

碩士學位論文

농가용 저온저장고의 모델설정과
열성능 분석

濟州大學校 大學院



金 錫 佑

2001年 12月

농가용 저온저장고의 모델설정과 열성능 분석

指導教授 玄 明 澤

金 錫 佑

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2001年 12月

金錫佑의 工學碩士學位 論文을 認准함



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

審査委員長 印

委 員 印

委 員 印

濟州大學校 大學院

2001年 12月

Development of an Agricultural Cool Storage Room Model and Heat Performance Analysis

Seok-Woo Kim

(Supervised by Professor Myung-Taek Hyun)

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER
OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

2001. 12.

목 차

List of Table	ii
List of Figure	ii
SUMMARY	iv
I. 서 론	1
II. 시뮬레이션 모델링	3
1. PHOENICS 구조	3
2. 저온저장고의 열전달	5
3. 격자 형성	5
III. 실험장치 및 방법	8
1. 실험장치	8
1) 저온저장고	8
2) Control box 설계	10
3) 저온저장고 냉동 설비	11
2. 실험방법	13
IV. 연구결과 및 고찰	18
1. 실험결과	18
1) 설정온도에 따른 온도분포	19
2) 온도편차 변화에 따른 온도분포	23
3) 환기에 따른 온도분포	26
4) 제어변수에 따른 전력소비량	29
2. 시뮬레이션 결과	31
1) 시뮬레이션 모델 검증	31
2) 저장물 적재방법의 모델화	35
3) 시뮬레이션 결과 및 검토	38
V. 요약 및 결론	44
참고문헌	45

List of Table

Table 3-1 Refrigerator specification	12
Table 4-1. Power consumption for various experimental conditions	30
Table 4-3 Geometry parameters of simulation model	35

List of Figure

Fig. 2-1 Structure of PHOENICS	4
Fig. 2-2 Schematics of internal heat transfer in a cool storage room	6
Fig. 2-3 Computational meshes of a cool storage room	7
Fig. 3-1 Schematics of a cool storage room	9
Fig. 3-2 Photograph of control box	10
Fig. 3-3 Circuit diagram of refrigerator	11
Fig. 3-4 Thermistor positions in a cool storage room	14
Fig. 3-5 Positions of thermistor in a cool storage room	15
Fig. 3-6 Photograph of thermistor installation	16
Fig. 3-7 Measurement apparatus for temperature and humidity	17
Fig. 3-8 Measurement apparatus for power consumption	17
Fig. 4-1 Variations of outside temperature (June 25, 2001)	20
Fig. 4-2 Temperature variations with setting temperatures for temperature deviation= $\pm 2^{\circ}\text{C}$	22

Fig. 4-3 Temperature variations with temperature deviations for setting temperature=4°C	25
Fig. 4-4 Temperature variations with ventilation time for setting temperature=4°C and temperature deviation=±1°C	28
Fig. 4-5 Iso-therm lines on y-z plane (x=0.85m)	32
Fig. 4-6 Iso-therm lines on x-y plane (z=1m)	33
Fig. 4-7 Temperature distributions on y-z plane	34
Fig. 4-8 Temperature distributions on x-y plane	34
Fig. 4-9 Schematics of simulation model for gap=0.5m	36
Fig. 4-10 Schematics of simulation model for gap=1m	37
Fig. 4-11 Velocity distributions on y-z plane for gap=0.5m (x=1.4m, 4m)	40
Fig. 4-12 Velocity distributions on x-y plane for gap=0.5m (z=1m, 2.8m)	40
Fig. 4-13 Temperature distributions on y-z plane for gap=0.5m (x=1.4m, 4m)	41
Fig. 4-14 Temperature distributions on x-y plane for gap=0.5m (z=1m, 2.8m)	41
Fig. 4-15 Velocity distributions on y-z plane for gap=1m (x=1.4m, 4m)	42
Fig. 4-16 Velocity distributions on x-y plane for gap=1m (z=1m, 2.8m)	42
Fig. 4-17 Temperature distributions on y-z plane for gap=1m (x=1.4m, 4m)	43
Fig. 4-18 Temperature distributions on x-y plane for gap=1m (z=1m, 2.8m)	43

SUMMARY

The low temperature storage method has been used to increase the value of agricultural products by reducing quality deterioration regulate consignment time by controlling respiration rate of agricultural products. The respiration rate of agricultural products depends on several factors such as temperature, moisture, gas composition and microbe inside the storage room. Among those factors the temperature is the most important factor, which affects respiration rate and causes severe damage.

Two types of experiments have been conducted to get the optimal parameters:

- 1) The experiment of measuring the electrical power consumption under the various setting temperature at fixed temperature deviation.
- 2) The experiment of measuring the electrical power consumption under the temperature deviation at fixed setting temperature.

The results of these experiments show that the electrical power consumption on economical operations economic operation decreases as setting temperature increases.

In the ventilation experiment, the case of ventilating four times a day(every six hours a day) with ten minutes operation each time, showed as much electrical power consumption as non-ventilation case.

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.

I. 서 론

제주도의 1차산업에 종사하는 인구는 총인구의 30% 정도로 상당한 비율을 차지하고 있으며 가까운 기간 내에 다른 산업으로 전환할 수 있는 가능성이 적다. 특히, 제주농업에서 차지하는 감귤비중이 60%에 이르러 어떤 방법이던 감귤산업을 육성해야 할 실정이다. 따라서 감귤산업의 유지를 위해 우선적으로 해결해야 할 분야는 생산조성과 더불어 감귤의 출하기간을 연장함으로써 생산된 감귤의 적절한 처리대책이 시급하다.¹⁾

현재 감귤재배면적은 26,000 ha로 연평균 60만톤 정도가 생산되고 있으며,²⁾ 3~5년 이내 연평균 생산량은 60~70만톤 수준에서 안정될 것으로 추정된다. 생과 소비는 1997년 기준으로 한국이 1인당 11 kg으로서³⁾ 일본의 1인당 6.6 kg에 비해 매우 높은 편으로 소비증가보다는 지속적인 소비감소가 이루어질 것으로 추정되어 종합적인 처리대책이 요구되고 있다. 이에 따라 가격안정에 필요한 물량조절을 위하여 저장을 통한 출하기간 연장, 가공산업의 육성 등이 필요하다. 그러나 가공산업은 국제경쟁력 문제로 대규모 물량처리에 한계를 보이고 있어서 저장기술 개발을 통하여 부가가치를 높일 필요가 커졌다.¹⁾

지금까지의 감귤저장은 주로 생산농가의 간이창고에서 상온저장을 하고 있으며, 저장고의 환경과 저장조건에 따라 다소 차이가 있지만 2월 중순까지는 신선도가 다소 떨어지지만 어느 정도 상품성을 유지할 수 있다. 그러나 그 이후 외기 온도의 상승으로 인하여 호흡작용, 증산작용 등 감귤의 생리활동이 급격히 증가하면서 상품성을 유지하기 어려워 품질이 매우 떨어진 상태에서 출하되고 있다.

제주지역에 저온저장고는 1999년말 현재 약 31,683m²에 저장능력은 25,000톤에 이르고 있음에도 불구하고 감귤 저온저장에 관한 실용적인 기술축적이 이루어지지 않고 있다. 또한 경영주의 위험 부담으로 인하여 감귤의 저온저장을 기피하고 있

어서 신축된 저온저장고가 제대로 활용되지 않아 제주형 저온저장의 실용화 모델을 개발할 필요가 있다. 따라서 기존의 저온저장 시설뿐만 아니라 거의 방치되다시피 하고 있는 상온저장 시설을 저온저장 시설로 전환시키고 이를 활용하여 감귤을 효과적으로 저장하는 방법을 모색할 필요성이 있으나 이에 대한 연구는 매우 미흡한 실정이다.^{4,5)}

따라서 본 연구에서는 장기간 품질유지를 위한 저온저장 체제로 전환할 수밖에 없는 환경변화에 부응하여 기존의 농가창고를 농가보급형 저온저장고로 전환할 수 있는 실용적인 모델을 제시하기 위한 방안으로 기존 상온저장 시설을 저온저장 시설로 시설 변경을 한 후 이에 대한 열적 검토를 하고자 한다. 이를 위하여 두 개의 저온저장고를 설치하여 한쪽은 덕트시설 및 환기시설을 갖추어 적절한 환기량과 환기시간을 검토하고 에너지소비량 및 저장효과에 대한 덕트를 설치하지 않은 저장고와의 비교 분석을 통해 농가에 효율적인 관리 방안을 제시하고자 한다. 또한 실험조건 설정의 어려운 문제에 대한 검토를 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 병행하여 저온저장고내의 저장물의 적재방법에 따른 저장방법의 효율성 분석을 수행하고자 한다.



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 시뮬레이션과 실험을 병행하여 수행하였다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여서는 실제 실험이 어려웠던 감귤 적재방법에 따른 저온저장고 내의 열 및 유동 특성에 관한 연구를 수행하였다.

저온저장고 내의 3차원 열 및 공기유동 분석을 위한 시뮬레이션 도구로는 PHOENICS 패키지⁶⁾를 이용하였다. 이때 저온저장고내 유체의 난류해석을 위한 모델은 표준 $k-\epsilon$ 난류모델⁷⁾을 사용하였다.

1. PHOENICS 구조



PHOENICS 패키지는 일반적으로

- 1-D, 2-D, 3-D, 정상상태 및 비정상상태
- 직교좌표계, 원통좌표계 및 극좌표계, 비직교 및 moving grid를 포함한 일반좌표계, 회전좌표계, Multi-Block grid와 Fine grid embedding
- 비뉴턴 유체를 포함한 압축 및 비압축성 유동
- 아음속, 천음속, 초음속 유동
- 대류, 전도, 복사 열전달과 이들의 복합 열전달

의 해석이 가능한 것으로 알려져 있다. 따라서 본 저온저장고의 시뮬레이션 도구로도 적합한 것으로 판단되며 타당성에 대한 검토는 뒤에 언급하였다.

Fig. 2-1은 PHOENICS의 구조를 나타낸 것이다. 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.

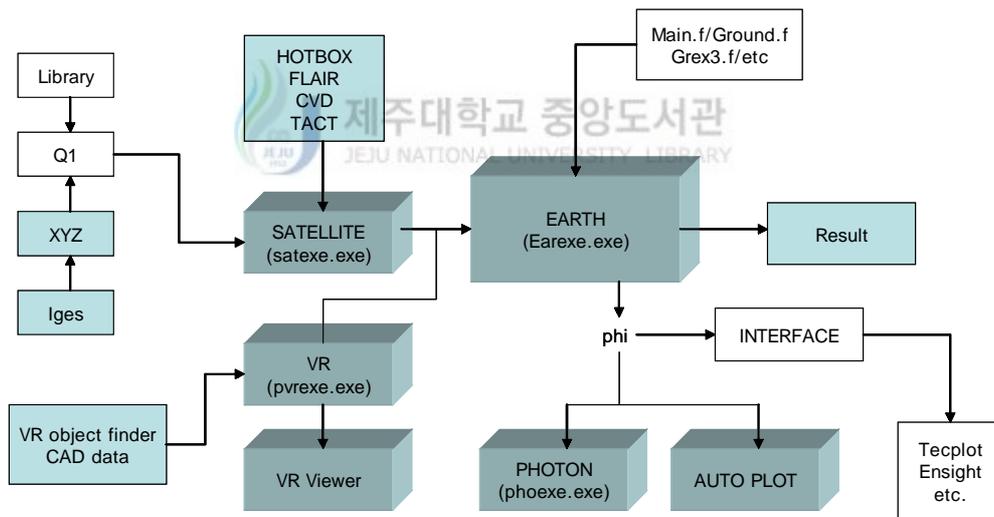


Fig. 2-1 Structure of PHOENICS

2. 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 경우와 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. 2-2는 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 열분포에도 영향을 미칠 것이다.

3. 격자 형성

컴퓨터 시뮬레이션의 경우 정확한 해와 빠른 수렴을 위해서는 적절한 격자(Grid)를 설정해주어야 한다. 그러나 저온저장고의 경우 특별히 복잡한 형상이 아니기 때문에 Fig. 2-3에 제시한 것처럼 직교좌표계형 격자를 이용하였다. 그러나 냉각팬 주변은 공기유동 변화가 크므로 격자를 조밀하게 형성하여 계산하였다. 본 해석에서 사용한 각 단면의 격자수는 30×30×30이다.

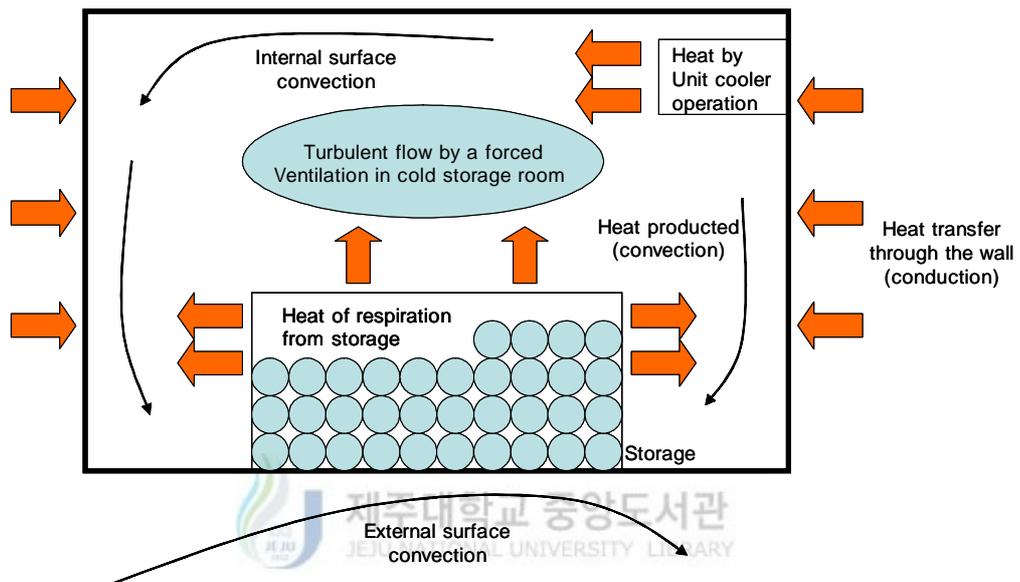
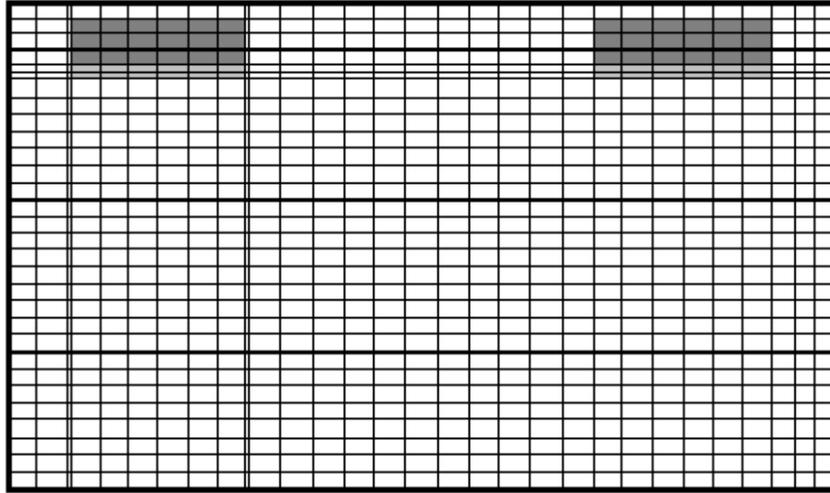
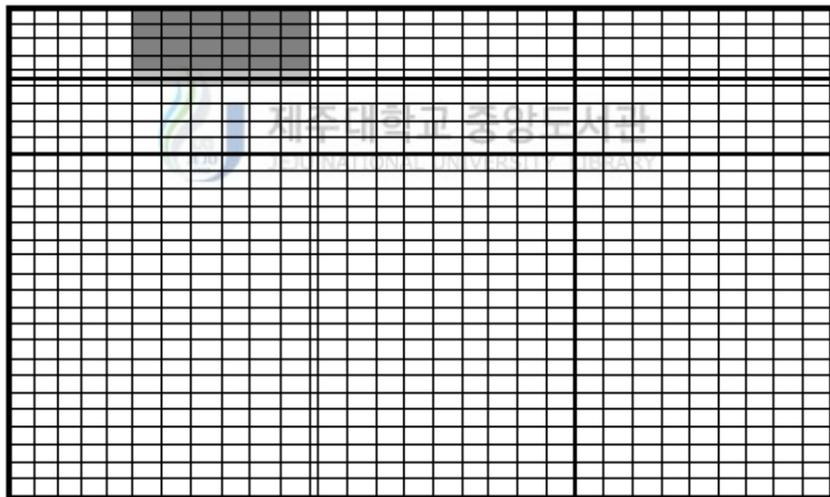


Fig. 2-2 Schematics of internal heat transfer in a cool storage room



(a) x-z plane



(b) y-z plane

Fig. 2-3 Computational meshes of a cool storage room

Ⅲ. 실험장치 및 방법

1. 실험장치

본 연구는 현재 농가에서 사용되고 있는 상온저장고 시설을 저온저장고 시설로 전환하여 사용할 목적으로 제주도 상온저장고 기준 형식에 맞추어 애월읍 용흥리에 콘크리트 구조물로 신축된 저온저장고를 이용하여 실험하였다. 저온저장고는 감귤 저장을 위한 준비 및 출입문 개폐시 열손실을 줄이기 위해 준비실을 두었으며 여러 가지 변수에 따른 효율실험을 위해 두 개의 저온저장시설로 나누었다.

1) 저온저장고

Fig. 3-1은 제주도 상온저장고 기준 형식으로 신축되어 실험에 사용된 저온저장고의 설계도면이다. 전체 건축물의 크기는 15320mm×5860mm×3900mm의 규모이며 준비실과 같은 크기의 저온저장고 2개로 구성되어 있다. 준비실은 4200mm×5860mm×3900mm이며, 저온저장고의 규모는 5560mm×5860mm×3200mm 면적의 2개의 방으로 설계하여 건축하였다. 각 저온저장고에는 냉기를 공급하기 위한 냉각기가 대칭되는 위치에 각각 2개씩 설치되어 있으며, 저온저장고의 벽과 천정은 80mm 스티로폼 단열재를 이용하여 외부와의 열전달을 극소화하였다. 저온저장고를 2개를 만든 것은 실험조건에 따른 차이점을 분석하기 위한 것으로 특히 환기실험을 비교하기 위해 저온저장고 1호실(Fig. 3-1(a)의 왼쪽 방)에는 오랜 기간 저장물을 저장했을 때 작물의 호흡열에 의해 혼탁해진 공기를 환기시키기 위해 덕트시설과 환기장치를 설치하였으나 2호실(Fig. 3-1(b)의 가운데 방)에는 환기장치를 설치하지 않았다. 또한 습도에 의한 저장상태의 검토를 위해 각 저온저장고에 초음파 가습기를 설치하였다.

2) Control box 설계

환경변수 설정에 따라 두 개의 저온저장고를 비교·분석하기 위해 콘트롤 박스 두 개를 제작하여 저온저장고 1, 2호실을 독립적으로 제어할 수 있게 하였다. 콘트롤 박스는 저온저장고내의 최적 저장 조건을 설정하기 위해 온도와 습도 제어를 위한 냉동기 작동, 가습, 제상 기능 이외에 공기 환경을 위한 급기, 배기 등을 24시간 기준으로 설정하여 제어할 수 있도록 하였다. 콘트롤 박스 작동을 위한 온도 제어 센서는 각각의 저온저장고 중앙위치에 높이 2/3지점에 설치하였고, 습도 제어 센서는 각각의 저온저장고 중앙위치의 천정부에 설치하였다. 이를 위해 제작된 콘트롤 박스 내부 모습은 Fig. 3-2와 같다.

또한 냉동기의 대수제어 비교를 위해 저온저장고의 냉각기와 솔레노이드 밸브의 작동 스위치를 수동으로 on/off 할 수 있게 하였으며 저온저장고 가동에 따른 전력량을 측정하기 위해 각 저온저장고의 전원을 분리하여 설치하였고 이를 위한 디지털 전력량계를 설치하였다.



Fig. 3-2 Photograph of control box

3) 저온저장고 냉동 설비

최적의 저온저장고 환경을 설계하기 위해 냉각기의 대수제어 및 온도의 급냉각을 위해 각 실마다 두 대의 KUC-M030 기종((주)경동산업)의 냉각기(Unit Cooler)를 설치하였다. 각각의 냉각기는 소형 및 경량화 타입으로 1.27mm 동관을 사용하여 전열효과를 증대시켰으며 응축된 물이 빠져나갈 수 있는 드레인관이 있다. 냉각기의 작동으로 인해 냉각핀 사이의 서리나 얼음을 제거하기 위한 제상장치에는 전기제상과 살수제상 방법이 있는데 본 실험에 사용된 냉각기에는 0.4kW의 히터를 8개 설치한 전기제상방식을 사용되었다. 또한 외기조건에 의해 저온저장고의 온도에 이상이 생겼을 경우 작물의 냉해를 예방하기 위한 0.6kW 용량의 히터가 냉각기 앞뒤에 세 개씩 설치되었다.

Fig. 3-3은 저온저장고에 설치한 냉동기의 전체 회로도이고 Table 3-1은 저온저장고에 설치된 냉동기의 기계사양을 나타낸다.

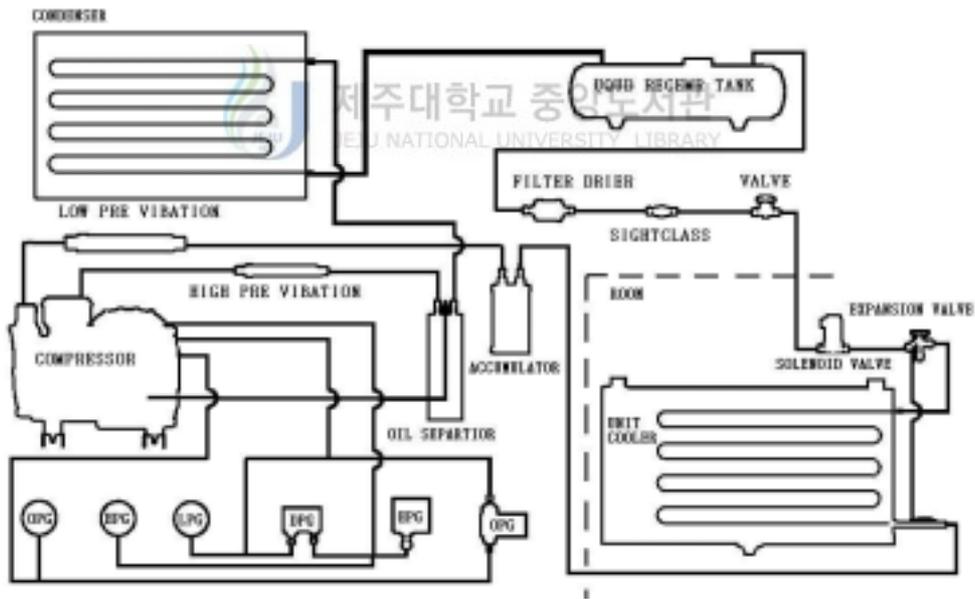


Fig. 3-3 Circuit diagram of refrigerator

Table 3-1 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
	Air volume	90 m ³ /min
Compressor unit	Model	PA050SM
	Electric consumption	3.7kW
	Power supply	220V 60Hz
	Volt range	220V ~ 380V

2. 실험방법

저온저장고 내의 온도를 측정하기 위해 T-type(오차범위 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$)의 열전대를 사용하여 데이터 로거(Data Logger, Data-scan 7320, Datascan사)를 통해 각 점의 온도 데이터가 20초마다 컴퓨터에 입력되도록 하였다. 각 저온저장고마다 48개의 온도센서를 직육면체 격자모양으로 설치하여 온도분포를 측정하였다. Fig. 3-4는 저온저장고 1호실 내부에 설치된 전체 온도센서의 3차원 위치를 채널번호로 나타낸 것이다. 저온저장고 2호실에 설치된 온도센서의 채널번호도 이와 같은 순서로 채널 49에서 채널 96까지 부여되어 있다. 이들의 정확한 위치를 나타내기 위하여 Fig. 3-5에 온도센서의 위치를 2차원으로 나타내었다. 가로방향(x)로 1750mm, 세로방향(y)로 1375mm 그리고 높이방향(z)으로 800mm 혹은 1000mm마다 저장조의 대칭의 위치에 온도센서를 설치하였다. 이들이 저온저장고에 설치된 모습은 Fig. 3-6과 같다.

감귤류 저장시 신선도를 높이는 변수의 하나인 습도측정을 위해 HD8508TO 상대습도계(Delta OHM사)를 이용하였으며 각 저온저장고와 외기습도를 측정하였고 각 측정점의 습도데이터는 데이터 로거(Data-scan 7327, Datascan사)를 통해 20초마다 컴퓨터에 입력되도록 하였다. 저온저장고 내의 상대습도 측정값은 냉각기에서 송풍되는 바람과 초음파가습기의 수증기의 영향을 받기 때문에 상대습도 측정 위치를 외부조건이 영향을 적은 냉각기 사이인 천장 중앙부위에 설치하였다. Fig. 3-7은 온도 및 습도 데이터용 데이터 로거가 설치된 모습이다.

또한 감귤류 저장시 설정온도 및 온도편차에 따른 전력량을 측정하기 위해 Fig. 3-8과 같이 MACH 30 전력량계(Cucati사)를 설치하여 저온저장고의 저장조건 제어변수에 따른 전력량을 비교하여 경제성을 분석할 수 있도록 하였다.

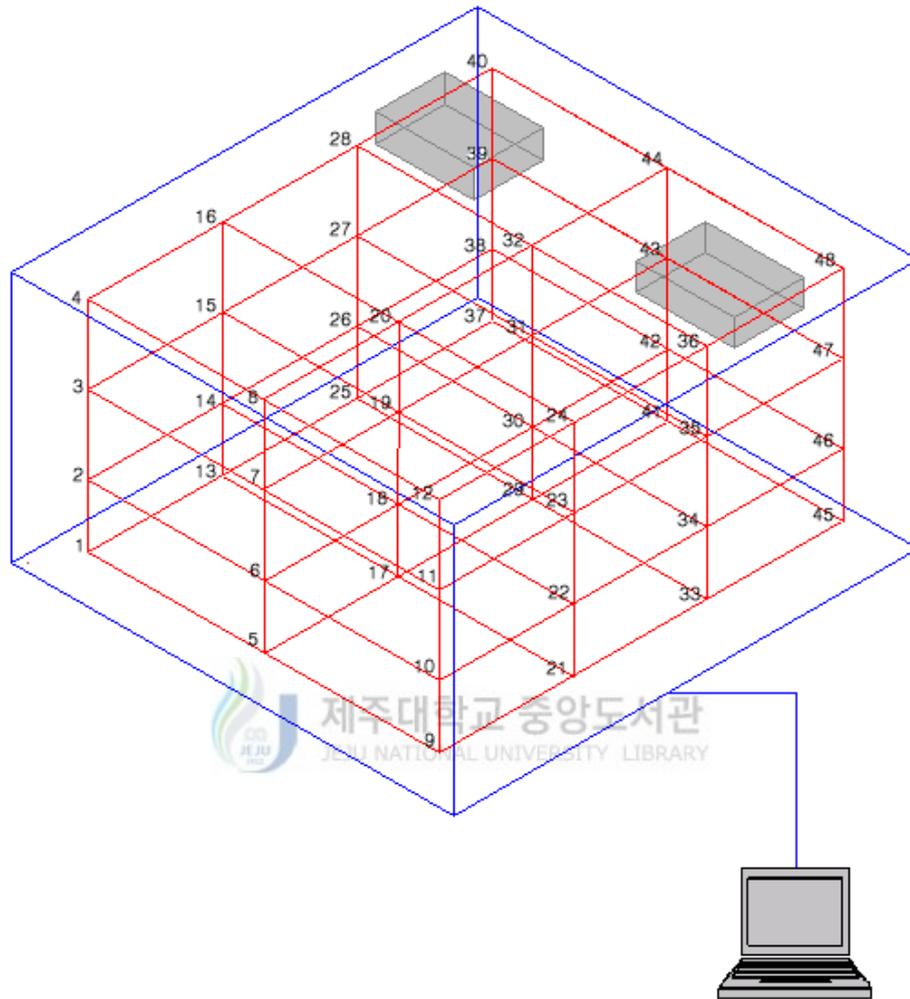
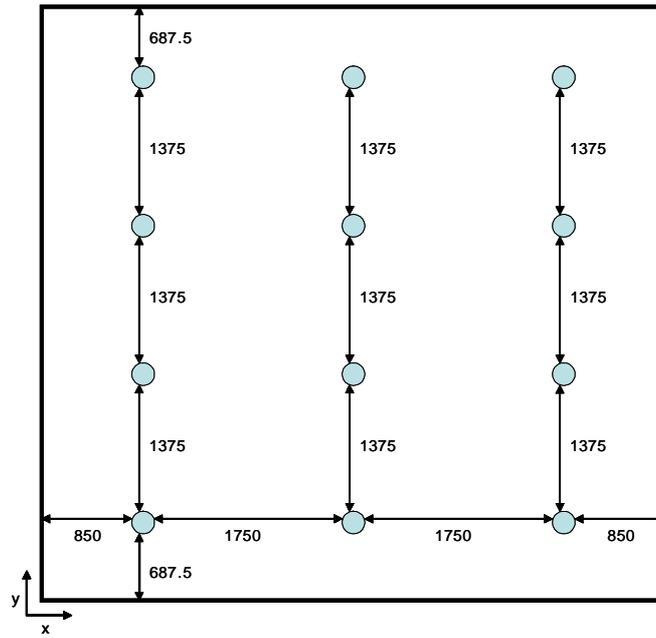
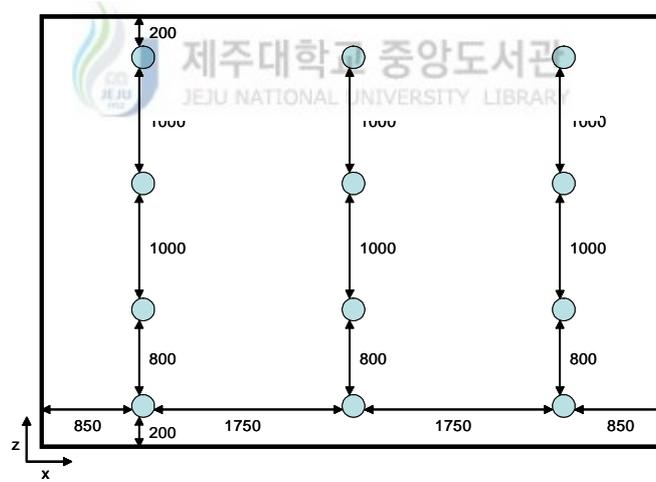


Fig. 3-4 Thermistor positions in a cool storage room



(a) x-y plane



(b) x-z plane

Fig. 3-5 Positions of thermistor in a cool storage room



Fig. 3-6 Photograph of thermistor installation



Fig. 3-7 Measurement apparatus for temperature and humidity



Fig. 3-8 Measurement apparatus for power consumption

IV. 연구결과 및 고찰

1. 실험결과

저온저장고 환경을 위한 제어변수로는 온도 설정, 온도편차 설정, 습도 설정, 환기 그리고 저장물(감귤)의 적재 방법 등을 들 수 있다. 이러한 분석을 위해 본 연구에서는 온·습도 감지를 위한 센서를 장착하고 이의 조절을 위한 냉각기와 가습기를 설치하였으며 환기에 따른 저장 환경 변화에 대한 조사를 하기 위해 전술한 바와 같이 같은 규모의 저온저장고 2개를 시설하여 1호실은 환기를 위한 팬과 덕트를 부착한 한편 2호실은 완전히 밀폐되도록 저장고를 건축하였다.

온도 조건 설정의 경우 과냉각에 의한 저장고의 온도 강하 방지와 제상을 위해 0.4kW의 히터 8개가 냉각기에 부착되어 있어서 정교한 조정이 가능하다. 그러나 습도의 경우 습기의 확산 속도가 느려 저온저장고내의 습도가 국소적으로 매우 불균일한 상태가 되어 평균 습도를 측정하기 어려웠다. 이를 개선하기 위해 습도센서의 위치를 변경시키는 등 많은 노력을 하였지만 정확한 습도의 감지가 불가능하여 전체적으로 설정습도 이상으로 가습되었다. 그러나 습도의 영향을 검토하기 위한 실험에 따르면 습도에 의한 영향은 저장 작물의 부패도에는 큰 영향을 미칠 것으로 예상되지만 열적 분석면에서는 차이점을 거의 관찰할 수 없었다.

따라서 본 연구에서는 습도 변화에 따른 저온저장고의 특성을 무시하고 다음과 같은 제어변수에 대한 실험을 진행하였다.

- 첫째, 온도 편차를 일정히 하고 설정온도를 달리 하였을 때
- 둘째, 설정온도를 일정히 하고 온도편차를 달리 주었을 때
- 셋째, 환기에 따른 저장고내 환경 변화

저온저장고의 환경에 대한 실험은 2001년 6월에서 8월 사이에 집중적으로 실시되었다. 계절적 요인으로 감귤을 구할 수 없어서 감귤이 입고된 상태에서의 실험은 수행할 수 없었다. 이러한 문제점은 컴퓨터 시뮬레이션으로 보완하여 뒤에 그 결과를 제시하였다.

실험을 행한 날마다 외기 온도는 그 날의 환경에 따라 변하지만 저온저장고내의 온도 환경은 외기 환경에 관계없이 거의 일정한 경향을 보이기 때문에 실험을 행한 기간동안의 대표적인 외기온도의 일변화(2001년 6월 25일)를 Fig. 4-1에 제시하였다. 그림에서 살펴보면 오후 2시경 31℃까지 상승하고 새벽 4시경 18℃까지 하강하는 전형적인 여름 기온의 특징을 보이고 있다. 이후의 모든 실험은 환기 실험을 제외하고는 실험조건이 설정되면 저온저장고가 밀폐된 상태에서 24시간 진행되어 각종 데이터를 저장하였다.

1) 설정온도에 따른 온도분포

설정온도에 따른 저온저장고 내의 에너지 성능 및 환경을 분석하기 위하여 저장고내의 환경 조성을 습도는 85%(±5%)로 유지하고, 냉각기 1대만을 가동하면서 냉각기의 냉각핀에 영겨붙은 서리와 얼음알갱이를 녹이기 위한 제상 기능은 하루4번(6시간마다) 각각 20분 동안 이루어지도록 콘트롤 박스를 설정하였다.

Fig. 4-2는 온도편차를 ±2℃로 일정하게 한 상태에서 설정온도를 1℃(Fig 4-2(a)), 3℃(Fig 4-2(b)), 5℃(Fig 4-2(c))로 하였을 때 저온저장고의 중앙 상부(채널 8, 채널 20, 채널 32, 채널 44)를 따라 조사된 온도분포를 측정 경과 시간에 따라 제시한 것이다.

그림에서 살펴보면 설정된 온도와 온도편차에서 모두 제어가 잘 되고 있는 것을 알 수 있으며, 다만 6시간마다 냉각기가 제상되도록 설정되어 있기 때문에 하루 중 4번 제상을 위한 히터의 가동으로 온도가 상승하는 것을 알 수 있다. 제시된 채널에서의 온도분포를 살펴보면 냉각기에 가장 가까운 곳(채널 32)에서나 가장

먼 곳(채널 8)이나 거의 온도차가 나지 않아 저온저장고 전체에 균등한 온도 분포를 보이고 있음을 예측할 수 있다.

또한 저온저장고의 설정온도가 높을수록 설정된 온도에 다다른 시간이 빠르며 대체적으로 온도 진동의 주기도 짧아져 저장에 효율적임을 Fig. 4-2에서 알 수 있다.

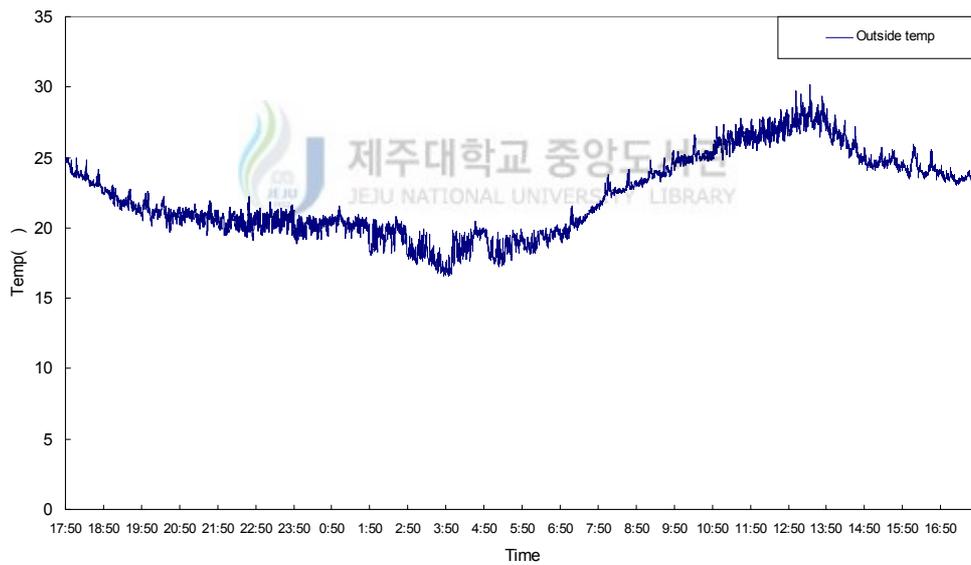
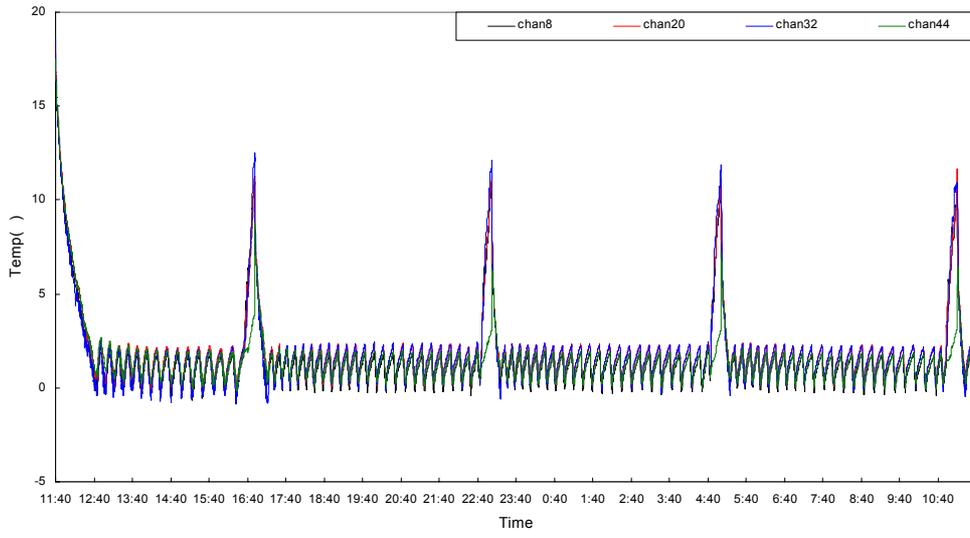
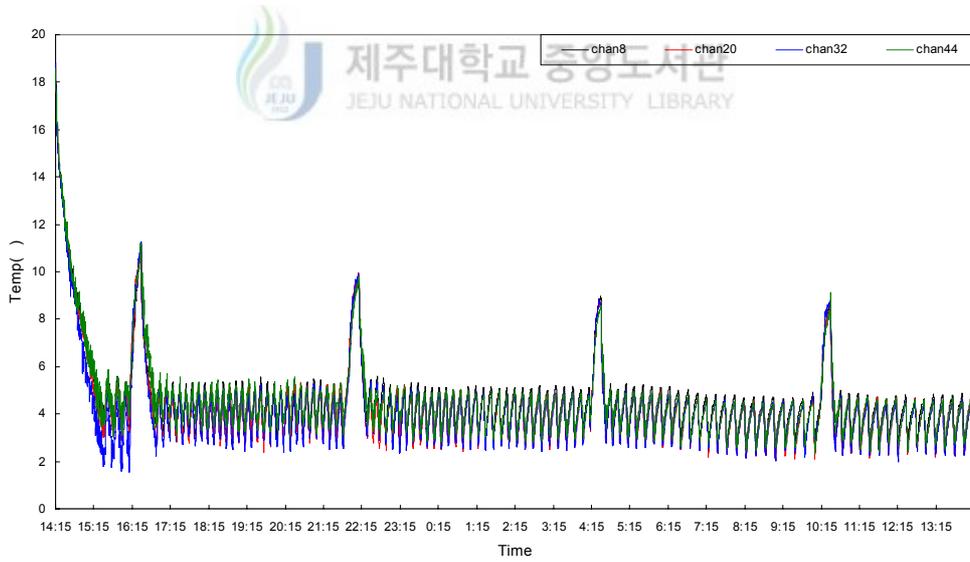


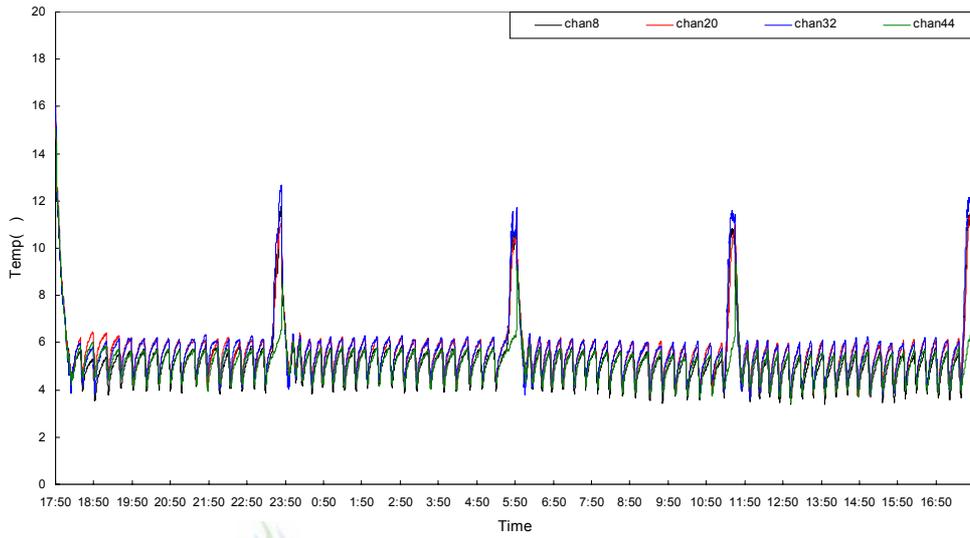
Fig. 4-1 Variations of outside temperature (June 25, 2001)



(a) Setting temperature=1°C



(b) Setting temperature=3°C



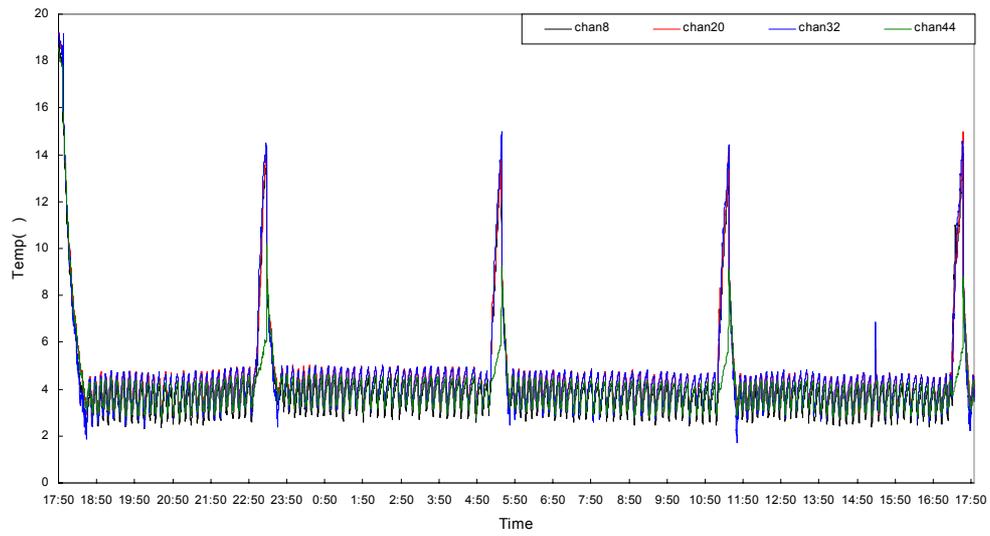
(c) Setting temperature=5°C
 제주대학교 중앙도서관
 JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 4-2 Temperature variations with setting temperatures
 for temperature deviation= $\pm 2^{\circ}\text{C}$

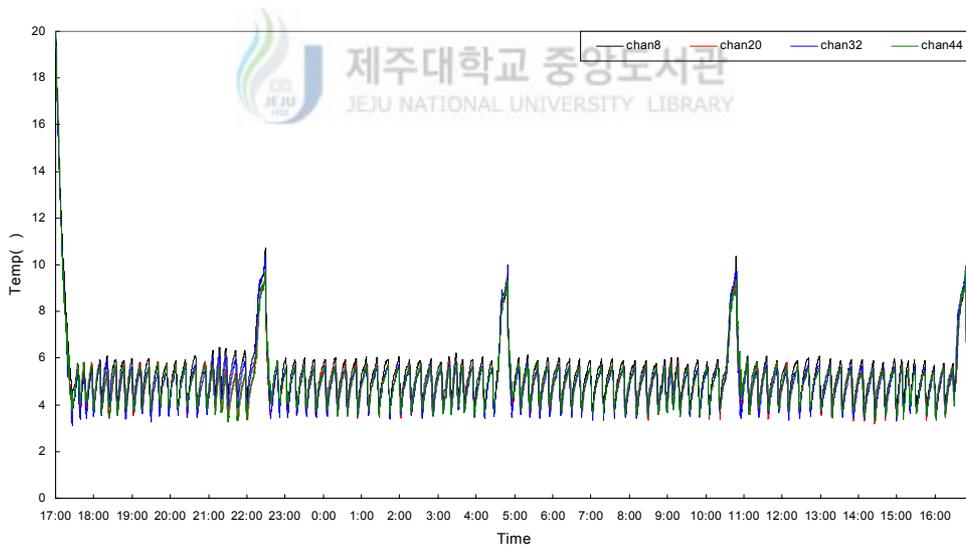
2) 온도편차 변화에 따른 온도분포

저온저장고 내에 작물을 저장할 때 설정온도 외에 온도편차를 적절히 설정하지 않으면 냉동기 작동주기가 짧아지고 냉동기의 잦은 on/off 기능으로 기계의 수명 및 성능이 떨어지게 된다. 그로 인해 저장기능이 약해져 작물의 저장상태가 불량해져 부패가 올 수 있다. 따라서 냉동기의 잦은 on/off를 방지하고 최적의 작물 저장상태를 유지하기 위해서는 저장온도 뿐 아니라 온도편차도 적절히 설정해주어야 한다.

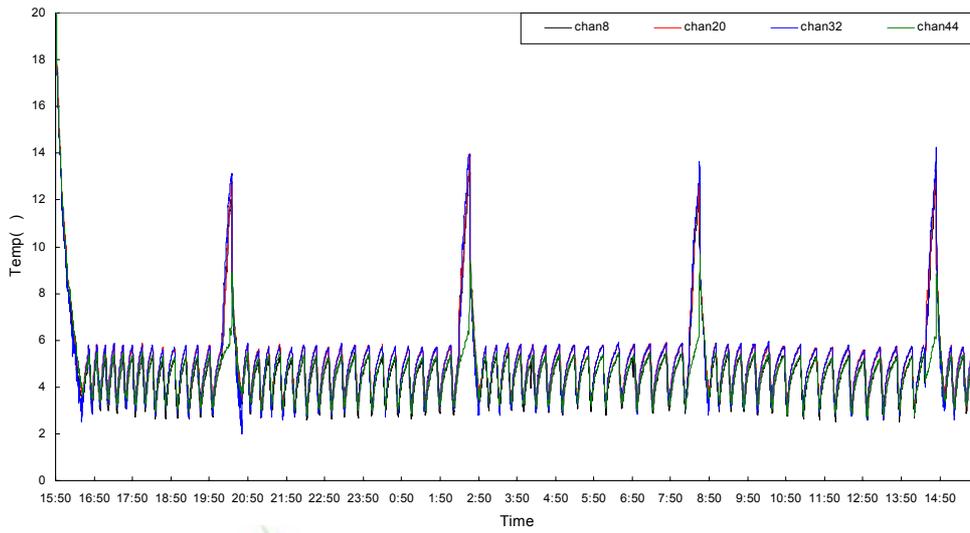
Fig. 4-3은 설정온도를 4℃로 일정하게 한 상태에서 온도편차를 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ (Fig 4-3(a)), $\pm 2^{\circ}\text{C}$ (Fig 4-3(b)), $\pm 3^{\circ}\text{C}$ (Fig 4-3(c))로 변화시켰을 때 채널 8, 채널 20, 채널 32, 채널 44(저온저장고의 중앙 상부)에서의 시간에 따른 온도 변화를 제시한 것이다. 그림에서 살펴보면 1일 4번의 냉각기 제상을 위한 히터의 가동으로 실내 온도가 급격히 상승하는 것을 제외하고는 각 실험마다 설정된 저장온도와 온도편차로 제어가 되고 있음을 알 수 있다. 또한 온도편차를 작게 설정할수록 온도진동의 주기가 짧아 냉각기의 on/off 횟수가 증가함을 알 수 있다. 이는 냉각기의 기계적 손실을 일으킬 수 있기 때문에 전술한 바와 마찬가지로 각 저장물의 특성을 손상시키지 않으면서 냉각기도 보호할 수 있는 적절한 온도편차에 의한 저온저장이 필요하다.



(a) Temperature deviation= $\pm 1^{\circ}\text{C}$



(b) Temperature deviation= $\pm 2^{\circ}\text{C}$



(c) Temperature deviation=±3℃
 JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 4-3 Temperature variations with temperature deviations
 for setting temperature=4℃

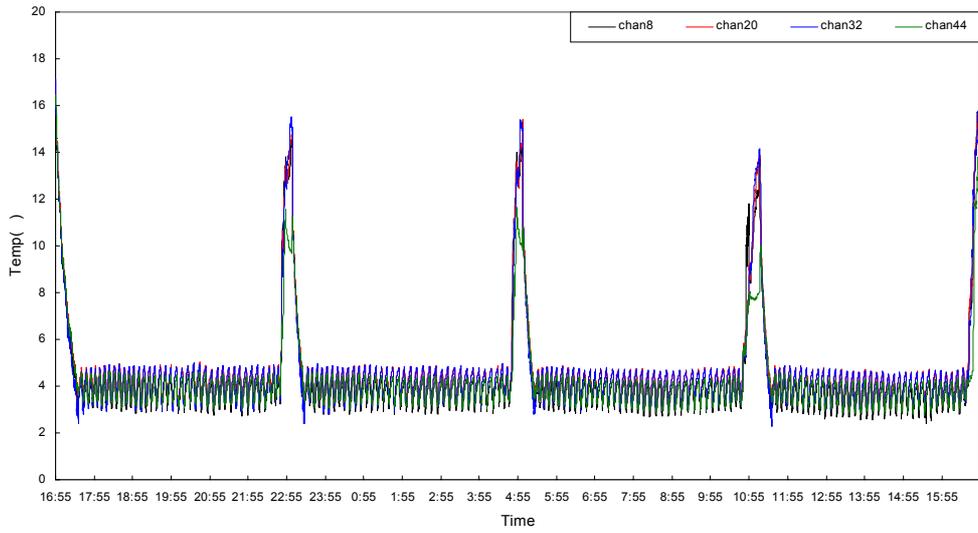
3) 환기에 따른 온도분포

저온저장고에 작물을 적재하여 보관시에 냉기가 작물 전체에 골고루 분산되어 공급되어야 저장 당시의 상태를 보존할 수 있다. 또한 작물의 호흡에 의한 호흡열로 인해 공기의 성분이 바뀌고 그에 따른 온도 또한 상승하게 되는데 송풍기에 의해 공기를 강제 순환시킴으로써 이러한 문제점을 줄일 수 있다. 따라서 작물 전체에 골고루 신선한 공기를 공급하고 오염된 공기를 배기시킬 수 있는 덕트시설이 필요하다.

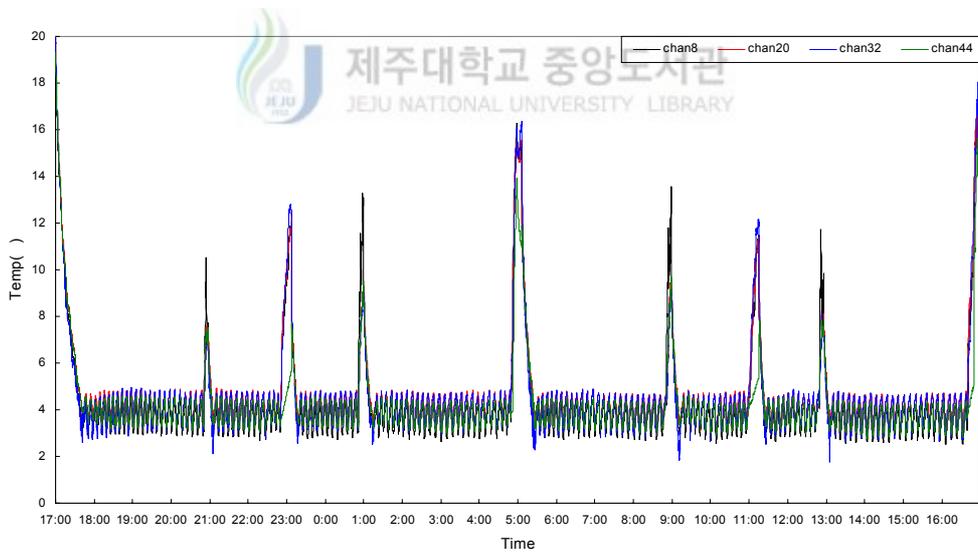
본 실험에서는 전술한 바와 같이 계절적 요인으로 감귤의 집하된 상태에서 실험하지 못하고 단지 비어 있는 저온저장고 내의 환기시간 및 환기횟수에 따른 전력량 및 온도분포를 측정하였다. 이를 위해 설정온도 4℃(온도편차 ±1℃), 6시간마다(하루 4회) 20분간 제상이 이루어지도록 콘트롤 박스를 설정하고 냉각기는 저장고 내의 각 1대씩만 가동시켰다.

Fig. 4-4는 설정온도 4℃, 온도편차가 ±1℃일 때 환기시간에 따른 최고 높이의 가운데 채널(채널 8, 채널 20, 채널 32, 채널 44)에서의 온도분포를 나타낸 것으로 앞에서의 결과와 마찬가지로 각 채널에서의 온도차가 거의 나타나지 않아 저온저장고의 온도가 거의 균일할 것으로 예측된다. 다만 송풍기를 하루에 4번 가동시켰을 때는 제상시간과 거의 동일시간대에 환기가 이루어져 다른 변수를 설정했을 때와 마찬가지로 1일 4번의 피크가 형성(Fig. 4-4(a)와 Fig. 4-4(c))되고 있으나 하루에 6번 환기시켰을 경우(Fig. 4-4(b)와 Fig. 4-4(d))는 제상시간과 환기시간이 불일치로 다른 형상의 온도분포를 보여 8개의 피크가 나타남을 알 수 있다.

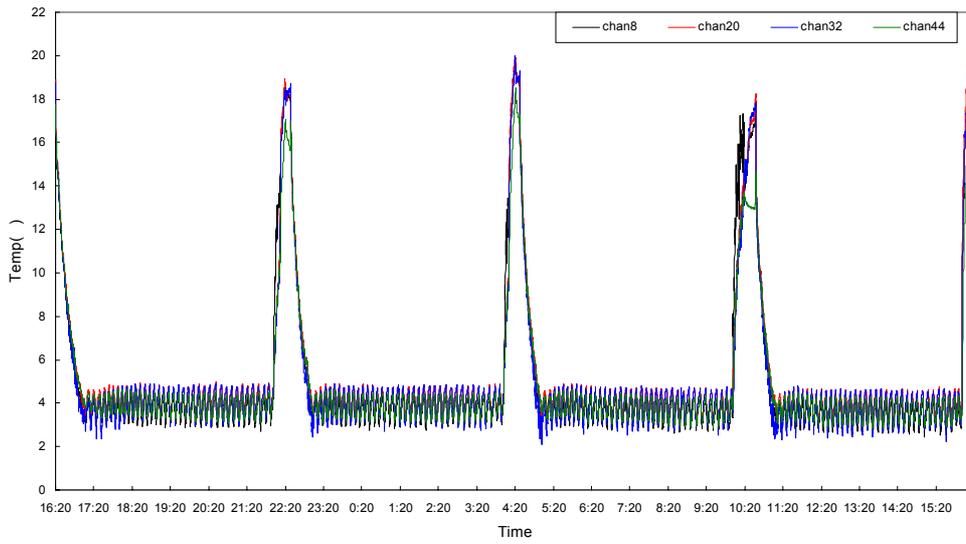
또한 그림에서 살펴보면 환기에 의한 온도분포상의 별다른 차이점은 찾을 수 없으나 같은 설정온도(4℃)와 같은 온도편차(±1℃)를 주었으나 환기 유무를 시행한 결과(Fig. 4-3(a)와 Fig. 4-4(a)(c))에서 살펴보면 환기에 의한 영향으로 온도 점프 시간이 훨씬 길게 진행되는 것을 알 수 있다. 이러한 영향이 이후의 온도에 거의 영향을 미치지 않는 것은 실험시 주어진 열부하에 비해 냉동기의 용량이 충분하기 때문이다.



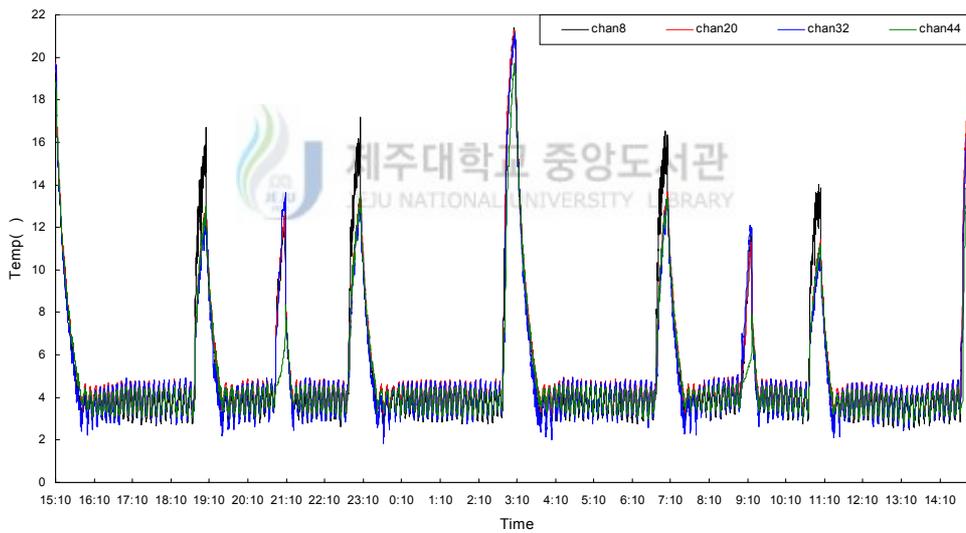
(a) Four times ventilation a day (10 minutes operation each time)



(b) Six times ventilation a day (10 minutes operation each time)



(c) Four times ventilation a day (20 minutes operation each time)



(d) Six times ventilation a day (20 minutes operation each time)

Fig. 4-4 Temperature variations with ventilation time for setting temperature=4°C and temperature deviation=±1°C

4) 제어변수에 따른 전력소비량

저온저장고의 경제적인 운영을 위해서는 저장 작물을 보호하면서 가장 적은 전력소비량에서 운영하여야 한다. Table 4-1은 본 연구에서 실행한 각 실험에서 설정온도, 온도편차 및 환기 변수에 따른 시설된 저온저장고의 1일 전력소비량을 나타낸 것이다.

우선 설정온도(온도편차 $\pm 2^{\circ}\text{C}$)에 따른 전력소모량을 살펴보면 설정온도가 1°C 일 경우 59kW, 2°C 일 경우는 58kW, 3°C 일 경우는 57kW로 비슷한 값의 전력량이 측정되고 4°C 일 경우는 49kW, 5°C 일 경우는 41kW의 전력량이 감소하였다. 또한 설정온도가 8°C 일 경우는 32kW, 9°C 일 경우는 27kW가 측정되어 전력량 소모가 크게 감소하여 설정온도가 높을수록 경제적인임을 알 수 있다.

설정온도가 일정(4°C)할 때 온도편차에 따른 전력소모량은 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 일 경우는 53kW, $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 일 경우는 49kW, $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 일 경우는 41kW의 전력량을 나타내어 온도편차를 크게 할수록 경제적인임을 알 수 있다.

또한 환기시간에 따른 전력소비량을 살펴보기 위한 실험(설정온도 4°C , 온도편차 $\pm 1^{\circ}\text{C}$)에서는 환기시에 전력소모를 줄이기 위해 급기·배기를 동시에 하였는데 1일 6시간마다(하루에 4번) 10분씩 가동시에는 54kW, 1일 4시간마다(하루에 6번) 10분씩 가동할 때는 65kW, 1일 6시간마다(하루에 4번) 20분씩 가동시에는 69kW, 1일 4시간마다(하루에 6번) 20분씩 가동시에는 77kW의 전력소모량이 측정되어 환기시간이 많고 환기 횟수가 많을수록 전력소비량이 많음을 알 수 있다. 같은 조건에서 환기를 시키지 않은 경우와 비교해보면(설정온도 4°C , 온도편차 $\pm 1^{\circ}\text{C}$) 전력소모량이 53kW로 급기·배기를 10분씩 4번 환기시켰을 때와 그다지 많은 차이가 없어 시설비의 부담이 없으면 송풍기로 환기를 시켜 저장고 내의 공기를 신선하게 유지시킬 수 있을 것이다. 이에 대한 명확한 결론은 보다 많은 실험이 요구된다.

이상의 결과로부터 실험기간의 날씨가 일정한 외기온도를 유지하는 날씨가 아닌 장마와 무더위가 반복되는 날씨가 계속되어 24시간의 데이터 값으로 설정한 제어변수에 따른 정확한 전력량을 분석할 수는 없지만 저온저장고의 운영은 설정온도

와 온도편차를 크게 취할수록 경제적인임을 알 수 있다. 그러나 이러한 경제성은 저장 기간에 따른 저장작물의 저장성을 떨어뜨리지 않는 범위여야 할 것이다.

Table 4-1. Power consumption for various experimental conditions

Parameter	Experimental condition	Power consumption
Setting temperature	1°C (Deviation: ±2°C)	59kW
	2°C (Deviation: ±2°C)	58kW
	3°C (Deviation: ±2°C)	57kW
	4°C (Deviation: ±2°C)	49kW
	5°C (Deviation: ±2°C)	41kW
	6°C (Deviation: ±2°C)	40kW
	7°C (Deviation: ±2°C)	33kW
	8°C (Deviation: ±2°C)	32kW
	9°C (Deviation: ±2°C)	27kW
Temperature deviation	±1°C (Temperature: 4°C)	53kW
	±2°C (Temperature: 4°C)	49kW
	±3°C (Temperature: 4°C)	41kW
Ventilation time (Setting temp of all conditions : 4°C±1°C)	Every six hour a day (four times a day) (10 minutes operation each time)	54kW
	Every four hour a day (six times a day) (10 minutes operation each time)	65kW
	Every six hour a day (four times a day) (20 minutes operation each time)	69kW
	Every four hour a day (six times a day) (20 minutes operation each time)	77kW

2. 시뮬레이션 결과

1) 시뮬레이션 모델 검증

저온저장고에 대한 시뮬레이션 모델이 타당성을 검증하기 위하여 설정온도가 4℃(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. 4-5와 Fig. 4-6은 온도를 4℃(온도편차 $\pm 2^\circ\text{C}$)로 하여 저온저장고를 가동시키고 정상상태에 도달하였을 때(12시간 경과 후)의 저온저장고 내부의 등온도선을 나타낸 것이다. Fig 4-5는 $x=0.85\text{m}$ 에서의 저온저장고의 $y-z$ 단면에서의 등온선을 나타내고 Fig 4-6은 $z=1\text{m}$ 에서의 $x-y$ 단면에서의 등온선을 나타내는데 그림에서 살펴보면 최고온도와 최저온도의 편차가 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 범위 내에서 분포함을 알 수 있다.

같은 조건(설정온도 4℃)일 때 저온저장고의 각종 환경을 입력데이터로 취해 저장고의 임의의 지점에서 계산된 시뮬레이션 결과는 Fig. 4-7($x=0.85\text{m}$, 4m)과 Fig. 4-8($z=1\text{m}$, 2.8m)에 나타나 있다. 도시된 단면에서의 온도 편차는 무시할 수 있어서 전 영역에 걸쳐 4℃로 분포됨을 알 수 있어서 실험결과와 비교할 때 본 시뮬레이션 방법이 타당함을 알 수 있다.

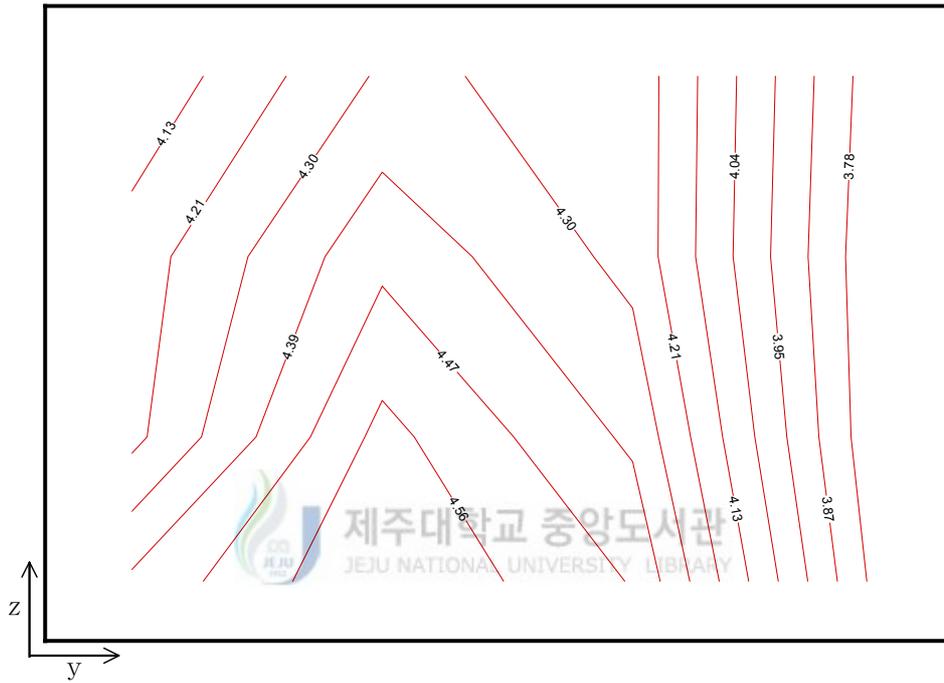


Fig. 4-5 Iso-therm lines on y-z plane ($x=0.85m$)

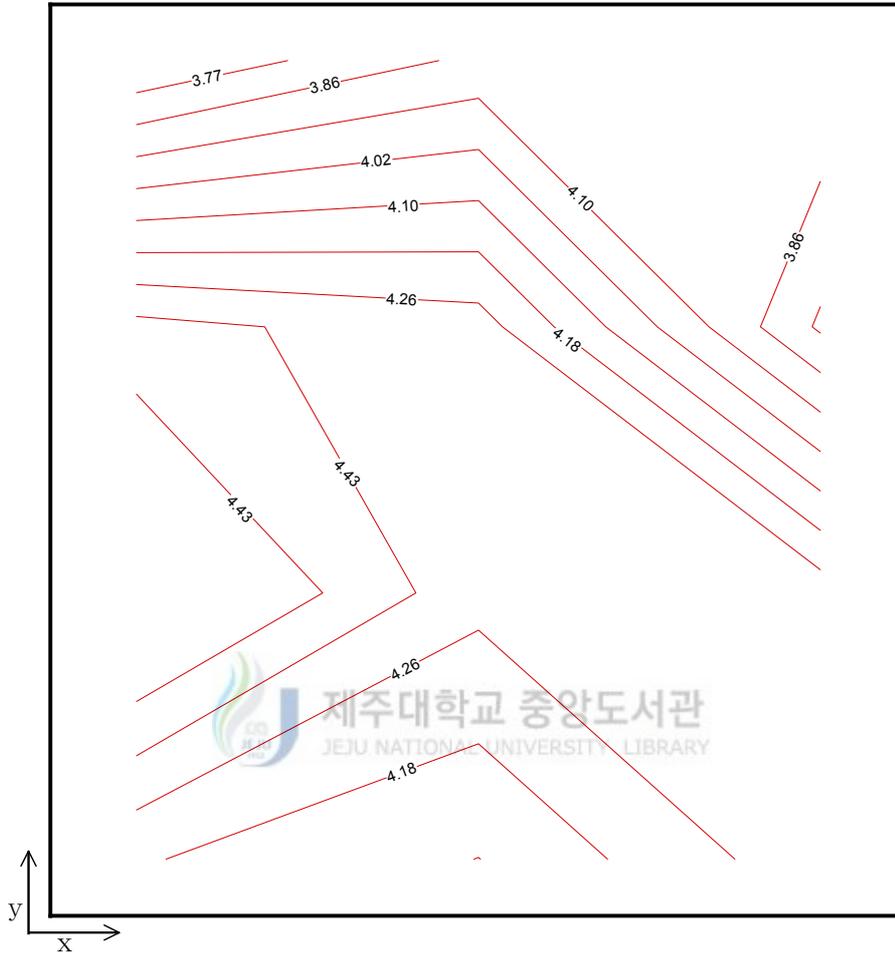


Fig. 4-6 Iso-therm lines on x-y plane ($z=1\text{m}$)

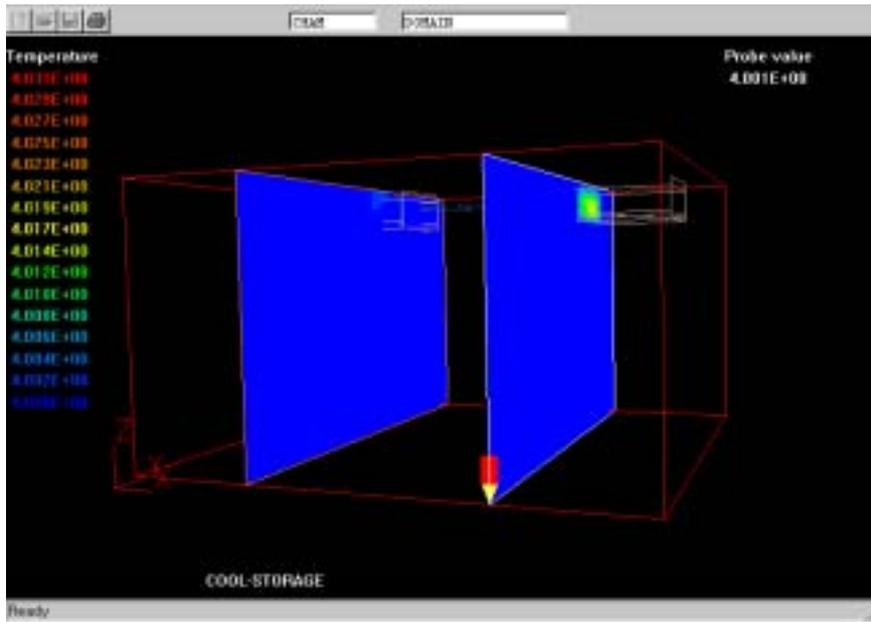


Fig. 4-7 Temperature distributions on y-z plane

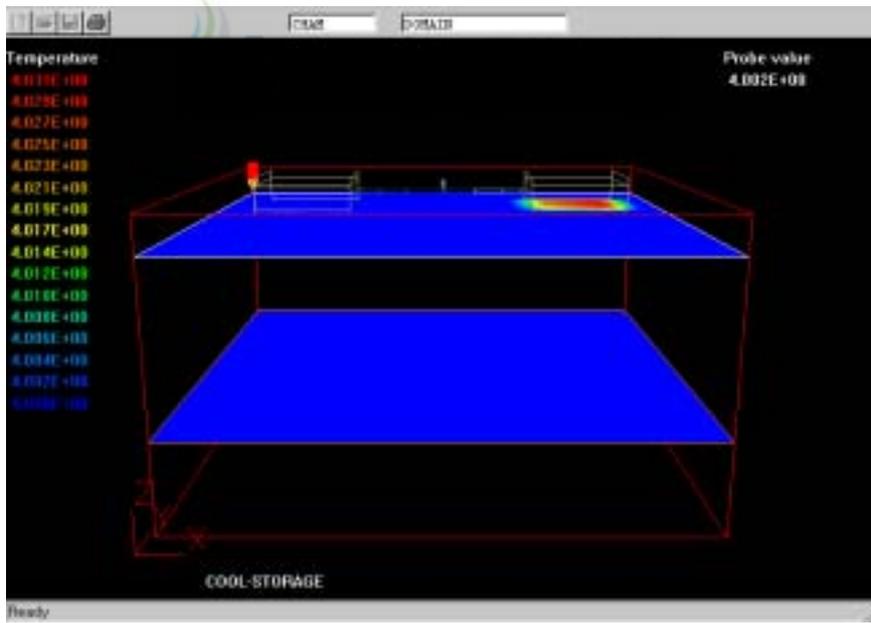


Fig. 4-8 Temperature distributions on x-y plane

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 4-3과 같이 설정하였다.

감귤류를 적재한 저온저장고는 정상상태이며 경계조건을 입구에서 4℃, 냉각팬에 의한 공기의 유입량은 실험조건과 동일하게 56m³/min으로 하였다. 또한 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.

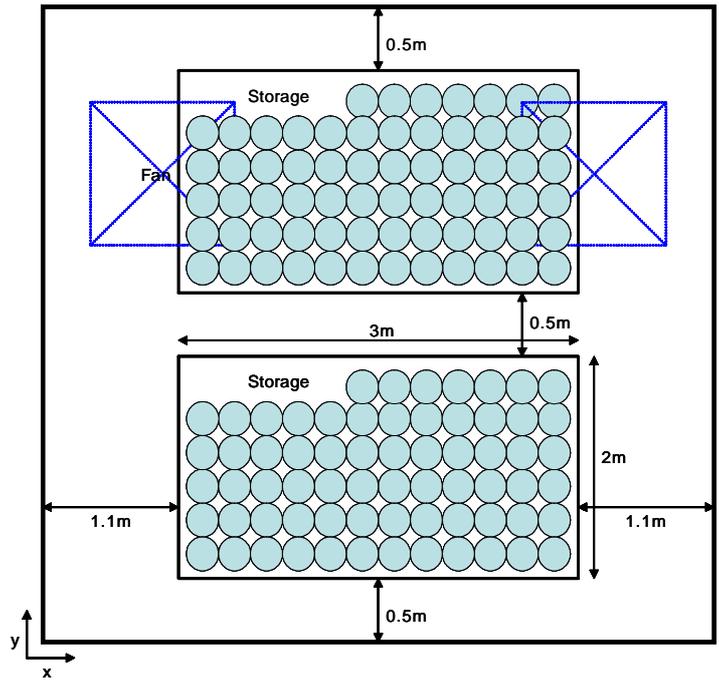
따라서 내부 찬공기와의 접촉면적은 적재물 간의 간격이 0.5m인 경우는 42m², 1m인 경우는 45m²로 간격이 0.5m인 경우의 공기와의 접촉면적은 1m인 경우의 93%에 해당한다.

Fig. 4-9와 Fig. 4-10은 적재물의 사이의 간격이 각각 0.5m와 1m인 경우의 시뮬레이션 모델 설정시 감귤의 적재에 따른 적재물의 위치와 크기를 나타낸 것이다.

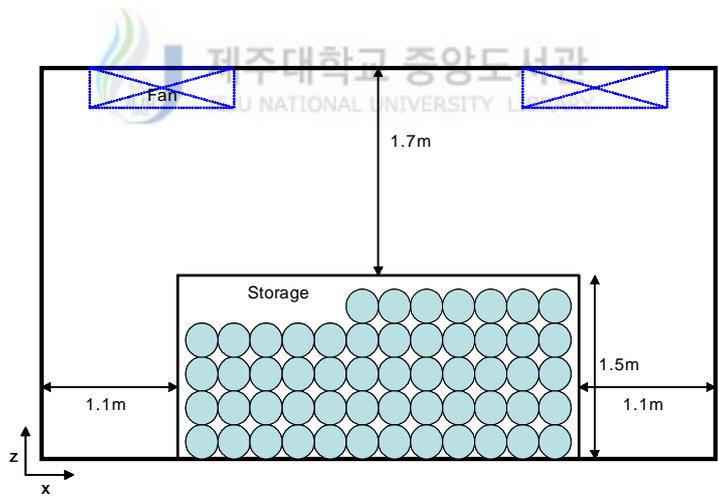


Table 4-3 Geometry parameters of simulation model

Cooler type	Gap size	Storage size(20% of total capacity)				Difference of gap
		W(m)	L(m)	H(m)	Number	
KUC-M030	1m	3	1.5	2	2	+0.5m
KUC-M030	0.5m	3	2	1.5	2	

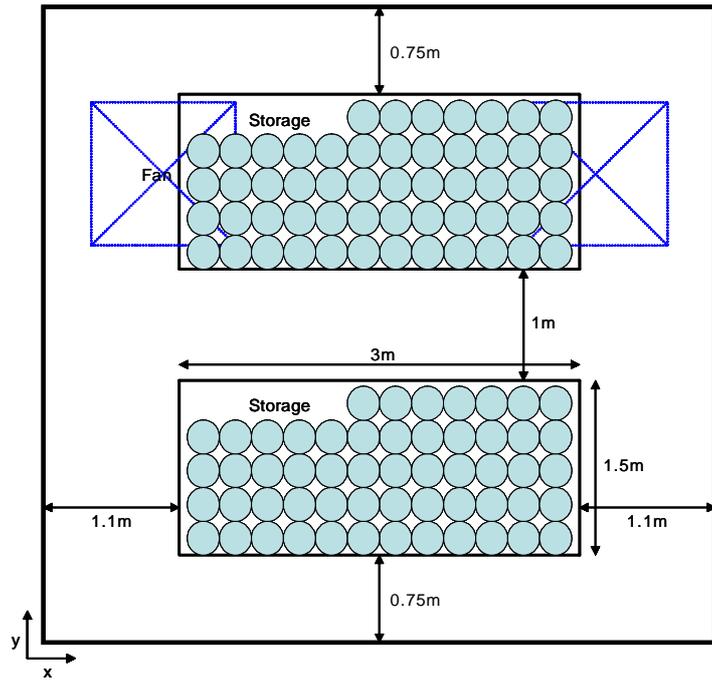


(a) x-y plane

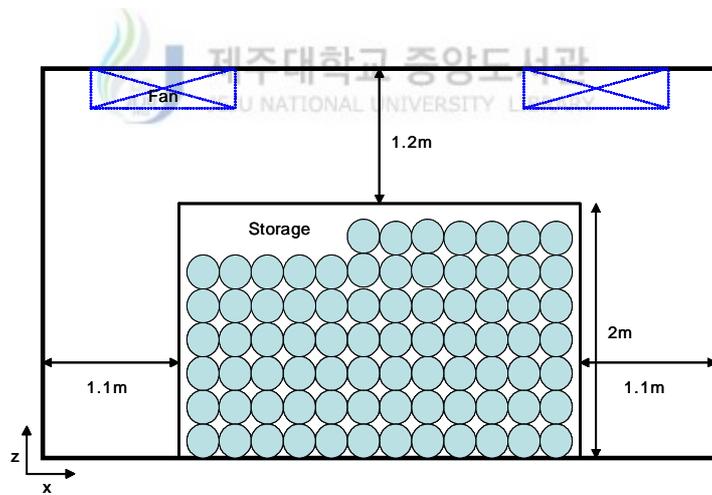


(b) x-z plane

Fig. 4-9 Schematics of simulation model for gap=0.5m



(a) x-y plane



(b) x-z plane

Fig. 4-10 Schematics of simulation model for gap=1m

3) 시뮬레이션 결과 및 검토

감귤이 저장된 저온저장고에 대한 시뮬레이션을 수행하는데 있어서 고려해야 할 사항은 감귤에 의한 발생열이다. 이를 위해 본 연구에서는 감귤에 의한 열원은 각각 별도로 고려하지 않고 적재된 상태로 고려하여 각 적재물의 총 열원을 $100\text{W}/\text{m}^3$ 으로 간주하였다.⁷⁾ 또한 실험에서와 마찬가지로 냉각기는 1대만 가동시켰다.

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

적재물 간의 간격이 0.5m인 경우의 계산결과를 Fig 4-11~Fig. 4-14에 제시하였다. 여기서 Fig. 4-11($x=1.4, 4\text{m}$)과 Fig 4-12($z=1\text{m}, 2.8\text{m}$)는 저장고내의 공기유동 분포를 나타내고, Fig. 4-13($x=1.4, 4\text{m}$)과 4-14($z=1\text{m}, 2.8\text{m}$)는 같은 위치에서의 온도분포를 나타낸다. 이때 공기유동 속도는 최대 $4.66\text{m}/\text{s}$ 에서 최소 $0.006\text{m}/\text{s}$ 의 분포를 이루고 있으며 온도분포는 최대 4.094°C 에서 최소 4°C 를 나타내고 있음을 알 수 있다.

또한 적재물 간의 간격이 1m인 저온저장고내의 유속 및 온도분포의 계산 결과는 각각 Fig. 4-15($x=1.4, 4\text{m}$)와 4-16($z=1\text{m}, 2.8\text{m}$), 그리고 Fig. 4-17($x=1.4, 4\text{m}$)과 Fig. 4-18($z=1\text{m}, 2.8\text{m}$)과 같다. 그림에서와 같이 공기유동 속도는 최대 $4.69\text{m}/\text{s}$ 에서 최소 0에 가까운 분포를 보이고 있으며 온도분포는 최대 4.085°C 에서 최소 4°C 이다.

저온저장고 내에 적재물이 있는 경우와 적재물이 없는 경우의 온도분포를 비교할 때(Fig. 4-7, Fig 4-8) 저장물의 호흡열로 인한 적재물 표면에서 뚜렷한 온도상승을 보여준다. 본 연구에서는 감귤간 공극률을 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 이동

함을 알 수 있다. 이러한 공기 유동은 저장물과의 접촉에 의해 강제대류에 의한 열전달을 촉진시키게 된다. 따라서 일반적으로는 공기와의 접촉면적이 넓을수록 저장물의 냉각 효과를 증대시켜 감귤의 저장에 좋은 결과를 초래할 것이다. Fig. 4-13(Gap=0.5m)과 Fig. 4-17(Gap=1m)에서 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 무시하였기 때문이다.

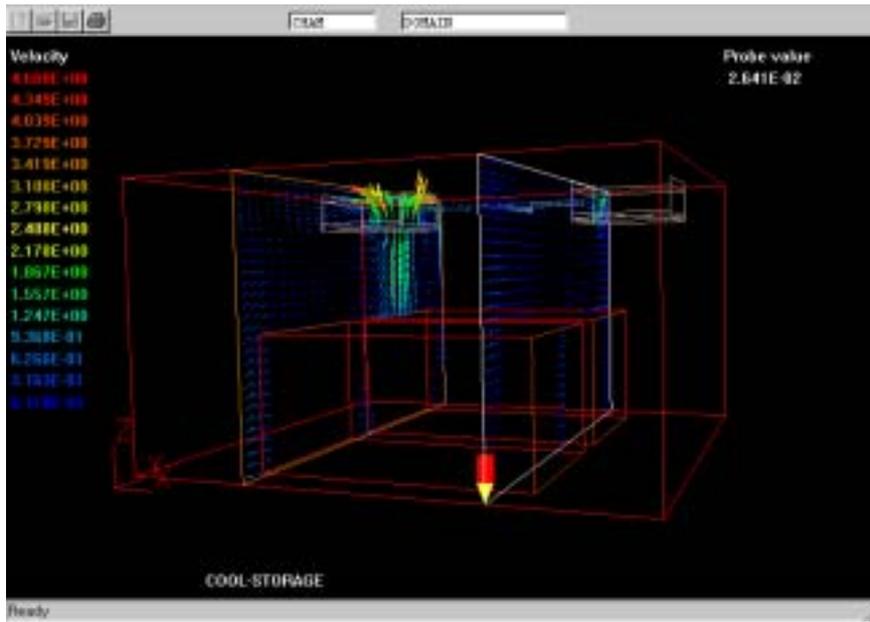


Fig. 4-11 Velocity distributions on y-z plane for gap=0.5m (x=1.4m, 4m)

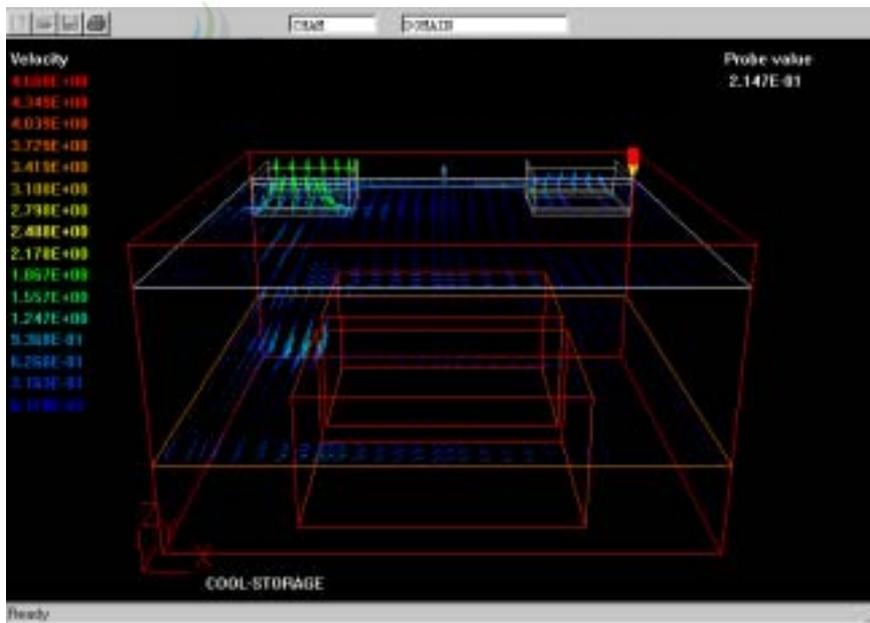


Fig. 4-12 Velocity distributions on x-y plane for gap=0.5m (z=1m, 2.8m)

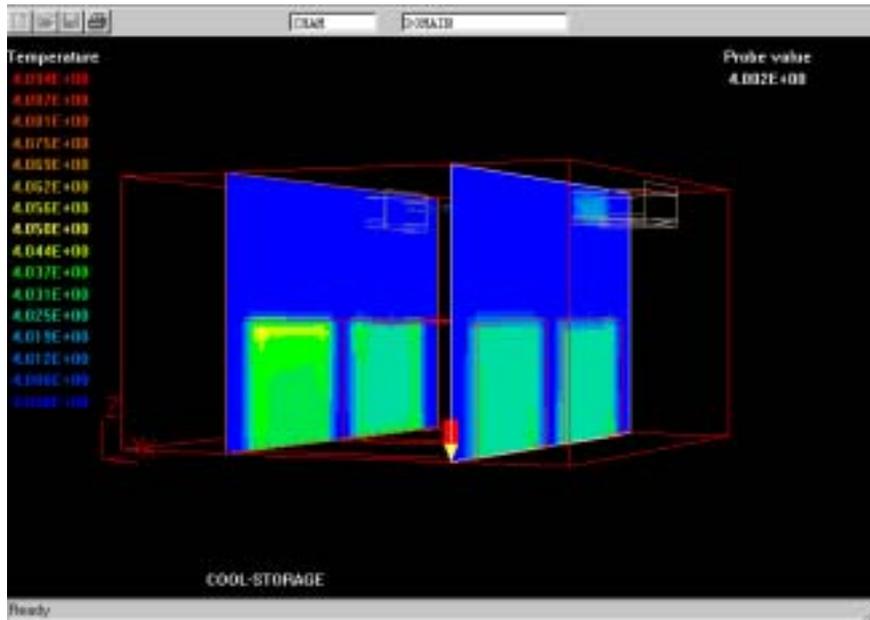


Fig. 4-13 Temperature distributions on y-z plane for gap=0.5m (x=1.4m, 4m)

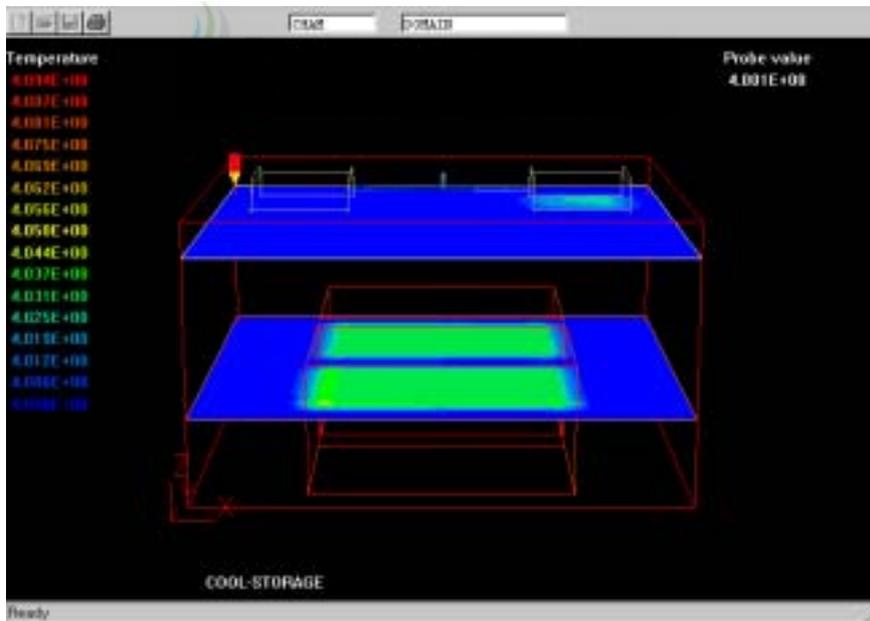


Fig. 4-14 Temperature distributions on x-y plane for gap=0.5m (z=1m, 2.8m)

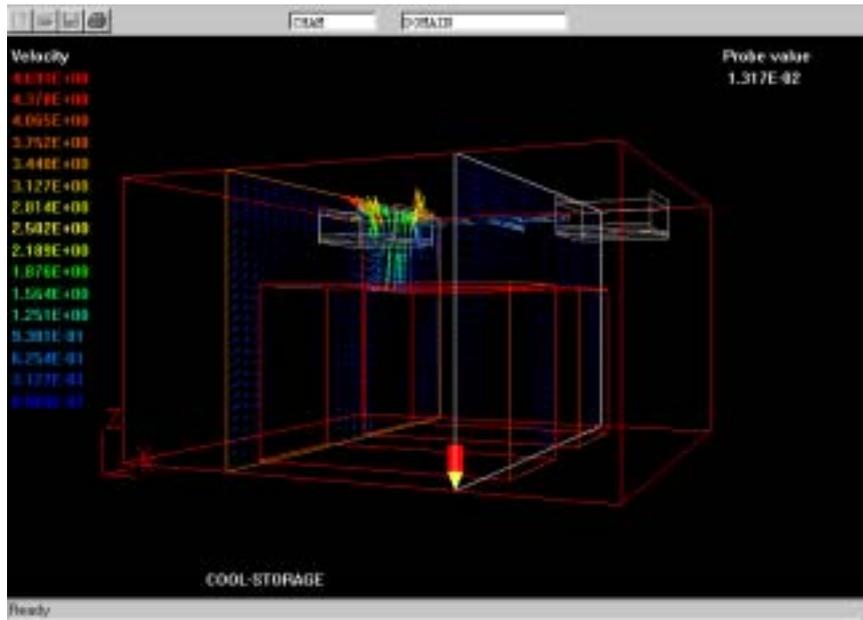


Fig. 4-15 Velocity distributions on y-z plane for gap=1m (x=1.4m, 4m)

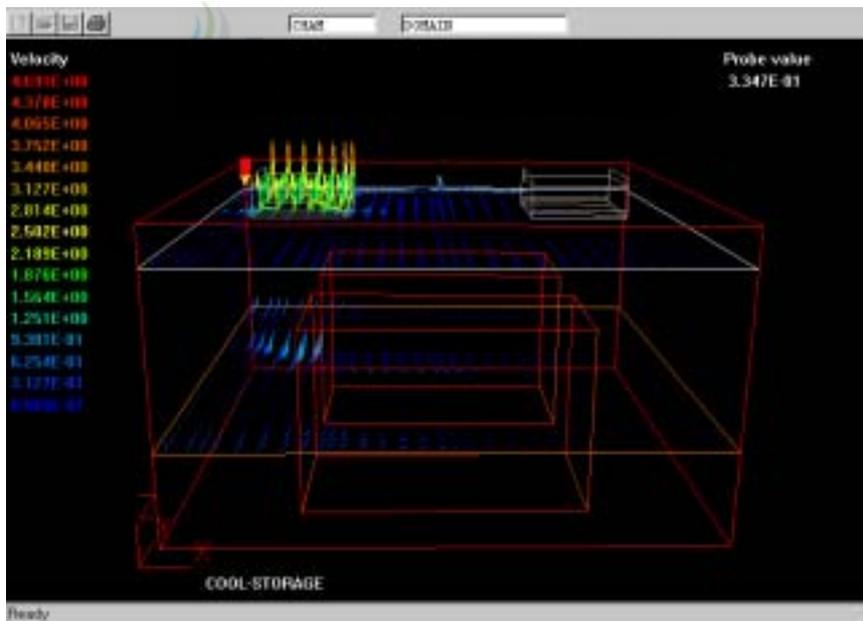


Fig. 4-16 Velocity distributions on x-y plane for gap=1m (z=1m, 2.8m)

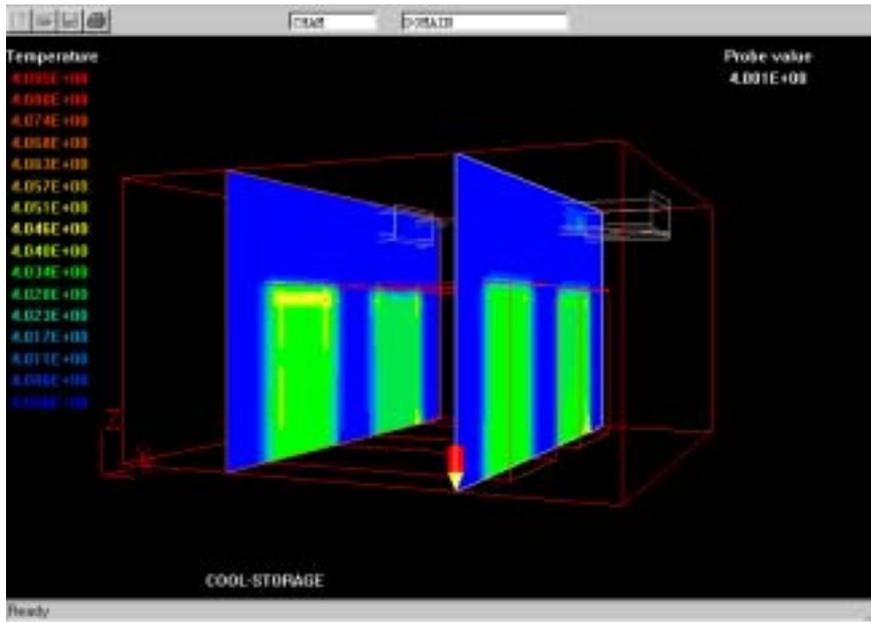


Fig. 4-17 Temperature distributions on y-z plane for gap=1m (x=1.4m, 4m)

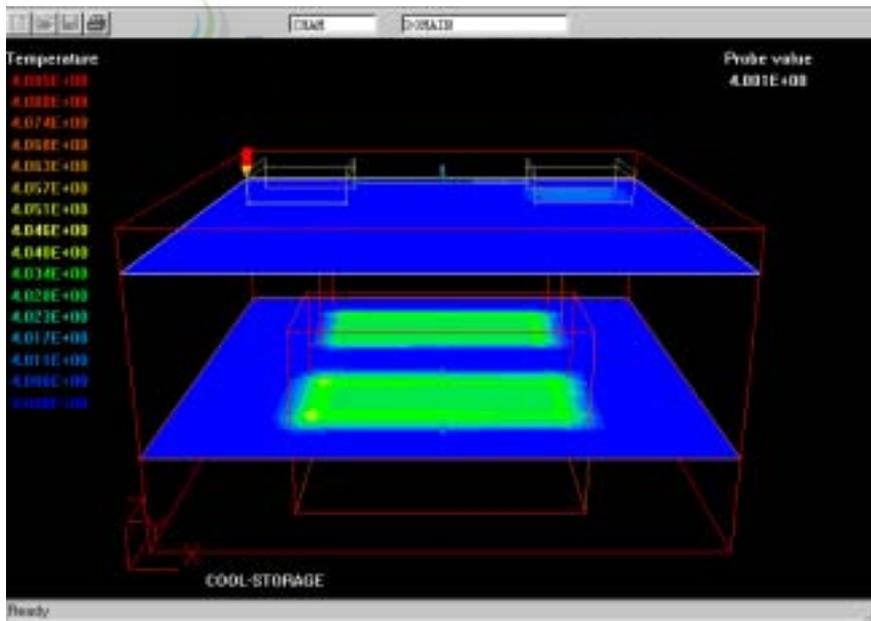


Fig. 4-18 Temperature distributions on x-y plane for gap=1m (z=1m, 2.8m)

V. 요약 및 결론

저온저장고의 설정온도, 온도편차 등의 제어변수에 따른 저온저장고 내의 온도 분포를 분석하고 그에 따른 전력소모량을 측정하였다. 또한 PHOENICS 팩키지를 이용하여 저온저장고의 3차원 시뮬레이션을 통한 수치해석을 수행하였으며 적재물 사이의 간격에 따른 공기유동 및 온도분포 특성을 연구하였다. 본 연구의 범위내에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 온도편차를 일정하게 하고 설정온도를 변화시키며 소요전력량을 측정했을 때 설정온도가 높을수록 경제적이다. 작물의 저장기간과 부패를 고려하여 가급적 설정온도를 높일 필요가 있다.

둘째, 설정온도를 고정시키고 온도편차를 변화시키며 소요전력량을 측정했을 때 온도편차가 클수록 전력소모량은 적어 경제적이기 때문에 작물의 저장상태를 유지시키면서 가급적 온도편차를 크게 설정할 필요가 있다.

셋째, 저장물의 호흡에 의한 공기성분 변화와 호흡열에 의한 온도 상승으로 인해 저장상태가 나빠지는 것을 방지하기 위한 환기 실험에서는 1일 6시간마다 10분씩 환기시키는 경우에는 환기를 전혀 하지 않은 경우와 비교하여 소요전력량이 많지 않았다.

넷째, 저장고에 저장물을 적재할 때에는 공기와의 접촉면적을 크게할 수 있는 형태로 적재하는 것이 저장물 사이의 공기유동을 통한 열제거와 저장물의 온도상승을 억제하여 저장성을 높일 수 있다.

참고문헌

- 1) 고정삼, 강영주, 1998, 감귤가공, 제주대학교 출판부
- 2) 농협지역본부, 2000, 감귤유통처리분석
- 3) 박병원, 1998, 과수산업육성정책, 21세기를 향한 제주감귤산업의 새로운 방향 모색을 위한 심포지엄, 제주도의회
- 4) 고정삼, 현명택, 최동호, 박영하, 김성학, 송은영, 2001, 제주형 감귤저장 기술개발과 농가보급형 저온저장고 모델설정, 감귤류 수입관리 운영위원회, 제주도
- 5) 강동연, 김성만, 윤종호, 이의준, 박영하, 현명택, 2000, 다수의 냉동시스템에 의한 저온저장고의 에너지 성능평가, 제주대학교 산업기술연구소 논문집, vol. 11, no. 1, pp. 15-21.
- 6) PHOENICS 3.3 Documentation, 2000, Concentration, Heat & Momentum Ltd.
- 7) 조병관, 1998, $k-\epsilon$ 난류모델을 이용한 저온저장고 내부의 온도분포 및 공기유동에 관한 연구, 서울대학교 석사학위 논문

감사의 글

2년의 대학원 생활을 이 논문으로 마감하려 합니다.

하고싶은 것도 많았지만 진정으로 노력하지 않았기에 많은 아쉬움이 남습니다. 저는 항상 지금 이 시기가 아니면 할 수 없는 것들이 무엇인가 고민했고 그래서 여러 사람들의 생각을 공유하기에 힘썼습니다. 같은 문제에 대하여 여러 가지 생각을 교환하면서 지적만족 뿐만 아니라 인간적인 친밀감도 느낄 수 있었습니다.

논문을 준비하면서 부족함이 많은 저를 더 성장할 수 있는 기회를 마련해주시고 다가오는 미래에 대한 차분한 계획을 세울 수 있도록 해주신 현명택 교수님, 논문 심사를 통해 좀 더 나은 논문이 되도록 세심한 검토와 조언을 주신 조경호 교수님, 임중환 교수님께 감사드립니다. 또한 대학 4년과 대학원 과정에 있어서 전문지식과 삶의 지혜를 가르쳐 주신 권기린 교수님, 김귀식 교수님, 허종철 교수님, 정동원 교수님, 최경현 교수님, 강철웅 교수님 그리고 논문을 위한 실험을 도와주신 건축공학과 최동호 교수님께도 감사의 마음 전합니다. 언제나 어느 위치에 서있든 교수님들의 가르침을 잊지 않겠습니다.

대학원 생활동안 열전달 & 열시스템설계 실험실에서 작은 일부터 큰 일까지 언제나 웃음으로 함께 했던 김성만 선생님, 이동원 선생님, 김형철, 강은철, 허성력, 한동훈, 이승철, 홍상수, 이지훈님께 감사의 마음 전합니다. 기계공학과 대학원이라는 이름하나로 언제나 힘이 되어주었던 부영진 선생님, 이창수 선배님, 김상철, 정승현, 강남훈, 김재철님께도 진심으로 감사드립니다. 먼저 졸업하여 자신의 위치에서 최선을 다하는 모습을 보여주는 양경부 선배님, 김양훈 선배님, 조혁진, 강동언, 양윤석, 강병수, 최민호님께도 저의 결실을 보여드리고자 합니다. 또한 논문을 위한 실험을 도와주신 건축공학과 대학원 과정 전삼채, 김보연님께도 감사드립니다.

답답한 문제에 마주했을 때 논문을 위해 정신적으로 육체적으로 도와주신 高手의 말 한마디 한마디를 통한 사막의 오아시스와 같은 지적갈등의 해소는 배움의 이유, 필요성이 무엇인지 다시 한번 깨닫는 순간이었습니다. 이분들의 앞날에 항상 좋은 일만 함께하기를 바랍니다.

항상 가까운 곳에서 늘 지켜봐 주셨고 지금도 같은 모습인 부모님께 정말로 고마운 마음을 전합니다. 그리고 친구같은 형과 자기 할일을 너무나도 잘 해 나가고 있는 사랑스러운 동생에게도.....

2001년 12월의 끝자락. 김석우