

목재의 치수안정성과 내후성 개선을 위한 열처리 가공에 관한 연구 동향¹

김 영 숙^{2,†}

Research Trend of The Heat-Treatment of Wood for Improvement of Dimensional Stability and Resistance to Biological Degradation¹

Yeong-Suk Kim^{2,†}

요 약

본 연구에서는 목재의 열처리공공에 대하여, 문헌 연구를 통하여 이와 관련된 주요 이슈 및 기술 동향을 조사하였다. 산업적으로 이용되는 주요 열처리기술은 네덜란드의 Plato-process, 프랑스의 Retification process, 독일의 OHT-process, 및 핀란드의 Thermowood process 등이었다. 열처리 공정상의 주요 영향인자들은 대상 수종, 가열 온도, 시간, 열전달 매질(air, 증기, 진공, 질소, 오일 등)이며, 이들 인자들을 변수로 한 최적조건 탐색 등의 연구가 주류를 이룬다. 열처리 목재는 치수안정성 증가, 중량 및 강도 감소, 부후균에 대한 내후성 향상에 변이, 변색균 및 해충에 대해 불충분한 저항성 등의 특징을 가진다. 열처리 목재의 내후성 향상을 위해 각 수종에 적합한 열처리 공정과 처리조건 탐색의 필요성이 시사되었다. 지속가능한 환경보존 및 목재자원 절약을 위해 열처리 목재의 새로운 용도 개발 및 이용 확대 노력이 반드시 필요한 과제인 것으로 고찰되었다.

ABSTRACT

This was investigated on the major issues and research trends regarding the heat-treatment of woods through literature reviews. The principal heat-treatment technologies utilized for industrial purposes include the Plato-process (Netherlands), the Retification process (France), the OHT-process (Germany), and the Thermowood Process (Finland). Factors that mainly influence the heat-treatment process are the wood species, process temperature, processing time, and the heating medium (air, steam, vacuum, N₂, oil, etc.). Researches on investigating the optimal conditions with these process conditions being the variables stand as the mainstream. Heat-treated woods present dimensional stability improvement, but mass loss and strength reduction, a wide variations for decaying inhibition, and insufficient resistance against mold, wood borer, and termites. For further improvement in respects of durability or resistance to biological degradation, necessity to search for more suitable heat treatment process and processing conditions fit for each wood

¹ Date Received March 1, 2016, Date Accepted May 18, 2016

² 국민대학교 임산생명공학과. Department of Forest Products and Biotechnology, College of Forest Science, Kookmin University, Seoul 02707, Republic of Korea

[†] 교신저자(Corresponding author): 김영숙(e-mail: yskim@kookmin.ac.kr)

species has been suggested. Exploiting new ways to utilize heat-treated wood and extending its range of use have been considered to be important matters that need more effort put into for the sustainable and sound environment as well as saving the wood resources.

Keywords : heat-treatment, heat-treated wood, biological resistance, dimension stability, modulus of rupture

1. 서 언

범 지구차원의 지속가능한 환경보존에 대한 요구가 커지고, 자원과 에너지 부족 현상에 직면하면서 독성의 잔유물이 없고 내후성을 지닌 열처리 목재(Heat treated wood or Thermally modified wood)가 재조명되고 있다(Sandberg와 Kutnar, 2015; Sandberg 등, 2013; Esteves와 Pereira, 2009). 목재의 열처리 가공 기술은 주로 유럽을 중심으로 발전되어 핀란드의 Thermowood process, 프랑스의 Retification process, 독일의 OHT 및 네덜란드의 Plato process가 대표적인 산업기술로 알려져 있다(Homan과 Jorissen, 2004; Militz, 2002; Mayes와 Oksanen, 2002; Boonstra 등, 1998; Dirol과 Guyonnet, 1993). 전 세계에 약 100개 정도의 열처리 산업체에서 생산되는 열처리 목재는 연간 약 35만 m³ (2011년)인데 그중에서 약 25만 m³가 유럽에서 생산되어 유럽이 이 분야의 산업을 주도한다고 볼 수 있다(Sandberg와 Kutnar, 2015).

목재의 열처리 가공은 고온가열로 목재성분의 열분해 수준을 조절하면서 화학적 성분 변화를 유도하여 치수안정성 및 내후성 증대 등을 목표로 하는 가공이다. 즉, 목재가 열처리에 의해 흡습성이 감소되고 치수안정성이 증가하는 효과를 가지게 되는 것이 열처리 목재의 큰 장점이라고 할 수 있다. 이러한 열처리 가공은 제재목과 같은 solid wood뿐 아니라 목재칩, 스트랜드, 목섬유 및 단판 등에 적용하여 OSB, MDF나 합판과 같은 목제품에 응용한 제품이 소개되기도 하여 열처리의 적절한 산업적 이용의 폭이 넓어졌다고 할 수 있다(Platowood B.V., 2016; Sandberg 등, 2013; Del Menezzi와 Tomaselli, 2006; Paul 등, 2007; Paul 등, 2006). 그러나 열처리 공정 중, 고열에 의한 일부 목재성분의 열분해로 인해 목재가 가지는

고유의 밀도 감소, 휨탄성계수(modulus of elasticity; MOE)와 휨강도(modulus of rupture; MOR) 감소, 충격강도 감소, 취약해지는 재질, 짙어지는 색상, 냄새, 금속부식성 증가 등의 문제점을 가지는 것도 사실이다(Sandberg & Kutnar, 2015; Guo *et al.*, 2014). 목재의 열처리에 대한 연구는 1946년 Stamm 등이 목재의 내후성 증대와 같은 성능 개선을 위해 체계적인 열처리 가공을 처음 보고한 이래 현재까지 열처리로 발생하는 문제점과 공정의 효율성 개선을 위해 지속적인 연구가 이루어져 왔다. 특히, 목재의 열처리 가공에 주요 영향인자인 가열온도, 처리 시간, 열전달 매체 종류 등 공정 변수에 따른 다양한 물성 변화를 추적하면서 최대의 성능개선효과를 가지는 최적 공정 조건을 도출하고자하는 많은 연구가 진행되어 왔다(Ozkan 등, 2014; Talaei 등, 2013; Awoyemi 등, 2012; Fojutowski 등, 2012; Navi와 Sandberg, 2012; Rassam 등, 2012; Acker 등, 2011; Anderson 등, 2010; Bazyar 등, 2010; Awoyemi, 2009; Awoyemi 등, 2009; Talaei와 Yaghoobi, 2009; Welzbacher 등, 2009; Sailer 등, 2000; Tjeerdsma 등, 2000; Jamsa와 Viitaniemi, 1998).

열처리 목재의 주요 용도로서 정원용 가구, 울타리, 기둥, 목재수납장, 창문틀, 도어, 가구, 데크재, 외장벽판재 및 마루판 등 치수안정성이나 내후성이 요구되는 다양한 용도에 적용 가능한 것으로 소개하고 있다(Boonstra 등, 1998). 그러나 고온의 열처리 가공에서는 긍정적인 성능개선도 있으나 열처리로 인한 중량감소로 인한 기계적 성능의 저하(Sandberg와 Kutnar, 2015; Guo 등, 2014; Tjeerdsma 등, 1998b; Kandem 등, 1999)가 발생함으로 열처리 목재를 구조용 등에 사용하고자 하는 경우에는 열처리 후 강도 감소 등에 대해 세심한 주의가 요구되는 것도 사실이다. 특히 Sandberg와 Kutnar (2015)는 열처리 가

공이 이미 산업화 되어 있기는 하나 기술 및 산업적 차원에서 해결해야 할 과제로 첫째, 신속한 품질과 공정관리 방법 개발, 둘째, 열처리 목재의 낮은 충격 저항과 저함수율에 기인하는 기계가공 시 분진발생을 극복하는 공정기술 개발, 셋째 저함수율의 열처리 목재에 적용할 수 있는 접착제나 도료 시스템 개발, 넷째, 열처리 목재의 자외선에 대한 불안전성, 표면경도 약화, 금속부식성, 표면도막을 통한 페놀류의 블리딩 현상, 낮은 나사목 인발 저항, 윤활 등을 개선할 수 있는 기술개발 등이 필요한 상황임을 시사하였다.

최근 국내에 (사)한국고열처리 목재협회에 가입한 회원사가 20개 업체에 이르고, 특히 고온 열처리 목재는 방부목재에 대체재로서 야외 시설용으로 공급되기도 하는 것이 현실이기도 하다. 이와 같이 산업적으로 국내시장에 열처리 목재가 공급되고, 목재 열처리에 대한 다수의 국내 연구보고(Won 등, 2015; Hong 등, 2014; Ra 등, 2012; Park 등, 2012; Lee 등, 2012; Byun 등, 2008; Hong 등, 2008)도 있기는 하나 아직 국내 유용수종에 대한 열처리 적용 연구 등 정보가 부족한 여건이라 향후 이와 관련된 많은 연구가 필요한 상황이라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 목재의 열처리가공과 관련된 기술 및 연구 동향 등을 조사 분석하여 국내 열처리 목재 생산 기술 개발과 활용에 참고할 수 있는 자료를 제공하고자 하였다.

2. 열처리공정

전 세계적으로 산업화된 주요 기술은 네덜란드의 Plato process (PLATO BV, Netherland), 프랑스의 Rectification (NOW, New Option Wood, France) process, 독일의 OHT process (Oil-Heat Treatment, Menz Holz, Germany) 및 핀란드의 Thermowood process (Stora, Finforest, Stellac, Jertec, Finland) 등이다(Sandberg & Kutnar, 2015). 산업화된 대부분의 열처리 공정은 목재 온도를 160~260℃ 범위까지 상승시키는 공통점이 있고, 공정단계, 열전달 매질(산소 또는 질소가스, 증기, wet 또는 dry 공정, oils)적용,

처리 조건(온도, 시간, 압력 등) 및 공정 조작 스케줄 등의 공정조건이 주요 기술 간에 서로 다른 점이라 할 수 있다(Sandberg와 Kutnar, 2015; Welzbacher 등, 2009; Militz, 2002). 열처리 목재의 치수안정성 및 내후성 개선, 강도저하를 방지하기 위한 공정 조건 연구가 다수 진행되어 왔다(Guo *et al.*, 2014; Rassam *et al.*, 2012; Bazyar *et al.*, 2010; Welzbacher *et al.*, 2009; Borges, *et al.*, 2008; Sakai *et al.*, 2008; Homan & Jorrisen, 2004). Candelier 등(2013)은 열처리로 충분한 내후성을 부여하면서 강도 유지를 위한 열분해 수준의 중량감소율이 10~14%라는 기존의 시험결과(Chaouch 등, 2010)에 착안하여 중량감소 목표를 12%로 설정하고 공정 개선 시험을 시행하였다. 이것은 열처리로 인해 과도한 중량감소를 초래하면서 내후성 향상을 피하는 모순을 피하기 위하여 Candelier 등(2013)이 정한 한계 중량감소로 볼 수 있다. 대표적인 산업화 공정의 특징은 다음과 같다.

Plato process는 네덜란드에서 개발된 열처리 공정으로서 Fig. 1에 나타난 바와 같이 수소화열분해(hydrothermolysis)단계와 건조, 열처리단계로 구성된다(Militz, 2002). 수소화열분해 공정은 목재성분의 화학적 변환을 유도하는 단계인데 생체나 기건상태에서 160~190℃, 열전달 매질은 증기나 공기를 이용한다. 수소화열분해 반응 동안 목재 세포벽에 존재하는 풍부한 수분을 이용하여 화학적 변환을 유도하는 특징을 가지며, 실제로 수분은 저온에서 세포벽 성분의 반응을 촉진시키는 역할을 한다. 수소화열분해단계에서 헤미셀룰로스의 급속한 열분해로 인한 부작용을 최소화 하기 위해 비교적 마일드한 조건의 공정이 연구되기도 하였다(Tjeerdsma 등, 1998b). 수소화열분해공정에 있어 건조와 열처리를 동시에 하는데 함수율을 약 10% 수준까지 건조시킨다. 그 후 열처리공정에서는 170~190℃ 사이의 고온으로 열처리된다. Plato process에서 수소화열분해 처리 시간은 수종, 재료의 두께 및 재료의 모양 등에 따라 4~5시간, 2단계 건조는 3~5일, 마지막 열처리는 14~16시간이다(Ruyter, 1989; Militz와 Tjeerdsma, 2000; Militz, 2002; Boonstra 등, 1998). Tjeerdsma 등(1998b)은 Plato process의 2번째 단계에서 공기 대신

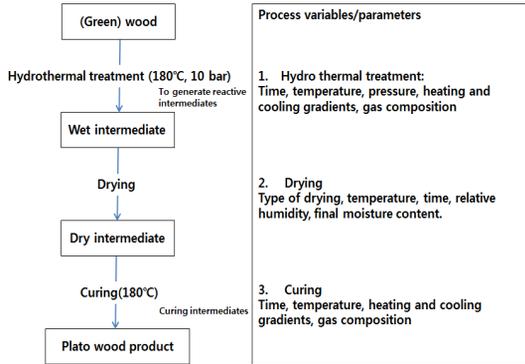


Fig. 1. Schematic overview of the Plato process (Boonstra, *et al.*, 1998).

에 질소가스를 유입시켜 열분해로 인한 중량감소와 강도감소를 낮추면서 치수안정성과 내후성을 증대시키는 공정을 제안했다. Candelier 등(2013)도 beech를 대상으로 한 Plato process의 2번째 단계에서 진공과 질소가스를 도입하고, 220℃로 인한 중량감소가 약 12%가 되는 수준까지 열처리하여 치수안정성과 내후성을 증대시키고자 하였다. 시험결과, 진공이 질소가스에 비해 강도 감소가 현저히 작고, 부후균에 대한 내후성 향상도 좋아서 beech에 적합한 공정으로 제안되었다. 이 외에도 Tjeerdsma 등(2000)이 기존의 Plato process와 건조열처리를 비교하여 기존의 다단계 열처리의 내후성 증대 효과가 더 크다고 보고했다.

Retification process는 프랑스에서 개발된 열처리 공정으로서 함유율이 거의 12% 정도로 인공 건조한 상태에서 열처리가 시작되며 온도는 200~240℃ 범위로 열전달 매질로 질소가스를 활용하는 기술이다 (Homan, 2004; Militz, 2002; Vernois, 2000; Dirol & Guyonnet, 1993). 공정 진행시 질소가스도입에서 공기함유가 2% 미만으로 제한된다. 이 기술의 경우, 230~240℃로 열처리했을 때 열처리효과는 우수하나, MOR 감소가 40%나 되어, 강도감소가 적고, 부후균에 대한 내후성이 높은 210℃를 채택하는 경우가 많다. 그러나 성능개선을 위해 질소가스 대신에 증기를 사용하고, 열처리 시작 단계에서 생재를 사용하는 “Bour perdure” 공정이 상업화되기도 했다 (Vernous, 2001). Bour perdure 공정의 증기는 목재

에 함유된 수분으로부터 유래한다. 공정이 단순하여 열전달 매질 또는 공정조건을 다양하게 적용하여 열처리 목재의 치수안정성 및 내후성을 증대시키고, 열분해 중량감소를 저하시키는 연구보고들이 다수 있다(Sakai *et al.*, 2008; Homan & Jorissen, 2004; Militz, 2002).

OHT process는 밀폐된 처리조에서 처리가 수행된다. 목재를 먼저 넣고 hot oil을 유입시킨 후, 계속 가열하면서 온도를 유지시키며 열처리하는 방법이다. 열처리 목재의 최대 내후성과 최대의 강도적 성질을 갖추도록 가열온도는 180~200℃, 열처리 시간은 목표 온도에 도달한 시간부터 2~4시간이다(Militz, 2002; Rapp와 Sailer, 2001). 열전달 매질은 rape oil, linseed oil, sunflower oil 등 식물성 oil을 주로 사용한다. 이 중에서 linseed oil이 처리 후 냄새 등 문제가 없는 것으로 증명된 oil이다.

OHT process에서 soy oil을 사용하여 220℃에서 약 2~4시간 열처리했을 때 치수안정성과 내후성은 증대되고, 강도저하 현상도 적어지는 결과를 나타내었다고 보고했다(Militz, 2002). Awoyemi (2009)는 pine (pinus resinosa)목재에 대해 DATT (Dry air thermal treatment)와 SOTT (Soy oil thermal treatment)로 처리한 결과, dry air를 사용했을 때 soy oil에 비해 열처리 목재의 흡습성, 팽윤성은 현저하게 증가되나, MOR은 크게 감소되는 결과를 나타내 pine에는 oil을 사용한 열처리 공정이 더 성능개선에 도움이 된다고 보고하였다. Sailer 등(2000)도 scots pine과 spruce에 적용하여 OHT가 열전달 매질로서 hot air를 사용한 것에 비해 기계적 성능 저하는 낮으면서 부후균에 대한 내후성이 높아서 야외사용 용도로 사용가능성이 있음을 시사하였다. Ozkan 등(2014)은 터키산 젓나무에 열전달 매질로서 질소와 오일을 사용한 시험에서 OHT처리재가 질소매질에 비해 발수효능 및 ASE가 높다고 보고하고 강도에 영향이 크지 않은 150℃의 온도에 2~4시간의 처리를 터키산 젓나무 OHT 처리에 최적조건으로 제시하였다. Scots pine, birch 및 poplar에 각각 증기열처리(195℃), 오일을 사용한 진공감압처리(60℃, rapeseed와 linseed oil 사용), 증기열처리(195℃) 후 오일 감압처리(60℃,

rapeweed와 linseed oil사용)를 적용한 시험에서 증기열처리 후 오일감압처리를 시행한 열처리 결과 내후성이 상대적으로 컸고, 오일 종류에 따라서도 그 효과가 다르다고 보고했다(Fojutowski 등, 2009; Fojutowski 등, 2012). Fojutowski 등(2012) 외에도 오일의 종류에 따른 열처리 효과의 차이에 대해서는 다수의 연구자에 의해 보고되었다(Awoyemi 등, 2012; Bazyar 등, 2010; Wang와 Cooper, 2005; Rapp와 Sailer, 2000; Rapp 등, 2000). 열처리 시간의 경우, 두께 90 mm의 재내 중심부까지 열이 전달되는 시간이 4시간 정도 소요됨으로 재료의 크기에 따라 가열시간설정에 유의할 필요가 있다(Rapp와 Sailer, 2001). Bazyar 등(2010)은 poplar에 아민유로 열처리했을 때 온도증가에 따라 치수안정성은 증가하지만 처리시간의 영향은 크지 않았다고 보고해 수종과 오일의 종류에 따라 처리조건 설정 시 주의가 요구된다. 또한 OHT 열처리 목재(scots pine) 타공정(plato, thermo 및 rectification process) 처리 목재와 마찬가지로 내후성이 취약하다는 보고도 있기 때문에 토양접촉 등의 야외환경에 사용하기 위해서는 공정 개선이 요구된다(Edlund와 Jermer, 2007; Welzbacher와 Rapp, 2005; Doi 등, 2004). 이러한 내후성의 취약점을 개선하여 사용환경이 열악한 야외 용이나 건축물의 외장, 데크용재 등으로 사용하기 위해 ACQ와 같은 목재보존제나 방화제 등을 첨가하여 내후성이 현저하게 개선된 오일 열처리 공정이 제안되기도 했다(Wang 등, 2013; Simmon 등, 2011).

Thermowood process는 1990년에 핀란드 연구 센터 VTT와 핀란드 산업체가 공동으로 개발하여 “Thermowood”라는 상품명으로 산업화한 공정으로 유럽에서 가장 성공한 공정으로 양적으로 유럽시장의 90% (2007년 기준)를 차지하는 것으로 소개된 바 있다(Militz, 2002; Esteves와 Pereira, 2009). 이 공정은 3단계로 나뉘어진다. Fig. 2에 나타낸 바와 같이, 첫 번째 단계에서는 고온의 건조공정으로서 증기와 열을 이용하여 100℃ 수준으로 신속하게 열 상승을 유도한 다음, 처리목재의 함수율이 거의 0%가 될 때까지 온도를 천천히 130℃까지 상승시킨다. 두 번째 단계는 본격적인 열처리가 시작되는데 185~230℃

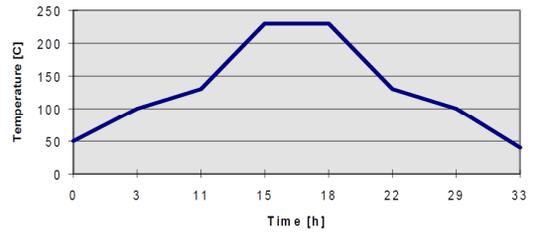


Fig. 2. Principle of heat treatment process (Syrjänen, & Kangas, 2000).

로 온도를 상승시켜 2~3시간 동안 열처리를 실시하고, 세 번째 단계로 이행된다. 이 단계에서는 냉각과 조습을 하면서 함수율을 약 4% 정도의 수준으로 조정한다. 이 공정은 활엽수종과 침엽수종의 목재에 모두 적용가능하나, 각각의 수종에 따라 적절한 공정을 적용해야 하고, 생재 또는 건조재에 모두 적용이 가능한 것으로 보고되고 있다(Jamsa와 Viitaniemi, 1998; Syrjanen 등, 2000). Thermowood process는 핀란드에서 가장 흔한 pine, spruce, birch 및 european aspen에 처리되고 있다. 처리공정조건은 전술한 수종마다 각기 다른 조건을 적용한다. 침엽수는 좀 더 강한 조건으로 처리하여 수분으로부터 보호가 요구되는 건축물에, 활엽수를 이 공정으로 처리하면 색상과 표면성이 좋아짐으로 실내 주방용 가구 등에 사용되는 것으로 소개되고 있다. 또한 높은 내후성이 요구되는 경우에는 200℃ 이상의 고온처리 할 것을 권장한다 (Syrjanen과 Kansas, 2000).

이상과 같이 산업화된 대표적 공정을 소개하였으나, 실제로 열처리 대상 목재의 세포내강에서 진행되는 수분과 열 이동에 의한 열처리 반응은 매우 다양한 상(phase)을 이루고 있어 다양한 매체를 사용하는 열처리에 섬세한 디자인이 요구된다. Younsei 등 (2010)은 180℃, 200℃ 및 220℃의 최종 열처리 온도를 적용하여, 열처리 스케줄의 동역학적 커브, 온도, 수분비율, 시간에 의한 변화 등을 측정하는 실험을 통하여 목전주에 적용 가능한 고온의 열처리 공정 디자인 계산에 필요한 알고리즘을 개발하였다. Kocaefe 등(2007)도 목재 조직 내에서 발생하는 열처리 공정에서의 다양한 반응 모델에 대해 연구하여

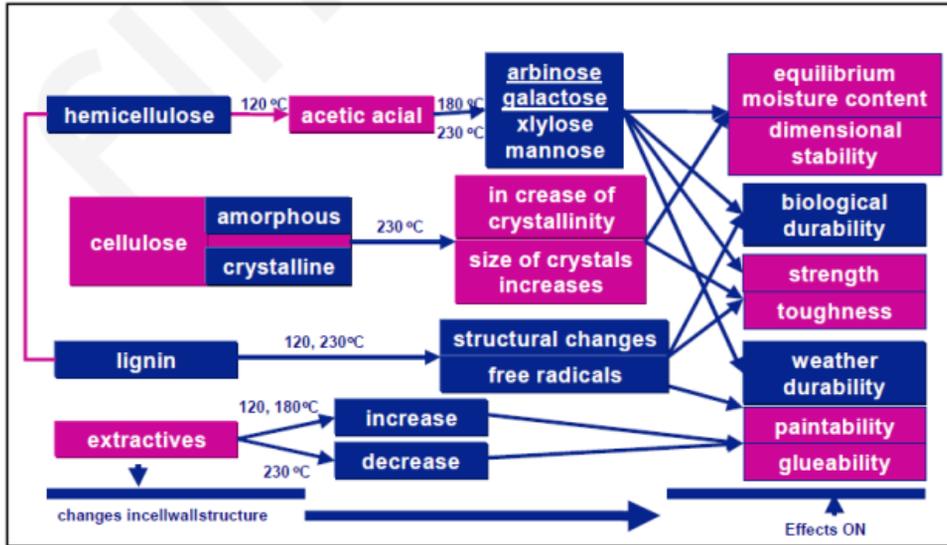


Fig. 3. Reaction mechanisms of heat treated wood (ref: Mayes & Oksanen, 2002).

실제 목재 내의 반응 예측에 정확한 Diffusion model 을 제안한 바 있다. Acker 등(2011)은 열 전달 매질로서 진공을 이용하는 Smarheat®로 불리우는 새로운 열처리공정으로서 열대활엽수와 북미산 유용침엽수 적용에 적절한 중량감소와 내후성 증대효과를 가지는 공정조건을 도출하였다. 그러나 Smarheat®의 경우, 수중 및 균중에 따라 내후성에 변이가 큰 문제점이 시사되어 보다 심도 있는 연구가 필요한 것으로 고찰되었다.

3. 열처리에 의한 목재 성분의 화학적 변환

열처리 과정에서 목재 성분의 화학적 변환을 일으키는 열과 목재성분 사이의 반응 기구를 Fig. 3에 나타내었다(Mayes와 Oksanen, 2002).

목재를 구성하는 주요 성분은 헤미셀룰로스, 셀룰로스, 리그닌, 및 추출성분 등으로 구성되어 있다. Fig. 3에 제시된 바와 같이 우선 열이 가해지면 120°C 정도의 초기단계에서 목재의 수분 이탈과 함께 헤미셀룰로오스가 가장 먼저 열분해되면서 Acetic acid와 같은 산이 생성된다. 이들 산 촉매에 의한 분

해 반응에 의해 재중에 formaldehyde, furfural과 aldehyde와 물질이 생성되고 목재 내 당고분자의 중합도가 감소되는 현상이 나타난다. 동시에 헤미셀룰로스에 수산기그룹의 감소와 함께 탈수 반응이 일어나고 목재 중에 탄수화물의 함량 감소가 초래된다. 셀룰로스보다 헤미셀룰로스가 더 쉽게 많이 분해되는 것으로 보고되고 있다. 온도가 더 높아져서 180~230°C 정도에 이르면 자일로오스나 만노오스는 재중에서 감소하고, 아라비노오스와 갈락토오스는 거의 사라져 버린다. 셀룰로스는 결정영역을 가짐으로 인해 헤미셀룰로스가 열분해 되는 수준에서 열분해 반응이 비교적 느린 것으로 알려져 있다. 재중 온도가 높아짐에 따라 셀룰로스 비결정영역이 먼저 분해되면서 230°C 부근에서 셀룰로스의 결정화도가 증가하고 결정영역의 크기가 커지는 현상이 나타나는 것으로 보고하고 있다. 셀룰로스의 결정화도가 증가하면서 셀룰로스에는 물분자가 접근할 수 있는 수산기 그룹이 감소하게 되고, 결과적으로 셀룰로스에 흡착하는 물분자가 적어지면서 평형습수율과 흡습성 등의 감소 효과를 나타나게 된다. 이 같은 현상으로 인해 목재의 치수안정성과 열화 생물에 대한 내후성을 증대시키는 효과를 가지게 된다. 동시에 이 과정에서

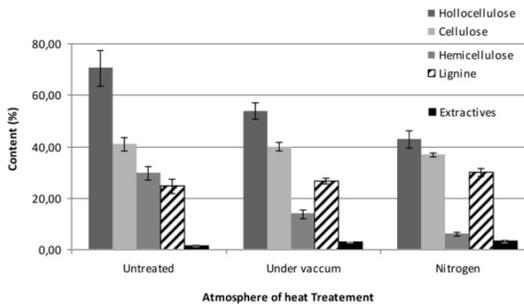


Fig. 4. Chemical composition of untreated and heat treated beech under different inert atmospheres (Candelier *et al.*, 2013).

많은 고분자 당이 소실되어 중량감소로 인한 밀도 감소, 기계적 성능 저하 등의 부작용을 동반하게 된다. 리그닌도 120℃에서 230℃로 이행하는 과정에서 헤미셀룰로스 분해로 인해 생성된 산 촉매 반응에 의해 리그닌의 Cα와 O4개열 등을 초래하여 formaldehyde, furfural과 aldehyde 등을 생성시키고, 화학 결합의 개열로 인한 리그닌의 자가 축합 반응이 시작된다. 이때 이미 일부 리그닌의 방향환에 반응기 수가 증가하고, 메톡실기의 분리로 benzyl의 Cα가 양이온성을 띄게 되는데 이때 초기열분해산물인 aldehyde그룹 중 일부가 methylene bridge로 연결되는 리그닌 방향환의 반응기들과 반응한다. 이러한 반응이 완만하게 일어나지만 리그닌에 cross-linking이 증가하면서 리그닌 구조가 변화되어 목재에 흡수성을 줄이거나 치수안정성을 증대시키는 결과를 초래한다고 보고되고 있다(Candelier 등, 2013; Esteves 등, 2008; Dirol과 Guyonnet, 1993; Bourgois와 Guyonnet, 1988). Fig. 4에 나타낸 것과 같이 열처리 목재가 무처리에 비해 리그닌 함유율이 높아지는 경향이 있다. 이러한 현상에 대해 Esteves와 Pereira (2009)는 열처리 목재샘플에 사용된 분석방법에 의한 측정치가 순수한 리그닌이 아닐 수 있다는 가능성을 제시하였다. 즉, 열처리 과정에서 리그닌이 셀룰로스나 헤미셀룰로스같은 성분과 중축합 반응에 의해 cross-linking이 일어나 외관상 리그닌이 많은 것처럼 측정되었을 수 있다는 것이다(Tjeerdsma와

Milits, 2005; Boonstra와 Tjeerdsma, 2006; Esteves 등, 2008).

목재의 추출물 성분은 열처리과정에서 120~180℃ 정도에서는 추출물이 휘산되거나, 열분해되어 목재 내에 새로운 물질로 전환되어 추출물이 증가한다. 그러나 230℃ 이상의 고온에서는 목재 내 대부분의 추출물이 열분해 되어 사라지는 것으로 보고되고 있다. 그러나 실제로 열처리 목재를 분석하면 추출물이 늘어나는 것처럼 높은 값이 나오는데 이는 목재 내 탄수화물의 열분해 산물에 기인한 것으로 추정하였다.(Esteves와 Pereira, 2009; Mayes와 Oksanen, 2002; Militz, 2002; Kotilainen, 2000; Tjeerdsma *et al.*, 1998a).

4. 열처리에 의한 목재의 물리·기계적 특성 변화

4.1. 열처리에 의한 목재의 중량감소

본 문 3.항의 열처리에 의한 목재 성분의 화학적 변환에 서술한 바와 같이, 목재의 온도가 상승하면 목재를 구성하고 있는 주요 성분의 열분해가 발생하면서 목재의 중량이 감소하는 현상이 발생한다. Norway spruce를 대상으로 열처리 온도 상승에 따른 중량감소 경향을 Fig. 5에 제시하였다. Fig. 5에 나타낸 바와 같이, 열처리 가공과정에서 가열온도가 높아질수록 목재성분 분해에 의한 질량감소가 커지는 것으로 보고되고 있다(Welzbacher 등, 2009). 특히 온도가 높아질수록 중량감소가 발생하는 시간이 짧아지고 220℃ 온도에서는 약 8시간 가열에 원래 목재 중량의 13%가 감소했고, 240℃에서는 4시간 가열로 중량감소율이 약 15%나 감소하였다. 이러한 경향은 수종을 달리한 연구에서도 가열시간에 따라 다르나 170~260℃ 수준에서 목재 성분 분해에 의한 중량 감소율이 최소 5%~30%를 나타내어, 고열처리에 의한 가공에서 보고되는 일반적인 결과라고 할 수 있다(Candelier 등, 2013; Esteves와 Pereira, 2009; Welzbaccher 등, 2009; Kartar 등, 2007; Militz, 2002; Kamdem 등, 1999). Kim 등(1998)은 목재의 열처리

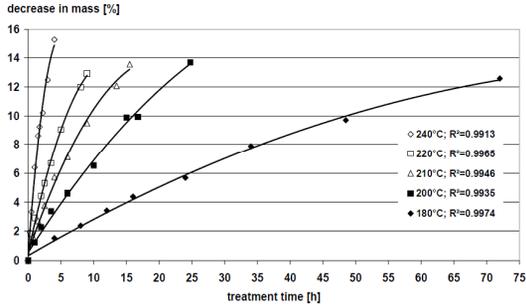


Fig. 5. Correlation between decrease in mass (dm) and treatment time for different heat treatment temperatures; each dot represents the mean value of 60 specimens (Welzbacher *et al.*, 2009).

가공에서 가장 효율적이고 양질의 열처리 목재를 생산하기 위하여 열분해에 의한 중량감소와 MOR감소를 예측하고 최적의 가열온도와 가열시간을 추정하기 위한 알고리즘을 개발한 바 있다.

목재를 열처리하는 과정의 중량감소에 영향을 미치는 인자로서 사용하는 재료의 수종, 열전달 매질, 가열온도, 가열시간을 들 수 있다(Estevés와 Pereira, 2009; Obataya 등, 2006; Green 등, 2003; Bourgois와 Guyonnet, 1988; Hillis, 1984; Dietrichs 등, 1978). 목재의 열처리 과정에서 발생하는 목재의 중량감소는 열처리 목재의 질적인 면에서 매우 중요한 요소임으로 이와 관련된 영향인자를 잘 고려한 산업기술의 추구가 필요하다고 하겠다.

4.2. 흡습성 및 치수안정성

열처리 목재가 가지는 큰 장점으로 대기 중의 관계습도변화에 따른 목재의 흡습성이 무처리 목재에 비해 낮고, 치수안정성 또한 현저하게 개선된다는 것을 들 수 있다. 본 문 3.항의 열처리에 의한 목재 성분의 화학적 변환에 서술한 바와 같이, 목재의 온도가 상승하면 목재가 가지는 주요 조성분이 열과 반응하여 성분 전환이 일어나면서 친수성기 노출이 감소되어 흡습성이 무처리재에 비해 현저히 낮아지고 이로 인한 치수안정성이 확보되는 것으로 밝혀진 바 있다. 대기 중의 관계습도와 열처리된 Scots pine

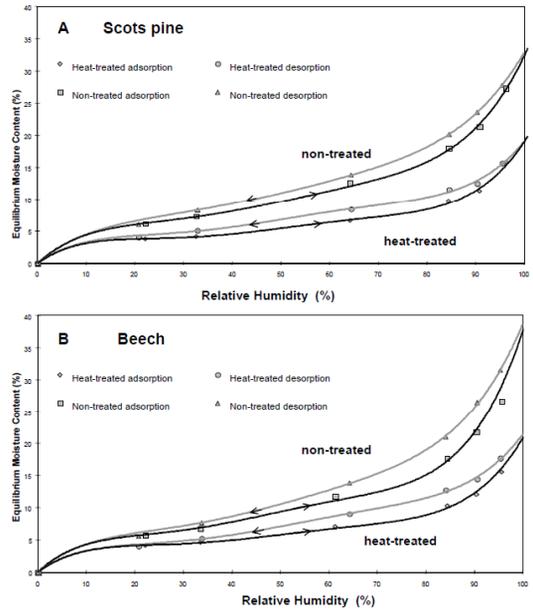


Fig. 6. Sorption curves of non-treated and heat-treated Scotch pine and Beech (Tjeerdsma *et al.* 1998b).

과 Beech의 흡습성과의 관계를 Fig. 6에 나타내었다 (Tjeerdsma 등, 1998b). Fig. 6에서 목재의 흡습성을 평형함수율(Equilibrium Moisture Content: EMC)로 나타내었고, EMC의 변화를 열처리 목재와 무처리재의 흡착과 탈착곡선으로 나타내었다. Fig. 6에 제시된 바와 같이, 열처리된 Scots pine과 Beech의 경우, 두 수종 모두 대기 중의 관계습도가 높아질수록 EMC가 무처리에 비해 현저하게 낮아지는 결과를 보였다. 두 수종 모두, 흡착과 탈착할 때 EMC가 유사하게 감소하고, 두 수종 모두 무처리재에 비해 흡습성이 약 30~45% 감소하였다. 그러나 열처리 공정상 사용하는 열처리 조건을 달리했을 때는 열처리 목재의 EMC 변화가 다르다는 것을 소개하였다 (Millitz, 2002; Guo *et al.*, 2014). Guo 등(2014)은 poplar를 대상으로 시험한 결과 가열온도가 170°C에서 230°C까지 증가할수록 EMC가 최소 13% (170°C, 1시간 처리)에서 최대 54.3% (230°C, 4시간 처리)까지 감소하는 경향이 있고, 열처리에 의한 흡습성이 온도 및 처리시간 증가에 따라 현저하게 감소하는

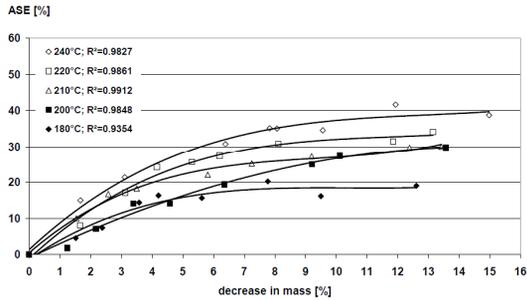


Fig. 7. Correlation between anti swelling efficiency (ASE) and decrease in mass of specimens heat treated at different temperatures (Welzbacher *et al.*, 2009).

내용을 보고하고 있다.

일반적으로 흡습성이 감소하여 섬유포화점이 낮아지면 치수안정성이 증대된다. 목재의 치수안정성은 항팽윤효과(anti swelling efficiency; ASE)로 나타낸다. 열처리 목재의 중량감소율과 ASE와의 관계를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에 제시된 바와 같이 열처리 목재의 중량감소율의 증가에 따라 ASE도 증가하고, 열처리 가공 시 가열온도가 높을수록 ASE 값이 높아진다. 즉, 가열온도가 높아질수록 목재의 흡습성이 감소되고 치수안정의 효과가 높아진다는 것을 의미한다. 열처리 목재의 ASE는 열처리조건에 따라 다르나 핀란드에서 산업화된 Thermowood라는 열처리 목재의 접선방향 ASE는 무처리재에 비해 약 50~90% 정도, 독일의 OHT 열처리 목재는 가열온도에 따라 20~40%, 프랑스의 Rectified wood는 50%, 네덜란드의 Plato wood는 15~40% 정도 상승효과가 있는 것으로 소개하고 있다(Mayes와 Oksanen, 2002; Rapp와 Sailer, 2001; Vernois, 2001; Homan과 Jorissen, 2004). Ozkan 등(2014)도 터키산 전나무에 OHT처리를 했을 때 최적의 열처리조건에서 ASE가 50%에 이르는 결과를 제시하였다. Chaouch 등(2012)은 5종의 침엽수와 활엽수 목재에 동일한 조건으로 중량감소율 10% 정도가 되도록 처리했을 때, 수종별로 ASE는 약 34~48%로 서로 다른 치수안정성을 보고하였다. 또 다른 많은 보고들이 열처리에 의한 흡습성을 현저하게 감소되어 치수안정의 효과를 인

정하였다(Talei 등, 2015; Sandberg *et al.*, 2013; Bazyar 등, 2010; Fojutowski 등, 2009; Sailer 등, 2000; Sakai 등, 2008; Welzbacher 등, 2009; Homan 등, 2004; Millitz, 2002). 그러나 일부 연구자들은 상업용 열처리 기술을 다른 수종에 적용했을 때 충분한 ASE를 얻지 못했거나 변이가 심한 문제가 있으므로 산업을 위해서는 대상수종과 열처리공정과의 관계에 대한 연구의 필요성이 시사되었다(Hamamda 등, 2015; Vidrine 등, 2007).

4.3. 기계적 성능 변화

열처리 목재의 사용 한계를 가지게 하는 주요한 성질이 기계적 성능 감소이다. 이 한계점 때문에 대부분의 구조용목의 사용에는 적절치 않다는 평가를 받기도 한다(Estevés와 Pereira, 2009). 본 보 4.1.항에 제시된 바와 같이 목재에 열처리 가공을 거치는 과정에서 목재의 중량감소율이 열처리 조건에 따라 약 5%~30% 정도 감소하는 현상이 소개되었다. 이와 같이 목재 성분의 열분해에 의한 중량감소가 발생하면 밀도가 감소되면서 MOE, MOR, 충격휨강도 및 표면 경도 등의 기계적 성능 저하가 초래되는 것이 일반적이다. 열 온도가 170~180℃ 정도에서 열처리 목재의 MOR 및 경도 감소가 완만하게 발생하고, 200℃ 이상으로 상승하면 기계적 성능이 급속하게 감소하는 경향을 나타낸다(Jiang 등, 2012; Estevés와 Pereira, 2009). 특히 열처리 목재의 강도는 수종, 공정 조건과 가열온도의 조합에 크게 의존한다.

수종별 기계적 성능의 차이가 나타난 예시를 Fig. 8에 나타내었다(Tjeerdsma 등, 1998b). Fig. 8에 나타난 바와 같이, 열처리된 beech, spruce, douglas fir, scotch pine 및 radiata pine 등에 대한 MOR을 처리 전과 후를 비교한 결과에서, 모든 수종에서 열처리 후에 MOR은 수종에 따라 5~18% 정도 감소되어 열처리로 인한 강도감소 발생이 보고되었다. 또한 수종별로 강도감소의 차이가 크다는 것을 볼 수 있는데 이와 유사한 결과들이 다수 보고되고 있어 열처리 공정에 적절한 수종 선택, 또는 수종에 적절한 공정 선택 등 강도 손상을 최소화할 수 있는 방안의 필요

Table 1. Measured properties of heat-treated and control poplar woods by treating temperature and duration (Guo *et al.*, 2014)

Treating Temp.	Treating duration (h)	SH _{air} (%)	SH _{ov} (%)	SW _{air} (%)	SW _{ov} (%)	EMC (%)	MOR (Mpa)	MOE (Gpa)	Den (g/m ³)	Color			DR
										L [*] (%)	a [*] (%)	b [*] (%)	
Control		6.47	10.98	2.63	11.52	10.23	73.32	10.20	0.446	89.53	0.92	19.14	NR
170 °C	1	6.41	10.87	2.53	11.21	8.74	78.17	11.71	0.443	77.11	5.36	23.86	NR
	2	6.36	10.82	2.49	10.84	8.85	78.83	11.81	0.442	72.89	6.41	24.47	MR
	3	6.27	10.75	2.37	10.69	8.64	81.59	11.67	0.437	69.86	7.27	24.72	MR
	4	6.01	10.34	1.93	10.53	8.45	76.99	11.35	0.434	68.51	7.34	25.52	MR
185 °C	5	5.82	10.21	1.82	10.29	8.27	76.48	11.30	0.430	65.91	7.73	25.98	MR
	1	6.36	10.77	1.99	10.66	8.43	80.30	11.43	0.441	72.36	6.14	25.17	MR
	2	5.95	10.39	1.86	9.60	8.13	73.89	11.23	0.432	68.93	6.54	25.20	MR
	3	5.71	9.90	1.65	9.53	7.74	73.14	11.08	0.429	63.25	7.69	25.56	MR
	4	5.45	9.19	1.52	9.20	7.57	66.48	10.95	0.424	62.51	7.86	25.81	MR
200 °C	5	5.40	8.96	1.48	9.11	7.41	66.17	10.74	0.421	61.77	8.03	26.06	MR
	1	6.16	10.08	1.79	9.11	7.34	64.44	11.49	0.433	57.68	8.72	24.42	MR
	2	5.14	8.56	1.77	8.16	6.31	59.63	11.43	0.427	48.70	9.66	22.99	MR
	3	4.50	7.84	1.51	7.75	5.82	51.71	11.38	0.424	43.68	9.64	21.42	MR
	4	4.25	7.54	1.44	7.39	5.82	48.71	11.27	0.416	42.05	9.83	21.25	MR
215 °C	5	4.17	7.32	1.39	6.70	5.44	47.51	11.04	0.411	40.49	9.74	20.45	R
	1	4.50	8.09	1.48	7.76	5.56	54.88	11.48	0.424	43.62	9.48	21.31	MR
	2	3.25	6.63	1.38	6.84	5.60	49.10	11.35	0.417	40.66	9.15	19.89	R
	3	3.18	6.37	1.27	6.12	5.39	47.18	11.21	0.413	45.83	8.66	21.65	R
	4	3.02	6.10	1.21	5.97	5.10	41.63	10.95	0.409	31.27	5.38	16.10	R
230 °C	5	2.53	5.47	1.14	5.81	5.02	36.97	10.69	0.396	30.58	7.60	14.01	R
	1	3.29	6.14	1.39	6.59	5.03	43.32	11.22	0.412	33.27	8.06	15.87	R
	2	2.66	5.33	1.33	5.70	4.76	42.25	11.10	0.411	39.32	7.80	18.07	HR
	3	2.43	5.20	1.25	5.53	4.89	37.69	10.81	0.397	29.17	6.88	12.75	HR
	4	2.34	5.21	1.21	5.22	4.67	36.01	10.70	0.392	29.39	6.84	12.81	HR
	5	2.12	4.89	1.09	5.02	4.77	33.58	10.48	0.385	28.30	6.82	12.45	HR

DR, HR, R, MR, NR are defined in Table 1

SH_{air} volumetric shrinkage from water-swollen to air-dry condition, SH_{ov} volumetric shrinkage from water-swollen to oven-dry condition, SW_{air} volumetric swelling from air-dry to water-swollen condition, SW_{ov} volumetric swelling from oven-dry to water-swollen condition, EMC equilibrium moisture content, MOR modulus of rupture, MOE modulus of elasticity, Den oven-dry density, L^{*} lightness, a^{*} chromatic coordinates on the green-red axis, b^{*} chromatic coordinates on the blue-yellow axis

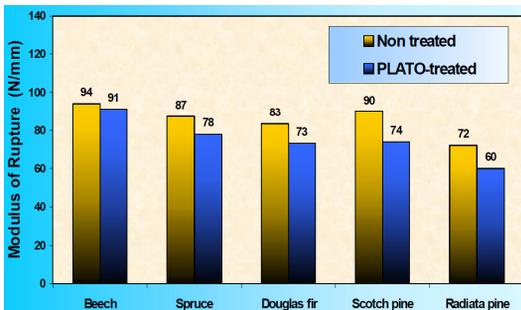


Fig. 8. Modulus of rupture of some wood species before and after heat-treatment on whole plank scale (Tjeerdsma *et al.*, 1998b).

성이 시사되었다(Brischke와 Rapp, 2004; Kamdem *et al.*, 1999; Tjeerdsma 등, 1998b).

열처리 공정조건에 의한 열처리 목재의 기계적 성능 변화에 대한 예시를 Table 1에 제시하였다(Guo 등, 2014). Table 1에는 다양한 온도와 가열시간을 조건으로 열처리한 poplar재의 기계적 성능 변화를 나타내었다. Table 1에서 볼 수 있는 바와 같이 열처리 가공에서 가열온도와 가열시간이 증가할수록 목재의 강도감소가 커지는 경향을 가진다. Guo 등 (2014)은 170~230 °C, 1~5시간의 조건에 따라 열처리한 결과, 170~185 °C에서는 1~5시간을 처리하여

도 열처리 목재의 최대 MOR 감소가 11% 이하이었는데, 200℃ 이상에서는 MOR 감소가 최대 50%까지 높아지는 현상을 보고하였다. Candelier 등(2013)도 진공 열처리가 질소 열처리에 비해 동일 조건(220℃)에서 목재성분의 분해가 가장 낮고, MOE, MOR 및 Brinell 경도 감소가 개선될 수 있음을 보고하였다. 또한 soy oil을 이용한 SOTT 공정이 dry air를 이용한 DATT 공정에 비해 MOR 및 Toughness가 상대적으로 높다는 보고도 있다(Awoyemi, 2009). 특히 오일을 매질로 한 경우, 인장강도 감소가 매우 큰 것으로 나타나 열처리 목재는 하중에 견디어야 하는 구조용으로는 보다 신중한 검토가 필요하다고 하겠다(Hale 등, 2005). 이 밖에도 다수의 보고에서 증기, oil, 질소, 진공 등의 열전달 매질이 열처리 목재의 기계적 성능에 깊이 영향함이 시사되었다(Sandberg와 Kutnar, 2015; Hale 등, 2005; Rapp와 Sailer, 2000; Syrjänen와 Kangas, 2000; Jamsa & Viitaniemi, 1998).

세계적으로 널리 알려져 있는 주요 상업화 공정으로 생산된 열처리 목재의 강도적 변화를 다음과 같이 소개한다. 핀란드 Thermowood의 경우, 제조공정에서 최고 온도의 범위가 150~240℃일 때, 열처리 목재의 휨강도 감소율은 0~30%, 네덜란드의 Plato wood는 160~190℃로 처리했을 때 5~18%, 프랑스의 Rectified wood는 210~240℃에서, 약 40%, 독일의 OHT wood는 220℃에서, 약 30% 수준으로 나타났다(Raggers, 2016; Homan과 Jorrison, 2004; Militz, 2002; Mayes와 Oksanen, 2002; Rapp와 Sailer, 2001; Vernous, 2001). 이와 같이 타 상업공정에 비해 비교적 낮은 온도를 채택한 네덜란드의 plato wood를 제외하 나머지 공정기술들이 고온을 채택할 때는 모두 30% 이상의 매우 큰 강도 손상을 초래함으로 구조용으로 사용하고자하는 경우에는 면밀한 검토가 필요할 것으로 고찰되었다.

이상과 같이 열처리 가공에서는 수종과 다양한 공정조건들이 열처리 목재의 기계적 성능에 밀접하게 관여됨으로 이를 줄이기 위하여 대상수종에 적합한 공정 선정 및 최적 처리조건 도출의 필요성이 크다고 할 수 있다.

5. 열처리 목재의 내후성

열처리 목재는 열로 인한 목재성분의 화학적 변화로 목재를 가해하는 생물열화인자에 대한 저항성이 증가되는 효과가 크다고 소개되고 있다(Raggers, 2016; Homan과 Jorrison, 2004). 즉, 천연내구성이 낮은 수종에 열처리를 함으로서 내후성등급이 상승되는 효과가 있다는 것이다.

일반적으로 열처리 목재의 내후성은 목재 수종, 열처리 공정조건(가열온도와 처리시간, 사용되는 매질의 종류 등)의 영향을 시사하는 보고들이 많다(Raggers, 2016; Acker *et al.*, 2011; Welzbacher 등, 2009; Sakai 등, 2008; Welzbacher와 Rapp, 2005; Mayes와 Oksanen, 2002; Rapp and Sailer, 2000; Tjeerdsma 등, 2000; Militz, 2002; Tjeerdsma 등, 1998b).

상업적으로 사용되는 공정별 열처리 목재의 내후성에 대해 소개한다.

Plato process의 경우, 처리단계별로 다양한 변수 적용, 즉, 단계별 처리온도 및 시간, 매질의 pH, 매질의 종류, 가열과 냉각기술 등의 인자가 내후성 증대 및 열화생물별 효력성에 영향한다(Talaie 등, 2013; Anderson 등, 2010; Tjeerdsma 등, 2000; Tjeerdsma 등, 1998). Plato process에 다양한 처리조건을 변수를 적용하여 생물열화인자에 대한 내후성을 분석한 문헌에서는 다음과 같은 경향의 특성이 나타났다. 첫째, 두 번째 단계인 건조양생을 추가한 경우, 갈색부후균과 연부후균에 대한 내후성 증가가 더 컸다(Tjeerdsma 등, 2000). 둘째, 매질의 pH가 산성일 때는 갈색부후균에 대해 저항성이 크고, 중성 또는 알칼리에서는 갈색부후균과 백색부후균에 대한 내후성이 유사한 수준을 나타냈다(Talaie 등, 2013). 셋째, 열전달매질로 진공을 도입한 경우, radiata pine은 갈색부후균에는 내후성 1등급, 백색부후균에는 1~4등급, spruce에서는 갈색부후균에 대한 내후성이 1~5등급으로 radiata pine과 상이했다. 다른 수종에서도 이와 같이 수종에 따라 부후균 종류에 대한 내후성이 달라 매질 선정에 세심한 사전 분석의 필요성이 제기되었다(Tjeerdsma 등, 2000). 또한, 일본의 alder

와 자작나무에 Plato process를 적용하여 열처리한 결과 부후균에 대한 실내시험과 야외시험 모두에서 열처리 목재에 내후성이 나타나지 않았고, 흰개미 저항성 시험에서는 실내시험 및 야외시험 모두 오히려 무처리재에 비해 열처리 목재에 더 극심한 흰개미피해가 보고된 바 있다(Doi 등, 2004). 국내에서도 잣나무 및 로지폴소나무에 열처리하고 6개월간 야외노출시험을 실시한 결과, 흰개미에 의한 피해가 심하게 나타났음을 보고(나 등, 2012)한 바 있어, 열처리 목재의 흰개미 저항성은 보다 신중한 평가가 필요한 것으로 고찰되었다.

Rectification process에 의한 열처리 목재의 내후성은 어떤 수준에 적용하였는가에 따라 내후성 수준이 상이하게 나타난다. Kandem 등(1999)은 열처리된 poplar, spruce 및 fir에 적용했을 때는 갈색부후균과 백색부후균에 대해 pine처리재가 spruce와 poplar에 비해 비교적 내후성이 컸으나 세 수준 모두 무처리재와 중량감소를 차가 크지 않아 충분한 내후성이 부여되었다고 할 수 없는 결과를 보였다. Sakai 등(2008)은 일본삼나무나 소나무에 질소를 매질로 했을 때, 열처리온도가 높을수록 높은 내후성을 나타낸 결과를 보고하였고, 220℃ 및 240℃로 24시간 열처리한 일본삼나무 및 소나무의 변재를 일본 공업규격(JIS K 1571)에 준한 실내시험 및 야외시험 한 결과, 부후균에 대한 실내시험에서는 보존처리한 목재와 유사한 높은 내후성을 보였으나, 흰개미 시험에 대해서는 충분한 저항성을 나타내지 못한 결과를 보고하였다.

Thermowood의 경우, 백색부후균(*Poria placenta*)과 갈색부후균(*Coniophora puteana*)에 노출되었을 때 가열온도 230℃에서는 중량감소를 0%를 나타냈으나, 180℃에서는 백색부후균에 대해서 15.5%, 갈색부후균에서는 3.9%를 나타내 갈색부후균에 대한 억제효과가 컸다(Mayes와 Oksanen, 2002). 그러나 본 보 4.3.항에서 Thermowood 공정으로 230℃에서 처리했을 때 휨강도 감소가 약 40%에 이르는 것을 감안한다면 실제 부후위험도가 높은 용도에 사용은 바람직하지 않을 수 있음이 시사되었다. Thermowood는 흔히 활엽수 가구에 가해하는

Anobium punctatum, 활엽수 건재해충인 *Lyctus brunneus*, 및 흰개미에 대한 저항성도 매우 낮은 것으로 소개되었다(Mayes와 Oksanen, 2002).

OHT process로 처리한 열처리 목재의 부후균에 대한 저항성은 처리온도가 더 고온일수록 내후성 증가가 크고, 오일을 사용하지 않은 것에 비해 오일 열처리한 목재가 갈색부후균인 *Coniophora puteana*에 대해 저항성 증가율이 크게 나타났다. 이 같은 현상은 scots pine, spruce, 및 poplar에 대해서 서로 다른 연구보고에서 갈색부후균에 저항성이 강한 유사한 경향을 보여주었다(Awoyemi 등, 2012; Fojutowski 등, 2012; Rapp와 Sailer, 2000; Sailer 등, 2000). Plato process와 마찬가지로 OHT 처리재(Scots pine, Norway spruce, Eucalyptus)에서도 흰개미에 대한 저항성이 취약한 것으로 밝혀져 열처리과정에서 흰개미에 대한 저항성 향상을 위한 기술개발이 필요하다고 고찰되었다(Nune *et al.*, 2006). 사용한 오일의 종류에 따라 내후성 증대가 다소 차이가 난다는 보고도 있는데, Wang & Cooper (2005)는 팜오일보다 soy oil이 부후나 곰팡이에 대한 내후성이 더 큰 것으로 보고하였다. 그러나 Mayes & Oksanen (2002)은 해양해충에 대한 내후성에 대한 자료 소개에서 오일을 매질로 한 열처리 목재가 해양해충에는 저항성이 없음을 보고하였다. Welzbacher & Rapp (2005)은 네덜란드의 Plato process, 핀란드의 Thermowood, 프랑스의 Rectified wood 및 독일의 OHT로 처리된 열처리 목재를 4년간 야외시험(토양접촉)을 실시한 결과에서 모든 공정의 열처리 목재의 토양접촉 내후성은 무처리에 비해 증가되기는 하였으나 장기간 토양접촉 사용에는 적절치 못하다고 보고하였다. 이 밖에 오일열처리 목재와 아세틸화목재, 그리고 방부목재의 내후성을 비교 시험한 결과 아세틸화목재와 방부목재는 거의 유사한 내후성을 보였으나, 오일열처리 목재는 그에 미치지 못하는 내후성을 보이지 못했으며, 특히 지점부에서는 내후성이 매우 낮다고 보고했다(Edlund & Jermer, 2007).

표면오염균인 곰팡이류에 대한 열처리효과(180~220℃, 2 및 4시간)에 대해서 삼나무에 대해 시험한 결과, *Aspergillus niger*에 대해서는 거의 효과가 없

있으며 *Rhizopus javanicus*와 *Gliocladium virens*에 대해서 약간의 저항성을 보일 뿐이었다고 보고되었다(Kartal, 2007).

이상과 같이 열처리 목재의 내후성은 열처리 공정, 처리조건 및 수종 등에 따라 상이함으로 대상 수종에 최적의 조합 개발의 필요성이 매우 크다는 것이 밝혀졌다. 또한 열처리 목재가 모든 부후균에 대해 목재보존제를 처리한 것과 동일한 내후성을 나타내지 못하고, 토양이나 물 접촉이 되는 환경에서 내후성이 발휘되지 못하고, 특히 해충에 대한 저항성이 매우 낮음으로 사용환경과 용도를 고려하여 주의 깊게 사용되어야 함이 시사되었다.

6. 열처리에 의한 기타 물성변화

열처리 목재의 중요한 특징 중의 하나가 색상이 짙은 갈색으로 변화한다는 것이다(Militz, 2002). 열처리 목재의 색상변화는 온도와 공정시간에 영향을 많이 받는 것으로 알려져 있어, 온도와 공정시간이 증가할수록 색상이 짙어지는 경향을 가지는 것으로 보고되고 있다(Welzbacher 등, 2009; Borges 등, 2008). 또한 열처리 후에 목재에서 탄 냄새가 나는 데 이는 목재 성분 중 열분해 산물인 furfural이 원인으로 추정된다는 보고가 있다(Kotilainen, 2000; Mayes와 Oksanen, 2002). 실제로 열처리되지 않은 목재에는 terpene, α -pinene, camphene, limonene와 같은 방향성 물질이 많으나 열처리(230℃) 후에는 이들 물질의 함유량이 1/6 정도로 감소하여 고유의 나무 향 감소 현상이 있다(Militz, 2002). 이와 같이 열처리과정에서 추출물의 이탈은 해충 등에 대한 저항성이 낮은 이유로 설명되기도 한다(Mayes & Oksanen, 2002).

열처리에 의한 도장성, 표면가공성, 접착성, 금속 부식성 등 기타 물성 변화 및 개선에 대한 연구들이 소개되었다. 열처리 목재의 기상열화 저항성이 무처리재와 유사한 수준으로 옥외 사용 시, 도장 등의 표면가공이 필요한 것으로 보고되었다(Mayes & Oksanen, 2002). 열처리 가공에서 가열온도 및 시간을 증가시킬수록 기상열화 저항성은 개선되나 MOR

이 무처리재의 50%까지 감소하는 현상이 나타나 문제가 되는 것을 보고하였다(Yildiz, *et al.*, 2010). Petric 등(2007)은 열처리 목재의 기상열화 저항성을 개선하기 위해 다양한 표면도료를 사용한 결과, 야외에서 도장 열처리 목재가 미도장 열처리 목재에 비해 퇴색방지가 잘 되었고, 투명 도료보다는 불투명도료가 표면 열화 방지 효과가 크다는 것을 보고하였다. 또한 열처리 목재에 접착가공을 시행하는 경우, 열처리로 인해 전단강도가 낮아지고 목재 손상이 많아 접착품질에 문제가 발생하고, 열처리로 인한 소수성 증대로 접착제의 용매 침투가 지체되는 특성이 있어 접착공정에 개선이 요구된다고 보고되었다(Sandberg와 Kutnar, 2015; Mayes와 Oksanen, 2002; Rapp 등, 2000). Awoyemi 등(2009)은 soy oil로 열처리했을 때 발생하는 접착 전단강도 감소 문제를 개선하기 위해 북미산 수종(balsam fir, black spruce, lodgepole pine)에 slack wax와 cobalt stain을 첨가하여 시험한 결과, Spruce에 적용효과가 가장 높았고, slack wax를 20% 정도 첨가했을 때 전단강도에 긍정적 개선효과가 있음을 보고하였다.

Jermer & Anderson (2005; 2012)은 핀란드식 열처리공법(220℃, 5시간)에 의해 처리한 열처리 목재의 경우, 2년, 9년간의 야외시험에서 공히 금속부식성이 무처리재에 비해 높았다고 보고하였다. 공시 금속 중에서 연강(mild steel) 및 아연 도금된 철의 부식성이 가장 높았고, 스테인리스강이 부식성이 가장 낮은 소재인 것으로 보고하고 있어 최근 목구조물 등에 많이 사용되는 철물을 열처리 목재에 적용하는 경우에 세심한 주의가 요구됨이 시사되었다.

7. 결 론

본 연구에서는 문헌 연구를 통하여 목재의 열처리 기술, 열처리에 의한 목재 성분의 화학적 변환, 열처리에 의한 목재의 물리·기계적 특성 변화(중량감소, 흡습성 및 치수안정성, 기계적 성능 변화, 생물열화 인자에 대한 저항성, 색상과 냄새 등)에 대해 조사 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 열처리 가공에서 가장 많이 채용되는 상업용 열

처리 공정은 네덜란드의 Plato-process, 프랑스의 Retification process, 독일의 OHT-process 및 핀란드의 Thermowood process 등이었다.

- 열처리 목재는 흡습성이 감소되어 치수안정성이 현저하게 증가되는 효과를 나타낸다.
- 열처리 공정상의 주요 영향인자들은 대상 수종, 가열 온도, 시간, 열전달 매질(air, 진공, 질소, 오일 등)이며, 이들 인자들을 변수로 한 최적조건 탐색 등의 연구가 주류를 이룬다.
- 열처리 목재의 최대 취약점은 열처리 과정에서 발생하는 중량감소로 인한 기계적 성능 저하임으로, 고강도가 요구되는 구조용으로의 사용을 지양하고, 개량목표에 적절한 열처리조건 탐색이 최우선 과제인 것으로 고찰되었다.
- 열처리 목재는 수종과 열처리공정조건에 따라 부후균에 대한 저항성이 다르고, 특히 갈색부후균과 백색부후균에 대한 내후성 효과가 다른 경우가 많다. 여러 종류의 부후균에 고루 효력을 가지는 열처리 공정 연구가 필요하다.
- 열처리 목재의 해충(천공해충, 흰개미 등)에 대한 저항성이 낮아 해충피해가 우려되는 환경에서 사용하기 위해서는 이를 보완하는 처리공정 개발이 필요하다.
- 열처리 목재가 다년간 야외시험에서 충분한 내후성을 나타내지 못한 경우가 있으므로, 토양이나 물 접촉 등 심각한 열화가 예측되는 환경에 사용을 위해서 신중한 검토가 요구됨이 시사되었다.
- 목재의 고온을 이용한 열처리 공정은 앞으로 수종에 따른 가열방식, 온도, 가열시간, 매질 선정 등이 지속적인 연구 주제가 될 것으로 전망된다. 특히 목제품을 다양하게 이용하는 차원에서 열처리 목재의 용도 개발 및 적재적소의 이용 확대는 지속가능한 환경보존 및 목재 자원 절약에 반드시 필요한 과제인 것으로 고찰하였다.

사 사

본 연구는 국민대학교 2013년도 교내연구비 지원에 의해 수행되었다.

REFERENCES

- Acker, J.V., Michon, S., Bulcke, J.V.den., Windt, I.D., Swaay, B.V., Stevens, M. 2011. Limited variability in biological durability of thermally modified timber using vacuum based technology, The International Research Group on Wood Protection, Document no. IRG/WP 11-40567.
- Andersons B., Andersone, I., Biziks, V., Irbe, I., Chirkova, J., Sansonetti, E., Grinins, J., Militz, H. 2010. Hydrothermal Modification for Upgrading the Durability Properties of Soft Deciduous Wood, The International Research Group On Wood Protection, No. IRG/WP 10-40494.
- Awoyemi, L. 2008. Thermal Treatment of Nigerian-grown *Albixxia xygia* and *Funtumia elastica* Wood in Soy oil Medium, The International Research Group on Wood Protection, Document no. IRG/WP 08-40413.
- Awoyemi, L. 2009. Differential Response of Wood to Dry Air Thermal Treatment (DATT) and soy oil thermal treatment (SOTT), The International Research Group on Wood Protection, Document no. IRG/WP 09-40446.
- Awoyemi L., Cooper, P.A., Ung, T. 2009. Wettability and bonding strength of wood thermally-treated with different combination of soy oil and chemical additives, The International Research Group on Wood Protection, Document no. IRG/WP 11-40454.
- Awoyemi L., Apetogbor, M.M., Oteng-Amoako, A.A. 2012. Effect of oil types and treatment temperature on the properties of wood subjected

- to thermal modification in oil medium, The International Research Group on Wood Protection, Document no. IRG/WP 12-40574.
- Bachle, H., Zimmer, B., Wegener, G. 2012. Classification of thermally modified wood by FT-NIR spectroscopy and SIMCA. *Wood Sci. Technol.* 46: 1181-1192.
- Bak, M., R. Nemeth, 2012. Modification of wood by oil heat treatment. International Scientific Conference on Sustainable Development & Ecological Footprint, March, Hungary, 1-5.
- Bazyar, B., parsapajouh, D., Khademiasalam, H. 2010. An investigation of some physical properties of oil heat treated poplar wood. International Research Group on Wood Preservation, Document no. IRG/WP 10-40509.
- Boonstra, M.J., Tjeerdsma, B.F., Groeneveld, H.A.C. 1998. Thermal modification of non-durable wood species. 1. The PLATO technology: thermal modification of wood. The International Research Group on Wood Protection, Document no. IRG/WP 98-40123.
- Boonstra, M.J. and Tjeerdsma, B.F. 2006. Chemical analysis of heat treated softwoods. *Holz als Roh- und Werkstoff* 64: 204-211.
- Borges, C.C., Barbosa, A.L., Campos, R.F.D., Targas, S.T. 2008. High Temperature Treated Wood, The International Research Group on Wood Protection, Document no. IRG/WP 08-40429.
- Bourgois, J., Guyonnet, R. 1988. Characterization and analysis of torrefied wood. *Wood Science and Technology* 22: 143-155.
- Brischke, C., Rapp, A.O. 2004. Investigation of the suitability of silver fir (*Abies alba* Mill.) for thermal modification, The International Research Group on Wood Protection, Document no. IRG/WP 04-40275.
- Burmester, Arno. 1973. Einfluß einer Wärme-Druck-Behandlung halbtrockenen Holzes auf seine Formbeständigkeit, *Holz als Roh- und Werkstoff*, vol. 31, Issue 6: 237-243.
- Byun, H.S., Park, J.H., Park, H.M., Park, B.S., Jeong, S.H. 2008. Compression strength and hardness of heat-treated wood, Proceedings of the Korean Society of Wood Science and Technology Annual meeting: 169-170.
- Candelier, K., Dumarcay, S., Petrissans, A., Petrissans, M., Gerardin, P. 2013. Effect of the nature of the Inert Atmosphere Used During Thermal Treatment on Chemical Composition, Decay Durability and Mechanical Properties of Wood, The International Research Group on Wood Protection, Document no. IRG/WP 13-40625.
- Chaouch M., Petrissans, M., Petrissans, A., Gerardin, P. 2010. Use of wood elemental composition to predict heat treatment intensity and decay resistance of different softwood and hardwood species. *Polymer Degradation and Stability* 95: 2255-2259.
- Chaouch M., Dumarcay, S., Petrissans, A., Petrissans, M., Gerardin, P. 2012. Relationships between heat treatment intensity and some conferred properties of different European softwood and hardwood species, The International Research Group on Wood Protection, Document no. IRG/WP 12-40593.
- Del Menezzi, C.H.S., Tomaselli, I. 2006. Contact thermal post-treatment of oriented strandboard to improve dimensional stability: A preliminary study. *Holz als Roh- und Werkstoff* 64: 212-217.
- Dietrichs, H.H., Sinner, H., Puls, J. 1978. Potential of steaming hardwoods and straw for feed and food production. *Holzforschung* 32: 193-199.
- Dirol, D., Guyonnet, R. 1993. The improvement of wood durability by retification process. The

- International Research Group on Wood Protection, Document no. IRG/WP 93-40015.
- Doi, S., Hanata, K., Kamonji, E., Miyazaki, Y. 2004. Decay and termite durabilities of heat-treated wood, The International Research Group on Wood Protection, Document no. IRG/WP 04-40272.
- Edlund M.J., Jermer, J. 2007. Durability of Some Alternatives to Preservative-Treated Wood. Progress report 2: Results from Field Tests after 5 years' Exposure, The International Research Group on Wood Protection, Document no. IRG/WP 07-30442.
- Esteves, B., Graca, J., Pereira, H. 2008. Extractive composition and summative chemical analysis of thermally treated eucalypt wood, *Holzforschung* 62: 344-351.
- Esteves, B., Pereira, H. 2009. Wood modification by heat treatment: a review. *Bioresources* 4: 370-404.
- Esteves, B., Nunes, L., Domingos, I., Pereira, H. 2012. Differences between heat treated *Pinus pinaster* heartwood and sapwood, The International Research Group on Wood Protection, Document no. IRG/WP 12-40617.
- Fojutowski A., Kropacz, A., Noskowiak, A. 2009. The Resistance of Thermo-oil Modified Wood against Decay and Mould Fungi, The International Research Group On Wood Protection, No. IRG/WP 09-40448.
- Fojutowski A., Kropacz, A., Noskowiak, A. 2012. The Resistance of Thermo and Thermo-oil Modified Black Poplar Wood (*Populus nigra* L.) to *basidiomycetes* Fungi, The International Research Group On Wood Protection, No. IRG/WP 12-40585.
- Green, D.W., Evans, J.W., Craig, B.A. 2003. Durability of structural lumber products at high temperatures. Part I. 66°C at 75% RH and 82°C at 30% RH. *Wood Fiber Sci.* 35: 499-523.
- Guo F., Huang, R., Lu, J., Chen, Z., Cao, Y. 2014. Evaluating the effect of heat treating temperature and duration on selected wood properties using comprehensive cluster analysis, *J. Wood Sci.* 60: 255-262.
- Hale, M.D.C., Ghosh, S.C., Spear, M.J. 2005. Effect of artificial UV weathering and soft rot decay on heat treated wood, The International Research Group on Wood Protection, Document no. IRG/WP 05-40302.
- Hamamda, J., Petrissans, A., Mothe, F., Petrissans, M., Gerardin, P. 2015. Effect of natural variability of European Oak wood on heat treatment process and potential implication on wood durability, The International Research Group on Wood Protection, Document no. IRG/WP 15-40693.
- Hill, C.A.S. 2006. Wood modification: chemical, thermal and other processes, 99-128. John Wiley & Sons, Chichester, England.
- Hillis, W.E. 1984. High temperature and chemical effects on wood stability. Part 1: General considerations. *Wood Sci. Technol.* 18: 281-293.
- Homan, W.J., Jorissen, A.J.M. 2004. Wood Modification developments, *HERON* 49(4): 364-366.
- Hong, N.Y., Kwon, S.S., Jeong, S.H., Won, K.R., Byun, H.S. 2014. Decay of heat-treated wood by concentration of heat medium, 2014. Proceedings of the Korean Society of Wood Science and Technology Annual meeting: 320-321.
- Hong, B.H. 1986. Dynamic viscoelasticity of heat treated wood, *J. Korean Wood Sci. & Tech.* 14(2): 2013-2020.
- Jamsa, S., Viitaniemi, P. 1998. Heat treatment of wood. Better durability without chemicals. In: Proceedings from Nordiske Trebeskyttelsesdager, pp. 47-51.

- Jamsa, S., Viitanemi, P. 2001. Heat treatment of wood: Better durability without chemicals. In A. O. Rapp (ed.) Review on Heat Treatments of Wood. Proceedings of the special seminar of COST Action E22, 9 February, Antibes, France, pp. 2126.
- Jermier, J., Anderson, B.-L. 2005. Corrosion of fasteners in heat-treated wood-progress report after two years' exposure outdoors, The International Research Group on Wood Protection, Document no. IRG/WP 05-40296.
- Jermier, J., Anderson, B.-L. 2012. Corrosion of fasteners in heat-treated wood-progress report after nine years' exposure outdoors, The International Research Group on Wood Protection, Document no. IRG/WP 12-40601.
- Jiang, C.Y., Lu, JH., JX., Huang R.F. 2012. Effect of steam-heat treatment on mechanical properties of Chinese fir. *Bioresources* 7: 1123-1133.
- Kamdem, D. P., Pizzi, A., Guyonnet, G., Jermannaud, A. 1999. Durability of heat-treated wood, The International Research Group on Wood Protection, Document no. IRG/WP 99-40145.
- Kartar, S.N. 2007. Mold Resistance of Heat-Treated Wood, 2007, The International Research Group on Wood Protection, Document no. IRG/WP 07-40358.
- Kocaefe, D., Younsei, R., Poncsak, S., Kocafae, Y. 2007. comparison of different models for the high-temperature heat-treatment of wood, *Bioresource Technology* 46: 707-716.
- Kotilainen, R. 2000. Chemical changes in wood during heating at 150 - 260 °C. PhD thesis, Jyväskylä University, Research Report 80, Finland.
- Kim, G., Yun, K., Kim, J. 1998. Effect of heat treatment on the decay resistance and the bending properties of radiata pine sapwood, *Material und Organismen* 32(2): 101-108.
- Lee, S.J., Kang, S.K., Kang, C.W., Kang H.Y. 2012. FSP Measurement of Heat-treated Hardwoods Using Volumetric Swelling Method, *Journal of the Korea Furniture Society* 23: 163-168.
- Mayes, D., Oksanen, O. 2002. *Thermo Wood Handbook*, By: Thermowood, Finnforest, Stora.
- Meyer L., Brischke, C., & Welzbacher, C.R. 2011. Thermally modified timber (TMT) for decking applications - determination of relevant surface properties, The International Research Group on Wood Protection, Document no. IRG/WP 11-40544.
- Militz, H. 2002. Thermal treatment of wood: European Processes and their background. The International Research Group on Wood Protection, Document no. IRG/WP 02-40241.
- Militz, H., Tjeerdsma, B. 2000. Heat treatment of wood by the Plato-process: Proceedings of Seminar "Production and development of heat treated wood in Europe", Nov. 2000, Helsinki, Stockholm, Oslo.
- Navi, P., Sandberg, D. 2012. *Thermo-hydro-mechanical processing of wood*. Lausanne, Switzerland: EPFL Press.
- Nguila Inari, G., Petrisans, M., Lambert, J., Ehrhardt, JJ., Gerardin, P. 2007. Chemical reactivity of heat-treated wood. *Wood Science and Technology* 41: 157-168.
- Nunes, L., Nobre, T., Welzbacher, C., Rapp, A.O. 2006. Termite response to Oil-Heat-Treated Norway spruce, Scot pine and Eucalyptus Wood, The International Research Group on Wood Protection, Document no. IRG/WP 06-20325.
- Obataya, E., Shibutani S., Hanata, K., Doi, S. 2006. Effects of high temperature kiln drying on the practical performances of Japanese cedar wood II : changes in mechanical properties due to heating. *J. Wood Sci.* 52: 111-114.

- Obataya, E. 2009. Effects of ageing and heating on the mechanical properties of wood. In: Uzielli, L (Ed.), *Wood Science for Conservation of Cultural Heritage*, (pp. 16-23). Proceedings of the International Conference held by COST Action IE0601, November 8-10, Florence, Italy.
- Ozkan, O.E., Vurdu, H., Temiz, A., Kose, G. 2014. The Physical Properties of Heat Treated Fir Wood and Outdoor Durability, The International Research Group on Wood Protection, Document no. IRG/WP 14-40677.
- Park, Y.G., Eom, C.D., Park, J.H., Chang, Y.S., Kim, K.M., Kang, C.W., Yeo, H.M. 2012. Evaluation of Physical Properties of Korean Pine (*Pinus koraiensis* Siebold & Zucc.) Lumber Heat-Treated by Superheated Steam, *J. Korean Wood Sci. & Tech.* 40(4): 257-267.
- Paul, W., Ohlmeyer, M., Leithoff, H. 2007. Thermal modification of OSB-strands by a one-step heat pre-treatment Influence of temperature on weight loss, hygroscopicity and improved fungal resistance. *Holz als Roh- und Werkstoff* 65: 57-63.
- Paul, W., Ohlmeyer, M., Leithoff, H., Boonstra, M.J., Pizzi, A. 2006. Optimising the properties of OSB by a one-step heat pre-treatment process. *Holz als Roh- und Werkstoff* 64: 227-234.
- Petric M., Kricej, B., Pavlic, M., Rapp, A. 2007. Natural Weathering of Coated Oil Heat Treated Wood, The International Research Group on Wood Protection, Document no. IRG/WP 07-30440.
- Platowood B.V. 2016. www.platowood.com
- Pohleven, G., Rep, F., Bucar, B. 2004. Characteristics of thermally modified wood in vacuum, The International Research Group on Wood Protection, Document no. IRG/WP 04-40287.
- Ra, J.B., Kim, K.B., Lim, K.H. 2012. Effect of heat treatment conditions on color change and termite resistance of heat-treated wood, *J. Korean Wood Sci. & Tech.* 40(6): 370-377.
- Raggers, J. 2016. 4. Process/Durability, 69-91.
- Rapp, A.O., Sailer, M. 2000. Heat treatment in Germany. Proceedings of Seminar "Production and development of heat treated wood in Europe", Nov. 2000, Helsinki, Stockholm, Oslo.
- Rapp, A.O., Sailer, M., Westin, M. 2000. Innovative Holzvergütung - neue Einsatzbereiche für Holz. In: Proceedings of the Dreiländer-Holztagung, Luzern, Switzerland.
- Rapp, A.O., Sailer, M. 2001. Oil heat treatment of wood in Germany: State of the art. Proceedings of the special seminar of COST Action E22, Antibes, 9 Feb., France, 47-64.
- Rasaam G., Tagiyari, H.R., Karimi, A., Jamnani, B., Ebrahimi, M. 2012. Study on the Effect of Combined Nanosilver-Hygrothermal treatment on Wood Properties, The International Research Group on Wood Protection, Document no. IRG/WP 12-40581.
- Ruyter, H.P. 1989. European patent Appl. No. 89-203170.9.
- Sailer, M., Rapp, A.O., Leithoff, H. 2000. Improved resistance of Scots pine and spruce by application of an oil-heat treatment, The International Research Group on Wood Protection, Document no. IRG/WP 00-40162.
- Sakai, H., Imamoto, Y., Itoh, T., Sato, T. 2008. Biological resistance and hygroscopicity of the heat-treated wood under nitrogen atmosphere, *Wood Preservation* 34(2): 69-79.
- Sandberg, D., Haller, P., Navi, P. 2013. Thermo-hydro and thermo-hydro-mechanical wood processing: An opportunity for future environmentally friendly wood products. *Wood Material Science and Engineering* 8: 64-88.
- Sandberg, D., Kutnar, A. 2015. Recent Development

- of Thermal Wood Treatments: Relationship between Modification Processing, Product properties, and the Associated Environmental Impacts, IAWPS 2015, International Symposium on Wood Science and Technology, p. 55-59.
- Simmon, F., Kutnik, M., Goyer, M., Thevenon, M.-F., Ceron, M. 2011. Optimization of the bi-oleothermal treatment process for wood preservation and fireproofing, The International Research Group on Wood Protection, Document no. IRG/WP 11-40566.
- Syrjänen T., Kangas, E. 2000. Heat Treated Timber in Finland, The International Research Group On Wood Protection, No. IRG/WP 00-40158.
- Syrjanen, T., Jamsa, S., Viitaniemi, P. 2000, Heat treatment of wood in Finland. Proceedings of Seminar “Production and development of heat treated wood in Europe”, Nov. 2000, Helsinki, Stockholm, Oslo.
- Syrjanen, T., Oy, K. 2001. Production and classification of heat treated wood in Finland. In: Review on heat treatments of wood. Proceedings of the special seminar held in Antibes, pp. 7-16.
- Talei, A., Kalimi, A., Thevenon, M.-F. 2013. Influence of Heat Treatment Medium on Fungal Resistance of Beech Wood, International Research Group on Wood Preservation, Document no. IRG/WP 13-40643.
- Talaei, A., Yaghoobi, K. 2009. Physical and Mechanical Properties of Hydrothermally Modified Mulberry (*Morus alba* L.) Wood, The International Research Group on Wood Protection, Document no. IRG/WP 09-40481.
- Talaei, A., Movahed, D.A., Rassam, G. 2015. Investigation of Coating Performance of Different Heat-treated Poplar Wood Before and After Accelerated Aging. The International Research Group on Wood Protection, Document no. IRG/WP 15-40702.
- Tetri, T. 2012. Development and markets of thermally modified wood products. In: Current and future trends of thermo-hydro-mechanical modification of wood opportunities for new markets. COST Action FP0904 workshop, March, 26-28, Nancy Université, France, pp. 130-131.
- Tjeerdsma, B.F., Boonstra, M., Pizzi, A., Tekely, P., Militz, H. 1998a. Characterisation of thermal modified wood: molecular reasons for wood performance improvement. CP-MAS 13C NMR characterisation of thermal modified wood. Holz als Roh- und Werkstoff. 56: 149-153.
- Tjeerdsma, B.F., Boonstra, M., Militz, H. 1998b. Thermal modification of non-durable wood species. 2. Improved wood properties of thermally treated wood. International Research Group on Wood Preservation, Document no. IRG/WP 98-40124.
- Tjeerdsma, B.F., Stevens, M., Militz, H. 2000. Durability aspects of hydrothermal treated wood. International Research Group on Wood Preservation, Document no. IRG/WP 00-40160.
- Tjeerdsma, B.F., Militz, H. 2005. Chemical changes in hydrothermal treated wood: FTIR analysis of combined hydrothermal and dry heat treated wood. Holz Als Roh- Werkstoff; 63: 102-111.
- Troya, M.T., De Navarrete, A.M. 1994. Study of the degradation of retified wood through ultrasonic and gravimetric techniques. The International Research Group on Wood Protection, Document no. IRG/WP 94-40030.
- Vidrine, C., Freitag, C., Nicholson, J., Morrell, J.J. 2007. Effects of Heat Treatments on Decay Resistance and Material Properties of Ponderosa pine and Yellow poplar, The International Research Group on Wood Protection, Document no. IRG/WP 07-40374.
- Vernois, M. 2001, Heat treatment of wood in France. Review on Heat Treatment of wood,

- Proceedings of the special seminar of COST Action E22, 9 Feb., Antibes, France, 39-46.
- Vernois, M. 2000. Heat treatment in France. Proceedings of Seminar "Production and development of heat treated wood in Europe", Nov. 2000, Helsinki, Stockholm, Oslo.
- Viitanen, H.A., Jamsa, S., Paajanen, L.M., Nurmi, A.J., Viitaniemi, P. 1994. The effect of heat treatment on the properties of spruce. International Research Group on Wood Preservation, Document no. IRG/WP 94-40032.
- Wang, J., Cooper, P.A. 2005. Properties of hot oil treated wood and the possible chemical reactions between wood and soybean oil during heat treatment, The International Research Group on Wood Protection, Document no. IRG/WP 05-40304.
- Wang, J., Cooper, P. 2007. Fire, flame resistance and thermal properties of oil thermally-treated wood, The International Research Group on Wood Protection, Document no. IRG/WP 07-40361.
- Wang, W., Zhu, Y., Cao, J. 2013. Combined effects of thermal modification and ACQ-D impregnation on properties of southern yellow pine wood, The International Research Group on Wood Protection, Document no. IRG/WP 13-40637.
- Welzbacher, C.R., Brischke, C., Rapp, A.O. 2009. Estimating the heat treatment intensity through various properties of thermally modified timber (TMT), International Research Group on Wood Preservation, Document no. IRG/WP 09-40459.
- Welzbacher, C.R., Rapp, A.O. 2002. Comparison of thermally modified wood originating from four industrial scale processes- Durability, International Research Group on Wood Preservation, Document no. IRG/WP 02-40229.
- Welzbacher, C.R., Rapp, A.O. 2010. Durability of different heat treated materials from industrial process in ground contact, International Research Group on Wood Preservation, Document no. IRG/WP 05-40312.
- Won, K.R., Hong, N.Y., Kwon, S.S., Jeong, S.H., Byun, H.S. 2015. Application of heat-treated wood with heat medium, 2015. Proceedings of the Korean Society of Wood Science and Technology Annual meeting, 344-345.
- Younsei, R., Kocafee, D., Poncsak, S., Kocafee, Y., Gastonguay, L. 2010. A high-temperature thermal treatment of wood using a multiscale computational model: Application to wood poles, *Bioresource Technology* 101: 4360-4638.