

청과물의 차압통풍 예냉을 위한 냉각조건 구명시험

Determination of Cooling Conditions for Pressure Cooling of Fruits and Vegetables

윤 홍 선 *	조 영 길 *	박 경 규 **
정회원	정회원	정회원
H.S.Yun	Y.G.Cho	K.K.Park

1. 서론

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 유효공기량이 많아지고 산물과 공기와의 접촉면적이 증가되어 냉각속도는 빨라지고 냉각 불균일은 적어진다. 이러한 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. 그 중에서도 송풍량, 포장상자 통기구의 크기와 갯수, 그리고 냉각공기의 온도 등은 냉각장치의 용량과 효율을 좌우하는 중요한 요인이다.

청과물의 공기냉각은 청과물 내부에서의 전도열전달과 냉각공기와 청과물 사이에서의 대류열전달의 조합에 의해 일어나는데, 대부분의 청과물에 있어서 전도열전달계수는 대류열전달계수에 비해 매우 작다. 즉, 청과물의 냉각속도는 대부분의 경우 전도열전달의 지배를 받는다고 할 수 있다. 따라서 송풍량을 증가시켜 대류열전달계수를 크게하여도 어느 정도의 범위를 넘어서면 냉각속도는 송풍량의 증가비율과 같은 정도로 빨라지지 않으며 에너지의 낭비만을 초래하게 된다.

한편, 청과물의 냉각 구동력은 피냉각물과 냉각공기의 온도차가 클수록 큰데, 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 냉각공기는 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

* 농업기계화연구소 가공기계과

**경북대학교 농업기계공학과

냉각속도 지연의 원인이 되어 냉각공기 이용의 효율성을 저하시키고 에너지의 낭비를 초래하게 된다.

한편, 윤(1994) 등은 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 청과물 포장상자 내에서의 풍압 및 풍속 분포의 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.

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

2. 재료 및 방법

가. 공시재료

수원시 권선동에 위치한 농산물 도매시장에 당일 출하된 굴과 토마토를 구입하여 재선별한 후 공시재료로 사용하였다.

나. 실험장치

실험장치는 상자 퇴적탑, 송풍기, 퇴적탑과 송풍기를 연결하기 위한 배관, 송풍량 측정부, 냉각실, 냉동기, 측온센서 및 온도기록계로 구성되어 있으며, 그림1은 실험장치의 개략도 이다.

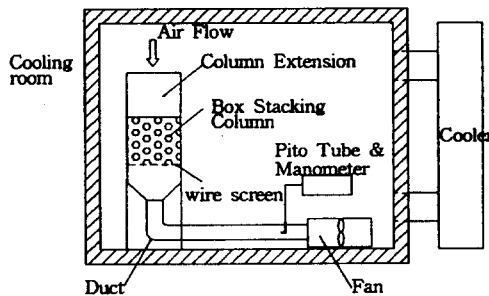


Fig.1. Diagram of experimental setup for measuring cooling rate.

다. 실험방법

(1) 온도비(T.R : Temperature Ratio)

냉각속도의 비교를 위한 피냉각물의 무차원 온도비는 다음 식으로 계산하였다.

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

T, T_i : 임의의시간 및 초기의 품온(℃), T_a : 냉각공기온도(℃)

(2) 품온 반감시간(Half Cooling Time)

피냉각물의 품온반감시간은 다음의 식에 의하여 계산하였다

$$Z_1 = \ln \frac{2}{CR}, \quad CR = \frac{\ln \frac{(T_i - T_a)}{(T - T_a)}}{\theta}$$

CR : 냉각율(1/hr), Z_1 : 품온반감시간(hr), θ : 냉각시간(hr)

(3) 냉각실험

포장상자 내의 산물의 퇴적은 육방계 능면체 배열법을 사용하였고, 상자 당 퇴적시료의 중량은 귤은 28kg, 토마토는 25kg이었으며, 이 때의 공극율은 각각 0.29와 0.35이었다. 풍량은 퇴적시료의 단위중량(kg)당 0.03~0.05 m³/min의 범위에서 조절하였다. 상자의 개구비는 2.5%~10%(귤은 100%) 범위에서 변화시켰고, 산물의 초기온도는 귤은 20℃, 토마토는 30℃였으며, 냉각공기의 온도는 귤은 3℃, 토마토는 5℃로 유지하였다. 귤과 토마토의 냉각에 사용된 포장상자 및 통기구의 크기와 갯수는 표2와 같다. 피냉각물의 품온은 중심부의 온도 로 하였다.

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)
Citrus	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	

3. 결과 및 고찰

가. 통기구의 갯수 및 개구비와 냉각속도

상자포장 귤과 토마토의 통기구의 갯수 및 개구비에 따른 품온반감시간을 표3에 나타내었다. 상자포장 귤에 대한 냉각 실험에서 포장상자 통기구의 개구비를 2.5~10%로 증가시키에 따라 냉각공기의 입구, 중앙 및 배출층의 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 주위의 냉각공기의 확산이 원활하게 되었기 때문으로 판단되었다. 이로 미루어 볼 때 상자내의 피냉각물을 균일하게 냉각하기 위해서는 통기구의 갯수를 늘려주어 냉각공기의 원활한 확산을 도모하여야 할 것으로 생각되었으며, 이는 윤(1994) 등의 연구에서 포장상자 내의 균일한 통풍을 위한 통기구의 갯수는 2~4개라고한 연구 보고와도 근접하는 결과였다. 또 개구비 10%에서는 각층의 중앙과 벽면에 위치한 귤 사이의 품온반감시간의 차이가 현저히 축소되는 것으로 나타났는데, 이 결과와 Henderson(1943)이 곡물을 퇴적한 타공망의 송풍저항에 관한 연구에서 타공망의 개구비가 10% 이상이면 그 저항을 무시할 수 있다고 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 개구

비 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 공기통로의 길이가 길어져 피냉각물과의 접촉시간이 길어지기 때문으로 판단되었으며, 이와같은 차압통풍 냉각의 효과를 얻을 수 있는 최대 개구비는 약 10% 정도인 것으로 생각되었다.

상자포장 토마토에 대한 냉각 실험에서 포장상자 통기구의 개구비를 3~10%로 증가시키기에 따라 냉각공기의 입구, 중앙 및 배출층의 중앙(실제로는 중앙에서 약 3cm 비켜난 지점)에 위치한 토마토의 품온반감시간이 점차 짧아졌으나, 개구비 3%에서는 품온반감시간이 개구비 5%나 10%에 비하여 현저하게 길어지는 것으로 나타났다. 그 이유는 통기구가 3개인 경우는 공기의 확산이 원활하게 일어나지만, 통기구의 크기가 너무 작으면 통기구를 통과하는 풍속이 빠르고 직진성이 강해져 통기구 주위로의 냉각공기의 확산이 원활히 일어나지 않고 배출되기 때문으로 판단되었다. 이 결과는 Baird(1988) 등이 개구비 3% 이하에서는 냉각 소요시간이 현저하게 늘어났다고 한 연구결과와도 일치하였다. 따라서 차압통풍 냉각을 위한 포장상자 통기구의 최소 개구비는 약 4% 정도로 생각되었다.

이상의 결과로부터 윤(1994) 등이 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.

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

Produce	Air flow rate (m ³ /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	10	39		59		71	
			5	40		78		91	
			3	40		110		140	

나. 송풍량과 냉각속도

상자포장 귤과 토마토의 송풍량에 따른 품온반감시간을 표4에 나타내었다. 산물퇴적한 귤에 있어서 송풍량을 피냉각물 중량(kg)당 0.05~0.03m³/min로 감소시키기에 따라 품온반감시간은 공기 유입구층에서는 거의 같았으나 공기 유출구 층으로 갈수록 점차 길어지는 경향을 나타내었고, 송풍량 0.03m³/min.kg에서는 품온반감시간이 현저하게 길어지는 것으로 나타났다. 통기구 3개, 개구비 5%인 상자에 퇴적한 토마토에 있어서도 같은 경향을 나타내었다.

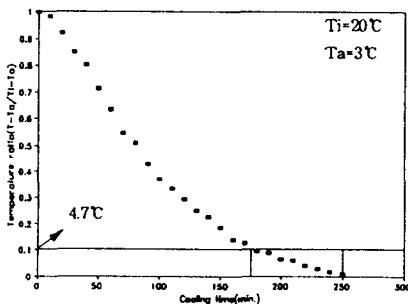
이 결과로 볼 때 청과물의 공기 냉각에 있어서 송풍량을 증가시켜도 더 이상 냉각속도가 빨라지지 않는 한계송풍량이 존재하며, 귤과 토마토의 차압통풍 냉각에 있어서의 한계 송풍량은 피냉각물 중량(kg)당 약 0.04m³/min 정도인 것으로 판단되었다.

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

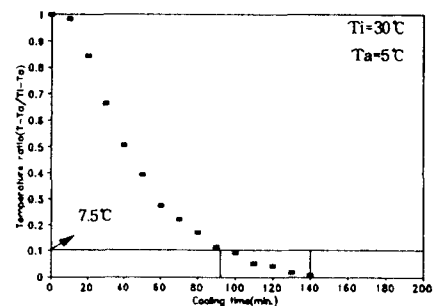
Produce	No. of vent hole	Opening ratio of venthole(%)	Air flow rate (m ³ /min.kg)	Half cooling time(min.)		
				Air entrance layer	Middle layer	Air exit layer
Mandarin	Bulk stacking		0.03	39	142	285
			0.04	39	92	166
			0.05	35	87	148
Tomato	3	5	0.03	42	93	110
			0.04	41	78	94
			0.05	43	78	96

다. 품온의 경시변화

그림2는 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 나타내는데, 온도비 0.1 이후의 냉각 소요시간이 전체냉각 시간의 약 30%를 차지하여 냉각 목표품온과 냉각공기 온도를 동일하게 설정하면 냉각시간 측면에서 상당한 손실이 있는 것으로 나타났다. 그림에서 온도비가 0.1일때의 귤과 토마토의 품온은 각각 4.7℃와 7.5℃로서 냉각공기 온도보다 각각 1.7℃와 2.5℃가 높았다. 따라서 냉각지수 0.1에서 냉각목표 온도인 3℃와 5℃로 냉각시키기 위해서는 냉각공기의 온도를 각각 1.7℃와 2.5℃ 정도 낮추어 주는 것이 냉각시간 단축에 효과가 있을 것으로 판단되었으며, 이 결과는 Barid(1988) 등이 냉각공기의 온도를 냉각 목표품온 보다 2.2℃ 정도 낮게 설정하는 것이 효율적이라고 한 결과와도 유사하였다. 한편 적절한 냉각공기의 온도 설정은 냉각 온도비의 정의로부터 초기품온과 냉각 목표품온에 따라 달라지며 초기품온이 높고 냉각 목표품온이 낮을수록 냉각 공기의 온도를 목표품온 보다 크게 낮추어 주어야 한다. 따라서 차압통풍 냉각시스템의 냉동기의 용량도 이러한 청과물의 냉각특성을 반드시 고려하여 결정하여야 할 것이다.



(a) Citrus



(b) Tomato

Fig. 2. Cooling rate of citrus and tomato.

4. 요약 및 결론

차압통풍 예냉장치의 효율적 설계와 이용을 위해서는 농산물의 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. 그 중에서도 송풍량, 포장상자 통기구의 크기와 갯수, 그리고 냉각공기의 온도 등은 냉각장치의 용량과 효율을 좌우하는 중요한 요인이다.

본 연구에서는 윤(1994) 등의 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 청과물 포장상자 내에서의 풍압 및 풍속분포의 3차원 해석에 관한 이전의 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 하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

가. 포장상자 통기구의 갯수와 개구비에 따른 굴과 토마토의 냉각시험으로 부터, 윤(1994) 등이 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.

나. 청과물의 공기 냉각에 있어서 송풍량을 증가시켜도 더 이상 냉각속도가 빨라지지 않는 한계송풍량이 존재하며, 굴과 토마토의 차압통풍 냉각에 있어서의 한계 송풍량은 피냉각물 중량(kg)당 약 $0.04\text{m}^3/\text{min}$ 정도인 것으로 판단되었다.

다. 청과물의 냉각속도는 시간이 경과함에 따라서 서서히 둔화되는 경향을 나타내는데, 온도비 0.1 이후의 냉각 소요시간이 전체냉각 시간의 약 30%를 차지하여 냉각 목표품온과 냉각공기 온도를 동일하게 설정하면 냉각시간 측면에서 상당한 손실이 있는 것으로 나타났다. 따라서 냉각지수 0.1에서 냉각목표 온도로 냉각시키기 위해서는 냉각공기의 온도를 냉각 목표온도 보다 낮추어 주는 것이 냉각시간 단축에 효과가 있을 것으로 판단되었다. 또 적절한 냉각공기의 온도 설정은 초기품온과 냉각 목표품온에 따라 달라지며 초기품온이 높고 냉각 목표품온이 낮을수록 냉각 공기의 온도를 목표품온 보다 크게 낮추어 주어야 할 것으로 생각되었다.

5. 참고문헌

가. 윤홍선. 1994. 차압통풍식 예냉 청과물의 송풍저항 및 냉각특성. 경북대학교 박사학위논문.

나. 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.

다. Henderson,S.M. 1943. Resistance of Shelled Corn and Bin Walls to Air Flow. Agr. Eng. 25 : 367~369, 374.