

국산 소경재의 휨 성질을 이용한 충격에너지와 최대하중까지 일-에너지 예측연구¹

차재경²

Study on the Prediction of the Work-Energy to the Maximum Load and Impact Bending Energy from the Bending Properties¹

Jae- Kyung Cha²

ABSTRACT

This research investigates the bending properties to predict the work-energy to maximum load and impact bending energy from static bending and impact bending test. Specimens were prepared from lumber made of thinning crop-trees. Matched specimens were used for MC 12% and green moisture specimens to measure the effect of moisture content on the absorbed energy from static and impact bending tests. The bending properties such as MOE, MOR, etc. is a good predictor to investigate the work-energy and work-energy per unit volume from static bending and impact bending test. The impact bending energy is increased with increasing moisture content. However, the work to maximum load from static bending test is increasing with increasing the MC only for higher density species.

Keywords: Work-energy to the maximum load, impact bending energy, static bending test, impact bending test, moisture content.

1. 서 론

목재는 인류가 선사시대부터 다양한 용도로 사용했던 여러 재료들 중에 하나였다. 시간이 지나면서 목재의 용도는 변해왔지만 오늘날에도 널리 사용되고 있다. 특히 목재는 다양한 종류의 하중들을 지지하는 건축, 교량, 가구 등 구조물에 사용되고 있다. 목재에 작용하는 여러 하중들의 지지능력은 휨강도, 인장강도, 압축강도 및 전단강도 등의 실험에 의해 측정된 값들로 나타낸다. 따라서 기계적 성질들은 목재가 더 다양한 용도로 이용되게 하는데 기여하고 있다. 첨가적인 측정으로는 종종 휨강도 실험으로부터 최대하중까지의 일-에너지, 충격강도 및 경도 등이 있다. 특히 휨강도는 부재가 지지할 수 있는 최대 휨하중으로부터 구한 휨모멘트에 비례한다. 하지만 최대하중까지의 일은 하중에 의해 파괴될 때까지 시편에 의해 흡수된 에너지(일)로 측정된다. 다른 한편으로 충격강도는 매우 짧은 시간에 작용하는 하중에 의해 흡수되는 에너지와 관계가 있다.

1. 논문접수: 2008. 08. 29. 본 연구는 국민대학교 교내연구비(2008) 지원에 의해 수행되었음.

2. 국민대학교 임산공학과 Dept. of Forest Products, College of Forest science, Kookmin University, Seoul 136-702. E-mail: jcha@kookmin.ac.kr.

목재의 기계적 성질들은 목재의 밀도와 결합 등에 의해 영향을 받는다. 목재의 기계적 성질들은 특히 함수율에 의해서도 영향을 받는다. 섬유화화점 이하로 목재의 함수율이 감소되면 대부분의 강도와 탄성계수는 증가한다. 이는 세포벽으로부터 수분이 감소하기 때문에 긴 체인으로 된 분자들이 더 밀착되어 단단히 결합되기 때문이다. 또한 목재에 대한 대부분의 기계적 성질들은 하중지속시간에 영향을 받는다. 하중지속시간은 목재의 기계적 성질에 중요한 역할을 하여, 목재로 만든 구조물이 지탱할 수 있는 하중의 크기에 영향을 한다. 하중지속시간이 길면 구조물을 안전하게 지지할 수 있는 하중의 크기가 작아진다. 파괴 위험 없이 지지할 수 있는 하중의 크기가 매우 작을지라도 부재는 시간이 흐르면서 계속하여 휘거나 변형될 것이다. 목재이용에는 하중지속시간을 고려해야 하므로 짧은 시간 하중이 가해진 실험실에서의 실험결과들은 보정한 다음에 적용이 가능하였다. 특히 충격강도는 정적이고 느리게 작용하는 휨강도 등과는 다르게 짧은 시간에 작용하는 하중과 관계가 있다. 스포츠 용구, 도구의 손잡이 등은 휨강도 등과 같은 정적하중보다 충격강도에 의해 더 자주 파괴된다. 따라서 충격에너지는 연장 손잡이, 야구 방망이 등 운동기구, 상자 등에 목재를 사용하는 데 매우 중요한 성질이다. 충격실험은 눈으로 보이지 않는 목재 부후(Wang 등 1980), 압축파괴 및 심재 등 결함을 찾아내는데도 효과적으로 이용되고 있다. 최대하중까지 일-에너지는 미숙재의 기계적 성질에 대한 영향을 조사하기 위해서도 사용했다.(Adamopoulos 등 2007; Evans II 등 2000) 휨강도실험에서 갑작스럽게 파괴되지 않는 목재는 최대하중까지 더 큰 에너지 값을 가지고 있다. 큰 에너지 값을 나타내는 목재는 휨하중에 의해 파괴되기 전에 큰 처짐을 일으킨다. 구부러도 부러지지 않는 목재는 갑자기 파괴되지 않고 많은 시간이 지난 다음에 파괴가 일어난다. 하지만 파괴를 일으킬 때까지 목재가 흡수하는 에너지는 보통 충격실험으로부터 측정된 값을 이용한다.

목재강도는 정적하중들보다 짧은 시간 동안 하중을 가할 때 더 크다. 보는 정적하중과 비교하여 약 2배 이상 더 큰 하중을 지지할 수 있다. 또한 목재는 섬유화화점 이하로 건조되면 강도는 증가한다. 이와 같은 사실은 함수율의 증가가 변형량의 증가를 의미하는 파괴될 때까지 시편에 의해 흡수되는 일/에너지나 충격에너지에는 적용할 수 없다. 목재가 흡수하는 일/에너지 또한 함수율 변화에 영향을 받지만 그에 대한 연구는 매우 부족하고, 또한 기존의 휨강도 및 휨탄성계수 등 기존의 다른 자료를 활용할 방법이 필요하다. 따라서 본 연구는 휨강도 및 휨탄성계수 등 휨성질을 이용하여 휨강도실험 및 충격실험에 의해 흡수되는 최대하중까지 일/에너지를 예측하고자 하였다. 또한 함수율 변화에 따른 최대하중까지 일 및 충격에너지의 변화에 대해서도 검토하였다.

2. 재료 및 실험방법

본 연구는 국내에서 생산되는 낙엽송, 잣나무, 리기다소나무, 상수리나무 목재를 사용하였다. 이들 목재들은 간벌에 의해 국내에서 많이 생산되지만 낮은 품질과 용도 개발이 이루어지지 않아 저가에 팔리고 있다. 기계적 성질들을 측정하기 위해 시편들은 먼저 시편길이보다 2배 이상 크게 제작하였다. 모든 시편들은 대조구와 함수율 시편 사이의 목재 변이를 최대한 줄이기 위해 길이를 따라 둘로 잘랐다. 한쪽은 대조구로 사용하기 위해 목재 실험의 표준조건인 함수율 12%가 되도록 온도 21℃와 상대습도 65%를 유지한 항온항습기에서 조습하였다.(차와 이 2007) 다른

한쪽은 생재함수를 시편을 위해 온도 21℃가 유지되는 항온 수조에서 목재함수율이 섬유포화점 이상이 되도록 1주일간 침지하였다. 항온수조에 목재를 넣기 전에 자동대패기로 면삭하였다. 함수율 12%와 섬유포화점이상으로 처리된 소형 무결점 시편들에는 기계적 성질과 물리적 성질에 대한 실험을 ASTM D 143(ASTM 1986)에 의해 실시했다.

2-1 휨강도실험

휨 성질을 계산하기 위해 각각의 시편에 휨하중을 가했던 차와 이(2007) 및 차(2007)의 자료를 사용했다. 차와 이(2007) 및 차(2007)는 휨 하중을 3점 하중 실험방법(ASTM D143)에 의해 시편이 파괴될 때까지 만능재료시험기에 의해 분당 2.5mm의 하중속도로 시편 중앙에 가했다. 휨 탄성계수, 휨강도 등의 휨성질을 구하기 위해 모든 하중과 변형량은 개인용 컴퓨터에 자동으로 저장하였다.

2-2 충격시험

충격실험은 표준 충격시험방법인(ASTM D143)에 의해 각각의 무결점 목재시편에 실시했다. 충격실험은 여러 실험기계들이 충격에너지를 측정하는데 유용하지만 간단한 실험에 의해 측정할 수 있다. 흔들리는 추에 의한 시험기는 추의 위치에너지 차에 의해 파괴를 위해 요구되는 에너지를 측정하기 위해 국제적으로 표준화된 24cm 지지점 사이의 스펠 중앙에 하중을 가한다. 하중은 국립산림과학원에 있는 충격시험기를 사용하여 스펠 중앙에 수직으로 가해 충격에너지를 측정하였다.

2-3 함수율과 비중 측정

함수율은 전건법(ASTM D 143)에 따라 측정했다. 모든 시편들의 함수율은 생재와 기건 상태에서 측정했다. 비중들은 전건중량과 각각의 함수율에서 체적을 사용하여 측정했다. 함수율과 비중을 측정하기 위해 조습이 완료된 시편들은 두께, 폭, 길이와 함께 중량을 측정했다. 또한 휨강도 실험과 충격강도 시편들은 실험이 완료된 즉시 시편의 양끝에서 길이를 5cm로 잘라 두께, 폭, 길이와 중량을 측정했다. 측정이 완료된 시편들은 온도 103℃ 전기오븐에서 하루 동안 전건시킨 다음 다시 치수와 중량을 측정했다.

3. 결과 및 고찰

충격에너지와 최대하중까지 일-에너지를 구하기 위해 모든 실험들은 각각 7개의 시편을 사용했다. Table 1은 본 연구에 사용된 목재의 생재비중에 대한 평균과 표준편차를 보여주고 있다. 생재비중은 전건무게와 섬유포화점 이상에서의 체적을 사용하여 계산하였다. 생재비중은 잣나무 목재가 0.36으로 가장 작았고, 밤나무목재가 0.72로 가장 큰 값을 보여주고 있다. Table 2는 차와 이(2007) 및 차(2007)의 휨강도 실험 자료들을 사용하여 계산한 최대하중까지 일-에너지를 보여주고 있다. 최대하중까지 일-에너지는 하중에 의해 변형된 시편의 하중-변형률 곡선을 나타내는 하중-변형률 자료들로부터 극한정리를 이용한 적분법을 사용하여 계산하였다. 하중-변형률 곡선

의 아래 면적은 하중의 각각 두 점 사이의 평균값을 높이로 하고 두 점 사이에 변형량 차를 밑변으로 하는 각각의 직사각형 면적을 계산한 다음 각각의 면적을 연속으로 더해 구했다. 또한 최대하중까지 일-에너지는 최대하중(F_{max})와 최대처짐량(D_{max})을 곱하고 2로 나누어 구했다. 함수율 12%에서 최대 하중과 변형량을 이용해 구한 일-에너지는 적분에 의해 구한 일-에너지의 79.2%로 수종에 따라 74.6에서 85.8%를 나타냈다. 하지만 생재함수율에서는 71.2%로 비중이 작은 잣나무와 리기다소나무 목재가 70%보다 낮은 69.1%와 67.3%로 하중의 증가 없이 변형량만 크게 증가하였기 때문에 하중-변형량의 원 자료(raw data)에서 이를 보여준다. 또한 함수율 12%에서 충격하중에 대한 파괴는 대부분 돌로 완전히 분리되었지만 생재함수율에서는 Figure 1과 같이 크게 구부러지는 모습을 보였다. 이는 휨하중에서 하중의 큰 증가 없이 파괴되기 전에 큰 처짐을 일으켰다는 것을 의미한다. 또한 독일과 프랑스에서는 최대하중까지 일-에너지를 보통 최대하중에 최대 처짐량의 곱으로 나눈 인자를 곱하여 사용하고 있다. 구조재의 경우 보통 인자가 약 0.7로 웅이 및 할렐 등의 결합에 따라 0.5까지 감소하여 사용한다. 본 연구결과는 함수율 12%에서는 약 0.63이었고, 반면에 섬유포화점 이상의 생재함수율에서 비는 0.70이었다. 이와 같은 결과들은 최대하중까지 일/에너지를 계산하는데 최대하중과 변형량의 사용이 가능할 것으로 판단된다.

Table 1. Average and standard deviation of specific gravities for impact and static bending wood samples

Samples	Basic specific gravity
<i>Larix kaempferi</i> Carr.	0.54(0.052*)
<i>Pinus koraiensis</i> Sieb. et Zucc	0.36(0.030)
<i>Pinus rigida</i> Mill.	0.46(0.030)
<i>Castanea crenata</i> Sieb. et Zucc	0.72(0.032)

*Sample standard deviation

Table 2. Comparison of average and standard deviation of maximum absorption energies determined by direct integration and $P_{max} \cdot D_{max}/2$ from the static bending test

Samples		Maximum absorption energy(kgf • cm)		
		Total(A)	$F_{max} \cdot D_{max}/2$ (B)	Relative changes(B/A, %)
<i>Larix kaempferi</i> Carr.	12%	102.1 (24.2*)	80.8 (15.8)	79.1
	Green	110.3 (46.3)	78.3 (24.4)	71.0
<i>Pinus koraiensis</i> Sieb. et Zucc.	12%	45.7 (11.5)	39.2 (5.4)	85.8
	Green	41.8 (9.4)	28.9 (5.2)	69.1
<i>Pinus rigida</i> Mill.	12%	88.3 (23.3)	67.5 (15.5)	76.4
	Green	54.8 (19.7)	36.9 (11.8)	67.3
<i>Castanea crenata</i> Sieb. et Zucc.	12%	129.5 (39.0)	104.6 (28.4)	80.8
	Green	176.5 (48.7)	130.1 (33.9)	73.7
Overall	12%	92.5 (38.2)	73.3 (29.2)	79.2
	Green	98.3 (64.3)	70.0 (45.6)	71.2

* Sample standard deviation

충격과 휨강도 실험에 의해 측정된 일-에너지는 일정한 스패ン길에서 시편의 두께와 폭의 작은 변이로 횡단면 치수 사이에 선형관계를 이

용하여
$$W_{adj} = \frac{A_{stan}}{A_{test}} W_{test}$$
에 의

해 조정된 에너지(W_{adj})를 계산했다. W_{test} 는 하중-변형률 곡선으로 구한 에너지를 사용했고 A_{test} 는 시편의 횡단면 면적이며, A_{stan} 은 충격에너지와 비교를 위해 표준 충격시편의 횡단면 면적 4cm^2 (KS F 2211 2004)를 사용하여 조정된 에너지(W_{adj})를 구하였다. Table 3은 함수율 12%와 생재함수율에서 조정된 최대하중까지 일-에너지를 보여주고 있다. 최대하

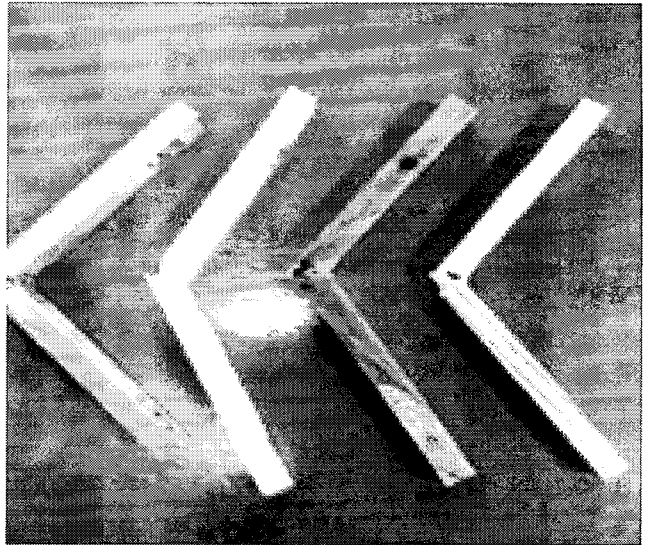


Fig.1. Typical failure mode of impact bending specimen at green moisture condition.

중까지 일-에너지는 비중이 작은 잣나무 가장 작은 값을 보였고, 비중이 증가하므로 증가하였다. 함수율이 증가하므로 최대 일-에너지 값은 비중이 큰 낙엽송 목재와 밤나무 목재는 증가하였지만, 비중이 작은 잣나무 목재와 리기다소나무 목재는 크게 감소하였다. 일반적으로 목재는 섬유포화점 이하로 건조되면 강도는 증가한다. 이 같은 사실은 최대에너지에는 적용할 수 없다. 최대에너지 또한 함수율 변화에 영향을 받지만 건조재는 생재와 같이 유연하지 않아 파괴가 일어날 때까지 하중-변형률 곡선의 면적들은 함수율에 의해 영향을 받지 않는다. 이는 차의 연구(2007)에서 함수율이 증가하므로 리기다소나무의 휨강도와 휨탄성계수가 가장 크게 감소하였고, 잣나무 목재가 그 다음으로 크게 감소하였기 때문에 그에 따른 하중-변형률 곡선의 면적인 최대하중까지 일-에너지의 감소 때문으로 판단된다. Table 4는 충격시험으로부터 구한 충격에너지의 평균 및 표준편차를 보여주고 있다. 충격에너지는 비중이 큰 수종이 큰 값을 보여주고 있다. 섬유포화점 이상으로 함수율이 증가했을 때 비중이 작은 목재는 최대하중까지 일/에너지가 감소하였지만 충격에너지는 모든 수종이 증가하였다. 하지만 충격에너지는 비중이 작은 목재가 더 큰 충격에너지의 증가를 보여주고 있다. 전체적으로 충격에너지는 함수율 12%에서 최대 휨하중까지 일-에너지보다 거의 배에 가까운 큰 값을 보여주고 있다. 하지만 섬유포화점이상에서는 1.38배 더 큰 값을 보여주고 있다. 전에 언급하였던 것처럼 그림 1은 섬유포화점 이상인 시편의 충격실험에 의한 파괴 모습으로 함수율 12% 시편에 대한 충격실험으로부터 파괴 모습과 다르게 시편이 완전히 분리되지 않고 모든 시편이 부러진 후에도 연결되어 있는 모습을 보인다. 인장 부위는 완전히 목 섬유가 뽑히는 모습이지만 압축부위는 높은 함수율로 크게 주름이 잡혔다. 이는 충격하중에 큰 변형이 일어난 다음에도 어느 정도의 하중을 지지하고 있었기 때문으로 판단된다.

Table 3. Average and standard deviation of adjusted work/energy to maximum load

Samples	Maximum absorption energy(kgf • cm)		
	12%(A)	Green(B)	Relative changes(B/A %)
<i>Larix kaempferi</i> Carr.	129.0(32.0*)	138.1(65.4)	7.1
<i>Pinus koraiensis</i> Sieb. et Zucc	61.0(11.4)	50.5(11.1)	-17.2
<i>Pinus rigida</i> Mill.	110.4(29.7)	65.5(23.3)	-40.7
<i>Castanea crenata</i> Sieb. et Zucc	155.8(45.8)	200.9(57.6)	28.9
Overall	115.3(46.3)	116.2(75.3)	0.8

* Sample standard deviation

Table 4. Average and standard deviation of adjusted impact bending energies

Samples	Maximum absorption energy(kgf • cm)		
	12%(A)	Green(B)	Relative changes(B/A %)
<i>Larix kaempferi</i> Carr.	236.0(99.4*)	270.2(35.1)	14.5
<i>Pinus koraiensis</i> Sieb. et Zucc	89.3(19.6)	121.0(23.3)	35.5
<i>Pinus rigida</i> Mill.	123.5(51.4)	192.6(63.4)	56.0
<i>Castanea crenata</i> Sieb. et Zucc	455.8(105.8)	493.2(145.5)	8.2
Overall	226.2(163.2)	275.3(169.0)	21.7

*Sample standard deviation

최대하중까지 일과 충격에너지에 대한 치수 효과를 제거하기 위해 단위체적당 일-에너지를 구하였다. 휨하중에 의한 최대하중까지 일과 충격에너지는 보의 지지점 사이 스패ن 부분에 대한 체적으로 나누었다. Table 5는 하중-변형량 곡선의 면적을 스패ن부분의 체적으로 나누어 구한 단위체적당 일-에너지를 보여준다. Table 6은 충격에너지를 지지점 사이 체적으로 나눈 단위체적당 충격에너지를 보여주고 있다. 응력-변형률 곡선의 아래 면적 또한 단위 체적에 대한 일을 나타낸다. 하중-변형량 곡선으로부터 일-에너지(J, N-m) $W = \frac{P\Delta}{2}$ 은 단위체적당 일-에너지 $w = \frac{W}{V} = \frac{\sigma\epsilon}{2}$ 로 나타낼 수 있으며, 응력-변형률 곡선의 선형 범위 내에서 여러 응력 범위 내에서 일/에너지를 계산할 수 있다. 비례한계점까지 단위체적당 일-에너지도 응력과 탄성계수를 이용하여 계산할 수 있다. $\sigma = E\epsilon$ 관계를 이용하면 비례한계점까지 단위체적당 일(w_{pl})은 $\frac{\sigma_{pl}^2}{2E}$ 로 나타낼 수 있다. 응력-변형률 곡선에서 최대 응력까지 면적인 단위체적당 에너지는 위 식에 휨강도(MOR)과 휨탄성계수(MOE)를 대입하여 $\frac{MOR^2}{2(MOE)}$ 으로 구했다. 휨강도와 휨탄성계수는 차와 이(2007) 및 차(2007)의 자료를 사용했다. 함수율 12%에서는 단위체적당 에너지와 $\frac{MOR^2}{2(MOE)}$ 값

의 비가 전체적으로 0.26으로 모든 수종에서 0.25로부터 0.29사이 값을 보였다. 하지만 섬유포화점 이상의 함수율에서는 두 값들의 비는 전체적으로 0.39로 수종에 따라 0.36부터 0.50사이로 함수율 12%에서 보다 더 큰 값을 보여주고 있다. 이와 같은 결과는 함수율 12%에서 단위체적당 에너지를 예측하는데 휨강도와 휨탄성계수를 이용하는 것이 가능한 것으로 판단된다. 휨강도와 탄성계수를 이용하여 충격에너지를 예측하기 위해 Table 6은 함수율 12%에서는 0.46으로 수종에 따라 0.29와 0.63 사이 값을 보였다. 섬유포화점 이상에서는 전체가 0.82로 수종에 따라 0.67부터 1.30으로 비중이 작은 수종은 단위체적당 충격에너지보다 큰 값을 보였다. 따라서 단위체적당 충격에너지는 함수율 12%에서 휨강도 및 휨탄성계수에 의해 어느 정도 예측이 가능한 것으로 판단된다.

Table 5. Average and standard deviation of maximum absorption energies per volumes from static bending test

Samples		Maximum absorption energy(kgf • cm/cm ³)		
		static bending(A)	$\frac{MOR^2}{2MOE}$	Relative changes(A/B)
<i>Larix kaempferi</i> Carr.	12%	1.54(0.38*)	5.81(0.94)	0.27
	green	1.64(0.78)	4.22(1.06)	0.39
<i>Pinus koraiensis</i> Sieb. et Zucc	12%	0.74(0.14)	2.73(0.24)	0.27
	green	0.60(0.13)	1.24(0.22)	0.48
<i>Pinus rigida</i> Mill.	12%	1.31(0.35)	4.50(0.76)	0.29
	green	0.78(0.28)	1.55(0.30)	0.50
<i>Castanea crenata</i> Sieb. et Zucc	12%	1.88(0.54)	7.59(1.43)	0.25
	green	2.39(0.69)	6.60(1.17)	0.36
Overall	12%	1.37(0.55)	5.18(1.99)	0.26
	green	1.38(0.90)	3.50(2.33)	0.39

* Sample standard deviation

Table 6. Average and standard deviation of maximum absorption energies per volumes from impact bending test

Samples		Maximum absorption energy(kgf • cm/cm ³)		
		impact bending (A)	$\frac{MOR^2}{2MOE}$	Relative changes(A/B)
<i>Larix kaempferi</i> Carr.	12%	2.46(1.04*)	5.81(0.94)	0.42
	green	2.81(0.37)	4.22(1.06)	0.67
<i>Pinus koraiensis</i> Sieb. et Zucc	12%	0.93(0.20)	2.73(0.24)	0.34
	green	1.26(0.24)	1.24(0.22)	1.02
<i>Pinus rigida</i> Mill.	12%	1.29(0.54)	4.50(0.76)	0.29
	green	2.01(0.66)	1.55(0.30)	1.30
<i>Castanea crenata</i> Sieb. et Zucc	12%	4.75(1.10)	7.59(1.43)	0.63
	green	5.14(1.52)	6.60(1.17)	0.78
Overall	12%	2.36(1.70)	5.18(1.99)	0.46
	green	2.87(1.76)	3.50(2.33)	0.82

* Sample standard deviation

4. 결 론

국산 소경재에 대한 휨탄성계수와 휨강도 등의 휨성질을 사용하여 최대하중까지 일 및 충격 에너지를 예측하기 위한 연구 결과는 다음과 같다. 적분에 의해 구한 최대하중까지 일-에너지는 비중이 증가하면 증가하였다. 최대하중까지 일-에너지는 함수율이 증가하므로 비중이 큰 낙엽송과 밤나무 목재는 증가하였지만 비중이 작은 리기다소나무와 잣나무 목재는 감소하였다. 함수율 12%에서 최대하중과 처짐량을 이용하여 구한 에너지는 적분에 의해 구한 최대하중까지 일-에너지에 79.2%로, 수중에 따라 74.6%에서 85.8%를 보였다. 충격에너지는 최대 일-에너지보다 배 이상의 큰 값을 보여주었다. 특히 충격에너지는 함수율이 증가하므로 모든 수중에서 증가하였고, 비중이 작은 목재가 더 큰 증가율을 보였다. 특히 휨성질인 휨강도와 휨탄성계수가 함수율 12%에서 단위체적당 일/에너지를 예측하는데 좋은 인자임을 보여주었다. 충격에너지 또한 함수율 12%에서 휨강도와 휨탄성계수를 이용하여 어느 정도 예측이 가능하였다.

5. 인용문헌

- Adamopoulos, S., C. Passialis and E. Voulgaridis. 2007. Strength properties of juvenile and mature wood in black locust. *Wood and Fiber Sci.* 39(2): 241-249.
- American Society for Testing and Materials. 1986. Standard test method of testing small clear specimens for timber. ASTM D 143. ASTM, Philadelphia, PA.
- Evans, J. W., J. F. Senft and D. W. Green. 2000. Juvenile wood effect in red alder: analysis of physical and mechanical data to delineate juvenile and mature wood zones. *Forest Prod. J.* 50(7/8): 75-87.
- Hearman. R. F. S. 1966. Theory of vibration testing of wood. *Forest Prod. J.* 16(8): 29-40.
- Wang, J. C., O. Suchsland and J. H. Hart. 1980. Dynamic test for evaluating decay in wood. *Forest Prod. J.* 30(7): 35-37.
- 차 재경. 2007. 국내산 침엽수목재의 섬유포화점측정 및 기계적 성질에 대한 함수율의 영향. *산림과학* 20: 43-51.
- 차 재경, 이 성우. 2007. VARTM(Vacuum assisted resin transfer molding)방법에 의해 보강된 목재 및 파티클보드용 유리섬유로 보강한 복합소재의 성질. *목재공학* 35(3): 29-35.
- 한국표준협회. 2004. 목재 휨 시험방법. KS F 2211.