한국농업기계학회지 제 20 권 제 4 호, pp. 343~350. 1995

청과물의 품온예측모델 개발

Development of the Numerical Model for Temperature Prediction of Fruits

김의웅* 김병삼* 남궁배* 정진웅* 김동철* 금동혁**
정회원 정회원 정회원
O. W. Kim, B. S. Kim, G. B. Nahm J. W. Jeong, D. C. Kim, D. H. Keum

ABSTRACT

In order to design efficient and effective pressure cooling system for fruits and vegetables, a numerical model for temperature prediction of fruits was developed.

This model was extended to study the various factors affecting product cooling time, such as product depth, approach air temperature, entering air velocity and initial product temperature. Also, selection of these factors were examined with respect to the efficiency of the pressure cooling system, the overall precooling cost and the final quality of the product.

When designing a pressure cooling system for a particular product, the range of the factors must be selected carefully according to the thermal and physiological properties.

주요 용어(**Key Words**) : 차압예냉시스템(Pressure Cooling System), 냉각속도(Cooling Rate), 수치해석 모델(Numerical Model)

1. 서론

예냉의 목적은 빠른 냉각속도를 얻는데 있으며, 차압예냉시스템에서 냉각속도에 직접 영향을 미치는 인자로는 냉기의 온도 및 속도, 직렬적재의 길이 및 청과물의 초기온도 등을 들 수 있다. 냉기의 속도를 빠르게 할수록 냉각속도는 향상되지만 차압팬의 용량이 커져야 하며, 냉기의 온도를 낮게 할수록 청과물의 품온강하는 빨라지지만 냉동능력이 증대되어야 한다. 또한 직렬적재의 길이를 길게 할수록 예냉고 바닥면적은 효율적으로 활용할 수 있으나 냉각속도가 늦어지며, 청과물의 초기 품온이 높을수록 냉각속도가 늦어지게 된다.

이러한 인자들은 냉각속도뿐만 아니라 예냉에 소요되는 비용 및 청과물의 품질에도 영향을 미

* 한국식품개발연구원 산업화연구부
** 성균관대학교 생물기전공학과

치게 된다. 따라서 차압예냉시스템의 효율적인 설계를 위해서는 냉각속도와 관련된 인자들의 영향을 파악하는 것은 대단히 중요하며, 이를 위해 청과물의 품온을 예측할 수 있는 모델의 개발이 필요하다.

퇴적층에서의 전열에 관한 이론해는 Schumann(1929)이 최초로 1차원 퇴적층에서의 온도 예측을 위하여 편미분방정식을 도입한 이래, 농산물의 가열 및 냉각과정의 해석을 위해 Schumann모델 및 유사한 모델이 적용되었다. 이와 관련하여 청과물에 대한 Guillou(1958), 사탕무우에 대한 Bakker-Arkema등(1966) 및 Holdredge등(1982), 토마토에 대한 Wang등(1967) 및 Bellagha등(1985), 사과에 대한 Zahradnik등(1972), 양파에 대한 Huang등(1974), 그리고 감귤류에 대한 Baird등(1976) 및 Rumsey(1984)등의 연구를 들 수 있다.

Rumsey(1987)는 이러한 편미분방정식의 해를 유한차분법에 의하여 용이하게 구할 수 있으며, 다양한 초기 및 경계조건을 수용할 수 있는 모델로서 퇴적층에서의 전열과 유사한 고정층에서의 흡착식(adsorption equation)의 수학적 해를 다룬 Cooney (1974) 및 von Rogenberg등(1977)의 모델을 들고, 그 중 Von Rogenbeg의 방법이 어떠한 시간 증분에 대해서도 조건없이 안정하여 가장 유용한 방법이라 하였다.

따라서 본 연구의 목적은 Rumsey(1984)등의 열전달방정식을 이용하여 von Rogenberg방법을 이용하여 청과물 퇴적층에서의 품온을 예측하기 위한 수치해석모델을 개발하고, 이를 이용하여 냉각속도와 관련된 인자의 영향을 살펴보는데 있다.

2. 품온 예측 모델

가. 품온예측모델

청과물 퇴적층에서의 품온과 통과공기의 온도를 예측하기 위하여 Rumsey(1984) 등의 농산물 퇴적층의 열전달 해석 방정식을 이용하였다. 이들 방정식은 다음과 같다.

$$\varepsilon \rho_f C_f \frac{\partial T}{\partial t} + V \rho_f C_f \frac{\partial T}{\partial x} = ha(\theta - T) \quad \cdots\cdots (1)$$

$$(1-\varepsilon) \rho_s C_s \frac{\partial \theta}{\partial t} = ha(T - \theta) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (2)$$

나. 수치해석

그림 1의 점 $(x+\frac{\Delta x}{2}, t+\Delta t)$에서 차분식을 적용하면

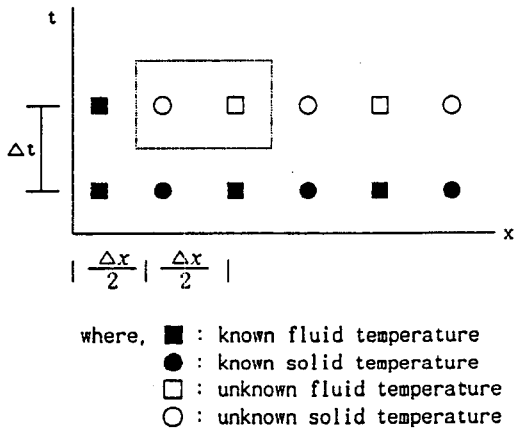

Fig. 1. Grids for Packed-bed of fruits.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t}\Big|_{x+\frac{\Delta t}{2}, t+\Delta t} = \frac{\theta^{\,t+\Delta t}_{x+\frac{\Delta x}{2}} - \theta^{\,t}_{x+\frac{\Delta x}{2}}}{\Delta t} \quad \cdots\cdots (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t}\Big|_{x+\frac{\Delta t}{2}, t+\Delta t} = \frac{T^{\,t+\Delta t}_{x+\frac{\Delta x}{2}} - T^{\,t}_{x+\frac{\Delta x}{2}}}{\Delta t} \quad \cdots\cdots (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x}\Big|_{x+\frac{\Delta t}{2}, t+\Delta t} = \frac{T^{\,t+\Delta t}_{x+\Delta x} - T^{\,t+\Delta t}_{x}}{\Delta x} \quad \cdots\cdots (5)$$

(3), (4), (5)식을 (1) 및 (2)식에 대입하면

$$\varepsilon \rho_f C_f \left(\frac{T^{\,t+\Delta t}_{x+\frac{\Delta x}{2}} - T^{\,t}_{x+\frac{\Delta x}{2}}}{\Delta t}\right) + V_f \rho_f C_f \left(\frac{T^{\,t+\Delta t}_{x+\Delta x} - T^{\,t+\Delta t}_{x}}{\Delta x}\right) = ha\left(\theta^{\,t+\Delta t}_{x+\frac{\Delta x}{2}} - T^{\,t+\Delta t}_{x+\frac{\Delta x}{2}}\right) \quad \cdots\cdots (6)$$

$$(1-\varepsilon)\ \rho_s C_s\left(\frac{\theta^{t+\Delta t}_{x+\frac{\Delta x}{2}}-\theta^{t}_{x+\frac{\Delta x}{2}}}{\Delta t}\right)$$
$$=ha\left(T^{t+\Delta t}_{x+\frac{\Delta x}{2}}-\theta^{t+\Delta t}_{x+\frac{\Delta x}{2}}\right) \cdots\cdots (7)$$

여기서

$$T^{t+\Delta t}_{x+\frac{\Delta x}{2}}=\frac{1}{2}\left(T^{t+\Delta t}_{x+\Delta x}+T^{t+\Delta t}_{x}\right) \cdots\cdots (8)$$

$$T^{t}_{x+\frac{\Delta x}{2}}=\frac{1}{2}\left(T^{t}_{x+\Delta x}+T^{t}_{x}\right) \cdots\cdots (9)$$

(8), (9)식을 (6), (7)식에 대입하여 정리하면

$$C_1\left(T^{t+\Delta t}_{x+\Delta x}+T^{t+\Delta t}_{x}-T^{t}_{x+\Delta x}-T^{t}_{x}\right)+\left(T^{t+\Delta t}_{x+\Delta x}-T^{t+\Delta t}_{x}\right)$$
$$=-C_2\left(-2\theta^{t+\Delta t}_{x+\frac{\Delta x}{2}}+T^{t+\Delta t}_{x+\Delta x}+T^{t+\Delta t}_{x}\right) \cdots\cdots (10)$$

$$\theta^{t+\Delta t}_{x+\frac{\Delta x}{2}}-\theta^{t}_{x+\frac{\Delta x}{2}}=C_3\left(T^{t+\Delta t}_{x+\Delta x}+T^{t+\Delta t}_{x}-2\theta^{t+\Delta t}_{x+\frac{\Delta x}{2}}\right)$$
$$\cdots\cdots (11)$$

여기서

$$C_1=\frac{\varepsilon\,\Delta x}{2\,V\,\Delta t}$$

$$C_2=\frac{\Delta x\ ha}{2\,\rho_f C_f V}$$

$$C_3=\frac{\Delta t\ ha}{2(1-\varepsilon)\ \rho_s C_s}$$

(10), (11)을 다시 정리하면

$$T^{t+\Delta t}_{x+\Delta x}(C_1+1+C_2)\ -2C_2\theta^{t+\Delta t}_{x+\frac{\Delta x}{2}}$$
$$=(1-C_1-C_2)T^{t+\Delta t}_{x}+C_1T^{t}_{x}+C_1T^{t}_{x+\Delta x} \quad (12)$$

$$T^{t+\Delta t}_{x+\Delta x}C_3-(1-2C_3)\theta^{t+\Delta t}_{x+\frac{\Delta x}{2}}=-C_3T^{t+\Delta t}_{x}-\theta^{t}_{x+\frac{\Delta x}{2}}$$
$$\cdots\cdots (13)$$

(12), (13)식의 연립방정식을 풀면

$$T^{t+\Delta t}_{x+\Delta x}=\frac{C_1\left(T^{t}_{x}+T^{t}_{x+\Delta x}\right)+C_7\theta^{t}_{x+\frac{\Delta x}{2}}+C_5T^{t+\Delta t}_{x}}{C_6}$$
$$\cdots\cdots (14)$$

$$\theta^{t+\Delta t}_{x+\frac{\Delta x}{2}}=\frac{1}{1+2C_3}\left[\theta^{t}_{x+\frac{\Delta x}{2}}+C_3\left(T^{t+\Delta t}_{x}+T^{t+\Delta t}_{x+\Delta x}\right)\right]$$
$$\cdots\cdots (15)$$

여기서

$$C_4=\frac{2\,C_2C_3}{1+2C_3}$$

$$C_5=1-C_1-C_2+C_4$$

$$C_6=1+C_1+C_2-\frac{2\,C_2C_3}{1+2C_3}$$

$$C_7=\frac{2\,C_2}{1+2C_3}$$

3. 재료 및 방법

가. 재료

실증실험용 재료로 사과중 주로 8월 초순부터 하순까지 생산되는 조생종으로서 저온저장시에도 감량이 많고 품질변화가 심한 쯔가루를 이용하였으며, 충북 중원군 가금면 창동리에서 직접 구매하여 공시하였다.

나. 실험방법

수치해석모델의 적용성을 검토하기 위해 FORTRAN 77으로 프로그램을 작성한 다음 수치해석해와 실측치를 비교하였다. 실측치는 온도의 조절이 가능한 저온저장고에서 김등(1995, 1)이 사용한 정압강하 측정장치에 쯔가루를 퇴적높이 94.4cm로 퇴적한 다음, 일정한 송풍량하에서 쯔가루의 경시적인 품온을 측정하여 사용하였다. 이 때 사과의 품온은 질량평균지점에 열전대(T type)을 삽입하여 Data logger(Digi 4 plus, KAYE, USA)로 측정하였으며, 동일높이의 4점의 평균온도를 사용하였다. 열전대를 삽입할 때 외부의 영향을 배제하기 위하여 실리콘 접착제로 접촉부분을 밀봉한 다음 폴리플로필렌 접착테이프로 재밀봉하였다. 또한 프로그램을 수정하여 냉각속도와 관련된 인자의 영향을 살펴보았다.

4. 결과 및 고찰

가. 수치해석모델의 적용성

압력강하 측정장치에 퇴적높이 94.4cm로 쯔가루를 퇴적한 다음 실시한 냉각실험의 실측치와 품온예측모델의 수치해석해를 비교한 결과는 그림 2와 같았다. 이 그림에서 알 수 있듯이 퇴

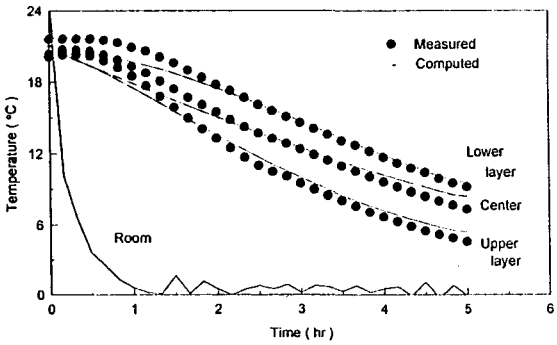

Fig. 2. Comparision of measured and computed temperature profiles for packed bed of Tsugaru apple in height 94.4cm bin at superficial velocity 160.48㎥/hr/㎡.

적층에서 약 30cm(upper layer), 45cm(center), 60cm(lower layer)에서 해석해와 실측치가 비교적 잘 일치하여 수치해석해가 품온예측에 잘 적용될 수 있음을 알 수 있었다. 여기서 냉각과정중 초기 및 후기에 실측치와 해석해간에 다소의 편차가 나타나는 것은 수치해석해에는 냉기온도를 전 냉각과정의 평균온도인 1.86℃로 일정하게 고려한 반면, 실제 냉기온도는 초기에 평균온도까지 도달하기까지는 약 1시간가량이 소요되고, 후기에는 평균온도보다 낮게 유지되기 때문인 것으로 사료된다. 이는 정압강하측정장치에 쯔가루를 퇴적시 측정위치에 열전대를 삽입하는데 상당한 시간이 소요되어 냉기의 온도를 일정하게 유지하기 어렵기 때문이다. 한편, 압력강하 측정장치를 설치한 저온저장고내의 냉기는 약 ±1.5℃ 정도의 편차를 나타내었으나 이러한 온도편차는 쯔가루의 품온변화에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 보인다. 이 때 입력한 데이터는 표 1과 같았으며, 여기서 밀도, 공극율은 김등(1995,1)의 결과를, 비열은 ASHRAE Handbook (1989)의 결과를 각각 사용하였다. 또한, 퇴적층에서의 열전달계수는 비표면적이 고려된 Löf등(1948)의 다음 수식인 (16)식을 사용하였으며, 이 때 표면열전달계수는 1834.3kJ/㎡ h ℃였다.

$$h_s \cdot a = 7.0613\left(\frac{\rho_f V_f}{d_s}\right)^{0.7} \quad kJ/m^2h℃ \cdots\cdots (16)$$

Table 1. Input values for temperature prediction of Tsugaru apple

Items	Unit	Value
Product depth	m	0.944
Fruit diameter	m	0.081
Void fraction	−	0.3774
Density	kg/㎥	791.544
Specific heat of fruit	kJ/kg ℃	3.78
Initial product temperature	℃	20.80
Entering air temperature	℃	1.86
Approach air velocity	m/hr	160.48

나. 냉각속도와 관련된 인자의 영향

수치해석해를 이용하여 작성한 프로그램을 수정하여 냉각속도와 관련된 인자의 영향을 살펴본 결과 다음과 같았다. 이 때 입력한 데이터는 표 2와 같았으며, 해당 인자의 값은 타 영향인자

Table 2. Hypothetical operating conditions for cooling simulations

Items	Unit	Value
Product depth	m	1.20
Fruit diameter	m	0.081
Void fraction	−	0.3774
Density	kg/㎥	791.544
Specific heat of fruit	kJ/kg ℃	3.78
Initial product temperature	℃	20.80
Entering air temperature	℃	1.86
Approach air velocity	m/hr	510.00

의 영향을 고려하여 적당한 범위의 값을 적용하였다. 또한, 냉각시간은 퇴적층의 높이의 83.3% 지점이 되는 1m에서의 품온이 5℃가 되는데까지 소요되는 시간으로 하였다.

1) 퇴적높이

차압예냉시스템에서 냉기와 동일 방향인 폭방향의 적재 즉, 직렬적재 길이를 길게 할수록 예냉고 바닥면적을 효율적으로 사용할 수 있으나 냉각편차가 발생하기 쉽고, 냉각에 장시간이 소요되므로 청과물이 높은 수증기압차에 장시간 노출되므로 건조가 발생하기 쉽다. 또한, 냉각속도를 빠르게 하기 위해서는 차압을 크게 할 수 밖에 없고, 차압이 커짐에 따라 정압강하는 더욱 증가하게 된다.

이와 관련하여 Mitchell등(1972)은 적정 정압하에서 양호한 냉각속도를 얻기 위해서는 폭 방향의 적재는 3~4 ft(91.44~121.94cm)정도가 적당하다고 하였으며, 大久保(1991)는 Mitchell등(1972)의 결과를 인용하여 폭방향의 적재를 1상자 또는 3상자로 하여도 청과물의 단위중량당의 송풍량은 큰 차이가 없지만 정압강하는 큰 차이가 있어 비교적 통풍이 양호한 품목에서는 폭방향의 적재는 3상자정도가 좋다고 하였다. 김등(1995, 2)도 직렬적재시의 정압강하는 상자수에 따라 2차 다항식형태로 증가하여 직렬, 병렬, 높이적재중 직렬적재의 영향이 가장 크다고 하였다.

이러한 직렬적재의 길이에 따른 영향을 살펴보기 위하여 퇴적층의 높이 0.1~2.2m에서 각 퇴적층 높이의 83.3% 지점의 냉각시간을 예측한 결과 그림 3과 같았다. 그림에서와 같이 퇴적높이가 증가할수록 냉각시간도 1차 선형형태로 증가하는 것을 알 수 있으나, 퇴적높이 증분에 따른 냉각시간차의 증가폭은 감소하는 경향을 나타내었다. 또한 냉각시작후 5시간이 되는 시점에서 퇴적층 높이의 5% 및 95%되는 지점에서 냉각편차를 살펴본 결과, 퇴적높이가 0.4, 1.0, 1.6m일 경우 각각 6.6, 15.7, 17.6℃ 정도로서 퇴적높이에 따라 냉각편차 또한 증가하나 냉각시간과 동일하게 퇴적높이 증분에 따른 냉각편차의 증가폭

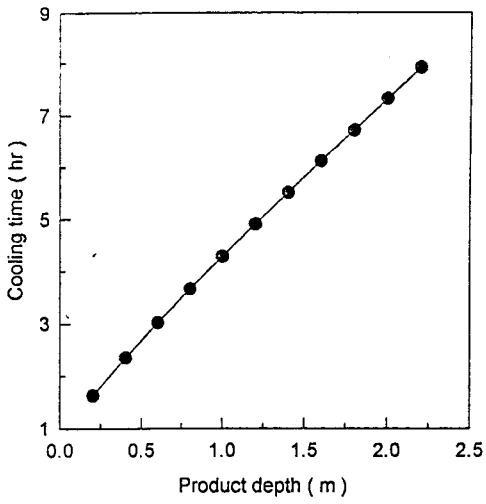

Fig. 3. Cooling time as a function of product depth.

은 감소하는 경향을 나타내었다. 이 때 냉기의 접근속도 510m/hr에서의 대류열전달계수는 4120.8kJ/㎡ h ℃이었다.

2) 냉기속도

냉기속도는 차압예냉시스템의 성능에 영향을 주는 주요한 인자의 하나이다. 냉기속도를 빠르게 할수록 높은 열전달이 이루어지고 퇴적층을 통과한 냉기의 온도 또한 큰 변화가 없어 냉각편차가 감소하지만, 차압팬의 용량이 증대되어야 하고 정압강하 또한 대단히 증가하게 된다.

그림 4는 냉기의 접근속도를 240m/hr(0.067m/s, $h_s \cdot a$=2431.3kJ/㎡ h ℃)에서 1500m/hr(0.4167m/s, $h_s \cdot a$=8768.9kJ/㎡ h ℃)까지 변화시켰을 때의 냉각속도를 나타낸 것으로서 약 400m/hr($h_s \cdot a$=3476.4kJ/㎡ h ℃)정도까지는 냉기의 속도에 따라 냉각시간이 현저하게 빨라지나, 약 800m/hr($h_s \cdot a$=5647.4kJ/㎡ h ℃)이상에서는 그 차이가 점점 작아지고 있어 냉기의 속도를 무한정 크게 하여도 냉각속도는 비례하여 빨라지지는 않는다는 것을 알 수 있다. 여기서 차압예냉시스템에서 골판지상자의 개공율을 3%로 가정하였을 경우 통기공을 통과하는 냉기의 속도는 400m/h일 경우 약 3.7m/s 정도, 800m/hr일 경우 7.4m/s정도에 달하고 있다.

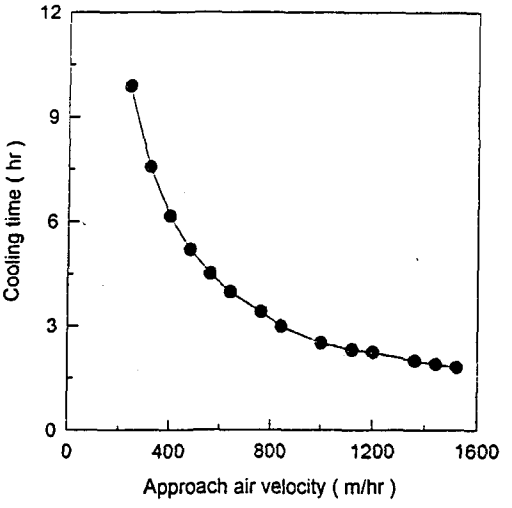

Fig. 4. Cooling time as a function of approach air velocity.

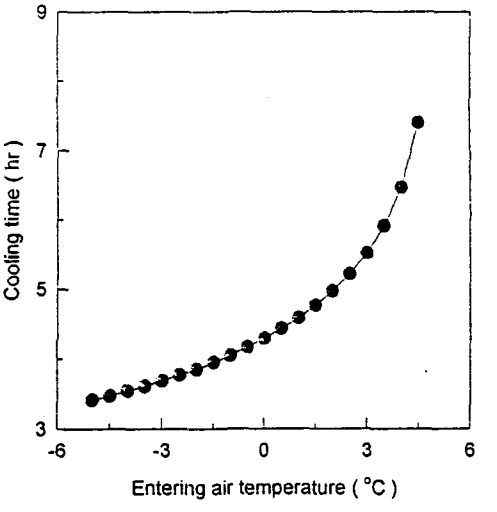

Fig. 5. Cooling time as a function of entering air temperature.

한편, 채소류등 조직이 연약한 품목의 경우 냉기의 속도가 빨라질수록 시듦이 발생하기 쉬우므로 대상 청과물에 따라 적정한 풍속을 선정하는 것이 필요할 것으로 사료된다.

3) 냉기온도

동일 냉동능력의 냉각시스템에서 냉기온도를 낮게 할수록 냉각능력은 감소하나, 냉각속도는 비례하여 빨라지지 않는다. 그러나 Gaffney등(1975)은 냉각과정중 초기에는 청과물의 동결점보다 훨씬 낮은 −6.7℃에서도 청과물은 동결되지 않았고, 그 후 냉기온도를 동결점이상으로 점차 상승시킬 경우 냉각속도가 빨라진다고 하였다. 또한 Baird등(1988)은 청과물의 예냉 목표온도보다 냉기의 온도를 2.2℃ 정도 낮게 유지하는 것이 효율적이라 하였다.

그림 5는 청과물의 초기품온 20.8℃에서 냉기의 온도를 −5~5℃로 변화시켜 가면서 냉각시간을 예측한 것으로서 약 3℃이하에서는 냉기온도가 낮아져도 냉각시간은 크게 감소하지 않지만, 약 3℃ 이상에서는 냉기의 온도가 높아질수록 냉각시간이 현저하게 증가하는 경향을 나타내고 있다. 또한 청과물의 초기품온을 30℃로 하여도 유사한 경향을 나타내었다.

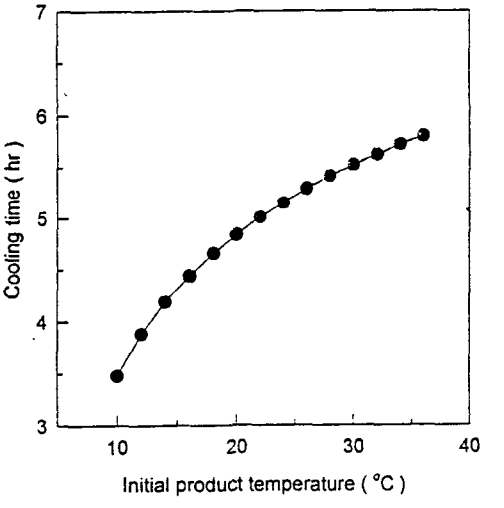

Fig. 6. Cooling time as a function of initial product temperature.

그러나 차압예냉에서 냉기는 청과물 표면에 직접 접촉하기 때문에 청과물 표면으로 부터의 증산이 많아지고 이 때의 기화열에 의해 표면온도는 동결점이하로 떨어져 동해를 입을 염려가 있다. 또한 청과물은 비교적 높은 온도에서도 저온장해가 발생되는 품목이 많으므로 청과물의 종류에 따라 적정 냉기온도를 결정하는 것이 중

요할 것으로 사료된다.

4) 청과물의 초기품온

청과물의 초기품온과 목표품온의 온도차는 냉각부하에 직결되어 냉동기의 능력에 큰 영향을 미치고, 동일 능력의 차압예냉시스템에서 냉각시간에 영향을 미치게 된다. 그림 6은 청과물의 초기온도에 따른 냉각시간의 변화를 나타낸 것으로서, 약 36℃에서 24℃까지는 초기품온의 감소에 따라 냉각시간의 감소는 비교적 적었으나, 약 20℃ 이하에서는 초기품온의 감소에 따라 냉각시간의 감소가 비교적 현저하게 나타났다.

따라서 청과물의 수확후 예냉고에 입고전까지의 품온의 관리가 필요하게 되는데 가능한 그늘지고 통풍이 잘된 곳에서 취급할 필요가 있다.

5. 결론 및 요약

차압예냉시스템의 효율적인 설계를 위하여 청과물의 품온을 예측할 수 있는 수치해석모델을 개발하였으며, 실제 쯔가루의 냉각실험 결과와 수치해석해를 비교한 결과 높은 적용성을 나타내었다.

따라서, 이 수치해석해를 이용하여 청과물의 냉각속도에 영향을 미치는 인자를 살펴본 결과, 퇴적층의 높이가 증가함에 따라 냉각에 소요되는 시간은 1차 선형 형태로 증가하는 경향을 나타내었으며, 냉기속도 약 400m/hr이하에서는 냉기속도가 증가할수록 냉각시간은 현저하게 빨라졌으나 그 이상의 속도에서는 냉기속도를 크게 하여도 냉각시간은 비례하여 빨라지지 않았다. 또한 냉기온도는 3℃ 이상에서는 냉기온도가 높아질수록 냉각에 소요되는 시간이 현저하게 증가하였으며, 청과물의 초기품온이 20℃ 이하일 경우 냉각시간의 감소가 현저하게 나타났다.

그러나 이러한 영향인자는 시스템의 효율, 예냉비용 및 예냉후의 청과물의 품질과도 깊은 영향이 있으므로 대상 청과물에 따라 적정 조건을 결정할 필요가 있다.

6. 기호설명

a : 비표면적(㎡/㎥)
C : 비열(kJ/kg ℃)
d : 직경(m)
hs · a : 비표면적이 고려된 대류열전달계수 (kJ/㎥ h ℃)
t : 시간(hr)
T : 유체상의 온도(℃)
V : 냉기속도(m/hr)
ε : 공극율 (−)
θ : 고체상의 온도(℃)
ρ : 밀도(kg/㎥)

하 첨 자
f : 유체상
s : 고체상

참 고 문 헌

1. 김의웅, 김병삼, 남궁배, 정진웅, 김동철, 금동혁. 1995. 청과물 퇴적층에서의 정압강하. 한국농업기계학회지 투고중
2. 김의웅, 김병삼, 남궁배, 정진웅, 김동철, 금동혁. 1995. 청과물상자의 통기공 및 상자적재방법이 정압강하에 미치는 영향. 한국농업기계학회지 투고중.
3. 大久保增太朗. 1991. 野菜の鮮度保持, P90, 養賢堂. 東京.
4. American Society of Heating and Air Conditioning Engineers, Inc. 1989. ASHRAE Handbooks, P30.2.
5. Baird,C.D. and J.J.Gaffney. 1976. A numerical procedure for calculating heat transfer in bulk loads of fruits or vegetables. ASHRAE Transactions, 82(2) : 525−540.
6. Baird,C.D., J.J.Gaffney and M.T.Talbot. 1978. Design criteria for efficient and cost effective forced air cooling systems for fruits and ve-

getables, ASHRAE transactions, 94(1) : 1434 −1454.

7. Bakker-Arkema,F.W. and W.G.Bickert. 1966. A deep-bed computational cooling procedure for biological products. Transactions of ASAE, 9(6) : 834−836, 845.
8. Bellagha,S. and K.V.Chau. 1985. Heat and mass transfer during the cooling of tomatoes individually in bulk, ASAE Paper 85−6002.
9. Cooney,D.O. 1974. Numerical investigation of adiabatic fixed-bed adsorption, Ind. Eng. Chem., Process Des. Develop., 13(4) : 368−373.
10. Gaffeny,J.J. and C.D.Baird. 1975. Susceptibility of west india avocadoes to chilling injury as related to rapid cooling with low temperature air and water, Proc. Florida State Hort. Soc., 88 : 490−496.
11. Guillou,R. 1958. Some engineering aspects of cooling fruits and vegetables, Transactions of ASAE : 38−39, 42.
12. Holdredge,R.M. and R.E.Wyse. 1982. Computer simulation of the forced convection cooling of sugar beets. Transactions of ASAE, 25(5) : 1425−1430.
13. Huang,T. and W.W. Gunkel. 1974. Theoretical and experimental studies of the heating front in a deep bed hygroscopic product. Transactions of ASAE, 17(1) : 346−354.
14. Löf, G.O.G. and R.W.Hawley. 1948. Unsteady-state heat transfer between air and loose solids. Industrial and Engineering Chemistry, 40(6) : 1061−1070.
15. Mitchell,F.G, R.Guillou and R.A.Pardons. 1972. Commercial cooling of fruits and vegetables, Califonia Agricultural Experiment Station, Manual 43 : 1−44.
16. Rumsey,T.R. 1984. A computer program to simulate forced air cooling. ASAE Paper 84−103.
17. Rumsey,T.R. 1987. Computer aided instruction of heat transfer in packed beds. ASAE Paper 87−6568.
18. Schumann,T.E.W. 1929. Heat transfer : a liquid flowing through a porous prism. Journal of the Franklin Institute, 208(3) : 405−416.
19. von Rogenberg,D.U., R.P.Chambers and G.A. Swan. 1977. Numerical solution of surface controlled fixed-bed adsorption. Industrial and Engineering Chemistry, 16(1) : 154−157.
20. Wang,J.K. and P.Wang. 1967. A computational procedure for deep-bed forced-air precooling of tomatoes. ASAE Paper No.67−819.
21. Zahradnik,J.W. and L.E.Reinhart. 1972. Insack hydrocooling for apples. Transactions of ASAE, 15(1) : 141−145.