

폐열회수 증대를 위한 열운송 축열 시스템 특성 연구

오창용*, 임홍섭, 김인수**

Study on Heat Storage and Transportation System for Recovering Non-using Low-temperature Heat

Changyong Oh*, Hongseop Im and Insu Kim**

Abstract Non-used waste heat has recently been paid special attention due to several global warming regulation and energy cost rising. In this study, therefore, thermal energy storage system which uses a solid type heat media has been investigated about the possibility of heat accumulation and heat release for thermal energy storage system. 35kWh of bench-scale thermal storage system was used to investigate the characteristics of the solid type heat media. From the result, it is shown that a solid type heat media should be divided to supply constant heat to the customers' side. It is also shown the flow direction should be considered to reduce temperature difference between top and bottom sides in the thermal storage system.

Key words Thermal energy storage(열 저장), Non-using waste heat(미활용 폐열), Solid type heat media(고체 축열체)

(접수일 2014. 10. 10, 수정일 2014. 12. 5, 게재확정일 2014. 12. 5)

* 현대제철 기술연구소 에너지기술개발팀 (Hyundai Steel Company R & D Center)
■ E-mail : cyoh@hyundai-steel.com ■ Tel : (041)680-8397 ■ Fax : (041)680-8591

** 현대제철 기술연구소 에너지기술개발팀 (Hyundai Steel Company R & D Center)
■ E-mail : 12insu@hyundai-steel.com ■ Tel : (041)680-8390 ■ Fax : (041)680-8591

Nomenclature

m : media weight, g
 $c(T)$: specific heat of media, J/g·K
 ρ : media density, kg/m³
 V : media volume, m³
 Q_{si} : sensible heat, kcal

subscrip

ORC : organic rankine cycle
PCM : phase change material
DAS : data acquisition system

1. 서론

최근 연료 및 전력 단가의 지속적인 상승과 온실가스 배출 규제 강화로, 철강산업에서는 이에 대한 대응 방안으로 공정에서 발생하는 폐열을 회수하여 재이용하는 기술의 개발이 중요 이슈로 부각되고 있다. 현재 제철공정 폐열 중 350°C 이하의 중, 저온 폐열은 경제성, 수요처 부족 등의 문제로 재사용되지 않고 굴뚝을 통해 대기로 버려지고 있으며, 그 양이 연간 18만 가구가 이용가능한 규모에 이르기 때문에 중, 저온 폐열에 대한 회수 및 활용 기술개발이 절실한 실정이다. 최근 유럽에서는 유기랭킨 사이클(ORC) 및 카리나 사이클(Kalina Cycle)을 이용한 200°C 이하의 폐열 활용 발전기술이 활발히 적용되고 있으며, 미국, 독일 및 일본을 중심으로 상변화 물질(PCM)을 이용한 열택배 기술이 적용되고 있다. 그러나 폐열 발전의 경우 낮은 효율과 고가의 터빈가격, 작동유체 누설의 문제가 있으며, 열택배 기술은 경제성 확보는 가능하나 PCM의 낮은 열전달 효율과 액상 PCM의 누설 등의 문제가 있어 국내에서는 아직 실용화되지 못하고 있다.⁽¹⁻⁴⁾ 따라서 본 연구에서는 열택배 기술의 실용화를 목적으로 PCM의 단점을 보완할 수 있는 고체 축열재를 이용한 폐열 저장시스템을 개발하기 위하여 35kWh용량의 실험장치를 구성하여 실험을 통한 축열 및 방열 특성을 분석하고 CFD해석을 수행하여 개선안을 도출 하였다.

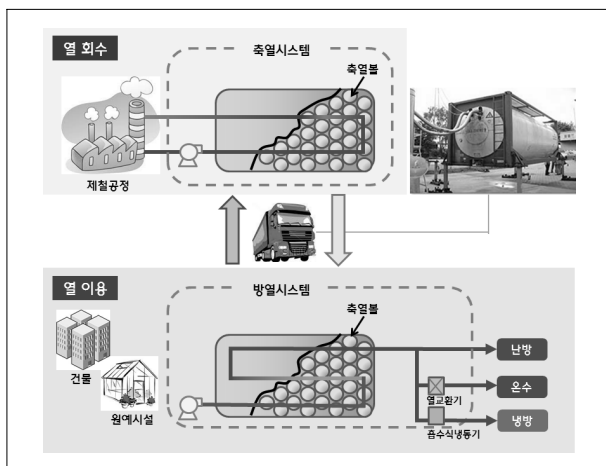


Fig. 1 Schematic diagram of heat transportation system

2. 본론

2.1 열택배 기술

열택배 기술은 Fig. 1과 같이 폐열원에서 차량을 이용하여 열 사용처까지 직접 열을 운송하는 기술이기 때문에 기존의 배관을 통해 열을 공급하는 열 공급기술의 지리적인 한계를 극복할 수 있을 뿐만 아니라 배관 등의 인프라 구축에 소요되는 비용을 크게 줄일 수 있는 장점이 있다. 열택배 기술의 핵심은 열을 저장하고 방열하기 위한 축열 시스템으로 짧은 시간 동안 많은 양의 열 에너지를 저장할 수 있는 기술이 요구된다.

한편, 축열 시스템의 종류는 열 에너지의 저장방법에 따라 크게 PCM과 같이 상변화 시의 잠열을 이용하는 기술과 현열을 이용하는 기술이 있다. 이 중 현열을 이용하는 축열 방법은 식 (1), (2)에 나타난 것과 같이 축열재가 가지고 있는 높은 비열을 이용하여 열을 저장하는 방법으로, 고체 축열재의 경우 허용될 수 있는 축열 온도의 범위가 넓고 화학적으로 안정되어 있으며, 축열을 위한 용기제작에 문제가 없어 경제적이라는 장점이 있다.^(5,6)

$$Q_{si} = m \int c(T)dt \quad (1)$$

$$Q_{si} = mc\Delta T = \rho Vc\Delta T \quad (2)$$

2.2 축열물질 선정

열택배 기술에 적용하기 위한 고체 축열재의 요구조건으로는 비열이 크고 밀도가 높아 단위 부피당 열 에너지의 저장량이 크고 작은 부피의 축열 시스템 제작이 가능한 것이어야 한다. 또한, 열전도도가 높아 축열 및 방열 시 시스템 내부의 온도편차를 최소화할 수 있어야 한다. Table 1은 현재 널리 사용되고 있는 고체 축열재의 종류와 그 특성을 나타낸 것으로 대표적인 고체 축열재 중 금속계인 경우, 열용량과 열전도도가 비교적 높아 축열에 적합하다. 특히 Aluminum oxide(Al₂O₃, 알루미나)는 비교적 밀도와 비열이 크고 우수한 열전도도를 나타낸다. 또한 높은 내열성, 내식성 및 고강도 등의 우수한 특성으로 내열재, 내마모재, 축열식 버너의

Table 1. Properties of solid type heat media

Material	Density (kg/m ³)	Specific heat (J/kg·K)	Thermal Conductivity (W/m·K)
Aluminum	2,707	896	204@20°C
Aluminum Oxide	3,900	840	30@20°C
Brick	1,698	840	0.7@29°C
Concrete	2,240	1,130	0.9~1.3
Cast Iron	7,900	837	29.3
Pure Iron	7,897	452	73@20°C
Copper	8,954	383	385@20°C
Sandstone	2,200	710	1.83
Stone	2,600	800	20.7~2.94

축열재 등 제철공정에 널리 사용되는 물질로 그 안정성과 경제성이 검증되었으며 본 연구의 축열 물질로 적합하다고 판단된다.

2.3 고체 축열시스템 특성평가

2.3.1 실험장치 구성

고체 축열 시스템의 특성을 평가하기 위하여 Fig. 2와 같이 실험장치를 구성하였다. 축열 시스템은 크게 열을 공급하는 열원부(b)와 열을 저장하는 축열부(c, d), 급/배기 장치로 구성된 통풍부(e)로 구성된다. 열원부는 제철공정 중 가열로 배열인 약350°C의 배기가스를 모사하기 위해 100,000kcal/h 용량의 버너를 이용하여 열풍을 생산할 수 있도록 하였다.

축열부는 0.2m³의 체적의 축열공간에 제철공정 축열식 버너에서 주로 사용되고 있는 직경10mm의 알루미늄 볼 350kg이 충전하였으며, 온수 생산을 위한 열교환 튜브가 Fig. 2(d)와 같이 설치되어 축열된 열에너지를 이용하여 온수를 생산할 수 있도록 하였다. 그리고 축열 시 배기가스를 흡입하고 방열 시 냉풍을 공급하여 열풍을 생산하기 위하여 2대의 Fan으로 통풍부를 구성하였으며, 13개 지점에 K-type(Sheath type, 400°C미만 시 허용오차 ±3°C) 열전대를 설치하여 축열 및 방열과정에서의 온도변화를 실시간 측정하고, 저장할 수 있도록 DAS를 구성하였다. 실험장치에서 유체의 흐름은 Fig. 2(f)에 나타내었다.

2.3.2 특성평가 결과

Fig. 3은 축열단계에서 시간에 따른 열원온도와 축열부 내

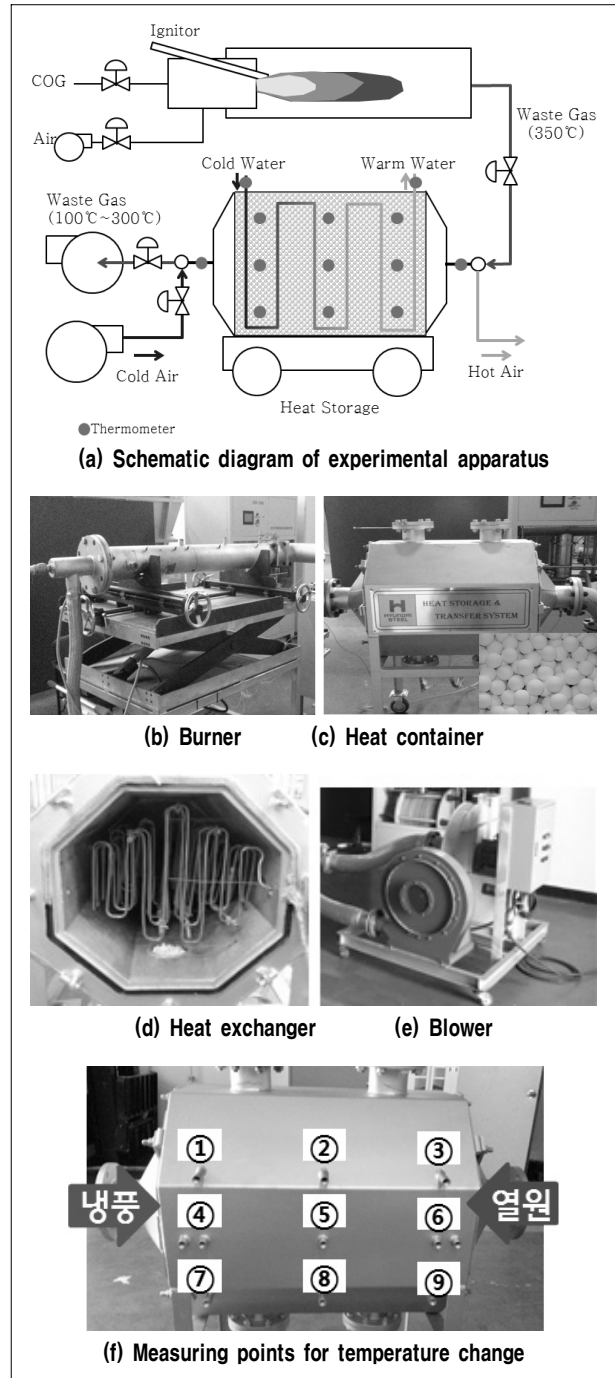


Fig. 2 Components of experimental apparatus

부의 온도변화를 나타낸다. Fig. 3(a)에서 보듯이, 평균온도가 평형에 도달하기까지는 약 2.5시간 이상이 소요되었으며, 알루미늄 볼의 비열 및 온도변화, 그리고 장입량으로부터 약 15Mcal의 열에너지가 저장되었음을 산정할 수 있다. 위치별

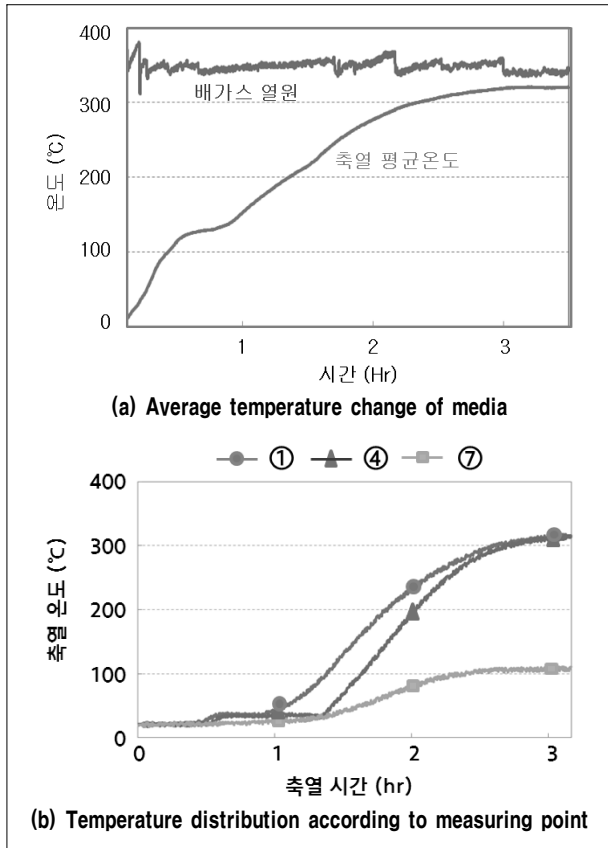


Fig. 3 Temperature change of heating process

온도 특성을 보면, Fig. 3(b)와 같이 축열체의 상부가 가장 먼저 가열되어 급격히 온도가 상승하는 반면, 하부는 온도상승의 정도가 더딘 것을 알 수 있다. 그 원인으로서는 축열체 내부로 유입되는 350°C의 배기가스가 내부 유체보다 상대적으로 고온이기 때문에 밀도가 작아 부력에 의해 유동이 상부로 형성되기 때문으로 판단된다. 이러한 현상은 축열체의 단면적이 클수록 더욱 뚜렷이 나타나는데 이는 유체의 속도가 느려질수록 유입방향의 직선 모멘텀보다 부력으로 인한 상부 방향 모멘텀이 더 커지기 때문이다. 이로 인해 단면적이 클수록 유체유동이 부족하여 축열되지 않는 사각부(死角)가 더욱 증가하게 된다.

Fig. 4(a)는 가열된 축열체에 냉풍을 주입하여 열풍을 생산하는 경우의 시간에 따른 온도변화를 나타낸 것으로, 축열 때와는 반대로 냉풍이 유입되는 입구 하부의 온도가 급격히 하강하는 반면 출구 상부의 온도는 고온의 상태로 장시간 유지되는 것을 관찰할 수 있다. 또한 하부 축열체의 유동의 불

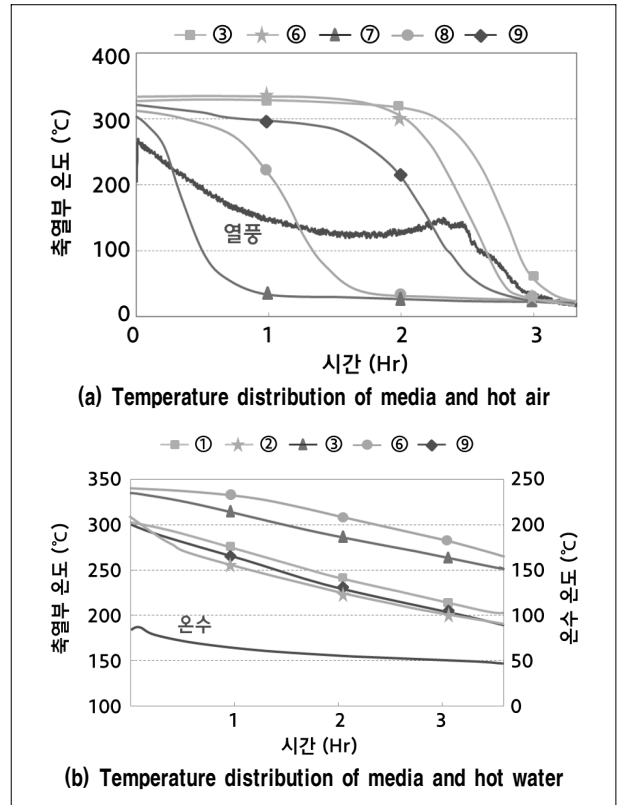


Fig. 4 Temperature change of discharging process

균형으로 방열초기에는 급격히 온도가 하강하나 약 120°C 영역에서는 미반응 영역인 상부의 고온영역의 영향으로 인해 120~150°C 수준의 온도유지 구간을 형성하는 것을 관찰할 수 있다. 이를 통해 열풍 생산의 경우 축열체의 구조에 따라 상부영역에서 열교환을 하지 못하는 사각(死角)부가 형성될 수 있음을 예측할 수 있다.

Fig. 4(b)는 축열완료 후 축열시스템을 이용하여 온수를 생산하는 경우의 축열부 내부와 온수의 온도변화를 나타낸 것이다. Fig. 4(b)를 보면, 냉수가 튜브를 통해 흐르기 때문에 밀도 차에 의한 유동은 일어나지 않음에도 방열 시 축열부 내부에 일정한 온도편차가 형성됨을 알 수 있다. 이는 축열재와 튜브와의 거리로 인해 발생하는 온도차로 알루미늄의 열전도도의 한계 때문으로 판단된다. 축열 및 방열 특성 실험 결과를 통해 고체 축열시스템 설계 시 개선해야 할 사항을 두 가지로 요약할 수 있다. 첫째, 방열시간 경과에 따른 열풍과 온수의 온도 변화를 최소화 해야 한다. 이는 생산된 열을 사용하는 사무실, 온실 등의 수요처에서 일정한 온도의 열풍이

나 온수의 공급이 필요하기 때문이다. 즉, 고체 축열재는 상 변화 온도에서 일정온도를 유지하는 PCM과는 달리 방열 과정에서 온도변화가 수반되기 때문에 이를 최소화 할 수 있는 개선 방안이 필요하다. 둘째, 고성능 축열시스템 개발을 위해서는 Fig. 3, 4에서의 유동 사각영역을 최소화하여야 한다. 이를 위해 열원의 밀도 차에 의한 유동편차를 최소화 할 수 있는 설계가 필요하다.

3. 축열시스템 열유동 해석

축열 및 방열과정에 대한 실험결과에서 나타난 유동불균형에 의해 발생하는 온도 취약부를 개선하고 열풍 및 온수 온도의 편차를 줄이기 위한 방안을 CFD해석을 통해 도출하였다.

3.1 해석조건

알루미늄으로 채워져 있는 축열체 내부에서의 열전달을 모사하기 위해서 공극율 40%를 가지고 형상에 의한 저항을 갖는 Porous media로 가정하였으며, 밀도 차에 의한 유동의 특성을 반영하기 위해 유동 수직방향으로의 중력가속도를 고려하였다. 출구는 배기 팬에 의해 흡입되는 음압(-) 조건이며, 시간에 따른 비정상 문제로 가정하였다. 본 해석을 위한 코드로는 현재 자동차 등 연소 분야 등에서 널리 사용되고 있는 STAR-CCM+7.6를 이용하였으며, Polyhedral 형상의 20만 개 격자로 해석을 수행하였다.

3.2 열유동 해석결과

Fig. 5(a)는 실험모델의 축열 특성 해석 결과로 실험결과와 같이 축열체로 유입되는 배기가스가 밀도차로 인한 부력에 의해 유선이 상부로 밀집되고 후류에서는 온도의 성층화가 뚜렷하게 나타나 하단부에서 온도가 가장 낮은 영역이 나타나는 것을 확인할 수 있었으며 이를 통해, 본 해석결과의 가정이 타당하다고 판단할 수 있다.

본 연구에서는 축열부의 온도편차 감소와 온도제어의 편의성 개선을 위해 Fig. 5(b)와 같이 축열부를 3개로 분할하여 배가스 및 냉풍의 유동을 댐퍼로 제어하여 순차적으로 개방

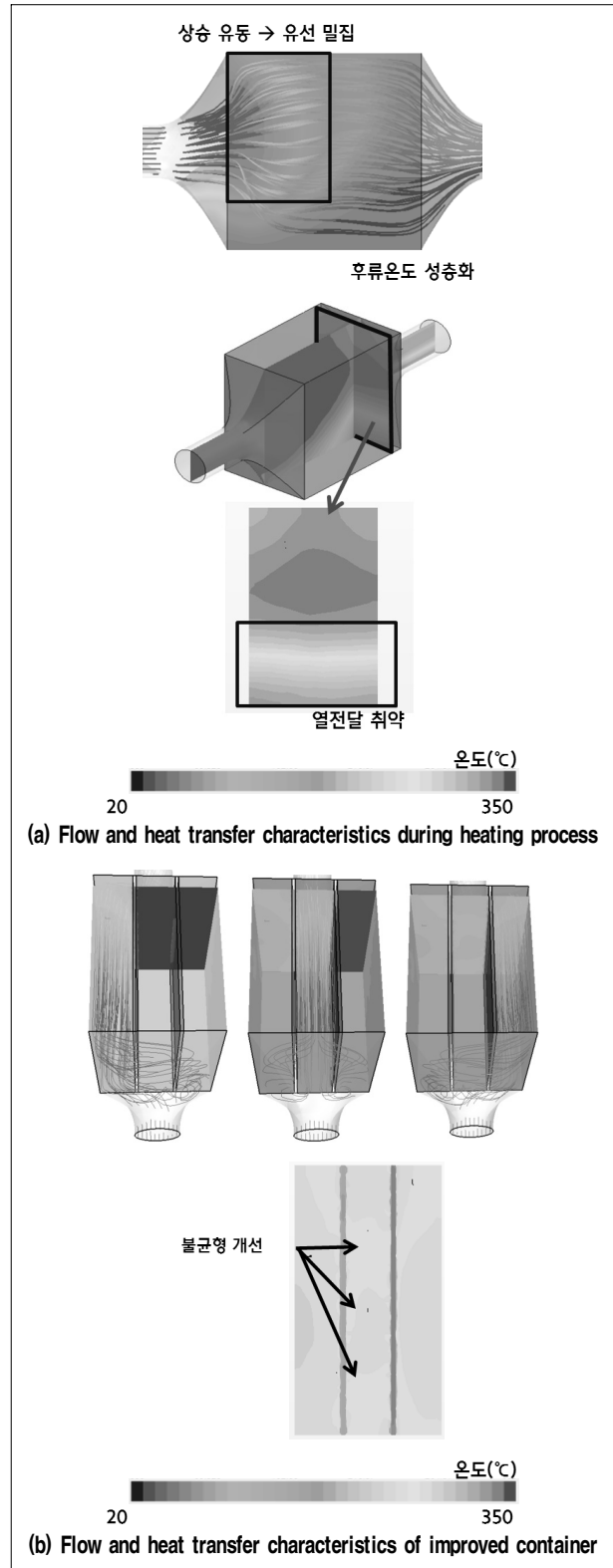


Fig. 5 Comparison of flow and heat transfer characteristics according to container design

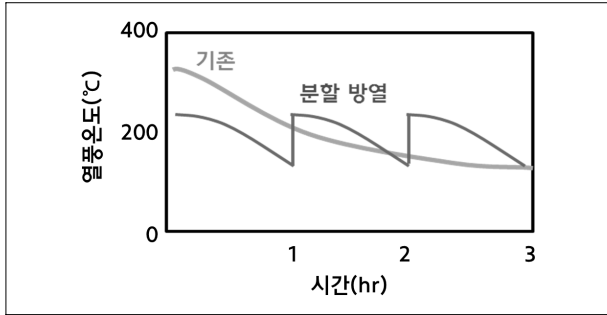


Fig. 6 Comparison of temperature distributions according to container design

하는 방법을 고안하였다. Fig. 5(b)에서 알 수 있듯이 실험 및 기존 해석모델의 해석결과에서 나타났던 축열체 출구 하부에서의 온도편차가 48°C에서 5°C로 현격히 감소한 것을 알 수 있다.

이는 기존모델에서는 유체유량에 의한 유동보다 밀도 차에 의한 유동이 더 지배적이었지만 체적을 분할함으로써 유동 단면적의 축소를 통해 밀도 차에 의한 유동보다 유체유량에 의한 유동이 더 지배적인 조건으로 변경되었기 때문이다.

또한 Fig. 6에서 보는 바와 같이 분할제어를 적용했을 경우, 기존 모델에 비해 방열온도 편차의 효과적인 제어가 가능하여 보다 안정적인 시스템 구현이 가능할 것으로 기대된다.

4. 결론

제철공정에서 발생하는 중저온 폐열을 회수하고 활용 하기 위하여 35kWh 축열시스템을 이용한 특성 평가 실험과 열유동 해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 고체 축열시스템 내부에서 밀도 차에 의한 배가스, 냉풍의 유동 사각부가 형성되어 온도저하의 문제가 발생하는 것을 확인하였다.
- 2) 고체 축열체에서 생산되는 열풍, 온수 온도는 시간에 따라 변하므로 사용처에 적용하기 위해서는 온도제어 방안이 필요함을 확인하였다.
- 3) 도출된 문제점을 보완하는 방안으로서 축열부의 공간을 3개로 분할하여 순차적 제어하는 방안을 적용했을 경우 온

도편차가 현격히 감소하였으며, 효과적인 온도제어가 가능함을 확인하였다. 이러한 본 연구의 실험 및 시뮬레이션 결과는 0.3MWh 규모의 Pilot 설비를 통해 그 효과를 실증할 예정이다.

후 기

본 연구는 한국산업단지공단와 생태산업단지 구축사업(2014-5-1043)의 일환으로 수행되었으며, 연구에 도움을 주신 한국산업단지공단 관계자 여러분들께 깊은 감사를 드립니다.

References

- [1] Maria T. Johansson, Mats Söderström, 2014, "Electricity generation from low temperature industrial excess heat – an opportunity for the steel industry", Energy efficiency, Vol. 7, pp. 203–215.
- [2] Kanimozhi B, Ramesh Babu B.R, 2011, "Experimental Study of Heat Transfer Enhancement in Latent Heat Thermal Storage System during Charging and Discharging Processes", International Journal of Design and Manufacturing Technologies, Vol. 2, No. 5, pp. 42–49.
- [3] Kanimozhi B, Ramesh Babu B.R, 2012, "Experimental Study of thermal energy storage in Solar System using PCM", Advanced Materials Research, No. 433, pp. 1027–1032.
- [4] A. Kaizawa, N. MaruoKa, 2008, "Thermophysical and heat transfer properties of phase change material candidate for waste heat transportation system", Heat Mass System, Vol. 44, pp. 763–769.
- [5] Chow Zhong J.K, Beam J.E, 1996, "Thermal conductivity enhancements for phase change storage media", International Journal of Heat Mass Transfer, Vol. 23, No. 1, pp. 91–100.
- [6] Yogesh M. Menghare, Y.M.Jibhakate, 2013, "Review on sensible heat storage system principle, performance", IJERT, Vol. 2, Issue 6.

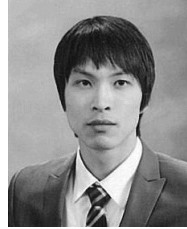
오 창 용



1997년 울산대학교 기계공학과 공학사
1999년 울산대학교 기계공학과 공학석사

현재 현대제철 기술연구소 에너지기술개발팀
(E-mail : cyoh1017@hyundai-steel.com)

임 흥 섭



2007년 부경대학교 기계공학과 공학사
2009년 부산대학교 기계공학과 공학석사

현재 현대제철 기술연구소 에너지기술개발팀
(E-mail : ihs1218@hyundai-steel.com)

김 인 수



1992년 경북대학교 기계공학과 공학사
1994년 경북대학교 기계공학과 공학석사
1998년 Kyoto대학교 에너지응용공학과 공학박사

현재 현대제철 기술연구소 에너지기술개발팀
(E-mail : 12insu@hyundai-steel.com)