

## MgO를 사용한 고온축열탱크의 성능특성에 관한 연구

조소앙\* · 신창훈\*\* · 이수상\*\* · 윤석훈\*\*\*†

\*, \*\* (주) 아이씨이, \*\*\* 한국해양대학교 기관시스템공학부

### A Study on the Performance Characteristics of the High Temperature Heat Storage Tank using MgO Materials

So-Ang Cho\* · Chang-Hoon Shin\*\* · Su-Sang Lee\*\* · Seok-Hoon Yoon\*\*\*†

\*, \*\* I.C.E. Co., Ltd.

\*\*\* Division of Marine System Engineering Korea Maritime University

**요 약** : 최근 화석에너지의 남용으로 인한 지구온난화문제가 인류가 해결해야 할 지상과제로 대두되고 있으며, 본 연구는 이러한 에너지문제의 해결에 도움이 될 수 있는 고온축열탱크의 개발과 그 성능특성에 관한 내용이다. 지금까지 이에 관한 연구는 그다지 활발하지 않았으며, 특히 고온축열탱크에 관한 연구는 매우 드문 실정이다. 본 연구의 목적은 비교적 열물성이 양호하며 가격이 저렴한 물질인 MgO를 현열축열제로 사용하는 고온축열탱크의 개발이다. 이를 위하여 분말 상태의 MgO를 이용하여 축열벽돌을 제작하고, 실험적 방법을 통하여 MgO를 축열제로 사용하는 고온축열탱크의 성능특성에 관하여 연구하였다. 본 연구를 통하여 현열축열제인 MgO의 고온축열 및 방열성능을 확인하였다.

**핵심어** : 지구온난화, 화석에너지, 태양에너지, 풍력에너지, 축열탱크, MgO

**Abstract** : *The global warming by abuse of fossil fuel is going to become an important problem which must be solved by human beings. This research is to develop a high temperature heat storage tank with high efficiency and to investigate the performance characteristics of this tank to help these energy problem. But the researches for this area have not been enough until now and specially the researches for high temperature heat storage tank are very few. For this research, heat storage bricks were made using MgO powder and studied about the performance characteristics of high temperature heat storage tank by experimental method. Through this research, it was confirmed that MgO can be used as a heat storage material for high temperature range.*

**Key Words** : *Global warming, Fossil fuel, Solar energy, Wind energy, Heat storage tank, MgO*

## 1. 서 론

최근 화석에너지의 남용으로 인하여 점점 심각해지고 있는 지구온난화문제를 해결하기 위하여 전 세계적으로 신·재생에너지의 효율적인 이용에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이러한 관점에서, 축열시스템은 시기적으로 편재되어 있는 열에너지의 효과적인 저장 및 활용이라는 측면에서 볼 때 매우 중요한 요소라고 할 수 있다.

현재까지 축열시스템에 관한 연구는 비교적 저온영역의 축열기술에 한정되어 왔으며, 이러한 연구결과들로 인하여 저온축열탱크는 이미 상용화되어 많이 이용되고 있다(윤, 2005; 김과 강, 2006). 그러나 저온축열탱크는 열용량이 작으므로 일정량 이상의 열에너지를 저장하기 위해서는 축열탱크의 크기를 크게 하거나 잠열축열제를 사용하여 크기를 줄일 수밖에 없

다. 또한 잠열축열제는 장시간 사용 시 그 기능이 현저히 저하되어 일정한 시간 간격으로 새로운 축열제로 교환해야 하는 불편이 있을 뿐만 아니라 현재 사용되고 있는 대부분의 잠열축열제는 독일 등 외국으로부터 수입한 것들로서 매우 고가이므로 경제성에도 문제가 많은 실정이다.

그러므로 축열탱크의 크기를 획기적으로 줄이면서도 큰 열용량을 갖는 축열탱크를 제작하기 위해서는 신뢰성과 경제성을 확보할 수 있는 고온축열제의 개발이 필수적이지만 이에 관한 연구결과는 매우 부족한 실정이다. 즉, 고온축열기술의 실용화를 위해서는 축열 및 방열의 반복적인 과정 속에서도 안정적인 열물성과 큰 열용량을 갖는 축열제의 개발과 함께 고온축열시스템의 단열문제 등이 해결해야 할 과제라고 할 수 있다(신 등, 1987; 홍 등, 1988).

따라서 본 연구의 목적은 고효율의 고온축열시스템을 개발하는 것이다. 이를 위하여 고온축열제로서의 필요조건인 큰 열용량과 장시간 반복 사용 시에도 비교적 안정적인 열물성을 갖는 재료인 MgO를 고온축열제로 사용하였다. 분말상태의

\* 대표저자 : 정희원, ice33777@naver.com, 051-831-5086

† 교신저자 : 종신회원, shyoon@hhu.ac.kr, 051-410-4288

MgO를 일정 크기의 축열벽돌로 제작하고, 이를 이용하여 반복적인 축열성능실험을 수행하여 고온축열재로서의 타당성을 연구하였으며, 방열시 축열탱크의 열에너지 방출특성을 분석하여 최적의 방열시간과 방열조건 등을 구명하였다.

## 2. 고온축열시스템 설계

축열시스템은 축열재의 특성에 따라, 물질의 상변화를 동반하지 않는 열저장방식인 현열축열방식, 물질의 상변화 시의 잠열을 저장하는 잠열축열방식, 화학적인 흡열·방열 반응을 이용하여 열에너지를 축열 및 방열하는 화학축열방식으로 크게 나눌 수 있다.

효과적인 축열시스템을 구성하기 위한 축열재의 구비조건은 다음과 같다.

- ① 단위체적당 열용량이 커야 한다.
- ② 열확산계수가 커서 축열 및 방열이 신속하게 이루어져야 한다.
- ③ 반복적인 축열, 방열에도 안정적인 물성을 유지해야 한다.

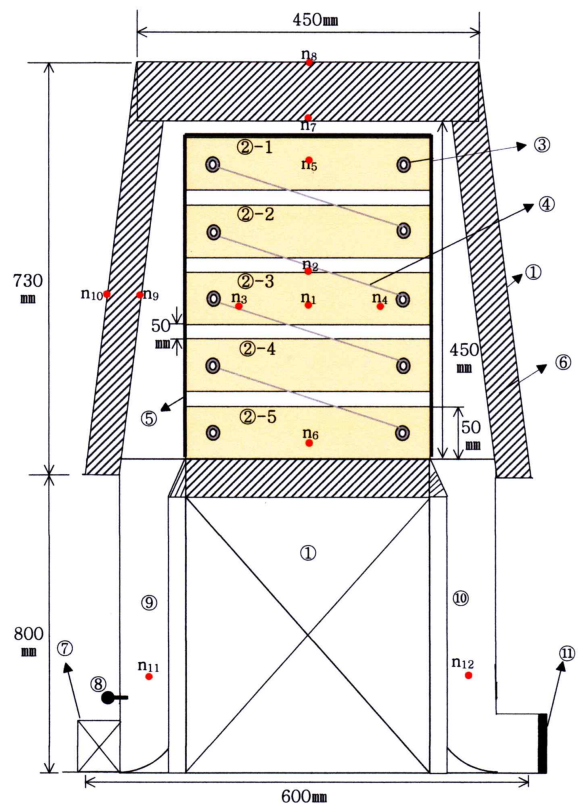
이상과 같은 조건을 충족시키기 위하여 본 연구에서는 고온축열재로 MgO를 선택하였는데, MgO는 Table 1과 같이 비교적 높은 열용량과 고온에서도 안정적인 물성을 가지고 있어 히터충진재와 내화벽돌 등으로도 많이 사용되고 있다(Mao 등, 2007; 천과 이, 2003; 박, 1993).

Table 1. The physical properties of MgO(일본기계학회, 1986)

Name	Temp (K)	Heat conductivity (W/mK)	Specific heat (kJ/kgK)	Density (kg/m <sup>3</sup> )
MgO	300	48.4	0.924	3,510
	500	26.9	1.130	3,480
	800	13.4	1.234	3,440

Fig. 1과 Fig. 2는 본 실험장치인 고온축열탱크의 설계도와 사진이다. 축열탱크의 최대공급열량은 1kW, 내부체적은 닥트부를 포함하여 0.067 m<sup>3</sup>로 설계하였다. Fig. 1의 ①은 축열탱크를 지지하고 형태를 유지하기 위한 본체이며, ②와 ③은 MgO(10% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> cement) 축열재와 칸탈게 전기저항열선인 Kanthal-A1으로서, 열선이 전기에너지를 열에너지로 변환시키면 MgO 축열재가 변환된 열을 저장하는 역할을 한다. 이 축열재 한 블록의 크기는 250×170×50 mm이다. ⑥은 고온축열탱크의 열손실을 최대한 억제하기 위한 단열재로서 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>울, 미네랄울, 스테인리스 스틸 박판이 복합적으로 사용되었다. 스테인리스 스틸 박판은 복사열전달을 억제하기 위한 목적으로 축열탱크의 가장 안쪽 면에 배치하였고, 고온단열재인 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

울은 스테인리스 스틸 박판 다음에 배치하였으며, 미네랄울을 축열탱크의 가장 외부 면에 배치하였다. 축열 중 열에너지는 대류열전달에 의하여 축열탱크의 상부로 이동하기 때문에 축열탱크 상부는 단열재의 두께를 150 mm으로 설계하였고 그 외 부분은 100 mm로 하였다. 이 그림의 ⑦은 고온축열탱크의 방열실험 시 축열탱크 내의 강제대류를 발생시키기 위한 송풍기시스템으로 최대용량 1.5 m<sup>3</sup>/min.의 송풍기, 송풍닥트, 배풍닥트로 구성되었다. 송·배풍 닥트는 직경 80 mm의 Al 신축관(Flexible duct)으로, 열손실을 최소화하기 위하여 수직하방으로 길게 늘어진 구조로 되어 있다. Table 2는 단열재의 물성치이다(Yunus, 2003).



- ① body
- ② MgO(heat storage material)
- ③ heater
- ④ electric wire
- ⑤ steel frame
- ⑥ insulation
- ⑦ ventilator
- ⑧ anemometer
- ⑨ duct(inlet)
- ⑩ duct(outlet)
- ⑪ hood

Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.



Fig. 2. The photo of experimental apparatus.

Table 2. The physical properties of insulation materials

Insulation material	Heat conductivity (W/mK)	Density (kg/m <sup>3</sup> )
Mineral Wool	0.044이하(70 ℃)	100
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Wool	0.06~0.12(200~500 ℃)	71~100
Glass fiber	0.043(상온)	48
Urethane, rigid foam	0.026(상온)	35 ± 5
Air	0.026(상온)	1.2046

### 3. 실험방법

#### 3.1 축열탱크의 축열실험

축열탱크의 축열실험은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 축열제 적층부, 축열탱크 상부와 옆면부 및 송·배풍 덕트부에 직경이 1mm인 12개의 시스열전대(sheathed thermocouple, K type, n<sub>1</sub>~n<sub>12</sub>)를 설치하여 축열 과정시 시간에 따른 각 부분의 온도를 Fig. 2의 데이터로거(Data logger, YOKOGAWA MV2000)를 이용하여 측정·처리하였다. 공급열량은 400 W, 600 W, 800 W, 1kW이었으며, 축열시간은 300 min.~900 min., 축열제의 축열 시작온도는 200 ℃, 축열 완료온도는 500 ℃로 하였다.

#### 3.2 축열탱크의 단열실험

축열탱크의 단열실험을 수행하기 위하여, 1kW의 공급전력으로 축열탱크의 축열제 온도가 500 ℃에 도달할 때까지 축열한 상태에서 전기에너지의 공급을 중단하였다. 이후 축열탱크 내부 축열제의 온도가 200 ℃로 하강할 때까지의 시간에 따른

온도변화를 각 지점의 열전대 위치(n<sub>1</sub>~n<sub>12</sub>)별로 측정하여, 축열탱크에 축열된 열에너지가 목적하는 소정의 시간까지 어느 정도 손실 없이 저장될 수 있는지를 측정하였다.

#### 3.3 축열탱크의 방열실험

공급열량 1kW의 조건으로 축열탱크 온도가 500 ℃에 도달하도록 축열한 상태에서, 전기에너지의 공급을 중단한 후 송풍기를 가동하여 축열탱크 내부에 강제대류를 발생시켜 축열탱크의 방열실험을 실시하였다. 이후 닥트출구로 토출되는 공기온도가 100 ℃로 하강할 때까지의 시간에 따른 온도변화 양상을 각각의 열전대 위치(n<sub>1</sub>~n<sub>12</sub>)별로 측정하여 축열제와 공기와의 열전달율을 계산하였다. 축열탱크 내부의 강제대류 발생을 위한 유입 풍량은 진압조정기(slidac)를 이용한 진압조절을 통해 송풍기의 토출 풍량을 가감하였으며, 풍량은 각각 0.6 m<sup>3</sup>/min.(풍속 8 m/s), 0.45 m<sup>3</sup>/min.(풍속 6 m/s), 0.3 m<sup>3</sup>/min.(풍속 4 m/s) 이었다.

## 4. 실험결과 및 고찰

#### 4.1 축열성능

Fig. 3은 공급전력이 각각 1kW, 800 W, 600 W, 400 W일 경우, 시간에 따른 MgO 축열제의 평균온도이다. 본 그림에 나타난 바와 같이 공급전력을 800 W 이상에서는 목표 축열온도 달성여부와 축열시간에서 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

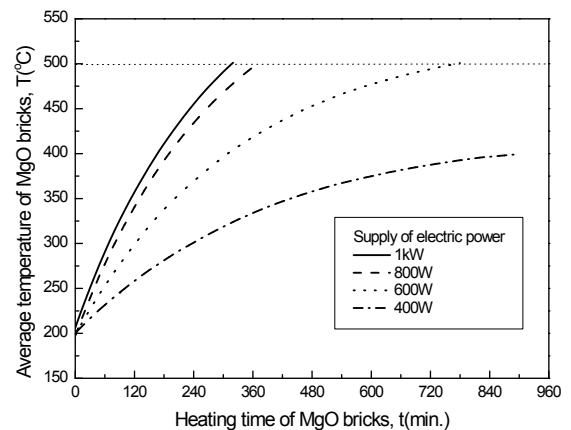


Fig. 3. Comparison of average temperature of MgO bricks during heat storage process.

Fig. 4는 공급열량에 따른 총 축열량(Q<sub>storage</sub>)을 시간의 변화에 따라 나타낸 그림이며, 이 경우에도 가열량이 800kW 이상에서는 큰 차이가 없으나 공급열량이 감소할수록 가열시간이 급격히 증가함을 알 수 있다. 식(1)은 MgO 축열제의 총 축열량을 계산하는 식이다.

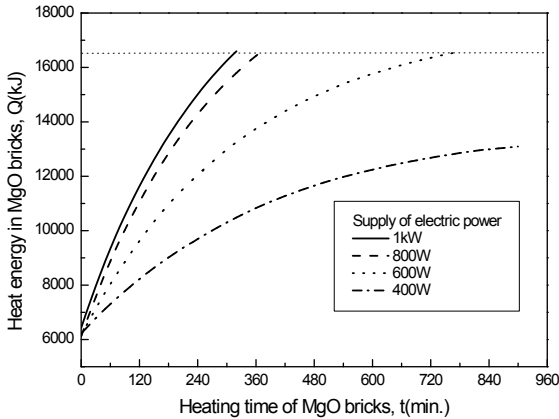


Fig. 4. The amount of heat storage in MgO bricks.

$$Q_{\text{storage}} = mC(T_2 - T_1) = \rho VC(T_2 - T_1) \quad (1)$$

상기 식에서  $\rho$ 는 축열재의 밀도,  $V$ 는 체적,  $C$ 는 비열이며,  $T_1$ 과  $T_2$ 는 각각 축열 시작과 종료시점의 축열재온도이다.

Fig. 5는 공급전력 대비 실제 축열량의 비율( $Q_{\text{storage}}/Q_{\text{input}}$ )을 나타낸 그림이다. 본 그림의 실선은 순수 축열재인 MgO에 저장된 열량의 비율이며, 실선으로 나타난 것은 MgO축열재 뿐만 아니라 MgO 지지용 철제 프레임에도 일부 축열이 진행되므로 이를 고려한 값이다. 본 그림과 같이 공급전력이 비교적 소량인 600 W 이하의 경우에는 축열재의 축열효율이 크게 감소하였으며, 이러한 현상은 작은 가열량으로 인하여 축열시간이 증가함에 따른 외손실량의 증가 때문이다. 따라서 축열탱크의 축열능력에 따라서 일정 크기 이상의 공급열량이 공급될 때 최적의 축열효율을 달성할 수 있음을 알 수 있다.

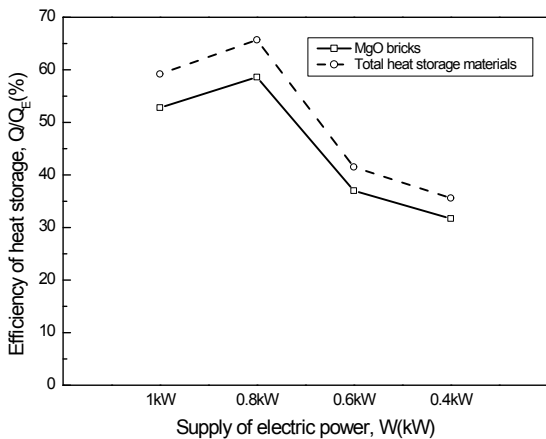


Fig. 5. The efficiency of heat storage tank during heating process.

#### 4.2 단열성능

Fig. 6은 축열탱크로의 열량과 풍량의 공급을 차단한 후, 자연방열 상태에서 시간에 따른 축열재의 위치별 온도변화를 나타낸 그림이다. 시간의 변화에 따라 모든 위치의 축열재 온도가 완만하게 하강하고 있으나, 특히 축열탱크 최하부인  $n_6$ 열전대의 온도가 가장 낮게 나타나고 있을 뿐만 아니라 온도하강 속도도 가장 빠름을 알 수 있다. 반면 축열탱크 최상부에 위치한  $n_5$ 열전대의 온도가 가장 높으며, 온도하강 속도도 비교적 완만하게 나타나고 있다. 이러한 이유는 축열탱크 최하부 축열재는 축열탱크 바닥재와의 직접접촉에 의하여 열전도가 촉진됨에 의한 것으로 판단된다.

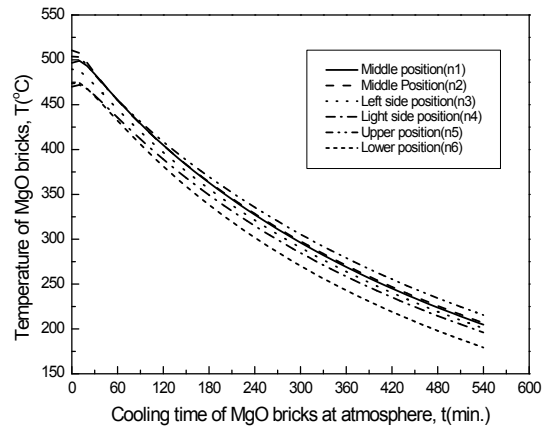


Fig. 6. The temperature changes of MgO bricks during insulation process.

Fig. 7은 축열탱크의 내벽부분( $n_7, n_9$ )과 외벽부분( $n_8, n_{10}$ )의 온도 및 변화를 나타내고 있다. 상부내벽이 413 °C, 측면내벽이 449 °C 일 때, 축열탱크 외부의 온도는 40~46 °C 범위였으며, 약 540 min.의 시간이 경과된 후의 축열탱크 내벽 온도는 180 °C이었다. 또한 닥트부( $n_{11}, n_{12}$ ) 온도는 축열탱크 내벽 온도가 400 °C~450 °C의 온도범위에 있을 경우에도 21 °C의 저온상태를 유지하고 있으며, 이러한 현상으로 미루어 볼 때 축열탱크로부터 하부 닥트부를 통한 열손실은 거의 무시해도 큰 문제가 없을 것으로 판단된다. 따라서 본 축열탱크의 상부 및 측면부의 단열설계와 닥트부의 설계는 바람직하나 축열탱크 하부의 단열설계를 보강하는 것이 필요하다고 판단된다.

Fig. 8은 축열탱크를 500 °C까지 가열한 후, 전력공급을 중단하고 자연방열시키는 경우, 시간의 경과에 따른 축열탱크의 열손실량을 나타낸 그림이다. MgO 지지용 스틸프레임을 고려하였을 경우, 자연방열을 시작하였을 시점의 축열재의 총 축열량은 18216 kJ이었으나 540 min. 이 경과한 후의 잔여 축열량은 6985 kJ로 열손실량은 11231 kJ이었다. 540 min. 후 축열탱크 온도는 약 200 °C이었다.

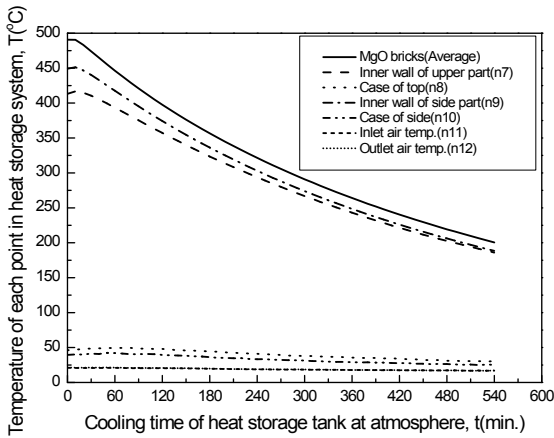


Fig. 7. The temperature change of heat storage tank during insulation process.

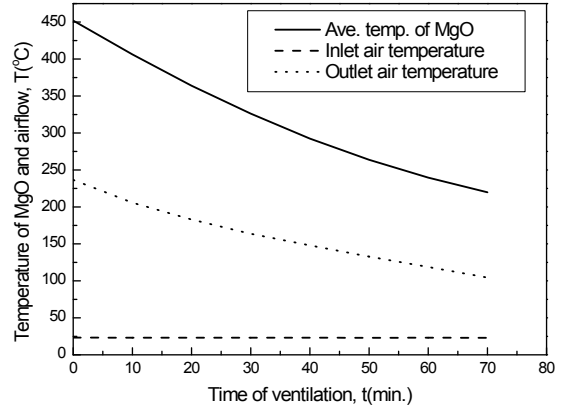


Fig. 9. The temperature changes of MgO during ventilation process in case of 0.6 m<sup>3</sup>/min. flow rate.

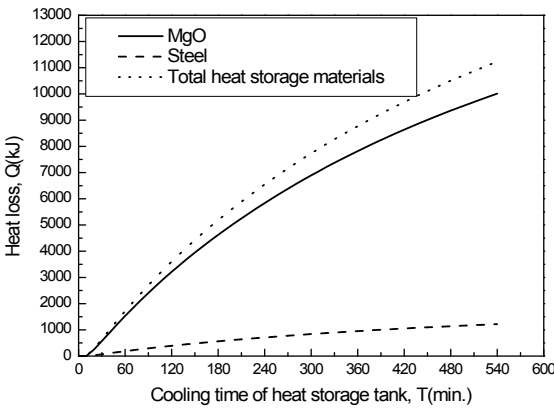


Fig. 8. The total heat loss of heat storage tank during insulation process.

#### 4.3 방열성능

Fig. 9는 축열탱크에 저장된 열량을 이용하여 저온의 외부 공기를 효과적으로 가열하기 위한 방열실험을 실시한 결과이다. 본 그림은 송풍량이 0.6 m<sup>3</sup>/min.인 경우로서, 축열탱크 평균온도가 450 °C일 경우 토출되는 최고열풍온도는 240 °C였으며, 축열탱크 평균온도가 200 °C일 경우 열풍온도는 100 °C를 유지하였다. 방열실험이 계속 진행될수록 열풍의 온도는 하강하는 거동을 보였는데, 열풍온도가 200 °C에서 100 °C로 하강할 때까지의 시간은 송풍조건이 8 m/s인 경우 70 min.이었으며, 6 m/s일 경우에는 80 min.이었다.

Fig. 10은 각각의 송풍량에 대하여 70 min. 동안 축열재로부터 열풍으로 전달된 열에너지의 총량을 계산한 그림이다. 본 계산에서는 방열실험 시작점과 종료점에서의 축열탱크 보유열량의 차이가 열풍으로 전달된 것으로 간주하였다. 본 그림에 나타난 바와 같이 송풍량이 증가할수록 열교환량의 증가현상이 나타나고 있으며, 이러한 이유는 축열탱크를 통과하는 공기유량이 증가할수록 더욱 더 활발한 대류열전달현상이 발생하기 때문이다.

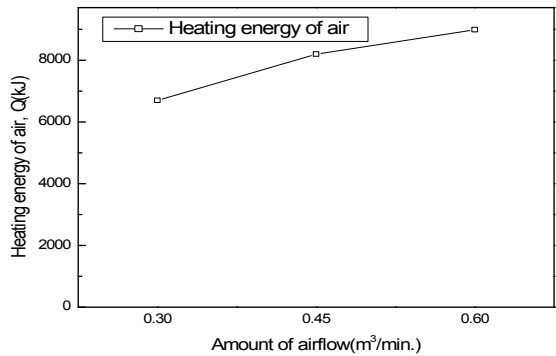


Fig. 10. The amount of heating energy of air according air flow rates.

## 5. 결론

MgO를 축열제로 사용한 고온축열탱크 성능특성에 관한 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 본 연구를 통하여 MgO라는 현열축열재를 이용한 고온축열탱크의 성능을 확인할 수 있었으며, MgO는 다른 축열재에 비하여 매우 경제적인 물질이므로 경제성 또한 충분히 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

- (2) 고온축열탱크(max. 500 ℃)의 단열성능 시험결과, 목적하는 축열유지시간을 효과적으로 달성하기 위해서는 축열제와 직접 접촉하는 축열탱크 하부의 단열성능을 보강하는 것이 필요하다.
- (3) 고온축열탱크(max. 500 ℃)의 방열성능 실험결과, 배풍다트를 통해 배출되는 고온의 열풍(100 ℃ 이상)은 송풍기의 송풍조건이 8 m/s(송풍량 0.6 m<sup>3</sup>/min.)일 경우에 70 min. 이상 유지되었다.

본 연구를 통하여 MgO의 고온축열성능을 확인하였으며, 차후 보다 다양한 실험조건에서의 반복실험을 통하여 경제성과 신뢰성을 담보할 수 있는 고온축열탱크의 개발이 가능할 것으로 판단된다.

### 참 고 문 헌

- [1] 김진수, 강용혁(2006), 고온축열기술개발동향, Solar Energy Vol.5, No.2, pp. 12-17.
- [2] 박영태(1993), 열저장 시스템용 축열제에 관한 기초 연구, 경북산업대학논문집 제3집, pp. 55-56.
- [3] 신병철, 김상돈, 박건유, 박정훈(1987), 고온 축열재료의 특성, Solar Energy, Vol.7, No.1, pp. 61-64.
- [4] 윤석훈(2005), 에너지 공학, 다솜출판사, pp. 115-123.
- [5] 일본기계학회(1986), 전열공학자료 4판, p. 320.
- [6] 천원기, 이재영(2003), 태양열 시스템의 활용성 제고를 위한 축열장치개발에 관한 실험적연구, Solar Energy Vol. 22, No. 1, pp. 31-35.
- [7] 홍성안, 박원훈, 최형준(1988), 고온 축열 시스템의 개발에 관한 연구, Solar Energy, Vol.8 No.1, pp. 13-15.
- [8] Mao Aiming, 김기만, 한귀영, 서태범, 강용혁(2007), 태양열발전을 위한 고온축열물질의 열전달특성, Solar Energy, Vol. 27, No.3, pp. 63-68.
- [9] Yunus Cengel(2003), Heat Transfer A Practical Approach , 2nd Edition McGraw-Hill Korea, pp. 15-30.

---

원고접수일 : 2011년 08월 30일

원고수정일 : 2011년 11월 10일

게재확정일 : 2011년 12월 26일