

지열 열펌프 시스템의 경제성 분석

본 연구에서는 공기, 지열 그리고 지하수를 열원으로 하는 열펌프를 서울에 소재한 30평 규모의 공간에 대하여 냉방 및 난방 동특성 시뮬레이션을 수행하여 각각의 경제성을 비교, 분석한다.

김 영 일

충주대 에너지시스템공학과

1. 서론

우리가 사용하는 에너지의 대부분은 석유, 석탄, 천연가스 등의 화석연료로 총 에너지원의 85%를 넘는다. 그러나 그 양이 한정되어 있고 환경 문제를 유발하고 있어 재생 가능한 에너지자원의 개발이 시급한 실정이다. 가장 널리 쓰이는 원유의 남은 매장량은 1조 배럴 (1 배럴 = 159 liter) 정도로 앞으로 약 40년 가량 사용 가능한 분량이다. 석탄은 200년 (1 조ton), 천연가스는 60년 (146 조m³) 동안 사용할 수 있는 양이 남아있다고 알려져 있다. 이러한 화석연료가 전부 고갈되는 날이면 인류는 역사상 최대의 위기를 맞이하게 되며 생존 자체를 위협받게 될 것이다. 이에 반하여 태양열, 지열 등의 자연에너지는 무공해이며 그 양이 무한하다는 점에서 인류 생존을 위한 영원한 에너지원으로 인식되고 있다.

우리나라는 4계절이 뚜렷하여 전체 에너지 사용량의 15%가 냉난방 공조용이고 건물 에너지의 47%가 공조용이다. 여름철 전력최대부하 문제는 냉방이 주원인이므로 냉방에 소요되는 에너지 절감은 매우 중요한 일이다. 열펌프란 공기, 흙, 물, 지하수, 태양열, 폐열 등의 다양한 열원으로부터 열을 흡수 또는 방출하여 하나의 기기로 냉방과 난방이 가능한 공조기기를 말하며 그 편리성 때문에 그 수요가 날로 증가하고 있다. 현재까지는

공기 열원이 그 편리성 때문에 주로 사용되었다. 그러나 겨울철 외기온도가 낮아지면 용량과 효율이 저하하여 보조열원(주로 전기히터)에 의존해야 하므로 운전비도 많아지고 용량도 부족하여 보급 실적은 미미하다 (2003년 국내 보급 실적 262대). 이에 반하여 지열을 열원으로 사용하는 경우 지열 온도가 외기 조건보다 유리하므로 용량도 충분하고 효율도 높지만 초기 설치비가 높아 아직 보편화되고 있지 못하다.

다양한 열원 방식에 대하여 많은 경제성 분석이 이루어졌지만 외기와 실내 조건 특성에 따른 열펌프 성능을 고려하여 냉방과 난방이 한 주기를 이루는 1년간의 동특성 시뮬레이션에 근거한 경제성 분석은 아직 이루어지지 않았다. 본 연구에서는 공기, 지열 그리고 지하수를 열원으로 하는 열펌프를 서울에 소재한 30평 규모의 공간에 대하여 냉방 및 난방 동특성 시뮬레이션을 수행하여 각각의 경제성을 비교, 분석한다. 여기에는 설치공사비, 열원기기 구입비, 외기에 따른 성능을 고려한 1년간의 운전비 등이 종합적으로 고려된다.

공기 열원 방식은 대기 중의 공기와 열교환을 하여 열을 방출 또는 흡수하는 방식이다. 공기를 열원으로 하는 경우 열원 확보가 용이하고 안정성이 우수한 반면 외기 온도가 불리하여 성능이 낮아지는 단점이 있다. 특히 외기가 낮은 조건에서의 난방 운전시에는 용량이 부족하고 성능계수가 극히 낮아져 전기히터 등의 보조 열원이 필요하

다. 지열 방식은 지중에 열교환기를 매설하여 토양과 열교환을 한다. 이 방식은 열원 온도 측면에서는 유리하나 열교환을 위하여 지하 100~300 m 깊이까지 열교환기를 매설해야 하므로 설치비가 많이 소요되는 단점이 있다. 지하수 방식은 열교환기 없이 지하의 지하수를 직접 이용하므로 열전달 측면에서는 매우 유리하나 지하수 탐사 기술이 요구된다.

2. 경제성 분석 방법

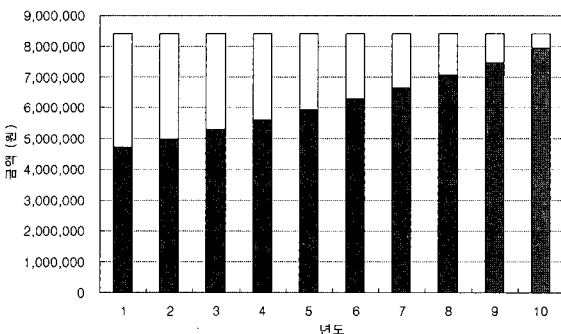
본 연구에서는 공기, 지열, 지하수의 3가지 열원 방식에 대하여 경제성을 분석하고자 한다. 경제성 분석은 크게 초기투자비와 운전비의 2가지 항목으로 분류된다. 주어진 초기투자비와 운전비에 대하여 경제성 분석을 하는 방법은 여러 가지가 사용되고 있으나 여기서는 초기투자비의 연간 균등 부담법을 새로 제안하여 사용한다. 이 방식에서는 초기 투자비 전체를 대출 받은 후 매년 같은 금액을 기기의 수명이 종료될 때까지 상환한다고 가정한다. 매년 부담하는 금액은 원금 상환과 이자의 합이 된다. 초기에는 이자 부담이 많지만 점차로 감소되어 말기에는 원금 상환금이 많아지게 된다. 예를 들어 수명이 10년인 기기의 초기 투자비 60,000천원에 대하여 이자율을 6%라고 가정하여 연간 균등 부담법으로 계산하면, 10년 동안 매년 8,152,078원씩 부담하게 된다. 10년 동안 부담한 금액은 총

81,520,775원이다. 이 중 60,000,000원은 원금 상환금이고 나머지 21,520,775원은 이자이다. 그림 1은 연간 균등 부담법에 의하여 매년 부담해야 할 원금 상환금(아래 진한 부분)과 이자(위 흰 부분)를 보여 준다.

3. 열원 특성 및 열펌프

열펌프는 시스템 내의 증발온도와 응축온도에 따라 그 성능이 크게 달라진다. 증발온도는 높을수록, 응축온도는 낮을수록 용량과 성능계수는 증가한다. 실내 온도는 일반적으로 고정값으로 유지하는 것이 목표이므로 임의로 변경하는 것은 어렵다. 물론 외기 조건도 임의로 변경하는 것은 어렵지만 열원 방식을 달리함에 따라 실외측 열원 온도를 유리하게 유지할 수 있다. 즉, 냉방시에는 가급적 낮은 응축온도, 난방시에는 가급적 높은 증발온도를 유지할 수 있는 열원 온도가 유리하다. 공랭식인 경우 여름철에는 가급적 낮은 외기 온도, 겨울철에는 가급적 높은 외기 온도가 유리하다. 그러나 외기 온도는 여름에는 높고, 겨울에는 낮으므로 공랭식 열펌프의 성능이 낮아지는 주 이유가 되고 있다. 이에 반하여 지중 온도는 1년 내내 그 변동폭이 매우 작다. 일반적으로 10 m 깊이 이후부터는 외란이 없는 한 거의 일정한 온도로 유지된다. 서울의 경우 지중 평균 온도는 약 13°C이다. 이 온도는 대기 조건에 비하여 유리하므로 이것을 열원으로 사용하는 경우 열펌프의 성능을 증가시킬 수 있다.

표 1은 공기, 흙, 물의 물성치를 비교하고 있다.



[그림 1] 경제성 분석의 연간 균등 부담법

<표 1> 공기, 흙, 물의 물성치 비교

	Air	Soil	Water
C_p [kJ/(kg · K)]	1.0035	0.7531	4.184
ρ [(kg/m ³)]	1.215	1736	1000
κ [W/(m · K)]	0.02521	0.1442	0.5914
ρC_p [kJ/(m ³ · K)]	1.219	1307.2	4184

단위 체적당 열용량은 물이 가장 유리하고 공기가 가장 불리하다. 공기 대비 단위 체적당 열용량은 물이 3,432배, 흙이 1,073배이다. 대기 중의 공기는 확보가 용이하여 안정적인 반면 온도 조건이 불리하고 난방시 심한 경우 열교환기 표면에 착상이 발생하여 성능을 더 저하시킨다. 흙은 대기보다 온도 조건이 유리하지만 열전달이 열전도율이 낮은 흙의 전도에 의존하므로 필요한 열전달량을 확보하기 위해서는 많은 열전달 면적이 요구된다. 물이 열원으로 사용되는 경우, 해수, 연못, 하천수 또는 지하수 등이 고려될 수 있다. 이 경우 물이 근처에 있어야 하므로 다른 방식에 비하여 확보가 어려운 문제점이 있다. 특히 지하수를 활용하는 경우 지표면에서 지하수 위치를 탐사할 수 있는 기술이 필요하다. 우리나라의 경우 깊이 40~60 m 정도만 시추하면 대부분 풍부한 지하수를 접할 수 있다고 알려져 있다.

지하수 열원인 경우, 직경 250 mm의 시추공은 30평 주택 15세대의 냉난방이 가능하며 하루 필요 인출량은 약 200 ton/day이다.

시뮬레이션을 수행하기 위해서는 증발온도와 응축온도에 따른 열펌프의 용량과 동력의 상관식이 필요하다. KIST 연구실에서는 그동안 8 kW 공기 열원 열펌프, 9 kW 공기 열원 열펌프, 25 kW 공기 열원 열펌프, 100 kW 수냉식 스크류 냉동기, 700 kW 수냉식 터보냉동기의 성능 측정 실험을 수행하여 증발/응축 온도 변화에 따른 성능 특

성 자료가 축적되어 있다. 성능시험 방법 및 결과는 Baik(2000), 장영수(2001), 장영수(2002)를 참조한다. 측정 연구 결과에 의하면 스크류 냉동기의 성능계수는 냉매의 증발온도 1°C의 상승마다 약 5%, 응축온도 1°C의 하강마다 약 3%의 향상이 있다. 그림 2는 7 RT 공랭식 열펌프의 성능시험 결과를 이용하여 외기 온도의 영향에 따른 결과를 보여준다. 외기 온도의 영향은 냉방인 경우 2.8%/°C, 난방인 경우 1.0%/°C이다.

열펌프의 측정된 용량과 동력을 곡선접합하여 다음 식과 같이 냉매의 증발온도와 응축온도의 함수로 표현한다. 본 연구에서는 이 식을 사용하여 열펌프의 운전 조건에 따른 성능을 시뮬레이션하였다.

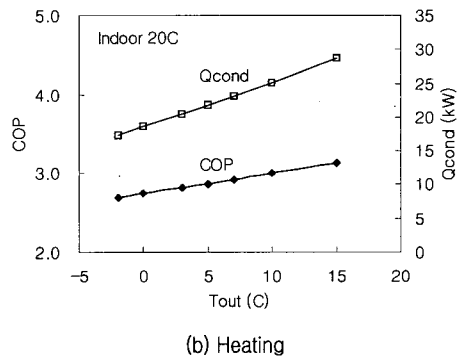
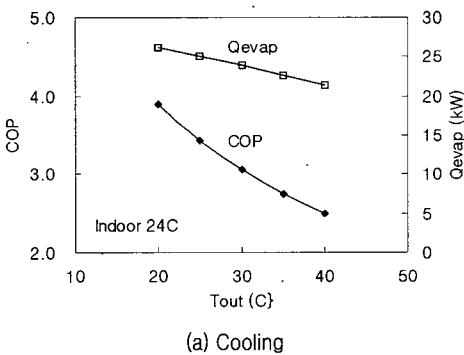
$$Q, W = c_1 + c_2 T_e + c_3 T_e^2 + c_4 T_c + c_5 T_c^2 + c_6 T_e T_c + c_7 T_e^2 T_c + c_8 T_e T_c^2 + c_9 T_e^2 T_c^2$$

4. 동특성 시뮬레이션

본 절에서는 동특성 시뮬레이션에 사용된 가정과 방법을 설명한다.

외기 조건은 1999년부터 2000년까지 10년 동안 기상청에서 측정한 서울의 기상 데이터를 평균하여 사용한다. 최저 온도는 1월 19일 6시의 -7.15°C, 최고 온도는 8월 14일 15시의 31.13°C이다.

시뮬레이션을 위한 지중 온도는 상세한 측정과 해석 모델링을 근거로 하여 예측되어야 하나 본



[그림 2] 7 RT 공랭식 열펌프의 외기 온도의 영향

연구에서는 간략한 계산을 위하여 지중 온도는 연 평균 13℃으로 가정한다. 여름과 겨울 최대 4℃의 편차가 있다고 가정하면 여름철 지중온도는 17℃, 겨울철 지중온도는 9℃로 가정할 수 있다.

평균 지중 온도 $T_{geo, mean} = 13^{\circ}\text{C}$

지중 온도 (냉방) $T_{geo, cooling} = T_{geo, mean} + 4 = 13 + 4 = 17^{\circ}\text{C}$

지중 온도 (난방) $T_{geo, heating} = T_{geo, mean} - 4 = 13 - 4 = 9^{\circ}\text{C}$

지열 열교환기 사용시 2차 유체의 출구 온도는 열전달 효율과 간접 열교환을 고려하여 지중 온도에 비하여 3℃ 차이가 난다고 가정한다.

지열 열교환기 (냉방) $T_{cond, in} = T_{geo} + 3 = 17 + 3 = 20^{\circ}\text{C}$

지열 열교환기 (난방) $T_{evap, in} = T_{geo} - 3 = 9 - 3 = 6^{\circ}\text{C}$

지하수 사용시 2차 유체의 출구 온도는 지열 열교환 방식보다 상대적으로 유리한 열전달 효율과 직접 열교환을 고려하여 지중 온도에 비하여 2℃ 차이가 난다고 가정한다.

지하수 (냉방) $T_{cond, in} = T_{geo} + 2 = 17 + 2 = 19^{\circ}\text{C}$

지하수 (난방) $T_{evap, in} = T_{geo} - 2 = 9 - 2 = 7^{\circ}\text{C}$

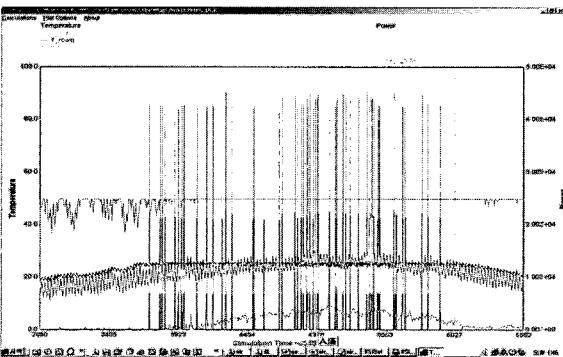
동적 부하 계산을 위한 실내 공간은 100 m² (약 30평) 규모의 건물로 한다. 총괄열전달계수는 지붕 0.594 W/(m²·℃), 벽체 0.542 W/(m²·℃), 바닥 0.560 W/(m²·℃)로 국내의 기준 조건과 유사한

값을 갖도록 하였다. 외기와 일사량만의 영향을 고려하기 위하여 내부 부하는 없는 것으로 가정하였고 외기가 실내로 침입하는 환기회수는 0.6 회/h로 가정하였다.

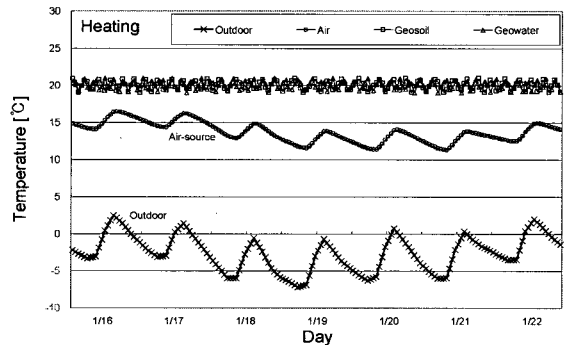
동적 부하 계산을 위하여 TRNSYS 15.1 프로그램이 사용되었다. 시뮬레이션 시간 간격은 0.01 hr (36 sec)을 사용하였다.

5. 동특성 시뮬레이션 결과

그림 3은 TRNSYS 시뮬레이션의 결과 화면을 보여 준다. 모사된 기간 동안 각 관심 대상의 변수가 시간에 따라 변화하는 경향을 보여준다. 그림 4는 난방시 실내 온도와 3 방식(공기, 지열, 지하수 열원)에 의한 실내 온도 변화를 나타낸다. 시뮬레이션은 1년 동안 수행되었으나 그래프는 외기 온도가 가장 낮은 1월 19일을 기준으로 1주일 간만 나타내었다. 지열과 지하수 열원은 실내 온도 유지 목표인 19~21℃ 범위를 만족시켜 주고 있으나 공기 열원 방식은 용량이 부족하여 실내 온도가 목표값보다 매우 낮게 유지되고 있다. 1월 19일 오전 9시에는 실내 온도가 11.6℃까지 낮아진다. 따라서 공기 열원 열펌프를 단독으로 사용하는 경우, 실내 온도를 원하는 조건으로 유지할 수 없고 전기히터와 같은 보조 열원기기와 병행하여 사용하여야 한다. 단, 전기히터는 동력원인 전기가 고가이므로 운전비가 많이 소요되는 단점



[그림 3] 동특성 시뮬레이션의 결과

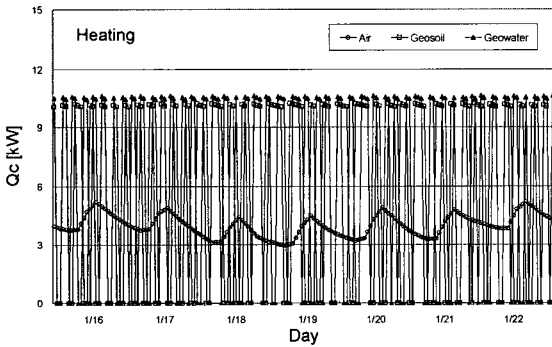


[그림 4] 난방시 실내 온도

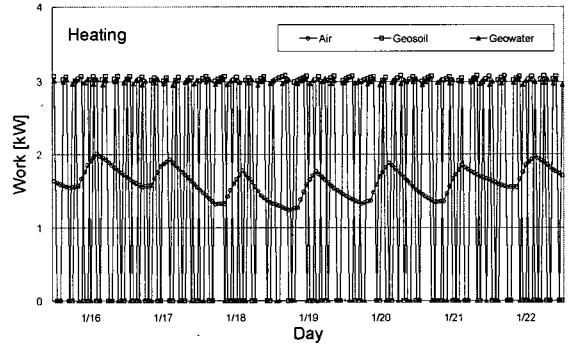
이 있다. 그림 5는 3 방식의 난방 용량을 비교하고 있다. 외기 온도에 영향을 받는 공기 열원 열펌프는 증발온도가 낮게 유지되어 난방 용량이 가장 낮고, 온도 조건이 가장 유리한 지하수 열원 열펌프의 경우 용량이 가장 크다. 그림 6은 열펌프의 소요 동력을 보여준다. 공기 열원 열펌프는 순환 냉매의 유량이 적어 동력도 적게 소요된다. 그림 7은 난방시 총 소요 동력과 성능계수를 나타낸다. 여기서의 성능계수는 압축기 외에 실내기 팬과 2차 유체 이송을 위한 동력을 모두 포함하여 계산한 값이다. 공기 열원 열펌프는 난방에 소요되는 총 소요 동력이 6,105 kWh, 평균 성능계수는 1.557이다. 지하수 열원 방식은 4,885 kWh의 전력이 필요하고 평균 성능계수는 2.559로 공기 열원에 대비 64.4%의 향상이 가능하다.

그림 8은 냉방시 실외 온도와 3 방식(공기, 지

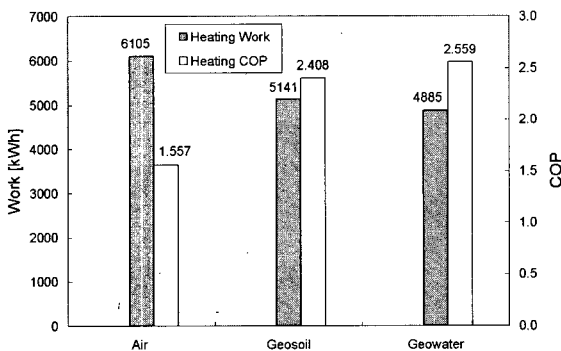
열, 지하수 열원)에 의한 실내 온도 변화를 나타낸다. 냉방 시물레이션 결과는 외기 온도가 가장 높은 8월 14일을 기준으로 1주일간만 나타내었다. 냉방 조건에서는 3 방식 모두 실내 온도 유지 목표인 24~26℃ 범위를 전부 만족시키고 있다. 그림 9, 10은 각각 냉방시 용량과 소요 동력을 나타낸다. 응축 열원 조건이 가장 유리한 지하수 열원 방식의 성능이 가장 좋다. 공기 열원 방식은 응축기가 대기와 열교환을 하므로 성능이 가장 낮다. 그림 11은 냉방시 총 소요 동력과 평균 성능계수를 나타낸다. 냉방 성능계수도 실내기 팬과 2차 유체 이송을 위한 동력을 모두 포함하여 계산한 값이다. 공기 열원 열펌프는 냉방에 소요되는 총 소요 동력이 6,72 kWh, 평균 성능계수는 3.227이다. 지하수 열원 방식은 453 kWh의 전력이 필요하고 평균 성능계수는 4.838로 공기 열원



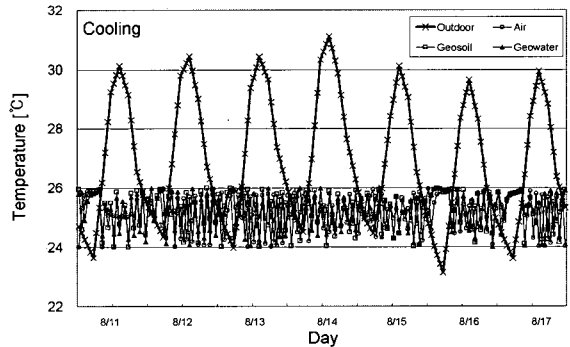
[그림 5] 난방시 난방 용량



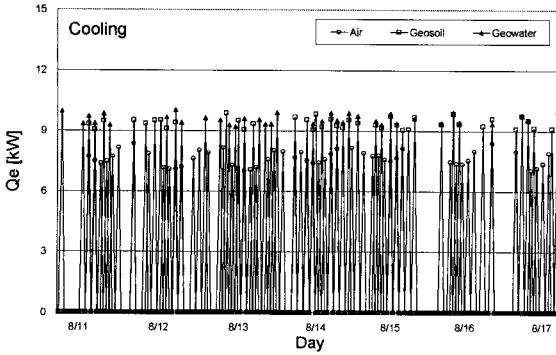
[그림 6] 난방시 소요 동력



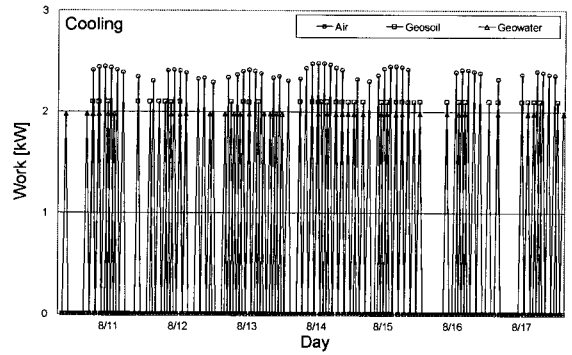
[그림 7] 난방시 총 소요 동력 및 성능계수



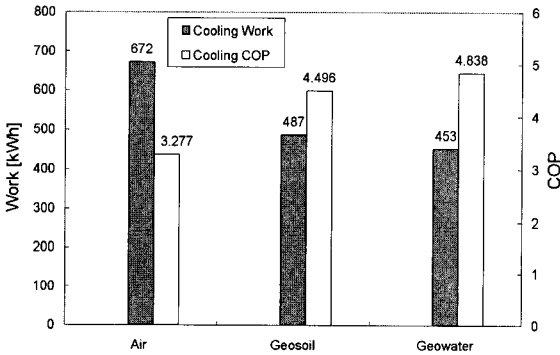
[그림 8] 냉방시 실내 온도



[그림 9] 냉방시 냉방 용량



[그림 10] 냉방시 소요 동력



[그림 11] 냉방시 총 소요 동력 및 성능계수

에 대비 47.6%가 증가한다.

6. 고찰

열펌프 운전시 지열과 지하수 열원 방식이 공기 열원 방식에 성능 측면에서는 유리하나 설치 비용이 큰 부담이 되고 있다. 따라서 본 절에서는 초기투자비 (설치 비용, 열원 기기 구입비) 그리고 운전비를 종합적으로 고려하여 각 방식의 경제성을 비교, 분석하고자 한다. 우리나라의 경우 난방은 화석연료를 많이 사용하므로 가스 열원 난방 방식을 추가하였다.

비교는 30평 규모의 공간 15 세대를 대상으로 하였다. 시뮬레이션 결과 각 세대당 냉방 부하는 7,894 kJ, 난방 부하는 45,006 kJ로 계산되었다.

지열 열원 방식은 각 세대당 1개의 시추공이 필요하다고 가정하였으며, 시추공 공사는 전문 시공업체의 자문에 따라 각각 10,000천원이 소요된다고 가정하였다. 난방의 경우 도시가스를 이용하는 도시가스의 발열량은 10,500 kcal/m³, 가격 546.5 원/m³이라고 한다. 전력 요금은 간단하게 계산하기 위하여 100 원/kWh이라고 가정하였다. 공기 열원 방식으로는 난방 용량이 부족하므로 부족분은 전기히터를 사용한다고 가정하였다. 지하수 열원인 경우 직경 250 mm의 시추공으로 15 세대의 냉난방이 가능하므로 이 방식에서는 하나의 시추공사만 하는 것으로 가정하였다.

비교 대상으로 4가지 방식이 선정되었다. 방식 A는 공기를 열원으로 하여 전력을 동력으로 냉방과 난방 모두를 수행하는 경우이며 부족한 난방 용량은 전기히터를 보조 열원으로 사용하였다. 방식 B는 공기 열원 냉방과 가스 연료 난방 방식으로 현재 가장 보편적으로 사용되는 방식이다. 방식 C는 매설된 열교환기를 사용하여 지열을 열원으로 냉방과 난방을 수행하는 방식이다. 방식 D는 지하수를 직접 열원으로 사용하는 방식이다.

수명으로는 시설이 30년, 열원기기는 15년이라고 가정하였다. 즉 30년마다 새로운 시설이 구축되며, 열원기기는 15년마다 새로 구입한다고 가정하였다. 초기투자비 대출금에 대한 상환 이자율은 6%라고 가정한다. 지열 열원 시스템의 경우 설치 공사비가 총 237,500천원이 소요되므로 수

명 30년을 고려하면 연간 17,254천원의 비용 부담이 필요하다.

평균 연간 비용을 보면 지하수 열원 방식이 가장 유리하고, 그 다음에는 지열, 공기 열원 및 가스 난방, 공기 열원 순이다.

7. 결론

본 연구에서는 냉방 및 난방 방식의 경제성을 비교, 분석하기 위하여 공기, 지열 및 지하수를 열원으로 하는 열펌프 시스템에 대하여 동특성 시뮬레이션을 수행하였다. 서울에 소재한 30평 규모의 건물의 경우, 냉방 부하는 7,894 kJ, 난방 부하는 45,006 kJ로 계산된다. 공기를 열원으로 하는

경우 평균 연간 비용은 1,301천원으로 계산되었다. 이 방식은 낮은 외기 온도에서는 난방 용량이 부족하여 전기히터와 같은 보조 열원이 필요하다. 가장 일반적인 공기 열원 전기 구동 냉방과 가스 난방을 조합한 시스템은 평균 연간 비용이 1,047천원, 지열 시스템은 2,073천원, 지하수 시스템은 998천원으로 계산되었다. 따라서 설치비, 구입비, 운영비를 종합적으로 고려할 경우 지하수 열원 열펌프 시스템이 가장 경제적이다.

지하수를 활용하는 경우 지하수 고갈과 오염 문제로 아직 법적인 규제가 해결되지 않았다. 그러나 지하수를 단지 열교환 대상으로만 하여 폐회로로 구성할 경우 고갈과 오염 문제가 발생하지 않으므로 전혀 문제가 되지 않는다.

<표 2> 경제성 비교 (단위: 천원)

	A. 공기 열원 냉방 및 난방	B. 공기 열원 냉방 및 가스 난방	C. 지열 열원 냉방 및 난방	D. 지하수 열원 냉방 및 난방
설치 공사 (수명 30년)	배관공사 200×15=3,000	배관 공사 200×15=3,000 가스 배관 공사 200×15=3,000	시추공사 10,000×15=150,000 열교환기, 부동액 30,000 케이싱 설치 외 38,000 Motar 뒤채움 15,000 배관 공사 4,500	지하수 탐사비 2,000 250 mm 시추공사 8,000 케이싱 설치 외 2,000 양수 시험 2,000 펌프 공사 3,000 배관 공사 4,500
	소계 3,000 천원 연간비용 218 천원/년	소계 6,000 천원 연간비용 436 천원	소계 237,500 천원 연간비용 17,254 천원	소계 21,500 천원 연간비용 1,562 천원
열원 기기 (수명 15년)	3,000×15=45,000 소계 45,000 연간비용 4,633 천원/년	3,800×15=57,000 소계 57,000 연간비용 5,869 천원/년	3,500×15=52,500 소계 52,500 연간비용 5,406 천원/년	3,500×15=52,500 소계 52,500 연간비용 5,406 천원/년
운전비	냉방전기동력 672×15=10,080 kWh 난방전기동력 6,105×15=91,575 kWh 난방 전기 히터 2,998×15=44,977 kWh 전력소계 146,632 kWh 비용소계 14,663 천원 연간비용 14,663 천원/년	냉방전기동력 672×15=10,080 kWh 난방도시가스 1,024×15=15,367 m ³ 전력소계 10,080 kWh 도시가스소계 15,367 m ³ 전력비용소계 1,008 천원 가스비용소계 8,397 천원 비용소계 9,405 천원 연간비용 9,405 천원/년	냉방전기동력 487×15=7,305 kWh 난방전기동력 5,141×15=77,115 kWh 전력소계 84,420 kWh 비용소계 8,442 천원 연간비용 8,442 천원/년	냉방 전기동력 453×15=6,795 kWh 난방전기동력 4,885×15=73,275 kWh 전력소계 80,070 kWh 비용소계 8,007 천원 연간비용 8,007 천원/년
평균 연간 비용	19,514 천원	15,710 천원	31,102 천원	14,975 천원
세대별 평균 연간 비용	1,301 천원	1,047 천원	2,073 천원	998 천원