

최 중
연구보고서

Neuro-Fuzzy 제어시스템을 이용한
중형 저온저장고의
최적설계에 관한 연구
Design of Middle Sized Cold Storage
Room Using Neuro-Fuzzy Controller

연구기관
서울대학교

농 립 부

제 출 문

농림부 장관 귀하

본 보고서를 “Neuro-Fuzzy 제어시스템을 이용한 중형 저온저장고의 최적설계에 관한 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2003년 8월 28일

주관연구기관명 : 서울대학교

총괄연구책임자 : 고 학 균

연 구 원 : 홍 지 향

연 구 원 : 양 길 모

연 구 원 : 김 형 국

연 구 원 : 이 강 운

요 약 문

I. 제 목

Neuro-Fuzzy 제어시스템을 이용한 중형 저온저장고의 최적설계에 관한 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

현재 대다수의 저온저장고에 사용되고있는 단속 운전(on-off) 제어 기술로는 이를 제어하는 것은 상당히 어렵다. 그 결과 기존의 저온 창고에서는 특히 유니트 쿨러로 부터 냉기가 창고 내로 유입되고 있는 경우, 미세한 온도의 변화에 대응하지 못해 저장물에 이상이 생기고 장기 저장이 어려워 손실률도 높은 편이다. 또한 불합리한 저장고의 설계로 내부의 불균일한 온도 및 풍속분포를 유발시켜 저장 농산물의 저장기간을 단축시키고 신선도를 떨어뜨리는 결과를 초래하고 있어 농가 보급형 저온저장고의 제어성능 향상과 최적설계에 관한 연구가 절실하다.

이에 본 연구의 목적은 국내 저온저장고의 문제점을 이해하고 청과물의 저온저장시 보다 안전한 저장환경을 제공하기 위하여 현행의 단속운전 제어와 PID 제어방식에 의한 냉동시스템 제어기술 대신 정밀제어가 가능하고 학습기능을 가지고 있어 외란 및 파라미터 변화에 적응성이 우수한 뉴로-퍼지 제어시스템을 개발하고 3차원 CFD(computational fluid dynamics) 시뮬레이션을 이용하여 정체구역이 없는 열 유동과 공기유동을 제공할 수 있는 저온저장고를 개발하는 데 있다.

III. 연구개발 내용 및 범위

- ① 저온저장고의 Neuro-Fuzzy제어 시스템을 개발하여 보다 신선한 상태로 장기간 농산물을 저장할 수 있게 하고 출하시기를 조절하는 데 기여하고자 한다.
- ② 저온저장고의 최적설계를 위해 3차원 CFD 시뮬레이션을 이용 저온저장고 내의 공기 유동 및 열유동 분포를 분석한다.
- ③ 3차원 CFD 시뮬레이션을 이용 중형 저온저장고의 최적설계 모형을 개발한다.

IV. 연구개발 결과 및 활용에 대한 건의

개발된 기술은 국내 저온저장고 설비 제작업을 하는 중소기업에 기술이전을 하며 국내 농산물 유통의 Cold Chain화에 일조를 할 수 있다. 그리고 연구결과물은 학계에 발표하여 저온저장고를 연구하는 연구자들과 일반 사용자들이 공유할 수 있도록 하는 것이 바람직 한 것으로 사료된다.

SUMMARY

This study was conducted to develop optimum model for cold storage facility that could offer safe storage environment for green grocery and improve irrational design of the conventional container-type cold storage facility. A Neuro-Fuzzy control system with learning ability was developed for cold storage facility and dome-type cold storage facility was also developed by using 3-D CFD simulation. The results are summarized as follows.

1. Neuro-Fuzzy algorithm and single chip Neuro-Fuzzy micro controller were developed.
2. Dynamic characteristics and hunting of Neuro-Fuzzy control system were more efficient than On-Off and Fuzzy control system. Dynamic characteristics of Neuro-Fuzzy control system were faster than On-Off control system by 1,555 seconds(123% faster) and Fuzzy control system by 460 seconds(36.4% faster). When system was arrived at steady state, hunting was $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ in On-Off control system, $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ in Fuzzy control system, and $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ in Neuro-Fuzzy control system.
3. Characteristics of three different control system were compared. For the set value of humidity 70%RH, variation of RH of On-Off control system was in the range of 65 to 75%, Fuzzy control system 67 to 73%, while Neuro-Fuzzy control was only 70 to 72.5%.
4. Neuro-Fuzzy control system were tested for storage of onions and showed a uniform temperature distribution.
5. CFD simulation model was verified experimentally using dome-type cold storage facility 6m×6m×5m

CONTENTS

Introduction and Objective	8
The research conditions	10
Materials, Methods and Results	12
Development of Neuro-Fuzzy Control System for Cold Storage Facility	12
Materials and Methods	12
Results and Discussion	22
Summary and Conclusions	30
Optimum design of Cold Storage Facility Using 3-D CFD Simulation	32
Materials and Methods	32
Results and Discussion	45
Summary and Conclusions	62
Synthetic Summary and Conclusion	64
Achievement and Contribution	65
Application Plan	66
Technology Information of Foreign Country	66
References	71

목 차

제 1 장	연구개발과제의 개요	8
1.	연구개발의 필요성	8
2.	연구개발 목적 및 범위	9
제 2 장	국내·외 관련기술의 현황	10
1.	국내의 경우	10
2.	국외의 경우	10
3.	연구결과가 국내·외 기술개발현황에서 차지하는 위치	11
제 3 장	연구개발수행 내용 및 결과	12
제 1 절	저온저장고용 Neuro-Fuzzy 제어시스템 개발	12
1.	연구수행 방법	12
가.	Neuro-Fuzzy제어기의 학습과정	12
나.	Nuero-Fuzzy 제어기 알고리즘 개발	12
다.	Neuro-Fuzzy 제어기 인터페이스 개발 및 시작기 개발	14
라.	실험장치	16
마.	실험방법	22
2.	연구수행 내용 및 결과	22
가.	제어시스템별 온도하강 동특성과 헌팅	22
나.	제어시스템별 풍속제어	23
다.	제어시스템별 습도제어	25
라.	On-Off, Fuzzy, Neuro-Fuzzy 제어시스템에서의 압력분포	26
마.	저장실험	28
3.	요약 및 결론	30
제 2 절	3차원 CFD 시뮬레이션을 이용한 저온저장고의 최적설계	32
1.	연구수행방법	32
가.	농산물 저장실험	32

나. 실험장치	35
다. 3차원 CFD 시뮬레이션을 이용한 공기유동 및 열유동 해석	37
라. 실험방법	44
2. 연구수행내용 및 결과	45
가. 저장물의 위치, 높이, 적재방식에 따른 시뮬레이션 실시	45
나. 저장고의 높이, 폭의 변경에 따른 시뮬레이션 실시	50
다. 컨테이너 박스형 저온저장고의 실측치와 예측치의 유의성 검증	53
라. 컨테이너 박스형 저온저장고의 설계상의 문제점 분석	54
마. 저장고의 형태에 따른 시뮬레이션과 신모델 개발	55
바. 신모델(돔형) 저온저장고의 시작기 개발	58
사. 신모델(돔형) 저온저장고 개발을 위한 시뮬레이션 모델 검증	60
3. 요약 및 결론	62
4. 종합요약 및 결론	64
제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도	65
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	66
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	66
1. 적설식 냉장시설	66
2. 빙온용 냉장시설	67
3. 보습형 냉장시설	68
4. 자연냉열이용 저온저장고	69
5. 냉온 고습도 조건과 선도보지효과	69
제 7 장 참고문헌	71

제 1 장 연구개발과제의 개요

1. 연구개발의 필요성

일반 냉동 창고는 동결점 이하로 온도를 유지하기만 하면 저장품에 이상이 생기지 않아 온도의 변동에 민감하지 않아도 큰 문제가 없다. 그러나 저온저장고에서는 저장 온도 범위가 통상적으로 0.5℃ 이내로 온도 변화가 적어야 한다. 그러나 현재 대다수의 저온저장고에 사용되고있는 단속 운전(on-off) 제어 기술로는 이를 제어하는 것은 상당히 어렵다. 그 결과 기존의 저온 창고에서는 특히 유니트 쿨러로 부터 냉기가 창고 내로 유입되고 있는 경우, 미세한 온도의 변화에 대응하지 못해 저장물에 이상이 생기고 장기 저장이 어려워 손실률도 높은 편이다. 특히 열대 과일을 저장하는 경우는 저온 장해가 염려되고, 저장 온도가 동결점에 가까운 청과물은 기존 기계식 제어 방식으로는 저장고 내의 온도 편차에 대한 미세한 온도 조정이 어려워서 과다 냉각에 따른 저온 장해의 위험성이 높다. 따라서 저장 농산물의 생리작용과 관계한 온도 조절 기술의 개발이 매우 시급한 실정이다.

또한 국내 저온저장고의 설계모형이 컨테이너 박스형에 유니트 쿨러를 이용한 냉각방식을 사용하고 있어 저장고 내부의 균일한 온도 및 풍속분포를 이루기 어렵고 이에 따라 청과물 저장중 10~30%의 감모율 발생의 원인을 불러오고 있다.

이를 해결하기 위하여 최근에는 컴퓨터를 이용한 전자제어 방식으로 발전하고 있다. 선진국의 경우 이미 컴퓨터를 이용한 전자 제어 방식을 도입하여 사용하기 시작하였으며, 또한 인공지능을 이용한 FLC(Fuzzy Logic Control) 등을 저온저장고에 응용하여 좋은 결과를 가져오고 있다. 하지만 국내의 경우 이의 연구가 미흡한 실정으로 아직까지 시퀀스 제어나 PID제어가 그 주류를 이루고 있으며 이에 따라 저온저장고의 성능면에서 개선의 여지가 많다고 할 수 있다.

이는 낙후된 제어성능 뿐만아니라 저온저장고의 설계에도 문제가 있다. 불합리한 저장고의 설계로 내부의 불균일한 온도 및 풍속분포를 유발시켜 저장 농산물의 저장기간을 단축시키고 신선도를 떨어뜨리는 결과를 초래하고 있어 농가 보급형 저온저장고의 제어성능 향상과 최적 설계에 관한 연구가 절실하다.

2. 연구개발 목적 및 범위

본 연구의 목적은 국내 저온저장고의 문제점을 이해하고 청과물의 저온저장시 보다 안전한 저장환경을 제공하기 위하여 현행의 온-오프 제어와 PID 제어방식에 의한 냉동시스템 제어기술 대신 정밀제어가 가능하고 학습기능을 가지고 있어 외란 및 파라미터 변화에 적응성이 우수한 뉴로-퍼지 제어시스템을 개발하여 저온저장고의 온도, 풍속, 습도를 효율적으로 제어하기 위하여 수행되었다. 그리고 뉴로-퍼지 제어시스템의 정밀성과 환경 적응성을 보다 효과적으로 살릴 수 있도록 3차원 CFD(computational fluid dynamics) 시뮬레이션을 이용하여 정체구역이 없는 열 유동과 공기유동을 제공할 수 있는 저온저장고를 개발하는 데 있다. 본 연구의 세부 연구내용과 범위는 다음과 같다.

- ① 저온저장고의 Neuro-Fuzzy제어 시스템을 개발하여 보다 신선한 상태로 장기간 농산물을 저장할 수 있게 하고 출하시기를 조절하는 데 기여하고자 한다.
- ② 저장 농산물간의 온도, 풍속, 습도를 적절히 조절하여 농산물의 부패 및 중량감소로 인한 손해를 최소화하여 더 많은 부가가치를 도모한다.
- ③ 저온저장고의 최적설계를 위해 3차원 CFD 시뮬레이션을 이용 저온저장고 내의 공기 유동 및 열유동 분포를 분석한다.
- ④ 3차원 CFD 시뮬레이션을 이용 중형 저온저장고의 최적설계 모형을 개발한다.

구 분	연 구 개 발 목 표	연구개발 내용 및 범위
1차 년도 (2001)	저온저장고용 Neuro-Fuzzy 제어시스템 개발	a. Neuro-Fuzzy 알고리즘 개발 b. Neuro-Fuzzy 인터페이스 개발 c. Neuro-Fuzzy 검증을 위한 저장실험 d. 최종 Neuro-Fuzzy 제어기 설계 및 성능평가
2차 년도 (2002)	3차원 CFD 시뮬레이션을 이용한 저온저장고의 최적설계	a. 저장실험을 통한 저장고내 공기유동 온도분포 규명 b. 실제 실험과 개발된 시뮬레이션 모델의 비교 검증 c. 저장물의 위치, 높이 및 형태에 따른 시뮬레이션 d. 저온저장고의 최적설계

제 2 장 국내·외 관련기술의 현황

1. 국내의 경우

최순오 등(1994)은 EEV를 이용한 증발기의 냉매유량 제어 및 과열도 특성에 관한 연구를 하였다. 증발기 과열도 제어에는 온도식 팽창밸브 보다는 전자식 팽창밸브가 그 성능 면에서 우수하고, 전자 팽창밸브를 사용할 경우에도 PID 제어보다는 PI 제어가 유리하며, PI 제어 시에도 적절한 샘플링 타임을 설정하여야 한다는 것을 알 수 있었다.

김정훈 등(1996)은 냉동 공조용 증발기의 과열도 및 증발온도의 퍼지제어에 관한 연구에서 압축기 출력 0.75HP, 가로, 세로, 높이 각각 1m의 모의 저장고를 설치 실험하였으며 PID 제어 보다 빠른 동특성을 확인했다.

최홍림(1993)은 환기중인 축사의 열부력이 공기유동과 온도분포에 미치는 영향을 $k-\epsilon$ 난류모델로 2차원으로 분석하였으며 열부력의 크기에 따른 공기유동의 변화를 관찰하기 위하여 유입공기의 수준에 따라 가축 현열플럭스를 경계조건으로 입력하여 공기유동 및 온도분포를 시뮬레이션하였다. 공기유동형태는 실험(Boon, 1978)으로 분석된 유동형태와 일치하였으며 각 지점별 온도편차가 1.7°C 이내로 나타났다. 시뮬레이션 유동에 대한 수정 Ar수 75에서 유입공기의 제트는 수평유동한다는 Randall(1979)의 연구결과와 일치함을 보였다.

조병관 등(1997)은 $k-\epsilon$ 난류모델을 이용한 저온저장고 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 최적모델을 연구하였다.

한도영 등(1999)은 멀티형 히트펌프 시스템의 퍼지 제상 제어에 관한 연구에서 실외 열교환기 입출구 공기 온도차와 압축기 입출구 냉매 압력차를 입력변수로, 제상지속시간을 출력변수로 사용하여 퍼지 제상 제어 알고리즘을 개발하였다. 개발된 퍼지 제상 제어 알고리즘을 멀티형 히트펌프 시스템에 적용하여 적절한 제상이 이루어짐을 증명하였다.

2. 국외의 경우

Timmons(1979)는 통풍이 되는 공간에서의 공기유동을 유체역학 이론을 이용하여 분석하였다. 그 당시 그는 여러 가지 치명적인 단점으로 사용이 잘되지 않는 $\psi-\omega$ 난류모델을 비점성 Navier-Stokes 방정식과 함께 연구에 적용하였다.

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.

Kato T.(1990)는 퍼지제어 이론을 이용하여 실내 온도제어의 장애효과에 대해 연구하였다. 실내공기의 쾌적함이 제어성능 강화에 의해 얻어 졌고 작은 변환장치 에어컨에 퍼지제어 이론을 적용함으로써 제어 손실 감소를 가져왔다.

K. Higuchi 등(1992)은 증발기(evaporator)에서 EEV 사용에 관한 연구에서 EEV는 TEV에 비해 정밀제어가 가능하고 냉매유량 제어가 용이함을 보였다.

Sukwon Kang (1996)은 와도(vorticity)를 이용한 Poisson model을 2차원, 비압축, 등온 정상 상태로 가정한 저온 저장고에 적용하여 유입 및 배출구와 장애물의 조건 변화에 따른 공기 유동이 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용한 Choi(1987)와 Low-Reynolds-number $k-\epsilon$ 모델을 사용한 Rousseau(1995)의 연구결과와 유사함을 보였다.

3. 연구결과가 국내·외 기술개발현황에서 차지하는 위치

우리나라 실정에 맞는 저온저장고의 최적 설계와 시스템의 개발로 신선 농산물을 원활하게 공급할 수 있는 콜드체인 시스템이 구축 될 것이며 농가는 보다 좋은 가격으로 시장에서 이익을 창출할 수 있고 소비자는 신선한 농산물을 언제 어디서나 구입할 수 있게 될 것이다. 외국으로 수출되는 농산물은 저장중 손실율을 감소시킬 수 있고 소비지에서의 신선 식품으로 인정 받아 농가에 많은 경제적 도움을 줄 것으로 전망된다.

자국의 첨단 산업기술을 보호하기 위한 노력들이 전 세계적으로 일고 있다. 이에 국내에서도 저온저장고에 관한 첨단 제어기술과 설계기술 개발이 절실히 요구되며 이는 농민들 뿐만 아니라 관련 중소기업과 소비자 모두에게 도움을 줄 것으로 판단된다.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 저온저장고용 Neuro-Fuzzy 제어시스템 개발

1. 연구수행 방법

가. Neuro-Fuzzy제어기의 학습과정

본 Neuro-Fuzzy 제어시스템의 퍼지 모델링은 기본적인 퍼지 제어기의 기본 구성을 사용하면서 신경망의 감독자 학습을 통하여 퍼지룰을 자동적으로 생성하게 하고 가중치를 조절하여 그 중 불필요한 퍼지룰을 제거해 나가는 방법을 사용하였다. 이를 위해 먼저 퍼지변수와 퍼지관계를 설정하고 그 퍼지변수와 퍼지관계로부터 학습 데이터를 만들었다. 만들어진 퍼지제어 규칙들 각각에 대해 적합정도(degree of support)를 부여하였고 한계 오차가 될 때까지 학습을 시켜 Neuro-Fuzzy 제어 알고리즘을 완성하였다.

Neuro-Fuzzy 제어 알고리즘의 개발을 위한 구체적인 학습과정은 다음과 같다.

- ① 입력변수와 출력변수를 선정해주고 그들의 데이터형도 정하여 주었다.
- ② 소속함수를 결정하였다.
- ③ 퍼지룰 베이스(IF-THEN 형태의 제어규칙)를 구체적으로 기술하고 감독자 학습을 위한 기준 입력 값을 만들었다.
- ④ 추론방식을 결정하였다.
- ⑤ 출력부의 비퍼지화 방식을 결정하였다.
- ⑥ 학습을 위한 학습 데이터를 만들고 가중치와 모멘텀 계수를 정하였다.
- ⑦ 학습과정 중 적합도가 0.8이하의 퍼지규칙은 제거시키고 학습 후 적합도가 0.9이상의 퍼지규칙 만을 선택하여 최종적으로 Neuro-Fuzzy 제어 규칙을 완성하였다.

나. Neuro-Fuzzy 제어기 알고리즘 개발

인공지능제어 기법 중 Neuro-Fuzzy 제어 시스템을 개발하려는 본 연구에서는 첫째로, 인공신경망을 이용하여 퍼지 멤버십 함수를 구할 수 있는 인공신경망 모델을 개발하였다. 다음으로, 퍼지신경망의 학습 능력을 부여하기 위해 오차 역전파 학습 알고리즘을 적용하였다.

그림 1은 저온저장고의 Neuro-Fuzzy 제어 알고리즘이다. EEV의 개도를 조절함으로써 증발기에 공급되는 냉매의 압력을 조절하여 온도를 제어하고 풍속 및 가습기의 구동모터를 제어하여 저장고내 냉기의 유속과 습도를 조절하는 프로그램의 흐름도이다.

상단부에 입출력 퍼지변수의 귀속도 함수 형태를 정의하였는데 이는 제어대상들의 설정 온도, 풍속, 습도, 각각의 시간에 따른 오차변화량, 샘플링 간격 등을 정의하였다. 실제 실험과 퍼지제어 이론에서 중요한 부분은 퍼지화 부분, 지식베이스를 바탕으로 한 퍼지추론 과정 그리고 비퍼지화 부분들이다.

프로그램과 컴파일러는 AVR(Alf Vergard Wollan Risk) GCC를 사용하였고 제어를 위한 기계어는 AVR ISP(in system programmer)를 이용하여 구현하였다. Neuro-Fuzzy 학습을 통해 구해진 퍼지룰과 제어량은 프로그램 상에 반영하였고, 그 밖의 인터페이스 장치 구동 프로그램과 하드웨어 구동 프로그램들은 Neuro-Fuzzy 알고리즘과 연동해서 동작할 수 있도록 알고리즘을 개발하였다.

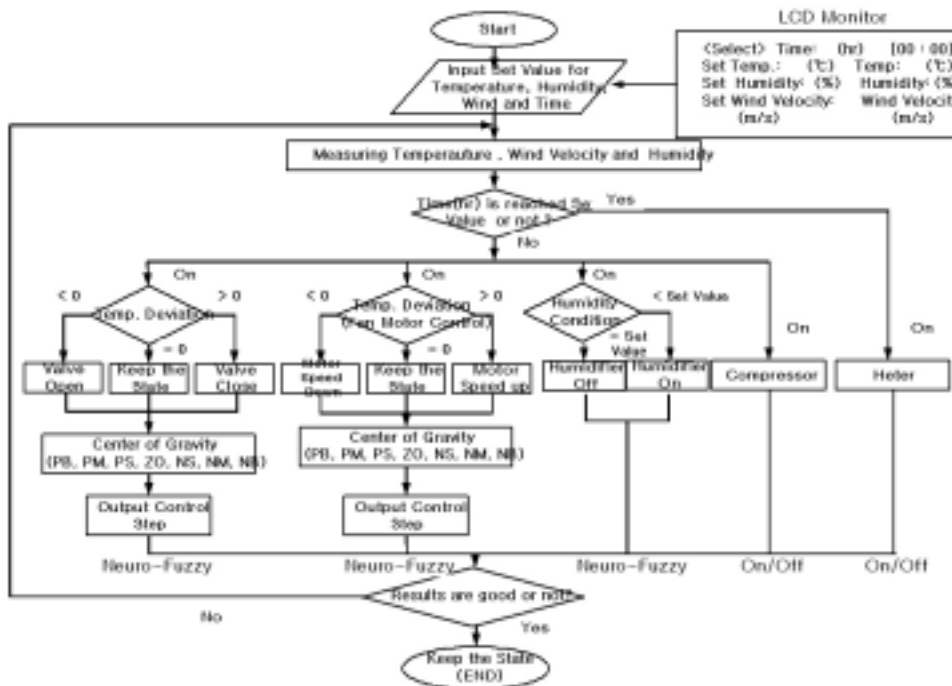


Fig. 1. Algorithm for Neuro-Fuzzy control

그림 2는 개발된 Neuro-Fuzzy 제어시스템의 블록도를 나타낸다. Neuro-Fuzzy 제어기의 후건부는 신경회로망의 함수 근사화 능력을 이용하여 비퍼지화 연산에 대한 부분을 다층 퍼셉트론으로 구현하였다. 그리고 후건부의 학습을 위한 데이터는 결론부에 나타나는 언어항에 대해 기존의 계산 방법으로 구하였다.

다. Neuro-Fuzzy 제어기 인터페이스 개발 및 시작기 개발

Neuro-Fuzzy 제어기의 CPU는 Atmel사의 AVR 103 칩을 사용하였다. 온도, 풍속, 습도가 LCD의 한 화면상에 설정치와 실제치가 나타날 수 있도록 설계를 하였다. 온도제어는 EEV(Electrical Expansion Valve)를 이용하여 냉매의 압력과 유량을 조절함으로써 제어를 해주었고, 풍속은 인버터를 이용하여, 습도는 가습기를 이용하여 제어를 하였다. 에틸렌 가스와 같은 환경가스는 저온저장고의 구조를 이용하여 자연적으로 밖으로 배출이 되도록 설계를 하였다.

그림 3은 Neuro-Fuzzy 제어기의 개략도를 나타내고 있으며 온도, 풍속, 습도센서들에 의해 입력값을 받아 Neuro-Fuzzy 알고리즘이 내장되어 있는 CPU에 의해 각각의 제어대상들을 제어할 수 있도록 구성을 하였다.

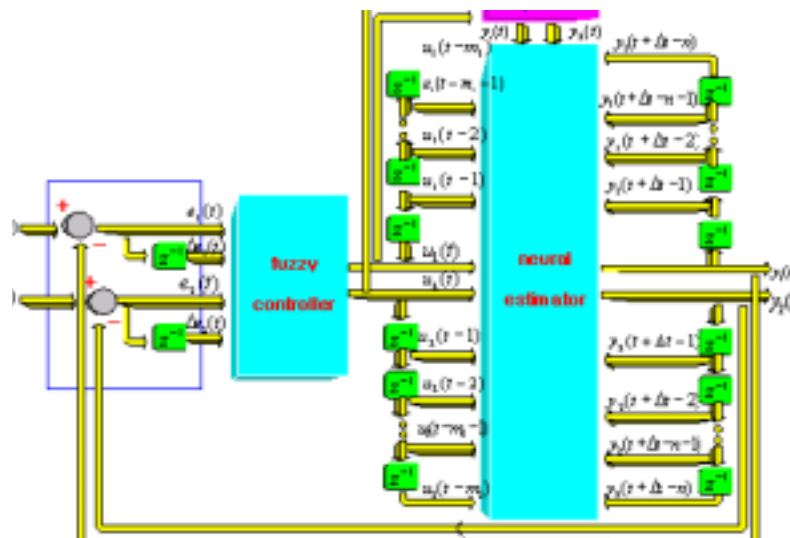


Fig. 2. Block diagram for Neuro-Fuzzy control system

그림 4는 Neuro-Fuzzy제어기와 풍속제어를 위한 인버터와 인터페이스 장치를 보여 주고있다. 온도제어를 위한 EEV, 고내 습도와 풍속 상태를 알기 위한 습도센서와 풍속센서 그리고 그의 인터페이스 장치들과 power supply들로 되어있다. 풍속센서는 유니트 쿨러 맞은편 천장에 설치하여 저장고내 풍속을 실시간으로 LCD 모니터에 나타내었다. 그림 5는 제작된 Neuro-Fuzzy 제어기로서 AVR 103 CPU와 각각의 제어 입·출력 단자 그리고 반대편에는 실시간으로 제어상태를 볼 수 있는 LCD 모니터로 구성하였다.

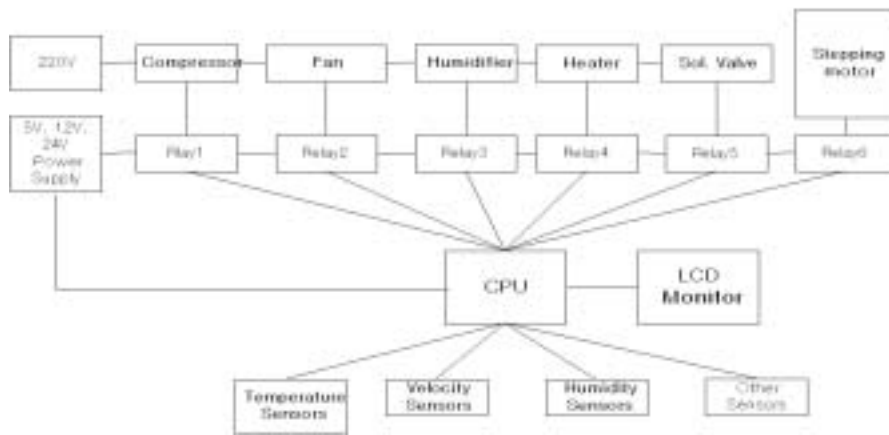


Fig. 3. Schematic for Neuro-Fuzzy controller



Fig. 4. Neuro-Fuzzy controller and its interface

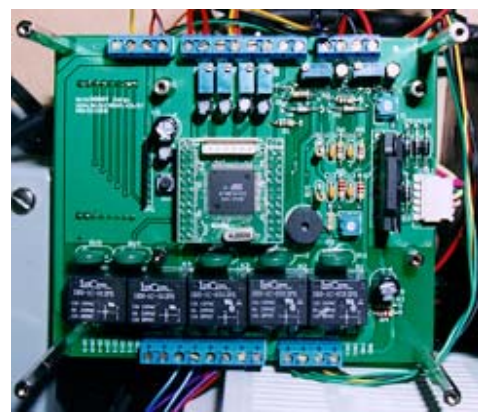


Fig. 5. Neuro-Fuzzy controller

그림 6은 제어기의 포트 구성도이다. 온도센서는 4개를 사용하였고 각각의 온도센서를 통해 입력되는 신호는 평균을 하여 제어 입력값으로 사용할 수 있도록 하였다. 그리고 사용된 센서들 중 어느 하나가 오동작할 경우 경고음을 울려 사용자에게 알릴 수 있게 하였다.

라. 실험장치

1) 저온저장고

그림 7은 본 연구 주제인 Neuro-Fuzzy 제어시스템의 성능테스트를 위해 사용된 돔형 저온저장고와 Neuro-Fuzzy 제어기의 성능테스트를 위한 실험장치들을 나타낸 것이다. 본 돔형저온저장고는 2차년도 연구주제로서 3차원 CFD 시뮬레이션을 이용해 컨테이너 박스형 저온저장고의 단점을 개선한 것으로 자세한 개발과정은 “제2절 3차원 CFD 시뮬레이션을 이용한 저온저장고의 최적설계”편에 소개되었다.

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. 천장부와 벽면부는 130도의 각도를 가지고 있고 유니트 쿨러 맞은편 천장부에 풍속센서를 설치하였다. 양쪽 벽면에 가습기를 엇갈려 설치하였고 저장고 중앙에는 습도센서를 설치하여 가습기를 제어하는데 사용하였다. 측벽부 4면에는 각각 1개씩 총 4개의 온도센서를 설치하였고 각각의 지역에서 받은 온도값을 평균하여 제어에 적용하였다.

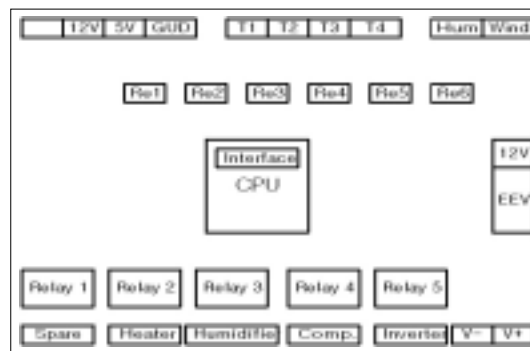


Fig. 6. The port formation of Neuro-Fuzzy controller

2) 전자식 팽창밸브(EEV, Electrical Expansion Valve)

인버터 구동 가변 용량형 공기조화장치나, 증발온도가 낮은 냉동장치에서는 팽창밸브의 냉매유량 조절 특성 향상과 유량제어 범위 확대 등을 목적으로 각종 전자식 팽창밸브가 사용되고 있으며, 전자식 팽창밸브에는 밸브의 개폐를 위한 작동기로 아날로그형의 전기 신호를 이용한 바이메탈 구동형, 봉입 왁스의 가열에 의한 체적 팽창을 이용한 구동형, 디지털형의 전기 신호를 이용한 펄스 전동기 구동형이 있다.

그림 8는 스텝핑 모터 구동형 전자식 팽창밸브의 구조를 나타낸 것이다. 센서를 통해 들어오는 신호를 제어기의 제어 알고리즘에 의해 EEV의 개폐정도를 조절한다. 운전신호에 의해 스텝핑 모터의 회전을 나사부에 있는 샤프트의 직선운동으로 변환하여 니들밸브에 있는 오리피스에 개폐를 조절한다. 제어면에서는 온도식 자동 팽창밸브에 비하여 냉매액을 정확하게 공급 할 수 있는 매우 우수한 특징을 가지고 있어서 증발기를 효과적으로 이용할 수 있다.

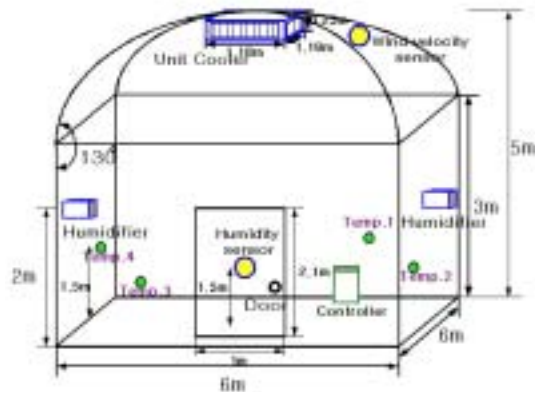


Fig. 7. Schematic for dome type of cold storage facility

3) 팽창밸브, 냉매압력 측정장치, 냉매유량 측정장치

개발된 Neuro-Fuzzy 제어시스템의 성능 검증을 위한 실험장치로는 먼저 4개의 온도센서를 저온저장고의 4방 벽면에 각각 설치하여 각 구간의 온도값들을 받을 수 있도록 하였다. 저장고 내 온도제어와 냉매의 압력 및 유량 측정을 위해 그림 9, 그림 10과 같이 실험장치를 구성하였다. 냉매의 유량을 제어하는 온도식 팽창밸브(TEV)와 전자식 팽창밸브(EEV) 그리고 냉매의 압력을 측정하는 압력계이지들과 유량을 측정하는 유량센서이다. 기존의 on-off 시스템에서 저장고내 과열도를 이용하여 냉매의 유량을 제어하는 온도식 팽창밸브(TEV)와 Neuro-Fuzzy제어 알고리즘에 의해 냉매의 유량을 제어하는 전자식 팽창밸브(EEV)를 솔레노이드 밸브 후단에 각각 설치하여 비교 실험하였다. 온도변화에 따른 냉매의 압력과 유량을 측정하기 위해 팽창밸브 전단에 1개의 압력계이지와 후단에 또 다른 압력계이지와 유량센서들을 각각 설치하여 저장고내 온도변화와 압력의 변화와의 상관관계를 실험하였다.

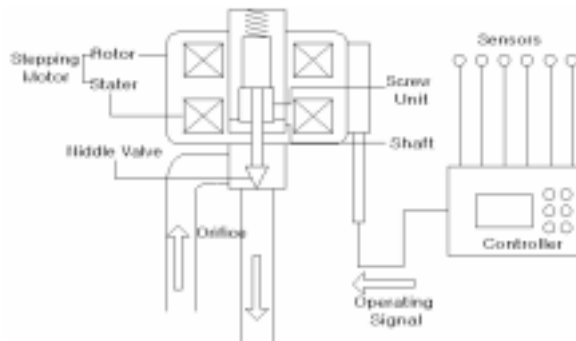


Fig. 8. Electrical Expansion Valve

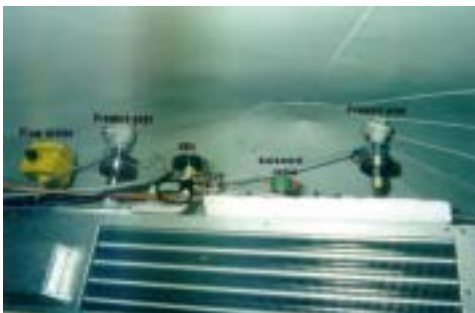


Fig. 9. TEV, EEV, pressure gauges, flow meter and solenoid valves

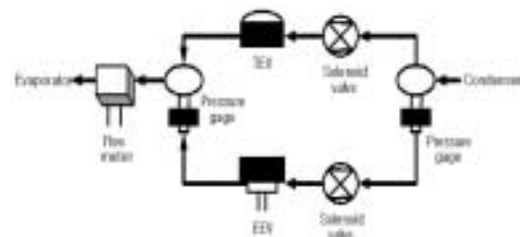


Fig. 10. Schematic of equipments for controlling temperature and measuring pressure and flow of refrigerant

4) 저온저장고

표 1은 뉴로-퍼지 제어시스템의 성능 테스트를 위하여 사용된 저온저장고의 제원이다.

Table 1. Specification of cold storage facility.

Compressor		Model	AV5535E
		Electric power	380 V 3 <i>ph</i> 60 Hz
		Electric consumption	7.5 kW
		Voltage range	340 - 420 V
		Motor wiring method	Star type (380V-3ways)
Unit cooler /Evaporator		Model	CUC-T22
		Electric power	220 V 3 <i>ph</i> 60 Hz
		Electric consumption	0.4 kW
		Voltage range	200 - 240 V
		Fan diameter	550 mm
		Air volume	70 m ³ /min
		Defrost heater	3.7 kW
Structure	Insulation	Material	Polystyrene form
		Thickness	100 mm
		Density	0.2 kg/m ³
		Temperature range	-118 ~ 82 °C
	Steel plate	Thickness	0.5 mm
	Panel	Width	1,000 mm
		Weight per area	0.28 kg/m ²
		Heat transfer rate	0.028 kcal/m · h · °C
	Size (mm)	Overall	W6,000×L6,000×H5,000
		Door	W1,000×H2,100×T100

5) 유니트 쿨러

그림 11과 그림12는 4면 토출형 유니트 쿨러와 개략도이다. 아래 팬을 통해 흡입되는 공기를 냉매가 흐르는 모세관 사이를 통해 4방향으로 냉기를 토출시켜주는 구조로 되어있다.



Fig. 11. Unit cooler (bottom view)

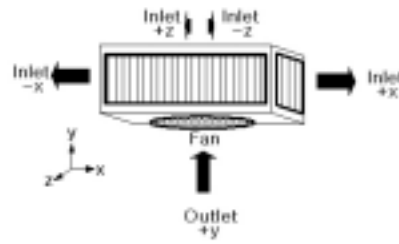


Fig. 12 Schematic for unit cooler

6) 온도계측 및 저장실험

그림 13은 저장물이 없을 때 저장고내의 각 구간별 온도 측정을 위한 센서들의 위치를 도시한 것이다. 온도를 측정하기 위하여 17개의 온도센서를 3차원상으로 배열하였고 데이터 로거에 연결하여 데이터를 수집하였다. 이는 저장고 내에서 Neuro-Fuzzy 제어에 따른 온도분포의 균일성과 다음 절에서 소개하게 될 3차원 CFD 시뮬레이션 결과값과 비교하기 위하여 실시하였다.

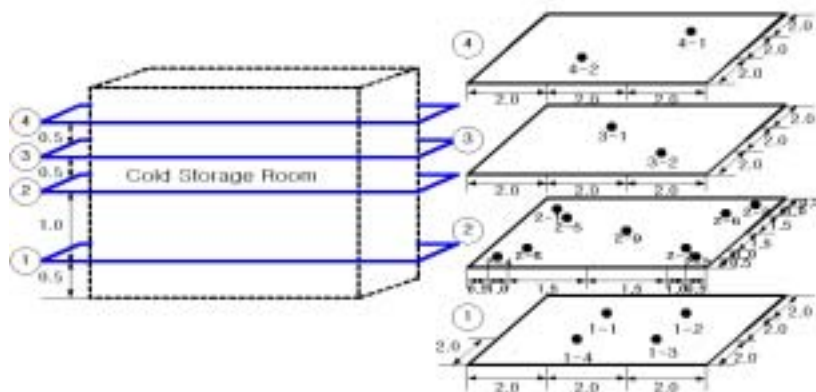


Fig. 13. Location of sensors for empty storage (unit: meter)

그림 14는 청과물 저장실험을 위한 실험장치의 구성도로서 양파를 그림15과 같이 저장하고 저장물 사이에 12개의 온도센서를 3차원 상으로 설치하였다. 청과물의 호흡열 제거에 따른 온도하강 동특성과 설정온도에서의 헌팅을 실험하였다.

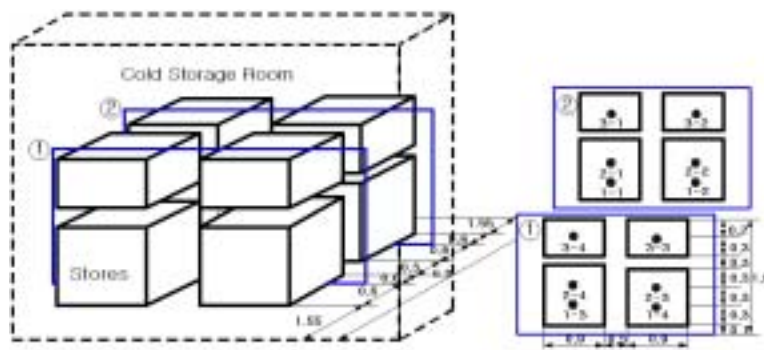


Fig. 14. Location of sensors for storage experiment (unit: meter)



Fig. 15. Photograph of loaded onion

마. 실험방법

본 실험은 2002년 4월초부터 5월 중순 사이에 외기온이 비교적 일정한 기간을 선택하여 실시하였다. 평균기온을 측정하고 설정한 온도와 습도 하에서 온도하강 동특성을 실험하였다. 그리고 설정온도 도달 이후에 헌팅의 발생정도를 실험하였다. 기존의 On-Off 제어시스템, Fuzzy 제어시스템, 개발된 Neuro-Fuzzy 제어시스템의 성능을 상호 비교하였다.

청과물 저장실험을 위해 2002년 4월 초순에 수확된 제주산 조생종 양파를 사용하여 Neuro-Fuzzy 시스템의 성능을 실험하였다.

양파의 안전 저장조건은 설정온도 0℃, 습도 70~75%(건조양파)와 90~95%(생양파)이므로 이에 맞춰 저장환경을 설정하였다.

2. 연구수행 내용 및 결과

가. 제어시스템별 온도하강 동특성과 헌팅

그림 16은 On-Off, Fuzzy, Neuro-Fuzzy 제어시스템 상에서 동특성을 서로 비교 실험한 결과이다. 외기온이 평균 24℃였을 때 총 17개소에서 온도를 측정하여 설정온도 0℃에 도달했을 때까지의 시간을 측정하고 이후 헌팅 발생정도를 실험하였다.

최초 22.1℃에서 0℃에 도달할 때까지 걸린 시간은 On-Off, Fuzzy, Neuro-Fuzzy 제어시스템 순으로 2,820초, 1,725초, 1,265초씩 각각 소요되었다. 이는 Neuro-Fuzzy 제어시스템이 On-Off 제어시스템보다 1,555초, Fuzzy 제어시스템 보다는 460초 빠른 동특성을 보여주었다. 결과적으로 Neuro-Fuzzy 제어시스템이 온도 하강 동특성 면에서 On-Off 제어시스템 보다 123%, Fuzzy 제어시스템보다 36.4%의 성능개선을 가져왔다고 볼 수 있다. 특히, Neuro-Fuzzy 제어시스템에서도 Fuzzy 제어시스템에서와 같이 정상상태에 도달했을 때 제어시스템의 빠른 동특성 때문에 일시적으로 오버슈트 구간이 발생하였다. 그러나 이 구간은 184초의 짧은 시간동안 발생하였기 때문에 시스템의 성능에는 영향을 미치지 않았다.

그림 17, 18 및 19는 On-Off, Fuzzy, Neuro-Fuzzy 제어시스템에서 헌팅분포도 이다. 헌팅은 On-Off 제어시스템에서 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, Fuzzy 제어시스템에서 ± 0.4 , Neuro-Fuzzy 제어시스템에서 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 로 Neuro-Fuzzy 제어시스템이 가장 정밀한 헌팅분포를 보였다.

나. 제어시스템별 풍속제어

그림 20은 On-Off 제어시스템에서 풍속을 실험한 결과이다. 풍속은 설정온도에 도달할 때까지 다소 감소하다가 설정온도부터는 단속적인 운전을 계속하였다. 시스템 특성상 설정온도에 도달할 때까지 풍속은 일정하게 설계되어 있지만 냉매가 모세관을 순환할 때 주위의 공기가 증발잠열에 의해 모세관 주위에 성에를 맺히게 한다. 이들 성에는 팬(fan)에 의해 유도되는 찬공기의 흐름을 방해하여 저장고내의 풍속을 떨어뜨리고 동특성에도 영향을 미치게 한다. 그러므로 바람직한 제어방법은 이들 성에가 생기지 않도록 주위 공기와의 조화로운 증발잠열을 유지하는 것이 중요하다. 그러나 On-Off 제어시스템에서는 팽창밸브가 감온통을 이용하여 과열도로 제어를 하기 때문에 그 정밀도가 떨어진다고 할 수 있다.

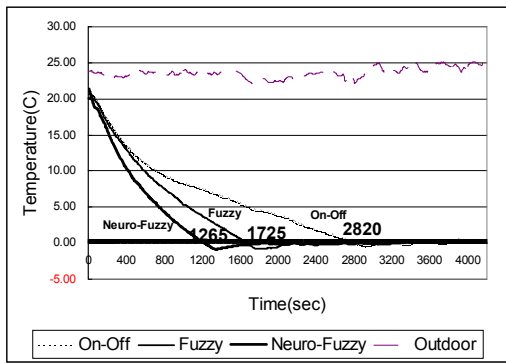


Fig. 16. Activation between the three systems

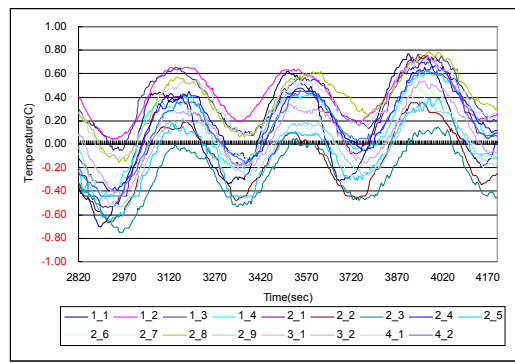


Fig. 17. Hunting profiles of On-Off control system

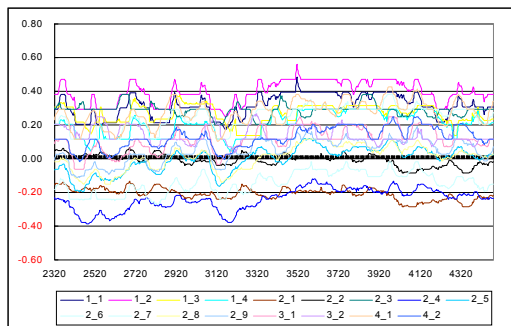


Fig. 18. Hunting profiles of Fuzzy control system

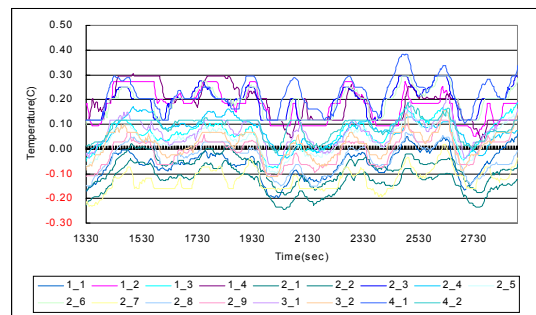


Fig. 19. Hunting profiles of Neuro-Fuzzy control system after learning

그림 21과 그림 22는 Fuzzy와 Neuro-Fuzzy 제어시스템에서 풍속제어 상태를 보여주고 있다. 두 시스템 모두 정상상태에 도달한 후에도 유니트 쿨러 앞에서 측정된 풍속은 최초 4.72 m/s에서 2.5 m/s의 풍속을 유지하였다. 이와 같은 이유는 외부에서 유입되는 열 유입을 계속적으로 제거해 주는 효과를 가짐으로써 시스템이 정상상태를 계속 유지할 수 있도록 해준다. 또한 저장물이 있어서 외란이 발생할 경우에도 능동적으로 대처할 수 있게 해줌으로써 시스템의 강인성을 증가시켜준다.

풍속의 경우 Fuzzy 제어시스템과 유사한 경향을 보이는 이유는 풍속의 경우 온도를 제어하는 알고리즘 보다 간단하고 많은 제어 단계가 필요하지 않기 때문에 전문가가 시행착오법으로 만든 퍼지룰과 비슷한 효과를 나타낸 것으로 보인다. 그러나 전문가가 저온저장고에 대한 지식이 부족할 경우 이와 같은 결과를 가져오기 힘들다고 사료된다.

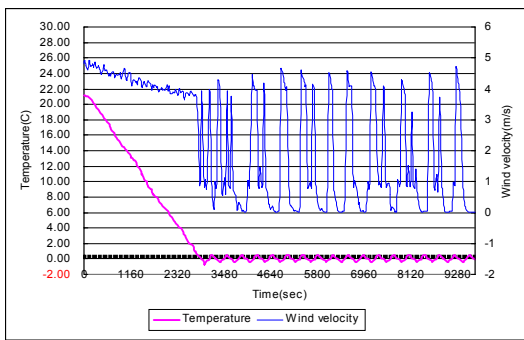


Fig. 20. Velocity profile of On-Off control system

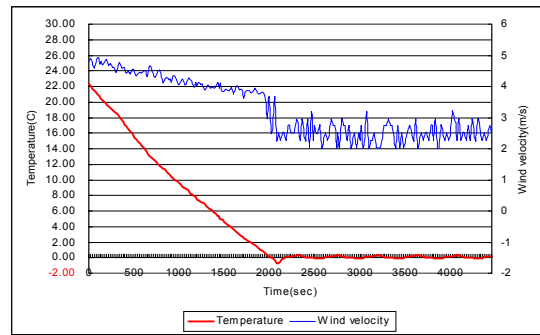


Fig. 21. Velocity profile of Fuzzy control system

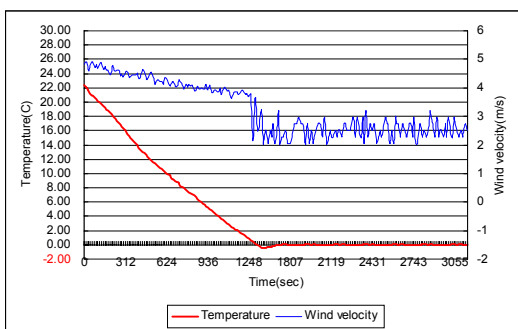


Fig. 22. Velocity profile of Neuro-Fuzzy control system

다. 제어시스템별 습도제어

건조양파의 적정 저장습도는 70~75%, 생양파는 90~95%를 유지하는 것이 바람직한 저장 방법으로 알려져 있다. 그러므로 본 실험에서는 이에 준해 저온저장고의 습도를 70%와 90%로 각각 설정하고 On-Off, Fuzzy, Neuro-Fuzzy 제어시스템의 성능을 상호 비교 실험하였다.

그림 23은 On-Off 제어시스템 상에서 습도를 제어하는 모습을 보여주고 있다. 온도제어와 마찬가지로 정상상태에 도달한 후에 단속적인 운전을 계속하는 것을 볼 수 있다. 가습기를 이용해 습도를 제어할 경우 미세한 물분자들이 공기중에서 계속적으로 확산되기 때문에 제어하기가 어려운 점이 있다. 이러한 이유로 정상상태이후 다소 진폭이 높은 현탕을 발생하였다. 현탕은 65~75% 사이를 반복하였다.

그림 24는 Fuzzy 제어시스템에서 습도를 제어하는 모습을 보여주고 있다. Fuzzy 제어시스템에서 습도는 67%~73% 사이로 제어가 되었다.

그림 25와 그림 26은 Neuro-Fuzzy 제어시스템에서 습도를 제어하는 모습을 보여주고 있다. Fuzzy 제어시스템에서와 같이 정상상태 70%와 90%일 때 각각 70~72.5%와 90~92%의 변화를 보이며 동작하였다. 이는 세 가지 제어시스템과 비교해서 Neuro-Fuzzy 제어시스템이 On-Off 제어시스템 보다 4배의 정밀도, Fuzzy 제어시스템 보다 2.4배의 정밀도를 보인 결과치이다.

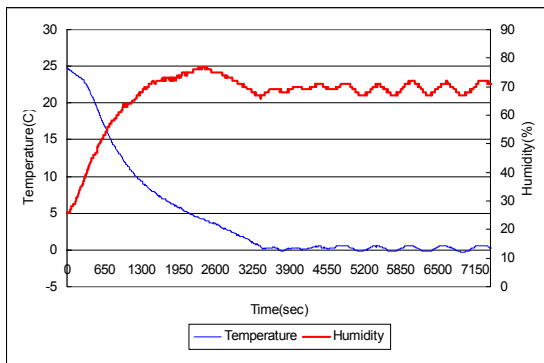


Fig. 23. Humidity profile of On-Off control system(humidity 70%)

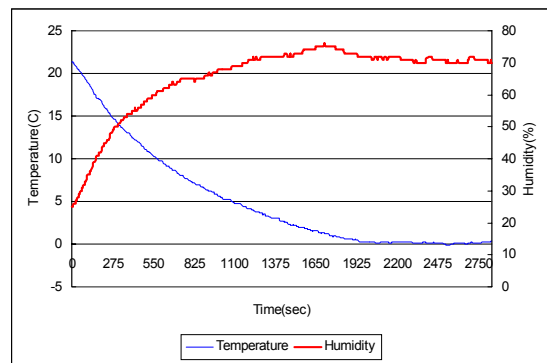


Fig. 24. Humidity profile of Fuzzy control system(humidity 70%)

라. On-Off, Fuzzy, Neuro-Fuzzy 제어시스템에서의 압력분포

서로 다른 세 가지 시스템에서 냉매가 순환될 때 냉매 압력의 변화 정도를 분석하여 제어시스템 별로 온도 하강 동특성이 서로 다른지를 분석하기 위해서 본 실험을 실시하였다.

그림 27은 On-Off 제어시스템에서 압력의 변화를 나타낸 것이다. 시스템이 정상상태에 도달할 때까지 고압측은 1274.51 kPa 에서, 그리고 저압측은 294.12 kPa 에서 냉매의 압력이 일정하게 평행선을 그리는 것을 알 수 있었다. 이는 On-Off 제어시스템이 외란이나 파라미터 변화에 대해 능동적으로 대처하지 못하고 정해진 기준값에서만 동작하는 것을 알 수 있다.

그림 28은 Fuzzy 제어시스템에서 압력의 변화를 나타낸 것이다. 시스템이 정상상태에 도달할 때까지 동작초기부터 정상상태에 이를 때까지 고압측은 1274.51 kPa 에서 1078.43 kPa 로 변화하였고 저압측은 294.12 kPa 에서 98.04 kPa 으로 변화하였다. 시스템의 빠른 동특성을 유도하기 위해 저장고 내 온도에 따라 순차적으로 EEV 밸브를 닫아가기 때문으로 사료된다. 그러나 퍼지 멤버쉽 함수를 시행착오법에 의해 찾은 관계로 퍼지 멤버쉽 함수가 최적화 되지 못하여 냉매의 압력변화가 온도 하강과 별도로 규칙성이 없이 변화하는 것을 알 수 있다.

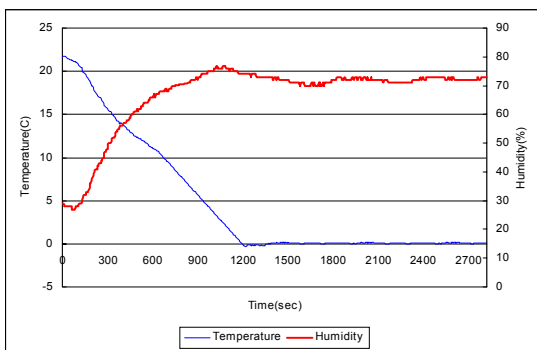


Fig. 25. Humidity profile of Neuro-Fuzzy control system(humidity 70%)

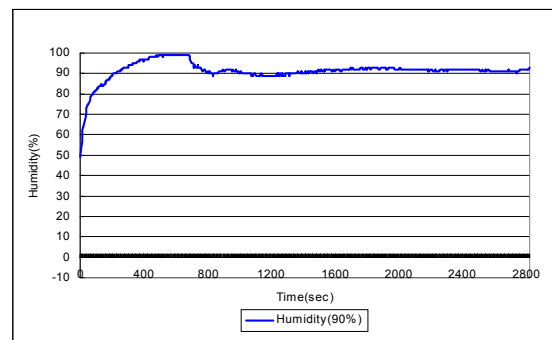


Fig. 26. Humidity profile of Neuro-Fuzzy control system(humidity 90%)

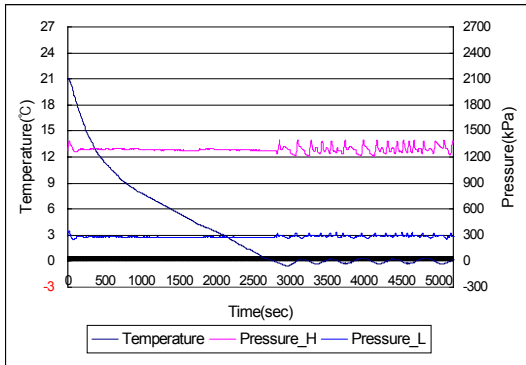


Fig. 27. Pressure distribution of On-Off control system

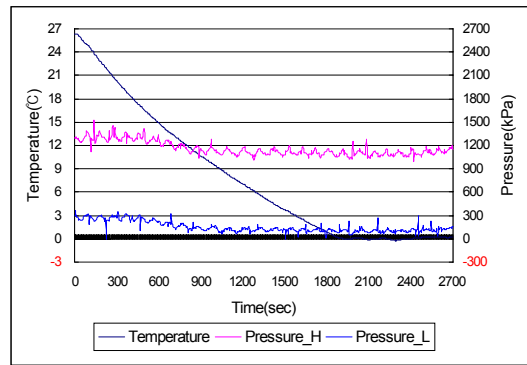


Fig. 28. Pressure distribution of Fuzzy control system

그림 29는 Neuro-Fuzzy 제어시스템 동작시 냉매의 압력변화이다. 고압측은 1274.51 ~ 1372.55 kPa 로 진동하는 데 비해 저압측은 빠른 온도하강 동특성을 유도하기 위해 294.12 kPa 로 동작하다가 정상상태에 도달한 후에는 196.08 kPa 로 동작하는 것을 볼 수 있다. 이는 시스템이 동특성과 헌팅을 최적의 상태로 유지하기 위해 유니트 쿨러의 모세관에 성애가 맺히는 것을 최소화하려는 동작상태로 풀이된다.

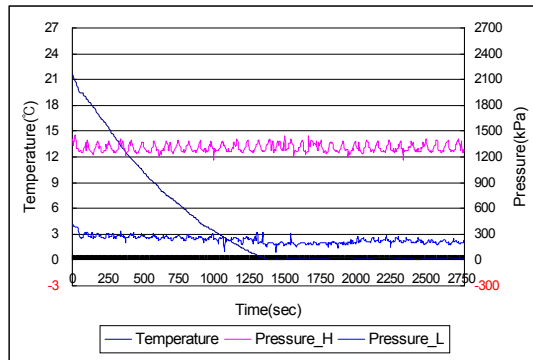


Fig. 29. Pressure distribution of Neuro-Fuzzy control system

마. 저장실험

본 실험에서는 Neuro-Fuzzy 제어시스템이 저장물이 있을 경우 즉, 외란이 작용했을 경우에도 저장물이 없을 경우와 마찬가지로 빠른 온도 하강 동특성과 작은 헌팅을 이용하여 저온저장고가 예냉 기능을 수행할 수 있고 저장단계에 있는 청과물간에 균일한 온도분포를 보이는지를 확인하기 위해 실시하였다.

그림 30은 낮 최고기온이 26℃로 균일한 상태에서 양파를 팔렛상태로 저장한 후에 저장실험을 실시한 결과이다. 예냉은 청과물의 안전 저장온도와 수확시 온도의 중간까지 2시간 이내로 냉각하는 것이 바람직하고, 또 들의 온도차를 6시간 이내에 7/8까지 산지 냉각하는 것이 경제성이나 기술적으로도, 또 신선도유지의 측면에서 바람직한 냉각으로 알려져 있다.(농업기술대계) 이에 따라 본 실험에서는 수확시 품온이 20.5℃인 양파를 2시간 이내에 10℃ 이내로 떨어뜨리는 실험과 수확시 온도와 저온저장시 온도간의 7/8선인 2.6℃까지 떨어뜨릴 수 있는지를 실험하였다.

그림에서 보는 바와 같이 Neuro-Fuzzy 제어시스템은 품온을 절반으로 떨어뜨리는데 1시간 20분 27초가 걸렸고 7/8선인 2.6℃까지 떨어뜨리는데 4시간 26분 24초의 시간이 소요되었다. 이는 Neuro-Fuzzy 제어시스템으로 동작한 강제순환식 저온저장고가 예냉기능을 수행할 수 있는 동특성을 제공할 수 있음을 보여준 실험결과라 할 수 있다.

그림 31은 저장단계에 접어든 양파가 Neuro-Fuzzy 제어시스템 하에서 저장물간 균일한 저장온도를 유지할 수 있는지를 보기 위한 저장실험이다. 저장물은 정상상태 온도에서 그 균일성을 유지하면서 외기온의 변화에 상관없이 그 강인성을 보여주었다. 군데군데 일시적으로 급변한 온도변화는 저온저장고가 성예를 제거하기 위해 제상장치가 동작할 때 나타나는 일시적인 온도변화이다. 부득이 성예를 제거하기 위한 이러한 과정은 아직까지 국내·외적으로 완전히 해소가 안되고 있으며 그 만큼 이 부분이 기술적으로 어려운 문제로 남아있으나 향후 연구를 통해 해소해야할 난제로 여겨진다.

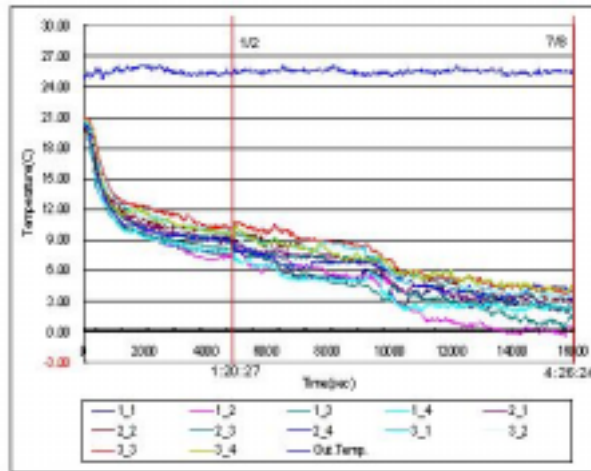


Fig. 30. Storage experiment by Neuro-Fuzzy control system

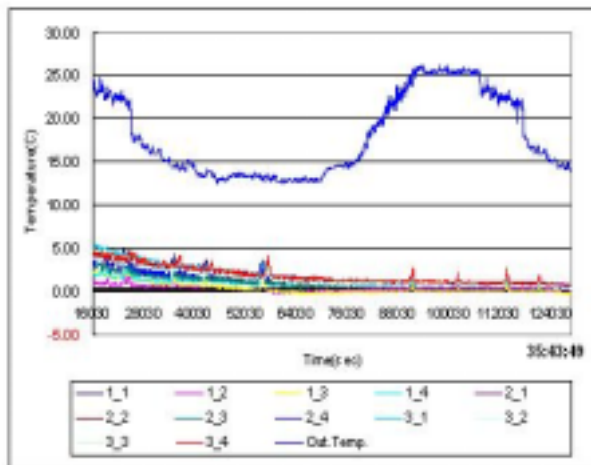


Fig. 31. Storage experiment on the steady state of Neuro-Fuzzy control system

3. 요약 및 결론

현재 국내의 강제순환식 저온저장고의 제어방식은 On-Off 제어시스템과 PID 제어시스템으로 온도하강 동특성이 느리고 정상상태에서 불균일한 헌팅과 심한 온도차, 불합리한 풍속 및 습도제어로 인하여 저온저장고의 성능을 낮다. 이러한 저온저장고의 성능저하는 저장 청과물에 영향을 미쳐 저장 중 부패나 건조, 영양 성분의 감소나 시들 등의 품질저하를 초래하고 있어서 이로 인하여 저장기간을 단축시키고 저장중 감모율 저하의 원인이 되고 있다.

본 연구에서는 이와 같은 재래식 제어방식으로 운영되고 있는 저온저장고의 제어시스템 성능을 개선하여 저온저장고 운영 시 최적의 환경을 제공할 수 있도록 정밀제어가 가능한 Neuro-Fuzzy 제어시스템을 개발하였으며 구체적인 연구 결과는 다음과 같다.

- 1) 저온저장고 제어를 위한 학습기반 알고리즘인 Neuro-Fuzzy 알고리즘을 개발 하여 저온저장고의 정밀제어가 가능하도록 하였다.
- 2) PC 기반제어가 아닌 싱글 칩 Neuro-Fuzzy 마이크로 컨트롤러를 개발하였으며 산업현장에 응용 할 수 있도록 하였다.
- 3) 기존의 On-Off 제어시스템, Fuzzy 제어시스템 그리고 개발된 Neuro-Fuzzy 제어시스템의 성능을 상호 비교하였다. On-Off 제어시스템의 온도하강 동특성은 2,820초, Fuzzy 제어시스템의 온도하강 동특성은 1,725초, 완전히 학습된 Neuro-Fuzzy 제어시스템의 온도하강 동특성은 1,265초로 각각 나타났다. 이는 Neuro-Fuzzy 제어시스템의 동특성이 On-Off 제어시스템 보다는 1,555초 빠른 것으로 123%의 온도하강 동특성의 성능개선을 가져왔다. Fuzzy 제어시스템의 동특성에 비하여 460초 빠른 36.4%의 성능개선을 보였다.
- 4) 정상상태에서의 헌팅 정도를 상호 비교에서 On-Off 제어시스템은 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, Fuzzy 제어시스템은 $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$, Neuro-Fuzzy 제어시스템은 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 의 편차를 보였다. 이는 청과물이 장기 저장 중 온도변화를 보여주는 수치로서 세 가지 시스템 중 Neuro-Fuzzy 제어시스템이 가장 적은 온도편차로 온도변화에 따른 품질변화가 적을 것으로 나타났다.
- 5) 풍속제어 실험에서 On-Off 제어시스템은 정상상태에서 저장고내 공기유동이 없는 관계로 온도제어가 원활하지 못하게 하는 원인을 제공하고 있었고 Fuzzy와 Neuro-Fuzzy 제어시스템은 정상상태에 도달 한 후에도 풍속을 적정선인 1m/s이하로 계속유지하여 헌팅이 감소하도록 도와주는 역할을 하고 있었다. 즉, 풍속이 정상상태에서 1m/s 이하의 적정선을

- 유지한다는 의미는 실제 청과물을 장기 저장시 풍속이 호흡열을 지속적으로 제거시켜 주기 때문에 그 만큼 정밀제어가 가능해져보다 오랫동안 신선도를 유지할 수 있게 해준다.
- 6) 습도제어 실험에서 설정습도가 70%였을 때 On-Off 제어시스템은 단속적인 운전으로 인하여 65%에서 75%의 큰 폭의 변화를 가졌다. Fuzzy 제어시스템은 67~73%의 사이에서 변화를 하였고 학습이 완료된 Neuro-Fuzzy 제어시스템에서는 70~72.5% 내에서 지속적인 변화를 보였다. 이는 두 가지 제어시스템을 비교해서 On-Off 제어시스템 보다 4배의 정밀도, Fuzzy 제어시스템 보다 2.4배의 정밀도를 보인 결과이다. 세 가지 시스템 중 Neuro-Fuzzy 제어시스템이 가장 정밀하게 제어를 하였다.
- 7) 운전 중 냉매의 압력변화 실험에서 On-Off 제어시스템은 정상상태에 도달할 때까지 고압측이 1274.51 *kPa*, 저압측이 294.12 *kPa*을 일정하게 유지하다가 정상상태에 도달한 후 고압측이 1176.47~1372.55 *kPa*, 저압측이 245.1~ 343.14 *kPa*사이에서 변화하였다. 이는 On-Off 시스템이 정상상태에 도달 할 때까지 외란이나 파라미터 변화에 대해 능동적으로 대처하지 못하고 정해진 기준 값에서만 동작하는 것을 알 수 있다. Fuzzy 제어시스템의 경우 저온저장고 동작초기부터 정상상태에 이를 때까지 고압측은 1274.51~1078.43 *kPa*로 변화하였고 저압측은 294.12~ 98.04 *kPa*로 변화하였다. 이는 퍼지 멤버쉽 함수를 시행착오법에 의해 찾은 관계로 퍼지 멤버쉽 함수가 최적화 되지 못하여 발생한 오차로 해석된다. Neuro-Fuzzy 제어시스템의 경우 고압측은 저온저장고 동작 중 1274.51~1372.55 *kPa*로 지속적으로 진동하는 데 비해 저압측은 빠른 온도하강 동특성을 유도하기 위하여 처음부터 294.12~274.51 *kPa*로 동작하다가 정상상태에 도달한 후에는 176.47~245.1 *kPa*로 동작하였다. 이는 시스템이 동특성과 헌팅을 최적의 상태로 유지하기 위해 EEV 밸브를 미세하게 조절하면서 유니트 쿨러의 모세관에 성애가 맺히는 것을 최소화하려는 동작으로 풀이된다.
- 8) 양과저장실험을 통해 Neuro-Fuzzy 제어시스템의 성능을 검증하였다. Neuro-Fuzzy 제어시스템의 빠른 동특성은 저온저장고가 예냉기능을 하였고 작은 헌팅은 정상상태에 있는 청과물간에 균일한 온도분포를 가지도록 해 주었다.

제 2 절 3차원 CFD 시뮬레이션을 이용한 저온저장고의 최적설계

1. 연구수행방법

가. 농산물 저장실험

실험에 사용된 컨테이너 박스형 저온저장고는 그림 32와 같다. 저장고는 냉각팬과 증발기 및 제상히터가 내장된 유니트 쿨러와 3마력 용량의 압축기, 응축기, 수액기 그리고 이들을 제어하는 제어반으로 구성되어있다. 저장고는 전체가 모두 10cm의 폴리스티렌과 안팎으로 0.5cm 두께의 양면 철판으로 제작되었다. 저장고 내의 온도를 측정할 수 있는 13개의 온도 센서를 그림 32와 같이 3차원상으로 설치하여 데이터를 수집하였다.

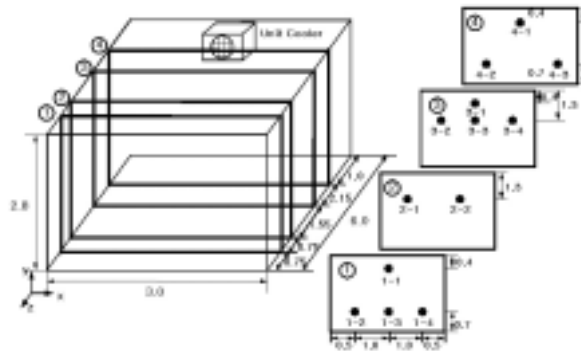


Fig. 32. Location of temperature sensors in a container-type cold storage facility

저장실험은 그림 33과 그림 34와 같이 저장한 후에 실시하였고 저장물 내부에서 열 유동 분포를 확인하기 위하여 13개의 온도센서를 저장물 사이에 설치하여 CFD 모델과 비교 검증하였다. 양파 저온저장은 냉각장치를 사용한 강제공기순환 냉각식이 적합하고 최적 저장 조건은 온도 0℃, 습도 89% 가 가장 좋다. 위의 적정저장 온도에 따라 저장물을 bulk 상태 저장과 pallet 상태저장으로 나누어 저장 후 정상상태에 도달했을 경우의 온도를 측정한다. 저장된 양파사이로 공기가 최대한 적게 통과하도록 하기 위하여 산물저장방법을 사용한 bulk 상태저장의 경우 저장된 양파는 저온저장고의 밑면과 접하게 된다. 그리고 pallet 상태 저장은 저온저장고 내부에 일정한 공기유동통로를 제시한 저장이며 pallet을 제작하여 저장

물이 저온저장고 밑면과 약 0.1m, 벽면과는 약 0.75m 공간을 갖도록 하였다. 그리고 최우 저장물 사이는 약 0.24m, 아래와 위의 저장물사이에는 약 0.13m 의 공간을 주었다.

Bulk 상태저장의 경우 내부 찬공기와의 접촉면적은 12.85m^2 , pallet 상태저장의 경우는 45.44m^2 로 bulk 상태저장이 pallet 상태저장시 접촉면적의 28.3% 에 해당하였다. 윗면을 제외한 벽면에서의 heat flux는 $2\sim 3\text{ W/m}^2$ 의 값을 나타내었다.

그림 33은 bulk 상태저장을, 그림 34는 pallet 상태저장을 나타낸 것이다.

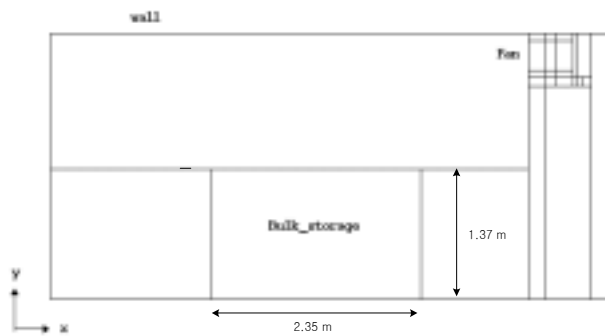


Fig. 33. Bulk storage in cold storage room

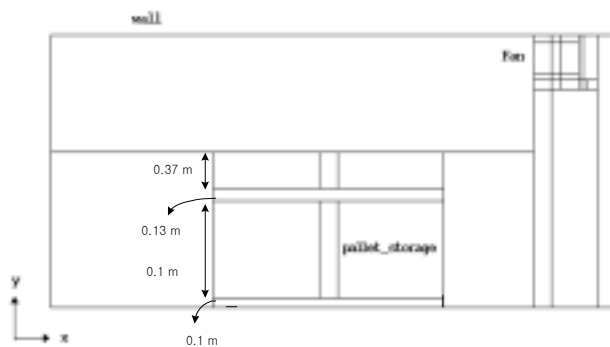


Fig. 34. Pallet storage in cold storage room

3차원 CFD 시뮬레이션으로 개발한 돔형 저온저장고의 저장실험은 그림 13과 14와 같다. 공기유동을 실험하기 위하여 열선식 풍속계를 유니트 쿨러 맞은 편 천장부에 설치하고 데이터 로거를 이용하여 데이터를 수집하였다. 외기온은 온도센서와 데이터 로거를 이용하여 실시간으로 측정 기록하였다.

저온저장고 벽면을 통해 유입되는 열을 측정하기 위하여 heat flux 계측 장비를 사용하였다. 정확한 계측을 위하여 내부 벽면에 heat flux계측을 위한 평판센서를 부착한 후 폴리스티로폼과 단열테이프를 이용하여 반대쪽에서의 열전달을 차단한 후에 계측하였다.

저장고 내 공기유동을 실험하기 위하여 그림 35와 같이 저온저장고의 높이 1m와 2m 지점 각각 17개소에서 풍속을 측정하였다. 측정한 데이터는 시뮬레이션 모델에 의한 예측값과 비교하여 그 유의성을 검증하기 위하여 사용하였다.

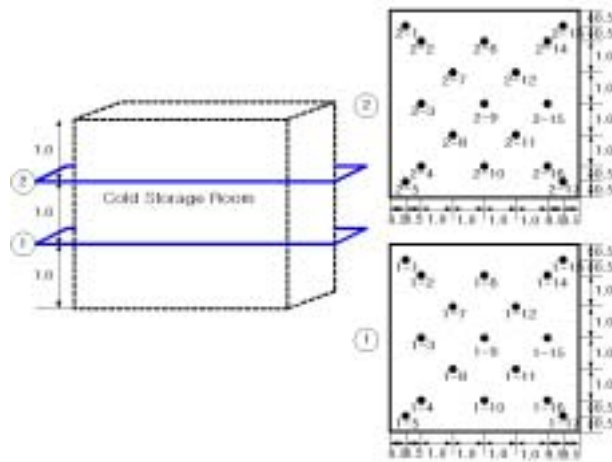


Fig. 35. Location of wind velocity sensors

나. 실험장치

본 실험을 위하여 사용된 실험장치의 제원은 표 2와 같다.

Table 2. Specification of experimental equipment

EEV	Flow rate	Linear
	Capacity	5.0 USRt
	Driving method	4-phase stepping motor
	Rated voltage	DC 12V
	Maximum operating pressure	30kgf/cm ²
	Size	57×57×8 mm
Humidifier	Type	Ultra sonic
	Quantity of humid	2.5kg/h
	Voltage	AC 220V / 60HZ
	Number of vibrator	5EA
	Type of water supply	By Solenoid Valve
	Weight	10.5 kg
Humidity sensor	Range	20~95%
	Accuracy	±3%
Pressure gage	Range	0~30 kgf/cm ²
	Accuracy	±0.25%

Table 2. Specification of experimental equipment (continue)

Data logger	Channels	8 ch
	Input	0~10V
	Resolution	0~4% full scale
	Accuracy	1%
	Memory	128KB
	Conditions	-20~70℃, 0~95%RH
	Interface	RS-232
	Size	48×34×17mm
	Weight	30g
Anemometer 1	Type	Hot wire type
	Range	0~20m/s
	Accuracy	2% FS
	Conditions	-20~60℃, 0~95% RH
	Power supply	15±10% VDC
	Output	0~10V
Anemometer 2	Type	Dia type
	Range	0.2~40m/s
	Accuracy	±0.25% FS
	Resolution	0.01 m/s
Temperature	Type	NTC, PT100
	Range	-30℃~120 ℃
	Accuracy	±0.1℃
Flow converter	Accuracy	±0.5%
	Repeatability	±0.1%
	Linearity	±0.5%
	Flow range	2.26~30 LPM
	Pressure	max.5,000PSI
	Temperature	-40~+100℃
	Size	95×95×90mm
	Power supply	DC 24V
	Output	DC4~20mA,2wire

다. 3차원 CFD 시뮬레이션을 이용한 공기유동 및 열유동 해석

1) 해석 절차

본 연구에서는 3차원 CFD 시뮬레이션을 이용하여 저온저장고 형상을 설계하고 내부의 난류 유동을 해석하기 위해서 다음과 같은 5단계의 절차에 의해서 해석을 하였다.

- ① 3차원 CFD 시뮬레이션으로 균일한 열 유동과 에디현상을 최소화할 수 있는 공기유동 보이는 저온저장고 형상을 결정하고 지배방정식이 형태를 결정하였다. 공기유동이 층류 또는 난류인 가를 결정하였으며 주요 열전달 형태(복사, 대류, 전도)와 화학반응의 여부를 확인하여 그에 적합한 지배방정식을 결정하였다.
- ② 풀어야 할 지배방정식이 어떤 형태의 편미분방정식인 가를 확인하였다. elliptic type, parabolic type, hyperbolic type 중 어떤 형태의 편미분방정식인 가를 확인하고 적당한 형태의 편미분방정식을 적용하였다.
- ③ 관심영역에서 정의된 문제에 대해 형상을 만들고 해석하기 위한 격자를 생성하고 초기조건과 경계조건들을 확인하였다. 격자생성은 주어진 문제의 물리적인 현상에 대한 기초지식과 수치해석의 안정, 그리고 정확도 등에 따라 달라지기 때문에 이점에 주의하여 격자를 생성하였다.
- ④ 아날로그 형태로 된 지배방정식을 디지털 컴퓨터상으로 계산하기 위하여 식을 근사화시키는 discretization 작업을 하였다. discretization 작업에는 유한차분법 (FDM, finite difference method), 유한체적법(FVM, finite volume method), 유한요소법(FEM, finite element method)이 있으나 본 연구에서는 유한체적법을 적용하였다.
- ⑤ 적당한 numerical scheme을 동원한 수치해석을 수행하였다. CFD를 이용하여 난류 흐름을 해석하는 scheme의 종류로는 1st order upwind scheme, 2nd order upwind scheme, 3rd order upwind scheme, central difference, smart scheme 등이 있는데 본 연구에서는 1st order upwind scheme을 사용하였다.

2) 저온저장고의 형상설계 및 공기유동 예측

본 연구에서는 컨테이너 박스형 저온저장고의 단점을 개선한 새로운 형태의 저온저장고를 그림 36과 같이 설계하였다. 저온저장고는 직사각형이 아닌 정사각형으로 설계하였고 유니트 쿨러는 사방 토출형으로 제작하여 한 쪽 벽면이 아닌 천장 중앙에 설치하여 유니트 쿨러

로부터 열전달 거리와 냉기의 이동거리를 최소화하였다. 또한 천장부와 측벽부는 공기가 부드럽게 순회할 수 있도록 돔형으로 설계를 하였다.

저장고의 크기는 현재 국내에서 많이 보급되고 있는 저온저장고의 크기가 5평~10평 규모인 것을 감안하여 10평(6m×6m×5m) 규모로 결정하였다.

돔형의 천장부 각도는 CFD를 이용하여 임의의 각도를 주고 열 유동과 공기유동을 해석해 보았을 때 저장물이 저장되는 유효공간에서 에디현상을 최소화할 수 있는 각도를 구하여 현장에 적용하였으며 그 각도는 130도였다.

CFD 시뮬레이션을 통한 실험에서 천장부와 측벽부의 각도가 130도 미만으로 작을 경우 벽 부근에서 세로방향으로 길게 에디현상이 나타났으며 145도 이상일 경우 유니트 쿨러로부터 토출되는 냉기는 바닥면 까지 충분히 도달하지 못하여 바닥부근이 높은 온도분포를 보였으며 이를 방지하기 위해서는 풍속을 증가시켜야 하는 단점을 내포하고 있었다. 이 실험은 대부분 발산을 하여 정확한 실험값을 제공하지 못하는 관계로 본 논문에는 삽입하지 못하였으나 본 돔형 저온저장고를 사용하려는 사용자들에게 참고가 되었으면 한다.

CFD를 이용하여 형상 설계된 돔형의 저온저장고에서 시뮬레이션을 이용해서 구한 여러 가지 물리량들이 실제 저온저장고가 제작되었을 때 현장 실측치와 다소 차이가 있기 때문에 본 연구에서 개발한 학습 기능을 가지고 있는 뉴로-퍼지 제어시스템을 이용하여 그 시스템에 알맞은 열 유동(온도 제어량)과 공기유동(풍속 제어량)을 찾을 수 있었다.

이와 같은 사실을 검증하기 위하여 본 연구에서는 CFD 시뮬레이션에 의해 설계한 저온저장고가 실제 현장에서도 에디현상이 최소화된 것을 확인하기 위하여 뉴로-퍼지 제어시스템으로 동작되는 저온저장고에서 현장 계측값을 구하여 CFD 시뮬레이션의 경계값으로 사용하여 이를 검증하였다.

설계시 유니트 쿨러에 의한 풍속은 5m/s이고 천장부와 측벽부의 각도는 130도를 이루고 있다. 풍속 5m/s에 해당하는 레이놀즈 수는 81,841로서 난류유동에 해당한다. 그리고 이러한 경계값들은 최초 저온저장고 형상설계시 사용된 값이었고 적용된 경계값은 현장 계측값을 사용하였다. 그리고 저장고 벽면에서는 열이 일정하게 침투되고 있으며 저장물이 있을 때는 양파로 가정하여 양파의 물리적인 조건들을 적용하였다. 따라서 저온저장고 내부의 유동은 3차원 정상상태, 비압축성, 비등온, 난류유동으로 가정하였다.

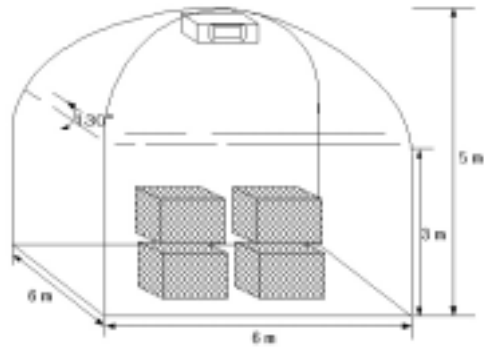


Fig. 36. Schematic of cold storage facility loaded with onions

3) 지배방정식 확인

본 연구에서는 CFD(computational fluid dynamics)를 이용하여 공기유동과 유동을 해석하기 위해 저장고 내부의 공기 유동을 정상상태, 난류 유동, 비압축성 그리고 3차원 상태로 가정하고 저장물은 균질한 물질이고 공기라는 단상유체만 흐르는 것으로 간주하였다. 고체와 유체의 열물성치는 문헌상에서 제시된 상수라 가정하고 이론적 해석모델의 지배방정식 형태로 본 연구에서는 3차원 직교 좌표계의 연속 방정식, 운동량 방정식, 에너지 방정식, 그리고 표준 $k-\epsilon$ 난류유동 방정식을 사용하며 다음과 같이 나타낸다.

① 연속방정식

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

② 운동량 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} + \rho f_i + \frac{\partial(\rho \overline{u_i u_j})}{\partial x_i}$$

f_i 는 전자기력이나 중력 같은 외력, τ_{ij} 는 응력텐서

③ 에너지 방정식

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

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

④ 표준형 $k-\epsilon$ 난류모델

팬에서 발생하는 유동을 등방성 난류 유동이라 보고 경계조건에서 k 와 ϵ 값을 계산하였다.

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

I : 난류 intensity

u_r : velocity

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

C_μ : closure coefficient

K : 확산계수

L : 난류의 혼합길이

난류현상의 해석을 위해 유한체적법에 기초를 둔 검사체적을 사용하여 표준 $k-\epsilon$ 난류 모델을 사용하였다. $k-\epsilon$ 난류모델에서 소산율과 유동속도는 first order upwind scheme 을 사용하였다.

청과물의 최적저장조건을 찾기 위해 저장물의 적재 방식과 저장위치를 변경시키면서 시뮬레이션을 실시하였다. 최적저장방법을 찾은 후 청과물의 증산작용과 중량변화에 영향을 미치는 풍속을 변화시키면서 실험을 하였다.

4) 격자생성

격자생성(mesh generation)은 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.

물리적인 영역에서 급격한 유동함수의 구배가 발생하는 지역인 팬 근처와 벽 가까운 곳에서는 격자선들이 충분히 밀집해 있도록 하여 오차가 발생하거나 해가 발산하지 않도록 격자를 생성하였다. 또한 두 격자선 사이의 과도한 기울어짐(skewness)은 truncation error를 증폭시키므로 피하였으며 격자 cell의 가로, 세로비인 aspect ratio가 너무 크지 않게 하여 오차가 발생하지 않도록 하였다.

컨테이너 박스형 저온저장고의 경우 3차원적으로 형성된 전체적인 mesh는 저장물이 없는 경우와 bulk 상태저장인 경우는 각각 약 12만개, pallet 상태저장인 경우 약 15만개였다. 그림 37과 그림 38은 structured mesh로 구성되어진 저온저장고 내부에 격자생성 모습을 보여주고 있으며 특히 팬 부근은 강제송풍에 따라 공기유동의 변화가 크므로 격자를 조밀하게 형성하여 계산하였다.

본 연구를 통해 개발된 돔형 저온저장고의 경우 사용된 요소망(mesh)은 그림 39, 그림 40, 그림 41과 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. CPU time은 약 120시간이 소요되었다.

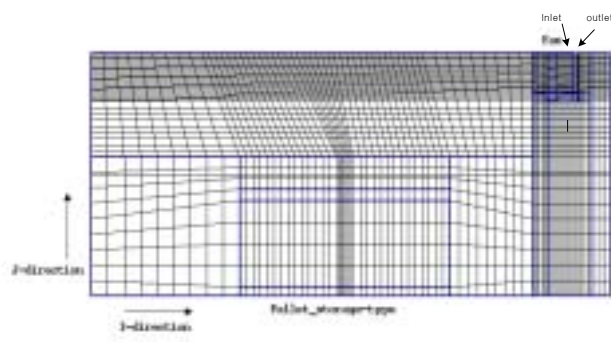


Fig. 37. Computational meshes of pallet storage (front view)

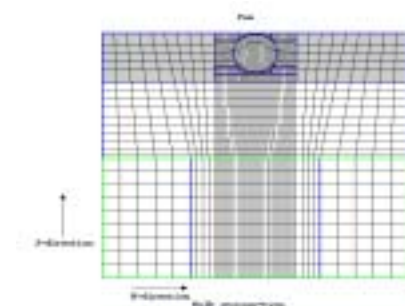


Fig. 38. Computational meshes of bulk storage. (side view)

5) 초기조건과 경계조건

본 연구에서의 초기조건과 경계조건은 실측값을 사용하였다. 그 이유는 3차원 CFD 시뮬레이션으로 저온저장고 내부의 열 유동과 공기유동을 예측하기 위하여 적용한 유니트 쿨러의 입구쪽 속도, 출구쪽 속도, 벽과 천장을 통한 열 유입량 등의 경계값으로 모두 예측값을 사용하여 실측값과 큰 오차를 보인다. 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 위해서 시작기 개발 후 현장실측을 통해 그 경계값들을 다시 구하고 직접 CFD 시뮬레이션 모델에 적용하였다.

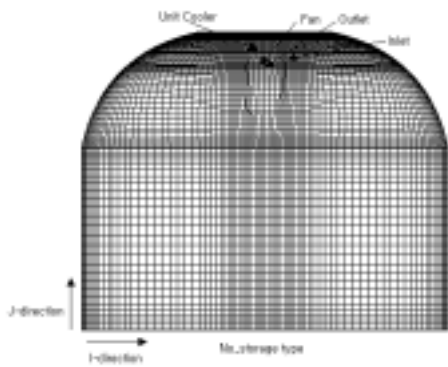


Fig. 39. Mesh generation for the empty storage facility (front view)

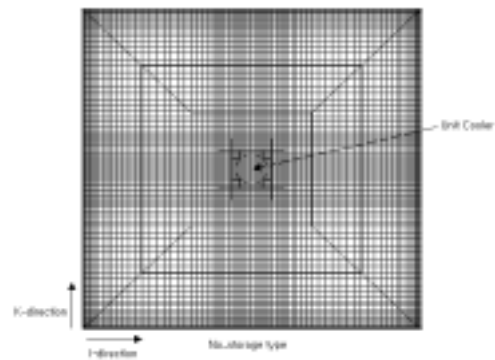


Fig. 40. Mesh generation for the empty storage facility (top view)

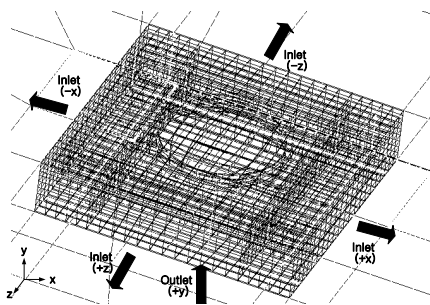


Fig. 41. Mesh generation for the unit cooler

CFD 시뮬레이션으로 해석한 예측값과 실측값을 비교하여 저장고내에서 열 유동과 공기 유동의 유의성을 평가하였다. 이 후 CFD 시뮬레이션만을 이용하여 저장고내의 기타 물리적인 인자들을 분석하여 개발된 저온저장고의 우수성을 검증하였다. 현장계측과 참고문헌을 통해 적용된 경계조건들은 다음에 열거하였다.

입구조건에서 4방향의 풍속은 $+x$, $-x$, $+z$, $-z$ 방향으로 약간의 차이를 보였으며 각각 4.71, 4.76, 4.72, 4.69m/s 이었고, 출구조건에서는 풍속은 2.82m/s를 적용하였다. 그리고 입구쪽 온도는 -1°C (272.15 K), 출구쪽 온도는 1°C (274.15 K)로 하였다. 내부 열원으로는 팬 작동에 따른 발열량, 벽체로부터의 흡입열량, 바닥으로부터의 지열, 저장물의 호흡열량을 고려하였다. 유니트 쿨러와 같은 solid는 순수 철의 물성을 바탕으로 밀도는 $7,830\text{ kg/m}^3$, 비열은 $450\text{ J/kg}\cdot\text{K}$, 열전도율은 $73\text{ W/m}\cdot\text{K}$ 로 하였다. 저장된 양파의 내부 공극을 통해 측정된 평균 품온은 1.2°C 이었다. 양파의 물성은 ASHRAE Handbook(1998)에서 제시된 값을 사용하였다. 호흡열량을 저장된 양파의 부피로 나눈 단위부피당 열발생량 28.84 W/m^3 을 시뮬레이션 모델에서 내부 저장물의 열원으로 사용하였다. 저온저장고의 천장부를 제외한 벽체에서의 경계조건으로는 heat flux 측정장치를 이용하여 측정한 값을 벽체에서의 침투열량으로 하였다. 자세한 경계조건의 값은 표 3에 나타내었다.

팬 앞에서의 난류 intensity는 일반적으로 0.02~0.04를 사용하는데 본 연구에서는 0.02를 사용하였다. 난류의 혼합길이를 나타내는 L_t 는 보통 채널 너비를 사용하기 때문에 본 연구에서는 팬의 넓이인 0.55를 사용하였다.

입구조건으로는 유속의 측정값을 평균한 4.72m/s로 계산한 k 값 0.034565, ϵ 값 0.0057387 그리고 대기압과 저온저장고의 설정온도를 주었다. 출구조건은 2.82 m/s로 계산한 k 값 0.019086과 ϵ 값 0.006017을 각각 적용하였다.

Table 3. Boundary conditions

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

라. 실험방법

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 위치에서 각각 17개 지점에서 풍속계를 이용하여 풍속을 측정한 후에 CFD 시뮬레이션을 통해 해석한 예측치와 비교하여 그 유의성을 검증하였다. 이후 시뮬레이션만을 통해 공기유동 분포를 분석하였다.
- ③ 저온저장고 설계시 CFD 시뮬레이션을 통해 해석한 난류유동 모형과 시작기 개발 후 실제 저온저장고 내에서의 난류유동 모형의 유의성을 검증하기 위하여 센서를 이용하여

실제 난류유동 모형을 실험하고 그 유의성을 입증하였다.

- ④ 컨테이너 박스형 저온저장고에서 3차원 CFD 시뮬레이션을 이용하여 열유동과 난류유동을 해석하여 본 연구에서 개발한 돔형 저온저장고와 비교하여 돔형 저온저장고가 열유동 및 난류유동이 보다 우수한 성능을 보였음을 증명하였다.

2. 연구수행내용 및 결과

가. 저장물의 위치, 높이, 적재방식에 따른 시뮬레이션 실시

bulk상태와 pallet상태로 저장되어 있는 저장물의 공기유동과 온도분포를 저장물의 위치에 따라 모델링하였다. 먼저 bulk 상태의 저장물이 저장고의 중앙에, 팬의 반대쪽에 그리고 팬 쪽에 치우쳐 있는 상태를 모델링하고 그 때의 공기유동과 온도분포를 시뮬레이션하였다. 이때 설정된 저장물의 크기는 $2.35 \times 1.37 \times 1.26\text{m}$ 이었으며 냉기와의 접촉면적은 12.85 m^2 이었다. 그림 42는 저장물이 bulk 상태로 저장되어 있을 경우 냉기의 속도분포 및 온도분포를 보여주고 있다. 그림 42의 (a)는 냉기의 속도분포로서 저장물의 좌측에서는 강한 에디가 발생하고 우측에서는 냉기가 순화되지 못하고 역류하는 모습을 볼 수 있다. 순화되지 못하는 냉기의 영향으로 그림 42의 (b)에서처럼 저장물의 아래쪽과 위쪽이 심한 온도편차를 보여주고 있는 것을 볼 수 있다. 또한 저장물의 왼쪽은 평균 0.5°C , 저장물의 내부는 평균 3.61°C 그리고 저장물의 오른쪽은 1.25°C 의 온도 분포를 보였다.

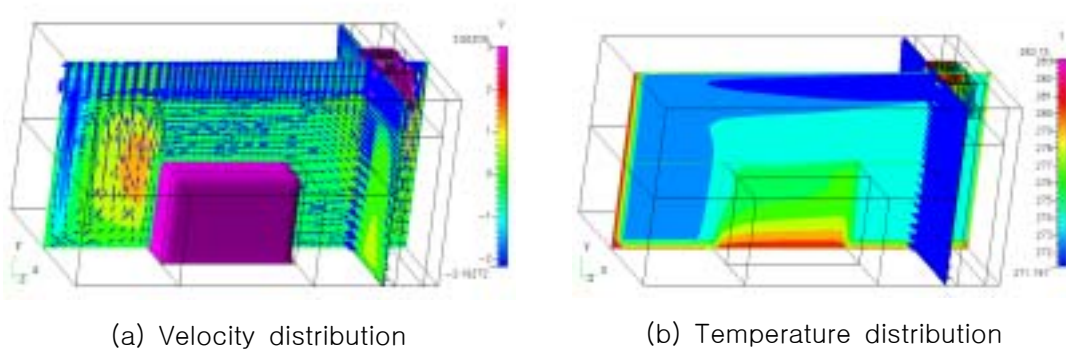


Fig. 42. Velocity and temperature distribution when stores are stored at center of room

그림 43은 bulk 상태의 저장물이 좌측에 치우쳐 저장되었을 때 냉기의 속도분포 및 저장물의 온도분포를 보여주고 있다. 그림 43의 (a)는 벽을 통한 유입열과 순화되지 못한 냉기 분포가 저장물에 미치는 영향을 보여주고 있다. 저장물의 오른쪽에서 냉기는 저장물 쪽으로 강하게 역류하는 모습을 볼 수 있다. 이와 같은 냉기분포로 인해 그림 43의 (b)에서처럼 저장물 내부의 온도분포는 중앙에 저장되었을 때 보다 심한 온도 불균일을 가져오는 것을 알 수 있었다. 저장물 내부의 온도 분포는 평균 4.85℃ 저장물 오른쪽은 평균 0.75℃의 온도분포를 보였다.

그림 44는 저장물이 유니트 쿨러쪽으로 치우쳐 저장되었을 경우 냉기의 속도분포 및 저장물의 온도분포를 보여주고 있다. 그림 44의 (a)는 냉기가 저장물 앞쪽에서 커다란 에디를 유발하고 반대쪽에서 심한 난류흐름 분포를 가지는 것을 보여주고 있다. 이와 같은 냉기의 흐름은 그림 44의 (b)에서처럼 저장물의 앞과 뒤에서 공기흐름의 부조화로 저장물에 악영향을 미치는 것을 알 수 있다.

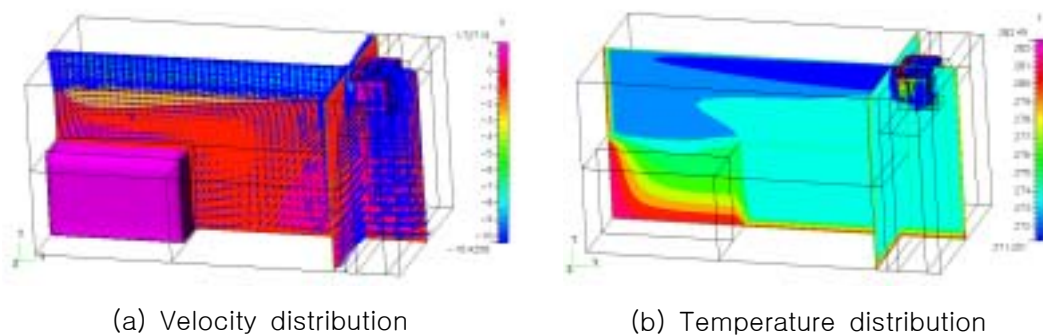


Fig. 43. Velocity and temperature distribution when stores are stored at left side of room

그림 45는 저장물이 중앙에 벽을 형성하며 넓게 분포할 때 냉기의 흐름과 온도분포를 보여주고 있다. 그림45의 (a)와 그림 45의 (b)에서 보듯 공기조화와 저장물 내부에서 높은 호흡열로 인해 저장물에 심한 온도 불균일을 보여 주고 있다.

그림 46의 (a)와 (b)는 저장물이 중앙에 bulk 상태로 높게 적재되었을 경우 냉기의 흐름과 온도분포를 보여주고 있다. 저장물의 아래 부분과 위 부분의 온도 편차와 그리고 저장물의 좌측과 우측의 온도 편차가 심하게 나타나고 있는 것을 알 수 있다.

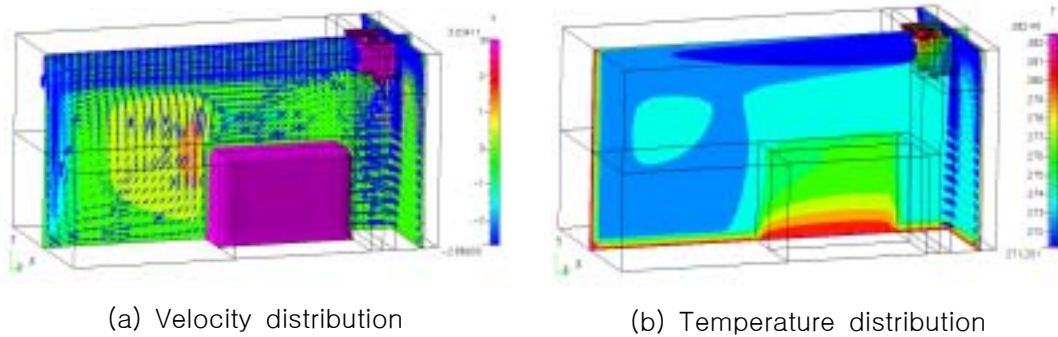


Fig. 44. Velocity and temperature distribution when stores are stored at right side of room

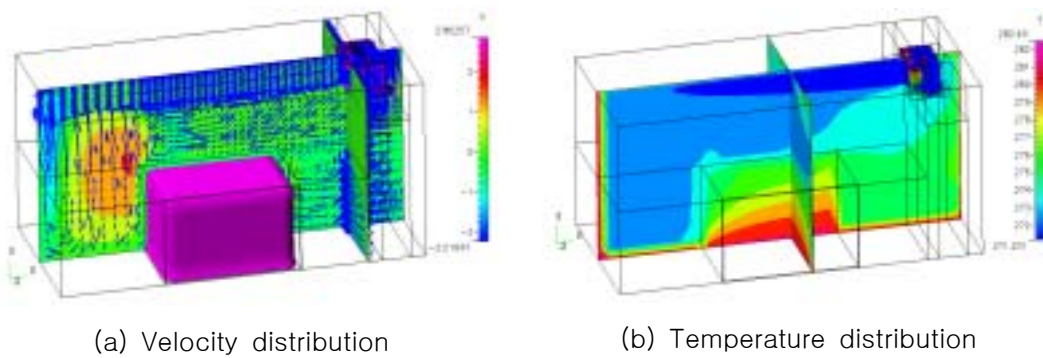


Fig. 45. Velocity and temperature distribution when stores are stored at center of room widely

그림 47은 저장물이 pallet 상태로 저장되어 있을 경우 냉기의 속도분포 및 온도분포를 보여주고 있다. 저장물이 냉기와 접촉하는 면적은 45.44 m^2 이었다. 이는 bulk 상태일 때보다 71.1% 만큼 많아진 경우이다.

그림 47의 (a)는 냉기가 저장물 사이로 잘 순화되어 흐르는 모습을 보여주고 있다. 이로 인해 그림 47의 (b)에서 저장물들은 bulk 상태로 저장되었을 때 보다 고른 온도분포와 낮은 온도분포를 보였다. 설정온도가 0°C 일 때 저장물의 왼쪽은 평균 0.18°C , 저장물 내부는 평균 1.71°C , 저장물의 오른쪽은 0.82°C 의 온도 분포를 보였다. 그림 47의 (c)와 (d)는 저장물의 좌측과 우측의 온도분포를 나타낸다. 냉기가 저장물 사이를 잘 순화되어 흐르지만 그림 47의 (c)에서 보듯이 좌측의 저장물은 냉기에 직접적으로 접촉하므로 낮은 온도분포로 인해 냉해를 입을 위험성이 높은 것으로 판단된다. 반면에 그림 47의 (d)에서 우측의 저장물은 비교적 고른 온도분포를 보이고 있다. 이는 저장고의 불합리한 설계로 풍속이 지나치게 세기 때문에 발생하는 문제이다.

이 같은 문제점을 해결하기 위해 그림 48의 (a)와 (b)에서처럼 저장물을 좌·우 벽쪽으로 치우쳐 저장을 하였다. 그 결과 직접적으로 냉기에 접촉하지 않으므로 저장물의 냉해를 방지할 수 있는 저장 방법으로 판단되었다.

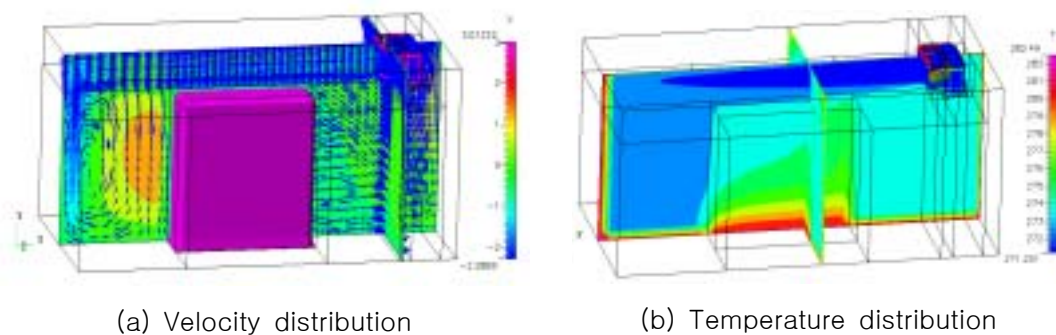
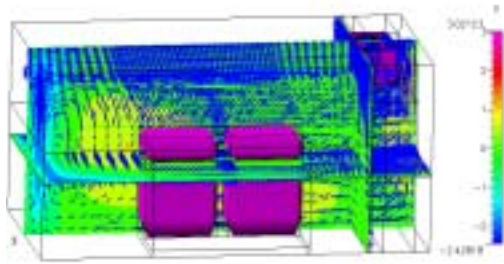
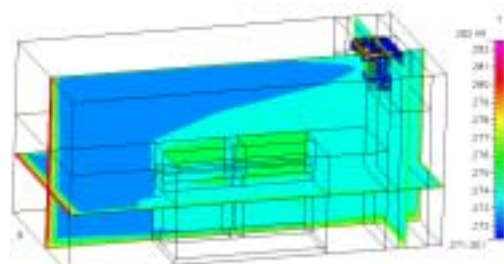


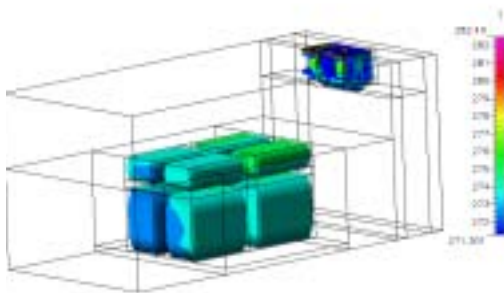
Fig. 46. Velocity and temperature distribution when stores are stored at the center of room highly



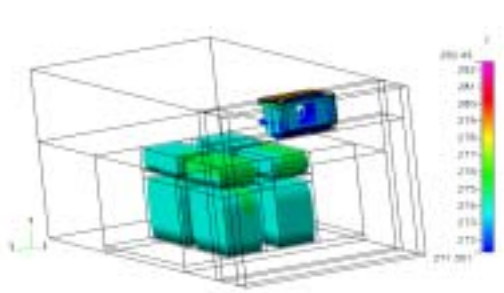
(a) Velocity distribution



(b) Temperature distribution

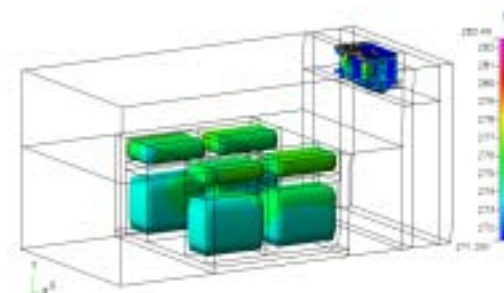


(c) Left side view for temperature distribution of stores

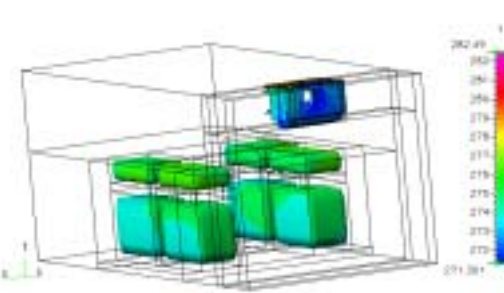


(d) Right side view for temperature distribution of stores

Fig. 47. Velocity and temperature distribution when stores are stored by pallet method



(a) Left side view for temperature distribution of stores



(b) Right side view for temperature distribution of stores

Fig. 48. Temperature distribution of stores when it is stored at the side of room

나. 저장고의 높이, 폭의 변경에 따른 시뮬레이션 실시

그림 49와 50은 저장고의 높이를 각각 3.3과 4.0m로 변경한 후 공기유동과 열유동을 관찰한 결과이다. 그림 49와 같이 저장고 높이 3.3m에서 공기유동이 높이 2.8m이었을 때의 공기유동 모형과 큰 차이는 없었으나 그림 49의 (a)처럼 유닛 쿨러 맞은 편 벽면에서 y축 방향으로 하향 공기유동이 발생하였으며 저장물 앞에서는 큰 에디현상이 발생하였다. 그림 49의 (b)처럼 열유동에 있어서도 저장고의 부피가 증가한 만큼 열확산도 크게 나타났다. 이에 따라 저장물 내부에서의 열유동이 저장고 높이가 2.8m 였을 때 열유동에 비해 전체적으로 불균일한 온도분포를 보였다. 또한 저장물 내부에서의 온도가 평균적으로 상승하는 결과를 가져왔다. 저장고 내부의 온도상승으로 인해 그림 49의 (c)와 (d)처럼 저장물 앞단이 냉해를 입을 가능성은 없는 것으로 확인되었다. 설정온도가 0℃일 때 저장물의 왼쪽은 평균 0.35℃, 저장물 내부는 평균 3.75℃, 저장물의 오른쪽은 1.08℃의 온도 분포를 보였다.

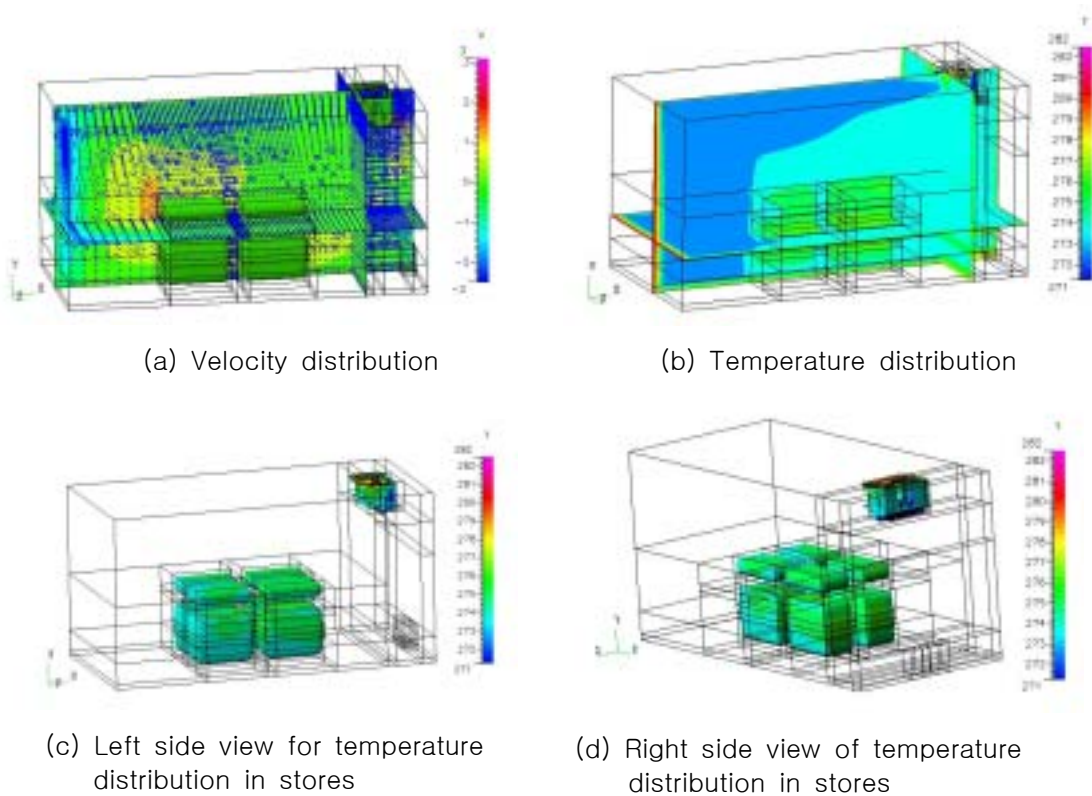


Fig. 49. Velocity and temperature distribution of 3.3 m height cold storage room

그림 50과 같이 저장고 높이를 4.0m로 상향 변경하였을 때 그림 50의 (a)처럼 공기유동의 경우 유니트 쿨러 맞은 편 벽면에서 하향 공기유동이 주요하였다. 그러나 저장물 앞단에서의 에디현상은 다소 줄어들었다. 게다가 그림 50의 (b)처럼 열 유동은 더 커진 저장고의 부피에도 불구하고 저장고 높이가 3.3m 였을 때에 비해 저장물 내부에서의 온도분포는 다소 균일해 진 것을 알 수 있다. 그림 50(c)와 (d)는 저장물 내에서의 온도분포가 보다 균일해 졌으며 저장물 앞단의 냉해 현상도 발생하지 않았다. 설정온도가 0℃일 때 저장물의 왼쪽은 평균 0.45℃, 저장물 내부는 평균 1.6℃, 저장물의 오른쪽은 1.15℃의 온도 분포를 보였다.

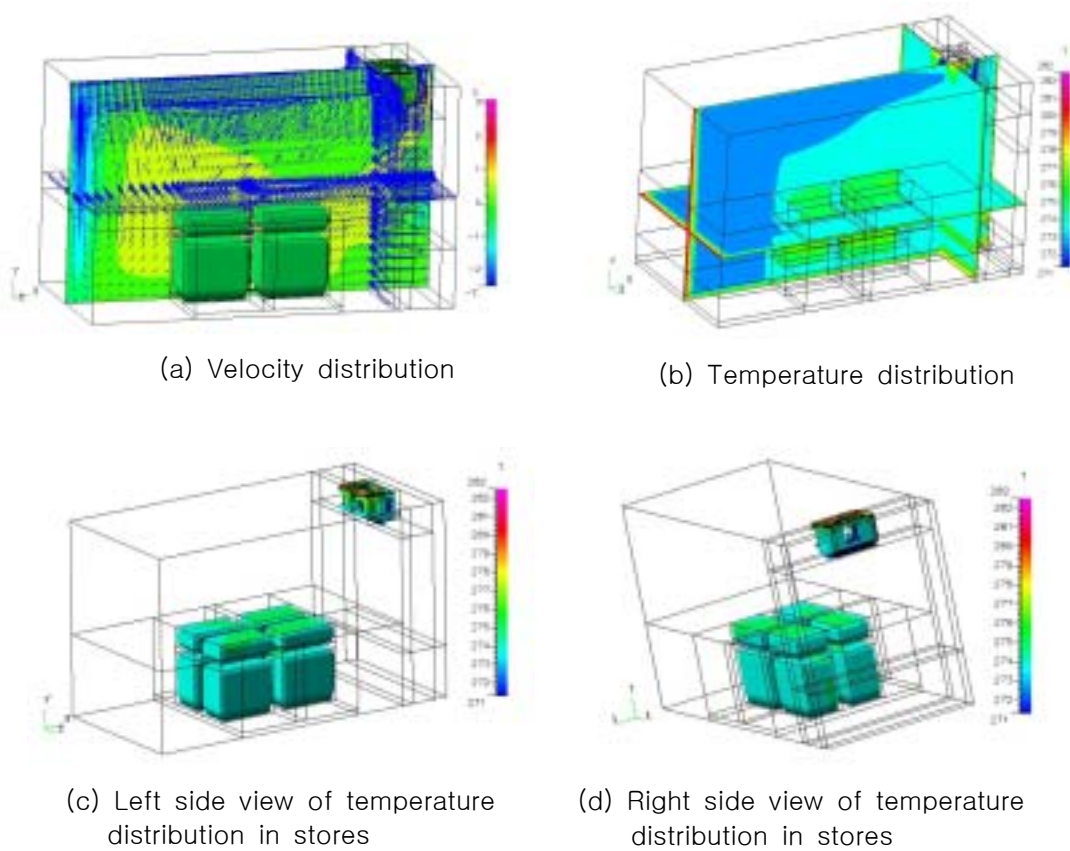


Fig. 50. Velocity and temperature distribution for 4.0 m height cold storage room

그림 51과 그림 52는 저장고의 폭을 각각 3.0m에서 3.5m와 4.0m로 증가하였을 때 공기 유동과 열유동 분포를 보여 주는 실험결과이다. 저장고의 폭이 3.5m에서 4.0m로 증가할수

록 저장물 앞단에서 발생되던 에디현상이 줄어들어는 것을 볼 수 있었다. 그리고 예상되었던 저온저장고 중앙과 가장자리의 온도차이는 미미한 수준이었다. 설정온도 0℃에서 저온저장고의 폭이 3.5m 일 때 중앙부위의 온도는 0.25℃, 가장자리는 0.48℃, 저장물 내부는 평균 1.32℃, 저장물의 오른쪽은 0.85℃이었고(그림 51(b)) 폭이 4.0m일 때 중앙부위의 온도는 0.48℃, 가장자리는 0.74℃, 저장물 내부는 평균 1.65℃, 저장물의 오른쪽은 0.91℃로(그림 52(b)) 나타났다. 이상의 결과들은 표4에 나타내었다.

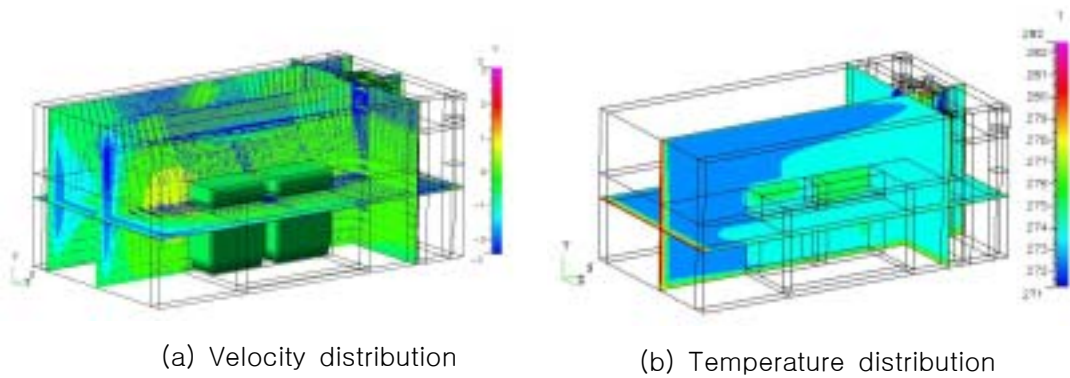


Fig. 51. Velocity and temperature distribution for 3.5 m width cold storage room

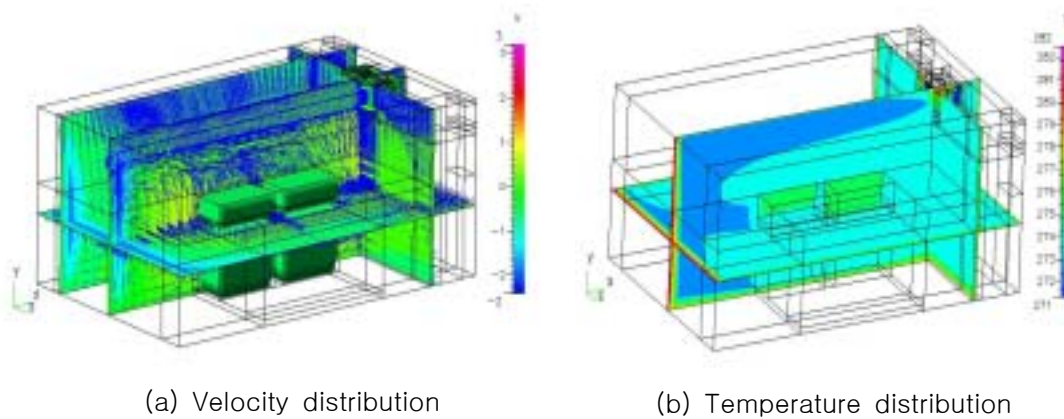


Fig. 52. Velocity and temperature distribution for 4.0 m width cold storage room

Table 4. Temperature distribution at different size of cold storage facility

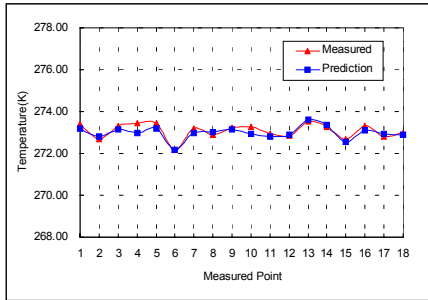
The size of cold storage facility				Temperature distribution (unit: °C)		
	length	hight	width	left side	center	right side
no change	6.0m	2.8m	3.0m	0.18	1.71	0.82
change of hight	6.0m	3.3m	3.0m	0.35	3.75	1.08
	6.0m	4.0m	3.0m	0.45	1.6	1.15
change of width	6.0m	2.8m	3.5m	0.25	1.32	0.85
	6.0m	2.8m	4.0m	0.48	1.65	0.91

다. 컨테이너 박스형 저온저장고의 실측치와 예측치의 유의성 검증

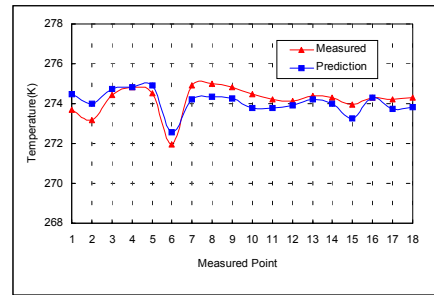
그림 53의 (a)는 저장물이 없을 때 실측치와 시뮬레이션에 예측치를 보여주고 있다. 6지점에서 온도가 가장 낮게 나타나는 것은 유니트 쿨러에 의한 냉기의 영향이 다른 지점에 비해 강하게 작용하기 때문인 것으로 분석된다. 전체적으로 실측치와 예측치의 평균오차는 0.17°C 이었다.

그림 53의 (b)는 bulk 상태로 저장되었을 때 실측치와 예측치를 비교한 것이다. bulk 상태일 경우는 실측치와 예측치의 오차가 no storage와 pallet storage일 때 보다 크게 나타나는 이유는 bulk 상태로 저장할 경우 저장물과 냉기와의 접촉면적이 작은 관계로 호흡열이 불규칙하게 발생하기 때문이다. 또한 완전히 단열되지 않은 벽체를 통한 불규칙한 열 유입도 오차를 발생시키는 원인으로 사료된다. 전체적으로 실측치와 예측치의 평균오차는 0.45°C 이었다.

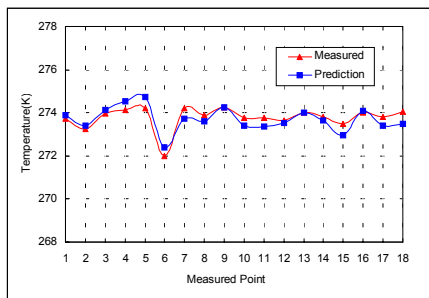
그림 53의 (c)는 pallet 상태로 저장되었을 때 실측치와 예측치의 유의성을 보여주고 있다. pallet 상태로 저장할 경우 냉기와의 고른 접촉으로 no storage일 때의 공기분포와 같이 오차가 아주 작은 값을 나타냄을 알 수 있다. 전체적으로 실측치와 예측치의 평균오차는 0.28°C 이었다.



(a) With no-storage.



(b) With bulk storage.



(c) With pallet storage.

Fig. 53. Comparison between experimental data and prediction data

라. 컨테이너 박스형 저온저장고의 설계상의 문제점 분석

이상과 같이 본 연구에서는 컨테이너 박스형 저온저장고의 설계상의 문제점과 효율적인 설계인자를 찾기위해 저온저장고 내부의 공기유동과 열유동 실험을 하였다. 저장물의 위치, 높이, 적재방법에 따른 시뮬레이션과 저장고의 높이, 폭의 변화에 따른 실험에서 조건에 따라 많은 변화를 가져오는 것을 알 수 있었다. 청과물의 안전저온저장을 위해 적재방법에 있어서는 bulk 저장보다는 pallet 저장이, pallet 저장에서는 가장자리 저장이 안전한 것으로 나타났다.

저온저장고의 크기에 따른 공기유동과 열유동 분포에서 현행 저온저장고 크기보다 저장고 넓이가 3.5m로 변경되었을 때가 가장 좋은 결과를 가져왔다. 그러나 저온저장고의 크기에 따라 공기유동 및 열유동 분포가 좋고 나쁨이 있었지만 전반적으로 균일한 공기유동 및 열유동 분포는 가져오지 못했다. 이는 컨테이너 박스형 저온저장고의 설계가 근본적으로 문제

가 있음을 보여주는 실험결과이다. 이상의 실험결과를 통해 컨테이너 박스형 저온저장고의 설계상의 문제점을 열거하면 다음과 같다.

한 쪽 벽면에서만 불어오는 찬공기는 천장부와 측벽부가 90도로 절곡부를 이루고 있어서 저온저장고의 여러 군데에서 공기정체 현상이 나타나고 있음을 알 수 있다. 유닛 쿨러 반대쪽 벽면과 2/3 지점 그리고 유닛 쿨러 아래 부근에서는 공기의 역류현상과 에디현상이 심각한 것을 알 수 있다. 이에 따라 이 부근에 청과물이 저장되었을 경우 증산작용이나 에디현상으로 청과물의 표면 건조나 부패, 영양분 손실을 가져 올 수 있다. 또한 컨테이너 박스형 저온저장고는 공기유동이 불균일하고 이로 말미암아 온도분포도 균일하지 못하여 저장 청과물의 감모율과 신선도를 떨어뜨리고 저장성능을 약화시키며 상당부분의 공간을 사용하지 못하는 비경제적인 면이 많은 단점을 포함하고 있다.

마. 저장고의 형태에 따른 시뮬레이션과 신모델 개발

1) 3차원 CFD 시뮬레이션에 의한 열 유동 분석

본 실험은 기존의 컨테이너 박스형 저온저장고의 단점을 보완하기 위해 새로 설계한 돔형 저온저장고의 열유동 분석을 위한 실험이며 또한 돔형 저온저장고의 우수성을 검증하기 위한 실험이기도 하다.

그림 54는 저온저장고내의 열 유동 분포도이다. 냉기의 영향을 간접적으로 받는 천장부에는 열 유입이 계속되고 있으나 유닛 쿨러에 의해 아래로 더 이상 전달되지 못하고 차단되는 것을 관찰할 수 있다. 바닥면에서의 냉기의 영향은 벽면부에 비해 다소 작았지만 냉기의 영향에 의해 바닥면을 통한 열 유입이 상쇄되는 것을 볼 수 있다.

그림 55는 3차원 상에서 열 유동을 관찰한 것이다. 냉기의 영향을 비교적 덜 받는 천장부와 그 가장자리로 열 유입이 있는 것으로 나타났지만 유닛 쿨러에서 지속적으로 토출되는 냉기에 의해 아래로 전달되지 못하고 차단되는 것을 알 수 있다.

벽면에서 열 유입이 적은 이유는 유닛 쿨러에서 토출되는 냉기가 4방 벽면으로 흐르기 때문에 외부에서 유입되는 열이 상쇄되는 것으로 분석된다. 저온저장고의 균일한 온도분포를 유지하게 해주는 커다란 잇점으로 작용되었다. 결과적으로 본 연구에서 3차원 CFD를 이용하여 설계된 돔형 저온저장고는 외부로부터의 열 유입을 최소화해주는 내부 구조를 가짐으로써 그 만큼 저온저장고의 성능을 향상시켜 주는 결과를 가져온 것으로 판단된다.

2) 3차원 CFD 시뮬레이션에 의한 공기유동 분석

본 실험은 저장고 내부의 공기유동을 실측치와 유의성이 검증된 3차원 CFD 시뮬레이션을 이용하여 공기의 정체구간 여부와 공기유동의 왜곡된 부분을 분석하고 이를 통하여 돔형 저온저장고의 공기유동 우수성을 입증하기 위하여 실시하였다.

그림 56은 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.

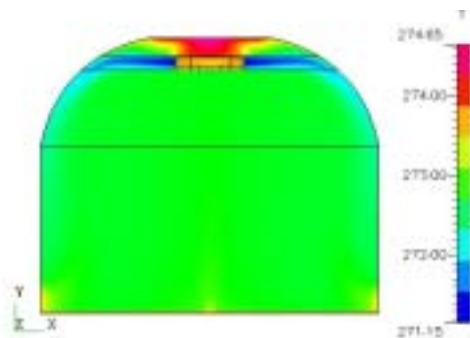


Fig. 54. Heat flow in the cold storage facility (front view)

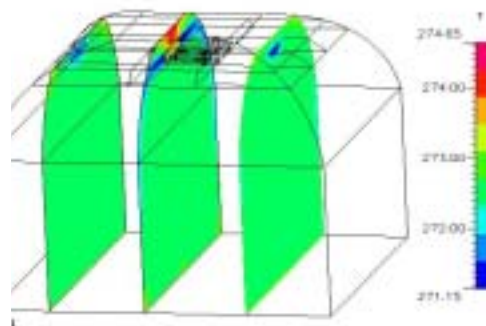


Fig 55. 3-D heat flow in the cold storage facility (3-D view)

3) 저장물이 있을 때 3차원 CFD 시뮬레이션에 의한 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 57은 저장물이 있을 때 열유동을 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.

그림 58는 저장물이 있을 때 공기 유동 분포를 분석한 결과이다. 냉기는 저장물 사이를 부드럽게 순환하고 있으며 저장물 윗 부분에서는 상승공기로 인해 유니트 쿨러 쪽으로 냉기가 재흡입되었다.

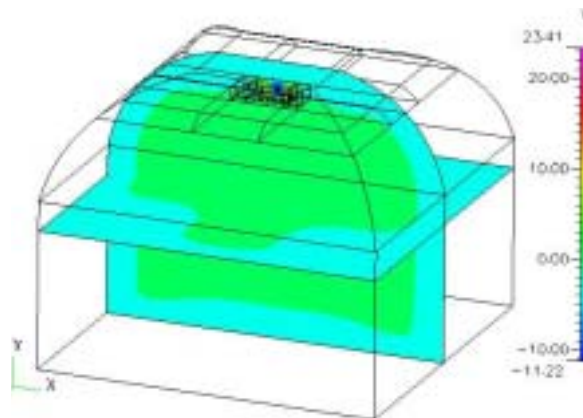


Fig. 56. 3-D velocity distribution

바. 신모델(돔형) 저온저장고의 시작기 개발

3차원 CFD 시뮬레이션을 통하여 설계한 저온저장고를 시공하기 위하여 먼저 그림 59과 같이 바닥을 콘크리트로 기초를 다진 후 C형강을 이용하여 골조를 형성하였다. 다음으로 그림 60과 같이 합석을 이용하여 돔형의 천장을 구성하였다. 단열시공을 위하여 10mm 두께의 스티로폼 판넬로 측벽부를 형성하고 천장부는 유리섬유와 10mm 두께의 스티로폼 판넬로 단열을 하였다. 그림 61과 그림 62는 시설이 완성된 후의 저온저장고 내부의 천장부와 벽면부를 나타낸 것이고 그림 63는 사방 냉기 토출용 유니트 쿨러의 모습이다. 그림 64는 완성된 후의 저온저장고의 외관이다. 외형은 원활한 시공을 위하여 보통의 구조 형식으로 건축하였으나 내부는 돔 형식으로 설계·시공하였다.

그러나 시작기 개발 후 유니트 쿨러 바로 앞에서 현장 계측한 공기의 속도는 평균 약 4.72 m/s였고 천장부와 측벽부의 각도는 130°로서 CFD 시뮬레이션을 이용하여 설계했을 때와 다소 차이가 있었다. 현장 계측치의 레이놀즈 수는 77,258로 난류유동에 해당한다.

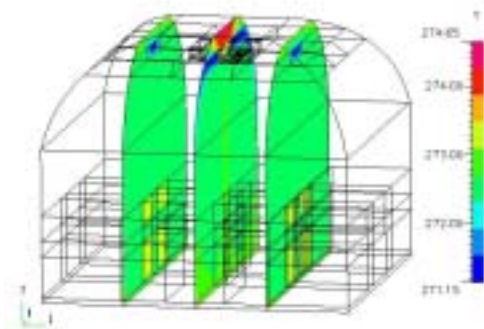


Fig. 57. 3-D heat flow in the empty storage room

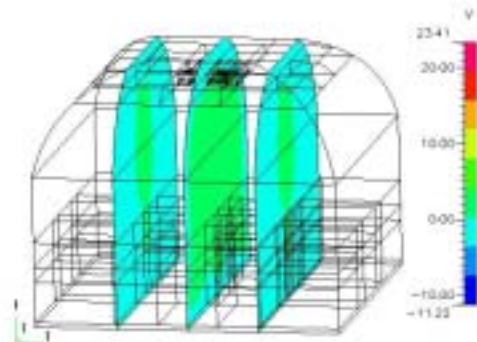


Fig. 58. 3-D velocity distribution in the storage room with onions



Fig. 59. Skeleton of the dome-type cold storage facility



Fig. 60. Shape of ceiling of the dome-type cold storage facility



Fig. 61. Edge line of ceiling

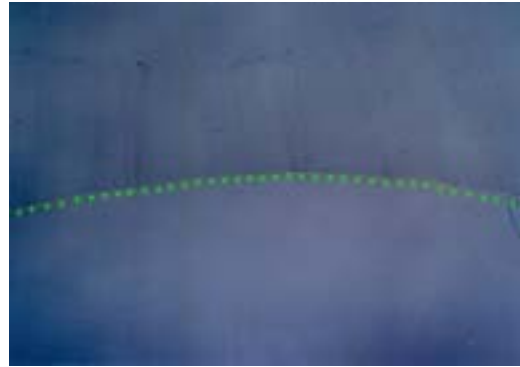


Fig. 62. Center line of ceiling



Fig. 63. Unit cooler



Fig. 64. The cold storage facility

사. 신모델(돔형) 저온저장고 개발을 위한 시뮬레이션 모델 검증

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

1) 온도

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.

설정온도가 0°C일 때 실측치와 예측치의 온도값을 비교하여 그 오차의 경향에 대한 R.M.S. 값을 계산하였다.

$$R.M.S. = \sqrt{\frac{\sum(\text{deviation})^2}{\text{No. of data}}}$$

여기서, *deviation*: 실측치와 예측치의 차이

No. of data: 관측 데이터의 수

그림 65과 그림 66은 실측치와 예측치의 유의성을 검증하기 위하여 그래프로 나타낸 것이다. 전반적으로 왜곡된 곳 없이 저장물이 없을 경우 R.M.S. 값은 0.12°C였고 저장물이 있을 경우 R.M.S. 값은 0.18°C로 나타났다. 이러한 결과로 부터 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 해석된 반면 실제 현장에서는 유니트 쿨러의 모세관과 성에에 의해 방해받기 때문에 온도하강중에는 4.72m/s~3.8m/s로, 그리고 뉴로-퍼지 제어에 의해 헌팅 구간에서는 2.5m/s로 동작하기 때문에 현장 계측 시에는 풍속의 낮은 분포가 저장고 내 열 유동을 크게 만들어 실측치 온도가 예측치 온도보다 다소 높은 값을 보이는 것으로 해석되었다.

2) 풍속

그림 67과 그림 68은 각각의 계측위치에서의 오차의 경향을 분석한 내용이다. 센서위치가 8번과 10번에서 잔차가 높게 나타났는데 $y=1\text{m}$ 인 경우 8번 위치에서 $38.5\%(-0.2\text{m/s})$, 10번 위치에서 $33.3\%(-0.16\text{m/s})$ 의 오차를 보였다. $y=2\text{m}$ 인 경우 8번 위치에서 $20\%(-0.13\text{m/s})$, 10번 위치에서 $25.7\%(-0.18\text{m/s})$ 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 또한 풍속 측정시 측정오차나 표준 $k-\epsilon$ 난류모델의 적용오차일 가능성도 고려할 수 있다. 그러나 기타 다른 지점에서는 이보다 작은 오차를 보여 비교적 정확한 결과를 보여주었다.

온도의 경우와 반대로 풍속의 경우에 실측치가 예측치 보다 다소 낮은 이유는 예측치의 경계조건에서 입구쪽 풍속이 4.72m/s 로 균일하게 설정된 반면 실제 현장에서는 유니트 쿨러의 모세관과 성에에 의해 공기유동이 방해받기 때문에 온도하강중에는 $4.72\text{m/s} \sim 3.8\text{m/s}$ 로, 그리고 뉴로-퍼지 제어에 의해 헌팅 구간에서는 2.5m/s 로 동작하기 때문에 실측치가 예측치 보다 다소 작은 값을 보이는 것으로 해석되었다.

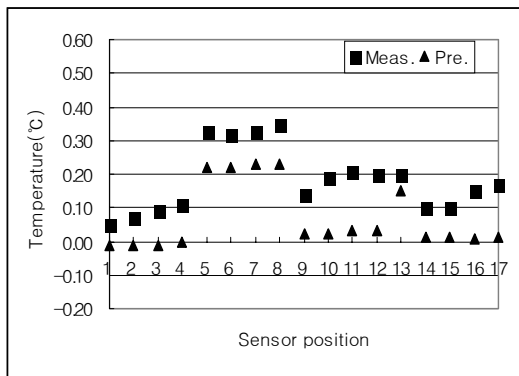


Fig. 65. Measured and predicted temperatures for empty storage facility

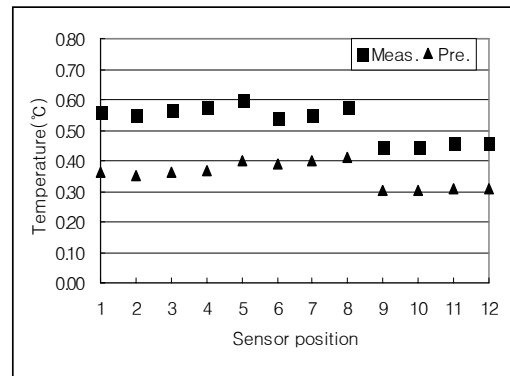


Fig. 66. Measured and predicted temperatures for the loaded storage facility

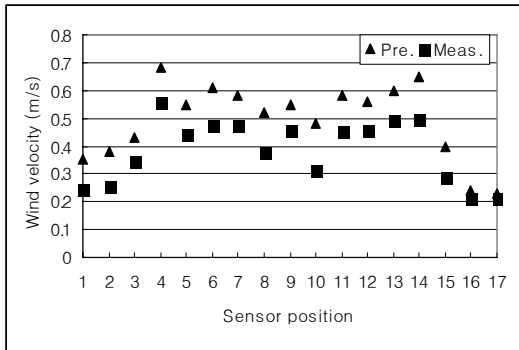


Fig. 67. Measured and predicted wind velocities at y=1m

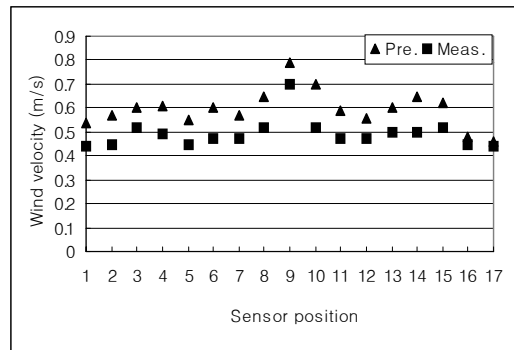


Fig. 68. Measured and predicted wind velocities at y=2m

3. 요약 및 결론

본 연구에서는 컨테이너 박스형 저온저장고의 문제점을 분석하고 이를 해소하고자 3차원 CFD 시뮬레이션을 이용하여 저온저장고의 형상을 설계하고 저장고 내부에서의 열 유동과 공기 유동을 분석하여 균일한 온도 분포와 공기 정체 현상이 없는 신모델(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 130°의 각도를 가지고 있다. 유니트 쿨러는 사면 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. 이 같은 저온저장고의 구조와 공기유동 방식은 저장고내의 에디현상이나 열 적체 구간을 최소화시켜주는 결과를 가져왔다.

4) 개발된 돔형 저온저장고와 컨테이너 박스형 저온저장고의 열 유동과 공기유동을 CFD 시뮬레이션을 통하여 비교한 후 돔형 저온저장고의 성능이 더 우수하다는 사실을 증명하였다. 컨테이너 박스형 저온저장고는 한 축 방향에서 불어오는 7.59m/s의 강한 냉기의 흐름에 의해 천장부는 설정온도 0℃보다 1.5℃ 낮은 분포를 보였고 측면부와 바닥면은 지속적인 열 유입으로 불균일한 온도 분포를 보였다. 또한 한 축 방향의 난류 흐름으로 인해 유니트 쿨러 반대면과 저온저장고의 2/3 지점, 그리고 유니트 쿨러 아랫부분에서 심한 에디현상이 발생하는 것을 확인 할 수 있었다. 반면에 돔형 저온저장고는 4축에서 불어오는 냉기의 영향과 돔형의 천장부와 측벽부를 냉기가 부드럽게 순환하기 때문에 균일한 온도 분포와 풍속 분포를 보였다. 특히, 돔형 저온저장고의 경우 측벽부를 통해 외부에서 들어오는 열이 천장부와 측벽부를 따라 순환하는 냉기에 의해 차단되기 때문에 균일한 열 분포를 보였다. 이와 같은 공기역학적 설계의 잇점으로 인하여 1m/s이하의 적은 양의 풍속으로도 저온저장고의 온도를 균일하게 맞출 수 있다는 결과를 가져왔다. 이 같은 잇점은 청과물 저장시 컨테이너 박스형 저온저장고에서 흔히 나타나는 증산작용에 의한 표면 건조로 상품성을 떨어뜨리는 현상이라든가 부패로 인한 감모율 저하를 줄일 수 있을 것으로 사료된다.

4. 종합 요약 및 결론

본 연구에서는 저장 중 청과물의 품질손상을 최소화할 수 있는 저온저장고의 뉴로-퍼지 제어시스템을 개발하였다. 또한 3차원 CFD 시뮬레이션을 이용하여 컨테이너 박스형 저온저장고의 문제점을 분석하고 불합리한 설계를 개선하여, 저장고 내의 공기유동이 공기역학적인 특성에 의해 부드럽게 흐를 수 있도록 돛형 저온저장고를 개발하였다.

저온저장고의 뉴로-퍼지 제어시스템 개발 및 3차원 CFD 시뮬레이션을 이용한 돛형 저온저장고 개발에 관한 구체적인 연구결과는 다음과 같다.

- 1) 저온저장고 제어를 위한 학습기반 알고리즘인 뉴로-퍼지 알고리즘과 이를 탑재한 원 칩 뉴로-퍼지 마이크로 컨트롤러를 개발하였다.
- 2) 기존의 on/off 제어시스템, 퍼지 제어시스템과 개발된 뉴로-퍼지 제어시스템의 동특성과 헤팅을 비교하여 뉴로-퍼지 제어시스템의 성능을 증명하였다.
- 3) 습도제어 비교실험에서 각 시스템간의 습도제어 성능을 비교하였다.
- 4) 풍속제어실험으로 각 제어시스템이 외란이나 파라미터 변화에 대해 얼마나 유기적으로 동작하는가를 비교하였다. on/off 시스템의 경우 정상상태에 도달하였을 때 외란의 변화와는 상관없이 단속적인 운전만 반복하여 시스템의 성능을 떨어뜨렸고 퍼지와 뉴로-퍼지 제어시스템은 외란이나 파라미터 변화에 대해 유기적으로 동작하여 정상상태에 도달 후 1m/s 이하의 풍속을 유지하였다. 이는 실제 저장 청과물이 있을 경우 계속해서 발생하는 호흡열을 제거시켜주는 유기적인 동작이 되는 것으로 매우 바람직한 현상이라고 사료된다.
- 5) 3차원 CFD 시뮬레이션을 이용하여 신모델(돛형) 저온저장고를 설계제작하였다. 돛형 저온저장고는 6m×6m×5m의 크기로 시뮬레이션 모델과 같은 형상과 크기로 사면 토출형 유니트 쿨러를 설계 제작하여 모델과 같은 성능을 보이도록 하였다.
- 6) 개발된 돛형 저온저장고가 CFD 시뮬레이션 모델과 같은 열 유동과 공기유동을 가지는가를 실측치와 예측치를 비교하여 그 유의성을 검증하였다.
- 7) 개발된 돛형 저온저장고가 컨테이너 박스형 저온저장고에 비해 균일한 열 유동과 공기유동을 보이는 것을 3차원 CFD 시뮬레이션 모델과 실제실험을 통해 증명하였다.

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

구 분	연구 개발 목표	연구개발 목표의 달성도	
		연구 내용	달성도
1차 년도 (2001. 8~ 2002. 8)	저온저장고용 Neuro-Fuzzy 제어 시스템 개발	Neuro-Fuzzy 제어 알고리즘 개발.	100 %
		Neuro-Fuzzy 제어기 인터페이스 개발.	100 %
		Neuro-Fuzzy 제어기의 검증 실험을 위한 시작기 제작	100 %
		Neuro-Fuzzy 제어기의 검증을 위한 저장실험	100 %
		Neuro-Fuzzy 제어기 성능평가	100 %
2차 년도 (2002. 8~ 2003. 8)	3차원 CFD 시뮬레 이션을 이용한 저 온저장고의 최적설 계	농산물 저장실험을 통한 저장고내의 공기유동 과 온도분포 규명	100 %
		실제 실험과 개발된 시뮬레이션 모델과의 비 교 검증	100 %
		저장물의 위치, 높이에 따른 시뮬레이션 실시	100 %
		저장고의 높이에 따른 시뮬레이션 실시	100 %
		저장고의 형태에 따른 시뮬레이션 실시	100 %
		저온저장고의 최적설계	100 %

본 연구에서 개발한 뉴로-퍼지 제어시스템은 on/off 제어, PID 제어 및 퍼지 제어시스템에 비해 온도 하강 동특성이 빠르고 헌팅의 발생이 적어 온도, 풍속, 습도를 정밀하게 제어함으로써 청과물 저장 중 발생 될 수 있는 여러 가지 생리적인 변화를 억제하여 신선한 상태로 장기간 저장할 수 있는 우수한 제어시스템이라고 판단된다. 또한 기존의 컨테이너 박스형 저온저장고의 단점을 개선하여 3차원 CFD 시뮬레이션을 이용하여 개발된 신모델(돛형) 저온저장고는 강제순환식 저온저장의 설계상의 단점을 개선한 연구결과라고 판단된다. 그러므로 본 연구를 통해 개발된 뉴로-퍼지 제어시스템과 신모델(돛형) 저온저장고는 저온저장고의 제어와 최적설계에 기술진전이 있었다고 사료된다.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

본 연구에서는 저온저장고의 Neuro-Fuzzy 제어시스템을 개발하여 기존의 재래식 제어방식에 비해 성능면에서 우수하다는 것을 증명하였다. 그리고 기존의 컨테이너 박스형 저온저장고의 문제점을 3차원 CFD 시뮬레이션과 실제실험을 병행하여 파악하였으며 이를 토대로 신모델(돔형) 저온저장고를 개발하였다. 개발된 본 기술은 국내 저온저장고 설비·제작업을 하는 중소기업에 기술이전을 할 것이며 국내 농산물 유통의 Cold Chain화에 일조를 할 수 있을 것이다. 또한 연구결과물은 학계에 발표하여 저온저장고를 연구하는 연구자들과 일반 사용자들이 공유할 수 있도록 할 예정이다.

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

1. 적설식 냉장시설

- '97년판 농산물유통기술년보, 농산물유통기술연구회편(일본)

청과물 장기저장을 위한 저온저장시설에 관한 일본의 연구동향을 조사하였다. 청과물의 품질을 유지하면서 장기저장을 하기 위해서는 설정 저장온도의 변화와 풍속이 적을수록 좋으며 습도는 고습도를 유지하는 것이 이상적인 청과물 장기저장 방법이다. 이 조건을 만족하기 위한 저온저장시설의 연구로 그림 69과 같이 저온저장시설을 만들어 실험을 하였다. 자연 빙열을 이용하기 위해 북해도 지방의 지하 50m 지점의 지하공간에 저온저장시설을 만들었다. 저장실은 1~6℃의 온도분포를 보였다. 저온저장시설에 얼음창고와 저장실을 두었다. 얼음창고의 면적은 100 m^2 , 얼음 양 340 톤, 저장실 면적 200 m^2 이다. 저장실의 한쪽에 칸막이로 저장실 A를 만들고 온도 10℃, 상대습도 70%를 유지하였다. 저장실 B는 온도 5℃, 상대습도 90%를 유지하도록 저온저장시설을 만들었다. 얼음창고에서 전도와 대류에 의해 전해진 냉열로 저장실을 냉각시켰다. 이럴 경우 풍속이 없이 단지 전도와 대류에 의해 전달된 자연냉기에 의해 저장실은 냉각기능을 수행하게 된다. 습도는 얼음에 의해 자연적으로 고습도를 유지하게 된다. 이러한 자연열 냉각 방식의 설비비는 보통의 저온저장시설비보다 1/3 정도 저렴하게 비용이 소요되었으며 청과물 장기 저장에 효과적인 성능을 보였다.

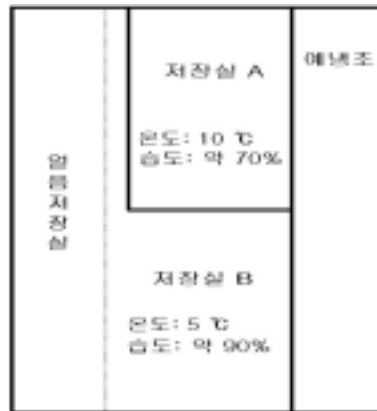


Fig. 69. Stored snow type cold storage facility

2. 빙온용 냉장시설

- '97년판 농산물유통기술년보, 농산물유통기술연구회편(일본)

청과물을 적정 저장온도보다 낮은 온도 즉 결빙이 일어나지 않는 온도를 피해서 보관이 가능한지를 연구하였다. 그림 70은 빙온용 저장고로서 벽에 냉각관을 설치하고 저장고 위에서 냉기를 아래로 불어넣는 방식이다 냉기의 평균 온도는 0~-2℃ 였다. 이는 특수 냉장고 용으로 개발되었으며 0℃이하 -1℃, -2℃에서 각각 실험하여 청과물의 결빙저장 가능성을 보였다

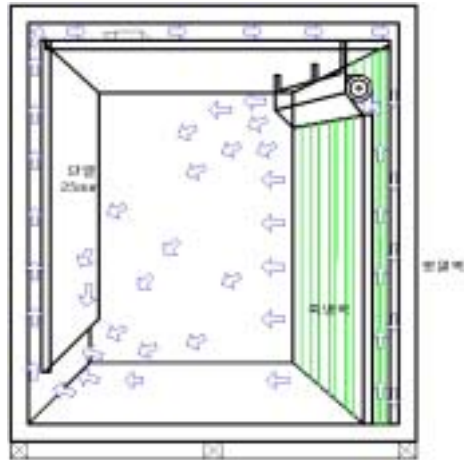


Fig. 70. Cold storage facility for refrigeration

3. 보습형 냉장시설

- '97년판 농산물유통기술년보, 농산물유통기술연구회편(일본)

그림 71는 저장고내 상대습도를 95%이상 유지하면서 청과물을 보존할 수 있는 냉열복사형 냉장고이다. 이는 고습도를 장기간 유지할 수 있도록 개발된 냉장고로서 4개의 벽면에 냉각관을 설치하고 전도와 대류에 의해 냉각 및 보습이 되도록 하였다.

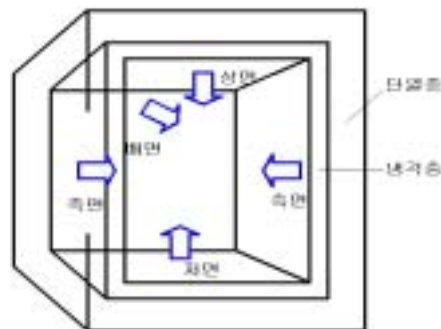


Fig. 71. Cold storage facility to preserve humidity

4. 자연냉열이용 저온저장고

- '98년판 농산물유통기술년보, 농산물유통기술연구회편(일본)

자연냉열을 이용한 저온저장고의 연구개발이 최근에 일본에서 활발히 전개되고 있다. 그림 72는 자연냉열이용 저온저장고의 개략도이다. 심야전력을 이용해 야간에 얼음을 만들어 저장해 두었다가 낮 동안에 얼음의 용해잠열을 이용 저장고내의 열교환기로 보내 저장고의 공기를 냉각시키는 방식이다. 용적은 1200 m^3 였고 냉방시 열교환기의 온도는 1°C 이고 설정환경은 2°C 를 유지하게끔 제작되었다. 성능테스트 결과 용해잠열을 이용한 저장고 내의 온도와 습도는 적절히 유지되었고 특히, 저장실험에 사용된 감자의 당함량이 증가하여 관능평가에서 높은 평가를 받았다.

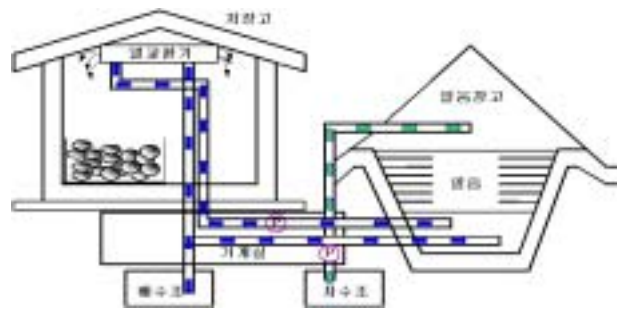


Fig. 72. Cold storage facility to use natural coldness

5. 냉온 고습도 조건과 선도보지효과

- 기계화농업 1999. 12.(일본)

청과물의 저온저장시 선도를 보지하기 위해 온도, 풍속과 더불어 중요한 인자가 습도이다. 습도는 저장 청과물의 증산작용을 방지하여 저온저장 중 중량감소로 인한 청과물의 외관품질 손상에 의한 상품성을 저해하는 것을 막아주는 역할을 한다. 대부분의 청과물의 적정 저장습도는 85%~95%이며 이를 유지하는 것이 선도 장기유지에 중요하다.

그림 73은 과피저항이 서로 다른 청과물에서 상대습도 변화와 선도보지일수와의 관계를 실험한 것이다. 상대습도가 50%에서 95% 까지 고습도 상태로 변화될 때 선도보지일수는 급격하게 증가하는 것을 알 수 있다. 과피저항이 500인 청과물의 경우 상대습도 50%에서 저장했을 때는 선도보지일 수가 1일 정도였지만 상대습도가 95%에서 저장했을 때는 약 15일로 선도보지일 수가 증가하는 것을 알 수 있다. 과피저항이 1000인 청과물의 경우는 상대습도 50%에서 2일 정도 95%에서 약 27일 선도보지일수가 증가하였고 과피저항이 5000인 청과물은 상대습도 50%에서 10일, 95%에서 118일로 선도보지일수가 급격히 증가한 것을 알 수 있다. 이 같은 연구결과는 저온저장고에서 저장 청과물의 고습도 유지가 청과물의 신선도를 유지하는데 얼마나 중요한지를 보여 주는 연구사례라 할 수 있다.

하지만 고습도를 유지할 경우 저장 청과물이 곰팡이 균에 감염되기 쉽기 때문에 이에 대한 연구도 같이 병행되고 있다. 고습도 유지시 균에 감염되는 것을 예방하기 위해 이온(ion)이나 오존(ozone), 기타 살균방법 등에 관해 연구중이다.

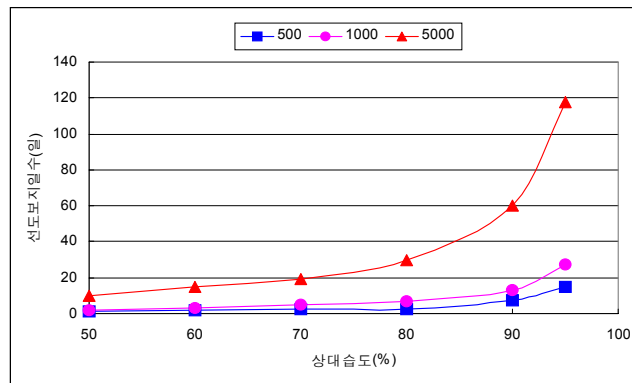


Fig. 73. Relation between R.H. and the day of freshness

제 7 장 참고문헌

1. 김정훈. 1996. 냉동 공조용 증발기의 과열도 및 증발온도의 퍼지제어. 부경대학교 박사 학위 논문
2. 최순오, 김정훈, 양현석, 김종수. 1994. 전자 팽창밸브를 이용한 증발기의 냉각 유량제어 및 과열도 특성에 관한 연구. 공기조화냉동공학 논문집 6(4) : 380-387
3. 김정훈. 1996. 냉동 공조용 증발기의 과열도 및 증발온도의 퍼지제어. 부경대학교 박사 학위 논문
4. American Society of Heating, Refrigerating & A/C Engineers. 1998. ASHRAE Handbook
5. 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
6. Califano. A. N. and N. E. Zaritzky. 1993. A numerical method for simulating heat transfer in heterogeneous and irregularly shaped foodstuffs, Journal of Food Process Engineering 16 : 159-171
7. Cho, B. K. 1997. Study on the temperature distribution & air flow in cold storage room using $k-\epsilon$ turbulence model. Seoul National University Agricultural Machinery Eng.. Master's Thesis
8. Gommori, M., H. Kogure and T. Hara. 1986. Reduction of thermal energy loss in cyclic operation of refrigeration cycle. Trans. of the JAR. Vol 3. No.2 : 37-44
9. Higuchi K. 1992. Evaporator Control Systems. Refrigeration. Vol. 61, No.701 : 223-230
10. Husain, A., C. S. Chen and J. T. Clayton. 1973. Simultaneous heat and mass diffusion in biological materials. Journal of Agricultural Engineering Research 18 : 343-354
11. Kang, S. W. 1996. Development of a poisson model to predict recirculating flows in cold storage rooms. Ph.D. dissertation. Cornell University, Ithaca, New York
12. Kato, T. 1990. Development of the fuzzy control system for heat pump air conditioners. Refrigeration Vol. 65, No.755 : 50-58
13. Kim, G. S., K. S. Lee, J. H. Yun, I. C. Song. 1997. Study on the method of calculating air cooling load for cold storage facility. HAVAC. Summer Conference : 372-377

14. Launder, B. E. and D. B. Spalding. 1974. The Numerical Computation of Turbulence Flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 3 : 269–289
15. Nielsen, P. V, A. Restivo and J. H. Whitelaw. 1978. The velocity characteristics of ventilated room. *Trans. ASME. J. Fluids Engrg.* 100 : 291–298
16. Rousseau, A. N. 1995. A computational fluid dynamics study of incomplete air mixing in a model slot-ventilate enclosure. Ph. D. dissertation. Cornell University. Ithaca, New York.
17. Timmons, M. B. 1979. Experimental and numerical study of air movement in slot-ventilated enclosures. Unpublished Ph.D. dissertation, Cornell University. Ithaca, New York.