



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	チヨウセンゴヨウ造林木の材質 : 特性と利用開発に関する基礎的研究
Author(s)	姜, 善求; Kang, Sun Koo
Citation	北海道大学農学部邦文紀要, 18(4), 331-377
Issue Date	1993-11-29
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/12153
Type	departmental bulletin paper
File Information	18(4)_p331-377.pdf



チョウセンゴヨウ造林木の材質

— 特性と利用開発に関する基礎的研究 —

姜 善 求*

(博士論文, 北海道大学大学院農学研究科)

(平成5年4月22日受理)

Wood Properties of Korean Pine Grown in Plantation

— Fundamental Studies on the Characteristics and Applications —

Sun Koo KANG

(Doctoral thesis, Graduate School of Agriculture,

Hokkaido University, Sapporo 060, Japan)

目 次

I 緒 論	332	2) 仮道管二次壁中層のフィブリル傾角	338
1. 本研究の目的及び意義	332	3) 仮道管長	338
2. 韓国におけるチョウセンゴヨウの現状と 問題点	333	4. 結果と考察	339
1) 世界的分布	333	1) 仮道管の直径と壁厚	339
2) 現存量	333	a) 仮道管の直径	339
3) 韓国におけるチョウセンゴヨウの利用	333	b) 仮道管の壁厚	340
4) 造林の歴史と現状	334	2) 仮道管二次壁中層のフィブリル傾角	340
5) 問題点	334	a) 年輪内のフィブリル傾角の変動	340
3. 研究史	334	b) 幹径方向のフィブリル傾角の変動	341
1) チョウセンゴヨウに関するもの	334	3) 仮道管長の変動と指数式の適用	341
2) 組織構造的な材質の変動と未成熟材の 区分	335	4) 仮道管長変動から決定した未成熟材部の 区分	342
3) 物理的な材質指標の変動	336	5) 未成熟材の樹心からの年輪数と距離	342
4) 樹幹の旋回木理とねじれ	337	5. 結 論	344
5) 年輪幅変動と気候変動との関係	337	III 物理的特性	345
4. 本論文の構成	338	1. はじめに	345
II 組織特性の変動と未成熟材の区分	338	2. 供試木	345
1. はじめに	338	3. 試験方法	345
2. 供試木	338	1) 年輪幅と晩材率	345
3. 実験方法	338	2) 容積密度数	345
1) 仮道管の直径と壁厚	338	3) 軟X線デンシトメトリーによる比重の 測定	346
		4) 収縮率	346
		5) 強 度	346
		a) 曲げ強度	346
		b) 縦圧縮強度	347
		4. 結果と考察	347
		1) 年輪幅と晩材率の変動	347
		a) 年輪幅の変動	347

*韓国林業研究院林産工学部

〒130-012 韓国ソウル特別市東大門区清凉里洞 207
Forest-Research Institute, Department of Forest
Products Technology, Seoul 130-012, Korea

b) 晩材率の変動	348	2) 気候と成長との関係	366
c) 平均年輪幅	349	5. 結論	367
d) 年輪幅と早・晩材幅, 晩材率の関係	349	VI 総合考察	367
2) 容積密度数の樹幹内変動	349	1. チョウセンゴヨウ造林木の材質評価	367
3) 軟X線デンシトメトリーによる比重変動	350	1) 材質のまとめ	367
a) 年輪間の比重変動	350	2) 天然木との比較	368
b) 年輪内の比重変動	351	3) 他のソフトパインとの比較	369
4) 収縮率の樹幹内の変動	352	4) 韓国産パイン類の材質の総合評価	369
5) 曲げ強度	352	2. チョウセンゴヨウの育林技術と材質	369
a) 樹幹内の曲げ特性値	353	1) 成長と材質	369
b) 密度と曲げ強度	353	2) 年輪幅と未成熟材の範囲の制御	370
c) 曲げヤング率と曲げ強度及び曲げ比例限度との関係	354	3) 気候因子と材質	370
d) 年輪幅と曲げ強度	355	4) 材質育種	370
6) 縦圧縮強度	355	3. チョウセンゴヨウの用途と利用開発	370
a) 樹幹内の縦圧縮特性値	355	1) 利用上の問題点の解明	370
b) 密度と縦圧縮強度	355	2) 欠点除去など加工技術の開発	371
c) 密度と縦圧縮比例限度	355	3) 育林技術への要望	371
d) 縦圧縮比例限度と縦圧縮強度	355	結 言	371
e) 年輪幅と縦圧縮強度との関係	356	引用文献	372
5. 結論	356	Summary	376
IV 樹幹の回旋特性	357		
1. はじめに	357		
2. 供試木	358		
3. 実験方法	358		
1) 木取り方法	358		
2) 繊維傾斜度	358		
3) ねじれ狂い	359		
4. 結果と考察	359		
1) 繊維傾斜度の樹幹内の分布	359		
2) 繊維傾斜度とねじれとの関係	359		
5. 結論	361		
V チョウセンゴヨウの年輪解析と環境変遷情報	362		
1. はじめに	362		
2. 供試木	362		
3. 試験方法	362		
1) 年輪試料の採取	362		
2) Cross Dating と年輪幅測定	363		
3) 年輪統計分析	363		
a) 年輪幅の標準化	363		
b) 相互相関関係	364		
c) 平均敏感度 (Mean sensitivity)	364		
d) 自己相関 (Autocorrelation)	364		
e) Signal Strength	364		
4) 年輪変動と気候との相関関係	364		
4. 結果と考察	364		
1) 年輪年代記の統計的性質	364		

I. 結 論

1. 本研究の目的及び意義

韓国における針葉樹は構造用材または造作用材として最も重要な樹種であり、その中でもチョウセンゴヨウ (*Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc.; Korean pine) は昔から建築, 家具, 器道具材等の用材だけでなく種子採取等の用途で多様に利用されてきた。しかし, 過去には天然林から生産利用されてきたが, 今日では天然林が極めて少なくなり, 人工造林されたものが生産段階にある。一方産業の発展と共に外材の輸入が増加し, 木材の用途は多様になっているが, チョウセンゴヨウは用途が極めて制限的に利用されている。このような状況下でチョウセンゴヨウの利用用途を拡大することが何よりも重要である。これを解決するためには材質の特性を左右する因子をより深く把握して材質特性を究明することが切実に要請されている。利用幅を広げさらに材質の改善をめざす方案としては, チョウセンゴヨウの成長に関係する年輪から成長層を逐次観察解析して成長期間を通して育林面からとの関連を提示すると共に, また, 木材を合理的に利用するため, 利用面から問題点を解決するための材質特性を究明しなければならない。本研究では韓国産チョウセンゴヨウを

用い、材質特性として樹幹の変動因子と造林木の環境因子の関連等を把握する。研究の経過は次の通りである。

- ・韓国におけるチョウセンゴヨウの現状と問題点
- ・チョウセンゴヨウの樹幹内の成熟材と未成熟材の区分。
- ・樹幹内の組織構造として仮道管の直径と壁厚、長さ、仮道管の二次壁中層のフィブリル傾角等の変動要因。
- ・樹幹内の物理的な変動要因として年輪幅の変動、容積密度数、比重、収縮率、強度等を成熟材と未成熟材別に調査。
- ・韓国産チョウセンゴヨウと北洋チョウセンゴヨウの繊維傾斜とねじれとの関係。
- ・韓国産チョウセンゴヨウの年輪年代記から年度間の年輪幅変動と気候変動との関係。

本論文の結果は今後、育林施業による未成熟材部の調節の材質改善のための材質育種、材質欠陥の除去による加工技術改善及び立木の環境因子と木材の密度との関連などの材質評価の基礎資料として利用され、今後の研究を推進する場合大きな意義があると考えられる。

2. 韓国におけるチョウセンゴヨウの現状と問題点

1) 世界的分布

チョウセンゴヨウの世界的分布はFig. 1に示したようにロシアのアムル (Amur) 地方、沿海地方、中国、韓国、即ち、北緯約 35°15' から 50° 以内の地域と日本の本州地方では排水が容易である山すそ (海拔 600—900 m) に分布する¹⁾。

各国別のチョウセンゴヨウの分布を見ると韓国では全羅南道と済州道を除いた北緯 35°15' より北の全国に分布し、垂直的な分布は緯度によって多少の差はあるものの一般的に海拔 100—1,900 m に分布する^{2,3)}。日本では本州の関東・中部高地と愛媛県に分布し、本州中央部では海拔 1,050—2,600 m に、北部では海拔 1,200—1,600 m に分布する⁴⁾。ロシアではシコウテアリム (Sikhote Alim; ウスリ江と日本海の間) 帯では海拔 600 m に分布し、特に、沿海地方に多く分布する¹⁾。中国には東北地方に分布し、キンカン (Khingán) 山では海拔 600—900 m に分布する¹⁾。

2) 現存量

韓国における多くの森林は 1950 年の動乱で人工

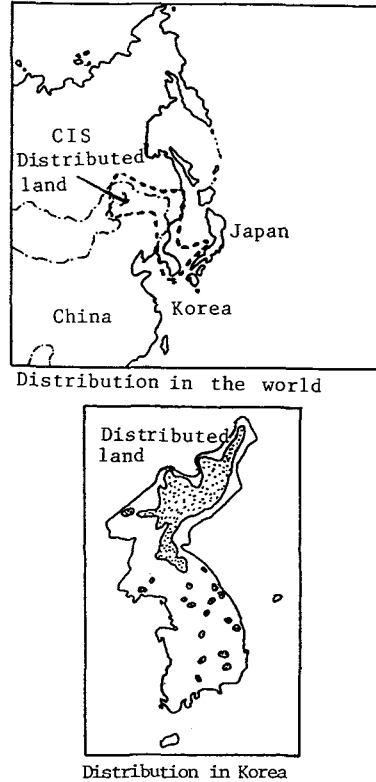


Fig. 1. Distributed land of Korean pine.

林は勿論天然林も大部分破壊され、蓄積は極めて僅かになった。しかし、1962 年から大面積の造林が始まり徐々に山林が復旧されるようになった。現在のチョウセンゴヨウの成林地は 150,000 ha におよんでおり、立木蓄積は 200 万 m³ と推定される。しかし、これらの多くは成長が旺盛である幼齡林で構成されており、年間成長率も 4—11% に達するので蓄積は今後増加されるものと思われる⁵⁾。

ロシアの総蓄積は 9 億 6 千万 m³ で沿海地方が 6 億 1 千万 m³、ハバロフスク地方が 3 億 5 千万 m^{3,6)} と極東地方森林資源の総蓄積量 110 億 1 千万 m³ の 9% に達し、世界のチョウセンゴヨウ蓄積量の 91% を占めている。中国におけるチョウセンゴヨウの林地面積は 390 千 ha で、その蓄積は 8,500 万 m³ である。全世界のチョウセンゴヨウの蓄積は約 10 億 5 千万 m³ である。

3) 韓国におけるチョウセンゴヨウの利用

チョウセンゴヨウ材の供給量は年間 18 千 m³ で、

その内末口直径 15 cm 未満の小径材が 60% を占めており、21 cm 以上 30 cm 未満の材は 10% に過ぎない。

チョウセンゴヨウ材の現用途は小角材、建築内装材(壁材)等の比較的低価値の材に使われており、過去の用途は建築材(建具、内装、構造材)、車両材、家具材(桶、細工、棺、鋳型)、包装(紅蔘箱)、船舶、彫刻及びパルプ等に多様に使用されてきた。しかし、現在は大径材が生産されていないため南洋材等の輸入材が使用され、固有樹種であるチョウセンゴヨウの用途は極めて制限的に使用されており、今後は良質の大径材の生産を初め集成材など木材加工技術の向上及び新しい用途開発が大きな課題である。

チョウセンゴヨウの実の用途は粥、菓子、伝統料理及び茶等に必要不可欠なものとして利用されている。

チョウセンゴヨウの実の年度別生産量を Table 1 に示す。

4) 造林の歴史と現状

韓国における造林の歴史は 1187 年チョウセンゴヨウ、栗、なつめ、楮、桑を造林したとする記録が造林の始まりである。その後 1407 年ソウル南山に 3,500 名が 20 日間造林に従事したのを初め、1423

Table 1. Production of pine nut in Korea

Year	1986	1987	1988	1989	1990
Production (t)	428	789	1127	1164	868

Source: Adapted from survey data, Forestry Administration.

Table 2. Afforestation area and number of planting individuals of Korean pine by year

Species	Year	Afforestation area (ha)	Number of planting individuals (1,000 individuals)
Korean pine	1962-1972	53,332	159,998
	1973-1978	89,879	278,256
	1979-1987	125,261	371,620
	1988-1990	43,727	127,379
	1991	10,059	29,068
Total		322,158	966,321

Data: Forestry Administration 1991. Forestry Statistics.

年海岸地帯調査造林などの造林が行われた。造林地は主に王陵、寺院等の周辺等である。1946 年には第 1 回植林日の行事が 4 月 5 日に初めて行われ、本格的な造林は 1947 年造林及び砂防事業 10 年計画、1952 年短期速成造林 3 年計画、1955 年民有林 10 年計画、1959 年燃料林造成 5 年計画等多くの計画と治山緑化 1 次、2 次 10 年計画によって造林が行われるようになった。

チョウセンゴヨウの造林実績は Table 2 に示しており、今後も長期造林計画により継続造林される展望である。

5) 問題点

チョウセンゴヨウ材は材質が軟らかいので加工性が良く乾燥も比較的容易であるが狂いとねじれが大きい。また、高含水材の辺材は青変しやすく耐朽性が低く強度も弱いので建築、家具材としての使用は避けている。また、未成熟材はフィブリル傾角と繊維傾斜が大きいためねじれ・狂いと収縮等を引き起こす原因になるので、このような欠点を改良するためには材質の向上を目的とした林木の育種、初期の成長を促進させ未成熟材部の形成期間を短縮させると共に年輪変動の調査や年輪の解析をもとにした林木の環境改善等の森林施業体系の改善が望ましい。さらに、未成熟材が含まれている材の欠陥がカバーできる木材の加工技術の開発を同時に推進しなければならない。

3. 研究史

1) チョウセンゴヨウに関するもの

工藤ら⁷⁾は鴨緑江地域チョウセンゴヨウの縦圧縮強度について報告した⁸⁾。山林は朝鮮木材の識別においてチョウセンゴヨウとヒメコマツの組織と識別

について報告し、李⁹⁾は韓国産チョウセンゴヨウの年輪幅と晩材率の変動は各々0.5—6.5 mm, 5—50%であり、平均年輪幅と平均晩材率は各々3.0 mmと24%であると報告した。姜¹⁰⁾は韓国産針葉樹の材質研究を行い、平均年輪幅はチョウセンゴヨウ3.0 mm, アカマツ2.6 mm, クロマツ2.8 mm, リギダマツ2.9 mmであり、早・晩材の平均仮道管長はチョウセンゴヨウ2.81 mm, アカマツ2.65 mm, クロマツ2.97 mm, リギダマツ2.90 mmであることを報告し、これらの樹種の比重、収縮率及び強度についても報告した。姜¹¹⁾は北洋産針葉樹の材質研究で平均年輪幅はチョウセンゴヨウ1.2 mm, オウシュウアカマツ1.5 mm, 北洋カラマツ1.4 mmであり、晩材の平均仮道管長はチョウセンゴヨウの未成熟材は2.1 mm, 成熟材は3.75 mm, オウシュウアカマツの未成熟材は1.94 mm, 成熟材は3.71 mm, 北洋カラマツの未成熟材は2.07 mm, 成熟材は3.76 mmであると報告した。さらにこれらの樹種の比重、収縮率、強度及び加工性について報告した。

李¹²⁾は韓国産チョウセンゴヨウの地上高0.2 mと11.2 mで仮道管長が各々2,000—4,500 μm , 1,500—4,000 μm の範囲であると報告した。李¹³⁾は北洋産針葉樹の仮道管長はチョウセンゴヨウでは2,500 μm で最も長く、北洋モミ、北洋カラマツが各々3,400 μm , エゾマツが2,900 μm で韓国産の針葉樹より多少長い傾向であることを報告した。

李¹⁴⁾は韓国産チョウセンゴヨウのフィブリル傾角は早材が23.38°, 晩材は17.85°であり、髓から樹皮側までの半径方向変動では髓に近い部分の傾角が最も大きいことを報告した。中国科学院林業土壤研究所¹⁵⁾はチョウセンゴヨウの天然林と人工林の組織、物理、強度及び化学的性質について報告した。全¹⁶⁾は韓国産チョウセンゴヨウの樹幹でのフィブリル傾角の平均は17.6°であり、早材部の平均は19.8°, 晩材部の平均は15.3°であることを報告した。また、フィブリル傾角は地上高の増加と共に増加する傾向にあると報告した。全¹⁷⁾は韓国産チョウセンゴヨウの仮道管の長さが長いほどフィブリル傾角は減少し、細胞壁の厚さと仮道管の幅が増加するほど傾角は減少し年輪幅が広がるに従って増大することを報告した。全¹⁸⁾は韓国産チョウセンゴヨウのフィブリル傾角の変動と縦圧縮強度、比重と収縮率との関係の研究で繊維方向の収縮

率の増大と共にフィブリル傾角は増大し、比重の増大と共にフィブリル傾角は若干減少すること、縦圧縮強度の増加と共にフィブリル傾角は若干減少することを報告した。

李¹⁹⁾は韓国産チョウセンゴヨウの容積密度数は優勢木306 kg/m³, 準優勢木371 kg/m³, 劣勢木389 kg/m³で平均は321 kg/m³であると報告した。李²⁰⁾は韓国産チョウセンゴヨウの未成熟材の範囲は髓から6—11 cmであり、年輪数では12—20年輪の間であることを報告した。

2) 組織構造的な材質の変動と未成熟材の区分

未成熟材と成熟材区分は研究者によって異なるが3つに分けられる。第1はTrendelenburg²¹⁾, 加納^{22,23)}, 田島²⁴⁾等による見分け方で材質指標の諸因子変動或は枝が枯れ上がる軌跡から区分する方法である。即ち、樹冠領域の幹に形成された木部を樹冠材、樹冠より下方の幹に形成された部分を枝下材として、両材を区分している。また、深沢²⁵⁾は樹幹内の同一年次において材質の垂直方向変動で上方部(幼時には全部)の材質が変動する領域を未成熟材とした。その未成熟材の下方部として材質が同一年次についてはほぼ一定の領域(主幹材)を成熟材とした。一方、地際部で材質が変動する領域を根張り材として区分している。

第2には、Dadswell²⁶⁾, Larson²⁷⁾, Panshin²⁸⁾, Rendle²⁹⁾, 渡辺³⁰⁾によるもので樹幹内の組織構造と物理的な性質及び化学的な性質等の水平方向変動と樹齢との関係を中心に区分する方式である。材質のバラツキが多い髓付近に形成された木部は未成熟期の形成層始原細胞によるもので未成熟材と定義し、その外部の成熟期の形成層によって形成された木部を成熟材と定義している。

第3は塩倉³¹⁾によって区分された方式で、針葉樹樹幹を構成している主要な組織構成要素である仮道管の長さの樹幹内変動から未成熟材部を判定したものである。仮道管長の樹幹内変動に関する研究はSanio³²⁾が行い、古くからサニオの法則として知られている。外側へ向けて増加し、最大値に達した後、一定になることを発表してから、多くの研究者によって確かめられている。しかし、仮道管長の変動パターンで未成熟材と成熟材の区分を試みた研究は比較的少なく、渡辺^{30,33)}及び深沢²⁵⁾のスギ、太田³⁴⁾のヒノキ、須藤³⁵⁾のアカマツ、塩倉³¹⁾のカラマツ、Schultze³⁶⁾等のScotch pine, Elliott³⁷⁾の

Sitka spruce 等を対象にして発表した結果がある。

須藤³⁵⁾は髄からの年輪番号による仮道管長の変動の値が安定すること、仮道管長増加率の変動が安定すること、さらに全体あるいは未成熟材の代表値と各年輪及びある年輪までの平均値との間の相関係数の変動の経過における変曲点等、いずれをとっても未成熟材と成熟材との境界があり、それぞれ同じ程度に成熟・未成熟材部を指示する目的に用いられると報告している。

深沢²⁵⁾は前述の樹幹内に同一年次における材質の垂直変動から、スギについて未成熟材は大体5—7 cmの半径内にあると報告している。

塩倉³¹⁾は未成熟材部で判定する仮道管長の伸長率が前年輪との比で約1%の部位を未成熟材部と成熟部の区分の基準とし、未成熟材の範囲は髄からの年輪数で11—19年とし、距離は5—8 cmの範囲内にあると報告している。

組織構造的な材質変動因子として仮道管の直径と壁厚、仮道管二次壁中層のフィブリル傾角に対する研究は次のようである。

塩倉³¹⁾はカラマツの仮道管で早材部壁厚は髄から外側に向かってはほぼ変動がみられないが、晩材部では髄付近で最も薄く外方に向かって急激に厚くなり、ほぼ19年輪を過ぎると一定になると報告している。

塩倉³¹⁾は仮道管の二次壁中層のフィブリル傾角は髄に接した木部では早・晩材部共に最大の傾角を示し、外方に向かって徐々に傾角が小さくなる。早材部では緩やかで、晩材部では早く小さくなり、約15年輪から多少ではあるが、安定すると報告した。

Hiller³⁸⁾はLoblolly pineの樹幹に対して同一年輪に形成された木部において晩材仮道管の壁厚が幹の縦方向で変動する状態を調査して、最上部で壁は最も薄く下方へ形成層の年齢が増加するに従って早く厚くなり、樹齢15年頃の形成層でつくられた木部ではほぼ安定することを見いだした。

田島²⁴⁾はスギの未成熟材の仮道管壁厚が成熟材に比べて少し薄いと報告した。

3) 物理的な材質指標の変動

物理的な材質変動因子の年輪幅と晩材率、容積密度数やマイクロデシトメータによる比重、収縮率、強度等についての報告では、塩倉³¹⁾は正常に成長したカラマツ樹幹では年輪幅は髄付近でやや狭く、外方に向かって約8年輪ぐらいまで急激に増加

し、その後は次第に減少し、20年輪を過ぎるとほぼ安定するを報告した。また、晩材率は髄付近で最も小さく、外方に向かって緩やかに増大し、20年輪過ぎるとほぼ30—50%の範囲で安定すると報告した。宮島³⁹⁾はチョウセンゴヨウの平均年輪幅は4.1 mmであり、容積密度数の平均は343 kg/m³で直径成長が最もよく、材の容積密度数もトドマツより大であったが、力学的性質が劣ると報告した。

Trendelenburg^{40,41)}は林木の樹幹成長の解析を行い、地上高別に5—10年の成長層の容積密度数を測定し、容積密度数を一定階級で区分し樹幹成長図に模式的に記入して幹の中の容積密度数の変動を明らかにすることを試みた。Trendelenburg⁴¹⁾はオウシュウトウヒについて樹幹内の容積密度数の変動は樹心部に極めて軽い材部が形成し、その外側の幹足部に少し重い材部が層状堆積し、樹冠部位にも少し重い材が形成するのが認められると報告した。渡辺⁴²⁾はスギ造林木樹幹内の容積密度数変動を調べ、容積密度数は樹心部が重く、外側に向けて激減し、また幹の下から上に向かって増大する傾向があると報告した。平井⁴³⁻⁴⁷⁾はスギと2, 3の樹種について樹幹内の容積密度数の変動は成長の優勢あるいは劣勢によって分布が異なり、劣勢木では樹体上部の全断面にかけて重い材が最外部に沿って下部へ垂下する傾向が認められることを報告した。大沢ら⁴⁸⁾は北海道産アカエゾマツ樹幹内の容積密度数の変動は樹心部の材が軽く、梢端部と地上部の低い部位に重い材が形成すると報告した。加納⁴⁹⁾は天然林におけるトドマツ材の容積密度数の大きさと幹の容積密度数の構成について報告した。太田⁵⁰⁾はスギ、ヒノキは髄心部の比重が高く、外側に向って減少すると報告した。

田島²⁴⁾はスギについて早材部の密度は低く、晩材部では高いためその差は大きく、従って一年輪内での移行は急激であると報告した。カラマツのように晩材率の大きい樹種によっては比重に及ぼす晩材率の影響は極めて大きいと報告した。

塩倉³¹⁾はカラマツにおいて密度が低い早材部の変動では髄付近でやや高く、外周に向かって約8年輪目まで徐々に減少し、その後再び増大し、12—13年輪を過ぎるとほぼ安定することを報告した。また、一年輪内の最大値を示す晩材部では髄に近い部位で低く、外周に向かって急激に増大し、12—13年輪ではほぼ一定な値を示すと報告した。渡辺³⁰⁾は

スギの収縮率は成熟材が1.4%、未成熟材が2.7%ではほぼ2倍になることを報告した。深沢²⁵⁾はスギの容積密度数と容積収縮率の比は未成熟材が成熟材に比べて少ない傾向にあると報告した。塩倉³¹⁾はカラマツの未成熟材は成熟材に比べて収縮率が放射、接線ともに少ないと報告した。

Meylan⁵¹⁾は繊維方向の収縮率は未成熟材が成熟材より大きいと報告した。PearsonとGilmore⁵²⁾はLoblolly pineの圧縮強度、圧縮弾性係数は未成熟材が成熟材に比べて小さいことを報告した。渡辺^{30,33)}はスギの、太田⁵⁰⁾はヒノキの圧縮強度と圧縮弾性係数が、未成熟材では成熟材より減少すると報告した。塩倉³¹⁾はカラマツの欠点がある材の曲げ強度は未成熟材として見える部位は成熟材に比べて約1/3であると報告した。

4) 樹幹の旋回木理とねじれ

針葉樹の樹幹内の繊維傾斜度を調査し、材部位別特徴、構造用材との品質に及ぼす影響等構造用材としての利用適性に関する研究は次のようである。

中川⁵³⁾はカラマツの未成熟材に現れる繊維傾斜度は樹心部ではS傾斜が始まり、その出現率は97%である。また、最大繊維傾斜度は未成熟材部に75%出現する。繊維傾斜度の評価による構造用材への利用適性と他の材質指標によって出現された利用適性は個体間に密接な関連性は認め難く、独立に取り扱わなければならないと考えられると報告した。

塩倉³¹⁾はカラマツの旋回木理傾角は髓から外方に向かって増大し、髓から5—15年輪までの範囲に最大の傾角を示し、成熟材に入ると傾角は小さくなり、らせん傾角の方向はほぼS旋回を示すと報告した。重松ら⁵⁴⁾はカラマツの旋回木理及び各収縮率は樹幹内で変動しており、この変動は樹木の肥大成長と関連しており、晩材の曲げ、そり、材面割れ等の欠点は旋回木理と収縮率、特に幹軸方向の収縮率に関与することを報告した。Harris⁵⁵⁾はラジアタマツの旋回木理の角度は成熟材部より未成熟材において大きいのが明確であると報告した。中川⁵⁶⁾はシンシュウカラマツの旋回木理に現れる型は5種の基本型と変化型に分類されると報告した。加納ら^{57,58)}はシンシュウカラマツについて角材としての実用品質を調査してこの樹種での製材品の中で一辺長さ10 cm以下の角材には旋回木理に起因するねじれによる材質の損傷が極めて顕著であると報告した。沈⁵⁹⁾はカラマツは樹軸に直角方向と繊維に

直角方向の全収縮率は後者が約1%大きく、繊維旋回方向はS旋回で平均繊維傾斜度は髓側が大きく樹皮側に向かって減少し、そりは髓に近い側で材幅のそりが大きく樹皮側に向かって少しずつ減少する傾向があると報告した。

5) 年輪幅変動と気候変動との関係

年輪変動と気候因子の相関関係を定量的に研究し始めたのは、年輪年代学の創始者であるDouglas⁶⁰⁾である。彼は米国のアリゾナ産樹種の年輪幅変動が冬季の降水量と密接な関係があることを明らかにした。その後、多くの研究が行われ、Fritts⁶¹⁾とSchweingruber⁶²⁾によって集大成された。このように年輪と気候との相関係数は古気候復元、木材材質変動等に利用されてきた。Fritts⁶³⁾は米国西部地方の乾燥した地域を対象に年輪幅を利用して近來の約400年間の気候を復元し降水量の時間的、地域的な変動を明らかにした。これを1970年代の半ばまでに数値化した(Blasing⁶⁴⁾, Blasing and Fritts⁶⁵⁾。

Lamarch⁶⁶⁾は米国東中央のカリフォルニア、ネバダ州等の高山で育つプリシルコンマツの年輪年代を用いて5000年前までの冷、湿潤気候期間を復元した。Stockton⁶⁷⁾は北米西部河川流量変動を復元し、Cook and Jacoby⁶⁸⁾, Conkey⁶⁹⁾が東部の気候を、また、Stahleら⁷⁰⁾はノースカロライナの気候を世紀372年から1985年まで復元した。北米ではこのような年輪幅を利用した気候復元の研究が続いており、広域的に復元するのに力点が置かれている(Fritts and Lough⁷¹⁾, Graumlich and Brubaker⁷²⁾, Fritts⁷³⁾。

Parker and Henschel⁷⁴⁾は年輪密度を気候復元に利用しており、Stuiver⁷⁵⁾は炭素同位元素比を利用した気候復元に利用し、Gray and Thompson⁷⁶⁾, Burkら⁷⁷⁾は水素同位元素比を利用して古気候復元について研究した。Briffaら⁷⁸⁾は、年輪密度年代記を利用して古気候復元の一つとして針葉樹類から1750年以後のヨーロッパ夏期温度を復元し、Schweingruberら⁶²⁾はスカンディナヴィアとアルプスの267個の針葉樹年輪年代を利用して581年までさかのぼっての夏季温度を復元した。

その他にもLamarchら⁷⁹⁾, Graybillら⁸⁰⁾, Wuら⁸¹⁾がアルゼンチン、チリ、ニュージーランド、オーストラリア、南アフリカ、ロシア、中国等で年輪年代を利用した気候復元を研究しており、Jozsa

ら⁸²⁾、太田⁸³⁾、深沢ら⁸⁴⁾は木材材質変動の研究に関する結果を報告した。

4. 本論文の構成

本論文の構成と概要は次の通りである。

第2章では韓国産チョウセンゴヨウの組織構造的な性質のうち仮道管の直径と壁厚、仮道管二次壁中層のフィブリル傾角及び仮道管長の変動を検討し、未成熟材の区分を髓からの年輪数と距離を用いて明確にした。

第3章では韓国産チョウセンゴヨウの物理的な特性として年輪幅と早・晩材幅、晩材率の関係と幹径及び垂直方向での変動、樹幹内容積密度数、比重、収縮率及び各種強度をとりあげ、成熟材と未成熟材との区分別にそれらの材質変動を明らかにした。

第4章では韓国産チョウセンゴヨウと北洋チョウセンゴヨウの樹幹内繊維傾斜度を未成熟材と成熟材また未成熟材と成熟材の混在したもので調べ、板材の繊維傾斜とねじれの関係を明らかにした。

第5章では韓国産チョウセンゴヨウの年輪間の年輪幅変動と気候因子変動との関係を季節別に明らかにし、育林施業の資料として活用するようにした。

第6章では以上の結果を要約し、総合的に考察して結論とした。

II. 組織特性の変動と未成熟材の区分

1. はじめに

チョウセンゴヨウの造林木に適合した用途への利用開発を進めるに当たっては、まず、基本的材質の早期究明が望まれている。そのためには未成熟材と成熟材の区分と未成熟材の範囲を明らかにする必要がある。本章ではそれらの区分を行うことに対して樹幹内における組織構造的性質の変動を追求することを目的とした。

成熟材と未成熟材を区分するには種々の方法が挙げられるが、本研究の供試木においては仮道管長の変動の境界が明らかであり、その変動状態によって成熟材と未成熟材を区分するのが適当であると考え、この方式で成熟材と未成熟材を区分した。

本章では仮道管長が針葉樹の成長過程を示す要因になることに注目し、未成熟材の範囲を髓からの年輪数と距離との関連について追求しようとした。なお、仮道管長の変動パターンを説明するため、韓国産チョウセンゴヨウを正常木と被圧木とに区別して

調べた。変動パターンを塩倉⁸¹⁾の方法によって対数式に当てはめることにより、成熟材と未成熟材の変曲点を明らかにすることを試みた。

2. 供試木

実験に用いたチョウセンゴヨウ材は正常に成長したものと韓国産の林業研究院中部林業試験場の演習林で伐採した。供試木の概要はTable 3に示した。

3. 実験方法

1) 仮道管の直径と壁厚

供試木 No. 11-13の胸高部位の円板から1×1×1 cmの試料を髓から連続採取してブロックとし、軟化したのちに、マイクロームで厚さ約20-30 μmの横断面切片を切り、染色はサフランを用いた常法によって永久プレハラートを作製した。測定は顕微鏡で約600倍に拡大し、接眼マイクロメーターによって測定した。測定の際には仮道管の中央部と見られる細胞列の5-10列を連続的に測定し、その平均値を求め、細胞の放射方向径及び接線壁の厚さとした。

2) 仮道管二次壁中層のフィブリル傾角

供試木 No. 14, 20から採取した試料は早・晩材別に分け、厚さ約30-40 μmの接線断面切片を作り、これにヨードの結晶を析出させる小林法⁸⁵⁾を用いた。仮道管壁のS₂層のフィブリル間隙にヨウ素の針状結晶を形成させた後、顕微鏡写真を撮影した。写真上でヨウ素の針状結晶の走向と仮道管軸間の角度をフィブリル傾角とし、仮道管の中央部を測定した。

3) 仮道管長

仮道管長の放射方向変動パターンを究明するためには測定用試料の採取部位をまず決定する必要がある。年輪内の早材より連続した厚さの板目切片を取り、各々を解織法によって調べた。これまでの研究結果を見ると、仮道管長の放射方向のパターンは、各々の年輪の一定部位で測定試料を選ぶと、何れも早材部から晩材部に、髓から外側に向かって同一な変動パターンが見られる。

そこで、本章では晩材部のみを取って仮道管長を測定し、放射方向の変動を求めた。放射方向については、各供試木の地上高1.2 mでの円板を採取して、髓から外側に向けて各年輪の晩材部から小さい

Table 3. Description of sample trees

Species	Sample trees No.	Origin	D. B. H. (cm)	Height (m)	Age (year)	Remark
<i>Pinus koraiensis</i>	1	SOHUL-MYON	30	19.5	42	For
	2	POCHON-GUN	30	19.7	42	tracheid
	3	KYUNGGI-DO	24	18.0	32	length
	4		24	17.6	32	survey
	5		20	17.0	32	
	6		20	16.5	32	
	7		18	16.2	32	
	8		22	16.8	32	
	9		20	16.8	32	
	10		28	18.5	42	For
	11		23	18.5	35	anatomical
	12		22	18.5	35	charater-
	13		22	18.0	35	istic
	14		20	17.0	32	survey
	15		22	18.5	32	
	16		20	16.0	32	
	17		22	18.0	32	
	18		24	18.5	32	
	18		20	16.7	32	
	20		30	21.0	45	

D. B. H : diameter at breast height.

試料を作製した。

この試料を常法によりシュルツ氏液で解織し、ニコソ製万能投影器を用いて各々100本ずつ長さを測定し、その平均値を平均仮道管長として表した。

4. 結果と考察

1) 仮道管の直径と壁厚

Larson⁸⁶⁾とVan Buijtenen⁸⁷⁾は早材から晩材への変化に対して生理的処理を実施した実験によって仮道管の直径と壁厚は樹木の生理と密接な関係があることを報告している。塩倉³¹⁾は仮道管の早材部の壁厚は髄から外側に向かってほとんど変化を示さないが、晩材部では髄付近で最も薄く、外側に向かって急激に厚くなり、10年を過ぎるとほぼ一定になると報告した。

a) 仮道管の直径

仮道管の放射方向径での変動を早・晩材別に Fig. 2 に示した。晩材部の径は髄に接した部位では小さいが、外側に向かって大きくなる傾向があり、その変化は大きくない。早材部では髄に接した部位で最も小さく、外方に向けて急速に直径が大きくなり、

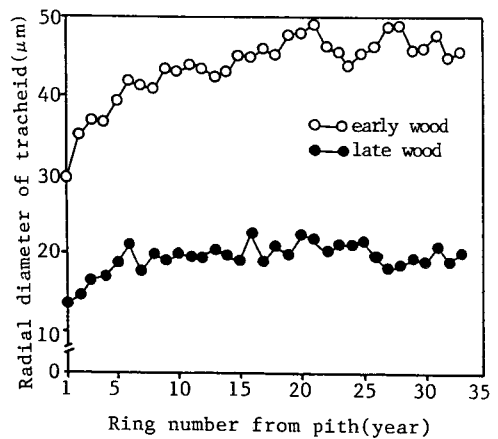


Fig. 2. Variation in radial diameter of tracheid from the pith to bark.

15—20年輪を過ぎるとほぼ安定になる。髄からの距離は5—8 cmである。この早材部の直径の変化は仮道管長の幹径方向の変動パターンと類似し、成熟材部と未成熟材部を区分する指標として重要な因子であると考えられる。

田島²⁴⁾はスギ, 太田⁵⁰⁾はスギとヒノキについてこのことを調査した結果, 早材仮道管直径の安定する部位は, 髄から数えてスギでは10-15年輪目, ヒノキでは10年輪目であると報告している。

b) 仮道管の壁厚

仮道管の壁厚は供試木 No. 11-13 の胸高部位から4-5 cm の円板を採取して接線壁で調査した。仮道管の壁厚は Fig. 3 に示したように髄から3年輪, 9年輪及び20年輪における各年輪内の仮道管の接線壁厚を見ると, 未成熟材部とみられる3年輪目と9年輪目の早材部ではほとんど差が見られない。しかし, 成熟材部とみられる20年輪目では早材部では緩慢に上昇し, 晩材部では未成熟材より急に厚くなる。年輪別の平均壁厚は3年輪 $3.15 \mu\text{m}$,

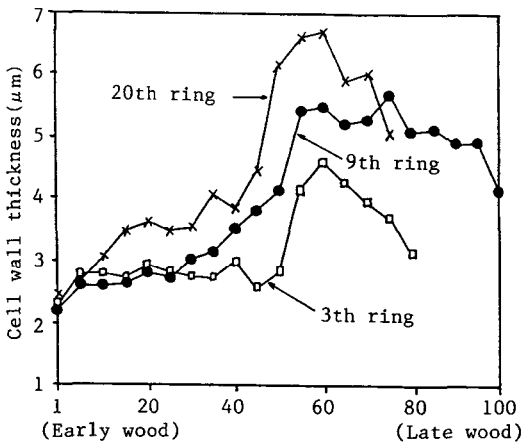


Fig. 3. Fluctuation in cell wall thickness within an annual ring.

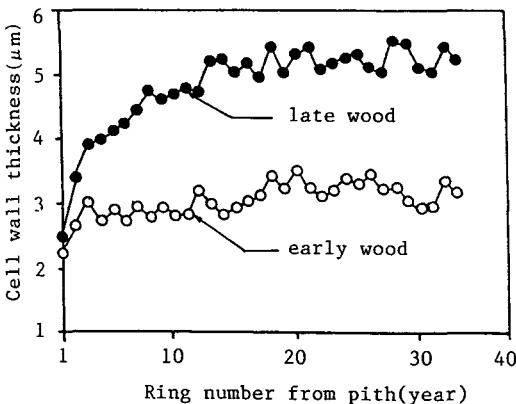


Fig. 4. Variation in cell wall thickness from the pith to bark.

9年輪 $4.01 \mu\text{m}$, 20年輪 $4.48 \mu\text{m}$ である。

幹径方向の変化は Fig. 4 に示したように早材部の平均壁厚が $3.03 \mu\text{m}$ であり, 髄から外周に向かって18年輪頃から増加している。晩材部仮道管の平均壁厚は $4.82 \mu\text{m}$ で髄付近で最も薄く, 外周に向かって急速に厚くなり, 13年頃からはほぼ一定になる。加納²²⁾はトドマツ, 太田³⁴⁾はヒノキ, 田島²⁴⁾と太田⁵⁰⁾はスギについてこのような研究を行い, 未成熟材と成熟材の境界が10-15年輪であることを報告した。また, 太田³⁴⁾はヒノキの早材部の壁厚は髄から外側に向かって徐々に厚さが減り, 10年頃からはほぼ一定な厚さになると報告した。

2) 仮道管二次壁中層のフィブリル傾角

仮道管の二次壁中層の厚さは仮道管壁の約80%を占めているため, この層のフィブリル傾角は仮道管の性質を判定する指標であり, 木材の物理・力学的性質と高い相関があると推定されている⁸⁸⁻⁹²⁾。

a) 年輪内のフィブリル傾角の変動

測定箇所は供試木 No. 14, 20 の未成熟材部とみられる髄から7年輪目, 成熟材部とみられる30年輪目と未成熟材と成熟材の境界付近とみられる15年輪目である。それらの年輪内のフィブリル傾角の変動を Fig. 5 に示した。これによるとフィブリル傾角は早材部から晩材部に向かって徐々に小さくなる。平均フィブリル傾角は7年輪目 21.21° , 15年輪目 19.35° , 30年輪目 12.28° である。李¹⁴⁾によると, 平均フィブリル傾角は7年輪目 24.80° , 15年輪目 25.45° , 31年輪目 13.25° であり, 15年輪目は差が大きいがそのほかの年輪では大きな差はなかった。このような傾向はスギ³⁰⁾, アカマツ, カラマツ⁹³⁾, ダグラスファー⁸⁸⁾でも認められるが, ヒノキ³⁴⁾の成熟材部では早材部と晩材部の間に差が

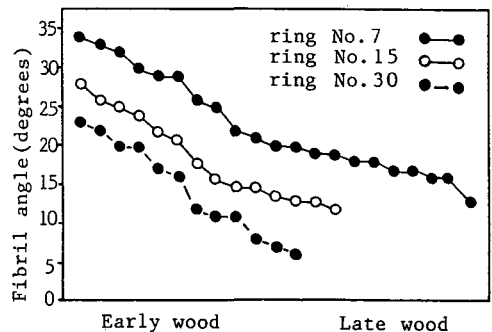


Fig. 5. Fluctuation in fibril angle within an annual ring.

ないと報告されている。7年輪目の未成熟材と30年輪目の成熟材を比較すると未成熟材の傾角が大きい、15年輪目の傾角はその中間であることを示している。塩倉³¹⁾は二次壁中層のフィブリル傾角を仮道管長の変動との関係で見ると負の相関が推察されると報告しているが、本研究でも同様な傾向を示している。

b) 幹径方向のフィブリル傾角の変動

幹径方向の仮道管二次壁中層のフィブリル傾角の変動をFig.6に示した。これによると、髓に接した木部では早材部、晩材部ともに最大の傾角を示し、外側に向かって徐々に傾角が小さくなる。早材部は晩材部より傾角が大きく、早・晩材とも15年輪をすぎると多少とも安定する。これは髓から約15年輪目までは未成熟材部であるためと考えられる。平均フィブリル傾角は早材22.51°、晩材16.31°であり、髓からの距離は6cmであった。

韓国産チョウセンゴヨウの平均フィブリル傾角は早材23.38°、晩材17.85°であり、髓に接している部分が最も大きいと報告した李¹⁴⁾は、韓国産チョウセンゴヨウのフィブリル傾角から判断した未成熟材範囲は髓から15—20年輪目までであると報告した。従って、本研究で得られたこのような変動傾向はこれまで報告された針葉樹材の結果と一致している^{29),94,95)}。

3) 仮道管長の変動と指数式の適用

仮道管長の変動を知るために韓国産のチョウセンゴヨウの正常に成長した正常木No.6と供試木の中では被圧木とみられる供試木No.7を選定して地上

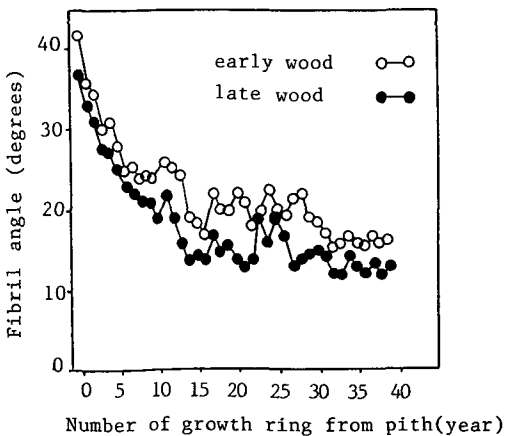


Fig. 6. Fluctuation in fibril angle from the the pith to bark.

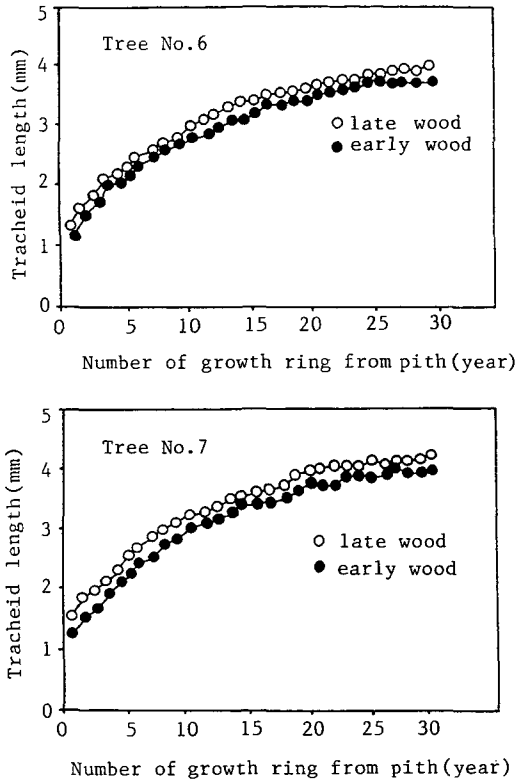


Fig. 7. Variation in tracheid length from the pith to 30th ring at 1.2 m above ground level.

高1.2 m 部位から5 cmの円板を採取して早材部と晩材部仮道管長を測定した結果、Fig.7のように、何れも髓に接した木部仮道管が最も短かく、外側に向かって急速に長くなり、部位によって異なるが、地上高1.2 m 部位では正常木は18年輪、被圧木は15年輪以後から伸長率が急に減少し、その後、多少安定している。塩倉³¹⁾によると初期被圧木部を含んだ円板では髓から6—8年輪頃までは急速な平均仮道管長の伸長を示すが、それ以後は、平均仮道管長が多少とも安定する成熟材部に達するまでの移行部が非常に長いと報告した。ここでも8年輪までは比較的急速な伸長を示すが、それ以後は成熟部に達する移行部が長いのが分かった。塩倉³¹⁾はカラマツの仮道管長の変動パターンを対数式で表した。韓国産チョウセンゴヨウに対しても髓からの年輪数を対数目盛りにしたFig.8に示すと両者の間に直線関係が得られ、相関係数は何れも0.99以上のよい直線関係が得られた。

その対数式は

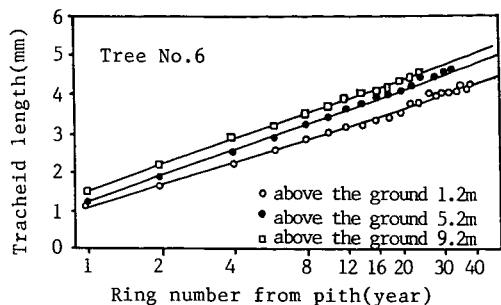


Fig. 8. Relationship between tracheid length and ring number from the pith.

$$Y = a + b \log X$$

ここに、Y：仮道管長

X：髄からの年輪数

a：1年輪目の仮道管長

b：係数

この数式を用いて仮道管長の分布図に回帰曲線を適用したのが Fig. 9 である。

$$Y = 1.0306 + 1.9804 \log X \quad r = 0.991$$

$$Y = 1.1551 + 2.2623 \log X \quad r = 0.996$$

$$Y = 1.4575 + 2.1700 \log X \quad r = 0.998$$

4) 仮道管長変動から決定した未成熟材部の区分
 既述したように正常に成長した供試木 No. 6 において仮道管長は髄に接した木部が最も短く、外方に向かって急速に長くなり、15年輪で約2倍となる。その後は伸長率が急速に減少するが、多少安定する。このように平均仮道管長が著しく長くなる部分が未成熟材部であり、多少とも長さが安定した部分は成熟材部であると思われる。しかしながら、移行部があり、そのパターンは一定でない。従って、この差を減らすために塩倉³¹⁾は対数式から得た回帰線の毎年輪の伸長率からその区分を求めた。これに

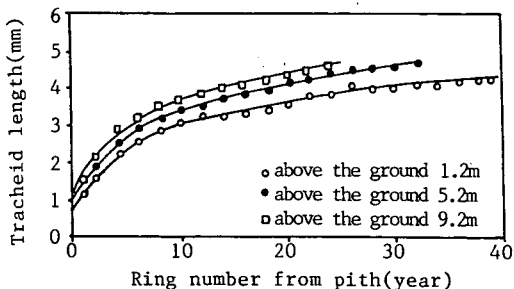


Fig. 9. Relationship between tracheid length and ring number from the pith.

よると髄に接した部分での伸長率は高く、外方に向かって急速に低下し、ある部分からその伸長率は一定になり、ほぼ直線で示される。この伸長率が約1%以下であり、ほぼ直線になる点を未成熟材部と成熟部の区分基準にした。この方法は回帰線で両材が客観的に区分される有効な方法であると報告している。

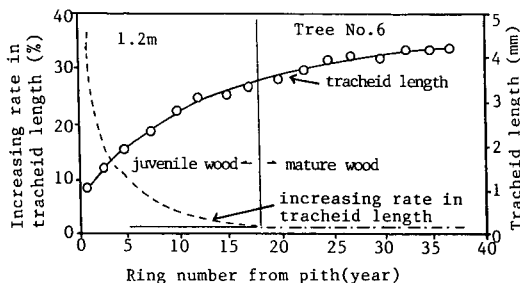


Fig. 10. Relationship between tracheid length of juvenile and mature wood and an increasing rate in tracheid length from the pith to bark.

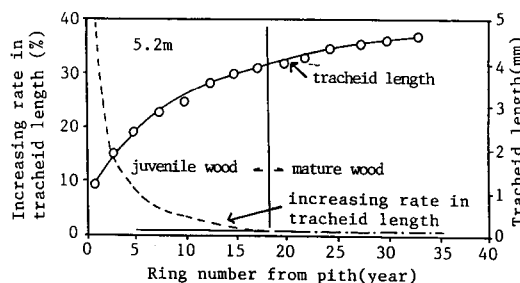


Fig. 11. Relationship between tracheid length of juvenile and mature wood and an increasing rate in tracheid length from the pith to bark.

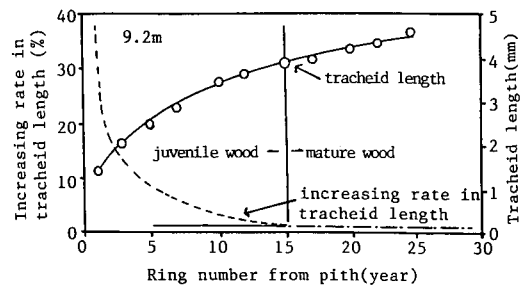


Fig. 12. Relationship between tracheid length of juvenile and mature wood and an increasing rate in tracheid length from the pith to bark.

Table 4. Relation between ring number and distance from the pith of juvenile wood

Sample tree No.	Height (m)	Ring No.	Distance (cm)	Regression equations	R	Tracheid length (mm)	
						Mean	S. D
1	1.2	16	8.1	$Y=1.78+1.21 \log X$	0.907	3.08	± 0.47
	5.2	17	7.8	$Y=1.72+1.28 \log X$	0.927	3.24	± 0.51
	9.2	15	6.7	$Y=1.94+1.12 \log X$	0.856	3.20	± 0.66
2	1.2	18	6.8	$Y=1.66+1.36 \log X$	0.868	3.16	± 0.55
	5.2	18	6.3	$Y=1.67+1.41 \log X$	0.807	3.09	± 0.56
	9.2	15	5.6	$Y=1.74+1.33 \log X$	0.929	2.92	± 0.50
3	1.2	15	6.5	$Y=1.60+1.64 \log X$	0.911	3.41	± 0.64
	5.2	17	7.1	$Y=1.73+1.59 \log X$	0.922	3.30	± 0.60
	9.2	16	6.1	$Y=1.71+1.60 \log X$	0.880	3.22	± 0.61
4	1.2	17	7.6	$Y=1.95+0.88 \log X$	0.858	3.00	± 0.36
	5.2	19	7.0	$Y=1.62+1.41 \log X$	0.935	3.54	± 0.55
	9.2	15	6.0	$Y=2.17+1.44 \log X$	0.899	3.98	± 0.56
5	1.2	16	7.8	$Y=1.65+1.27 \log X$	0.847	3.44	± 0.53
	5.2	18	8.0	$Y=1.72+1.39 \log X$	0.851	3.68	± 0.59
	9.2	13	5.6	$Y=1.83+1.47 \log X$	0.901	3.60	± 0.50
6	1.2	18	8.1	$Y=1.03+1.98 \log X$	0.991	2.86	± 0.57
	5.2	18	6.8	$Y=1.15+2.26 \log X$	0.996	2.73	± 0.49
	9.2	15	6.2	$Y=1.45+2.17 \log X$	0.998	2.70	± 0.59
7	1.2	23	5.1	$Y=1.08+2.13 \log X$	0.984	3.38	± 0.80

従って、本報告のチョウセンゴヨウについてもこの方法による対数式を適用してみた結果の例を Fig. 10, 11 及び 12 に示す。

5) 未成熟材の樹心からの年輪数と距離

未成熟材の範囲を仮道管長の回帰式における伸長から求めて決定した髄からの年輪数と距離は Table 4 の通りである。未成熟材は髄から 13—19 年輪までの範囲で、髄からの距離は 5—8 cm の範囲であった。未成熟材の範囲に対しては仮道管長を指標とする報告が主流となっており、渡辺ら³⁰⁾は髄から 10—15 年輪、太田³⁰⁾はヒノキで 10—13 年輪、深沢²⁵⁾はスギで 10—15 年輪であり、髄から 5—7 cm にあると報告した。須藤³⁵⁾はアカマツについて調査した結果、未成熟材の範囲は 20 年輪であると報告した。韓国産チョウセンゴヨウの未成熟材の範囲は年輪数では 15—20 年輪、髄からの距離は 8—10 cm であると李ら²⁰⁾は報告した。このような結果から正常に成長した針葉樹材の未成熟材の範囲は髄からはほぼ 20 年輪以内であると考えられ、この

Table 5. Variation of tracheid length for late wood and early wood (Unit: μm)

Classification	Average	Early wood	Late wood
Mean	3,014	2,851	3,132
Range		1,153—4,200	1,665—4,486

ような傾向は本実験の結果と一致した。しかし、個体間あるいは個体内の地上高部位によって年輪数の距離に差があるのは個体の成長状況による差が現れたと思われる。

正常材の平均仮道管長は 2.70—3.98 mm の範囲にあり、地上高部位別では地上高が高くなるにしたがって仮道管長が長くなる傾向であり、被圧材は正常材より短い。この結果は塩倉³¹⁾が被圧による成長抑制は平均仮道管長の伸長が遅くなると報告した結果と同じであり、李ら¹²⁾が地上高 0.2 m で 2,000—4,000 μm 、11.2 m では 1,500—4,000 μm であると報告した結果と一致した。本研究で調査し

た仮道管長は地上高別では1.2 mで1,030—4,190 μm , 9.2 mでは1,250—4,060 μm であり, 早・晩材の仮道管長の変動は, Table 5のように, 早材は2,851 μm , 晩材は3,132 μm で, 平均仮道管長は3,014 μm で多少長い傾向であった。

5. 結 論

韓国産チョウセンゴヨウにおける未成熟材と成熟材の組織構造的材質特性をまとめると Table 6の通りである。

チョウセンゴヨウの仮道管長については, 水平方向では, 仮道管が最も短い髓付近から樹齡の増加に伴って急速に増加して, 髓付近の2.5倍以上になり, 垂直方向では, 地上高の増加につれ仮道管長が増加してから上端部では短くなるという Saino の法則と同じ傾向を示している。また, 被圧木は正常木に比べて仮道管が短くなり, 未成熟材の期間も長くなる。なお, 年輪幅が1—2 mm程度であるとき仮道管長は最大に達し, 成長状態がそれより良くても悪くても仮道管長は減少するという, アカマツについての須藤³⁵⁾の調査結果は本研究の結果と一致している。さらに, 早材部よりも晩材部の仮道管が長く, 年輪幅が狭いほど仮道管は長くなる傾向である。

仮道管の直径は, 晩材での変動は少ないが, 早材部の場合には髓に接した部分の仮道管の直径がもっとも小さく, 外周に向かって急激に増加する。また, 早材部の仮道管の直径は晩材部の約2倍以上であり, 早材部における未成熟材と成熟材の直径の差は10 μm 以上である。針葉樹の細胞直径に関する既往の結果を見ると, 田島²⁴⁾はスギについて, 太田⁵⁰⁾はスギとヒノキについて, さらに塩倉³¹⁾はカラマツについても同じ傾向があることを明かにしている。

仮道管の壁厚については, 早材部では壁厚の変動

が少ないが, 晩材部では髓より外周に向かって急速に増加している。また, 成熟材の壁厚は未成熟材より10—20%厚く, 13—18年輪頃から安定する。トドマツについての加納²²⁾の調査をはじめ, 田島²⁴⁾はスギについて, 太田^{34,50)}はスギとヒノキについて, さらに塩倉³¹⁾はカラマツについて, それぞれ調べた結果, 仮道管の壁厚の変化はほとんど見られないが, 晩材部の仮道管の壁厚は髓付近から外周に向かって急速に増加し, 約10年輪を過ぎるとほぼ一定になる傾向である。しかし, 太田⁵⁰⁾はヒノキの場合早材部の壁厚が髓より外周に向かって漸次減少して, 10年輪頃からほぼ一定になるとしており, チョウセンゴヨウについての本研究の結果とは異なる傾向である。

なお, 仮道管中層のフィブリル傾角においては, 7年輪, 15年輪, 30年輪ともに同一年輪内では早材部が大きく, 晩材部に向かって小さくなっている。このような結果は, カラマツ, スギならびにアカマツに対する塩倉³¹⁾, 渡辺³⁰⁾およびNoskwiak⁹³⁾の結果と同様であるが, ヒノキに対する太田³⁴⁾の報告によると, 成熟材部における早材部と晩材部の差が見られないので, チョウセンゴヨウとは相違することが分かる。また, 幹径方向におけるフィブリル傾角の変動は, 髓付近では早・晩材ともに最大の傾角を示してから外周に向かって徐々に減少し, 15年輪以後では安定になる。この結果はカラマツに対する塩倉³¹⁾の報告と一致する傾向を示している。

一方, チョウセンゴヨウ造林木における未成熟材と成熟材の組織構造的境界は, 仮道管長についての回帰式によって決めると, 13—19年輪(髓よりの距離は5—8 cm)である。また, 仮道管の壁厚によると, 13—18年輪(髓よりの距離は6—8 cm)であり, 仮道管中層のフィブリル傾角によると15—18年輪(髓よりの距離は6—8 cm)である。この推定値は

Table 6. Variation of tracheid structure for juvenile wood and mature wood

Tracheid structure	Juvenile wood	Mature wood	Total	Early wood	Late wood
Tracheid length (μm)	2,964	3,654	3,014	2,851	3,132
Tracheid diameter (μm)	29.87	32.25	30.30	41.90	18.70
Tracheid wall thickness (μm)	3.45	4.35	3.15	3.035	4.825
S ₂ fibril angle of tracheid secondary wall (°)	21.05	11.74	15.01	23.38	17.05

D. B. H: diameter at breast height

チョウセンゴヨウにおける未成熟材と成熟材の境界が12—20年輪(髓よりの距離は6—11 cm)であるという李¹⁴⁾の報告とおおむね一致している。さらに、本研究における未成熟材の範囲は、スギ、ヒノキ、アカマツ、クロマツ、カラマツ等についての多数の報告と大体同様であるが、韓国産チョウセンゴヨウの未成熟材の年輪数はスギ、ヒノキ、アカマツ、カラマツ等より多少多いと考えられる。なお、成長を促進させることによって成熟材部までの年輪数の増加や材質の低下があまり見られなく、個体ごとに成長状態や材質が異なるという太田⁵⁰⁾の推察に注目すると、今後その問題を含めた材質育種の面での検討が必要であると考えられる。

III. 物理的特性

1. はじめに

韓国におけるチョウセンゴヨウの重要性は前に述べた。前章で未成熟材と成熟材の区分点を明確にした。本章では、髓からの年輪数と距離から未成熟材と成熟材を区分し、供試原木を標準製材して、樹幹内の物理的な材質の変動を把握するために、正常に成長したチョウセンゴヨウ材の年輪幅、晩材率、密度、収縮率及び強度(曲げ強度、圧縮強度)等の樹幹内においての変動と、成熟材・未成熟材との関係を考察した。

2. 供試木

実際に用いた供試木は Table 7 に示したように、正常に成長したチョウセンゴヨウを韓国の林業研究院中部林業試験場の演習林から選定した。なお、年

輪幅、晩材率については第2章における供試木 No. 10—19 を用いた。

3. 試験方法

1) 年輪幅と晩材率

年輪は樹木の成長を記録しているもので、年輪幅及び早・晩材幅の寸法は材質性質の指標として広く利用されている。年輪幅と晩材率を測定するため、各々調査位置で採取した樹幹円板の上面をよく鉋削し、南北二方向について基準線を設け、0.01 mm 読みのルーペを用いて測定した。早・晩材の区分を Mork⁹⁶⁾ は年輪内細胞壁率約 50% を境界として早材と晩材に区分している。また、佐伯^{97,98)} は細胞壁率 $W < 50\%$ の晩材を移行帯あるいは不顕著な晩材、 $W \geq 50\%$ を識別できる晩材(Mork 晩材)、 $W \geq 70\%$ を典型的な晩材として区分した。そのほか加納⁹⁹⁾ 等の研究があるが、本章では早・晩材の区分を色調の変化によって判定し晩材率を測定した。

2) 容積密度数

選定された供試木 No. 21, 22 から根張り材(0.2 m)、胸高部位(1.2 m)、次には 2 m 間隔で厚さ 5 cm の円板を採取し、採取した円板の平均直径に当たる所から幅 2.5 cm の strip を採取して、ここから毎年輪間隔で平均年輪幅を測定した。髓付近から樹皮側に向けて鋭い刃物を用いて 1 年輪間隔で連続的に分離した。次に水中に浸せきして飽水状態にした後、水中の浮力から飽水時の体積を測定した。続いて 105℃ の乾燥器で恒量に達したときの重さを測定した。重量測定は 0.001 g の digital balance を使用した。

Table 7. Description of sample trees

Species	Sample trees No.	Origin	D. B. H. (cm)	Height (m)	Age (year)	Remark
<i>Pinus</i>	21	SOHUL-MYON	32	20.5	48	
<i>koraiensis</i>	22	POCHON-GUN	21	17.0	45	
	23	KYUNGGI-DO	28	18.5	40	
	24		30	19.5	42	
	25		32	19.2	42	
	26		30	20.0	42	
	27		28	19.6	42	
	28		30	20.0	42	
	29		32	20.5	42	
	30		30	20.0	42	

D. B. H.: diameter at breast height

$$\text{容積密度数 (kg/m}^3\text{)} = \frac{\text{全乾重量}}{\text{生材体積}}$$

3) 軟X線デンストメトリーによる比重の測定

樹幹内木材比重の連続的な変動を軟X線デンストメトリーで調査した。試片製作は供試木 No. 23, 54 を用い地際部から樹高方向へ 0.2 m, 1.2 m 以後は継続して 2 m 間隔で厚さ 5 cm の円板を採取して供試円板の平均直径に当たる所から髓心を含む幅 3 cm の strip を採取した後, 20°C, 65%RH の恒温恒湿室で 1 カ月間調湿した。この試験片に軟X線を透過し, 写真上に透過線量を感光させてその透過度を軟X線デンストメトリーで測定した。調査断面は横断面にし, 標準密度試片はスオウンハイブリッドポプラ (*Populus tomentiglandulose* T. Lee) の辺材を用いた。軟X線発生装置は CMBW 型を使用し, 最大出力 60 kVP, 20 mA, 発生波長範囲 0.28—1.8 Å, X線写真の撮影条件はX線発生源から 60 cm 支点到試料とフィルムを重ねておいた後, 加速電圧 20 kVP, 1.5 mA, 照射時間 1 分間の条件にした。使用フィルムは Fuji film soft X線用 FR, 現像は Fuji film 現像剤 Rendol を使用して 20°C で 5 分, 定着は Fuji Renfix を使用して 20°C で 10 分間処理した。フィルムの透過度測定は Joice Loebel 社の microdensitometer 3CS を使用し, 同機器のコンピュータプログラムを利用して資料を分析した。

4) 収縮率

収縮率測定用の試料は供試木 No. 24, 25, 26 及び 27 を用い, 成熟材と未成熟材に分け, Fig. 13 のように地上高 0.2 m, 1.2 m, 3.2 m 以後は 2 m 間隔で厚さ 10 cm の円板を採取し, 各円板から成熟

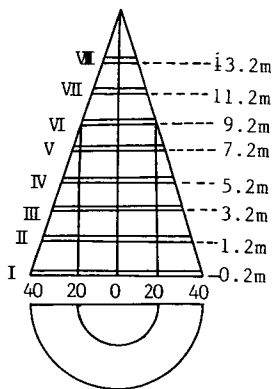


Fig. 13. Specimen locations

材と未成熟材に区分し, 2 方向で髓から外方に向けて辺長 30 mm, 厚さ 5 mm の二方板の試験片を採取した。

測定方法は JIS Z 2103 の木材収縮率測定法に従って次の式から求めた。

$$\text{全収縮率 (\%)} = \frac{l_1 - l_3}{l_1} \times 100$$

$$\text{気乾までの収縮率 (\%)} = \frac{l_1 - l}{l_1} \times 100$$

$$\text{含水率 1\% に対する平均収縮率 (\%)} = \frac{l_2 - l_3}{nl} \times$$

100

但し n : l_2 を測定したときの含水率

l : 含水率 15% の時の基準線の長さで l_2 及び l_3 から比例的に次の式で算出したもの

$$l = l_3 + \frac{15(l_2 - l_3)}{n}$$

l_1 : 生材の長さ

l_2 : 室内で重量が一定に達したときの長さ

l_3 : 全乾の長さ

長さの測定にはコーパレイタで 0.001 mm まで読み, 重量測定には 0.001 g の digital balance を使用した。各部位の収縮率はその部位から得た試料の平均値である。

5) 強度

木材の強度は正常に成長した供試木 No. 27, 28, 29 及び 30 のチョウセンゴヨウ材を用い, 樹幹内の全域において未成熟材と成熟材に分け, 地上高 30 cm から 2 m 間隔の丸太を造材した。各丸太から南北半径で厚さ 4 cm の板を製材してそれから無欠点材を採取して試験体を製作した。試験体は 20°C, 65%RH の恒温恒湿室で含水率約 12% に達するまで調湿した。

a) 曲げ強度

曲げ強度試験は 10 ton 島津木材万能材料試験機を使い, 試験片は 3.0 cm × 3.0 cm × 48 cm, スパンの長さは 42 cm, 荷重はスパン中央に集中荷重を加えた。荷重面の標準は放射断面にし, 荷重速度は毎分約 150 kg/cm² 以下にした。

$$\text{曲げ強度} = \frac{3Pl}{2bh^2}$$

$$\text{曲げ比例限度} = \frac{3Ppl}{2bh^2}$$

$$\text{曲げヤング率} = \frac{\Delta P l^3}{bh^3 \Delta y} \times \frac{1}{4}$$

但し P：破壊荷重

l：スパンの長さ (cm)

b：試験片の幅 (cm)

h：試験片の高さ (cm)

Pp：比例限度荷重 (kg)

ΔP：比例域における上限荷重と下限荷重との差

Δy：ΔPの時のスパン中央のたわみ (cm)

但し、試験片の曲げ試験時の含水率は12%に補正換算した。則ち、含水率変化1%に対する変化率は比例限度5%、曲げ強度4%、ヤング率2%を減増した。

b) 縦圧縮強度

縦圧縮強度試験は曲げ強度のように、10 ton 島津木材万能材料試験機を使い、縦圧縮強度の試験片は3.0 cm×3.0 cm×6.0 cmにし、平均荷重速度は毎分約100 kg/cm²にした。ここでは縦圧縮強度、縦圧縮比例限度を各々次の式によって求めた。

$$\text{縦圧縮強度} = \frac{P}{A} (\text{kg/cm}^2)$$

$$\text{縦圧縮比例限度} = \frac{Pp}{A} (\text{kg/cm}^2)$$

P：最大荷重 (kg)

A：断面積 (cm²)

Pp：比例限度荷重 (kg)

4. 結果と考察

1) 年輪幅と晩材率の変動

a) 年輪幅の変動

年輪幅の変動は供試木 No. 10-19 について放射方向に調査しており、水平方向での変動は Fig. 14 に示すように年輪幅は髓付近で若干狭く外方に向かって5-8年輪までは急激に増加し、その後は徐々に減少し15-18年輪 (髓からの距離は6-8 cm) を過ぎるとほぼ安定になる。このような傾向は酒田ら¹⁰⁰⁾ がスギについて報告しており、塩倉³¹⁾ のカラマツでも同じ傾向を示し、李⁹⁾ はチョウセンゴヨウの場合12-15年輪以後で安定すると報告したものと同一傾向であった。地上高0.2 mの部位から20年輪を過ぎると幅の広い年輪が見られる。

これは塩倉³¹⁾ の報告のように根張りの影響によるものであると思われる。同じ年輪幅のパターンは

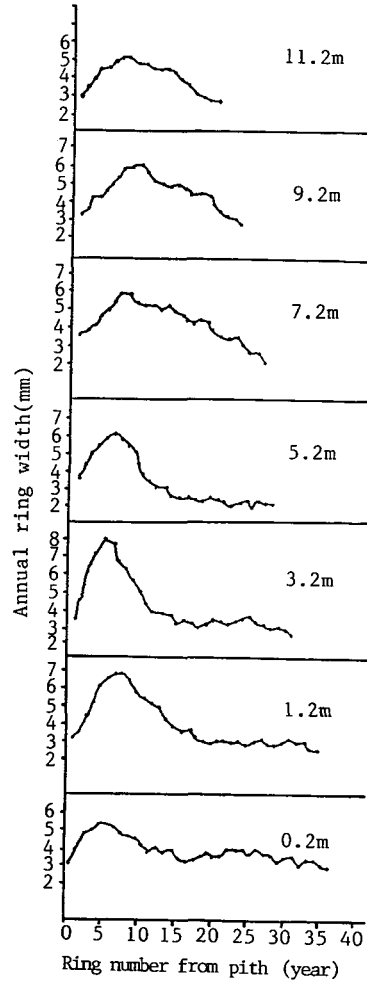


Fig. 14. Variation in ring width from the pith to bark at different heights.

Table 8. Statistical values of annual ring width at parts of stem on sample trees

Parts of stem	Mean (mm)	Standard deviation (%)	C. V
At bottom	3.44	1.46	42
With clear length	3.53	1.74	52
With crown	3.77	1.38	37
Total	3.56	1.59	45

Richardson¹⁰¹⁾, 田島²⁴⁾, 上村¹⁰²⁾によっても示されている。深沢²⁵⁾, 塩倉³¹⁾は年輪幅の垂直変動から、成熟材の年輪幅はほぼ一定域の主幹材と根張り材の二域に区分した。

チョウセンゴヨウの垂直変動については、供試材を地際部分（地上高0—1 m）と枝下部分（2—7 cm）及び樹冠部分（8—13 m）に区分し、それらの統計的数値を整理した結果を Table 8 に示す。この結果によると地上高が増加するにつれて平均年輪幅も増加する傾向を見せており地上高が高い所でさらに著しい傾向を示した。

チョウセンゴヨウで地上高が増加するに従い平均年輪幅が樹冠材>枝下材>地際材となり、地上高と共に増加する比例的な関係があると報告した李⁹⁾の研究結果と同じ傾向であった。年輪幅の垂直変動を心辺材別に見ると Fig. 15 のように心材部では地上高の増加と共に年輪幅が増加している。辺材では地上高が増加しても地上高 7.2 m まではほぼ一定の傾向を見せ、それ以上での年輪幅は著しく増加している。李⁹⁾は心辺材の地上高増加による変化がほぼない一定する安定した領域(約 7.0 m)を区分することができ、心材部では地上高増加によって年輪幅は多少増加しているが辺材部のように顕著ではないと報告しており、本研究と同じ傾向であった。年輪幅は育林によってある程度調整できる。朱¹⁰³⁾らは成林木のチョウセンゴヨウの無間伐施肥によって平均胸高直径成長量が 2.3% 増加し、間伐施肥は 3.0% 増加したことを報告している。施肥や間伐によって年輪幅をコントロールできることは今後の可能を秘めている。

b) 晩材率の変動

チョウセンゴヨウの晩材率の変動を供試木 No. 10—19 について調査し、水平方向での晩材率の変動を示すと Fig. 16 の通りである。晩材率は髓付近で大きく減少して再び増加し 15—18 年輪頃まで増加しそれ以後には安定した傾向を示す。変異が著し

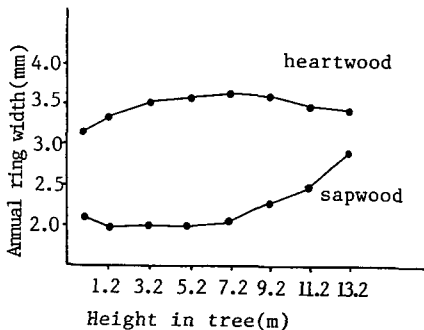


Fig. 15. Relation between annual ring width and height in tree by sapwood and heartwood.

い領域の髓からの距離は 6—8 cm である。晩材率の垂直変動は Table 9 のようであり、この結果によると地上高が増加するに従い平均晩材率は減少して、地際部>枝下部>樹冠部の順であり、地上高が 7 m 以上に高くなると晩材率は不安定になった。

李⁹⁾はチョウセンゴヨウの平均晩材率は優勢木 22%、準優勢木 24%、劣勢木 26% であり、立木成長が劣勢なものほどその率が大きいとしており、本

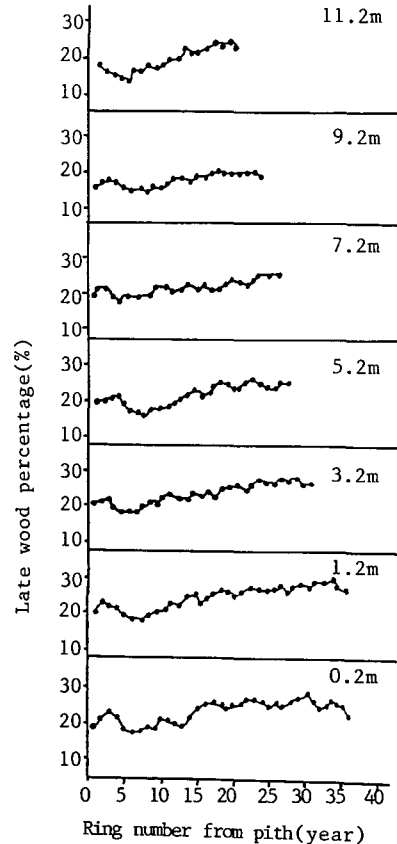


Fig. 16. Variation in late wood percentage from the pith to bark at different heights.

Table 9. Statistical values of late wood percentage at parts of stem on sample trees

Parts of stem	Mean (%)	Standard deviation (%)	C. V
At bottom	23.3	3.52	15
With clear length	22.2	3.24	14
With crown	20.1	2.99	14
Total	22.0	3.33	15

研究では平均晩材率が22%であり、同じ傾向を示している。

c) 平均年輪幅

韓国チョウセンゴヨウの供試木 No. 11-19 の年輪幅の出現率を Fig. 17 に示す。姜ら¹⁰⁾は韓国産マツ属の平均年輪幅は2.6-3.0 mm の範囲にあり、アカマツが2.6 mm, クロマツが2.8 mm, チョウセンゴヨウが3.0 mm であると報告し、李⁹⁾はチョウセンゴヨウの年輪幅は0.5-6.5 mm で平均年輪幅は3 mm と報告した。本試験に用いた供試木の年輪幅の出現率は3 mm が最も多く、次が4 mm, 5 mm, 2 mm で大部分を示しており、それらを平均した結果を Table 10 に示した。

d) 年輪幅と早・晩材幅, 晩材率の関係

韓国産チョウセンゴヨウは年輪幅と比較して早材幅は変化が大きい, 晩材幅の変化は非常に少ない。しかし, ある程度年輪幅が広くなると晩材幅は年輪幅の変化に逆比例する傾向であり, 年輪幅が3.3 mm の時の晩材率は28.4%として最も高く, 年輪幅が7.16 mm の時の晩材幅は1.38 mm で最も小さく, 年輪幅が8.91 mm の時は早材幅が7.81 mm で最も広がった。

李⁹⁾は韓国産チョウセンゴヨウは一般的に年輪幅が増大すると晩材率は漸次減少する反比例的な関係があるとし, 年輪幅が7 mm 以上では晩材率が15%以下が大部分であると報告した。

晩材率は年輪幅によって増加してから減少する傾向を示している。これは Ylinen¹⁰⁴⁾ はある限度より年輪幅が広くなると晩材率は年輪幅の変化に逆比例

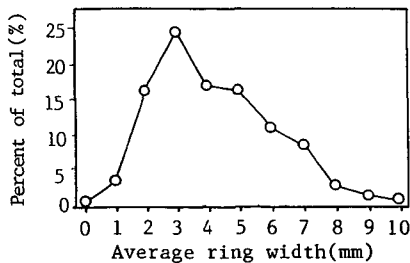


Fig. 17. Frequency of average annual ring width.

Table 10. Variation of annual ring width

Average annual ring width (mm)	Standard deviation (mm)	C. V
3.66	±1.86	50

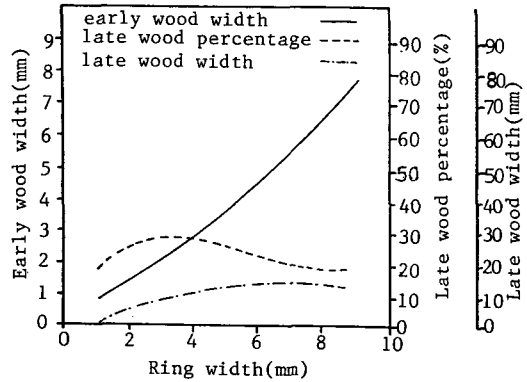


Fig. 18. Variation of late wood percentage and early wood width with ring width.

する傾向が認められると報告している。彼が示したオウシュウアカマツのように, Fig. 18 のチョウセンゴヨウも同様な傾向を示している。

2) 容積密度数の樹幹内変動

木材の容積密度数は生材の単位容積に含まれた木材実質の量であり, 材料的な指標の一つとして考えられてきた。木材繊維を利用するときには容積当りの数量を, また, 構造材で利用するときには強度性能や伸縮性能を示すのに使われてきた。

材質の直接的な指標としての容積密度数は年輪幅と晩材率の2個の要素で決定されており, これは個体や成長条件によって変化する。

加納⁴⁹⁾はトドマツの容積密度数の大きさと樹幹内の分布についての研究で年輪幅と晩材率と容積密度数, 幹の容積密度数の構成及び樹幹内で容積密度数の変化する類型について示した。また, 渡辺⁴²⁾はスギの造林木の樹幹内で容積密度数の変動について容積密度数は樹心部では大きく, 外側に向かって軽減し, 幹の下から上へ増大する傾向があると報告した。

平井^{44-47, 105-107)}はスギのほか2, 3の樹種について樹幹内の容積密度数の変動を研究し, 成長の優劣によって樹幹内の容積密度数の分布が異なり, 劣勢木では, 樹幹上部に全断面にかけて重い材が最外側に沿って下部に直下する傾向があると報告した。

韓国産チョウセンゴヨウについての容積密度数の水平変動と年輪幅の関係を Fig. 19 に示す。

容積密度数は髓に接する部位で地上高に関係なく高く, 年輪幅が広い髓から5-7年輪で低く, 以後外周に向かって増加し13-18年輪で安定する。垂

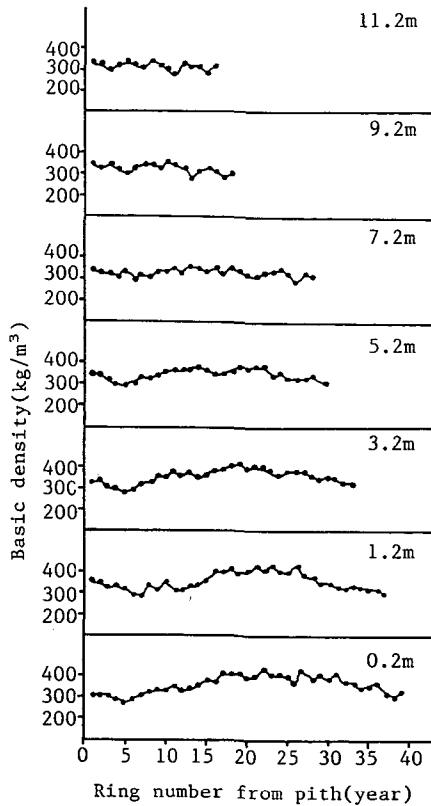


Fig. 19. Variation in basic density from the pith to bark at different heights.

Table 11. Statistical values of basic density at parts of stem on sample trees

Parts of stem	Mean (kg/m ³)	Standard deviation (kg/m ³)	C. V
At bottom	369	42.19	11
With clear length	357	35.52	10
With crown	327	20.02	6
Total	354	36.65	10

直方向での変動は Table 11 の通りであり、地際材が最も大きく、枝下材、樹冠材の順であった。年輪幅と容積密度数との関係は年輪幅が1.5-4.0 mmで容積密度数が大きく、これより年輪幅が狭いかあるいは広い時は容積密度数が低く、年輪幅が3 mm前後で最も大きく晩材率とは同じ傾向を示した。これは加納⁹⁹⁾のトドマツについての結果と一致する。宮島³⁹⁾は構造材育成を対象とすると平均容積密度数 320 kg/m³ 以上が望ましく、グイマツは年輪幅

10 mm 近くまで上記条件以上であり、チョウセンゴヨウも年輪幅 7 mm まではこの条件に適合し、従って、構造材として適当であると報告している。

李¹⁹⁾は韓国産チョウセンゴヨウの容積密度数の算術平均値は優勢木の場合 306 kg/m³、準優勢木 371 kg/m³、劣勢木 389 kg/m³ であると報告し、被圧木では劣勢木と同じ傾向であり、加納¹⁰⁸⁾が下層木部では年輪幅 2.0 mm 範囲として年輪幅と比例して増加する傾向を示すと報告したものと同じ傾向であった。

チョウセンゴヨウの早材と晩材の容積密度数の頻度分布を Fig. 20 に示した。早材の容積密度数の平均は 306 kg/m³、晩材の平均は 429 kg/m³ である。また早材より晩材の分布範囲が広い。早・晩材の重なりは晩材の最低値が早材の領域まで入ってきていることを示している。深沢⁸⁴⁾は早・晩材の境界がはっきりしている材はスギであると報告しており、チョウセンゴヨウはスラッシュパインのように早・晩材が緩やかな樹種であった¹⁰⁹⁾。

3) 軟X線デンストメトリーによる比重変動

a) 年輪間の比重変動

軟X線デンストメトリーによって供試木 No. 23 を用い樹幹内比重の変動を調査した結果は Fig. 21 のようである。この結果は地上高 1.2 m, 5.2 m, 9.2 m で髄から樹皮側までの比重変動を連続的に調査した結果である。この図ではわかりにくいチョウセンゴヨウ早材部の比重は樹心部が多少高く樹皮に向かって減少し、10-15年輪を過ぎると安定する。しかし、晩材部は樹心部が低く樹皮側に向かって増大し、12-15年輪を過ぎると安定する傾向を示した。なお、地上高部位では早材部では変異が大

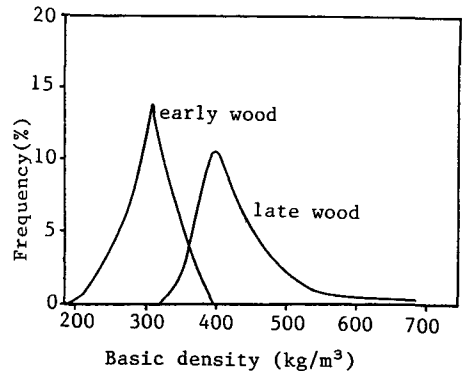


Fig. 20. Distribution of frequency for basic density of earlywood and latewood.

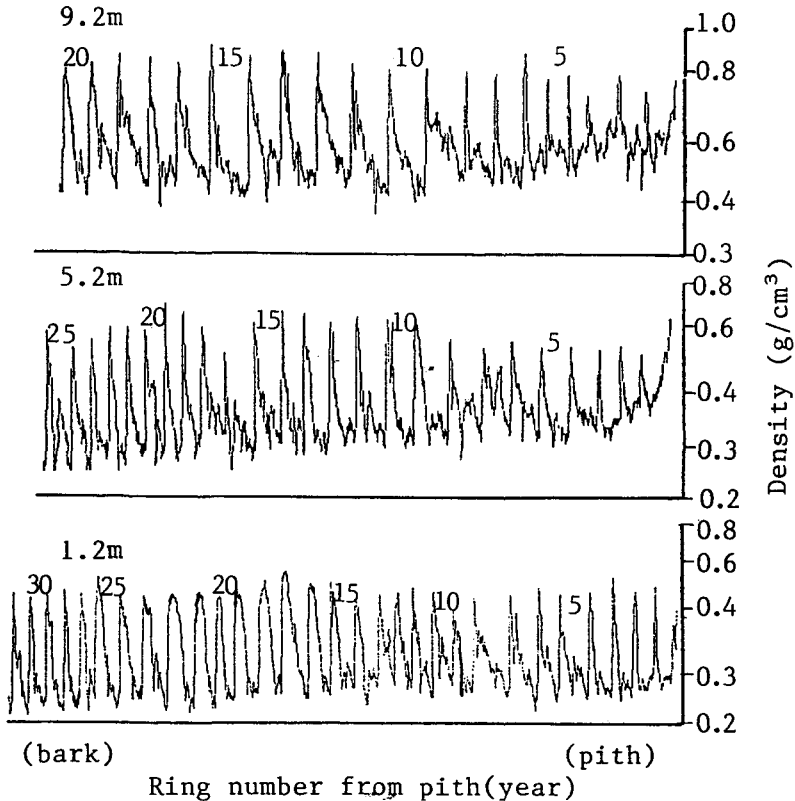


Fig. 21. Variation in density with ring number from the pith to bark.

きく、この傾向がわかりにくい。

このような傾向はすべての地上高部位で共通的に現れるが各地上高部位で比重の絶対値は一致しないし、不規則であった。本報でのデントメトリーから得た早・晩材の数値は各年輪の最大値と最小値のPeakの部分である。一年輪内の平均比重は早材部と晩材部の面積を計算して全体年輪の平均比重を計算しなければならないが、本研究ではこのような計算はしなかった。放射方向の比重変動に関するこの種の研究で、太田⁵⁰⁾はスギ、ヒノキの場合、髓心部位で比重が高く、外側に向かって比重は減少するが、髓心から10—15年ではほぼ一定になり、アカマツでは髓心から3—4年までは比重が減少し、その外側では比重が徐々に増加すると報告した。

b) 年輪内の比重変動

一年輪内比重の変動を調査するため、供試木 No. 23 の地上高 9.2 m 部位の円板から髓心から 3 年、9 年及び 20 年めの年輪を選び、早材部位から晩材部位までの比重変動を連続的に調査した。その結果を

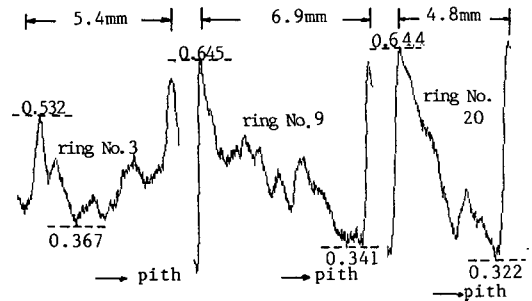


Fig. 22. Variation in density within an annual ring.

Fig. 22 に示す。チョウセンゴヨウの髓心から 3 年目の年輪内の比重変動は 0.367—0.532 の範囲内にあり、早・晩材間の比重差はそれほど大きくはなかった。しかし、髓心から 9 年目では 0.341—0.645 の範囲にあり、20 年輪では 0.322—0.644 で髓心からの年輪数が増加するほど早・晩材間の比重差は大きかった。

チョウセンゴヨウは 2 葉松であるマツより早・晩

材の移行が緩慢である。未成熟材における早材から晩材への移行は成熟材より緩慢であった。早・晩材の比重の差はチョウセンゴヨウで未成熟材は約1.5—1.8倍、成熟材は約2倍である。

4) 収縮率の樹幹内の変動

供試木 No. 24, 25, 26 の各部位から採取した試料の半径方向と接線方向の収縮率と異方差は Table 12 のようであり、繊維方向の収縮率は Table 13 のようである。

塩倉³¹⁾は未成熟材は成熟材より半径方向と接線方向ともに収縮率が少ないと報告し、Zobel 等^{26,28,110)}は成熟材より未成熟材が大きいと報告した。Yao¹¹¹⁾は Loblolly pine に対しても同じ結果を報告した。

収縮率が樹幹各部位で変異する原因についてはいろいろ因子があるが、特にその部位において仮道管二次壁中層の平均フィブリル傾斜角の変動によって最も大きく影響を受けると推論した⁹¹⁾。

韓国産チョウセンゴヨウ供試木 No. 25, 26 は未成熟材が成熟材より半径方向と接線方向ともに収縮率が小さいが、供試木 No. 26 は接線方向では未成熟材が成熟材より収縮率が小さいが、半径方向では未成熟材の収縮率が大きかった。従って、接線方向で未成熟材が成熟材より収縮率が少ないと言えるが、半径方向では必ずしも少ないとは言えない。繊維方向では成熟材より未成熟材が大きく、これは未成熟材の繊維方向収縮が大きいと報告した Maddern⁹⁰⁾の結果と同じ傾向である。深沢⁷²⁾の体積収縮は未成熟材が成熟材に比して少ない傾向であり、チョウセンゴヨウも同じ傾向であった。このように未成熟材の収縮率が少ないのは、Yao¹¹¹⁾と塩倉³¹⁾が言ったように成熟材に比して未成熟材の仮道管二次壁中層のフィブリル傾角が大きいためであると考えられる。

5) 曲げ強度

木材の曲げ強度は樹幹内全域について未成熟材と

Table 12. Summary on the percentage of shrinkage and anisotropy

Tree number	Portions	Ring width (mm)	Density in air dry	Total shrinkage (%)		
				T	R	T/R
24	Juvenile wood	4.47~6.15~8.31	0.31~0.34~0.38	5.79~7.96~9.40	2.60~3.37~4.92	1.66~2.28~3.00
	Mature wood	3.61~3.97~4.21	0.33~0.34~0.36	7.20~8.99~9.67	3.14~3.73~4.99	1.96~2.53~3.17
25	Juvenile wood	2.88~3.79~4.49	0.40~0.48~0.47	6.63~7.87~9.16	2.29~3.21~4.61	1.98~2.50~3.14
	Mature wood	2.64~3.14~3.78	0.39~0.41~0.46	7.53~8.70~9.11	2.34~3.55~4.87	1.87~2.49~3.05
26	Juvenile wood	4.38~5.87~7.70	0.32~0.35~0.37	4.85~6.92~8.03	2.02~2.97~3.93	1.64~2.40~3.55
	Mature wood	3.26~3.97~4.98	0.29~0.32~0.35	5.89~7.28~8.36	2.08~2.50~2.98	2.31~2.95~3.73
Shrinkage from green to air dry (%)			Average shrinkage (%)			
t	r	t/r	t'	r'	t'/r'	
2.00~3.76~4.93	0.98~1.58~2.07	1.50~2.46~3.32	0.17~0.32~0.45	0.11~0.15~0.20	1.36~2.07~3.00	
3.34~4.72~5.70	1.41~1.78~1.93	2.19~2.58~2.94	0.33~0.37~0.45	0.13~0.19~0.25	1.37~2.01~3.15	
2.18~3.78~4.96	1.03~1.42~2.06	1.88~2.68~8.22	0.23~0.30~0.45	0.10~0.12~0.14	1.59~2.52~3.16	
3.67~4.38~5.26	1.21~1.88~2.21	1.81~2.61~3.26	0.31~0.36~0.47	0.11~0.15~0.16	2.00~2.44~3.28	
2.87~3.93~4.81	1.01~1.68~2.60	1.35~2.33~4.43	0.15~0.26~0.31	0.09~0.11~0.13	1.42~2.37~2.99	
3.02~3.95~4.88	1.03~1.24~2.77	1.91~3.33~4.55	0.23~0.29~0.47	0.07~0.11~0.44	2.20~2.45~3.35	

Table 13. Longitudinal shrinkage

Portions	Total shrinkage (%)	Shrinkage from green to air dry (%)	Average shrinkage per 1% of moisture content (%)
Juvenile wood	0.24~0.32~0.44	0.101~0.150~0.200	0.009~0.014~0.019
Mature wood	0.22~0.24~0.36	0.060~0.121~0.181	0.010~0.012~0.016

※Min.~Ave.~Max.

Table 14. Bending strength corrected to 12% moisture content of wood within the stem

		N	σ_b (kg/cm ²)	σ_{bp} ($\times 10^3$ kg/cm ²)	E _b (kg/cm ²)	sp·gr	σ_b/ru
Juvenile	min.		500	294	53.8	0.38	930
wood	mean \pm sd	40	676 \pm 56.24	362 \pm 30.37	76.4 \pm 9.33	0.42 \pm 0.02	1093 \pm 100
	max.		802	494	95.4	0.45	1279
Mature	min.		525	294	62.0	0.42	1137
wood	mean \pm sd	40	726 \pm 59.31	394 \pm 30.86	80.9 \pm 6.77	0.46 \pm 0.02	1432 \pm 122
	max.		837	470	98.0	0.53	1658
Total	min.		500	290	53.0	0.38	930
wood	mean \pm sd	80	701 \pm 62.81	373 \pm 32.43	78.6 \pm 8.42	0.44 \pm 0.03	1262 \pm 204
	max.		837	494	98.0	0.53	1658

成熟材の曲げ強度を検討した。

a) 樹幹内の曲げ特性値

供試木 No. 27, 28, 29, 30 の樹幹内全域について、未成熟材と成熟材別に調べた曲げ強度 σ_b (kg/cm²)、曲げ比例限度 σ_{bp} (kg/cm²)、曲げヤング率 E_b (kg/cm²) の各々の最小—平均—最大値と標準偏差を Table 14 に示す。

樹幹内の曲げ強度は 500—837 kg/cm²、曲げ比例限度は 290—494 kg/cm²、ヤング率 53.0—98.0 ($\times 10^3$ kg/cm²) とかなり大きい変動を示す。樹幹内心部に存在する未成熟材と成熟材の曲げ強度の幹軸方向の変動を Fig. 23 に示す。未成熟材部の曲げ特性は成熟材部に比して低い。特に樹幹基部に近い未成熟材部は最も低い値を示した。このことについて Loblolly pine を用いた Pearson ら⁵²⁾ はあて材が影響を与えろと言っており、塩倉³¹⁾ はカラマツの幹軸方向において仮道管の平均長と二次壁中層の平均フィブリル傾角の変動の実験結果より、同じ年齢の

形成層によってつくられた木部の仮道管の平均長とフィブリル傾角は樹幹基部において長さは短く、傾角は大きくなると報告し、これが樹幹基部の曲げ特性値の低下に関与している主な因子であると推定されると述べている。チョウセンゴヨウもこのような原因によるとも考えられるが次に述べるような密度との関連も考えねばならない。

b) 密度と曲げ強度

気乾密度と曲げ強度との関係は Fig. 24、気乾密度と曲げヤング率との関係を Fig. 25、気乾密度と曲げ比例限度との関係を Fig. 26 に示した。Kollmann ら¹¹²⁾ は、密度と曲げ破壊係数は比例関係にあり、Shirasawa¹¹³⁾ は日本産材の比重と曲げ強度、比重と曲げヤング率に関する実験式を報告し、Pearson⁵²⁾ は密度と曲げ破壊係数との間及び密度と曲げヤング率の間には高い相関関係があると指摘し、比重が曲げ特性のよい指標になると述べてい

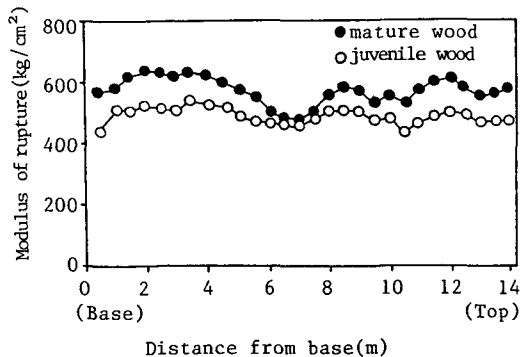


Fig. 23. Vertical variation in average modulus of rupture in bending.

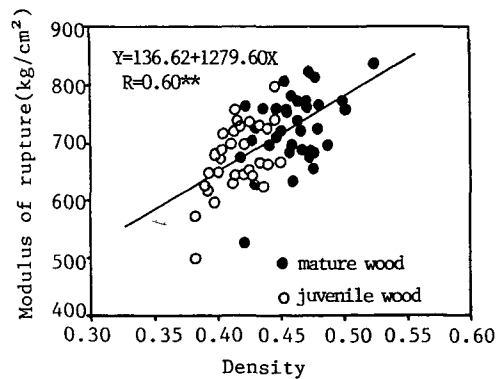


Fig. 24. Relation between density and modulus of rupture in bending.

** Significant at 1% level

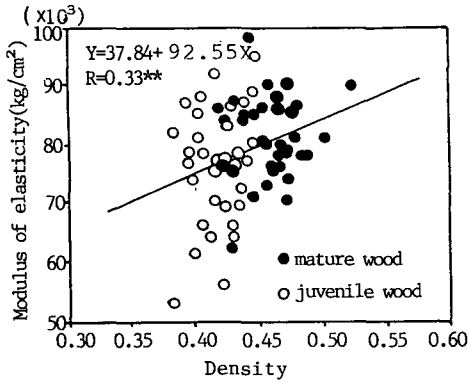


Fig. 25. Relation between density and modulus of elasticity in bending.
** Significant at 1% level

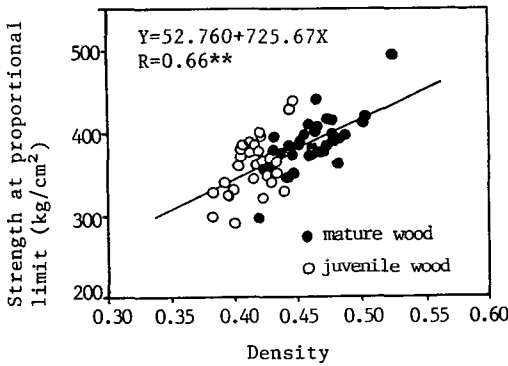


Fig. 26. Relation between density and Strength at proportional limit in bending.
** Significant at 1% level

る。韓国産チョウセンゴヨウの未成熟材は成熟材に比べて曲げ強度が低いが、両材を合わせた比重と曲げ強度との関係には高い相関関係があり密度による原因が大きいことを示している。両材を分けた両者の関係は未成熟材では0.58で、成熟材では0.43の高い相関関係を示しており、比重と曲げヤング率との関係は相関関係が低く、比重と曲げ比例限度との関係は高い相関関係があり、両材を分けた各々の関係は相関関係があった。

c) 曲げヤング率と曲げ強度及び曲げ比例限度との関係

曲げヤング率と曲げ強度との関係及び曲げヤング率と曲げ比例限度との関係を Fig. 27 と Fig. 28 に示した。何れも正相関が認められ、その相関係数は各々0.774, 0.546であった。従って、曲げヤング

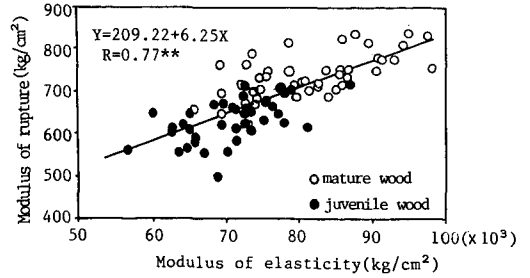


Fig. 27. Relationship between modulus of rupture and modulus of elasticity in bending.
** Significant at 1% level

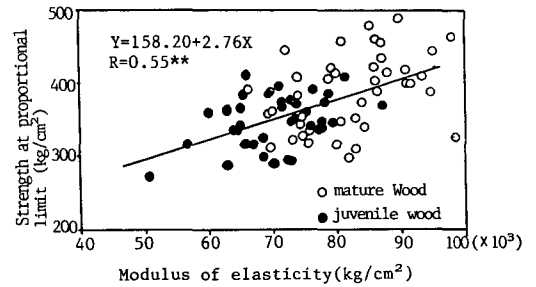


Fig. 28. Relation between strength at proportional limit and modulus of elasticity in bending.
** Significant at 1% level

率と曲げ強度、曲げヤング率と曲げ比例限度との相関はよい直線関係が認められる。多くの研究者が曲げヤング率と曲げ破壊係数との間には高い相関があると報告している。塩倉³¹⁾は木材の曲げに対する品等区分のために行う非破壊試験で曲げヤング率に利用の価値が認められ、韓国産チョウセンゴヨウにおいても品等に曲げヤング率が利用できると考えられる。

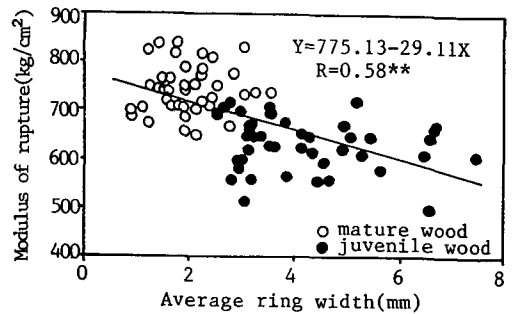


Fig. 29. Relation between modulus of rupture in bending and average ring width.
** Significant at 1% level

d) 年輪幅と曲げ強度

年輪幅と曲げ強度との関係を Fig. 29 に示した。年輪幅が広くなると曲げ強度が低下する傾向が認められた。Libardic ら¹¹⁴⁾ は年輪幅と強度との間には必ずしも相関関係があるのではないと報告しているが、年輪幅と各種強度との関係は肉眼による材質評価が基準になるため、多くの研究報告がある^{28,115,116)}。

韓国産チョウセンゴヨウは成熟材と未成熟材をあわせた場合負の関係が大きく認められたが、これは未成熟材が年輪幅が大きく強度は小さいためである。

6) 縦圧縮強度

木材の縦圧縮強度は樹幹全体で未成熟材と成熟材の縦圧縮強度を検討した。

a) 樹幹内の縦圧縮特性値

供試木は曲げ強さ試験供試木で、未成熟材と成熟材別に縦圧縮強度 σ_c (kg/cm²)、縦圧縮比例限度 σ_{cp} (kg/cm²) の各々の最小—平均—最大値と標準偏差を Table 15 に示した。縦圧縮強度は未成熟材では 380—463 kg/cm² の範囲、成熟材では 432—528 kg/cm² で平均縦圧縮強度は大きく、縦圧縮比例限度は未成熟材では 263—394 kg/cm² の範囲、成熟材では 307—470 kg/cm² で平均縦圧縮比例限度も同様に成熟材の方が大きかった。

b) 密度と縦圧縮強度

密度と縦圧縮強度との関係を Fig. 30 に示した。成熟材と未成熟材の両材を合わせた密度と縦圧縮強度との関係は高い相関関係があり、未成熟材と成熟材の各々の関係は未成熟材は 0.15 で相関が低いが、成熟材は 0.66 で高い相関関係を示した。

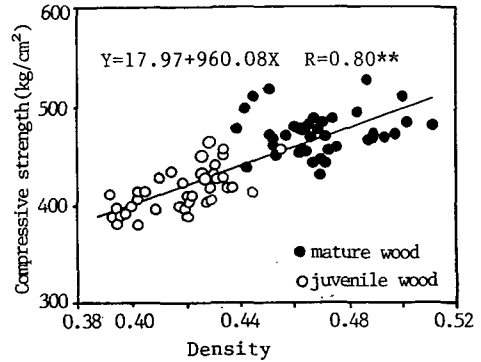


Fig. 30. Relation between density and compressive strength.

** Significant at 1% level

成熟材と未成熟材を区分した各種強度と比重との間にはいつも正の相関があり、両者の回帰直線に差異が無いものには Loblolly pine 相関係数 0.93⁵²⁾、カラマツ欠点を持った試料⁴⁹⁾、差異があるものにスギ⁵⁰⁾、ヒノキ^{117,118)} が報告されている。後者の比強度は成熟材が未成熟材より大きいと言われており⁵⁰⁾ 国産チョウセンゴヨウも密度が高いほど圧縮強度が増加し、未成熟材より成熟材の圧縮強度が大きく^{50,117,118)}、Pearson⁵²⁾ と同じ傾向であった。

c) 密度と縦圧縮比例限度

密度と縦圧縮比例限度との関係を Fig. 31 に示した。未成熟材と成熟材の両方を合わせた場合高い相関関係があり、各々単独の相関関係は未成熟材が 0.12、成熟材は 0.49 であり相関が低かった。

d) 縦圧縮比例限度と縦圧縮強度

縦圧縮比例限度と縦圧縮強度との関係を Fig. 32 に示した。未成熟材と成熟材の両方を合わせた場合

Table 15. Compressive strength corrected to 12% moisture content of wood within the stem

		N	σ_c (kg/cm ²)	σ_{cp} (kg/cm ²)	sp*gr	σ_c/ru
Juvenile wood	min.		380	263	0.39	913
	mean ± sd	40	416 ± 21.68	334 ± 32.51	0.42 ± 0.02	979 ± 30.31
	max.		463	394	0.46	1037
Mature wood	min.		432	307	0.44	888
	mean ± sd	40	473 ± 21.46	390 ± 33.39	0.47 ± 0.02	1017 ± 44.47
	max.		528	470	0.51	1093
Total wood	min.		380	263	0.39	888
	mean ± sd	80	445 ± 35.90	362 ± 43.26	0.44 ± 0.03	997 ± 42.13
	max.		528	470	0.51	1093

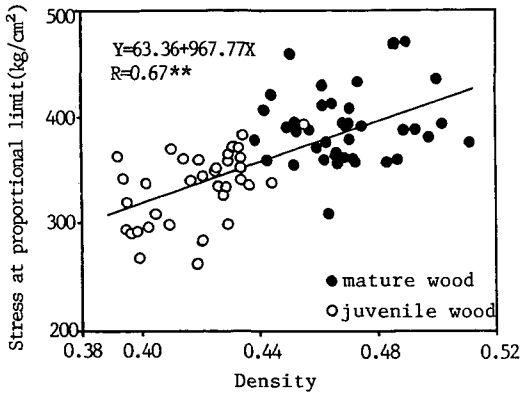


Fig. 31. Relation between density and stress at proportional limit in compression.
** Significant at 1% level

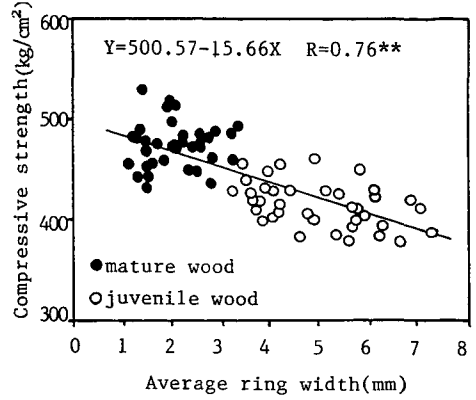


Fig. 33. Relation between average ring width and compressive strength.
** Significant at 1% level

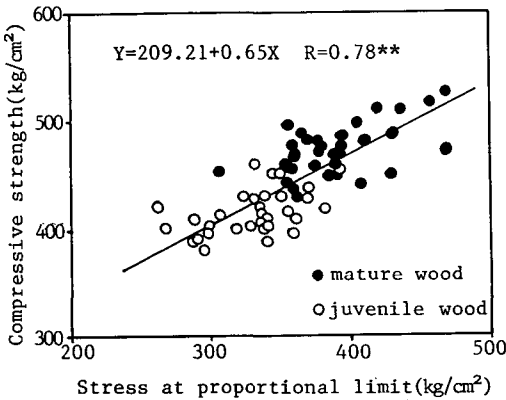


Fig. 32. Relation between stress at proportional limit and compressive strength.
** Significant at 1% level

相関関係は高い値を示している。未成熟材は0.58, 成熟材は0.57で有意性があった。

e) 年輪幅と縦圧縮強度との関係

年輪幅と縦圧縮強度との関係を Fig. 33 に示す。未成熟材と成熟材の両材を合わせた年輪幅と縦圧縮

強度とは0.76の負の高い相関関係を示し、年輪幅が増加するほど強度は減少する傾向を示した。成熟材が未成熟材より大きく、未成熟材と成熟材の各々の関係は未成熟材の相関係数は0.02でほとんど相関関係がなく、成熟材は0.44で比較的低い相関係数を示している。

5. 結 論

韓国産チョウセンゴヨウ造林木における年輪幅、晩材率および容積密度数の樹幹内の変動を Table 16 に示した。

水平方向における年輪幅の変動は、髓付近では年輪幅がやや狭いながら5-8年輪まで急激に増加し、それ以後は減少して安定状態となる。また、地上高0.2 mの部位では20年以降幅の広い年輪が形成されているが、これは塩倉³¹⁾の報告でも見られるように、根張りからの栄養供給によるものと考えられる。一方、垂直方向における年輪幅の変動は、地上高の増加に伴って平均年輪幅が増加する傾向を示すが、辺材部では年輪幅が地上高7.2 mまでほぼ一

Table 16. Variation of ring width, late wood percentage and basic density within stem

Division	Ring width			Late wood percentage			Basic density		
	Ave. (mm)	S. D (mm)	C. V (%)	Ave. (%)	S. D (%)	C. V (%)	Ave. (kg/m ³)	S. D (kg/m ³)	C.V (%)
At bottom	3.44	1.46	42	23.3	3.52	15	369	42.19	11
Wth clear length	3.53	1.74	52	22.2	3.24	14	357	35.52	10
With crown	3.77	1.38	37	20.1	2.99	14	327	20.02	6
Total	3.56	1.59	45	22.0	3.33	15	354	36.65	10

定に増加し、それ以上では急速に増加している。李⁹⁾は、立木の成長と年輪幅の変動について、正常状態での年輪幅の範囲は0.5—6.5 mmであり、優勢木では年輪幅1.0—8.0 mmのModeが3.0—4.0 mmの範囲であるが、年輪幅1.0—8.0 mmの範囲での全体出現数が95%以上を占めており、優勢木、準優勢木、劣勢木および全体の平均年輪幅はそれぞれ3.78, 2.80, 2.43および3.04 mmであると報告している。

晩材率の変動については、李⁹⁾の報告によると、水平方向では、髓付近の成長初期の晩材率が高く、年輪幅が最大になる5—8年輪目で一時減少してからさらに定常的に増加する傾向を示しており、さらに、垂直方向では、地上高の増加に伴って平均晩材率が減少して、地上高7 mm以上から不安定になっているが、本研究においても同様な傾向を示している。なお、年輪幅と早・晩材幅および晩材率の関係については、年輪幅が広いほど早材や晩材の幅は広くなるが、年輪幅8 mm以上では晩材幅は減少し、年輪幅3.3 mmで晩材率は最大値の28.4%であった。これに関連して、李⁹⁾は年輪幅と晩材率は反比例的な関係があることを報告している。

また、容積密度数の変動では、水平方向では、髓付近の成長初期の密度数が大きく、年輪幅が広い5—8年輪目で減少してから、外周に向かって増加し、漸次安定的になっている。これはアカマツにおいて髓の部分の比重がやや大きく、4—5年輪で最小値になるという田島²⁴⁾の調査結果と同様な傾向を示している。垂直方向では、地上高の増加に伴い容積密度数は減少しており、年輪幅とは反比例的で晩材率とは同じ傾向である。また、収縮率の場合、接線方向では未成熟材より成熟材の方が大きい反面、半径方向では未成熟材の方が大きい。なお、繊維方向では成熟材より未成熟材の収縮率が大きい。

一方、樹幹内の強度の変動を見ると、幹軸方向では樹幹基部に近い未成熟材が最も低い曲げ強さを示し、成熟材より未成熟材の曲げ強さが低い。比重と曲げ性質との関係において、全般に曲げ強さおよび曲げ比重と高い正の相関関係があり、曲げヤング係数の場合は相関関係が低い。塩倉³¹⁾は、未成熟材の曲げ強さ、曲げ比例限度および曲げヤング係数等は成熟材の1/3位で、特に樹幹基部の未成熟材が最も弱いことを明らかにしているが、本研究では、未成熟材の曲げ性質が成熟材の5—15%程度低く、や

はり樹幹基部の未成熟材が最も低い値を示している。また曲げ強さは年輪幅と負の相関関係がある。縦圧縮強度および縦圧縮比例限度の場合は、未成熟材が成熟材の85—90%であり、それらは密度と密接な相関関係がある中で特に成熟材では高度の相関関係がある。これは、スギにおける比重と圧縮強度の関係において、成熟材の場合は高度の相関関係があるが、未成熟材の場合は相関関係が低いという太田⁵⁰⁾の調査結果と同様な傾向を表していることである。なお、年輪幅と縦圧縮強度との関係においては、未成熟材と成熟材の全体的には高い相関関係を示すが、両材の各々の場合では、成熟材の方が低い相関関係を持っている。

さて、年輪幅、晩材率、容積密度数や比重等による未成熟材の範囲については、年輪幅や晩材率によると、15—18年輪(髓よりの距離は6—8 cm)まで、容積密度数や比重によると、13—18年輪(髓よりの距離は髓より5—8 cm)までであり、仮道管長による範囲と同じである。このように未成熟材と成熟材の区分点は立木の成長状態によってその差が見られ、また地上高の増加に伴って未成熟材の年輪数あるいは髓からの距離が減少することは李²⁰⁾の結果と同じ傾向である。塩倉³¹⁾は、トドマツの天然林で初期成長が抑制された未成熟材の期間は明かに延長しており、肥培スギに対する実験では、初期成長を促進することによってその期間は短縮されることを推察した。太田⁵⁰⁾は、同じ生育条件でも未成熟材の範囲は多少異なるが、成長を促進することによって必ずしも材質の低下や成熟材までの年輪数の増加等は認められないと考察している。チョウセンゴヨウの場合でも、初期成長が抑制された未成熟材はその期間が延長し、髓よりの距離は短くなるが、肥培によって初期成長を促進した場合には、年輪幅が広がって髓よりの距離も多少伸びていると推察される。また、この場合、年輪数は増加しないと推定される。なお、他の針葉樹と比較して見ると、チョウセンゴヨウはスギやカラマツより年輪数あるいは髓よりの距離が多少増加するが、アカマツやクロマツとはほぼ同じである。

IV. 樹幹の回旋特性

1. はじめに

木材は一般的に程度に差があっても構成繊維が樹幹に対してある角度を持って斜めに配列する、いわ

ゆる旋回木理（繊維傾斜）を示すことが普通である^{53,56)}。このような旋回木理はS旋回とZ旋回とに分けており、繊維の走行が幹の外側より見て右下から左上に向かうものをS旋回とし、これと反対に左下から右上を向かう場合をZ旋回とする。

旋回木理の研究は多くの研究者^{53,57,58)}により取り上げられ、その成因として風や雪の圧力、陽光に対する屈性、立地条件および遺伝要因等が取り上げられている。しかし、これらの多くは事例からの推論であり明かではない。

このような旋回木理は材の乾燥に伴いねじれ狂いを起こし、丸太材や心持ち角材にあっては、その旋回方向と一致する干割れを生ずることが知られている。さらに、これまでの研究結果から、角材や板材のねじれ狂いの程度は、繊維傾斜度の大きさと密接な関係があることが明らかにされている。また、材の繊維傾斜度が大きい場合は強度低減の要因となり、圧縮試験では傾斜による強さの低減は少なく、引張試験では4/100と6/100の傾斜の間において急激な強さの低下を示すことが報告されている。

本章ではチョウセンゴヨウの天然木、植栽木のはかにロシアからの輸入材を用いて繊維傾斜度とねじれとの関係について検討した。

2. 供試木

供試木はTable 17に示すとおりである。植栽木は林業研究院中部林業試験場の演習林で伐採した。ロシア産チョウセンゴヨウは樹齢から見て天然木である。なお、供試木は林分の中で成長が良く比較的直円で通直である材を地上約0.1mで伐採し、樹高方向に元口から長さ1.8mに玉切りした。伐採の前に各立木の南方向に印を付けた。

ロシア産供試材は元口から長さ1.8mの材を輸入会社から分譲してもらい、これを用いた。

3. 実験方法

1) 木取り方法

繊維傾斜の樹幹内変動の測定（割裂法）には厚さ10cmの円板を用いた。チョウセンゴヨウの円板は地上高0.2, 1.2, 3.2, 5.2, 7.2, 9.2及び11.2mの部位から採取した。

また、繊維傾斜度とねじれ狂いを測定するため天然、植栽チョウセンゴヨウの胸高部位から10cmの円板と50cmの丸太を木取った。ロシア産チョウセンゴヨウは元口から30cm離れたところから10cmの円板と長さ50cmの丸太を木取った。10cmの円板は繊維傾斜測定用に用い、50cmの丸太はねじれの測定用とした。すなわち、見かけの未成熟材部位、成熟材と未成熟材が混在している部位及び成熟材部位から厚さ2.7cm、幅10.5cm及び長さ40cmの板を木取り、厚さ2.0cm、幅10cmに鉋仕上げした。なお、長さは35cmに切断した。

2) 繊維傾斜度

繊維傾斜の測定はFig. 34に示すような割裂方法で行った。即ち、円板の両木口の南と北方向で髓を通る重錘をさげ基準線を引いた。円板木口の一方の基準線に沿ってナタを置き加撃割裂させ、他方の木口の基準線から割裂線までの距離を各年輪毎に晩材部で測定した。この測定には1/10mmの精度のメスルーペを用いた。繊維傾斜度はルーペで読みとった値と円板の高さとの比を求め、パーセントで表示した。繊維傾斜の方向はFig. 34に示した。即ち、実線のように割裂線が基準線の右（下）と左（上）にある時をZ旋回（Z-grain）、点線のような割裂

Table 17. Description of sample trees

Species	Sample trees No.	Origin	D. B. H. (cm)	Height (m)	Age (year)	Remark
<i>Pinus koraiensis</i>	31	SOHUL-MYON POCHON-GUN KYUNGGI-DO	28	14.9	45	Plantation
	32	HONGCHON-OUP HONGCHON-GUN KANGWON-DO	16	12.1	34	Natural
	35	FROM SIBERIA IMPORTED	26	—	170	Natural

D. B. H.: diameter at breast height

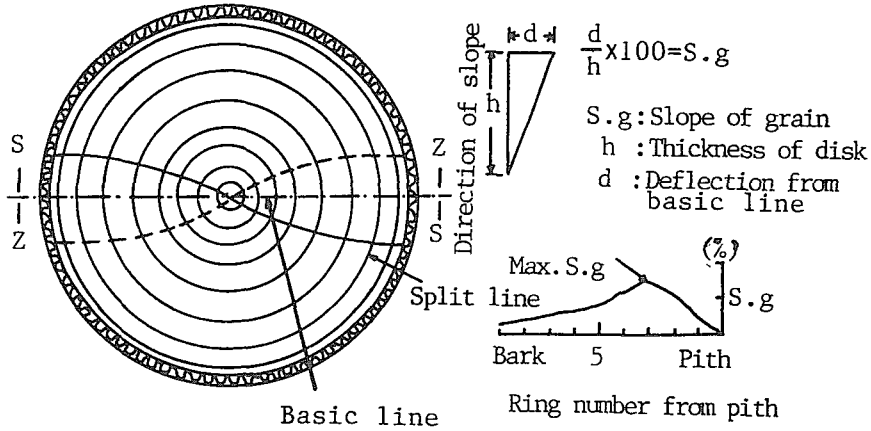


Fig. 34. The appearance of the spiral grain on the transverse surface of a disk and the method of the measurement of the slope of grain.

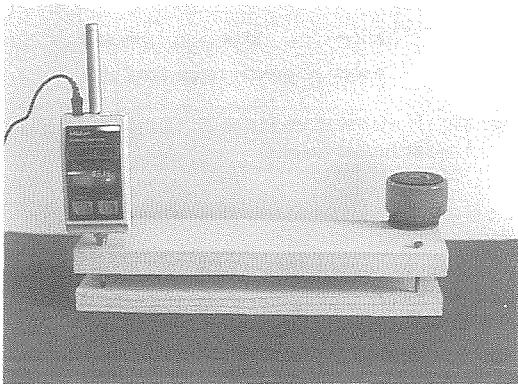


Fig. 35. A measurement apparatus of twist warp.

線が現れた時をS旋回 (S-grain) とした。また図の表示ではZ旋回を(-), S旋回を(+)

3) ねじれ狂い

幅 10 cm, 厚さ 2.0 cm, 長さ 35 cm の試験片を試験室で気乾含水率に達するまで乾燥し, この乾燥にともなうねじれの経時変化を Fig. 35 のような手作りの装置 (測定区間長 8×30 cm) を用い木表面で 1/1000 mm の精度まで測定した。なお, ねじれは S ねじれを + (Positive twist), Z ねじれを - (Negative twist) と示した。

4. 結果と考察

1) 繊維傾斜度の樹幹内の分布

チョウセンゴヨウは地上高 0.2 m から 11.2 m までの部位を対象とし, 髓から樹皮側を向かって各年

輪の晩材部に現れる繊維傾斜度を測定した。

Fig. 36 にチョウセンゴヨウの繊維傾斜を示した。チョウセンゴヨウの繊維傾斜はZ方向から始まる。0.2 m 円板は約 35 年輪まで繊維傾斜が緩やかに増大し, 最大の繊維傾斜を示した後, 再び繊維傾斜は減少する傾向を示した。しかし, 1.2 m 円板からは早い時期即ち, 髓から約 5—10 年輪以内で最大の繊維傾斜が現れ, 10—13 年輪までは再び繊維傾斜が若干減少し, その後は年輪増加と共に繊維傾斜も一定もしくはさらに増加する傾向であった。チョウセンゴヨウのねじれ返しの現象は認められなかった。

2) 繊維傾斜度とねじれとの関係

Fig. 37 に人工造林木チョウセンゴヨウの半径方向における繊維傾斜を示した。繊維傾斜はZ方向の繊維傾斜から始まり髓から 8 年輪で最大の繊維傾斜を示した後再び繊維傾斜は減少し, 14 年輪からはねじれ返し, 即ちS方向の繊維傾斜を示した。

Fig. 38 には天然チョウセンゴヨウの繊維傾斜を示した。人工造林木チョウセンゴヨウと同じようにZ方向からの繊維傾斜であり, 髓から約 10 年輪で最大の繊維傾斜を示した。また, ねじれ返しは人工造林木チョウセンゴヨウより遅い 26 年輪からであった。

Fig. 39 には北洋チョウセンゴヨウの繊維傾斜を示した。人工造林木及び天然木チョウセンゴヨウの繊維傾斜方向と同じようにZ方向の繊維傾斜であり, 天然木チョウセンゴヨウと同じように髓から約 10 年輪で最大の繊維傾斜を示した。一方, ねじれ返しは韓国産材より遅い約 100 年輪からである。

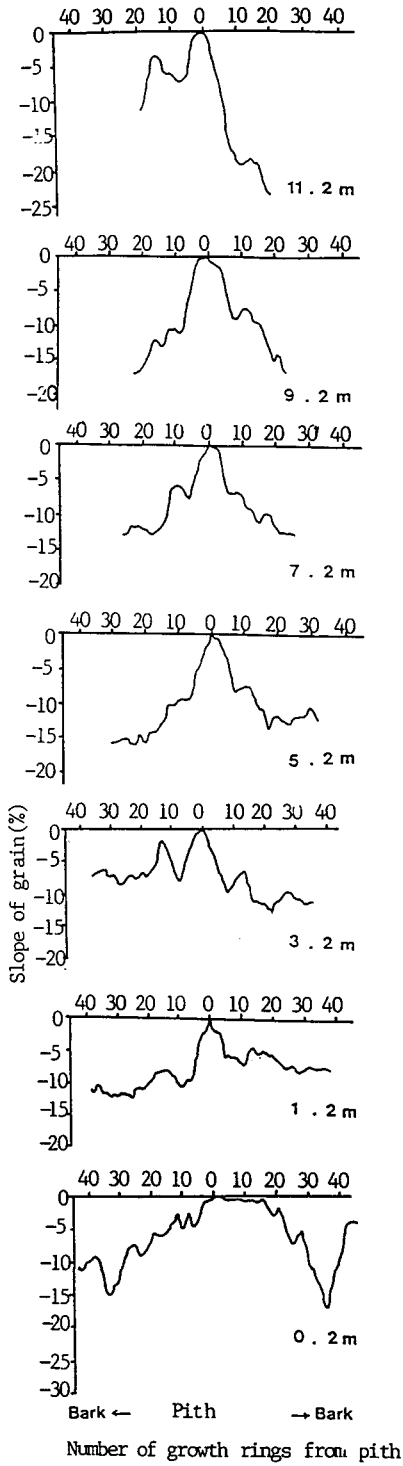


Fig. 36. Horizontal variation in the slope of grain at different heights for *Pinus koraiensis* No. 31.

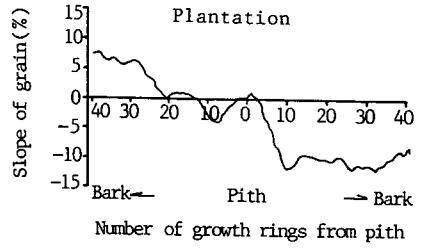


Fig. 37. Horizontal variation in the slope of grain at breast height.

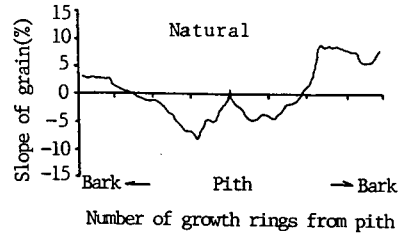


Fig. 38. Horizontal variation in the slope of grain at breast height.

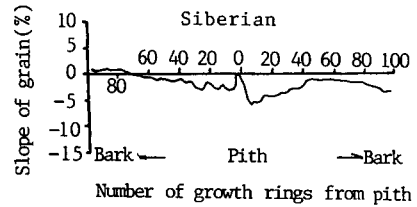


Fig. 39. Horizontal variation in the slope of grain at breast height.

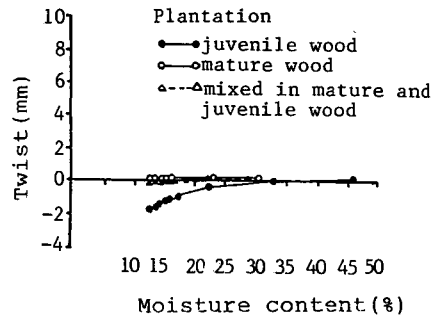


Fig. 40. The process of twist warp with seasoning.

Fig. 40, 41 及び 42 には人工造林木, 天然木及び北洋チョウセンゴヨウの板を気乾含水率まで乾燥した時のねじれの経時変化を示した。

人工造林木チョウセンゴヨウは Fig. 40 に示すように髄に近い未成熟材部分から木取った板のねじれが円板の繊維傾斜方向と一致する Z 方向でのねじれであった。また, 未成熟材と成熟材が混在している材のねじれも若干 Z 方向でのねじれであった。一方, 成熟材部分から木取った板は S 方向でのねじれであり, ねじれの方向は円板の繊維傾斜方向と一致した。ねじれの量は繊維傾斜度が最も大きい成熟材部分の板材が約 0.1 mm であるが, 未成熟材部分から木取った板のねじれは 3 mm 以上であった。

Fig. 41 には天然木チョウセンゴヨウのねじれを示した。天然木チョウセンゴヨウも人工造林木チョウセンゴヨウと同じように未成熟材部分のねじれは Z 方向でのねじれであった。しかし, 未成熟材と成熟材が混在している材のねじれは大きい S 方向でのねじれであった。このように未成熟材と成熟材が混在している板のねじれが大きいことは沈⁵⁹⁾が指摘したように板の木表と木裏の繊維傾斜が反対 (S と Z) であるため木表と木裏がお互いに同じ方向にねじれようとすることと木表は成熟材であり木裏は未成熟材であるためその収縮率の差が大きいことによるものと思われる。また, 成熟材部分から木取った材のねじれの量とねじれ方向は繊維傾斜度と繊維傾斜方向と一致しない。沈⁵⁹⁾は板材の木表の方の繊維傾斜より木裏の繊維傾斜度が大きい時は, 必ずしも一致しないが一般的に木裏の繊維方向と同じ方向にねじれることを報告しており, この結果とも一致した。

Fig. 42 には北洋チョウセンゴヨウのねじれを示した。北洋チョウセンゴヨウも成熟材部分から木

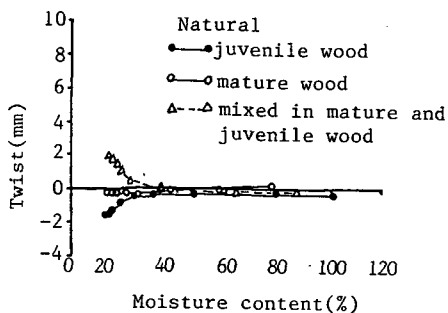


Fig. 41. The process of twist warp with seasoning.

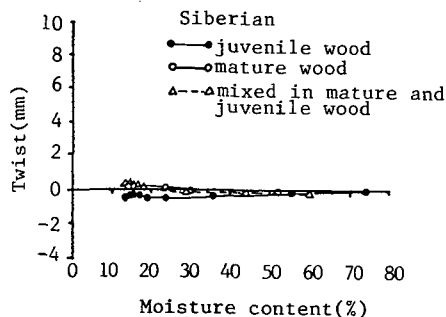


Fig. 42. The process of twist warp with seasoning.

取った板のねじれは約 1 mm であり, 未成熟材と成熟材が混在している板と成熟材部分の板のねじれは 1 mm 以下の小さいねじれを示しており, 繊維傾斜度とほぼ一致した。

5. 結 論

チョウセンゴヨウの地上高別の繊維傾斜度の平均, 最大及び最小値を Table 18 に示した。

五葉のマツ類, 即ちチョウセンゴヨウ, ヒメコマツ, ハイマツとネズコ及びアスナロは Z 旋回樹であることが知られており, 本試験で用いたチョウセンゴヨウも Z 旋回を示している。半径方向での旋回木理の現れ方は一般的に髄に近い部分の繊維傾斜度の値は小さく, その後増大して最大となり再び減少する傾向, 繊維傾斜が最大となりその後一定になる傾向及び樹皮側まで継続して増大する傾向の三つのパターンに分けられる。これらの旋回木理の現れ方を地上高別にみると地上高 0.2 m では約 35 年輪までは繊維傾斜度が増減を繰り返しながら増大した後減少し, 地上高 1.2 m から 7.2 m までは約 10 年輪ま

Table 18. Spiral grain by tree height level (Unit: %)

Height (m)	Ave.	Max.	Min.
0.2	- 6.35	-0.1	-14.9
1.2	- 7.85	-1.8	-12.4
3.2	- 7.47	-0.5	-12.7
5.2	-10.38	-0.5	-15.9
7.2	- 8.95	-0.5	-13.5
9.2	- 9.67	-0.1	-17.1
11.2	- 9.87	-0.1	-23.8
13.2	-	-	-
Ave.	- 8.65	-0.5	-15.8

で増大しその後はほぼ一定になり、地上高9.2mと11.3mにおいては約10年輪までは急に増加し、その後も小さな増減を繰り返しながら樹皮側まで増大した。これらの繊維傾斜度の出現型を中川⁵⁶⁾の分類にあてはめると Type 2a, Type 4 及び Type 1a であった。

韓国産人工造林木チョウセンゴヨウと天然木チョウセンゴヨウの繊維傾斜度、半径方向における繊維傾斜の変動傾向及びねじれ返しの年数はほぼ同じである。しかし、北洋チョウセンゴヨウでは最大の繊維傾斜を示す年輪は髓から10年輪ではほぼ同じであるが繊維傾斜度は小さく、ねじれ返しを示す年輪数も約140年輪で大変違う傾向を示している。このように韓国産造林木と天然木はほぼ同じ傾向であるが、北洋材の繊維傾斜の傾向と差があるのは地理的または気候的因子によるものと思われる。これらのチョウセンゴヨウ材の乾燥によるねじれは繊維傾斜度及び繊維傾斜方向と一致する。即ち、Z方向の繊維傾斜度と大きな繊維傾斜度を示している未成熟材部分から木取った材のねじれはZ方向でのねじれでねじれの量も大きい。韓国産チョウセンゴヨウと北洋チョウセンゴヨウの成熟材及び成熟材と未成熟材が混在している部分から木取った材のねじれは小さい。しかし、韓国産天然チョウセンゴヨウの未成熟材と成熟材が混在している部分から木取った材のねじれは大きい。これは収縮率の結果からも分かるように木表の成熟材より木裏の未成熟材の収縮率が大きく、未成熟材と成熟材の間でねじれ返しがおこり木表と木裏の繊維傾斜の方向が互いに反対であるためであると思われる。沈⁵⁹⁾は木表と木裏の繊維傾斜が反対であると木表と木裏におけるねじれようとする力が互いに同じ方向に作用してねじれが大きくなると報告しており本試験の結果とも一致した。ねじれの量は半径方向において材質変異が小さく繊維傾斜も小さい北洋チョウセンゴヨウが最も小さく、造林木チョウセンゴヨウ、天然木チョウセンゴヨウの

順に大きかった。

V. チョウセンゴヨウの年輪解析と環境変遷情報

1. はじめに

韓国産チョウセンゴヨウ造林木の樹幹内材質変動に影響を与える因子として年度別変動が環境因子などどのような関連があるか、年輪年代学(Dendrochronology)技法を応用して分析を行った。環境変遷情報としては長期間記録されており、最も頻繁に利用されている気候因子である月平均気温と月降水量を採択した。年輪情報としては比較的判定が容易な年輪幅を利用したが、これは現在まで最も頻繁に利用されてきた年輪因子中の一つである。特に年輪年代学の発展で世界的に広域にわたって多様な樹種を対象に年輪幅による年代解析が開発されていて他地域の研究結果と比較するのも容易である。韓国ではいままでも年輪年代学を応用した研究は行われていない。環境変遷因子を年輪情報で解析しようとする場合、いかなる樹種が適当であるかが問題である。本報告はチョウセンゴヨウの基礎材質を評価するのが目的であるが、それをさらに一歩進めて過去の情報を年輪年代的に整理して、もし例えば気候因子と関連があれば、ある程度将来の材質を予測することも可能であると考えた。チョウセンゴヨウは韓国の郷土樹種であり、この解析が進めばさらに有用になると思われる。

2. 供試木

供試樹種はチョウセンゴヨウであり、韓国の林業研究院中部林業試験場の演習林で正常に成長した樹木を選定した。その概要はTable 19に示した。

3. 試験方法

1) 年輪試料の採取

選定された林木から可能なかぎり多くの年輪を採取するためには地際部に近い部分から試料を採取し

Table 19. Description of sample trees

Species	Sample trees No.	Origin	D. B. H. (cm)	Height (m)	Age (year)	Remark
<i>Pinus koraiensis</i>	37-53	SOHUL-MYON POCHON-GUN KYUNGGI-DO	29 26-29	20 19-21	60	

D. B. H.: diameter at breast height

なければならないが、成長錐の回転のために地上 50 cm の高さで随に接近可能な二つの年輪試料（直径 5 mm の成長片）を任意の方向から向かい合わせるようにし、成長錐を利用して採取した。成長片（コア）は採取直後ストローに挿入して約一週間気乾にした後、U型の溝が掘られた板に接着剤で接着させ 2-3 日間接着剤が硬化した後、研磨紙で研磨して年輪境界を鮮明にさせた。

2) Cross Dating と年輪幅測定

Cross Dating は一名交叉接続法としても呼ばれ、年輪年代を複数の個体でつなげていくもので、なによりも重要なことは各年輪の正確な生育年度の測定である。正確に生育年度が測定されない年代系列を利用して数個の個体を持って系列年代記をつくる場合、各系列の年度別数値が互いに加減され環境変化に対する有用な情報が相殺され、不正確であり、あいまいな結果を招く^{61,119}。

Cross Dating とは年輪の幅が狭いか広いかの様相を隣接樹木（個体）の間、または隣接地域樹木（個体）の間を比較することにより、偽年輪、実年輪を探し、既知の基準年輪を利用して正確な生育年度をその年輪に付与するもので年輪の変動曲線過程をグラフで表示し、相互比較する方法である。作成された年代記は普通の相関関係を利用した Computer program で再確認した^{120,121}。本研究は COFECHA Program¹²⁰ を利用して交差接続法により総 34 個の成長片中、正確に生育年度が Dating された 29 個だけの年輪幅をルーペで 0.1 mm まで測定した。

3) 年輪統計分析

各年輪幅シリーズの標準化、相互相関関係、平均年代記算出及びその統計的特性等を VAX-11 を利用して Tree-ring library program の ARSTAN¹²⁰ で分析した。

a) 年輪幅の標準化

正確に Dating された各年輪シリーズの年輪幅を測定して作成された年輪幅系列は、樹齢による樹木固有の生物学的生育趨勢を除去するために標準化された。樹木が幼齢期には生育が速いため年輪幅が広く年度別変化の幅が大きい、幼齢期が過ぎると相対的に均一になる。また、樹幹が円形であるため髓心から遠ざかるにつれ、すなわち、老齢期に移行するにつれて同じ容積の木質が形成されても年輪幅は小さくなる。もし年輪幅測定値をそのまま平均す

ると、各年輪系列の幼齢期期間内の年輪幅等により平均値などが大きく左右されるため時系列の抽出が困難になる。

標準化は生物学的成長趨勢を測定する生育曲線を求めて予測される年輪幅と実際年輪幅の比例として指標を計算して各年輪系列別に指標年代記を得る。

$$I_t = \frac{W_t}{Y_t}$$

Y_t : 予測される年度別年輪幅または密度

W_t : 観測された年度別年輪幅または密度

I_t : 年度別指標値

本研究では指標化の方法として二重標準化法を利用したが、これは一次に Negative Exponential Curve で生育曲線を推定して指標を求めた後、この指標をまた二次に Spline 50% Response Period (60 年) を利用して再標準化したもので Fig. 43 にこの方法で標準化した過程を示した。

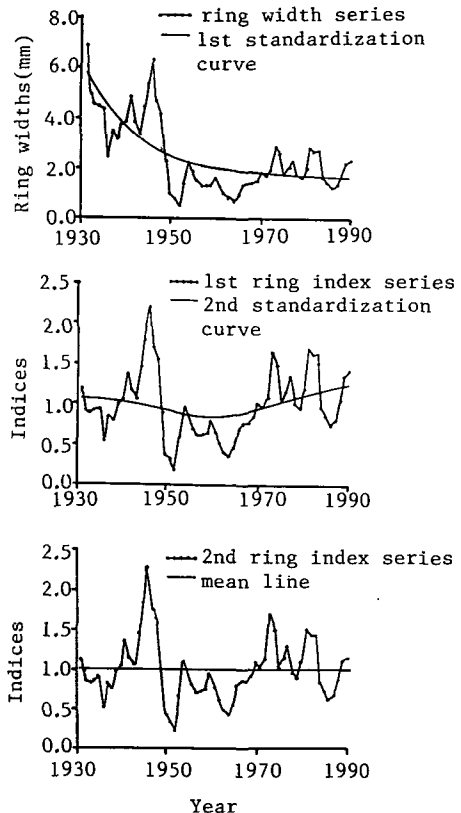


Fig. 43. Standardization curve by negative exponential curve and spline 50% response period (60 Year).

b) 相互相関関係

隣接した場所で生育する林木などの成長の間にも遺伝的及び Micro Site 生育環境差異に起因して個体間年輪シリーズがある程度差異があり、同一立木内でも採取方向に従っても差異がある。このような個体間・個体内変異の大きさは年輪研究では普通分散分析 (ANOVA: Analysis of variance) または相互相関分析により分析することができる⁶¹⁾。

本研究では同一立木内成長片間年輪幅シリーズの相関係数 r_{wt} (Within tree correlation), それから立木間年輪幅シリーズの相互相関分析係数 r_{bt} (Between-tree correlation) を次のような式を利用して求めた。

$$r_{xy} = \frac{\sum_{t=1}^{n-1} (X_t - M_x)(Y_t - M_y)}{(n-1)S_x S_y}$$

M_x, M_y : 二つの年輪のシリーズの平均

S_x, S_y : 二つの年輪のシリーズの標準偏差

X_t, Y_t : 各年輪のシリーズの t 年度の年輪幅指標

n : 年輪の総年数

c) 平均敏感度 (Mean sensitivity)

平均敏感度は Fritts⁶¹⁾ が考察した式で次のように示される。

$$MS_x = \frac{1}{n-1} \sum_{t=1}^{n-1} \left| \frac{2(X_{t+1} - X_t)}{X_{t+1} + X_t} \right|$$

上式で X_t はある年度の年輪幅, X_{t+1} は t 年度次の年の年輪幅, 即ち X_t と X_{t+1} は隣接した二つの年輪の幅を示す。従って平均敏感度は一つの年輪とそれと隣接した年輪の幅が相対的にその大きさがどのくらい差があるかを平均的に示す。MS が大きいのは年輪幅の隔年変化が大きいことを示す。

d) 自己相関 (Autocorrelation)

自己相関は一つの時系列(即ち一つの年輪年代記)内の持続性を測定する統計因子で、これは年輪内の周波数変動の大きさを表すもので次の式で自己相関係数を求めた。

$$r_n = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\left[\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \right]^{1/2} \cdot \left[\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 \right]^{1/2}}$$

r_n : lag(時差)が n の時の相関係数

\bar{X} : lag(時差)がないシリーズ (X_i) の平均値

\bar{Y} : lag(時差)が n であるシリーズ (Y_i) の平均値

第1次相関係数 (r_1 : First-order autocorrelation coefficient), 2 である場合第2次相関係数

(r_2), m である場合第 m 次相関係数 (r_m) とする。このような自己相関係数は一つの生育年度 (t) の成長が該当 (t) の環境条件だけでなくその前年度 ($t-1, t-2, t-3$) の環境条件の影響を受けた程度を表す。

Fritts⁶¹⁾ はこのような関係を生物学的モデルとしてよく説明しており、生育年度 (t) に形成された芽、葉および根或は栄養物質、生育ホルモン等が次の年度の生育にも影響を与えるためであるとした。

e) Signal Strength

作成された年代記の Signal Strength (Signal/Noise Ratio: SNR) は立木間相互相関係数の平均値 (r_{bt} : Correlation between trees) と立木の数 (N) を利用して次の式で求めた。

$$SNR = N r_{bt} / (1 - r_{bt})$$

上記の式から解るように SNR は r_{bt} が増加するほど大きくなるのが分かり、同じ r_{bt} でも年輪編年(年輪曲線)作成時に多量の立木を利用すると、即ち、 N が大きくなると SNR が増加することが解る。従って SNR は林木の間に共通的に観察されるシグナルの強度を示す。

4) 年輪変動と気候との相関関係

気候因子は韓国の気象庁で発表したソウル地方の月平均気温(最高気温と最低気温の平均値を月別で算出したもの)と月総降水量を使用し、韓国動乱の影響で1950年9月から1951年11月までのデータは欠落している。年輪年代学で通常的に利用している多変量回帰方法である Response Program を利用することが出来ないため本研究では単純相関関係を利用した。

Table 20 は気候 Data の統計値を示したもので月降水量の場合には大部分正常分布をしないために年輪シリーズと気候変動との関係は非母数統計因子を用いて相関係数を求めた。

生育前年度の環境条件が現年度の成長にもある程度影響を及ぼすと言うことを勘案して気候因子の範囲は生育前年 ($t-1$) 7月から生育年度 (t) 生育末期である8月までにした。分析に含まれた期間は1931年から1988年(58年)までである。

4. 結果と考察

1) 年輪年代記の統計的性質

最終的に1930年から1990年にわたる年輪年代記は Fig. 44 に、統計分析結果は Table 21 に要約し

Table 20. The statistics of the monthly temperature and precipitation of the Seoul area during 1930~1990

Monthly precipitations (mm)								
Month	Mean	STD	Medium	Lowest	Highest	Skewness	Kurtosis	Prob.<W
1	20.3	20.5	13.3	1.2	96.9	1.915	3.765	0.0001
2	21.8	22.3	14.7	0.2	111.3	2.396	7.050	0.0001
3	49.8	36.8	41.4	4.9	163.6	1.151	0.856	0.0001
4	80.9	65.9	59.4	6.1	338.8	1.680	3.504	0.0001
5	86.1	52.0	80.7	11.6	255.2	1.281	1.960	0.0001
6	146.8	122.2	111.4	15.7	638.9	1.786	3.808	0.0001
7	360.4	206.4	323.1	87.6	1354.2	2.345	8.931	0.0001
8	254.1	153.8	231.4	36.8	881.8	2.544	4.397	0.0001
9	152.0	103.1	129.0	4.5	461.2	0.843	0.374	0.0101
10	51.8	36.0	44.5	3.5	177.8	1.236	2.125	0.0003
11	44.8	33.2	35.2	1.2	164.8	1.791	3.983	0.0001
12	25.5	17.4	19.2	2.6	76.8	1.171	1.105	0.0001

Monthly temperatures (°C)								
1	- 4.1	2.4	- 3.9	- 9.2	0.9	0.135	-0.056	0.4032
2	- 1.5	1.9	- 1.5	- 5.3	2.8	0.257	-0.362	0.4339
3	4.0	1.6	4.3	- 0.3	6.7	-0.784	0.449	0.0237
4	11.2	1.2	11.1	9.1	14.3	0.588	0.155	0.1631
5	16.9	1.0	16.7	13.6	19.3	-0.112	0.806	0.4983
6	21.1	0.9	21.2	18.7	22.6	-0.421	-0.265	0.2735
7	24.8	1.2	24.8	21.9	27.6	0.044	-0.090	0.9838
8	25.4	1.1	25.5	22.7	27.8	-0.298	0.100	0.6777
9	20.4	0.7	20.3	18.9	22.6	0.453	1.010	0.6251
10	13.8	1.1	13.8	11.7	16.7	0.333	-0.449	0.3702
11	8.4	1.5	8.5	3.2	9.5	-0.081	-0.590	0.4228
12	- 0.8	2.3	- 0.5	- 5.8	4.0	-0.295	-0.200	0.2884

Data : Climatic table of Korea, published by Korea eeteorological Administration

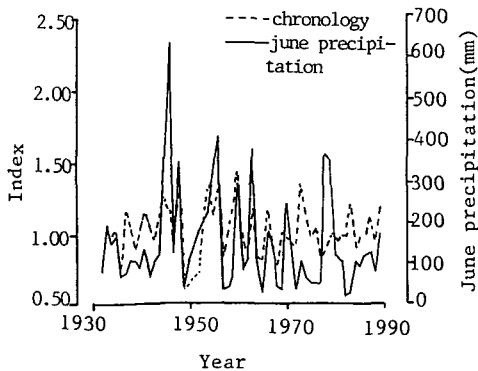


Fig. 44. The master chronology and june precipitation of the Seoul area during 1930-1990.

た。同一立木内年輪シリーズ間相関関係である r_{wt} は 0.868 であったが、立木間相関係数である r_{bt} は 0.436 で r_{wt} の 50% に過ぎないため林木間成長変異が大きいとすることが分かった。

試料採取地域の林分を高密度に造林した地域であるため立木間の競争が極めてきびしかったためだと考えられる。

r_{bt} で計算された SNR は 11.57 であった。それから 17 本の供試木中立木間相関分析に利用された供試木が 8 本であったことを考慮するともっと多くの供試木を選定しなければならないことが分かる。この年代記の平均敏感度、標準偏差、自己相関係数は各々 0.172, 0.236, 0.583 であった。これらの数

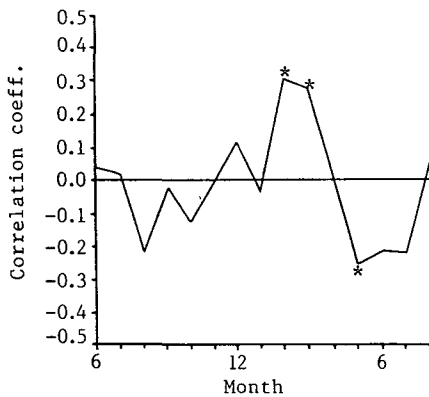
Table 21. Summary of the statistics for the final chronology

Mean	1.0000
Median	0.9996
Mean sensitivity	0.1722
Standard deviation	0.2363
Skewness	-0.4581
Kurtosis	1.7914
Autocorrelation order 1	0.5827
Mean correlation* ¹	
Among all radii	0.457
Between trees (Y variance)	0.436
Within trees	0.868
Signal-to-noise ration* ¹	11.574

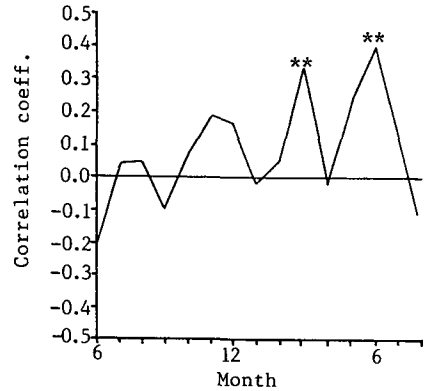
*¹ Mean correlations and SNR were calculated by using common-interval (51 years; 1940-1990) series from 15 trees; Others than the above two parameters were calculated by using entire-interval (61 years; 1930-1990) series from all sample trees (17 trees)

値は米国の西部地方の89年間の年輪年代記を調査した Fritts¹²²⁾ の研究から得た平均敏感度 0.35 ± 0.22 (95%限界), 標準偏差 0.37 ± 0.18 (95%限界), 自己相関係数 0.42 ± 0.21 (95%限界) と比較すると, これらの95%限界範囲内には全部含まれた。

米国の西部地域が年輪年代記等の応用面で世界各地のなかで成功している地域の一つである点を勘案すると, 直接的な数値の比較は難しいが, 本研究で作成された年代記の基本統計値は一次的にある程度周波数, 高周波変動性を所有しているものと考え

**Fig. 45.** The correlation between monthly temperatures and annual ring chronology.

* Significant at 5% level

**Fig. 46.** The correlation between monthly precipitation and annual ring chronology.

** Significant at 1% level

られる。

2) 気候と成長との関係

月別気候因子などと年輪年代記との相関関係は Fig. 45 と 46 に示した。気温の場合は生育当年の2月 ($r=0.299$) と3月 ($r=0.272$) が年輪幅(指標)と統計的に有意であり, 降水量の場合は生育当年の3月 ($r=0.340$) と6月 ($r=0.401$) が年輪幅(指標)と高度に有意であった。

本研究の供試木である韓国中部地方のチョウセンゴヨウの成長開始期(即ち, 形成層分裂期)を一年中4月中旬に, それから成長休止期を9月末であると仮定して概略的に季節的に相関関係を分析した結果, 当年の成長最盛期(5-7月)においての関係が最も明かであるが, この期間中直径成長(年輪幅)と温度は負の相関関係, それから降水量は正の相関関係があった。

このような関係は成長期間中樹木成長が水分の平衡状態に大きく影響を受けることを示している。即ち, 成長最盛期の高温, 乾燥した気候下では土壌水分の蒸発と樹木の蒸散作用がすべて増大するために樹木器官内に吸収するか, 残存することが出来る水分の量が減少して細胞分裂が少なくなると同時に細胞拡大も減少して放射方向に成長が少なくなるものと考えられる。低温, 多湿な場合はこれと反対に水分 Stress を受けずに純光合成(Net photosynthesis)も増加して直径成長が大きくなるのが分かる。相関が最も高かったのは生育当年6月降水量であった。

成長休止期(大略的に生育前年度11月中から当年

3月初まで)中においての相関係数を調べると2月、3月の降水量と温度がすべて直径成長と正の相関関係を示し、11月、12月、1月の場合もはっきりしてはいないが、正の相関関係を維持していた。

これは成長休止期中にはチョウセンゴヨウの光合成は連続して(特に、冬期間中気温が高い場合)栄養物質を貯蔵細胞に蓄積した後、次の成長期に利用されるものと思われる。また、休止期中に降水量(主に積雪量)が多い場合、土壌中に水分を保持することができ、次の成長期に樹木成長に利用されるものと推測される。生育前年度の成長期中の気候条件と生育当年の年輪成長との関係は温度の場合、連続的に相関関係を維持したが、その原因と効果の関係を類推できるほど明かな傾向はなかった。

本章では韓国の人工造林した林分で樹齢が60年の比較的幼齢であるチョウセンゴヨウの直径成長と気候との相関係数を分析した。立木が密生していることから、立木間の競争が甚だしく各立木から作成した年輪シリーズ間の変異が大きいために気候の重要な変動Signalを表示する指標であるSNR(Signal Noise Ratio)は小さかった。しかし、このような立木間変異はいくつかの年代記シリーズを平均化する過程で減少され、最終年代記から年度間年輪幅(指標)変動と気候因子変動との相関係数は季節別に比較的是っきりしていた。これは林木間成長変異が大きい幼齢木であると同時に人為的加害(チョウセンゴヨウの実の採取)が頻繁な樹種の場合にも標準化を適切に行えば有用な年代曲線を作成することが出来るということを示している。造林された地域では年代記はその期間が短く古気候の推定等、伝統的年輪年代記法の応用には適切でないために外の応用方向を模索しなければならない。例をあげれば造林木の成長を各地域別に評価時に各地域別に気候差異による変異を削除しようとするとき一定標準値として利用することができる。また軟X線デンストメトリーを利用し木材密度年代記が作成出来るとすれば成長のみならず木材材質を評価することが出来る。

5. 結 論

韓国産チョウセンゴヨウ造林木の樹幹内材質変動に影響を与える環境と生育との関係はチョウセンゴヨウ林同一林木内の年輪シリーズ間には相関関係があり、林木間の相関係数は立木内年輪シリーズ間の

相関係数の50%に過ぎず、立木間の成長変異が大きいために認められた。

気温は生育当年の2月と3月の年輪幅と有意で、降水量は生育当年の3月と6月の年輪幅と高度に有意であった。

成長期間中直径成長(年輪幅)と温度とは負の相関関係があり、降水量との関係は正の相関関係がある。

成長最盛期の高湿・乾燥の気候下では土壌水分と樹木の蒸散作用が増大して細胞分裂が少なくなり、細胞拡大も減少して、放射方向における成長が少なくなると考えられる。反対に低温多湿の時は純光合成が増加し直径成長が大きくなっており、成長休止期には2月と3月の降水量と温度が直径成長と正の相関関係を示し、11月、12月及び1月の場合は明かではないが正の相関関係を維持している。成長休止期中チョウセンゴヨウの光合成は連続して栄養物質を貯蔵細胞に蓄積した後、次の成長期に利用されると考えられる。

立木間の変異は年代記シリーズを平均化する過程で多少減少し、最終年代記で年度間年輪幅変動と気候因子変動との相関係数は季節別には比較的明かであった。造林木の成長は各地域別評価時に気候差異を削除しようとする時、一定標準値として利用できるし、軟X線デンストメトリーを利用して木材密度年代記を作成すれば、成長だけでなく木材材質も評価出来るものと考えられ、環境とともに今後の課題になるであろうと思われる。

VI. 総合考察

1. チョウセンゴヨウ造林木の材質評価

1) 材質のまとめ

韓国産チョウセンゴヨウの未成熟材と成熟材の材質変動はTable 22および23のようにまとめられる。

まず、組織構造の変動について、仮道管の直径は、早材の方が晩材の約2.2倍であり、未成熟材が成熟材より小さい。仮道管の壁厚は、晩材の方が早材の約1.6倍に達し、仮道管長は、晩材が早材より、また成熟材の方が未成熟材より長い。なお、フィブリル傾角は、晩材が早材より、また未成熟材が成熟材より大きい。このように、未成熟材は成熟材より各種の組織的な変動が大きく、材質も粗悪であるが、成熟材では組織的な変動も少なく、安定的

な材質を示している。

また、物理・機械的性質の変動において、年輪幅は、初期の成長速度が早くて未成熟材の年輪幅は成熟材の1.4倍となり、地際部から枝下材、樹冠材の順に年輪幅が増加する。晩材率は、年輪幅とは逆に成熟材の方が未成熟材より高く、地際部、枝下材、樹冠材の順に晩材率が減少する。晩材率および容積密度数は年輪幅2.5—3.5 mmで極大値を示している。収縮率は、全収縮率の場合、接線方向と放射方向ともに個体による差が大きい、縦収縮率の場合には成熟材より未成熟材の方が大きい。一方、曲げ強さおよび縦圧縮強度等の強度的性質を見ると、未成熟材より成熟材の強度が高く、年輪幅が広いほど諸強度は減少する傾向である。したがって、育林技

術の面で年輪幅を適当に抑制すれば、要求強度に適する用材が生産できると考えられる。このようにチョウセンゴヨウの物理・機械的性質は、未成熟部分での変動幅が大きく、幹軸方向では地際部の変動が大きい。

以上の結果によると、チョウセンゴヨウ材における未成熟材から成熟材へ移行する年輪の範囲は13—19年輪であり、髄からの距離は5—8 cmである。この年輪数あるいは髄からの距離は、針葉樹の中でスギ、ヒノキ、およびカラマツよりは多少大きい方であるが、アカマツやクロマツとは同様である。

2) 天然木との比較

韓国ならびに中国におけるチョウセンゴヨウの天然木と造林木の材質比較はTable 24の通りである。

これまで韓国ではチョウセンゴヨウの天然木についての報告がほとんどなかったため、造林木との年輪幅の比較ができないが、朝鮮半島と隣接している中国長白山の紅松林についての調査資料と比較してみると、造林木の年輪幅は本研究での調査値と同様であり、天然木より良い成長を示している。また、1938年に韓国で発表した『朝鮮木材の識別』によると、天然木の比重は0.50であり、造林木である本研究の供試材より大きく、中国の資料においても天然木の比重がやや大きい値を示す。なお、造林木の収縮率は天然木の範囲内であり、天然木の収縮率の絶対値が大きい。強度的性質については、天然木に比べて造林木の曲げ強さや圧縮強度が高い方であるが、中国の紅松林についての報告でも同様な結果を示している。しかしながら、引張強さおよびせん断強度の場合は、天然木の方が大きい値を示している等、強度的性質において一定の傾向は見られない。

以上のように、成長速度が早い造林木の年輪幅は

Table 22. Variation of wood properties for juvenile wood and mature wood

Division	Juvenile wood	Mature wood
Tracheid length (mm)	2.964	3.645
Tracheid diameter (μm)	29.87	32.25
Tracheid wall thickness (μm)	3.45	4.35
S ₂ fibril angle of tracheid secondary wall (°)	21.05	11.74
Ring width (mm)	4.76	3.37
Late wood Percentage (%)	20.0	24.6
Bulk density (kg/m ³)	334	371
Longitudinal shrinkage (%)	0.32	0.24
Average spiral grain angle (%)		
Max.		- 0.5
Min.		-15.8
Bending strength (kg/cm ²)	675	726
Compressive strength	416	473
Parallel to grain (kg/cm ²)		

Table 23. Critical limits of juvenile to mature wood transition

Division	No. of annual ring from pith (each)	Distance from pith (cm)
Tracheid length	13~19	5~8
Tracheid diaeter	15~19	5~8
Tracheid wall thickness	13~18	6~8
S ₂ fibril angle of tracheid secondary wall	15~18	6~8
Ring width	15~18	6~8
Late wood percentage	15~18	6~8
Bulk density	13~18	5~8
Specific gravity	13~16	5~7

Table 24. Wood properties of Korean pine from natural forest and plantation by nation

By nation	Division	Annual ring width (mm)	Density in air dry (g/cm ³)	Shrinkage (%)		Strength* (kg/cm ²)			
				Radial	Tangential	Static bending	Compression parallel to grain	Tension parallel to grain	Shear
KOREA	Natural	—	0.50	—	—	—	(366)	—	—
	Plantation	3.0	0.45	2.82	7.41	772	425	788	96
CHINA	Natural	1.28~1.75	0.437~0.443	0.120~0.198	0.271~0.411	650~657	311~342	906~1014	63~74
	Plantation	3.07~4.55	0.426~0.438	0.131	0.324	671~680	348~357	881~928	63~71

※KOREA : * Values adjusted to a moisture content of 12 percent.

() : Values adjusted to air dried condition

※CHINA : * Values adjusted to a moisture content of 15 percent.

天然木より広いが、強度的性質では大きい差がない。ただし、天然木の強度の一部が造林木より低くなっているのは試験片の年輪幅の差があるためではないかと考えられる。また、組織構造や化学的性質の面で若干の差があるが、造林木と天然木ともに繊維傾斜はZ方向であり、ねじれ量にはあまり差がなかった。したがって、チョウセンゴヨウの造林木の材質は天然木と大きく変わらないと考えられる。

3) 他のソフトパインとの比較

韓国に分布している種々のソフトパイン類の中で、チョウセンゴヨウの比重はストロブマツよりは高く、ヒメコマツよりは低い。また、チョウセンゴヨウの収縮率および諸強度的性質も大きい方である。長期負荷に対するチョウセンゴヨウの繊維方向の許容応力は、圧縮が70 kg/cm²、曲げおよび引張が80 kg/cm²、せん断が60 kg/cm²であり、韓国の建築物基準に適しているので内装材のみでなく構造材としても用いられる。そこで、チョウセンゴヨウは柱、梁等の構造材を含め、内装材、造作材および包装材として、ストロブマツは内装材、造作材および包装材として、なお、ヒメコマツは建築材や器具材として使われている。

4) 韓国産パイン類の材質の総合評価

韓国針葉樹の主要造林樹種の材質は次の通りである。まず、年輪幅は、韓国の造林針葉樹の中でテードマツとリギダマツが最も広く、チョウセンゴヨウは中間程度である。比重については、カラマツ、バーニアパイン等が高い方であり、チョウセンゴヨウは中間程度に属する。収縮率については、チョウセンモミ、リギダマツ、クロマツ、カラマツ、およびコンゴウマツ等が大きい方であり、スギ、スト

ローブマツおよびチョウセンゴヨウ等は小さい値を示している。さらに、強度的性質では、カラマツ、リギダマツ、コンゴウマツおよびヒノキ等は高いが、チョウセンゴヨウ、テードマツ、ストロブマツおよびチョウセンモミ等は弱い樹種である。

以上のように、チョウセンゴヨウは、韓国の針葉樹の造林木の中で、成長状態が良く、材質は中間程度であり、韓国の郷土樹種として重要な位置を占めている樹種である。

2. チョウセンゴヨウの育林技術と材質

1) 成長と材質

成長に伴うチョウセンゴヨウの材質の変動は、年輪幅が増加するにしたがって早・晩材ともにその幅が広がるが、晩材率は年輪幅2 mm以下では減少し、その後増加してから、年輪幅4 mm以下ではさらに減少している。また、晩材率は優勢木22%、準優勢木24%、劣勢木26%の順であり、成長が劣るほど晩材率は増加する反面、容積密度数は、優勢木306 kg/m³、準優勢木371 kg/m³、劣勢木389 kg/m³の順に年輪幅が狭いほど増加している。なお、年輪幅と強度(曲げ強さ、縦圧縮強度)との関係においては、年輪幅が広いほど強度が低下するよう負の相関関係がある。

チョウセンゴヨウ材の繊維方向の許容応力は、長期負荷に対して圧縮が70 kg/cm²、曲げおよび引張が80 kg/cm²であって、短期負荷の場合には長期負荷の場合の1.5倍となり、建築構造基準を満たしているため、構造材として使用され得る。さらに、チョウセンゴヨウの容積密度数は、日本における構造材としての育成目標である平均密度数320 kg/m³

に達している。しかし、韓国では容積密度数や年輪幅に対する基準が規定されていないので、本研究における年輪幅と容積密度数や強度的性質との関係からみると、年輪幅2—6 mm 範囲のチョウセンゴヨウ材は構造材として適しているが、今後、このようなデータの蓄積による育林指標の設定や施業体系の改善が必要である。

2) 年輪幅と未成熟材の範囲の制御

チョウセンゴヨウの平均年輪幅は、成熟材が3.37 mm、未成熟材が4.76 mm であり、年輪幅は髓より5—8年輪で最大の5—8 mm に達した後、徐々に減少して、15—18年輪ではほぼ安定状態となる。全年輪における平均年輪幅は3.0—4.0 mm であり、韓国の立地環境でこれ以上の成長は無理であると考えられる。しかし、施肥により2.3%の平均胸高直径成長量の増加を示しているため、立地によっては施肥が必要である。ここで、肥培によって初期成長を延長させた場合には、年輪幅が広くなるとともに髓よりの距離も多少増加できると推察される。

一方、未成熟材は年輪幅が大きく晩材率も少ないので、成熟材より強度的性質が10—15%程度劣っており、特に、樹幹基部に近い部分では非常に低い強度を示す。さらに、未成熟材の繊維傾斜角が大きくて、未成熟材部分から取った板材のねじれは3 mm 以上であり、成熟材部分の0.1 mm に比べて著しく大きい。チョウセンゴヨウの未成熟材はこのような材質の欠陥を有しており、施肥等による未成熟材の範囲の制御が望まれる。

3) 気候因子と材質

韓国の気候は夏は高温・多湿、冬は低温・乾燥であるが、チョウセンゴヨウの天然林の分布地は年平均気温が5—10℃の地域であり、夏に高温・多湿な低地帯では成長状態が良くない。さらには、低緯度地域ではチョウセンゴヨウの天然林が分布する標高が高い。

また、気候因子とチョウセンゴヨウの成長との関係をみれば、生育期間中の年輪幅は湿度とは負の相関関係が、降水量とは正の相関関係がある。すなわち、低温・多湿の場合には直径成長が良いことになる。なお、生育休止期である前年度11月から当年度3月までの降水量と温度は概略的に正の相関関係があり、冬季中に気温が高く、降水量（あるいは積雪量）が多ければ、次の生育期の成長に役立ってい

る。しかし、このような気候の移り変わりを利用した森林の管理は実際には難しいことである。ただし、枝打ちや間伐等の森林作業は生育休止期に行われており、気候因子を利用した育林施業による材質の制御は今後とも検討しなければならない。

4) 材質育種

チョウセンゴヨウの早・晩材の容積密度数は各々306 kg/m³と429 kg/m³であり、晩材/早材の比は1.4である。ここで、他のソフトパイン類における早・晩材の全乾比重の比をみると、ホワイトパイン（辺材）が1.4、シュガーパイン（辺材）が1.5である。ハードパイン類としては、テーダマツの容積密度数の晩材/早材の比が2.2、ジャックパイン（*Pinus banksiana*）の全乾比重の比は2.0である。このように、チョウセンゴヨウを含むソフトパイン類の晩材/早材の比は、針葉樹全般における1.5—3.0の範囲の中で、非常に低い値を示し、ソフトパインの特徴を表している。要するに、ソフトパインの比重はハードパイン比べて晩材率にあまり左右されないことを示していると考えられる。なお、チョウセンゴヨウの晩材率は22%であり、ホワイトパインの31%やシュガーパインの34%より相当低い比率を示し、遺伝的選抜による晩材率の増加の可能性がみられるが、この問題は今後材質育種の面で検討すべき課題である。

3. チョウセンゴヨウの用途と利用開発

1) 利用上の問題点の解明

チョウセンゴヨウ材は、木理が通直で、肌目は中間程度の精緻度や光沢度を有している粗な軽軟材であり、乾燥および機械加工が容易である。かつて韓国の伝統工法の住宅にはチョウセンゴヨウ材が柱、梁およびたるき等の構造材として用いられてきたが、現代では木造住宅をあまり好まない風潮により、構造材としての利用はほとんどない実情である。また、チョウセンゴヨウ材は内装材の内壁仕上材やそのほか建具材として一部使われているが、まだ大部分の生産材が小径木であり、節が多く、ねじれや狂い等の欠点があるため輸入材に押されている。さらに、家具材としては、低級家具の部材として一部が投入されているが、やはり節やねじれ等が問題となり、素材よりも集成材として使われている。一方、木箱材の場合には、チョウセンゴヨウ特有の香りが好まれ、朝鮮人参の箱材として多く用い

られているが、用材の不足により、その一部はストローブマツに代替されつつある。

このようなチョウセンゴヨウ材における利用上の問題点を克服し、利用開発を図るのは簡単ではないが、造林木に対する枝打ちおよび間伐を適期に行くと、大きい節の発生が抑制され、さらには年輪幅の調節がある程度は可能となり、その需要は増大され得ると考えられる。

2) 欠点除去など加工技術の開発

チョウセンゴヨウの未成熟材は成熟材に比べて、ねじれや狂いが著しく、組織的な変動が大きいとともに材質も粗悪である。なお、物理・機械的性質の変動幅が大きく強度も低い。

このような未成熟材が大部分であるチョウセンゴヨウ材の間伐材の利用度を高めるには、まず、節等の欠点の除去あるいは分散できる集成加工が必要であり、製材木の生材接着および連続式集成工程の導入等の省力加工技術の開発が望まれる。特に、長大材の使用に当たって、乾燥後のねじれや狂い、割れ等を防ぐためには、熱板加熱あるいは高周波加熱による減圧乾燥を行い、内部応力を緩和あるいは除去しなければならない。さらに、軽軟材であるチョウセンゴヨウ材が家具材や建具材に用いられる場合は、表面の硬度や耐摩耗性の強度が要求され、その方法として、モノマーの表面処理あるいはポリマーの注入処理等を施す必要がある。

3) 育林技術への要望

韓国においてチョウセンゴヨウを含む針葉樹造林木の一般林に対する施業基準によると、植栽後3—5年の間に下刈、蔓切除および施肥(2—3年間)を行い、植栽後7—8年の間には雑木除去をするようになっている。また、枝打ちは植栽してから10—15年くらい経ち、胸高直径が8—10 cmに成長した時に実施するが、枝打ち程度によって5—13%の直径成長の増加をもたらしている。さらに、間伐については、令級によって基準本数が定められており、植栽して15年から30年まで5年毎に3回の間伐を施すが、この場合にも2令級では16%、3令級では9%、4令級では6%の順に直径成長の効果がある。したがって、枝打、間伐および施肥等の施業を合理的に行う場合、年輪幅の調節が可能であると考えられる。

しかしながら、このような施業基準は材積成長とともに樹幹の通直な木材を生産するための一般林に

対する基準であり、採種林の場合の立木本数は一般林の正常立木本数の80%を維持しなければならない。そこで、隔年結実樹種であり、頂芽部位だけで結実するチョウセンゴヨウの場合、主要な有実樹資源として堅実な種実を生産するためには、適正立木本数が維持できる適正な施業を行うべきである。なお、各用途に応ずる良質材の生産を導く施業基準を備えなければならない。

結 言

チョウセンゴヨウは、韓国の郷土樹種として、南部地方の全羅南道と済州道を除いた全国に分布しているが、低地帯や海岸地帯以外の年平均気温が5—10℃である地域の中で、土深が厚く肥沃な適潤地として霧が多い山腹部や溪谷部が最適地であると言われる。

韓国では、荒れた森林を復旧するため緑化を主としたリギダマツおよびアカマツ等の造林が先立って行われ、引き続いて用材としての価値が高いチョウセンゴヨウをこれまで普及・造林してきた。

このチョウセンゴヨウは、成長状態が良く木理が通直で、割れや変形が少ない樹種である。また、光沢や美観とともに特有の香りを発散するので工芸的価値が非常に高い。さらに、軽軟材であり、加工しやすい木材であるのでその用途が多様である。

チョウセンゴヨウ材の用途としては、柱、梁等の構造材、内壁仕上材、天井材等の内装材、朝鮮人参の箱材等があげられるが、その他、家具材、器具材および彫刻材等がある。また、小径木は坑木、繊維板やパルプの原料として使われている。なお、チョウセンゴヨウの種実は昔から韓国人に好まれる高級食品でもある。

このように、チョウセンゴヨウは韓国の主要な木材資源として木材文化の主流を担っており、国民経済生活にも大いに寄与してきた。しかし、現在は輸入外材に押され、ごく制限的な用途以外には使われていない実情である。

そこで、本研究では、チョウセンゴヨウの材質特性を総合的に検討し、これからの新しい利用開発のための基礎資料を提供するとともにチョウセンゴヨウの材質育種および育林施業体系の改善を導く参考資料としての活用を図ろうとした。

一方、チョウセンゴヨウは、木材だけではなく、各種副産物から香料、樹脂、芳香油および薬剤等が

得られるので、これらについての研究も重要な課題であり、今後、チョウセンゴヨウの造林面積や蓄積量が持続的に増大するに伴って、国民生活の豊かさにもっと寄与していくと期待される。

本研究の遂行および論文の作成にあたり、終始、懇切なる御指導を賜った北海道大学農学部深沢和三教授に深く感謝の意を表します。また、本論文の取りまとめに際し、貴重な御意見、御指摘を賜った北海道大学農学部笹谷宜志教授、同藤原滉一郎教授、同大谷 諄助教授に深謝の意を表します。

さらに、本研究の遂行において、絶えざる御支援を賜った大韓国民業研究院の趙 在明院長を始め、同院の諸位に心から感謝のお礼申し上げます。

特に、本研究の遂行過程においては、林業研究院林産工学部の韓 甲俊部長を始め、同沈 槿研究官、同鄭 成鎬研究官、同沈 相魯研究士、同朴鍾瑩研究官、並びに同職員諸氏の多大な御協力を戴き、また、供試材の入手にあたっては、林業研究院中部試験場朴勝杰場長、並びに同職員各位の御協力を戴いた。なお、慶北大学の朴 相珍先生、忠北大学の朴元奎先生からも多くの御意見を戴いた。

このように、本論文は、多くの先生諸氏の御支援、御助言、さらに惜しめない御協力の下に完成したものであり、ここに記して厚く感謝の意を表する次第であります。

引用文献

1. MIROV, N. T.: The genus *Pinus*. 262-267, Ronald Press Company, New York: 1967
2. 韓国樹木図鑑: 山林庁林業試験場: 14. 1987
3. 植木秀幹: 朝鮮の木材: 第1編, 公孫樹及び松柏類, 林業試験場報告 4: 26-35. 1926
4. 世界有用植物事典: 平凡社: 817. 1989
5. RICHARDSON, S. D.: A biological basis for sampling in studies of wood properties. *Tappi*, 44(3): 170-173. 1967
6. ソ連・中国の林業政策研究: 林業研究院, 研究資料, 49: 38. 1990
7. 工藤一郎, 李 元睦: 鴨緑江材の縦圧縮に依る破壊形態, 朝鮮総督府林業試験場特報: 1-18. 1933
8. 山林 暹: 朝鮮木材の識別, 40-41, 朝鮮総督府林業試験場蔵版. 1938
9. LEE Won Yong: Studies on wood quality of *Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc. (III): On annual ring width and summer wood percentage. *J. Kor. Soc.*, 24: 24-44. 1977
10. KANG Sun Ku et al.: On the wood properties of pines grown in Korea. *Res. Rep. For. Res. Inst.*, 22: 71-84. 1975
11. KANG Sun Ku et al.: Studies on the wood properties of Siberian wood (I). *Res. Rep. For. Res. Inst.*, 40: 29-45. 1990
12. LEE Ki Young and LEE Won Yong: Studies on the variation of tracheid length in *Pinus koraiensis*. *J. For. Prod. Tech.*, 2: 17-23. 1987
13. LEE Won Yong: Variation of tracheid length and wood-ray major Siberian coniferous woods. *Ann. Rep. Inst. For. Sci., Kangweon Nat. Univ. Korea*, 7: 1-6. 1990
14. LEE Won Yong and KWEON Jin Heon: Trend of fibril angle variation in *Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc. *J. Kor. Soc.*, 46: 44-56. 1980
15. 中国科学院林業土壤研究所: 紅松林, 中国林業出版社. 1982
16. CHUN Su Kyung and LEE Won Yong: Studies on micro fibril angle of wood plant cell wall (I): Variation of micro fibril angle on tree stem. *Kor. Soc. Wood Sci. Tech.*, 1: 5-11. 1983
17. CHUN Su Kyung and LEE Won Yong: Studies on micro fibril angle of wood plant cell wall (II): Influence of micro fibril angle by anatomical factors. *Res. Bull. Exp. For., Kangweon Nat. Univ.*, 11(3): 47-55. 1983
18. CHUN Su Kyung and LEE Won Yong: Studies on micro fibril angle of wood plant cell wall (III): Influence of physical and mechanical factors by micro fibril angle. *Res. Bull. Exp. For., Kangweon Nat. Univ.*, 12(1): 301-304. 1984
19. LEE Won Yong: Studies on wood quality of *Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc. (V): *Res. Bull. Kangweon Univ. Korea.*, 12: 137-141. 1978
20. LEE Won Yong and KIM Su Chang: Studies on wood quality of *Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc. (VI). *Kor. Soc. Wood Sci. Tech.*, 10: 38-46. 1982
21. TRENDELENBURG, R.: Das Holz als Rohstoff, Carl Hanser Verlag, München. 1955
22. 加納 孟: スギの材質(第1報). 釜淵産スギ, 林試研報 125: 95-119. 1960
23. 加納 孟, 枝松信之, 無木自輔: 製材用原木としてのスギ造林木の品質(第2報). 西川産材, 林試研報 134: 60-114. 1961

24. 田島俊雄：木材の生長と材質. 東京農業大学農学部紀要 **13**: 1967
25. 深沢和三：スギ樹幹内の材質変動に関する研究, 産地を異にする林木樹幹の未成熟材などの区分とその材質特徴. 岐大農研報 **25**: 47-128. 1967
26. DADSWELL, H. E.: Wood structure variation occurring during tree growth and their influence on properties. *J. Inst. Wood Sci.*, **1**: 11-33. 1958
27. LARSON, P. R.: Changes in chemical composition of wood cell walls associated with age. *F. P. J.*, **16**(4): 37-45. 1966
28. PANSHIN, A. J. and de ZEEUW, C: Textbook of wood technology. Vol. 1, Third Ed., 264, McGraw-Hill, 1970
29. RENDLE, B. J.: Juvenile and adult wood. *Inst. Wood Sci.*, **5**. 1960
30. 渡辺治人, 堤 寿一, 小島敬吾: 未成熟材に関する研究(第1報). スギ樹幹についての実験, 木材学会誌 **9**: 225-230. 1963
31. 塩倉高義: 針葉樹の未成熟材に関する知見補遺ならびにカラマツ樹幹内における材質の変動に関する研究. 東京農業大学木材工学研究会: 1-71. 1981
32. SANIO, K.: Über die Grösse der Holzzellen bei der gemeinen Kiefer (*Pinus silvestris*). *Jahrb. f. wiss. Botanik*, **8**: 401. 1872
33. 渡辺治人, 堤 寿一, 松本 勲, 太田貞明: 未成熟材に関する研究(第2報). スギ樹幹の比圧縮強度と比圧縮ヤング率の分布. 木材学会報 **10**: 125-130. 1964
34. 太田貞明, 渡辺治人, 松本 勲, 堤 寿一: 未成熟材の力学的特性に関する研究(第2報). ヒノキ樹幹における材質判定因子の変動と力学的性質について. 木材学会誌 **14**: 261-268. 1968
35. 須藤彰司: アカマツ仮道管の変移について(第6報). 林分(東北地方)における生長と仮道管長の関係について. 木材学会誌 **15**: 241-246. 1969
36. SCHULTZE-DEWITZ, G.: Variation und Häufigkeit der Faserlänge der Kiefer. *Holz als Roh-und Werkstoff*, **23**: 81-86. 1965
37. ELLIOTT, G. K.: The Distribution of tracheid length in a single stem of Sitka spruce. *J. Inst. Wood Sci.*, **5**: 38-47. 1960
38. HILLER, C. H.: Correlation of fibril angle with wall thickness of tracheids in summer wood of slash and loblolly pine. *Tappi*, **47**(2): 125. 1964
39. 宮島 寛: 苫小牧地方演習林産造林木3樹種の基礎材質. 北大演習林研報 **42**: 1089-1114. 1985
40. TRENDELENBURG, R.: Schwankungen der Raumgewichts gewichtiger Nader holzer nach Wuchsgebiet Standort und Einzelstamm. 1935
41. TRENDELENBURG, R.: Über Stammwuchs untersuchungen und ihre Auswertung in der Holzforschung. *Holz als Roh-und Werkstoff*, **1**, 1/2: 3-13. 1937
42. 渡辺治人: 人工杉林の樹幹に於ける容積重の分布に就いて. 日本林学会誌 **21**: 549-558. 1939
43. 平井信二: 林木の重量生長に関する研究(第1報). 富士演習林産カラマツ. 東京大演習林報 **35**: 92-105. 1945
44. 平井信二: 林木の重量生長に関する研究(第2報). 秩父演習林産オウシュウトウヒ. 東京大演習林報 **38**: 141-152. 1950
45. 平井信二: 林木の重量生長に関する研究(第3報). 茨城県大子産スギ. 東京大演習林報 **39**: 219-234. 1951
46. 平井信二: 林木の重量生長に関する研究(第4報). 千葉県演習林産スギ. 東京大演習林報 **45**: 203-221. 1953
47. 平井信二: 林木の重量生長に関する研究(第5報). 北海道演習林産ストロブマツ. 東京大演習林報 **48**: 221-235. 1955
48. 大沢正之, 井阪三郎: アカエゾマツ樹幹内木材比重の偏異. 札幌農林学会報 **35**(4): 1-92. 1943
49. 加納 孟: 木材材質の森林生物学的研究(第14報). トドマツ材の容積密度数の大きさと幹の中の分布. 林試研報 **101**: 1-90. 1957
50. 太田貞明: スギ, ヒノキ樹幹内における未成熟材の力学的特性に関する基礎的研究. 九州大演習林報 **45**: 1-80. 1972
51. MEYLAN, B. A. and PROBINE, M. C.: Microfibril angle as a parameter in timber quality assessment. *F. P. J.*, **19**(4): 30-34. 1969
52. PEARSON, R. G. and GILMORE, R. C.: Characterization of the strength of juvenile wood of loblolly pine (*Pinus taeda*). *F. P. J.*, **21**: 23-31. 1971
53. 中川伸策: カラマツの繊維傾斜度. 林試研報 **335**: 15-30. 1986
54. 重松頼生, 安本善次: カラマツの材質試験. 旋回木理と収縮率の樹幹内分布. 日林中部講演集 **19**: 92-94. 1970
55. HARRIS, J. M.: Preliminary studies of spiral grain in radiata pine. Proceedings Meeting of IUFRO Section, **41**: 1-9. 1965
56. 中川伸策: カラマツ樹幹内における旋回木理の分布とその出現型. 林試研報, **248**: 97-120. 1972

57. 加納 孟, 中川伸策, 斉藤久夫, 小田正一, 重松頼生: カラマツ用材品質について(第1報). 用材品質におよぼす林木, 素材および角材の条件. 林試研報 **162**: 1-44. 1964
58. 加納 孟, 中川伸策, 斉藤久夫, 小田正一: カラマツ用材品質について(第2報). 用材品質におよぼす立地条件の影響. 林試研報 **182**: 113-147. 1965
59. 沈 相魯: カラマツの性質と有効利用に関する基礎的研究. 北大博士学位論文. 1990
60. DOUGLAS, A. E.: A Method of estimating rainfall by the growth of tree. In climate factor. Ed. by E. Huntington. *Carnegie Institute of Washiton Pub.*, **192**: 101-122. 1914
61. FRITTS, H. C.: *Tree-rings and climate*. Academic Press, New York, 1976
62. SCHWEINGRUBER, F. H., BARTHOLIN, T., SCHAR, E. and BRIFFA, K. R.: Radiodensitometric-dendroclimatological conifer chronologies from Lapland (Scandinavia) and the Alps (Switzerland). *Boreas*, **17**: 559-566. 1988
63. FRITTS, H. C.: Tree-ring evidence for climatic changes in western north America. *Monthly Weather Review*, **93**: 421-443. 1965
64. BLASING, T. J.: Methods for analyzing climatic variations in the North Pacific sectors and western north America for the last few centuries. Ph. D. Thesis. Univ. of Wisconsin, Madison, 1967
65. BLASING, T. J. and FRITTS, H. C.: Pacific climate of Alaska from tree rings. In climate of the arctic. Ed. by G. Weller and S. Bowling. The 24th Alaska Science Conference: 48-58, Geophysical Institute, Univ. Alaska, Alaska, 1975
66. LAMARCH, V. C., Jr.: Paleoclimatic inferences from long tree-ring records. *Science*, **183**: 1043-1048. 1974
67. STOCKTON, C. W.: Long-term stream low records reconstructed from tree-rings. papers of tree-rings lab., No. 5, Univ. Arizona, Arizona, 1975
68. COOK, E. R. and JACOBY, G. C.: Evidence for quasiperiodic July drought in the Hudson valley, New York. *Nature*, **282**: 390-392. 1979
69. CONKEY, L. E.: Response of tree-ring density to climate in Maine. *Tree-Ring Bull.*, **39**: 29-38. 1979
70. STAHL, D. W., CLEAVELAND, M. K. and HEHR, J. G.: North Carolina climate changes reconstructed from tree-rings: A. D. 372 to 1985. *Science*: 1517-1519. 1988
71. FRITTS, H. C. and LOUGH, J. M.: An estimate of average annual temperature variations for North America, 1602 to 1961. *Climate Change*, **7**: 203-224. 1985
72. GRAUMLICH, L. J. and BRUBAKER, L. B.: Reconstruction of annual temperatures (1590-1979) for Longmire, Washington derived from tree-rings. *Quaternary Research*, **25**: 223-224. 1986
73. FRITTS, H. C.: Reconstructing large-scale climatic pattern from tree-ring data: A diagnostic analysis. Univ. Arizona Press, 1990
74. PARKER, M. L. and HENOCH, W. E. S.: The use of engelmann spruce latewood density for dendrochronological purposes. *Can. J. For. Res.*, **1**(2): 90-98. 1971
75. STUIVER, M.: Solar variability and climate change during the current millennium. *Nature*, **286**: 868-871. 1980
76. GRAY, J. and THOMPSON, P.: Climatic information from O¹⁸/O¹⁶ analysis of cellulose, lignin, and whole wood from tree-rings. *Nature*, **270**: 708-709. 1971
77. BURK, R. L.: Factors affecting O¹⁸/O¹⁶ ratios in cellulose. Dissertation. Univ. Washington, Seattle, 1979
78. BRIFFA, K. R., JONES, P. D., PILCHER, J. R. and HUGHES, M. K.: Reconstructing summer temperatures in Northern Fennoscandia Back to A. D. 1700 using tree-ring data from Scots pine. *Arctic and Alpine Research*, **20**(4): 385-394. 1988
79. LAMARCH, V. C., Jr., Homels, R. L., DUNWIDDIE, P. W. and DREW, L. G.: Tree-ring chronologies of the southern hemisphere. Vol. 1-5, Tree-Ring Lab., Univ. Arizona, 1979
80. GRAYBILL, D. A. and SHIYATOV, S. G.: A 1009 year tree-ring reconstruction of mean June-July temperature deviations in the polar Urals. In Proceedings of the Second US-USSR Symposium on: Air Pollution Effects on Vegetation. Ed. by R. D. Noble, J. L. Martin and K. F. Jensen. NE Forest Experiment Station, USDA, Forest Service, 37-42. 1988
81. WU, X. and ZHENYAO, L.: A Preliminary analysis of climatic variation during the last hundred years and its outlook on Tibetan Pla-

- teau. *Kexue Tongbao*, **23**: 746-750. 1978
82. JOZSA, L. A., PARKER, M. L., BRAMHALL, P. A. and JOHNSON, S. G.: How climate affects tree growth in the boreal forest. *Environ. Can., Can. For. Serv., North For. Res. Cent., Edmonton, Alberta, Inf. Rep., NOR-X-255*. 1984
83. 太田貞明: ソフト X 線による樹木の年輪構造解析 (第 2 報). 一方向から吹く風が林木の材質に及ぼす影響. *木材学会誌* **25**: 561-566. 1979
84. 深沢和三: 樹木の年輪が持つ情報 (解析技術と林業への応用). 平成元年度科学研究費補助金研究成果報告書. 1990
85. 小林弥一: 木材細胞膜のフィブリル傾斜度測定用試料作製上の簡便法, *日本林学会誌* **34**: 392-393. 1952
86. LARSON, P. R.: Biological approach to wood quality. *Tappi*, **45**(6): 443-448. 1962
87. Van BUIJTENEN, J. P.: Experimental control of environmental factors and their effect upon some aspects of wood anatomy in Loblolly pine. *Tappi*, **41**(4): 175-178. 1958
88. IFJU, G.: Some variables affecting microtensile strength of Douglas-fir. *F. P. J.*, **12**: 213-239. 1962
89. IFJU, G.: Improve microtechnique for wood tensile strength and related properties. *F. P. J.*, **15**: 13-14. 1965
90. Harris, J. M. and Meylan, B. A.: The influence of microfibril on longitudinal and tangential shrinkage in *Pinus radiata*. *Holzforshung*, **19**: 144-153. 1965
91. 鈴木正治: スギのヤング率と細胞膜構造の関係. *木材学会誌* **15**: 278-284. 1969
92. 山井良三郎: 針葉樹アテ細胞膜の力学的構造模型. *九大農学芸誌* **13**(1): 234-237. 1951
93. NOSKWIAK, A. F.: Spiral grain. *F. P. J.*, **13**: 266-275. 1963
94. 中戸莞二, 梶田 茂: 木材の収縮膨張に関する異方性の原因について (4 報). 年輪と異方収縮, *日本林学会誌* **37**(1): 22-25. 1955
95. PRESTON, R. D. and DADSWELL, H. E.: *Inst. Wood Sci.*, **11**: 33. 1958
96. MORK, E.: Die Qualität des Fichtenholes unter besonderer Rücksichtnahme auf Schleif- und Papierholz. *Papier Fabrikant*, **26**: 741. 1928
97. 佐伯 浩: 針葉樹材の年輪構造に関する研究 (第 2 報). 早材・晩材の区分 (I). *木材学会誌* **9**: 231-236. 1963
98. 佐伯 浩: 針葉樹材の年輪構造に関する研究 (第 3 報). 早材・晩材の区分 (II). *木材学会誌* **9**: 237-243. 1963
99. 加納 孟: 北海道厚田産トドマツ材の年輪の構造について. *林試研報* **71**: 15-20. 1954
100. 酒田金治, 佐伯 浩: 智頭スギの材質 (第 2 報). 樹幹内における年輪幅および年輪の性状の変化について. *鳥取農学会報* **12**: 137-141. 1960
101. RICHARDSON, S. D.: *Forests and forestry in China: Changing Patterns*, Washington, D. C. U. S. A.: **94**: 1990
102. 上村 武, 齊藤寿義: 材内部位によるヒノキ材の生長変異 (樹高, 半径方向と年輪幅および繊維長の関係). *林試研報* **263**: 43-63. 1974
103. SOON Joo Jin, LEE Won Kyu, KIM Jae Hoon, LEE Chun Yong, JIN Ik Sup, Seung Kull Park and Min Young Oh: Studies on fertilization in pruning and thinning stands. *Res. Rep. Res. Inst.*, **30**: 153-174. 1983
104. YLINEN, A.: Über den Einfluss des Spätholzanteils und der Jahrringbreite auf die Rohdichte beim Finnischen Kifernholz. *Holz als Roh- und Werkstoff*, **9**: 449-456. 1951
105. 平井信二: 林木の重量生長に関する研究 (第 6 報). 千葉県演習林産ヒノキ. *東京大演習林報* **54**: 200-217. 1958
106. 平井信二: 林木の重量成長に関する研究 (第 7 報). 北海道演習林産ドロノキ属 (I). *東京大演習林報* **57**: 190-201. 1962
107. 平井信二: 林木の重量生長に関する研究 (第 8 報). 人工植栽ドロノキ属 2 種. *東京大演習林報* **62**: 189-196. 1966
108. 加納 孟: 木材材質の森林生物学的研究 (第 11 種). *林試研報* **90**: 37-76. 1956
109. KOLLMANN, F. P. and Côté W. A.: Principle of wood science and technology I Solid wood, 174-175, Springer Verlag, 1968
110. ZOBEL, B. J., WEBB, C. and HENSON, F.: Core or juvenile wood of Loblolly and Slash pine Trees. *Tappi*, **42**(5): 345-356. 1959
111. YAO, J.: Shrinkage properties of second-growth in southern yellow pine. *Wood Sci. Technol.*, **3**: 25-39. 1951
112. KOLLMANN, F. and Côté, W., Jr.: Principle of wood science and technology (Solid Wood). 443-448, Springer-Verlag New York Inc., 1962
113. SHIRASAWA, H.: International critical table. **2**: 37. 1972
114. LLIBARDIC, S. et al.: Sumarst Vo, **23** (314): 31. 1970

115. TRENDELEBURG, R. and Mayer-Wegelin, H.: Das Holz als Rohstoff. Carl Hanser Verlag, 1955
116. TSOMIS, G.: Wood as raw material. 168, Pergamon Press, London, 1968
117. PARKER, M. L., SCHOORLMER, J. and CARCER, L. J.: Computerized scanning densitometer for automatic recording of tree-ring width density data from X-ray negatives. *Wood and Fiber*, 5(3): 237-248. 1973
118. SCHWEINGRUBER, F. H.: Tree-rings: Basics and applications of dendrochronology. 64-71, D. Reidel Pub., Dordrecht, Holland, 1987
119. FRITTS, H. C. and SWETNAM, T. W.: Dendroecology: A tool for evaluating variations in past and present forest environments. Tree-Ring Lab., Univ. Arizona, Arizona, 1986
120. HOLMES, R. L., ADAMS, R. K. and FRITTS, H. C.: Tree-ring chronologies of Western America: California, Eastern Oregon and Northern Great Basin. NSF Grant Report, Tree-Ring Lab., Univ. Arizona, 1986
121. BAILLIE, M. G. L. and PILCHER, J. R.: A simple crossdating program for tree-ring research. *Tree-Ring Bull.*, 33: 7-14. 1973
122. FRITTS, H. C., AVAGANOV, E., SVIDERSKAYA, I. V. and SHASHKIN, A. V.: Climatic variation and tree-ring structure: A statistical simulative model of tree-ring chronology index, cell-wall thickness and density. Tree-Ring Lab., Univ. Arizona, Arizona (Unpublished), 61: 1989

Summary

Most Korea's wood products are provided by high quality imported logs. This limits the utilization of wood from Korean pine (*Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc.) plantations. One of the greatest needs in Korea is to understand the properties of Korean pine so that its uses can be expanded. This study investigated the factors influencing these properties by making a detailed classification of the features of mature and juvenile wood, and of earlywood and latewood. The factors influencing the changes in cell characteristics in the stem and the causes of physiological changes in Korean pine were determined, as was the detailed relationship between annual ring growth and climatic changes. The main

results obtained are summarized as follows:

1) The tracheid diameter in earlywood was 2.2 times that of latewood and mature wood had a greater tracheid diameter than juvenile wood. Tracheid wall thickness of latewood was 1.6 times that of earlywood and its tracheid length was longer; mature wood had greater tracheid wall thickness and tracheid length than juvenile wood.

2) Annual ring width of juvenile wood was 1.4 times that of mature wood, with the width increasing in order of base, stem and crown. The percent of latewood in mature wood was greater than in juvenile wood and decreased in order of base, stem and crown. The difference between the radial and tangential directions in shrinkage was great. Bending and compression strength parallel to the grain of mature wood were stronger than in juvenile wood, and the strength properties of wood decreased as the annual ring width increased.

3) The transition from juvenile to mature wood was 13-19 growth rings. The growth of plantation trees in temperate zones was superior to that of trees grown in natural stands. Though wood from the latter stands had a slightly higher specific gravity than wood from plantations, there was no other evident difference in properties between the two groups.

4) The percentage of latewood was less when the annual ring width was less than 2 mm or greater than 4 mm. A negative correlation was found between annual ring width and strength. Accordingly, Korean pine lumber with rings 2-6 mm in width is thought to be the most appropriate for structural materials.

5) The average annual ring width was 3.37 mm for mature wood and 4.76 mm for juvenile wood. Maximum width was 5-8 mm in the 5-8 growth rings from the pith, thereafter decreased and was almost constant in the 15-18 rings. Average annual ring width was 3.0-4.0 mm for the whole tree. Juvenile wood was 10-15% lower in strength than mature wood.

6) Korean pine had a Z-grain in the stem axis. The slope of grain at 0.2 m from the base of the stem increased constantly outward from the pith, and then decreased toward the bark. From 1.2 m to 7.2 m from the base of the stem, the slope of grain increased until the 10th annual ring, after which it became constant.

7) The twist of boards sawn from Korean pine had a Z-grain direction which coincided with the spiral grain direction, and boards from juvenile wood formed with high grain showed severe twist while those from mature wood showed little twist.

8) There was a negative correlation between the

temperature and annual ring width, and a positive correlation between rainfall and annual ring width. This is believed due to the linear correlation of rainfall and temperature in the dormant season with diameter growth.