

초단열 연소현상을 이용한 산업용 건조기 개발에 관한 연구

채재우*, 황재원*, 한정희*, 황화자*, 전정규*
 한정옥**, 이중성**, 유현석**, 이현찬**

A Study on the Development of Industrial Dryer using the Superadiabatic Combustion Phenomena

J.O.Chae, J.W.Hwang, J.H.Han, H.J.Hwang, J.K.Jun
 J.O.Han, J.S.Lee, H.S.You, H.C.Lee,

Key Words: Superadiabatic combustion, Radiation heat flux, Porous media

Abstract

This paper illustrates the validity of reciprocating type superadiabatic combustor as a industrial applicable dryer. After the investigations of inner and surface temperature distributions of combustor various with air-fuel(methane) ratio, mixture flow rate and reciprocating time, this combustor can be applied in industrial dryer at certain operating conditions. The results are as follows. 1) Higher equivalence ratio emits more radiation heat flux at the center chamber 2) Higher mixture flow rate makes more uniform temperature distribution. however, due to the heat transfer from center chamber to porous media, the radiation heat flux is worse. 3) Longer reciprocating time emit more radiation heat flux. however, this case also makes temperature distribution wide

1. 서론

기호설명

- T_g : 중앙 챔버내의 가스 온도
- T_s : 연소기 내부 벽면 온도
- k_g : 연소가스의 열 전도도
- k_s : 연소기 벽면의 열 전도도
- ρ_g : 생성가스의 밀도
- c_g : 생성가스의 비열
- h_w : 생성가스와 벽면간의 열대류 계수
- T_w : 연소기 외부 벽면의 온도
- σ : Stephan-Boltzmann 상수
- ϵ : 방열 표면의 emissivity
- k_{ins} : 단열재의 열전도도
- h_{ins} : 단열재의 두께
- T_i : 단열재의 표면온도
- S_{ins} : 단열재로 둘러싸인 벽면의 면적

건조는 열풍, 고온 등을 이용하여 생산품 또는 폐기물 등의 수분을 제거하거나 부피를 감소시키는 공정으로서 거의 모든 산업생산과정에서 사용되고 있으며, 특히 최근에는 환경문제에 대한 인식이 고조되어 폐기물의 재활용을 위한 건조공정이 늘어나면서 관련 건조기의 수요도 계속 급증하고 있는 추세에 있다. 건조방식은 크게 열원의 전달방식인 대류, 전도 및 복사와 건조기내에서의 열풍흐름방식인 향류, 병류, 혼합류 등으로 구분할 수 있으며 이중 대류방식의 열풍공정이 건조방식의 대부분을 차지하고 있다. 또한 국내 건조기의 열원을 분류해보면 증기, 전기, 경유, 중유 순으로 가스사용율은 매우 미비하다. 따라서 건조공정은 그 특성상 다량에너지 소비형 공정이므로 건조공정에서의 에너지 효율성 제고를 위해 고효율, 저공해의 건조기 개발이 요구되고 있다¹⁾. 그러나 우리의 건조기 기술수준은 선진국에 비해 50%정도에 그치는 열악한 수준이며 생산업체의 영세성으로 설계도면을 비롯한 핵심기술 및 주요부품 등은 주로 일본, 독일 등 선진국에 의

* 인하대학교 기계공학과
 ** 한국가스공사

존하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 가스사용에 따라 배기가스의 배출을 줄이면서 강한 복사열을 이용한 건조공정에 현재 여러 가지 용도에 사용되고 있는 초단열연소²⁾³⁾(super adiabatic combustion)의 적용 타당성을 검토하고자 열유동의 해석과 파일럿스케일 수준의 시험용 연소기를 제작하여 일련의 연구를 수행하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 왕복식 연소기

일반적으로 가스를 이용한 건조기에는 주로 피 건조물에 직접가열하는 방식을 주로 사용하고 있으나 본 연구에서는 초단열연소현상을 이용한 간접가열방식으로 연소기 중심부에서 나오는 복사열을 이용하고자 한다. 왕복식 연소기의 작동원리와 연소기 내부 및 표면의 온도분포는 Fig. 1과 같다.

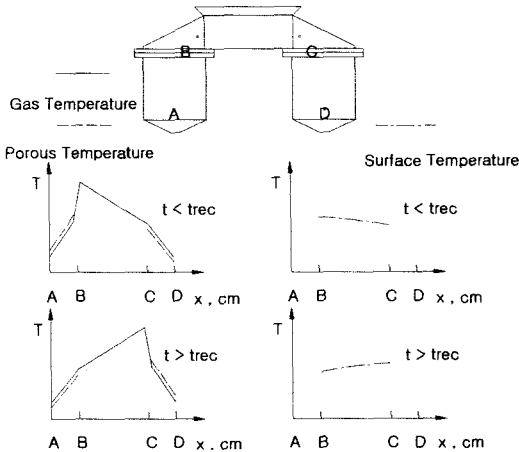


Fig. 1 The inside and surface temperature distribution of reciprocating combustor

기초 실험결과 혼합기가 이론당량비에 접근할 경우 B와C지점에서 연료가 반응하기 시작하여 중심부에 비해 양단부의 온도가 높은 경향을 나타내며 왕복주기가 증가됨에 따라 확장되는 경향을 볼 수 있었다. 이때의 연소기 표면 온도분포는 우측그림과 같으며 연소기 내부온도와 유사한 경향을 나타내었다. 회복한 조건에서는 연소의 반응개시가 중심부에서 이루어지므로 연소기의 내부 및 표면 온도분포는 중심부에서 최고온도를

갖는 경향을 나타내었다. 이러한 일반적인 경향을 바탕으로, 초단열 연소현상을 이용한 왕복식 연소기를 사용할 경우 피건조물의 특성에 따라서 연료공기비의 유입조건과 왕복주기의 설정을 다양화 할 수 있는 장점이 있는 것을 알 수 있었다.

2.2 연소현상의 해석

건조기의 성능을 파악하기 위하여 건조기용 연소기 중앙챔버의 내부의 구조를 Fig. 2와 같이 나타내었다.

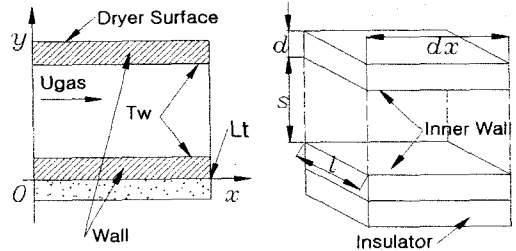


Fig.2 The inner structure of dryer

먼저 중앙 챔버내에서의 반응가스에 대한 열전달은 열확산 지배방정식을 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$c_g \rho_g U_g \frac{\partial T_g}{\partial x} = k_g \left(\frac{\partial^2 T_g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_g}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

식(1)에서 벽면과의 열전달 현상은 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$-k_g \frac{\partial T_g}{\partial y} = h_w (T_g - T_w) \quad (2)$$

$$T_g(x=0) = T_{max} , \quad \frac{\partial T_g}{\partial x} \Big|_{(x=L)} = 0 \quad (3)$$

연소기 표면에서의 열전달은 식(1)의 가스온도항을 이용하며 내부벽면의 온도와 열복사의 지배방정식을 이용하여 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$k_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + h_w \frac{1}{d} (T_g - T_w) - \epsilon \sigma \frac{1}{d} T_w^4 = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial x} \Big|_{(x=0)} = 0 , \quad \frac{\partial T_s}{\partial x} \Big|_{(x=L)} = 0 \quad (5)$$

연소기 표면으로부터의 피건조물로 복사되는 heat flux를 예측하기 위한 방정식은 다음과 같다.

$$q_{rad} = \epsilon \sigma T_s^4 \quad (6)$$

여기에 손실되는 열의 양은 다음의 식을 통해 나타낼 수 있다.

$$Q_{los} = k_{ins} \frac{T_g - T_i}{h_{ins}} S_{ins} \quad (7)$$

이와 같이 소요되는 복사열을 갖기 위해서는 적절한 당량비의 선택이 중요하며 이에 따라 연소반응에 따른 엔탈피의 차를 이용하여 당량비에 따른 발열량의 관계를 성립하였다. 열전달의 해석을 위해 유동속도를 분석해야 한다. 이때 Re수는 100~1000을 나타내며 이는 연소기내의 흐름은 층류에 가까움을 의미한다. 또한 Nu수는 4~5로서 건조물로의 열전달을 다음과 같이 예측할 수 있다.

$$q_{rad} = \frac{Nu k_g}{h} (T_g - T_0) = \epsilon \sigma T_s^4 \quad (8)$$

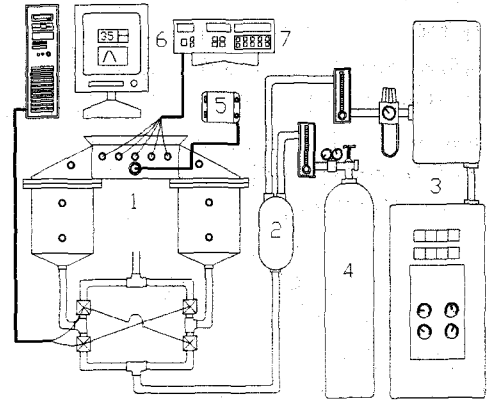
따 건조물을 건조시키면서 손실되는 온도의 예측에 대해 다음의 방정식을 통해 예측하였다.

$$\Delta T = \frac{N k_g}{m c_p} \frac{dL}{h} (T_g - T_s) \quad (9)$$

ΔT 가 증가함에 따라 복사열의 이용효율은 높음을 의미한다. 그러나 이 경우 전체 발생열량은 감소하게 된다. 마지막으로 연소기내로 혼합가스의 공급에 있어 양단부의 다공성 물질로 인한 압력손실이 고려되어야 한다.

3. 실험 및 결과

Fig. 3에 본연구에서 사용한 실험장치의 개략도를 나타내었다. 실험에서 가스와 공기와 의 원활한 혼합을 위해서 mixing chamber를 설치하였으며 왕복유로의 가변을 위해 솔레노이드 밸브를 4개 설치하여 일정한 주기로 PC에서 제어하도록 하였다. 초기 작동시 혼합기의 점화를 위해 연소기 중심부에 igniter를 설치하였다. 또한 초단열 연소현상을 이용하기 위해 중심부분을 제외한 모든 연소기내부에 다공성물질(Al_2O_3)을 채웠다. Fig. 4에 건조기에 설치된 열전대의 위치를 나타내었다. 내부온도를 측정하기 위해 11개의 열전대를 임의의 간격으로 설치하였고, 표면온도를 측정하기 위하여 9개의 열전대를 각각 설치하였다. 열전대로부터 측정된 온도는 thermometer에 연결하여 표면과 내부 온도분포의 특성을 파악하였고 이에 따른 중심부의 복사 발열량을 계산하였다.



1. Combustor
2. Mixing chamber
3. Air compressor
4. Gas
5. Igniter
6. PC
7. Thermometer

Fig. 3 Schematic diagram of experiment apparatus

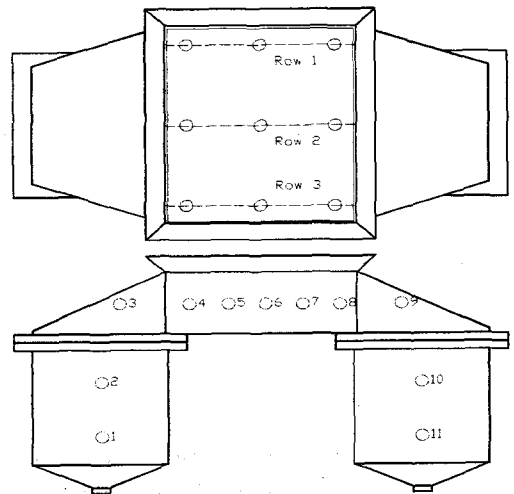


Fig. 4 The location of thermocouples

공기 및 가스의 유량은 면적식 유량계로 조절하였으며 압축기로부터 공급된 공기는 서지탱크와 레귤레이터를 이용하여 맥동을 최소화하였다. 실험조건은 공기 및 연료와 왕복주기를 9개의 조건으로 나누어 실험하였다. 공기의 유량은 120, 150l/min의 조건으로 실험하였으며 이에 따른 가스의 유입량은 당량비 0.6~0.9 내에서 각각 3가지의 조건으로 나누었다. 왕복주기는 15초와 30초의 경우로 나누어 실험하였다.

3 실험 결과 및 고찰

Fig. 5~12는 혼합기의 유량이 120l/min일 때 당량비와 유로주기를 변화가면서 연소기 내부와 외부의 온도를 측정된 것이다. 전체적으로 중앙 챔버에서 고온영역이 형성되어 피건조물로 복사열이 전달되는 것을 볼 수 있으며 당량비의 상승에 따라 내부온도의 상승을 확인할 수 있었다. 연소기의 중앙 챔버로부터 양단부로 벗어남에 따라 내부온도는 하강하였다가 양단부의 다공성물질 경계면에서 다시 증가하는 것을 볼 수 있는데 이는 연료의 반응에 따른 발생열이 양쪽 다공성물질의 경계면에 축적되고 있다고 판단되었으며 유로의 변경에 따른 공기의 가열 및 냉각 효과로 인해 좌,우측의 온도 편차가 발생하고 있음을 알 수 있었다. 표면 온도분포에서는 양단부의 열이 높은 것으로 나타났는데 이는 중심부에서는 화염에 의한 발생열이 일시적인 반면, 양측에서는 다공성 물질과 단열재에 의해 열이 축적되어 전달되기 때문에 높게 나타나는 것으로 사료된다. 또한 유로의 방향이 바뀌면서 온도를 측정된 결과 Fig. 1에서 설명한 바와 같이 일시적으로 B와 C 지점에서 내부온도가 상승한 것으로 나타났다. 전체적으로 볼 때 유로의 왕복주기가 30sec이고 혼합가스의 당량비가 높을 때 중앙챔버 부분의 복사열량이 우수한 것으로 측정되었다.

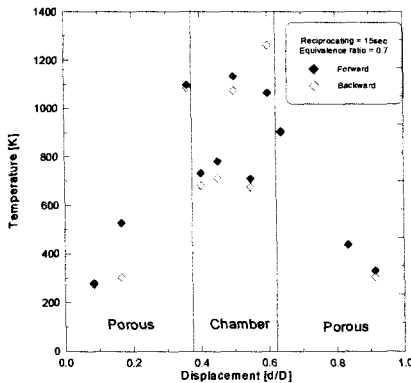


Fig. 5 Temperature distribution of inner combustor (120l/min, $\phi = 0.7$, R.T.=15sec)

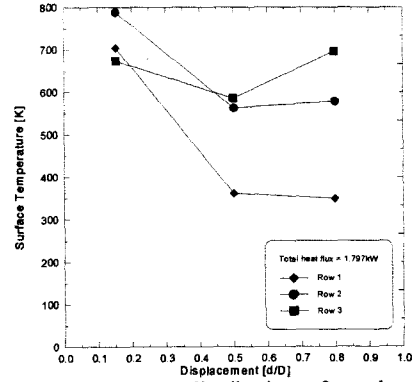


Fig. 6 Temperature distribution of combustor surface (120l/min, $\phi = 0.7$, R.T.=15sec)

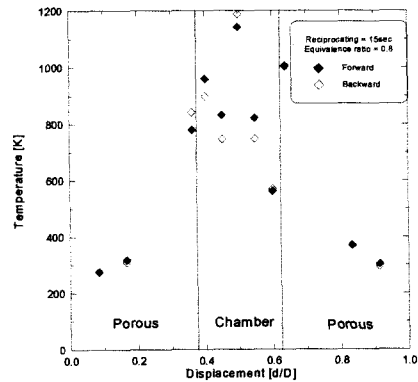


Fig. 7 Temperature distribution of inner combustor (120l/min, $\phi = 0.8$, R.T.=15sec)

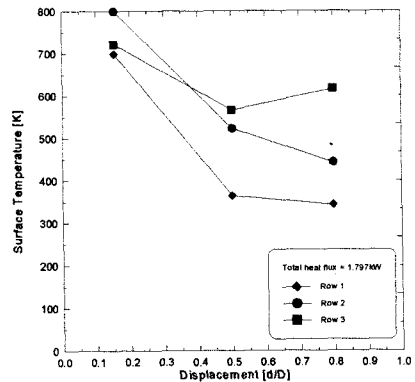


Fig. 8 Temperature distribution of combustor surface (120l/min, $\phi = 0.8$, R.T.=15sec)

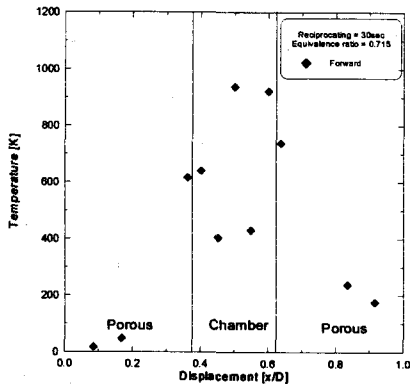


Fig. 9 Temperature distribution of inner combustor (120l/min, $\Phi = 0.715$, R.T.=30sec)

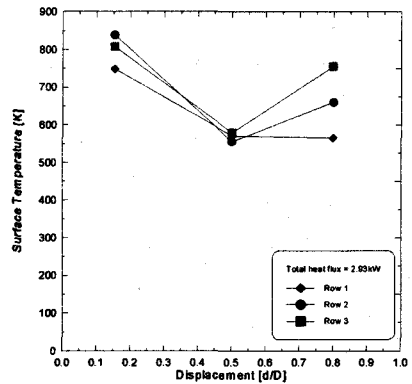


Fig. 12 Temperature distribution of combustor surface (120l/min, $\Phi = 0.874$, R.T.=30sec)

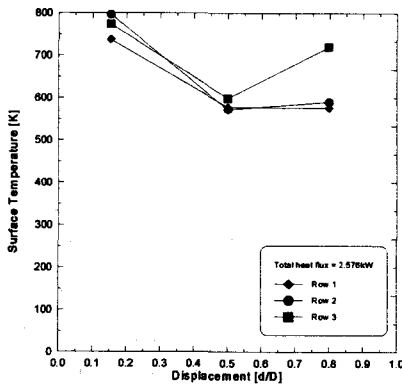


Fig. 10 Temperature distribution of combustor surface (120l/min, $\Phi = 0.715$, R.T.=30sec)

Fig. 13~20는 혼합기의 유량이 150l/min일 때 당량비와 유로주기의 변화에 따른 연소기 내부 및 외부의 온도분포를 나타낸 것이다. 상대적으로 120l/min일 때에 비해 화염영역이 양단부로 확장되었음을 보여주었으며 온도분포가 유량이 적을 때보다 균일하게 나타났고 또한 전체적으로 당량비의 상승에 따른 내부 및 표면의 온도의 상승효과도 파악할 수 있었다. 그러나 상대적으로 중앙 챔버 발열부만의 발열량은 다소 낮은 것으로 나타났다. 이는 유량의 증가에 따라 화염 영역이 중앙 챔버를 넘어서 양측 다공성 물질의 일부 공간까지 확장되었기 때문인 것으로 판단되었다. 이로써 보다 적절한 유량의 선택이 중요함을 알 수 있었다.

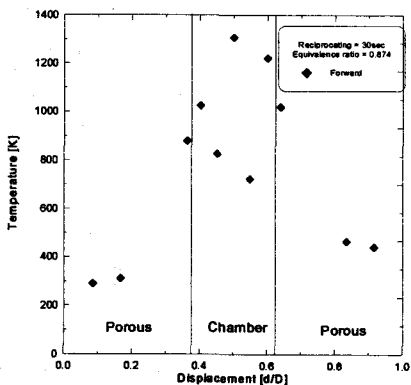


Fig. 11 Temperature distribution of inner combustor (120l/min, $\Phi = 0.874$, R.T.=30sec)

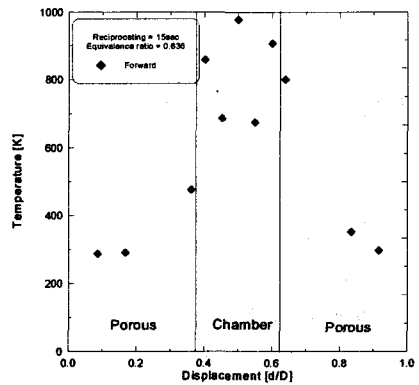


Fig. 13 Temperature distribution of inner combustor (150l/min, $\Phi = 0.638$, R.T.=15sec)

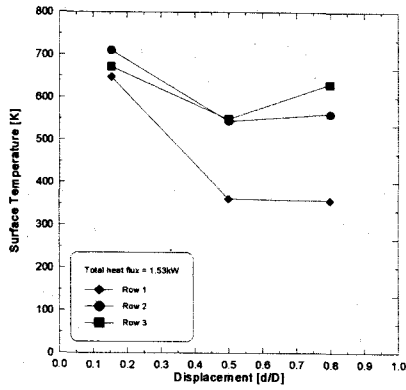


Fig. 14 Temperature distribution of combustor surface (150l/min, $\Phi = 0.638$, R.T.=15sec)

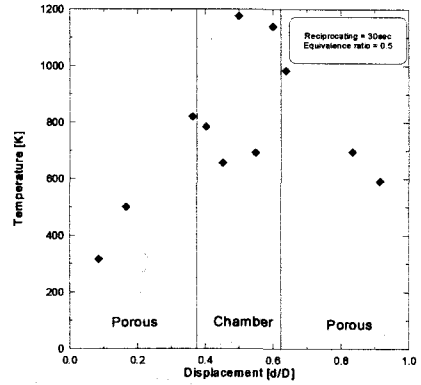


Fig. 17 Temperature distribution of inner combustor (150l/min, $\Phi = 0.5$, R.T.=30sec)

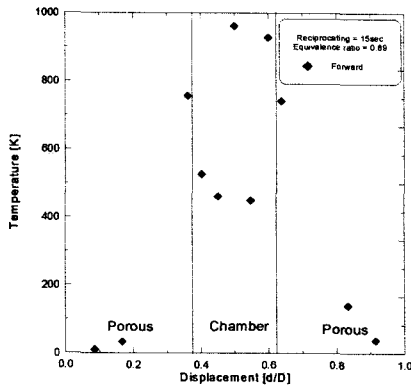


Fig. 15 Temperature distribution of inner combustor (150l/min, $\Phi = 0.89$, R.T.=15sec)

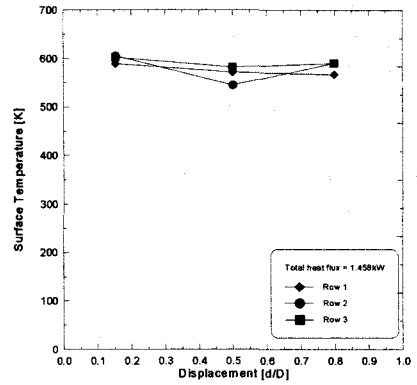


Fig. 18 Temperature distribution of combustor surface (150l/min, $\Phi = 0.5$, R.T.=30sec)

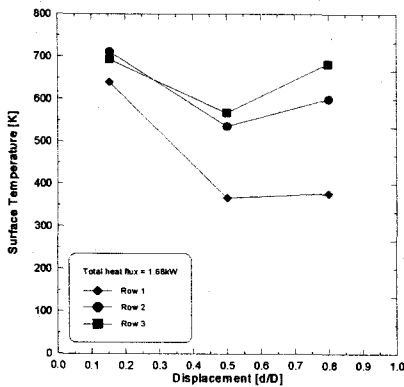


Fig. 16 Temperature distribution of combustor surface (150l/min, $\Phi = 0.89$, R.T.=15sec)

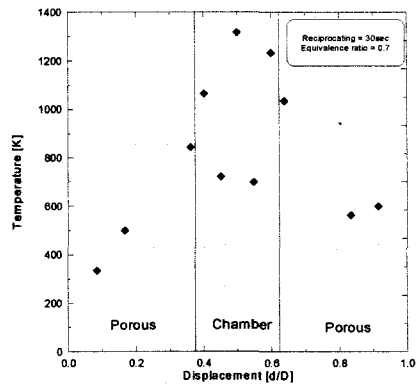


Fig. 19 Temperature distribution of inner combustor (150l/min, $\Phi = 0.7$, R.T.=30sec)

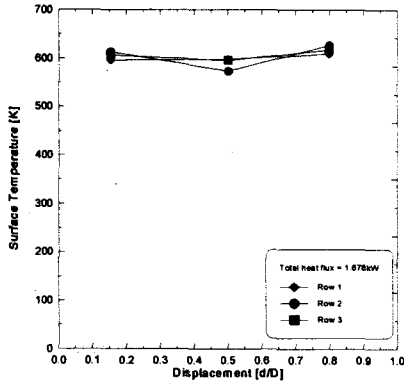


Fig. 20 Temperature distribution of combustor surface (150l/min, $\Phi = 0.7$, R.T.=30sec)

당량비의 변화에 따른 중앙철퍼 부분의 발생열량 관계를 Fig. 21에 나타내었다. 먼저 유량이 120l/min인 경우가 150l/min인 경우에 비해 피건조물이 받는 복사열량이 우수한 것으로 나타났다. 당량비가 증가할수록 그 성능이 우수한 것으로 나타났다. 또한 체류시간이 증가한 경우에는 피건조물로 방사하는 복사열량의 분포가 균일한 것으로 나타났다.

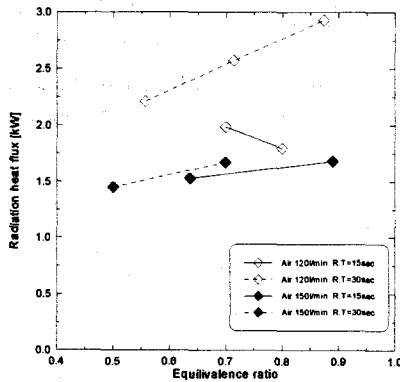


Fig. 21 Radiation heat flux according to various condition

5. 결론

본 연구에서는 산업용건조기 개발에 앞서 초단열 연소현상을 이용한 연소기가 산업용건조기에 응용이 타당한지를 판단하기 위하여 연소기를 제작하여 여러 가지 조건에서 실험하였다. 그 결과

피건조물에 따라 연소기의 적절한 운전조건을 설정할 경우 건조기로의 적용이 가능함을 알 수 있으며 기초실험결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 1) 전체적으로 당량비가 높은 경우가 피건조물로 방출되는 복사열량이 우수하였다. 2) 연소기내에 유량이 증가한 경우에는 표면의 온도분포가 비교적 균일했으나, 다공성 물질 부분으로 열이 이동하여 결론적으로는 출력이 다소 떨어지는 경향을 보였다. 3) 왕복주기를 증가할 경우 전체적으로 방출되는 복사열이 증가하였으나 이 경우에도 연소기 내부온도의 분포는 좌우로 퍼지는 경향을 보였다. 4) 위의 실험결과를 바탕으로 연소기의 운전조건을 피건조물의 특성에 맞게 설계한다면 초단열연소현상을 이용한 연소기가 건조기로의 적용이 가능하리라 사료된다.

후 기

본 사업은 한국가스공사의 지원에 의해 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) M.Pettersson and S.Stenstrom, "Absorption of infrared radiation transfer mechanism in paper. Part II : Application ti infrared dryers", J.of pulp and paper science, vol 24 No. 11, 1998
- (2) J.G. Hoffmann, R.Echigo, H.Yoshida and S.tada 1997, "Experimental study on combustion in porous media with a reciprocating flow system", Combustion and Flame, pp.32-46
- (3) Min, D.K., and Shin, H.D., Laminar premixed flame stabilised inside a honeycomb ceramic, Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 34., p.341-355, (1991).
- (4) Hanamura, K, Echigo, R., and Zhdanoc, S.A., Super adiabatic combustion in porous media. Int. J. Heat Mass Transfer, 36, (13):3201, (1993).
- (5) Strehlow, R.A., Combustion Fundamentals, McGraw-Hill Book company, 1984.