

공진주파수에 의한 목재의 동적탄성계수 추정*1

李元熙*1 · 黃權煥*2

Estimation of the Dynamic MOE in Woods with Resonance Frequency*1

Weon-Hee Lee*1 · Kweon-Hwan Hwang*2

ABSTRACT

The purpose of this study was to investigate the relationships among density, moisture content, and modulus of elasticity in which are important characteristics in physical and mechanical properties of woods. In this study, the dynamic MOE was calculated through the combination with resonance frequency of transverse vibration method and density, and the estimated moisture contents were calculated with two different equations (1, 2) in order to compare with experimental moisture contents.

The following results from this study were obtained:

1. According to the regression analysis with two different parameters (E' and density), the two regression lines appeared to be straight intersecting at 0.6 density. As another factor, moisture contents in wood also influenced on the analysing regression at the below F.S.P.
2. When considering the relationship between moisture contents and E' , the tendency of each moisture content and E' showed very similar pattern suggesting that moisture contents in addition to density are very important parameter.
3. When together with moisture contents and density as parameters for multiple regression analysis, coefficients of determinations are dramatically improved. Interestingly, the coefficients of determinations are further increased when analysing at the below point of F.S.P., and when analysing higher and lower density seperately.

In summary, more correct estimation of the dynamic MOE of woods can be possible with only transverse vibration and density in wood. Therefore, with this indirect method, the calculation of MOE in all kinds of woods including timber, live tree and wood products can be feasible resulting in accelerating the efficiency of time and labor.

Keywords : Density, moisture content, MOE(Modulus of Elasticity), E' (dynamic MOE), transverse vibration method, multiple regression function

*1 접수 1997년 1월 20일 Received January 20, 1997

*2 경북대학교 농과대학 College of Agriculture, Kyungpook National University, Taegu 702-701, Korea

1. 서론

최근 전자파, 초음파, AE, 빛, 적외선, 방사선 등에 의한 계측 및 화상해석기술, 컴퓨터제어기술의 진전에 따라 비파괴검사기술은 비약적으로 진보해 왔다. 비파괴검사로서는 수분계측, 건조제어, 치수·형상계측, 온·습도계측, 라인관리, 강도·탄성계수계측 등이 있다. 예를 들면 마이크로파의 공진현상을 이용하면 목재의 함수율과 밀도를 계측할 수 있으며 고유진동법에서는 공진주파수와 밀도로부터 탄성계수를 산출할 수 있다(祖父江, 1993). 그러나 질량과 체적을 계측하는 방법은 제재품과 같이 형상이 한정된 것이나 체적측정이 용이한 경우에는 유효하다. 이런 문제점으로 인해 비파괴적 방법에 의한 연구가 행해져 왔다.

목재의 유효이용을 위해서는 원목의 단계에서 용도별 구분을 행하는 것이 수율향상 등의 측면에서 보다 유리하다. 최근에는 원목의 종진동을 이용한 제재품의 휨탄성계수(MOE, Modulus of Elasticity)나 휨강도(MOR, Modulus of Rupture)의 추정 및 계측기를 이용한 간이평가법으로서 원목의 고유진동수를 척도로 하여 수분변동의 경향과 제재품의 탄성계수추정 등이 검토되고 있다(荒武 等, 1992). 그러나 이런 연구에서는 함수율과 밀도를 개개의 인자로서 주로 설명하였고, 공동인자로서의 연구검토는 부족한 실정이다.

본 연구에서는 함수율추정 모델식에 의한 추정 함수율 및 목재의 기본 물성치인 비중과 공진주파수로써 구한 동적 탄성계수를 서로 상관성을 비교하여, 밀도와 함수율을 단독 변수로 했을때와 공동 변수로 했을 때의 동적 탄성계수의 추정 가능성에 대해 조사·검토하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 함수율과 밀도

前報(黃 等, 1995)에서 밀도로부터 추정할 수 있는 함

수율 $u(\%)$ 는 섬유포화점(uf)을 기준으로 각각 다음과 같이 근사적으로 표현할 수 있었다.

$$u(\%) = \frac{R_g - R_o}{R_o(1 - R_g)} \times 100 \quad (u \leq uf) \dots (1)$$

$$u(\%) = \frac{(100 + uf \cdot R_o)R_g}{R_o} - 100 \quad (u > uf) \dots (2)$$

여기서, u 는 추정함수율(%), R_g 는 측정시점의 시험편의 밀도(g/cm^3), R_o 는 시험편의 전건밀도(g/cm^3) 그리고 uf 는 섬유포화점(≈28%)이다.

2.2 공시재료

공시재료로는 너도밤나무(*Fagus crenata*), 칠엽수(*Aesculus turbinata*), 소나무(*Pinus densiflora*), 들메나무(*Fraxinus mandshurica*), 미국솔송나무(*Tsuga heterophylla*)재를 이용하였다. 시험편의 치수는 150mm(L) × 4mm(T) × 14mm(R)의 크기로 준비하였으며, 시험편수는 각 수종에 대해 24개씩을 취하였다. Table 1은 전체 시험편의 전건밀도와 평균연륜폭을 나타냈다.

2.3 실험방법

일정 함수율의 시험편을 중량과 치수를 측정한 후 공진주파수를 동시에 측정하였다. 이때 시험편의 중량측정에는 0.1mg精度的 전자저울을, 치수측정에는 버니어캘리퍼스를 사용하였다. 공진 주파수 측정에는 FFT Analyzer(ONOSOKKI CF-360E)를 사용하였다. 밀도는 각 측정시점에 있어서의 중량을 그때의 각 체적으로 나눈 값으로 정의하여 산출하였다. 또한 함수율(u)은 각 시점에서 측정된 중량(W_a)과 실험 종료후에 구한 시험편의 전건중량(W_o)에 의해 전건법에 의거하여 산출하였으며, 공진주파수에 의한 동적 탄성계수(E')는 다음식에 의해 산출하였다.

Table 1. Densities(R_o) in oven-dry wood and width of annual rings(ARW) of tested specimens.

Specimens	ARW(mm)	R_o (g/cm^3)			
		Mean	SD*	Max	Min
<i>Fagus Castanea</i>	1.18	0.501	0.031	0.530	0.380
<i>Aesculus turbinata</i>	1.99	0.446	0.032	0.500	0.390
<i>Pinus densiflora</i>	4.18	0.466	0.027	0.510	0.420
<i>Fraxinus mandshurica</i>	2.42	0.659	0.021	0.700	0.610
<i>Tsuga heterophylla</i>	2.96	0.468	0.032	0.520	0.420

* Standard Deviation.

$$E = \frac{48\pi^2 \rho l^4 f_0^2}{m^4 h} \quad (\text{cm}) \dots (3)$$

여기서 ρ 는 재의 밀도(g/cm^3), l 은 스펠($=96\text{mm}$), f_0 는 공진주파수(Hz), m 은 공진차수(기본진동 $=4.73$), h 는 측정시편의 두께(mm)이다.

공진주파수는 Fig. 1과 같은 형태의 횡진동법에 의해 측정하였다.

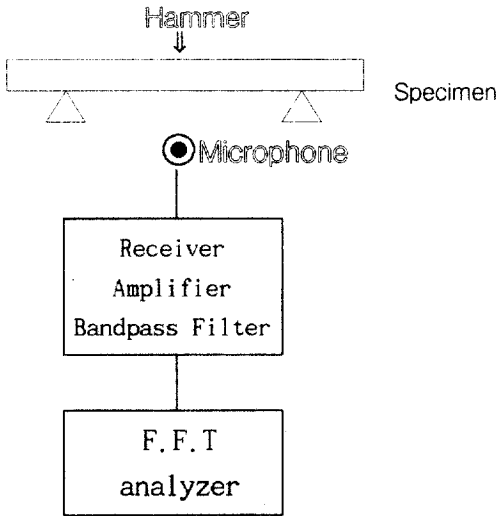


Fig. 1. The schematic diagram of transverse vibration method.

3. 결과 및 고찰

3.1 밀도로부터 함수율추정

Fig. 2의 상부그림은 실험치함수를 U_1 과 각 수종별 평균 전건밀도값으로 구한 함수율 U_2 와의 관계를 나타낸 것이며, 하부그림은 실험치함수를 U_1 과 각시편의 전건 밀도값으로 구한 함수율 U_4 와의 관계를 나타낸 것이다.

각각의 그림에서 알 수 있듯이 전체적으로 실험치함수를 U_1 과 추정함수를 U_2 , U_4 사이에는 직선적인 관계를 나타내고 있다. 각 수종별로 보면 더욱 명확한 직선관계를 알 수 있다. 즉 소나무 시편의 추정함수를 U_2 와 실험치함수를 U_1 과의 비교에서는 불일치하는 경향을 나타냈으나, 개개 전건밀도값에 의한 추정함수를 U_4 와 실험

치함수를 U_1 과의 유사성은 뛰어났다. 또한 나머지 4수종의 경우에 있어서는 U_2 , U_4 모두 전체적으로 실험치함수를 U_1 과 일치하는 경향을 나타냈다. 그럼 전체에서는 들메나무와 같은 고밀도재의 경우, 하나의 그룹으로 구분되어 추정치 함수율 U_2 , U_4 모두 실험치함수를 U_1 보다 높은 값을 나타내고 있다. 이것은 각 수종별 시편의 평균 전건밀도값이나 전건밀도값에 비해 측정시점의 밀도가 상대적으로 높기 때문에 생긴 현상이었다. 이는 밀도가 상

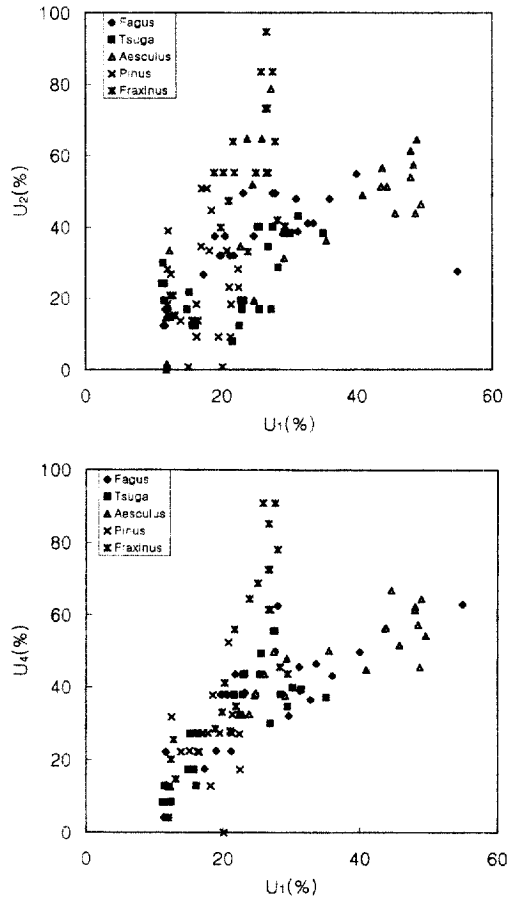


Fig. 2. Relationships between estimated moisture contents(U_2 , U_4) and experimental moisture content(U_1).

Legend; $U_2(\%)$: Calculated MC that is estimated by equations (1), (2) and average density in oven-dry(R_o) of specimens.

$U_4(\%)$: Calculated MC that is estimated by equations (1), (2) and individual densities(R_o , R_g) of specimens.

대적으로 높은 재들이 식에 의한 함수율 추정시, 실험치 함수율보다 높게 나타난 것으로 평균 전건밀도값에 의한 함수율 U_2 보다는 개개전건밀도값에 의한 함수율 U_1 의 경우 다소 안정된 형태를 취하고 있다.

따라서 밀도로부터 모델식에 의해 추정된 함수율은 실험치 함수율과 직선적인 관계가 있음을 알 수 있다. 즉 본 실험에서의 밀도로부터 추정된 함수율(U_2)은 실험치 함수율 U_1 과의 비교에 있어 시편에 따른 편차는 있으나 前報(黃等, 1995)에서와 유사한 결과를 나타내었다.

3.2 함수율과 동적탄성계수

3.2.1 실험치 함수율 U_1 과 동적탄성계수

Fig. 3은 전건법에 의한 함수율 U_1 과 횡진동법에 의한 동적탄성계수 E' 와의 관계를 나타냈다. 동일함수율을 기준으로 보면 들메나무 > 소나무 > 미국솔송나무 > 너도밤나무 > 칠엽수 순으로 탄성계수는 감소하였으며, 들메나무가 함수율 20%이후에 있어서도 탄성계수의 감소를 보이지 않는 반면, 미국솔송나무, 너도밤나무, 칠엽수는 함수율 약 20%이후부터 탄성계수는 거의 일정하게 낮은 값을 나타냈다. 함수율변화와 관계없이 거의 전함수율범위에서 일정한 값을 나타내고 있다. 너도밤나무와 칠엽수 및 실험범위에서 비교적 고밀도인 들메나무는 동적탄성계수가 함수율에 크게 영향받지 않는 것으로 나타났다. 1차 직선회귀한 결과를 표 2에 부기하였으며, 미국솔송나무를 제외한 수종에 있어서 모두 상관성이 매우 낮음을 보여주고 있다.

또한 전체시험편을 대상으로 할 경우, 그림에서처럼 상부와 하부의 두 그룹으로 구분되어 나타났다. 이를 검토해 본 결과, 들메나무와 같은 밀도가 높은 재는 상부그룹에 속하며 밀도가 낮은 시편들은 하부에 분포하는 것으로 밝혀졌다. 즉 고밀도재의 경우, 섬유포화점이하에 있어서 함수율이 증가함에 따라 밀도의 증가폭이 커져서 밀도 증가에 따른 고유진동수증가에 따라 상대적으로 탄성계수는 증가하여 함수율에 의한 영향은 나타나지 않았다.

이는 일정체적에 대한 수분의 증가가 밀도의 증가에 크게 영향을 주기 때문이다. 저밀도재의 경우는 조직구조가 고밀도재에 비해 bulk한 상태이므로 함수율의 영향을 크게 받는다. 특히, 저함수율영역에서 들메나무를 제외한 경우의 상관분석결과 결정계수는 향상됨을 알 수 있었다.

섬유포화점이상에서의 함수율에 따른 동적탄성계수의 변화는 일정하였다. 이는 목재중의 자유수의 양은 목재의 강도적 성질이나 수축, 팽창에 영향을 끼치지 않기 때문이다. 또한 저함수율영역인 섬유포화점이하에서는 함수율변화에 따른 탄성계수의 변화양상이 두드러졌다. 이는 결합수의 증감이 세포벽의 구성물질 즉 셀룰로오스, 헤미셀룰로오스와 물리화학적으로 결합하여 목재의 팽창 및 강도감소 등에 큰 영향을 끼치기 때문이다. 여기서 함수율만이 아닌 목재의 조직구조와 밀도와 같은 다른 중요

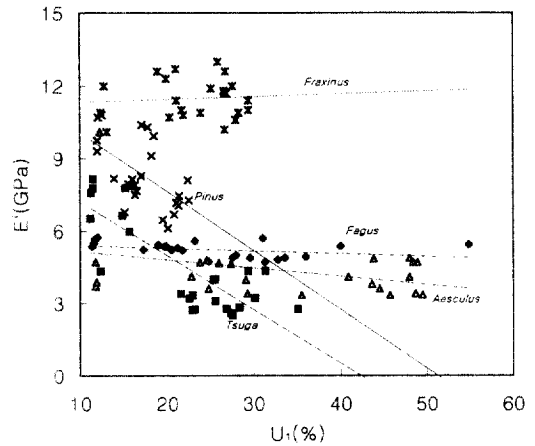


Fig. 3. Relationships between dynamic modulus of elasticity(E') and experimental moisture content U_1 (%).

Notes: ◆: *Fagus*, ■: *Tsuga*, ▲: *Aesculus*,
×: *Pinus*, *: *Fraxinus*

Table 2. Coefficients a, b of linear regression for a simple equation, $E' = aU_1 + b$.

Specimens	Constant		R^2
	a	b	
<i>Fraxinus mandshurica</i>	0.0198	11.006	0.018
<i>Pinus densiflora</i>	-0.2306	12.256	0.321
<i>Tsuga heterophylla</i>	-0.2429	9.985	0.712
<i>Fagus crenata</i>	-0.0108	5.497	0.127
<i>Aesculus turbinata</i>	-0.0051	4.281	0.016

Notes: E' : dynamic MOE(GPa), U_1 : experimental moisture content(%).

한 인자가 동적탄성계수에 크게 영향을 끼침을 알 수 있다.

따라서 동적탄성계수의 함수율에 대한 변이는 섬유포화점을 기준으로 구분할 수 있으며, 섬유포화점이하에서는 함수율증가에 따라 동적탄성계수는 증가 또는 감소하였다. 섬유포화점이상에서는 함수율증가에 따라 일정한 값을 나타냈다. 이 결과는 荒武(1994)의 연구결과와 같은 경향을 나타냈다.

3.2.2 추정함수율 U_2 , U_4 와 동적탄성계수

Fig. 4에는 각각의 추정함수율과 동적탄성계수간의 관계를 나타낸 것이다. 상단그림은 각 수종의 평균전건밀도값을 이용한 추정함수율 U_2 와 동적탄성계수와의 관계를 나타냈으며, 하단그림은 각시험편의 전건밀도값을 동일한 방법으로 식 (1), (2)에 대입하여 구한 추정함수율 U_4 와 동적탄성계수간의 관계를 나타낸 것이다. 아래 표 3에는 이들 그림을 1차 직선회귀한 결과를 나타냈는데, 평균 전건밀도값을 이용하여 구한 함수율과 동적탄성계수의 상관성에 있어서는 소나무가 높았으며, 시편 각각의 전건밀도값을 이용하여 구한 함수율간의 상관성에 있어서는 미국솔송나무를 제외하고 매우 낮은 값을 나타냈다.

여기서도 Fig. 3과 같이 크게 두 개의 그룹으로 나뉘어져 나타났으며, 이 현상은 밀도의 高低에 의한 차이로

판명되었다. 즉 추정함수율 U_2 , U_4 모두 실험치함수율 U_1 과 비슷한 경향을 보였으며 고밀도재인 상부그룹은 섬유포화점까지는 동적탄성계수가 급격히 증가하며, 그 이상에 있어서는 완만한 경향을 나타내고 있다. 또한 저밀도재인 하부그룹에 있어서 섬유포화점이하에서는 함수율의 증가에 따라 동적탄성계수는 밀도증가율보다 오히려 함수율증가에 영향을 받아 전체적으로 감소하는 경향이 며, 섬유포화점이상에서는 상부그룹과 마찬가지로 자유수가 관계하므로 함수율이 증가하여도 일정한 경향을 나타낸다. 이는 실험치함수율 U_1 과 동적탄성계수간의 비교와 일치하며, Fig. 4는 Fig. 3의 실험치함수율 U_1 보다 섬유포화점이상의 함수율이 많이 나타났다. 이 현상은 3.1항에서처럼 식에 의한 함수율추정시, 고밀도재에서는 함수율이 높게 나타난다는 사실과 일치한다.

따라서 추정함수율과 동적탄성계수간에는 밀도의 高低로 구분하여 분석하면 상관성은 향상되며, 전체시험편의 평균전건밀도값을 이용한 함수율 U_2 는 실험치함수율 U_1 과 유사성이 뛰어나 현장 적용성이 있는 것으로 판단되었다. 그러나 효율적인 현장적용성을 도모하기 위해서는 먼저 수종별 평균전건밀도산출에 대한 연구·검토가 先行되어야 할 것이다.

3.3 밀도와 동적탄성계수

Fig. 5에는 밀도와 횡진동법에 의한 동적탄성계수와

Table 3. Coefficients a~d of linear regression for a simple equations, $E = aU_2 + b$, $E = cU_4 + d$.

Specimens	Constants				R ²	
	a	b	c	d	U_2	U_4
<i>Fraxinus mandshurica</i>	0.0164	10.612	0.0088	11.008	0.175	0.064
<i>Pinus densiflora</i>	0.0745	6.518	-0.0282	8.922	0.612	0.056
<i>Tsuga heterophylla</i>	-0.0128	5.675	-0.1199	8.456	0.053	0.754
<i>Fagus crenata</i>	-0.0106	5.602	-0.0072	5.479	0.171	0.139
<i>Aesculus turbinata</i>	0.0115	3.614	-0.0013	4.166	0.181	0.002

Notes: E : dynamic MOE, U_i : See to the Fig. 2.

Table 4. Coefficients a, b of linear regression for a simple equation, $E = aRg + b$.

Specimens	Constant		R ²
	a	b	
<i>Fraxinus mandshurica</i>	7.570	5.784	0.073
<i>Pinus densiflora</i>	38.296	-11.578	0.632
<i>Tsuga heterophylla</i>	-23.162	17.071	0.055
<i>Fagus crenata</i>	-2.942	6.955	0.134
<i>Aesculus turbinata</i>	3.181	2.313	0.148

Notes: E : dynamic MOE(GPa), Rg : density(g/cm³).

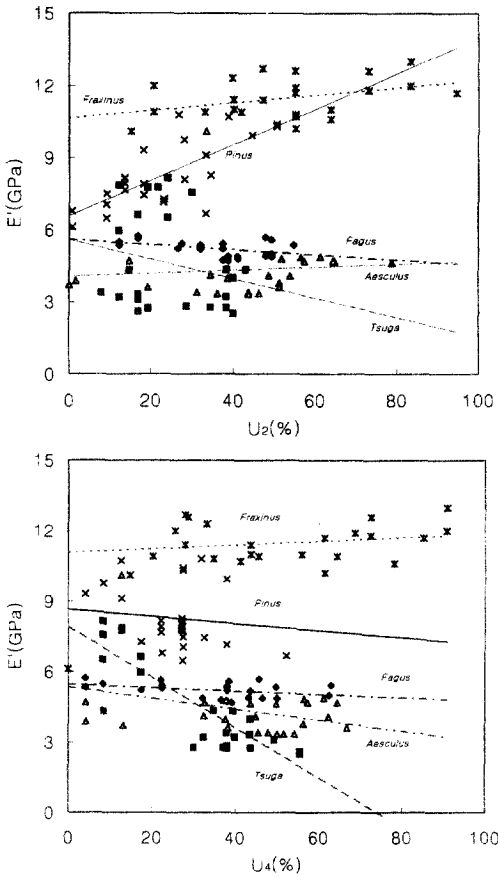


Fig. 4. Relationships between dynamic modulus of elasticity (E') and estimated moisture contents (U_2 , U_4).

Legend: U_2 (%) : Calculated MC that is estimated by equations (1), (2) and average density in oven-dry (R_0) of specimens.

U_4 (%) : Calculated MC that is estimated by equations (1), (2) and individual densities (R_0 , R_g) of specimens.

◆ : *Fagus*, ■ : *Tsuga*, ▲ : *Aesculus*,
× : *Pinus*, * : *Fraxinus*

의 관계를 나타냈다. 전체 시편에 대해서는 밀도증가에 따라 동적탄성계수 E' 은 직선적으로 증가하는 경향을 나타내고 있다. 표 4에는 동적탄성계수 산출에 이용한 목재의 밀도와 동적탄성계수와와의 1차 회귀직선의 계수 및 결정계수를 정리하여 나타냈다. 여기서도 소나무 이외의 시편에서는 그 상관성이 매우 낮게 나타났다.

Fig. 5에서 상하그룹별로 보면 상부그룹의 경우, 밀도가 증가함에 따라 탄성계수의 증가가 뚜렷하였으며, 하

부그룹의 경우, 변화는 나타나지 않고 일정한 경향이였다. 이것을 수종별로 보면 소나무를 제외한 모든 수종에 있어서, 밀도증가에 따른 동적탄성계수의 변화는 변이가 크거나 거의 일정한 값으로 나타났다. 즉 미국 솔송나무의 경우, 동적탄성계수의 함수율에 의한 편차가 매우 크게 나타났으며, 고밀도재인 들메나무, 소나무의 경우는 밀도증가에 따라 탄성계수도 비례적으로 증가하였으며, 특히 소나무의 경우 밀도증가에 따른 탄성계수변화는 뚜렷하였다. 그러나 여기서도 함수율향에서 논했듯이 직선회귀한 결과를 그림 옆에 부기한 결과와 같이, 소나무를 제외한 수종 모두 상관성이 매우 낮음을 보여주고 있다. 또한 밀도변화에 따른 동적탄성계수의 변화는 고밀도재에 있어서는 함수율에 의한 영향보다 밀도에 의한 영향을 더 크게 받는 것을 알 수 있다(Table 5의 중회귀함수참조). 또한 저밀도재에 있어서는 고밀도재에 비해 bulk한 상태이므로 함수율에 의한 영향을 크게 받기 때문에, 밀도의 증가와 동시에 함수율의 증가가 일어나기 때문에 동적탄성계수의 변화양상이 뚜렷하지 않았다.

이는 밀도가 유사한 시편에 있어서는 함수율의 증감이 동적탄성계수의 변화에 영향하기 때문이다. 즉 밀도가 유사한 시편의 밀도가 증가하기 위해서는 함수율이 상대적으로 증가해야만 된다. 그러한 함수율의 증가는 특히 섬유포화점이하에 있어서는 동적탄성계수의 감소효과를 초래한다. 칠엽수와 너도밤나무의 경우, 밀도증가에 따른 탄성계수의 증가량과 함수율증가에 따른 탄성계수의 감소량이 서로 상쇄되어 일정한 값을 나타내는 것으로 추정된다.

일반적으로 목재의 탄성계수가 목재의 기본물성치인 밀도와 함수율에 크게 의존하는 경향이 있음을 감안해 볼 경우, 목재의 동적탄성계수를 예측할 때는 특히 섬유포화점이하에 있어서는 반드시 함수율과 밀도를 공동변수로 하여 검토해야 할 것으로 생각된다.

3.5 밀도·함수율과 동적탄성계수

동적탄성계수를 밀도와 함수율에 대해 개개로 회귀한 경우 결정계수가 낮게 나타났으므로, Table 2에서는 밀도와 함수율을 공동변수로 하여 중회귀분석한 결과를 나타냈다. 표에 나타난 것처럼 밀도와 함수율을 변수로 취하여 중회귀분석한 경우, 결정계수값이 전체시험편을 대상으로 했을 때는 함수율과 밀도에 있어서는 0.697로 나타났으며, 추정함수율 U_2 , U_3 와의 분석에서는 낮게 나타났다. 이것은 전건법에 의한 함수율과 추정함수율의 편차 때문에 생기는 현상이다. 또한 표에서의 전체시험편에 대한 분석결과로서 알 수 있는 것은, 임의의 밀도 0.6

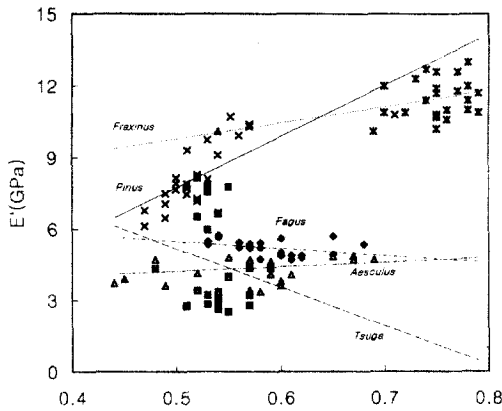


Fig. 5. Relationships between dynamic modulus of elasticity(E') and densities(R_g).

Notes: ◆: *Fagus*, ■: *Tsuga*, ▲: *Aesculus*,
×: *Pinus*, *: *Fraxinus*

을 기준으로 구분하는 경우에 있어서, 전체시험편의 경우보다 고밀도재(≥ 0.60)의 경우에 있어서 결정계수가 높게 나타났다. 그러나 저밀도재(< 0.60)만의 중회귀분석에서는 결정계수가 낮게 나타났다. 이와 같이 고밀도재만을 대상으로 분석한 경우 전체시험편을 대상으로 한 경우보다 결정계수 R^2 가 약 33% 높아져 상관성이 크게 향상됨을 알 수 있었다.

따라서 탄성계수추정에 있어 주요 영향인자인 밀도와 함수율을 공동변수로 하여 분석할 때, 밀도의 영향이 크

다는 사실을 알 수 있다. 이 결과로부터 목재의 밀도 및 함수율, 횡진동법에 의한 공진주파수로써 비파괴적으로 목재의 동적탄성계수를 추정할 수 있음이 인정되었다.

4. 결론

비파괴검사의 하나인 횡진동법에 의해 원목의 고유진동수로써 각 시험편의 동적탄성계수를 구하고 함수율 및 밀도와의 상관성에 대하여 검토하였다. 그 결과, 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

1. 밀도와 횡진동법에 의한 동적탄성계수간에는 고밀도재와 저밀도재로 구분하여 분석할 경우, 상관성은 크게 향상되었으며, 밀도 이외에도 함수율에 의한 영향이 섬유포화점 이하에서 두드러졌다.
2. 함수율(U_1 , U_2 , U_4) 또는 밀도를 단독변수로 하여 공진주파수로써 구한 동적탄성계수간에는 1차 직선 회귀하는 경우, 상관관계는 전체적으로 매우 낮게 나타났다.
3. 그러나 밀도와 함수율을 공동변수로 한 중회귀분석 결과 상관관계는 크게 향상되었으며, 목재의 기본 물성치인 이들과의 공진주파수를 이용한다면 비파괴적인 수법에 의해 동적탄성계수의 추정가능성이 있을 것으로 판단되었다.

따라서 현장에서 간단한 무게와 체적 측정 및 횡진동법에 의한 공진주파수 측정에 의해 간접적으로 탄성계수를 추정할 수 있음이 인정되었다. 이로부터 현장에서 보

Table 5. Multiple regression function of dynamic modulus of elasticity(E') by density(R_g) and moisture contents(U_1 , U_2 , U_4).

Dependent variable	R^2	Multiple regression function	Situation
E'	0.697	$-4.642356 + 26.455707 \cdot R_g - 0.175110 \cdot U_1$	All
	0.449	$-8.496648 + 29.150987 \cdot R_g - 0.055504 \cdot U_2$	
	0.542	$-8.454832 + 30.510770 \cdot R_g - 0.076736 \cdot U_4$	
E'	0.323	$2.385634 + 12.443719 \cdot R_g - 0.153265 \cdot U_1$	Low density (< 0.60)
	0.019	$12.378988 - 13.068775 \cdot R_g - 0.011779 \cdot U_2$	
	0.292	$2.125467 + 11.586756 \cdot R_g - 0.088551 \cdot U_4$	
	0.888	$-11.016194 + 34.320993 \cdot R_g - 0.14545 \cdot U_1$	
E'	0.784	$-22.352313 + 47.873357 \cdot R_g - 0.046145 \cdot U_2$	High density (≥ 0.60)
	0.777	$-21.763513 + 46.233854 \cdot R_g - 0.035238 \cdot U_4$	

Notes : U_1 : Experimental moisture content,

U_2 (%) : Calculated MC that is estimated by equations (1), (2) and average density in oven-dry(R_0) of specimens.

U_4 (%) : Calculated MC that is estimated by equations (1), (2) and individual densities(R_0 , R_g) of specimens.

R^2 : Coefficient of Determination.

다 신속하고 능률적으로 업무를 처리할 수 있음이 예상된다. 따라서 각 시점에 있어서의 수종별 적정밀도값의 부여와 함수율추정이 가능하므로 횡진동법과 같은 간접적인 방법에 의해서도 목재의 동적탄성계수는 보다 정확하게 추정할 수 있음을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 祖父江信夫, 1993. 木材の非破壊検査. 木材學會誌 39(9) : 973~979
2. 荒武志郎, 有馬孝禮, 迫田忠芳, 中村徳孫, 1992. 積み状態における丸木の高次固有振動數 からの製材品MORとMOEの推定. 木材學會誌 38(11) : 995~1001
3. 黃權煥, 李元熙, 1995. 목재의 밀도에 의한 함수율 추정. 목재공학 23(3) : 58~65
4. 荒武志郎, 有馬孝禮, 迫田忠芳, 1994. 高次固有振動數による木材含水率の推定. 木材學會誌 40(5) : 474~480
5. 정희석, 1990. 목재이학. 서울대학교출판부 : 259~405
7. 澤田 稔, 1958. 木材の強度特性に関する研究. 林業試験場研究報告 108 : 115~232
8. Hearmon, R. F. S. 1966. Vibration Testing of Wood. *Forest Prod. J.* 16(8) : 29~40