

## 매트촉매 버너의 적외선 복사열전달 특성

송광섭<sup>†</sup> · 최정인

한국에너지기술연구원 에너지융합소재 연구단  
305-343 대전광역시 유성구 가정로 152  
(2012년 6월 11일 접수, 2012년 7월 13일 채택)

### Infrared Radiative Heat Transfer Characteristics of Fiber Mat Catalytic Burners

Kwang Sup Song<sup>†</sup> and Jung In Choi

Energy Materials and Convergence Research Department, Korea Institute of Energy Research,  
152 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea  
(Received 11 June 2012; accepted 13 July 2012)

#### 요 약

화염 없이 연소가 일어나고 원격외선 복사열을 활용할 수 있는 매트 촉매버너를 제작하여 연소실험과 전열특성 분석을 수행하였다. 매트 촉매버너를 이용한 예혼합 연소실험에서 연소열의 9~17% 정도가 현열로 배출되었으며, 연소 조건에 따라 차이를 보였다. 촉매버너와 시료 사이 거리증가에 따라 복사강도가 적어졌는데, 매트 촉매버너 아래에서 거리에 따라 변하는 복사에너지 흡수면적을 계산할 수 있는 수식을 유도하였다. 이 식을 멜라민 건조실험 결과와 비교하여 상관성이 있음을 보였다. 매트 촉매버너를 이용하여 멜라민, wood chip, 농산 pallet 등에 대한 건조실험을 수행하고, 이들의 건조속도로부터 에너지 이용효율을 계산하였다. 매트 촉매버너를 이용한 건조에서 최대 에너지 이용효율은 wood chip 건조에서 79% 정도까지 얻을 수 있었다.

**Abstract** – The fiber mat catalytic burner that uses infrared radiative heat obtained by flameless catalytic combustion was manufactured and tested to investigate its combustion characteristics. About 9 to 17% of combustion heat was released by sensible heat during the premixed catalytic combustion depend on combustion condition. To find out radiation intensity with distance between catalytic burner and sample, the equation that calculate the receiving surface of radiative energy under the fiber mat catalytic burner was driven. This equation was well correlated with the drying rate of melamine. The drying experiments were carried out to the melamine, wood chip and agricultural pallet by using the fiber mat catalytic burner and the energy efficiency was calculated from drying rate of them. The energy efficiency of the fiber mat catalytic burner reaches to 79% in maximum for drying of the wood chip.

Key words: Catalytic Combustion, Infrared Radiative Heat Transfer, Fiber Mat Catalytic Burner, Drying

#### 1. 서 론

최근 원유가격이 급격히 상승함에 따라 에너지의 효율적 이용은 온실가스의 배출을 줄이기 위한 수단과 더불어 경제적인 측면에서도 매우 중요해지고 있다. 화석연료를 에너지로 변화시키는 연소방식은 전통적인 화염연소와 촉매연소로 구분할 수 있다. 촉매표면에서 반응에 의해 연소가 이루어지는 촉매연소 기술은 낮은 온도에서도 연소반응이 쉽게 일어나기 때문에 연소과정에서 NO<sub>x</sub>와 같은 공해물질의 배출이 적고, 부하변동에도 안정적으로 연소가 일어나기 때문에 많은 주목을 받고 있다[1,2]. 촉매연소 반응이 안정적으로 일어나기 위해서는 촉매 층의 온도를 일정한 온도 이상으로 유지시켜만 하기

때문에 다양한 형태의 촉매연소장치가 만들어지고 있다. 저온의 열을 사용하기 위해 만들어진 촉매연소장치는 주로 매트 형태의 연소 촉매를 사용하고 있으며, 확산 연소방식[3] 또는 예혼합 연소방식[4,5]에 의해 연소가 이루어진다.

기존의 건조장치는 열매체 등에 의한 간접 가열방식을 채택하여 열효율이 낮기 때문에 이를 개선하기 위해 다양한 방식의 건조장치가 개발되고 있다. 유동층 건조[6], 과열증기를 이용한 통기건조[7] 및 적외선을 이용하는 복사건조 등이 대표적인 예이다. 그 중에서 복사 전열을 활용하는 적외선 건조장치는 독특한 전열방식에 의해 많은 주목을 받고 있다. 열에너지가 원격외선 형태로 건조물질에 전달 되면 건조물질 내부까지 열이 쉽게 전달되어 빠르고 균일한 건조가 가능하다고 알려져 있다. 실제 감자를 이용한 건조실험과 건조속도 모델 비교에서 복사전달에 의해 표면과 내부로 열이 동시에 공급되면 감자 내부에 있던 수분이 표면의 기공이 축소되기 전에 외부로 빠

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: kssong@kier.re.kr

\*이 논문은 서울과학기술대학교 손재익 교수의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

저나오기 때문에 건조속도가 빨라지며 제품의 특성을 향상시킬 수 있다고 보고하였다[8]. 최근 개발된 매트 촉매버너[9]는 열부하가 1.0~2.0 kcal/cm<sup>2</sup>·h로 낮지만 연소가스의 온도를 쉽게 제어할 수 있고 연소열이 복사방식으로 전달되기 때문에 건조공정에 활용하면 뛰어난 특성을 보일 것이다.

본 연구에서는 예혼합 방식으로 연소가 가능한 매트 촉매버너를 제작하고, 연소실험을 수행하여 연소열 배출 형태와 전열특성을 분석하였다. 촉매버너와 시료 사이 거리에 따른 복사강도 변화를 계산할 수 있는 수식을 유도하고 벨라민 건조실험에서 얻은 결과와 비교 분석하였다. 또한 매트 촉매버너를 이용하여 벨라민, wood chip, 농산 pallet 등에 대한 건조실험을 수행하여 건조특성을 분석함과 동시에 촉매버너와 시료 사이의 거리에 따른 에너지 이용효율을 계산하고 비교 분석하였다.

2. 이론적 고찰

복사 열전달에서 거리가 멀어짐에 따라 전열량이 감소하는 이유는 거리 증가에 따라 복사에너지가 감소하는 것보다 거리가 증가함에 따라 복사에너지를 받는 면적이 증가하기 때문에 단위면적당 받는 복사에너지가 감소하는 것으로 설명하고 있다[10]. 매트 촉매버너를 이용한 건조실험에서 건조시료 표면에서 단위면적 당 받는 복사에너지 양을 유추하기 위하여 거리 증가에 따라 복사에너지 흡수면적의 변화를 나타내는 식을 유도하였다. 유도방법은 작은 점 에너지원으로 방출되는 복사에너지를 흡수하는 면적을 계산하고 이를 확장하여 우리가 원하는 수식을 유도하였다.

작은 점에서 방출되는 복사에너지 속도를 복사강도(I)라고 하면, 복사 열원으로부터 흡수표면 사이의 방향과 거리의 변화에 따른 복사강도 변화는 확산복사의 코사인 법칙(The cosine law of diffuse radiation)을 활용하면 얻을 수 있다. 복사 열원의 요소면적 dA<sub>1</sub>이 Fig. 1에 표시된 바와 같이 반지름이 r인 반구의 표면적 A<sub>2</sub>의 중심에 놓여 있다고 가정하면 요소 복사강도 dI는 다음과 같은 과정으로 구할 수 있다[10].

반지 모양의 복사흡수 요소면적 dA<sub>2</sub>는 2πr<sup>2</sup>sinφdφ 값을 갖는다. 여기서 φ는 dA<sub>1</sub>의 수직선과 dA<sub>1</sub>과 dA<sub>2</sub>를 연결하는 반지름 PQ 사이의 각도를 나타낸다. dA<sub>1</sub> 바로 위의 복사강도를 dI<sub>0</sub>라고 쓰면, 다른 미소 요소면적 A<sub>1</sub>에서의 복사강도는 dI이다. 확산복사의 코사인 법칙에 의하여

$$dI = dI_0 \cos \phi \tag{1}$$

복사 열원 표면에서 방출 속도 W<sub>1</sub>과 복사강도 사이의 관계는 다

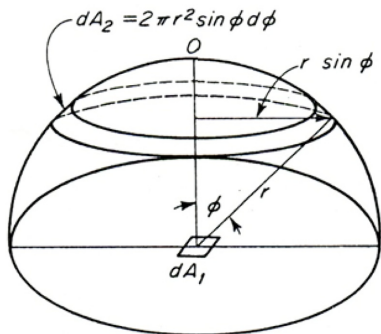


Fig. 1. Diffuse radiation to a hemispherical surface.

음과 같다. 요소면적 dA<sub>2</sub>에서 받는 에너지 속도 dq<sub>dA<sub>2</sub></sub>는 식 (1)에 의하여

$$dq_{dA_2} = dI dA_2 = dI_0 \cos \phi dA_2 \tag{2}$$

dA<sub>2</sub> = 2πr<sup>2</sup>sinφdφ 이므로

$$dq_{dA_2} = dI_0 2\pi r^2 \sin \phi \cos \phi d\phi \tag{3}$$

면적 dA<sub>1</sub>으로부터 방출되는 모든 복사에너지는 A<sub>2</sub> 어느 부분에도 영향을 주기 때문에 면적 dA<sub>1</sub>으로부터 복사방출 되는 속도는 전체 면적 A<sub>2</sub>에서 받는 복사에너지 흡수속도와 같다. 면적 A<sub>2</sub>에서 받는 속도는 dq<sub>dA<sub>2</sub></sub>를 전체면적에서 적분하면 얻어진다.

$$W_1 dA_1 = \int_{A_2} dq_{dA_2} = \int_0^{\pi/2} 2\pi dI_0 r^2 \sin \phi \cos \phi d\phi = \pi dI_0 r^2 \tag{4}$$

그러므로

$$dI_0 = \frac{W_1}{\pi r^2} dA_1 \tag{5}$$

식 (5)를 식 (1)에 대입하면

$$dI = \frac{W_1}{\pi r^2} dA_1 \cos \phi \tag{6}$$

가 된다.

같은 방식으로 건조에서 사용된 매트 촉매버너와 거리에 따른 복사강도 변화를 계산하여 보았다. 즉, 매트 촉매버너와 건조 시료사이의 거리가 멀어짐에 따른 복사에너지 흡수면적의 증가를 계산하고, 흡수면적에서 조사각도의 영향을 고려하여 총 확산 흡수면적을 계산하였다. 그리고 총 확산 흡수면적의 증가만큼 복사강도가 감소한다고 생각한 것이다.

Fig. 2는 복사에너지 흡수면적(A<sub>m</sub>)의 계산방법을 도식으로 나타낸 것이다. 그림에서 매트 촉매버너는 가로와 세로의 길이가 각각 a, b인 직사각형으로 생각하였고, 매트 촉매버너와 건조 시료 사이의 거리는 R로 계산하였다. 그림에서 보인 바와 같이 매트 촉매버너 아래는 버너와 동일한 크기의 직사각형으로 계산하였고, 버너 모서리에서는 버너의 변과 길이가 같고 반지름이 R인 원기둥 표면적의 1/4 면적을 취하고, 꼭지 점에서는 반지름이 R인 구의 1/8 표면적을 취하고, 입사각을 고려한 계산식을 수식으로 나타내면 다음과 같이 얻어진다.

$$A_m = a \times b + \int_0^{\pi/2} \cos \theta (2a + 2b) R d\theta + \int_0^{\pi/2} \cos \theta \frac{2\pi R^2 \sin \theta d\theta}{4} \tag{7}$$

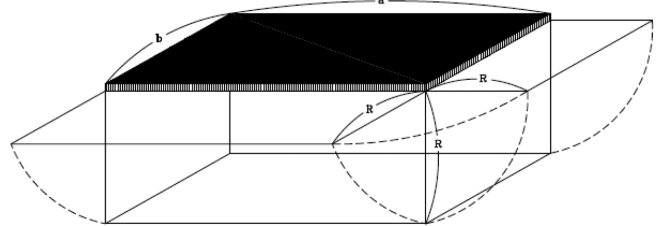


Fig. 2. Variation of the receiving surface with distance under fiber mat catalytic burner.

이것을 정리하여 풀면

$$A_m = a \times b + (2a + 2b)R + \frac{\pi R^2}{4} \quad (8)$$

이 된다.

### 3. 실험 장치 및 방법

#### 3-1. 매트 형태의 연소촉매 제조

매트 촉매버너를 제작하는데 사용된 연소촉매는 실리카 매트에 분말 백금 촉매를 코팅하여 만들었다. 실리카 매트는 상용 실리카 매트를 구입하여 사용하였으며, 분말 백금 촉매는 다음과 같은 방법으로 제조하였다. 무수에탄올을 이용하여 분말 실리카를 처리한 다음, zirconium propoxide와 80 °C에서 4시간 동안 반응시켰다. 실리카와 반응하지 않은 zirconium propoxide을 무수에탄올로 제거하고 100 °C에서 건조, 400 °C에서 2시간 동안 소성하여 지르코늄을 분말 실리카에 고정하였다. 지르코늄이 고정된 분말 실리카에 백금 전구체 tetraamine platinum (II) chloride hydrate를 이용하여 백금이 실리카에 1 wt%가 되도록 함침법으로 담지하고, 100 °C에서 건조한 다음 60 °C에서 과산화수소로 처리하였다. 과산화수소로 처리된 백금 촉매를 다시 100 °C에서 건조한 후에 400 °C에서 2시간 동안 환원 (H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>=50/50, 100 ml)하여 분말 백금 촉매를 제조하였다.

분말 백금촉매는 프라이머(primer)를 이용하여 실리카 매트에 코팅하였다. 프라이머는 에탄올 20 g, zirconium propoxide 15 g, 과산화수소 4 g, 질산 2 g을 잘 교반하여 겔 상태로 만들어 사용하였다. 프라이머 용액 100 ml에 분말 백금촉매 12 g의 비율로 슬러리를 만든 다음, 실리카 매트를 넣어 완전히 젖게 하여 분말 백금촉매를 실리카 매트에 코팅하였다. 이것을 100 °C에서 12시간 건조한 다음 400 °C에서 2시간 환원하여 매트 촉매로 사용하였다.

#### 3-2. 매트 촉매연소 버너의 제작

실험에 사용한 매트 촉매연소 버너는 Fig. 3에 나타난 구조로 만들었으며, 매트 촉매버너의 전열면의 크기는 0.6×1 m<sup>2</sup>이다. 그림에서 보인 바와 같이 촉매버너는 연료가스를 공급하는 노즐, 단열재, 히터, 매트 형태 연소촉매와 케이스 등으로 구성되어 있다. LPG와 공기가 혼합된 가스는 노즐을 통해 촉매버너 내부로 공급되도록 함으로써 촉매 층에서 연료와 공기가 균일한 접촉이 일어나도록 하였다. 단열재는 국내에서 보온재로 널리 사용되고 있는 세라크올을 사용하였는데 두께는 75 mm이다. 초기 연소촉매를 연소반응 개시온도 이상으로 가열하기 위해 3 kW 용량의 전기 히터가 사용되었다. 연소

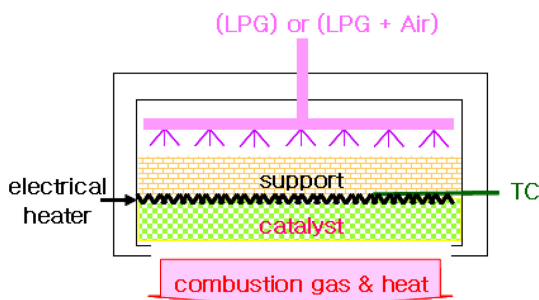


Fig. 3. Schematic diagram of fiber mat catalytic burner.

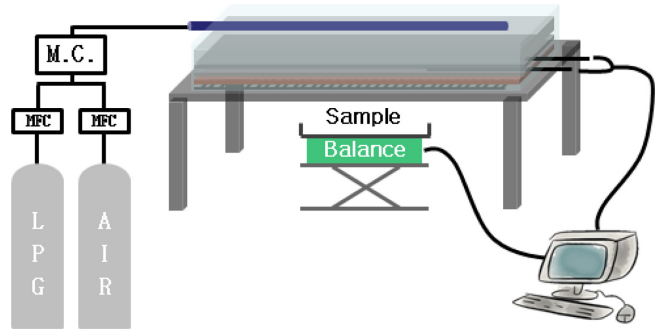


Fig. 4. Schematic diagram of drying experimental apparatus using fiber-mat catalytic burner.

반응의 진해상태는 촉매 층과 단열재 층의 온도를 측정하여 확인하였다.

#### 3-3. 매트 촉매버너를 이용한 건조실험

건조실험 장치는 Fig. 4에 나타난 방식으로 구성하였다. 매트 촉매버너는 아래 방향으로 열이 나가도록 설치되었고, 그 아래 시료접시와 저울이 놓여 있다. 건조실험이 진행되는 동안 무게 변화와 촉매버너 내부의 온도는 컴퓨터를 이용하여 기록하였다. 저울은 최대무게 2000 g, 감도 0.1 g까지 측정 가능한 수준이며, 저울과 버너 사이 거리는 수동으로 조절하였다.

실험방법은 먼저 전기히터를 이용하여 촉매 층의 온도가 250 °C 이상 되도록 촉매 층을 충분히 예열한 다음, 촉매버너에 LPG와 공기를 혼합하여 공급함으로써 촉매연소 반응이 일어나도록 하였다. LPG의 유량은 3~4 l/min, 공기는 과잉공기비에 맞추어 MFC를 이용하여 제어하였다. 매트 촉매 층에 연료가스가 공급되어 연소반응이 시작되고 1시간 정도 지나면 연소열과 버너 케이스 열손실, 매트 촉매에 의한 복사열전달 및 현열 배출 등이 열적으로 평형에 도달한다. 평형에 도달하여 매트 촉매버너의 촉매표면 온도가 일정해지면 건조 실험을 시작하였다.

건조실험은 멜라민(melamine, C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>N<sub>6</sub>), wood chip 및 농산 pallet를 대상으로 수행하였다. 수분은 시료에 따라 약간의 차이를 보이고 있지만 평균적으로 멜라민은 17%, wood chip은 52%, 농산 pallet는 15% 정도 함유되어 있다. 건조실험은 업체의 요구조건에 맞추어 실험하였기 때문에 건조실험 조건이 시료에 따라 조금 차이가 있다. 멜라민의 경우 잔류수분이 0.1%가 될 때까지 실험하였고, wood chip은 잔류수분이 20%, 농산 pallet는 잔류수분이 12% 될 때까지 실험하였다. 매트 촉매버너가 안정되면, 약 300 g 시료가 들어 있는 시료접시(250×255 mm<sup>2</sup>)를 규정된 높이로 설치되어 있는 저울 위에 올려 놓음으로써 건조실험이 진행되었으며, 건조 시료의 무게변화는 6초 간격으로 컴퓨터로 기록하였다.

### 4. 실험 결과 및 고찰

#### 4-1. 매트 촉매버너의 연소열 배출 형태

매트 형태의 연소촉매를 사용하는 촉매버너는 기존의 가스버너에 비하여 공해물질의 배출이 적고 연소효율도 99.95% 이상 언어짐을 이전의 논문을 통해 알 수 있었다[4]. 매트 촉매버너의 연소열 배출 형태는 외부에 노출된 연소촉매의 온도를 기준으로 계산하고 분석하

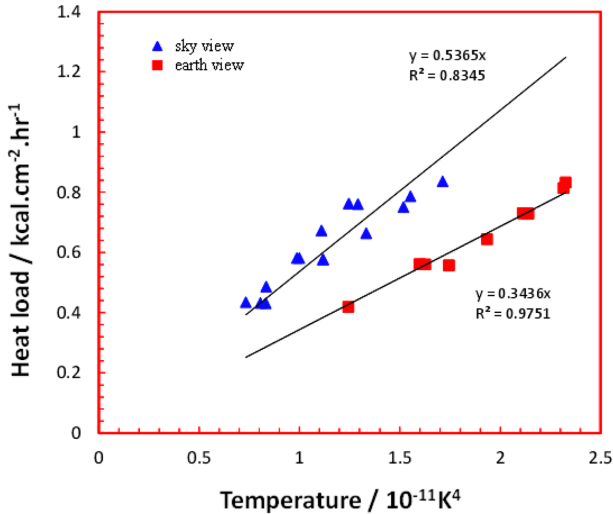


Fig. 5. Correlation between heat load and catalytic bed temperature.

였다. 측정된 촉매의 표면온도와 연소가스의 온도가 동일하다고 가정하고 부하를 변동시키면서 연소가스의 현열을 계산하였다. 그리고 현열에 의해 배출되는 열량을 제외한 연소열을 복사열량으로 계산하였다. 복사 열량은 복사능(emissivity)과 절대온도의 4승에 비례한다고 알려져 있으므로, 복사열량을 온도에 따라 도시하면 Fig. 5와 같다. 매트 촉매버너를 하늘로 열이 배출되도록 설치한 경우와 지면으로 열이 배출되도록 설치하여 수행한 결과를 비교하여 연소열 배출 특성을 분석하였다. 그 결과 그림에서 보인 바와 같이 촉매버너의 설치방식의 차이에 따라 연소열 배출 형태가 달라져서 복사에 의해 전달되는 열량이 차이가 있음을 알 수 있다. 촉매버너를 하늘을 향하게 설치하면 연소열이 과장 형태로 전환되어 확산되기 때문에 복사능의 값이  $5.37 \times 10^{-12} \text{ kcal/cm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K}^4$  가 되었고, 촉매버너를 지면을 향하게 설치하면 복사능의 값이  $3.44 \times 10^{-12} \text{ kcal/cm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K}^4$ 로 적어졌다. Radcliff와 Hicjman[11]은 확산식 촉매버너에서 복사능을 측정하여 제시하였다. 그들이 제시한 값과 본 연구에서 예혼합 연소방식으로 제시한 값이 같은 차수를 갖는 것으로 보아 연소방식의 차이에도 불구하고 촉매버너의 복사전열 특성은 촉매의 표면온도에 기인한다는 것을 알 수 있었다. 여기서 촉매버너가 지면을 향해 설치되어 있을 때 복사능 값이 작은 것은 촉매버너에서 발생된 복사열의 일부가 바닥에 반사되어 촉매표면에 영향을 주었기 때문이라 생각한다.

촉매버너에서 배출되는 연소가스의 온도를 촉매의 표면온도와 같다고 가정하고, 연소열 중에서 현열이 가지고 가는 비율을 계산해 보면 연소부하가 증가할수록 현열에 의한 배출열량이 증가하였고, 촉매버너를 지면을 향하도록 설치하였을 때에도 더 증가하였다. Radcliff와 Hicjman[11]은 확산방식 촉매연소 버너에서 발생된 열량이 17% 정도 연소가스에 의해 배출된다고 하였다. 본 연구에서 수행된 예혼합 촉매연소의 경우에는 촉매버너의 구성 및 연소조건에 따라 연소열 배출 형태에 차이가 있었으며, 9~17% 정도의 연소열이 현열로 배출되는 것으로 계산되었다.

4.2. 매트 촉매버너의 복사전열 특성 분석

에너지 이용효율 극대화를 위한 최적의 건조장치 구성을 위하여 복사전열 특성을 분석하였다. 촉매버너와 시료 사이의 거리 증가에 따른 복사에너지 흡수면적 변화를 계산하고, 멜라민 건조실험 결과

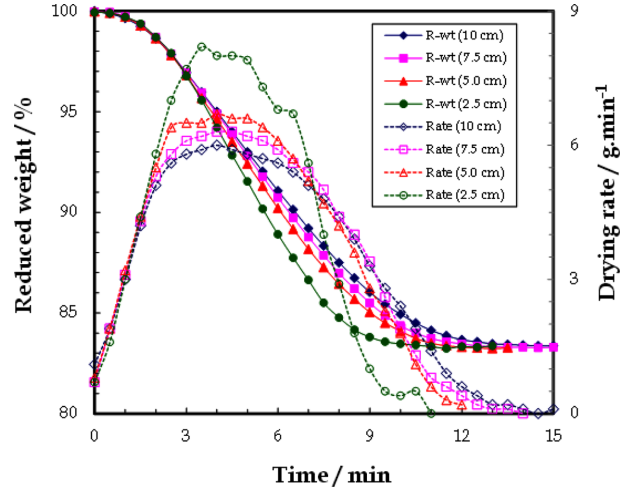


Fig. 6. Drying characteristics of melamine with time in the heat load of  $0.64 \text{ kcal/cm}^2 \cdot \text{h}$ .

와 비교하였다. 멜라민 시료는 직경이 3~5 mm 정도인 구 형태로 되어 시료접시 위에 일정한 높이로 놓을 수 있기 때문이었다.

건조실험은 매트 촉매버너의 부하를 일정하게  $0.65 \text{ kcal/cm}^2 \cdot \text{h}$ 로 유지하고 수행하였다. 멜라민 시료의 두께를 10 mm 정도가 되도록 유지하기 위하여 멜라민 시료의 무게를 300 g으로 고정하였다. 촉매버너와 건조시료 사이 거리는 100, 75, 50, 25 mm로 변화시켰다. 규정된 거리에서 건조실험 동안 무게 변화를 측정하고, 1분 동안 무게 변화로부터 무게감소 속도를 계산하여 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 보인 바와 같이 동일한 연소부하에서 촉매버너와 건조시료 사이 거리가 증가하면 건조속도가 작아지고, 건조시간이 많이 걸렸다.

이론적 고찰에서 설명한 바와 같이 복사전열에서 열원과 건조 시료 사이의 거리가 증가하면 복사에너지 흡수면적이 증가하기 때문에 단위 면적 당 받는 복사에너지가 감소한다. 매트 촉매버너를 부하  $0.64 \text{ kcal/cm}^2 \cdot \text{h}$ 로 운전하였을 때, 거리의 증가에 따라 멜라민 시료가 받는 복사강도를 식 (8)을 이용하여 계산하고, 멜라민 건조실험에서 건조 시작 후 3분부터 6분이 지나는 동안 평균 건조속도를 측정하여 Table 1에 비교하여 나타내었다. 표에서 보인 바와 같이 건조속도는 거리의 증가에 따라 감소하는데, 감소 비율이 거리 증가에 따른 복사강도 감소와 비슷한 비율로 변화함을 알 수 있었다. 이와 같은 결과로부터 본 실험에 사용한 매트 촉매버너의 거리의 증가에 따른 복사강도 변화는 식 (8)을 사용하면 예측이 가능할 것으로 판단된다.

한편, Fig. 2에 촉매버너의 크기와 거리 R에 따른 흡수면적을 유추할 수 있도록 비교하여 나타내었다. 매트 촉매버너( $0.6 \times 1.0 \text{ m}^2$ )를 기준으로 거리(R)의 증가에 따른 복사 에너지 흡수면적은 식 (8)을 이용하여 계산하고 Fig. 7에 나타내었다. 본 연구와 유사한 형태로 매트 촉매버너를 건조에 활용할 때, 매트 촉매버너와 건조시료 사이

Table 1. Comparison of radiation intensity and maximum drying rate of melamine

Distance between burner and melamine (mm)	Radiation intensity		Drying rate (Ave. 3 min)	
	kcal/cm <sup>2</sup> .h	ratio	g/min	ratio
25	0.56	1.00	7.87	1.00
50	0.50	0.89	6.60	0.84
75	0.46	0.81	6.20	0.80
100	0.42	0.74	5.87	0.75

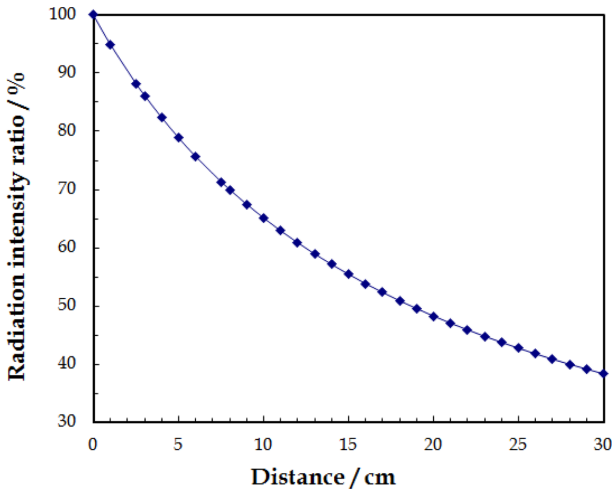


Fig. 7. The radiation intensity with distance between catalytic burner and samples.

멀어질수록 에너지 이용효율이 낮아질 수밖에 없기 때문에 가능한 촉매버너와 건조시료 사이의 거리는 가까울수록 좋다. 하지만 거리가 너무 가까우면 시료의 온도가 너무 많이 올라가 제품의 품질에 영향을 줄 수 있으므로 최적의 거리를 찾는 것이 중요함을 알 수 있었다.

4-3. 매트 촉매버너를 이용한 건조실험에서 에너지 이용효율

연소부하 0.85 kcal/cm<sup>2</sup>.h와 0.64 kcal/cm<sup>2</sup>.h에서 wood chip, 농산 pallet의 건조실험 결과를 Fig. 8에 도시하였다. 멜라민의 건조실험 결과와 마찬가지로 촉매버너와 시료의 사이가 멀어질수록 건조가 느리게 일어나고, 연소부하가 증가할수록 건조속도가 빨라져서 규정된 스펙의 제품을 얻는데 걸리는 시간을 단축할 수 있음을 확인하였다.

산업공정에서 매트 촉매버너를 사용하는 경우에 에너지 이용효율은 운전비(연료비)와 밀접한 관계가 있기 때문에 매우 중요하게 고려한다. 매트 촉매버너는 연소열이 원적외선 형태로 배출되기 때문에 기존의 연소방식에 비하여 에너지 이용효율이 좋을 것이라 예상된다. 건조실험에서 에너지 이용효율은 시료의 수분 증발량과 동일한 양의 물을 증발시키는데 필요한 열량을 투입된 에너지(저위 발열량)로 나누어 계산하였다.

연소부하를 변화시키면서 수행된 wood chip, 농산 pallet 및 멜라

의 거리가 80 mm 정도 떨어지면 복사 에너지를 70% 정도 밖에 활용할 수 없고, 187 mm 정도 떨어지면 복사 에너지를 50% 정도 밖에 활용할 수 없다는 것을 예측할 수 있다. 이처럼 거리가 멀어지면

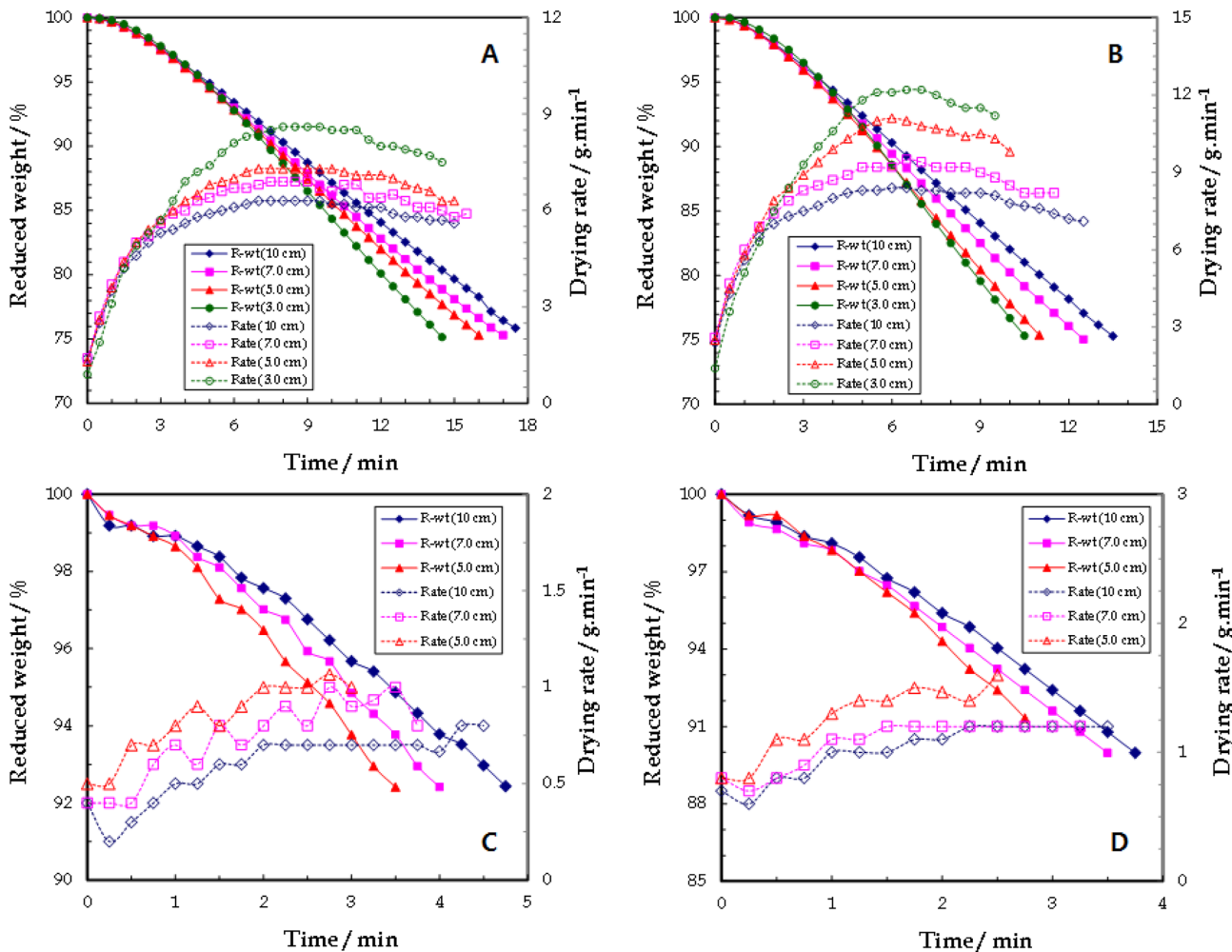


Fig. 8. Drying characteristics of the samples with time. A: Wood chip, 0.64 kcal/cm<sup>2</sup>.h, B: Wood chip, 0.85 kcal/cm<sup>2</sup>.h, C: Agricultural pallet, 0.64 kcal/cm<sup>2</sup>.h, D: Agricultural pallet, 0.85 kcal/cm<sup>2</sup>.h.

**Table 2. The efficiency of energy utilization for catalytic burner in drying of the wood chip, agricultural pallet and melamine**

Distance between burner and sample		100 mm	75(or 70) mm	50 mm	25(or 30) mm	
Wood chip	Heat Load: 0.64 kcal/cm <sup>2</sup> .h	Max. rate	54.6%	59.8%	63.3%	74.6%
		H <sub>2</sub> O%: 52%→20%	56.6%	60.8%	63.6%	69.4%
	Heat Load: 0.85 kcal/cm <sup>2</sup> .h	Max. rate	54.6%	59.8%	72.2%	79.4%
		H <sub>2</sub> O%: 52%→20%	56.8%	61.9%	68.3%	70.8%
agricultural pallet	Heat Load: 0.64 kcal/cm <sup>2</sup> .h	Max. rate	49.1%	56.2%	70.2%	
		H <sub>2</sub> O%: 15%→10%	37.0%	43.9%	50.1%	
	Heat Load: 0.85 kcal/cm <sup>2</sup> .h	Max. rate	57.9%	63.2%	79.0%	
		H <sub>2</sub> O%: 15%→10%	35.1%	46.8%	51.6%	
melamine	Heat Load: 0.64 kcal/cm <sup>2</sup> .h	Max. rate	52.1%	54.7%	58.2%	71.2%
		H <sub>2</sub> O%: 17%→0.1%	37.6%	46.2%	50.3%	54.2%

민의 건조실험 결과로부터 에너지 이용효율을 계산하여 Table 2에 나타내었다. 표에서 보인 바와 같이 모든 시료에서 거리가 멀어질수록 에너지 이용효율이 낮아졌다. 이것은 앞에서 설명한 바와 같이 거리가 멀어지면 복사에너지를 흡수할 수 있는 면적이 증가하여 한정된 면적을 갖는 건조시료에 도달되는 복사에너지가 작아지기 때문이라 생각된다.

한편, Fig. 3에 보인 바와 같이 연소부하가 높을수록 촉매의 표면온도가 증가하기 때문에 연소부하가 높을수록 연소가스에 의한 현열손실이 커질 수밖에 없다. 또한 연소부하가 높아짐에 따라 매트 촉매버너의 촉매 온도가 증가하고, 촉매의 온도 증가는 촉매버너 케이스 온도를 높이기 때문에 케이스를 통한 열손실도 커진다. 따라서 연소부하가 높은 경우에 에너지 이용효율이 낮을 것으로 예상했는데, wood chip과 농산 pallet의 에너지 이용분석에서 보인 바와 같이 모든 조건에서 연소부하가 0.85 kcal/cm<sup>2</sup>.h일 때 에너지 이용효율이 높은 값을 나타내었다.

따라서 연소부하가 높을 때 에너지 이용효율이 높은 것을 다른 원인으로 유추할 수밖에 없다. 복사 열전달에서 고온의 물질(열원)로부터 방출되는 복사 파장은 물질의 종류에 따라 다른 형태를 가지며, 온도의 변화에 따라 차이가 있는 것으로 알려져 있다[12]. 또한 물질의 종류와 복사 파장의 길이에 따라 흡수율이 차이가 많은 것으로 알려져 있다. 따라서 높은 연소부하에서 에너지 이용효율이 높은 것은 촉매버너의 표면온도가 변함에 따라 복사 파장이 달라지고 이로 인해 건조 대상물이 흡수하는 에너지의 양이 달라지기 때문이라 추측된다.

#### 4. 결 론

매트 촉매버너의 활용성을 높이기 위해 예혼합 연소특성 분석과 건조실험을 수행하였다. 매트 촉매버너의 연소특성 분석을 통하여 매트 촉매버너는 설치하는 방식에 따라 복사전열에 차이가 있음을 확인 하였다. 촉매버너가 하늘과 지면을 향해 설치하였을 때 복사능의 값은 각각  $5.37 \times 10^{-12}$ 과  $3.44 \times 10^{-12}$  kcal/cm<sup>2</sup>.h.K<sup>4</sup>이 얻어졌다. 예혼합 촉매연소에서 연소열 배출 형태는 연소조건에 따라 차이를 보였으며, 9~17% 정도 에너지가 현열로 배출됨을 확인하였다. 촉매버너와 시료 사이 거리에 따른 복사강도 변화를 계산할 수 있는 수식을 유도하여 멜라민 건조속도 변화 값과 비교한 결과 좋은 상관관계가 얻어짐을 알 수 있었다. 멜라민, wood chip, 농산 pallet 등에 대한 건조실험에서 에너지 이용효율은 연소부하와 촉매버너와 시료 사이의 거리에 영향을 많이 받음을 확인하였다. 현열 등에 의한 열손실

에도 불구하고 매트 촉매버너를 이용한 건조실험에서 에너지이용 효율은 최대 79% 정도까지 얻을 수 있었고, 높은 연소부하에서 에너지 이용효율이 높은 값을 보이는 것으로부터 촉매의 표면온도가 복사 열전달에 영향을 줄 수 있음을 알았다.

#### 감 사

본 연구는 한국에너지기술연구원에서 시행한 자체연구사업과 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원이 지원한 연구비(2008ECM02p020000)로 수행되었습니다.

#### 사용기호

- $A_i$  : Area;  $A_1$ , of surface 1;  $A_2$ , of surface 2 [m<sup>2</sup>]
- $A_m$  : Area of catalytic burner square surface by  $a$  and  $b$  [m<sup>2</sup>]
- $D$  : Distance between burner and sample [m]
- $I$  : Radiation intensity [W/m<sup>2</sup>]
- $I_o$  : Radiation intensity at point in normal to radiating surface [W/m<sup>2</sup>]
- $q_{dA_2}$  : Heat flow rate by radiation at  $d_{A_2}$  [W]
- $r$  : Radius of hemisphere [m]
- $W_1$  : Total radiating power of surface 1 [W/m<sup>2</sup>]
- $\phi$  : Angle with normal to surface

#### 참고문헌

1. Pfefferle, L. D. and Pfefferle, W. C., "Catalysis in Combustion," *Catal. Rev.-Sci. Eng.*, **29**, 219(1987).
2. Hodnett, B. K., *Heterogeneous Catalytic Oxidation*, John Wiley & Sons, Chichester, England, 189-239(2000).
3. Trimm, D. L. and Lan, C.-W., "The Combustion of Methane on Platinum-Alumina Fibre Catalysts. II Design and Testing of a Convective-Diffusive Type Catalytic Combustor," *Chem. Eng. Sci.*, **35**, 1731(1980).
4. Song, K. S., Jung, N. J. and Kim, H. Y., "Combustion Characteristics and Design of Fiber Mat Catalytic Burners," *J. Energy Eng.*, **17**, 77(2008).
5. Cerri, I., Saracco, G., Specchia, V. and Trimis, D., "Improved Performance Knitted Fibre Mats as Supports for Pre-mixed Natural Gas Catalytic Combustion," *Chem. Eng. J.*, **82**, 79(2001).
6. Kim, S. D., Lee, S. H., Rhim, Y. J., Choi, H. K., Lim, J. H., Chun,

- D. H. and Yoo, J. H., "Drying Characteristic of High Moisture Coal using a Flash Dryer;" *Korean Chem. Eng. Res.(HWAHAK KONGHAK)*, **50**, 106(2012).
7. Kim, O. S., Lee, D. H. and Chun, W. P., "Eco-Friendly Drying Technology using Superheated Steam;" *Korean Chem. Eng. Res. (HWAHAK KONGHAK)*, **46**, 258(2008).
8. Nema, P. K. and Datta, A. K., "Infra Red Drying and Hot Air Drying of Potato: A Theoretical Consideration;" *J. Food Sci. Technol.*, **41**, 580(2004).
9. Seo, Y. S., Cho, S. J., Song, K. S. and Kang, S. K., "A Fiber-mat Catalytic Burner for the Heating System of PVC Tiles;" *Int. J. Energy Res.*, **26**, 921(2002).
10. McCabe, W. L. and Smith, J. C., *Unit Operation of Chemical Engineering*, 3rd, McGraw- Hill, New York, 371-397(1976).
11. Radcliffe, S. W. and Hickman, R. G., "Diffusive Catalytic Combustors;" *J. Inst. Fuel*, **48**, 208(1975).
12. Park, W. S., *Far-Infrared Radiation Technology and it's Application (Korean)*, Laboratory of Korea Far-Infrared Radiation Application (1997).