



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사학위논문

온수 사용량 예측을 통한 태양열 축열조
내장형 보조열원의 에너지 사용량 저감
운영 방안

Operation Method for Reducing the Energy
Consumption of Solar Storage Embedded
Auxiliary Heater with Prediction of DHW Use

2013 년 2월

서울대학교 대학원

건축학과

남 현 민

온수 사용량 예측을 통한 태양열 축열조
내장형 보조열원의 에너지 사용량 저감
운영 방안

Operation Method for Reducing the Energy
Consumption of Solar Storage Embedded
Auxiliary Heater with Prediction of DHW Use

지도교수 김 광 우

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2013년 2월

서울대학교 대학원

건축학과

남 현 민

남현민의 공학석사 학위논문을 인준함

2013년 1월

위원장 _____ 인

부위원장 _____ 인

위원 _____ 인

국문 초록

본 연구에서는 보조열원 내장형 축열조를 연구의 대상으로 하여 축열조 내에 설치된 보조열원의 에너지 사용량을 저감하는 방안을 제시하였다.

보조열원의 설치 위치를 결정할 때는 설치 대상 건물에서 발생 가능한 부하량을 예상하기 어려운 이유로 인해 안전성을 고려해서 최대 온수 사용량을 항상 생산, 저장하는 방식을 사용해왔다. 따라서 온수의 실제 사용량 이상을 전기히터로 가열하게 되고, 전기히터로 가열된 과량의 온수를 저장함에 따라 태양열을 집열할 수 있는 낮시간 동안 축열조의 고온수가 집열 회로를 순환함에 따라 집열기의 사용 효율이 저하되는 문제가 있었다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 기존의 2-히터 축열조의 설계 방식을 이용하였다. 설정 온도에 따라 운영되는 기존 2-히터 축열조의 운영방식과 달리 본 연구에서는 온수 사용량을 예측하는 방식을 제시하였고 이 예측값에 따라 에너지 효율적으로 보조열원을 운영하는 방안을 제시하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 보조열원 내장형 축열조의 적용 시 발생하는 문제에 대하여 국외의 에너지 효율적인 설계사례와 운영 방법에 대해 고찰함으로써 온수 사용량의 예측 최적 제어 시, 태양열 시스템의 에너지 효율적인 운영 및 보조열원 에너지 사용 저감이 가능함을 제시하였다.

(2) 기존 연구에서 제시하고 있는 온수 사용량 변화의 주요 영향 인자인 월 변화, 요일 변화에 따른 온수 사용량의 변화를 대학교내 체육시설의 온수 사용량에 대한 실측 데이터와 비교하였다. 이를 통해, 제시된 영향 인자들 중에서 월의 변화, 주중-주말

의 변화에 따라 최대 사용량이 발생하는 시각과 양이 유사한 패턴을 도출할 수 있는 것으로 판단되었다.

(3) 도출된 패턴에 의한 예측값은 실제 온수 사용량과 오차가 있었다. 따라서 예측값과 실제 사용량 사이에 발생하는 오차의 특징을 분석하였다. 오차 분석 결과를 바탕으로 온수 공급의 안전성을 확보하기 위해 해당 시각의 실제 사용량을 이용해서 예측값을 수정하는 방안을 제시하였다.

(4) 패턴에 의한 일일 단위의 예측과 실측값을 이용한 예측값의 실시간 수정 방안을 이용하여 해당 시각의 온수 사용량이 상부 히터의 온수 생산량을 초과하는지 여부를 실시간으로 판단 가능하도록 하였다. 해당 시각의 사용량이 상부 히터 생산량을 초과한다고 판단될 경우 하부 히터를 작동하여 온수 공급의 안전성을 유지하는 방안을 제시하였다.

(5) 제안된 온수 사용량 예측 방법과 히터 운영 방법을 일반적인 방식으로 설계된 2-히터 축열조에 적용하고 실제 온수 사용량을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 공급수 온도를 확인하여 제시된 방안은 안정적으로 온수를 공급가능하다고 판단하였다. 기존 보조열원 내장형 축열조에 비해 축열조 내부 온도를 낮게 유지하여 태양열 집열 효율을 개선하고 최종적으로 보조열원의 에너지 사용량을 저감할 수 있다고 판단되었다.

주요어 : 보조열원 내장형 축열조, 온수 사용량 패턴, 태양열 급탕 시스템

학 번 : 2011- 20586

목 차

제 1 장 서 론	1
1.1 연구의 배경 및 목적	1
1.2 연구의 범위 및 방법	3
제 2 장 예비적 고찰	5
2.1 태양열 급탕 시스템의 기존 용량 산정법 및 운영 방안	6
2.1.1 태양열 급탕 시스템의 기존 용량 산정법	6
2.1.2 태양열 급탕 시스템의 기존 운영 방안	14
2.1.3 기존 설계 방법 및 운영 방안을 보조열원 내장형 축열조에 적용 시 문제점	18
2.2 축열조의 에너지 효율적인 설계 및 운영에 관한 기존 연구	22
2.3 소결	25
제 3 장 실측 자료를 이용한 온수 사용량 패턴의 도출	26
3.1 개요	28
3.2 온수 사용량 패턴 도출에 고려되는 영향 인자	31
3.3 실측 자료를 이용한 온수 사용량 패턴의 도출	37
3.4 소결	43
제 4 장 온수 사용량 예측을 이용한 보조 히터 운영 방안	45
4.1 개요	45
4.2 온수 확보 안전성을 고려한 온수 사용량 예측	46
4.3 온수 사용량의 예측값을 이용한 보조 히터 운전 방안 도출	64
4.4 소결	74
제 5 장 보조 히터 운전 방안의 검증	76

5.1	검증 개요	76
5.2	시뮬레이션 모델링 대상 시스템의 구성 및 용량 산정	77
5.3	시뮬레이션 결과 및 분석	81
5.4	소결	87
제 6 장 결 론		88
참고 문헌		91
ABSTRACT		93

표 목차

<표 2.1> 건물의 종류별 급탕량 (60℃ 기준)	8
<표 2.2> 각종 건물에서의 기구별 급탕량 (L/1개·h)	10
<표 2.3> 급탕 부하 패턴에 따른 축열조 용량	13
<표 2.4> 태양열 집열 매체 순환 펌프의 동작 방법	14
<표 2.5> 온수의 사용 온도	17
<표 3.1> 온수 사용량 측정 기기 및 측정 프로그램	30
<표 3.2> 월별 온수 사용량 변화(ℓ)	32
<표 3.3> 월별 시수 온도 분포 (서울)	32
<표 4.1> 실측 대상 건물의 축열조 설계 내용	47
<표 4.2> 축열조 용량과 히터 가열 능력에 따른 온수 공급량	48
<표 4.3> 주중, 주말 요일의 예측값-실제값 초과율 평균	51
<표 4.4> 합산 간격에 따른 실제 1시간 사용량과의 표준편차 비교	56
<표 5.1> 태양열 급탕 시스템의 구성 요소별 시뮬레이션 입력값	80
<표 5.2> 기존안 대비 제안된 히터 운영 방안의 에너지 성능 비교	86

그림 목차

[그림 2.1] 저탕 용량과 열원의 가열 능력간의 관계 예시	11
[그림 2.2] 집열기 입출수 온도차에 따른 순환펌프의 동작 상태	15
[그림 2.3] 보조열원 내장형 축열조의 구조	20
[그림 2.4] 두 개의 전기히터를 사용하는 축열조 모델	22
[그림 3.1] 기존 예측 시스템의 구조	29
[그림 3.2] 본 연구에 적용된 온수 사용량 예측 시스템의 구조	29
[그림 3.3] 월별 시간당 온수 사용 패턴 비교 (주중)	33
[그림 3.4] 요일별 일일 평균 온수 사용량	35
[그림 3.5] 요일별 일일 온수 사용 패턴	36
[그림 3.6] 월별 온수 사용량 패턴 비교 (주말)	36
[그림 3.7] 월말-월초의 사용 패턴 변화 비교 (8월말-9월초)	38
[그림 3.8] 월말-월초의 사용 패턴 변화 비교 (9월말-10월초)	39
[그림 3.9] 월말-월초의 사용 패턴 변화 비교 (10월말-11월초)	39
[그림 3.10] 월 전체 평균 온수 사용 패턴과 단기 온수 사용량 패턴 비교 (8월)	40
[그림 3.11] 월 전체 평균 온수 사용 패턴과 단기 온수 사용량 패턴 비교 (9월)	40
[그림 3.12] 월 전체 평균 온수 사용 패턴과 단기 온수 사용량 패턴 비교 (10월)	41
[그림 3.13] 기간별 평균값과 실제 사용량과의 오차 제곱합 비교	42
[그림 4.1] 설계된 2-히터 축열조 형상	47
[그림 4.2] 주중 예측값과 실제 사용량과 값의 차이 비교	49
[그림 4.3] 주말 예측값과 실제 사용량과 값의 차이 비교	50
[그림 4.4] 주중요일 실제 사용량의 예측값에 대한 초과율 최대값	52
[그림 4.5] 주말 요일 실제 사용량의 예측값에 대한 초과율 최대값	52
[그림 4.6] 주중요일의 평균 온수 사용량과 시간별 초과율 2이상 발생 회수	53
[그림 4.7] 주중요일의 실제 사용량의 예측값 초과 연속 시간의 발생 회수	54
[그림 4.8] 온수 사용량 실측값의 20분 간격 합산값과 1시간 사용량 비교	57

[그림 4.9] 온수 사용량 실측값의 15분 간격 합산값과 1시간 사용량 비교	57
[그림 4.10] 온수 사용량 실측값의 10분 간격 합산값과 1시간 사용량 비교	58
[그림 4.11] 온수 사용량 실측값의 5분 간격 합산값과 1시간 사용량 비교	58
[그림 4.12] 온수 사용량 예측 방법의 전체 흐름도	61
[그림 4.13] 온수 사용량 예측 결과 예시	63
[그림 4.14] 실측 온수 사용량 데이터를 이용한 예측값의 수정 예시	63
[그림 4.15] 하부 히터 운영 방안	64
[그림 4.16] 상,하부 히터 1시간 온수 생산량 초과 대비 온수 생산 필요성 판단 프로세스	65
[그림 4.17] 현재 시각 사용량 대비 온수 생산 필요성 판단 프로세스	70
[그림 5.1] 시뮬레이션 모델링 대상 태양열 급탕 시스템의 구성	77
[그림 5.2] TRNSYS 17을 이용한 태양열 급탕 시스템의 모델링	78
[그림 5.3] TRNSYS 시뮬레이션에 이용된 2-히터 축열조의 모델링	78
[그림 5.4] TRNSYS 시뮬레이션에 이용된 기존 보조열원 내장형 축열조의 모델링	79
[그림 5.5] 개선 방안을 적용한 축열조의 최상위 노드 온도 변화	82
[그림 5.6] 기존 보조열원 내장형 축열조 최상위 노드 온도 변화	82
[그림 5.7] 개선안의 축열조 내부 온도 분포	83
[그림 5.8] 기존안의 축열조 내부 온도 분포	83
[그림 5.9] 일사량 분포	84

제 1 장 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

태양열 급탕 시스템은 여타 신재생 시스템에 비해 적은 투자비로 건물에 설치할 수 있어 주택을 포함한 다양한 시설에서 이용되고 있다. 특히 태양열 급탕 시스템의 경우 연중 급탕 부하의 분포가 고르고 비교적 저온을 사용하는 특징을 가진 시설에 적용될 때 태양열의 이용 효율이 높아 이와 같은 부하 분포를 가진 목욕탕이나 수영장, 운동시설 등에서 많이 적용되고 있다.

태양열 급탕 시스템은 시스템의 구성이나 운영에 따라 이용 효율에서 큰 차이를 보이는데 시스템의 구성 요소 중 축열조는 태양으로부터 집열된 에너지를 저장하였다가 급탕 부하가 발생할 때 전달하는 역할을 담당함으로써 열에너지의 수요와 공급 사이에서 발생하는 시간적, 양적 차이를 극복하는 매우 중요한 역할을 하는 요소이다. 따라서 축열조의 설계와 운영에 의해 태양열 급탕 시스템의 효율에 큰 영향을 미치는 요소이다. 한편 태양열 급탕 시스템은 기상에 따라 집열량이 변할 수 있기 때문에 반드시 보조열원을 이용한 저장조와 결합하여 시스템을 구성한다. 태양열 급탕 시스템의 구성은 태양 집열량을 저장하는 축열조와 보조열원이 설치된 저장조를 따로 두어 직렬 연결하는 방안이 가장 에너지 효율적이다. 하지만 중·소규모의 태양열 급탕 시스템의 경우 탱크 설치의 공간상의 문제, 투자비 증가 등의 이유에서 보조열원을 태양열 축열조 내부에 설치해 하나의 탱크로써 태양열 축열조와 저장조 기능을 수행하도록 하고 있다. 이와 같이 보조열원을 축열조 내부에 설치한 축열조를 보조열원 내장형(일체형) 축열조라고 하며 보조열원이 설치된 위치에 따라 태양열 급탕 시스템의 효율에 큰 영향을 미치는 특징을 가진다.

보조열원의 설치 위치를 결정할 때는 설치 대상 건물에서 발생 가능한 부하

량을 예상하기 어렵기 때문에 기존에 제시된 용량 기준을 참고하여 최대 부하를 담당하도록 설계된다. 탱크의 설치 공간에 제약이 있는 경우에는, 온수 공급의 안전성이 태양열의 축열 기능보다 중요하므로 보조열원을 통해 가열되는 저탕조 용량의 확보를 우선하여 설계된다. 그런데 예상했던 온수 사용량에 비해 건물의 실제 온수 사용량이 적거나, 특정 짧은 시간대에 사용량이 집중되는 시설의 경우, 온수의 실제 사용량 이상을 보조열원으로 가열하고 저장하게 된다. 이에 따라 태양열을 집열할 수 있는 낮 시간 동안에도 이미 보조열원에 의해 가열된 고온수는 집열 회로를 순환하면서 집열기의 사용 효율을 저하시킨다.

이러한 문제는 필요한 양만큼의 온수만을 사용 시점 이전에 생산·저장함으로써 해결 가능하다. 이를 위해서는 시간에 따른 온수 사용량의 예측이 가능해야 한다. 하지만 어떠한 예측 방법도 매 시간 정확하게 실제 대상을 예측할 수 없다. 축열조는 항상 온수를 안정적으로 공급 가능해야 하는 조건을 가지며 이 조건은 축열조의 보조열원 에너지 효율성 개선에 우선하는 목표이다.

따라서 본 연구에서는 2-히터 축열조의 기존 설계 방식을 적용하고 축열조의 상부 히터를 이용해서 축열조 상부 저장 공간의 온수를 항상 급탕 설정 온도로 유지하는 기존의 히터 운영 방식을 적용하여 상부 히터의 온수 생산량 이하의 부하를 처리하도록 한다. 한편, 설정 온도를 기준으로 상부 히터가 설정 온도 도달 시에 종속적으로 하부 히터를 작동하였던 기존의 운전 방식과 달리 본 연구에서는 온수 사용량의 예측 방법을 도출하여 상부 히터 위치의 온도와 함께 예측된 온수 사용량을 기준으로 상부 히터를 초과하는 시각에 대해서 하부히터를 작동하여 필요한 만큼의 온수를 추가 생산하는 방안을 제시하고자 하였다. 이로써 상부 히터만으로 온수 공급이 가능한 구간 동안에는 상부 온도가 설정 온도에 도달하였더라도 하부 히터의 동작을 중지하여 축열

조 하부 온도를 낮게 유지하고자 하였다. 이로써 집열기의 사용 효율을 개선하여 태양열 집열량을 증대함에 따라 결과적으로 보조열원의 사용량을 줄일 수 있도록 하였다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구는 중,소규모 태양열 급탕 시스템을 이용하는 시설 중 연중 고온 부하를 가진 목욕탕, 체육시설의 샤워시설에 적용될 수 있는 보조열원 내장형 축열조의 보조열원이 소비하는 에너지의 사용량을 저감할 수 있는 운영 방안을 제시한다. 이를 위해, 실시간 온수 사용량을 이용하여 온수 사용량을 예측하는 방법에 대해 도출하였고 도출된 예측 사용량에 의해 보조열원이 운영될 수 있는 방안을 마련하였다. 본 연구의 방법을 순서에 따라 정리하면 다음과 같다.

(1) 태양열 급탕 시스템의 기존 설계 및 운영 방안 고찰

축열조와 저탕조의 기존 설계 및 운영 방안을 고찰하여 본 연구의 대상이 되는 보조열원 내장형 축열조에 기존의 저탕조 설계 방식이 적용될 경우 최대 부하 기준으로 용량이 산정됨으로써 오프피크 기간에는 보유중인 과량의 온수로 인한 태양열 시스템 효율 저하 문제를 제기하였다. 이러한 문제에 대해 국외의 에너지 효율적인 축열조 설계 사례와 운영 방법에 대해 고찰함으로써 온수 보유량을 가변화할 수 있는 2-히터 축열조의 설계 방식과 온수 사용량의 예측을 통한 보조 열원 운영 방안의 연구 가능성을 제시한다.

(2) 실측 자료를 이용한 온수 사용량 패턴의 도출

기존의 온수 사용량 패턴 도출 방법에서 제안된 기본적인 가정 요인들을 알아보고 실측된 온수 사용량 데이터를 이용하여 적용 타당성을 검토한다. 이후

적용 타당성을 가진 인자들을 바탕으로 온수 사용량 패턴을 도출하는 방안
에 대해 제시한다.

(3) 온수 사용량 예측을 이용한 보조 히터 운영 방안 도출

온수 사용량 실측 대상 시설에 대하여 기존의 2-히터 축열조 설계 방식을
적용하여 보조열원 내장형 축열조를 설계한다. 앞에서 도출된 온수 사용량 패
턴과 실시간으로 측정되는 온수 사용량 데이터를 이용하여 설계된 축열조 내
부의 보조열원의 에너지 효율적인 운영 방법에 대하여 도출한다.

(4) 도출된 보조 히터 운전 방안의 검증

도출된 온수 사용량 예측을 이용한 보조 히터의 운영 방안의 적용 타당성에
대해 동적 해석 시뮬레이션 프로그램인 TRNSYS를 이용하여 검증한다. 적용
타당성의 판단 기준으로써 도출된 보조 히터의 운전 방안을 적용 시 온수 공
급의 안전성과 보조열원 일체형 축열조의 기존 설계·운영 방안에 대비하여
에너지 효율성의 개선 여부를 평가한다.

제 2 장 예비적 고찰

태양열 급탕 시스템은 건물에서 발생하는 급탕 부하를 태양으로부터 흡수한 열에너지를 이용하여 처리하는 시스템을 말한다. 이때 축열조는 태양으로부터 집열된 에너지를 저장하였다가 유용한 열에너지를 부하로 전달하는 역할을 담당함으로써 열에너지의 수요와 공급 사이에 발생하는 시간적, 양적 차이를 극복하는 매우 중요한 역할을 하고 있다. 한편, 집열량은 기상에 따라 가변적이므로 항상 안정적으로 집열량 이상의 급탕부하에 대비하기 위해서는 최대부하를 담당할 수 있는 저탕조와 보조열원을 추가적으로 설치해야 한다. 그러나 공간적, 경제적, 미적인 이유에서 저탕조를 따로 설치하지 않고 축열조 내부에 보조열원을 설치하여 하나의 탱크로써 저탕조와 축열조 기능을 동시에 수행하는 경우에 에너지 낭비를 초래할 수 있다.

본 장에서는 국내의 태양열 축열조와 급탕용 저탕조의 기존 설계방법 및 운영방법에 대한 문헌을 고찰함으로써 기존의 설계 및 운영 방법이 본 연구의 대상이 되는 보조열원 내장형 축열조에 적용되었을 경우 축열조 내의 과도한 온수 저장량으로 인한 태양열 집열효율 손해를 문제점으로 제기하였다. 또한 보조열원 내장형 축열조의 적용 시 발생하는 문제에 대하여 국외의 에너지 효율적인 설계사례와 운영 방법에 대해 고찰함으로써 태양열 시스템의 에너지 효율적인 운영을 위해 급탕 부하의 예측의 필요성에 대하여 언급하였다.

2.1 태양열 급탕 시스템의 기존 용량 산정법 및 운영 방안

국내 태양열 급탕 시스템의 설계 및 운영 방안에 대해 제시하고 있는 대표적인 문헌은 지식경제부의 “태양열 설비 시스템 표준화” 기준이다. 태양열 시스템의 설계 및 운용 방법의 결정에 앞서 급탕량의 산정과 이에 따른 보조열원 및 저탕조의 설계와 관련해서는 2007 ASHRAE Handbook-HVAC Applications Ch.49 Service Water Heating의 자료를 일부 참고하여 적용되고 있다. 본 절에서는, 태양열 급탕 시스템의 여러 설계 요소 중에서 보조열원의 에너지 사용량에 영향을 크게 미치는 축열조와 저탕조에 관한 설계와 운영 방안에 대해 고찰한다. 먼저 급탕부하의 산정 방법에 대해 고찰하고, 이에 대응하는 태양열 축열조, 저탕조, 보조열원의 설계 및 운영 방안에 대해 고찰한다. 그리고 기존의 설계 및 운영 방안을 본 연구의 대상이 되는 보조열원 내장형 축열조에 적용했을 경우 문제점에 대해 제기하였다.

2.1.1 태양열 급탕 시스템의 기존 용량 산정법

태양열 급탕 시스템의 용량의 산정을 위해서는 먼저 건물에서 사용하는 급탕량의 산정하고 이에 대비할 수 있도록 저탕조와 열원의 용량을 산정하게 된다. 그리고 집열기의 설치 가능 면적과 투자비를 고려하여 건물의 급탕 사용량에 대한 일정 비율을 태양열을 이용하여 담당하도록 설계되고 있다.

(1) 급탕 사용량의 산정에 따른 저탕조, 열원의 용량 산정

ASHRAE Handbook-HVAC Applications Ch.49 Service Water Heating에서는 급탕 설비를 계획할 때 해당 건물의 용도, 급탕 사용량, 피크의 지속시간, 온수 사용처에 따른 공급 온도를 정확히 파악하여 이를 반영하여야 한다

고 제안하고 있다. 이 때 급탕 사용량은 건물의 용도에 따라 다르며, 하루 동안에도 시간대에 따라 차이가 크고, 계절에 따라 영향을 받으므로 다양한 상황에 대한 고려가 필요하다. 따라서 예외적인 상황을 제외하고 일반적으로 적용되고 있는 급탕 사용량의 산정방법을 제시한다면 건물의 사용인원에 의해 결정하는 방법과 설치기구의 종류 및 개수에 의해 결정하는 방법이 있다.¹⁾

(가) 사용인원에 의한 방법

건물을 이용하는 인원이 예상 가능할 경우, <표 2.1>과 같이 건물 종류에 따른 일일 사용량 자료를 이용하여 급탕량을 구하는 방법이다. 인원에 의한 급탕량 산정방법에 관한 계산은 식(2.1)~식(2.4)와 같다.

$$Q_d = N \cdot q_d \quad (2.1)$$

$$Q_h = Q_d \cdot q_h \quad (2.2)$$

$$V = Q_d \cdot v \quad (2.3)$$

$$H = \frac{4.19}{3600} Q_d r (t_h - t_c) \quad (2.4)$$

여기서,

- N : 급탕 대상인원, 인
- H : 열원의 가열 능력, kW
- Q_d : 1일최대급탕량, ℓ/d
- Q_h : 1시간최대급탕량, ℓ/h
- t_c : 시수온도, °C
- t_h : 급탕설정온도, °C
- V : 저탕용량, ℓ

q_d, q_h, v, r 은 <표 2.1>에서 제시

1) 서승직, 『건축 설비 계획』, 일진사 p.87, 2008

<표 2.1> 건물의 종류별 급탕량 (60℃ 기준)²⁾

건물의 종류	1일 1인마다의 급탕량 (<i>l/d</i>)	1일 사용량에 대해 필요한 1시간마다의 최대치 비율	피크로드 지속시간	1일 사용량에 대한 저탕비율	1일 사용량에 대한 가열능력 비율
	<i>q_c</i>	<i>q_h</i>	<i>h</i>	<i>v</i>	<i>r</i>
주택·아파트·호텔 등	75~150	1/7	4	1/5	1/7
사무소	7.5~11.5	1/5	2	1/5	1/6
공장	20	1/3	1	2/5	1/8
음식점(레스토랑)	-	-	-	1/10	1/10
음식점(레스토랑) 1일3식	-	1/10	8	1/5	1/10
음식점(레스토랑) 1일1식	-	1/5	2	2/5	1/6

- (주) 1. 급탕 공급 온도 60℃에 대한 값이다.
 2. 호텔에서의 1일 필요량과 특성은 호텔의 형식에 따라 달라진다. 고급 호텔에서는 피크로드가 낮지만 1일 사용량이 비교적 많다. 일반 호텔은 피크로드는 높으나 1일 사용량은 적다.
 3. 주택이나 아파트에서 식기 세척기나 세탁기가 있는 경우는 식기 세척기 1대마다 60 L, 세탁기 1대마다 150 L를 추가한다.

2) Ibid. p.88

(나) 설치 기구수에 의한 방법

사용 인원수를 파악하기 힘든 경우 <표 2.2> 건물에서의 기구별 급탕량 자료³⁾를 참조하여 건물 용도에 따른 각 기구별 1시간 동안의 최대 온수 사용량을 구하고 그 누계에 동시 사용율을 곱하여 전체 건물 내 설치된 전체 기구수에 따른 최대 급탕량을 산정한다. 가열기 능력은 1시간 동안의 최대 온수 사용량에 온수와 시수의 온도차를 곱해서 구하고, 일반적으로 6시간~8시간동안 저탕조의 온수를 모두 생산할 수 있는 범위에서 결정한다. 저탕 용량은 1시간 마다의 최대 온수 사용량에 저탕용량계수를 곱하여 구한다.⁴⁾

$$Q_h = \sum e q F \quad (2.5)$$

$$V = Q_h \cdot v' \quad (2.6)$$

$$H = \frac{4.19}{3600 h} V (t_h - t_c) \quad (2.7)$$

여기서,

- e : 기구별 동시 사용률, %
- q : 기구별 1시간 급탕량, $\ell/h \cdot$ 개
- Q_h : 1시간 최대 온수 사용량, ℓ/h
- F : 위생기구수, 개
- V : 저탕용량, ℓ
- v' : 저탕용량 계수
- H : 열원의 가열 능력, kW
- t_c : 시수온도, $^{\circ}\text{C}$
- t_h : 급탕설정온도, $^{\circ}\text{C}$
- h : 가열시간, 시 (일반적으로 6~8시간)

3) Ibid. pp.87-88

4) ASHRAE, 『ASHRAE Handbook-HVAC Applications』, 2007, pp 49.18-49.22

<표 2.2> 각종 건물에서의 기구별 급탕량 (L/1개·h)

건물종류 기구종류	개인 주택	일반 주택	사무 소	호 텔	병 원	공 장	학 교	YMCA	체 육 관
개인 세면기	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6
일반 세면기	-	15	23	30	23	5.5	57	30	30
양식 욕조	76	76	-	76	76	-	-	114	114
샤워	114	114	114	284	284	850	850	850	850
부엌 싱크	38	38	76	114	76	76	76	76	-
급식 싱크	19	19	38	38	38	-	38	38	-
식기세척기*1	57	57	-	190~ 760	190~ 570	75~ 380	76~ 380	76~ 380	-
청소 싱크	57	76	57	114	76	76	76	76	-
세탁 싱크	76	76	-	106	106	-	-	106	-
하바드 탱크	-	-	-	-	2270	-	-	-	-
수치료용 샤워	-	-	-	-	1520	-	-	-	-
동시사용율	0.30	0.30	0.30	0.25	0.25	0.40	0.40	0.40	0.40
저탕용량계수*2	0.70	1.25	2.00	0.80	0.60	1.00	1.00	1.00	1.00

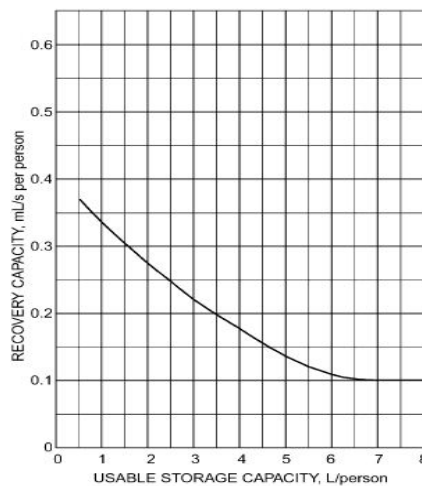
*1) 사용하는 기구의 종류를 아는 경우에는 그 기구에 대한 제조사의 자료에 의해 산출해야 한다.

*2) 열원을 충분히 얻는 경우에는 계수를 감해도 좋으나, 그 분량의 가열능력을 크게 할 필요가 있다.

(다) 저장 용량과 열원의 가열 능력간의 관계

온수를 적절히 공급하기 위해서는 최대 부하 발생 시에도 온수를 사용하는 말단 기구까지 공급된 에너지의 총량이 맞아야 한다. 이를 위해서는 온수 사용에 의해 발생하는 최대 부하를 충족할 만큼 열원의 가열능력을 크게 하거나 상대적으로 작은 가열능력을 가진 열원을 사용하는 경우에는 최대 온수 사용량을 감당할 수 있는 부피의 저장조를 사용하여야 한다.

일반적으로 열원의 가열능력과 저장조의 용량 사이에는 반비례하는 관계가 있어서 열원의 가열능력을 크게 하면 저장조 용량을 작게 할 수 있고, 열원의 가열능력을 작게 하면 저장 용량은 크게 해야 한다. 따라서 체육관이나 일부 호텔, 세탁소, 목욕탕, 스포츠 센터 등과 같이 온수 사용 기구의 동시 사용율이 높은 건물의 경우에는 짧은 시간동안 다량의 온수가 사용되기 때문에 최대 부하와 가열부하가 거의 일치한다. 따라서 열원의 가열능력을 크게 하고 저장조는 소용량으로 설계한다. 반대로 주택, 아파트, 사무소 등과 같이 온수 사용 기구의 동시 사용율이 낮은 건물에서는 일반적으로 최대부하의 지속시간이 짧거나 양이 적기 때문에 가열기능력을 작게하고 저장조의 용량을 크게 한다.



[그림 2.1] 저장 용량과 열원의 가열 능력간의 관계 예시⁵⁾

5) Ibid. 49.11

(2) 태양열 축열조 용량 산정 방법

지식경제부에서 제공하는 태양열 설비 시스템 표준화 자료에 따르면, 국내에서 태양열 시스템의 설계에 이용되는 지표로써 다음 식(2.8)으로 계산하는 태양열 의존율을 제시하고 있다. 태양열 급탕 시스템을 설치하고자 할 경우에는 앞서 계산된 급탕 부하에 대하여, 특히 월 평균 부하량을 기준으로 하여 일일 발생하는 평균 부하에 대비하여 소비자가 결정한 태양열 의존율에 따라 해당 열량을 하루 동안 평균적으로 생산할 수 있는 집열 면적을 정한다. 결정된 집열 면적에서 생산된 집열량을 저장 가능하면서도 부하의 형태를 고려하여 에너지 효율적이고 경제성을 가질 수 있도록 축열조의 용량을 정하도록 한다. 예를 들어 태양열을 집열하고 있는 주간시간대에 부하가 많으면 축열조의 용량은 작아질 수 있고, 야간에 부하가 집중된다면 축열조의 용량은 크게 해야 한다고 제안하고 있다. 대부분의 경우는 집열기 면적 당 필요한 축열조의 용량을 제시하는 것이 일반적이다. 온수 급탕의 경우에 집열기 단위 면적당 약 50L/m²를 기준으로 산정하는 것이 보통이며 부하에 따라 다음 <표 2.3>를 참고하여 축열조 용량을 결정하도록 하고 있다.⁶⁾

$$f = \frac{Q_{load} - Q_{aux}}{Q_{load}} \times 100 = \frac{Q_{sol}}{Q_{load}} \times 100 \quad (2.8)$$

여기서,

- Q_{load} : 총 급탕부하, kWh
- Q_{aux} : 보조열원으로부터 공급된 열량, kWh
- Q_{sol} : 태양으로부터 공급된 열량, kWh

6) 지식 경제부, 『태양열설비 시스템 표준화』, pp.22, 2008

<표 2.3> 급탕 부하 패턴에 따른 축열조 용량

부하 패턴	필요 축열조 용량 (단위 집열 면적 당)
7일/주 주간 일정부하	20-30 ℓ/㎡
5일/주 주간 일정부하	40-45 ℓ/㎡
야간 일정부하	70-82 ℓ/㎡

한 편, 축열조의 열적 성능의 향상을 위해서는 축열조 내 온도 성층화가 잘 이루어져야 하는데, 이를 위해 축열조로 유입 또는 축열조로부터 유출되는 모든 배관에 디퓨저를 설치하는 것을 제안하고 있지만 현재 국내에서 시판되고 있는 대부분의 제품의 경우 설치 비용의 이유로 축열조 내부에 디퓨저를 설치하는 경우는 드물다. 디퓨저 이외에도 온도 성층화의 축진을 위해 축열조는 가능한 수직형이 되도록 하고 종횡비를 크게 하도록 제안하고 있다. 이 때, 일반적으로 성층화를 위한 축열조의 세로길이를 가로길이의 비는 2.5 : 1 이상을 유지하는 것이 적합하다고 알려져 있다.⁷⁾

7) German Solar Energy Society, 『Planning and Installing Solar Thermal Systems: A Guide for Installers, Architects and Engineers, 2nd ed.』, earthscan, 2010 p.38.

2.1.2 태양열 급탕 시스템의 기존 운영 방안

(1) 태양열 축열조의 운영 방안

태양열 설비 시스템 표준화 자료에서는, 태양열 급탕 시스템에서의 제어는 일반적으로 집열 매체의 집열기 입수온도와 집열기 출수온도의 차이를 측정하여 순환펌프의 구동을 제어하는 차온 제어 방식을 제안하고 있으며 일반적으로 적용되고 있다. 시스템별로 현장 상황에 맞추어 집열기 입수온도와 출수온도의 온도 차이 값을 설정하여 순환 펌프의 ON, OFF의 기준으로 설정한다. 이 때, 정지해 있는 집열매체의 순환펌프를 동작시키는 기준이 되는 입출수 온도 차이 값을 ΔT_{on} 이라고 하며, 동작 중인 순환 펌프를 정지시키는 기준이 되는 입출수 온도 차이 값은 ΔT_{off} 으로 정의하여 ΔT_{on} , ΔT_{off} 값에 따른 순환펌프의 동작 방법은 다음<표 2.4>와 같다.⁸⁾

<표 2.4> 태양열 집열 매체 순환 펌프의 동작 방법

순환 펌프가 정지중일 때		순환 펌프가 동작중일 때	
$T_{out} - T_{in} < \Delta T_{on}$	순환펌프 계속 정지	$T_{out} - T_{in} > \Delta T_{off}$	순환펌프 계속 동작
$T_{out} - T_{in} > \Delta T_{on}$	순환펌프 동작	$T_{out} - T_{in} < \Delta T_{off}$	순환펌프 정지

여기서,

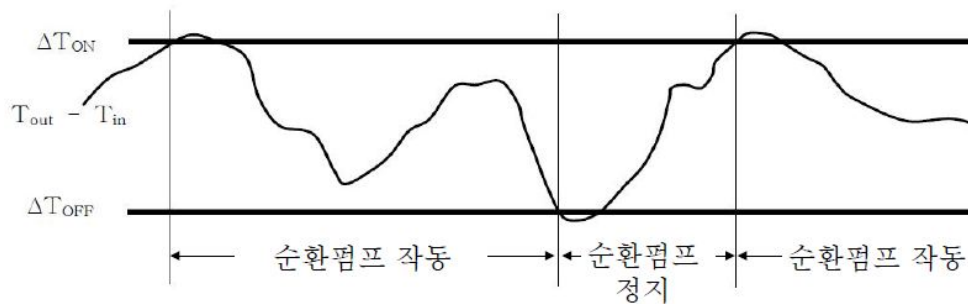
- T_{in} : 집열기 입수 온도, °C
- T_{out} : 집열기 출수 온도, °C
- ΔT_{on} : 순환펌프를 동작 기준이 되는 입출수 온도 차이 값, °C
- ΔT_{off} : 순환펌프를 정지 기준이 되는 입출수 온도 차이 값, °C

8) 지식 경제부, op. cit. pp.17-18.

[그림 2.2]를 참고하여 태양열 급탕 시스템에서 순환 펌프의 작동, 정지하는 과정의 예시는 다음과 같다. 순환펌프가 정지해 있는 상태에서 태양열이 집열기에 입사되면 집열기 온도는 점차 상승하고, 집열량에 따라 집열기의 출수온도가 상승하게 된다. 따라서 집열기의 입출수의 온도차가 커지게 되고, 이 값이 설정한 ΔT_{on} 값 보다 커지게 되면 순환펌프가 작동하여 집열 과정이 진행된다.

순환펌프가 동작하여 집열기의 열이 집열매체로 전달되거나 집열관에 입사되는 태양열이 적어지면, 집열기 입출수 온도차는 점차 작아지게 되어 이 값이 설정한 ΔT_{off} 의 값보다 작아지게 되면 순환 펌프가 정지하여 집열 과정을 멈추게 된다.

집열기에 입사되는 태양 집열량이 많은 하절기에는 ΔT_{on} 을 높게 설정하여 집열기 입출수 온도차가 크게 벌어지는 경우에만 펌프를 동작하도록 함으로써 펌프의 동작과 정지가 빈번하게 반복되는 것을 피할 수 있도록 한다. 반대로 겨울철에는 ΔT_{on} 을 낮게 설정하여 집열 가능한 열을 최대화할 수 있게 한다.⁹⁾



[그림 2.2] 집열기 입출수 온도차에 따른 순환펌프의 동작 상태

9) Ibid. pp.17-18.

(2) 저탕조의 운영 방안

ASHRAE Handbook에서는 급탕 설정 온도로써 55~60℃를 제시하고 있으며 이용자가 온수와 시수를 혼합하여 적당한 온도로 만들어 사용하도록 제안하고 있다. 저탕조의 물을 급탕 설정 온도까지 가열하는 방식은 보일러와 저탕조를 직결하여 순환 가열하는 직접가열식과, 저탕탱크 내에 가열코일을 설치하여 코일에 증기 또는 고온수 등의 열원을 통하여 탱크내의 물과 열교환시켜 가열하는 간접가열식이 있다.¹⁰⁾

본 연구에서 다루고 있는 전기히터를 열원으로 사용하는 경우는 간접 가열식에 해당하며 전기히터의 작동은 저탕조 내에 설치된 온도 센서를 이용하여 급탕 설정 온도보다 낮은 경우에는 히터를 켜고, 설정 온도에 도달하면 히터가 꺼지도록 제어하고 있다.

온수의 생산에 추가적으로 고려할 사항으로, 피부는 52℃의 온수에 3분 이상 접촉되어 있으면 화상을 입기 때문에 공급수의 온도가 너무 높을 경우에는 화상의 위험이 있다는 점이다. 반대로 급탕 공급 온도를 낮추는 경우 시수와 혼합 시, 다량의 온수가 필요하게 되어 저탕조 용량이 커져 비경제적일 수 있다고 제안하고 있다. 순환식 급탕 설비의 급탕온도는 샤워 등으로부터 발생하는 에어러졸이 폐에 들어가 일으키는 레지오넬라증(재향균인병)의 원인균인 레지오넬라속균의 번식을 피하기 위하여 55℃이하로 공급하지 않도록 제안하고 있다. 한편 영업용의 접시세척기와 같이 일반적인 급탕온도 보다 높은 온도를 필요로 하는 경우에는 사용기기에 부스터 히터를 설치하여 사용하도록 제안하고 있다. 온수의 사용 용도별 적정 공급수 온도를 고려가 필요하며 <표 2.5>의 데이터를 참고하여 운영한다. ¹¹⁾

10) 서승직, op. cit. p.92

11) ASHRAE, op. cit. p 49.10-49.11

<표 2.5> 온수의 사용 온도

용 도	사 용 온 도 [℃]
음료용	85~90 (실제로 마시는 온도 50~55)
목욕·샤워	42~45
세면·수세용	35~40
면 도	45~50
주 방	40~45 (접시 세척기 : 80)
세 탁	명주 및 모직물 : 33~37(기계 세탁의 경우는 38~49) 린넨 및 면직물 : 49~52 (기계 세탁의 경우는 60)
물치료 목욕	위장 장애 : 40~43 호흡질환, 고혈압증 : 36~40 호흡기질환, 신경마비 : 40~42
욕내 수영장	일반적으로는 25~28 (겨울철은 30 전후, 경기용 수영에 사용하는 경우는 25 전후)
차고 세차용	24~30

2.1.3 기존 설계 방법 및 운영 방안을 보조열원 내장형 축열조에 적용 시 문제점

축열조의 열성능에 영향을 미치는 주요 인자에 대해 분석하고 보조열원 내장형 축열조에 기존 설계법 및 운영방안을 적용할 경우에 발생할 수 있는 열성능 저하 문제에 대해 고찰하였다.

(1) 축열조 열성능 영향 인자

축열조의 열성능에 영향을 미치는 가장 중요한 요소는 축열조 내부 수온의 성층화이다. 즉, 축열조의 열성능 향상을 위해서는 급탕 공급 배관과 연결되는 축열조의 상부는 고온으로 유지하고 축열조의 하부는 저온으로 유지하고 해야 한다.

축열조 상부를 고온으로 유지하지 못할 경우에는 온수를 사용할 때마다 온수 사용량만큼 저온의 시수가 축열조 상부로 유입되어 축열조 상부의 수온이 급탕 설정 온도 이하로 떨어지며 보조열원의 잦은 작동으로 인해 에너지의 소비량이 증가한다.

2.1.2절에서 제시하였듯이 태양열 축열조를 운영할 때 집열기의 입출수 온도를 기준으로, 온도차가 설정 온도(ΔT_{on}) 이상 차이가 날 경우에 집열이 시작되므로 집열기의 입수온도를 결정하는 축열조 하부 온도를 낮게 유지하여 집열량을 최대화하도록 한다. 또 다음 식(2.9)¹²⁾을 참고하면 동일한 집열기에 대해서 $F_R(\tau\alpha)$ 와 $F_R U_L$ 로 구해지는 흡수율이나 열손실을 과 재료 물성에 의한 값은 크게 변화하지 않으므로 집열기의 입수 온도가 낮을수록 집열기 외부로의 열손실을 줄여서 집열 효율을 높일 수 있다. 이에 따라 축열조 내에 태

12) John, A.D. and William, A. B. 『Solar engineering of thermal process 3rd ed.』 Wiley, 2006 pp. 292-293

양으로부터의 집열량을 늘릴 수 있어 효율 증가에 따른 태양 집열량 증가로 인해 보조열원 사용량을 줄일 수 있다.¹³⁾

$$\eta = \frac{Q}{IA} = F_R(\tau\alpha) - F_R U_L \frac{(T_{in} - T_{amb})}{I} \quad (2.9)$$

여기서,

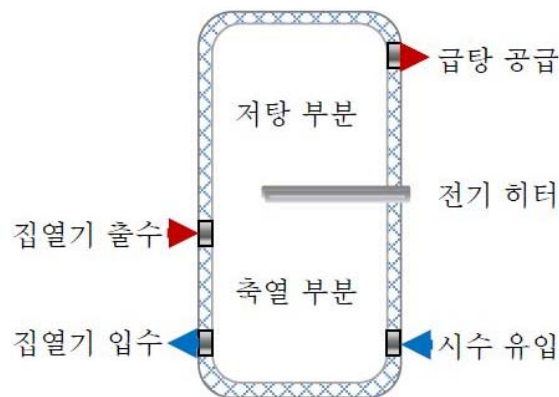
- η : 집열기 효율
- Q : 집열기가 취득한 에너지, kW
- I : 집열면 일사량, kW/m²
- A : 집열 면적, m²
- F_R : 집열 효율 수정계수
- τ : 집열기 투과율
- α : 흡수판 흡수율
- U_L : 열손실 계수, kW/m²°C
- T_{in} : 집열기 입수 온도, °C
- T_{amb} : 외기 온도, °C

13) 지식 경제부, op. cit. pp.13-17.

(2) 기존 설계법 및 운영 방법을 보조열원 내장형 축열조의 적용시 문제점

보조열원 내장형 축열조는 [그림 2.3]과 같이 하나의 축열조 내에 태양열로 가열한 온수와 보조열원으로 가열한 온수를 함께 저장하는 구조를 가진다. 2.1.1절에서 제시된 바와 같이 보조열원에 의해 생산된 온수의 저장 부피(저탕 부분 용량)는 최대 급탕 사용량에 대비하여 설계되며, 태양열에 의한 온수 저장부피(축열 부분 용량)는 일일 평균 온수 사용량에 대비하여 설계된다. 그리고 축열부분의 온도는 가변적일 수 있으나 저탕 부분은 설정된 급탕 온도를 항상 유지하도록 운영되고 있다.

ASHRAE Handbook-HVAC Applications Ch.49 Service Water Heating 에서는 급탕 시스템의 설계에서 가장 어려운 부분으로써 지어지지 않은 건물에서 발생할 급탕 부하에 대한 불확실성을 들고 있다. 이로 인해 기존의 오래된 부하 자료를 바탕으로 급탕 시스템을 설계 하는 경우 부하를 처리하는 데 문제는 없지만 대개 과다 설계 되는 경향이 있다고 제시하고 있다. 따라서 앞서 제시한, 기존 부하 자료를 이용하는 산정 방식으로 보조열원 내장형 축열조의 저탕 부분과 축열 부분 용량을 산정하여 합산하게 될 경우 과다 설계의 가능성이 있다.



[그림 2.3] 보조열원 내장형 축열조의 구조

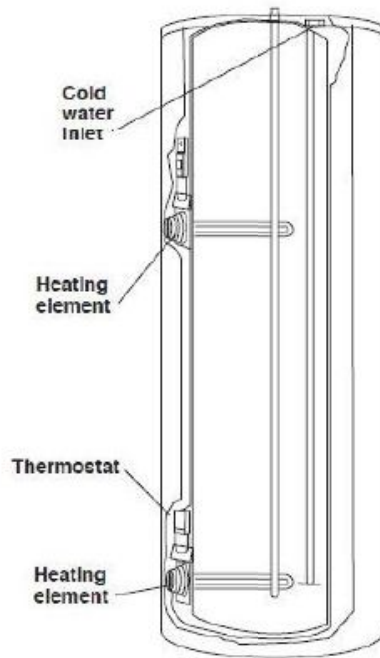
특히 체육시설과 같이 오프 피크시간과 피크시간동안의 온수 사용량 차이가 큰 시설의 경우, 일일 온수 사용량 중 1시간 최대 사용량이 차지하는 비율이 큰 특징이 있다. 따라서 최대 사용량에 맞추어 설계되는 저탕 부분 용량이 부하가 고른 시설에 비해 더 크게 산정될 수 있다. 온수의 안정적인 공급 측면에서 저탕 부분 용량의 확보가 태양열 축열 부분 용량 확보에 비해 우선시되므로 설치공간의 제약이 있을 때 태양열 이용 효율을 손해 보더라도 태양열에 의한 축열 부분 용량을 줄여서 설계되고 있다. 즉, [그림 2.3]에서 보조열원을 설치 위치가 낮아지게 된다. 이에 따라 보조열원과 시수 유입관이 가까워져 시수와 온수의 믹싱 혼합으로 인한 보조열원의 on/off가 잦아져 에너지 손실량이 커진다.¹⁴⁾ 또, 저탕 부분의 용량이 클수록 축열조 하부의 온도가 상승하게 되어 앞의 식의 집열기 출수 온도를 상승시켜 집열 효율도 떨어지는 문제가 발생한다.

요약하면, 기존의 설계 방법과 운영방법을 보조열원 내장형 축열조를 사용하는 최대부하가 큰 시설에 적용하였을 경우 저탕 부분의 부피가 커지고 이 부피의 온수의 온도는 항상 보조열원으로 일정하게 유지되도록 운영되므로 오프 피크 동안 태양열의 이용 효율의 저하와 이로 인한 보조열원의 사용량이 증가하는 문제가 발생한다.

14) Minguez JM. Water heaters in series, Energy Research v.11. pp.145-151. 1987

2.2 축열조의 에너지 효율적인 설계 및 운영에 관한 기존 연구

급탕 부하 발생 시 유입되는 시수와 축열조 내에 저장된 온수와의 혼합 현상에 대한 개선을 위해 국외의 경우 [그림2.4]와 같이 두 개의 전기 히터를 축열조 상부와 하부에 나누어 설치한 모델(2-히터 축열조, dual heater storage)이 있다.¹⁵⁾ Minguez에 따르면 동일한 용량의 축열조와 히터라도 절반의 축열조 부피를 절반 용량의 히터가 둘로 나뉘어 직렬로 가열하게 되면 급탕 부하 발생 시 발생하는 냉수와 온수의 혼합으로 인한 문제를 극복하여 열성능의 개선이 가능한 것으로 나타났다.¹⁶⁾



[그림 2.4] 두 개의 전기히터를 사용하는 축열조 모델

15) Virginia Department of Mines Minerals and Energy,
<http://www.dmme.virginia.gov/de/consumerinfo/HandbookWaterHeating.pdf>

16) Minguez JM, op. cit.

[그림 2.4]의 축열조와 같은 경우, 상부부터 급탕 설정 온도에 도달시키고, 하부 히터를 필요에 따라 on/off 하여 급탕 설정 온도와 큰 온도차를 가진 시수의 상부 유입을 방지하도록 한다.

(1) 2-히터 축열조의 설계 관련 연구 및 현황

Kar et al.의 연구¹⁷⁾에서는 시뮬레이션을 이용해 동일한 총 축열조 부피에 대해서 최적의 효율을 가지는 축열조의 부피비(상부 히터 담당 부피 : 하부 히터 담당 부피 = 1 : 3)를 제시하였다. 또 2-히터 축열조의 열성능 개선의 원인으로써 온수 사용량에 따라, 상부의 히터만으로 급탕 설정 온도의 온수를 생산함으로써 축열조 하부 온도가 낮게 유지하는 동안 에너지 사용량이 절감된 것으로 분석하였다. I.Sezai의 연구¹⁸⁾에서는 실험을 통해 축열조 상부 히터의 설치 위치에 따른 에너지 효율성 변화를 평가하였다.

현재 판매되고 있는 축열조들은 대체적으로 상부 히터 담당 부피 : 하부 히터 담당 부피 = 1 : 3의 부피비를 따르고 있다.¹⁹⁾

(2) 2-히터 축열조의 히터 운영 관련 연구

상용 2-히터 축열조의 히터 제어방식은 크게 두 가지 방식으로써, 동시 제어방식과 비동시 제어방식으로 나뉜다. 동시 제어 방식의 경우는 일반 히터 제어 방식과 같은 방식으로써 설정온도 이하일 때 상부와 하부의 히터가 동시에 켜지며, 설정온도에 도달하면 동시에 꺼지게 된다. 비동시 제어방식은, 주종 제어(master-slave mode)라고도 하는데 대부분의 2-히터 방식은 이 방식을 따른다고 한다.

17) A. Kerim Kar, Ümit Kar, Optimum design and selection of residential storage-type electric water heaters for energy conservation, Energy Conversion and Management, Volume 37, Issue 9, 1996, pp.1445-1452

18) I. Sezai, et. al. Performance improvement by using dual heaters in a storage-type domestic electric water-heater, Applied Energy, Volume 81, Issue 3, 2005, pp. 291-305

19) Rheem - www.rheem.com
AOSmith - www.aosmith.com

이 제어방식은 상부에 설치한 히터 영역의 온도가 설정온도보다 낮을 경우 상부의 히터가 켜지고 상부의 히터가 켜져 있는 동안에는 하부 히터가 켜지지 않는다. 상부 히터 부분의 온도가 설정온도 이상이 만족된 경우에만 하부의 히터가 작동한다. 대부분의 경우에는 주종 제어를 사용하여 급격하게 많은 전력을 사용하는 것을 방지하고 있다.²⁰⁾

T.Prud'homme의 연구²¹⁾에서는 축열조 내부에 수직방향으로 설치된 3개의 다른 길이의 히터 운영에 대하여 급탕 사용량의 변화나 기상 변화 등의 사용자 운영 조건 변화를 반영하여 최적 제어를 하는 방안을 제안하였다. 해당 연구에서는 시뮬레이션을 이용하여 미리 입력된 급탕 사용량과 일사량에 따라 축열조 내부의 온도를 계산하고 최적화 알고리즘을 거쳐 각 상황에서 보조열원의 에너지 소비를 최소화 할 수 있도록 제어 하였다. 즉, 축열조 내에서 보조열원의 에너지 사용량을 최소화하기 위해서는 온수 사용 직전에 정확히 필요한 양만큼의 온수만을 확보함으로써 실현가능하였다. 하지만 해당 연구의 경우, 태양열에 의해 생산되는 온수량의 계산과 급탕 사용량의 예측 부분에 대하여 미리 입력된 자료에 의해 계산되도록 하여 실제 부하변동이나 예측 밖의 기상 변화에 대해서는 고려하지 못하여 실제 시스템에 적용에는 한계점이 있었다.

20) BJ Newton, Modeling of Solar Storage Tanks, Master's Thesis, University of Wisconsin-Madison, 1995, ch.2

21) T. Prud'homme, D. Gillet, Advanced control strategy of a solar domestic hot water system with a segmented auxiliary heater, Energy and Buildings, Volume 33, Issue 5, 2001, pp. 463-475

2.3 소결

본 장에서는 태양열 급탕 시스템을 구성하는 축열조와 저탕조에 대한 기존 설계방식과 운영 방식에 관한 문헌 고찰을 하였다. 고찰 결과 본 연구의 대상이 되는 보조열원 내장형 축열조에 기존의 축열조와 저탕조 각각의 설계, 운영 방식을 적용할 경우 축열조 부피가 커지는 문제가 있었다. 이에 따라 공간적 제약이 있는 경우, 최대 온수 사용량에 맞춰 설계되는 저탕 부분의 용량을 유지하고 축열조 부분의 부피가 축소됨으로 인해 전체 태양열 급탕 시스템의 열성능 저하와 이를 통한 보조열원의 사용량 증가를 문제점으로 제기하였다. 이에 대한 개선 사례나 연구를 고찰함으로써 축열조 내장형 보조열원의 에너지 소비량 절감을 위한 설계 사례들과 히터의 운영에 급탕 사용량의 변화를 반영할 필요성에 대해 보였다. 본 장의 내용은 아래와 같이 요약할 수 있다.

1) 지식경제부의 ‘태양열 설비 시스템 표준화’ 자료와 ASHRAE Handbook 및 설비계획서를 통해 태양열 급탕 시스템의 축열조와 저탕조의 기존 설계 방법을 분석하였다. 기존의 저탕조 설계·운영 방식을 보조열원 내장형 축열조의 저탕 부분에 적용할 경우, 1시간 최대부하를 기준으로 설계·운영되어 오프피크 기간이 긴 체육 시설의 경우에는 장시간 과량의 온수 보유로 인한 보조열원의 에너지 사용량 증가와 태양열 시스템의 집열 효율 저하 문제가 발생할 수 있었다.

2) 보조열원 내장형 축열조의 에너지 효율적인 설계·운영 사례와 연구 내용을 고찰하여 2-히터 축열조를 이용할 경우 온수 저장 부피의 가변화에 따른 열성능 향상 가능성을 보이고 이 축열조에 적용된 기존 설계 방식과 제어 방식에 대해 제시하였다.

3) 온수 사용량과 일사량의 변화를 반영하여 최적제어를 통해 보조열원의 에너지 사용량을 최소화한 연구를 통해 온수 사용량 예측 시, 보조열원 에너지 사용의 저감 가능성에 대해 고찰하였다.

제 3 장 실측 자료를 이용한 온수 사용 패턴의 도출

2장의 선행 연구의 예와 같이, 보조열원의 에너지 효율적인 운영 방안은 온수를 사용하기 직전에 필요한 양 만큼만 생산하여 공급하는 것이다.²³⁾ 즉, 보조열원의 효율적인 운영 방안을 위해서는 각 시간별 온수 사용량을 예측할 수 있어야 한다. 이때 시간에 따라 변화하는 자료를 시계열 자료라고 하고 시계열 자료의 변화 양상에 대한 분석을 통해 다음 시각의 자료값을 예측을 하는 방법은 크게 결정적 모형과 확률적 모형이 있다.²⁴⁾

결정적 모형의 경우는 주로 물리 법칙을 이용하여 입력 변수들의 물리적인 영향 관계를 파악하여 값을 예측한다. 일반적으로 건물의 냉방과 난방 부하의 계산에 이용되는 외기온, 일사량, 건물 자재의 열관류율, 내부 발열 등의 다양한 변수 사이에는 물리 법칙이 존재한다. 따라서 변수들 간의 물리 법칙을 이용하여 시간에 따른 건물의 냉,난방 부하값을 예측하는 데는 결정 모형이 주로 이용된다. 하지만 시간에 따른 온수 사용량의 변화는 주로 사용자의 스케줄, 습관에 의존하며 같은 사용자더라도 일정한 법칙을 발견할 수 없다는 특징이 있다. 또한 건물에 따라 다양한 사용 패턴, 기구의 종류, 시수 온도, 온수 사용량과 유량, 온수 사용 시기의 차이 등이 모두 고려되어야 하는 복잡한 과정이다. 따라서 기존의 온수 사용량 변화에 관한 연구는 확률적 모형을 이용하여 광범위한 사용량 데이터를 바탕으로 정규화 된 사용량 패턴을 도출하는 방향으로 연구되고 있다.²⁵⁾

이 외에도 예측 방법론에는 ANN(인공 신경망)이나 유전자 알고리즘 등의 방식이 이용되고 있다. 이들 방식은 높은 정확도를 나타내지만, 이를 위해서

23) T. Prud'homme, D. Gillet. op. cit.

24) 조신섭, 손영숙, SAS/ETS를 이용한 시계열 분석, 율곡출판사, 2009, p.326

25) R. Hendron, J. Burch, Development of standardized domestic hot water event schedules for residential buildings. NREL conference paper. 2008

는 방대한 양의 데이터 베이스가 필요하며 예측에 사용되는 적절한 파라미터를 도출하는 과정에서 시간이 오래 걸리는 특징이 있다.²⁶⁾

본 연구의 경우, 온수 사용량의 예측값이 시스템의 운영에 실시간으로 사용되어야 하기 때문에 온수 공급의 안전성을 확보하는 범위 내에서 예측값 계산 속도가 중요하다. 또한 기존의 온수 사용량의 정규화 된 패턴을 작성하기 위한 연구와 달리 본 연구의 경우, 예측 대상이 되는 개별 건물 하나에 대한 온수 사용량을 예측하기 때문에 다양한 온수 사용 패턴, 기구의 종류, 시수 온도, 온수 사용량과 유량, 온수 사용 시기의 차이 등의 확률 분포를 포함할 필요가 없는 특징이 있다. 따라서 기존의 확률적 모형에 따른 패턴의 도출과정을 따르되 다양한 종류의 기구나 유량의 확률분포 전부를 고려하지 않고 해당 건물의 실제 온수 사용량 데이터만을 활용하여 간략하고 빠르게 해당 건물의 일일 온수 사용량 패턴을 도출하는 방안을 제시하도록 한다. 한 편, 기존의 어떤 예측 방법론을 이용하더라도 예측값은 실제값과 모든 시각 정확하게 일치할 수 없다는 점을 고려하여 실제 급탕 시스템에 적용하기 위해서는 온수 공급의 안전성을 위한 대비 방안도 필요하다.

따라서 본 장에서는 일일 사용량 패턴을 도출하여 온수의 최대 사용량이 발생하는 시간대와, 각 시간별 사용량의 경향성을 파악하고 4장에서 실제 급탕 시스템의 운영 시에 확보되어야 하는 온수 공급의 안전성을 고려하여 패턴을 통한 예측값을 수정하는 방안을 제시한다. 수정된 최종 예측값을 이용하여 보조열원을 운영하는 방안을 제시하도록 한다.

26) Zhao H and Magoules F. "A review on the prediction of building energy consumption". Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 16, 2012, pp. 3586-3592

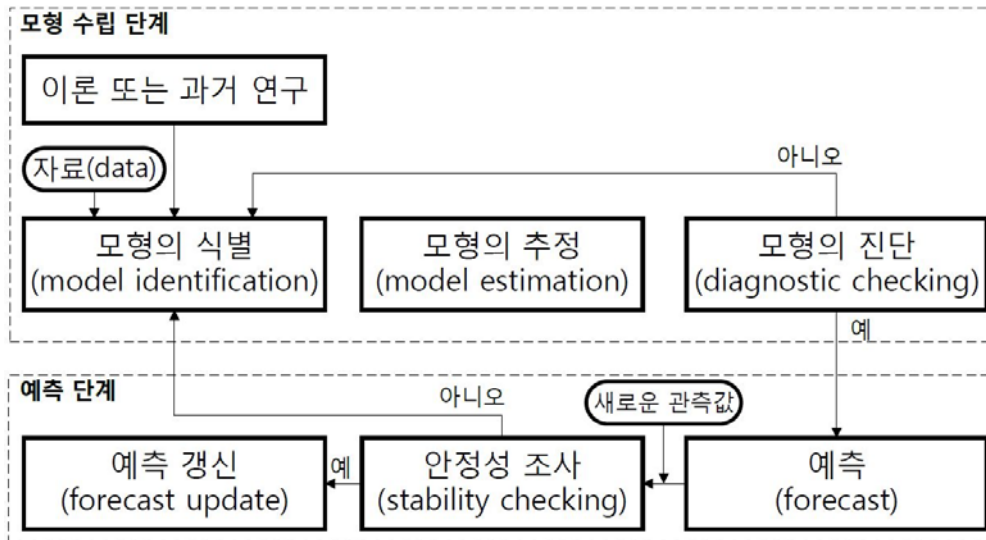
3.1 개요

본 장에서는 기존의 예측 모형의 도출과정을 따라 해당 건물의 온수 사용량의 실측 데이터를 활용하여 간략하고 빠르게 해당 건물의 일일 온수 사용량 패턴을 도출하는 방안을 제시하는 것을 목적으로 한다. 패턴을 도출하는 과정은 [그림 3.1]과 같이 기존에 제시된 예측 시스템의 구조를 참고하여 [그림 3.2]와 같이 온수 사용량 예측에 사용할 온수 사용량 패턴을 도출하였다.

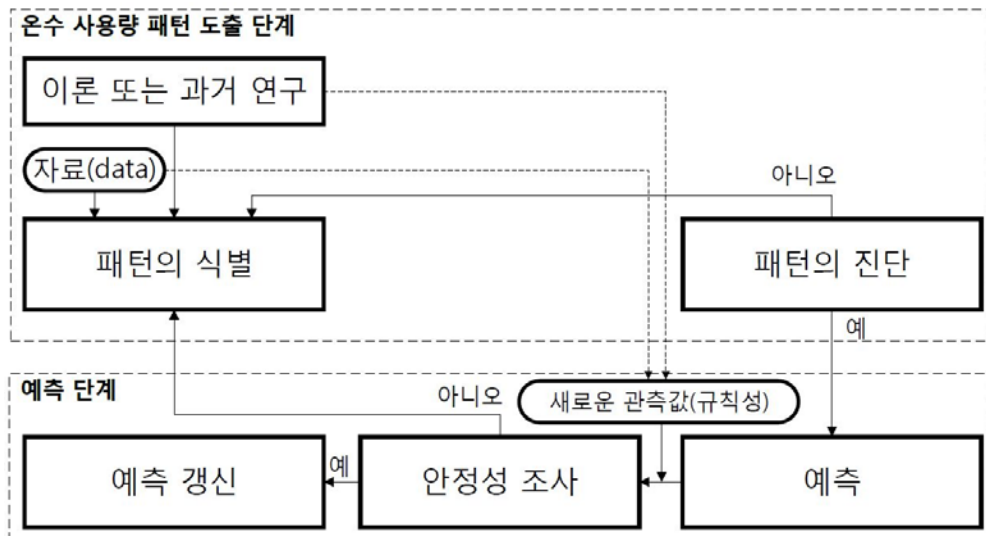
[그림 3.2]의 온수 사용량 패턴 도출과정의 첫 단계로써 온수 사용량의 패턴 도출에 관한 기존 연구²⁷⁾의 이론을 참고하고 실측된 사용량 데이터를 이용하여 본 연구의 실측 대상 건물의 온수 사용량 패턴에 영향 인자를 확인한다.

다음으로 온수 공급의 안전성에 영향을 미치는 최대 온수 사용량이 발생하는 시각과 양을 기준으로 유사한 양상을 나타내게 하는 영향 인자에 따라 동일 인자 조건의 값들의 평균값으로써 온수 사용량을 패턴을 도출 한다. 도출된 패턴을 이용하여 예측에 이용하도록 한다. 기존의 예측 시스템의 구조에서는 온수 사용량 패턴이 도출(예측 모형의 수립)이후, 새로운 관측값이 발견될 경우 새로운 모형을 수립하는 과정을 반복하게 된다. 본 연구에서는 기존의 이론과 자료의 분석을 통해 도출된 패턴을 벗어난 새로운 관측값이 발생 또한 온수 사용량의 변화 영향 인자(월별, 요일별 차이)에 따라 일정 규칙을 가진다는 것을 확인하고 이 규칙성을 이용하여 도출된 온수 사용량 패턴의 갱신 방법을 포함하여 온수 사용량 패턴을 도출하는 과정으로 제시하고자 한다.

27) Jordan, Ulrike, and Klaus Vajen. "Realistic domestic hot-water profiles in different time scales." 2001



[그림 3.1] 기존 예측 시스템의 구조²⁸⁾



[그림 3.2] 본 연구에 적용된 온수 사용량 예측 시스템 구조

28) 조신섭, 손영숙, op. cit. p.16

(1) 온수 사용량 데이터의 수집

본 연구의 분석 대상 데이터는 대학교 캠퍼스 내 헬스장 (유효 면적 : 312m²)의 샤워용 온수사용량에 대해 8월부터 11월 말까지 3개월간 측정된 데이터이다. 온수 사용량 측정 대상 시설에서 사용 중인 급탕 이용 기기는 샤워기 9개로 구성된 시설이며 2장의 <표 2.3>을 이용한 온수 사용량 산정 방법으로 1시간 최대 온수 사용량은 3060 ℓ로 산정된다. 대상 시설의 경우 주중 운영시간은 오전 7시 30분부터 오후 10시 30분이며 주말(토요일)은 오후 12시부터 6시 30분까지로 단축 운영되며 휴일과 일요일은 운영을 하지 않아 온수 사용량은 없다. 온수 사용량의 측정에 사용된 기기와 프로그램은 <표3.1>과 같다.

(2) 온수 사용량 데이터의 가공

세수와 같이 가장 짧은 시간 사용되는 온수의 사용도 확인 가능하도록 유량계의 측정 간격은 10초로 하였고 LPM 단위로 측정되는 유량계로부터 측정된 순간값을 이용하여 10초 단위로 ℓ 환산하였다. 이후 온수 사용량 패턴의 특징을 보기 위한 값으로 1시간 단위 사용량 계산할 때에는, ℓ 환산값의 누적 합산한 값을 사용하였다.

<표 3.1> 온수 사용량 측정 기기 및 측정 프로그램

항 목	내 용
온수 유량 측정 센서	터빈유량계 (모델명 : DYTSP-1) 측정오차 : ± 1%
데이터 수집장치	NI-cDAQ, (수집 프로그램 : LabVIEW 2009)

3.2 온수 사용량 패턴 도출에 고려되는 영향 인자

온수 사용량의 시간에 따른 패턴을 산출하는 기존의 연구에서는 월 변화, 요일 변화, 휴일 여부, 해당일의 시간에 따라 사용자의 온수 사용 활동의 종류와 발생 확률을 이용하여 해당 시각의 온수 사용량을 계산한다. 즉 샤워, 목욕, 주방 용수 사용, 빨래 등 다양한 온수 사용 활동의 지속시간, 사용유량 등의 정규화된 자료를 기반으로 하고 시간별 온수 사용 활동의 발생 확률을 고려하여 최종적으로 해당 시각의 온수 사용량을 결정한다.²⁹⁾

기존 연구의 경우 매우 다양한 급탕 시스템의 환경에 대해 대표적인 온수 사용 패턴을 제공하기 위해 샤워 시간이나 유량 등의 정규화된 자료를 이용하였다. 하지만 본 연구와 같이 온수 공급처의 용도 및 급탕 기구수와 사용자가 정해진 개별 건물의 경우는 이미 일정 수준 온수 사용량의 패턴이 발견된다. 따라서 월 변화, 요일 변화, 해당일의 시간변화에 따라 온수 사용량이 변화한다는 기존 연구의 가장 기본적인 가정이 실제 온수 사용량 변화에 영향을 미치는지 여부에 대해 검토하였다. 그리고 해당일의 시간별 변화는 독립적으로 분석하지 않고 월별, 요일별 변화와 함께 비교하였다. 실측 대상의 경우 일요일과 휴일은 온수 사용량이 없으므로 제외하였다.

(1) 월별-시간별 변화

측정된 온수 사용량을 월별로 비교한 결과 <표3.2>와 같이 8월에서 9월로 달이 바뀔 때, 일일 평균 온수 사용량에서 44.9%로 크게 증가하였으며 9월에서 10월, 10월에서 11월로 변화할 때에도 각각 21.3%, 18.9%의 증가율을 나타냈다. 즉 여름에서 겨울로 계절이 변화함에 따라 증가 추세를 따르고 있다. 이러한 계절의 변화에 따른 온수 사용량 변화의 주요 원인에 대해 기존 연구

29) Ibid.

에서는 시수의 온도 변화를 들고 있다. 시수 온도 변화로 인해 온수를 사용하는 말단부에서 시수와 급탕 공급수의 혼합 비율이 변화되기 때문이다.³⁰⁾

<표 3.3>을 참고하면 여름에서 겨울로 변할 때 시수 온도가 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 그런데 9월은 8월에 비해 시수온도가 높은 달이지만 온수 사용량이 오히려 증가하였다. 이는 학사 일정(개강)에 따라 체육 시설의 이용자 수가 증가한 것으로 파악된다.

<표 3.2> 월별 온수 사용량 변화(L)

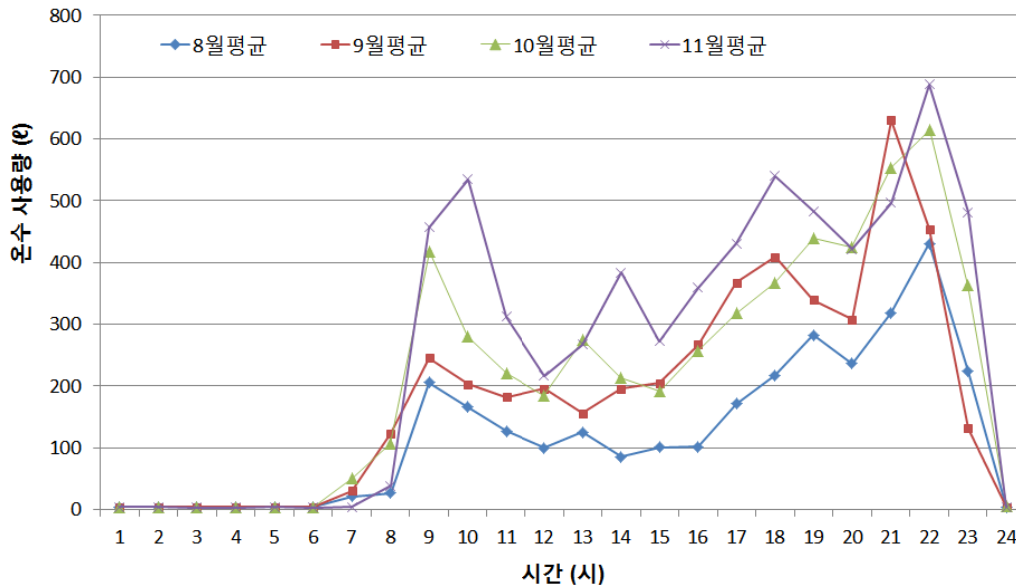
	8월	9월	10월	11월
일일 평균 급탕 사용량 (ℓ)	2721	3943	4783	5691

<표 3.3> 월별 시수 온도 분포 (서울)

	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
시수온도(℃)	4	5.3	9.1	14	19.5	22	24.2	24.6	25.4	22.7	17.6	8.8

30) Ibid.

31) 서울특별시 상수도사업본부, <http://arisu.seoul.go.kr/>



[그림 3.3] 월별 시간당 온수 사용 패턴 비교 (주중)

주1) 가로축에서 1(시)는 0시-1시 사이를 의미한다.

주2) 토요일은 제외된 주중 요일의 사용 패턴에 해당된다.

[그림 3.3]과 같이 월별 시간당 온수 사용 패턴을 비교하면 8월에서 11월로 변함에 따라 매시간별 온수 사용량이 전반적으로 증가하였다. 8월에서 11월로 달의 변화에 따라 온수 사용량에서 큰 차이를 보이는 시간은 9시-10시, 13-14시, 17-18시 사이였다. 특히 9시-10시 사이에 8월 대비 11월의 온수 사용량은 146% 증가하여 오전의 피크부하도 오후만큼 많이 발생하는 패턴이 나타났다. 하루 중 시간당 최대 온수 사용량은 8월에 430L, 9월에 630L, 10월에 615L, 11월에 690L로 특히 8월과 9월 사이의 야간 시간의 사용량에서 큰 변화가 나타났으며 12시-18시 사이의 오후 시간에도 8월 대비해서 100% 이상 증가하였다. 이로써 온수의 최대 사용량이 발생하는 시간대와, 각 시간별 사용량의 변화에 경향성을 보이는 월별 변화에 따라 온수 사용량이 변화는 유효하다고 판단되었다.

(2) 요일별-시간별 변화

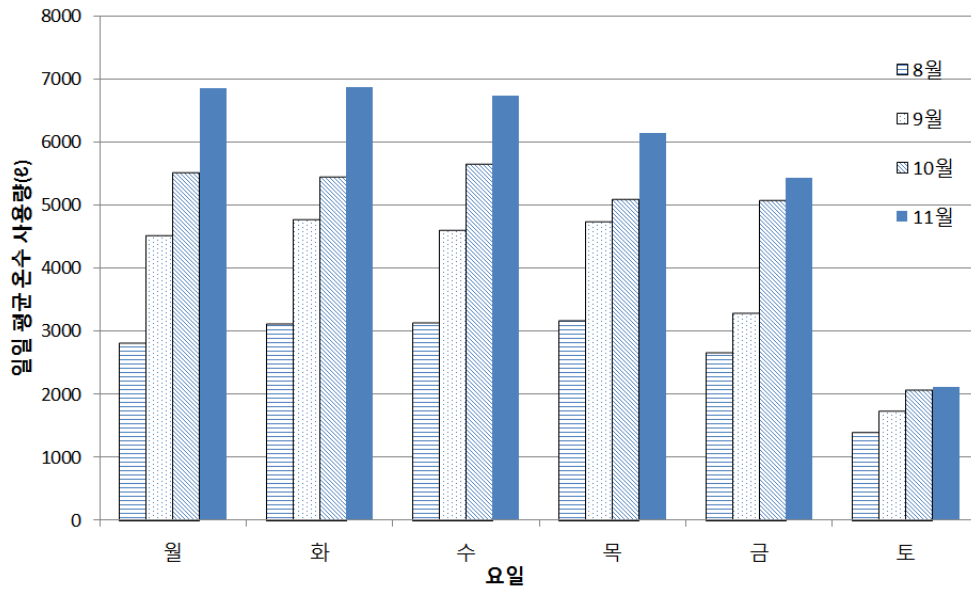
[그림 3.4]의 요일별 일일 온수 사용량 비교 결과와 같이 주말의 일일 온수 사용량은 주중의 일일 온수 사용량과 뚜렷한 차이를 보였다. 8월의 경우 주중 요일의 일일 사용량에 대비해서 주말의 일일 사용량이 47%에 달하지만, 9월의 경우 39%, 10월은 38%, 11월은 33% 로써 월별 변화에 따라 주중의 사용량이 주말의 사용량의 변화에 비해 더 큰 폭으로 변하는 것을 알 수 있다. 주중에도 요일별로 일일 사용량을 비교한 결과 평균적으로 월, 화, 수, 목, 요일은 비슷한 양을 사용하는 반면 금요일은 월-목요일 평균 사용량의 83%에 해당하였다.

[그림 3.5]의 요일별 시간에 따른 사용 패턴을 보면 금요일의 사용량이 주중의 다른 요일에 비해 적은 원인으로써, 특히 21시 이후의 온수 사용량이 적기 때문으로 파악된다. 주중의 시간당 온수 사용량은 200L 이상 차이 나는 시간은 16-17시, 19-22시이며 최대 차이값은 250L 였다. 온수 사용량을 측정하고 있는 대상 체육 시설은 주중에는 오전 7시 30분부터 오후 10시30분까지 운영하며, 토요일은 12시부터 오후 6시 30분까지 단축 운영을 그리고 공휴일 및 일요일에는 운영을 하지 않고 있다. [그림 3.5]의 요일별 시간에 따른 사용 패턴을 비교하면 온수 사용량에 운영 시간이 반영되는 형태를 확인할 수 있다.

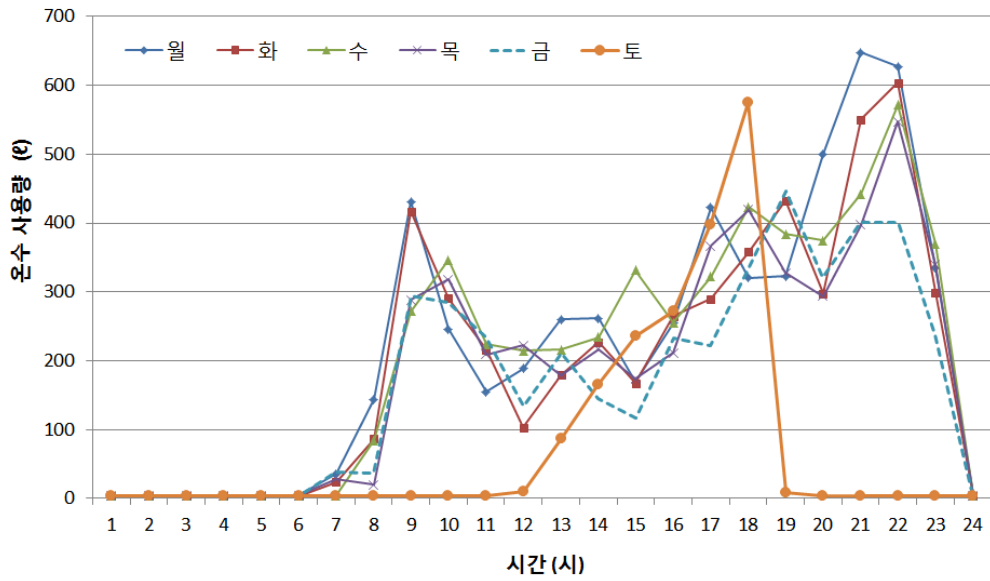
[그림 3.6]과 같이 주말의 시간당 사용량은 매달 동일하게 18시-19시 사이에 형성하였으며 이때 피크값은 피크이외 시간의 평균사용량의 4배 이내로 나타났다. 8월이 3.7배로 가장 큰 차이를 보이고 9월 3.2배, 10월 2.7배, 11월 2배로 나타나 월별 변화에 따라 피크시간의 사용량 변화보다 피크이외의 시간에 사용량이 변화가 큰 것을 확인할 수 있다.

이로써 최대 부하가 발생하는 시각과 온수 사용량이 뚜렷하게 구분이 되는 주중-주말에 따라 사용량 패턴이 유사하다고 판단할 수 있다. 주중 요일 내에서도 금요일이 다른 요일에 비해 적은 부하가 발생하지만 22시를 제외한 시

각에서는 다른 요일과 대부분 비슷한 온수 사용량을 나타냄에 따라 주중 전체를 하나의 패턴으로 나타내도록 하였다.

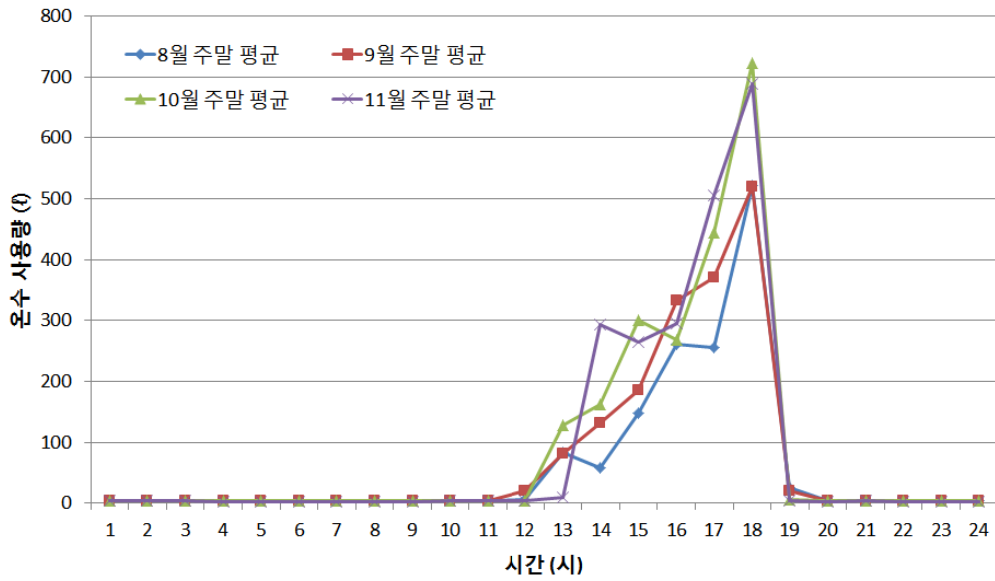


[그림 3.4] 요일별 일일 평균 온수 사용량



[그림 3.5] 요일별 일일 온수 사용 패턴

주) 가로축에서 1(시)는 0시-1시 사이를 의미한다.



[그림 3.6] 월별 온수 사용량 패턴 비교 (주말)

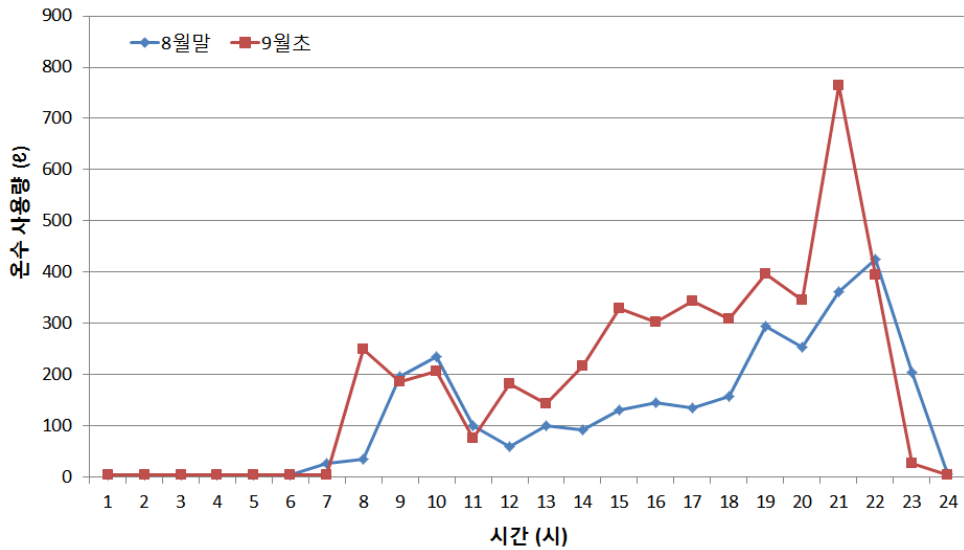
주) 가로축에서 1(시)는 0시-1시 사이를 의미한다.

3.3 실측 자료를 이용한 온수 사용량 패턴의 도출

기존의 온수 사용 패턴 작성에 관한 연구가 다양한 사용자와 다양한 상황에도 대응할 수 있는 정규화된 자료를 제시하는 목적으로 개발된 것을 고려하면 본 연구와 같이 개별 건물의 실제 온수 사용량에 영향을 미치는 주요 인자로서 기존 연구에서 제시한 월 변화, 요일 변화, 해당일의 시간의 변화에 따라 온수 사용량이 변한다는 가정을 차용하는 것이 타당하다고 판단했으며 이 가정은 실제 사용량 데이터와 잘 부합하는 것을 확인하였다.

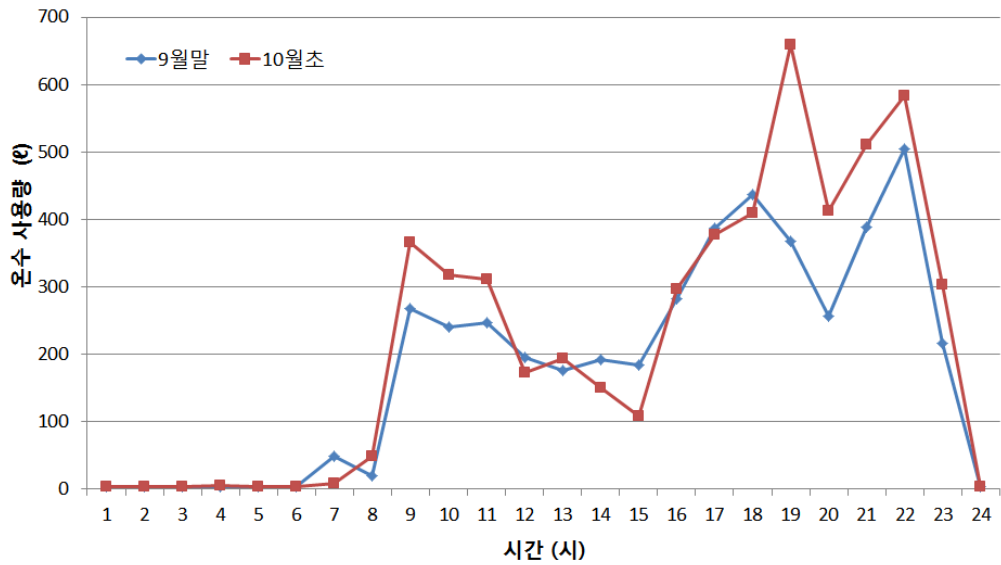
즉, 월별, 요일별 변화에 따라 시간별 실제 온수 사용량의 변화 특성이 뚜렷하게 나타났으며 주중-주말요일로 변화 시, 8,9,10월과 같이 해당 월이 변화 시에 따라 [그림 3.2]에서 제시된 “새로운 관측값”이 주기적으로 나타났다. 즉, 주중 패턴과 달리 주말의 경우 오전과 야간의 부하가 전혀 발생하지 않게 되며 이는 주중 패턴과 확연히 구별된다. 그리고 [그림3.7]~[그림3.12]에서와 같이 동일 월에서는 피크 시각과 해당시각의 온수 사용량이 비슷한 형태를 띠다가 월이 바뀌는 순간 “새로운 관측값”이 발생하여 이러한 “새로운 관측값” 또한 월 변화, 요일 변화에 따른 주기성을 가진다고 할 수 있다. 따라서 이러한 성질을 이용하여 실측한 온수 사용량 데이터 중 동일한 월, 요일, 시간 조건에 해당하는 복수의 데이터들의 평균값을 이용하여 동일 월의 요일(주중-주말)에 따라 두 종류의 온수 사용량 패턴을 도출 하여 예측에 이용하도록 하였다. 그런데 동일한 해당 조건의 다수의 데이터를 확보하여 온수 사용량 패턴을 작성하면 정규성은 높아지지만 온수 사용량 패턴을 작성하고 예측에 이용하기 위해 소요되는 시간이 길어져서 실용성이 떨어진다. 즉, 동일한 달의 주중 요일 전체 일수의 평균값과 주말 전체 일수의 평균값을 이용하는 방안이 해당월의 온수 사용 특성을 가장 정규화하여 나타낼 수 있으며 따라서 예측에 이용시 높은 정확도를 가질 수 있다. 하지만 이 방식은 월말이 될 때에서야 해당 월간의 평균값을 사용할 수 있게 되는 문제가 있으며 [그림 3.7],[그림3.8],[그림3.9]에서와 같이 달이 바뀌는 경우, 특히 8월에서 9월과 같이 월별 변화가 큰 경우에 적용성이 떨어진다. 한편 [그림3.10],[그림

3.11],[그림3.12]에서는 당월의 주중 전체 평균값으로 온수 사용량 패턴을 작성하였을 경우와 당월의 월초와 월말의 주중 평균값을 비교한 결과이다. 비교 결과 최대 온수 사용량이 발생하는 시각이나 전체 시간에 따른 온수 사용량의 변화 양상이 월 전체 평균과 큰 차이가 없었다. 따라서 단기간의 평균값을 이용해 온수 사용 패턴을 작성하면서 월별 변화를 빠르게 반영할 수 있도록 일주일 이내 기간의 평균으로써 패턴을 도출하는 것이 타당하다고 판단된다.



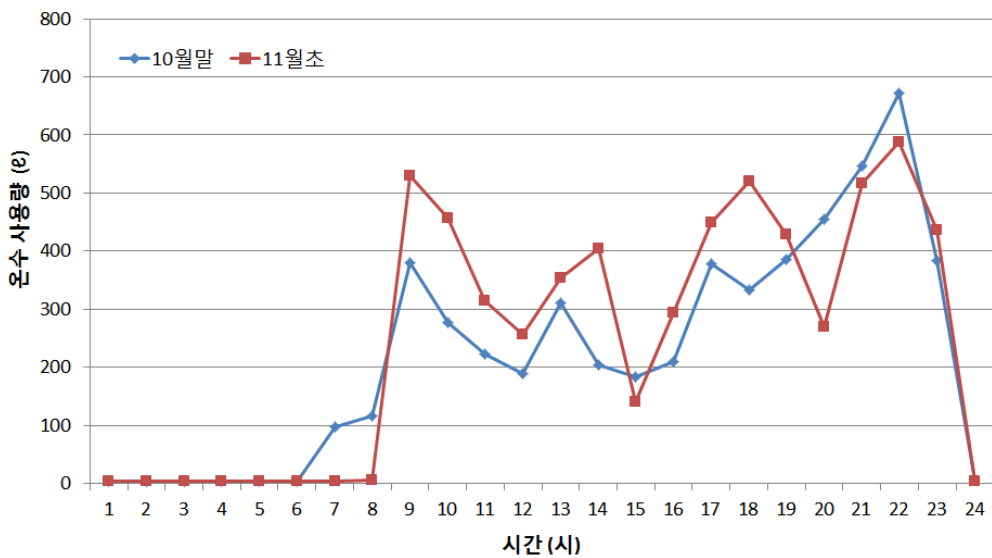
[그림 3.7] 월말-월초의 사용 패턴 변화 비교 (8월말-9월초)

주) 가로축에서 1(시)는 0시-1시 사이를 의미한다.



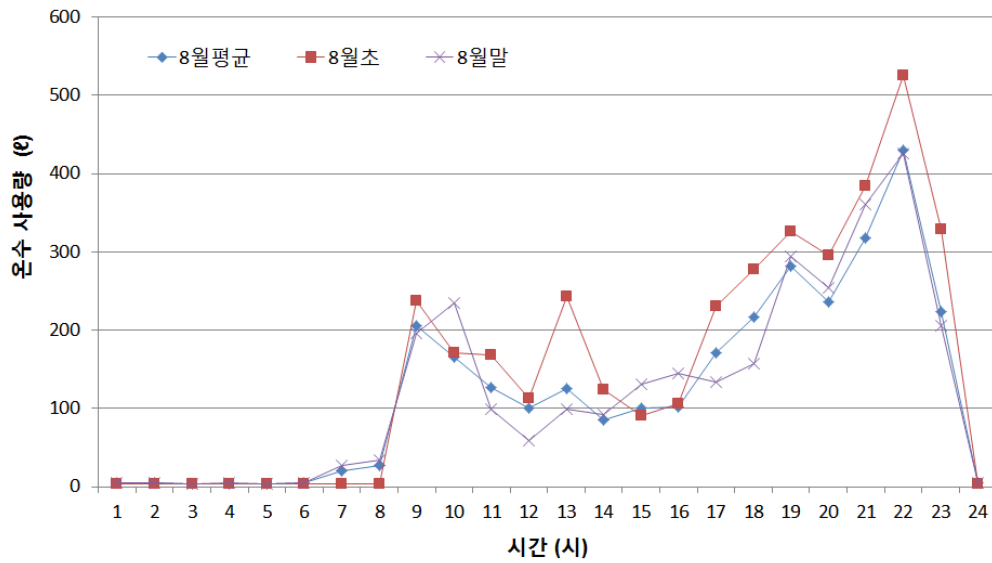
[그림 3.8] 월말-월초의 사용 패턴 변화 비교 (9월말-10월초)

주) 가로축에서 1(시)는 0시-1시 사이를 의미한다.

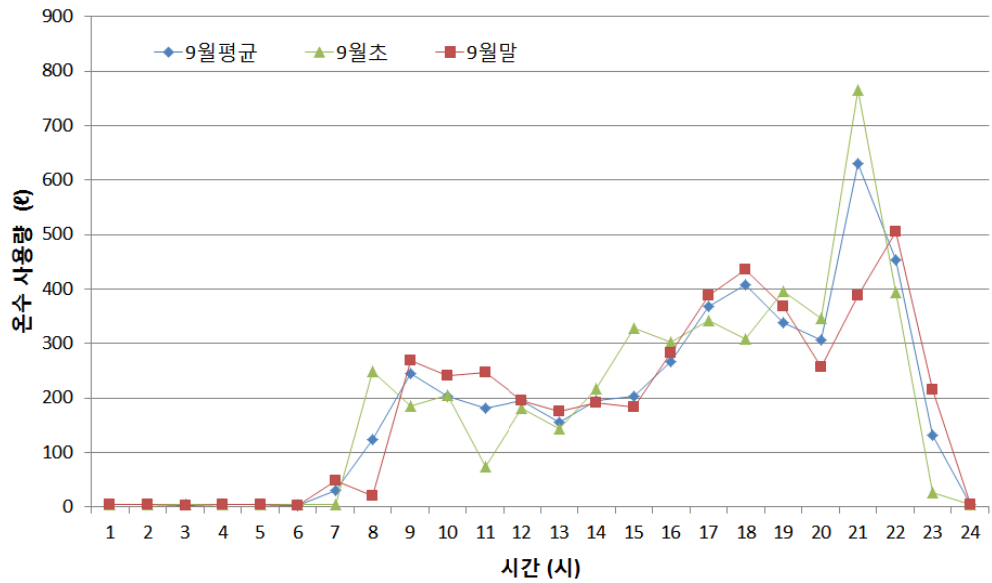


[그림 3.9] 월말-월초의 사용 패턴 변화 비교 (10월말-11월초)

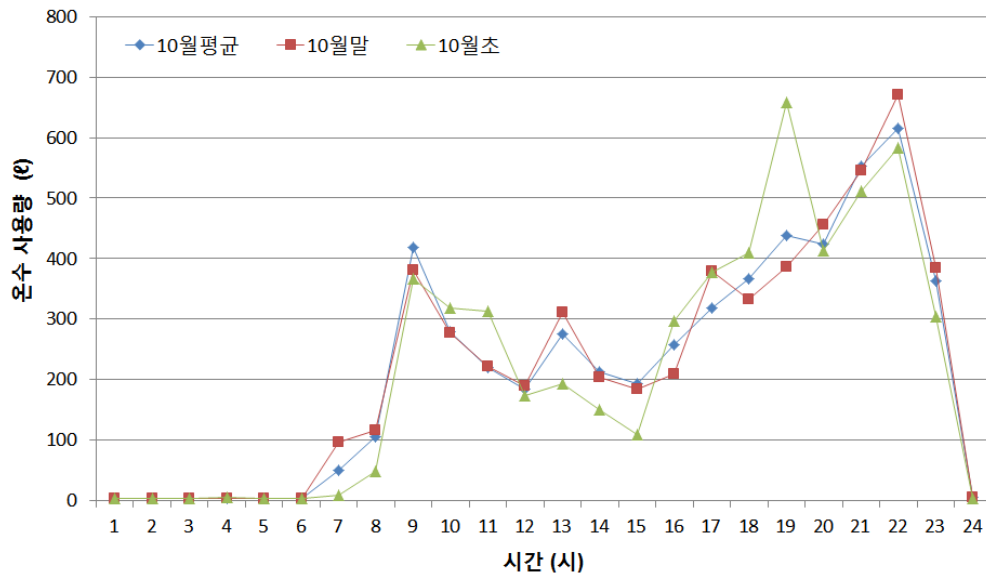
주) 가로축에서 1(시)는 0시-1시 사이를 의미한다.



[그림 3.10] 월 전체 평균 온수 사용 패턴과 단기 온수 사용량 패턴 비교 (8월)
 주) 가로축에서 1(시)는 0시-1시 사이를 의미한다.



[그림 3.11] 월 전체 평균 온수 사용 패턴과 단기 온수 사용량 패턴 비교 (9월)
 주) 가로축에서 1(시)는 0시-1시 사이를 의미한다.



[그림 3.12] 월 전체 평균 온수 사용 패턴과 단기 온수 사용량 패턴 비교 (10월)
 주) 가로축에서 1(시)는 0시-1시 사이를 의미한다.

(1) 주중 요일에 대한 온수 사용 패턴의 도출

단기간의 평균값들 중 월별 변화를 빠르게 반영하면서 정확도를 상대적으로 높게 유지할 수 있는 평균값 계산 구간을 알아보기 위하여 월이 바뀌는 기간인 2012년 10월 19일 금요일부터 2012년 11월 8일 목요일 사이의 주중요일의 3,4,5,6,7,8,9,10일 간격으로 각각의 시간별 온수 사용량 평균값으로 다음 해당일의 실제 온수 사용량과 차이를 비교하였다.

식 (3.1)로 계산되는 오차의 제곱합은 시간별 온수 사용 예측량과 실제 사용량 간의 차이를 비교하여 오차 제곱합이 작을수록 예측의 정확도가 높은 것을 의미한다. 3,4,5,6,7,8,9,10일 기간의 전일 사용량 평균값으로 작성된 온수 사용 패턴값과 예측 해당일의 시간별 온수 사용량을 각각 비교한 결과 5일 평균값을 이용한 패턴값과 실제량의 오차제곱합이 가장 낮은값을 나타내어 다른 기간의 평균값을 이용한 패턴에 비해 상대적으로 높은 예측 정확도를 가진

다고 판단하였다. [그림 3.10]에서 5일 평균값으로 도출된 온수 사용 패턴의 경우 3일 평균값을 사용할 때보다 오차 제곱합을 12%, 4일 평균값을 사용할 때보다 4% 감소하는 결과가 나타났다.

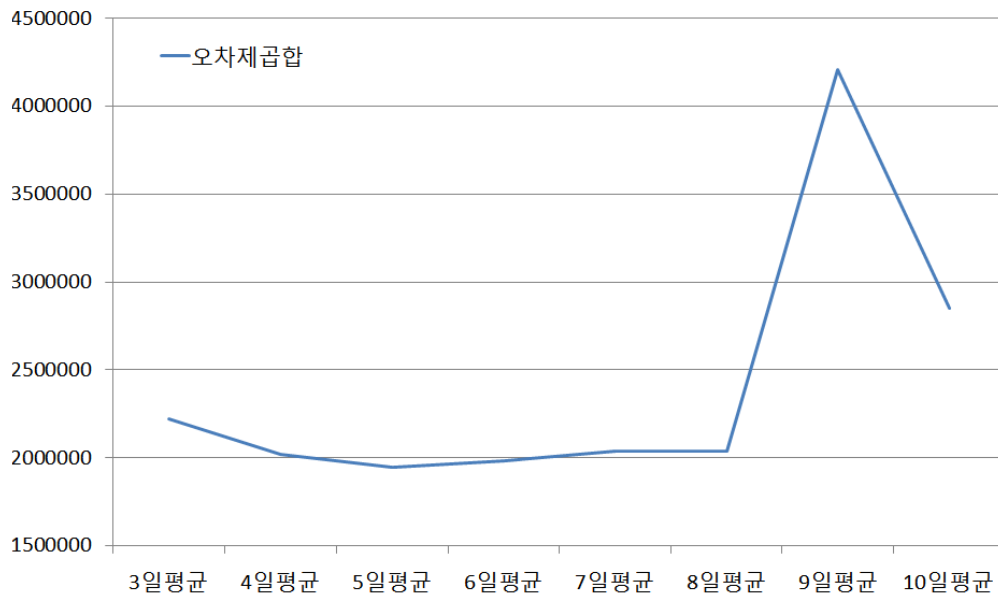
$$SS = \sum (Q_{exp,i} - Q_{actual,i})^2 \quad (3.1)$$

여기서,

SS : 오차 제곱의 합

$Q_{exp,i}$: 도출된 온수 사용량패턴의 i 시간의 온수사용량, l

$Q_{act,i}$: 실제 i 시간의 온수 사용량, l



[그림 3.13] 기간별 평균값과 실제 사용량과의 오차 제곱합 비교

(2) 주말에 대한 온수 사용량 패턴의 도출

주말의 경우 일주일 이내의 값을 이용할 경우, 지난 주 1일의 값만을 사용하게 되는 단점이 있다. 그렇지만 주말의 경우 시간당 사용량 자체가 작고, [그림 3.6]과 같이 최대 부하가 발생하는 시점의 변화가 없어 비교적 사용량의 차이가 많이 발생하지 않았다. 또, 앞의 요일별-시간별 변화의 분석 결과와 같이 월별 변화에 따라 주중 요일보다 주말의 사용량의 변동은 적은 것으로 나타나 이전 주 1회의 사용량으로도 사용량 면에서 큰 차이는 없을 것으로 보인다.

3.4 소결

본 장에서는 실측 온수 사용량을 이용하여 온수사용 패턴을 도출하는 방법을 알아보았다. 이를 위해 대학교 캠퍼스내 헬스장의 급탕 시설의 온수 사용량 데이터를 사용하였다. 기존 확률적 정규화 과정에서 적용되는 가정이 실측 사용량에도 적용되는지 검토하였고 타당성이 입증된 가정들을 토대로 실측 데이터를 이용해서 온수 사용량 패턴을 도출하는 방안을 제시하였다. 그리고 도출된 패턴이 실제 온수 사용량과의 비교하여 오차의 분석을 통해 시스템의 운영 방안에 고려되도록 하였다. 그 내용을 정리하면 아래와 같다.

(1) 월 변화, 요일 변화, 해당일의 시간변화에 따라 온수 사용량이 변화한다는 기본적인 가정이 실제 온수 사용량 변화에 영향을 미치는지 여부에 대해 검토 결과 월별, 요일별, 시간의 변화에 따라 실측 사용량 결과에서도 뚜렷한 특징을 갖는 것으로 나타났다.

(2) 월별 변화에 따라, 기존 연구의 결과와 같이 시수의 변화를 반영하여 8, 9, 10, 11월로 변해 가면서 일일 총 사용 온수량은 각각 44.9%, 21.3%,

18.9%의 증가율을 나타냈다.

요일별 변화에서는, 시설의 운영시간의 영향을 크게 받아 단축 운영되는 주말의 일일 온수 사용량이 주중의 일일 온수 사용량의 모든 월에서 50% 이하의 사용량을 보였다. 월, 화, 수, 목요일은 비슷한 양을 사용하는 반면 금요일은 월-목요일 평균 사용량의 83%에 해당하였으며 차이의 원인으로서는 특히 21시 이후의 온수 사용량이 적기 때문으로 나타났다.

시간에 따른 사용량 특성으로는, 주중의 피크는 20-22시 사이에서 나타나며 주말의 경우 18시-19시 사이에 일정하게 나타났다. 이때 피크값은 피크 이외 시간의 평균사용량의 4배 이내로 나타났다.

8월과 9월 사이에는 야간 시간의 사용량에서 주중의 피크 발생 가능 시간인 21시에 310L로 차이가 가장 크게 발생했으며 12-18시 사이의 오후 시간에도 8월 대비해서 100% 이상 증가하는 변화가 나타났다. 또, 월 변화에 따라 온수 사용량의 변화가 주로 나타나는 시간은 주중의 경우, 9시-10시, 13-14시, 17-18시 사이로 나타났으며 주말의 경우 월변화에 따라 피크시간의 사용량 변화보다 피크 이외의 시간에 사용량의 변화가 큰 것을 확인할 수 있다.

- (3) 8월, 9월의 변화와 같이 월이 바뀌면서 온수 사용량의 변화가 크게 발생하는 것에 대비하기 위해서 일주일 이내의 기간의 평균값으로써 패턴을 도출하는 것이 타당하다고 판단되었으며 이를 위해 주중 요일의 사용량의 패턴은 해당일의 이전 기간 동안의 평균값으로써 작성한 뒤 실제 사용량과의 오차 제곱합을 비교하여 오차를 가장 줄일 수 있는 5일 평균값으로 온수 사용 패턴을 도출하도록 하였다. 그리고 시간에 따른 사용량이 크지 않고, 양의 변화도 크지 않은 주말의 경우는 지난 1주의 값으로 패턴을 도출하였다.

제 4 장 온수 사용량 예측을 이용한 보조 히터 운영 방안

4.1 개요

본 장에서는 2-히터 축열조의 하부 히터의 운영시간을 최소화하면서도 안정적인 온수를 공급할 수 있는 방안을 도출하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해, 앞 장에서 도출된 온수 사용량 패턴을 이용하여 공급해야 할 총 온수량을 예측하고 축열조의 상부 저장 부피와 상부 히터의 가열 능력을 고려하여 이를 초과하는 경우에만 하부 히터를 작동하도록 한다.

어떤 예측 방법도 실제값을 100% 정확하게 예측할 수 없으며 정확도를 높이기 위해서는 긴 시간의 계산과정이 요구되어 실제 시스템의 운영에 사용하기에는 부적합하다. 앞 장에서 간략한 방식으로 도출한 패턴을 이용하여 온수 사용량을 예측하는 경우, 요일과 월에 따라 24시간 동안의 사용량의 분포, 최대 사용량이 발생하는 시각과 그 때의 급탕 사용량 정도를 평균값으로 예측할 수는 있지만 매 시간 발생하는 온수 사용량을 정확하게 예측하지 못하여 실제 사용량과 오차가 발생하였다.

따라서 본 장에서는 2-히터 축열조의 설계 사항을 고려하고 예측 패턴과 실제 온수 사용량의 오차의 특성을 분석하여 온수 사용량의 예측값이 온수 공급의 안전성을 확보할 수 있는 범위 내에 들도록 실시간으로 예측값을 조정하는 하는 방안에 대해서 제시한다. 이를 통해 실제 사용량이 앞서 도출한 패턴의 예측값을 초과하는 경우에도 온수 공급의 안전성을 확보할 수 있도록 하였다.

4.2 온수 공급의 안전성을 고려한 온수 사용량 예측

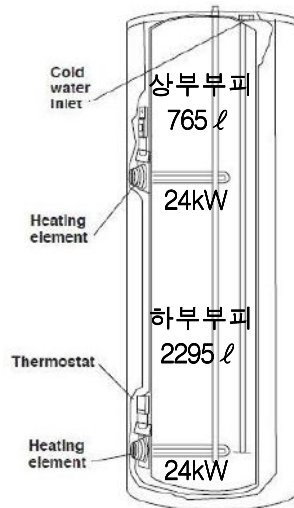
가장 이상적인 보조열원의 에너지 효율적인 운영 방안은 온수를 사용하기 직전에 필요한 양 만큼만 생산하여 공급하는 것이지만, 높은 정확도의 예측방법을 사용하더라도 예측한 값 이상의 부하의 발생 가능성은 항상 존재한다. 축열조의 보조열원의 에너지 사용량을 최대한 저감하는 것이 본 연구의 목적이지만 축열조의 기본 조건은 항상 온수를 공급할 수 있는 안전성이 우선적으로 만족되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 일반적인 용량 산정 방식으로 설계된 2-히터 축열조의 상부 히터와 축열조 상부 저장 공간의 온수는 항상 설정 온도(55℃)를 유지하여 상당 기간의 부하는 축열조 상부 히터로 대응하도록 하였다. 그리고 상부 히터를 초과하는 시각에 대해서만 하부히터를 작동하여 온수를 추가 생산함으로써 온수 공급의 안전성을 유지하도록 하였다. 즉, 온수 전체 공급량 중 예측에 의존하는 부분은 상부 히터를 초과하는 구간에만 해당하게 함으로써 온수 공급의 안전성을 높이고, 예측이 틀린 경우에도 상부 저장 공간의 온수로써 완충작용을 통해 온수 공급의 안전성을 확보할 수 있도록 하였다.

(1) 2히터-축열조 설계에 따른 온수 공급 가능 범위 설정

본 연구에서는 실측 대상 건물의 급탕 사용량에 대해 2-히터 축열조의 일반적인 설계 방식을 적용하여 축열조의 전체 부피, 보조열원의 용량 산정, 보조열원의 설치위치 등의 용량을 산정하였다. 산정 결과는 <표 4.1>과 같다.

그리고 전체 축열조 부피의 25%에 해당하는 축열조 상부 부분은 상부에 설치된 히터가 항상 설정 온도 55℃로 유지하도록 운전하여 시수온도가 가장 낮은 1월을 기준으로 1시간에 최소 383 ℓ의 온수를 생산가능하며 상부 히터의 1시간 생산량을 초과하는 부하가 발생하더라도 상부 저장 공간인 초과

량합이 765 ℓ 까지는 설정 온도로 공급 가능하다.



[그림 4.1] 설계된 2-히터 축열조 형상

<표 4.1> 실측 대상 건물의 축열조 설계 내용

항 목	산정 방법	산정 결과
축열조 전체 부피	<표 2.2>을 이용, 샤워기9개, 체육시설(동시사용율=0.4) = 850 ℓ /1개·h * 9개 * 0.4	3060 ℓ
보조열원의 용량	식(2.7)이용 =4.19*3060(55-4)/(3600*8)	24kW * 2개 (축열조 상,하부)
보조열원의 설치 위치	기존 연구 ³²⁾ 결과 참조(상,하부 부피 비=1:3), 현재 판매중인 제품 ³³⁾ 설계 참조	상부 : 765 ℓ 하부 : 2295 ℓ

32) A. Kerim Kar, Ümit Kar. op. cit.

33) Rheem - www.rheem.com

<표 4.2> 축열조 용량과 히터 가열 능력에 따른 온수 공급량

항 목	온수 공급량
히터 1시간 온수 생산량*	1개 동작시 : 384 ℓ 2개 동작시 : 768 ℓ (시수온도에 따라 가변적)
축열조 상부 부피	765 ℓ

* 참고 : 히터 1시간 온수 생산량은 서울시 최저 시수온도 4℃ 기준이며, 공급 설정 온도 55℃ 히터의 효율을 95%로 계산한 결과이다.

(2) 패턴과 실제 온수 사용량의 오차 특성 분석

도출된 패턴값으로 예측한 사용량의 값이 실제 사용량의 값보다 크게 예측할 경우는 에너지 효율 측면에서 손해 볼 수 있지만 온수 공급 안전성 측면에서 문제되지 않는다. 그렇지만 도출된 패턴값으로 예측한 사용량이 실제 사용량보다 작게 예측된 경우에는 온수 공급의 안전성 확보에 문제가 발생할 수 있으므로 이 경우에 대한 오차를 중점적으로 분석하였다.

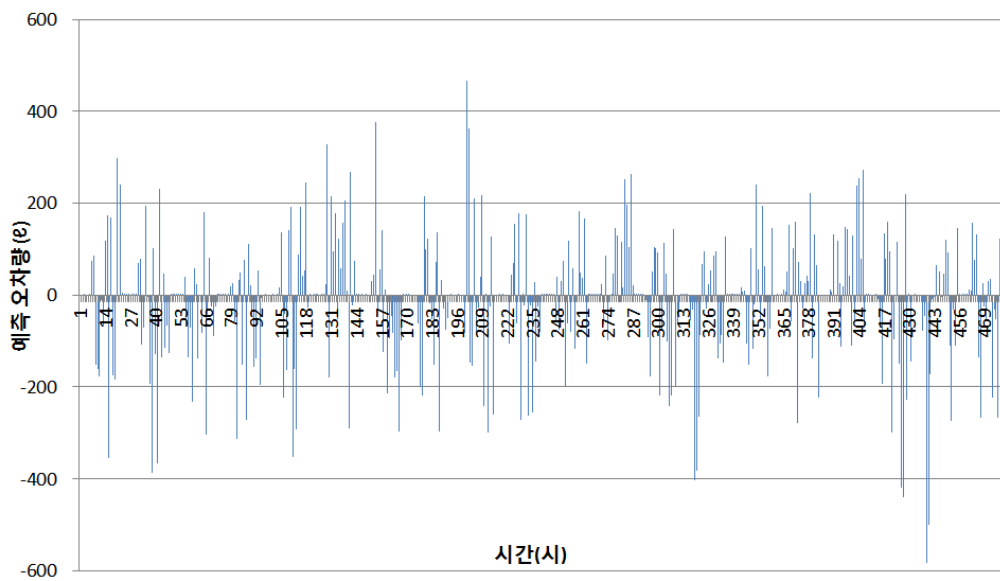
(가) 예측값에 대한 실제 사용값의 초과량 분석

[그림 3.3]의 온수 사용량 실측 결과와 같이 일반적인 2-히터 설계방식으로 설계한 경우 상부의 히터만으로 최대 온수 사용 시간대를 제외한 대부분의 시간동안 온수 공급이 가능했다. 하지만 과량의 온수를 갑자기 사용하게 되는 시간들이 있으며 앞 장에서 도출된 패턴을 이용한 예측값을 초과하여 상부 히터의 1시간 생산량을 초과하는 부하가 발생하는 경우가 있었다.

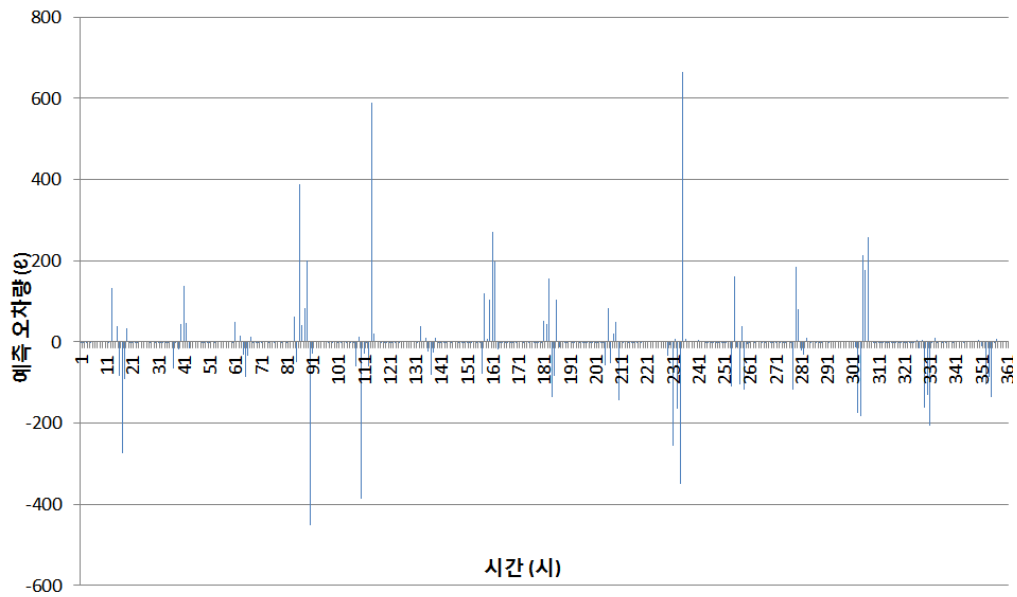
주중요일에 대하여 5일 평균값을 이용한 패턴값으로 예측한 량과 실제 사용량의 비교 결과는 [그림 4.2]와 같다. 실측 기간 중 상대적으로 더 많은 온수 사용이 예상되는 11월 1일부터 28일 중 주말을 제외한 평일 20일, 총 480

시간 중 250 ℓ 이상 초과한 시간은 28시간이었으며 패턴의 값에 비해 실제 사용량이 최대 580 ℓ 초과한 경우가 1회 있었다.

주말요일에 대해서는 [그림 4.3]에서와 같이 8월부터 11월 말까지 총 16주의 주말에 대하여 이전 주의 사용량으로써 패턴을 도출하고 실제 사용량과 값의 차이를 비교한 결과 패턴의 값을 250ℓ 이상 초과한 경우는 5시간, 최대 초과량은 450 ℓ로 나타났다.



[그림 4.2] 주중 예측값과 실제 사용량과 값의 차이 비교



[그림 4.3] 주말 예측값과 실제 사용량과 값의 차이 비교

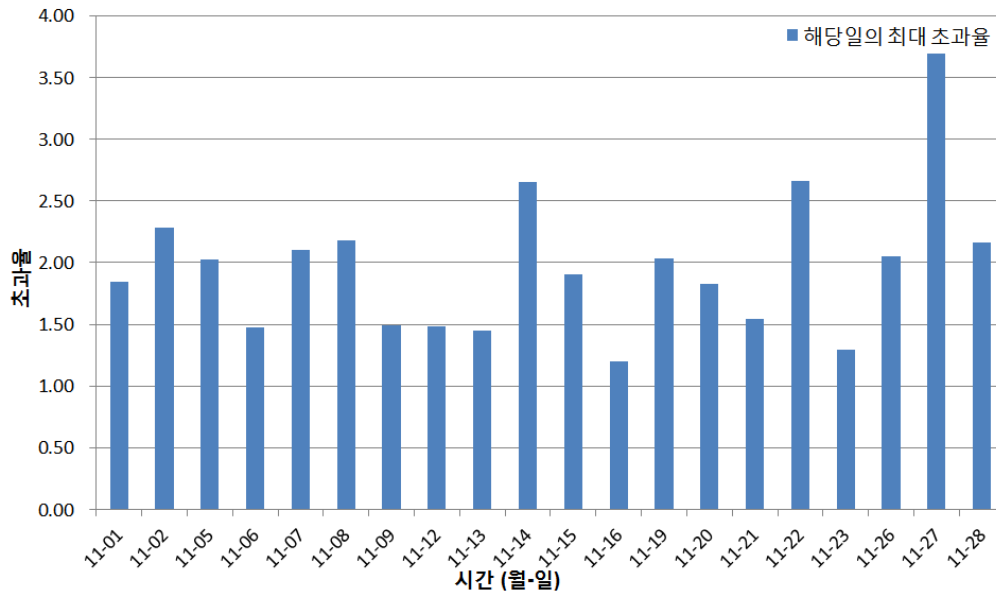
주중과 주말의 예측량과 실제 사용량의 오차 중에서도 가장 위험한 경우는 실제 사용량이 예측값을 초과하면서 동시에 상부 히터의 1시간 온수 생산량을 초과 하는 경우이다. 다음 <표 4.3>은 주중요일과 주말요일의 실제 사용량이 예측값을 초과하면서도 상부히터의 1시간 온수 생산량 (383 ℓ)을 넘어서는 시각의 초과율 평균을 나타낸 것이다. <표 4.3>의 결과와 같이 주말의 경우는 초과율 평균값이 1 미만의 값으로 나타나 예측값으로도 대부분의 시간동안 온수 공급의 안전성을 확보할 수 있는 것으로 판단되지만 주중의 경우는 초과율 평균이 1.96로 나타나 예측 온수량의 약 2배 정도까지 초과하는 것을 확인할 수 있었다.

그리고 [그림 4.4]와 [그림 4.5]는 위와 같이 예측값을 초과하면서 동시에 상부히터 생산량을 초과하는 시각 중 해당일의 최대 초과율을 나타낸

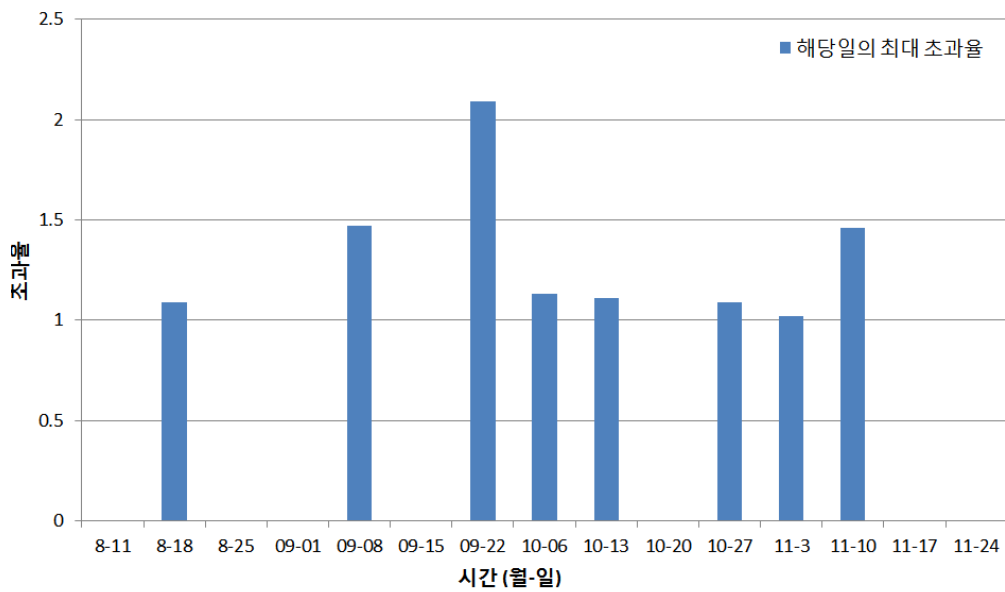
결과이다. 주말의 대부분은 2배 초과한 경우는 1회(15-16시 사이) 있었으며 [그림 3.6]을 참고하면 예측값에 2배를 초과하더라도 상,하부 히터를 통해 1시간 이내 회복이 가능한 범위이다. 주중의 경우 대부분 2배 이하의 초과율을 보였으며 11월 27일 3.5배 이상의 초과율은 사용량이 상대적으로 적은 아침에 발생한 것으로 3.5배 초과하더라도 상,하부 히터를 통해 1시간 내 회복 가능한 범위이다. [그림 4.6]은 11월 주중 평균 사용량과 각 시간별 초과율 2 이상인 회수를 나타냄으로써 상대적으로 적은 사용량이 발생하는 시각에 2배 이상의 초과율이 발생하는 것으로 나타나는 것을 알 수 있었다. 해당 시각에서 2배 이상의 초과량이 발생하더라도 하부 히터를 작동함으로써 1시간 이내에 온수 사용량을 공급 가능한 것으로 판단되었다.

<표 4.3> 주중, 주말 요일의 예측값-실제값 초과율 평균

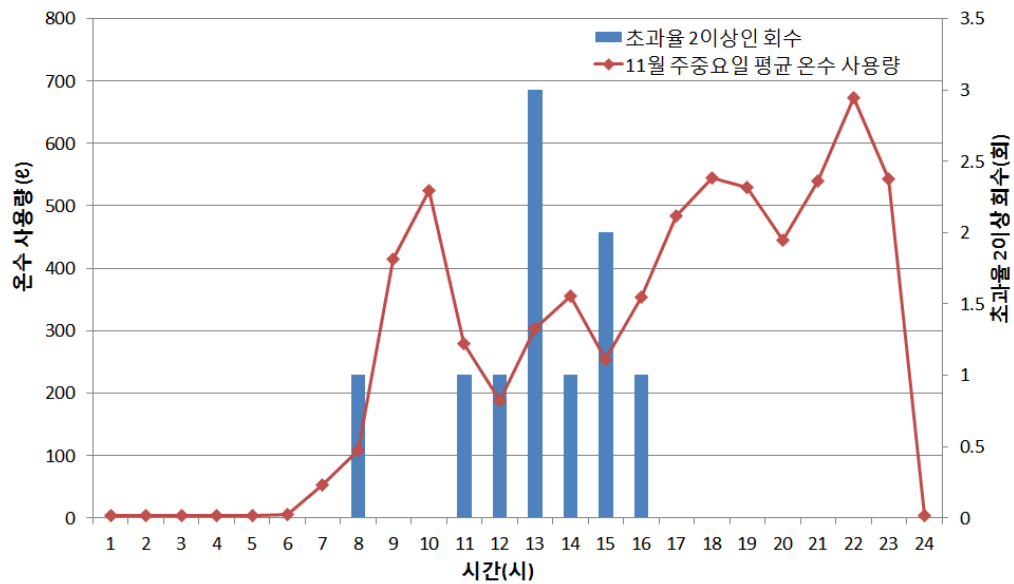
항 목	온수 공급량
주중 평균 초과율	1.96
주말 평균 초과율	0.70



[그림 4.4] 주중요일 실제 사용량의 예측값에 대한 초과율 최대값



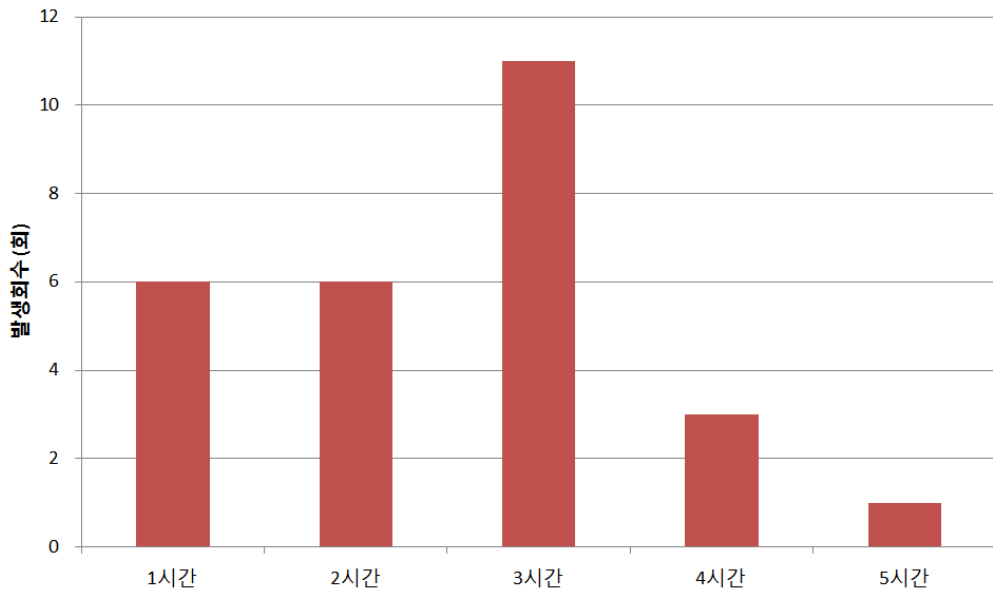
[그림 4.5] 주말 요일 실제 사용량의 예측값에 대한 초과율 최대값



[그림 4.6] 주중요일의 평균 온수 사용량과 시간별 초과율 2이상 발생 회수

(나) 실제 사용량의 예측량 초과 지속 시간 분석

주말요일의 경우 실제 사용하는 양이 예측값에 비해 초과하는 경우가 드물며 초과하더라도 초과량 자체가 적기 때문에 온수 공급의 안전성에 문제가 없다. 하지만 주중 요일의 경우 실제 사용량이 예측값을 초과하는 경우가 자주 발생하며 예측값에 대해 지속적으로 초과하는 경우에는 상,하부 히터를 동시에 작동하더라도 초과량만큼의 온수를 생산하지 못할 수 있다. 이에 따라 [그림 4.7]에서는 11월의 주중 요일에 대해 예측값보다 실제 사용량이 초과하면서도 초과가 연속적인 경우의 회수를 확인하였다. 그 결과 주로 예측값을 초과한 후 패턴과 실제값의 차이가 주로 3시간까지 연속적으로 발생하는 것으로 나타났다.



[그림 4.7] 주중요일의 실제 사용량의 예측값 초과 연속 시간의 발생 회수

(3) 온수 공급의 안전성에 대비한 온수 사용량 예측 방법

3장에서 도출된 패턴으로는 해당일의 최대 온수 사용 시각이나 시간별 평균 사용량의 경향성을 파악할 수는 있었지만, 위에서 확인된 바와 같이 패턴을 이용한 예측을 이용해서는 실제 사용량을 정확하게 예측하는 것이 어려웠다. 특히 실제 온수 사용량이 예측값 보다 많은 경우가 발생하여 온수 공급의 안전성을 위협하는 구간들이 발생하였다. 따라서 위의 오차 분석의 결과를 활용하여 패턴에 의한 예측값에 오차가 발생할 경우에도 온수를 안정적으로 공급할 수 있도록 예측값의 수정 방법이 필요하다.

온수 사용량의 전체 분포와 오차 분석 결과를 요약하면, 실측된 온수 사용량의 데이터의 결과, 피크 시간이 아닌 대부분의 구간에서는 두 개의 히터를 동시에 운전하면 한 시간 내에 온수를 공급할 수 있었다. 즉, 하부 히터를 추

가 작동할 경우 상부 히터의 가열 능력을 초과하는 양의 누적이 한 시간 내에 중지될 수 있다. 이 때, 예측값에 따라 하부 히터가 운전되는 본 연구의 방법에서, 패턴을 이용한 예측값이 실제 온수 사용량의 상부히터 생산량 초과 여부를 잘못 판단할 경우 해당시각 1시간의 상부 히터 생산량에 대한 초과량은 축열조 상부 저장공간 내에 저장된 온수량(765 ℓ)으로 공급 가능한 범위에 있었다. 오차 분석의 결과 실제 사용량이 예측값을 초과하는 경우 보통 3시간까지 초과양상이 지속되었으며 초과율은 예측값의 약 2배로 나타났다.

이에 따라, 해당시각의 실제 사용량의 값을 이용하여 예측값을 수정하는 방식을 통해 실제 해당시각의 예측 사용량을 보다 정확하게 예측하여 상부히터의 생산량을 초과하는지 여부를 판단할 수 있도록 하였다. 일반적으로 한 시간 내 온수의 총 사용량이 해당시각의 특정 시각에만 발생하지 않으므로 한 시간 내에서 온수 사용 발생확률이 균일하다고 가정하면, 해당시각의 30분 이내의 실제 사용량을 확인할 경우 해당시각의 예측값을 2배 이상 초과하는 실제 사용량이 발생하는 것을 미리 알 수 있게 되며 패턴값의 초과로 인한 상부 히터의 생산량 초과 여부를 예측할 수 있으므로 온수 공급의 안전성을 떨어뜨리는 경우를 배제할 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 패턴을 이용하여 1차적으로 해당일의 시간별 온수 사용량의 분포를 예측하고 30분 이내 간격으로 온수 사용량의 실시간 측정값을 이용하여 해당 시각의 1시간 온수 사용량을 예측하여 예측값을 초과하는 부하가 발생하는 것에 대비하였다. 오차 분석 결과와 같이 한번 예측값을 초과하는 사용량이 발생한 경우, 초과현상은 3시간까지 지속될 수 있는 사실을 반영하여, 실시간 사용량 측정값이 예측값을 초과하는 것이 감지된 이후 2시간의 패턴에 의한 예측값을 증분하여 오차 발생에 의한 온수 공급 안전성 위협요소를 최소화하고자 하였다.

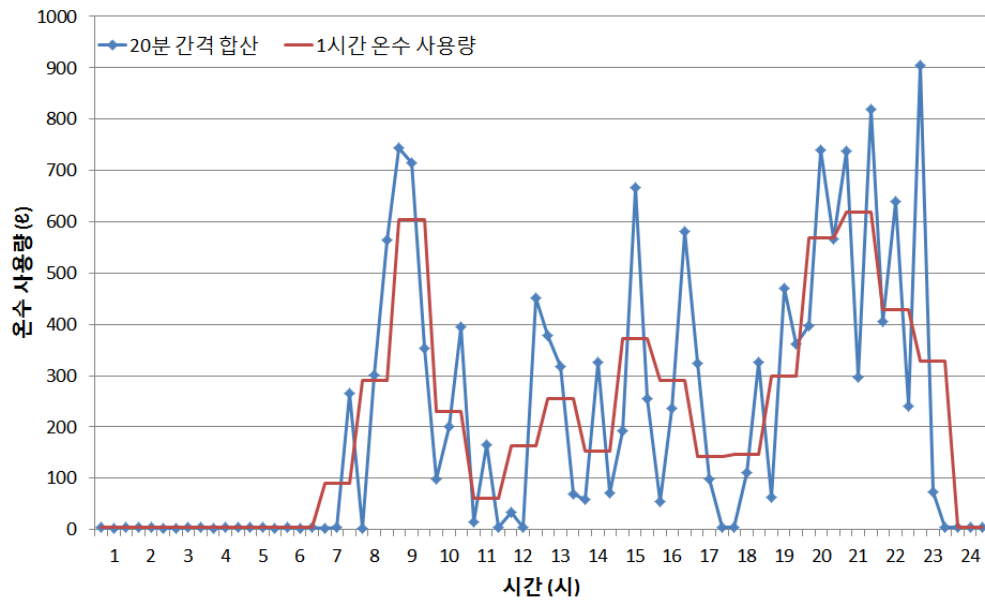
(가) 온수 사용량의 측정값의 합산 간격 결정

30분 이내의 시간 간격으로 해당 시각의 온수 사용량을 실시간 수정 예측하기 위해 10초 간격으로 측정되는 온수 사용량을 5분, 10분, 15분, 20분 간격으로 합산하여 실제 1시간 사용값과 비교했다. 5분의 합산간격일 경우 5분 동안 측정, 합산된 사용량 값에 12배하여 해당 시각 1시간 사용량을 예측하고 10분의 경우 6배, 15분의 경우 4배, 20분의 경우 측정값의 3배를 해당 시각의 1시간 사용량으로 예측하는 방식이다. <표 4.4>는 각각의 합산간격에 따른 측정값에 의한 1시간 예측값과 온수 사용이 없는 일요일을 제외한 11월 한 달간의 실제 1시간 사용량과의 차이에 대해 표준편차 결과이다. 20분 간격으로 합산할 경우 해당 시각의 실제 사용량과 가장 편차가 적은 것을 확인할 수 있었다.

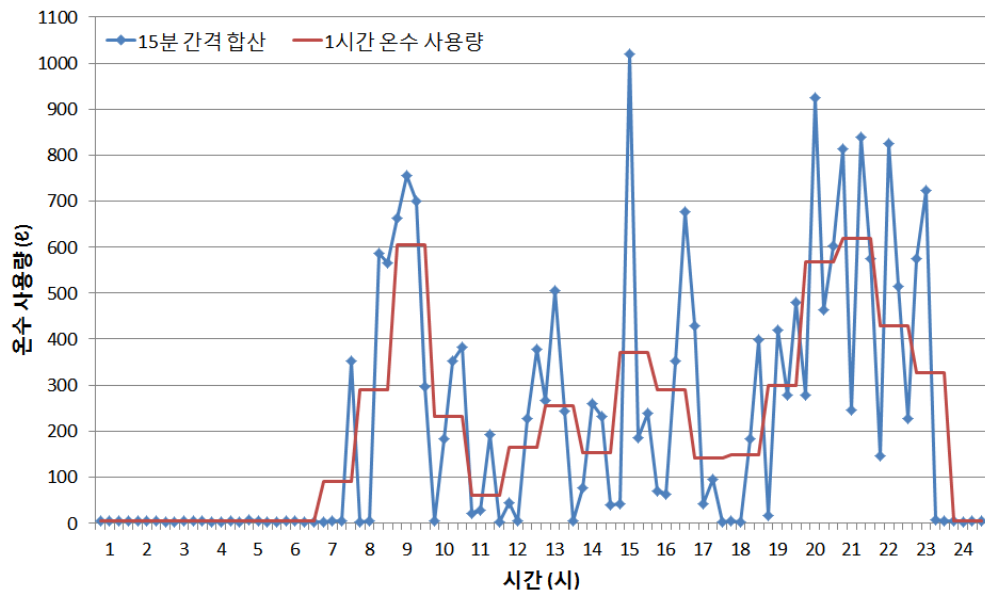
[그림 4.8]~[그림 4.11]을 비교하면 5분 간격으로 합산할 경우, 해당 시각의 실제 사용량을 최대 55분 전에 예측할 수 있지만 실제 사용량과의 오차가 크게 나타나게 되어, 2시간 이내 구간의 패턴값에 적용 같은 오차율을 적용할 경우 하부 히터의 잦은 on/off가 발생할 우려가 있다. 따라서 비교적 작은 오차범위 내에서 안정적으로 1시간 사용량을 예측할 수 있도록 20분 간격으로 합산하는 방안이 타당하다고 판단된다.

<표 4.4> 합산 간격에 따른 실제 1시간 사용량과의 표준편차 비교

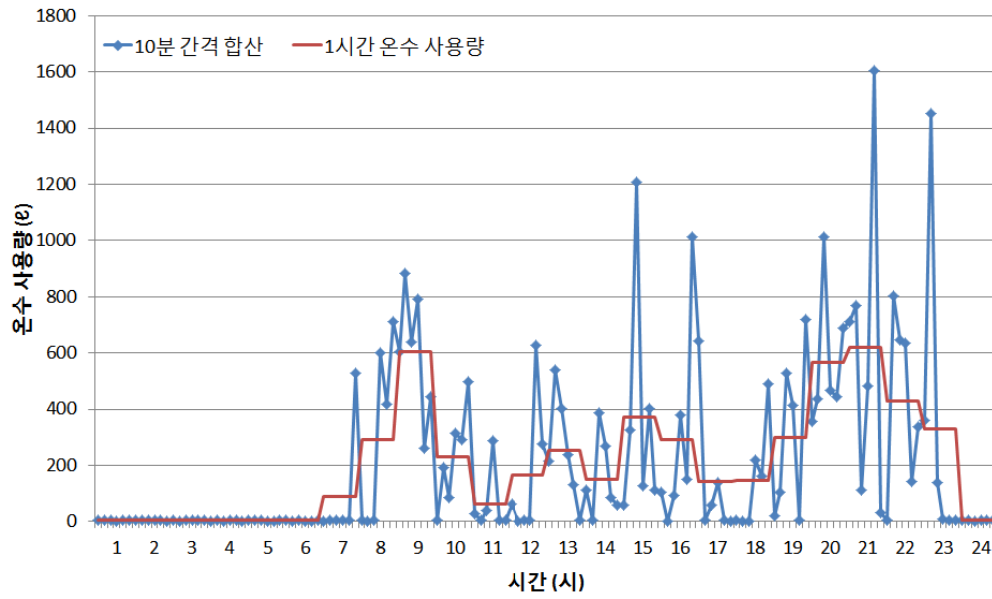
항목	표준 편차
측정값의 합산 간격 (5분)	414.38
측정값의 합산 간격 (10분)	354.34
측정값의 합산 간격 (15분)	306.38
측정값의 합산 간격 (20분)	265.99



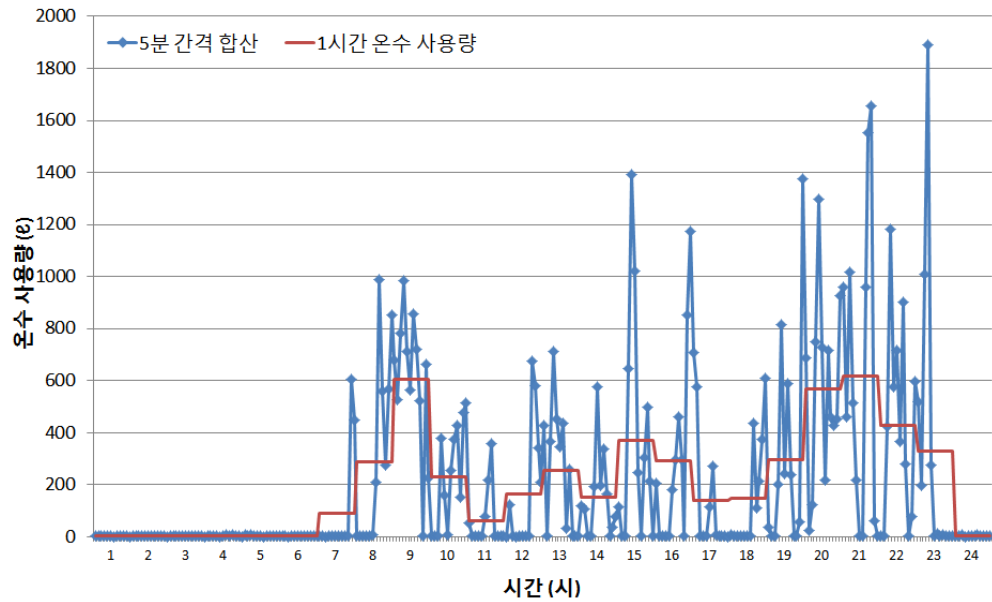
[그림 4.8] 온수 사용량 실측값의 20분 간격 합산값과 1시간 사용량 비교



[그림 4.9] 온수 사용량 실측값의 15분 간격 합산값과 1시간 사용량 비교



[그림 4.10] 온수 사용량 실측값의 10분 간격 합산값과 1시간 사용량 비교



[그림 4.11] 온수 사용량 실측값의 5분 간격 합산값과 1시간 사용량 비교

(나) 실시간 사용량 측정값을 반영한 예측값 계산

먼저 24시간 간격으로 해당일의 요일에 따라 패턴의 값을 이용하여 24시간의 각 시간별 온수 사용량을 예측한다. 이후 20분 간격으로 온수 사용량 실측값을 합산하여 해당 시각의 사용량이 이미 패턴으로 예측된 해당시각의 값을 초과할 것으로 판단되면 해당시각과 이후 2시간, 총 3시간 동안 초과율을 부여하여 해당 시각 포함 3시간의 온수 사용량 예측값을 수정하며 3시간 이후의 시각의 온수 사용량은 패턴에 의한 예측값을 유지한다. 매일 24시간 단위로 해당일의 실제 1시간 사용량 값을 저장하여 다음일의 온수 사용량 계산에 이용하도록 한다. 다음 [그림 4.12]는 패턴을 통해 예측하는 단계에서부터 실측값을 이용해 해당시각의 사용량을 수정하는 부분을 포함하는 예측 방법의 흐름도이다.

① 해당 시각의 합산값에 의한 해당시각 1시간 사용량 예측 계산식

$$\begin{aligned}
 q_{i,exp_h} &= 3 \times q_{i,sum1} \\
 &= q_{i,sum1} + q_{i,sum2} + 0.5(q_{i,sum1} + q_{i,sum2}) \\
 &= q_{i,sum1} + q_{i,sum2} + q_{i,sum3}
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

여기서,

- q_{i,exp_h} : 실측 해당 시각 1시간 사용 예측량, l
- $q_{i,sum1}$: 해당 시각 0~20분 동안 실제 온수 사용량, l
- $q_{i,sum2}$: 해당 시각 20~40분 동안 실제 온수 사용량, l
- $q_{i,sum3}$: 해당 시각 40~60분 동안 실제 온수 사용량, l

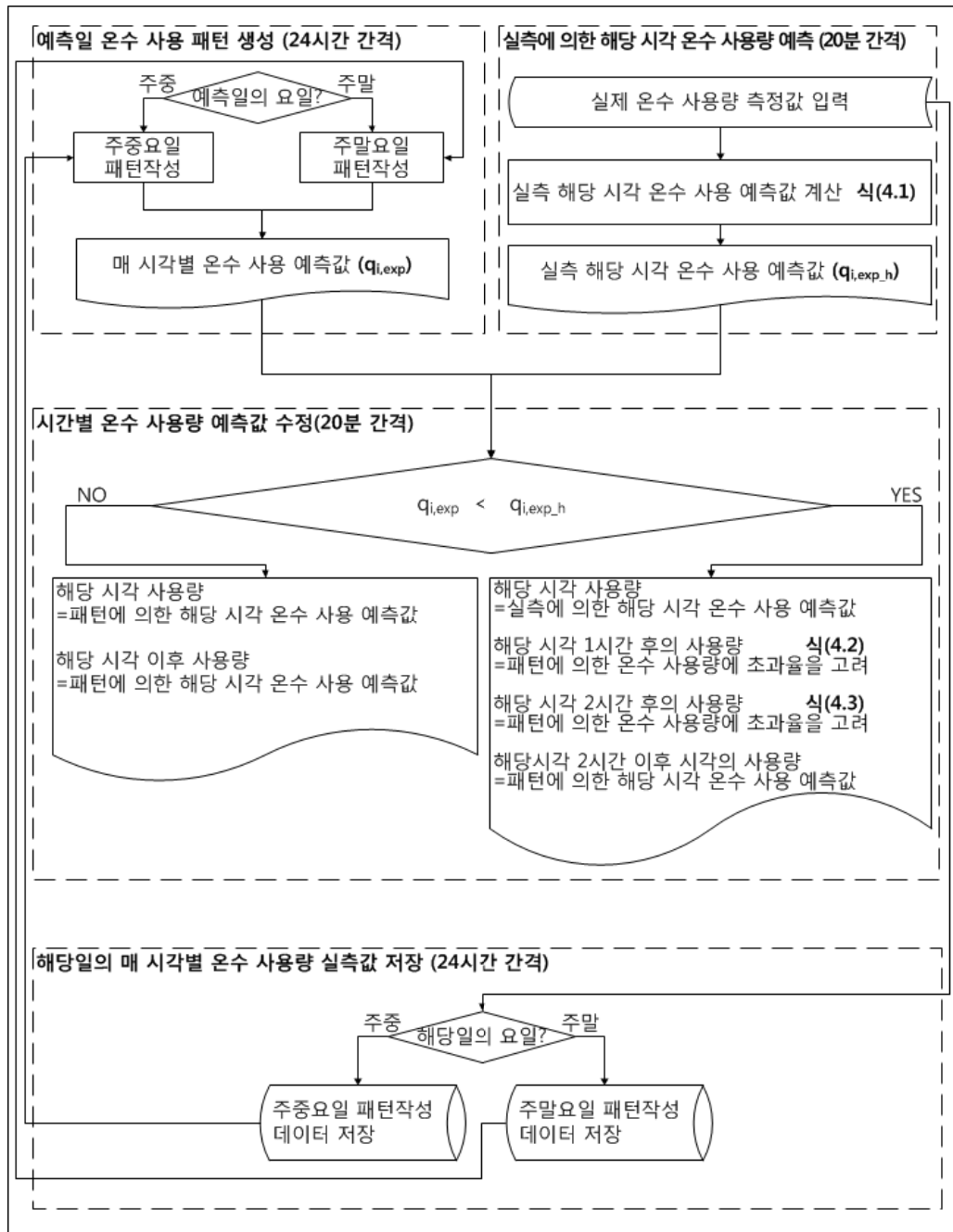
② 실측 합산값에 의한 해당 시각의 1시간 사용량 예측값이 패턴에 의한 예측값을 초과할 경우 초과 시각 이후 2시간의 패턴 예측값에 초과율 고려

$$q_{i+1,exp_h} = q_{i+1,exp} \times \frac{q_{i,exp_h}}{q_{i,exp}} \quad (4.2)$$

$$q_{i+2,exp_h} = q_{i+2,exp} \times \frac{q_{i,exp_h}}{q_{i,exp}} \quad (4.3)$$

여기서,

- q_{i,exp_h} : 실측 해당 시각 1시간 사용 예측량, ℓ
- $q_{i+1,exp}$: 예측값의 초과시각 1시간 이후 시각의 패턴에 의한 해당 시각 온수 사용 예측값, ℓ
- q_{i+1,exp_h} : 예측값의 초과시각 1시간 이후 시각의 초과율이 고려된 예측값, ℓ
- $q_{i+2,exp}$: 예측값의 초과시각 2시간 이후 시각의 패턴에 의한 해당 시각 온수 사용 예측값, ℓ
- q_{i+2,exp_h} : 예측값의 초과시각 2시간 이후 시각의 초과율이 고려된 예측값, ℓ

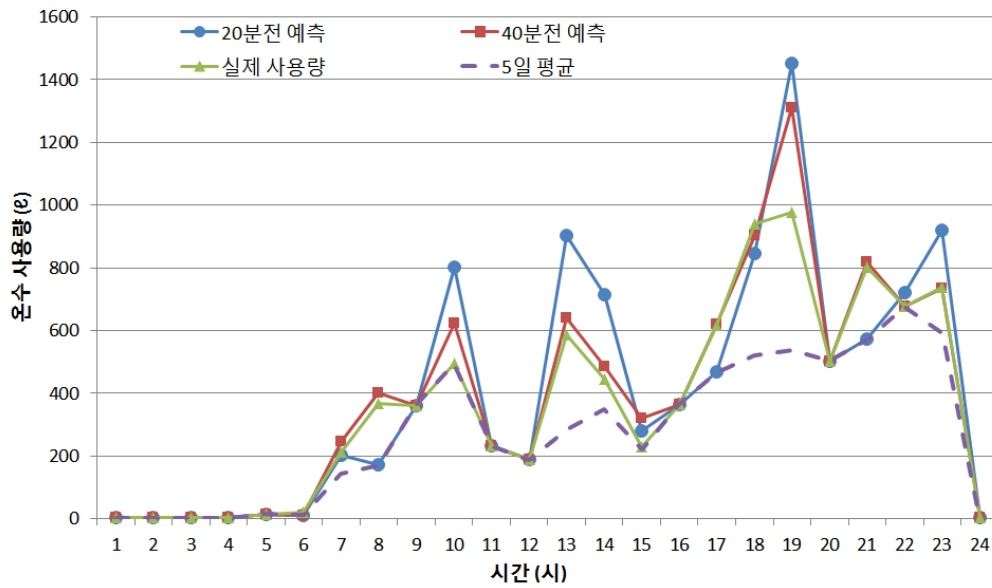


[그림 4.12] 온수 사용량 예측 방법의 전체 흐름도

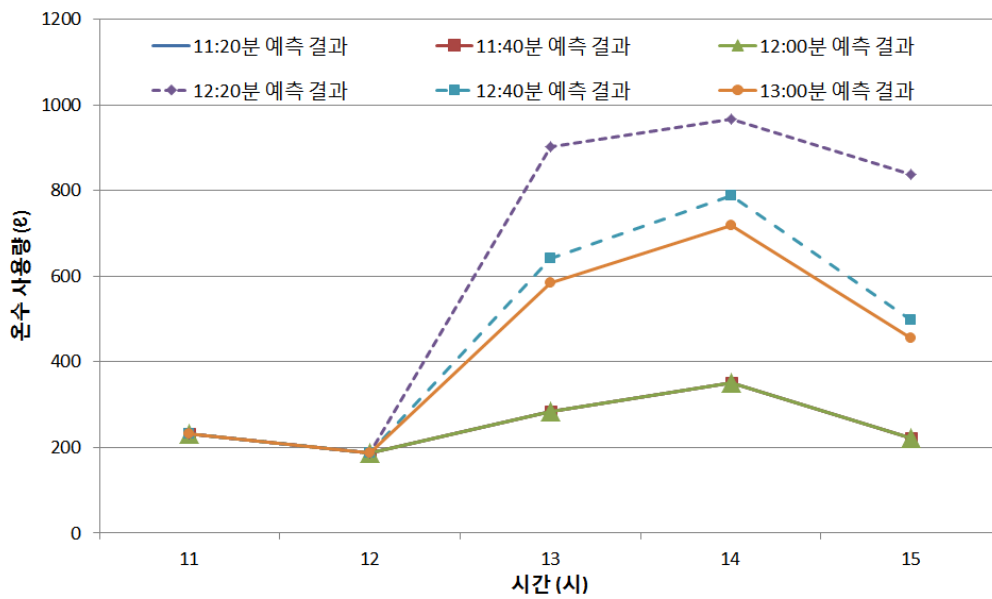
(다) 온수 사용량 예측 방법에 의한 예측 결과

[그림 4.13]은 측정 기간 중, 평균적인 사용량값인 패턴의 예측 결과와 실제 사용량이 매우 상이했던 11월 26일의 경우에 대하여 제안된 예측의 수정 방법을 적용하여 해당 시각의 20분 전, 40분 전의 예측 결과를 비교한 그래프이다. 11월의 경우 평균 시수 온도 17.6 °C로써 상부 히터의 1시간 온수 생산량은 히터 가열능력 24kW (효율 95%) 기준으로 523 ℓ이다. 패턴에 의한 예측만으로 온수 사용량의 상부히터 생산량 초과여부를 판단했다면 12시-15시 사이에 상부히터만으로 온수 공급이 가능하다고 판단하여 하부히터는 추가적으로 작동하지 않게 되어 온수 공급의 안전성을 저해할 수 있다. 하지만 실제 사용량을 실시간으로 측정하여 20분마다 사용량을 수정하여 예측한 결과, 5일 평균값으로 예측한 패턴 결과와 달리 13-14시의 상부 히터 생산량 초과 여부를 사전에 예측할 수 있었다.

[그림 4.14]는 [그림 4.13]의 12-15시 사이에 대하여, 실시간으로 측정된 온수 사용량을 반영하여 수정하는 과정을 나타낸 결과이다. 12시 20분에 측정된 사용량(12시-12시 20분 사이의 온수 사용량)을 이용하여 기존의 5일 평균값으로 예측한 13시의 사용량보다 큰 양이 소비될 것을 예측하였으며 이 값은 실제 사용량과 유사하게 예측함으로써 상부 히터 생산량을 초과하는 부하가 발생하는 것을 예측한 것이다. 따라서 본 장에서 제시한 예측 방법을 이용하여 온수 공급의 안전성을 확보할 수 있다고 판단하였다.



[그림 4.13] 온수 사용량 예측 결과 예시



[그림 4.14] 실측 온수 사용량 데이터를 이용한 예측값의 수정 예시

4.3 온수 사용량의 예측값을 이용한 보조 히터 운전 방안 도출

(1) 보조 히터 운전 방안 개념

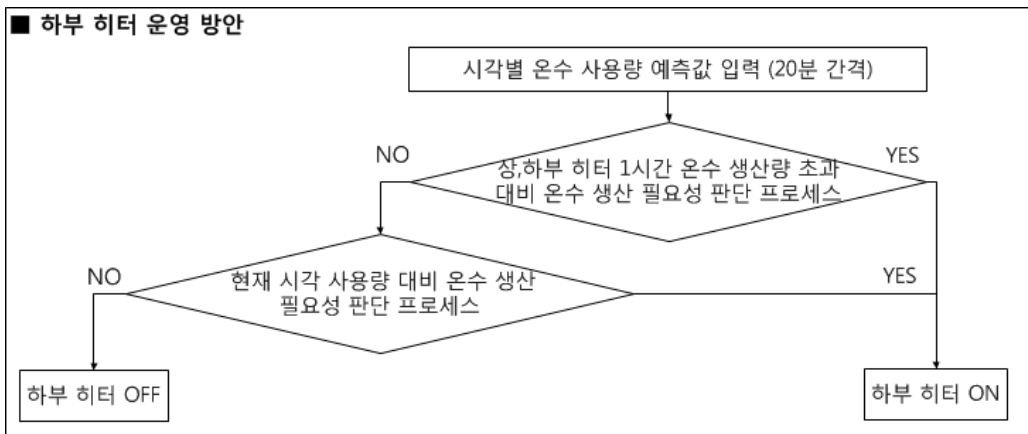
보조열원 내장형 축열조의 보조열원에서 사용하는 에너지를 최대한 저감하는 것이 본 연구의 목적이지만 축열조의 기본 조건은 항상 온수를 공급할 수 있는 온수 공급의 안전성이 우선적으로 만족되어야 한다. 즉, 온수 공급의 안전성을 우선 만족하면서 에너지 효율적인 운영이 이루어져야 한다. 앞서 2장과 3장에서도 언급하였듯이, 온수 공급의 안전성을 위해서는 매시간 사용하는 온수량을 생산·저장되어 있어야 하며, 보조열원 내장형 축열조의 집열량 증대나 손실 에너지를 줄이는 등 에너지 효율의 개선을 위해서는 축열조 하부의 온도가 가능한 낮게 유지되는 것이 좋다.

따라서 본 연구에서는 일반적인 용량 산정 방식으로 설계된 2-히터 축열조의 상부 히터와 축열조 상부 저장 공간의 온수는 항상 설정 온도(55℃)를 유지하여 상당 기간의 부하는 축열조 상부 히터와 상부 저장 공간 만으로 대응하도록 하였다. 그리고 앞에서 24시간 간격으로 예측하는 일일 온수 사용량과 20분 간격으로 수정되는 온수 사용량 예측값을 이용하여 상부 히터 생산량을 초과하는 부하의 발생이 예측되는 시각에 대해서만 하부히터를 작동하여 온수를 추가 생산하게 함으로써 온수 공급의 안전성 유지와 동시에 축열조 하부 온도를 낮게 유지함으로써 축열조로 인한 손실 가능 에너지를 줄일 수 있도록 하였다.

(2) 하부 히터의 운전 방안

축열조 내부에 설치된 상부, 하부의 히터는 설계된 용량에 따라 1시간 동안 생산 가능한 온수량은 식(4.4)과 같이 구할 수 있다. 따라서 상, 하부 히터의 1시간 생산량을 초과하는 온수사용량이 존재하는 부하 패턴을 가진 시설의 경우에는 상,하부 히터 생산량을 초과하는 부하가 발생하는 시각 이전부터 실제 필요한 양 이상의 온수를 생산하여 축열조에 저장하도록 해야 한다.

이 외의 경우에는 상부 히터 외에 하부 히터를 동시에 작동하여 1시간 이내에 상부 히터의 생산량에 대한 초과량에 대해 보충이 가능하다. 따라서 20분 간격으로 예측되는 해당 시각의 온수 사용량이 상부 히터의 1시간 온수 생산량을 초과하는지 여부에 따라 하부히터를 추가적으로 작동함으로써 온수 공급의 안전성을 유지하도록 한다. 예측값을 이용 하여 위의 두 경우에 따라 하부 히터의 작동을 [그림 4.15]와 같이 나타낼 수 있으며 “상,하부 히터 1시간 온수 생산량 초과 대비 온수 생산 필요성 판단 프로세스”와 “현재 시각 사용량 대비 온수 생산 필요성 판단 프로세스”는 각각 [그림 4.16]와 [그림 4.17]에 제시하였다.



[그림 4.15] 하부 히터 운영 방안

(가) 상, 하부 히터 1시간 온수 생산량 초과 대비 온수 생산 필요성 판단 프로세스

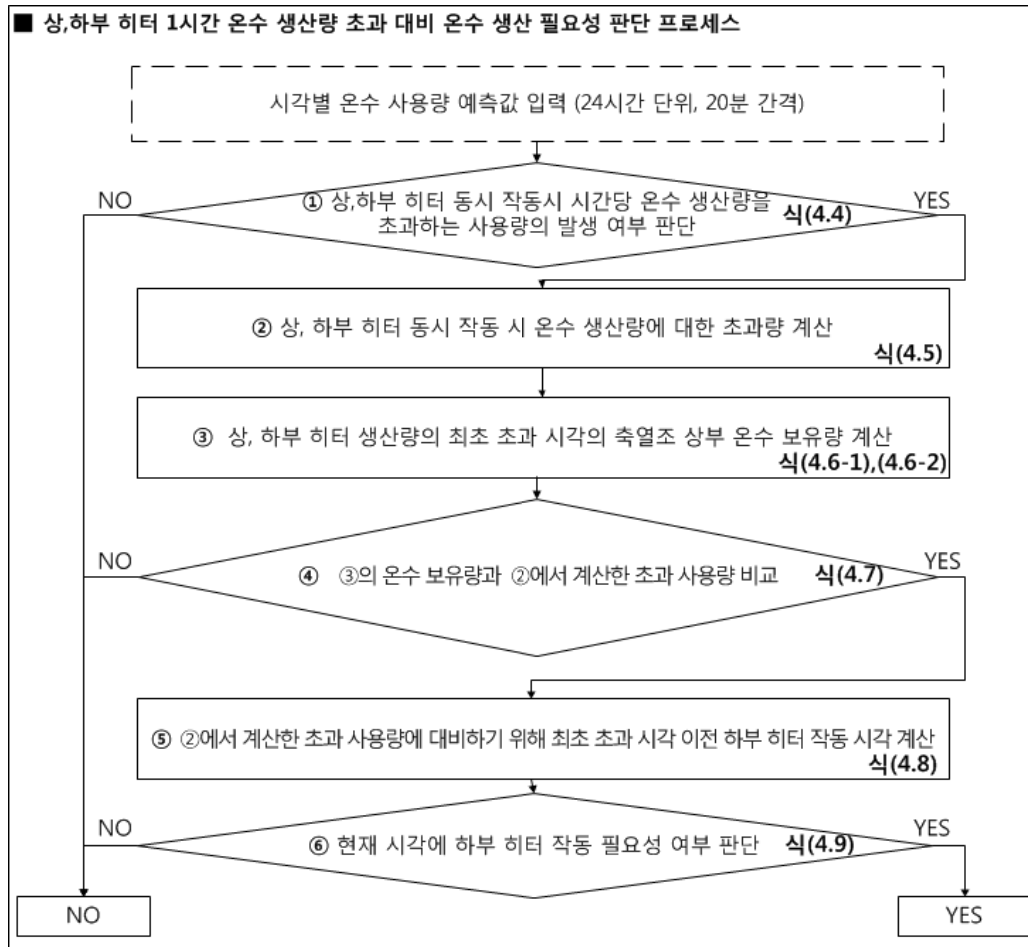
일반적인 2-히터 축열조의 설계방식을 따르면, 1시간 동안의 온수 사용량이 1시간 동안 상,하부 히터의 생산량을 초과하는 경우는 거의 없다. 상,하부 2개의 히터를 모두 작동하여 온수를 생산해도 사용량만큼 공급할 수 없는 경우가 연중 일정하게 자주 발생한다면 히터의 설계 용량을 늘려야만 한다. 하지만 연중 특정기간동안 희박하게 상,하부 히터의 1시간 생산량을 초과하는 온수사용량이 존재하는 부하 패턴을 가진 시설의 경우에는 상,하부 히터 생산량을 초과하는 부하가 발생하는 시각 이전부터 해당 시각에 실제 필요한 양 이상의 온수를 생산, 저장하여 상,하부 히터 1시간 생산량을 초과하는 시각에 대비해야 한다.

이를 위해, 먼저 패턴에 따른 24시간 단위의 예측값을 이용하여 설계된 상, 하부 히터의 온수 생산량을 초과하는지 여부를 판단한다. 해당일에 상, 하부 히터의 온수 생산량을 초과하는 구간이 없다면 하부 히터를 추가로 켜 필요 없다고 판단하고 바로 “현재 시각 사용량 대비 온수 생산 필요성 판단 프로세스”를 진행한다.

초과하는 구간이 있다면 식(4.5)를 이용하여 초과량을 계산한다. 이 때 계산된 초과량은 상,하부 히터의 생산량을 최초로 초과한 시각 이전에 저장되어 있어야만 한다. 식(4.6-1),(4.6-2)를 이용하여 최초 초과 시각의 온수 보유량이 초과량보다 클 것으로 예측된 경우, 미리 추가적인 온수 생산할 필요가 없다고 판단하고 “현재 시각 사용량 대비 온수 생산 필요성 판단 프로세스”를 진행한다.

최초 초과 시각에서의 온수 보유량이 초과량보다 작다고 예측되는 경우에는 최초 초과 시각 이전에 추가적으로 온수를 생산하여 저장해둔다. 이때 식(4.8)을 이용하여 예측된 초과량을 준비하기 위한 시간을 계산하여 최종적으로

로 현재 시점에서 미래의 상,하부 히터의 온수 생산량을 초과하는 시각에 대비해서 하부 히터의 작동 여부를 결정한다. 위의 과정을 정리하면 다음 [그림 4.16]과 같다.



[그림 4.16] 상,하부 히터 1시간 온수 생산량 초과 대비 온수 생산 필요성 판단 프로세스

① 상, 하부 히터 동시 작동 시 시간당 온수 생산량 계산

상, 하부 히터 동시 작동 시 시간당 온수 생산량은 상, 하부 각 히터의 가열 능력(H_{upper} , H_{lower})에 따라 식(4.4)를 이용하여 계산된다. 이때, 설계된 각 히터의 가열능력에 대해 일반적으로 사용되는 전기 히터의 효율값인 0.95³⁴⁾와 함께, 급탕을 위한 축열조의 설정온도(t_h)와 해당일의 시수온도(t_c)를 고려하여 계산한다.

$$\dot{V}_{upper} + \dot{V}_{lower} = \frac{3600 \cdot 0.95(H_{upper} + H_{lower})}{c_w \rho_w (t_h - t_c)} \quad (4.4)$$

여기서,

- \dot{V}_{upper} : 상부 히터의 1시간 온수 생산량, ℓ
- \dot{V}_{lower} : 하부 히터의 1시간 온수 생산량, ℓ
- H_{upper} : 상부히터의 가열 능력, kW
- H_{lower} : 하부히터의 가열 능력, kW
- t_c : 시수온도, $^{\circ}\text{C}$
- t_h : 급탕설정온도, $^{\circ}\text{C}$
- c_w : 물의 비열, $\text{kJ/kg}^{\circ}\text{C}$
- ρ_w : 물의 밀도, kg/ℓ

34) ACEEE (American Council for an Energy-Efficient Economy),
<http://aceee.org/consumer/water-heating>

② 상, 하부 히터 동시 작동 시 시간당 온수 생산량에 대한 초과량 계산 패턴을 통해 예측된 해당일의 24시간 단위의 시간당 온수 사용량을 확인하고, 식(4.4)를 이용해서 계산된 상,하부 히터의 온수 생산량을 초과하는 양을 다음 식(4.5)와 같이 계산한다. 본 연구에서는, 일반적인 2-히터 축열조의 설계방식을 따를 경우 1시간 동안의 온수 사용량이 1시간 동안 상,하부 히터를 동시에 작동하여 생산한 온수량을 초과하는 경우는 거의 없으며 초과할 경우는 해당일의 피크시간대를 전후하여 1회만 발생한다고 가정하였다.

$$V_{2over} = \sum_{n=1}^{24} (V_{n,overload} - (\dot{V}_{upper} + \dot{V}_{lower})) \quad (4.5)$$

여기서,

- \dot{V}_{upper} : 상부 히터의 1시간 온수 생산량, ℓ
- \dot{V}_{lower} : 하부 히터의 1시간 온수 생산량, ℓ
- V_{2over} : 상,하부 히터의 1시간 온수 생산량에 대한 초과량, ℓ
- $V_{n,overload}$: n시간에 발생한 상, 하부 히터의 1시간 온수 생산량을 초과하는 온수 사용량, ℓ

③ 상,하부 히터 생산량 최초 초과 시각(i시각)의 축열조 상부 부분 온수 보유량 계산

상부히터를 이용하여 축열조의 상부 부분은 항상 설정온도를 유지되도록 운전된다. 따라서 해당 시각 1시간 동안의 온수 사용량이 상부 히터의 1시간 온수 생산량보다 작은 경우에는 해당 시각 안에 사용한 온수량 만큼을 회복가능하다고 가정하여 식(4.6-1)과 같이, 상부 히터의 윗부분에 해당하는 축열조 상부 부분의 부피만큼 온수가 그대로 저장되어 있다고 계산한다. 한편, 해당

시각 이전의 온수 사용량이 상부 히터의 생산량을 초과한 경우에는 초과량만큼 축열조 상부 부분의 부피에서 공급했다고 가정하여 식(4.6-2)와 같이 축열조의 상부 부피에서 초과량만큼을 제하여 계산한다.

$$V_{i,store} = V_{up_storage} \quad (4.6-1)$$

$$V_{i,store} = V_{up_storage} - (V_{i-1,Load} - \dot{V}_{upper}) \quad (4.6-2)$$

여기서,

- \dot{V}_{upper} : 상부 히터의 1시간 온수 생산량, ℓ
- $V_{i,store}$: i시각의 축열조 상부 부분 온수 보유량, ℓ
- $V_{up_storage}$: 2-히터 축열조의 설계에 따른 상부 부피, ℓ
- $V_{n,load}$: n시각의 온수 사용량, ℓ

④ 온수 보유량과 상,하부 히터 동시 생산량의 초과량과의 비교

식(4.6)을 통해 계산된 최초 초과 시각의 축열조 상부 온수 저장량과 해당 일의 상,하부 히터 생산 초과량의 값을 비교하여 상부 온수 저장량이 작은 경우는 최초 초과 시각 이전에 온수를 생산, 저장해야한다고 판단하여 하부히터를 추가로 작동해야 한다.

$$V_{i,store} < V_{2over} \quad (4.7)$$

여기서,

- V_{2over} : 상,하부 히터의 1시간 온수 생산량에 대한 초과량, ℓ
- $V_{i,store}$: i시각의 축열조 상부 부분 온수 보유량, ℓ

⑤ 초과 사용량에 대비하기 위해 초과 시각 이전 하부 히터의 작동 시각 계산
 다음 식(4.8)과 같이, 상, 하부 히터 공급 불가 시점의 최초 시각부터 1시각
 씩 줄이며 해당시각의 예측 사용량에 대해 상, 하부 히터를 동시에 켜올 때
 온수 회복량을 계산한다.

$$\begin{aligned}
 i\text{시} : \quad V_{i,ready} &= (\dot{V}_{upper} + \dot{V}_{lower}) - V_{i,load} & (4.8) \\
 i-1\text{시} : \quad V_{i-1,ready} &= (\dot{V}_{upper} + \dot{V}_{lower}) - V_{i-1,load} \\
 i-2\text{시} : \quad V_{i-2,ready} &= (\dot{V}_{upper} + \dot{V}_{lower}) - V_{i-2,load} \\
 \dots & : \quad \dots
 \end{aligned}$$

여기서,

- \dot{V}_{upper} : 상부 히터의 1시간 온수 생산량, ℓ
- \dot{V}_{lower} : 하부 히터의 1시간 온수 생산량, ℓ
- $V_{n,load}$: n시각의 온수 사용량, ℓ
- $V_{i,ready}$: i시각에서의 미래 부하에 대한 준비량, ℓ

⑥ 현재 시각에 하부 히터 작동 필요성 여부 판단

앞의 ⑤단계에서 계산된 값에 의해 식(4.9)를 만족하는 최후의 시각을 산출한다. 산출된 k시각이 현재 시각 이후의 값이면 현 시점에서 미래의 초과 부하로 인한 준비는 필요 없다고 판단하고 다음 프로세스로 진행하며 현재 시각부터 미래의 초과 부하를 온수를 추가 생산해야한다고 판단되면 하부히터를 작동하도록 한다.

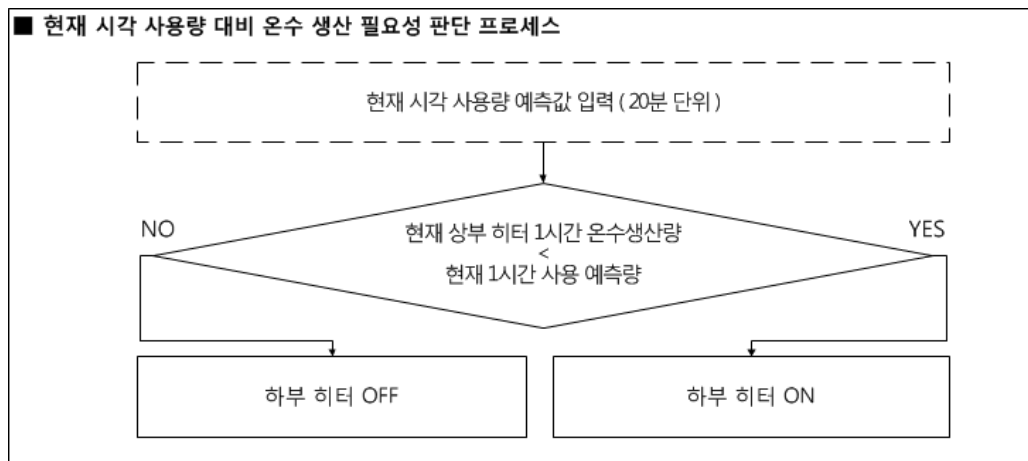
$$V_{i,ready} + V_{i-1,ready} + V_{i-2,ready} + \dots + V_{k,ready} + V_{i,store} > V_{2over} \quad (4.9)$$

여기서,

- V_{2over} : 상,하부 히터의 1시간 온수 생산량에 대한 초과량, ℓ
- $V_{i,store}$: i시각의 축열조 상부 부분 온수 보유량, ℓ
- $V_{i,ready}$: i시각에서의 미래 부하에 대한 준비량, ℓ

(나) 현재 시각 사용량 대비 온수 생산 필요성 판단 프로세스

20분 단위로 현재 시각 온수 사용량 예측값을 확인하여 해당시각의 사용량이 상부 히터의 1시간 생산량(\dot{V}_{upper})을 초과한다고 판단되는 경우 하부 히터를 작동하여 온수 공급을 보충하도록 하였으며 상부 히터가 있는 위치의 온도 센서가 설정 온도의 데드 밴드(예. $55-5 = 50^{\circ}\text{C}$)를 유지하는 범위에서 히터를 동작하도록 하였다.



[그림 4.17] 현재 시각 사용량 대비 온수 생산 필요성 판단 프로세스

4.4 소결

본 장에서는 3장에서 도출된 온수 사용량 패턴을 이용한 온수량 예측 방식을 시스템의 운영에 적용할 경우 발생할 수 있는 온수 공급의 안전성 문제를 해결하기 위해 패턴에 의한 예측값과 실제 사용량 사이에 발생하는 오차의 특징을 분석하여 해당 시각 실제 사용량을 실시간으로 참조하여 예측값을 수정하는 방안을 제시하였다. 이와 함께 일반적인 2-히터 축열조의 설계 방식을 적용하여 상부 히터의 온수 생산량과 상부 저장 공간의 온수량을 이용해 예측시 발생 가능한 오차로 인해 온수 공급의 안전성을 떨어뜨리는 경우를 배제할 수 있었다. 또한 수정된 예측값을 이용한 2-히터 축열조의 하부 히터를 운영하는 방안에 대해 제시 하였다. 본 장의 내용을 요약하면 다음과 같다.

(1) 주중요일에 대하여 5일 평균값을 이용한 패턴값으로 예측한 양과 실제 사용량의 비교 결과, 11월 1일부터 28일 중 주말을 제외한 평일 중 최대 580ℓ (오전 8-9시) 초과한 경우가 1회 있었다. 주말요일의 경우 8월부터 11월 까지 총 16일 동안 패턴에 의한 예측값과 실제 사용량과 값의 차이를 비교한 결과 최대 초과량은 450 ℓ(15-16시)로 나타남에 따라 예측값을 초과한 값이 일반적인 2-히터 축열조의 설계 방식에 의한 상부 저장 공간에서 1시간 동안은 온수 공급의 안전성을 유지할 수 있는 범위 내로 나타났지만 예측값에 대해 1시간 이상 초과할 경우를 대비하여 패턴에 의한 예측값의 수정이 필요하다고 판단되었다.

(2) 잘못된 예측에 의해 온수 공급의 안전성을 떨어뜨릴 수 있는 경우로써, 실제 사용량이 패턴에 의한 예측값을 초과하면서 동시에 상부 히터의 1시간 온수 생산량을 초과하는 경우에 대한 분석을 실시한 결과 패턴에

의해 예측한 값을 초과하는 실제 사용량의 초과율은 주중 평균 약 2배, 주말 평균 0.7배로 나타났으며 패턴에 의한 예측값을 초과한 후, 예측값의 초과현상이 3시간 지속되는 경우가 자주 발생하는 것으로 나타났다.

(3) 오차 분석 결과를 바탕으로, 예측 해당 시각의 온수 사용량을 30분 이내 간격(20분)으로 실시간 참고하여 주로 발생하는 오차 범위인, 패턴에 의한 예측값의 2배 이상 초과하는 경우를 사전에 예측할 수 있도록 하였다. 또한 해당 시각의 온수 사용량이 패턴에 의한 예측값을 초과할 것이라고 판단된 경우, 해당시각과 이후 2시간의 예측값을 실시간으로 수정하여 해당 시각의 온수 사용 예측값이 상부 히터 생산량을 초과 가능성 여부를 보다 정확하게 예측할 수 있게 하였다.

(4) 패턴에 의한 24시간 단위의 예측과 실측에 의해 20분 간격의 예측값을 수정하는 방법에 의해 예측되는 온수 사용량을 이용하여 상부 히터의 1시간 온수 사용량을 초과하는지 여부를 판단하여 해당 시각의 사용량이 상부히터 생산량을 초과한다고 판단될 경우 하부 히터를 작동하여 온수 공급의 안전성을 유지하는 방안을 제시하였다.

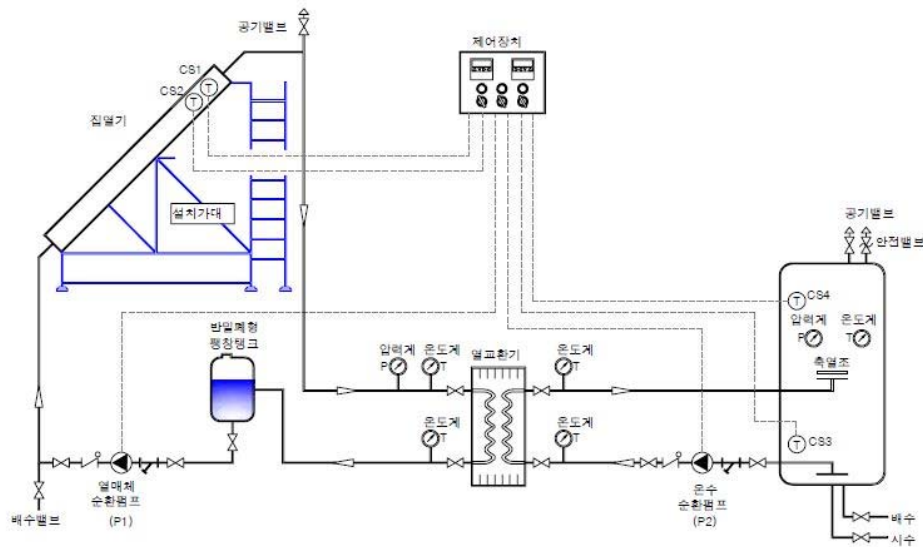
제 5 장 보조 히터 운전 방안의 검증

5.1 검증 개요

본 장에서는 앞에서 도출된 온수 사용량 예측을 이용한 축열조 내장형 보조 히터의 운영 방안의 적용 타당성에 대해 동적 해석 시뮬레이션 프로그램인 TRNSYS를 이용하여 검증한다. 적용 타당성의 판단 기준으로써 도출된 보조 히터의 운전 방안을 적용 시 온수 공급의 안전성의 확보 여부와 보조열원 일체형 축열조의 기존 설계·운영 방안에 대비하여 에너지 효율성의 개선 여부를 평가하였다. 이 때, 온수 공급의 안전성 기준으로, 축열조에서 사용처에 공급하는 물의 온도를 확인하여 <표2.5>를 참고하여 샤워용 최저 온도 기준인 42℃ 이상을 유지하는지 여부를 확인한다. 또 기존 설계·운영 방안에 대한 제안 방안의 에너지 효율성 개선 여부를 보기 위해서는 축열조 내부 보조열원의 에너지 사용량 값의 차이와 태양열 급탕 시스템의 태양열 의존율의 값, 집열 효율의 개선 여부를 확인한다

5.2 시뮬레이션 모델링 대상 시스템의 구성 및 용량 산정

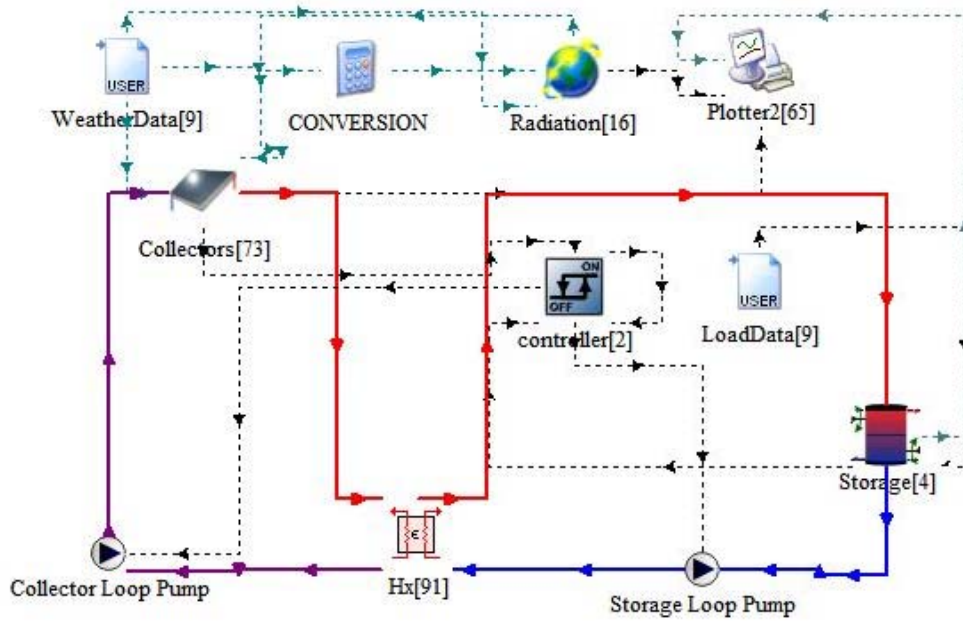
시뮬레이션에 모델링되는 대상 시스템의 구성은 일반적으로 이용되고 있는 “태양열 설비 시스템 표준화” 기준의 “부동액 이용 열교환기 외부설치 반밀폐형 시스템(B13)”²⁵⁾으로 구성하였으며 집열기와 축열조는 각각 평판형 집열기와 보조열원 내장형 축열조로 이루어진 태양열 급탕 시스템이다. 시뮬레이션에 입력한 온수 사용량은 실측 기간의 데이터를 이용하였으며 외기온, 일사량에 대해서는 한국 태양 에너지 학회의 서울시 표준 기상 데이터²⁶⁾를 이용하였다. 시뮬레이션은 실측 대상 기간 중 비교적 온수 사용량이 많아 예측에 따른 온수 공급의 안전성 판단이 필요한 11월의 평일과 주말 사용량에 대해서 실시하였다.



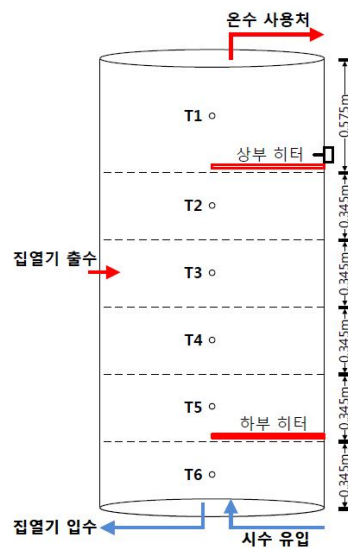
[그림 5.1] 시뮬레이션 모델링 대상 태양열 급탕 시스템의 구성

25) 지식 경제부, 『태양열설비 시스템 표준화』, pp.65, 2008

26) 태양에너지 학회, 대한민국 표준년 기상데이터 등록번호 서울 2010-Seoul-R-005



[그림 5.2] TRNSYS 17을 이용한 태양열 급탕 시스템의 모델링



[그림 5.3] TRNSYS 시뮬레이션에 이용된 2-히터 축열조의 모델링



[그림 5.4] TRNSYS 시뮬레이션에 이용된 기존 보조열원 내장형 축열조의 모델링

축열조의 용량 산정 방법으로 기존안의 경우는 2장에 제시된 방법과 같이 급탕 기구수 기준 1시간 최대 온수 사용량인 3060 l로 산정하고 히터는 6~8 시간내에 전체 축열조를 가열할 수 있는 용량인 24 kW로 설치하여 해당 부피를 항상 설정 온도 55℃로 유지하는 운전 방법을 적용 하였다. 도출된 히터 운전 방안이 적용된 축열조의 경우에 기존의 2-히터 축열조의 용량 산정방법을 적용하여 전체 축열조 용량 3060 l 와 히터 용량 24 kW로 동일하고 전체 부피의 25%에 해당하는 상부 부피를 가열하는 24 kW 히터를 추가로 설치한 모델을 사용하였다.

축열조 이외 집열기, 펌프 등의 용량 산정은 실측 대상 시설의 기존의 연간 온수 사용량 데이터를 바탕으로 일일 평균 부하 838,000 MJ/day를 기준으로 지식경제부의 “태양열 설비 시스템 표준화” 자료를 참고하여 가장 타당하다고 판단되는 태양열 의존율 30~70% 범위에서 설계하였다. 다음 <표5.1>은 TRNSYS의 각 모듈별 모델링에 입력된 값이다.

<표 5.1> 태양열 급탕 시스템의 구성 요소별 시뮬레이션 입력값

구분	항목	내용
집열기	종류	평판형 집열기
	집열 면적	40㎡(태양열 의존율 30%) 60㎡(태양열 의존율 40%) 80㎡(태양열 의존율 60%)
	핀 효율계수	0.8
	덮개판 개수	2 개
	설치 방위각	0° (정남향)
	설치 경사각	40°
열교환기	열교환 효율	0.7
축열조	종류	성층형 축열조
	용량	3060 ℓ
	열 손실 계수	2.5 kJ/h·㎡·℃
집열펌프/ 축열펌프	유량	0.018 kg/s·㎡
제어 모듈	방식	차온 제어 방식 (ΔT_{on} : 10 ℃, ΔT_{off} : 2 ℃)
급탕 부하	급탕 사용량	실제 사용량 데이터
	급탕 설정 온도	55 ℃
	시수 온도	17.6 ℃ (서울시 11월 시수 온도)

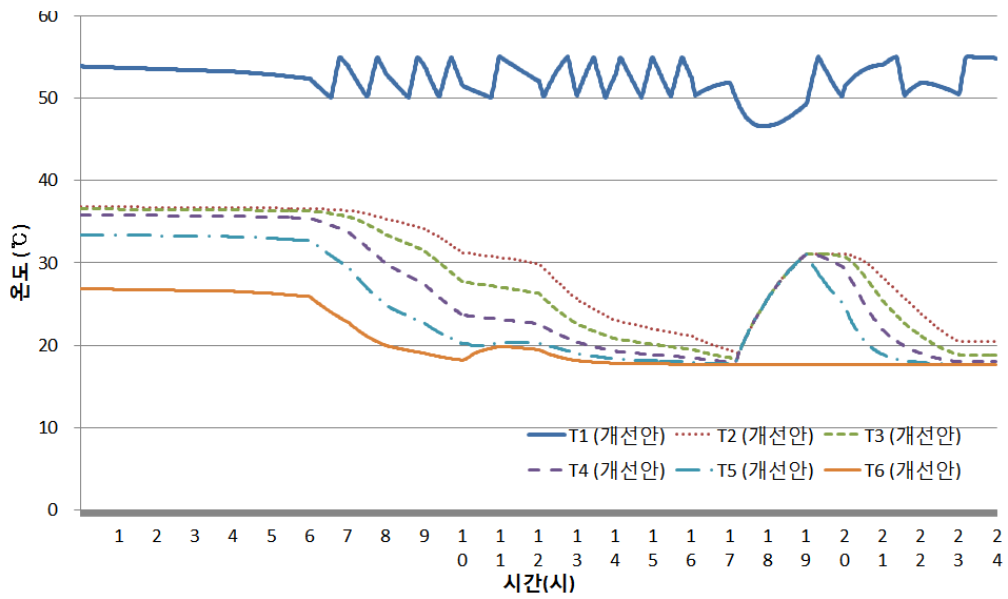
5.3 시뮬레이션 결과 및 분석

(1) 온수 공급의 안전성 검토

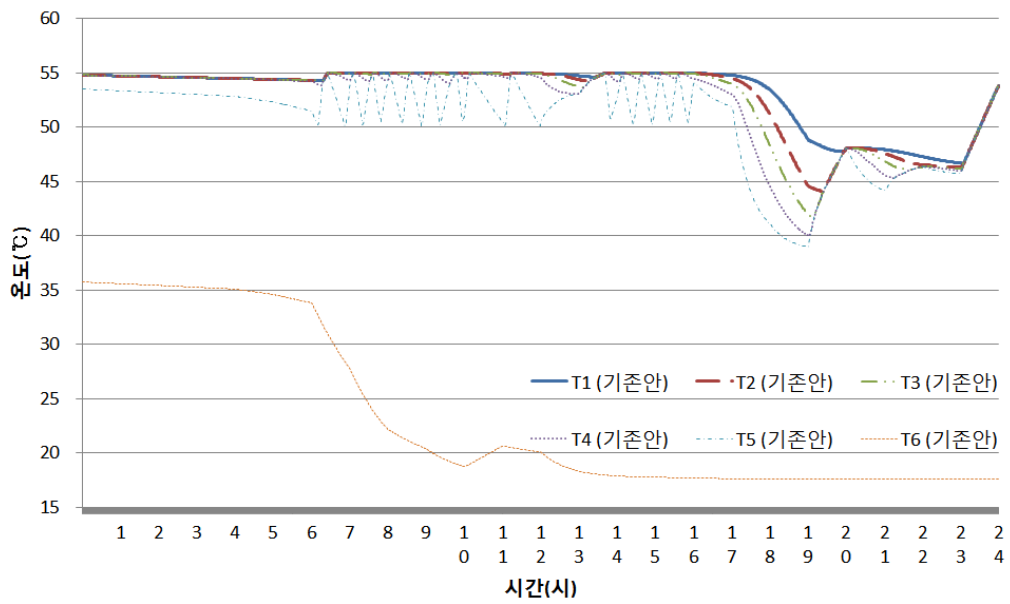
먼저 축열조의 기본 조건인 온수 공급의 안정성의 확인을 위해서 축열조에서 공급하는 물의 온도를 확인하여 샤워용 최저 온도 기준인 42℃ 이상을 유지하는 지 여부를 확인하였다. 비교대상인 기존 보조열원 내장형 축열조와 개선 방안 모두 태양열 시스템 설비 최소 태양열 의존율 30%에 해당하는 집열면적 40m² 일 경우에 대하여 11월 1일부터 28일까지 축열조의 최상위 노드의 급탕 온도를 확인하였다. 확인 결과 개선안의 최저온도는 46.5℃(11월 26일)로 나타남에 따라 해당 기간동안 온수 공급의 안전성을 확보한 것으로 판단할 수 있다. 최저온도가 나타난 11월 26일의 기존 축열조의 온수 온도를 비교해서도 0.1℃ 정도의 차이를 갖는 46.6℃ 를 나타내는 것으로 보아 해당 일에 과량의 온수 사용에 의한 것으로 판단된다.

11월 26일의 개선안의 축열조 내부 온도 분포와 기존안의 온도분포를 비교한 그래프를 각각 [그림 5.7],[그림5.8]에 나타내었다. 해당일은 [그림 5.9]와 같이 11월의 평균적인 일사량(정오 기준 약 3,000 kJ/hrm²)에 비해 일사량이 적은 날이었고 [그림 5.10]과 같이 과량의 온수 사용량이 발생한 날이다. 4장의 [그림4.13]을 참고하면 해당일의 온수 사용량은 기존일의 사용량에 비해 상당히 많이 발생한 것을 알 수 있다. 하지만 이에 대해 제안된 예측 방법에 의해 하부 히터가 작동하여 공급수의 온도가 42℃ 이상으로 유지되고 있음을 알 수 있다.

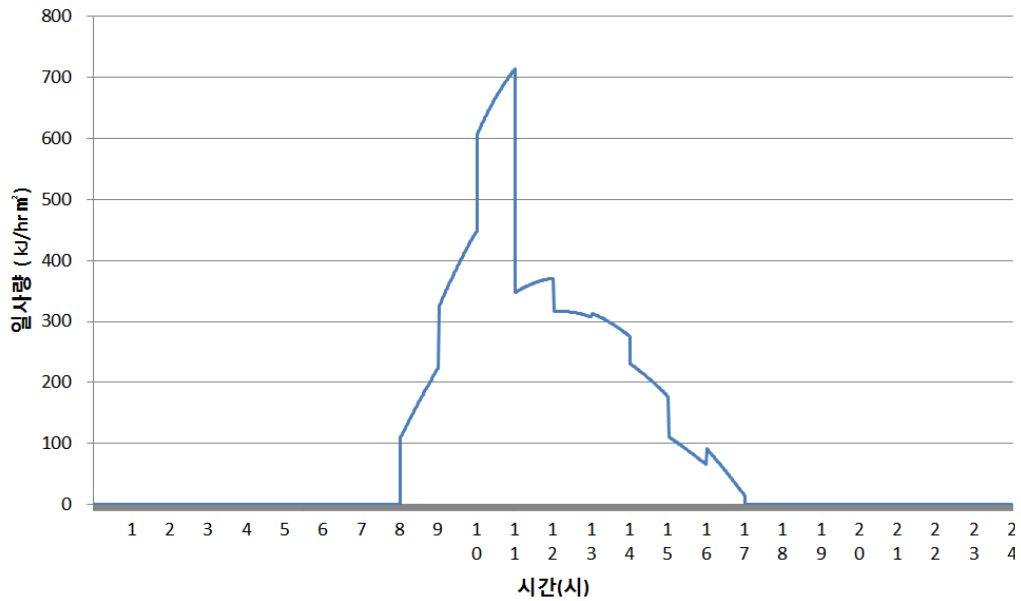
이에 따라 기존안에 비해 개선안은 과량의 온수를 사용하지 않는 시간에는 상부의 히터만으로 충분히 온수를 공급하고 있어 온수 공급의 안전성을 유지하면서도 축열조 하부의 온도를 낮게 유지하여 태양열 집열 효율 개선에 영향을 줄 수 있다고 판단할 수 있다.



[그림 5.7] 개선안의 축열조 내부 온도 분포



[그림 5.8] 기준안의 축열조 내부 온도 분포



[그림 5.9] 일사량 분포

(2) 제안 방안의 에너지 효율성 개선 여부 검토

제안된 히터 운영 방안의 에너지 효율성 개선 여부를 보기 위해서는 축열조 내부 보조열원의 에너지 사용량 값의 차이, 태양열 급탕 시스템의 태양열 의존율의 값, 집열 효율의 개선 여부를 <표 5.2>에 제시하였다. 태양열 의존율의 값은 식(5.1) 집열효율의 값은 식(5.2)를 이용하여 계산하였다.

$$f = \frac{Q_{load} - Q_{aux}}{Q_{load}} \times 100 = \frac{Q_{sol}}{Q_{load}} \times 100 \quad (5.1)$$

여기서,

- Q_{load} : 총 급탕부하, kWh
- Q_{aux} : 보조열원으로부터 공급된 열량, kWh
- Q_{sol} : 태양으로부터 공급된 열량, kWh
- f : 태양열 의존율

$$\eta = \frac{Q_{use}}{IA} = F_R(\tau\alpha) - F_R U_L \frac{(T_{in} - T_{amb})}{I} \quad (5.2)$$

여기서,

- η : 집열 효율
- Q_{use} : 집열기가 취득한 에너지(유효 집열량), kW
- I : 집열면 일사량, kW/m²
- A : 집열 면적, m²
- F_R : 집열 효율 수정계수
- τ : 집열기 투과율
- α : 흡수판 흡수율
- U_L : 열손실 계수, kW/m²°C
- T_{in} : 집열기 입수 온도, °C
- T_{amb} : 외기 온도, °C

<표 5.2> 기존안 대비 제안된 히터 운영 방안의 에너지 성능 비교

		Q_{load} (kJ/hr)	Q_{use} (kJ/hr)	Q_{aux} (kJ/hr)	f	η
집열면적 40 m ²	기존안	22,031,316	2,731,325	19,568,782	0.11	0.23
	개선안	20,594,959	3,642,906	16,526,768	0.20	0.30
	변화율 (%)	- 6.5	+33.4	-15.5	+76.7	+33.3
집열면적 60 m ²	기존안	22,335,394	3,558,673	18,938,224	0.15	0.20
	개선안	20,589,445	4,919,536	15,074,506	0.27	0.27
	변화율 (%)	-7.8	+38.2	-20.4	+76.1	+38.2
집열면적 80 m ²	기존안	22,670,561	4,252,383	18,490,978	0.18	0.18
	개선안	20,727,288	5,974,917	14,022,765	0.32	0.25
	변화율 (%)	-8.5	+40.5	-24.2	+75.5	+40.5

집열 면적에 상관없이 개선안이 적용된 경우 기존 축열조에 비해 보조열원의 사용량(Q_{aux})이 15% 이상 감소 가능한 것으로 확인되었다. 집열면적의 증가율에 비해 실제 시스템의 운영 시 태양열 의존율(f)은 비교적 적게 개선되는 것을 알 수 있었다. 하지만 집열 면적의 증가에 따라 태양열의 유효 집열량(Q_{use}) 커져 태양열 시스템의 집열 효율(η)이 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 이에 따라 개선안과 기존안의 보조열원 사용량(Q_{aux})의 감소율이 커지는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구를 통해 제안된 운전 방안을 적용할 경우 태양열 시스템을 더욱 에너지 효율적으로 이용될 수 있다고 판단할 수 있다.

5.4 소결

본 장에서는 앞에서 도출된 온수 사용량 예측을 이용한 축열조 내장형 보조 히터의 운영 방안의 적용 타당성에 대해 동적 해석 시뮬레이션 프로그램인 TRNSYS를 이용하여 검증하였다. 적용 타당성의 판단 기준으로써 온수 공급의 안전성의 확보 여부와 에너지 효율성의 개선 여부를 평가하였다. 본 장의 내용을 요약하면 다음과 같다.

1) 온수 공급의 안전성을 판단하기 위해 해당 시설의 용도에 따라 샤워용 기준으로 42 °C 이상의 온수를 지속적으로 공급가능한 지 여부를 확인하였다. 관측기간 중 온수 사용이 가장 많은 11월을 기준으로 시뮬레이션 진행 결과 공급수의 최저 온도는 46.5 °C 로 온수를 안정적으로 공급 가능하다고 판단하였으며 기존안의 경우에도 해당일의 공급수 최저 온도 46.6 °C를 나타냄에 따라 기존안에 비해 안전성이 떨어지지 않는다고 판단되었다.

2) 상부 히터 생산량 이상의 온수 사용량이 발생한 11월 26일의 축열조 온도 분포를 확인한 결과, 개선안을 적용한 축열조는 기존 축열조에 비해 하부 온도가 낮게 유지되는 것으로 나타났으며 상부 히터의 온수 생산량을 초과하는 구간에 대해서는 적절히 하부 히터가 작동된 것을 확인하였다.

3) 기존의 보조열원 내장형 축열조에 비해 본 연구에서 도출한 온수 사용량을 예측하여 히터를 운영하는 방안이 시뮬레이션 기간(11월 한 달)동안 보조 열원의 총 에너지 사용량을 15% 이상 감소 가능한 것으로 나타났다. 이것은 축열조의 내부 온도가 낮게 유지됨에 따른 태양열의 유효 집열량의 증가에 기인한 것으로 판단된다.

제 6 장 결론

태양열 급탕 시스템에서 공간적, 경제적 제약으로 인해 보조열원 내장형 축열조를 사용하는 경우 보조열원의 설치 위치를 결정할 때는 설치 대상 건물에서 발생 가능한 부하량을 예상하기 어려운 이유로 인해 안전성을 고려해서 최대 온수 사용량을 항상 생산, 저장하는 방식을 사용해왔다. 따라서 온수의 실제 사용량 이상을 전기히터로 가열하게 되고, 전기히터로 가열된 과량의 온수를 저장함에 따라 태양열을 집열할 수 있는 낮시간 동안 축열조의 고온수가 집열 회로를 순환함에 따라 집열기의 사용 효율이 저하되는 문제가 있었다. 따라서 본 연구에서는 온수 공급의 안전성을 확보하면서 축열조의 히터 운영을 에너지 효율적으로 하는 방안으로써 2-히터 축열조의 일반적인 설계 방식을 차용하고 온수 사용량의 예측을 통해 상부 히터 생산량을 초과하는 경우에만 하부 히터를 추가적으로 작동하는 방식을 제시하였다. 이를 위해 온수 사용량의 변화에 관한 기존의 연구에 적용된 가정을 참조하고 실측 데이터에 대해 적용성을 검토하여 온수 사용량 예측 방법을 도출하였다. 그리고 예측된 온수 사용량 값을 실제 시스템의 운영에 적용 시, 발생할 수 있는 오차로 인한 온수 공급의 안전성 저하문제를 방지하기 위해 예측값의 수정 방안을 마련하였다. 이로써 최종적으로 수정된 예측값을 이용하여 보조열원을 운영하는 방안을 제시하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 국내의 태양열 축열조와 급탕용 저탕조의 기존 설계방법 및 운영방법에 대한 문헌을 고찰함으로써 기존의 설계 및 운영 방법이 본 연구의 대상이 되는 보조열원 내장형 축열조에 적용되었을 경우 축열조 내의 과도한 온수 저장량으로 인한 태양열 집열 효율의 저하를 문제점으로 제기하였

다. 보조열원 내장형 축열조의 적용 시 발생하는 문제에 대하여 국외의 에너지 효율적인 설계사례와 운영 방법에 대해 고찰함으로써 온수 사용량의 예측과 최적화된 제어를 적용할 경우, 태양열 시스템의 에너지 효율적인 운영 및 보조열원 에너지 사용량의 저감이 가능함을 제시하였다.

- (2) 기존 연구에서 제시하고 있는 온수 사용량 변화의 주요 영향 인자인 월 변화, 요일 변화에 따른 온수 사용량의 변화를 대학교내 체육시설의 온수 사용량에 대한 실측 데이터와 비교하였다. 이를 통해, 제시된 영향 인자들 중에서 월의 변화, 주중-주말의 변화에 따라 최대 사용량이 발생하는 시각과 양이 유사한 패턴을 도출할 수 있었다.
- (3) 도출된 패턴에 의한 예측값은 실제 온수 사용량과 오차가 있었다. 따라서 예측값과 실제 사용량 사이에 발생하는 오차의 특징을 분석하였다. 오차 분석 결과, 패턴에 의한 예측값을 초과하는 실제 사용량의 초과율은 주중 평균 약 2배, 주말 평균 0.7배로 나타났으며 패턴에 의한 예측값을 초과한 후, 예측값의 초과현상은 3시간 지속되는 경우가 자주 발생하는 것으로 나타났다. 이에 따라, 주로 발생하는 오차범위인, 패턴의 예측값의 2배 이상 초과하는 경우를 사전에 예측하기 위해 30분 이내의 시간 간격(20분)으로 실제 사용량을 측정해서 예측값을 수정하는 방안을 제시하였다.
- (4) 패턴에 의한 일일 단위의 예측과 실측값을 이용한 예측값의 실시간 수정 방안을 이용하여 해당 시각의 온수 사용량이 상부 히터의 온수 생산량을 초과하는지 여부를 실시간으로 판단 가능하도록 하였다. 해당 시

각의 사용량이 상부 히터 생산량을 초과한다고 판단될 경우 하부 히터를 작동하여 온수 공급의 안전성을 유지하는 방안을 제시하였다.

- (5) 제안된 온수 사용량 예측 방법과 히터 운영 방법을 일반적인 방식으로 설계된 2-히터 축열조에 적용하고 실제 온수 사용량을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 공급수 온도를 확인한 결과, 제시된 방안은 샤워용 기준 적정 온수 온도 범위인 42℃ 이상의 온수를 지속적으로 공급 가능하였다. 기존 보조열원 내장형 축열조에 비해 축열조 내부 온도를 낮게 유지하여 태양열 집열 효율을 개선하고 최종적으로 보조열원의 에너지 사용량을 저감할 수 있다고 판단되었다.

참 고 문 헌

1. 산업자원부, 태양열시스템 최적화와 신뢰성 향상을 위한 설계 및 성능기준 개발과 실증시험 연구, 2003.
2. 서승직, 건축 설비 계획, 일진사, 2008.
3. 신정철, 태양열 냉난방 기술, 구민사, 2006.
4. 오정무, 태양열 냉난방 및 온수급탕시스템: 개념, 설계기법 및 경제성 분석 II - 설비형 태양열주택, 예일기획, 2005.
5. 조신섭, 손영숙, SAS/ETS를 이용한 시계열 분석, 울곡출판사, 2009.
6. 지식 경제부, 태양열설비 시스템 표준화, pp.22, 2008.
7. ACEEE (American Council for an Energy-Efficient Economy), <http://aceee.org/consumer/water-heating>
8. Allard, Y., Kummert, M., Bernier, M. and Moreau, A., Intermodel Comparison and Experimental Validation of Electrical Water Heater Models in TRNSYS, Building Simulation 2011.
9. ASHRAE, ASHRAE Handbook-HVAC Applications, 2007, pp 49.18-49.22
10. Duffie, J.A. and Beckman, W.A., Solar engineering of thermal process 3rd ed. Wiley, 2006.
11. German Solar Energy Society, Planning and Installing Solar Thermal Systems: A Guide for Installers, Architects and Engineers, (2nd. edition), earthscan, 2010.
12. Hendron, R. and Burch, J., Development of standardized domestic hot water event schedules for residential buildings, NREL conference paper, 2008.
13. Jordan, U. and Vajen, K., Realistic domestic hot-water profiles in different time scales, 2001.
14. Jordan, U. and Vajen, K., Influence of the DHW load profile on the fractional energy savings : a case study of a solar combi system with TRNSYS simulations. Solar Energy 69, 2001, pp.197-208.
15. Kar, K.A. and Kar, U., Optimum design and selection of residential storage-type electric water heaters for energy conservation, Energy Conversion and Management, Volume 37, Issue 9, 1996, pp.1445-1452.

16. Minguez, J.M., Water heaters in series, *Energy Research* v.11, 1987, pp.145-151.
17. Newton, B.J., Modeling of Solar Storage Tanks, Master's Thesis, University of Wisconsin-Madison, 1995, ch.2
18. Prud'homme, T. and Gillet, D., Advanced control strategy of a solar domestic hot water system with a segmented auxiliary heater, *Energy and Buildings*, Volume 33, Issue 5, 2001, pp. 463-475.
19. Sezai, I., Aldabbagh, L.B.Y., Atikol, U. and Hacisevki, H., Performance improvement by using dual heaters in a storage-type domestic electric water-heater, *Applied Energy*, Volume 81, Issue 3, 2005, pp. 291-305.
20. Virginia Department of Mines Minerals and Energy, <http://www.dmme.virginia.gov/de/consumerinfo/HandbookWaterHeating.pdf>
21. Werner Weiss, *Solar Heating Systems for Houses*, James and James, 2003.
22. Zhao, H. and Magoules, F., A review on the prediction of building energy consumption, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, 2012, pp. 3586-3592.

ABSTRACT

Operation Method for Reducing the Energy Consumption of Solar Storage Embedded Auxiliary Heater with Prediction of DHW Use

By Nam, Hyun-min
Department of Architecture
Masters Course in Graduate School
Seoul National University
Advised by
Professor Kim, Kwang-Woo
2013. 2.

In this paper, a method for reducing the energy consumption of heater in the storage is suggested.

We have installed the auxiliary heater in the storage where the storage can supply the maximum hot water consumption since it is difficult to predict the future load. Thus, much amount of water than the actual usage is heated by the auxiliary heater during the off-peak period and the high temperature of water which is already heated by the auxiliary heater drop the efficiency of solar domestic hot water system.

In order to solve these problems, this study used the design method of conventional dual heaters storage Tank. There is different in the operation method between the conventional dual heaters storage and

this study. This study proposed the way how to predict the hot water consumption and the way how to operate the heater in the storage using the predicted hot water consumption in order to improve the overall efficiency of the solar domestic hot water system. The results of this research are summarized as follows:

(1) By studying international energy efficient storage design cases and operation method to solve the problems which are occurred when we are adapting auxiliary heater embedded thermal storage, prediction and optimal control of domestic heating load could have the possibility to energy effective operation of solar heating system and reduced energy use of auxiliary heater.

(2) Changes of the amount of hot water use according to the monthly change and daily change which is proposed as main influential factors by existing studies, is compared to hot water use data from gym facility in university. Among the proposed influential factors, monthly change and weekday-weekend change drew similar pattern of the amount of use and the time at maximum use.

(3) Compared to the amount of actual consumed hot water, the predicted value from derived patterns had errors. Characteristic of errors between the predicted value and the amount of actual consumed hot water was analyzed. Based on the results from analyzed error results, plan which is revising predicted value is proposed to secure the stability of hot water supply using actual amount of hot

water use at corresponding time.

(4) By using daily prediction by pattern and hourly revised prediction by using actual data, judgement was carried out whether the amount of hot water use at corresponding time exceed the amount of produced hot water from upper heater. If judgement is made that hot water use exceeds the amount of produced hot water from upper heater, lower heater is operated to maintain the safety of hot water supply.

(5) Proposed method of predicting the amount of hot water use and operating method of heater were adapted to the 2-heater thermal storage which is designed by general method. By checking the supply water temperature, the proposed method can be considered as method that supply hot water stably. By maintaining lower internal temperature of thermal storage than existing auxiliary embedded thermal storage, efficiency of solar heat collection was improved and consequently energy use of auxiliary heater can be reduced.

Keywords: Storage embedded auxiliary heater, DHW pattern, Solar domestic hot water system

Student Number : 2011-20586

감사의 글

처음 대학원에 진학할 때 먹었던 마음이 떠오릅니다. ‘짧어서 고생은 사서도 한다.’는 생각으로, 어떤 연구실보다 열심히 연구를 한다고 정평이 났던 서울대학교 건축 환경 계획 연구실의 문을 열었던 기억이 생생합니다. 같은 시간동안 더 열심히 노력해서 많은 것을 배울 수 있다면 더 좋은 일 아니겠냐는 생각에 참으로 설레었던 하루하루로 기억됩니다. 그리고 2년의 석사과정을 마치는 지금, ‘내가 과연 고생을 했던가.’ 돌이켜 봅니다. 지금 와서 ‘고생 조금만 더 사서 할껄...’이라는 아쉬움이 드는걸 보니, 우리 연구실 교수님, 함께 연구한 선·후배님, 동기들이 있었기에 저의 석사과정이 고생 아닌 축복의 시간이지 않았나 생각합니다.

먼저, 지도교수님이신 김광우 교수님께 무한한 감사의 말씀을 전합니다. 세상에 이미 정답이 정해져있다고 생각하며 살아온 세계, 교수님께서서는 항상 더 좋은, 더 나은, 우리만의 답을 만들어가는 방법을 알려주셨습니다. 지난 2년간 항상 교수님께 부족한 제자였지만 그 부족했던 저의 모습을 기억하며 일생동안 그 부족한 부분을 채우면서 교수님의 가르침에 보답하는 사람이 되겠습니다. 그리고 해박한 지식을 바탕으로 건축 환경과 설비에 대해 명쾌한 강의를 해주신 여명석 교수님께도 깊은 존경의 마음을 표합니다. 수업이나 세미나시간 이외 사석에서는 저희에게 항상 살갑게 대해주시던 여교수님의 모습에서는 스승과 제자가 아닌, 연구실 선배로서의 진한 정을 느낄 수 있었습니다. 논문의 수정 과정에서 세세한 부분까지도 꼼꼼하게 조언해주신 여현수 교수님께도 감사의 말씀을 전합니다. 항상 인자하신 모습, 배려해주시는 모습을 잊지 않겠습니다.

동고동락한 우리 연구실 선·후배, 동기님들... 사랑합니다. 긴 연구의 과정에도 항상 진지한 자세로 탐구하는 여러분의 모습은 매순간 제게 귀감이 되었습니다. 특히 제게 항상 버팀목이 되고, 좋은 본보기가 되고자 온 마음으로 노력한 최소원 양에

게 깊이 감사드립니다. 우리 연구실의 전통과 문화를 자랑스럽게 기억하면서, 저 또한 연구실의 전통을 빛낼 수 있는 사람이 될 수 있도록 노력하겠습니다.

끝으로, 아무런 조건도 없이 제가 더 멀리 세상을 바라볼 수 있고, 더 깊이 생각할 수 있도록 좋은 환경을 만들어 주신 가족들에게 감사의 말씀을 올립니다. 아버지, 어머니 저는 진짜 복이 많은 사람입니다. 사랑합니다.

2012년 2월

남 현 민