

## 技術論文

## 교육용 도구로서의 저가 소형위성 연구 및 개발

문병영\*, 이병훈\*, 장영근\*\*

Low-Cost Small Satellite Research and Development  
as an Education Tool

Byoung-Young Moon\*, Byung-Hoon Lee\* and Young-Keun Chang\*\*

## ABSTRACT

A method of multidisciplinary education has been implemented for satellite design, based on HAUSAT-1 and 2 ultra-small satellite development projects, in order to provide practical knowledge and experience to students studying satellite engineering. HAUSAT-1 was the nation's first 1kg-class ultra-small satellite. HAUSAT-2 nano-satellite is currently under a Proto-Flight Model development. These design projects make it possible to achieve the goal of science and technical research, which is representative of a university function, and the goal of molding professionals through providing an integrated function of system design education. An integrated system design, like satellite system, provides all participating students with an opportunity to directly/indirectly experience the entire system development process and encourage growth of multidisciplinary system education that has lately become an important issue.

## 초 록

위성공학을 전공하는 학생들에게 실질적이고 경험적인 교육을 제공하기 위해 HAUSAT-1과 HAUSAT-2 두 초소형 위성 개발 프로젝트 기반의 다학제간 우주비행체 설계 교육방법을 적용하였다. HAUSAT-1은 국내최초로 개발된 1 kg급의 초소형 피코 위성이다. HAUSAT-2는 25 kg급의 나노 위성으로 현재 준비행 모델(Proto-Flight Model)을 개발 중에 있다. 이들 설계 프로젝트는 연구와 설계 교육의 통합적 기능을 제공함으로써 대학의 고유기능인 과학 및 기술 연구와 설계 교육을 통한 전문 인력양성의 목표를 동시에 이루는 것이 가능하다. 이러한 복합시스템인 우주비행체 설계 교육을 통하여 참여 학생 전원이 우주비행체의 전 시스템 개발 과정을 직간접적으로 경험할 수 있게 하고, 최근 들어 각광을 받고 있는 다학제간 시스템 교육의 활성화를 이룰 수 있다.

**Key Words** : System Engineering(시스템 엔지니어링), Engineering Education(엔지니어링 교육), Pico/Nano Satellite(피코/나노위성), CubeSat(큐브셋)

## I. 서 론

† 2006년 7월 21일 접수 ~ 2006년 9월 6일 심사완료

\* 정회원, 한국항공대학교 대학원

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

이전 위성기술의 대형화 추세와는 달리 1990년대 들어 나노테크놀로지와 같은 소형화 기술의 발전과 함께 우주용 전자기술의 비용이 계속 감소하고 이러한 부품들의 성능이 증가함에 따라

저궤도용 위성개발은 'Faster, Cheaper, Better'의 위성개발 모토 하에 기존에 하나의 중대형 위성이 수행하던 기능을 다수의 소형위성을 이용하여 수행할 수 있도록 하려는 연구가 전 세계적으로 계속되고 있다[1]. 특히 초소형위성 시스템 및 핵심부품 기술은 단기간에 보다 적은 비용과 적은 위험 부담으로 신기술을 위성에 적용하여 검증할 수 있다는 큰 장점을 가지고 있기 때문에 우주개발의 선진국인 미국과 유럽 등에서도 중점적으로 연구·개발되고 있다.

이와 같은 세계적인 추세에 발맞춰 한국항공대학교 우주시스템연구실에서는 이미 1 kg 급의 피코위성 HAUSAT-1의 성공적인 개발을 통하여 우리나라에서 시도된 적 없는 초소형위성 기술을 습득하였다. 이를 기반으로 본 연구실에서는 현재 국가지정연구실 사업의 일환으로 국내에서는 최초로 25 kg 급의 나노위성 HAUSAT-2의 개발을 수행하고 있다.

1 kg급 피코위성 HAUSAT-1은 우주시스템연구실에서 개발된 국내 최초의 초소형 피코 위성이다. 2006년 7월 러시아 발사체 '디네프르(Dnepr)'에 의해 발사되었으나, 1단 로켓엔진 유압구동기의 오작동으로 위성을 궤도에 올리는데 실패하였다. 정상적으로 발사되면 HAUSAT-1은 원래 발사 이후 1년의 임무기간 동안 경사각 97.43°의 510 km 저궤도에서 운용될 예정이었다.

HAUSAT-2는 25 kg급의 나노위성으로 대학수준에서 두 번째로 수행되는 위성개발 프로젝트이다. HAUSAT-2는 32 cm x 32 cm x 40 cm의 직육면체 형상이며, 650~800 km의 태양동기궤도에서 2년 동안 동물추적, 플라즈마 측정, 우주방사선 피폭량 측정, 국내에서 처음 개발된 별센서의 우주검증 등의 임무를 수행할 수 있도록 설계되고 있다.

본 논문에서는 개발이 완료된 1 kg급의 큐브셋(CubeSat) HAUSAT-1과 현재 개발되고 있는 25 kg급의 초소형 위성 HAUSAT-2의 개발 예를 통해 프로젝트 기반의 우주비행체 설계 교육방법에서의 초소형 위성의 장점과 교육적 가치의 중요성에 대해 기술하고자 한다.

## II. 초소형 위성 개발의 기대효과 - 교육적 도구로서의 측면

우리나라에서 전통적인 공학 교육은 특정 과학 기술 현상의 이해, 분석 및 최적화 등에 초점을 맞추고 있으며, 복합시스템 설계와 다학제간 통합 설계 등에 대해서는 여러 가지 이유로 설계

교육이 활성화 되어 있지 않은 것이 현실이다. 설사 이러한 복합시스템 설계 교육 프로그램이 존재한다 하더라도 예산, 일정 및 프로그램상의 문제 등으로 인해 교육 범위가 개념 설계나 페이지 상의 설계에서 그치고 실제로 제작, 조립, 시험 및 운영을 목표로 하는 경우는 거의 없다.

이에 대한 해결방안으로 한국항공대학교 우주시스템연구실에서는 'HAUSAT-1', 'HAUSAT-2' 초소형 위성 설계교육을 도입하였다. 이와 같은 초소형 위성 설계 프로그램은 개발 기간이 짧고, 개발비용이 저렴하여 그 규모가 작으므로 대학 내에서 자체 프로그램으로 진행하기에 적합하며, 초기 설계 단계에서부터 시작품에 이르기까지 하나의 완전한 시스템을 개발하기 때문에 대학교육에 도입되어 인공위성 설계분야에 보다 실제적인 경험을 가진 전문가를 양성하기에 적합하다.

프로젝트 기반의 단계적이고 실질적인 초소형 위성 설계 교육을 통해 학생들은 1)다학제간 통합 설계를 수행하고 2)이를 통하여 학생들이 위성 설계, 해석 제작, 조립, 시험, 발사 및 운용의 개발을 직접 수행 및 경험함으로써 3)위성시스템 전체 개발 사이클을 경험하게 되며, 시스템 및 서브시스템의 담당자로 활동하면서 4)완전한 위성시스템 엔지니어링을 위한 팀 기반의 개발활동을 이해하고 습득하게 된다.

## III. 초소형 위성 HAUSAT 시리즈 개발

HAUSAT 개발 프로젝트의 목적은 초소형 위성의 자체 개발을 통해 학생들에게 위성시스템 설계의 전 과정을 경험하게 하고, 이를 바탕으로 위성시스템 엔지니어링 통합기술을 정립하고 위성의 각 분야에 대한 전문가를 양성하는 것이다[2].

HAUSAT-1, 2는 각각 1 kg (Pico Class), 25 kg (Nano Class)급의 초소형 위성으로 개발기간이 수백kg의 실용급 위성에 비해 짧으며 개발비용이 저렴하기 때문에 대학에서 교육적 목적으로 개발하기가 용이하다. 또한, 초소형이라 할지라도 중·대형 위성의 경우와 크기에 상관없이 구성요소가 동일하기 때문에 초소형 위성은 위성시스템 엔지니어링 통합기술을 연구, 습득하는데 유용한 수단이 된다. 또한, 위성시스템 개발에 참여한 학생들은 졸업 후에 위성개발업체나 연구소에서 실질적인 업무를 바로 수행할 수 있는 능력을 갖출 수 있기 때문에 인력 양성의 측면에서도 초소형 위성은 그 가치가 매우 높다.

### 3.1 HAUSAT-1 피코위성의 개발

HAUSAT-1 위성은 그림 1과 2에서 보는 바와

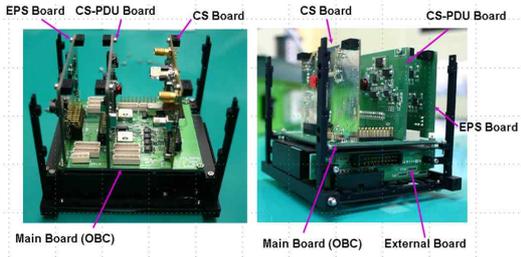


그림 1. HAUSAT-1의 내부형상

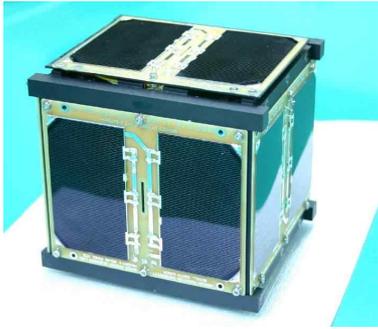


그림 2. HAUSAT-1의 비행모델

같이 10 cm × 10 cm × 10 cm 의 크기를 갖는 정육면체 모양이며, 무게는 1 kg 이하에 맞추어 개발되었다. HAUSAT-1의 개발 목적은 초소형 위성의 자체 개발을 통해 학생들에게 위성 설계에서부터 해석, 제작, 조립, 시험, 발사 및 운용의 전 과정을 경험하게 하고, 이를 바탕으로 위성 분야의 전문 인력을 양성하는 것이다. 우주용 GPS 수신기를 이용한 위성의 위치정보 획득, 태양전지패널 전개장치 실험 및 자체제작 태양센서의 우주인증을 임무 목적으로 하며, 미국의 Cal-Poly 대학에서 주관하는 국제 큐브셋 프로그램의 일환으로 수행하였다.

HAUSAT-1은 중·대형 위성과 거의 동일한 총 6 개의 서브시스템으로 구성되었으며, 각 서브시스템은 주어진 동작, 부피, 전력 등의 요구조건을 만족하도록 설계되어 탑재되었다[3].

구조체는 큐브셋 프로그램에서 제시한 위성체 재질, 크기, 질량에 대한 제한조건들을 반영하여 설계하였다. 따라서 위성 내 각 모듈에서 요구하는 전력량에 비해 작은 부피와 길쭉이를 가지며, 태양전지판도 몸체에 부착하는 형태로 제작하여 소형화, 경량화, 고효율 설계에 많은 노력을 기울였다.

전력계는 10개의 GaAs 태양전지셀 (5 세트), 3 개의 리튬-이온 배터리 팩, 전력 조절 및 분배회로로 구성되었으며, 임무기간 동안 위성 내 각종

전자 모듈들의 동작을 가능하도록 하였다. 탑재 컴퓨터는 위성이 궤도를 돌때, 전력 상황을 끊임 없이 파악하고 운용모드에 알맞게 각 탑재보드의 동작을 제어한다. 통신계는 상향/하향 주파수로 145.84 MHz / 437.465 MHz를 사용하며, 500 mW의 송신 출력을 내도록 설계하였다. 데이터 통신을 위해 FSK 변조 방식을 사용하였고, AX.25 패킷 통신으로 구현하였다. HAUSAT-1에서는 위성의 진행방향과 평행하게 탑재된 영구자석과 지구 자기장의 작용을 이용한 수동형 자세 제어 방법을 적용하였으며, ±5° 이내로 안정적으로 자세가 제어될 것으로 분석되었다[3].

HAUSAT-1은 비행모델의 개발과 시험을 모두 성공적으로 완료하였다. 2004년 4월에 미국의 Cal-Poly 대학으로 운송하여 발사용기와의 정합성 체크(fit check)를 수행하였으며, 일본 및 노르웨이의 대학에서 개발한 2기의 큐브셋과 함께 P-POD (Poly-Pico-satellite Orbital Deployer)에 장착되어 인수수준 환경시험이 수행되었다.

HAUSAT-1은 2006년 7월 27일 러시아의 ‘디네플(Dnepr)’ 발사체에 의해 발사되었으나 발사체 1단 엔진의 유압구동기의 오작동으로 인해 궤도 진입에는 실패하였다. 그러나 HAUSAT-1 개발사업의 주목적은 연구개발에 참여한 학생들에게 설계, 제작, 조립, 시험, 발사 및 운용에 이르기까지 위성개발의 전체 과정을 체험하게 함으로써, 인공위성 분야의 전문 인력을 양성하는 교육적 도구로서 활용하고자 함이었던 만큼 비록 발사에는 실패하여 위성의 실제 운용이라는 과정은 수행하지 못하였으나, 설계, 제작, 조립, 시험, 발사 준비 등의 과정을 학생들이 완수함으로써 원래 개발 목표의 80%는 달성하였다고 볼 수 있다.

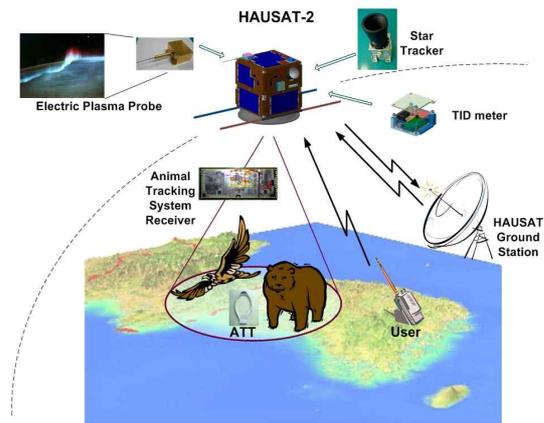


그림 3. HAUSAT-2의 시스템 구성

### 3.2 HAUSAT-2 나노위성의 개발

#### 3.2.1 HAUSAT-2 시스템

그림 3에서 보는 바와 같이 나노위성 HAUSAT-2는 4개의 주요 임무를 수행하도록 설계하였다. 임무는 크게 과학임무와 기술검증임무로 구분된다. 동물의 활동과 생태를 연구할 수 있는 추적 시스템 구축과 전기 플라즈마 탐침을 이용한 우주 플라즈마 환경 측정, TIM 측정기를 이용한 우주 방사선 측정의 과학임무를 주 임무로 하고 있으며, (주)썬트랙아이에서 개발된 별센서의 우주 검증 임무도 함께 수행한다. 표 1은 HAUSAT-2의 주요 시스템 제원을 보여주고 있다.

표 1. HAUSAT-2의 주요 시스템 자원

|              | 자원  | 기타                |
|--------------|---|-------------------|
| 고도           | 650 ~ 800 km                                  | 저궤도               |
| 경사각          | 약 98 도  | 태양동기              |
| 무게           | < 25 kg                                       |                   |
| 부피           | 32 cm × 32 cm × 40 cm                         |                   |
| 전력           | > 20 W  | @EOL              |
| 자세제어<br>정밀도  | - 피치(Pitch) : ± 1도<br>- 롤(Roll), 요(Yaw): ± 3도 |                   |
| 과학<br>탑재체    | - 동물추적 시스템<br>- 전기 플라즈마 탐침<br>- TID 측정기       |                   |
| 기술 검증<br>탑재체 | - 별센서   |                   |
| 통신<br>전송률    | 9600/2400 bps<br>(상향/하향)                      | FSK               |
| 설계<br>임무기간   | 2 년   | 운영<br>임무기간<br>1 년 |

#### 3.2.2 HAUSAT-2 탑재체

##### 동물추적시스템 (Animal Tracking System)

HAUSAT-2 주요 탑재체 중 하나인 동물 추적 시스템은 동물 생태를 연구하는 연구소, 혹은 기업 종사자들에게 소형 위성을 이용하여 동물 추적 연구를 실시할 수 있는 기회를 제공한다는 목적으로 개발 중이다. 위성을 이용한 동물 추적 프로젝트는 위치와 시간의 제약을 받지 않고 지속적인 운용이 가능하며 GPS 수신기와 위성용 송신기 등을 사용하기 때문에 조류, 육상, 해양 동물의 생태 연구는 물론 부표를 이용한 자연 환경 연구, 혹은 비무장 지대 내의 생태 연구 등과 같은 위치상 제약을 많이 받지만 지속적인 감시가 필요한 프로젝트에 적합하다.

동물추적시스템은 크게 추적동물로부터 송신되는 신호를 수신하기 위한 동물추적시스템 수신기와 동물에 장착되는 동물추적단말기로 구분된다.

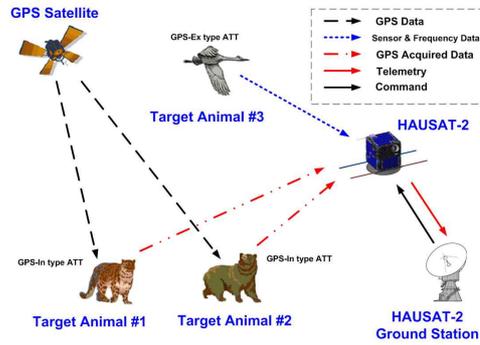


그림 4. 동물 추적 시스템 개념도

동물추적시스템 수신기는 145.860 MHz의 VHF 대역의 FSK 신호를 수신할 수 있도록 설계되었으며, 잉여시스템(Redundancy)을 가지고 있어 임무기간인 1년 동안 지속적인 임무수행이 가능하다.

동물추적단말기의 경우, GPS 수신기가 장착된 단말기(GPS-In ATT)와 GPS 수신기 없이 HAUSAT-2 위성을 향해 일정 시간 동안 데이터를 송신, 도플러 효과를 이용하여 지상국에서 거리를 추정하는 단말기(GPS-Ex ATT) 등 크게 두 가지 형태로 개발하고 있다. 동물추적단말기는 동물에 장착해야 하는 만큼 단말기 무게에 많은 제약 조건이 부여된다. 비교적 개체 크기가 큰 포유동물의 경우 개체 무게의 10% 이내의 무게를 가진 단말기를 장착하면 문제가 없기 때문에 단말기 무게에 큰 제약을 받지 않는다. 반면, 조류의 경우에는 개체 무게가 포유동물과 비교하여 가볍기 때문에 단말기 무게에 큰 제약이 따르게 된다. 단말기에 GPS 수신기를 장착하게 되면 GPS 수신기 무게는 물론 GPS를 운용하기 위해 추가되는 배터리 무게가 전체 단말기 무게의 상당 부분을 차지하기 때문에 조류 추적 임무에는 적합하지 않다. 따라서 GPS가 장착되어 있지 않은 형태의 단말기가 필요하게 된다. 이러한 형태의 단말기로부터 위성으로 수신된 데이터를 이용하여 도플러 편이(Doppler Shift)를 측정하게 되고 그 결과 값을 지상국에서 분석함으로써 동물의 위치를 추정하게 된다.

##### 전기플라즈마 탐침 (Electric Plasma Probe)

전기플라즈마 탐침은 전자밀도와 온도를 측정하여 상층대기 변화를 연구하기 위한 탑재체이다. 전기플라즈마 탐침은 그림 5에서 보는 바와 같이 전자밀도를 측정하는 'probe'와 이를 지지하는 'Boom', 미약한 아날로그 값을 증폭시켜주는 'pre-amp'단으로 구성된 탐침부와 측정된 데

< Probe, Boom and Pre-Amp. >



< EPP Electric Board >

그림 5. 전기플라즈마 탐침의 엔지니어링 모델

이터를 디지털 값으로 변환하고 위성의 탑재컴퓨터와의 인터페이스를 통해 변환된 데이터를 전송하기 위한 전장보드로 구성되어 있다. 임의의 지역 또는 궤도 전반에 걸쳐 4초 간격으로 측정된 데이터는 전장박스에서 처리되며, 하루에 5.4Mb에 해당하는 데이터를 생성한다.

**별센서 (Star Tracker)**

별센서는 저궤도에서 지구 수평 센서의 정밀도 한계와 자이로를 이용한 관성 측정 장치(IMU; Inertial Measurement Unit)의 표류(Drift) 효과를 보정하기 위한 목적으로도 이용되고 있는 고정밀 자세제어를 위한 필수적인 센서이다. HAUSAT-2에는 국내에서는 최초로 (주)썬트랙아이에서 개발된 별센서를 탑재하여 우주에서의 성능을 검증하게 된다. 탑재된 별센서는 약 15도 정도의 시야각을 갖으며 10 arcsec의 높은 지향정밀도를 갖는다. 그림 6은 실제 제작된 별센서의 엔지니어링 모델을 보여준다.

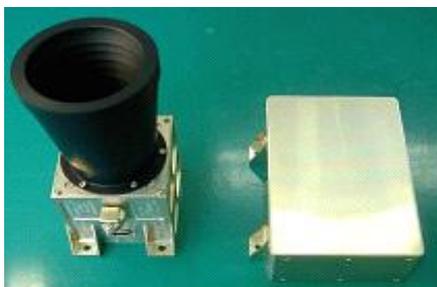


그림 6. 별센서의 엔지니어링 모델

**피폭량 측정기(TID Meter)**

피폭량 측정기는 임무궤도에서 임무기간 동안 피폭되는 방사능의 양을 측정하기 위한 목적으로 이용되는 센서이다. HAUSAT-2에서는 NMRC Laboratory의 ESAPMOS4 RADFET을 이용하여 위성내부의 총 피폭량을 측정하여 피폭량의 영향을 분석하고 시뮬레이션 결과를 검증하게 된다. 또한 지속적인 피폭량 측정을 통하여 태양활동과 피폭량의 관계를 분석하는 것을 주요 목적으로 한다.

**3.2.3 HAUSAT-2 버스 시스템**

HAUSAT-2 위성의 버스 시스템은 크게 기계 및 구조계, 자세제어계, 명령 및 데이터 처리계, 통신계, 전력계, 열제어계로 구성되어 있다.

**기계 및 구조계 (SMS)**

구조 및 기계시스템은 할당된 질량 버짓 내에서 강도와 강성 요구 조건을 만족시키며 장착되는 여러 전장박스 및 하니스(harness)의 배치가 문제없도록 충분한 용적 공간을 제공하며 조립과 분해가 용이하도록 개발하였다.

전장박스의 경우 그림 7과 같이 각 서브시스템 및 탑재체의 전장박스를 통합한 버스 전장박스(Bus Electronic Unit; BEU)를 개발, 위성 내부 공간을 효율적으로 활용할 수 있게 하였다.

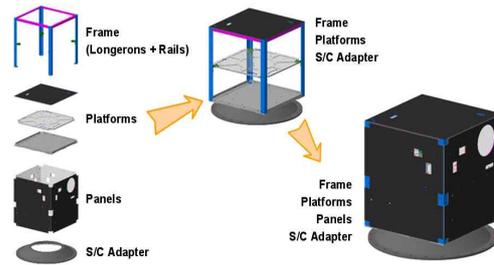


그림 7. 구조계 설계 개념

구조-열 모델(Structural-Thermal Model, STM) 및 BEU 인증모델의 개발, 조립 및 분해를 통해 구조 설계의 적정성을 확인하였으며, 진동 시험을 통해 구조 해석에 대한 검증을 수행하였다.

**자세제어계 (ADCS)**

HAUSAT-2는 임무수행을 위하여 피치 축으로 ± 1도, 롤/요 축으로 ± 3도의 지향정밀도를 가지며, 피치 축 방향의 지향정밀도를 고려하여 소형 위성으로는 드물게 피치 바이어스 모멘텀(Pitch Bias Momentum)방식을 사용한다.

자세제어계는 위성의 자세를 결정하는 센서부와

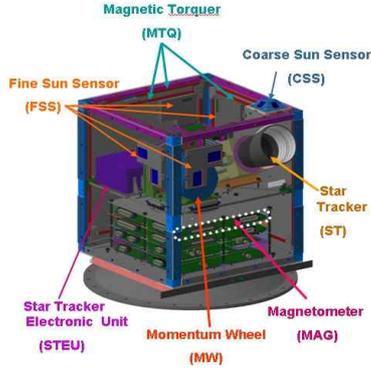


그림 8. 자세제어계 센서 및 구동기 장착 형상

자세를 제어하는 구동부로 나누어지며 HAUSAT-2에서는 자세 결정 센서로 태양센서(Sun Sensor), 자기센서(Magnetometer), 별 센서(Star Tracker)를 사용하고, 자세제어 구동기로는 모멘텀 휠과 각 축을 제어하는 자기토크를 장착하였다. 그림 8은 자세제어계 각 센서 및 구동기의 장착 위치를 보여 주고 있다.

**명령 및 데이터 처리계 (C&DH)**

C&DH는 위성 전체의 스케줄 판단 및 관리, 메모리 관리, 위성 자세 제어의 기능을 수행하는 탑재컴퓨터(On Board Computer, OBC)와 각 탑재체 및 서브시스템에 명령을 전달하고 데이터 수집 및 제어하기 위한 원격측정 및 명령부(Telemetry & Command Assembly, TCA), 수집된 정보를 저장하기 위한 메모리 관리부(Memory Management Assembly, MMA)로 구성된다. 전자 소자의 수를 줄이고 공간을 절약하여 HAUSAT-2와 같은 초소형 위성에 적합하도록 FPGA(Field Programmable Gate Array) 및 마이크로컨트롤러 등을 사용하여 최적화된 시스템을 구현하였으며, 하드웨어 본체의 동작에 이상이 생겼을 때 그 기능을 그대로 수행할 수 있는 하드웨어 잉여시스템을 가지고 있다.

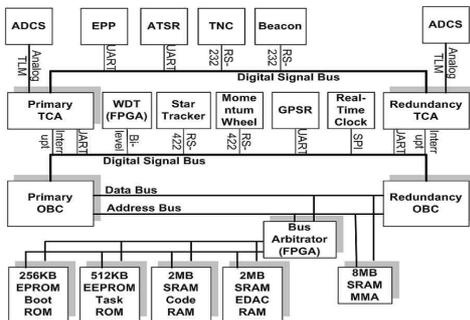


그림 9. 명령 및 데이터 처리계 구성

**전력계 (EPS)**

전력계는 Triple Junction의 GaAs 태양전지셀을 사용하여 전력을 생성하며, 2개의 리튬-이온 배터리 팩이 구성되었다. 태양전지판에서 생산된 전력은 디지털 방식의 최대 전력 조절기에서 정류되며, 전력 제어기 및 전력 분배기에서 각 서브시스템에 필요한 전압으로 변환되어 서브시스템 및 탑재체에 공급된다. 그림 10은 전력계의 엔지니어링 모델을 보여 주고 있다.

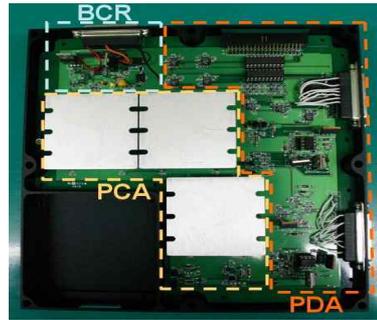


그림 10. 전력계 엔지니어링 모델

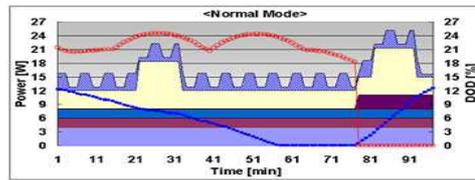


그림 11. 정상 모드 에너지 평형 분석 결과

에너지 평형 분석을 통해 탑재체 및 서브시스템에 원활히 전력을 공급할 수 있는지를 분석하였다. 그림 11은 전력 소비가 가장 많은 정상 모드에서의 에너지 평형 분석 결과를 보여준다. 이를 통해 위성 임무기간 동안 원활한 전력 공급과 배터리의 완충이 이루어짐을 확인할 수 있었으며, 전력 소모가 가장 많은 정상 모드에서도 배터리 DOD(Depth-of-Discharge)는 최대 12.5%로 전력계 요구조건인 30%이하로 내려가지 않음을 확인하여, 전 운용 모드에서 한 주기 동안 배터리가 완충될 수 있음을 확인하였다[4].

**통신계 (CS)**

통신계는 그림 12에서 보는 바와 같이 크게 텔레메트리를 지상국으로 송신하기 위한 송신기, DTMF(Dual Tone Multi-Frequency) 명령(Command) 신호와 프로그램 패치 파일을 지상국으로부터 수신하기 위한 수신기 및 AX.25 패킷

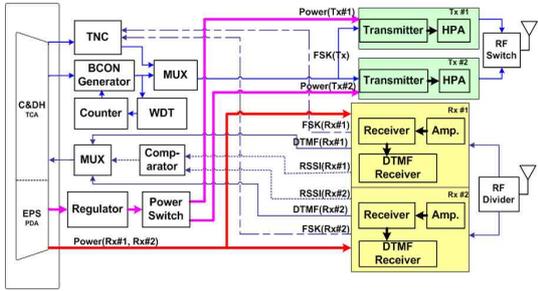


그림 12. 통신계 기능선도

데이터 처리를 위한 TNC(Terminal Node Controller)로 구성되었다. 상향링크에 145.84MHz VHF대역, 하향링크에 437.465MHz의 UHF대역을 사용하였으며, 변조 방식은 상/하향링크 모두 FSK(Frequency Shift Keying)를 사용한다.

HAUSAT-2의 통신계에서는 C&DH와 마찬가지로 시스템 결함에 의한 상황에서도 안정적인 통신을 위해 잉여시스템을 구현하였다. 지상으로 부터의 명령 송신 및 프로그램 업데이트를 수행하는 상향링크의 중요성으로 인해 두 개의 수신기를 동시에 사용하여 최대한 오류를 줄이도록 설계를 하였으며, 지상으로 데이터를 전송하기 위한 송신기도 잉여시스템을 추가하여 임무기간 동안 원활한 통신이 되도록 설계하였다.

**비행 소프트웨어 (Flight Software)**

비행 소프트웨어는 크게 C&DH, ADCS, EPS, CS 소프트웨어로 구성된다. 이중 HAUSAT-2의 임무를 주로 관리하는 것은 C&DH 비행 소프트웨어이다. ADCS 비행 소프트웨어는 다시 우주비행체 및 탑재체 관리, 명령 및 데이터 처리로 나뉜다. 이 때 C&DH의 비행소프트웨어는 실시간 처리 운영체제가 탑재되어 명령 및 데이터 처리가 실시간으로 이루어지며, 여러 태스크가 동시에 이루어지는 멀티태스킹을 지원한다. 한편, 초기운영모드, 일반모드, 과학임무모드, 통신모드,

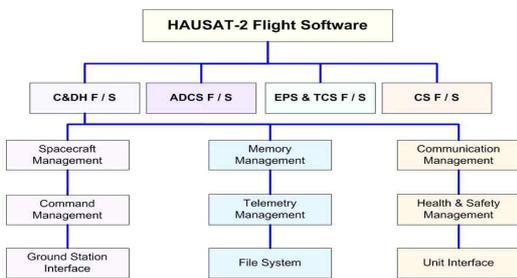


그림 13. HAUSAT-2 비행 소프트웨어 구성

안전모드에 따른 각 모드별 알고리즘에 따라서 비행 소프트웨어가 작동하도록 구성되었다.

**3.2.4 HAUSAT-2 구조-열 시험 (인증 수준)**

구조/열 해석의 검증, 설계의 적정성 및 설계 마진의 확인을 위해 STM (Structural Thermal Model)을 개발하였고, 인증 수준의 열-진공 시험을 수행하였다.

진동 시험은 크게 정현파(Sine) 진동 시험과 랜덤 진동 시험으로 수행하였다. 시험 수준은 발사체가 아직 정해지지 않았기 때문에 최악의 조건(Worst Case)을 고려하여 이후 결정될 어떠한 발사체에 대해서도 구조체 설계 여유를 가질 수 있도록 하였다. 정현파 진동 시험에는 발사 후보군 중 KSLV(Korea Space Launch Vehicle)의 시험 수준, 랜덤 진동 시험에는 Military Standard에 명시된 우주 왕복선(Space Shuttle)의 시험 수준을 참조하였다[5,6].

표 2. 구조-열 모델 진동시험 결과

| Test                  | Natural Frequency(Hz) |      |      |
|-----------------------|-----------------------|------|------|
|                       | X                     | Y    | Z    |
| 1st Low Level Random  | 53.8                  | 69.4 | 67.5 |
| -6dB Sine Vibration   | 53.1                  | 65.7 | -    |
| -3dB Sine Vibration   | 52.7                  | 66.6 | -    |
| 0dB Sine Vibration    | 55.2                  | 67.5 | 68.8 |
| 2nd Low Level Random  | 48.8                  | 66.3 | 68.1 |
| Main Random Vibration | 47.7                  | 65.0 | 67.5 |
| 3rd Low Level Random  | 30.6                  | 62.5 | 68.1 |

표 2에서 보여주는 바와 같이 HAUSAT-2의 고유 진동수는 각 축에 대해 설계 강성 요구조건인 50 Hz를 충분히 만족시키는 약 70 Hz의 고유 진동수를 갖는다는 것을 확인할 수 있었다.

열-진공/평형 시험 또한 인증 수준으로 수행하였으며, 내부 열 소산은 표면 히터로 모사하였다. 그림 14는 열-진공 시험 결과를 보여준다. 이 데이터를 활용하여 열 모델이 더욱 정밀한 결과를

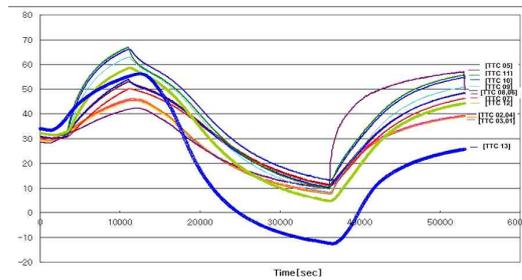


그림 14. 구조-열 모델 열-진공/평형 시험 결과

도출하도록 수정하였고, 열 해석을 수행하여 실제 시험 데이터와 거의 유사한 결과를 얻을 수 있었다[7].

### 3.2.5 HAUSAT-2 전장 시험 베드(Electrical Test Bed; ETB)

ETB는 실제 비행모델의 제작 전에 각 서브시스템 및 탑재체의 엔지니어링 모델을 기본으로 위성 시스템 수준에서 비행 소프트웨어를 검증하고, 모사된 궤도 환경에서의 각 서브시스템의 인터페이스와 전기적 성능을 확인하기 위해 개발하였다.

그림 15에서 보는 바와 같이 ETB는 탑재체 및 각 서브시스템의 엔지니어링 모델, 자세제어 시뮬레이터, 전기지상지원장비 (Electrical Ground Support Equipment, EGSE), 기계지상지원장비 (Mechanical Ground Support Equipment, MGSE) 등으로 구성된다.

ETB 시험은 다음 그림 16과 같이 'ETB 준비 및 개별 조립', '전력계(EPS)와 명령 및 데이터처리계(C&DH)의 조립', '전력계(EPS)와 명령 및 데이터처리계(C&DH)를 포함한 각 서브시스템과 탑재체의 시험', '종합 성능 시험', '운용 시험', '위기관리 시험', '자세제어계(ADCS) 시뮬레이션 시험'의 7단계로 구분하여 수행하였다.

ETB 개발 및 시험을 통하여 비행 소프트웨어를 검증하고, 각 서브시스템의 개별 성능을 시험



그림 15. HAUSAT-2 ETB 형상

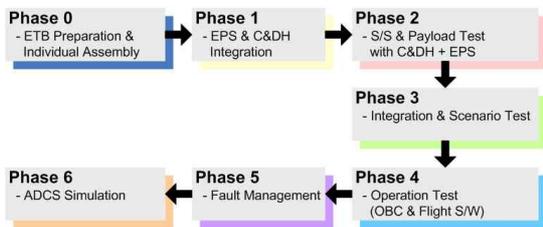


그림 16. ETB 시험 단계 및 흐름

하였으며 이를 통해 모든 인터페이스 문제를 해결할 수 있었다. 또한, ETB는 준비행 모델 및 비행 모델 개발 기간 동안에도 계속하여 동작 및 운용시험을 수행함으로써 소프트웨어의 성능 향상을 지원하게 될 것이다. 특히 HAUSAT-2가 향후 위성이 발사된 후 비행 소프트웨어의 수정과 위성시스템 시뮬레이터로도 활용할 예정이다.

## IV. HAUSAT-1, 2의 개발 사례를 통한 소형위성 설계 교육의 목표 달성

### 4.1 다학제간 통합 설계 수행

지금까지의 공학 교육은 특정 기술 분야에 초점을 맞춘 학제간 교육이 주를 이루어 왔다. 그러나 근래에 엔지니어들에게 요구되는 것은 특정 영역에 국한된 편협한 전문성이 아니라 다양한 기술에 두루 학문적 배경을 갖춘 보편성인데 반해, 대학교육은 아직 이러한 다학제간의 교육 시스템을 갖추는데 인색한 실정이다. 반면, 우주시스템연구실의 초소형 위성 프로젝트는 학생들이 전기, 전자 공학 분야에서 기계 공학 분야에 이르기까지 다양한 학문을 기반으로한 다학제간 통합 설계 수행의 기회를 제공할 수 있다. 인공위성은 다양한 기술이 서로 융합되어 있는 시스템이다. 인공위성을 구성하는 다양한 서브시스템과 탑재체에는 각종 센서류, 트랜시버, 전장 보드와 컴퓨터를 포함하는 전기전자 기술과 이러한 장비들을 지지하는 구조/열 메커니즘의 기계 기술 등 서로 전혀 다른 분야로 인식되어 오던 학문들이 임무를 효과적으로 지원하기 위해 위성 시스템 전체에 두루 융합되어 있다. 특히, 초소형 위성 분야에 있어서 MEMS (Micro Electro Mechanical System), MFS (Multi-Function Structure) 등의 초소형, 다기능, 고성능의 융합 기술을 위성에 적용하려는 노력이 활발히 진행되고 있다. 다시 말해, 그림 17에서 보는 바와 같이 HAUSAT-1, 2와 같은 초소형 위성 프로젝트는 다른 어떠한 분야 보다 ST, IT, NT가 융합된 다학제간 연구성과를 집대성한다고 할 수 있다.

실제로, HAUSAT-1, 2에는 전자에서 기계에 이르기까지 다양한 학문을 기반으로한 서브시스템이 구성되었으며, 적용된 모든 기술을 학생들이 기초 단계에서부터 스스로 설계하였다. 이러한 과정을 거친 학생들은 전형적인 복합 시스템의 상호 연관된 기능의 영향을 직접적으로 경험하며, 다양한 학문적 복합지식을 갖추게 됨으로써, 최첨단 복합 기술의 사회에 요구되는 전문

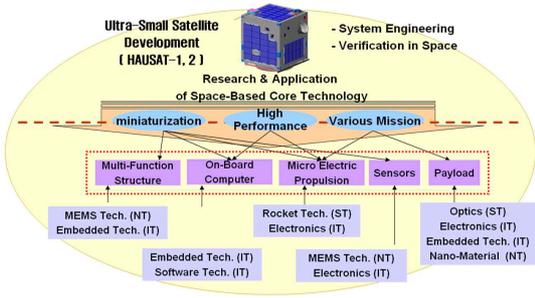


그림 17. 초소형 위성 개발을 위한 기술요구

연구개발 인력으로 거듭날 수 있다. 또한 각 서브시스템에 적용된 기술뿐 아니라, 위성버스의 시스템 규격을 만족시키기 위한 각 서브시스템의 개발, 인터페이스 관리 및 엔지니어링 모델, 준비행모델, 비행모델의 각 개발모델에서 요구되는 조건에 합당한 전장보드, 구조물의 조립 및 제작 등은 모두 위성 시스템 설계과정에서 매우 중요한 과정이라 할 수 있다. 때문에 이러한 서브시스템 개발은 시스템 엔지니어링 교육이라는 측면에서도 유용한 교육적 도구로서 활용될 수 있다.

국내 공학교육의 측면에서도, 본 연구개발 프로그램은 다학제간 연구 활성화의 표본으로서 급변하는 과학기술에 대처할 수 있는 매우 효과적인 대학수준의 공학교육의 방법으로 활용될 수 있음을 증명한다.

4.2 위성시스템 전체 개발 사이클 경험

HAUSAT-1, 2의 개발 프로그램에 참여하는 학생들은 임무설정, 상세 설계, 제작, 조립, 시험, 발사, 그리고 운용을 통한 위성시스템 전체 개발 사이클을 경험하게 된다.

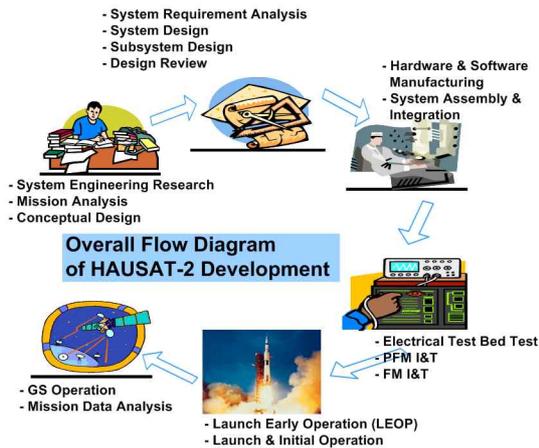


그림 18. HAUSAT-2 위성 시스템 개발 과정

그림 18은 HAUSAT-2 위성의 전체 개발 과정을 보이고 있다. 초기 시스템 개념 설계단계에서는 임무 목적과 임무 요구조건을 정립하고, 이후 임무 해석과 설계를 수행하고, 시스템의 요구조건 및 제한조건에 따라 시스템 설계 및 각 서브시스템의 예비설계와 세부설계를 수행하였다. 위성 개발의 각 단계에서 SRR (System Requirement Review), SDR (System Design Review), PDR (Preliminary Design Review), CDR (Critical Design Review)의 설계 점검회의를 통해 설계 검증을 수행하였고, 시스템 종합능성시험과 환경 시험 등을 거쳐 실제 우주에서 운용될 수 있는 비행모델을 개발하고 있다.

이와 같은 과정을 통해 학생들은 단순히 인공 위성 시스템 설계 뿐만 아니라, 어떤 종류의 시스템 개발에도 공통으로 적용될 수 있는 설계 개념을 이해하고 익히게 된다.

4.3 시스템 엔지니어링 교육과 팀 기반 개발활동

초소형 위성 HAUSAT-1, 2라는 시스템을 개발하기 위한 모든 활동은 학생들을 중심으로 수행하였다. 설계 초기의 요구조건, 개발일정, 개발모델, 개발조직의 설정에서부터 인터페이스 관리 및 각종 종합시험에 이르기까지의 모든 시스템 개발 활동을 통해 학생들은 자연스럽게 시스템 엔지니어링 설계를 체험하고 이해하게 되고, 팀 운용 환경에서 관리 및 시스템 엔지니어링 기술을 접하여 기술적 통찰력을 키울 수 있다. 개인의 능력을 넘어서는 목표를 달성하기 위해 다른 학생들과 함께 일하는 것은 학생들에게 새로운 경험일 수 있으나, 이는 실제 연구과정에서는 필수적으로 요구되는 것이다[8].

그림 19에서 보는 바와 같이, 학생들은 하나의 시스템을 제작하기 위해 팀(서브시스템)을 구성하고, 각 구성원간의 공동작업, 설계 및 인터페이

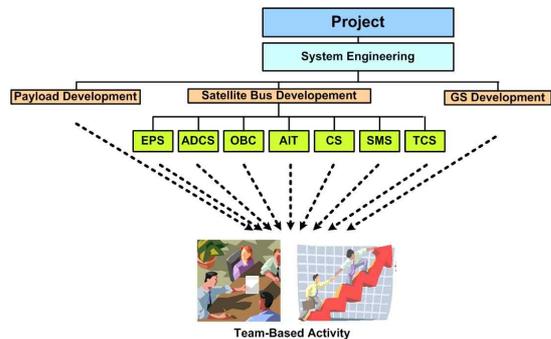


그림 19. HAUSAT-2 시스템 조직

스 회의 등 임무목적에 최적화 된 시스템을 만들기 위한 과정을 수행함으로써, 리더와 팀 구성원 간의 역할 분담, 팀원 간의 유기적인 구조, 팀 간의 의사소통, 팀을 유지하기 위한 활동이자 공학 기술 연구분야에 반드시 필요한 팀워크(teamwork)라는 중요한 교훈을 자연스럽게 얻을 수 있다.

**4.4 우주분야의 핵심 기술 습득**

HAUSAT 위성 시리즈는 비록 작은 위성이지만 그 개발과정과 위성을 구성하는 부품들은 중·대형 위성과 거의 동일하다. 표 3에서 보는 바와 같이 HAUSAT 위성 시스템의 개발 프로젝트가 수행되면서 많은 기술이 개발되어 위성에 적용하였다. 특히, 위성에 적용된 다양한 기술들은 전자, 통신, 기계 등 다양한 분야가 접목된 기술이 주를 이루고 있어, 연구개발과정에 참여하여 부품기술을 체험하고 습득한 학생들은 연구소나 회사에 즉시 활용 가능한 능력을 갖춘 인력으로 성장할 수 있다.

특히, 'Plug-n-Play' 형태의 BEU의 개발과 FPGA를 이용해 데이터 처리를 할 수 있는 C&DH의

개발은 새로이 각광받고 있는 우주분야의 신기술을 위성에 적용하였다는 점에서 주목할 만하다. 이러한 기술들은 우주 선진국에서도 최근에 활발히 연구가 진행되고 있는 분야로서 이와 같은 기술의 개발 및 성공적인 우주검증이 이루어진다면 국내 우주산업분야의 발전에 큰 기여를 할 것으로 기대된다.

**'Plug-n-Play'형 BEU(버스전장박스) 개발**

내부 공간의 효율적 활용과 조립 시 작업의 용이성 및 효율성을 높이기 위해서 모든 서브시스템과 탑재체의 전장품을 하나로 통합한 'Plug-n-Play' 형 BEU를 장착하였다. 아래 그림 20은 통신계, 전력계, 자세제어계, 그리고 명령 및 데이터 처리계의 전장보드가 BEU에 어떻게 구성되어 탑재되는지를 보여준다.

BEU개발의 가장 큰 의미는 초소형 위성에서의 'plug-n-Play'를 구현한 것이라 할 수 있다. BEU에는 위성 임무수행을 지원하는 필요한 모든 전장 보드를 포함하고 있다. 또한 외부 인터페이스

표 3. HAUSAT 프로젝트에서 개발 및 적용된 기술

| 분류           | 핵심 기술                                 |
|--------------|---------------------------------------|
| 구조계          | 각종 구조해석                               |
|              | (Plug-n-Play 형) 버스 전장 박스              |
| 전력계          | 전력 평형 해석                              |
|              | GaAs 태양전지셀 부착(Lay-Down)               |
|              | 디지털 최대 전력 추적기                         |
|              | 전력 분배 및 정류기                           |
| 명령 및 데이터 처리계 | FPGA를 이용한 데이터 처리                      |
|              | 분산 처리 시스템                             |
|              | 단일보드 컴퓨터                              |
|              | EDAC (Error Detection and Correction) |
| 비행 소프트웨어     | 실시간 운영체제 (Real-time O/S)              |
|              | 메모리 관리                                |
|              | 비행 운용 알고리즘                            |
|              | 보드 지원 소프트웨어                           |
|              | 임베디드(Embedded) 소프트웨어                  |
| 통신계          | UHF 텔레메트리 송신기                         |
|              | VHF 원격명령 및 데이터 수신기                    |
|              | 패킷 데이터 통신                             |
| 자세 제어계       | 고/저 정밀 태양 센서                          |
|              | 자력 측정기                                |
|              | 피치 바이어스 모멘텀 방식의 자세제어 알고리즘             |
|              | 자세제어 시뮬레이터                            |
| 열제어계         | 시스템 수준 계도 열해석                         |
|              | 보드 수준 열해석                             |

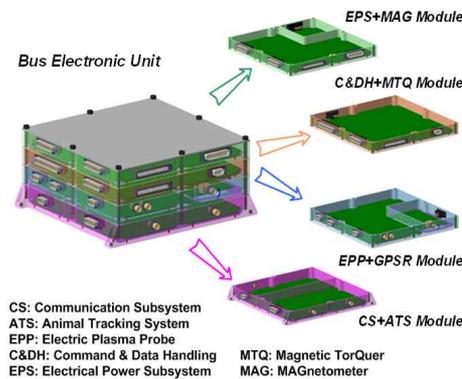


그림 20. BEU (Bus Electronic Unit)

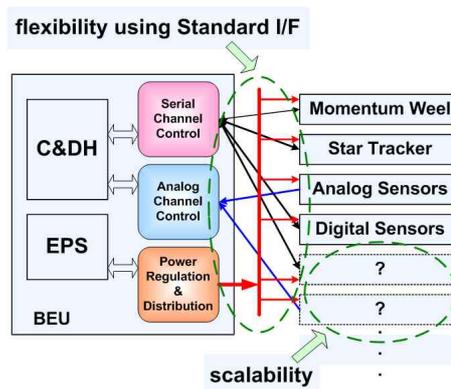


그림 21. 'Plug-n-Play'형 BEU 활용

는 IEEE 표준을 따르고 있어, 이후 다른 임무를 가진 소형위성의 개발 시에도 인터페이스만 동일하게 구성한다면 본 개발에서 사용된 BEU의 설계를 그대로 활용할 수 있다. 즉, BEU의 활용은 버스 개발 기간을 매우 단축시킬 것이고, 나아가 빠른 우주 대응력을 갖춘 우주 기반 기술로 자리 잡을 것으로 기대된다.

**고 신뢰도 및 확장성을 가진 C&DH의 구현**

C&DH의 전체적인 구조는 분산처리시스템(Distributed Processing System)이다. 또한 별도의 잉여 시스템을 가지고 있어 위성 운용 중 하드웨어 기능 장애 시 능동적으로 대처할 수 있도록 구현하였다. 하나의 하니스 및 정보유입 경로를 두 개의 컨트롤러가 공유하도록 되어 있으며 한쪽 시스템만 동작 시키는 잉여 시스템 구조를 가지고 있다.

그림 22에서 보는 바와 같이, HAUSAT-2의 C&DH는 FPGA (Field-Programmable Gate Array)를 사용하여 다수의 직렬 통신 채널을 제어한다. 다시 말하면 모든 정보는 OBC로 직접 전송되지 않고 다채널 직렬 통신을 제어하는 FPGA를 통해서 이루어진다. 이 방법으로 위성 시스템은 외부 인터페이스의 증가에도 단지 FPGA의 프로그램과 하니스의 수정을 통해 유연하게 대처할 수 있다. 이는 버스전장유닛이 'plug-n-play' 기능을 가능하도록 하는 구조이다.

감시 모듈(Monitoring Module, MM)에는 전송되는 정보의 신뢰성을 위해 패킷에 포함되는 CRC(Cyclic Redundancy Code)를 검산하는 기능이 있어 SEU(Single Event Upset)에 의한 오류 발생 시 OBC에 보고하여 명령을 재전송하도록 한다. 패킷은 SLIP(Serial Line Internet Protocol)을 모체로 하며 모든 명령 및 정보 패킷에는 각각의 인식 플래그(Identification Flag)가 정의되며

정해진 길이의 패킷을 송수신한다. 또한, 메모리 관리 모듈(Memory Management Module, MMM)은 OBC와 MMA 사이에 위치하여 EDAC(Error Detection And Correction)을 통해 메모리에 기록하거나 읽어 들이는 데이터의 신뢰성을 보장한다.

**III. 결 론**

HAUSAT-1, 2 개발의 예를 통해 프로젝트 기반의 우주비행체 설계교육의 교육적 목적을 논의하고, 각 프로젝트에 대해 설계 가이드라인과 전략 등을 검토해 보았다. HAUSAT-1, 2와 같은 초소형 위성의 개발 프로젝트는 실질적이고 경험적인 교육의 기회를 제공함으로써 전통적 공학 교육의 틀에서 벗어난 다학제간 통합설계, 복합 시스템 개발을 수행하게 함으로써 대학에서 훌륭한 교육적 도구가 될 수 있음을 확인하였다. 이러한 프로젝트 기반의 설계 교육을 통해 본 연구실에서는 대학의 고유기능인 과학 및 기술연구, 설계 교육을 통한 우주분야의 전문 인력 양성의 목표를 동시에 달성할 수 있었으며, 연구 개발에 참여한 학생들은 개개인의 기술 이해 및 설계 능력의 향상뿐만 아니라 전체 시스템 개발 사이클을 경험함으로써 시스템 엔지니어링 개념의 이해, 팀 기반의 연구 활동을 직접 체험하는 귀중한 성과도 얻을 수 있었다. 또한 본 설계교육은 국내 대학교육에서 다소 결여되어 있었던 다학제간 시스템 교육이 활성화되는 기반이 될 것으로 기대된다.

HAUSAT-1은 2006년 7월 27일 러시아의 '디네플(Dnepr)' 발사체에 의해 발사되었으나 발사체 1단 엔진의 유압구동기의 오작동으로 인해 궤도 진입에는 실패하였다. 그러나 HAUSAT-1 개발사업의 주목적은 연구개발에 참여한 학생들에게 설계, 제작, 조립, 시험, 발사 및 운용에 이르기까지 위성개발의 전체 과정을 체험하게 함으로써, 인공 위성 분야의 전문 인력을 양성하는 교육적 도구로서 활용하고자 함이었던 만큼 비록 발사에는 실패하여 위성의 실제 운용이라는 과정은 수행하지 못하였으나, 설계, 제작, 조립, 시험, 발사 준비 등의 과정을 학생들이 완수함으로써 원래 개발 목표의 80%는 달성하였다고 볼 수 있다. 또한 HAUSAT-2는 현재 엔지니어링 모델의 개발이 모두 완료되었고, 구조-열 모델의 인증시험, ETB를 통한 전기적 성능 시험 및 비행 소프트웨어의 개발, BEU의 인증시험이 모두 완료되었다. 현재 준비행 모델을 제작, 시험하고 있으며, 2007년 말까지 비행모델의 개발을 완료할 예정이다.

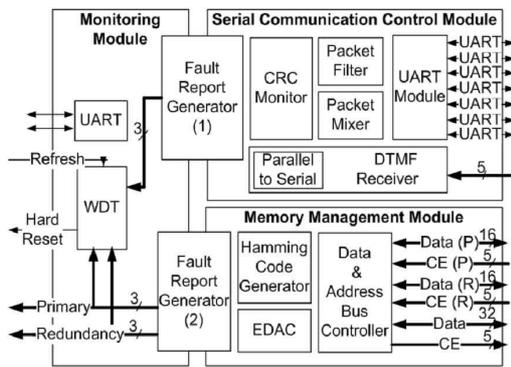


그림 22. FPGA 기능선도

## 후 기

본 연구개발은 과학기술부의 국가지정연구소 (National Research Lab.) 사업지원에 의해 수행된 결과의 일부이며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- 1) Robert J. Twiggs, Hank Herdt, Jordi Puig-Suari, Augustus S. Moore, Shinichi Nakasuka, "A new Generation of Picosatellite for Education and Industry Low-Cost Space Experimentation", AIAA/USU Small Satellite Conference Proceedings V-5, 2000.
- 2) Y. K. Chang, B. Y. Moon, and K. L. Hwang, "Development of The HAUSAT-2 Nanosatellite as a Low-Cost Technology Demonstration", RAST 2005, Istanbul, Turkey, June, 2005.
- 3) Y. K. Chang, "Development of HAUSAT-1 Picosatellite as a Test Bed for Educational Purpose", 1st CubeSat Developer's Workshop, Obispo, USA, April, 2004.
- 4) 장영근, 김동운, "HAUSAT-2 위성의 전력계 개발 및 검증", 한국항공우주학회지, 제 34권 4호, 2006.
- 5) "STSAT-2 SDR Data Package", HAUSAT 2-100-REVV-005, 2004, p. Spacecraft-70.
- 6) MIL-STD-1540B, Test Requirements for Space Vehicles(USAF Military Standard), 1982.
- 7) 장영근, 황기룡, "HAUSAT-2 위성 STM 개발 및 발사환경시험 분석", 한국항공우주학회지, 제 33권 11호, 2005.
- 8) Christopher A. Kitts, "Three Project-Based Approaches to Spacecraft Design Education", 1999 IEEE Aerospace Conference Proceedings, Vol. 5, 1999.