

## 차압통풍 예냉 청과물의 냉각특성

윤홍선 · 박경규\*

농촌진흥청 농업기계화연구소, \*경북대학교 농업기계공학과

## Cooling Characteristics of Fruits and Vegetables for Pressure Cooling

Hong-Sun Yun · Kyung-Kyu Park\*

National Agricultural Mechanization Research Institute, R.D.A.

\* Department of Agricultural Machinery, Kyungpook National University

### Abstract

Numerous variables affect product cooling rate of pressure cooling system for fruits and vegetables. These include carton vent area, initial and desired final product temperature, flow rate and temperature of the cooling air, product size, shape and thermal properties and product configuration(whether in bulk or packed in shipping cartons). This study was carried out to determine the influence of each of these variables as they affect cooling time. The opening ratio and number of the vent hole were recommended as 4~10% and 2~4 ea., respectively, for a minimum air flow resistance and for a uniform air flow pattern. In the cooling experiment for tomatoes and mandarins, optimum air flow rate was 0.04 m<sup>3</sup>/min.kg in terms of energy saving. The cooling air temperature should be about 2°C less than the desired final product temperature for reducing cooling time.

**Key words** : cooling, pre-cooling, pressure cooling

### 서 론

청과물의 차압통풍 냉각에서는 포장상자에 적당한 크기와 갯수의 통기구를 뚫어주고 통기구 이외의 포장상자 주변의 공기통로를 차단하여 냉기가 포장상자 통기구와 상자 내부의 산물 퇴적층을 통과하도록 유도한다. 이렇게 하여 상자 내부의 산물 퇴적층으로 유입되는 유효 공기량이 많아지고 산물과 공기와의 접촉 면적이 증가되어 냉각속도는 빨라지고 냉각 불균일은 적어진다[1,2]. 이러

한 차압통풍 예냉장치의 효율적 설계와 이용을 위해서는 청과물의 크기, 형상, 열물성, 송풍량, 포장상자의 통기구의 크기와 갯수, 냉각공기의 온도, 초기품온, 냉각 목표품온 등과 같은 냉각속도 및 냉동기와 송풍기의 부하에 영향을 미치는 요인들에 관한 자료가 반드시 필요하다[3,4,5,6]. 그 중에서도 송풍량, 포장상자 통기구의 크기와 갯수, 그리고 냉각공기의 온도 등은 냉각장치의 용량과 효율을 좌우하는 중요한 요인이다.

청과물의 공기냉각은 청과물 내부에서의 전도열 전달과 냉각공기와 청과물 사이에서의 대류 열전달의 조합에 의해 일어나는데, 대부분의 청과물에 있어서 전도 열전달 계수는 대류 열전달 계수에

Corresponding author : Hong-Sun Yun, National Agricultural Mechanization Research Institute, R.D.A., Seodundong 249, Suwon, Korea.

비해 매우 작다. 즉, 청과물의 냉각속도는 대부분의 경우 전도 열전달에 의해 제약을 받는다고 할 수 있다. 따라서 송풍량을 증가시켜 대류 열전달 계수를 크게하여도 어느 정도의 범위를 넘어서면 냉각속도는 송풍량의 증가비율과 같은 정도로 빨라지지 않으며 에너지의 낭비만을 초래하게 된다.

한편, 청과물의 냉각 구동력은 피냉각물과 냉각 공기의 온도차가 클수록 클데, 냉각이 진행됨에 따라서 온도차가 점점 적어지고 따라서 냉각구동력이 떨어져 냉각속도는 점점 느려진다. 따라서 피냉각물의 품온을 냉각공기와 같은 온도 까지 낮추려 한다면 에너지의 낭비만을 초래하게 될 것이다.

또 청과물을 퇴적한 포장상자를 통과하는 냉각 공기는 적절한 송풍정압과 송풍량의 조건이 유지된다 하더라도 퇴적물 사이의 불균일한 공기통로와 통기구의 영향으로 인하여 그 유동이 불균일하게 된다. 이러한 포장상자 내에서의 냉각공기의 불균일 유동은 냉각 불균일과 냉각속도 지연의 원인이 되어 냉각공기 이용의 효율성을 저하시키고 에너지의 낭비를 초래하게 된다.

한편,尹은 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 청과물 포장상자 내에서의 풍압 및 풍속분포의 3차원 해석에 관한 연구에서 송풍저항을 최소화 하고 또한 풍속분포를 균일하게 유지하기 위해서는 통기구의 갯수를 2~4개, 개구비를 4~10%로 하는 것이 좋다고 보고한 바 있다[7].

본 연구는尹의 연구결과를 냉각시험을 통하여 다시 검증함으로써 차압통풍 예냉장치의 설계와 이용의 효율화를 위한 적절한 포장상자 통기구의 크기 및 갯수를 결정하고, 아울러 적정 냉각 송풍량과 냉각 공기온도 등을 실험을 통하여 구명하고자 수행하였다.

## 재료 및 방법

### 공시재료

수원시 권선동에 위치한 농산물 도매시장에 당일 출하된 귤과 토마토를 구입하여 재선별한 후 공시재료로 사용하였으며, 그 물성값은 Table1과 같다.

Table 1. Physical properties of fruits used

Fruit	Mandarin	Tomato
Equivalent Dia.(mm)	4.89	6.64
Average Weight(kg)	0.05	0.134
Average Volume(cm <sup>3</sup> )	61.3	138.5
Density(kg/m <sup>3</sup> )	815	967.5

### 실험장치

실험장치는 냉각탑, 송풍기, 냉각탑과 송풍기를 연결하기 위한 배관, 송풍량 측정부, 냉각실, 냉동기, 축온센서 및 온도기록계로 구성되어 있으며, Fig. 1은 실험장치의 개략도이다.

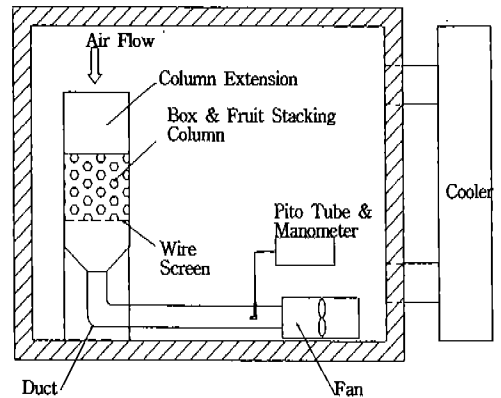


Fig. 1. Diagram of experimental setup for measuring cooling time.

### 1. 냉각탑

냉각탑은 그 위에 포장상자를 여러 단으로 쌓을 수 있게 제작하였고, 각각의 상자의 상,하부에는 통기구의 크기를 조절하기 위한 개공판을 착탈할 수 있도록 하였으며, 연결부위는 공기가 새어나가지 않도록 완전히 밀폐하였다. 또 냉각탑과 포장상자의 외벽은 단열재로 마감하여 벽체를 통한 열이동이 일어나지 않도록 하였다.

### 2. 송풍기 및 배관

송풍기는 풍량 80m<sup>3</sup>/min., 정압 60mmH<sub>2</sub>O인 축류송풍기를 사용하였으며, 공기 흡입구 쪽을 배관(φ135mm×L2,000mm, P.V.C.관)과 연결하여 냉각탑의 상부로 부터 송풍기 쪽으로 공기가 유입되도록

하였다. 송풍량은 변압기에 의해 송풍기의 회전수를 변화시켜 조절하였다.

3. 풍량 측정부

송풍량의 측정은 디지털 마이크로 마노메타(영국, Furness Controls LTD, Model FCO12)와 피토 튜브를 사용하여 측정하였는데, 마노메타는 1.999mm.H<sub>2</sub>O 까지는 0.001mm.H<sub>2</sub>O 단위로, 2.0mm.H<sub>2</sub>O~19.99mm.H<sub>2</sub>O 범위에서는 0.01 mm.H<sub>2</sub>O의 단위로 정압을 측정할 수 있고, 동시에 0~18m/s 까지 0.01m/s 단위로 풍속을 측정할 수 있는 것을 사용하였다.

4. 냉각실 및 냉동기

냉각실은 2,000×2,000×2,000mm의 크기로 100mm 두께의 스티로폴로 단열된 샌드위치 판넬을 사용하여 제작하였고, 냉각실의 온도조절을 위한 냉동기는 2Hp의 것을 사용하였으며, 냉각실의 온도는 설정온도에 대하여 ±1.0℃의 편차로 조절할 수 있었다.

5. 측온센서 및 온도기록계

측온센서로는 T형 열전대를 사용하였으며, 온도기록계는 32점식 디지털 온도기록계(미국, Westronics Inc., DDR-10)를 사용하였다.

실험방법

1. 냉각공기 풍량 측정

냉각 공기의 풍량은 송풍배관을 통과하는 풍량을 한국산업 표준규격의 송풍기 시험 및 검사방법(KS B 6311)에 따라 측정하여 냉각탑을 통과하는 피냉각물의 단위중량당의 풍량(m<sup>3</sup>/min. kg)으로 환산하였다.

2. 포장상자 개구비

포장상자에서 통기공이 있는 단면의 전체 면적에 대한 통기공의 면적의 비를 백분율로 표시하였다.

3. 무차원 온도비

냉각 속도의 비교를 위해 냉각물의 무차원 온

도비를 다음의 식으로 계산하였다.

$$T.R = \frac{T - T_a}{T_i - T_a}$$

T.R : 무차원 온도비

T, T<sub>i</sub> : 임의의 시간 및 초기의 물체온도(℃)

T<sub>a</sub> : 냉각 공기 온도(℃)

4. 품온 반감 시간

냉각물의 품온반감시간은 다음의 식에 의하여 계산하였다.

$$Z_1 = \frac{\ln 2}{CR}$$

$$CR = \frac{\ln \left( \frac{T_i - T_a}{T - T_a} \right)}{\theta}$$

Z<sub>1</sub> : 품온 반감 시간(hr), CR : 냉각율(1/hr),

θ : 냉각 시간(hr)

5. 피냉각물의 품온 측정

피냉각물 퇴적층 내에서 상,중,하층의 각각의 중앙부와 벽면에 위치한 산물의 중심온도를 5분 간격으로 측정하였으며, 측온센서를 산물의 중심에 설치하고 산물 표피와 측온센서 사이의 틈으로 공기가 스며들지 않도록 실리콘으로 밀봉하였다.

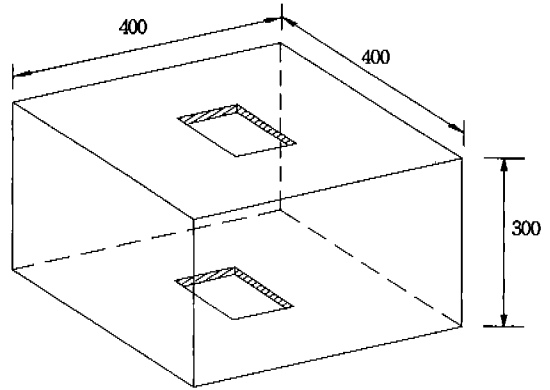
6. 냉각조건

산물의 퇴적은 육방계 능면체 배열법을 사용하였고, 퇴적 시료 중량은 꺾은 28kg, 토마토는 25kg이었으며, 이 때의 공급율은 각각 0.29와 0.35이었다. 풍량은 퇴적시료의 단위중량(kg)당 0.03~0.05 m<sup>3</sup>/min의 범위에서 조절하였다. 상자의 개구비는 2.5%~10% 범위에서 변화시켰고, 산물의 초기온도는 꺾은 20℃, 토마토는 30℃였으며, 냉각공기의 온도는 꺾은 3℃, 토마토는 5℃로 유지하였다. 꺾과 토마토의 냉각에 사용된 통기구의 크기와 갯수

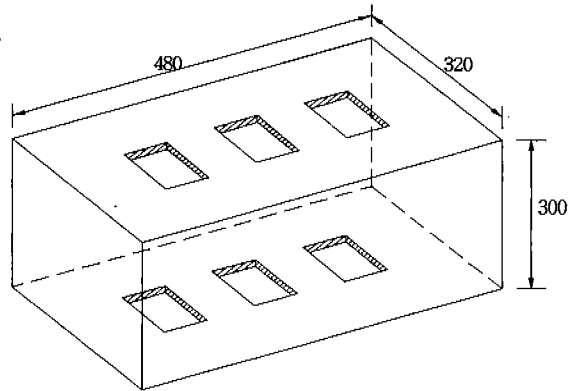
는 Table 2와 같으며, 포장상자및 통기공의 형상은 Fig.2와 같다.

**Table 2. Dimension of vent hole and box**

Fruit	No. of vent holes	Opening ratio of vent hole	Vent hole size(mm)	Box size (mm)
Mandarin	1	2.5%	63 × 63	400×400×300
		5%	90 × 90	
		10%	127 × 127	
Tomato	3	3%	50 × 29	480×300×320
		5%	60 × 40	
		10%	80 × 60	



(a) Packing box for citrus



(b) Packing box for tomato

**결과 및 고찰**

**통기구의 갯수 및 개구비와 냉각속도**

상자포장 귤과 토마토의 통기구의 갯수 및 개구비에 따른 품온반감시간을 Table 3에 나타내었다.

귤에 대한 냉각 실험에서, 통기구가 1개인 포장상자의 통기구의 개구비를 2.5~10%로 증가시키에 따라 냉각공기의 입구, 중앙 및 배출층의 각각의 중앙에 위치한 귤의 품온반감시간은 점차 길어졌고, 각 층의 벽면에 위치한 것의 품온반감시간은 점차 짧아지는 것으로 나타났다. 그 이유는 통기구의 크기가 클수록 통기구를 통과하는 풍속이 느리고 직진성이 약해져 통기구 주위로의 냉각공기의 확산이 원활하게 되었기 때문으로 판단되었다. 그러나 통기구의 개구비를 10%까지 늘려도 냉각공기 유입층의 중앙부와 벽면부에 위치한 귤의 냉각속도의 차이는 다른 층에 비해 여전히 큰 것으로 나타났다. 이로 미루어 볼 때 상자내의 피

**Fig. 2. Configuration of packing box.**

냉각물을 균일하게 냉각하기 위해서는 통기구의 갯수를 늘려주어 더욱 원활한 냉각공기의 확산을 도모하여야 할 것으로 판단되었으며, 이는尹 등의 연구에서 포장상자 내의 균일한 통풍을 위한

**Table 3. Half cooling time of mandarin and tomato with various vent hole ratio**

Produce	Air flow rate (m <sup>3</sup> /min.kg)	No. of vent hole	Opening ratio of vent hole(%)	Half cooling time(min.)					
				Air entrance layer		Middle layer		Air exit layer	
				Center	Wall	Center	Wall	Center	Wall
Mandarin	0.04	1	2.5	21	45	36	69	60	90
			5	21	39	41	62	66	85
			10	25	37	48	55	80	77
			100	38		92		165	
Tomato		3	3	40		110		140	
			5	40		78		91	
			10	39		59		71	

Table 4. Half cooling time of mandarin and tomato with various airflow rate

Produce	No. of vent hole	Opening ratio of venthole(%)	Air flow rate (m <sup>3</sup> /min.kg)	Half cooling time(min.)		
				Air entrance layer	Middle layer	Air exit layer
Mandarin	Bulk stacking		0.03	39	142	285
			0.04	39	92	166
			0.05	35	87	148
			0.03	42	93	110
Tomato	3	5	0.04	41	78	94
			0.05	43	78	96

통기구의 갯수는 2~4개라고한[7] 연구 보고와도 근접하는 결과였다. 또 개구비 10%에서는 각층의 중앙과 벽면에 위치한 굴 사이의 품온반감시간의 차이가 현저히 축소되는 것으로 나타났는데, 이 결과와 Henderson이 곡물을 퇴적한 타공망의 송풍 저항에 관한 연구에서 타공망의 개구비가 10% 이상이면 그 저항을 무시할 수 있다[8]고 한 연구보고를 종합해 볼 때 개구비 10%이상에서 부터는 냉각공기의 흐름에 대한 통기구의 영향이 현저히 줄어드는 것으로 판단되었다. 한편, 개구비 2.5~10% 범위에서의 품온반감시간이 개구비 100%일 때 보다 훨씬 짧은 것으로 나타났는데, 그 이유는 적당한 크기의 통기구가 있을 경우에 포장상자의 양면이 일종의 압력판의 역할을 하여 통기구를 통과하는 냉각공기의 흐름이 빨라지고, 또 포장상자 입구에서의 통기구를 통과한 공기의 확산과 출구 쪽 통기구 부근에서의 공기의 수렴 과정에서 공기 통로의 길이가 길어져 피냉각물과의 접촉시간이 길어지기 때문으로 판단되었으며, 이와같은 차압 통풍 냉각의 효과를 얻을 수 있는 최대 개구비는 약 10% 정도인 것으로 생각되었다.

토마토에 대한 냉각 실험에서, 통기구가 3개인 포장상자의 통기구의 개구비를 3~10%로 증가시킴에 따라 냉각공기의 입구, 중앙 및 배출층의 중앙(실제로는 중앙에서 약 3cm 비켜난 지점)에 위치한 토마토의 품온반감시간은 점차 짧아졌으며, 개구비 3%에서의 품온반감시간이 개구비 5%나 10%에 비하여 현저하게 긴 것으로 나타났다. 그 이유는 통기구가 3개인 경우라 하더라도, 통기구의 크기가 너무 작으면 통기구를 통과하는 풍속이 빠르고 직진성이 강해져 통기구 주위로의 냉각공기의 확산이 원활히 일어나지 않고 배출되기 때문

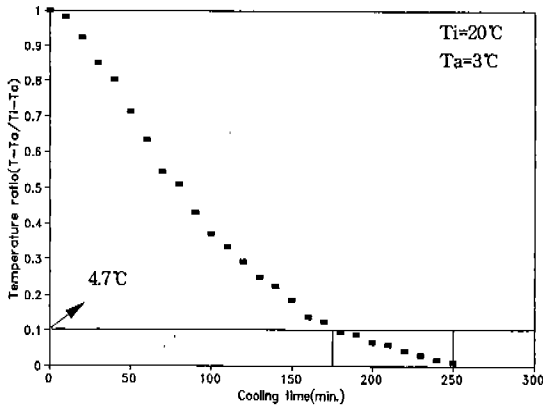
으로 판단되었다. 이 결과는 Baird 등이 개구비 3% 이하에서는 냉각 소요시간이 현저하게 늘어났다고 한[3] 연구결과와도 일치하였다. 따라서 차압 통풍 냉각을 위한 포장상자 통기구의 최소 개구비는 약 4% 정도로 생각되었다.

이상의 결과로 부터尹 등이 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 청과물 포장상자 내에서의 품압 및 풍속분포의 3차원 해석에 관한 연구에서 송풍저항을 최소로 하고 또한 풍속분포를 균일하게 하기 위해서는 통기구의 갯수를 2~4개, 개구비를 4~10%로 하는 것이 좋다고 한[7] 연구결과가 상자포장 청과물의 냉각속도에도 같이 적용됨을 확인할 수 있었다.

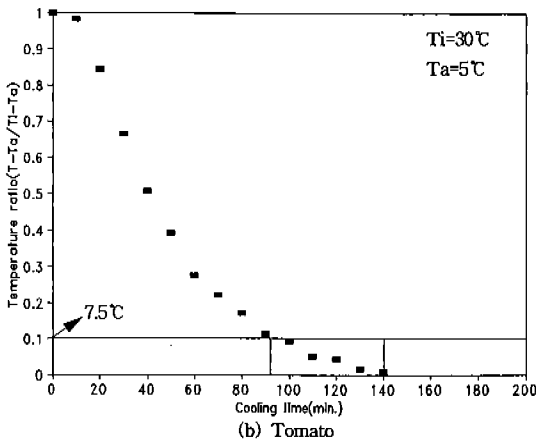
#### 송풍량과 냉각속도

상자포장 굴과 토마토의 송풍량에 따른 품온반감시간을 Table 4에 나타내었다. 산물퇴적한 굴에 있어서 송풍량을 피냉각물 중량(kg)당 0.05~0.03 m<sup>3</sup>/min로 감소시킴에 따라 품온반감시간은 공기 유입구층에서는 거의 같았으나 공기 유출구 층으로 갈수록 점차 길어지는 경향을 나타내었고, 송풍량 0.03m<sup>3</sup>/min/kg에서는 품온반감시간이 현저하게 길어지는 것으로 나타났다. 통기구 3개, 개구비 5%인 상자에 퇴적한 토마토에 있어서도 같은 경향을 나타내었다.

이 결과로 볼 때 청과물의 공기 냉각에 있어서 송풍량을 증가시켜도 더 이상 냉각속도가 빨라지지 않는 한계송풍량이 존재하며, 굴과 토마토의 차압 통풍 냉각에 있어서의 한계 송풍량은 피냉각물 중량(kg)당 약 0.04m<sup>3</sup>/min 정도인 것으로 판단되었다.



(a) Mandarin



(b) Tomato

Fig. 3. Cooling rate of mandarin and tomato.

### 품온의 경시변화

Fig.3은 토마토와 귤을 냉각할 때 시간의 경과에 따른 토마토와 귤의 중심부에서의 냉각 온도비의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 냉각속도는 시간이 경과함에 따라서 서서히 둔화되는 경향을 나타내었으며, 온도비 0.1 이후의 냉각 소요 시간이 전체 냉각 시간의 약 30%를 차지하는 것으로 나타나 냉각 목표 품온과 냉각 공기 온도를 동일하게 설정하면 냉각시간 측면에서 상당한 손실이 있을 것으로 판단되었다. 그림에서 온도비가 0.1일때의 귤과 토마토의 품온은 각각 4.7°C와 7.5°C로서 냉각공기 온도보다 각각 1.7°C와 2.5°C가 높았다. 따라서 냉각지수 0.1에서 냉각

목표 품온인 3°C와 5°C로 냉각되기 위해서는 냉각 공기의 온도를 각각 1.7°C와 2.5°C 정도 낮추어 주는 것이 냉각시간 단축에 효과가 있을 것으로 판단되었으며, 이 결과는 Barid 등이 냉각공기의 온도를 냉각 목표 품온 보다 2.2°C 정도 낮게 설정하는 것이 효율적이라고 한[3] 결과와도 유사하였다. 따라서 차압통풍 냉각시스템의 냉동기의 용량 계산에 있어서는 이러한 청과물의 냉각특성이 반드시 고려되어야 할 것으로 생각되었다.

### 요 약

차압통풍 예냉장치의 효율적 설계와 이용을 위해서는 농산물의 크기, 형상, 열물성, 송풍량, 포장상자의 통기구의 크기와 갯수, 냉각공기의 온도, 초기품온, 냉각 목표 품온 등과 같은 냉각속도 및 냉동기와 송풍기의 부하에 영향을 미치는 요인들에 관한 자료가 반드시 필요하다. 그 중에서도 송풍량, 포장상자 통기구의 크기와 갯수, 그리고 냉각공기의 온도 등은 냉각장치의 용량과 효율을 좌우하는 중요한 요인이다.

본 연구에서는 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 청과물 포장상자 내에서의 풍압 및 풍속분포의 3차원 해석에 관한 이전의 연구결과를 냉각시험을 통하여 다시 검증함으로써 차압통풍 예냉장치의 설계와 이용의 효율화를 위한 적정한 포장상자 통기구의 크기 및 갯수를 결정하고, 아울러 적정 냉각 송풍량과 냉각 공기온도 등을 실험을 통하여 구명하고자 하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

포장상자 통기구의 갯수와 개구비에 따른 귤과 토마토의 냉각시험으로부터, 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 청과물 포장상자 내에서의 풍압 및 풍속분포의 3차원 해석에 관한 연구에서 송풍저항을 최소로 하고 또한 풍속분포를 균일하게 하기 위해서는 통기구의 갯수를 2~4개, 개구비를 4~10%로 하는 것이 좋다고 한 연구결과가 상자포장 청과물의 냉각속도에도 같이 적용됨을 확인할 수 있었다.

청과물의 공기 냉각에 있어서 송풍량을 증가시켜도 더 이상 냉각속도가 빨라지지 않는 한계송풍량이 존재하며, 귤과 토마토의 차압통풍 냉각에 있어서의 한계 송풍량은 피냉각물 중량(kg)당 약

0.04 m<sup>3</sup>/min 정도인 것으로 판단되었다.

청과물의 냉각속도는 시간이 경과함에 따라서 서서히 둔화되는 경향을 나타내었으며, 온도비 0.1 이후의 냉각 소요시간이 전체냉각 시간의 약 30%를 차지하는 것으로 나타나 냉각 목표품온과 냉각 공기 온도를 동일하게 설정하면 냉각시간 측면에서 상당한 손실이 있을 것으로 판단되었다. 따라서 냉각지수 0.1에서 냉각목표 품온 까지 냉각하기 위해서는 냉각공기의 온도를 냉각 목표온도 보다 약 2℃ 정도 낮추어 주는 것이 냉각시간 단축에 효과가 있을 것으로 판단되었다.

### 참고문헌

1. 石橋貞人, 田中俊一郎, 中野和弘 等(1982) 差壓通風冷却方式の開発(第1報), 冷凍, 57(662), 1191-1197.
2. 全農施設・資材部(1982) 青果物豫冷施設のてびき, 日本.
3. Barid,C.D, Gaffney,J.J, Talbot,M.T.(1988) Design Criteria for Efficient and Cost Effective Forced Air Cooling Systems for Fruits and Vegetables, ASHRAE Transactions, 94(1), 1434~1454.
4. 石橋貞人, 小島孝之, 兼子健男(1969) 空氣冷却裝置に關する研究(第1報), 農機誌, 7 31(2), 121-127.
5. 石橋貞人, 小島孝之, 兼子健男(1970) 空氣冷却裝置に關する研究(第2報), 農機誌, 32(3), 215-224.
6. 石橋貞人, 田中俊一郎(1984) 差壓通風冷却方式, 冷凍, 59(677), 214-223.
7. 尹弘善(1994) 차압통풍식 예냉청과물의 송풍저항 및 냉각특성, 경북대학교 박사학위논문.
8. Henderson,S.M.(1943) Resistance of Shelled Corn and Bin Walls to Air Flow, Agr. Eng. ,25, 367~369, 374.

(1997년 12월 3일 접수)