J Rec Const Resources 8(4)571-580(2020)
https://doi.org/10.14190/JRCR.2020.8.4.571

Print ISSN : 2288-3320
Online ISSN : 2288-369X

열사이클을 적용한 고온 조건 콘크리트 블록의 열용량 특성

Thermal Energy Capacity of Concrete Blocks Subjected to High-Temperature Thermal Cycling

양인환[1*] · 박지훈[2]
In-Hwan Yang[1*] · Ji-Hun Park[2]

(Received November 19, 2020 / Revised December 1, 2020 / Accepted December 6, 2020)

In this study, an experimental study on storage media for thermal energy storage system was conducted. For thermal energy storage medium, concrete has excellent thermal and mechanical properties and also has various advantages due to its low cost. In addition, the ultra-high strength concrete reinforced by steel fibers exhibits excellent durability against exposure to high temperatures due to its high toughness and high strength characteristics. Moreover, the high thermal conductivity of steel fibers has an advantageous effect on heat storage and heat dissipation. Therefore, to investigate the temperature distribution characteristics of ultra-high-strength concrete, concrete blocks were fabricated and a heating test was performed by applying high-temperature thermal cycles. The heat transfer pipe was buried in the center of the concrete block for heat transfer by heat fluid flow. In order to explore the temperature distribution characteristics according to different shapes of the heat transfer pipe, a round pipe and a longitudinal fin pipe were used. The temperature distribution at the differnent thermal cycles were analyzed, and the thermal energy and the cumulated thermal energy over time were calculated and analyzed for comparison based on test results.

키워드 : 열사이클, 콘크리트 블록, 열전달, 열에너지

Keywords : Thermal cycle, Concrete block, Heat transfer, Thermal energy

1. 서 론

에너지는 인류의 경제 성장과 삶의 질 향상에 필요한 필수 요소 중 하나이다. 그러나 지구 온난화의 가속과 에너지 수요의 급격한 증가로 인해 화석 연료 매장량이 지속적으로 감소하고 있으며, 여러 분야에 걸쳐 경제성과 효율성을 갖는 재생에너지 및 대체 에너지 개발을 위한 연구가 진행 중이다. 현재 재생 에너지로부터 생성되는 에너지의 17%가 전 세계 에너지 수요에 기여하고 있다.

한편, 자연에서 얻는 재생 에너지로는 파력, 풍력, 지열 및 태양열에너지가 있으나, 발생 주기로 인해 활용을 위한 지속적인 에너지 공급에 어려움이 있다. 이에 재생 에너지의 지속적인 공급을 위하여 열에너지 저장(thermal energy storage, TES)시스템 개발을 위한 연구가 수행되고 개발된다면 주기로 인한 에너지 공급 문제를 해결할 수 있다. TES 시스템은 공급과 수요 사이의 에너지 균형을 맞추는 역할을 하며, 궁극적으로 재생 에너지원을 다양한 에너지 저장 매체에 저장하여 활용한다면 기존 에너지인 화력 발전으로 인한 CO_2 배출을 억제할 수 있다.

열에너지 저장 매체를 이용한 열저장 기술은 태양열 발전소로 인해 발생되는 경제적인 문제를 해결하고 에너지 효율 상승시킬 수 있는 대안으로 활용할 수 있다. Islam et al.(2018)과 Vigneshwaran et al.(2019)는 집중 태양광 발전소(concentrated solar power, CSP)의 운영을 위해 원하는 특성을 가진 에너지 저장 매체 개발에 대하여 연구를 수행하였으며, Laing and Zunft(2015)는 에너지 저장 용량 및 수명주기 성능 측면에서 다양한 유형의 고체 및 액체 물질을 연구하였으며, 물, 암석, 모래, 벽돌, 콘크리트, 합성 오일, 액체 금속 및 용융염 등이 있다. Skinner et al.(2013)은 고체 저장 매체인 콘크리트는 내구성이 있으며 변형이나 균열 없이 여러 번

* Corresponding author E-mail: ihyang@kunsan.ac.kr
[1]군산대학교 토목공학과 교수 (Department of Civil Engineering, Kunsan National University, Jeonbuk, 54150, Korea)
[2]군산대학교 토목공학과 박사과정 (Department of Civil Engineering, Kunsan National University, Jeonbuk, 54150, Korea)

Copyright ⓒ 2020 by Korean Recycled Construction Resources Institute
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited

의 가열 및 냉각 주기에 사용할 수 있다고 보고하고 있으며, 또한, 다양한 열전달 유체(heat transfer fluid, HTF)에 대하여 부식에 강하고 500℃까지 온도 노출을 견딜 수 있다고 제시하고 있다.

위의 장점을 고려하여 John et al.(2011)은 칼슘알루민산염, 강섬유 및 폴리프로필렌으로 만든 모르타르를 개발했으며, 상온에서 500℃까지 가열실험을 수행하였다. 열사이클 10회 후에도 균열 없이 압축강도의 75%를 유지한 것으로 보고되었다. 또한, Laing et al.(2012)은 열에너지 저장 시스템 개발을 위하여 가열 실험을 하는 동안 콘크리트의 중량 손실이 최소화되었고 몇 번의 열사이클 후에 강도가 일정하게 유지된 것으로 보고하고 있다. 또한, 콘크리트는 열적 및 역학적 특성이 우수하고 저렴한 재료 비용으로 인해 열에너지 저장 매체에 적합한 특성을 보유한다고 보고되고 있다(Laing et al. 2006; Laing et al. 2009; Salomoni et al. 2014; Tamme et al. 2003).

따라서, 본 연구에서는 열에너지 저장 시스템 개발에서 중요한 요소로 작용하는 열에너지 저장 매체를 콘크리트로 활용하기 위한 연구를 수행하였다. 특히, 강섬유 보강 초고강도 콘크리트는 고인성과 높은 압축강도를 보유함으로써 고온 노출 시, 내구성이 우수하고, 높은 열전도율을 나타냄으로써, 축열 및 방열 관점의 열교환에 용이성을 가진다. 이에 초고강도 콘크리트를 블록 형태로 제작하여 하나의 모듈을 설정하고 열교환이 활발히 이루어질 수 있도록 블록 중심부를 관통하도록 열전달 파이프를 매립하여 일정한 열사이클을 설정하여 가열 실험을 수행하고, 온도분포 특성을 분석하였다. 또한, 초고강도 콘크리트 블록의 온도분포 특성을 토대로 열에너지를 산정하여 축열 성능을 파악하였다.

2. 콘크리트 블록 열저장 성능

2.1 열에너지 저장용 콘크리트 블록 제작

콘크리트 강도 180MPa의 초고강도 수준으로 확보하기 위하여 보통 포틀랜드 시멘트(ordinary portland cement)를 기본 바인더로 설정하고 반응성 분체로써 지르코늄을 혼입하여 배합을 수행하였다. 잔골재는 입도 0.5mm 이하의 모래를 선정하여 성능 변동성을 최소화하였으며, 구성 입자들의 평균 크기가 4μm, SiO_2 96% 이상 및 밀도 2.60g/cm^3 특성을 갖는 충전재(filler)를 적용하였다(Tabel 1). 또한, 초고강도 특성을 나타내기 위하여 강섬유를 혼입하였으며, 인장강도는 2,500MPa, 섬유 직경은 0.2mm, 섬유 길이 16.5mm의 직선 형상의 강섬유(Fig. 1(a))를 콘크리트 부피비의 1.5%로 적용하였다. 한편, 고온의 열사이클에 콘크리트가 노출되었을 때 폭렬 현상을 동반할 수 있으며, 이를 방지하기 위한 보강섬유(Fig. 1(b))로써 폴리프로펠렌 섬유(polypropylene fiber)를 단위배합당 2kg/m^3을 혼입하였다. 폴리프로필렌 섬유는 지름 21 ㎛, 비중 0.91, 길이는 12.7mm이며, 인장강도는 400MPa를 보유한 폴리프로필렌 섬유를 적용하였다.

열에너지를 효율적으로 활용하기 위해서는 축열 및 방열 성능이 우수해야 하므로 열저장 특성을 파악해야 한다. 따라서, 콘크리트를 열에너지 저장 매체로 활용하기 위해서는 저장매체의 역할을 수행하기 위한 시스템이 필요하다. 본 연구에서는 콘크리트에 열전달 파이프를 매립하여 열교환, 즉, 열에너지 전달인 축열 및 방열이 용이한 콘크리트 블록 모듈을 모사하였다. 실제 열에너지 저장용 콘크리트 블록 모듈은 여러 개의 열전달 파이프가 규칙적으로 배열되는 형상을 갖게 된다. 열전달 파이프를 중심으로 열전달은 등방성을 나타내며 목표 열용량에 따라 축열 블록 크기와 열전달 파이프 개수가 결정된다. 따라서, 단면 내 등방성 열전달 특성을 고려하여 한 개의 열전달 파이프를 갖는 콘크리트 축열 블록을 제작하여 온도분포 특성을 분석하고자 하였다. 가로×세로×길이가 각각 100×100×800mm의 크기를 갖는 블록을 제작하였으며, 콘크리트 블록 중심을 관통하는 열전달 파이프를 매립하여 열에너지 전달을 수행할 수 있도록 제작하였다(Fig. 2). 또한, 파이프 형상에 따라 열전달 성능을 파악하기 위하여 원형 파이프(round pipe)와 길이 방향으로 핀이 달린 종방향 핀 부착 파이프(longitudinal fin pipe)를 설정하여 블록 제작을 수행하였다. 파이프 양 끝 단에

(a) Steel fiber

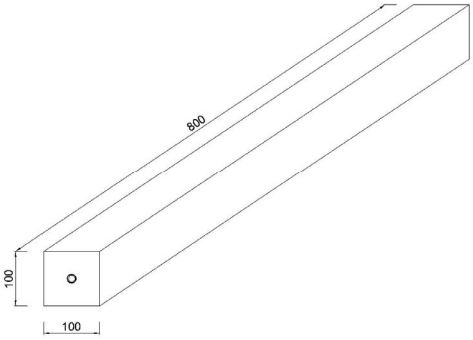
(b) Polypropylene fiber

Fig. 1. Type and shape of fiber

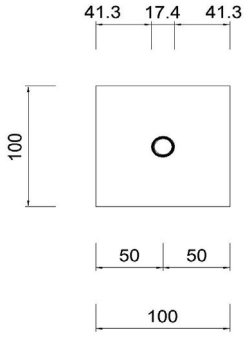
Table 1. Mixing proportion

f_{ck} (MPa)	W/B (%)	Unit weight(kg/m³)					Content of fiber	
		W	OPC	Zr	Fine agg.	F	Steel fiber (%)	Polypropylene fiber (kg/m³)
180	0.18	178	783	196	862	235	1.5	2

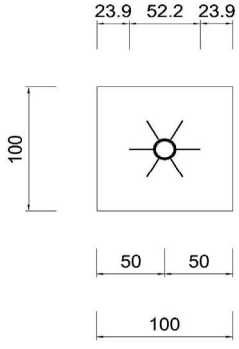
W: water, B: binder, OPC: ordinary portland cement, Zr: zirconium, F: filler



(a) Concrete block size



(b) Section of round pipe



(c) Section of longitudinal fin pipe

Fig. 2. Detail of thermal energy storage block

는 열사이클을 수행하고 열에너지를 공급하기 위한 열전달 장비에 장착이 용이하도록 플렌지를 부착하여 열손실을 방지하였다. 제작이 완료된 블록은 양생 초기에 90±5℃에서 72시간 동안 증기양생을 실시하였으며, 이후, 실제 현장조건의 양생환경을 고려하여 기건양생을 실시하였다.

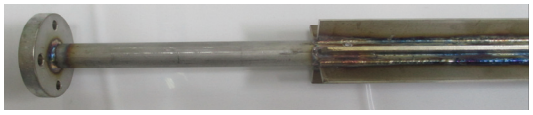
2.2 열전달 파이프

열에너지 전달을 위한 파이프의 형상, 치수 및 핀 정보에 대하여 Table 2에 자세히 나타내었다. 열전달 파이프 단면은 두께가 2mm로 일정하며, 단면 형상은 원형 파이프 및 종방향 핀 부착 파이프로 구분하여 2종류를 설정하였다. 두 열전달 파이프의 외경, 내경은 동일하며, 핀 부착 파이프의 핀은 두께 및 높이가 일정하도록 설계하였다. 또한, 파이프 양 끝단에 플렌지를 부착하여 열전달 장비와 체결하였을 시, 열 유체 공급의 누수를 방지하고 열손실을 최소화하여 줄일 수 있도록 설계하였다(Fig. 3).

Table 2. Detail of heat transfer pipe

Shape	Pipe			Fin	
	Outer diameter (mm)	Inner diameter (mm)	Thickness (mm)	Thickness (mm)	Height (mm)
Round pipe	17.4	13.4	2.0	-	-
Longitudinal fin pipe	17.4	13.4	2.0	3.0	17.4

(a) Round pipe



(b) Longitudinal fin pipe

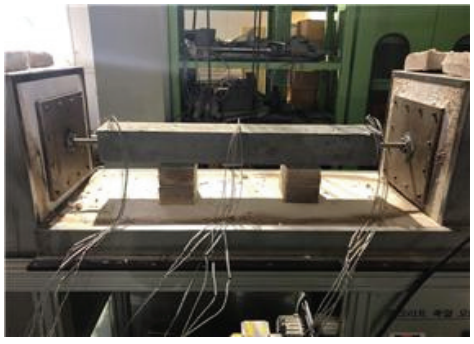
Fig. 3. Actual pipes

2.3 열사이클

Fig. 4에 나타낸 열전달 장비에 열전달 파이프가 매립된 콘크리트 블록을 장착하여 열사이클을 적용한 가열 실험을 수행하였다. 열전달 장비의 하단에 위치한 펌프에서 유체(공기)가 공급되고 온도조절을 할 수 있는 코일이 매립된 통로를 지나 뜨거워진 열유체가 콘크리트 블록을 통과하여 열교환이 이루어지고 외부로 배출되는 시스템을 갖도록 설계하였다. 또한, 열유체가 이동하는 통로에 단열재를 배치하여 열손실이 발생하는 것을 최소화할 수 있도록 설정하였다.

콘크리트 블록에 적용하는 열사이클의 목표 온도 및 시간에 따라 온도 분포를 분석하기 위하여 A 및 B 타입으로 두 가지 열사이클을 설정하였으며, 열사이클 곡선을 Fig. 5, 열사이클 상세내용을 Table 3에 나타내었다. A 타입 열사이클의 경우, 총 5회 적용하였으며, B 타입 열사이클은 2회 적용하였다.

(a) Heat transfer equipment

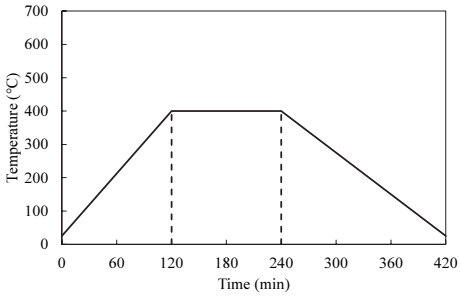


(b) Concrete module block installed

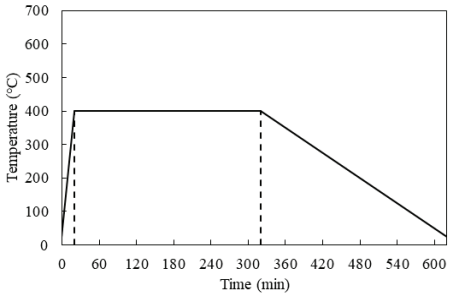
Fig. 4. Detail of heat transfer equipment

2.4 계측 계획

콘크리트 블록의 전체적인 온도분포를 측정하기 위하여 온도센서(thermo couple)를 콘크리트 블록 입구 단면(inlet section), 중앙 단면(middle section) 및 출구 단면(outlet section)에서의 측정을 설정하였다. 한 단면에서 열전달 파이프를 기준으로 수직 방향 3개와 수평 방향 3개를 배치하였으며, 입구 단면, 중앙 단면 및 출구 단면에 걸쳐 총 콘크리트 모듈 블록 내에 매립하였다(Fig. 6). 콘크리트 블록은 열전달 장비에 장착하여 열사이클 A 타입 적용 후 B 타입 순으로 연속적으로 수행하였으며, 그에 따른 온도분포를 측정하였다.



(a) A type thermal cycling

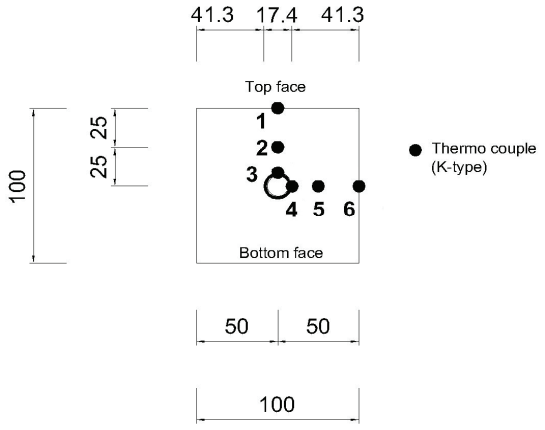


(b) B type thermal cycling

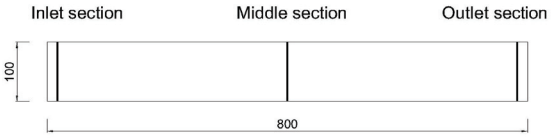
Fig. 5. Type of thermal cycling

Table 3. Detail of thermal cycling

Type	Increasing temperature		Constant temperature		Decreasing temperature	
	Time (min)	Temp. (℃)	Time (min)	Temp. (℃)	Time (min)	Temp. (℃)
A	120	400	240	400	360	25
B	20	400	320	400	620	25

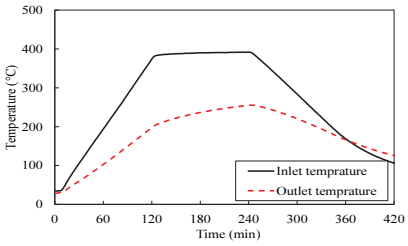


(a) Thermo couple position in section

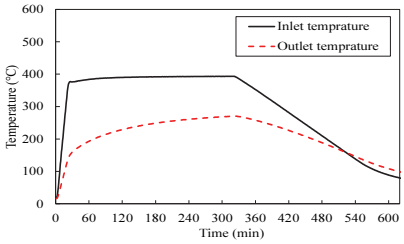


(b) Thermo couple location by section

Fig. 6. Temperature distribution measurement location



(a) A type thermal cycling



(b) B type thermal cycling

Fig. 7. Inlet and outlet temperature measured from heat transfer equipment

3. 열전달 및 열용량 실험 결과 및 분석

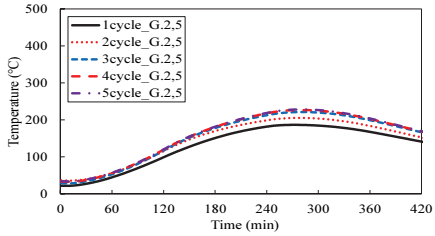
3.1 열사이클 횟수에 따른 열전달 특성

콘크리트 블록에 전달하는 열에너지 및 온도분포를 파악하기 위하여 열전달 장비에서 주는 온도를 계측하였다. 이에 열사이클 타입에 따른 온도 측정 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 본 연구에서 설정한 열사이클에 맞게 일정한 승온속도 기울기를 가지며 가열을 수행한 것으로 나타냈다. 반면에 A 타입 열사이클에서 약 360분, B 타입 열사이클에서 약 540분에 입구 온도와 출구 온도가 역전되는 현상이 나타냈다. 열전달 장비를 통해 콘크리트에 저장된 열, 즉, 콘크리트 블록 온도가 열전달 장비에서 공급하는 열유체의 온도보다 높아 오히려 콘크리트 블록에서 열유체로 열전달이 이루어져 나타나는 결과로 판단된다.

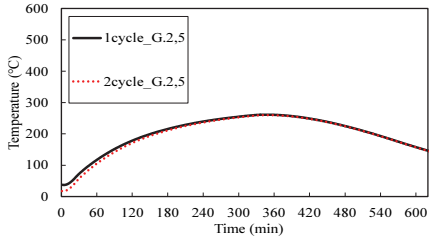
원형 파이프 블록의 중앙 단면에서 열사이클 횟수에 따른 온도분포 비교 그래프를 Fig. 8에 나타내었다. 범례에 나타낸 G.2, 5는 온도센서 위치를 의미하며 콘크리트 블록의 표면부와 중심부 사이에 위치한다(Fig. 6(a)). A 타입 열사이클에서는 2회의 열사이클까지 온도분포는 점차 증가하는 경향을 나타냈다. 이후 3회 열사이클부터는 뚜렷한 경향을 나타내지 않고 일정한 온도분포를 나타낸다. 열사이클이 반복될수록 콘크리트는 고온에 대한 영향이 줄어들고 안정화를 나타내는 것으로 판단된다. 또한, 278분에서 228.1℃의 최대 온도를 나타내며, 열사이클 단계 중 온도 하강 구간에 위치한다. 이는, 실제 열사이클의 278분에서 열전달 장비에서 전달하는 온도는 입구 및 출구에서 각각 326.7℃ 및 237.0℃로 측정되었으며, 콘크리트 블록의 온도보다 높은 온도를 나타낸다. 결과적으로 열사이클에서는 하강구간이지만 열전달 장비는 콘크리트 블록에 온도를 전달하고 있으며, 최대 온도를 나타내는 이유로 판단된다. 콘크리트 블록에 A 타입 열사이클을 적용한 후에 B 타입 열사이클을 적용하였다. 따라서, A 타입 열사이클을 적용하는 동안 고온에서의 콘크리트 매체 안정화가 이루어졌으며, 일정한 온도분포를 나타내었다. B 타입 열사이클에서는 347분에서 259.9℃ 최대 온도가 관찰되었다.

3.2 단면별 온도분포

종방향 핀 부착 파이프를 매립한 콘크리트 블록의 열사이클 타입에 따른 단면별 온도분포 비교 그래프를 Fig. 9와 10에 나타냈다. 입구 단면에서 콘크리트 블록 중심부에 위치한 온도센서(G.3,4)에서 가장 높은 온도분포를 나타냈으며, 중앙 단면 및 출구 단면으로 갈수록 낮은 온도분포가 관찰되었다. 이는 입구 단면에서 출구 단면쪽으로 열유체가 이동하며 순차적으로 열을 전달하기 때문에 나타나는 것으로 판단된다. 입구 단면에서 온도 측정 위치인 콘크리트 블록 중심부(G.3,4), 중심부와 표면부 사이 위치(G.2,5) 및 콘

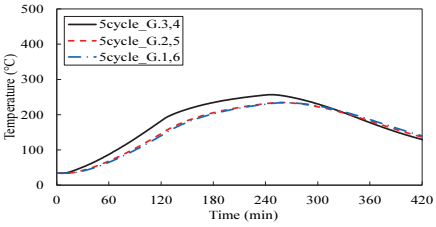


(a) A type thermal cycling

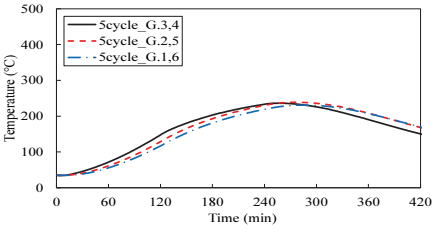


(b) B type thermal cycling

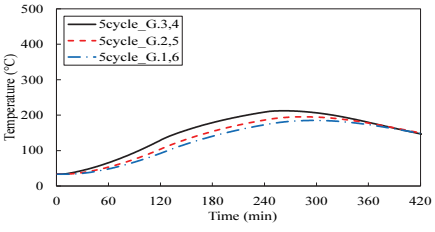
Fig. 8. Temperature distribution according to the number of thermal cycling in the middle section (concrete block with round pipe)



(a) Inlet section

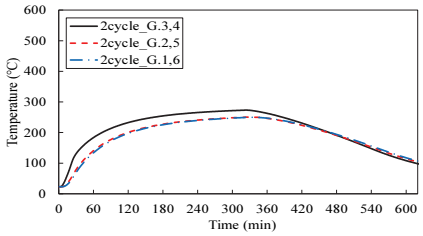


(b) Middle section

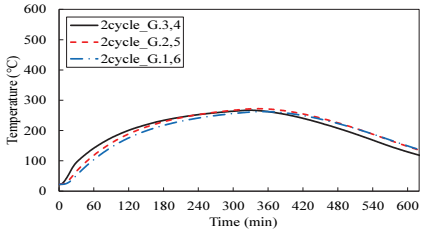


(c) Outlet section

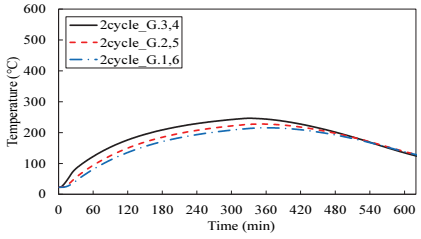
Fig. 9. Temperature distribution in three sections under A type thermal cycling (concrete block with longitudinal fin pipe)



(a) Inlet section



(b) Middle section



(c) Outlet section

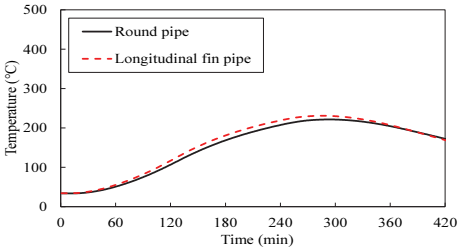
Fig. 10. Temperature distribution in three sections under B type thermal cycling (concrete block with longitudinal fin pipe)

크리트 블록 표면부(G.1,6)간의 온도분포 차이가 가장 크게 나타났으며, 중앙 단면 및 출구 단면으로 갈수록 온도분포 차이는 감소하는 경향을 나타낸다. A 타입 열사이클에서 약 360분 경과 후에 콘크리트 블록 중심부(G.3,4), 중심부와 표면부 사이 위치(G.2,5) 및 콘크리트 블록 표면부(G.1,6)의 온도분포는 거의 같거나 역전되는 현상이 관찰되었다.

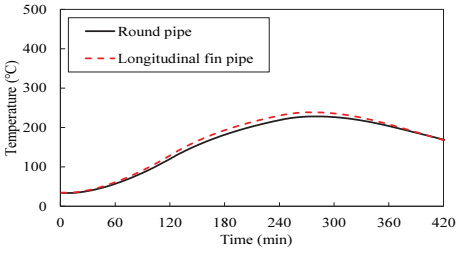
3.3 열전달 파이프 형상의 열전달 거동에 대한 영향

열사이클 타입별로 열전달 파이프에 따른 온도분포 비교를 Fig. 11과 12에 나타내었다. A 타입 열사이클에서 원형 파이프의 온도분포가 낮게 나타나는 반면, 종방향 핀 파이프의 온도분포는 원형 파이프보다 높게 나타났다. 반면에 360분에서 종방향 핀 파이프의 온도가 원형 파이프보다 낮게 나타났으며, 종방향 핀 파이프가 보유한 종방향 핀의 효과로 인해 열전달 성능이 우수한 것으로 판단된다. B 타입 열사이클에서도 원형 파이프의 온도분포가 낮게 나

타났으며, 상대적으로 종방향 핀 파이프의 온도분포가 높게 나타났다. 핀의 형상에 따라 열전달 성능에 차이가 나타나는 것으로 판단된다. 또한, 450분에서 종방향 핀 파이프의 온도가 원형 파이프와 유사하게 나타나다가 480분 이후에 종방향 핀 파이프의 온도가 오히려 더 낮게 측정되었다. 종방향 핀 파이프는 열을 전달하는 데 유리하며, 축열 및 방열에 기여하는 역할이 효과적일 것으로 판단된다.

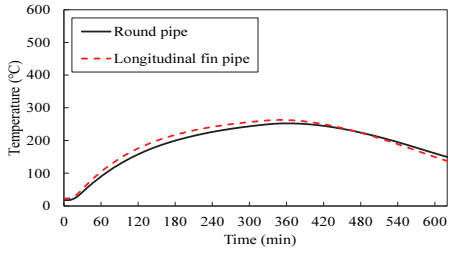


(a) Surface temperature in the middle section

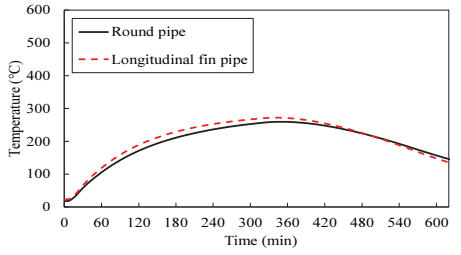


(b) Intermediate position temperature in the middle section

Fig. 11. Temperature change over time in A type thermal cycle scenario



(a) Surface temperature in the middle section



(b) Intermediate position temperature in the middle section

Fig. 12. Temperature change over time in B type thermal cycle scenario

4. 콘크리트 블록 열용량 산정

4.1 열용량 산정 기법

콘크리트 블록에 저장되는 열에너지를 산정하기 위하여 다음과 같은 식을 이용하였다. 콘크리트 블록 내의 각 영역에 저장되는 열에너지는 다음의 식 (1)과 같다.

$$Q_{c,i} = \rho_c \; c_{p,c} \; V_{c,i} \; (T_{c,i} - T_{c,ini}) \tag{1}$$

여기서, $Q_{c,i}$는 콘크리트 각 영역에서의 열에너지(J)이다. ρ_c는 콘크리트의 밀도(kg/m^3), $c_{p,c}$는 콘크리트의 비열 ($J/kg \cdot K$)이며, $V_{c,i}$는 콘크리트 블록 영역에서의 콘크리트 부피 (m^3)를 의미한다. $T_{c,i}$과 $T_{c,ini}$는 각각 콘크리트의 온도(K) 및 콘크리트의 초기온도(K)를 나타낸다. 따라서, 콘크리트 블록에 저장되는 열에너지는 식 (2)로 표현할 수 있다.

$$Q_c = \sum_{i=1}^{3} Q_{c,i} = \sum_{i=1}^{3} \rho_c \; c_{p,c} \; V_{c,i} \; (T_{c,i} - T_{ini}) \tag{2}$$

여기서, Q_c는 콘크리트 전체 블록 열에너지(J)를 나타낸다. 이와 유사하게 콘크리트 블록에 저장되는 열에너지를 다음의 식 (3)과 같이 계산할 수 있다.

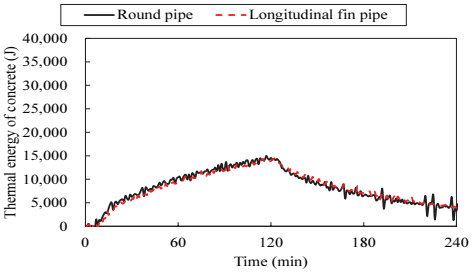
$$Q_c = \rho_c \; c_{p,c} \; V_c \; (T_{c,mean} - T_{c,ini}) \tag{3}$$

여기서, V_c는 콘크리트 전체 블록 부피(m^3)이며, $T_{c,mean}$은 콘크리트 블록의 평균온도(K), $T_{c,ini}$는 콘크리트 블록의 초기온도(K)이다.

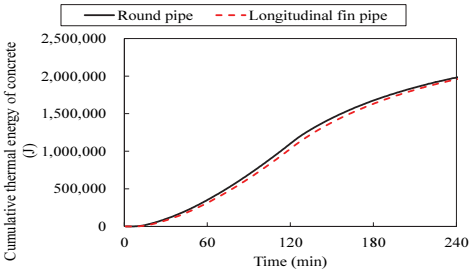
4.2 열용량 산정 결과

열사이클 타입별로 콘크리트 블록의 단위시간(분)당 열에너지 증분량 및 총(누적) 열에너지량을 Fig. 13과 14에 나타내었다. A 타입 열사이클 적용 콘크리트 블록의 경우, 열사이클 온도 상승 구간인 0~120분까지 단위시간(분)당 열에너지 저장량은 지속적으로 증가하나, 열사이클에서 온도가 일정하게 유지되는 단계인 120~240분 동안에는 단위시간당 열에너지 저장량이 점진적으로

감소한다. 시간에 따른 콘크리트의 온도 변화량은 축열 블록의 열용량 산정에 중요한 영향인자이며, 열사이클 온도상승 구간에서 급격한 온도상승으로 인해 콘크리트 온도 증분량은 크게 나타난다. 반면에, 열사이클 온도 유지구간에서는 상대적으로 작은 온도 증분량을 나타나므로 이와 같은 단위시간당 열에너지 저장 곡선을 나타낸 것으로 판단된다.

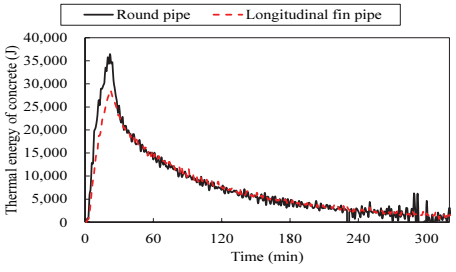


(a) Thermal energy storage over time

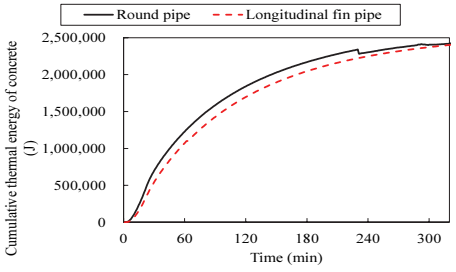


(b) Cumulative thermal energy

Fig. 13. Thermal energy storage performance (A type thermal cycling)



(a) Thermal energy storage over time



(b) Cumulative thermal energy

Fig. 14. Thermal energy storage performance (B type thermal cycling)

단위시간당 열에너지를 누적하여 총(누적) 열에너지를 계산하였으며, 온도 유지기간 종료 시점(240분)까지 A 타입 열사이클을 적용한 콘크리트 블록의 총 열에너지는 지속적으로 증가하는 결과를 나타낸다. A 타입의 열사이클을 적용하는 경우, 열사이클 적용 후 240분 (열사이클 온도 유지기간 종료 시점)까지 원형 파이프 및 종방향 핀 부착 파이프 콘크리트 블록의 총 열에너지는 각각 1,980 및 1,957kJ로 나타났다.

B 타입 열사이클 적용 블록의 열사이클 온도 상승 구간인 0~20분까지 단위시간(분)당 열에너지 저장량은 지속적으로 증가하나, 열사이클 시나리오에서 온도가 일정하게 유지되는 20~320분 동안에는 단위시간당 열에너지 저장량이 점진적으로 감소한다. 열사이클 온도상승 구간에서 급격한 온도 상승으로 인해 콘크리트 온도 증분량은 크지만, 열사이클 온도유지구간에서는 상대적으로 작은 온도 증분량을 나타나므로 이와 같은 단위시간당 열에너지 저장 곡선을 나타낸 것으로 판단된다. 단위시간당 열에너지를 누적하여 총(누적) 열에너지를 계산하였으며, 온도유지기간 종료 시점(240분)까지 B 타입 열사이클을 적용한 콘크리트 블록의 총 열에너지는 지속적으로 증가하는 결과를 나타냈다. B 타입의 열사이클을 적용하는 경우, 열사이클 적용 후 320분 (열사이클 시나리오의 온도유지기간 종료 시각)까지 원형 파이프 및 종방향 핀 부착 파이프 콘크리트 블록의 총 열에너지는 각각 2,422 및 2,402kJ로 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 열에너지 저장시스템에서 중요한 요소로 작용하는 저장 매체 개발에 관한 연구를 수행하였다. 콘크리트를 저장매체로써 활용한 가열실험을 수행하여 온도분포 및 열에너지에 대하여 분석하였으며, 주요 결론은 다음과 같다.

1. 1회 및 2회 열사이클 적용 후의 콘크리트 온도분포는 점차 증가하는 경향을 나타내다가 3회 열사이클 적용부터는 일정하게 유지되는 결과를 나타냈다. 이와 같은 결과는 열사이클이 반복될수록 콘크리트가 고온에 대한 영향이 줄어들어 변동성이 최소화되고 점차 안정화를 나타내는 것으로 판단된다.
2. 열사이클의 온도 하강 구간에서 콘크리트 블록 온도가 열전달 장비에서 공급하는 열유체의 온도보다 높아 오히려 콘크

리트 블록에서 열유체로 열전달이 이루어지는 것으로 보아, 콘크리트는 열사이클을 통해 열저장, 즉, 열에너지를 저장하는 성능을 충분히 보유한 것으로 판단된다.

3. 원형 파이프가 매립된 콘크리트 블록보다 종방향 핀 파이프가 매립된 콘크리트 블록의 온도분포가 열사이클의 온도 상승 및 유지 구간에서는 높은 경향을 나타냈으며, 온도 하강 구간에서는 역전되어 낮은 경향을 나타냈다. 열전달 파이프의 형상이 콘크리트와 접하는 표면적이 클수록 열에너지 저장 성능에 중요한 역할인 열전달 성능을 향상시킬 수 있는 것으로 판단된다.
4. 시간별 열에너지 곡선에서 일부 구간은 종방향 핀 파이프가 매립된 콘크리트 블록이 낮은 경향을 나타냈으나, 온도 유지 기간 종료 시점에서 열전달 파이프에 따른 총 열에너지량은 뚜렷한 차이를 나타내지 않았다. 즉, 열전달 파이프의 형상에 따라 축열 및 방열 성능에 미치는 영향은 지대하며, 열에너지 저장성능의 향상을 기대할 수 있는 것으로 판단된다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

본 연구는 국토교통기술촉진연구사업의 지원을 받아 연구되었습니다(19CTAP-C151889-01).

References

Islam, M.T., Huda, N., Abdullah, A.B., Saidur, R. (2018). A comprehensive review of state-of-the-art concentrating solar power(CSP) technologies: current status and research trends, Renewable and Sustainable Energy Reviews, **91**, 987-1018.

John, E.E., Hale, W.M., Selvam, R.P. (2011). Development of a high-performance concrete to store thermal energy for concentrating solar power plants, Proceedings of the ASME 2011 5th International Conference on Energy Sustainability, 523-529.

Laing, D., Steinmann, W.D., Tamme, R., Richter, C. (2006). Solid media thermal storage for parabolic trough power plants, Solar Energy, **80**, 1283-1289.

Laing, D., Lehmann, D., Fiß, M., Bahl, C. (2009). Test results of concrete thermal energy storage for parabolic trough power plants, Journal of Solar Energy Engineering, **131(4)**, 041007.

Laing, D., Bahl, C., Bauer, T., Fiss, M., Breidenbach, N., Hempel, M. (2012). High-temperature solid-media thermal energy storage for solar thermal power plants, Proceedings of the IEEE, **100(2)**, 516-524.

Laing, D., Zunft, S. (2015). Using concrete and other solid storage media in thermal energy storage(TES) systems, Advances in Thermal Energy Storage Systems, 65-86.

Salomoni, V.A., Majorana, C.E., Giannuzzi, G.M., Miliozzi, A., Maggio, R.D., Girardi, F., Mele, D., Lucentini, M. (2014). Thermal storage of sensible heat using concrete modules in solar power plants, Solar Energy, **103**, 303-315.

Skinner, J.E., Strasser, M.N., Brown, B.M., Selvam, R.P. (2014). Testing of high-performance concrete as a thermal energy storage medium at high temperatures, Journal of Solar Energy Engineering-Transactions of The Asme, **136(2)**, 021004.

Tamme, R., Laing, D., Steinmann, W.D. (2003). Advanced thermal energy storage technology for parabolic trough, Journal of Solar Energy Engineering, **126**, 794-800.

Vigneshwaran, K., Sodhi, G.S., Muthukumar, P., Guha, A., Senthilmurugan, S. (2019). Experimental and numerical investigations on high temperature cast steel based sensible heat storage system, Applied Energy, **251**, 113322.

열사이클을 적용한 고온 조건 콘크리트 블록의 열용량 특성

본 연구에서는 열에너지 저장시스템의 중요한 요소인 저장 매체에 관한 연구를 수행하였다. 열에너지 저장 매체로써 콘크리트는 열적 및 역학적 특성이 우수하며 저렴한 비용으로 인해 다양한 이점을 갖는다. 또한, 강섬유가 혼입된 초고강도 콘크리트는 고인성 및 고강도 특성으로 인해 고온 노출에 우수한 내구성을 나타내며, 강섬유의 높은 열전도율은 축열 및 방열에 유리한 영향을 미친다. 초고강도 콘크리트의 온도분포 특성을 파악하기 위하여 콘크리트 블록을 제작하고 일정한 열사이클을 적용하여 가열실험을 수행하였다. 열유체 흐름에 의한 열전달을 위하여 열전달 파이프를 콘크리트 블록 중심부에 매립하였다. 또한, 열전달 파이프 형상에 따른 온도분포 특성을 비교하기 위하여 핀의 유무에 따라 원형 파이프 및 종방향 핀 부착 파이프를 설정하였다. 열사이클에 따른 온도분포 특성을 분석하고, 이를 토대로 시간에 따른 열에너지 및 누적 열에너지를 산정하여 비교 분석하였다. 열사이클이 반복될수록 강섬유 혼입 초고강도 콘크리트는 고온에 대하여 안정화를 나타내었다. 또한, 온도분포 및 열에너지 산정 결과를 통해 축열 성능을 보유한 것으로 판단되며, 열에너지 저장 매체 역할을 수행할 수 있는 재료로 기대된다.