KIEAE Journal, Vol. 16, No. 4, Aug. 2016, pp.63-69.

KIEAE Journal

Korea Institute of Ecological Architecture and Environment

80

축열과 채광조절을 겸한 자연형 태양열 수벽시스템의 집열방식별 성능실험

Experiment on measures of heat collection for passive solar water wall systems that provide heat storage and natural lighting control

오영훈* · 최지은** · 이철성*** · 윤종호****

Oh, Young-hoon* · Choi, Ji-eun** · Lee, Chul-sung*** · Yoon, Jong-ho****

* *Dept. of Architectural Engineering, Hanbat National Univ., South Korea (chojjj9@naver.com)*
** *Coauthor, Dept. of Architectural Engineering, Hanbat National Univ., South Korea (sanbit33@naver.com)*
*** *Coauthor, Dept. of Architectural Engineering, Hanbat National Univ., South Korea (cslee.skor@gmail.com)*
**** *Corresponding author, Dept. of Architectural Engineering, Hanbat National Univ., South Korea (jhyoon@hanbat.ac.kr)*

ABSTRACT

Purpose: This preliminary study investigated a potential of the water wall systems that provide heat storage and natural lighting control simultaneously. **Method:** In order for transparency of the water wall to be controlled, the study first proposed two measures: to adjust transparency of the water wall; to control transparency of water wall surface. The performance of two measures then was verified and compared by experiments. In addition, a trade-off between heat collect and heat storage resulting from using additive for adjusting transparency was investigated. **Result:** The experiment showed that the two measures are similar in performance. The investigation of trade-off relation showed the additive should have the same heat storage as the water to prevent decrease in thermal performance of the water wall. As an economical measure to control transparency of the water wall, this study suggested a measure of secondary heat transfer systems using shading device that first absorbs solar radiation and then transfers heat to the water wall. The experiment show that performance of the proposed measure is similar to controlling transparency of water wall surface. In conclusion, it is expected that the performance of the water wall can be economically maximized by using the proposed mean in terms of heating, cooling and lighting energy saving.

ⓒ 2016 KIEAE Journal

KEYWORD

자연형 태양열 시스템
수벽
현열축열
집열방식

Passive solar system
Water wall
Sensible heat storage
Measure of heat collection

ACCEPTANCE INFO

Received May 10, 2016
Final revision received Jul 28, 2016
Accepted Aug 2, 2016

1. 서론

20세기 후반 인류의 활동이 유발한 온난화를 완화시키고자 글로벌 온실가스 저감정책에 부합해 정부차원에서 에너지 저감을 위한 다양한 노력을 기울이고 있다. 그중 건축분야에서는 국내 전체의 1/4에 해당하는 건물에서의 에너지 소비량을 줄이고자 녹색건축인증제(G-SEED)와 건축물에너지효율등급인증제 등의 제도를 마련하여 일정등급이상의 건축물에 대해서는 세제혜택 및 건축기준 완화 등 다양한 인센티브를 지원해 친환경 건축물의 건설을 유도하고 있다. 또한 최근 건물자체에서 주변의 자연에너지만을 이용해 건물에 필요한 모든 에너지원을 충당하는 제로에너지 건축의 필요성을 인지하고, 2025년 상용화를 목표로 다양한 제도 및 지원체계를 구축해 정부차원에서 제로에너지 건축의 실현을 위한 적극적인 노력을 기울이고 있다.[1)]

한편, 건축물에서 에너지를 직접 생산하지 않으므로 제로에너지 건축을 실현하기 위해 고효율 설비형 시스템(Active System)과 태양광 및 태양열, 지열히트펌프 시스템 등의 신재생 에너지를 이용한 백업 시스템(Back-up System)을 도입하기위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 하지만 이 두 시스템들은 대부분 초기 설치비용이 고가이고, 지속적으로 유지비용이 발생한다는 단점이 있다. 결국 경제적인 제로에너지 건축을 실현하기 위해서는 설비형 시스템이나 백업시스템이 고려되기 전 건물 자체에서 에너지 절약적인 기법을 통해 건물 부하를 최소화하는 노력이 선행되어야 한다.

한편, 설비형 또는 백업 시스템과 달리 자연형 시스템(Passive system)은 초기비용이 저가일 뿐만 아니라, 유지비용이 거의 발생하지 않으면서 에너지를 저감할 수 있는 경제적인 시스템이다. 그 대표적인 자연형 시스템 중 하나로 축열시스템(TES, Thermal Energy Storage)을 들 수 있다. 축열시스템의 기본 운영방법은 필요 없는 열을 일정기간동안 미리 저장해 놓았다가, 나중에 필요할 때 저장된 열을 사용한다. 이와같은 축열에 의한 냉난방부하 저감방법을 도입하고 최적화하기 위한 연구가 지난 수십 년간 수행되어 왔고 또 건물에서 에너지소비량을 저감하는데 효과가 있다는 사실이 연구결과 밝혀졌다.[2)]

pISSN 2288-968X, eISSN 2288-9698
http://dx.doi.org/10.12813/kieae.2016.16.4.063

1) 윤종호, "권두언 - 실측기반의 국내 제로에너지건물 기술현황 및 전망", 그린빌딩협의회 웹진 2015년 12월호// (Yoon, jong-ho, Preface - Actual measurement based technology status and prospect of zero energy building in Korea, Korea Green Building Council, 2015-12)

2) Vincent Basecq, Ghislain Michaux, Christian Inard, Patrice Blondeau, "Short-term storage systems of thermal energy for buildings: a review", Advances in Building Energy Research, 2013

이러한 축열시스템은 크게 현열축열과 잠열축열로 나눌 수 있다. 잠열축열시스템은 축열재의 물리적 상태를 고체에서 액체상태 또는 기체에서 액체상태 등으로 변화시켜 열을 저장하거나 저장한 열을 방출하는 시스템이다. 이때 축열재로 사용되는 물질을 상변화물질(Phase Change Material, PCM)이라 하며, 현열축열 시스템에 비해 작은 크기에 대용량의 열을 적은 온도변화를 이용해 저장할 수 있다. 그 중 무기질 상변화 물질의 경우 가격이 싸고 열저장능력이 크며, 열전도율이 크다는 장점이 있지만, 상변화시 부피의 변화가 심하고 부식의 우려가 있으며 상변화온도 이하까지 내려가도 상변화가 일어나지 않는 과냉각현상을 일으키는 경향이 있다. 반면, 유기질 상변화물질의 경우 화학적으로 안정적이며 부피변화가 적고 과냉각현상을 일으키지 않지만, 열저장능력이 상대적으로 적고 열전도율이 낮으며, 가연성이라 안전성에 문제가 있다.[3)]

한편, 현열축열은 축열재의 온도를 변화시켜 열을 저장하거나 방출하는 방식으로 주로 비열이 큰 콘크리트나 벽돌, 물 등이 축열재로 사용된다. 상변화물질을 이용한 잠열축열에 비해 축열용량이 적어 낮에 열을 저장하고 밤에 저장된 열을 사용하는 단기 열저장용 시스템으로 사용되며, 경제적이고 부피 변화없이 안정적이며, 안전상의 문제가 없어 자연형 건축에 많이 사용되고 있다.[4)]

이러한 단기 열저장시스템 중 물을 이용한 수벽(water wall) 시스템은 다른 재료들에 비해 상대적으로 열저장능력이 크고, 투명한 성질을 이용한 자연채광의 도입이 가능해 〈그림 1〉과 같이 의장 및 기능성 건축용 자재로써 사용될 수 있다. 특히 PET병과 같은 재활용소재를 응용할 경우 친환경측면에서 보다 큰 의의를 가질 수 있을 것이다.

Fig. 1. Water-filled trombe wall concept (An idea of Solar Decathlon team from University of Arizona in 2009)

하지만 수벽을 축열재 외에 채광목적으로 사용 할 경우, 빛을 투과시킴에 따라 축열량이 감소하고, 일조량이 큰 경우 별도의 차양장치를 설치하지 않는 한 현휘가 발생되기 쉽다. 결국 수벽시스템이 상용화되기 위해서는 시각적으로 쾌적한 환경을 제공해주는 채광성능과 냉난방부하 저감을 위한 축열성능이 동시에 만족되어야 한다. 이에 본 연구는 수벽시스템을 도입하기 위한 기초연구로써, 축열과 동시에 채광을 위한 효과적인 현열집열방식을 실험적으로 도출하고자 한다.

2. 수벽시스템의 집열방식 및 성능

2.1. 기존 수벽시스템의 집열방식 및 성능

실험에 앞서 국내외 문헌고찰을 통해 수벽시스템의 기존 집열방식에 대한 연구내용 및 집열방식별 성능을 조사하였다. 사례조사는 국내의 경우 수벽시스템에 대한 선행연구를 찾아볼 수 없어 국외 연구를 중심으로 수행되었다. 문헌고찰결과에 따르면 수벽시스템은 크게 다음과 같이 두 가지 집열방식으로 나눌 수 있다.

우선 가장 기본적인 형태는 물의 다른 재료보다 큰 축열성능만을 이용하는 방식으로 실내·외측을 철판, 콘크리트 또는 단열재로 구성한 후 물을 채워 벽체를 만들어 집열하는 방식이다. 이러한 방식에 대해서 Sutton 과 McGregor [5)]은 실험을 통해 오스트레일리아 타즈마니아(Tasmania) 지역 북측벽을 콘크리트를 이용한 축열벽을 사용하는 주택과 수벽을 사용하는 자연형 태양열 주택의 열성능을 비교·분석 하였다. 이들의 연구결과에 따르면 콘크리트를 적용한 주택에 비해 수벽을 적용한 주택이 난방에너지를 절반정도만 소비하였으며, 전체 에너지소비량 측면에서 29.2%의 에너지소비량이 저감되었음을 실험을 통해 밝혀냈다. Sodha et al.[6)] 은 트롬월로써 1) 수벽 + 콘크리트, 2) 수벽 + 단열재 3)단순 수벽의 열성능을 수치해석을 통해 비교하였다. 분석결과에 따르면 겨울철 인도의 뉴델리(New Delhi) 지역은 수벽 + 콘크리트의 조합이 에너지 소비량 저감 측면에서 가장 유리하게 나타났으며, 수벽의 크기가 증가 할수록 전체 건물의 열성능 또한 증가하였다.

수벽시스템의 두 번째 집열형태는 수벽의 내·외측을 투명한 유리나 플라스틱 등으로 시공하여 일사를 투과시키는 방식이다. 이때 실내측 면은 불투명하게 만들어 태양열을 집열할 수도 있고, 반투명으로 시공하여 채광을 유도 할 수도 있다. Balcomb et al. [7)]의 연구결과에 따르면 투명한 유리 또는 투명한 단열재 뒤에 설치된 수벽시스템이 불투명한 벽뒤에 설치된 수벽시스템보다 겨울철 우수한 집열성능을 나타냈다. 한편, 채광이 가능한 반투명한 건물외벽으로써 트랜스월(transwall)[8)]이 Fuchs와 Mcclelland에 의해 제안되었다. 트랜스월은 〈그림 2〉와 같이 양쪽 투명한 유리벽 사이에 20% 투과율을 갖는 반투명한 판유리가 추가로 시공되

3) Ting Wu, Chengwang Lei, "A review of research and development on water wall for building applications", Energy and Buildings, 2016

4) Ting Wu, Chengwang Lei, "A review of research and development on water wall for building applications", Energy and Buildings, 2016

5) R. G. Sutton, R. J. McGregor, "Solarwall Project: Two Demonstration Houses with Passive Solar Heating in Tasmania", Architectural Science Review, 1986

6) M.S. Sodha, S.C. Kaushik, J.K. Nayak, "Performance of trombe walls and roof pond systems", Applied Energy, 1981

7) J.D. Balcomb, J.C. Hedstrom, R.D. McFarland, "Simulation analysis of passive solar heated buildings—Preliminary results", Solar Energy, 1977

8) R. Fuchs, J.F. McClelland, "Passive solar heating of buildings using a transwall structure", Solar Energy , 1979

는 형태로 채광이 가능하다. 또한 트롬월과 비교한 성능평가 결과에 따르면 일사획득량이 트롬월과 비슷하거나 오히려 더 좋게 나타났다.

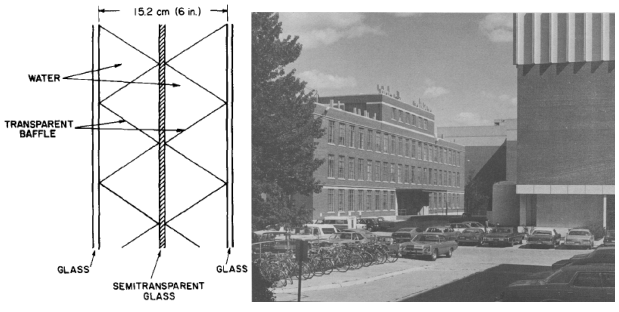

Fig. 2. Configuration of transwall (left) and outside view through transwall[9)]

Nayak[10)]은 트롬월, 트랜스월, 수벽트롬월 시스템의 열적 성능을 비교 분석하였다. 연구결과에 따르면 트랜스월이 트롬월보다 주간의 난방부하 저감측면에서 유리하였으며, 수벽트롬월의 축열성능이 가장 우수하고 주야간 온도편차도 적어 가장 쾌적한 실내 열환경을 제공하였다. Tiwari et al.[11)] 의 연구 또한 축열성능이 큰 물을 이용한 트랜스월 적용시 주거형 건물의 야간 난방부하 저감에 유리함을 입증하였다. Liu and Feng[12)]은 트롬월과 반투명한 워터튜브월의 성능을 비교·검증하였다. 워터튜브월은 반투명한 워터튜브를 이용해 동측과 남측벽에 적용되었으며, 외벽을 통한 채광이 가능한 시스템이다. 시뮬레이션을 이용한 성능평가결과 겨울철 워터튜브월의 일사획득량은 트롬월보다 10배 더 크며, 이 시스템을 도입했을 경우 일반 건물과 비교 했을 때 약 25%의 난방부하가 저감됨을 밝혀냈다.

Nisbet et al.[13)]은 염색된 물이 충전된 트랜스월과 워터젤(water-gel)이 충전된 트랜스월 의 성능을 각각 비교분석하였다. 연구는 우선 염색된 물이 충전된 트랜스월이 적용된 영국내 주거건물의 에너지 성능을 최적화하기 위한 트랜스월의 최적 염료 농도와 두께를 수치해석적 방법을 통해 도출하였다. 분석결과 스코틀랜드 서부에서 최적의 성능을 내기위한 염료(Lissamine RED 3GX)의 농도는 20ppm 이었으며, 최적의 두께는 150 mm 로 나타났다. 수치해석적 방법에 의한 에너지 성능평가결과 염색된 물이 충전된 트랜스월이 워터젤이 충전된 트랜스월 보다 야간에 30% 더 많은 열을 방출하였다. 또한 이 트랜스월을 도입했을 경우 난방에너지소비량 저감 가능성이 스코틀랜드 서부의 경우 23%, 프랑스 남부의 경우 65%로 분석되었다.

2.2. 축열 및 채광조절을 위한 집열방식

이상 문헌고찰에 따르면 수벽시스템이 에너지 저감은 물론 실내 열쾌적 측면에서도 큰 이점을 가지고 있음을 알 수 있다. 그 중 채광이 가능한 형태의 수벽시스템은 자연채광은 물론 외부조망이 가능하고, 또한 비록 선행연구에서 검증하지 않았지만 자연채광도입을 통해 조명에너지도 크게 저감 가능할 것이다. 따라서 제로에너지건축을 위한 건물부하 저감 측면에서, 조명 및 냉난방부하 저감이 가능한 투명 또는 반투명 수벽시스템은 건물자체의 에너지부하를 줄이기 위한 자연형 시스템으로 적절하다고 사료된다.

하지만 기존의 연구들은 주로 정적인 수벽운용을 중심으로 수행되어왔으며, 이러한 운용방법은 자연채광을 도입하여 건물의 성능을 높이기 위한 융통성 있는 방법이라 할 수 없다. 예를 들어 투과율이 20%로 고정된 트랜스월의 경우 일조량이 적을 때 낮은 투과율에 의해 조명에너지 소비량이 증가할 것이며, 일조량이 클 경우 현휘가 발생 될 것이다. 따라서 이상적인 수벽의 운용방법은 일조량이 적은 경우 수벽의 투과율을 높여 채광을 적극적으로 도입하고, 일조량이 많은 경우 투과율을 적절히 조절해 현휘가 발생하지 않는 범위내에서 자연채광을 도입하고 남은 일사열은 수벽에 축열시키는 형태가 되어야 한다. 이와 같은 유연한 운용방법은 기존의 정적인 운용방법보다 시적 쾌적성을 확보할 수 있으며, 에너지 또한 크게 저감 시킬 수 있을 것이다.

한편, 축열 및 채광조절을 겸한 수벽시스템을 유연하게 운용하려면 Nisbet et al.[14)] 같이 물 자체의 투과율을 조절하거나 Balcomb et al.[15)]와 같이 외측 또는 내측 표면의 투과율을 조절하는 방식을 고려해 볼 수 있다. 하지만 이 두 방식에 대한 비교연구사례가 없어, 어떤 방식으로 집열하고 투과율을 조절하는 방식이 합리적인지에 대한 연구가 필요하다. 따라서 본 연구는 축열 및 채광조절이 가능한 수벽시스템의 성능평가에 대한 기초연구로써 집열방식에 따른 수벽의 성능을 실험적으로 검증하고, 축열과 채광을 동시에 확보하기 위한 경제적이고 효율적인 집열방식을 제시하고자 한다.

3. 집열방식에 따른 수벽의 성능실험

3.1. 실험의 개요 및 방법

축열 및 채광조절이 가능한 수벽시스템의 집열방식에 따른 수벽의 성능을 검증하기 위해 물의 투과율을 조절하면서 집열하는 방식과 표면의 투과율을 조절하면서 집열하는 방식으로 나누어 실험하였다. 여기서 두 집열방식은 현재 구현이 불가능하거나 실험비용이 크게 소요되므로, 기초연구단계상 쉽고 일반적인 방법으로 물과 표면의 투과율을 조절하여 성능실험을 수행하였다. 집열방식별 실험의 개요 및 방법은 다음과 같다.

우선 물의 투과율을 조절하는 가장 일반적인 방법은 염료등의 특정 첨가물을 첨가하는 방법일 것이다. 하지만 염료등의 첨가물을 넣었을 경우 첨가된 염료의 열용량이 물과 동일하거나 비슷

9) R. Fuchs, J.F. McClelland, "Passive solar heating of buildings using a transwall structure", Solar Energy , 1979

10) J.K. Nayak, "Transwall versus trombe wall: Relative performance studies", Energy Conversion and Management, 1987

11) G.N. Tiwari, M. Upadhya, S.N. Rai, "Relative thermal performances of south walls in winter", Energy and Buildings, 1991

12) Y. Liu, W. Feng, "Integrating passive cooling and solar techniques into the existing building in South China", Advanced Materials Research, 2012

13) S.K. Nisbet, N.S. Mthembu, "Transwall modeling using effective conductivities", Solar Energy, 1992

14) S.K. Nisbet, N.S. Mthembu, "Transwall modeling using effective conductivities", Solar Energy, 1992

15) J.D. Balcomb, J.C. Hedstrom, R.D. McFarland, "Simulation analysis of passive solar heated buildings—Preliminary results", Solar Energy, 1977

ⓒCopyright Korea Institute of Ecological Architecture and Environment

하지 않는 한 그 양에 따라 수벽의 열용량은 감소할 것이다. 결국 염료의 비율이 증가할수록 투과율이 감소하면서 일사획득량이 증가하나 단위체적당 열용량이 감소하므로 이 둘 사이는 trade-off 관계에 있다. 이를 고려하기 위해 본 연구는 첨가물의 양에 따른 투과율 및 비열변화에 따른 축열량 비교실험도 병행하였다. 따라서 염료의 함량에 따른 trade-off를 실험하기 위한 집열재로써 퍼센트 농도 기준 22.5%와 47.5%의 소금물을 사용하였다. 일반적으로 순수한 물의 비열이 가장 크며 (그림 3에서 염도 S가 0일 때), 소금물의 경우 〈그림 3〉에 나타난 바와 같이 소금 농도별 비열은 감소하게 된다.

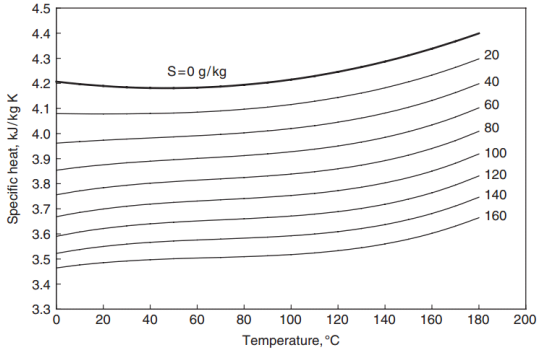

Fig. 3. Specific heat variations of salt water with salinity[16)]

또한 물의 투과율을 조절해 집열하는 방식을 실험하기 위한 불투명한 집열재로써 '콜라(coke)'를 선정하였다. 여기서 콜라를 불투명한 집열재로 선정한 이유는 우선 가장 구하기 쉽고 값이 싸며, 시간이 지나도 재료분리나 침전이 일어나지 않아 투과율이 일정하기 때문이다. 하지만 콜라의 경우 물 이외에 설탕 및 CO2등이 첨가되어있으므로, 실험 전 순수한 물과의 비열 비교실험을 수행하였다. 〈그림 4〉와 같이 동일한 체적의 물과 콜라를 100° C 까지 가열 후 1.5시간 동안의 상온에서의 온도변화를 관찰한 결과 동일한 곡선을 그리며 온도가 감소하였다. 따라서 측정오차를 제외하면 물과 콜라의 비열은 비슷하다고 볼 수 있다. 하지만 본 연구는 콜라의 첨가물에 따른 성능변화를 관찰하기 위해 CO2를 제거했을 때 성능비교실험도 병행하였다.

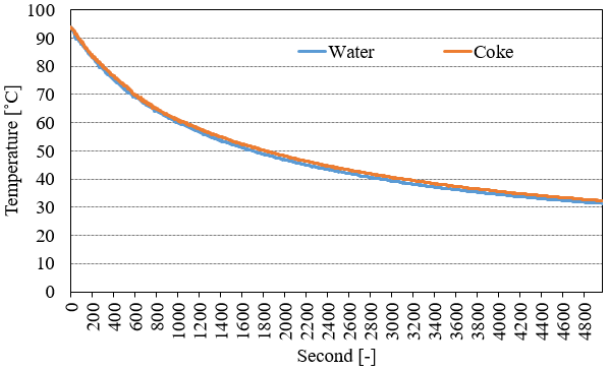

Fig. 4. Temperature decrease of water and coke in the air after heating up

16) Sharqawy, Mostafa H., John H. Lienhard V, Syed M. Zubair. "The thermophysical properties of seawater: A review of existing correlations and data." Desalination and Water Treatment, 2010

종합하면 집열방식에 따른 성능시험에 적용된 축열재는 비교실험을 위한 물, 22.5%의 소금물, 47.5%의 소금물, CO2가 첨가된 콜라, CO2가 첨가되지 않은 콜라이다.

표면의 투과율을 조절하는 방식은 표면에 도달한 일사가 일단 표면에 흡수된 후 축열재의 온도를 높이는 방식이며, Balcomb et al.[17)]의 연구결과를 중심으로 보다 나은 축열성능을 위해 내측에 면할 부분을 〈그림 5〉의 좌측 사진과 같이 불투명 스프레이로 도색하였다. 한편, 집열재의 투명한 정도에 따라 집열효율이 변하기 때문에 그림 5의 우측과 같이 10mm 두께의 시험용기에 담아 가시광선 투과율을 측정하였다.

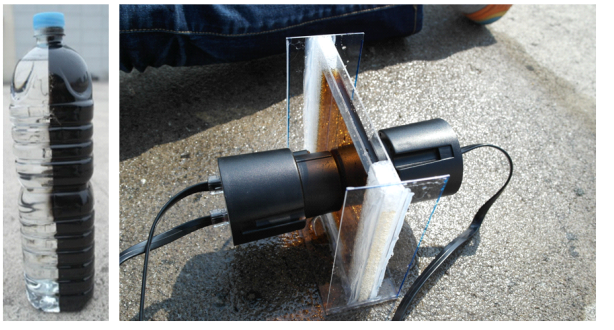

Fig. 5. A picture of half opaque water bottle (left) and measurement of visual transmittance (right)

각 축열재의 가시광선 투과율을 측정한 결과는 〈표 1〉과 같다. 집열재의 투과율을 조절한 경우 순수한 물의 투과율이 0.81로 가장 높았으며, 소금의 함유량이 많을수록 투과율이 감소하였고, 불투명한 콜라의 투과율이 0.42로 가장 낮았다. 스프레이로 도색해 표면의 투과율을 낮췄을 경우 0.09로 나타났다.

여기서 유의할 점은 실제 실험에 사용한 축열재의 두께는 80mm 이며, 따라서 집열재의 투과율을 조절한 경우 최종 투과율은 표1보다 더 낮다.

Table 1. Visible transmittance of considered five materials for measurement

Material	Visible transmittance
Water	0.81
22.5% salt water	0.80
47.5% salt water	0.68
Coke	0.42
Spray coating	0.09

집열방식에 따른 성능실험방법은 〈그림 6〉에 나타난 바와 같다. 우선 쉽게 구할 수 있는 재활용 플라스틱 병을 이용해 동일한 부피의 축열재를 준비하였다. 그리고 축열재를 동시에 일사에 노출시킨 후 시간별 온도변화를 측정하였다. 데이터 수집방법은 각 축열재의 중간에 온도센서를 삽입하여 축열재의 온도를 직접 수집하였다. 실험에 적용된 실험체는 〈그림 6〉의 좌측부터 22.5%의 소금물, 47.5%의 소금물, CO2가 없는 콜라, 콜라, 순수한 물, 스프레이로 후면을 도색한 물로 총 6가지이다. 성능분석을 위해 축열재 온도 외에도 외기온도, 수평 및 수직 일사량을

17) J.D. Balcomb, J.C. Hedstrom, R.D. McFarland, "Simulation analysis of passive solar heated buildings—Preliminary results", Solar Energy, 1977

동시에 수집하였으며, 실험에 사용된 실험장치 및 사양, 그리고 데이터 수집 간격은 〈표 2〉에 기술된 바와 같다.

Fig. 6. A setting of temperature measurement to assess the performance of heat collection

Table 2. Specifications of sensors and equipments for experiment

Item	Equipment name	Measurement range	Step
Temperature	T type T/C sensor	-250℃~400℃	Second
	Data logger (testo 176 T4)	-200℃~1000℃	
Irradiance (Vertical, Horizontal)	Pyranometer (LP PYRA 10)	0W/m²~4000W/m²	Second
	Data logger (yokogawa GP 10)	-	

3.2. 실험결과 및 분석

집열방식 및 축열재의 축열성능에 따른 영향은 일출 후 부터 다음날 일출 전까지만 지속된다고 간주하고 만 1일간의 수집된 자료를 중심으로 성능평가를 수행하였다. 〈그림7〉의 실험결과를 보면 24일 밤사이 비슷한 온도까지 내려갔다가 일출을 기점으로 집열방식 및 투과율에 따라 축열재의 온도가 달라짐을 확인할 수 있다. 우선 축열재 자체에서 집열하는 방식은 투과율이 낮은 두 콜라의 온도가 가장 빨리 상승하였으며, 태양이 떠있는 주간 내내 다른 축열재보다 높은 온도를 유지하였다. 반면, 투과율이 물보다 낮은 두 소금물의 경우 주간 내내 순수한 물보다 조금 더 높은 온도분포를 보였으나 야간의 온도분포는 더 낮았다. 한편, 표면의 투과율을 조절해 집열하는 방식은 투과율이 낮은 두 콜라와 비슷한 성능을 보였다.

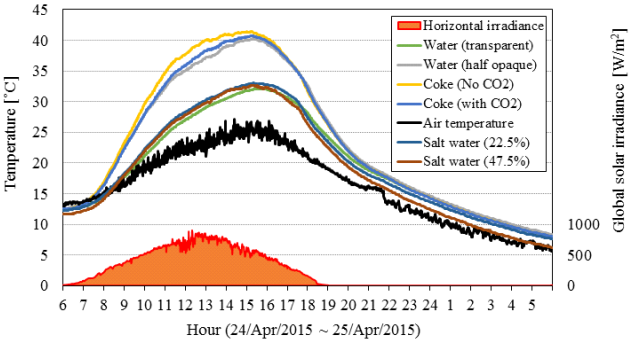

Fig. 7. Temperature variations of the TESs for a day depending on the measures of heat collection and the material properties.

집열방식 및 축열재 성능을 비교하기 위해 〈그림 8〉과 같이 하루 동안의 최대 및 최소온도, 평균온도를 도식하였다. 그래프에서 온도의 최대값이 높음은 집열성능이 우수하거나 축열성능이 작음을 의미하며, 일출 전 발생하는 온도의 최소값이 낮음은 집열성능과 축열성능 모두가 작음을 의미한다. 평균온도는 집열성능 및 축열성능이 통합된 지표로 평균온도가 높을수록 우수한 집열 및 축열방식이라 할 수 있다.

우선 축열재가 직접 일사열를 흡수하여 집열하는 방법은 비열이 물과 비슷하나 투과율이 낮은 콜라의 최대온도(41.4° C) 및 평균온도(23.5° C)가 가장 높게 나타났다. 그중 CO2를 제거한 콜라의 평균온도 및 최대온도가 각각 0.7° C 와 0.4° C 더 높았다. 이에 비해 투과율은 물보다 낮으나 비열도 낮은 소금물이 최대온도는 물과 다소 높거나 비슷한 분포를 보였으며, 47.5%의 소금이 함유된 소금물의 경우 평균온도는 물과 같거나 오히려 0.8° C 낮게 나타났다. 따라서 축열 및 채광조절이 가능한 수벽시스템을 축열재의 투과율을 조절해 구현할 경우 CO2 없는 콜라나 소금물의 실험결과에서 볼 수 있듯이 첨가물의 비열이 최대한 물과 비슷해야 성능저하를 최소화 할 수 있음을 알 수 있다.

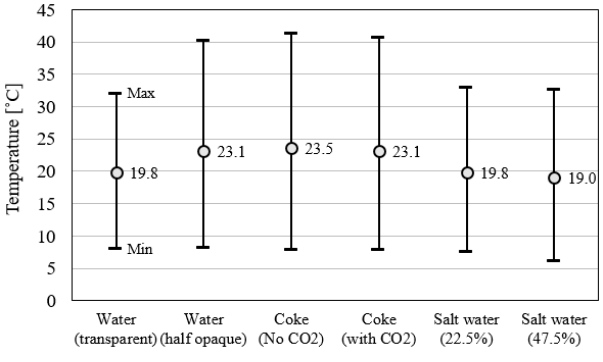

Fig. 8. Minimum, maximum and average temperature of the TESs that represent thermal performance of systems

축열재의 표면에서 투과된 일사열을 흡수하여 집열하는 방식은 최대온도 40.3° C, 평균온도 23.1° C로 콜라와 비슷한 성능을 나타냈다. 이는 결국 축열재 자체에서 투과율을 조절해 집열하는 방식이나 축열재를 투과한 일사열을 집열재 표면에서 집열하는 방식이나 성능차이는 크지 않음을 의미한다.

4. 2차 집열방식에 의한 집열성능

4.1. 실험의 개요 및 방법

집열방식에 따른 성능실험결과 불투명한 표면에서 집열하는 방식과 축열재 자체에서 집열하는 방식의 집열성능이 비슷하게 나타났다. 결국 수벽시스템의 경제적인 채광조절은 성능이 비슷한 두 방식 중 저렴한 방식을 적용하면 될 것이다. 두 집열방식의 구현방식에 대해 본 연구에서 조사한 바에 따르면, 축열재 자체의 투과율을 조절해 채광하고 집열하는 방식은 현재 개발된 관련 기술이 없으나, 축열재 표면의 투과율을 조절하는 방식은 전압

ⓒCopyright Korea Institute of Ecological Architecture and Environment

에 따라 투과율을 조절할 수 있는 일렉트로크로믹 유리와 같은 기술의 도입을 생각해 볼 수 있다. 하지만 이러한 스마트 유리는 경제적인 측면에서 대면적의 외벽에 적용하기 어렵다. 따라서 좀 더 저렴한 가격에 축열재 표면의 투과율을 조절하는 방식으로써 블라인드나 스크린 등의 차양장치를 이용한 채광조절 및 집열을 고려해 볼 수 있다. 이러한 방식은 단파복사인 일사열을 차양창지가 일차적으로 흡수한 후 수벽표면과 차양장치 사이의 공기온도 상승과 장파복사열교환으로 집열하는 방법이다. 따라서 표면에서 직접 집열하는 방식과 경제적으로 수벽의 집열성능을 높이는 방법으로써 차양장치 흡수 후 2차로 수벽표면에 집열하는 방식의 성능을 비교 및 검증 할 필요가 있다. 본 연구는 실험체를 이용한 실험을 통해 두 방식에 대한 성능실험을 수행하였다.

실험을 위해 〈그림 9〉의 최상부 사진과 같이 길이 0.9m(W) * 0.7m(H) * 0.9m(D) 크기의 Test Cell 3개를 제작하였으며, 일사를 수열하는 전면부는 5mm 플로트유리를 적용하였다. 또한 기밀을 위해 접합부는 실리콘으로 마감하였다. 실험 전 이 세 실험체가 초기 동일 실험조건인지 확인하기 위해 하루 동안의 온도변화를 관찰하였으며 그 결과 세 실험체는 거의 동일한 온도분포를 보였다. 그 후 〈그림 9〉의 중간과 같이 실험을 위한 동일한 체적(36,000cm^3)의 축열재 3가지를 준비하였다. 준비된 축열재는 물이 들어 있으며 1/2면을 흑색스프레이로 도장한 플라스틱 병(Case1), 물이 들어있는 투명한 플라스틱 병(Case2), 그리고 적벽돌(Case3)이다. 이들 축열재를 Test Cell 내부에 설치하였으며, Test Cell 2의 경우 차양장치 효과를 위해 축열재 (Case2) 바로 뒤에 흑색 캔트지를 설치하였다. 적벽돌(Case3)이 설치된 Test Cell 3의 경우 수벽과 일반적인 벽과의 상대적 비교를 목적으로 수행되었다.

Fig. 9. Preparation of the three identical test cells (top) and materials (middle), and installation (bottom) for performance measurement

4.2. 실험결과 및 분석

세 실험체의 집열성능은 만 4일간 측정되었으며, 시간에 따른 실험체 내 공기온도변화를 〈그림 10〉에 도식하였다. 일출 후 Test Cell 2의 공기온도가 Test Cell 1에 비해 조금 높거나 비슷한 분포를 보였으나, 일몰 후 Test Cell 2의 공기온도분포가 Test cell 1에 비해 최대 1° C정도 낮게 나타났다. 이는 Test Cell 2의 경우 주간에 일사열이 축열재에 흡수되는 동시에 일부가 켄트지를 통해 실내로 유입되었기 때문이며, Test Cell 2의 총 축열량이 Test Cell 1에 비해 적은 것은 야간 실내온도가 Test Cell 1보다 낮은 것에서 확인 할 수 있다. 그러나 야간 공기온도차가 크지 않아 내부 차양장치를 이용해 축열하는 방법의 성능차가 크지 않음을 알 수 있다. 한편 Test cell 3의 주간의 온도분포는 다른 두 Test cell에 비해 다소 낮거나 비슷하게 나타났으나 야간의 온도저하가 다른 두 축열재 보다 3° C정도 낮게 나타났다.

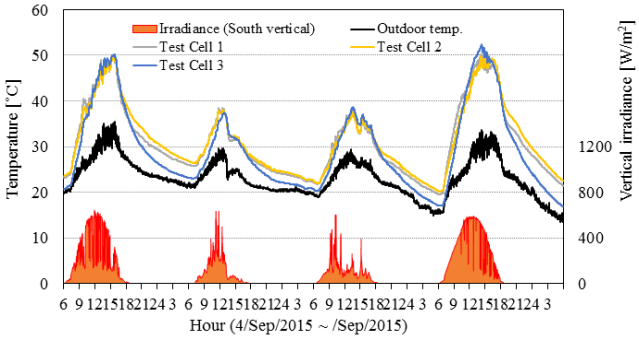

Fig. 10. Air temperature variations of three test cells for four days depending on the measures of heat collection and the material properties.

이 세 축열방식 및 축열재에 따른 축열성능은 최대·최소온도 및 평균온도로 확인할 수 있다. 〈그림 11〉에 나타난 바와 같이 Case1과 Case2의 최대 최소온도 및 평균온도는 거의 비슷함을 확인할 수 있었다. 그러나 Case3의 경우 다른 두 축열재에 비해 최대 · 최소 온도가 2.5° C 정도 높거나 낮아 주야간 온도차가 크고, 평균온도 또한 다른 두 실험체에 비해 1.6° C ~ 2.0° C 정도 낮게 나타났다. 따라서 수벽을 이용해 축열했을 경우 기존 건물 성능을 열쾌적 및 에너지성능측면에서 보다 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

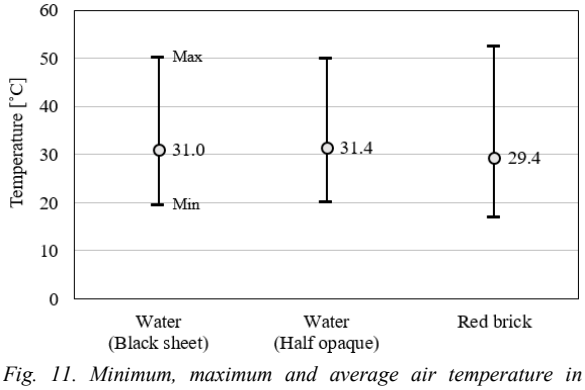

Fig. 11. Minimum, maximum and average air temperature in three test cells that represent thermal performance of systems

5. 결론

본 연구는 수벽시스템을 도입해 건물의 성능을 높이기 위한 기초연구로써, 기존의 정적인 수벽시스템의 운용방법에서 축열과 동시에 채광조절이 가능한 효과적인 현열집열방식을 실험적으로 도출하였다. 우선 축열 및 채광조절을 겸한 수벽시스템을 운용하기 위한 방법으로써 물 자체의 투과율을 조절하거나 수벽 내측 표면의 투과율을 조절하는 방식을 제안하였으며, 이 두 방식의 집열성능을 실험적으로 검증 및 비교하였다. 또한 축열재 자체의 투과율을 조절하는 방식에 대해서 첨가물의 함량증가에 따른 집열성능 증가와 축열능력 감소의 trade-off 관계도 함께 검증하였다.

실험결과 채광과 축열을 겸한 수벽시스템을 구현하기 위해 첨가물을 넣어 투과율을 조절할 경우 집열성능 보다 첨가물의 축열성능이 최대한 물과 비슷해야 성능저하를 최소화 할 수 있음이 밝혀졌다. 또한 집열방식에 따른 성능분석결과 축열재의 표면에서 투과된 일사열을 흡수하여 집열하는 방식과 축열재 자체의 투과율을 조절하는 방식이 비슷한 성능을 나타냈다.

그 중 경제적으로 집열성능을 높이는 방법으로써 일사를 차양장치 흡수 후 2차로 수벽 표면에 집열하는 방식을 제안하였고, 마찬가지로 실험을 통해 제안된 집열 방식의 성능을 검증하였다. 실험결과 차양장치를 이용한 2차 집열방식의 성능이 축열재의 표면에서 직접 집열한 방식과 비슷하게 나타났으며, 벽돌을 축열재로 사용한 경우보다 더 우수하게 나타났다. 따라서 수벽시스템을 건물에 도입시 차양장치를 이용해 채광조절과 집열을 동시에 할 경우 미적인 면과 함께 기존 건물성능을 열쾌적 및 에너지성능 측면에서 보다 개선시킬 수 있을 것으로 기대된다.

본 논문은 새로운 수벽시스템의 가능성 타진을 위한 기초실험 연구로 PET병 재활용소재의 이용가능성에 초점을 맞추어 진행된 초기단계 연구이다. 기초실험의 연구결과를 기반으로 향후 다양한 투광성 축열매체의 종류 및 구성비, 재활용용기의 내구성 및 누수, 동파 문제, 채광효과에 대한 정량적 해석, 차양장치를 포함한 시스템적 측면의 구성 최적화 등에 대한 후속연구가 진행되어야 할 것이다.

Reference

[1] 윤종호, “권두언 - 실측기반의 국내 제로에너지건물 기술현황 및 전망”, 그린빌딩협의회 웹진 2015년 12월호// (Yoon, jong-ho, Preface - Actual measurement based technology status and prospect of zero energy building in Korea, Korea Green Building Council, 2015-12)

[2] Vincent Basecq, Ghislain Michaux, Christian Inard, Patrice Blondeau, “Short-term storage systems of thermal energy for buildings: a review”, Advances in Building Energy Research, 2013

[3] Ting Wu, Chengwang Lei, “A review of research and development on water wall for building applications”, Energy and Buildings, 2016

[4] R. G. Sutton, R. J. McGregor, “Solarwall Project: Two Demonstration Houses with Passive Solar Heating in Tasmania”, Architectural Science Review, 1986

[5] M.S. Sodha, S.C. Kaushik, J.K. Nayak, “Performance of trombe walls and roof pond systems”, Applied Energy, 1981

[6] J.D. Balcomb, J.C. Hedstrom, R.D. McFarland, “Simulation analysis of passive solar heated buildings—Preliminary results”, Solar Energy, 1977

[7] R. Fuchs, J.F. McClelland, “Passive solar heating of buildings using a transwall structure”, Solar Energy , 1979

[8] J.K. Nayak, “Transwall versus trombe wall: Relative performance studies”, Energy Conversion and Management, 1987

[9] G.N. Tiwari, M. Upadhya, S.N. Rai, “Relative thermal performances of south walls in winter”, Energy and Buildings, 1991

[10] Y. Liu, W. Feng, “Integrating passive cooling and solar techniques into the existing building in South China”, Advanced Materials Research, 2012

[11] S.K. Nisbet, N.S. Mthembu, “Transwall modeling using effective conductivities”, Solar Energy, 1992

[12] Sharqawy, Mostafa H., John H. Lienhard V, Syed M. Zubair. "The thermophysical properties of seawater: A review of existing correlations and data." Desalination and Water Treatment, 2010

ⓒCopyright Korea Institute of Ecological Architecture and Environment