

강좌

수냉각에 의한 과채류 예냉의 열전달 해석

Analysis of Heat Transfer in Precooling of Fruits and Vegetables by Hydrocooling

조용진*

정희원

Y. J. Cho

1. 서론

예냉(precooling)이란 과채류 수확시의 높은 품온을 일정한 수준까지 신속히 떨어뜨리는 작업이다. 과채류는 생명체이기 때문에 수확으로 인해 생리 환경이 크게 변하게 되어 고온과 외부 오염원에 매우 취약한 상태로 바뀌게 된다.

수확 직후의 품질 관리와 관련하여 가장 중요한 처리는 품질 유지에 적합한 수준까지 과채류의 품온을 낮추는 작업과 미생물, 곤충 등과 같은 각종 오염원을 제거하는 작업이다. 과채류의 품온을 낮추기 위해 효과적으로 이용될 수 있는 처리 방법이 예냉이다.

예냉은 수냉각(hydrocooling), 차압냉각(pressure cooling) 및 진공냉각(vacuum cooling)으로 분류된다. 1923년 미국에서 수냉각이 실용화되었으며, 1949년대 중반부터는 진공냉각이 이용되기 시작하였다. 각각의 냉각 방법은 과채류의 특성과 저장/유통 시스템의 유형에 따라 선택적으로 이용된다.

최근 우리나라에서도 예냉에 대한 관심이 고

조되고 있는 가운데 몇 가지 연구가 시도되고 있는 것으로 파악되고 있다. 그러나, 수냉각의 경우 아직 국내에서는 냉각 과정에 대한 해석이 이루어진 바가 없어 수냉각 시스템의 설계를 위한 기초자료가 확보되어 있지 않은 형편에 있다.

따라서, 여기서는 수냉각 시스템의 설계를 위한 기초자료를 확보하기 위하여 수냉각시의 열전달 과정의 해석에 대해서 살펴보고자 한다.

2. 수냉각의 특징

수냉각은 냉각속도가 공기냉각에 비해서 매우 크다는 장점 때문에 많은 양을 신속히 냉각하고자 할 때 널리 사용되는 방법이다. 이 외에 냉수 냉각의 장점을 살펴보면, 물의 접촉에 의해 냉각을 하게 되므로 냉각물의 수분 증발에 따른 피해나 중량 손실이 없고, 세척 효과를 얻을 수 있으며, 냉각수의 온도를 적절하게 유지만 해주면 동해의 염려가 없다는 점 등이 있다. 반면에, 냉수냉각의 단점으로는 열전달 매체인 물의 계속 사용에 따라 미생물의 오염이 염려되며, 살수식

* 한국식품개발연구원

의 경우 살수 강도가 과도하게 클 경우 냉각물이 기계적 손상을 입을 우려가 있다는 것 등이다.

냉수냉각에서는 물이 열전달 매체가 되며, 열전달 현상은 열전달 매체의 조건, 냉각물의 열적 물리적 특성, 열교환 방식 등에 의해 지배된다. 이미 물의 열적물리적 특성치는 잘 알려져 있다. 냉각물의 주요 열특성은 열전도도, 열확산계수, 비열 등이 있으며, 밀도, 크기, 형상 등도 열전달 현상에 영향을 주는 요인들이다. 한편, 냉수냉각에서 열교환 방식으로는 크게 두 가지로 구분되는 바, 침지식과 살수식이 그것이다.

3. 열적물리적 성질

수냉각에서의 열전달 과정을 해석하기 위하여 몇 가지 열적물리적 성질(thermophysical properties)에 관한 자료가 확보되어야 한다. 필요한 열적 특성치로는 비열, 열전도도, 열확산계수, 대류열전달계수, 증발잠열 등이 있다. 만약 수냉각에서 물질전달 현상이 무시될 수 있다면 증발잠열에 관한 자료는 불필요하게 된다.

한편, 수냉각에서의 열전달 현상을 해석하기 위하여 형상, 크기, 부피, 표면적, 원형률(roundness), 구형률(sphericity) 등과 같은 기하학적 자료, 밀도, 물의 점도에 관한 자료도 필요하게 된다.

이와 같은 자료는 여러가지 실험적 방법과 수학적 모형을 통해서 얻을 수 있으며 자료를 얻기 위한 구체적 방법은 다음과 같다.

가. 비열

Siebel은 1892년에 식품의 비열은 고형물의 비열과 수분의 비열의 합으로 얻을 수 있다고 주장하고 Siebel의 비열식을 제시한 바 있으며 (Mohsenin, 1980), 이후 많은 모형식이 제안되었고 Vagenas 등(1989)은 이들 결과를 정리하였으며 과채류의 경우는 (1)식과 같다.

$$C = 1.2955 + 2.8801 M, (r^2 = 0.684) \quad \dots(1)$$

여기서, 빙점 이상에서

$$0.25 < M < 0.90$$

C : 과일류 및 채소류의 비열 (kJ/kg K)

M : 수분함량(습량기준)

또한, 식품의 비열은 식품의 구성 성분의 비에 의해 표현될 수 있다고 하여 다음과 같은 식을 제시하고 있다(Heldman과 Singh, 1981).

$$C = 1.424 X_c + 1.549 X_p + 1.675 X_f + 0.837 X_m + 4.187 X_w \quad \dots\dots\dots(2)$$

여기서, C : 비열(kJ/kg C)

X_p : 단백질 구성비

X_m : 회분 구성비

X_c : 탄수화물 구성비

X_f : 지방 구성비

X_w : 수분함량 구성비

한편, 비열을 측정하기 위하여 사용될 수 있는 실험적 방법으로는 mixtures calorimetry method, guarded-plate method, comparison calorimeter method, adiabatic agricultural calorimeter method, differential scanning calorimetry method 등이 있다(Mohsenin, 1980).

나. 대류열전달계수

대류열전달계수는 다음과 같은 3가지 방법에 의해 측정될 수 있다(Hallstrom 등, 1988).

정상상태법(steady-state method) : 물체의 중앙에 전기저항식 열원이나 유도 코일을 설치하여 Newton의 냉각 법칙을 적용하는 방법으로 실험 조건을 일정하게 유지할 수 있다면 가장 좋은 방법이다. 그러나, 식품의 경우 실험 중 물리적 성질이 변할 가능성이 매우 크고 물체의 표면온도 측정이 쉽지 않기 때문에 이 방법의 이용이 용이한 편은 아니다.

비정상상태법(transient method) : 물체가 주어진 온도 환경에 놓였을 때 초기 상태로부터 변하는 물체의 온도를 측정하여 다음의 두 가지 방법 중의 하나에 의해 열전달계수를 산출해 내는 방법이다. 첫째, Biot수가 0.1 이하일 때는 집중용량법(lumped capacity analysis)을 적용하여 열전달계수를 산출할 수 있다. Zuritz 등(1990)은 이 방법에 의해 버섯 모양의 입자가 비뉴턴 유체에서 열교환이 일어날 때 대류열전달계수를 구한 바 있다. 조와 고(1991)도 집중용량법을 이용하여 공기 중의 고추의 열전달계수를 산출한 바 있다. 둘째, 열전달 매체 내에서 물체의 온도 분포가 주어질 때 물체의 경계조건을 이용하여 대류열전달계수를 산출할 수 있다. Wadsworth와 Spadaro (1970)는 이 방법을 이용하여 감자가 물 속에서 가열될 때의 열전달계수를 산출한 바 있다.

열속법(heat flux method) : 물체 표면에서 열속을 측정할 수 있는 센서가 요구된다. 동시에 물체의 표면온도를 측정하여 Newton의 냉각 법칙을 적용하여 열전달계수를 산출할 수 있다.

한편, 열전달 매체인 유체의 특성치들이 주어졌을 때 대류열전달계수를 산출할 수 있는 매우 편리한 방법으로서 Nusselt수에 관한 모형식을 이용할 수 있다. 물체가 실린더형 및 구형일 때 적용될 수 있는 모형식은 다음과 같으며, 정지상태의 물 속에서는 물체의 형상에 관계없이 (5)식을 이용하게 된다(Holman, 1981; Mohsenin, 1980).

$$\frac{hL}{k_f} = (Pr)^{0.3} [0.35 + 0.56(Re)^{0.52}],$$

$$10^{-1} < Re < 10^5 \dots\dots\dots (3)$$

여기서, h : 대류 열전달계수 (실린더형)
 L : characteristic dimension
 (L=4A/P)

- A : 단면적
- P : 수력둘레
- k_f : 유체의 열전도도
- Pr : Prandtl 수
- Re : Reynolds 수

$$\frac{hL}{k_f} = 0.37(Re)^{0.6} (Pr)^{0.333}$$

$$20 < Re < 150,000 \dots\dots\dots (4)$$

여기서, h : 대류 열전달계수(구형)

$$(h L)/k_f = 2, \text{ 정지상태 물 속에서 } \dots\dots\dots (5)$$

다. 열전도도 및 열확산계수

Fourier의 냉각 법칙에 의해 정의되는 열전도도와 전도에 관한 Fourier의 일반식에 의해 정의되는 열확산계수는 여러가지 방법에 의해 측정될 수 있다. 그 방법은 크게 정상상태법(steady state method)과 비정상상태법(transient method)으로 나누어지는데, 정상상태법은 Laplace 식에 의해 해석되므로 열전도도만 측정할 수 있을 뿐이다.

Nesvadba(1982)는 식품의 열전도도와 열확산계수를 측정하기 위해 연구된 결과들을 수집하여 분류한 결과, 정상상태법에 의한 열전도도 측정에는 absolute steady state method와 comparative steady state method가 이용되었으며, 비정상상태법에 의한 열전도도 및 열확산계수의 측정에는 heat pulse method, heated probe method, method using internal heater and non-integral sensor, method using external heater and analytical solution of the heat equation, direct method of temperature profiles to identify thermal properties, temperature matching method, Fitch method, first method of regular phase (a-calorimeter), second method of regular phase (k-calorimeter), third method of regular phase (method of two points) 등이 이용되었다고 하였다.

한편, 식품의 열전도도와 열확산계수를 추정할 수 있는 모형식의 개발에 관한 연구가 활발히 이루어졌으며, Miles 등(1983)은 연구의 결과들을 수집하여 정리한 바 있고, 그 중에서 간편하게 이용할 수 있는 식으로서 다음과 같은 모형식이 있다.

$$k = 0.344 X_w - 0.0644 X_p - 0.1334 X_f + 0.0008 T_k \dots\dots\dots(6)$$

여기서, k : 열전도도(W/mK)

X_w : 수분의 무게구성비

X_p : 단백질의 무게구성비

X_f : 지방의 무게구성비

T_k : 절대온도

$$a = (0.0572 X_w + 0.0138 X_f + 0.0003 T_k) \times 10^6 \dots\dots\dots(7)$$

여기서, a : 열확산계수(m²/s)

라. 밀도

밀도는 산물밀도(bulk density), 겉보기밀도(apparent density 또는 unit density), 진밀도(true density 또는 solid density)로 구분된다. 진밀도를 측정하기 위해서는 전체 부피에서 공극(pore space)이 배제되어야 하며, 공극은 air comparison pycnometer 법에 의해 측정될 수 있다.

겉보기밀도와 진밀도의 관계는 다음과 같은 식에 의해 나타낼 수 있다.

$$\rho = (1 - \epsilon) \rho_s \dots\dots\dots(8)$$

여기서, ρ : 겉보기밀도

ρ_s : 진밀도

ϵ : 공극률

한편, 식품의 성분별 무게구성비를 알고 있을 때 밀도를 산출하는 방법은 다음과 같다.

$$\rho = (1 - \epsilon) \frac{1}{\sum \frac{x_i}{\rho_i}} \dots\dots\dots(9)$$

여기서, x_i : 식품의 성분별 무게구성비

ρ_i : 식품의 성분별 밀도

표 1 식품의 성분별 밀도

성분	밀도(kg/m ³)
탄수화물	1550
단백질	1380
지방	930
물	1000
얼음	917

4. 열전달 해석

가. 열전달 일반식

냉수냉각시의 열전달 현상을 해석하기 위해 Fourier의 전도 법칙이 적용될 수 있다. 열전달 과정에서 내부 열원이 없을 때 Fourier의 일반식은 다음과 같다.

$$\text{직교좌표계} : \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \dots\dots\dots(10)$$

$$\text{실린더좌표계} : \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \dots\dots\dots(11)$$

$$\text{구좌표계} : \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{\sin \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\sin \phi \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{1}{\sin^2 \phi} \frac{\partial^2 T}{\partial \psi^2} \right] \dots\dots\dots(12)$$

이와 같은 일반식은 여러가지 가정과 함께 초기 조건 및 경계 조건에 의해 해석학적으로 해를 구할 수 있다. 그러나, 해석학적 해를 구하기 위해 설정된 가정이 실제 현상과 부합하는가의 문제와 해석학적 풀이가 난해하다는 점으로 인하여 수치해를 구하는 것이 편리할 수 있다.

한편, 열전달 해석시 Biot 수가 매우 작을 때

집중열용량법(lumped capacity method)을 이용하게 되면 열전달 과정을 다음과 같이 매우 간단히 다룰 수 있다. 일반적으로 Biot 수가 0.1 이하일 때 유효하다(Holman, 1981).

$$\rho CV \frac{dT}{dt} = hA(T - T_f) \quad \dots\dots\dots(13)$$

- 여기서, ρ : 물체의 밀도
- C : 물체의 비열
- V : 물체의 부피
- h : 열전달계수
- A : 열전달면적
- T : 물체의 온도
- T_f : 유체(냉수)의 온도
- t : 시간

나. 냉각률

냉각 시스템의 특성을 나타내는 척도로서 냉각률(cooling rate 또는 cooling coefficient, CR)을 사용할 수 있다. 집중열용량법이 적용될 수 있는 냉각 시스템에서 냉각률은 (14)식과 같이 정의된다.

$$CR = \frac{hA}{\rho CV} \quad \dots\dots\dots(14)$$

(14)식은 (13)식에서 시정수(time constant)의 역수와 같으며 다음의 3가지 방법에 의해 산출할 수 있다.

방법 1

$$CR = \frac{\ln[(T_i - T_f)/(T - T_f)]}{t} \quad \dots\dots\dots(15)$$

여기서, CR : 냉각률(°C/°C hr)

(15)식에서 냉각률(CR)의 물리적 의미는 초기의 물체와 냉수의 온도차에 대하여 단위 시간 경과 후의 물체와 냉수의 온도차의 비를 나타낸다.

방법 2

$$CR = \frac{TR/t}{LMTD} \quad \dots\dots\dots(16)$$

여기서, TR = $T_i - T$: Temperature reduction

$$LMTD = \frac{(T_i - T_f) - (T - T_f)}{\ln[(T_i - T_f)/(T - T_f)]} \quad \text{: Log mean temperature difference}$$

방법 3

마지막으로 물체와 냉각 매체 사이의 평균 온도차를 사용하여 냉각률을 구하는 방법으로서 다음과 같다.

냉각 과정을 지수 함수의 일반 형태로 표시하면,

$$\frac{T - T_f}{T_i - T_f} = A \exp(-Bt) \quad \dots\dots\dots(17)$$

시간 t_1 과 t_2 사이에서 물체와 냉각 매체의 온도차의 평균은 (18)식과 같다.

$$TD_{avg} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} (T - T_f) dt}{t_2 - t_1} \quad \dots\dots\dots(18)$$

(17)식을 (18)식에 대입하여 정리하면,

$$TD_{avg} = \frac{A(T_i - T_f) \exp(-Bt_1) - A(T_i - T_f) \exp(-Bt_2)}{\ln \frac{A(T_i - T_f) \exp(-Bt_1)}{A(T_i - T_f) \exp(-Bt_2)}} \quad \dots\dots\dots(19)$$

결과적으로 (19)식은 LMTD와 같다. 따라서

$$CR = \frac{TR/t}{TD_{avg}} \quad \dots\dots\dots(20)$$

(20)식에서 TD_{avg} 는 냉각 과정에서 주어진 냉각 시간 구간에 의해 시간-온도 곡선이 이루는 면적을 그 냉각 시간으로 나누어 얻을 수 있다.

다. 반냉기 및 지연요인

반냉기(half-cooling time, z)는 냉각 과정에서 물체와 냉각 매체의 온도차가 초기 그 온도차의 1/2이 되는 데 소요되는 시간을 나타낸다. 반냉기는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$CR \left|_z = \frac{\ln \frac{(T_i - T_f)}{(T - T_f)}}{t} \right|_{z=1} = \frac{\ln \frac{(T_i - T_f)}{1/2(T_i - T_f)}}{z}$$

$$z = \frac{\ln}{CR} \dots \dots \dots (21)$$

냉각 과정을 반냉기를 이용하여 표현하면 (22)식과 같다.

$$\frac{T - T_f}{T_i - T_f} = (1/2)^{(1/z)} \dots \dots \dots (22)$$

그런데, 냉각 과정에서 물체의 중심 온도와 표면 온도 사이에 허용 이상의 차이를 가지게 되면 집중열용량법을 그대로 적용하기가 어렵게 된다. 이때 물체의 중심 온도는 집중열용량법에 의해 예측된 값보다 지연요인(lag factor)을 가지게 된다. 따라서 냉각 과정에 있는 물체의 일반식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{T - T_f}{T_i - T_f} = j \exp(-CR t) \dots \dots \dots (23)$$

여기서, j : 지연요인

결국, 냉각 과정에 있는 물체의 중심 온도를 기준으로 반냉기를 구하기 위해서 (23)식을 사용하거나 Fourier의 일반식에 대한 수치해법을 사용하게 된다.

한편, Parsons 등(1972)은 7/8 냉각기(7/8 cooling time)를 적용하는 것이 더욱 현실적이라고 주장한 바 있다.

5. 결론

생산된 과채류의 품질은 생산 후 처리 및 유통 기술에 의해 크게 영향을 받게 되는데, 수확 후 초기 처리 단계에서 신선도가 저하되면 가역적으로 신선도를 회복시킬 수 없게 된다. 농산물은 생명체이기 때문에 수확으로 인해 생리 환경이

크게 변하게 되므로 수확 직후의 관리가 매우 중요하다. 특히, 수확된 과채류가 고온에 장시간 노출된다든지 저온저장고에서의 냉각이 더더서 초기 냉각 효과가 만족스럽지 못하게 되면 품질 손상의 우려가 매우 크게 되므로 예냉의 중요성이 부각되고 있다. 더구나 과채류의 품질 경쟁력을 강화하기 위한 저온유통체계(cold-chain system)에서는 적절한 예냉시스템의 도입이 적극적으로 검토되어야 할 것이다.

참고 문헌

1. 박효근 등. 1991. 채소수출산업육성연구. 연구보고서. 서울대학교.
2. 조용진 등. 1991. 고추의 범용 건조모형 개발에 관한 연구. 한국농업기계학회지 16(1): 60-82.
3. Bennett, A. H. and J. M. Wells. 1976. Hydrocooling: a new precooling method with special application for waxed peaches. J. Amer. Soc. Hort. Sci 101(4):428-431.
4. Emond, J., K. V. Chau and J. K. Brecht. 1991. An expert system for hydrocoolers. Proc. Fla. State Hort. Soc. 104:108-111.
5. Fontanel, C.. 1990. Hydrocooling as method of preservation. International Fruit World (2):320-343.
6. Hallstrom, B., C. Skjoldebrand and C. Tragardh. 1988. Heat transfer and food products. Elsevier Applied Science, London.
7. Heldman, D. R. and R. P. Singh. 1981. Food process engineering. 2nd ed., AVI Publishing Company, Inc., Westport.
8. Henry, F. E. and A. H. Bennett. 1973. Hydrocooling vegetable products in unit loads. Trans. of the ASAE 16:731-739.
9. Henry, F. E. et al.. 1980. The effect of certain precooling and storage conditions on the quality of bell peppers. Proc. Fla. State Hort. Soc. 93:314-316.

10. Holman, J. P.. 1981. Heat transfer. 5th ed., McGraw-Hill.
11. Kader, A. A.(ed.). 1992. Postharvest technology of horticultural crops. University of California, Oakland.
12. Miles, C. A., G. V. Beek and C. H. Veerkamp. 1983. Calculation of thermophysical properties of foods. In Physical properties of foods, ed. by R. Jowitt et al., Applied Science Publishers, London. pp.269-312.
13. Mohsenin, N. N.. 1980. Thermal properties of foods and agricultural materials. Gordon and Breach, Science Publishers, Inc., New York.
14. Nesvadba, P.. 1982. Methods for the measurement of thermal conductivity and diffusivity of foodstuffs. J of Food Engineering 1: 93-113.
15. Parsons, R. A., F. G. Mitchell and G. Mayer. 1972. Forced air cooling of palletized fresh fruit. Trans. of the ASAE 15(4):729-731.
16. Vagenas, G. K. et al.. 1989. Predictive equations for thermophysical properties of plant foods. In Engineering and Food(Vol. 1), ed. by W. E. L. Spiess and H. Schubert, Elsevier Applied Science, London, pp.399-407.
17. Wadsworth, J. I. and J. J. Spadaro. 1970. Transient temperature distribution in whole sweetpotato roots during immersion heating. Food Technology 24(8):77-84.
18. Zuritz, C. A., S. C. McCoy and S. K. Sastry. 1990. Convective heat transfer coefficients for irregular particles immersed in non-Newtonian fluid during tube flow. J of Food Engineering 11:159-174.
19. Patankar, S. V.. 1980. Numerical heat transfer and fluid flow. Hemisphere Publishing Corporation, Washington.
20. Ferziger, J. H.. 1981. Numerical methods for engineering application. John Wiley & Sons, New York.