

## 종압축하중하에서 춘재와 추재의 역학적 거동\*1

姜春遠\*2 · 堤壽一\*3 · 張祥植\*4

### Mechanical Behaviour of Earlywood and Latewood under Longitudinal Compression Load\*1

Chun Won Kang\*2 · Tsutsumi Juichi\*3 · Sang Sik Jang\*4

#### 요 약

춘재부와 추재부로 분리한 일본삼나무재 시험편을 이용하여 목재의 목리방향에 평행하는 압축응력에 대한 목재의 역학적 거동을 관찰하였다.

그 결과, 춘재와 추재간에는 역학적 거동의 차이가 있었는데, 춘재는 하나의 연륜내에서 거의 동일한 세포벽을 나타내며 응력의 증가에 대하여 변형이 직선적으로 증가하였다. 그러나 한 연륜내에서 수에서 수피방향으로 세포벽이 점차 증가하는 추재부에서는 응력의 증가에 따라 변형량이 더 커져서 곡선적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 하중속도가 변화할 때 종적탄성율의 하중속도 의존성은 춘재부와 추재부에서 비슷하게 나타났다.

추재부의 종압축강도와 종압축탄성율은 춘재부의 약 4배의 수치를 나타내었다.

#### ABSTRACT

This study was carried out to clarify the mechanical behaviour of the earlywood and the latewood to the compressive load applied parallel to the grain. The results from the analysis of Japanese cedar wood (*Cryptomeria japonica*) were used to introduce a concept on stress-strain behaviour of the earlywood and the latewood.

There was a significant differences in the mechanical behaviour of the earlywood and the latewood. In the earlywood, the rate of cell wall upon annual ring was almost similar and the strain increased linearly

\* 1 접수 2000년 8월 6일, 채택 2001년 5월 22일.

\* 2 益山大學 林産工業科, Department of Forest products, Iksan National College, Iksan 570-752, Korea.

\* 3 九州大學 農學部, College of Agriculture, Kyushu University, Fukuoka 812-81, Japan.

\* 4 忠南大學校農科大學, College of Agriculture, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea.

with the stress increased. However, the rate of cell wall upon annual ring varied in the latewood and the strain of that increased curve-linearly with the stress increased. The longitudinal compression modulus of elasticity (MOE) variation by loading speed on latewood specimens and earlywood specimens shows no significant difference.

The modulus of rupture (MOR) and MOE of latewood were about 4 times higher than those of earlywood.

**Keywords:** earlywood, latewood, mechanical behaviour

## 1. 서 론

춘재와 추재의 명료한 차이를 함께 가진 목재가 외력을 받을 때, 서로를 구속 또는 보완하면서 동일한 개체로 거동하는데, 춘재와 추재의 성질이 다르기 때문에 동일한 개체에서도 이들의 역학적 거동이 상이하다. 이에 따라 목재의 역학적 성질은 일년륜 내의 춘·추재의 비율, 수종간에 존재하는 춘·추재간의 역학적 성질의 차이 등에 의해 다르게 되어, 탄성율이나 최대강도 등이 춘·추재의 비율에 크게 영향 받게 되므로 춘·추재의 역학적 거동을 정확하게 파악해야 할 필요가 있다.

한편, 춘·추재간의 역학적성질의 차이에 대한 기존의 연구는 춘·추재가 서로를 구속하고 있는 목재 블록상태에서의 고찰이어서 춘·추재의 역학적 거동을 정확하게 비교·분석하기 어렵다.

본 연구는 춘재와 추재가 적층되어 구성되어 있는 목재에서 춘재와 추재의 성질을 정확히 파악하기 위하여, 춘재부와 추재부를 분리하여 몇 개의 춘재와 추재를 따로 접착하여 각각의 시험편을 제작하였다. 이 시험편으로 비례한계 이하의 하중에서 하중속도를 변화시키며 하중을 가하여 춘재부와 추재부의 종압축탄성율의 하중속도 의존성을 파악하고, 파괴까지의 종압축하중을 가하여 춘·추재의 비례한도, 파괴계수 등의 결과를 검토하여 춘재와 추재의 성질을 명확하게 파악하고자 하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 공시재료

#### 2.1.1 시험편

춘·추재간의 구별이 비교적 명료한 일본삼나무재 (*Cryptomeria japonica*)를 공시하여 Fig. 1과 같은 방법으로 춘재부와 추재부의 압축시험편을 제작하였다. 즉 블록상태의 목재에서 춘·추재의 경계부를 절단하여 춘재와 추재소재로 분리한 후, 비교적 불규칙적인 형상의 각각의 소재를 접착이 용이하도록 각재로 가공하여 이들 소재들을 각각 에폭시수지접착제로 접착하였다. 이렇게 얻어진 춘재부와 추재부목편을 10mm×10mm×30mm(T×R×L)의 형상으로 가공하여 기건상태와 포수상태로 공시하였다.

### 2.2 시험방법

#### 2.2.1 종압축탄성율의 하중속도의존성 측정

대조재를 사용한 파괴시험에서 얻어지는 하중-변형선도에서 비례한계하중을 파악한 후, 비례한계보다 작은 파괴하중의 약 30% 이하의 하중범위내에서 1.0 kgf/min부터 100kgf/min까지 6단계로 하중속도를 변화시키며 종압축하중을 가하여 춘재부와 추재부의 종압축탄성율의 하중속도 의존성을 검토하였다.

춘재부와 추재부시험편에 최대하중능력 10tonf의 Olsen type 강도시험기를 사용하여 하중속도를 변화시키며 압축하중을 가하고, 각주형 시험편의 4면에

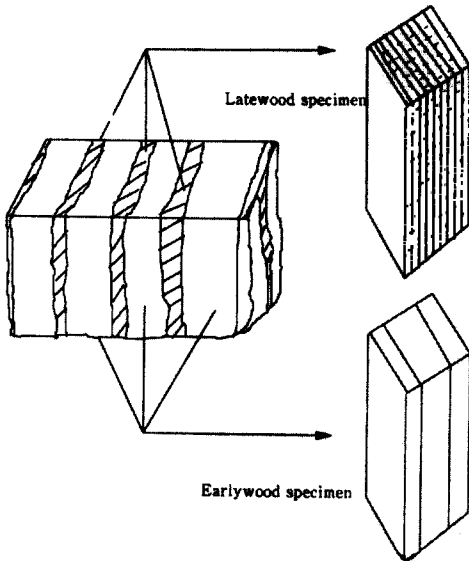


Fig. 1. Schematic diagram of sample specimens.

strain gauge(길이: 5mm, 폭 3mm)를 부착하여 평균 변형량을 측정하였다. 이때 포수재의 경우에는 방수형 strain gauge를 사용하였으며, digital strain meter(UCAM-10A)로 압축변형량을 측정하여 각각의 하중속도에서의 종압축탄성율을 구하였다.

### 2.2.2 압축파괴시험

비례한계 내에서의 반복시험으로 종압축시험을 행한 후 파괴까지의 최대하중을 가하여, 종압축비례한도와 최대하중을 구하였다.

### 2.2.3 세포벽 파괴 관찰

압축파괴에 도달한 시험편의 파괴면에서 전자현미경 관찰용의 소폭편을 절취하여 주사전자현미경(Scanning electron micrography : JSM-35-LaB6형)으로 파괴면의 세포벽 변화를 관찰하였다.

### 2.2.4 세포벽율의 관찰

무결점 소 시험편에서 microtome으로 횡단면 박절편을 절취하여 세포벽질과 공극을 구분하여 처리하는

화상해석장치와 광학현미경을 사용하여 세포벽율을 측정하였다. 이때 한 개의 연륜에서 춘재부와 추재부를 10등분하여 세포벽율을 측정함으로써 한연륜내에서의 세포벽율의 변화를 관찰하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 종압축하중에 대한 춘재부와 추재부의 역학적 성질

종압축 하중에 대한 춘재부와 추재부 및 통상의 목재에서 얻어진 결과를 Table 1에 나타내었다.

기건재의 경우 추재부의 압축강도는 평균 813 kgf/cm<sup>2</sup>이었고 춘재부는 평균 197kgf/cm<sup>2</sup>으로 춘재부가 추재부의 약 1/4의 수치를 나타내었다. 또한 압축비례한계응력도는 각각 평균 490kgf/cm<sup>2</sup>, 175kgf/cm<sup>2</sup>이었다. 포수재의 경우에는 추재부의 압축강도는 평균 314kgf/cm<sup>2</sup>이었고 춘재부는 평균 79kgf/cm<sup>2</sup>으로, 춘재부가 추재부의 약 1/4의 수치를 나타내며 포수재가 기건재의 1/2 이하의 값을 나타내었다.

비례한계응력도는 포수재에서 춘재부와 추재부가 74kgf/cm<sup>2</sup>, 207kgf/cm<sup>2</sup>로, 춘재부의 최대응력에 대한 비례한계가 더 큰 수치를 나타내었고, 이러한 경향은 기건재보다 포수재에서 더 현저하였다. 즉, 최대하중에 대한 탄성영역과 소성영역의 비율을 파악할 수 있는 최대하중에 대한 비례한계응력의 비율( $\sigma_p/MOR$ )은, 춘재부가 약 0.9이고 추재부에서 약 0.6으로 나타나 춘재부가 더 직선적임을 알 수 있었다. 비중을 고려한 비최대응력  $\sigma_p/SG$ 는 춘재부와 추재부에서 비슷한 수치를 나타내었다.

압축탄성율의 수치는 기건재에서 춘재부와 추재부가 각각  $77 \times 10^3$ kgf/cm<sup>2</sup>,  $306 \times 10^3$ kgf/cm<sup>2</sup>이고, 포수재에서  $51 \times 10^3$ kgf/cm<sup>2</sup>,  $181 \times 10^3$ kgf/cm<sup>2</sup>이어서 강도성능의 상대적 비교에서는 압축강도와 비슷한 경향을 나타내었다.

한편 古川(1975), 北原 등(1987)은 외력을 받은 목재세포벽의 관찰에서, 추재부보다 춘재부에서 세포벽 파괴가 많은 것을 보고하였으며, 세포벽 파괴가 시작

**Table 1.** Mechanical behaviour of wood, earlywood and latewood under longitudinal compression stress.

	MOR (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_p$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	MOE (10 <sup>3</sup> × kgf/cm <sup>2</sup> )	MOR/SG	$\sigma_p$ /SG	$\sigma_p$ /MOR	SG
Wood <sup>a</sup>	457	235	180	1045	538	0.51	0.44
Earlywood <sup>a</sup>	197	175	77	743	665	0.89	0.27
Latewood <sup>a</sup>	813	490	306	1061	640	0.60	0.77
Earlywood <sup>w</sup>	79	74	51	297	277	0.93	0.27*
Latewood <sup>w</sup>	314	207	181	440	195	0.44	0.71*

MOR : Modulus of rupture,  $\sigma_p$  : Stress at proportional limit, MOE : Modulus of elasticity, SG : Specific gravity,  
<sup>a</sup> : air-dried wood, <sup>w</sup> : water-saturated wood.

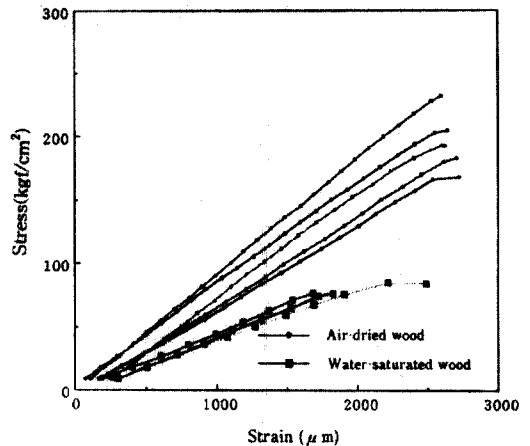
되는 하중레벨에 대해서는 파괴하중을 1로 가정할 때, Kisser 등(1952)은 0.52~0.54라고 보고하였고, 北原 등(1987)은 일본삼나무재의 경우 약 0.3이라고 하였으며, Hudson(1961)은 Douglas fir, Noble fir 및 sitka spruce의 3수종의 경우 거의 파괴직전까지 세포벽 손상을 관찰할 수 없다고 보고하였다.

이와 같이, 연구자와 수중에 따라 세포벽 손상이 시작되는 하중레벨이 커다란 변이를 나타내는 이유는, 세포벽 파괴가 시작되는 하중은 춘·추재간의 역학적 성질의 차이, 춘·추재간의 일연륜 내의 변이의 수종간 차이 등에 의해 크게 영향 받는 것으로 판단되었다.

### 3.2 춘재부와 추재부의 응력-변형선도

Fig. 2부터 Fig. 5에는 춘재부, 목재소재 그리고 추재부의 압축파괴시험에서 얻어진 응력-변형 선도를 나타내었다.

춘재부는 추재부보다 훨씬 낮은 파괴응력을 나타내는 동시에, 파괴에 이르기 직전까지 변형이 직선적인 경향을 나타내었다. 또한 추재부와 목재시험편의 경우는 파괴하중의 약 60% 부근에서부터 변형이 곡선적으로 증가하였으며, 이와 같은 경향은 기건재와 포수재에서 유사한 경향을 나타내었다. 이와 같은 현상은 3.4의 세포벽율의 관찰결과로 추론이 가능한데, 춘재부의 응력증가에 따른 변형이 직선적으로 증가하는 것은 일연륜 내의 세포벽율이 거의 동일하기 때문



**Fig. 2.** Stress-strain diagram of Japanese cedar earlywood specimens.

에 거의 파괴 직전까지 직선적 변형을 하고, 추재부는 세포벽율이 일연륜 안에서 집중하기 때문에 세포벽율이 낮은 부위에서 파괴가 시작되고 응력의 증가에 따라 세포벽율이 높은 세포로 파괴가 순차적으로 증가하여 응력증가에 따른 변형이 곡선적으로 증가하는 경향을 나타내는 것으로 추론된다. 한편, 춘재와 추재가 외력에 대하여 서로 다른 역학적거동을 나타내지만 파괴시의 변형량은 그다지 큰 차이를 나타내지 않았다.

응력에 대한 춘재부와 추재부의 거동과 관련해서

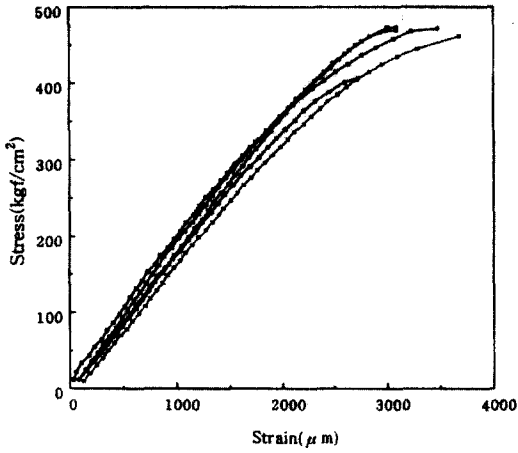


Fig. 3. Stress-strain diagram of Japanese cedar wood specimens.

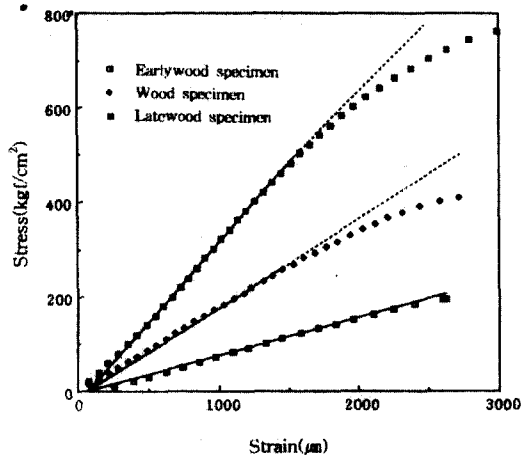


Fig. 5. Stress-strain diagram of Japanese cedar earlywood, wood and latewood specimens.

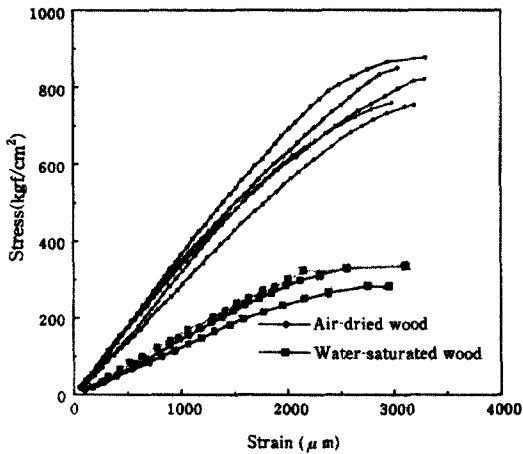


Fig. 4. Stress-strain diagram of Japanese cedar latewood specimens.

Bach(1970)는 Douglas fir재의 춘재부와 추재부의 응력완화 실험결과를 이용하여 춘재부는 일단계 응력완화 파괴(one step stress relaxation rupture)가 일어나고, 추재부는 몇 단계에 걸쳐 파괴가 일어나는 다단계 응력완화 파괴(multi step stress relaxation rupture)가 일어나는 것을 보고하고 있다.

그러나 北原(1987)은 통상목재상태에서 춘재부와 추재부에 별도의 strain gauge로 변형을 측정하여,

춘재부는 소성변형을 일으키고 추재부는 탄성적이며 목재가 비례한계를 초과한 하중에 대하여 변형의 증가가 곡선적인 이유는 춘재에서 기인하고 있다고 추론하였는데, 이는 춘재와 추재가 서로를 구속하고 있는 상태에서의 거동으로서 본래의 춘재와 추재의 거동과는 다르게 보고되었음을 알 수 있다. 본 연구에서는 Fig. 2부터 Fig. 5에서 알 수 있듯이 춘재부가 파괴에 이르기 직전까지 변형이 직선적인 경향을 나타내고 추재에서 곡선적인 경향을 나타내어 목재의 비례한계이상의 하중에 대한 변형의 곡선적 증가의 이유가 추재에 더욱 기인한 것임을 추측할 수 있다.

### 3.3 춘재부와 추재부의 하중속도의존성

기건상태의 춘재부와 추재부시험편에 비례한계내에서 하중속도가 다른 압축하중을 가하여 각각의 종압축탄성율을 측정된 결과는 Fig. 6과 같다. 그림에서 알 수 있듯이, 하중속도가 1.0kgf/min에서 100 kgf/min로 변화할 때 추재부시험편은  $1769 \times 10^2 \times \text{kgf/cm}^2$ 에서  $1784 \times 10^2 \times \text{kgf/cm}^2$ 로 증가하고 춘재부 시험편은  $504 \times 10^2 \times \text{kgf/cm}^2$ 에서  $511 \times 10^2 \times \text{kgf/cm}^2$ 로 증가하였으며 하중속도의 대수치에 직선적으

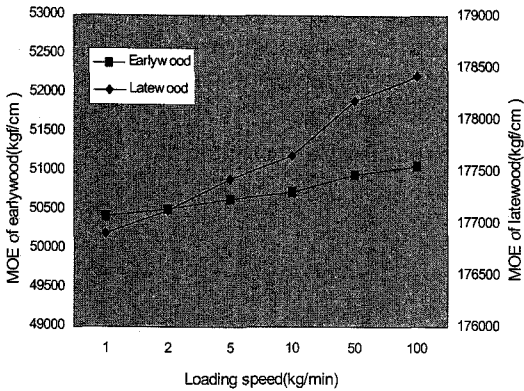


Fig. 6. Relationship between MOE and loading speed.

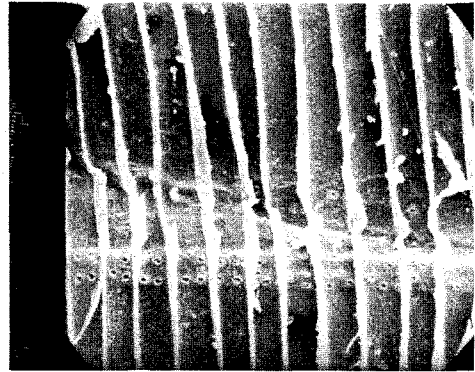


Fig. 7. Typical microscopic failures of radial-longitudinal surfaces of Japanese cedar earlywood by ultimate load ( $\times 200$ ).

로 비례하는 경향을 나타내었다. 한편 姜 등(1995)은 삼나무재의 탄성적성질이 하중속도에 비례하여 증가하는 것을 보고하였다. 하중속도증가에 의한 종압축 탄성율의 변화비율에서는 춘재부와 추재부시험편간에 큰 변이를 나타내지 않았다.

### 3.4 종압축파괴 하중을 받은 춘재부와 추재부의 세포벽 손상

춘재부와 추재부의 세포벽 손상을 관찰하기 위하여 파괴까지의 종압축응력을 받은 춘재부 시험편과 추재부 시험편의 파괴면을 주사전자현미경으로 관찰한 결과, 춘재부의 세포벽파괴형태는 Fig. 7과 같이 벽공부근에서 가도관의 섬유방향을 횡단하는 주름(microscopic compression failure)이 나타난 반면, 추재부에서는 Fig. 8처럼 하중을 받고 가도관이 굴곡하거나, 인접한 가도관과 가도관 사이에 부분적인 구열이( $\rightarrow$ ) 발생하였다. 이는 3.5절에서 언급하는 한 연륜내에서의 세포벽율의 변이에 기인하는 것으로 판단된다. 즉, 춘재부는 세포벽율이 거의 일정한 반면, 추재부는 세포벽율이 연속적으로 변하는 경향을 나타내었는데 이에 의하여 춘재부는 응력에 대한 거동이 직선적이고, 추재는 하중의 증가에 대하여 세포벽율의 차이에 따라 추재가도관의 파괴시점이 인접하는 가도관의 파괴시점과 달라져 하중의 증가에 따라 변

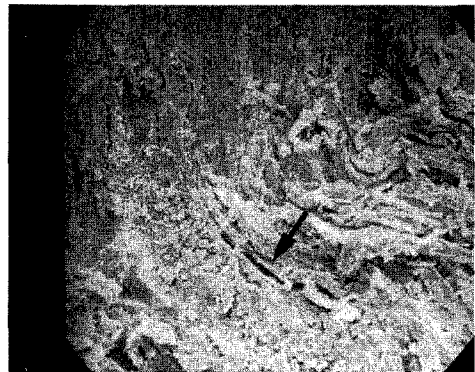


Fig. 8. Typical microscopic failures of radial-longitudinal surfaces of Japanese cedar latewood by ultimate load ( $\times 200$ ).

형이 더욱 증가하며 경우에 따라 구열이 발생하는 것으로 판단된다.

이와 관련하여 Bach(1970)는 인장응력으로 파괴한 Douglas fir재의 춘재부와 추재부의 파괴면을 관찰하여, 춘재부는 파괴면이 단순인장파괴이고, 추재부는 인장파괴와 목재섬유간에 종전단파괴가 발생하여 파괴양상이 복잡함을 보고하였는데, 본 연구에서의 세포벽 파괴양상과 유사하였다.

### 3.5 세포벽율과 역학적 성질의 관계

춘재부와 추재부의 세포벽율을 관찰한 결과, 춘재부 세포는 세포내강이 크고 세포벽이 얇아서 세포벽율이 평균 24%(±2.10)이었고, 추재부는 세포내강이 작고 세포벽이 두꺼워서 세포벽율이 평균 64%(±11.46)이었다.

Fig. 9는 일련륜내에서의 세포벽율 추이를 10등분하여 나타내고 있는데, 춘재부는 세포벽율이 하나의 연륜내에서 거의 일정한 반면, 추재부는 40%에서 88%까지 점증하는 경향을 나타내었다. 이러한 목재의 조직구조의 차이에서 춘재부와 추재부의 응력-변형선도의 차이, 그리고 세포벽 손상의 차이에 대한 추론이 가능하였다.

즉, 춘재부의 응력-변형선도가 직선적인 것은 일련륜내의 세포벽율이 추재부보다 작지만 거의 동일하기 때문에 직선적 변형을 하여 세포벽손상이 단순하며, 추재부는 세포벽율이 낮은 부위에서 파괴가 시작되고 응력의 증가에 따라 세포벽율이 높은 세포로 파괴가 순차적으로 증가하여 변형이 곡선적으로 증가하고 가도관과 가도관 사이에 구열이 발생하는 것으로 사료되었다.

## 4. 결 론

춘재와 추재가 적층되어 구성되어 있는 목재에서 춘재와 추재의 성질을 정확히 파악하기 위하여, 일본 삼나무재를 춘재부와 추재부로 분리하여 각각의 시험편을 제작하여 목리방향에 평행하는 압축응력을 가하고 역학적거동을 관찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 일본삼나무재의 춘재부와 추재부 사이에는 역학적 성질의 차이가 있었다. 춘재부는 추재부의 약 1/4의 최대강도와 종압축탄성율을 나타내었다.
2. 춘재부는 응력의 증가에 대하여 파괴 직전까지 직선적으로 변형을 나타낸 반면, 추재부는 탄성영역이 작고 소성영역이 커서 응력의 증가에 대하여 변형율이 증가하는 곡선적인 변형거동을 나타내

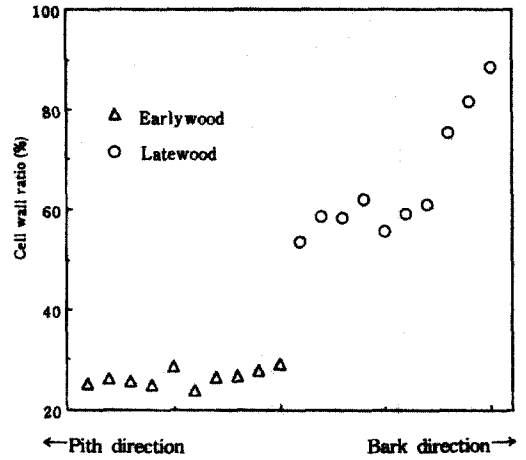


Fig. 9. Variation of cell wall ratio on a annual ring.

었다.

3. 종압축탄성율의 하중속도 의존성은 추재부시험편과 춘재부시험편의 변화비율의 차이가 미미하였다.
4. 압축파괴응력을 받은 춘재부 시험편은 파괴면이 단순압축파괴이었으나 추재부 시험편은 압축파괴와 전단파괴가 발생하였다.
5. 일련륜내에서 춘재부는 균일한 세포벽율을 나타내었으나, 추재부는 시점에서 종점까지 세포벽율이 점증하는 추이를 나타내어, 이것이 응력에 대한 변형거동과 파괴형태에 영향 하는 것으로 판단되었다.

## 참 고 문 헌

1. Bach, L. 1970. Rupture characteristics of earlywood and latewood under stress relaxation. *Wood Sci*, 3(1): 31-33.
2. 古川 傾夫, 佐白浩, 原田浩. 1975. 針葉樹材單一仮道管の引張破壊過程. *材料*, 24(264): 855-861.
3. 姜春遠, 堤壽一, 小田一幸. 1995. 曲げ強度性態と細胞壁變化への荷重速さの影響. *學藝雜誌*, 49(3): 139-142.
4. 姜春遠. 1995. 木材の力學的拳動と細胞壁變化への荷重

- 速さ依存性に關する研究. 九州大學博士學位論文.
5. 北原龍士, 堤壽一. 1987. A concept on stress-strain behaviour of wood. 九大農演報, 57: 175-182.
  6. Hudson, W. M. 1961. The effect of precompression on the static and impact bending strength of wood. *Wood*. 26: 18-20.
  7. Kisser, J. and A. staining. 1952. Makroskopische und makroskopische strukturwronderungen bei der biegebeanspruchung von holz. *Holz*, R.W. 10(11): 415-420.