

목재의 기상열화에 관한 최근의 연구 동향¹

김 영 숙^{2,†}

Current Researches on The Weathering of Wood¹

Yeong-Suk Kim^{2,†}

요 약

본 총설에서는 목재의 기상열화 특성(색상, 목재표면의 미세구조 및 화학적 변화)과 국제적으로 다양하게 이용되는 내후성시험방법에 관한 국제적 연구동향에 대하여 보고한다.

ABSTRACT

This was reviewed on the characteristics (changes of color, microscopic structures, and chemical degradations) that appears on wood surface, when wood is exposed to outdoors and weathering testing methods applicable for assessment of wood weatherability in outside environment through literature reviews.

Keywords : weathered wood, photodegradation, change of color, weathering tests, weathering intensity

1. 서 언

신기후변화체제에 대응하기 위한 환경 친화적 목재 이용은 점차 증대될 것으로 예상되는 상황에서 목제품의 내구성 증대 및 안전성 향상은 매우 중요한 이슈라고 할 수 있다. 산림청은 『탄소흡수원 유지 및 증진에 관한 법률』 제27조 및 동법 시행령 제24조 기반의 『사회공헌형 산림탄소 상쇄 운영표준』을 제정 고시(산림청 고시 제2013-37호)하고, 목제품 이용을 산림탄소상쇄 사업유형으로 제시하는 등 향후 목재

사용은 친환경 활동으로서 더욱 권장하게 될 것으로 예측되고 있다. 또한 2016년 국토부 자료에 의하면 목조주택 착공동수는 2015년 대비 12% 상승해 최근 8년간 가장 높은 성장률을 보였다고 보고하고 있다(The Korea wood newspaper, 2017). 그러나 실제로 목재는 천연소재로서 외부환경 중 특히 햇빛, 바람, 강우, 환경오염물질 등 기상예에 그대로 노출되었을 때 색상의 변화, 표면손상이나 거칠음, 크고 작은 할열 발생 등 기상열화 또는 풍화(weathering)라고 불리는 열화가 발생하는 특징을 지니고 있다(Kim *et al.*,

¹ Date Received April 11, 2017, Date Accepted May 8, 2017

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

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

2004). 기상열화가 발생한 목재에 주로 나타나는 열화증후가 주로 표층에 국한되어 수 mm 깊이의 목재 내부는 기본적으로 건전한 재질을 나타내는 경우가 많아 구조용 목재에서는 큰 문제가 되지 않는 것으로 알려져 있다(Feist, 1982). 그러나 국내에서 주로 사용되는 옥외용 목재시설이나 목조주택의 경우에 사람과의 접촉이 많은 환경에 위치해 있음으로써 외관상 재료가 불량해 보이는 단점이 있고, 특히 시설물의 유지관리의 빈도가 높아지고 그로 인한 보수비용이 많이 소요되는 문제점이 있다. 일본에서는 외부용으로 잠재가능성이 높은 목재의 잠재수요로서 건축, 조경, 도시개발, 도로, 항만, 농림토목 분야 등 폭넓게 제시하면서, 옥외용 목재의 높은 내구성과 유지관리를 해결과제로 적극적인 방부목재 사용과 기상열화 방지의 표면처리를 들었다(Nobuta, 1995). 우리나라의 경우, 1990년대부터 국내에 경골목구조 형식의 건축양식이 도입되면서 기설치된 목재시설물들이 15~20여 년이 경과되어 이들 목구조물에 나타나는 기상열화 현상이 앞으로의 목재 선호도에 부정적 영향이 우려되는 상황이다. 더욱이 기상열화가 원인이 되어 목재의 표면할열을 통해 목재부후균이 목재 조직 속에 깊이 침투 가해함으로써 구조재의 강도감소를 일으키는 경우도 있어 이에 대한 보호방안이 더욱 절실하다고 할 수 있다(Rowell, 2013).

근년 기상열화와 관련된 연구들은 대상재료(목재 또는 목질재료) 자체의 기상열화특성 및 열화시험(Weathering test), 대상재료별 기상열화 방지 기술 및 평가 등의 주제로 요약될 수 있다. 주요 연구 대상재료로는 제재목, 합판, MDF, 파티클보드, OSB, 집성재, 방부목재 및 WPC 등의 목질재료들이고, 이들 재료에 각기 나타나는 기상열화 특성 및 방지기술에 관련된 연구들이 주종을 이룬다. 목질재료별로 기상열화의 현상과 그 원인인자가 다르기 때문에 특히 열화시험은 대상재료별로 각각 다른 열화시험과 그와 관련된 주제의 연구들이 보고된다. 즉, 제재목과 같은 목재의 경우에는 옥외용으로 사용될 때 발생하는 기상열화 특성 구명(Schnabel *et al.*, 2017; Kim *et al.*, 2016; Cademartori *et al.*, 2015; Kataoka *et al.*, 2015; Ishikawa *et al.*, 2014b; Evans *et al.*, 2013;

Ebe *et al.*, 2011; Kataoka, 2008; Yamamoto *et al.*, 2007; Nozokou & Kamdem, 2006; Pandey, 2005; Kataoka *et al.*, 2004; Williams *et al.*, 2001), 도장 등 방지 기술 및 평가시험 등이 주요 연구대상이 된다(Jebrand *et al.*, 2016; Kose *et al.*, 2014; Ozgenc *et al.*, 2012; Kataoka *et al.*, 2011; Schaller and Rogez, 2007). 그리고, 접착제나 고분자를 사용하는 목질재료의 경우에는 제품의 성능보존 차원에서 접착제 및 고분자 재료와 연관된 기상열화 특성을 분석하거나 이에 따른 고내구성 물질을 탐색하는 연구들이 주를 이룬다고 할 수 있다(Yanagawa and Harata, 2016; Hyvarinen, 2014; Korai *et al.*, 2014; Korai and Hattori, 2013; Korai *et al.*, 2013).

본 총설에서는 옥외용 목조시설물에 사용되는 부재 중, 주로 제재목과 같은 목재의 내구성 향상과 유지관리 등의 인식제고를 위한 자료 제공을 목적으로 목재에 발생하는 기상열화에 관련된 연구동향을 다루었다. 특히 목재의 색상, 표면의 미세구조 및 화학적 변화 등이 나타나는 기상열화 목재의 특성 연구들과 국제적으로 다양하게 이용되는 열화시험과 관련된 문헌들의 연구동향에 대하여 조사분석하였다.

2. 목재의 기상열화 특성

2.1. 기상열화 목재의 색상 및 표면 변화

목재가 자연에 노출되어 기상열화가 발생하면 목재표면의 분자구조가 변화되면서 화학적 기계적 생물학적으로 복합된 변화가 나타난다. 제재목과 같은 목재의 기상열화를 일으키는 주요 인자로서 태양광, 수분, 열, 미생물 및 대기오염물질(산성비 등) 등이 소개되는데, 이들 인자 중에서 목재의 기상열화에 가장 영향하는 인자가 태양광으로 알려져 있다. 그 이유는 많은 목재가 자외선이 침투하는 깊이에 한정되어 열화가 진행되기 때문이다. 실제로 목재의 기상열화로 변색되는 층의 깊이는 기상열화조건, 수증, 조제와 만재 등 조건에 따라 차이는 있으나 연구보고들의 내용을 망라하면 그 범위가 약 34~2540 μm 의 깊이

로 얇은 표층에 발생하는 것으로 보고되고 있다(Kim *et al.*, 2016; Kataoka, 2008; Kataoka *et al.*, 2004; Williams *et al.*, 2001; Kiguchi, 1993; Feist, 1992).

목재가 보통 태양광에 노출되면 최초 수개월에 노랗거나 갈색으로 변화하기 시작하고, 더 햇빛에 노출 되면 회색빛을 띠는 색상변화가 나타나는 특징을 가진다(Schnabel *et al.*, 2017; Cademartori *et al.*, 2015; Ishikawa *et al.*, 2014b; Yamamoto *et al.*, 2007; Park *et al.*, 1996). 그 예로 Cademartori *et al.* (2015)은 속성수인 3종의 Eucalyptus 속 속하는 목재를 옥외에 폭로했을 때 목재표면에 나타나는 폭로기간별 색상변화를 보고하였다. 기상열화에 의한 색상변화는 주로 색차계를 이용한 CIEL**a**b*색공간에서 각 인자의 변화가 측정되는데, Cademartori *et al.* (2015)은 3종의 Eucalyptus 속 목재들은 옥외 폭로시간이 120일 정도 경과했을 때, L* 값 변화를 폭이 240일 및 360일 폭로에 비해 현저히 큰 결과를 보인다고 보고하였다. a*와 b* 값의 경우에는 폭로 초기 120일 만에 L* 값 변화에 비해 더 민감한 변화를 보였고, 360일간 폭로했을 때는 세 가지 수종 모두가 유사한 a* 값을 나타내는 경향을 보였다. a* 값의 큰 변화는 proanthocyanidine, 리그닌 및 추출물의 산화 또는 분해, 축합 등이 원인으로 발생한 것으로 해석되고 있다(Cademartori *et al.*, 2015; Nozokou and Kamdem, 2006). 이와 유사하게 자연폭로시험에서 폭로 직후부터 수개월 사이에 색상변화가 급속히 변화한다는 연구보고들이 있다(Schnabel *et al.*, 2017; Ebe *et al.*, 2011; Pandey, 2005). 이 외에도 색상변화와 함께 노출 후 1~2년 내에 조직 붕괴로 인해 표면이 거칠게 되는 등의 결점이 급격히 나타나고, 그 이후의 열화 속도는 느리게 진행된다(Kim *et al.*, 2016; Kataoka *et al.*, 2015; Feist, 1992; Cui *et al.*, 2004; Nozokou and Kamdem, 2002; Hon과 Feist, 1986). 또한 ISO/DIS 2810.2: 2000 (JIS K 5600-7-6)규격에 근거하여 24개월 간의 자연내후성시험(일본, 山形市)으로 실제 목재표면의 발수도와 색상의 변화추이를 시험한 결과에서도 도장 처리한 표면은 6개월까지 발수도 100%를 유지하였으나, 도장처리하지 않은 목재 표면은 자연에 폭로한 직후부터 급속히 저하하여 15

개월 후에는 5~16% 수준으로 하락한다고 보고한 바 있다(Ebe *et al.*, 2011). 이와 같은 연구결과들을 고려할 때, 목재가 외부에 폭로되어 사용되면 초기 수개월에 현저한 색상변화가 일어나고 1~2년 사이에 목재표면의 거칠음이 현저하게 증가하는 경향을 나타냄으로 목재를 외부에 사용하는 경우에는, 목재 부재 설치 직후에 표면보호처리를 행하여만 색상보존 및 표면보호 효과가 극대화될 수 있는 것으로 고찰되었다.

한편, 수종별 기상열화 특성은 주로 밀도에 따라 다른데, 밀도가 높은 활엽수의 경우, 빛의 침투깊이가 낮아서 기상열화 수준이 상대적으로 낮은 밀도의 침엽수 수종에 비해 낮다(Schnabel *et al.*, 2017; Kim *et al.*, 2016; Codemartori *et al.*, 2015; Yamamoto *et al.*, 2007; Williams *et al.*, 2007; Lee *et al.*, 2003; Schweitzer, 1999; Sudiyani *et al.*, 1999; Kiguchi, 1993). 목재가 100년간 자연에 노출되었을 때, 소나무, 삼나무, 레드우드 및 가문비나무와 같은 침엽수의 기상열화로 인한 침식은 약 6.35 mm, 오크와 같이 비중이 높은 활엽수는 약 3.18 mm라는 보고가 있어 대체적으로 활엽수의 경우 침엽수에 비해 기상열화저항성이 크다고 할 수 있다(Feist, 1992). 그러나 활엽수라 하더라도 강우량이 많거나 수분접촉이 많은 환경에서는 침엽수에 비해 리그닌과 헤미셀룰로스의 분해가 현저하게 크게 나타난다는 보고가 있어 수분의 광산화반응 촉진(Kiguchi, 1993)이 수종고유의 기상열화성에 영향할 수 있음이 시사되었다(Sudiyani *et al.*, 1999; Sudiyani *et al.*, 2002).

조재와 만재 간의 기상열화저항성도 밀도에 의한 차이로 인해 조재부에 기상열화로 인한 침식이 추재부에 비해 현저히 커서 목재표면에 연륜을 따라 굴곡이 생기는 원인이 된다(Williams *et al.*, 2001; Kataoka and Kiguchi, 2009; Kiguchi, 1993). 특히 횡단면이 판목이나 정목면에 비해 기상열화되기 쉽고, 판목면은 정목면보다 열화가 적다는 보고도 있지만 수종이나 연륜 폭에 따라 다른 기상열화성을 가진다(Kiguchi, 1993). 외부에 설치된 데크재 등의 경우에 표면 할열은 판목면에서 정목면의 데크보다 현저하게 많이 발

생하는 것으로 보고되고 있다(Williams *et al.*, 2001; Kiguchi, 1993). 또한 표면할열이 깊이 발생할 경우에는 할열을 통한 부후균의 포자 침입으로 부후가 초래되는 2차 피해의 우려도 크므로 외부에서 사용하는 경우에는 표면에 발수제 등으로 표면층에 발생하는 표면 할열 방지의 조치가 필요한 것으로 강조되고 있다(Evans *et al.*, 2009; Evans *et al.*, 2000).

근년 화석에너지사용 등으로 발생한 대기 중의 환경오염물질과 산성비 등도 기상열화를 촉진시키는 결과를 초래할 수 있다는 보고들(Park *et al.*, 1996; Kim *et al.*, 1993; Kiguchi, 1993)이 있어 지구온난화 및 환경변화에 따른 목재 표면보호에 대한 필요성도 더 강조되어야 하는 것으로 고찰되었다.

2.2. 기상열화 목재의 미세구조 변화

목재가 외부 자외선에 폭로되고 수일 만에 나타나는 현상을 SEM 등에 의해 관찰할 때 가장 두드러지게 나타나는 현상은 리그닌분포가 많은 중간층의 미세구조변화이다(Turkulin, 2004; Wang *et al.*, 2009; Park *et al.*, 1996; Kim *et al.*, 2008; Evans, 1989). 이로 인해 표면에 중간층이 많이 나타나는 방사단면에서 접선단면보다 중간층 파괴가 더 많이 보이는 특징을 나타낸다. 좀 더 오랜 기간 햇빛에 목재를 노출시킬 경우에는 Williams (2005)와 Turkulin (2004) 문헌의 사진을 보면 중간층이 완전히 붕괴되고 가도관의 길이방향으로 섬유간 분리현상이 나타나는 특징을 가진다(Evans, 2013; Park *et al.*, 1996; Wang *et al.*, 2009). 또한 침엽수의 유연벽공에 다이아몬드형의 미세할열이 발생하고(Park *et al.*, 1996; Turkulin, 2004), 벽공이 없는 경우에는 2차벽 s2층에서 마이크로섬유각방향으로의 미세할열이 관찰된다(Wang *et al.*, 2009; Turkulin, 2004). 이러한 현상은 특히 얇은 방사가도관이나 유세포 세포벽에서 거의 막이 소실되어 공동이 생기는 것처럼 나타나기도 한다(Derbyshire와 Miller, 1981; Evans, 1989; Paajanen, 1994).

2.3. 자외선에 의한 목재의 화학적 변화

기상열화된 목재표면의 화학적 특성을 구명하는데 FTIR (Fourier transform infrared spectroscopy), FT-ATR (Fourier transform attenuated total reflectance infrared spectroscopy), FT-Raman (Fourier transform attenuated raman spectroscopy), XPS (X-ray photoelectron), EDXA (Energy dispersive x-ray spectroscopy), SIMS (Secondary ion mass spectroscopy), 및 SSIMS (Static secondary ion mass spectroscopy) 등의 다양한 분석방법이 소개되어 있다(Tshabalala *et al.*, 2013). FT-ATR로 분석하여 자연내후성시험을 통해 기상열화된 목재와 건전한 목재 표면의 화학적 성상을 비교한 예는 Jebrane *et al.* (2016)에서 찾아볼 수 있다. Jebrane *et al.* (2016)의 보고에서는 기상열화된 것과 그렇지 않은 목재에서 구성성분별 원소결합의 변화가 있고 이를 통해서 목재조성분의 자외선에 의한 화학적 성상 변화를 구명하였다.

목재의 주요성분인 셀룰로스, 헤미셀룰로스, 리그닌 및 추출물이 자외선에 노출될 때 각각의 성분은 자외선에 대한 흡수 특성이 다르다. 셀룰로스는 파장이 200 nm에서 강한 흡수를 보이는데 실제로 200 nm는 지구까지 도달하지 못하므로 셀룰로스는 태양광 흡수가 적어서 자외선에 대해 비교적 안정적인 특징을 가진다. 그러나 리그닌은 280~380 nm 파장의 빛을 흡수하는 특성을 가짐으로 이 범위의 파장에서 쉽게 광분해가 발생할 수 있다(Rowell, 2013; Kiguchi, 1993). 특히 C-C결합은 파장 346 nm, C-O는 334 nm, C-H는 289 nm 등에서 자외선을 흡수하므로 자외선에 의한 해리특성이 다르다(Kataoka, 2008). 이와 같이 자외선 파장에 따라 에너지흡수가 다른 성질을 이용하여 목재의 화학적 성상의 변화를 구명한 많은 보고들이 있다(Jebrane *et al.*, 2016; Kim *et al.*, 2016; Lionetto *et al.*, 2012; Kataoka, 2008; Scheller & Roges, 2007; Williams, 2005; Cui *et al.*, 2004; Nozokou & Kamdem, 2002; Sudiyani *et al.*, 1999; Wang *et al.*, 2009; Park *et al.*, 1996; Hon & Feist, 1986; Gierer & Lin, 1972; Kringstad & Lin,

1970). 이와 같은 연구보고들로부터 밝혀진 자외선에 의한 목재성분의 광분해 기구는 다음과 같이 설명된다.

리그닌의 자외선 흡수에 역할을 하는 것은 이중결합, 페놀기나 카보닐기, quinonemethides 및 biphenyl기 등으로 알려져 있고, 이들이 광산화반응에 의해 리그닌고분자가 저분자화되는 등의 여러 가지의 경로가 보고되었다(Scheller와 Roges, 2007). 우선, 빛에 의한 리그닌 반응은 자외선이 목재의 전자쌍을 이루어 안정된 페놀그룹에 직접 흡수되어 페놀성 수산기로부터 수소가 탈리됨으로써 phenoxy 자유라디칼이 생성되거나, 방향족의 카보닐기 세 개가 빛에 의해 여기됨에 따라 페놀기의 수소가 이탈되어 하나의 ketyl기와 페녹시라디칼이 형성된다는 것이다(Kringstad and Lin, 1970). 리그닌에 발생한 페녹시라디칼은 발색단인 퀴논 구조 등을 형성하여 리그닌의 화학결합을 개열시키고, 이들 구조는 리그닌 중에서 비교적 풍부하게 존재하므로 리그닌이 광분해되기 쉬운 이유로 해석되고 있다(Kataoka, 2008). 또한 빛에 의해 비페놀성 phenacyl- α -O-arylethers가 개열되어 phenacyl phenoxy 자유라디칼 쌍을 만든다는 이론(Gierer and Lin, 1972)과 α -guaiacylglycerol- β -arylether 그룹 벤질의 수소 이탈로 ketyl자유라디칼이 생성되는 원리 등이 소개되었다(Schmidt and Heitner, 1993). 리그닌의 자유라디칼이 산소와 반응하여 광분해 산물인 quinoides, aromatic chromophores 등과 같은 물질이 생성되면서 발색단으로 인한 색상변화, 리그닌 분해산물인 oligomeric lignin 성분들이 표층에 많이 축적되면서 기상열화 초기에는 노랑과 갈색, 그리고 나중에는 회색으로 변화한다고 보고되었다(Scheller and Roges, 2007; Cui *et al.*, 2004; Hon and Feist, 1986; Nozokou and Kamdem, 2002). 그리고 리그닌의 광산화반응의 분해생성물 중 유기산 바닐린이나 시린가알데히드 등은 수분에 가용성이 되면서 빗물 등의 기상요건에 침식되어 표면의 거칠음이나 표층의 강도감소 등이 유발되는 원인이 되기도 한다고 소개되고 있다(Kiguchi, 1993). Kiguchi (1993)는 50년간 외부에 노출된 목재에서 회색으로 변한 표층의 리그닌 함량을 분석하니 목재

내부 리그닌 함량의 약 1/5 ~ 1/10 정도로 낮았고, 셀룰로스는 표층과 내부조직사이에 함량차이가 거의 없음을 보고하였다. 2400시간의 인공촉진내후성 시험에서도 목재표면의 리그닌 함량이 약 2%, 헤미셀룰로스 10%, 셀룰로스 80% 정도로 기상열화에 주로 리그닌 분해가 발생함을 알 수 있었다(Kataoka, 2008). 한편 리그닌 구조단위에 guaiacylglycerolguaiacyl ether, phenylcoumarin 및 pinosresinol과 같이 단일결합만의 프로판측쇄체인을 가지는 경우에는 305~420 nm의 빛은 흡수하지 않아 자유라디칼 형성도 매우 적어 광산화되지 않음이 확인되었다(Williams, 2005).

3. 목재의 내후성(기상열화) 시험 방법

목재가 옥외에 사용되면 그 지역의 기상여건에 직접적인 영향을 받음으로써 지역에 따라 기상열화의 거동이 다른 것으로 보고되었다(Kiguchi *et al.*, 1996). 예를 들어, 핀란드 헬싱키의 연평균기온과 강수량은 4.7°C, 630 mm, 독일의 뮌헨은 7.9°C, 930 mm, 뉴욕은 12.1°C, 1144 mm인데 비해 서울은 12.5°C, 1451 mm로서 타 지역에서 사용되는 목재의 기상열화와는 확실한 차이를 보일 수밖에 없다(<https://ko.climate-data.org>, 2017). 도장된 목재에 대하여 일본의 북해도에서 가고시마까지 6개 지역에 42개월간 폭로한 시험에서, 북해도와 가고시마에 설치된 목재표면의 기상열화가 현저하게 다르다는 보고 등 지역을 달리한 자연내후성시험에서 지역 간 차이가 많은 것으로 보고되었다(Sekino and Korai, 2013; Korai *et al.*, 2012; Korai, 2012; Kiguchi *et al.*, 1996). 이와 같은 이유로 목재의 기상열화에 대한 내후성 등을 평가하는데 자연내후성시험방법(Natural weathering test)은 반드시 필요한 과정으로서 촉진내후성시험(Artificial weathering test 또는 accelerated weathering test)과 함께 많이 도입되고 있다(Mokhtarruddina *et al.*, 2015; Turkoglu *et al.*, 2015; Kataya, 2015; Isikawa *et al.*, 2014a; Isikawa *et al.*, 2014b; Ebe *et al.*, 2011; Sudiyani *et al.*, 1999; Kiguchi, 1993). 국제적으로 흔히 통용되는 목재표면의 기상인자에 대한 내구성평가 시험방법의 예를

Table 1. Weathering testing methods applicable for assessment of wood surface durability

Classification	Standards	Subject	Remark
Natural weathering test	KS M ISO 16053: 2010	Paints and Varnishes—Coating Materials and Coating Systems for Exterior Wood—Natural Weathering Test	
	EN 927-3: 2012	European Committee for Standardization. Paints and Varnishes—Coating Materials and Coating Systems for Exterior Wood—Part 3: Natural Weathering Test	
	ASTM D1006-13	Standard Practice for Conducting Exterior Exposure Tests of Paints on Wood	
	ISO/DIS 2810.2: 2000	Paints and varnishes—Natural weathering of coatings—Exposure and assessment	JIS K 5600-7-6 Testing methods for paints—Part 7: Long-period performance of film Section 6: Natural weathering
Artificial weathering test	KS M ISO 16474-2	Paints and Varnishes — Accelerated weathering and exposure to artificial radiation (Exposure to filtered xenon-arc radiation)	
	EN 927-6: 2016	European Committee for Standardization. Paints and Varnishes—Coating Materials and Coating Systems for Exterior Wood—Part 6: Exposure of Wood Coatings to Artificial Weathering Using Fluorescent UV Lamps And Water	
	ASTM D4587-11	Standard Practice for Fluorescent UV-Condensation Exposures of Paint and Related Coatings	
	ASTM D6695-16	Standard Practice for Xenon-Arc Exposures of Paint and Related Coatings	
	ISO 11341: 2004	Testing methods for paints—Part 7: Long-period performance of film—Section 7: Accelerated weathering and exposure to artificial radiation (Exposure to filtered xenon-arc radiation)	JIS K 5600-7-7 Testing methods for paints—Part 7: Long-period performance of film Section 7: Accelerated weathering and exposure to artificial radiation (Exposure to filtered xenon-arc radiation)
	ISO/FDIS 11507: 1997	Paints and varnishes—Exposure of coatings to artificial weathering—Exposure to fluorescent UV and water	JIS K 5600-7-8 Testing methods for paints—Part 7: Long-period performance of film Section 8: Accelerated weathering (Exposure to fluorescent UV lamps)

Table 1에 나타내었다. Table 1에 나타낸 바와 같이 목재표면의 도장성 또는 표면특성을 평가하기 위한 방법으로서 자연내후성시험방법과 촉진내후성시험방법으로 분류되어 있다. 자연내후성시험은 실제로 야외에 폭로하여 장기간 햇빛과 빗물 등과 같은 인자에 의한 열화여부를 시험하는 방법이다. 촉진내후성시험은 그와 달리 인공내후성장치에 목재시험편을 설치하고 인공적인 빛과 물 등의 가혹한 조건으로 내후성을 시험하는 방법이다. 촉진내후성시험에는 자연의 태양광과 매우 유사한 분광 복사량 분포를 가지는 광원이 이용되는데, 광원의 종류로는 카본 아크, 형광 UV 램프, 크세논 아크 램프 그리고 메탈 할라이드 램프 등(Shin, 2006)이 사용될 수 있다. Table 1에 제시된 목재 표면을 대상으로 한 내후조작에는 형광 UV 램프와 크세논아크램프를 사용하는 방법이 제시되어 있다. 형광 UV 램프를 사용하는 EN 927-6:2016 및 ASTM D4587-11에 제시된 내후시험장치에는 320~340 nm 파장의 복사조도 분포가 많은 UVA-340램프를 사용토록 되어 있다. 그러나 동일한 형광 UV 램프 시험기를 사용하는 ISO/DIS 11507:1997 (KS ISO 11507와 JIS K 5600-7-8)의 경우에는, 313 nm 방사조도(300~340 nm 분광방사조도 70% 중에 313 nm가 41.4%)가 가장 높은 UVB (313)형, 340 nm의 방사조도(320~380 nm 분광방사조도 85% 중 340 nm 가 34.4%)가 높은 UVA (340)형, 351 nm의 방사조도(320~380nm의 분광방사조도 91% 중 351 nm가 43.4%)가 가장 높은 UVA (351)형 중의 하나를 선택해서 사용하도록 제시되어 있다. ASTM D6695-16과 ISO 11341: 2004 (JIS K 5600-7-7)에서 제시된 크세논아크램프를 사용한 시험기는 다른 광원보다도 UV와 가시영역의 태양 에너지를 잘 시뮬레이션하는 것으로 알려져 있다(Shin, 2006).

Ishikawa *et al.* (2014a)은 크세논아크램프를 사용한 ISO 11341: 2004 (JIS K 5600-7-7)에 준한 시험과 형광 UV 램프를 사용하는 EN 927-6의 촉진내후성시험을 시행하여 색상과 발색도의 변화를 비교 해석한 결과를 보고하였다(Ishikawa *et al.*, 2014a). 그 결과에서 2년간의 자연내후성시험에 상당하는 열화 수준으로서 크세논아크램프 사용에서는 2500시간(촉

진배율: 약 7배), 형광UV램프 사용에서는 약 2000시간(촉진배율 약 8.7배) 소요되어 사용램프차이에 의한 열화수준의 차이가 있음이 시사되었다. 색상변화와 광택도변화를 기준으로 크세논아크램프를 장착한 시험과 형광 UV 램프시험 결과를 자연내후성시험결과에 비교해보면 크세논아크램프를 장착한 시험보다는 형광 UV 램프를 사용한 시험결과가 자연내후성시험결과와 상관성이 큰 것으로 보고하였다(Ishikawa *et al.*, 2014b). 그러나 크세논아크램프가 태양광의 시뮬레이션이 가능한 필터를 이용하여 분광 복사량 분포를 조절할 수 있는 장점이 있어 자연광에서 시험해야 하는 재료를 시험할 때 가장 선호되는 광원으로 소개(한국의류시험연구원 자료, 2006)되고 있어, 전술한 Ishikawa *et al.* (2014b)의 목재에 대한 결과와 상이하여 목재 적용시험에서 조명도구 및 조건 등 촉진열화방법 선택에 검토가 필요한 것으로 고찰되었다. 또한 목재표면에 도장을 실시한 경우에는 수지나 안료에 따라 옥외내후성시험과 촉진내후성시험 후에 도막의 표면에 나타나는 화학적 변화가 다르게 나오는 보고(Yabe *et al.*, 2006)도 있고, 촉진내후성시험보다는 자연내후성시험을 중시하는 경우(Katakawa, 2015)도 있어 국내에서 목재표면의 기상열화 또는 표면도장의 효과 등을 시험하기 위해서는 국내 자연 환경에서의 자연내후성시험과 다양한 촉진내후성시험과의 비교해석이 필요한 것으로 고찰되었다. 특히 WPC, OSB나 집성재와 같이 기상에 노출될 가능성이 높은 목질재료의 경우에도 자연내후성시험과 촉진열화시험의 기상열화수준과 양상이 다르거나 촉진열화시험조건과 재료의 열화성이 다르다는 보고들(Kojima and Suzuki, 2011; Yanagigawa and Sonota, 2011a; Yanagigawa and Sonota, 2011b; Fugimura *et al.*, 1991)이 있어 국내 자연환경에 근접한 촉진시험방법의 모색이 더욱 강조되었다.

또한 Sekino *et al.* (2014)은 8년간의 옥외폭로시험에서 목질재료의 기상열화특성이 시험지역의 기상청 자료, 즉, Climate Index (CI), Aridity Index (AI)와 옥외폭로에서 얻어진 Deterioration Index (DI) 등이 Weathering Intensity (WI)와 깊은 상관성이 있다고 보고하였다. Sekino 등(2014)이 세계 각 도시의 WI

를 활용하여 도출한 목질재료의 기상열화에 소요되는 기간을 산출하였다. WI를 파티클보드, MDF, OSB, 합판 등의 다양한 목질재료에 적용한 결과에서 기상열화 수준과 WI과의 상관성이 매우 높다는 보고들(Watanabe *et al.*, 2015; Kojima *et al.*, 2012; Kojima *et al.*, 2011)이 뒷받침하고 있어 국내 WI적용을 통해 보다 간편하게 목재의 기상열화를 추정하는 연구의 필요성도 시사되었다.

4. 결 론

옥외용 목조시설물에 사용되는 부재 중, 주로 제재목과 같은 목재에 발생하는 기상열화, 특히 목재의 색상, 표면의 미세구조 및 화학적 변화 및 기상열화 시험방법 등에 대한 문헌 조사를 실시한 결론은 다음과 같다.

1. 목재의 기상열화는 기상열화조건, 수종, 조재와 만재 등에 따라 차이는 있으나 약 34~2540 μm 범위의 깊이로 얇은 표층에 한정되어 발생한다. 특히 목재의 기상열화는 밀도에 영향을 많이 받아서 수종, 조재와 만재, 판목정목 간 침식의 수준이 상이하다.
2. 기상열화된 목재표면의 미세구조 변화는 중간층 붕괴와 가도판의 길이방향으로 섬유간 분리 현상, 유연벽공에 다이아몬드형의 미세할열 발생 등이 대표적 특징이다.
3. 목재의 기상열화에 의한 화학적 변화는 FTIR과 같은 분석방법이 많이 사용되며, 주로 리그닌의 이중결합, 페놀기나 카보닐기, Quinomethides alc biphenylrI 등에 흡수된 빛에너지에 의해 발생한 자유라디칼이 산소와 반응하여 열화가 유도된다. 광분해로 인해 quinoides, aromatic chromophores 등과 같은 물질이 생성되면서 색상변화가 시작되고 올리고머형의 리그닌과 함께 기상열화 초기에는 노랑과 갈색, 그리고 나중에는 회색으로 변화하는 특성을 나타낸다.
4. 목재의 기상열화는 초기 수개월 내에 현저한 색상변화가 일어나고, 1~2년 사이에 목재표면의 거칠음이 급격하게 증가한다. 그 이후에는

색상과 표면성의 열화가 완만하게 진행함으로 표면보호처리는 목재부재 설치 직후에 시행하여야만 색상보존 및 표면보호 효과가 극대화될 수 있음이 시사되었다.

5. 목재의 기상열화 특성을 시험하는데 자연내후성시험방법과 축진인공내후성시험방법이 이용된다. 이 두 방법으로 도출된 기상열화 정도와 양상이 달라 특정지역에서의 정확한 기상열화 구명을 위해서는 두 가지 방법을 모두 채용하는 것이 필요하다. 따라서 국내 자연 환경에서의 목재의 기상열화특성을 조사하기 위해서는 지역별 자연내후성시험과 다양한 축진내후성시험과의 비교해석이 반드시 필요할 것으로 고찰되었다.
6. Climate Index (CI), Aridity Index (AI)를 활용한 Weathering Intensity (WI)와 목질재료의 기상열화 간에 유의적 상관성이 보고되어, 국내에서도 WI적용을 통해 보다 간편하게 목재의 기상열화를 추정하는 연구의 필요성도 시사되었다.

사 사

본 연구는 국민대학교 2014년도 교내연구비 지원에 의해 수행되었다.

REFERENCES

- Cademartori, G.P.H., Missio, A.L., Dufau M.B., Gatto, D.A. 2015. Natural weathering performance of three fast-growing Eucalypt woods. *Maderas. Ciencia y tecnologia* 17(4): 799-808.
- Cui, W.N., Kamdem, D.P., Rypstra, T. 2004. Diffuse reflectance infrared Fourier transform spectroscopy (DRIFT) and color changes of artificial weathered wood. *Wood & Fiber Science* 36(3): 291-301.
- Derbyshire, H., Miller, E.R. 1981. The photo-degradation of wood during solar irradiation. Part 1. Effects on the structural integrity of thin

- wood strips. *Holz als Roh-und Werkstoff* 39(8): 341-350.
- Ebe, K., Kataoka, Y., Kiguchi, M. 2011. Evaluation of weatherability of finished wood by surface roughness analysis. *MOKUZAI HOZON (Wood Protection)* 37(3): 122-129.
- Evans, P.D. 1989. Structural changes in *Pinus radiata* during weathering, *Journal of the Institute of wood science* 11(5): 172-181.
- Evans, P.D., Wingate-Hill, R., Barry, S.C. 2000. The effects of different kerfing and center-boring treatments on the checking of ACQ treated pine posts exposed to the weather. *Forest Products Journal* 50(2): 59-64.
- Evans, P.D. Wingate-Hill, R., Cunningham, R.B. 2009. Wax and Oil emulsion additives: How effective are they at improving the performance of preservative-treated wood. *Forest Products Journal* 59(1/2): 66-70.
- Evans, P.D. 2013. Weathering of wood and wood composites, In: Rowell, R. (2nd ed) *Handbook of wood chemistry and wood composites*, CRCjpress, Boca Raton pp. 151-216.
- Feist, W.C. 1982. Weathering of wood in structural uses. In: Meyer, R.W. and Kellogg, R.M. (Eds.), *Structural Use of Wood in Adverse Environments*. Van Nostrand Reinhold Co., New York.
- Feist, W.C. 1992. Natural weathering of wood and its control by water - repellent preservatives. *American Painting Contractor* 69(4): 18-25.
- Fujimura, T., inoue, M., Uemura, I. 1991. Weatherability of the composite wood with acrylic high polymer (II) Weatherability of the paint-coated composite wood. *MOKUZAI HOZON (Wood Protection)* 17(2): 59-66.
- Gierer J. and Lin S.Y. 1972. Photodegradation of lignin. A contribution to the mechanism of chromophore formation. *Svensk Papperstidn.* 75(7): 233-239.
- Hon, D.N.S., Feist, W.C. 1986. Weathering characteristics of hardwood surfaces. *Wood Science & Technology* 20(2): 169-183.
- https://www.fh-salzburg.ac.at/fileadmin/fh/forschung/holz-biogene-tech/documents/Publikationen/2008_Konferenz_Schnabel_StLuis.pdf
- Hyvarinen, M. 2014. Ultraviolet light protection and weathering properties of wood- Polypropylene composites, Thesis for the degree of Doctor of Science (Technology), Lappeenranta University of Technology.
- Ishikawa, A., Kataoka, Y., Kawamoto, S., Matsunaga, M., Kobayashi, M., Kiguchi, M. 2014a. Correlation between natural and accelerated weathering of coated wood. *MOKUZAI HOZON (Wood Protection)* 40(2): 55-63.
- Ishikawa, A., Kataoka, Y., Kawamoto, S., Matsunaga, M., Kobayashi, M., Kiguchi, M. 2014b. Correlation between natural and accelerated weathering of coated wood (II) *MOKUZAI HOZON (Wood Protection)* 40(5): 216-224.
- Jebrane Jebrane, M., Franke, T., Terziev, N. & Panov, D. 2016. Natural weathering of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood treated with epoxidized linseed oil and methyltriethoxysilane, *Wood Material Science & Engineering*, 1748-0280 (online).
- Kataoka, Y. 2008. Photodegradation of wood and depth profile analysis. *Journal of the Japan Wood Research Society (Japan)* 54(4): 165-173.
- Kataoka, Y., Kiguchi, M. 2009. Weatherability of water-borne wood preservative semi-transparent coatings (I) -Coating performance during 24 months of natural weathering-, *MOKUZAI HOZON (Wood Protection)* 35(5): 204-214.
- Katatani, M. 2015. Importance of full scale tests for developments of wood preservative coatings, *MOKUZAI HOZON (Wood Protection)* 41(5): 231-235.
- Kataoka, Y., Yamamoto, K., Kawamoto, S., Kobayashi,

- M., Kiguchi, M., 2011. Weatherability of water-borne wood preservative semi-transparent coatings (II) -Performance of coatings after re-finishing without removing old finish, MOKUZAI HOZON (Wood Protection) 37(2): 64-73.
- Kataoka, Y., Kiguchi, M., Evans, P.D. 2004. Photodegradation depth profile and penetration of light in Japanese cedar earlywood (*Cryptomeria japonica* D Don) exposed to artificial solar radiation. Surface Coatings International Part B: Coatings Transactions 87(3): 187-193.
- Kataoka, Y. 2008. Photodegradation of wood and depth profile analysis. Mokuzaï Gakkaishi 54(4): 165-173.
- Kiguchi, M. 1993. Weathering deterioration and protection, MOKUZAI HOZON (Wood Protection), MOKUZAI HOZON (Wood Protection) 19(6): 262-271.
- Kiguchi, M. 1994. Weathering deterioration and protection 2. protection technologies, MOKUZAI HOZON (Wood Protection) 20(2): 55-62.
- Kiguchi, M., Kataoka, Y., Doi, S., Mori, M., Hasegawa, M., Morita, S., Kinjo, M., Kadegaru, Y., Imamura, Y. 1996. Evaluation of weathering resistance of the commercial pigmented stains by outdoor exposure test in Japan, MOKUZAI HOZON (Wood Protection) 22(3): 150-158.
- Kiguchi, M. 1999. Overseas exterior wood and protection technologies against weathering, MOKUZAI HOZON (Wood Protection) 25(3): 98-111.
- Kim, J.J., Kim, G.H. 1993. Study of the Accelerated Weathering of Sitka spruce under Acidic Conditions, Journal of the Korean Wood Science and Technology 21(2): 9-14.
- Kim, J.S., Singh, A.P., Wi, S.G., Koch, G., Kim, Y.S. 2008. Ultrastructural characteristics of cell wall disintegration of *Pinus* spp. in the windows of an old Buddhist temple exposed to natural weathering, International bioterrorism & biodegradation 61(2): 194-198.
- Kim, Y.S., Lee, K.H., Kim, J.S. 2016. Weathering characteristics of bamboo (*Phyllostachys puber-scence*)exposed to outdoors for one year, Journal of Wood Science 62(4): 332-338.
- Kim, Y.S., Kim, G.H., Kim, Y.S. 2004. Wood preservation science, p160, Publishing department of Cheonnam National University.
- Kojima, Y., Suzuki, S. 2011a. Evaluating the durability of wood-based panels using internal bond strength results from accelerated aging treatments, Journal of wood science 57(1): 7-13.
- Kojima, Y., Shimoda, T., Suzuki, S. 2011b. Evaluation of the weathering intensity of wood-based panels under outdoor exposure, Journal of wood science 57(5): 408-414.
- Kojima, Y., Shimoda, T., Suzuki, S. 2012. Modified method for evaluating weathering intensity using outdoor exposure tests on wood-based panels, Journal of wood science 58(6): 525-531.
- Korai, H., Saotome, H. 2014. Effects of water soaking and outdoor exposure on nail joint properties of particleboard, Journal of wood science 60: 134-140.
- Korai, H., Saotome, H., Ohmi, M. 2014. Effects of water soaking and outdoor exposure on modulus of rupture and internal bond strength of particleboard, Journal of wood science 60: 127-133.
- Korai, H., Adachi, K., Saotome, H. 2013. Deterioration of wood-based board subjected to outdoor exposure in Tsukuba, Journal of wood science 59: 24-34.
- Korai, H., Hattori, K. 2013. Effects of surface coating on durability improvement of particleboard subjected to outdoor exposure, Mokuzaï Gakkaishi 59(6): 361-366.
- Korai, H., Sekino, N., Saotome, H. 2012. Effects of outdoor exposure angle on the deterioration of wood-based board properties, Forest Products Journal 62(3): 184-190.

- Korai, H. 2012. Durability of Medium Density Fiberboard Subjected to Outdoor Exposure, *Mokuzai Gakkaishi* 58(6): 347-356.
- Kose, G., Temiz, A., Demirel, S., Ozkan, O.E. 2014. Using commercial water repeoent chemicals on wood protection, IRG/WP 14-30656.
- Kringstad, K.P., Lin, S.Y. 1970. Mechanisms in the yellowing of high yield pulps by light: structure and reactivity of free radical intermediates in the photo-degradation of lignin. *Tappi* 53(12): 2296-2301.
- Lee, M.J., Lee, D.H., Kim, G.H. 2003. Effect of Accelerated Weathering on the Leaching of Copper from Preservative Treated Wood, *Journal of the Korean Wood Science and Technology* 31(4): 38-43.
- Kataoka, Y. 2008. Photodegradation of wood and depth profile analysis. *Journal of the Japan Wood Research Society (Japan)*.
- Kataoka, Y., Kiguchi, M. 2009. Weatherability of water-borne wood preservative semi-transparent coatings (I) -Coating performance during 24 months of natural weathering-, *MOKUZAI HOZON (Wood Protection)* 35(5): 204-214.
- Lionetto, F., Del Sole, R., Cannoletta, D., Vasapollo, G., Maffezzoli, A. 2012. Monitoring wood degradation during weathering by cellulose crystallinity, *Materials* 5(10): 1910-1922.
- Mokhtarruddina, S.H.S., Ahmadb, Z., Hassana, R., Ashaaric, Z. 2015. A conceptual review of weathering testing using malaysian tropical timber. *Jurnal Teknologi* 77(32): 125-131.
- Nobuta, S. 1995. Current utilization and challenges (2) -Utilization and challenges in Japan, *MOKUZAI HOZON (Wood Protection)* 21(1): 2-9.
- Nzokou, P., Kamdem, D.P. 2002. Weathering of two hardwood species : African padauk (*Pterocarpus soyauxii*) and red maple (*Acer rubrum*), *Journal of Tropical Forest Products* 8(2): 200-209.
- Nzokou, P., Kamdem, D.P. 2006. The influence of wood extractives ofn the photodiscoloraion of wood surfaces exposed to artificial weathering, *Color Research & Application* 31(4): 425-434.
- Ozgenç, O., Hiziroglu, S., Yildiz, U.C. 2012. Weathering properties of wood species treated with different coating applications, *Bioresources* 7(4): 4875-4888.
- Paaanen, L.M. 1994. Structural-changes in primed Scots pine and Norway spruce during weath-ering, *Materials & Structures* 27(168): 237-244.
- Pandey, K.K. 2005. A note on the influence of ex-tractives on the photo-discoloration and pho-to-degradation of wood, *Polymer Degradation & Stability* 87(2): 375-379.
- Park, B.S. Furuno, T., Uehara, T. 1996, Histochemical changes of wood surfaces irradiated with ultraviolet light, *Mokuzai Gakkaishi* 42(1): 1-9.
- Rowell, R. M. 2013. Handbook of wood chemistry and wood composites 2nd edition, p. 151-252.
- Schaller, C., Roges, D. 2007. New approaches in wood coating stabilization,. *Journal of Coatings Technology & research* 4(4): 401-409.
- Schmidt, J.A., Heitner, C. 1993. Light-induced yellowing of mechanical and ultra-high yield pulps. Part 2. radical-induced cleavage of etheri-fied guaiacylglycerol- β -arylether groups is the main degradative pathway. *Journal of Wood Chemistry & Technology* 13(3): 309-325.
- Schnabel, T., Zimmer, B., Petutschnigg, A.J. 2017. Color Changes In Wood While Weathering, <https://www.fh-salzburg.ac.at>
- Schweitzer, P.A. 1999. Atmospheric degradation and corrosion control (Vol.12), 195-204, CRCPress.
- Sekino, N., Sato, H., Adachi, K. 2014. Evaluation of particleboard deterioration under outdoor ex-posure using several different types of weath-ering intensity, *Journal of wood science* 60(2): 141-151.
- Sekino, N., Korai, H. 2013. 2nd evaluation project of

- durability for Wooden panel, Journal of the Japan Wood Research Society (Japan) 59(6): 361-366.
- Shin, E.H. 2006. Types and differences of artificial acceleration test apparatus, The Monthly technology & standards 55(4): 46-52.
- Sudiyani, Y., Tsujiyama, S.I., Imamura, Y., Takahashi, M., Minato, K., Kajita, H. 1999. Chemical characteristics of surfaces of hardwood and softwood deteriorated by weathering, Journal of wood science 45(4): 348-353.
- Sudiyani, Y., Horisawa, S., Keli, C., Doi, S., Imamura, Y. 2002. Change of surface properties of tropical wood species exposed to the Indonesian climate in relation to mold colonies, Journal of Wood Science 48(6): 542-547.
- The Korea wood newspaper, 2017. No. 530.
- Tshabalala, M.A., Jakes, J., Vanlandingham, M.R., Wang, S., Pelton, J. 2013. Surface characterization: In: Rowell, R. (2nd ed) Handbook of wood chemistry and wood composites, CRC press, Boca Raton, pp. 230.
- Turkoglu, T., Baysal, E., Toker, H. 2015. The effects of natural weathering on color stability of impregnated and varnished wood materials, *Advances in Materials Science and Engineering, Article ID 526570*, p. 9.
- Turkulun, H. 2004. SEM methods in surface research on wood. *High Performance Wood Coatings Exterior and Interior Performance, COSTA*, 18.
- Wang, X.Q., Ren, H.Q. 2009. Surface deterioration of moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*) induced by exposure to artificial sunlight, Journal of wood science 55(1): 47.
- Watanabe, K., Korai, H., Matsushita, Y., Hayashi, T. 2015. Predicting internal bond strength of particleboard under outdoor exposure based on climate data: comparison of multiple linear regression and artificial neural network, Journal of Wood Science 61(2): 151-158.
- Williams, R.S., Knaebe, M.T., Sotos, P.G., Feist, W.C. 2001. Erosion rates of wood during natural weathering. Part I. Effects of grain angle and surface texture, *Wood and fiber science* 33(1): 31-42.
- William, R.S. 2005. Weathering of Wood, In: Rowell, R. (2nd ed) Handbook of wood chemistry and wood composites, CRC press, Boca Raton, pp. 139-185.
- Yabe, M., Tagiri, S., Okamoto, K. 2006. Interpretation of mechanisms on the coating surface deterioration by Various weathering tests, *Paint Research* 146: 8-16.
- Yamamoto, K., Kataoka, Y., Furuyama, Y., Matsuura, T., Kiguchi, M. 2007. The effect of irradiation wavelength on the discoloration of wood, *Mokuzai Gakkaishi* 53(6): 320-326.
- Yanagawa, Y., Harata, M. 2017. Outdoor exposure test for Sugi glued -laminated timber manufactured using 7 adhesive resins I, Shear strength and wood failure ratio, *Mokuzai Gakkaishi* 63(1): 34-40.
- Yanagawa, Y., Masuda, K. 2011. Evaluation of Bonding Durability for Wood Preservative Treated Glulam by Accelerated Aging Test and Outdoor Exposure Test I. Bonding durability evaluated by outdoor exposure test and correlation to accelerated aging test, *Mokuzai Gakkaishi* 57(4): 211-222.
- Yanagawa, Y., Masuda, K. 2011b. Evaluation of Bonding Durability for Wood Preservative Treated Glulam by Accelerated Aging Test and Outdoor Exposure Test II. Bonding durability evaluated by outdoor exposure test and correlation to accelerated aging test, *Mokuzai Gakkaishi* 57(5): 265-275.