

# 3차원 CFD 시뮬레이션을 이용한 저온저장고에서 청과물의

## 최적저장방법에 관한 연구

### Study on the Optimum Storage Method of Green Groceries for Cold Storage Room Using 3-D CFD Simulation

양길모*	고학균*	조성인*
정회원	정회원	정회원
G. M. Yang	H. K. Koh	S. I. Cho

#### 1. 서론

청과물은 살아있는 생명체로서 저장 중에도 물질대사와 일반 생리작용이 유지되고 조직의 변화가 일어난다. 수확 후 품질변화는 호흡작용과 증산작용에 의해 큰 영향을 받는다. 이러한 생리특성은 청과물의 품질에 직접적인 영향을 미치게 된다.

청과물의 품질변화에 영향을 미치는 환경인자들은 온도, 습도, 기체조성, 풍속, 빛, 압력차 등 여러 가지가 있다. 그 중 품질에 가장 크게 영향을 미치는 인자는 온도와 습도 그리고 기체조성들이다. 이러한 여러 가지 품질변화 인자들을 최적의 저장조건에서 관리해 주는 것이 저온저장고이다. 국내에 보급되어 농가 및 유통센터에서 주로 사용되어지고 있는 저장방식으로는 강제순환식, 차압식, CA, MA 저장고 등이 있다.

강제순환식 저온저장고는 차압식이나 CA, MA 저장고에 비해 그 저장성능이 떨어지는 단점을 가지고 있다. 하지만 설치 및 운영비에 있어서 저렴하기 때문에 국내 농가 및 유통업체에서 가장 많이 사용되고 있다.

강제순환식 저온저장고의 성능이 낙후되어 있는 원인으로서는 적절하지 못한 공기조화 방식과 저장물의 특성을 고려하지 않은 채 설계되고 있기 때문이다. 또한 강제순환식 공기조화 방식에 알맞은 청과물의 최적저장방법에 관한 연구가 부족한 것도 그 원인으로 지적할 수 있다.

본 연구는 강제순환식 저온저장고의 최적 설계인자를 규명하기 위한 기초 연구로서 저장 청과물의 최적저장방법에 관한 연구내용이며 최적저장방법을 규명하기 위해 컴퓨터를 이용한 3차원 CFD 시뮬레이션을 이용하였다.

---

† 본 연구는 한국학술진흥재단 연구과제 연구비 지원에 의해 수행되었음.

\* 서울대학교 농업생명과학대학 생물자원공학부

## 2. 재료 및 방법

### 가. 공시재료

본 실험에서는 전남 무안에서 7월초에 수확해서 약 2개월간 0°C에서 저장되었던 약 2톤의 양파를 사용하였다. 양파가 일정한 품온을 갖도록 하기 위하여 저장실험 전 저온저장고 내부의 온도를 약 12°C로 맞춘 후 35 일 동안에 내부의 온도를 11°C, 10°C, 9°C, 8°C...0°C로 점차 변화시키면서 낮추었다.

### 나. 계측장치

실험장치의 전체적인 개략도는 그림 1과 같다. 저온저장고에 18개의 온도센서, 1개의 속도센서를 설치하였다. 각 센서는 4ch 또는 8ch의 입력채널, 한 개의 출력채널을 가진 데이터 수집기에 연결하였다. 그리고 RS-232 케이블과 컴퓨터를 연결하여 온도 및 풍속계측 장치를 구성하였다. 풍속센서를 설치하기 어려운 곳은 휴대용 풍속계를 유동방향에 맞게 위치시켰다. 그리고 내부 벽면에 heat flux계측을 위한 평판센서를 부착 후 단열테이프를 이용하여 반대쪽에서의 열 전달을 차단하였다.

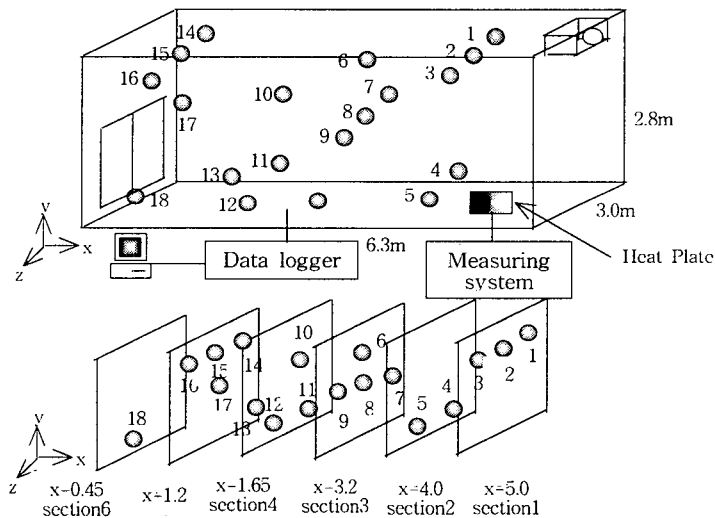


Fig. 1. Block diagram and thermistor position of cold storage room.

### 다. 시뮬레이션

형상이 복잡한 3차원 대상 물체를 해석하기 위해 CFD-ACE+ 6.2 상용 패키지를 이용하였다.

#### (1) 지배방정식

##### ① 연속방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0$$

② 운동량 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) = \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} + \rho f_i + \frac{\partial (\overline{\rho u_i u_j})}{\partial x_i}$$

$f_i$ 는 전자기력이나 중력 같은 외력,  $\tau_{ij}$ 는 응력텐서

③ 에너지 방정식

$$(\rho u_i h) \frac{\partial T}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (K \frac{\partial T}{\partial x_i}) + H$$

$h$ 와  $T$ 는 엔탈피와 온도이고  $K$ 는 열전달 계수,  $H$ 는 내부 열원을 말한다.

(2) 표준형  $k-\epsilon$  난류모델

팬에서 발생하는 유동을 등방성 난류 유동이라 보고 경계조건에서  $k$ 와  $\epsilon$ 값을 계산하였다.

$$k = \frac{3}{2} (I u_r^2)$$

$I$ : 난류 intensity

$u_r$ : velocity

$$\epsilon = \frac{C_\mu^{3/4} k^{3/2}}{K \cdot L}$$

$C_\mu$ : closure coefficient

$K$ : 확산계수

$L$ : 난류의 혼합길이

난류현상의 해석을 위해 유한체적법에 기초를 둔 검사체적을 사용하여 표준  $k-\epsilon$  난류 모델을 사용하였다.  $k-\epsilon$  난류모델에서 소산율과 유동속도는 first order upwind scheme을 사용하였다.

청과물의 최적저장조건을 찾기 위해 저장물의 적재 방식과 저장위치를 변경시키면서 시뮬레이션을 실시하였다. 최적저장방법을 찾은 후 청과물의 증산작용과 중량변화에 영향을 미치는 풍속을 변화시키면서 실험을 하였다.

#### 라. 경계조건

시뮬레이션을 위한 초기조건은 최종 계산값에 직접적인 영향을 미치지 않으나 그 값을 얻기 위해 진행되어지는 경로에 영향을 준다. 특히 압력이나 난류운동에너지, 난류소산률을 구하는 경우 합리적인 초기값의 설정이 매우 중요하다. 본 연구에서 초기조건과 경계조건은 실험값을 기본으로 하여 설정하였다.

내부 열원으로는 팬 작동에 따른 발열량, 벽체로부터의 흡입열량, 저장물의 호흡열량을 고려하였다. 팬을 둘러싸고 있는 부분을 유동의 통과는 없고 열전달만 발생하는 solid로 설정

하여 팬 작동에 따른 발생열량을 계산하였다.

저장된 양파의 내부 공극을 통해 측정된 평균품온은 2.2℃이었다. 양파의 물성은 ASHRAE Handbook(1998)에서 제시된 값을 기본으로 사용하였다. 호흡열량을 저장된 양파의 부피로 나눈 단위부피당 열발생량  $28.84 \text{ W/m}^3$ 을 시뮬레이션 모델에서 내부 저장물의 열원으로 사용하였다. 저온저장고의 윗면을 제외한 벽에서의 경계조건으로는 유속과 heat flux 측정장치를 이용하여 계측한 값을 벽체에서의 침투열량으로 하였다.

자세한 경계조건의 값은 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Boundary conditions.

입구 조건	풍속	7.59 m/s	팬의 물성	RPM	1135
	온도	271.65 K		Blade Angle	25°
출구 조건	풍속	2.52 m/s	벽체의 침투열량	발생열량	144 Kcal/h
	온도	275.15 K			$2.342 \text{ W/m}^2$
팬의 물성	밀도	$7830 \text{ kg/m}^3$	양파의 물성	호흡열량	$6.22 \text{ W/m}^2$
	비열	$452 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$		밀도	$493 \text{ kg/m}^3$
	열전도도	$73 \text{ W/mK}$		비열	$3770 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$

팬 앞의 4부분을 측정, 평균을 내어 유속의 초기조건으로 하였고 그 값은 7.59m/s였다. 팬 앞에서의 공기유동은 강제순환으로 인하여 불균일하므로 난류 intensity는 0.02로 설정하였으며 난류의 혼합길이를 말하는 L은 팬의 직경인 0.46m로 하였다.

입구조건으로는 유속의 측정값 7.59m/s인 측정값을 통하여 계산한  $k$ 값 0.034565,  $\epsilon$ 값 0.0057387 그리고 대기압과 저온저장고의 설정온도를 주었다.

#### 마. 실험방법

저장물이 없을 경우 내부의 온도를 파악하기 위하여 구간별로 온도센서를 설치한 후 저온저장고의 설정온도를 각각 4℃, 0℃로 하고 정상상태에 도달할 때까지 온도분포를 측정하였다. 측정된 온도와 시뮬레이션 모델과 비교하여 그 유의성을 검증하였고 이후 시뮬레이션만을 통해 공기흐름 분포를 분석하였다.

실측치와 시뮬레이션에 의한 예측치의 유의성을 검증하기 위하여 저장물이 없는 경우, bulk 상태저장, pallet 상태저장으로 각각 나누어 정상상태에 도달했을 경우의 온도를 측정 그 유의성을 검증하였다. 저장된 양파사이로 공기가 최대한 적게 통과하도록 하기 위하여 산물저장방법을 사용한 bulk 상태저장의 경우 저장된 양파는 저온저장고의 밑면과 접하게 하였다. 그리고 pallet 상태저장은 저온저장고 내부에 일정한 공기유동통로를 제시하여 저장하였으며 pallet을 제작하여 저장물이 저온저장고 밑면과 약 0.1m, 벽면과는 약 0.75m 공간을 갖도록 하였다. 좌우 저장물 사이는 약 0.24m, 아래와 위의 저장물 사이에는 약 0.13m의 공간을 주었다.

bulk 상태저장의 경우 내부 찬 공기와의 접촉면적은  $12.85 m^2$ 이고 pallet 상태저장의 경우는  $45.44 m^2$ 로 bulk 상태저장이 pallet 상태 저장시 접촉면적의 28.3%에 해당하였다.

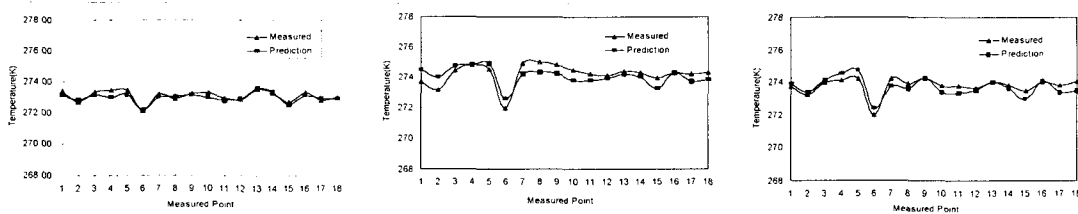
### 3. 결과 및 고찰

#### 가. 실측치와 예측치의 유의성 검증

그림 2의 (a)는 저장물이 없을 때 실측치와 시뮬레이션에 의한 예측치의 유의성을 보여주고 있다. 각 지점에서 측정값들이 예측치와 오차 내에서 상호 유의성을 가지고 있음을 알 수 있다. 6지점에서 온도가 가장 낮게 나타나는 것은 유니트 쿨러에 의한 냉기의 영향이 다른 지점에 비해 강하게 작용하기 때문인 것으로 분석된다. 전체적으로 실측치와 예측치의 평균오차는  $0.17^\circ C$  이었다.

그림 2의 (b)는 bulk 상태로 저장되었을 때 실측치와 예측치의 유의성을 비교 검증한 것이다. bulk 상태일 경우는 실측치와 예측치의 오차가 no storage와 pallet storage일 때 보다 크게 나타나는 이유는 bulk 상태로 저장할 경우 저장물과 냉기와의 접촉면적이 작은 관계로 호흡열이 불규칙하게 발생하기 때문이다. 또한 완전히 단열되지 않은 벽체를 통한 불규칙한 열 유입도 오차를 발생시키는 원인으로 사료된다. 전체적으로 실측치와 예측치의 평균오차는  $0.45^\circ C$  이었다.

그림 2의 (c)는 pallet 상태로 저장되었을 때 실측치와 예측치의 유의성을 보여주고 있다. pallet 상태로 저장할 경우 냉기와의 고른 접촉으로 no storage일 때의 공기분포와 같이 오차가 아주 작은 값을 나타냄을 알 수 있다. 전체적으로 실측치와 예측치의 평균오차는  $0.28^\circ C$  이었다.



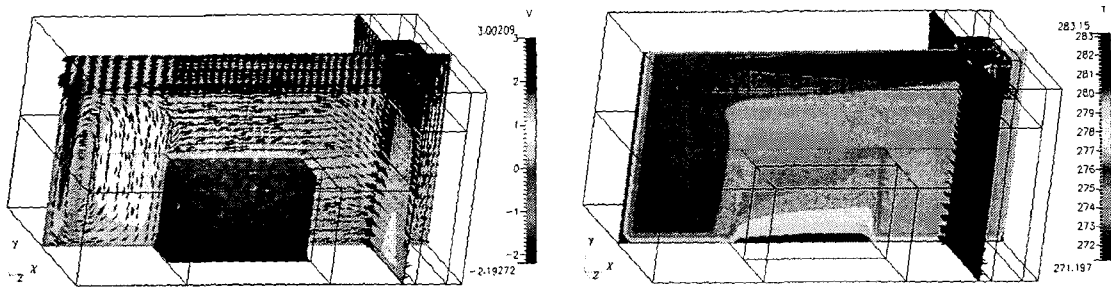
(a) In case of no-storage. (b) In case of bulk storage. (c) In case of pallet storage.

Fig. 2. Comparison between experimental data and prediction data.

#### 나. 저장물의 적재 방식과 위치에 따른 시뮬레이션

bulk상태와 pallet상태로 저장되어 있는 저장물의 공기유동과 온도분포를 저장물의 위치에 따라 모델링하였다. 먼저 bulk 상태의 저장물이 저장고의 중앙에, 팬의 반대쪽에 그리고 팬 쪽에 치우쳐 있는 상태를 모델링하고 그 때의 공기유동과 온도분포를 시뮬레이션하였다. 이때 설정된 저장물의 크기는  $2.35 \times 1.37 \times 1.26m$ 이었으며 냉기와의 접촉면적은  $12.85 m^2$ 이었다. 그림 3은 저장물이 bulk 상태로 저장되어 있을 경우 냉기의 속도분포 및 온도분포를 보여주고 있다. 그림 3의 (a)는 냉기의 속도분포로서 저장물의 좌측에서는 강한 에디가 발생

하고 우측에서는 냉기가 순화되지 못하고 역류하는 모습을 볼 수 있다. 순화되지 못하는 냉기의 영향으로 그림 3의 (b)에서처럼 저장물의 아래쪽과 위쪽이 심한 온도편차를 보여 주고 있는 것을 볼 수 있다. 또한 저장물의 왼쪽은 평균 0.5℃, 저장물의 내부는 평균 3.61℃ 그리고 저장물의 오른쪽은 1.25℃의 온도 분포를 보였다.

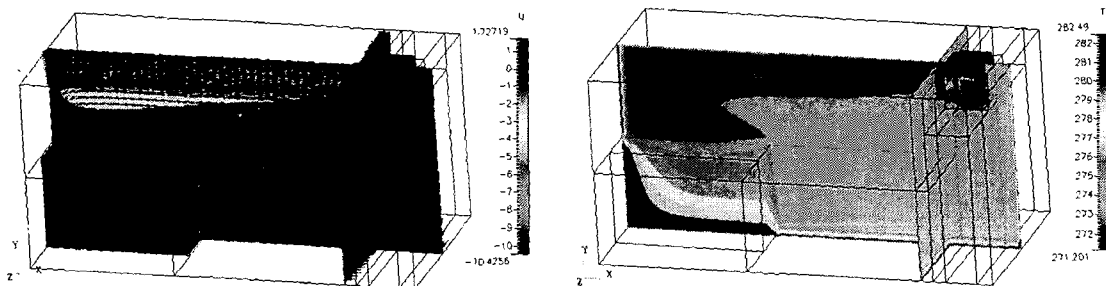


(a) Velocity distribution

(b) Temperature distribution

Fig. 3. Velocity and temperature distribution when stores are stored at center of room.

그림 4는 bulk 상태의 저장물이 좌측에 치우쳐 저장되었을 때 냉기의 속도분포 및 저장물의 온도분포를 보여주고 있다. 그림 4의 (a)는 벽을 통한 유입열과 순화되지 못한 냉기 분포가 저장물에 미치는 영향을 보여주고 있다. 저장물의 오른쪽에서 냉기는 저장물 쪽으로 강하게 역류하는 모습을 볼 수 있다. 이와 같은 냉기분포로 인해 그림 4의 (b)에서처럼 저장물 내부의 온도분포는 중앙에 저장되었을 때 보다 심한 온도 불균일을 가져오는 것을 알 수 있었다. 저장물 내부의 온도 분포는 평균 4.85℃ 저장물 왼쪽은 평균 0.75℃의 온도분포를 보였다.

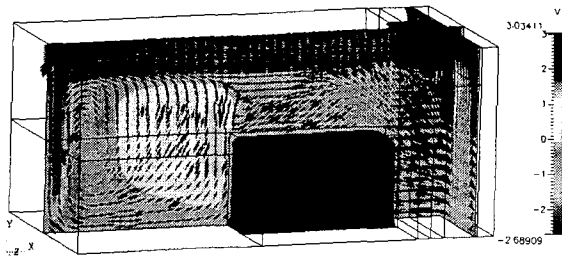


(a) Velocity distribution

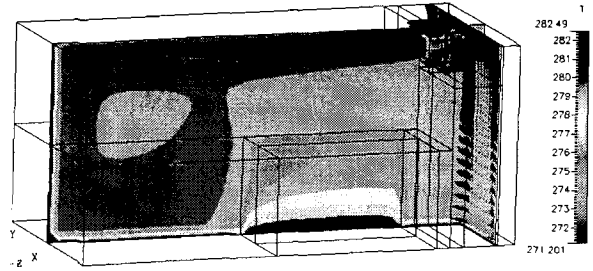
(b) Temperature distribution

Fig. 4. Velocity and temperature distribution when stores are stored at left side of room.

그림 5는 저장물이 유니트 쿨러쪽으로 치우쳐 저장되었을 경우 냉기의 속도분포 및 저장물의 온도분포를 보여주고 있다. 그림 5의 (a)는 냉기가 저장물 앞쪽에서 커다란 에디를 유발하고 반대쪽에서 심한 난류흐름 분포를 가지는 것을 보여주고 있다. 이와 같은 냉기의 흐름은 그림 5의 (b)에서처럼 저장물의 앞과 뒤에서 공기흐름의 부조화로 저장물에 악영향을 미치는 것을 알 수 있다.



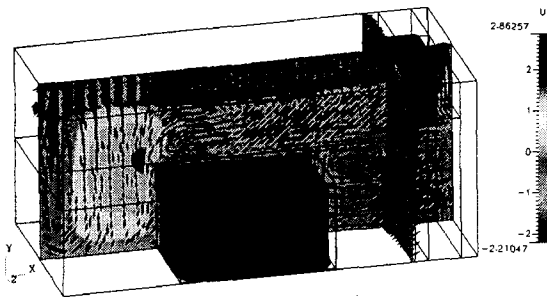
(a) Velocity distribution



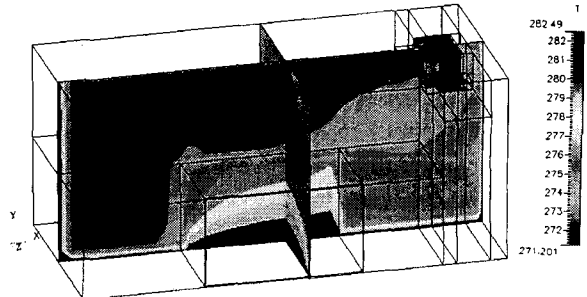
(b) Temperature distribution

Fig. 5. Velocity and temperature distribution when stores are stored at right side of room.

그림 6은 저장물이 중앙에 벽을 형성하며 넓게 분포할 때 냉기의 흐름과 온도분포를 보여 주고 있다. 그림6의 (a)와 그림 6의 (b)에서 보듯 공기조화와 저장물 내부에서 높은 호흡열로 인해 저장물에 심한 온도 불균일을 보여 주고 있다.



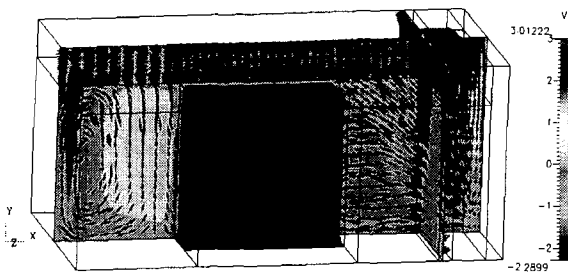
(a) Velocity distribution



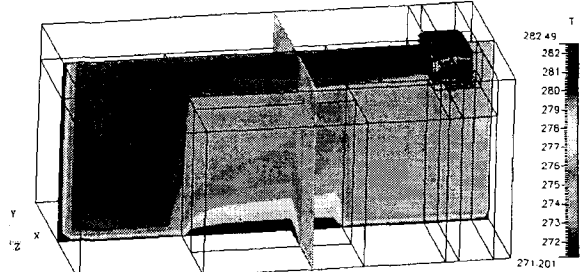
(b) Temperature distribution

Fig. 6. Velocity and temperature distribution when stores are stored at center of room widely.

그림 7의 (a)와 (b)는 저장물이 중앙에 bulk 상태로 높게 적재되었을 경우 냉기의 흐름과 온도분포를 보여주고 있다. 저장물의 아래 부분과 위 부분의 온도 편차와 그리고 저장물의 좌측과 우측의 온도 편차가 심하게 나타나고 있는 것을 알 수 있다.



(a) Velocity distribution



(b) Temperature distribution

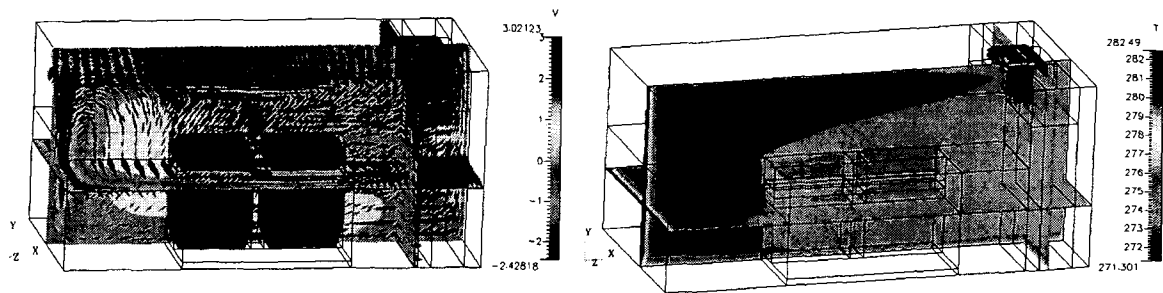
Fig. 7. Velocity and temperature distribution when stores are stored at right side of room.

그림 8은 저장물이 pallet 상태로 저장되어 있을 경우 냉기의 속도분포 및 온도분포를 보여주고 있다.

저장물이 냉기와 접촉하는 면적은  $45.44 \text{ m}^2$ 이었다. 이는 bulk 상태일 때보다 71.1% 만큼 많아진 경우이다.

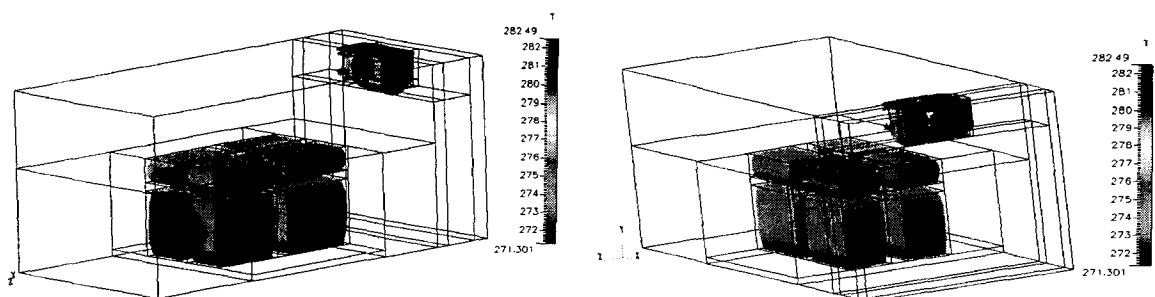
그림 8의 (a)는 냉기가 저장물 사이로 잘 순화되어 흐르는 모습을 보여주고 있다. 이로 인해 그림 8의 (b)에서 저장물들은 bulk 상태로 저장되었을 때 보다 높은 온도분포와 낮은 온도분포를 보였다. 설정온도가  $0^\circ\text{C}$ 일 때 저장물의 왼쪽은 평균  $0.18^\circ\text{C}$ , 저장물 내부는 평균  $1.71^\circ\text{C}$ , 저장물의 오른쪽은  $0.82^\circ\text{C}$ 의 온도 분포를 보였다. 그림 8의 (c)와 (d)는 저장물의 좌측과 우측의 온도분포를 나타낸다. 냉기가 저장물 사이를 잘 순화되어 흐르지만 그림 8의 (a)에서 보듯이 좌측의 저장물은 냉기에 직접적으로 접촉하므로 낮은 온도분포로 인해 냉해를 입을 위험성이 높은 것으로 판단된다. 반면에 그림 8의 (d)에서 우측의 저장물은 비교적 높은 온도분포를 보이고 있다. 이는 저장고의 불합리한 설계로 풍속이 지나치게 세기 때문에 발생하는 문제이다.

이 같은 문제점을 해결하기 위해 그림 9의 (a)와 (b)에서처럼 저장물을 좌·우 벽쪽으로 치우쳐 저장을 하였다. 그 결과 직접적으로 냉기에 접촉하지 않으므로 저장물의 냉해를 방지할 수 있는 저장 방법으로 판단되었다.



(a) Velocity distribution

(b) Temperature distribution

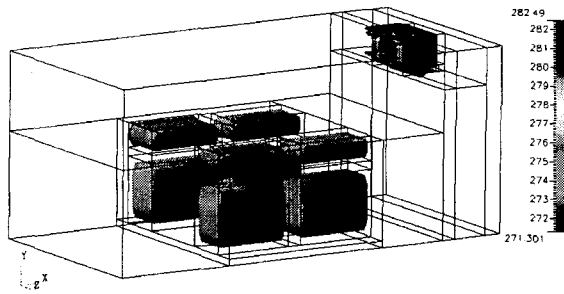


(c) Left side view for temperature distribution of stores

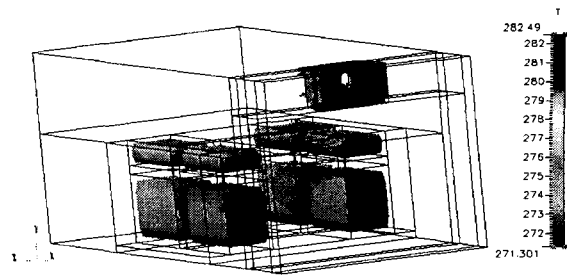
(d) Right side view for temperature distribution of stores

Fig. 8. Velocity and temperature distribution when stores are stored by pallet method.





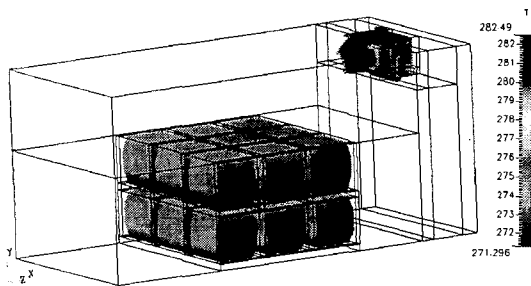
(a) Left side view for temperature distribution of stores



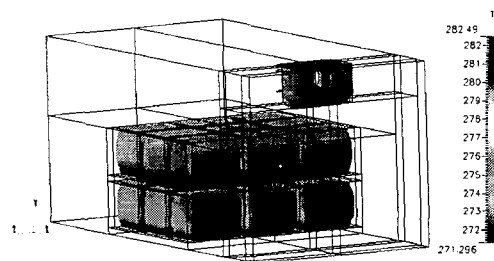
(b) Right side view for temperature distribution of stores

Fig. 9. Temperature distribution of stores when it is stored at the side of room.

하지만 그림 9처럼 저장을 할 경우 저장고의 많은 면적을 사용하지 못하는 비경제적인 방법이라 할 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 냉해를 입지 않고 저장물의 증산작용을 억제하며 고른 온도분포를 갖게 하는 것이 중요하다. 그림 10은 저장물을 상·하, 좌·우 10cm 간격을 두고 pallet 상태로 저장하고 팬의 RPM을 800으로 줄였을 경우 저장물의 온도 분포를 나타낸 것이다. 전반적으로 저장물간에 고른 온도 분포를 보이고 있으며 냉해의 발생을 피할 수 있는 저장방법이라 판단된다. 하지만 우측의 경우는 좌측에 비해 다소 높은 온도분포를 보였다. 이는 강제순환식 저온저장고의 설계 문제로 판단되며 이를 해결하기 위해서는 향후 저온저장고의 최적설계인자 규명에 관한 더 많은 연구가 필요할 것으로 판단된다.



(a) Left side view for temperature distribution of stores



(b) Right side view for temperature distribution of stores

Fig. 10. Temperature distribution of stores when air velocity is decreased to 800 RPM.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구는 강제순환식 저온저장고의 최적설계인자를 규명하기 위한 전 단계로 3차원 CFD 시뮬레이션을 이용하여 저온저장고에서 청과물의 최적적재방법을 찾기 위해 수행되었

다. 지금까지 경험에 의해 적용되었던 청과물의 저장방식을 가시적인 실험에 의해 그 근거를 제시하였다. 시뮬레이션한 결과를 양과를 이용한 저장실험을 통해 비교함으로써 그 유의성을 검증하였다.

연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 저온저장고를 규칙적인 격자 요소망(structure mesh)을 적용하여 시뮬레이션으로 구현하였으며 적절한 공기유동 결과를 도출하였다.
- 2) 저장물의 위치에 따라 저장고 내부의 공기유동을 분석하였고 냉기가 저장물에 미치는 영향을 분석하였다.
- 3) bulk 상태 저장방법보다 pallet 상태로 저장할 경우 냉기와의 접촉면적이 높아지므로 저장물 내부의 온도분포가 고르게 나타남을 알 수 있었다. 저장물이 팬의 반대쪽에 적재된 경우에는 냉기가 저장물 쪽으로 급격히 역순환하여 저장물 내부에서 심한 온도 불균일을 가져왔고 벽을 통한 열 유입의 영향을 많이 받는 것을 알 수 있었다. 또한 저장물이 가운데에서 bulk 상태로 벽을 이루며 저장된 경우나 지나치게 높게 적재된 저장물의 경우 저장물 좌우측으로 불균일한 냉기유동과 저장물의 호흡열로 인해 아주 안 좋은 결과를 초래하였다.
- 4) pallet 상태의 저장시 풍속이 셀 경우 저장물을 가운데보다는 저장고 벽쪽으로 저장하는 것이 저장물의 냉해를 방지하는 방법으로 판단되었다. 하지만 저온저장고의 전체공간을 경제적으로 모두 사용하고 냉해를 방지하기 위해서는 지나치게 셀 저장고내의 풍속을 적절히 맞춰줌으로서 해결할 수 있음을 알 수 있었다.

## 5. 참고문헌

1. 박호석 외. 1997. 농산가공유통시설, 농협전문대학.
2. 신병록 외. 1994. 전산유체역학. 대영사.
3. 조병관 외. 1998.  $K-\epsilon$  난류모델을 이용한 저온저장고 내부의 온도분포 및 공기유동에 관한 연구.
4. A.D.Althouse. 1998. 냉동공학. 원화.
5. Hinze, J. O. 1975, Turbulence. McGraw Hill, Inc.
6. Kang, S. W. 1996. Development of a poisson model to predict recirculating flows in cold storage rooms, Ph. D. dissertation. Cornell University. Ithaca, New York.
7. Mohsenin. Nuri, N. 1986. Physical Properties of Plant and Animal Materials. Gordon and Breach Science Publishers. Inc.
8. Tennekes, H. and J. L. Lumley. 1972, A First Course in Turbulence. The MIT Press.
9. Timmons, M. B. 1979. Experimental and numerical study of air movement in slot-ventilated enclosures. Unpublished Ph. D. Thesis, Cornell University. Ithaca, New York.
10. White. F. M. 1986. Fluid Mechanics. McGraw-Hill, Inc.