

## 개방형 유동층을 이용한 태양광 고온가스 가열장치의 연구

최 준 섭

한국기계연구원

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

**Choi, Jun-Seop**

*Korea Institute of Machinery & Metals*

#### 요 약

후레넬렌즈(면적  $0.5\text{m}^2$ )에 의해서 고밀도 집광능력을 갖는 소형태양 집열시스템이 태양에너지 집열장치와 소형 유동층 태양광 수열장치로서 개발되었다. 유동층 수열장치에서의 성능과 온도분포는 SiC입자와 공기를 작동유체로 하여서 측정하였다.

본 연구에서는 공기 최대도달 온도는 1250K이었다. 또한 개발한 태양에너지 집열기와 유동층 수열장치에 대한 에너지 효율은 높았다.

#### ABSTRACT

A small scale solar collector system composed of a Fresnel lens of  $0.5\text{m}^2$  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.

**주요기호**

- $A_f$ : 후레넬 렌즈의 유효면적  $m^2$
- $A_r$ : 마스크의 개구(開口)면적  $m^2$
- $\bar{c}_{pg}$ : 공기의 평균비열  $kJ/(kg \cdot K)$
- $\bar{c}_{pw}$ : 물의 평균비열  $kJ/(kg \cdot K)$
- $d_c$ : 탑경(塔徑)  $mm$
- $\bar{d}_p$ : 입자의 상승(相乘)평균경  $\mu m$
- $h_r$ : 개구부의 대류열전달율  $W/(m^2 \cdot K)$
- $I_D$ : 직달(直達)일사량  $W/m^2$
- $l_o$ : 정지 충전층(充填層) 높이  $mm$
- $\dot{m}_w$ : 냉각수의 질량유량  $g/s$
- $Q_i$ : 수광면(受光面)에 입사하는 태양에너지  $W$
- $r$ : 탑(塔) 중심에서부터 반경방향의 거리  $mm$
- $T_a$ : 주위온도  $K$
- $T_g$ :  $x$ 방향의 최대공기온도에 도달한 위치에 있어서 반경방향의 평균 공기온도  $K$
- $T_{g1}$ : 입구공기온도  $K$
- $T_{g2}$ : 출구공기온도  $K$
- $T_{g,max}$ : 공기의 최대 도달온도  $K$
- $t$ : 시간  $min$
- $U_b$ : 기포생성속도  $mm/s$
- $V$ : 공기유량  $m^3/s$
- $x$ : 분산판에서 부터 연직상방에의 거리  $mm$
- $x_{max}$ : 최고기체온도가 얻어지는 위치  $mm$
- $\alpha$ : 흡수율
- $\varepsilon$ : 방사율
- $\eta'$ : 개방형 수열장치의 열변환 효율
- $\eta_c$ : 집광효율
- $\rho_g$ : 입구공기온도에 있어서 공기밀도  $kg/m^3$
- $\sigma$ : Stefan-Boltzmann 상수  $5.669 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$

**1. 서 론**

근년, 가스터빈<sup>1)</sup>이나 스테링엔진<sup>2)</sup>에의 이용을 목적으로서, 태양광에 의한 고온가스 가열장치의 연구가 행하여 지고 있다. 그러나 종래의 고체 수광면(受光面) 혹은 수광관(受光管)을 사용한 태양광 수열기에서는 입사복사선(入射輻射線)의

수광면에서의 반사나 고체벽과 작동유체간의 낮은 열전달 특성 때문에, 그 에너지 흡수특성은 반드시 좋았다고는 할 수 없었다.

이 때문에 Aihara는 미립자(微粒子)의 고전열(高傳熱) 특성과 고기혼상 매체(固氣混相媒體)의 복사흡수특성을 활용하고, 유동층에 의한 태양광 수열장치의 제안을 행하여<sup>3)</sup> 그 가능성을 검토하였다. 또한 구미(歐美)에서도 개방형과 유동층식 태양광 가스 가열장치의 제작<sup>4,5)</sup>이나 혼상매체에 의한 태양광 왕복엔진의 고안<sup>6)</sup>이 이루어지고 있다.

본 연구에서는  $0.5m^2$ 의 후레넬(Fresnel)렌즈를 사용한 소규모의 태양광자동추적장치(太陽光自動追跡裝置)에 의해서 고밀도로 집광(集光)한 태양에너지( $1.4 MW/m^2$ )의 흡수와 기체 가열에 필요한 소형유동층가스 가열장치를 만들어, 일련의 성능 측정을 행하였다. 여기에서는 첫단계 연구로서 SiC 입자와 공기를 이용한 유동층식 가스가열 장치와 유동화 상태와 전열특성의 측정결과 및 작동유체의 최고가열온도에 대하여 기술하였다.

**2. 실험장치 및 측정방법**

**2.1 태양 추적 집광장치와 계측시스템**

실용상으로는 반사경을 사용하지 않고, 집광계를 직접 태양에 향하게 하는 것이 집광효율을 높이는 점에서 유리하다. 그러나 본 연구에서는, 유동층 수열장치(流動層 受熱裝置)나 계측계를 고정시켜 실험하려고 하기 때문에, 반사경을 사용하는 헬리오스태트(heliostat) 방식<sup>7)</sup>을 채용했다.

그림 1에는 실험장치의 개략을 표시한다. 태양광은 추적장치 ①에 붙어 있는  $1250 \times 1220 mm$ 의 평면경 ②에 의해서 일정방향으로 반사되어, 후레넬 렌즈 ③( $843 \times 613 mm$ , 초점거리  $1200 mm$ )에 입사한다. 이 평면경 ②의 방위각(方位角)과 양각(仰角)은, 태양광의 위치를 광

화이버(光 fiber)로서 검출하여, 입사광이 항상 후레넬 렌즈 ③에 수직으로 입사하도록 자동추적 장치 ④에 의해서 원격조작된다. 후레넬 렌즈를 투과한 태양광은, 제2의 평면경 [700×400 mm, 이면증착(裏面蒸着)] ⑤에 의하여 하방연직으로 반사되어 유동층 수열장치 ⑥에 조사(照射)된다. 조사광의 초점에서는 집광직경은 약 15 mm이고 그 평균강도는 1.4 MW/m<sup>2</sup>에 달한다.

작동유체로서의 공기는, 다이아프램(diaphragm) 펌프 ⑮에서 가압되어, 서징(surging) 탱크 ⑭에 의해 맥동제거와 조절밸브 ⑩에 의한 유량 조절을 받아 로타메타(rotameter) ⑨로 유량계 측을 한 후 유동층 하부에서부터 유입한다.

직달일사량(直達日射量)  $I_b$ 는, 망원경용 적도의(赤道儀)에 고정된 2대 전천일사계(全天日射計)의 한쪽을, 그것과 같은 직경의 원반으로 차폐하여, 다른쪽의 차폐하지 않은 일사계와의 출력 차로부터 입사광의 직달성분을 구하였다. 상기의 직달 일사량은 일본 동북대학 초고층 물리연구 시설의 Eppley 일사계로서 검정했다.

## 2.2 태양자동 추적 장치

직접추적식 집광시스템에서는 적도의식(赤道儀式) 추적장치와 미세조정장치를 조합시킨것<sup>8)</sup>이나 마이크로 프로세서에 의한것<sup>2)</sup> 등이 있고 헬리오스태트식 집광시스템에서는, 평면경의 구동이 2축 제어로 되기 때문에 추적장치가 복잡<sup>7)</sup>하게 될 우려가 있다. 본 실험에서는, 광 화이버와 photo-transistor를 써서 후레넬 렌즈에의 입사광의 광축을 feedback 제어하는 간편한 자동추적 시스템을 고안했다.

그림 1의 평면경 ②에서 반사된 태양광의 일부를, 핀 구멍을 통하여 후레넬 렌즈의 광축과 수직한 투광면(投光面)상에 직경 약 4 mm의 태양상(像)을 결상(結像)시킨다. 투광면상에는 이 태양상을 포함하는 상하수평의 4점에, 광 fiber의 입광단(入光端)이 설치되어 있고 그 출력을 photo-diode에 의해서 검출한다. 태양상이 이동하여 좌우상하의 광량(光量)의 균형이 깨지면,

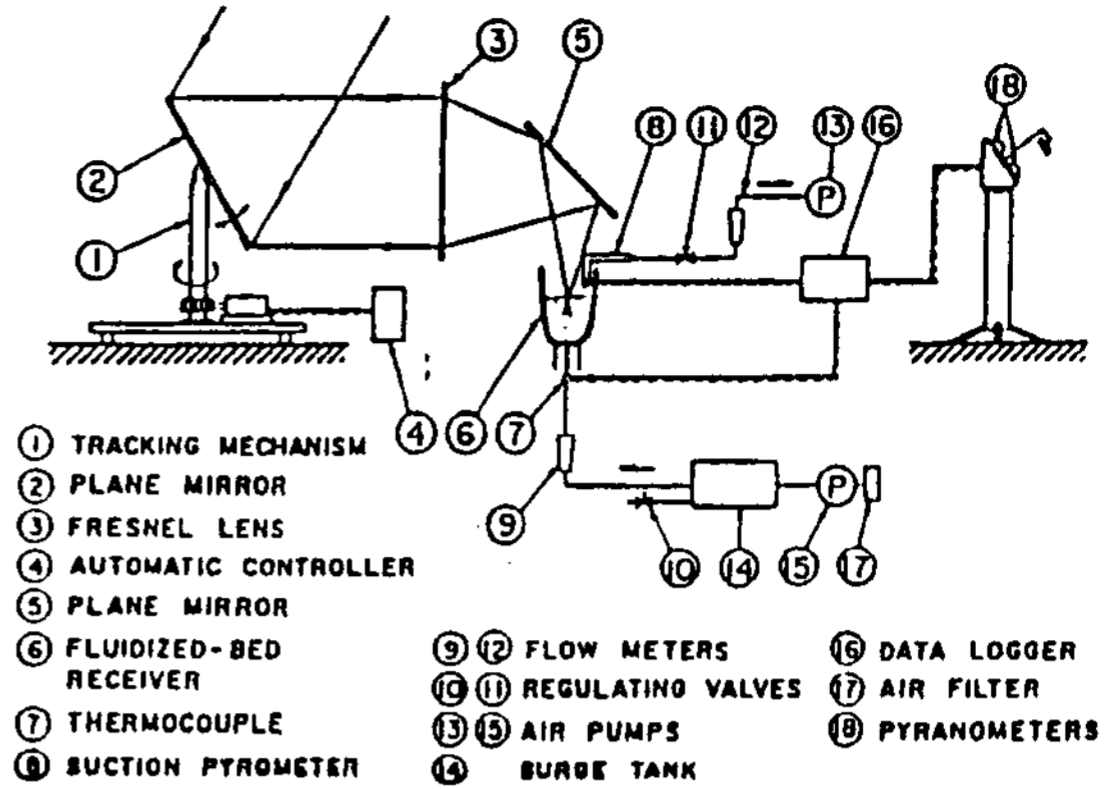


그림 1. 태양추적 집광장치와 계측시스템

relay switch가 작동하여 그 불균형을 수정하는 방향으로 평면경의 구동모타가 제어된다.

이 추적방식은 컴퓨터 제어나 복잡한 기구를 요하지 않고, 기존의 수동추적장치에 용이하게 접속시킬 수 있으며, 추적정도(精度)도 비교적 좋다는 이점이 있다.

## 2.3 개방형 유동층 수열장치

처음에 태양광의 입사각이 대기에 개방되어

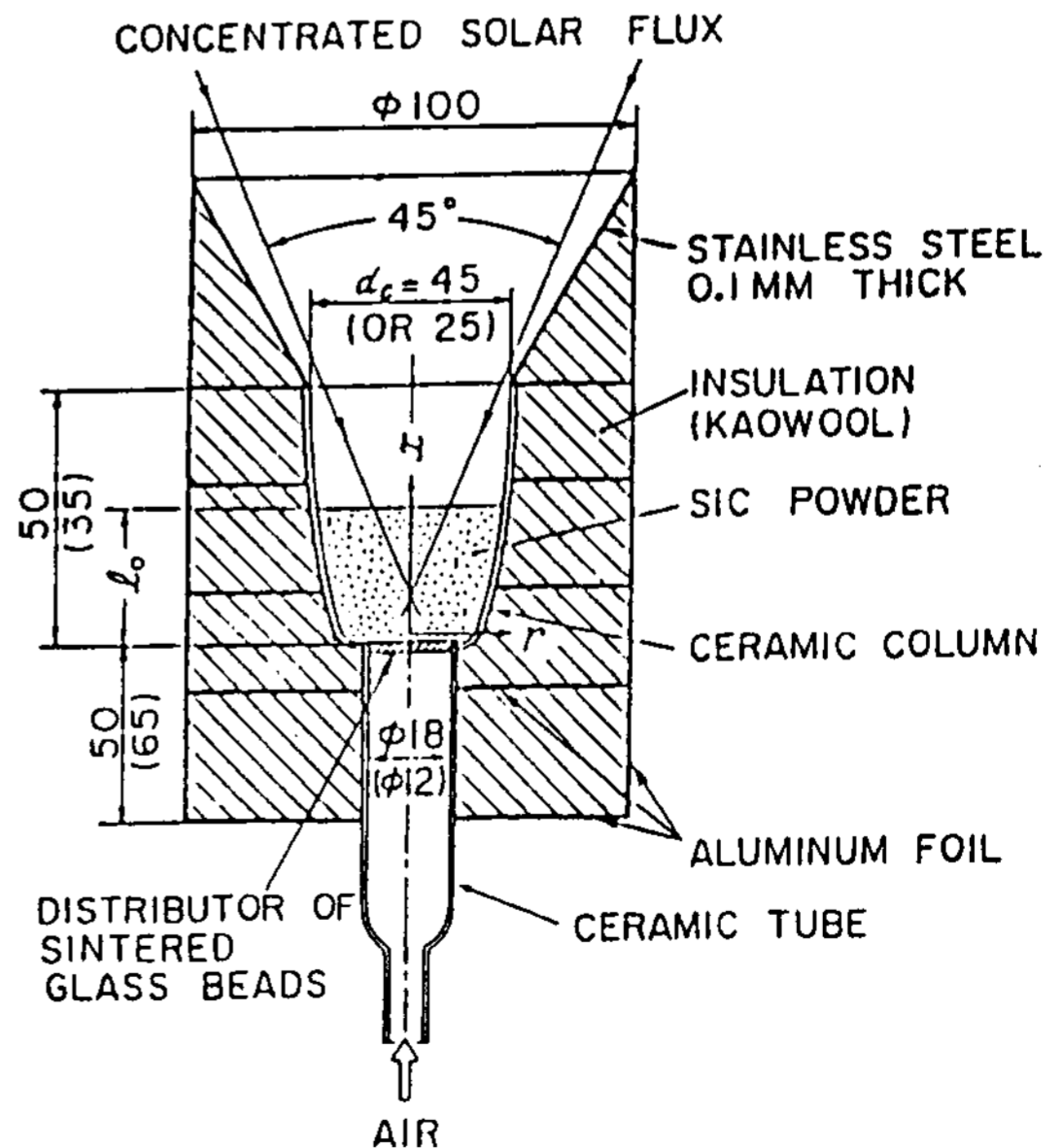


그림 2. 개방형 유동층 수열장치의 상세도

있는 그림 2와 같은 개방형 수열장치를 만들었다. 작동유체의 공기는 자기제 입구관(磁氣製入口管)을 거쳐, 유동층 용기의 저부에 세라믹 접착제로서 고정된 소결(燒結)유리휠터 분산판(分散板)을 통과하고, 층내 입자를 유동화 함과 동시에 태양에너지를 흡수하여 개구부(開口部)에서 고온으로 되어 유출한다. 유동층용기로서는 최대 탑경(塔徑)  $d_c=25\text{ mm}$ 와  $45\text{ mm}$ 의 2종류의 세라믹관을 사용하였다.

본 실험에서는 장치의 동작온도가 아주 높기 때문에 장치 전체를 세라믹 fiber(Kaowool)로 단열하고, 단열층내에서 자유대류의 발생을 막기 위하여 알루미늄 박지로 4단으로 나누고 나아가 복사손실을 막기 위하여 장치의 외표면을 알루미늄 박지로 입혔다.

유동층에의 유입공기온도  $T_{k1}$ 은, 입구관내의 중앙에 설치된 직경  $0.1\text{ mm}$ 의 CC 열전대로서 측정하고 층내 및 유출공기의 온도  $T_{k2}$ 는 traverser장치에 취부된 흡인(吸引)온도계 (그림 1의 ⑧)에서 측정하였다.

작동입자에는 흡수율이 크고 고융점( $2900^\circ\text{C}$ )의 SiC 입자를 사용하여, 80 mesh(구멍벌어짐  $177\ \mu\text{m}$ )와 65 mesh( $210\ \mu\text{m}$ )의 표준채로서 분류한 것 [상승(相乘) 평균경  $\bar{d}_p=193\ \mu\text{m}$ ]을 이용하였다.

### 2.4 흡인(吸引)온도계

유동층내의 공기온도계측에 사용한 흡인 온도계를 그림 3에 표시한다. 흡입관은 외경  $2.5\text{ mm}$ , 두께  $0.2\text{ mm}$ 의 스테인레스제로서 흡입구보다  $6\text{ mm}$  하류의 위치에 직경  $50\ \mu\text{m}$ 의 PR 열전대의 온접점(溫接点)이 설치되어 있다. 이 열전대는 외경  $1\text{ mm}$ , 내경  $0.4\text{ mm}$ 의 세라믹 관에 의해서 절연되어 있지만, 관으로부터의 열전도 오차를 경감하기 위하여, 온접점은 길이  $6\text{ mm}$ 의 노출구간의 중앙에 위치하고 있다.

흡입관의 선단부는, 태양복사에 의한 계측오차를 경감하기 위해  $0.5\text{ mm}$ 의 백금박지로 피복하였다. 또 SiC 입자의 침입을 막기 위하여, 흡입구에는 두께  $2\text{ mm}$ 의 석영 wool이 봉입되어 있다.

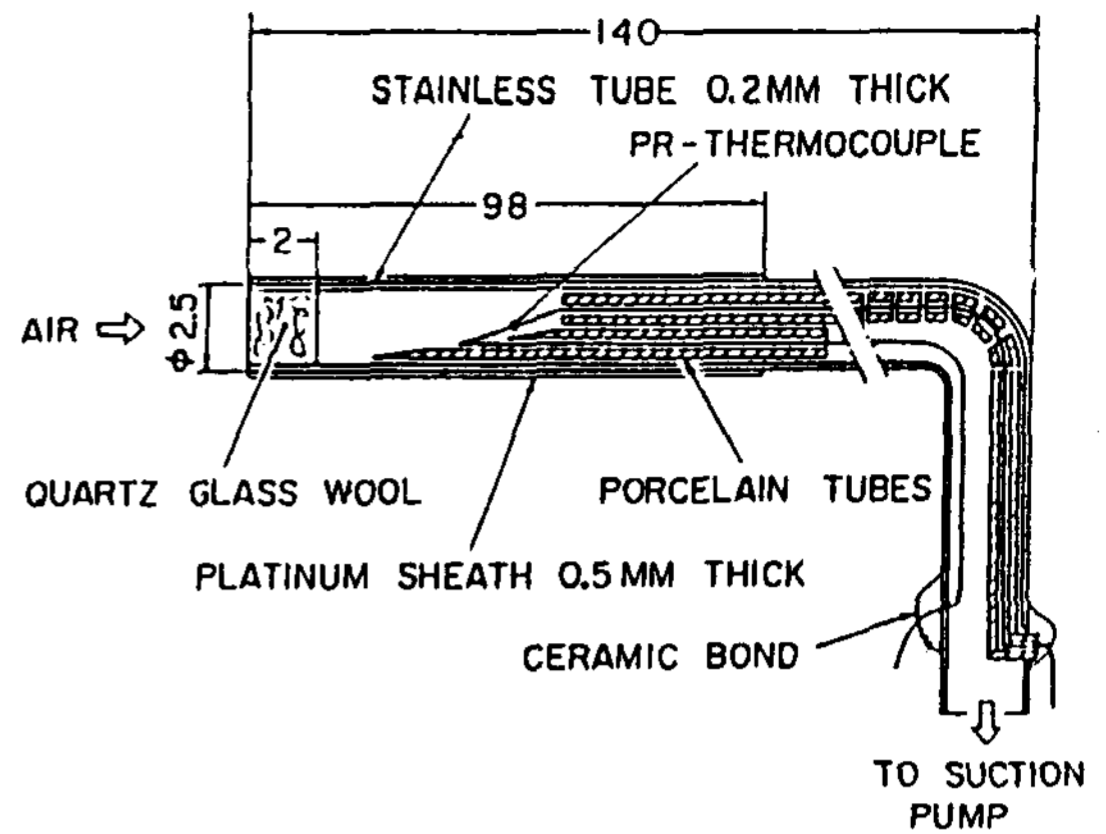


그림 3. 흡인온도계(비례척도 아님)

흡인속도는 검정시험의 결과 약  $1.2\text{ m/s}$ ( $20^\circ\text{C}$ )에 설정했다.

### 2.5 입사에너지 계측장치

본 실험에서는 후레넬 렌즈의 초점면에 있어서 태양에너지의 입사량을 측정하기 위해, 그림 4에 표시하는 표면흡수형 열량계를 제작하였다. 즉 두께  $1\text{ mm}$ 의 동원판(銅圓板)표면을 아세틸렌 그을음(태양광에 대한 흡수율<sup>9)</sup>  $\alpha=0.99$ )으로서 coating한 것을 복사 수광면(受光面)으로 하였다. 동원판에 배면에는 나선상 환(fin)이 있어 나선유로를 형성하고 있다. 수광면에서 흡수된 태양에너지는 이 나선유로의 중앙에서 유입하여, 외주

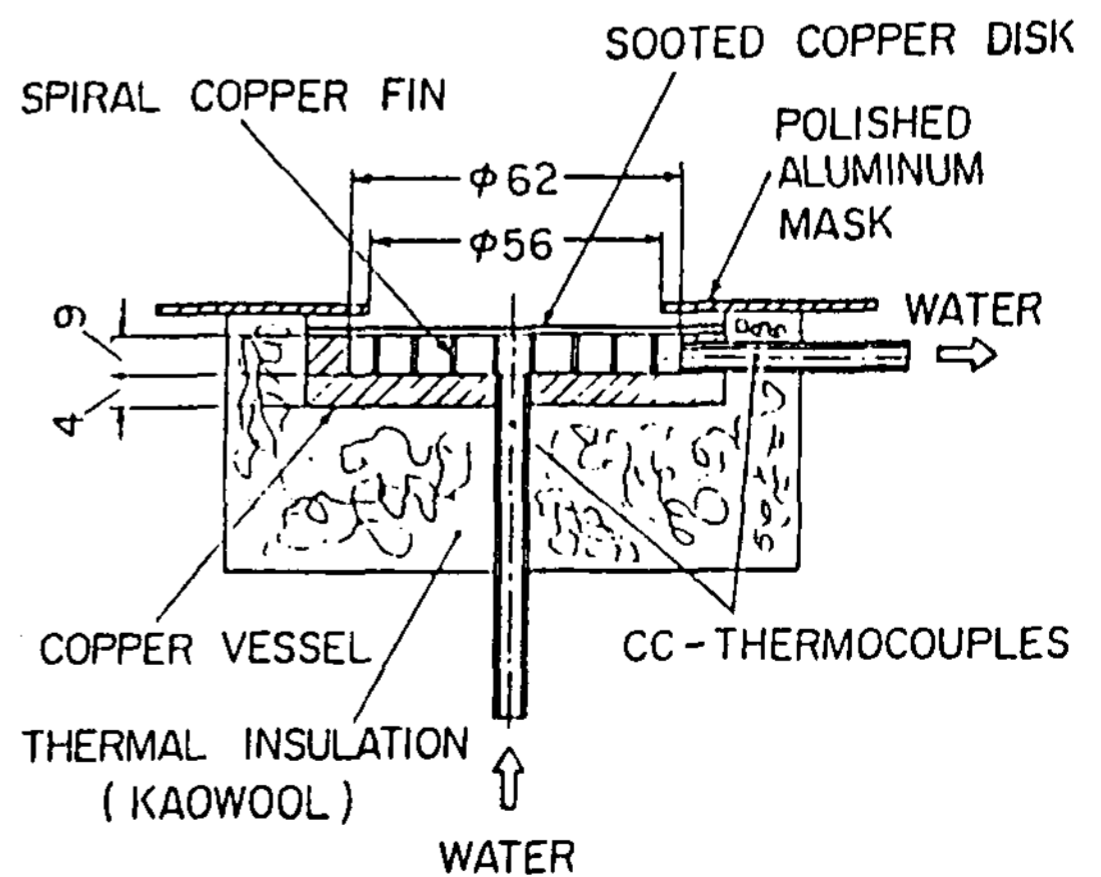


그림 4. 열량계

(外周)로부터 유출하는 냉각수에 전달된다. 열량계의 측면과 저면은 발포제로서 단열시켰으며, 윗면은 1.5 mm의 틈을 형성하여 알루미늄제 마스크로서 덮었다. 냉각수의 입구온도  $T_1$ 과 출구온도  $T_2$ 는 0.1 mm경의 CC열전대로서 측정하여 수광면 중앙에도 같은 열전대를 설치해서 수광면 온도  $T_r$ 를 측정하였다.

지금 냉각수의 질량유량을  $\dot{m}_w$ , 수광면의 흡수율을  $\alpha$ 라고 하면, 수광면에 입사한 태양에너지  $\dot{Q}_i$ 는 근사적으로 다음 식으로 주어진다.

$$\dot{Q}_i = [m_w c_{pw} (T_2 - T_1) + A_r \{ \epsilon \sigma (T_r^4 - T_a^4) + h_r (T_r - T_a) \}] / \alpha \dots\dots\dots (1)$$

여기에서  $c_{pw}$ 는 물의 비열<sup>10)</sup>,  $A_r$ 은 마스크 개구면적,  $\sigma$ 는 Stefan-Boltzmann 상수,  $h_r$ 은 개구부의 대류열전달율,  $T_a$ 는 주위온도이고, 수광면의 저온복사율  $\epsilon \approx \alpha$ 로 하였다.

본 실험에서는, 집광경(集光徑)이 30~40 mm로 되는 위치에 열량계를 설치하여,  $(T_2 - T_1) = 20 \sim 25K$ 이 되도록  $\dot{m}_w$ 를 조정하여 측정하였지만, 그때의  $T_r - T_a < 30K$ 이기 때문에, 식 (1)의 제2, 제3항의 기여는 1% 미만이다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 유동층 수열장치에의 입사에너지와 집광 효율

유동층에의 입사에너지량  $\dot{Q}_i [W]$ 는, 2.5절에서 기술한 열량계를, 안전을 위하여 입사광의 초점 전방 40 mm의 위치에 설치하여, 에너지 밀도를 낮추어서 측정하였다. 한편, 그림 1의 집광 시스템에서는 유동층에 도달하는 태양광은, 평면경에서 2회 반사되어, 후레넬 렌즈를 1회 투과하기 때문에 직달 일사량  $I_b [W/m^2]$ 보다 적은 것으로 된다. 이 복사에너지의 감쇠를 조사하기 위하여 다음 식에서 정의한 집광효율  $\eta_c$ 를 구하였다.

$$\eta_c = \dot{Q}_i / [A_r \cdot I_b] \dots\dots\dots (2)$$

여기에서  $A_r$ 는 후레넬 렌즈의 유효면적 [ $m^2$ ]

이다. 열량계의 냉각수유량  $\dot{m}_w$ 를 0.5~2.3 g/s로 바꾸어서 행한 광범위한 실험에서는,  $\eta_c = 0.57$ 이며 거의가 일정하였다. 따라서 유동층에의 입사 에너지량  $\dot{Q}_i$ 는 다음식에서 주어진다.

$$\dot{Q}_i = (\eta_c A_r) \cdot I_b = 0.30 I_b \dots\dots\dots (3)$$

이후의 실험에서는, 직달일사량  $I_b$ 에서 식(3)에 의해서  $\dot{Q}_i$ 를 추산하고, 실험을 행하였다. 실험에 있어서 직달일사량은 최대 812  $W/m^2$ , 초점에서의 집광직경은 약 15 mm이므로 초점에서의 에너지 밀도는 1.38  $MW/m^2$ 에 달하고 있다.

### 3.2 개방형 유동층 수열장치의 실험결과

#### 3.2.1 층내온도분포

우선 층내온도분포의 측정이 용이한 개방형 유동층 수열장치에 대해서 실험을 행하였다. 본 연구에서는, 층내의 초기 기포 생성 속도를 측정하여 최소 유동화 속도로 정했다. 입구공기온도  $T_{g1}$ 과 최대탐경  $d_c$ 기준의 초기 기포생성 속도  $U_b$ 는 정지충전(充填)높이  $l_0 = 20 \sim 35$  mm일때,  $d_c = 25$  mm에서는  $U_b = 21 \sim 40$  mm/s,  $d_c = 45$  mm에서는  $U_b = 10 \sim 29$  mm/s정도이지만, 본 연구에서는  $U_b$ 보다 충분히 큰 속도로 전열실험을 하였다.

그림5는 탐경  $d_c = 25$  mm, 충전층높이  $l_0 = 15$  mm의 수열장치에 대해서 얻어진 층내공기온도  $T_g$ 에 있어서 최대탐경  $d_c$ 기준의 속도,  $\dot{V}$ 는  $T_{g1}$ 에 있어서 공기의 체적유량,  $\dot{Q}_i$ 와  $I_b$ 는 유동층 수열장치에의 입사에너지와 직달일사량의 시간평균치이고  $x$ 는 분산판에서부터 연직상방으로의 거리이다. 그림에 있어서, 유량  $\dot{V}$ 가 적은 경우에는, 공기온도  $T_g$ 는 분산판 표면 ( $x=0$ )에서 상승하여, 충전층 높이부근 ( $x \approx l_0$ )에서 최고도달온도  $T_{g,max} = 1250K$ 에 달한다. 이와 같은 기체온도의 뚜렷한 상승으로 인해,  $(T_{g,max} - T_a)$ ,  $d_c$  및  $U_g$  기준의 Grashof수와 레이놀즈수의 비  $Gr/Reg^2$ 은 40에 달한다. 그 결과 낮은 유량의 경우에는 일종의 열사이폰 효과에 의해서 저온의 외기가 탐상부에서 유입하여, 층내의 고온공기와 혼합하기 때문에 출구를 향하여 기체온도는 급격히 감소하게 된다. 따라서 유동층 수열장치에서 얻어지는 고

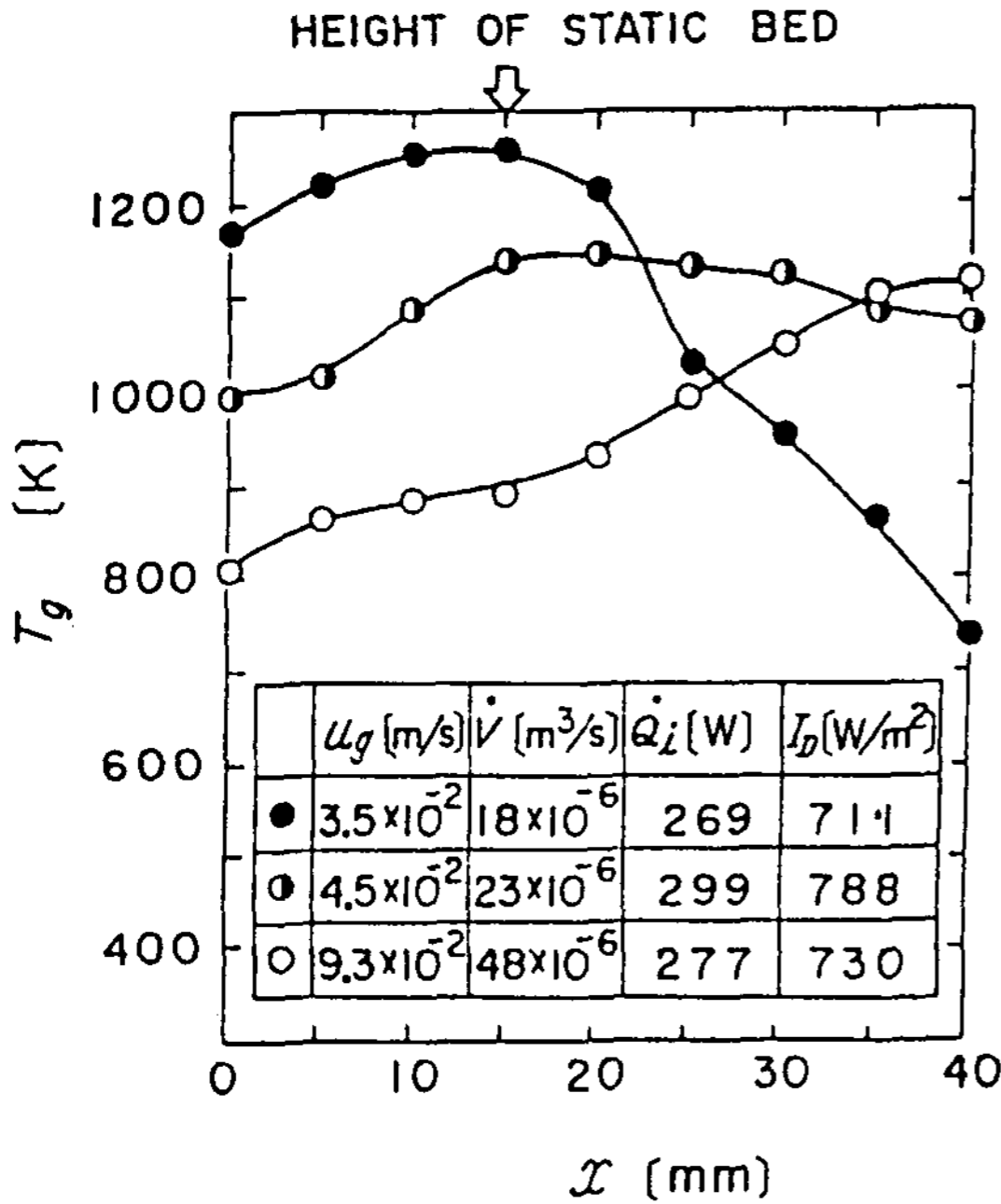


그림 5. 유동층 수열장치내의 축방향 기체온도분포 (탑경  $d_c=25$  mm, 정지층전높이  $l_0=15$  mm, 입구공기온도  $T_{g1}=284$ K)

온가스의 유효이용을 위해서는, 열사이폰효과에 의한 외기의 혼입(混入)을 방지할 필요가 있다.

공탑(空塔)속도가 증대하면, 층의 bubbling이 활발하게 되어, 층이 팽창하여 입사복사선은 층내의 보다 넓은 영역에서 흡수되어, 기체온도가 최대가 되는 위치  $x_{max}$ 는 20 mm 정도로 최고도달온도는 1150K으로 저하한다. 더욱 공기유량을 증가시키면, 층의 팽창은 탑상부까지 달하며, 최고 기체온도가 얻어지는 위치  $x_{max}$ 는 탈출구까지 이동한다. 이 경우의 층내온도분포는 층저부의 active bed역,  $x \approx l_0$ 까지의 정온(定溫)역, 입사에너지의 흡수가 활발한 층상부의 희박층역(稀薄層域)으로 대별된다.

그림 6은,  $d_c=45$  mm,  $l_0=30$  mm의 수열장치에 대하여 얻어진 축방향 기체온도분포를 표시한 것이다. 전반적으로는 그림 5의 경우와 비슷하지만, 공기유량이 많기 때문에, 열평형의 관계에서 최고도달온도는 그림 5의 경우보다 낮게 된다. 또 탑경이 크고 더우기 공탑속도  $U_g$ 가 작기 때문에 열사이폰 효과가 나타나기 쉽고, 최대공기

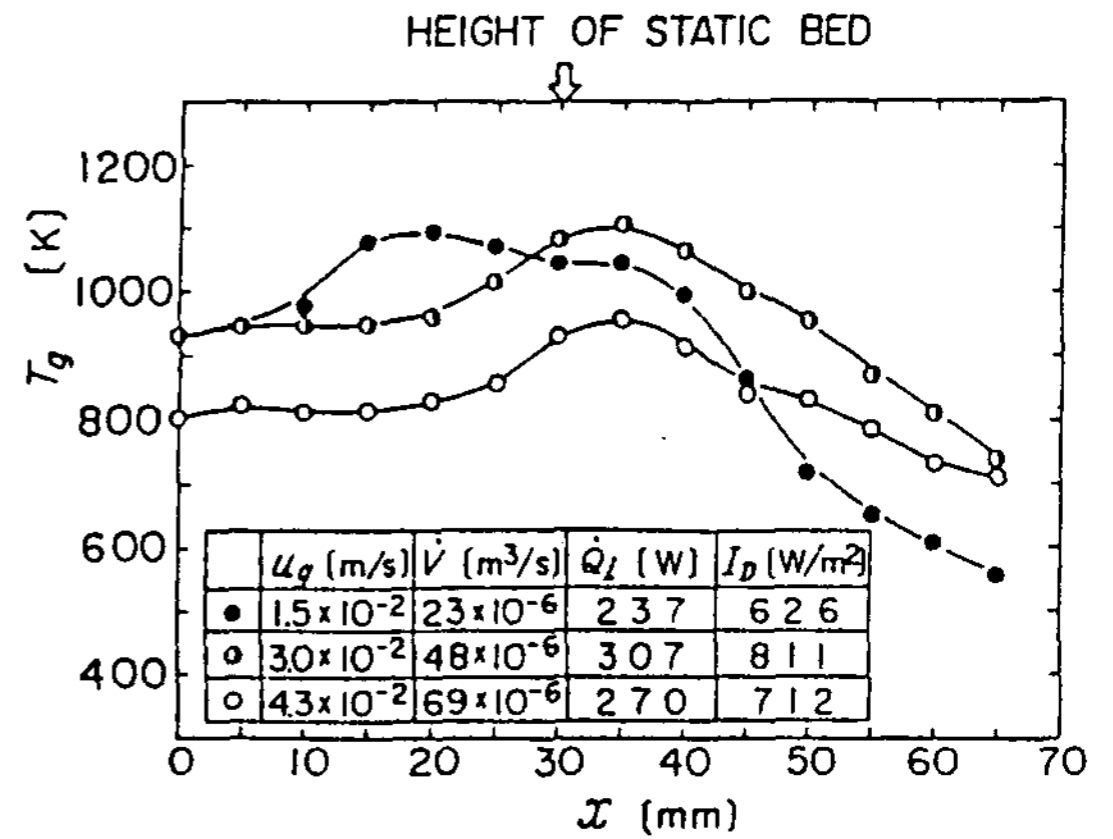


그림 6. 유동층 수열장치내의 축방향 기체온도분포 ( $d_c=45$  mm,  $l_0=30$  mm,  $T_{g1}=283$ K)

유량  $\dot{V}=6.9 \times 10^{-5}$  m<sup>3</sup>/s의 경우에도, 탈출구를 향해 기체온도가 저하하는 것이 확실히 보인다.

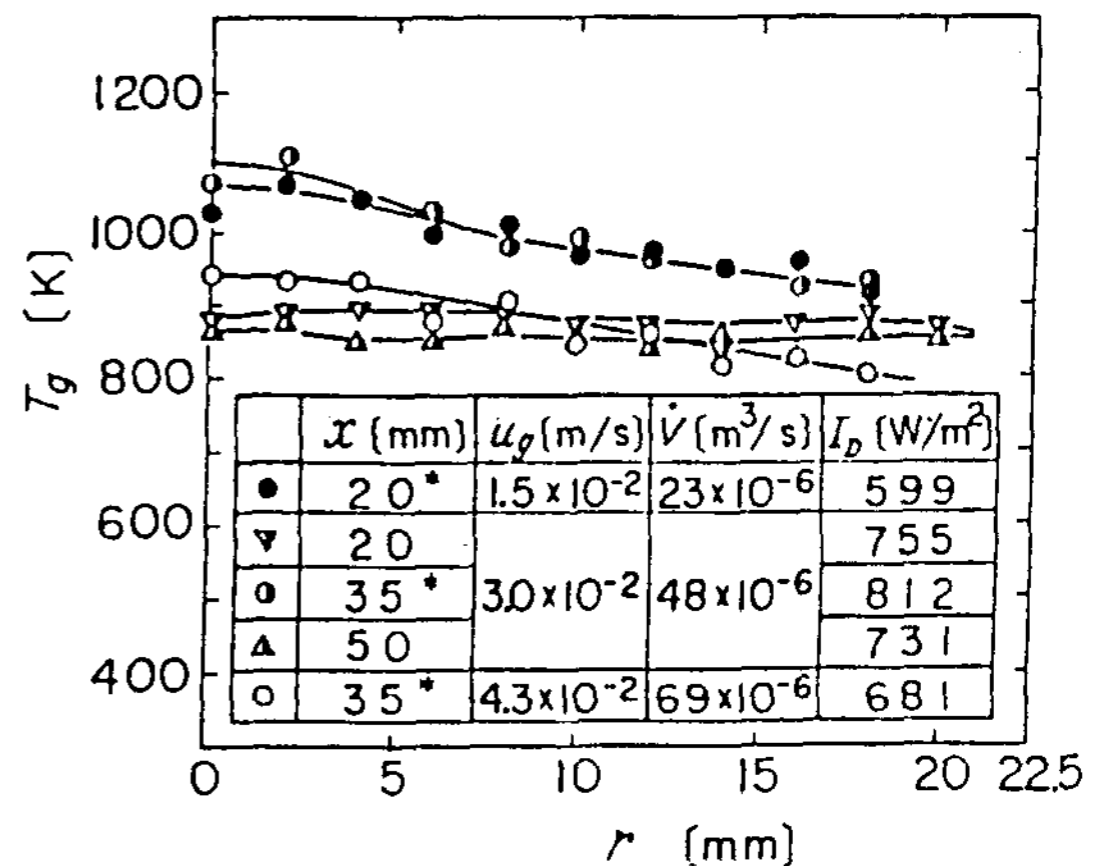


그림 7. 유동층 수열장치내의 반경방향 기체온도분포 ( $d_c=45$  mm,  $l_0=30$  mm,  $T_{g1}=284$ K)  
\*부호는  $x_{max}$ 를 표시한다.

그림 7에서는, 탑경  $d_c=45$  mm의 수열장치에 대해서 얻어진 기체온도  $T_g$ 의 반경방향분포를 나타낸다. 기체온도의 반경방향분포는, 대략 일정하지만 최고 기체온도가 얻어지는 위치(그림 중에서 \*로 표시)에서 약간 중심부가 고온으로 된다.

### 3. 2. 2 열변환효율

본 연구에서는 우선 집광계의 에너지 손실을

고려치 않고, 열변환효율  $\eta'$ 는 다음식으로 정의한 것을 사용한다.

$$\eta' = \rho_g \dot{V} \bar{c}_{pg} (\bar{T}_g - T_{g1}) / Q_i \dots\dots\dots (4)$$

여기에서  $\bar{T}_g$ 는  $x_{max}$ 의 위치에 있어서 반경방향의 평균기체온도,  $\rho_g$ 는 입구공기온도  $T_{g1}$ 에 있어서 공기밀도,  $\bar{c}_{pg}$ 는  $\bar{T}_g$ 와  $T_{g1}$ 간의 공기의 평균비열<sup>10)</sup>이다.

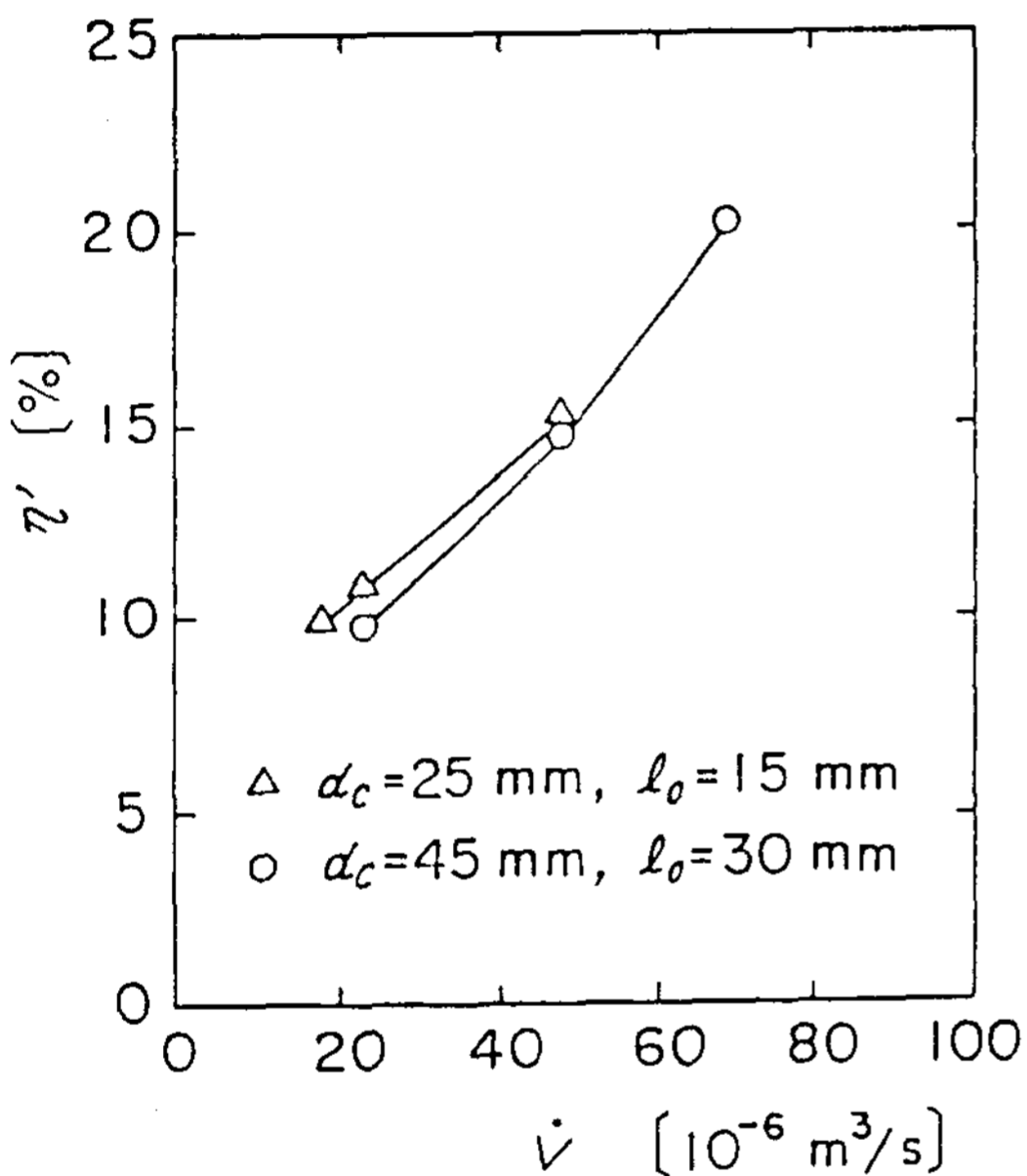


그림 8. 공기의 유체유량  $\dot{V}$ 에 대한 열변환효율  $\eta$ 의 변화

그림 8은 탐경  $d_c=25 \text{ mm}$ 와  $45 \text{ mm}$ 의 수열장치에 대해서, 공기유량  $\dot{V}$ 를 바꾸어, 열변환효율  $\eta'$ 를 측정하여 표시한 것이지만,  $\eta'$ 는 거의 탐경에 의하지 않고 주로 공기유량에 비례하여 변화하는 것을 알 수 있다. 본 실험에서 얻어진 최대효율은,  $d_c=45 \text{ mm}$ 일 때 약 20%에 달했다. 공기유량을 증가시키면  $\eta'$ 는 더욱 증대되는 것이 예상되지만, 본 논문의 개방형 수열장치에서는 공탐속도를 높이면 수송층(輸送層)으로 되어 입자가 유출되기 때문에  $70 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 이 유량의 한계였다.

#### 4. 결 론

에너지 밀도  $1.4 \text{ MW/m}^2$ 에 집광한 태양 복사와, SiC입자와 공기를 작동매체로 한 유동층에 의한 개방형 콤팩트 고온가스가열 장치를 제작하여, 다음의 결과를 얻었다.

(1) 개방형 수열장치의 층내 기체온도는 분산판에서의 거리와 함께 급격히 상승하여, 최대치에 도달한 후 열사이폰 효과에 의한 외기침입때문에 출구로 갈수록 저하한다.

(2) 이 온도분포경향은, 공탐속도 즉 입자의 유동화상태에 크게 의존하고, 최대온도가 얻어지는 위치는 공탐속도의 증대에 따라서 출구쪽으로 이동한다.

(3) 개방형 유동층 수열장치의 열변환효율은 공기유량에 비례하여 증대하고 탐경의 의존도는 작다. 이 장치에서 얻어진 최고효율은 약 20%이었다.

#### 후 기

본 연구를 행함에 있어 일본 東北大學 流體科學研究所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) 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

- (日本鐵道技術協會), S-2261(1981), pp. 95-103.
- 4) G. Flamant : Theoretical and Experimental Study of Radiant Heat Transfer in a Solar Fluidized-Bed Receiver, AIChE Journal, Vol. 28(1982), pp. 529-535.
  - 5) 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.
  - 6) 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.
  - 7) T. Sakurai, O. Kamada, Kamada K. Inagaki : Construction of a Large Solar Furnace, Solar Energy, Vol. 8(1984), pp. 117-126.
  - 8) R. Zogbi and D. Laplaze : Design and Construction of a Sun Tracker, Solar Energy, Vol. 44(1984), pp. 369-372.
  - 9) 甲藤, 伝熱概論, (昭56), 342, 養賢堂.
  - 10) 相原・円山・崔 : 壁温一樣な鉛直管路内の層流自由対流熱伝達に及ぼす物性値温度依存性の影響, 日本機械学会論文集(B編), 第51卷(1985), 3582-3588.

## NOMENCLATURE

$A_f$  : effective area of Fresnel lens,  $m^2$   
 $A_r$  : effective opened area of mask,  $m^2$   
 $\bar{c}_{pa}$  : average specific heat of air,  $kJ/(kg \cdot K)$   
 $\bar{c}_{pw}$  : average specific heat of water,  $kJ/(kg \cdot K)$

$d_r$  : diameter of receiver,  $mm$   
 $\bar{d}_p$  : root mean square diameter of particles,  $\mu m$   
 $h_r$  : convective heat transfer coefficient of opened area,  $W/(m^2 \cdot K)$   
 $I_D$  : direct insolation energy,  $W/m^2$   
 $l_o$  : height of packed bed,  $mm$   
 $\dot{m}_w$  : mass flow rate of water,  $g/s$   
 $\dot{Q}_i$  : incident solar energy on received surface,  $W$   
 $r$  : distance from receivers centerline,  $mm$   
 $T_a$  : ambient temperature,  $K$   
 $T_g$  : average air temperature in r-direction at elevation attained maximum x-direction temperature,  $K$   
 $T_{g1}$  : inlet air temperature,  $K$   
 $T_{g2}$  : outlet air temperature,  $K$   
 $T_{g,max}$  : maximum air temperature,  $K$   
 $t$  : time,  $min$   
 $U_{fb}$  : velocity for bubbling condition,  $mm/s$   
 $V$  : air flow rate,  $m^3/s$   
 $x$  : vertical upward length from distributor  $mm$   
 $x_{max}$  : elevation to be attained maximum gas temperature,  $mm$   
 $\alpha$  : absorptance  
 $\varepsilon$  : emissivity  
 $\eta'$  : efficiency of heat converted to energy at open-type receiver  
 $\eta_c$  : efficiency of solar collection energy  
 $\rho_g$  : air density at inlet temperature  $kg/m^3$   
 $\sigma$  : Stefan-Boltzmann constant  
 $5.669 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$



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 0.5m<sup>2</sup> 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*