

# 국내 기계등급구조재의 등급구분체계 및 기준설계값 결정방법 연구<sup>1</sup>

홍 정 표<sup>2</sup> · 이 전 제<sup>3</sup> · 박 문 재<sup>4</sup> · 여 환 명<sup>3</sup> · 방 성 준<sup>3</sup> · 김 철 기<sup>3</sup> · 오 정 권<sup>2,†</sup>

## Determination of Grades and Design Strengths of Machine Graded Lumber in Korea<sup>1</sup>

Jung-Pyo Hong<sup>2</sup> · Jun-Jae Lee<sup>3</sup> · Moon-Jae Park<sup>4</sup> · Hwanmyeong Yeo<sup>3</sup> ·  
Sung-Jun Pang<sup>3</sup> · Chul-Ki Kim<sup>3</sup> · Jung-Kwon Oh<sup>2,†</sup>

### 요 약

국내외 기계등급제재목(구조재 및 층재)의 등급기준 및 설계강도 산출방법을 비교 분석하고 국내 제재산업 실정을 고려한 평균 탄성계수(modulus of elasticity, 이하 MOE) 기준방법 적용을 제안하였다. 먼저 올바른 기계등급제재목 기준 정착을 위해 기계등급구조재와 기계등급층재의 공통점과 차이점을 설명하였다. 최소 고정 MOE 기준 등급을 사용하는 국내 기준은 등급구분에는 편리하나 휨강도(modulus of rupture, 이하 MOR) 예측과 자원이용도 측면에서는 효율성이 낮은 것으로 파악되었다. 해외에서 사용되는 평균 MOE 기준 방법은 초기 컴퓨터 기반 작동을 요구하나 MOR-MOE 직선회귀에 근거한 합리적인 MOR 예측과 품질관리 측면에서 효율성이 높은 것으로 분석되었다. 무엇보다도 현 국내 기계등급구조재 등급체계는 수종별 강도 특성을 반영하지 못하고 있다는 것이 가장 큰 문제점으로 분석되었으며 이러한 결과를 기반으로 MOR-MOE 직선회귀분석에 근거한 기계등급제재목 등급기준 및 기준설계값 산출 방법 적용을 제안하였다. 이를 통하여 궁극적으로 부가가치가 높은 국산 기계등급구조재 생산 활성화를 이루고, 기계등급구조재의 층재 전용 기능에 따른 구조용 집성재 가격경쟁력 제고 효과를 얻을 수 있다고 사료되었다.

### ABSTRACT

Based on comparative studies on standards and grading procedures of machine graded lumber in Korea and other countries, this study proposed a procedure of determining the grade classification and design strengths of domestic

<sup>1</sup> Date Received March 25, 2015, Date Accepted May 13, 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) : 오정권(e-mail: jkoh75@hotmail.com)

machine graded lumber. Differences between machine stress rated lumber and E-rated laminations were detailed in order to clarify the need for the procedure improvement. To this improvement the use of average MOE requirement for grading was introduced instead of the fixed minimum MOE requirement which is currently used in the Korean standards. It was found that the fixed minimum MOE requirement method was easier for an inspector to grade but, less efficient as a strength predictor than the average MOE requirement method. The advantage of average MOE requirement method is statistically MOR-MOE regression-based MOR prediction and highly efficient in quality control though it requires a computer-aided operation system in an initial setup. A major weakness of the current Korean grading system was found that different strength characteristics depending on wood species were not reflected on the grade classification and the tabulated allowable design stress. The proposed procedures were developed taking advantages of respective merits of both methods and based on MOR-MOE regression analysis. Through this procedure, the grades of machine stress rated lumber should be revised to become interchangeable with E-rated lamination, which would be beneficial to the cost competitiveness of domestic machine graded lumber and glued laminated timber industry.

**Keywords :** machine grading, machine stress rated, allowable design stress, modulus of rupture, modulus of elasticity, structural lumber

## 1. 서 론

구조용 제재목 생산에 있어 강도적 성능을 평가하고 이에 따른 등급을 부여하는 작업은 최종적으로 목구조물의 성능 및 안전성과 직결된다. 따라서, 이에 대한 등급체계와 품질관리 기준은 실제 사용상태와 가장 근접한 시험방법으로 실시하고, 이로부터 얻은 자료에 근거하여 합리적 방법으로 결정되어야 한다(Madsen 1992). KS F 3020-침엽수 구조용재(2013)에 따르면 국내 구조용 제재목 등급구분 방법에는 육안등급구분방법과 기계등급구분방법으로 구분된다. 전문 육안등급사 자격 관리 체계가 미비하고 국산 육안등급 구조용 제재목 수요가 전무 하다시피 한 국내 시장상황에서, 그나마 기계등급구조용 제재목은 국내 구조용집성재 제조사들이 자체 보유한 등급구분기계를 이용하여 기계등급층재 제품으로 지속적 생산이 이루어지고 있다. 구조재료 사용이란 측면에서 기계등급구조재와 기계등급층재는 그 목적이 같으나 엄밀히 구분하면 이 두 생산품은 각각 다른 품질기준에 의해 생산되는 서로 다른 제품이다. 기계등급구조재는 KS F 3020-침엽수 구조재에 규정된 품질 기준을 따르고 기계등급층재는 KS F 3021-구조용 집성재(2013) 기준을 따른다. 이 두 가지 기준의 공통점은 강도에측기준(strength predictor)으로 휨

탄성계수(Modulus of Elasticity, 이하 MOE)를 이용한다(Divos *et al.* 1997; Ayarkwa *et al.* 2000; Galligan *et al.* 2000; FPL 2010)는 점이며, 가장 큰 차이는 육안검사에 의한 강도감소 결점 측정 기준이다.

국산 수종에 대한 육안등급구조재는 1980년 후반부터 현재까지 꾸준한 연구가 이어져 오고 있으나(Jang 1989; Oh *et al.* 1993; Oh 1996; Park and Shim 1998; Oh *et al.* 2000; Lee *et al.* 2003; Pang *et al.* 2011a, 2011b, 2013a, 2013b; Kong *et al.* 2015) 기계등급제재목과 관련된 연구는 Shim *et al.* (2005)이 2 × 6 소나무와 잣나무 기계등급구조재에 대한 장기하중 수준 결정을 위한 휨파괴 시험과 Oh *et al.* (2000)이 기계등급장치를 이용한 낙엽송 실대재 MOE 측정 연구 정도만이 수행되었다. 기계등급구조재의 기준(설계)강도값 산출에 대한 시험과 연구는 시도된 적이 없다. 국내에서 제시된 기계등급제재목(구조재 및 층재)의 등급별 기준 강도값들은 해외 기준자료에 근거한 수치로 파악되며, 등급별 설계값을 산출하는 명확한 국내 기준도 마련되어 있지 않은 것으로 보인다.

현재 건축구조기준(이하 KBC)과 KS F 3020에 제시된 허용응력설계값도 동일 등급에 대하여 서로 다른 기준과 수치를 보이고 있어 설계자들에게 사용의 혼란을 가져오고 있다(AIK 2011; KS F 3020 2013).

**Table 1.** Essential documents regulating machine graded lumber in Korea and foreign countries

| Korea  | Foreign countries   |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Korea forest research institute Notification 2009-1; Standard for sizes of Korean softwood structural lumber</li> <li>• KS F 3020. Softwood structural lumber</li> <li>• KS F 3021. Structural glued laminated timber</li> <li>• Korean Building Code and Commentary</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• [USA] Western Lumber Grading Rules</li> <li>• [Canada] Standard Grading Rules for Canadian Lumber</li> <li>• [Europe] EN 14081-2. Timber structures-Strength graded structural timber with rectangular cross section</li> <li>• [Japan] Wood Frame Building Code and Commentary</li> </ul> |

무엇보다도 가장 큰 문제는 수종별 강도특성에 대한 고려 없이 단순히 측정된 MOE를 기준으로 일률적으로 허용응력설계값이 제시되고 있어 신뢰성에 의문을 갖게 한다는 점이다. 예를 들면, 현 등급시스템에서는 육안품질기준을 모두 충족한 기계등급 E7을 갖는 삼나무와 낙엽송은 동일한 허용응력설계값(예, 휨허용응력 7.2 MPa)을 사용하도록 되어 있다. 동일탄성계수를 갖더라도 수종에 따라 휨, 인장, 압축 등의 허용설계값이 서로 다르다는 것은 잘 알려진 사실이다(FPL 2010).

따라서, 본 논문의 목적은 기계등급제재목과 관련한 국내 기준을 검토하고 국내 여건에 맞는 기계등급제재목의 기본설계값(구조재) 또는 합격기준값(층재) 결정 방법을 검토·분석하고자 하였다. 특히, 강도에측기준값으로 사용되는 MOE와 관련하여 해외에서 사용하는 평균 MOE 방법과 국내에서 적용하고 있는 고정 최소 MOE 방법을 비교 설명하고 각 방법의 장단점을 분석하여 기계등급제재목의 등급구분방법과 기본설계값 산출방법을 제안하였다.

## 2. 재료 및 방법

국내 기계등급제재목 등급구분기준 및 기준설계값 산출방법과 관련한 국내의 문헌들을 조사·분석하였다. 기계등급제재목 등급구분 및 품질기준과 관련하여 KS F 3020-침엽수 구조용재, KS F 3021-구조용 집성재를 비교 분석하였고, 등급별 설계허용응력 검토를 위하여 건축구조기준(KBC)과 KS F 3020를 검토하였다. 본 연구에서 참고된 국내외 주요 문헌자료는 Table 1과 같다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 기계등급구조재와 기계등급층재

국내 기계등급제재목은 KS F 3020-침엽수 구조용재와 KS F 3021-구조용 집성재 표준문서에 각각 기계등급구조재와 기계등급층재로 그 등급구분 방법과 품질기준이 제시되어 있다. 북미 기준(WWPA 2004; NLGA 2007) 용어로 구분하면 각각 기계응력등급구조재(일반적으로 국내에서 통용되는 Machine Stress Rated lumber, 이하 MSR)와 탄성계수등급층재(E-rated lamination, 이하 E-rated 층재)라 할 수 있으며, Table 2에 KS F 3020의 기계등급구조재와 KS F 3021의 기계등급층재의 등급구분 및 육안검사 품질기준을 상호 비교하였다.

기계를 통하여 측정된 MOE를 기준으로 목재를 등급 구분한다는 점에서는 같지만, 사용용도 및 품질기준 측면에서는 다른 제품으로 볼 수 있다. 기계등급구조재는 육안등급구조재를 대체하는 구조재로 일반 구조용을 주 목적으로 하며 해외 기준에서는 제품표시에 휨허용응력과 휨탄성계수를 포함시킨다(예, 1650F<sub>b</sub>-1.5E). 따라서 생산자들은 기준에 적합한 기계등급구조재가 생산되는지에 대한 지속적인 MOR-MOE 관계 모니터링과 이를 근거로 한 품질관리를 필요로 한다. 기계등급층재는 적층효과로 결점보완(Theandersson and Larsen 2003)을 기대할 수 있고 핑거조인트와 같이 길이접합 방법으로 주요 결점이 제거될 수 있는 반면, 기계등급구조재는 일반적으로 재가공없이 구조용재로 사용되기 때문에 기계등급층재보다 육안검사 기준이 까다롭다고 볼 수 있다.

**Table 2.** Grades and visual quality standard of machine stress rated lumber and E-rated laminations

|                     | Machine stress rated lumber<br>(KS F 3020)   | E-rated lamination<br>(KS F 3021)  |
|---------------------|--|--|
| Grades*             | 9 Grades: From E6 to E14   | 11 Grades: From E5 to E12 and E14, E16, E18  |
| Visual restrictions | wane: not more than 30%<br>check and split: not more than 2 times the width<br>shake: not more than 1/2 the thickness<br>decay: light<br>warp: not severe<br>twist: suitable for use | rot: not allowed<br>split: very light<br>stain: light<br>grain: light<br>other defects: very light<br>knot: limited when used for outer lamination |

\* In grade marks, "E" represents modulus of elasticity and the following number means the minimum requirement for the modulus of elasticity of the grade.

기계등급층재의 경우, 구조용집성재 제조를 목적으로 생산되는 제품이기 때문에 국내외 기준 모두에서 휨허용응력에 대한 표시를 요구하지 않는다. 표본 추출을 통한 휨강도 시험 결과의 성능 품질기준 적합여부와 용이결점이 주요 등급적합 판단기준이 된다. 개별 층재들이 접합·접착되어 구조용 집성재가 제작된 후, 최종 집성재 허용응력이 설계자들의 관심사항이기 때문에 개별층재의 성능기준 합격여부만으로 등급품질관리가 진행되며 개별 층재의 설계응력은 주요 정보가 아니다. 국내 기준에서 기계등급구조재의 육안검사 기준이 상대적으로 세밀하게 규정되어 있고 등급구분 단계(9등급)가 적은 반면, 기계등급층재의 등급구분은 총 11단계 등급으로 나뉘어져 있다. 기계등급층재가 최외층재로 사용될 경우 용이지름비(표면 용이의 긴 지름/층재의 너비 × 100%)에 대한 육안검사 기준을 두고 있으나 전반적인 육안검사 기준이 기계등급구조재에 비하여 엄격하지 않음을 알 수 있다. 이와 같이 기계등급구조재와 기계등급층재는 다른 등급체계와 기준에 의해서 생산되는 서로 다른 제품이지만, 보다 엄격한 기준을 갖는 기계등급구조재는 기계등급층재로 전용이 용이함을 알 수 있다. 따라서, 국산 구조용 제재목 시장 확대 측면에서, 구조용집성재 생산에 따른 국산 기계등급층재 수요를 일반 기계등급구조재 생산자들이 생산·공급하는 분업체계를 장려함으로써 부가가치가 높은 국산 구조용 제재산업 활성화를 이루고 구조용 집성재 가격경쟁력을 제고하는 효과를 얻을 수 있다고 본다. 이것이 본 연구의 궁극적인 목적이라

하겠으며, 이를 위해선 기계등급구조재의 등급체계 및 기준설계강도에 대한 개선이 선행되어야 할 것으로 판단하였다.

### 3.2. 허용설계응력 분석

건축구조기준(KBC)에 따라 허용응력설계법이 목구조에 사용되고 있는 국내 상황에서, 설계에 필요한 집엽수 기계등급구조재의 설계허용응력은 KS F 3020과 KBC에 제시되어 있다. Table 3에 KS F 3020과 KBC의 장기허용허용응력을 비교하였다. KS F 3020에서는 E6등급에서 E14등급까지 총 9등급에 대한 휨강도( $F_b$ ), 섬유방향인장강도( $F_{t//}$ ), 섬유방향압축강도( $F_{c//}$ ), 섬유직각방향압축강도( $F_{c\perp}$ ), 전단강도( $F_v$ )에 대한 허용응력과 탄성계수(MOE)가 제시되어 있다. KBC는 E7, E9, E11, E13, E15인 5단계 등급에 대한  $F_b$ ,  $F_{t//}$ ,  $F_{c//}$ , MOE 만을 제시하고 있으며( $F_{c\perp}$ ,  $F_v$  없음), KS F 3020에 제시되어 있는 값과 상이하러, 목구조 설계자들에게 혼란을 초래하고 있다. KS와 KBC 사이에 차이를 보이는 이유는 명확히 파악할 수는 없었으나, MOE 관련 등급구분기준에 큰 차이가 있음을 알 수 있었다. E11등급을 예로 들어 설명하면, KS는 E11등급 부여기준을  $11 \text{ GPa} \leq \text{MOE} < 12 \text{ GPa}$ 로, 구간범위 1 GPa에서 최소값을 기준으로 등급판정을 규정하고 있지만, KBC는  $10 \text{ GPa} \leq \text{MOE} < 12 \text{ GPa}$ 로 구간 범위가 2 GPa인 중간 MOE 값(11 GPa)을 기준으로 함을 알 수 있었다. 과거 개정판들을 추적해 보면, KS F 3020가 2013년 개정되

**Table 3.** Allowable stress design values\* of machine stress rated lumber in KS F 3020:2013 and KBC 2009

| Grade | $F_b$<br>(MPa) |      | $F_t$<br>(MPa) |      | $F_{c//}$<br>(MPa) |      | $F_{c\perp}$<br>(MPa) |     | $F_v$<br>(MPa) |     | $MOE$<br>(GPa) |       |
|-------|----------------|------|----------------|------|--------------------|------|-----------------------|-----|----------------|-----|----------------|-------|
|       | KS**           | KBC  | KS             | KBC  | KS                 | KBC  | KS                    | KBC | KS             | KBC | KS             | KBC   |
| E6    | 6.2            | -    | 2.4            | -    | 7.2                | -    | 2.0                   | -   | 0.9            | -   | 6000           | -     |
| E7    | 7.2            | 6.0  | 3.1            | 2.5  | 8.5                | 7.0  | 2.0                   | -   | 0.9            | -   | 7000           | 7000  |
| E8    | 8.2            | -    | 4.1            | -    | 9.6                | -    | 2.5                   | -   | 1.0            | -   | 8000           | -     |
| E9    | 9.0            | 8.5  | 5.5            | 5.0  | 10.1               | 10.0 | 2.5                   | -   | 1.0            | -   | 9000           | 8000  |
| E10   | 10.0           | -    | 6.0            | -    | 11.2               | -    | 3.0                   | -   | 1.1            | -   | 10000          | -     |
| E11   | 11.3           | 11.0 | 7.4            | 7.0  | 11.7               | 12.0 | 3.0                   | -   | 1.1            | -   | 11000          | 10000 |
| E12   | 12.4           | -    | 8.2            | -    | 12.0               | -    | 3.5                   | -   | 1.2            | -   | 12000          | -     |
| E13   | 14.0           | 15.0 | 10.7           | 10.0 | 12.8               | 13.0 | 3.5                   | -   | 1.2            | -   | 13000          | 13000 |
| E14   | 16.0           | -    | 13.0           | -    | 13.5               | -    | 3.5                   | -   | 1.2            | -   | 14000          | -     |
| E15   | -              | 17.0 | -              | 12.0 | -                  | 15.0 | -                     | -   | -              | -   | -              | 15000 |

\*  $F_b$ : allowable bending strength,  $F_t$ : allowable tensile strength parallel to grain,  $F_{c//}$ : allowable compression strength parallel to grain,  $F_{c\perp}$ : allowable compression strength perpendicular to grain,  $MOE$ : modulus of elasticity

\*\* KS: KS F 3020:2013, KBC: Korean Building Code

기 전의 2007년도판에는 KS F 3020도 KBC와 같은 중간 MOE값 기준 등급부여기준을 가지고 있었다. 2007년도 KS는 기계등급구조재에 대한 등급별 장기허용응력표가 제시되어 있지 않았으며, 단지 산림청고시 제1995-27호 “침엽수 구조용재 제재 규칙”(KFS 1995)에 근거하여 육안등급장기허용응력이 결정되었으며 기계등급구조재의 강도 성질은 육안등급구조재 등급과의 연관관계 표에 따라 적용한다는 설명만이 존재하였다. 추정하건대 현재 제시된 기계등급구조재의 장기허용응력표는 강도시험값에 의한 것이 아닌, 앞에서 설명된 육안등급구조재의 허용응력값을 비교 분석하여 결정된 값이라 사료되며, 이로 인해 개정이 진행되면서 KS와 KBC가 차이가 발생된 것으로 생각되었다. 이러한 차이는 차후 기준 개정작업을 통해서 일관된 설계값으로 변경하는 작업이 필요할 것으로 보인다.

### 3.3. 등급 기준 분석

KS F 3020에 따르면 기계등급은 수종과 무관하게 전적으로 휨MOE에 의해서만 결정되도록 규정되고 있다. KS F 3021 (구조용 집성재)과 같이 기계등급

층재의 수종별 차이를 휨MOR 또는 인장강도 합격 기준과 같은 품질기준을 마련함으로써 어느 정도 수종에 따른 강도성능 차이를 반영할 수 있는 조건이 기계등급구조재 품질기준에도 필요한 것으로 사료되었고, 향후 KS F 3020 (침엽수 구조용재) 기계등급구조재 등급기준 개정작업 시, 이에 대한 논의가 반드시 있어야 될 것으로 판단되었다. 참고로 해외의 경우 유럽(EN 14081 2010)은 휨MOR, 밀도, 평균 MOE 등을 기준으로 강도등급을 구분하며 북미(WWPA 2004; NLGA 2007)는 휨강도, 밀도, 인장강도, 평균MOE 및 수종군 분류에 의해 강도등급을 구분함으로써 수종에 따른 강도특성 구분이 가능하다고 볼 수 있다. 국내 기준과 유사한 일본 기준(AIJ 2006) 또한 등급별 설계기준강도가 수종군별로 각각 제시되어 있었다. 이와 같이 현 국내 기계등급구조재의 강도등급 체계는 구조설계 측면에서 보완 및 개선할 점들이 많다고 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 일반적으로 북미 및 유럽에서 적용하고 있는 MOR-MOE 관계에 근거한 평균 MOE 기준 기계등급구조재 강도등급 체계를 도입하여 국내실정에 적합한 등급구분 및 기준설계값 산출 방법 제안을 다음 절부터 설명하였다.

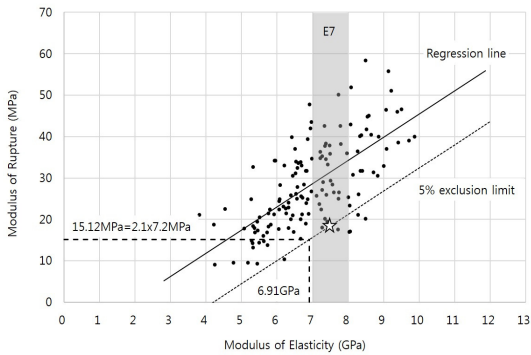


Fig. 1. Relationship between MOR and MOE of machine stress rated lumber (Oh, 2009).

### 3.4. 국내 기계등급구분

국내 기계등급구조재 및 층재의 강도등급은 기본적으로 측정된 휨MOE 값이 속하는 등급구간에 따라 결정되는 최소 휨MOE 방법이 사용되었다. 측정된 휨MOE로 결정된 강도등급에 따라 휨설계강도값이 제시되었다. 반면, 북미나 유럽은 강도등급에 따라 제시된 휨MOR을 만족시키는 평균 휨MOE 값을 강도등급 기준으로 삼았다. Oh (2009)가 수행한 국산 소나무(*Pinus Densiflora*) 휨시험 연구자료에 근거한 Fig. 1을 예로 설명하면, KS국내 등급구분 기준과 설계강도 산출은 E7등급의 경우  $7 \text{ GPa} \leq \text{MOE} < 8 \text{ GPa}$  구간(음영부분)에 속하는 제재목이 해당되며 허용휨설계응력은 KS기준  $7.2 \text{ MPa}$ 으로 결정하게 된다. 최소 휨MOE 방법의 기준 MOR 값 결정은 설계 기준 개발자들이 동일 등급의 제재목을 가지고 시험하여 5% 하한치를 산출하게 되며 생산자들은 생산되는 E7등급이 MOE 7 GPa 이상 및 MOR 7.2 MPa 기준에 충족되도록 품질관리를 하게 된다. 수종별 각 등급단계별로 동일한 작업을 수행하면 강도등급별 설계값을 산출할 수 있다. 그러나 현재의 기준은 수종구분 없이 등급별 단일 설계값을 제시하고 있는데, 보다 신뢰성 있는 설계값을 산출하기 위해서는 대표 수종별 또는 수종군별 MOR-MOE 관계 자료를 통하여 각 등급별 설계값이 산출되어야 한다. 이러한 방법의 단점은 상대적으로 적은 생산수율을 갖는 저등

급 및 고등급 시편을 얻기 위해 방대한 제재목 자원이 소요되며, MOE에 의해 주도되는 기준 설정값이기에, 생산측면에서는 기준 MOR 값과 차이가 발생하는 결과를 자주 발생하게 된다(Fig. 1 내 별표식 ☆ 참조). 또한, 생산자 측은 어느 한 등급의 MOE구간에서 전체적으로 MOR 값이 낮아 기준을 충족하지 못하게 되는 경우, 동일등급에 대한 일괄 부적합품 처리가 되어 자원의 비효율적 이용과 생산단위 품질관리의 어려움을 초래하게 된다. 장점으로는 개별 구조재의 측정된 MOE에 따라 어떤 등급구간에 속하는지에 대한 판단이 용이하여, 수동으로 진행되는 생산공장에서는 등급구분이 빠르게 진행될 수 있다.

### 3.5. 해외기계등급구분기준

북미나 유럽에서 사용되는 평균 MOE 기준 방법은 등급별 기준 MOR을 충족시키는데 필요한 평균 MOE를 추정하여 사용한다. 생산자의 품질관리 측면에서 설명하면, Table 4에 가상으로 생성된 자료의 예로, 측정된 개별 제재목의 MOE를 내림차순으로 정리하여 내림방향으로 MOE를 누적이동평균하면서 평균 MOE 기준을 충족하는지의 여부를 판단함과 동시에 이동한 차수까지의 5% MOR 하한치를 계산하여 기준 MOR 값을 충족하면 이때의 차수까지를 선순위 등급으로 정하고 이 MOE 값을 품질관리 등급기준의 최소치(near-minimum MOE)로 결정하는 것이다. 차순위 등급들은 선순위 등급으로 결정된 제재목은 제외하고, 같은 방법을 반복 수행하여 결정하게 된다. 설계기준 개발자들은 같은 방법으로 합리적인 평균 기준 MOE와 이에 동반되는 기준 MOR 값을 정하여 결정하게 된다. 이러한 순위법(ranking method)은 일정규모 이상의 MOR-MOE 시험자료를 요구하며, 지속적으로 특정 제품을 생산하는 제재소와 같이 컴퓨터 프로그램으로 자동 계산되어 생산공정에 반영될 수 있는 곳에 유용할 것으로 판단된다. 구조용제재목 생산이 많지 않은 국내 적용에는 아직 이른 방법이라 판단되었다.

일반적으로 이러한 평균 MOE 기준 방법을 보다 쉽게 이용하는 것은 Fig. 1과 같이 MOR-MOE 관계

**Table 4.** Example of determining the near-minimum modulus of elasticity for Grade E12 in the average modulus of elasticity method

| Rank | MOE (GPa) | MOR (MPa) | Ave. MOE (GPa) | 5% MOR (MPa) |
|------|-----------|-----------|----------------|--------------|
| ...  | ...       | ...       | ...            | ...          |
| 102  | 10.9      | 40        | 12.20          | 25.00        |
| 103  | 10.8      | 39        | 12.15          | 25.00        |
| 104* | 10.5      | 47        | 12.03          | 25.50        |
| 105  | 10.1      | 39        | 11.88          | 25.00        |
| 106  | 9.8       | 46        | 11.72          | 25.50        |
| 107  | 9.8       | 51        | 11.62          | 26.00        |
| ...  | ...       | ...       | ...            | ...          |

\* 10.5 GPa (rank 104) is determined as the min. MOE of Grade E12 satisfying the requirement of MOR for Grade E12 (i.e. 21 MPa)

그래프에서 직선회귀식과 경험식을 이용하는 것이라 생각되었다. 방법을 설명하면, 먼저 MOR-MOE 간의 직선회귀선을 구하고 이를 이용하여 정규분포 가정 하에  $1.64 \times$  표준오차만큼 MOR 값을 낮춰 5% 하한치 선(5% exclusion limit)을 구하게 된다. 이 선을 기준으로 하여 기준 MOR을 찾고 이에 해당되는 MOE 값을 평균 MOE 값의 최소값(near-minimum MOE)으로 정한다. Fig. 1에서 기준 E7등급의 경우 7.2 MPa 기준 MOR 강도에 2.1를 곱한 15.12 MPa를 찾고 이에 해당되는 MOE 6.91 GPa가 평균 MOE 기준의 최소값(또는 5% MOE 하한치)이 되며, 평균 MOE는 변이계수(coefficient of variation)에 근거하여 통계적으로 구하거나(Green *et al.* 2006), 경험적으로 6.91 MPa에 10% (0.7 MPa)를 더한 7.61 MPa를 얻는다(Galligan 2000). E7등급에 대한 평균 MOE 기준을 대략 7.5 MPa로 규정하였다면, 이 예는 MOR 및 MOE 등급기준을 모두 만족하게 된다. 이 방법의 장점은 설계기준 개발자나 생산품질관리자 모두에게 회귀직선에 근거하여 쉽게 기준값 설정 및 품질관리가 용이하다고 판단되었다. 또한 MOE는 MOR을 추정하기 위한 강도예측값 역할이라는 기본적인 기계등급구조재 등급구분 개념에 충실하며 보다 합리적인 MOR 예측으로 자원을 효율적으로 사용할 수 있다는 것이다. 단점으로는 생산자의 품질관리에 사용하는데 있어 다소 복잡하며 많은 경험의

필요할 것으로 생각되었다. 즉, 지속적인 MOR-MOE 자료 추가 갱신에 따른 평균 MOE의 최소 설정값이 변화됨에 따라 꾸준한 모니터링으로 등급구분에 반영되어야 할 것이다.

### 3.6. 국내 기계등급구조재 등급체계 개선방안

국내 기계등급제재목 생산의 활성화를 위해선 먼저 수종특성을 고려한 등급기준과 기준설계값 개선이 필요하다고 전술하였다. 국내 구조용 제재목 산업이 낙후된 상황에서 해외의 기준을 사용하기에는 다소 무리가 있을 수도 있기 때문에, 현 국내 기준의 장점과 해외 기준 장점을 결합한 최소 MOE 등급기준에 근거한 직선회귀 방법이 적합하다고 판단되었다. 이를 위하여 최소 MOE 등급기준 구분을 과거에 적용하던 구간의 중간값을 평균값으로 하고 직선회귀방법에 따라 기준 MOR 설계값을 산출하는 방법이다. 즉, 설계기준개발자들은 평균 MOE 기준과 기준 MOR 설계값을 등급별로, Fig. 1 예에서와 같이 별표식의 위치에서 정하는 것이다. 생산자들은 기존의 MOE 등급구분 방법을 따르거나, 기존의 방법 그대로 평균값의 최소 MOE 값을 찾는 방법으로 결정된 평균 MOE 기준과 MOR 기준을 충족하는지를 검사하여 품질관리를 진행하는 것이다.

이를 위해 선행되어야 할 작업은 체계적인 실대개

휨강도 시험이 진행되어야 할 것으로 본다. 대표적 구조용재 수종인 국산 낙엽송, 소나무, 잣나무, 삼나무 등에 대한 시험을 실시를 제안하며 기계등급층재의 전용을 고려한 기준 시편크기도 결정되어야 한다고 판단되었다. Park and Jung (2010)의 연구결과와 같이 동일 수종 내 지역별 기계적·물리적 특성 차이가 존재하므로 주요 제재소 생산량을 기준으로 시편 생산을 할당하는 것도 고려되어야 할 것으로 사료되었다. Park *et al.* (2004)의 연구에 근거하여 시편수는 수종 및 산지별로 각각 최소 500개 이상이 적합할 것으로 판단되며 장기적인 연구계획을 통해 시험자료의 축적 및 모니터링 체계도 마련되어야 할 것으로 사료되었다.

#### 4. 결론

국내외 기계등급제재목의 등급체계기준 및 설계강도 산출방법을 비교 분석하였다. 국내 등급구분 기준과 기준설계값 결정방법은 면밀한 계획을 통하여 개선 및 발전시켜야 될 것으로 판단되었으며 이를 위한 방법을 제안하였다. 본 연구에서 얻은 결론은 아래와 같다.

- 현 국내 기계등급구조재 등급체계 및 기준설계값은 수종별 강도 특성을 고려하고 있지 않기 때문에 설계자 입장에서 제시된 기준설계값 사용에 혼란을 가져오는 것으로 파악되었다.
- 최소 MOE 기준 등급을 사용하는 현 기준은 평균 MOE 기준 방법과 비교하여 MOR 예측과 자원이용도 측면에서는 효율성이 낮은 것으로 분석되었다.
- 해외에서 사용되는 평균 MOE 기준 방법은 등급별 기준 MOR을 충족시키는데 필요한 평균 MOE를 기준으로 사용하는 것이며, 적용측면에서는 다소 복잡할 수 있으나 합리적인 MOR 예측과 자원을 효율적으로 이용할 수 있다는 장점이 있는 것으로 파악되었다.
- 분석된 국내외 기준의 장점을 찾아, 국내에 적

용 가능한 기계등급제재목 등급기준 및 기준설계값 산출방법을 제시하였다.

- 기계등급구조재의 등급체계에 대한 개선이 선행되어 부가가치가 높은 국산 기계등급 구조용 제재산업 활성화를 이루고 구조용 집성재 가격경쟁력을 제고하는 효과를 얻을 수 있다고 사료되었다.

#### 사 사

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

#### REFERENCES

- Ayarkwa, J., Hirashima, Y., Sasaki, Y. 2000. Predicting modulus of rupture of solid and finger-jointed tropical African hardwoods using longitudinal vibration. *Forest products journal* 51(1): 85-92.
- Architectural Institute of Japan (AIJ). 2006. *Wood Frame Building Code and Commentary*. Architectural Institute of Japan, Tokyo, Japan.
- Architectural Institute of Korea (AIK). 2011. *Korean Building Code and Commentary*. Kimoondang, Seoul, Korea.
- Divos, F., Tanaka, T. 1997. Lumber strength estimation by multiple regression. *Hozforschung* 51: 467-471.
- EN 14081-2: 2010. 2010. *Timber structures-Strength graded structural timber with rectangular cross section. Part 2: Machine grading; additional requirements for initial type testing*. British Standard Institute. London, UK.
- Forest Products Laboratory (FPL). 2010. *Wood handbook: wood as an engineering material. General Technical Report. FPL-GTR-190*, USDA, Forest Service.
- Galligan, W.L., McDonald, K.A. 2000. *Machine*



- grading of lumber: practical concerns for lumber producers. General Technical Report FPL-GTR-7, USDA, Forest Service.
- Green, D.W., Gorman, T.M., Evans, J.W., Murphy, J.F. 2006. Mechanical grading of round timber beams. *Journal of materials in civil engineering* 18(10): 1-10.
- Jang, S.S. 1989. Measurement and modification of allowable properties of wood. *Journal of Korean Wood Science & Technology* 17(2): 74-83.
- Kong, J.H., Jeong, G.Y. 2015. Review of visual grading and allowable stress determination methodologies for domestic softwood. *Journal of the Korean Wood Science & Technology* 43(1): 25-35.
- Korea Forest Service (KFS). 1995. Notification 1995-27; Standard for sizes of Korean softwood structural lumber. 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.
- Madsen, B. 1992. Structural behavior of timber. Timber Engineering Ltd., North Vancouver, BC, Canada.
- National Lumber Grades Authority (NLGA). 2007. Standard Grading Rules for Canadian Lumber. NLGA, New Westminster, BC. Canada.
- Oh, J.K. 2009. Development of bending strength prediction model for structural lumber using x-ray radiation. Doctoral dissertation, department of forest sciences graduate school, Seoul National University, Seoul, South Korea.
- 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.
- Oh, S.C. 1996. Assignment of the allowable design values for domestic softwood structural lumber-structural I-grade. *Journal of the Korean Wood Science & Technology* 24(1): 11-16.
- Oh, S.C., Park, M.J., Shim, K. 1993. Stress grading of domestic softwood 2 × 4 lumber. *Journal of the Korea furniture Society* 4(1): 8-13.
- 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 the Korean Wood Science & Technology* 41(5): 432-439.
- Park, B.S., Jung, S.H. 2010. Physical properties of domestic major wood species. Research report 10-29, Korea Forest Research Institute, Korea Forest Service, Seoul, Korea.
- Park, C.Y., Kim, H.K., Lee, J.J. 2004. Study on soft conversion from ASD to RBD code in Larch. *Journal of the Korean Wood Science & Technology* 32(5): 45-50.
- Park, M.J., Shim, K.B. 1998. Establishing allowable

- design stress of domestic structural lumber. Proceedings of the Korean society of wood science and technology 1998: 127-133.
- Shim, K.B., Park, J.H., Lee, D.S., Park, M.J., Yeo, H.M., Lee, J.H. 2005. Long-term loading structural behavior of domestic softwood structural lumber. Research report 05-13, Korea Forest Research Institute, Korea Forest Service, Seoul, Korea.
- Thelandersson, S., Larsen, H.J. 2003. Timber engineering. John Wiley & Sons Ltd. West Sussex, England.
- Western Wood Products Association (WWPA). 2004. Western Lumber Grading Rules. WWPA, Portland, OR. USA.