

3차원 CFD 시뮬레이션을 이용한 신모델(돔형) 저온저장고 개발

Development of New Model(Dome Type) Cold Storage Facility

Using 3-D CFD Simulation

양길모*
정회원
G. M. Yang

고학균*
정회원
H. K. Kho

홍지항*
정회원
J. H. Hong

1. 서론

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

첫째, 한 축 방향에 설치되어있는 유니트 쿨러에서 토출되는 냉기에 의해 저장고 내의 공기를 냉각하는 형태이기 때문에 냉기의 분포가 고르지 못하여 균일한 온도 분포를 이루기 어렵다는 단점을 가지고 있다.

둘째, 한 축 방향에서 토출되는 냉기가 맞은 편 벽면까지 도달해야 하기 때문에 풍속이 강해야 하며 이로 인해 저장 청과물이 냉해를 쉽게 입고 심한 증산작용에 의해 쉽게 표면건조나 중량감소를 가져온다.

셋째, 천장부와 측벽부가 90°의 경사각을 가지고 있어 공기의 유동이 원활하지 못하여 에디현상으로 인한 온도나 풍속의 불균일 구간을 피해서 청과물을 저장해야 하기 때문에 그 만큼 버려지는 공간이 많아 비경제적이다.

넷째, 위와 같은 문제점들 때문에 중·대형의 저온저장고를 컨테이너 박스형으로 설비 할 경우 보다 심한 온도 불균일과 냉기유동 분포를 보여 경제적인 손실이 더 커지게 되는 악순환을 낳게된다.

이에 따라 본 연구에서는 국내 저온저장고의 구조적인 설계상의 문제점을 인식하고 이를 해결하고자 3차원 CFD 시뮬레이션을 이용하여 저온저장고의 새로운 모델을 설계하였다. 이를 바탕으로 직접 저온저장고의 시작기를 개발하여 저장고 내부의 열 유동과 난류유동을 해석하였다.

2. 표준형 $k-\epsilon$ 난류모델

본 연구에서 표준형 $k-\epsilon$ 난류모델을 이용하여 저온저장고 내의 난류흐름을 분석하였다.

큰 난류와도의 크기를 L_i 이라 하면 난류에너지소산율 ϵ 과 특성길이 l 은 다음과 같다.

$$\epsilon \sim \frac{k^{3/2}}{L_i} \dots\dots\dots (2.1)$$

$$l = \frac{C_\mu^{3/4} k^{3/2}}{\epsilon} \dots\dots\dots (2.2)$$

* 서울대학교 농업생명과학대학 농공학과 농업기계전공

이때 난류점성계수 ν_t 는 C_μ 를 경험상수로 다음과 같이 계산된다.

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \dots\dots\dots (2.3)$$

따라서 모델화한 아래의 수송방정식을 풀면 ν_t 가 구해진다.

① 난류유동 에너지 방정식(k -방정식)

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \rho P - \rho \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} [(\mu + \mu_t/\sigma_k) \frac{\partial k}{\partial x_j}] \dots\dots\dots (2.4)$$

여기서 $\mu_t = \rho C_\mu k^2/\epsilon$ 로서 eddy viscosity이고

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

로 정의된다.

② 난류유동 에너지 소산율 방정식(ϵ -방정식)

$$\rho \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = C_{\epsilon 1} \frac{\rho P \epsilon}{k} - C_{\epsilon 2} \frac{\rho \epsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} [(\mu + \mu_t/\sigma_\epsilon) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}] \dots\dots\dots (2.5)$$

3. 재료 및 방법

가. 저온저장고의 형상설계 및 시작기 개발

본 연구에서는 컨테이너 박스형 저온저장고의 단점을 개선한 새로운 형상의 저온저장고를 그림 1과 같이 설계하였다. 저온저장고의 바닥은 직사각형이 아닌 정사각형으로 설계하였고 유니트 쿨러는 사방 토출형 유니트 쿨러를 제작하여 한 쪽 벽면이 아닌 천장 중앙에 설치하여 유니트 쿨러로부터 열전달 거리와 냉기의 이동거리를 최소화하였다. 또한 천장부와 측벽부는 공기가 부드럽게 순화할 수 있도록 돔형으로 설계를 하였다.

그림 2는 CFD를 이용하여 설계한 후 제작한 저온저장고의 시작기이다. 돔형의 천장부 각도는 CFD를 이용하여 임의의 각도를 주고 열 유동과 공기유동을 해석해 봤을 때 저장물이 저장되는 유효공간에서 에니현상을 최소화 할 수 있는 각도를 구하여 현장에 적용하였다.

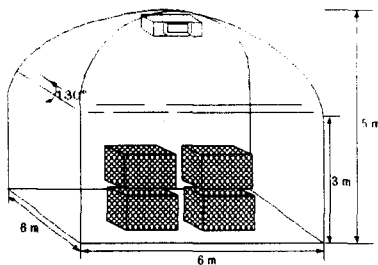


Fig. 1. Schematic of cold storage facility with onion.

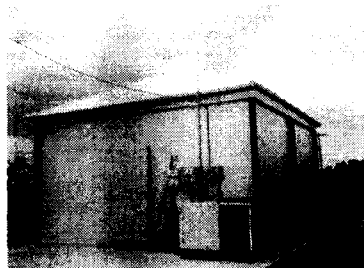


Fig. 2. Dome type of cold storage facility

나. 격자생성(Mesh generation) 및 경계조건

격자생성은 유동영역 내부에 구하고 싶은 해의 위치를 정의하는 절차이다. 본 연구에서는 격자선이 서로 꼬이지 않게 1:1 mapping이 되도록 격자를 생성하였으며 격자선들은 좌표변환의 미분값들이 연속적이 되도록 smooth하게 구성하였다.

사용된 요소망(mesh)은 그림 3과 그림 4와 같이 규칙 요소망(structure mesh)을 적용하였다. 저온저장고의 경우 복잡한 형상이 아니고 대부분이 곡선과 직선으로 연결되는 격자 요소망으로 형성이 가능하기 때문이다.

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

본 연구에서의 초기조건과 경계조건은 현장 실측값을 기본으로 하였다. 현장계측과 참고문헌을 통해 적용된 경계조건들은 표 1과 같다.

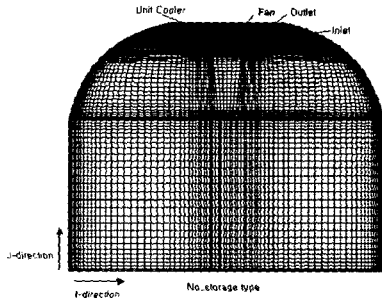


Fig. 3. Mesh generation for no-storage case (front view)

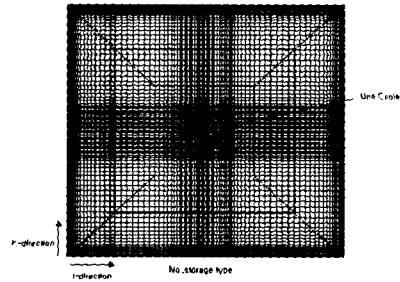


Fig. 4. Mesh generation for no-storage case (top view)

Table 1. Boundary conditions

Inlet	Wind velocity (m/s)	I	4.71	Properties of fan	RPM	3487
		-I	-4.76			
		K	4.72		Blade Angle	25°
		-K	-4.69			
Temperature (°C)	-1 (272.15 K)	Heat	144 Kcal/h			
Outlet	Wind velocity (m/s)			2.82		
Outlet	Temperature (°C)	1 (274.15 K)	Heat flux from wall (W/m ²)	-I	1.00	
				-I	2.20	
				-K	1.77	
				-K	0.40	
			Heat flux from the ceiling (W/m ²)	2.3		
Heat flux from the floor (W/m ²)	2.20					

다. 실험장치

3차원 CFD 시뮬레이션을 이용해 설계 및 개발된 돔형 저온저장고는 6m×6m×5m의 크기로 냉각팬과

증발기 및 제상히터가 내장된 유니트 쿨러와 7.5마력 용량의 압축기와 응축기, 수액기 그리고 이들을 제어하는 제어반으로 구성하였다. 특히, 천장부에 설치된 유니트 쿨러는 사면 토출형으로써 1.18m×1.18m×0.25m의 크기를 가지고 있다. 저장고는 전체가 모두 두께 10cm의 폴리스틸렌과 안 밖으로 0.5cm 두께의 양면 철판으로 제작되었다. 17개의 온도센서를 3차원 상으로 설치하여 온도값을 계측하였고 12개 지점에서 풍속을 계측하여 CFD 시뮬레이션의 유의성을 검증하였다.

그림 5는 4면 토출형 유니트 쿨러를 아래에서 보여주는 그림이고 그림 6은 4면 토출형 유니트 쿨러의 개략도이다. 아래 팬을 통해 흡입되는 공기를 차가운 모세관을 통해 4방향으로 냉기를 토출시켜주는 구조로 되어있다.

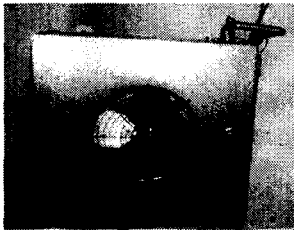


Fig. 5. Unit cooler (bottom view)

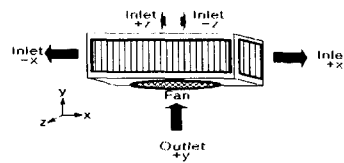


Fig. 6. Schematic for unit cooler

4. 결과 및 고찰

가. 3차원 CFD 시뮬레이션에 의한 열유동 분석

그림 7은 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 아래로 더 이상 전달되지 못하고 차단되는 것을 관찰할 수 있다.

그림 8는 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 못하고 차단되는 것을 알 수 있다.

벽면에서 열 유입이 없는 이유는 유니트 쿨러에서 토출되는 냉기가 4방 벽면에 직접적으로 접촉하여 흐르기 때문에 외부에서 유입되는 열이 원천적으로 차단되는 것으로 분석된다.

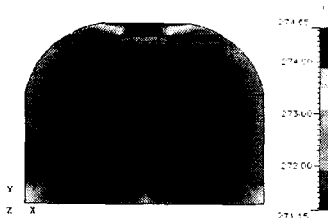


Fig. 7. Heat movement in the cold storage facility(front view)

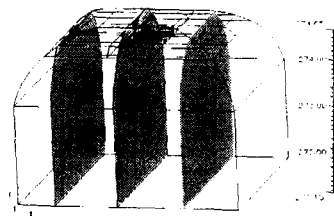


Fig 8. 3-D heat movement in the cold storage facility (3-D view)

나. 3차원 CFD 시뮬레이션에 의한 공기유동 분석

본 실험은 저장고 내부의 공기유동을 실측치와 유의성이 검증된 3차원 CFD 시뮬레이션을 이용하여 저장고 내부에서 공기의 에디현상과 공기유동의 왜곡된 점을 분석하기 위한 실험이다. 그리고 이의 분석으로 돔형 저온저장고의 공기유동 우수성을 입증하기 위해 실시하였다.

그림 9는 저온저장고 내의 공기 유동을 화살표를 이용하여 2차원 상으로 도시한 그림이다. 유니트 쿨러에서 토출되는 냉기는 천장과 벽면을 타고 공기의 정체현상 없이 부드러운 유선운동을 하다가 다시 유니트 쿨러로 빨려들어가는 모습을 볼 수 있다. 공기의 정체현상이 나타나지 않은 관계로 보다 균일한 온도분포를 기대할 수 있으며 이는 청과물의 장기 저장시 균일한 온도를 유지할 수 있도록 해주는 데 중요한 요소이다.

그림 10은 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 에디현상이 최소화되기 때문에 벽면을 제외한 전체 공간을 청과물 저장공간으로 활용할 수 있어서 그만큼 공간효율이 좋아 경제적이다. 또한 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.

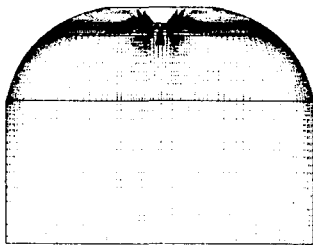


Fig. 9. Air movement in the cold storage facility

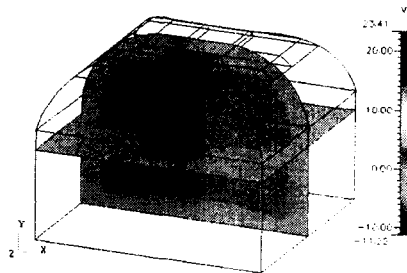


Fig. 10. 3-D air movement

다. 저장물이 있을 때 3차원 CFD 시뮬레이션에 의한 열유동 분석 및

공기유동 분석 결과

본 실험은 3차원 CFD 시뮬레이션을 이용하여 저장물이 있을 때 저장물 사이에서의 열 유동 분포를 분석한 실험이다. 그림 11은 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 저장물 전반적으로 균일한 온도분포를 보이고 있다. 저장물이 위와 아래 구분없이 균일한 온도분포를 보이는 것은 저온저장고의 열 유동 분포와 공기유동 분포가 균일하다는 것을 뜻한다.

그림 12는 저장물이 있을 때 공기유동 분포를 분석한 결과이다. 냉기는 저장물 사이를 부드럽게 순환

하고 있으며 저장물 윗 부분에서는 상승공기로 인해 유니트 쿨러 쪽으로 냉기가 재흡입되었다.

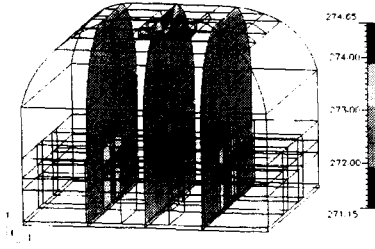


Fig. 11. 3-D heat movement with onion

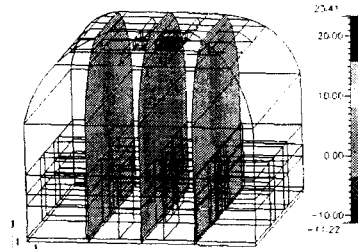


Fig. 12. 3-D air movement with onion

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 컨테이너 박스형 저온저장고의 문제점들을 해소하고자 3차원 CFD 시뮬레이션을 이용하여 저온저장고의 형상을 설계하고 저장고 내부에서의 열 유동과 공기 유동을 분석하여 균일한 온도 분포와 에디현상을 최소화 할 수 있는 돔형 저온저장고를 개발하였다.

구체적인 연구개발 결과는 다음과 같다.

1. 저온저장고의 형상을 3차원 CFD 시뮬레이션을 이용하여 공기역학적인 특성을 살릴 수 있는 돔형 저온저장고를 설계하였다.
2. 돔형 저온저장고는 6m×6m×5m의 크기로서 천장부와 측벽부가 돔형으로 되어있다. 유니트 쿨러는 4면 토출형 냉기분사식으로 본 저온저장고의 설계에 따라 공기 유동을 할 수 있게 직접 설계하여 제작하였다.
3. 유니트 쿨러에서 사면으로 토출된 냉기는 돔형의 천장부와 측벽부를 타고 부드럽게 순환하였으며 다시 바닥면을 지나 유니트 쿨러로 흡입되었다. 그 결과 냉기가 순환하면서 에디현상이 최소화되는 것을 확인하였다.
4. CFD를 이용하여 이러한 열 유동과 공기유동 특성을 가지는 형상을 설계한 후에 실제 같은 모형의 돔형 저온저장고 시작기를 개발하였다.

6. 참고문헌

1. Ansari, F. A, K. V. Charan and H. K. Varma. 1984. Heat and mass transfer analysis in cooling of spherical food products. International Journal of Refrigeration 7(3) : 194-197
2. Ashis, K. 1999. Heat transfer coefficient in laminar flow of non-Newtonian fluid in tubes. Journal of Food Engineering 39 : 285-287
3. Baird, C. D. and J. J. Graffney. 1986. Numerical procedure for calculating heat transfer in bulk loads of fruits or vegetables. Transaction of the ASHRAE. 82(II) : 525-540