목재사방댐에 사용된 낙엽송 부재의 내구성 평가*¹

장 재 혁*² · 김 중 호*² · 전 근 우*² · 권 구 중*³ · 황 원 중*⁴ · 김 남 훈*^{2†}

Durability Characterization of Larch Wood (*Larix kaempferi*) used for Woody Erosion Control Dam*¹

Jae-Hyuk Jang*² · Jong-Ho Kim*² · Kun-Woo Chun*² · Gu-Joong Kwon*³ ·
Won-Joong Hwang*⁴ · Nam-Hun Kim*^{2†}

요 약

본 연구는 목재사방댐에 사용된 국산 낙엽송재의 내구성을 평가하기 위하여 수행되었다. 낙엽송부재의 수중침적부위, 미침적부위 및 대기중 방치재를 공시재료로 이용하였다. 낙엽송 부재의 설치 위치 및 설치 후 기간 경과에 따른 목재조직의 열화정도는 광학현미경 및 주사전자현미경으로 관찰하였고, 각 조건 및 부위별 시료의 종압축강도와 전단강도는 만능강도측정기로 측정하였다. 그 결과, 수중 침적부위는 사용기간이 7년 이상 경과해도 거의 정상재와 유사한 해부 및 역학적 특성을 나타냈다. 수중에 침적되지 않은 부재의 경우, 심재는 기간이 경과해도 정상재와 유사한 양호한 상태를 유지하고 있었으나, 변재는 5년 이상 경과됨에 따라 세포벽이 얇아지거나 붕괴되는 열화가 발생하였다. 또한 변재는 사용기간이 경과함에 따라 역학적 특성이 크게 저하되었으나, 심재는 비교적 그 저하율이 작았다. 사방댐 제작 후, 자연상태에서 그대로 방치된 잔여 목재는 열화의 정도가 심하고 강도적 성능이 크게 저하되어 사방용 부재로의 역할을 수행하기에는 부적합한 것으로 나타났다.

ABSTRACT

This research has been carried out to evaluate the durability characterization of larch wood used for woody erosion control dam. Wood deterioration and strength properties were analyzed according to installed position and duration. Optical and scanning electron microscope were used for examining wood deterioration, and an universal testing machine was applied for compression

*¹ 접수 2013년 3월 21일, 채택 2013년 7월 23일

*² 강원대학교 산림환경과학대학. College of Forest & Environmental Sciences, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea

*³ 동국대학교 바이오시스템대학. College of Life Science and Biotechnology, Dongguk University, Seoul 100-715, Korea

*⁴ 국립산림과학원. Korea Forest Research Institute, Seoul 130-172, Korea

† 교신저자(corresponding author) : 김남훈(e-mail: kimnh@kangwon.ac.kr)

and shearing strength. As a result, deposited wood in water was maintained almost similar anatomical and physical properties compare to normal wood, even though it was used for seven years. In non-deposited wood which was installed on the side of the dam, heartwood did not show any significant change during seven years, while sapwood was significantly deteriorated in five years. Also, strength properties of sapwood were significantly decreased according to installed duration whereas, degree of decrease in heartwood were relatively smaller than that in sapwood.

Keywords: woody erosion control dam, larch, *Larix kaempferi*, wood deterioration, CT

1. 서 론

사방댐(erosion control dam)이란 국지성 집중호우, 여름장마 등으로 인하여 다량의 빗물이 돌, 자갈, 모래, 흙 등의 침식물질과 함께 흘러내려 산복붕괴가 일어나는 것을 방지하기 위해 계류를 횡단하여 설치하는 재해방지용 시설물로써 2007년 369개소에서 2011년 775개소의 사방댐이 준설되는 등 그 필요성과 인식이 상당히 높아지고 있다(산림청, 2012). 그러나 지금까지의 사방댐에는 주로 콘크리트 구조물, 철강제틀형 투수댐, 석축용 돌 등이 사용되어 왔으며 이러한 구조물들은 인위적이기 때문에 주위 환경과 어울리지 못하고 오히려 주위를 황폐하게 한다. 또한 양생되지 않은 콘크리트 반죽은 하천의 pH를 상승시키므로 하천생태계 파괴의 원인이 되며 사방공사를 위한 재료 운반이 곤란하며 공사기간 역시 길어지게 된다(전 등, 2005; 2006). 그리고 콘크리트 구조물 안쪽에 쌓이는 토사나 낙엽 등의 퇴적토에 의해 통행 제한이 발생될 수 있으며 오히려 산사태 등을 일으키는 원인이 되고 있다(이, 2008). 이러한 문제점 등으로 인하여 최근 목재는 주위 환경과 어울리는 친환경적인 재료로 콘크리트 사방댐을 대체할 수 있는 중요한 구조물로써의 필요성이 증가하고 있는 추세이다. 그중에서도 국내 목재생산량의 50% 이상을 차지하고 있는 중·소경재는 그 활용도가 낮아 벌목 후 방치되는 경우가 많다. 그러나 이와 같이 버려지는 목재는 토목용재로 충분히 활용 가능하며, 대량의 목재가 소요된다 하여도 사방댐의 설치 대부분이 산림 주변에서 이루어지기 때문에 숲가꾸기 사업에서 생산되는 간벌재를 모두 이용할 수

있다. 또한 콘크리트로 주변 환경에 식상한 소비자의 욕구를 친환경적인 목재를 이용함으로써 크게 만족시킬 수 있으므로 국민의 관심을 산림 속으로 흡수시켜 산림에 대한 애착심을 고취시킬 수 있다(이, 2007). 이에 국산재의 활용방법에 대한 다양한 연구가 발표되었으며(권 등, 2003; 2011; 차 등, 2008) 사방댐 부재로의 사용 또한 중요한 활용방법 중 하나로 대두되고 있다. 그러나 목재는 일정 기간이 경과하면 자연적으로 부후되어 구조적인 기능을 상실할 수 있는 생물재료이기 때문에 친환경 목재사방댐의 확산을 위해서는 부재의 열화진행 정도를 중심으로 하는 내구성에 대한 과학적인 근거 자료가 절실하다. 따라서 본 연구에서는 현재 설치되어 있는 사방용 목재의 열화정도를 판단할 수 있는 지표로써 해부, 물리 및 역학적 특성을 조사하여 목재 사방댐의 내구년을 판단하는 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 공시재료

강원도 홍천군 북방면에 소재한 강원대학교 학술림에 설치(2004년 3월 시공)된 3곳의 낙엽송(*Larix kaempferi* (Lamb.) Carriere) 사방댐 중 상부댐의 부재를 설치 후 4년(2008년), 5년(2009년), 7년(2011년)에 채취하였으며, 채취 부재의 평균 직경은 약 20 cm였다. 부재에 사용된 낙엽송재는 별도의 방부 및 방충처리를 하지 않고 현장에서 수피를 제거하고 원목 내 웅이만을 제거한 후 사용된 것이다. 이들을 각각 물속 침적재와 비침적재(Fig. 1A), 그리고 댐

Fig. 1. Woody erosion control dam in the Research Forest of Kangwon National University.

건설 후 남은 잔여목재를 댐 근처에 자연 상태로 쌓아 장시간 방치한 목재인 방치재(Fig. 1B)를 공시재료로 이용하였다.

2.2. 실험방법

2.2.1. 해부학적 특성

각 조건별로 3단면에서 시편을 제작한 후, 활주식 마이크로톰을 이용하여 15~25 μm 두께로 절편하고 safranin액으로 염색한 다음 ethanol 및 xylene 계열로 탈수, 투명화 처리하고 영구 프레파라트를 제작하였으며, 이를 광학현미경(Nikon ECLIPSE E600, Nikon, Tokyo, Japan)으로 관찰하였다. 이때 모든 부재의 시료는 사용기간이 4년 이상 경과하였기 때문에 특별한 연화처리를 실시하지 않고도 마이크로톰 절삭이 용이했다. 또한 사방댐 설치 7년 경과 시료에 한하여 부재의 내부 열화정도를 정밀 관찰하기 위해 주사전자현미경(JSM-5510, JEOL Ltd., Tokyo, Japan)과 컴퓨터단층촬영(CT)을 실시하였다. CT촬영은 TOSHIBA사의 Xpeed TSX 모델을 사용하였으며, X선은 120 kV, 110 mA로 5초간 조사하는 조건으로 촬영하였다. 이 때, 시료를 횡방향으로 5 mm 간격으로 촬영하고 얻어진 2차원 영상으로 판정하였다.

2.2.2. 물리 및 역학적 특성

부재의 내구성을 조사하기 위하여 밀도(KS F 2198),

종압축강도(KS F 2206), 전단강도(KS F 2209)를 각각 측정하였다. 낙엽송 부재의 설치 위치별 시료를 변재와 심재로 구분하고 40 mm (L) $\times$ 20 mm (R) $\times$ 20 mm (T) 크기로 각각 10개씩 제작하였으며, 가급적 할렬이나 웅이 등의 결함 부분은 배제하였다. 종압축 및 전단강도 실험은 만능재료시험기(UTM 4482, Instron, USA)를 이용하였으며, 하중속도는 2.0 mm/min으로 하였다.

$$\text{Air-dried density } (g/cm^3) = \frac{m_o}{V_w}$$

m_o : 시험편의 전건질량(g),

V_w : 기건상태에서 시험편의 가로, 세로 및 길이(cm)

$$\text{Compression, shear strength } (N/mm^2) = \frac{P_{\max}}{A}$$

$P_{\max}$: 최대하중(N), A : 단면적(mm^2)

3. 결과 및 고찰

3.1. 목재조직의 열화특성

3.1.1. 현미경 관찰

Fig. 2는 설치 경과에 따른 사방용 낙엽송 부재의 횡단면상 광학현미경 관찰 결과이다. 설치 4년 경과 후의 침적재와 비침적재, 변재와 심재에서는 모두

Fig. 2. Optical micrographs on cross section of larch wood used for woody erosion control dam for different duration (D: deposited in water, N: non-deposited, S: sapwood, H: heartwood, number: duration).

Fig. 3. SEM images of earlywood in sapwood of larch wood used for woody erosion control dam for seven years (D: deposited, N: non-deposited, U: unused wood).

일반 낙엽송에서 나타나는 횡단면상 세포벽 형태가 비교적 온전히 관찰되었다. 침적재의 심재는 설치 7년 경과 후에도 비교적 정상적인 가도관 세포벽의 구조를 나타낸 반면, 변재의 조재부는 5년 경과 후부터 점차 세포벽이 붕괴되는 것으로 관찰되었다. 이러한 현상은 비침적재에서도 동일하게 관찰되었으나 침적재에 비하여 변재부의 열화정도가 상대적으로 매우 심하였으며, 특히 설치 7년 경과 후에는 심재부까지 열화가 일부 진행되어 조재부 도관벽이 만재부에 비하여 상대적으로 크게 손상되고 있는 것으로 나타났다. 목재의 내부열화는 표면 할렬 부위의 수분 및 균의 침입이나 흰개미 등 곤충에 의해 발생할 수 있으며, 이는 특히 주위환경에 크게 영향

을 받는 것으로 알려져 있다(이 등, 2005). 또한 신과 안(2003)은 목재가 유기물과 수분을 다량으로 함유하고 있는 토양과 접촉할 시에는 터널형 세균 공격으로 목재세포벽이 분해될 수 있다고 밝히고 있는데 전술한 열화 조건들은 본 연구에서 조사한 비침적재의 환경과 거의 일치하고 있다.

광학현미경 관찰을 위한 시료 제작 시, 슬라이딩마이크로톰 절삭에 의해 인위적인 변형이 발생할 수 있기 때문에 이를 확인하기 위하여 설치 7년 경과 시료에 한하여 열화가 비교적 심했던 변재부 중 조재를 주사전자현미경으로 관찰하였다(Fig. 3). 침적재의 가도관 세포벽은 매끈하였으나, 비침적재는 세포벽이 찢어진 형태를 나타내었고, 방치재는 세포벽의 형

Fig. 4. Optical micrographs on radial and tangential section of larch wood used for woody erosion control dam for seven years (D: deposited, U: unused, N: non-deposited, S: sapwood, R: radial, T: tangential).

Fig. 5. CT images of larch wood used for woody erosion control dam for seven years.

태가 크게 손상되어 붕괴된 형태를 나타내었다.

Fig. 4는 군사의 분포를 조사하고 그 이동경로를 추정하기 위하여 관찰한 사방댐 설치 7년 경과 시료들의 방사 및 접선단면 광학현미경 사진이다. 횡단면 관찰결과와 마찬가지로 침적재(Fig. 4: DS-R)는 모두 정상적인 구조를 나타낸 반면 방치재의 심재부 분야벽공(Fig. 4: UH-R)에서 충전물과 비침적의 변재부(Fig. 4: NS-T)에서 정상적인 목재의 구성세포와는 구분되는 세포 장축에 대해 직각방향으로 뻗은 실의 형태가 각각 관찰되었다(Fig. 4: U). 또한, 방치재의 변재부 접선단면(Fig. 4: US-T)에서는 축방향으로 인접한 세포벽이 완전히 소실되어 단열의 형태가 붕괴된 방사조직이 관찰되었다. 따라서 주로 벽공을 통해 세포축에 대하여 횡방향으로 군사가 이동하고 있는 것으로 추정할 수 있으며 이들은 침투된 세포내강축으로부터 공격을 시작하여 세포벽을 얇게 하는 것으로 생각된다. 권과 이(1993)는 소나무재에서의 갈색부후균 이동경로를 조사한 결과, 군

사는 방사조직을 통해 목부에 깊숙이 침투한 후 주로 분야벽공을 통해 가도관으로 이동하고 있는 것으로 보고하고 있으며, 목재부후균의 이동은 일반적으로 벽공을 통해 이루어지는 것으로 알려져 있어 (Greaves and Levy, 1965; Liese and Schmid, 1964; Wilcox, 1968) 본 연구 결과와 유사하였다.

3.1.2. 컴퓨터단층촬영(CT)

Fig. 5는 컴퓨터단층촬영(CT)을 통한 비파괴 열화 진단의 방법으로써 설치 7년 경과 사방용 부재(길이 30 cm)의 최외측 횡단면으로부터 10 cm 내부를 횡방향으로 스캔한 결과이다. 심재부는 침적재와 비침적재 모두 양호한 형태를 나타내었으나, 방치재는 변재부에서 기인한 할렬이 심재부의 수심부까지 깊게 관찰되었다. 변재부는 침적재의 경우, 심재부와 크게 구별되지 않을 정도로 매우 양호한 상태를 나타내었다. 그러나 비침적재는 변재부의 내측까지 열화가 진행되었으며 특히, 방치재의 변재부는 연륜

Table 1. Air-dried density, moisture content, compression and shear strength of each sample

Samples		Air-dried density (g/cm ³)		Moisture content (%)		Compression strength parallel to the grain (N/mm ²)		Shear strength on tangential section (N/mm ²)	
		Sapwood	Heartwood	Sapwood	Heartwood	Sapwood	Heartwood	Sapwood	Heartwood
4 yrs	Deposited wood	0.57 ± 0.02	0.61 ± 0.04	15.0 ± 1.2	12.9 ± 0.7	48.9 ± 2.9	51.4 ± 1.6	10.9 ± 1.1	12.3 ± 1.0
	Non-deposited wood	0.55 ± 0.03	0.61 ± 0.06	13.3 ± 2.3	12.0 ± 0.9	41.9 ± 1.9	50.2 ± 2.1	8.9 ± 2.0	9.5 ± 1.5
5 yrs	Deposited wood	0.55 ± 0.07	0.59 ± 0.02	14.4 ± 1.0	12.6 ± 0.9	44.6 ± 2.2	49.5 ± 4.4	8.7 ± 1.9	11.4 ± 2.8
	Non-deposited wood	0.50 ± 0.08	0.57 ± 0.04	13.3 ± 2.2	11.5 ± 0.7	30.8 ± 1.4	40.5 ± 3.0	5.6 ± 0.8	7.4 ± 1.7
7 yrs	Deposited wood	0.55 ± 0.03	0.58 ± 0.03	17.4 ± 2.5	15.5 ± 2.0	42.7 ± 1.9	42.9 ± 2.5	8.5 ± 0.8	10.8 ± 2.4
	Non-deposited wood	0.41 ± 0.02	0.54 ± 0.06	16.3 ± 2.2	12.2 ± 0.6	25.6 ± 1.6	38.0 ± 2.4	1.8 ± 0.1	4.1 ± 0.2
	Unused wood	0.38 ± 0.05	0.41 ± 0.07	12.8 ± 2.8	11.1 ± 2.7	24.4 ± 2.0	33.7 ± 1.9	1.1 ± 0.1	4.7 ± 0.3

* NOTE : Compression and shear strength of sound larch wood was 52 N/mm² and 12 N/mm², respectively (Kang et al, 2008).

경계 및 사진상의 명암 차이가 불분명하게 나타나고 다수의 활렬이 관찰되어 열화가 가장 많이 진행된 것으로 판단된다. 이 등(2005)은 X선을 이용한 투과 분석으로 목재 내부를 관찰하여 이들 사진에서 나타나는 연륜 경계의 뚜렷함과 사진의 명암 등을 기준으로 활렬과 부후 및 충해를 비파괴적 방법으로 예측할 수 있다고 보고하고 있다.

3.2. 역학적 특성 평가

Table 1은 설치 경과에 따른 사방용 낙엽송 부재의 밀도, 종압축 및 전단강도 측정 결과이다. 밀도는 설치기간에 관계없이 모두 침적재가 비침적재보다 높았다. 밀도와 강도는 사방댐 설치 기간이 경과함에 따라 감소하였으나, 침적재는 그 감소폭이 다른 시료에 비하여 상대적으로 현저하게 작고 거의 유사한 수치를 유지하였다. 비침적재는 설치 4년 경과시에는 침적재와 큰 차이를 나타내지 않았으나 5년 후부터는 변재부의 강도가 상대적으로 크게 감소하여 전년도 대비, 종압축강도는 약 25%, 전단강도는 약 35%가 감소하였다. 그러나 그 이후의 설치기간이

경과함에 따라서 감소하는 강도적 수치는 상대적으로 작았으며, 모든 결과는 강도측정 당시 시편의 밀도의 감소와 함께 감소하는 경향을 나타내었다. 7년간 부재로 이용하지 않고 숲속에서 방치시킨 낙엽송재의 강도는 비침적재와 유사한 것으로 나타나 사방댐 보수용도로 사용하기에는 부적합한 것으로 판단된다. 이 등(1992)은 소나무와 상수리나무에 다른 종류의 균사를 주입하여 강도 저하율을 분석한 결과 균사의 종류에 따라 각기 다른 변화율을 나타내었으나 평균적으로 변재의 감소율이 심재보다 5배 이상으로 크게 나타난 것으로 보고하고 있다. 목재의 열화는 적절한 온도와 수분, 산소 등의 주요 요인에 진행되는 것으로 알려져 있는데(신과 안, 2003) 물에 침적되어 있는 목재는 산소가 적은 환경이고, 목재 주변의 온도환경이 주변의 통기성에 의해 미생물의 번식범위와 속도를 억제할 수 있기 때문에 열화피해를 지연시키는 것으로 생각되며, 반대로 비침적 및 방치재는 위 조건들과 균이 활동하기에 적합한 토양과도 직접적으로 맞닿아 있어 침적재에 비해 열화가 더 진행된 것으로 판단된다.

4. 결 론

현재 설치되어 있는 목재사방댐의 내구년을 평가하기 위하여 사방댐 낙엽송부재의 해부, 물리 및 역학적 특성을 조사하여 열화정도를 진단한 결과는 다음과 같다.

현미경 관찰 결과, 물속에 침적되어 있는 부위는 사방용 부재로 7년 이상 사용되었음에도 불구하고 세포벽 구조의 변화가 거의 없었으나 물속에 침적되지 않고 댐의 측면을 구성하는 부위는 특히, 변재내 조재부를 중심으로 열화가 상당히 진행되는 것으로 관찰되었다. 방사조직과 가도관 세포벽은 두께가 얇아지거나 붕괴되어 완전히 소실된 형태로 관찰되기도 하였다. 컴퓨터단층촬영을 이용한 비파괴적 열화 진단 결과에서도 침적재는 외측부와 내측부 모두 정상적인 상태를 나타냈다. 그러나 비침적재의 경우, 심재와 변재의 경계선을 기준으로 내·외부의 열화 정도가 명확히 구분되어 나타나 현미경 관찰결과와 마찬가지로 변재부가 크게 부후된 것으로 나타났다. 강도적 성질은 모든 부재가 시간의 경과와 함께 감소하였으나 침적재는 변재와 심재부 모두 감소의 폭이 크지 않았다. 그러나 비침적재는 설치 5년 이후부터 침적재에 비하여 상대적으로 크게 감소하는 경향을 나타냈다.

따라서 낙엽송 목재사방댐 설치 후, 약 5년을 기준으로 세부적인 점검이 이루어져야 하며 특히 물속에 침적되지 않는 부위를 우선적으로 정밀 분석한 후, 선택적으로 부재를 교체하거나 보강하는 것이 보수작업에 가장 효과적일 것으로 생각된다. 또한, 사방용 부재에 별도의 방부 및 방충처리를 하지 않을 시에는 비침적부위의 변재부가 크게 열화될 수 있으므로 목재사방댐의 설치시에는 부재와 부재를 연결하는 못접합이 부재의 심재부까지 깊숙이 이루어져야 할 것으로 생각된다.

사 사

본 연구는 산림청 “산림과학기술개발사업(과제번호 : S210810L010110)”의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

참 고 문 헌

1. 강춘원, 김남훈, 김병로, 김영숙, 변희섭, 소원택, 여환명, 오승원, 이원희, 이화형. 2008. 신고 목재물리 및 역학. 향문사. 서울. 대한민국. pp.250~257.
2. 권구중, 권성민, 김남훈. 2003. Polyethylene glycol(PEG) 처리에 의한 국내산 소경재의 치수안정화에 관한 연구 II- 환공재와 산공재의 비교-. 목재공학. 31(4): 8~15.
3. 권구중, 권성민, 장재혁, 전근우, 김남훈. 2011. 목타르와 목초액으로 처리한 낙엽송재의 Weathering 특성. Journal of Forest Science. 27(1): 55~60.
4. 권미, 이필우. 1993. 갈색부후균(*Lentinus lepideus*)에 의해 부후된 소나무 재(*Pinus densiflora* S. et Z.)의 해부학적 특성. 목재공학. 21(1): 39~50.
5. 산림청. 2012. 제42호 입법통계연보. pp.206.
6. 신동소, 안세희. 2003. 목재보존학. 서울대학교 출판부. pp.50~51.
7. 이동훈. 2007. 지구환경보전과 간벌재의 이용. 간벌재를 이용한 친환경 토목·조경시설 심포지움. 서울. 대한민국. pp.3~35.
8. 이동훈. 2008. 산지 재해방제를 위한 간벌재로 만든 골막이 댐. 산림. 505호. 64~67.
9. 이동훈, 최돈하, 윤승락, 손승현. 1992. 목재부후의 기초적 연구(II) -주요 백색부후균의 부후 생리 및 물리·화학적 특성. 목재공학. 20(4): 49~56.
10. 이진재, 김규혁, 엄영근, 오정권. 2005. 비파괴 검사법에 의한 국산재의 생물학적 열화 평가기술 개발. 농림부 최종 연구보고서 pp.13.
11. 전근우, 김민식, 엄규진, 김윤진, 이진호, Tsugio Ezaki. 2006. 목재사방댐의 현지적용(II)-2006년 집중호우에 의한 계상변동-. 학술림연구지. 강원대학교. 26: 44~53.
12. 전근우, 유우근, 이호, 김석우, 홍순일, Tsugio Ezaki. 2005. 목재사방댐의 현지적용(I)-강원대학교 학술림-. 학술림연구지. 강원대학교. 25: 23~32.
13. 차재경. 2008. 국산 소경재의 휨 성질을 이용한 충격에너지와 최대하중까지 일-에너지 예측연구. 한국가구학회지 19(5): 350~357.
14. 한국표준협회. 2001. KS F 2198. 목재의 밀도 및 비중 측정 방법.
15. 한국표준협회. 2004. KS F 2206. 목재의 압축 시험 방법.
16. 한국표준협회. 2004. KS F 2209. 목재의 전단 시험 방법.
17. Greaves, H. and J. F. Levy. 1965. Comparative degradation of the sapwood of scots pine, beech and birch by *Lentinus trabea*, *Polystictus versicolor*, *Chaetomium globosum* and *Bacillus poly-*

- myxa. Journ. Inst. Wood Sci. 15: 55~63.
18. Liese, W. and R. Schmid. 1964. ber das Wachstum von Bl uepilzen durch verholzte Zellw nde. Phytopathology. 51: 385~393.
19. Wilcox, W. W. 1968. Changes in wood micro-structure through progressive stages of decay. U.S. Forest Service Research Paper FPL-70: 45.