

축열식 히트펌프 시스템의 최적 운전 기술

축열기능이 결합된 히트펌프 시스템을 경제적으로 운전하는 기술에 대하여 소개하고자 한다.

서론

건물부문의 에너지 소비량은 총 에너지 소비량의 30%에 달하며, 그 비율도 매년 상승하고 있다. 이 중 냉난방에 사용되는 에너지는 건물에너지의 40~50% 정도로 높은 비중을 차지하고 있다. 80년대 이후 경제 성장에 따른 생활 수준 향상으로 여름철 냉방 에너지수요는 증가하고 있으며, 전력 최대수요는 연평균 5% 이상의 높은 증가 추세를 보이고 있다. 하절기 냉방부하에 의한 전력소비는 냉방부하가 가장 커지는 주간에 발생함으로써 전력 공급의 불안을 초래하고 있으며, 최근에는 동절기에도 난방을 위한 전력소비가 증가함에 따라 하절기와 유사하게 주간시간대에 전력 최대수요가 발생하고 있다.

지속적인 전력수요 증가에 대응하여 안정적인 전력공급을 위해서는 발전설비의 확충이 필요하나, 동시에 전력수요관리를 통한 발전설비의 이용률 향상을 도모하는 것도 중요하다. 심야전력 요금제는 부하수준이 낮은 심야시간대의 요금을 낮게 책정함으로써, 축열 설비의 사용을 권장하여 주간시간대의 전력소비량을 심야시간대로 이동시켜 전력 평준화를 통한 전력공급의 효율화를 도모하고 있다. 즉 축열시스템은 상

장영수

국민대학교 기계공학과 교수

yschang@kookmin.ac.kr

대적으로 값싼 심야전력을 이용하여 축열조에 열을 저장하고, 이를 에너지 수요가 급증하는 주간 시간대에 사용하여 에너지 공급의 불균형 해소, 운전비용의 저감 및 주간 피크부하의 심야로의 이전 등의 이점을 제공한다.

건물의 냉난방시스템의 운전비용을 절감하기 위해서는 장비의 운전효율 향상뿐만 아니라 전력요금체계에 최적화된 운전 제어방법도 매우 중요하다. 축열시스템의 장점을 극대화하고 효율적인 운전을 위하여 시간에 따라 변화하는 건물 냉난방 부하에 대응이 가능한 최적 운전 기법이 필요하다. 부분축열 방식의 축열시스템의 대표적인 운전기법으로는 냉동기 우선방식과 축열조 우선방식이 있으며, 두 가지 운전 방식은 서로 다른 운전 특성 및 장점을 가지고 있다. 최근에는 건물의 시간별 냉방부하 수요 패턴을 예측하고 이를 바탕으로 최적의 냉방시스템 운전 전략을 수립해 주는 기

술에 대한 연구가 활발하다. 본 글에서는 친환경 냉난방기술로서 축열기능이 결합된 히트펌프 시스템에 대한 동향과 경제적인 운전제어에 대한 기술을 소개하고자 한다.

축열이용 히트펌프시스템

1980년대 중반에 수축열을 이용한 축냉식 냉방설비가 처음 도입되기 시작하였으며 축열조 설치 등의 문제로 1990년대 들어서는 축냉시스템이 도입되기 시작하였다. 심야전력을 사용하여 냉열 및 온열을 생산하여 축열조에 저장하였다가 냉방 및 난방에 사용하는 축열설비는 주간 및 저녁시간대에 필요한 냉난방 열량 전체를 심야시간대에 축열하는 전축열과 주간 및 저녁 시간대에 필요한 냉난방 열량의 일부(40% 이상)만 심야시간대에 축열하는 부분 축열 방식이 이용되고 있으며, 표 1과

〈표 1〉 축방열 방법에 따른 축열시스템

축방열방법			축열매체	
대분류	중분류	소분류		
수축열시스템	온도성층형	-	물 수용액	
	혼합형			
	기타 수축열			
빙축열시스템	관외빙착형	내용형	전열관의 종류 및 형태	얼음(물)
		외용형		
	캡슐형	캡슐 재질 및 형태		
	아이스슬러리형	슬러리 제빙기 종류		
	하베스트형	제빙기 종류		
기타빙축열	-			
잠열축열시스템	관외빙착형	내용형	전열관의 종류 및 형태	잠열재
		외용형		
	캡슐형	캡슐 재질 및 형태	Clathrate	
	포접화합물형	-	잠열재	
기타 잠열축열	-	-		
기타축열시스템	상기이외	-	-	
혼합축열시스템	2가지 이상	-	-	

같이 다양한 형태의 축열 방식이 활용된다.

축열과 부분축열 방식에서 냉난방부하를 처리하기 위해서 냉동기나 히트펌프와 같은 열원기기가 사용되는데, 히트펌프는 저온의 열원(공기, 수열, 지열, 폐열, 태양열 등)에서 열을 흡수하여 고온의 열을 얻을 수 있는 고효율기기로서, 히트펌프의 응축기에서 열을 방출하거나 증발기에서 열을 회수하는 열원의 종류에 따라 표 2와 같은 분류가 가능하다. 유럽의 경우 SET-2020 프로그램에서 히트펌프에 의한 에너지절약과 신재생에너지 보급 및 온실가스 감축 목표를 설정하여 추진하고 있으며, 일본은 2004년 기준 이산화탄소 총배출량의 10%를 단일기기인 히트펌프로 감축시킨다고 보고하고 있다. 일본의 Dakin사는 냉·난방 및 온수 동시 공급시스템의 실용화와 고효율화에 대한 연구를 추진하고 있으며, 축열조와 연계된 하이브리드 히트펌프 시스템을 개발하여 실용화 단계에 있다.

온수 냉난방 및 급탕을 목적으로 하는 공기열원 히트펌프 냉온수기는 2005년 무렵부터 일본, 유럽 및 중국 시장을 중심으로 전기온수기 및 가스보일러를 대체하며 급성장하여 현재 연간 5조 원의 시장규모를 가지고 있다. 그러나 공기열원은

주위에서 쉽게 얻을 수 있는 장점에도 불구하고 낮은 열밀도와 변화가 큰 사용조건, 열량 수요와 열원 공급량 사이 불균형 문제가 있고, 외기 온도가 낮아질 경우 효율과 능력 저하를 극복할 수 있는 기술의 확보가 필요하다.

공기열원 방식의 경제성 및 신뢰성을 보완할 수 있는 방식으로 지열, 태양열, 폐열 또는 미활용 형태의 열원으로서 하수열, 하천열, 호수열 및 해수열 등을 사용하는 수열원방식의 히트펌프가 사용될 수 있다. 공기와 다양한 신재생에너지를 복합열원으로 사용하는 시스템에 대한 개발 및 보급이 진행되고 있다. 다양한 열원을 사용하는 히트펌프를 축열시스템과 결합함으로써 열원의 시간적, 공간적 한계를 극복하여 히트펌프의 효율적 운전 및 신뢰성을 확보하고, 전력수요관리를 통한 발전설비의 이용률 향상, 신재생에너지의 보급 촉진 등 국가에너지 수급에 큰 역할을 할 것으로 생각된다.

냉난방 부하 예측 기술

효율적인 히트펌프 시스템의 운전을 위해서는 냉난방부하를 예측하고 그에 대응하여 히트펌프

〈표 2〉 히트펌프의 열원에 따른 분류

분류		정의
대분류	소분류	
수열원식	냉각탑이용	응축기(증발기)에서 물이나 브라인 또는 기타 액체를 이용하여 열을 방출(회수)하는 시스템
	폐수 / 지표수이용	
	해수이용	
	지열 이용	
공기열원식	공기열원이용	응축기(증발기)에서 공기 또는 기타 기체를 이용하여 열을 방출(회수)하는 시스템
	폐가스이용	
기타열원식	기타열원이용	수열원식이나 공기열원식에 이용되는 매체 이외의 매체를 이용하여 열을 방출(회수)하는 시스템
복합열원식	복합열원이용	1개의 축열조에 열원이 다른 2개 이상의 열원기기를 이용하는 시스템

〈표 3〉 단순화된 건물 부하 예측 모델

CTF method	CLTD/SCL/CLF	HCLFM	LCC method	IHG method
Wang and Xu (2008)	McQuiston and Spitler (1992)	Duanmu et al. (2013)	Gong et al. (2013)	Yoo et al. (2012)
외벽체를 통한 부하 계산을 위해 CTF계수를 이용하는 방법	벽체의 구성물 및 구조, 건물 조건, 특성에 따라 미리 구해진 계수 값을 이용하는 방법	설계 자료를 이용하여 건물의 부하를 예측하는 방법	건물 외피부하에 보정 계수를 적용하는 방법	순간적인 열취득을 고려하여 건물 부하 예측

시스템을 제어하는 것이 가장 효과적이다. 즉 건물의 시간별 냉난방부하 수요 패턴을 예측하고 이를 바탕으로 최적의 히트펌프 시스템 운전 전략을 수립해 주는 것이 필요하다.

변동하는 기후에 따른 냉난방부하의 예측을 위해 TRNSYS, DOE-2, BLAST, ESP 등의 건물 에너지 시뮬레이션 프로그램이 개발되어 이용되고 있다. 시뮬레이션 툴은 복잡한 계산 수행을 통해 높은 수준의 신뢰성을 가지고 있으나, 모델링에 있어서 많은 양의 건물 정보가 요구되며, 사용하기에 어려움이 따른다. 반면 단순화된 예측 기법은 계산의 정확성은 다소 낮아지지만, 사용하기 쉽고, 구조적으로 간단하며, 적은 건물의 정보만으로도 예측이 가능한 장점이 있다.

표 3에 제시된 5가지 단순화된 건물 부하 예측 모델에 대하여, 서울 지역에 위치하는 사무용 건물을 대상으로 상용 프로그램인 TRNSYS를 기준

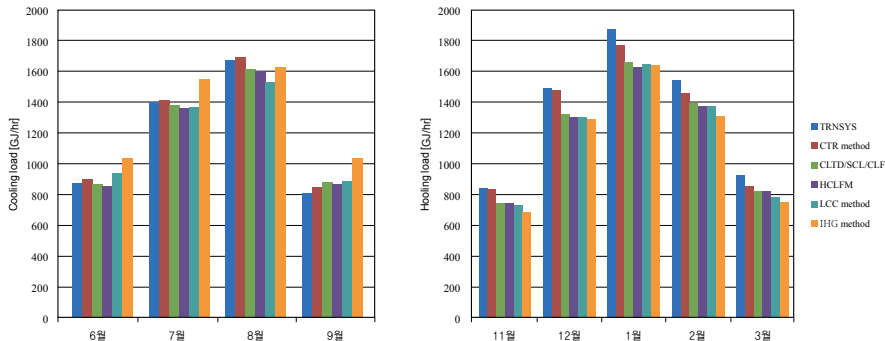
모델로서 각 모델의 예측 성능을 비교하였다.

그림 1과 표 4에 5가지 모델을 이용한 냉난방 부하 예측값과 TRNSYS의 냉난방 부하 시뮬레이션 결과를 비교하여 나타내었다. 단순화된 예측 기법들은 전반적으로 TRNSYS와 유사한 경향을 보였으며, CTF 기법이 가장 작은 오차를 보였으며, IHG 방법이 가장 큰 오차가 발생하였다.

시뮬레이션 결과를 바탕으로, 모델 계산 과정의 복잡성 및 사용의 용이함, 예측의 정확성 등을 고려하여 각 모델별 특성을 비교하여 표 5에 나타내었다. 5가지 방법 중 LCC 방법이 냉난방 기간 모두 적절한 수준의 정밀도로 예측이 가능하며, 사

〈표 4〉 TRNSYS 대비 단순화된 모델의 냉난방부하 절대오차

	CTF method	CLTD/SCL/CLF	HCLFM	LCC method	IHG method
냉방 부하	12%	13%	14%	17%	28%
난방 부하	14%	21%	25%	22%	26%



〈그림 1〉 건물 냉난방 부하 시뮬레이션 결과

〈표 5〉 단순화된 예측 모델 특성 비교

	CTF method	CLTD/SCL/CLF	HCLFM	LCC method	IHG method
복 잡 성	High	Fair	Fair	Fair	Low
사용 편의성	Fair	Yes	Yes	Yes	Yes
입력정보량	Fair	Fair	Low	Low	Low
정 확 도	High	Fair	Fair	Fair	Low
특 징	CTF 계수 값의 결정을 위해 벽체 구조 및 상세 열적 물성치 요구됨	손쉬운 계산이 가능하나, 대상 건물에 대한 적절한 계수 선정이 중요	실내외 온도차에 기인한 시간별 부하율에 따른 오차 발생 가능성 증가	냉난방 기간 적절한 수준의 예측이 가능, 수정 및 보완이 용이함	복사성분 고려 안됨. 냉방부하 예측 오차 증가

용이 쉽고 실제 부하 데이터가 쌓이게 되면 보정계수의 수정을 통해 모델의 정확성을 높일 수 있는 장점이 있다.

히트펌프 최적 제어 기술

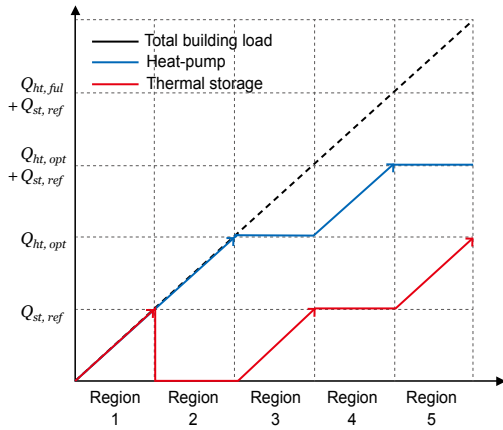
히트펌프-축열시스템은 냉난방부하 패턴에 따라 여러 운전방식이 가능하며, 가장 널리 이용되는 방식으로 히트펌프 우선 방식과 축열조 우선 방식이 있다. 히트펌프 우선 방식은 주간시간대 히트펌프의 정격운전과 동시에, 부하의 나머지를 축열조가 담당하게 된다. 히트펌프 우선 방식은 제어가 용이하고, 히트펌프의 부분부하 운전을 최소화함으로써 높은 운전효율을 유지할 수 있는 반면, 저부하 조건에서 축열조의 이용률이 감소하는 단점이 있다. 축열조 우선 방식은 축열조 이용률을 최대한으로 하는 것을 목적으로 기저부하를 축열조가 담당하고 나머지를 히트펌프가 담당하게 된다. 부하변동에 관계없이 축열조의 이용률을 최대한으로 할 수 있으나, 히트펌프의 주간운전 시 부분부하 운전으로 운전효율이 저하되는 단점이 있다.

최근 동적계획법을 이용하여 냉난방 시스템의 운전이 시작되기 이전에 예측된 냉난방 부하를 통해 미리 운전계획을 수립하여 운전비용을 최소화하는 최적화 기법이 제안되기도 하였다. 한편으로 기존 히트펌프 우선 방식과 축열조 우선 방식의

장점을 취합하여 히트펌프 운전율 및 축열조 이용률을 높게 유지하기 위한 부하 대응 제어 기법을 그림 2에 나타내었다.

시간별 건물에 요구되는 냉난방 부하에 따라 구간을 정의하게 되며, 각 구간별 히트펌프와 축열조의 부하분담률을 다르게 설정하게 되며, 요구되는 냉난방 부하에 따라 5개의 구간으로 운전하게 된다.

- a) 구간 1($Q_{load} \leq Q_{st,ref}$) : 냉난방 부하가 축열조 기준 방열량보다 작은 경우로, 축열조의 단독운전이 이루어지며 히트펌프는 정지하게 된다.
- b) 구간 2($Q_{st,ref} \leq Q_{load} \leq Q_{ht,opt}$) : 냉난방 부하가 축열조 기준 방열량보다 크고 히트펌프의 최적 운전율에 따른 출력보다 작은 구간으로, 히트펌프 단독운전이 이루어진다.
- c) 구간 3($Q_{ht,opt} \leq Q_{load} \leq Q_{ht,opt} + Q_{st,ref}$) : 냉난방 부하가 히트펌프의 최적 운전율에 따른 출력보다 크게 발생하는 경우로, 히트펌프는 최적 운전율로 일정하게 운전하며, 부족분을 축열조가 담당하게 된다.
- d) 구간 4($Q_{ht,opt} + Q_{st,ref} \leq Q_{load} \leq Q_{ht,ful} + Q_{st,ref}$) : 축열조는 기준 출력을 유지하고 히트펌프가 최적 운전율 이상으로 운전되어 부하를 만족하게 된다.
- e) 구간 5($Q_{ht,ful} + Q_{st,ref} \leq Q_{load}$) : 히트펌프



[그림 2] 부하 변동 대응 제어 방식

는 정격운전으로 전부하 상태로 운전되고 축열조의 방열량을 제어하여 부하를 만족시키게 된다.

축열조의 기준 방열량과 히트펌프의 최적 운전율은 다음과 같이 정의한다.

$$Q_{st,ref} = \min(Q_{st,ref}, Q_{st,max}) \quad (1)$$

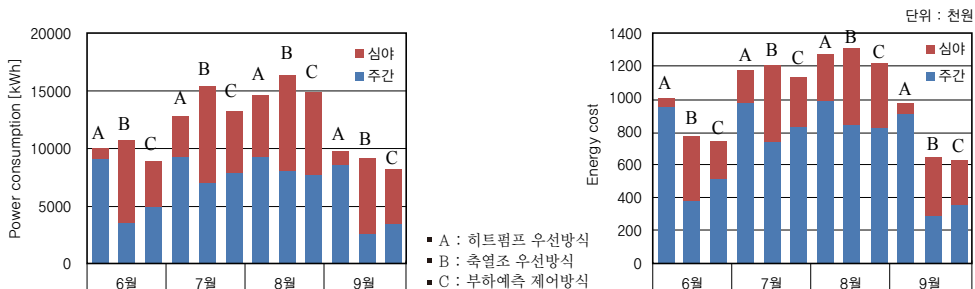
$$Q_{ht,opt} = s \cdot Q_{ht,ful} \quad (2)$$

여기서, $Q_{st,ref}$ 는 축열조의 기준 방열량을, $Q_{ht,opt}$ 는 히트펌프의 최적 운전율에 따른 출력을 의미한다. 축열조의 기준 방열량은 안정적인 운전을 위해 잔여 시간 동안의 평균 방열량과 최대 방열량의 최소값으로 선정한다. 히트펌프의 최적운

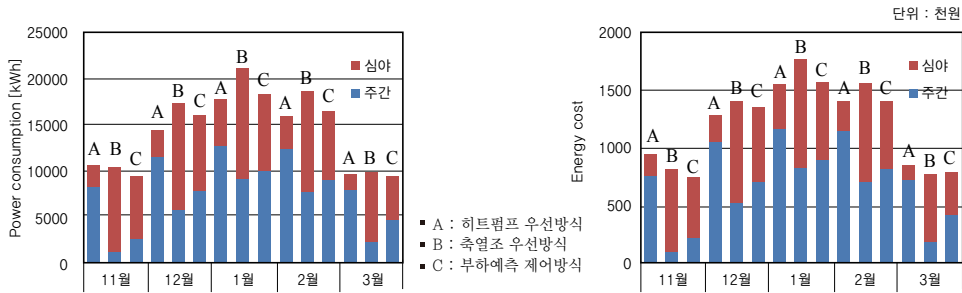
전율보다 작은 부하를 공급하기 위하여 히트펌프의 운전율을 감소시키면 축열조의 이용률은 증가시킬 수 있으나, 히트펌프의 부분부하 운전에 의한 효율저하가 축열조를 이용함으로써 얻을 수 있는 경제적 이득을 상쇄하게 된다. 따라서 히트펌프의 적정 운전율을 설정하기 위한 식(2)의 최적 운전율 파라미터 s 를 대상 시스템에 대하여 미리 구해 놓고, 실제 운전 시에는 냉난방부하 예측모델에 의한 부하율로부터 s 를 설정하게 된다.

그림 3은 냉방 기간 동안의 제어 방식에 따른 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 그래프 상에서 A, B, C는 각각 히트펌프 우선 방식, 축열조 우선 방식, 그리고 부하 대응 제어 방식을 나타낸다. 부하가 크게 발생하는 7, 8월에는 축열조 우선 방식이 에너지 소비 및 비용이 가장 크게 발생하였으며, 부하가 상대적으로 작은 6, 9월에는 심야전력 사용의 감소로 인해 히트펌프 우선 방식의 에너지 비용이 가장 크게 발생하였다. 전체적으로 부하 대응 제어 방식이 기존 운전 방식 대비 가장 작은 에너지 소비 및 에너지 비용이 발생함을 확인할 수 있었다.

그림 4는 난방 기간 동안의 제어 방식에 따른 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 냉방과 동일하게 A, B, C로 제어 방식을 나타내었으며, 각 방식별 소비 에너지와 에너지 비용이 유사한 형태를 보였다. 난방 역시 전체적으로 부하 대응 제어 방식이



[그림 3] 냉방시 제어 방식에 따른 에너지 소비 및 에너지 비용



[그림 4] 난방시 제어 방식에 따른 에너지 소비 및 에너지 비용

가장 작은 에너지 비용이 발생하였으나, 여름철 대비 겨울철 주간전력과 심야전력 요금 차이가 줄어들어 부하 대응 방식의 효과가 작아지게 된다. 또한 축열을 수행하는 심야 시간 동안 응축온도와 증발온도 차가 크게 발생하게 되어 히트펌프 효율이 크게 감소하였다.

맺음말

축열-히트펌프시스템의 효율적인 운영을 위해서 건물의 냉난방부하를 정확히 예측하고 그에 대응하여 히트펌프와 축열시스템의 운전계획을 설정하는 것이 가장 효과적이며, 동적계획법에 의해 최적화된 운전계획을 설정하는 기법이나, 부하에 대응하여 히트펌프와 축열조의 방열량을 최적화하는 기법 등이 제안되고 적용되고 있다. 이를 통해 공기열원 또는 신재생에너지를 활용하는 히트펌프와 축열시스템이 결합함으로써 친환경 기기인 히트펌프의 효율적 운전 및 신뢰성을 확보하고, 피크전력 감소, 전력 평준화를 통한 전력 수요관리, 신재생에너지의 보급 촉진 등에 기여할 것으로 여겨진다.

참고문헌

1. 김옥중, 2010, 공기열원 히트펌프 냉온수기 현황과 기술 개발 로드맵 소개, 대한설비공학회

2010 동계학술발표대회논문집, pp. 306-312.
 2. 윤홍익, 2011, 냉방부하예측을 이용한 냉방시스템 최적제어기술, 설비저널 제40권, pp. 69-85.
 3. 이재모, 2012, 에너지 다소비형 건물 축냉 시스템의 경제성에 관한 연구, 설비공학논문집, 제24권 제10호, pp. 733-738.
 4. 임효목, 권일욱, 2010, 빙축열을 이용한 복합열원 히트펌프는 가능한가, 설비저널, 제39권 제6호, pp. 33-40.
 5. 정성훈, 이대영, 강병하, 김우승, 2000, 냉방부하 변동을 고려한 빙축열시스템의 경제적 운전방식, 공기조화냉동공학논문집, 제12권 제2호, pp. 140-149.
 6. 한전 심야전력기기 기술규격, 2014, 한국전력공사 전력수급처 수요관리팀.
 7. Duanmu, L., Wang, Z., Zhai, Z.J. and Li, X., 2013, A simplified method to predict hourly building cooling load for urban energy planning, Energy and Buildings, Vo. 58, pp. 281-291.
 8. Gong, S., Gong, G., Han, T. and Wu, R., 2013, A simplified method for building cooling load calculation, In ICSDEC 2012@ sDeveloping the Frontier of Sustainable Design, Engineering, and Construction, pp. 46-54.
 9. McQuiston, F.C. and Spitler, J.D., 1992, Cooling

- and heating load calculation manual, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
10. Wang, S. and Xu, X., 2008, A simplified dynamic model for existing buildings using CTF and thermal network models, International Journal of Thermal Sciences, Vo. 47, pp. 1249–1262.
11. Yoo, S.H., Kim, T.H., Han, K.H., Yoon, H.I., Kang, H.C. and Kim, K.H., 2012, Prediction of heating load for optimum heat supply in apartment building, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 36, No. 8, pp. 803–809. 