

저온저장고 내부의 균일한 온도분포를 위한 3차원 공기유동 분석

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

성 제 중*	고 학 균*	조 성 인*	양 길 모*
정회원	정회원	정회원	정회원
J. J. Sung	H. K. Koh	S. I. Cho	G. M. Yang

SUMMARY

Most of the domestic cold storage rooms are inefficient for agricultural products because of temperature gradients inside the storage rooms. Temperature gradients are developed mainly by improper airflow pattern inside the storage room, which is a main cause of the spoilage of the agricultural products. There proper airflow pattern is essential to minimize these temperature gradients and the spoilage.

The performance and characteristics of a cold storage room were determined as a function of airflow pattern and temperature distribution in forced circulation cold storage room.

A commercial CFD(computational fluid dynamics) code was used to simulate 3-D airflow in the cold storage room. Solving the flow equations for the storage room, a standard $k-\epsilon$ turbulent model was implemented to calculate steady state turbulent velocity distribution. The CFD prediction results were compared with temperature measurements inside the cold storage room.

In case of no storage, internal airflow was circulated without stagnation and consequently temperature distribution was uniform.

And in case of pallet storage, Temperature gradients inside pallet storage was reduced because the contact area of cold air expanded through an alley of airflow in storage.

But in case of bulk storage, the last temperature of storage considerably rose more than the initial temperature of storage. The reason was that bulk storage didn't include any alley of airflow in storage.

주요용어(Key Words) : 저온저장고(Cold storage room), $k-\epsilon$ 모델($k-\epsilon$ model), CFD(Computational fluid dynamics), 벌크 상태저장(Bulk storage), 팔렛 상태저장(Pallet storage)

1. 서 론

현재 설치 가동중인 대부분의 저온저장고는 단열 및 시스템 설비의 문제점으로 인하여 열에너지의 손실이 크고 불균일한 공기유동으로 저온저장

고 내부의 온도분포가 고르지 못하여 비효율적인 저장이 이루어지고 있다.

저장농산물의 품질저하를 최소화하기 위해서는 저장고내의 냉기의 흐름이 균일하게 분포되는 것이 중요하다. 그러기 위해서는 저장고내의 냉기

This study was conducted by the research fund supported by Korea Research Foundation(KRF) and article was submitted for publication in February 2000; reviewed and approved for publication by the editorial board of KSAM in June 2000.

The corresponding author is H. K. Koh, Professor, Dept. of Agricultural Engineering, Seoul National University, 103 Suhdun-dong, Kwonson-ku, Suwon City, 441-744, Korea. E-mail: <drkoh@snu.ac.kr>

* Major of Agricultural Machinery, Bioresources and Materials Engineering, Seoul National University.

흐름 분포를 분석하고 이를 바탕으로 저온저장고의 중요 설계변수를 찾아야 하는 필요성에 의해 본 연구를 수행하게 되었다.

노동력과 비용, 시간을 감소시키는 효율적인 설계를 위해 CFD(computational fluid dynamics)를 이용하여 저온저장고 내부의 압력과 공기유동 분포 그에 따른 온도분포 등을 시뮬레이션 하였다.

저온저장고 내부의 공기유동을 분석하기 위한 3차원 유체해석기구로써 CFD-ACE+ 패키지를 사용하였고 난류흐름 분석을 위해 표준형 k-ε 모델을 적용하였다.

2. 재료 및 방법

가. 공시재료

본 실험에서는 전남 무안에서 7월초에 수확해서 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 맞춘 후 35일 동안에 내부의 온도를 11℃, 10℃, 9℃, 8℃...0℃로 점차 변화시키면서 낮추었다.

나. 계측장치

실험장치의 전체적인 개략도는 그림 1과 같다. 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 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.

다. CFD-ACE+ 패키지

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

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

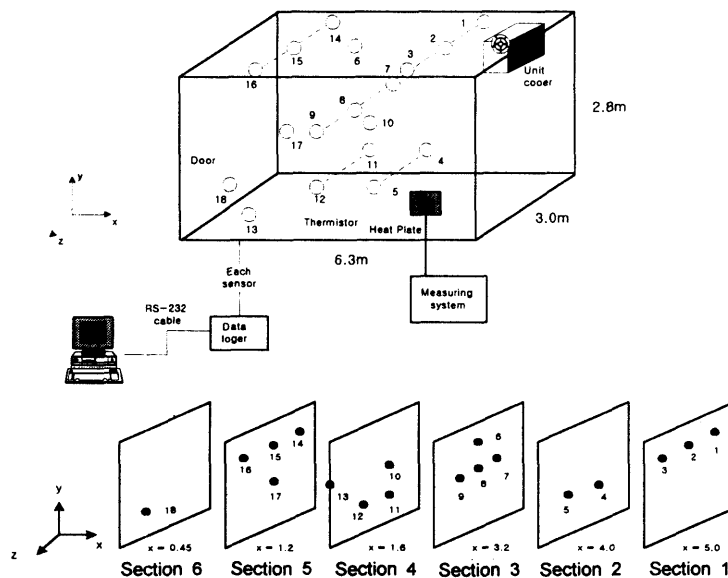


Fig. 1 Block diagram and thermistor position of cold storage room.

라. 경계조건

정상상태 시뮬레이션의 경우 초기조건은 최종 계산값에 직접적인 영향을 미치지 않는 것으로 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 통과를 없애고 열전달만 발생하는 solid로 설정하여 팬 작동에 따른 발생열량을 계산하였다.

저장된 양파의 내부 공극을 통해 측정된 평균품온은 2.2℃이었다. 양파의 물성은 ASHRAE Handbook(1989)에서 제시된 값을 기본으로 사용하였다. 호흡열량을 저장된 양파의 부피로 나눈 단위부피당 열발생량 28.84 W/m³을 시뮬레이션 모델에서 내부 저장물의 열원으로 사용하였다. 저온저장고의 윗면을 제외한 벽에서의 경계조건으로는 유속과 heat flux 측정장치를 이용하여 측정한 값을 벽체에서의 침투열량으로 하였다.

자세한 경계조건의 값은 Table 1에 나타내었다. 그리고 팬에서 발생하는 유동을 등방성 난류 유동이라 보고 경계조건에서 k 와 ϵ 값을 다음과 같이 정하였다.

Table 1 Boundary condition

Initial condition	Velocity	6.67 m/s
	Temperature	273 K
Outlet condition	Velocity	1.0 m/s
	Temperature	276 K
Physical properties of fan	Density	7,800 kg/m ³
	Specific heat	45 J/KgK
	Heat conductivity	78 W/mK
Product heat of fan		144 Kcal/h
Permeated heat from wall		2~3 W/m ²
Upper side temperature of cold storage room		276 K
Breathing heat of onion		117 W

$$k = \frac{3}{2} (I u_1^2)$$

$$\epsilon = \frac{C_\mu^{3/4} k^{3/2}}{0.014L}$$

팬앞의 12부분을 측정, 평균을 내어 유속의 초기조건으로 하였고 그 값은 6.67m/s였다. 팬앞에서의 공기유동은 강제순환으로 인하여 불균일하므로 난류 intensity는 0.04로 설정하였으며 난류의 혼합 길이를 말하는 L은 팬의 직경인 0.44m로 하였다.

초기조건으로는 유속의 측정값 6.67m/s인 측정값을 통하여 계산한 k 값 0.1068, ϵ 값 0.7136 그리고 대기압과 저온저장고의 설정온도를 주었다.

마. 시뮬레이션

CFD를 이용한 해석은 일반적으로 세 가지 단계로 나누어 진다.

첫 번째 단계는 해석하고자 하는 실제현상에 대한 이해와 해석하고자 하는 범위를 정한다. 관심 영역에서 정의된 문제에 대해 형상을 만들고 해석하기 위한 격자를 생성한다. 두 번째 단계는 적절한 경계조건과 물성을 이용하여 지배방정식을 해석한다. 여기서 연속적인 수치해석 방법과 지배유동방정식 안에서 알지 못하는 유동 변수의 근사를 통하여 구하고자 하는 값을 계산한다. 세 번째는 이전의 단계에서 얻어진 격자와 계산 값을 graph나 table 등을 이용하여 나타내는 것이다.

적용된 지배방정식과 표준형 $k-\epsilon$ 난류모델은 다음과 같다.

(1) 지배방정식

(가) 연속방정식

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

여기서 ρ 는 밀도이며 u_i 는 각 방향으로의 유속이다.

(나) 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 중력같은 외력, τ_{ij} 는 응력 텐서로 다음과 같다. 그리고 레이놀즈응력 $\overline{\rho u_i u_j}$ 는 Boussinesq 가설에 근거한 평균유동 속도와 관련하여 표현된다.

$$\tau_{ij} = [\mu(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i})] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij}$$

$$\overline{\rho u_i u_j} = \rho \frac{2}{3} k \delta_{ij} - \mu_t (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) + \frac{2}{3} \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij}$$

(다) 에너지 방정식

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

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

(2) 표준형 $k-\epsilon$ 난류모델

$$k = \frac{u_\tau^2}{C_\mu^{1/2}}$$

$$\epsilon = \frac{C_\mu^{3/4} k^{3/2}}{Ky}$$

u_τ 는 마찰속도, ν_τ 는 난류점성계수, C_μ 는 경험상수이다.

난류현상의 해석을 위해 사용된 CFD-ACE+ 패키지는 유한체적법에 기초를 둔 검사체적을 사용하여 표준 $k-\epsilon$ 난류모델을 사용한다. $k-\epsilon$ 난류모델에서 소산율의 경우는 second order upwind scheme을 사용하고, 유동속도는 first order upwind scheme을 사용하는 등 선택적으로 고차의 upwind scheme을 사용하였다.

바. 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 시뮬레이션 만을 통해 공기흐름 분포를 분석하였다.

저장물을 bulk 상태저장과 pallet 상태저장으로

나누어 저장 후 정상상태에 도달했을 경우의 온도를 측정하였다. 저장된 양과사이로 공기가 최대한 적게 통과하도록 하기 위하여 산물저장방법을 사용한 bulk 상태저장의 경우 저장된 양과는 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 찬공기와의 접촉면적은 12.85m²이고 pallet 상태저장의 경우는 45.44 m²로 bulk 상태저장이 pallet 상태저장시 접촉면적의 28.3%에 해당하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 저장실험 및 검증

그림 2는 설정온도 0℃, 4℃이고 편차는 1℃ 일 때 저장상태에 따른 저온저장고 내부의 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 일어나

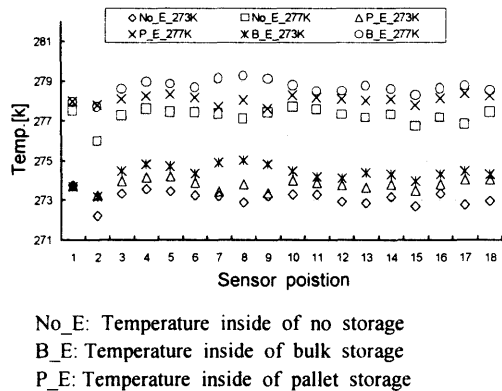
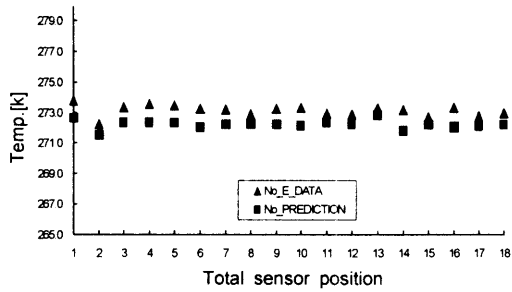
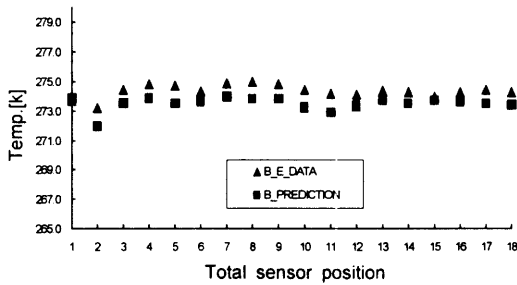


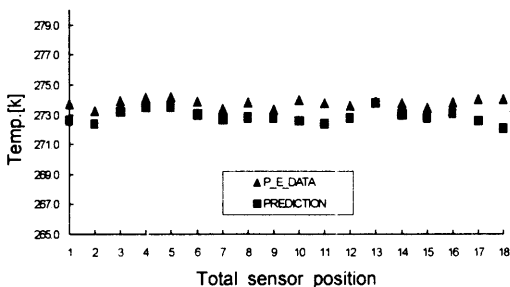
Fig. 2 Comparison of experimental data.



[a] In case of no storage.



[b] In case of bulk storage.



[c] In case of pallet storage.

Fig. 3 Comparison of temperature distribution between experimental data and predicted data.

게 되어 실험값과 예측값이 차이를 보였으며 그 경향성은 유사하였다.

그림 3은 저온저장고의 상태에 따라 실험을 통해 얻어진 온도값과 시뮬레이션에 의해 예측된 온도를 비교한 것이다. (a), (b)를 보면 저온저장고 입구쪽인 14와 16위치에서 실험값과 예측값이 상대적으로 큰 오차를 나타냄을 알 수 있다, 실제 저온저장고의 불균일한 단열로 heat flux에 의한

Fig. 4 Velocity distribution under no storage, $z = 0.0\text{m}$ (front view).

영향이 공기유동에 의한 영향보다 커져 차이가 낮다고 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 실제온도편차 1.6°C 안에서 일치하였다. 그리고 저장물이 pallet 상태로 있을 경우 실험값과 예측값은 저온저장고 내부의 실제온도편차 0.95°C 안에서 일치하였다.

나. 저장물이 없는 경우 시뮬레이션

그림 4를 보면 팬에서 강제된 공기는 점차 약한 흐름을 보이면서 맞은편 벽까지 도달하고 돌아와 뒤쪽에 있는 흡입구로 들어감을 알 수 있다. 그림 5의 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 6, 7은 측면과 윗면에서 본 저온저장고

내부의 온도분포를 나타낸 것이다

다. Bulk 상태저장 시뮬레이션

그림 8은 bulk 상태저장시 윗면에서 본 공기유동이다. 저온저장고 반대편에 도달한 공기유동이 저장물로 인하여 순화되지 못하여 팬 아랫부분에서 공기정체현상이 발생함을 알 수 있다. 그림 9는 $y = 1.0\text{m}$ 에서 온도분포이며 공기가 통과하는 양쪽사이의 공간이 저장물이 있는 부분보다 훨씬 낮은 온도분포를 보였다.

그림 11은 윗면에서의 온도분포를 나타낸 것이며 저장물사이 공기유동통로를 통한 냉기의 접촉은 저장물의 온도상승을 억제하였다.

4. 요약 및 결론

CFD를 이용하여 저온저장고의 가장 중요한 설계요인인 내부 3차원 공기유동 및 온도분포를 알아보고자 하였다. 저장물이 없을 경우와 산물저장 방법을 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 유동확산을 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 x축을 따라 형성된 공기유동통로 팬 아래까지 냉기가 순환되었다.

마. Pallet 상태저장이 bulk 상태저장보다 전체적으로 약 0.6℃의 낮은 온도구배를 보여 저장기간의 증가 및 품질저하의 감소에 효율적임을 알 수 있었다.

라. Pallet 상태저장 시뮬레이션

그림 10은 저장물이 있는 부분의 y 단면 공기유동을 나타낸 것이다. 저장물 사이사이에 있는 유동통로를 통하여 공기가 이동함을 알 수 있다. 특히 팬의 강제유동방향과 일치하게 형성된 유동통로의 공기 이동은 팬 아래 부분에서 균일한 유선이 형성되도록 하였다.

참 고 문 헌

1. 농수산물 유통공사. 1996. 농산물 유통시설의 물류표준화실태. pp 105-179.
2. 박호석, 김동철. 1997. 농산가공 유통시설. 농협 전문대학.
3. 신병록 외. 1994. 전산유체역학, 대영사.
4. 윤정인 외. 1997. 냉동설비공학, 태훈출판사.
5. Cho, B. G. 1998. Study on the Temperature Distribution & Air Flow in Cold Storage Room Using K- ϵ Turbulence Model. M. S. thesis. Seoul National University. (In Korean)
6. Choi, H. L., L. D. Albright, M. B. Timmons and Z. warhaft. 1988. An application of the K- ϵ turbulence model to predict air distribution in an slot-ventilated enclosure, Trans. ASAE 31(6): 1804-1814 (In America).
7. CFD-ACE+ user manual(ver 5.01), 1999. CFD research corporation, Inc.



학 위 취 득



성 명 : 조 기 현 (조 기 현)

생 년 월 일 : 1969년 1월 3일

취 득 학 위 명 : 공 학 박 사

학 위 수여 대학 : 경상대학교

학 위 취득년월일 : 2000년 8월 26일

학 위 논 문 : Off-road 차량용 LPG 기관의 개발에 관한 연구