

밀폐형 유동층을 이용한 태양광 고온가스가열 장치의 연구

최준섭

한국기계연구원

High Temperature Solar Gas Heating by a Compact Fluidized-Bed Receiver of Closed-Type

Choi, Jun-Seop

Korea Institute of Machinery & Metals

요 약

태양광 고온가스가열 장치를 위하여 후레넬렌즈면적 0.5m^2 을 갖는 소형태양집열 및 추적시스템과 고급의 소형 밀폐형 유동층 태양광 수열기를 개발하였다. 개발된 태양광 수열기는 개방형 유동층의 단점인 SiC입자의 유출과 열사이폰효과를 개선하였다. 공기의 최대 도달온도는 1140K 이며, 최대 열효율은 64% 얻어졌다. 본 연구에서 개발한 태양광 수열기는 기존의 평판이나 관형의 고체표면을 갖는 태양 집열기와 비교할 때 아주고온에서 효율좋게 작동된다.

ABSTRACT

A small-scale solar collector and tracking system, using a Fresnel lens of 0.5m^2 , and novel compact fluidized-bed solar receiver[FBR] of closed type has been developed for high temperature solar gas heating. The FBR was improved in carrying over of SiC powder and thermo-siphon effect. The maximum outlet air temperature of 1140K and the maximum thermal efficiency of 64% were obtained. The present FBR's operated efficiently at extremely high temperatures in comparison with conventional solar receivers, composed of flat or tubular solid surfaces.

주요기호

- A_r : 후레넬 렌즈의 유효면적 m^2
- c_{pr} : 공기의 평균비열 $kJ/(kg \cdot K)$
- d_c : 탑경(塔徑) mm
- d_p : 입자의 상승(相乘)평균경 μm
- I_D : 직달(直達)일사량 W/m^2
- I_o : 정지충전층(充填層)높이 mm
- Q_i : 수광면(受光面)에 입사하는 태양에너지 W
- \dot{Q}_{wall} : 2중유리창과 수열(受熱)장치 외벽면으로부터의 열손실 W
- \dot{Q}_{r1} : 입자온도가 출구공기온도와 같다고 가정하는 경우의 적외복사손실 W
- \dot{Q}_{r2} : 전(全)복사손실에서 \dot{Q}_{r1} 을 뺀값 W
- T_{g1} : 입구공기온도 K
- T_{g2} : 출구공기온도 K
- t : 시간 min
- \dot{V} : 공기유량 m^3/s
- η : 밀폐형 수열장치의 열변환효율
- η_c : 집광효율
- θ : 무차원온도, 식(3)
- τ : 석영유리와 Pyrex유리의 태양광에 대한 투과 및 반사율의 복합치
- ρ_x : 입구공기온도에 있어서 공기밀도 kg/m^3

1. 서론

근년, 가스터빈¹⁾이나 스테링엔진²⁾에의 이용을 목적으로서, 태양광에 의한 고온가스 가열장치의 연구가 행하여지고 있다. 일반적으로 열기관의 열효율은 고온측 열원의 온도가 높을 수록 양호하지만, 종래의 평판 내지는 관상(管狀)의 태양광 수열기(受熱器)에서는, 입사복사선(入射輻射線)의 수광면(受光面)에서의 반사나, 고체벽과 작동유체간의 저열전달(低熱傳達)특성때문에 고온 운전시에 양호한 에너지 흡수특성을 달성하는 것이 곤란하다^{3),4),5)}.

이때문에 Aihara는, 미입자(微粒子)의 고전열

(高傳熱)특성과 고기혼상매체(固氣混相媒體)의 복사흡수특성을 활용하고, 유동층에 의한 태양광 수열장치의 제안을 행하여⁶⁾ 그 가능성을 검토하였다. 또한 구미(歐美)에서도 개방형의 유동층식 태양광 가스가열장치의 제작^{7),8)}이나 혼상매체에 의한 태양광 왕복엔진의 고안⁹⁾, biomass입자의 flash열분해¹⁰⁾의 연구가 수행되었다.

전보(前報)¹¹⁾에서는 $0.5m^2$ 의 후레넬렌즈를 사용한 소규모의 태양추적장치에 의해서 고밀도로 집광한 태양에너지($1.4 MW/m^2$)의 흡수와 기체가열에 적합한 소형의 대기개방형 유동층 가스 가열 장치를 만들어, 일련의 성능측정을 행하였다.

본 연구에서는, 전보에서 문제로 되었던 열사이폰(thermosiphon)효과와 미세입자의 유출방지를 위하여, 태양광의 입사창을 석영 유리로 밀폐시켜 열변환효율의 향상을 꾀하고 아울러 토출(吐出)가스의 최고도달 온도, 제손실의 평가 및 기존의 고체 벽면형 수열장치와의 성능 비교를 행하였다.

2. 실험장치

태양광 추적집광 장치는 전보¹¹⁾와 거의 같은 시스템을 사용하였다. 개방형 유동층 장치의 성능개선의 목적으로 그림1의 밀폐형 수열장치를 제작하였다. 즉 태양광 입사창에서부터 열사이폰 효과에 의한 외기침입(外氣侵入)과 미세입자의 유출(流出)을 방지하기 위하여, 두께 $1mm$ 의 석영유리로서 입사창을 막고, 더우기 이 부분으로부터의 대류 및 적외복사손실을 막기 위하여, 두께 $1mm$ 의 내열 유리판에 의해서 2중창을 형성한 것이다. 유동층 용기에는 최대탑경 $d_c=34mm$ 의 세라믹 도가니를 사용하였다. 작동공기는 유동층 용기 저부의 세라믹 휠터를 이용한 분산관을 통하여, 용기내 입자를 유동화함과 동시에, 입자가 흡수한 태양에너지가 전달되어 고온으로 되고, 상부의 출구 세라믹 휠터를 거쳐 출구세라믹관으로 유출된다. 출구 세라믹 휠터는 유동화 입자의 유출을 방지하기 위하여 설치하였다. 흡

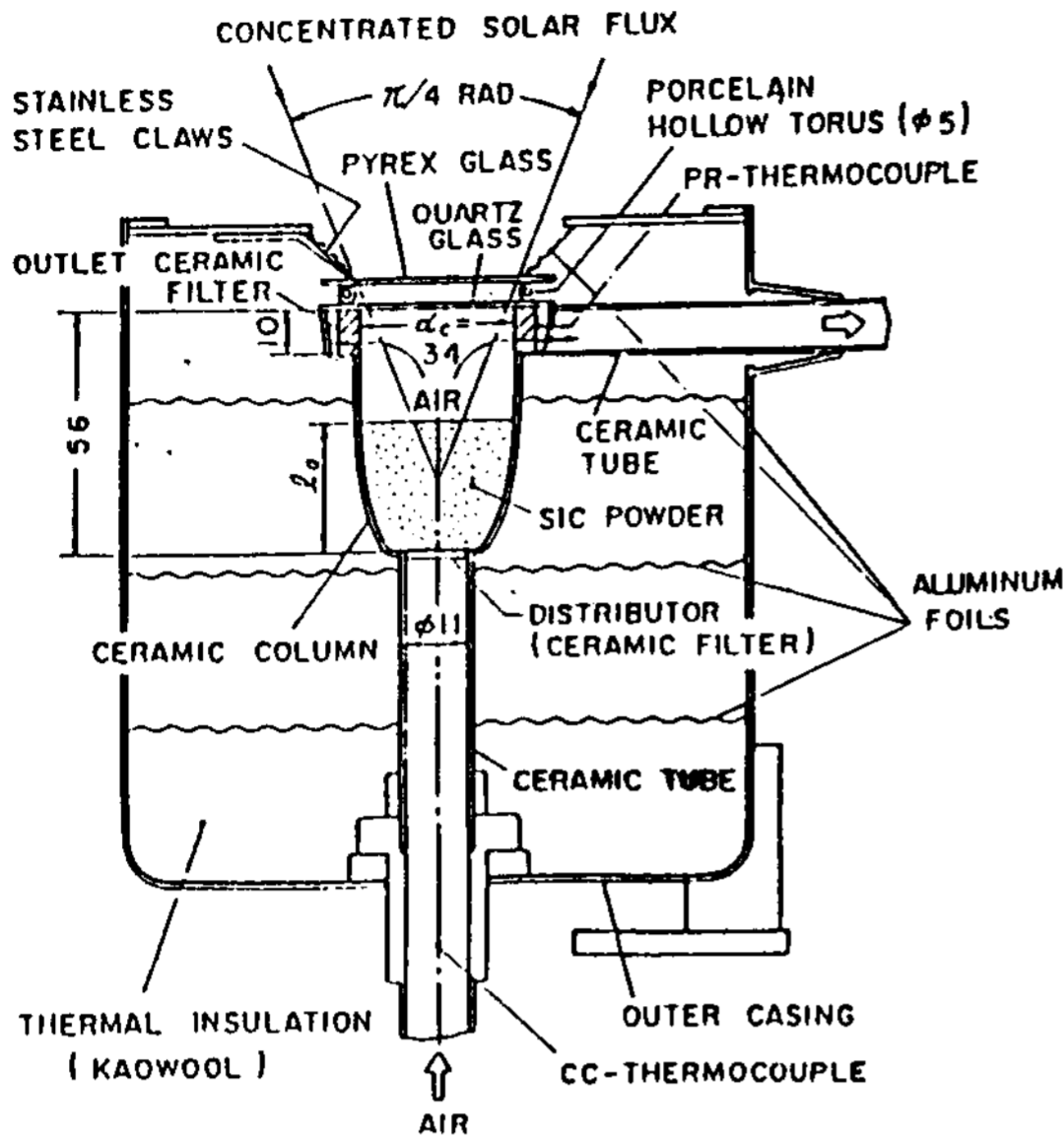


그림 1. 밀폐형 유동층 수열장치의 상세도

입공기온도 T_{g1} 은 유입관의 중앙에 설치한 0.1 mm경의 CC열전대에 의해서, 또 유출공기온도 T_{g2} 는 출구 세라믹 필터의 외측에 설치한 50 μm 경의 PR열전대에 의해서 각각 측정하였다.

작동입자에는 흡수율이 크고 고융점(2200°C)의 SiC입자를 사용하여, 80 mesh(구멍벌어짐 177 μm)와 65 mesh(210 μm)의 표준체로서 부류한 것 [상승(相乘)평균 경 $d_p=193 \mu\text{m}$]을 이용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 유동층 수열장치에의 입사에너지와 집광 효율

유동층에의 입사에너지량 Q [W]는, 표면 흡수형 열량계를 써서 측정하였다. 한편 본 연구의 집광시스템은 유동층에 도달하는 태양광은, 이면경(裏面鏡)에서 2회 반사되어, 후레넬렌즈를 1회 통과하기 때문에 직달일사량(直達日射量) I_D [W/m²] 보다는 적게 된다. 이 복사에너지의 감쇠를 조사하기 위하여, 다음식에서 정의한 집광 효율 η_c 을 구하였다.

$$\eta_c = \dot{Q} / A_r \cdot I_D \quad \dots\dots(1)$$

여기에서 A_r 는 후레넬렌즈의 유효면적[m²]이다. 열량계의 냉각수량 m_w 를 0.5~2.3 g/s로 변화시켜 행한 광범위한 실험에 있어서 $\eta_c=0.58$ 이며, 거의 일정하였다. 따라서 유동층에의 입사에너지량 \dot{Q}_i 는 다음식으로 주어진다.

$$\dot{Q}_i = (\eta_c \cdot A_r) I_D = 0.30 I_D \quad \dots\dots(2)$$

3.2 수열장치의 비정상특성

본 연구를 행한 일본의 센다이지역에서는 전천쾌청일(全天快晴日)은 비교적 적고 구름 때문에 간헐적으로 일사량이 저하하는 경우가 많다. 따라서 실험 정도(精度)를 높이기 위해서는, 직달일사량의 정상성(正常性)의 확보가 필요하다. 일반적으로 장치의 열응답성은, 그 열용량이 클수록 느리기 때문에 본 연구에서는 밀폐형 수열장치에 대하여 비정상특성을 조사하였다. 즉 태양복사를 조사(照射)하지 않은 상온상태로부터, 수열장치에 갑자기 일사(日射)를 개시한 경우의 가열실험과, 장시간 조사한 정상상태로부터 갑자기 조사를 정지하여 통기(通氣)만을 계속하는 냉각실험의 양쪽을 행하였다. 그림 2는 얻어진 측정치를 하기의 무차원 온도로 표시한 것이다.

가열실험 :

$$\theta = (T_{g,max} - T_{g2}) / (T_{g,max} - T_{g1})$$

냉각실험 :

$$\theta = (T_{g2} - T_{g1}) / (T_{g,max} - T_{g1})$$

.....(3)

여기에서 T_{g1} 과 T_{g2} 는 입구와 출구의 공기온도, $T_{g,max}$ 는 정상시의 최고도달 공기온도, t 는 조사개시(照射開始) 또는 정지후의 경과시간이다. 냉각실험에서는, 입자와 수열장치가 보유하는 열량이 작동공기에 의해서만 이동되는 것에 비해서 가열실험에서는 태양복사에 의한 유동층의 가열이 선행하기 때문에, 가열실험의 쪽이 빨리 정상상태에 도달하는 경향이 보여진다. 입사에너지 밀도에 의해서 다소의 차이는 있지만, 대개 15

분정도에서 정상상태에 도달하고 있다. 이하의 실험에서는 그림 2의 특성을 참조하면서 정상상태에서의 측정을 행하였다.

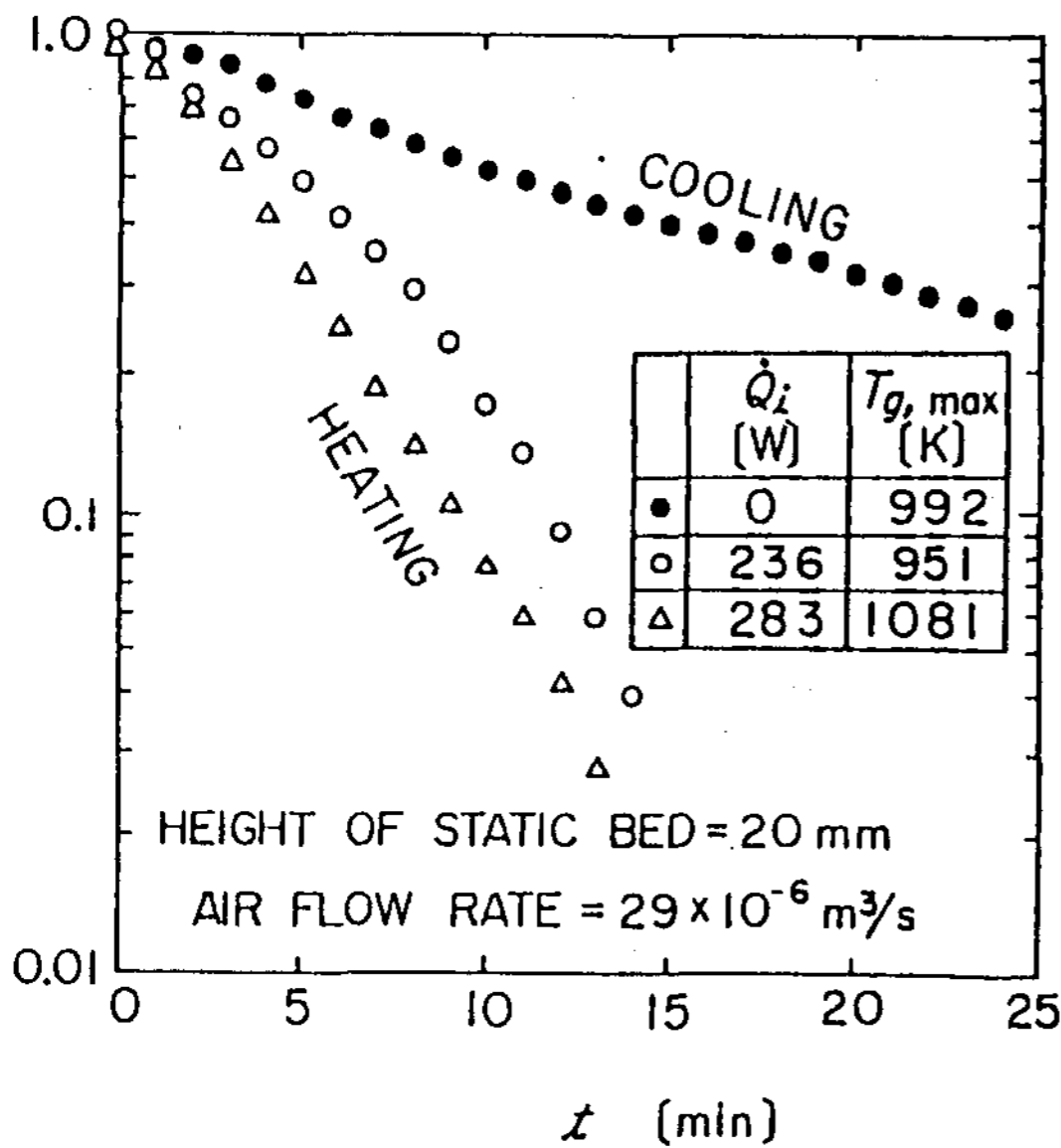


그림 2. 밀폐형 유동층 수열장치의 가열·냉각특성

3.3 밀폐형 유동층 수열장치의 실험결과

이상의 결과를 토대로 하여서, 전보¹¹⁾에서 기술한 열사이폰 효과와 대유량시의 입자유출을 방지하고, 열변환효율의 향상을 기하기 위하여 그림 1의 밀폐형 수열장치를 제작하였다.

3.3.1 열변환율

밀폐형 수열장치의 열변환효율 η 는, 식(4)에 준하여 다음 식으로 정의한 것을 사용하였다.

$$\eta = \rho_g \dot{V} \bar{c}_{pg} (T_{g2} - T_{g1}) / \dot{Q}_i \quad \dots\dots\dots(4)$$

여기에서 T_{g2} 는 출구공기온도, \bar{c}_{pg} 는 T_{g1} 과 T_{g2} 간의 공기의 평균비열이다.

그림 3은, SiC입자의 정지층전높이 1.0와 공기 유량 \dot{V} 를 여러가지로 바꾸어서 실험한 열변환효율 η 와 출구공기온도 T_{g2} 의 측정결과이다. 열변환효율은 개방형 수열장치와 마찬가지로, 공기유량 \dot{V} 와 함께 단조롭게 증대하며 층전층높이 1.0에의 의존성은 그다지 보이지 않는다. 밀폐형

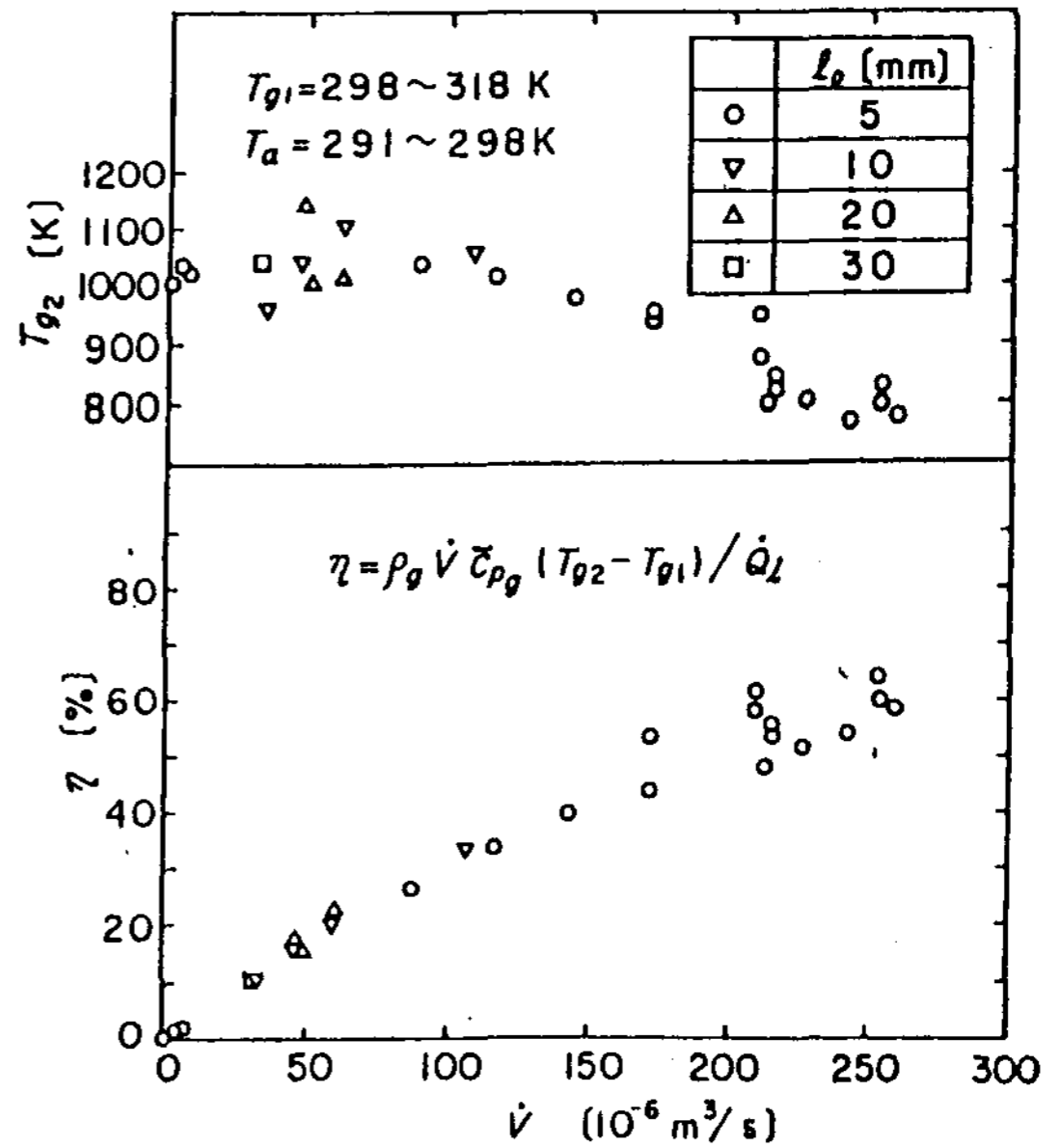


그림 3. 밀폐형 유동층 수열장치의 열변환효율 η 와 출구온도 T_{g2}

에서는 입자의 유출이 없기때문에 공기유량은 $260 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ 까지 높게 취하는 것이 가능하며 변환효율 η 도 최대 64%에 달하고 있다.

한편, 공기출구온도 T_{g2} 에 대하여서는 열평형 관계에서 유량 \dot{V} 의 감소에 따라서 T_{g2} 는 천천히 상승하여 가지만, $\dot{V} = 50 \sim 100 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ 부근에서 최고온도(1140K)에 도달한 후에는 \dot{V} 의 감소와 함께 저하하는 경향이 인정된다. 이것은 공탑속도가 낮으면 입자의 유동화가 나빠져서 유동층 내의 태양복사의 침투도가 떨어져, 농후층표면(濃厚層表面)에서의 반사나 적외복사가 증대하기 때문이라고 생각된다. 이와 같이 공기유량 내지는 공탑속도의 변화에 대하여, 출구속도가 극대치를 취하는 것이 본 유동층 수열장치의 특징이다.

3.3.2 제손실의 평가

밀폐형 수열장치에의 입사에너지가 다음의 식과 같이 분배된 것으로서 제손실의 평가를 대략적으로 행하였다.

$$\dot{Q}_i \cdot \tau = \dot{Q}_i \cdot \eta + \dot{Q}_{wall} + \dot{Q}_{r1} + \dot{Q}_{r2} \quad \dots\dots\dots(5)$$

여기에서 τ 는 태양광 입사창을 밀폐하고 있는

석영유리와 Pyrex유리의 태양광에 대한 투과 및 반사율의 복합비로서, Laser용 Power meter에 의한 실측에서는 0.81이었다. 우변 제1항은, 작동 공기에 의한 회수에너지, \dot{Q}_{r1} 은 입자온도가 출구 공기온도 T_{g2} 에 같다고 가정했을때의 적외복사 손실이다.

여기에서 $(\dot{Q}_{wall} + \dot{Q}_{r1})$ 의 값은 다음과 같이 구하였다. 즉, 탑벽온도 T_{wall} 과 $(\dot{Q}_{wall} + \dot{Q}_{r1})$ 의 관계를 구하기 위하여, 입자에 대신하여 농후층(濃厚層)과 거의 같은 높이의 동(銅) block에 니크롬 히터를 집어 넣은 가열기를 유동층 용기내에 삽입하여, 틈새를 납이나 알루미늄등의 용융금속으로 채워 $(T_{wall} - T_a) = 74 \sim 650K$ 으로 변화시켜 외벽에서 열손실을 측정하였다. 주어진 측정치는 오차 3%내에서 다음의 실험식으로 정리된다.

$$\dot{Q}_{wall} + \dot{Q}_{r1} = 3.8 \times 10^{-3} (T_{wall} - T_a)^{1.48} [W] \dots\dots (6)$$

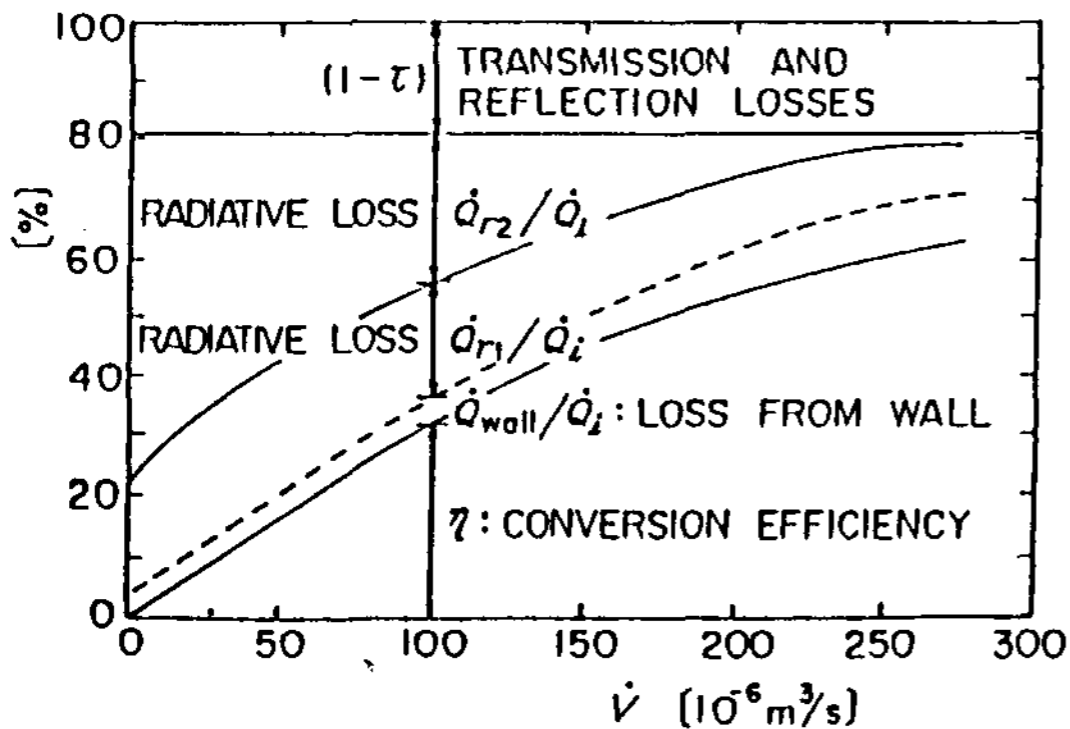


그림 4. 유동층 수열장치의 각종 열손실의 비율

그림 4는 유동층의 탑벽온도가 출구공기온도와 같다고 한 경우에 대하여 입사에너지 \dot{Q}_i 에 차지하는 제손실의 비율을 표시한 것이다. 그림중에서 η 의 곡선은 그림 3의 측정치의 평균곡선이다.

그림에 있어서, 복사손실 $(\dot{Q}_{r1} + \dot{Q}_{r2})$ 는 공기유량 \dot{V} 의 증대에 따라서 뚜렷이 감소하여 왔고, 이때문에 동작온도가 아주 고온임에도 불구하고, 뛰어난 열변환효율이 달성된 것을 알 수 있다. 즉, 본 연구의 유동층 수열방식의 채용에 의해서, 태양복사는 층내 깊이 침투하고 입자가 흡수한 열에너지는 기체에 효율 좋게 전달되고, 더구나 입사창부근의 고온입자는 빠르게 층저부에 이동

하여 기체의 가열에 기여한다. 이것이 본 장치의 특징이다.

3.3.3 기존의 실험과의 비교

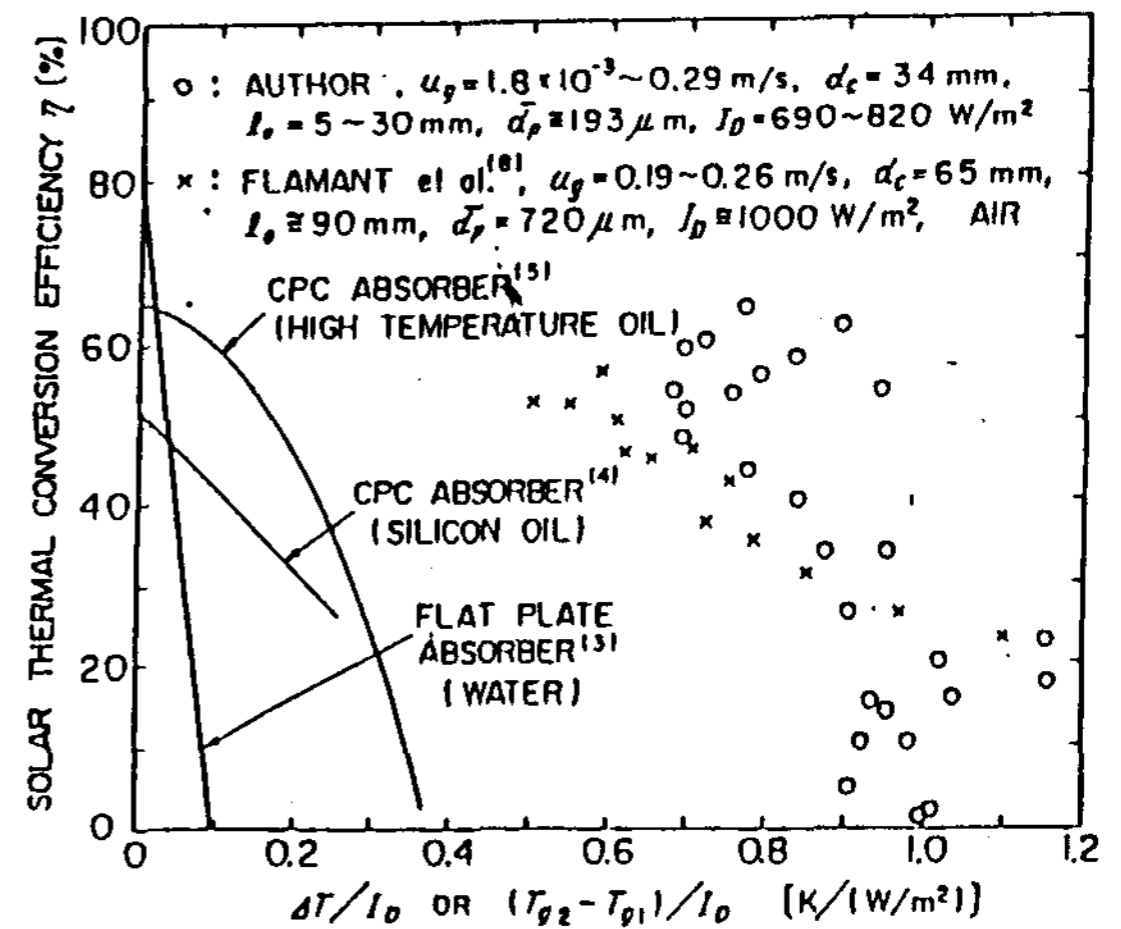


그림 5. 밀폐형 유동층 수열장치와 기존의 집열방식과의 성능비교

그림 5는 본 실험장치인 유동층 수열장치 (FBR로약기)와 기존의 실험결과와의 비교를 표시한 것이다. 그림중 개방형 FBR에 관한 Flamant등⁸⁾의 측정치는 $I_D = 1 kW/m^2$ 이라고 가정하여 환산한 것이다. 본 연구의 FBR은 $(T_{g2} - T_{g1})/I_D = 0.7 \sim 0.9$ 의 고온역에 있어서, 분명히 Flamant등의 것보다는 효율이 양호하다.

한편, 고체수광면방식의 평판형 집열기(작동유체: 물)³⁾나 CPC집광집열기(작동유체: 실리콘 오일 내지는 고온유⁵⁾)와 비교하면, 본 연구의 밀폐형 FBR은 작동온도 내지는 토출유체온도가 아주 높아 예를들면 $\eta = 30\%$ 에 있어서 평판형 집열기의 실로 16배에 달하고 있다. 또 FBR은 $(T_{g2} - T_{g1})/I_D$ 가 η 에 대해서 극대치를 취하는 것이 특징으로서, 본 연구의 밀폐형 FBR에서는 $\eta = 20\%$ 때 $(T_{g2} - T_{g1})I_D = 1.16$ 의 극대치를 취하고 있다.

4. 결 론

에너지 밀도 $1.4 MW/m^2$ 에 집광한 태양복사와,

SiC입자와 공기를 작동매체로한 유동층에 의한 소규모 고온가스 가열장치를 제작하여, 태양복사의 열변환실험을 행하여 다음의 결과를 얻었다.

- (1) 밀폐형 유동층 수열장치의 열변환효율은 공기유량에 비례하여 증대하고, 입자의 정지충전높이에의 의존성은 그다지 인정되지 않는다. 출구공기온도는 공기유량의 증가에따라서 천천히 저하하지만 유동화 상태와의 균형관계로 저유량역에서 극대치가 생긴다.
- (2) 밀폐형 유동층 수열장치에서는 입자의 유출이 없으므로 공기유량 내지는 공탑속도를 충분히 크게 잡는 것이 가능하며, 열사이폰 효과도 억제할 수 있어, 출구공기온도는 최고 1140K 열변환효율은 64%에 달했다.
- (3) 밀폐형 수열장치에 대하여 제열손실의 평가를 행하여, 우수한 열변환효율이 얻어지는 이유를 밝혔다.
- (4) 본 연구의 밀폐형 유동층 수열장치는, 고체수광면을 갖는 기존의 집열기에 비교해서, 상당히 높은 수열온도역($\eta=30\%$ 일 경우, $\Delta T/I_b$ 가 16배)을 보여 주었다.

후 기

본 연구를 수행함에 있어 일본 東北大學 流体科學研究所의 相原利雄教授, 圓山重直助教授로부터 많은 도움을 얻었으며, 실험장치의 제작에는 本郷三夫助手(정년퇴임), 下山利幸技官등의 지대한 협조를 받았기에 심심한 사의(謝意)를 표한다.

REFERENCES

- 1) K. Bammert and P. Seifert : Die Auslegung von Erhitzern Solar Beheizter Gasturbinen, VDI-Forschungsheft, No. 620(1983).

- 2) R. A. Crane and G. Bharadhwaj : Evaluation of Thermal Energy Storage Devices for advanced Solar Dynamic Systems, ASME Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 113(1991), pp. 138-145.
- 3) 宮川 : 流下式太陽熱集熱器, 空氣調和・衛生工學, 第57卷(1983), 33-38頁.
- 4) 森・青木・橋本 : CPC形太陽熱集熱器, 空氣調和・衛生工學, 第57卷(1983), 27-31頁.
- 5) K. A. Snail, J. J. O'Gallagher, and R. Winston : A Stationary Evacuated Collector with Integrated Concentrator, Solar Energy, Vol.33 (1984), pp. 441-449.
- 6) 相原 : 流動層による太陽エネルギーの利用法, 自然熱利用融雪システムの研究報告書(日本鉄道技術協会), S-2261(1981), pp. 95-103.
- 7) G. Flamant : Theoretical and Experimental Study of Radiant Heat Transfer in a Solar Fluidized-Bed Receiver, AIChE Journal, Vol. 28(1982), pp. 529-535.
- 8) G. Flamant and G. Olalde : High Temperature Solar Gas Heating Comparison between Packed and Fluidized Bed Receivers-1, Solar Energy, Vol. 31(1983), pp. 463-471.
- 9) P. G. Hull and A. J. Hunt : A Reciprocating Solar-Heated Engine Utilizing Direct Absorption by Small Particles, Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 106(1984), pp. 29-34.
- 10) L. Hofmann and M. J. Antal, Jr. : Numerical Simulations of the Performance of Solar Fired Flash Pyrolysis, Solar Energy, Vol. 33(1984), pp. 427-440.
- 11) 최준섭 : 개방형 유동층을 이용한 태양광 고온가스 가열 장치의 연구, 한국태양에너지학회지, 제12권(1992), 1호, ~ .

NOMENCLATURE

A_f : effective area of Fresnel lens, m^2

c_{pk}	: average specific heat of air, kJ/(kg · K)		radiation, W
d_c	: diameter of receiver, mm	T_{g1}	: inlet air temperature, K
d_p	: root mean square diameter of particles, μm	T_{g2}	: outlet air temperature, K
I_D	: direct insolation energy, W/m ²	t	: time, min
l_o	: height of packed bed, mm	\dot{V}	: air flow rate, m ³ /s
Q_i	: incident solar energy on received surface, W	η	: efficiency of heat converted to energy at closed-type receiver
\dot{Q}_{wall}	: heat loss from surfaces of double glasses and receivers outerwall, W	η_c	: efficiency of solar collection energy
\dot{Q}_{r1}	: thermal radiation loss in case of particles temperature equal to outlet air temperature, W	θ	: dimensionless temperature from equation(3)
\dot{Q}_{r2}	: subtracted value \dot{Q}_{r1} from total thermal	τ	: combined value of transmittance and refractiviance to solar incident energy for quartz glass and pyrex glass
		ρ_g	: air density at inlet temperature, kg/m ³

of indoor temperature for residential buildings. To carry out the analysis here, the method called "PSTAR (Primary and Secondary Terms Analysis and Renormalization)" has been extensively used. This method was originally developed by the National Renewable Energy Laboratory(NREL) in the United States. The test results reported here represent two extreme cases of the interior thermal mass, Which demonstrate its effect on the interior thermal environment as well as on the overall thermal behavior of the building structure. The monthly heating and cooling loads are also extrapolated by using the renormalized model, Which are crucial in designing and refurbishing HVAC systems for the building.

A study on the Thermal Characteristics of a Thermal Storage Tank for using Gravels

Park, Jung-Won*Park, Bong-Kyu*Ahn, Sang-Kyu**

**Yn-Han Technical College*

***Baum Architects Engineers Consultants*

The purpose of this study was to investigate the fluid flow characteristics of heat storage in sensible heat storage system for use in cooling and heating of buildings.

Heat storage material was gravels and experiments were performed in the condition of constant temperature. The experimental parameters were fluid velocity and size of gravels.

The experimental results of the heat storage quantity and the heat storage efficiency by the variation of packing size and fluid velocity were as the follows :

The maximum value of the heat storage capacity and heat storage efficiency and the minimum arriving time for maximum heat storage were observed when the packing ratio was 72.5% and the fluid velocity was 0.14m/s.

High Temperature Solar Gas Heating by a Compact Fluidized-Bed Receiver of Closed-Type

Choi, Jun-Seop

Korea Institute of Machinery & Metals

A small-scale solar collector and tracking system, using a Fresnel lens of 0.5 μ , and novel compact fluidized-bed solar receiver[FBR] of closed type has been developed for high temperature solar

gas heating. The FBR was improved in carrying over of SiC powder and thermosiphon effect. The maximum outlet air temperature of 1140K and the maximum thermal efficiency of 64% were obtained. The present FBR's operated efficiently at extremely high temperatures in comparison with conventional solar receivers, composed of flat or tubular solid surfaces.

High Temperature Solar Gas Heating by a Compact Fluidized-Bed Receiver of Open-Type

Choi, Jun-Seop

Korea Institute of Machinery & Metals

A small scale solar collector system composed of a Fresnel lens of 0.5m² area as a solar concentrator and a compact fluidized-bed solar receiver was developed. Performance and temperature distribution in the fluidized bed receiver were measured using SiC for particles and air for working fluid. The maximum gas temperature was attained up to 1250K at this moment. In this study, energy efficiency achieved by the present experiment was high for the small scale solar collector system and compact receiver.

The Path Toward Solar-Hydrogen Energy System as the Best Alternative in Future(t)

Kim, Kil Hwan

President, Korean Hydrogen Energy Society