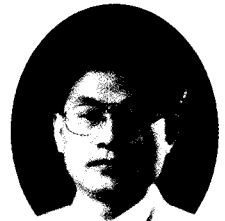


빙축열 시스템의 성능평가



윤 정 인

- 출처 : Refrigeration, Nov., 1999
- Masayuki Tanino, Takasago Thermal Engineering Co., Ltd.
(Japan Society of Refrigeration and Air Conditioning Engineers)

현재까지 많은 공조용 빙축열 시스템이 전력 수요 평준화를 목적으로 개발되어 설비에 적용되어 왔다. 지금까지 각종 학회에서 발표된 내용들은 기업에서 개발된 빙축열 시스템의 제빙 방식의 특징이나 시운전 결과가 중심이고, 빙축열 시스템의 평가, 특히 실제 설비의 운전 데이터에 기초한 시스템 성능 평가에 대한 내용은 많지 않았다.

이번에 소개하고자 하는 기술은 현장 제조형의 과냉각 방식 빙축열시스템의 실제 설비를 대상으로 제빙조의 제빙성능과 해빙성능에 관하여 모델해석을 기초로 평가하고, 제빙효율, 소비전력, 운전비용과 관련하여 설명함으로써 열원시스템을 평가하고자 한다.

빙축열시스템의 성능평가

전력수요 평준화의 평가지표로 야간이행율이 있으며 야간이행율의 향상, 또는 제빙조의 콤팩트화(고밀도화)의 지표로 빙축진율(IPF)이 있다. 야간이행율을 과도하게 높이는 것은 열원기기의 용량이나 가동율을 저하시켜 경제성이 떨어지게 된다. 또 IPF를 수축열조와 비교한 용적 저감율로 평가하면, 과도하게 IPF를 높여도 수조내의 현열성분의 감소에 의해 큰 저감효과는 얻을 수 없다. 전력수요 평준화를 위해서는 야간이행율도 향상시키면서 전력피크 시간대에 대한 대폭적인 야간이행, 즉 전력수요 피크감소가 효과적이다.

소비전력에 관계된 제빙효율은 빙축열시스템

의 중요한 평가기준이다. 많은 빙축열시스템에서 제빙효율을 높이려는 노력이 이루어지고 있지만, 얼음을 만들어야 하기 때문에 수축열시스템에 비해 효율의 저하나 소비전력의 증가는 피할 수 없다.

경제성 평가는 이것들을 종합적으로 생각하여 얻어지는 것이다. 어떤 연구자들은 초기비용에서 운전비용까지의 비용에 기초하여 연간경상비에 의한 경제성 평가를 하였다. 열부하형태에 따라서 빙축열시스템이 수축열시스템보다 경제적으로 유리한 축열조 용적이 있는 것을 보여주었다. 과냉각방식의 빙축열시스템은 냉열제조단가(단위 냉열량을 제조하기 위한 비용)가 축열하지 않는 시스템의 약 85%로, 수축열시스템과 동등한 경제성을 가지는 것을 확인하였다.

최근에는 환경에 대한 영향 평가도 필요하게 되었다. 어떤 연구자들은 빌딩 멀티에어콘의 소형빙축열 유닛을 대상으로 소비전력, 효율 및 발전소에서의 배출원단위에 기초한 CO₂ 배출량에 의해 비교·평가하였다. 여름철 약 30%의 야간전력을 활용할 수 있는 것, 야간의 제빙에 의한 효율저하와 주간보다도 적은 CO₂ 배출원단위가 상쇄되는 것으로 보면 CO₂ 배출량은 비축열과 같은 정도이며, 이렇게 하면 가스엔진식 빌딩 멀티 에어컨보다 작은 값이 되는 것을 보고하고 있다.

이상과 같은 평가를 얻고 있기는 하지만 수축열시스템과 비교하여 효율이 낮은 점이나 소비전력의 증가는 빙축열시스템의 큰 문제라고 할

수 있다. 이것들을 극복하기 위해서는 효율 저하를 감수하고 얻었던 빙점온도와 열 부하(공조) 온도의 큰 온도차를 수축열시스템에서는 실현 불가능한 대출력의 냉열공급, 또는 열부하 응답성으로서 충분히 활용할 필요가 있다. 이것은 경제성 관점에서는 전력의 피크시간공조계약으로 대폭적인 운전비용을 절감할 수 있다. 또, 이처럼 피크시간대의 전력을 줄여 야간으로 이행하는 것은 전력수요의 평준화에 효과적으로 기여하는 것과 같다.

빙축열시스템에 요구되는 성능은 냉열의 공급 능력이다. 즉 저장된 얼음을 녹여 얻어진 냉수의 온도가 높은 열 부하를 처리하는 시간 내에 소정의 온도이하로 유지 가능한 필요 제빙량을 확보하는 것이 중요하다. 그렇지만 빙축열시스템의 성능은 제빙능력(제빙효율)과 동시에 제빙조에서의 제빙(축냉)과 해빙(방냉)의 특성에 관련이 있다.

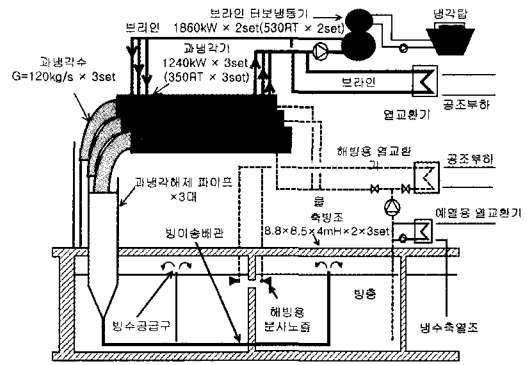
과냉각방식의 다이내믹형 빙축열시스템

여기에서 대상으로 하는 과냉각방식의 다이내믹형 빙축열시스템은 물의 과냉각상태(과냉각수 온도 -2°C)의 해제로 만들어지는 얼음입자가 다량의 물과 동시에 배관으로 제빙조에 공급되어 샤베트형의 얼음(빙층)으로서 퇴적하는 것으로서, 제빙과정이 진행된다. 또 공조부하에서 돌아오는 물 등으로 퇴적빙층을 용해하는 해빙(방냉)과정에서는 샤베트형의 빙층의 양호한 해빙 특성을 충분히 발휘시켜, 저온의 냉수를 공조부하 등에 공급한다.

모델해석에 기초한 제빙·해빙성능 평가

제빙 성능평가

여기에서 설명하는 설비는 바닥면적 $64,753\text{m}^2$ 의 대규모 쇼핑센터에 적용된 다이내믹형 빙축열 시스템 계통도를 <그림 1>에 나타내었다. 그

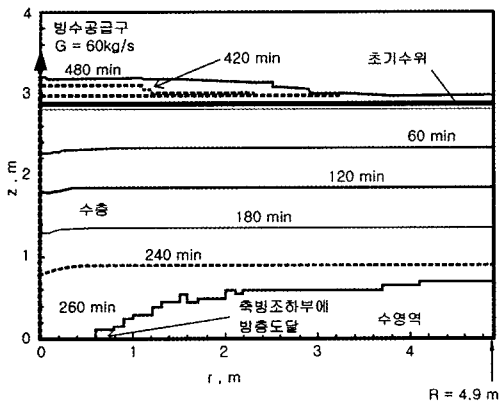


<그림 1> 설비 계통도

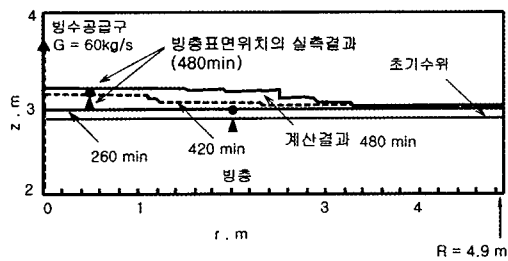
림에서와 같이 2대의 브라인 터보냉동기 1,860 kW(530RT)를 냉열원기기로 하고, 3대의 과냉각기 1,240kW(350RT) 및 과냉각해제 파이프에서 만들어진 빙수가, 슬라브 아래의 $8.8 \times 8.5 \times 4\text{mH} \times 6$ 조의 대규모 제빙조($1,100\text{m}^3$)에서 3계통의 조내배관으로 공급된다.

먼저, 제빙과정의 모델해석 결과로서 빙층형태의 경시변화 계산결과를 <그림 2>에 나타내었다. 그림의 R은 제빙조의 단면적($8.8\text{m} \times 8.5\text{m} = 74.8\text{m}^2$)의 상당반경이고, 1조당 빙수공급유량 G는 60kg/s 이다. 여기에서 $r=0$ 은 빙수의 공급구, $r=4.9\text{m}$ 는 측벽면까지의 위치를 나타낸다. <그림 2>의 (a)와 같이 하나의 빙수 공급구에서 빙층은 제빙조의 측벽면까지 도달하고, 조의 용적을 제빙하기 하기에 유효하게 이용할 수 있다는 것을 알 수 있다. 또, 260mm에서 빙층은 제빙조의 하부에 도달한 후 빙층표면에서 얼음이 퇴적하여 빙층은 윗방향으로 성장하고, 480mm의 제빙운전으로 초기수위에서 조 높이 방향으로 약 0.4m의 얼음이 퇴적하는 계산결과가 얻어진다.

실제로 야간 제빙운전에서는 제빙조내에 균일하게 얼음이 쌓이고, 소정의 열량(127kJ)이 축냉되어 있는 것이 실측치에 기초한 열량계산으로 확인되었다. 또 제빙조의 맨홀에서 측정한 빙층면의 위치는 <그림 2> (b)와 같은 계산결과와 큰 차이가 없다는 것도 확인할 수 있었다. 또한, 처음 설계에서는 1조당 4개소(전 24개소) 빙수공급



(a) 빙층형성의 예측계산결과



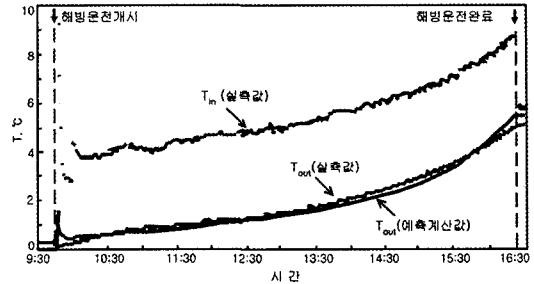
(b) 빙층표면 위치의 실측값과 계산값과의 비교

〈그림 2〉 대규모 설비에서의 빙층형상의 경시변화

구의 설치가 계획되어 졌지만, 그림 2와 같이 사전의 빙층형태 계산결과에 기초하여 각조에서 1개소(전 6개소)의 빙수공급구로서 조내배관의 간략화를 도모하였다. 이상과 같이 이 시스템은 다이내믹형 빙축열시스템으로서는 최대급의 빙축조로, 복잡한 조내구조물(다수의 빙수공급구나 복잡한 배관)을 필요하지 않으면서, 균일한 소정의 얼음을 저장할 수 있어 대규모 현지설치형에 적합하다는 것이 모델해석에 기초하여 평가할 수 있었다.

해빙성능 평가

그림 1의 설비에 있어서 소정의 축열량이 확보가능한 야간의 제빙운전 결과 주간의 해빙운



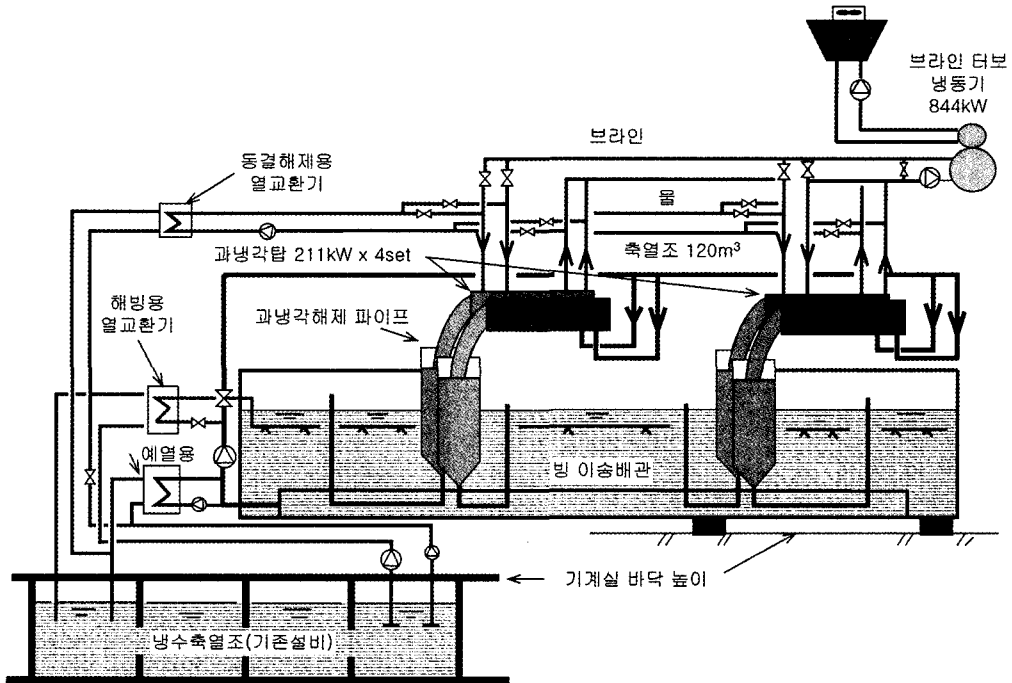
〈그림 3〉 대규모 실제 설비에서의 냉수온도 경시변화

전에서 얻어진 냉수는 〈그림 3〉과 같이 설계(예측계산)대로 저온으로 유지된다는 것을 알 수 있다. 여기에서 T_{out} 은 제빙조의 출구온도, T_{in} 은 입구온도이다. 이 시스템에서는 먼저 일반공조부하에 대해 소정의 시간 내에 충분한 냉수를 얻을 수 있는 해빙성능을 가진다는 것을 알 수 있다.

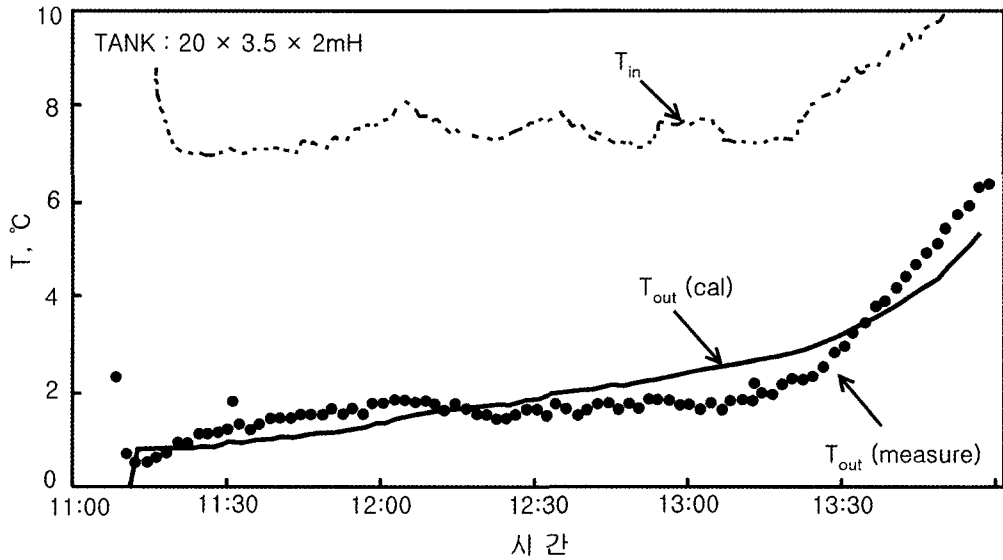
다이내믹형 빙축열시스템은 열부하 응답성에서 우수한 성능을 가진다고 평가되고 있다. 이것을, 축열식 히트펌프에 의한 지역냉난방 플랜트에 냉열공급능력의 증강을 위해 이 시스템이 적용된 실제 설비로 설명한다.

빙축열시스템은 〈그림 4〉와 같이 브라인 터보냉동기 884kW(240RT), 4기의 과냉각기 211kW(60RT), FRP제의 제빙조(120m³) 등으로 구성되어 있다. 해빙운전은 기존의 수축열시스템과의 제휴운전이 용이하기 때문에, 열교환기를 증개하고 냉수축열조에 3시간정도의 단시간에 냉열을 공급하게 된다.

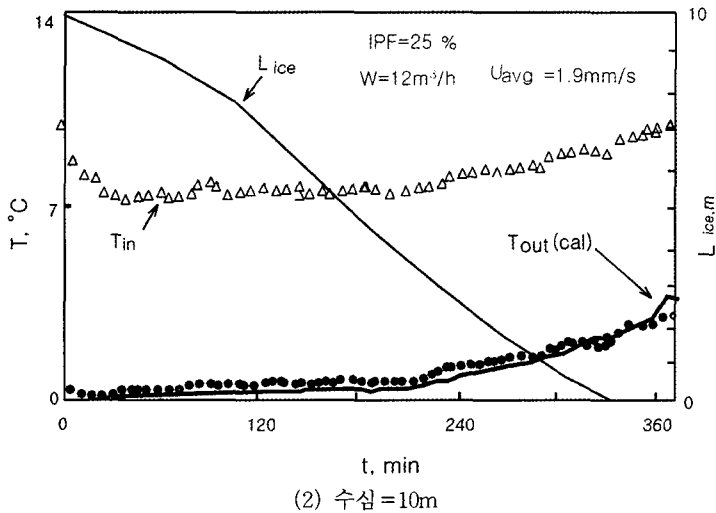
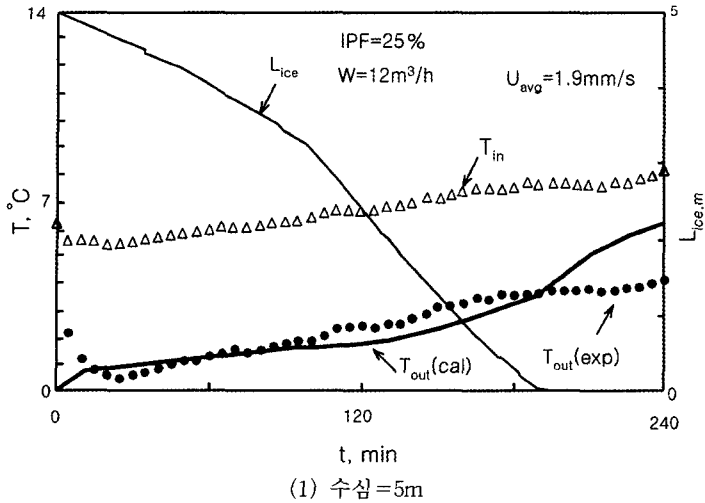
〈그림 5〉에 해빙운전 결과를 계산결과와 동시에 나타내었다. 해빙운전은 11시부터 14시까지 약 3시간 운전한다. 제빙운이 10시간에 비해 시간비율로 보면, 방냉시에는 제빙능력의 3배이상의 능력이 있다는 것을 알 수 있다. 냉수온도 T_{out} 은 제빙조내에 얼음이 있는 동안은 2°C이하에서 안정되고, 방냉의 종료와 함께 급격히 온도가 상승하고 운전이 완료된다. 또 냉수온도의 실측값 $T_{out}(measure)$ 와 계산값 $T_{out}(cal)$ 이 대체로 일치하고 있다는 것을 알 수 있다. 이상의 결과에서 냉



〈그림 4〉 지역냉난방 플랜트에서의 설비 계통도



〈그림 5〉 지역냉난방 플랜트의 냉수온도 경시변화



〈그림 6〉 제빙조에서의 냉수온도 경시변화

열공급 능력이 제빙능력의 3배이상인 고출력, 그리고 단시간의 해빙(방냉) 운전에도 있어서도 저온의 냉수가 얻어져, 이 시스템은 전력 피크 시간 조정계약이 충분히 가능한 해빙성능을 가진다는 것을 알 수 있다. 빙축열 시스템에서 가장 중요한 성능은 냉열의 공급능력이고, 이 고출력으로 본 시스템의 평가는 냉동기 또는 기본부하를 처리하는 정적(static)형 수축열 시스템과 비교하여

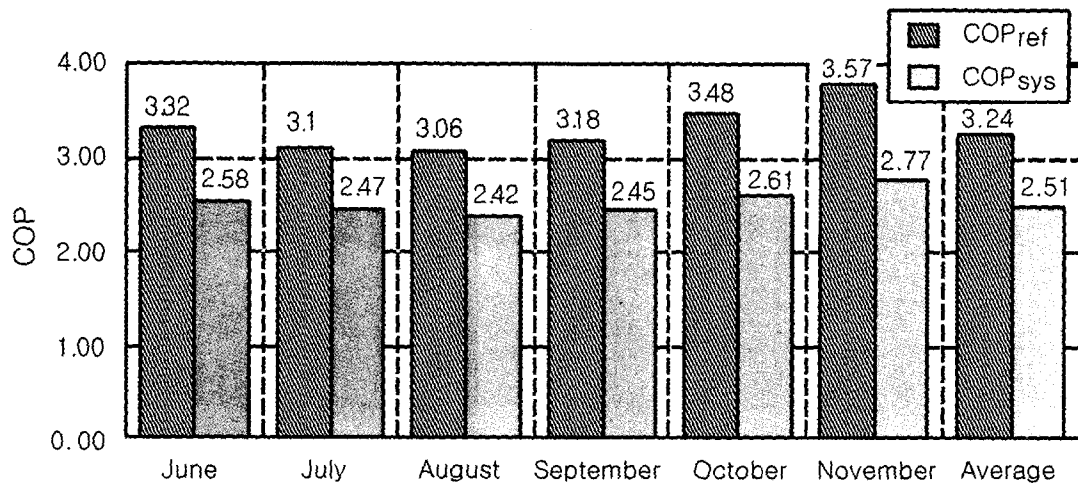
3배 이상으로 평가할 수 있다.

본 시스템의 양호한 해빙성능을 평가하기 위해 수심 5m와 10m의 제빙조에서의 실험결과와 계산결과를 함께 〈그림 6〉에 나타내었다. $T_{out}(exp)$ 는 제빙조에서 얻어진 냉수온도의 실험값, $T_{out}(cal)$ 는 계산값이다. 그림과 같이 수심이 깊은 조를 이용하여 설비 설계하는 것으로 냉수의 저온화가 도모되고, 냉수온도의 경시변화를 예측할 수 있다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 이 시스템은 공조설비에 비하여 저온의 냉수를 필요로 하는 식품 공장등의 설비에도 적용가능한 해빙성능을 가진다는 것을 알 수 있다.

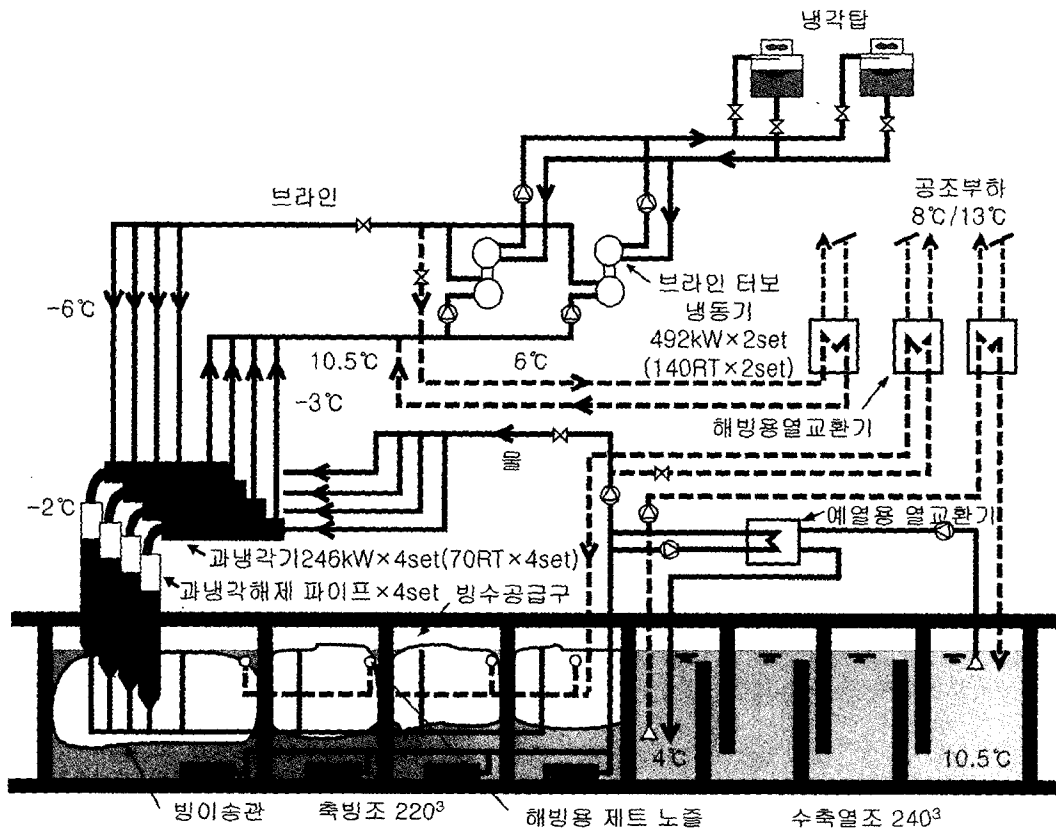
이상과 같이 이 시스템은 공조용, 특히 고출력이 필요한 전력 피크시간 조정계약에 의한 열부하조건은 물론 산업용에 있어서도 충분히 저온의 냉수가 얻어지는 해빙성능을 가진다는 것이 모델해석에 근거하여 평가할 수 있었다. 또 냉열의 공급능력 관점에서 이 시스템의 가치는 정적형 빙축열시스템의 3배 이상으로 평가할 수 있다.

열원시스템 평가

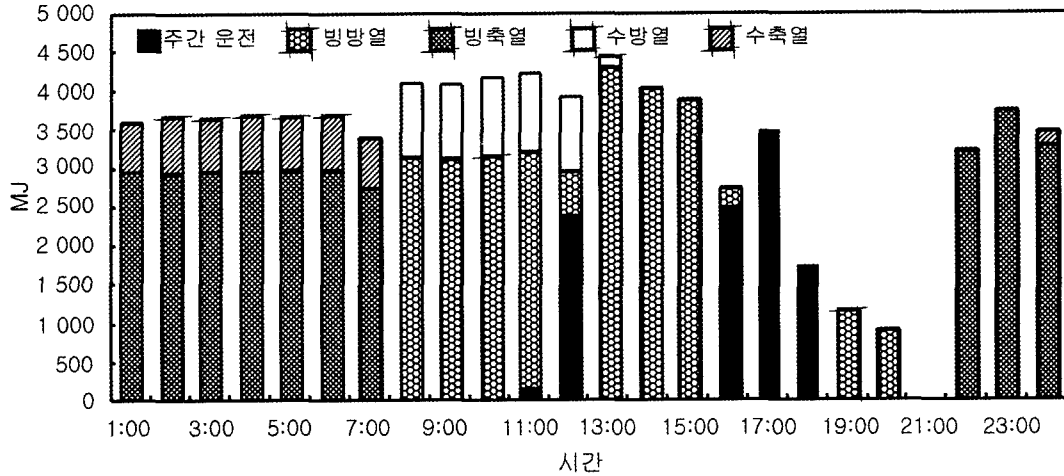
열원시스템으로 평가하기 위해 그림 4의 실제 설비에서 제빙운전의 효율인 COP를 그림 7에 나타내었다. 그림에서와 같이 냉동기에서의 제조 열량을 근거로한 냉동기의 COP(COP_{ref})는 평균 3.24, 보조기기동력을 포함한 제빙시의 시스템 COP(COP_{sys})는 2.51(해빙시의 보조동력을 포함한 총합시스템 COP로는 2.41)로, 높은 COP를 유지



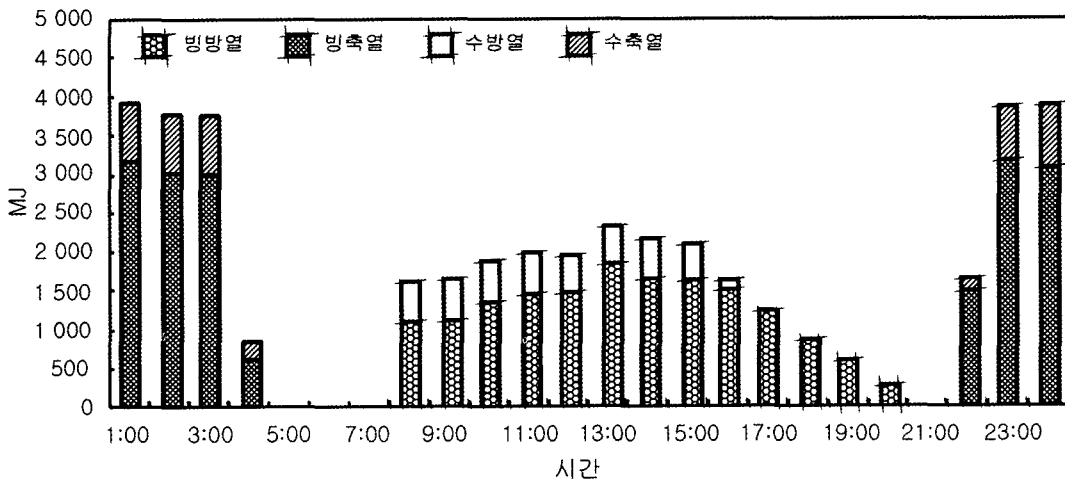
〈그림 7〉 지역냉난방 플랜트에서의 방축열 시스템 COP



〈그림 8〉 열원선정 설비 계통도



(1) 중간기



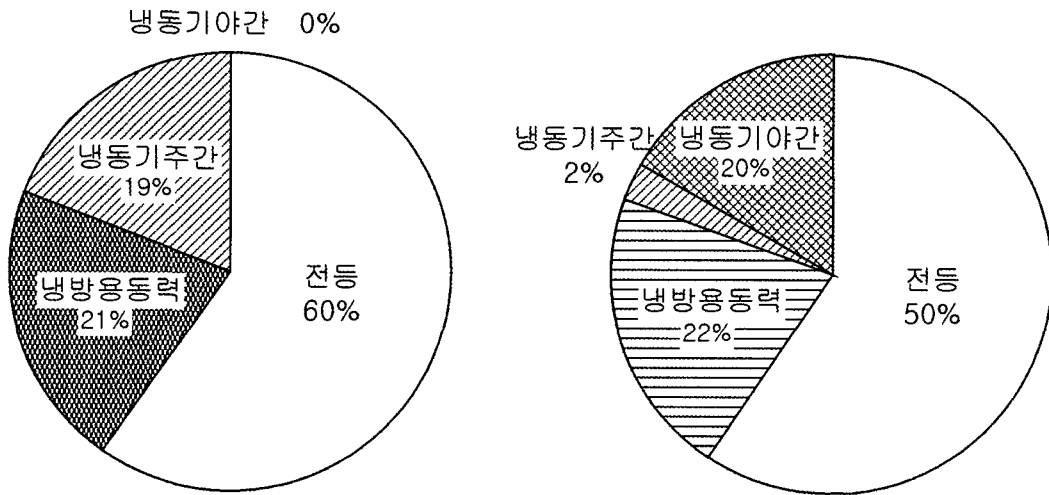
(2) 피크시

<그림 9> 열원기 운전결과

할 수 있다. 또 여름철에 있어서도 COP_{sys} 는 2.42로 야간전력을 유효하게 이용할 수 있다.

여기서 소개하는 빌딩설비는 60년에 준공되어 98년에 열원기기의 리뉴얼에 따라 병축열시스템을 적용하였다. 빌딩은 지상 8층, 지하 3층, 바닥 면적 23,580m²의 건물이다. 주요한 열원 기기는

그림 8에서와 같이 2대의 브라인 터보냉동기 492kW(140RT), 4대의 과냉각기 246kW(70RT), 슬라브 아래의 제빙조 (220m³) 및 과냉각수 제조를 위한 예열열원이기도한 수축열조(240m³)이다. 공조부하는 제빙조 및 수축열조의 방냉운전과 브라인 터보냉동기 운전으로 처리된다.



〈그림 10〉 소비전력 내역

열원기기 운전결과를 〈그림 9〉에 나타내었다. 중간기에는 22시부터 4시까지 제빙을 완료하고, 공조부하는 제빙조 및 축열조에서의 방열량만으로 처리한다. 피크부하시에 22시부터 8시까지의 10시간동안 제빙을 완료하고, 12시경과 16시부터 19시사이에 냉동기 운전을 하며, 그 이외의 시간대에는 제빙조 및 수축열조에서의 방열만으로 공조부하를 처리하게 된다. 특히 13시부터 15시까지의 주간 전력 피크시간대에도 냉동기를 운전하지 않고 각 조에서의 방열열만으로 공조부하를 처리하게 되어 있다. 이와 같은 열원기기의 운전 결과 8월 전공조부하의 84%를 제빙조 및 수축열조의 방열운전으로 감당할 수 있다.

이 시스템의 도입전과 도입후의 소비전력 결과를 〈그림 10〉에 나타내었다. 냉동기 소비전력의 약 90%가 야간으로 이행되고 있다. 단, 여기

에서 총소비전력은 약간 증대하는데, 이 원인은 빙축열시스템의 도입에 의한 열원설비(냉동기+보조기기)의 동력 증대때문이다. 그러나, 냉동기 용량의 감소에 의한 계약전력의 감소, 업무용 축열 계약, 특히 피크시간 조정계약에 의한 공조용 전력요금의 연간 1000만원 정도 감소하여 이 빙축열시스템의 경제성을 확인할 수 있다.

앞으로의 전망

이상과 같이 과냉각방식 빙축열시스템의 성능 평가를 실제설비에 근거하여 평가하였다. 특히, 다른 열원기구나 공조시스템의 접점에 있는 제빙조의 성능평가, 특히 해석적 수법에 의한 평가는 실제 설비의 사전평가와 연결되어 빙축열시스템의 보급에 기여할 수 있으리라 생각한다. ㉔