

공조용 축열시스템 현황

건물의 냉난방 공조용으로 이용되고 있는 축열시스템에 대하여 그 필요성 및 보급현황 등에 대해 소개하고자 한다.

축열(Thermal Energy Storage)시스템은 열에너지의 공급과 수요 사이에 나타날 수 있는 시간적·양적·질적 부하격차를 해소하기 위한 설비로서, 에너지 이용효율을 향상시키는데 기여한다. 태양열과 같은 재생에너지 열원은 생산되는 열에너지의 양이 기상조건에 따라 다르며 생산과 소비 사이에도 시간적 격차가 큰 것이 일반적이므로 축열시스템의 이용은 필수적이다. 또한, 열병합발전을 통한 지역난방 시스템에서도 전력추종 운전을 해야 하는 설비의 특성상, 전력과 함께 생산된 열에너지를 수요에 대응할 수 있도록 저장해두는 축열시스템이 반드시 필요하게 된다.

한편, 건물의 냉난방을 위한 공조설비의 경우 주간시간대 운전이 집중되어 주간 전력부하가 크게 상승하는 주원인이 되므로, 예비율에 여유가 있는 심야시간대 전력으로 냉온열을 생산해서 저장하였다가 주간 시간대에 사용하는 축열시스템이 이용되고 있다. 이 경우 축열시스템은 전기에너지를 저장하였다가 공급하는 배터리(battery)와 같은 기능을 하기 때문에 thermal battery라고도 부른다. 이러한 공조용 축열시스템은 기본적으로 전력부하 평준화를 위한 설비이므로, 국내 전력수요가 어떤 특성을 나타내고 있는지를 먼저 알아보는 것이 필요하다.

이동원

한국에너지기술연구원

책임연구원

dwlee@kier.re.kr

국내 전력수요 현황

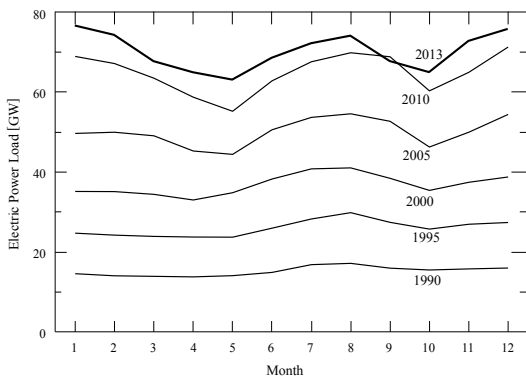
월별 최대 전력수요가 1990년부터 2013년까지 어떻게 변화하였는지를 나타내고 있는 **그림 1**에서 볼 수 있는 바와 같이, 우리나라의 전력소비는 매년 증가하고 있으며 여름철 및 겨울철 주간 냉난방 수요가 급증할 때 나타나는 최대 전력수요도 매년 꾸준히 상승하고 있다. 1990년 최대 전력수요는 8월에 나타난 약 1,725만 kW였고 월별 최대 전력수요의 차이는 351만 kW에 불과했으나, 2013년에는 최대 전력수요가 1월에 기록된 7,652만 kW로 약 4.4배 증가하였으며 월별 최대 전력수요 차이도 1,349만 kW로 증가한 것을 볼 수 있다. 또한 연간 최대 전력수요가 2007년까지는 여름철인 8월에 나타났으나 2008년에는 겨울철인 12월에 나타나기 시작하여, 그 이후에는 매년 1월이나 12월에 최대 전력수요가 발생하고 있음을 알 수 있다.

그림 2는 2013년 1월과 2013년 8월에 각각 발생한 최대 전력 수요일의 시간대별 전력수요를 나타낸 것이다. 겨울철인 1월의 최대 전력수요가 여름철인 8월보다 약 250만 kW 정도 크게 나타난 것을 알 수 있다. 2013년 여름에는 전력 예비율이 매우 낮은 수준으로 떨어져 공공건물의 냉방금지 등이 의무화되었으며, 이 결과 2012년 여름철에 발생

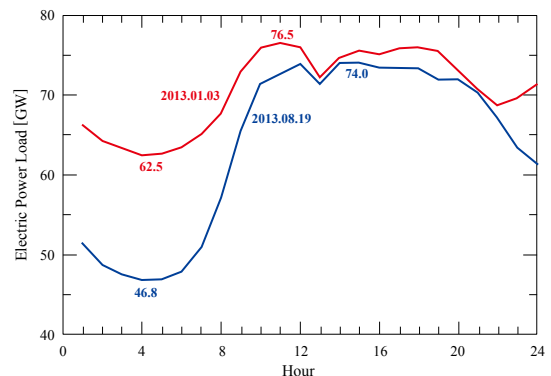
한 약 7,429만 kW의 최대 전력수요보다 적은 값을 나타낸 것임을 감안할 필요는 있다.

겨울철의 전력수요 증가는 주로 산업체에서의 수요증가 때문으로 짐작되는데, 이것은 산업용 전력요금이 타 에너지원 요금보다 상대적으로 저렴하면서 전력사용의 편리성이 크기 때문이다. 한편 여름철 최대 전력수요의 약 24%는 냉방 공조에 의한 것으로 추정되고 있으며,¹⁾ 따라서 2013년에는 약 1,760만 kW정도의 전력이 냉방 공조 때문에 발생한 것으로 볼 수 있다. 한편 같은 날 최소 전력수요는 약 4,679만 kW였기 때문에 일일 전력수요 격차는 약 2,722만 kW인데, 이것은 겨울철 격차인 약 1,406만 kW의 약 두 배 정도에 해당한다. 즉, 여름철에는 냉방 공조에 의한 전력수요 때문에 주·야간 전력수요 격차가 매우 크며, 주간 최대 전력수요가 발생한 때에 운전되었던 발전설비의 35% 이상이 추후 운전을 정지하였음을 알 수 있고, 따라서 냉방 공조에 의해 발생하는 전력수요 때문에 발전설비의 효율적 이용이 어렵다는 것을 확인할 수 있다.

전기는 일단 생산되면 저장이 거의 불가능하므로 모두 소비해야 하고, 이를 거꾸로 얘기하면 최대 전력수요에 대비하여 발전설비가 갖추어져야 한다는 것을 의미한다. 발전설비 건설은 경제적인



[그림 1] 국내 월별 최대 전력수요의 변화



[그림 2] 최대 전력수요일의 시간대별 전력수요

로 국가에 큰 부담이 되며 최근에는 입지선정에도 많은 어려움이 있는 것이 사실이다. 따라서 여름철이나 겨울철 짧은 시간에 발생하는 최대 전력수요에 맞추어 발전설비를 건설하는 것은, 경제적인 면에서나 발전설비의 효율적 운용 면에서 모두 바람직하지 않은 것이다.

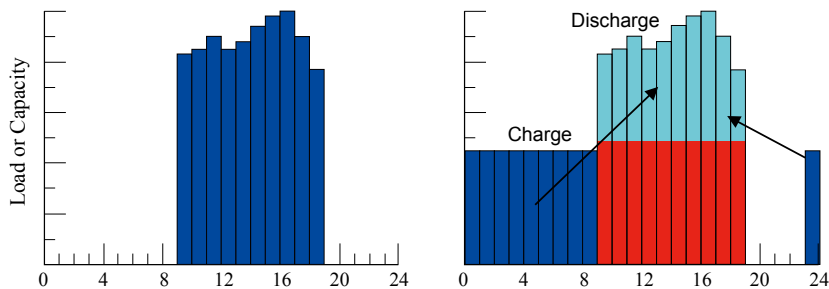
일반적으로 상업용 또는 업무용 건물에서 소비되는 연간 총 에너지의 50% 이상은 냉난방 공조 및 온수 급탕을 위한 에너지로 알려졌다.^{2,3)} 공조설비 중 전기를 이용하는 냉동기나 히트펌프 등은 가스 등 타 에너지원을 이용하는 설비보다 성능, 안전성, 편리성 등에 있어서 우수한 특성을 갖고 있기 때문에 이용을 장려해야 하지만, 이러한 공조설비의 사용 때문에 발생하는 최대 전력수요 문제는 간과할 수 없다. 최근에는 대용량 전력저장장치(ESS)를 이용하여 전력부하 평균화에 기여하자는 의견이 있지만, 결국 열에너지로 변환되어 이용되는 에너지를 굳이 전기에너지로써 저장해야 하는지는 의문이다.⁴⁾

공조용 축열시스템의 역할

건물의 냉난방 설비로는 전기구동식 냉동기, 보일러, 가스흡수식 히트펌프 등이 일반적으로 널리 이용되고 있으며, 최근에는 냉난방이 모두 가능한 전기구동식 히트펌프의 보급이 점차 증가하고 있

다. 한편 공조용 축열시스템은 심야시간대에 전기구동식 냉동기 또는 히트펌프를 이용하여 냉방 또는 난방용 열에너지를 생산하고 이를 축열조에 저장하였다가, 저장된 열에너지를 이용하여 주간시간대에 냉방 또는 난방에 이용하는 설비이다. 냉방용 축열매체로는 물이나 얼음이 이용되며, 난방용으로는 물이 이용되고 있다. 이러한 축열시스템은 **그림 3**에 나타낸 바와 같이 주간 시간대 냉난방용 전력소비를 크게 감소시켜 국가적 전력부하 평균화에 직접 기여할 뿐만 아니라, 공조설비의 용량축소가 가능하므로 소비자에게도 이익이 된다. 다만, 열에너지를 저장하기 위한 축열조를 구비해야 된다는 점에서 초기투자비가 증가하게 되지만, 저렴한 심야전력 요금을 적용받기 때문에 투자회수 기간은 2년~3년 정도인 것이 일반적이다.

국내에서는 1992년부터 일정 규모 이상의 건물에 중앙집중 냉방설비를 설치할 때에는 해당 건물에서 소비되는 주간 최대 냉방수요의 60% 이상을 가스흡수식 히트펌프나 축열시스템 방식으로 설치하도록 하고 있다(개정 산업부고시 제2008-17호). 그 시기부터 주간 시간대에 집중되는 냉방용 전력사용을 심야시간대로 이전시키려는 노력이 있었음을 알 수 있다. 그러나 중앙집중식 냉난방 공조설비보다는 개별식 공조설비의 설치가 증가하고 있어, 위 기준에 구애받지 않고 공조설비가 설치되는 문제점이 제기되고 있다.



[그림 3] 건물의 공조부하와 축열시스템의 역할(예시)

공조용 축열시스템의 종류

냉난방 공조를 위한 축열시스템은 축열매체로 물을 이용하는 수축열시스템과 얼음을 이용하는 빙축열시스템으로 크게 구분할 수 있다. 이 외에 특정 온도에서 상변화하는 잠열축열재(PCM)를 이용하는 잠열축열시스템도 있으나 여러 가지 제기되는 문제점 때문에 상용화 사례는 거의 없다.⁹⁾

수축열시스템

열을 저장하는 방법 중에서 가장 간단하면서 오랫동안 사용되어 왔던 방식이 현열축열 방식이다. 현열축열은 축열매체가 갖고 있는 열용량을 이용하여 열을 저장하는 방법으로 축열원리가 단순하여 기술적 문제점이 거의 없으며, 물, 자갈, 벽돌 등과 같이 잘 알려졌고 안정된 축열재료가 많다는 장점이 있다. 또한, 거의 무한기간 축열 및 방열과정이 가역적이므로, 한번 축열시스템을 구성하면 별도의 개보수가 필요 없다는 장점도 갖고 있다. 그러나 단위부피당 열을 저장할 수 있는 열량이 적어 큰 용량의 축열조가 필요하다는 단점이 있다.

수축열시스템의 축열매체인 물은 여러 가지 물질 중에서 질량대비 열용량이 크고 안정적이며, 경제성이 우수하고, 냉난방 공조용으로 사용하기에 적합한 작동온도를 가지고 있다. 또한, 얼음을 생산해야 하는 빙축열시스템에 비해 상대적으로 높은 온도의 냉열을 생산하기 때문에 냉동기의 성적계수(COP)가 향상되고, 하절기 냉방용으로 사용하던 수축열조는 동절기 난방용으로도 사용할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 현열축열이라는 점 때문에 축열조 부피가 큰 점과 효율적인 이용을 위해서 축열조 내 온도성층화에 크게 유의해야 한다는 점은 단점이라고 할 수 있다. 도심지 기존 건물에 대형 축열조를 설치하는 것은 매우 어렵기 때문에 수축열시스템은 축열조 설치공간에 제약

이 크지 않은 교외(郊外)지역이나, 운동장 또는 운동장 지하를 활용할 수 있는 학교 등, 그리고 소방수(消防水) 비축의무가 있는 장소에서 소방수 저장 겸용으로 활용되는 것이 바람직하다. 수축열시스템은 냉열을 생산하는 열원기기의 효율이 상대적으로 우수하기 때문에, 축열조 부피가 크다는 단점이 큰 문제가 되지 않는다면, 우수한 축열시스템으로 추천될 수 있다.

빙축열시스템

빙축열시스템은 축열조 부피가 큰 수축열시스템의 단점을 극복하면서도 같은 축열매체인 물을 사용하는 잠열축열시스템이라는 점 때문에 널리 보급되고 있다. 즉, 물이 얼음으로 상변화할 때 필요한 약 333 kJ/kg의 잠열량을 이용하여 냉열을 저장하는데, 이 정도의 잠열량은 다른 축열매체에서는 찾아보기 어려운 큰 잠열량이다. 따라서 수축열시스템에 비해서 축열조 부피를 크게 줄일 수 있으며, 물과 마찬가지로 화학적으로 안정적이고 경제적이며 응고와 용해를 반복하여도 열적 성능이 변하지 않는 장점이 있다. 또한, 축열조 부피가 축소되어 방열면적이 작아지기 때문에 외부로의 열손실이 감소하며, 수축열시스템에 비해 저온의 냉수를 부하 측에 배출하므로 대온도차 열교환에 따른 열교환기 용량 및 수송동력의 경감을 도모할 수 있다.

그러나 공조에 필요한 5℃~12℃의 냉수보다 저온의 얼음을 만들기 때문에 냉동기 증발온도 저하에 의해 소비전력이 증가하며, 저온의 증발온도를 갖는 냉동기가 필요하다는 단점이 있다. 또한 빙축열시스템의 축열조는 그 내부에 제빙코일이나 캡슐 등이 가득 차있는 경우가 대부분이어서 동절기 난방용 축열조로 겸용하기 힘들다는 불리한 점도 있다. 이론적으로는 빙축열시스템이 수축열시스템에 비해 단위부피당 10여 배의 축열밀도를 갖

지만, 축열조 내 얼음을 가득 채우는 것은 불가능할 뿐만 아니라 각종 열적 성능을 저하시키는 요인이 되기 때문에, 실제 축열밀도는 이보다 낮은 5~8배 정도인 것이 보통이다.

빙축열시스템의 구분

빙축열시스템은 다양하게 구분할 수 있으나, 국내에 보급되고 있는 빙축열시스템은 크게 세 종류로 구분할 수 있다(그림 4).

관외착빙형(Ice-on-coil type)은 축열조 내 coil(관)을 설치하고 물을 채운 다음 관 내부로 냉매 또는 브라인을 순환시키면서 관 외벽에 얼음을 형성하는 제빙방법이다. 해빙방법에 따라 내용형(內融形, static-indirect contact type)과 외용형(外融形, static-direct contact type)으로 구분된다. 장치의 구성이 간단하고 유지관리가 비교적 용이하며, 특히 외용형의 경우 해빙 시 냉수를 직접 순환시킬 수 있어 별도의 열교환기가 필요하지 않은 장점이 있다. 그러나 비교적 두꺼운 얼음층에 의해 제빙효율이 저하되며 불완전한 해빙이 이루어지거나 브릿징(bridging)이 발생하는 경우 열적 성능이 크게 떨어지고, 해빙성능도 좋지 않아 부하추종성이 낮다는 단점이 있다.

캡슐형(Capsule type)은 일반적으로 PE 재질인 구형 또는 관형 용기(capsule) 내에 물과 과냉방지를 위한 소량의 조핵제를 함께 넣고 밀봉한 다음 축열조 내에 적층한 빙축열시스템이다. 제빙과정에서는 브라인 수용액이 냉동기와 축열조를 순환하면서 용기 내부의 물을 얼리게 되고, 방열과정에서는 브라인 수용액이 부하측 열교환기와 축열조를 순환하면서 용기 내부의 얼음을 녹여 얻어진 냉열을 부하측에 전달한다. 용기의 형태에 따라 ice ball type과 ice lens type으로 크게 구분된다. 전자는 축열조 내에 적층하기 쉬운 구조이며, 후자는 열교환 면적이 상대적으로 넓은 구조를 갖고

있다. 캡슐을 제외하고는 장치구성 및 시공이 간단하고 모듈화가 쉬우며, 축열조의 형태에 제한을 거의 받지 않는 장점이 있다. 또한, 부하에 따라 축냉량의 조절(캡슐의 수)이 용이하고 캡슐 내에 잠열재를 넣을 경우 0℃ 이상의 고효율 축열도 가능하다. 그러나 역시 두꺼운 얼음층 형성으로 제빙효율이 저하되며 축열조내 브라인 흐름이 균일하지 않은 경우 부분 결빙 및 부분해빙의 가능성이 높다. 또한 조핵제에 따라서는 과냉의 염려가 있으며 부하추종성도 낮은 단점이 있다.

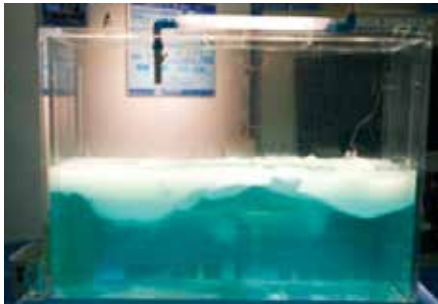
아이스슬러리형(Ice slurry type)은 별도의 제빙기를 통해 물 또는 수용액에 수심 μm 에서 수 mm 크기의 작은 얼음 입자가 섞여 있는 아이스슬러리를 제빙하고 축열조에 저장하였다가, 건물의 냉방 또는 산업용 냉장·냉각부하에 대응하는 빙축열시스템이다. 제빙방법에 따라 물 또는 첨가제가 섞인 수용액을 이용하게 되는데, 활용 측면에서는 물만을 이용하는 방법이 바람직하지만, 아이스슬러리 제빙의 안정성을 향상시키고 용점을 낮추며 유동성을 증가시키기 위해서, 5~10%의 브라인이나 에탄올과 같은 첨가제를 섞는 것이 일반적이다. 아이스슬러리형 시스템은 널리 보급되고 있는 관외착빙형이나 캡슐형과 같은 정적 제빙방식의 빙축열시스템과는 달리, 두꺼운 얼음층이 형성되지 않아 제빙효율이 높을 뿐만 아니라 용해속도가 빨라 방열효율이 우수하다는 기본적인 장점을 가지고 있다. 또한 제빙방법이나 첨가제의 종류 및 농도의 조절을 통하여 얼음 입자 크기나 제빙온도 등을 조절할 수 있으며, 유동성이 있어 부하 측으로의 직접수송이 가능하므로 냉열수송 배관 및 펌프동력을 줄일 수 있다는 큰 장점도 갖고 있다. 직접수송이 가능한 아이스슬러리는 각종 산업용 냉장·냉각 시스템의 브라인이나 냉매 대신에 적용할 수 있고, 이러한 이유로 아이스슬러리는 우수한 2차 냉매라고도 한다.



관외착빙형



캡슐형



아이스슬러리형

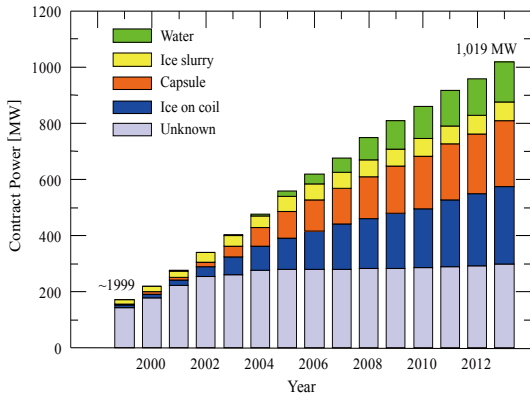
[그림 4] 빙축열시스템의 종류

공조용 축열시스템의 보급

축열시스템을 이용한 냉난방설비는 1980년대 말부터 보급되었는데, 초기에는 가정용 축열식 심야 전기보일러가 보급되었으며, 1990년부터 일반 건물용 축열식 냉방설비인 축냉설비가 보급되기 시작하였다. 심야 전기보일러의 경우 전기히터를 사용하는 데 따른 효율성 문제와 1990년대 말 외

환위기 이후의 급격한 보급량 증가에 따라 현재는 극히 제한적으로 보급을 축소시켰으며, 대안으로 히트펌프 보일러가 최근에 개발되어 한국전력의 지원 하에 보급되고 있다.

냉방용 축열시스템으로는 빙축열시스템이 초기에 보급되었고, 2000년대 이후에는 냉난방 겸용이 가능한 수축열식 히트펌프의 보급이 점차 증가하고 있다. 이러한 축열시스템은 냉동기가 보급되



[그림 5] 빙축열시스템의 누적보급량

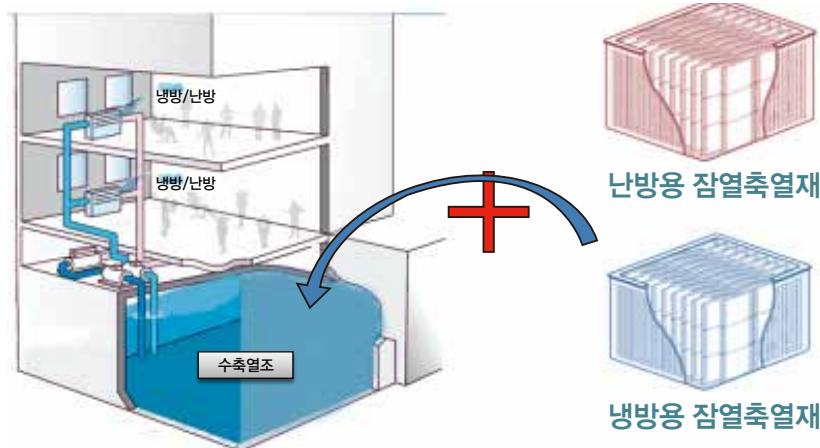
기 시작한 19세기부터 단기간에 냉방부하가 집중하는 교회나 극장과 같은 건물 또는 유가공 공장 등에서, 냉방 또는 냉각용 공조시스템의 소형화를 목적으로 이용되어 왔다. 그러나 현재는 요금이 저렴한 심야시간대 전력을 이용하여 냉열을 생산·저장하였다가, 기타 시간대에 저장된 냉열을 활용하는 시스템을 의미한다.

그림 5는 축열시스템의 축열 방식별 누적 보급량(용량 기준)을 나타내고 있다. 2000년 이전까지는 보급된 축열시스템의 방식이 명확히 보고되지 않았기 때문에 정확하게 구분할 수 없으나, 냉방용

만 보급되었기 때문에 관외착빙형과 캡슐형이 비슷한 비율로 보급되었을 것으로 짐작된다. 히트펌프가 본격적으로 보급되기 시작한 2000년대 중반부터 냉난방 겸용의 수축열식 히트펌프의 보급이 크게 증가하는 것을 볼 수 있으며, 2013년 기준 약 100만 kW 용량의 축열시스템이 보급되었음을 알 수 있다. 최근에는 수축열식 히트펌프 시스템의 축열밀도를 증가시키기 위해, 적용 건물의 부하상황에 따라 냉방용 또는 난방용 잠열축열재를 일부 충전시키는 그림 6과 같은 개념의 축열시스템이 연구되고 있다.

공조용 축열시스템의 효과 및 문제점

축열시스템의 보급은 전력회사 입장에서 매우 중요한 전력 수요관리 수단으로 전력부하 평준화를 이루는 데 있어서 가장 효과적인 방법이라고 할 수 있다. 즉, 축열시스템은 발전설비의 가동률을 높이고 전력부하 평준화를 이루게 하는 적극적 방법이며, 국가적으로는 에너지원의 효율적 이용을 가능하게 한다. 이러한 이유 때문에 전력회사 및 국가에서는 축열시스템의 보급을 위하여 저렴한



[그림 6] 개선된 수축열식 히트펌프 시스템의 개념

심야전력 공급 외에 다양한 지원혜택을 부여하고 있다.

축열시스템을 도입하고 효율적으로 냉난방 운전계획을 세운다면 열원설비는 항상 정격운전을 하게 되며, 이러한 정격운전은 열원설비의 수명을 연장시키기도 하지만 효율 향상에도 기여하여 에너지를 절약할 수 있게 해준다. 이와 함께 냉방용 축열시스템은 외기온이 낮은 심야시간에 주로 운전되기 때문에 응축온도 저하에 따른 효율상승도 기대할 수 있다. 일본 도쿄전력의 자료에 의하면, 심야전력을 이용하는 냉방용 축열시스템은 기존의 냉방설비에 비해서 정격운전과 야간운전에 의한 효율상승만으로도 연간 약 10%의 에너지절약 효과가 있는 것으로 알려졌다.

한편 전술한 바와 같이 축열시스템은 전력저장 효과가 있기 때문에, 대용량 2차전지를 이용한 전력부하 평준화보다 기술적·경제적으로 훨씬 유리한 방법이라고 할 수 있다. 예를 들어 지름 3m에 높이 5m인 축열조를 갖는 빙층진률 80%인 빙 축열시스템은, 총괄 COP 3.5인 냉방설비를 이용하여 냉방하는 경우와 비교할 때 약 870 kWh의 전력저장 효과를 나타내게 된다.

많은 장점을 가진 축열시스템이지만, 보급 시 가장 큰 단점은 상당한 규모의 축열조를 설치해야 한다는 점이다. 따라서 도심지역에 있는 건물에서는 지하층에 축열조를 설치하는 경우가 대부분이며, 이에 따라 건물 설계단계에서부터 적용되지 않으면 추가 설치가 어려운 문제점이 있다. 이와 함께 운전관리 상태에 따라 열적 성능과 운전비용이 달라진다는 불확실성은 건물의 공조설비를 운전하는 운전자에게도 큰 부담으로 작용하게 된다. 또한 기술적 수준이 낮은 기업에서 보급한 축열시스템 중에 문제를 일으키는 경우가 있어, 일부 설계자와 시공자 사이에서 부정적 인식이 퍼져있는 점도 보급에 걸림돌이 되고 있다. 한편, 축열시스

템은 초기투자비의 증가를 운전비용의 절감에 의해 상쇄시키는 설비인데, 국내 여건상 초기투자비를 지불하는 건물주와 운전비용을 지불하는 사용자가 다른 경우가 많기 때문에, 건물주가 축열시스템을 적용하려는 의지가 약할 수밖에 없는 문제점도 있다.

맺음말

본고에서는 건물의 냉난방 공조에 활용되는 축열시스템에 대하여 설명하였다. 심야전력을 이용하는 공조용 축열시스템은, 공조용 전력이 어차피 열에너지로 변환된다는 점에 착안하여, 심야시간대에 열에너지를 생산·저장하였다가 주간시간대 냉난방 공조에 이용하는 thermal battery 역할을 담당한다는 점을 설명하였다. 매년 증가하는 최대 전력수요를 억제하고 국가적 전력부하 평준화를 위해서는 축열시스템의 보급이 보다 활성화되어야 한다는 점을 강조하면서, 한국전력의 많은 자료협조에 감사드린다.

참고문헌

1. 계통운영처, 2013, 2012년도 전력계통 운영실적, 한국전력거래소.
2. 이태원, 김용기, 2010, 건물에너지관리 시스템의 기능 및 활성화 방안, 대한설비공학회 2010 동계학술발표대회는문집.
3. 조진균 외, 2011, 건물의 공조시스템 에너지 효율화방안 및 평가방법 연구, 대한설비공학회 2011 동계학술발표대회는문집.
4. 이동원, 2014, 열에너지 저장(축열), 그린에너지 기술저널.
5. 이동원 외, 2000, 에너지(열)저장 기술개발 연구 기획 사업 보고서, 과학기술부. 