

매트 형태의 예혼합 촉매 버너에 의한 복사 건조 특성

김혁주* · 안 준**† · 송광섭*

* 한국에너지기술연구원, ** 국민대학교 기계시스템공학부

Drying Characteristics of a Radiative Industrial Dryer Adopting a Mat-Type Premixed Catalytic Burner

Hyouck Ju Kim*, Joon Ahn**† and Kwang Sup Song*

* Korea Institute of Energy Research,

** School of Mechanical Engineering, Kookmin Univ.

(Received August 31, 2010 ; Revised April 13, 2011; Accepted April 14, 2011)

Key Words : Catalytic Burner(촉매 버너), Industrial Dryer(산업용 건조기), Moisture(함수율), Thermal Efficiency (열효율)

초록: 인체에 유해한 질소산화물(NOx)의 생성을 억제하면서 열효율을 높일 수 있는 새로운 버너의 개념으로 촉매 버너가 제안되었고 본 연구에서는 대표적인 에너지 다소비 설비인 건조기에 사용하기 위한 촉매버너를 개발하였다. 산업용 건조기에 활용하기 위해 촉매버너는 평평한 매트 형태로 제작되어 열전달 면적을 극대화하였고 밀폐 공간인 건조실에 활용하기 위하여 예혼합 연소방식을 적용하였다. 새로 개발된 촉매 버너를 산업용 건조기에 적용하여 실험한 결과 열에너지가 원적외선 형태로 공급되어 감열건조 영역에서 식품과 같은 유기물을 효과적으로 건조할 수 있음을 확인하였다. 또한 건조기의 열효율은 건조속도보다 피건조물의 함수율에 보다 큰 상관관계를 나타내었다.

Abstract: A catalytic burner that utilizes the thermal energy from fossil fuels without the emission of nitrogen oxides (NO_x) has been developed. For this purpose, the newly developed burner has two features: firstly, it is in the shape of a flat mat so as to maximize its heating surface, and secondly, it adopts premixed combustion so that it can be used in a closed space. In the present study, the burner was used in a radiation-type industrial dryer. This dryer yields thermal energy in the form of thermal radiation in the infrared regime, which has been proved to be effective for drying organic substances under low-moisture conditions. Analysis of the experimental data has proved that the thermal efficiency of the dryer is better correlated to the moisture than to the dry rate.

- 기호설명 -

1. 서론

- d_p : 피건조물 평균지름
- f^* : 무차원 투입량 ($=H/d_p$)
- H : 피건조물 적층 두께
- Q_L : 수분 증발에 필요한 잠열 (W)
- Q_S : 피건조물 가열에 사용된 현열 (W)
- Q_f : 연료로부터 공급된 열량 (W)
- T : 온도 (K)
- T_{ini} : 피건조물 투입 전의 온도 (K)
- T_{sg} : 단일버너 실험에서 촉매버너 온도 (K)
- v^* : 무차원 속도 (=벨트 속도/특성 속도)

화석 연료의 연소 과정에서 발생하는 질소산화물 (NO_x)은 최근 유해성이 심각하게 인식되면서 인구가 밀집해 있는 수도권을 중심으로 규제가 강화되고 있다. 질소산화물은 연소 과정에서 연료나 공기 중에 포함된 질소 성분이 산화하면서 발생한다. 이중 많은 부분은 공기 중의 질소가 화염에 의해 산화되면서 발생하는 열적(Thermal) NO_x 로서 생성을 억제하기 위해서는 화염의 온도를 낮추어야 한다.⁽¹⁾

화염의 온도를 낮추어 NO_x 의 생성을 억제하는 방법으로 촉매연소 방식이 있다.⁽²⁻⁴⁾ 촉매연소는 촉

† Corresponding Author, jahn@kookmin.ac.kr
© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

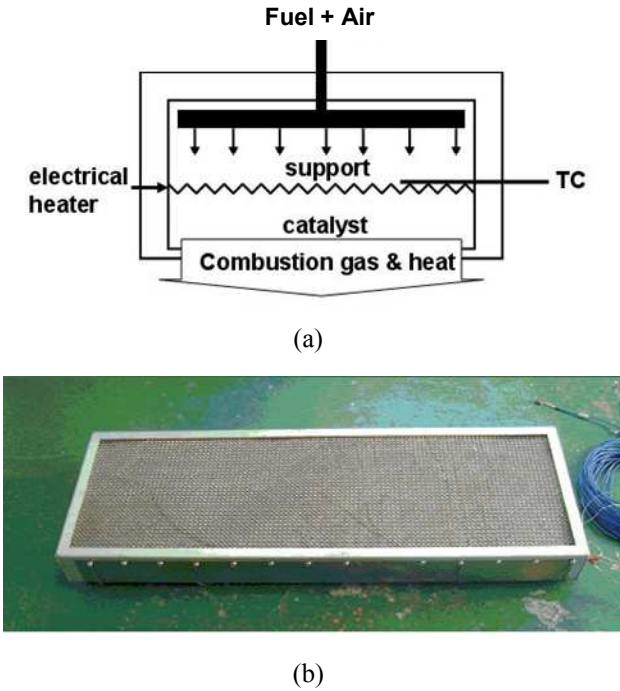


Fig. 1 Mat type premixed catalytic burner; (a) schematics; (b) photograph

매에 의해 작은 활성화 에너지로부터 반응을 일으킴으로써 화염이 없는 조건에서 반응열을 이용할 수 있다. 촉매연소는 고온의 화염을 요구하지 않는 건조기 및 난방 장치 등에 활용하면 효과적이데 본 연구에서는 촉매 버너를 대표적인 에너지 다소비설비인 산업용 건조기에 적용하였다.

건조 공정은 건조에 필요한 열을 효과적으로 이용하기 위해서 주로 밀폐된 공간에서 이루어지며 밀폐된 공간에서 연소 성능을 확보하기 위하여 본 연구에서는 Fig. 1(a)에 도시한 것과 같이 예혼합 방식을 적용하였다. 촉매 버너의 경우 다공성 담체에 촉매를 담지하여 제작하는데 본 연구에서는 열교환 면적을 극대화하기 위하여 담체를 평평한 매트 형태로 제작하였고 Fig. 1(a)와 같이 촉매 층에서 균일한 반응이 일어날 수 있도록 연료-공기 혼합기체의 유로를 설치하였다.

산업용 건조기에 내부에서 표면까지 수분을 포함할 정도로 함수율이 높은 피건조물이 공급될 경우 건조 과정은 크게 두 단계를 거쳐 이루어진다. 먼저 피건조물의 표면에 수분이 존재하는 동안에는 거의 일정한 속도로 건조가 이루어지는 항률 건조 영역에서 건조가 시작된다. 건조 과정이 진행되면 피건조물의 표면은 건조가 완료되어 수분이 없는 상태가 되고 피건조물 내부에서 수분이

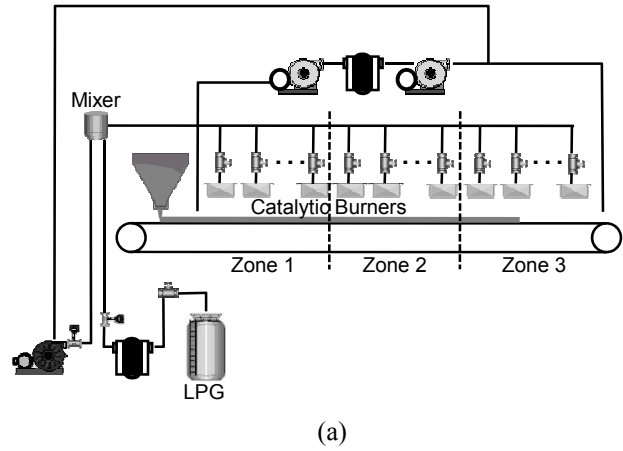


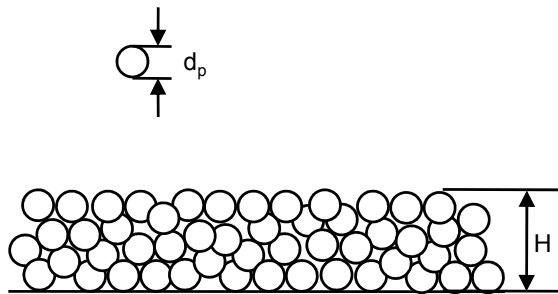
Fig. 2 Industrial dryer with catalytic burners; (a) schematic diagram; (b) photograph

증발하게 된다. 이 경우 건조가 진행되면서 건조 속도가 감소하는 경향을 보이므로 항률건조 영역과 구별하여 감률건조 영역이라 부른다.^(6,7) 일반적으로 피건조물은 건조기에 투입되기 전에 탈수 과정을 거치므로 건조기의 에너지소비를 절감에는 감률건조영역에서의 건조속도 향상이 결정적인 영향을 미치게 된다.

감률건조영역에서의 건조속도는 건조방식 및 피건조물의 특성에 크게 영향을 받는다. 산업용 건조기는 수분을 증발시키는 방식에 따라 전도식, 대류식, 복사식으로 분류하는 데⁽⁵⁾ 본 연구에서 개발한 촉매버너의 경우 매트형태로 제작되어 복사식 건조장치에 적합하다. 복사 방식 건조기의 경우 피건조물이 열에너지를 흡수하는 흡수율에 따라 감률건조 영역에서의 건조속도가 달라지는데 촉매버너의 경우 세라믹 소재의 담체를 사용하여 원적외선 영역에서 열복사가 이루어지므로 식품이



(a)



$$f^* = \frac{H}{d_p}$$

(b)

Fig. 3 Drying Specimen; (a) photograph; (b) feeding configuration

나 섬유와 같은 유기물의 건조에 적용할 경우 유리해진다.

이에 본 연구에서는 밀폐공간에서 활용할 수 있는 예혼합 방식을 채택하고 열전달 측면에서 유리한 매트 형태의 촉매 버너를 개발하여 산업용 건조기에 적용하여 건조 특성을 파악하였다. 감률 건조 영역에서의 건조 특성을 관찰하기 위하여 피건조물로서 반건조 상태의 난연재를 투입하였고 기존의 단일 버너 실험과 비교하여 피건조물과 상호 작용에 따른 열전달 특성 변화를 측정하였다. 또한 건조기 설계에 활용할 수 있도록 수분과 건조효율 및 건조속도의 상관관계를 구하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에서는 외부 공기 공급이 원활하지 않은 곳에서 활용할 수 있도록 예혼합 방식을 채택한

촉매버너를 개발, 적용하였다(Fig. 1). 연소 촉매는 백금(Pt)으로서 알루미늄 매트에 함침법으로 담지하였다. 촉매 담지량은 백금의 질량비가 0.5%가 되도록 하였다. 버너는 Fig. 1(a)에 제시한 것과 같이 노즐, 단열재, 히터, 촉매로 구성하였다. 노즐은 CFD를 통해 혼합기가 균일하게 공급되도록 설계하였고 단열재는 1차원 열전도 해석을 통해 50 mm의 세라크올로 제작하였다. 전기 히터는 초기에 촉매를 연소반응 개시온도 이상으로 가열하는데 사용되며 열용량과 응답속도를 고려하여 2 kW용량을 사용하였다.⁽⁸⁾

본 연구를 통해 개발한 촉매버너를 적용한 건조장치는 복사식 건조기로서 Fig. 2에 보인 것과 같이 15개의 촉매버너와 피건조물의 투입을 위한 호퍼, 이송을 위한 컨베이어로 구성하였다. 제어장치는 촉매버너의 연소와 피건조물 투입을 제어할 수 있도록 구성하였다. 촉매버너의 가동은 버너에 장착된 예열용 히터를 통하여 제어하고 (Fig. 1(a)), 버너의 온도를 측정하여 연소가

이루어지지 않을 경우 연료 공급을 차단하기 위한 제어 체계를 갖추었다. 즉, 연소 제어를 위하여 열전대, 솔레노이드 밸브, 니들 밸브, 체크 밸브를 각각의 버너에 차례대로 설치하였다.

연료는 LPG를 사용하였고 질량 유량 제어기를 통해 촉매 버너로 공급된다. 15개의 버너에 균일하게 연료를 공급하기 위하여 2개의 질량 유량 제어기를 통해 공급하도록 공급망을 구성하였다. 연소 및 환기를 위한 공기는 송풍기를 통해 공급하였고 연소를 위한 공기는 연료와 혼합하여 가버너를 거쳐 공급하였다. 피건조물은 호퍼를 거쳐 컨베이어 벨트로 공급되고 건조기 내부에서는 인버터로 제어하는 컨베이어 벨트를 이용하여 이송한다.

피건조물은 난연재로 활용되는 고분자 물질로서 Fig. 3에 제시한 것과 같이 구에 가까운 타원체의 형태를 갖는다. 시편의 크기는 100개의 샘플을 측정한 결과, 평균지름(d_p)은 5 mm이며 표준편차는 0.2 mm이다. 감률건조 상태에서 건조 특성을 파악하기 위하여 건조기에는 기계적 탈수장치를 거친 반건조 상태의 피건조물을 투입하였으며 초기 함수율은 약 10%이다.

정확한 수분의 측정을 위하여 피건조물은 일정한 크기의 용기에 담아 건조기에 투입하였고 같은 양의 피건조물이 담긴 2개의 용기를 나란히 투입하여 건조가 시작되는 입구조건에서 연소 및

건조 성능을 파악하도록 하였다. 피건조물은 평균 지름 (d_p) 5 mm의 타원체로서 투입량은 용기에 적층한 두께 (H)가 1 cm, 2 cm, 3 cm가 되도록 하였다. 본 논문에서는 피건조물의 투입량을 적층한 두께를 입자의 지름으로 나누어준 값인 f^* 로 표현하였다(Fig. 3(b)). 피건조물의 투입 속도는 예상 최단 건조시간을 바탕으로 결정하였다. 최소 투입량인 $f^* = 2$ 일 때 열효율 100%인 상태에서 완전 건조가 이루어지는 투입 속도로 무차원화한 투입속도 v^* 가 0.15, 0.2, 0.3에 대하여 실험을 수행하였다.

측정의 경우 먼저 건조기를 가동하는 동안에 배가스를 포집하고 가스분석기(Testo 350-XL)를 통해 성분을 분석하여 연소특성을 파악하였다. 다음으로 촉매 버너의 작동특성을 파악하기 위해 각각의 버너에 대해 표면과 내부에 K-type 열전대를 설치하여 피건조물 투입에 따른 온도변화를 관찰하였다. 마지막으로 건조속도 및 열효율을 계산하기 위하여 함수율계 (Kett FD-720)를 이용하여 건조과정 전후에 피건조물의 함수율을 측정하였다.

3. 결과 및 토의

건조기 내부에서 촉매 버너의 연소상태를 파악하기 위해 배가스 성분을 분석한 결과 거의 공기에 가까운 성분을 보이고 질소산화물 (NOx)이나 일산화탄소 (CO)는 거의 검출되지 않았다. 이는 건조기의 입출구가 개방되어 있고 대류 효과, 배열 회수, 습도 조절 등을 목적으로 환기(Fig. 2(a))를 했기 때문인 것으로 판단된다.

건조 실험에 앞서 피건조물 투입에 따른 연소 특성을 파악하기 위하여 건조 장치를 정상 상태로 만들고 피건조물을 투입하기 전에 온도를 측정하여 Fig. 4(a)에 제시하였다. 촉매버너 내부에서는 단일 버너실험⁽⁸⁾과 마찬가지로 연소가 원활하게 이루어져 600-700°C의 분포를 나타낸다. 촉매 버너 표면 온도의 경우 300-400°C의 분포를 나타내고 출구에 가장 가까운 15번 버너의 경우 200°C 부근의 낮은 온도를 보인다. 건조실 내에서의 촉매 버너의 온도를 밀폐 공간에 단일 버너를 설치했을 때 측정된 온도와 비교해보면(Fig. 4(b)), 버너 내부의 경우 거의 비슷하여 두 온도의 비율이 거의 1에 가까운 값을 갖지만 표면의 경우에는 대체로 1보다 작은 값을 나

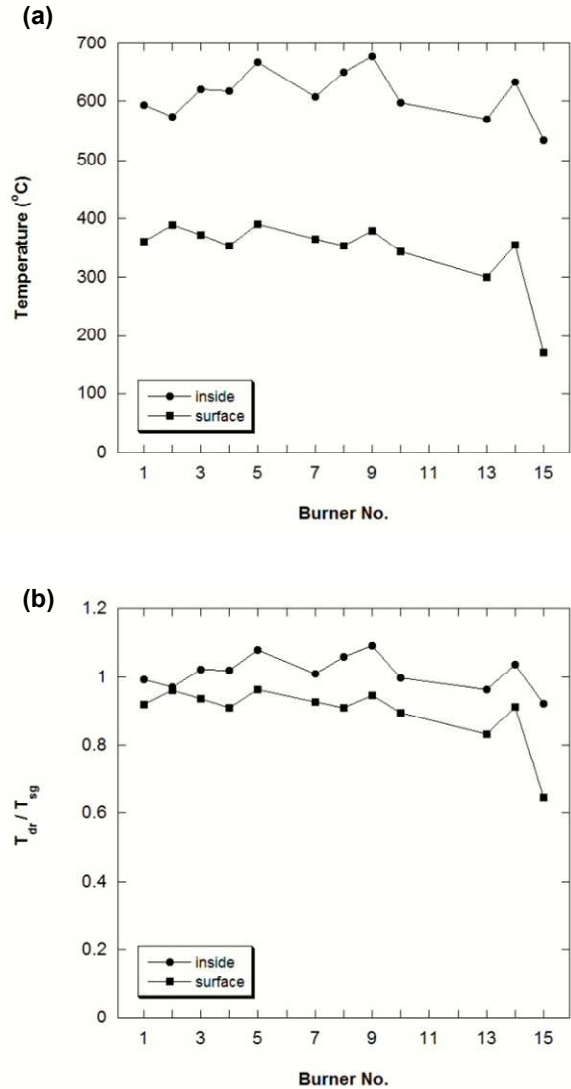


Fig. 4 Temperature of the burner before feeding the specimen; (a) initial temperature; (b) temperature ratios to the single burner experiment

타낸다. 건조실의 경우 건조실을 채우고 있는 공기 및 컨베이어 벨트와의 열전달, 입, 출구의 효과 등으로 촉매 버너 표면의 온도가 낮아진 것으로 보인다.

Figure 5에는 촉매버너를 작동시킨 상태에서 피건조물을 투입했을 때와 투입하지 않았을 때의 온도비를 제시하였다. 촉매버너 내부 온도(Fig. 5(a))는 피건조물을 투입해도 거의 변화하지 않아 온도비가 거의 1에 가까운 값을 유지한다. 촉매 표면에서는 (Fig. 5(b)), 피건조물에서 발생한 수증기 및 외부에서 유입된 공기의 영향으로 촉매 버너 표면의 온도가 변화하게 되고 특히 하류에 위치한 11번 버너 이후에서 온도비가 1에서 벗어나는 경향을

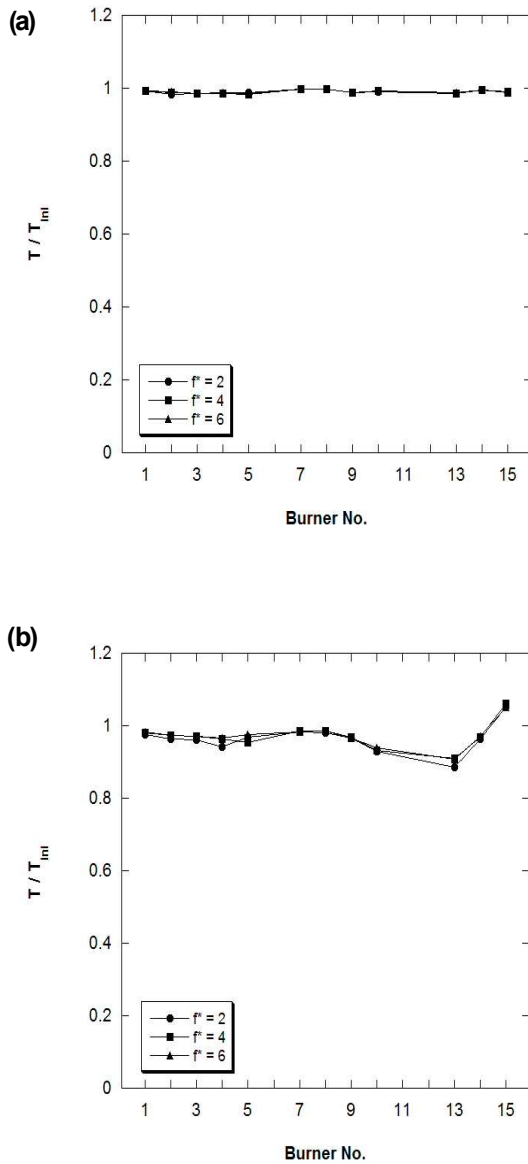


Fig. 5 Temperature of catalytic burner at $v^* = 0.15$; (a) Inside the catalysis; (b) At burner surface

보인다. 건조속도가 작은 경우 ($v^* = 0.15$)에도 피건조물 투입량(f^*)의 영향은 상대적으로 크지 않은 경향을 보인다.

건조실험에 앞서 피건조물의 초기 함수율을 측정하였다. 초기 함수율은 Kett社의 FD-720을 이용하여 측정하였고 측정 과정 동안 시료의 수분 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 초기 수분은 10.1%로 측정되었고 측정이 진행될수록 수분의 변화가 감소하는 특성을 보인다(Fig. 6(a)). 이러한 결과를 통해 시료가 본 연구에서 관찰하고자 하는 감률 건조 영역에 있는 것을 확인할 수 있다. 수분 변화량을 건조속도로 환산해 보면 (Fig. 6(b)), 측정

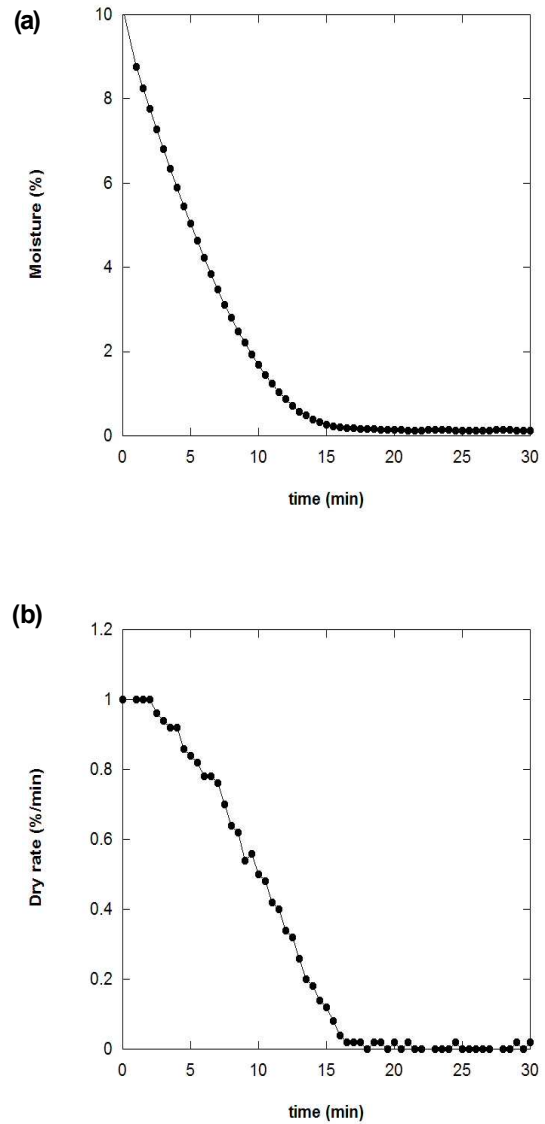


Fig. 6 Drying characteristics of the specimen in the moisture meter; (a) Moisture; (b) Dry rate

이 시작되고 약 17분간 감률 건조의 특성을 보이다가 그 이후에는 평형 함수율 조건에 들어가는 건조 곡선을 보인다.

본 연구를 통해 개발한 건조기의 성능은 건조 속도 및 건조기 효율로서 평가하였다. 건조 속도는 단위 시간 동안 단위 면적에서 수분 감소량으로 정의된다. 한편, 건조기 효율은 식 (1)과 같이 재료를 가열하면서 사용한 현열과 수분을 증발시키면서 사용한 잠열의 합과 투입된 열량의 비율로 정의된다.

$$\text{Efficiency} = \frac{Q_s + Q_L}{Q_f} \quad (1)$$

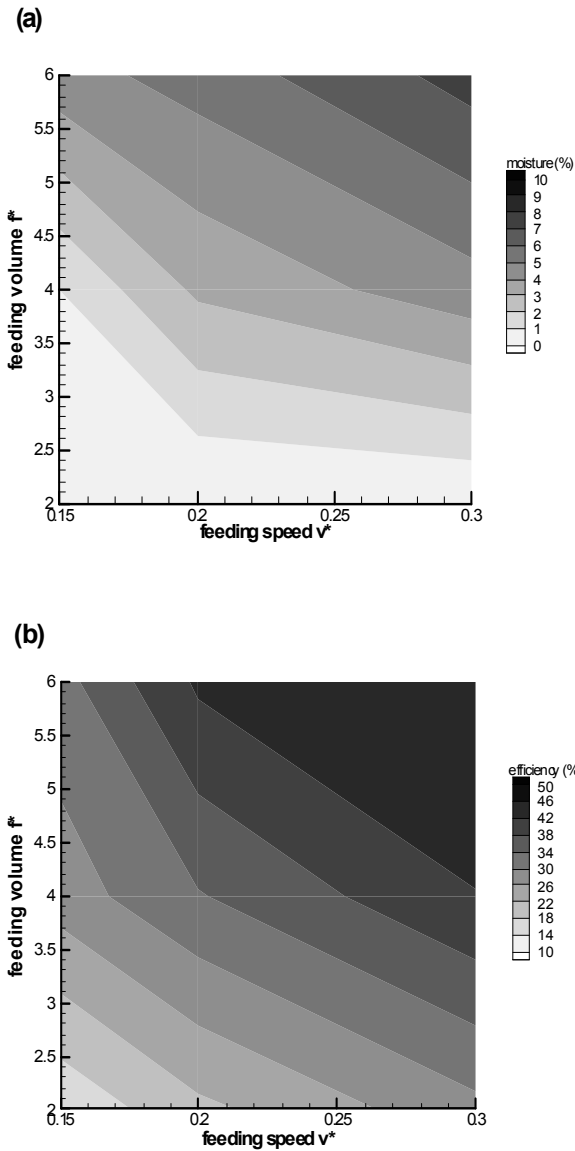


Fig. 7 Drying characteristics according to the feeding volume and rate; (a) Moisture; (b) Thermal efficiency

피건조물의 공급 조건에 따른 건조 특성을 보면 (Fig. 7) 수분이 감소하면서 건조효율이 감소하는 감률 건조 특성이 반영되어 수분과 건조 효율이 피건조물의 공급속도와 공급량에 대해 유사한 경향을 보인다. 공급 조건에 따른 수분의 분포 (Fig. 7(a))에서는 투입량 f^* 가 2.5보다 작은 경우 이송속도 구간 전체에 걸쳐 1%이하로 나타나며 이는 건조실을 나가기 전에 이미 거의 건조가 완료되어 있음을 의미한다. 이송속도 v^* 가 0.3인 경우에 f^* 가 6에 해당하는 양을 투입하면 초기 수분의 20%도 증발하지 않은 상태로 피건조물이

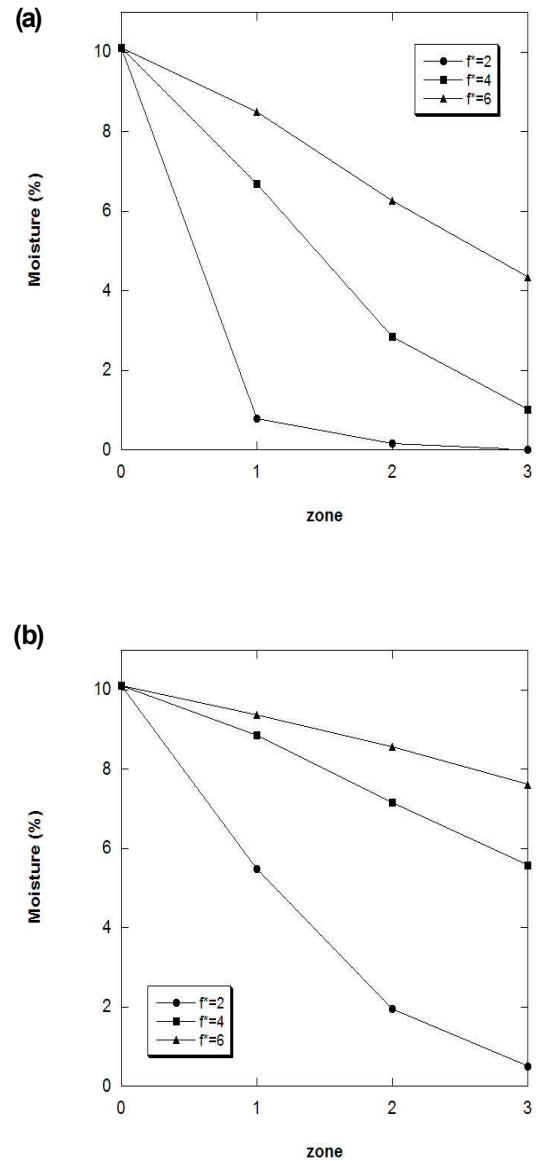


Fig. 8 Change in the moisture of the specimen during the drying process; (a) $v^* = 0.15$; (b) $v^* = 0.3$

건조실을 나가게 된다. 피건조물 공급조건에 따른 건조기 효율을 보면 Fig. 7(b)의 오른쪽 위로 건조기 효율 45%이상의 영역이 분포하며 Fig. 6에 제시한 건조 곡선을 볼 때, 피건조물의 초기 수분이 10%가 넘는 항률 건조 영역에서는 건조기 효율이 45%를 상회할 것을 알 수 있다.

건조물 이송 속도가 작은 경우인 $v^* = 0.15$ 일 때 $f^* = 2$ 인 조건에서는 건조기의 1/3 지점에서 대부분의 건조가 이루어진다 (Fig. 8(a)). $f^* = 4$ 일 때는 2/3 지점까지 선형적으로 수분이 감소하다가 그 이후에는 수분 감소량이 줄어들고 $f^* = 6$ 일

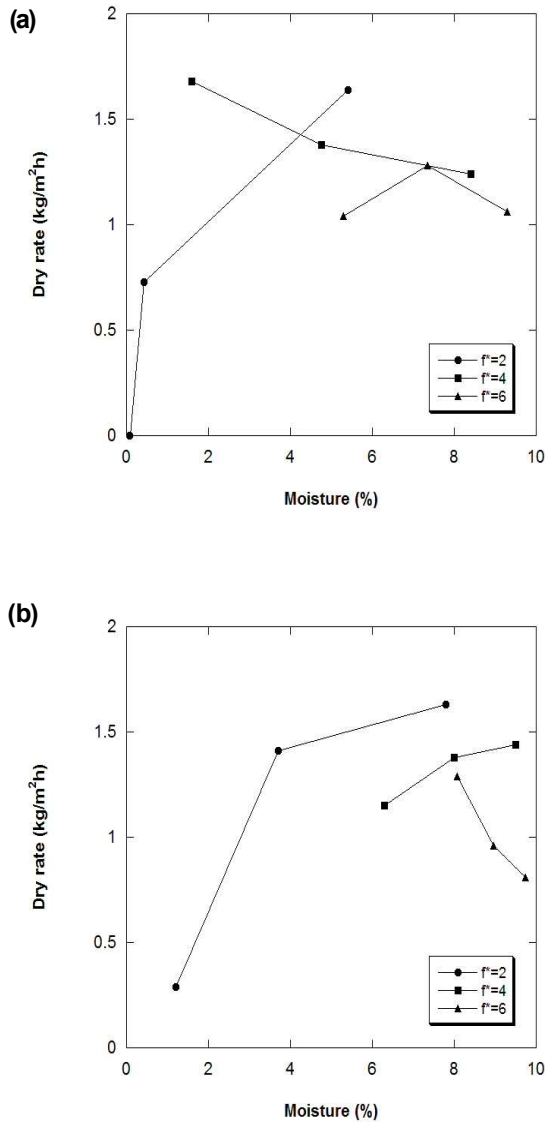


Fig. 9 Dry rate according to the moisture of the specimen; (a) $v^* = 0.15$; (b) $v^* = 0.3$

때는 전 영역에서 선형적으로 수분이 감소한다. 피건조물 이송속도가 $v^* = 0.3$ 까지 증가하면(Fig. 8(b)) $f^* = 2$ 를 투입한 경우에도 2/3 지점까지는 수분이 선형적으로 감소하는 경향을 보인다.

다음으로 피건조물의 수분에 따른 건조특성을 건조속도 및 건조기 효율을 기준으로 살펴보았다. 건조속도는 실험을 수행한 두 가지 이송속도에 대하여 투입량이 가장 적은 경우인 $f^* = 2$ 일 때, 수분이 감소할수록 건조속도가 작아지는 것을 볼 수 있고 이는 감률건조의 특성을 보이는 것을 의미한다(Fig. 9). 그러나, 투입량이 증가할 경우 ($f^* = 4$ 또는 6), 수분에 대한 경향을 찾기 어려워진다.

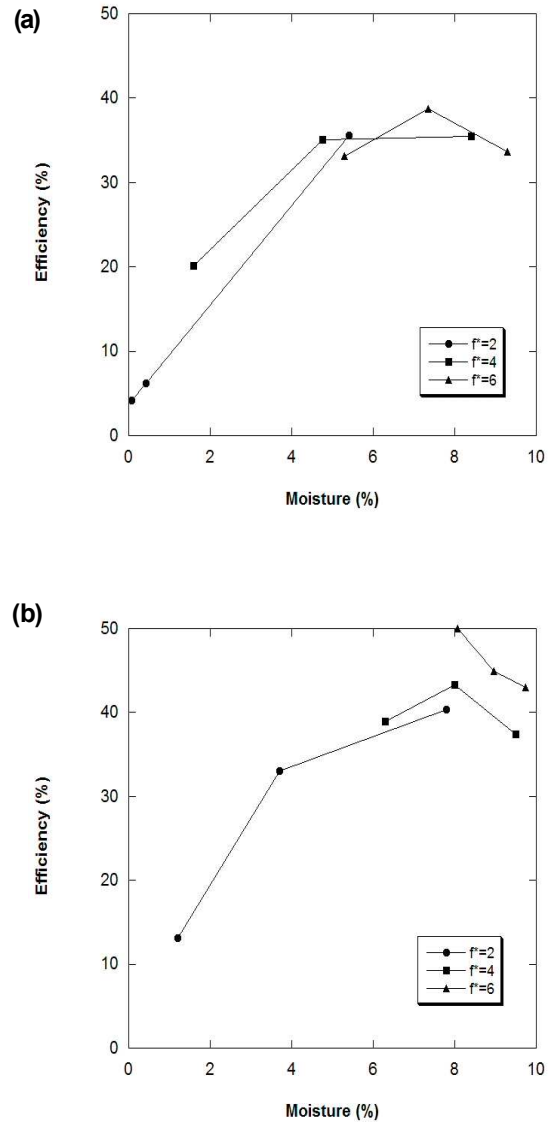


Fig. 10 Thermal efficiency according to the moisture of the specimen; (a) $v^* = 0.15$; (b) $v^* = 0.3$

이러한 투입량에 따른 차이는 투입량이 적은 경우 환기 및 연소가스 유동에 의한 대류 건조 메커니즘이 작용하여 일반적 감률건조 특성을 나타내지만 투입량이 증가하면서 복사 건조의 비중이 증가하면서 감률건조 특성이 나타나지 않는 것으로 보인다.

수분의 변화량과 함께 피건조물의 온도 변화를 일으키는 현열을 고려한 건조기 효율의 경우(Fig. 10) 각각의 투입량에 대하여 건조속도에 비해 수분에 대해 높은 상관관계를 보이는 것을 관찰할 수 있다. 피건조물의 이송 속도가 증가하면(Fig. 10(b)) 상관관계가 약해지기는 하지만 수분이 5%

이하인 경우 수분 감소에 따라 효율이 감소하고 수분이 5% 이상인 경우에는 비교적 일정한 효율을 나타낸다.

4. 결 론

본 연구에서는 예혼합 방식의 매트형태 촉매버너를 적용한 25 kW급 산업용 건조기를 개발하였고 감률 건조 영역에서 건조 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 본 연구 과제를 통해 개발한 예혼합 방식의 매트형태 촉매버너가 밀폐 공간인 산업용 건조기에서 정상적인 연소 특성을 보였다.

(2) 촉매버너는 표면 온도가 낮고 근접 가열이 이루어지므로 건조가 진행되면서 피건조물과의 상호작용으로 버너 표면온도가 영향을 받는 것이 관찰되었다.

(3) 촉매버너를 장착한 25 kW급 건조기에서 감률 건조 영역의 피건조물에 대한 건조 실험을 수행한 결과 건조 속도보다 효율이 피건조물의 수분에 대해 강한 상관관계를 보인다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 에너지·자원기술개발 사업에 의해 수행되었고 2010년도 국민대학교 신진교수 연구지원금으로부터 일부를 지원 받았

으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Ahn, J., Kim, H. J. and Choi, K. S., 2010, "Combustion Characteristics of Non-premixed VISTA Burner in Once-Through-Type Boiler," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 34, No. 5, pp. 547~552.
- (2) Ro, S. and Scholten, A., 1999, "Catalytic Combustion in a Domestic Natural Gas Burner," *Catalysis Today*, Vol. 47, pp. 415~420.
- (3) Seo, Y. S., Kang, S. K. and Shin, H. D., 1998, "Combustion Characteristics of Lean Premixed Mixture in Catalytic Combustors," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 22, No. 12, pp. 1681~1690.
- (4) Hwang, C. H., Jeong, Y. S. and Lee, C. E., 2001, "Numerical Studies on Combustion Characteristics of a Hybrid Catalytic Combustor," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 25, No. 4, pp. 583~592.
- (5) Lee, K. H., Hong, Y. J. and Kim, O. J., 2006, "Analysis of Heat Transfer and Drying Characteristics in the Dryer Using the Refraction of Radiation," *Trans. of the SAREK*, Vol. 18, No.8, pp. 678~685.
- (6) Land, C. M. v., 1991, *Industrial Drying Equipment*, Marcel Dekker Inc.
- (7) Shin, H. I., 1998, *Industrial Dryer*, Daekwang.
- (8) Song, K.S., Jung, N.J. and Kim, H.Y., 2008. "Combustion Characteristics and Design of Fiber Mat Catalytic Burners," *KOSEE J. Energy Eng.*, Vol. 17, No. 2, pp.100~106.