

지열히트펌프 시스템 성능 예측과 검증

이 의 준

한국에너지기술연구원 책임연구원

1. 서론

1.1 지열히트펌프 시스템 년 성능 평가 기술

지열히트펌프 시스템은 가장 비용 효율적인 온실가스 저감 신재생에너지 설비 기술 중 하나로 품질을 보증하고, 신뢰성을 제고하기 위해 지열히트펌프 유닛에 대한 성능 인증 제도를 시행하고 있다. 하지만 지열히트펌프 시스템은 에어컨 디셔너와 같이 단품 유닛으로 이루어진 것이 아니라 지중열교환기, 부하기기, 기타 기기 등의 유기적인 조합으로 운전되는 시스템 설비로서 히트펌프 유닛에 대한 인증만으로 전체 시스템의 성능을 보증할 수 없다. 지열히트펌프 인증 기준으로 사용되고 있는 KB ISO 13256-1,2의 경우 한 점의 운전 조건에 대해서만 시험을 수행하고 있으나 현장에 적용된 시스템은 연중 지속적인 외기 및 부하의 변화로 다양한 운전조건에서 운전되고, 실제 기준조건에서만 운전되는 경우는 극히 일부이다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 현장에 설치되어진 전체 시스템의 성능 진단 및 측정에 대한 방법과 다양한 운전조건에서 성능을 객관적으로 판단하고, 예측하는 기술에 대한 연구가 필요하다. 표 1은 Water to Water 타입의 히트펌프 성능데이터를 보여주고 있으며, 설계 유량 및 열원측 입구 및 부하측 출구 온도를 기준으로 COP,

냉·난방 능력, 소비전력에 대한 정보를 포함하고 있다.

본고에서는 지열히트펌프 단위 유닛이 아닌 IPMVP (International Performance Measurement & Verification Protocol) 4.4.2에 근거한 통합 시스템의 성능 예측 기술을 제시하고, 예측된 자료를 토대로 성능을 검증하였다.

2. 본론

2.1 지열히트펌프 시스템 성능 예측 기술

지열히트펌프는 간단히 난방 시 응축기 측은 부하를 커버하고, 증발기 측은 열원 측을 담당하며, 냉방 시는 반대로 작동한다. 이때 열교환을 통하여 각각 열량을 전달하게 되는데, 히트펌프를 기준으로 순환수가 들어오는 부분을 EWT (Entering Water Temperature)라 하고 순환수가 나가는 부분을 LWT (Leaving Water Temperature)라 한다. 지열히트펌프의 성능은 Fischer and Rice는 최소제곱법을 이용하여 예측하였으며, 열원측에서 히트펌프로 들어가는 입구 온도 (EWTS)와 부하측 히트펌프로 나오는 출구 온도 (LWTL)를 사용하였다.

$$Capaity = a_0 + a_1 EWT_s + a_2 EWT_s^2 + a_3 EWT_l +$$

$$a_4EWT_L^2 + a_5EWT_sEWT_L \quad (1)$$

$$Power = b_0 + b_1EWT_s + b_2EWT_s^2 + b_3EWT_L + b_4EWT_L^2 + b_5EWT_sEWT_L \quad (2)$$

$$COP = \frac{Capacity}{Power} \quad (3)$$

2.2 IPMVP 4.4.2 기준 성능 예측 기술

IPMVP는 에너지 서비스와 에너지 절약의 가치를 나타내고, 사용자나 계약자 그리고 투자자가 비용을 계산하고, 비교하는 일이 가능한 일반적으로 수용될 수 있는 기준의 필요에 의해 1997년 미국 에너지부의 책임하에 만들어진 ‘국제 성능 측정, 검사 의정서’이다.

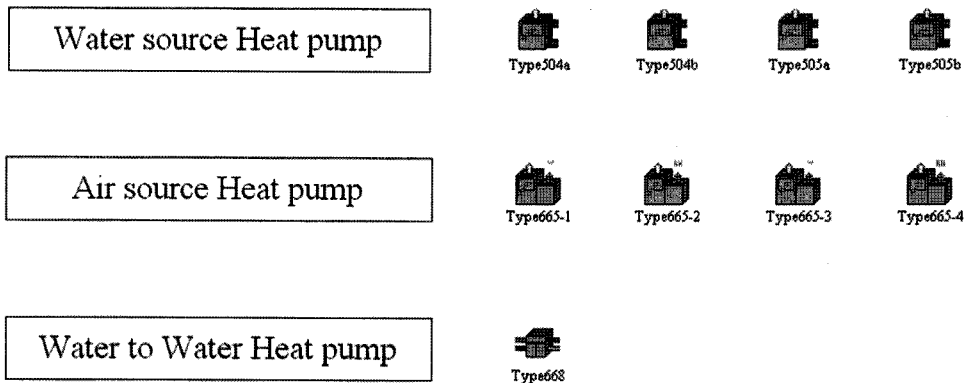
에너지 효율성 평가 및 인증을 위한 IPMVP는 개도국 및 선진국에 있어서 화석 연료를 태우는데 드는 엄청난 규모의 재정적 건강 및 환경 비용 확대를 제한해주는 가장 저렴하고, 효율적인 방법으로 에너지 절약 평가에 관한 국제적인 기준을 제공함으로써 건물의 에너지 효율성을 향상시키고, 에너지 효율성 프로젝트의 재정비용을 낮추고, 에너지 절약을 증대하며, 오염을 줄여 공공의 건강을 증진시키는데 그 목적을 두고 있다. 따라서 본고에서는 국제적인 에너지 성능평가 규약인 IPMVP 4.4.2에서 추천하는 시뮬레이션 방안인

TRNSYS에 근거한 지열히트펌프 성능 예측 방안을 제시하고자 한다. 그림 1은 TRNSYS에서 제공하는 히트펌프이다. 일반적으로 열원 및 부하의 종류에 따라 연간 성능 분석이 가능하도록 구성 되어 있으며, 히트펌프의 성능데이터를 구성하면 선형보간법에 의하여 가동되는 구조이다.

표 3은 냉방 시 TRNSYS를 이용하여 ISO 기준 성능데이터와 비교한 것인데, 열원측과 부하측에 동일한 유량을 설정하였을 경우 표에서 볼 수 있듯이 입구온도에 따른 출구온도는 비교적 일치하는 경향을 보였다. 하지만 COP가 다소 차이가 나는 것을 볼 수 있는데, 이는 부하측에서 방출되는 열량이 손실로 작용하지 않았으며, 특히 열원측의 온도가 낮을 경우 부하측에 공급할 수 있는 부하량이 상대적으로 열원측의 온도가 높을 때보다 적기 때문이라 사료된다.

2.3 지열히트펌프 시스템 성능 검증 기술

그림 2는 지열히트펌프의 같은 온도조건에서 실제 난방능력과 성능데이터의 난방능력을 비교한 그래프로서 2차측 유체 조건이 동일하고, 정상적인 운전 상태이면 차이는 생기지 않을 것이다. 그러나 실제 측정된 난방능력이 성능데이터에 명시된 난방능력 대비 평균 약 8.1%의 오차를 보이고 있으며, 그림 3은 실제 난방능력과 성능데이터를



[그림 1] TRNSYS 제공 지열히트펌프 종류

<표 1> 지열히트펌프 성능데이터 및 실험조건

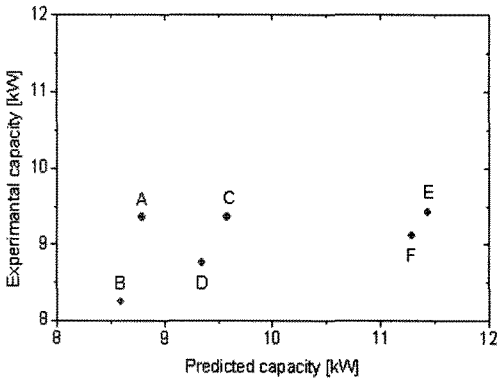
30 Loop LPM (5.5 PSI dP) and 19 Hyd LPM (1.7 PSI dP)											
난방						냉방					
EWTS (°C)	LWTL (°C)	성능 (kW)	전력 (kW)	COP	조건	EWTS (°C)	LWTL (°C)	성능 (kW)	전력 (kW)	COP	조건
-3.9	21.1	7.9	1.4	5.4		10.0	1.7	8.1	1.4	5.8	
	29.5	7.8	1.7	4.6			4.5	8.6	1.4	6.1	
	37.8	7.7	1.9	4.1			7.2	9.2	1.4	6.3	
	46.1	7.6	2.3	3.3			10.0	9.5	1.5	6.4	
	54.5	7.5	2.8	2.7			12.8	9.9	1.5	6.7	
-1.1	21.1	8.5	1.5	5.6		21.1	1.7	7.9	1.8	4.4	
	29.5	8.2	1.7	4.8			4.5	8.6	1.8	4.7	
	37.8	8.1	2.0	4.2			7.2	9.2	1.9	4.8	G
	46.1	8.0	2.4	3.5			10.0	9.6	1.9	5.1	H
	54.5	7.8	2.9	2.8			12.8	10.0	2.0	5.1	
1.7	21.1	9.1	1.5	6.1		26.7	1.7	7.8	1.9	4.1	
	29.5	8.6	1.8	5.0			4.5	8.4	2.0	4.2	
	37.8	8.4	2.0	4.4			7.2	9.1	2.1	4.3	I
	46.1	8.4	2.4	3.7	A		10.0	9.5	2.1	4.5	J
	54.5	8.0	2.9	3.0	B		12.8	9.9	2.2	4.6	
4.4	21.1	9.7	1.6	6.4		32.2	1.7	7.7	2.1	3.7	
	29.5	9.5	1.8	5.3			4.5	8.4	2.2	3.7	
	37.8	9.2	2.1	4.6			7.2	9.0	2.3	3.9	K
	46.1	9.1	2.5	3.9	C		10.0	9.5	2.4	4.0	L
	54.5	9.1	3.0	3.1	D		12.8	9.8	2.5	4.0	
10.0	21.1	11.1	1.6	7.0		37.8	1.7	7.6	2.3	3.3	
	29.5	11.4	1.9	6.1			4.5	8.3	2.4	3.5	
	37.8	11.2	2.2	5.1			7.2	8.9	2.5	3.5	
	46.1	10.9	2.6	4.2	E		10.0	9.3	2.6	3.6	
	54.5	10.5	3.1	3.4	F		12.8	9.6	2.7	3.6	

<표 2> 식 (1)과 식 (2)의 냉난방 계수

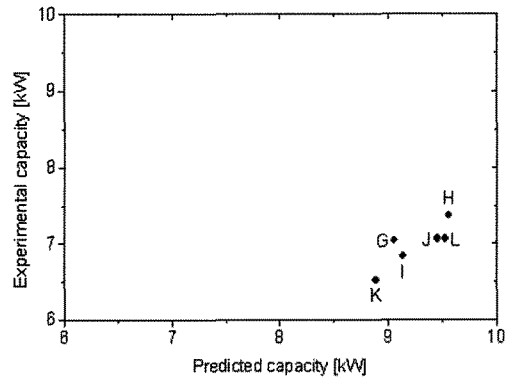
		냉방	난방
성능		7.46783259E+00	8.84211747E+00
	a_0	9.93319878E-03	1.98965318E-01
	a_1	-5.31647543E-04	9.74067703E-03
	a_2	2.77105112E-01	-1.19019349E-02
	a_3	-7.48716716E-03	-9.07074176E-05
	a_4	5.65478329E-04	-4.44954143E-04
소비전력		1.06689368E+00	1.35749889E+00
	b_0	3.12821806E-02	1.12959246E-02
	b_1	-9.81465198E-06	-2.71667504E-04
	b_2	-2.88563188E-03	-6.46662532E-03
	b_3	1.63347336E-04	6.33832806E-04
	b_4	1.00870993E-03	2.33300044E-04

<표 3> TRNSYS 지열히트펌프 모델과 성능데이터 비교 (냉방)

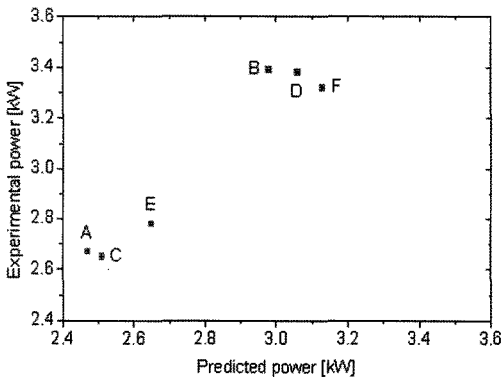
열원		부하		COP
EWT[°C]	LWT[°C]	EWT[°C]	LWT[°C]	
TRNSYS 결과 / 성능데이터 결과				
21.1	26.6 / 26.4	14.1	6.9 / 7.2	4.5 / 4.8
21.1	25.8 / 26.6	17.2	11.5 / 10.0	3.3 / 5.1
26.7	31.4 / 32.0	14.1	8.3 / 7.2	3.7 / 4.3
26.7	31.8 / 32.2	17.2	11.0 / 10.0	3.5 / 4.5
32.2	37.2 / 37.6	14.0	7.7 / 7.2	3.8 / 3.9
32.2	37.6 / 37.9	17.1	10.4 / 10.0	3.6 / 4.0



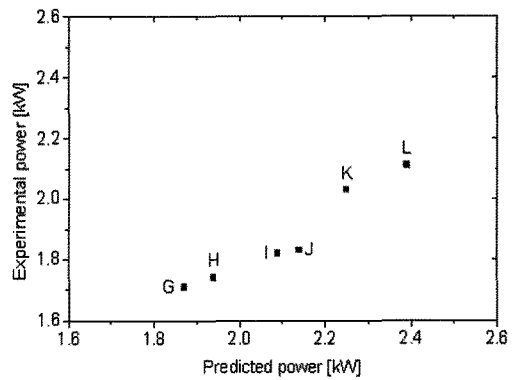
[그림 2] 난방 성능 검증



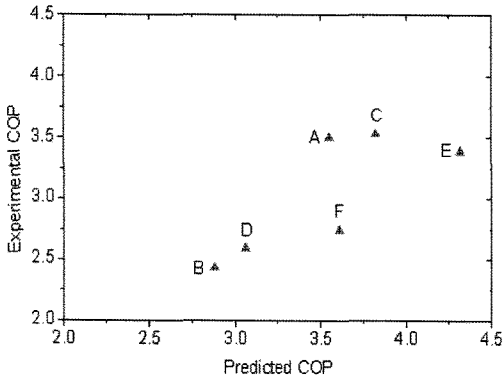
[그림 3] 냉방 성능 검증



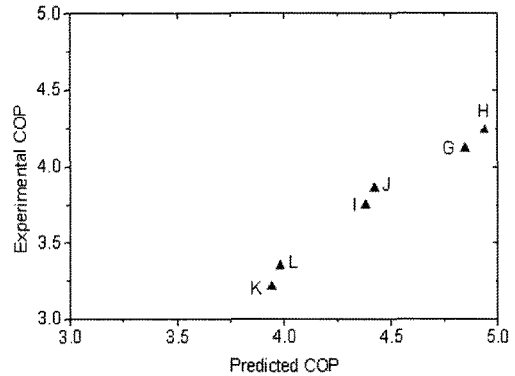
[그림 4] 난방 소비전력 검증



[그림 5] 냉방 소비전력 검증



[그림 6] 난방 COP 검증



[그림 7] 냉방 COP 검증

기준으로 한 냉방능력을 비교한 그래프인데, 결과에서 보는 바와 같이 냉방능력의 오차는 평균 약 24.7%의 높은 차이를 보였다. 또한 그림 4는 난방 시 실제 실험과 성능데이터의 소비전력 오차를 보여주는 그래프이며, 그림 5는 냉방시를 비교한 그래프이다. 그림에서 볼 수 있듯이 난방 시는 성능데이터에 비해 실제 소비전력이 평균 0.2 kW 정도 높게 도출되었으며, 냉방 시에는 실제 실험이 성능데이터에 비해 평균 0.1kW 가량 낮게 도출되었다. 그림 6은 난방 시 실제 실험과 성능데이터의 COP를 비교한 그래프인데, 그림에서 볼 수 있듯이 열원측 입구의 설정온도가 높을수록 COP의 오차는 커졌으며, 열원측 입구 설정온도가 낮은 구간(1.7°C)에서는 평균 7.8%의 낮은 오차율을 보임을 알 수 있다. 또한 그림 7은 냉방 시의 COP 차이를 보여주는 그래프인데, 냉방 시에는 조건별로 비교적 일정한 오차를 보였는데, 실제 실험이 성능데이터에 비해 평균 15% 가량 낮게 도출되었다.

3. 결론

본고에서는 지열히트펌프 시스템의 성능 예측을 위하여 Fischer and Rice의 최소제곱법과 IPMVP 4.4.2에 근거한 TRNSYS를 이용하였으

며, 실제 실험을 토대로 성능을 검증하였다. TRNSYS를 이용한 성능 예측의 경우 평균 15%의 오차가 났지만 이는 열원측의 온도가 낮을 경우에 발생한 오차가 많은 비중을 차지하였으며, 일반적으로 근소한 오차를 나타내었다. ISO 성능데이터를 기준으로 최소제곱한 결과는 다소 차이가 났는데, 지열히트펌프의 성능이 낮게 도출되는 것은 압축기 성능 저하, 배관 단열 미흡, 열교환기 과설계 등의 기계적인 문제를 의심할 수 있다. 또한 열원측, 부하측 온도를 기준으로 실제 측정된 소비 전력량이나 냉난방 용량, COP가 성능 데이터의 값과 오차가 적을수록 시스템은 정상적으로 작동되는 것이라 판단할 수 있으며, 추가적인 커미셔닝 과정을 통하여 지열히트펌프 시스템의 성능을 최적화할 필요가 있을 것이다.

4. 참고문헌

1. V.R. Tarnawski, Ground heat storage with double layer heat exchanger, International Journal of Energy Research 13 (1989), pp. 137-148.
2. Fischer, S. K. and Rice, C. K., 1980, The Oak Ridge heat pump model : 1. A steady state computer design model for air-to-

air heat pumps, ORNL/CON-80/R1, Oak Ridge National Lab.

3. Kim, J. Y., Jang, J. C., Kang, E. C., Chang, K. C., and Lee, E. J., "Initial Commissioning Study of GHP System", Proceedings of the Korea Society of Geothermal Energy

Engineers, pp. 35~39, 2010.

4. 1. G. H. Ko, J. Y. Kim, E. C. Kang, E. J. Lee, M. T. Hyun, 2007, A study on Ground Source Heat Pump(GSHP) performance Measurement and Initial commissioning, Proceedings of The SAREK, pp. 44. 