

# 저온저장고 냉각부하분석 프로그램 개발

## Development of a computer program for refrigeration load calculation in a cold storage house

정 훈*	윤홍선*	이원옥*	이현동*	조광환*
정희원	정희원	정희원	정희원	정희원
H.Jeong	H.S.Yun	W.O.Lee	H.D.Lee	K.H.Cho

### 1. 서론

우리나라 농산물 저온저장고 설치비 중 70% 이상이 저장고내 열관리를 위한 자재와 설비에 소요되며, 저온저장고의 가동에는 많은 에너지가 소요되므로 열관리 설비 및 에너지 비용의 최소화로 저온저장 비용을 절감화 시킬 필요가 있다. 더욱이, 우리나라는 에너지의 대부분을 수입에 크게 의존하는 나라로 에너지를 효율적으로 관리하는 것이 매우 중요하다.

저온저장고에서 냉각부하계산은 저온저장고설비 계획에 의한 시스템의 용량결정과 성능평가 및 연간에너지 소요량 산정의 기초가 되는 기본기술이다. 냉각부하 계산방법에는 최대냉각부하 계산법과 동적 냉각부하 계산법이 있다. 최대 냉각부하 계산법은 저온저장고의 장치용량을 결정하기 위한 것이고, 동적 냉각부하 계산법은 연간 에너지 소비량을 산정하기 위한 것이다. 저온저장고의 에너지 비용에는 저장고의 구조재, 냉동시스템의 효율과 가동방법 등의 요인들이 상호 연계되어 영향을 미치므로 에너지 비용의 최소화를 위해서는 이들 인자들을 고려한 동적 냉각부하의 분석이 필요하다.

현재 우리나라 농산물 저온저장고의 설계 및 시공에 있어서, 저온저장고를 사용할 농민이나 농촌지도자는 저온저장고 설계에 대한 지식이 희박하고, 시공업체도 주로 경험에 의하거나, 간단한 계산방법에 의존하여 시공하는 실정이므로 과도한 용량 설정으로 인해 에너지를 낭비하거나, 부족한 용량 설정으로 인해 저장물의 품질을 저하시키는 부작용을 초래한다. 또한 저온저장고 운영기술에 있어서도 에너지 측면을 고려하지 않은 저장방법을 사용하는 농가가 대부분이다. 선진 외국에서는 저온저장고의 설계 및 운영을 위한 컴퓨터 소프트웨어가 개발되어 널리 이용되고 있다.

따라서, 본 연구는 저온저장고의 최적 설계와 에너지 절감을 위하여, 우리나라 기후, 지역 및 저장 품종에 적합한 저온저장고의 냉각부하 분석 컴퓨터 프로그램을 개발하고자 수행하였다.

---

\* 농촌진흥청 농업기계화연구소

## 2. 재료 및 방법

### 가. 냉각부하 분석프로그램 작성

#### (1) 기본 메뉴구성

저온저장고의 냉각부하를 분석할 수 있는 프로그램을 데이터베이스 개발용 프로그래밍 언어인 Power Builder 6.0을 사용하여 마이크로소프트 윈도우 작업환경 하에서 실행할 수 있도록 작성하였으며, 기본 메뉴 컴퓨터 화면을 Fig. 1에 나타내었다.

메뉴구성은 크게 입력정보, 냉각부하계산, 데이터베이스 및 연산데이터 관리로 이루어져 있으며, 입력정보 메뉴에는 저장고 크기, 저장실 개수, 저장물 종류, 설치지역, 저장조건(냉동기기 용량, 조명, 작업원 등), 단열재 종류 및 두께와 입출고 계획 등의 세부 항목으로 구성하였다. 냉각부하계산 메뉴에는 설계용 최대냉각부하 계산항목과 기간별 에너지 소모량을 예측할 수 있는 동적냉각부하 계산항목으로 구성하였다. 데이터베이스 메뉴에는 기상 데이터, 포장재 데이터, 저장작물 데이터 및 단열재 데이터 등의 항목으로 구성하였다. 연산데이터 관리메뉴에는 결과 테이블 및 그래프를 출력할 수 있는 항목과 소비전력 비용계산을 할 수 있는 항목으로 구성하였다.

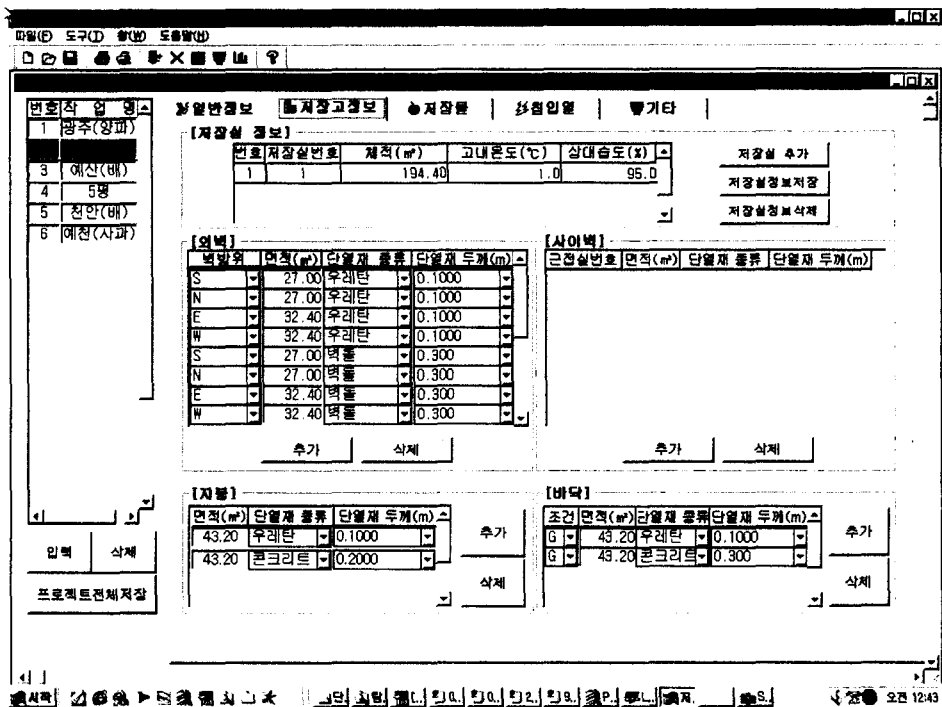


Fig. 1. Display of main menu

#### (2) 최대 냉각부하 분석 프로그램 작성

Table 1에 최대 냉각부하 계산내용 및 계산식을 나타내었다. 최대 냉각부하의 전체부하

계산은 벽체 침입열, 냉각열, 환기 침입열, 호흡열 및 저장고 내 발생열량을 합하여 안전율 10%을 곱한값으로 계산하였다. 벽체 침입열량은 벽체 침입열, 지붕침입열 및 바닥 침입열의 합한 값이며, 냉각열량은 입고품 냉각열 및 상자 냉각열을 합한 값이다. 저온저장고내 발생열량은 팬발생열, 작업원 발생열 및 조명발생열 등을 합한 값이다.

최대 냉각부하 계산에 사용된 세부 수식은 미국냉동공조학회 핸드북(ASHRAE handbook, 1993)과 농산물저장유통기술핸드북(한국농산물저장유통학회, 1999)을 참조하여 사용하였다.

Table 1. Equations and contents of maximum load calculation

구 분	냉각부하 내용	계산식
벽체 침입열량	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 벽체 침입열</li> <li>· 지붕 침입열</li> <li>· 바닥 침입열</li> </ul>	$Q_w = k \cdot A \cdot \Delta t$ $k$ : 열전달율, $A$ : 면적 $\Delta t$ : 온도차
냉각열량	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 입고품 냉각열</li> <li>· 상자 냉각열</li> </ul>	$Q_c = M \cdot C \cdot \Delta t$ $M$ : 냉각물중량 $C$ : 냉각물비열 $\Delta t$ : 온도차
환기 침입열량	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 환기에 의한 침입열</li> </ul>	$Q_v = E \cdot V \cdot n \cdot 1/24$ $E$ : 엔탈피차 $V$ : 저장실체적 $n$ : 환기회수
호흡열량	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 입고품 호흡에 의한 발생열</li> </ul>	$Q_r = M \cdot K$ $M$ : 냉각물중량 $K$ : 냉각물 호흡열계수
저온저장고내 발생열량	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 팬발생열</li> <li>· 작업원 발생열</li> <li>· 조명 발생열</li> </ul>	$Q_e = \text{팬발생열량} + \text{작업원 발생열량} + \text{조명발생열량}$
전체부하	$(Q_w + Q_c + Q_v + Q_r + Q_e) \times 0.1(\text{안전율})$	

### (3) 동적 냉각부하 분석 프로그램 작성

저온저장고의 기간별 에너지 소모량 분석을 위한 동적 냉각부하 분석프로그램 계산의 절차를 Fig. 2에 나타내었다. 동적 냉각부하 분석프로그램은 태양의 일사량을 고려한 저온저장고 벽체의 상당온도를 구하기 위한 기상데이터 전처리 과정과 시간별 기상자료 및 환경변화에 의한 냉각부하를 계산하는 과정으로 크게 나눌 수 있다. 기상데이터 전처리 루틴은 시간별 외기온도, 수평면 전일사량, 토양온도, 외기온 등을 입력받아서 수평면 직달일사량, 수평면 산란일사량, 벽체 상당온도를 출력하며, 출력데이터는 전달함수법에 의해 시간별 벽체침투부하 계산에 이용된다. 시간별 외부공기 침입부하는 일정기간별 기상데이터 자료를 이용해서 출입문 및 환기 침입부하를 합하여 계산된다. 시간별 저장물에 의한 부하는 시간별 저장물의 냉각부하 및 호흡열에 의한 부하를 합하여 계산된다. 또한 유닛쿨러, 작업원, 조명열, 지게차 등의 기타 부하를 합산하여 기간별 전체부하를 계산하고 에너지 소모량을 계산하게 된다.

Table 2에는 동적 냉각부하 계산식을 나타내었다.

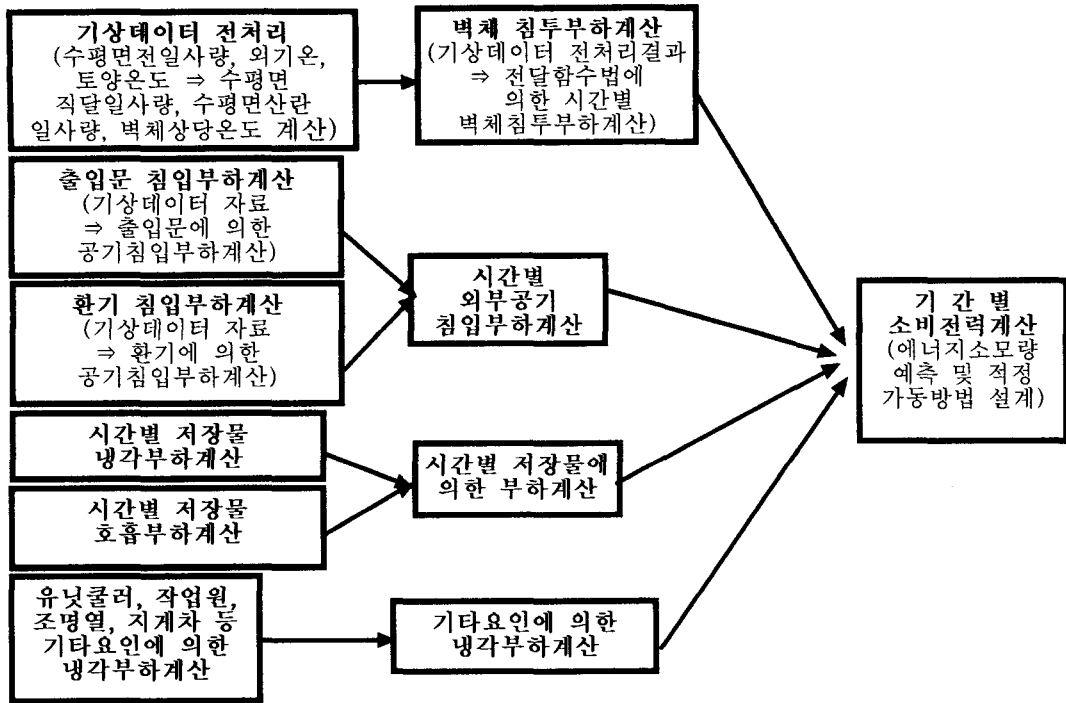


Fig. 2. Calculation process of transient load calculation

Table 2. Equations of transient load calculation

구분	계산식	출처
벽체침투부하	$q_{\text{heatgain}} = \text{ins\_r\_value} * \text{ag\_area} * (\text{id\_temp}[\text{ii\_time}] - \text{room\_temp})$ $\text{ins\_r\_value}$ : 단열재계수(W/m <sup>2</sup> .°C), $\text{ag\_area}$ : 벽체면적(m <sup>2</sup> ) $\text{id\_temp}[\text{ii\_time}]$ : 시간별 상당 외기온도(°C) $\text{room\_temp}$ : 저장실 온도(°C)	ASHRAE 핸드북자료 1993, 저장유통 기술 핸드북 1999
외부공기 침입부하	$q_{\text{vent}} = (\text{ho} - \text{hi}) * \text{vent\_number} * \text{room\_vol}$ $\text{ho}$ : 실외공기 엔탈피(W/m <sup>3</sup> ), $\text{hi}$ : 실내공기 엔탈피(W/m <sup>3</sup> ) $\text{vent\_number}$ : 환기회수, $\text{room\_vol}$ : 저장실 체적(m <sup>3</sup> )	
저장물 냉각부하	$q_{\text{product\_cooling}} = (\text{product\_weight} * \text{product\_spheat} * (\text{product\_temp} - \text{a\_room\_temp}))$ $\text{product\_weight}$ : 저장물 중량(kg), $\text{product\_spheat}$ : 저장물 비열(W/kg.°C), $\text{product\_temp}$ : 저장물 온도(°C), $\text{a\_room\_temp}$ : 저장실 온도(°C)	
저장물 호흡부하	$q_{\text{respiration}} = \text{qr} * \text{product\_weight}$ $\text{qr}$ : 저장물 호흡열 계수(W/kg), $\text{product\_weight}$ : 저장물 중량(kg)	
유닛쿨러 부하	$q_{\text{unitcooler}} = (\text{power\_fan} * \text{number\_fan} * \text{hour\_operation})$ $\text{power\_fan}$ : 팬 동력(W), $\text{number\_fan}$ : 팬 개수 $\text{hour\_operation}$ : 팬 작동시간(h)	
작업원 부하	$q_{\text{people}} = \text{number\_people} * \text{heat\_people} * \text{hour\_work}$ $\text{number\_people}$ : 작업원수, $\text{heat\_people}$ : 작업원 발생열(W) $\text{hour\_work}$ : 작업시간(h)	
조명부하	$q_{\text{etc\_light}} = \text{lw} * \text{nl} * \text{h}$ $\text{lw}$ : 조명동력(W), $\text{nl}$ : 조명개수, $\text{h}$ : 조명시간(h)	

## 나. 데이터 베이스 자료조사 및 입력

### (1) 기상 데이터

냉각부하 분석에 필요한 기상데이터는 최대 냉각부하분석용과 동적 냉각부하분석용으로 나누어 입력하였으며, 기상청 자료를 참조하여 입력하였다. 최대 냉각부하분석용 기상자료의 입력자료는 전국 66개 지역의 1961년부터 1990년까지의 월평균 자료이며, 내용은 위도, 경도, 설계용 온·습도, 월별 건구온도 및 상대습도 자료이다. 동적 냉각부하용 기상자료의 입력자료는 전국 20여개 지역의 1999년부터 2001년까지의 시간별 평균자료이며, 내용은 시간별 건구온도, 지중온도(0.3m), 일사량 자료이다. 동적 냉각부하용 기상자료의 일사량 및 지중온도 자료 측정지역이 20여개 지역으로 한정되어 있으며, 최근 몇 년 전부터 일사량을 측정한 곳이 대부분이기 때문에 1999년부터 2001년까지의 평균값을 사용하였다.

### (2) 포장재 데이터

농산물 포장재의 냉각부하 계산을 위한 나무, 골판지, 플라스틱, 스티로폼 상자 등의 무게, 비열 등의 자료를 국내자료 및 미국냉동공조학회 핸드북을 참조하여 입력하였다.

### (3) 단열재 데이터

벽체침투부하를 계산하기 위해 우레탄, 스티로폼, 콘크리트, 이이소핑크, 유리섬유, 암면, 벽돌, 우레아폼 등의 단열재에 대한 단열 특성계수를 국내자료 및 미국 냉동공조학회 핸드북 자료를 참조하여 입력하였다.

### (4) 저장작물 데이터

저장물의 냉각부하 및 호흡열을 계산하기 위해서 사과, 배 등 저장가능 작물에 대한 저장 온도 및 상대습도, 저장기간, 최고빙점, 함수율, 비열, 공기 교환량, 산물밀도, 호흡열계수, 냉각속도계수, 온도별 호흡열 등의 자료를 미국 USDA 또는 냉동공조학회(ASHRAE) 핸드북 등을 참조하여 입력하였다. 저장물에 대한 데이터는 국내 연구자료가 거의 없어 앞으로 국내 농산물 품종에 대해서도 구명이 되어야 할 것으로 판단된다.

## 다. 냉각부하 분석프로그램 검증시험

동적 냉각부하 분석프로그램의 검증을 위해 2001년 11월과 2002년 10~11월 사이의 사과와 배 저온저장고의 전력소모량 실측치와 냉각부하 예측치와의 전력소모량을 비교하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 가. 냉각부하 분석프로그램 검증

동적 냉각부하 분석프로그램의 검증을 위해 2001년 11월 16일부터 11월 20일까지 충남 천안과 예산의 배 저온저장고의 자료와 2002년 10월 31일부터 11월 17일까지의 경북 예천의 사과 저온저장고 자료를 입력하여 저온저장고의 전력소모량 실측치와 냉각부하 예측치와의 전력소모량을 비교하여 Table 3에 나타내었다.

오차는 실측치에서 예측치를 뺀 값이며, 정밀도는 실측치를 100%로 가정했을 때의 예측치의 백분율로 나타내었다. 기상자료는 1999년부터 2001년까지의 서산과 안동지역의 평균값으로 계산하였으며, 전기량 예측 정밀도는 평균 91.2%로 나타났다.

Table 3. Simulation accuracy of electric power

(단위 : kWh)

구분	천안배저장고	예산배저장고	예천사과저장고	평균	비고
계산기간	5일	5일	17일		
실측치	191	138	666.4	-	
예측치	218	145.3	620.5	-	
오차	+27	+7.3	-45.9	-	실측치 - 예측치
정밀도	85.9%	94.7%	93.1%	91.2%	실측치를 100%로가정

※ 기상자료 : 1999~2001년간 서산과 안동지역 평균값(기상청자료)

Fig. 3은 예천 사과 저온저장고의 냉각부하 항목별 부하량을 예측하여 저장일수 별로 나타낸 그래프이다. 저장 초기에 저장물 부하에 의한 냉각부하값이 높게 나타나고 저장일수가 증가함에 따라 감소하여 일정한 값에서 변화하게 된다.

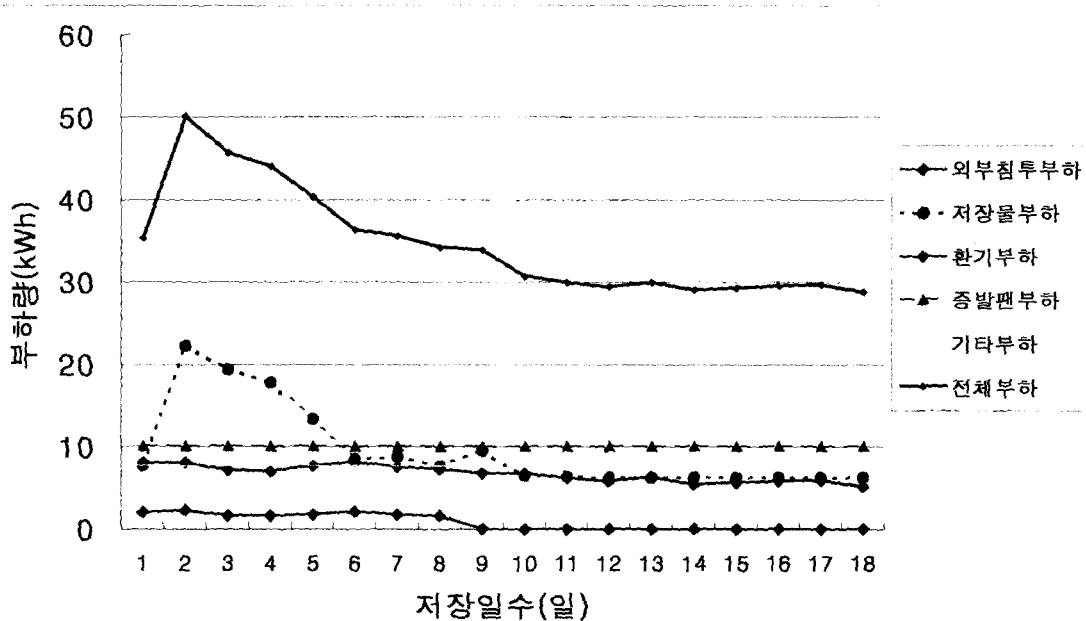


Fig. 3. Result of transient load calculation(Ye-cheon apple cold storage)

### 나. 동적 냉각부하 분석을 위한 일사량 및 상당온도 시뮬레이션

동적 냉각부하분석에 필요한 환산 일사량과 상당온도를 계산하기 위해서 기상자료 전처리 과정을 거치게 된다. 이 프로그램의 입력자료는 시간별 외기온도, 수평면 전일사량, 토양 온도, 외기온도이며, 출력자료는 수평면 직달일사량, 수평면 산란일사량, 벽체 상당온도이다.

Fig. 4에는 벽체 침투부하를 계산하기 위한 일사량을 고려한 벽체의 상당온도를 시뮬레이션에 의해 예측한 그래프를 나타내었다. 입력자료는 2001년 11월 26일부터 20일까지의 청원지역 자료이며, 시뮬레이션 결과 지붕쪽의 상당온도가 높은 것으로 나타나고 오전에는 동쪽, 오후에는 서쪽의 벽체온도가 높은 것으로 나타났다.

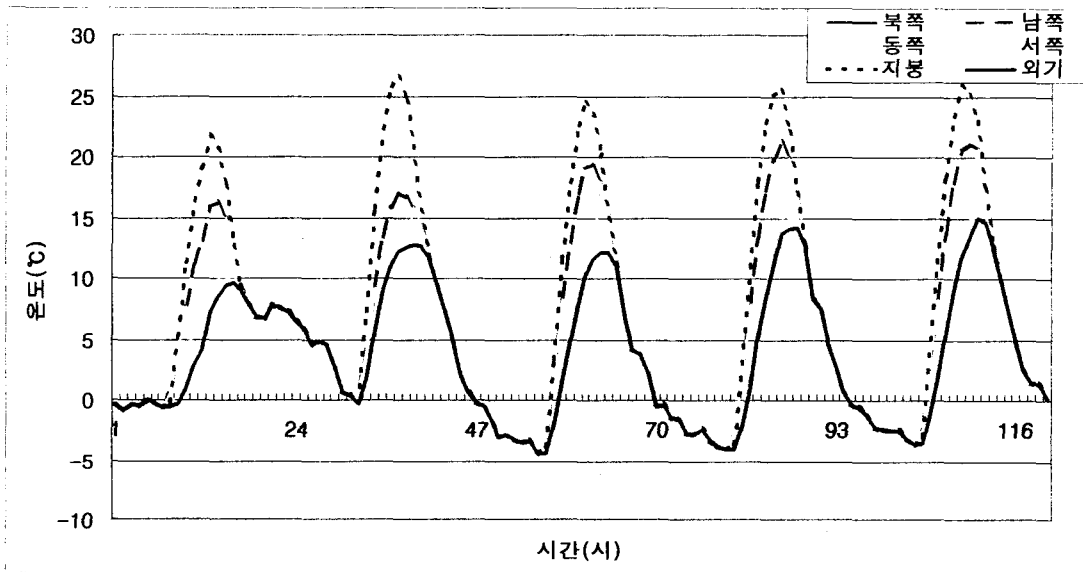


Fig. 4. Sol-air temperature simulation

### 다. 냉각부하분석 프로그램의 이용

#### (1) 최대 냉각부하분석 프로그램의 이용

최대 냉각부하분석 프로그램은 저온저장고의 설계시에 설계요인 변경에 따른 전력을 분석할 수 있기 때문에 초기 저온저장고 시공시에 널리 사용될 수 있다.

사과 저온저장고를 예로 최대 냉각부하 분석한 결과 1일 저장물 입고율을 30%에 비해 10% 입고시에 19.5%의 전체 전력이 절감되므로 저장고 시공시의 용량을 줄일 수 있다. 따라서 저장고 사용자는 저장물과 저장방법을 미리 설계하여 적절한 저장고 용량을 설계할 수 있다. 또, 저장물 초기 품온이 25°C일 때에 비해 10°C로 저장할 때에 10.6%의 전체 전력을 절감할 수 있는 것으로 나타났으며, 벽체, 지붕을 100mm, 바닥을 50mm 단열했을 때, 우레탄 단열재 사용시 스티로폼 단열재보다 5%의 전체 전력이 절감되는 것으로 나타났다. 따라서, 단열재의 재료와 두께 선정은 단열재의 가격과 최대 전력비용을 비교하여 선정할 수 있다.

(2) 동적 냉각부하분석 프로그램의 이용

Table 4에 저장물 입고율 변경에 따른 기간별 전력 소비량을 예측한 결과를 나타내었다. 예천 사과 저온저장고의 입력자료를 참고하여 초기 1개월간 저장하였을 때 하루 입고율 50%에 비해 입고율 10%의 저장방법이 23%의 전력을 절감할 수 있었으며, 농업용 전기료로 환산했을 때 9,747원의 전기료를 절감할 수 있는 것으로 나타났다. 동적 냉각부하분석 프로그램을 이용하여 입고방식에 따른 기간별 전기료 분석이나 증발기 가동방법 등의 운영방법 변경 등 여러 가지 방식에 의한 전기료를 분석할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 4. Simulation result of periodic electric power consumption by change of products input ratio

구 분	사과 저온저장고 (초기 1개월간 저장)	비 고
입고율 50%	1,184 kWh	13평, 12톤 2일 입고
입고율 10%	914 kWh	13평, 2.4톤 10일입고
오 차	270 kWh	입고율 50% - 10%
절 감 율	23%	-
절감 전기료	9,747원	기준요금 : 36.1원/kWh

#### 4. 결론 및 요약

저온저장고의 최적 설계와 에너지 절감을 위하여, 냉각부하 분석 컴퓨터 프로그램을 개발하고, 검증시험을 한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 저온저장고의 최적설계를 위해 최대냉각부하 분석프로그램을 개발하고, 효율적인 에너지 이용을 위해 동적냉각부하 분석프로그램을 개발하였으며, 부하분석에 필요한 기상자료, 저장물자료, 포장재자료 등을 데이터베이스화 하였다.
- 2) 개발된 냉각부하 분석프로그램의 예측정밀도를 조사한 결과, 동적냉각부하 분석프로그램의 정밀도는 3년 평균기상자료 이용시 농가 저온저장고의 실측치에 비해 91.2%의 정밀도를 나타내었다.
- 3) 최대냉각부하 분석프로그램을 이용하여 각종 입력변수의 변경에 따른부하량을 비교분석 할 수 있었으며, 동적냉각부하 분석프로그램을 이용하여 입고율 변화에 따른 일정 기간 동안의 전력소모량을 분석할 수 있었다.
- 4) 개발된 냉각부하 분석프로그램을 이용하여 저온저장고의 최적 설계와 다양한 운영방법에 의한 에너지 절감이 가능할 것으로 판단된다.



## 5. 참고문헌

1. 기상청. 1991. 한국기후표 1, 2권.
2. 김두천, 서진석, 신대현, 이준성, 최의중, 양양욱, 김춘엽. 1990. 열부하 계산 컴퓨터 소프트웨어의 설계자료 개발, 한국과학재단 제1차년도 연차보고서.
3. 김두천, 서진석, 신대현, 이준성, 최의중, 양양욱, 김춘엽. 1991. 열부하 계산 컴퓨터 소프트웨어의 설계자료 개발, 한국과학재단 제2차년도 연차보고서.
4. 김두천, 서진석, 신대현, 이준성, 최의중, 양양욱, 김춘엽. 1992. 열부하 계산 컴퓨터 소프트웨어의 설계자료 개발, 한국과학재단 제3차년도 최종보고서.
5. 김은영, 김용한 편저. 2000. 냉동 및 공기조화(개정판), 대광서림.
6. 이석건, 고재균. 1976. 청과물저장고의 구조특성 및 냉각부하량 산정에 관한 연구, 한국농공학회지. 18(1) : 28-41
7. 이의준, 윤종호, 곽희열, 강용혁, 윤환기, 유창균, 박준택, 조성환, 김기세, 이동규, 박준언, 김창범, 강동언, 오후규, 박세원, 이대우, 박명식, 강일경, 김상민. 1999. 에너지 절약형 저온저장고 시스템 개발, 산업자원부 최종보고서.
8. 한국냉동공조기술협회. 1994. 냉장참고.
9. 한국냉동공조기술협회. 1992. 냉동공조기술.
10. 한국농산물저장유통학회. 1999. 농산물저장유통기술핸드북.
11. 宇田川 光弘. 1993. PC를 이용한 공기조화계산법. 기문당.
12. Adre, N. and M. L. Hellickson. 1988. Computer simulation of transient refrigeration load in a cold storage for apples and pears. ASAE Paper No. 88-6010. June.
13. Adre, N. and M. L. Hellickson. 1989. Simulation of transient refrigeration load in a cold storage for apples and pears. Transactions of the ASAE. 32(3) : 1038-1048
14. ASHRAE, 1993. ASHRAE handbook - 1993 Fundamentals.