

소나무 고목재와 건전재의 물리, 기계, 화학적 특성 차이¹

심국보² · 이도식² · 박병수² · 조성택² · 김광모² · 여환명³

Differences of Physical, Mechanical and Chemical Properties of Korean Red Pine(*Pinus densiflora*) Between Old and New Wood¹

Kug-Bo Shim², Do-Sik Lee², Byung-Soo Park², Sung-Taig Cho²
Kwang-Mo Kim² and Hwan-Myeong Yeo³

요 약

안동 봉정사 대웅전의 지붕구조로 사용되었던 해체부재와 새로이 벌채된 소나무재의 물리적, 기계적, 화학적 특성을 평가 분석하였다. 고목재의 해부학적 분석에 의해 만재부위에서 수지의 응고현상을 관찰할 수 있었다. 또한 열화에 의한 비중의 감소, 가도관의 미세할렬이 발생하였으며, 가도관 미세할렬은 S2층 마이크로휘브릴 경사각과 동일한 각도를 갖는 것으로 판단되었다. 고목재의 휨강도, 압축강도 및 전단강도는 모두 35-27% 가량 감소하였으며, 초음파 비파괴시험에 의한 동적탄성계수는 목재의 사용기간이 길어짐에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 목재의 열화는 비중과 동적탄성계수의 측정으로 확인할 수 있었다. 또한 길이방향 동적탄성계수의 측정으로부터 기계적 성능의 예측이 가능하였다. 목재의 부후를 판정할 수 있는 1% NaOH 추출 결과 고목재에서 부후가 많이 진행되었음을 확인하였다. 이에 따라 목재의 열화는 화학조성분의 분석에 의해 평가가 가능할 것으로 판단되었다. 이 연구의 결과는 시간의 경과에 따른 소나무의 물성 변화 분석으로부터 장기적으로 사용하는 목재의 물성 변화를 이해하고 예측을 가능하게 하는 자료로 활용될 수 있을 것이다.

ABSTRACT

The physical, mechanical and chemical properties of old and new Korean red pine (*Pinus densiflora*) were analyzed. The old woods were from dismantled timbers of Bonjungsa temple. The crystallized resin in the latewood was observed by microscopic analysis. Also, reduction of specific gravity, occurrence of microscopic cleavage of tracheid was observed in the old wood. The angle of microscopic cleavage

1. 접수 2006년 11월 27일 Received on November 27, 2006.
2. 국립산림과학원 임산공학부 재료성능과 Div. of Wood Engineering, Dept. of Forest Products at Korea Forest Research Institute.
3. 서울대학교 농업생명과학대학 산림과학부 Dept. of Forest Science, College of Agriculture & Life Sciences, Seoul National University.

of tracheid is estimated with the same angle of micro-fibril angle of S2 layer. The bending, compression and shear strength of old wood were decreased about 35-27% than those of new wood. Dynamic modulus of elasticity measured by ultrasonic nondestructive test has the tendency of reducing by the time elapse of the wood usage. Therefore, deterioration of wood could be measured by reduction of specific gravity and dynamic MOE. The static MOE and mechanical properties of old wood could be predictable by measuring dynamic MOE in the longitudinal direction. Extractives of the old wood in 1-% NaOH solution are larger quantity than new wood. Therefore the decay of the wood could be evaluated by analyzing the chemical compound, especially 1-% NaOH solution. The results of this research could be used for understanding and prediction of the changing properties with elapsing time of wood.

keywords : Korean red pine, physical properties, mechanical properties, chemical properties, decay

서 론

우리나라의 전통 건축은 주요 건축재료를 자연으로부터 구하였다. 특히 건축물의 하중을 지지하는 구조부재는 목재를 주로 사용하였는데, 주거용 건축물에서 가장 흔하게 사용한 수종은 소나무였다. 소나무는 조선시대부터 궁궐과 배를 만들거나 수리하기 위하여 국가에서 보호 관리하여 왔다. 따라서 양질의 소나무 자원이 풍부하고 품질이 우수하였기 때문에 대형 건축물의 시공에 가장 흔하게 이용되었다(소나무 소나무림 2001 임업연구원).

고건축 문화재의 보수기간은 해당 건축물의 유지 및 관리의 적정성, 부재의 위치와 기후에 노출되는 정도에 따라 달라질 수 있다. 부재의 열화 진행이 빠른 부분은 약 50년 정도에 교체되는 반면 장기간 사용하는 재료는 300년 이상 사용되는 부재도 있었다. 쉽게 부후되고 교체되는 부분은 기둥의 아랫부분 또는 마루판 아래, 서까래 부분과 건축물의 후면에 사용되어 습기에 많이 노출되거나 환기가 잘 되지 않는 부분에 사용된 부재들이다. 그러나 기둥의 상부 및 장여 등과 같이 지붕에 의해 보호되고 있으면서 환기가 잘되어 수분에 장기간 노출되지 않는 부분에서는 교체주기가 긴 것이 일반적이다.

소나무는 재질이 단단하지 않아 가공이 쉽기 때문에 복잡한 접합부의 가공에 유리하였다. 또한 송진을 많이 함유하고 있어 시간의 경과에

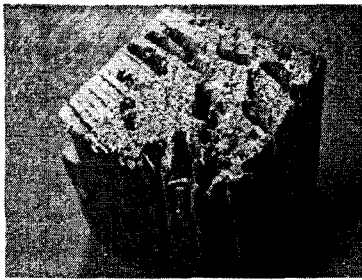
따라 송진이 결정화되므로 강도가 증가한다는 속설이 있기도 하다. 그러나 송진의 결정화에 의한 강도의 증가는 아직 밝혀져 있지 않으며, 시간의 경과에 의한 열화로 기계적 특성이 어느 정도 변화되는지에 대한 연구가 이루어지지 않았다.

따라서 본 연구에서는 약 300년 정도 사용된 후 교체된 봉정사 대웅전의 장여 및 마루판재에 대하여 해부학적, 물리적, 기계적, 화학적인 변화를 조사하였다. 오래된 목재의 물성 변화를 지속적으로 관찰 또는 분석하기는 어렵지만, 300년이라는 시간의 경과에 대한 소나무재의 물성변화를 관찰하여 고목재의 물성 변화를 개략적으로 조사할 수 있었다. 이러한 연구결과는 고건축은 물론 목조건축물의 내구성 증진 또는 물성의 변화에 따른 건축물 수명 예측의 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

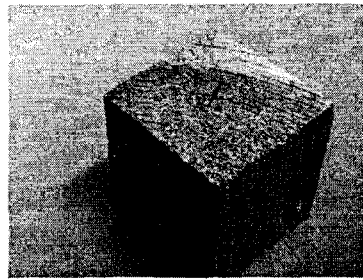
재료 및 방법

1. 공시재료

봉정사 대웅전의 수리를 위하여 해체된 소나무(*Pinus densiflora*) 장여 및 마루판재의 부재를 공시재료로 하였다. 또한 고목재와의 물성비교를 위한 대조 목재로 이용한 건전재는 강원도 삼척 국유림관리소에서 분양받은 소나무 원목(흉고지름 30cm)을 공시재료로 하였다.



Decayed old wood



Sound old wood

Figure 1. Configuration of decayed and sound old wood.

2. 시험방법

2.1 해부학적 특성

고목재 및 건전재의 세포벽 열화, 세포내강의 침적물질 유무 등을 조사하기 위하여, 0.5×0.5×0.5cm 블록 시편을 제조하여 활주식 마이크로 톰으로 두께 20-30 μ m로 절편을 제작하여 영구 프레파라트를 제작하였다. 제조된 시편을 광학 현미경과 SEM(Scanning Electronic Microscope)으로 3단면을 관찰하였다. 평균연륜폭과 만재율은 루페로 측정하였다.

2.2 기계적 특성

고목재 및 건전재의 기계적 특성을 조사하기 위하여, 3×3×48cm의 정목제재를 채취하였다. 공시재료로부터 표준임업시험실시요령에 의거하여 휨강도, 압축강도, 전단강도 시험을 수행하였다. 또한 부후 정도에 의한 비파괴 탄성계수의 변이를 조사하기 위하여 초음파 전달속도를 측정하는 비파괴 시험기(PUNDIT)로 시험을 실시하였다.

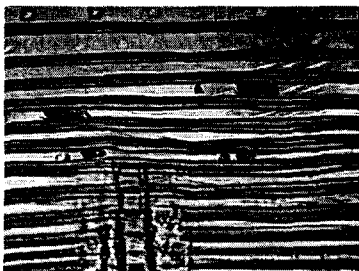
2.3 화학적 특성

소나무 고목재와 건전재의 조성분 변화를 조사하기 위하여 표준임업실시요령에 의거하여 회분, 냉·온수 추출물, 알콜벤젠 추출물, 1% NaOH 추출물 등 추출물질의 양과 리그닌 및 전섬유소의 양을 측정하여 비교하였다.

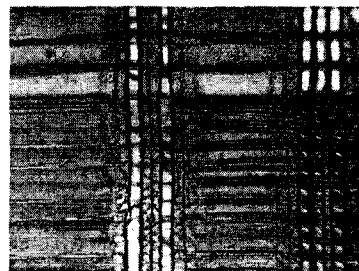
결과 및 고찰

1. 해부학적 특성

고목재와 건전재의 횡단면을 광학현미경을 이용하여 200배의 배율로 관찰하였다. 고목재의 경우에는 방사단면 및 횡단면에서 만재부위의 가도관 내강에 수지성 물질이 응고되어 침적되어 있는 현상을 관찰할 수 있었으나, 건전재의 경우에는 응고되어 있는 수지성 물질을 발견할 수 없었다. 소나무재의 사용기간이 길어짐에 따라 세포 내강에 응고되어 있는 수지성 물질의 결정화 및 침적 현상에 의한 물성변화가 예상되며 이에 대



Old wood



New wood

Figure 2. Microphotograph of radial section.

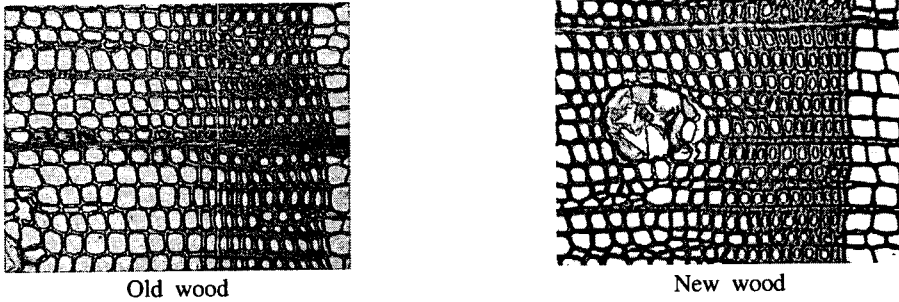


Figure 3. Microphotograph of tangential section.

한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단되었다.

광학현미경에 의해 가도관벽을 관찰한 결과 고목재의 경우 가도관벽에 미세한 할렬이 무수히 존재함을 알 수 있었다. 이 미세한 할렬은 일정한 방향으로 진행하고 있으며, S2층 마이크로휘브릴 경사각과 같은 각도로 측정되었다. 마이크로휘브릴 경사각의 측정 방법은 벽공구 경사각에 의한 측정법, 급속 건조법, 동결 및 급속 건조법, 압축에 의한 방법과 요오드 결정 침착법 등이 있으나 측정이 어려워 많이 활용되지 않는다. 따라서 본 실험에서와 같은 소나무재의 경우

목재의 열화에 의한 미세할렬의 각도 측정으로부터 S2층 마이크로휘브릴 경사각의 측정이 가능할 것으로 판단되었다.

2. 기계적 특성

2.1 물리적 특성

고목재와 건전재의 비중, 함수율 등 물리적 특성은 Table 1과 같았다. 지붕 구조용으로 사용된 서까래 및 보의 경우에는 지붕에 의해 외부의 수분에 직접 노출되지 않고 있으며, 적절

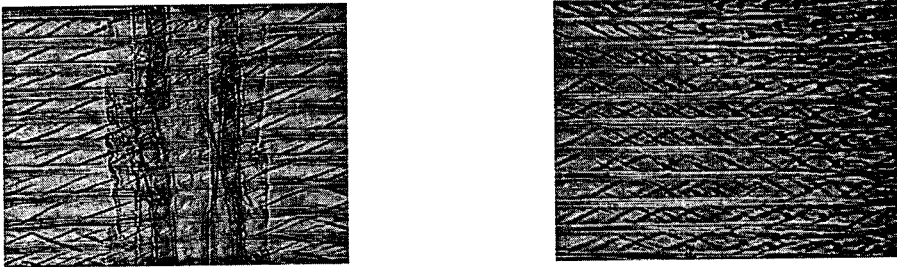
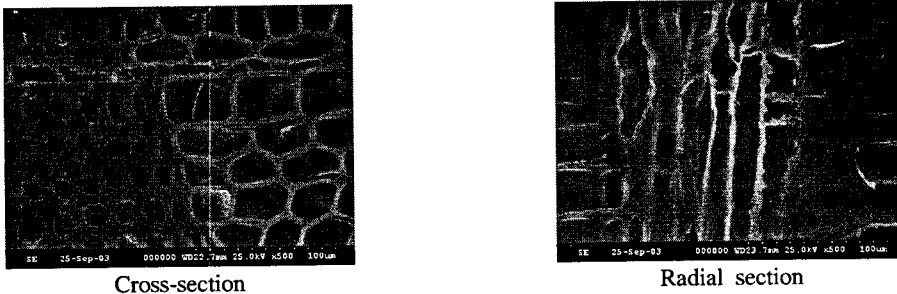


Figure 4. Microscopic failure of tracheid in old wood.



Cross-section

Radial section

Figure 5. Cross-section and radial section by SEM.

Table 1. Physical properties of old and new wood.

	Sp. Gr.	M.C. (%)	Average ring width (mm)	Ratio of Late wood (%)
Old wood	0.404 (0.08)	11.9 (0.65)	2.50 (0.8)	15.7 (5.8)
New wood	0.484 (0.07)	10.7 (0.46)	2.73 (1.1)	22.3 (7.8)

() : Standard deviation.

한 통풍에 의해 평형함수율에 이르고 있는 조건이었으며, 건전재의 경우에는 인공건조에 의해 조절된 함수율이었다.

고목재의 경우 평균연륜폭은 건전재에 비하여 작은 값을 나타내고 있었으나, 만재율은 건전재가 큰 값을 나타내고 있었다. 비중은 목재의 평균연륜폭과 만재율에 따라 차이가 나타날 수 있으나, 이들에 의한 영향은 Table 1에서처럼 크게 나타나지 않는다. 따라서 위 표에서와 같은 고목재와 건전재의 비중 차이는 부후의 진행에 의한 고목재의 비중 감소로 판단되었다. 고목재의 경우 비중이 건전재에 비하여 20% 가량 낮았으므로, 부후 또는 열화가 진행되고 있었음을 알 수 있었다.

2.2 강도 특성

(1) 정적 파괴시험

고목재와 건전재의 시험편으로부터 3×3×48cm 무결점 시험편을 제작하여 표준임업실시요

령에 의거하여 휨강도, 압축강도, 전단강도 시험을 수행하였다. 그 결과는 Table 2와 같았다. 각 강도는 고목재가 건전재에 비하여 상당히 작은 값을 나타냈으며, 건전재에 비하여 35%-27% 가량의 강도감소가 있었다. 특히 휨강도와 압축강도의 감소율이 전단강도보다 크게 나타났다. 고목재의 강도감소는 적은 만재율이 원인일 수 있으나, 열화에 의한 비중의 감소가 주 원인으로 판단되었다.

(2) 초음파 비파괴시험

고목재에서 부후의 영향을 평가하기 위하여 초음파 전달속도를 측정하는 장비(PUNDIT)를 이용하여 초음파 비파괴 시험을 수행하였다. 초음파의 속도는 길이방향과 방사방향, 접선방향에서 측정하였으며, 그 결과는 Table 3에 나타났다. 고목재는 건전재에 비하여 길이방향의 경우 초음파 전달속도가 늦었으며, 방사방향과 접선방향에서는 빠르게 나타났다. 그러나 시험편

Table 2. Bending, compression and shear strength of old and sound wood.

	Bending strength (kg/cm ²)	Compression strength (kg/cm ²)	Shear strength (kg/cm ²)
Old wood	594.5 (62.4)	346.6 (24.8)	99.0 (8.8)
New wood	918.3 (158.6)	527.9 (60.0)	135.3 (19.4)
Strength ratio (old/new, %)	64.7	65.7	73.2

() : Standard deviation

Table 3. Directional characteristics of dynamic MOE and ultrasonic speed.

	Longitudinal direction		Radial direction		Tangential direction	
	Velocity (m/sec)	Dynamic MOE (kg/cm ²)	Velocity (m/sec)	Dynamic MOE (kg/cm ²)	Velocity (m/sec)	Dynamic MOE (kg/cm ²)
Old wood	4,570 (269)	83,148 (8,619)	1,545 (13.2)	9,938 (207)	1,467 (63.9)	8,865 (847)
New wood	5,018 (366)	134,372 (18,780)	1,337 (163)	9,751 (2,661)	1,413 (198)	10,940 (3,233)
Ratio (Old/New, %)	91.1	61.8	116	102	104	81

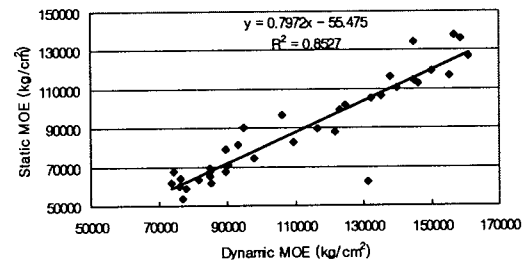
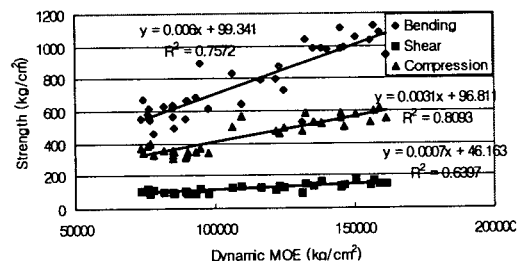
의 비중을 반영하여 계산한 동적탄성계수의 경우, 길이방향과 접선방향에서는 고목재가 작은 값을 나타내었으며, 방사방향에서는 큰 값을 나타내었다. 길이방향의 경우에는 측정거리가 약 48cm여서 초음파 전달속도 측정의 오차를 어느 정도 줄일 수 있었으나, 방사방향과 접선방향의 경우에는 측정거리가 3cm에 불과하여 정확성이 떨어질 수 있었다. 길이방향 시험에서 동적탄성계수는 고목재가 건전재에 비하여 38.8% 적게 나타났다. 이는 고목재의 부후를 동적탄성계수로 분석할 수 있음을 나타낸다. 즉 비파괴 시험의 결과 목재의 사용 기간이 길어질수록 동적탄성계수는 감소하는 경향을 보여주었다.

길이방향 동적탄성계수와 정적탄성계수의 관계는 Table 4와 같이 나타났다. 고목재의 경우에는 건전재에 비하여 동적 및 정적 탄성계수의 비가 약 40%가량 적게 나타났다. 이러한 결과로부터 목재가 부후하면서 밀도의 감소가 발생하는 동시에 탄성계수가 적어지는 결과로 분석되었다. 따라서 동적 탄성계수의 측정 즉 비파괴 시험에 의하여 목재의 부후 정도를 판단하는 것이 가능할 것이라는 결론을 내릴 수 있었다.

또한 동적탄성계수와 정적 탄성계수의 상관관계를 Figure 6에 도시하였다. 그림에서와 같이 동적탄성계수와 정적 탄성계수는 R² 0.85의 높은 상관관계를 나타내었다. 따라서 동적탄성계수로 정적탄성계수를 예측할 수 있을 것으로 판단되었다.

Table 4. Comparison of static and dynamic MOE in longitudinal direction.

	Dynamic MOE (kg/cm ²)	Static MOE (kg/cm ²)
Old wood	83,148 (8,619)	66,700 (7,148)
New wood	134,372 (18,780)	107,300 (19,375)
Ratio (old/New, %)	61.8	62.1

**Figure 6.** Correlation between dynamic and static MOE.**Figure 7.** Correlation between dynamic MOE and strengths.

Tabel 5. Chemical contents of old and sound wood(%).

	Ash	Extractives				Lignin	Holocellulose
		Cold-water	Hot-water	Alcohol-benzen	1%-NaOH		
Old wood	0.34	2.55	4.57	7.74	23.60	28.90	72.42
New wood	0.16	1.58	3.15	9.81	21.28	26.79	76.89

동적탄성계수에 대한 강도의 비율을 Figure 7에 도시하였다. 그림에서와 같이 동적탄성계수와 상관계수(R^2)는 휨강도의 경우 0.76, 전단강도의 경우 0.64, 압축강도의 경우 0.81 정도로 높게 나타났으며, 이로부터 동적탄성계수를 이용하여 결점이 없는 소나무재에 대하여 여러 가지 강도를 예측할 수 있었다.

3. 화학적 특성

고목재와 건전재의 조성분의 차이는 Table 5에 나타내었다. 고목재의 경우 회분, 냉·온수 추출물 및 1% NaOH 추출물의 양이 많았으며, 이는 목재가 열화되어 이들 추출물의 함량이 증가된 것으로 판단되었다. 알콜·벤젠추출물의 경우에는 건전재가 높았으며, 이는 재중에 함유되어 있는 테르펜류가 장시간동안 유지하여오면서 휘산되어 건전재보다 적은 것으로 판단되었다. 또한 전섬유소와 리그닌의 함량변화는 목재의 열화에 기인한 것으로 사료되나 큰 변화는 없는 것으로 판단되었으며, 목재부후를 판정할 수 있는 1% NaOH 추출에 있어서도 고목재가 많이 추출되어 부후가 진행되고 있음을 알 수 있었다.

결 론

약 300년 정도 경과한 소나무 고목재를 다양한 분석을 통해 부후의 진행도와 이에 의한 물리적 기계적 화학적 특성을 분석하였다. 이로부터 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

1. 소나무재는 오랜 기간 사용하므로 인해 만재부위에 수지의 응고현상을 관찰할 수 있었다. 또한 열화에 의한 비중의 감소, 가도판의 미세할렬이 발생하였으며, 가도판 미세할렬은 S2층 마이크로휘브릴 경사각과 동일한 각도를 갖는 것으로 판단되었다.

2. 휨강도, 압축강도 및 전단강도는 모두 35-27 % 가량 감소하였으며, 초음파 비파괴시험에 의한 동적탄성계수는 목재의 사용기간이 길어짐에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 목재의 열화는 비중과 동적탄성계수의 측정으로 확인할 수 있었다. 또한 길이방향 동적탄성계수의 측정으로부터 기계적 성능의 예측이 가능하였다.

3. 고목재와 건전재의 화학조성분 차이는 냉·온수 추출물 및 1% NaOH 추출물, 리그닌의 경우 고목재에서 많은 양이 추출되었다. 목재에서 열화는 화학조성분의 분석에 의해 평가가 가능할 것으로 판단되었다.

인 용 문 헌

1. Bell, E. R., Peck, E. C., and Krueger, N. T. 1950, Youngs modulus of wood determined by a dynamic method. Report 1775. Madison, WI : USDA, FS, FPL.
2. E. George Stern. 2001. Construction with small-diameter roundwood. Forest Prod. J. 51(4) : 71-82.
3. Jerrold E. Winandy, Carol A. Clausen, and

- Simon F. Curling. 2000. Predicting the Effects of Decay on Wood Properties and Modeling Residual Service-Life. Proceedings of the 2nd Annual Conference on Durability and Disaster Mitigation in Wood-Frame Housing. 261-263.
4. K. Flaga. 2000. Advances in materials applied in civil engineering. Journal of Materials Processing Technology. 106(2000) 173-183.
 5. Smulski, S. J. 1991. Relationship of stress wave and static bending determined properties of four northeastern hardwoods. Wood and Fiber Science. 23(1) : 44-57.
 6. USDA. 1999. Wood handbook. Wood as an Engineering Material.
 7. Wang, Z., Ross, R. J., Murphy, J. F., 1993. A comparison of several NDE techniques for determining the modulus of elasticity of lumber. World Forestry Research. 6(4) : 86-88.
 8. 임업연구원. 1994. 한국산 주요수종의 성질과 용도. 연구자료 제95호.
 9. 임업연구원. 1999. 소나무 소나무림. pp.205.
 10. 장기인. 1998. 목조. 보성각.