

비파괴 시험에 의한 국산 침엽수 2×6" 구조부재의 등급구분¹

심국보² · 박정환² · 김광모²

Grading of Domestic Softwood 2×6 Structural Lumber by Non-destructive Test¹

Kug-Bo Shim², Jung-Hwan Park² and Kwang-Mo Kim²

요 약

국산 침엽수재의 구조재 활용에 필요한 등급구분을 위해 소나무, 잣나무와 낙엽송 2×6" 부재에 대해 초음파를 이용한 비파괴 방법을 적용하였다. 정적 탄성계수와 초음파 시험에 의한 동적 탄성계수의 상관관계를 나타내는 k-factor는 소나무의 경우 1.0602, 잣나무 1.0013, 낙엽송 1.2320로 나타났다. k-factor를 적용할 경우 비파괴방법에 의한 동적 탄성계수 측정에 의해 침엽수 구조부재 등급구분이 가능할 것으로 판단되었다. 기계응력 등급구분에서 소나무는 E9 이상의 등급이 전체의 76%인 반면 잣나무는 E7 이상의 등급이 전체의 85%, 낙엽송은 E11 이상의 등급이 68% 분포하였다. 정적 탄성계수와 휨파괴계수(MOR)의 상관관계도 비교적 높게 나타나 이를 동적 탄성계수로부터 추정된 k-factor와 연계할 경우 초음파 비파괴 등급구분 방법에 의해 국산 침엽수재의 휨강도 성능평가가 가능할 것으로 판단되었다.

ABSTRACT

This study was carried out to provide basic data for using domestic structural softwood lumber efficiently and ensuring structural safety of timber structures. The ratios (k-factor) between static and dynamic MOE measured by ultrasonic device for 2×6 domestic softwood structural lumber are 1.0602 for Korean red pine, 1.0013 for Korean white pine and 1.2320 for Japanese larch. In machine grade using nondestructive method, 76% of Korean red pine was classified into higher than E9 grade, 85% of Korean white pine was sorted into higher than E7 grade and 68% of Japanese larch was classified into higher than E11 grade. Correlation between MOE and MOR by static bending with k-factor from nondestructive method provide a possibility to predict bending strength and allowable stress of domestic softwood structural lumber.

keywords : Ultrasonic nondestructive test, Machine grade, Softwood structural lumber

1. 접수 2006년 11월 27일 Received on November. 27, 2006.

2. 국립산림과학원 임산공학부 재료성능과 Div. of Wood Engineering, Dept. of Forest Products at Korea Forest Research Institute.

서 론

구조부재로 사용하기 위한 목재는 허용응력을 결정하기 위한 등급구분 방법에 의해 구분되어 용도에 따라 설계하중을 산정하여 이용하는 것이 목재자원의 효율적인 이용 뿐만 아니라 목구조물의 안전성 향상을 위하여 바람직하다. 구조부재의 등급 구분은 크게 육안등급구분과 비파괴 시험에 의해 등급구분으로 나눌 수 있다. 육안등급 구분은 구조부재에 존재하는 용이 등 결점의 크기와 분포, 섬유주행경사 등을 육안으로 검사하여 등급을 나누는 것으로 허용응력의 예측에는 유리하지만, 숙련된 노동력이 필요할 뿐만 아니라 시간이 많이 소요되는 단점이 있다. 반면, 비파괴 시험에 의한 등급구분은 구조부재의 탄성계수를 정확하고 빠르게 예측할 수 있는 장점이 있어 구조부재 생산의 한 공정으로 포함될 수 있는 장점이 있지만, 이의 적용을 위해서는 비파괴 등급구분 시험장비의 설치 등 초기 투자가 필요한 단점이 있다. 그러나 부재의 생산이 점차 자동화되고, 비파괴 시험에 의한 탄성계수 예측 방법 정확성이 증가하고 있으므로, 이의 적용이 목재이용 선진국에서는 구조부재 생산공정으로 포함되고 있다. 비파괴 시험은 부재의 탄성계수를 음파 및 초음파 전달속도, 진동의 감쇠 등 다양한 방법으로 측정하여 구조부재의 등급을 구분하므로, 구조부재를 효율적이고 적절한 용도로 사용할 수 있도록 하는 것을 목적으로 하고 있다.

본 연구에서는 국산 낙엽송, 소나무와 잣나무 2×6" 구조부재에 대해 초음파 전달속도를 측정하여 재료의 탄성계수를 예측하고, 이들 부재에 대하여 정적 휨시험에 의한 정적 탄성계수를 측정하여 비교하였다. 또한 초음파를 이용한 구조부재의 비파괴 탄성계수와 정적 탄성계수의 비교를 통해 초음파를 이용한 국산침엽수 구조부재의 탄성계수 예측을 위한 K-factor를 산출하였으며, 이러한 결과를 국산 침엽수 구조부재의 비파괴 등급구분을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

재료 및 방법

1. 공시재료

실대재의 휨하중 성능과 비파괴 시험 특성의 조사를 위해 2×6" 구조재를 제작하였다. 공시원목으로 낙엽송과 잣나무는 국립산림과학원 산림생산연구소에서 벌채한 경급 18~38cm의 중경재로 하였고, 소나무는 강원도 삼척국유림관리소에서 분양받은 원목을 공시재료로 사용하였다. 공시원목은 두께 55mm로 평할 제재하여 함수율 15%까지 인공건조한 후 2×6" 구조재로 제작하였다. 구조재의 단면 실제 치수는 38×140mm, 길이는 2.7m로 하였다.

2. 비파괴 탄성계수 측정

비파괴 시험에 의한 기계응력 등급구분을 위하여, 초음파 파동 속도가 물체의 밀도와 탄성계수에 따라 결정된다는 이론을 적용한 PUNDIT (Portable Ultrasonic Nondestructive Digital Indicating Tester)를 사용하여 동적 탄성계수(Dynamic modulus of elasticity)를 추정하였다(Figure 1). 측정거리는 2400mm로 하였으며 구조부재의 앞면과 뒷면에서 각 2회씩 반복 측정하여 그 평균값으로부터 초음파 전달속도를 계산한 후 식 (1)에 의해 시험체의 동적 탄성계수를 추정하였다.

$$v = \sqrt{\frac{E_d G}{d}} \quad (1)$$

v : 초음파 전달속도(m/sec)

E_d : 동적 탄성계수(kg/cm²)

d : 밀도(kg/m³)

G : 중력가속도(kg/sec²)

또한 정적 탄성계수 측정을 위해 Instron series IV-4206 만능재료시험기에서 일정 휨하중(100kf)을 부가하고, 이때의 처짐량을 이용하여 정적 휨탄성계수를 측정하였다. 이때 지간거리는 2400mm로 하였다.

Table 1. Modulus of Elasticities of 2×6 " domestic softwoods.

Species	Velocity of ultrasonic wave (m/sec)	Dynamic MOE (kg/cm ²)	Static MOE (kg/cm ²)
Korean red pine	4,244	91,065	96,546
Korean white pine	4,331	84,266	84,379
Japanese larch	4,565	118,747	146,294

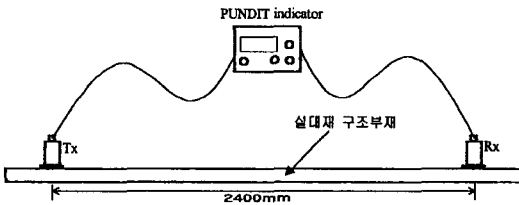


Figure 1. Measuring dynamic MOE by ultrasonic transmission.

초음파 전달속도로부터 측정된 동적 탄성계수로부터 구조부재의 휨 탄성계수를 예측하기 위해 정적 휨 탄성계수와 상관계수로부터 k-factor를 결정하였다.

결과 및 고찰

1. 정적 탄성계수와 동적 탄성계수의 관계

PUNDIT을 이용하여 측정된 초음파 전달속도, 동적 탄성계수 및 정적 휨 시험에 의한 정적 탄성계수는 Table 1과 같다.

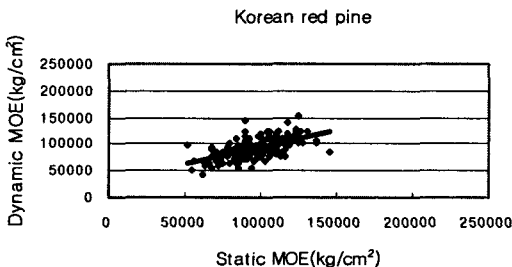


Figure 2. Correlation between static and dynamic MOE of Korean red pine.

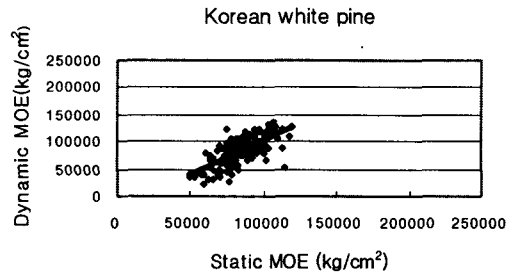


Figure 3. Correlation between static and dynamic MOE of Korean white pine.

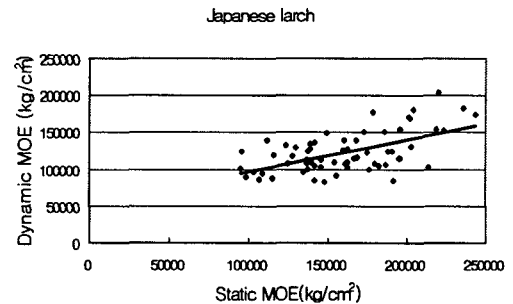


Figure 4. Correlation between static and dynamic MOE of Japanese larch.

정적탄성계수와 동적 탄성계수의 상관관계는 Figure 2, Figure 3, Figure 4와 같고, 그 회귀식은 Table 2와 같다. 소나무와 잣나무의 경우에는 동적 및 정적 탄성계수의 편차 범위가 작은 반면 낙엽송은 그 범위가 넓었다.

Table 2의 회귀식을 이용하여 동적탄성계수로부터 정적 탄성계수를 예측할 수 있었으며, 이 자료를 국산재 구조부재의 등급구분에 효과적으로 이용할 수 있을 것으로 판단되었다.

Table 2. Regression between static and dynamic MOE.

Species	Regression Equation	R ²
Korean red pine	$y = 0.6202x + 31184$	0.32
Korean white pine	$y = 1.2580x - 21882$	0.49
Japanese larch	$y = 0.4369x + 52697$	0.33

정적 휨 시험에 의한 탄성계수의 측정은 탄성학 이론에 의해 측정되기 때문에 실제 재료의 탄성계수에 매우 근사한 값을 제공하지만 이 방법으로 구조재의 등급구분에 적용하기에는 많은 번거로움이 따를 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 초음파와 같은 비파괴적인 방법을 적용하는데, 이때 얻어진 탄성계수 값을 실제의 근사 값으로 변환하기 위해서 두 탄성계수 사이의 상관관계를 이용하여 변환계수 k-factor를 산출해야 한다. Figure 2, Figure 3, Figure 4에서와 같이 정적 및 동적 탄성계수 사이에는 비교적 높은 상관관계가 관찰되었다. 이러한 결과를 근거로 소나무, 잣나무와 낙엽송 2×6" 구조재에 대해 추정된 k-factor는 소나무의 경우 1.0602, 잣나무 1.0013, 낙엽송 1.2320로 3 수종 간에 비교적 비슷한 값을 나타내었다.

2. 비파괴 시험에 의한 등급구분

KS F 3020에서 국산 침엽수 구조부재에 대해 규정한 기계응력 등급에 따라 비파괴 시험을 통해 추정된 2×6" 구조부재의 탄성계수 분포는 Table 3과 같다.

Table 3. Machine grading of domestic structural softwood by KS F 3020.

Grade	E5	E7	E9	E11	E13	E15
MOE (CPa)	4~6	6~8	8~10	10~12	12~14	14~16

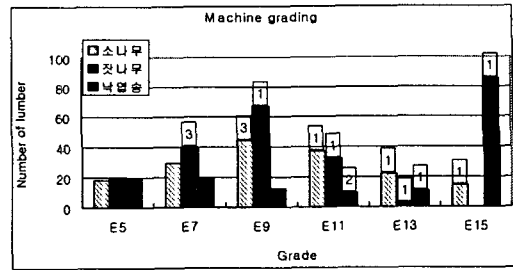


Figure 5. Distribution of lumber grade of 2×6" structural lumber.

Table 4. Distribution of machine graded domestic lumber by nondestructive test.

	E5	E7	E9	E11	E13
MOE(GPa)	4-6	6-8	8-10	10-12	12-
Korean red pine	11.0	17.7	26.8	22.6	21.9
Korean white pine	12.4	24.8	41.6	19.9	1.2
Japanese larch	12.2	12.2	7.7	5.8	62.2

KS F 3020에서 국산 침엽수 구조부재에 대해 규정한 기계응력 등급에 따라 비파괴 시험을 통해 추정된 2×6" 구조부재의 탄성계수 분포는 Figure 5 및 Table 4와 같다. 소나무는 E9 이상의 등급이 전체의 76%가 분포하는 한편 잣나무는 E7 이상의 등급이 전체의 85%가 분포하였다. 따라서 전체적으로 소나무의 기계응력 등급이 잣나무에 비해 우수하게 나타났다. 낙엽송의 경우에는 E11 이상의 등급이 68% 분포하였다.

한편 육안등급과 기계응력 등급간의 상관관계로부터 구조부재의 등급을 구분할 수 있다. 소나무의 경우 육안등급 1등급은 기계응력 등급 구분의 E11 이상에 해당하는데, 육안등급 1등급의 비율은 44.5%였다. 잣나무의 육안등급 1등급은 기계등급 구분의 E9 이상에 해당하며, 이때 육안등급 1등급의 비율은 62.7%였다. 낙엽송의 육안등급 1등급은 기계등급 구분의 E13 이상에 해당하며 이의 비율은 62.2%였다.

잣나무와 낙엽송의 공시목은 비교적 무늬가 잘 되고 있는 시험림에서 채취한 반면, 소나무

공시목은 상대적으로 무육작업이 거의 전무한 국유림에서 채취하였다. 이러한 결과에 따라 잣나무와 낙엽송에서 육안등급 1등급의 구성비율이 높았으며, 이는 무육작업을 통한 목재 재질 관리의 결과로 추정되었다. 따라서 구조재의 등급 향상과 안전성 개선을 위해서는 간벌과 가지치기 등 무육작업을 통한 임분 관리가 매우 중요할 것으로 판단되었다.

비파괴 시험에 의한 구조재의 등급구분은 육안등급구분에 비해 빠르고 재료가 포함하는 결점을 비교적 잘 평가하는 장점이 있으며, KS F 3020 침엽수 구조용재와 임업연구원 고시(제 2000-39호)의 침엽수 구조용 제재규격의 기계등급구분 체계화를 위한 응용자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

3. 휨 파괴 시험

소나무와 잣나무 구조재의 기계등급 구분 중 전체의 90% 이상을 차지하고 있는 E7 이상의 등급에 대한 휨 파괴 시험 결과는 Table 5와 같다. 동일한 기계등급 내에서 소나무와 잣나무의 최대하중 및 휨 파괴 계수 차이는 매우 작았다. 이는 비파괴 시험에 의한 기계등급 구분방법이 구조부재의 파괴하중수준을 결정하는데 매우 유용하게 활용될 수 있음을 의미한다.

정적 휨 시험으로 추정한 탄성계수와 휨 파괴 계수와의 상관관계는 Figure 6과 같다. 두 계수 사이에는 비교적 높은 상관관계가 있음을 알 수

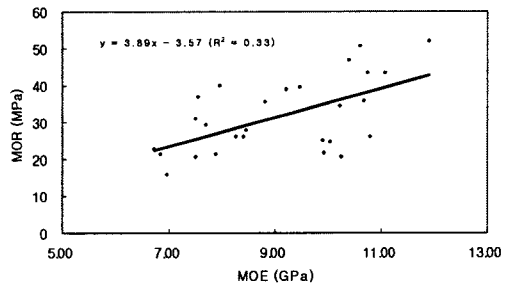


Figure 6. Relationship between nondestructive MOE and MOR.

있었으며, 이로부터 초음파 비파괴 등급구분 방법에 의해 재료의 휨강도 예측이 가능할 것으로 판단되었다.

KS F 3020에서는 침엽수 구조재의 장기 허용응력으로 소나무 1등급에 대해 7.4MPa, 잣나무 1등급에 대해 5.9MPa를 규정하고 있다. 이를 본 결과에서 얻어진 MOR과 비교하면 설계응력이 소나무 실대재 평균강도의 19%, 잣나무 실대재 평균강도의 22%에 해당하였다. 이는 실대 구조부재의 평균 강도에 장기하중에 의한 하중지지 능력 감소와 안전율을 적용하여 환산된 것으로 구조용 재료의 허용응력 결정에 장기하중인자 적용의 중요성을 의미하였다.

결 론

국산 침엽수재의 효율적인 이용과 목구조물 설계의 안전성을 확보하기 위하여 소나무, 잣나무, 낙엽송 2×6" 부재에 대해 초음파 비파괴 방법을 적용한 등급구분 연구 결과는 다음과 같다.

1. 정적 탄성계수와 초음파 시험에 의한 동적 탄성계수의 소나무, 잣나무와 낙엽송 2×6" 구조재에 대해 추정된 k-factor는 소나무의 경우 1.0602, 잣나무 1.0013, 낙엽송 1.2320로 세 수종간에 비교적 유사한 값을 나타내었다. 이를 적용하여 비파괴 동적 탄성계수 측정에 의한 등급구분이 가능할 것으로 판단되었다.

Table 5. Bending strength of 2×6 structural lumber.

Machine grade	Max. load(kgf)			MOR(MPa)		
	E7	E9	E11	E7	E9	E11
Korean red pine	995.7	1003.3	1440.3	25.6	26.8	38.7
Korean white pine	880.7	980.8	1374.2	24.3	26.7	37.7

2. 기계응력등급 구분에 의하여 소나무는 E9 이상의 등급이 전체의 76%가 분포하는 한편 잣나무는 E7 이상의 등급이 전체의 85%가 분포하였다. 낙엽송의 경우에는 E11 이상의 등급이 68% 분포하였다.

3. 정적 탄성계수와 휨파괴계수(MOR)의 상관관계는 비교적 높았으며, 이로부터 초음파 비파괴 등급구분 방법에 의해 재료의 휨강도 평가가 가능할 것으로 판단되었다.

인 용 문 헌

1. Bodig, J., and Jayne, B. A. 1982. Mechanics of wood and wood composites. New York, Cincinnati, Toronto, London, Melbourne : Von Nostrand Reinhold Co.
2. Hoyle, R. J. 1961. A nondestructive test for stiffness of structural lumber. Forest Prod. J. 11(6) 251-254.
3. Kug-Bo Shim., Moon-Jae Park., Do-Sik Lee., and Jung-Hwan Park. 2005. Structural Utilization of Planted Softwood in Korea. IUFRO World Congress.
4. Kug-Bo Shim., Moon-Jae Park., and In-Pyo Hong. 1999. Determination of Allowable Stresses for Domestic Structural Softwood Lumber. 1999 Proceedings of the Korean Society of Wood Science and Technology Annual Meeting. 67-73.
5. Kug-Bo Shim., and Moon-Jae Park. 1998. Establishing System of Allowable Stresses for Structural Lumber. FRI Journal of Forest Science No. 57 : 43-52.
6. Moon-Jae Park., and Kug-Bo Shim. 1998. Determination System of Allowable Stresses for Korean Structural Lumber. 1998 Proceedings of the Korean Society of Wood Science and Technology Annual Meeting. 127-133.
7. Moon-Jae Park, Kug-Bo Shim. 1998. Mechanical Properties of Korean Pine and Larch Structural Lumber. Proceedings of the 5th World Conferences on Timber Engineering. Vol.2. 654-660.
8. Moon-Jae Park., and Kug-Bo Shim. 2000. Korean standards of visual grading and establishing allowable properties of softwood structural lumber. Proceedings of the 6th World Conferences on Timber Engineering. Vol.II.
9. Ross, R. J., and Pellerin, R. F. 1994. Nondestructive testing for assessing wood members in structures : A review. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-70. Madison, WI : U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
10. Senft, J. F., Suddarth, S. K. and Angleton, R. D. 1962. A new approach to stress grading of lumber. Forest Prod. J., 12(4) : 183-186.
11. U.S. Forest Products Lab. 1974. Wood Handbook. USDA, Madison, WI.
12. Wang, S. D., Suchsland, O., and Hart, J. H. 1980. Dynamic test for evaluating decay in wood. Forest Prod. J., 30(7) : 35-37.
13. 한국산업규격 KS F 3020. 1997. 침엽수 구조용재(Softwood Structural Lumber).