

소나무재의 단면치수에 따른 수축률 특성*1

황 권 환*2† · 박 병 수*2

Effect of Cross-Sectional Dimension on the Shrinkage Property of Korean Red-Pine Wood*1

Kweonhwan Hwang*2† · Beyung-Su Park*2

요 약

우리나라에서 전통주택(한옥) 및 목조건축 문화재의 구조부재로 많이 이용되는 소나무는 천연건조가 일반적이어서 건조에 많은 시간이 소요되고 건조가 불충분하면 수축에 의한 갈라짐 및 변형 등의 결함을 일으킬 수 있다. 소나무 소시험편과 대단면 시험편을 제작하여 함수율상태에 따른 수축률변화를 검토하였다. 특정 함수율 상태에서의 체적수축률을 예측할 경우, 생재상태에서 기건상태, 기건상태에서 전건상태까지의 구간으로 나누어 적용하는 것이 정밀도가 높았다. 변재의 체적수축률은 단면크기에는 상관성이 없으며, 심재는 단면이 커질수록 체적수축률이 감소하는 것으로 나타났다.

ABSTRACT

Red pine (*Pinus densiflora*) has been used for structural wood members of Korean traditional residence (HANOK) and historic wooden structures. For these constructions, generally, natural drying has conducted for long time; however, unless drying is conducted sufficiently, it could cause several drying defects such as check or warping. Shrinkage changes of red pine species for small clear specimens and big-size specimens according to the conditions of moisture contents, were examined. For the estimation of volumetric shrinkage at a special moisture content, it was more precise to divide the range of moisture contents into two groups, green to air-dry and air-dry to oven-dry. The volumetric shrinkage had no difference with specimen sizes in sapwood, but decreased as specimen size increased in heartwood.

* 1 접수 2008년 11월 3일, 채택 2009년 3월 23일

* 2 국립산림과학원 임산공학부 목재성능과. Division of Wood Engineering, Department of Forest Products, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

† 주저자(corresponding author) : 황권환(e-mail: m54290@chol.com)

Keywords: structural wood member, red pine, drying, shrinkage, moisture content, volumetric shrinkage

1. 서 론

목재는 구성세포가 축방향과 방사방향으로 분포하여 직교이방적 특성을 나타내며, 세포벽은 친수성을 가지는 셀룰로오스로 구성되어 수분변화에 따른 치수변동이 섬유포화점 이하에서 극심한 편이다 [1,2]. 이로 인해 수분변화에 따른 치수변화가 목재의 3방향에서 각각 다르게 나타난다. 전통공법으로 구성된 한옥과 문화재 등의 목재 구조부재는 외기의 상대습도(RH) 변화에 따른 수축과 팽윤이 발생하며, 수축결합이 가장 큰 문제점으로 지적되고 있다. 특히, 천연건조단계만을 거치고 대단면 부재를 많이 사용하는 전통건축에서는 부재내의 심변재간, 재의 내외부간의 함수율차이(함수율경사)로 인한 활렬 또는 갈라짐 등의 결함에 대한 사례가 많아 더욱 주의가 요하고 있다. 또한, 숯레문과 황룡사 9층목탑과 같이 목조문화재를 전체적으로 복원하고자 할 때는 현재의 부재치수를 그대로 적용하기 보다는 건축 당시의 부재 함수율을 고려하여 정확한 치수를 예측하여 적용하여야 할 것이다. 이를 위해서는 현재의 치수와 함수율을 파악하여 장건 당시의 치수 및 함수율에 대해 역추산하는 방법이 거론될 수 있을 것이다.

일반적인 목재의 수축률은 길이방향(L) : 방사방향(R) : 접선방향(T)에 대해 0.5~1 : 5 : 10 수준이다 [3]. 또한, 소나무(*Pinus densiflora*)의 평균수축률은 L : R : T에 대해 1 : 16 : 29로써 일반적인 목재수축률보다 이방성이 크다 [4]. 부재의 길이방향(L)에 대해서는 그 수축률이 상대적으로 매우 미미한 상태여서 수 %의 함수율 변화에 따른 길이방향을 변화는 무시해도 좋을 것이다 [2]. 하지만, 이러한 현상은 특히 인공건조에 의해 저함수율까지 건조되어 함수율변화가 크지 않은 부재에 대해 적용성이 있는 것이므로, 천연건조된 구조부재는 최종사용함수율을 고려하여야 할 것이다.

본 연구에서는 소나무에 대해 심재와 변재, 소시

험편과 대단면 시험편에 대해 다양한 함수율변화에 따른 수축률을 얻고, 비교적 단면이 큰 시험편의 심변재 구성과 함수율상태에 따른 체적수축률을 검토하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 공시재료

경상북도 울진지역의 소나무를 공시목으로 사용하였다. 우선, 건조정도에 따른 목재 내부의 함수율 분포를 살펴보았다. 목재를 수확한 후 박피를 행하지 않은 채 1년 정도 야적한 3 m 길이 원목의 중간 부분에서 천연건조가 일부 진행된 것과 건조가 진행되는 과정의 수간내 함수율분포를 살펴보기 위해 25 mm 두께로 3개의 원판을 준비하였다. 원판에 대해서는 바로 수에서 수피부까지 일정 크기별로 절편을 취한 후, 전건법으로 함수율을 측정하여 함수율분포를 관찰함으로써 변재와 심재, 재의 내외부 함수율 경사를 살펴보았다.

한편, 수축률 시험을 위해 제제한 소나무 판재는 일반 열기건조를 행하여 6개월 이상 실내보관하였으며, 이 소나무 판재를 이용하여 KS F 2203 [5]에 의거한 수축률 시험편을 제작하였다. 시험편의 공칭 치수는 대조구(Control, 20 × 20 × 20 mm)와 P50 (50 × 50 × 100 mm), P75 (75 × 75 × 100 mm), P100 (100 × 100 × 100 mm)으로 각각 10개씩 제작하여 이용하였다. 대조구에 대해서는 심재(CH)와 변재(CS)에 대해 두 그룹으로 나누어 시험편을 준비하였다. 단면이 큰 시험편은 변재만으로 구성(P50)한 것, 심변재를 혼합한 것(P75) 및 심재만으로 구성(P100)한 시험편을 준비하였다. 시험편에는 각 방향별 기준선을 설정하여 항상 같은 위치에서 치수변화를 측정할 수 있도록 하였다(Fig. 1).

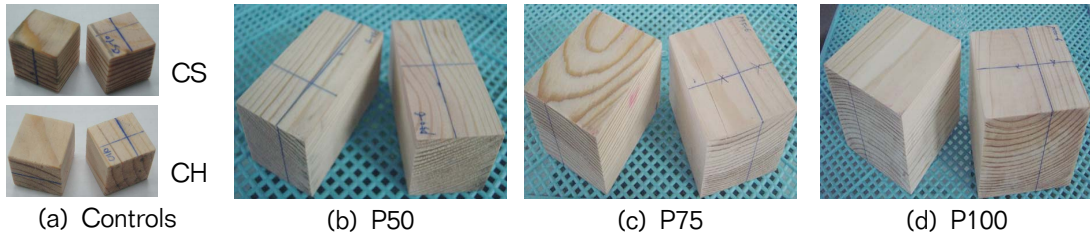


Fig. 1. Tested specimens manufactured in each size. CS (upper), sapwood for control; CH (bottom), heartwood for control; P, Korean red pine; 50, 75, and 100, nominal sizes in cross section (mm).

2.2. 시험방법

함수율분포 측정용 원판시험편은 생재상태로부터 전건상태에 이르기까지의 변화를 3단계로 나누어 살펴보았다. 원목에서 떼어낸 두께 25 mm의 3개의 원판으로부터 수로부터 수피부까지 폭 25 mm로 블록을 떼어내고 수에서 수피부까지 3~5 mm 간격으로 함수율시험편을 절단하여 KS F 2199[6]에 따라 전건법에 의해 함수율을 측정하여 수로부터 수피부향의 함수율분포를 검토하였다.

수축률 시험방법은 KS F 2203[5]을 기준으로 흡습, 흡수, 건조 조건으로 생재상태에서 전건상태까지의 함수율변화에 따른 수축률을 측정하였다. 일반적인 목재의 수축률은 흡습(또는 흡수)보다는 탈습(또는 탈수) 과정에서 치수변화율이 크며, 수축이 팽윤보다 심각한 문제를 야기한다. 각각의 시험편에 대해 $20 \pm 2^\circ\text{C}$, 상대습도(RH) $60 \pm 5\%$ 의 조건에서 함수율 약 12% 수준으로 안정시킨 후, 72시간 수침에 의해 생재상태로 변화시켰으며, 건조결함을 방지하기 위해 $40\sim 50^\circ\text{C}$ 의 조건에서 건조를 일부 진행하고 최종적으로는 오븐에서 전건시켰다. 섬유포화점은 12% 함수율을 기준으로 전건무게를 가정하여 변화된 수분변화량으로 추정하였으며, 전건무게로부터 최종 확인하였다. 건조과정별로 시험편의 무게를 0.01 g 단위로 측정하고, 방향별 치수는 기준선을 따라 3단면에서 3방향에 대해 0.01 mm 정밀도의 디지털 버니어캘리퍼스로 측정하였다[7].

섬유포화점(함수율 약 30%)에서의 치수를 기준으로 함수율변화에 따른 방향별 수축률을 산출하였다.

수축률은 KS F 2203[5]에 의거하여 전건수축률(생재상태에서 전건까지), 기건수축률(생재상태에서 기건까지), 평균수축률(기건상태에서 전건까지)의 항목별로 산출하였으며, 동일한 방법으로 각 구간에 대해 체적수축률을 산출하여 소시험편과 P50 (변재만으로 구성된 시험편), P75 (심재와 변재가 혼합된 시험편), P100 (심재만으로 구성된 시험편)과 같은 단면이 큰 시험편과의 관련성을 살펴보았으며 이에 대한 문제점을 검토하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 원판 내 함수율분포

천연건조가 일부 진행된 생재상태의 원판과 건조가 진행된 후의 원판 내에서의 수피방향에서 수방향으로의 함수율분포를 비교한 것이 Fig. 2이다. 생재 상태에서는 변재부의 함수율이 높게 나타나고 건조가 진행되면서 함수율경사는 점차 줄어들고 최종단계에서는 내외부의 함수율차이는 거의 나타나지 않았다. 천연건조에 의한 예상 함수율분포(그림에서 원)와 같이 천연건조가 진행된 부재는 외부에서 우선 건조가 진행되고 점차적으로 내부로 건조가 진행되므로 상당한 기간이 지나지 않는 이상 내부의 함수율이 외부에 비해 높게 나타나 함수율경사가 나타나는 것이 일반적이다. 이러한 현상은 충분히 건조되지 않은 소재를 부재로 사용한 목조건축물에서 시공 후 건조수축이 발생할 수 있는 소지가 충분히 있음을 반영한다. 물론, 이러한 수축과 팽윤 현상이 시

Table 1. Moisture contents and densities of tested specimens

<i>Pinus densiflora</i>	Moisture content (%)		Wood condition	Total density (g/cm ³)		
	Green (72 h in water)	Air-dried		Green	Air	Oven
KFRI (1994)	-	-	-	0.70	0.47	0.44
CS	85.6	10.8	S	0.74	0.47	0.44
CH	50.1	12.6	H	0.60	0.48	0.45
P50	66.2	13.6	S	0.66	0.48	0.44
P75	37.9	13.9	S/H	0.63	0.54	0.50
P100	34.4	14.5	H	0.53	0.47	0.43

Legends: S, sapwood; H, heartwood, Specimen names are referred in Fig. 1.

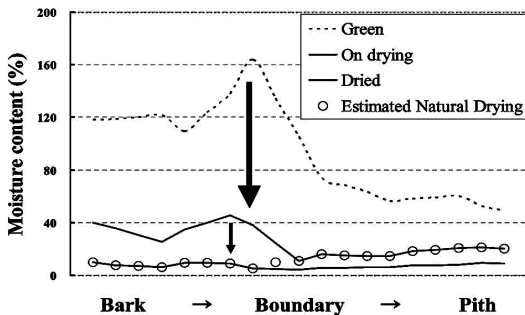


Fig. 2. Distribution of moisture contents (MC) from bark to pith during wood drying.

간경과에 따라 수분흡탈착에 의한 이력현상이 완화되기도 하지만, 대부분의 건조수축문제는 수 년 내에 발생하는 경우가 많다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 우선 건조가 잘된 목재를 사용하여야 하며, 사용 중에는 함수율관리가 철저히 이루어져야 한다. 또한, 충분히 건조되지 않은 목재를 부재로 사용하였을 경우에는 꾸준한 함수율관리를 통하여 건조수축문제를 미연에 방지하는 것이 필요하다.

3.2. 기초물성

본 연구에 사용된 울진산 소나무는 수령 72년, 평균연륜폭 3.18 mm, 평균만재율 20.5%였으며, 심변재가 혼재한 P75시험편의 변재율은 11.3~51.5% (평균 33.9 ± 14.4%, 변이계수 42.7%)였다. Table 1은 본 연구에서 사용된 시험편의 함수율과 특정 함수율상태에서의 무게와 부피로 계산한 전밀도(total

density)를 나타냈다.

밀도는 생재상태에서 0.53~0.74 g/cm³, 기건상태(함수율 12%)에서 0.47~0.54 g/cm³, 전건상태에서 0.43~0.50 g/cm³ 범위였다. 시험편별 밀도의 차이는 심변재의 구성비율과 만재율에 따른 것으로 변재가 많이 포함되고 연륜폭이 좁은 시험편일수록 높게 나타나며, 심재만으로 구성되고 연륜폭이 넓은 CH 시험편과 P100 시험편은 가장 낮게 나타났다. 심변재가 혼합된 P75 시험편의 경우, 기건밀도 및 전건밀도가 다른 시험편에 비해 높게 나타났으며, 이는 심변재간의 불균일한 건조수축에 기인한 것으로 추측된다. 즉, 건조가 진행됨에 따라 변재의 수축을 심재부에서 억제하여 시험편 전체적으로는 전밀도가 상승한 요인으로 분석된다.

한편, 생재함수율은 변재로 구성된 CS 시험편과 P50 시험편에서 높고, 심재로 구성된 CH 시험편과 P100 시험편은 낮은 함수율을 나타냈다. 이는 실제 생재상태의 목재에서 변재가 심재보다 2배 정도 높은 값을 나타낸 자료[4]와 유사하게 나타났다.

3.3. 방향별 수축률

Fig. 3은 각 시험편의 생재에서 전건까지의 함수율변화에 따른 방향별 수축률을 나타낸 것으로 섬유포화점에서의 치수를 기준으로 한 것이다. 함수율 5% 이하의 범위에서 할렐 및 뒤틀림 등의 영향으로 수축률은 변화양상이 불균일하며, 5%~FSP 범위에서는 직선적인 형태를 취하며, 25% 이상에서는 소시험편은 방향별 수축률변화가 뚜렷하지만 단면이

소나무재의 단면치수에 따른 수축률 특성

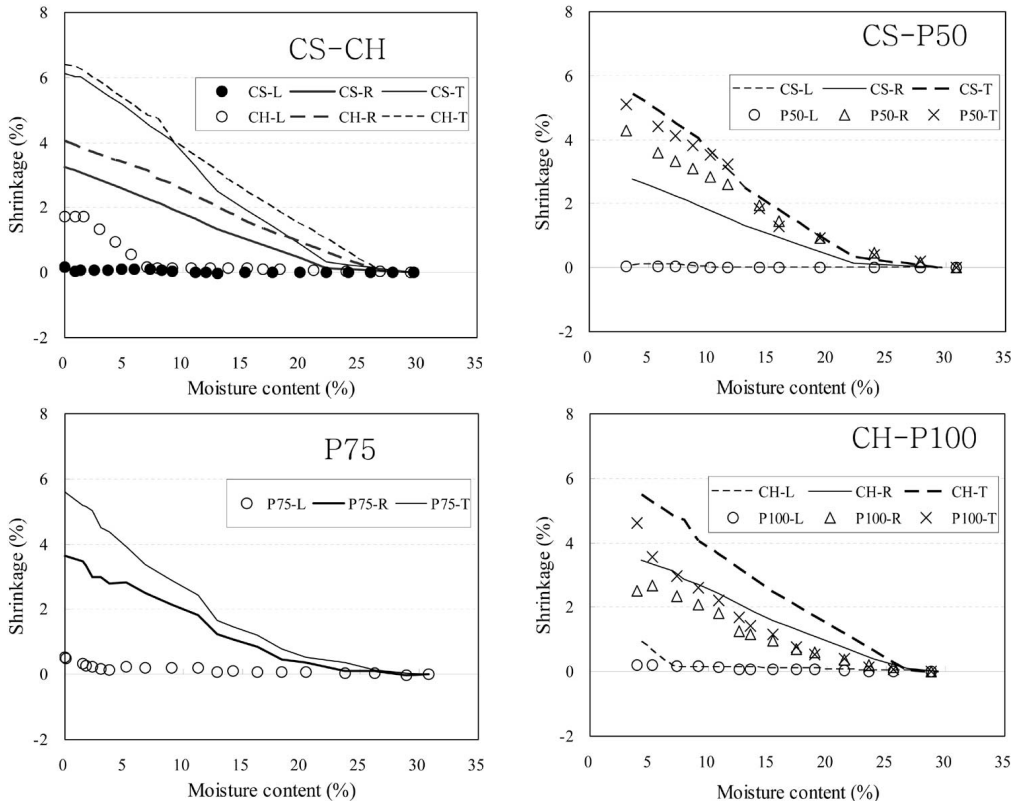


Fig. 3. Shrinkage at various moisture contents (MC). Legends are referred to Fig. 1.

커질수록 방사방향(R)과 접선방향(T)은 추정면 등의 증가로 수축률차이는 감소하는 것으로 나타났다.

한편, Fig. 3의 오른쪽 그래프에 있어서 함수율범위 5%~FSP 범위에서의 CS 시험편과 P50 시험편을 동시에 나타낸 것이 CS-P50, CH 시험편과 P100 시험편을 동시에 나타낸 것이 CH-P100이다. 그림에서 수축률차이가 거의 없는 길이방향을 제외하면, 대단면 시험편에서는 방사방향과 접선방향의 수축률차이가 크지 않아 P50에서는 접선방향에서만 동일한 수축률변화를 보였으며, 오히려 소시험편(CH)의 방사방향 수축률이 P100에서는 접선방향에 가까운 거동을 보였다. 이러한 현상은 대단면재일수록 시험편의 단면구성에 있어 방사방향과 접선방향의 구분이 불명확한 부분이 존재하여 나타난 것으로 실제 대단면재의 수축률을 추정할 때에는 단면구성을 반드시 고려하여야 함을 알 수 있는 결과이다.

건조(함수율 감소)에 따른 수축률변화에 대한 각 구간값을 Table 2에 나타내었다. 표에서 72시간 수침한 이후의 생재상태에서 전건상태까지의 전건수축률(GO), 생재상태에서 기건상태까지의 기건수축률(GA), 기건상태에서 전건상태까지의 평균수축률(AO)로 나타냈으며, 각 방향별 수축률의 비율을 하단에 나타냈다. 평균수축률은 변재부를 포함할수록 그리고 심재시험편에 있어서는 단면이 커질수록 감소하는 경향을 나타냈으며, 이러한 차이는 길이방향에 있어 뚜렷함을 알 수 있다. 여기서, 심재만으로 구성된 소시험편(CH)의 길이방향 수축률이 상대적으로 높게 나타난 것은 Fig. 1에서와 같이 변재시험편에 비해 상대적으로 낮은 만재율에 기인하는 것을 들 수 있다. 또한, 소시험편의 구성상 치수측정시의 미세한 오차가 영향을 끼쳤거나 미성숙재가 일부 포함되었을 가능성 등에 의한 요인일 수 있다. 전체적

Table 2. Shrinkage at each condition

<i>Pinus densiflora</i>	Shrinkage (%)								
	GO			GA			AO		
	L	R	T	L	R	T	L	R	T
KFRI (1994)	0.31	4.88	9.11	0.16	2.97	5.40	0.24	2.04	4.08
CS	0.18	3.54	7.00	0.04	2.64	4.13	0.14	0.92	2.99
CH	1.69	3.74	6.81	0.36	2.34	3.03	1.33	1.44	3.90
P50	0.22	4.78	6.31	0.12	2.03	4.01	0.10	2.81	2.40
P75	0.55	3.72	5.71	0.21	1.76	2.04	0.34	2.00	3.75
P100	0.28	2.77	5.89	0.16	1.32	1.52	0.12	1.48	4.43
	-- L : R : T --								
KFRI (1994)	1	16	29	1	19	34	1	9	17
CS	1	20	39	1	60	94	1	7	22
CH	1	2	4	1	6	8	1	1	3
P50	1	22	29	1	17	34	1	28	24
P75	1	7	10	1	8	10	1	6	11
P100	1	10	21	1	8	9	1	13	38

Legends GO, green to oven-dry; GA, green to air-dry; AO, air-dry to oven-dry; Specimen names are referred to Fig. 2

인 경향에서는 구조부재의 경우, 단면이 크고 심변재가 혼재하며 순수한 정목판재나 판목판재로 구성되지 않는 점 등의 단면상태를 고려하여 적용하여야 할 것으로 판단되었으며, 연구자료[4]와 비교해보면, CS 시험편에 가까운 결과를 나타냈다. 소시험편의 수축률 특성만으로 대단면재의 수축률을 정확히 예측하기 위해서는 단면구성에 대한 요소가 고려되어야 하며, 이에 대한 차후 연구가 이루어질 필요가 있다.

목재의 평형함수율은 상대습도(RH) 25%, 상온조건에서 약 9%, RH 75%에서 약 15%, RH 100%에서 약 30%이다. 우리나라에서 목재의 함수율은 장마철에 다소 높아져 15~20%가 되고, 겨울철에 난방을 한 실내에서는 4~8%를 나타낸다[8,9]. 이러한 함수율 범위는 일반적으로 외기에 직접 노출되지 않는 상태에서의 결과이며, 한옥과 같이 기둥 및 보와 같은 주요 구조부재들이 외기에 노출되는 경우와 대단면 부재가 장시간 실내난방조건에 노출되면 이 값은 더욱 높아질 가능성이 있다. 노출부재의 건조수축으로 인한 결함은 경시변화를 감안하여야 하는 것으로 함수율 20% 이상의 변화폭을 고려해야 할 경우도 있을 것이다. 특히, 내외부의 함수율경사가 클 것으로 여겨지는 전통목조건축물에서의 대단면 구조부

재는 천연건조된 부재에 대한 시공 당시의 초기함수율과 시공 후의 사용함수율 사이에는 차이가 클 수 있으므로 특히 시공과 사용에 있어 주의를 요하는 사항이다.

3.4. 체적수축률

소나무의 방향별 수축률은 1 (L) : 16 (R) : 29 (T)이며, 체적수축률은 19.2%로 잣나무의 11.1%와 낙엽송의 13.1%보다 높게 나타남을 알 수 있다[4]. 이러한 소나무의 수축률 특성으로부터 함수율차이가 극심할 때는 세심한 주의가 필요함을 알 수 있다.

Table 3은 체적수축률을 각각의 시험편 상태에 따라 정리한 것이며, 자료[4]의 체적수축률 19.2%는 본 연구의 소시험편 및 대단면 시험편보다 높게 평가되어 있다. 이로써 시험편이 작을수록 체적수축률은 높게 나타나는 것으로 보아 임업연구원 시험편은 본 연구에서의 소시험편보다 작았을 가능성이 있다. 한편, 대단면 시험편(P50, P75, P100)에서는 기건에서 전건(AO) 구간을 제외하면 심변재의 구성보다는 단면이 증가할수록 체적수축률은 감소하는 경향을 나타냈다. 이는 변재시험편보다 심재시험편에서 현저하였으며, 시험편이 커질수록 방사방향(방사방향

Table 3. Volumetric shrinkage

<i>Pinus densiflora</i>	Volumetric shrinkage (%)				
	GO	GA	AO	G~5%	
				GO	GA + AO
KFRI (1994)	19.20 (0.64)*	-	-	16.00	-
CS	9.34 (0.31)	5.55 (0.31)	4.02 (0.33)	7.79	7.22
CH	11.70 (0.39)	5.51 (0.31)	6.54 (0.55)	9.75	8.24
P50	10.34 (0.34)	5.39 (0.30)	5.23 (0.44)	8.61	7.57
P75	9.50 (0.32)	3.74 (0.21)	5.99 (0.50)	7.92	6.23
P100	8.54 (0.28)	2.75 (0.15)	5.96 (0.50)	7.12	5.23

Legends and specimen names are referred to Fig. 2

* Parentheses present volumetric shrinkages in unit percentage.

의 축세포)에서 방사조직의 길이방향 수축률을 억제하는 치수효과(size effect)가 체적수축률에서도 나타난 것으로 추론된다.

생재상태(함수율 30% 기준)에서 5%까지의 함수율변화에 대해 나타난 것이 Table 3의 G~5% 결과이다. 이 조건은 체적수축률을 생재상태에서 5%까지 전체적으로 적용한 것(GO)과, 생재상태에서 기건상태(GA)까지와 기건상태에서 전건상태(AO)까지 두 구간으로 나누어서 적용한 것(GA + AO)으로 구분하여 나타내었다. 특정 함수율(표에서는 5%)에서의 체적수축률을 알고자 할 때는 후자가 보다 정밀도가 높을 것으로 여겨진다. 변재상태의 소시험편(CS)과 대단면 시험편(P50)은 4% 정도의 체적수축이 일어남을 알 수 있으며, 심재가 많이 포함되고 단면이 커질수록 체적수축률도 감소하였다. 또한, 심재시험편 결과로부터 심재라도 단면이 감소할수록 수축현상이 현저함을 알 수 있다. 이에 대한 검토 및 실대 구조부재에의 적용에 대해 추후 연구가 필요한 실정이다.

따라서, 특정함수율에서의 체적수축률을 보다 정밀하게 추정하기 위해서는 심변재율과 부재 크기를 고려하여야 하며 실대 구조부재에 대한 검토가 필요한 것으로 고찰되었다.

4. 결 론

소나무에 대해 소시험편과 대단면 시험편의 방향별 수축률 및 체적수축률 변화를 실험적으로 검토하

였다. 방향별 수축률은 변재와 심재, 시험편의 크기에 따라 차이가 나타났으며, 체적수축률은 변재시험편의 경우, 소시험편과 대단면 시험편 사이에는 비슷한 결과를 나타냈으나, 심재시험편의 경우, 시험편의 크기가 증가할수록 수축억제효과가 생재상태에서 기건상태의 구간에서 현저하였다.

시험편의 단면구성, 심변재율, 시험편의 크기, 함수율 구간 등을 고려하여 적용하면 보다 정밀하게 예측이 가능할 것이며, 이에 대한 진행 연구가 필요한 것으로 검토되었다.

참 고 문 헌

1. 이필우 외 9인. 1981. 목재공학, 향문사.
2. 황권환, 박주생. 2008. 집성재의 집착층수에 따른 치수안정성, 목재공학. 36(6): 88~95.
3. 岡野健, 2006. 祖父江信夫, 木材科学ハンドブック, 朝倉書店.
4. 임업연구원. 1994. 한국산 주요목재의 성질과 용도, 연구자료 제95호.
5. 한국표준협회. 2004. 목재의 수축률 시험 방법, KS F 2203.
6. 한국표준협회. 2001. 목재의 함수율 측정 방법, KS F 2199.
7. 한국표준협회. 2001. 목재의 밀도 및 비중 측정 방법, KS F 2198.
8. 김재수 외 10인. 1998. 숲, 문화 그리고 인간, 충북대학교 출판부.
9. 伏谷賢美 外 8人 共著. 1985. 木材の物理 (木材の科学 2), 文永堂.
10. 대한건축학회. 2005. 건축구조설계기준 및 해설.

11. 강호양, 변희섭, 이원희, 박병수, 박정환. 2008. 국산재의 응용물성연구I - 소나무(*Pinus densiflora*)의 수분흡착성 및 열적·전기적·음향적 성질. 목재공학. 36(3): 70~84.
12. 변희섭, 이원희, 박병수, 정성호, 강호양. 2008. 국산재의 응용물성연구II - 잣나무 낙엽송의 수분흡착성 및 열적·전기적·음향적 성질. 목재공학. 36(4): 1~10.
13. 이원희, 박병수, 변희섭, 강호양, 정성호. 2008. 주요 국산 침엽수종의 평형흡수율, 한국가구학회지. 19(1): 75~82.