creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

농학석사학위 논문

고온건조 중 발생 할렬을 고려한 목재의 온도 및 함수율 분포 변화에 대한 수치해석

Numerical Analysis on Temperature and Moisture Profiles of Wood Considering Crack Occurrence during High Temperature Drying

2019년 2월

서울대학교 대학원

산림과학부 환경재료과학 전공

김 현 빈

농학석사학위 논문

고온건조 중 발생 할렬을 고려한 목재의 온도 및 함수율 분포 변화에 대한 수치해석

Numerical Analysis on Temperature and Moisture Profiles of Wood Considering Crack Occurrence during High Temperature Drying

지도교수 : 여 환 명

김 현 빈

서울대학교 대학원

산림과학부 환경재료과학 전공

2019년 2월

초 록

흡습성 재료인 목재는 수분 변화에 따라 수축, 팽윤하는 특성을 가지고 있다. 따라서 목재를 사용하는데 있어 건조는 필수적이다. 고온건조는 100 ℃ 이상의 건구 온도 조건에서 목재를 건조하는 방법으로 관행 열기건조보다 빠르게 목재를 건조할 수 있는 방법이다. 하지만 단면의 크기가 큰 대단면 정각재를 고온건조 시키는 경우, 목재 내부 수분이 빠르게 목재 표면에 도달하지 않기 때문에 더욱 건조 결함 발생 가능성이 높다. 건조 결함 발생을 줄이기 위한 건조 스케줄 개량은 주로 시행착오법을 통해 이루어져 왔다. 하지만, 실험 대상의 크기가 크고, 실험 조건이 위험한 대단면 목재의 고온건조 공정은 예측 시스템을 이용한 시뮬레이션을 이용하여 스케줄을 개량하는 것이 효율적이다. 건조 중 목재 내 열전달기작과 수분이동 기작은 목재 열전달 영향인자와 수분이동 영향인자를 적용한 수치해석을 통해 분석할 수 있다.

초기 함수율과 온도 데이터를 이용한 예측과 함께 건조 중 결함을 측정하여 이를 통한 추가적인 수분 이탈을 예측에 적용할 수 있다면, 정확한 목표 함수율 도달시간을 예측하여 결함이 발생한 목재의 과도한 건조를 방지 할 수 있을 것이다. 따라서 본 연구에서는 고온 건조 공정 제어를 위해 고온 건조 중 단면크기별 목재 내부 온도 및 수분 분포를 수치해석을 통해 예측하고 목재 건조 결함 중 목재 표면 수분 이탈에 영향을 주는 표면 할렬을 예측 시스템에 적용하여 건조 중 할렬이 발생한 목재의 함수율 변화를 예측하고자 하였다.

본 연구에서는 낙엽송(*Larix kaempferi*) 대단면재를 사용하였다. 한 변의 길이가 각각 120 mm, 210 mm, 250 mm인 세 종류의 낙엽송 정각재가 사용되었고, 길이는 모두 3,500 mm이었다. 초기 평균 함수율은 120 mm 정각재는 37.59 %, 210 mm 정각재는 43.13 %, 250 mm 정각재는 41.85 %였으며, 초기 온도는 약 16 ℃로 측정되었다. 실험적, 이론적인 내용을 바탕으로 하여 목재내부의 열전달 영향 인자인 목재 비열, 밀도, 열전도계수, 열확산계수, 열대류계수를 결정하였으며, 기하학적 수분확산모델과 대류물질전달계수 전환식을 이용하여 목재 수분확산계수, 수분방사계수를 결정하였다. 이를 3차원 유한차분법에 적용하여 고온 건조에서의 목재 내부 온도 및 함수율 분포 변화를 예측하였다. 또한 실제 고온건조를 통해 온도, 함수율, 할렬의 길이와 깊이를 측정하여 예측 시스템의 적용가능성을 평가하였다.

온도 예측 결과와 실제 측정한 온도 데이터와 비교하였을 때, 48 시간에서 168 시간사이에서 오차가 발생하는 구간이 생겼다. 이는 예측 시스템에서 설정한 섬유포화점과 실제 고온에서의 목재 세포 섬유포화점간의 오차로 인해 목재 온도가 비등점 이상으로 상승하는 시점을 정확하게 분석하지 못한 것으로 추정된다.

함수율 예측 결과, 120 mm 정각재의 경우 할렬이 시험재 길이의 50 % 이상 발생한 시간이 짧았기 때문에 할렬을 고려하지 않은 모델을 통해 예측을 진행하였으며, 예측과 실측의 최종 평균함수율 차이는 약 0.5 %로 오차가 미미하였다. 건조 중 할렬 고려 모델을 사용한 210 mm 정각재와 250 mm 정각재의 경우, 최종 평균 함수율의 오차는 각각 약 2 %, 3.4 %로, 할렬 고려 모델을 예측에 적용할 때, 더욱 정확한 결과를 예측할 수 있었다.

건조 결함을 최소화하는 건조 스케줄을 적용하더라도 피건조물의 개체별 물성 차이로 인해 건조 중 결함이 발생할 확률은 항상 존재한다. 따라서 본 연구내용을 바탕으로 하여 실시간으로 목재 건조 결함을 예측 시스템에 적용할 수 있는 시스템이 구성할 수 있을 것이다. 또한 이를 이용하여 건조 중 할렬이 발생하더라도 실시간으로 예측을 보정하여 목표함수율 도달 시간을 정확히 예측해 과도한 건조를 통한 에너지 소비를 줄이고 과도한 건조로 인한 추가적인 건조 결함 발생을 억제할 수 있을 것이라 기대된다.

주요어 : 목재 열전달, 목재 수분이동, 유한차분법, 고온건조

학 번 : 2017-21425

목 차

제 1 절 서론 ····· 8
1.1. 연구배경 ····· 9
1.2. 연구목적 ····· 11

제 2 절 연구사 ····· 12
2.1. 목재의 열전달 ····· 13
2.1.1. 열대류 현상에 의한 목재 표면에서의 열전달 ····· 14
2.1.2. 열전도 현상에 의한 목재 내부에서의 열전달 ····· 15
2.2. 목재의 수분이동 ····· 19
2.2.1. 수분확산에 의한 목재 내부 수분이동 ····· 20
2.2.2. 수분방사로 인한 목재 표면 수분이동 ····· 24
2.3. 목재 건조 중 열전달 및 수분이동 수치해석 ····· 25
2.3.1. 3차원 유한차분법을 이용한 온도 분포 예측 ····· 27
2.3.2. 3차원 유한차분법을 이용한 함수율 분포 예측 ····· 34
2.4. 고온 건조 ····· 40

제 3 절 재료 및 방법 ····· 41
3.1. 공시재료 ····· 42
3.2. 예측 시스템 ····· 43
3.2.1. 목재의 열전달 영향 인자 결정 ····· 46
3.2.2. 목재의 수분이동 영향 인자 결정 ····· 49

3.3. 고온 건조 중 목재 내부 온도와 함수율 분포 및 표면 할렬 측정 ····· 52
제 4 절 결과 및 고찰 ····· 54
4.1. 고온 건조 중 목재 내부 온도 예측 결과 ····· 55
4.1.1. 시간에 따른 방향별 열 전달 영향 인자 결정 ····· 55
4.1.2. 시간에 따른 온도 분포 예측 결과 ····· 60
4.2. 고온 건조 중 목재 내부 함수율 예측 결과 ····· 68
4.2.1. 시간에 따른 방향별 수분 이동 영향 인자 결정 ····· 68
4.2.2. 시간에 따른 함수율 분포 예측 결과 ····· 73

4.3. 실제 고온 건조를 통한 실측치와 예측치의 비교 ····· 80
4.3.1. 온도 실측치와 예측치의 비교 ····· 80
4.3.2. 함수율 실측치와 예측치의 비교 ····· 84
4.3.3. 고온 건조 중 할렬 측정 결과와 할렬 고려 모델 적용 결과 ····· 91

제 5 절 결론 ····· 99

참고문헌 ····· 102

List of Figures

Figure Ⅱ-1. Geometric moisture diffusion model in each direction (Kang *et al.*, 2008; Han, 2014). ····· 22
Figure Ⅱ-2. A schematic view of the joints along the convective boundary where thermal convection occurs in the three-dimensional finite differential analysis. ····· 29
Figure Ⅱ-3. A schematic view of the joints along the convective boundary where surface moisture emission occurs in the three-dimensional finite differential analysis. ····· 36
Figure Ⅲ-1. Schematic diagram of prediction for temperature and moisture content distribution. ····· 45
Figure Ⅲ-2. Schematic diagram of prediction system when surface crack occurred. ····· 45
Figure Ⅲ-3. Convective heat transfer coefficient for temperature and relative humidity. ····· 46
Figure Ⅲ-4. Specific heat of oven-dried larch wood. ····· 48
Figure Ⅲ-5. SEM image of larch wood. ····· 51
Figure Ⅲ-6. High temperature dryer and timber stack. ····· 53
Figure Ⅳ-1. Convective heat transfer coefficient of larch wood during drying. ····· 56
Figure Ⅳ-2. Thermal diffusivity of larch wood of 120 mm square timber during drying. ····· 58
Figure Ⅳ-3. Thermal diffusivity of larch wood of 210 mm square timber during drying. ····· 58

Figure Ⅳ-4. Thermal diffusivity of larch wood of 250 mm square timber during drying. ····· 59
Figure Ⅳ-5. Moisture diffusion coefficient of larch wood in transverse direction of 120 mm square timber during drying. ····· 70
Figure Ⅳ-6. Moisture diffusion coefficient of larch wood in longitudinal direction of 120 mm square timber during drying. ····· 70
Figure Ⅳ-7. Moisture diffusion coefficient of larch wood in transverse direction of 210 mm square timber during drying. ····· 71
Figure Ⅳ-8. Moisture diffusion coefficient of larch wood in longitudinal direction of 210 mm square timber during drying. ····· 71
Figure Ⅳ-9. Moisture diffusion coefficient of larch wood in transverse direction of 250 mm square timber during drying. ····· 72
Figure Ⅳ-10. Moisture diffusion coefficient of larch wood in longitudinal direction of 250 mm square timber during drying. ····· 72
Figure Ⅳ-11. Predicted and measured temperature of 120 mm square timber. ····· 82
Figure Ⅳ-12. Predicted and measured temperature of 210 mm square timber. ····· 82

Figure Ⅳ-13. Predicted and measured temperature of 250 mm square timber. ····· 83
Figure Ⅳ-14. Fractional moisture content of 120 mm square timber. ····· 85
Figure Ⅳ-15. Fractional moisture content of 210 mm square timber. ····· 85
Figure Ⅳ-16. Fractional moisture content of 250 mm square timber. ····· 86
Figure Ⅳ-17. Transversal moisture contents distributions in 120 mm square timber at 120 hours. ····· 89
Figure Ⅳ-18. Transversal moisture contents distributions in 210 mm square timber at 120 hours. ····· 89
Figure Ⅳ-19. Transversal moisture contents distributions in 250 mm square timber at 120 hours. ····· 89
Figure Ⅳ-20. Transversal moisture contents distributions in 120 mm square timber at 288 hours. ····· 90
Figure Ⅳ-21. Transversal moisture contents distributions in 210 mm square timber at 288 hours. ····· 90
Figure Ⅳ-22. Transversal moisture contents distributions in 250 mm square timber at 288 hours. ····· 90
Figure Ⅳ-23. Average crack length on 120 mm square timber surface. ····· 92
Figure Ⅳ-24. Average crack length on 210 mm square timber surface. ····· 92
Figure Ⅳ-25. Average crack length on 250 mm square timber

surface. ····· 93
Figure Ⅳ-26. Fractional moisture content of 210 mm square timber with crack considered model. ····· 95
Figure Ⅳ-27. Fractional moisture content of 250 mm square timber with crack considered model. ····· 95
Figure Ⅳ-28. Transversal moisture contents distributions in 210 mm square timber at 288 hours. ····· 97
Figure Ⅳ-29. Transversal moisture contents distributions in 250 mm square timber at 120 hours. ····· 97
Figure Ⅳ-30. Transversal moisture contents distributions in 250 mm square timber at 288 hours. ····· 98

List of Tables

Table Ⅱ-1. Geometric moisture diffusion coefficient in each direction (Han, 2014). ····· 24
Table Ⅲ-1. High temperature drying condition. ····· 23
Table Ⅲ-2. Dimensions of larch wood elements. ····· 43
Table Ⅳ-1. Predicted temperature profile of cross section during drying (continued). ····· 51
Table Ⅳ-2. Predicted temperature profile in longitudinal direction during drying. ····· 62
Table Ⅳ-3. Predicted moisture contents profile of cross section during drying (continued). ····· 67
Table Ⅳ-4. Predicted moisture contents profile in longitudinal direction during drying. ····· 74
Table Ⅳ-5. Average crack length on wood surface. ····· 93

제 1 절

서론

1.1. 연구배경

자연에서 생장하는 임목은 많은 수분을 함유하고 있다. 흡습성 재료인 목재는 수분 변화에 의해 치수가 변하는 특징이 있기 때문에 건조되지 않은 생재를 이용하여 제품을 제작할 경우, 목제품 사용 중 치수 변화, 할렬, 틀어짐과 같은 결함이 발생할 수 있다. 이를 방지하기 위해 목재를 이용함수율 이하로 건조하는 공정이 필요하다. 하지만 목재 건조 공정에는 많은 시간과 에너지가 소비된다. 특히 대단면재와 같이 두께가 두꺼운 목재는 목재 내부에서 표면까지 수분의 이동거리가 길기 때문에 건조에 더욱 많은 시간이 소비된다. 따라서 에너지 사용량을 줄이고 신속하게 목재를 건조하기 위한 연구가 필요하다.

고온건조는 건구온도가 100 ℃ 이상인 조건에서 목재를 건조하는 방법으로 관행 열기건조보다 빠르게 목재를 건조할 수 있고, 에너지 사용량이 적다는 장점이 있다. 하지만 고온 건조에서는 높은 건구온도의 영향으로 목재 표면이 빠르게 건조되어 목재 표면과 내부 사이의 수분 경사가 크게 형성되고, 이에 따른 건조 응력이 크게 발생하여 목재에 할렬이나 틀어짐 등의 건조결함이 발생할 가능성이 높다. 특히 대단면재의 경우, 목재 내부의 수분이 두께가 얇은 판재보다 이동하는 거리가 길다. 따라서 목재 내부에 오래 존재하여 목재 내 수분 경사가 크게 형성되기 때문에 건조 결함이 발생할 가능성이 높다. 고온건조 중 발생하는 건조 결함을 줄이기 위해서는 건조 중 목재 내부 수분 경사를 완만하게 해 부위별 수축률 차이를 감소시킬 수 있는 건조 스케줄 개발이 필요하다.

실제 건조를 통해 건조 스케줄을 개량하는 시행착오법은 이상적인 건조 스케줄 개량을 위해 많이 이용되어 왔으나, 많은 자원과 에너지를 소비하기 때문에 이를 개선하기 위해 목재의 열전달기작과 수분이동기작을 분석하는 목재 건조 시뮬레이션이 연구되어왔다. 특히 실험 대상의 크기가 크고, 실험 조건이 위험한 대단면 목재의 고온 건조 공정은 반복 실험이 필요한 시행착오법보다 시뮬레이션을 이용하여 목재 내 열전달과 수분이동을 분석 및 예측하는 것이 효율적이다.

건조 중 목재의 열전달기작과 수분이동기작은 목재 방향별 열전달 영향 인자(목재 열확산 계수와 열대류 계수)와 수분이동 영향 인자(목재 수분확산 계수와 표면 수분방사계수)에 의해 결정된다. 이는 목재 세포의 모델링 및 여러 환경적 요인과 관련한 관계식을 통해 정량적으로 결정할 수 있다.

건조 중 목재 외부에서 내부로 열이 전달되는 것에 관련한 에너지 평형과 목재 내부에서 외부로 수분이 이동하는 것에 관련한 물질 평형은 미분방정식을 통해 나타낼 수 있다. 이를 적용한 수치해석을 통해 건조 중 목재의 온도와 함수율 분포 변화를 예측하고, 실제 공정 중 발생하는 결함을 통한 추가적인 수분 이탈 또한 예측에 적용할 수 있다면, 정확한 목표 함수율 도달시간을 예측할 수 있으며, 건조 공정의 소요일수를 정확히 산정할 수 있다. 이에 본 연구에서는 고온 건조 공정 제어를 위해 단면크기별 고온 건조 중 목재 내 온도 및 수분 분포를 수치해석을 통해 예측하고 목재 표면 수분 이탈에 영향을 주는 표면 할렬을 예측 시스템에 적용하여 건조 중 할렬이 발생한 목재의 함수율 변화를 예측하고자 한다.

1.2. 연구목적

본 연구의 목적은 다음과 같다.

- 고온건조 중 목재 내부 온도와 함수율 분포를 수치해석을 이용하여 예측하고자 한다. 이를 실제 고온건조를 통해 얻은 실측 데이터와 비교하여 본 연구에서 결정한 목재의 열전달 영향 인자와 수분이동 영향 인자들이 고온에서 적합한지 평가하고자 한다.

- 실제 고온건조 중 낙엽송재의 표면 할렬 발생시점을 측정하고 할렬 길이를 측정해 추가적인 수분방사를 예측하기 위한 할렬 고려 모델을 적용하는 예측 시스템을 구성하고자 한다. 이를 통해 할렬이 발생한 목재에 대한 건조 소요시간을 예측하여 실측 데이터와 비교해 할렬 고려 모델의 적용가능성을 평가하고자 한다.

제 2 절

연구사

2.1. 목재의 열전달

열전달이란 한 시스템에서 다른 시스템으로 열에너지가 전달되는 과정이며, 열전달 방식에 따라 전도, 대류, 복사로 분류된다. 전도란 주로 고체 물질내의 높은 온도 영역에서 낮은 온도 영역으로 또는 높은 온도의 고체에서 그것과 물리적으로 접하고 있는 낮은 온도의 고체로의 열전달을 의미한다. 대류란 유체운동의 결과에 의해 높은 온도의 고체표면으로부터 낮은 온도의 유체로 또는 유체의 높은 온도 영역으로부터 낮은 온도 영역으로의 열전달이다. 복사란 진공 또는 낮은 밀도의 매질 내에서 서로 떨어진 두 물체사이의 온도차 때문에 일어나는 전자기파에 의한 열의 전달이다(Holman, 2005). 건조 중 목재가 높은 온도의 대기에 노출되면 대기에서 목재 표면까지 대류를 통해 열이 전달되며, 전도의 방식으로 목재 표면에서 내부까지 열전달이 이루어진다.

2.1.1. 열대류현상에 의한 목재 표면에서의 열전달

외부 공기가 가지고 있는 에너지는 대류의 방식으로 목재 표면까지 전달된다. 유체와 표면사이에서 대류현상에 의한 열전달 크기를 나타내는 계수인 열대류계수(h)는 물체 외부 공기 조건과 관련되어 있다. 공기의 흐름이 층류일 때, 열대류계수는 (식 2-1)을 통해 결정할 수 있다(Hollman, 2005).

$$h = \frac{0.664 k_a}{L} Re^{1/2} \mathrm{Pr}^{1/3} \quad \cdots\cdots (식\ 2\text{-}1)$$

$$Re = \frac{L v \rho_a}{\mu_a} \quad \cdots\cdots (식\ 2\text{-}2)$$

$$\mathrm{Pr} = \frac{\mu_a c_a}{k_a} \quad \cdots\cdots (식\ 2\text{-}3)$$

여기에서, h는 열대류계수(W/m^2℃), Re는 레이놀즈 수(Reynold number), Pr는 프란츨 수(Prandtl number), L은 대류가 발생하는 표면 길이(m), v는 풍속(m/s), ρ_a는 공기의 밀도(kg/m^3), μ_a는 공기의 절대 점도(Kg/ms), c_a는 공기의 비열(J/g℃), 그리고 k_a는 공기의 열전도계수(W/m℃)이다.

2.1.2. 열전도 현상에 의한 목재 내부에서의 열전달

목재 표면에 전달된 에너지는 전도를 통해 목재 내부로 전달된다. 목재를 구성하는 성분의 열전도계수, 비열, 밀도 등이 목재의 내부 열전도에 영향을 미치는 인자로 알려져 있다. 목재는 세포벽 물질과 공극이 교차되어 있는 구조이므로 세포벽 물질의 열전도계수와 공극 내 공기층의 열전도계수에 의하여 목재의 열전도계수가 결정된다. 목재의 열전도계수는 비중, 방향, 함수율 등의 조건에 따라 변한다. 목재의 열전도계수는 비중이 증가함에 따라 커지는 경향을 가진다. 이는 목재의 공극 속 정체된 공기의 열전도계수가 세포벽 물질의 열전도계수에 비하여 작기 때문이다(Siau, 1995). 목재의 함수율이 높아질수록 열전도계수는 커지는데, 이는 물의 열전도계수가 목재에 비하여 매우 큰 값을 가지고 있기 때문이다. 특히 함수율이 섬유포화점에 도달하게 되면 열전도계수가 급격히 상승하는 경향이 있다고 보고된 바 있다(Kollmann, 1968; Deliiski, 2011).

MacLean(1941)은 열전도계수와 함수율과의 관계에 대한 실험식을 제시하였으며, (식 2-4)는 함수율 40 %이하, (식 2-5)는 함수율 40 % 이상일 경우의 식이다.

$$k_T = G(0.200 + 0.0038MC) + 0.024 \quad \cdots\cdots \text{(식 2-4)}$$

$$k_T = G(0.200 + 0.0052MC) + 0.024 \quad \cdots\cdots \text{(식 2-5)}$$

여기에서, k_T 는 횡단방향 열전도계수(W/m℃), G는 전건비중, MC는 함수율(%)이다.

목재의 열전도계수는 온도에 영향을 받으며, 온도가 상승할수록 열전도계수 또한 상승한다. 이는 목재 내 공극에 존재하는 공기의 열전도계수가 온도 상승에 따라 상승하기 때문이다. 열전도계수와 온도의 관계는 실험적으로 절대온도에 비례한다고 알려져 있으며, Kollmann(1968)이 제시한 관계식은 (식 2-6)과 같다.

$$k_2 = k_1\left\{1-(1.1-0.98S_0)\frac{T_1-T_2}{100}\right\} \quad \cdots\cdots (식\ 2\text{-}6)$$

여기에서, k_1, k_2는 목재의 온도가 각각 T_1(K), T_2(K)일 때의 열전도계수(W/m℃), S_0는 전건비중이다.

목재 방향별 열전도계수 차이는 목재세포의 마이크로피브릴 각도가 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 마이크로피브릴 각도가 작을수록 섬유방향과 횡단방향의 열전도계수의 차이는 커진다. 보통 방사방향의 열전도계수는 접선방향의 열전도계수보다 크다고 알려져 있으나, 그 차이는 별로 크지 않으며, 섬유방향의 열전도계수는 섬유직각방향보다 2 ~ 2.75배 더 크다고 보고된 바 있다(MacLean, 1941).

비열은 어떤 물질을 단위 질량당 1 ℃ 올리는데 소요되는 열량을 말하며 물질의 종류에 따라 비열이 다르다. 목재가 완전히 건조되었을 경우 온도가 상승함에 따라 비열도 상승한다. 전건재의 경우 온도가 20 ℃에서 100 ℃로 상승할 때 비열이 약 30 % 상승한다고 보고된바 있다(MacLean, 1941). 또한 수지가 많이 함유된 목재는 일반적인 목재에 비하여 비열이 크게 나타나는 경향이 있다고 보고된 바 있다(Mcmillen, 1969). Siau(1995)가 제시한 목재의 함수율에 따른 비열(c_{MC})은 (식 2-7)과 같다.

$$c_{MC} = \frac{c_{water}(MC/100) + c_0}{1 + (MC/100)} \quad \cdots\cdots (식\ 2\text{-}7)$$

여기에서, c_{MC}는 특정 함수율에서의 비열(J/kg℃), c_{water}는 물의 비열(J/kg℃), MC는 함수율(%), 그리고 c_0는 목재의 전건비열(J/kg℃)이다.

열확산은 어떤 재료의 주위 온도가 변할 때 그 재료의 온도가 변하는 속도를 나타내는 인자이다. 목재의 열확산계수는 목재의 밀도(ρ_{wood}), 비열(c_{wood}), 열전도계수(k_{wood})를 이용하여 (식 2-8)과 같이 정의할 수 있다. 목재 내 함수율이 상승하면 목재의 열전도계수와 밀도, 비열이 상승하게 된다. 이 경우, 밀도와 비열의 상승이 열전도계수의 상승보다 크기 때문에 목재 내 함수율이 상승하면 목재 열확산계수는 낮아진다.

$$\alpha = \frac{k_{wood}}{\rho_{wood}\, c_{wood}} \quad \cdots\cdots (식\ 2\text{-}8)$$

여기에서, a는 목재의 열확산계수(m^2/s), k_{wood}는 목재의 열전도계수(W/m℃), ρ_{wood}는 목재의 밀도(kg/m^3), c_{wood}는 목재의 비열(J/g℃)이다.

2.2. 목재의 수분이동

목재의 수분이동에 관한 연구는 지속적으로 이루어져 왔다. 목재 내부 수분은 자유수, 결합수, 수증기의 세 가지 형태로 존재한다. 이 중 자유수와 수증기는 세포내강과 세포간층에 존재하며, 결합수는 목재 세포와 결합한 상태로 존재한다(Skaar, 1988). 건조 중 목재 내부가 섬유포화점 이하의 함수율에 도달할 때까지 주로 모세관을 통한 자유수의 용적유동으로 수분이동이 이루어진다. 목재가 섬유포화점 이하의 함수율에 도달하면 목재 내부에 자유수는 존재하지 않으며, 목재 세포벽들 간 농도차로 인한 결합수 확산과 세포내강이나 벽공 등 공극에서의 수증기 확산을 통해 수분이 이동한다(Siau, 1995). 목재를 건조할 경우, 목재 내부의 수분은 자유수 유동과 결합수와 수증기의 확산을 통해 목재 표면까지 이동하며, 목재 표면에 도달한 수분은 표면 방사를 통해 외기로 증발한다.

2.2.1. 수분확산에 의한 목재 내부 수분이동

목재 내부 수분은 주로 확산을 통해 목재 표면까지 이동한다. 수분확산계수(D)는 목재 내부에서의 수분이동률로서 세포내강에서는 수증기의 형태, 세포벽에서는 결합수의 형태로 수분확산이 발생하기 때문에 세포내강과 세포벽에는 서로 다른 수분확산계수가 이용된다. Siau(1995)는 이상기체방정식을 이용하여 세포내강에서의 수증기 확산계수를 (식 2-9)로 제시하였으며, 횡단방향 세포벽의 수분확산계수는 결합수확산의 활성화 에너지에 관한 식을 근사하여 (식 2-10)으로 제시하였다.

$$D_v = \frac{0.018\, D_a P_0}{G_{MC}^{w} \rho_w RT} \frac{\partial H}{\partial MC} \quad \cdots\cdots \text{(식 2-9)}$$

여기에서, D_v는 세포내강에서 수증기의 확산계수(m^2/sec), D_a는 외기에서 수증기의 확산계수(m^2/sec), P_0는 포화수증기압(Pa), H는 상대습도(%), G_{MC}^{w}는 특정 함수율에서 세포벽 비중, ρ_w는 물의 밀도(kg/m^3), R은 기체 상수(8314 m^3Pa/(kgmol K)), MC는 함수율(%)이며 T는 온도(K)이다.

$$D_{BT} = 7 \times 10^{-6} \exp[-(38{,}500 - 290MC)/RT] \quad \cdots\cdots \text{(식 2-10)}$$

여기에서, D_{BT}는 횡단방향의 결합수 확산계수(m^2/sec)이다.

섬유포화점 이하에서 목재 내 수분확산 모델에 관한 연구 또한 지속적으로 이루어져 왔다. Stamm(1960)은 수분이동을 수증기와 결합수의 확산으로 구분하고 세포벽, 세포내강, 방사조직 및 벽공으로 구성된 전기저항 모델을 제시하였다. Siau(1995)는 물질이동 통로를 세포벽, 세포내강으로만 단순히 표현하여 수분확산 모델을 제시하였다. Kang 등(2008)은 Stamm(1960)의 전기저항 모델을 수정하여 섬유방향, 접선방향, 방사방향에서의 기하학적 수분확산계수 모델을 제시하였다(Figure Ⅱ-1). 벽공, 방사조직, 세포내강에서 세포내강의 수증기 확산계수를 이용한다면, 방향별 기하학적 수분 확산모델을 Table Ⅱ-1과 같이 제시할 수 있다.

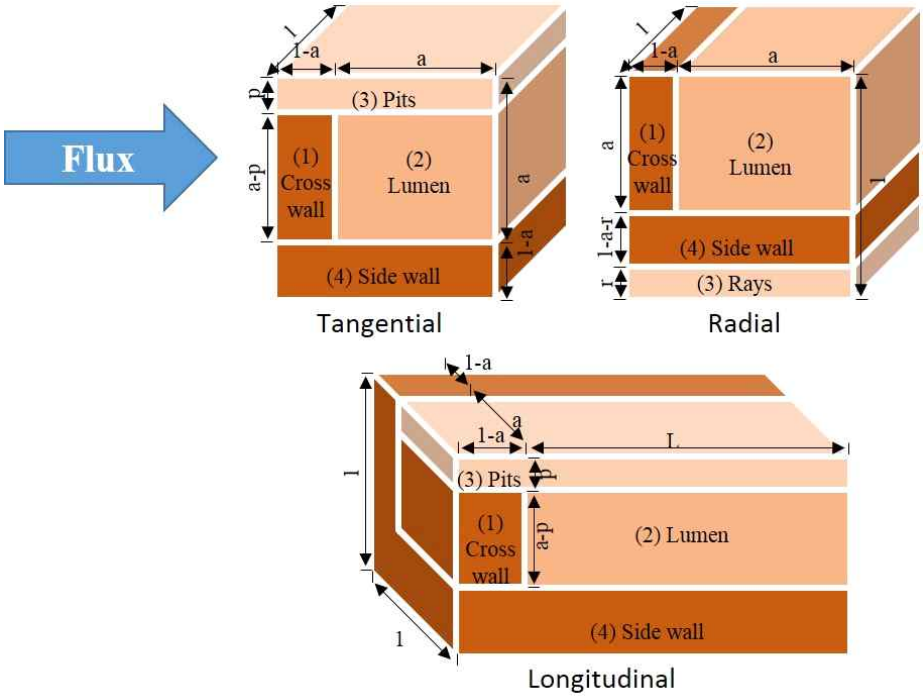


Figure Ⅱ-1. Geometric moisture diffusion model in each direction (Kang *et al.*, 2008; Han, 2014).

Table Ⅱ-1. Geometric moisture diffusion coefficient in each direction (Han, 2014).

Direction	Moisture Diffusion coefficient (m^2/sec)
Tangential	$\frac{(a-p)D_{BT}D_v}{a(1-a^2)D_{BT}+(1-a)(1-a^2)D_v}+\frac{pD_v+(1-a)D_{BT}}{1-a^2}$
Radial	$\frac{(a-p)D_{BT}D_v}{(1-a^2)(aD_{BT}+(1-a)D_v)}+\frac{rD_v+(1-a-r)D_{BT}}{1-a^2}$
Longitudinal	$\left(\frac{a(a-p)D_{BL}D_v}{(1-a^2)(L\cdot D_{BL}+(1-a)D_v)}+\frac{apD_v}{(L+1-a)(1-a^2)}+\frac{D_{BL}}{L+1-a}\right)L$

a^2 = volume fraction of lumen in wood; p = ratio of pits to wood cells; r = ratio of rays to wood cells; D_{BT} = transverse bound-water diffusion coefficient of the cell walls(m^2/s); D_V = diffusion coefficient (m^2/s) of water vapor in the air with in the lumens; L = length of lumen(m); D_{BL} = longitudinal bound-water diffusion coefficient of the cell wall(m^2/s).

2.2.2. 수분방사로 인한 목재 표면 수분이동

목재의 표면수분방사계수는 목재의 외부와 표면 사이에 발생하는 수분이동을 의미하는 계수이다. 비정상상태에서 목재 표면 방사계수를 이론적으로 결정하는 방법은 Yeo와 Smith(2005)가 대류물질전달계수($h_{H_2O,air}$)를 전환하여 제시한 바 있다. 대류물질전달계수를 (식 2-12)에 대입하면 표면에서의 수증기분압과 건구온도에서의 수증기분압, 표면에서 공기로 방출되는 수증기 유속의 관계를 이용해 표면 수분방사계수를 결정할 수 있다(Yeo와 Smith, 2005).

$$h_{H_2O,air} = \frac{0.66 D_{H_2O,air} Re^{1/2} Sc^{1/3}}{L_s} \quad \cdots\cdots \text{(식 2-11)}$$

$$S = h_{H_2O,air} \cdot \frac{\dfrac{M_{H_2O}\, p_s}{RT_s} - \dfrac{M_{H_2O}\, p_e}{RT_{dry}}}{G_{SMC}\, \rho_w \dfrac{SMC}{100} - G_{EMC}\, \rho_w \dfrac{EMC}{100}} \quad \cdots\cdots \text{(식 2-12)}$$

여기에서, $h_{H_2O,air}$는 길이 L_s 에서의 대류물질전달계수 (m/s), $D_{H_2O,air}$는 공기 중 수증기 확산계수 (m^2/s), L_s는 대류가 발생하는 표면 길이 (m), Sc는 Schmidt number, p_s는 목재표면 주위 외기의 수증기압(Pa), p_e는 건구온도에서 외기의 수증기압(Pa), G_{SMC}와 G_{EMC}는 SMC 와 EMC 일 때의 비중, SMC는 표면 함수율(%), EMC는 평형함수율(%), M_{H_2O}는 물의 분자량(18kg/kgmol), T_s는 표면 온도(K), T_{dry}는 건구온도(K)이다.

2.3. 목재 건조 중 열전달 및 수분이동 수치해석

건조 중 목재의 열전달 영향 인자와 수분이동 영향 인자들은 목재의 온도, 함수율에 서로 영향을 받아 지속적으로 변하기 때문에, 건조 중 목재의 열전달과 수분이동 해석은 복잡하다. 이를 해결하기 위하여, 건조 중 목재의 열전달과 수분이동에 대한 상호작용을 고려한 모델을 이용하여 수치해석에 의한 온도와 함수율 변화를 예측한다. 수치해석 방법 중 유한차분법(finite difference method)은 미소 제어체적 내 에너지 및 물질 평형의 관계에 대한 미분식을 차분식으로 근사하여 분석하는 방법이다.

과도열전달상태에서 목재 내부의 열전도로 인한 온도변화는 Fourier's law를 이용한 2차 미분식으로 표현할 수 있다. 따라서 이를 근사시키는 수치해석 방법을 이용하여 목재의 건조, 열처리, torrefaction시 시간에 따른 열전달 분석에 관한 연구가 수행되었다(Pang 등, 1994; 1996; Younsi, 2007; Deliiski, 2011; 한 등, 2016).

섬유포화점 이하의 함수율 조건에서 건조 중 수분이동은 자유수 유동을 제외한 결합수 확산이 대부분을 차지하며, 이는 Fick's second law를 이용한 비정상상태 수분 확산으로 표현할 수 있다. 이를 이용하여 건조 중 목재 내부 수분이동 분석에 관한 수치해석이 연구되었다(Avramidis 등, 1994; Younsi 등, 2006; 2010; da Silva 등, 2014). Avramidis 등(1992)은 70 ℃, 50 %RH 열기건조 중 Douglas fir (*Pseudotsuga menziessi* (Poir.) Britton) 심재에 대한 1차원 유한차분해석을 실시한 바 있다. 또한 목재 건조 중 수분확산에 관한 2차원 해석(Yeo 등, 1994; da Silva 등, 2011, 2014; 한,

2014; Schnabel 등, 2017)과 3차원 수치해석을 이용하여 목재 건조 중 시간에 따른 함수율 예측에 관한 연구가 이루어진 바 있다(Younsi 등, 2010; da Silva 등, 2014; Kim 등, 2017). Kim 등(2017)은 3차원 유한차분법을 이용하여 고온 건조 중 목재 내 수분 분포를 예측하였으며, 실제 고온건조 중 할렬이 발생하여 건조 후기에 오차가 발생했다고 보고하였다.

100 ℃이상의 건구온도 조건에서 목재의 열전달과 수분이동을 해석하는 연구는 주로 180 ℃이상의 고온에서 목재를 열처리하는 공정에 관한 연구가 이루어졌다(Fredlund, 1993; Younsi 등, 2008; Cai, 2010). Fredlund(1993)는 목재 탄화 중 수분이동 모델링에 관한 연구에서 탄화과정 초기에 온도가 낮은 목재 중심부로 수분이 응축하여 목재 중심부의 함수율이 높아지는 현상이 발생했다고 보고하였다.

2.3.1. 3차원 유한차분법을 이용한 온도 분포 예측

과도열전달상태에서 주위 절점간의 열전도만 발생하는 내부절점에 대한 열전달 방정식은 3차원 시스템에서 (식 2-13)과 같이 표현할 수 있다(Figure Ⅱ-2(a)).

$$k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad \cdots\cdots (식\ 2\text{-}13)$$

여기에서, k_x, k_y, k_z는 각각 x, y, z방향으로의 열전도계수(W/m·℃), T는 온도(℃), ρ는 밀도(kg/m^3), c는 비열(J/kg·℃), x, y와 z는 x, y, z 방향으로의 거리(m), 그리고 t는 시간(sec)이다.

식 (2-13)에서 각 방향 별 열전도로 인한 열전달을 나타내는 2차 미분항은 (식 2-14) ~ (식 2-16)과 같이 차분식을 이용해 근사적으로 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \approx \frac{T^p_{m+1,n,l} + T^p_{m-1,n,l} - 2T^p_{m,n,l}}{(\triangle x)^2} \quad \cdots\cdots (식\ 2\text{-}14)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \approx \frac{T^p_{m,n+1,l} + T^p_{m,n-1,l} - 2T^p_{m,n,l}}{(\triangle y)^2} \quad \cdots\cdots (식\ 2\text{-}15)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \approx \frac{T^p_{m,n,l+1} + T^p_{m,n,l-1} - 2T^p_{m,n,l}}{(\triangle z)^2} \quad \cdots\cdots (식\ 2\text{-}16)$$

여기에서, m, n과 l 은 x, y, z 방향별 위치를 나타내는 수이며, p는 p번째 시점을 나타내는 수, Δx, Δy와 Δz는 거리 증분(m)이다.

또한 (식 2-13)의 시간에 대한 미분항을 (식 2-17)과 같이 근사적으로 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} \approx \frac{T_{m,n,l}^{p+1} - T_{m,n,l}^{p}}{\triangle t} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \text{(식 2-17)}$$

여기에서, Δt는 시간 증분(sec)이다.

(식 2-13)에 (식 2-14) ~ (식 2-17)을 대입하면 $p+1$시점에서 열대류가 발생하지 않는 내부 절점의 온도에 관한 (식 2-18)로 정리할 수 있다.

$$k_x \frac{T_{m+1,n,l}^{p} + T_{m-1,n,l}^{p} - 2T_{m,n,l}^{p}}{(\triangle x)^2} + k_y \frac{T_{m,n+1,l}^{p} + T_{m,n-1,l}^{p} - 2T_{m,n,l}^{p}}{(\triangle y)^2}$$

$$+ k_z \frac{T_{m,n,l+1}^{p} + T_{m,n,l-1}^{p} - 2T_{m,n,l}^{p}}{(\triangle z)^2} = \rho c \frac{T_{m,n,l}^{p+1} - T_{m,n,l}^{p}}{\triangle t} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \text{(식 2-18)}$$

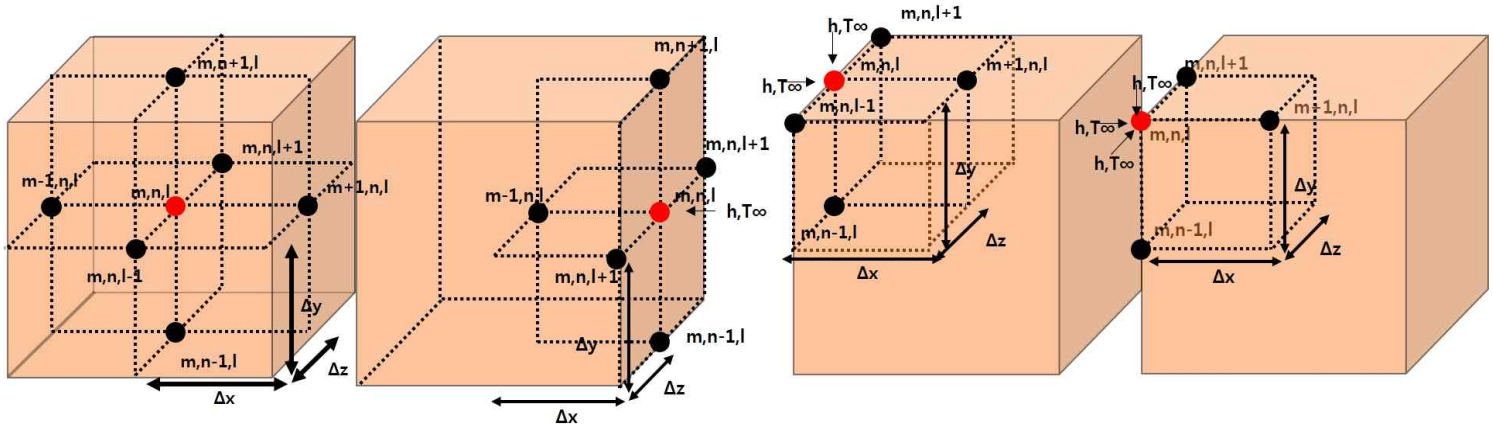


Figure Ⅱ-2. A schematic view of the joints along the convective boundary where thermal convection occurs in the three-dimensional finite differential analysis. (a) the internal nodes, (b) the surface nodes, at which thermal convection occurs in one direction, (c) the edge nodes, at which thermal convection occurs in two directions, and (d) the vertex nodes, at which thermal convection occurs in three directions.

대류경계면에서의 열유동은 열대류계수를 이용한 에너지평형을 통해 나타낼 수 있다. 1차원계 대류경계면에서의 에너지 평형은 (식 2-19)와 같이 나타낼 수 있다.

$$-k\frac{\partial T}{\partial x}\Big]_{suface} = h(T_{surface} - T_{\infty}) \quad \cdots\cdots (식\ 2\text{-}19)$$

여기에서, h는 열대류계수(W/m^2·℃), T_{∞}는 건구온도(℃)이며, $T_{surface}$는 목재의 표면 온도(℃)이다.

(식 2-19)를 이용하여 Figure Ⅱ-2(b)와 같이 3차원에서 x 방향으로 열대류가 발생하는 외표면 절점의 차분방정식을 (식 2-20)과 같이 표현할 수 있다.

$$k_x \triangle y \triangle z \frac{T^p_{m-1,n,l} - T^p_{m,n,l}}{\triangle x} + k_y \frac{\triangle x}{2} \triangle z \frac{T^p_{m,n+1,l} + T^p_{m,n-1,l} - 2T^p_{m,n,l}}{\triangle y}$$

$$+ k_z \frac{\triangle x}{2} \triangle y \frac{T^p_{m,n,l+1} + T^p_{m,n,l-1} - 2T^p_{m,n,l}}{\triangle z} + h \triangle z \triangle y (T_{\infty} - T^p_{m,n,l})$$

$$= \rho c \frac{\triangle x}{2} \triangle y \triangle z \frac{T^{p+1}_{m,n,l} - T^p_{m,n,l}}{\triangle t} \quad \cdots\cdots (식\ 2\text{-}20)$$

이와 동일한 방법으로 Figure Ⅱ-2(c)와 같이 두 면(x, y 방향)으로 열대류가 발생하는 모서리 절점은 (식 2-21)로, FigureⅡ-2(d)와 같이 세 면(x, y, z 방향)으로 열대류가 발생하는 꼭지점 절점의 차분방정식을 (식 2-22)로 표현할 수 있다.

$$k_x \frac{\triangle y}{2} \triangle z \frac{T^p_{m+1,n,l} - T^p_{m,n,l}}{\triangle x} + k_y \frac{\triangle x}{2} \triangle z \frac{T^p_{m,n-1,l} - T^p_{m,n,l}}{\triangle y}$$

$$+ k_z \frac{\triangle x}{2} \frac{\triangle y}{2} \frac{T^p_{m,n,l+1} + T^p_{m,n,l-1} - 2T^p_{m,n,l}}{\triangle z} + h \frac{\triangle y}{2} \triangle z (T_\infty - T^p_{m,n,l})$$

$$+ h \frac{\triangle x}{2} \triangle z (T_\infty - T^p_{m,n,l}) = \rho c \frac{\triangle x}{2} \frac{\triangle y}{2} \triangle z \frac{T^{p+1}_{m,n,l} - T^p_{m,n,l}}{\triangle t} \quad \cdots\cdots \text{(식 2-21)}$$

$$k_x \frac{\triangle y}{2} \frac{\triangle z}{2} \frac{T^p_{m+1,n,l} - T^p_{m,n,l}}{\triangle x} + k_y \frac{\triangle x}{2} \frac{\triangle z}{2} \frac{T^p_{m,n-1,l} - T^p_{m,n,l}}{\triangle y}$$

$$+ k_z \frac{\triangle x}{2} \frac{\triangle y}{2} \frac{T^p_{m,n,l+1} - T^p_{m,n,l}}{\triangle z} + h \frac{\triangle y}{2} \frac{\triangle z}{2} (T_\infty - T^p_{m,n,l})$$

$$+ h \frac{\triangle x}{2} \frac{\triangle z}{2} (T_\infty - T^p_{m,n,l}) + h \frac{\triangle x}{2} \frac{\triangle y}{2} (T_\infty - T^p_{m,n,l})$$

$$= \rho c \frac{\triangle x}{2} \frac{\triangle y}{2} \frac{\triangle z}{2} \frac{T^{p+1}_{m,n,l} - T^p_{m,n,l}}{\triangle t} \quad \cdots\cdots \text{(식 2-22)}$$

(식 2-18), (식 2-20), (식 2-21), (식 2-22)는 시간 t가 0인 초기 상태에서 구하고자 하는 시점의 절점온도를 표현한 전진차분기법을 바탕으로 정리된 식이다. 전단계의 각 절점온도T^p를 이용하여 T^{p+1}을 명확하게 표현할 수 있으며, 최종상태까지 직접적인 계산을 통해 온도 변화를 계산할 수 있다.

전진차분법을 이용할 경우, 수치적으로 구한 해의 수렴성을 확보하지 않으면 예측 결과는 시간이 지날수록 목표 온도에 수렴하지 않고 진동 또는 발산하여 큰 오차를 발생시킨다. 이를 충족시키기 위해서는 거리증분 Δx, Δy, Δz 값과 시간증분 Δt 값을 조절하여 수렴성을 충족시켜야 한다. (식 2-18)에 대한 수렴조건은 (식 2-23)과 같다.

$$\left(1-\frac{2k_x\Delta t}{\rho c(\Delta x)^2}-\frac{2k_y\Delta t}{\rho c(\Delta y)^2}-\frac{2k_z\Delta t}{\rho c(\Delta z)^2}\right)\leq 1 \quad \cdots\cdots (식\ 2\text{-}23)$$

이를 무차원 수인 각 방향별 Fourier 수(Fo)와 Biot 수(Bi)로 간단히 표현 할 수 있다. x 방향에 관한 Fourier 수와 Biot 수는 각각 (식 2-24)와 (식 2-25)로 정의할 수 있다.

$$Fo_x=\frac{k_x\Delta t}{\rho c(\Delta x)^2} \quad \cdots\cdots (식\ 2\text{-}24)$$

$$Bi_x=\frac{h\Delta x}{k_x} \quad \cdots\cdots (식\ 2\text{-}25)$$

(식 2-24)를 대입하면 (식 2-23)을 (식 2-26)과 같이 간단히 할 수 있다.

$$\left(1-2Fo_x-2Fo_y-2Fo_z\right)\leq 1 \quad \cdots\cdots (식\ 2\text{-}26)$$

같은 방법으로 (식 2-20), (식 2-21), (식 2-22)의 수렴조건은 각각 (식 2-27), (식 2-28), (식 2-29)로 결정할 수 있다.

$$\left(1-2Fo_x-2Fo_y-2Fo_z-2Bi_x\right)\leq 1 \quad \cdots\cdots \text{(식 2-27)}$$

$$\left(1-2Fo_x-2Fo_y-2Fo_z-2Bi_x-2Bi_y\right)\leq 1 \quad \cdots\cdots \text{(식 2-28)}$$

$$\left(1-2Fo_x-2Fo_y-2Fo_z-2Bi_x-2Bi_y-2Bi_z\right)\leq 1 \quad \cdots\cdots \text{(식 2-29)}$$

2.3.2. 3차원 유한차분법을 이용한 함수율 분포 예측

비정상상태에서 수분방사가 발생하지 않는 내부 절점을 3차원 시스템 내에서 표현하면 Figure Ⅱ-3(a)와 같다. Figure Ⅱ-3(a)에서 절점 (m, n, l)의 물질 평형은 주변과의 수분 확산에 관한 식으로 표현가능하다. 목재 내부 수분이동을 Fick's second law에 따라 표현하면 (식 2-30)과 같이 표현 할 수 있다.

$$D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} = \frac{\partial C}{\partial t} \quad \text{(식 2-30)}$$

여기에서, C는 수분농도(kg/m^3), D_x, D_y, D_z는 각각 x, y, z방향으로의 수분확산계수(m^2/sec), x, y, z는 x, y, z 방향으로의 거리(m), 그리고 t는 시간(sec)이다.

(식 2-30)에서 방향별 수분확산에 관련된 2차 미분항은 (식 2-31) ~ (식 2-33)과 같이 차분식을 이용해 근사적으로 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \approx \frac{C^p_{m+1,n,l} + C^p_{m-1,n,l} - 2C^p_{m,n,l}}{(\triangle x)^2} \quad \text{(식 2-31)}$$

$$\frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \approx \frac{C^p_{m,n+1,l} + C^p_{m,n-1,l} - 2C^p_{m,n,l}}{(\triangle y)^2} \quad \text{(식 2-32)}$$

$$\frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \approx \frac{C^p_{m,n,l+1} + C^p_{m,n,l-1} - 2C^p_{m,n,l}}{(\triangle z)^2} \quad \text{(식 2-33)}$$

여기에서, m, n과 l은 x, y, z방향별 위치를 나타내는 번호이며, p는 p번째 시점을 나타내는 수이다.

또한 (식 2-30)의 시간에 대한 미분항을 (식 2-34)와 같이 근사적으로 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} \approx \frac{C_{m,n,l}^{p+1} - C_{m,n,l}^{p}}{\triangle t} \quad \cdots\cdots (식\ 2\text{-}34)$$

(식 2-30)에 (식 2-31) ~ (식 2-34)를 대입하면 p+1시점에서 내부 절점(m,n,l)의 수분확산에 관한 차분식으로 정리가 가능하다.

$$D_x \frac{C_{m+1,n,l}^{p} + C_{m-1,n,l}^{p} - 2C_{m,n,l}^{p}}{(\triangle x)^2} + D_y \frac{C_{m,n+1,l}^{p} + C_{m,n-1,l}^{p} - 2C_{m,n,l}^{p}}{(\triangle y)^2}$$

$$+ D_z \frac{C_{m,n,l+1}^{p} + C_{m,n,l-1}^{p} - 2C_{m,n,l}^{p}}{(\triangle z)^2} = \frac{C_{m,n,l}^{p+1} - C_{m,n,l}^{p}}{\triangle t} \quad \cdots\cdots (식\ 2\text{-}35)$$

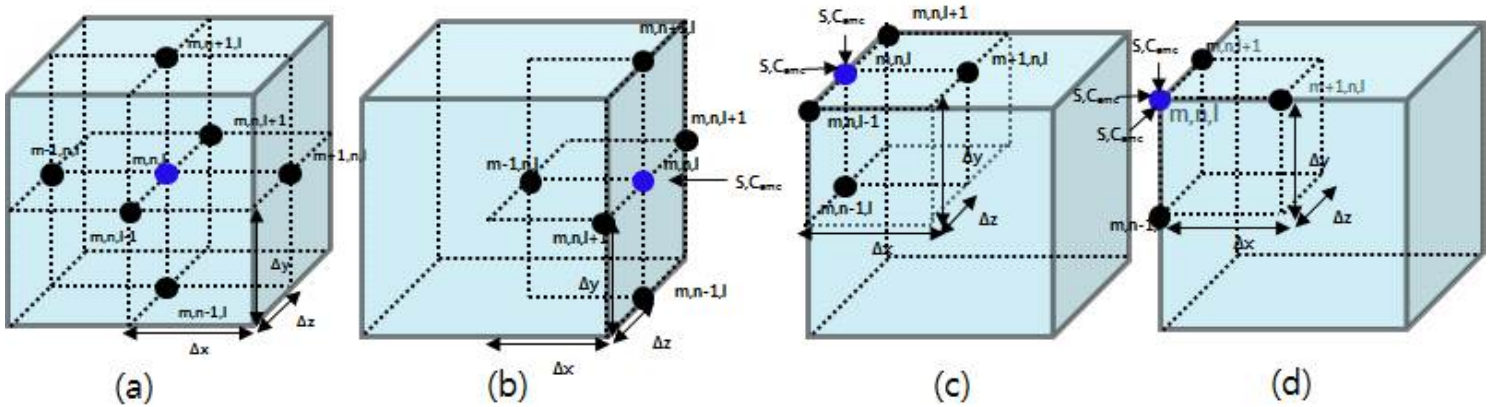


Figure Ⅱ-3. A schematic view of the joints along the convective boundary where surface moisture emission occurs in the three-dimensional finite differential analysis. (a) the internal nodes, (b) the surface nodes, at which surface moisture emission occurs in one direction, (c) the edge nodes, at which surface moisture emission occurs in two directions, and (d) the vertex nodes, at which surface moisture emission occurs in three directions.

외부공기로의 수분 방사가 일어나는 대류경계면에서의 수분이동은 수분방사계수를 이용한 물질 평형을 통해 나타낼 수 있다. 1차원계 대류경계면에서의 물질 평형은 식(2-36)과 같이 나타낼 수 있다.

$$-D\frac{\partial C}{\partial x}\Big]_{suface} = S(C_{surface} - C_e) \quad \cdots\cdots \text{(식 2-36)}$$

여기에서, S는 표면 수분방사계수(m/sec), C_e는 외기에서 평형을 이루는 수분농도(kg/m^3), $C_{surface}$는 목재 표면의 수분농도(kg/m^3)이다.

(식 2-36)를 이용하여 Figure Ⅱ-3(b)와 같이 3차원에서 x 방향으로 수분방사가 발생하고, 다른 방향으로는 수분확산이 발생하는 외표면 경계 절점의 차분방정식을 (식 2-37)과 같이 표현할 수 있다.

$$D_x \triangle y \triangle z \frac{C^p_{m-1,n,l} - C^p_{m,n,l}}{\triangle x} + D_y \frac{\triangle x}{2} \triangle z \frac{C^p_{m,n+1,l} + C^p_{m,n-1,l} - 2C^p_{m,n,l}}{\triangle y}$$

$$+ D_z \frac{\triangle x}{2} \triangle y \frac{C^p_{m,n,l+1} + C^p_{m,n,l-1} - 2C^p_{m,n,l}}{\triangle z} + S \triangle z \triangle y (C_e - C^p_{m,n,l})$$

$$= \frac{\triangle x}{2} \triangle y \triangle z \frac{C^{p+1}_{m,n,l} - C^p_{m,n,l}}{\triangle t} \quad \cdots\cdots \text{(식 2-37)}$$

이와 동일한 방법으로 Figure Ⅱ-3(c)와 같이 두 면(x, y 방향)으로 수분방사가 발생하는 모서리 절점은 (식 2-38)로, FigureⅡ-3(d)와 같이 세 면(x, y, z 방향)으로 수분방사가 발생하는 꼭지점 절점의 차분방정식을 (식 2-39)로 표현할 수 있다.

$$D_x \frac{\triangle y}{2} \triangle z \frac{C^p_{m+1,n,l} - C^p_{m,n,l}}{\triangle x} + D_y \frac{\triangle x}{2} \triangle z \frac{C^p_{m,n-1,l} - C^p_{m,n,l}}{\triangle y}$$

$$+ D_z \frac{\triangle x}{2} \frac{\triangle y}{2} \frac{C^p_{m,n,l+1} + C^p_{m,n,l-1} - 2C^p_{m,n,l}}{\triangle z} + S \frac{\triangle y}{2} \triangle z (C_e - C^p_{m,n,l})$$

$$+ S \frac{\triangle x}{2} \triangle z (C_e - C^p_{m,n,l}) = \frac{\triangle x}{2} \frac{\triangle y}{2} \triangle z \frac{C^{p+1}_{m,n,l} - C^p_{m,n,l}}{\triangle t} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \text{(식 2-38)}$$

$$D_x \frac{\triangle y}{2} \frac{\triangle z}{2} \frac{C^p_{m+1,n,l} - C^p_{m,n,l}}{\triangle x} + D_y \frac{\triangle x}{2} \frac{\triangle z}{2} \frac{C^p_{m,n-1,l} - C^p_{m,n,l}}{\triangle y}$$

$$+ D_z \frac{\triangle x}{2} \frac{\triangle y}{2} \frac{C^p_{m,n,l+1} - C^p_{m,n,l}}{\triangle z} + S \frac{\triangle y}{2} \frac{\triangle z}{2} (C_e - C^p_{m,n,l})$$

$$+ S \frac{\triangle x}{2} \frac{\triangle z}{2} (C_e - C^p_{m,n,l}) + S \frac{\triangle x}{2} \frac{\triangle y}{2} (C_e - C^p_{m,n,l})$$

$$= \frac{\triangle x}{2} \frac{\triangle y}{2} \frac{\triangle z}{2} \frac{C^{p+1}_{m,n,l} - C^p_{m,n,l}}{\triangle t} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \text{(식 2-39)}$$

(식 2-35), (식 2-37), (식 2-38), (식 2-39)은 전진차분기법을 바탕으로 정리된 식이다. 이전 시점에서 예측된 각 절점의 수분농도 C^{p}를 이용하여 다음 시점의 수분농도 C^{p+1}을 명확하게 표현가능하기 때문에 최종상태까지 직접적인 계산을 통해 함수율 변화를 예측 가능하다. (식 2-35)에 대한 수렴 조건은 (식 2-40)과 같다.

$$\left(1-\frac{2D_x\triangle t}{(\triangle x)^2}-\frac{2D_y\triangle t}{(\triangle y)^2}-\frac{2D_z\triangle t}{(\triangle z)^2}\right)\leq 1 \quad \cdots\cdots \text{(식 2-40)}$$

같은 방법으로 (식 2-37), (식 2-38), (식 2-39)의 수렴조건을 각각 (식 2-41), (식 2-42), (식 2-43)으로 결정할 수 있다.

$$\left(1-\frac{2D_x\triangle t}{(\triangle x)^2}-\frac{2D_y\triangle t}{(\triangle y)^2}-\frac{2D_z\triangle t}{(\triangle z)^2}-\frac{2S\triangle x}{D_x}\right)\leq 1 \quad \cdots\cdots \text{(식 2-41)}$$

$$\left(1-\frac{2D_x\triangle t}{(\triangle x)^2}-\frac{2D_y\triangle t}{(\triangle y)^2}-\frac{2D_z\triangle t}{(\triangle z)^2}-\frac{2S\triangle x}{D_x}-\frac{2S\triangle y}{D_y}\right)\leq 1 \quad \cdots\cdots \text{(식 2-42)}$$

$$\left(1-\frac{2D_x\triangle t}{(\triangle x)^2}-\frac{2D_y\triangle t}{(\triangle y)^2}-\frac{2D_z\triangle t}{(\triangle z)^2}-\frac{2S\triangle x}{D_x}-\frac{2S\triangle y}{D_y}-\frac{2S\triangle z}{D_z}\right)\leq 1 \text{(식 2-43)}$$

2.4. 고온 건조

고온 건조는 건구 온도가 100 ℃ 이상인 조건에서 목재를 건조하는 공정으로 주로 함수 공기 또는 과열증기를 이용하는 공정이 연구되었다(Baranski, 2018). 고온 건조는 건조 중 표면할렬이나 내부할렬이 발생하기 쉽기 때문에 섬유포화점 이하의 목재를 추가적으로 건조시키기 위해 고온건조를 이용하는 연구가 수행되었다(Basilico 등, 1990).

고온 건조 중 목재 표면의 색상이 황색 또는 황갈색으로 변색되는 특징이 있으며, 이에 관해 헤미셀룰로오스 변성이 원인이라 보고된 바 있다(Sehlstedt-Persson, 1995). 또한 고온에서 목재 세포가 열분해 되어 강도가 감소한다고 보고된 바 있다(Langrish, 1992).

100 ℃이상의 공기를 이용하여 목재를 건조하는 경우, 관행 열기건조에 비해 2배 ~ 6배 이상 건조 속도가 향상되며, 이는 높은 건구온도 조건으로 인한 낮은 평형함수율 형성과 높은 온도에 노출된 목재의 흡습성이 낮아지는 것이 원인이라 보고된 바 있다(Espenas, 1971; Obataya, 2005). Konopka 등(2015)은 함수율 15%의 판재를 120 ℃, 48 %RH 조건하에 고온 건조를 진행하였을 때, 목재 내부에 응력이 발생하지 않았다고 보고하였다. 하지만 섬유포화점 이상의 목재에서는 목재 표면이 빠르게 건조되면서 내부할렬이 발생하였다(Langrish, 1992). Baranski(2018)는 고온 건조 중 목재 온도 및 함수율을 측정하여 섬유포화점 이상의 함수율에서 건구온도를 100 ℃ 이상으로 높이면 건조 결함이 발생하기 때문에 100 ℃ 이상으로 온도를 높이는 시점이 목재 품질에 영향을 미칠 것이라 보고하였다.

제 3 절

재료 및 방법

3.1. 공시재료

본 연구에서는 낙엽송(Larix kaempferi) 대단면재를 사용하였다. 한 변의 길이가 각각 120 mm, 210 mm, 250 mm인 세 종류의 낙엽송 정각재가 사용되었고, 길이는 모두 3,500 mm이었다. 초기 평균 함수율은 120 mm 정각재는 37.59%, 210 mm 정각재는 43.13%, 250 mm 정각재는 41.85%였으며, 초기 온도는 약 16 ℃로 측정되었다.

일반적으로 실대재를 건조할 때에는 말단부에서 횡단면을 통해 과도한 수분 이탈에 따른 건조 결함이 발생하는 것을 방지하기 위해 말단부 횡단면을 우레탄 페인트 등을 이용하여 실링 하는 경우가 많다(end-coating). 본 연구의 실제 고온 건조에서도 우레탄 페인트를 말단부 횡단면에 도포하였으며, 예측시스템에도 이를 반영하여 말단부에서 섬유방향으로 수분방사가 일어나지 않도록 설정하였다.

3.2. 예측 시스템

고온 건조 중 목재 내부 온도 및 함수율 분포 예측에 이용한 수치해석 방법은 3차원 유한차분법(Three Dimensional Finite Difference Method)이며, 목재 열전달과 수분이동에 대한 지배식은 (식 2-13)과 (식 2-30)을 이용하였다. 대류 경계 절점의 경우 에너지 평형과 물질 평형을 이용하여 온도 및 함수율 변화에 관한 차분식을 결정하였다.

건조 조건은 Table Ⅲ-1과 같다. 건조 시작 후 48시간까지 건구온도 85 ℃ 습구온도 70 ℃ 조건으로 목재 내부 온도를 승온시킨 후, 240시간 동안 100 ℃ 이상의 건구온도 조건에 노출시켜 고온 건조를 진행하는 조건을 적용하였다.

Table Ⅲ-1. High temperature drying condition.

time(hour)	Dry bulb temperature(℃)	Wet bulb temperature(℃)
0-48	85	70
48-120	120	70
120-288	112	70

시스템 구성은 Figure Ⅲ-1과 같다. 초기 물성 값을 온도 예측에 입력한 뒤, 예측된 온도 데이터를 초기 수분이동 관련 물성값과 함께 함수율 예측에 입력하여 함수율을 예측하였다. 이전 시점의 온도와 함수율을 이용하여 결정한 열전달 영향 인자와 수분이동 영향 인자들을 다음 시점의 온도와 함수율 데이터 예측에 이용하여, 열전달 영향인자와 수분이동 영향인자들이 그 시점의 온도와 함수율에 따라 변화하며, 온도 분포 예측과 함수율 분포 예측이 서로 상호작용하는 시스템을 구성하였다.

예측에 사용한 모델은 Figure Ⅲ-2에 제시한 직육면체 형태의 모델이다. 전진차분으로 건조 중 목재 내부 온도 및 함수율 예측을 진행하기 때문에 전진차분식의 수렴조건인 (식 2-26) ~ (식 2-29)와 (식 2-40) ~ (식 2-43)을 만족시키기 위해 폭방향(Δx)과 두께방향(Δy) 증분값을 단면 크기 별로 120 mm 정각재는 20 mm, 210 mm 정각재는 35 mm, 250 mm 정각재는 41.7 mm로 설정하였으며, 모든 단면크기 조건에서 길이방향 증분(Δz)은 50 mm, 시간 증분(Δt)은 75 초로 설정하여 전 구간에서 차분식의 수렴조건을 만족시켰다. 수치해석에 이용한 프로그램은 Microsoft Office Excel 2013이다.

예측 시스템에 표면 할렬 발생을 반영하기 위해 실제 건조 중 측정된 할렬의 길이를 예측 시스템에 적용시켰다. 재면 당 평균 할렬 길이가 시험재 길이의 50 % 이상으로 측정된 시점부터 할렬이 목재 표면 수분 방사에 미치는 영향이 크다고 가정하여 Figure Ⅲ-2에 제시한 할렬 고려 모델(Crack considered model)로 변경하여 예측을 다시 진행하였다. 할렬 고려 모델은 목재 길이 방향 전체에 일정한 깊이의 할렬이 발생한 경우를 가정한 모델이다.

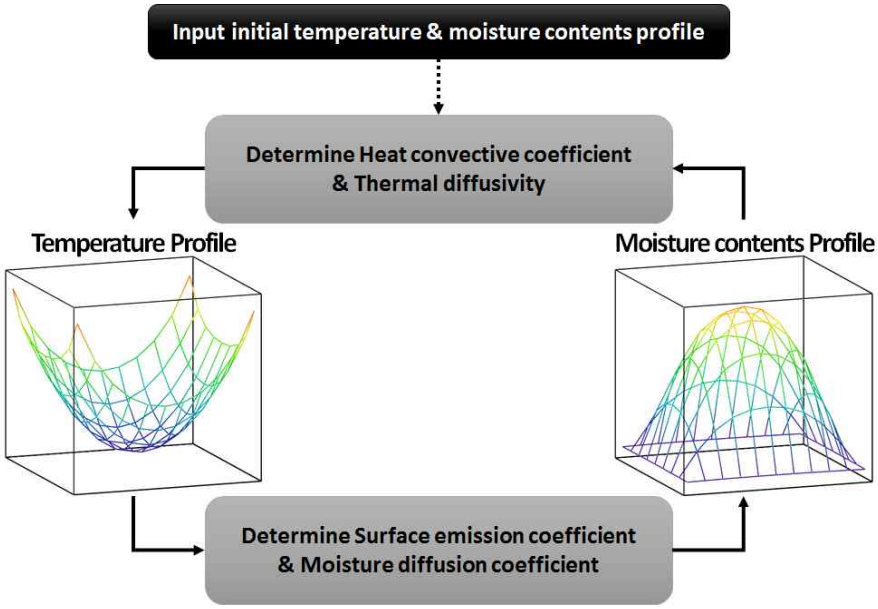


Figure Ⅲ-1. Schematic diagram of prediction for temperature and moisture content distribution.

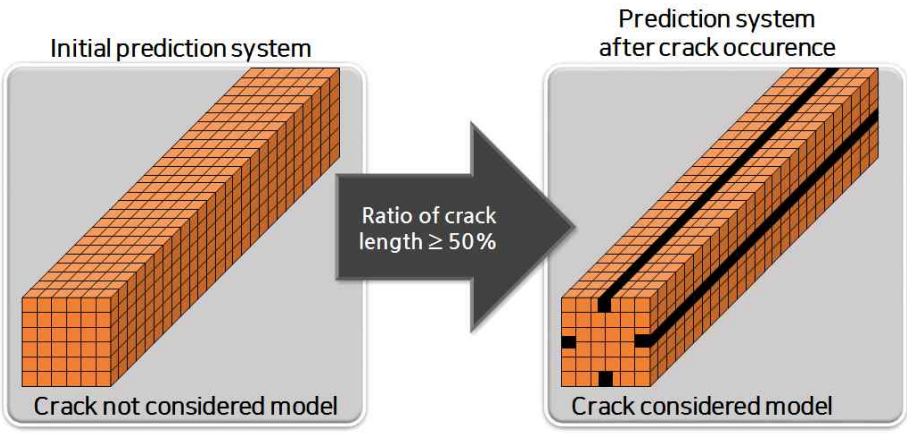


Figure Ⅲ-2. Schematic diagram of prediction system when surface crack occurred.

3.2.1. 목재의 열전달 영향 인자 결정

대류경계절점에서의 차분식 결정에 필요한 열대류계수(h)는 (식 2-1)을 이용하여 결정하였다. 3.5 m 길이의 목재가 풍속 2 m/s로 건조될 경우, 온습도 변화에 따른 열대류계수는 Figure Ⅲ-3과 같다.

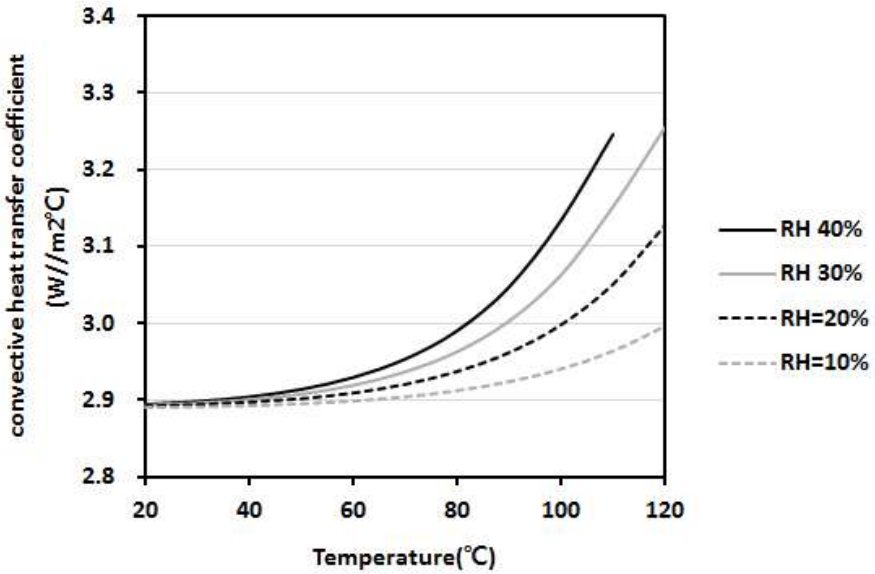


Figure Ⅲ-3. Convective heat transfer coefficient for temperature and relative humidity.

목재 건조 중 온도 변화 예측에 이용할 열 확산계수(a)를 결정하기 위해서 열전도계수(K), 비열(c), 밀도(ρ)를 결정해야 한다. 횡단방향 열전도계수(k_T)는 MacLean(1941)이 제시한 (식 2-4)와 (식 2-5)를 통해 결정하였다. 섬유방향 열전도계수는 횡단방향 열전도계수의 2 ~ 2.75배라고 보고된 바 있다(MacLean, 1941). 따라서 본 연구에서는 식 (3-1)을 이용하여 섬유방향 열전도계수를 결정하였다.

$$k_L = 2.5k_T \quad \cdots\cdots (식\ 3\text{-}1)$$

여기에서, k_L은 섬유방향 열전도계수(W/m℃), k_T는 횡단방향 열전도계수(W/m℃)이다.

목재의 비열은 Siau(1995)가 제시한 (식 2-7)을 이용하여 결정하였다. 온도에 따른 낙엽송의 전건 비열은 시차주사열량계(Q200, TA instruments)를 사용하여 측정하였다. 시차주사열량계를 사용해 열유속 차이를 측정한 뒤, 이를 (식 3-2)에 대입하여 열용량을 계산하여 목재의 전건 비열을 결정하였으며. 승온 속도 5 ℃/min, 측정온도범위 20 ~ 120 ℃에서 측정한 낙엽송의 전건 비열은 Figure Ⅲ-6과 같다.

$$\frac{dQ}{dt} = C\frac{dT}{dt} \quad \cdots\cdots (식\ 3\text{-}2)$$

여기에서, dQ/dt 는 열유속(W), dT/dt는 승온속도(℃/min), 그리고 C는 물질의 열용량(J/℃)이다.

목재의 비중은 열전도계수, 비열, 수분확산계수의 결정에 영향을 미치는 주요한 인자이다. 본 연구에서는 KS 2198 『목재의 밀도 및 비중 측정 방법』에 따라 측정된 전건비중을 이용하였으며, 측정된 낙엽송 전건비중은 0.49(±0.03)였다. 목재의 함수율에 따른 밀도 ρ_{MC}는 Siau(1995)에 제시된 (식 3-3)을 이용하여 결정하였다.

$$\rho_{MC} = G_{MC}(1+0.01MC)\rho_w \quad \text{(식 3-3)}$$

여기에서, ρ_{MC}는 함수율에 따른 목재 밀도(kg/m^3), G_{MC}는 함수율에 따른 목재 비중, MC는 함수율(%), ρ_w는 물의 밀도(kg/m^3)이다.

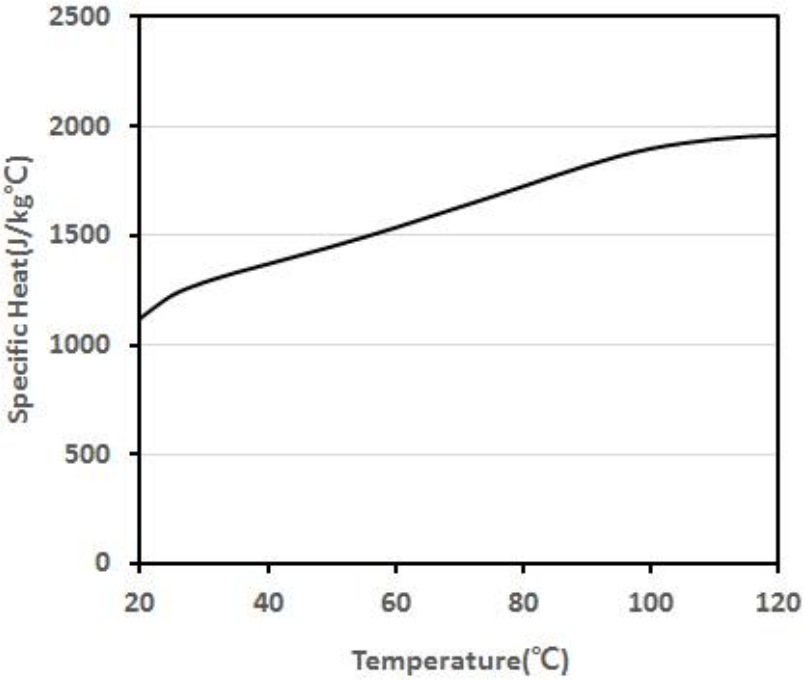


Figure Ⅲ-4. Specific heat of oven-dried larch wood.

3.2.2. 목재의 수분이동 영향 인자 결정

함수율 분포 예측에 필요한 낙엽송재의 수분확산계수(D)는 Kang 등(2008)이 제시한 기하학적 수분확산계수를 이용하였다. 섬유방향, 방사방향, 접선방향에 대한 수분확산계수는 Table Ⅱ-1에 제시한 식을 통해 결정하였다. 섬유방향 세포벽의 결합수 수분확산계수(D_{BL})는 횡단방향 수분확산계수의 2.5배로 가정하였다. 목재 세포의 공극률(a^2)은 목재비중과 함수율을 이용하여 (식 3-4)를 통해 결정하였다.

$$a^2 = 1 - G\left(\frac{1}{1.53} + \frac{MC}{100}\right) \quad \cdots\cdots (식\ 3\text{-}4)$$

여기에서, G는 목재 비중, MC는 목재 함수율(%)이다.

120 mm 이상의 폭과 두께를 가지는 대단면 정각재의 경우, 대부분 수(pith)를 포함하고 있는 수심 정각재이다. 이 경우에 수의 편향 등으로 인해 개체별 수의 위치가 일정하지 않아 예측 시스템에서 절점 별 목재의 방사방향과 접선방향을 정확히 지정할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 접선방향의 수분확산계수와 방사방향의 수분확산계수를 평균하여 계산된 횡단방향 수분확산계수(D_T)를 결정하여 함수율 예측에 이용하였다.

Kang 등(2005)이 제시한 기하학적 수분확산모델을 적용하기 위해서는 목재 세포 대비 벽공의 비율(p)과 방사조직의 비율(r)이 필요하다. 따라서 낙엽송 목재세포의 실제 치수를 적용하기 위해 각각의 단면을 전자현미경(SIGMA FE-SEM, Carl Zeiss, England)을 사용하여 분석하였다. 전자현미경을 통해 낙엽송의 세포요소 중 종축 가도관의 직경과 방사가도관의 길이, 벽공 개구부의 유효직경을 측정하였으며, 그 결과는 Table Ⅲ-2에 제시하였다. 측정값은 Siau(1995)가 제시한 침엽수재 내 종축가도관 직경 35 μm, 벽공 개구부 유효직경 0.02~4.0 μm와 유사하였다. 목재 세포 대비 벽공의 비율(p)과 방사조직의 비율(r)은 (식 3-5)와 (식 3-6)를 통해 계산가능하며, 전자현미경을 사용하여 측정한 값과 Eom (2015)에 제시한 낙엽송의 세포요소 측정결과를 이용하였다. 그 결과, 단위면적에 대한 벽공 비율(p)은 0.00271, 방사조직의 비율(r)은 0.0111로 나타났다.

p = (단위면적 당 가도관 수) × (가도관 당 벽공 개수) × (벽공 면적) …… (식 3-5)

r = (단위면적당 방사세포 수) × (방사세포 당 벽공 개수) × (벽공 면적) …… (식 3-6)

대류 경계 절점에서의 함수율 예측에 필요한 수분방사계수(S)는 Yeo와 Smith(2005)가 제시한 대류물질전달계수 전환식을 이용하였다((식 2-12)). 이 때, 목재 표면의 수증기압(p_s)은 습구온도에서의 포화수증기압과 동일하다고 가정하였으며, 포화수증기압은 Kirchhoff 식을 이용하여 계산하였다(Siau, 1995).

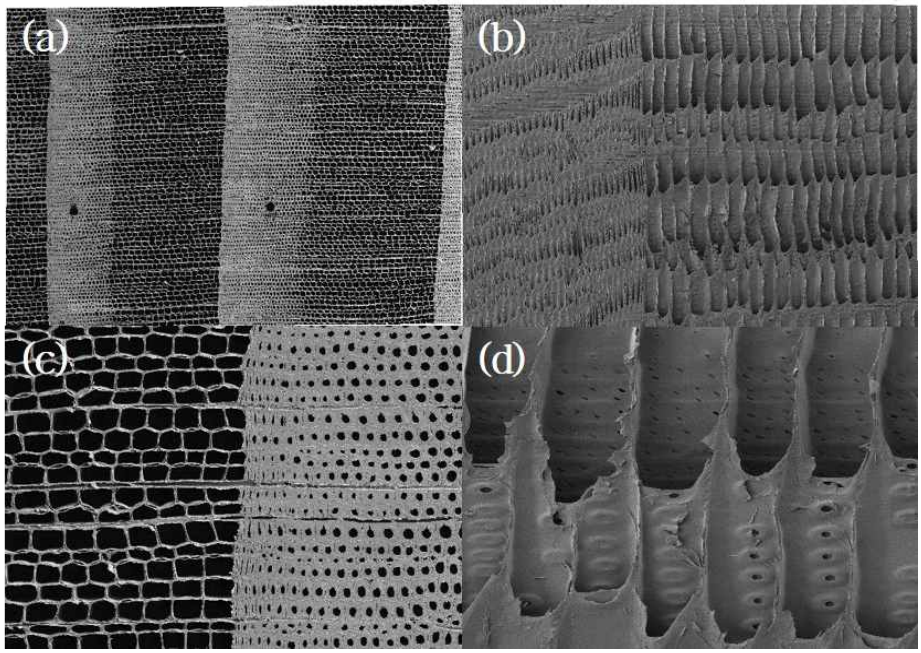


Figure Ⅲ-5. SEM image of larch wood. (a) cross section; (b) radial section; (c) longitudinal tracheid; (d) effective diameter of pit opening..

Table Ⅲ-2. Dimensions of larch wood elements.

Structural element	Dimension mean value±SD (range)
Tracheid diameter (μm)	34.4 ± 1.2 (5.9 - 79.4)
Ray tracheid length (μm)	253 ± 11 (144 - 384)
Effective diameter of pit opening (μm)	2.3 ± 0.1 (0.2 - 6.4)

3.3. 고온 건조 중 목재 내부 온도와 함수율 분포 및 표면 할렬 측정

예측 시스템을 통해 예측한 고온 건조 중 목재 내부 온도 및 함수율 분포를 검증하기 위해 실제 고온 건조를 진행하였다. 예측에 사용한 세 단면크기의 시험재를 건조하였으며, 단면 크기 당 4 개의 제재목을 고온 건조시켜 내부 온도와 함수율 분포 및 표면 할렬을 측정하였다. 건조 중 섬유방향으로의 과도한 수분확산을 방지하기 위해 건조 전 각 제재목의 양 말단에 우레탄 페인트를 도포하였다. 고온 건조 조건은 Table Ⅲ-1과 같다.

고온 건조 중 목재 내부 온도를 측정하기 위해 열전대(k-type)를 각 단면크기마다 말단에서 길이방향으로 가운데 지점에서 목재 깊이 중심(1/2지점), 목재 표면과 중심 사이(1/4지점)에 설치하였으며, 자료 수집 장치(data logger, CR-3000; Campbell, USA)를 사용하여 부위별 온도를 5분 간격으로 측정하였다.

목재 부위별 함수율 측정을 위해 건조 시작 전과 건조 중 48 시간, 120 시간, 168 시간, 288 시간에서 평균 함수율과 함수율 분포를 측정하였다. 함수율 시편은 길이방향으로 가운데 부위에서 약 2 cm의 두께로 제작하였으며, 이를 36등분하여 부위별 함수율 시편을 제작하였다. 또한 폭 1 mm이상의 표면 할렬이 발생한 경우, 그 길이와 깊이를 측정하였으며, 각 재면의 할렬을 모두 측정한 뒤, 그 평균값을 FigureⅢ-2에 제시한 예측 모델 변경에 이용하였다.

Figure Ⅲ-6. High temperature dryer and timber stack.

제 4 절

결과 및 고찰

4.1. 고온 건조 중 목재 내부 온도 예측 결과

4.1.1. 시간에 따른 방향별 열 전달 영향인자 결정

목재의 열적 특성은 풍속, 건구온도, 상대습도와 같은 외부적 요인과 함수율, 밀도, 비중 등 내부적 요인이 복합적으로 작용하여 결정되기 때문에 과도 열전달 상태에서 목재의 열확산계수와 열대류계수는 계속 변한다.

건조 시간에 따른 목재의 열대류계수는 Figure Ⅳ-1과 같다. 목재의 길이와 외부 공기 조건을 동일하게 설정하였기 때문에 열대류계수는 세 단면크기 모두 동일한 값을 이용하였다. 건조 시작 후 48 시간 까지 열대류계수는 약 3.06 $W/m^2℃$로 건습구온도차가 비교적 낮고 상대습도가 약 51 %RH 상태이기 때문에 건조 기간 중 가장 높은 값을 보였다. 48 시간 이후 건구온도가 100 ℃보다 높아 건조기 내부 상대습도가 낮아졌기 때문에 열대류계수는 120 시간까지 약 3.03 $W/m^2℃$, 196 시간까지 약 3.04 $W/m^2℃$로 낮아졌다. 건구온도가 120 ℃이상으로 상승했음에도 그 값은 하강하였는데, 이는 100 ℃이상의 온도조건에서는 온도가 열대류계수에 미치는 영향보다 상대습도가 미치는 영향이 더 강하기 때문인 것으로 생각된다.

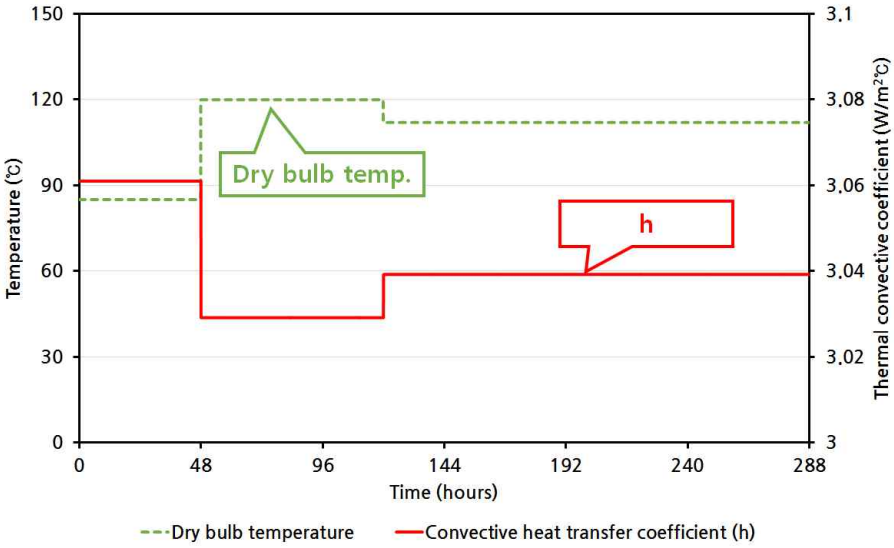


Figure Ⅳ-1. Convective heat transfer coefficient of larch wood during drying.

단면 크기 별 건조 시간에 따른 열확산계수는 Figure Ⅳ-2 ~ Figure Ⅳ-4와 같다. 낮은 상대습도 조건으로 인해 목재 표면의 수분은 급속히 증발하여 외부 공기로 방출된다. 이로 인해 목재 표면의 함수율과 목재 내부의 함수율 차이가 크기 때문에 목재 부위별 열확산계수에 큰 차이가 발생한다. 따라서 본 연구에서는 시험재의 표면과 내부의 열확산계수를 다르게 하여 표면 횡단/섬유 열확산계수는 표면의 평균 함수율을, 내부 횡단/섬유 열확산계수는 내부 평균 함수율을 입력하여 결정하였다. 건조 시작 후 48 시간까지 목재의 횡단방향 열확산계수는 3 단면 크기 모두 약 1.7×10^{-7} m^2/sec에서 급속도로 낮아져 표면 열확산계수는 1.1×10^{-7} m^2/sec, 내부는 1.0×10^{-7} m^2/sec까지 낮아졌다. 이는 목재의 온도가 상승함에 따라 목재의 비열이 높아지기 때문이다. 표면과 내부의 값이 차이가 나는 이유는 목재의 표면이 건조 시작 후 빠르게 평형함수율에 도달하지만 내부는 아직 30 % 이상의 높은 함수율을 유지하기 때문이다. 이로 인해 표면과 내부의 열전도계수, 비열, 밀도에 차이가 발생하여 열확산계수 변화에 영향을 미쳤다.

48 시간 이후 목재의 표면 열확산계수는 온도 상승으로 인한 비열 상승으로 낮아지는 경향을 보였으며, 목재 표면 온도가 건구온도와 같아지는 시점부터 일정한 값을 유지하였다. 목재 내부 열확산계수 또한 48 시간 이후 낮아지는 경향을 보였지만 온도 상승폭이 낮아지는 건조 중기부터 다시 높아지는 경향을 보였다. 이는 목재의 함수율 감소에 따른 비열 및 목재 밀도 감소가 열확산계수에 미치는 영향이 온도 상승에 의한 영향보다 더 커지기 때문에 열확산계수가 상승한 것이라 볼 수 있다.

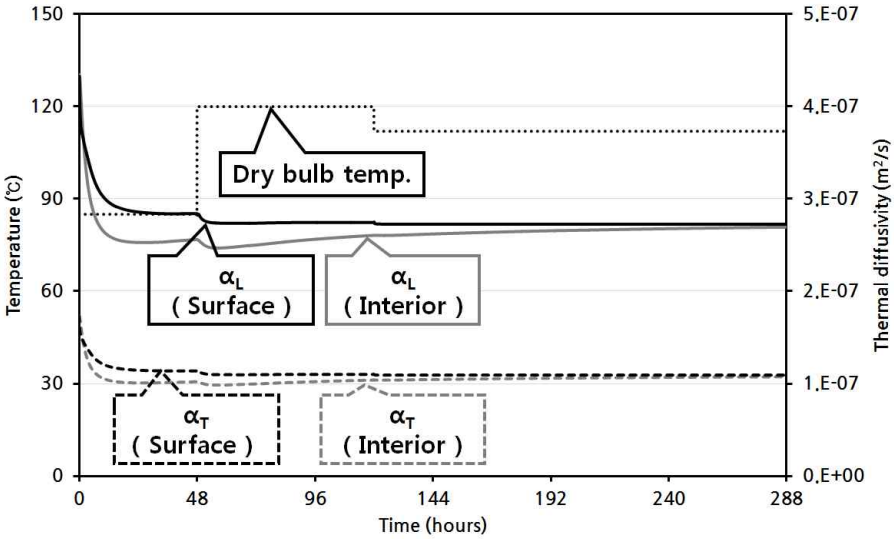


Figure Ⅳ-2. Thermal diffusivity of larch wood of 120 mm square timber during drying.

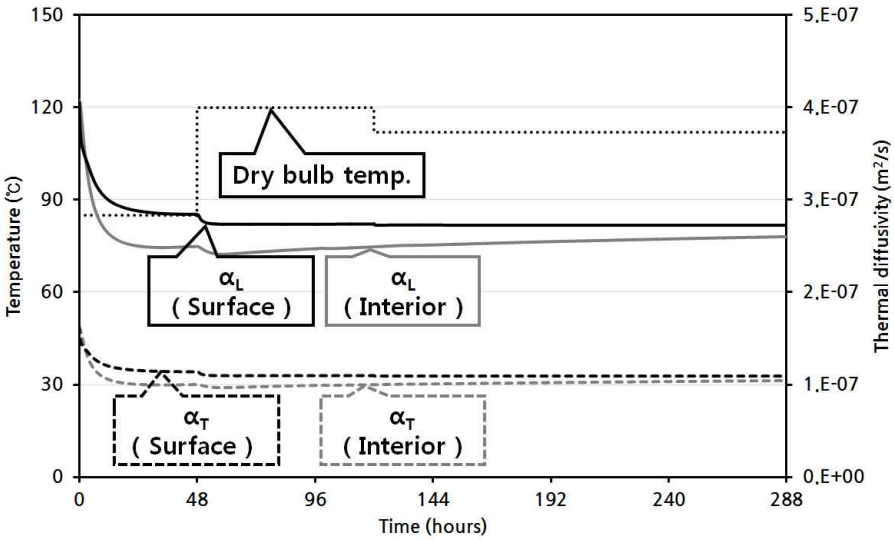


Figure Ⅳ-3. Thermal diffusivity of larch wood of 210 mm square timber during drying.

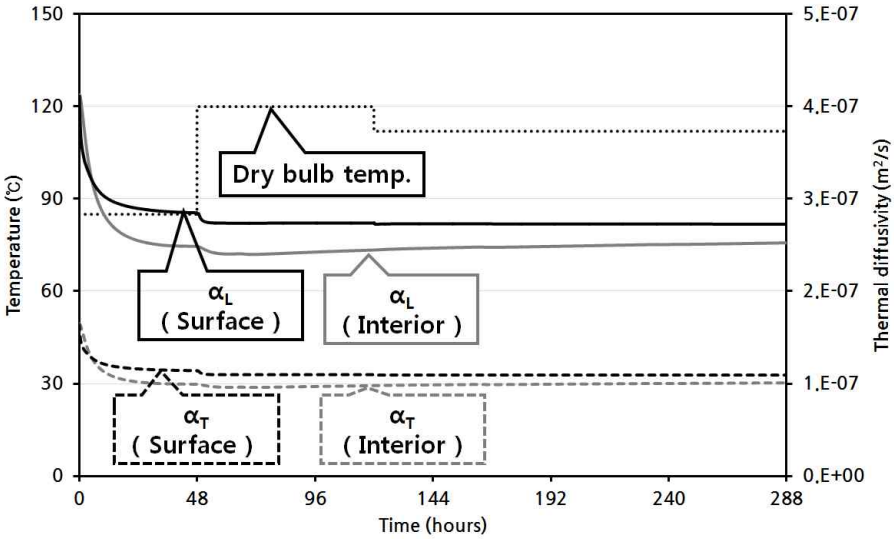


Figure Ⅳ-4. Thermal diffusivity of larch wood of 250 mm square timber during drying.

4.1.2. 시간에 따른 온도 분포 예측 결과

단면크기 별 시간에 따른 온도 분포를 예측한 결과는 Table Ⅳ-1, Ⅳ-2와 같다. 건조 시작 후 48시간까지 목표 건구온도는 85 ℃로, 세 단면크기 조건 모두 100 ℃에 도달하지 않기 때문에 온도 변화 거동은 동일한 경향을 나타냈다. 표면 절점은 열대류의 영향으로 인해 매우 빠르게 목표 건구온도에 도달할 것으로 예측하였다. 내부 절점들의 경우, 표면 온도보다 느리게 상승하여 48 시간에서의 중심 온도는 120 mm 정각재의 경우 약 83.78 ℃, 210 mm 정각재의 경우에는 약 82.18 ℃, 단면크기 250 mm 정각재의 경우 약 79.14 ℃로 목표 건구온도에 도달하지 못할 것으로 예측하였다.

48시간 이후 고온건조 스케줄의 목표 건구온도는 120 ℃로, 대기압에서의 물의 비등점인 100 ℃를 넘는 건구온도 조건으로 건조가 진행되었다. 120 mm 정각재의 경우, 60 시간에서 중심부 함수율이 30% 미만에 도달하였기 때문에 자유수 기화로 인한 잠열이 감소하여 표면과 내부 모두 빠른 속도로 비등점보다 높은 목표 건구온도에 도달하였다. 하지만 210 mm 정각재와 250 mm 정각재의 경우, 내부 절점들 중 함수율이 30 %보다 높은 절점이 120 시간까지 존재하였기 때문에 이에 따른 영향으로 표면은 빠른 속도로 온도가 상승하지만 내부 온도는 느린 속도로 상승하는 경향을 보였다. 중심과 표면 사이 절점이 100 ℃이상의 온도로 높아지기 시작하는 시점은 120 mm 정각재의 경우에 약 40 시간, 210 mm 정각재에서는 약 72 시간, 250 mm 정각재의 경우에는 약 110 시간 후로 예측되었다. 중심 절점이 100 ℃이상의 온도이상으로 높아지는 시점은 120 mm 정

각재에서는 약 68 시간, 210 mm 정각재는 약 135시간, 250 mm 정각재의 경우에는 약 238 시간 후로 예측되었다. 고온 건조가 종료된 후 목재 중심 절점의 최종 온도를 예측한 결과, 120 mm 정각재의 경우에 약 112.00 ℃, 210 mm 정각재에서는 약 112.00 ℃ , 250 mm 정각재의 경우에는 약 111.77 ℃로 건구온도에 도달하거나 유사할 것으로 예측되었다.

Table Ⅳ-1. Predicted temperature profile of cross section during drying (continued).

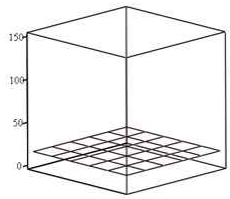
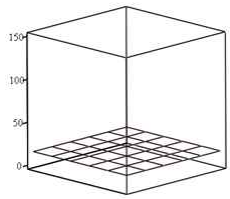
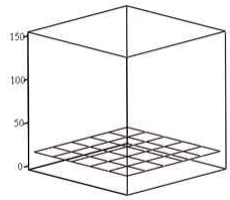
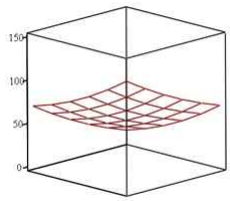
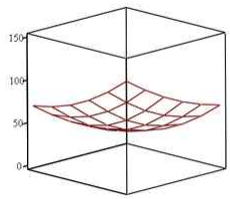
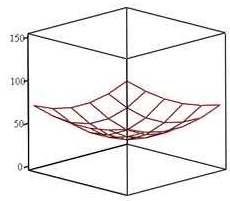
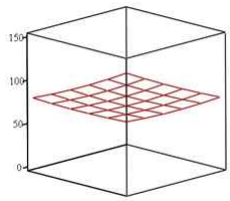
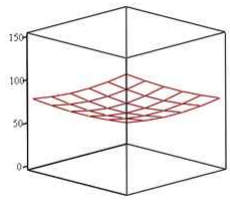
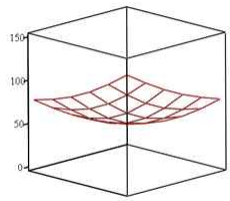
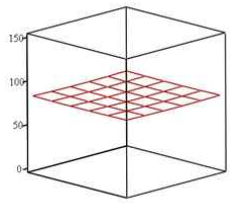
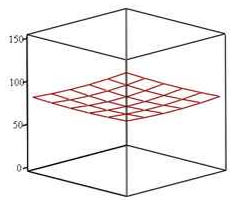
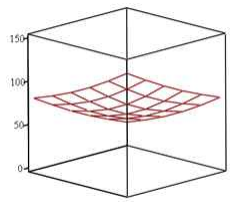
Time (hours)	Predected temperature profile of cross section (℃)		
	120×120 mm^2	210×210 mm^2	250×250 mm^2
0			
8			
16			
24			

Table Ⅳ-1. Predicted temperature profile of cross section during drying (continued).

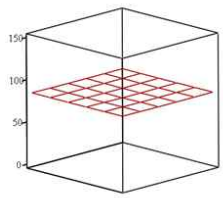
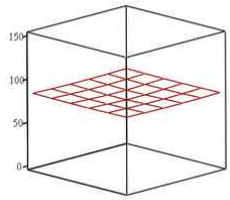
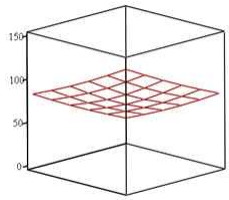
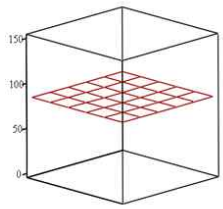
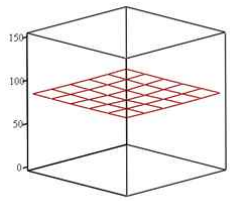
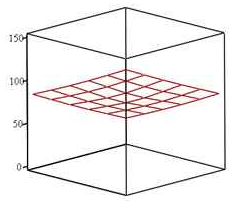
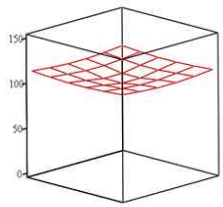
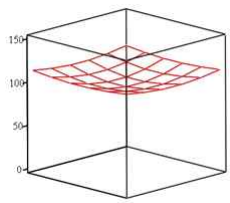
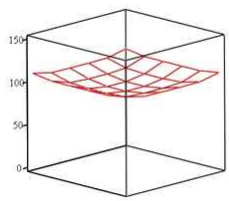
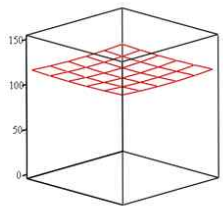
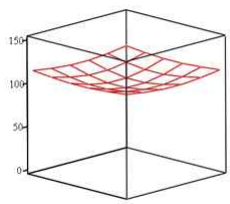
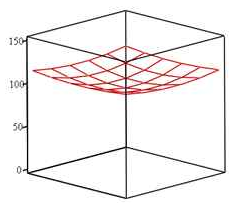
Time (hours)	Predected temperature profile of cross section (℃)		
	120×120 mm^2	210×210 mm^2	250×250 mm^2
36			
48			
60			
72			

Table Ⅳ-1. Predicted temperature profile of cross section during drying (continued).

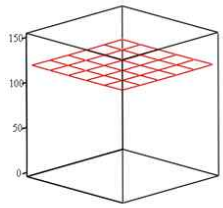
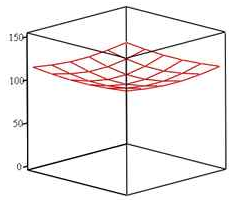
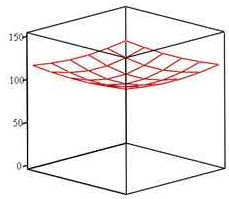
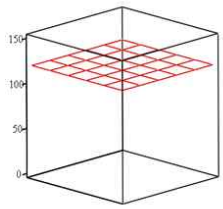
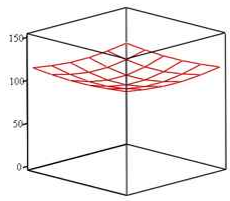
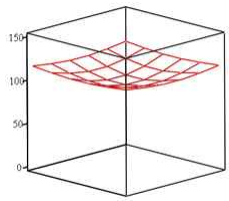
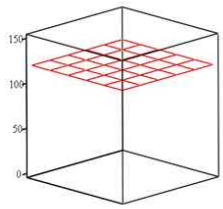
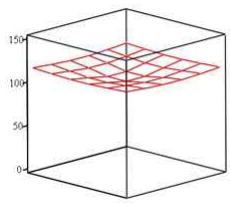
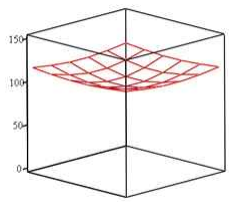
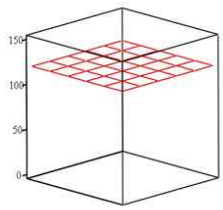
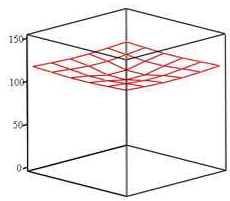
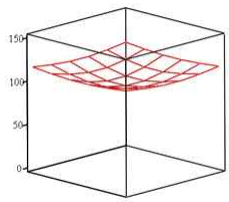
Time (hours)	Predected temperature profile of cross section (℃)		
	120×120 mm^2	210×210 mm^2	250×250 mm^2
84			
96			
108			
120			

Table Ⅳ-1. Predicted temperature profile of cross section during drying (continued).

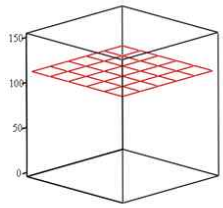
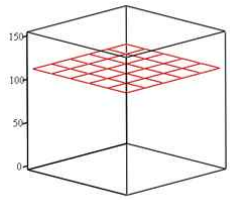
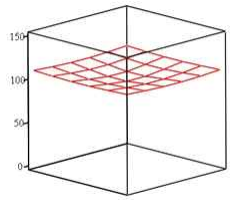
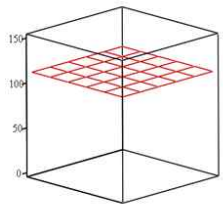
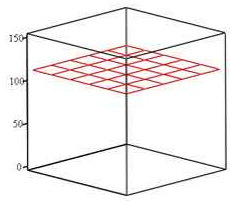
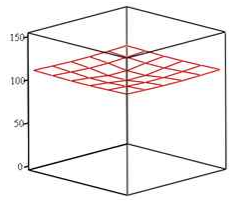
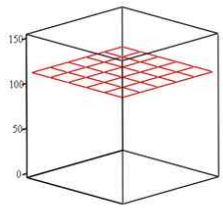
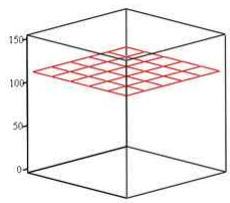
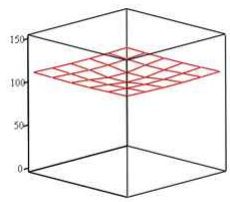
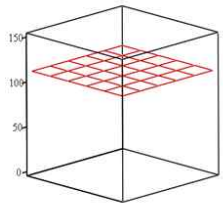
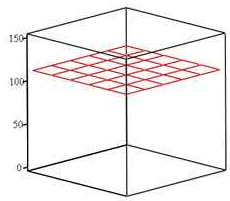
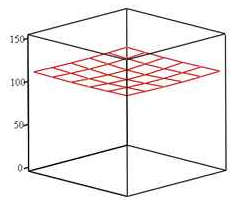
Time (hours)	Predected temperature profile of cross section (℃)		
	120×120 mm^2	210×210 mm^2	250×250 mm^2
168			
192			
216			
240			

Table Ⅳ-1. Predicted temperature profile of cross section during drying.

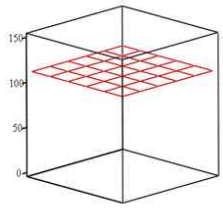
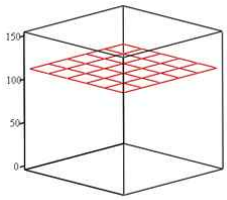
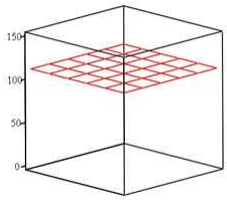
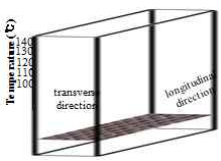
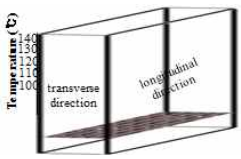
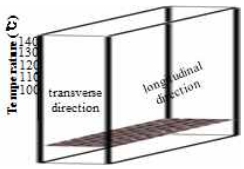
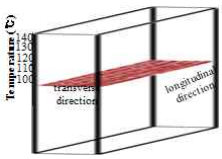
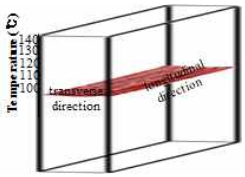
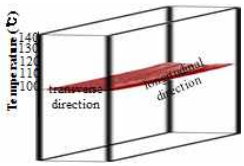
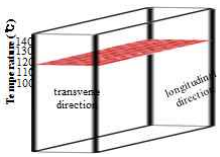
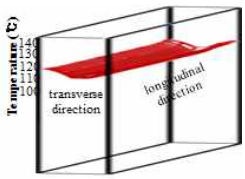
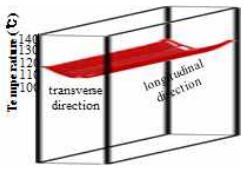
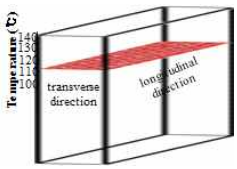
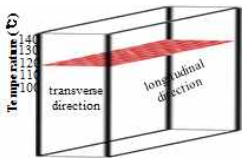
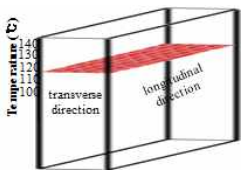
Time (hours)	Predected temperature profile of cross section (℃)		
	120×120 mm^2	210×210 mm^2	250×250 mm^2
288			

Table Ⅳ-2. Predicted temperature profile in longitudinal direction during drying.

Time (hours)	Predected temperature profile of cross section (℃)		
	120×120 mm^2	210×210 mm^2	250×250 mm^2
0			
48			
120			
288			

4.2. 고온 건조 중 목재 내부 함수율 예측 결과

4.2.1. 시간에 따른 방향별 수분 이동 영향인자 결정

시간에 따른 3가지 단면크기의 횡단방향 수분확산계수와 섬유방향 수분확산계수는 Figure Ⅳ-5 ~ Figure Ⅳ-10과 같다. 각 단면크기의 건조 시간에 따른 횡단방향 수분확산계수는 Figure Ⅳ-5, Ⅳ-7, Ⅳ-9에 제시하였다. 세 단면크기 모두 표면부위의 횡단방향 수분확산계수는 건조 초기에 1.25×10^{-9} m^2/s의 값으로 결정되었으며, 건조 48시간까지 서서히 상승하는 경향을 보였다. 이는 표면 함수율이 건조 조건의 평형함수율까지 빠르게 증발하여 횡단방향 수분확산계수 변화에 영향을 주지 않고, 온도의 상승이 수분확산계수 결정에 미치는 영향이 크기 때문이다. 건조 초기에 목재 내부 횡단방향 수분확산계수가 초기에 상승하였다. 이는 목재 내부 온도가 목표 온도까지 매우 빠르게 올라가기 때문에 목재의 세포벽 결합수 확산계수와 세포내강 수증기 확산계수가 증가하기 때문이다. 목재 내부 함수율은 일정한 속도로 감소하기 때문에 목재 세포의 공극률 상승으로 인해 횡단방향 내부 수분확산계수는 다시 낮아졌다.

목재 내부 수분확산계수가 상승하는 구간은 단면의 크기가 클수록 길어졌다. 이는 목재의 단면크기가 클수록 목재 내부의 함수율 감소 속도가 느리고 온도만 급격히 상승하는 구간이 길기 때문이다. 목재 단면크기가 작으면 목재 내부의 함수율이 줄어드는 속도가 빠르기 때문에 함수율 하강이 목재 내부 횡단방향 수분확산계수에 온도 상승보다 더 큰 영향을 미쳤을 것이라 생각된다.

건조 48 시간 이후, 210 mm 정각재에서는 약 135 시간, 250 mm 정각재의 표면 수분확산계수는 온도 상승으로 인해 급격하게 상승한 뒤 약 4.00×10^{-9} m^2/s 값을 120 시간까지 유지하였다. 120 mm 정각재의 경우, 목재 표면의 횡단방향 수분확산계수는 4.13×10^{-9} m^2/s까지 급격히 상승하여 일정하게 유지하였다.

48 시간부터 목재 내부의 횡단방향 수분확산계수는 높아진 뒤, 점진적으로 내려가는 경향이 나타난다. 이는 목재 내부 온도는 비등점인 100 ℃를 유지하지만, 목재 내부 함수율이 급격하게 감소하여 목재 횡단방향 수분확산계수에 영향을 미치기 때문이다. 고온건조 중 전체 기간에 걸쳐 단면 크기가 넓으면 넓을수록 더 높은 내부 횡단방향 수분확산계수를 예측하였으며, 이는 고온건조 전체 구간에서 단면크기가 넓을수록 내부의 함수율이 높게 유지되었기 때문이다.

각 단면크기의 섬유방향 수분확산계수를 계산한 결과는 횡단방향과 같은 경향을 보였다. 하지만 횡단방향 수분확산계수와는 달리 함수율 하강이 섬유방향 수분확산계수 하강에 미치는 영향이 크지 않아 건구온도가 일정한 기간에서는 완만하게 낮아지는 경향이 나타났다.

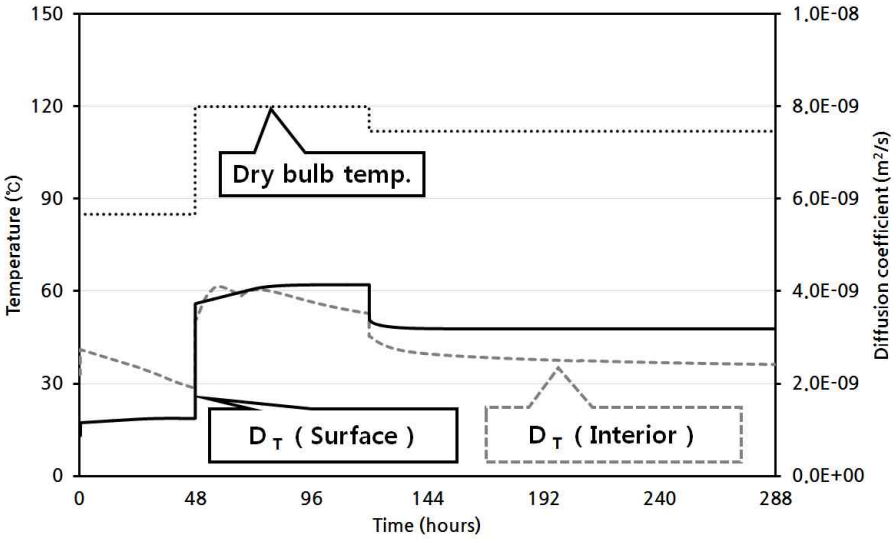


Figure Ⅳ-5. Moisture diffusion coefficient of larch wood in transverse direction of 120 mm square timber during drying.

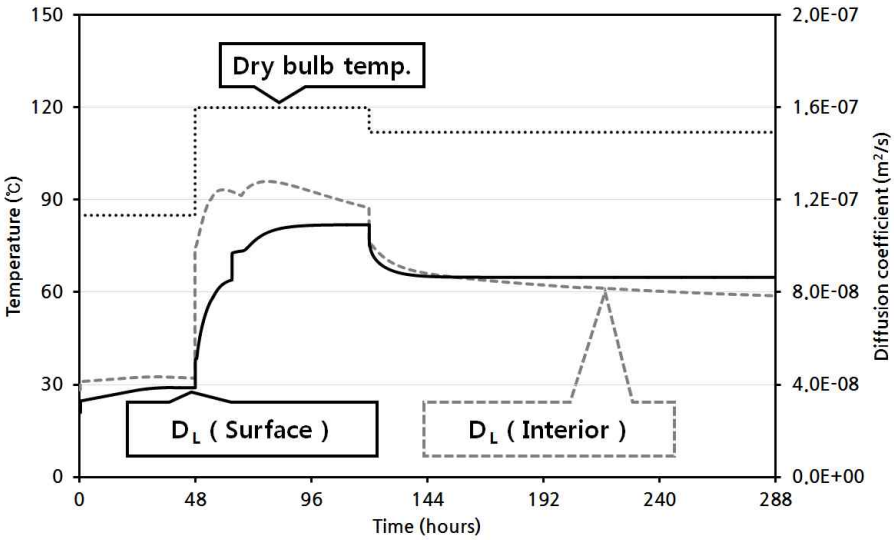


Figure Ⅳ-6. Moisture diffusion coefficient of larch wood in longitudinal direction of 120 mm square timber during drying.

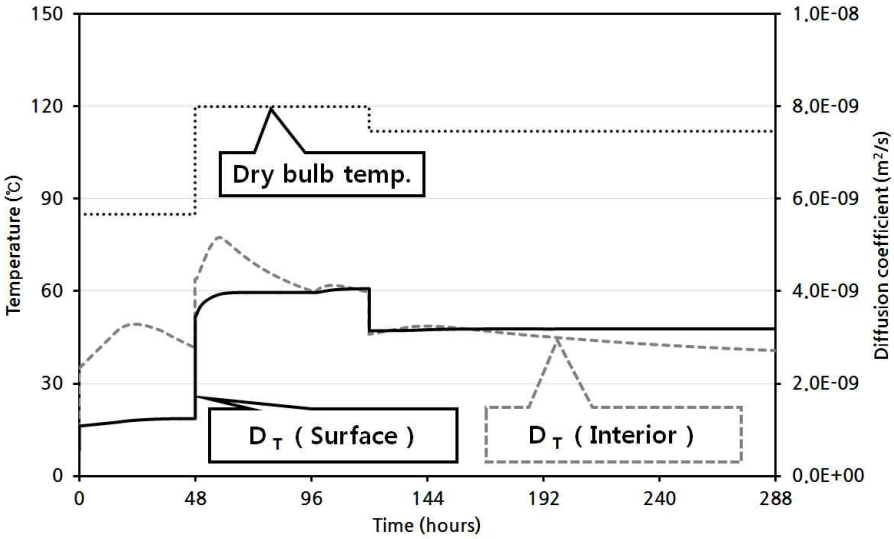


Figure Ⅳ-7. Moisture diffusion coefficient of larch wood in transverse direction of 210 mm square timber during drying.

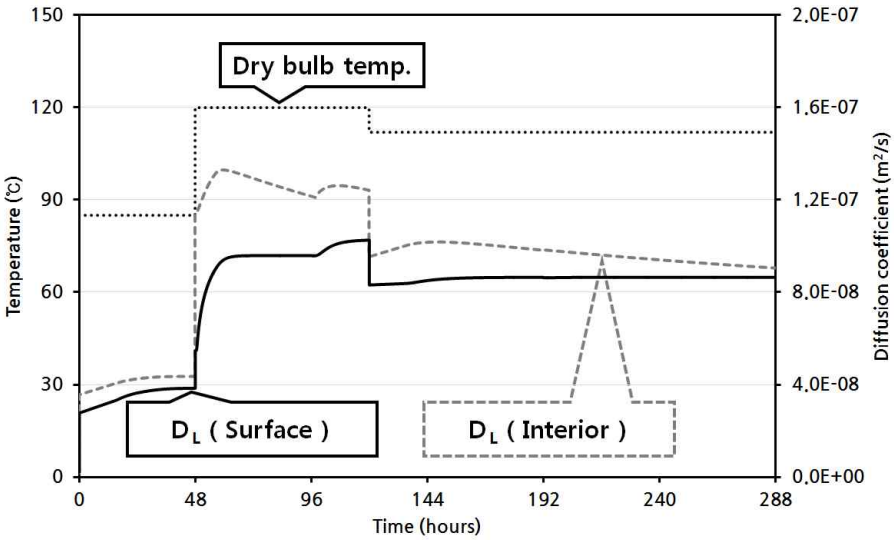


Figure Ⅳ-8. Moisture diffusion coefficient of larch wood in longitudinal direction of 210 mm square timber during drying.

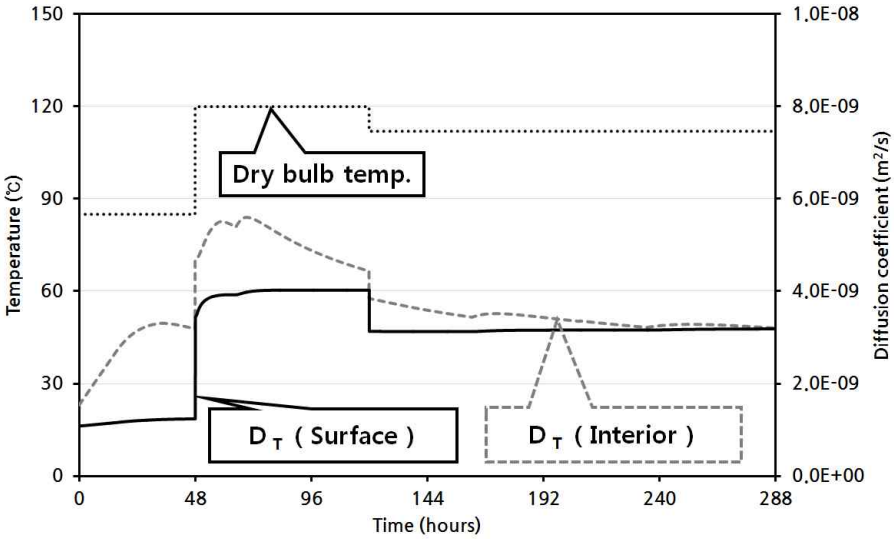


Figure Ⅳ-9. Moisture diffusion coefficient of larch wood in transverse direction of 250 mm square timber during drying.

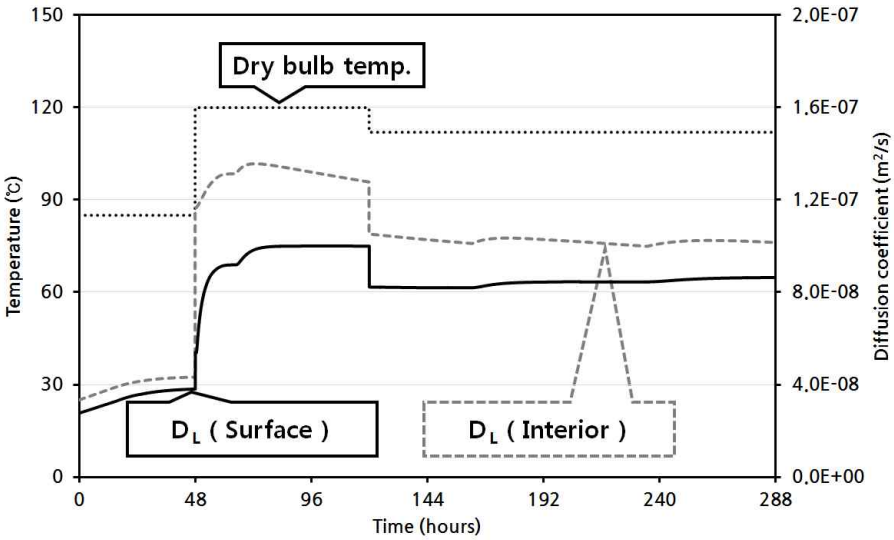


Figure Ⅳ-10. Moisture diffusion coefficient of larch wood in longitudinal direction of 250 mm square timber during drying.

4.2.2. 시간에 따른 함수율 분포 예측 결과

예측한 함수율 분포 결과는 Table Ⅳ-3, Table Ⅳ-4와 같다. 대류 경계절점은 표면 수분 방사의 영향으로 인해 매우 빠르게 건조 조건에서의 평형함수율에 도달하였으며, 그로 인해 32 시간 후 절점과 절점 사이의 함수율 차이가 약 20 %이상으로 매우 심하게 발생하였다. 이와 같은 함수율 차이는 120 mm 정각재와 210 mm 정각재는 건조 8시간, 250 mm 정각재는 건조 16 시간에서 최대값을 보였다. 인접한 절점 간 함수율 차이는 48 시간까지 계속 하강한 뒤, 120 시간에서 급격히 낮아진 평형함수율로 인해 다시 높아진 후 다시 하강하였다. 건조가 종료되는 시점에서 최종 평균 함수율은 각각 120 mm 정각재는 약 3.04 %, 210 mm 정각재는 약 9.87 %, 250 mm 정각재는 약 16.30 %이었으며, 목재 중심의 최종 함수율은 각각 120 mm 정각재는 약 4.64 %, 210 mm 정각재는 약 13.43 %, 250 mm 정각재는 약 22.38 %로 210 mm 정각재와 250 mm 정각재는 중심부 함수율이 10 %이상인 상태에서 건조가 종료될 것이라 예측하였다. 세 단면크기 모두 길이 방향으로의 급격한 함수율 차이는 발생하지 않았다. 이는 고온 건조 시 제재목 말단에 우레탄 페인트를 도포하여 말단부에서의 수분 방사가 발생하지 않는다는 가정을 시스템에 설정했기 때문에 섬유방향으로의 수분이동이 줄어들었기 때문이다.

Table Ⅳ-3. Predicted moisture contents profile of cross section during drying (continued).

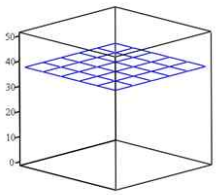
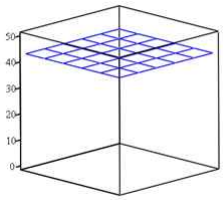
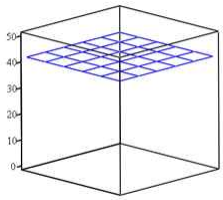
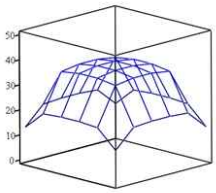
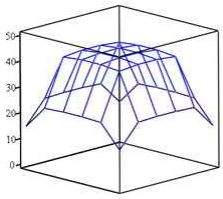
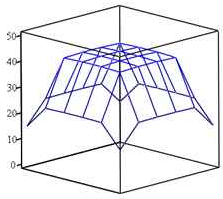
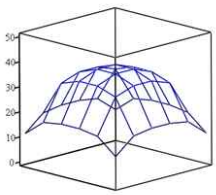
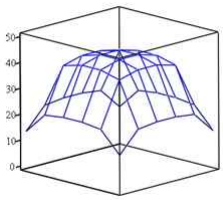
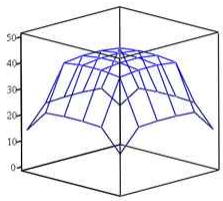
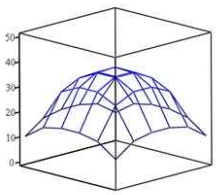
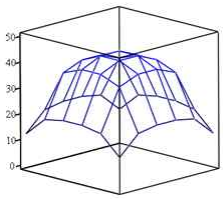
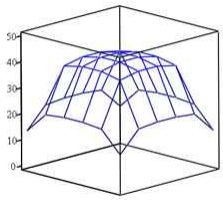
Time (hours)	Predicted moisture contents profile of cross section (%)		
	120×120 mm^2	210×210 mm^2	250×250 mm^2
0			
8			
16			
24			

Table Ⅳ-3. Predicted moisture contents profile of cross section during drying (continued).

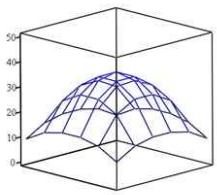
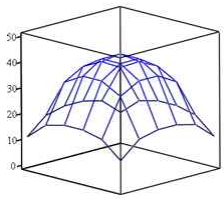
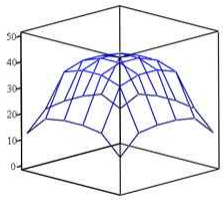
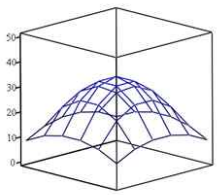
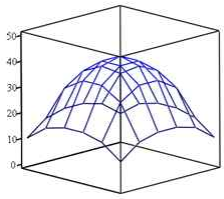
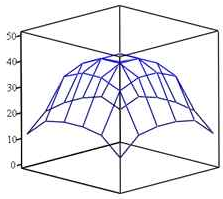
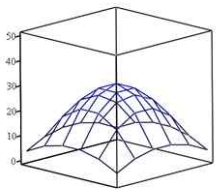
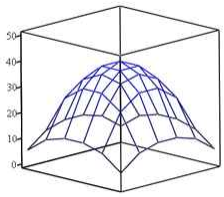
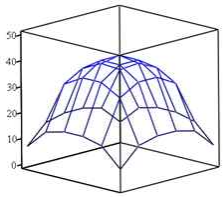
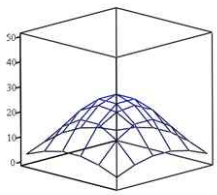
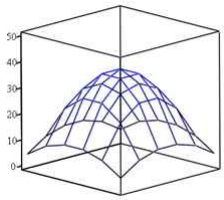
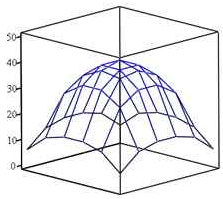
Time (hours)	Predicted moisture contents profile of cross section (%)		
	120×120 mm^2	210×210 mm^2	250×250 mm^2
36			
48			
60			
72			

Table Ⅳ-3. Predicted moisture contents profile of cross section during drying (continued).

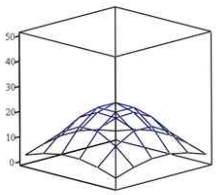
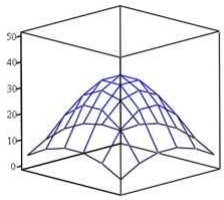
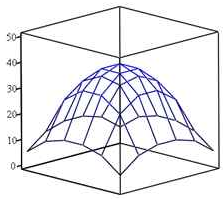
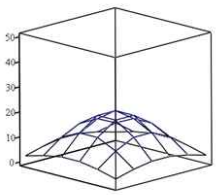
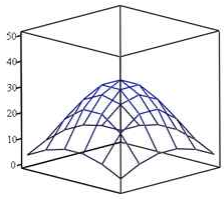
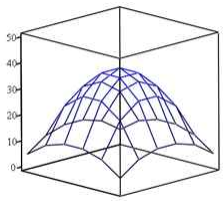
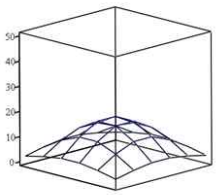
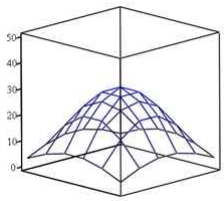
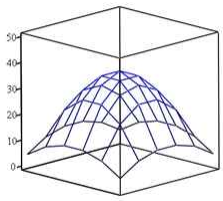
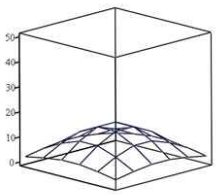
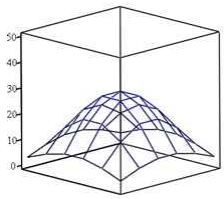
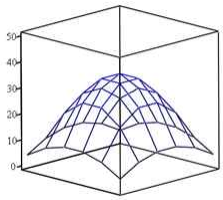
Time (hours)	Predicted moisture contents profile of cross section (%)		
	120×120 mm^2	210×210 mm^2	250×250 mm^2
84			
96			
108			
120			

Table Ⅳ-3. Predicted moisture contents profile of cross section during drying (continued).

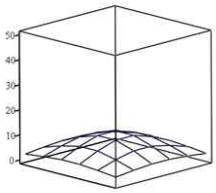
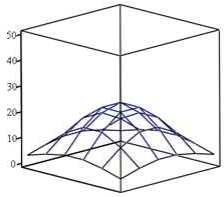
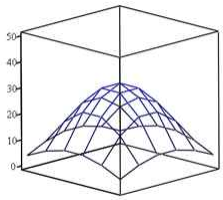
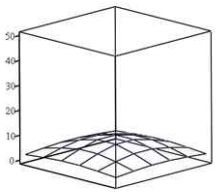
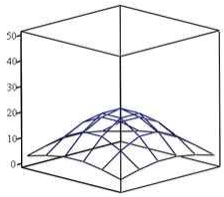
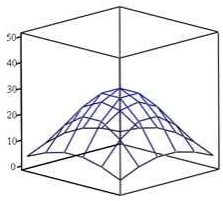
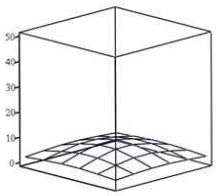
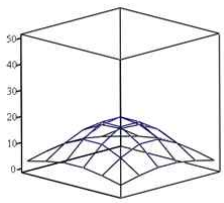
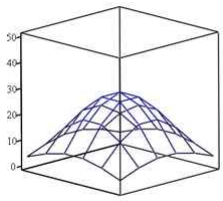
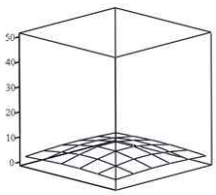
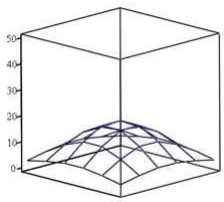
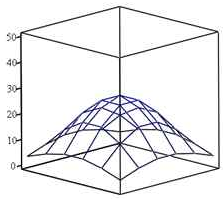
Time (hours)	Predicted moisture contents profile of cross section (%)		
	120×120 mm^2	210×210 mm^2	250×250 mm^2
168			
192			
216			
240			

Table Ⅳ-3. Predicted moisture contents profile of cross section during drying.

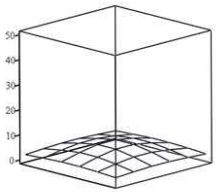
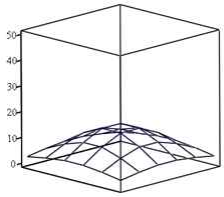
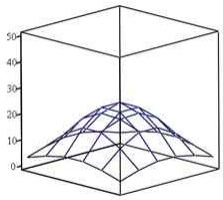
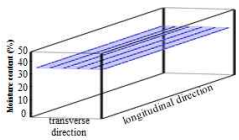
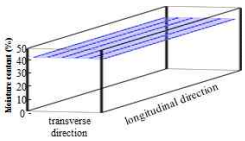
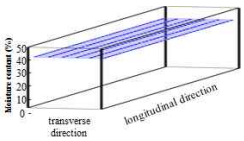
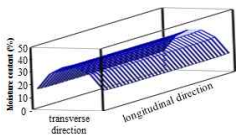
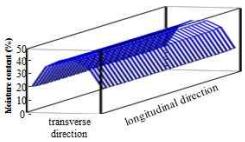
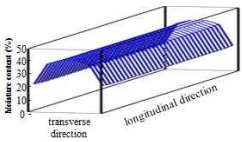
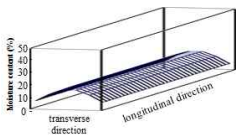
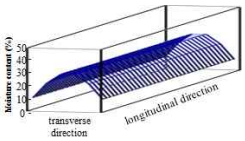
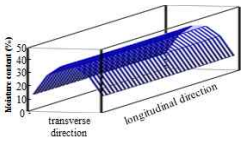
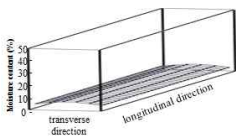
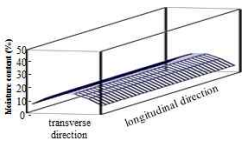
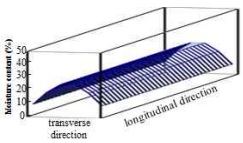
Time (hours)	Predicted moisture contents profile of cross section (%)		
	120×120 mm^2	210×210 mm^2	250×250 mm^2
288			

Table Ⅳ-4. Predicted moisture contents profile in longitudinal direction during drying.

Time (hours)	Predicted moisture contents profile of cross section (%)		
	120×120 mm^2	210×210 mm^2	250×250 mm^2
0			
48			
120			
288			

4.3. 실제 건조를 통한 실측치와 예측치의 비교

4.3.1. 온도 실측치와 예측치의 비교

시간에 따른 온도변화를 실제 측정한 온도와 비교한 결과는 Figure Ⅳ-11 ~ Figure Ⅳ-13과 같다. 건조 후 48 시간까지 목재의 온도는 예측한 결과와 측정한 결과가 매우 유사하였다.

48 시간 이후 목표 건구온도가 85 ℃에서 120 ℃으로 상승하면서 목재 표면과 중심 사이 (1/4지점)과 목재 중심(1/2지점)의 온도는 48 시간 이후 표면 온도와 같이 급격하게 100 ℃까지 상승할 것이라 예측하였으며, 이는 실제 측정 결과와 일치하였다.

120 mm 정각재의 경우에 1/4지점과 1/2지점 온도는 100 ℃를 유지하는 구간이 매우 짧으며 다시 온도가 완만하게 상승하여 건조 72 시간 후 114 ℃까지 상승할 것이라 예측하였다. 하지만 실측 결과, 목재 온도는 그보다 빠른 58 시간에 온도가 급상승하여 72시간에 모든 측정 부위가 120 ℃에 도달하였다.

210 mm 정각재의 경우, 1/4지점과 1/2지점의 온도 모두 약 100 시간에서 자유수 제거가 완료되어 온도가 다시 상승하기 시작할 것이라 예측하였다. 하지만 실제 1/4지점의 온도를 측정한 결과에서는 70 시간에 비등점 이상의 온도가 측정되었으며, 1/2지점의 온도를 측정한 결과에서는 83 시간에서 100 ℃이상의 온도가 측정되어 완만하게 상승하는 경향을 보였다.

250 mm 정각재의 경우에서는 1/2지점의 온도가 167 시간까지 비등점을 유지할 것이라 예측하였으며, 이로 인해 주변 절점 또한 영

향을 받아 1/4지점의 온도 또한 100 ℃보다 약 2 ℃높은 온도를 유지하며 이후 완만하게 온도가 상승할 것이라 예측하였다. 하지만 실제 건조를 진행한 결과, 실측된 온도는 예측된 온도보다 약 5 ℃ 높은 값이 측정되었다. 이러한 결과는 100 ℃ 이상의 고온조건에서 목재 내부에서 발생하는 자유수의 기화가 끝나는 시점에서 발생한 오차로 추정된다. 일반적으로 목재의 경우, 온도가 높아질수록 섬유포화점이 낮아지기 때문에 이로 인해 정확한 섬유포화점을 예측하지 못해 시스템에서 오차가 발생하였다. 따라서 고온에서의 목재 섬유포화점에 관한 추가적인 연구를 통해 오차를 보정한다면 더욱 정확한 예측이 가능할 것이라 생각된다.

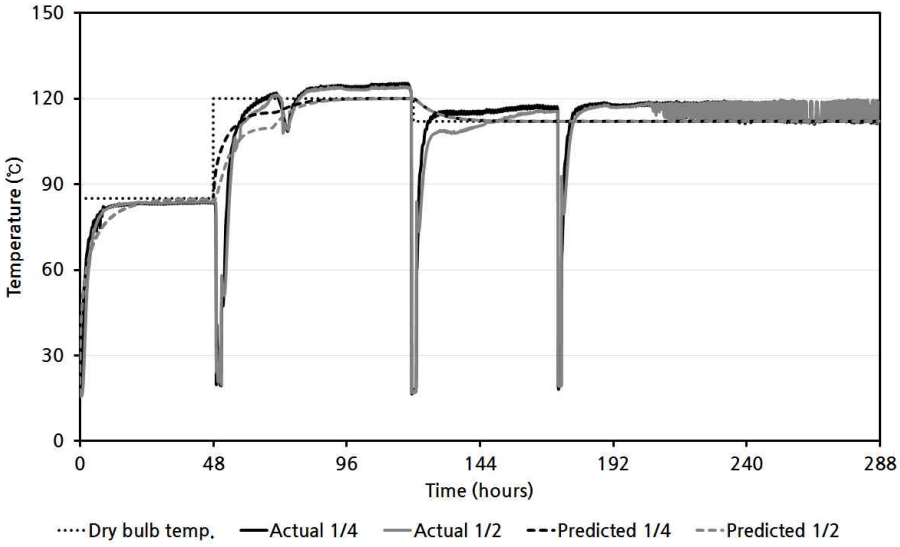


Figure Ⅳ-11. Predicted and measured temperature of 120 mm square timber.

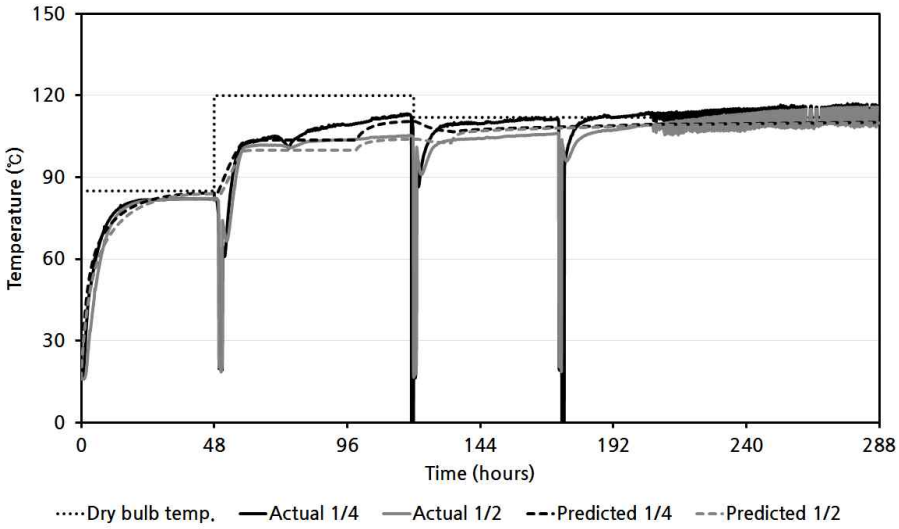


Figure Ⅳ-12. Predicted and measured temperature of 210 mm square timber.

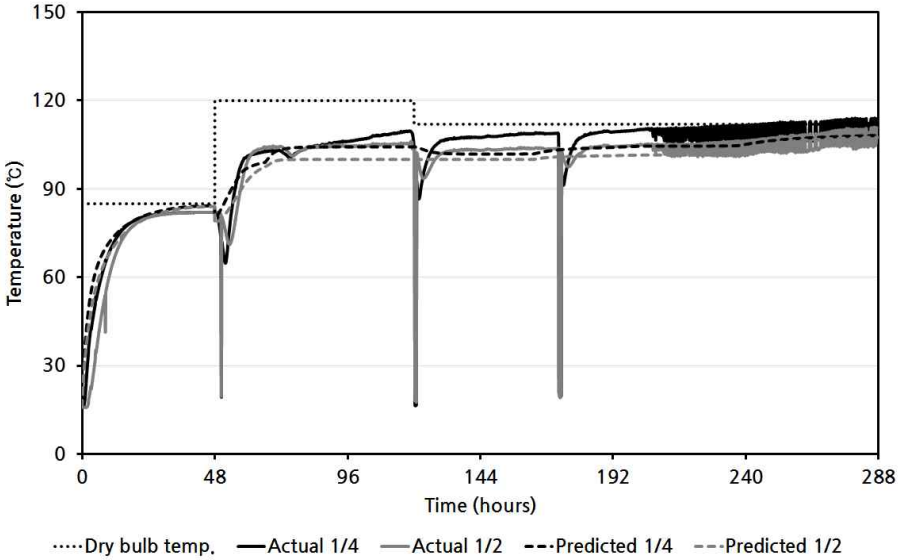


Figure Ⅳ-13. Predicted and measured temperature of 250 mm square timber.

4.3.2. 함수율 실측치와 예측치의 비교

각 단면크기 별 고온 건조를 진행한 후, 초기함수율, 48 시간, 120 시간, 168 시간, 288 시간 건조 후 함수율을 측정하여 예측 결과와 비교하였다. 예측치와 실측치는 분율 함수율(Fractional moisture content)을 통해 비교하였으며, 분율 함수율은 (식 4-1)을 이용하여 계산하였다.

$$\overline{E} = \frac{C_{average} - C_e}{C_i - C_e} = \frac{AMC - EMC}{IMC - EMC} \quad \text{(식 4-1)}$$

여기에서, $C_{average}$는 평균 수분 농도 (kg/m^3), C_i 는 초기 수분 농도 (kg/m^3), C_e = 평형을 이루는 수분 농도 (kg/m^3), IMC는 초기 함수율 (%), AMC는 평균함수율 (%), EMC는 평형함수율 (%)이다.

예측값과 실측값의 분율 함수율 비교 결과는 Figure Ⅳ-14 ~ Figure Ⅳ-16과 같다. 120 mm 정각재의 함수율 예측 결과는 실제 측정 결과와 비교하였을 때 오차 발생이 미미하였다. 하지만 210 mm 정각재는 건조 168 시간부터 오차가 발생하여 실측 함수율이 예측 함수율보다 낮은 결과를 보였다. 250 mm 정각재 또한 120 시간부터 예측에 오차가 발생하였고, 예측 함수율보다 낮은 함수율이 지속적으로 측정되었다.

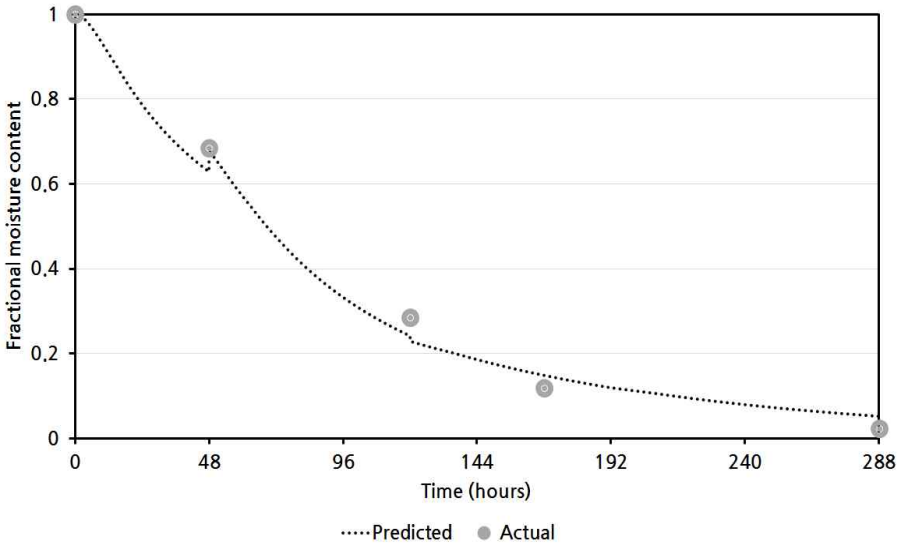


Figure Ⅳ-14. Fractional moisture content of 120 mm square timber.

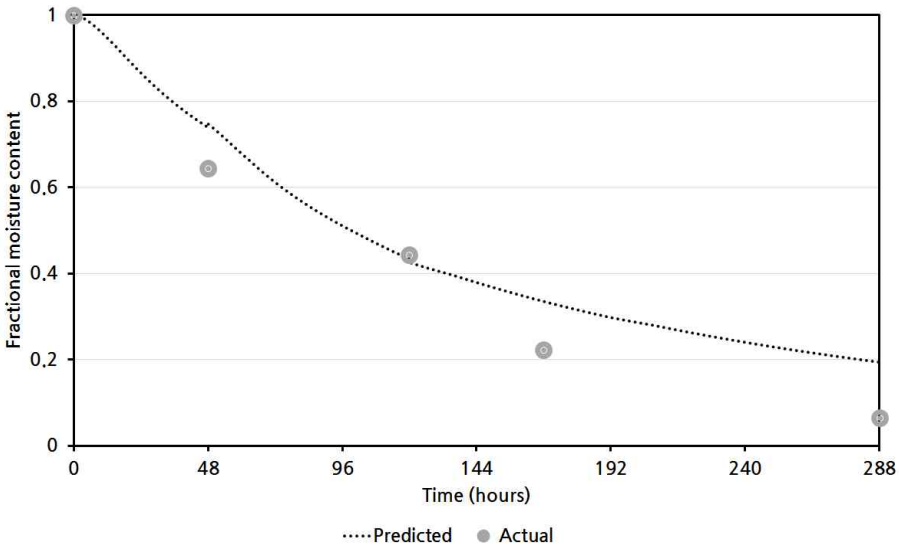


Figure Ⅳ-15. Fractional moisture content of 210 mm square timber.

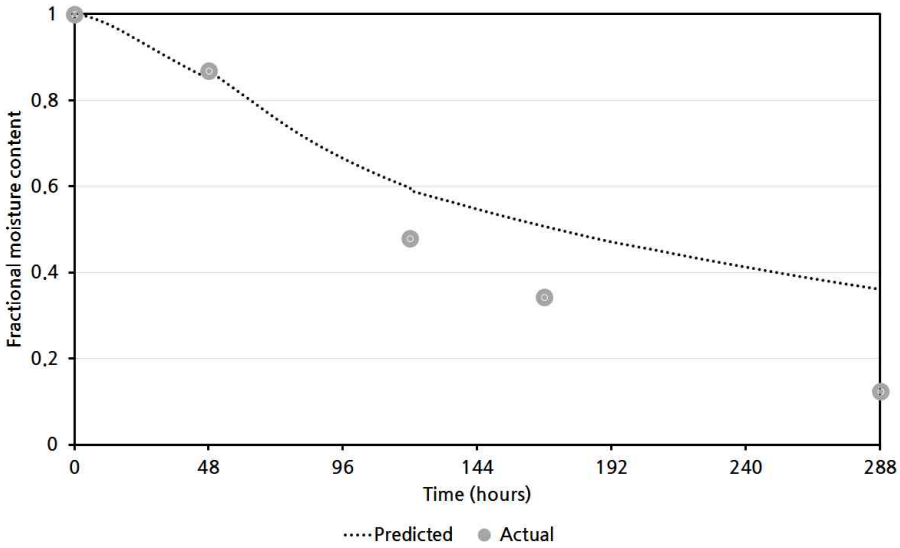


Figure Ⅳ-16. Fractional moisture content of 250 mm square timber.

함수율 분포에 대한 비교를 위해 목재 중심 지점의 횡단면 함수율 분포 예측 결과를 실제 측정한 결과와 비교하였다. 비교 결과는 Figure Ⅳ-17 ~~ Figure Ⅳ-22에 제시하였다.

120 시간에서 120 mm 정각재의 평균 함수율은 10.08 %로 예측하였고 실제 평균 함수율은 11.69 %였다. 표면에서 3 cm 깊이까지 함수율이 10 % 미만으로 측정되었고 그 이상의 깊이에서는 15 ~ 20 %의 높은 함수율을 유지하여 함수율 차이가 크게 나타났다. 또한 수와 옹이로 인해 높은 함수율을 가진 부위가 우측으로 편향되었다. 120 시간 후 210 mm 정각재의 경우, 예측 평균 함수율은 19.44 %로, 실제 평균 함수율은 19.81 %로 측정되었다. 250 mm 정각재의 경우, 120 시간에서 예측 평균 함수율은 25.49 %, 실제 평균 함수율은 20.73 %로 측정되어 약 5 % 의 오차를 보였으며, 이는 표면 할렬이 48 시간에 발생한 뒤 할렬을 통한 과도한 수분방사가 지속되어 함수율이 예측보다 낮게 측정된 것으로 추정된다.

288 시간 건조 후 함수율 측정 결과, 120 mm 정각재의 평균 함수율은 3.04 %로 예측하였으나 실제 평균 함수율은 3.75 %의 결과를 보여, 실제보다 낮은 최종 평균 함수율을 예측하였지만, 그 오차는 1 % 미만이었다. 210 mm 정각재는 예측 최종 평균 함수율은 9.87 %, 실제로 측정된 최종 평균 함수율인 4.53 % 보다 높은 값을 예측하였으며, 마지막으로 250 mm 정각재의 경우, 16.30 %의 예측 평균 함수율을 보여 실제 측정값인 6.83 %와 9 %이상 오차가 발생하였다. 이와 같은 오차의 원인은 고온 건조 중 발생한 할렬이 내부로 깊어지면서 수분이 증발하는 면적을 증가시키기 때문에 예상보다 낮은 함수율이 측정된 것으로 사료된다.

본 연구에서 처음 예측에 이용한 모델은 할렬을 고려하지 않은 직육면체 형상의 모델이기 때문에 할렬로 인한 과도한 수분방사를 예측하지 못한 것이다. 따라서 초기 함수율과 온도 데이터만 이용하는 예측 시스템은 할렬 무발생 건조 공정에서 유효할 것이라 사료된다.

5.1	6.5	7.5	7.5	6.5	5.1
6.5	10.4	13.1	13.1	10.4	6.5
7.5	13.1	16.9	16.9	13.1	7.5
7.5	13.1	16.9	16.9	13.1	7.5
6.5	10.4	13.1	13.1	10.4	6.5
5.1	6.5	7.5	7.5	6.5	5.1

(a)

6.2	7.6	5.1	6.4	7.7	5.6
8.0	9.2	13.3	14.9	14.7	9.4
9.8	13.3	19.0	24.2	22.0	10.4
7.6	19.3	14.5	25.4	24.8	11.3
6.5	9.3	11.1	16.0	16.7	8.2
4.9	6.8	6.9	8.1	10.0	6.4

(b)

(c)

Figure Ⅳ-17. Transversal moisture contents distributions in 120 mm square timber at 120 hours. (a) Predicted value; (b) actual value; (c) picture of test specimen.

5.3	10.7	13.8	13.8	10.7	5.3
10.7	20.8	26.3	26.3	20.8	10.7
13.7	26.2	33.7	33.7	26.2	13.7
13.7	26.2	33.7	33.7	26.2	13.7
10.7	20.8	26.3	26.3	20.8	10.7
5.3	10.7	13.8	13.8	10.7	5.3

(a)

10.3	15.3	11.5	13.8	12.6	8.1
18.7	40.3	31.8	35.0	34.7	13.8
15.8	33.9	39.9	29.2	29.8	13.5
12.0	29.3	34.7	30.2	22.7	9.2
11.4	29.4	23.3	21.2	18.7	8.1
8.6	11.9	9.3	8.8	9.6	6.7

(b)

(c)

Figure Ⅳ-18. Transversal moisture contents distributions in 210 mm square timber at 120 hours. (a) Predicted value; (b) actual value; (c) picture of test specimen.

13.2	17.6	19.9	19.9	17.6	13.2
17.6	29.2	35.0	35.0	29.2	17.6
19.9	34.9	42.5	42.5	34.9	19.9
19.9	34.9	42.5	42.5	34.9	19.9
17.6	29.2	35.0	35.0	29.2	17.6
13.2	17.6	19.9	19.9	17.6	13.2

(a)

10.1	16.6	13.4	15.7	14.4	7.8
16.6	39.1	41.0	42.7	35.3	13.1
14.0	36.2	31.8	31.0	40.3	14.4
14.6	33.9	21.1	24.9	36.8	13.8
16.9	35.1	25.8	31.9	37.0	14.7
10.6	18.0	16.9	14.5	16.2	8.9

(b)

(c)

Figure Ⅳ-19. Transversal moisture contents distributions in 250 mm square timber at 120 hours. (a) Predicted value; (b) actual value; (c) picture of test specimen.

2.1	2.4	2.6	2.6	2.4	2.1
2.4	3.2	3.8	3.8	3.2	2.4
2.6	3.8	4.6	4.6	3.8	2.6
2.6	3.8	4.6	4.6	3.8	2.6
2.4	3.2	3.8	3.8	3.2	2.4
2.1	2.4	2.6	2.6	2.4	2.1

(a)

2.5	3.3	3.1	3.6	3.74	3.3
3.2	4.5	4.2	4.1	4.3	4.2
2.9	3.9	3.0	4.1	4.4	3.7
3.0	4.3	4.0	3.2	3.7	3.0
2.9	3.3	3.0	3.1	3.8	3.2
2.4	3.3	2.4	2.0	2.9	3.4

(b)

(c)

Figure Ⅳ-20. Transversal moisture contents distributions in 120 mm square timber at 288 hours. **(a)** Predicted value; **(b)** actual value; **(c)** picture of test specimen.

2.6	3.9	4.8	4.8	3.9	2.6
3.9	7.4	9.9	9.9	7.4	3.9
4.8	9.9	13.4	13.4	9.9	4.8
4.8	9.9	13.4	13.4	9.9	4.8
3.9	7.4	9.9	9.9	7.4	3.9
2.6	3.9	4.8	4.8	3.9	2.6

(a)

2.8	3.4	3.8	3.6	3.3	2.7
3.6	4.4	4.8	4.5	4.0	3.3
4.0	4.6	5.1	5.4	4.8	3.0
4.4	5.2	6.0	5.9	5.0	4.0
4.3	5.1	5.9	5.7	5.2	4.0
4.0	4.6	5.0	4.6	4.5	3.7

(b)

(c)

Figure Ⅳ-21. Transversal moisture contents distributions in 210 mm square timber at 288 hours. **(a)** Predicted value; **(b)** actual value; **(c)** picture of test specimen.

3.2	5.6	7.2	7.2	5.6	3.2
5.6	12.1	16.4	16.4	12.1	5.6
7.1	16.4	22.4	22.4	16.4	7.1
7.1	16.4	22.4	22.4	16.4	7.1
5.6	12.1	16.4	16.4	12.1	5.6
3.2	5.6	7.2	7.2	5.6	3.2

(a)

4.6	5.3	5.1	5.6	6.0	4.7
4.9	5.7	8.9	10.9	8.9	6.0
3.8	6.6	13.2	17.6	9.8	5.7
3.5	5.8	12.3	11.3	6.8	3.9
4.2	5.7	7.1	6.5	5.4	4.4
3.7	4.4	4.6	4.7	4.7	4.1

(b)

(c)

Figure Ⅳ-22. Transversal moisture contents distributions in 250 mm square timber at 288 hours. **(a)** Predicted value; **(b)** actual value; **(c)** picture of test specimen.

4.3.3. 고온 건조 중 할렬 측정 결과와 할렬 고려 모델 적용 결과

각 단면크기 별 고온 건조를 진행한 후, 건조 전, 건조 48 시간 , 120 시간, 168시간, 288시간에서의 할렬의 길이를 측정하였다. 측정한 할렬의 길이를 모두 더한 뒤 4를 나누어 각 시험편의 한 재면당 평균 할렬 길이를 계산하였다. 계산된 개체 당 평균 할렬 길이는 Figure Ⅳ-23 ~ Figure Ⅳ-25와 같다. 단면크기 별 한 재면당 평균 할렬 길이는 Table Ⅳ-5에 제시하였다. 측정 결과, 모든 단면 크기에서 할렬의 길이는 건조 120 시간일 때 최대값을 나타냈으며, 그 이후 줄어드는 경향을 보였다. 예측 시스템에는 Table Ⅳ-5에 제시한 평균 할렬 길이를 바탕으로 하여 할렬 고려 모델을 적용하였다.

각 단면크기 시험재의 고온 건조 중 할렬의 깊이를 측정하였다. 측정한 할렬 깊이는 시험재 말단 부위와 중심 부위에서 제작한 함수율 시편의 사진을 분석하여 실시하였다. 건조 시간에 따른 할렬의 깊이 차이는 미미하였으며, 말단 부위와 중심 부위의 할렬 깊이 또한 할렬 개수에 차이가 있을뿐 그 깊이의 차이는 미미하였기 때문에 모델 적용에는 단면별 평균 깊이를 이용하였다. 평균 할렬 깊이는 120 mm 정각재에서 21.4 mm, 210 mm 정각재에서 22.3 mm, 마지막으로 250 mm 정각재의 경우 36.6 mm로 측정되었으며, 측정된 값은 횡단 방향 거리 증분과 유사한 값을 보였기 때문에 할렬 고려 모델에서 설정한 할렬의 깊이는 거리 증분과 같은 값을 이용하였다.

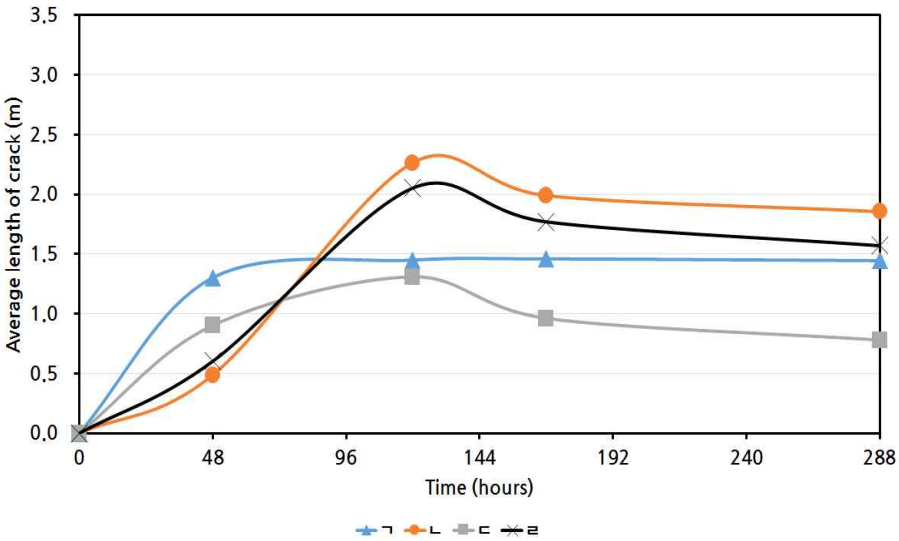


Figure Ⅳ-23. Average crack length on 120 mm square timber surface.

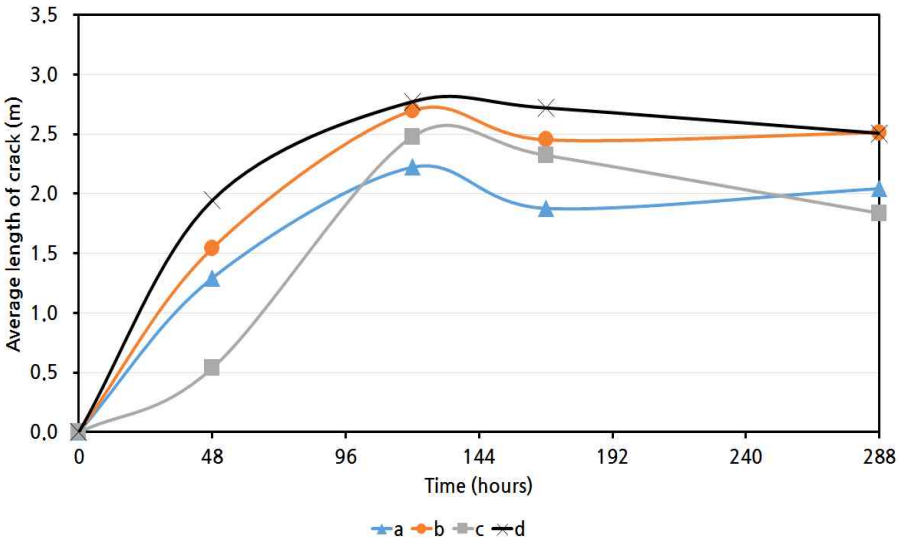


Figure Ⅳ-24. Average crack length on 210 mm square timber surface.

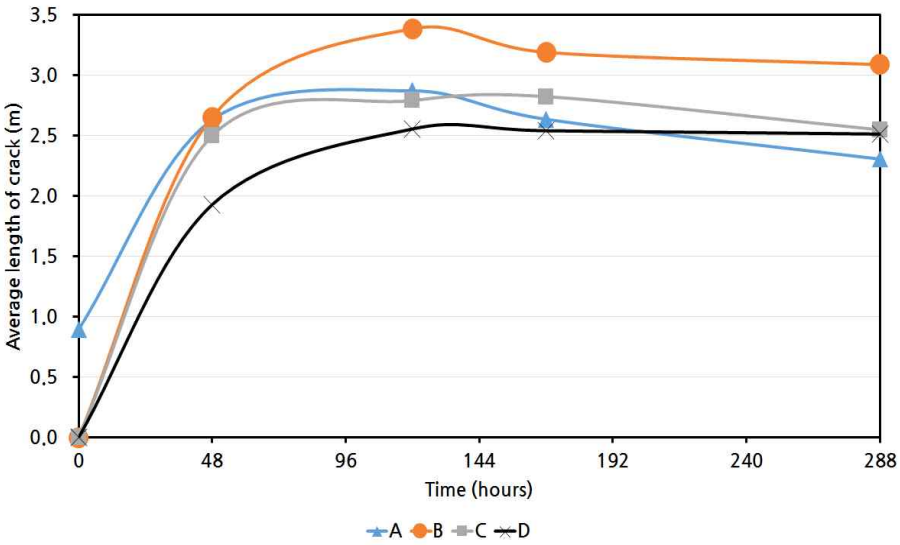


Figure Ⅳ-25. Average crack length on 250 mm square timber surface.

Table Ⅳ-5. Average crack length on wood surface.

Time (hours)	Average crack length on wood surface (m)		
	120×120 mm^2	210×210 mm^2	250×250 mm^2
0	0.90	0	0
48	0.82	1.33	2.46
120	1.77	2.54	2.90
168	1.55	2.34	2.80
288	1.41	2.26	2.62

실험에 사용한 제재목 길이의 50 %인 1.75 m 이상 할렬이 발생한 경우에 할렬 고려 모델을 적용하였다. 120 mm 정각재에서 1.75 m 이상 할렬이 발생한 시간은 120 시간이었으나 이후 표면에서 발생하는 압축응력으로 인해 할렬이 닫히는 현상이 발생하였다. 따라서 할렬이 제재목 길이의 50 % 이상을 유지한 기간이 매우 짧다고 가정하여 할렬 고려 모델을 적용하지 않았다. 210 mm 정각재는 120 시간, 250 mm 정각재는 48 시간에 할렬이 1.75 m 이상으로 발생하였으며, 이후 목재 내부 함수율 변화에 큰 영향을 미칠 것이라는 가정 하에 할렬 고려 모델을 예측 시스템에 적용하여 다시 예측을 진행하였다. Figure Ⅳ-26과 Figure Ⅳ-27은 할렬을 고려하지 않은 모델과 할렬 측정 후 적용한 할렬 고려 모델을 이용한 예측 함수율과 실측 함수율을 분율 함수율로 나타낸 결과이다. 210 mm 정각재와 250 mm 정각재의 예측 결과는 실제 측정 결과와 비교하였을 때 오차 발생이 미미하였으며, 기존에 사용한 할렬을 고려하지 않은 모델의 경우보다 오차가 적게 발생하며 예측 시스템의 성능이 향상되었다.

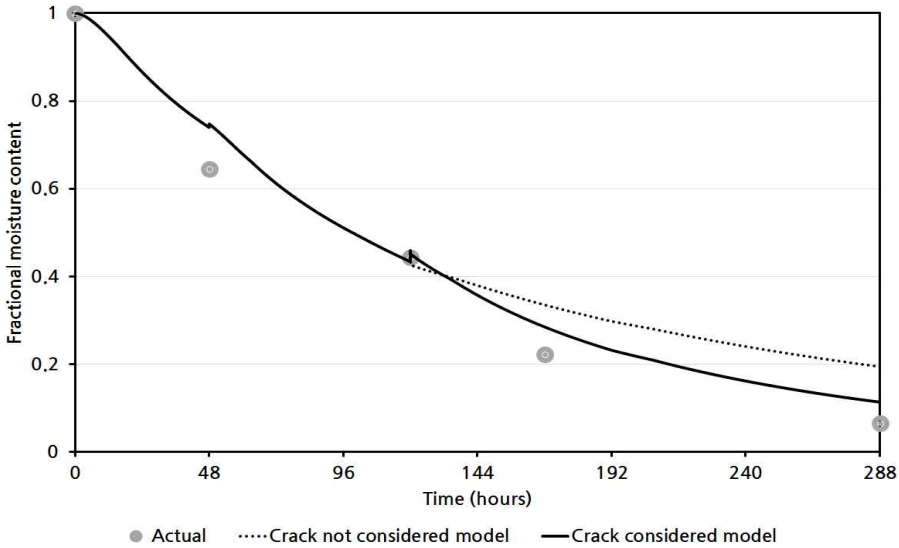


Figure Ⅳ-26. Fractional moisture content of 210 mm square timber with crack considered model.

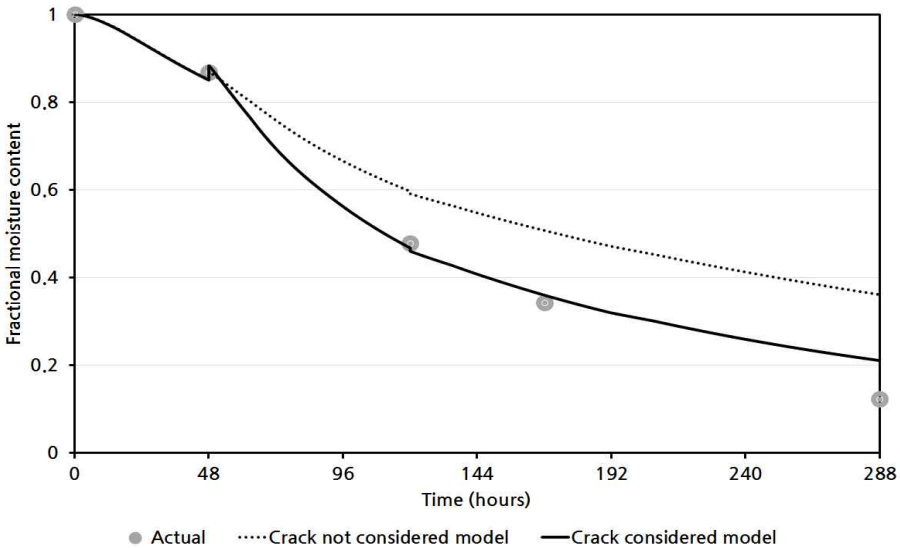


Figure Ⅳ-27. Fractional moisture content of 250 mm square timber with crack considered model.

더욱 정확한 함수율 비교를 위해 Figure Ⅳ-19, Ⅳ-21, Ⅳ-22에 제시되어있는 할렬을 고려하지 않은 모델의 예측과 실제 측정 함수율 분포 결과와 할렬 고려 모델의 함수율 분포 예측 결과를 비교하였다. 할렬 고려 모델의 건조 시간에 따른 함수율 분포 예측 결과는 Figure Ⅳ-28 ~~ Figure Ⅳ-30에 제시하였다.

210 mm 정각재의 경우, 288 시간 건조 후 할렬 고려 모델의 최종 평균 함수율은 6.55 %로 예측되었으며, 실제로 측정된 최종 평균 함수율인 4.53 % 보다 높은 값을 예측하였으나 할렬 고려 모델을 사용해 예측한 결과가 할렬을 고려하지 않은 모델보다 적은 오차를 보이며 예측시스템의 성능이 향상됨을 확인하였다.

250 mm 정각재의 경우, 건조 120시간에서 할렬을 고려하지 않은 모델의 예측 평균 함수율은 25.49 %, 할렬을 고려한 모델의 예측 평균 함수율은 20.27 %로 예측되었으며, 실제 평균 함수율은 20.73 %로 측정되어 과도한 수분방사가 일어나는 구간을 적은 오차로 예측하였다. 288 시간 건조 후, 할렬을 고려하지 않은 모델은 16.30 %로 예측한 반면에, 할렬을 고려한 모델은 10.31 %로 예측하였고, 실제 측정값이 6.83 %로 약 3.5 %의 차이를 보여 예측 성능이 향상되었음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 사용한 할렬 고려 모델을 예측에 적용할 경우, 모든 단면크기에서 할렬이 일정 길이 이상 발생할 때 예측 성능을 높일 수 있을 것으로 기대된다.

3.2	3.7	3.4	3.4	3.7	3.2
3.7	5.4	6.3	6.3	5.4	3.7
3.4	6.3	9.8	9.8	6.3	3.4
3.4	6.3	9.8	9.8	6.3	3.4
3.7	5.4	6.3	6.3	5.4	3.7
3.2	3.7	3.4	3.4	3.7	3.2

(a)

2.8	3.4	3.8	3.6	3.3	2.7
3.6	4.4	4.8	4.5	4.0	3.3
4.0	4.6	5.1	5.4	4.8	3.0
4.4	5.2	6.0	5.9	5.0	4.0
4.3	5.1	5.9	5.7	5.2	4.0
4.0	4.6	5.0	4.6	4.5	3.7

(b)

Figure Ⅳ-28. Transversal moisture contents distributions in 210 mm square timber at 288 hours. (a) Predicted value by crack considered model; (b) actual value.

12.5	15.4	13.1	13.1	15.4	12.5
15.4	24.8	25.5	25.5	24.8	15.4
13.1	25.5	36.4	36.4	25.5	13.1
13.1	25.5	36.4	36.4	25.5	13.1
15.4	24.8	25.5	25.5	24.8	15.4
12.5	15.4	13.1	13.1	15.4	12.5

(a)

10.1	16.6	13.4	15.7	14.4	7.8
16.6	39.1	41.0	42.7	35.3	13.1
14.0	36.2	31.8	31.0	40.3	14.4
14.6	33.9	21.1	24.9	36.8	13.8
16.9	35.1	25.8	31.9	37.0	14.7
10.6	18.0	16.9	14.5	16.2	8.9

(b)

Figure Ⅳ-29. Transversal moisture contents distributions in 250 mm square timber at 120 hours. (a) Predicted value by crack considered model; (b) actual value.

2.5	4.5	3.8	3.8	4.5	2.5
4.5	8.3	9.5	9.5	8.3	4.5
3.8	9.5	16.1	16.1	9.5	3.8
3.8	9.5	16.1	16.1	9.5	3.8
4.5	8.3	9.5	9.5	8.3	4.5
2.5	4.5	3.8	3.8	4.5	2.5

(a)

4.6	5.3	5.1	5.6	6.0	4.7
4.9	5.7	8.9	10.9	8.9	6.0
3.8	6.6	13.2	17.6	9.8	5.7
3.5	5.8	12.3	11.3	6.8	3.9
4.2	5.7	7.1	6.5	5.4	4.4
3.7	4.4	4.6	4.7	4.7	4.1

(b)

Figure Ⅳ-30. Transversal moisture contents distributions in 250 mm square timber at 288 hours. (a) Predicted value by crack considered model; (b) actual value.

제 5 절

결론

본 연구에서는 실험적, 이론적인 내용을 바탕으로 하여 목재내부의 열전달 영향 인자인 열확산계수, 열대류계수를 결정하였다. 또한 기하학적 수분확산모델과 대류물질전달계수 전환식을 이용하여 목재 수분확산계수, 수분방사계수를 결정하였다. 이를 3차원 유한차분법에 적용하여 고온 건조에서 단면크기에 따른 온도 및 함수율 분포 변화를 예측하였다. 또한 세 종류 단면크기의 시험재를 사용하여 실제 건조를 진행하였으며, 고온 건조 중 할렬 길이를 측정하고 이를 이용하여 할렬 고려 모델을 사용한 예측 시스템의 적용가능성을 평가하였다.

온도예측결과와 실제 측정한 온도 데이터와 비교하였을 때, 초기 48시간까지 예측값과 실측값이 적은 오차를 나타냈다. 하지만 48시간에서 168시간사이에서 오차가 발생하는 구간이 발생하였으며, 이는 목재 내부 수분이 섬유포화점 이하로 감소해 온도가 비등점 이상으로 상승하기 시작하는 시점을 정확하게 예측하지 못한 것으로 추정된다. 따라서 고온 건조 중 목재 내부 섬유포화점을 정확히 분석할 수 있다면, 더욱 정확한 예측이 가능할 것으로 보인다.

함수율 예측 결과, 120 mm 정각재의 경우, 할렬이 시험재 길이의 50 % 이상 발생한 시점이 매우 짧았기 때문에 할렬을 고려하지 않은 모델을 통해 예측을 진행하였으며, 예측과 실측의 최종 평균함수율 차이는 약 0.5 %로 나타났다. 따라서 초기 함수율과 온도 데이터를 이용하는 예측시스템은 할렬이 발생하지 않는 건조 공정의 경우에 유효한 방법일 것이라 생각된다.

210 mm 정각재의 경우에 건조 120 시간 후 할렬이 시험재 길이의 50 %를 초과한 약 2.54 m의 길이로 발생하였기 때문에 할렬 고

려 모델을 예측 시스템에 적용하였으며 최종 평균 함수율 차이가 약 2 %로 나타나 할렬을 고려하지 않은 모델보다 향상된 예측 성능을 보였다. 마지막으로 250 mm 정각재의 건조 중 목재의 열전달 및 수분이동을 예측하였을 때, 할렬 고려 모델을 사용하였을 때 약 3.5 %의 오차로 최종 평균 함수율을 예측하여 예측 성능이 향상됨을 확인할 수 있었다. 따라서 고온 건조 중 온도 및 함수율 분포 예측 실험을 통해 할렬 고려 모델을 예측에 적용한다면, 할렬이 일정 길이 이상 발생한 경우에 예측 성능을 높일 수 있을 것이라 기대된다. 또한 할렬의 길이, 폭, 깊이를 유동적으로 적용하는 추가적인 모델을 이용한다면 더욱 정확한 예측이 가능할 것이다.

대단면 정각재를 건조하는 경우, 건조 결함을 최소화하는 건조 스케줄을 적용하더라도 옹이 분포, 수심의 위치, 조만재 비율 등의 개체간 차이로 인해 건조 결함이 발생할 확률이 높다. 따라서 본 연구 내용을 바탕으로 하여 실시간으로 목재 건조 결함을 예측 시스템에 적용해 예측 성능을 향상 시킬 수 있을 것이라 생각된다. 또한 건조 중 할렬이 발생하더라도 실시간으로 예측을 수정하여 목표함수율 도달 시간을 정확히 산정해 과도한 건조를 통한 에너지 소비를 줄이고 과도한 건조로 인한 추가적인 건조 결함 발생을 억제하여 목재의 수율을 높일 수 것이라 기대된다.

참고문헌

Ananias R. A., Mougel E., and Zoulalian A., Introducing an overall mass-transfer coefficient for prediction of drying curves at low-temperature drying rates, Wood Science and Technology 43:43-56, (2009).

Avramidis S., Englezos P., Papathanasion T., Dynamic Nonisothermal Transport in Hygroscopic Porous Media: Moisture Diffusion in Wood. AIChE Journal 38(8):1279-1287. (1992).

Avramidis S., Hatzikiriakos S. G., and Siau J. F., An irreversible thermodynamics model for unsteady-state nonisothermal moisture diffusion in wood. Wood Science and Technology 28:349-358. (1994).

Baranski J. Moisture content during and after high-and normal-temperature drying processes of wood. Drying Technology, 36(6): 751-761. (2018).

Basilico, C., Genevaux, J. M., and Martin, M., High temperature drying of wood semi-industrial kiln experiments. Drying Technology, 8(4), 751-765. (1990).

Cai, L., Oliveira, L.C. Experimental evaluation and modeling of high temperature drying of sub-alpine fir. Wood science and

technology 44(2): 243~252. (2010).

da Silva, W.P., da Silva, C.M., Rodrigues. D.P., A.F. Comparison between two-and three-dimensional diffusion models to describe wood drying at low temperature. European Journal of Wood and Wood Products 72(4): 527~533. (2014).

da Silva, W.P., da Silva, L.D., de Silva, C.M., Nascimento. P.L. Optimization and simulation of drying processes using diffusion models: application to wood drying using forced air at low temperature. Wood science and technology 45(4): 787~800. (2011).

Deliiski, N. Transient heat conduction in capillary porous bodies. In Convection and Conduction Heat Transfer. InTech. (2011).

Eom Y. G., Wood Anatomy of Korean Species, Seoul, MEDIA WOOD,.Ltd., Republic of Korea, (2015).

Fredlund B., Modelling of Heat and Mass Transfer in Wood Structures During Fire, Fire Safety Journal 20:39-69, (1993).

Gerhards C. C. Effect of moisture content and temperature on the mechanical properties of wood: an analysis of immediate effects. Wood and Fiber Science 14(1): 4-36. (2007).

Glass, Samuel V. Glass, and Samuel L. Zelinka. Moisture Relations and Physical Properties of Wood. (2010).

Han Y., Park J., Chang Y., Eom C., Lee J. and Yeo H., Classification of the conductance of moisture through wood cell components, Journal of Wood Science 59(6):469-476, (2013).

Hart, C.A., Effective surface moisture content of wood during sorption, Wood Science 9(4): 194-201 (1977).

Holman J. P., Heat transfer. Ninth Edition. Seoul, Kyungmoon. (2005).

Kang W., Kang C. W., Chung W. Y., Eom C. D., and Yeo H., The effect of openings on combined bound water and water vapor diffusion in wood, Journal of Wood Science 54(5): 343-348, (2008).

Kim, H., Han, Y., Park, Y., Yang, S. Y., Chung, H., Eom, C. D., and Yeo, H. Finite Difference Evaluation of Moisture Profile in Boxed-heart Large-cross-section Square Timber of Pinus densiflora during High Temperature Drying. Journal of the Korean Wood Science & Technology, 45(6): 762-771. (2017).

Kollmann, F. The Mechanical Properties of Wood of Different Moisture Content Within-200 Degrees to+ 200 Degrees C Temperature Range. (1941).

Kollmann, F. F. P. and Cote Jr. W. A., Principles of wood science and technology, I. Solid wood. Springer, Berlin, Heidelberg, New York. 592, (1968).

Konopka A., Baranski J., Hurakova T., Klement I. The influence of high temperature wood drying conditions using air-steam mixture on its properties. Annals of Warsaw University of Life Sciences-SGGW. Forestry and Wood Technology 90:107-114. (2015).

Langrish T. A. G., Kho P. C. S., and Keey R. B. Experimental measurements and numerical simulation of local mass-transfer coefficient in timber kilns. Drying Technology, 10, 753-781. (1992).

MacLean J. D., Thermal Conductivity of Wood. Heating, piping, and air conditioning 13:380-391. (1941)

McMillen J. M., Accelerated kiln drying of presurfaced 1-inch northern red oak (No. FSRP-FPL-122), Forest products lab madison wis, (1969).

Melaaen M. C. and Gronli M. G., Modelling and Simulation of Moist Wood Drying and Pyrolysis, Developments in Thermochemical Biomass Conversion 132-146, (1997).

Nadler, K. C., Choong, E. T. and Wetzel, D.M. Mathematical modeling of the diffusion of water in wood during drying. Wood and fiber science 17(3): 404～423. (2007).

Obataya, E., Shibutani, S., Hanata, K., & Doi, S. Effects of high temperature kiln drying on the practical performances of Japanese cedar wood (Cryptomeria japonica) I: changes in hygroscopicity due to heating. Journal of wood science, 52(1), 33-38. (2006).

Pang S., Langrish T. A. G., and Keey R.B., Moisture movement in softwood timber at elevated temperatures, Drying Technology 12(8):1897-1914. (1994).

Pang S., Relationship between a Diffusion Model and a Transport Model for Softwood Drying, Wood and Fiber Science 29(1):58-67, (1996).

Parlange M. B. Cahill A. T., Nielsen D.R., Hopmans J. W., and Wendroth O.. Review of heat and water movement in field soils, Soil and Tillage Research 47(1):5-10, (1998).

Perré, P., and Martin M., Drying at high temperature of sapwood and heartwood: theory, experiment and practical consequence on kiln control. Drying technology 12(8): 1915-1941.(1994).

Perré, P., Fundamentals of Wood Drying, Nancy, France, A.R.BO.LOR, pp. 366 (2007).

Philip J. R., de Vries D. A., Moisture movement in porous materials under temperature gradients, Trans. Am. Geophys. Union 38:222-232, (1957).

Rémond, R., Passard, J., and Perré, P. The effect of temperature and moisture content on the mechanical behaviour of wood: a comprehensive model applied to drying and bending. European Journal of Mechanics-A/Solids, 26(3), 558-572. (2007).

Salinas C., Gatica Y. A., Vargas H. A., and Ananias R. A., Three-Dimensional Simulation of Isothermal Wood Drying of Radiata Pine Using Effective Diffusion Coefficients, Latin American applied research 43(1):95-102, (2013).

Siau J. F., Wood: Influence of moisture on physical properties, Blacksburg. Virginia Polytechnic Institute and State University, (1995).

Simpson, W.T., Dry kiln operator's manual, United States Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, USA, pp. 274 (1991).

Skaar C., Wood-Water relations, Berlin, Springer Berlin Heidelberg, (1988).

Stamm A. J., Combined bound-water and vapour diffusion into sitka spruce, Forest Products Journal 10(12):644-648, (1960).

Stamm A. J., Movement of fluids in wood. Part I: Flow of fluids in wood, Wood Science and Technology 1(2):122-141, (1967a).

Stamm A. J., Movement of fluids in wood. Part II: Diffusion, Wood Science and Technology 1(3):205-230, (1967b).

Tarmian, A., Sepegh, A., and Rahimi, S., Tension wood drying stresses and strains and a conventional kiln schedule to efficiently dry mixed tension/normal wood board in poplar (Populus nigra), Drying Technology 27(10): 1033-1040 (2009).

Thibeault, F., Marceau, D., Younsi, R., and Kocaefe, D. Numerical and experimental validation of thermo-hygro-mechanical behaviour of wood during drying process. International Communications in Heat and Mass Transfer, 37(7), 756-760. (2010).

Tiemann H.D., Kiln Drying of Lumber, Philadelphia. J.P. Lippincott Coy 4th edn, (1921).

Yeo H., Jung H., Distribution Model Based on Computer Simulation for Internal Temperature and Moisture Content in Press Drying of Tree Disks, Journal of Korean Wood Science and Technology. 22(2): 61~70, (1994).

Yeo H., Smith W. B., Development of a convective mass transfer coefficient conversion method, Wood and Fiber Science 37(1):3-13, (2005).

Younsi R., Kocaefe D., Poncsak S., and Junjun T., Numerical and Experimental Validation of The Transient Heat And Mass Transfer During Heat Treatment of Pine Wood, International Journal of Modelling and Simulation 28(2):117-123, (2008).

Younsi R., Kocaefe D., Poncsak S., and Kocaefe Y., A Diffusion-based Model for Transient High Temperature Treatment of Wood, Journal of Building Physics 30(2):113-135, (2006).

Younsi R., Kocaefe D., Poncsak S., and Kocaefe Y., Three-dimensional simulation of heat and moisture transfer in wood, Applied Thermal Engineering 26:1274-1285, (2005).

Younsi R., Poncsak S., and Kocaefe D., Experimental and Numerical Investigation of Heat and Mass Transfer during High-Temperature Thermal Treatment of Wood, Drying Technology 28:1148-1156, (2010).

강춘원, 김남훈, 김병로, 김영숙, 변희섭, 소원택, 여환명, 오승원, 이원희, 이화영, 신고 목재 물리 및 역학, 서울, 향문사, (2008).

한연중, 박병수, 강호양, 변희섭, 이원희, 엄창득, 여환명, 비평형상태의 소나무재의 내부수분이동 및 표면방사 계수 결정, 산림바이오에너지 27(1):11-18, (2008).

한연중, 서연옥, 정성철, 엄창득. 소나무재선충병 피해를 받은 곰솔원목의 열처리 소요시간 예측. 목재공학 44(3):370-380, (2016).

한연중, 엄창득, 김세종, 강욱, 박주생, 박문재, 여환명. 낙엽송재내 수분의 내부이동 및 표면방사 평가, 목재공학 35(4):1-8, (2007).

한연중, 소나무 목재 내 물질전달 및 건조응력의 비정상상태 분석, 박사학위논문, 서울대학교, (2014).

KS F 2198. 목재의 밀도 및 비중 측정 방법. (2001).

Abstract

Hyunbin Kim
Department of Forest Sciencies
The Graduate School
Seoul National university

Wood drying is essential for the use of wood. High temperature drying is a method for drying wood at 100°C or higher, which can dry the wood faster than kiln drying. However, during high temperature drying of wood with large cross section, there is a high possibility of occurrence of drying defects. Drying schedule improvement to reduce the occurrence of drying defects has mainly been performed through trial and error method. However, it is effective to improve the schedule by using the simulation of drying process. Heat transfer and moisture movement of wood during drying can be analyzed by numerical analysis using wood heat transfer factor and moisture movement factor.

By measuring defects during drying and applying additional moisture deviations as well as predicting initial moisture content and temperature data to the prediction, it is possible to predict the time to reach the target moisture content to prevent excessive drying of the wood with defects. Therefore, in this study, the temperature and moisture profiles of the wood during high temperature drying were predicted by numerical analysis

and the surface cracks affecting the moisture emission from the wood surface were reflected to the prediction.

The wood to be subjected to prediction was larch(*Larix kaempferi*) wood. Three different width of larch timber were used, The width of each types was 120 mm, 210mm, and 250 mm, and the lengths were all 3,500 mm. The initial average moisture contents were 37.59% for the 120 mm square timber, 43.13% for the 210 mm square timber, and 41.85% for the 250 mm square timber. The initial temperature was about 16 ℃. Based on the experimental and theoretical equations, the specific heat, density, thermal conductivity, thermal diffusivity, and convective heat transfer coefficient of wood were determined. The moisture diffusion coefficient and surface emission coefficient of wood were determined by using geometric moisture diffusion model and convective mass transfer coefficient conversion. By applying the determined coefficients to the three-dimensional finite difference method, the temperature and moisture content profiles in the wood at the high temperature drying were predicted. In addition, the feasibility of the prediction system was evaluated by measuring the temperature, moisture content, length and depth of the cracks during actual high temperature drying.

Compared with the prediction result and the measured result of temperature in the wood, there was an error occurrence interval between 48 hours and 168 hours. This is due to the error

between the fiber saturation point set in the prediction and the actual saturation point at the actual high temperature. In the moisture content prediction, re-prediction was performed using a model considering the cracks when the cracks occurred more than 50% of the test length. The difference between the predicted and actual final average moisture contents of each width of square timbers was about 0.5%, 2% and 3.4%. When the crack considered model was applied to the prediction, more accurate results could be predicted.

Even if a drying schedule to minimize drying defects is applied, there is always a probability that drying defects will occur due to differences in the physical properties of the drying objects. Therefore, it is possible to construct a system that can apply real - time drying defects of the wood to the prediction system based on this study. Also, it is expected that, even if drying defects were occurred during the drying process, it is possible to correct the prediction in real time to accurately predict the time to reach the target moisture content, thereby reducing energy consumption and suppressing the occurrence of additional drying defects due to excessive drying.

key words : moisture transfer of wood, heat transfer of wood, finite difference method, high temperature drying

Student number : 2017-21425