탄화온도별로 제조된 거대억새 세라믹의 비파괴 휨강도 평가¹

원 경 록² · 오 승 원^{3,†} · 변 희 섭²

Nondestructive Bending Strength Evaluation of *Miscanthus sinensis* var. *purpurascens* Ceramics Made from Different Carbonizing Temperatures¹

Kyung-Rok Won² · Seung-Won Oh^{3,†} · Hee-Seop Byeon²

요 약

공진주파수 모드를 이용하는 비파괴 평가기술법을 거대억새 파티클 보드를 페놀수지로 함침한 후 탄화온도별(600, 800, 1000, 1200℃)로 제조한 세라믹에 적용하였다. 동적 탄성계수와 정적 휨 탄성계수는 탄화온도가 증가할수록 증가하였다. 휨 강도에 대한 동적 탄성계수 및 정적 휨 탄성계수는 밀접한 상관관계를 나타내었다. 그러나 휨 강도에 대한 상관관계에서 정적 탄성계수 보다 동적 탄성계수가 더 밀접한 상관관계를 나타내었다. 따라서 공진 주파수 모드를 사용하는 동적 탄성계수측정법으로 소성온도에 따라 제조된 거대억새 파티클보드의 휨 강도를 예측하는 비파괴 평가 방법으로 유용할 것으로 판단된다.

ABSTRACT

Nondestructive evaluation (NDE) technique method using a resonance frequency mode was carried out for ceramics made by different carbonizing temperatures (600, 800, 1000, 1200℃) after impregnating the phenol resin with *Miscanthus sinensis* var. *purpurascens* particle boards. Dynamic modulus of elasticity increased with increasing carbonizing temperature. There were a close relationship of dynamic modulus of elasticity and static bending modulus of elasticity to modulus of rupture (MOR). However, the result indicated that correlation coefficient was higher in dynamic modulus of elasticity to MOR than that in static modulus of elasticity to MOR. Therefore, the dynamic modulus of elasticity using resonance frequency by free vibration mode is more useful as a nondestructive evaluation method for

¹ Date Received April 7, 2014, Date Accepted June 2, 2014

² 경상대학교 농업생명과학대학 농업생명과학연구원. College of Agriculture & Life Science, IALS, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea

³ 전북대학교 목재응용과학과. Department of Wood Science and Technology, Chonbuk National University, 561-756, Chonju, Korea

[†] 교신저자(corresponding author): 오승원(e-mail: ohsw@jbnu.ac.kr)

predicting the MOR of ceramics made by different carbonizing temperature for *Miscanthus sinensis* var. *purpurascens* particle boards.

Keywords : Nondestructive evaluation, carbonizing temperature, *Miscanthus sinensis* var. *purpurascens*, resonance frequency, modulus of rupture

1. 서 론

역새는 세계 각국에서 주목하는 비식량 에너지작물로서 주목받고 있으며, 우리나라의 이용기술은 세계적으로 우위를 선점하고 있다고 평가받고 있다. 또한 거대역새를 활용한 친환경 건축자재의 개발은 자원의 활용뿐만 아니라 부족한 목재자원의 대체와 친환경 건축자재의 공급이라는 측면에서 경제적, 산업적 효과가 클 것으로 생각된다. 이러한 재생가능한 자원의 활용방법 중 하나로 비 목질재료를 탄화시켜 세라믹을 제조하여 신용도개발에 대한 연구가 진행 중이다.

최근의 목재에 대한 진동이나 음파를 이용한 비파괴 평가기술은 목재생산품의 분류나 등급구분을 위하여 광범위하게 사용되고 있다(Byeon *et al.* 2011). 평가방법으로는 육안에 의한 등급구분, 기계에 의한 응력 등급(machine stress rated, MSR) 구분방법, 동적 탄성계수와 초음파를 이용하는 방법 등 여러 가지 방법이 널리 이용되고 있다. 본 연구에서는 동적 탄성계수를 이용하는 방법에 대하여 주로 살펴보고자 한다. 동적 탄성계수는 주로 음향전달 속도나 공진주파수를 측정하여 구한다. 음향전달속도는 충격해머를 사용하여 구할 수 있고 공진주파수는 진동이나 충격해머의 주파수분석에 의해서도 구할 수 있다(Won *et al.* 2011).

음향전달속도를 측정하여 탄성계수를 구하는 간단하고 효율적인 방법이 개발되어 이와 관련된 많은 연구가 이루어졌다. Gerhards (1974)는 응력과 전달 속도는 수분과 온도, 입자 각도, 웅이 등에 의하여 영향을 받는 것을 밝혔다. Ross *et al.* (1997)와 Jang (2000)은 원목의 동적 탄성계수와 원목에서 제조한 제재목으로부터 구한 동적 탄성계수 간에는 높은 상

관관계의 존재를 보고하였다. 또한 응력과 신호의 적용은 목재의 등급평가를 위하여 개발되었다. Ross *et al.* (1994)은 응력파를 이용한 측정기술은 참나무에서 수분의 존재를 감지하는 효과가 있음을 보고하였다. 또한 Ross *et al.* (1997)은 응력과 특성과 생물학적 저급재의 압축강도 값과 잘 일치하는 공통점을 가지고 있는 것을 보고하였다. Cha (1996)는 국내산 소경원목에서 구조용집성재(glulam) 제조에 응력파에 의한 등급구분을 실시하였다. 그리고 초음파로 집성목재(Park & Hong, 2009) 특성을 평가하고 오래된 목조건물을 특성을 평가하기 위해서도 사용되었다(Lee *et al.* 2001).

공진주파수를 측정하여 동적 탄성계수를 이용하는 분야는 약기재의 목재특성평가를 위하여 광범위하게 사용되고 있지만 목재나 목질재료에 적용한 예는 많지 않다. Park & Byeon (2006)은 목질재료의 역학적 특성평가에서 3층집성재의 공진주파수 거동에 의한 동적 탄성률과 휨강도와 크리프 간에는 밀접한 상관관계(상관계수 0.811-0.947)를 보고하였다.

본 연구에서는 거대역새보드에 일정한 함침률로 수지를 함침시킨 후 여러 가지 탄화온도조건으로 제조한 세라믹의 비파괴 강도성능평가를 위하여 세라믹에 양단자유 진동모드를 적용하여 공진주파수를 측정하고 이것을 이용하여 동적 탄성계수를 구하여 휨강도 특성과의 관계를 분석하였다.

Table 1. Characteristics of phenol-formaldehyde resin for the test

Resin types Items	Powder resin (Novolak type)	Liquid resin (Resol type)
Solid content (%)	99	51-53
Melting point (°C)	80~95	
Specific gravity	-	1.06
Gelation time (sec.)	80~120	80-95
Plate flow (mm)	30~35	
Viscosity (cps)	-	45-65

2. 재료 및 방법

2.1. 공시재료

2.1.1. 거대역새

보드제조에 사용된 거대역새는 전남 무안 소재 ‘농촌진흥청 국립식량과학원 바이오에너지작물센터’로부터 분양받아 사용하였으며, 보드 제조 시 시료의 균일함을 위하여 입자의 크기를 10~20 mesh로 선별하고 함수율은 7% 이하로 조절하였다.

2.1.2. 수지

거대역새 보드 제조를 위하여 분말상 페놀수지(코오롱유화(주), KNB-100PL)를, 함침을 위해서는 액상 페놀수지(코오롱유화(주), KPD-L777)를 사용하였으며, 각 수지의 특성은 Table 1과 같다.

2.2. 보드제조

보드를 제조하기 위하여 균일하게 선별된 거대역새 파티클에 분말상 페놀수지를 충분히 혼합한 후 열압기의 열판 위에 있는 스테인레스 정방형 몰드 속에 넣고 시료상부의 높이를 일정하게 조절한 후 열압 성형하여 26 cm × 26 cm × 1.4 cm의 보드를 제조하였다. 보드 제조 조건은 밀도를 0.6 g/cm³, 접착제 첨가량을 10%로 고정하여 보드를 제조하였다. 이때 열압온도는 190℃, 가압압력은 40 kgf/cm² → 30 kgf/cm² → 20 kgf/cm²(3단가압), 가압시간 3분

→ 2분 → 1분(3단 가압시간)으로 하였다. 열압과정에서 보드의 두께를 일정하게 하기 위하여 스톱퍼(distance bar)를 사용하였으며, 열에 의한 보드의 상·하면과 열판의 부착을 방지하기 위하여 테프론 판을 사용하였다.

2.3. 함침 및 세라믹 제조

거대역새 보드를 120 × 120 × 14 mm 크기로 절단한 다음 액상 페놀수지(코오롱유화(주), KPD-L777)가 들어있는 감압 함침장치에 넣고 1기압에서 함침률을 50 ± 2%로 조절하여 함침하였다. 함침 후 시료를 건조기에 넣고 60℃에서 10시간 100℃와 135℃에서 각각 8시간씩 건조 및 경화시켰다. 건조한 다음 진공 소결로(KOVAC KSF-200V, 고려진공(주))를 이용하여 탄화온도 600, 800, 1000, 1200℃에서 탄화시켜 세라믹을 제조하였다. 이때 승온온도는 4 °C/min이었으며, 목표온도에서 2시간 유지한 다음 냉각시켰다.

2.4. 동적 휨탄성률 및 휨강도 성능시험

공진주파수 측정장치는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 여진과 검출이 전자적 방법으로 시행되는 양단 자유공진법을 적용하여 측정하였는데 사용된 generator는 LEADER사 LAG-120B를 사용하였으며 주파수측정은 universal counter timer (GSP, 5001)을 사용하고 oscilloscope는 HP사(1740 A)를 사용하였다. 측정은 일단은 여진하고 다른 일단은 검출하는 공진법에 따

Fig. 1. Schematic diagram of magnetic driver vibration mode.

라 발전기출력과 검출기출력을 각각 음극선에 연결하여 발전기 주파수를 낮은 쪽에서 높은 쪽으로 올려 검출기 출력이 최대의 공진곡선을 그릴 때 공진 주파수를 측정하고 공진주파수를 이용하여 동적 탄성계수를 구하였으며, 공진주파수(f)와 동적 탄성률(MOE_d)은 다음 식에 의하여 구하였다.

$$f = f_0 \left(\frac{1 + ah^2}{l^2} \right) \dots\dots\dots (1)$$

여기서, f_0 : 카운터 타이머로 측정된 값,
 a : 진동형식에 따라 결정되는 정수로서 8.2,
 h : 시편의 두께, l : 시편의 길이.

동적 탄성률 MOE_d 는 다음 식 (2)와 같다.

$$MOE_d = \frac{48\pi^2 \rho l^4 f^2}{m^4 h^2} \dots\dots\dots (2)$$

여기서, ρ : 비중, m : 기본진동의 경우 4.73, h : 시편의 두께.

휨강도성능시험용 시험편은 공진주파수를 측정한 시편의 크기를 $110 \times 10 \times 10$ mm로 재단하여 항온

항습기에서(온도 $20 \pm 1^\circ\text{C}$, 습도 $65 \pm 3\%$) 조습처리한 후 각각의 조건별로 10개씩 휨강도성능시험을 실시하였다. 휨강도 시험은 KS F 2208규정에 따라 만능강도시험기(TAESHIN, model TSU-2)를 사용하여 스패ن길이를 100 mm, 하중속도를 분당 1 mm로 하여 휨 탄성계수 및 휨강도를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 탄화온도에 따른 밀도특성

Table 2에 탄화온도에 따른 밀도, 공진주파수, 동적 탄성률, 정적 탄성률, 휨강도의 평균값을 나타내었다. 밀도는 Table 2에서 보는 바와 같이 페놀수지 함침률을 $50 \pm 2\%$ 로 일정하게 하고, 탄화온도를 각각 600, 800, 1000, 1200 $^\circ\text{C}$ 에서 탄화시킨 세라믹의 밀도는 각각 0.53, 0.63, 0.64, 0.67 g/cm³의 값을 나타내어 거대역세 세라믹제조를 위하여 페놀수지 함침률을 $50 \pm 2\%$ 로 하고 탄화온도를 증가시킬수록 높은 밀도의 세라믹이 제조되었다. Byeon *et al.* (2010)도 닥나무로 제조된 우드세라믹의 성질에서 페놀수지 함침률이 $50 \pm 2\%$ 이고 탄화온도가 각각 600, 800, 1000, 1200 $^\circ\text{C}$ 일 때 탄화 후의 우드세라믹의 밀도는 각각 0.52, 0.59, 0.62, 0.62 g/cm³의 값을 나타내어 탄화온도가 증가할수록 탄화 후의 우드세라믹의 밀도가 증가하다가 유지되는 경향을 보고하였다.

3.2. 탄화온도에 따른 휨강도성능특성

3.2.1. 공진주파수

Table 2와 Fig. 2에 탄화온도에 따른 공진주파수의 평균값을 나타내었다. 함침률이 50%이고 탄화온도가 각각 600, 800, 1000, 1200 $^\circ\text{C}$ 일 때 탄화 후 세라믹의 공진주파수는 각각 1,774, 3,045, 3,351, 3,540 Hz로 탄화온도가 증가할수록 공진주파수가 증가하여 밀도의 경우와 유사한 경향을 보였다(Table 2, Fig. 2). t검정결과에서도 각 개체 간에 유의성이 나타났다. Byeon *et al.* (2011)은 페놀수지 함침률이

Table 2. The physical and mechanical properties of ceramics made at different carbonizing temperature at impregnation ratio of 50%

Temperature (°C)	Impregnation ratio (%)	Density (g/cm ³)	Resonance frequency (RF)		MOE _d		MOE _s (GPa)	MOR (MPa)
			(Hz)	p-value	(GPa)	p-value		
600	50	0.53 (0.026)	1774 a ¹⁾ (146)	0.000	0.66 a (0.13)	0.004	0.43 (0.10)	1.02 (0.37)
800		0.63 (0.030)	3045 b (189)		1.62 b (0.25)		1.39 (0.33)	3.30 (0.97)
1000		0.64 (0.042)	3351 c (317)		1.88 b (0.44)		1.28 (0.41)	4.76 (1.21)
1200		0.67 (0.035)	3540 c (264)		2.31 c (0.53)		1.78 (0.46)	6.00 (1.46)

Notes ; MOE_d: dynamic modulus of elasticity, MOE_s: static modulus of elasticity, MOR: modulus of rupture, mean value from 10 replications, parenthesis is standard deviation.

¹⁾ Different letters (a, b and c) indicate significant difference at 5% (Duncan's new multiple range test).

Fig. 2. Resonance frequency according to different carbonization temperature at resin impregnation ratio of 50%. **Fig. 3.** Dynamic modulus of elasticity according to different carbonization temperature at resin impregnation ratio of 50%.

50%이고 탄화온도를 각각 600, 800, 1000, 1200℃로 처리한 닥나무 우드세라믹의 밀도는 각각 0.52, 0.60, 0.63, 0.63 kgf/cm²로 탄화온도의 증가에 따라서 탄성계수가 증가하는 본연구의 결과와 같은 경향을 보고하였다. 그러나 Hong & Byeon (1995)은 소나무 정상재에서는 밀도가 증가함에 따라 공진주파수가 증가하지만 압축응력재의 경우에는 밀도가 증가함에 따라 오히려 공진주파수가 감소하는 경향을 보이는 결과를 보고하였다.

3.2.2. 동적 휨 탄성계수

Table 2와 Fig. 3에 탄화온도에 따른 동적 휨 탄성계수 평균값을 나타내었다. 페놀수지 함침률이 50%이고 탄화온도가 600, 800, 1000, 1200℃일 때 세라믹의 동적 휨 탄성계수는 각각 0.66, 1.62, 1.88, 2.31 GPa를 나타내었다. 탄화온도가 증가할수록 동적 휨 탄성계수가 증가하는 경향을 나타내었고 t검정결과 개체 간에 유의성이 인정되었다. 이것은 공진주파수의 경우와 큰 차이가 없는 결과로 생각된다. Byeon *et al.* (2011)은 페놀수지 함침률이 50%이고 탄화온도를 각각 600, 800, 1000, 1200℃로 처리한 닥나무

Table 3. Summary of regression parameters for relationships between density, MOR, MOE, RF and MOE_d for ceramics produced at different carbonizing temperature

Parameter			Regression model	Correlation coefficient <i>r</i>	p-value
Density	vs.	MOE _s	$y = 86674x - 41129$	0.882**	0.000
Density	vs.	RF	$y = 10940x - 3842.4$	0.928**	0.000
Density	vs.	MOE _d	$y = 107965x - 50290$	0.929**	0.000
Density	vs.	MOR	$y = 309.22x - 152.62$	0.882**	0.000
MOE _s	vs.	MOE _d	$y = 0.7155x + 650.7$	0.840**	0.000
MOE _s	vs.	MOR	$y = 0.003x + 0.8462$	0.853**	0.000
RF	vs.	MOE _d	$y = 9.2505x - 10559$	0.938**	0.000
RF	vs.	MOR	$y = 0.0276x - 42.654$	0.894**	0.000
RF	vs.	MOE _s	$y = 7.0812x - 8345.2$	0.819**	0.000
MOE _d	vs.	MOR	$y = 0.0028x - 7.3458$	0.912**	0.000

Fig. 4. Relationship between density and MOR according to carbonizing temperature at resin impregnation ratio of 50%.

우드세라믹의 동적 휨 탄성계수는 각각 15,280, 37,670, 40,046, 38,889 kgf/cm²로 소성온도의 증가에 따라서 탄성계수가 증가하여 본 연구의 동적 탄성률과 비슷한 경향을 보고하였다. Okabe (1996)의 연구에서도 2000℃ 이하에서는 탄화온도가 증가할수록 탄성계수가 증가한다고 한 보고한 바 있다.

Fig. 5. Relationship between MOEs and MOR according to carbonizing temperature at resin impregnation ratio of 50%.

3.3. 밀도와 휨강도 성능과의 관계

Table 3에 밀도와 공진주파수, 휨 탄성계수, 휨강도와와의 관계를 나타내었다. Fig. 4에 밀도와 휨강도와의 관계를 나타내었다. 거대역사를 이용하여 탄화온도에 따라 제조한 세라믹의 밀도와 공진주파수, 밀도와 동적 휨 탄성계수, 밀도와 정적 휨 탄성계수, 밀도와 휨강도 간의 상관계수는 각각 0.883, 0.819, 0.883이었다. 각 요소 간에는 1% 수준에서 유의성이

Fig. 6. Relationship between MOE_d and MOR according to carbonizing temperature at resin impregnation ratio of 50%.

인정되는 높은 상관관계를 나타내었다.

3.4. 정적 휨 탄성계수와 강도와와의 관계

Table 3와 Fig. 5에 정적 휨 탄성계수, 휨강도를 나타내었다. 거대역새 재료를 이용하여 만든 파티클 보드에 페놀 수지를 함침한 후 탄화온도에 따라 제조한 세라믹의 정적 휨 탄성계수와 휨강도 사이에는 1% 수준에서 유의성이 인정되는 0.853의 높은 상관계수 값을 나타내었다. Byeon *et al.* (2004)은 소나무 잣나무 낙엽송의 간벌목 3종류를 사용하여 내층의 입자의 크기가 표층의 입자보다 큰 보드를 사용하여 우드세라믹을 제조한 경우 표층과 내층의 재질이 달라 낮은 상관관계를 나타낸 경우와는 달리 본 연구에서는 세라믹의 경우 두께에 따른 재질의 변화가 없도록 균질의 세라믹을 사용한 것에 기인하는 것으로 생각된다.

3.5. 동적 휨 탄성계수와 휨강도의 관계

Table 3와 Fig. 6에 동적 휨 탄성계수와 휨강도의 관계를 나타내었다. 휨 탄성계수와 휨강도 사이에는 1%의 유의성이 인정되는 높은 상관관계를 나타내는 상관계수 0.912의 상관계수 값을 나타내었다. 거대역새 재료를 이용하여 만든 파티클보드에 페놀 수지를

함침한 후 탄화온도별로 제조한 세라믹의 동적 탄성계수와 휨강도 간에는 높은 상관관계가 밝혀졌다. 일반적으로 응력파를 이용한 동적 탄성계수와 휨강도 간에는 밀접한 상관관계가 보고(Ross & Pellerin 1991)되고 있다. Won *et al.* (2013)은 열처리에 따른 소재의 비파괴 강도평가와 슬쩍질각지벌레 피해 해충의 비파괴강도평가에서 휨강도와 동적 탄성계수의 상관관계가 휨강도와 정적 탄성계수와의 상관관계보다 높아 휨강도 평가에서 동적 탄성계수에 의한 비파괴 방법이 유용함을 밝혔다. 또한 Byeon *et al.* (2011)은 페놀수지함침량에 따라 제조한 우드세라믹의 경우에도 휨강도와 동적 탄성계수 간에는 상관계수 0.881의 높은 상관관계를 보고하였다.

4. 결 론

양단자유 진동모드에 의한 비파괴 평가를 페놀수지를 50%로 고정하고 탄화온도를 600, 800, 1000, 1200℃로 다르게 제작된 세라믹으로 실시하였다. 세라믹의 재료는 전남 무안의 거대역새를 사용하였다. 공진주파수와 동적 탄성계수는 탄화온도가 증가할수록 값이 증가하는 경향을 나타내었고 t검정결과 개체간 유의성이 인정되었다. 밀도와 공진주파수, 휨 탄성계수, 휨강도와와의 관계에서는 모든 조건에서 1% 수준에서 유의성이 나타났다. 휨강도와와의 상관관계는 밀도, 정적 탄성계수, 동적 탄성계수 중 비파괴 방법인 동적 탄성계수가 가장 높게 나타나 양단자유 진동모드를 이용한 비파괴 방법이 가장 유용함을 밝혔다. 따라서 거대역새삭편편을 사용하여 일정한 함침률로 페놀수지를 함침시키고 탄화온도를 달리하여 제조한 세라믹의 휨강도 성능 예측을 위해서는 동적 휨 탄성계수를 이용하는 비파괴적인 방법이 좋을 것으로 판단된다.

REFERENCES

- Byeon, H.-S., Ahn, S.-Y., Oh, S.-W., Piao, J.-J. 2004. Nondestructive bending strength evaluation of woodceramics using resonance Frequency

- Mode. Journal of The Korean Wood Science and Technology 32(3): 8-14.
- Byeon, H.-S., Hwang, K.-K., Lee, D.-H., Hwang, J.-W., Oh, S.-W. 2010. Properties of Woodceramics Made from *Broussonetia kazinoki* Sieb. -Effect of Carbonization Temperature-. Journal of Agriculture & Life Science 44(4): 21-27.
- Byeon, H.-S., Kim, J.-M., Won, K.-R., Oh, S.-W. 2011. Nondestructive Bending Strength Evaluation of Woodceramics Made from Woody Part of *Broussonetia kazinoki* Sieb. -Effect of Carbonization Temperature-. Journal of Agriculture & Life Science 46(1): 398-405.
- Byeon, H.-S., Kim, J.-M., Won, K.-R., Oh, S.-W. 2011. Nondestructive Bending Strength Evaluation of Woodceramics Made from Woody Part of *Broussonetia kazinoki* Sieb. -Effect of Resin Impregnation Ratio-. Journal of The Korean Wood Science and Technology 39(5): 398-405.
- Cha, J.-K. 1996. Study on Stress Waves for Development of Glulam from Domestic Small Diameter Log (I) - Effect of MC on Stress Wave in Glulam Member -. Journal of The Korean Wood Science and Technology 24(3): 90-100.
- Gerhards, C.C. 1974. Stress wave speed and MOE of sweetgum ranging from 150 to 15 percent MC. Forest Products Journal 25: 51-57.
- Hong, B.-W., Byeon, H.-S. 1995. Dynamic MOE and Internal Friction of Compression Woods in *Pinus densiflora*. Journal of The Korean Wood Science and Technology 23(2): 32-36.
- Jang, S.-S. 2000. Evaluation of lumber properties by applying stress waves to larch logs grown in Korea. Forest Products Journal 50: 44-48.
- Lee, J.-J., Kim, K.-C., Bae, M.-S. 2001. Studies on the safety assessment of the wooden ancient buildings-The qualitative evaluation of deterioration used by ultrasonic methods for wooden ancient buildings. In: Proc. The Korean society of wood science and technology annual meeting. pp. 36-42.
- Okabe, T. 1996. Wood-based porous carbon materials Woodceramics. Uchida Rokakuho Publishing Co., LTD. JAPAN.
- Park, H.-M., Byeon, H.-S. 2006. Measurement of dynamic MOE of 3-ply woods by flexural vibration and comparison with bending strength and creep performances. Journal of The Korean Wood Science and Technology 34(2): 46-57.
- Park, J.-C. Hong, S.-I. 2009. The Practice of Bending Deflection Using Non-destructive MOE of Glulam. Journal of The Korean Wood Science and Technology 37(1): 48-55.
- Ross, R.J., Ward, J.C., Tenwolde, A. 1994. Stress wave nondestructive evaluation of wet wood. Forest Products Journal 44: 79-83.
- Ross, R.J., McDonald, K.A., Green, D.W., Schad, K.C. 1997. Relationship between log and lumber modulus of elasticity. Forest Products Journal 47: 89-92.
- Ross, R.J., Degroot, R.C., Nelson, W.J., Lebow, P.K. 1997. The relationship between stress wave transmission characteristics and the compressive strength of biologically degraded wood. Forest Products Journal 47: 89-93.
- Won, K.-R., Hong, N.-E., Kang, S.-U., Byeon, H.-S. 2013. Nondestructive Evaluation of Strength Property for Heat-Treated Wood Using Free Vibration Mode. Journal of Agriculture & Life Science 47(4): 189-196.
- Won, K.-R., Yoo, B.-O., Lee, K.-S., Jung, S.-Y., Chong, S.-H., Byeon, H.-S. 2013. Nondestructive Evaluation of Strength Property for Damaged Black Pine Wood (*Pinus thunbergii*) by *Matsucoccus thunbergianae* Using Free Vibration

- Mode. Journal of Agriculture & Life Science 47(6): 53-59.
- Won, K.-R., Chong, S.-H., Hong, N.-E., Kang, S.-U., Byeon, H.-S. 2013. Nondestructive Evaluation of Strength Performance for Heat-Treated Wood Using Impact Hammer & Transducer. Journal of The Korean Wood Science and Technology 41(5): 466-473.