

應力波 測定에 依한 數種의 國產 針葉樹材 및
熱帶 闊葉樹材의 힘性質 評價*1

李道植*2 · 趙載晟*3 · 金奎赫*2

Evaluation of Static Bending Properties
for Some Domestic Softwoods and Tropical Hardwoods
Using Sonic Stress Wave Measurements*1

Do-Sik Lee*2 · Jae-Sung Jo*3 · Gyu-Hyeok Kim*3

ABSTRACT

Stress wave velocity, wave impedance, and stress wave elasticity of small, clear bending specimens of five domestic softwoods (*Pinus densiflora*, *Pinus koraiensis*, *Chamaecyparis obtusa*, *Cryptomeria japonica*, and *Larix leptolepis*) and four tropical hardwoods (Kempas, Malas, Taun, and Terminalia) were correlated with static bending modulus of elasticity (MOE) and modulus of rupture (MOR).

The degree of correlation between stress wave parameters and static bending properties was dependent on wood species tested. Stress wave elasticity and wave impedance were better predictors for static bending properties than stress wave velocity for each species individually and for softwood or hardwood species taken as a group, even though elasticity and impedance were nearly equally correlated with static bending properties apparently. Based upon the correlation coefficient between stress wave parameters and static properties, stress wave elasticity and wave impedance were found as stress wave parameters which can be used for the purpose of the reliable and successful prediction of bending properties. The degree of correlation between static MOE and MOR was also different according to wood species tested. Static MOE was nearly as well correlated with MOR as was stress wave elasticity.

The results of this research are encouraging and can be considered as a basis for further work using full-size lumber. From the results of this study, it was concluded that stress wave measurements could provide useful predictions of static bending properties and was a feasible method for machine stress grading of domestic softwoods and tropical hardwoods tested in this study.

Keywords : Sonic stress wave measurements, nondestructive test, stress wave velocity, wave impedance, stress wave elasticity, modulus of elasticity, modulus of rupture, domestic softwoods, tropical hardwoods

*1 접수 1996년 10월 29일 Received October 29, 1996

*2 임업연구원 Forest Research Institute, Forestry Administration, Seoul 130-012, Korea

*3 고려대학교 자연자원대학, College of Natural Resources, Korea University, Seoul 136-701, Korea

1. 서론

급속한 경제발전과 이에 따른 국민 생활수준의 향상으로 木造住宅에 대한 대중들의 관심이 높아지면서 木構造에 의한 주거구성 가능성이 점차 커지고 있다. 이에 따라 製材木을 보다 효율적인 구조재료로 이용하기 위한 관심이 크게 증대되고 있다. 목구조물의 보급을 위해서는 목구조물 전반에 대한 기준(예를 들어, 設計基準, 耐久性 및 安全性에 관한 기준등)의 설정도 중요하지만 우선 목구조물에 사용될 제재목 等級의 標準化 작업이 선행되어야 한다. 현재 우리의 현실을 살펴보면 제재목의 構造部材 사용을 위한 選別과정에서 역학적 성질을 영향하는 용이나 木理傾斜 등 자연적 결점의 존재에 의한 肉眼등급법(visual grading)은 일부 사용되고 있으나 육안등급법에 비하여 제재목의 역학적 성질 예측 효율이 우수하고 예측 신뢰도가 높은 機械應力 등급법(machine stress grading)은 전혀 사용되고 있지 않다. 약 30년전부터 북미나 유럽에서 연구가 시작되어 현재 많이 사용되고 있는 기계응력 등급법은 목재의 역학적 성질을 평가할 수 있는 非破壞係數를 기계적으로 측정하여, 이를 기준으로 하여 목재의 등급을 구분하는 제재목의 등급 방법이다(Bendtsen & Youngs, 1981).

현재 국내의 기계응력 등급법에 대한 연구는 절음파 단계이나 장차 목구조물내의 구조부재로써 제재목 사용량의 증가가 예상되기 때문에 이에 대한 연구가 절대적으로 필요하다고 본다. 본 실험에서 사용한 應力波 평가법은 현재 북미에서 제재목의 기계응력 등급법으로 주로 사용되고 있는 連續變形法(continuous deflection method)과 振動法(vibration testing method)에 비하여 대형의 제재목에 적용할 수 있을 뿐만 아니라, 측정기가 소형으로 휴대가 가능하고 구입 가격도 비교적 저렴하며, 동시에 측정이 신속, 용이하다는 장점을 가지기 때문에 응력과 평가법을 기계응력 등급법의 한 방법으로 사용하고자 하는 연구가 외국의 경우에는 상당히 오래 전부터 실시되어 왔다.

응력과 평가법은 응력과 변수들인 응력파의 목재내부 傳達速度, 波動 임피던스, 그리고 응력과 彈性係數가 목재의 제반 역학적 성질과 양호한 相關 관계를 가짐에 기초를 둔 비파괴 시험법이다. 無缺點 목재 시험편의 횡탄성계수가 응력파의 목재내부 전달속도와 밀접한 관련이 있다는 것을 증명한 Bertholf(1965)의 연구 이래로 응력과 평가법에 의한 목재의 비파괴 시험법에 대한 연구가 시작되었다. 그 후 가격이 저렴한 휴대용 응력과 試驗機

器(衝擊 응력과 시험기인 미국 Metriguard社의 sonic stress wave timer와 超音波 응력과 시험기인 미국 James electronics社의 V-meter)가 시판되면서, 신속한 측정이 가능한 매력을 가진 이 비파괴 시험법에 대한 기초연구 및 연구결과의 현장 적용에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다. 응력과 변수들과 횡탄성계수간의 상관 관계에 대한 연구는 주로 침엽수재를 대상으로 실시되어 왔는데, 최근에는 활엽수재에 대한 연구도 실시하고 있다. 주로 單純 直線回歸에 의해 결정되는 兩者간의 상관 관계는 매우 양호하여 대부분 0.90 이상의 相關係數가 보고되어 있다(James, 1964; Galligan & Courteau, 1965; Marra *et al.*, 1966; Doyle & Markwardt, 1966; Miller, 1968; Hoyle, 1968; Porter *et al.*, 1972; Gerhards, 1982; Dean & Kaiserlik, 1984; Smulski, 1991). 응력과 변수들과 횡강도간의 상관 관계는 상기한 응력과 변수들과 횡탄성계수와의 상관 관계에 비해 우수하지는 못하나, 직접 응력과 변수들에 의해 목재의 횡강도를 예측할 수 있는 가능성을 제시하여 주고 있다. 응력과 평가법을 이용한 국내의 연구상황을 보면, 아직 초기 단계로서 목재의 역학적 성질 예측에 관한 연구는 없고 單板積層材用 單板의 응력과 탄성계수와 제조된 단판적층재의 횡탄성계수간의 관계에 대한 연구(車, 1990)와 集成材 素材(laminae)의 응력과 탄성계수와 제조된 집성재의 횡탄성계수간의 관계에 대한 연구(徐·朴, 1990)가 있다.

본 연구는 몇 종의 국산 침엽수재 및 우리가 수입, 사용하는 열대 활엽수재를 대상으로 비파괴계수인 응력과 변수들(응력과 전달속도, 파동 임피던스, 응력과 탄성계수)과 파괴계수인 횡성질(횡탄성계수와 횡강도)간의 상관 관계를 조사하여, 횡성질을 신뢰성 있게 예측할 수 있는 응력과 변수를 구명하고, 또한 기계응력 등급법의 한 방법으로써 응력과 평가법의 사용 가능성을 타진하고자 수행되었다. 본 연구의 결과는 후후 국산 침엽수 및 열대 활엽수 실험재의 역학적 성질을 평가하기 위한 방법으로써 응력과 평가법의 사용을 위한 기초자료를 제공하리라 믿는다.

2. 재료 및 방법

2.1 實驗材料

국산 침엽수 5종(소나무, 잣나무, 낙엽송, 편백, 삼나무)과 열대 활엽수 4종(Kempas, Malas, Taun, Terminalia)으로부터 횡단면 치수가 3.0(폭)×3.0cm(두께)이고 길이가 50cm(국산 침엽수) 또는 60cm(열대 활엽수)

인 무결점 휨시험편을 채취하여 20℃와 65% 상대습도하에서 시험편의 무게가 恒量에 도달할 때까지 1개월간 조습처리를 실시하였다.

2.2 實驗方法

2.2.1 應力波 評價

각 시험편의 치수와 중량을 각각 0.01mm와 0.01g까지 측정 후 sonic stress wave timer(Metriguard Inc., Model 239A)를 사용하여 시험편의 길이방향 45cm(start accelerometer와 stop accelerometer간의 거리)에 대한 응력과 전달시간을 시험편의 4면에 대해 측정하여 응력과 전달속도(v), 응력과 탄성계수(stress wave elasticity: ESW), 파동 임피던스(wave impedance: Z)를 계산하였다.

2.2.2 破壞試驗

비파괴시험이 끝난 후 모든 시험편을 ASTM 표준규격 D-143(ASTM, 1986)에 의거하여 중앙집중하중 방식을 이용한 휨시험을 실시하고, 휨시험시 얻어진 각 시험편의 荷重-變形曲線(load-displacement curve)으로부터 휨탄성계수(modulus of elasticity: MOE)와 휨강도(modulus of rupture: MOR)를 계산하였다.

휨시험이 종료된 후, 시험편의 파괴부위 근처에서 길이 3cm의 比重 및 含水率 시험편을 채취하여 비중과 함수율을 측정하였다. 비중의 측정은 휨시험 직후 채취된 시험편의 체적과 全乾重量을 사용하여 계산하였다.

2.2.3 資料分析

응력과 변수들과 휨성질간의 상관 관계는 일단은 수준별로, 그리고 공시수종들을 침엽수와 활엽수별로 묶었을 경우와 공시수종 전체를 하나로 묶었을 경우별로 단순 직

Table 1. Correlation coefficient*¹ between stress wave parameters and static bending properties using the simple, linear model*².

Species	Stress wave parameter		
	Velocity	Impedance	Stress wave elasticity
<i>Pinus densiflora</i>	0.35	0.69**	0.70**
	0.12	0.34	0.36
<i>Pinus koraiensis</i>	0.42	0.85**	0.79**
	0.40	0.78**	0.73**
<i>Chamaecyparis obtusa</i>	0.93**	0.72**	0.89**
	0.65**	0.34	0.55*
<i>Cryptomeria japonica</i>	0.96**	0.96**	0.95**
	0.47*	0.53*	0.43*
<i>Larix leptolepis</i>	0.36	0.81**	0.79**
	0.38	0.73**	0.71**
<i>Koombassia malaccensis</i>	0.03	0.28	0.15
	0.09	0.02	0.05
<i>Homallium foetidum</i>	0.91**	0.87**	0.90**
	0.68**	0.55*	0.611
<i>Pometia pinnata</i>	0.28	0.94**	0.93**
	0.21	0.88**	0.85**
<i>Terminalia spp.</i>	0.39	0.92**	0.93**
	0.22	0.87**	0.83**
All domestic softwoods	0.78**	0.87**	0.92**
	0.58*	0.79**	0.79**
All tropical hardwoods	0.50*	0.94**	0.94**
	0.30	0.92**	0.87**
All species	0.46*	0.95**	0.95**
	0.30	0.93**	0.88**

*1 First row indicates correlation coefficient with MOE, and second row with MOR.

*2 * and ** represent significant difference at 0.01% and 0.05%, respectively.

선회귀에 의해 평가하였다. 여기서 수종별로 결정된 응력과 변수들과 휨성질간의 관계를 동일 회귀식에 의해 표현할 수 있는지 여부는 공분산분석에 의해 결정하였다. 응력과 변수들과 휨성질간의 상관 관계를 개선할 목적으로 응력과 변수 및 휨성질의 변수變換(自然代數, 逆數, 제곱, 제곱근 변환)에 의한 직선회귀, 응력과 변수의 2차식 회귀, 모든 응력과 변수를 이용한 多乘回歸를 시도하였다. 모든 통계처리는 통계 패키지인 Statistical Analysis System(SAS Institute, 1987)를 이용하여 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

파동 임피던스 및 응력과 탄성계수는 Table 1에서 볼 수 있듯이 Kempas를 제외하고는 휨탄성계수와 우수한 상관을 보였으나, 응력과 전달속도와 휨탄성계수의 상관은 편백, 삼나무, Malas를 제외하고는 불량하였다. 휨강도와 응력과 변수들의 상관은 휨탄성계수와와의 상관계수에 비하여 불량하였으나, 휨탄성계수와와의 상관계수가 양호한 수종은 휨강도와와의 상관계수 비교적 양호하게 나타났다. 파동 임피던스 및 응력과 탄성계수와 휨강도의 상관은 잣나무, 낙엽송, Terminalia, Taun은 상관계수가 0.71~0.88로서 양자간의 상관계수 비교적 우수하였으나 소나무, 편백, 삼나무, Malas, Kempas의 경우는 양자간의 상관계수가 불량하게 나타났다. 그러나 응력과 전달속도와 휨강도의 상관계수는 편백과 Malas를 제외하고는 전체적으로 우수하지 못하였다. 응력과 탄성계수나 파동 임피던스는 응력과 전달속도 뿐만 아니라 목재의 휨성질을 직접적으로 영향하는 목재의 밀도와 관련이 있기 때문에 응력과 전달속도보다 휨성질과의 상관계수가 우수한 것은 당연한 결과라고 할 수 있다. 그리고 수종에 따른 응력과 변수들과 휨성질간의 상관계수의 변이는 수종별 목재 조직구조 차이가 목재 내에서 응력과의 전달에 어떤 영향을 미치기 때문이라 사료되는데, 앞으로 이에 대한 연구가 필요하다고 본다. 응력과 변수들과 휨성질간의 상관을 개선할 목적으로 시도된 응력과 변수 및 휨성질의 변수변환에 의한 직선회귀, 응력과 변수의 2차식 회귀, 모든 응력과 변수를 이용한 다중회귀 결과, 단순 직선회귀에 비해 어느 정도 상관계수의 증가는 관찰할 수 있었으나 양자간의 상관계수를 크게 개선하지는 못하였다.

미국 북동부산 활엽수들인 sugar maple, yellow birch, white ash, red oak의 무결점·소형 시험편들을 1개의 그룹으로 묶었을 때, 이들의 응력과 전달속도의 제곱, 파동 임피던스, 응력과 탄성계수와 휨탄성계수

및 휨강도간의 상관계수가 각각 0.89, 0.87, 0.93과 0.69, 0.88, 0.85라고 한 Smulski(1991)의 보고와 본 실험에서 얻어진 상관계수를 비교해 볼 때, 파동 임피던스와 응력과 탄성계수는 서로 비슷한 상관계수를 보였으나 응력과 전달속도는 아주 낮은 상관계수를 나타냈다. Gerhards(1982)가 12개 연구보고의 결과를 요약, 발표한 바에 의하면 응력과 평가법에 의해 측정된 응력과 탄성계수와 제재목(무결점·소형 시험편과 실대재) 또는 단판의 휨탄성계수간의 상관계수가 0.87~0.99이라고 하였는데, 이 역시 본 실험의 결과와 비슷하였다. 본 실험에서 얻어진 응력과 탄성계수와 휨강도간의 상관계수는 James(1964)가 Douglas-fir 무결점·소형 시험편을 대상으로 한 실험 결과 얻어진 응력과 탄성계수와 휨강도간의 상관계수보다는 약간 높았다. 그리고 James(1964)가 지적한대로 본 실험에서도 파동 임피던스가 응력과 탄성계수보다는 약간 우수한 휨강도 예측계수임이 입증되었다. Porter 등(1972)는 Hem-fir와 western white spruce 실대재의 응력과 평가 결과, 응력과 탄성계수와 휨강도간의 상관계수가 0.72와 0.58이라고 보고하였다. 이들은 본 실험에서 얻어진 상관계수보다 낮았는데 이는 실대재에 존재하는 웅이나 목리경사등의 역학적 성질 감소요인의 존재에 기인한다.

지금까지의 비파괴시험에 대한 많은 연구 결과들을 종합해 보면, 휨탄성계수의 경우는 비파괴계수와와의 상관계수가 0.90 이상(Pellerin, 1965), 그리고 휨강도의 경우는 비파괴계수와와의 상관계수가 0.70 이상(Hoyle, 1968)이어야 만이 비파괴계수에 의한 信賴性있는 휨성질을 예측이 가능하다고 한다. 본 연구에서도 상기한 기준을 근거로 하였을 때, 모든 수종에 전부 해당되는 것은 아니지만 전반적으로 볼 때 응력과 탄성계수와 파동 임피던스가 휨성질을 신뢰성 있게 예측할 수 있는 응력과 변수로 나타났다. Table 2는 수종별로 그리고 수종들을 침엽수와 활엽수별로 묶었을 때, 휨성질을 신뢰성있게 예측할 수 있는 응력과 변수들을 보여준다.

각 수종별로 결정된 응력과 변수들과 휨성질간의 관계를 동일 회귀식에 의해 표현할 수 있는지 여부를 공분산분석에 의해 분석한 결과를 Table 3에 나타냈는데, 분석 결과에 의하면 파동 임피던스와 휨강도간의 관계를 제외하고는 응력과 변수와 휨성질에 관계없이 모든 수종을 하나로 묶는데는 통계학적으로 문제가 없음이 나타났다.

모든 국산 침엽수들을 하나의 그룹으로 묶어서 실시된 그룹회귀의 결과, 응력과 전달속도, 파동 임피던스, 그리고 응력과 탄성계수와 휨탄성계수 및 휨강도간의 상관계수가 각각 0.78, 0.87, 0.92와 0.58, 0.79, 0.79로 나

Table 2. Stress wave parameters which can be used for the purpose of the successful prediction of bending properties*1.

Species	Bending property	
	MOE	MOR
<i>Pinus densiflora</i>	None	None
<i>Pinus koraiensis</i>	Z, ESW*2	Z, ESW
<i>Larix leptolepis</i>	Z, ESW	Z, ESW
<i>Chamaecyparis obtusa</i>	v, Z, ESW	None
<i>Cryptomeria japonica</i>	v, Z, ESW	None
<i>Koompassia malaccensis</i>	None	None
<i>Homallium foetidum</i>	v, Z, ESW	None
<i>Pometia pinnata</i>	Z, ESW	Z, ESW
<i>Terminalia spp.</i>	Z, ESW	Z, ESW
All Softwoods	v, Z, ESW	Z, ESW
All Hardwoods	Z, ESW	Z, ESW

*1 Basis for the successful MOE and MOR prediction: $r \geq 0.90$ for MOE and $r \geq 0.70$ for MOR.

*2 Underlined stress wave parameters have somewhat lower correlation coefficient than that for successful

타나서, 각 응력과 변수에 의해 예측된 휨탄성계수와 휨강도는 실제 측정된 휨탄성계수의 약 61, 76, 85퍼센트, 그리고 실제 측정된 휨강도의 약 34, 62, 62퍼센트를 설명할 수가 있었다. 그리고 모든 열대 활엽수들을 하나의 그룹으로 묶어서 실시된 그룹회귀의 결과도 침엽수재와 비슷한 경향을 보였는데, 응력과 전달속도에 의한 휨성질의 예측은 침엽수의 경우가 활엽수에 비하여 우수하였고, 파동 임피던스나 응력과 탄성계수에 의한 예측은 활엽수의 경우가 우수하였다. 열대 활엽수재의 경우는 응력과 전달속도, 파동 임피던스, 그리고 응력과 탄성계수와 휨탄성계수 및 휨강도간의 상관관계수가 각각 0.50, 0.94, 0.94와 0.30, 0.92, 0.87로 나타나서, 각 응력과 변수에 의해 예측된 휨탄성계수와 휨강도는 실제 측정된 휨탄성계수의 약 25, 88, 88 퍼센트, 그리고 실제 측정된 휨강도의 약 9, 84, 76 퍼센트를 설명할 수가 있었다. Fig. 1과 2는 모든 공시수종들을 하나로 묶어서 실시한 그룹회귀에 결과, 응력과 탄성계수와 휨탄성계수 및 휨강도간의 관계를 보여준다. 이상과 같이 본 실험에서 얻어진 응력과 변수인 파동 임피던스 및 응력과 탄성계수와 휨성질간의 상관을 고려해 볼 때, 본 실험의 결과는 응력과 평가에 의해 직접 목재의 휨성질을 예측할 수 있다는 가능성을 보여주었으며, 이는 앞으로 자연적인 강도감소 인자들을 포함하는 實大材 휨성질의 직접 예측을 위한 연구의 기초자료가 되리라 사료된다.

휨탄성계수와 휨강도간의 상관도 수준에 따른 변이가 관찰되었으나, 본 실험에서 계산된 상관계수는 0.56(삼나무)~0.93(*Terminalia*)의 범위로서 지금까지 보고

된 연구결과와 매우 유사하였다. Curry와 Tory(1976)는 Sweden 및 Finland産 redwood와 whitewood, 그리고 Canada産 western hemlock 실대재의 휨탄성계수와 휨강도간의 상관관계수가 0.67~0.90의 범위라고 보고하였다. 그리고 Orosz(1968)는 무결점, 소형 시험편의 휨탄성계수에 의한 미국 남부송과 미송 실대재의 휨강도 예측시 양자간의 상관관계수가 0.27~0.67의 범위라고 보고하였다. El-Osta 등(1979)이 Egypt산 활엽수 6종에 대한 연구결과 양자간의 상관계수를 0.24~0.93, 그리고 Sumlski(1991)는 미국 북동부 활엽수 4종에 대한

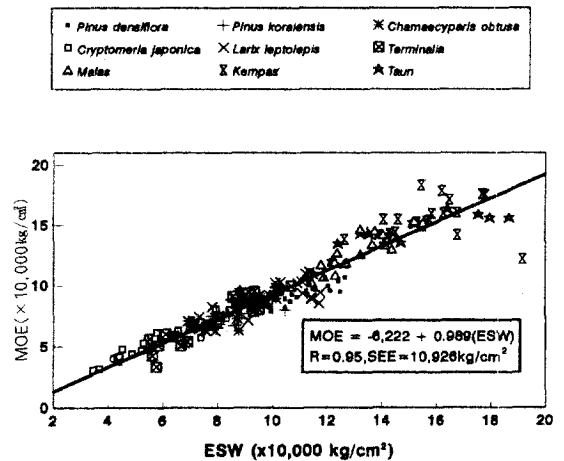


Fig. 1. Relationship between stress wave elasticity(ESW) computed using stress wave velocity and static MOE.

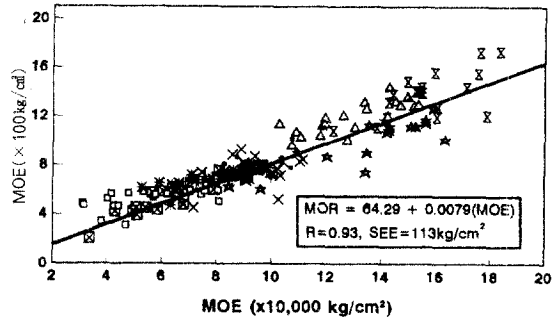
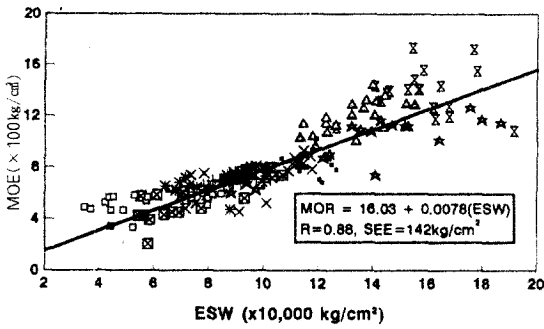


Fig. 2. Relationship between stress wave elasticity(ESW) computed using stress wave velocity and MOR(same legend as in Fig. 1).

Fig. 3. Relationship between static MOE and MOR(same legend as in Fig. 1).

Table 3. Analysis of covariance for all species for testing heterogeneity of the nine simple regression equations between stress wave parameter and static properties*1.

Dependent variable	Independent variable	Slope F	Significance	Intercept F	Significance
MOE	Stress wave velocity	0.0985	NS	1.5502	NS
	Stress wave impedance	0.0160	NS	0.0497	NS
	Stress wave elasticity	3.3280	NS	3.0980	NS
MOR	Stress wave velocity	0.1436	NS	1.7424	NS
	Stress wave impedance	5.1497	*	0.5448	NS
	Stress wave elasticity	0.0394	NS	0.2020	NS

Note: *1 NS: No significant difference at $\alpha = 0.01\%$.

* : Significant difference at $\alpha = 0.01\%$.

연구 결과 양자간의 상관계수가 0.67~0.91(모든 수종을 1개 그룹으로 묶었을 경우는 0.82)이라고 보고하였다.

모든 수종들을 침엽수와 활엽수 별로 하나의 그룹으로 묶어서 실시된 그룹회귀의 결과, 휨탄성계수와 휨강도간의 상관계수가 전자는 0.79, 그리고 후자는 0.93으로써 양자간의 상관은 아주 우수하였다. Fig. 3은 모든 공시 수종들을 하나의 그룹으로 묶었을 때의 휨탄성계수와 휨강도간의 관계들을 보여준다. 휨탄성계수와 휨강도간의 상관 관계를 개선하기 위한 방법으로 비중을 첨가한 다중회귀를 실시하였으나, 휨강도 예측의 개선이 뚜렷하지는 못하였다.

4. 결 론

응력과 변수들과 휨성질간의 상관은 수종에 따른 변이가 관찰되었는데, 일반적으로 응력과 변수중 파동 임피던스와 응력과 탄성계수는 휨성질과 양호한 상관을 보

였으나 응력과 전달속도는 휨성질과의 상관이 불량하였다. 모든 수종들을 하나의 그룹으로 묶어서 실시된 그룹회귀의 결과도 수종별 분석 결과와 비슷하게 파동 임피던스와 응력과 탄성계수가 휨성질을 비교적 성공적으로 예측할 수 있는 응력과 변수들로 나타났다. 휨탄성계수와 휨강도간의 상관 관계도 수종에 따른 변이를 보였으나, 모든 수종들을 하나의 그룹으로 묶었을때 양자간의 상관계수는 매우 양호하였다. 본 실험에서 얻어진 응력과 변수인 파동 임피던스 및 응력과 탄성계수와 휨성질간의 상관계수를 놓고 볼 때, 본 실험의 결과는 매우 고무적이며 앞으로 자연적인 강도감소 인자들을 포함하는 국산 침엽수 및 열대 활엽수 실험재의 휨성질 예측 및 평가를 위한 연구의 기초자료가 되리라 믿는다.

참 고 문 헌

1. Annual Book of American Society for Testing and Materials, 1986. Standard methods

- of testing small clear specimens of timber. ASTM D-143. Philadelphia, PA.
2. Bendtsen, B. A., and R. L. Youngs. 1981. Machine stress rating of wood: An overview. Proceedings of XVII IUFRO World Congress, Division 5 : 21~34
 3. Bertholf, L. D. 1965. Use of elementary stress wave theory for prediction of dynamic strain in wood. Washington State Institute of Technology Bulletin No. 291. Washington State Univ., Pullman, WA.
 4. Curry, W. T. and J. R. Tory. 1976. The relation between the modulus of rupture (ultimate bending stress) and modulus of elasticity of timber. BRE current paper cp 30/76. Building Research Establishment, Princes Risborough Lab. UK.
 5. Dean, M., and J. Kaiserlik 1984. Nondestructive screening of hardwood specialty blanks. *Forest Prod. J.* 34(3) : 51~56
 6. Doyle, D. V., and L. J. Markwardt. 1966. Properties of southern pine in relation to strength grading of dimension lumber. USDA Forest Service. Res. Paper, FPL-64. Forest Prod. Lab. Madison, WI.
 7. El-Osta, M. L. M., O. A. Badran, A. O. K. El-Wakeel. 1979. Prediction of modulus of rupture from modulus of elasticity for some Egyptian hardwoods. *Wood & Fiber* 11(3) : 147~154
 8. Galligan, W. L., and R. W. Courteau. 1965. Measurement of elasticity of lumber with longitudinal stress wave and the piezoelectric effect of wood. Proceedings of the 2nd Nondestructive Testing of Wood Symposium. Washington State Univ. Pullman, WA.
 9. Gerhards, C. C. 1982. Effect of knots on stress waves in lumber. USDA Forest Service. Res. Paper FPL-384. Forest Prod. Lab. Madison, WI.
 10. Hoyle, R. J. 1968. Background to machine stress grading. *Forest Prod. J.* 18(4) : 87~97
 11. James, W. L. 1964. Vibration, static strength and elastic properties of clear Douglas-fir at various levels of moisture content. *Forest Prod. J.* 14(9) : 409~413
 12. Marra, G. G., R. F. Pellerin, and W. L. Galligan. 1966. Nondestructive determination of wood strength and elasticity by vibration. *Holz als Roh-und Werk* 24(10) : 460~466
 13. Miller, D. G. 1968. Nondestructive testing of joists by a vibrational technique. *Forest Prod. J.* 18(2) : 25~27
 14. Orosz, I. 1968. Some nondestructive parameters for prediction of strength of structural lumber. USDA Forest Serv. Research Paper FPL-100
 15. Pellerin, R. F. 1965. A vibrational approach to nondestructive testing of structural lumber. *Forest Prod. J.* 15(3) : 93~101
 16. Porter, A. W., D. J. Kusec, and S. L. Olson. 1972. Digital computer for determining modulus of elasticity of structural lumber. Dept. of Environment, Canadian Forest Serv. WFPL. Information Report, VP-X-99. Vancouver, BC. *Forest Prod. J.* 32(2) : 20~25
 17. SAS Institute. 1987. Statistical Analysis System (SAS), User's Manual. Cary, NC.
 18. Smulski, S. J. 1991. Relationship of stress wave- and static bending-determined properties of four northeastern hardwoods. *Wood & Fiber Sci.* 23(1) : 44~57
 19. 차재경. 1990. 응력과 실험에 의해 예측된 단판으로 제작한 할렐과 목리를 지닌 3매 단판 적층재의 특성. *목재공학* 18(3) : 17~25
 20. 서진석 박용길. 1990. 비파괴 강도평가법을 적용한 국산 침엽수 집성재의 휨성능. *임업연구원보고* 40 : 84~92