

절전형 제빙시설 설계를 위한 사이클 모사

강종호* · 김남진* · 이재용* · 김중보**

Cycle Simulations for Power Saving BIP(block ice plant) design

Jong-Ho Kang , Nam-Jin Kim , Jae-Yong Lee , and Chong-Bo Kim

Key Words : BIP (블릭 아이스 설비), Cycle simulation (사이클 모사), Precooler system (예냉장치), Power saving (절전형), COP (성적계수), Ice making time (제빙시간), Electric cost (전력요금)

Abstract

Most Ice making companies make simple efforts to make products and fail to introduce improvements into the system against high cost of products. The work presented here is an implementation of ice making method to improve both energy efficiency and productivity. In this present investigation, several ice making cycles are designed and calculated to evaluate COP, ice making time and electric energy consumption. Results obtained shows that COP is improved with more efficient use of time for ice making and electric consumption. Therefore this can offer the opportunity for more efficient energy consumption and productivity in ice making.

기 호 설 명

C	: 정압 비열 (kJ/kg·K)
COP	: 성적계수
H_{latent}	: 얼음의 융해잠열 (kJ/kg)
m	: 제빙량 (kg)
\dot{m}	: 냉매유량 (kg/s)
P	: 압력 (kPa)
Q	: 열 (kJ)
\dot{Q}	: 냉동능력 (kW)
T	: 온도 (°C)
T_m	: 중간 증발온도 (°C)
t	: 제빙시간 (hour)
\dot{W}	: 압축일량 (kW)
Δh	: 입출구 엔탈피 차(kJ/kg)

첨자

<i>auxil</i>	: 보조압축기
<i>comp</i>	: 압축기
<i>evap</i>	: 증발기
<i>d</i>	: 주 압축기 출구
<i>flash</i>	: 플래쉬 탱크
<i>i</i>	: 얼음
<i>main</i>	: 주 사이클
<i>mid</i>	: 보조 사이클
<i>pre</i>	: 예냉 사이클
<i>s</i>	: 보조 압축기 입구
<i>w</i>	: 물

1. 서 론

에너지이용합리화법 제 22 조에 근거한 에너지 절약기업제도는 정부 주도하에 이루어지고 있는 에너지 절약 정책에서 탈피하여 민간업체의 참여와 창의를 유도하기 위하여 1993년부터 시작되었다. 상기의 법령은 에너지 사용자가 에너지절약 투자보다는 설비확장 및 신제품 생산 등을 위한 전략적 투자에 관심을 가짐으로 인해 에너지 절약

* 인하대학교 기계공학과 대학원

** 인하대학교 기계공학과

투자의 우선 순위가 낮아지는 한계점을 극복하고 사용자의 에너지 사용비용을 감소시켜 사회 간접 자본의 효율적 이용 및 기업의 이윤을 극대화하는데 그 목적을 두고 있다.

생산비 대비 에너지 투입비중이 높은 대표적인 기업으로 제빙업체를 꼽을 수 있다.⁽¹⁾ 오랜 기간 동안 한국의 제빙업체는 에너지의 효율적인 관리 측면보다는 생산활동에 주력을 하여 에너지의 비효율적 이용에 의한 생산비용의 증대에 의하여 기업운영의 영세성을 벗어날 수 없었다.

또한, 일반적으로 공업용 전력의 요금은 일반 가정용 전력의 요금보다도 저렴함에도 불구하고 제빙업체에서는 Electric pick time(기준요금의 3배, 오전 11:00~오후 15:00)에도 비싼 전력을 계속 사용해야 한다. 이로 인하여 공업용 및 가정용 전력의 수급 불균형을 초래하여 또 다른 사회간접 자본의 투자 유발을 일으키는 요소로도 작용한다.

그리고 여름철 성수기의 경우 얼음의 출하량 대비 생산량의 불균형으로 인한 빙질의 저하를 유발하기도 한다. 또한 시설의 노후화로 인한 열의 외부 방열에 따른 에너지의 손실도 생산성 저하의 한 요소로서 작용한다. 하지만 현재 우리나라 제빙업체의 경우 업체의 영세성 때문에 생산성의 향상과 에너지 절약 설비투자에 어려움을 겪고 있다.

따라서 본 연구에서는 여러 가지 각도에서의 제빙설비 사이클을 모사하여 현재의 제빙방법의 개선을 통한 에너지의 효율적 이용 및 생산성 증대방법을 알아보려고 한다.

2. 사이클 해석

일반적으로 제빙업체에서 생산하는 제빙방식은 블럭 아이스 형태로⁽²⁾ 냉동기를 이용하여 브라인 탱크의 온도를 영하 12~15℃ 정도를 유지한 후 브라인 탱크에 아이스 캔을 장시간 담가두는 형식이다. 여기서는 기존의 제빙시설과 절전형 제빙시설의 성능비교를 위해서 Table. 1 과 같은 기본적인 제빙조건을 갖는다고 가정한다.

Table. 1 Basic condition of block ice making process

온도조건(°C)		설비조건	
원수온도	25	제빙량	100 Ton
제빙온도	-10	냉매	암모니아
증발온도	-18	브라인	염화칼슘 수용액
응축온도	40	주 냉매량	0.5 kg/s

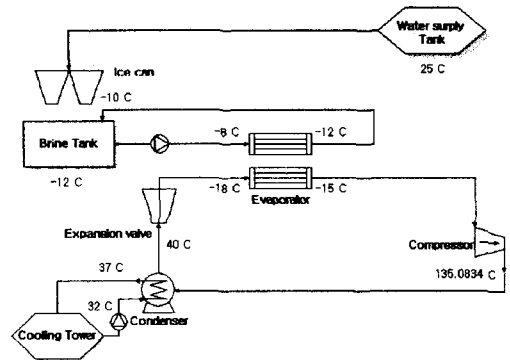


Fig. 1 General block ice plant cycle

2.1 기존의 제빙시설

기존의 일반화 된 블럭 아이스 형태의 제빙시설은 Fig. 1 과 같이 단일 냉동사이클로 구성되어 있다. 이러한 제빙시설로 Table. 1 과 같은 조건으로 100 톤의 25℃ 원수를 -10℃ 얼음으로 만드는데 Fig2 와 같은 과정으로 약 24 시간의 제빙시간이 걸리게 된다. 즉, 제빙공장은 얼음을 만들기 위하여 냉동기를 하루 종일 운전 시켜야 한다.

2.2 절전형 제빙시설

기존의 제빙시설은 원수를 그대로 아이스 캔에 공급하여 제빙에 사용하고 있다. 이에 따라 Fig. 2 에서 볼 수 있는 바와 같이 원수로부터 얼음이 되기까지 3 단계로 나뉘어져 약 24 시간의 제빙시간이 소요된다.

1 단계로 25℃ 의 원수가 0℃ 의 물로 되는 상온 냉각 단계, 2 단계로 0℃ 의 물이 0℃ 고체상태의 얼음으로 되는 잠열 제거 단계, 마지막으로 0℃ 의 고체상태의 얼음이 -10℃ 의 고체상태의 얼음으로 되는 제빙 단계로 나뉘어져 있다.

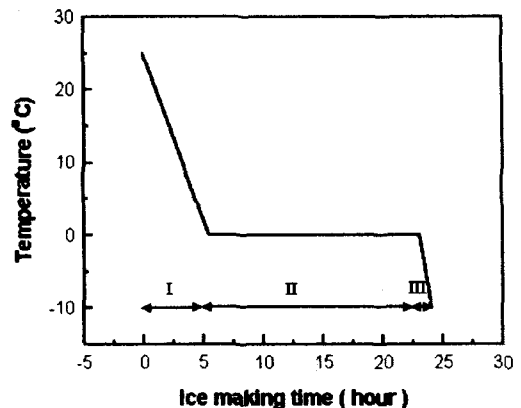


Fig. 2 Ice making time

실제로 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 의 얼음을 만들기 위한 냉동기의 증발온도는 $\pm 18^{\circ}\text{C}$ 이고 압축일 또한 이에 상응하는 큰 값을 갖게 된다. 하지만 1단계의 상온 냉각에는 이와 같이 큰 압축일을 쓰는 것은 설비상의 낭비일 것이다.

따라서 본 연구에서는 여기에 착안하여 다음과 같은 3가지 유형의 절전형 제빙설비를 설계하여 사이클 해석을 통한 이것의 효율성을 검증하고자 한다.

2.2.1 Type1: 부가장치를 이용

Type1은 Fig. 3과 같이 플래쉬 탱크를 1단 팽창밸브 이후에 설치하여 1단 팽창된 냉매의 건도 조건을 향상시키는 시스템과 동시에 1단 압축된 냉매를 플래쉬 탱크로 통과 시켜서 1단 응축을 시킴으로써 증발기에서 냉동효과를 증가시키는 동시에 압축일을 줄이는 설비이다. Fig. 4와 같이 플래쉬 탱크를 이용하여 건도 조건을 향상시키는 방법은 포화 액화선과 포화 증기선에 따라 암모니아 냉매를 사용한 경우에만 효율의 증대를 가져올 수 있다.⁽³⁾ 반면에 기타 R-12나 R-22 같은 냉매에서는 플래쉬 탱크를 사용하면 오히려 효율이 감소할 수 있어 설비비의 증대만 가져온다.

2.2.2 Type2: 독립된 예냉장치를 이용

Type2는 Fig. 5와 같이 원수가 아이스 캔에 공급되기 전에 원수의 온도를 독립된 예냉장치를 이용하여 Fig. 2에서 나타난 1단계의 상온냉각은 기존에 사용한 증발온도 $\pm 15^{\circ}\text{C}$ 의 압축일 대신에 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 의 중간 냉각을 시켜줌으로써 보다 적은 압축일을 사용하여 효율을 증대시키는 방법이다.

예냉장치를 이용한 제빙설비는 효율의 향상뿐만 아니라 1단계의 상온냉각과 2, 3단계의 냉각 과정이 동시에 이루어져 제빙시간을 단축하여 전력요금의 절감을 꾀할 수 있다.

Fig. 6에서 보는 바와 같이 독립된 예냉설비로 인해 두개의 독립된 사이클을 구성하게 된다.

2.2.3 Type3: 부가장치와 예냉장치를 이용

Type3는 Fig. 7에서와 같이 Type1과 Type2를 합친 것으로 독립된 예냉장치를 이용할 때 나타나는 증발기 입구에서의 냉매의 나쁜 건도 조건을 플래쉬 탱크를 이용하여 향상시키고 중간응축을 시킴으로써 냉동효과의 최대화와 압축일의 최소화를 통해 제빙설비의 효율의 극대화와 제빙시간의 단축을 이루어 에너지 절약과 생산시간의 효율적 운영으로 전력사용을 효과적으로 사용할 수 있다.

Fig. 8에서 보는 바와 같이 1차 팽창 후 플래

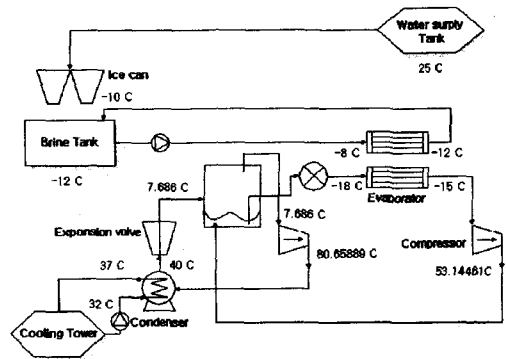


Fig. 3 Type1: Power saving block ice plant using additional components

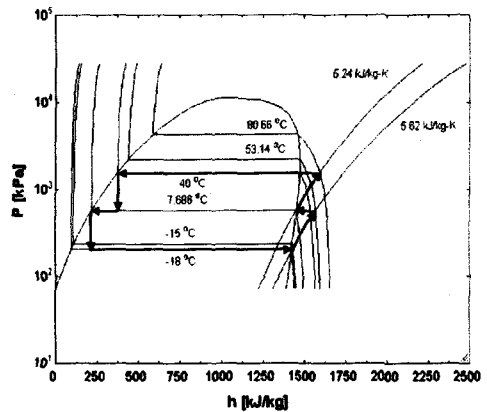


Fig. 4 P-h diagram of type1 that using additional components

쉬 탱크로 들어가게 되고 여기서 나온 냉매가 예냉장치와 냉동장치로 나뉘어서 들어가게 된다. 이후에 증발기에서 나온 냉매는 1차 압축 후 다시 플래쉬 탱크를 통과함으로써 적은 압축일을 필요로 하게 된다.

2.3 사이클 해석방법

사이클을 해석하는데 있어서 기본적인 온도조건은 Table. 1과 같다.

Type1에서 플래쉬 탱크에서의 중간압력은 다음과 같이 구한다.⁽⁴⁾

$$P_{flash} = \sqrt{P_s \cdot P_d} \quad (1)$$

기본 사이클을 비롯해서 절전형 제빙 사이클을 해석하는데 있어서 25°C , 100톤의 원수로부터 -10°C 의 얼음을 만드는데 제빙장치가 제거해야 하는 열은 다음과 같이 주어진다.

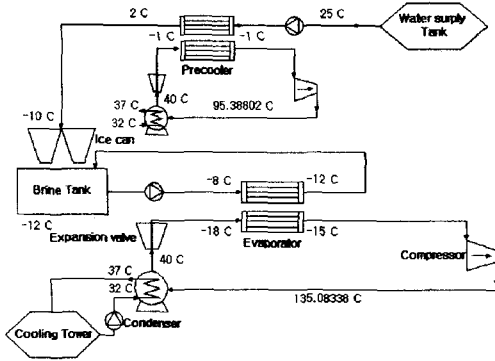


Fig. 5 Type2 : power saving block ice plant using seperated precooler system

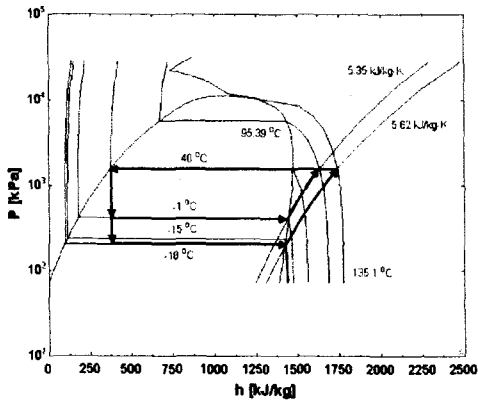


Fig. 6 P-h diagram of type2 that using seperated precooler system

$$Q_{w,1} = (T_w - T_m) \cdot C_w \cdot m \quad (2)$$

$$Q_{w,2} = (T_m \cdot C_w + H_{latent} - T_i \cdot C_i) \cdot m \quad (3)$$

(2)식은 Type 2, 3 의 예냉장치에서 제거되는 열이고 (3)식은 주 제빙장치에 의해 제거되는 열이다. 따라서 예냉장치가 없는 기존설비와 Type1 에서 사용한 총 제거해야 할 열량은 다음과 같다.

$$Q_w = Q_{w,1} + Q_{w,2} \quad (4)$$

다음으로 각 Type 의 증발기에서 얻는 냉동효과는 다음과 같다.

$$\dot{Q}_{evap} = \Delta h_{main, evap} \cdot \dot{m}_{main} \quad (5)$$

$$= \Delta h_{main, evap} \cdot \dot{m}_{main} + \Delta h_{pre, evap} \cdot \dot{m}_{pre} \quad (6)$$

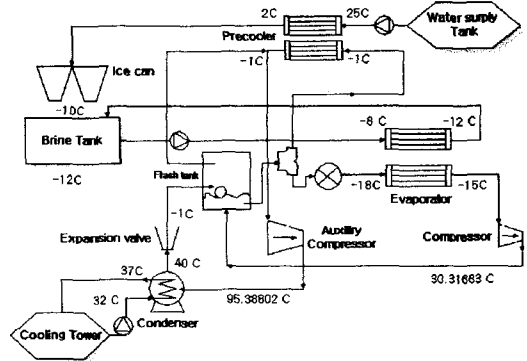


Fig. 7 Type3 : Power Saving Block Ice Plant Using Precooler System & Additional Components

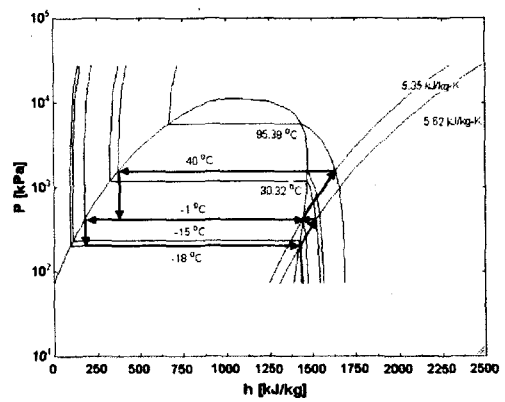


Fig. 8 P-h diagram of type3 that using precooler system & additional components

식(5)는 기존장치와 Type1 에서 사용하게 되고 식(6)은 예냉장치가 있는 Type2, 3 설비를 해석하는데 사용한다.

마찬가지로 제빙과정에서 필요로 하는 압축일량은 다음과 같다.

$$\dot{W}_{comp} = \Delta h_{main, comp} \cdot \dot{m}_{main} \quad (7)$$

$$= \Delta h_{main, comp} \cdot \dot{m}_{main} + \Delta h_{auxil, comp} \cdot \dot{m}_{mid} \quad (8)$$

$$= \Delta h_{main, comp} \cdot \dot{m}_{main} + \Delta h_{auxil, comp} \cdot \dot{m}_{pre} \quad (9)$$

식(7)은 주 압축기를 하나 사용하는 기존제빙설비의 압축일량이고 압축일을 줄이기 위한 다단압축을 하는 Type1 는 (8)식, 그리고 예냉장치 이용한 Type2, 3 에서는 식(9)을 사용한다.

따라서 냉동사이클의 성능을 나타내는 COP (Coefficient Of Performance) 와 절전형 제빙설비의 효율성과 경제성을 나타내는 제빙시간은 다음과 같다.

$$COP = \frac{\dot{Q}_{evap}}{\dot{W}_{comp}} \quad (10)$$

$$t = \frac{Q_w}{\dot{Q}_{evap} \cdot 3600} \quad (11)$$

$$t_{pre} = \frac{Q_{w,1}}{\Delta h_{pre,evap} \cdot \dot{m}_{pre}} \cdot \frac{1}{3600} \quad (12)$$

$$t_{main} = \frac{Q_{w,2}}{\Delta h_{main,evap} \cdot \dot{m}_{main}} \cdot \frac{1}{3600} \quad (13)$$

예냉장치가 없는 기존장치와 Type1 의 제빙 시간은 식(11)으로 구하고 예냉장치가 있는 Type2, 3 의 제빙시간은 식(12) 혹은 (13)로 구한다. 예냉장치를 이용한 절전형 설비는 예냉장치에서 수행하는 1 단계의 상온냉각과 주 사이클에서 수행되는 2, 3 단계의 제빙과정이 동시에 이루어져야 한다. 그렇지 않으면 먼저 끝난 사이클의 온도를 유지시켜줄 수 있는 부가장치가 더 필요할 것이다. 이에 따라 예냉장치로 나뉘어 들어가는 냉매량을 구할 수 있다.

3. 해석결과 및 고찰

3.1 성적계수의 비교

냉동 사이클의 성능을 나타내는 것으로 성적계수 (COP)를 계산 비교하였다. 식(10)에 의한 기존 제빙장치의 성적계수와 절전형 제빙장치의 각 유형별 값은 Fig. 9 와 같이 나타났다. 그림에서 보는 바와 같이 예냉장치와 플래쉬 탱크를 이용한 제빙 사이클이 4.059 로 18.6%의 효율향상을 보인다.

3.2 제빙시간의 비교

제빙시간은 제빙설비에 있어서 전기요금과 직결되는 항으로 성적계수와 같은 경향을 보인다. 성적계수가 높을수록 제빙시간은 짧아진다. 하지만 예냉장치를 이용한 Type2, 3 은 상온냉각과 주요냉각을 동시에 수행함에 따라 제빙시간은 더욱 짧아진다.

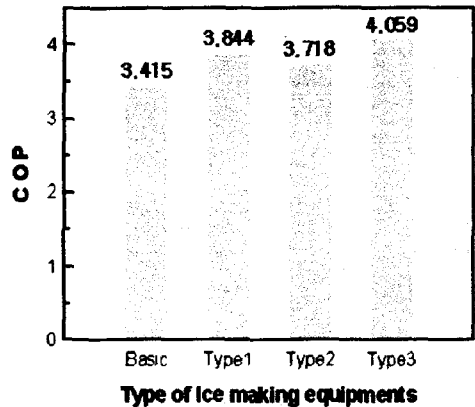


Fig. 9 COP of each type of block ice plant cycle

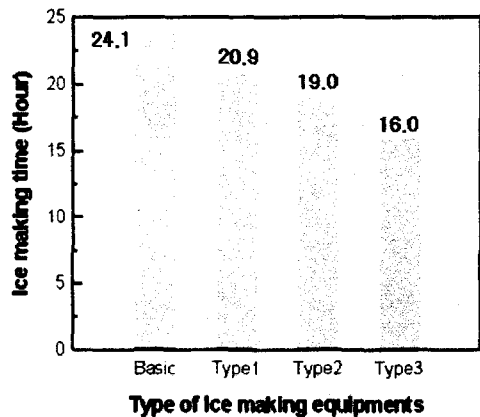


Fig. 10 Ice making time of each type of block ice plant cycle

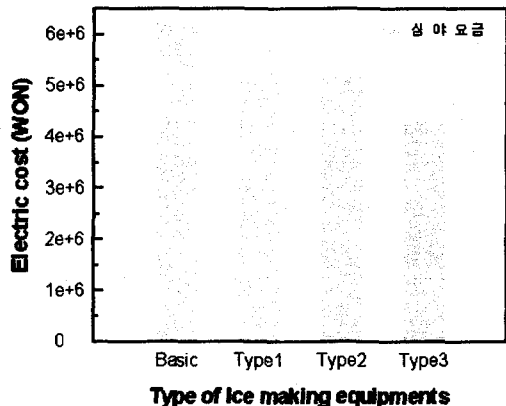


Fig. 11 Electric cost of each type of block ice plant cycle (based midnight electric system)

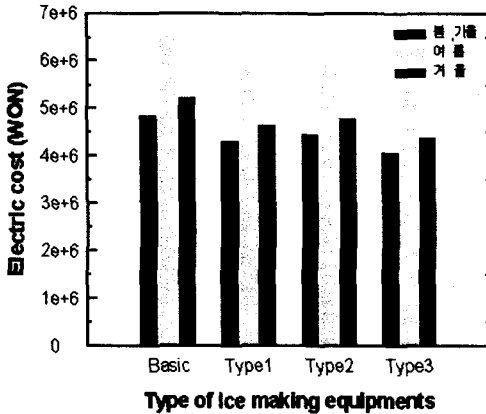


Fig. 12 Electric cost of each type of block ice plant cycle (based industrial electric cost system)

따라서 Fig. 9 와 Fig. 10 에서 보면 Type1 의 성적 계수가 Type2 보다 크지만 제빙시간은 Type2 가 더 단축됨을 알 수 있었다.

3.3 전력요금의 비교

제빙시간과 전력요금은 거의 비례적으로 나타난다. 하지만 전력요금의 체계에 따라 냉동기에서의 압축기의 용량에 따른 전력량이 크게 작용하는 경우도 있다. 여기서 계산된 전력요금은 Fig. 11 은 심야전력요금(을)⁽⁴⁾을 적용하여 한달 동안의 전력요금을 계산 비교한 결과이고 Fig. 12 는 산업용(감, 선택 2, 고압 A)요금을 적용한 결과이다.

전체적으로 제빙시간과 유사하게 기존의 제빙장치보다 적은 값을 갖음을 볼 수 있다. 하지만 Fig. 12 에서 보는 바와 같이 산업용(감, 선택 2, 고압 A)요금에서는 압축기의 용량이 상대적으로 큰 Type2 가 제빙시간은 짧지만 요금은 더 많이 나왔다.

4. 결론

본 연구에서는 여러 유형의 제빙 사이클을 구성하여 이것을 해석하고 기존 설비와 비교해 본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 냉동성능을 나타내는 성적계수에서는 기존설비의 3.415 와 비교해본 결과 Type3 인 경우 4.059 로 가장 성능이 좋았으며 약 18.6%의 향상을 가져왔다.
- (2) 제빙시간의 계산에서는 기존설비(100 톤/24 시간)에 비해 Type1 은 20.9 시간, Type2 는 19.0 시간, Type3 는 16.0 시간으로 Type3 인 경우 약 33.6%의 제빙시간이 단축되었다.
- (3) 전력요금계산에서는 심야전력요금을 이용하는

것과 산업용전력요금을 이용하는 경우로 구분 하였는데 심야전력을 이용한 경우에는 Type3 인 경우가 기존설비에 비해 약 31.8%의 전기요금이 절감됨을 볼 수 있었다. 그리고 산업용 전력요금을 적용한 결과 마찬가지로 Type3 인 경우가 가장 많이 절감되었고 그 절감률은 계절에 상관없이 약 16%로 나타났다.

위의 결과로 볼 때 기존설비에 비해 예냉장치와 플래쉬 탱크등의 부가 장치를 이용한 Type3 가 가장 최적화 된 제빙설비로 사료되어 진다.

후 기

본 연구는 산업자원부·에너지관리공단에서 시행한 에너지절약기술개발사업의 일환으로 주관연구기관인 (주)진평하이텍의 위탁과제로 연구되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) 1997, " 국내 제빙업계 시장규모 및 사업평가", 냉동·공조공학, Vol.16, No.2, 대한냉동협회.
- (2) 공기조화 · 냉동공학 편람, PP 341~344.
- (3) Stoecker, Jones, 1986, " Refrigeration & Air conditioning", McGraw-Hill, 2nd Edition, p308~327.
- (4) 2000, " 국내 전력수급 현황 및 요금체계 ", 한국전력공사, <http://www.kepco.co.kr>.
- (5) 1989, " ASHRAE handbook of Fundamentals ", American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta, GA.
- (6) Reid, R.C.Prausnitz, J.M. and Sherwood, T.K, 1977, " The Properties of Gases and Liquids, McGraw-Hill, 3rd edition.
- (7) Thomas H.K, Jaes W.R, James L.T, 1998, " Thermal Environmental Engineering", Prentice-Hall, 3rd edition.
- (8) Sonntag, Van Wylen, 1991, " Introduction to Thermodynamics Classical and statistical", Wiley, 3rd edition