

촉진 열화 목재의 초음파 전달 시간 측정을 통한 탄성 계수의 평가¹

박 천 영² · 김 광 철^{2,†}

Evaluation of Modulus of Elasticity of Wood Exposed to Accelerated Weathering Test by Measuring Ultrasonic Transmission Time¹

Chun-Young Park² · Gwang-Chul Kim^{2,†}

요 약

본 연구에서는 전통 목조 건축물의 주재료인 목재를 인공 촉진 열화 시킨 후 초음파 전달 속도 측정을 통하여 탄성 계수를 측정하였다. 촉진 열화 시간은 0시간에서 500, 1000, 1500, 2000시간이며, 자외선 조사와 주기적인 인공 강우를 통해 열화를 진행시켰다. 초음파 전달 속도 측정을 통하여 동적 탄성 계수를 평가하고 이를 3점 휨 시험을 통하여 측정한 정적 탄성계수와 비교분석하였다. 초음파 전달 속도, 정적 탄성계수, 동적 탄성계수는 열화 시간이 증가함에 따라 동일한 경향을 나타내었는데, 열화 1000시간까지는 탄성계수가 감소하다가 1500시간 이후 다시 회복되는 경향을 보였다. 이러한 결과는 비파괴 검사법을 통하여 전통 목조 건축물의 구조 부재의 열화 평가는 물론 구조 안전성 평가의 기초 자료로 활용될 수 있음을 알려준다.

ABSTRACT

In this study, accelerated weathering test was performed with wood, a major material for wooden cultural building. In order to evaluate the deterioration of wood, ultrasonic transmission times were measured to evaluate dynamic modulus of elasticity (MOE), which was verified by determining static MOE using three-point bending test. Ultrasonic transmission time was decreased with an increase in the weathering time levels (0, 500, 1000 hours) while it increased in 1500 and 2000 hours. Distribution of dynamic and static MOE was similar to that of the ultrasonic transmission time measurements. The results mean that the measurement of ultrasonic transmission time was very effective to evaluate MOE of wooden cultural buildings for their preservation and management. This method could be utilized to assess wooden cultural buildings as a way of preserving them in a scientific manner.

Keywords : Accelerated weathering test, Ultrasonic transmission time, Dynamic modulus of elasticity, static modulus of elasticity

¹ Date Received August 12, 2013, Date Accepted February 27, 2014

² 전북대학교 주거환경학과 Department of Housing Environmental design, Chonbuk National University, Jeonju, 561-756, Korea

[†] 교신저자(Corresponding author): 김광철(e-mail: gckim@jbnu.ac.kr)

1. 서 론

목재는 외부 온습도 조건 변화에 의한 함수율 증가나 자외선 노출에 의해 내 외부 열화가 발생할 수 있다. 목재의 열화 특히 구조재로 사용되는 목재의 열화는 재료의 밀도 감소나 조직 손상, 단면 손실 등을 초래하여 구조 성능을 떨어뜨리며, 이는 구조적 문제를 야기 시킬 수 있다. 특히 고건축물의 경우 부재의 위치와 해당 지역의 기후 등에 따라 적절한 유지 관리가 이루어지지 않을 경우 보수 시기가 빨라지고, 안정성에 문제를 일으켜 문화재로서의 가치를 훼손할 수 있다. 유구한 역사를 고스란히 간직한 목조 문화재를 잘 관리하여 후세에 이어주는 것이 우리의 사명임을 생각할 때 목재 부재를 적절한 방법으로 관리하는 것은 매우 중요한 과제이다.

목재는 콘크리트나 철근 등의 다른 재료와 다르게 비균질 재료이며 이방성을 갖는다. 다공성의 섬유로 구성되어 있으며, 다양한 구성 성분을 가지고 있다. 자연에서 성장하는 나무를 가공하여 생산된 재료로 주변의 온습도 변화나 생물 등에 의해 자연 열화가 발생할 수 있다. 자연 열화는 주로 햇빛에 의한 자외선과 외기의 습기나 우천에 의한 함수율에 기인하여 발생한다. 고건축물의 목재 부재 특히 외부에 노출되어 있는 기둥이나 보, 서까래 등은 설치 위치에 따라 이러한 원인들에 쉽게 노출되어 있다. 목재 부재를 주관적이고 감성적인 관리가 아닌 과학적이고 객관적으로 평가하고 관리하기 위해서는 자외선과 온습도가 목재에 미치는 영향을 정확히 평가해야 한다. 그러나 이를 위해서는 시간적, 공간적 제약은 물론 방법적 어려움이 존재한다. 다른 구조 재료 즉, 철근 콘크리트나 마루판 등의 경우 이러한 평가를 위하여 축진 열화 시험이 많이 시행되어 왔으나 목재에서는 거의 이루어지지 않았다. 특히 축진 열화 시간이 목재의 구조적 성능에 미치는 영향을 평가하는 연구는 전무한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 목재 부재를 축진 열화 시험을 진행하여 실제 온습도 및 기후 조건에서 건축물에서 진행할 수 없는 열화 시험을 진행하였으며, 열화에 의한 재료의 구조적 손상을 평가하기 위해 초음파 전달 속도를 측정하고 이를 통해

동적 탄성 계수를 평가하고, 실제 힘 실험을 통하여 산출한 정적 탄성 계수와 비교 분석을 진행하여 축진 열화 시간에 따른 목재의 구조적 성능 변화를 검증하고자 하였다.

초음파는 재료의 손상 없이 매질을 통과하는 속도와 파형, 에너지 등을 분석하여 재료의 특성을 조사할 수 있는 수단이다. 목재의 경우 제재목이나 원목의 등급 구분을 위한 강성의 평가, 판재 등의 품등 구분 그리고 최근에는 목재 내부의 열화를 평가하는 기법으로 많은 연구와 노력이 진행되고 있다. 그러나 기존 연구는 실제 고건축물에 사용된 부재가 이미 열화된 상태에서 이를 평가하는데 초점이 맞추어져 있다. 본 연구에서는 축진 열화 단계에 따른 목재에 대하여 비파괴적인 방법인 초음파 전달 속도 측정을 통하여 강성을 평가하였다.

강 등은 Weather-Ometers를 사용하여 축진 열화 실험을 진행하여 10시간과 20시간을 열화 데이터를 분석하였다(Kang *et al.* 2002). 상대적으로 축진 열화 시간이 짧게 진행하였으나 연구를 통해 색차 변화와 함께 자외선에 의한 리그닌과 일부 당이 열화되어 섬유방향의 셀룰로오스 양이 상대적으로 많아져 열화 시간이 길어지면 초음파 전달 속도가 빨라진다고 하였다. 보통 목재의 역학적 성질은 열화가 진행됨에 따라 어느 정도 증가하다가 감소하는 것으로 알려져 있는데 초기 열화에 의한 영향으로 평가되지만 열화 시간에 한계가 있다. 심 등은 전통 건축물에 주로 사용되는 300년 이상 된 소나무 고목재에 대하여 다양한 물리, 화학적 특성을 분석하여 초음파 전달 속도로 평가한 동적 탄성계수의 경우 정적 탄성계수에 비해 20% 정도 크게 나오며, 건전재에 비하여 탄성계수가 40% 정도 작고, 동적 탄성계수와 정적 탄성계수가 R^2 이 0.85로 매우 높은 상관관계를 가짐을 보고하였다(Shim *et al.* 2006). 이러한 연구 결과는 소나무, 낙엽송, 잣나무 등 국산 침엽수재에서 역시 높은 상관 관계를 갖지만, 정적 탄성 계수의 경우 수종에 따라 동적 탄성 계수보다 높게 나오는 경우도 있다(Shim *et al.* 2006). 초음파 전달 속도는 섬유포 화점 이상에서는 거의 함수율의 영향을 받지 않지만, 이하에서는 함수율이 감소할수록 초음파 전달 속도

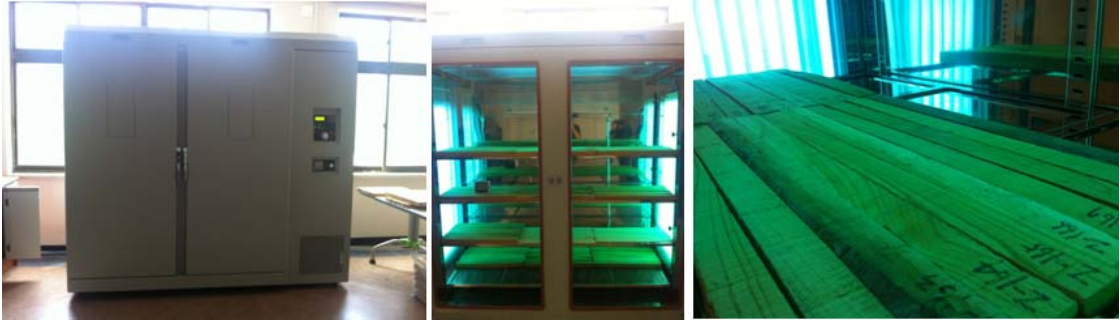


Fig. 1. Accelerated weathering tester for wood.



Fig. 2. KCT 2000(55KHz).

가 느려지는 경향이 있으며, 이는 결합수에 의한 초음파 전달 과정에서의 에너지 손실에 따른 속도 지연에 기인함으로 관련 연구에 있어 함수율에 대한 면밀한 검토가 필요하다(Jang 2000).

본 연구에서 수행하고자 하는 목재의 촉진 열화 시간에 따른 탄성 계수의 평가는 목조 문화재의 주요 부재인 목재에 대하여 대기 노출 조건 하에서 열화가 발생할 경우 이를 열화 시간에 따라 객관적, 과학적으로 분석하고 구조물의 안정성에 미치는 영향을 평가하는 기초 데이터로 활용하여 문화재의 적절한 유지 관리에 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

2. 재료 및 방법

2.1. 재료

본 연구에서 사용한 목재의 수종은 목조 문화재의 건축부재로 주로 사용되는 수종 중에 하나인 느티나무(Zelkova Serrata Makino)이며, 치수는 30 mm ×

30 mm × 500 mm이다. 촉진 열화 시험을 위해 각 열화 단계별(0시간, 500시간, 1000시간, 1500시간, 2000시간)로 40개 총 200개의 시편을 사용하였다.

2.2. 실험 방법

2.2.1. 촉진 열화 시험

목재에서 촉진 열화 시험은 일반적으로 판재의 표면 색도 변화 중심으로 평가가 이루어진다. 그러나 본 실험에서는 구조적 성능을 평가하기 위하여 별도의 촉진열화시험 장치를 구성하여 사용하였다(Fig. 1). 기존의 문헌 자료를 기초로 일반적인 Xenon weather-O-meter 방식(Model : Model LCE-6101T, Labtech)을 기본 모델로 하여 동일한 조건을 조절할 수 있도록 구축하였다. 자외선 램프로는 BL lamp (Black Light lamp 조사량 : 340 nm파장에서 0.35 w/m²)를 사용하였고, 챔버 내 온도 42°C, 상대 습도 70%로 유지하도록 하였다. 120분간 자외선 조사(Light segment)와 18분간 인공 강우(증류수 사용, Spray segment)를 1 cycle로 하는 촉진 열화 시험을 실시하였다. 열화 시간은 정 등(2002)의 연구 결과를 바탕으로 하여 0, 500, 1000, 1500, 2000시간으로 설정하였다(Son *et al.* 2008; Feist and Mraz 1978; Kalnins and Feist 1993; Lee *et al.* 2003; Jung *et al.* 2002).

2.2.2 초음파 전달 속도 측정

목재의 초음파 전달 속도의 측정은 중심 주파수 80 KHz의 센서를 사용하는 KCT 2000 장비를 사용하여

Table 1. Ultrasonic transmission velocity

Weathering times (Hours)	0	500	1,000	1,500	2,000
Transmission velocity (m/s)	3,880	3,346	2,972	3,080	3,893
Standard Deviation (m/s)	569	631	860	730	602
Rate	1.00	0.86	0.77	0.79	1.00

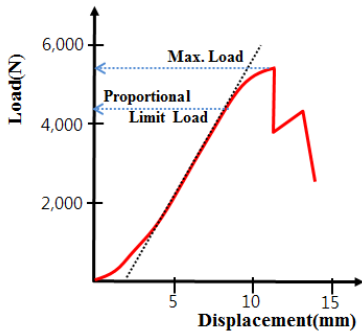


Fig. 3. 3-point bending test and load-displacement curve.

재료의 횡단면에 동일 압력으로 센서를 부착(동일한 탄성계수를 갖는 스프링을 부착하여 조절함)하여 길이 방향의 초음파를 송수신하였으며, 3회 측정하여 평균 값을 해당 시편의 대푯값으로 사용하였다. 축진열화시험을 마친 모든 시편에 대하여 20°C, 65%의 항온 항습실에서 48시간 조습과정을 거친 후 길이 방향 500 mm에 대하여 초음파 전달 속도를 측정하여 일정한 함수율을 유지하도록 하였다(Park and Hong 2008).

2.2.3. 동적 탄성 계수의 평가

각 시편에서 측정된 초음파 전달 시간은 아래 식(식-1)에 따라 초음파 전달 속도로 계산하였다.

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

(V: 초음파 전달 속도(m/sec), L: 시편편 길이 (mm), t: 초음파 투과 시간(μs))

초음파 전달 속도를 통해 동적 탄성 계수를 평가하기 위하여, Bucur(1995)에 의해 제안된 아래 식(식-2)을 적용하여 평가하였다.

$$V = \sqrt{\frac{E_d G}{d}} \dots\dots\dots (식 - 2)$$

(V: 초음파 전달 속도(m/sec), E_d : 동적 탄성 계수 (kg/cm²), d: 밀도(kg/m³), G: 중력가속도(kg/sec²))

2.2.3. 정적 휨 하중 시험

초음파 전달 속도로 평가된 동적 탄성계수를 검증하고 비교 분석하기 위하여 정적 휨 하중 시험을 수행하여 정적 탄성계수를 산출하였다. 지간 거리는 300 mm, 하중 속도 1.5 mm/min로 KS F 2,208에 따라 진행하였다. 실험 기기는 만능강도시험기(Zwick, 10 ton)를 사용하였다. 시편은 각 그룹(0시간, 500 시간, 1,000시간, 1,500시간, 2,000시간)에서 10개를 무작위 추출하여 진행하였으며, 실험 종료 후 함수율 시편은 2곳에서 채취하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 초음파 전달 속도 측정

목재의 동적 탄성 계수를 측정하기 위하여 시편의 길이 방향으로 초음파 전달 속도를 측정하였으며, 그 결과는 Table 1에 나타내었다.

Table 2. Comparison of static and dynamic MOE

Weathering Times (Hours)		0	500	1,000	1,500	2,000
MOE _d ^{*1} (kg/cm ²)	Average	81,264	67,744	54,381	56,957	92,817
	Standard Deviation	16,812	26,360	23,383	22,593	20,983
	Rate	1.00	0.83	0.67	0.70	1.14
MOE _s ^{*2} (kg/cm ²)	Average	54,402	43,895	38,376	44,354	X
	Standard Deviation	11,317	6,074	8,062	7,416	X
	rate	1.00	0.81	0.71	0.82	X
	Rate	0.67	0.65	0.71	0.78	X

* 1) Dynamic MOE, * 2) Static MOE

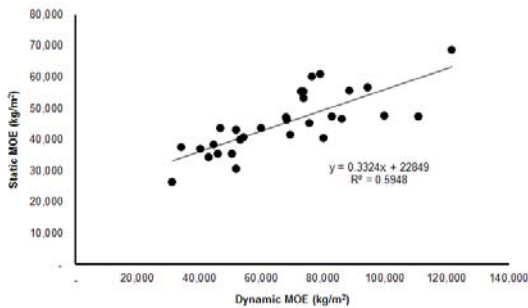


Fig. 4. Correlation between dynamic and static MOE.

Table 1에서 열화 0시간의 무처리 시편에 대한 비율을 보면 촉진 열화 시간이 1,000시간까지는 초음파 전달 속도가 느려지다가 그 이후에는 처음 상태로 회복되는 것을 알 수 있다. 이전 연구 결과의 기상 열화 초기에 초음파 전달 속도가 빨라지는 것을 확인할 수 없었으나, 일정 기간까지는 주기적인 인공 강우로 내부 함수율이 높아져 목재 조직이 연화된 것에 기인한 것으로 판단되며, 초음파 전달 속도가 빨라지는 원인에 대한 규명은 추가적인 연구가 진행되어야 할 것이다.

3.2. 탄성 계수의 평가

초음파 전달 속도를 기초로 동적 탄성 계수 (Dynamic MOE)를 평가하였으며, 정적 휨 하중 실험

을 통해 정적 탄성 계수(Static MOE)를 측정하였다. 각각의 평가 결과는 Table 2에 나타내었다.

열화 시간이 2,000시간의 경우 실험 과정의 오류 (측정 데이터의 컴퓨터 미저장으로 인한 데이터 손실)로 데이터를 습득하지 못하였다. 측정 결과를 보면 정적 탄성 계수의 경우 초음파 전달 속도와 동적 탄성 계수와 마찬가지로 1,000시간까지는 값이 낮아 지다가 다시 1,500시간부터 회복되는 것을 알 수 있다. 또한, 동적 탄성 계수를 기준으로 보았을 때 정적 탄성 계수가 약 65~78% 정도의 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 약간의 편차가 있으나 거의 일정한 비율로 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이를 바탕으로 탄성 계수 사이의 회귀 분석을 하면 Fig. 4와 같다.

그림에서 보듯 R² 값이 0.6 정도의 높은 상관관계를 나타내었다. 그러나 일반적인 소시편 실험에서의 상관 계수보다는 낮은 수치이다. 이는 열화 시편이 인공 강우에 노출되어 48시간 조습과정을 거쳐 12% 전후의 일정한 함수율을 갖도록 하였으나 개체 간 1% 전후의 차이가 있었고, 열화 시편의 색도를 측정 한 결과 열화 위치가 시편 위치에 따라 다르게 분포 하는 것 등에 기인한 것으로 판단된다.

Fig. 5는 초음파 전달 속도, 동적 탄성 계수, 정적 탄성 계수를 나타낸 것이다. 그래프를 보면 모든 항목이 동일한 경향을 나타내는 것을 알 수 있다. 이는 목재의 열화 정도는 비파괴 검사법인 초음파 전달 속도 측정을 통해 평가하고, 이를 통해 동적 탄성 계

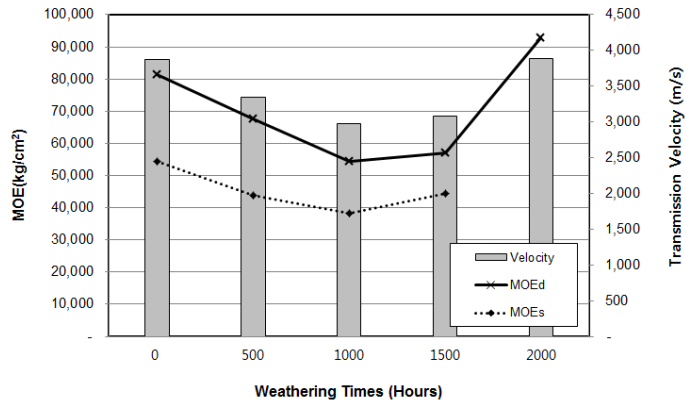


Fig. 5. Correlation between MOE and transmission velocity of ultrasonic wave.

수는 물론 정적 탄성계수의 측정이 가능함을 나타낸다. 다만, 1,500시간 이후 다시 초음파 전달 속도가 증가하는 것에 대한 해부학적인 고찰과 원인 규명을 위한 추가 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다. 또한 축진 열화 시간과 실제 열화 시간과의 상관관계에 대한 연구가 함께 진행되면, 보다 효율적이고 과학적인 건축물의 목재 구조 부재의 구조적 안정성 평가가 비파괴적인 방법으로 평가되고, 열화 단계별 유지 관리가 가능할 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 목재를 인공적으로 축진 열화시키고, 열화 정도를 초음파 전달 속도로 평가하였으며, 초음파 전달 속도를 통해 구조적 성능을 평가할 수 있는지를 탄성 계수 측정을 통해 분석하였다. 특히 목조 문화재의 경우 잘 보존하기 위해서는 현재 상태를 제대로 평가할 수 있어야 하지만 목재의 열화는 육안으로 판단하기에는 한계가 있다. 본 실험을 통해 얻어진 결과는 두 가지 결론으로 요약할 수 있다. 먼저 초음파 전달 속도의 측정을 통해 축진 열화된 목재의 탄성 계수를 예측하고 검증함으로써 비파괴 검사 기법으로 활용하여 부재 손상 없이 구조재 또는 구조물의 안정성 평가가 가능하다는 것을 확인한 것이다. 과거 축진 열화 실험은 얇은 판에 대해 국한되어 색도 평가 이외에는 열화 평가가 거의 이

루어지지 않았고, 구조적인 부분에는 한계가 있었다. 본 연구를 통해 일반적인 축진 열화 실험을 통한 평가법을 구조적 관점으로 확대한 것에 그 의의가 있다. 또한 목재의 열화를 평가하기 위한 인공 열화는 많은 시간과 비용이 소요되지만 모의된 축진 열화 시험을 통해 재현성 있게 가능하다는 것이다. 문화재로써의 목재는 더 이상 경험적, 주관적 판단에 의해 보존하기에는 문제가 있으며 과학적 접근이 필요하다. 본 연구는 문화재의 보존 과학 측면에서 기초 연구를 수행한 것이다. 축진 열화 시험과 실제 목재 열화 기간과의 상관 관계, 열화 진행에 따른 다양한 손상도 평가법과 열화가 구조물의 안정성에 미치는 영향을 평가할, 수중에 따른 축진 열화 경향과 구조 성능 등 추가적인 연구가 뒷받침되면 목조 문화재의 객관적이고 과학적인 유지 관리가 가능할 것이다.

사 사

“이 논문은 2012년도 전북대학교 교비 연구 교원 연구비 지원에 의하여 연구되었음”

“이 연구는 2012년도 문화재청 국립문화재연구소 문화유산 융복합연구(R&D)의 일환인 ‘목조 문화재의 개방과 관람객 출입에 따른 보존 영향 평가’ 연구 사업의 지원을 받아 이루어졌으며, 행정적 및 재정적 지원에 깊이 감사한다.”

REFERENCES

- Feist, W.C., Mraz, E.A. 1978. Comparison of outdoor and accelerated weathering of unprotected softwoods. *Forest Products Journal* 28(3): 38~43.
- Jang, S.S. 2000. Effects of moisture content and slope of grain on ultrasonic transmission speed of wood. *Mokchae Konghak* 28(2) : 10~18.
- Jung, H., Ahn, B.-M., Lee, D.-M., Shin, P.-S., Park, S.-Y. 2002. Reliability evaluation and standardization of outdoor exposure materials. *The Korean Reliability Society Proceeding* (July): 147~155.
- Kalnins, M.A., Feist, W.C. 1993. Increase in wettability of wood with weathering. *Forest Products Journal* 43(2): 55~57.
- Kang, H.-Y., Park, S.-J., Kim, Y.-S. 2002. Moisture sorption and ultrasonic velocity of artificially weathered sitka spruce. *Mokchae Konghak* 30(1): 18~24.
- Kang, H.-Y., Kim, S.-W., Park, S.-J. 2003. Weathering of *prunus sargentii* specimens modified with acetic anhydride and formaldehyde vapor. *Mokchae Konghak* 31(5): 57~64.
- Lee, M.-J., Lee, D.-H., Kim, G.-H. 2003. Evaluation of weathering durability of waterborne preservative treated wood by accelerated weathering. *Mokchae Konghak* 31(4): 44~49.
- Park, J.-C., Hong, S.-I. 2008. Determination of localized defects in wood by the transfer time of ultrasonic waves. *Mokchae Konghak* 36(1) : 60~68.
- Shim, K.-B., Lee, D.-S., Park, B.-S., Cho, S.-T., Kim, K.-M., Yeo, H.-M. 2006. Differences of physical, mechanical and chemical properties of Korean red pine(*Pinus densiflora*) between old and new wood. *Journal of Korea forestry energy* 25(2) : 1~8.
- Shim, K.-B., Park, J.-H., Kim, K.-M. 2006. Grading of domestic softwood 2*6 structural lumber by non-destructive test. *Journal of Korea forestry energy* 25(2) : 49~54.
- Son, D.W., Lee, S.-M., Lee, D.-H., Kang, E.-C., Park, B.S.. 2008. The evaluation of the preservative treated plywood produced by factory processing. *Mokchae Konghak* 36(3): 47~54.