

저장물의 적재방법에 따른 저온저장고의 열성능 분석

김 석 우* · 김 성 만* · 현 명 태** · 최 동 호*** · 고 정 삼**** · 박 영 하*****

Heat Performance Analysis of Cool Storage Room on Carrying Method of Storage

Seok-Woo Kim*, Sung-Man Kim*, Myung-Taek Hyun**,
Dong-Ho Choi***, Jeong-Sam Koh**** and Young-Ha Park*****

ABSTRACT

The heat performance in a forced circulating cool storage room was numerically investigated. A commercial PHOENICS package was used to simulate 3-D airflow. For solving the governing equations a standard k- ϵ turbulent model was implemented to calculate steady state turbulent velocity and temperature distributions. The results show that the large air contacting area of products increases the storage quality, because the airflow between products helps to remove the heat from the products by convective heat transfer.

Key Words : Cool storage room, Heat performance, PHOENICS package, 3-D airflow, k- ϵ turbulent model.

1. 서론

생산자와 수요자에게 농산물을 안정적으로 제공할 수 있는 저온저장고는 96년 말 전국에 약 1300개소가 설치되어 있고 필요성과 효율성으로 인해 그 수가 증

가하고 있다. 그러나 기존에 설치된 많은 저온저장고는 건축단열 및 시스템설비 등의 문제점으로 인하여 열에너지의 손실이 크고 내부의 불균일한 공기유동으로 온도분포가 고르지 못하여 저장기간 중에 있는 농산물의 많은 양이 부패되거나 품질이 저하되는 경우가 자주 발생하고 있다.¹⁾ 저장온도가 균일하게 유지되지 못하여 적정온도보다 높은 온도의 저장물은 부패되며, 반대로 적정 저장온도보다 낮은 온도의 저장물은 저온장애로 품질이 저하된다. 그리고 비효과적인 환기로 인한 공기의 정체현상으로 발생하는 호흡열은 조직의 대사활동을 더욱 가속화시키거나 미생물의 활동을 증가시켜 품질을 저하시킨다. 기존의 저온저장고는 이러한 특성을 고려하지 않고 설계되어 사용되고 있기 때문에 저장시 품질

* 제주대학교 대학원

Graduate school, Cheju Nat'l Univ.

** 제주대학교 기계공학과, 첨단기술연구소

Dept. of Mechanical Eng., Research Institute of Advanced Tech.

Cheju Nat'l Univ.

*** 대구가톨릭대학교 건축학과

Dept. of Architecture, Catholic Univ. of Taegu

**** 제주대학교 원예생명과학부

Faculty of Horticultural and Life Science, Cheju Nat'l Univ.

***** 제주관광대학 메카트로닉스계열

Dept. of Mechatronics, Jeju Tourism College

의 저하에 따른 손해를 감수하고 있는 실정이다. 농가소득 증대와 수출 농업을 위해서는 유통과정에 있는 농산물을 품질손상이 가장 적은 적정온도로 유지하여 장시간 저장하는 저온저장고의 개발이 더욱 필요한 과제이다.²⁾

저온저장고의 생명은 빠른 시간 안에 농산물이 저장되어 있는 내부의 온도를 적정 저장온도로 떨어뜨리고 편차가 적으면서 일정하게 유지하는 것이다. 일반적으로 농산물은 장기간 보관되기 때문에 외부환경이나 농산물의 호흡열에 따른 온도변화가 수반되는데 이때 품질손상이 생기게 된다. 저온저장고 내부의 공기유동이 비효율적이면 온도분포가 균일하지 못하여 품질저하가 발생하는데 본 연구에서는 감귤류의 호흡작용이나 미생물의 활동이 억제되는 온도를 저온저장고 전체에 균일하게 유지하기 위한 저온저장고의 제어변수(설정온도, 온도편차)에 따른 저온저장고 내의 온도 및 속도분포를 분석하여 저온저장고의 3차원 시뮬레이션 모델을 개발하고자 한다. 또한 실제 저온저장고 실험을 통해 개발된 시뮬레이션 모델의 유의성을 검토하고 검증된 시뮬레이션 모델을 이용하여 저온저장고에 적재물을 저장하는 방법중 적재물 사이의 간격(Gap)에 따른 공기유동 및 온도분포 특성을 분석하였다.³⁾

II. 시뮬레이션 모델링

농산물의 저장을 위한 저온저장고에 관한 실험은 농산물을 직접 취급하여 각 실험조건에 맞는 상황을 만들어야 하고 실내의 정확한 온·습도 설정 등 실험환경을 정확히 구현하는데 어려움이 많다. 따라서 본 연구에서는 저온저장고 해석의 기초를 제공한다는 의미에서 저온저장고 해석을 위한 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여서 감귤 적재방법에 따른 저온저장고 내의 열 및 유동 특성에 관한 연구를 수행하였다.

저온저장고 내의 3차원 열 및 공기유동 분석을 위한 시뮬레이션 기구로는 PHOENICS 패키지⁴⁾를 이용하였다. 이때 저온저장고내 유체의 난류해석을 위한 모델은 표준 k-ε 난류모델⁵⁾을 사용하였다.

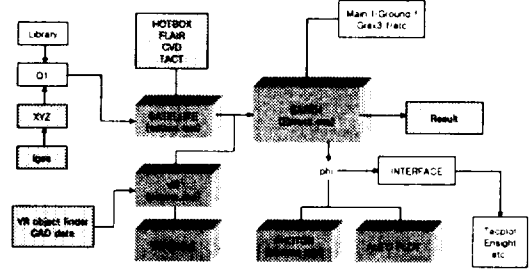


Fig. 1. Structure of PHOENICS.

2.1. PHOENICS 구조

Fig. 1은 PHOENICS의 구조를 나타낸 것이다. PHOENICS는 VR-Editor의 control panel과 start menu를 통해 저온저장고의 열 및 유동해석에 관한 수치해석을 수행할 수 있다. 즉, control panel에서는 구현하고자 하는 형상을 구체적으로 가시화하고 이에 사용될 경계조건 및 변수들의 값을 start menu에 입력하여 준다. 이때 구현된 형상은 Earth를 실행하기 전에 Q1 파일로 저장함으로써 해석 후 파일이 설정 전으로 돌아가는 것을 방지한다. Earth 실행시키면 해석하고자 하는 영역에 대한 열 및 유동해석을 할 수 있다. 해석 결과는 VR-View를 통해 확인할 수 있다.

여기서, 해석하고자 하는 저온저장고의 데이터인 Q1 파일들을 얻기 위한 Domain setting의 내용은 다음과 같다.

Geometry의 button을 눌러서 Fig. 2와 같이 좌표계, Steady/Unsteady, Domain size, 격자개수, tolerance 등을 설정한다. Models의 button을 눌러서 Fig. 3과

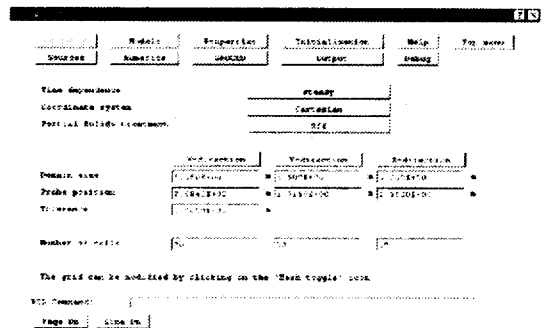


Fig. 2. Domain settings box selected geometry button.

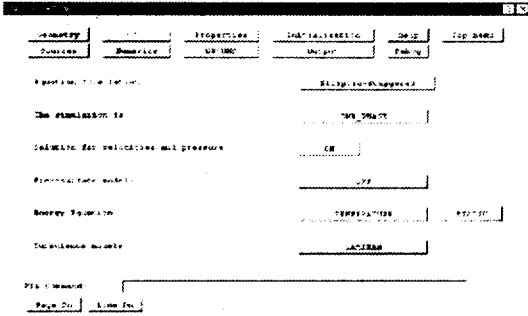


Fig. 3. Domain settings box selected models button.

같이 풀거나 저장할 변수들, 필요한 방정식 등을 설정한다.

그 밖의 설정메뉴인 Properties, Initialization, Source, Numerics, Ground, Output에 관한 내용들을 설정하여야 한다.

2.2. 저온저장고의 실제모형

연구에 사용된 저온저장고의 벽과 천정은 80mm 스티로폼 단열재를 이용해 시공하였으며 바닥은 콘크리트 타설을 하였다. 전체 건축물의 크기는 15320mm × 5860mm × 3900mm(가로 × 세로 × 높이)로 약 20평 규모이며 준비실은 4200mm × 5860mm × 3900mm(가로 × 세로 × 높이), 저온저장고는 5560mm × 5860mm × 3200mm(가로 × 세로 × 높이)의 면적으로 설계하였으며 Fig. 4는 제주도 상온저장고 기준 형식으로 신축되어 연구에 사용된 저온저장고의 설계도면이다.

제어변수에 따른 저온저장고 환경을 비교·분석하기 위해 저온저장고마다 콘트롤 박스를 분리·제작하여 각각의 저온저장고를 제어할 수 있게 하였으며 저온저장고 내부에는 두 대의 KUC-M030(주)경동산업) 기종의 냉동기를 설치하였다. 냉동기의 작동으로 인해 냉각핀 사이의 서리나 얼음을 제거하기 위한 제상장치에는 전기제상과 살수제상 방법이 있는데 0.4kW의 히터를 8개 설치한 전기제상방식을 사용하였다. 또한 외기조건에 의해 저온저장고의 온도에 이상이 생겼을 경우 작물의 냉해를 예방하기 위한 0.6kW 용량의 히터가 Unit Cooler의 앞뒤에 세 개씩 설치하였고 Table 1은 저온저장고에 설치된 냉동기의 기체사

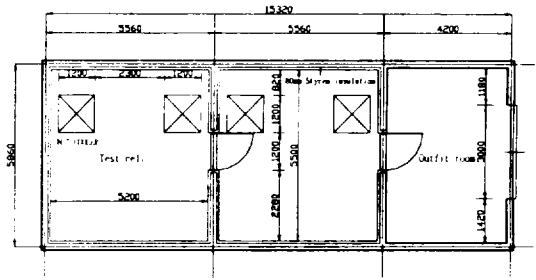


Fig. 4. Schematics of a cool storage room.

Table 1. Refrigerator specification

Unit cooler	Model	KUC-M030
	Electric consumption	0.2kW
	Power supply	220V 60Hz
	Volt range	220V ~ 380V
	Fan diameter	500mm
	Air volume	56 m ³ /min
	Defrost heater	3.2kW
Condenser unit	Model	CU-PA050
	Electric consumption	0.1kW
	Power supply	220V 60Hz
	Volt range	220V ~ 380V
	Fan diameter	400mm
Compressor unit	Model	PA050SM
	Electric consumption	3.7kW
	Power supply	220V 60Hz
	Volt range	220V ~ 380V

양을 나타낸다.

2.3. 저온저장고의 열전달

컴퓨터 시뮬레이션에서 해석하고자 하는 저온저장고의 크기는 실험을 위해 건축된 저온저장고의 크기와 동일하다. 다만 전체적인 해석을 위해 저온저장고의 외부 단열재의 두께를 제외하여 해석영역을 설정하였다. 따라서 해석 영역은 5200mm × 5500mm × 3200mm(가로 × 세로 × 높이)이며 저장물이 없는 경우

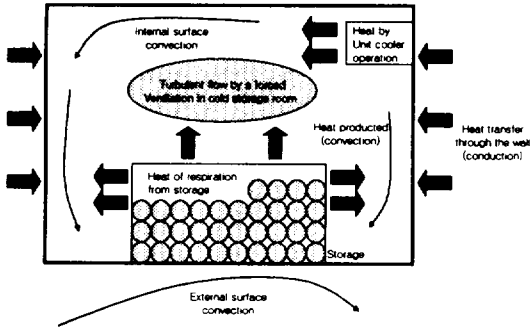


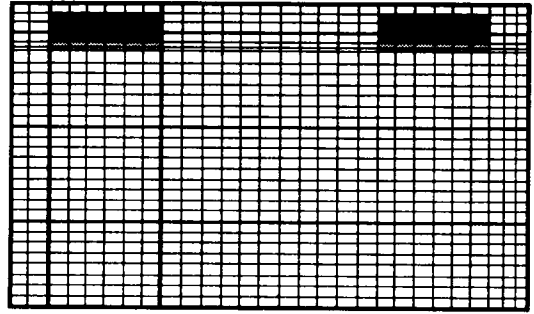
Fig. 5. Schematics of internal heat transfer in a cool storage room.

와 있는 경우에 대하여 강제순환식 냉각팬에 의해 지배되어지는 내부 공기유동을 3차원으로 해석하였다. 이때 냉각팬에서 발생하는 강제순환 공기유동은 난류에 해당하며 마하수는 0.02이므로 비압축성 유동으로 볼 수 있다. 이에 따라 지배방정식은 비압축성 난류 유동 해석 방정식을 이용하였다.

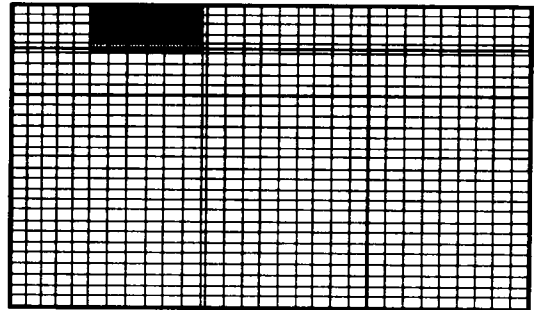
Fig. 5는 저온저장고를 검사체적(Control volume)으로 할 때 검사체적 내·외에서의 온도차에 따른 열전달 현상을 도시한 것이다. 주요 열전달 기구로는 냉각팬에 의한 강제 대류 열전달, 저장물의 호흡에 의한 발생열 그리고 벽체를 통한 전도 및 외기와의 대류현상이다. 저온저장고 내의 유동은 냉각팬에 의한 강제대류가 지배적일 것으로 예상된다. 다만 이러한 유동현상은 저장물의 적재방법에 따라 달라지게 되며 이는 저온저장고내의 공기유동 및 열분포에도 영향을 미칠 것이다.

2.4. 격자 형성

컴퓨터 시뮬레이션의 경우 정확한 해와 빠른 수렴을 위해서는 적절한 격자(Grid)를 설정해주어야 한다. 그러나 저온저장고의 경우 특별히 복잡한 형상을 필요로 하지 않고 연구목적 자체가 공기유동의 빠른 수렴성 문제가 아니라 정확한 현상의 해석을 목표로 하기 때문에 Fig. 6에 제시한 것처럼 직교좌표계형 격자(x:가로축, y:세로축, z: 높이축)를 이용하였다. 그러나 냉각팬 주변은 공기유동 변화가 크므로 격자를 조밀하게 형성하여 계산하였다. 본 해석에서 사용



(a) x-z plane



(b) y-z plane

Fig. 6. Computational meshes of a cool storage room.

한 각 단면의 격자수는 $30 \times 30 \times 30$ 이다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 시뮬레이션 모델 검증

저온저장고에 대한 시뮬레이션 모델이 타당성을 검증하기 위하여 설정온도가 4°C (온도편차 $\pm 2^{\circ}\text{C}$)일 때 저온저장고의 온도가 정상상태에 도달했을 때의 온도분포를 측정하여 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 보다 정확한 검증을 위해서는 저온저장고내의 속도분포에 의한 타당성 검토도 요구되나 본 연구에서는 속도분포의 조사가 불가능하였다. 여기서 온도분포의 정상상태는 실험 시작 후 12시간 경과되었을 때로 설정하였다.

Fig. 7과 Fig. 8은 온도를 4°C (온도편차 $\pm 2^{\circ}\text{C}$)로 하여 저온저장고를 가동시켜 정상상태에 도달하였을

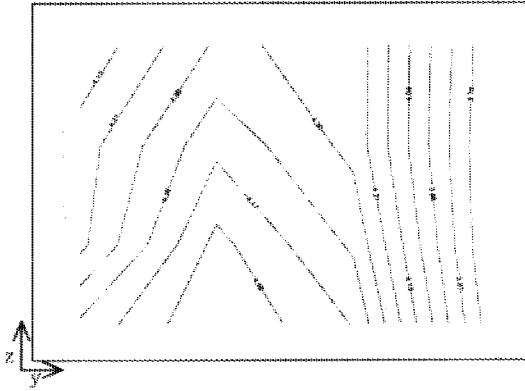


Fig. 7. Iso-therm lines on y-z plane at $x=0.85m$.

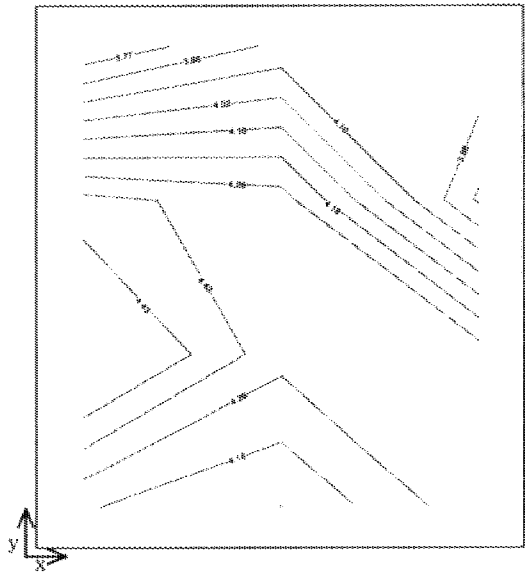


Fig. 8. Iso-therm lines on x-y plane at $z=1m$.

때의 저온저장고 내부 등온도선을 나타낸 것이다. Fig. 7은 $x=0.85m$ 에서의 저온저장고의 y-z 단면에서의 등온선을 나타내고 Fig. 8은 $z=1m$ 에서의 x-y 단면에서의 등온선을 나타내는데 그림에서 살펴보면 최고온도와 최저온도의 편차가 $\pm 0.5^{\circ}C$ 범위 내에서 분포함을 알 수 있다.

같은 조건(설정온도 $4^{\circ}C$)일 때 저온저장고의 각종 환경을 입력데이터로 취해 저장고의 임의의 지점에서 계산된 시뮬레이션 결과는 Fig. 9($x=0.85m, 4m$)와 Fig. 10($z=1m, 2.8m$)에 나타내었다. 도시된 단면에서



Fig. 9. Temperature distributions on y-z plane at $x=0.85m$ and $4m$.

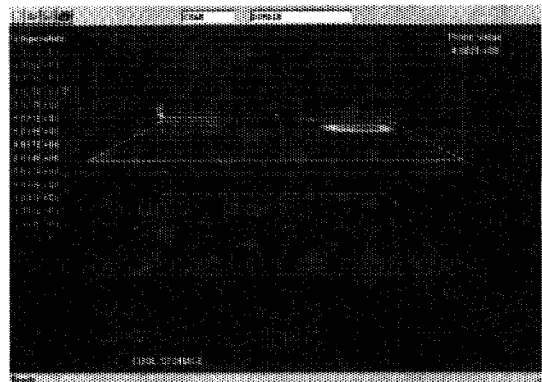


Fig. 10. Temperature distributions on x-y plane at $z=1m$ and $2.8m$.

의 온도 편차는 무시할 수 있어서 전 영역에 걸쳐 $4^{\circ}C$ 로 분포됨을 알 수 있어서 실험결과와 비교할 때 본 시뮬레이션 방법이 타당함을 알 수 있다.

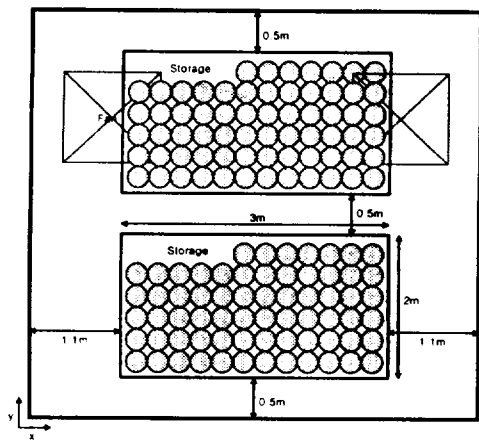
3.2. 저장물 적재방법의 모델화

작물을 저온저장고에 저장할 때 적재방법에 따라 저온저장고의 공기유동 및 온도분포가 달라진다. 적재방법 중 적재물의 크기 및 적재물 사이의 간격에 따른 시뮬레이션 모델을 Table 2와 같이 설정하였다.

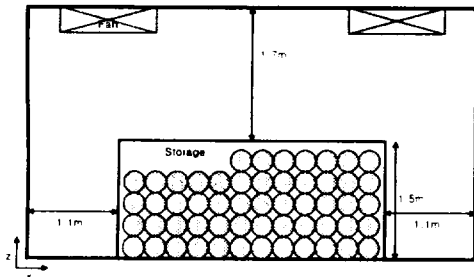
감귤류를 적재한 저온저장고는 정상상태이며 경계조건을 입구에서 $4^{\circ}C$, 냉각팬에 의한 공기의 유입량은 실험조건과 동일하게 $56m^3/min$ 로 하였다. 또한

Table 2. Geometry parameters of simulation model

Cooler type	Gap size	Storage size (20% of total capacity)				Area of contact (m ²)
		W(m)	L(m)	H(m)	Number	
KUC-M030	1m	3	1.5	2	2	42
KUC-M030	0.5m	3	2	1.5	2	45



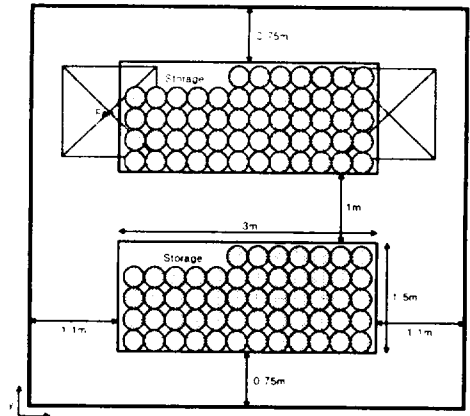
(a) x-y plane



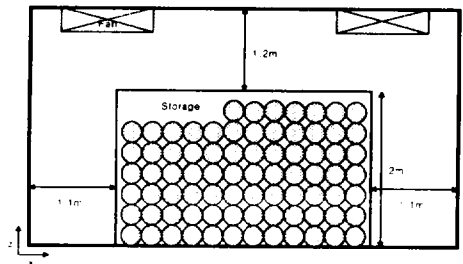
(b) x-z plane

Fig. 11. Schematics of simulation model for gap = 0.5m

감귤간의 공극율은 0이며 모든 벽과 지붕은 단열상태로 설정하였다. 이때 감귤의 입고율은 20%로 하였으며 두 개의 동일한 체적으로 나누어 저장하는 것으로 가정하였으며 적재물 사이의 간격은 0.5m와 1m일 때에 대해 연구를 수행하였다.



(a) x-y plane



(b) x-z plane

Fig. 12. Schematics of simulation model for gap = 1m.

3.3. 속도 및 온도분포

Fig. 11과 Fig. 12는 적재물의 사이의 간격이 각각 0.5m와 1m인 경우의 시뮬레이션 모델 설정시 감귤의 적재에 따른 적재물의 위치와 크기를 나타낸 것이다.

따라서 내부 찬공기와의 접촉면적은 적재물 간의 간격이 0.5m인 경우는 42m², 1m인 경우는 45m²로 간격이 0.5m인 경우의 공기와의 접촉면적은 1m인 경우의 93%에 해당한다.

감귤이 저장된 저온저장고에 대한 시뮬레이션을 수행하는데 있어서 고려해야할 사항은 감귤에 의한 발생열이다. 이를 위해 본 연구에서는 감귤에 의한 열원은 각각 별도로 고려하지 않고 적재된 상태로 고려하여 각 적재물의 총 열원을 100W/m³으로 간주하였다. 또한 실험에서와 마찬가지로 냉각기는 1대만 가동시켰다.

수렴 판정은 전회에서 계산된 변수와 새롭게 획득된 데이터의 오차가 $1.0E-03$ 의 이내일 때로 하였으며 발산에 의한 계산 착오를 방지하기 위해 계산 반복횟수는 1000회까지로 설정하였다.

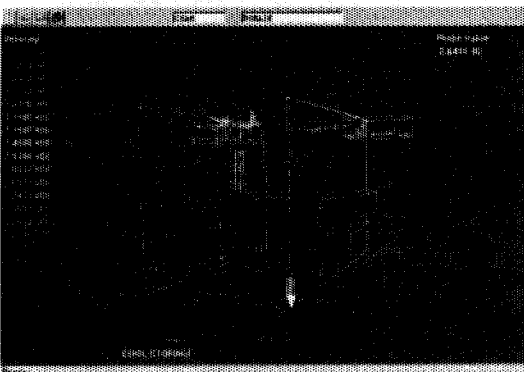
적재물 간의 간격이 0.5m인 경우의 계산결과를 Fig. 13과 Fig. 14에 나타내었다. 여기서 Fig. 13($x=1.4$, 4m)은 저온저장고의 y - z 단면에서의 속도 및 온도분포이며 Fig. 14($z=1$ m, 2.8m)는 x - y 단면에서의 속도 및 온도분포를 나타낸다. 이때 공기유동 속도는 최대 4.66m/s에서 최소 0.006m/s의 분포를 보이고 있으며 온도분포는 최대 4.094°C에서 최소 4°C를 나타내고 있음을 알 수 있다.

또한 적재물 간의 간격이 1m인 저온저장고 내의 속도 및 온도분포의 계산 결과는 각각 Fig. 15($x=1.4$,

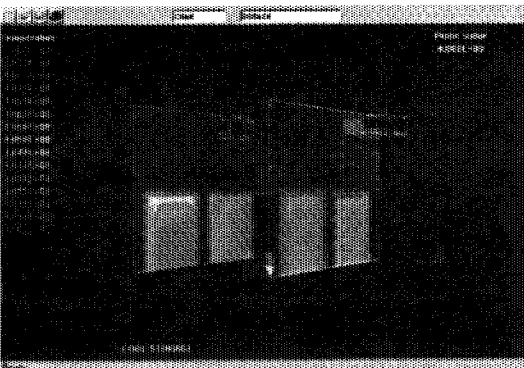
4m)와 Fig. 16($z=1$ m, 2.8m)과 같다. 그림에서와 같이 공기유동 속도는 최대 4.69m/s에서 최소 0에 가까운 분포를 보이고 있으며 온도분포는 최대 4.085°C에서 최소 4°C이다.

저온저장고 내에 적재물이 있는 경우와 적재물이 없는 경우의 온도분포를 비교할 때(Fig. 9, Fig. 10) 저장물의 호흡열로 인한 적재물 표면에서 뚜렷한 온도 상승을 보여준다. 본 연구에서는 감광간 공기유동을 0으로 보고 있지만 실질적으로는 저장물 사이에서 차가운 공기의 흐름이 차단되기 때문에 내부 온도가 높아져 저장물의 과성숙 및 부패를 유발하리라 생각된다.

공기유동 분포 그림을 보면 저장물 사이에 있는 유동통로를 통하여 공기가 이동함을 알 수 있다. 이러한 공기 유동은 저장물과의 접촉에 의해 강제대류



(a) Velocity distributions

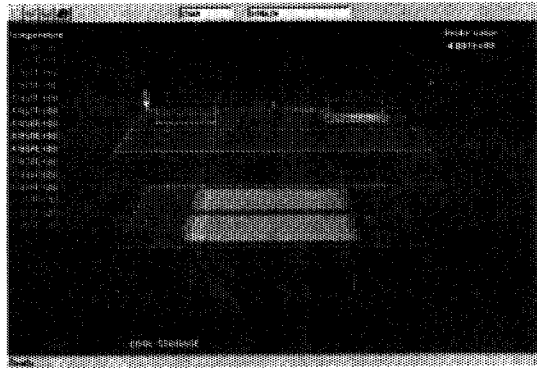


(b) Temperature distributions

Fig. 13. Velocity and temperature distributions on y - z plane for gap = 0.5m ($x = 1.4$ m, 4m).

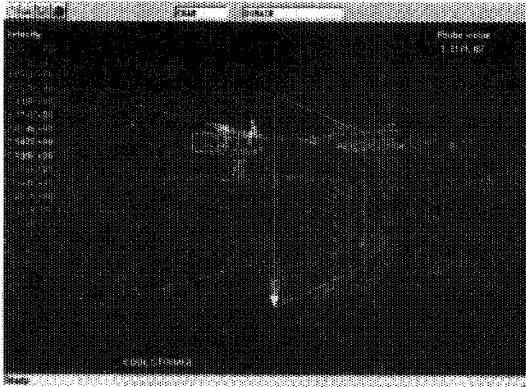


(a) Velocity distributions

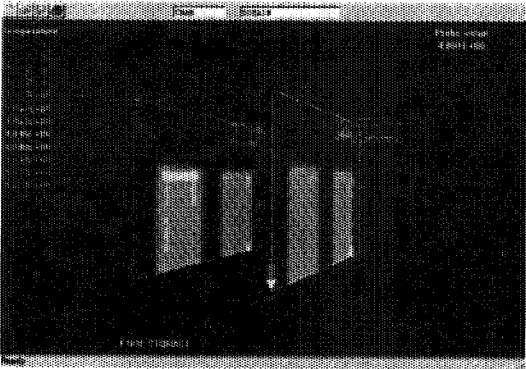


(b) Temperature distributions

Fig. 14. Velocity and temperature distributions on x - y plane for gap = 0.5m ($z = 1$ m, 2.8m)



(a) Velocity distributions

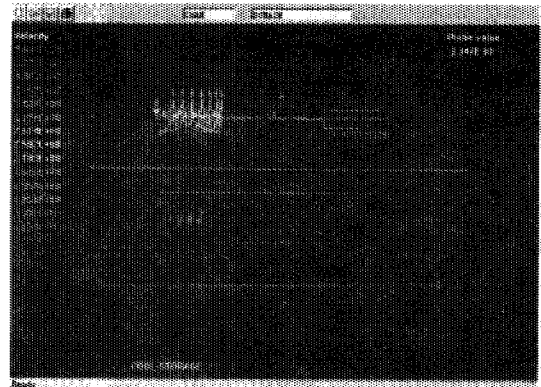


(b) Temperature distributions

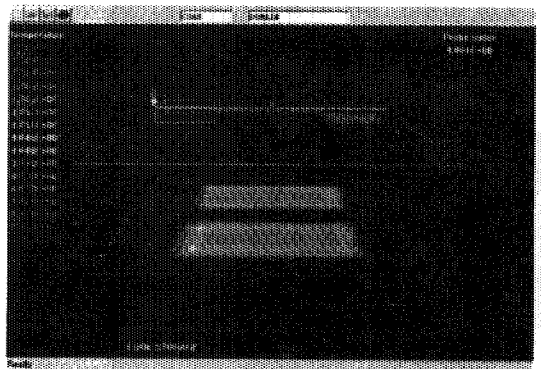
Fig. 15. Velocity and temperature distributions on y-z plane for gap=1m (x=1.4m, 4m).

에 의한 열전달을 촉진시키게 된다. 따라서 일반적으로는 공기와의 접촉면적이 넓을수록 저장물의 냉각효과를 증대시켜 감람의 저장에 좋은 결과를 초래할 것이다.

시뮬레이션 결과를 살펴보면 적재물간의 간격이 넓은 경우가 적재물의 온도가 다소 낮음을 알 수 있다. 적재물 간의 간격, 즉 공기와의 접촉면적의 증감에 따른 저장효과는 단순한 접촉면적의 증감만으로 저장효과를 결론지을 수는 없을 것이다. 적재물의 간격차에 의한 공기 흐름이 영향을 받을 뿐 아니라 저장물이 다공물질이라는 사실을 무시하지 않기 때문이다.



(a) Velocity distributions



(b) Temperature distributions

Fig. 16. Velocity and temperature distributions on x-y plane for gap=1m (z=1m, 2.8m).

IV. 결론

본 연구에서는 PHOENICS package를 이용하여 실제 사용중인 저온저장고의 3차원 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 이를 위해 냉동기에 의한 강제대류, 저장물의 호흡열, 벽을 통한 열손실 등을 고려하여 k-ε 난류모델을 이용하여 열전달 해석을 수행하였다.

저온저장고 내 저장물의 적재방법에 따른 저장효과를 분석한 결과 같은 부피의 저장물에 대해 저장물간의 간격이 넓을수록 저장물의 온도상승이 억제되어 저장에 효과적이며 공기와의 접촉면적이 넓을수록 저장물의 온도를 균일하게 유지할 수 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 감귤류 수입관리 운영위원회의 연구비 지원과 (주)삼성냉기플랜트의 시설비 지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌

- 1) 고정삼, 강영주, 1998, 감귤가공, 제주대학교 출판부
- 2) 박호석, 김동철, 1997, 농산가공 유통시설, 농협전문대학 출판부
- 3) 강동언, 김성만, 윤종호, 이의준, 박영하, 현명택, 2000, 다수의 냉동시스템에 의한 저온저장고의 에너지 성능평가, 제주대학교 산업기술연구소 논문집, Vol. 11, No. 1, pp. 15-21.
- 4) PHOENICS 3.3 Documentation, 2000, Concentration, Heat & Momentum Ltd.
- 5) 조병관, 1998, $k-\epsilon$ 난류모델을 이용한 저온저장고 내부의 온도분포 및 공기유동에 관한 연구, 서울대학교 석사학위 논문