

시뮬레이션에 의한 간밤의 동결시간 예측

Freezing Time Prediction of Peeled Chestnut Using Simulation

김중훈*	정진웅*	박노현*	이충호**
정회원		정회원	정회원
J.H.Kim	J.W.Jeong	N.H.Park	C.H.Lee

1. 서론

국내 밤 생산량은 1970년대 년평균 만 2천톤을 생산하였고, 1980년대 접어들어 년평균 6만 5천톤으로 생산이 대폭 증가되었으며, 1990년대에는 약 10만톤 이상의 생산량을 나타내고 있다. 1998년도의 생산량은 109,965톤으로 중국과 더불어 세계 제 1의 밤 생산국으로 세계 생산량의 20%을 차지하고 있다. 밤 수출액은 1971년이래 꾸준히 증가하여 1996년도에는 수출액이 1억1천2백만불을 달성하는 높은 실적을 나타냈으며, 1999년도에는 15만7천톤을 수출하여 8천5백만불의 수출액을 나타냈다. 수출형태는 생밤, 간밤, 통조림 등이 있으며, 간밤이 대부분을 차지하고 있다.

밤의 동결점, 비열, 열전도도 등 열물성치는 동결, 수송, 저장 및 가공공정의 설계에 필수적인 자료이다. 일반적으로 청과물 및 식품에 대한 동결점, 비열 등에 대한 열물성치는 대단히 많이 보고되고 있고¹⁾, 일부 식품에 관한 열전도도 및 열확산율이 보고되고 있으나⁴⁻⁵⁾, 밤에 대한 동결점, 비열, 열전도도 등 열물성치에 대한 보고는 찾아 볼 수 없다.

동결은 농산물이나 식품의 품질보존을 위한 보편적인 방법중의 하나로서 온도를 저하시켜 조직내의 자유수를 빙결정화하여 미생물의 성장과 발효활성의 억제로 농산물이나 식품의 품질저하를 방지시키는 것이다²⁾. 따라서 농산물의 품질저하를 방지하고 동결공정의 최적화하기 위하여 동결시간 예측은 대단히 중요하다.

그러므로 본 연구에서는 간밤의 열물성치를 분석하고, 시뮬레이션을 통하여 간밤의 내부 깊이별 동결점에 도달하는 과정의 분석을 통하여 간밤의 동결시간 예측모델을 개발하고자 하였다.

+ 이 연구는 농림부정책연구과제 연구비 지원으로 수행되었음

* 한국식품개발연구원 식품유통연구본부

** 성균관대학교 생물기전공학과

2. 재료 및 방법

가. 공시재료

본 연구에서 사용된 밤은 1999년도에 공주 밤 생산영농조합에서 생산된 은기품종으로서 0.02mm의 PE필름에 넣어 0℃의 저온창고에 저장하여 사용하였다. 간밤 시료는 저장된 밤을 16℃의 예냉실에서 3시간이 지난 후 내외피를 박피하여 사용하였다.

나. 실험방법

열적특성 분석

측정시료의 동결 전후의 밀도는 부피에 대한 중량의 비로써 산정하였으며, 동결상태의 경우는 일정량의 시료를 비중병에 주입하여 처리온도 별로 약 24시간 동결시킨 후의 체적과 동결전의 중량으로 구하였다. 초기빙결점은 Beckmann법에 의해 열평형 온도대를 외삽하여 결정하였으며, 표면 열전달계수는 Creed와 James의 총괄 열전달계수의 산출을 위한 transient temperature method를 적용하였다. 비열은 빙결점 이상의 온도에서는 Siebel 및 Kong의 실험식에 의해, 빙결점 이하의 온도에서는 Yano 및 Kong의 실험식으로 산정하였으며, 잠열은 Woolrich의 실험식으로, 동결동안 제거되는 전열량은 시료의 초기온도와 최종동결온도사이의 total enthalpy차를 이용하여 산출하였다. 그리고, 열전도도를 추정하기 위해 열확산율을 측정하여 $k = \alpha \cdot \rho \cdot C_p$ 식(여기서 α =열확산율(m^2/hr), ρ =밀도(kg/m^3), C_p =비열($J/m^3 \cdot ^\circ C$))으로 산출하였다. 이를 위해 열확산율은 항온조에서 시간에 따른 온도변화를 연속 측정하여 curve fitting법을 이용하여 분석하였다.

수학적 모델 및 유한차분 해석

간밤의 냉동공정의 수학적 모델은 간밤의 열전달 특성을 전도 및 대류에 의한 열이동, 내부 온도구배 및 간밤의 물성값을 이용해 모델링을 수행하였으며, 수학적 모델링을 유도하는 공급냉각열원은 냉각된 일정한 온도의 공기이며 상변화는 짧은 시간에 이루어지고 내부의 상변화는 일정한 것으로 가정하여 수학적 모델을 개발하였다.

간밤 냉동공정의 유한차분 해석은 간밤 냉동공정의 수학적모델을 이용하여 수치해석방법인 양함수 유한차분법(explicit finite differential method)을 이용하여 수행하였다.

동결실험

간밤의 동결실험은 실제 간밤의 동결과정을 분석하여 간밤 동결과정의 수학적 해석 및 컴퓨터 시뮬레이션의 결과를 검증하기 위하여 수행되었다. 동결실험은 -5, -10, -15℃의 동결온도에서 60분간 밤 내부의 동결과정을 분석하였다. 동결시간에 따른 밤 내부의 온도는 시료 표면과 표면으로부터 3, 6, 9, 12mm 위치에 열전대(thermocouple, Ktype) 온도센서를 삽입하여, 온도계측시스템(hydra data acquisition system, model 2620A, Fluk, USA)를 이용하여 30초 간격으로 연속 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 간밤의 열적특성

간밤이 동결점에 도달하는 과정을 해석하기 위한 간밤의 열적 특성으로 열전도도, 비열, 잠열, 동결점, 밀도 등을 분석하였으며, 분석결과는 표 1과 같다.

Table 1 Thermo-properties of peeled chestnut

Properties	Above freezing	Below freezing
Density(kg/m ³)	1063.7	1007.5
Thermal conductivity(W/m°C)	0.43	1.18
Specific heat(J/m ³ °C)	2.72×10 ⁶	1.32×10 ⁶
Latent heat(J/m ³)	216.9×10 ⁶	
Freezing point(°C)	-2.8	
Water content(%)	64.80	

나. 시뮬레이션

시뮬레이션 프로그램

간밤의 냉동과정의 수학적 모델 및 유한차분 해석법을 이용하여 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다. 시뮬레이션 프로그램은 마이크로소프트사의 Visual C++ 프로그램 언어를 이용하여 윈도우 메뉴방식으로 개발되었다.

개발된 프로그램은 열전도도, 비열, 대류 열전달계수 등 간밤의 열적특성과 밀도를 시료의 고정변수로 사용하고, 동결온도, 시료의 초기온도, 시료의 직경 등을 시뮬레이션 입력변수로 사용하여 지정된 동결온도에서 시간에 따른 간밤 내부의 온도변화를 분석할 수 있도록 개발되었다.

동결과정 분석

간밤 내부의 깊이에 따라 동결되는 과정을 해석하기 위하여 주어진 동결온도에서 밤 내부 깊이별 동결점에 이르는 과정을 분석하였다. 동결온도가 일정할 때 밤 표면으로부터 깊이에 따른 동결점에 이르는 과정은 밤 중심에서부터 표면에 근접한 위치일수록 온도가 떨어지는 속도가 빠르고 일찍 동결점에 도달하는 것으로 나타났다.

그림 1은 초기온도가 17°C인 간밤이 동결온도 -5°C에서 동결점에 도달하는 과정을 나타낸 것이다. 밤 시료 표면으로부터 3, 6, 9, 12mm 깊이에서 동결점에 이르는 과정을 보면, 동결시간 6분이 지난후의 밤 내부 깊이별 온도는 3mm일 때 1.8°C, 6mm일 때 3.4°C, 9mm일 때 4.8°C, 12mm일 때 5.7°C의 온도구배가 나타났다. 그리고 밤의 동결점에 이르는 시간은 표면으로부터 3mm일 때 12분 36초, 6mm일 때 13분 54초, 9mm일 때 14분 48초, 12mm일 때 15분 18초로 나타났다.

또한 동결온도가 밤의 동결과정에 미치는 영향은 매우 중요하다. 동결온도가 낮을수록 밤 내부가 동결점에 이르는 시간이 빠르게 나타난다. 그림 1에서 동결온도가 낮을수록 동결점에 도달하는 그래프의 기울기가 커지는 것을 알 수 있으며, 동결점에 이르는 시간은 동결온도가 -5°C 일 때 15분 18초, -10°C 일 때 9분 30초, -15°C 일 때 7분 27초, -20°C 일 때 6분 18초, -25°C 일 때 5분 30초로 나타났다.

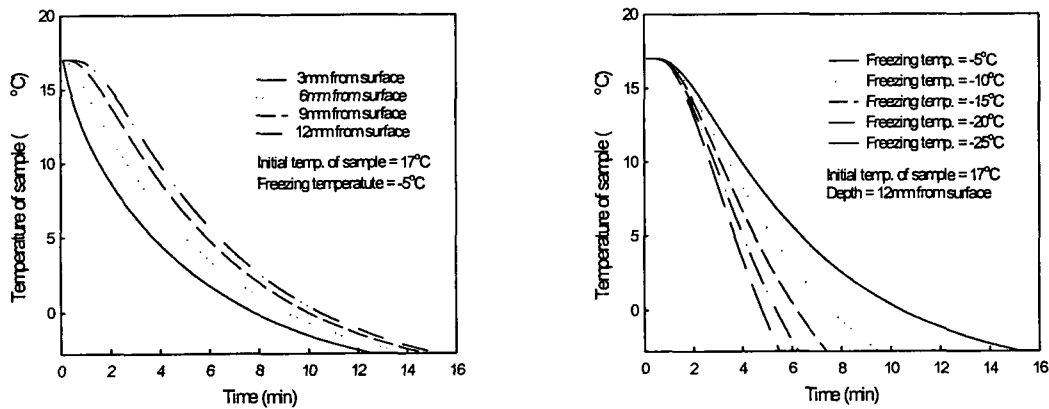


Fig. 1 Changes of peeled chestnut temperature using simulation.

표 2는 시뮬레이션에 의한 간밤 표면으로부터의 내부 깊이별 동결점에 도달하는 시간을 나타낸 것이다.

Table 2 Freezing time of peeled chestnut using simulation

Temp of freezing ($^{\circ}\text{C}$)	Initial temp. of sample ($^{\circ}\text{C}$)	Depth from surface (mm)	Freezing time (min)
-5	18	3	12.9
		6	14.2
		9	15.0
		12	15.5
-10	20	3	7.5
		6	8.8
		9	9.6
		12	10.1
-15	21	3	5.5
		6	6.8
		9	7.6
		12	8.1
-20	19	3	3.9
		6	5.2
		9	6.1
		12	6.6

동결실험

간밤의 동결실험의 수행결과에서 동결온도가 일정한 경우 밤 중심에서부터 표면에 근접한 위치일수록 온도가 떨어지는 속도가 빠르고 일찍 동결점에 도달하는 것으로 나타났으며, 또한 동결온도가 낮을수록 밤 내부가 동결점에 이르는 시간이 빠르게 나타났다. 이와 같은 결과는 시뮬레이션의 결과와 일치한다.

그림 2는 동결온도가 -5°C 일 때 간밤 내부의 위치별 동결점에 도달하는 동결실험 결과와 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 동결시간 초기에서는 실험결과와 시뮬레이션 결과값이 차이를 나타내고 있으나 동결점에 근접할수록 실험 결과와 시뮬레이션 결과가 일치하는 것을 알 수 있다. 시료의 초기온도는 위치별로 $17\sim 18.6^{\circ}\text{C}$ 를 나타냈으며, 동결점에 이르는 시간은 시뮬레이션 결과에서 밤 표면으로부터 3, 6, 9, 12mm 위치에서 각각 12.7, 13.9, 14.6, 15.5분으로 나타났고, 실증실험에서는 밤 표면으로부터 3, 6, 9, 12mm 위치에서 각각 13.0, 14.0, 14.5, 15.0분으로 나타났다.

그림 3은 시뮬레이션 결과와 검증실험 결과를 비교 분석한 것으로 시뮬레이션 결과와 검증실험 결과의 회귀분석에서 이들은 선형적인 관계를 나타내고 있으며, 이들의 결정계수(R^2)는 0.99로 높게 나타났다. 그러므로 본 연구에서 개발한 간밤 내부의 위치별 동결점에 도달하는 과정을 분석하는 시뮬레이션 모델은 간밤의 동결공정 해석에 사용될 수 있을 것으로 판단되었다.

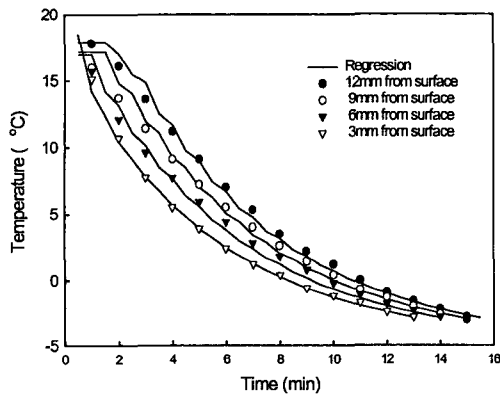


Fig. 2 Comparison of measured and simulated temperature of peeled chestnut.

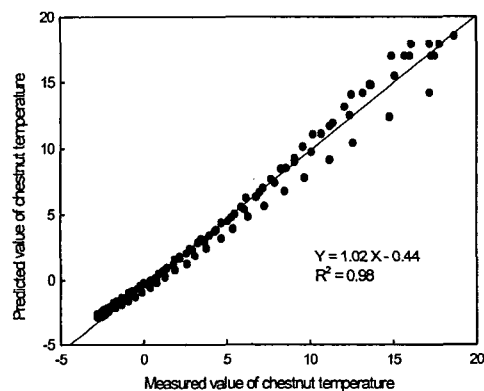


Fig. 3 Relationship between measured and predicted temperature of peeled chestnut.

다. 동결시간 예측

일정한 동결온도에서 간밤 표면으로부터 중심점까지 내부 위치별로 동결점에 도달하는 시간을 예측하기 위한 방정식의 변수는 동결온도, 밤 시료의 초기온도 및 밤 표면으로부터

의 깊이로 시물레이션 결과를 토대로 SAS 6.11 프로그램의 다중 회귀분석을 실시하여 개발하였다. 간밤의 동결시간 예측 방정식은 다음식과 같다.

$$Y = a + bX_1 + cX_2 + dX_3 + eX_1^2$$

여기서, Y : 동결점 도달시간(min), X1 : 동결온도(°C), X2 : 시료밤의 초기온도(°C), X3 : 시료밤의 표면으로부터 깊이(mm), a : 15.052, b : 1.417, c : 0.177, d : 0.293, e : 0.032

동결시간 예측 방정식의 회귀분석 결과에서 결정계수(R^2)는 0.98이고, 회귀방정식의 적합도를 나타내는 F 값은 1440.1이며, 그 확률은 0.0001로서 통상적인 유의수준 0.05보다 훨씬 적으므로 동결시간 예측 방정식은 유의한 것으로 분석되었다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 간밤의 열물성치를 분석하였고, 시물레이션을 통하여 간밤의 내부 깊이별 동결점에 도달하는 과정의 분석을 통하여 간밤의 동결시간 예측모델을 개발하였다.

본 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

간밤의 열적 특성으로 열전도도, 비열, 잠열, 동결점 등을 분석하였다. 간밤의 열적 특성 분석결과 열전도도는 $0.43 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, 비열은 $2.72 \times 10^6 \text{ J/m}^\circ\text{C}$, 잠열은 $216.9 \times 10^6 \text{ J/m}^\circ\text{C}$, 동결점은 $-2.8 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 분석되었다.

간밤의 동결시간을 분석하기 위하여 간밤의 냉동과정의 수학적 모델 및 유한차분 해석법을 이용하여 시물레이션 프로그램을 개발하여 주어진 동결온도에서 밤 내부 깊이별 동결점에 이르는 과정을 분석하였다. 동결온도가 일정할 때 밤 표면으로부터 깊이에 따른 동결점에 이르는 과정은 밤 중심에서부터 표면에 근접한 위치일수록 온도가 떨어지는 속도가 빠르고 일찍 동결점에 도달하는 것으로 나타났으며, 동결온도가 낮을수록 밤 내부가 동결점에 이르는 시간이 빠르게 나타났다.

간밤 동결과정의 수학적 해석 및 컴퓨터 시물레이션의 결과를 검증하기 위하여 동결실험을 수행하였다. 간밤의 동결실험의 수행결과에서 동결온도가 일정한 경우 밤 중심에서부터 표면에 근접한 위치일수록 온도가 떨어지는 속도가 빠르고 일찍 동결점에 도달하는 것으로 나타났으며, 또한 동결온도가 낮을수록 밤 내부가 동결점에 이르는 시간이 빠르게 나타났다. 이와 같은 결과는 시물레이션의 결과와 일치한다. 또한 시물레이션 결과와 검증실험 결과를 비교 분석한 결과, 이들은 선형적인 관계를 나타내고 있으며, 이들의 결정계수(R^2)는 0.99로 매우 높게 나타났다. 그러므로 본 연구에서 개발한 간밤 내부의 위치별 동결점에 도달하는 과정을 분석하는 시물레이션 모델은 간밤의 동결공정 해석에 사용될 수 있을 것으로 판단되었다.

일정한 동결온도에서 간밤 표면으로부터 중심점까지 내부 위치별로 동결점에 도달하는 시간을 예측할 수 있는 간밤의 동결시간 예측방정식을 시물레이션 결과를 토대로 개발하였다. 간밤의 동결시간 예측 방정식은 다음식과 같다.

$$Y = a + bX_1 + cX_2 + dX_3 + eX_1^2$$

Y : 동결점 도달시간(min), X1 : 동결온도(°C), X2 : 시료밖의 초기온도(°C), X3 : 시료밖의 표면으로부터 깊이(mm), a : 15.052, b : 1.417, c : 0.177, d : 0.293, e : 0.032

5. 참고문헌

1. ASHRAE Handbook. 1989
2. I. I. R. 1972. Recommendations for the Processing and Handling of Frozen Foods. 2th ed., 18-56.
3. Kim, J. H., J. B. Park and C. H. Choi. 1997. Development of Chestnut Peeling System. J. of the Korean Society for Agricultural Machinery 22(3):289-294(In Korean)
4. Kong, J. Y. et al. 1982. Analysis and Prediction of the Effective Thermal Conductivities of Meat. Argic. Biol. Chem. 46(5):1235
5. Singh, R. P. 1982. Thermal Diffusivity in Food Processing. Food Technology 36(2):87