

큰 정각재의 가열판과 고주파 진공건조간 건조특성의 비교*1

정희석*2† · 강욱*2 · 이철현*2

Comparison of Drying Characteristics of Square Timber by Heated Platen and Radio-frequency/Vacuum Drying*1

Hee-Suk Jung*2 · Wook Kang*2 · Chul-Hyun Lee*2

요약

변장 14.0 cm와 16.5 cm인 소나무 정각재의 가열판진공건조와 고주파진공건조간의 건조속도, 함수율분포와 비에너지를 비교하였다. 고주파진공건조는 가열판진공건조보다 건조속도 및 변장이 건조속도에 미치는 영향이 컸었다. 가열판진공건조 목재의 재장방향, 두께방향과 폭방향의 함수율분포는 불룩 형태를 나타내었고, 고주파진공건조 목재는 오목 형태를 나타내었다. 가열판진공건조 목재의 폭방향과 두께방향간의 수분경사는 유사하였으나 고주파진공건조 목재의 경우는 폭방향의 수분경사가 두께방향보다 완만하였다. 가열판진공건조와 고주파진공건조의 비에너지곡선은 함수율이 감소할수록 증가하는 경향을 나타내었고, 가열판진공건조의 비에너지는 고주파진공건조보다 컸었다.

ABSTRACT

Red pine(*Pinus densiflora*) square timbers with 14.0 cm and 16.5 cm of face size and 2.4 m long were dried in a vacuum-press kiln and in a radio-frequency/vacuum(RF/V) kiln to compare drying rate, moisture content(MC) distribution and specific energy. RF/V drying rate was higher than vacuum-press drying rate. The effect of size of cross section on the RF/V drying rates were more pronounced than those of vacuum-press drying. The longitudinal- and the transverse MC distribution of dried square

*1 접수 2001년 11월 24일, 채택 2002년 3월 4일

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호 : R01-2000-00396) 지원으로 수행되었음.

*2 서울대학교 농업생명과학대학, College of Agriculture & Life Sciences, Seoul National University, Suwon 441-744, Korea.

† 주저자(corresponding author) : Hee-Suk Jung (e-mail: heesjung@snu.ac.kr)

timber showed convex profile for the vacuum-press drying and concave profile for the RF/V drying. Moisture gradient of width direction was similar to the thickness direction in vacuum-press dried square timber and was more slight than that of the thickness direction in the RF/V dried large square timber. The specific energy consumption curve increased as MC decreased. Specific energy(kWh/kg of water evaporated) of the vacuum-press process required more than that of the RF/V process.

Keywords: square timber, vacuum-press, RF/V, drying rate, moisture content distribution, energy consumption curve, specific energy

1. 서 론

구조재는 함수율 18% 이하로 건조된 목재를 사용토록 규정하고 있으나 대형구조재는 정식 건조하지 않고 사용하는 사례가 허다하다. 두께 10 cm 이상의 구조재는 천연건조 또는 열기건조에서 건조속도가 매우 느리고, 다량의 에너지가 소비되며 건조결함이 심하게 발생하는 등 건조효율이 매우 낮기 때문에 진공건조의 필요성이 제기된다. 진공건조는 저온 적용에 의해서도 고온건조의 효과가 있기 때문에 투과성이 낮거나 대형구조재 등 난건조목재에 적용할 수 있는 적절한 건조법으로 인식되고 있다.

진공건조의 가열방식 중에 열수 또는 증기 가열판 접촉에 의한 전도식 가열과 고주파 가열은 대류식 진공건조(vacuum-convective drying)보다 열전달 효과가 크다. 전도식은 재면에서 열전도되기 때문에 두꺼운 목재의 경우 중심층까지 열확산이 느리나, 고주파에 의한 내부가열식은 중심층부터 먼저 가열된다. 가열판과 고주파 가열은 목재의 가열부위가 서로 상반되기 때문에 건조속도와 목재부위간 함수율 분포가 서로 상이할 수 밖에 없을 것으로 생각되나 실제 어떤 차이가 있는지 알려져 있지 않다.

건조방법간의 건조특성의 비교에서 Harris 등(1984)은 두께 2인치 레드오크 제재목의 고주파 진공건조와 열기건조간의 건조속도와 함수율 분포 등을 비교 보고하였고, Trebula 등(1984)은 hornbeam 제재목을, 그리고 Moldrup 등(1992)은 소나무 제재목을 열기건조와 대류식 진공건조간의 건조소요시간을 비교하였다. Lamb 등(1993)은 고주파진공건조는 개개의 제재목뿐만 아니라 한 제재목 부위에 따라서도

함수율 변이가 심함을 보고하였고, Trofatter 등(1986)은 고주파진공건조는 열기건조보다 함수율 변이가 큰데, 이는 투과성과 밀도차이에 기인된다고 보고하였다. Perré 등(1995)은 참나무와 너도밤나무 제재목의 대류식과 전도식 진공건조와 열기건조간에 에너지 소모를 비교하였다. Cividini(1995)은 가열판진공건조에서 구주적송의 수축율과 가문비나무의 틀어짐 등을 보고하였다.

본 연구에서는 소나무의 변장 14.0 cm와 16.5 cm 정각재를 가열판에 의한 전도식진공건조와 고주파진공건조에서 건조곡선, 건조속도, 재장방향, 두께방향 및 폭방향의 함수율 분포 및 건조에 소요되는 비에너지 등 건조특성 차이를 알고자 실시하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 공시목의 수량과 잔적

공시목은 변장 14.0 cm와 16.5 cm인 소나무 정각재이고, 재장 2.4 m인 생재를 사용하였으며, 가열판진공건조와 고주파진공건조에서 각각 사용한 정각재의 수량은 변장 14.0 cm 정각재는 12본(2층×6본)씩, 그리고 변장 16.5 cm 정각재는 5본(1층×5본)씩 잔적하였다.

가열판진공건조에 사용한 변장 14.0 cm와 16.5 cm 정각재의 초기함수율(표준편차)는 각각 40.3%(8.0)과 46.2%(9.5)이고, 고주파진공건조에 사용한 14.0 cm와 16.5 cm 정각재의 경우는 각각 60.7%(28.6)과 68.9%(31.2)이었다.

2.2. 건조온도, 압체력 및 내부온도

가열판진공건조에서 14.0 cm 정각재의 건조온도는 가열판 온도를 기준으로 하여 건조초기부터 건조중기까지 71℃를 적용하였고, 그 이후부터 81℃를 적용하였다. 그리고 16.5 cm 정각재의 건조온도는 초기함수율부터 함수율 20%까지 68℃, 그 이하에서 71℃를 적용하였다.

고주파진공건조에서 주파수는 13.56 MHz이고, 14.0 cm와 16.5 cm 정각재의 건조온도는 전 건조기간동안 코아온도 기준으로 68℃를 적용하였다.

가열판진공건조와 고주파진공건조 중 진공건조기의 내부압력은 120 mmHg 수준을 유지시켰다.

2.3. 건조곡선과 건조속도

건조개시부터 1일 간격으로 건조 중 무게를 측정하였다. 건조종료 후 횡단면에서 60 cm 떨어진 부위에서 최종함수율을 구하였다. 이 최종함수율을 이용하여 건조목재의 전건무게를 구하고, 이 전건무게를 이용하여 건조일수별 함수율을 계산하고 건조곡선을 작성하였다. 건조속도는 건조일수별로 제거된 함수율로 나타내었다.

2.4. 재장과 횡단방향의 함수율 분포

건조목재의 함수율분포는 정각재의 재장방향, 두께방향과 폭방향에서 구하였다. 두께방향은 가열판이 수직으로 압체하는 방향이고, 폭방향은 가열판의 압체방향과 직각을 이루는 수평방향을 의미한다.

재장방향의 함수율 분포는 재장의 위치에 따라 3부위, 즉 횡단면, 횡단면에서 60 cm 거리인 중간부위, 120 cm 거리인 중심부위에서 구하였다.

두께방향 함수율 분포는 전술한 재장의 3부위에서 각각 7등분하여 7개의 스트리프(strip)를 절취하고 스트리프 위치에 따라 상하 재면의 표층은 번호 1과 7, 그 안쪽으로 향하여 2와 6, 그리고 3과 5, 중심층은 4로 표시하였다.

폭방향 함수율 분포는 재장의 중간부위에서 좌우

재면의 표층은 1과 7로 표시하는 등 두께방향과 동일한 방법으로 7개 스트리프를 절취하여 함수율 분포를 구하였다.

2.5. 비에너지

비에너지는 가열판진공건조와 고주파진공건조에서 건조일수별로 제거된 수분량과 소요된 전기에너지를 측정하여 증발수분무게(kg)당 전기에너지(kWh)로 나타낸 비에너지 곡선을 작성하였고, 또한 전 건조기간동안 평균 비에너지를 구하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 건조방법별 건조곡선과 건조속도

14.0 cm와 16.5 cm 정각재의 가열판과 고주파 진공건조곡선은 Fig. 1과 같고, 최종 함수율과 표준편차는 Table 1과 같다.

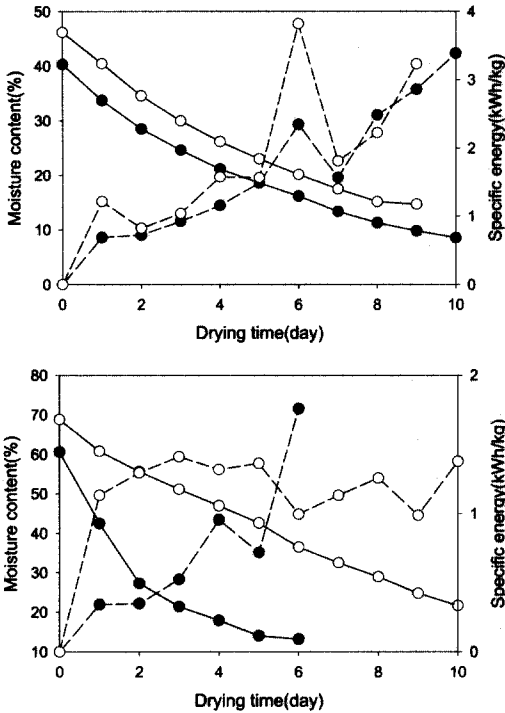
가열판진공건조에서 두가지 변장의 정각재간의 함수율 감소 추세는 유사하였고, 14.0 cm와 16.5 cm 정각재의 전 건조기간 평균건조속도는 각각 3.18%/日和 3.50%/日로서 큰 정각재가 더 크게 나타났다. 이는 큰 정각재의 초기함수율과 최종함수율이 14.0 cm 보다 높은데 기인된 것 같다. 그러나 동일한 함수율 범위, 즉 함수율 40%에서 15% 범위의 건조속도를 비교하여 보면 14.0 cm 정각재는 4.02%/日로서 16.5 cm 정각재의 3.16%/日보다 컸었다. 이 결과는 Jung 등(2001)이 침엽수 제재의 가열판 진공건조속도는 두께가 증가함에 따라 완만하게 감소하였다는 보고와 부합되고 있다.

14.0 cm와 16.5 cm 정각재의 고주파 진공건조에서

Table 1. Final moisture content(%) of dried square by heating sources

Face size (cm)	Heated platen	Radio-frequency
14.0	85±19	13.2±0.85
16.5	14.7±1.7	21.7±0.23

큰 정각재의 가열판과 고주파 진공건조간 건조특성의 비교

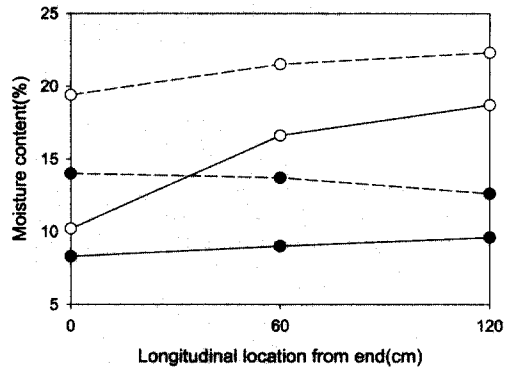


Solid line : moisture content, Dashed line : specific energy
Shaded circle : 14.0 cm square, Open circle : 16.5 cm square

Fig. 1. Vacuum drying curve and specific energy curve for two square timbers by heating sources (top : heated platen, bottom : radio-frequency).

전 건조기간 평균건조속도는 각각 7.91%/日와 4.72%/日로서 큰 차이가 있었다. 14.0 cm 정각재의 건조 개시 후 처음 24시간 동안 건조속도는 18.16%/日로서 섬유포화점 이상에서 매우 컸었고, 그 이후부터 급속하게 감소하였다. 16.5 cm 정각재의 첫날 건조속도는 6.03%/日이고 그 이후부터 거의 직선적으로 감소하였다. 건조곡선의 형태와 건조속도는 변장의 크기에 따라 상당한 차이를 나타내었다.

고주파진공건조속도는 가열판진공건조속도보다 컸었고, 고주파진공건조는 변장의 크기에 따라 건조속도와 건조곡선의 형태에 미치는 영향은 가열판진공건조의 경우보다 더 컸었다.



Solid line : vacuum-press, Dashed line : radio-frequency
Shaded circle : 14.0 cm square, Open circle : 16.5 cm square

Fig. 2. Longitudinal MC distribution of vacuum-press and RF/V dried square timbers.

3.2. 재장, 두께 및 폭방향 함수율분포

3.2.1. 재장방향 함수율분포

14.0 cm와 16.5 cm 정각재의 가열판진공건조와 고주파진공건조재의 3 재장 부위별 함수율 분포는 Fig. 2와 같다.

가열판진공건조에서 14.0 cm 정각재의 횡단면 함수율은 8.3%, 중간(1/4재장)은 9.0%, 중앙(1/2재장)은 9.6%이고, 16.5 cm 정각재의 횡단면은 10.2%, 중간은 16.6%, 중앙은 18.7%로서 횡단면이 가장 낮고 중앙부위가 가장 높았다.

고주파진공건조에서 과소 건조된 16.5 cm 정각재는 횡단면의 함수율이 가장 낮고 중간과 중앙부위에서 높았다. 그러나 저 함수율까지 건조된 14.0 cm 정각재는 중앙의 함수율이 횡단면보다 오히려 낮은 등 가열판진공건조의 재장방향 함수율분포와 반대현상이 나타났다.

3.2.2. 두께방향 함수율분포

가열판진공건조에서 두께방향의 함수율분포는 Fig. 3과 같고, 횡단면 부위가 가장 낮고 중앙부위가 가장 컸었다. 저함수율까지 건조된 14.0 cm 정각재의 수분 경사는 매우 완만하였으나, 과소 건조된 16.5 cm 정

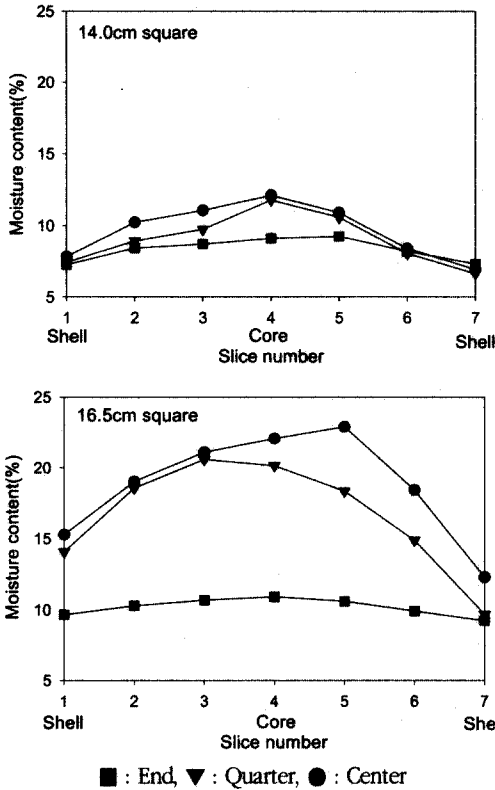


Fig. 3. MC distribution in the thickness direction by longitudinal locations for vacuum-press dried square timber.

각재는 재장의 중간과 중앙 부위에서 심한 수분경사를 나타내었다.

고주파진공건조에서 두께방향의 함수율 분포는 Fig. 4와 같이 모든 재장부위에서 코아(두께중심)는 가장 낮고 표층이 가장 높았다. 그리고 두께방향의 수분경사를 보면 횡단면에서 가장 완만하였고, 중간부위와 중심부위에서 컷으나 서로 비슷하였다. 과소 건조된 16.5 cm 정각재의 수분경사는 과도 건조된 14.0 cm 정각재보다 현저하게 컷었다. 본 연구의 결과는 Harris 등(1984)의 레드오크 고주파진공건조 목재의 두께방향 함수율분포가 표층에서 낮고 코아에서 높다는 보고와 상반되고 있으나, Avramidis 등(1996)이 western red cedar의 고주파진공건조목재의 함수율 분포곡선 형태와 유사하였다. 함수율분포는 목재의 횡

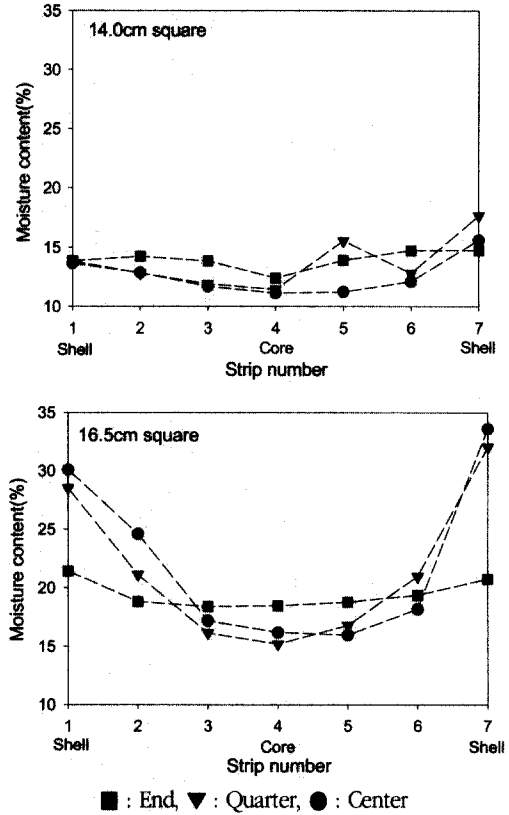


Fig. 4. MC distribution in the thickness direction by longitudinal locations for RF/V dried square timber.

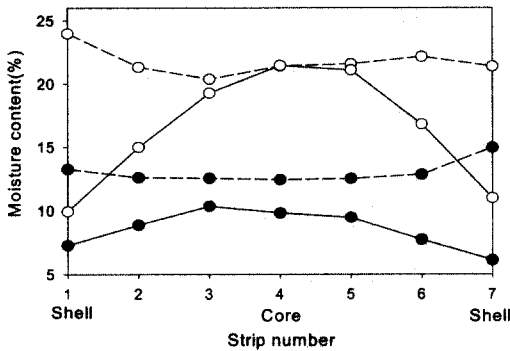
단방향과 재장방향의 투과성과 재온의 분포 등에 따라 영향을 받게 될 것이다.

가열판진공건조의 두께방향 함수율분포는 불룩포물선 형태를 나타내고 있으나 고주파진공건조의 경우는 오목포물선 형태를 나타내고 있었다.

3.2.3. 폭방향 함수율분포

가열판진공건조와 고주파진공건조에서 폭방향 함수율분포는 Fig. 5와 같이 가열판진공건조한 14.0 cm 정각재는 16.5 cm보다 완만하였고, 모두 불룩포물선 형태를 나타내었다. 14.0 cm 정각재의 폭방향의 수분경사는 두께방향의 수분경사보다 완만하였으나 변장 16.5 cm 정각재의 경우는 급하게 나타났다.

큰 정각재의 가열판과 고주파 진공건조간 건조특성의 비교



Solid line : vacuum-press, Dashed line : radio-frequency
 Shaded circle : 14.0 cm square, Open circle : 16.5 cm square

Fig. 5. MC distribution in the width direction for vacuum-press and RF/V dried square timbers.

고주파진공건조에서 14.0 cm와 16.5 cm 정각재의 표층 함수율이 코어 함수율보다 약간 높은 오목포물선 형태를 나타내었으며 수분경사는 매우 완만하였다. 14.0 cm 정각재의 폭방향 함수율분포는 두께방향과 유사하였으나 16.5 cm 정각재는 두께방향보다 더 완만하였다.

3.3. 건조방법별 비에너지

14.0 cm와 16.5 cm 정각재의 가열판진공건조와 고주파진공건조의 건조일수별 소요된 비에너지 곡선은 Fig. 1과 같이 건조초기부터 건조말기로 향해 서서히 증가하는 경향을 나타내었다.

가열판진공건조의 비에너지는 14.0 cm 정각재의 경우 건조온도를 상승시킨 5일째와 7일째에만 감소하였으나, 그 이후부터 계속 상승하였다. 16.5 cm 정각재도 건조온도가 상승한 6일째만 감소하다가 계속 증가하였다. 14.0 cm와 16.5 cm 정각재의 전 건조기간 평균 비에너지는 각각 1.38 kWh/kg와 1.45 kWh/kg이었다.

고주파진공건조의 비에너지는 건조초기에서 건조말기로 향해 약간씩 증가하다가 감소하는 등 약간 변동하고 있으나 전체적으로 보면 증가하는 경향을 나타내고 있었다. 14.0 cm와 16.5 cm 정각재의 전 건조

기간 평균 비에너지는 각각 0.49 kWh/kg와 1.21 kWh/kg로서 변장간에 큰 차이를 나타내었다.

가열판진공건조의 비에너지는 고주파진공건조의 경우보다 컸었고 변장의 증가에 따른 영향은 적었다.

Simpson(1991)은 결합수 제거에는 기화열보다 더 많은 열이 소모되며 함수율 20% 이하부터 함수율이 감소함에 따라 흡착열이 지수적으로 증가한다고 하였다. 본 가열판 진공건조의 연구결과는 Jung 등(2000)이 보고한 폭 11 cm, 두께 10 cm인 평각재의 비에너지는 소나무와 웨스턴렉트의 혼합잔적의 경우 0.799 kWh/kg이고 잣나무와 낙엽송의 혼합잔적의 경우 0.880 kWh/kg보다 컸었다. 비에너지는 변장이 증가함에 따라 증가함을 의미한다.

4. 결론

고주파진공건조속도는 가열판진공건조속도보다 컸었다. 특히 건조초기 건조속도는 현저하게 컸었고 변장의 크기가 건조속도에 미치는 영향도 컸었다.

가열판진공건조 정각재의 재장방향의 함수율은 횡단면에서 가장 낮고 재장 중심으로 향해 증가하였다. 고주파진공건조 정각재의 경우 파소 건조된 16.5 cm 정각재는 횡단면에서 가장 낮고 중심으로 향해 약간 증가하였으나 과도 건조된 14.0 cm 정각재는 횡단면에서 가장 컸고 재장 중심으로 향하여 감소하였다.

가열판진공건조재의 두께방향과 폭방향의 함수율 분포곡선은 관행적인 건조의 경우와 같이 볼록 포물선 형태를 나타내고 있으나, 고주파진공건조의 경우는 오목 포물선 형태를 나타내고 있었다. 두께방향의 수분경사는 횡단면 부위에서 가장 적었고 재장의 중심부위에서 가장 컸었다.

가열판진공건조와 고주파진공건조의 비에너지곡선은 함수율이 감소할수록 증가하는 경향을 나타내었다. 14.0 cm와 16.5 cm 정각재의 전 건조기간 평균 비에너지는 가열판진공건조에서 각각 1.38 kWh/kg과 1.45 kWh/kg이었고, 고주파진공건조에서 각각 0.49 kWh/kg와 1.21 kWh/kg이었다.

참 고 문 헌

1. Avramidis, S., L. Zhang, and S. U. Hatzikiriakos. 1996. Moisture transfer characteristics in wood during radio frequency/vacuum drying. Proceedings of the 5th International IUFRO Wood Drying Conference. Quebec city, Canada : 125~133.
2. Cividini, R. 1995. Timber straightening and shrinkage tests in vacuum-press plus dryer. Proceedings of Int'l Conference on Wood Drying. High Tatras, Slovak Republic : 231~236.
3. Harris, R. A. and M. A. Taras. 1984. Comparison of moisture content distribution, and shrinkage of red oak lumber dried by a radio-frequency/vacuum drying process and a conventional kiln. Forest Prod. J. 34(1): 44~54.
4. Jung, H. S., J. H. Lee, W. Kang, and N. H. Lee. 2001. Relationship between softwood lumber thickness and drying rate and drying time factor in vacuum-press drying. Mokchae Konghak. 29(1): 1~8.
5. Jung, H. S., J. H. Lee and N. H. Lee. 2000. Vacuum-press drying of thick softwood lumbers. Drying Technology 18(8): 1921~1933.
6. Lamb, F. M., and E. M. Wengert. 1993. Comparison of lumber drying quality between two vacuum drying systems and a conventional predryer and dry kiln system. Vacuum Drying of Wood 1993. High Tatras, Slovakia : 251~256.
7. Moldrup, S., and B. Moldrup. 1992. Drying of timber under vacuum in an atmosphere of super-heated steam. 3rd IUFRO International Wood Drying Conference. Vienna, Austria : 235~239.
8. Perré, P., P. Joyet, and D. Aleon. 1995. Vacuum drying : Physical requirements and practical solutions. Vacuum Drying of Wood '95. High Tatras, Slovak Republic. pp. 7~34.
9. Simpson, W. T. 1991. Dry kiln operator's manual. USDA Forest Service Agric. Handbook. No. 188 : 239~256.
10. Trebula, P., and A. Dekret. 1984. Vacuum drying of hornbeam wood. Holztechnologie. 25(1): 20~22.
11. Trofatter, G., R. A. Harris, J. Schroeder, and M. A. Taras. 1986. Comparison of moisture content variation in red oak lumber dried by a radio-frequency/vacuum drying process and a conventional kiln. Forest Prod. J. 36(5): 25~28.