

건축 내장재료로의 이용을 위한 백합나무의 연소특성 연구

Study on the Combustion Characteristics of Tulip Tree (*Liriodendron tulipifera*) for Use as Interior Building Materials

Min Ji KIM¹ · Sang-Joon LEE¹ · Sejong KIM¹ · Myung Sun YANG¹ · Dong Won SON¹ · Chul-Ki KIM^{1,†}

¹Forest Product and Industry Department, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Korea

초록 : 본 연구에서는 대한민국의 대표 활엽수 조림수종인 백합나무의 연소특성을 분석하였다. 백합나무에 난연약제만 처리한 것, 난연약제 및 오일스테인 처리한 것, 무처리한 것까지 총 세 가지 시험편을 대상으로 연소특성분석을 실시하여 난연성능 등급을 분류하였다. 실험결과, 난연약제처리재, 난연약제 및 오일스테인처리재, 무처리재 순으로 우수한 난연성능을 보였다. 국내 건축물 내장재의 평가기준인 총방출열량과 최대열방출률을 살펴본 결과, 세 가지의 시험편 중 무처리재를 제외한 두 종류의 시험편에서 총방출열량과 최대열방출률이 모두 난연성능기준을 통과하였다. 그러나 준불연성능기준에는 총방출열량에서 충족하지 못한 것으로 나타났다. 목재의 물성과 연소특성과의 관계를 확인하기 위하여 백합나무가 속한 산공재 수종들의 연소특성을 분석한 결과, 연소특성은 밀도와 양의 상관관계가 있음을 알 수 있었다. 본 연구의 결과는 백합나무의 연소특성에 대한 기초정보로 활용될 것으로 판단한다.

1. 서론

세계적으로 이산화탄소의 과도한 배출로 인한 기후변화로 피해가 급증함에 따라 이의 해결을 위한 이산화탄소의 배출 제한과 더불어 토지의 효율적인 이용과 산림관리, 화석연료를 대체할 에너지의 개발, 친환경적 재료의 이용 연구가 진행되고 있다. 특히 빛과 공기 중의 이산화탄소를 이용해 성장하여 많은 양의 탄소를 저장하는 목재의 이용이 관심 받고 있다 (Ahn *et al.*, 2021; Bergman *et al.*, 2014). 목재는 예로부터 건축과 가구재료로 사용되고 있으며, 현재는 펄프 등과 같은 여러 목적으로 이용하기 위해 생산되고 있다 (Ghani and Lee, 2021; Lee and Kim, 2022). 목재의 탄소저장효과를 높이기 위해서는 대표적인 장주기 재료인 건축재료로 사용해야 하나, 그를 위해서는 목재의 단점인 가연성을 해결해야 한다. 현재 국내 건축법에서는 화염확대방지 및 피난 안전을 도모하기 위해 일정규모 이상의 건축물에 사용되는 내부마감재료(건축물 내부의 천장 벽, 기둥 등에 부착되는 마감재료)는 불연, 준불연재료 및 난연재료를 사용하도록 의무화하고 있기 때문이다 (Cho *et al.*, 2019).

목재의 난연성능을 확보하기 위해 인화합물계, 질소화합물계, 붕소화합물계, 실리코화합물계 등을 단독 또는 혼합한 난연약제들이 개발되고 있으며 (Jin and Chung, 2018), 환경오염을 저감하기 위한 친환경적인 난연약제에 대해서도 연구가 이루어지고 있다 (Park *et al.*, 2021). 대부분의 난연약제는 목재 표면에 보호층을 형성하여 산소 공급을 차단하는 역할을 한다 (Xu *et al.*, 2021). 난연약제를 적용한 목재의 특성을 분석하기 위해 Kim *et al.* (2021)은 자체 개발한 난연약제를 목재에 주입하여 약제 흡수량 및 두께에 따른 연소특성분석 등을 분석하여, 국가에서 지정한 준불연 기준을 통과하는 성능을 확인하였다. 다양한 난연약제들의 유독성 및 유해성을 평가하였을 때 인화합물계 난연약제가 가장 안전하다는 결과가 발표된 바 있다 (Wang *et al.*, 2007). 이 밖에도 국내, 외에서 착화지연 등 난연성능을 부여한 목재에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다 (Kim, 2018). 이 밖에도 원목뿐만 아니라 인테리어의 내장재나 가구재 등으로 이용되는 합판에 난연성능을 부여하기 위한 연구들이 진행되고 있으며 (Wen *et al.*, 2020), 효율적인 제작 방법과 적용 후 합판의 강도분석 등의 연구가 진행되고 있다 (Liu *et al.*, 2021; Schulz *et al.*, 2021).

한편, 백합나무는 대한민국 기후와 풍토에 잘 맞는 우수한 조림 수종으로 알려져 있다. 또한 15~20년까지는 완만한 생장

을 하다가 그 이후에는 급속한 생장을 하는 속성수이다(Ryu *et al.*, 2003). Kim(2013)은 백합나무의 연간 생체량 증가율은 54.0 kg/tree/y이며, 이산화탄소 흡수량은 99.1 kgCO₂/Tree/y으로 성장량이 왕성하고 탄소흡수율이 높다고 보고하였다. 따라서 백합나무의 풍부한 생산량이 기대되며, 추후 가구재, 악기 및 펄프용 또는 건축내장재로 다양하게 사용될 가능성이 높다. 최근 Song and Kim(2022)은 백합나무를 CLT의 약축에 적용하여 구조재로서의 가능성을 분석하였으며, 그 성능이 양호하다고 보고하였다. 그러나 백합나무의 이용을 위해서는 연소특성과 난연성능을 확보하기 위한 방안에 대한 연구는 미흡한 상황이다. 이와 더불어 백합나무를 이용하기 위해서는 목적에 맞게 가공하여 주변환경으로부터의 목재를 보호하고 목재의 치수안정성을 부여하기 위한 마감처리가 필요한데(Jung *et al.*, 1998; Park *et al.*, 2004), 도장처리가 난연성능에 미치는 영향에 대한 연구는 저자들이 아는 한 진행된 바 없다.

따라서 본 연구에서는 현재 활발히 조립되고 있는 백합나무의 난연성능을 확인함으로써 백합나무를 실생활에서 이용하기 위한 방안을 구축하기 위해서 실시되었다. 그리고 난연처리와 난연 및 오일스테인으로 마감처리한 백합나무의 연소특성을 분석함으로써 마감처리가 목재의 연소특성에 미치는 영향을 확인하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 공시재료

본 연구에서는 백합나무(*Liriodendron tulipifera*)를 공시수종으로 선정하였다. 백합나무 제재목을 활용하여 시험편은 무처리시편(A), 난연처리시편(C), 난연약제 및 오일스테인 처리시편(B)을 각각 3개씩 제작하였다. 연소성능 분석을 위해 KS F ISO 5660-1(콘칼로리미터법의 시험규격)에 따라 시편 크기를 결정하였으며 온도 23 ± 2℃, 습도 50 ± 5%의 조건에서 항온항습 처리 후 실험에 이용하였다. 시험편의 최종 크기는 100(R) × 100(T) × 10(L) mm³이었다.

2.2. 난연약제 조성 및 주입

2.2.1. 난연약제 조성

난연처리시편(C), 난연처리 및 오일스테인 처리시편(B)의 난연성능을 부여하기 위해 사용된 약제는 국립산림과학원에서 개발한 난연약제(약제명: eGF)이며 Table 1과 같이 8가지 성분을 조합하여 사용하였다. 본 연구의 난연약제는 무기계 수용성으로 제조 시 첨가되는 약제의 충분한 희석을 통해 완성된 약제는 무색, 무취의 특성을 가지고 있다.

2.2.2. 난연약제 주입

각 시험편이 겹치지 않도록 간격을 두고 배치하여 고정된 후 난연약제를 주입하였다. 난연약제 주입과정은 감압 30분(1.5 MPa) → 난연약제투입 30초 → 가압 60분(12~15 MPa) → 감압 10분(1.5 MPa)의 순서로 진행되었다. 난연약제 주입장치는 가압식 진공수지 함침장치(Myung Sung Tech사, Korea)를 사용하였다(Fig. 1). 시험편에 흡수된 약제의 양은 약 25.5%이었다.

2.3. 하도제 및 오일스테인 처리

난연약제를 처리한 백합나무 시험편의 수축과 팽윤에 의한 할렬을 막고 미적 요소를 가하기 위해 후처리를 진행하였다. 후처리를 위하여 약 1~2 g 정도의 하도용 오일(House oil, Hollyway사, USA)과 수용성 스테인(Stain, Bondex사, Denmark)을 각각 1, 2회를 도포하였다(Fig. 2).

2.4. 연소성능 분석을 위한 콘칼로리미터 실험

백합나무의 처리별 연소특성은 KS F ISO 5660-1(콘칼로리미터법)에 따라 측정하였다. 콘칼로리미터법은 현재 국내 건축법 시행령에서 정의하고 있는 불연재료, 준불연재료, 난연재료를 평가할 수 있는 방법이다(Kim *et al.*, 2012). 연소는 10분 동안 진행되었으며 난연 및 준불연성능을 확인하기 위하여 최대열방출률(peak heat release rate), 총방출열량(total heat release)을 조사, 분석하였다. 국토교통부 고시 제2015-744호(건축물 마감재료의 난연성능 및 화재 확산 방지구조 기본) 제3조에 규정된 난연성능기준은 가열개시 후 5분, 준불연성능기준은 10분 동안 총방출열량이 8 MJ/m² 이하, 최대열방출률이 10초 이상 연속으로 200 kW/m²을 초과하지 않아야 한다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 각 조건별 총방출열량 결과

총방출열량은 시험체의 연소로 인해 방출된 열량의 총량으로, 이를 활용하여 실제 화재 시 발생하는 화재의 크기를 예측할 수 있다(Kim and Song, 2016). 세 조건의 시험편을 콘칼로리미터법에 따라 연소특성을 측정하였을 때, 가열개시 후 5분간 평균 총방출열량은 무처리재(A)가 32.4 MJ/m², 난연처리(C)만 실시한 것이 2.3 MJ/m², 난연처리 및 오일스테인 처리(B)한 것이 6.1 MJ/m²로 측정되었다. 이후 10분간 연소를 진행했을 때의 총방출열량은 무처리재(A)가 61.9 MJ/m², 난연약제처리(C)만 실시한 것이 9.4 MJ/m², 난연처리 및 오일스테인을 처리한 것(B)이 16.4 MJ/m²로 측정되었다(Table 2). 국토교통부 고시 기준과 비교하였을 때 무처리재(A)를 제외한 두 조건의 시험편이 난연기준을 만족하는 것으로 나타났으며 준불연 성능기준은 모든 조건에서 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 세 조건 중 난연처리(C)만 실시한 것이 가장 낮은 총방출열량을 나타냈으며, 난연처리 및 오일스테인처리한 것(B), 무처리재(A) 순으로 총방출열량이 높게 측정되었다(Figs. 3 and 4). 난연약제 및 오일스테인을 처리한 시험편(B)이 난연처리(C)만 실시한 시험편보다 난연성능이 떨어지는 이유는 연소 시 오일의 유성분이 산소와 결합하여 열량이 상승한 것으로 판단된다(Abraham, 1996). 따라서 미적, 보호의 목적으로 오일스테인을 이용할 때 난연성능의 저하를 유의해야할 것으로 판단된다.

3.2. 각 조건별 열방출률

열방출률은 시험체가 연소할 때 소비되는 산소소비량을 측정하여 역으로 계산한 것이며 화재 초기단계에서 최대열방출률을 통해 화재의 초기 성장속도와 크기를 예측할 수 있다(Lee *et al.*, 2004). 각 조건의 시험편을 가열개시 후 5분간 실험하였을 때 평균 최대열방출률은 무처리재(A)가 137.1 kW/m², 난연처리만 실시한 것(C)이 8.5 kW/m², 난연 및 오일스테인 처리한 것(B)이 11.5 kW/m²로 측정되었다. 이후 10분간 연소를 진행했을 때의 평균 최대열방출률은 무처리재(A)가 185.7 kW/m², 난연약제만 처리(C)한 것이 56.7 kW/m², 난연약제 및 오일스테인을 처리(B)한 것이 71.8 kW/m²로 측정되었다(Table 3). 국토교통부 고시에 따라 모든 조건의 시험편이 평균값은 난연과 준불연성능기준을 만족하는 것으로 나타났다. 목재가 열에 노출될 때 열방출률은 두 번의 최고점에 도달한다(Ondrej and Henrich, 2001). 이는 연소에 의해 휘발성분이 날아가면서 남아 있는 탄소로 이루어진 탄화층이 공기의 유입을 막아 열의 확산을 더디게 하기 때문이다. 이때 열에 노출된 시간과 탄화된 양은 비례한다(Xu *et al.*, 2015). 본 연구에서도 기존 연구와 같은 양상을 보였으며 최대열방출률의 경우 난연처리(C)만 실시한 시험편이 가장 낮은 열방출률을 나타냈고 착색제와 난연처리한 시험편(B), 무처리재(A) 순으로 높게 측정되었다. 총방출열량과 같이 열방출률 또한 오일스테인의 영향을 받아 차이를 보인 것으로 판단한다. Son and Kang(2015)은 연구를 통해 난연처리를 통해 최대열방출률이 85% 감소한다고 보고하였으며 본 연구에서도 난연처리를 통해 최대열방출률이 감소하는 경향을 나타냈다(Figs. 5 and 6).

3.3. 타 수종과의 연소특성 비교

본 연구의 공시재료인 백합나무는 활엽수종 중 생장률 내 대도관의 배열이 무분별하게 산재된 산공재이며 도관의 직경이 50~100 μ m으로 상당히 크고 다량으로 존재한다. 또한 도관요소 상하가 인접한 면이 계단상천공판으로 연결되어 있어 높은 공극률을 가진다(Kang *et al.*, 2011). 그러나 이외의 부분은 세포내강이 거의 없고 두꺼운 벽을 가지는 목섬유들이 존재한다. 기존 연구에서 콘칼로리미터를 이용해 같은 방식으로 조사된 산공재 수종의 밀도와 연소특성과의 관계를 분석해본 결과 선정한 모든 수종이 밀도가 높아지면 총방출열량 및 최대열방출률이 상승하는 경향을 보였다(Table 4, Fig. 7). 목재는 연소 시 구성성분의 변화에 의한 성능이 저하될 때 수종과 함수율에 따라서 결정된다(Ragland *et al.*, 1991). Park *et al.*(2020) 또한 연소특성 중 낙엽송, 자작, 편백, 잣나무에 대해 방염성능을 조사한 결과 수종에 따라 차이가 있으며, 다양한 수종과 목재제품에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 보고하였다. 이에 따라 연소특성은 산공재의 밀도를 결정하는 목섬유의 함유량에 따른 차이가 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 대한민국 내에서 주요 조림수종으로 손꼽히는 백합나무를 대상으로 연소특성을 분석하였다. 난연제의 성능을 확인하기 위하여 난연처리재와 무처리재의 연소특성을 분석하였으며 건축내장재료의 이용을 위해 방미, 방부역할 및 미적요소를 부여하기 위해 사용되는 마감제를 도포한 시험편 함께 실시하였다.

- 세 조건의 시험편을 대상으로 연소성능을 분석해 본 결과 난연처리시험편(C), 난연처리 및 오일스테인처리한 시험편(B), 무처리재(A) 순으로 우수한 난연 성능을 보였다.
- 보호 및 미적요소를 부여하기 위해 사용된 난연 및 오일스테인 처리한 시험편(B)이 난연처리만 한 시험편(A)보다 난연 성능이 떨어지는 이유는 본 연구에서 사용한 마감재의 유성분이 연소 시 산소와 결합하여 열량이 상승한 것으로 판단된다. 그러나 급격히 연소가 일어나지 않으므로 이용에 크게 제한되지 않을 것으로 판단된다.
- 기존 연구와 본 연구의 결과를 분석해 본 결과 목재의 밀도는 연소성능과 높은 상관관계를 보이는 것으로 나타났다. 이에 따라 목재의 구성요소에 따른 연소성능의 변이가 있을 것으로 판단되며 추후 분석이 필요할 것으로 판단한다.