

국산재의 파괴인성에 관한 연구(II)^{*1}

—활엽수의 모—드 I 파괴—

李銓濟^{*2} · 沈國輔^{*2}

Fracture Toughness of Wood Grown in Korea.(II)^{*1}

—Mode I Fracture of Hardwoods—

Jun Jae Lee^{*2} · Kug Bo Shim^{*2}

SUMMARY

Tests of notched specimens of ten hardwood species in the LR and LT systems were conducted to investigate fracture toughness(K_{IC}) and effective moduli of elasticity(MOE). K_{IC} values were examined in relation to MOR, MOE, specific gravity of clear wood specimens. It was found in both systems that there were significant relationship between K_{IC} and MOR, K_{IC} and specific gravity.

To predict the effective MOE of notched specimen from MOE of clear wood, it was analyzed by using equivalent cross-section method. In LR system, the observed values were similar to the predicted values, but in LT system, both were not agreed as the observed values were smaller. However, the results were shown that this method was available to predict the effective MOE of notched specimens.

1. 서론

목재는 단일한 재료로 다른 재료에 비해 가볍고, 가공성이 풍부한 반면 강도가 크고, 어디서나 쉽게 생산되는 재료로써 주거용 및 구조물에 서도 가장 대중적으로 광범위하게 사용되는 기본 재료이다. 그러나, 양질의 대경목의 고갈과, 산림보유국들의 자원민족주의에 따라 그 공급

이 매우 어려운 실정이므로 한국과 같이 외재에 의 의존도가 높은 나라에서는 간벌재나, 임산가 공산업에서 발생하는 막대한 양의 부산물등에 대한 이용율을 높이기 위한 노력이 필수적이다. 즉, 소경재나 저급원목, 폐재등을 이용하여 양질의 대경원목에 필적한 목질재료의 개발을 위한 연구가 절실히 요구되고 있다.

그러나, 소경재나 저급원목을 이용한 목질재

*1. 接受 1990年 11月 10日 Received November 10, 1990

본 연구는 1989년도 문교부 지원 한국학술진흥재단의 자유공도과제 학술 연구조성비에 의하여 연구되었음.

*2. 서울대학교 농과대학 College of Agriculture, Seoul National University, Suwon 441-744, Korea

료는 그 구성요소가 단적이고 소단면이므로 길이방향이나 폭방향으로의 접합을 필요로 하게 되며, 이러한 접합부는 목질재료의 강도를 저하시키는 결함이 된다. 따라서 접합부에 대한 정확한 강도해석이 선행되어야만 새로이 개발된 목질재료를 합리적이고 효율적으로 이용할 수 있다.

목재에서 파괴역학에 관한 연구는 Porte¹⁾에 의하여 처음 시도된 이후 많은 연구가 수행되어 왔다. 높은 항복강도를 가지는 금속의 취성 파괴를 다루기 위해 연구되었던 파괴역학의 개념은 많은 결점과 이방성을 갖는 목구조부재의 설계문제를 해결하는데 이용할 수 있다. 특히 목재에서의 Mode I 파괴는 대부분 탄성영역 내에서 이루어지므로, 선형탄성파괴역학(LEFM, Linear Elastic Fracture Mechanics)을 적용시킬 수 있는데, 선형파괴역학은 크랙을 지닌 부재나 구조물의 강도 또는 변형을 선형탄성론을 써서 연구하는 학문으로 급속한 크랙의 전파에 의한 갑작스런 파괴의 연구 및 목구조의 설계분석에서 유용한 자료를 제공하여 줄 수 있는 학문으로 여겨지고 있다.^{2,4,5,6,7)}

본 연구에서는 접합부를 목재내에 존재하는 크랙으로 모델화하여, 아직 연구되지 않은 국산 활엽수재의 K_{IC} 에 관한 연구를 통하여 목질재료의 강도해석에 필요한 기초자료를 제공하고자 수행하였다. 또한 지금까지의 모든 연구는 외국산 수종만을 대상으로 한 것으로 국산수종에 대한 연구는 거의 전무한 상태이므로, 활엽수 간벌재의 효율적인 이용을 위한 목질재료의 개발가능성과, 구조부재로서의 용도를 구명하기 위하여 본 연구를 수행하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 공시재료

국산 활엽수재인 가래나무(*Juglans mandshuricum* Max.), 밤나무(*Castanea cranata* S. et Z.), 오리나무(*Alnus japonica* Steudel), 음나무(*Kalopanax pictus* Nakai), 산벚나무(*Pru-*

nus sargentii Rehder), 살구나무(*Prunus armeniaca* var. *anzu* max.), 고로쇠나무(*Acer mono* Max.), 아까시나무(*Robinia pseudoacacia* L.), 물푸레나무(*Fraxinus rhynchophylla* Hance)와 갈참나무(*Quercus aliena* Blume)등의 10가지 수종에 대하여 말구직경이 24~30cm, 길이 180cm인 원목을 1~2분씩 국산원목상으로부터 구입하여 공시원목으로 사용하였다.

이들 원목으로부터 두께 5cm의 판재를 제작한 후 30°C에서 1개월간 건조하여 가능한 한 미성숙재, 수, 용이등이 포함되지 않도록 길이 45cm×두께 5cm×폭 3cm의 LT, LR시편을 제작하고 플래너로 평활가공하여 최종치수를 길이 40cm×두께 4cm×폭 2cm로 하여 각 수종당 10개씩의 시편을 제작하였다. 제작된 시편을 항온습습실에서 3개월동안 조습시켜 기건함수율이 12%가 되도록 하였다. 시험편의 중앙부에 두께 3mm의 둥근톱으로 깊이 19mm의 크랙을 내고 그 단부에 예리한 칼로 1mm의 홈집을 내어 크랙의 최종길이를 20mm로 하여 크랙長比(crack-length ratio)가 0.5인 SEN(single edge-notch)휨강도 시험편을 제작하였다. (Fig.1 참조) 또한, 각 수종의 기초재질을 조사하기 위하여 크랙이 없는 LT, LR 시험편을 길이 40cm×두께 2cm×폭 2cm가 되도록 각 수종당 10개씩 제작하였다.

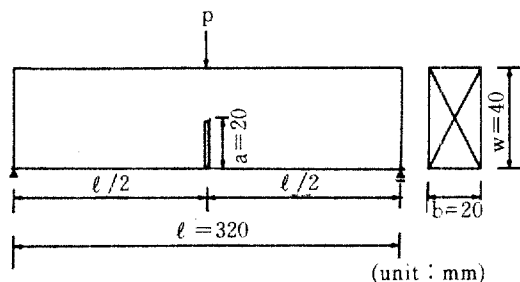


Fig.1. Schematic diagram of bending test specimens.

2.2 실험방법

크랙이 있는 LT, LR시험편은 크랙을 시편의 중앙부에 위치시키고, 만능강도시험기(Shimadzu, 10 ton)를 사용하여 휨시험을 행하였다. 이

때 시험편의 스패는 32cm (span to depth ratio 8:1), cross-head의 속도는 2mm/min, 중앙집중하중방식을 사용하여, 1~2분 사이에 파괴가 일어나도록 하였으며, 하중-처짐 관계를 기록하였다.

크랙이 없는 시험편은 스패길이 32cm(span to depth ratio 16:1), cross-head의 속도는 5mm/min, 중앙집중하중방식을 사용하여, 3~4분 사이에 파괴가 일어나도록 하였으며, 이 또한 하중-처짐 관계를 기록하였다.

중앙집중하중시 Mode I의 응력확대계수(Critical stress intensity factor) K_I 은 다음 식에 의하여 계산하였다.³⁾

$$\frac{K_I}{K_0} = 1.11 - 2.12\left(\frac{a}{w}\right) + 7.71\left(\frac{a}{w}\right)^2 - 13.55$$

$$\left(\frac{a}{w}\right)^3 + 14.25\left(\frac{a}{w}\right)^4 \dots\dots\dots (1)$$

여기서, K_0 는

$$K_0 = \frac{6M\sqrt{\pi a}}{bw^2} \dots\dots\dots (2)$$

M : Bending Moment (=pl/4)

w : 시험편의 두께

b : 시험편의 폭

a : 크랙 길이

3. 결과 및 고찰

3.1 기초재질시험 결과

공시수종의 휨 시험결과를 Table 1에 나타내었다. Table 1에서 휨파괴계수(M.O.R)값을 보면, LT 방향이나 LR 방향의 결과는 대개 5%

Table 1. Bending properties of clear specimens.

Species	M.C. %	Sp.Gr.	LT specimens		LR specimens	
			MOE	MOR	MOE	MOR
			($\times 10^3$ kg/cm ²)	(kg/cm ²)	($\times 10^3$ kg/cm ²)	(kg/cm ²)
Karae-namu	13.07	0.49	76.5(21.6)	867(70)	112.0(12.9)	904(194)
Bam-namu	14.87	0.50	60.0(12.8)	759(39)	54.4(5.9)	810(69)
Ori-namu	13.66	0.51	94.5(10.4)	926(77)	73.9(8.1)	850(67)
Eum-namu	13.89	0.53	108.9(21.8)	1003(108)	97.2(14.0)	938(72)
Sanbut-namu	13.85	0.54	118.6(16.5)	981(102)	106.4(2.4)	984(80)
Salku-namu	11.86	0.57	114.2(22.3)	1048(68)	110.8(11.6)	1118(108)
Korosoi-namu	13.98	0.62	114.7(18.3)	1176(99)	120.5(9.2)	1186(68)
Akkasi-namu	13.09	0.65	85.8(4.4)	1162(150)	95.4(15.5)	1215(46)
Mulpure-namu	12.95	0.66	92.6(9.7)	1053(59)	101.1(20.8)	1122(171)
Kalcham-namu	13.80	0.73	122.5(5.6)	1235(44)	124.5(10.4)	1227(47)

*() Standard Deviation

이내의 범위에서 어느 한쪽이 높게 나타나 양자간의 차이는 없는 것으로 간주하여도 무방하리라 사료된다.

MOE 에 있어서는 수종에 따라 매우 다른 결과가 나타났다. 가래나무, 고로쇠나무, 아끼시나무 등에서는 LR방향의 값이 크나, 그 외의 수종에서는 LT방향의 값이 크게 나타나, 일정한 경향을 보여주지 않았으며, 양자간의 차이도 최대 30%로 나타났다. 그러나 갈참나무, 살구나

무 등에서는 그 차이가 없는 것으로 나타났다. 이 점에 대해서는 지금까지의 연구에서는 거의 취급되지 않았으므로 방향에 따른 차이인지, 시험편의 채취에 문제가 있는지 확실하지는 않으나 양 방향의 MOR 값의 경우 거의 차이가 없는 것으로 미루어 볼때 시험편 채취에 있어서는 잘못된 없는 것으로 사료되어 MOE 에 있어서는 수종에 따라 LT와 LR 방향에 있어 차이가 있는 것으로 판단된다. 다만, 수종에 따라 LT

방향의 값이 크거나 LR방향의 값이 크기도 한 결과는 매우 흥미로운 일이며, 여기에 대해서는 보다 깊은 연구가 수행되어야 할 것이다.

한편, MOR, MOE, 및 비중과의 상관관계를 알아보기 위하여 Fig.2, 3, 4에 각각 이들 간의 상관관계를 나타내었다.

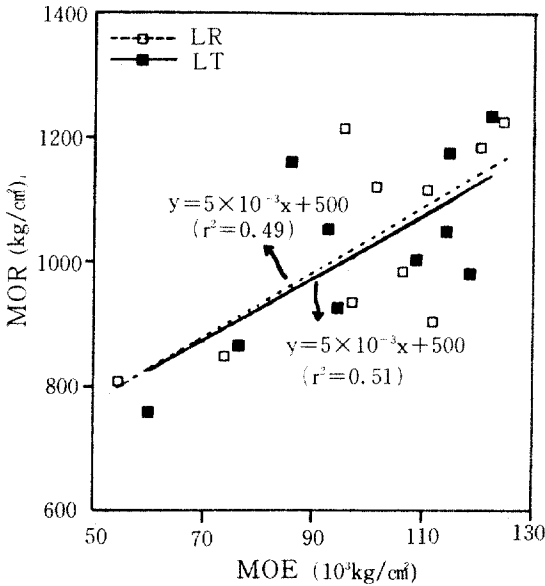


Fig.2. Relationship between MOE and MOR for clear wood specimens.

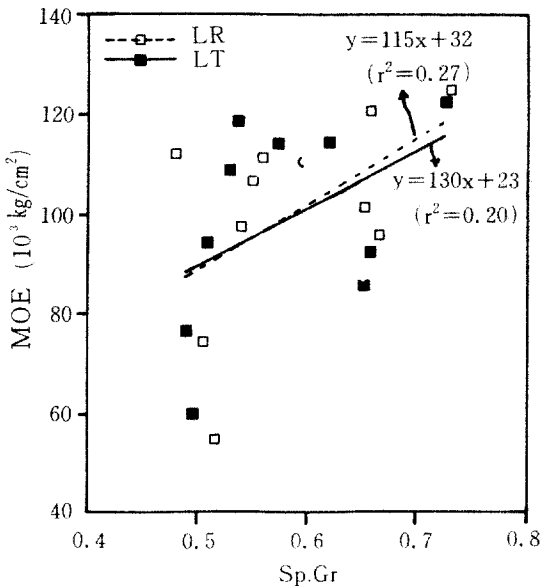


Fig.3. Relationship between Sp.Gr. and MOE for clear wood specimens.

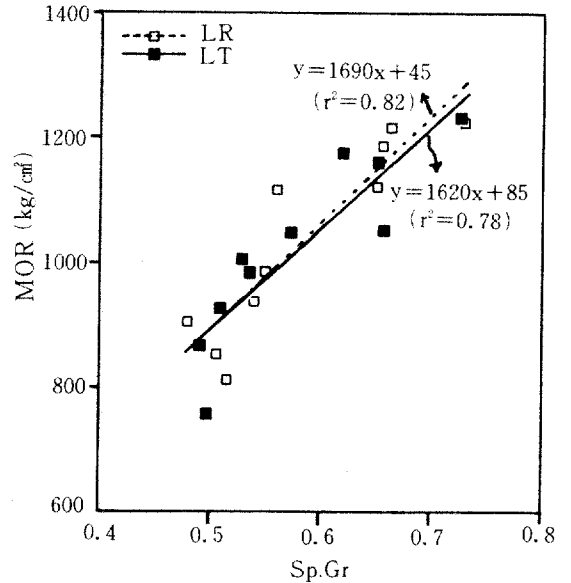


Fig.4. Relationship between Sp.Gr. and MOR for clear wood specimens.

Fig.2에서는 MOR 과 MOE 와의 관계를 나타내었으며, 그림에서 LR 방향의 경우 $r^2=0.49$, LT방향의 경우 $r^2=0.51$ 로 나타났다. 그림에서 보듯이 MOE 가 증가함에 따라 MOR 의 값이 증가하는 경향을 보이고는 있지만, r^2 의 값으로 보아 MOR 과 MOE 의 상관관계는 비교적 낮은 것으로 나타났다.

Fig.3에서는 MOE 와 비중과의 관계를 나타내었다. 그림에서 LR 방향의 경우 $r^2=0.27$ 로, LT 방향의 경우 $r^2=0.20$ 로 나타났으며 r^2 의 값으로 보아 MOE 와 비중 사이에는 상관관계가 거의 없는 것으로 나타났다.

Fig.4에는 MOR 과 비중과의 관계를 나타내었다. 그림에서 LR방향의 경우 $r^2=0.82$ 로 LT방향의 경우 $r^2=0.78$ 로 나타났다. r^2 의 값으로 보아 MOR 과 비중 사이에는 밀접한 상관관계를 가지는 것으로 나타나, 국산활엽수재의 경우 그 수종의 비중으로부터 휨강도를 예측할 수 있을 것으로 사료된다.

3.2 임계응력확대계수, K_{Ic}

공시수종 10수종에 대한 LT 방향과 LR방향

Table 2. Critical stress intensity factor, K_{IC} values of cracked specimens.

Species	LT specimens		LR specimens	
	MOE ($\times 10^3 \text{ kg/cm}^2$)	$K_{IC} \text{ LT}$ ($\text{kg/cm}^{3/2}$)	MOE ($\times 10^3 \text{ kg/cm}^2$)	$K_{IC} \text{ LR}$ ($\text{kg/cm}^{3/2}$)
Karae-namu	76.5(21.6)	294(29)	112.0(12.9)	317(18)
Bam-namu	60.0(12.8)	267(16)	54.4(5.9)	290(19)
Ori-namu	94.5(10.4)	267(23)	73.9(8.1)	317(21)
Eum-namu	108.9(21.0)	285(27)	97.2(14.0)	339(24)
Sanbut-namu	118.6(16.5)	328(19)	106.4(2.4)	325(22)
Salku-namu	114.2(22.3)	325(29)	110.8(11.6)	347(28)
Korosoi-namu	114.7(18.3)	346(38)	120.5(9.2)	415(53)
Akkasi-namu	85.8(4.4)	320(14)	95.4(15.5)	367(19)
Mulpure-namu	92.6(9.7)	344(28)	101.1(20.8)	342(26)
Kalcham-namu	122.5(5.6)	387(30)	124.5(10.4)	403(17)

* () Standard Deviation

의 K_{IC} ($K_{IC} \text{ LT}$, $K_{IC} \text{ LR}$)값을 Table 2에 나타냈다. Table 2로부터 $K_{IC} \text{ LT}$ 와 $K_{IC} \text{ LR}$ 값등을 비교해 보면, 대체로 $K_{IC} \text{ LR}$ 이 $K_{IC} \text{ LT}$ 보다 큰 것으로 나타났으며, 그 차이는 0~19%로 평균 약 10% 정도의 차이가 있는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 이미 보고된 대부분의 수종에서도 비슷한 경향을 나타내고 있는 것으로 볼때, 목재에 있어서의 일반적인 결과로 볼 수 있다. 무결점재에 있어서는 LT방향과 LR방향간의 휨강도의 차이가 없는 것으로 나타난 것과 비교해 볼때 K_{IC} 값에 있어서는 LR 방향이 LT방향보다 약간 크게 나타난 것은 다음과 같은 이유로 설명될 수 있을 것이다. 즉 LT시편에서는 크랙의 진전은 크랙의 방향과 직각으로 일어나, 실제로 LT방향 시편에서는 접선방향으로 크랙이 진전하므로 방사조직의 배열에 평행하게 크랙이 진전하는 반면 LR방향 시편에서는 방사조직의 배열에 직각인 방향으로 크랙이 진전하기 때문에 방사조직에 의하여 크랙의 진전이 억제되기 때문인 것으로 판단된다.

따라서, 수종에 따라 $K_{IC} \text{ LT}$ 와 $K_{IC} \text{ LR}$ 값의 차이가 서로 다른것은 방사조직과 밀접한 관계가 있는 것으로 판단되며, 이에 대하여는 금후 보다 많은 연구가 필요로 되어진다.

K_{IC} 값과 무결점재의 M.O.R. 및 비중과의 관계를 살펴보기 위하여 Fig.5와 Fig.6에 각각 이들의 관계를 나타냈다. K_{IC} 와 M.O.R.의 관계를 나타낸 Fig.5를 보면, 이들간의 상관관계는 LT방향의 경우 $r^2=0.70$ 으로, LR방향의 경우 $r^2=0.77$ 로 매우 높은 상관관계를 나타내고 있다. 또한 K_{IC} 와 비중과의 관계를 나타낸 Fig.6에서

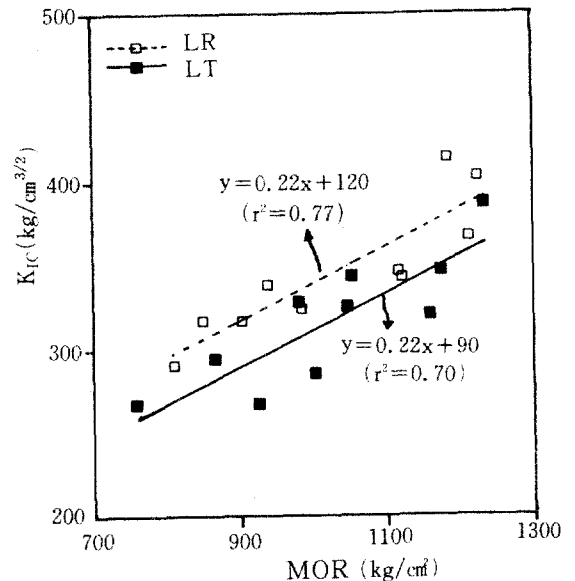


Fig.5. Relationship between MOR and K_{IC} for notched specimens.

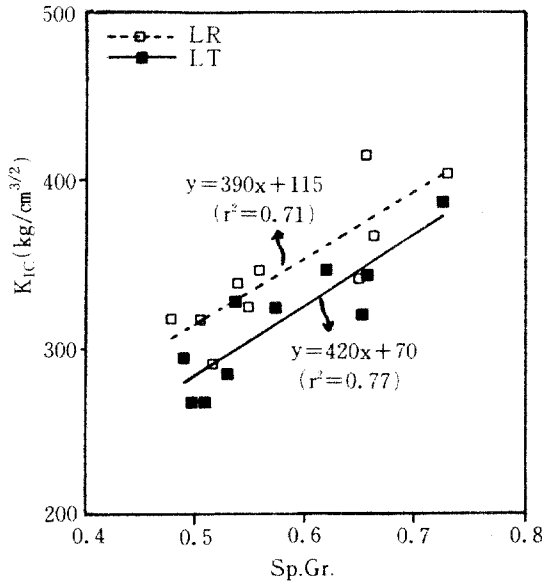


Fig.6. Relationship between Sp.Gr. and K_{IC} for notched specimens.

도 r^2 의 값이 LT, LR방향에 있어 각각 0.77, 0.71로 높은 상관관계를 보여준다. 이러한 결과는 앞에서 밝혀진 바와 같이 MOR 과 비중과의 상관관계가 매우 높게 나타난 결과와도 일치하는 것으로서, 당연한 결과라고도 할 수 있겠으나, 아뭏든 K_{IC} 는 MOR, 비중과 밀접한 관계를 나타내므로써 그 수종의 비중이나 MOR 값으로부터 K_{IC} 값을 쉽게 예측할 수 있으며, 이러한 사실은 K_{IC} 가 하나의 재료상수로써 인정되기에 충분하다는 사실을 입증해 주는 결과라 할 수 있을 것이다.

한편 본 시험에서 얻어진 K_{IC} 값과 Schniewind⁸⁾이 보고한 결과를 비교해 보면, 동일비중에 있어서 본 시험에서 얻어진 K_{IC} 값이 약 10% 정도 크게 얻어졌다. 이것은 임계하중의 측정방법에 차이가 있었던 것으로 판단되며, 이러한 문제는 금후 측정방법에 대한 연구가 보다 많이 행해져서 동일한 방법에 의하여 임계하중이 측정될 수 있을때 K_{IC} 값이 목재에 있어서 고유의 재료상수로써 정착될 수 있을 것이다.

3.3 MOE 의 예측

Fig.7에 크랙이 없는 재료의 MOE 와 크랙이 있는 재료의 MOE 의 관계를 나타내었다. Fig. 7에 의하면 양자간에는 밀접한 관계가 있는 것으로 나타났으며(LT에 있어서는 상관관계가 다소 낮은 것으로 나타남), 이러한 결과는 크랙이 없는 재료의 MOE로부터 크랙이 있는 재료의 MOE를 예측할 수 있는 가능성을 보여주는 것이므로 여기에 대하여 좀더 자세히 살펴보기로 한다.

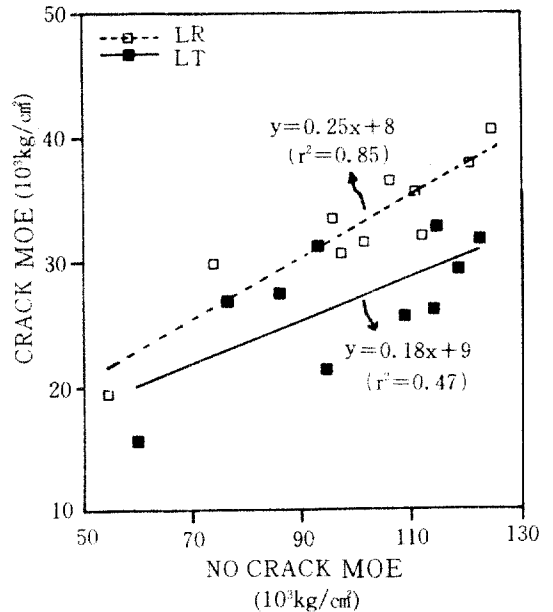


Fig.7. Relationship between MOE of clean wood specimens (no crack MOE) and effective MOE of notched specimens (crack MOE)

탄성변형에 있어서는 휨하중에 의한 처짐은, 외력의 작용에 의하여 재료내부에 축적되는 탄성변형에너지의 총량에 의해 결정된다. 크랙을 가진 재료에서는 크랙의 존재에 의한 응력분포의 불균일로 인하여 재료 전체로서의 에너지 총량에 변화가 생겨, 결과적으로 외형상의 휨강성이 저감된다. 이문제를 엄밀히 다루는 데에는 재료 내부의 변형에너지 밀도분포를 확정지워야 하므로 매우 어려운 일이다. 따라서 여기서는 平井⁹⁾¹⁰⁾, 李¹²⁾ 등이 제안한 等價단면의 개념을 이용하여 유효 MOR 比를 계산하고, 이

를 실험치와 비교하여 보았다. 크랙이 없는 경우와 크랙이 있는 경우의 유효 MOE 比를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$k = \frac{\delta_0}{\delta}$$

여기서, k : 유효휨강성비(effective stiffness ratio)

δ_0 : 크랙이 없을 때의 처짐

δ : 크랙이 있을 때의 처짐

이때 k는 等價단면의 설정에 따라서 다소 차이가 있으나, 여기서는 李¹²⁾가 제안한 等價단면을 택하기로 하면, 본 실험조건에서는 k값은 k=0.366이 된다.

Table 3에 본 실험에서 얻어진 k_{exp} 값과 등가 단면법에 의해 예측된 k_{cal} 과의 比를 나타냈다. Table 3에 의하여 본 실험에서 얻어진 유효휨강성비는 예측치보다 낮게 나타나고 있다.

로 구하지 않아 정확한 산출은 불가능하므로 그 경향만 살펴보기로 한다. 일반적으로 목재에 있어서는 LR방향의 E/G값은 10~20정도가 되는 것으로 알려져 있으며 LR과 LT단면에 있어서의 G값은 활엽수의 경우 LR단면의 G값이 LT단면에 비해 1.2~2.0배 정도 되는 것으로 보고되고 있다.¹¹⁾ 이러한 기존의 결과를 고려하면 k_{exp}/k_{cal} 비는 LR 방향의 경우 0.88~0.95, LT 방향의 경우 0.76~0.94의 범위에 속하게 된다.

Table 3의 k_{exp}/k_{cal} 값을 보면 LR방향의 경우에는 대부분이 이 범위에 속하나, LT방향의 경우는 대체로 이 범위보다 낮은 값을 나타내고 있다. 이와 같은 차이는 크랙에 의한 전단응력의 집중으로 인해 발생한 전단변형이 LT 방향에 있어서는 LR 방향보다 더 크기때문인 것으로 판단된다. 그러나, 전체적인 경향을 볼 때 전단변형의 영향 및 LR과 LT방향에 있어서의 휨강

Table 3. Effective stiffness ratio of cracked specimens to clear specimens.

Species	LT specimens		LR specimens	
	k_{exp}	k_{exp}/k_{cal}	k_{exp}	k_{exp}/k_{cal}
Karae-namu	0.351	0.880	0.286	0.782
Bam-namu	0.261	0.654	0.356	0.974
Ori-namu	0.225	0.565	0.403	1.102
Eum-namu	0.235	0.589	0.355	0.971
Sanbut-namu	0.248	0.622	0.342	0.936
Salku-namu	0.229	0.574	0.321	0.877
Korosoi-namu	0.286	0.718	0.314	0.858
Akkasi-namu	0.321	0.802	0.350	0.956
Mulpure-namu	0.339	0.849	0.311	0.850
Kalcham-namu	0.260	0.652	0.326	0.890

Note : k_{exp} : observed values by experiments

k_{cal} : calculated values by equivalent cross-section method. ($k_{cal}=0.366$).

이러한 결과는, 본 실험에서는 크랙이 있는 시편의 span to depth ratio가 8 : 1인 관계로 전단변형에 의한 처짐의 영향을 무시할 수 없으며, 더욱 엄밀하게는 크랙에 의한 응력집중이 전단변형에 미치는 영향도 고려되어야 함을 나타내는 것으로 생각한다. 전단변형에 의한 처짐은 E/G에 따라 달라지나 본 실험에서는 G를 따

성의 차이등을 정확히 반영시킨다면 위에서 제시한 등가단면법에 의한 MOE의 예측은 가능한 것으로 사료된다.

4. 결 론

크랙을 가진 국산 활엽수재의 파괴인성 및 탄

성계수에 대하여 조사하고, 크랙이 없는 무결점재의 강도특성과 이들과의 관계를 살펴보았다.

그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 각 수종의 휨성능에 있어서 휨강도는 LT와 LR방향의 차이가 거의 없는 것으로 나타났으나 휨탄성계수에 있어서는 양방향간에 차이가 있음이 인정되었다. 그러나, LT와 LR방향의 값을 비교해 볼 때, 어느쪽이 더 높은지에 대해서는 일정한 경향을 나타내지 않았다.

2) K_{IC} 에 있어서는, 대체로 비중이 증가함에 따라 K_{IC} 값도 증가하는 경향을 보였으며, 비중 MOR, MOE 등과 K_{IC} 와의 상관관계에 있어서는 K_{IC} 와 MOR 간 및 K_{IC} 와 비중간의 상관관계가 매우 높은 것으로 나타났다.

한편, K_{IC} LT와 K_{IC} LR을 비교할 때 평균 약 10% 정도 K_{IC} LR값이 크게 나타났다.

3) 크랙이 있는 경우의 MOE를 예측하기 위하여 등가단면법을 이용하여 산출한 유효휨강성비의 예측치와 실측치를 비교한 결과, 본 실험조건에서는 전단변형의 영향으로 실측치와 예측치간에 일치되지 않는 것으로 나타났으나, 그 경향에 있어서는 등가단면법에 의한 예측이 가능한 것으로 판단되었다.

참 고 문 헌

- Porter, A. W. 1964. On the mechanics of fracture in wood. Forest Prod. J. 14(8): 325-331.
- Walsh, P. F. 1972. Linear fracture mechanics in orthotropic plates. J. Appl. Mech. 34:967-974.
- Brown, W. F. J., and J. E. Srawley. 1966. Plane strain crack toughness testing of highstrength metallic materials. Special Technical Publication No. 410. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Pa
- Bodig, J., and B. A. Jayne. 1982. Mechanics of wood and wood composites. pp431-433. Van Nostrand Reinhold Company Inc.
- Schniewind, A. P., and J. C. Centeno. 1973. Fracture toughness and duration of load factor I. Wood and Fiber 5(2): 152-159.
- Leicester, R. H. 1974. Fracture strength of wood. Proc. of First Austrian Conference on Engineering Materials.
- Petterson, R. W., J. Bodig. 1981. Prediction of fracture toughness of conifers. Wood and Fiber Sci. 15(4): 302-316.
- Schniewind, A.P., T. Ohgama, T. Aoki, and T. Yamada. 1982 Effect of specific gravity, moisture content, and temperature on fracture toughness of wood. Wood Science 15(2): 101-109
- 平井卓郎, 澤田 稔. 1979. 切り欠きを持つ木材梁の曲げ剛性と耐力. 北海道大學 農學部 演習林 研究報告. 36(2):387-420.
- _____, _____. 1979. 切り欠き持つ木材梁の曲げ剛性と耐力. 北海道大學 農學部 演習林 研究報告36(3): 663-680
- 日本林業試験場. 1973. 木材工業ハンドブック. 丸善(株).
- 李鎭濟, 大熊幹章. 1986. 단판 적층재에 있어서의 종접합부의 강도에 미치는 영향 및 새로운 판상재료 LVB의 개발에 관한 연구. 東京大學 學位論文.