

자발가압 성질을 가진 아산화질소의 2상유체 모델링을 통한 하이브리드 로켓 내탄도 해석 I

이정표* · 이선재* · 우경진* · 오지성* · 정식항** · 문희장*** · 성홍계*** · 김진곤***†

The Hybrid Rocket Internal Ballistics with Two-phase Fluid Modeling for Self-pressurizing N₂O I

Jungpyo Lee* · Sunjae Rhee* · Kyoungjin Woo* · Jisung Oh* · Sikhang Jung** · Heejang Moon*** · Honggye Sung*** · Jinkon Kim***†

ABSTRACT

The blow-down oxidizer feed system with self-pressurizing N₂O has more advantages than the regulated system. However, it is difficult to predict the exhaust flow rate because there exist two phases in the N₂O tank - liquid phase and gas phase, and the properties of N₂O in storage tank are varied continuously during blow-down. In this paper, a method that can analyse simply the blow-down oxidizer feed system is studied. The properties of saturated N₂O are found from the NIST data base, and mass flow through the orifice is modeled as NHNE. Cold flow test with hybrid rocket combustor is performed for the comparison where the results should found from the good agreement.

초 록

자발가압 특성이 있는 N₂O를 적용한 Blow-down 산화제 공급방식은 조절 시스템(Regulated system)에 비해 많은 장점을 가지고 있다. 그러나 탱크 내에 N₂O가 액체와 기체의 2상으로 공존하고, 유동이 배출되는 동안 탱크 안의 N₂O의 물성치가 계속적으로 달라지기 때문에 배출 유량을 예측하는데 어려움이 있다. 본 논문에서는 N₂O를 적용한 Blow-down 산화제 공급방식을 간단하게 해석 할 수 있는 방법을 연구했다. 포화상태 N₂O의 물성치는 NIST 데이터베이스를 이용했으며, 인젝터 모델로 nonhomogeneous nonequilibrium(NHNE) 모델을 적용하였다. 하이브리드 로켓 연소기를 이용해 cold flow test를 수행하였으며, 두 결과가 잘 일치함을 확인했다.

Key Words: N₂O(아산화질소), Two Phase(2상), NHNE Model(Non-Homogeneous Non-Equilibrium Model), Hybrid Rocket(하이브리드 로켓), Saturation (포화), Blow-down(블로우 다운)

* 한국항공대학교, 항공우주 및 기계공학과

** (주)한국항공, 비행시험지원팀

*** 한국항공대학교, 항공우주 및 기계공학부

† 교신저자, E-mail: jkkm@kau.ac.kr

Nomenclature

A_{out} : Orifice cross-sectional area, m²
 C_d : discharge coefficient
 h : enthalpy, kJ/kg
 \dot{m} : mass flow rate, kg/sec
 P : pressure, bar
 S : total entropy, kJ/K
 s : specific entropy, kJ/kg-K
 T_0 : initial temperature (K)
 V_{tank} : tank volume, m³
 Z : compressibility
 γ : ratio of specific heats
 κ : weighting factor

ρ : density
 χ : quality

Subscripts

inc : incompressible
 $NHNE$: nonhomogeneous nonequilibrium
 HEM : homogeneous equilibrium
 L : liquid
 V : vapor
 $1, tank$: orifice upstream
 $2, out$: orifice downstream
 0 : initial

아산화질소(N₂O)는 상온(300 K)에서 높은 증기 압(~65 bar)인 자발가압(Self-pressurizing) 특성을 갖고 있다. 따라서 N₂O를 로켓 추진 Blow-down 공급방식의 산화제로 적용할 경우 부가적인 가압 시스템을 필요로 하지 않고, 높은 신뢰성, 추진체 중량 감소 등의 많은 장점을 가질 수 있다. 또한 N₂O는 LOX와 같은 다른 산화제에 비해 다루기가 쉽고, 무독성, 경제성 등의 장점이 있어 중·소형 사운드 로켓이나 우주 추력기 등의 추진제로 적합하다.

그러나 자발가압 특성이 있는 N₂O를 적용한 Blow-down 공급 방식은 산화제 탱크 내에 N₂O가 액체와 기체의 2상으로 공존하고, 유동이 배출되는 동안 탱크 안의 N₂O의 물성치가 급격히 바뀌기 때문에 유동 모델링에 어려움이 있다.

본 논문에서는 N₂O와 같은 포화 압축성 유체를 적용한 Blow-down 산화제 공급방식에 대한 유동 모델링 및 내탄도 해석을 수행하였다. 따라서 본 연구는 2 부분으로 나뉘어져 있다. 우선 본 논문에서는 자발가압 Blow-down 산화제 공급 시스템에 대한 엔지니어링 유동 모델을 소개하고, 두 번째 논문(자발가압 성질을 가진 아산화질소의 2상유체 모델링을 통한 하이브리드 로켓 내탄도 해석 II)[1]에서는 본 논문의 유동 모델링을 하이브리드 로켓 추진시스템에 적용하여 내탄도 해석을 수행하고, 연소시험 결과와 비교·

분석 하였다.

2. 본 론

2.1 N₂O Property

일반적으로 산화제 유동 해석은 기체의 경우 이상기체($Z_v \sim 1$)로 가정하고, 액체는 비압축성($Z_l \sim 0$)으로 가정하여 수행하고 있다. 그러나 N₂O의 경우 상온에서 압축성인자가 $Z_v \sim 0.53$, $Z_l \sim 0.13$ 값을 가지고 있기 때문에, 위와 같이 이상기체·비압축성 가정을 이용하여 물성치를 계산하는 것은 적합하지 않다[2]. 또한 N₂O의 작동 온도가 임계점과 가깝기 때문에, N₂O는 단상(one-phase) 모델로 가정하기 어렵다. Blow-down 산화제 공급 방식에서 유동이 배출되는 동안 탱크 안의 N₂O 물성치의 변화는 배출 유량, 연료 연소량, 연소실 압력, 추력 등의 추진 성능에 영향을 미치게 된다. 따라서 포화상태의 N₂O 물성치를 이해하고 모델링 하는 것은 로켓 성능을 예측 하는데 중요하다.

본 연구에서 N₂O의 물성치는 NIST (National Institute of Standards and Technology) [3]의 데이터베이스를 이용하여 구하였다. NIST는 N₂O를 포함하여 일반적으로 사용되는 산업 유체 및 추진제의 열화학성 물성치를 제공하고 있다.

2.2 Injector Model

산화제 탱크에서 배출되는 N₂O 유동의 상의 종류에 따라 인젝터 모델링을 다르게 고려하였다. 액상의 N₂O가 배출되는 경우에는, Dyer et al.[4]의 Nonhomogeneous nonequilibrium(NHNE) 모델을 적용하였다. NHNE 모델은 액체에 적용할 수 있는 ‘Incompressible Model’과 ‘Homogeneous Equilibrium Model (HEM)’을 혼합한 형태로, 유체의 인젝터 잔류시간과 기포 성장 시간의 비로 표현 되는 비평형 변수 κ 를 weighting factor로 적용 하였다.

$$\kappa = \sqrt{\frac{P_1 - P_2}{P_v - P_2}} \quad (1)$$

$$\frac{\dot{m}_{NHNE}}{A_{out}} = \frac{(\dot{m}_{inc}/A_{out}) + k(\dot{m}_{HEM}/A_{out})}{1 + \kappa} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_{L,out} &= A_{out} \frac{(\dot{m}_{inc}/A_{out}) + k(\dot{m}_{HEM}/A_{out})}{1 + \kappa} \quad (3) \\ &= A_{out} C_{d,out} \left[\frac{\sqrt{2\rho_L(P_{tank} - P_{out})(P_v - P_{out})}}{\sqrt{P_v - P_{out}} + \sqrt{P_{tank} - P_{out}}} \right. \\ &\quad \left. + \frac{\rho_2 \sqrt{2(P_{tank} - P_{out})(h_{tank} - h_{out})}}{\sqrt{P_v - P_{out}} + \sqrt{P_{tank} - P_{out}}} \right] \end{aligned}$$

액체 N₂O가 모두 배출되면 탱크 내부에는 기체 N₂O만 존재하기 때문에, NHNE 모델을 적용하여 N₂O 배출유량을 구할 수 없다. 기상 배출 모델은 압축성 유동을 적용하여 choking 조건과 non-choking 조건으로 나눠 구분할 수 있으며, choking 조건은 인젝터 상·하단의 압력비로 판단했다.

choking : (4)

$$\dot{m}_{v,out} = (A_{out} C_{d,ext}) \sqrt{\gamma P_{tank} \rho_v \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)}}$$

non choking : (5)

$$\dot{m}_{v,out} = (A_{out} C_{d,ext}) \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} P_{tank} \rho_v \left[\left(\frac{P_2}{P_{tank}}\right)^{2/\gamma} - \left(\frac{P_2}{P_{tank}}\right)^{(\gamma+1)/\gamma} \right]}$$

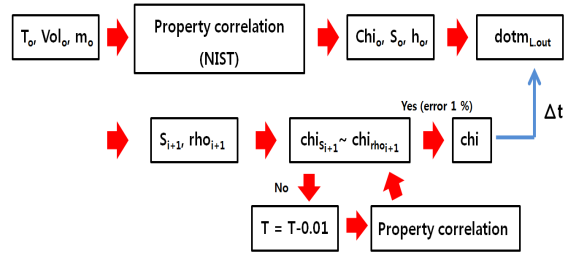


Fig. 1 Two-phase Model Algorithm (Liquid-phase)

2.3 Two-phase Model

N₂O의 2상 유동 모델에서는 NIST 데이터베이스를 이용하여 N₂O의 물성치를 구하며, 인젝터 모델로 NHNE 모델을 적용한다. 또한 본 모델의 가정으로는 외부에서의 열전달을 무시하고, 탱크 내 두 상의 혼합은 발생하지 않으며, 두 상의 혼합 배출도 없다. 즉 액체가 완전히 탱크 밖으로 배출 된 후에 기체가 배출되는 것으로 가정한다.

본 모델의 알고리즘은 Fig. 1과 같다. 초기조건인 초기온도, 탱크 체적, 산화제 충전량을 이용하여 초기상태 액·기상의 밀도, 엔트로피, 엔탈피, 건도, 압력 등의 물성치를 NIST를 통하여 구할수 있다. 이러한 초기상태의 물성치를 NHNE 모델에 적용하여 Δt 후의 N₂O 탱크를 통해 배출되는 액체 유량을 구한다.

N₂O 유량이 배출 된 후에 탱크내의 엔트로피는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$S_{i+1} = S_i - (m_{L,out} s_L)_i \quad (6)$$

Δt 후의 새로운 비엔트로피와 밀도는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$s_{i+1} = \frac{S_{i+1}}{m_{i+1}} \quad (7)$$

$$\rho_{i+1} = \frac{m_{i+1}}{V_{tank}} \quad (8)$$

Δt 후의 유효 비엔트로피와 밀도를 다음 관계식에 대입하여 건도 χ_s , χ_ρ 를 각각 구할 수

있다.

$$s = \frac{s_L m_L + s_V m_V}{m_L + m_V} = s_L(1 - \chi_s) + s_V \chi_s \quad (9)$$

$$\rho = \frac{m_{total}}{V_{tank}} = \frac{\rho_V \rho_L}{\rho_L \chi_\rho + \rho_V (1 - \chi_\rho)} \quad (10)$$

비엔트로피와 밀도로 구한 χ_s , χ_ρ 는 탱크내에 2상으로 존재하고 있는 N₂O의 건도를 의미하므로 서로 일치해야 한다. 본 모델링에서는 χ_s 와 χ_ρ 의 차이가 1 % 미만이 될 때까지 온도에 0.01 K 씩 감소시켜 반복계산을 수행하였다. 이때 탱크내의 N₂O 물성치는 NIST의 데이터를 이용하여 구하게 된다. χ_s 와 χ_ρ 의 차이가 1 % 미만이 된다면 구해진 건도를 이용하여 Δt 후의 N₂O 배출 유량을 구하게 되고, 이러한 계산은 탱크내에 액체가 없어질 때까지 반복적으로 진행된다.

N₂O 탱크에서 액체가 모두 배출되면 탱크 내부에는 기체 N₂O만 남는다. 기체 N₂O의 배출은 두 가지 경우(chocking, non-chocking)를 고려하였고, 각각의 식은 Eq. 4와 Eq. 5와 같다. 초기 탱크 충전량이 모두 배출되면 모델링 해석은 종료하게 된다.

2.4 Experiment

N₂O 유동 모델링을 실험 결과와 비교하기 위해 cold test를 수행하였다. 초기온도, T_o 는 291 K에서 실험이 수행되었으며, 실험 데이터 확인 결과 충전 탱크압이 약 49 bar로 확인 하였다. 이는 N₂O의 포화 증기압과 큰 차이가 없음을 알 수 있고, 탱크 내부에 N₂O가 포화 상태로 존재함을 의미한다. 산화제 탱크 체적은 1 liter이며, 충전 산화제량은 520 g, 인젝터는 직경 1.5 mm × 3 hole을 적용하였다. Two-phase 모델링의 변수 입력 조건은 Table 1과 같다. 대부분 실험 조건의 초기값으로 설정하였고, C_{dL} 와 C_{dV} 는 실험상수로 각각 0.85, 0.7을 설정 하였다. 인젝터 후방 압력은 대기압으로 가정하였고, 이는 오리피스 후방에서 측정된 압력 데이터 결과와 잘

Table 1. Modeling Input Parameters

T_o	291 K	C_{dL}	0.85
V_{tank}	1 liter	C_{dV}	0.7
m_0	520 g	Δt	0.1 sec
A_{out}	$5.3 \times 10^{-6} \text{ m}^2$	$P_{out,gage}$	0 bar

일치함을 확인하였다.

Figure 2는 실험 결과(cold test)와 모델링 결과를 비교한 것이다. 실험 결과에서 유량 배출 초기에 탱크압이 급격하게 감소했다가 완만한 감소를 보이는 것은 N₂O가 급격히 배출되고 등엔트로피 과정에서 발생하기 때문이다.[5] 본 연구의 유동 모델링은 탱크 내부가 등엔트로피 과정이 성립하지 않기 때문에, 배출 초기에 실험값과 모델링 결과에 차이가 나타난다. 그러나 전체적으로 본 연구의 모델링이 포화 압축성 유체, N₂O의 배출 현상을 잘 모사하고 있음을 확인할 수 있다. 유량 배출 후 약 2.5초에서 탱크압의 기울기가 급격히 증가하는 것은 탱크내 액체가 모두 배출되고 기체만 남아있기 때문이다. 모델링 결과에서도 이와 같은 현상을 잘 모사하며, 상변화 유량배출이 나타나는 시점도 큰 오차 없이 잘 일치함을 볼 수 있다.

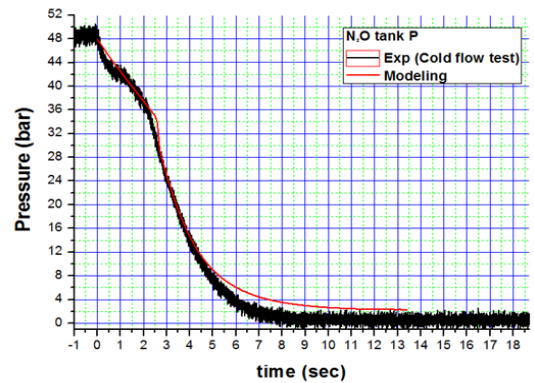


Fig. 2 Model prediction compared with measured result (Cold test)

3. 결 론

본 연구에서는 2상이 공존하는 N_2O 같은 포화 압축성 유체를 간단하게 해석 할 수 있는 유동 모델링을 제안하였다. NIST의 데이터베이스를 기반으로 하여 포화상태 N_2O 의 물성치를 찾고, NHNE 인젝터 모델링을 통해 액체 산화제 질량유량을 계산할 수 있었다. Two-phase 모델링 결과와 실험결과를 비교·분석하기 위하여 소형 산화제 탱크에 N_2O 를 충전하여 cold flow test를 수행 하였다. 모델링 결과는 실험 결과와 큰 차이없이 Blow-down 산화제 공급방식의 특성을 잘 묘사할 수 있었다. 모델링을 통해 탱크 밖으로 배출되는 유동이 액상에서 기상으로 바뀌는 시점을 예측했으며, 실험결과와 잘 일치함을 확인했다.

본 연구에 이어 '자발가압 성질을 가진 아산화질소의 2상유체 모델링을 통한 하이브리드 로켓 내탄도 해석 II'에서는 Two-phase model을 이용하여 하이브리드 로켓의 내탄도 해석을 수행 하며, 하이브리드 연소시험 결과와 비교·분석 하였다.

후 기

"이 논문은 2007년도 정부(교육과학기술부)의 재

원으로 한국과학재단의 국가지정연구실사업으로 수행된 연구임(No. R0A-2007-000-10034-0(2007))."

참 고 문 헌

1. 이선재 외, "자발가압 성질을 가진 아산화질소의 2상유체 모델링을 통한 하이브리드 로켓 내탄도 해석 II", 한국추진공학회, 2011년, 추계학술대회
2. Stephen A. Whitmore, Spencer N. Chandler, "Engineering Model for Self-Pressurizing Saturated N_2O -Propellant Feed Systems", JPP Vol. 26, No. 4, 2010
3. "Thermophysical Properties of Fluid Systems", [online database], National Institute of Standards and Technology, <http://webbook.nist.gov/chemistry/fluid>
4. Dyer, J., Doran, E., Dunn, Z., and Lohner, K., "Modeling Feed System Flow Physics for Self-Pressuring Propellants," 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference&Exhibit, AIAA Paper 2007-5702, July 2007.
5. 한조영, "우주비행선 추진공학", 경문사, 2005