

촉진열화목재의 흡습성과 초음파전달속도*1

강 호 양*2 · 박 상 진*3 · 김 영 숙*4

Moisture Sorption and Ultrasonic Velocity of Artificially Weathered Sitka Spruce*1

Ho-Yang Kang*2 · Sang-jin Park*3 · Young-Sook Kim*4

요 약

시트카스프루스 $50 \times 133 \times 10 \text{ mm}^3$ 시편을 340 nm 제논광과 주기적 강우장치를 갖춘 장치 내에서 촉진열화 시켰다. 시편은 자외선만 조사하거나 자외선을 조사하면서 동시에 강우를 병행하였으며 처리시간도 10시간과 20시간으로 구분하였다. 촉진열화 처리재의 물리적 성질을 색도, 흡습성 그리고 초음파 전달속도를 측정하여 조사하였다. 자외선 조사시간이 길수록 표면 명도가 낮아졌다. 강우처리는 표면 명도의 감소를 촉진하였으며 흡습성을 증가시켰다. 자외선과 강우 병행 처리재 중에 10시간 처리재의 흡습성이 20시간 처리재보다 높았는데 이는 20시간 처리재의 표면이 과도하게 열화된 때문일 가능성이 있다. 촉진열화 처리재의 초음파 전달속도는 무처리재보다 높았는데 이는 촉진열화에 의해 목재의 탄성계수가 높아졌거나 밀도가 감소했다고 할 수 있다.

ABSTRACT

Small Sitka spruce specimens of $50 \times 133 \times 10 \text{ mm}^3$ were artificially weathered in a chamber equipped with 340 nm xenon arc and water spray as part of the accelerated-weathering cycle. Specimens were exposed to only ultraviolet or ultraviolet with water spray for 10 and 20 hours. Physical properties of the weathered specimens were investigated by colorimetry, sorption and ultrasonic testing methods. The longer exposed to ultraviolet the less bright were the specimens. It was revealed that the water spray treatment accelerated the loss of brightness and increased the wettability. Among the specimens exposed to ultraviolet with water

* 1 접수 2001년 9월 19일, 채택 2001년 12월 10일.

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호 1999-1-317-001-3)지원으로 수행되었음.

* 2 충남대학교 농과대학 College of Agriculture, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

* 3 경북대학교 농과대학 College of Agriculture, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

* 4 국민대학교 삼림과학대학 College of Forest Science, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

spray the specimens treated for 10 hours showed greater wettability than those for 20 hours, which might lose the wettability due to the excessive degradation on their surfaces. The ultrasonic velocities of the weathered specimens were obviously higher than those of the unweathered. It is considered that the accelerated weathering either increases the modulus of elasticity of wood or decrease the density of wood.

Keywords: cyclic sorption, weathering, ultraviolet, ultrasonic velocity, Sitka spruce

1. 서 론

우리나라는 많은 목재문화재를 가지고 있으나 보존 환경이 매우 열악한 편이다. 방대한 양과 오랜 역사로 세계적인 유래가 없는 해인사 고려대장경도 외기에 완전히 노출된 장소에 보관되어 있다. 우리나라는 사계절이 뚜렷하여 온·습도변화가 심하기 때문에 경판의 수축팽창이 반복된다. 게다가 자외선에 심하게 노출된다면 열화가 급격히 진행될 것이다. 목재의 촉진열화과정을 조사함으로써 목재 문화재의 열화를 예측하기 위하여 본 연구를 수행하였다.

시간 경과에 따라 목재의 물리적 성질이 변하는데 1300년된 편백의 압축강도, 휨강도, 경도는 새로운 목재에 비해 증가한 반면 충격강도와 할열강도는 감소하였다는 보고가 있다 (伏谷 등, 1985). 이러한 현상은 열처리목재의 변화와 유사하다. 열처리는 결정화와 열분해가 동시에 진행되는데 이 과정에서 목재 강도는 어느 정도까지 증가하다 그 후에 감소한다.

야외에 노출된 목재는 실내에 있는 목재에 비해 자외선과 비에 의해 더욱 심하게 열화한다. 자외선은 세포벽내 리그닌을 광화학작용으로 분해하므로써 셀룰로오스 사이에서 접착제 역할을 하고 있는 리그닌이 쉽게 물에 씻겨 나가도록 한다. 따라서 목재표면은 셀룰로오스만 남게 되어 흡습성이 증가한다(Kalnins and Feist, 1993).

Yata 등(1995)은 야외폭로한 편백 통나무 표면을 관찰하여 할열 진행과정을 조사하였다. 야외폭로 초기에 발생하는 작은 할열은 500 nm 이하 자외선과 비의 상호작용에 의해 생기는 것으로 수선조직에서 시작되는데 점차 표면세포의 collapse에 의해 벌어지는 것을 발견하였다. 6개월 후에 광분해지역은 깊이 0.2 mm까지 회색으로 변하며 그 후에는 더 발전하지

않았으며 회색부위 아래 0.5 mm 두께의 갈색부위는 회색과 구분되게 뚜렷이 나타났다고 보고하였다.

Hon과 Feist(1986)는 red oak, yellow poplar, sweetgum, white oak의 51×51×19 mm³시편을 야외폭로시험과 220과 254 nm 이상 파장의 UV조사 시험을 수행하였다. 두 방법 모두 변색과 명도손실이 일어났는데 white oak 와 sweetgum이 red oak 와 yellow poplar 보다 느리게 일어났다. 태양광 아래서는 30일만에, UV에서는 500시간만에 표면손상이 일어나 중간층 손실, 평복세포(procumbent cell)의 분리, 벽공손상이 횡단면에서 발견되었다고 발표하였다. 또 ESCA로 표면을 조사하여 야외폭로목재나 UV조사 목재의 표면에 산소 양이 많음을 발견하고 이는 표면이 많이 산화되었기 때문으로 설명하였다. IR spectroscopy 조사로 산화된 표면에는 리그닌 손실이 많고 carbonyl, carboxylic acid, quinone 등 새로운 chromophoric groups이 생겨났음을 밝혔다.

표면열화를 방지하기 위해 무수초산, methyl methacrylate (MMA) 처리 등을 하는데 Feist 등(1991)의 실험에 의하면 중량증가를 18% 무수초산 처리 포플라는 흡수속도와 팽윤율은 매우 감소하였으나 MMA처리재는 흡수속도만 약간 감소하였을 뿐 팽윤율은 감소하지 않았다. 한편 무수초산과 MMA 병행 처리재는 팽창속도와 팽창율이 감소하였으며 마모율도 85%나 줄었다고 보고하였다. 특히 무수초산처리된 리그닌 손실은 약간 줄이나 헤미셀룰로오스(xylans)의 손실을 많이 줄이는 것으로 밝혀졌다.

본 연구에서는 자외선 조사와 강우로 촉진열화시킨 시트카스프루스 시험편 표면을 색차계로 분석하고 습윤성과 초음파전달속도를 측정하여 무처리재와 비교하였다. 자외선 조사와 강우가 목재 열화에 미치는 효과를 조사하므로써 목재 문화재의 열화과정을 예측하고 보존대책을 강구하는데 본 연구의 목적이 있다.

2. 재료 및 방법

2.1 공시재료

공시수종은 유럽에서 수입한 폭 116 mm, 두께 10 mm, 길이 540 mm(섬유방향)의 시트카스프루스(*Picea sitchensis*) 정목판재를 사용하였다. 재면이 비교적 밝기 때문에 열화에 의한 색상변화를 뚜렷이 관찰 할 수 있을 것으로 생각되어 선택하였다. 공시판재는 열기건조한 것을 구입하여 실온에서 오래 방치하여 평형상태에 도달하도록 하였다.

2.2 습도의 주기적 변화에 의한 색상변화

해인사 고려대장경과 같이 실내에 보관된 목재문화재는 자외선과 강우에는 노출되어 있지 않으나 거의 대부분 온도와 습도 변화가 심한 환경에 놓여있다. 자외선과 강우를 제외하고 온도와 습도가 급격히 변하는 환경에서 목재의 색상변화를 측정하였다.

온도와 습도의 자동조절이 가능한 열기건조기 내에 폭 116 mm, 길이 200 mm 시험편을 매달고 상대습도 90%, EMC 19.0%인 고습도 조건(건구온도 35℃, 습구온도 33.5℃)과 상대습도 16%, EMC 3.65%인 저습도 조건(건구온도 35℃, 습구온도 18.0℃)을 4시간마다 교대로 변화시켰다. 30일이 지난 후에 시험편을 꺼내 색차계 HUNTER Lab JX777을 이용하여 시험편 당 세 지점의 백색도(L*), 적색도(a*), 황색도(b*)를 측정하여 평균하였다. 동일한 실험을 2회 반복하였다.

2.3 자외선과 강우의 촉진열화

폭 113 mm, 길이 500 mm 공시시험편에서 Fig. 1과 같이 폭(방사방향) 50 mm, 길이(섬유방향) 133 mm의 시험편을 6개씩 절취하였다. 시험편은 10시간과 20시간 처리, 강우와 비강우로 나누고 나머지는 비교시험을 위해 무처리재로 사용하였다(Fig. 1). 무처리재는 온도 25℃, 상대습도 50~60% 조건의 압

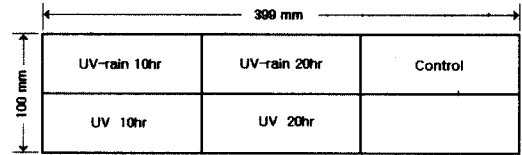


Fig. 1. Cutting spruce specimens for accelerated weathering experiments.

실에 보관 후 시험에 사용하였다. 각 처리당 5개 시험편을 사용하였다. 동일한 조건일 경우 10시간 처리재와 20시간 처리재 동시에 처리하였으며 처리시간만 달리하였다.

촉진열화장치는 ATLAS사 Ci3000+ Xenon Weather-Ometers를 사용하였다. 본 실험에 사용된 자외선램프는 4,500 watt, 파장 340 nm, 열량 0.34 watt/m²였다. 장치 내부 조건은 상대습도 50%, 내부온도 42℃, 시료온도 63℃였으며 강우는 2시간마다 18분 정도 실시하였다.

처리 후 모든 시험편을 암실에서 48시간 보관하였다. 암실에 있는 동안 처리재 색상이 안정되었으며, 강우 처리재의 표면이 어느 정도 건조되었다. 각 시험편 표면에서 3지점의 색상을 색차계로 조사하였다.

2.4 처리재의 흡습성

촉진열화 시험편의 흡습성 조사를 온도와 습도 조절이 가능한 humidity chamber에서 실시하였다. 시험편의 촉진열화 표면(길이 120 mm, 폭 50 mm)을 제외한 5단면에 알루미늄 테이프를 부착하여 흡습은 촉진열화 표면으로만 일어나도록 유도하였다. 흡습조건은 건구온도 40℃, 습구온도 38.4℃ (90% RH, 18.7%EMC), 방습조건은 건구온도 40℃, 습구온도 25.0℃ (29%RH, 5.5%EMC)를 사용하였다.

초기에는 흡습과 방습을 12시간 간격으로, 이후에는 24시간 간격으로 교대시키면서 매 교대 시마다 시험편의 무게를 정도 0.01 g 디지털저울로 측정하였다.

2.5 초음파 비파괴측정

처리재의 물성측정은 문화재에서의 재현성 등을 고

려하여 비파괴검사법 중 하나인 초음파검사법을 사용하였다. 위 2.4항의 흡습성 실험이 끝난 시험편에서 알루미늄 테이프를 벗겨낸 다음 응력을 제거하기 위해 24시간 동안 건구온도 40℃, 습구온도 40℃ 조건에서 컨디셔닝처리를 실시하였다.

콘크리트 비파괴검사에 많이 사용되는 CNC사의 PUNDIT로 섬유방향 초음파 전달시간을 측정하였다(강, 1999). 시험편의 섬유방향 길이를 측정한 다음, 식 (1)을 이용하여 초음파 전달속도를 계산하였다. 탐촉자는 송수신 모두 공진주파수 37 kHz를 사용하였으며 시험편과 탐촉자의 밀착을 위해 사용하는 couplant를 시험편의 물성변화를 염려하여 사용하지 않았다. Couplant를 사용하지 않으면 초음파 전달시간이 실제보다 약간 증가한다. 한편, 시험편의 초음파 전달속도는 다음과 같은 식으로 구하였다.

$$V = \frac{L}{t} \times 10^3 \quad (1)$$

V: 초음파전달속도 (m/s)

L: 시험편 길이 (mm)

t : 초음파 투과시간 (μ s)

3. 결과 및 고찰

3.1 습도의 주기적 변화에 의한 색상변화

각 시험재 표면에서 3점의 색상을 측정하여 평균한 값은 Fig. 2와 같다. 30일간 처리 후에도 처리재의 색상이 무처리재와 거의 비슷하였다. 따라서 목재가 습도 변화에만 노출되었을 때는 색상 변화가 거의 일어나지 않는다고 할 수 있다.

3.2 자외선과 강우의 촉진열화

촉진열화 처리전후 시험재의 단위면적, 단위시간 당 중량 증가를 측정하여 비교하였다(Table 1). 자외선과 강우 병행 10시간 처리재(이하 UV-rain 10)는 평균 13.18 g/m²hr, 20시간 처리재(이하 UV-rain 20)은 14.74 g/m² 증가하였다. 10시간 이전 보다 이

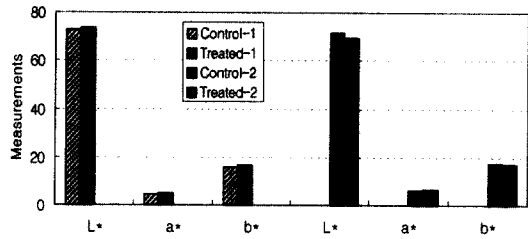


Fig. 2. L*, a*, b* values on the surfaces of Sitka spruce specimens stored in a cyclic environmental chamber for 30 days. The results of two runs look similar to each other.

후에 강우에 의한 중량증가가 더 컸다. 이는 처리시간이 증가할수록 건조되었던 시험재의 흡수성이 개선된 때문이다.

자외선만 조사한 처리재는 10시간(이하 UV 10)과 20시간(이하 UV 20)이 매우 다르게 나타났다. 10시간 처리재 중량은 평균 0.71 g/m²hr 증가하였으나 20시간 처리재는 평균 0.79 g/m²hr 감소하였다. 이 정도의 중량변화는 매우 적지만 오직 자외선에 의한 중량변화라는 점에서 의미가 있다. 10시간 처리재에서 2번 시험편을 제외하고 모두 중량이 증가하였다는 것은 처리재 함수율이 chamber내 평형함수율(약 8.6%)보다 낮았기 때문에 초기에 흡습이 일어났다고 볼 수 있다. 그러나 2번 시험편은 반대로 초기함수율이 높아 방습이 일어났다고 할 수 있다. 따라서 그 후 20시간까지 중량감소는 수분이동에 의한 것이 아닌 자외선 열화에 의한 것이라고 해석할 수 있다.

Table 3. Weight changes of Sitka spruce specimens during artificial weathering.

Specimen no.	Weight change (g/m ² hr)			
	UV 10	UV 20	UV-rain 10	UV-rain 20
1	0.77	-0.90	12.88	16.15
2	-1.03	-1.09	12.34	14.22
3	1.11	-0.73	13.02	10.43
4	1.52	-0.62	15.22	16.50
5	1.20	-0.59	12.46	16.46
Average	0.71	-0.79	13.18	14.75
Standard deviation	1.01	0.21	1.17	2.59

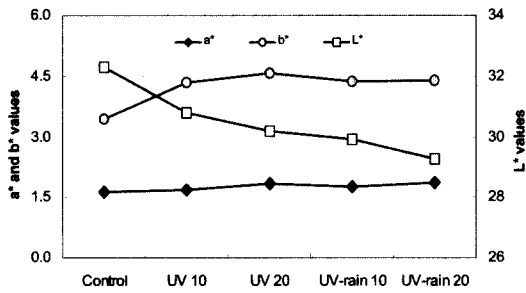


Fig. 3. L*, a*, b* values on the surfaces of artificially weathered Sitka spruce specimens.

명도(L*), 적색도(a*), 황색도(b*)를 Fig. 3에 비교하였다. 비록 연속적인 값은 아니지만 연관성을 분명히 하기 위해 같은 것끼리 선으로 연결하였다. 세 가지 값 모두 촉진열화처리재와 무처리재의 차이를 나타냈는데 그 차이는 명도가 가장 컸고 적색도가 가장 작았다. 촉진열화처리재에도 명도는 자외선 조사 시간과 강우여부에 따라 분명한 차이를 보였다. 자외선 조사시간이 길수록, 자외선만 조사하는 것보다 강우를 병행할수록 명도가 더 많이 낮아졌다.

한편 황색도는 자외선만 조사하였을 때와 자외선과 강우를 병행하였을 때 모두 20시간이 10시간보다 높았다(Fig. 3). 그러나 그 차이는 미미하여 통계적 유의성이 없으나 무처리재의 낮은 황색도를 감안한다면 강우여부보다 자외선 조사시간이 황색도 증가에 더 큰 역할을 한다고 볼 수 있다.

촉진열화처리재의 적색도도 황색도와 같은 경향을 나타내고 있다. 비록 차이가 미미하여 통계적 유의성은 없으나 20시간 처리재가 10시간 처리재보다 높은 값을 나타냈다(Fig. 3). 그러나 황색도와는 달리 무처리재와 촉진열화처리재 중 가장 낮은 값을 가진 자외선만 10시간 조사한 처리재는 거의 같은 값을 나타냈다.

3.3 촉진열화목재의 흡습성

흡습 5회와 방습4회를 교대로 반복하면서 측정한 촉진열화처리재의 중량변화를 Table 2에 나타냈다. 비교의 편의를 위해 흡습과 방습의 결과를 분리하여

표기하였다.

먼저 평균치를 비교하면 흡습시 UV-rain 10, UV-rain 20, UV 10, 무처리, UV 20 처리재 순으로 중량이 증가하였으며, 방습시 UV-rain 10, UV-rain 20, 무처리, UV 10, UV 20 처리재 순으로 중량이 감소하였다. 이들 평균간 통계적 유의성 검정을 위해 5% 유의수준에서 대응이 있는 두 표본평균간 비교법(조 등, 1994)을 사용하였다. 그 결과는 Table 2의 평균값 우측에 영문문자로 표기하였다.

흡습시 무처리재, UV 처리재들 간에 유의성이 없었으나 이들과 UV-rain 처리재 간에는 분명한 차이를 나타냈다. 또한 UV-rain 처리재들 간에도 분명한 차이가 있었는데 10시간 처리재가 20시간 처리재보다 높은 흡습성을 나타냈다.

방습시 UV 처리재들 간에 유의성이 없었으며 이들과 무처리재는 유의성을 나타냈다. 한편 무처리재와 UV-rain 20 처리재가 유의성이 없는 반면 UV-rain 10 처리재는 다른 처리재와 분명한 유의성을 나타냈다.

위 결과를 종합할 때 UV-rain 처리재가 흡습성과 방습성 모두 좋았으며 그 중 10시간 처리재가 20시간 처리재보다 더 높은 중량변화를 보였다. 이러한 경향은 평균뿐만 아니라 흡습과 방습의 매 단계에서 동일했다. 흡습성이 높다는 것은 표면이 활성화되었다는 것을 의미하므로 10시간 처리재가 20시간 처리재보다 표면이 더 활성화되었다고 말할 수 있다. 이러한 결과에 대해 본 연구에서 심도있는 분석이 이루어지는 않았으나 열화목재 세포벽에 미세할열이 생겨 도료의 침투를 도와주므로 도장이 잘 된다는 연구결과(Thay and Evans, 1998)로 설명할 수 있다. 적당히 열화된 춘재에서 도장 효과가 분명히 좋았으며 과도하게 열화된 춘재에서는 효과가 분명치 않았다는 연구결과로 미뤄볼 때 20시간 처리재에는 과도한 열화가 일어났을 것으로 미루어 짐작할 수 있다.

3.4 촉진열화처리재의 초음파전달속도

무처리재와 처리재 간의 초음파 전달속도는 분명한 차이가 있으나 처리재들 간에는 큰 차이를 나타내지 않았다(Fig. 4). 촉진열화처리가 초음파 전달속도를

Table 4. Weight changes of artificially weathered Sitka spruce specimens being alternatively adsorbed and desorbed in a cyclic environmental chamber

	Steps	Sorption time (hr)	Weight change (g/m ² hr)				
			Control	UV 10	UV 20	UV-rain 10	UV-rain 20
Adsorption	Ads-1	12	11.71	11.91	11.97	12.78	12.53
	Ads-2	36	11.47	11.98	11.72	12.92	12.56
	Ads-3	84	8.31	8.30	8.07	9.01	8.67
	Ads-4	132	6.73	6.56	6.46	7.01	6.79
	Ads-5	180	7.81	7.47	7.36	8.13	7.88
	Average		9.21(a)*	9.24(a)	9.12(a)	9.97(c)	9.68(b)
Desorption	Des-1	24	-7.99	-7.53	-7.56	-8.51	-8.17
	Des-2	60	-5.72	-5.59	-5.46	-6.23	-6.14
	Des-3	108	-7.48	-7.10	-6.90	-7.83	-7.60
	Des-4	156	-6.50	-6.13	-6.01	-6.79	-6.54
	Average		-6.92(b)	-6.59(a)	-6.48(a)	-7.34(c)	-7.11(b)

* Statistical analysis at 5% significance level

향상시키는 이유는 다음과 같이 설명할 수 있다. 목재 표면에 UV를 조사하면 리그닌과 일부 당이 열화되어 떨어져 나감으로써 섬유방향의 셀룰로오스 양이 상대적으로 많아지므로 섬유방향 초음파 전달이 빨라진다. 본 실험과 같이 탐촉자 크기에 비해 목재 단면이 작을 때는 초음파가 표면을 타고 전파되므로 표면 열화효과가 더 커진다.

초음파 전달속도(V)와 탄성계수(C), 밀도(ρ)의 관계는 식 (2)와 같다(Bucur, 1995).

$$V = \sqrt{\frac{C}{\rho}} \quad (2)$$

따라서 본 실험에서 실시한 촉진열화처리에 의해 초음파 전달속도가 증가하였다는 것은 탄성계수가 증가하거나, 혹은 감소하였더라도 밀도보다 덜 감소하였다는 것을 의미한다. 목재의 탄성력을 포함한 강도는 열화가 진행됨에 따라 어느 정도 증가하다가 감소한다고 알려져 있다(Bucur, 1995).

4. 결론

자외선램프 용량 4,500 watt, 파장 340 nm, 열량

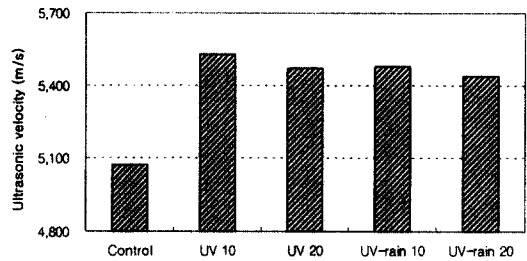


Fig. 4. Ultrasonic sound velocities of artificially weathered Sitka spruce specimens.

0.34 watt/m²의 ATLAS사 Ci3000+ Xenon Weather-Ometers를 사용하여 촉진열화시킨 시트 카스프루스 표면을 색차계로 분석하고 습윤성과 초음파전달속도를 측정하여 무처리와 비교한 결과는 다음과 같다.

1) 건구온도 35°C에서 자외선조사 없이 주기적 습도 변화만 겪은 목재표면 색상은 거의 변화가 없었다.

2) 촉진열화처리 동안 UV-rain 10 처리재는 평균 11.90 g/m²hr, UV-rain 20 처리재는 13.31 g/m²hr 증가하였다. 이는 10시간 이전보다 이후에 표면의 흡수성이 증가하였다는 것을 의미한다.

3) 목재표면의 명도(L*)는 자외선 조사시간이 길

수록, 자외선만 조사하는 것보다 강수를 병행할수록 더 많이 낮아졌다.

4) 목재표면의 적색도(a^*)는 조사시간과 강우시간이 증가할수록 증가하나 그 증가정도는 매우 적었다.

5) 목재표면의 황색도(b^*)는 처리재간 차이는 매우 적으나 무처리재보다 매우 증가하였다. 강우와 비강우 시험재간 차이는 거의 없으나 자외선 조사시간이 길수록 황색도가 증가하였다.

6) 흡습성은 UV-rain 처리재가 무처리재와 UV 처리재보다 높았으며 무처리재와 UV 처리재는 별 차이가 없었다. UV-rain 10 처리재가 UV-rain 20 처리재보다 흡습성과 방습성 모두 높았다.

7) 처리재의 초음파 전달속도는 무처리재보다 분명히 높았으나 처리재들 간에는 큰 차이를 나타내지 않았다.

참 고 문 헌

1. Bucur, Voichita. 1995. Acoustics of Wood. CRS Presss, New York.
2. Feist, William C., R. M Rowell and W. D. Ellis. 1991. Moisture sorption and accelerated weathering of acetylated and methacrylated aspen. Wood and Fiber Science 23(1): 128~136.
3. Kalnins, M. A. and W. C. Feist. 1993. Increase in wettability of wood with weathering. Forest Products Journal 43(2): 55~57.
4. Yata, Shigeki and Takeshi Tamura. 1995. Histological changes of softwood surfaces during outdoor weathering. Mokuzai Gakkaishi 41(11): 1035~1042.
5. Hon, D. N.-S. and W. C. Feist. 1986. Weathering characteristics of hardwood surfaces. Wood Science and Technology 20: 169-183.
6. Thay, Phan D. and Philip D. Evans. 1998. The adhesion of an acrylic primer to weathered radiata pine surfaces. Wood and Fiber Science 30: 198~204.
7. 강호양. 1999. 목재 초음파 전달속도에 대한 온도의 영향. 목재공학 27(1): 50~55.
8. 伏谷 등. 1985. 木材の物理. 文永堂出版, 東京, Japan.
9. 조재성 등. 1994. 실험실통계학 117p. 선진문화사. 서울.