

배할 및 자상-인사이징 전처리가 Douglas-fir 중목구조부재의 함수율과 재면할렬 발생에 미치는 영향¹

이 창 진² · 이 남 호² · 오 승 원^{2,†}

Effects of The Knife-incising and Kerfing Pretreatment on Moisture Content and Surface Check Occurrence of Douglas-fir Heavy Timber¹

Chang-Jin Lee² · Nam-Ho Lee² · Seung-Won Oh^{2,†}

요 약

본 연구는 배할과 자상-인사이징 처리가 Douglas-fir 중목구조부재의 함수율과 재면할렬 발생에 미치는 영향을 확인하기 위해 수행되었다. 그 결과 함수율의 경우, 횡단면 크기에 관계없이 모든 시험재들에서 수분경사가 존재하였으며, 전처리 조건에 따라 표층으로부터 72 mm 깊이까지 수분경사가 다르게 형성되어 있었다. 표층으로부터 72 mm 깊이까지 형성된 수분경사는 자상-인사이징보다 배할 처리한 시험재가 더 완만하게 형성되었다. 또한 전기저항식 수분계를 이용한 평균함수율 측정에 있어 단면이 증가함에 따라 실질물의 고려가 중요한 것으로 나타났다. 재면할렬의 경우, 전처리 조건에 따른 차이가 존재하였으며, 자상-인사이징처리와 배할처리 모두 건조 후 발생된 재면할렬의 감소가 가능하였다. 특히 배할은 재면할렬의 폭이 확장되는 것을 억제하는데 효과적이었다. 하지만 자상-인사이징의 경우, control과 비교하였을 때 재면할렬 발생의 억제가 가능하긴 하였으나, 그 효과가 배할의 수준에 미치지 못하였다.

ABSTRACT

This study was carried out to confirm the effects of the knife-incising and kerfing pretreatment on the moisture content and surface check occurrence of Douglas-fir heavy timber. In the case of moisture content, the moisture gradient that formed in the inner part of the specimen was observed in all specimens. In addition, the moisture gradient was formed differently from the surface layer to 72 mm depending on the pretreatment conditions, and it was formed gradually in the kerfing than the knife-incising. In addition, it was found that the solid volume should be considered when measuring the average moisture content. In the case of surface check, the surface check occurrence was reduced in the knife-incising, kerfing, and the combination of knife-incising and kerfing than the control. In particular, the kerfing treatment was shown that the expansion of surface check width was effectively suppressed. In the case of knife-incising treatment, although the surface check was less than the control, the preventive effect on the surface check occurrence did not reach the level of the kerfing treatment.

¹ Date Received November 16, 2015, Date Accepted February 2, 2016

² 전북대학교 목재응용과학과. Department of Wood Science & Technology, Chonbuk National University, Chonju 54896, Korea

[†] 교신저자(Corresponding author): 오승원(e-mail: ohsw@jbnu.ac.kr)

Keywords : moisture content, surface check, surface check area ratio, check width expansion ratio, heavy timber, douglas-fir, high temperature drying

1. 서 론

한옥건축에는 주로 기둥-보와 같은 대단면 중목 구조부재가 사용되기 때문에 직경이 큰 원목의 확보가 중요하다. 하지만 국산재의 경우 가격상승과 함께 직경이 큰 원자재의 확보가 매우 어려운 실정이다. 현재 국산재의 자급률이 꾸준히 증가하고 있는 추세이긴 하나 한옥건축에 필요한 직경을 가지는 큰 원자재를 확보하는 것은 여전히 어려운 실정이다. 그로 인해 최근에는 Douglas-fir와 같이 가격이 저렴하고 원자재의 확보에 우위를 차지하고 있는 외국산재의 도입이 시도되고 있다.

Douglas-fir는 국산재보다 가격이 저렴하고 원자재 확보에 이점을 가지고 있어 흔히 사용되고 있는 수종으로 일부에서 기둥이나 들보용으로 사용되기도 한다. 하지만 Douglas-fir의 경우 투과성이 불량하여 건조가공이 어렵고 건조 중 표층과 내층의 수분경사가 크게 형성되어 재면할렬이 쉽게 발생하는 문제가 있다. 특히 기둥-보와 같은 중목구조부재의 경우, 시공 후 수축 및 변형에 의한 문제를 예방하기 위해서는 반드시 건조 후 사용되어야 하지만, Douglas-fir와 같이 투과성이 불량하고 중목구조부재와 같이 두께가 두꺼운 부재의 경우, 건조가공의 난이도가 크게 증가되어 대부분의 목재회사들에서 건조공정에 어려움을 호소하고 있는 실정이다.

중목구조부재와 같이 큰 부재를 건조하기 위해서는 많은 양의 목재를 동시에 수용할 수 있는 규모의 건조설비가 요구된다. 예로 압체식고주파진공건조와 같은 특수건조 설비의 경우, 1회 건조 시 수용할 수 있는 양이 상당히 제한적이며, 접근성이 떨어지는 문제가 있다. 따라서 중목구조부재와 같이 큰 부재를 건조하기 위해서는 상업적으로 쉽게 접할 수 있고, 많은 양의 목재를 동시에 건조가 가능한 열기건조설비를 활용하는 것이 적합하다. 또한 열기건조설비의 경우 건조스케줄에 따라 저온(21.1~48.9℃), 중온

(43.3~82.2℃), 승온(43.3~99.4℃), 고온(100℃ 이상)과 같이 다양한 조건으로 온·습도 조절이 가능하기 때문에 다양한 분야에 적용이 가능하다(Simpson, 1991). 이 중 고온건조는 고온조건 하에 발생하게 되는 증기압력이 모세관장력에 의한 수분의 이동을 촉진함으로써 건조시간의 감소에 기여하게 된다(Listyanto *et al.*, 2013). 이러한 고온건조의 장점을 활용한 사례가 고온저습전처리와 고온저습건조이다.

고온저습전처리 및 고온저습건조는 건조 중 형성된 수분경사에 의해 발생하는 재면할렬을 감소시킬 목적으로 제안된 건조방법이다(Yoshida *et al.*, 2000; Lee *et al.*, 2013). 고온저습건조는 건조초기 표층과 인접한 내부인접층 간의 수분경사를 크게 형성시켜 표층에 상당한 인장응력이 작용하게 되어 재면에 미세한 할렬들이 발생하게 된다. 그리고 건조중기 이후 응력이 역전되어 건조초기 표층에 발생한 인장응력과 상응한 크기의 압축응력이 형성되고, 고온저습처리 중에 발생하였던 미세한 재면할렬이 닫히게 됨으로서 재면할렬 억제효과를 가지게 된다(Lee *et al.*, 2013). 하지만 고온건조의 경우 건조 중 응력이 크게 형성되기 때문에 내부할렬이 발생되거나, 할렬 폭이 과도하게 확장될 우려가 있다. 이에 Lee *et al.* (2014)은 건조 중 형성되는 응력을 감소시키기 위해 건조 전 예비건조 후 인공건조를 진행한 결과, 내부할렬의 발생을 감소시킬 수는 있었으나 예비건조 중 재면에 상당수의 재면할렬이 발생됨으로서 재면할렬 발생의 증가에 원인이 될 수 있음을 보고하였다. 또한 고온건조의 경우 최종함수율이 초기 함수율에 영향을 받기 때문에 건조 후 건조재들 사이에 함수율 변이가 심하여 일부 연구들에서는 배할이나 인사이징과 같은 전처리 가공이 시도되기도 하였다(Lee *et al.*, 2014; Listyanto *et al.*, 2013).

배할은 건조 중 발생하는 응력을 감소시키고, 통나무 건조 시 흔히 발생하는 V형 크랙을 예방하기

Table 1. Specification of testing specimens

Timber type (size)	Treatment	Sample number	Number (piece)
25 × 25 × 360 cm ³	Control	Con-25	5
	Knife-Incising	T-25	5
	Kerfing	(Thickness 25 cm) Ker-25	5
	Incising and Kerfing	Inc-Ker-25	5
30 × 30 × 360 cm ³	Control	Con-30	5
	Incising	T-30	5
	Kerfing	(Thickness 30 cm) Ker-30	5
	Incising and Kerfing	Inc-Ker-30	5
Total number			40

위해 제안된 전처리로(Hsu and Tang, 1974), Jung *et al.* (1997)은 배합을 가공할 때 이방성수축응력 분포 모형을 고려하여 두께 반경의 2/3 깊이로 가공할 것을 제안하였다. 또한 한 단면에 생성된 홈으로 응력을 집중시킴으로서 나머지 세 단면에 형성되는 인장 응력의 감소를 유도하여 재면할렬의 발생을 억제하는데 효과적이며, 건조속도에 큰 영향을 미치지 않는 데 배합에 의해 형성된 단면과 인접한 부위의 수분이동거리가 감소되기 때문에 함수율 분포에 영향을 미칠 수 있다(Jung *et al.*, 1997; Lee *et al.*, 2013).

인사이징은 레이저 또는 드릴을 사용하여 가공하는 침상(Needle) Type과 원형 톱니바퀴 모양과 유사한 형태의 끝 모양 칼날을 사용하여 갈지자 형태로 가공하는 자상(Knife) Type이 있다. Listyanto *et al.* (2013)은 CO₂ laser로 처리한 삼나무를 건조한 결과 건조 중 수분경사가 감소됨으로서 재면 및 내부 할렬이 감소되었음을 보고하였다. 또한, Hattori *et al.* (1997)은 일본산 삼나무 수심기동체에 레이저인사이징 전처리 후 건조한 결과 레이저인사이징처리가 건조시간 감소에 도움이 되었다고 보고하였으며, Islam *et al.* (2009)은 건조 전 인사이징 처리를 하여도 약 제주입이 가능하며, 약재주입성 뿐만 아니라 건조시간의 단축에도 도움이 될 것이라고 보고하였다. 그러나 인사이징은 처리과정에서 섬유조직을 파괴하기 때문에 강도와 같은 몇몇 기계적 특성을 감소시키게 된다(Perrin, 1978; Winandy and Morrell, 1998; Park *et al.*, 2008). 특히 인사이징 밀도가 증가함에 따라

목재의 물리 및 기계적 특성은 현저하게 감소되기 때문에, 기둥-보와 같은 구조재에 적용할 경우 이러한 특성이 고려되어야 할 것이다.

자상-인사이징의 경우 원형 톱니바퀴 모양과 유사한 형태의 끝 모양 칼날이 섬유방향으로 많은 수의 자상을 생성시킨다. 따라서 자상의 깊이와 인접한 부위의 함수율분포에 영향을 줄 뿐만 아니라, 한 지점으로 응력을 집중시키는 배합과는 반대로 단면에 생성된 자상으로 응력을 고르게 분산시킴으로서 재면할렬의 발생에 영향을 줄 수 있을 것으로 예상되었다.

이에 본 연구에서는 두께 25 cm와 30 cm 크기의 Douglas-fir 중목구조부재에 배합과 자상-인사이징 전처리를 하였다. 인사이징의 경우 앞서 언급한 바와 같이 기계적 특성이 감소되는 것을 고려하여 인사이징 밀도는 약 2,400 개/m²로 하여 처리하였다. 이후 고온건조를 수행하고 배합과 자상-인사이징 처리가 Douglas-fir 중목구조부재의 함수율과 재면할렬 발생에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 공시재료 및 전처리

공시수종으로 Douglas-fir를 선정하고, 25 × 25 × 360 cm³ (T-25; thickness 25 cm)와 30 × 30 × 360 cm³ (T-30; thickness 30 cm) 크기로 각각 20본을 준

배할 및 자상-인사이징 전처리가 Douglas-fir 중목구조부재의 함수율과 재면할렬 발생에 미치는 영향

Table 2. Drying schedule of Douglas-fir heavy timber with dimensions of thickness 25 cm and 30 cm

Stage		Time (Hours)	Dry-bulb (°C)	Wet-bulb (°C)
Pretreatment	Steaming	12	95	95
	HT-LH*	48	120	90
	ETD**	144	90	70
	Cooling	24	-	-
Total time		228		

* High Temperature and Low Humidity

** Elevated Temperature Drying

비하였다(Table 1). 시험재의 크기에 따라 각각 10本の 시험재를 무작위로 선별하고, 인사이징 밀도는 약 2,400 개/m² (깊이 10 mm, 폭 10 mm, 두께 2 mm)로 하여 네 면에 처리하였다. 이후 인사이징을 가공한 시험재 5本과 가공하지 않은 시험재 5本을 무작위로 선별하고, 등근톱을 사용하여 폭 3 mm, 횡단면 크기의 1/3 깊이로 한 면에 배할을 가공하였다.

2.2. 고온건조시험

Douglas-fir 중목구조부재 건조에 적용된 스케줄은 Table 2에 나타내었다. 건조시험에는 Shinshiba社의 상업용 열기건조기(SKD-90HPT)를 사용하였으며, 잔적에는 횡단면 3 cm × 3 cm, 길이 100 cm 크기의 건조된 잔목을 사용하고, 시험재 간격 3 cm, 잔목 간격 60 cm로 하여 잔적하였다.

2.3. 최종함수율 및 함수율분포 조사

각 재종별 처리재의 대표 시험재 1本씩을 선정하고, 횡단면으로부터 60 cm, 120 cm, 180 cm 떨어진 부위에서 각각 두께 2 cm 시험편을 1매씩 채취하였다. 그리고 표면으로부터 18 mm간격으로 층을 구분하여 최종함수율과 그 분포를 전건법으로 조사하였다.

2.4. 재면할렬 조사

건조가 종료된 모든 시험재에서 폭 2 mm 이상인

재면할렬의 수, 길이 그리고 폭을 조사하여 할렬 폭에 따른 평균 재면할렬 수(ASN: Average surface checks number)와 평균 재면할렬 길이(ASL: Average surface checks length)를 조사하였다.

전처리조건에 따른 재면할렬 발생 억제효과를 비교하기 위해 각 시험재들에서 발생한 재면할렬들의 평균 길이(AL: Average length of surface check), 평균 재면할렬 면적(ASA: Average surface checks area), 재면할렬 면적 비율(SCAR: Surface checks area ratio), 평균 할렬 폭(ASW: Average surface checks width)을 다음의 식으로 계산하였다. SCAR은 횡단면을 제외한 시험재의 총 표면적에서 재면할렬이 차지하는 면적의 비율을 나타낸 것이며, ASA의 경우 건조 후 발생된 재면할렬은 마름모와 유사한 형태를 가지기 때문에, ASA의 계산식에서 분모를 '2'로 설정하였다.

$$AL = \frac{\text{Total length of surface checks}}{\text{Total number of surface checks}}$$

$$ASN = \frac{\text{Total number of surface checks}}{\text{Number of specimens}}$$

$$ASL = \frac{\text{Total length of surface checks}}{\text{Number of specimens}}$$

$$ASA = \frac{\left[\frac{(l_1 \times w_1) + (l_2 \times w_2) + \dots + (l_n \times w_n)}{2} \right]}{\text{Number of specimens}}$$

l : length of each surface check

w : width of each surface check

n : number of surface checks

Table 3. Final moisture content of Douglas-fir heavy timber according to distance from end surface after the end of drying

Sample number	Distance from end surface (cm)			AVG. (%)
	60	120	180	
Con-25	21.6	22.0	21.6	21.7
Inc-25	17.4	20.9	19.0	19.4
Ker-25	18.2	16.4	15.9	16.7
Inc-Ker-25	14.5	14.0	13.9	14.2
Con-30	17.2	26.7	19.7	20.7
Inc-30	20.8	20.1	20.8	20.5
Ker-30	20.9	22.2	21.3	21.5
Inc-Ker-30	19.2	18.1	18.1	18.5

$$SCAR (\%) = \frac{ASA}{TAS} \times 100$$

TAS : total surface area of specimen apart from the end surface

(thickness + width + thickness' + width') × length

$$ASW = \frac{w_1 + w_2 + \dots + w_n}{\text{total number of surface checks}}$$

w : width of each surface check

3. 결과 및 고찰

3.1. 최종함수율 및 함수율분포

횡단면으로부터 거리에 따른 최종함수율 및 분포는 Table 3에 나타내었다. 모든 조건에서 횡단면으로부터의 거리에 따른 최종함수율 분포에 차이는 없었으며, 횡단면 크기에 관계없이 Inc-Ker의 함수율이 가장 낮았다. 표면으로부터 거리에 따른 표층과 내층의 함수율 분포는 Figs. 1, 2에 나타내었으며, 횡단면 크기에 관계없이 모든 시험재에서 수분경사가 존재하였다. 또한 Inc-25-120의 36 mm, Ker-25-120의 132 mm, Inc-Ker-30-120의 126 mm 위치에서 경미한 수준의 함수율 변이가 존재하였으며(Figs. 1, 2), Con-30의 횡단면으로부터 120 cm 떨어진 부위의 최종함수율이 비교적 높게 조사되었다(Table 3). 이는

초기함수율, 중심을 향한 수분이동, 벽공폐색과 같은 인자들에 기인한 결과인 것으로 사료되며(Lee *et al.*, 2013; Lee *et al.*, 2014; Shusheng *et al.*, 1994; Fujii *et al.*, 1997), 그 차이가 심하지 않기 때문에 무시하여도 될 수준인 것으로 판단된다.

Table 3에 나타난 전처리 조건에 따른 최종함수율에서, Con-25는 21.7%, Inc-25는 19.4%, Ker-25는 16.7% 그리고 Inc-Ker-25는 14.2%로 전처리 조건에 따른 차이가 존재하였다. 또한 Fig. 1에서 표층(0~18 mm)으로부터 72 mm까지 형성된 수분경사가 전처리 조건에 따라 다르게 형성되어 있었다. 반면 T-30의 경우 Table 3에 나타난 최종함수율에서 Inc-Ker이 가장 적은 값을 나타내긴 하였으나 T-25에서와 같이 뚜렷한 차이를 확인할 수 없었다. 그러나 Fig. 2에서 Con-30을 제외한 각각의 전처리 조건에서 표층과 내층의 함수율 분포를 살펴보면, 표층으로부터 72 mm까지 형성된 수분경사가 T-25에서와 같이 처리조건에 따라 차이가 있는 것을 확인할 수 있다. 건조 전 시험재들의 중량이 사전에 준비한 저울의 측정범위를 초과하여 초기함수율의 확인이 불가능하였다. 하지만 건조 메커니즘과 최종함수율 및 분포를 고려하였을 때, T-30 또한 전처리 조건에 따른 최종함수율 분포에 차이가 존재하는 것으로 판단되며, 최종함수율에서 뚜렷한 차이를 나타내지 못한 것은 Lee *et al.* (2014)이 보고한 바와 같이 초기함수율에 기인한 결과인 것으로 사료된다.

배할 및 자상-인사이징 전처리기 Douglas-fir 중목구조부재의 함수율과 재면할릴 발생에 미치는 영향

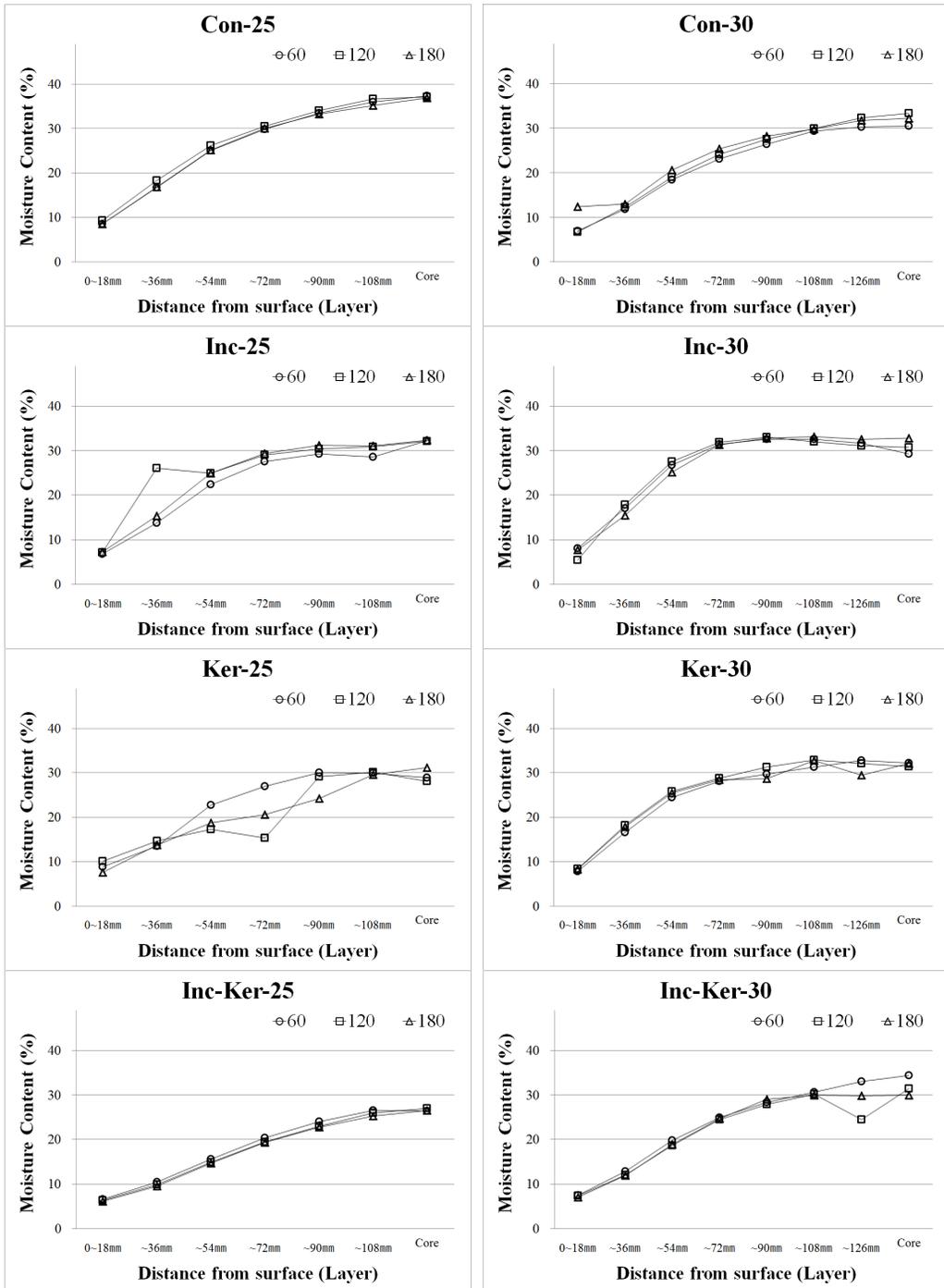


Fig. 1. Distribution of the finl moisture content of Douglas-fir heavy timber after the end of drying.

Table 4. Evaluation factors for the estimation on the preventive effect of surface check

Specimen	Surface checks	Treatment			
		Con	Inc	Ker	Inc-Ker
T-25	ASN (number/piece)	21.6	15.8	15.2	7.4
	ASL (cm/piece)	917	657	602	245
	ASA (cm ² /piece)	193.8	142.3	85.3	26.3
	AL (cm/check)	42.4	41.6	39.6	33.1
	SCAR (%)	0.54	0.4	0.24	0.07
	ASW (mm)	3.6	3.6	2.6	2.1
T-30	ASN (number/piece)	27.6	34.8	20.0	16.6
	ASL (cm/piece)	1,271	1,304	869	620
	ASA (cm ² /piece)	295.6	251.3	157.1	92.4
	AL (cm/check)	46.1	37.5	43.5	37.4
	SCAR (%)	0.69	0.59	0.37	0.21
	ASW (mm)	4.0	3.4	3.2	2.7

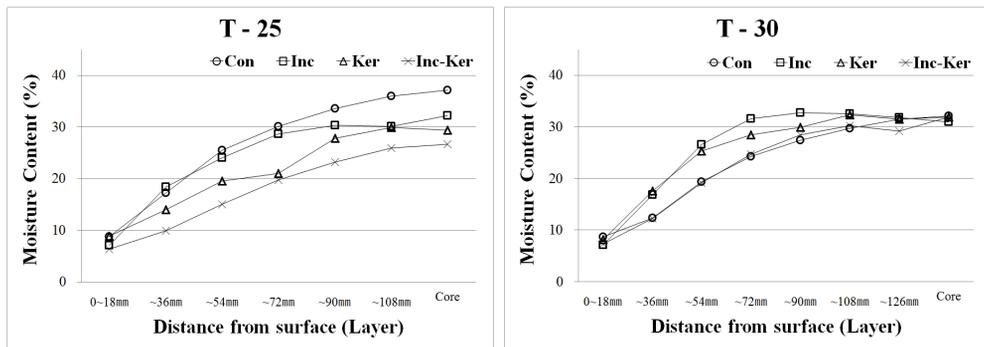


Fig. 2. Distribution of the average moisture content of Douglas-fir heavy timber according to the pretreatment condition after the end of drying.

3.2. 재면할렬

Douglas-fir 중목구조부재의 건조 후 조사된 재면

할렬 폭에 따른 평균 수, 길이, 면적을 Fig. 3에 나타내었다. 전처리조건에 따른 ASN, ASL, ASA, AL, SCAR, 그리고 ASW를 Table 4에 나타내었다.

배합 및 자상-인사이징 전처리가 Douglas-fir 중목구조부재의 함수율과 재면할렬 발생에 미치는 영향

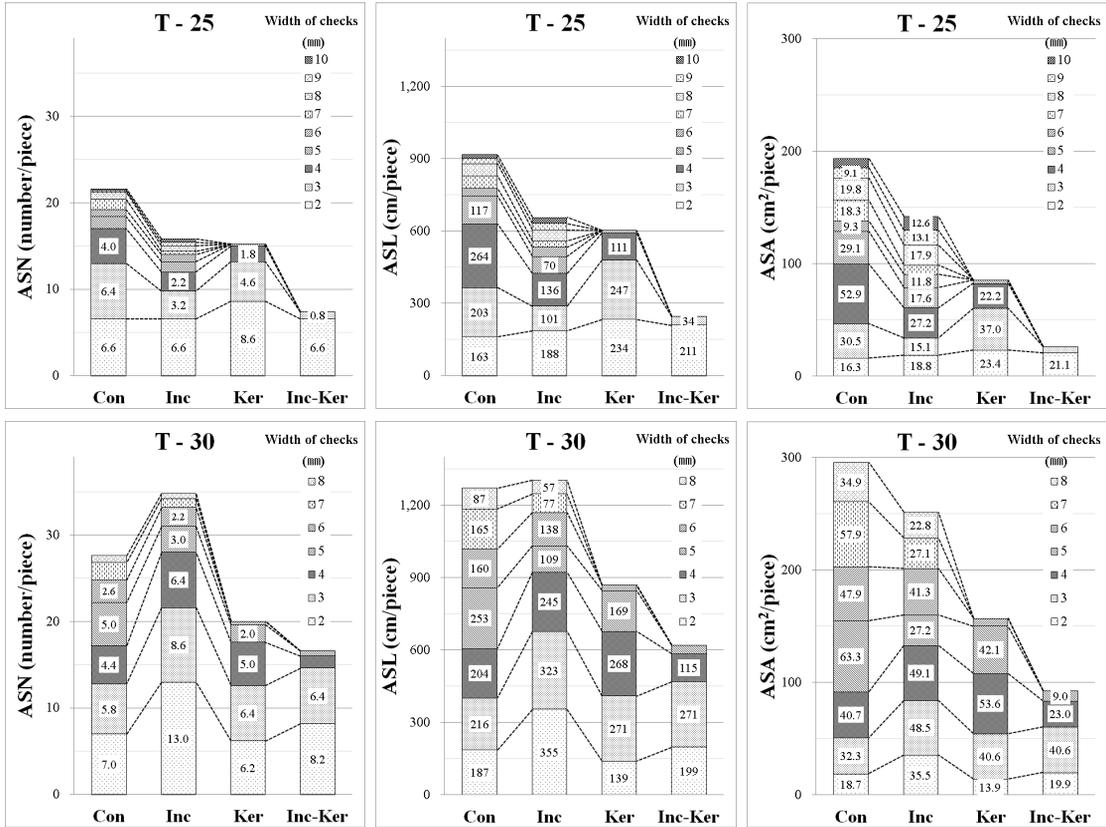


Fig. 3. Occurrence extent of surface check on Douglas-fir heavy timber with dimensions of thickness 25 cm and 30 cm after drying.

T-25의 경우, Inc-Ker, Ker, Inc 순으로 전처리 조건에 따라 발생된 ASN, ASL, ASA가 감소되었으며, Inc-Ker에서 발생된 재면할렬이 가장 적었다. ASW는 Inc와 Con 사이에 차이를 나타내지 않았으나, Ker과 Inc-Ker은 Con보다 적은 값을 나타내었다. 따라서 실제 재면할렬 폭의 감소효과를 가질 수 있었던 전처리 배합가공이며, 전처리 조건에 따라 발생된 ASA가 감소되긴 하였으나 인사이징처리는 재면할렬 폭 감소에 효과가 없었던 것으로 사료된다.

T-30의 경우, Ker과 Inc-Ker에서 발생된 재면할렬의 ASN, ASL, ASA은 감소되었다. 그러나 Inc은 Con보다 ASN와 ASL이 더 많이 발생했음에도 불구하고, ASA에서 적은 값을 나타내어 상반된 결과를

나타냈다. 이는 Inc에서 더 많은 수의 할렬이 발생되긴 하였으나 할렬의 길이가 짧았던 것과 폭 5 mm 이상인 할렬이 적게 발생함으로써 ASA이 감소되었던 것으로 판단된다.

Table 4에서 T-25의 AL 값은 Inc-Ker에서 가장 짧은 것으로 나타났으나 Con, Inc, Ker 사이에 큰 차이를 나타내지 않았다. T-30의 경우 AL 값이 인사이징처리를 하였을 때 짧아지는 것으로 나타났다. 자상-인사이징 처리된 시험재들의 경우, 재면에 균일하게 배열된 자상이 서로 연결된 형태의 재면할렬이 상당히 많이 관찰되었으며, 길이가 짧은 특징을 나타내었다. 이는 재면에 균일하게 배열된 자상이 확장되는 과정에서 서로 만나게 되고, 자상 폭의 확장이 진행

되어 재면할렬로 전환되기 때문이다. 또한 재면에 균일하게 배열된 자상으로 응력을 분산시켜 재면할렬로 전환된 자상들이 심하게 확장되는 것을 억제하기 때문이다. 따라서 AL 값의 차이는 건조 후 인사이징 처리한 시험재들의 재면에 길이가 짧은 할렬이 더 많이 존재하였던 것에 기인한 결과로 해석된다.

SCAR의 경우, 횡단면 크기에 관계없이 T-25와 T-30 모두에서 감소되었으며, Inc-Ker, Ker, Inc 순으로 Inc-Ker에서 가장 낮은 SCAR 값을 나타내었다. ASW의 경우 T-25는 Inc를 제외한 Ker과 Inc-Ker에서만 감소하였으나, T-30은 Inc, Ker, Inc-Ker 모두에서 감소하였다.

Inc의 경우, T-30의 SCAR과 ASW이 Con보다 적은 값을 나타내었으나, T-25는 SCAR만 감소되고 ASW에서는 차이를 나타나지 않았다. 또한, Ker과 비교하였을 때, Inc의 SCAR이 T-25의 경우 0.4%, T-30의 경우 0.59%로 Ker의 SCAR보다 더 큰 값을 나타내었으나, T-30의 ASW에서는 Ker과 유사한 값을 나타내었다. Inc-Ker의 경우, 단면의 크기가 증가함에 따라 더 많은 재면할렬이 발생되었으나, 동일한 두께를 가질 때 재면할렬 발생 억제효과가 가장 큰 것으로 조사되었다.

3.3. 전처리의 영향

3.3.1. 최종함수율 및 함수율분포

배할과 자상-인사이징 처리한 시험재들의 건조 후 최종함수율 및 분포를 검토한 결과 전처리 조건에 따른 차이가 존재하였다. 먼저, 자상-인사이징 처리한 시험재들의 표층과 내층의 함수율분포를 살펴보면 표층으로부터 54 mm까지의 수분경사가 크게 형성되어 있었다. 이 결과에서 자상-인사이징 칼날의 깊이가 10 mm이었던 것을 고려하면, 자상-인사이징이 Douglas-fir 대단면재 건조중 수분의 이동에 영향을 미칠 수 있는 범위는 인사이징 최대 깊이로부터 약 10~20 mm 범위일 것으로 사료된다.

배할의 경우 자상-인사이징보다 표층과 내층의 수분경사가 비교적 완만하게 형성되어 있었다. 이는 시험재 두께의 1/3 깊이로 가공된 배할이 자상-인사이

징보다 더 깊은 범위까지 영향을 주었기 때문이다. T-25는 약 8 cm 깊이로 가공되었기 때문에 최대 72~90 mm 위치까지, T-30은 깊이가 약 10 cm이므로 최대 90~108 mm 위치까지 배할가공에 의한 수분 이동거리 감소효과가 있을 것이다. 하지만 배할처리한 시험재의 함수율분포를 살펴보면, 54~72 mm 위치에서 비교적 큰 수분경사가 형성기 시작되는 것을 확인할 수 있다. 목재내부에 존재하는 수분이 배할에 의해 형성된 단면을 통해 제거되기 위해서는 표면 주변의 습도조건이 목재 표면의 인접한 부위보다 더 낮아야 한다. 하지만 배할 홈의 깊이가 깊어짐에 따라 공기순환이 불량해지기 때문에 건조 중 습도가 높게 유지된다. 따라서 배할 깊이에 따른 공기순환의 차이로 인해 최대 72 mm까지만 최종함수율 분포에 영향을 주었던 것으로 사료된다.

Inc-Ker의 경우, 최종함수율과 표층으로부터 72 mm까지 형성된 수분경사 또한 비교적 낮고 완만하게 형성되어 있었다. 목재 내의 수분은 모세관유동에 의해 자유수가 제거된 후 확산에 의해 결합수가 제거되며, 건조 중 내부에 존재하는 수분은 증발표면까지의 거리가 증가됨에 따라 건조저항이 증가하게 된다(Bramhall and Wellwood, 1976). 그러나 본 연구에서는 인사이징과 배할을 함께 처리함으로써 가장 큰 수분이동거리 감소효과를 가지게 되었다. 그러므로 Inc-Ker의 최종함수율과 수분경사가 가장 낮고 완만하게 형성되었던 것은 내부에 존재하는 자유수와 결합수의 이동거리가 짧아짐으로서 건조저항이 감소되었기 때문인 것으로 해석된다.

Fig. 4는 표면으로부터 거리에 따라 각 층들이 차지하는 비율을 나타낸 것이다. Fig. 1과 Fig. 2에서 나타난 함수율분포에서 T-25와 T-30의 내부함수율이 모두 높게 분포하고 있었던 것에 반해, Table 3에서는 약 20% 전후의 최종함수율을 나타내고 있었다.

이는 목재의 전체 부피에 대한 표층과 내층이 각각 차지하고 있는 부피의 비율, 즉 실질물에서 큰 차이를 나타내고 있기 때문이다. T-25의 경우 50~80%, T-30의 경우 40~70%로, 실제 20% 이하의 함수율을 나타내고 있는 층들이 대부분을 차지하고 있었다. 수분의 양이 일정하다고 가정하였을 때, 전건

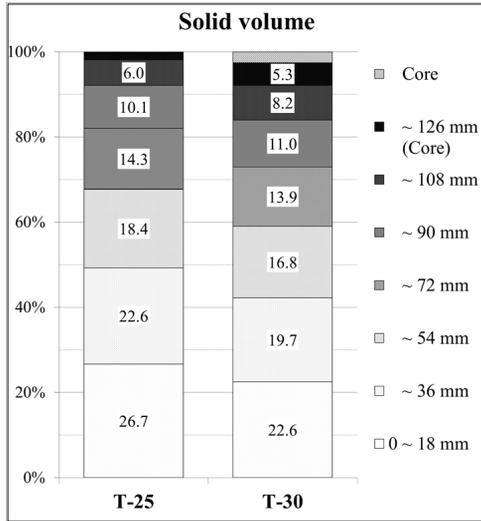


Fig. 4. The solid volume of Douglas-fir heavy timber with dimensions of thickness 25 cm and 30 cm according to distance from surface layer.

중량이 증가하면 함수율은 감소하게 된다. 따라서 가장 적은 실질률을 가지는 내층과 가장 큰 실질률을 가지는 표층을 합산하여 다시 함수율을 계산할 경우, 내층에서의 함수율 보다 상당히 작은 값을 나타내게 되는 것이다.

이처럼 목재는 건조됨에 따라 수분경사를 나타내기 때문에, 전기저항식 수분계를 사용하는데 있어서도 “one-fourth to one-fifth thickness rule (ASTM 1968)”을 따르게 되는 것이다. 전기저항식 수분계의 경우 전극편을 일정깊이로 삽입하여 해당 깊이에서 측정된 저항 값이 함수율로 변환되어 표시된다. 하지만 단면이 증가함에 따라 표층과 내층 사이에 수분경사가 쉽게 형성되며, 표층으로부터 거리가 증가함에 따라 내부에 존재하는 수분의 양에 차이가 발생하게 된다. 그로 인해 전극편의 삽입 깊이에 따라 측정값이 변하게 된다. 따라서 전기저항식 수분계를 이용하여 목재의 평균함수율을 측정할 때, 측정된 값이 전체 단면의 평균함수율과 거의 동일한 값을 나타낼 수 있는 위치에서 측정되어야 한다. 그리고 이에 해당하는 위치가 직사각형 목재의 경우 두께의 1/4 ~ 1/5 깊이, 원형 목재의 경우 1/6 깊이이다.

앞서 언급한 바와 같이 전처리조건에 따라 최종함수율 분포에 차이가 발생하게 된다. 따라서 Con의 결과와 비교할 경우, 이 기준에서 해당되는 깊이는 T-25의 경우 50~62 mm, T-30의 경우 60~75 mm 이나, 실제 각 층에서 조사된 함수율과 평균함수율이 일치하지 않는다. 반면, 이를 실질률로 나타낼 경우, 표면으로부터 전체 실질의 약 36~44% (36~54 mm) 범위의 깊이에 포함되며, 실제 해당 위치의 함수율과 평균함수율이 유사한 것을 알 수 있다. 이는 단면이 증가함에 따라 동일한 깊이라 하더라도 실질률에 차이가 생기기 때문이며, 단면이 큰 목재의 평균함수율을 측정하는데 있어 실질률 고려의 중요성을 나타내는 결과이기도 하다.

이러한 결과들로부터 전처리 조건에 따른 목재 중심으로부터 표층까지의 수분이동거리를 Fig. 5와 같이 나타낼 수 있다. 배합의 경우 건조속도에 큰 영향을 주지 않더라도, 배합가공에 의해 형성된 단면과 인접한 부위의 수분의 이동거리가 감소되기 때문에 인접한 부위의 함수율은 배합 이전의 동일부위보다 낮은 값을 나타내게 된다(Lee et al., 2013). 자상-인사이징처리 또한 새롭게 형성된 면들이 중심부에서 표면까지의 수분이동거리 감소에 영향을 줌으로서 건조시간의 감소에 기여하게 된다. 따라서 전처리 조건에 따른 최종함수율 분포의 차이는 목재 중심으로부터 표층까지의 수분이동거리가 다르게 형성됨으로서 최종함수율과 분포에 영향을 주는 것이 가능했던 것으로 판단된다.

3.3.2. 재면할렬

단면 크기가 증가함에 따라 T-25보다 T-30에서 더 많은 재면할렬이 발생되었다. 이는 건조초기 표층의 인장응력이 크게 형성될수록 인장세트 이후 압축응력도 증가하게 됨으로, 건조초기 T-30의 표층에서 인장응력이 더 크게 발생되었던 것으로 해석할 수 있다. 또한 Inc는 Con과 비교하여, T-25의 경우 ASN과 ASL이 감소하였으나 ASW에서는 차이가 없었다. 반면, T-30에서는 ASN과 ASL의 발생을 증가시켰으나 ASW은 감소되었다. 이는 단면이 증가함에 따라 표층에 형성되는 인장응력이 증가고, 균일하게 응력

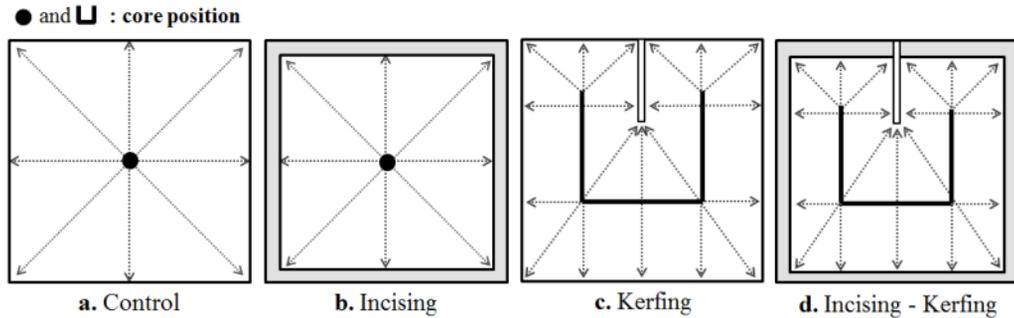


Fig. 5. The moisture moving distance diagram of heavy timber from the core position to the evaporation surface.

을 분산시키는 효과가 T-25에서보다 더 크게 작용하였기 때문인 것으로 사료된다.

또한, Inc는 Ker과 비교하여, T-30의 할렬확장 억제효과에서는 유사한 수준의 효과를 나타내긴 하였으나, SCAR은 모두 높게 나타났다. 비록 Con과 비교하여 일부 항목에서 효과를 나타내긴 하였으나, 그 효과에서도 Ker보다 균일성이 부족하였다. 따라서 재면할렬의 수, 길이, 면적 등을 종합적으로 평가한 결과, Inc의 재면할렬 발생 억제효과는 Ker의 수준에 미치지 못하였던 것으로 판단된다.

Inc-Ker의 경우, 건조 중 발생하는 응력이 배할로 집중됨과 동시에 인사이징으로 형성된 자상이 남아 있는 응력을 고르게 분산시켜 줌으로서 재면할렬의 발생과 할렬 폭이 확장되는 것을 효과적으로 억제가능하였다.

Hermawan *et al.* (2012)은 고온저습처리시간이 감소함에 따라 surface drying set가 감소된다고 보고하였으며, Lee *et al.* (2015)은 인사이징으로 형성된 자상이 목재표면이 견딜 수 있는 최대 응력을 감소시킴으로 인해 자상과 미세할렬의 확장을 야기할 수 있다고 하였다. 또한, 수축과정에서 발생한 할렬은 접선단면의 연속성을 단절시킴으로서 수축에 영향을 미치게 되나(Kang *et al.*, 2008), 실대재의 수축에 있어서는 심재가 많이 포함되고 단면이 증가할수록 체적수축률이 감소하게 된다는 연구결과도 보고되었다(Hwang and Park, 2009).

이와 같이 건조 중 형성된 수분경사는 표층과 내

층의 불균한 수축을 야기하여, 표층의 인장응력 증가의 원인이 된다. 또한, 건조 조건에 따라 수분의 이동속도에 차이가 발생하고 표층에 형성되는 응력의 크기와 인장세트의 발생시점에 차이가 발생하게 된다. 하지만, 본 연구에서는 동일한 조건에서 건조가 진행되었기 때문에 고온저습처리 시간 및 건조 조건에 따른 영향은 배제할 필요가 있다.

투과성이 불량하고 단면의 크기가 증가할수록 수분경사가 크게 형성되며, 수분경사에 기인하여 발생된 응력은 지속시간이 증가함에 따라 건조 중 creep에 기인한 수축억제 현상이 증가하게 된다. 이는 결국 인장세트 이후 닫힌 할렬의 유도를 방해하게 된다. 따라서 Inc이 건조초기 표층에 형성된 인장응력을 고르게 분산시켜 줌으로서 재면할렬 발생의 억제가 가능하긴 하였으나, 그 효과가 Ker의 수준에 미치지 못하는 못하였던 것은 건조 중 creep에 기인한 수축억제 현상이 증가하였기 때문인 것으로 사료된다.

단면이 큰 Douglas-fir 중목구조부재의 경우 수분경사가 쉽게 형성될 뿐만 아니라 건조 중 creep에 기인한 수축억제 현상도 증가하게 된다. creep에 기인한 수축억제 현상은 닫힌할렬의 발생을 감소시키기 때문에, 결국 재면할렬 발생의 증가로 이어지게 된다. 따라서 두께 25 cm를 초과하는 Douglas-fir 중목구조부재에 고온저습전처리를 적용하는데 있어 신중을 기할 필요가 있을 것으로 사료되며, 표층에 인장세트가 일어나기 전에는 건조구온도차를 크게 설정하지 않아야 할 것으로 사료된다.

4. 결 론

배할 및 자상-인사이징 처리한 Douglas-fir 중목구조부재의 고온건조 후 함수율과 재면할렬 발생에 미치는 영향을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 함수율
 - 배할과 자상-인사이징 처리는 새롭게 형성된 단면과 인접한 부위에 존재하는 수분의 양이 감소됨으로서, 표층으로부터 72 mm까지 형성된 수분경사가 전처리 조건에 따라 다르게 형성되었다. 건조 후 배할과 자상-인사이징이 최종함수율 분포에 영향을 미칠 수 있는 최대 범위는 각각 표면으로부터 배할 깊이의 2/3, 자상의 최대 깊이로부터 약 10~20 mm 범위였다.
 - 또한 단면이 증가함에 따라 동일한 깊이라 하더라도 실질물에 차이가 생기기 때문에, 단면이 큰 목재의 평균함수율을 측정하는데 있어서는 실질물의 고려가 중요한 것으로 나타났다.
- 재면할렬
 - 건조 후 발생한 재면할렬은 Inc, Ker, Inc-Ker 모두에서 Con보다 적게 발생되었다. 재면할렬 감소 효과는 Inc-Ker, Ker, Inc 순으로 Inc-Ker에서 가장 효과적이었다. Inc의 경우, Con과 비교하여 재면할렬의 발생을 억제하는 것이 가능하긴 하였으나, 그 효과가 배할의 수준에 미치지 못하였다. 특히 배할가공은 할렬 폭이 확장되는 것을 억제하는데 효과적이었다. 그러나 creep에 기인한 수축억제로 인해 전처리 조건에 관계없이 단면의 크기가 증가함에 따라 할렬발생이 증가하였다.

사 사

본 논문은 교육과학기술부의 재원으로 지원을 받아 수행된 산학협력선도대학(LINC) 육성사업의 연구결과입니다.

REFERENCES

- American Society for Testing and Materials. 1968. Methods of measuring moisture content of wood (ASTM Standard D 2016). Philadelphia, United States.
- Bramhall, G., Wellwood, R.W. 1976. Kiln Drying of Western Canadian Lumber: Information Report, VP-X-159, Canadian Forest Service, Western Forest Products Laboratory, Vancouver, BC.
- Fujii, T., Suzuki, Y., Kuroda, N. 1997. Bordered pit aspiration in the wood of *Cryptomeria japonica* in relation to air permeability. Iawa Journal 18(1): 69-76.
- Hattori, N., Ando, K., Kitayama, S., Kubo, T., Kobayashi, Y. 1997. Application of laser incising to microwave drying of sugi square lumber with black-heart. Forest resources and environment 35: 53-60.
- Hermawan, A., Fujimoto, N., Sakagami, H. 2012. Effects of high-temperature and low-humidity pretreatment on the drying properties of sugi boxed-heart timber with black-colored heartwood. Drying Technology 30(7): 780-786.
- Hwang, K.H., Park, B.S. 2009. Effect of cross-sectional dimension on the shrinkage property of Korean red-pine wood. Journal of the Korean Wood Science and Technology 37(3): 231-238.
- Hsu, N.N., Tang, R.C. 1974. Internal stresses in wood logs due to anisotropic shrinkage. Wood Science 7(1): 43-51.
- Islam, M.N., Ando, K., Yamauchi, H., Hattori, N. 2009. Effects of species and moisture content on penetration of liquid in laser incised lumber by the passive impregnation method. European Journal of Wood and Wood Products. 67(2): 129-133.
- Jung, H.S., Lee, N.H., Park, J.H. 1997. The characteristics of vacuum drying heated by hot plates

- for the thinned logs and pillars of korean pine. Journal of the Korean Wood Science and Technology 25(4): 51-60.
- Kang, C.W., Matsumura, J., Kang, W. 2008. Observation of shrinkage features of cross sectional surface of wood by LV-SEM. Journal of the Korean Wood Science and Technology 36(3): 17-23.
- Listyanto, T., Ando, K., Yamauchi, H., Hattori, N. 2013. Microwave and steam injection drying of CO2 laser incised sugi lumber. Journal of wood science 59(4): 282-289.
- Lee, C.J., Lee, N.H., Eom, C.D., Shin, I.H., Park, M.J., Park, J.S. 2013. Effect of end-coating around pith of heavy timbers of red pine and korean pine on high-temperature and low-humidity drying characteristics. Journal of the Korean Wood Science and Technology 41(3): 221-233.
- Lee, H.M., Lee, D.H., Hwang, W.J. 2013. Penetration of ACQ treatment and its effect of degradation on wood tissues (Structure). Journal of the Korean Wood Science and Technology 41(6): 576-582.
- Lee, C.J., Lee, N.H., Park, M.J., Park, J.S., Eom, C.D. 2014. Effect of reserve air-drying of korean pine heavy timbers on high-temperature and low-humidity drying characteristics. Journal of the Korean Wood Science and Technology 42(1): 49-57.
- Perrin, P.W. 1978. Review of incising and its effects on strength and preservative treatment of wood. Forest Products Journal 28(9): 27-33.
- Park, J.C., Kim, S.W., Ryu, J.Y., Hong, S.I. 2008. Strength Property of the incised larix (*Larix kaempferi* Carr.) round posts treated with CCA. Journal of the Korean Wood Science and Technology 36(3): 85-92.
- Simpson W.T. 1991. Dry kiln operator's manual. Forest Products Laboratory, Madison, United States.
- Shusheng, P., Langriah, T.A.G., Keey, R.B. 1994. Moisture movement in softwood timber at elevated temperatures. Drying Technology 12(8): 1897-1914.
- Winandy, J.E., Morrell, J.J. 1998. Effects of incising on lumber strength and stiffness: relationships between incision density and depth, species, and MSR grade. Wood and fiber science 30(2): 185-197.
- Yoshida, T., Hashizume, T., Fujimoto, N. 2000. High-temperature drying characteristics on boxed-heart square timber of karamatsu and sugi-influences of high temperature conditions with low humidity on drying properties. Mokuzai Kogyo 55(8): 357-362.