

# 국내산 주요 침엽수 3종간의 수간 내 목재셀룰로오스의 미세구조 변이\*<sup>1</sup>

은 동 진\*<sup>2</sup> · 권 성 민\*<sup>2</sup> · 김 남 훈\*<sup>2†</sup>

## Variation of Fine Structure of Wood Cellulose within Stems of 3 Commercial Softwood Species Grown in Korea\*<sup>1</sup>

Dong-Jin Eun\*<sup>2</sup> · Sung-Min Kwon\*<sup>2</sup> · Nam-Hun Kim\*<sup>2†</sup>

### 요 약

국내에서 성장한 주요 침엽수 3종(소나무, 잣나무, 리기다소나무)의 수간 내 셀룰로오스 상대결정화도와 결정폭에 대한 수평방향 및 수직방향 변이를 X선 회절법에 의해 조사하였다. 각 수종의 상대결정화도 평균값은 소나무 60.6%, 잣나무 61.7%, 리기다소나무 49.4%로 리기다소나무가 가장 낮게 나타났다. 공시 수종의 상대결정화도는 약 10~15연륜까지 증가하다가 그 후 거의 일정한 값을 보여 주었고 만재부의 상대결정화도가 조재부의 상대결정화도보다 다소 높게 나타나는 경향이 있었다. 소나무 상대결정화도는 수관부보다 기부에서 다소 낮게 나타났으나 잣나무, 리기다소나무는 수고에 따른 차이를 거의 나타내지 않았다. 각 수종의 셀룰로오스 결정폭은 3수종 모두 2.8~3 nm 정도로 거의 차이가 없었고 수평방향 및 수직방향, 조만재 간에도 차이가 없었다. 따라서 상대결정화도와 결정폭 중 상대결정화도는 국내산 주요 침엽수재의 미성숙재와 성숙재를 구분하는 재질 지표의 하나로 이용이 가능할 것으로 생각되었다.

### ABSTRACT

Radial and vertical variations of relative crystallinity and crystallite width of cellulose within stems of three softwoods (*Pinus densiflora* S. et Z., *P. koraiensis* S. et Z., *P. rigida* Mill.) grown

\*<sup>1</sup> 접수 2007년 7월 11일, 채택 2007년 9월 17일

\*<sup>2</sup> 강원대학교 산림환경과학대학. College of Forest and Environmental Sciences, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea

† 주저자(corresponding author) : 김남훈(e-mail: kimnh@kangwon.ac.kr)

in Korea were examined by an X-ray diffraction method. The mean of relative crystallinity was 61.7% in *P. koraiensis*, 60.6% in *P. densiflora* and 49.4% in *P. rigida*. The degree of crystallinity in earlywood and latewood increased with the age from pith to about 10~15 years, and then remained almost constant value. The relative crystallinity of latewood was slightly higher than that of earlywood. The relative crystallinity in *P. densiflora* was a little lower at the base of stem, but no significant difference by height was shown in *P. koraiensis* and *P. rigida*. The crystallite widths in the stems were 2.8 to 3.0 nm, but were not significantly different in earlywood and latewood by height. In conclusion, the relative crystallinity appeared to be a useful index for separating juvenile wood from adult wood in the softwoods of *P. densiflora*, *P. koraiensis*, and *P. rigida* grown in Korea.

**Keywords:** X-ray diffraction, relative crystallinity, crystallite width, cellulose, *Pinus densiflora*, *Pinus koraiensis*, *Pinus rigida*.

## 1. 서 론

목재의 조직이나 구성 요소의 크기는 수로부터의 연륜 수나 지상고 등 수간 내의 부위에 따라 다르다 (George, 1991). 따라서 목재의 구조와 재질은 동일 개체 내에서도 각 부위에 따라 변이성을 보이게 된다. 이러한 변화는 측분열조직인 유관속형성층 세포로부터의 분열, 확대, 성숙 목화 과정을 거치는 세포 형성 과정에 차이가 있기 때문으로 생각되고 있다. 성숙한 수목의 수간 내에서는 방사방향으로 미성숙재, 이행재 및 성숙재의 3부분으로 구분된다 (Panshin and de Zeeuw, 1980). 이 가운데 성숙재와 미성숙재는 물리적, 화학적, 해부학적 특성에 차이가 있어 재질에 크게 영향을 주는 것으로 보고되고 있다. 즉, 미성숙재는 성숙재보다 연륜폭의 변화 (Zhu *et al.*, 1998)와 마이크로피브릴경각 (Fang *et al.*, 2006; Lichtenegger *et al.*, 1999; Wahsusen *et al.*, 2005; 이와 김 2005)이 크고, 만재율과 비중이 낮으며 가도관 길이가 짧고 (Alteyrac *et al.*, 2006; Bao *et al.*, 2001; Fujiwara and Yang 2000; Zhu *et al.*, 2000; 이와 김 2005; 박 등 2007), 상대 결정화도는 낮은 것 (Andersson *et al.*, 2003; Wellwood *et al.* 1974)으로 보고되고 있다. 또한, 결정의 폭은 *Valonia*, Cotton, Ramie, 목재 등 재료에 따라 차이가 있는 것으로 알려져 있다 (Fengel and Wegner, 1984;

Harada and Goto, 1982; Preston., 1974; Lewin and Goldstein 1991). 이러한 셀룰로오스 결정의 변이성은 셀룰로오스를 기반으로 하는 셀룰로오스계 생물 재료의 중요한 특성으로 생각되고 있다. 목재도 셀룰로오스계 재료의 하나로서 목재의 재질 특성은 셀룰로오스 결정의 영향을 받는다. 특히, 상대 결정화도는 목재 세포벽 중의 셀룰로오스의 결정성 비율을 의미하는 것으로서 밀도, 영계수, 경도, 치수안정성, 함수율, 연신율, 유연성 등에 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다 (Lee, 1961; Parresol *et al.*, 1998).

이와 같이 상대결정화도는 목재의 특성에 크게 영향을 미치며 성숙재와 미성숙재를 구분하는 중요한 지표임에도 불구하고 이에 대한 국내에서의 연구는 많지 않은 실정이다. 따라서 본 연구에서는 주요 국내 침엽수재의 재질 평가를 위한 지표를 마련하기 위하여 수간 내에서의 목재 미세구조 변이성을 수평 방향 및 수직방향에 대하여 조사하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 공시재료

강원대학교 구내림에서 비교적 생장이 양호한 소나무, 잣나무, 리기다소나무 각 1본을 채취하여 공

Table 1. Sample trees

Species	Tree age	Height (m)	DBH* (cm)	Locality
<i>Pinus densiflora</i> S. et Z.	47	135	47	Chuncheon, Korea
<i>Pinus koraiensis</i> S. et Z.	35	135	35	
<i>Pinus rigida</i> Mill.	34	115	24	

\*Diameter at breast height

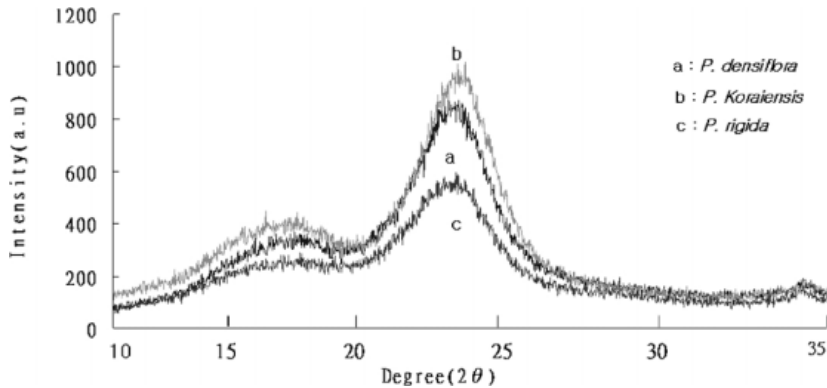


Fig. 1. Representative X-ray diffraction patterns of earlywood in the sample trees.

시재료로 사용하였다(Table 1).

## 2.2. 실험방법

### 2.2.1. 시료 제작

각 수종별로 0.2, 1.2, 3.2, 5.2, 7.2, 9.2, 11.2 m 높이에서 원판을 채취하였다. X선 회절 시료는 각 원판의 수에서 수피방향으로 각 연륜마다 조재부와 만재부를 구분하여 두께(R방향) 약 1 mm, 길이(L방향) 20 mm, 폭(T방향) 10 mm의 크기로 각각 2개씩 제작하였으며 제작된 시료는 데시게이터에 보관하였다.

### 2.2.2. 결정화도 및 셀룰로오스 결정폭 측정

X선 회절 실험은 RIGAKU社의 DMAX 2100V를 사용하였다. X선은 Ni filter로 단색화한 CuKα선을 사용하였으며, 조건은 40 kV, 40 mA였다. 상대결정화도와 셀룰로오스 결정폭은 Segal법(Segal *et al.*, 1959)과 Scherrer식(Scherrer, 1918)으로 계산하였

다. 각 수종의 평균치 통계 분석은 각 수종의 조재부, 만재부, 미성숙재, 성숙재, 각 수고별 전체 결과를 이용하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 상대결정화도

Table 2는 각 수종의 성숙재와 미성숙재, 조재부와 만재부의 상대결정화도를 나타내고 있다. 3수종의 조재부와 만재부의 상대결정화도 평균값은 소나무 60.7%, 잣나무 61.6%, 리기다소나무 49.4%로서 리기다소나무가 가장 낮게 나타났다. 성숙재와 미성숙재를 구분하여 상대결정화도 측정한 결과 소나무 미성숙재 58.4%, 성숙재 60.3%, 잣나무 미성숙재 57.3%, 성숙재 64.9%, 리기다소나무 미성숙재 46.5%, 성숙재 53.1%로서 모든 수종에서 성숙재가 미성숙재보다 다소 높게 나타났다. Wellwood *et al.* (1974)은 미송의 상대결정화도 연구에서 미성숙재

Table 2. Mean of relative crystallinity in sample trees

		Relative crystallinity (%)								
		<i>P. densiflora</i>		t-test	<i>P. koraiensis</i>		t-test	<i>P. rigida</i>		t-test
JW vs AW	58.4 ± 3.7	60.3 ± 3.6	-7.10*	57.3 ± 4.1	64.9 ± 2.2	-5.51*	46.5 ± 4.9	53.1 ± 2.4	-5.87*	
EW vs LW	58.3 ± 2.4	63.0 ± 2.7	15.4*	61.0 ± 4.3	62.5 ± 3.6	-0.74	49.5 ± 1.6	49.4 ± 2.6	-1.44	
Total means	60.7 ± 2.5			61.6 ± 1.6			49.4 ± 2.1			

JW: Juvenile wood, AW: Adult wood, EW: Earlywood, LW: Latewood

\*P < 0.0005, \*\*P < 0.005, \*\*\*P < 0.05

47.6%, 성숙재 61.7%로 보고하였다. 또한, Wang and Chiu (1990)는 일본 삼나무의 상대결정화도가 본 실험의 결과와 비슷하게 미성숙재 56.7~58.8%, 성숙재 61.5~64.6%인 것으로 보고하였다. 또한 각 수종별 조재부와 만재부의 상대결정화도는 소나무 조재 58.3%, 만재 63.0%, 잣나무 조재 61.0%, 만재 62.5%, 리기다소나무 조재 49.5%, 만재 49.4%로서 리기다소나무를 제외한 두 수종에서 만재가 조재보다 다소 높은 경향이 나타났는데 이는 이전의 연구와 비슷한 결과를 보여 주었다(Lee, 1961; Newman and Hemmingson, 1990; Parresol *et al.*, 1998; Tanaka *et al.*, 1981; Wellwood *et al.*, 1974).

각 수종의 성숙재와 미성숙재, 조재부와 만재부간의 셀룰로오스 결정화도의 유의성을 검토한 결과 잣나무 조재부와 만재부, 리기다소나무 조재부와 만재부를 제외한 모든 부위에서 유의성이 인정되었다.

### 3.1.1. 수평방향 변이

Fig. 2는 각 수종의 수에서 수피방향으로의 연륜 증가에 따른 조재부와 만재부의 상대결정화도를 측정된 결과이다. 상대결정화도는 3수종 모두 수 부위에서 낮고 약 10~15 연륜까지 증가하다가 그 후 거의 일정해지는 경향을 나타냈다. 삼나무 수간 내에서의 상대결정화도에 관한 연구에서 組父江 등(1970)은 수에서 수피방향을 향해 10~15 연륜까지 증가하다가 거의 일정해진다고 보고하였다. 또한 Andersson *et al.* (2003)은 노르웨이 가문비나무의 경우 4~10 연륜까지 증가하다가 일정해졌다고 보고하고 있다. 김과 이(1998)는 편백나무 각 연륜의 상대결정화도를 측정된 결과 수심부에 가까운 5 연

륜과 10 연륜의 상대결정화도는 20 연륜 이상 부위보다 10% 정도 낮은 결과 값을 나타낸다고 보고하였다. 이와 유사한 연구 결과는 비교적 많은 편이다(Lee, 1961; Jahan and Mun, 2005; Wang and Chiu, 1990). 이러한 수간 내 변이성은 성숙재와 미성숙재를 나타내는 중요한 지표로 생각된다. 성숙재와 미성숙재를 구분하는 인자로서 가도관 길이와 마이크로피브릴 경각 등에 관한 연구가 많이 수행되어져 왔다. 즉, 가도관 길이 변이에 관한 연구에서 이와 김(2005)은 일본잎갈나무의 가도관 길이는 15~20 연륜까지 증가하다가 거의 일정해진다고 보고하였다. 박 등(2007)은 일본잎갈나무의 가도관 길이 변이는 10~15 연륜까지 증가하다가 이후 일정해지며, 마이크로피브릴 경각은 21 연륜까지 점차 감소하며 이후 안정된다고 보고하였다.

### 3.1.2. 수직방향 변이

Table 3은 수고별 조재부와 만재부의 상대결정화도를 측정된 결과이다. 소나무의 경우 0.2와 11.2 m에서 다소 낮게 나타났으며 잣나무, 리기다소나무는 수고에 따른 차이를 거의 보이지 않았다. 수직방향 변이성에 관하여 組父江 등(1970)은 수고에 따른 상대결정화도 차이는 거의 없다고 보고하였다. 또한, Wang and Chiu (1990)는 일본 삼나무에 있어 기부와 초단부(梢端部)의 상대결정화도가 다른 높이에 비해 상대적으로 낮게 나타난다고 하였는데 이는 본 연구의 소나무 결과와 대략 일치한다. 수직방향의 재질 판단을 위한 연륜폭, 밀도 및 만재율 등(Banna, 1965; Larson, 1962a, b; Zhu *et al.*, 1998; 組父江 등, 1970)에 관한 연구는 다수 보고되고 있으

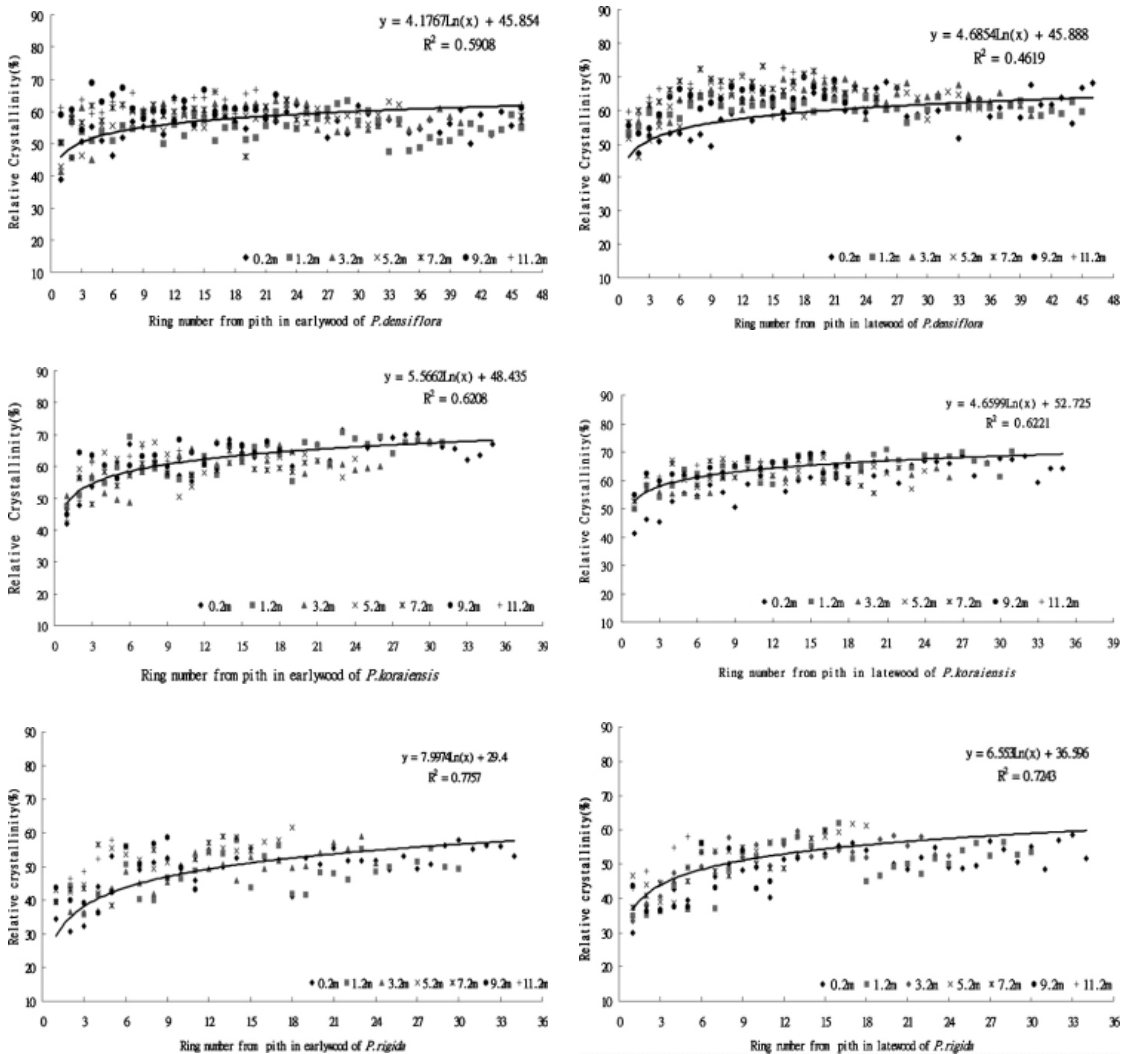


Fig. 2. Variation patterns of relative crystallinity with age in the sample trees.

나 결정성의 변이에 관한 연구는 찾아보기 어렵다. 이러한 이유는 본 연구의 결과처럼 수고방향에서의 차이를 규명하는 것이 다른 인자들보다 비교적 어렵기 때문인 것으로 생각된다.

Table 4는 각 수종의 흉고높이를 기준으로 수고에 따른 조재부와 만재부 상대결정화도의 상관관계를 나타내고 있다. 소나무 조재부 11.2 m, 만재부 11.2 m, 잣나무 만재부 1.2, 3.2 m, 리기다소나무 만재부 1.2 m에서 부분적으로 유의성이 인정되었다. 따라

서 각 수종별 수고에 따른 상대결정화도 상관관계는 수종의 조재부와 만재부에 따라 다른 경향을 나타냈다.

### 3.2. 결정폭

Table 5는 각 수종의 성숙재와 미성숙재, 조재부와 만재부의 결정폭을 나타낸 결과이다. 3수종의 조재부와 만재부의 결정폭 평균값은 소나무 2.87 nm,

Table 3. Mean of relative crystallinity at each height of sample trees

	Relative crystallinity (%)											
	<i>P. densiflora</i>				<i>P. koraiensis</i>				<i>P. rigida</i>			
	Earlywood		Latewood		Earlywood		Latewood		Earlywood		Latewood	
0.2 m	55.9	± 4.7	59.7	± 5.3	62.8	± 6.5	60.1	± 6.7	50.2	± 6.5	49.4	± 6.3
1.2 m	54.9	± 3.8	60.7	± 2.4	62.4	± 6.0	64.6	± 4.9	47.6	± 5.6	49.8	± 7.4
3.2 m	57.9	± 4.7	63.4	± 3.9	59.2	± 4.7	61.6	± 4.8	48.9	± 6.1	51.5	± 6.2
5.2 m	56.8	± 4.7	62.3	± 5.3	60.6	± 4.8	62.6	± 3.9	51.7	± 5.5	52.6	± 6.6
7.2 m	58.8	± 3.7	66.4	± 3.9	58.2	± 4.6	61.9	± 4.0	50.6	± 6.6	48.9	± 6.0
9.2 m	61.6	± 3.6	63.0	± 4.5	62.7	± 5.5	63.9	± 3.3	46.9	± 7.4	44.2	± 7.1
11.2 m	62.6	± 2.7	66.0	± 4.2	61.2	± 6.6	63.4	± 3.7	48.9	± 5.9	49.5	± 5.8
Means	58.3 ± 2.6		63.0 ± 2.4		61.0 ± 1.7		62.5 ± 1.5		49.5 ± 1.6		49.4 ± 2.6	

Table 4. T-test of relative crystallinity at each height

		0.2 m	3.2 m	5.2 m	7.2 m	9.2 m	11.2 m
<i>P. densiflora</i> (1.2 m)	Earlywood	1.26	-2.96	-1.29	-4.80	-6.18	-8.27*
	Latewood	-1.72	-4.43	-2.06	-7.62	-2.37	-6.34*
<i>P. koraiensis</i> (1.2 m)	Earlywood	0.33	1.71	0.26	1.45	-2.50	-2.06
	Latewood	-5.06*	3.34***	1.00	0.72	-2.25	-1.63
<i>P. rigida</i> (1.2 m)	Earlywood	-1.15	-2.02	-2.41	-0.71	0.12	-5.04
	Latewood	1.57	0.98	-3.71***	-3.26	-1.67	-2.80

\*P < 0.0005, \*\*P < 0.005, \*\*\*P < 0.05

Table 5. Means of crystallite width in sample trees

	Crystallite width (nm)									
	<i>P. densiflora</i>			<i>P. koraiensis</i>			<i>P. rigida</i>			
	t-test		t-test		t-test				t-test	
JW vs AW	288 ± 0.05	285 ± 0.05	0.27	3.01 ± 0.02	3.02 ± 0.09	-2.29	286 ± 0.07	285 ± 0.05	0.77	
EW vs LW	286 ± 0.08	288 ± 0.08	0.39	3.02 ± 0.02	3.00 ± 0.06	-2.11	287 ± 0.04	287 ± 0.02	-2.19	
Total means	287 ± 0.08			3.01 ± 0.04			287 ± 0.02			

JW: Juvenile wood, AW: Adult wood, EW: Earlywood, LW: Latewood

\*P < 0.0005, \*\*P < 0.005, \*\*\*P < 0.05

잣나무 3.01 nm, 리기다소나무 2.87 nm로 각 수종간의 차이는 인정되지 않았다. 또한 성숙재와 미성숙재를 구분하여 결정폭을 측정된 결과 소나무 미성숙재 2.88 nm, 성숙재 2.85 nm, 잣나무 미성숙재 3.01 nm, 성숙재 3.02 nm, 리기다소나무 미성숙재 2.86 nm, 성숙재 2.85 nm로서 성숙재와 미성숙재간에는 큰 차이가 나타나지 않았다. 이는 국내산 목재의 셀룰로오스 결정폭 연구에서 침엽수 3.11 nm,

활엽수 3.22 nm라고 보고한 이와 김(1992)의 결과와 유사하였다. 결정의 폭은 *Valonia* 14.3 nm, Cotton 2.5 nm, Ramie 2.5 nm, 목재 2~3 nm 등 재료에 따라 차이가 나는 것으로 보고(Fengel and Wegner, 1984; Harada and Goto, 1982; Preston, 1974; Lewin and Goldstein, 1991)되고 있다.

각 수종의 성숙재와 미성숙재, 조재부와 만재부간의 셀룰로오스 결정폭 유의성을 검토한 결과 모든

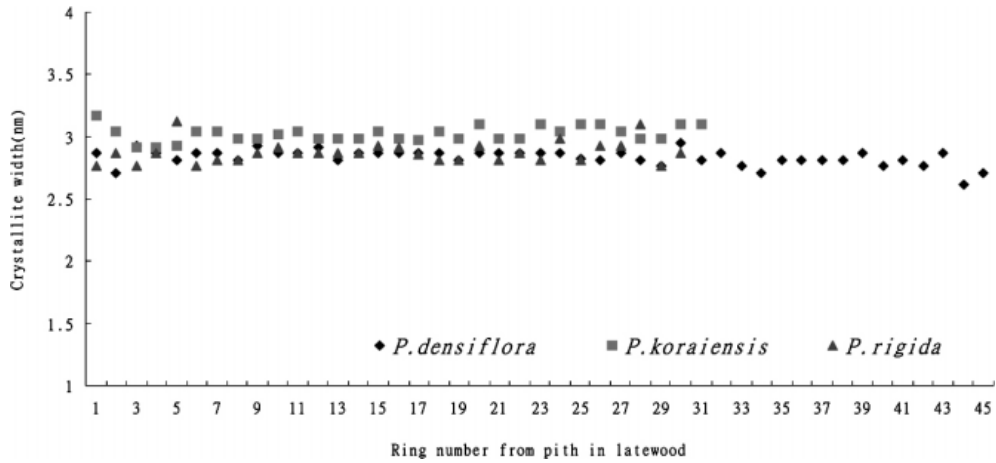


Fig. 3. Variation of crystallite width with age from pith in latewood of the sample trees at breast height.

Table 6. Means of crystallite width at each height of sample trees

	Crystallite width means (nm)								
	<i>P. densiflora</i>			<i>P. koraiensis</i>			<i>P. rigida</i>		
	Earlywood	Latewood	t-test	Earlywood	Latewood	t-test	Earlywood	Latewood	t-test
0.2 m	289 ± 0.09	288 ± 0.10	0.39	298 ± 0.12	3.02 ± 0.09	-1.57	282 ± 0.08	290 ± 0.08	-3.95
1.2 m	276 ± 0.13	283 ± 0.06	-2.60	3.05 ± 0.06	3.01 ± 0.06	2.85	280 ± 0.09	286 ± 0.08	-2.99
3.2 m	288 ± 0.07	289 ± 0.08	-0.75	3.00 ± 0.07	2.96 ± 0.06	2.48	289 ± 0.09	286 ± 0.07	0.97
5.2 m	277 ± 0.08	284 ± 0.09	-3.50	3.01 ± 0.06	2.98 ± 0.05	1.91	287 ± 0.08	290 ± 0.07	-0.97
7.2 m	282 ± 0.06	284 ± 0.07	-0.51	3.01 ± 0.05	2.98 ± 0.03	2.09	294 ± 0.13	288 ± 0.14	1.79
9.2 m	297 ± 0.07	286 ± 0.08	5.27	3.05 ± 0.07	3.03 ± 0.06	1.46	286 ± 0.14	290 ± 0.14	-1.22
11.2 m	296 ± 0.06	3.00 ± 0.09	-1.60	3.03 ± 0.03	3.01 ± 0.04	1.56	289 ± 0.15	293 ± 0.16	2.44
Means	286 ± 0.08	288 ± 0.05		3.02 ± 0.02	3.00 ± 0.06		287 ± 0.04	287 ± 0.02	

\*P < 0.0005, \*\*P < 0.005, \*\*\*P < 0.05

부분에서 유의성이 인정되지 않았다.

### 3.2.1. 수평방향 변이

Fig. 3은 각 수종별 수에서 수피방향으로의 연륜 증가에 따른 셀룰로오스 결정폭 측정 결과를 나타내고 있다. 3수종 모두 2.8~3 nm로서 연륜 증가에 따른 차이는 거의 없었다. Andersson *et al.* (2003)은 가문비나무의 셀룰로오스 결정폭이 약 3.2 nm로 연륜 증가에 따른 변화는 없다고 보고하였다. 또한 김과 이(1998)는 편백나무의 수간 내에서 셀룰로오스

결정폭변이는 3~3.5 nm로 차이가 거의 없다고 보고하였다. 이처럼 셀룰로오스 결정폭은 수간 내에서 변이성을 거의 보이지 않기 때문에 성숙재와 미성숙재를 구분할 수 있는 지표로 삼기 어려울 것으로 생각되었다.

### 3.2.2. 수직방향 변이

Table 6은 각 수종별 셀룰로오스 결정폭의 수고별 평균값을 나타낸 것이다. 소나무 조재 2.86 nm, 만재 2.88 nm, 잣나무 조재 3.02 nm, 만재 3.00 nm,

리기다소나무 조재 2.87 nm, 만재 2.87 nm로 나타났다. 이는 소나무의 셀룰로오스 결정폭이 수간 전 부위에 걸쳐 약 3.2 nm로 일정하다고 한 Tanaka *et al.* (1981)의 보고와 유사하였다.

각 수종별 수고에 따른 조재부와 만재부의 셀룰로오스 결정폭 유의성을 검토한 결과 모든 부분에서 유의성이 인정되지 않았다.

## 4. 결 론

국내산 주요 침엽수재의 수간 내 미세구조 변화를 조사한 결과는 다음과 같다.

1) 상대결정화도는 수 부근에서 낮고 수피 쪽을 향해 약 11~15 연륜까지 증가하다가, 그후 거의 일정해지는 경향을 나타내어 미성숙재와 성숙재에 따라 비교적 명확한 차이를 보였다.

2) 소나무와 잣나무 만재부의 상대결정화도 값이 조재부의 것보다 다소 큰 값을 나타냈다.

3) 상대결정화도는 잣나무가 가장 크고 소나무, 리기다소나무 순으로 작았다.

4) 수고에 따른 상대결정화도는 소나무 기부의 조재부와 만재부 그리고 초단부(梢端部)에서 다소 낮게 나타났으나, 잣나무와 리기다소나무는 수고에 따른 차이가 거의 없었다.

5) 결정폭은 수종, 조·만재, 수고에 따른 차이를 거의 보이지 않았다.

결론적으로 상대결정화도는 소나무, 잣나무, 리기다소나무의 미성숙재와 성숙재를 구분할 수 있는 하나의 지표로 이용 가능할 것으로 생각되었다.

## 사 사

본 연구는 강원대학교 산림과학연구소의 지원에 의해 수행되었음.

## 참 고 문 헌

1. Alteyrac, J., A. Cloutier, and S. Y. Zhang. 2006. Characterization of juvenile wood to transition age in black spruce (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P) at different stand densities and sampling heights. *Wood Science and Technology*. 40: 124~138.
2. Andersson, S., R. Serimaa, T. Paakkari, P. Saranpää, and E. Pesonen. 2003. Crystallinity of wood and the size of cellulose crystallites in Norway spruce (*Picea abies*). *Journal of Wood Science*. 49: 531~537.
3. Banna, M. W. 1965. The length, tangential diameter and length/width ratio conifer tracheids. *Can. Bot.* 43: 967~984.
4. Bao, F. C., Z. H. Jiang, X. M. Jiang, X. X. Lu, X. Q. Luo, and S. Y. Zhang. 2001. Differences in wood properties between juvenile wood and mature wood in 10 species grown in China. *Wood Science and Technology*. 35: 363~375.
5. Fang, S., W. Yang, and Y. Tian. 2006. Clonal and within-tree variation in microfibril angle in poplar clones. *New Forests*. 31: 373~383.
6. Fengel, D. and G. Wegner. 1984. *Wood: Chemistry, ultrastructure, reactions*. Walter de Gruyter. pp. 90~93.
7. Fujiwara, S. and K. C. Yang. 2000. The relationship between cell length and ring width and circumferential growth rate in five canadian species. *IAWA Journal*. 21(3): 335~345.
8. George, T. 1991. *Science and technology of wood: structure, properties, utilization*. Van Nostrand Reinhold. pp. 66~74.
9. Harada, H. and T. Goto. 1982. The structure of cellulose microfibrils in valonia. *Cellulose and other natural polymer system: Biogenesis, structure, and degradation*. 19: 383~400.
10. Jahan, M. S. and S. P. Mun. 2005. Effect of tree age on the cellulose structure of Nalita wood (*Trema orientalis*). *Wood Science and Technology*. 39: 637~373.
11. Larson, P. R. 1962a. A biological approach to wood quality. *Tappi*. 45: 443~448.
12. Larson, P. R. 1962b. Stem from development of forest trees. *Forest Science Monograph No. 5*.



13. Lee, C. L. 1961. Crystallinity of wood cellulose fibers studies by X-ray method. *Forest Product Journal*. 11(2): 108~112.
14. Lewin, M. and I. Goldstein. 1991. Wood structure and composition. Marcel Dekker, Inc. pp. 151~154.
15. Lichtenegger, H., A. Reiterer, S. E. Stanzel-Tschegg, and P. Fratzl. 1999. Variation of cellulose microfibril angles in softwood and hardwoods: A possible strategy of mechanical optimization. *Journal of Structural Biology*. 128: 257~269.
16. Newman, R. H. and J. A. Hemmingson. 1990. Determination of the degree of cellulose crystallinity in wood by carbon-13 nuclear magnetic resonance spectroscopy. *Holzforschung*. 44: 351~355.
17. Panshin, A. J. and C. de Zeeuw. 1980. Textbook of wood technology. McGraw-Hill Book Company. pp. 237~275.
18. Parresol, R., R. Bernard, and C. Fuliang. 1998. An investigation of crystalline intensity of wood of poplar clones grown in Jiangsu Province, China. Res. Pap. SRS-11, Asheville, NC : US Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station. p. 7.
19. Preston, R. D. 1974. The physical biology of plant cell walls. London Chapman and Hall. 5: 144~146.
20. Scherrer, P. 1918. *Gottinger Nacher*. 2: 98.
21. Segal, L., J. J. Greely, A. E. Martin Jr., and C. M. Conrad. 1959. An empirical method for estimating the degree of crystallinity of native cellulose using the x-ray diffractometer. *Textile Research Journal*. 29: 786~994.
22. Tanaka, F., T. Koshijima, and K. Okamura. 1981. Characterization of cellulose in compression and opposite woods of a *Pinus densiflora* tree grown under the influence of strong wind. *Wood Science Technology* 15: 265~273.
23. Washusen, R., R. Evans, and S. Southerton. 2005. A study of *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus globulus* branch wood microstructure. *IAWA Journal*. 26(2): 203-210.
24. Wang, S. Y. and C. M. Chiu. 1990. The wood properties of Japanese cedar originated by seed and vegetative reproduction in Taiwan IV. - The variation of the degree of crystallinity of cellulose. *Mokuzai Gakkaishi*. 36(11): 909~916.
25. Wellwood, R. W., C. B. R. Sastry, M. M. Micko, and L. Paszner. 1974. On some possible specific gravity, holo and  $\alpha$ -cellulose, tracheid weight/length and cellulose crystallinity relationship in a 500-year-old Douglas-fir tree. *Bd. 28 H. 3*: 91~94.
26. Zhu, J., T. Nakano, and Y. Hirakawa. 1998. Effect of growth on wood properties for Japanese larch (*Larix kaempferi*): Difference of annual ring structure between corewood and outerwood. *Journal Wood Science*. 44: 392~396.
27. Zhu, J., T. Nakano, and Y. Hirakawa. 2000. Effect of radial growth rate on selected indices for juvenile and mature wood of the Japanese larch. *Journal of Wood Science*. 46: 417~422.
28. 祖父江信夫, 平井信之, 淺野猪久夫. 1970. X線による木材構造の研究 - スギの樹幹内による結晶状態の變化について. *木材學會誌*. 16(6): 262~267.
29. 김남훈, 이기영. 1998. 편백(*Chamaecyparis obtusa* E.) 수간내에서의 결정상태의 변이성. *목재공학*. 26(4): 20~28.
30. 박병수, 박정환, 정성호, 한소라. 2007. 낙엽송의 가도관 변이. 2007 학술발표요지집. 한국목재공학회. pp. 257~258.
31. 이소미, 김병로. 2005. 일본잎갈나무 수간내 채질변동에 관한 연구(II): 가도관 길이와 폭, 마이크로피브릴 경각, 강도의 남북방향 변동. *목재공학*. 33(1): 21~28.
32. 이원용, 김남훈. 1992. X선회절법에 의한 주요 침·활엽수재의 미세구조 해석. *목재공학*. 20(1): 28~37.