

# 육안등급으로 구분된 낙엽송 제재목의 휨성능 분포 특성\*1

이 전 제\*2† · 김 광 철\*3 · 김 광 모\*2 · 오 정 권\*2

## Distribution Characteristics of Bending Properties for Visual Graded Lumber of Japanese Larch\*1

Jun Jae Lee\*2† · Gwang Chul Kim\*3 · Kwang Mo Kim\*2 · Jung Kwon Oh\*2

### 요 약

신뢰성 설계에서 재료강도의 분포 특성은 기본적인 입력 변수로 사용된다. 따라서 강도특성의 분포형태 및 그에 따른 인자들을 정확하게 결정하는 것은 신뢰성 설계를 위한 필수적인 작업이다.

지금까지 강도성능 평가는 주로 무결점 소시편에 대한 실험결과가 사용되어 왔다. 그러나 이러한 방법은 부재가 실제 사용되는 조건을 제대로 반영하지 못함에 따른 오차를 포함하게 된다. 본 연구에서는 구조재로 많이 사용되는 2×6부재(38 mm×140 mm, 길이 3.0 m) 498본에 대하여 육안검사를 통해 등급을 구분하고, 휨시험을 실시하였다.

신뢰성 설계로 전환을 위해 각 등급의 강도특성에 대한 분포형태 및 인자를 결정하였다. 분포형태의 결정을 위해 정규분포, 대수정규분포, 웨이블분포의 세가지 분포형태에 대한 square error를 비교하고, KS test를 통하여 결정된 분포형태의 적합성을 확인하였다. 모든 등급에서 휨강도(MOR)의 가장 적합한 분포형태는 웨이블분포로 나타났으며, 휨탄성계수의 경우는 정규분포가 가장 적합한 것으로 나타났다.

### ABSTRACT

In reliability based design(RBD) method, the distribution characteristics of mechanical properties of material are basic input variable. Therefore, distribution type and parameters of mechanical properties should be determined accurately.

Until now, the properties were derived from tests with small, clear specimens. However, the test

\*1 접수 2002년 11월 28일, 채택 2003년 1월 28일

본 연구는 1999년도 농림부 농림기술개발사업 및 2003년도 두뇌한국21사업의 지원에 의해 이루어진 것임

\*2 서울대학교 농업생명과학대학 College of Agriculture & Life Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

\*3 익산대학, Iksan National College, Iksan 570-752, Korea

† 주저자(corresponding author) : 이전제(e-mail: junjae@snu.ac.kr)

conditions should emulate as nearly as possible the way in which the timber would be used in practice and the test results should, as closely as possible, reflect the structural end use conditions to which the timber products would be subjected. In this study, structural timbers (38mm by 140mm, 3.0m long) were graded by visual assessment of growth characteristics and defects. And then bending tests were conducted on 498 structural size timbers.

For each grade, the distribution type and the parameters of mechanical properties were determined for each grade. For the determination of best-fit distribution type, comparing of square error between distribution types and KS test were conducted. Best-fit distribution type of bending strength(MOR) is weibull distribution for all grade. In case of MOE, normal distribution is best-fit.

**Keywords:** reliability based design(RBD), bending strength(MOR), MOE, allowable stress, weibull distribution

## 1. 서 론

국산재의 부가가치를 높이고, 이용의 효율성을 높이기 위하여, 구조용도로 활용할 필요가 있는 자명한 사실이다. 그러나 국산재는 등급구분이 되어 있지 않으며, 등급에 따른 성능 평가가 되어 있지 않으므로, 해당 등급별 적합한 성능 평가는 구조용 부재로 사용할 때 선행되어야 할 필수적인 조건이다. 더구나, 최근 세계적 추세가 신뢰성 설계(Reliability-Based Design, RBD)로 전환이므로 여기서는 국산재의 신뢰성 설계를 위한 기초적 연구를 수행하였다(Lewis, 1987).

결정론적 방법이 허용응력이라는 특정값을 입력하는 반면에, 신뢰성 설계법을 사용할 때에는 사용할 재료강도의 분포특성이 가장 기초가 되는 입력변수로서 사용된다(Foschi *et al.*, 1989). 따라서 입력될 변수인 재료강도의 분포특성은 신뢰성 설계법에서 가장 기초적이고, 가장 중요한 부분이라 할 수 있을 것이다.

지금까지 허용응력 산출방법은 편의상 강도특성을 정규분포로 가정하고 산출하였으나, 강도특성은 정규분포처럼 대칭형태의 분포를 갖지 않고 대수정규분포나 웨이블 분포와 같이 한쪽으로 편향되어있는 분포형태를 갖고 있다. 정규분포로 가정하고 허용응력을 산출하는 경우 재료의 강도특성을 저평가하는 경향이 있으며(Durran *et al.*, 1997, 1998), 신뢰성

설계법을 적용할 때, 기본 입력변수인 재료의 강도특성이 올바르게 갖게 적용됨에 따라 재료이용의 효율성 뿐만 아니라 구조물의 안전성에도 악영향이 우려된다. 따라서 재료의 강도에 대한 분포특성의 올바른 평가는 구조설계시 가장 기본적이며, 필수적이라 할 수 있다(Joseph, 1988).

국산 낙엽송의 강도 특성에서 분포형태를 고려한 기존의 연구(임업연구원, 1998)에서는 대수정규분포와 정규분포만을 비교하였으나, 최근 재료의 강도특성에 대한 최적분포형태로서 웨이블 분포가 강조되고 있으므로, 최적 분포형태의 선택을 위한 대상분포에 정규분포, 대수정규분포 뿐만 아니라 웨이블 분포도 포함시킬 필요가 있다.

실험 방법에 있어서도 기존 허용응력도 산출방법인 무결점 소시편을 사용할 경우에는 재료자체의 결함이 포함되어 있지 않기 때문에 실제 부재의 파괴와 파괴 형태가 다를 수 있다(Madsen, 1992). 따라서 재료의 성능 평가가 올바르게 이루어진다고 할 수 없으며, 올바른 성능평가가 이루어지지 않고는 구조물의 안전성 측면이나 재료의 효율적 이용의 측면 모두 만족시킨다고 할 수 없을 것이다.

따라서 본 연구에서는 재료의 올바른 성능평가를 위해, 실대재 실험을 통해 무결점 소시편을 이용한 실험의 문제점을 보완하고, 신뢰성 설계법으로 전환 시 필수 입력변수인 재료의 강도, 강성의 분포특성을 구명, 제시하고자 한다.

Table 1. Results of visual grading

Grade	No. of Specimens
No. 1	148 ( 29.7%)
No. 2	154 ( 30.9%)
No. 3	103 ( 20.7%)
Under No.3	93 ( 18.7%)
Total	498 (100.0%)

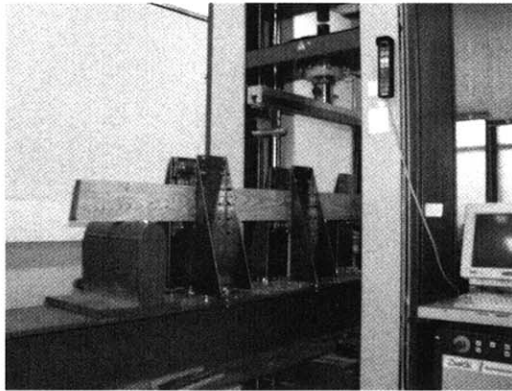


Fig. 1. Setup for four-point bending test.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 공시재료

국산 침엽수재 중 구조재로 이용 가능한 낙엽송 (*Larix leptolepis*)을 공시수종으로 선정하였으며, 목조주택의 경골목조 공법에 주로 사용되는 크기인 2×6 (38 mm×140 mm), 길이 3.0 m인 제재목 498 개를 사용하였다.

이들 제재목을 침엽수 구조용 제재규격(임업연구원 고시 제 2000-39호)에 의거하여 육안 등급구분 하였다. 육안 등급구분을 위하여 용이, 활렬, 연륜폭, 길이굽음, 틀어짐, 둥근모, 목리경사를 측정하였으며, 등급구분 결과는 Table 1과 같다. 등위를 제외한 1, 2, 3등급은 비교적 균일하게 분포하였다.

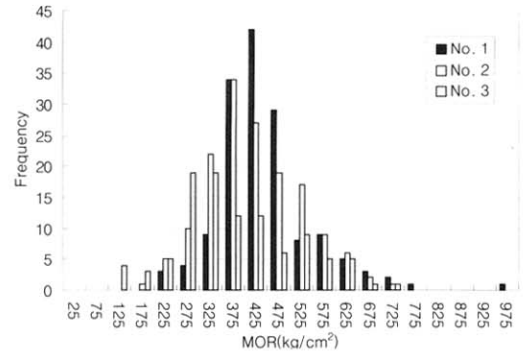


Fig. 2. Histogram of bending strength for each visual grades.

### 2.2. 시험방법

ASTM D-198에 준하여 만능강도시험기(최대하중 10 t)를 사용하여 Fig. 1과 같이 3등분점 4점하중으로 휨강도 시험을 실시하였다. 스패는 2.4 m, 하중 속도는 10 mm/min으로 하였다. ASTM에 따라 시편의 쓰러짐을 방지하기 위하여 하중점과 지지점 사이(각 1개)와 양 하중점 사이(2개)에 총 4개의 쓰러짐 방지 지지대를 설치하였다. 지지대는 수평방향의 변위는 억제하면서 수직방향의 변위에 대하여는 마찰력이 발생하지 않도록 제작하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 휨강도(MOR)

각 등급별 MOR 분포는 Fig. 2와 같다. 실험데이터 분석을 위해 구간을 나누었으며, 50 kg/cm<sup>2</sup>의 구간 간격을 사용하였다.

#### 3.1.1. 분포형태결정

추후 진행될 한계상태 설계법의 적용시 기초 자료로 사용될 수 있도록 적합한 분포 형태를 결정하고자 정규분포, 대수정규분포, 웨이블 분포를 대상분포로 가정하고 가장 적합한 분포 형태를 평가하였다.

Table 2. Average, standard deviation and most value of MOR

	MOR (kg/cm <sup>2</sup> )		
	No. 1	No. 2	No. 3
Mean	449	421	378
Standard Deviation	91	105	131
Most Value	425	375	325

Table 3. Comparison of Square errors(MOR)

Distribution	No. 1	No. 2	No. 3
Weibull ( $\times 10^2$ )	<b>1296</b>	<b>0319</b>	<b>0961</b>
Normal ( $\times 10^2$ )	1537	0351	1208
Lognormal ( $\times 10^2$ )	1321	0320	1311

각 등급의 휨강도의 평균, 표준편차, 최빈수는 Table 2와 같으며, 평균, 최빈수 모두 1등급이 가장 크고 3등급이 가장 낮은 값을 보였고, 모든 등급에서 최빈수가 평균보다 낮은 값을 보인다는 것이 확인되었으며 이 차이로부터 한쪽으로 편향되어 있는 분포 형태인 웨이블 분포와 대수정규분포가 정규분포보다 더 적합할 것이라고 추측된다.

한쪽으로 편향되어 있는 분포 형태인 웨이블분포, 대수정규분포, 그리고 기존 규정에 적용되는 정규분포 중 가장 적합한 분포모형을 결정하기 위해 square error를 산출하였으며 이를 근거로 가장 적합한 분포모형을 선택하였다(Table 3).

대상분포로 사용된 웨이블 분포, 정규분포, 대수정규분포의 확률밀도함수는 다음과 같다.

웨이블 분포 :

$$f_T(t) = -\overline{F}'_T(t) = \lambda(t) \exp\left[-\int_t^0 \lambda(s) ds\right] \quad (1)$$

$$= \left(\frac{\alpha}{\beta}\right) t^{\alpha-1} \exp\left(-\frac{t^\alpha}{\beta}\right) I_{(0, \infty)}(t)$$

정규분포 :

$$f_x(x) = f_x(x, \mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (2)$$

$$-\infty < x < \infty, -\infty < \mu < \infty, \sigma > 0$$

Table 4. Selected distribution type and parameters (MOR)

Type of distribution	No. 1	No. 2	No. 3
	Weibull	Weibull	Weibull
x	259	202	118
Parameter a	2.2	24	2.2
β	214	249	299

대수정규분포 :

$$f_x(x) = f_x(x, \mu, \sigma^2) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2} (\ln x - \mu)^2\right] \quad (3)$$

$$0 < x < \infty, -\infty < \mu < \infty, \sigma > 0$$

$$E(X) = e^{\mu + \frac{\sigma^2}{2}}$$

$$Var(X) = e^{2\mu + 2\sigma^2} - e^{2\mu + \sigma^2}$$

Table 3에 의하면, square error는 모든 등급에서 웨이블 분포가 가장 작은 값을 갖는 것이 확인되었으며, 따라서 국산 낙엽송의 휨강도 특성에는 웨이블 분포가 가장 적합하다고 할 수 있다. 1등급과 2등급의 경우 웨이블 분포 다음으로 대수 정규분포가 적합한 것으로 평가되었으며, 3등급만이 웨이블 분포 다음으로 정규분포가 적합한 것으로 평가되었다. 본 연구의 실험 결과로부터 국산 낙엽송 휨강도의 분포 형태는 대칭형태를 가지는 정규분포보다는 한쪽으로 편향되는 분포 형태인 웨이블 분포와 대수정규분포가 더 적합함을 확인할 수 있었다.

선정된 분포에서 적합한 Parameter를 결정하기 위해 통계프로그램인 Arena Input Analyzer (ver3.01)를 사용하여 최적화 하였다. 실험실 실험을 통해 구한 각 등급별 최적화된 분포 및 parameter를 Table 4에 제시하였으며, Fig. 3~5에는 각 등급에 대하여 정규분포, 대수정규분포, 웨이블분포의 상대비교를 위해 최적화된 3가지 분포형태와 실험값을 도시하였다. 실험값에 대한 히스토그램을 보면 왼쪽으로 편향된 형태라는 것을 확인할 수 있다. 따라서 대수 정규분포와 웨이블 분포가 정규분포보다는 더 근

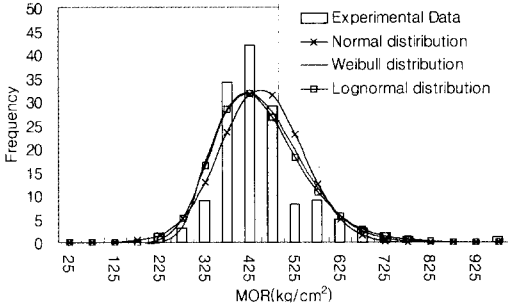


Fig. 3. Histogram of MOR for No. 1 grade.

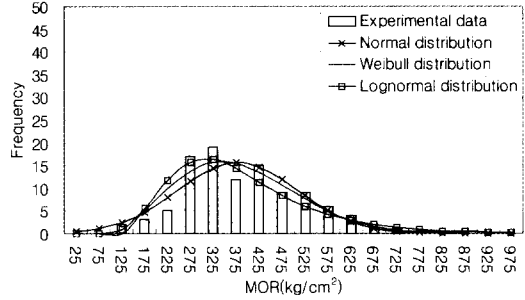


Fig. 5. Histogram of MOR for No. 3 grade.

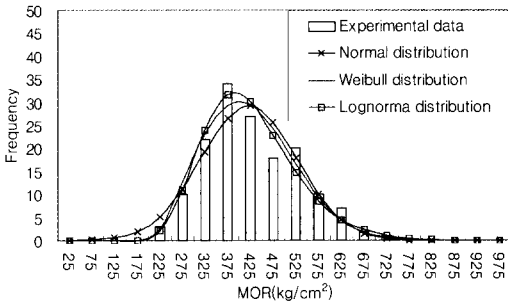


Fig. 4. Histogram of MOR for No. 2 grade.

적합하다고 할 수 있다.

실험값으로 모집단인 국산 낙엽송 2×6 제재목의 휨강도 분포를 추정하는 것이 적합한지 여부를 정량적으로 분석하기 위하여 Kolmogorov-Smirnov(KS) Test를 실시하였으며, 90% 유의수준에서 본 실험 데이터가 웨이블 분포에 적합함을 검증하였다(Law and Kelton, 1991).

### 3.1.2. 허용응력 산출

각 등급에 적합하다고 평가된 분포를 사용하여 5% 하한치를 산출하였다. 5%하한치 계산은 정규분포는 식(4)에, 웨이블 분포는 식 (5)에 의해 산출하였다. (Breyer, 1993)

$$5\% = \mu - (\sigma \times 1.645) \quad (4)$$

$$5\% = \beta(-\ln 0.95)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (5)$$

Table 5. Comparison of 5 percentile value (MOR)

	5% percentile value (kg/cm <sup>2</sup> )		
	No. 1	No. 2	No. 3
Prediction	Weibull	314	196
	Normal	300	163
Experimental result	318	279	195

각 등급별 실험값을 강도 순으로 번호를 부여하고 하위 5%에 해당하는 시편의 강도값과, 웨이블분포 및 정규분포에 기초해 5% 하한치를 결정한 경우를 서로 비교해보면(Table 5) 정규분포로 가정해 구한 5% 하한치 보다는 웨이블 분포를 이용한 경우가 실험치와 더 근접한 것을 알 수 있다. 정규분포는 실제 재료의 강도에 비해 재료의 성능을 저평가하는 경향이 있는 것으로 나타났다.

본 연구의 결과와 기존에 제시된 허용응력 값을 Table 6에 비교하였다. 허용응력값은 Table 5에 제시된 5% 하한치 값을 보정인자인 2.1로 나누어 준 값이다. 실대재 시험편을 사용하고 적합한 분포특성을 고려해 산출한 본 연구에서의 휨허용응력은 실대재를 사용한 다른 연구(임업연구원, 1998)에서 제시한 허용응력도와는 유사한 결과를 보이는 반면, 무결점 소시편으로 실험한 결과인 산림청 고시와 미국의 NDS(National Design Specification, 1997)에서 제시한 허용응력도는 실대재 실험값에 비해 낮은 값을 보이고 있어 수정될 필요가 있다고 판단된다. 다른 연구의 경우에는 실대재 시험편을 사용하였으나 정

Table 6. Comparison of allowable stresses

	allowable bending stress (kg/cm <sup>2</sup> )		
	No. 1	No. 2	No. 3
Experimental result	151	133	93
Prediction (Weibull)	150	130	93
KFRI*	136	106	98
KFS**	80	60	35
NDS***	86	61	35

\* Research report of Korea Forest Research Institute, tested with structural timber.

\*\* Announcement of Korea Forest Service, tested with small clear specimen.

\*\*\* National Design Specification, tested with small clear specimen.

Table 7. Average, standard deviation and most value of MOE for each grade

	MOE (×10 <sup>3</sup> kg/cm <sup>2</sup> )			
	No. 1	No. 2	No. 3	Total
Average	131	136	127	132
Standard Deviation	28	32	32	30
Most Value	125	135	125	135

구분포로 가정하여 산출한 결과로서, 분포의 특성상 다소 작은 값을 보이고 있다.

따라서 국산 낙엽송 2×6의 휨강도 분포에 적합하다고 평가된 웨이블분포 형태를 사용하여 5% 하한치를 산출한 경우 1등급은 약 4.7%, 2등급은 10.5%, 3등급은 20.2%의 허용응력 상향 조정이 가능하여 재료를 보다 효율적으로 사용할 수 있는 것으로 나타났다.

### 3.2. 휨탄성계수(MOE)

휨실험 결과로부터 MOE를 산출 하였으며 그 결과를 Table 7 및 Fig. 6에 나타내었다.

#### 3.2.1. 분포형태결정

MOR에서와 동일한 방법으로 가장 적합한 분포형

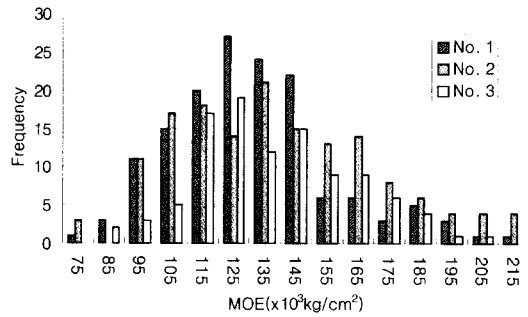


Fig. 6. Histogram of MOE for each grade.

Table 8. Comparison of square errors(MOE)

Distribution	No. 1	No. 2	No. 3
Weibull (×10 <sup>-2</sup> )	1.096	0.297	1.058
Normal (×10 <sup>-2</sup> )	0.668	0.197	0.744
Lognormal (×10 <sup>-2</sup> )	0.965	0.225	8.321

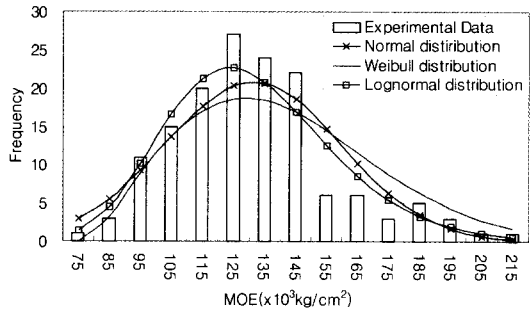


Fig. 7. Histogram of MOE for No. 1 grade.

태를 결정하기 위하여 각 대상분포에 대한 square error를 산출하였다(Table 8).

Table 8에 의하면 정규분포가 모든 등급에서 가장 작은 square error를 나타내었으며, 이를 근거로 국산 낙엽송의 MOE는 정규 분포가 가장 적합하다고 할 수 있다. 정규분포, 대수정규분포, 웨이블 분포의 상대 비교를 위해 Fig. 7~9에 최적화된 3가지 분포 형태와 실험값을 도시하였으며, 정규분포가 가장 적합한 형태라는 것을 확인할 수 있다.

모집단인 국산 낙엽송 제재목의 MOE 분포형태를 표본집단인 본 연구의 결과로부터 추정한 결과의 적

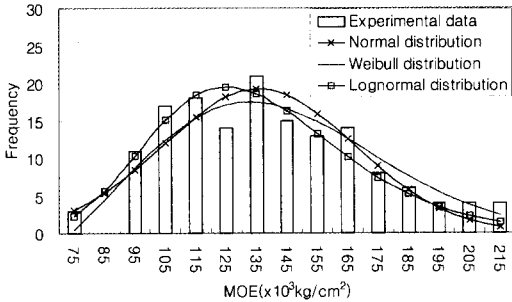


Fig. 8. Histogram of MOE for No. 2 grade.

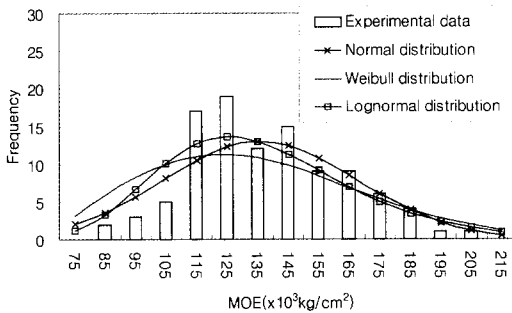


Fig. 9. Histogram of MOE for No. 3 grade.

합성을 검정하기 위해 KS Test를 수행하였다. 각 등급 모두에서 90% 유의수준에서 정규분포가 적합함을 확인하였다.

### 3.2.2. 허용 탄성계수

본 실험의 결과로부터 얻어진 MOE의 평균값을 설계치(design value)로써 제시하였다. 기존 산림청에서 고시한 허용 MOE값 및 미국의 기준인 NDS (National Design Specification, 1997)에서 유사수종인 D-Larch에 대해 제시된 값과 비교해 보면 다소 높은 값이 나타남을 확인할 수 있다.(Table 9)

특히, 기존에 제시된 값의 경우에 등급이 높아짐에 따라 다소 높은 설계치를 적용하도록 되어있는 반면에 본 실험으로부터 얻어진 결과를 살펴보면 등급간 MOE값의 차이는 거의 없으며 2등급의 경우 1등급보다 오히려 높은 값을 나타내었다. 육안등급구분은 MOR을 예측하기 위한 등급구분 방법으로, MOR에 영향을 미치는 웅이 등 결함에 초점이 맞추어져 있어

Table 9. Comparison of MOEs

	MOE ( $\times 10^3$ kg/cm <sup>2</sup> )			Total
	No. 1	No. 2	No. 3	
Experimental result	131	136	127	132
KFS*	125	110	95	-
NDS**	120	112	98	-

\* Announcement of Korea Forest Service.

\*\* National Design Specification.

MOE와는 상관관계가 적은 것으로 알려져 있다. 따라서 육안구분된 부재의 MOE는 등급과 상관없이 거의 일정한 값을 나타내며, 설계치로써 전체 부재의 평균값을 적용하는 것이 바람직하다고 사료된다. 전체 부재에 대하여 측정된 MOE의 평균값은 약  $132 \times 10^3$  kg/cm<sup>2</sup>으로 나타났다.

최적 분포형태와 Table 7에 제시된 파라미터를 사용함으로써 추후 한계상태 설계법에서 기초 입력자료로 사용할 수 있을 것이다.

## 4. 결론

본 연구에서는 육안등급 구분된 국산 낙엽송 2×6 부재의 휨강도와 MOE 분포특성을 평가하였다.

휨강도는 각 등급 모두에서 웨이블 분포가 가장 적합한 분포로 나타났으며, 허용응력도는 1, 2, 3등급 각각 150, 130, 90 kg/cm<sup>2</sup>으로 산출되었다. 무결점 소시편을 사용한 기존 연구보다 높은 값을 보임으로써 무결점 소시편을 통한 허용응력 산출방법은 개선될 필요가 있다고 판단된다.

MOE의 경우에는 정규분포가 가장 적합한 것으로 나타났으며, 각 등급에 대한 설계치는 기존의 결과보다 다소 높은  $131, 136, 127 \times 10^3$  kg/cm<sup>2</sup>으로 나타났다. 육안등급 방법의 특성상 등급간 차이가 거의 나타나지 않았으며, 따라서 등급에 상관없이 전체 부재에 대한 평균값( $132 \times 10^3$  kg/cm<sup>2</sup>)을 설계값으로 사용하는 것이 가능하리라 사료된다.

본 연구에서 얻어진 국산 낙엽송 2×6 부재의 휨성능에 대한 설계값 및 분포특성은 앞으로 신뢰성 설계법의 적용에 주요한 입력데이터로 사용될 수 있을 것

이다.

## 참 고 문 헌

1. 임업연구원 고시 제2000-39호, 침엽수 구조용 제재규격.
2. 임업연구원, 1998, 국산재의 신수요 개발, 농림부, pp. 37~94.
3. American Society for Testing and Materials. 1994. ASTM D-198. Standard Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes.
4. Breyer. D. E., 1993. Design of wood structures. 3rd Ed. pp. 189~207.
5. Durrans. S. R., M. H. Triche, S. E. Taylor and F. E. Woeste, 1997, Parameter and Quantile Estimation for the Distributions of Failure Strength of Structural Lumber, Forest Prod. J. 47(4): 80~88.
6. Durrans. S. R., M. H. Triche, and S. K. Suddarth, 1998, Estimation of Lower Tail Quantiles of Weibull Probability Distributions for Lumber Strength, Forest Prod. J. 48(1): 97~101.
7. Foschi. R.O., B.R. Folz, and F.Z. Yao. 1989. Reliability-based design of wood structures. Univ. of British Columbia. pp. 239~244, 264~272.
8. Joseph. F. Murphy. 1988. Load and resistance factor design for engineered wood construction. ASCE. pp. 18~40, 58~81.
9. Law. A. M. and W. D. Kelton, 1991, Simulation Modeling and Analysis, McGraw-Hill, Inc, pp. 329~350, 380~394.
10. Lewis. E.E., 1987, Introduction to Reliability Engineering, John Wiley & Sons, pp. 137~147.
11. Madsen, B., 1992, Structural Behaviour of Timber, Timber Engineering LTD. pp. 37~110.
12. National Design Specification for Wood Construction, 1997, American Forest & Paper Association.