

## 論文

## 다공성 매질 접근법을 적용한 하이브리드 로켓 N<sub>2</sub>O 촉매 점화기의 열적 현상

유우준\*, 김수종\*, 김진곤\*\*, 장석필\*\*

### Thermal Phenomena of an N<sub>2</sub>O Catalyst Bed for Hybrid Rockets Using a Porous Medium Approach

Woo-Jun You\*, Soo-Jong Kim\*, Jin-Kon Kim\*\* and Seok Pil Jang\*\*

#### ABSTRACT

In this study, fluid flow and thermal characteristics in a catalyst bed for nitrous oxide catalytic decomposition which is introduced as a hybrid rocket ignition system for small satellites were theoretically considered. To analyze the thermal phenomena of the catalyst bed, a so-called porous medium approach has been opted for modeling the honeycomb geometry of the catalyst bed. Using a Brinkman-extended Darcy model for fluid flow and the one-equation model for heat transfer, the analytical solutions for both velocity and temperature distributions in the catalyst bed are obtained and compared with experimental data to validate the porous medium approach. Based on the analytical solutions, parameters of engineering importance are identified to be the porosity of the catalyst bed, effective volumetric ratio, the ratio of the radius of the catalyst bed to the radius of a pore, heat flux generated by a heater, and pumping power. Their effects on thermal phenomena of the catalyst bed are studied.

#### 초 록

본 연구에서는 소형 위성용 하이브리드 로켓 점화장치에 적용되는 N<sub>2</sub>O 촉매 베드의 유동 및 열적 현상에 대한 이론적인 고찰을 하였다. 허니콤 형상을 가지는 촉매 베드 내의 열적 현상을 분석하기 위해서 다공성 매질 접근법을 사용하였다. 유동장은 Brinkman-extended Darcy 모델을 사용하였고, 온도장은 One-equation 모델을 사용하여 촉매 베드 내에서 유동장 및 온도장에 대한 해석해들을 구하였다. 다공성 매질 접근법을 적용한 모델의 해석해와 기존 실험결과를 비교하여 본 모델의 정확성을 검증하였다. 해석해에 근거하여 N<sub>2</sub>O 촉매 베드에 영향을 미치는 중요한 변수들이 촉매 베드의 기공률, 유효 체적비, 촉매 베드와 기공의 직경비, 공급열, 그리고 펌핑파워임을 확인하였으며 촉매 베드 내에서의 열적현상에 대한 중요 변수들의 효과를 연구하였다.

**Key Words** : Hybrid Rocket(하이브리드 로켓), N<sub>2</sub>O(아산화질소), Catalyst(촉매), Porosity(기공률), Porous Media Approach(다공성 매질 접근법)

† 2006년 5월 23일 접수 ~ 2006년 8월 23일 심사완료

\* 정회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부 대학원

\*\* 정회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부  
연락처, E-mail : spjang@hau.ac.kr  
경기도 고양시 덕양구 화전동 200-1

#### 1. 서 론

하이브리드 추진 시스템은 산화제의 유량을 조절함으로써 연소를 제어할 수 있고 산화제와 연료가 따로 저장되어 고체 추진 시스템에 비해

안전성이 뛰어난 장점을 갖고 있을 뿐만 아니라 액체 추진 시스템보다 구조가 간단하다는 장점 또한 갖고 있어 최근 국내외에서 연구가 활발히 진행되고 있다[1-6]. 그러나 현재 널리 사용되고 있는 스파크 점화 방식은 점화시 발생하는 압력 진동으로 인해 연소 불안정을 유발하거나, 운용 외부환경에 따라 부탄이나 프로판과 같은 가연성 가스와 산화제의 혼합비를 변화시켜야 하는 문제점을 가지고 있다[3,4,5]. 이런 문제점을 해결하기 위해서 하이브리드 추진 시스템에 사용될 수 있는 신뢰성 있는 점화기에 대한 연구가 필요하며 그 중에서도 산화제인  $N_2O$ 를 공용할 수 있는  $N_2O$  촉매 점화기에 대한 관심이 집중되고 있다.

$N_2O$  촉매 점화기는  $N_2O$ 의 열분해시 발생하는 고온의 열을 점화원으로 이용하는 것으로 압력진동이 거의 발생하지 않기 때문에 하이브리드 추진 시스템의 점화장치에 적용할 경우 기존 스파크 점화장치에서 발생하는 문제점인 연소 불안정의 유발 요인을 해결할 수 있다. 또한 단일 가스를 사용함으로써 점화를 위한 별도의 가연성 기체가 요구되지 않음에 따라 점화 신뢰성을 확보할 수 있다. Zakirov 등은  $N_2O$ 의 열분해 반응을 저온에서 일으키기 위해 촉매를 사용하였으며 촉매 사용시 촉매 베드내의 온도가  $200^\circ C$  이상이면 열분해가 시작된다고 보고하고 있다[7,8,9]. 따라서 외부 열원을 이용하여 초기 촉매 베드 내부에서 열분해를 일으킬만한 충분한 온도를 유지하는 것은  $N_2O$  분해반응을 발생시키기 위한  $N_2O$  촉매 점화기의 중요한 요구조건이다.

본 연구에서는  $N_2O$  촉매 점화기내에서 촉매 베드의 기공률,  $N_2O$ 의 유량, 촉매 베드에 공급되는 외부 열량에 따라 촉매 점화기내에서의  $N_2O$  유동 특성 및 온도 분포 특성을 이론적으로 연구하였다. 이를 위해서 촉매 베드를 다공성 매질로 가정하여 온도장과 유동장에 대한 해석해를 구하였다. 해석해의 타당성을 검증하기 위해서 해석해에서 얻은 결과들은 Zakirov 등 [8]이 제시한 실험 결과와 비교하였다. 또한 해석해를 이용하여  $N_2O$  촉매 점화기의 중요한 요구조건인 초기 촉매 베드 내부 온도를  $200^\circ C$  이상 유지시키기 위해서 필요한 작동 조건들을 분석하였다.

## II. 본 론

### 2.1 $N_2O$ 촉매 분해반응

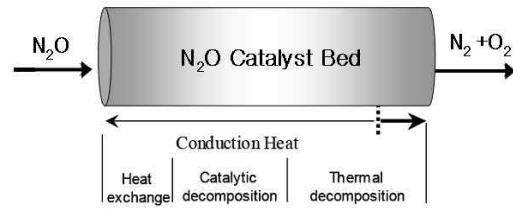
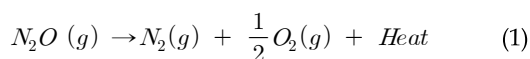


Fig. 1. Schematic of  $N_2O$  catalytic decomposition in the catalyst bed[8]

Fig. 1은 촉매 베드 내부에서의  $N_2O$  분해과정을 나타낸 것이다. Fig. 1에서와 같이 촉매 베드 내부는 외부 열원에 의해 공급된 열이 촉매 베드로 전달되는 영역, 촉매에 의해  $N_2O$ 가 분해되는 영역, 분해에 의해 열이 발생하는 영역으로 구분할 수 있다. 이 때 촉매 베드 내부에서는 식 (1)과 같이 화학반응이 일어나며 아산화질소 1mole 당 82kJ의 열을 발생하고 반응을 시작하기 위해 요구되는 활성화 에너지는  $250kJ/mole$ 이다[8].  $N_2O$  열분해 과정을 하이브리드 로켓의 점화 장치로 사용하기 위해서 점화기 내부를 외부 열원을 사용하여  $1000^\circ C$  이상 가열해야 하나 촉매 베드를 사용함으로써 반응 시작 온도를  $200^\circ C$ 로 크게 낮출 수 있음을 최근 연구 결과들이 보고하고 있다[7,8,9]. 이러한 저온 반응을 위해서는 반응 초기에 촉매 베드를  $200^\circ C$  이상 가열할 수 있는 열량의 공급이 요구되며, 충분한 반응이 이루어진다면 외부의 열원공급 없이 자체적인 분해열을 이용하여 촉매 반응을 연속적으로 유지할 수 있기 때문에, 초기  $200^\circ C$  이상의 온도를 유지하는 영역은 넓고 온도 분포가 균일해야 보다 많은 양의  $N_2O$ 가 분해하게 되어 효율적인 점화기로서 사용될 것으로 판단된다. 따라서 촉매 베드의 기공률,  $N_2O$ 의 유량, 촉매 베드에 공급되는 외부 열량에 따라 촉매 베드 내에서의 온도장을 분석하는 것은  $N_2O$  촉매 점화기의 성능을 예측하는데 중요한 역할을 할 것으로 사료되며 본 논문에서는 이를 위해서 해석적으로 촉매 베드 내에서의 유동장 및 온도장을 구하였다.

### 2.2 지배방정식

본 연구에서 분석한 촉매 베드의 지지체는 제올라이트(Zeolite)이고 로듐(Rh)이 담지되어 있는 것으로 그 형상은 Fig. 2의 왼쪽 그림과 같다. 일반적으로 사용되는 촉매는 신터드(Sintered), 폼 메탈(Foam Metal), 팩 베드(Pack Bed) 형상인 다공성 매질들이고 본 연구에서 분석한 촉매 역시 허니콤(Honeycomb) 형상의 다공성 매질이기에 때

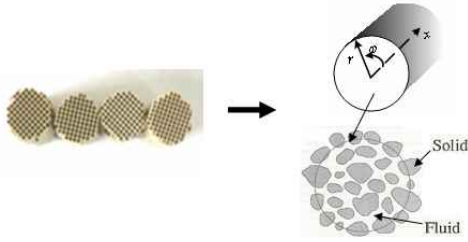


Fig. 2. Model of catalyst bed(Zeolite+Rh) with a porous medium approach

문에 해석 모델을 Fig. 2의 오른쪽 그림과 같은 다공성 매질로 모델링하였다[10,11].

본 연구에서 해석하고자 하는 허니콤 형상의 촉매 베드 내에서의 유동은 정상상태, 층류이며 속도 및 온도가 완전 발달된 유동으로 가정하였다. 그 이유는 본 연구에서 분석하고자 하는 허니콤 형상의 다공성 매질의 기공 크기가 1mm 정도 이어서 Reynolds 수가 매우 작기 때문이다. 또한 벽면으로는 균일한 열 공급이 이루어지고, 열역학적 물성은 일정한 것으로 가정하였다. 다공성 매질 접근법을 사용하여 유동장을 구하기 위해서 Brinkman-extended Darcy 모델을 사용하였으며 식(2)와 같다[10,11,12].

$$\frac{d\langle p \rangle_f}{dx} = -\frac{\mu_f}{K} \varepsilon \langle u \rangle_f + \frac{\mu_f}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \langle u \rangle_f}{\partial r} \right) \quad (2)$$

여기서  $\langle p \rangle_f$ ,  $\mu_f$ ,  $\langle u \rangle_f$ ,  $\varepsilon$ ,  $K$  그리고  $r$ 은 각각 압력, 점성계수, 유체의 속도, 기공률(Porosity), 투과율(Permeability, K), 그리고 반경 방향 길이를 나타낸다. 또한  $\langle \rangle_f$ 는 유체의 체적 평균을 의미하며 식 (3)과 같다.

$$\langle \phi \rangle_f = \frac{1}{V_f} \int_{V_f} \phi dV \quad (3)$$

에너지 방정식은 다공성 매질에서 열적 평형 상태(Thermal equilibrium)인 고체와 유체의 온도가 같다는 조건하에서 One-equation 모델을 사용하였고, 그 식은 다음과 같다[11].

$$\varepsilon \rho_f c_f \langle u \rangle_f \frac{d\langle T \rangle}{dx} = k_{eff} \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{d\langle T \rangle}{dr} \right) \quad (4)$$

$k_{eff}$ 는 유효 열전도 계수로서  $[k_s(1-\varepsilon) + k_f\varepsilon]$ 으로 표현되고  $\rho_f$ ,  $c_f$ ,  $k_s$ ,  $k_f$ ,  $\langle T \rangle$ 는 각각 밀도, 정압비열, 고체 및 유체의 열전도계수, 유체의 온도를 나타낸다. 경계조건은 다음과 같다.

$$\langle u \rangle_f = 0, \langle T \rangle = T_w \quad \text{at } r = R_0 \quad (5)$$

$$\frac{d\langle u \rangle_f}{dr} = 0, \frac{d\langle T \rangle}{dr} = 0 \quad \text{at } r = 0 \quad (6)$$

지배 방정식을 단순화하기 위해 다음과 같이 무차원화 하였다[10].

$$U = \frac{\langle u \rangle_f}{u_{f,m}}, \eta = \frac{r}{R_0}, Da = \frac{K}{R_0^2} \quad (7)$$

$$\theta = \frac{\langle T \rangle - T_w}{\frac{q_w'' R_0}{k_{eff}}}, \frac{1}{\mu_f} \frac{d\langle p \rangle_f}{dx} \left( \frac{R_0^2}{u_{f,m}} \right) = P \quad (8)$$

여기서  $Da$ ,  $q_w''$ ,  $\mu_f$ ,  $R_0$ ,  $u_{f,m}$ ,  $P$ ,  $U$ ,  $\theta$ 는 각각 Darcy number, 열 유속, 유체 점성계수, 촉매 베드 반경, 유체 평균 속도, 무차원화 한 압력, 속도, 온도를 나타낸다. 여기서 투과율 K는 Fig. 2와 같은 형상을 가진 무한히 큰 매질에서 Poiseuille flow 유동과 Darcy 속도로부터 식(9)와 같이 구할 수 있다.

$$K = \frac{r_0^2}{8} \varepsilon \quad (9)$$

완전 발달된 조건하에서 일정한 열 유속의 경우 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$\frac{d\langle T_m \rangle}{dx} = \frac{dT_w}{dx} = \frac{d\langle T \rangle}{dx} \quad (10)$$

그리고 실린더 형상에서의 에너지 평형 방정식을 이용하여 촉매 베드내로 들어오는 열 유속을 다음과 같이 구하였다.

$$q_w'' = \varepsilon \rho_f c_f u_{f,m} \frac{R_0}{2} \frac{d\langle T \rangle}{dx} \quad (11)$$

식 (7)~(11)을 식 (2)와 (4)에 적용하면 무차원 운동량 및 에너지 방정식을 얻을 수 있고 이는 식 (12), (13)과 같다. 식 (14), (15)는 이에 따른 경계조건을 나타낸다.

$$\frac{d^2 U}{d\eta^2} + \frac{1}{\eta} \frac{dU}{d\eta} - \frac{\varepsilon}{Da} U = P \quad (12)$$

$$2U = \frac{d^2 \theta}{d\eta^2} + \frac{1}{\eta} \frac{d\theta}{d\eta} \quad (13)$$

$$U = 0, \theta = 0 \quad \text{at } \eta = 1 \quad (14)$$

$$dU/d\eta = 0, d\theta/d\eta = 0 \quad \text{at } \eta = 0 \quad (15)$$

무차원 속도분포는 경계조건 식(14), (15)를 적용하면 식(16)과 같다[10,12].

$$U(\eta) = \frac{P}{\varepsilon/Da} \left[ \frac{I_0(\sqrt{\varepsilon/Da} \eta)}{I_0(\sqrt{\varepsilon/Da})} - 1 \right] \quad (16)$$

여기서  $I_0, I_1$ 는 차수가 0, 1차인 수정된 1종 Bessel 함수를 나타내며, 무차원 압력강하는 식 (17)의 유량 조건을 이용하여 구할 수 있다[10,12].

$$\pi R_o^2 u_{f,m} = \int_0^{R_o} \langle u \rangle_f 2\pi r dr \quad (17)$$

그 결과 무차원 압력강하량은 식 (18)과 같이 표현된다.

$$P = \frac{\varepsilon}{2Da} \left[ \frac{I_1(\sqrt{\varepsilon/Da})}{I_0(\sqrt{\varepsilon/Da}) \sqrt{\varepsilon/Da}} - \frac{1}{2} \right] \quad (18)$$

무차원 온도 분포는 식 (13)과 경계조건 식(14), (15)로부터 식(19)과 같은 관계를 얻을 수 있다.

$$\theta(\eta) = \frac{a_4}{\varepsilon/Da} [I_0(\sqrt{\varepsilon/Da} \eta) - I_0(\sqrt{\varepsilon/Da})] - \frac{1}{4} a_5 (\eta^2 - 1) \quad (19)$$

여기서  $a_4 = \frac{2P}{\varepsilon/Da I_0(\sqrt{\varepsilon/Da})}$ ,  $a_5 = \frac{2P}{\varepsilon/Da}$  을 나타낸다. 따라서 식 (16), (19)의 무차원 속도 및 온도분포는 기공률과 Darcy number의 비로 표현할 수 있으며, 촉매 베드의 전체 직경과 기공의 직경이 결정되면 반지름 방향으로 따른 무차원 속도 및 온도 분포를 구할 수 있다.

### III. 결과 및 분석

#### 3.1 무차원 속도 및 온도분포

Fig. 3은 동일 기공률 조건에서 식 (16)을 적용하여 기공의 크기에 따른 촉매 베드 반지름 방향으로의 무차원 속도 분포를 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 반지름 방향으로의 속도 분포는 기공의 크기가 작을수록 균일해지고 기공의 크기가 커질수록 속도 분포의 균일도가 떨어짐을 보여주고 있다. 이는 동일 기공률 조건에서 기공의 크기가 작아질수록 기공의 개수는 많아지고 그 결과 촉매 베드 내부에  $N_2O$ 가 균일하게 공급되어 촉매 베드 내부에서  $N_2O$ 가 균일하게 분해될 수 있음을 의미한다.

Fig. 4는 동일 기공률 조건에서 식 (19)를 적용하여 기공의 크기에 따른 촉매 베드에서 반지름 방향으로의 무차원 온도 분포를 보여주고 있다. 본 결과는 동일 기공률 조건에서 기공의 크기가

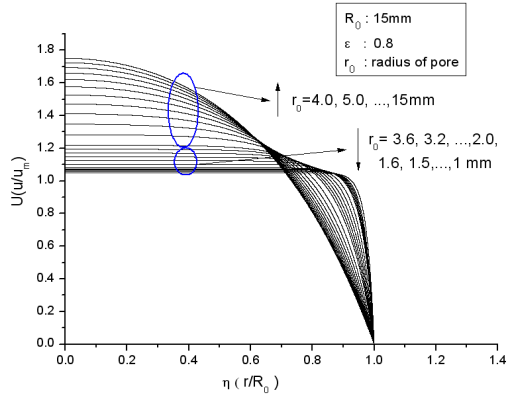


Fig. 3. Non-dimensional velocity profiles of the radial direction in the catalyst bed

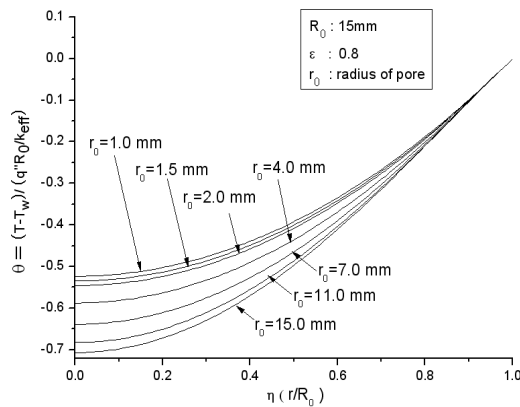


Fig. 4. Non-dimensional temperature profiles of the radial direction in the catalyst bed

작아질수록 촉매 베드 외벽과 촉매 베드 중심과의 온도차가 작아짐을 보여주며, 그 결과 촉매 베드 반지름 방향으로의 온도분포 균일도가 우수해져서 촉매 베드 내에서 균일한 반응을 얻을 수 있을 것으로 예측된다.

#### 3.2 다공성 매질 접근법 모델에 대한 검증

촉매 베드 내의 유동장과 온도장에 대한 해석 해와 Zakirov et al.[6,8] 등에 의해서 실시된 실험 결과를 이용하여 본 논문에서 제시한 촉매 베드를 다공성 매질로 묘사한 모델의 타당성을 검증하고자 한다. Table 1은 Zakirov et al. [6, 8]등이 사용한 실험조건이고 본 논문에서 제시한 해석해 결과도 Table 1의 실험조건을 사용하여 구하였다. 특히, 촉매 베드 기공의 반경은 식 (20), (21)로부터 구할 수 있고, 촉매 베드 내부의 Bulk mean 온도는 식 (22)와 같이 표현된다[13].

**Table 1. Experimental conditions of N<sub>2</sub>O catalyst bed[8]**

System radius (mm)	12
Catalyst bed length (mm)	60
Mass flow rate (g/sec)	0.073
Pore radius (mm)	0.108
N <sub>2</sub> O inlet temperature (°C)	120
Thermal conductivity-fluid (W/m·K)	0.022
Thermal conductivity-solid (W/m·K)	40
Porosity	0.478

$$\frac{dP}{dz} = -\frac{\rho u_{f,m}^2 (1-\varepsilon)}{d_p} \left[ \frac{150(1-\varepsilon)\mu}{d_p \rho u_{f,m}} + 1.75 \right] \quad (20)$$

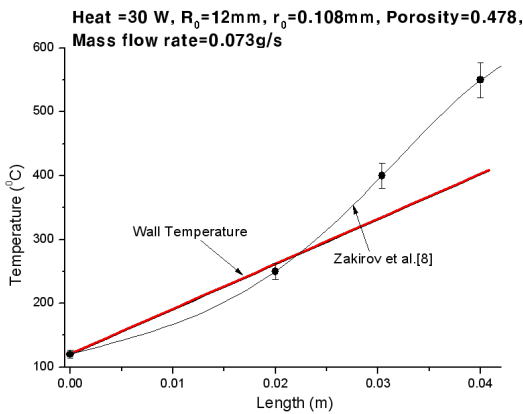
$$d_f = \frac{4\varepsilon d_p}{\pi} \quad (21)$$

$$\langle T_m \rangle = \left\langle \frac{1}{u_{f,m} A_C} \int T u dA_C \right\rangle$$

$$= \frac{1}{u_{f,m} A_C} \int \langle T \rangle \langle u \rangle_f dA_C - 0.0625 \frac{q_p''}{k_f} d_f \quad (22)$$

여기서,  $d_p$ ,  $d_f$ ,  $A_C$ ,  $q_p''$ 는 각각 입자의 크기, 기공의 직경, 촉매 베드 내에서 유동 방향에 수직한 유체의 단면적, 기공에 전달되는 열 유속을 나타낸다. 또한, 균일 열 유속조건 식 (11)과 Bulk mean 온도 식 (22)에 무차원 유동장 및 온도장 식 (16), (19)를 적용하여 촉매 베드 길이 방향에 따른 온도분포를 구하였다.

Fig. 5는 Table 1의 실험 조건에 대해 30 W의 열 공급이 있는 경우, Zakirov et al. [8]의 실험 결과와 동일 조건에서의 본 모델을 이용하여 구

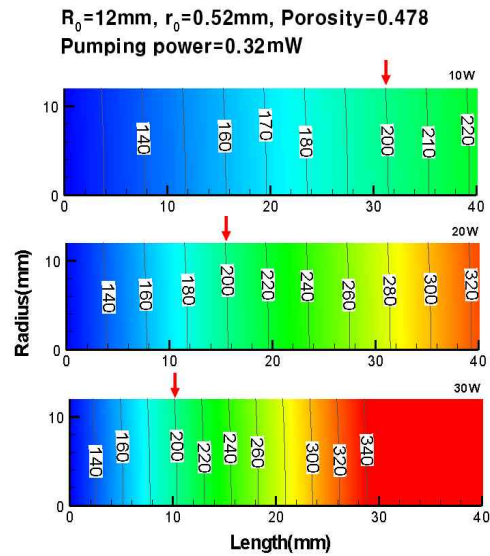


**Fig. 5. Axial temperature profile in the catalyst bed**

한 해석해를 보여주고 있다. 해석해의 경우는 촉매 베드의 외벽 온도를 촉매 베드의 길이방향으로 나타내었으며 실험 결과는 촉매 베드의 외벽 온도를 나타낸 것이다. 실험 결과와 해석 결과가 전체적으로 일치함을 보여주고 있다. 그러나 30mm이후 실험 측정값과 해석해의 차이가 커지는데 이는 실험값의 경우 N<sub>2</sub>O의 열분해 반응에 의해 발생한 열량이 고려되었으나 해석해의 경우 그 열량을 고려하지 않았기 때문에 차이를 보이는 것으로 사료된다. 본 연구의 목적은 촉매 베드 내의 초기 점화 조건 즉 200°C 이상의 온도 조건을 만족시키는 영역을 구별하는데 있다. 따라서 열분해 반응에 의해서 발생된 열량을 고려하지 않고 다만 외부에서 가해지는 열량에 의해서 결정되는 촉매 베드 내의 온도분포가 초기 점화 조건 즉 200°C 이상의 온도 조건을 만족하는 지 분석하는 것이 중요하다고 사료된다.

**3.3 열 공급량에 따른 촉매 베드내의 열적 현상**

Fig. 6은 Table 1과 같은 실험조건에 대해 촉매 베드로 가해지는 열량을 10, 20, 30 W로 변화를 주었을 경우 촉매 베드 내의 온도분포를 나타낸 것이다. 10, 20, 30 W 경우 모두 촉매 베드의 반지름 방향에 비해서 길이방향으로의 온도 구배가 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 동일 기공률 및 펌핑파워(Pumping Power)조건에서 촉매 베드 기공의 크기가 작아져 반지름



**Fig. 6. Effect of heat generated at the side wall on the temperature distribution in the catalyst bed**

방향으로의 온도분포가 균일해진 반면, 0.067 g/s의 적은 유량이 유입되어 촉매 베드 길이 방향으로 온도가 증가한 결과이다. 따라서 Fig. 6과 같은 형상을 가진 촉매베드는 균일한 온도분포를 가져올 수 있지만, 기공률이 작아서 적은 N<sub>2</sub>O 유량이 촉매 베드 내부로 유입되는 문제점이 있을 수 있다. 또한 촉매 베드로 가해지는 외부의 열공급이 증가할수록 촉매 베드의 유입구로부터 길이방향으로 보다 가까운 지점에서 점화조건(200℃이상)에 도달하는 것을 확인할 수 있다.

### 3.4 기공률에 따른 촉매 베드내의 유동 및 열적현상

Fig. 7은 동일 펌핑파워 조건과 N<sub>2</sub>O 촉매 베드 벽면에 일정한 열공급이 있는 경우, 기공률 변화에 따른 촉매 베드 내에서의 온도분포를 보여주고 있다. Fig. 7에서 기공률이 증가할수록 촉매 베드 외벽과 촉매 베드 중심과의 온도차가 증가하고 온도분포가 불균일해짐을 확인할 수 있다. 따라서 비록 기공률이 증가하면 압력강하가 작아지고 유입되는 N<sub>2</sub>O 유량은 증가하지만 촉매 베드 내에서 분해 반응을 일으킬 수 있는 영역 즉 점화조건인 200℃ 이상에 도달하는 촉매 베드의 영역이 감소하게 되어 분해를 일으키는 N<sub>2</sub>O 유량이 상대적으로 감소하게 된다. 반면 기공률이 작은 경우 동일 펌핑파워 조건에서 촉매 베드 반지름 방향으로 온도분포가 균일해지고 길이 방향으로 온도가 증가하게 되어 분해반응을 일

으킬 수 있는 촉매 베드내의 영역이 증가하게 된다. 그러나 촉매베드내로 유입되는 유량이 감소하게 되어 분해되는 N<sub>2</sub>O 양이 작아지고 그 결과 촉매 점화기의 성능을 악화시킬 수 있는 문제점이 발생할 수 있다. 따라서 동일 펌핑파워 조건에서 최적의 N<sub>2</sub>O 촉매 베드 설계 시 고려해야 할 사항은 촉매 베드의 기공률 변화에 따라 촉매 베드에 유입되는 N<sub>2</sub>O 유량과 촉매 베드 전체 영역에 대해 점화조건(200℃ 이상)에 해당하는 영역이 차지하는 비율임을 알 수 있다.

### 3.5 최적의 N<sub>2</sub>O 촉매 베드 설계 방법

동일 펌핑파워 조건에서 촉매 베드로 유입되는 N<sub>2</sub>O 질량유량이 많을수록 그리고 촉매 베드 전체 체적 중 N<sub>2</sub>O의 분해 반응이 일어나는 조건(200℃ 이상)에 해당하는 체적이 커질수록 N<sub>2</sub>O 촉매 베드의 분해 성능이 우수할 것으로 기대할 수 있다. 따라서 촉매 베드의 기공률에 따른 촉매베드로 유입되는 유량과 촉매 베드 전체 체적에 대해 점화조건(200℃ 이상)에 해당하는 체적비인 유효 체적비(Effective volumetric ratio),  $V_{eff}$ 의 영향을 조사하였다.

$$V_{eff} = \frac{V_{N_2O > 200^\circ C}}{V_{N_2O, total}}, \quad 0 \leq V_{eff} \leq 1 \quad (23)$$

여기서  $V_{N_2O > 200^\circ C}$ 는 점화조건인 200℃ 이상을 유지하는 촉매 베드의 체적,  $V_{N_2O, total}$ 은 촉매 베드 전체 체적을 나타낸다. Fig. 8은 N<sub>2</sub>O 촉매 점화기 외부에서 공급해 주는 열량이 제한되는 경우[9], 기공률 변화에 따른 N<sub>2</sub>O의 유량과 유효 체적비의 영향을 보여주고 있다. 촉매 베드 내에 기공률이 커질수록 N<sub>2</sub>O의 유량은 점점 커지지만 유효 체적비는 점점 작아지게 되어 촉매 베드 내에서 N<sub>2</sub>O의 분해 반응이 균일하게 일어나지 못한다. 또한 촉매 베드 내에 기공률이 작아질수록 유효 체적비는 1에 가까워져 N<sub>2</sub>O의 분해 반응이 촉매 베드 내에서 균일하게 일어나지만 촉매 베드내로 유입되는 유량이 작아져서 충분한 로켓 점화장치로 사용되기 힘들다. 따라서 촉매 베드에서 최적의 기공률이 존재함을 알 수 있으며 N<sub>2</sub>O 촉매 베드의 점화 용량과 촉매 베드 내에서 최소 유효 체적비가 설계 조건으로 주어진다면 최적의 기공률을 Fig. 8을 이용하여 구할 수 있을 것으로 사료된다. 예를 들면 최소 유효 체적비가 0.6, 동일 펌핑파워(0.26mW) 및 외부에서 가해주는 동일 열량 조건(15W)에 대해 유효 체적비에 맞는 기공률과 유량 범위를 Fig. 8이 보

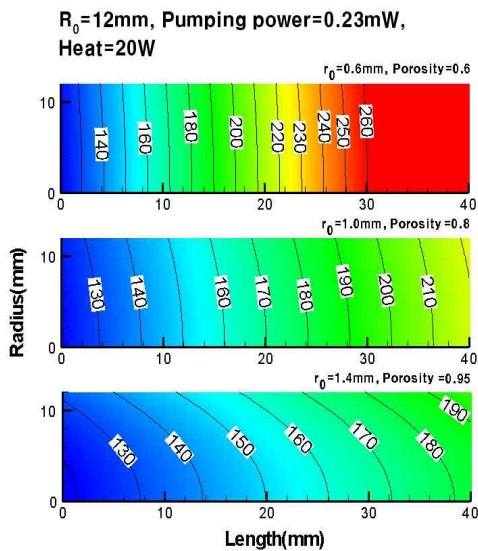


Fig. 7. Effect of the porosity on the temperature distribution in the catalyst bed

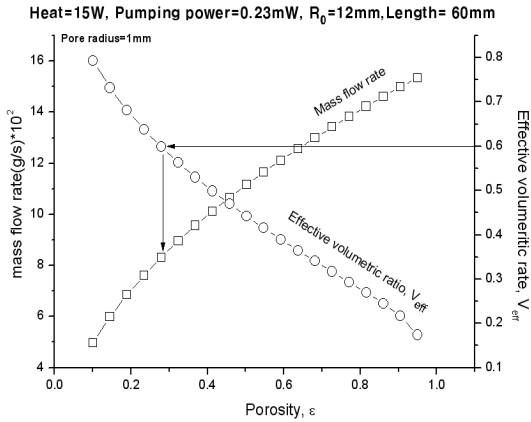


Fig. 8. Effect of the porosity on both mass flow rate and the effective volumetric ratio of the N<sub>2</sub>O catalyst bed

여주고 있다. 여기서 유효 체적비가 0.6이고 N<sub>2</sub>O 유량이 가장 큰 부분은 기공률이 0.25이면서 기공의 반지름이 1.0mm가 됨을 알 수 있다. 즉 0.23mW의 동일 펌핑과워 조건과 15W의 열량을 촉매 베드 외부에서 가해주는 조건으로 N<sub>2</sub>O를 0.25의 기공률을 가지는 촉매 베드로 유입시킬 경우 분해 반응 조건을 만족시키는 촉매 베드의 영역은 전체 영역의 60%이며 질량유량은 약 0.08g/sec임을 알 수 있다. 이처럼 본 연구 결과를 이용하여 촉매 베드의 기공률을 디자인 할 수 있다.

#### IV. 결 론

N<sub>2</sub>O 촉매 점화기를 하이브리드 추진시스템에 적용하고자 다공성 매질 접근법을 이용하여 촉매 점화기 내부의 유동장과 온도장에 대한 해석해를 구하였으며 해석해의 정확성을 검증하기 위하여 Zakirov et al.[8]의 실험 결과와 본 연구에서 사용한 모델의 해석적인 값을 비교하여 잘 일치함을 확인하였다. 또한 본 연구에서 제시된 모델의 해석해를 이용하여 Zakirov et al.[8]이 제시한 Table 1의 실험조건 및 동일 펌핑과워조건 하에서 촉매 베드 외부에서 열 공급량을 10, 20, 30W로 다르게 하였을 경우 촉매 베드 내에서의 열적 현상을 분석하였다. 그 결과 촉매 베드 내에서의 열적 현상을 다음과 같이 분석할 수 있었다.

첫째, 열 공급량이 증가할수록 촉매 베드 내에서 점화조건에 해당하는 영역이 증가했으며, 본 모델을 이용하여 열 공급량에 따라 촉매 베드 내에서 N<sub>2</sub>O의 분해 반응이 시작되는 영역을 예측할 수 있었다.

둘째, 동일 펌핑과워 조건과 외부로부터 가해지는 열량이 일정한 경우 촉매 베드의 기공률 변화에 따른 촉매 베드 내의 열적현상을 분석하였다. 그 결과 기공률이 작을수록 촉매 베드의 반지름 방향으로는 온도분포가 균일해지고 촉매 베드 내에서 N<sub>2</sub>O의 점화조건에 해당하는 영역 즉 유효 체적비가 증가하지만 유입되는 N<sub>2</sub>O 유량이 적어지게 된다. 반면에 기공률이 증가할수록 촉매 베드로 유입되는 N<sub>2</sub>O 유량은 증가하지만 온도분포의 균일도가 떨어져 점화조건에 해당하는 영역이 감소함을 확인하였다.

따라서 본 연구 결과를 통해서 N<sub>2</sub>O 촉매 베드 설계 시 중요한 인자는 동일 펌핑과워 조건에서 기공률에 따른 촉매 베드로 유입되는 N<sub>2</sub>O 유량, 촉매 베드 외부에서 공급되는 열원 그리고 촉매 베드 전체 영역중 점화조건에 해당하는 영역임을 확인할 수 있었다. 특히 설계 조건으로 유효 체적비나 분해 반응해야 할 N<sub>2</sub>O 유량이 주어진다면 본 모델을 이용하여 펌핑과워에 대한 촉매 베드 형상에 맞는 최적의 기공률을 설계할 수 있음을 확인하였다.

#### 참고문헌

- 1) 김수중, 김진곤, 이승철, 유우준, 이정표, 길성만, 국태승, "하이브리드 로켓의 고체 연료 길이 변화에 따른 후퇴율 거동에 관한 연구", 한국항공우주학회 춘계학술대회 논문집, 2005, pp. 517-520.
- 2) 유덕근, 김진곤, 문희장, 김수중, 국태승, "하이브리드 연소에서 낮은 범위의 유량에서 압력에 따른 고체연료 후퇴율 변화에 대한 연구", 한국항공우주학회 추계학술대회 논문집, 2003, pp. 1031-1034.
- 3) Meadors, C., Elsasser, J. E., Wright, A. B., and Hudson, M. K. "Design of an Optical Port in the Combustion Chamber of a Labscale Hybrid Rocket Motor", AIAA 2000-3888. 36th AIAA/ASME/SAE/Joint Propulsion Conference and Exhibit 16-19, July 2000. Huntsville, AL.
- 4) Gany, A., "Scale Effects in Hybrid Motors under Similarity Conditions", AIAA 96-2846, 32nd AIAA/ASME/SAE/Joint Propulsion Conference, Lake Buena Vista, FL, July 1-3, 1996.
- 5) Gary K. Lund, 'Development and Lab-Scale Testing of a Gas Generator Hybrid Fuel in Support of the Hydrogen Peroxide Hybrid Upper Stage Program", AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and

Exhibit, Salt Lake City, Utah, July 8-11, 2001.

6) Zakirov, V., Richardson, G., and Sweeting, M., "Surrey Research Update on N<sub>2</sub>O Catalytic Decomposition for Space Applications", AIAA 2001-3922, 37th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, 8-11, July. 2001.

7) 전정규, 김길영, 김치봉, 이성택, "소형위성용 전기저항제트 엔진의 성능시험", 항공우주학회 추계학술대회 논문집, 2003, pp. 1073-1077.

8) Zakirov, V. Sweeting, M., Guildford, and Lawrence, T., "An Update on Surrey Nitrous Oxide Catalytic Decomposition Research", SSCXI-01-2, 15th AIAA/USU Conference on Small Satellites.

9) Gibbon, D., Baker, A. M and Guildford, "Development of 50-100 milliNewton Level Thrusters For Low Cost Small Spacecraft", AIAA 2002-4150, 38th AIAA/ ASAME/ SAE/

ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit.

10) Kim, S. J., Yoo, J. W., Jang, S. P., "Thermal Optimization of a Circular- Sectored Finned Tube Using a Porous Medium Approach", ASME, Vol. 124, 2002, pp. 1026-1033.

11) Kim, S. J., and Jang, S. P., "Effect of Darcy Number, The Prandtl Number, and The Reynolds Number on Local Thermal Equilibrium", Int. J. Heat Mass Transfer Vol. 45, 2002, pp. 3885-3896.

12) Haji-Sheikh, A., Vafai, K., "Analysis of flow and heat transfer in porous media imbedded inside various-shaped ducts. Int. J. Heat Mass Transfer Vol. 47, 2004, pp. 1889-1905.

13) Jang, S. P., Kim, S. J., and Choi, S. U. S., "Bulk Mean Temperature in Porous Medium Analysis", Int. J. Heat Mass Transfer Vol. 47, 2004, pp. 5603-5607.