

다수의 냉동시스템에 의한 저온 저장고의 에너지 성능평가

강동언* · 김성만** · 윤종호*** · 이의준*** · 박영하**** · 현명택*****

Assessment of Energy Performance for Cool Storage System(CSS) with Multi-Unit Cooler Operating Control System

Dong-Un Kang*, Sung-Man Kim**, Jong-Ho Yoon***, Euy-Joon Lee***,
Young-Ha Park**** and Myung-Taek Hyun*****

ABSTRACT

The cool storage system(CSS) is a specific building that is required only cooling load without heating during the whole year. CSS uses a electric energy which is very expensive and is required much amount of energy due to temperature differences between interior and ambient temperatures. The purpose of this study is to assess the energy performance of the multi-unit cooler operating control system. For the prediction of its performance, two types of test cell are installed at Korea Institute of Energy Research (KIER). First cell is equipped with one large unit cooler, and second cell consists of two small unit coolers. According to the results of experiments using these cells, the multi-unit cooler operating control system is found to be effective in energy saving and beneficial for storage due to much less deviation of temperature.

Key words : Assessment of energy performance, cool storage system, multi-unit cooler operating control system

1. 서 론

저온저장고 시설은 일반 건축물과 달리 실내 설정 온도가 0°C 부근으로 매우 낮으며 연중 난방부하는

거의 없이 냉방부하만 발생하는 특수한 형태의 건물이다. 따라서 요구되는 설비조건은 고급 에너지인 전기에너지를 소비하는 냉방설비가 주를 이루며, 실내의 온도차가 크기 때문에 연중 많은 양의 에너지가 요구되는 에너지 다소비형 구조이다. 따라서 저온저장고의 에너지 소비 절감을 위해서는 냉방설비의 효율 및 운전 상황에 대한 종합적 제고가 이루어질 필요가 있다.^{1,2)}

특히 저온저장고 시설의 경우 저장물의 초기 입고 시와 정상상태에 도달했을 때의 냉방부하를 가지는 특성을 가지고 있다. 따라서 일단 저장물의 입고가 완료되고 요구하는 설정온도가 맞춰지면 그 이후부터는 순수히 저온저장고 건물부하와 환기부하 및 호흡

* 제주대학교 대학원
Graduate School, Cheju Nat'l Univ.

** 한림공업고등학교
Han-Lim Technical High School

*** 한국에너지기술연구소
Korea Institute of Energy Research

**** 제주관광대학 메카트로닉스계열
Dept. of Mechatronics, Cheju Tourism College

***** 제주대학교 기계에너지생산공학부 산업기술연구소
Faculty of Mechanical, Energy and Production Engrg., Cheju Nat'l Univ., Res. Inst. Ind. Tech.

열에 의한 냉방열량만이 요구된다. 현재 가장 일반적으로 적용되고 있는 저온저장고 냉방설비는 단위저장고에 각기 독립적인 유니트 쿨러를 용량에 맞게 한 대씩 설치하는게 통례이다. 이 경우 유니트 쿨러의 용량은 초기 입고시의 냉각열과 작물의 호흡열, 건물 부하 및 환기부하 등을 모두 포함한 것이다. 따라서 유니트 쿨러 전체 용량의 반 이상을 차지하는 초기 저장물 입고시의 냉각열 부하가 주도하는 운전조건과 설정온도에 도달한 이후 어느 정도 안정된 조건이 형성된 상황의 운전조건에는 많은 차이가 발생하게 된다. 즉 초기 입고시에는 대부분 전부하 상태에서 유니트 쿨러가 운영되지만, 설정온도 도달 이후의 유니트 쿨러 운영조건은 대부분 50%도 안되는 부하조건에서 운영되는 비효율성을 가지게 되는 것이다.

따라서 본 논문에서는 저온저장고 설비시스템의 에너지 성능개선 방안 중 하나로 초기 입고부하와 일상 운전부하의 차에 따른 설비시스템 운전 비효율성 개선택으로 다수 유니트 쿨러의 대수 제어에 대한 타당성 및 에너지 절감성능을 검증하고 또한 저장산물의 신선도에 영향을 줄 수 있는 저장고내의 온도차를 분석하여 다수 유니트 쿨러 사용의 타당성을 검증하고자 한다.

II. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 본 실험을 위해 한국에너지기술연구소 소재 test cell 2동의 전경이다. Test cell은 조립식 폴리우레탄 패널구조로 건립되었으며 2개동 모두 냉동 설비시스템을 제외하곤 동일한 사양이다. 대수제어 성능평가를 위한 본 실험을 위해 test cell A에는



Fig. 1 Test cell A and B at KIER

1.5kW 용량의 유니크 쿨러 1대를, test cell B에는 동일회사 제품의 0.75kW용량 유니트 쿨러 2대를 설치하였다. Table 1은 test cell 건축모델 데이터이다.

고내 저장물은 양파³⁾이며 산지에서 수확된 직후의 생산품을 입고하였다. 입고량은 각 test cell 당 2톤을 입고하여 50%의 적재율을 형성하였다. 입고는 1회에 모두 적재하였으며 일주일간 냉동기 중단상태로 방치한 후 동시에 냉방을 가동하였다.

한편 호흡열이 왕성한 상태의 양파에 대해 실험을 수행하기 위해 실험기간은 양파의 수확시기인 6월 말~7월초 이후에 수행되었다. 7월 첫주에 test cell 내에 수확직후의 양파가 입고되었으며 1주간 방치후에 7월 2번째 주부터 냉방실험이 실시되었다.

고내의 설정온도는 유니트 쿨러 자체의 요구조건에 따라 2°C의 데드밴드 편차를 주어 냉동기 기동온도를 2°C, 냉동기 중단온도를 0°C로 설정하여 평균 1°C 부근에서 운영되도록 구성하였다. 이때 고내의 평균온도와 유니트 쿨러 자체의 온도 센서간에 편차를 보정하기 위해 고내의 중심높이에 5개의 열전대를 설치하여 평균온도를 산출하고 이 온도를 기준하여 유니트

Table 1. Test cell model data

dimension	Dimension [m]		2.7 by 2.84 by 2.4
	Volume [m ³]		18.4032
	Floor area [m ²]		7.56
	Total wall area [m ²]		42
materials	Steel panel	Conductivity k [kJ/hr°Cm ²]	54
		Thickness t [m]	0.002
	Urethane foam	Conductivity k [kJ/hr°Cm ²]	0.13
		Thickness t [m]	0.075

쿨러의 설정온도를 보정하는 방법을 취하였다. Test cell B에 설치된 2대의 유니트 쿨러 대수제어를 위해서 1대의 유니트 쿨러는 test cell A와 동일하게 냉동기 기동온도를 2°C, 냉동기 중단온도를 0°C로 설정하며, 또 다른 유니트 쿨러에 대해서는 냉동기 중단온도를 0°C, 냉동기 기동온도를 3°C로 설정함으로써 test cell B의 부하조건에 따라 1대 또는 2대가 운영되도록 설정하였다. 증발기의 제상은 전기코일식 제상방식을 적용하였으며, 제상시간은 4시간 및 6시간 간격으로 10분간 공급하는 방식을 각기 적용하였다. 고내에 설치된 증발기 팬은 test cell A 및 B 모두 동일하게 2대의 팬이 설치되며, 제상시간만 정지되고 그 외 시간대는 압축기 운전 및 증단에 관계없이 항상 작동된다.

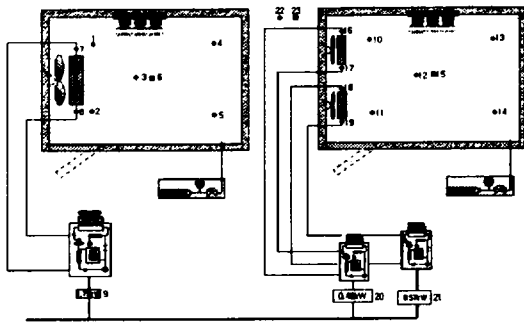


Fig. 2 The position of sensors for temperature, relative humidity distributions and electric consumption

Fig. 2는 고내의 온도, 습도 및 전기 에너지소비량 측정을 위해 설치된 센서의 부위별 위치를 나타내며, Table 2에 채널별 측정 항목을 나열하였다. 각 test cell은 평균온도 산출을 위해 셀의 중심 높이 위치 5개 지점에 T타입 열전대가 설치되었으며, 각 증발기의 입구 및 출구 온도와 외기온도를 포함해 총 17개의 온도 센서가 설치되었다. 고내 습도변화 추적을 위해 셀 중심위치에 General Eastern사의 RH-3 습도 센서가 설치되었다. 에너지 소비량 측정을 위해서는 각 유니트 쿨러별로 투입 전기에너지 소비량이 측정되었다. 이때 전기 에너지소비량은 압축기와 팬, 제상 코일 등이 모두 포함된 값이며 CT와 함께 Watt Transducer를 통해 측정하였다.

데이터로거는 FLUKE사의 Helios plus를 이용하였으며, 측정 및 제어 프로그램은 LAB TECH 프로그램을 이용하였다. 각 데이터는 매초 간격으로 측정되며 설비시스템의 On/Off 거동을 관찰하기 위해 가능한 저장시간을 축소해 1분간의 평균값이 1분 간격으로 저장되도록 하였다.

III. 실험결과

Fig. 3은 test cell A 및 B의 고내온도가 설정온도에 도달하고 기온이 어느 정도 안정상태에 도달한 후인 8월 3일부터 8월 12일 까지의 고내 평균온도 및 외기온도의 변화를 도식한 것이다. Test cell A와 B

Table 2. Channel numbers of the sensor position

Channel number	Sensor position	Channel number	Sensor position
1	Indoor temp. of Cell A(left 1)	13	Indoor temp. of Cell B(right 1)
2	Indoor temp. of Cell A(left 2)	14	Indoor temp. of Cell B(right 2)
3	Indoor temp. of Cell A(middle 1)	15	RH of Cell B
4	Indoor temp. of Cell A(right 1)	16	Unit cooler supply temp. of Cell B1
5	Indoor temp. of Cell A(right 1)	17	Unit cooler return temp. of Cell B1
6	RH of Cell A	18	Unit cooler supply temp. of Cell B2
7	Unit cooler supply temp. of Cell A	19	Unit cooler return temp. of Cell B2
8	Unit cooler return temp. of Cell A	20	Power of unit cooler B1
9	Power of unit cooler A	21	Power of unit cooler B2
10	Indoor temp. of Cell B(left 1)	22	Ambient temp.
11	Indoor temp. of Cell B(left 2)	23	Ambient RH
12	Indoor temp. of Cell B(middle 1)	24	

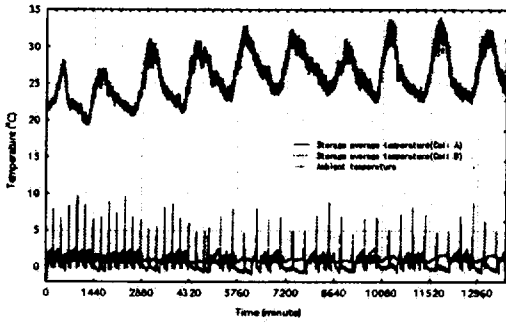


Fig. 3 The averaged ambient and internal temperatures of test cell A and B with time

의 냉동기 테드밴드 폭을 정확히 일치시킬 수는 없었지만 평균온도는 모두 15°C 부근에서 잘 제어됨을 알 수 있다. 고내 평균온도 변화에서 주기적인 온도 상승 패턴이 나타나는 것은 재상열에 기인한 것이다. 초반부 4일간은 4시간 주기의 10분 재상공급이 적용되었으며, 그 이후로는 6시간 주기로 변화 적용한 결과이다. 이 기간의 외기온은 최소 20°C, 최대 34°C에 이를 정도로 매우 혹서조건이었다.

분석은 대수제어 운전 패턴이 가장 잘 나타난 8월 3일 9시 45분~8월 4일 2시 44분 (Time Step 1~1.020 minutes)까지 초기 17시간에 대해 세부적 항목 별로 집중 분석하고 총 에너지 소비량 비교에 대해 전 구간(Time Step 1~13.815 minutes)으로 확대 분석하였다.

Figs. 4-6은 데이터 구간 초기 17시간에 대한 고내

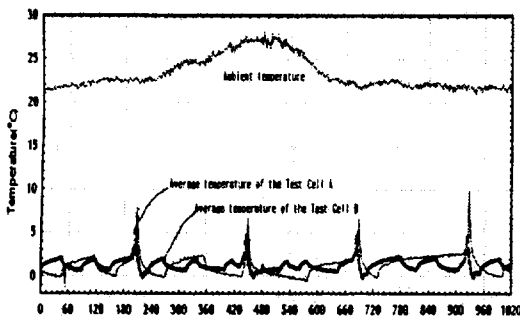


Fig. 4 The averaged temperature in cool storage system

평균온도와 외기온 변동, 증발기 입출구 온도 및 이에 상응하는 총에너지 소비량을 도식한 결과이다. Figs. 7과 8은 동시간대에 대해 고내 평균온도 산출을 위한 5개 지점의 온도 변화 및 평균온도를 test cell A와 B에 대해 도식한 것이며 Fig. 9는 실내의

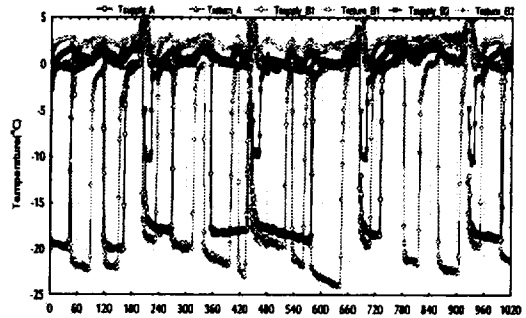


Fig. 5 The temperature of supply and return of unit cooler

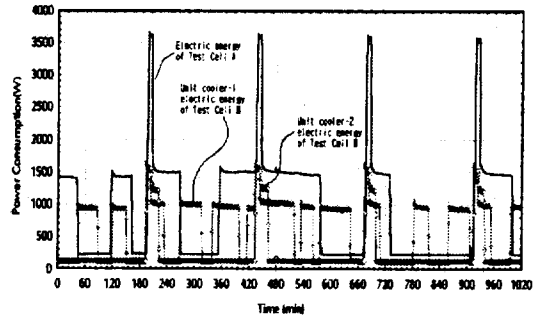


Fig. 6 The amount of energy consumption

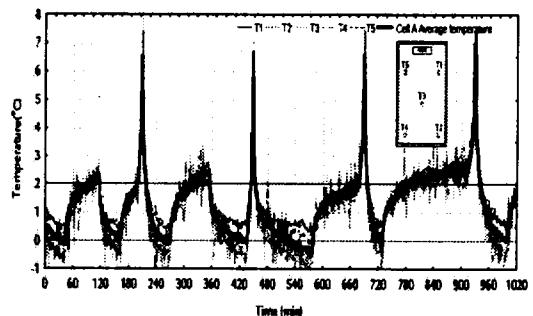


Fig. 7 The horizontal temperature distributions for test cell A

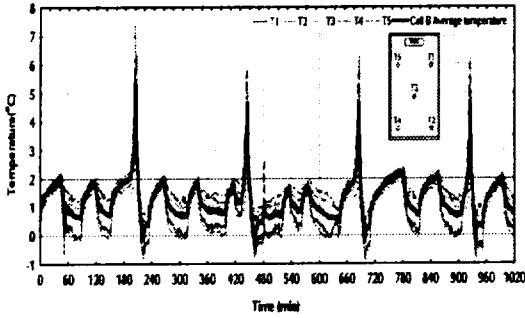


Fig. 8 The horizontal temperature distributions for test cell B

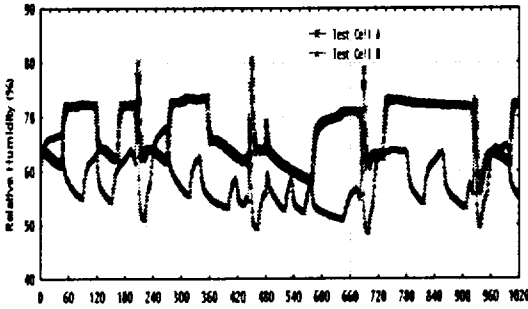


Fig. 9 The variation of relative humidity for test cell A and B

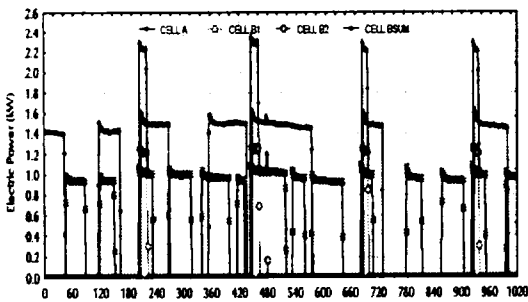


Fig. 10 The electric energy consumption without defrost time for test cell A and B

상대습도 변화를 나타낸다. Fig. 10은 Fig. 6의 전기 에너지 소비량 그래프와 동일하지만 제상에 소비된 에너지를 제외하고 순수히 냉방에만 소요된 에너지 소비량 변화를 test cell A와 B에 대해 상대 비교하

여 도식한 결과 그래프이다.

이 구간에 대한 최소값, 최대값 및 평균 데이터를 통계처리한 결과를 Table 3에 정리하였으며, 제상시간대를 포함한 경우의 총 에너지 소비량과 제상시간대를 제외한 경우의 에너지 소비량을 분리하여 제시하였다. 또한 측정기간 전 구간(8월 3일 9시45분~8월 12일 23시 59분 : Time Step 1~13,815 minutes)에 대한 에너지 소비량의 비교를 위해 제상 시간대를 제외하고 순수 냉방에 소비된 에너지만을 선별하여 test cell A와 B에 대한 비교결과를 정리하였다.

우선 Fig. 4에서 세부 분석기간 중에 test cell A와 B의 고내 평균온도는 각각 1.29°C 및 1.27°C이며, 제상 시간대를 제외한 경우도 1.15°C 및 1.21°C로 거의 완벽하게 동일 온도조건으로 유지되었음을 확인할 수 있다. 이 기간의 평균 외기온은 23.3°C이다. 고내 평균온도 변화에서 나타난 바와 같이 test cell B의 경우 냉동기 On/Off 발생 주기가 test cell A에 비해 더 자주 일어남을 알 수 있다. 특히 test cell B의 경우 제상열이 공급된 직후에는 2대의 냉동기가 동시 가동되며, 그 이후에는 대부분 한 대의 냉동기만으로도 충분히 부하를 대처하는 것이 입증되었다. 증발기 공급온도의 경우 냉동기가 한 대 설치된 test cell A는 평균 -18.3°C이며, B의 경우 상시 운전되는 냉동기의 증발기 공급온도는 -20.7°C, 보조 역할의 냉동기는 -9.7°C로 운영되었다. Figs. 7과 8의 수평온도 분포를 살펴보면 압축기 가동시 팬 전면부 센서위치의 온도가 가장 낮게 나타나며 수평온도 편차는 test cell B가 A보다 더 적게 나타나고 있다.

한편 test cell A 및 B의 상대습도(Fig. 9)는 각각 평균 67.5%와 58.2%로 약 9%정도 A가 높게 유지되었다. 이는 test cell B의 냉동기 가동시간이 더 많았고, 증발기 온도도 더 낮게 운영되었기 때문으로 판단된다.

Fig. 6의 그래프 및 Table 3에 나타난 바와 같이 이 기간에 투입된 총 전기에너지 소비량을 비교해 보면 test cell A가 B에 비해 5%정도 더 소비되는 것으로 나타났다. 특히 제상시간대를 제외하고 순수히 냉방에 소비된 에너지만을 비교하면 test cell B가 대수제어를 통해 14%의 에너지를 절감하는 것으로 나타났다. 대수제어에 따른 에너지 절감 비율은 일사량

Table 3. The results of statistical analysis of temperature, relative humidity and electric energy within a measurement time

Analysis time : Time step 1~1,020 minutes (8/3 09:45 ~ 8/4 14:44)

Item		Minimum	Maximum	Average		
Temp	Ambient Temp.	21.0	28.1	23.3		
	Supply temp. to evaporator	Test Cell A	-20.2	-	-18.3	
		Test Cell B1	-24.0	-	-20.7	
		Test Cell B2	-10.7	-	-9.7	
	Indoor average Temp. (total time)	Test Cell A	-1.53	9.81	1.29	$\Delta T = 0.02^{\circ}\text{C}$
		Test Cell B	-0.23	5.47	1.27	
Indoor average Temp. (without defrost time)	Test Cell A	-1.53	2.96	1.15	$\Delta T = 0.06^{\circ}\text{C}$	
	Test Cell B	-0.23	2.97	1.21		
RH	Relative humidity (total time)	Test Cell A	56.1	80.6	67.5	$\Delta RH = 9\%$
		Test Cell B	48.8	78.5	58.2	

Analysis time : Time step 1~1,020 minutes (8/3 09:45 ~ 8/4 14:44)

Item		Integral value within a time step($\times 0.06$ kJ)			Difference
Required energy	Required energy (total time)	Test Cell A	970.808		-5%
		Test Cell B	B1	663.943	
	B2		258.792		
	Required energy (without defrost time)	Test Cell A	707.726		-14%
Test Cell B		B1	550.419	621.683	
	B2	71.264			

Analysis time : Time step 1~1,020 minutes (8/3 09:45 ~ 8/12 23:59)

Required energy	Required energy (without defrost time)	Test Cell A	11,944,592		-8%	
		Test Cell B	B1	10,195,345		11,092,371
			B2	897,026		

및 외기온과 같은 외부조건에 따라 변화된다. Table 3의 하단부 표에 분석한 바와 같이 8월 3일부터 8월 12일 까지 측정기간 전구간에 대해 제상시간을 제외하고 순수히 냉방에 소비된 전기에너지 소비량을 비교해 보면 대수 제어가 이루어진 test cell B가 평균 8%의 에너지를 절감하는 것으로 판명되었다.

따라서 본 실험기간의 경우 외기조건에 따라 평균 8~14%의 에너지를 냉동기 대수제어를 통해 절감할 수 있는 것으로 결론지을 수 있다. 통상 양파의 출고 시기가 동절기임을 감안할 때 시간이 지남에 따라 대

수제어에 의한 에너지 절감효과는 더욱 커질 것으로 기대된다.

IV. 결 론

본 논문에서는 동일 규모의 두개의 test cell을 대상으로 실제 수확 직후의 양파를 입고한 상태에서 저온저장고 건물의 에너지 소비성능 및 냉동설비의 운영효율과 고내 온도분포 불균일도에 대한 실험을 수

행하였다.

우선 저장물 입고시점의 초기 냉각열 부하와, 설정 온도에 도달한 이후의 정상 냉방부하와의 큰 격차로 인해 생기는 냉동설비의 부분부하 운영효율의 개선을 위해 수행된 냉동기 대수제어 실험결과 최소 8%~14% 이상의 에너지가 대수제어를 통해 절감될 수 있는 것으로 판명되었다. 특히 본 실험이 수행된 기간은 연중 외기온이 제일 높은 시기에 수행된 것으로 냉방부하가 점차 줄어드는 동절기로 갈수록 절감효과는 더욱 크게 나타날 것으로 기대되기 때문에 대수제어에 대한 에너지절감 잠재성은 매우 클 것으로 평가된다. 본 실험에서는 정격출력 1.5kW 유니트쿨러 1대 (Test Cell A)에 대해, 1/2용량인 0.75kW 유니트쿨러 2대 (Test Cell B)를 독립적으로 부착하여 운영하였다. 따라서 보조 냉동기 성격의 두번째 유니트쿨러의 경우 증발기 표면상태에 관계없이 동일한 주기로 제상열이 공급되었기 때문에 적절한 제상열 공급 제어 알고리즘이 적용될 경우 추가적인 에너지 절감도 가능한 것으로 판정된다. 또한 보다 효율적인 대수제어를 위해서는 독립적인 여러대의 유니트쿨러로 대수제어를 하는 것 보다는, 다수의 압축기와 증발기로 구성된 하나의 냉방 시스템을 구성하여 저온저장고 단위실 2~3개의 냉방을 동시에 공급하는 형태로 적용하는 것이 바람직할 것이다. 한편 실험 과정에서 유니트쿨러 설비장치와 관련하여 장치 사양서 상의 성능과 실제 운영상의 성능에 많은 차이가 있었으며, 보다 안정된 품온 유지를 위해 센서의 정밀도 및 테드밴드의 폭과 제어 방식에 대한 많은 문제점이 발견되어 설비장치 자체에 대한 개선도 시급한 것으로 나타났다.

그 외에도 운전조건에 따른 고내온도 분포 실측결과 제상열과 관련된 부분을 제외하면 test cell 규모의 실험조건에서는 극심한 온도 불균일도 문제는 없는 것으로 나타났지만 대체적으로 test cell B가 더 온도편차가 적은 나타났고, 이는 농산물 저장시 더 유리함을 알 수 있다. 하지만 제상이 공급되는 시간대와 제상이 끝난 직후에는 품온변화에 영향을 줄 수 있을 정도의 불균일도가 발생하여 제상열 처리에 대한 심도있는 재고가 있어야 할 것이며, 제상이 공급된 후 일정시간은 송풍팬 작동은 중지시킨 상태에서 냉동기만 가동시키는 형태와 같이 제상시 발생된 고온의 열기가 고내에 확산되지 않도록 최대한의 대책을 수립해야 할 것이다.

참고 문헌

- 1) Kreider, J.F. and Rabl, A., 1994. *Heating and cooling of buildings -design for efficiency-*, McGraw-Hill
- 2) McQuiston, F.C. and Parker, J.D., 1994. *Heating, ventilating, and air conditioning -analysis and design*. Fourth Edition. John Wiley & Sons
- 3) Al-Jabori, M.K, Shaker, A.S, Hamey, M.N. and Manf, F.A., 1988, Effect of storage temperature on sprouting, rooting, decay, and weight loss of onion (*Allium cepa* L.) local cultivars. *J of Agric. and Water Resources Res. Plant Prod.*, Vol 7, No. 1, pp.23-35