

# 국내 기계등급구조재의 허용응력 분석<sup>1</sup>

홍 정 표<sup>2</sup> · 오 정 권<sup>2</sup> · 박 주 생<sup>4</sup> · 한 연 중<sup>3</sup> · 방 성 준<sup>3</sup> · 김 철 기<sup>3</sup> · 이 전 제<sup>3,†</sup>

## Analysis of Allowable Stresses of Machine Graded Lumber in Korea<sup>1</sup>

Jung-Pyo Hong<sup>2</sup> · Jung-Kwon Oh<sup>2</sup> · Joo-Saeng Park<sup>4</sup> · Yeon Jung Han<sup>3</sup> ·  
Sung-Jun Pang<sup>3</sup> · Chul-Ki Kim<sup>3</sup> · Jun-Jae Lee<sup>3,†</sup>

### 요 약

KS F 3020-침엽수구조용재 기준에 따라 국산 소나무(*Pinus densiflora*) 38 × 140 × 3600 mm 구조용 제재목 365개에 대하여 기계등급구분을 실시하고, 휨허용응력을 산출하여 현재 적용되는 KS기준허용응력과 비교 분석하였다. 휨허용응력 계산을 위하여 5% 휨강도 하한값을 75% 신뢰수준의 비모수적 방법, 2-parameter 그리고 3-parameter Weibull 분포를 가정한 모수적 방법, 휨강도-휨탄성계수 직선회귀 방법, 총 4가지 분석방법을 사용하여 결정하였다. 기계등급 E8, E9, E10 만이 비모수적 방법의 통계 처리가 가능한 자료 수를 얻었으며, 휨강도-휨탄성계수 직선회귀 방법은 이론적으로 모든 등급에 대한 5% 하한값 결정이 가능함을 보여주었다. 결정된 등급별 휨허용응력은 기준허용응력에 비하여 모두 낮은 값을 나타내었으며 이것은 과소설계의 위험성이 있는 것으로 현행 기계등급구분체계의 문제점으로 파악되었다. 이러한 문제는 구조설계 신뢰성과 관련하여 반드시 개선되어야 할 것으로, 휨강도-휨탄성계수 조합 등급 도입이 필요할 것으로 생각되었다.

### ABSTRACT

365 pieces of domestic 38 × 140 × 3600 mm Red pine structural lumber were machine graded conforming to a softwood structural lumber standard (KS F 3020). The allowable bending stresses calculated for each grade were compared with the values currently tabulated in the standard. Four calculation methods for lower 5<sup>th</sup> percentile bending stress were non-parametric estimation with 75% confidence level, 2-parameter and 3-parameter Weibull distribution fit, and bending modulus of rupture (MOR)-modulus of elasticity (MOE) regression based method. Only the data set of Grades E8, E9, and E10 were statistically eligible for the 5<sup>th</sup> percentile calculation. The MOR-MOE regression based method

<sup>1</sup> Date Received April 8, 2015, Date Accepted May 6, 2015

<sup>2</sup> 서울대학교 농업생명과학연구원. Research Institute for Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea

<sup>3</sup> 서울대학교 산림과학부. Department of Forest Sciences, College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea

<sup>4</sup> 국립산림과학원 임산공학부. Department of Forest Products, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

<sup>†</sup> 교신저자(Corresponding author) : 이전제(e-mail: junjae@snu.ac.kr)

only was able to estimate the lower 5<sup>th</sup> percentile values theoretically for the full range of grades. The results showed that all allowable bending stresses calculated were lower than the design values tabulated in the standard. This implies that the current machine grading system has the pitfall of structural safety. Improvement in current machine grading system could be achieved by introducing the bending strength and stiffness combination grade system.

**Keywords :** machine graded lumber, machine grading, allowable bending design stress, modulus of rupture, modulus of elasticity

## 1. 서 론

구조설계를 위한 국내 기계등급구조재의 등급별 허용응력은 건축구조기준(이하 KBC) (AIK 2011)과 2013년에 개정된 KS F 3020-침엽수 구조용재(2013)에 표로 제시되어 있다. 이러한 허용응력들은 측정된 휨탄성계수에 의해 구분된 등급에 따라 수종과 무관하게 단일 값으로 되어있다. 국내 표준에 따라 침엽수 실대재 구조용재의 허용응력을 결정하려면 KS F 2152-침엽수 구조 용재의 허용성질 결정 방법(2004)을 따라야 한다. 이 표준에 따르면 실대재 구조용재에 대한 휨허용응력 결정은 KS F 2150-목구조용 실대재의 휨 시험 방법(2004)에 따라 실시된 시험 자료를 바탕으로 5% 하한값을 적절한 통계적인 방법에 의하여 계산하도록 명시되어 있다. 일반적으로 실대재 구조용재에 적용되는 통계적 방법은 모수적 또는 비모수적 방법으로 시험자료를 처리하는 것이다. 이러한 접근 방법으로 진행된 국내 실대재 구조용재에 대한 연구는 2000년 초반부터 본격적으로 시작되었다고 볼 수 있다(Oh *et al.* 2000; Lee *et al.* 2003; Hwang *et al.* 2011; Pang *et al.* 2011a, 2011b, 2013a, 2013b). 그러나 대부분의 연구는 육안등급구조재에 국한되었으며 실제 허용응력을 결정하여 설계기준에 반영하기 위한 체계적인 연구보다는 기존 설계기준이 적절한 것인지 판단을 위한 검증 시험이었다고 볼 수 있다. 반면, 기계등급구조재에 대한 국내 연구는 상대적으로 적어 이에 대한 허용응력의 타당성 검증이나 결정 방법에 대한 연구도 미미하다.

따라서, 본 연구는 국산 소나무 육안등급구조재의 기존 휨 시험 자료에 대하여 기계등급으로 재구분하고, 일반적인 많이 이용되는 통계적 방법과 국내 기



**Fig. 1.** Set up for structural lumber bending test (Hwang *et al.* 2011).

계등급구분 방법에 적합하게 수정한 직선회귀식 방법으로 허용응력을 결정하였다. 기존 허용응력에 대한 타당성을 분석하고 국내 기계등급구조재 등급체계 전반에 대한 고찰 내용을 기술하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 분석자료

국립산림과학원(Hwang *et al.* 2011)에서 수행된 418개  $38 \times 140 \times 3600$  mm 육안등급구조재 소나무 (*Pinus densiflora*) 휨시험 자료를 분석에 활용하였다. KS F 3020의 기계등급구조재 육안품질기준에 대응되는 육안등급 1, 2등급 시편만을 추출(3등급 제외)하여 총 365개 시험 자료만을 가지고 분석하였다. 365개 시험자료 중 육안등급 1등급은 155개였으며 2등급은 210개였다. 휨시험은 Fig. 1과 같이 KS F

**Table 1.** Analysis methods for calculating 5<sup>th</sup> percentile design value of bending strength

Method	Abbreviation	Reference
Non parametric estimation with 75% confidence level	NPE	ASTM D 2915 and ASTM D 6570
2-parameter Weibull distribution fit	2PW	Canadian lumber properties
2-parameter Weibull distribution fit	3PW	Canadian lumber properties
MOR-MOE regression estimation	Reg	Wood Handbook

2150에 따라 4점 하중으로 실시되었다. 함수율은 KS 기준에 따라 15% 이하로 건조된 제재목이었으나, 휨 강도(이하 MOR) 및 휨탄성계수(이하 MOE) 계산과정에서 개별 시편 함수율에 따른 함수율 보정은 이루어지지 않았다.

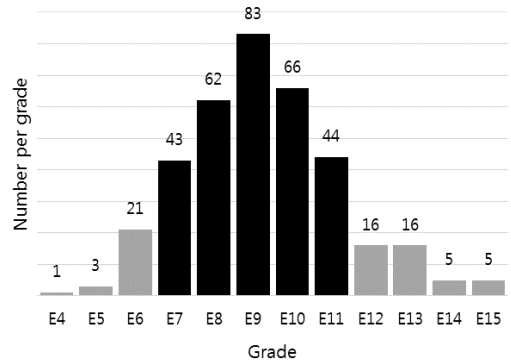
## 2.2. 분석방법

KS F 3020에 따라 개별 구조재 MOE를 기준으로 기계등급구분을 하였다. 허용응력 산출을 위한 5% 하한값은 Table 1 같이 4가지 통계적 방법을 이용하여 계산하였다. 75% 신뢰수준의 5% 하한값을 구하는 비모수적 방법(이하 NPE)은 ASTM D 6570 절차를 따랐다. 참고로 이 표준에서 요구하는 등급당 휨 강도 자료의 최소 개수는 53이다. 모수적 방법은 MOR 분포에 가장 적합한 Weibull 분포 모델을 가정하여 5% 하한값을 구하였고 2-매개변수(이하 2PW) 및 3-매개변수(이하 3PW) 분포모델 모두를 적용하여 분석하였다. 마지막으로 기계등급구조재 분석에 일반적으로 적용되는 MOR-MOE 직선회귀 방법(이하 Reg)을 응용하여 5% 하한값을 분석하였다(FPL 2010). 각 분석방법의 절차와 이론적인 내용은 Table 1에 열거된 참고문헌에 자세히 나와있다. 다만, MOR-MOE 직선회귀 방법은 국내 연구와 현장에서 적용된 바가 없어, 이에 대한 자세한 내용은 별도의 논문으로 작성하였다(Hong *et al.* 2015).

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 기계등급구분

측정된 MOE를 기준으로 총 365개 시편에 대한



**Fig. 2.** Grade yield of Red pine machine graded lumber.

기계등급구분을 하였고 등급당 개수를 Fig. 2와 같이 막대그래프로 나타내었다. E9등급이 83개로 전체 22.7%의 가장 높은 수율을 보였으며 ASTM D 6570에서 규정하는 최소 시편수 53개를 만족하는 등급은 E8에서 E10까지 세 등급으로 전체 57.8%를 차지하였다. 그러나 ASTM D2915에 따라 비모수 75% 신뢰수준의 5% 하한값 즉, 모집단의 95%를 초과시키게 만드는 하한값이 될 경우의 수가 75%인 표본 5% 하한값을 구하는 최소 시편수를 28개로 정의한다면 E7에서 E11등급까지 포함(Fig. 1에서 검은색 막대부분)이 가능하므로 본 연구에서는 이 등급들을 포함하여 분석하였다. 시편수가 충분하다면 KS F 3020에서 정의된 최저 E6등급에서 최고 E14등급까지 각각의 5% 하한값 계산이 가능할 것이다. 본 자료를 바탕으로 필요한 시험 시편수를 단순히 추정한다면, 최저 빈도수 5개인 E14등급이 기준이 된다. 전체 시편수 365개에서 5개 빈도수는 1.4%에 해당되고 5% 하한값 계산에 필요한 최소 자료수 53개를 얻기 위해서는 전체 시편수가 대략 3786 (= 53/0.014)개가

**Table 2.** Allowable bending stress design values of red pine machine graded lumber

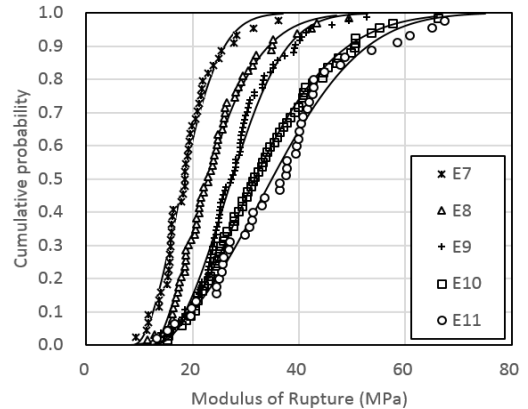
Grade	$F_b$ (MPa)*					
	Yield (count)	KSF3020	NPE	3PW	2PW	Reg
E6	5.8% (21)	6.2	-	-	-	-2.1
E7	11.8% (43)	7.2	5.4	5.0	4.3	0.5
E8	17.0% (62)	8.2	7.5	6.5	5.2	3.0
E9	22.7% (83)	9.0	7.7	7.2	6.4	5.6
E10	18.1% (66)	10.0	7.4	7.4	5.9	8.1
E11	12.1% (44)	11.3	7.2	6.6	5.9	10.6
E12	4.4% (16)	12.4	-	-	-	13.1
E13	4.4% (16)	14.0	-	-	-	15.7
E14	1.4% (5)	16.0	-	-	-	18.2

\* KSF3020: allowable design values currently in design code, NPE: non parametric estimation with 75% confidence level, 3PW: 3-parameter Weibull fit, 2PW: 2-parameter Weibull fit, Reg: MOR-MOE regression method

필요하다는 결과를 얻게 된다. 본 연구에서 활용된 자료는 38 × 140 × 3600 mm 크기의 육안등급 1등급과 2등급 구조재로부터 나온, 일정 부분 선별된 자료로 볼 수 있기 때문에 실질적으로 필요한 시편수는 이보다도 훨씬 더 많을 것으로 판단되었다. 따라서 비모수 방법에 의한 5% 하한값 결정은 방대한 시편과 시험을 요구하므로 현 국내 연구여건과 제재목 시장 상황에 비추어 적합한 분석방법이 아니라고 판단되었다. 다만, 체계적인 연구계획에 따라 지속적인 시험 자료축적이 이루어지게 되면 가능할 것으로 판단된다.

### 3.2. 5% 하한값 계산

Table 2에 네 가지 분석방법으로 얻은 국산 소나무 허용응력과 현재 적용되고 있는 KS F 3020의 등급별 기준값들을 나타내었다. 네 가지 방법으로 결정된 허용응력값은 계산되어 얻어진 5% 하한값을 KS F 2152에 따라 2.1로 나눈 값들이다. 결과로 얻은 모든 값들이 모든 등급에서 KS 허용응력값보다 낮게 나타났다. 예를 들면, 수율이 가장 높은 E9등급의 경우 KS F 3020에 제시된 휨허용응력은 9.0 MPa이지만, NPE, 3PW, 2PW, Reg방법으로 얻은 값들은 각각 7.7 MPa, 7.2 MPa, 6.4 MPa, 5.4 MPa로 모두 낮은 값들을 보여주었다. 이러한 사실은 현행 MOE



**Fig. 3.** Cumulative probability plots and 3-parameter Weibull fits for bending strength in machine grades.

기준에 전적으로 의존하는 기계등급구분 체계에서 단일값으로 제시된 허용응력값 사용은 실제 소나무 기계등급구조재로 구조물 설계 적용 시 과소설계가 될 가능성이 있음을 보여준다.

NPE, 3PW, 2PW방법의 경우 E9등급과 E11등급을 비교하였을 때 높은 등급에서 산출된 휨허용응력은 오히려 낮은 값들을 나타내었다. Fig. 3에 MOR에 대한 등급별 누적확률분포와 이에 적합한 3-parameter Weibull 확률분포를 나타내었다. 등급이 높을수록 MOR 변이가 큰 것을 알 수 있으며, 이러한 현상은 현행 기계등급구분 품질기준에 MOR과 밀접

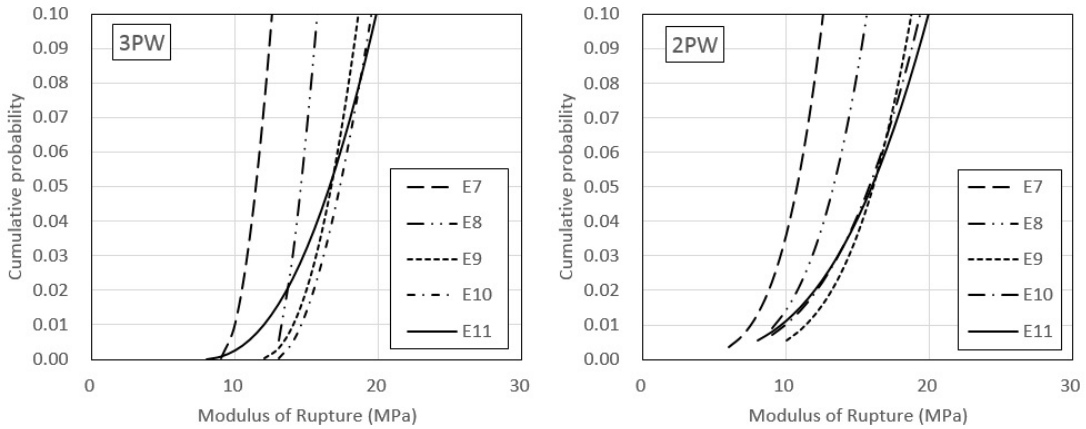


Fig. 4. Lower tail Weibull fit of bending strength; 3-parameter fit (left) and 2-parameter fit (right).

한 관련이 있는 용이, 섬유경사 등 주요강도감소결점 (major strength reducing defect, 이하 MSRД)에 대한 MOR 제한 기준이 존재하지 않기 때문인 것으로 생각한다.

일반적으로 휨시험 시 최대 휨모멘트가 작용하는 부분에 MSRД가 존재하면 구조재가 어느 정도 하중에 저항하기도 전에 비정상 파괴(premature failure)가 발생한다는 점을 생각하면, MOE로 MOR을 예측하는 것에 한계가 있을 수 있다. 이러한 사실은 Weibull분포에 따른 5% 하한값 결정에서 잘 나타났다. Fig. 4는 3-parameter와 2-parameter Weibull 확률밀도 0.0~0.1까지의 lower tail 부분을 확대하여 나타낸 것이다. 0.05 (5% 하한값)에서 값을 비교해보면 두 그래프 모두 E9, E10, E11등급에서 유사한 값을 나타냄을 알 수 있었다. 만일 북미(WWPA 2004, NLGA 2007)와 같이 MSRД에 대한 MOR 제한 기준 (예, 단면의 용이면적비가 1/2이면 최대 허용MOR 6.2 MPa (900 psi) 미만으로 제한)을 등급규정에 포함하여 어느 정도 비정상파괴를 제한한다면 보다 합리적인 등급구분이 이루어질 것이라 판단된다.

### 3.3. MOR-MOE 직선회귀 방법

MOR-MOE 직선회귀 방법에 의한 허용응력값은, MOE가 MOR를 예측할 수 있는 비파괴 측정 특성값

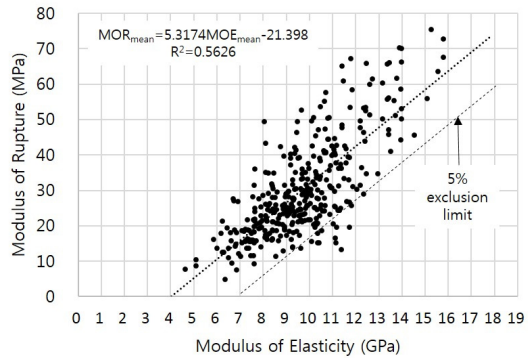


Fig. 5. Estimation of 5<sup>th</sup> percentile bending MOR based on MOR-MOE linear regression.

이라는 개념을 적용시킨 방법으로 Fig. 5와 같이 MOR-MOE 직선회귀 결과에 근거하였다. 본 연구에서 적용한 직선회귀식과 이로부터 얻은 5% 하한값 식은 각각 (1)과 (2)와 같다.

$$MOR_{mean} = 5.3174MOE_{mean} - 21.398 \dots\dots\dots (1)$$

$$MOR_{0.05} = 5.3174MOE_{0.05} - 36.471 \dots\dots\dots (2)$$

여기서, MOR과 MOE의 아래첨자 mean과 0.05는 각각 평균값과 5% 하한값을 나타낸다. 한 등급에서 MOE<sub>0.05</sub>는 국내 등급 기준에 따라 최저 MOE등급 기준에서 0.05 GPa를 더한 값으로 추정하였다. 즉,

E9등급의 경우 9.0-9.99 GPa의 MOE에 해당하므로 9.05 GPa를  $MOE_{0.05}$ 값으로 가정하여 대응되는  $MOR_{0.05}$ 를 구하였다. 이러한 방법으로 계산된 등급별 허용응력값은 Table 2에 나타난 것과 같이 등급이 올라갈수록 허용응력값도 비례하여 올라가는 정상적인 값이 산출되고, 상대적으로 시험자료가 부족한 저등급(E6)과 고등급(E14)의 허용응력값도 이론적으로 추정 가능하다는 이점이 있었다. 그러나 E6등급에서와 같이 산술적인 결과값이다 보니 음의 값(-2.1 MPa)을 갖는 모순이 발생하는 단점을 발견하였다. 이러한 모순점들은 수종별로 최저, 최고 등급을 제한하는 적절한 공학적 판단이 있어야 될 것으로 생각하였다.

### 3.4. 기계등급구분 제안

현 국내 기계등급구분은 육안품질기준과 MOE 기준이 충족되면 해당 허용응력값을 사용해도 좋은 체계로 구성되어있다. 이것은 본 연구의 소나무에 대한 결과가 보여준듯이 과소설계를 야기시키는 위험성을 초래한다. 따라서, 해외에서 적용되는 MOR-MOE 조합으로 이루어진 등급구분 체계가 도입되어야 한다고 생각한다. 본 연구결과를 기준으로 기계등급구조재의 등급을 제안하면, E10등급의 조합체계로 10F-10E (즉, 허용휨강도 10 MPa-평균휨탄성계수 10 GPa), 7F-10E (허용휨강도 7 MPa-평균휨탄성계수 10 GPa) 등과 같이 동일 MOE 기준에 수종별로 다른 MOR을 반영할 수 있도록 세분하는 것이다. 이러한 등급구분 체계를, 본 연구의 소나무 결과에 적용시키면 MOE 10 GPa이상인 개별 구조용재는 모두 7F-10E의 등급을 부여받게 되며, 그 나머지 낮은 등급들은 또 다른 하위 등급으로 구분될 것이다. 따라서, 구조용재로 쓰이는 대표적인 수종에 대한 자료를 축적하여 MOR-MOE 조합을 갖는 기본 등급구분 체계를 결정하고 생산자가 자체 시험 자료분석을 통하여 이러한 조합 등급을 부여할 수 있는 제도도 마련되어야 할 것으로 생각한다.

## 결론

국내 기계등급구조재에 부여된 허용응력값의 타당성을 기존 소나무 휨시험자료를 가지고 분석하였다. 등급별 소나무의 휨허용응력값을 네 가지 분석방법에 의하여 결정하였고 이에 대한 결론은 다음과 같다.

- 기계등급구분 결과 E8, E9, E10이 소나무의 대표적인 등급으로 나타났다.
- 네 가지 분석방법으로 결정된 허용응력값은 모든 등급에서 현행 기준에서 제시된 값보다 낮게 나타났다. 이러한 사실은, 구조설계 안전성에 위험을 초래할 가능성이 있음을 말해주었다.
- MOR-MOE 직선회귀에 근거한 결정방법은 이론적으로 모든 등급범위의 5% 하한값 계산이 가능하였다.
- 현재의 기계등급구분 체계를 개선하기 위하여, MOE단일 기준이 아닌, MOR-MOE 조합 등급기준이 필요할 것으로 판단되었다.

## 사사

본 연구는 산림청 산림과학기술개발사업(과제번호: S111212L200110)의 지원에 의하여 수행되었습니다.

## REFERENCES

- ASTM. 2004. Standard practice for assigning allowable properties for mechanically graded lumber. D6570-04, West Conshohocken, Pa. USA.
- ASTM. 2010. Standard practice for evaluating allowable properties for grades of structural lumber. D 2915-10, West Conshohocken, Pa. USA.
- Architectural Institute of Korea (AIK). 2011. Korean Building Code and Commentary. Kimoondang, Seoul, Korea.
- Barrett, J.D., Jones, E.D., Lau, W. 1994. Canadian lumber properties. Canadian Wood Council.

- Ottawa, ON. Canada.
- Forest Products Laboratory (FPL). 2010. Wood handbook: wood as an engineering material. General Technical Report. FPL-GTR-190, USDA, Forest Service.
- Hong, J.P., Lee, J.J., Park, M.J., Yeo, H.M., Pang, S.J., Kim, C.K., Oh, J.K. 2015. Establishment of Grades and Design Strengths for Machine Graded Lumber in Korea. *Journal of Korean Wood Science & Technology* (in progress).
- Hwang, K.H., Park, J.S., Park, M.J. 2011. Evaluating structural performance of graded domestic softwood lumber. Research report 11-10, Korea Forest Research Institute, Korea Forest Service, Seoul, Korea.
- Korea Forest Service (KFS). 1995. Notification 1995-27; Standard for sizes of Korean softwood structural lumber. Korea.
- KS F 2150:2004. 2004. Method of static bending test for full sized structural lumber. Korean Standards Association. Seoul, Korea.
- KS F 2152:2004. 2004. Establish allowable properties of softwood structural lumber. Korean Standards Association. Seoul, Korea.
- KS F 3020:2013. 2013. Softwood structural lumber. Korean Standards Association. Seoul, Korea.
- KS F 3021:2013. 2013. Structural glued laminated timber. Korean Standards Association. Seoul, Korea.
- Lee, J.J., Kim, G.C., Kim, G.M., Oh, J.K. 2003. Distribution characteristics of bending properties for visual graded lumber of Japanese larch. *Journal of Korean Wood Science & Technology* 31(5): 72-79.
- National Lumber Grades Authority (NLGA). 2007. Standard Grading Rules for Canadian Lumber. NLGA, New Westminster, BC. Canada.
- Oh, J.K., Kim, G.C., Lee, J.J. 2000. Knot distribution and machine grades of Japanese larch lumber. *Proceedings of the Korean society of wood and technology* 2000(1): 41-47.
- Pang, S.J., Oh, J.K., Park, C.Y., Park, J.S., Park, M.J., Lee, J.J. 2011a. Characteristic evaluation of bending strength distributions on revised Korean visual grading rule. *Journal of Korean Wood Science & Technology* 39(1): 1-7.
- Pang, S.J., Park, J.S., Hwang, K.H., Jeong, G.Y., Park, M.J., Lee, J.J. 2011b. Bending strength of Korean softwood species for 120 × 180 mm structural members. *Journal of Korean Wood Science & Technology* 39(5): 444-450.
- Pang, S.J., Lee, J.J., Oh, J.K. 2013a. Effect of test zone selection for evaluating bending strength of lumber. *Journal of Korean Wood Science & Technology* 41(5): 392-398.
- Pang, S.J., Lee, J.J., Oh, J.K. 2013b. Evaluation of allowable bending stress of dimension lumber: confidence levels and size-adjustment. *Journal of Korean Wood Science & Technology* 41(5): 432-439.
- Western Wood Products Association (WWPA). 2004. Western Lumber Grading Rules. WWPA, Portland, OR. USA.