

# 저온저장고 내부의 균일한 온도분포를 위한 3차원 공기유동 분석<sup>†</sup>

## 3-D Simulation of Air Flow in Cold Storage Room for Uniform Temperature Distribution

성제중\*      고헌균\*      조성인\*      양길모\*  
                  정회원                    정회원

J. J. Sung    H. K. Koh    S. I. Cho    G. M. Yang

### 1. 서론

기존에 설치된 많은 저온저장고는 단열 및 시스템 설비의 문제점으로 인하여 열에너지의 손실이 크고 불균일한 공기유동으로 저온저장고 내부의 온도분포가 고르지 못하여 비효율적인 저장이 이루어지고 있다. 저장온도를 적정온도로 유지하여 품질 저하를 최소화하기 위해서는 냉기가 균일하게 분포되는 것이 중요하며 그 기초연구로서 중요 설계변수를 통한 저온저장고 내부 온도분포, 공기유동 분석이 필요하였기에 본 연구가 진행되었다.

노동력과 비용, 시간을 감소시키면서 효율적인 설계를 하고자 CFD(computational fluid dynamics)를 이용하여 저온저장고 내부 압력과 공기유동분포 그에 따른 온도분포 등을 시뮬레이션 하였다. 저온저장고 내부의 공기유동을 분석하기 위한 3차원 유체해석기구로서 CFD프로그램 중의 하나인 CFD-ACE+ 패키지가 사용되었고 이때 난류분석에 가장 흔히 사용되어지는 표준형 k- $\epsilon$  모델을 사용하였다.

### 2. 재료 및 방법

#### 2.1 공시재료

본 실험에서는 전남 무안에서 7월초 수확후 약 2개월간 0℃ 에서 저장되었던 약 2톤의 양파를 사용하였으며 저장실험을 하기 전에 부패된 부분을 제거하였다. 양파가 일정한 품온을 갖도록 하기 위하여 저장실험 전 저온저장고 내부의 온도를 약 12℃로 맞추후 35 일 동안에 내부의 온도를 11℃, 10℃, 9℃, 8℃ .....0℃로 점차 변화시키면서 낮추었다.

#### 2.2 계측장치

저온저장고 벽면에 4개의 구멍을 뚫고 18개의 온도센서, 1개의 속도센서를 설치 후 실리콘으로 밀봉하였다. 각 센서는 4 ch 또는 8 ch의 입력채널, 한 개의 출력채널을 가진 데이터 수집기에 연결하였다. 그리고 RS-232 케이블과 컴퓨터를 연결하여 온도 및 풍속 계측장치

<sup>†</sup>본 연구는 한국학술진흥재단 연구비로 수행되었음.

\* 서울대학교 농업생명과학대학 농공(기계)학과

를 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.

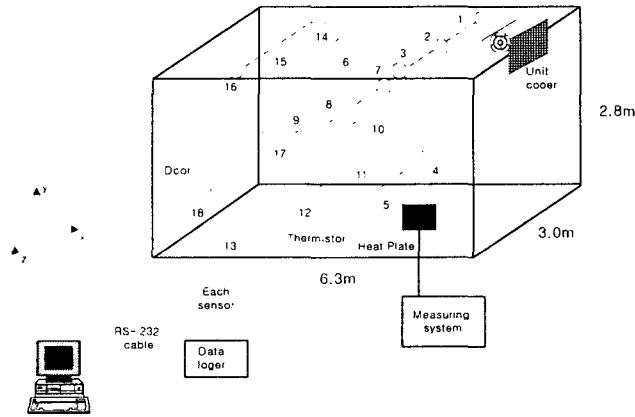


Fig. 1. Thermistor position in cold storage room.

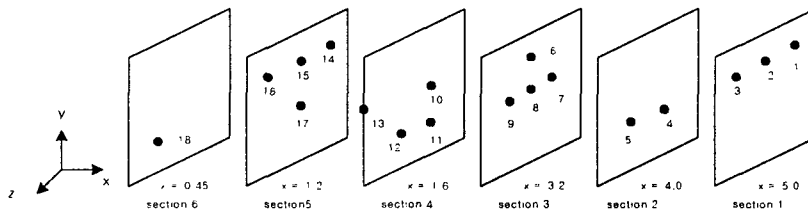


Fig. 2. Thermistor position along x-axis.

### 2.3 CFD-ACE+ 패키지

유체유동이나 상변화 또는 연소 등의 물리적 변화를 시뮬레이션 하기 위한 패키지로서 현재 항공이나 자동차, 의공학 등에서 많이 사용되고 있다.

본 연구에 사용된 컴퓨터는 CPU 450 Mhz, 내부 메모리 384 SDRAM, 64000 이상의 색상이 1024 × 768의 분해능을 갖는 그래픽카드와 모니터 등의 사양에 O/S 는 Window NT 4.0 이었으며 CFD-ACE+ 5.01 버전을 사용하였다.

### 2.4 시뮬레이션

CFD를 이용한 해석은 일반적으로 세 가지 단계로 나누어 진다.

첫 번째 단계는 해석하고자 하는 실제현상에 대한 이해와 해석하고자 하는 범위를 정한다. 관심영역에서 정의된 문제에 대해 형상을 만들고 해석하기 위한 격자를 생성한다. 두 번째 단계는 적절한 경계조건과 물성을 이용하여 지배방정식을 해석한다. 여기서 연속적인 수치 해석 방법과 지배 유동방정식 안에서 알지 못하는 유동 변수의 근사를 통하여 구하고자하는 값을 계산한다. 세 번째는 이전의 단계에서 얻어진 격자와 계산 값을 graph나 table등을 이용하여 나타내는 것이다.

## 2.5 실험방법

저장물이 없을 경우 내부의 온도를 파악하기 위하여 온도센서를 설치한 후 저온저장고의 설정온도를 각각 4℃, 0℃로 하고 정상상태에 도달하였을 때의 온도를 시뮬레이션 모델 검증 시 비교온도로 삼는다.

저장물을 bulk 상태저장과 pallet 상태저장으로 나누어 저장 후 정상상태에 도달했을 경우의 온도를 측정한다. 저장된 양과사이로 공기가 최대한 적게 통과하도록 하기 위하여 산물저장 방법을 사용한 bulk 상태저장의 경우, 저장된 양과는 저온저장고의 밑면과 접하게 된다. 그리고 pallet 상태저장은 저온저장고 내부에 일정한 공기유동통로를 제시한 저장이며 pallet을 제작하여 저장물이 저온저장고 밑면과 약 0.1m, 벽면과는 약 0.75m 공간을 갖도록 하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 저장실험 및 검증

그림 3은 설정온도 0℃, 4℃이고 편차는 1℃ 일 때 저장상태에 따른 저온저장고내부의 온도분포를 나타낸 것이다. 온도설정후 12시간 이후의 값을 측정하였으며 설정온도 0℃일 경우 측정된 온도를 비교온도로 하여 예측값과 비교하였다. 시뮬레이션 모델은 입구조건에서 공기는 정해진 온도로 일정하게 나와 계속적으로 온도가 유지되나 실제 저온저장고의 경우 설정온도에 도달하면 냉동기의 작동이 중단된다. 따라서 바로 온도상승이 일어나게 되어 실험값과 예측값이 차이를 보였으며 그 경향성은 유사하였다.

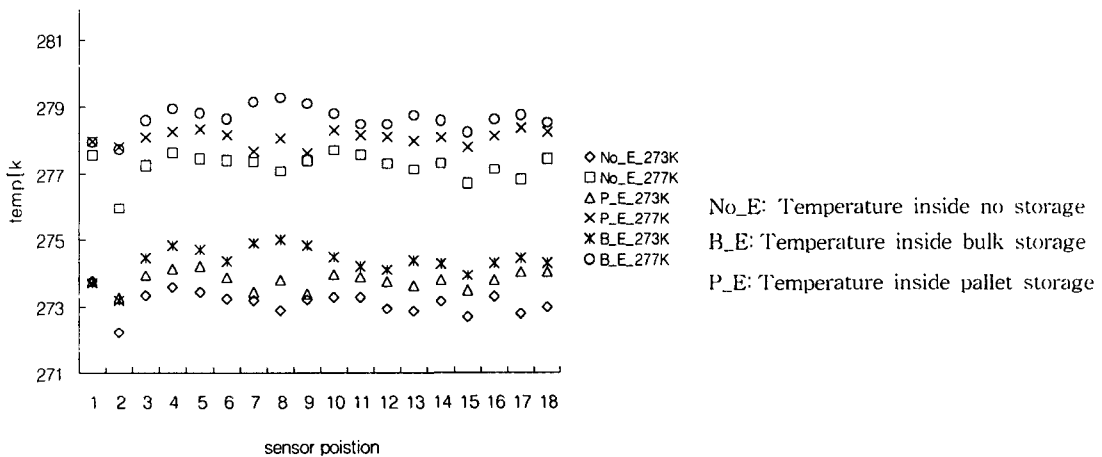
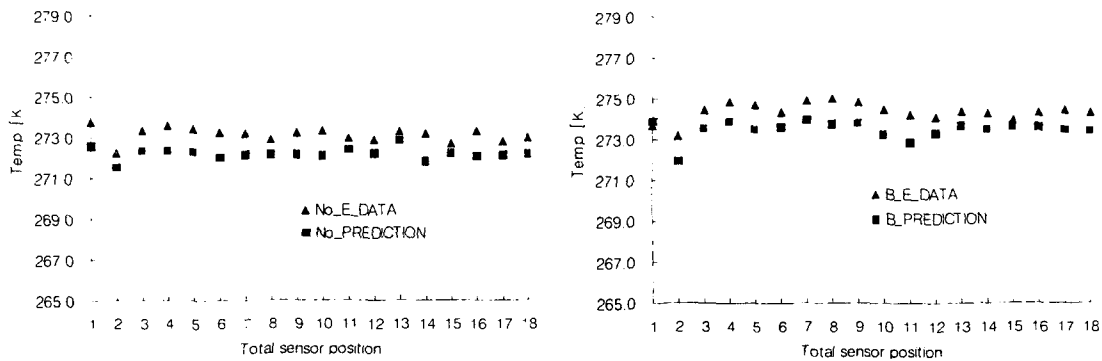


Fig. 3. Comparison of experimental data.

그림 4는 저온저장고의 상태에 따라 실험을 통해 얻어진 온도값과 시뮬레이션에 의해 예측된 온도값을 비교한 것이다. (a), (b)를 보면 저온저장고 입구쪽인 14와 16위치에서 실험값과 예측값이 반대의 경향을 나타낼 수 있다, 실제 저온저장고의 불균일한 단열로 heat flux에 의한 영향이 공기유동에 의한 영향보다 커져 차이가 났다고 생각된다.

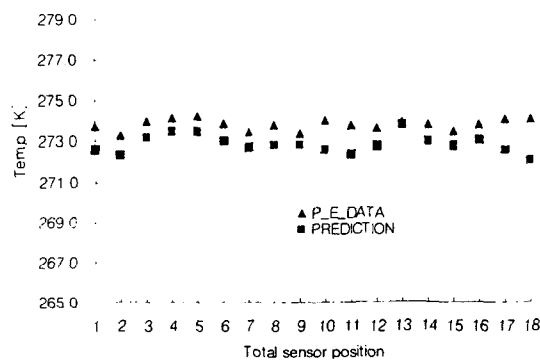
(c)를 보면 시뮬레이션 값은 실험값과의 일정한 경향을 보이고 있으나 10, 11위치에서 예측값이 다른 위치보다 많은 차이를 나타내었다. 시뮬레이션의 경우 내부공기는 다공물질인 저장물의 공극을 통하지 않고 공기유동통로만을 따라서 이동하기 때문에 저장물과 만나는 부분인 10, 11위치에서 큰 온도구배가 발생하였다고 판단된다.

저장물이 없을 경우 실험값과 예측값은 저온저장고 내부의 실제온도편차 1.5 °C 안에서 일치하였고 저장물이 bulk 상태로 있을 경우 실험값과 예측값은 저온저장고 내부의 실제온도 편차 1.6°C 안에서 일치하였다. 그리고 저장물이 pallet 상태로 있을 경우 실험값과 예측값은 저온저장고 내부의 실제온도편차 0.95°C 안에서 일치하였다.



(a) In case of no storage.

(b) In case of bulk storage.



(c) In case of pallet storage.

Fig. 4. Comparison of temperature distribution between experimental data and predicted data.

### 3.2 저장물이 없는 경우 시뮬레이션

그림 5를 보면 팬에서 강제된 공기는 점차 약한 흐름을 보이면서 맞은편 벽까지 도달하고 돌아와 뒤쪽에 있는 흡입구로 들어감을 알 수 있다. 그림 6의 분석을 통하여 팬 앞부분에서 공기유동이 급격하게 좌우로 확산됨을 알 수 있었다. 공기가 좌우보다는 앞쪽에 더 집중되어 있기 때문에 공기흐름이 분산되어지는 것이다. 좌우로 확산된 냉기는 벽을 타고 진행하여 heat flux의 영향을 줄여주었다. 그림 7, 8은 측면과 윗면에서 본 저온저장고 내부의 온도분포를 나타낸 것이다

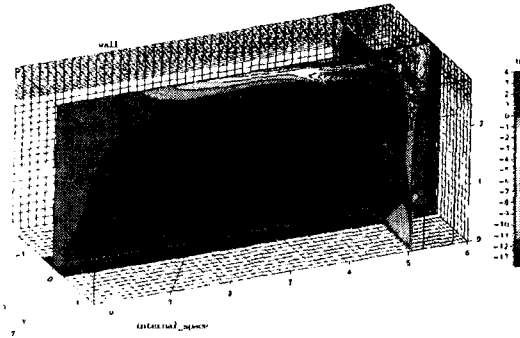


Fig. 5. Velocity distribution of no storage at  $z = 0.0\text{m}$  (front view)

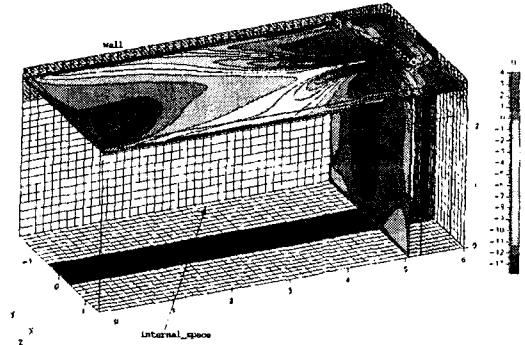


Fig. 6. Velocity distribution of no storage at  $y = 2.65\text{m}$  (top view)

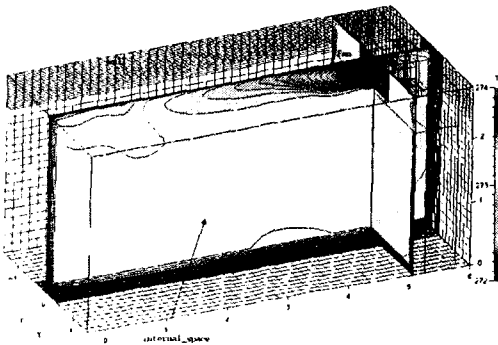


Fig. 7. Temperature distribution of no storage at  $z = 0.0\text{m}$  (front view)

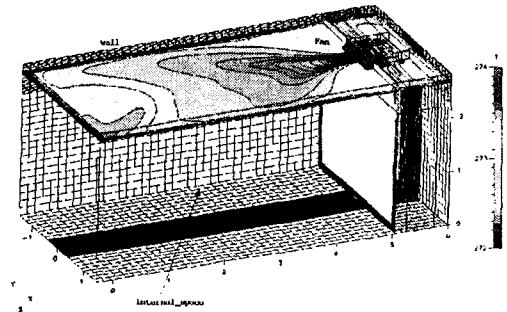


Fig. 8. Temperature distribution of no storage at  $y = 2.65\text{m}$  (top view)

### 3.2 Bulk 상태저장 시뮬레이션

그림 9는 bulk 상태저장시 윗면에서 본 공기유동이다. 저온저장고 반대편에 도달한 공기유동이 저장물로 인하여 순화되지 못하여 팬 아래부분에서 공기정체현상이 발생함을 알 수 있다. 그림 10은  $y = 1.0\text{m}$ 에서 온도분포이며 공기가 통과하는 양쪽사이의 공간이 저장물이 있는 부분보다 훨씬 낮은 온도분포를 보였다.

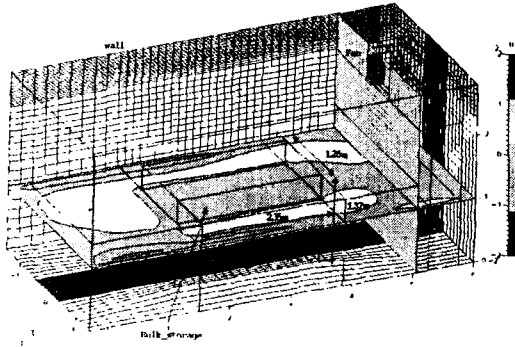


Fig. 9. Velocity distribution of bulk storage at  $y = 1.0\text{m}$  (top view)

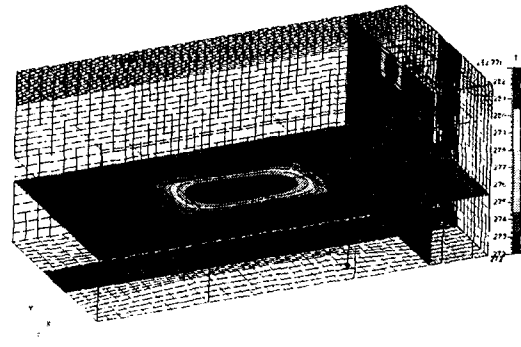


Fig. 10. Temperature distribution of bulk storage at  $y = 1.0\text{m}$  (top view)

### 3.2 Pallet 상태저장 시뮬레이션

그림 11은 저장물이 있는 부분의  $y$  단면 공기유동을 나타낸 것이다. 저장물 사이사이에는 유동통로를 통하여 공기가 이동함을 알 수 있다. 특히 팬의 강제유동방향과 일치하게 형성된 유동통로의 공기 이동은 팬 아래부분에서 균일한 유선이 형성되도록 하였다.

그림 12는 윗면에서의 온도분포를 나타낸 것이며 저장물사이 공기유동통로를 통한 냉기의 접촉은 저장물의 온도상승을 억제하였다.

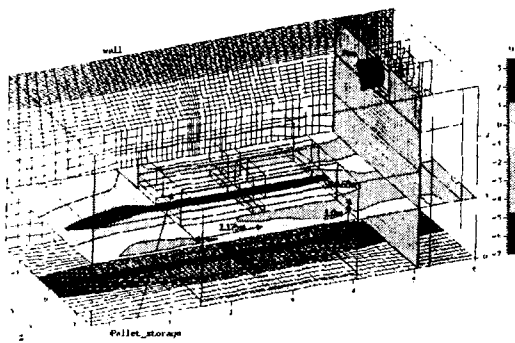


Fig. 11. Velocity distribution of pallet storage at  $y = 1.0\text{m}$ . (top view)

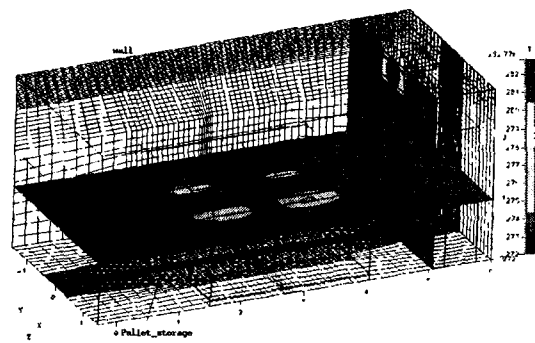


Fig. 12. Temperature distribution of pallet storage at  $y = 1.0\text{m}$ . (top view)

#### 4. 요약 및 결론

CFD를 이용하여 저온저장고의 가장 중요한 설계요인인 내부 3차원 공기유동 및 온도분포를 알아보려고 하였다. 저장물이 없을 경우와 산물저장방법을 이용한 bulk 상태저장의 경우 그리고 저장물내 공기유동 통로가 있는 pallet 상태저장의 경우에 대한 저장실험을 통하여 온도를 측정하였고 개발된 시뮬레이션 모델과 비교하여 그 유의성을 검증하였다. 또한 각 저장상태의 내부 공기유동은 검증된 시뮬레이션 모델을 이용하여 효율적으로 분석할 수 있었다.

연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 가. 내부 강제순환 팬에서의 속도와 저장물의 호흡열, 벽체를 통한 heat flux, 적재방법에 따른 3차원 시뮬레이션 모델을 개발하였다.
- 나. 저온저장고 팬 앞쪽 영역에서의 공기유동은 저장물의 유무에 관계없이 z 방향으로 유동 확산을 나타내었으며 온도분포는 벽체를 통한 heat flux보다 강제순환된 공기유동에 지배되었다.
- 다. Bulk 상태저장의 경우 저장물에서 발생하는 호흡열이 효과적으로 제거되지 않아 내부 품온이 상승되었고 공기유동경로가 차단되어 팬 아래부분에서 공기정체현상이 발생하였다.
- 라. Pallet 상태저장의 경우 저장물 사이의 공기유동통로를 통해 강제순환된 냉기가 흐르면서 품온 상승이 억제되었다. 특히 유동방향과 일치하여 x 축을 따라 형성된 공기유동통로 팬 아래까지 냉기가 순환되었다.
- 바. Pallet 상태저장이 bulk 상태저장보다 전체적으로 약 0.6℃ 의 낮은 온도구배를 보여 저장기간의 증가 및 품질저하의 감소에 효율적임을 알 수 있었다.

#### 5. 참고문헌

1. 신병록 외. 1994. 전산유체역학. 대영사
2. 윤정인 외. 1997. 냉동설비공학. 태훈출판사.
3. 조병관. 1998. K- $\epsilon$  난류모델을 이용한 저온저장고 내부의 온도분포 및 공기 유동에 관한 연구. 서울대학교 석사학위 논문.
4. Choi, H.L., L. D. Albright, M. B. Timmons and Z. warhaft. 1988. An application of the K- $\epsilon$  turbulence model to predict air distribution in an slot-ventilated enclosure. Trans. ASAE 31(6) : 1804-1814
5. CFD-ACE+ user manual(ver 5.01). 1999. CFD research corporation, Inc.