

樹軸方向 應力波 方法에 依한 라디에타소나무의 初期腐朽 評價*1

金奎赫² · 池宇根² · 羅鐘範²

Assessment of Incipient Decay of Radiata Pine Wood Using Stress-Wave Technique in the Longitudinal Direction^{*1}

Gyu-Hyeok Kim · Woo-Kuen Jee · Jong-Bum Ra^{*2}

ABSTRACT

This study was performed to investigate the feasibility of using sonic stress-wave technique in the longitudinal direction for the assessment of incipient decay of radiata pine wood. Decayed bending specimens by *Tyromyces palustris* and *Gloeophyllum trabeum* for various periods were tested nondestructively using stress-wave technique in the longitudinal direction and destructively.

Decay detection, quantitative assessment of decay, and the prediction of residual strength of decayed wood with less than five percent weight loss can be feasible using stress-wave parameters (wave velocity, wave impedance, stress-wave elasticity) measured by stress-wave technique in the longitudinal direction and their percent reduction due to decay.

Keywords : Stress-wave technique in the longitudinal direction, incipient decay assessment, radiata pine, stress-wave parameter, *Tyromyces palustris*, *Gloeophyllum trabeum*

1. 서 론

구조물 현장에서 목재부후의 진단은 肉眼평가, sounding 또는 drilling 등의 간단한 방법에 의하는데(Goodell & Graham, 1983). 이러한 방법들은 초기부후 상태에서 부후의 정도를 量的으로 평가하기가 곤란하고 더욱이 부후재의 殘存 역학적 성질의 예측이 불가능하다는 문제점을 가지고 있다. 따라서 부후의 유무, 부후의 정도, 그리고 부후재의 잔존 역학적 성질을 동시에 평가할 수 있는 방법의 개발이 필요하다. 그리고 이렇게 개발된

새로운 방법은 현장에서 직접 구조물에 적용하기 위해서는 반드시 非破壞의 방법이어야 하며, 또한 측정이 간단·용이하면서도 측정 信賴度가 우수하여야 한다. Galigan(1982)이 1978년 "열악한 환경조건하에서의 목재의 구조적 이용"에 관한 미국 임산물학회(Forest Products Society) 주최 심포지움에서 목재부후의 비파괴적 평가에 대한 중요성을 지적한 이래, 지금까지 이어 대한 많은 연구들이 수행되었는데 아직도 앞서 서술한 바와 같은 모든 조건들을 만족시키는 부후평가 방법은 개발되지 않은 상태이다. 지금까지 연구된 제반 초기부후 평가법들과 이들이 가지고 있는 문제점들은 Kim(1989)에 의

*1 접수 1995년 11월 28일 Received November 28, 1995

본 연구는 94년도 한국과학재단 연구비(과제번호: 941-0600-021-1) 지원에 의한 결과의 일부임.

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

해 요약된 바 있다.

應力波 방법은 사용되는 音波의 周波數에 따라서 超音波 應力파(Ultrasonic stress-wave)방법과 單純 應力파(Sonic stress-wave)방법으로 구분된다. Kim 등(1991, 1993)이 실시한 초음파 應力파를 이용한 초기부후 평가에 관한 연구 결과, 부후재의 역학적 성질 예측은 가능하였으나 부후도의 평가는 역학적 성질 평가와 비교할 때 그 신뢰도가 훨씬 떨어짐을 보고하면서 이 방법의 사용에는 아직도 해결되어야 할 문제가 많음을 지적하였다. 따라서 본 연구에서는 초기부후의 평가법으로서 단순 應力파 방법의 사용 가능성을 최근 건축재로 국내에서 많이 활용되고 있는 라디에타소나무를 대상으로 타진하여 보았다. 원래 단순 應力파 방법은 動的 彈性係數 측정정에 의한 製材木의 等級 매기기(machine-stress grading)에 사용하기 위하여 개발되었으나, Shaler(1982)와 Pellerin 등(1986)이 이를 목재부후의 평가에 적용시켜 비교적 양호한 결과를 보고한 바 있다.

2. 재료 및 방법

치수가 2.5(두께)×2.5(폭)×38cm(길이)인 무결점 라디에타소나무(*Pinus radiata* D. Don.) 시험편의 부후前 應力파 변수와 초기부후의 각 단계별 중량감소율 및 휨성질은 前報(金等, 1996)의 자료를 사용하였다. 그리고 전보의 실험 중 휨시험 직전에 sonic stress-wave timer(Metriguard Inc., Model 239A)를 사용하여 부후 시험편들의 길이(수축)방향 應力파 전달시간(μs)을 재측정하여 다음의 공식들에 의해 應力파 변수인 應力파 속도, 파동 임피던스, 그리고 應力파 탄성계수를 산출하였다.

$$v = \frac{d}{t} \text{ (m/sec)}$$

$$Z = v \times \rho \text{ (kg/m}^2 \cdot \text{sec)}$$

$$E_d = \frac{v^2 \times \rho}{g} \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

여기서 v = 應力파의 속도

d = starter와 stop 변환기간의 거리(m)

t = 應力파의 전달시간(sec)

Z = 파동 임피던스

E_d = 동적 탄성계수

ρ = 시험편의 밀도(g/cm³)

g = 중력 가속도(980cm/sec²)

대조구와 강제 부후그룹들간에 應力파 변수들인 應力파 속도, 파동 임피던스, 應力파 탄성계수의 統計學的 有意性을 검정하여 應力파 변수에 의한 초기 부후진단 가능성 여부를 조사하였다. 그리고 應力파 변수들에 의한 부후도 및 부후재의 잔존강도 예측 가능성은 전자의 경우는 부후시편의 중량감소율과 應力파 변수간의 관계를, 그리고 후자의 경우는 부후시편의 휨강도와 應力파 변수간의 관계를 單純 또는 多衆回歸分析에 의해 조사하였다. 본 연구의 자료분석에 사용된 모든 통계처리는 SAS(Statistical Analysis System) 통계 패키지에 의하였다(SAS, 1988).

3. 결과 및 고찰

3.1 初期腐朽의 診斷

Table 1은 부후군 별로 부후의 진행에 따른 각 부후 그룹과 대조구의 應力파 변수인 應力파 속도, 파동 임피던스, 應力파 탄성계수의 평균치와 Duncan의 多衆檢定法에 의한 이들 평균치간의 비교를 보여준다. 군의 종류에 관계없이 대조구와 비교할 때 應力파 속도는 중량감소율 약 10퍼센트 선부터, 그리고 부후재의 밀도와 관련이 있는 파동 임피던스와 應力파 탄성계수의 경우는 중량감소율 약 5퍼센트 근처부터 統計學的으로 有意性($\alpha < 0.05$)이 인정되는 차이가 나타났는데, 이는 應力파 속도의 감소보다는 파동 임피던스와 應力파 탄성계수의 감소에 의해 초기부후를 보다 정확히 진단할 수 있음을 의미한다. 파동 임피던스나 應力파 탄성계수를 산출하기 위해서는 應力파 전달속도 외에 부후재의 밀도를 측정하여야 하는데, 밀도를 측정하기 위해서는 부후재로부터 밀도 측정용 소형 시험편을 채취하여야 하기 때문에 應力파 방법이 완전한 非破壞試驗이 되지 않는 문제가 발생된다. 그러나 충격저항에 의한 목재밀도 측정기인 Pilodyn을 이용한 비파괴 방법에 의한 밀도 예측에 대한 연구(Kim, 1989) 결과에 의하면 Pilodyn 핀의 침투깊이에 의해 목재의 밀도를 양호하게 예측할 수가 있기 때문에, sonic stress wave timer 외에 Pilodyn을 별도로 준비하면 파동 임피던스나 應力파 탄성계수의 감소에 의해 초기부후를 비파괴적으로 진단하는 것은 가능하다고 할 수 있다.

이상과 같이 중량감소율 5퍼센트 미만의 극초기 부후는 應力파 변수의 감소에 의해서도 정확히 진단하는 게 어려운 것으로 나타났는데, 前報(金等, 1996)에 발표된 바와 같이 중량감소율 1~2퍼센트부터 부후시편의 역학적 성질 감소가 심각한 관계로 구조물의 안전측면에서 육안적으로는 부후를 탐지할 수 없는 구조부재의 극초기 부

Table 1. Effect of decay on sonic stress-wave parameters.

Fungus	Weight loss (%)	Wave velocity (m/sec)	Wave impedance (kg/m ² · sec)	Stress wave elasticity (kg/cm ²)
<i>Tyromyces palustris</i>	0.00	4490.7 A ¹	2.066.831 A	95.779 A
	1.44	4336.1 AB	1.876.442 AB	84.217 AB
	2.56	4361.3 AB	1.845.254 AB	81.823 AB
	4.33	4353.7 AB	1.707.000 B	76.028 B
	9.73	4070.6 B	1.560.872 B	65.370 B
<i>Gloeophyllum trabeum</i>	0.00	4490.7 A	2.066.831 A	95.779 A
	0.89	4334.7 AB	2.019.392 A	90.210 AB
	1.99	4282.9 AB	1.858.444 AB	81.388 AB
	6.48	4231.6 AB	1.711.500 BC	74.219 BC
	11.66	4104.3 B	1.462.337 C	61.586 C

*1 Values followed by the same letter are not significantly different ($\alpha < 0.05$) using Duncan's multiple range test.

Table 2. Effect of decay on changes in sonic stress-wave parameters¹.

Fungus	Weight loss (%)	Average percent reduction in		
		Wave velocity	Wave impedance	Stress wave elasticity
<i>Tyromyces palustris</i>	0.00	0.00 A	0.00 A	0.00 A
	1.44	2.04 B	3.40 B	5.31 B
	2.56	2.39 B	4.87 B	7.11 B
	4.33	3.97 C	8.77 C	12.90 C
	9.73	6.57 D	16.53 D	22.79 D
<i>Gloeophyllum trabeum</i>	0.00	0.00 A	0.00 A	0.00 A
	0.89	1.87 B	2.75 B	4.56 B
	1.99	3.31 B	5.24 C	8.34 C
	6.48	4.27 C	10.45 D	14.22 D
	11.66	7.45 D	18.19 E	24.19 E

*1 Values followed by the same letter are not significantly different ($\alpha < 0.05$) using Duncan's multiple range test.

후를 정확히 진단하는 것은 매우 중요하다. 그래서 다른 시도로서 부후그룹에 속하는 시험편들을 대상으로 측정된 부후前 응력과 변수와 부후後 동일 위치에서 재측정된 응력과 변수에 의하여 산출된 응력과 변수 감소율에 의한 초기부후의 진단 가능성을 살펴본 결과, Table 2에서 보여주는 것처럼 중량감소를 1~2퍼센트 선부터 부후재의 응력과 변수들의 감소율은 통계학적으로 유의성 ($\alpha < 0.05$)이 있는 차이가 인정되어 극초기 부후도 응력과 변수들의 감소율에 의해서 진단할 수 있는 것으로 나타났다. 본 실험의 결과로부터는 정확한 수치를 제시할 수는 없지만 극초기 부후의 존재가 탐지되는 응력과 변수의 감소율을 설정할 수가 있으면 다음과 같은 방법에 의해 구조부재의 극초기 부후를 탐지할 수가 있을 것이다. 목구조물 내에서 부후군에 의한 가해가 예상되는 구

조부재(예를 들어, 주기적으로 강우 등에 의해 재젓음이 발생하는 부재)를 대상으로 현장 시설 직후에 부재의 응력과 변수를 측정하고 그 후로 定期的으로 초기 측정위치와 동일한 위치에서 응력과 변수를 재측정하면서 응력과 변수의 감소율을 계산하여, 계산된 감소율이 실험을 통해 既定된 부후의 존재에 의한 응력과 변수의 감소율 또는 그 이상이 될 경우에는 부재가 부후군에 의해 가해를 받고 있는 것으로 판정할 수가 있을 것이다. 그러나 이러한 방법을 현장에 적용시키기 위해서는 Gerhards(1975)와 Kim(1989)이 제시한 것처럼 함수율에 대한 보정이 필요하고, 또한 응력파의 傳達經路上에 할렬 등의 乾燥缺陷이나 웅이 등의 자연결점이 존재할 경우에는 이들의 응력과 변수에 미치는 영향도 반드시 고려해 주어야 할 것이다.

Table 3. Result of regression analysis for prediction of percent weight loss using percent reduction in stress wave parameters¹.

Fungus	Predictor (%)	Regression equation	Correlation coefficient	Standard error of estimate
<i>Tyromyces palustris</i>	VL	WL = 0.438+0.948(%VL)	0.83	1.97
	ZL	WL = -0.147+0.562(%ZL)	0.96	0.96
	EL	WL = -0.102+0.387(%EL)	0.93	1.30
<i>Gloeophyllum trabeum</i>	VL	WL = -0.312+1.329(%VL)	0.85	2.36
	ZL	WL = -0.533+0.649(%ZL)	0.98	0.99
	EL	WL = -0.651+0.474(%EL)	0.95	1.45

*1 VL, ZL, EL, and WL represents percent reduction in wave velocity, wave impedance, stress wave elasticity, and weight, respectively.

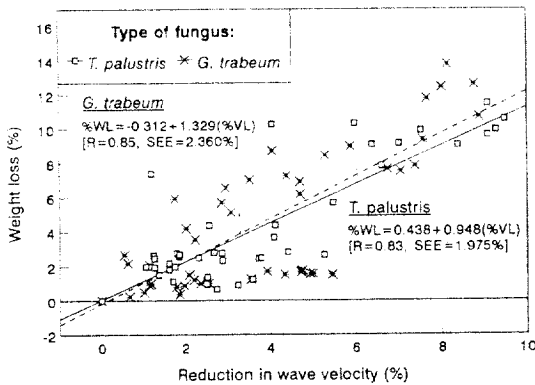


Fig. 1. Regression of percent weight loss on percent reduction in wave velocity of radiata pine sapwood beams decayed by two brown-rot decay fungi.

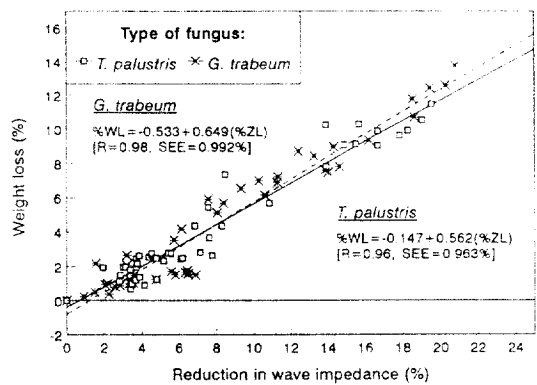


Fig. 2. Regression of percent weight loss on percent reduction in wave impedance of radiata pine sapwood beams decayed by two brown-rot decay fungi.

3.2 腐朽度の豫測

부후에 따른 부후도, 즉 중량감소율을 응력과 변수에 의해 예측할 수 있는지 여부를 판정하기 위하여 실시된 응력과 변수들과 중량감소율간의 회귀 결과, 응력과 변수들인 응력과 속도, 파동 임피던스, 그리고 응력과 탄성계수 자체와 중량감소율간의 상관은 그리 우수하지 못하였으나, 응력과 변수들의 감소율과 중량감소율간의 상관은 매우 양호하여(Table 3) 수축방향 응력과 방법에 의하여 부후도를 예측할 수 있는 것으로 나타났다. 특히 현장에서 용이하게 측정할 수 있는 응력과 속도의 감소율과 중량감소율간의 상관인 Fig. 1에서 볼 수 있는 것처럼 비교적 양호하여 부후균에 의한 피해가 예상되는 구조부재를 대상으로 동일 위치에서 정기적으로 응력과 속도를 측정함에 의해 응력과 속도의 감소율을 산출해내면 부후에 의한 부재의 중량감소율, 즉 부후도를 예측할 수가 있을

것이다. Fig. 2는 상관 관계가 매우 양호한 파동 임피던스 감소율과 중량감소율간의 관계를 보여주는데, 파동 임피던스를 산출하기 위해서는 부후평가 현장에서 응력과 전달속도 외에 부후재의 밀도를 측정하여야 하는 문제가 있으나 전항에 언급된 Pilodyn을 별도로 준비하면 응력과 속도 감소율에 의하는 것보다는 파동 임피던스의 감소율에 의해 부후도를 보다 정확하게 예측하는 것이 가능하다고 할 수 있다.

3.3 腐朽材의 殘存強度 豫測

부후재의 잔존강도를 응력과 변수에 의해 예측할 수 있는가 여부를 판정하기 위하여 실시된 응력과 변수들과 휨강도간의 회귀 결과, 응력과 변수들인 응력과 속도, 파동 임피던스, 그리고 응력과 탄성계수 자체와 휨강도간의 상관도 비교적 우수하였다. 그러나 Table 4에서 볼 수 있

Table 4. Correlation coefficients in regression of stress wave parameters for prediction of bending strength¹.

Fungus	Predictor(s)								
	V	Z	E	VL	ZL	EL	VL+VL ²	ZL+ZL ²	EL+EL ²
<i>Tyromyces palustris</i>	0.57	0.70	0.73	0.71	0.81	0.79	0.78	0.87	0.85
<i>Gloeophyllum trabeum</i>	0.60	0.75	0.77	0.75	0.83	0.82	0.77	0.87	0.85

¹ V, Z, E, VL, ZL, and EL represents wave velocity, wave impedance, stress wave elasticity, percent reduction in wave velocity, percent reduction in wave impedance, and percent reduction in stress wave elasticity, respectively.

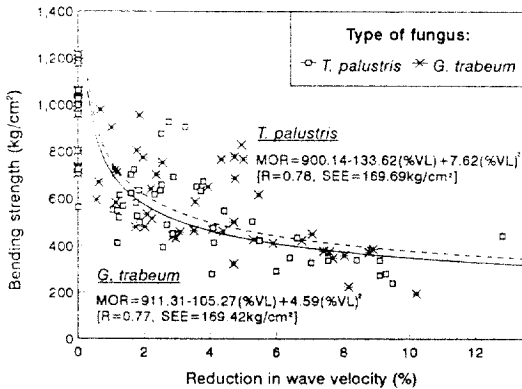


Fig. 3. Regression of bending strength on percent reduction in wave velocity of radiata pine sapwood beams decayed by two brown-rot decay fungi.

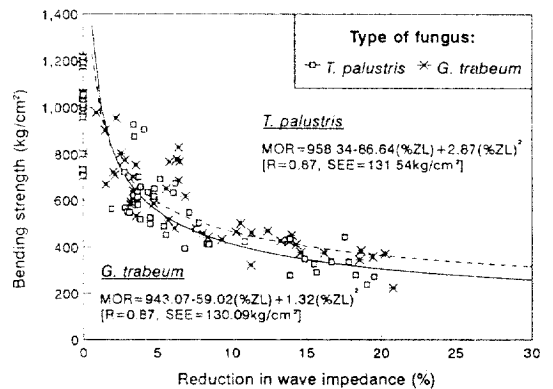


Fig. 4. Regression of bending strength on percent reduction in wave impedance of radiata pine sapwood beams decayed by two brown-rot decay fungi.

듯이 부후에 따른 응력과 변수들의 감소율과 휨강도간의 상관은 응력과 변수 자체들과의 상관과 비교할 때 보다 우수하게 나타나 수축방향 응력과 방법에 의하여 부후재의 잔존강도를 예측할 수 있는 것으로 나타났다. 참고로 지금까지의 비파괴시험에 대한 많은 연구 결과들을 종합해 보면, 휨강도의 경우는 비파괴계수와와의 상관계수가 0.70 이상이면 비파괴계수에 의한 신뢰성 있는 휨강도의 예측이 가능하다고 한다(Hoyle, 1968). 현장에서 용이하게 측정할 수 있는 응력과 속도의 감소율과 휨강도간의 상관이 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 양호하여 부후균에 의한 피해가 우려되는 구조부재를 대상으로 동일 위치에서 정기적으로 응력과 속도를 측정함에 의해 응력과 속도의 감소율을 산출해 내면 부후재의 잔존강도를 예측할 수가 있을 것이다. Fig. 4는 상관관계가 매우 양호한 파동 임피던스 감소율과 휨강도간의 관계를 보여주는데, 부후 현장 평가시 sonic stress wave timer 외에 Pilodyn을 별도로 준비하면 응력과 속도 감소율에 의하는 것보다는

파동 임피던스의 감소율에 의해 부후재의 휨강도를 보다 정확하게 예측하는 것이 가능하다고 할 수 있다.

본 실험의 결과로부터 제반 조건들이 조절·통제된 조건 하에서는 수축방향 응력과 방법에 의한 초기 갈색부후의 진단, 부후도의 예측, 그리고 부후재의 잔존강도 예측이 가능한 것으로 나타났다. 그러나 본 결과가 소형 무결점 시험편을 사용하여 실시된 실험실 규모의 실험 결과이기 때문에, 수축방향 응력과 방법을 구조물 현장에서 사용하기 위해서는 앞으로 옥외에서 부후중인 실대재에 대한 실험을 반드시 실시하여 본 실험의 결과를 입증하여야 할 것이다.

4. 결론

수축방향 응력과 방법에 의한 라디에타소나무의 초기 부후 평가 가능성을 타진하기 위해 수행된 본 연구의 결과로부터 다음과 같은 결론들을 내릴 수 있다.

1. 수축방향으로 측정된 응력과 변수들의 변화에 의해 초기부후를 진단할 수가 있었으나 응력과 속도의 감소에 의해서는 후기단계의 초기부후만, 그리고 파동 임피던스와 응력과 탄성계수의 감소에 의해서는 중기단계의 초기부후부터 탐지할 수 있었다. 그러나 응력과 변수의 감소율에 의해서는 중량감소율 1~2퍼센트 선의 극초기 부후도 진단할 수 있는 것으로 나타났다.
2. 응력과 변수들에 의한 부후재의 부후도와 잔존강도의 예측은 양자간의 상관관계가 매우 우수하지 못하여 예측 신뢰도가 떨어졌으나, 응력과 변수들의 감소율과 중량감소율 및 휨강도간의 상관은 양호하게 나타나서 이들의 감소율에 의해 부후재의 부후도와 잔존강도를 예측할 수가 있었다.
3. 제반 조건들이 조절·통제된 조건하에서 수축방향 응력과 방법에 의한 초기 갈색부후의 평가가 가능하다는 본 실험의 결과는 매우 고무적이며, 앞으로 수축방향 응력과 방법을 현장에서 부후가 의심되는 구조부재에 적용하기 위해서는 자연결점을 포함하는 실재 부후재에 대한 실험을 통해 본 실험의 결과를 입증하여야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. Galligan, W.L. 1982. Comments on presentation by M.P. Ansell. *In* : Proceedings of Structural Use of Wood in Adverse Environments. R.W. Meyer and R.M. Kellog, eds. Van Nostrand Reinhold. New York, NY.
2. Gerhards, C.C. 1975. Stress wave speed and MOE of sweetgum ranging from 150 to 15 percent MC. *Forest Prod. J.* 25(4) : 51~57
3. Goodell, B.S., and R.D. Graham. 1983. A survey of methods used to detect and con-

- trol fungal decay of wood poles in service. *Int. J. Wood Preservation* 3(2) : 61~63
4. Hoyle, R.J. 1968. Background to machine stress grading. *Forest Prod. J.* 18(4) : 87~97
5. Kim, G.H. 1989. Detection of incipient decay and assessment of residual strength of wood using nondestructive techniques. Unpublished Ph.D. dissertation. Dept. of Forest Products, School of Forest Resources, Mississippi State University, Mississippi State, Mississippi : 105
6. Kim, G.H., H.M. Barnes, and D.E. Lyon. 1991. Decay detection using Pilodyn and ultrasonic techniques. *Wood Protection* 1(2) : 61~68
7. Kim, G.H., H.M. Barnes, and D.E. Lyon. 1993. Estimation of the residual strength of decayed wood. *Wood Protection* 2(2) : 47~55
8. Pellerin, R.F., R.C. DeGroot, and G.R. Esenther. 1986. Nondestructive stress wave measurement of decay and termite attack in experimental wood units. The Int. Res. Group on Wood Pres. Document No. IRG/WP/2256
9. SASInstitute. 1988. Statistical Analysis System(SAS). User's Manual. Cary, NC.
10. Shaler, S. M. 1982. Nondestructive evaluation of wood properties by stress wave spectral analysis. Unpublished M.S. thesis. Dept. of Forest and Wood Sciences, Colorado State University, Fort Collins, Colorado
11. 金奎赫·池宇根·羅鐘範. 1996. 初期 褐色腐朽에 따른 라디에타 소나무의 力學的 性質 減少. 목재공학 24(1) : 81~86