



국내 공동주택의 수요반응형 급탕환수 시스템의 적용성 분석

Analysis of Applicability for On-demand Recirculation Domestic Hot Water System in Korean Apartment

김세현* · 김범준** · 강용권*** · 정재원****

Seheon Kim* · Beom-Jun Kim** · Yong-Kwon Kang*** · Jae-Weon Jeong****

* Graduate Student, Dept. of Architectural Engineering, Hanyang Univ., South Korea (noname0001@hanyang.ac.kr)

** Coauthor, Graduate Student, Dept. of Architectural Engineering, Hanyang Univ., South Korea (bumji21@hanyang.ac.kr)

*** Coauthor, Graduate Student, Dept. of Architectural Engineering, Hanyang Univ., South Korea (kyk908525@hanyang.ac.kr)

**** Corresponding author, Professor, Dept. of Architectural Engineering, Hanyang Univ., South Korea (jjwarc@hanyang.ac.kr)

ABSTRACT

Purpose: To investigate applicability of on-demand recirculation domestic hot water (DHW) system on domestic apartment housing. On-demand recirculation DHW system is one of the circulation type system for DHW supply which minimizes wasted time, water and energy from waiting period of the occupant. **Method:** To assess the applicability, TRNSYS simulation is utilized program to compare normal branch system and on-demand recirculation system, as the TRNSYS is suitable for simulate transient condition. For the simulation, factors and conditions including two main factors-shower schedule and tap water temperature- are assumed along the previous literature. Based on the condition, simulation model including both system was built and simulation was conducted. **Result:** The result showed that the on-demand recirculation system can save 4.5% of water consumption and 0.7% of domestic hot water supply energy. Further study is needed to consider detailed hot water consumption schedule. It is to be hoped that this paper will serve as a basis for the domestic research of the on-demand recirculation DHW system.

KEYWORD

주거 급탕 시스템
공동주택
수요반응형 급탕환수 시스템
TRNSYS 시뮬레이션

Domestic Hot Water Supply System
Apartment
On-demand Recirculation System
TRNSYS Simulation

ACCEPTANCE INFO

Received Dec. 28, 2022

Final revision received Jan. 18, 2023

Accepted Jan. 25, 2023

© 2023. KIEAE all rights reserved.

1. 서론

1.1. 연구의 배경 및 목적

국내 에너지 소비 중 가정·상업부문의 비중은 17.8%에 달하여[1] 건축부문 에너지 사용 저감 필요성이 대두되고 있다. 특히 전체 주택 유형중 아파트가 차지하는 비율 또한 48.6%에 달하며[2], 전체 건축물 유형 중 가장 큰 에너지사용량을 차지하므로[3] 공동주택에서의 에너지절감은 중요한 과제이다[4]. 또한 공동주택의 에너지사용처 중 급탕에너지는 탄소배출량의 12.4%를 차지하는데[5], 이는 전체 사용용도 중 세 번째로 높은 비중이다.

이에 따라 공동주택에서 급탕관의 환수 시스템 개선을 통해 급탕 에너지의 소비 효율을 개선하기 위한 연구가 꾸준히 수행되고 있다(김성진 외, 2013; 이승준, 2015). 그러나, 급수관을 임시로 회수관으로 활용하는 수요반응형 급탕환수 시스템은 국외 친환경설계기준에 등재되어 있음에도 불구하고 아직 국내에서는 적용에 관련된 연구가 이루어지지 않았다.

이러한 배경에 입각하여, 본 연구는 수요반응형 급탕환수 시스템을 국내 공동주택에 적용할 때 발생하는 급탕에너지 효율 개선효과 및 절수효과에 대해 고찰하고자 한다.

1.2. 연구의 방법 및 범위

본 연구에서는 국내 공동주택을 대상으로 수요반응형 급탕환수 시스템 적용 시 급탕에너지 저감 성능 예측을 수행하였으며, 추가적으로 절수 가능성에 대한 분석을 수행하였다. 연구대상 및 범위에 대한 상세 내용은 아래와 같다.

1) 연구 대상 및 방법

관련 문헌 및 통계자료 고찰을 통해 대표성을 갖는 연구대상을 선정하였다. 국내 주거형태 중 가장 큰 비중을 차지하는 24평, 2인 가구 공동주택을 대상으로 선정하였으며, 급탕 패턴이 뚜렷하게 드러나며 사용자가 급탕온도를 대기하지 않고 사용할 가능성이 가장 적은 샤워 수전을 대상으로 선정하였다.

연구는 TRNSYS 시뮬레이션을 사용하여 수행되었다. TRNSYS는 Transient System Simulation-Tool의 약어로, 시간에 따라 상태가 변하는 과도적 시스템을 분석하기 적합한 시뮬레이션 도구이다.

해당 시뮬레이션 도구는 선행 연구들을 고찰한 결과 급탕 분야에서 널리 사용되고 있음이 확인되었고[6-8], 따라서 본 연구에서 수요반응형 급탕환수 시스템을 분석하기에 적합하다고 판단하였다.

2) 연구 범위

본 연구는 아파트 건축물에 수요반응형 환탕배관이 적용되었다고 가정할 시 얻어지는 이점을 논하고자 하나, 시스템 적용에 들어가는 공사비용, 혹은 시스템의 유지보수비용은 고려되지 않았다.

실질적으로는 다양한 주거형태 및 평면계획, 거주자 생활패턴에 따라 시뮬레이션의 결과에 영향을 주는 실내온도, 관경, 배관 길이 등 다양한 요인이 변화할 것이나, 해당 내용을 전부 고려하는 것은 불가능하기 때문에, 본 연구에서는 가장 높은 빈도를 보이는 형태를 표준 형상으로 정하고 이에 대한 분석만을 수행하였다.

2. 수요반응형 급탕환수 시스템

급탕환수 시스템이란, 급탕관 내부의 물을 별도의 환수관(혹은 회수관)을 사용해 재순환시켜 사용자가 급탕대기시간 없이 급탕수를 사용할 수 있도록 하는 시스템을 의미한다.

급탕환수 시스템은 사용자의 급탕대기시간을 줄여 사용편의성을 향상시키며, 그 동안에 버려지는 물을 절약할 수 있다는 장점이 있다. 기계설비 기술기준 고시[9]에 고시된 바와 같이, 국내에서 중앙급탕방식을 사용할 경우에는 배관 열손실을 보상하며 급탕온도를 유지시키기 위해 환탕배관 및 급탕순환펌프를 시스템 내부에 포함시켜야 한다.

그러나 중앙급탕방식이 아닌 개별급탕방식을 사용할 경우는 보일러와 위생기구 간의 짧은 거리로 인해 이에 대한 제약이 없으며, 이에 따라 급탕환수 시스템이 적용되지 않아 급탕 사용 시 물의 낭비와 대기시간 소모가 발생한다[10].

이에 대해 Ally et al.[11]은 개별급탕방식에 적용 가능한 수요반응형 급탕환수 시스템을 제안하였다. 해당 시스템은 급탕관 내부의 물을 항상 순환시키는 기존 시스템과 달리, 사용자 수요발생 시에만 순환펌프를 가동함으로써 급탕에너지 소모, 급탕관 방열 손실 및 사용자의 급탕대기시간을 최소화시킨다. 이러한 개별급탕방식의 급탕환수 시스템은 아래 Fig. 1.과 같이 전용 회수관의 존재 여부에 따라 크게 두 가지로 분류된다[12]. 본 논문에서 다루는 급탕환수시스템은 아래 (b)에 해당하며, 보일러로부터 가장 먼 수전에 환수밸브를 설치하고, 해당 배관에 연결된 특정 수전의 사용수요가 입력되었을 때, 가장 먼 수전까지의 환수를 실행하여 수요에 반응하는 형태이다.

이 중 전용 회수관을 사용하지 않는 시스템의 경우, 밸브 조절을 통해 급수관을 일시적으로 회수관으로 사용한다. 이 경우 기존 주택에 추가적인 전용 회수관의 시공 없이 시스템 도입이 가능하다는 이점이 있으며, 해당 방식은 해외의 경우 친환경설계기준에 소개되었으며[13-14], 에너지 저감 및 절수 효과에 대한 평가가 다양하게 이루어진 바 있다.

Wendt, Baskin and Durfee[15]은 캘리포니아의 주거용 건축물을 대상으로 다양한 급탕 시스템의 에너지 및 물 관점에서의 성능, 비용 및 도입장벽에 대한 분석을 실시하였다. 결과에 따르면 수요반응형 급탕환수 시스템과 지속적 급탕환수 시스템 양쪽의 낭비되는 수량(Water waste)은 동일하게 기존 시스템보다 낮은 수치를 보였으며, 수요반응형 급탕환수 시스템은 낭비되는 에너지의 양(Energy waste)에서도 타 시스템 대비 크게 낮은 수치를 기록하였다.

또한, Iglesias and Palensky[16]은 건축물 프로파일 기반의 급탕환수 제어시스템을 제안하고 다양한 환수시스템과의 비교를 수행하였다. 제안된 시스템 이외에도 온도기반 환수제어, 스케줄 기반 환수제어, 수요반응형 환수제어 시스템이 비교되었으며, 사용자가 사

전에 급탕수요를 알리고 대기해야 하는 단점을 제하면 수요반응형 환수 시스템이 가장 효과적인 것으로 나타났다.

반면, 수요반응형 급탕환수 시스템이 오히려 에너지 사용량 관점에서는 효과적이지 못하다는 연구결과 또한 존재하였다. Weitzel and Hoeschele[17]는 가정용 급탕 시스템의 급탕수 공급방식을 평가하기 위해 시뮬레이션을 사용하여 재실자 수, 주택형태, 기후 등 다양한 요인에 의한 시스템 별 에너지사용량 및 버려지는 수량을 비교하였다. 시스템의 배관구조로는 가지식 구조(Trunk and branch), 중앙분배 구조(Home run), 하이브리드 및 환수식(Recirculation)의 4가지가 비교되었으며, 환수식 시스템의 경우 절수효과가 가장 크게 나타나는 것으로 드러났으나, 에너지 사용량 관점에서는 기존 가지식 구조보다는 비효율적인 것으로 보고되었다.

Brazeau and Edwards[18] 또한 실험을 통해 수요반응형 급탕환수 시스템이 수전에서의 절수 효과는 분명히 가지고 있지만, 오히려 크게 높은 에너지 사용량을 보이며, 비효율적인 관점에서 기존 시스템에 비해 비효율적이라고 주장하였다. 저자의 실험의 경우, 사용되는 에너지의 차가 에너지로 환산한 물 절감량의 차이보다 크기 때문에, 친환경 시스템임에도 불구하고 오히려 에너지를 더 사용하게 된다.

위의 선행연구 사례들을 둘러보았을 때, 수요반응형 급탕환수 시스템의 절수효과는 모든 선행연구에서 공통적으로 증명된 것에 반

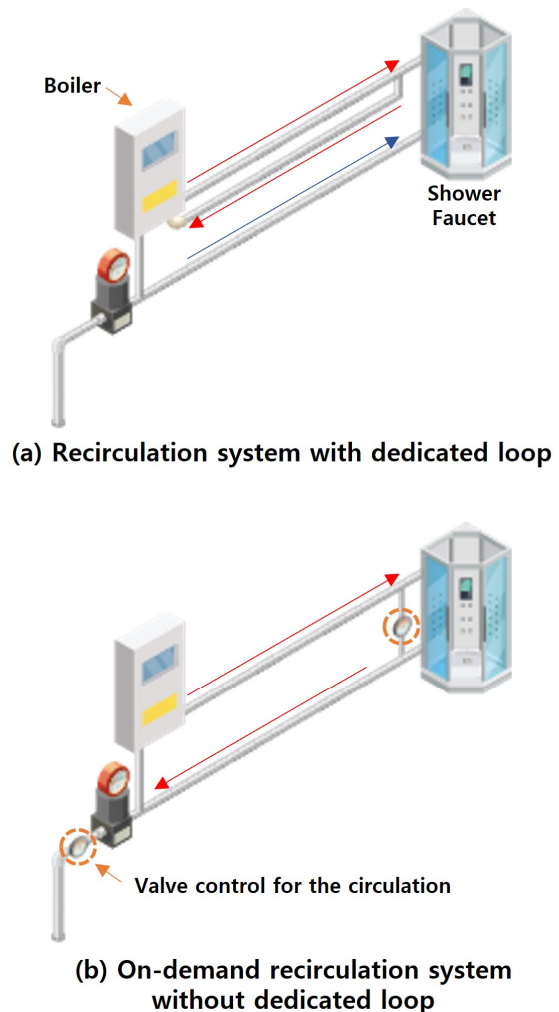


Fig. 1. Domestic hot water supply systems with circulation method

해, 에너지 저감에 대해서는 연구별로 다른 견해가 드러났는데, 연구별로 각기 다른 급탕 스케줄, 가구 및 평면 형태의 설정이 원인인 것으로 보인다. 따라서 시스템의 평가에 있어 가구 환경 요인들의 중요성을 알 수 있으며, 해당 사례들이 외국에서 수행된 연구라는 점을 감안하였을 때, 아파트의 주거 유형이 높게 나타나는 국내에서 수요 반응형 급탕환수 시스템을 평가하기 위해서는 국내의 급탕 스케줄 및 가구형태, 평면형태 등 국내 환경에 맞추어 실험을 진행해야 할 것이다.

또한, 위의 선행연구들은 별도의 전용 회수관을 활용하는 경우로, 급수관을 회수관으로 활용하는 경우에 대해서는 고려하지 않았다. 국내의 경우도 마찬가지로 급탕환수 시스템의 절수 및 에너지 저감에 대한 선행연구가 존재하였다.

차민철, 여명석 & 석호태[19]는 주거건물을 대상으로 가스소비량과 버려지는 물의 양을 측정하여 급탕환수 시스템을 평가하였으며, 급탕환수 시스템은 하절기에 비해 동절기에 급탕에너지의 상승률이 낮은 것으로 드러났으나, 급수관을 회수관으로 활용하는 경우

에 대한 고려는 이루어지지 않았다. 또한, 상술한 바와 같이 국내의 급탕 스케줄 및 주거환경에 맞추어 실험을 진행해야 하나, 해당 연구에서는 국외의 연구를 기반으로 급탕 스케줄을 산정하였다.

차광석 외 8인[20]은 전용 회수관을 활용하는 급탕환수 시스템이 적용된 '절수형 급탕 배관시스템'을 제안하였으며, 제안된 시스템은 절수효과 및 비용 절감효과가 확인되었다. 그러나, 급탕에너지 관점에서의 저감량 확인 및 분석은 이루어지지 않았다.

이승준[21]은 '절수형 급탕 배관시스템'의 Mock-up 테스트를 통해 시스템의 성능평가를 수행하였으며, 상수도, 하수도, 도시가스 및 전기로 비용을 세분화하여 시스템의 경제성을 평가하였으나, 일 단위 사용량에 대한 계산만이 이루어졌으며, 재실자의 수전사용 패턴은 반영되지 못하였으며, 매회 관 내부의 물을 새로 버리는 형태로 시스템을 가정하였다는 한계점이 존재한다.

이와 같이 국내의 선행연구 또한 급수관을 회수관으로 활용하는 경우에 대해서는 고려하지 않았으며, 국외의 수전사용 패턴을 기준으로 평가가 이루어지거나, 1~2인 가구와 저평형 주거형태의 상승

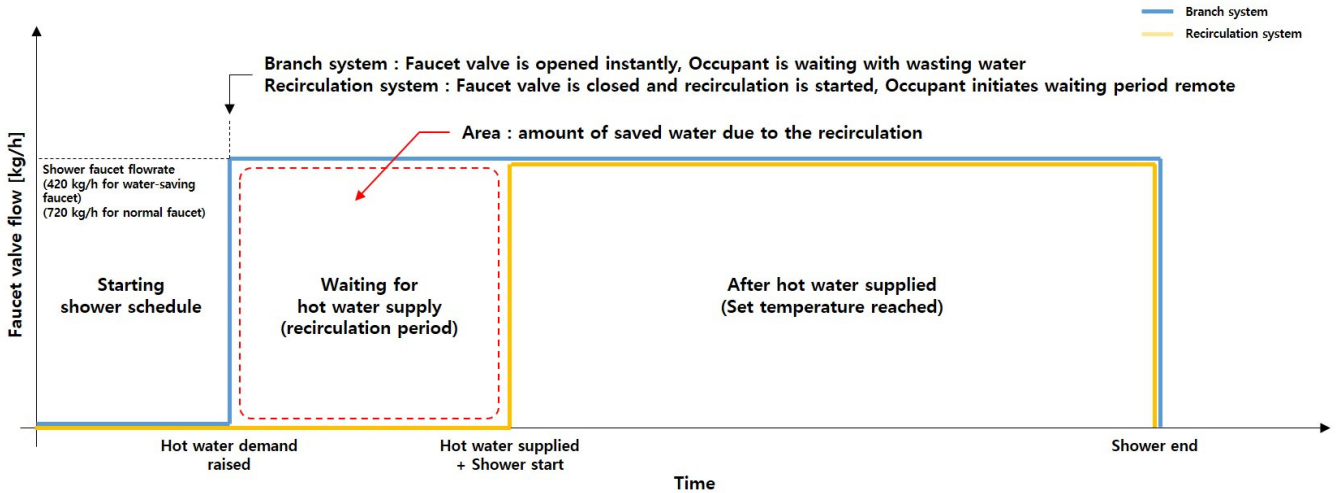


Fig. 2. Hot water supply schedule of both system (Hot water supply on the shower faucet)

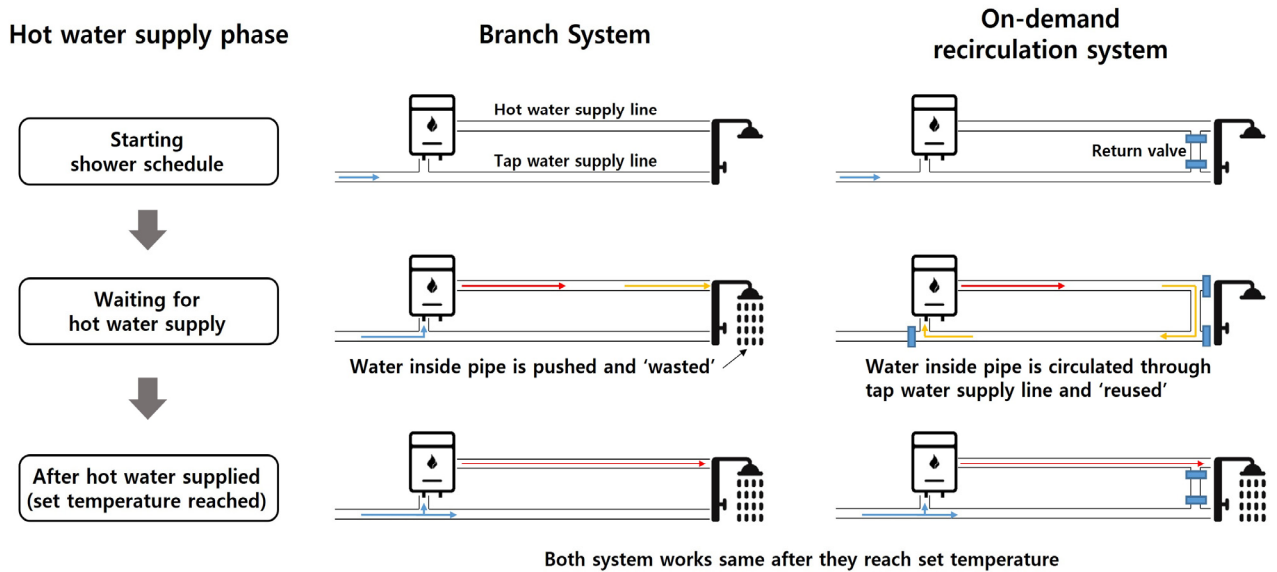


Fig. 3. Comparison of hot water supply system with the shower faucet: on-demand recirculation system and branch system

을 반영하지 않은 32평형의 4인 가정을 기준으로 시스템의 평가가 수행되는 등, 국내 환경표준에 맞춘 평가의 필요함을 알 수 있었다.

따라서 본 연구는 개별급탕방식을 사용하는 국내 공동주택을 대상으로, 추가 배관 시공을 요하지 않는 수요반응형 급탕환수 시스템의 급수관을 회수관으로 활용하는 형태에 대해서 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 본 실험은 급탕에너지 사용량 저감과 절수 효과에 대해서 실험을 진행하지만, 동일 실험으로 측정이 어려운 급탕대기시간 최소화에 대한 효용은 별도의 재실자 행태와 관련된 평가 실험을 요구하기에, 연구 대상에 포함하지 않았다.

3. 시뮬레이션 개요

3.1. 시뮬레이션 대상 설정

TRNSYS를 활용한 시뮬레이션 분석을 수행하기 위해 시스템을 적용할 가상의 대상을 우선 설정하였다. 시스템의 전반적 구조는 위 Fig. 1.의 (b)에 해당하는 전용회수관이 없는 수요반응형 급탕환수 시스템을 대상으로 하였으며, 상세한 시뮬레이션의 가정은 아래와 같다.

1) 보일러 및 급탕 시스템 설정

국내 공동주택의 보일러는 대부분 물탱크가 없는 직수형 보일러를 사용하며, 매우 짧은 시간 내에 급수요구온도까지 가열된 급탕수를 내보낼 수 있다. 직수형 보일러를 사용할 경우 급탕 대기로 인해 버려지는 물의 양은 기존의 급탕관 내부에 있던 냉각된 급탕수의 총량과 같다.

아래 Fig. 2., Fig. 3.은 양 시스템의 차이점을 보여 준다. 각각 Fig. 2.는 양 시스템의 급탕수 공급 스케줄, Fig. 3.은 관 내부의 물 흐름을 나타낸다. 환수 시스템을 사용하는 경우와 사용하지 않는 경우 모두 설정온도에 도달한 뒤에는 외부 급수관의 물을 사용한다는 점은 동일하며, 시스템 사용여부에 따른 차이점은 급탕환수 시스템을 가동시켰을 때, 급수관 내부에 존재하던 실내온도와 동일하게 열교환이 이루어진 물을 먼저 가열하여 재사용한다는 점으로, 이에 따라 절수 효과와 에너지 저감 효과가 발생한다.

실제 사용 조건에서는 급탕수를 급수라인의 냉수와 혼합하여 사용하므로 Fig. 3.의 Branch System의 설명과는 다르게 급수라인의 물이 동시에 사용되고, 급탕관의 유량이 이에 따라 변화할 것이나, 사용자별로 선호하는 혼합 비율이 달라 이에 대한 정확한 예측이 어려울 것으로 판단되었다. 따라서 본 연구에서는 보수적인 비교를 위해 기존 시스템의 이상적인 경우를 가정하였고, 기존 시스템에서 이는 급수라인의 물을 혼합하지 않고 물을 버리는 경우에 해당된다. 사용자 관점에서는 온수 쪽으로 밸브를 최대한 돌린 뒤 급탕온도 도달을 기다린 뒤 온도도달 이후 밸브를 원하는 위치로 조절하는 경우가 된다.

이에 따라, 외부 공급수의 온도가 연중 대부분의 경우 더 낮게 나타나므로, 외부 공급수와의 온도차로 인한 상대적 급탕에너지 저감이 존재할 것이다. 저감량은 급탕관 내부의 급탕수 총량과 비례할 것으로 예상된다.

2) 건축물 및 급탕관 설정

건축물의 면적은 건축물 내부의 급탕관의 경로 및 길이에 영향을 미치므로 급탕관의 방열량, 내부 수량 등을 결정짓는 핵심 인자이다. 본 연구에서 대상으로 하는 공동주택 관련 통계자료를 참조하여 시뮬레이션 상 건축물의 면적을 설정하였다.

국토교통부 산하의 공동주택관리 정보시스템(K-APT)에서 ‘관리비공개 의무단지’로 정의되는 “30세대이상 공동주택, 150세대 이상으로서 승강기 설치 또는 중앙(지역)난방방식의 공동주택, 주택이 150세대이상인 주상복합아파트, 그 외 입주자등이 2/3이상 서면동의하여 의무관리대상으로 전환한 공동주택, 공공임대 및 민간 임대주택”의 평균 호수당 주거전용면적은 75.58㎡이다. 또한 2016년 이후로 갱신이 이루어지지 않았으나 서울시의 전용면적기준 공동주택 현황 통계 또한 아래 Fig. 4.와 같이 60㎡~85㎡의 면적구간이 가장 비중이 높다. 따라서 해당 면적구간에 해당하는 79.2㎡(24평형)를 대상으로 선정하였다.

급탕관 길이는 선행연구의 제시 방법을 따라 전용면적의 변화에 맞추어 30m의 급탕관 길이를 대상으로 시뮬레이션을 수행하였다[22].

급탕관의 관경은 일반 실내급탕관에서 빈번하게 사용되는 치수인 15A를 사용하였다[19, 22-23]. 국내 동관에 대한 산업표준인 KSD 5301에 따르면, 급배수 및 급탕용으로 사용되는 M형 15A 동관의 기준 외경은 15.88mm, 두께는 0.71mm로, 15.17mm의 내경을 가지므로, 반올림하여 15mm의 내경으로 관경을 설정하였다.

급탕관의 단열 성능은 국토교통부 제정 건축기체설비공사 표준시방서[24]를 기준으로 삼았다. 원칙적으로는 급탕설정온도가 60℃ 이하인 가정용 급탕관은 보온이 요구되지 않지만, 실질적으로 에너지 효율을 높이기 위해 공동주택에서도 급탕관의 보온재 시공이 이루어진다[25]. 따라서 단열시공이 요구되는 61℃~90℃의 온도구간 기준을 적용하였는데, 해당 기준에 따르면 25mm의 유리면(Glass wool) 보온통이 적용되어야 한다. 유리면 소재의 열전도율은 KS L 9102:2014[26]표준을 따르며, 이 경우의 열전도율은 0.043W/(m·K)이며, 내부 동관의 두께는 0.71mm, 열전도율은 401W/(m·K)이다. 최종적으로 계산된 단열 동관의 열전도율은 1.72W/(㎡·K)이었다.

또한, 방열량을 계산하는 데 요구되는 배관 위치의 온도는 기계설비배관 설치공간의 동하게 온도를 실측한 연구를 참조하여[27] 24.5℃를 배관 위치의 주변온도로 설정하였다. 또한, 배관 샤프트의 온도는 동절기 24.3℃, 하절기 24.8℃로 계절별 차이가 크게 없는 것으로 관측되었으므로 평균온도에서 변하지 않는 것으로 가정하였다.

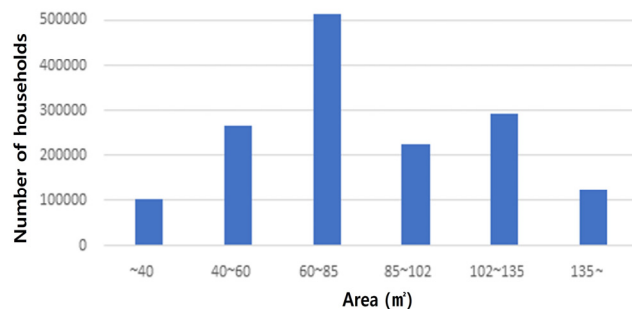


Fig. 4. Distribution of the apartment household area in Seoul

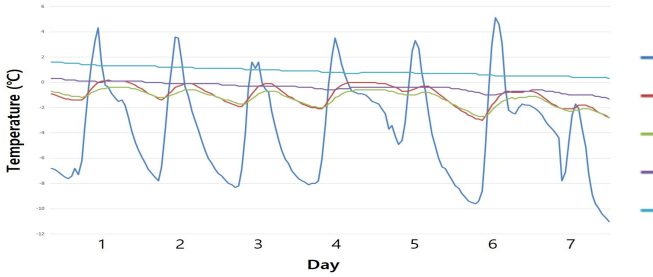


Fig. 5. Underground temperature along depth

3) 급탕기준온도 및 급수 온도

급탕설비가 공급표준인 60°C로 물을 가열하기 위한 에너지 사용량은 급수온도가 낮을수록 증가하므로, 시스템의 평가를 위해서는 급수온도의 정확한 설정이 필수적이다. 급수온도는 기상청에서 제공되는 표준 기상데이터의 서울지역 지중 1m의 온도를 기준으로 설정하였다[28].

그러나, 기상청 데이터에서 분, 혹은 시간별 데이터가 주어지는 것은 지중 30cm까지였고, 지중 1m 온도는 일별로만 제공되었다. 따라서, 지중 1m의 온도를 기준으로 하기 위해서는 해당 깊이에서 시간경과에 따른 일별 온도편차가 나타나지 않아야 하는데, 이를 확인하기 위해 2019년 1월의 1주차 기간 동안의 깊이별 온도변화를 비교하였다.

Fig. 5.에서 볼 수 있듯이, 시간별 온도편차는 지표면부터 깊이 10cm까지는 두드러지고, 20cm에 달하면 거의 완만해지되 약간의 영향이 드러나는 데 비해, 30cm위에서는 일별 온도편차가 거의 존재하지 않는 것을 확인할 수 있었다. 그러므로 지중 1m의 온도 값에 대한 일별 편차가 크게 두드러지지 않을 것으로 예상되며, 일별온도를 매 시간 동일한 것으로 가정해도 무방할 것이라 판단하였다. 설정된 급수온도는 아래 Fig. 6.과 같으며, 서울 지역의 급수온도를 기준으로 선정하였다.

4) 수전 및 급탕 스케줄 설정

수요반응형 급탕환수 시스템은 사용자가 급탕수를 사용하는 빈도를 나타내는 급탕 스케줄에 따라 절수 효과가 달라질 수 있다.

가령, 연속적으로 급탕수를 사용할 시 두 번째의 급탕에서는 관에 있는 물이 충분히 데워진 상태이므로 급탕 설정온도에 이미 도달되어 있으므로 두 시스템의 급탕에너지 및 급탕수의 소모 차이가 존재하지 않는다. 반면, 사용자가 아침에 한 번, 저녁에 한 번과 같이 충분한 시간 간격을 두고 급탕수를 사용한다면, 시간 간격 동안 관 내 수온이 하락할 것이므로 급탕에너지 및 급탕수의 저감효과가 발생한다.

그러나 주택에서 급탕수를 사용하는 수전은 싱크대, 욕조, 샤워, 세면대 등으로 다양하며, 사용 패턴 또한 가구 구성원의 특성에 따라 편차가 크다. 이러한 다양성을 전부 반영하는 것은 어려우므로 본 연구는 시뮬레이션 대상을 단일 수전으로 단순화해 한정하였다. 또한 싱크대나 세면대의 경우 사용자에 따라 설정온도 도달을 기다리지 않고 냉수가 공급되는 상태로 바로 사용하는 경우가 있으므로 온수가 토출될 때까지 기다리는 경향성이 높은 샤워 시설을 대상으로 선정하였다.

샤워 목적의 급탕수를 사용하는 스케줄에 대해서 200만개의 물

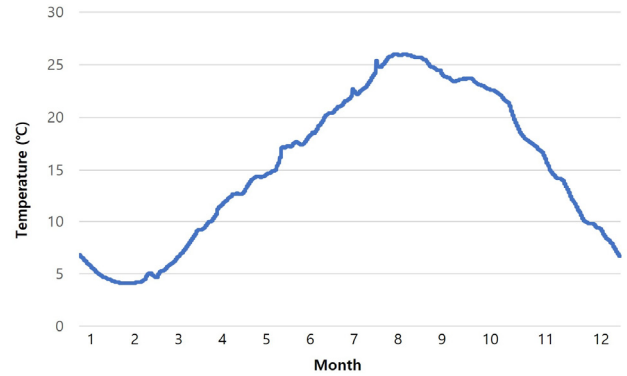


Fig. 6. Annual underground temperature of 1 m depth

사용 데이터를 포함하며, 약 5만개의 샤워 스케줄이 기록되어 있는 Water Research Foundation에서 제작된 REUWS Database를 사용하는 방법이 제시되었으나[29], 데이터 수집 시점과의 시간차가 약 17년으로 길고 국외의 사용 사례를 데이터화한 것이므로 상대적으로 최근의 국내 연구들을 대상으로 조사하였다[30-32]. 조사 결과 저녁 시간대에 더 높은 사용량이 관측되는 것을 확인하였다.

따라서 본 연구는 국내에서 가장 최근에 연구된 사례를 바탕으로 [32], 일 2회 10분의 샤워를 가정하였다. 실질적으로는 급탕사용부하의 편차를 반영하여 샤워시간을 아침과 저녁 시간대별로 다르게 설정해야 할 것이지만, 본 연구에서 다루고자 하는 시스템은 토출되는 급탕수의 수온이 지정온도에 도달한 뒤부터는 타 시스템과 차이가 없으며, 급탕수 수온이 지정온도에 도달하기 전까지는 샤워가 시작되지 않는다고 가정하므로 해당 내용은 고려되지 않았다.

또한, 수전의 물 소비량에 대해서, 수도법 시행규칙 제 6조의 '절수설비와 절수기기의 종류 및 기준'에서 제시된 절수설비의 기준을 따르면, 신축건물 기준 샤워용 수전의 토수유량은 9.5L/min 이하여야 한다. 그러나 서울특별시 상수도사업본부와 대구광역시 상수도사업본부의 물 절약 가이드라인에서는 공통적으로 7L/min을 제시하므로[33-34], 실질적인 절수 샤워 수전의 유량은 7L/min인 것으로 판단하였다.

절수설비가 아닌 경우, 급수설비 설계기준에 따르면[35] 급수용 위생기구 중 샤워기의 유량은 0.18L/s인데, 이 경우 대략 9.6L/min에 해당된다. 이 경우도 마찬가지로, 서울특별시 상수도사업본부(2022)와 대구광역시 상수도사업본부(2022)의 물 절약 가이드라인에 따르면, 최대수압에서 12L/min으로 제시되어 있기 때문에 실질적인 일반 샤워 수전의 유량은 12L/min인 것으로 추정하였다.

이에 따라, 본 연구에서는 절수설비를 사용하는 경우의 샤워 수전 유량과 그렇지 않은 경우의 유량을 각각 7L/min, 12L/min으로 설정하였다.

3.2. 시뮬레이션 모델 작성

설정된 내용을 바탕으로 아래 Fig. 7.과 같이 TRNSYS 시뮬레이션 모델을 작성하였다.

모델은 2종류가 포함되었는데, 수요반응형 급탕환수 시스템과, 해당 설비가 적용되지 않은 일반적인 시스템의 2가지를 TRNSYS 시뮬레이션에 작성하여 동일한 시간 흐름(Time step)에 따른 물 사용량

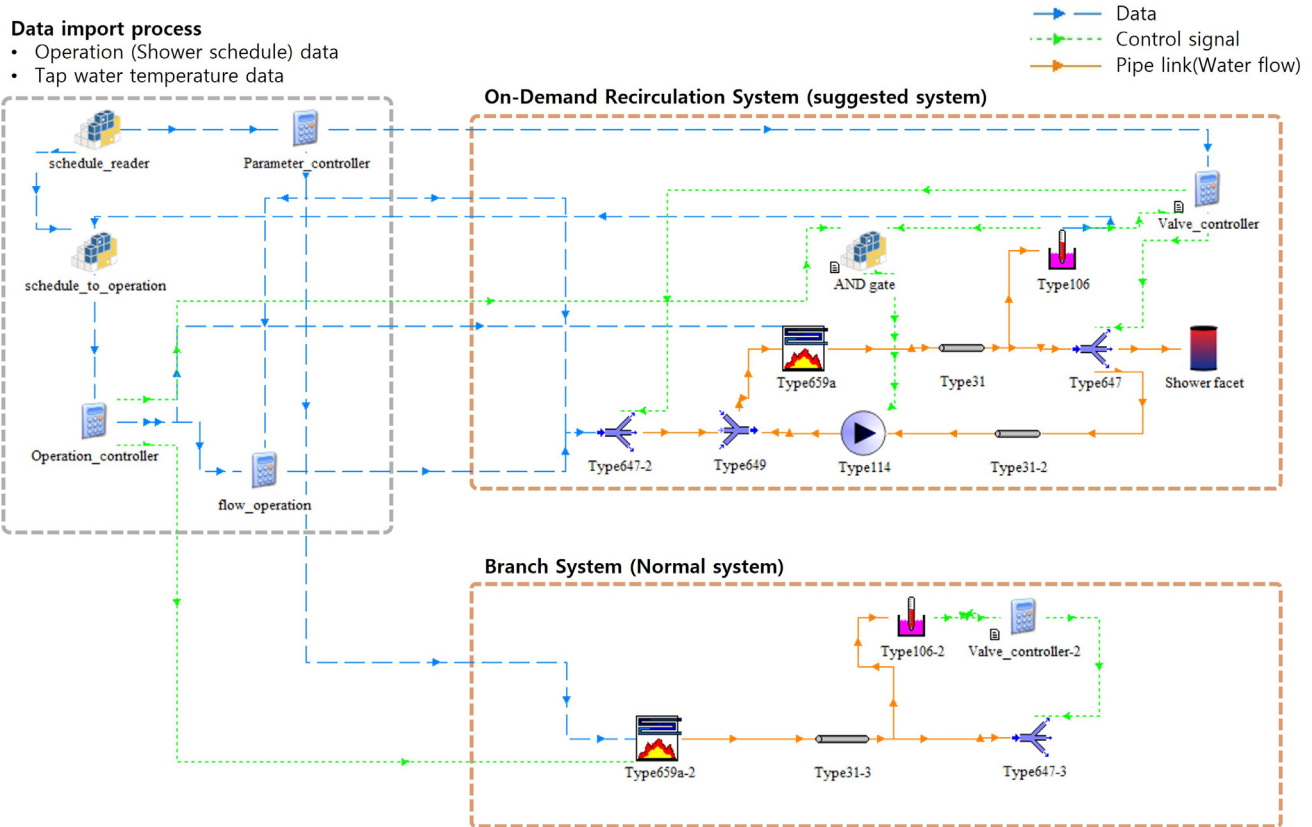


Fig. 7. Structure of TRNSYS model

Table 1. Parameter values (preset values for whole model)

Parameter / Input name	Value	Detail
tap_water_temp	acquired from KMA*	-
water_flowrate	420 [kg/h] 720 [kg/h]	Different along condition
control_value	0 / 1	determined from control logic
amb_temp	24.5 [°C]	Choi and Ryu (2020)

*Korea Meteorological Administration

및 급탕에너지(보일러 소비 에너지)의 차이를 확인하고자 하였다. 또한 시간 흐름에 맞추어 기상청의 외기온도 데이터 및 거주자 샤워 수전 사용 일정에 따른 제어신호를 공급하는 시스템도 시뮬레이션 상에 작성하였으며, Fig. 7.의 Data import process가 여기에 해당된다. 해당 절차를 거침으로서 동일한 수전사용 일정과 시스템 유량, 그리고 급수온도와 같이 시간흐름에 따라 변하는 설정 값이 양측 시스템에 동일하게 전달된다. TRNSYS시뮬레이션에 사용된 객체(컴포넌트)의 설정값 및 설명은 아래와 같다.

1) 기본 설정값(parameters)

기상청 외기온도, 유량 등 양 시스템에 공통인 값들은 아래 Table 1.과 같이 정의되었다. 조사된 유량 기준은 L/min단위이나, TRNSYS에서 사용되는 단위가 kg/h이므로, 이에 맞추어 환산하였다.

2) 환수 밸브 (Type647, Type649)

환수밸브는 급탕관의 마지막 지점과 급수관을 잇는 밸브로, 급탕 환수 시스템이 가동될 때에만 열리게 되어 있으나, 해당 컴포넌트가 TRNSYS에 존재하지 않는 관계로, 분배 밸브인 Type647을 대신 조정하여 사용하였다. 해당 컴포넌트는 설정 값으로 배출구의 수와 배출구별 유량비율을 정의하여 해당 비율에 맞추어 배출구에 유체를 분배한다.

따라서 본 실험은 Type647 컴포넌트에 배출구별 유량비율을 후술할 온도제어 장치인 Type106의 작동신호에 따라 100%, 0%값을 각각 할당하여 목표수온에 도달하기 전에는 급탕환수시스템이 작동한다고 가정하여 모든 유체를 보일러로 되돌려 보내고, 목표수온에 도달한 뒤에는 모든 유체를 수전에 분배하도록 설정하였다.

또한 보일러에 공급되는 급수라인이 급탕환수시스템이 가동되는 동안 차단되어야 하므로, 이를 위해 Type647을 한 번 더 사용하였으며, 이 또한 Type106의 작동신호에 따라 제어되며, Equation 컴포넌트를 추가하여 해당 값들을 조절하도록 시뮬레이션을 작성하였다.

Type649 컴포넌트는 병합 밸브로, 급수관으로 환수되는 물과 외부에서 시스템으로 급수되는 물을 합한 유량을 보일러에 공급하도록 설정되었다. 그러나, 상술한 Type647 컴포넌트의 조정으로 인해 환수가 일어날 경우는 외부 급수량이 없으며, 외부에서 급수가 일어날 경우는 그 반대이므로, 실질적으로는 환수나 급수 중 한 쪽의 유량만을 전달하게 된다.

3) 온도제어장치(Type106)

온도제어장치 모듈로는 Type106을 사용하였다. 해당 장치의 설

정값은 아래 Table 2.와 같았다. 감지온도기준은 관을 통해 이동하는 급탕수가 식을 가능성을 고려하여 보일러의 설정온도 60°C보다 2°C 낮은 58°C로 설정하였으며, 감지대상온도는 급탕관(Type31)에서 출력되는 배출수의 온도로 설정하였다. 따라서, 본 실험에서 수전 내부를 통과하며 방열되는 열 손실량에 대해서는 고려되지 않는다.

4) 데이터 처리 및 공급부(Type3157)

해당 컴포넌트는 TRNSYS에 기본적으로 내장되지 않은 컴포넌트로, 기상청의 수온데이터 로드 및 샤워 스케줄에 따른 제어를 위해 만들어졌다. 사용된 Type3157의 이름은 'Calling Python (CFFI)'으로, Python 코드를 TRNSYS와 연동시키는 모듈이다[36].

각각 schedule_reader는 가동스케줄 및 기상청 데이터를 불러오는 역할을 수행하며, schedule_to_operation은 해당 스케줄을 샤워 시간 계산 로직을 수행하여 샤워 가동여부로 변환하는 역할, AND_gate는 컨트롤러 컴포넌트에서 전달되는 제어신호(샤워 가동 중)와 온도제어장치(Type106) 컴포넌트에서 전달하는 온도 미도달 여부 신호가 모두 참일 경우에만 급탕순환펌프(Type114) 컴포넌트로 가동 신호를 보내는 역할을 수행한다.

3개의 Type3157 컴포넌트 중 급탕시스템에 포함되는 제어회로인 AND_gate를 제외하면, 나머지 2개의 컴포넌트는 데이터를 불러오는 과정에 사용된다. 해당 과정은 Fig. 7.의 좌측 부분에 해당된다.

Table 2. Parameter and input value for Type106 component

Parameter / Input name	Value	Detail
Temperature dead band	3 [°C]	-
Monitoring temperature	output of pipe	from Type31
Heating setpoint	55 [°C]	Boiler set point - 2°C

Table 3. TRNSYS simulation result of the normal shower faucet

Month		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Energy Consumption [MJ]	Branch	3980.0	3601.4	3770.6	3313.4	3199.9	2796.1	2651.0	2477.6	2544.5	2773.7	3159.6	3647.7
	Recirculation	3949.8	3573.9	3744.9	3295.9	3186.8	2790.0	2649.9	2480.3	2543.9	2770.0	3145.5	3624.8
	Difference	30.3	27.5	25.7	17.5	13.1	6.1	1.1	-2.7	0.6	3.8	14.1	23.0
Water Consumption [L]	Branch	7787.2	7033.6	7787.2	7536	7787.2	7536	7787.2	7787.2	7536	7787.2	7536	7787.2
	Recirculation	7452.4	6731.2	7452.4	7212	7452.4	7212	7452.4	7452.4	7212	7452.4	7212	7452.4
	Difference	334.8	302.4	334.8	324	334.8	324	334.8	334.8	324	334.8	324	334.8

Table 4. TRNSYS simulation result of the water-saving shower faucet

Month		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Energy Consumption [MJ]	Branch	2357.6	2133.3	2233.5	1962.7	1895.5	1656.3	1570.3	1467.6	1507.2	1643.0	1871.6	2160.8
	Recirculation	2328.1	2106.5	2208.6	1945.9	1883.0	1650.8	1569.8	1470.9	1507.2	1639.9	1858.2	2138.5
	Difference	29.5	26.8	24.9	16.8	12.5	5.5	0.5	-3.3	0.0	3.2	13.4	22.3
Water Consumption [L]	Branch	7787.2	7033.6	7787.2	7536	7787.2	7536	7787.2	7787.2	7536	7787.2	7536	7787.2
	Recirculation	7452.4	6731.2	7452.4	7212	7452.4	7212	7452.4	7452.4	7212	7452.4	7212	7452.4
	Difference	334.8	302.4	334.8	324	334.8	324	334.8	334.8	324	334.8	324	334.8

5) 그 외 모델 설정

시뮬레이션을 수행하기 위한 가동기준 또한 고려되었다. 시스템의 구성 자체는 초 단위로 1년 단위의 스케줄 및 온도데이터를 입력받을 수 있도록 코딩되었으나, 실제로 시뮬레이션을 시도해 본 결과 지나치게 많은 time step으로 인해 CSV파일을 사용하는 File DB의 한계로 인한 문제점이 발생하였다. 추가적으로, 급수온도의 일간 편차가 크지 않으며, 시뮬레이션을 실행한 결과 샤워 스케줄 이후 관내 잔여급탕수가 실내온도와 비슷해질 정도로 냉각되는 데 6시간 이상의 긴 시간이 소요되었다. 상기 내용을 고찰한 결과, 연속적인 샤워 스케줄의 여부(가구 구성원 수)나, 샤워 시간은 큰 영향이 없었고, 샤워 스케줄이 연속되지 않고 아침과 저녁으로 나뉘는지의 여부가 중요한 것으로 드러났다.

따라서 모델 설정을 단순화하여도 샤워 수전에 대한 수요반응형 환수 시스템의 적용상 이점의 차이가 없을 것으로 판단하여, 본 연구는 하루에 아침과 저녁으로 각 2번씩 샤워를 한다고 가정된 뒤 각 월별로 15일의 외기온도 조건을 기준일로 선정하여 시뮬레이션을 수행하였다.

보일러(Type659a) 및 급탕순환펌프(Type114)에 대해서는 컴포넌트의 기본값을 그대로 사용하되, 급탕용량에 한해서만 용량부족으로 인한 문제가 없도록 참조한 보일러 값 중 가장 높은 47500 kcal/h 값으로 설정하였다. 급탕관 또한 TRNSYS에서 제공되는 기본 파이프 모듈인 Type31을 사용하였기 때문에, 단열계수 설정 이외에는 특이 사항이 없다. 관의 내부에 존재하는 물은 시작 시점에서 주변 환경온도와 같은 24.5°C의 온도를 갖는 것으로 간주되었다.

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

작성된 모델을 기반으로 시뮬레이션 분석을 수행한 결과는 위 Table 3., Table 4.와 같이 나타났으며, 해당 결과를 에너지 사용량 관점과 물 사용량 관점에서 각기 고찰하였다.

1) 급탕에너지 소비량

연간 급탕에너지 저감량은 절수 샤워 수전의 경우가 152.09MJ, 비절수 샤워 수전의 경우가 159.97MJ로 나타났으며, 이는 대략 총량의 0.7%에 해당한다. 한국도시가스협회에서 제공되는 도시가스 요금표에 따르면[37], 서울특별시의 가스요금은 19.6910원/MJ로, 해당 요금 기준으로는 대략 2540원, 3150원의 도시가스 비용 절감 효과가 나타났다.

급탕에너지 저감량은 외기온도의 변화에 큰 영향을 받는 것으로 드러났다. 설계된 시스템의 구조 상 실내온도(24.5℃)보다 외부 급수온도가 25.7℃로 높을 때, 급수관 내부의 물을 재가열하는 것보다 외부 급수를 바로 가열하여 공급하는 것이 온도차가 더 낮기 때문인 것으로 예상된다. 8월에는 급탕에너지의 저감량이 마이너스 값으로 도출되는데, 이 또한 동일한 원인에 의한 것으로 보인다.

위와 같은 원인을 고려하였을 때, 수요반응형 급탕환수 시스템이 에너지 사용량 관점에서 갖는 이득은 외부 급수온도가 낮을수록 커지는 것으로 분석되었다. 아래 Fig. 8.은 월별 급탕에너지 저감량이 월별 외부 급수온도의 변화와 반대되는 방향으로 거동하는 것을 보여 준다.

본 연구에서 서울특별시의 공동주택이라는 전제조건 하에서 실행한 실험에서는 에너지의 실질적 저감량이 미미하였다. 그러나 외부 급수온도가 낮을수록 유리하다는 특성을 고려해 보았을 때, 수요

반응형 급탕환수 시스템이 최적의 효율성을 보이는 환경은 도심의 공동주택이 아니라 지중온도가 낮게 유지되는 산지 등의 교외 지역 일 것으로 추정된다.

2) 물 사용량

연간 절수효과는 절수여부와 관계없이 3942L였으며, 총량의 4.5%에 해당한다. 수도요금은 사용량에 따라 비용이 변하나, K-water에서 제공하는 '수도요금현황'에 따르면[38], 한국의 평균 수도요금이 719(원/㎥)으로 표기되어 있다. 해당 요금 기준으로 연간 2830원의 수도 비용의 절감 효과가 나타났다.

앞서 3.1장에서 예측한 바와 동일하게, 절수 효과는 계절과 무관하고, 샤워수전 유량과도 무관한 것으로 나타났는데, 이는 급탕수의 절약이 급탕관에 채워져 있던 물의 양만큼만 이루어지기 때문인 것으로 보인다.

따라서 수요반응형 급탕환수 시스템을 적용할 때의 효율이 극대화되기 위해서는 급탕관의 길이가 길어야 하는데, 실질적인 공동주택 내부에서의 급탕관의 길이는 면적이 동일하더라도 평면설계에 따라 크게 달라질 것으로 예상되기 때문에, 공동주택에서의 효율성 평가는 난점이 많을 것으로 예상된다. 그러나, 1층에 보일러가 있는 복층 단독주택처럼 수직적 거리와 같이 급탕관의 길이를 증가시킬 만한 요인이 있다면, 대체적으로 수요반응형 급탕환수 시스템의 효율이 늘어날다고 볼 수 있을 것이다.

전체적으로 샤워 수전 1개소에 대한 급탕에너지 저감 및 절수 효과는 크게 두드러지지 않았으나, 전반적인 급탕수전 전체에 적용할 경우 효과가 증대될 것으로 보인다. 그러나, 어느 정도의 표준화된 스케줄이 존재하는 샤워와는 달리, 세탁, 싱크대, 세면대, 목욕 등은 편차가 지나치게 크기 때문에 표준화된 시뮬레이션 모델 설정에 난점이 존재한다. 단순히 사용량 곱을 통해 추산하여도 되겠지만, 보다 정밀한 예측을 위해 해당 부분을 개선하여 좀 더 현실적인 실험을 추후 진행하며, 동시에 가구형태 및 주거형태, 건축물의 위치와 같은 다양한 요인을 고려하여야 할 것이며, 환수 중 급수밸브를 열 경우와 같은 다양한 상황에 대한 시스템적 고려 또한 이루어져야 할 것이다.

또한 급탕관의 길이변화에 따른 영향을 알아보기 위해, 급탕관의 길이를 변화시키며 비절수 샤워수전을 기준으로 시뮬레이션을 수행

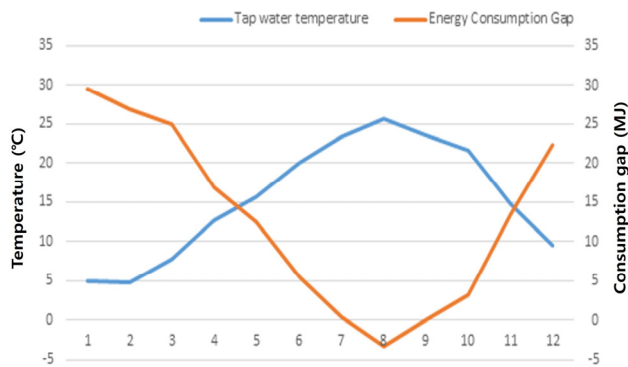


Fig. 8. Energy consumption gap between systems along tap water temperature change

Table 5. TRNSYS simulation result of the normal shower faucet, along the pipe length

Month		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	
Energy Consumption [MJ]	30 m	Branch	3980.0	3601.4	3770.6	3313.4	3199.9	2796.1	2650.9	2477.6	2544.5	2773.7	3159.6	3647.8
		Recirculation	3949.8	3573.9	3744.9	3295.9	3186.8	2790.0	2649.9	2480.3	2543.9	2770.0	3145.5	3624.8
		Difference	30.3	27.5	25.7	17.5	13.1	6.1	1.1	-2.7	0.6	3.8	14.1	23.0
	20 m	Branch	3950.9	3575.0	3742.9	3289.1	3176.5	2775.6	2631.5	2459.4	2525.8	2753.4	3136.5	3621.1
		Recirculation	3930.7	3556.7	3725.8	3277.5	3167.7	2771.6	2630.8	2461.3	2525.4	2750.9	3127.1	3605.7
		Difference	20.2	18.3	17.1	11.7	8.8	4.1	0.7	-1.8	0.4	2.5	9.4	15.3
	10 m	Branch	3921.7	3548.6	3715.3	3264.9	3153.1	2755.2	2612.1	2441.3	2507.2	2733.1	3113.3	3594.3
		Recirculation	3911.7	3539.5	3706.8	3259.0	3148.7	2753.1	2611.8	2442.2	2507.0	2731.9	3108.6	3586.7
		Difference	10.1	9.2	8.6	5.8	4.4	2.0	0.4	-0.9	0.2	1.3	4.7	7.7

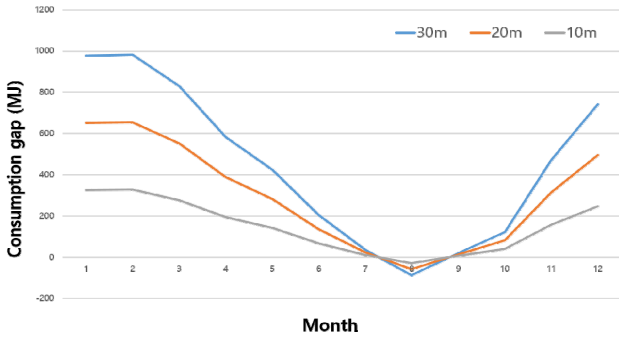


Fig. 9. Energy consumption gap between systems along different pipe length

Table 6. Comparison of simulation result

Experiment	Water saving	Hot water energy saving
Suggested system	3942L	160MJ
Cha, Yeo and Seok [19]	12166L	143MJ
Lee [21]	12556L	446MJ

하였다. 결과는 위 Table 5., 아래 Fig. 9.와 같았다. 관 길이가 짧아질 수록 기존 시스템의 버리는 물 양이 감소하며, 환수 시스템의 에너지 이득량 또한 이에 비례하여 감소하였다.

추가적으로 유사한 환수시스템에 대해 연구한 선행연구의 결과와 비교를 수행하여 절수효과 및 에너지 저감효과의 차이를 검토하였다. 비교대상 연구는 절기별로 분석을 실시하였기 때문에 각 절기를 3개월씩으로 가정하여 연간 저감량을 산정하였다. 비교 결과는 아래 Table 6.과 같았다.

상대적으로 타 연구의 절수량이 큰 폭으로 높게 나타났는데, 이는 본 연구가 샤워 수전 1개소만을 고려한 데 비해 선행연구는 시스템 전체를 평가대상으로 하기 때문인 것으로 보인다. 또한, 급탕 패턴(샤워 스케줄)의 차가 원인일 가능성 또한 존재하는데, 연속적으로 급탕 수요가 발생할 경우 관 내부 잔여 급탕수의 온도가 얼마나 빠르게 감소하는지, 구체적으로는 급탕수요 발생간격 내에 급탕기준온도 이하로 하락하는지의 여부에 따라 추가적으로 급탕환수(혹은 물 버림)가 발생하는지의 여부가 결정되게 된다. 선행연구 간에서도 서로 다른 급탕 패턴을 기준으로 분석을 수행한 바 있으며, 에너지 저감량의 경우 또한 역으로 더 높게 나타나는 모습을 보이는데, 해당 부분 또한 급탕 패턴이 원인인 것으로 파악되었다.

본 연구에서는 배관의 상세 평면에 대해 다루지 않기에 고려하지 않았지만, 급탕배관의 단열 또한 결과 차에 대한 원인으로 추정되었다. 상술한 바와 같이 연속적인 급탕수요 사이의 간격 또한 중요하지만, 해당 간격 내에 급탕수의 온도가 기준온도 이하로 하락하는지의 여부에는 급탕배관의 열관류율 영향이 크기 때문이다.

이처럼 연구 간의 실험조건이 다르기 때문에 시뮬레이션과 실험 연구에서 제시된 실험 간의 올바른 비교를 위해서는 동일한 실험조건을 가정한 뒤 시뮬레이션을 실행하며 비교를 수행해야 할 것이다.

5. 결론

본 연구는 급수관을 활용하는 수요반응형 급탕환수 시스템의 급탕에너지 저감 및 절수 효과의 예측을 수행하였으며, 해당 시스템의 분석을 위한 TRNSYS 시뮬레이션의 모델링 방법을 제안하였다. 서울특별시의 24평형 공동주택의 2인가구를 대상으로 제안된 시뮬레이션 모델을 활용한 시뮬레이션 분석을 진행하였으며, 분석 결과 샤워 수전에 대해 급탕에너지는 0.7%, 물 사용량은 4.5%의 감소를 확인하였다.

최종적인 급탕에너지의 저감율은 절수 효과에 비해 낮은 것으로 드러났으나, 샤워수전 1개를 대상으로 했다는 점, 실제 주택의 배관 및 급탕사용 스케줄에 따라 효율성이 달라질 수 있다는 점을 고려하면, 실제 주택에 적용 시 급탕에너지 저감 관점에서의 효율은 달라질 수 있을 것이다.

본 연구는 다양한 가구형태 및 주거형태가 고려되지 않은 점, 생애주기분석과 같은 총체적 비용분석이 이루어지지 않은 점, 급탕 대기 과정에서의 행태적 요인 등이 고려되지 않은 점 등 한계점이 존재한다. 추후 더 많은 데이터 수집을 통해 가구형태 및 주거형태별로 표준모델을 작성하여 활용하는 등 더 정밀한 시뮬레이션을 구축하며, 한편으로는 실증 실험을 수행하여 이를 통해 보다 더 현실적인 예측을 수행할 것이다.

Acknowledgement

이 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단(NRF)의 지원을 받아 수행된 연구임. 과제번호: 2022R1A4A1026503

References

- [1] 에너지경제연구원, 2019에너지통계연보, 2019. // (Korea Energy Economics Institute, 2019 Yearbook of Energy Statistics, 2019.)
- [2] 국토연구원, 2017년도 주거실태조사, 2017. // (Korea Research Institute for Human Settlements, 2017 Korea Housing Survey, 2017.)
- [3] 이도형 외 3인, 공동주택 기계설비 에너지로드맵 수립에 따른 에너지 비용 및 탄소배출량 저감효과 분석, 설비공학논문집, 제34권 제10호, 2022, pp.491-502. // (D.H. Lee et al., An analysis of energy cost and carbon emissions reduction effects by an energy roadmap for mechanical facilities in multi-unit dwelling, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, 34(10), 2022, pp.491-502.)
- [4] 윤석규, 박진철, 공동주택에 적용된 통합배관System과 세대유닛, 대한설비공학회 학술발표대회논문집, 2020, pp.633-637. // (S.G. Yoon, J.C. Park, Integrated pipe system and pure hot water apparatus applied in apartment houses, Proceedings of the SAREK Conference, 2020, pp.633-637.)
- [5] 국토교통부, “표본 계측 데이터에 기반한 공동주택 세대/공용부 및 업무시설에서의 상세 에너지정보 제공”, <http://www.kdbeis.net/site/MainPage.do?sessionid=CDDE1DE88129DA4BC343B3F6A2205DDC>, 2022.11.20. // (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, “measure-based detailed energy data of residential household, community and office facility”, <http://www.kdbeis.net/site/MainPage.do?sessionid=CDDE1DE88129DA4BC343B3F6A2205DDC>, 2022.11.20.)
- [6] 장형문, 이규남, 정근주, 시뮬레이션에 의한 냉방-급탕 지열히트펌프 시스템 성능평가, 동력시스템공학회지, 제24권 제2호, 2020, pp.64-72. // (X. Zhang, K.N. Rhee, G.J. Jung, Simulations for the performance evaluation of ground source heat pump cooling system combined with hot water heat pump, Journal of Power System Engineering, 24(2),

- 2020, pp.64-72.)
- [7] 황유진, 정재원, 주거용 건물을 위한 냉난방 및 급탕 통합 히트펌프 시스템의 에너지 절감 가능성 분석, 한국건축환경설비학회 논문집, 제14권 제5호, 2020, pp.503-514. // (Y.J. Hwang, J.W. Jeong, Energy saving potential of air-source heat pump system for cooling, heating and hot water supply in residential buildings, Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems, 14(5), 2020, pp.503-514.)
- [8] 백승효, 센서 고장에 따른 태양열 급탕 시스템 성능 분석, 한국건축환경설비학회 논문집, 제15권 제2호, 2021, pp.166-177. // (S.H. Baek, Investigation of the effects of sensor fault on the performance of solar hot water systems, Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems, 15(2), 2021, pp.166-177.)
- [9] 국토교통부, 기계설비 기술기준, 국토교통부고시 제2021 - 851호 // (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Technical Regulation in mechanical facility, 2021)
- [10] 김성진, 신광철, 김영균, 대형 고급 주거 시설의 온열원 설비. 설비지널, 제45권 제8호, 2016, pp.34-39. // (S.J. Kim, K.C. Shin, Y.K. Kim, Heating source equipment of the high-end residence, Magazine of the SAREK, 45(8), 2016, pp.34-39.)
- [11] M. R. Ally, J. J. Tomlinson, B. T. Ward, "Water and Energy Savings using Demand Hot Water Recirculating Systems in Residential Homes: A Case Study of Five Homes in Palo Alto, California. California.", 2020.08.26.
- [12] Fine Himebuilding, "Hot-water circulation loops", <https://www.finehomebuilding.com/project-guides/plumbing/hot-water-circulation-loops>, 2022.11.20.
- [13] U.S. Green Building Council, "LEED BD+C: Homes- Efficient hot water distribution system", <https://www.usgbc.org/credits/homes-high-rise/v4-draft/eac2>, 2022.11.20.
- [14] Energy Star, "Demand Hot Water Recirculating System", https://www.energystar.gov/products/water_heaters/demand_hot_water_recirculating_system, 2022.11.20.
- [15] R. Wendt, E. Baskin, D. Durfee, Evaluation of residential hot water distribution systems by numeric simulation, Oak Ridge Nat. Lab. for U.S. Dept. Energy, 2004
- [16] F. Iglesias, P. Palensky, Profile-Based control for central domestic hot water distribution, IEEE Transactions on Industrial Informatics, 10(1), 2013, pp.697-705.
- [17] E. Weitzel, M. Hoeschele, Evaluating domestic hot water distribution system options with validated analysis models (No. DOE/GO-102014-4515), National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States), 2014.
- [18] R.H. Brazeau, M.A. Edwards, Water and energy savings from on-demand and hot water recirculating systems, Journal of Green Building, 8(1), 2013, pp.75-89.
- [19] 차민철, 여명석, 석호태, 주거건물의 개별급탕방식 환탕배관 적용에 따른 급탕성능 평가에 관한 연구, 설비공학논문집, 제19권 제12호, 2007, pp.857-864. // (M.C. Cha, M.S. Yeo, H.T. Seok, A study on the performance evaluation of recirculation system for individual hot water supply system in residential buildings, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, 19(12), 2007, pp.857-864.)
- [20] 차광석 외 8인, 서머밸브를 이용한 온수순환 방식 절수형 급탕 배관 공법에 대한 성능평가 연구, 대한설비공학회 학술발표대회논문집, 2009, pp.17-22. // (K.S. Cha et al., A study on the performance evaluation of water-saving hot water piping system using thermo valve, Proceedings of the SAREK Conference, 2009, pp.17-22.)
- [21] 이승준, 서머밸브를 적용한 절수형 급탕배관시스템의 성능 및 경제성 평가에 관한 연구, 국내석사학위논문 서울과학기술대학교, 2015, 서울 // (S. J. Lee, A study on the performance and economic evaluation for hot water-saving piping system using thermo valve, master dissertation, Seoul Science and Technology University, 2015, Seoul, Korea)
- [22] 계훈중, 급탕관의 예비 가열 시스템, 한국건설기술관리협회 기술논고 (Construction Management News), 2005. // (H.J. Gye, Pre-heating system of domestic hot water pipe, Construction Management News, 2015.)
- [23] 최태균 외 4인, 공동주택 급수급탕 이중배관의 직렬이음 최적화 모델 개발, 대한설비공학회 학술발표대회논문집, 2018, pp.446-449. // (T.K. Choi et al., A study on the development of an optimization model for the direct joint of dual piping in apartment houses, Proceedings of the SAREK Conference, 2018, pp.446-449.)
- [24] 건축기계설비공사 표준시방서, 국토교통부, 2016. // (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Standard specification for building machinery equipment construction, 2016.)
- [25] 성순경, 류형규, 설비배관 단열의 실태와 문제점, 대한설비공학회 학술발표대회논문집, 2020, pp.820-823. // (S.K. Sung, H.G. Ryu, Site problems and existing conditions of thermal insulation for mechanical system pipes, Proceedings of the SAREK Conference, 2020, pp.820-823.)
- [26] 국가기술표준원, KS L 9102, 2014 // (Korean Agency for Technology and Standards, Artificial mineral fiber thermal insulation materials KS L 9102, 2014)
- [27] 최승력, 류형규, 배관단열기준 개선을 위한 기계설비배관 설치공간의 동하계 온습도 실측 연구, 대한설비공학회 학술발표대회논문집, 2020, pp.648-649. // (S.H. Choi, H.K. Ryu, A study on the measurement of temperature and humidity of winter and summer in the mechanical space for pipes to improve pipe insulation standards, Proceedings of the SAREK Conference, 2020, pp.648-649.)
- [28] 손진국, 지역별 기상조건과 급수온도에 따른 태양열 온수공급 시스템 성능에 관한 연구, 한국태양에너지학회 논문집, 제39권 제6호, 2019, pp.41-54. // (J.G. Sohn, A study on performance of solar thermal system for domestic hot water according to the weather conditions and feedwater temperatures at different locations in Korea, Journal of the Korean Solar Energy Society, 39(6), 2019, pp.41-54.)
- [29] J. Lutz, Estimating Energy and Water Losses in Residential Hot Water Distribution Systems (No. LBNL-57199). Lawrence Berkeley National Lab.(LBNL), 2005.
- [30] 정상웅, 지역난방 공동주택에서의 급탕량 및 열 소비특성에 관한 연구: 경기도 고양시 사례연구, 국내석사학위논문 서울산업대학교, 2006. // (S.W. Jeong, Study on the characteristics of hot water supply consumption in apartment housing with district heating system : In the case study of goyang city only, master dissertation, Seoul Science and Technology University, 2006.)
- [31] 김성민, 정광섭, 김영일, 공동주택의 급탕부하 지속시간 및 부하 패턴에 관한 실증연구, 에너지공학 제21권 제4호, 2012, pp.435-443. // (S.M. Kim, K.S. Chung, Y.I. Kim, An empirical study of hot water supply patterns and peak time in apartment housing with district heating system, Journal of Energy Engineering, 21(4), 2012, pp.435-443.)
- [32] 오병길, 공동주택 급수, 급탕 사용량 및 패턴에 관한 연구, 대한설비공학회 학술발표대회논문집, 2019, pp.535-538. // (B.K. Oh, A study on the usage and pattern of water supply and hot water in apartment houses, Proceedings of the SAREK Conference, 2019, pp.535-538.)
- [33] 서울특별시 상수도사업본부, "물 절약 방법", <https://e-arisu.seoul.go.kr/water/save03.jsp>, 2022.11.20. // (Seoul water supply headquarters, "way to save the water", <https://e-arisu.seoul.go.kr/water/save03.jsp>, 2022.11.20.)
- [34] 대구광역시 상수도사업본부, "물절약과 물사랑", <https://www.dgwater.go.kr/2014/pages/intro/page.html?mc=0634>, 2022.11.20. // (Daegu water supply headquarters, "Save water & love water", <https://www.dgwater.go.kr/2014/pages/intro/page.html?mc=0634>, 2022.11.20.)
- [35] 국토교통부, 급수설비 설계기준 // (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, KDS 31 30 15:2016, 2016)
- [36] Bernier et al., Calling Python from TRNSYS with CFFI, Polytechnique Montréal, 2022
- [37] 한국도시가스협회, "도시가스요금표", <http://www.citygas.or.kr/info/charge.jsp>, 2022.11.20. // (Korean city gas association, "Price table of city gas", <http://www.citygas.or.kr/info/charge.jsp>, 2022.11.20.)
- [38] 한국수자원공사, "수도요금현황", https://www.kwater.or.kr/cust/sub04/rateconsumerPage.do?s_mid=1548, 2022.11.20. // (K-Water, "water pricing status", https://www.kwater.or.kr/cust/sub04/rateconsumerPage.do?s_mid=1548, 2022.11.20.)