

耐火處理 및 再乾燥가 라디에타소나무의
力學的 性質에 미치는 影響^{*1}

정두진^{*2} · 조재성^{*3} · 윤기언^{*3} · 김재진^{*3} · 김규혁^{*3}

Effect of fire-retardant treatment and redrying
on the mechanical properties of radiata pine^{*1}

Doo-Jin Chung^{*2}, Jae-Sung Jo^{*3}, Ki-Eon Yun^{*3}, Jae-Jin Kim^{*3}, Gyu-Hyeok Kim^{*3}

ABSTRACT

The effect of fire-retardant treatment and redrying on the mechanical properties of radiata pine sapwood were evaluated. Small, clear specimens were treated with three different fire-retardant(FR) chemicals, borax-boric acid(BRX), minalith(MIN), and pyresote(PYR), with target retentions of 30 and 60kg/m³, and then redried at maximum dry-bulb temperature of 25°C, 60°C, 80°C or 110°C. Each specimen, including untreated and water-treated controls, was tested in static bending and in compression parallel to grain.

The extent of strength reduction was dependent on the type of FR chemicals, retention, and redrying temperature, and a highly significant interaction existed between FR treatment and redrying temperature. Modulus of rupture(MOR) and work to maximum load(WML) were significantly decreased by FR treatment and redrying. None of three FR chemicals adversely affect modulus of elasticity (MOE) and maximum crushing strength(MCS). MOE of BRX treatment and MCS of both BRX and PYR treatment increased significantly compared to untreated controls. No significant differences existed between retention levels except for MOE and MCS of some combinations of FR chemicals and redrying temperatures. Although MOE and MCS was not significantly affected by any of the redrying temperatures, these properties were generally decreased with the increase in redrying temperature. The significant reduction in MOR and WML was observed in BRX treatment when dried at temperatures of 60°C and above, and in MIN and PYR treatment when dried at temperatures of 80°C and above. Consequently, BRX-treated radiata pine should not be redried at temperatures >60°C, and MIN- and PYR-treated radiata pine should not be redried at temperatures > 80°C where bending strength and energy-related properties are important design considerations.

Keywords : fire-retardant chemical, redrying, mechanical properties, borax-boric acid, minalith, pyresote, radiata pine.

*1 접수 1998년 9월 25일, Received September 25, 1998

*2 임업연구원 Forest Research Institute, Forestry Administration, Seoul 130-012, Korea

*3 고려대학교 자연자원대학 College of Natural Resources, Korea University, Seoul 136-701, Korea

- 요약 -

내화처리 및 재건조가 목재의 역학적 성질에 미치는 영향을 구명하기 위하여 라디에타소나무 변재 무결점·소형 시험편 내로 내화제인 borax-boric acid(BRX), minalith(MIN), pyresote(PYR)를 가압주입한 후 25, 60, 80, 110°C로 재건조한 후 휨성질과 종압축강도를 측정하였다. 내화처리 및 재건조에 의한 라디에타소나무 시험편의 역학적 성질 감소 정도는 내화제의 종류, 보유량, 그리고 재건조온도의 조합에 따라 상이하였으며, 내화처리와 재건조온도간에 통계학적으로 매우 높은 유의성을 보이는 상호작용이 존재하였다. 휨강도와 휨파괴시 최대일량은 내화처리에 의해 상당히 감소되었으나 휨탄성계수와 종압축강도는 내화처리에 의해 감소되지 않고 오히려 BRX 처리구의 탄성계수와 BRX 및 PYR 처리구의 종압축강도는 대구조인 무처리구보다 높았다. 몇가지 내화제와 재건조온도의 조합의 휨탄성계수와 종압축강도의 경우를 제외하고는 내화제 보유량간에는 역학적 성질의 차이도 인정되지 않았다. 휨탄성계수와 종압축강도는 재건조온도의 영향을 크게 받지 않는 것으로 나타났다. 그러나 휨강도와 휨파괴시 최대일량은 재건조온도가 증가할수록 일반적으로 감소하였는데, BRX처리구는 재건조온도 80°C부터, 그리고 MIN과 PYR 처리구는 재건조온도 110°C에서 대구조와 비교할 때 심각한 휨강도의 감소가 관찰되었다. 따라서 내화처리 라디에타소나무 목재를 구조부재로 사용하기 위해서는 BRX 처리재의 경우는 60°C, 그리고 MIN과 PYR 처리재의 경우는 80°C 이상의 건조온도를 적용하는 것은 삼가야 할 것이다.

1. 緒 論

목재의 可燃性은 재료로서 목재의 치명적인 단점 중의 하나로 향후 木造住宅의 활발한 보급을 위해서는 내화처리 목재를 내화구조용 재료로 사용될 수 있도록 현행 建築法의 개정과 함께 耐火處理 목재의 사용이 적극 권장되고 있다. 處理材중의 耐火劑는 목재표면에서 火焰의 확산속도를 상당히 감소시킬 뿐만 아니라 熱劣化가 발생하는 온도까지의 목재온도 상승을 지연시켜서 화재시 엄청난 인명 및 재산 손실을 최소화한다. 그러나 내화처리는 상기한 긍정적인 측면만을 목재에 제공하는 게 아니라 처리재의 강도를 감소시키는 문제를 동반한다. 또한 대부분의 내화제가 水溶液 상태로 처리되기 때문에 내화처리 후 처리재는 원하는 치수안정성을 달성하고 운반비용을 줄이기 위하여 반드시 再乾燥되어야 하는데, 재건조시에도 처리재의 강도 감소가 따른다. 따라서 미국 임산물협회(National Forest Products Association; NFPA)의 木構造 設計 細則(National Design Specification for Wood Construction)은 내화처리에 의한 設計應力의 감소를 역학적 성질의 종류에 따라 최대 10~20%까지 인정하고 있다(NFPA, 1990). 이러한 내화처리 및 재건조에 의한 필연적인 강도감소 기작은 아직 정확히 밝혀지지 않았으나, 내화제 자체에 의한 열화, 처리 후 재건조시 고온에 의

한 熱劣化, 그리고 相互 上昇作用에 의한 열화가 내화처리재의 강도감소 원인으로 추정된다. 내화처리재의 강도감소는 사용된 내화제의 종류에 따라라도 상이하지만 동일 내화제의 경우도 재건조시 적용된 건조온도에 따라 상이한데, 그 동안의 연구결과들을 살펴보면 온도가 어느 한계 이상의 고온일 경우는 처리재의 강도감소가 심각함을 알 수 있다. 미국 목재 방부협회(American Wood-Preservers' Association; AWP)는 내화처리 목재와 합판의 재건조시 최대 건조온도가 160°F(71°C)를 넘지 않도록 규정하고 있다(AWPA, 1995a, 1995b).

그동안 국내에서의 내화처리 및 재건조에 관한 연구는 주로 合板 및 파티클보드 등 內裝用 板狀製品을 중심으로 진행되어 왔다(金, 1987; 權·李, 1985; 金等, 1984a, b; 李·權, 1983; 李·金, 1982; 李·Schaffer, 1981). 그러나 최근 국민생활의 향상과 더불어 목구조물에 대한 관심과 선호도가 높아지면서 그 築造數가 날로 증가되고 있는 점을 고려할 때, 향후 구조용 목재의 내화처리 물량이 증가하리라 예상된다. 따라서 내화처리 목재의 역학적 성질 감소를 구명하는 연구는 매우 중요한 것이라 사료되어 본 연구를 실시하였는데, 대상 수종으로는 松栢類중 현재 국내 사용량이 가장 많고 앞으로도 사용량이 지속적으로 증가하리라 예상되는 라디에타소나무를 사용하였다.

2. 材料 및 方法

2.1 試驗片的 準備

라디에타소나무(*Pinus radiata* D. Don.) 제재목을 市中 목재상에서 구입하여 치수가 1.75(폭)×1.75(두께)×30cm(길이)인 無缺點 휨 시편을 필요량 제조한 후, 이들을 실내에서 氣乾시켜 함수율이 12퍼센트 내외가 되도록 조정하였다. 기건된 시편중 邊材 시편만을 사용하였는데, 변재와 심재의 구분은 미국방부협회 표준규격 AWP A M-2 (AWPA, 1995c)의 正色反應에 의하였다. 동일 수종내에서 임목개체간, 그리고 동일 임목내에서 부위별 변이에 의한 내화제 처리 및 재건조 그룹간의 역학적 성질의 변이를 최소화하기 위하여 횡단면상의 연륜수, 기건밀도(기건중량/기건체적), 그리고 응력과 탄성계수의 분포가 그룹간에 비슷하게 되도록 30개씩의 시편들을 29개 그룹에 배치하였다. 응력과 탄성계수는 응력과 시험기인 sonic stress-wave timer (Metriguard Inc., Model 239A)를 사용하여 측정된 시편의 길이방향 응력과 전달속도와 시편의 기건밀도로부터 산출하였다.

2.2 耐火劑의 準備

본 연구에 사용된 공시 내화제는 棚沙-硼酸화합물

Table 1. Individual fire-retardant chemical compositions

Chemicals	Percent
Borax-boric acid (BRX)	
Borax (Na ₂ B ₄ O ₇)	60
Boric acid (H ₃ BO ₃)	40
Minalith (MIN)	
Diammonium phosphate [(NH ₄) ₂ HPO ₄]	10
Ammonium sulfate [(NH ₄) ₂ SO ₄]	60
Borax (Na ₂ B ₄ O ₇)	10
Boric acid (H ₃ BO ₃)	20
Pyresote (PYR)	
Zinc chloride (ZnCl ₂)	35
Ammonium sulfate [(NH ₄) ₂ SO ₄]	35
Boric acid (H ₃ BO ₃)	25
Sodium dichromate (Na ₂ Cr ₂ O ₇ · H ₂ O)	5

(borax-boric acid; 이하 BRX로 칭함), 미날리스(minalith; 이하 MIN으로 칭함), 파이레스트(pyresote; 이하 PYR로 칭함)였는데, 이들의 화학적 조성은 Table 1과 같다.

2.3 耐火處理

내화처리는 각 내화제의 예정보유량이 30kg/m³과 60kg/m³가 되도록 5%와 10% (w/v)의 내화제 수용액을 사용하여 가압처리에 의해 실시하였다. 그리고 물처리 대조구는 시편내로 물을 가압하여 주입하였다. 가압처리는 pilot 규모의 가압처리 시설을 이용하여 充細胞法(full-cell process)으로 실시하였는데, 760mmHg의 眞空 下에서 30분간 前排氣를 실시한 후 내화제를 注藥罐 내로 유입시킨 후 10kg/cm²의 압력으로 1시간 동안 가압을 실시하였다.

처리후 재건조시까지 수분손실을 예방하기 위하여 시편들을 밀봉하고 4℃에서 보관하였다.

2.4 處理 試驗片的 再乾燥

재건조는 건구온도 25, 60, 80, 및 110℃에서 실시하였다. 25℃ 건조는 恒溫機 내에서 함수율 15% 선까지 실시되었으며, 60, 80, 및 110℃ 건조는 Boone 등(1985)이 제안한 다음의 소형·무결점 시편을 이용한 角材의 模擬 건조방법에 의하여 실시되었다. 1cm 두께의 잔목을 사용하여 30cm 폭으로 시편을 잔적하여 60, 80, 110℃ 온도별로 시편들의 평균 함수율이 20±5%될 때까지 건조기 (convection oven) 내에서 건조하였다. 잔적을 잔목이 있는 상태 그대로 내열성 polyethylene film으로 밀봉하고, 60, 80, 110℃ 온도별로 횡단면의 크기가 5x10cm인 신태재의 건조 소요시간 만큼 건조기 내에서 가열하였다. 본 연구에서는 횡단면의 크기가 5x10cm인 라디에타소나무 신태재의 60, 80, 110℃ 온도별 건조 소요시간을 Anon (1988)이 제시한 라디에타소나무 각재의 건구온도별 예상 건조시간을 토대로 각각 7일, 5일, 24시간으로 하였다.

2.5 力學的 性質 測定

재건조후 실내에서 장기간 조습된 시편들의 휨시험은 ASTM 표준규격 D-143 (ASTM 1994)에 의거하여 Instron 萬能強度試驗機를 이용하여 中央集中荷重 방식에 의해 실시되었다. 스펠(span)은 24.5cm (스팬:두께=14:1), 그리고 하중속도는 8.8mm/분이었

다. 여기서 하중속도는 강도시험 시간을 단축하기 위하여 표준규격(0.88mm/분)보다 10배 빠르게 하였다. 각 시편으로부터 얻어진 荷重-變形曲線(load-displacement) 시편(길이:두께=4:1)을 채취하여 ASTM 표준규격 D-143 (ASTM 1994)에 의거하여 Instron 만능강도시험기를 이용하여 縱壓縮試驗을 실시하였으며, 하중속도는 1mm/분을 사용하였다.

압축시편 채취시 길이 3cm의 시편을 파괴부위 근처에서 채취하여 비중과 함수율을 측정하였다. 비중은 채취시 시편의 체적과 전건중량을 사용하여 계산하였다.

2.6 資料分析

내화제의 종류, 내화제 보유량, 처리후 재건조온도가 내화처리 시편의 휨성질(휨강도, 휨탄성계수, 파괴시까지 일량)과 종압축강도에 미치는 영향에 대한 통계처리의 正確度를 향상시키기 위하여 자료를 公分散分析에 의하여 분석하였다. 우선 내화처리후 재건조된 시편의 역학적 성질을 통계학적으로 유의성 있게 영향하는 공변수(covariate)를 조사하였다. 내화제 처리전 시편의 초기 비중과 동적 탄성계수는 조사하였으나, 내화제처리 및 재건조후 시험편의 함수율과 비중은 처리 및 건조의 영향을 받으므로 공변수로 조사하지 않았다. 공분산분석 결과, 통계학적으로 유의성이 있는 차이가 인정되는 修正 평균치간의 비교는 最小平方平均 分離法(least square mean separation method)에 의해 실시되었다. 모든 통계처리는 SAS(Statistical Analysis System) 통계패키지의 generalized linear model (GLM)을 이용하여 실시하였다 (SAS Institute 1995).

3. 結果 및 考察

측정된 시편의 휨성질(휨강도, 휨탄성계수, 파괴시 일량) 및 종압축강도의 평균 및 變異係數는 Table 2에, 그리고 시편의 초기 비중과 동적 탄성계수를 공변수로 하여 조정된 이들의 수정 평균치는 Table 3에 보여준다. 내화처리 및 재건조에 의한 라디에타소나무 시편의 역학적 성질 감소 정도는 내화제의 종류, 보유량, 그리고 재건조온도의 조합에 따라 상이하였는데, 전반적으로 볼 때 휨강도 및 휨파괴시 일량은 내화제 처리 및 재건조에 의해 영향을 받으나 탄성계수와 종압축강도는 크게 영향을 받지 않는 것

으로 나타났다 (Table 4). 탄성계수의 경우를 제외하고는 내화제의 종류와 재건조 온도간에 高度의 有意性있는 相互作用이 존재하였는데(Table 5), 이러한 상호작용은 자료분석의 한계를 부여할 뿐만 아니라 연구결과의 해석을 극도로 제한하게 된다. 따라서 난연처리와 재건조 효과를 별도로 분리하여 이들이 처리시편의 역학적 성질을 어떻게 영향하는가를 전반적인 경향을 중심으로 고찰하였다.

3.1 耐火處理의 影響

3.1.1 耐火劑의 種類에 따른 影響

내화제 처리구와 대조구인 무처리 및 물처리구의 역학적 성질간에 유의성($\alpha \leq 0.05$)이 있는지 여부를 Duncan의 다중검정법에 의해 분석한 결과 (Table 6), 처리제의 탄성계수는 내화처리에 의해 감소하지 않고 오히려 BRX 처리구의 탄성계수는 보유량과 재건조온도의 조합에 따라서는 무처리 대조구에 비하여 유의성있는 증가를 보였다. 휨탄성계수는 BRX 처리구 > MIN 처리구 \geq PYR 처리구 순이었는데, PYR 및 MIN 처리구의 탄성계수는 물 처리 대조구와는 비슷하였으나 무처리 대조구보다는 낮았다. 이러한 결과는 내화처리가 휨탄성계수에 미치는 영향에 대한 그간의 중요한 연구결과들과도 잘 일치한다(Levan & Winandy 1990). Graham(1964)과 Winandy등(1988)도 본 연구의 결과와 마찬가지로 BRX로 처리한 후 天然乾燥시킨 Douglas-fir 소형 시편과 BRX로 처리된 후 열기건조된 aspen 합판의 탄성계수가 대조구와 비교할 때 약간 증가된다고 보고하였다.

처리제의 휨강도는 내화처리에 의해 감소하여 보유량으로 처리후 80℃로 재건조된 PYR 처리구, 대조구인 무처리구보다 낮았으며, 모든 보유량과 재건조온도에서 BRX 처리구의 휨강도, 그리고 60kg/m³ 30 및 60kg/m³ 보유량으로 처리후 110℃로 재건조된 PYR 및 MIN 처리구의 휨강도는 대조구인 무처리구에 비하여 통계학적으로 유의성있는 감소를 보였다. 참고로 Graham(1964)은 BRX로 처리한 후 천연건조시킨 Douglas-fir 소형 시편의 휨강도가 약 20% 증가하였다고 보고하였으나, 반대로 Winandy등(1988)은 BRX로 처리한 후 熱氣乾燥된 Douglas-fir 및 aspen 합판의 휨강도가 상당히 감소됨을 보고한 바 있다. 휨강도는 전반적으로 MIN 처리구 \geq PYR 처리구 > BRX 처리구의 순이었으나, 재건조온도에 따라서 약간씩 상이하였다. PYR 및 MIN 처리구의 휨강도는 재건조온도 80℃까지는 물처리구와 비

耐火處理 및 再乾燥가 라디에타소나무의 力學的 性質에 미치는 影響

Table 2. Effects of fire-retardant treatment and redrying on mechanical properties*¹

Fire-retardant chemical	Redrying temperature (°C)	Moisture content (%)	Specific gravity	Bending property			
				MOR (kg/cm ²)	MOE (kg/cm ²)	WML (kg · mm)	MCS (kg/cm ²)
Control (untreated)	---	8.8(4.5)* ²	0.44(8.0)	944.9(14.0)	92,839(18.4)	740.2(27.2)	500.4(13.2)
WATER	25	8.0(3.3)	0.43(6.8)	929.2(15.9)	89,359(15.0)	642.1(29.9)	478.1(13.8)
	60	8.4(2.3)	0.42(9.3)	896.6(14.8)	86,779(12.8)	595.2(26.1)	483.9(13.7)
	80	7.4(5.2)	0.42(9.6)	870.5(21.4)	88,129(18.1)	573.2(40.9)	490.1(14.6)
	110	7.7(9.8)	0.42(7.6)	859.7(14.5)	85,381(12.4)	537.8(28.5)	471.8(14.4)
PYR-30	25	8.4(3.0)	0.44(9.9)	934.7(16.6)	87,592(15.1)	583.4(39.3)	512.9(11.1)
	60	8.9(3.7)	0.45(13.1)	893.6(15.5)	82,712(21.4)	563.6(33.9)	535.3(14.5)
	80	8.5(2.4)	0.45(10.0)	866.2(21.8)	85,024(13.0)	524.5(43.1)	528.2(13.4)
	110	7.5(5.7)	0.43(8.2)	711.8(17.2)	82,067(13.8)	320.0(35.3)	526.8(11.7)
PYR-60	25	9.6(6.4)	0.45(8.6)	920.9(17.7)	88,096(16.4)	556.7(35.1)	530.9(12.0)
	60	8.9(3.8)	0.46(6.6)	908.6(19.3)	87,921(15.7)	554.6(39.2)	546.4(8.2)
	80	8.8(4.3)	0.45(7.0)	865.3(20.3)	85,338(16.2)	474.2(36.2)	546.2(12.5)
	110	8.8(6.4)	0.45(8.5)	748.7(21.3)	85,402(17.2)	346.0(41.4)	531.8(13.1)
MIN-30	25	8.4(7.0)	0.43(9.4)	939.6(16.1)	86,070(16.5)	590.8(30.4)	494.5(13.2)
	60	8.8(3.6)	0.43(8.9)	892.7(22.5)	85,749(17.7)	589.9(38.5)	481.4(15.6)
	80	8.6(7.5)	0.44(6.3)	923.9(16.5)	90,606(12.6)	599.2(36.5)	501.3(10.9)
	110	7.5(6.9)	0.43(7.5)	704.1(22.8)	84,804(16.6)	294.5(40.3)	480.3(15.6)
MIN-60	25	8.9(4.2)	0.45(8.7)	928.4(18.1)	89,823(19.2)	564.1(32.8)	512.2(15.7)
	60	9.3(2.4)	0.46(8.7)	936.0(15.0)	89,770(12.3)	570.1(33.2)	500.6(12.7)
	80	8.6(6.7)	0.45(8.1)	919.0(19.3)	88,499(15.7)	538.4(42.8)	498.4(14.7)
	110	8.3(6.6)	0.45(8.0)	757.4(20.1)	87,517(14.7)	351.0(38.9)	498.3(12.0)
BRX-30	25	8.9(4.2)	0.44(9.1)	874.3(20.0)	98,718(16.9)	377.2(41.7)	569.6(16.0)
	60	9.3(2.4)	0.43(9.9)	865.6(20.5)	91,954(14.8)	431.9(35.4)	557.9(13.2)
	80	8.6(6.7)	0.43(9.8)	766.1(26.2)	93,975(15.6)	295.8(51.3)	591.6(14.5)
	110	8.3(6.6)	0.43(7.5)	735.1(17.9)	91,874(17.3)	382.7(32.1)	578.4(14.3)
BRX-60	25	8.7(2.7)	0.43(7.9)	846.0(17.8)	92,616(12.4)	371.9(32.2)	578.4(11.3)
	60	9.2(9.4)	0.43(5.8)	858.9(22.5)	92,370(13.5)	384.8(40.2)	574.7(13.5)
	80	8.3(2.8)	0.43(6.5)	801.2(27.5)	98,692(13.3)	313.9(54.0)	611.1(14.4)
	110	8.1(9.5)	0.44(9.3)	719.9(25.6)	99,715(13.7)	322.5(46.7)	652.9(10.7)

*¹MOR, MOE, WML, and MCS represent modulus of rupture, modulus of elasticity, work to maximum load, and maximum crushing strength, respectively.

*²Values in parenthesis are coefficient of variation(%).

Table 3. Adjusted mean values of mechanical properties using analysis of covariance with dynamic MOE(for MOR, MOE, and MCS) and original specific gravity(for WML and MSC) as the covariates*¹

Fire-retardant chemical	Redrying temperature (°C)	Bending property			
		MOR (kg/cm ²)	MOE (kg/cm ²)	WML (kg · mm)	MCS (kg/cm ²)
Control(untreated)	---	1,020.1	105,061	764.3	538.37
WATER	25	924.2	88,246	642.5	475.9
	60	889.0	85,380	594.0	480.3
	80	856.0	86,507	564.1	482.8
	110	851.1	84,428	532.2	466.9
PYR-30	25	922.6	86,511	573.7	506.1
	60	903.5	84,611	564.4	539.2
	80	869.0	85,318	526.7	530.3
	110	717.1	83,300	319.4	529.3
PYR-60	25	928.0	88,623	563.0	534.5
	60	908.9	88,266	552.5	545.7
	80	873.4	86,163	480.0	550.6
	110	733.7	83,285	339.2	524.2
MIN-30	25	935.0	85,149	590.6	492.6
	60	884.0	84,137	588.8	478.0
	80	919.4	90,677	585.5	498.2
	110	705.1	84,358	298.7	481.0
MIN-60	25	915.7	87,656	560.8	506.1
	60	941.3	90,163	574.8	503.4
	80	925.6	88,999	544.2	501.9
	110	755.3	87,471	348.7	497.6
BRX-30	25	859.5	96,833	368.0	561.7
	60	861.2	90,918	432.4	555.7
	80	762.0	93,480	293.3	589.4
	110	733.2	91,623	381.7	577.4
BRX-60	25	845.5	92,310	373.2	578.3
	60	856.6	91,215	389.1	574.1
	80	796.3	97,932	312.2	609.0
	110	710.2	98,183	319.0	647.6

*¹MOR, MOE, WML, and MCS represent modulus of rupture, modulus of elasticity, work to maximum load, and maximum crushing strength, respectively.

Table 4. Percent change in mechanical properties caused by fire-retardant treatment and redrying compared to untreated controls

Mechanical Property	Fire-retardant chemical	Redrying temperature(°C)			
		25	60	80	110
MOR	H ₂ O	-1.7	-5.1	-7.9	-9.0
	PYR	-1.8	-4.6	-8.5	-22.8
	MIN	-1.2	-3.0	-2.5	-22.7
	BRX	-9.0	-8.8	-17.5	-23.0
MOE	H ₂ O	-3.7	-6.5	-5.1	-8.0
	PYR	-5.4	-7.2	-8.3	-9.8
	MIN	-5.3	-5.5	-3.6	-7.2
	BRX	+3.1	-0.8	+3.7	+3.2
WML	H ₂ O	-13.6	-19.6	-22.6	-27.3
	PYR	-22.6	-24.4	-32.5	-55.0
	MIN	-22.0	-21.7	-23.2	-56.4
	BRX	-49.4	-44.8	-58.8	-52.4
MCS	H ₂ O	- 4.4	-3.2	-2.0	-5.6
	PYR	+ 4.4	+8.1	+7.4	+5.9
	MIN	+ 0.7	-1.9	-0.1	-2.2
	BRX	+14.8	+13.3	+20.3	+23.1

Table 5. Result of an analyses of variance on four mechanical properties tested for radiata pine

Source	Degrees of freedom	MOR	MOE	WML	MCS
Retention (R)	1	0.5127	0.0458	0.2337	0.0007
Chemical (C)	2	.0336	.0001	.0001	.0001
Temperature (T)	3	.0001	.2313	.0001	.2993
R*C	2	.7559	.9719	.9304	.3519
R*T	3	.6739	.3136	.7885	.5319
C*T	6	.0001	.6584	.0001	.0140
R*C*T	6	.9321	.2938	.5596	.3618

Table 6. The effect of fire-retardant chemical on mechanical properties at each level of retention and redrying temperature^{*1}

Retention (kg/m ³)	Redrying temperature (°C)	Bending property																			
		MOR		MOE		WML		MCS													
		(high)	(low)	(high)	(low)	(high)	(low)	(high)	(low)												
30	25	M	C	W	P	B	B	C	W	P	M	C	W	M	P	B	B	P	M	C	W
	60	C	P	W	M	B	B	C	P	W	M	C	W	M	P	B	B	P	C	W	M
	80	C	M	P	W	B	B	M	C	W	P	C	M	W	P	B	B	P	C	M	W
	110	C	W	P	M	B	B	C	W	M	P	C	W	B	P	M	B	P	C	M	W
60	25	P	W	C	M	B	B	P	C	W	M	C	W	P	M	B	B	P	M	C	W
	60	M	C	P	W	B	B	M	C	P	W	C	W	M	P	B	B	P	M	C	W
	80	M	C	P	W	B	B	M	C	W	P	C	W	M	P	B	B	P	M	C	W
	110	C	W	M	P	B	B	C	M	W	P	C	W	M	P	B	B	P	M	C	W

*1 Each bar represents mean values equivalent at a 95% level of significance using least square mean separation. C, W, B, M, and Prepresent untreated control, water-treated control, borax-boric acid, minalith, and pyresote, respectively

숫하였으나, 재건조온도 110°C에서는 급격하게 저하되면서 BRX, PYR, MIN 처리구의 휨강도가 동일하 cement curve)으로부터 탄성계수(MOE), 휨강도(MOR), 파괴시까지 일량(WML)을 계산하였다.

휨시험후 시편의 미파괴 부위에서 길이 7cm의 압였다. 재건조온도와 보유량을 함께 묶은 내화제 처리구별 휨강도의 累積度數分布(cumulative frequency distribution)를 보여주는 Fig. 1에서도 평균치에 의해 비교된 휨강도의 감소 경향과 동일한 경향을 관찰할 수 있었다.

휨파괴시 일량은 물처리구를 포함한 모든 내화제 처리구에서 대조구인 무처리재와 비교할 때 유의성 있는 감소를 보였는데, 감소정도가 휨강도에 비해 매우 큰 것으로 나타났다. 내화처리가 목재의 역학적 성질에 미치는 영향에 대한 기존의 연구결과들을 종합한 Levan과 Winandy(1990)도 휨파괴시의 일량이 내화처리에 의해 가장 민감하게 영향받는 역학적 성

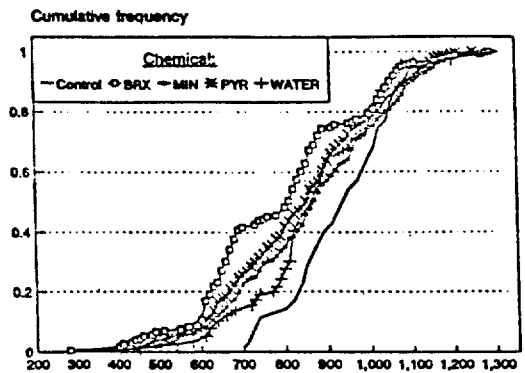


Fig. 1. Cumulative frequency of MOR for BRX, MIN, and PYR-treated specimens

질이 하였는데, 본 연구에서도 휨파괴시 일량이 내화처리에 의한 휨강도의 감소보다 크게 나타나서 기

존의 연구결과들과 부합되었다. 이는 내화처리에 의해 목재가 脆弱화(brittleness)되면서 대조구에 비해 強韌性(toughness)이 감소하기 때문으로 사료된다. 휨과파시 일량은 구조물 설계시 고려 대상이 되는 역학적 성질이 아니기 때문에 내화처리에 의한 극심한 일량의 감소가 실제적인 측면에서 어느 정도 중요한지를 판정하기는 어렵다. 그러나 상온(25℃) 재건조의 경우에서조차 내화처리 목재의 일량이 대조구인 무처리구에 비하여 유의성있게 감소됨은 목재의 충격 또는 에너지 흡수 특성이 중요한 경우에 내화처리 목재를 사용할 때는 이를 매우 중요하게 고려하여야 할 것으로 사료된다. 파괴시 일량은 MIN 처리구 > PYR 처리구 > BRX 처리구의 순이었는데, 재건조온도 110℃의 경우를 제외하고는 BRX 처리구의 일량과 MIN 및 PYR 처리구의 일량간에는 유의성이 인정되는 차이가 있었다.

처리재의 종압축강도 역시 내화처리에 의해 감소하지 않고 BRX 및 PYR 처리구의 종압축강도는 대조구인 무처리구에 비하여 유의성있는 증가를 보였다. 내화처리에 의한 이러한 종압축강도의 증가는 처리시편의 세포벽 내에 위치하는 내화제 鹽의 존재가 압축시험시 세포벽의 압축파괴에 대한 저항을 부여하기 때문으로 사료된다. Lyon 등(1988)도 성분이 밝혀지지 않은 시판 상업용 내화제로 처리된 white spruce의 종압축강도는 변화가 없으나, Douglas-fir와 southern yellow pine 소형 시편의 종압축강도는 1~2% 증가함을 보고한 바 있다. 종압축강도는 BRX 처리구 > PYR 처리구 > MIN 처리구의 순이었는데, MIN 처리구와 물처리구의 종압축강도는 무처리구보다는 약간 낮거나 비슷하였다.

내화처리에 의한 목재의 역학적 성질 변화는 다음과 같은 두가지 정반대의 측면에서 생각할 수 있다. 내화처리에 의해 역학적 성질이 증가한다면 이는 내화제에 의한 목재 세포벽의 bulking으로 야기되는 시편의 斷面係數(section modulus) 증가가 그 원인이고, 반대로 역학적 성질이 감소한다면 내화제 자체에 의한 세포벽 구성성분의 화학적 열화, 특히 내화제가 酸性인 경우 셀룰로오스의 산가수분해가 그 원인이다. 따라서 본 연구에서 BRX 처리에 의한 휨강도와 일량의 심각한 감소는 화학적 열화에 의한 강도감소 영향이 세포벽 bulking에 의한 강도증가 영향보다 크게 작용하였다고 할 수 있으며, 휨탄성계수와 종압축강도의 증가는 휨강도 및 일량의 경우와는 반대로 bulking에 의한 증가요인이 크게 작용하였다

고 할 수 있다. 그러나 水溶液의 평균 pH가 8.5인 BRX에 의한 목재 세포벽의 화학적 열화가 작은 현 단계에서는 분명치 않기 때문에 앞으로 이에 대한 보다 深度있는 연구가 필요하다고 본다. 참고로 본 연구에 사용된 MIN과 PYR 수용액의 평균 pH는 각각 7.8과 5.8이었다.

3.1.2 耐火劑의 保有量에 따른 影響

보유량에 따른 처리시편의 역학적 성질들간에 유의성($\alpha \leq 0.05$)이 존재하는지 여부를 Duncan의 다중검정법에 의해 분석한 결과 (Table 7), 몇가지 내화제와 재건조온도의 조합(60℃로 재건조된 MIN 처리구와 110℃로 재건조된 BRX 처리구의 휨탄성계수와 110℃로 재건조된 BRX 처리구의 종압축강도)을 제외하고는 30kg/m³과 60kg/m³ 보유량간에 역학적 성질의 차이가 인정되지 않았다. 만일 내화처리에 의한 역학적 성질의 감소가 세포벽의 화학적 열화에 의한다면 보유량이 높을수록 강도의 감소정도가 증가되어야 하는데, 본 연구의 결과는 그렇지 않다. 따라서 본 연구에서 내화처리에 의한 역학적 성질의 감소는 최소한 세포벽 구성성분의 화학적 열화에 의하지는 않았다고 사료된다.

3.2 再乾燥의 影響

내화처리후 25, 60, 80, 및 110℃로 재건조된 처리구와 무처리 대조구의 역학적 성질간에 유의성($\alpha \leq 0.05$)이 있는지 여부를 Duncan의 다중검정법에 의해 분석한 결과를 Table 8에 보여준다. 휨탄성계수와 종압축강도는 재건조 온도의 영향을 크게 받지 않는 것으로 나타났으나, 휨강도와 휨과파시 일량은 재건조온도가 증가할수록 일반적으로 감소하였는데 재건조온도 110℃에서의 감소 정도는 매우 크게 나타났다.

탄성계수는 60kg/m³ 보유량의 BRX 처리구의 경우를 제외하고는 재건조온도가 증가되어도 유의성 있는 감소 또는 증가가 관찰되지 않았다. 처리와 재건조에도 불구하고 이러한 처리재 탄성계수의 無變化는 역학적 성질의 변화기작이 유사한 CCA 처리재에 대한 연구결과들(Barnes & Mitchell, 1984; Barnes *et al.*, 1990; Winandy & Barnes, 1991; Winandy *et al.*, 1992)에서도 이미 밝혀진바 있고, 또한 Winandy 등(1988)도 여러종류의 내화제로 처리한 Douglas-fir와 aspen 합판을 120~260°F(ca. 49~127℃)의 온도로 재건조한 결과, 이들의 탄성계

Table 7. The effect of retention on mechanical properties at each level of redrying temperature for each fire-retardant chemical^{*1, 2}

Fire-retardant chemical	Redrying temperature (°C)	bending property							
		MOR		MOE		WML		MCS	
		(high)	(low)	(high)	(low)	(high)	(low)	(high)	(low)
PYR	25	60	C 0 30	60	C 0 30	C 0	60 30	60	30 C 0
	60	C 30	60 0	60	C 30 0	C 0	30 60	60	30 C 0
	80	C 60	30 0	C 60	0 30	C 0	30 60	60	30 C 0
	80	C 60	30 0	C 60	0 30	C 0	30 60	60	30 C 0
	110	C 0	60 30	C 0	30 60	C 0	60 30	30	60 C 0
MIN	25	30	C 0 60	C 0	60 30	C 0	30 60	60	30 C 0
	60	60	C 0 30	60	C 0 30	C 30	0 60	60	C 0 30
	80	0	60 C 30	30	60 C 0	C 30	0 60	60	30 C 0
	110	C 0	60 30	C 60	0 30	C 0	60 30	60	C 30 0
BRX	25	0	C 30 60	30	60 C 0	C 0	60 30	60	30 C 0
	60	C 0	30 60	60	30 C 0	C 0	30 60	60	30 C 0
	80	C 0	60 30	60	30 C 0	C 0	60 30	60	30 C 0
	110	C 0	30 60	60	30 C 0	C 0	30 60	60	30 C 0

*1 Each bar represents mean values equivalent at a 95% level of significance using least square mean separation.

*2 Each property value decreases as retention is read from left to right.

수는 80°F(ca. 27°C)로 재건조된 처리 합판과 차이가 없음을 밝힌바 있다.

BRX 처리구는 재건조온도 80°C부터, 그리고 MIN과 PYR 처리구는 재건조온도 110°C에서 대조구인 무처리구와 유의성있는 휨강도의 감소를 나타냈다. 재건조온도 80°C까지는 세종류의 내화제처리에 의한 휨강도의 감소정도가 상이하나 재건조온도 110°C에

서는 BRX, MIN, PYR 처리시편간의 강도감소 정도가 동일하였다. 따라서 내화처리재의 재건조시 BRX 처리재의 경우는 60°C, 그리고 MIN과 PYR 처리재의 경우는 80°C 이상의 건조온도를 적용하는 것은 삼가하여야 할 것이다. 이는 내화처리 목재 및 합판의 재건조에 대한 미국 목재방부협회 규격이 제시하고 있는 재건조 최고온도인 160°F(71°C)보다 약간

Table 8. The effect of redrying temperature on mechanical properties at each level of retention for each fire-retardant chemical^{*1}

Fire-retardant chemical	Retention (kg/m ³)	Bending property							
		MOR		MOE		WML		MCS	
		(high)	(low)	(high)	(low)	(high)	(low)	(high)	(low)
WATER	---	C 25 60 80 110	80 110	C 25 80 60 110	60 110	C 25 60 80 110	80 110	C 60 80 25 110	110
PYR	30	C 25 60 80 110	80 110	C 25 80 60 110	60 110	C 25 60 80 110	80 110	60 80 110 25 C	110
	60	25 C 60 80 110	80 110	C 60 25 80 110	60 110	C 25 60 80 110	80 110	80 60 25 110 C	110
MIN	30	25 C 80 60 110	80 110	80 C 25 60 110	60 110	C 80 25 60 110	80 110	80 C 25 110 60	110
	60	60 80 C 25 110	80 110	60 80 C 110 25	60 110	C 60 25 80 110	80 110	60 80 25 110 C	110
BRX	30	C 60 25 110 80	80 110	25 80 110 60 C	60 110	C 60 110 25 80	80 110	80 110 25 60 C	110
	60	C 60 25 110 80	80 110	110 80 25 60 C	60 110	C 60 25 110 80	80 110	110 80 25 60 C	110

^{*1}Each bar represents mean values equivalent at a 95% level of significance using least square mean separation.

높거나 낮는데, 이러한 차이는 대상 樹種의 차이와 본 연구에서 사용된 소형 시편을 이용한 모의 건조 방법과 실패재를 이용한 실제 건조법간에 목재의 열 열화에 미치는 건조조건의 차이에 기인한다고 사료 된다.

물 및 내화제 처리후 재건조는 적용된 온도에 관계없이 파괴시 일량을 심각하게 감소시켰는데, 대조구인 무처리구의 일량과 비교할 때 유의성있는 감소가 인정되었다. 물처리구의 경우는 재건조온도가 증가해도 감소정도가 매우 완만하였으나, MIN과 PYR 처리구의 경우는 재건조온도 80℃까지는 물처리구의 경우와 마찬가지로 감소정도가 완만하였으나 110℃ 재건조시는 심각한 일량 감소를 보였다. BRX 처리구의 경우는 재건조온도에 따른 변화는 거의 없는 것으로 나타났다. 종압축강도의 경우는 재건조온도의 증가에 따른 유의성있는 감소는 관찰 되지 않았다.

4. 結 論

내화처리 및 재건조가 목재의 역학적 성질에 미치는 영향을 구명하기 위하여 라디에타소나무 변재 무결점·소형 시편에 내화제인 borax-boric acid (BRX), minalith(MIN), pyresote(PYR)를 가압주입한 후 25, 60, 80, 및 110℃로 재건조한 후 휨성질과 종압축강도를 측정하였다.

내화처리 및 재건조에 의한 라디에타소나무 시편의 역학적 성질 감소 정도는 내화제의 종류, 보유량, 그리고 재건조 온도의 조합에 따라 상이하였으며, 내화제와 재건조 온도간에 매우 높은 유의성을 보이는 상호작용이 존재하였다. 휨강도와 휨파괴시 일량은 내화처리에 의해 감소되었는데, 감소정도는 BRX 처리구>PYR 처리구≥MIN 처리구의 순이었다. 그리고 휨탄성계수와 종압축강도는 내화처리에 의해 감소되지 않고 오히려 BRX 처리구의 탄성계수와 BRX

및 PYR 처리구의 종압축강도는 대조구인 무처리구보다 높았다. 몇가지 내화제와 재건조온도 조합의 휨탄성계수와 종압축강도의 경우를 제외하고는 내화제 보유량간에는 역학적 성질의 차이가 인정되지 않았다. 휨탄성계수와 종압축강도는 재건조온도의 영향을 크게 받지 않는 것으로 나타났다. 그러나 휨강도와 휨과괴시 일량은 재건조온도가 증가할수록 일반적으로 감소하였는데, BRX 처리구는 재건조온도 80℃부터, 그리고 MIN과 PYR 처리구는 재건조온도 110℃에서 대조구와 비교할 때 심각한 휨강도의 감소가 관찰되었다.

따라서 내화처리 라디에타소나무 목재를 구조부재로 사용하기 위해서는 BRX 처리재의 경우는 60℃, 그리고 MIN과 PYR 처리재의 경우는 80℃ 이상의 건조온도를 적용하는 것은 피하여야 할 것이다.

參 考 文 獻

- American Society for Testing and Materials. 1994. Standard methods of testing small clear specimens of timber. ASTM D-143. Philadelphia, PA.
- American Wood-Preservers' Association. 1995a. Structural lumber--Fire-retardant treatment by pressure processes. AWP Standard C20-93. Woodstock, MD.
- American Wood-Preservers' Association. 1995b. Plywood-Fire-retardant treatment by pressure processes. AWP Standard C27-93. Woodstock, MD.
- American Wood-Preservers' Association. 1995c. Inspection of treated timber products. AWP Standard M2-95. Woodstock, MD.
- Anon. 1988. New Zealand Radiata Pine: A technical appraisal of produce, processes, and uses. Ministry of Forestry, Forest Research Institute, Rotorua, NZ.
- Barnes, H. M. and P. H. Mitchell. 1984. The effect of post-treatment redry schedule on the strength of CCA-treated southern pine dimension lumber. Forest Prod. J. 34(6): 29-33.
- Barnes, H. M., J. E. Winandy and P. H. Mitchell. 1990. Effect of initial and post-treatment drying temperatures on the bending properties of CCA-treated southern pine. J. Inst. Wood Sci. 11(6): 222-230.
- Boone, R. S. J. E. Winandy and B. A. Bendtsen. 1985. A technique for simulating lumber drying using small clear specimens. Forest Prod. J. 35(11/12): 49-51.
- Graham, R. D. 1964. Strength of small Douglas-fir beams treated with fire-retardants. Proc., Am. Wood-Preservers' AssoC. 60: 172-177.
- LeVan, S. L. and J. E. Winandy. 1990. Effects of fire retardant treatments on wood strength: A review. Wood and Fiber Science 22(1): 113-131.
- Lyon, D. E., K. L. Bigbee, and W. S. McNamara. 1988. Evaluation of strength properties of fire-retardant treated wood using 1983 National Forest Products Association protocol. Forest Prod. J. 38(6): 13-18.
- National Forest Products Association. 1990. National design specification for wood construction. Washington, DC.
- SAS Institute. 1995. Statistical Analysis System (SAS), User's Manual. Cary, NC.
- Winandy, J. E., S. L. LeVan, E. L. Schaffer, and P. W. Lee. 1988. Effect of fire-retardant treatment and redrying on the mechanical properties of Douglas-fir and aspen plywood. Research paper FPL-485. USDA, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI.
- Winandy, J. E. and H. M. Barnes. 1991. Influence of initial kiln drying temperature on CCA-treatment effects on strength. Proc., Am. Wood-Preservers' Assoc. 87: 147-152.
- Winandy, J. E., H. M. Barnes and P. H. Mitchell. 1992. Effect of CCA treatment and drying on tensile strength of lumber. J. Materials in Civil Engineering 4(3): 240-251.
- 권진현, 이필우. 1985. 내화처리가 파티클보드와 콤파라이보드의 기계적 성질에 미치는 영향. 목재공학 13(4): 3-57.
- 김종만, 정우양, 이필우. 1984a. 수종의 내화약제로 처리된 합판의 기계적 성질에 관한 비교 연구 (1). 목재공학 12(2): 20-26.
- 김종만, 정우양, 이필우. 1984b. 수종의 내화약제로 처리된 합판의 기계적 성질에 관한 비교 연구

耐火處理 및 再乾燥가 라디에타소나무의 力學的 性質에 미치는 影響

- (II). 목재공학 12(4): 12-18.
20. 김종만. 1987. 봉산처리 합판의 열판건조 및 동적탄성율에 관한 연구. 목재공학 15(3): 56-67.
21. 이필우 · E. L. Schaffer. 1981. 구조용 내화처리 합판의 재건조에 관한 연구. 목재공학 9(4): 1-21.
22. 이필우, 김종만. 1982. 합판의 내화처리와 열판건조에 관한 연구. 목재공학 10(1): 5-37.
23. 이필우, 권진현. 1983. 내화처리 파티클보드의 휨강도와 물리적 성질에 미치는 영향 목재공학 11(3): 39-48.