

메탈화이버 버너의 화염구조 및 공해물질 배출 특성

정준영* · 김용모***

Numerical Study of Flame Structure and Emission Characteristics in Metal Fiber Burners

Junyoung Jeong and Yongmo Kim

ABSTRACT

This study has numerically investigated the flame structure and emission characteristics in the metal fiber burner. The one-dimensional premixed flame approach has been adopted to simulate the combustion processes of the metal fiber burner. Numerical results indicate that the present approach is capable of predicting the essential combustion characteristics of the metal fiber burner. Based on numerical results, the detailed discussion has been made for the effects of equivalence ratio and thermal load on the precise flame structure and the pollutant emission in the metal fiber burner.

Key Words : Metal fiber burner, Premixed flame, Flame structure, Pollutant emission

1. 서론

전 세계적으로 환경문제와 관련하여 보일러의 배기가스(CO, NOx)의 문제가 중요한 변수가 되고 있으며, 이산화탄소의 규제가 한층 강화되는 추세에 있으며 이에 따른 고효율 저공해 보일러의 요구가 점점 커지고 있다. 영국, 독일, 네덜란드, 이탈리아를 포함함 유럽연합(EU)의 경우, 2005년을 기점으로 에너지 사용기기의 고효율화와 친환경성을 강화시킨 Eco-Design Directive와 같은 제도를 도입하여 가정용 가스보일러의 효율 등의 기준을 강화하고 있다. 미국은 현재 연간효율(AFUE)이 85% 이상인 보일러에 대해서 'Energy Star' 마크를 부여하고 있으며, 2009년 1월부터는 연간효율이 90% 이상인 보일러에 대해서는 설치비용의 30%를 정부에서 지원하고 있다.

따라서 향후 독일, 이탈리아를 비롯한 유럽 콘텐싱 가스보일러 시장을 주도할 수 있는 초고효율 그린 콘텐싱 가스보일러의 개발이 필요한 상황이다. 그리고 현재 국내 가스보일러 제조사의 콘텐싱 가스보일러 제품 수준을 세계 최고 수준으로 이끌기 위해서는 열효율 91% 이상의 초고효율, 저NOx, 저CO의 친환경 성능에 응축수 배출 안전성도 반드시

고려되어야 한다.

공해 물질 저감과 효율이 높은 콘텐싱 보일러를 개발하기 위해서는 버너의 개선이 필요하다. 본 연구에서는 작동 조건에 따른 화염의 안정화와 배출 가스 저감을 도모하기 위하여, 화염을 1차원으로 모사하여 버너 내의 온도 분포와 배출 가스 특성을 알아보았다.



(a) Metal fiber burner



(b) Flame structure

Fig. 1. Fiber arrangement and flame field in the metal fiber burner.

* 한양대학교 대학원 기계공학과

** 한양대학교 기계공학과

† 연락처자, ymkim@hanyang.ac.kr

2. 수치해석

2.1. 메탈화이버 버너의 구조

메탈화이버 버너(metal fiber burner)는 금속 섬유를 이용하여 평면 예혼합 화염을 형성하여 만든 버너로 평면화염 형태로서 상향, 하향, 측향 어느 위치에 서나 안정된 화염 형태를 띠고 있고 어떤 모양이나 버너 제작이 가능하다는 이점이 있다. 반면에 평면 화염에서 관찰되는 적색의 적열화염 모드에 의하여 버너 외부로의 열손실에 의하여 기연화염 온도가 낮고, 적열모드의 형성에 따라 메탈화이버 재질의 팽창에 의한 화염형태의 변화 및 내구성이 저하될 수 있는 단점이 있다. 본 연구에서는 폭넓은 당량비 조건에서 안정화된 화염을 만들 수 있는 예혼합 메탈화이버 버너의 특성을 연구하였다.

예혼합 가스버너의 상세 화염을 모델링하기 위한 메탈화이버 버너의 1차원 모델을 Fig. 2와 같이 도식화하였다. 왼쪽에서 혼합가스가 유입되어 오른쪽 방향으로 가스가 진행된다. 메탈화이버 버너의 매트(mat)는 기공성(porosity)을 고려하였다. 매트의 왼쪽과 오른쪽 표면에서 각각 대류와 복사 에 의한 열방출이 일어난다.

2.2. 수치 및 물리 모델링

본 연구의 모델은 정상상태를 기반으로 다루었다. 1차원 모델을 다루기 위하여, 버너가 y축 방향으로, 즉 가스 유입속도에 수직인 방향으로 매우 크다고 가정하였다. 이는 실제로 화염의 두께가 매우 얇게 형성되기 때문에 합리적인 가정이다. 또한 유입되는 속도가 작기 때문에 층류 유동으로 다뤘다. 연소 가스는 이상기체로 가정하였고 버너의 각 측면에서 열손실은 무시하였다. 매트 표면에서의 반응은 무시하고 가스 상의 화학반응만 다루었다. 매트와 가스는 서로 열평형 상태가 아니어서, 대류에 인한 상호 간의 열교환이 이뤄진다. 매트는 spectrally gray로 여기고, 매트의 열전도도와 밀도 등 물성치는 모두 일정하다고 가정하였다.

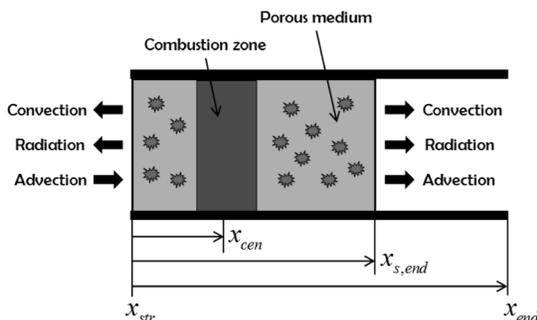


Fig. 2. Schematic configuration of metal fiber burner.

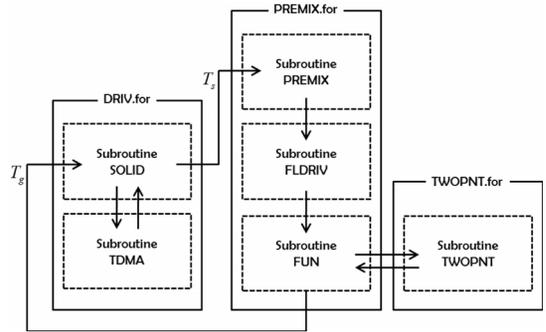


Fig. 3. Flow chart of the modified PREMIX code.

메탈화이버 버너의 화염을 해석하기 위하여, 예혼합 버너 안정화 화염(premixed burner-stabilized flame)을 해석하는 PREMIX 코드를 수정하여 사용하였다. 코드 수정은 크게 두 가지로 설명할 수 있다. 하나는 고체상에 대한 에너지 방정식을 추가한 것이고, 다른 하나는 버너 후류에서 공기의 back-diffusion을 고려하기 위하여 O₂와 N₂의 경계조건을 수정한 것이다[4].

기존 PREMIX 코드는 에너지 방정식은 가스 상에 대해서만 푼다. 하지만 메탈화이버 버너의 매트와 가스 사이에서의 열교환을 고려하기 위하여 고체상에 대한 에너지 방정식을 추가하였다. 기존 PREMIX 코드에서 지배방정식은 FUN이라는 서브루틴(subroutine)에 포함되어 있고, 이 방정식들은 damped Newton method로 짜여진 TWOPNT 코드에 의하여 해를 구하게 된다[1]. 이에 고체상에 대한 에너지 방정식은 Fig. 3과 같이 따로 서브루틴을 구성하고, TDMA로 방정식을 풀었다.

본 연구에서는 가변 열화학 물성치를 사용하였으며 277개 기본 화학반응식과 49개 화학종을 포함하는 GRI-Mech 2.11 mechanism을 이용하였다[3].

2.3. 지배방정식

지배방정식은 기존의 PREMIX 코드에 고체상인 매트에 대한 에너지 방정식을 추가한 것과 같다. 또한 가스 상에 대한 에너지 방정식과 고체상에 대한 에너지 방정식을 서로 연결(coupled)해주기 위하여 대류열전달에 의한 열교환 항 $h_v(T_g - T_s)$ 을 각각 에너지 방정식에 부호를 달리 하여 넣어주었다. 지배방정식은 정상상태, 정압, 1차원 화염 전파로 다음과 같이 표현할 수 있다[1].

- 연속 방정식

$$\dot{m} = \rho_g u A \tag{2}$$

- 화학종 방정식

$$\rho_g u A \frac{dY_k}{dx} + \frac{d}{dx}(\rho_g A Y_k V_k) - A \dot{w}_k W_k = 0 \quad (3)$$

- 가스에 대한 에너지 방정식

$$\begin{aligned} \rho_g u c_{pg} A \frac{dT_g}{dx} - \frac{d}{dx} \left(k_g A \frac{dT_g}{dx} \right) \\ + \sum_{k=1}^K \rho_g A Y_k V_k c_{pk} \frac{dT_g}{dx} \\ + \sum_{k=1}^K A \dot{w}_k h_k W_k - h_v A (T_g - T_s) = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

- 매트에 대한 에너지 방정식

$$\frac{d}{dx} \left(k_{s,eff} A \frac{dT_s}{dx} \right) + h_v A (T_g - T_s) = 0 \quad (5)$$

매트의 열전도도는 식 (7)의 diffusion approximation으로 매트에 의한 복사열전달 효과를 함께 고려하여 식 (6)처럼 유효 값으로 계산하였다[5]. 연소 가스는 이상기체로 가정하였다.

$$k_{s,eff} = k_s + k_{s,rad} \quad (6)$$

$$k_{s,rad} = \frac{16n^2\sigma T_s^3}{3\beta(1-\phi)} \quad (7)$$

- 상태 방정식

$$\rho_g = \frac{p \bar{W}_g}{RT_g} \quad (8)$$

2.4. 경계조건

$$\dot{m} c_{pg} (T_{gL} - T_{inlet}) = k_{gL} \frac{dT_g}{dx} \Big|_L \quad (9)$$

$$\frac{\partial T_g}{\partial x} \Big|_R = 0 \quad (10)$$

$$\begin{aligned} (1-\phi)h_L(T_{gL} - T_{sL}) + (1-\phi)k_s \frac{dT_s}{dx} \Big|_L \\ = \varepsilon_L \sigma (T_{sL}^4 - T_{sur,L}^4) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} (1-\phi)h_R(T_{gR} - T_{sR}) - (1-\phi)k_s \frac{dT_s}{dx} \Big|_R \\ = \varepsilon_R \sigma (T_{sR}^4 - T_{sur,R}^4) \end{aligned} \quad (12)$$

가스에 대한 에너지 방정식의 왼쪽 경계조건은 식 (4)에서 화학 반응 항(chemical source term)과 내부 확산 항(inter-diffusion term), 대류 항(convection term)

Table 1. Solid phase properties

Porosity ϕ	0.91
Heat transfer coefficient at faces h_L, h_R [$W/m^2 \cdot K$]	50.0
Conductivity k_s [$W/m \cdot K$]	0.13
Emissivity $\varepsilon_L, \varepsilon_R$	0.65
Boltzmann constant σ [$kW/m^2 \cdot K^4$]	5.672×10^{-11}
Refractive index n	1.0
Extinction coefficient β [$1/m$]	3100
Ambient temperature $T_{sur,L}, T_{sur,R}$ [K]	400.0

을 제외한 나머지인 이류 항(advection term)과 전도 항(conduction term)의 에너지 균형으로 나타낼 수 있다. 식 (9)에서 세 가지 항이 무시되는 이유는, 버너의 왼쪽 표면에서는 화학반응이 일어나지 않고 매트와 열교환이 없기 때문이다. 가스에 대한 에너지 방정식의 오른쪽 경계조건은 식 (10)처럼 zero gradient로 준다. 매트에 대한 에너지 방정식의 경계조건은 식 (11)과 (12)처럼 대류(convection)와 전도(conduction), 복사(radiation) 열전달의 에너지 균형으로 표현된다. 여기서 ϕ 는 메탈화이버 버너의 기공성을 나타낸다. 여기서 사용된 매트의 물성치 값들은 Table 1과 같다. 화학종 방정식(species equation)의 왼쪽 경계조건은 연료와 공기 혼합물의 질량 분율을 통하여 결정된다. 반면에 화학종 방정식의 오른쪽 경계조건은 매트가 끝나는 부분에서 주변 공기와 만나기 때문에, 주변 공기의 back diffusion 효과를 고려해 주어야 한다. 산소와 질소는 주변 조건에 따라 고정된 값으로 주고, 나머지 화학종은 기존의 PREMIX 코드의 조건 그대로 zero gradient를 준다[4].

3. 결과 및 검토

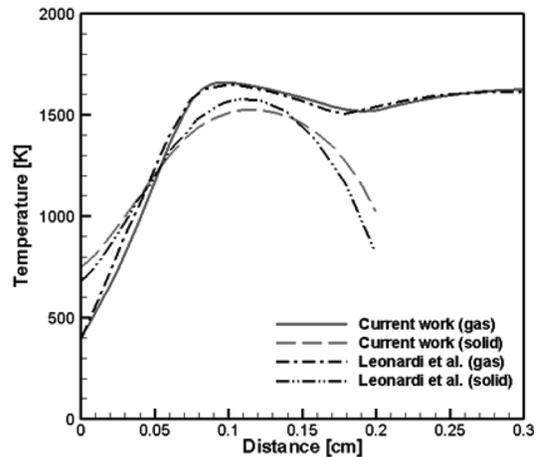


Fig. 4. Profiles of temperature distribution.

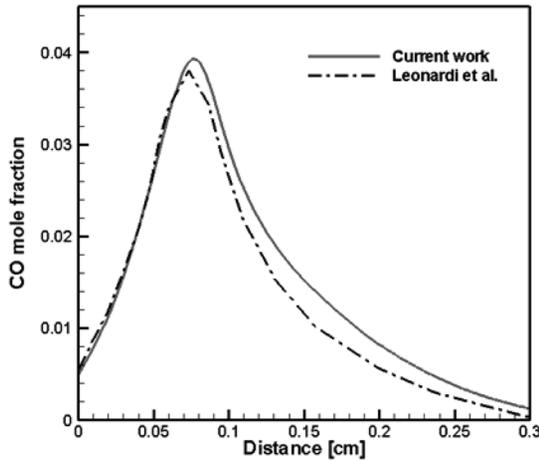


Fig. 5. Profiles of CO mole fraction.

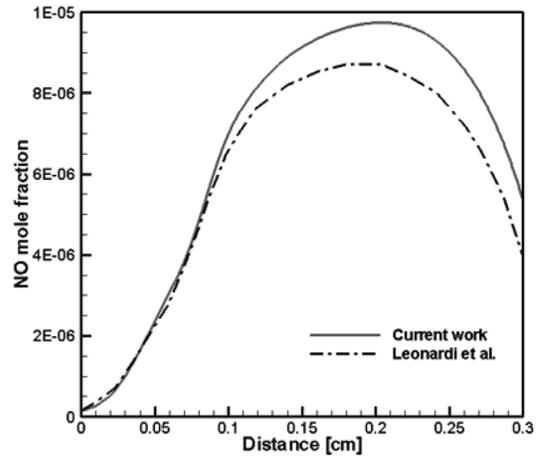


Fig. 6. Profiles of NO mole fraction.

3.1. 수치모델의 예측능력 검증

수정된 PREMIX 코드의 타당성을 확인하기 위하여 Leonardi et al.[4]의 수치해석 결과와 비교를 하였다.

Fig. 4-6에서 볼 수 있듯이, 본 연구에서 사용된 수정된 PREMIX 코드가 선행으로 연구된 수치해석 결과와 비교하였을 때, 온도 분포 및 공해물질인 CO, NO의 분포를 잘 예측한다는 것을 알 수 있다.

3.2. 당량비에 따른 결과

Fig. 7은 당량비(equivalence ratio)를 0.9부터 1.1까지 변화시켰을 때, 온도 분포 및 배출가스 특성을 나타낸다. 화염은 0.09 cm 부근에서 형성된다. 버너는

0.0~0.2 cm에 위치하는데, 입구부분($x < 0.06$ cm)에서 매트 온도보다 높은 이유는 화염에 의해 예열되기 때문이다. 당량비가 높아질수록 최고 온도가 높아지고 하류에서 CO와 H₂의 몰분율이 증가하며, 하류에 생성된 CO와 H₂는 주변 공기와 반응하여 2차적인 연소를 형성하게 된다. 그리고 매트 후류의 단열영역($x > 0.2$ cm)에서는 기체 온도가 다시 증가하게 된다. H₂는 연료가 농후한 영역에서 빠르게 생성되고 post-flame 영역을 지나면서 산화되어 없어지며 CO는 예혼합 화염 영역에서 급격하게 생성되었다가 post-flame 영역에서 빠르게 산화된다. Fig. 7에서 당량비가 증가함에 따라 매트 후류에서 형성되는 화염의 온도가 높아진다. 그 이유는 Fig. 7에서

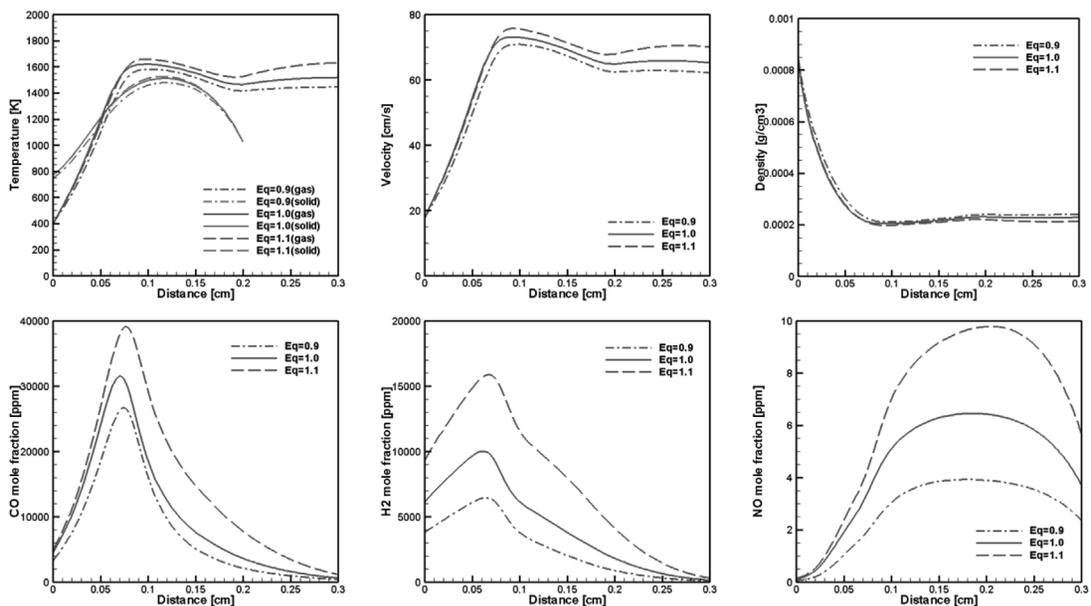


Fig. 7. Effects of equivalence ratio on flame structure and pollutant emission.

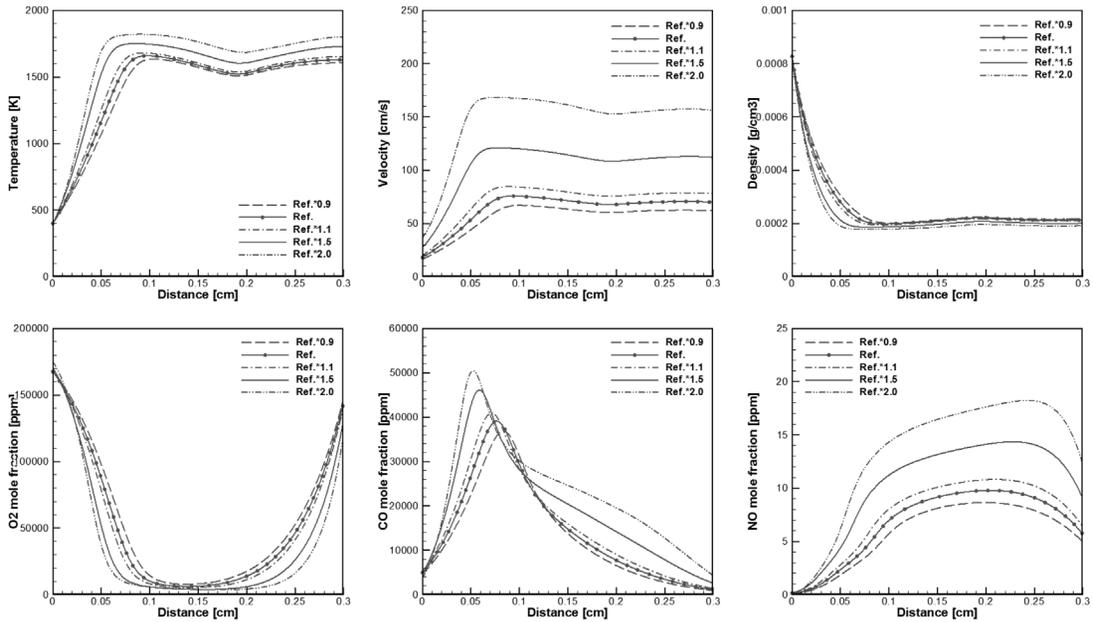


Fig. 8. Effects of thermal load on flame structure and pollutant emission.

알 수 있듯이 연료로 사용될 수 있는 일산화탄소와 수소가 당량비에 비례하여 증가하기 때문에 사료 된다. 이러한 수치해석 결과로부터 본 연구에서 개발한 수치모델이 메탈화이버 버너의 기본화염특성을 잘 모사하고 있음을 알 수 있었다.

3.3. 부하에 따른 결과

기준(reference) 작동조건은 당량비가 1.1이고 질량유량이 $0.015 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{sec}$ 일 때이다. 당량비를 고정하고 질량유량을 0.9배와 1.1배, 1.5배, 2.0배로 변화시켰을 때, 부하가 온도 분포와 배출가스에 어떠한 영향을 주는지 살펴보았다. 부하가 커질수록 최고 온도가 높아지고 고온의 화염장이 상류 쪽으로 이동하며 배출가스의 양은 증가한다. 반면에 기준 작동조건보다 낮은 부하에서는 화염이 형성되지 않았다. 기준 작동조건의 질량유량을 2.0배로 증가시켰을 경우, NO의 생성량이 많아지는데 그 이유는 1,800 K 이상의 온도로 형성된 화염이 thermal mechanism에 의해 NO의 생성을 촉진시킨 것으로 사료된다. 또한 부하가 증가할수록 CO의 최고치가 높아진다. 그 이유는 질량유량이 커질수록 발열량에 비하여 metal fiber로 전달되는 열손실이 상대적으로 작아지고 가스온도가 상승하게 되며 chemical dissociation이 증가하기 때문이다. 그리고 질량 유량이 커지면 Fig. 8에서 볼 수 있듯이 가스 속도가 증가하여 기준작동조건보다 체류시간이 짧아지므로, CO가 산화되는 과정이 지연된다. Fig. 8의 결과는 이 현상을 잘 나타내고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 메탈화이버 버너의 화염장을 모사할 수 있는 1차원 연소모델을 개발하였고 넓은 범위의 운전조건에 대하여 수치계산을 수행하였다. 수치계산결과로부터 본 연구에서 개발한 수치모델이 메탈화이버 버너의 화염 구조와 연소과정, 공해물질의 생성 특성을 잘 예측함을 확인하였다. 본 연구에서는 부상 화염에 대하여 다루지 못하였다. 후속 연구에서는 이를 고려하여 메탈화이버 버너의 화염구조 및 공해물질 생성에 주된 영향을 미치는 매개변수들에 대한 포괄적인 수치계산을 수행하여 메탈화이버 버너의 최적 연소조건을 도출할 계획이다.

후기

이 연구는 지식경제부의 에너지기술개발사업의 일환으로 수행되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] R. J. Kee, 2003, PREMIX Application User Manual, Release 3.7.1.
- [2] R. J. Kee, 1985, A Fortran Program for Modeling Steady Laminar One-Dimensional Premixed Flames, Sandia National Laboratory Report SAND85-8240.
- [3] GRI-Mech Version 2.11, 1st release, 1995.
- [4] S. A. Leonardi, 2000, Partially-Premixed Combustion.

- tion in Porous Radiant Burners, Ph.D. thesis, Purdue University.
- [5] M. H. Akbari, Lean Flammability Limits for Stable Performance with a Porous Burner, *Applied Energy*, Vol. 86, 2009, pp. 2635-2643
- [6] I. G. Lim, 1992, A Numerical Study of Combustion within a Porous Inert Medium Burner, Ph.D. thesis, the University of Texas at Austin.
-

접수일 : 2011. 06. 22
심사완료일 : 2011. 08. 26