

국산 주요 수종의 기초 재질 특성 평가

I. 소나무(*Pinus densiflora*) - 강원도 평창

Evaluation of the Basic Properties for the Korean Major Domestic Wood Species

I. Korean Red Pine (*Pinus densiflora*) in Pyeongchang-gun, Gangwon-do

Yonggun PARK¹ · Chul-ki KIM¹ · Hanseob JEONG² · Hyun Mi LEE^{1,†} · Kwang-Mo KIM¹ ·
In-Hwan LEE¹ · Min-Ji KIM¹ · Gyu Bin KWON¹ · Nayoung YOON¹ · Namhee LEE²

¹Division of Wood Engineering, Department of Forest Products and Industry, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Korea

²Division of Forest Industrial Materials, Department of Forest Products and Industry, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Korea

초록 : 목재는 수종 및 생장지역에 따라 재질 특성이 다르게 나타난다. 따라서, 목재를 효율적으로 이용하기 위해서는 수종에 따른 목재의 특성과 이에 맞는 적절한 용도에 대한 올바른 이해가 선행되어야 한다. 특히, 1,000종이 넘는 우리나라 목본식물을 목재로서 효과적으로 잘 이용하기 위해서는 다양한 국산 수종의 재질 특성을 평가하고, 이를 DB화할 필요가 있다. 본 연구에서는 강원도 평창군에서 생산된 소나무의 해부학적 특성(가도관의 길이 및 폭, 세포벽 두께), 물리적 특성(비중 및 수축률), 역학적 특성(휨강도, 종압축강도, 종인장강도, 전단강도, 경도) 및 화학조성(회분, 추출물, 리그닌, 총당함량)을 평가하였다.

1. 서론

목재는 금속이나 플라스틱처럼 공업적으로 생산되는 다른 재료와는 달리 광합성을 통해 자연적으로 생성되는 지속가능한 무한자원이며, 사용이 종료되어 폐기되면 미생물에 의해 분해되어 자연으로 되돌아가는 환경친화적인 재료라는 장점이 있다. 반면에 목재는 다양한 세포로 구성된 재료이기 때문에 불균일성이나 이방성과 같은 독특한 특성을 지니고 있어서 가공이나 이용시 주의가 필요하다. 특히, 수종에 따라서 재질 특성이 다르게 나타나며, 같은 수종이라 하더라도 생장지역이나 수령에 따라서 재질 특성의 변이가 나타나기 때문에 목재를 효율적으로 이용하기 위해서는 수종에 따른 목재의 특성과 이에 맞는 적절한 용도에 대한 올바른 이해가 선행되어야 한다.

우리나라는 기후적으로 온대림지역에서 난대림지역까지 걸쳐 있고, 산림면적이 차지하는 비중이 높을 뿐 아니라 지형도 복잡하여 식생환경이 다양하다. 이에 따라 국토 면적에 비해 식생의 구조가 복잡하고 수목의 종류도 다양하다. 국립수목원에서 운영하고 있는 국가표준식물목록에 따르면 우리나라 산림을 구성하고 있는 목본식물은 1,234종에 이른다(Korea National Arboretum, 2011). 그 중 우리나라 자생 목본식물이 1,074종으로 가장 많고, 귀화 목본식물 7종, 조림이나 시험 목적 등으로 도입한 식물이 203종이다. 이처럼 다양한 목본 식물을 목재로서 가치있게 활용하기 위해서는 수종에 따른 재질 특성 DB를 구축하는 것이 필요하다.

소나무(Korean red pine, *Pinus densiflora*)는 표고 1,000 m 이하의 전국 어디서나 자라는 우리나라를 대표하는 상록침엽 교목으로 평균 수고는 35 m, 평균 지름은 1.8 m이다. 소나무는 과거부터 건축이나 토목용재, 가구, 포장, 교량, 펄프용으로 널리 쓰이고 있다. 또한, 솔잎이나 송홑가루는 식용이나 약용으로도 사용된다(Korea National Arboretum, 2011). 소나무는 여러가지 용도로 사용되어 온 만큼 재료 자체의 특성이나 다양한 처리에 의한 재질 특성의 변화와 같은 연구재료로도 널리

본 문서는 출판된 영문논문의 국문서입니다. 출판된 영문논문은 아래의 DOI를 통해서 확인하실 수 있습니다.
Journal of The Korean Wood Science and Technology 52(1): 87-100. <https://doi.org/10.5658/WOOD.2024.52.1.87>

이용되고 있다(Choi *et al.*, 2020, 2022; Gong *et al.*, 2021; Han *et al.*, 2022; Jang, 2022c; Jung and Yang, 2018; Jung *et al.*, 2019, 2021, 2022; Kim and Kim, 2018, 2021; Kim *et al.*, 2017, 2018, 2020; Lee and Bae, 2021; Lee and Kim, 2022; Lee *et al.*, 2021c, 2022a, 2022b, 2022c; Min *et al.*, 2019).

본 연구에서는 국산 주요 수종의 재질 특성 DB 구축을 위하여 소나무의 해부학적 특성(가도관의 길이와 폭, 세포벽의 두께), 물리적 특성(비중 및 수축률), 역학적 특성(휨강도, 종압축강도, 종인장강도, 전단강도, 경도) 및 화학조성(회분, 추출물, 리그닌, 총당함량)을 분석하여 제시하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 공시 수종

본 연구에서는 강원도 평창군 봉평면 진조리 산 80-1(N37.56°, E128.31°)에서 생산한 소나무 원목 중, 말구 직경 300 mm 이상인 통직원 원목 40그루를 선별하여 사용하였다(Fig. 1). 실험에 사용된 원목의 평균 수령은 약 42년이였다.

2.2. 기초 재질 물성 평가

공시 수종인 소나무의 기초 재질로서 해부학적 특성(가도관의 길이와 폭, 세포벽의 두께), 물리적 특성(비중 및 수축률), 역학적 특성(휨강도, 종압축강도, 종인장강도, 전단강도, 경도) 및 화학조성(회분, 추출물, 리그닌, 총당함량)을 분석하였다. 실험에 사용한 시편은 목재의 불균일성 및 이방성 등을 고려하여 Fig. 2와 같이 미성숙재를 포함하지 않는 심재에서 연륜이 모서리에 평행한 정목 형태로 제재하여 사용하였다. 각 항목별 평가는 KS 또는 ASTM의 규격을 참고하였으며, 표준 규격이 없는 해부학적 특성 평가의 경우, 이전 연구 논문을 참고하여 실험 방법을 결정하였다(Table 1).

2.2.1. 해부학적 특성 평가

2.2.1.1. 가도관의 길이

소나무 원목의 성숙재(20연륜 이상)에서 한 번의 길이가 10 mm인 정육면체 형태의 시편을 제작한 다음, 칼날을 이용하여 섬유방향으로 가늘고 긴 성냥개비 모양의 시편을 만들었다. 만들어진 시편을 30% 과산화수소와 95% 빙초산을 1:1로 혼합한 용액(무게비)에 침지한 후, 히팅팬틀을 이용하여 80℃의 온도에서 48시간동안 가열하여 섬유를 해리하였다(Franklin method). 해리된 세포를 메틸렌블루를 이용하여 염색하고, 광학현미경(Axio imager A1, Carl Zeiss, Oberkochen, Germany)을 통해 1.25배 확대한 이미지를 획득한 다음, 이미지 분석 프로그램을 이용하여 가도관의 길이를 측정하였다. 30개의 가도관 길이를 측정한 다음 그 평균값을 제시하였다.

2.2.1.2. 가도관의 폭 및 세포벽 두께

소나무 원목의 성숙재(20연륜 이상)에서 한 번의 길이가 10 mm인 정육면체 형태의 시편을 제작한 다음, 글리세린과 증류수를 1:3으로 혼합한 용액에 넣고 1시간 동안 끓여서 연화시켰다. 활주식 마이크로톱을 이용하여 10 µm 두께의 횡단면 절편을 제작하였다. 광학현미경을 이용하여 횡단면의 20배 이미지를 얻은 다음, 가도관의 폭과 세포벽의 두께를 방사방향과 접선방향으로 구분하여 측정하였다. 30개의 가도관에 대한 폭과 세포벽 두께를 측정한 다음, 그 평균값을 제시하였다.

2.2.2. 물리적 특성 평가

2.2.2.1. 비중 및 수축률

비중 및 수축률 측정은 「목재의 밀도 및 비중 측정방법(KS F 2198)」 및 「목재의 수축률 시험방법 (KS F 2203)」에 따라 수행되었다. 한 번의 길이가 20 mm인 정육면체 형태의 시편을 100개 제작한 다음, 생재, 기건, 전건 상태에서 섬유방향, 방사방향, 접선방향의 길이와 무게를 측정하여 생재비중, 기건비중, 전건비중과 각 방향별 전수축률 및 전부피수축률을 측정하였다.

2.2.3. 역학적 특성 평가

역학적 특성은 기건 상태와 생재 상태에서 실험을 수행하였다(경도는 기건 상태에서만 수행). 생재 상태의 특성 평가를 위한 시편은 치수가 변하지 않을 때까지 증류수에 담가 높은 것을 사용하였고, 기건 상태의 특성 평가를 위한 시편은 온도 20℃, 상대습도 65%인 항온항습기에서 무게가 항량에 도달할 때까지 조습한 다음 시험에 사용하였다. 기건 상태의 시험

결과는 함수율 12%에서의 값으로 보정하여 결과 분석하였다.

2.2.3.1. 휨강도

휨강도의 측정은 「목재의 휨 시험방법(KS F 2208)」에 따라 수행되었다. 치수가 300 mm(섬유방향) × 20 mm(방사방향) × 20 mm(접선방향)인 직육면체 형태의 시편 40개를 제작한 다음, 기건 상태 시험과 생재 상태 시험에 각각 20개씩 사용하였다. 휨시험은 3점 하중시험으로 하였고, 지간 거리는 280 mm, 하중 속도는 5.5 mm/min으로 설정하였다.

2.2.3.2. 종압축강도

종압축강도의 측정은 「목재의 압축 시험방법(KS F 2206)」에 따라 수행되었다. 치수가 60 mm(섬유방향) × 20 mm(방사방향) × 20 mm(접선방향)인 직육면체 형태의 시편을 30개 제작한 다음, 기건 상태 시험과 생재 상태 시험에 각각 15개씩 사용하였다. 압축시험의 하중 속도는 0.4 mm/min으로 설정하였다.

2.2.3.3. 종인장강도

종인장강도의 측정은 「목재의 인장 시험방법(KS F 2207)」에 따라 수행되었다. 치수가 200 mm(섬유방향) × 10 mm(방사방향) × 30 mm(접선방향)인 직육면체 형태의 시편을 30개 제작한 다음, 기건 상태 시험과 생재 상태 시험에 각각 15개씩 사용하였다. 또한, 모든 시편은 Fig. 3과 같이 시편의 가운데 부분을 오목하게 제작하여 응력이 집중되게 하였다. 인장시험의 하중 속도는 5.0 mm/min으로 설정하였다.

2.2.3.4. 전단강도

전단강도의 측정은 「목재의 전단 시험방법(KS F 2209)」에 따라 수행되었다. 치수가 60 mm(섬유방향) × 50 mm(방사방향) × 50 mm(접선방향)인 직육면체 형태의 시편을 80개 제작한 다음, 단면(방사 및 접선)과 함수율(생재 및 기건) 상태에 따라 각각 20개씩 사용하였다. 전단강도 측정을 위하여 그림 4와 같이 전단면이 50 mm(섬유방향) × 50 mm(방사방향 또는 접선방향)가 되도록 시편의 귀퉁이를 제거하였다. 전단시험의 하중 속도는 0.8 mm/min으로 설정하였다.

2.2.3.5. 경도

경도의 측정은 「목재의 경도 시험방법(KS F 2212)」에 따라 수행되었다. 한 변의 길이가 50 mm인 정육면체 형태의 시편을 60개 제작한 다음, 횡단면, 방사단면 및 접선단면의 경도 측정을 위하여 각각 20개씩 나누어 사용하였다. 경도를 측정하고자 하는 단면의 중앙에 반지름 5.64 mm인 쇠구슬을 두고, 3.0 mm/min의 속도로 압입하여 경도를 측정하였다.

2.2.4. 화학조성 분석

2.2.4.1. 회분

회분 함량의 측정은 「고형 바이오연료 - 회분측정(KS M ISO 18122)」에 따라 수행되었다. 시료를 1 mm 이하로 분쇄한 다음, 60℃ 건조기에서 1일 이상 건조하였다. 건조된 목분 1 g을 알루미늄 접시에 담아 250℃ 회화로에서 1시간 동안 1차 연소하고(승온속도: 4.5℃/min), 다시 550℃ 회화로에서 2시간 동안 2차 연소한 후(승온속도: 10.0℃/min), 접시에 남아 있는 회분의 함량을 측정하였다. 동일한 실험을 3회 반복하였고, 그 평균값을 회분 함량으로 제시하였다.

2.2.4.2. 추출물

추출물 함량의 측정은 「Standard Test Method for Determination of Ethanol Extractives in Biomass(ASTM E 1690)」에 따라 수행되었다. 시료를 1 mm 이하로 분쇄한 다음, 60℃ 건조기에서 1일 이상 건조하였다. 건조된 목분 2 g을 알코올-벤젠 1:2(부피비) 혼합액에서 6시간동안 추출하여 목분의 추출물 함량을 측정하였으며, 3회 반복 실험하여 그 평균값을 추출물의 함량으로 제시하였다.

2.2.4.3. 리그닌

리그닌 함량의 측정은 「Standard Test Method for Determination of Carbohydrates in Biomass by High Performance Liquid Chromatograph(ASTM E 1758-01)」에 따라 수행되었다. 추출물이 제거된 목분 0.3 g을 72% 농도의 황산(H₂SO₄)

수용액에 넣고, 30℃로 설정된 항온수조에서 2시간 동안 1차 반응시켰다. 반응이 종료된 후, 황산 수용액을 4%로 희석한 다음 121℃ 오토클레이브에서 1시간 동안 2차 반응시켰다. 이때, 황산 수용액에 녹지 않고 남아 있는 잔사의 함량을 산불가 용성 리그닌(Acid-insoluble lignin)의 양으로 결정하였으며, 황산 수용액에 녹아 있는 리그닌 성분의 자외선 흡광도를 분석하여 산가용성 리그닌(Acid-soluble lignin)의 양으로 결정하였다. 총리그닌의 함량은 산불가용성 리그닌의 함량과 산가용성 리그닌의 함량의 합으로 결정하였으며, 각각 3회 반복 실험하여 그 평균값을 리그닌의 함량으로 제시하였다.

2.2.4.4. 총당함량

총당함량의 측정은 「Standard Test Method for Determination of Carbohydrates in Biomass by High Performance Liquid Chromatograph(ASTM E 1758-01)」에 따라 수행되었다. 2.2.4.3. 리그닌의 함량 측정을 위해 목분을 황산 수용액에서 2차 반응까지 완료한 액상 시료 1 mL를 고성능 액체 크로마토그래프를 이용하여 분석함으로써 총당함량을 평가하였다. 이때, 컬럼으로는 Aminex HPX-87H(300 × 7.8 mm, Bio-Lad Laboratories)를 사용하였고, 검출기는 시차굴절 검출기(refractive index detector)를 사용하였다. 또한, 컬럼 온도는 40℃, 이동상은 0.01N 황산, 이동상의 유속 0.6 mL/min으로 분석 조건을 설정하였다. 총 3회 반복실험하여 그 평균값을 총당함량으로 제시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 해부학적 특성

소나무의 해부학적 특성 측정 결과, 소나무 가도관의 길이는 조재에서 2.00 mm, 만재에서 2.31 mm로 측정되었고, 조재의 폭은 방사방향 39.23 μ m, 접선방향 34.57 μ m, 만재의 폭은 방사방향 12.75 μ m, 접선방향 20.94 μ m로 측정되었다. 세포벽의 두께는 조재에서 3.74 μ m, 만재에서 5.22 μ m로 측정되었다.

3.2 물리적 특성

소나무의 비중 및 수축률 측정 결과, 소나무의 비중은 생재 0.370, 기건 0.385, 전건 0.408로 측정되었다. 방향별 전수축률은 섬유방향 0.78%, 방사방향 2.35%, 접선방향 6.54%로 측정되었고, 전부피수축률은 9.44%로 측정되었다.

3.3 역학적 특성

소나무의 역학적 특성 측정 결과, 소나무의 휨강도는 기건 상태에서 67.8 MPa, 생재 상태에서 38.1 MPa로 측정되었고, 종압축강도는 기건 상태에서 30.9 MPa, 생재 상태에서 15.1 MPa로 측정되었으며, 종인장강도는 기건 상태에서 68.0 MPa, 생재 상태에서 57.1 MPa로 측정되었다. 방사단면 전단강도는 기건 상태에서 6.9 MPa, 생재 상태에서 3.6MPa로 측정되었고, 접선단면 전단강도는 기건 상태에서 8.0 MPa, 생재 상태에서 4.4 MPa로 측정되었다. 끝으로 기건상태의 경도는 횡단면에서 3.9 kN, 방사단면에서 2.2 kN, 접선단면에서 2.6 kN으로 측정되었다.

3.4 화학조성

소나무의 화학조성 분석 결과, 소나무의 회분함량은 0.19%, 추출물의 함량은 6.91%로 측정되었다. 리그닌의 함량은 산불용성 26.04%, 산가용성 1.84%, 합계 27.88%로 측정되었다. 총당함량은 글루칸 44.42%, XMG 18.97%, 아라비난 0.60%, 합계 63.99%로 측정되었다.

4. 결론

본 연구에서는 국산 주요 수종의 목재 성질 DB구축을 위하여 우리나라의 대표적인 상록 침엽수인 소나무(강원도 평창)의 해부·물리·역학적 특성 및 화학조성을 평가하였다(Table 2). 목재는 생장 지역에 따라 재질 특성이 다르게 나타나기 때문에 본 연구와 같이 하나의 지역에서 생산된 소나무의 재질 특성이 국산 소나무의 대푯값으로 볼 수 없다. 따라서, 국산 소나무의 대푯값을 도출하기 위해서는 다양한 산지에서 생산된 소나무의 재질 특성을 비교/평가할 필요가 있으며, 본 연구 결과는 이를 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다. 향후, 국산 주요 수종의 지역별 목재 성질 DB구축을 위하여 다양한 수종 및 지역의 기초 재질 특성 결과를 추가로 제공할 예정이다.