

## 고체입자의 수소화염에 있어서의 열복사에 관한 연구

최준원\* · 백승욱<sup>†</sup> · 김중주\* · 김한석\*\*

### A Study about The Effect of Radiation on Particle-Seeding Hydrogen Flame

Joon-Won Choi\*, Seung-Wook Baek<sup>†</sup>, Jung-Ju Kim\*, and Han-Seok Kim\*\*

#### ABSTRACT

From the view of the environmental protection against the use of fossil fuels, a great of efforts have been exerted to find an alternative energy source. Hydrogen may become an alternative. However the product species of the hydrogen flame is only H<sub>2</sub>O, which emits only non-luminous radiation so the radiation from it is much smaller than that for a hydrocarbon flame. In this study, the authors designed and fabricated a laboratory scale test furnace to study thermal characteristics of hydrogen-air diffusion flame. In addition, the effects of addition of reacting as well as non-reacting solid particles were experimentally investigated. Among the total heat flux to the wall, about 75 % was occupied by radiation while 25 % by convection. When the aluminum oxide (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) particles were added, the radiative heat flux was reduced due to heat blockage effects. On the other hand, the total as well as the radiative heat flux was increased when the carbon particles were seeded, since the overall temperature increased. The effects of swirl and excess air ratio were also examined.

**Key Words** : 대체연료(Alternative Fuel), 수소화염(Hydrogen Flame), 실험용 연소로(Test Furnace), 입자첨가(Particle Seeding), 복사열전달(Radiation), 대류열전달(Convection)

#### 기 호 설 명

d : 선회기 내부 직경

d<sub>h</sub> : 선회기 허브의 직경

S : 선회수(Swirl Number)

θ : 선회기 vane의 각도

ψ : 과잉공기비(Excess Air Ratio)

#### 1. 서 론

현재 인류의 주된 에너지원은 탄화수소계열(CxHy)의 화석 연료이다. 그러나 이는 그 매장량에 한계가 있어 무한히 사용될 수 없을 뿐 아니라 최근에는 연소 후 생성물에 의한 환경오염 문제가 심각하게 제기되고 있다. 주된 환경 오염

원으로는 질소 산화물(NOx), 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 외에 연료의 불완전 연소로 인한 일산화탄소(CO)와 매연(soot) 등이 있다. 오랫동안 NOx를 감소시키는 방법이 연구되었다. 그러나 최근에는 CO<sub>2</sub>가 온실효과를 유발시킨다는 것이 알려지면서 이를 규제하고자 국가마다 CO<sub>2</sub>배출량을 제한하는 교토 의정서가 발표되었다. 이와 같이 고갈되고 있는 화석연료의 공급문제와 이의 사용 시 발생하는 환경오염 문제를 해결하기 위해서 공급량이 풍부할 뿐만 아니라 환경에도 유해하지 않은 대체연료의 개발이 시급하게 되었다. 이에 대한 방편으로 보일러에 사용되는 화석연료의 대체

\* 한국과학기술원 항공우주공학과

<sup>†</sup> 정희원, 연락저자, 한국과학기술원 항공우주공학과  
E-mail : swbaek@sorak.kaist.ac.kr

\*\* 한국기계연구원 환경기계연구팀

연료로서 수소에 대한 관심이 높아지게 되었다.

수소는 이론적으로 물을 전기분해하면 무한히 얻을 수 있는 꿈의 연료이다. 또한 일반적인 화석연료의 경우 연소 시에 일산화탄소와 아세틸렌 등 각종 공해물질이 생성되지만 수소의 경우 불완전 연소가 되더라도 생성물은 인체에 무해한 수소와 수분 밖에는 없다.

화석연료의 대체연료로서 수소의 잠재적 능력에 대한 연구는 Suzuki[1]가 1929년에 발표하고 1982년에 재출판된 것이 최초의 논문이다. Nicoletti[2]는 수소를 경제적 측면에서만 평가한다면 다른 탄화수소계열의 연료보다 비용이 크지만 환경에 미치는 영향을 비용으로 환산해보면 충분히 대체연료로서의 가치가 있다고 주장하였다. 수소를 연료로 사용하기 위해 필요한 수소화염의 기본적 특성에 대해 많은 연구가 이루어졌다. Vranos 등[3]은 수소-공기 확산화염의 안정성에 대한 실험적 연구를 수행하였고, Koroll 등[4]은 수소-공기 혼합물의 연소 속도(burning velocity)를 측정하였다. Hutny와 Lee[5]는 수소를 보일러 연료로 사용하기 위해서는 수소화염의 복사 열전달을 증가시켜야 한다고 지적하고, 수소 화염으로부터의 복사 열전달을 증가시키기 위해 수소에 소량의 미분탄이나 탄화수소계열의 연료를 첨가하는 방법을 제안하였다. 이러한 방법으로 화염의 복사 열전달의 변화를 고찰한 연구가 여러 연구자들에 의해 수행되었다. Steward와 Guruz[6]는 프로판(propane) 화염에 불활성 입자인 산화알루미늄( $Al_2O_3$ )과 산화마그네슘( $MgO$ )을 첨가하여 화염으로부터의 복사 열전달의 변화를 측정하여 프로판(propane)화염으로부터의 복사 열전달을 크게 증가 시키지는 못한다는 것을 알았다. 그러나 수치적 모사를 통해 프로판(propane)화염에 탄소입자를 첨가하면 화염으로부터의 복사 열전달을 크게 증가시킬 수 있을 것이라고 예측하였다. 또, Choudhuri와 Gollahalli[7]는 실험적 연구를 통해 수소에 천연가스와 프로판(propane)과 같은 탄화수소계열 연료를 혼합한 결과 화염으로부터의 복사 열전달이 증가된다는 것을 알았다. Butler 등[8]은 실험실 규모의 연소로에서 미분탄을 연소시켜 연소로 벽면에서의 전체 열전달량과 복사 열전달량을 측정 한 결과 연소로 내에서의 열전달 중 대부분이 복사에 의해 일어난다는 것을 알았다.

일반적으로 화염으로부터의 열전달은 대류 열전달과 복사 열전달이 중요한 부분을 차지하며 전도에 의한 열전달은 그리 중요하지 않다. 화염으로부터의 복사 열전달은 크게 두 가지로 나눌 수 있는데,  $CO_2$ 와  $H_2O$ 에 의한 불휘염 복사(non-luminous radiation)와 매연(soot) 등에 의한 휘염 복사(luminous radiation)가 그것이다.

전체 복사 열전달 중에서 매연(soot)이나 재(ash)에 의한 휘염 복사의 비중이 불휘염 복사보다 더 큰 것으로 알려져 있다.[9] 그러나 수소화염의 경우 생성물은 오직 수분( $H_2O$ )뿐이고, 불완전 연소가 된다 하더라도 생성물은 여전히 수소( $H_2$ )와 수분( $H_2O$ )뿐이다. 이것은 수소 화염으로부터의 복사 열전달이 다른 탄화수소계열 연료들의 화염으로부터의 복사 열전달량 보다 적음을 의미한다. 그러므로 보일러 연료의 대체연료로서 수소가 사용되기 위해서는 주요 열전달 방식인 수소화염으로부터의 복사 열전달을 증진시키는 연구가 먼저 수행되어야 한다.

본 연구에서는 실험실 규모의 연소로를 제작하고 연소로 내부에서 수소-공기 확산화염을 생성시켜 연소로 내부의 온도분포와 벽면으로의 복사 열전달량을 측정하였다. 또, 수소화염에 입자를 부유시켜 불휘염(non-luminous flame)인 수소화염을 휘염(luminous flame)으로 변화시켜 화염으로부터의 복사 열전달량의 변화를 측정하였다. 화염에 부유시킨 입자는 연소로 내에서 연소 반응에 참여하지 않는 비활성 입자(inert particle)인 산화알루미늄( $Al_2O_3$ )입자와 연소반응에 참여하는 탄소(Carbon)입자의 두 종류이다.

## 2. 실험장치 및 방법

Fig. 1에 본 연구에서 사용된 연소로를 도시하였다. 연소로는 직경 0.5m, 길이 1m의 원통형의

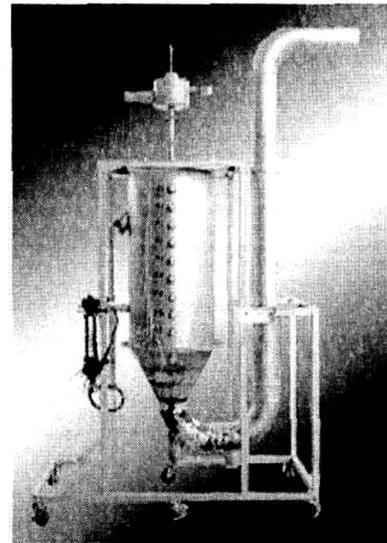


Fig 1. Furnace

모양이다. 연소로 상단에 연소기가 부착되어 화염이 위에서 아래 방향으로 향하게 되며 연소로

하단에 배출구가 있다. 내부벽면에는 단열재인 세라크올을 50mm 두께로 피복하여 외부로의 열 손실을 최소화하였다. 외부에서 연소로 내부의 화염상태를 관측할 수 있도록 관측창을 설치하고 고온용 결정 유리판(quartz plate)을 끼워넣었다. 하나는 연소로 상부 측면에 있고 나머지 하나는 하단의 배출구 끝에 설치되어 있다. 연소로 내부의 온도를 측정하기 위해 벽면에 100mm 간격으로 직경 20mm의 탭(tab)을 설치하였고 동일한 높이에서 벽면의 온도를 측정하기 위해 100mm 간격으로 직경 4mm의 구멍이 뚫려있다. 온도 측정구 반대편 벽면에는 화염으로부터 벽면으로의 열 유속을 측정하기 위해 직경 40mm의 측정구가 온도 측정구와 동일한 간격으로 뚫려있다. 본 연구에서는 수소-공기의 확산 화염(diffusion flame)을 다루므로 공기와 수소를 각각 다른 공급관을 통해 공급한 후 연소기 tip 부근에서 혼합되도록 연소기를 설계 및 제작하였다. 수소와 공기의 공급량은 각각 보정된 면적식 유량계(rotormeter)로 조절한다. 수소와 공기의 공급형태는 안쪽의 관으로 수소가 공급되고 바깥쪽의 관으로 공기가 공급된다. 수소 공급관의 직경은 17mm이고 공기 공급관의 직경은 38mm이다. 원활한 점화와 연소의 안전성을 확보하기 위하여 점화용 버너를 연소기 고정 장치 옆에 설치하였다. 확산 화염(diffusion flame)에서는 연료와 공기의 혼합과정이 연소과정을 좌우하는 인자가 된다. 따라서 안정된 화염을 얻기 위해서는 공기와 연료의 혼합 특성을 향상시켜야 한다. 공기-연료의 혼합특성을 향상 시키는 방법은 여러 가지가 있을 수 있으나, 본 연구에서는 공기에 선회(swirl)를 주어 혼합을 향상시켜 화염을 안정화시켰다. 선회기의 형태는 vane angle 15°, 30°를 가지는 두 가지 종류의 radial flow guide vane swirler를 제작하여 사용하였다. 선회각에 대한 선회수(swirl number, S)의 계산은 다음과 같은 관계식을 이용하였다.[10]

$$S = \frac{2}{3} \left[ \frac{1 - (d_h/d)^3}{1 - (d_h/d)^2} \right] \tan \theta$$

여기서  $d$ 는 선회기의 내부 직경,  $d_h$ 는 선회기 허브의 직경,  $\theta$ 는 선회기 vane의 각도이다.

수소화염에 입자를 부유시키기 위해 사용된 입자 공급기는 screw type particle feeder 이다. 입자가 내부에 웅집되는 것을 방지하기 위해 교반기(stirrer)와 충격기(impactor)를 사용하였다. 또한, screw 전체에 균일하게 입자가 유입되도록 하기 위하여 Yu와 Arnold[11]가 제안한 screw의 형태 중 stepped pitch와 tapered shaft를 적용한 screw를 설계, 제작하여 사용하였다.

연소실 내부의 온도를 측정하기 위해 R-type 열전대를 사용하였다. 온도 측정 시 복사열 손실에 의한 오차를 보정하기 위해 서로 다른 정점의 크기를 가지는 4개의 열전대로 온도를 측정 후 결과를 외삽하여 정점의 크기가 0일 경우의 온도를 구하였다.[12] 또한, catalytic heating에 의한 측정오차를 제거하기 위해서 R-type 열전대의 정점을 실리카( $\text{SiO}_2$ )로 코팅하였다. 본 연구에서는 조건에 따른 수소화염으로부터의 복사 열 유속(radiative heat flux)과 전체 열유속(total heat flux)의 변화를 측정해야 한다. 복사 열유속은 Vatel사의 TG-9000-9 복사열 유속계를 사용하여 측정하였다. 이 모델은 1960년대에 Gardon[13] 이 제안한 형태로 gardon type이라고 한다. 전체 열유속은 TG-1000-1 열 유속계를 사용하였다. 온도 데이터를 실시간으로 처리하기 위해 사용된 A/D converter는 IO-tech사의 분해능 32bit인 personal DAQ/56이다. Fig. 2에 실험장치의 구성을 도시하였다.

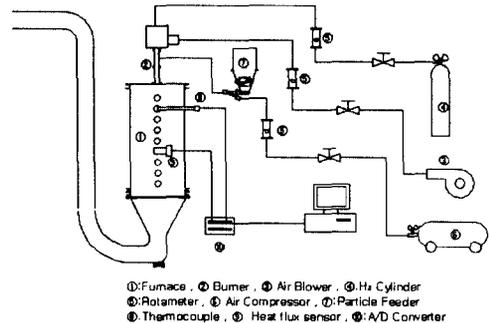


Fig. 2 Experimental Setup

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 화염의 형상 변화

##### 3.1.1 수소-공기 확산 화염

연소기를 연소로에 장착하지 않은 상태에서 선회수 (swirl number, S)나 과잉 공기비(excess air ratio,  $\Psi$ )의 변화에 따른 화염의 형상변화를 관찰 하였다. 연소기를 개방된 공기 중에 설치하여 연소시키면 공급관으로 공급되는 공기 이외에 주변 공기가 화염으로 끌려 들어와서 (entrainment) 실험조건보다 많은 공기량이 공급될 수 있으므로 연소기 주변에 석영관(quartz tube)을 설치하여 연소 시 주변 공기의 영향을 제거하였다. 그러나 석영관의 직경이 80mm에 불

과하고 길이 또한 500mm에 불과하여 연소로 내부의 상황을 정확히 재현할 수는 없으므로 사진에서 보이는 화염의 길이는 실제 연소로 내부에 존재하는 화염의 길이와 동일하지는 않다. 여러 조건에서 화염의 형상을 Fig. 3과 Fig. 4에 도시하였다. 사진에서 볼 수 있듯이 모든 경우에 화염의 휘도(luminosity)가 매우 낮다.

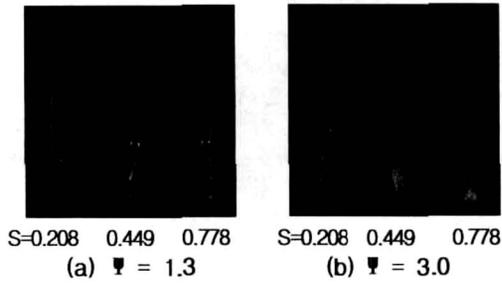


Fig. 3 Flame Structures on Swirl No.

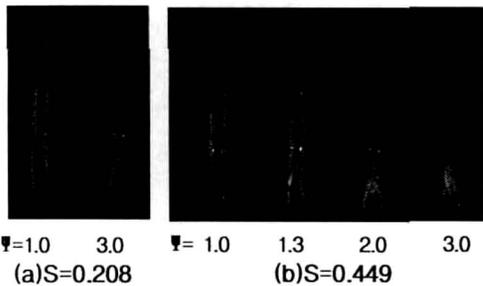
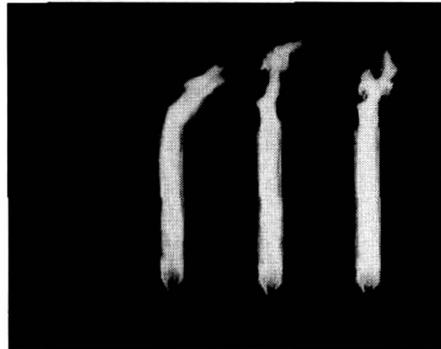


Fig. 4 Flame Structures on Excess Air Ratio

이는 연소 후 생성물에 고체 입자가 존재하지 않으므로 화염으로부터의 복사열전달(radiation)이 오직 non-luminous radiation이기 때문이다. Fig. 3을 보면 공기량이 일정할 경우 선회수가 증가함에 따라 화염이 짧아지고 넓어지는 것을 볼 수 있다. 이는 선회수가 증가하면 공기의 속도 성분 중 반경방향의 속도성분이 커져서 연료-공기의 연소 반응이 일어나는 화염면이 옆으로 퍼지며, 재순환 영역형성에 의한 연료-공기의 혼합이 증진되어 화염이 짧아지는 것으로 해석할 수 있다. Fig. 4를 보면 선회수가 일정할 때 공기량이 증가할수록 화염 후 영역(post flame zone)의 길이가 짧아지는 것을 볼 수 있다. 이는 공기량이 증가하면 연소반응에 참여하지 않은 잉여의 공기량이 증가하면서 화염의 온도를 낮추는 역할을 하여 생성물들이 가시광선 복사를 할 정도의 온도를 유지할 수 있는 영역이 줄어들기 때문이다.

### 3.1.2 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자를 첨가한 수소 확산 화염

앞 절의 결과에서 알 수 있듯이, 순수 수소-공기 확산화염은 전형적인 불휘염(non-luminous flame)으로 복사 강도가 매우 약하다. 연소로 내부에서의 주된 열전달 모드가 대류와 복사임을 감안하면 화염으로부터의 복사 열전달량이 작다는 것은 수소가 보일러 연료로서 매우 비효율적인 것이라는 것을 의미한다. 열복사의 변화를 정량적으로 측정하기에 앞서 산화 알루미늄 입자를 첨가 할 경우 화염의 휘도(luminosity) 변화를 정성적으로 관찰하였다. 연료와 공기의 공급량은 일정하게 두고 입자의 공급량을 증가 시켜가면서 화염의 휘도(luminosity) 변화를 관찰하였다. 화염 조건은 Table 1의 case 1이다. Fig. 5는 입자 공급량 변화에 따른 화염의 변화를 디지털 카메라로 촬영한 것이다. 사진에서 볼 수 있듯이 수소-공기 확산 화염(좌측)에 산화알루미늄(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 입자를 첨가하면 불휘염(non-luminous flame)인 수소화염이 휘염(luminous flame)으로 바뀌는 것



입자 공급량 : 0 100 300 800 (g/hr)  
Fig. 5 Flame Structures on Particle Supply

을 볼 수 있다. 입자를 첨가하지 않았을 때에는 화염의 반응 영역(reaction-zone)에서는 푸른색을 띄고, 화염 후 영역(post flame zone)에서는 붉은색을 띄었으나, 산화알루미늄 분말을 단계적으로 800g/hr까지 첨가하면 전체적인 화염의 색깔이 노란색으로 바뀐다. 이는 연소 반응으로 생성된 고온의 가스와 첨가된 고체 입자 사이의 에너지 교환이 일어나기 때문이다. 또한 입자의 공급량이 늘릴수록 화염의 휘도(luminosity)가 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이는 입자가 화염에 첨가된 양이 많을수록 기체상과 에너지를 교환하고 가시광선복사에 참여하는 입자의 number density가 증가하기 때문이다. 사진에서 화염이 상단에서

회는 모습이 보이는 것은 사진촬영을 위해 사용한 유리관 높이 이상으로 화염이 길어졌기 때문이다.

Table 1 Experimental Condition

	Case 1	Case 2	Case 3
S	0.449	0.208	0.449
$\Psi$	1.3	1.3	3.0

### 3.2 연소로 내부의 온도 분포

연소로 내부에 수소-공기 확산 화염을 생성시킨 후 화염 및 연소로 내부의 온도를 열전대를 이용하여 측정하였다. 실험조건은 Table 1의 case 1이다. Fig. 6에 동일한 조건에서 입자를 첨가 시키지 않은 경우와 산화알루미늄( $Al_2O_3$ ) 입자와 탄소(carbon) 입자를 첨가한 경우에 대하여 연소로 내부의 각각 다른 네 지점에서의 반경방향 온도 분포에 대한 실험결과를 나타내었다.

#### 3.2.1 수소-공기 확산 화염

연소기 근처영역에서는 화염면이 존재하는 전형적인 확산화염의 온도 분포가 보인다. 하류로 갈수록 온도분포가 균일해지고  $z=0.8m$  지점에서는 반경방향으로 온도 변화가 거의 없음을 알 수 있는데, 이는 연소 반응이 완전히 종료되어 생성물간의 혼합이 잘 되었기 때문이다.  $z=0.2m$  지점에서 반경방향으로 0.4m 지점에서 0.12m 지점까지의 온도 변화를 보면 온도가 감소했다가 다시 증가하는 경향성을 띠는데 이는 그 부근에 재순환 영역이 존재하기 때문이다.

#### 3.2.2 $Al_2O_3$ 입자를 첨가한 수소 화염

$Al_2O_3$  입자의 평균 직경은  $47.1\mu m$  이고 공급률은  $300g/hr$ 이다. Fig. 6을 보면 전 영역에 걸쳐 온도분포는 입자를 첨가하지 않은 화염과 동일한 변화 경향성을 보인다. 그러나 화염이 존재하는 상류의 고온 영역에서는 국부적으로 서로 다른 결과가 보이는데, 어떤 지점에서는 입자가 첨가 되었을 때의 온도가 더 높게 측정되었고, 다른 지점에서는 반대의 결과가 나왔다. 이는 화염에 입자가 첨가되면서 발생하는 실험오차라고 판단된다. 그러나 전반적으로 입자를 첨가한 경우 화염면의 내부라고 판단되는 고온의 상류 영역의 중심부에서는 온도가 높아지지만 고온 영역을 제외한 다른 영역에서는 입자를 첨가할 경우 그렇지 않은 경우보다 낮은 온도가 측정되었다.  $Al_2O_3$  입자는 연소 반응에 참여하지 않는 비활성 입자이므로 특별한 발열 반응을 하지는 않는다.

그러므로 기체장의 열이 입자로 전달되어 전체적인 기체장의 온도가 낮아지게 된다.

### 3.2.3 Carbon 입자를 첨가한 수소 화염

탄소 입자의 평균 직경은  $29.7\mu m$  이고 공급률은  $250g/hr$ 이다. Fig. 6을 보면 버너 출구에서 0.2m 하류 지점에서 입자를 첨가한 경우 온도가

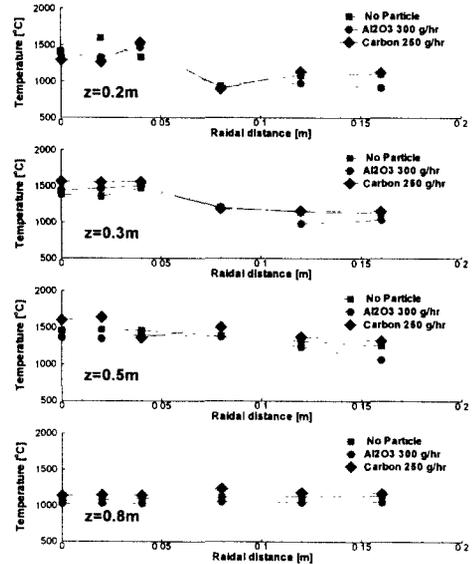


Fig. 6 Temperature in the Furnace

낮은데 이는 아직 연소 되지 않은 입자로 주변기체의 열이 전달되기 때문이다. 이러한 영역을 제외한 전 영역에서는 모두 탄소입자를 첨가한 경우의 온도가 그렇지 않은 경우보다 더 높다. 탄소입자는 연소로 내에서 연소 반응에 참여하므로 연소로 내부에서의 추가의 연소반응에 의해 발열량이 증가하고 따라서 내부 온도역시 상승하게 된다고 볼 수 있다.  $z=0.3m$  영역이나  $z=0.5m$  영역을 보면 고온 영역에서 입자의 첨가 유무에 따른 온도 차가 상대적으로 더 큰데, 이는 그 영역이 탄소의 연소반응이 일어나고 있는 화염 영역이기 때문이다.

### 3.3 벽면에서의 열속(Heat flux)

#### 3.3.1 수소-공기 확산 화염

실험조건은 Table 1과 같고 결과를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에서 case 1과 2를 비교하면 선회수의 변화가 복사 열유속에 미치는 영향을 고찰할 수 있고, case 1과 case 3을 비교하면 과

잉 공기량이 수소 화염으로부터의 복사 열전달에 미치는 영향을 고찰할 수 있다. 같은 공기량에서 선회수가 줄어들면 벽면에서의 복사 열유속이 감소함을 볼 수 있는데, 이는 선회 강도가 줄어들

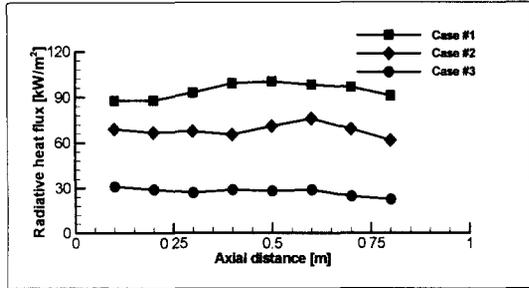


Fig. 7 Incident Heat Flux to the Wall

어 연료와 산화제간의 혼합특성이 나빠지고, 연소 강도가 약해져서 상류층의 중심부에 있는 화염 영역의 온도 수준이 떨어지기 때문에 복사 열유속 또한 감소하는 것이다. 또, 같은 선회수에서 과잉 공기량이 증가하면 벽면으로의 복사 열유속이 감소함을 볼 수 있는데, 이는 연소 반응에 참여하지 않는 공기의 양이 증가하여 연소로 내부의 화염 영역이 버너근처의 좁은 영역으로 한정되고, 과잉공기의 냉각 작용에 의해 온도 분포가 전체적으로 낮아지기 때문이다.

3.3.2 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자를 첨가한 수소 화염

Table 1의 case 1의 조건에 입자 공급률 300

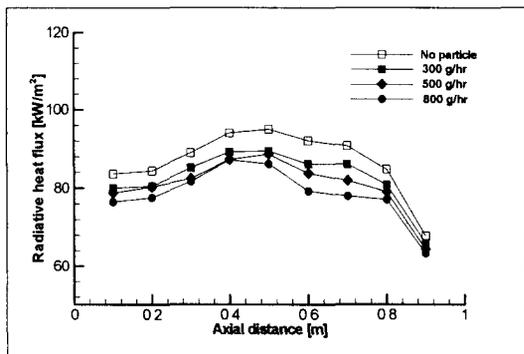


Fig. 8 Heat Flux Variation with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Addition

g/hr, 500g/hr, 800g/hr일 때의 벽면에서의 복사 열유속의 변화를 Fig. 8에 나타내었다. 결과에서 볼 수 있듯이 네 경우 모두 비슷한 변화의 경향

성을 보인다. 전체적으로 입자의 공급량이 증가할수록 벽면으로의 복사 열유속은 감소하는데, 이는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자가 불활성이므로 별도의 발열 반응 없이 수소 화염으로부터 에너지를 흡수하여 연소로 내부의 온도가 내려가고, 화염의 휘도는 증가하지만 입자의 number density가 너무 커서 화염으로부터의 복사열을 흡수하는 열차폐(heat

Table 2 Radiative Heat Flux Reduction by Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Addition (%)

공급량 위치	300 g/hr	500 g/hr	800 g/hr
0.1 m	-4.28	-5.83	-8.56
0.2 m	-4.66	-4.86	-8.13
0.3 m	-4.30	-7.34	-8.18
0.4 m	-5.14	-7.19	-7.32
0.5 m	-5.82	-6.70	-9.30
0.6 m	-6.43	-9.03	-13.96
0.7 m	-5.18	-9.73	-14.12
0.8 m	-4.64	-6.79	-9.08
0.9 m	-2.68	-4.98	-6.53
평균량	-4.79	-6.94	-9.46

blockage) 현상이 일어나기 때문이다. 각각의 위치에서의 변화량을 살펴보면 Table 2와 같다. 입자를 첨가하지 않은 경우를 기준으로 각각의 입자 공급량에서의 평균 감소량은 공급량 300 g/hr 일 경우 4.79%, 500 g/hr일 경우 6.94%, 800 g/hr일 경우 9.46%이다. 국부적인 변화를 살펴보면 모든 경우에 연소로 중간 영역에서의 변화량이 가장 크고, 연소로 출구영역에서 변화량이 가장 작은 것으로 나타났다. 이는 연소로 벽면에서의 복사 열유속의 크기와 관련이 있는데, 열복사가 강한 영역에서 고체입자의 영향이 상대적으로 열복사가 약한 영역인 연소로 출구 영역에서의 영향보다 크다. 즉, 열복사의 크기가 클수록 불활성입자의 첨가로 인한 열차폐효과(heat blockage effect)가 크다는 것을 알 수 있다. 그러나 입자의 공급량이 800g/hr인 경우에도 평균 변화량이 10% 미만인 것으로 미루어 산화알루미늄 입자의 첨가가 수소-공기 확산화염으로부터의 복사 열유속(thermal radiation)에 미치는 영향은 크지 않은 것을 알 수 있다.

3.3.3 탄소 입자를 첨가한 수소 화염

불활성인 산화알루미늄 입자와는 달리 연소로 내부에서 연소 반응을 일으키는 탄소입자가 수소 공기 확산화염에 첨가되어 화염으로부터의 열전달량에 미치는 영향을 알아보기 위하여 앞 결과

동일한 화염 조건에서 입자의 공급량을 변화시켜 가며 연소로 벽면에서의 복사 열유속 및 전체 열유속을 측정하였다. 연소로 내의 화염에 탄소 입자가 첨가되면 탄소의 연소반응에 의해 연소로의 발열량이 증가하게 된다. 본 실험에서 적용된 탄소입자의 공급률은 150 g/hr, 250 g/hr 그리고 350 g/hr의 세 경우이다. 탄소 입자의 단위 질량당 발열량이 7830 cal/g이므로 입자를 첨가하지 않은 수소-공기 확산화염의 발열량을 기준으로

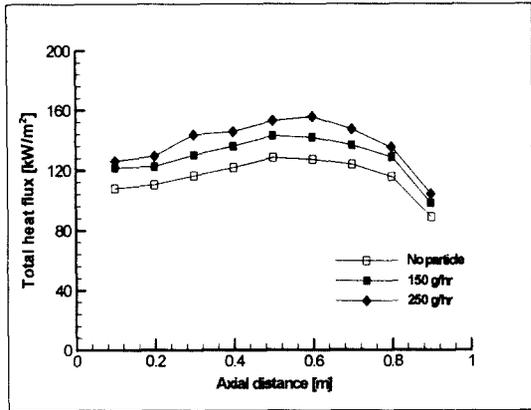


Fig. 9 Total Heat Flux Variation with Carbon Particle Addition

할 때 세 경우의 탄소 입자 첨가에 의한 발열량 증가율은 각각 11.7%, 19.6% 그리고 27.4%이다. Fig. 9는 입자 공급량 변화에 따른 연소로 벽면에서의 전체 열유속의 변화이다. 결과에서 보듯이 전체적인 변화의 경향성은 모든 경우에서 비슷하고, 탄소입자의 공급량이 증가할수록 연소로 벽면으로 들어오는 전체 열유속은 증가한다. 이는 탄소입자의 연소에 의한 전체 발열량의 증가와 연소 후 생성물의 성분변화에 기인한다. 즉, 추가의 연소반응에 의해 발열량이 증가하여 내부 연소 가스의 온도가 상승하고, 탄소입자의 연소 후 생성물인 이산화탄소와 매연입자(soot particle)이 생성되기 때문이다. 공급량 변화에 따른 전체 열유속의 변화를 정량적으로 고찰하기 위하여 Table 3에 입자를 공급하지 않은 경우를 기준으로 입자 공급량에 따른 전체 열유속의 증가율을 나타내었다. 전체적으로 일정한 입자 공급량에서는 비교적 균일한 증가율의 분포를 보인다. 입자 공급량에 대한 전체 열유속의 평균 증가율은 공급률 150 g/hr일 경우 11.0%이고 250 g/hr일 경우 19.1%인데, 이러한 heat flux의 증가율은 탄소 입자 첨가로 인한 발열량의 증가율과 비슷한 크기임을 알 수 있다.

본 연구에서는 연소로 벽면에서의 전체 열유속 외에 입자 공급률 변화에 따른 연소로 벽면에서

Table 3 Total Heat Flux Increase with Addition of Carbon Particle (%)

공급량 위치	150 g/hr	250 g/hr
0.1 m	10.0	16.8
0.2 m	10.9	17.2
0.3 m	11.9	23.4
0.4 m	11.7	19.6
0.5 m	11.3	19.1
0.6 m	11.6	22.5
0.7 m	10.4	18.9
0.8 m	11.2	16.8
0.9 m	10.4	17.3
평균량	11.0	19.1

의 복사 열유속을 측정하였다. 연소로 내부에서 열전달이 대류 열전달과 복사 열전달에 의해 이루어지므로 측정된 전체 열유속에서 복사 열유속을 빼면 그 지점에서의 대류 열유속 또한 구할 수 있다. 이렇게 측정된 복사 열유속과 대류 열유속을 Fig. 10에 도시하였다. 복사 열유속의 변화를 보면, 전체적으로 앞의 산화알루미늄 입자를 첨가한 경우와 같이 버너 출구부터 점점 증가

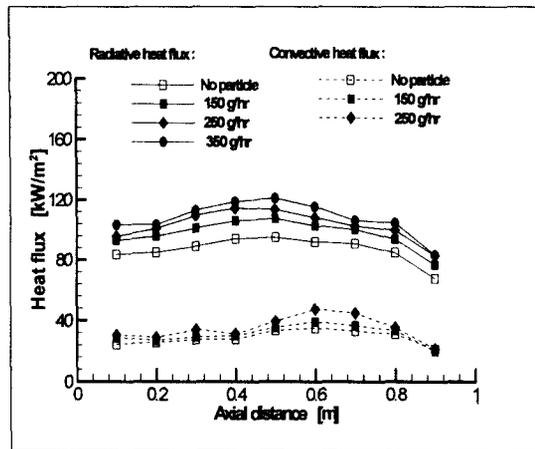


Fig. 10 Radiative and Convective Heat Flux Variation with Carbon Particle Addition

하다가 0.5m 부근영역에서 최고 값을 가지고 감소하여 연소로 출구 영역에서 최소 값을 가지는 비슷한 변화 경향성을 보인다. 그러나 입자 공급량이 증가할수록 산화알루미늄 입자의 영향과는 반대로 복사가 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 탄소 입자 연소 시에 생성되는 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)에 의한 non-luminous thermal radiation과 soot

particle에 의한 luminous thermal radiation에 의해 전체적으로 열복사가 강해지기 때문이다. 입자의 공급량이 증가할수록 복사 열유속이 증가하는 것도 탄소의 연소반응 후 생성물인 이산화탄

변화를 살펴보면 상대적으로 열복사량의 증가율이 큰 영역이 연소로 상류에 있음을 알 수 있다. 이는 화염의 위치와 관계가 있는데, 노란색의 화염이 존재하는 상류 영역에서는 매연입자(soot

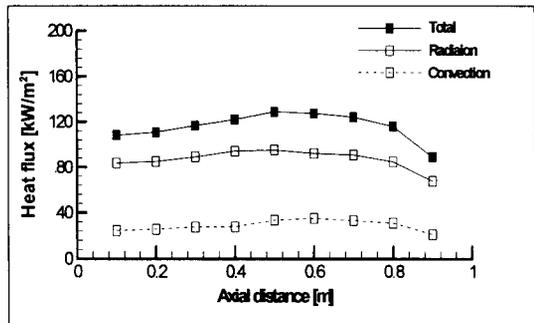
**Table 4 Radiative Heat Flux Increase with Addition of Carbon Particle (%)**

공급량 위치	150 g/hr	250 g/hr	350 g/hr
0.1 m	11.1	14.3	23.8
0.2 m	12.6	18.6	21.9
0.3 m	13.7	23.3	27.0
0.4 m	12.7	21.7	26.3
0.5 m	13.2	19.6	27.6
0.6 m	11.6	17.6	25.5
0.7 m	10.4	16.3	17.1
0.8 m	10.7	17.7	23.5
0.9 m	13.4	22.3	22.9
평균량	12.2	19.1	24.0

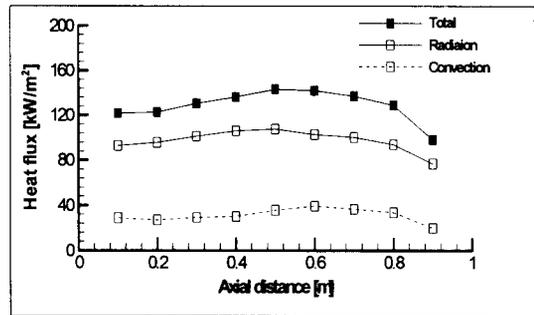
소와 매연입자(soot particle)의 양이 증가하여 그들에 의한 열복사량 또한 증가하기 때문이다. 각각의 위치에서의 입자 공급량 변화에 따른 복사 열유속의 증가율을 살펴보면 Table 4와 같다. 입자를 첨가하지 않은 경우를 기준으로 각각의 입자 공급량에서의 복사 열유속의 평균 증가율은 공급량 150 g/hr일 경우 12.2%, 250 g/hr일 경우 19.1%, 350g/hr일 경우 24.0%이다. 그러므로 산화알루미늄 입자의 첨가에 따른 변화량과 비교해 볼 때 비교적 큰 값으로, 탄소입자의 첨가는 수소-공기 확산 화염으로부터의 복사 열전달에 비교적 큰 영향을 미친다고 볼 수 있다. 국부적인

**Table 5 Convective Heat Flux Increase with Addition of Carbon Particle (%)**

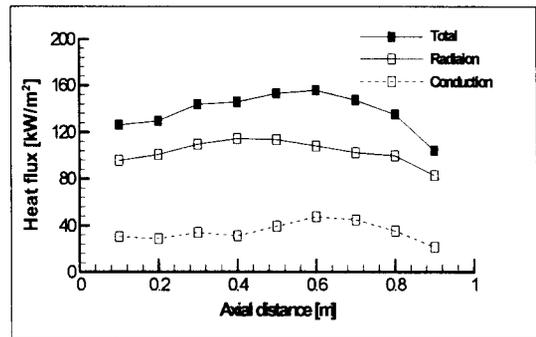
공급량 위치	150 g/hr	250 g/hr
0.1 m	6.0	25.1
0.2 m	5.3	12.5
0.3 m	6.0	23.8
0.4 m	8.2	12.7
0.5 m	5.8	17.6
0.6 m	11.5	35.2
0.7 m	10.2	25.8
0.8 m	12.7	14.1
0.9 m	0.8	1.4
평균량	7.4	18.7



(a) No Particle



(b) 150 g/hr



(c) 250 g/hr

**Fig. 11 Total, Radiative, and Convective Heat Flux at Wall**

particle)에 의한 luminous thermal radiation이 강해지기 때문에 입자 첨가에 의한 열복사의 증가량 또한 큰 것이다. 또한 Fig. 10을 보면 입자 공급량이 증가할수록 대류 열유속 역시 증가하는데, 이는 탄소입자의 공급량이 증가할수록 전체

발열량이 증가하여 연소로 내부의 온도가 증가하기 때문이다. 일정한 입자 공급량에서 대류 열유속의 변화 경향성은 복사 열유속의 그것과 비슷하나 열유속이 최대가 되는 영역이 복사 열전달이 최대가 되는 영역보다 약간 하류에 위치하는 차이점이 있다. Table 5에 입자 공급량 변화에 따른 연소로 벽면에서의 대류 열유속의 증가율을 나타내었다. 대류 열유속의 평균 증가율은 입자 공급율 150 g/hr일 경우 7.4%, 250 g/hr일 경우 18.7%이다. 그러나 복사 열유속과 절대적인 양을 비교해 보면 그 크기가 매우 작다. 열전달 중 복사 열전달과 대류 열전달이 차지하는 비중을 고찰하기 위해 Fig. 11에 일정한 입자 공급률에서 전체 열유속, 복사 열유속 및 대류 열유속을 같이 도시하였고, Table 6에 그 비중을 정량적으로 나타내었다. 전체 열유속 중에서 복사 열유속이 차지하는 비중은 평균적으로 탄소 입자를 첨가하지 않은 경우 75.2%, 입자 공급률 150 g/hr일 경우 76.0%, 250 g/hr일 경우 75.2%로 세가지 경우

에 비슷한 결과를 보였다. 또 모든 경우에 전체 열유속중 70%이상이 복사 열유속임을 알 수 있다. 이는 연소로 내부의 열전달중에 대부분이 열복사에 의해 전달된다는 것을 의미한다. 또한 탄소 입자 첨가에 의한 전체 열전달량의 증가 중에 복사 열전달과 대류 열전달이 차지하는 비중을 고찰하기 위해 Table 7에 입자를 첨가하지 않은 수소화염으로부터의 전체 열유속을 기준으로 하여 입자 공급량 증가에 따른 복사 열유속과 대류 열유속의 증가율을 나타내었다. 결과에서 볼 수 있듯이 전체 열유속의 증가율 중에서 복사 열유속의 증가율이 차지하는 비중이 대류 열유속의 증가율보다 훨씬 더 크다. 이로써, 탄소입자의 첨가로 인한 수소-공기 확산화염으로부터의 열전달의 증가는 발열량증가에 의해 내부온도가 상승한 상태에서 이산화탄소나 매연 입자(soot particle)등의 증가로 인한 열복사의 증가에 대부분 기인한다고 볼 수 있다.

Table 6 Radiative and Convective Heat Flux Ratio in Total Heat Flux (%)

공급량 위치	No Particle		150 g/hr		250 g/hr	
	Radiation	Convection	Radiation	Convection	Radiation	Convection
0.1 m	77.4	22.6	78.2	21.8	75.8	24.2
0.2 m	76.8	23.2	78.0	22.0	77.8	22.2
0.3 m	76.4	23.6	77.6	22.4	76.3	23.7
0.4 m	77.2	22.8	77.9	22.1	78.5	21.5
0.5 m	73.9	26.1	75.2	24.8	74.2	25.8
0.6 m	72.4	27.6	72.4	27.6	71.7	28.3
0.7 m	73.2	26.8	73.3	26.7	69.5	30.5
0.8 m	73.2	26.8	72.8	27.2	73.8	26.2
0.9 m	76.2	23.8	78.2	21.8	79.4	20.6
평균	75.2	24.8	76.0	24.0	75.2	24.8

Table 7 Radiative and Convective Heat Flux Increase Ratio in Total Heat Flux Increase Ratio with Addition of Carbon Particle (%)

공급량 위치	150 g/hr			250 g/hr		
	Radiation	Convection	Total	Radiation	Convection	Total
0.1 m	8.6	1.4	10.0	11.1	5.7	16.8
0.2 m	9.7	1.2	10.9	14.3	2.9	17.2
0.3 m	10.5	1.4	11.9	17.8	5.6	23.4
0.4 m	9.8	1.9	11.7	16.7	2.9	19.6
0.5 m	9.8	1.5	11.3	14.5	4.6	19.1
0.6 m	8.4	3.2	11.6	12.7	9.7	22.5
0.7 m	7.6	2.7	10.4	12.0	6.9	18.9
0.8 m	7.8	3.4	11.2	13.0	3.8	16.8
0.9 m	10.2	0.2	10.4	17.0	0.3	17.3
평균	9.1	1.9	11.0	14.3	4.7	19.0

#### 4. 결론

1. 수소-공기 확산 화염에서 선회 강도(swirl intensity)가 증가하면 가시 화염 길이가 짧아지고, 연소로 벽면에서의 복사 열유속이 증가한다.
2. 연료 공급량이 일정한 상태에서 과잉 공기(excess air)의 양이 증가하면 전체적으로 연소로 내부의 온도가 내려가고, 가시 화염 길이가 짧아진다. 또한, 연소로 벽면에서의 복사 열유속은 감소한다.
3. 수소-공기 확산 화염에  $Al_2O_3$  입자를 첨가시키면 고체입자와 주변의 고온 가스 사이의 에너지 전달에 의해 화염이 밝은 오렌지색으로 변한다. 또한 입자의 공급량을 늘릴수록 화염의 휘도(luminosity)는 증가한다. 그러나 전체적으로 연소로 내부의 온도가 내려가고 연소로 벽면으로의 열복사(thermal radiation)를 흡수하는 열차폐(heat blockage) 현상으로 인해 복사 열유속이 감소한다. 이러한 열차폐(heat blockage)는 입자의 공급량이 증가할수록 강해져서 입자 공급량이 증가 할수록 벽면에서의 복사 열유속이 감소하는 결과를 가져온다. 그러나  $Al_2O_3$  입자가 수소-공기 확산 화염으로부터의 복사 열전달에 미치는 영향은 크지 않다.
4. 수소-공기 확산 화염에 탄소 입자를 첨가하면 연소로 내부에서 탄소 입자에 의한 추가의 연소 반응이 일어나므로 전체 발열량이 증가하고 따라서 연소로 내부의 온도가 전체적으로 상승한다. 또한, 탄소입자의 연소 후 생성물인 이산화탄소와 매연입자(soot particle)등에 의한 추가의 열복사로 인하여 연소로 벽면으로의 열전달 또한 증가하며 그 영향은  $Al_2O_3$  입자보다 상대적으로 크다.
5. 수소-공기 확산화염으로부터 연소로 벽면으로의 전체 열전달 중 약75%는 복사 열전달에 의해 일어나고 나머지 25%는 대류 열전달에 의해 일어나는데, 이러한 복사와 대류의 비중은 탄소 입자를 첨가한 화염의 경우에도 비슷한 수준이다. 입자의 공급량을 증가시킬수록 벽면으로의 열전달량 또한 증가하는데, 복사 열전달의 증가가 큰 비중을 차지한다.
6. 연소로 벽면에서의 복사 열유속의 분포와 대류 열유속의 분포를 보면, 대류 열유속이 최대가 되는 지점은 복사 열유속이 최대가 되는 지점보다 약간 하류에 위치한다.

#### 후 기

본 연구는 CERC(연소기술연구센터)의 지원으로 수행하였으며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- [1] Suzuki, Y., "On Hydrogen as Fuel Gas," *Int. J. hydrogen Energy*, Vol. 7, No. 3, 1982, pp. 227~230.
- [2] Nicoletti, G., "The Hydrogen Option for Energy: A Review of Technical, Environmental and Economics Aspects," *Int. J. hydrogen Energy*, Vol. 20, No. 10, 1995, pp. 759~765.
- [3] Vranos, A., Taback, E. D., and Shipman, C. W., "An Experimental Study of the Stability of Hydrogen-Air Diffusion Flames," *Combust. Sci. and Tech.*, Vol 12, 1995, pp. 253~260.
- [4] Koroll, G. W., Kumar, R. K., and Bowels, E. M., "Burning Velocities of Hydrogen-Air Mixtures," *Combustion and Flame*, Vol. 94, 1993, pp. 330~340.
- [5] Hunty, W. P., and Lee, G. K., "Improved Radiative heat Transfer from Hydrogen Flames," *Int. J. hydrogen Energy*, Vol. 16, No. 1, 1991, pp. 47~53.
- [6] Steward, F. R., and Guruz, K. H., "The Effect of Solid Particles on Radiation Transfer in a Cylindrical Test Furnace," *15th Symposium (International) on Combustion*, 1974, pp. 1271~1283.
- [7] Choudhuri, A. R., and Gollahalli, S. R., "Combustion Characteristics of Hydrogen-Hydrocarbon Hybrid Fuels," *Int. J. hydrogen Energy*, Vol. 25, 2000, pp. 451~462.
- [8] Butler, B. W., Denison, M. K., and Webb, B. W., "Radiation Heat Transfer in a Laboratory-Scale, Pulverized Coal-Fired Reactor," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 9, 1994, pp.69~79.
- [9] Modest, M. F., "Radiative Heat Transfer," McGraw-Hill, Inc., 1993.
- [10] Gupta, A. K., Lilley, D. G., and Syred, N., "Swirl Flows," ABACUS PRESS, OHU, 1984.
- [11] Yu, Y., and Arnold, P. C., "The Influence of Screw Feeders on Bin Flow Patterns," *Powder Technology*, Vol. 88, 1996, pp. 81~87.
- [12] Ahn. K. Y., "A Study on the Ignition and

Combustion of Coal-Water Slurry Droplet,"  
Ph.D. Thesis, Korea Advanced Institute of  
Science and Technology, Taejon, Korea, in  
Korean, 1994.

[13] Gardon, R., "A Transducer for the  
Measurement of Heat Flow Rate," *Journal of  
Heat Transfer*, Vol. 82, 1960, pp. 396~398.