

## 橫斷方向 應力波 方法에 의한 라디에타소나무의 初期腐朽 評價\*1

金奎赫<sup>\*2</sup> · 池宇根<sup>\*2</sup> · 羅鐘範<sup>\*2</sup>

## Assessment of Incipient Decay of Radiata Pine Wood Using Stress-wave Technique in the Transverse Direction\*1

Gyu-Hyeok Kim<sup>\*2</sup> · Woo-Guen Jee<sup>\*2</sup> · Jong-Bum Ra<sup>\*2</sup>

### ABSTRACT

The feasibility of using stress-wave technique in the transverse direction for the assessment of early stages of decay was investigated using compression test specimens having different annual ring orientations subjected to decay by *Tyromyces palustris* for various time intervals.

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, and stress-wave elasticity) and their percent reduction due to decay, measured by stress-wave technique in the transverse direction. The use of stress-wave technique in the transverse direction for the application of this technique to structural members in service is desirable, when considering the easiness of attachment of accelerometers of stress-wave measuring device on the surface of members and also accurate detection of localized decayed areas. In stress-wave technique in the transverse direction, stress-wave parameters measured were different according to the angles between wave propagation path and annual ring, due to the anisotropy of wood structure. Therefore, it is recommended to use percent reduction in stress-wave parameters instead of stress-wave parameters. This evaluation method using percent reduction in stress-wave parameters is ideal when it is impossible to observe annual ring orientation on the transverse surface of wood.

**Keywords** : Stress-wave technique in the transverse direction, incipient decay assessment, radiata pine, stress-wave parameter, *Tyromyces palustris*, ring orientation

### 1. 서 론

前報(金等, 1996b)에서 발표된 수축방향 응력과 방법을 구조물 현장에 적용하기 위해서는 다음과 같은 문제

점들을 해결하여야 할 것이다. 첫째는 수축방향 응력과 평가법에서는 응력파의 전달경로가 구조부재의 길이방향이 되기 때문에 실제 구조물 현장에서 부재의 양끝에 응력파 측정장치의 變換器(start와 stop accelerometer)

\*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

부착이 용이하지 못하다는 것이다. 두번째는 수축방향 응력과 평가에 의해서 부후가 탐지된다 하여도 정확한 부후 부위가 응력과 전달경로상의 어디인지를 찾을 수 없다는 것이다. 응력과 전달경로상의 작은 腐朽部の 존재 (자연 상태에서 초기 부후재의 일반적인 부후형태)는 實大材와 같이 음파의 傳達距離가 긴 경우에는 응력파의 속도에 큰 영향을 미치지 못한다는 Gerhards(1982)의 보고에 의하면, 구조부재에서 부분적이고 작은 초기부후 부위를 수축방향 응력과 방법에 의해 탐지될 수 있을까 하는 의구심이 생기게 된다. 따라서 본 연구에서는 상기한 두 가지 문제점을 해결할 수 있다고 믿어지는 응력과 전달경로가 수축방향과 직각인 橫斷方向 응력과 방법에 의한 라디에타 소나무의 초기 갈색부후 평가 가능성을 타진하였다.

그리고 횡단방향 응력과 방법을 角材 형태의 구조부재에 적용할 경우에는 각재의 어느 방향으로 응력파를 전달 시키느냐에 따라 응력과 전달경로와 部材 橫斷面上的의 年輪이 이루는 각이 상이하기 때문에, 본 연구에서는 시험편의 연륜배향 별로 횡단방향 응력과 변수들을 측정하였다. 이는 樹種에 따른 차이는 있지만 橫壓縮 試驗시 시험편의 연륜배향이 彈性係數를 영향한다는 Wood Handbook의 보고(USDA FPL, 1987)처럼 목재의 탄성계수에 의해 영향을 받는 응력과 전달속도도 당연히 연륜배향에 따라 상이하리라 사료되기 때문이다. 그리고 응력과 전달경로상의 부후부의 위치가 응력과 변수에 미치는 영향도 조사되었는데, 이는 Kim 諱(1991)이 超音波 응력파를 이용한 초기부후 진단에 관한 연구 결과 極初期 단계의 表面腐朽(부후부위가 transmitting transducer 또는 receiving transducer의 부착부와 인접)의 경우는 횡단방향 응력과 변수에 의해 정확한 평가가 불가능하였기 때문이다. 이는 응력파가 통과되는 전체 경로상에 健全부위가 많아서 상대적으로 표면에 국한된 부후부위가 응력과 전달시간에 미치는 효과가 상쇄되었기 때문이라고 사료되어졌는데, 이러한 현상이 본 연구를 통하여 밝혀질 것이다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 試驗片的 準備

횡단면의 치수가 5×20cm인 라디에타소나무 판재로부터 횡단면의 치수가 3×18cm이고 수축방향 치수가 3cm인 시험편을 채취하여, 치수가 18cm 변을 기준으로 한 연륜각이 0~20° (판목재), 35~55°, 그리고 70~90° (정목재)인 시험편들을 연륜각 범위 별로 각 60개씩 준비하였다. 참고로 연륜각은 Olson(1986)이 제안한 방법에 의

하여 측정하였다. 그리고 응력과 전달경로상의 부후부의 위치가 응력과 변수에 미치는 영향을 구명하기 위하여 연륜각 35~55°인 시험편 40개를 별도로 준비하였다.

연륜각 별로 채취된 총 180개 시험편들은 3×18cm의 넓은 면 중앙부에 추후 菌接種을 실시할 집중구멍(직경 4mm, 깊이 1.5cm)을 portable drill로 뚫었고, 별도로 채취된 연륜각 35~55°인 40개의 시험편들은 3×18cm의 넓은 면 끝 부분(목구면에서 2.5cm 떨어진 곳)에 나중에 균접종을 실시할 집중구멍을 위와 동일한 방식으로 뚫었다. 시험편들을 실내에서 氣乾시켜 시험편의 함수율이 12퍼센트 내외가 되도록 조정한 후 시험편들의 치수를 측정하고 40℃에서 3일, 60℃에서 2일, 80℃에서 1일, 그리고 나서 100℃에서 시험편의 중량감소가 없을 때까지 건조시킨 후에 시험편의 전건중량을 측정하였다. 그리고 나서 전건 시험편의 길이방향, 즉 횡단방향으로의 응력과 전달시간( $\mu s$ )을 sonic stress-wave timer (Metriguard Inc., Model 239A)를 사용하여 측정하였다. 측정된 응력과 전달시간과 시험편의 밀도(전건중량/기건체적)에 의해 각 시험편의 응력과 탄성계수를 산출하여, 각 그룹의 응력과 탄성계수의 분포가 비슷하게 되도록 연륜각 별로 시험편들을 1개의 대조구(비부후그룹)와 4개의 부후그룹에 12개씩 배치하였다. 대조구를 제외한 부후그룹의 모든 시험편 내로 물을 감압법에 의해 주입시켜 시험편의 함수율을 부후군의 생육에 적절한 섬유포화점 이상(약 70퍼센트)으로 상승시킨 후 개개의 시험편을 aluminum foil에 싸서 121℃ 온도와 1.05kg/cm<sup>2</sup> 압력 하에서 60분간 멸균처리를 실시하였다.

### 2.2 腐朽菌의 接種 및 培養

갈색부후균인 *Tyromyces palustris*를 MEA(2.5% malt extract + 1.5% agar) 평판배지에서 일정기간 동안 배양하다가 생육이 왕성한 최외각 균사체 몇 조각을 떼어내어 액상배지(2% malt extract + 0.5% yeast extract)로 옮겨 상온에서 2주간 진탕배양을 실시하였다. 진탕배양 후 균사체 덩어리를 분쇄하기 위하여 배양시 배양 flask내에 멸균처리된 유리조각 몇 개를 집어넣었다. 무균상태에서 멸균처리된 각 시험편의 균접종 구멍에 배양액을 일정량 micropipet을 사용하여 주입시켜 균접종을 실시하였다. 균접종이 완료된 시험편들은 멸균처리된 질석(함수율 = 약 50%)이 바닥에 깔린 아르릴 상자 내에 수평으로 위치시켜 27℃ 온도에서 배양하면서 연륜각 범위 별로 4개 부후그룹 시험편들의 평균 중량감소율이 3, 6, 9, 그리고 12 퍼센트 선이 될 때까지 강제부후를 시도하였다. 참고로 배양중에 정기적으로 無菌箱 내

에서 아크릴 상자를 열어서 滅菌水를 부후 중인 시험편 위에 소량 분무해주면서 상자내의 공기를 교체하여 부후균의 생육에 필요한 수분과 산소의 결핍문제를 해결하였음을 밝혀둔다. 부후 중인 시험편의 표면에 균사가 완전 활착된 시점과 균사의 생육상태를 고려하면서 상기한 중량감소율들에 도달했으리라 예상되는 시점에서 강제부후를 중지하였다.

### 2.3 應力波 實驗에 依한 非破壞試驗

원하는 중량감소율이 얻어졌으리라 예상되는 배양기간이 끝나면 시험편들을 배양용 아크릴 상자로부터 꺼내서 표면에 부착된 균사체를 완전하게 제거하고 실내에서 시험편의 함수율이 12퍼센트 내외가 될 때까지 기건시켰다. 그리고 나서 40℃에서 3일, 60℃에서 2일, 80℃에서 1일, 그리고 100℃에서 시험편의 중량감소가 없을 때까지 건조시킨 후에 시험편의 전건중량을 측정하였다. 이렇게 측정된 부후 시험편의 전건중량과 부후전 시험편의 전건중량을 사용하여 시험편의 중량감소율을 계산하였다. 그리고 나서 전건된 부후 시험편들의 횡단방향으로의 응력과 전달시간( $\mu s$ )을 sonic stress-wave timer를 사용하여 재측정하여 응력과 속도, 파동 임피던스, 그리고 응력과 탄성계수를 계산하였다.

### 2.4 破壞試驗

횡압축 시험은 ASTM D-143(ASTM, 1982)에 제시된 방식에 의하여 Instron 만능강도 시험기를 이용하여 실시하였는데, 이때 하중속도는 0.61mm/분을 사용하였다. 본 연구에 사용된 시편의 "slenderness ratio"가 buckling이 발생하는 1/16 보다 크기 때문에 별도 보호장치를 사용하지 않았다. 실제 횡압축 시험에서 오직 한개의 시험편에서만 buckling현상이 관찰되었는데 이 시편은 자료분석시 제외시켰음을 밝혀둔다.

### 2.5 資料分析

대조구와 강제 부후그룹들간에 응력과 변수들인 응력과 속도, 파동 임피던스, 응력과 탄성계수의 통계학적 유의성을 검정하여 응력과 변수에 의한 초기 부후진단 가능성 여부를 조사하였다. 그리고 응력과 변수들에 의한 부후도 및 부후재의 잔존강도 예측 가능성은 전자의 경우는 부후시편의 중량감소율과 응력과 변수간의 관계를, 그리고 후자의 경우는 부후시편의 횡압축강도와 응력과 변수간의 관계를 단순 또는 다중 회귀분석에 의해 조사하였다. 본 연구의 자료분석에 사용된 모든 통계처리는 SAS(Statistical Analysis System)통계 패키지에 의

하였다(SAS, 1988).

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 初期腐朽의 診斷

Table 1은 연륜각 별로 중량감소율을 달리하는 부후 그룹들과 대조구로부터 측정된 응력과 변수인 응력과 속도, 파동 임피던스, 응력과 탄성계수의 평균치와 Duncan의 多衆檢定法에 의한 이들 평균치간의 비교를 보여준다. 응력과 전달방향에 대한 연륜배향에 관계없이 4퍼센트 전후의 중량감소율을 보이는 부후그룹으로부터 측정된 모든 응력과 변수들은 대조구의 응력과 변수들과 비교할 때 統計學的으로 有意性( $\alpha < 0.05$ )이 인정되는 차이를 보여서, 횡단방향 응력과 방법으로 측정되는 응력과 변수들의 수치에 의해 초기부후를 진단할 수 있었다. 특히 부후재의 밀도를 측정할 필요없이 응력과 전달시간과 starter와 stop 변환기간의 거리만으로 간단히 산출되는 응력과 전달속도에 의해 초기부후를 탐지할 수 있다는 점에서 횡단방향 응력과 방법은 초기부후의 현상 부후진단법으로는 이상적이라 본다.

前報(金等, 1996a)의 결과에서 볼 수 있듯이, 갈색 부후균에 의한 부후는 중량감소율 1퍼센트 전후의 극초기 단계부터 역학적 성질의 심각한 손실을 야기시키기 때문에 이러한 극초기 부후의 진단도 횡단방향 응력과 방법에 의해 가능한지에 대한 의문을 제기할 수 있는데, 본 실험의 결과로부터는 이에 대한 답을 제시할 수가 없었다. 따라서 앞으로 횡단방향 응력과 방법에 의해 중량감소율이 1퍼센트 전후인 극초기 부후의 진단이 가능한지에 대한 연구가 반드시 필요하다고 본다.

측정된 응력과 전달속도는 응력과의 전달방향과 연륜이 이루는 각도에 따라 상이하였는데, Lee(1958)가 침엽수재인 미송(Douglas-fir)과 Sitka spruce의 接線-放射面(TR-plane)에서 연륜배향과 초음파 응력과 전달 방향이 이루는 각도에 따른 응력과 속도에 관한 연구에서 지적인 바와 같이, 본 실험에서도 응력과 속도는 응력과 전달방향이 방사방향(연륜각 = 70~90°)인 경우가 가장 빨랐고 전달방향이 접선방향(연륜각 = 0~20°)인 경우가 가장 느렸다. 이렇게 횡단방향 응력과 측정은 응력과의 전달방향과 연륜이 이루는 각도에 따라서 응력과 속도가 상이하기 때문에 횡단방향으로 측정된 응력과 변수들에 의해 부후 유무를 판정하기 위해서는 반드시 응력과 전달 방향에 대한 연륜배향, 즉 전달방향과 연륜이 이루는 각도를 파악해야 될 것이다. 木口面이 노출되어 있는 경우는 연륜배향을 조사하는 것이 문제가 되지 않지만 목구멍

Table 1. Effect of decay by *T. palustris* on sonic stress-wave parameters<sup>1</sup>.

Annual ring angle (degree)	Weight loss (%)	Wave velocity (m/sec)	Wave impedance (kg/m <sup>2</sup> · sec)	Stress wave elasticity (kg/cm <sup>2</sup> )
0~20	0.00	1,102.52 A	451,119 A	5,073.6 A
	4.17	997.20 B	388,601 B	3,956.6 B
	6.69	979.67 BC	377,970 B	3,780.2 BC
	9.29	969.54 C	361,917 C	3,584.4 C
	14.23	923.59 D	324,886 D	3,070.7 D
35~55	0.00	1,040.97 A	422,190 A	4,507.5 A
	4.34	950.38 B	367,991 B	3,572.5 B
	7.18	941.56 B	358,956 B	3,464.0 B
	10.29	901.74 BC	323,856 C	2,999.6 C
	13.55	864.86 C	301,475 C	2,680.2 C
70~90	0.00	1,639.54 A	618,399 A	10,358.2 A
	3.46	1,522.30 B	556,014 B	8,650.3 B
	5.47	1,448.72 B	527,995 C	8,034.8 B
	9.20	1,434.15 C	480,598 D	7,047.3 C
	13.96	1,355.12 D	448,933 E	6,231.8 D

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

이 노출되어 있지 않은 구조부재의 경우에는 연륜배향을 조사하기 위해서는 응력과 전달시간을 측정하기 위하여 stress wave timer의 변환기를 부착하였던 위치나 또는 그와 인접된 위치에서 生長錐를 사용하여 木片을 채취하여야 할 것이다. 그러나 측정시마다 목편을 채취하여야 하는 불편이 따르는 점과 또한 목편을 채취하게 되면 응력과 방법에 의한 부후평가가 진정한 비파괴 평가가 될 수 없다는 점에서 목구멍이 노출되어 있지 않은 부재를 대상으로 횡단방향 응력과 변수들의 수치에 의해 부후를 진단하는 것은 再考할 필요가 있다.

응력과 전달방향에 대한 연륜의 배향을 파악할 필요없이 횡단방향 응력과 방법을 현장 부후진단에 이용하기 위하여 부후의 진행에 따른 응력과 변수들의 감소율 사용이 가능한지를 조사하였다. 왜냐하면 응력과 변수는 앞서 언급한 대로 연륜배향에 따라 상이하나 응력과 변수의 감소율은 연륜배향과 관계가 없기 때문이다. Table 2에서 볼 수 있듯이 사용된 시험편의 연륜각에 관계없이 중량감소율이 4퍼센트에서 응력과 변수들의 감소율이 통계학적으로 유의성( $\alpha < 0.05$ )이 인정되므로, 횡단방향으로 측정된 응력과 변수들의 감소율에 의해 초기부후를 진단할 수가 있었다. 그리고 중량감소율 1퍼센트 전후의 극초기 부후를 응력과 변수들의 감소율에 의해 진단이 가능한지는 앞서 언급한바와 마찬가지로 본 실험의 결과를 가지고는 말할 수 없으나, 前報(金等, 1996b)에서 발표된 수축

방향 응력과 방법의 경우는 응력과 변수 자체에 의해서는 불가능하였지만 응력과 변수의 감소율에 의해서는 극초기 부후의 진단이 가능하였기 때문에 횡단방향 응력과 방법에서도 응력과 변수의 감소율에 의해 극초기 부후의 진단이 가능하리라 사료된다.

본 실험의 결과로부터 초기부후 진단을 위한 횡단방향 응력과 방법의 현장적용을 다음과 같이 간단히 요약할 수가 있다. 목구조물 내에서 부후균에 의한 피해가 예상되는 구조부재를 대상으로 현장시설 직후에 부재의 응력과 변수를 측정하고 그 후로는 일정 시간 간격으로 초기 응력과 변수 측정위치와 동일한 위치에서 응력과 변수를 재 측정하면서 계산된 응력과 변수의 감소율이 부후의 존재가 최초로 탐지되는 변수의 감소율보다 높을 경우에는 진단 대상부재가 현재 부후균에 의해 가해를 받고 있다고 말할 수가 있을 것이다. 그러나 이러한 방법을 현장에 적용시키기 위해서는 응력과 전달속도를 영향하는 목재인자들인 측정 당시의 목재 함수율, 목재 내부의 응력과 전달경로 상에 존재하는 웅이나 할렐등이 응력과 속도에 미치는 영향을 定量하여 이를 반드시 고려해주어야 할 것이다.

응력과 전달로 상의 부후부의 위치(응력과 전달로 상에서 start accelerometer 부착부와 인접한 부위와 stop accelerometer 부착부와 인접한 부위)가 응력과 전달속도와 부후에 따른 속도 감소율에 미치는 영향을 조

Table 2. Effect of decay by *T. palustrison* on changes in stress-wave parameters<sup>1</sup>.

Annual ring angle (degree)	Weight loss (%)	Average percent reduction in		
		Wave velocity	Wave impedance	Stress wave elasticity
0~20	0.00	0.00 A	0.00 A	0.00 A
	4.17	9.43 B	13.20 B	21.36 B
	6.69	10.96 BC	16.91 C	25.97 B
	9.29	12.36 C	20.51 D	30.31 C
	14.23	16.14 D	28.06 E	39.62 D
35~55	0.00	0.00 A	0.00 A	0.00 A
	4.34	7.44 B	11.46 B	18.05 B
	7.18	10.32 C	16.75 C	25.31 C
	10.29	14.03 D	22.87 D	33.64 D
	13.55	16.45 E	27.79 E	39.63 E
70~90	0.00	0.00 A	0.00 A	0.00 A
	3.46	7.25 B	10.45 B	16.92 B
	5.47	9.64 C	14.59 C	22.74 C
	9.20	13.54 D	21.48 D	32.05 D
	13.96	17.47 E	28.99 E	41.37 E

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

Table 3. Effect of the location of decay pocket relative to wave propagation path on the detection of decay by stress-wave technique<sup>1</sup>.

Weight loss (%)	Wave velocity (m/sec)		Reduction in wave velocity (%)	
	Start	Stop	Start	Stop
0.00	1,040.97 A <sup>2</sup>	1,040.97 A	0.00 A	0.00 A
3.78	960.71 B	946.45 B	8.05 AB	9.49 B
6.07	954.01 B	944.10 B	9.02 B	9.89 C
14.07	910.82 C	925.00 B	16.09 B	14.80 C
20.95	821.92 D	836.14 C	18.47 C	17.05 D

\*1 The location of decay pocket of START is near start accelerometer, and that of STOP is near stop accelerometer.

\*2 Values followed by the same letter are not significantly different ( $\alpha < 0.05$ ) using Duncan's multiple range test.

사한 결과를 Table 3에 보여준다. 중량감소율이 3.78퍼센트인 부후그룹의 응력과 속도가 대조구의 속도와 비교할 때 통계학적으로 유의성( $\alpha < 0.05$ )이 인정되는 차이가 있어서 응력파가 전파되는 쪽에 부후부가 있어도 응력과 방법에 의해 그 부후부의 존재가 탐지되었다(부후에 따른 응력과 속도의 감소율의 경우도 동일). 비록 본 실험에 사용된 시험편의 부후형태(3×18cm의 넓은 면 끝부분, 즉 목구멍에서 2.5cm 떨어진 위치에 균접중 실시)가 표면부후는 아니지만 부후부위가 start acelerome-

ter 부착부와 인접되어 있기 때문에 본 실험의 결과로부터는 초기 표면부후도 응력과 방법에 의해 탐지할 수 있으리라 사료된다.

### 3.2 腐朽度の豫測

응력과 변수 자체 및 응력과 변수의 감소율과 중량감소율간의 단순 직선회귀 결과, Table 4에서 보여주는 것처럼 횡단방향 응력과 방법에 의해 부후재의 부후도를 예측할 수 있는 것으로 나타났다. 응력과 변수인 응력과 속

Table 4. Result of regression analysis for prediction of percent weight loss of decayed wood by *T. palustris* using stress wave parameters<sup>1</sup>.

Annual ring angle (degree)	Predictor	Regression equation	Correlation coefficient	Standard error of estimate
0~20	V	%WL = 84.45 - 0.07860(V)	0.75	2.68
	Z	%WL = 50.54 - 0.00011(Z)	0.86	1.94
	E	%WL = 37.23 - 0.00799(E)	0.85	2.14
	VL	%WL = -0.6299 + 0.751(%VL)	0.88	2.34
	ZL	%WL = -0.9248 + 0.491(%ZL)	0.96	1.42
	EL	%WL = -1.0000 + 0.331(%EL)	0.93	1.86
35~55	V	%WL = 42.09 - 0.03616(V)	0.66	2.81
	Z	%WL = 34.70 - 0.00007(Z)	0.80	2.22
	E	%WL = 24.52 - 0.00488(E)	0.76	2.42
	VL	%WL = -0.0278 + 0.734(%VL)	0.91	2.05
	ZL	%WL = -0.3115 + 0.470(%ZL)	0.95	1.51
	EL	%WL = -0.4077 + 0.323(%EL)	0.94	1.70
70~90	V	%WL = 55.77 - 0.03310(V)	0.70	2.90
	Z	%WL = 39.21 - 0.00006(Z)	0.80	2.42
	E	%WL = 27.87 - 0.00268(E)	0.78	2.55
	VL	%WL = -0.4221 + 0.699(%VL)	0.91	2.01
	ZL	%WL = -0.6785 + 0.465(%ZL)	0.96	1.25
	EL	%WL = -0.7924 + 0.314(%EL)	0.94	1.61
All degrees	VL	%WL = -0.3436 + 0.729(%VL)	0.90	2.14
	ZL	%WL = -0.6403 + 0.476(%ZL)	0.96	1.40
	EL	%WL = -0.7371 + 0.323(%EL)	0.94	1.72

<sup>1</sup> V, Z, E, VL, ZL, EL, and WL represents wave velocity, wave impedance, stress wave elasticity, percent reduction in wave velocity, percent reduction in wave impedance, percent reduction in stress wave elasticity, and percent weight loss, respectively.

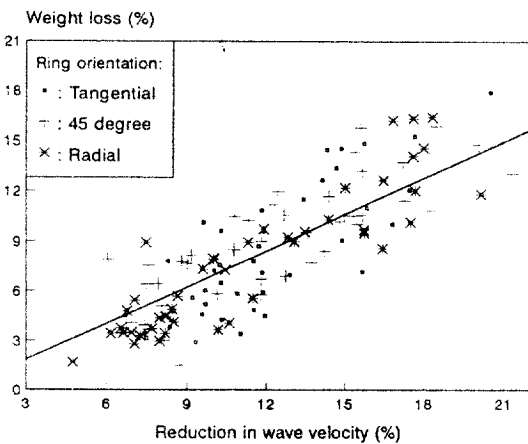


Fig. 1. Regression of percent weight loss on percent reduction in wave velocity.

도, 파동 임피던스, 그리고 응력과 탄성계수 자체와 중량 감소율간의 상관도 양호하였으나 응력과 변수들의 감소율과 중량감소율간의 상관은 더욱 양호하게 나타나서 후자에 의한 부후도 예측이 바람직하였다. 특히 현장에서 용이하게 측정할 수 있는 응력과 속도의 감소율과 중량감소율간의 상관이 Fig. 1에서 볼 수 있는 것처럼 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. 응력과 변수 자체 및 응력과 변수의 감소율과 중량감소율간의 상관을 개선할 목적으로 시도된 獨立變數(응력과 변수 및 부후에 따른 이들의 감소율) 및 從屬變數(중량감소율)의 諸般 가능한 변환(transformation)에 의한 직선회귀, 독립변수들의 2차식 회귀, 그리고 모든 독립변수들을 이용한 다중회귀 결과, 단순 직선회귀에 비해 어

Table 5. Changes in compression strength perpendicular to grain of radiata pine sapwood decayed by *Tyromyces palustris* after various incubation periods<sup>1</sup>.

Annual ring angle (degree)	Weight loss (%)	Compression strength(kg/cm <sup>2</sup> )	
		Mean	STD
0~20	0.00	50.24 A	1.98
	4.17	41.94 (-16.5) <sup>2</sup> B	2.85
	6.69	38.47 (-23.4) BC	3.39
	9.29	35.99 (-28.4) C	2.08
	14.23	29.32 (-41.6) D	3.85
35~55	0.00	41.38A	3.03
	4.34	35.34 (-14.6) B	3.90
	7.18	31.09 (-24.9) C	2.65
	10.29	28.57 (-31.0) CD	2.40
	13.55	26.21 (-36.7) D	2.67
70~90	0.00	54.97 A	3.00
	3.46	49.45 (-10.0) B	3.14
	5.47	43.34 (-21.2) C	4.91
	9.20	40.97 (-25.5) C	3.46
	13.96	29.56 (-46.2) D	4.97

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

<sup>2</sup> Values in parenthesis are percent difference from controls.

는 정도 상관계수의 증가는 관찰할 수 있었으나, 양자간의 상관 관계를 크게 개선하지는 못하였다.

### 3.3 腐朽材의 殘存強度 豫測

Table 5는 연륜각 별로 부후도, 즉 중량감소율을 달리하는 시험편의 횡압축 강도를 보여주는데, 부후에 의

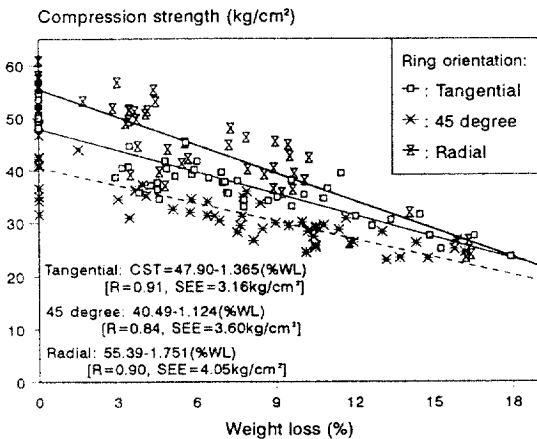


Fig. 2. Regression of compression strength perpendicular to grain on percent weight loss.

한 횡압축 강도의 감소는 前報 (金等, 1996a)의 횡강도 감소에 비하여 크지 않음을 알 수 있었는데, 이러한 사실은 Wilcox(1978)도 지적한 바가 있다. 그리고 횡강도 경우와는 달리 부후의 진행에 따라 횡압축 강도는 직선적으로 감소하였는데, 중량감소율에 비하여 압축강도의 감소율이 약 3~4배 정도였다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 중량감소율과 횡압축 강도간의 관계가 아주 양호하게 나타나서 초기 부후재의 횡압축 강도를 중량감소율로부터 성공적으로 예측할 수 있다고 말할 수 있다.

부후재의 잔존강도를 응력과 변수에 의해 예측할 수 있는가 여부를 판정하기 위하여 실시된 응력과 변수 및 이들의 감소율과 횡압축 강도간의 단순 직선회귀를 실시한 결과, Table 6에서 볼 수 있듯이 양자간의 상관이 양호하여 횡단방향 응력과 방법에 의하여 부후재의 잔존강도를 예측할 수 있는 것으로 나타났다. 특히 현장에서 용이하게 측정할 수 있는 응력과 속도와 횡압축 강도간의 상관이 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 양호하여 부후균에 의한 피해가 의심되는 구조부재를 대상으로 측정된 응력과 속도로부터 부후재의 잔존강도를 예측할 수가 있을 것이다. 응력과 변수 자체 및 응력과 변수의 감소율과 횡압축 강도간의 상관을 개선할 목적으로 시도된 독립변수(응력과 변수 및 부후에 따른 이들의 감소율) 및 종속변수(횡압축

Table 6. Result of regression analysis for prediction of compression strength perpendicular to grain of decayed wood using stress wave parameters<sup>1</sup>.

Annual ring angle (degree)	Predictor	Regression equation	Correlation coefficient	Standard error of estimate
0~20	V	CST = -61.82+0.1011(V)	0.90	2.68
	Z	CST = -19.45+0.0002(Z)	0.94	1.94
	E	CST = 1.827+0.0094(E)	0.93	2.14
	VL	CST = 49.71-1.1340(%VL)	0.89	2.34
	ZL	CST = 49.65-0.7070(%ZL)	0.93	1.42
	EL	%WL = 50.02-0.4884(%EL)	0.92	1.86
35~55	V	CST = -28.62+0.0650(V)	0.83	2.81
	Z	CST = -7.667+0.0001(Z)	0.90	2.22
	E	CST = 7.542+0.0072(E)	0.89	2.42
	VL	CST = 40.65-0.8456(%VL)	0.79	2.05
	ZL	CST = 41.22-0.5525(%ZL)	0.84	1.51
	EL	CST = 41.31-0.3784(%EL)	0.83	1.70
70~90	V	CST = -56.60+0.0679(V)	0.81	2.90
	Z	CST = -21.31+0.0001(Z)	0.89	2.42
	E	CST = 3.807+0.0050(E)	0.86	2.55
	VL	CST = 56.19 -1.2312(%VL)	0.82	2.01
	ZL	CST = 56.59-0.8150(%ZL)	0.87	1.25
	EL	CST = 56.76-0.5484(%EL)	0.84	1.61
All degrees	VL	CST = -0.3436+0.729(%VL)	0.90	2.14
	ZL	CST = -0.6403+0.476(%ZL)	0.96	1.40
	EL	CST = -0.7371+0.323(%EL)	0.94	1.72

<sup>1</sup>I Same as Table 4.

강도)의 제반 가능한 변환에 의한 직선회귀, 독립변수들의 2차식 회귀, 그리고 모든 독립변수들을 이용한 다중회귀 결과, 단순 직선회귀에 비해 어느 정도 상관계수의 증가는 관찰할 수 있었으나, 양자간의 상관 관계를 크게 개선하지는 못하였다.

본 실험의 결과들로부터 제반 조건들이 조절·통제된 조건 하에서는 횡단방향 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, 횡단방향 응력과 방법을 구조물 현장에서 사용하기 위해서는 앞으로 야외에서 부후중인 실대재에 대한 실험을 실시하여 본 실험의 결과를 입증하여야 할 것이다.

#### 4. 결 론

횡단방향 응력과 방법에 의해 초기 갈색부후의 평가가

가능한지를 타진하기 위해 수행된 본 연구의 결과로부터 다음과 같은 결론들을 내릴 수 있다.

1. 응력과 속도는 응력파의 전달방향과 연륜이 이루는 각도에 따라 상이하여 응력과 전달방향이 방사방향(연륜각 = 70~90°)인 경우가 가장 빨랐고 반면에 전달방향이 접선방향(연륜각 = 0~20°)인 경우에 가장 느렸다.
2. 응력과 변수들의 변화에 의해 초기부후를 진단할 수가 있었으나, 응력과 변수가 응력파의 전달방향과 연륜이 이루는 각도에 따라 상이하기 때문에 응력과 전달방향과 연륜이 이루는 각도를 알 수 있는 경우에만 사용이 가능하였다.
3. 부후의 진행에 따른 응력과 변수들의 감소율에 의해서도 초기부후를 진단할 수가 있었는데, 이러한 응력과 변수들의 감소율은 응력과 전달경로 상의 연륜배향에 영향을 받지 않기 때문에 현장 적용을 위해서는 이상적이라 할 수 있다.



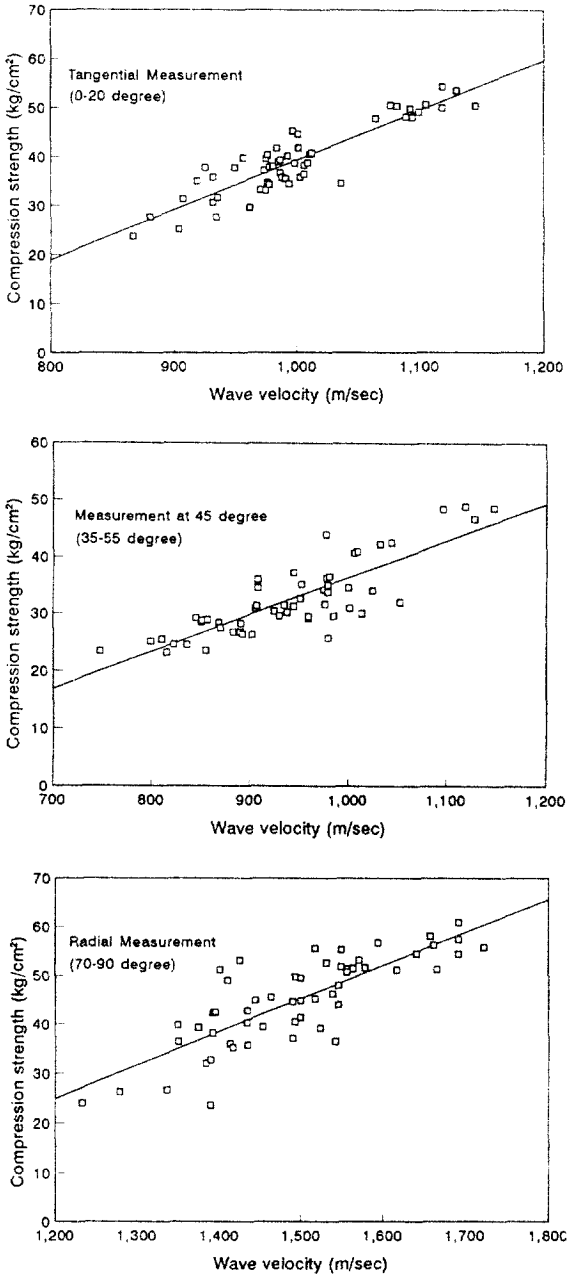


Fig. 3. Regression of compression strength perpendicular to grain on wave velocity.

- 부후에 의한 횡압축 강도의 감소는 휨강도의 감소에 비하여 그 정도가 높지 않았으며, 휨강도와는 달리 부후의 진행에 따라 횡압축 강도는 직선적으로 감소하였다.

5. 응력과 변수들과 응력과 변수들의 감소율에 의한 부후재의 부후도와 잔존강도의 예측은 양자간의 상관관계가 우수하여서, 횡단방향 응력과 방법에 의하여 부후재의 부후도와 잔존강도를 성공적으로 예측할 수가 있었다.
6. 부후재의 횡압축 강도는 중량감소율과 아주 우수한 상관관을 보여서, 중량감소율에 의한 부후재의 횡압축 강도를 예측할 수가 있었다.
7. 제반 조건들이 조절·통제된 조건 하에서는 횡단방향 응력과 방법에 의한 초기 갈색부후의 평가가 가능하다는 본 실험의 결과는 매우 고무적이며, 앞으로 횡단방향 응력과 방법을 현장에서 부후가 의심되는 구조부재에 적용하기 위해서는 자연결점을 포함하는 실재 부후재에 대한 실험을 통해 본 실험의 결과를 입증하여야 할 것이다.

### 참고 문헌

1. American Society for Testing and Materials. 1982. Standard methods for testing small clear specimens of timber. ASTM D-43
2. Gerhards, C.C. 1982. Longitudinal stress-waves for lumber stress grading: factors affecting applications - state of the art. *Forest Prod. J.* 32(2) : 20~25
3. Kim, G. H., H. M. Barnes, and D. E. Lyon. 1991. Decay detection using Pilodyn and ultrasonic techniques. *Wood Protection* 1(2) : 61~68
4. Lee, I. D. G. 1958. A non-destructive method for measuring the elastic anisotropy of wood using ultrasonic pulse technique. *J. Inst. Wood Sci.* 1 : 43~57
5. Olson, J. R. 1986. Measurement of growth ring orientation in lumber. *Forest Prod. J.* 36(3) : 23~24
6. SAS Institute. 1988. Statistical Analysis System (SAS), User's Manual. Cary, NC.
7. U. S. Forest Products Laboratory. 1987. Wood Handbook: Wood as an Engineering Material. USDA Forest Service. Agric. Handbook No. 72
8. Wilcox, W. W. 1978. Review of literature on the effects of early stages of decay on wood

- strength. *Wood & Fiber Sci.* 9(4) : 252~257
9. 金奎赫·池宇根·羅鐘範. 1996a. 初期褐色腐朽에 따른 라디에타소나무의 力學的 性質 減少. 목재공학 24(1) : 81~86
10. 金奎赫·池宇根·羅鐘範. 1996b. 樹軸方向 應力波 方法에 依한 라디에타소나무의 初期腐朽 評價. 목재공학 24(2) : 1~6