대한 피해정도가 훨씬 적다는 것은 이 같은 사실 - 다량의 리그닌 함유 - 에 기인한다 하겠다. 또한 흥미로운 사실은 바이킹시대의 선박재에서 뿐만 아니라 완도 어두리에서 인양된 고려시대 선박에서도 압축이상재가 관찰된다는 점이다.³⁾ 압축이상재의 존재는 고대시대의 목선제조에 압축이상재(만곡재)를 사용하고 있었음을 시사한다 하겠다.

적외선분광결과 수침고목재는 hemicellulose에 귀속되는 1730cm⁻¹band의 소실을 나타낸 반면, lignin에 귀속되는 band에서는 강한 peak를 보여 주었으며 결정영역의 섬유소를 가르키는 파장의 손실을 나타냈다. 이같은 결과는 고목재를 대상으로한 지금까지의 IR 연구결과와^{19,29)} 일치한다. 이같은 IR분석 결과는 신안 해저유물선체목인 馬尾松(Pinus massonia)에서도 동일하였다.¹⁷⁾ IR분석 결과는 지금까지 수침고목재를 대상으로 실시한 화학분석 결과와도 일치한다.^{1,12,17)}

5. 결 론

미생물에 의한 수침고목재의 미시형태적 변화를 파악하고자 독일과 스웨덴에서 인양된 선체목을 TEM으로 관찰한 결과 이들 목재 세포벽은 연부후균 이외에도 침식형·동굴형 및 동공형 세균에 의해 열화되었으며 IR분석 결과 수침고목재는 주로 다당류가 우선적으로 분해되는 것으로 나타나, 수침고목재를 분해하는 세균들은 주로 다당류를 분해하는 것으로 나타났다.

이상의 관찰로부터 우리나라에서 인양된 수침고목재 역시 본 연구에서 관찰된 다양한 세균에 의한 열화 가능성을 배제할 수 없는바 이에 따른 지속적인 연구와 함께 보존처리 대책의 수립이 요구된다.

<사 사>

본 연구의 진행을 위해 스웨덴 체류의 재정지원을 해준 Swedish Institute에 깊은 감사를 드린다.

참고문헌

1. 김윤수, 방주완, 김익주, 최광남 : 수침고목재의 화학 조성, 목재공학 18(2), 3-7 (1990).
2. 김윤수 : 적외선 분광법에 의한 고목재의 성상의 탐지, 목재공학 16(4), 3-9 (1988).
3. 김윤수, 최광남 : 수침고목재의 재질분석에 관한 연구 -미시형태적 변화를 중심으로-, 보존과학, 7, 275-298 (1986).
4. Coutois, H. Über den Zellwandabbau durch Bakterien in Nadelholz, Holzforschung, 20, 148-154 (1966).
5. Coutois, H. and J. J. Erasmy : Bakterienangriff auf die Zellwände von Eichen- und Buchenholz während einer Wasserlagerung, Holz Roh Werkst, 34, 381-384 (1976).
6. Daniel, G. F. T. Nilsson and A. P. Singh : Degradation of lignocellulosics by unique tunnelforming bacteria, Can. J. Microbiol, 33, 943-948 (1987).
7. Drysdale, J. A., P. I. Ruland and J. A. Butcher : Isolation and identification of bacteria from degraded wood—a progress report, IRG /WP, 1192 (1986).
8. Graves, H : Micromorphology of the bacterial attack of wood, Wood Sci. Technol, 3, 150-166 (1969).
9. Graves, H : The effect of selected bacteria and actinomycetes on the decay capacity of some wood-rotting fungi, Mat. U. Org. 5, 265-279 (1970).
10. Graves, H : Selected wood-inhabiting bacteria and their effect on strength properties and weights of Eucalytus regnans and Pinus radiata sapwoods, Holzforschung, 27, 20-26 (1973).
11. Harmsen, L. and T. V. Nissen : Der Bakterienangriff auf Holz, Holz Roh. Werkst, 23, 29-36 (1965).
12. Hoffman, P. and N. Parameswaran : Chemische und ultrastrukturelle Untersuchungen an wasser-gesättigten Eichenhoelzern aus archaologi-schen Funden, Berliner Bertr, Archaeo-mertri, 7, 273-285 (1982).
13. Holt, D. M : Bacterial degradation of lignified wood cell wall in aerobic aquatic habitats, decay pattern and mechanisms to account for their formation, J. Inst. Wood Sci, 9, 212-223 (1983).
14. Johnson, B. R : Permeability changes induced in the three western conifers by selective bacterial inoculation, Wood & Fiber, 11, 10-21 (1959).
15. Kadóta, H : Cellulose-degrading bacteria in the sea, Ray, D. L. (ed.), Marine Boring and Fouling Organisms, Univ. Washington press, Seattle, 332-341 (1959).
16. Kim, Y. S : Micromorphology of degraded archaeological pine wood in waterlogged situation, Mat., u. Org, 24, 271-286 (1989).
17. Kim, Y. S. : Chemical characteristics of waterlogged archaeological wood, Holzforschung, 44, 169-72 (1990).
18. Kohlmeyer, J. and E. Kohlmeyer : Marine Mycology, the Higher Fungi, Academic Press, New York, 690 (1979).
19. Kommert, R. and H. Pecina : Die Anwendung der Infrarotspektroskopie zur Unterscheidung von Hozfunde-Moeglichkeit und Beispiele, Z. Archaeol, 19, 115-126.
20. Nilsson, T. and D. Holt : Bacterial attack occuring in the S₂ layer of wood fibers, Holzforschung, 37, 107-108 (1983).
21. Pellinen, J., J. Jokla and M. S. Salonen : Degradability of different lignins by bacteria,

- Holzforschung, 41, 271-276 (1987).
22. Rheinheimer, G : Aquatic Microbiology 2nd., ed, John Wiley & Sons, Chiester, (1980).
 23. Schmidt, O., Y. Nagashima, W. Liese and U. Schmitt : Bacterial wood degradation studies under laboratory conditions and in lakes, Holzforschung, 41, 137-140 (1987).
 24. Schmidt, O. Zum Verhalten von Bakterien gegenüber der verholzter Zellwand, Mitteilungen der BFA u., Holzwirtschaft, Hamburg. Reinbeck, No. 133, 95 (1981).
 25. Singh, A. P., J. A. Drysdale and J. A. Butcher : TEM evidence of the wood degrading activity of actinomycetes-like organisms, Holzforschung, 42, 277-279 (1988).
 26. Singh, A. P., T. Nilsson and G. F. Daniel : Ultrastructure of the attack of the wood of two high lignin tropical hardwood species, *Alstonia scholaris* and *Homalium foetidum* by tunneling bacteria, J. Inst. Wood Sci, 11, 26-42 (1987).
 27. Singh, A. P., T. Nilsson and G. F. Daniel : Bacterial attack of *Pinus sylvestris* wood under near anaerobic conditions, J. Inst. wood Sci., 11, 237-249 (1990).
 28. Singh, A. P. and J. A. Butcher : Bacterial degradation of wood cell wall, A review of degradation pattern, IRG /WP, 1460 (1990).
 29. Taniguchi, T., K. Okamura, H. Harada and K. Nakato : Accessibility and density of cell walls of unearthed buried woods, Mokuzai Gakkaishi, 32, 738-743 (1986).