

# 이원추진제 추진시스템 수학적 열 모델링 고찰

채종원<sup>1</sup>, 한조영<sup>2</sup>

## A CONSIDERATION OF MATHEMATICAL THERMAL MODELING OF BIROPELLANT PROPULSION SYSTEM

J.W. Chae<sup>\*1</sup> and C.Y. Han<sup>2</sup>

*The authors have reviewed many mathematical thermal modelings of bipropellant propulsion system in literatures to gather basic data for developing a computer program which analyses the performance of bipropellant propulsion system. In this paper COMS and its propulsion system is briefly introduced for understanding. The set of first order nonlinear differential equations is reviewed and considered as candidate equations for the program development.*

**Key Words :** 이원추진제 추진시스템(Bipropellant Propulsion System), 수학적 열 모델링(Mathematical Thermal modeling)

### 1. 서론

본 연구에서는 이원추진제 추진시스템에 적용가능한 수학적 열 모델링을 조사, 분석, 재구성하였다. 이 기초연구를 바탕으로 통신해양기상위성(COMS, Communication, Ocean, and Meteorological Satellite)의 추진시스템의 성능해석 프로그램 개발 방안을 검토한다. 현재 수학적 열 모델링에 대한 조사와 분석을 마치고 재구성 단계에 있다. 따라서 본 논문에서는 수학적 열 모델링의 간략한 소개와 관련 수식들을 설명한다. 또한 이해를 위해서 통신해양기상위성과 추진시스템의 간략한 소개를 한다. 이원추진제 추진시스템은 가압제 탱크 모델링, 추진제 탱크 모델링, 압력조절기 모델링, 관망 해석 모델링으로 나눌 수 있다. 본 논문에서는 면수 제한에 때문에 가압제 탱크 모델링과 추진제 탱크 모델링 부분만 다루겠다. 또한 가압제 탱크 모델링은 주로 G. P. Purohit and R. P. Prickett[1]과 H. C. Hearn[2]의 모델링을 참고하였고, 추진제 탱크 모델링은 A. Ricciardi and E. Pieragostini[3]와 V. Shankar et al.[4]의 모델링을 참고하였으며, 편집상 오류로 판단되는 부분은 수정하였다.

통신해양기상위성은 국내 최초로 개발되는 3축 안정화 정지궤도위성이며, 중량 면에서 중간크기의 위성으로 분류할 수 있다. 2008년 말에 발사를 예정하고 있다. 통신해양기상위성의 목적은 기상영상기(MI, Meteorological Imager: 5 channels)가 스캔한 기상영상과 정지궤도 해양컬러영상기(GOCI, Geostationary Ocean Color Imager: 8 channels)가 스캔한 해양컬러영상자료를 제공하며, ETRI가 개발한 Ka 밴드 통신서비스를 제공하는 것이다. 통신해양기상위성의 목표 중량은 약 2400 kg 이고, 전력은 3 kW이다. 통신해양기상위성의 임무수명은 7 년이다. Fig. 1에 통신해양기상위성의 전체적인 구성도, 주요 탑재체(기상영상기, 해양컬러영상기, Ka밴드 안테나)와 단일 GaAs 태양전지판, 지구센서를 보여주고 있다[5,6].

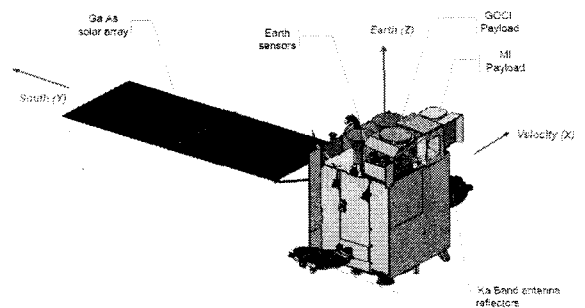


Fig. 1 COMS Overall Configuration[5,6]

1 정희원, 한국항공우주연구원

2 정희원, 한국항공우주연구원

\* Corresponding author E-mail: firstbel@kari.re.kr

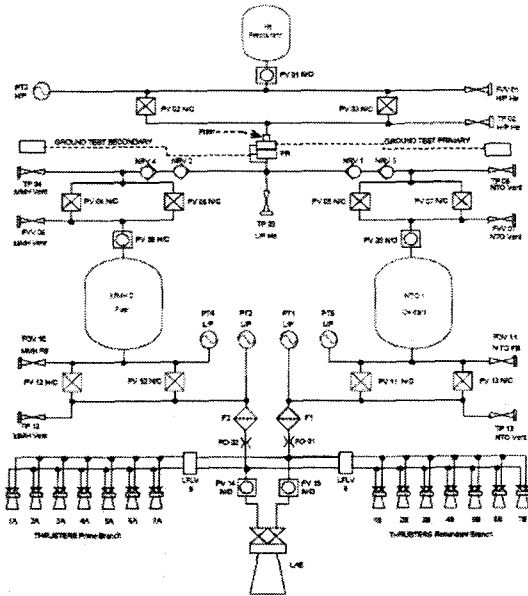


Fig. 2 COMS CPS Schematic[5,6]

통신해양기상위성은 이원추진제 추진시스템을 사용하고 있다. 가압제로는 헬륨(Helium)을, 연료는 MMH (Monomethyl-Hydrazine, CH<sub>3</sub>NH<sub>2</sub>)를, 산화제는 NTO (Nitrogen Tetroxide, N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>)를 각각 사용하고 있다. Fig. 2에 통신해양기상위성의 추진시스템 구성도를 보였고, 이는 가압제 탱크 부분, 압력조절 부분, 추진제 탱크 부분, 관망 부분, 액체원지점엔진 부분, 반동제어추력기 부분으로 분류할 수 있다[7].

## 2. 수학적 열 모델링

### 2.1 가압제 탱크 모델링

가압제 탱크 모델링은 가압제 탱크의 열역학 제 1 법칙, 즉 에너지 보존법칙에서 시작한다. 여기서는 자세한 수식유도 과정을 생략한다. 단열한계(Adiabatic Limit, dQ=0), 등온한계(Isothermal Limit), 실용조건(Practical Case, 열전달 고려) 등으로 나눌 수 있다. 단열한계와 등온한계는 열역학적인 한계 경우이고, 시간에 독립적이며, 초기조건(온도와 질량)에 종속적이다[1]. 실용조건은 단열한계와 등온한계 사이에 있으며 가압제의 실제와 유사한 배출량, 외부와 열전달, 내부의 열전달 등을 고려한 경우이다. 수식 (1)과 (2)에 각각 가압제 온도(T<sub>g</sub>)와 가압제 탱크 벽면 온도(T<sub>w</sub>) 최정식을 보였다. 이 수식에서는 열전달계수를 어떻게 정하느냐가 중요한 인자이며, 열전달 계수는 실험수식에 의해 구한다. 실험수식은 참고문헌을 참조 바란다. Z는 헬륨 가스 압축률(He Gas Compressibility)이다. Fig. 3에 가압제 탱크의 열전달과 헬륨유출을 나타내었다.

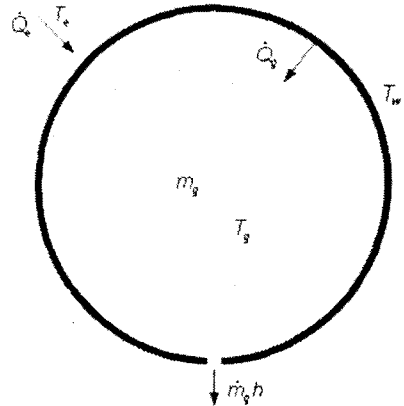


Fig. 3 Heat Transfer in Pressurant Tank[1]

$$\frac{dT_g}{dt} = \frac{h_c A_i (T_w - T_g) - \dot{m}_g Z C_v (\gamma - 1) T_g}{(m_0 - \dot{m}_g t) C_v} \quad (1)$$

$$\frac{dT_w}{dt} = \frac{\sigma \epsilon A_o (T_e^4 - T_w^4) - h_c A_i (T_w - T_g)}{m_w c_{p_w}} \quad (2)$$

### 2.2 추진제 탱크 모델링

추진제 탱크 모델링은 가압제 탱크 모델링과 같이 열역학 제 1 법칙에서 시작한다. Fig. 4에 제어 체적(Control Volume), 즉 얼리지 체적(Ullage Volume)과 주요변수를 나타낸다. 주요 변수는 가압제유량(dMh/dt), 가압제양(Mh), 추진제 증기양(Mv), 얼리지 온도(Tu), 얼리지 체적(Vu), 추진제 탱크 벽면 온도(Tw), 추진제 탱크 압력(P) 등이다. 수식 (3)과 (4)는 열역학 제 1 법칙을 적용하여 유도되었으며, 수식 (5)와 (6)은 이상기체상태방정식을 미분하고 적절히 변형하여 유도되었으며, 수식(7)은 질량보존법칙과 수식 (5)와 (6)을 조합하여 유도하였다. 변수 아래 쓰인 'o'는 산화제(Oxidant)를 뜻하고 동형의 수식을 연료에도 같은 방식으로 적용할 수 있다. 여기에서 생략된 수식들에는 얼리지 체적과 얼리지 면적에 관련한 수식, 추진제 밀도 실험식, 추진제 증기압 실험식, 액체 추진제안의 용해된 헬륨 실험식 등이 생략되어 있다. 또한 중요한 모델링으로 압력조절기 모델링이 빠져있다. 헬륨의 주울-톰슨 계수(Joule-Thompson Coefficient)가 음의 값을 가지기 때문에 스로틀링 과정(Throttling Process)후에 감압된 헬륨의 온도가 상승한다. 이 온도상승을 모델링에 넣어야 한다. 자세한 수식은 참고문헌을 참조하기 바란다. 가압제 탱크 모델링과 추진제 탱크 모델링을 통합하여서 가압제 탱크 모델링에서 2개, 추진제 탱크에서 각각 5개, 총 12개의 일차 비선형 미분 수식(Ordinary Nonlinear Differential Equations)을 구하였다. 이는 초기치 문제로서 수치적으로 적분을 수행해야 하고, V. Shankar

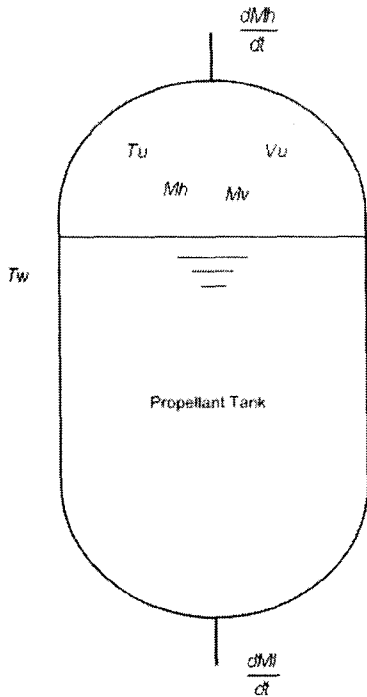


Fig. 4 Propellant Tank Modeling Schematic

변화, 얼리지 온도와 벽면 온도의 변화량과 추진제 탱크에 유입되는 각각의 헬륨의 양, 얼리지의 증기량과 액체 추진제의 헬륨 용해량을 계산할 수 있다.

압력강하 해석 모델링과 액체원지점엔진과 반동제어추력기 부분의 모델링을 추가하여 추진시스템의 성능해석 프로그램을 개발할 계획이다.

### 3. 결 론

통신해양기상위성과 추진시스템의 개략적인 설명과 이원추진제 추진시스템의 수학적 열 모델링의 지배방정식의 유도과 주요변수의 설명과 이들 사이의 관계를 간략하게 설명하였다. 향후에 추진시스템의 성능해석 프로그램 개발에 기초 자료로 사용될 것이다.

### 후 기

본 논문은 과학기술부 특정연구개발사업의 지원으로 수행 중인 통신해양기상위성 개발사업의 일환으로 진행되었습니다.

### 참고문헌

- [1] Purohit, G.P., and Prickett, R.P., 1993, "Modeling of the INTELSAT VI Bipropellant Propulsion Subsystem," *AIAA-93-2518*.
- [2] Hearn, H.C., 1999, "Development and Validation of Fluid /Thermodynamic Models for Spacecraft Propulsion Systems," *AIAA-99-2173*.
- [3] Ricciard, iA. and Pieragostini, E., 1987, "Prediction of the Performance and the Thermodynamic Conditions of a Bipropellant Propulsion System During its Life Time," *AIAA-87-1771*.
- [4] Shankar, V. et al., 1992, "Mathematical Modelling of the United Bipropellant Propulsion System," *Acta Astronautica*, Vol.26, No.11, pp.779-798.
- [5] ---, "COMS System Requirement Review Volume 2," 2005.
- [6] ---, "COMS Preliminary Design Review Volume 2," 2006.
- [7] 채종원, 한조영, 박용식, 2006, "통신해양기상위성 화학 추진 시스템의 구성 및 특징," 2006년도 한국항공우주학회 춘계학술대회 논문집.
- [8] Forsythe, G.E., Malcom, M.A. and Moler, C.B., 1977, "Initial value problems in ordinary differential equations," *Computer Methods for Mathematical Computations*, Chap. VI, pp. 110-147.

et al.은 Runge-Kutta 컴퓨터 코드[8]를 사용하였다. 초기치는 가압제와 추진제의 충전량, 탱크의 크기와 환경조건에서 구할 수 있다.

$$hw_o Au_o (Tw_o - Tu_o) + hl_o Al_o (Tl_o - Tu_o) - P_o \frac{dVu_o}{dt} + Cp_n Th_o \frac{dMh_o}{dt} + Rv_o Tv_o \frac{dMv_o}{dt} \quad (3)$$

$$= Cv_n Tu_o \frac{dMh_o}{dt} + (Mh_o Cv_n + Mv_o Cv_n) \frac{dTU_o}{dt}$$

$$\frac{dT_w_o}{dt} Mw_o \left( \frac{Au_o}{At_o} \right) Cw_o = hw_o Au_o (Tw_o - Tu_o) \quad (4)$$

$$\frac{dMh_o}{dt} = Mh_o \left( \frac{1}{Vu_o} \frac{dVu_o}{dt} - \frac{1}{Tu_o} \frac{dTU_o}{dt} \right) \quad (5)$$

$$\frac{dMv_o}{dt} = Mv_o \left( \frac{1}{Vu_o} \frac{dVu_o}{dt} - \frac{1}{Tu_o} \frac{dTU_o}{dt} \right) \quad (6)$$

$$\frac{1}{Vu_o} \frac{dVu_o}{dt} = \frac{1}{(\rho_o Vu_o - Mv_o)} \frac{dMl_o}{dt} - \frac{Mv_o}{(\rho_o Vu_o - Mv_o)} \frac{1}{Tu_o} \frac{dTU_o}{dt} \quad (7)$$

결과적으로 가압제 탱크 모델링에서 가압제 탱크의 시간에 따른 압력 변화, 헬륨 온도와 벽면 온도의 변화량을 계산할 수 있고, 추진제 탱크 모델링에서 시간에 따른 얼리지 체적의