

青果物 差壓豫冷시스템의 最適化

Optimization of Pressure Cooling System for Fruits and Vegetables

김의웅* 금동혁*
정희원 정희원
O.W.Kim D.H.Keum

1. 서 론

차압예냉시스템은 청과물의 형상 및 물성, 통기공의 형태 및 개공율, 통기폭, 청과물의 초기품온 및 최종품온, 냉동시스템 및 차압송풍기의 능력 등 대단히 많은 인자가 영향을 미치므로 냉각속도 및 소요에너지를 정확히 예측하는 것은 대단히 어렵다. 현재 차압예냉시스템의 설계는 주로 숙련된 설계자의 경험에 의해 이루어지므로 적절한 냉각속도를 얻기가 힘들뿐만 아니라 과대한 건설 및 운영 비용이 투자되는 경우가 많다(Baird 등, 1988). 일본의 경우 예냉에 소요되는 비용중 전력비는 10~40%수준으로 총 판매액의 0.2~0.4% 정도에 달하고 있으며, 전력비중 基本電力 및 使用電力 料금이 각각 50.5%, 49.5%로서 냉동기 용량과 관련되는 기본전력 요금의 높게 나타났다(黒田, 1982). 따라서 청과물의 품질저하를 최소화하고, 냉각소요시간을 단축하면서 예냉 소요비용을 최소화하기 위해서는 시설의 효율적인 설계 및 운전조건의 확립이 필수적이다.

이를 위해서는 먼저 연간 처리물량, 처리시기, 1일 처리횟수 등을 고려하여 시설의 적정 규모를 결정해야 한다. 그리고 적절한 冷凍負荷計算을 통하여 냉동시스템을 설계해야 하며, 고품질을 유지하면서 소요에너지 및 냉각시간을 최소화할 수 있도록 설계 및 운영인자인 냉각공기온도, 송풍량을 결정하고, 주어진 냉각공기온도 및 송풍량하에서 송풍저항이 최소화될 수 있는 적재방법을 찾아 차압송풍기를 설계하여야 한다. 그러나 이들 인자들은 상호 영향을 미치므로 독립적으로 결정할 수 없으며, 복합적으로 고려하여 최적조건을 결정하여야 한다.

기존의 연구는 예냉효과에 관한 내용이 대부분을 차지하고 있으며 예냉시설의 설계 및 운영에 관한 연구결과는 대단히 적은 실정으로(Baird 등, 1975), 설계자료는 대부분 경험치에 의존하고 있으므로 이의 사용시 검증이 필요하다고 판단된다.

* 성균관대학교 생물기전공학과

따라서 본 연구의 목적은 최적화기법을 이용하여 청과물 차압예냉시스템에서 적절한 냉각속도를 얻으면서 소요에너지를 최소화할 수 있는 냉각공기온도, 송풍량 및 통기폭 등 시스템의 설계 및 운영에 필요한 인자의 최적조건을 구명하는데 있다.

2. 목적함수 및 제한조건

차압예냉시스템의 최적화 목표로 일정한 냉각소요시간내에 냉각소요에너지를 최소화하고 그에 따른 제어변수를 찾는데 두었으며, 目的函數는 차압예냉과정중 소요되는 단위중량당 에너지로, 제어변수는 냉각공기온도, 통기폭, 송풍량 및 냉각소요시간을 설정하였다.

제한조건은 明示的 制限條件과 暗示的 制限條件으로 구분하여 다음과 같이 설정하였다.

가. 명시적제한조건

$$1^{\circ}\text{C} \leq \text{냉각공기온도} \leq 4^{\circ}\text{C}$$

$$0.72\text{m} \leq \text{통기폭} \leq 2.16\text{m}$$

$$4.2\text{m}^3/\text{min} \cdot \text{m}^3 \leq \text{송풍량} \leq 14.2\text{m}^3/\text{min} \cdot \text{m}^3$$

나. 암시적제한조건

$$3\text{hr} \leq \text{냉각소요시간} \leq 5\text{hr} \quad (\text{1일 2회 예냉처리})$$

$$3\text{hr} \leq \text{냉각소요시간} \leq 8\text{hr} \quad (\text{1일 1회 예냉처리})$$

3. 최적화 대상시설 및 소요에너지 산정

가. 최적화대상시설

1개의 흡기구(air slot)를 갖는 15평 규모의 차압예냉실(9.5×5.4×4.0m(L×W×H))을 대상으로 하였으며, 최적화 대상품목은 썬가루 사과(Tsugaru apple)로 하였다. 썬가루 사과는 '92년말 현재 재배면적이 40,711ha로서 사과의 총 재배면적의 13.9%를 차지하고 있으며, 연차적으로 재배면적이 증가하고 있는 품종이다. 높이방향 적재상자수는 유니트쿨러 및 차압송풍기의 설치공간을 고려하여 6상자, 길이방향 적재상자수는 기계하역을 고려하여 14상자로 하였다.

대상시설의 단열은 우레탄폼 0.075m 두께의 패널로, 冷却方式은 冷媒의 蒸發에 의해 유니트쿨러에서 열교환되는 直膨式(direct expansion type)을, 凝縮方式은 空冷式(air cooled type)을 기준으로 하였다. 외기온습도는 33°C, 70%RH로, 蒸發溫度와 庫內空氣溫度의 差는 유니트쿨러의 着霜量의 증가로 인한 예냉과정중의 除霜(defrost)을 고려하지 않기 위하여 7°C로, 유니트쿨러 전후의 온도차는 5°C, 凝縮溫度는 45°C로 설정하였다.

나. 소요에너지 산정

차압예냉시스템의 소요에너지는 압축기, 응축기, 증발기 및 차압송풍기 驅動에너지의 합으로 하였다. 여기서 압축기 소요동력은 냉동부하계산결과에 의거 基本所要動力 20Hp의 半密閉型 往復動式 壓縮機(HG 4/650-4S, BOCK, Germany)를 기준냉동기로 설정하여 증발압력과 응축온도의 변화에 따른 소요동력을 구하여 사용하였으며, 부하의 절대적인 비교를 위해서는 法定冷凍能力의 기본이 되는 標準冷凍사이클(standard refrigeration cycle)로 환산하였다. 차압송풍기의 구동동력은 송풍량과 정압의 관계식으로 구하였으며, 정압은 다음 예측식을 사용하였다.

$$\Delta P_T = 0.8552 + 0.8139 \times \Delta P_1 \times N^{1.1}$$

여기서 ΔP_T : 전송풍저항(mmAq)

ΔP_1 : 상자 1개의 송풍저항($\Delta P_1 = 987.87 V^{2.38}$ mmAq)

N : 통기폭방향 적재상자수(-)

V : 송풍량($m^3/sec \cdot m^2$)

4. 최적화 프로그램

냉각소요에너지를 최소화하는 냉각공기온도, 통기폭 및 송풍량을 탐색하기 위한 최적화 알고리즘으로 Box의 Complex algorithm을 사용하였다. vertex의 수는 제어변수 개수의 2배를, 반향계수 α 값은 1.3를 사용하였다. 청과물 퇴적층에서의 품온과 통과공기의 예측은 김등(1995)의 냉각 시뮬레이션 모델을 사용하였다. 최적화 프로그램은 1개의 주프로그램과 14개의 부프로그램으로 구성하였다.

5. 결과 및 고찰

가. 사과에 최적 설계 및 운전조건

사과에 대하여 1일처리 횟수를 1일 1회 및 2회, 이 때 예냉에 소요되는 시간을 각각 3~8시간 및 3~5시간 범위로 설정하고, 소요에너지를 최소화하는 냉각공기온도, 송풍량, 통기폭방향의 적재상자수 및 소요시간을 탐색하였으며, 그 결과는 표 1에 나타내었다.

표에서와 같이 사과의 냉각소요시간을 3~8시간으로 제한하였을 때 최적 냉각공기온도는 3.3℃, 최적 송풍량은 6.8 $m^3/min \cdot m^2$, 최적 통기폭방향 적재상자수는 4상자로 나타났으며, 이 때 냉각소요시간은 8시간, 소요에너지는 최소치인 29.7kJ/kg으로 나타났다. 또한, 사과의 냉각소요시간을 3~5시간으로 제한하였을 때는 최적 냉각공기온도는 2.6℃, 최적 송풍량은 8.1 $m^3/min \cdot m^2$, 최적 통기폭방향 적재상자수는 3상자로 나타났으며, 이 때 냉각소요시간은 5시간, 소요에너지는 최소치인 30.0kJ/kg으로 나타났다.

사과의 처리중량은 냉각소요시간이 5시간일 때 7,560kg, 냉각소요시간이 8시간일 때는 10,080kg으로 重量差가 2,520kg이었다.

냉각소요시간 5시간에서 표준냉동사이클상의 총냉동부하는 661,100kJ로 냉각소요시간 8시간일 때의 총냉동부하 880,160kJ의 약 75.1%수준이었다. 이 차이는 사과의 처리중량차인 2,520kg을 냉각하는데 추가로 소요된 열량이 대부분을 차지하였다. 단위중량당 냉동부하는 냉각소요시간 5시간일 때 87.4kJ/kg, 냉각소요시간 8시간일 때 87.3kJ/kg으로 거의 같은 값을 나타내었다. 시간당 총냉동부하중 사과의 냉각열량이 약 70%로 가장 큰 비중을 차지하였으며, 유니트쿨러 및 차압 송풍기, 벽체를 통한 전열량, 호흡열량 등에 의한 부하는 총냉동부하의 약 21%를 점유하였다.

냉각소요시간을 3~5시간으로 제한할 때의 최적 냉각공기온도 2.6℃는 사과 동결점(-1.1℃)보다 3.7℃가 높은 값이며, 냉각목표품온(5℃)보다 2.4℃가 낮은 값이다. 이는 적절한 냉각공기온도로 동결점보다 2~3℃ 높은 온도를 추천한 大久保(1991)의 연구 결과와 일치하며, 또한 냉각비용을 고려할 때 냉각목표품온보다 2.2℃정도 낮은 값을 추천한 Baird 등(1988)의 연구결과와 일치하였다.

통기폭방향의 최적 적재상자수는 3상자로, 통기폭은 1.08m(1개 상자의 폭 0.36 m)로 나타났다. 이 값은 Mitchell 등(1972)이 제시한 0.9~1.2m, A·U·F (1989)에서 제시한 1m와 거의 일치하였으며, 大久保(1991)가 추천한 3상자와 일치된 값을 나타내었다. 뿐만 아니라 현재 한국의 物流標準化 基本計劃에서 추진하고 있는 T-11형 표준팔레트(1.1×1.1m)의 치수와 잘 일치하여 單位 貨物積載體系(unit loading system)에 적합한 것으로 나타났다.

최적 송풍량은 송풍저항 24.1mmAq에서 8.1m³/min·m²로 나타났다. 이 송풍량은 통기폭방향 적재상자중 냉각공기 유입측 1개상자만을 고려할 때 1.098m³/min, 사과 1kg당 73.2 l/min의 송풍량에 해당한다. 이 결과는 A·U·F(1989)에서 제시한 62 l/min·kg과는 근사하였으나, 1개 상자에 대한 냉각실험 결과만을 이용하여 윤 등(1997), 石井 등(1981)이 제시한 40 l/min·kg과는 상당한 차이를 나타내었다. 石井 등의 연구결과와 상당한 차이를 나타낸 것은 통기폭의 고려 여부에 기인한 것으로 판단되었다.

나. 토마토의 최적 설계 및 운전조건

최적화 대상시설을 이용하여 토마토를 냉각할 경우의 최적 설계 및 운전조건을 탐색하였다. 목적함수 및 제한조건은 低溫障害를 고려하지 않고 사과의 경우와 동일하게 설정하였다. 토마토가 퇴적된 1상자당 송풍저항은 윤(1994)의 실험결과를 사용하였으며, 이 때 토마토의 공극율은 0.44, 상자의 규격은 0.48×0.3×0.28m(L×W×H)였다. 사과와 동일하게 냉각소요시간 3~5시간 및 3~8시간 범위로 제한하여 최적화를 실시하였으며, 그 결과는 표2와 같다.

토마토의 냉각소요시간을 3~8시간으로 제한하였을 때 최적 냉각공기온도는 3.0℃, 최적 송풍량은 7.8m³/min·m², 통기폭방향 최적 적재상자수는 5상자로 나타났으며, 이 때 소요에너지는 최소치인 32.0kJ/kg으로 나타났다. 또한, 토마토의 냉각소요시간을 3~5시간으로 제

한하였을 때는 최적 냉각공기 온도는 2.0℃, 최적 송풍량은 9.8m³/min · m³, 통기폭방향 최적 적재상자수는 4상자로 나타났으며, 이 때 소요에너지는 최소치인 33.7kJ/kg으로 나타났다.

다. 사과 및 토마토의 최적설계조건 비교

사과와 토마토의 냉각소요에너지를 비교해 보면 냉각소요시간을 3~5시간으로 제한할 때 최소 소요에너지는 사과가 30.0kJ/kg, 토마토가 33.7kJ/kg으로 나타났다. 최적 송풍량은 사과가 8.1m³/min · m³, 토마토가 9.8m³/min · m³, 단위 중량당 최적 송풍량은 사과가 73.2 l/min · kg, 토마토가 77.2 l/min · kg으로 나타났다. 이와 같은 차이는 사과 및 토마토의 비열이 각각 3.78kJ/kg · °C 및 4.0kJ/kg · °C임을 감안할 때 비열의 차이에 의한 것으로 판단되었다. 통기폭방향의 적재상자수는 사과 및 토마토가 각각 3상자 및 4상자, 통기폭은 각각 1.08m 및 1.2m로 나타났다. 이같은 차이는 사과 및 토마토 상자의 폭이 각각 0.36m 및 0.3m로 상자폭의 차이와, 1개 상자당 송풍저항이 토마토가 사과보다 적은 것이 원인으로 판단되었다.

6. 결론 및 요약

차압예냉시스템의 적정 설계 및 운전 조건을 구명하기 위하여 Box의 complex algorithm을 기초로 한 최적화 프로그램을 개발하였다. 개발한 최적화 프로그램을 이용하여 설정된 냉각소요시간내에 시스템의 소요에너지를 최소화하는 최적 냉각공기온도, 통기폭 및 송풍량을 결정하였다.

냉각 소요에너지의 최소화를 목적으로 할 때 사과 차압예냉시스템의 최적 송풍량은 8.1 m³/min · m³, 최적 냉각공기온도는 2.6℃, 통기폭방향 최적 적재상자수는 3상자로 단위 화물 적재체계에 적합한 것으로 나타났으며, 이 때 냉각소요시간은 5시간, 냉각소요에너지는 30.0kJ/kg으로 나타났다.

토마토 차압예냉시스템의 최적 송풍량은 9.8m³/min · m³, 최적 냉각공기온도는 2.0℃, 통기폭방향 최적 적재상자수는 4상자로 나타났으며, 이 때 냉각소요시간은 5시간, 냉각소요에너지는 33.7kJ/kg으로 나타났다.

설정된 냉각소요시간내에 시스템의 소요에너지를 최소화하는 최적 냉각공기온도, 통기폭 및 송풍량 값은 기존에 경험적으로 사용하는 설계치와 거의 일치하였다.

7. 참고 문헌

- 1 김의웅, 김병삼, 남궁배, 정진웅, 김동철, 금동혁. 1995. 청과물의 품온예측모델 개발. 한국농업기계학회지, 20(4) : 343-350.
2. 윤홍선. 1994. 차압통풍식 예냉 청과물의 송풍저항 및 냉각특성. 박사학위논문, 경북대학교 대학원.

3. 윤홍선, 조영길, 박경규. 1997. 청과물의 차압통풍예냉을 위한 냉각조건 구명실험. '97 동계학술대회, 한국농업기계학회 : 221-226.
4. 大久保増太郎. 1991. 野菜の鮮度保持. (株)養賢堂, 東京.
5. 石井勝 等. 1981. 野菜の差壓通風式豫冷技術の確立. 総合助成縣間共同研究報告書.
6. 黒田長治. 1982. 青果物豫冷における省エネルギー-. 冷凍, 57(659), 876-888.
7. A·U·F. 1989. Fresh produce manual - Handling storage practices for fresh produce -. Australian United Fresh Fruit and Vegetable Association Ltd., 25-44.
8. Baird, C.D., J.J. Gaffney and D.T. Kinard. 1975. Research facility for forced-air precooling of fruits and vegetables. Transactions of the ASAE, 376-379.
9. Baird, C.D., J.J. Gaffney and M.T. Talbot. 1988. Design criteria for efficient and cost effective forced-air cooling systems for fruits and vegetables. ASHRAE Transactions, 94(1), 1434-1454.
10. Mitchell, F.G., R. Guillou and R.A. Parsons. 1972. Commercial cooling of fruits and vegetables. California Agricultural Experiment Station Extension Service, Manual 43.

Table 1 Summary of optimization results of the pressure cooling system for apples under different implicit constraint conditions of cooling time.

| | Range of cooling time | |
|---|-----------------------|-----------|
| | 3~5hr | 3~8hr |
| Minimum required energy(kJ/kg) | 30.0 | 29.7 |
| Optimum values of control variables | | |
| cooling air temperature(°C) | 2.6 | 3.3 |
| number of stacked cartons in air flow direction | 3 | 4 |
| air flow rate(m ³ /min · m ²) | 8.1 | 6.8 |
| Cooling time(hr) | 5.0 | 8.0 |
| Apple weight(kg) | 7,560 | 10,080 |
| Power consumption(kWh) | 63.0 | 83.2 |
| Air flow resistance (mmAq) | 24.1 | 21.7 |
| Refrigeration load (kJ) | 768,500 | 1,044,400 |
| in standard refrigeration cycle(kJ) | 661,100 | 880,160 |
| Total coefficient of performance | 3.4 | 3.5 |

Table 2. Summary of optimization results of the pressure cooling system for tomatos under different implicit constraint conditions of cooling time.

| | Range of cooling time | |
|---|-----------------------|-----------|
| | 3~5hr | 3~8hr |
| Minimum required energy(kJ/kg) | 33.7 | 32.0 |
| Optimum values of control variables | | |
| cooling air temperature(°C) | 2.0 | 3.0 |
| number of stacked cartons in air flow direction | 4 | 5 |
| air flow rate(m ³ /min · m ²) | 9.8 | 7.8 |
| Cooling time(hr) | 5.0 | 8.0 |
| Tomato weight(kg) | 11,424 | 14,280 |
| Power consumption(kWh) | 106.8 | 126.7 |
| Air flow resistance (mmAq) | 41.1 | 33.8 |
| Cooling load (kJ) | 1,253,100 | 1,567,280 |
| in standard refrigeration cycle(kJ) | 1,088,100 | 1,316,400 |
| Total coefficient of performance | 3.3 | 3.4 |