

3차원 CFD 시뮬레이션을 이용한 돔형 저온저장고 개발

Development of Dome-Type Cold Storage Facility Using 3-D CFD Simulation

양길모	고학균	홍지향
정회원	정회원	정회원
G. M. Yang	H. K. Koh	J. H. Hong

ABSTRACT

This study was conducted to develop proper model for cold storage facility that could offer uniform heat movement and air movement for green grocery and improve improper design of the existing container-type cold storage facility. For that reason, new model(dome-type) cold storage facility was developed using 3-D CFD(computational fluid dynamics) simulation.

The size was $6m \times 6m \times 5m$. Its size and configuration were same to simulation model. Unit cooler was designed to send cold air in 4 side ways. A dome-type cold storage facility showed uniform distributions of air temperature and velocity because cold air was forced to move down along the ceiling and the wall and then circulated to the unit cooler from the central part of the floor. Dome-type cold storage facility also showed by low wind velocity, below 1 m/s that could minimized cold damage and quality deterioration.

Keywords : Cold storage facility, Cold storage, CFD. Refrigeration, Air conditioner.

1. 서 론

국내 저온저장고의 주류를 이루고 있는 컨테이너 박스형 저온저장고의 문제점은 재래식 제어방식으로 인한 성능저하 외에도 구조적인 설계상의 문제점을 가지고 있다. 이러한 구조적인 문제점을 열거하면 다음과 같다.

한 축 방향에 설치되어 있는 유니트 쿨러에 의한 냉기 토출방식. 긴 열전달 거리. 천장부와 측벽부가 90도의 경사각을 가지고 있어 원활하지 못한 공기 유동 등을 들 수 있다.

이에 밀폐된 공간에서 원활한 공기유동을 위한

연구와 최적설계에 관한 연구가 여러 연구자들에 의해 수행되어 왔다.

Nielsen 등(1978)은 작은 크기의 환기구로 구성된 공간에서의 유동특성을 $k-\epsilon$ 난류모델로 분석하였는데, 역유동에서의 최대속도는 유입구의 모양에 의하여 영향을 받는 것이 아니라 유입구의 단면적에 의하여 영향을 받는다고 보고하였다.

Choi 등(1993)은 환기중인 축사의 열부력이 공기 유동 및 온도분포에 미치는 영향을 $k-\epsilon$ 난류모델을 이용하여 2차원으로 분석하였는데, 이 연구에서는 열 부력의 크기에 따른 유동의 변화를 관찰하기 위하여 유입공기의 수준에 따라 가축 현열플럭

This article was supported by ARPC, Agricultural R&D Promotion Center and World System Co. and submitted for publication in September 2002; reviewed and approved for publication by editorial board of KSAM in January 2003. The authors are G. M. Yang Ph.D., H. K. Koh, Professor, J. H. Hong, Ph.D. School of Bioresources and Material Engineering, Seoul National University, Suwon, Korea, E-mail: <gilmoa@korea.com>

스를 경계조건으로 입력하여 공기유동 및 온도분포 경향에 대하여 시뮬레이션을 실시하였다. 여기서 시뮬레이션에 의한 공기유동의 형태가 실험(Boon, 1978)으로 분석된 유동형태와 거의 일치하며 각 지점별 온도의 편차도 1.7℃ 이내로 나타남을 보였다. 또한 시뮬레이션 유동에 대한 수정 Ar수가 75이면 유입공기의 제트는 수평유동한다는 Randall(1979)의 연구결과와 일치함을 보였다.

Cho 등(1997)은 $k-\epsilon$ 난류모델을 이용한 저온 저장고 내부의 온도분포 및 공기유동에 관한 2차원 시뮬레이션 연구를 하였다. 저장물의 위치, 적재 높이, 적재 넓이, 저장고의 높이, 팬의 위치에 따른 고내 온도분포와 공기유동을 컴퓨터 시뮬레이션과 저장실험을 통해 각각의 실험항목에 대해 그 최적 모델을 연구하였다.

이에 본 연구에서는 국내 저온저장고의 구조적인 설계상의 문제점을 인식하고 이를 해결하고자 열 유동 분포와 공기유동 분포가 균일한 신모델 저온저장고를 3차원 CFD를 이용하여 개발하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

가. 3차원 CFD 시뮬레이션 모델 해석

CFD를 이용 저온저장고의 난류유동을 해석하기 위해서 다음과 같은 4단계의 절차에 의해서 해석을 하였다.

- ① 주어진 문제에 대해 풀어야 할 지배방정식이 어떤 형태의 편미방정식인 가를 확인하였다.
- ② 관심영역에서 정의된 문제에 대해 형상을 만들고 해석하기 위한 요소망을 생성하고 초기조건과 경계조건들을 확인하였다.
- ③ 아날로그 형태로 된 지배방정식을 디지털 컴퓨터상에서 계산이 가능하게끔 식을 근사화 시켰다.
- ④ 적당한 numerical scheme을 동원한 수치해석을 수행하였다.

(1) 표준형 $k-\epsilon$ 난류모델

본 연구에서는 표준형 $k-\epsilon$ 난류모델을 이용하여 저온저장고 내의 난류흐름을 분석하였다. 이 모델은 난류 운동에너지의 수송방정식, 운동에너지 소산율의 수송방정식, 와점성계수, 그리고 5개의

closure 계수들로 구성되어 있다.

① 난류유동 에너지 방정식(k -방정식)

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \rho P - \rho \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t / \sigma_k) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad \dots\dots\dots (1)$$

여기서 $\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \epsilon$ 로서 eddy viscosity이고 ρ : 밀도, u : 속도이다. 압력 P 는

$$P = \nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_j}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_m}{\partial x_m} \delta_{ij} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} k \frac{\partial u_m}{\partial x_m}$$

로 정의된다.

② 난류유동 에너지 소산율 방정식(ϵ -방정식)

$$\rho \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = C_{\epsilon 1} \frac{\rho P \epsilon}{k} - C_{\epsilon 2} \frac{\rho \epsilon^2}{k} \dots\dots\dots (2) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t / \sigma_\epsilon) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right]$$

이 난류모델에 쓰인 아래 다섯 개의 값은 많은 시험계산으로 광범위한 실험데이터와 맞도록 제시된 상수이다(Launder and Spalding, 1974).

$$C_{\epsilon 1} = 1.44, \quad C_{\epsilon 2} = 1.92, \quad C_\mu = 0.09, \\ \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\epsilon = 1.3$$

난류유동 에너지 방정식과 소산율 방정식에서 왼 쪽항의 수식은 대류에 의한 수송비를 나타낸 것이다. 오른쪽항 수식중 첫 번째는 k 와 ϵ 생성을, 두 번째는 k 와 ϵ 소산비를, 마지막은 k 와 ϵ 확산에 의한 수송을 각각 나타낸다.

(2) 저온저장고의 형상설계 및 공기유동 예측

본 연구에서는 컨테이너 박스형 저온저장고의 단점을 개선한 새로운 형태의 저온저장고를 그림 1과 같이 설계하였다. 저온저장고의 바닥은 직사각형이 아닌 성사각형으로 설계하였고 유니트 쿨러는 사방 토출형으로 제작하여 한 쪽 벽면이 아닌 천장 중앙

에 설치하여 유니트 쿨러로부터 열전달 거리와 냉기의 이동거리를 최소화하였다. 또한 천장부와 측벽부는 공기가 부드럽게 순회할 수 있도록 돔형으로 설계를 하였다.

유니트 쿨러의 사방 냉기 토출용 팬이 중앙에서 더운 공기를 빨아드리고 냉매가 순환되는 모세관을 지나면서 차가워진 냉기를 천장부 및 측벽부 4개면을 타고 저온저장고 내부를 순환하게 된다. 이 같이 순환된 냉기는 유니트 쿨러의 중앙 아래에서 위로 재흡입된다. 즉, 유니트 쿨러에서 토출된 냉기가 저온저장고 내부를 골고루 원활하게 순환함으로써 공기의 정체 현상이 없이 저온저장고 내부의 모든 부위가 균일한 온도분포를 갖게 하였다.

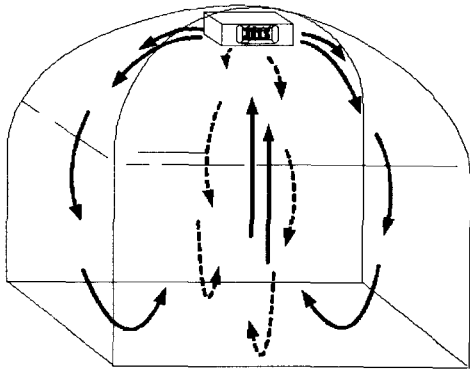


Fig. 1 3-D internal air movement in the cold storage facility.

(3) 요소망 생성, 초기조건 및 경계조건

① 요소망 생성

요소망 생성(mesh generation)은 유동영역 내부에 구하고 싶은 해의 위치를 정의하는 절차이다. 본 연구에서는 요소망선이 서로 꼬이지 않게 1:1 mapping이 되도록 요소망을 생성하였으며 요소망선들은 좌표변환의 미분값들이 연속적이 되도록 smooth하게 구성하였다.

사용된 요소망(mesh)은 그림 2, 그림 3과 같이 규칙 요소망(structure mesh)을 적용하였다. 저온저장고의 경우 복잡한 형상이 아니고 대부분이 곡선과 직선으로 연결되는 요소망으로 형성이 가능하기 때문이다.

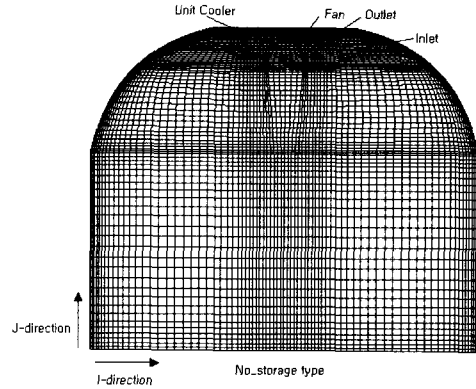


Fig. 2 Front view of mesh generation for the empty storage facility.

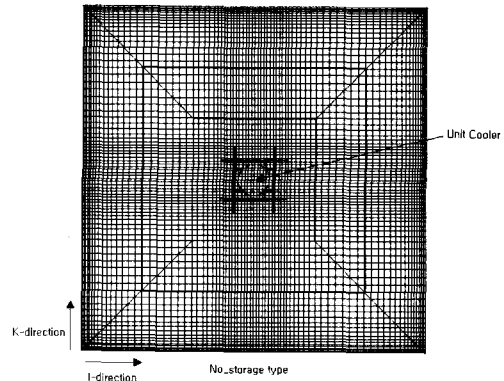


Fig. 3 Top view of mesh generation for the empty storage facility.

3차원적으로 형성된 전체적인 요소망에서 요소는 저장물이 없는 경우 500,200개, 저장물이 있는 경우 524,800개였다.

② 초기조건과 경계조건

본 연구에서의 초기조건과 경계조건은 현장 실측값을 사용하였다.

그 이유는 3차원 CFD 시뮬레이션을 이용하여 저온저장고 내부의 열 유동과 공기유동을 예측하기 위하여 적합한 유니트 쿨러의 입구쪽 속도, 출구쪽 속도, 벽과 천장을 통한 열 유입량 등의 경계값이 모두 예측값이기 때문에 현장 실측값과 많은 오차

를 가지게 된다. 그러므로 이 경계값들을 이용할 경우 예측값과 실측값 간의 유의성을 확인하는데 있어서 문제가 될 수 있다. 이 때문에 CFD 시뮬레이션에 의한 형상설계가 현장에 제대로 적용이 되었는가를 확인하기 위해서는 CFD 시뮬레이션에 의해 형상설계된 것을 시작기 개발 후 현장실측을 통해 그 경계값들을 다시 구하고 직접 CFD 시뮬레이션 모델에 적용하였다. 현장계측과 참고문헌을 통해 적용된 경계조건들은 표 1에 나타내었다.

(4) 난류유동 해석 알고리즘 및 수치해석

본 연구에서는 내부의 공기유동을 정상상태, 난류유동, 비압축성 그리고 3차원 상태로 가정하고 저장물은 균질한 물질이고 공기라는 단상유체만 흐르는 것으로 간주하였다. 그리고 3차원 난류흐름 분포를 해석하기 위하여 1984년에 Van Doormal과

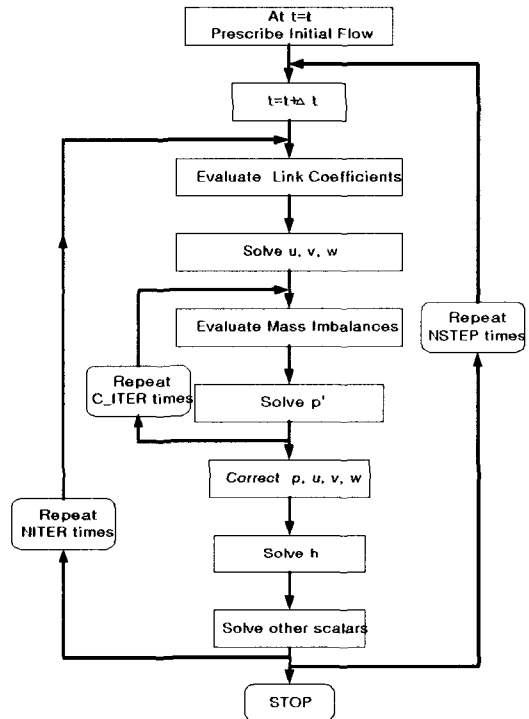
Raithby가 제안한 SIMPLEC(semi-implicity method for pressure-linked equations consistent) 알고리즘을 적용하였다.

SIMPLEC 알고리즘은 그림 4와 같은 문제 해석 절차를 가지고 있다. 우선, 관심영역의 압력을 유추하고 근사화된 운동방정식을 풀어서 u, v, w 의 속도를 근사화하게 된다. 다음으로 근사치 ρ 와 u 로부터 질량유동 G 를 계산하게 된다. 근사화된 운동방정식과 압력식으로부터 p, u, v, w 를 각각 반복 계산하게 된다. 이후 엔탈피와 해석하고자 하는 다른 물리량을 계산하게 되며 이러한 일련의 과정을 잔차가 최소화될 때까지 반복 계산하게 된다.

사용한 수치해석 scheme은 1st order upwind scheme으로서 이는 hyperbolic type PDE의 특성을 살릴 수 있고 요소망 간격이나 유동의 복잡성이 크더라도 수렴성이 좋은 특성을 가지고 있다.

Table 1 Boundary conditions

Inlet	Wind velocity (m/s)	x	4.71
		-x	-4.76
		z	4.72
		-z	-4.69
	Temperature (°C)	-1	(272.15 K)
Outlet	Wind velocity (m/s)	2.82	
	Temperature (°C)	1 (274.15 K)	
Properties of fan	Density (kg/m^3)	7,830	
	Specific heat	452 J/kg · K	
	Degree of heat flux	73 W/m · K	
	RPM	3,487	
	Blade angle	25°	
Properties of onion	Heat	144 kcal / h	
	Breath heat	6.22 W/m ²	
	Density	534.19 kg/m ³	
	Specific heat	3,770 J/kg · K	
Heat flux from wall (W/m^2)	+x	1.00	
	-x	2.20	
	+z	1.77	
	-z	0.40	
Heat flux from ceiling and floor (W/m^2)		2.3	



- NITER = the number of iterations
- NSTEP = the number of steps
- C_ITER = the number of continuity iterations

Fig. 4 SIMPLEC algorithm.

공기유동과 열유동을 예측하기 위해 CFD-ACE+ 6.4를 사용하였고 지배방정식의 근사화 방법으로 지배방정식을 적분영역인 검사체적을 정의하여 문제를 해석하는 방법인 유한체적법(FVM)을 사용하였다.

나. 유의성 검증

실험은 다음과 같은 방법으로 진행되었다.

① 저장물이 없을 경우와 팔렛 상태로 청과물이 저장되었을 때 정상상태에 도달했을 경우의 온도를 측정하고 수학적 모델링과 CFD를 이용하여 해석한 예측치와 비교하여 그 유의성을 검증하였다. 이후 시뮬레이션만을 통해 열유동 분포를 분석하였다.

② 저장고 내의 공기유동 분포를 해석하기 위하여 저장고의 높이 1m와 2m 위치 각각 17개 지점에서 풍속계를 이용하여 풍속을 측정 한 후에 CFD 시뮬레이션을 통해 해석한 예측치와 비교하여 그 유의성을 검증하였다. 이후 시뮬레이션만을 통해 공기유동 분포를 분석하였다.

③ 컨테이너 박스형 저온저장고에서 3차원 CFD 시뮬레이션을 이용하여 열 유동과 난류 유동을 해석하여 본 연구에서 개발한 돔형 저온저장고와 비교하여 돔형 저온저장고의 열 유동 및 난류 유동이 더 우수한 성능을 보임을 증명하였다.

3. 실험장치

그림 5는 3차원 CFD 시뮬레이션 모델에 의한 예측값과 현장 실측값의 유의성을 실험하기 위한 실험장치의 개략도이다. 저온저장고는 6m×6m×5m의 크기로 냉각팬과 증발기 및 제상히터가 내장된 유니트 쿨러와 7.5마력 용량의 압축기와 응축기, 수액기 그리고 이들을 제어하는 제어반으로 구성되어 있다. 천장부와 벽면부는 130도의 각도를 가지고 있고 유니트 쿨러 맞은편 천장부에 풍속센서를 설치하였다. 양쪽 벽면에 가습기를 엇갈려 설치하였고 저장고 중앙에는 습도센서를 설치하여 가습기를 제어하는 데 사용하였다. 측벽부 4면에는 각각 1개씩 총 4개의 온도센서를 설치하였고 각 지역에서 받은 온도값을 평균하여 제어에 적용하였다. 열 유동은 FQ Axxx 타입 계측기를 사용하여 저온저장고의 천장부, 벽면부, 바닥부에서 각각 측정하였다.

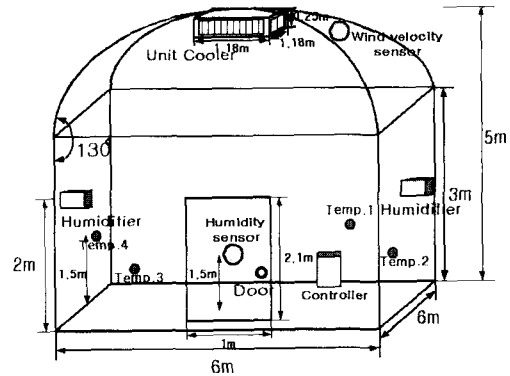


Fig. 5 Schematic for dome-type cold storage facility.

가. 돔형 저온저장고의 시작기 개발

3차원 CFD 시뮬레이션을 통하여 설계한 저온저장고를 시공하기 위하여 먼저 바닥을 콘크리트로 기초를 다진 후 C형강을 이용하여 골조를 형성하였다. 다음으로 합석을 이용하여 돔형의 천장을 구성하였다. 단열시공을 위하여 100mm 두께의 스티로폼 판넬로 측벽부를 형성하고 천장부는 유리섬유와 100mm 두께의 스티로폼 판넬로 단열을 하였다. 유니트 쿨러는 그림 6와 그림 7같이 4방향 냉기 토출형을 제작하여 사용하였다. 그림 8은 완성된 후의 저온저장고의 외관이다. 외형은 원활한 시공을 위하여 보통의 구조 형식으로 건축하였으나 내부는 돔 형식으로 설계 시공하였다.

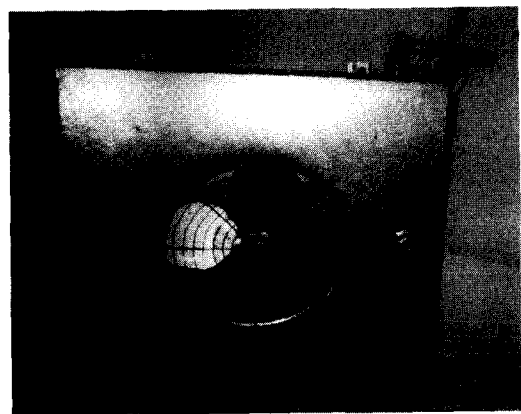


Fig. 6 Bottom view of unit cooler.

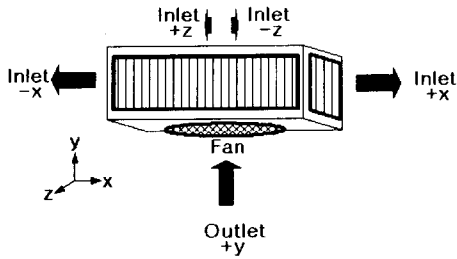


Fig. -7 Schematic of unit cooler.



Fig. 8 Front appearance of the cold storage facility.

나. 온도 및 풍속 계측

그림 9는 저장물이 없을 때 저장고내의 각 구간 별 온도를 측정하기 위한 센서의 위치를 도시한 것이다. 온도를 측정하기 위하여 정확도 0.1℃ pt100 Ω 온도센서 17개를 3차원상으로 배열하였고 데이터 수집장치에 연결하여 데이터를 수집하였다.

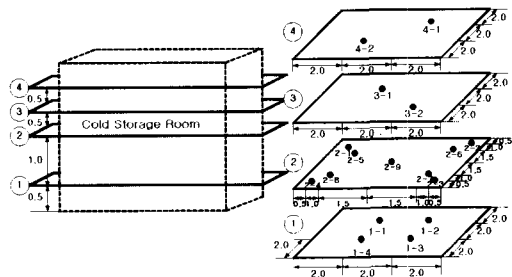


Fig. 9 Location of sensors when storage is empty (unit: meter).

그림 10은 청과물의 저장실험을 위한 실험장치의 구성도로서 팔렛 상태로 저장된 저장물 사이에 12 개의 온도센서를 3차원 상으로 설치하여 데이터 수집장치에 연결하였다. 이는 청과물간의 호흡열과 열 및 공기유동을 실험하기 위한 것이다.

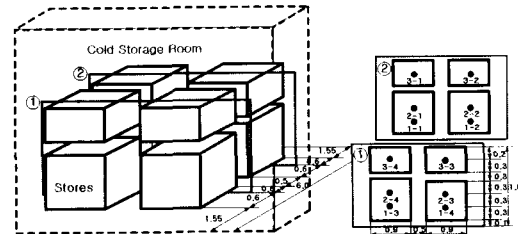


Fig. 10 Location of sensors when storage is full (unit: meter)

4. 결과 및 고찰

가. 시뮬레이션 모델 검증

본 실험은 3차원 CFD 시뮬레이션에 의해 개발된 동형 저온저장고가 시공 후 실제 현장 실측값과 유의성이 있는가를 검증하고 이를 바탕으로 저온저장고의 열 유동분포와 공기 유동분포를 시뮬레이션 값만으로 상세하게 분석하고자 실시하였다.

수학적 시뮬레이션 모델은 입구조건에서 공기는 정해진 온도로 일정하게 나와 계속적으로 같은 온도로 유지된다고 가정하기 때문에 실측값과 예측값이 오차를 포함하게 된다. 하지만 그 오차의 경향을 이용하여 상호 유의성을 확인할 수 있고 이후 CFD 모델만을 가지고 관심 영역의 인자를 해석할 수 있다.

그림 11과 그림 12는 실측치와 예측치를 그래프로 나타낸 것이다. 전반적으로 왜곡된 곳 없이 저장물이 없을 경우 R.M.S. 값은 0.12℃였고 저장물이 있을 경우 R.M.S. 값은 0.18℃로 나타났다. 이러한 결과로부터 실측치와 예측치가 저장물이 없을 경우와 저장물이 있을 경우 각각 상호 유의성을 가지고 있다고 판단할 수 있다.

실측치 온도가 예측치 온도보다 전반적으로 다소 높게 나타난 이유는 예측치의 경계조건으로 설정한 입구쪽 풍속이 4.72 m/s로 균일하게 설정되어 해석

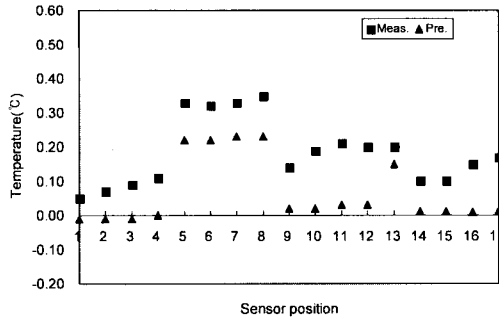


Fig. 11 Comparison of the measured and predicted temperatures for empty storage facility.

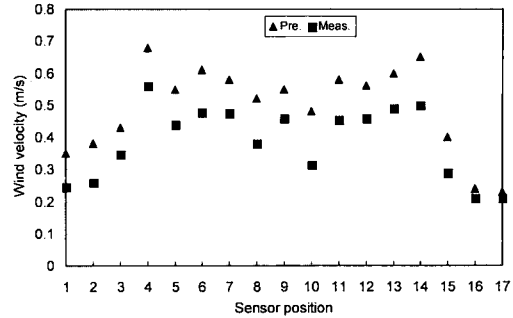


Fig. 13 Comparison of the measured and predicted wind velocities at $y=1m$.

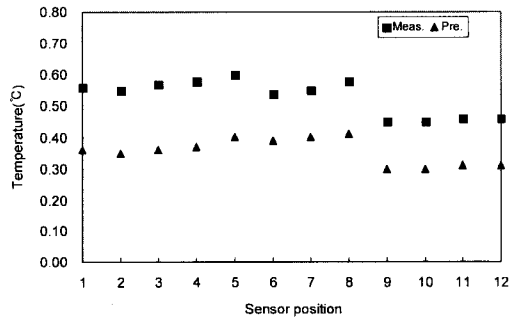


Fig. 12 Comparison of the measured and predicted temperatures for the loaded storage facility.

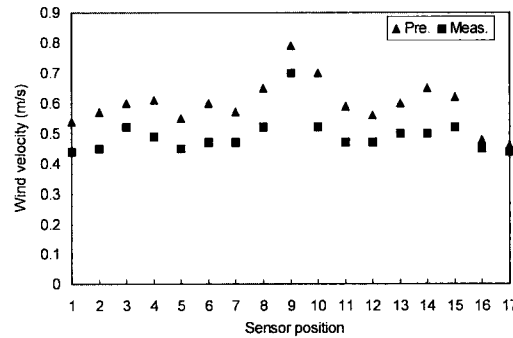


Fig. 14 Comparison of the measured and predicted wind velocities at $y=2m$.

된 반면 실제 현장에서는 유니트 쿨러의 모세관과 성에에 의해 방해받기 때문에 온도하강 중에는 4.72m/s~3.8m/s로, 그리고 헌팅 구간에서는 2.5m/s로 동작하기 때문에 냉기의 흐름을 더디게 하여 열 축적이 일어나기 때문에 실측치 온도가 예측치 온도보다 다소 높은 값을 보이는 것으로 해석되었다.

풍속의 경우 저장고내의 17개의 지점에서 측정된 실측값과 시뮬레이션에 의한 예측값을 비교한 결과 R.M.S.(root mean square) 값은 높이 $y=1m$ 일 경우 0.12 m/s였고 $y=2m$ 일 때 0.11 m/s로 나타났다.

그림 13과 그림 14는 각각의 측정위치에서 오차의 경향을 분석한 내용이다. 센서위치가 8번과 10번에서 잔차가 높게 나타났는데 $y=1m$ 인 경우 8번 위치에서 38.5% (-0.2m/s), 10번 위치에서 33.3% (-0.16m/s)의 오차를 보였다. $y=2m$ 인 경우 8번 위치에서 20%(-0.13m/s), 10번 위치에서 25.7%

(-0.18 m/s)의 오차를 보였다.

잔차가 큰 8번과 10번은 모두가 팬 아래부근에 위치한 지점들로서 이 같이 잔차가 다른 지점에 비해 높게 나타난 것은 팬 아래부근에서는 팬에 의한 난류유동이 지배적이기 때문인 것으로 풀이되며 또 한 풍속 측정시 측정오차나 표준 $k-\epsilon$ 난류모델의 적용오차일 가능성도 고려할 수 있다. 그러나 기타 다른 지점에서는 이보다 작은 오차를 보여 비교적 정확한 결과를 보여주었다.

나. 3차원 CFD 시뮬레이션에 의한 열 유동 분석

본 실험은 실측치와 예측치의 유의성이 검증된 3차원 CFD 시뮬레이션 결과를 이용하여 저장고내의 열 유동분포가 얼마나 균일하게 이루어지고 있는가를 분석한 결과이다. 이는 또한 돔형 저온저장고

의 우수성을 보여주기 위한 실험이기도 하다.

그림 15는 2차원 상에서 저온저장고내의 열 유동 분포를 나타낸 그림이다. 사방벽면으로 냉기가 토출되기 때문에 벽면에서 유입되는 열이 나타나지 않는 것을 볼 수 있다. 그러나 냉기의 영향을 간접적으로 받는 천장부에는 열 유입이 계속되고 있으나 유니트 쿨러에 의해 열이 아래로 더 이상 전달되지 못하고 찬공기의 흐름에 흡수되어 확산되었다. 바닥부에서의 열 유입은 벽면부에 비해 다소 작았지만 냉기의 영향에 의해 바닥면을 통한 열 유입이 상쇄되는 것을 볼 수 있다.



Fig. 15 Temperature distribution in the cold storage facility (front view).

그림 16은 3차원 상에서 열 유동을 관찰한 것이다. 냉기의 영향을 비교적 덜 받는 천장부와 그 가장자리로 열 유입이 있는 것으로 나타났지만 유니트 쿨러에서 지속적으로 토출되는 냉기에 의해 아래로 전달되지 못하는 것을 알 수 있다.

벽면에서 열 유입이 거의 없는 이유는 유니트 쿨러에서 토출되는 냉기가 4방 벽면에 직접적으로 접촉하여 흐르기 때문에 외부에서 유입되는 열이 찬공기의 흐름에 흡수되어 확산되는 것으로 분석된다. 이 같은 현상은 저온저장고의 균일한 온도분포를 유지하게 해주는 커다란 잇점으로 작용되었다.

다. 3차원 CFD 시뮬레이션에 의한 공기 유동 분석

본 실험은 저장고 내부의 공기 유동을 실측치와 유의성이 검증된 3차원 CFD 시뮬레이션을 이용하

여 공기의 정체구간 여부와 공기유동의 왜곡된 부분을 분석하고 이를 통하여 돔형 저온저장고의 공기유동 우수성을 입증하기 위하여 실시하였다.

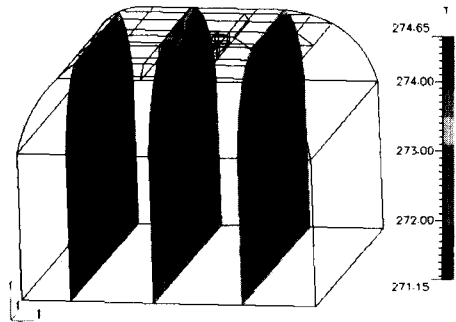


Fig. 16 3-D temperature distribution in the cold storage facility (3-D view).

그림 17은 3차원 상에서 공기유동 분포를 분석한 그림이다. 천장부와 측벽부에서는 하강기류가 발생하고 저장고 가운데 부근에서는 상승기류가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

이와 같이 돔형 저온저장고의 경우 공기의 왜곡된 부분이 전 구간에서 발생되지 않기 때문에 벽면을 제외한 전체 공간을 청과물 저장공간으로 활용할 수 있어서 그 만큼 공간 이용 효율이 높아 경제적이다. 또한 토출구와 흡입구를 제외한 저장고 내의 공기의 유속이 대부분 1m/s 이하의 흐름으로 저장물을 보관할 수 있기 때문에 증산작용에 의한 표면 건조라든가 저장 중 냉해로 인한 피해를 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

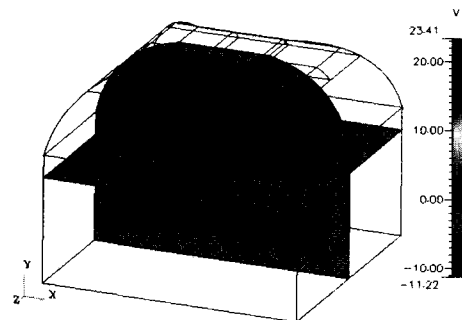


Fig. 17 3-D velocity distribution.

라. 저장물이 있을 때 열 유동 분석 및 공기 유동 분석 결과

본 실험은 3차원 CFD 시뮬레이션을 이용하여 저장물이 있을 때 저장물 사이에서의 열 유동 분포를 분석한 실험이다.

그림 18은 저장물이 있을 때 열 유동을 분석한 결과이다. 설정온도가 0℃일 때 저장물 내의 평균 품온은 0.33℃의 균일한 온도분포를 유지하였다. 이는 저장물의 호흡열에 의해서 정상상태 보다 다소 높게 나타났으나 그림에서 보듯이 저장물은 전반적으로 균일한 온도분포를 보이고 있다. 저장물이 위와 아래 구분없이 균일한 온도분포를 보이는 것은 저온저장고의 열 유동 분포와 공기 유동 분포가 균일하다는 것을 뜻한다.

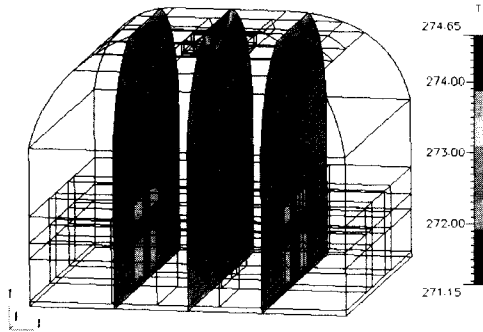


Fig. 18 3-D temperature distribution in the storage loaded with onions.

그림 19는 저장물이 있을 때 공기 유동 분포를 분석한 결과이다. 냉기는 저장물 사이를 부드럽게 순환하고 있으며 저장물 윗 부분에서는 상승공기인해 유니트 쿨러 쪽으로 냉기가 재흡입되었다.

마. 컨테이너 박스형 저온저장고의 열 유동 분포

그림 20은 컨테이너 박스형 저온저장고에서 열 유동 분포를 3차원 상으로 나타낸 것이다. 저장고의 설정온도는 0℃이지만 한 쪽 벽면에서 불어오는 강한 찬공기의 영향으로 천장부는 -2℃의 온도분포를 보이고 있다. 반면에 맞은편 벽면을 맞고 90°

로 꺾여 되돌아오는 찬공기는 저장고 내로 원활하게 확산되지 못하여 측벽부와 바닥면을 통해서 많은 열 유입이 일어나는 것을 확인할 수 있다.

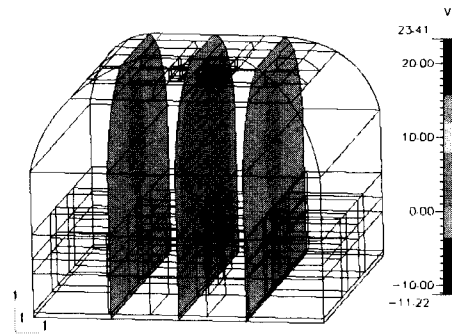


Fig. 19 3-D velocity distribution in the storage facility loaded with onions.

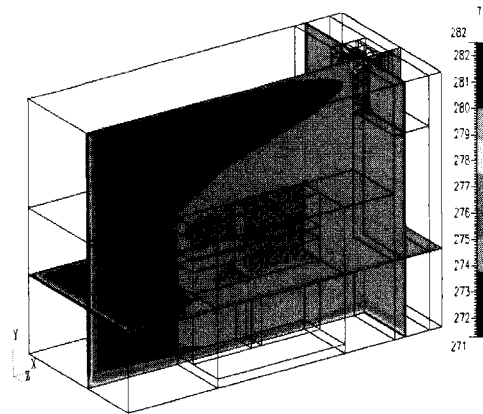


Fig. 20 Heat flow for the container-type cold storage facility.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 저온저장고의 형상을 3차원 CFD 시뮬레이션을 이용하여 열 유동과 공기 유동의 역학적인 특성을 살릴 수 있는 돔형 저온저장고를 설계 개발하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 돔형 저온저장고는 4축에서 불어오는 냉기가 돔형의 천장부와 측벽부를 부드럽게 순환하기 때문에 균일한 온도 분포와 풍속 분포를 보였다. 특히, 돔형 저온저장고의 경우 측벽부를 통해 외부에서

들어오는 열이 천장부와 측벽부를 따라 순환하는 냉기에 의해 최소화되기 때문에 균일한 온도분포를 보였다.

2) 돔형 저온저장고와 컨테이너 박스형 저온저장고의 온도분포와 공기유동을 현장실험과 CFD 시뮬레이션을 통하여 비교한 결과 돔형 저온저장고의 성능이 더 우수하다는 사실을 증명하였다.

참 고 문 헌

1. Cho, B. K. 1997. Study on the temperature distribution & air flow in cold storage room using $k-\varepsilon$ turbulence model. Seoul National University Agricultural Machinery Eng.. Master's Thesis.
2. Choi, H. R. 1993. Air movement and temperature distribution influenced by heat buoyancy of cattle shed ventilated. KSAM 16(2):144-157.
3. Launder, B. E. and D. B. Spalding. 1974. The Numerical Computation of Turbulence Flows. Computer Methods in Applied Mechanics and Eng. 3:269-289.
4. Nielsen, P. V., A. Restivo and J. H. Whitelaw. 1978. The velocity characteristics of ventilated room. Trans. ASME. J. Fluids Engrg. 100:291-298.