

탱크 내 N₂O액체산화제의 유량공급특성에 관한 연구

조민경* · 허준영* · 조승현* · 성유진* · 김진곤** · 문희장** · 성홍계**

Study on Flow-Supply Characteristics of the Liquid Oxidizer N₂O Reserved in a Tank

Mingyoung Cho* · Junyoung Heo* · Seunghyun Cho* · Yoojin Sung* · Jinkon Kim** · Heejang Moon** · Hong-Gye Sung**

ABSTRACT

The study focused on the flow-supply characteristics of the liquid oxidizer N₂O reserved in a tank without any pressurization devices. It was taken accounted that the change of material properties to temperature in the oxidizer tank and the discharge coefficients of both liquid and gas for more precise prediction of the supply mass-flow rate of N₂O oxidizer. To validate the prediction model derived in the study, the experiments were conducted and compare with the theoretical results.

초 록

별도의 가압장치가 없이 산화제탱크 내에 저장된 N₂O액체산화제가 공급될 때 액체에서 기체로의 상변화를 고려하여 N₂O액체 산화제의 유량공급특성을 예측하였다. 보다 정확한 산화제 공급특성을 계산하기 위해 산화제의 압력과 온도에 따른 N₂O의 물성치 변화를 고려하였으며 오리피스 형상과 토출계수 관계식을 이용하여 산화제 유량을 계산하였다. 그리고 산화제 공급에 따른 산화제탱크 내의 압력변화를 측정하고 해석결과와 비교하였다.

Key Words: Flow-supply Characteristics, Discharge Coefficient, N₂O Oxidizer

1. 서 론

하이브리드 로켓의 정확한 성능예측을 위해서는 연소 시 실제와 유사한 O/F비를 유추해낼 수 있어야한다. 이를 위해서는 산화제의 공급특성을 해석할 필요성이 있다. 따라서 이번 연구의

주요목적은 가압장치가 없을 때의 N₂O액체산화제 공급특성을 해석하는데 있다.

N₂O산화제 공급특성을 해석하기위해 산화제 탱크 내의 물성치 변화를 알아야 한다. 또한 오리피스를 통해 빠져나오는 산화제의 유량을 예측하기 위해서는 산화제 탱크의 압력 이외에도 연소실의 압력과 오리피스의 형상, 토출계수 값을 알아야 하는데 토출계수는 오리피스와 레이놀즈수의 함수이므로 N₂O의 물성치와 오리피스의 정해진 형상을 통해 구할 수 있다.

* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

** 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부
연락처, E-mail: hgsung@kau.ac.kr

이러한 과정을 거쳐 예측한 산화제 탱크의 압력 변화를 실제 산화제 공급 시 산화제 탱크의 압력변화와 비교해 봄으로써 예측 결과에 대한 평가를 수행하였다.

2. 물성치 변화

N_2O 산화제의 공급특성을 해석하기 이전에 보다 정확한 예측을 위해 온도 변화에 따른 N_2O 물성치의 변화를 알아야 할 필요성이 있다. 이를 위해 N_2O 의 물성치를 온도에 대한 함수로 나타내었다. 이렇게 얻어진 물성치 함수를 바탕으로 산화제 탱크 내 N_2O 가 오리피스스를 통해 빠져나오고 있는 과정에서 탱크 내 압력변화를 예측하였다.

N_2O 의 비열비는 280K이상에서 급격히 변하는 경향이 있다. 이는 계산수행에 있어서 함수식으로 표현하기가 어렵다. 그렇기 때문에 온도가 280K이하인 구간과 280K이상인 구간으로 나눠 온도에 따른 비열비의 변화를 함수식으로 표현하였다.

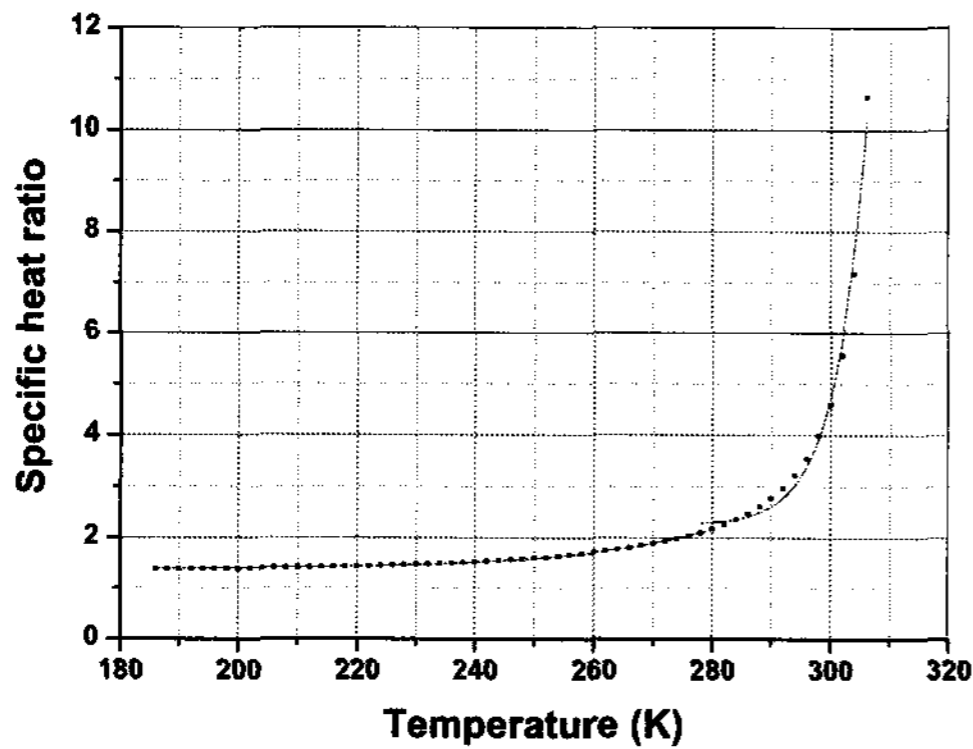


Fig 1. The specific heat ratio of N_2O as a function of tank-gas temperature.

3. 산화제 공급유량 변화

N_2O 산화제가 공급되기 전 탱크 내에 N_2O 는 기체와 액체 상태로 공존하고 있기 때문에 액체 상

태와 기체 상태에서 N_2O 가 빠져나갈 때의 탱크 내에서 물성치 변화과정은 서로 다른 방식으로 해석되어야 한다.

3.1 초기값 설정

초기 탱크 내에 기체 상태와 액체 상태로 존재하는 산화제의 양을 알기 위해 상온에서의 N_2O 의 액체상태 밀도와 기체상태 밀도를 가지고 초기 기체산화제 부피를 계산한다.

$$V_{gi} = \frac{m_{tot} - \rho_l V_{tot}}{\rho_g - \rho_l} \quad (1)$$

Equation 1 에서 초기 N_2O 기체의 부피를 계산하였으므로 위 식을 이용하여 초기 액체상태 산화제 질량을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$m_{oxl} = m_{tot} - \rho_g V_{gi} \quad (2)$$

3.2 산화제 유량 계산

n 개의 오리피스스를 통해 공급되는 산화제 질량 유속은 압력과 오리피스스 형상에 대한 함수이며, 토출계수를 도입함으로써 정해진 압력 차이와 오리피스스 형상에 대한 값으로 계산할 수 있다.

$$\dot{m}_{ox} = n C_D A_{inj} \sqrt{2\rho\Delta P} \quad (3)$$

산화제 탱크 내 압력 변화는 액체 상태의 산화제가 빠져나갈 시에는 액체에서 기체로의 상변화가 없다고 가정한다면 등엔트로피 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$P(n+1) = P_i \left(\frac{V_{gi}}{\frac{\sum m_{ox}(n)}{\rho_l} + V_{gi}} \right)^k \quad (4)$$

액체상태의 산화제가 모두 빠져나간 뒤 탱크 안에 남아 있던 기체상태의 산화제가 오리피스스를 통해 빠져나오게 된다. 이 과정에서 산화제 탱크의 압력 변화는 기체산화제 부피의 변화가 아닌 밀도의 변화와 관련된 식으로 나타내야 한다.

$$P(n+1) = P(n) \left(\frac{\rho_g(n+1)}{\rho_g(n)} \right)^k \quad (5)$$

또한 온도의 변화는 압력의 변화에 비례하므로 산화제가 액체 상태와 기체 상태로 빠져나가는 모든 경우에 등엔트로피 식으로 적용하여 나타낼 수 있다.

4. 토출계수 계산 (액체)

산화제의 질량 유속을 구하기 위해서는 토출계수를 구해야한다. 산화제가 액체일 경우 flip 또는 cavitation 현상을 고려위해 Eq. 8을 통해 구한 cavitation number를 기준으로 Eq. 9, 10과 그 값을 비교함으로써 액체유동에서의 noncavitation, cavitation, flip 현상을 모두 예측할 수 있다.

$$Re = \frac{D_{inj} \rho \bar{V}}{\mu} \quad (6)$$

그리고 Eq. 8에서 cavitation number를 구하기 위해 사용되는 증기압은 NIST데이터를 근거로 예측하였다.

$$P_v = -0.28026 + 1.536 \times 10^{-15} T(n)^{6.30107} \quad (7)$$

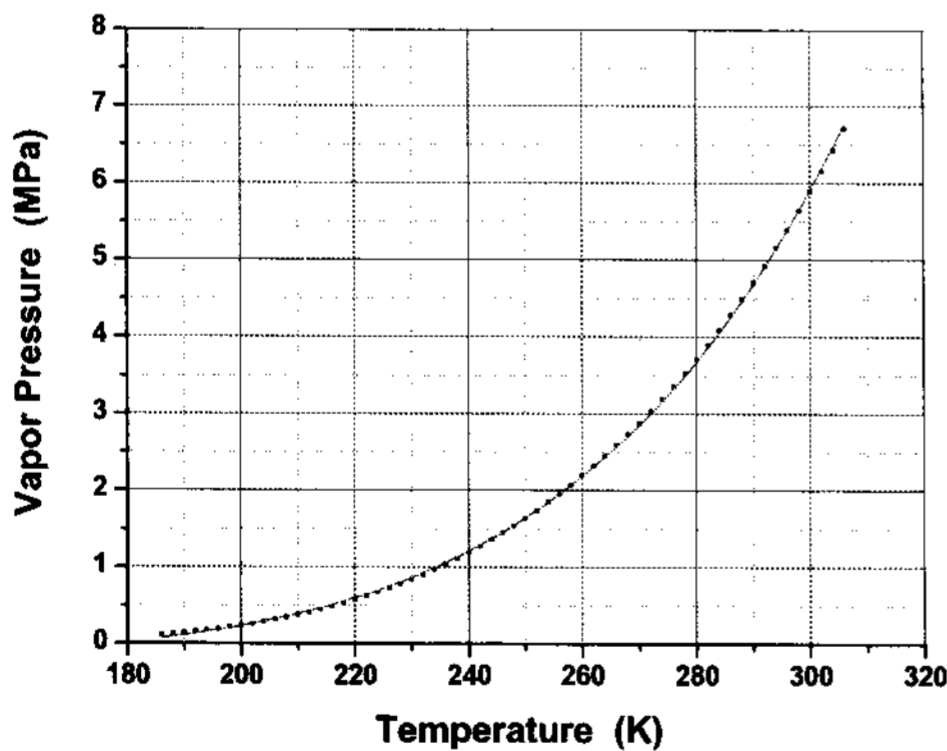


Fig 2. The vapor pressure of N_2O as a function of tank-gas temperature.

$$K = \frac{p_0 - p_v}{p_0 - p_b} \quad (8)$$

(p_0 : 산화제 전압력, p_v : 산화제 증기압, p_b : 연소실 압력)

$$K_{cav} = -\frac{1000}{Re_h} \quad (9)$$

$$K_{flip} = 1 + \frac{1}{\left(1 + \frac{L_{inj}}{D_{inj}}\right) \left(\frac{1 + 2000}{Re_h}\right)} \quad (10)$$

$K > K_{cav}$ 이고 $K \geq K_{flip}$ 인 경우에는 cavitation이 발생하지 않는 유동현상이 나타나고 이때의 토출계수는 Lichtarowicz's Eq. 11, 12를 통해 계산하였다.

$$C_{Du} = 0.827 - 0.0085 \frac{L_{inj}}{D_{inj}} \quad (11)$$

$$C_D = \frac{1}{\frac{1}{C_{Du}} + 20 \frac{1 + 2.25L/D}{Re_h}} \quad (12)$$

$K \leq K_{cav}$ 이고 $K \geq K_{flip}$ 인 경우에는 cavitation이 발생하게 되는데 Nurick's Eq. 13, 14을 통해 토출계수를 구할 수 있다.

$$C_C = 0.62 + 0.38(A_0 - A_i)^3 \quad (13)$$

$$C_D = C_C \sqrt{\frac{p_0 - p_v}{p_0 - p_b}} \quad (14)$$

Hydraulic flip 현상은 ($K > K_{cav}$ and $K < K_{flip}$) 또는 ($K \leq K_{cav}$ and $K < K_{flip}$) 인 경우에 발생하게 된다. Flip이 발생할 경우 토출계수는 일반적으로 $C_D = 0.61 \sim 0.62$ 라고 가정한다.

5. 토출계수 계산 (기체)

기체의 경우 토출계수는 압축성 유동의 관내흐름 식을 통해 계산할 수 있다. 레이놀즈수는 액체에서 계산한 바와 동일하게 구할 수 있고 Blasius Eq. 15로 계산된 마찰계수로 Eq. 16을 통해 토출계수를 구할 수 있다. ($Re \leq 10^5$)

$$C_f = \frac{0.3164}{Re^{0.25}}, \quad C_D = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{D_{in}}{L_{in} C_f}} \quad (15), (16)$$

6. 실험 및 결과

위에서 제시된 이론 모델을 검증하기 위해 산화제 유출에 따른 탱크내부압력을 측정하는 실험을 수행하였다.

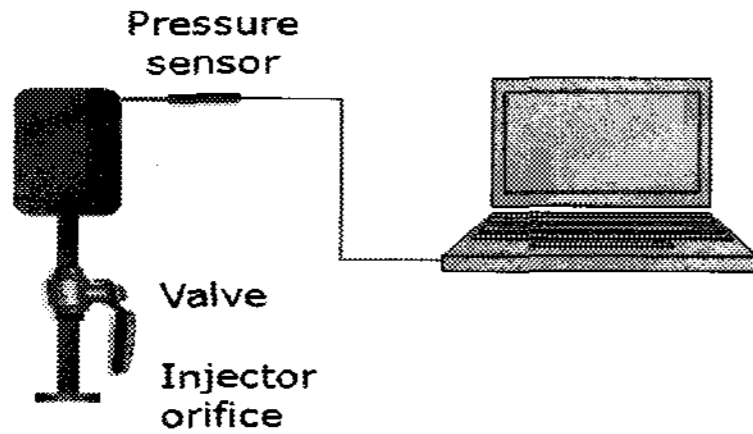


Fig. 3 Experimental setup

실험 장치는 Fig. 3과 같으며 실험조건은 Table 1.과 같다.

Table 1. Orifice parameters and experimental condition

Oxidizer	N ₂ O
orifice length(mm)	5
orifice diameter(mm)	1.2
number of port	4
tank volume(oz)	16
oxidizer mass(g)	300
initial pressure(Mpa)	4.8

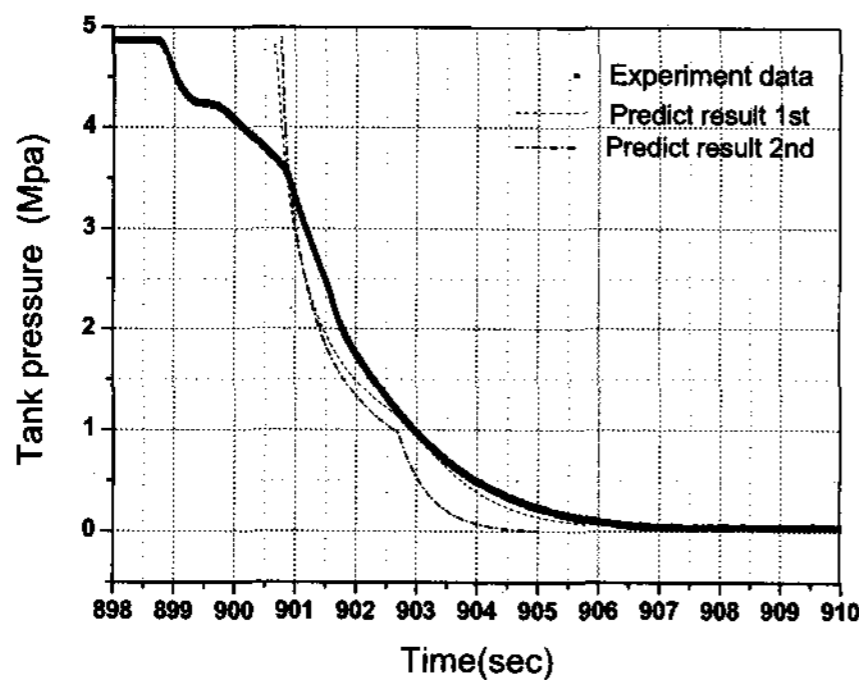


Fig 4. The changing gas pressure in tank

실험 결과 실제 탱크의 압력 변화는 예측한 압

력 변화의 경향성은 비슷하나 다소 차이가 있음을 알 수 있었다. 즉, 실험이 해석결과보다 압력이 완만하게 떨어지고 있고 액체에서 기체 상태로 바뀌는 부분이 실험에서는 뚜렷하게 나타나지 않음을 알 수 있었다.

7. 결 론

N₂O 액체산화제를 고려한 하이브리드 로켓의 산화제 공급특성에 대한 연구를 하였다. 실험에 직경이 작은 밸브를 사용하여 초기유량이 예측한 유량보다 작게 나와 탱크 내 압력이 예측보다 완만하게 변하는 것으로 보인다. 밸브가 완전히 열린 후 실제 탱크 내 압력이 예측 결과보다 다소 크게 나온 것은 예측 과정에 있어서 기화하는 N₂O의 양과 탱크 내 존재하는 공기의 양을 고려하지 않았기 때문인 것으로 보인다.

추후 연구 과정에서는 탱크 내 공기의 양과 산화제 공급 시 탱크 내 N₂O액체의 기화를 고려해 탱크 압력 변화를 예측하고 앞으로 수행 할 실험에서 빠져나가는 유량을 밸브가 제한하지 못하도록 더 큰 직경의 밸브를 사용해 압력을 측정해야 할 것으로 보인다.

참 고 문 헌

1. Robert W. Fox, Alan T, McDonald, "Introduction to Fluid Mechanics", John Wiley & Sons Inc., 1999, pp. 419-424.
2. 윤창진, 송나영, 유우준, 김진곤, 문희장, 성홍계, "Combustion Characteristics and Performance Prediction of PE-GOX Hybrid Rocket Motor, Part II : Interior Ballistic Performance", 한국추진공학회.
3. NIST Chemistry WebBook, "NIST Standard Reference Database Number 69", June 2005 Release