

절전형 제빙시설 사이클 모사를 통한 성능 및 경제성 해석

강 종호, 김 남진, 이재용, 김종보*

인하대학교 기계공학과 대학원, *인하대학교 기계공학과

Analysis of Performance and Economical Efficiency through Cycle Simulation for Power Saving BIP (Block Ice Plant)

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

Graduate School of Mechanical Engineering, Inha University, Inchon 402-751, Korea

*Department of Mechanical Engineering, Inha University, Inchon 402-751, Korea

(Received November 29, 2000; revision received April 4, 2001)

ABSTRACT: Domestic ice making companies make a simple effort to obtain products and neglect to introduce low cost product improvements with energy savings. 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 proposed for higher efficiency in the system. COP (Coefficient of Performance), ice making time and electric energy consumption are evaluated and compared with the conventional system. Results shows that COP is improved with more efficient use of time for ice making and electric consumption. Therefore, this can offer an opportunity for more efficient use of energy and higher productivity in ice making.

Key words: BIP(블럭 아이스 설비), Precooler system(예냉장치), Power saving(절전형), COP (성적계수), Ice making time(제빙시간), Electric cost(전력요금)

기호 설명

C : 정압비열 [$\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$]

COP : 성적계수

H_{latent} : 열음의 융해잠열 [kJ/kg]

m_{ice} : 제빙량 [kg]

\dot{m} : 냉매유량 [kg/s]

P : 압력 [kPa]

Q : 열 [kJ]

\dot{Q} : 냉동능력 [kW]

T : 온도 [$^\circ\text{C}$]

T_m : 중간증발온도 [$^\circ\text{C}$]

t : 제빙시간 [Hour]

\dot{W} : 암축일량 [kW]

Δh : 입출구 엔탈피차 [kJ/kg]

하첨자

auxil : 보조암축기

comp : 암축기

evap : 증발기

d : 주 암축기 출구

flash : 플래쉬 탱크

i : 얼음

* Corresponding author

Tel.: +82-032-862-7313; fax: +82-032-862-7313

E-mail address: cbkim@inha.ac.kr

main	: 주 사이클
pre	: 예냉장치
s	: 보조압축기 입구
tot	: 전체 사이클
w	: 물

1. 서 론

에너지이용합리화법 제22조에 근거한 에너지 절약기업제도는 정부 주도하에 이루어지고 있는 에너지 절약 정책에서 탈피하여 민간업계의 참여와 창의를 유도하기 위하여 1993년부터 시작되었다. 상기의 법령은 에너지 사용자가 에너지 절약에 투자하기보다는 설비확장 및 신제품생산 등을 위한 전략적 투자에만 관심을 가짐으로써 에너지 절약투자의 우선순위가 낮아지는 한계점을 극복하고 사용자의 에너지 사용비용을 감소시켜 사회간접자본의 효율적 이용 및 기업의 이윤을 극대화하는 데 그 목적을 두고 있다.

생산비 대비 에너지 투입비중이 높은 대표적인 기업으로 제빙업계를 꼽을 수 있다.⁽¹⁾ 오랜 기간 동안 한국의 제빙업계는 에너지의 효율적인 관리보다는 생산활동에 주력하여 에너지의 비효율적 이용에 의한 생산비용의 증대에 따라 기업운영의 영세성을 벗어날 수 없었다.

또한, 일반적으로 공업용 전력요금은 일반 가정용 전력요금보다 저렴함에도 불구하고 제빙업계에서는 최대전력사용시간대(기준요금의 3배, 오전 11:00~오후 15:00)에도 비싼 전력을 계속 사용해야 한다. 또한 시설의 노화로 인한 열의 외부 방열에 따른 에너지의 손실도 생산성 저하의 한 요소로서 작용한다.

국내 연구소 및 대학에서는 전체적인 사이클의 해석보다는 사이클을 구성하는 부품들의 효율향상에 더 많은 연구가 이루어지고 있다. 미국에서도 Fan blade를 이용하여 냉매를 냉각함으로써 증발효과를 가속화하는 기술과 Gas wave refrigerant 방법과 Pulsating flow wave resonant interaction을 생성하는 기술과 같은 제빙장치의 부품의 효율증대에 관점을 두어 진행되고 있다. 강등⁽²⁾은 여러 가지 각도에서의 제빙설비 사이클을 모사하여 기존의 제빙설비와의 단일화된 동일조건 하에 성능비교를 통한 공학적 측면의 효율향상을 검증하였다. 따라서 본 논문에서는 계절에 따

른 여러 조건을 적용하고 절전형 제빙설비의 설계변경에 따른 투자비와 절약금액을 계산함으로써 현재의 제빙방법의 개선을 통한 에너지의 효율적 이용 및 경제성에 대해 조사하여 그 실현 가능성에 대해 알아보고자 한다.

2. 사이클 해석

일반적으로 제빙업계에서 생산하는 제빙방식은 블럭 아이스 형태로 냉동기를 이용하여 브라인탱크의 온도를 영하 12~15°C 정도를 유지한 후 브라인탱크에 아이스 캔을 장시간 담가두는 형식이다.⁽³⁾ 본 연구에서는 기존의 제빙시설과 절전형 제빙시설의 성능비교를 위해서 Table 1과 같은 기본적인 제빙조건을 갖는다고 가정한다. 원수의 온도는 계절에 따라 구분하였고 사이클 해석은 일반적인 국내 기후에 맞는 제빙시설의 온도조건과 설비조건을 적용하였고 냉매는 암모ニア를 사용하였으며 이에 따른 냉매의 물성치는 ESS(Engineering equation solver)⁽⁴⁾를 이용하여 구하였다.

2.1 기존의 제빙시설

기존의 일반화된 블럭 아이스 형태의 제빙시설은 Fig. 1과 같이 단일 냉동사이클로 구성되어 있다. 이러한 제빙시설로 Table 1과 같은 조건으로 100톤의 원수를 -10°C 얼음으로 만드는데 Fig. 2에서 볼 수 있는 바와 같이 원수로부터 얼음이 되기까지 3단계로 나뉘어져 약 24시간의 제빙시간이 소요된다고 가정한다.

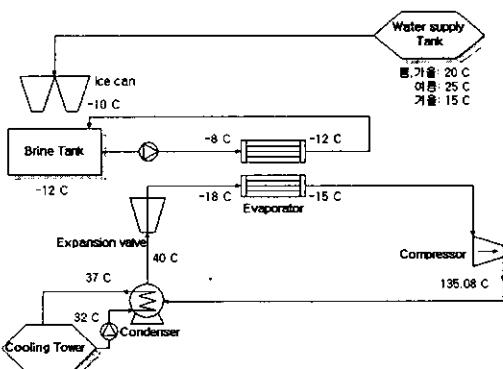


Fig. 1 Conventional block ice plant cycle.

Table 1 Basic condition of block ice making process

Temperature(°C)		Equipment condition	
Water	Spring · fall	Quantity of ice	100 Ton
	Summer	Refrigerant	Ammonia
	Winter	Brine	CaCl_2 solution
	Ice		-10
	Evaporator		-18
	Condenser	Main refrigerant	0.5 kg/s

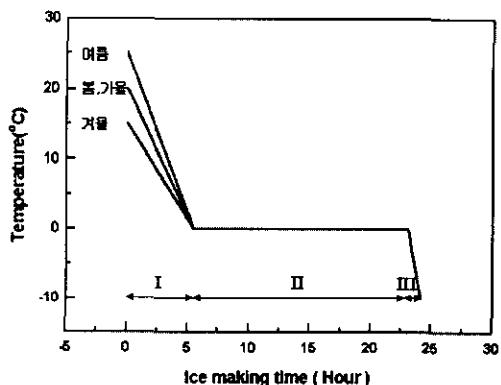


Fig. 2 Ice making time.

I단계로 원수가 0°C의 액체상태로 되는 상온냉각단계, II단계로 0°C의 액체상태의 물이 0°C 고체상태의 얼음으로 되는 잠열제거단계, III단계로 0°C의 얼음이 -10°C의 얼음으로 되는 제빙단계로 나뉘어져 있다.

2.2 절전형 제빙시설

기존의 제빙시설은 실제로 -10°C의 얼음을 만들기 위한 냉동기의 증발온도는 -18°C이고 압축일 또한 이에 상응하는 큰 값을 갖게 된다. 하지만 I단계의 상온냉각에는 이와 같이 큰 압축일을 쓰는 것은 설비상의 낭비일 것이다.

따라서 본 연구에서는 여기에 차안하여 다음과 같은 3가지 유형의 절전형 제빙설비를 설계하여 사이클 해석을 통한 이것의 효율성과 경제성을 검증하고자 한다.

2.2.1 부가장치를 이용(Type 1)

Type 1은 Fig. 3과 같이 플래쉬 탱크를 1단 팽

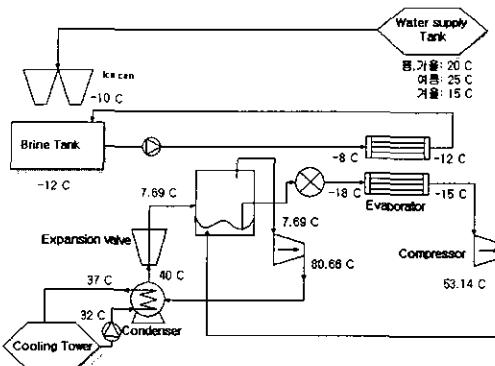


Fig. 3 Type 1: power saving block ice plant with flash tank & intercooler.

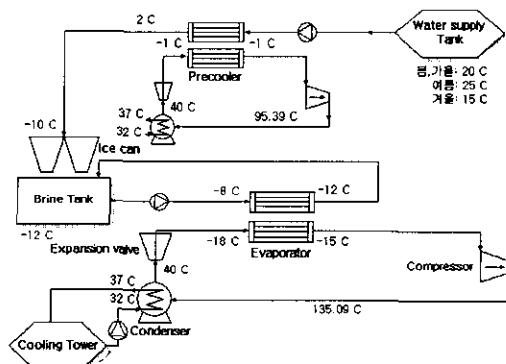


Fig. 4 Type 2: power saving block ice plant with separated precooler.

창밸브 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.

플래쉬 탱크를 이용하여 건도조건을 향상시키는 방법은 P-H선도의 포화액화선의 기울기에 따라 그 효용성이 나타난다. 냉매로써 암모니아를 사용한 경우에는 효율의 증대를 가져오는 반면, 기타 R-12나 R-22 같은 냉매는 플래쉬 탱크의 이용에 따른 건조조건의 향상으로 인한 증발효과 증대보다 Bypass시키는 냉매에 의한 증발효과의 감소가 더 커져 설비비의 증대만 가져온다.⁽⁵⁾

2.2.2 독립된 예냉장치를 이용(Type 2)

Type 2는 Fig. 4와 같이 원수가 아이스 캔에

공급되기 전에 원수의 온도를 둑립된 예냉장치를 이용하여 Fig. 2에서 나타난 I단계의 상온냉각을 기준에 사용한 증발온도 -15°C 의 압축일 대신에 -1°C 의 중간냉각을 시켜줌으로써 보다 적은 압축일을 사용하여 효율을 증대시키는 방법이다.

예냉장치를 이용한 제빙설비는 효율의 향상뿐만 아니라 I단계의 상온냉각과 II, III단계의 냉각과정이 동시에 이루어져 제빙시간을 단축하여 전력요금의 절감을 꾀할 수 있다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 독립된 예냉장치로 인해 두 개의 독립된 사이클을 구성하게 된다.

2.2.3 부가장치와 예냉장치를 이용(Type 3)

Type 3은 Fig. 5에서와 같이 Type 1과 Type 2를 합친 것으로 독립된 예냉장치를 이용할 때 나타나는 증발기 입구에서의 냉매의 나쁜 건도조건을 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. 1차 팽창 후 플래쉬 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 해석하는 데 있어서 기본적인 온도조

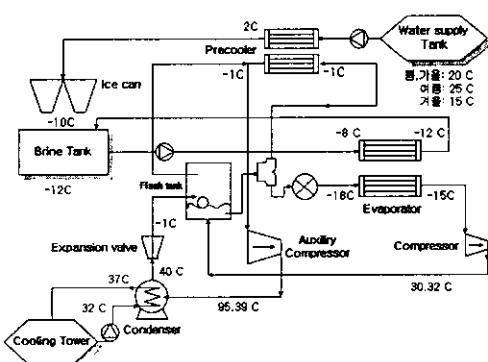


Fig. 5 Type 3: power saving block ice plant with precooler system & additional components

건은 Table 1과 같고, Type 1에서 플래쉬 탱크에서의 중간압력은 다음과 같이 구한다.⁽⁴⁾

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

기본사이클을 비롯해서 절전형 제빙사이클을 해석하는데 있어서 100톤의 원수로부터 -10°C 의 얼음을 만드는데 제빙장치가 제거해야 하는 열은 다음 식으로 구할 수 있다.

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

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

식(2)는 Type 2와 3의 예냉장치에서 제거되는 열이고, 식(3)은 주 체빙장치에 의해 제거되는 열이다. 따라서 예냉장치가 없는 기존설비와 Type 1에서 사용한 제거해야 할 열량은 다음과 같다.

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

다음으로 각 Type의 증발기에서 얻는 냉동효과는 다음과 같다.

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

$$\dot{Q}_{\text{evap}} = \Delta h_{\text{main evap}} \cdot \dot{m}_{\text{main}} + \Delta h_{\text{tre}} \cdot \dot{m}_{\text{tre}} \quad (6)$$

식(5)은 기존장치와 Type 1에서 사용하게 되고
식(6)은 예냉장치가 있는 Type 2와 3의 설비를
해설하는 데 사용한다.

마찬가지로 제빙과정에서 필요로 하는 압축일
량은 다음과 같다.

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

$$\dot{W}_{comp} = \Delta h_{main, comp} \cdot m_{main} + \Delta h_{auxil, comp} \cdot m_{tot} \quad (8)$$

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

식(7)은 주 압축기만 사용하는 기존제빙설비의 압축일량이고 압축일을 줄이기 위한 다단압축을

Table 2 COP & ice making time (h) for each type of block ice plant cycle with season

COP (time)	Spring · fall	Summer	Winter
Basic		3.42(24.0)	
Type 1		3.84(20.8)	
Type 2	3.66(19.8)	3.72(18.9)	3.60(20.8)
Type 3	4.01(16.7)	4.06(15.9)	3.95(17.5)

하는 Type 1은 식(8), 그리고 예냉장치를 이용한 Type 2와 3에서는 식(9)를 사용한다.

따라서 냉동사이클의 성능을 나타내는 성적계수(Coefficient of Performance, COP)와 절전형 제빙설비의 효용성과 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 Type 1의 제빙시간은 식(11)으로 구하고 예냉장치가 있는 Type 2와 3의 제빙시간은 식(12)과 (13)으로 구한다. 예냉장치를 이용한 절전형 설비는 예냉장치에서 수행하는 I단계의 상온냉각과 주사이클에서 수행되는 II, III단계의 제빙과정이 동시에 이루어져야 한다. 그렇지 않으면 먼저 끝난 사이클의 온도를 유지시켜 줄 수 있는 부가장치가 더 필요할 것이다. 이에 따라 예냉장치로 나뉘어 들어가는 냉매량을 구할 수 있다.

3. 해석결과 및 고찰

3.1 성적계수의 비교

냉동사이클의 성능을 나타내는 것으로 성적계수(COP)를 계산·비교하였다. 식(10)에 의한 기

존 제빙장치의 성적계수와 절전형 제빙장치의 각 유형별 값은 Table 2와 같이 계산되었다. 예냉장치를 이용하지 않는 기존제빙방식과 부가장치를 이용한 Type 1의 제빙설비는 계절에 따른 성적계수가 일정한데 반해 예냉장치를 사용하는 설비인 Type 2와 3의 제빙설비는 계절에 따라 성적계수가 다르게 나온다. 이는 원수의 온도가 다르기 때문에 예냉장치에서 작동하는 냉매의 양이 틀려지게 된다. 이에 따라 예냉장치의 성적계수가 달라지게 되고 전체 성적계수가 다르게 나타난다. 결과적으로 여름철을 기준으로 했을 때 기존장치의 성적계수 3.42에 비해 예냉장치와 플래쉬 탱크를 이용한 제빙사이클이 4.06으로 18.9%의 효율향상을 보인다.

3.2 제빙시간의 비교

제빙시간은 제빙설비에 있어서 전기요금과 직결되는 항으로 성적계수와 같은 경향을 보인다. 성적계수가 높을수록 제빙시간은 짧아진다. 하지만, 예냉장치를 이용한 Type 2와 3은 상온냉각과 주요 냉각을 동시에 수행하기 때문에 제빙시간은 더욱 짧아진다. 따라서 Table 2에서 보면 Type 1의 성적계수가 Type 2보다 크지만 제빙시간은 Type 2가 더 단축됨을 알 수 있다. 또한 예냉장치를 이용한 설비에서는 성적계수와 같이 원수온도에 따른 제빙시간이 약간의 차이를 보인다.

3.3 전력요금의 비교

제빙시간과 전력요금은 거의 비례적으로 나타난다. 하지만 전력요금의 체계에 따라 냉동기에 서의 압축기의 용량에 따른 전력량이 크게 작용하는 경우도 있다. 기존의 제빙장치를 비롯해서 각 Type별 전기요금을 심야전력(율)요금과 산업용전력(감, 선택1, 고압B)요금을 적용해서 그 결과를 Fig. 6부터 Fig. 9에 나타냈다.

산업용 전기요금의 적용시에는 계절별로 전기요금의 차이가 많이 나는데 특히 여름철의 전기요금이 봄, 가을 그리고 겨울철보다 상당히 많이 나옴을 알 수 있다. 이는 원수 온도가 다른 계절에 비해 높기 때문에 소요동력이 많이 들고 전기요금체계상 여름철의 전력량 요금이 타 계절에 비해서 비싸기 때문이다. 심야전력요금을 적용한

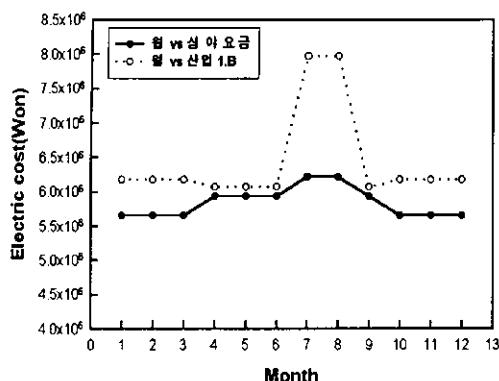


Fig. 6 Monthly electric cost for year of conventional plant.

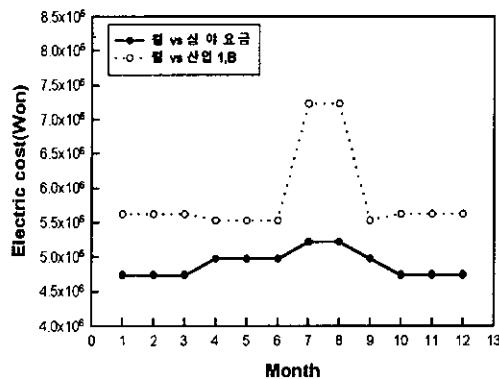


Fig. 7 Monthly electric cost for year of type 1 plant.

경우에는 계절별 요금이 구분되어 있지 않기 때문에 그 폭이 크지 않다. 또한 예냉장치를 이용한 제빙설비의 심야전력요금은 Fig. 8과 Fig. 9에서 보는 바와 같이 계절별 전기요금 차이가 많이 나지 않는 편이다. 이는 예냉장치를 이용함으로써 원수온도의 영향을 최소화시킴을 알 수 있다.

3.4 설계변경과 투자 회수기간

절전형 제빙장치로의 설계변경으로 인한 부가되는 설비투자금액과 그에 따른 연간 절약금액을 Table 3에 나타내었고 이에 따른 설비투자비의 회수기간을 조사하여 그 결과를 Fig. 10과 같이 나타내고 있다. 심야전력이 산업용전력을 이용했을 때보다 절약금액이 높게 나왔으며 성적계수와 제빙시간이 가장 좋은 Type 3인 경우가 가장 많이 절약됨을 알 수 있었다.

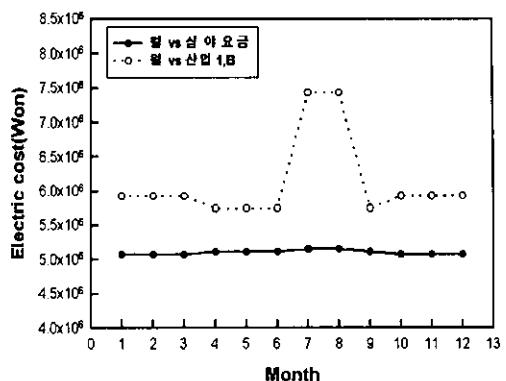


Fig. 8 Monthly electric cost for year of type 2 plant.

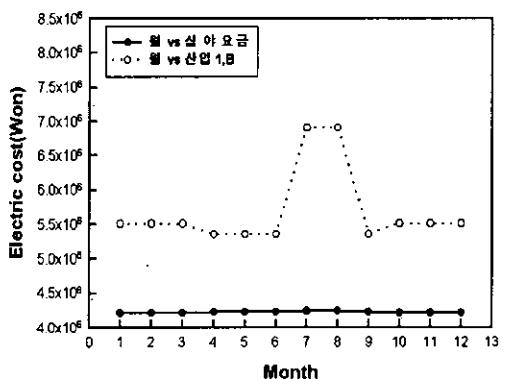


Fig. 9 Monthly electric cost for year of type 3 plant.

Table 3 Yearly saving money and total cost (won) for making for each type of block ice plant

Electric cost plan	Yearly saving cost		Cost of changing plant
	Midnight	Industry (1,B)	
Type 1	11,301,540	7,046,940	7,000,000
Type 2	9,046,140	3,911,640	16,500,000
Type 3	19,553,120	9,096,780	16,400,000

*출처 : (주) Alfa Laval

설계변경투자비 대비 절약금액으로 계산한 투자 회수기간으로 봤을 때 경제성을 고려했을 때 Type 1과 Type 3가 적절한 절전형 제빙설비로 고려되어진다.

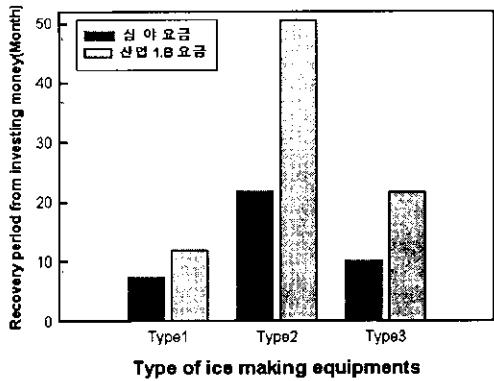


Fig. 10 Recovery period from investing money for each type of block ice plant.

4. 결 론

본 연구에서는 여러 유형의 제빙사이클을 구성하여 이것을 해석하고 기존의 설비와 비교해 본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 냉동성능을 나타내는 성적계수에서는 기존 설비의 3.42와 비교해 본 결과 계절에 따라 Type 3인 경우 3.96~4.06로 가장 성능이 좋았으며 약 15.7~18.9%의 향상을 가져왔다.

(2) 제빙시간의 계산에서는 기존설비(100톤/24시간)에 비해 계절에 따라 Type 1은 20.8시간, Type 2는 18.9~20.9시간, Type 3은 15.9~17.5시간으로 Type 3인 경우 약 27.1~33.8%의 제빙시간이 단축되었다.

(3) 전력요금의 계산과 그 경제성의 계산에서는 심야전력요금을 이용하는 것과 산업용전력요금을 이용하는 경우로 구분하였는데 심야전력을 이용한 경우에는 Type 3인 경우가 기존의 설비에 비해 약 27.8%의 전기요금이 절감됨을 볼 수 있었고 산업용 전력요금체계에서는 11.8%의 절감됨을 알 수 있었다.

투자 회수기간에서는 심야전력을 이용했을 시에는 Type 1과 Type 3이 1년 이내로, 산업용 전력요금체계에서는 Type 1이 약 1년 정도로 나타났다.

위의 결과로 볼 때 기존설비에 비해 성능과 경제성 면에서 예냉장치와 플래쉬 탱크 등의 부가 장치를 이용한 Type 3이 가장 최적화된 제빙설비로 사료되어진다.

후 기

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

참고문헌

- 1997, Journal of Refrigeration engineering and Air Conditioning, Korean Association of Refrigeration, Vol. 16, No. 2.
- Cycle Simulations for Power Saving BIP design, Proceeding of the KSME 2000 Fall Annual Meeting B, pp. 314-344.
- 1994, Handbok of Air-Conditioning, Refrigeration and Sanitary Engineering, Vol. 3, No. 2, pp. 341-344.
- 1976, Thermophysical Properties of Refrigerants, American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Atranta, GA.
- Stoecker and Jones, 1986, Refrigeration & Air conditioning, 2nd ed., McGraw-Hill, New York, pp. 308-327.