

# 國產材의 破壞靱性에 관한 研究(I) \*<sup>1</sup>

— 모 — 드 I 破壞時의 破壞靱性 —

李 銓 濟 \*<sup>2</sup>

## Study on the Fracture Toughness of Wood Grown in Korea(I) \*<sup>1</sup>

— Mode I Fracture Toughness —

Jun Jae Lee \*<sup>2</sup>

### SUMMARY

The fracture toughness of two species, *Pinus rigida* MILL and *Pinus koraiensis* S. et Z. grown in Korea, was investigated by means of single edge notch beam specimen for the six principal systems of crack propagation in wood. The values of the fracture toughness for the LR and the LT systems (KICLR and KICLT) were found to be similar to each other and about 8 times greater than those for the other systems (KICRL, KICTL and KICTR) in both species. The results indicate that the characteristics of fracture toughness in three principal directions of wood (L, R, T direction) are quite different from those of bending strength for the responsible direction.

To predict KIC value based on the variation of specific gravity, the experimental values of KICLT and KICTL were compared to the predicted values by published relationship between KIC and specific gravity. However, there were 10 to 25% differences between the former and the latter.

### 1. 서 론

양질의 대경원목의 고갈과 더불어 산림보유국의 산림보호정책이 갈수록 강화되고 있는 원목 사정을 고려할 때 한국과 같이 외재에 대한 의존도가 높은 나라에서는 목재의 이용효율을 높이는 노력은 필수적이라고 할 수 있다. 즉 지금까지 그 이용도가 매우

낮았던 小徑材나 曲材 등의 저급원목을 이용하여 양질의 대경원목으로서 얻어지는 목질재료에 필적할 만한 성능을 가지는 새로운 목질재료에 대한 연구가 절실히 요구되고 있다. 이러한 실정에 맞추어 국내에서도 지금까지의 원목수입 의존도를 줄이고, 매년 생산량이 증대하는 간벌재의 효율적인 이용을 위한 연구가 최근에 활발해지고 있다. 한편, 외국에서는

\* 1. 接受 1989年 8月 2日, Received August 2, 1989

본 연구는 1988년도 한국과학재단 학술연구비에 의하여 수행되었음.

\* 2. 서울대학교 農科大學 College of Agriculture, Seoul National University, Suwon 441-744, Korea

이미 이러한 소경목을 이용하여 여러 목질재료들의 개발에 성공하였으며, 그 예로서 Waferboard, Flakeboard, LVL, LVB 등의 제품이 시판되고 있다.

그러나, 소경재를 이용한 목질재료는 그 구성요소가 短尺, 소단면이므로 길이 방향이나 폭방향으로의 접합에 의하여 형성되고, 이러한 접합부는 재료의 강도를 저하시키는 결함으로 취급된다. 따라서, 이와 같이 재료의 강도를 저하시키는 접합부에 대한 보다 정확한 강도해석은 재료의 합리적인 설계 및 이에 따른 원자재의 효율적 이용에 있어 대단히 중요한 일이 아닐 수 없다.

목재에 있어서의 균열에 대한 파괴역학적 연구는 Porter(1964)<sup>14)</sup>에 의하여 처음 시도된 이후 많은 연구가 행하여져 왔다. 목재는 직교이방성재료로서 균열의 진행방향에 따라 Fig.1에 나타난 바와 같이 6가지의 기본시스템으로 분류되며, 이들에 관한 모드 I 파괴에 있어서는 파괴역학의 적용이 인정되었다. 즉, 각기본시스템에 관한 모드 I의 임계응력확대계수 (critical stress intensity factor,  $K_{Ic}$ )는 목재의 고유의 재료성질로써 인정되어지고 있다.<sup>15)~16)</sup>

한편, 지금까지의 연구는 외국산수종만을 대상으로 하여 밝혀진 것으로서 국산수종에 대한 연구는 전무한 상태이다. 따라서, 본연구에서는 접합부를 목재내에 존재하는 균열로 모델화시켜, 아직 연구되어지지 않은 국산수종에 대하여 모드 I 파괴시의 임계응력확대계수  $K_{Ic}$ 를 구하여, 국산수종을 이용한 목질재료의 강도해석에 필요한 기초자료를 제공하고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 공시재료

직경 30cm, 길이 3m의 리기다소나무 (Pinus rigida Mill)와 잣나무 (Pinus koraiensis Set z) 원목 각각 2本씩을 공시원목으로 사용하였다. 이들 원목으로부터 가능한 한 미성숙재가 포함되지 않도록 하여 두께 5cm 및 3cm의 판재를 제제한 후, 이들 판재를 60 °C의 건조실에서 약 48시간 건조하여 함수율을 10% 정도 되도록 건조하였다. 건조된 판재로부터

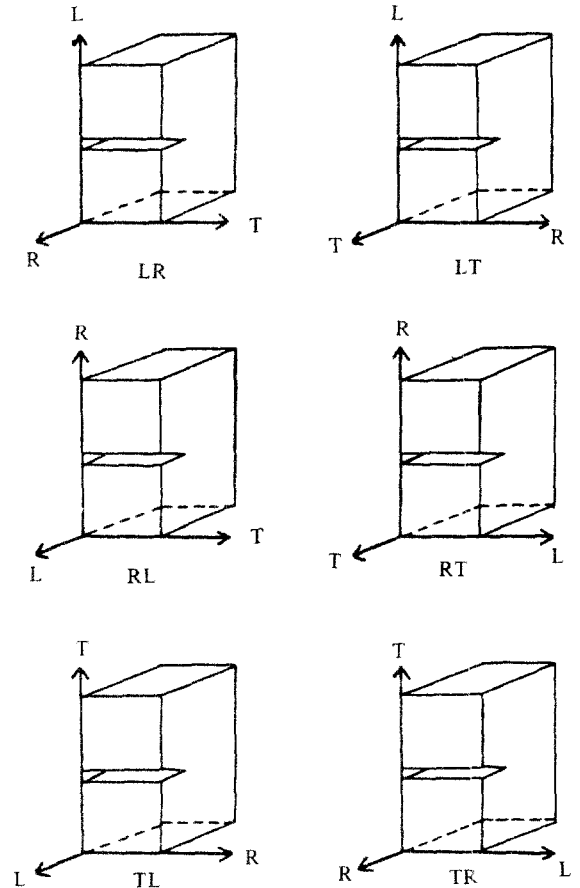
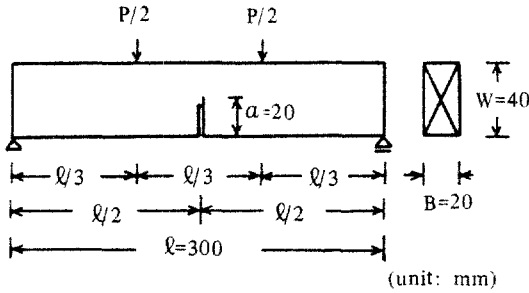


Fig. 1. The six principal systems of crack propagation for wood. L-longitudinal direction, R-radial direction, T-tangential direction. The first letter designated normal direction to the crack plane and the second letter designated the direction of crack propagation.

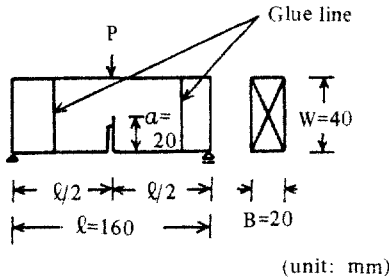
Fig.1에 나타난 6가지의 기본 시스템의 시험편을 제작하였다. 이때, LT 및 LR시스템의 시험편은 판재로부터 5×3×40cm의 치수로 제작하고, 나머지 시스템 (RT, RL, TR, TL)의 시험편은 초산비닐수지접착제를 사용하여 상온에서 48시간 정도 압착하여 소성의 폭방향으로 접착한 후, 5×3×20cm의 치수로 절단하였다.

준비된 시험편을 플레이너로 평활가공하여 최종 치수를 4×2cm로 한 후, Fig.2에 나타난 바와 같이 시험편의 중앙부에 두께 3mm의 둥근 튕으로 길이 19mm의 홈을 파고 그 단부로부터 예리한 칼로 다시 1mm의 홈집을 내어 균열의 최종길이를 20mm로

하여, 균열長比 (crack-length ratio) 0.5인 SEN (single edge notch) 휩강도 시험편을 제작하였다.



(a) LR and LT system



(b) RT, RL, TR and TL system

Fig. 2. Schematic diagram of bending test specimens.

2.2. 실험방법

시험편의 균열을 스펠중앙의 인장부에 위치시켜 INSTRON 10T 만능시험기를 사용하여 휩시험을 행하였다. 이때, Fig.2에 나타낸 바와 같이 LT 및 LR 시스템의 시험편은 스펠 30cm, cross-head속도 2 mm/min, 3등분점 4점하중방식을 사용하였으며, 나머지 4시스템의 시험편은 스펠 16cm (span-depth ratio 4 : 1), cross-head속도 5mm/min, 중앙집중 하중방식을 사용하였다.

모드 I 의 응력확대계수  $K_I$ 은 다음 식에 의해 구하였다.<sup>17)</sup>

$$K_I = \sigma(\pi a)^{1/2} \cdot Y \dots \dots \dots (1)$$

여기서,  $K_I$ : 응력확대계수 ( $\text{kg/cm}^2 \cdot \text{cm}$ )

$\sigma$ : 공칭휩응력 ( $6M/BW^2$ )

$a$ : 균열길이 (cm)

$M$ : 균열단면에 작용하는 휩모멘트  
위식에서  $Y$ 는 기하학적 보정계수로서 다음과 같이 구해진다.

순수휩의 경우 ;

$$Y = 1.222 - 1.40(a/W) + 7.33(a/W)^2 - 13.$$

Table 1. Basic properties of two experimental species.

Species	Sp. Gr.*	M.C. (%)	Type of System**	MOR ( $\text{kg/cm}^2$ )	MOE ( $\times 10^3 \text{ kg/cm}^2$ )
Pinus rigida	0.52 ( $\pm 0.04$ )	8.0 ( $\pm 0.7$ )	LR	596	61.5
			LT	620	67.0
			RT	-	-
			RL	61.5	6.1
			TR	-	-
			TL	29.4	2.9
Pinus koraiensis	0.44 ( $\pm 0.04$ )	9.4 ( $\pm 1.3$ )	LT	470	57.3
			LR	510	63.1
			RT	-	-
			RL	26.9	2.5
			TR	-	-
			TL	27.7	2.1

\* Specific gravity based on oven-dry weight and air-dry volume.

\*\* See Fig. 1.

$$08(\alpha/W)^3 + 14.0(\alpha/W)^4$$

3점휨의 경우 ; span-depth ratio 4 : 1일 때

$$Y = 1.09 - 1.735(\alpha/W) + 8.2(\alpha/W)^2 - 14.18(\alpha/W)^3 + 14.57(\alpha/w)^4$$

한편, 공시재료의 무결점재에 대하여 비중 및 휨 성질을 조사하여, 그 결과를 Table 1에 나타내었다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 임계응력확대계수, $K_{Ic}$

리기다소나무와 잣나무의 각 시스템별 실험결과를 Table 2에 나타냈다. 리기다소나무의 결과를 보면, LR과 LT시스템의 임계응력확대계수  $K_{IcLR}$ ,  $K_{IcLT}$ 의 값은  $K_{IcLR}$ 가 약 5% 정도 크고, RL, RT, TL, TR시스템의 임계응력확대계수  $K_{IcRL}$ ,  $K_{IcRT}$ ,  $K_{IcTL}$ ,  $K_{IcTR}$ 의 값은  $K_{IcRT}$ 의 값이 약간 작은 것을 제외하면 거의 동일한 값을 나타낸다. 잣나무의 경우,  $K_{IcLR}$ ,  $K_{IcLT}$ 의 값은 리기다소나무의 경우와 마찬가지로 차이가 없으나,  $K_{IcRL}$ 과  $K_{IcTL}$ 간에는  $K_{IcRL}$ 의 값이 더 큰 것으로 나타났다. 한편, 잣나무의 RT, TR시스템에 있어서는 시험편에 건조에 의한 휨이 크게 발생하여  $K_{Ic}$ 값을 측정할 수 없었다.

각 시스템에 있어서의  $K_{Ic}$ 값들간의 관계에 관한 기존의 연구결과를 살펴 보면,  $K_{IcRL}$ 이  $K_{IcTL}$ 보다 약 10~20% 정도 크거나<sup>11)15)6)12)</sup>, 또는 거의 같은 것으로 보고되고 있다.<sup>10)16)</sup> 본 실험결과에서도 잣나무에 있어서는  $K_{IcRL}$ 이  $K_{IcTL}$ 보다 약 20% 정도 크게 나타났다으며, 리기다소나무에 있어서는 동일한 값을 나타냈다. 이와 같은  $K_{IcRL}$ 과  $K_{IcTL}$ 간의 차이는 목재의 방사조직의 영향에 의한 것으로 추정된다.

즉, TL시스템에 있어서는 균열의 진전방향이 방사조직의 배열방향과 일치하므로 방사조직에 평행으로 균열이 진전되는데 반하여, RL시스템에 있어서는 방사조직의 배열방향과 직각인 방향으로 균열이 진전하므로 방사조직에 의하여 균열의 진전이 억제되기 때문인 것으로 사료된다.

한편,  $K_{IcLR}$ 과  $K_{IcLT}$ 의 값은 이미 보고된 결과<sup>12)</sup>를 보면  $K_{IcLR}$ 이 약 10% 큰 것으로 나타나, 본 실험결과와 비슷한 경향을 보인다. 이와 같은 결과는 LR과 LT시스템에 있어서의 균열의 진전은 균열의 초기방향과 직각으로 일어나 실제로는 균열의 진전이 RL과 TL시스템의 경우와 일치하므로 여기에 대해서도 상술한 바와 마찬가지로 설명되어질 수 있을 것으로 사료된다.

Table 2. Experimental results for the six principal systems of crack propagation.

Species	Type of System*	No. of specimens	Critical stress intensity factor $K_{Ic}$ (kg/cm <sup>2</sup> √cm)
Pinus rigida MILL	LR	6	282.0
	LT	11	267.3
	RL	8	36.4
	RT	6	31.3
	TL	8	35.4
	TR	8	34.3
Pinus koraiensis S. et Z.	LR	7	233.5
	LT	7	237.0
	RL	7	32.9
	RT	—	—
	TL	6	26.9
	TR	—	—

\* See Fig. 1.

3.2. 휨강도와  $K_{IC}$ 와의 관계

Table 1을 보면, 휨강도는 길이방향 (longitudinal direction), 반경방향 (radial direction), 접선방향 (tangential direction)의 강도비가 리기다소나무의 경우 약 20 : 2 : 1, 잣나무의 경우 20 : 1 : 1로 나타났다. 이것은 일반적인 목재의 방향에 따른 강도 특성과 일치한다. 그러나, 각 방향에 따른  $K_{IC}$ 값은 길이방향 (LR과 LT), 반경방향 (RL과 RT), 접선방향 (TL과 TR)의 비가 약 8 : 1 : 1로 나타났다. 이 결과는, 목재의 강도와  $K_{IC}$ 의 방향에 따른 특성을 비교해 볼때, 반경방향과 접선방향과의 관계에 있어서는 양자가 비슷한 경향을 나타내나, 길이방향과 그외의 방향과의 관계에 있어서는 양자 모두 길이방향의 값이 훨씬 크나, 그 비는 서로 다른 특성을 나타낸다. 이러한 사실은, 길이방향에 있어서는 균열의 진전이 초기방향으로 진행되지 못하고 초기방향에 수직으로 진행되므로 실제로는 길이방향의 강도를 충분히 발휘하지 못하기 때문인 것으로 사료된다.

한편, 일정방향에 대한  $K_{IC}$ 와 강도와의 관계를 살펴보자. 이들간의 관계에 대해서는 Petterson 등<sup>9)</sup>의 보고가 있으며, 이 보고에 의하면 침엽수에 관하여 TL시스템의  $K_{IC}$ 와 접선방향의 인장강도  $\sigma_T$ 와의 상관계를 조사하여 다음과 같은 식으로 나타냈다.

$$\sigma_T = 5.0 + 0.82K_{IC} \text{ (kg}/\sqrt{\text{cm}^2}) \quad (2)$$

Fig.3에 이 식과 본실험에서 얻어진 결과를 나타냈다. Fig.3을 보면 잣나무의 값은 식과 일치하나, 리기다소나무의 값은 일치하지 않는다. 이와 같은 결과는, 식(2)는 인장시험으로부터 얻어진 관계식인 반면, 실험결과는 휨시험으로부터 얻어진 결과라는 데에 그 원인이 있는 것으로 생각된다. 특히, 본실험에서는 2수종에 대한 값만을 구하였으므로 이들간의 관계를 정확히 구명할 수 없었으나, 휨시험에 관한 강도와  $K_{IC}$ 간의 관계를 구명할 필요는 있다고 판단된다.

또한, 길이방향과 반경방향에 관한 강도와  $K_{IC}$ 와의 관계에 있어서는 강도의 증가에 따른  $K_{IC}$ 의 증가가 인정되므로 이들 방향에 대한 양자간의 관계를 조사해 볼 필요가 있다고 생각된다.

3.3. 비중과  $K_{IC}$ 와의 관계

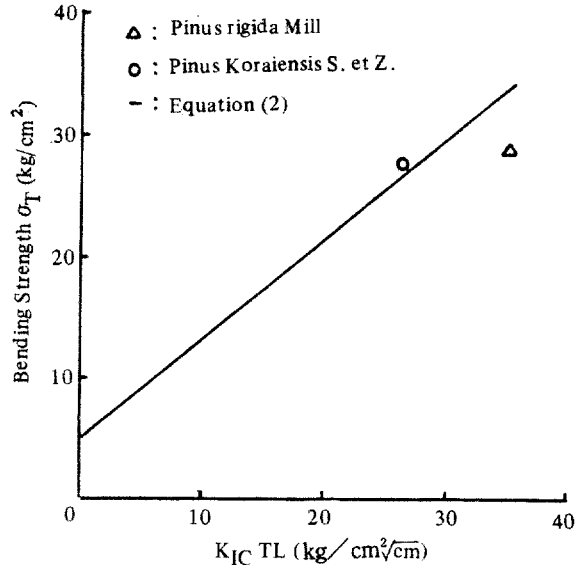


Fig. 3. Relationship between bending strength and  $K_{IC}$  in TL system.

일반적으로 목재의 기계적 성질은 비중과 밀접한 관계에 있는 것으로 알려져 있다. 따라서, 비중과  $K_{IC}$ 와의 관계를 살펴 보는 것 또한 중요한 일이라 여겨지므로, 본연구에서도 비중과  $K_{IC}$ 와의 관계를 조사했다.

Table 2를 보면, 리기다소나무와 잣나무에 있어서 비중과  $K_{IC}$ 는 모두 리기다소나무의 값이 큰 것을 알 수 있다. 즉, 비중이 크면  $K_{IC}$ 가 커진다. 또한, 이들간의 관계에 대해서는, Schniewind 등<sup>13)</sup>은 침엽수와 활엽수 14수종에 대한 인장시험을 행하여 비중과  $K_{IC}LT$  및 비중과  $K_{IC}TL$ 과의 상관관계를 조사하여, 직선비례관계가 성립한다고 하였으며, 그 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다고 하였다.

$$K_{IC}LT = 504.2S - 48.5 \text{ (kg}/\text{cm}^2 \cdot \sqrt{\text{cm}}) \quad (3)$$

$$K_{IC}TL = 95.6S - 11.9 \text{ (kg}/\text{cm}^2 \cdot \sqrt{\text{cm}})$$

여기서, S : 전진비중

Petterson 등<sup>9)</sup>은 침엽수 10수종의 인장시험으로부터 비중 및 함수율과  $K_{IC}TL$ 과의 관계를 조사하여, 비중이 0.4~0.6, 함수율이 섬유포화점이내의 범위에서 다음과 같은 관계가 성립한다고 하였다.

$$K_{IC}TL = 44.64S \cdot 2.253(10)^{-0.0126M} \text{ (kg}/\text{cm}^2 \cdot \sqrt{\text{cm}}) \dots \dots \dots (4)$$

여기서, S : 전진비중, M : 함수율

본실험결과와 위식들로부터 구한 계산치를 비교하기

Table 3. Comparison of K<sub>IC</sub> values observed and calculated by specific gravity.

Species	Type of System	K <sub>IC</sub> (kg/cm <sup>2</sup> ·√cm)			Ratio of K <sub>IC</sub>	
		Obs.	Cal.*	Cal.**	Obs./Cal.*	Obs./Cal.**
Pinus rigida MILL	LT	267.3	213.6	--	0.80	--
	TL	35.4	37.8	41.5	1.07	1.17
Pinus koraiensis S. et Z.	LT	237.0	173.3	--	0.73	--
	TL	26.9	30.1	33.7	1.12	1.25

\* Values calculated by eq. (3).

\*\* Values calculated by eq. (4).

위하여 Table 3에 K<sub>IC</sub>의 실험치와 계산치를 나타냈다. 이 표에 의하면, K<sub>IC</sub>LT에 있어서는 식(3) 및 (4)에 의한 계산치가 실험치보다 10~25% 정도 크게 나타났다. 이와 같은 결과는 위 식들이 인장시험으로부터 얻어진 것으로써 본실험에서 행한 휨실험의 결과에는 적용되지 않음을 보여 준다고 할 수 있다. 그러나, 휨실험의 결과 또한 비중의 증가에 따라 K<sub>IC</sub>의 값이 증가한다는 사실은 확인되었으므로 금후 휨실험에 있어서의 비중과 K<sub>IC</sub>간의 상관관계에 관한 보다 많은 연구를 필요로 한다.

나타냈다. 특히, 접선방향과 반경방향을 비교할 때, 휨강도는 반경방향의 강도가 접선방향보다 약2배정도 컸으나, K<sub>IC</sub>는 반경방향이 약간 크게 나타났을 뿐이다.

3) 비중과 K<sub>IC</sub>와의 관계는, 기존의 인장시험으로부터 얻어진 상관관계식과 본실험결과를 비교하였으나, LT 및 TL시스템에 있어서 양쪽 모두 10~25%의 차이를 나타내었다.

#### 참 고 문 헌

#### 4. 결 론

본연구에서는, 목재의 접합부에 대한 강도해석에 필요한 기초자료를 제공할 목적으로, 국산수종인 리기다소나무와 잣나무에 대하여 균열의 모-드 I 에 대한 휨시험을 행하여, 목재의 이방성에 따른 6가지의 기본시스템에 관하여 파괴인성치K<sub>IC</sub>를 구하였다. 실험으로부터 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 각시스템에 있어서의 K<sub>IC</sub>값은, 비중이 큰 리기다소나무가 잣나무보다 컸다. K<sub>IC</sub>RL과 K<sub>IC</sub>TL간에는 전자가 약간 컸으며, 이것은 목재의 방사조직의 영향에 따른 것으로 판단되었다. 또한, K<sub>IC</sub>LR과 K<sub>IC</sub>LT의 값은 나머지 시스템의 K<sub>IC</sub>값에 비하여 약 8 배정도 크게 나타났다.

2) 휨강도와 K<sub>IC</sub>간에는, 휨강도의 증가에 따라 K<sub>IC</sub>도 증가하는 추세를 나타내나, 목재의 방향에 따른 특성에 있어서는 K<sub>IC</sub>는 휨강도와는 상이한 특성을

1. Barrett, J.D. 1976. Effect of crack-front width on fracture toughness of Douglas-Fir. Engineering Fracture Mechanics 8: 711-717.
2. Johnson, J.A. 1973. Crack initiation in wood plates. Wood Science 6(2): 151-158.
3. Jung, J., J.F. Murphy. 1983. An investigation of the fracture of butt joints in parallel-laminated veneer. Wood and Fiber Science 15(2): 116-134.
4. Lee, J.J., M. Okuma. 1985. Effect of end-joints of veneer on the strength of LVL I. Journal of the Japan Wood Research Society 31(11): 888-895.
5. Lei, Y.K., J.B. Wilson. 1979. Fracture toughness of parallel-laminated veneer. Forest Products Journal 29(8): 28-32.

6. ————. 1980. Fracture toughness of oriented flakeboard. *Wood Science* 12(3): 154-161.
7. Mindess, S., J.S. Nadeau, J.D. Barrett. 1975. Slow crack growth in Douglas-Fir. *Wood Science* 8(1): 389-396.
8. ————. 1977. The fracture of wood in tension parallel to the grain. *Can. J. Civ. Eng.* 4: 412-416.
9. Petterson, R.W., J. Bodig. 1983. Prediction of fracture toughness of conifers. *Wood and Fiber Science* 15(4): 302-316.
10. Porter, A.W. 1964. On the mechanics of fracture in wood. *Forest Products Journal* 14(8): 325-331.
11. Schniewind, A.P., R.A. Pozniak. 1971. On the fracture toughness of Douglas-Fir wood. *Eng. Fract. Mech.* 2(3): 223-233.
12. ————, J.C. Centeno. 1973. Fracture toughness and duration of load factor I. *Wood and Fiber* 5(2): 152-159.
13. ————, T. Ohgama, T. Aoki, T. Yamada. 1982. Effect of specific gravity, moisture content, and temperature on fracture toughness of wood. *Wood Science* 15(2): 101-109.
14. Smith, F.W., D.T. Penney. 1980. Fracture mechanics analysis of butt joints in laminated wood beams. *Wood Science* 12(4): 227-235.
15. Walsh, P.F. 1972. Linear fracture mechanics in orthotropic materials. *Eng. Fract. Mech.* 4(3): 533-541.
16. Wu, E.M. 1967. Application of fracture mechanics to anisotropic plates. *J. Appl. Mech.* 34: 967-974.
17. Tada, H., P.C. Paris, G.R. Irwin. 1973. *The stress analysis of cracks handbook*. Del. Research Corp., Hellertown, Pa.