

구기자 가지의 진동 특성†

Vibration Characteristics of Boxthorn (*Lycium chinense* Mill) Branch

서 정 덕*

정회원

J. D. So

Abstract

Modulus of elasticity, modulus of rigidity, damping ratio, and natural frequency of three varieties of boxthorn (*Lycium chinense* Mill) (Cheongyang #2, Cheongyang gugija, and Cheongyang native) branches were analyzed. Modulus of elasticity and modulus of rigidity of the boxthorn branch was determined using standard formula after simple beam bending and torsion test, respectively, using an universal testing machine. Damping ratio and natural frequency of branches were determined using a system consisted of an accelerometer, a PC equipped with A/D converter, and a software for data analysis. Relationship between the elastic modulus and branch diameter in overall varieties and branch types showed a good correlation ($r \cong -0.81$). There was, however, no correlation between torsional rigidity and branch diameter. The internal damping results were highly variable and the overall range of the damping ratio of the boxthorn branch was 0.014 – 0.087, which indicated that the branch was a lightly damped structure. The natural frequency of the boxthorn branch was in the range of 89 – 363 rad/s for the overall varieties and branch types. A good correlation ($r \cong 0.82$) existed between the natural frequency and branch diameter in overall varieties and branch type.

Key words: 구기자(Boxthorn), 가지(Branch), 감쇠비(Damping ratio), 고유진동수 (Natural frequency)

* 충남대학교 농업과학연구소

† 본 연구는 농림기술개발과제로 수행되었음

1. 서론

진동체의 진동특성은 물질의 특성과 형상에 의하여 영향을 받으며 진동체의 자유진동수 및 진동형상(vibration mode)에 영향을 미치는 가장 중요한 요인들은 탄성계수, 강성계수, 그리고 비중량 등이라 할 수 있고(Ghate and Rohrbach, 1975), 진동식 수확기를 개발하는데 있어서 가지나 과병의 자유진동수를 기준으로 하여 수확기의 진동수를 선택하여 커피, 오렌지, 올리브 등을 수확하는데 응용하고 있다. 진동을 이용한 커피의 선택적 수확을 위해 Wang(1965)은 숙과의 과병 접합부의 자유 진동수를 커피 수확기의 진동수로 선택하여 공진(resonance)현상의 장점을 이용하여 커피를 수확하는데 응용하였고, Fridley and Yung(1975)은 올리브 과병 접합부의 자유진동수와 비슷한 강제진동을 끈고 단단한 가지에 가했을 때 올리브 탈과가 효과적이었고 구부러진 가지는 가지 자체에서 감쇠작용을 하여 탈과가 덜 이루어졌다고 발표하였다.

최근 구기자 수확작업의 기계화를 위한 기초 연구로서 구기자 가지 및 열매의 특성에 관한 연구(서정덕 외, 1999), 진동 특성에 관한 구기자 열매의 탈과율(서정덕 외, 2000), 구기자 열매와 과병 접합부의 강도 특성(서정덕, 2000) 등에 관한 연구들을 보고한바 있고 본 연구에서는 진동을 이용한 수확작업의 기계화에 관련한 설계요인에 매우 중요한 수확기의 진동수를 분석 및 결정하고자 구기자 가지의 자유 진동수에 영향을 미치는 구기자의 품종별 가지의 물리적 및 기계적 특성을 분석하였으며 기본적인 공식들을 이용하여 구기자 가지의 자유 진동수를 분석하였다.

2. 재료 및 방법

본 실험에서 구기자 가지의 탄성계수, 비틀림 강성계수, 감쇠계수, 자유진동수, 비중, 함수율 등을 측정하기 위하여 다음과 같은 시료 및 방법을 이용하여 실험을 실시하였다.

가. 공시 재료

본 실험에 사용한 공시재료는 2000년도에 청양구기자시험장에서 재배되었던 청양재래, 청양구기자 및 청양2호 세가지 품종을 사용하였다. 시료는 8월 중순의 수확시기에 열매가 매달린 줄기(주지, 1차지, 및 2차지)를 포장에서 무작위로 10개씩 채취하였고, 실험은 시료를 실험실로 옮겨와 실시하였다. 채취한 시료는 약 18 - 20 cm로 절단한 후 가지에 매달린 열매나 잎을 제거하였다. 모든 실험은 시료를 채취한 후 하루 내지 이틀에 걸쳐 실시하였으며, 시료의 수분 발산을 최소화하기 위해 폴리에틸렌 주머니(Polyethylene bag)에 넣어 냉장고에 보관하면서 실험을 하였다.

나. 실험 장치 및 방법

(1) 탄성계수

구기자 가지의 탄성계수 분석은 그림 1과 같이 인장이나 압축 강도를 계측할 수 있는 계기(force gauge)(Mecmesin, Model AFG50N)를 Universal Testing Machine(UTM)에 장착하여 실시하였고, 이에 필요한 지그(jig)를 제작하여 굽힘 실험을 실시한 후 식 (1)을 이용하여 탄성계수를 계산하였다 (Ghate and Rohrbach, 1975).

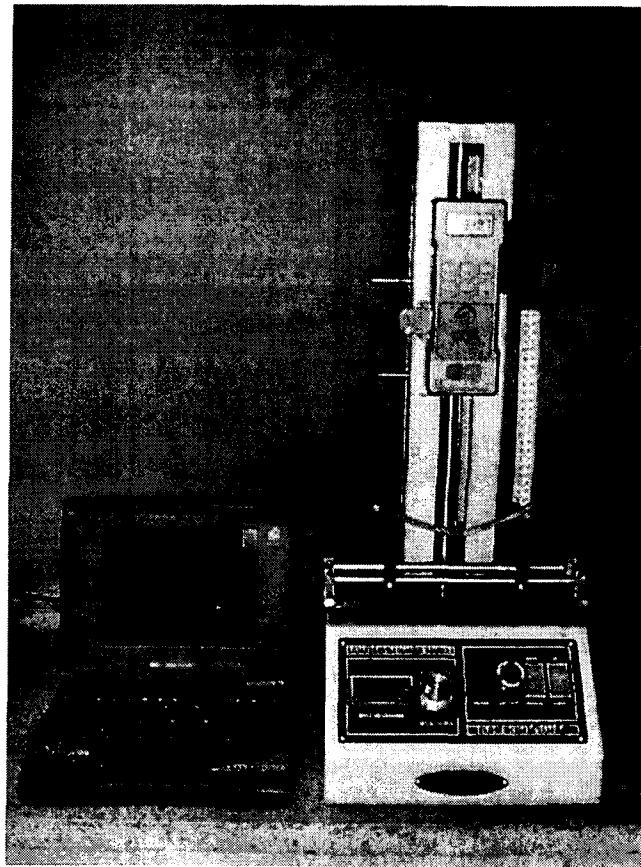


Fig. 1 Photograph of the bending test apparatus for boxthorn branch.

$$E = \frac{PL^3}{48Y_c I} \quad (1)$$

where E = modulus of elasticity (N/m²)

P = applied load at center (N)

L = distance between the supports (m)

Y_c = center deflection (m)

I = area moment of inertia of the beam cross-section (m^4) ($= \frac{\pi}{64} d^4$).

d = average diameter of branch (m)

본 실험에서 시료의 중앙에 가해진 힘은 시료의 중앙에서 최대 처짐이 일어나는 순간의 하중으로 하였고, 지지대 사이의 거리는 150mm로 고정 시켰으며 양쪽 지지대의 중앙 부분에 흠을 두어 시료에 하중을 가할 때 시료가 움직이지 않게 하였다. 또한 시료의 압축응력은 계기의 소프트웨어(Mecmesin DataPlot, Oriel Systems Limited, Version 1.03a)를 이용하여 계기에 나타나는 경과 시간에 따른 압축응력의 변화값을 PC에 저장하고 동시에 모니터에 나타나도록 하였다.

시료 중앙의 변위는 지지대의 최대 높이를 고려하여 시료에 하중을 가했을 때 시료가 지지대 바닥면에 닿지 않도록 UTM의 상하 변위 임계 센서를 이용하여 수직 변위 폭을 18.75mm로 고정시켜 실험을 실시하였으며, 재하속도 즉 시료에 하중을 가할 때의 속도는 거의 정적인 상태로서 약 1.82×10^{-3} m/s로 하였다.

시료의 직경은 디지털 버어니어 캘리퍼스(Mitutoyo, Model CD-20CP)를 이용하여 측정하였으며, 본 실험에 사용한 시료의 절단면이 동일하지 않아 절단면을 원형으로 간주하고 가지의 중앙 및 양 끝 세 부분의 직경을 잰 후 이들의 평균값을 이용하여 탄성계수를 산출하는데 사용하였다.

(2) 강성계수 (Modulus of Rigidity)

구기자 가지의 비틀림 강성(torsional rigidity)은 그림 2와 같이 최대허용직경이 10mm인 두개의 척(chuck)이 부착된 지그(jig)를 제작하여 비틀림을 시험을 한 후 식 (2)을 이용하여 구기자 가지의 강성계수를 계산하였다.

$$G = \frac{TL}{\phi J} \quad (2)$$

where G = modulus of rigidity (N/m^2)

T = applied torque ($N \cdot m$)

L = distance between the stationary points on the sample and the point of the application of the torque (m)

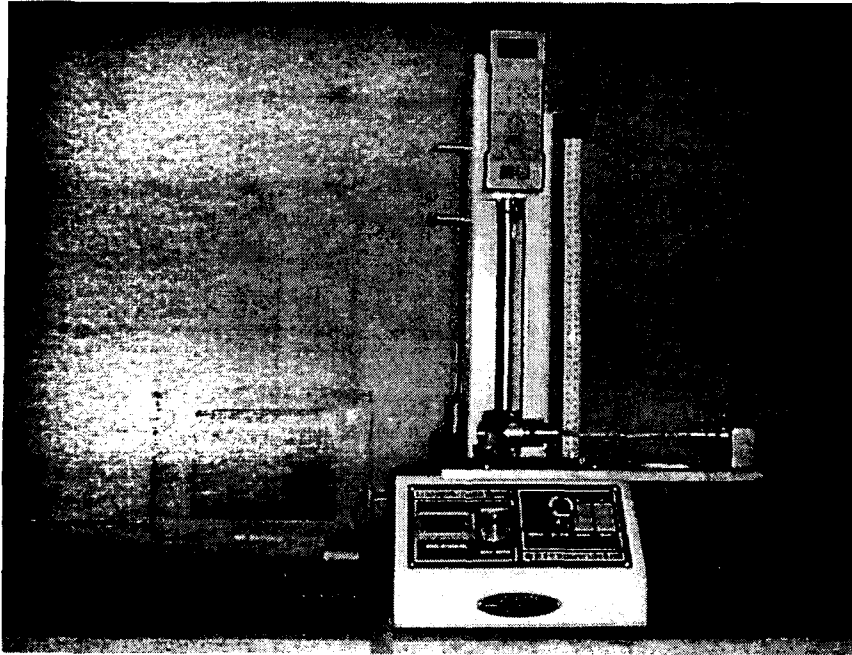


Fig. 2 Photograph of torsional rigidity test apparatus for the boxthorn branch.

ϕ = angle of twist (radian)

$J = (\pi/32)d^4$ = polar moment of inertia of the sample cross-section.

d = diameter of the sample (m).

본 실험에 사용한 지그는 10 mm 두께의 직사각형 알루미늄 판 위에 두개의 척, 폴리, 베어링 및 축을 설치하여 제작하였으며 UTM본체에 고정되어있다. 그림 2에서 지그의 오른쪽은 한 개의 척이 고정되어 있고, 왼쪽은 직경이 20mm인 알루미늄 축에 베어링 폴리 및 척을 고정시켜 축이 회전하면서 폴리 및 척이 동시에 회전 되도록 하였다. 또한, 폴리과 계기의 연결 고리 사이에 케이블을 연결하여 UTM의 크로스 헤드(Cross head)가 위쪽으로 수직 이동하면서 시료에 비틀림을 가하도록 하였으며, 이 때의 인장력을 측정하여 토크를 계산하였다.

비틀림 각은 계기의 이동거리를 변위 측정기(그림 2의 계기 우측)를 이용하여 변위를 측정 후 변위에 해당하는 각도를 래디안(radian)으로 환산한 후 비틀림 강성을 계산하였다. 시료를 양쪽 두개의 척에 고정 시킬 때 폴리과 계기 사이에 연결되어 있는 케이블은 하중을 받지 않은 상태에서 팽팽하도록 유지하면서 고정 시켰으며, 비틀림 각은 폴리과 직경(48mm)과 변위의 관계를 이용하여 계산하였다. 척과 척 사이의 간격

은 170mm이지만 시료의 길이(L)는 두개의 척의 물림장치 사이의 길이를 측정한 후 그 길이를 식 (2)의 L로 사용하였다.

시료를 척에 고정시켰을 때 폴리의 위치는 폴리에 고정되어 있는 케이블 연결고리와 폴리 센터의 연장선이 지그의 바닥면과 수평을 이루면서 케이블 연결고리가 앞에서 보았을 때 정면을 향하도록 하였으며, 계기의 연결 고리 및 폴리와 케이블이 이루는 접선은 수직으로 하였다.

(3) 감쇠비(Damping Ratio)

구기자 가지의 감쇠비(ζ) 측정을 위한 장치는 그림 3과 같이 시료물림지지대, 1차원 Accelerometer (Charge capacity = 1.93 pC/G) (Model VP-02S, IMV Corporation), Charge amplifier (Radebeul, Model M67-1), A/D Converter (PCLD, Model PCLD - 780) 및 PC(Pentium III 350MHz, Ram 120MHz)로 구성되어있다.

감쇠비는 위 장치들을 이용하여 가지의 가속 진폭의 시간에 따른 변위를 구한 후 대수감소(logarithmic decrement)관계를 아래 식 (3)을 이용하여 (그림 4 참조) 계산하였다 (Doebelin, 1990).

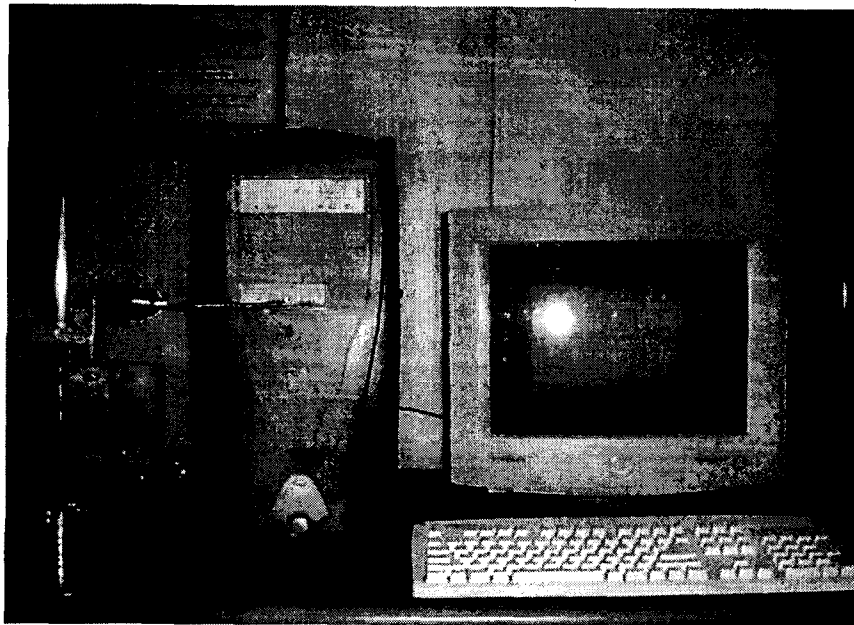


Fig. 3 Photograph of the apparatus for the damping ratio test for the boxthorn branch.

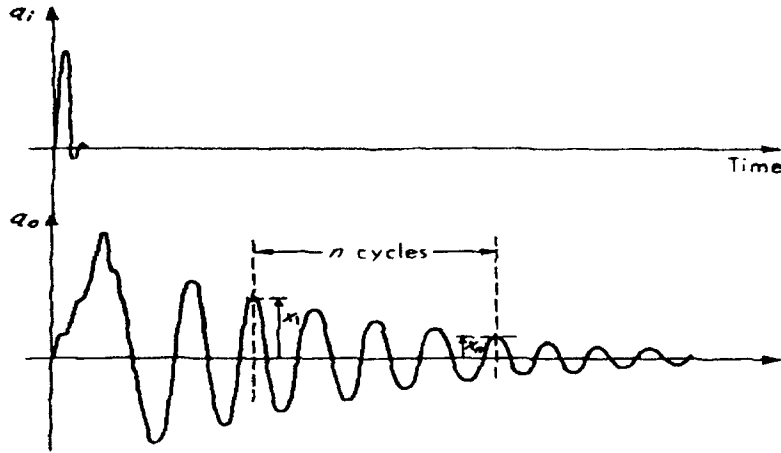


Fig. 4 Graphical illustration used for the calculation of damping ratio of the boxthorn branch in Equation (3).

$$\zeta \approx \frac{\delta}{2\pi n} \quad (3)$$

where ζ = damping ratio (dimensionless)

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \frac{x_1}{x_n} \left(= \frac{1}{n} \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \right) = \text{logarithmic decrement}$$

x_1 = initial amplitude of vibration (m)

x_n = amplitude of vibration n cycles later (m)

n = n number of cycle

식 (3)은 $(1-\zeta^2)^{1/2} \approx 1.0$ 로 가정한 것이며 특히, $\zeta < 0.1$ 일 때 매우 정확한 값을 갖는다 (Doebelin, 1990).

감쇠비의 결정은 변위($x = A_0e^{i\omega t} + A_n e^{-i\omega t}$) 진폭의 비를 이용하여 구하였다. 식 (3)에서 자유 진동을 하는 물체의 가속을 알고 처음과 마지막의 가속 진폭을 각각 $A_0e^{i\omega t}$ 및 $A_n e^{-i\omega t}$ 라 가정한 후 이들을 두 번 미분하면 처음과 마지막의 변위 진폭은 각각 $A_0\omega^2 e^{i\omega t}$ 및 $A_n\omega^2 e^{i\omega t}$ 와 같이 가속도로 되고 처음과 마지막 가속 진폭의 비는 변위 진폭의 비와 같다. 따라서, 감쇠비의 결정은 가속 변위의 진폭 비를 이용하여 구하였다. 감쇠 계수를 결정하기 위한 실험순서는 우선 시료를 지지대의 봉에 장착된 척을 이용

하여 시료의 한 끝을 고정하여 시료가 바닥면과 수평을 이루도록 하였으며, 시료의 다른 한 끝에는 테이프를 이용하여 가속도계(Accelerometer)를 고정시킨 후 인위적으로 가속도계가 매달린 시료의 끝을 수직방향의 아래로 당긴 후 놓아 자연적으로 진동이 발생하도록 하였으며, 같은 순간 PC가 작동하며 시료의 가속 진폭을 감지하도록 하였으며 감지된 진폭은 PC에 기록과 동시에 저장되도록 하였다.

(4) 자유 진동수 (Natural frequency)

구기자 가지의 자유 진동수(ω_n)는 식 (3)에서 구한 감쇠비(ζ)를 아래 식 (4)에 대입하여 구하였다(Doebelin, 1990).

$$\omega_n = \frac{2\pi}{T\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (4)$$

where T = period.

식 (4)에서 주기(T)는 모니터에 나타난 5 주기의 가속 변위의 평균값을 사용하여 구하였다.

(5) 비중량 (Specific weight)

구기자 가지의 비중은 품종별로 가지의 직경과 무게를 측정 후 단위 체적 당 무게로 계산하였다. 구기자 가지의 직경은 가지의 굵기가 고르지 않아 가지의 양끝 및 중앙 부분의 직경을 디지털 버어니어 캘리퍼스로 측정한 후 평균값을 사용하였다. 또한, 품종별 비중량의 차이를 분석하기 위하여 다중범위분석(Duncan)을 실시하였다.

(6) 함수율 (Moisture Content)

시료의 함수율은 항온 건조기(동양과학, Model 0560)의 온도를 105℃로 유지하면서 72시간 동안 건조 시킨 후 시료의 무게와 초기 시료의 무게를 비교하여 건량기준 함수율(Moisture content based on original weight)계산방법(식 (5))에 의하여 품종별 시료 전체의 함수율을 측정하였다.

$$mc\% = (G_{wt} - OD_{wt}) \times 100 \div OD_{wt} \quad (5)$$

where mc% = % Moisture content

G_{wt} = Green weight of wood

OD_{wt} = Oven dry weight of wood

3. 결과 및 분석

가. 탄성 계수

그림 5는 청양2호의 주지에 대한 재하시간과 굽힘 하중과의 관계의 한 예를 보여주고 있으며 본 실험에서의 탄성계수는 그림 5에 나타난 굽힘 응력의 최대값을 이용하여 위에서 설명한 식 (1)을 이용하여 계산하였다.

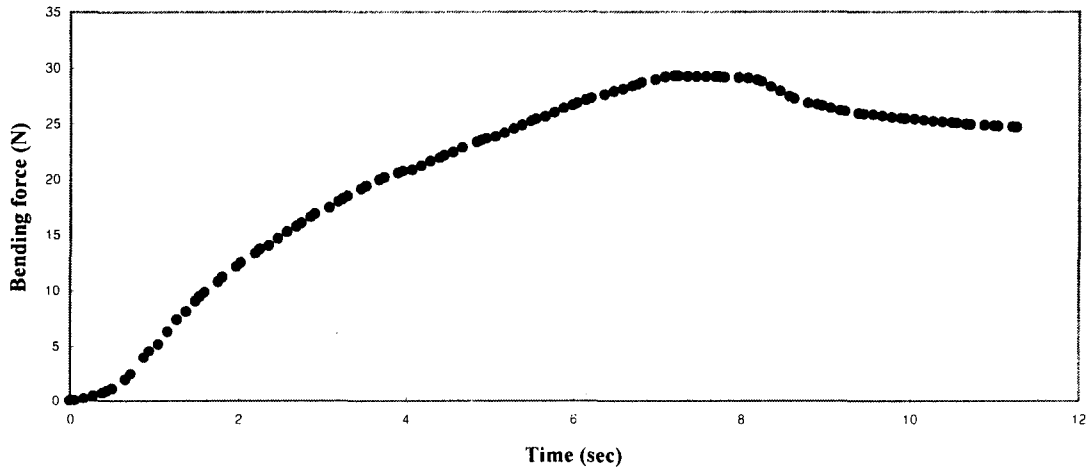


Fig. 5 An example of the relationship between bending force and time of a primary branch of Cheongyang #2.

그림 6, 7 및 8은 각각 청양2호, 청양구기자, 청양재래의 품종별 탄성 계수와 가지 굽기의 관계를 나타내고 있으며, 그림 9는 품종의 구분 없이 공시 재료 전체의 탄성 계수와 가지의 굽기 관계를 나타내고 있다. 한편, 표 1은 품종별 및 공시 재료 전체의 탄성 계수와 가지굽기 사이의 회귀분석 결과를 요약한 것이다. 탄성 계수는 각 공시 품종이 가지의 굽기가 증가 하면서 탄성계수는 감소하는 경향을 나타냈으며 청양2호, 청양구기자, 청양재래의 상관계수는 각각 -0.64, -0.72, -0.95으로서 비교적 높은 의존도를 나타내고 있다. 또한, 품종이나 가지의 종류를 구분하지 않고 전체 시료의 가지의 굽기와 탄성계수의 상관계수는 -0.81로서 서로 높은 의존도를 나타내고 있다. 또한, SNK(Student Newman-Keuls)를 이용하여 다중 범위 평균 테스트를 한 결과 품종간

평균 탄성계수의 차이가 있는 것으로 나타났으며, 청양2호 가장 높고 청양구기자와 청양재래는 차이가 없는 것으로 나타났다.

본 실험에서 계산된 구기자 가지의 탄성계수는 Ghate 와 Rohrbach (1975)가 분석한 블루베리 가지의 탄성계수 범위에 비해 비교적 작은 값($6.73 \times 10^9 \text{ N/m}^2$)을 나타내고 있으며, 참고로 공식적인 합판의 탄성계수는 $5.4 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ 으로 나타나 있다(Inman, 1996).

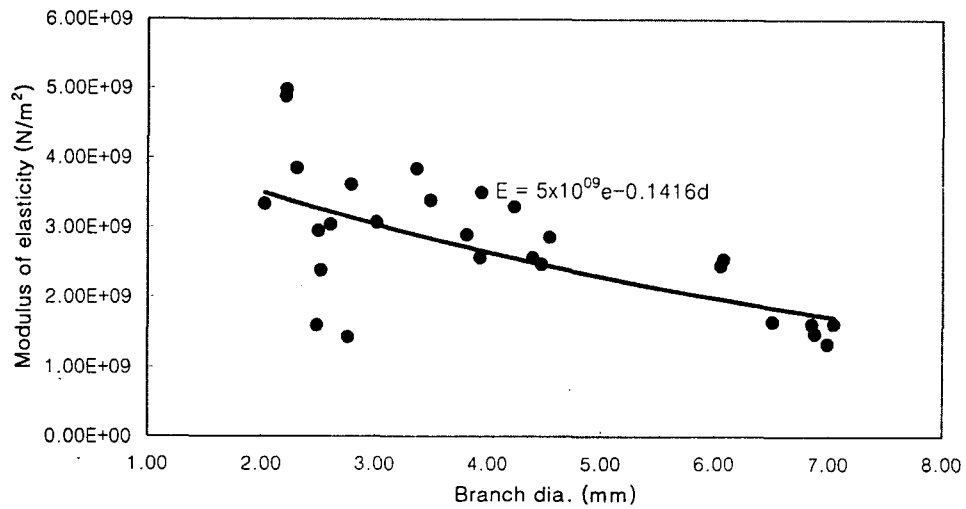


Fig. 6 Experimentally determined elastic modulus of Cheongyang #2 variety as a function of the branch diameter.

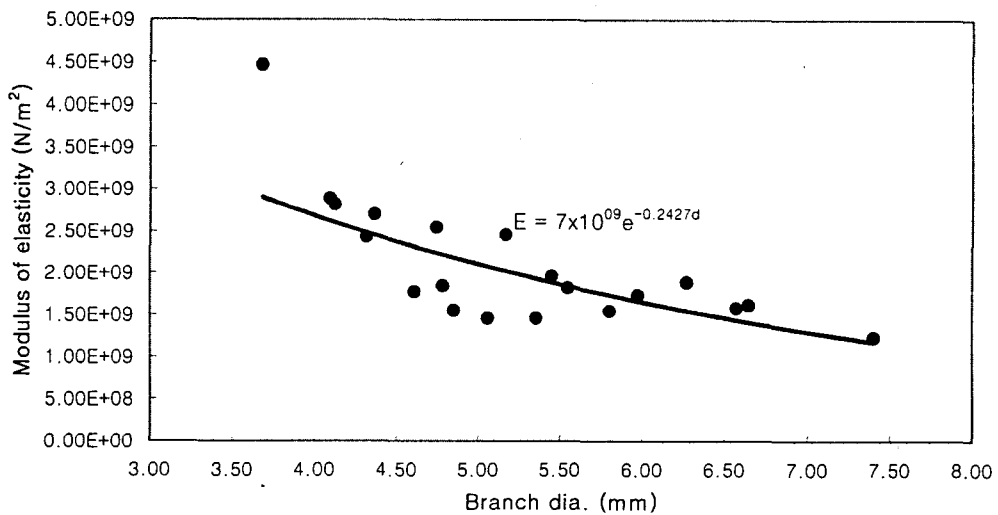


Fig. 7 Experimentally determined elastic modulus of Cheongyang gugija variety as a function of branch diameter.

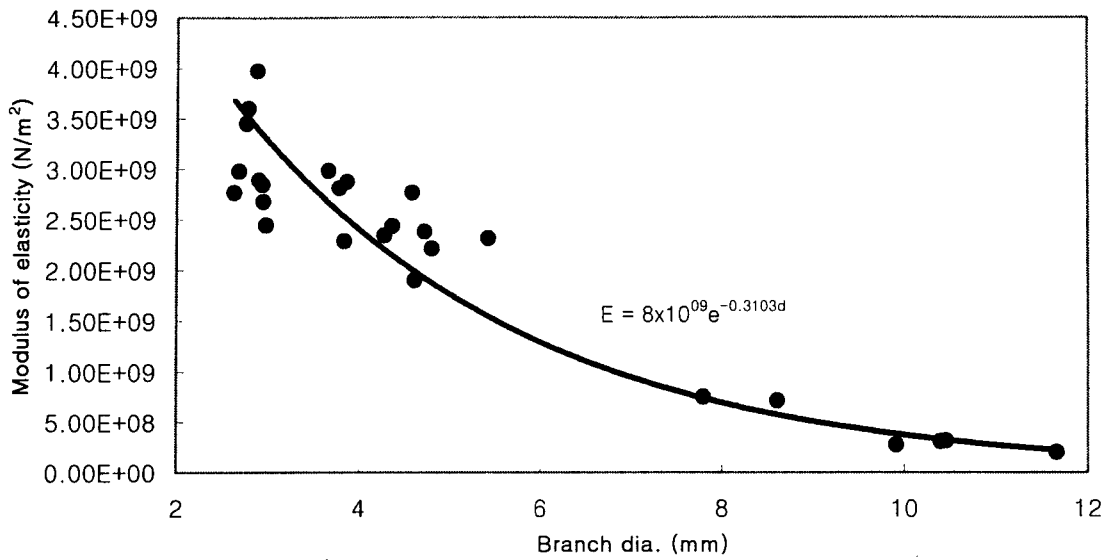


Fig. 8 Experimentally determined elastic modulus of Cheongyang native variety as a function of branch diameter.

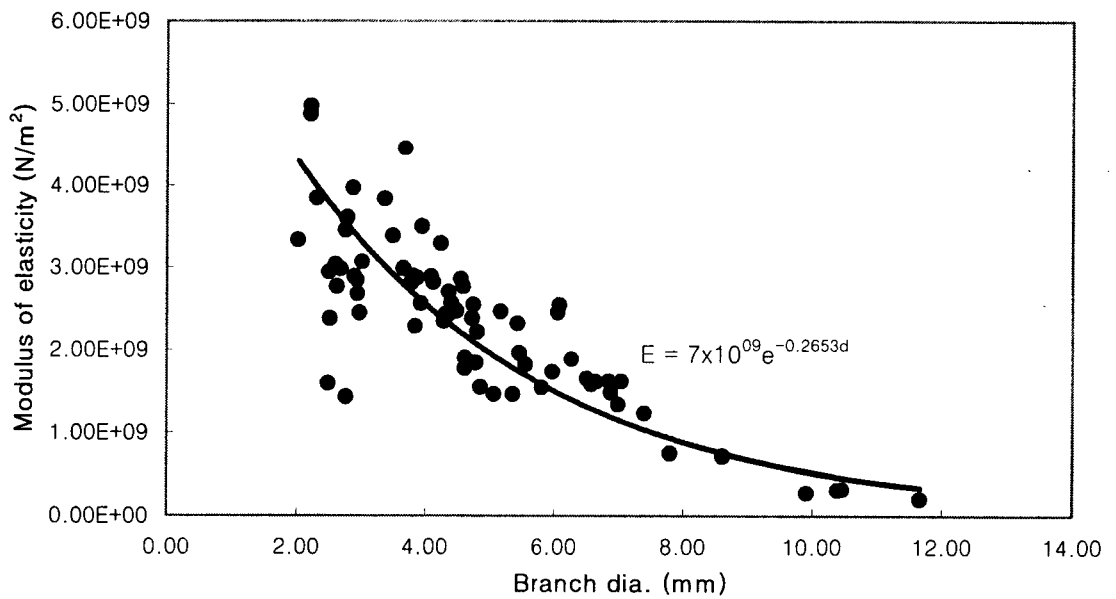


Fig. 9 Experimentally determined elastic modulus of all varieties combined as a function of branch diameter.

Table 1 Regression equation for the modulus of elasticity as a function of branch diameter.

Variety	No. of samples	Coefficient of correlation	Equation of regression line*
Cheongyang #2	27	-0.64	$E = 5 \times 10^9 e^{-0.141d}$
Cheongyang guguija	20	-0.72	$E = 7 \times 10^9 e^{-0.243d}$
Cheongyang native	26	-0.95	$E = 8 \times 10^9 e^{-0.310d}$
Combined	73	-0.81	$E = 5 \times 10^9 e^{-0.265d}$

* E = Modulus of elasticity (N/m²). d = Diameter of specimen (mm).

나. 강성계수 (Modulus of rigidity)

구기자 가지의 비틀림 강성은 그림 10과 같이 품종 및 가지의 구분 없이 전체 시료에서 일반적으로 가지의 굵기가 증가하면서 강성이 감소하는 경향(상관계수, -0.63)을 나타내고 있지만 데이터가 넓게 분포하고 있어 가지의 굵기와 강성 사이의 관계를 분석한다는 것은 별 의미가 없는 것으로 판단되었다.

품종별 구기자 가지의 비틀림 강성과 가지의 굵기 사이의 상관계수는 청양2호, 청양구기자, 청양재래의 각각 -0.66, -0.01, -0.95으로 나타나, 청양구기자의 경우 가지의 굵기와 강성사이에는 전혀 상관이 없는 것으로 나타났다. 또한, 청양재래를 제외하고는 품종 별 혹은 가지 종류별 가지의 굵기와 강성 사이에는 서로 상관 관계가 거의 없는 것으로 나타났다.

구기자 가지의 탄성계수와 비틀림 강성은 가지 굵기에 따라 가지의 껍질(bark)이나 가지의 심(pitch)의 크기에는 변화가 없는 반면 가지의 굵기가 커지면서 껍질과 심 사이에 있는 나무(wood) 부분도 증가하여 탄성계수는 증가하는 반면 비틀림 강성에는 영향을 주지 않는 나무 부분의 세포조직의 차이에 의해서 나타나는 현상으로 사료되며 이와 같은 현상은 블루베리의 경우와 비슷하게 나타났다(Ghate and Rohrbach, 1975). 한편, 구기자가 가지의 강성계수를 다른 작물과 비교해 볼 때 Ghate와 Rohrbach (1975)가 분석한 블루베리 가지의 강성계수($4.047 \times 10^8 \text{ N/m}^2$)와 비슷한 값을 나타내고 있다.

그림 11은 전체 품종에 있어서 청양구기자의 강성과 가지의 굵기와의 관계의 예를 보여주고 있으며, 표 2는 품종별 강성계수 및 다중범위분석(Duncan) 결과를 나타내고 있으며 청양2호와 청양재래 사이에는 차이가 있는 것으로 나타났다.

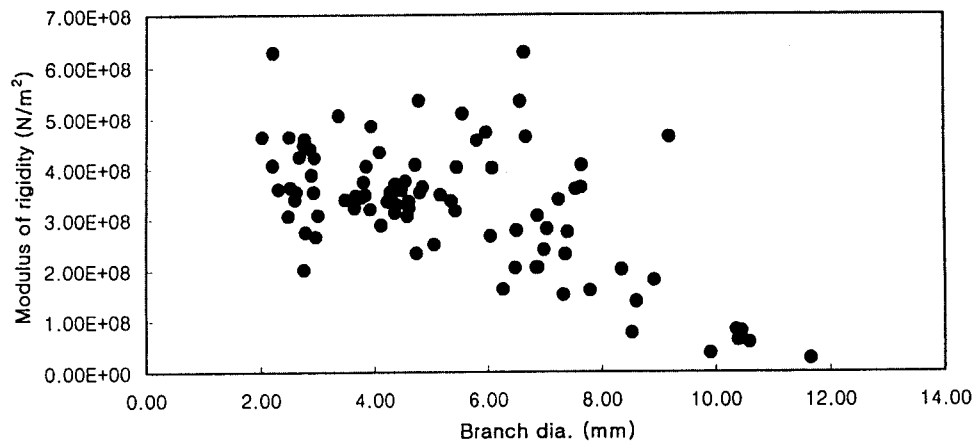


Fig. 10 Experimentally determined modulus of rigidity of all varieties of boxthorn combined as a function of branch diameter.

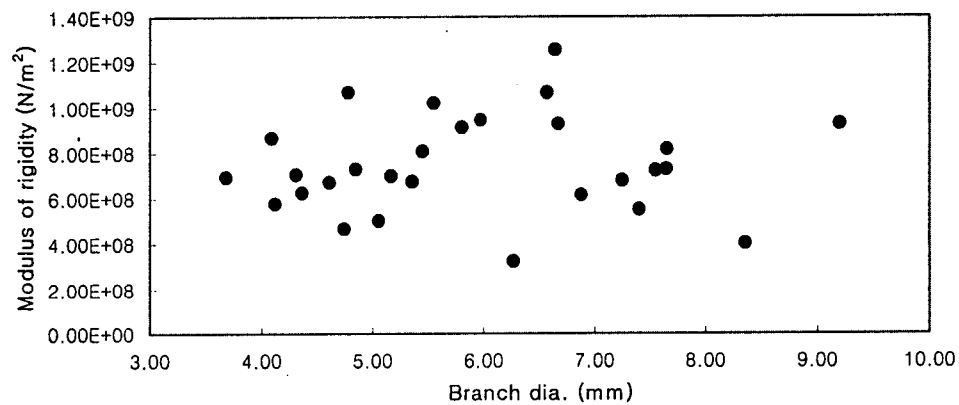


Fig. 11 Experimentally determined modulus of rigidity of Cheongyang gugija variety as a function of branch diameter harvested at Aug 18, 2000.

Table 2 Mean and standard deviation of the modulus of rigidity of the boxthorn branch.

Variety	No. of samples	Mean (N/m ²)	Standard deviation (N/m ²)	Duncan grouping*
Cheongyang #2	30	6.66 3 10 ⁸	2.11 3 10 ⁸	A
Cheongyang gugija	28	7.48 3 10 ⁸	2.15 3 10 ⁸	A B
Cheongyang native	30	5.53 3 10 ⁸	2.88 3 10 ⁸	B
All combined	88	6.53 3 10 ⁸	2.52 3 10 ⁸	

* Means with the same letter are not significantly different.

다. 감쇠비 (Damping ratio)

그림 12는 구기자가지의 감쇠계수를 측정하기 위한 구기자 가지의 진동 실험 결과를 컴퓨터 모니터상에 나타낸 한 예를 보여주고 있고, 그림 13은 공시재료 전체의 감쇠계수와 가지의 굵기사이의 관계를 나타내고 있다.

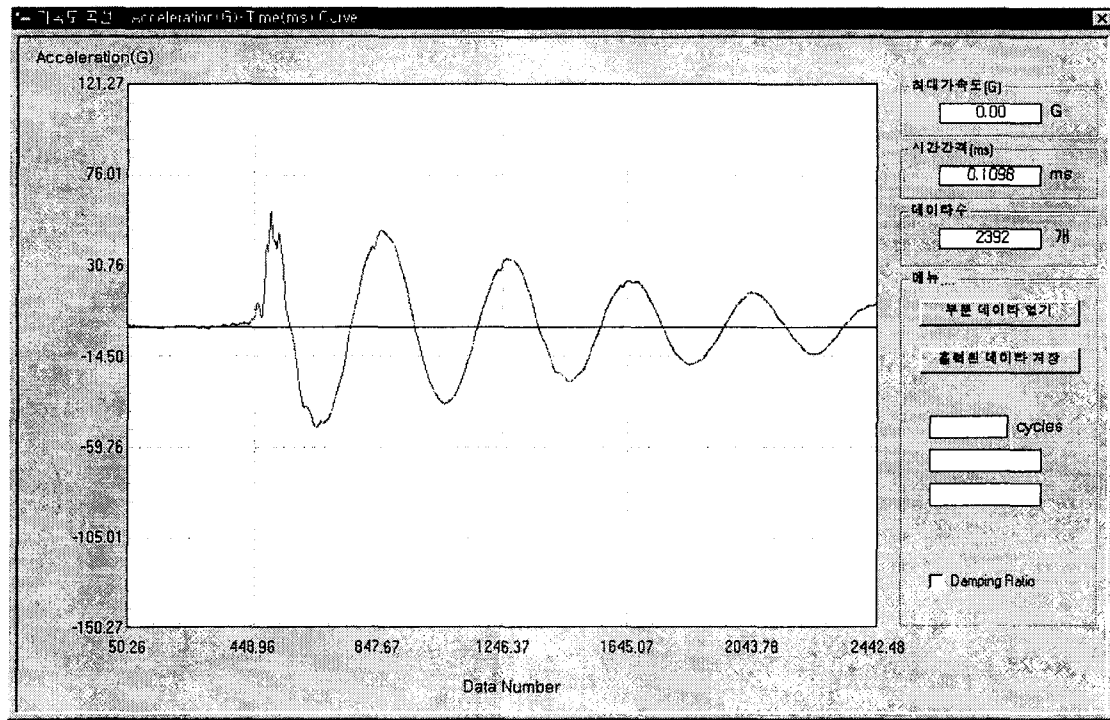


Fig. 12 An example of history of the acceleration of the boxthorn branch displayed on the PC monitor.

본 실험에서 사용한 공시재료의 품종 및 가지의 종류별 각각에 대한 구기자 가지의 굵기와 감쇠비 사이의 상관계수는 대해서는 거의 없는 것으로 나타났다 (상관계수 = -0.12). 전체 89개 시료의 평균 감쇠비는 0.035이고 표준편차는 0.016으로서 넓게 분포하고 있는 것으로 나타났다. 감쇠비의 최대값과 최소값은 각각 0.087과 0.014로 나타났으며 감쇠비의 범위가 0.01 - 0.02에는 약 10%, 0.02 - 0.03에는 약 34%, 0.03 - 0.04에는 31%, 0.04 - 0.05에는 10%, 0.05이상에는 15%가 나타났다. 따라서, 구기자 열매와 잎을 제거한 구기자 가지 자체에는 아주 작은 감쇠효과가 있는 것으로 나타났으며, 구기자 가지의 감쇠 혹은 비감쇠 자유 진동수는 크게 차이가 없는 것으로 판단된다. 또한, 구기자 가지의 감쇠비의 변화가 매우 심하게 나타났는데 이는 구기자 가지의 세포조직이나 가지의 모양의 변화가 다양하여 나타나는 현상으로 판단되었다.

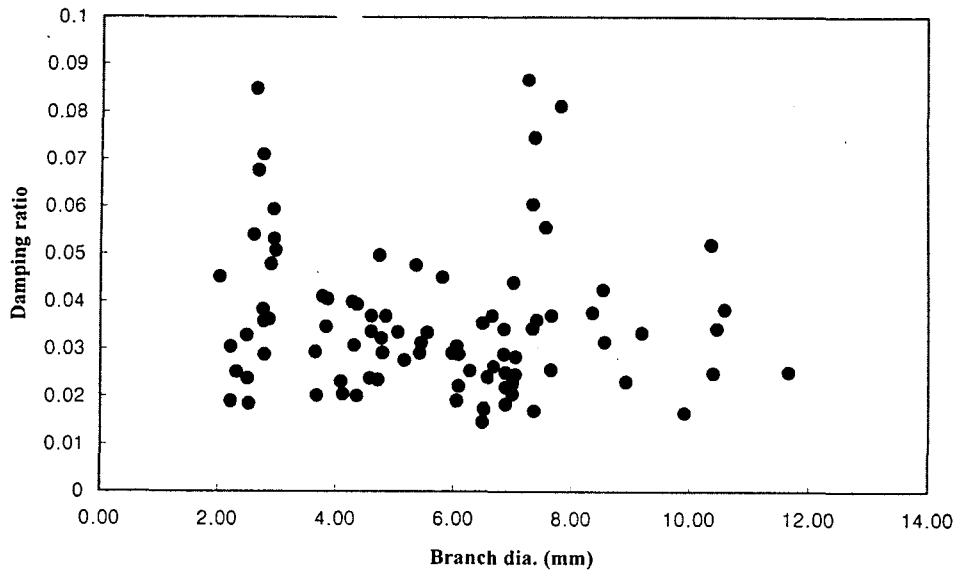


Fig. 13 Damping ratio of all varieties combined as a function of branch diameter.

라. 자유 진동수 (Natural Frequency)

구기자 가지의 굵기와 자유진동수의 관계는 세 품종 모두 일반적으로 1차지와 2차지는 가지의 굵기가 굵어지면서 자유진동수가 증가하는 현상을 나타냈다. 한편, 각 품종에서 주지의 자유진동수는 가지의 굵기와 거의 상관관계가 없이 수평적으로 넓게 분포하는 것으로 나타났다. 또한, 10개의 주지, 1차지 및 2차지의 평균 자유진동수는 표 3에 나타낸 바와 같이 각 품종에서 자유진동수가 주지, 1차지, 2차지 순으로 작은 값을 나타냈다.

그림 14는 품종이나 가지의 부분을 고려하지 않은 전체 구기자 가지의 자유 진동수와 가지 굵기의 관계를 나타내고 있으며(상관관계 = 0.82), 일반적으로 가지의 굵기가 굵어지

Table 3. Experimentally determined average natural frequency of the boxthron branch.

Variety	Branch	Avg. dia. (mm)	Std.	Natural freq. (rad/s)	Std.
Cheongyang #2	Primary	6.76	0.465	360.77	78.320
	First	3.92	0.511	217.72	47.066
	Second	2.45	0.249	89.41	22.006
Cheongyang gugija	Primary	7.68	0.806	363.59	76.818
	First	5.92	0.839	264.24	40.321
	Second	4.56	0.539	233.84	32.243
Cheongyang native	Primary	9.73	1.199	349.56	69.897
	First	4.43	0.514	217.98	60.109
	Second	2.92	0.287	123.28	24.388

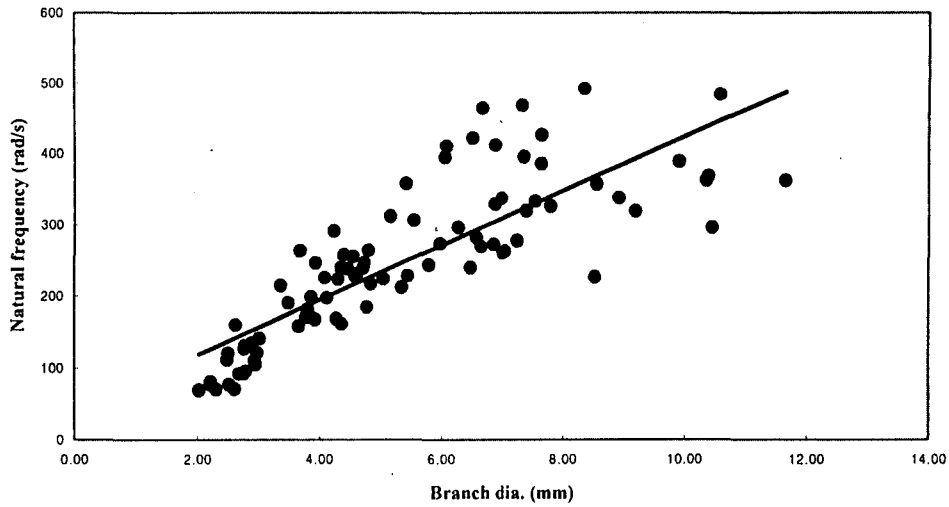


Fig. 14 Experimentally determined natural frequency of all boxthorn varieties combined as the function of boxthorn branch diameter.

면서 자유진동수 역시 증가하는 현상을 나타냈다. 또한, 품종별 구기자 가지의 자유 진동수는 SNK 다중 범위 테스트($\alpha = 5\%$) 결과 차이가 없는 것으로 나타났다.

마. 비중량 (Specific weight)

품종별 30개 구기자 가지의 품종별 평균 비중량과 표준편차를 표 4에 나타내었다. 비중의 범위는 청양2호, 청양구기자, 청양재래 각각 9272.1-13221.0, 9264.1-2290.6, 3764.7-12729.0 N/m^3 로 나타났으며, 분산 분석 결과 품종간에 비중의 차이가 있는 것으로 나타났고 청양구기자의 비중이 가장 크고 청양재래가 가장 낮은 것으로 나타났다.

Table 4. Statistics of the specific weight (N/m^3) of the boxthorn branch.

Variety	No. of sample	Min	Max	Mean	Std	Duncan grouping*
Cheongyang #2	30	9272.1	13221.0	11067.8	1191.4	B
Cheongyang gugija	30	9264.1	2290.6	13177.9	3552.2	A
Cheongyang native	30	3764.7	12729.0	9206.4	2428.7	C

* Means with the same letter are not significantly different.

바. 함수율(Moisture content)

구기자 가지의 품종별 함수율은 청양구기자, 청양2호, 청양재래가 각각 45%, 47%, 43%로 나타났다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 구기자 가지의 진동에 영향을 미치는 물리적 특성 즉, 탄성계수, 비틀림 강성계수, 감쇠비 및 구기자 가지의 자유진동수 등에 대하여 청양구기자시험장에서 재배되고 있는 청양2호, 청양구기자, 청양재래를 공시품종으로 선택하여 분석하였다. 본 연구에서의 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 구기자 가지의 탄성계수는 품종 및 가지 종류에 구분 없이 가지의 굵기가 클수록 탄성계수는 감소하였고, 가지의 굵기가 2.03 ~ 11.66 mm 일 때 탄성계수는 $2.01 \times 10^9 \sim 4.97 \times 10^6$ N/m²이었고, 전체 시료의 평균 탄성계수는 시료의 평균 직경이 4.76 mm일 때 2.39×10^6 N/m²로 나타났다.
2. 구기자 가지의 비틀림 강성은 일반적으로 가지의 굵기 별로는 큰 차이가 없었으며 전체 공시재료 88개 구기자 가지의 평균 강성계수는 6.53×10^8 N/m² 이었다.
3. 구기자 가지의 감쇠비의 범위는 0.014 ~ 0.087 로 구기자 가지의 감쇠효과는 매우 작은 것으로 나타났으나, 그 변화의 폭이 상당히 심하게 나타났다.
4. 구기자 가지의 자유진동수는 가지의 굵기가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였으며, 상관계수는 0.82로 나타났다. 구기자 가지의 자유진동수의 범위는 품종 및 가지의 종류의 구분 없이 약 89 ~ 363 rad/s으로 나타났다.

참고문헌

서정덕. 2000. 구기자 열매와 과병 접합부의 강도 특성. 한국농업기계학회지 게재 예정.

서정덕, 허윤근, 이상우. 2000. 진동특성에 의한 구기자 열매의 탈과율. 한국농업기계학회지 25(2): 151-158.

서정덕, 허윤근, 이상우. 1999. 구기자의 가지 및 열매의 특성에 관한 연구. 한국농업기계학회지 24(4):365-372.

Doebelin, E. O. 1990. Measurement systems: application and design. McGraw-Hill, Inc, New York, NY, USA

Fridley, R. B. and C. Yung. 1975. Computer analysis of fruit detachment during tree shaking. Transactions of the ASAE 18(3): 409-415.

Ghate, S. R. and R. P. Rohrbach. 1975. Mechanical properties influencing vibrations in blueberry canes. Transactions of the ASAE 18(5): 921-925.

Inman, D. J.. 1996. Engineering vibration. Prentice-Hall, Inc.. Upper Saddle River, NJ, USA.

Wang, J. K.. 1965. Mechanical coffee harvesting. Transactions of the ASAE 8(3): 400-405.