

## 論文

## 천리안위성 이원추진시스템 개발

한조영\*, 임철호\*

## Development of Chollian Bipropellant Propulsion System

Cho Young HAN\* and Cheol Ho LIM\*

## ABSTRACT

This paper gives a brief overview of the COMS CPS development process from start to finish. The manufacturing techniques used for CPS were founded on established generic processes that have been developed and proven on previous satellite programs, and have used the expertise and facilities in the framework of international collaboration. Manufacture and testing of the CPS were successfully accomplished, and COMS CPS demonstrated good performance in the launch phase.

**Key Words** : COMS(통신해양기상위성), CPS(화학추진시스템), Bipropellant(이원추진제), Manufacture(제작), Integration(조립), Testing(시험)

## 1. 서 론

공식명칭 통신해양기상위성(Communication, Ocean and Meteorological Satellite, COMS)의 천리안위성은 2010년 6월 26일 21시 41분 GMT, 즉 한국시간 2010년 6월 27일 06시 41분에 아리안-5 발사체에 의해 프랑스령 가아나 쿠루우주센터에서 발사 성공했다[1, 2].

이 통신해양기상위성에는 궤도전이와 궤도상 자세제어 및 궤도보정을 위해 화학추진시스템(chemical propulsion system, CPS)인 이원추진시스템(bipropellant propulsion system)[3]이 장착되어 있다. 위성용 이원추진시스템은 국내 개발경험이 전무했던 이유로, 영국 스티브니지(Stevenage)에 위치한 EADS Astrium과의 국제 공동개발을 통해 제작, 조립 및 시험[4]되어 한국으로 인도되었다.

본 논문에서는 통신해양기상위성의 개발과정 중 영국 현지에서 수행한 통신해양기상위성 이원추진시스템의 설계, 제작, 조립 및 시험과 관련된 전체 개발 과정에 대해 기술한다.

## 2. 추진시스템 개요

## 2.1 통신해양기상위성 화학추진시스템

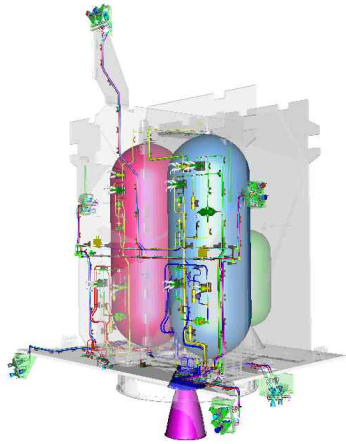
통신해양기상위성 화학추진시스템은 Eutelsat W3에 사용된 Eurostar E3000 CPS 계열로부터 파생되었으며, 그 운용에 있어서는 동일하다[5]. 위성 플랫폼에서의 추진시스템 형상은 2개의 추진제 탱크와 1개의 가압제 탱크로 구성되어 있으며, 이러한 설계 개념은 비행 검증된 기술이력(flight-proven heritage)에 입각하고 있다.

통신해양기상위성 화학추진시스템의 기능은 크게 두 가지로 대별된다. 이는 위성을 전이궤도에서 정지궤도로 궤도 전이하기 위한 궤도투입기능(orbital injection function)과, 위성의 총 임무 기간 동안 정지궤도 상에서 수행되는 위성의 자세제어 등에 관련된 궤도상 추진기능(on-station propulsive function)이다. 임무 계획상으로는 모든 궤도유지 기동비행이 화학추진시스템을 이용하여 수행된다.

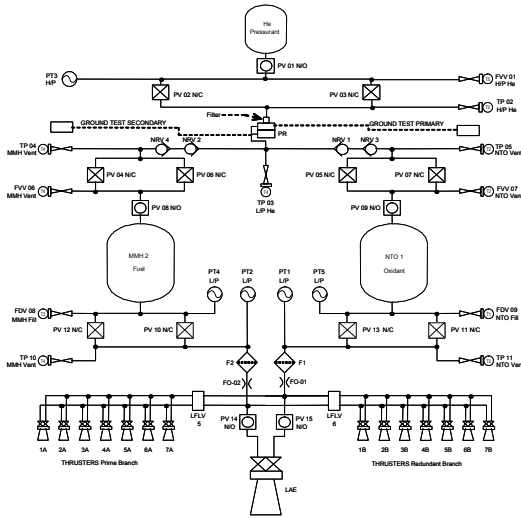
그러므로 통신해양기상위성의 화학추진시스템은 이러한 두 가지 상이한 기능을 하나의 추진시스템으로 합체해 구현함으로써, 다양한 형태의 임무에 대해 적절한 유연성을 갖는 고성능 추진시스템[6]이다.

2010년 12월 30일 접수 ~ 2011년 3월 15일 심사완료

\* 한국항공우주연구원 사업총합관리단  
연락처, E-mail : cyhan@kari.re.kr  
대전광역시 유성구 과학로 115



(a) overview

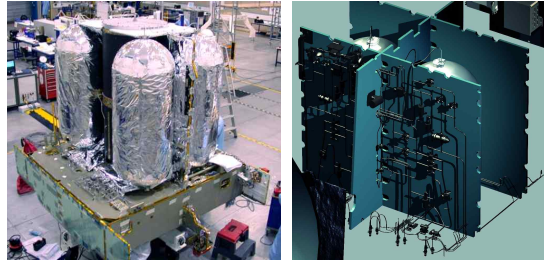


(b) schematic

Fig. 1 COMS bipropellant propulsion system

통신해양기상위성의 화학추진시스템의 개발에는, 유로스타(Eurostar) 개발 사업의 일부로 도출되었으며 유로스타 3000 추진시스템 개발 사업에서 한층 심화하여 개발한 현존 유로스타의 추진시스템(Fig. 2 (a))의 설계, 개발 및 제작 기술을 적용[5]한다. 설계 개념상의 측면에서는 마스익스프레스(Mars Express) 추진시스템(Fig. 2 (b))의 설계 개념을 차용하여, 유로스타와 같이 위성의 플랫폼(platform)에 추진제 배관 및 추진부품들을 배치하지 않고 마스익스프레스와 동일하게 위성체 내부벽 상에 추진제 배관과 추진부품들을

배치한다. 이는 일견 별반 차이가 없는 듯이 생각될지도 모르나, 구조적 진동 문제와 배관의 열설계 등 세부 설계적 측면에서는 상당한 차이점을 유발한다[7]. 결과적으로 통신해양기상위성 이원추진시스템은 마스익스프레스와 유로스타 추진시스템의 설계 및 기능과 관련된 기술적 이력을 기반으로, 기인증된 부품 및 재질과 제작 공정을 재사용해 개발되었다.



(a)Eurostar 3000 CPS (b)Mars Express CPS

Fig. 2 COMS CPS heritage

## 2.2 화학추진시스템 주요 특성

통신해양기상위성의 화학추진시스템은 이원추진시스템으로서 연료로서는 단일메틸하이드라진(monomethyl hydrazine, MMH)을 이용하며, 산화제로는 3%의 일산화질소(nitric oxide, NO)가 혼합된 사산화질소(nitrogen tetroxide, NTO) 용액인 혼합 질소산화제(mixed oxides of nitrogen, MON-3)를 사용한다[8]. 이 추진제들은 액체원지점엔진(liquid apogee engine, LAE)과 반동제어추력기(reaction control thruster, RCT)들에 공통으로 사용되며 동일한 추진제 저장 및 공급 시스템이 적용된다.

이원추진제 공급 방식은 압력 조절된 헬륨을 가압제로서 추진제 탱크 내로 공급해 액체원지점엔진 작동 중에는 일정 압력 모드로 작동되도록 설계되어, 액체원지점엔진이 궤도 전이 중 일정한 추력 및 비추력을 발생하도록 한다. 궤도 투입 기동비행 종료 후에는 헬륨 조절 공급 시스템과 원지점엔진은 강제로 격리된다. 이후 잔여추진제는 정지궤도 상에서 블로우다운(blowdown) 모드로 반동제어 추력기에 공급된다. 이 같은 시스템의 단순화로 최적의 신뢰성을 구현한다.

통신해양기상위성 이원추진시스템의 주요 특성은 다음과 같다.

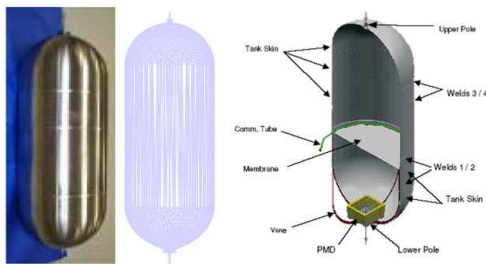
- 1기의 고성능 HiPAT 445 N 액체원지점엔진(LAE) 장착

- 총 14기의 고성능 DASA 10 N 반동제어추력기(RCT) 채택: 최소 임펄스비트 정밀도 충족을 위해 단일시트밸브 사용
- 각각 1개씩의 가압제(He), 연료(MMH) 및 산화제(NTO) 탱크 적용
- 누설 방지를 위해 모든 추진제 배관 연결부 위 용접
- 주(primary) 및 잉여(secondary)의 계통 구성으로 시스템의 대리기능성(redundancy) 제공
- 임무수명말기(EOL)에서 18 kg의 추진제 계측 정확도 유지

**2.3 화학추진시스템 주요 구성 부품**

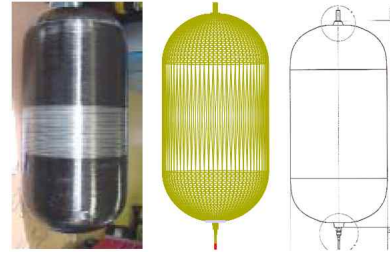
본 절에서는 통신해양기상위성 이원추진시스템에 적용된 주요 부품들[9, 10]을 간략하게 소개한다.

○ 추진제 탱크(propellant tank)  
액체원지점엔진과 반동제어추력기에 사용할 추진제를 저장한다. Fig. 3에 도시된 바와 같이 원통형 몸통에 반구형의 양끝단으로 구성된 형태의 티타늄 탱크이다. 탱크 내부에는 티타늄 박막인 멤브레인(membrane)으로 상하부 격실이 나누어져 있으며, 하부 격실에는 추진제관리장치(PMD)가 있어 기포가 포함되지 않은 액체추진제만을 공급한다. 최고예상운용압력(MEOP)는 20 bar이며, 99.76%의 배출 효율을 가진다.



**Fig. 3 COMS Propellant Tank (590 L)**

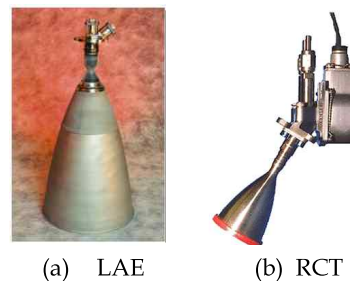
○ 가압제 탱크(pressurant tank)  
추진시스템 임무운용에 필요한 가압제인 헬륨 가스를 고압으로 저장한다. 이 탱크의 라이너는 인코넬(Inconel)이며, 이를 T1000 탄소 섬유와 에폭시 수지로 감싸 강화한다. 최고예상운용압력(MEOP)는 310 bar이며, 공칭(nominal) 97 리터의 용적을 가진다.



**Fig. 4 COMS Pressurant Tank (97 L)**

○ 액체원지점엔진(liquid apogee engine, LAE)  
Aerojet Corporation에서 제작한 추력 445 N, 비추력 323초의 이원추진제 엔진이며, 지구저궤도에서 전이궤도를 거쳐 정지궤도로 위성을 전이할 때 사용한다. 이 엔진은 요구되는 임무 수명의 1.5배를 초과하는 진동 및 지상연소시험을 수행해 인증시험이 완료되어 공급되었다.

○ 반동제어엔진(reaction control thruster, RCT)  
공칭 유입조건시 추력은 9.9 N이며, 비추력은 287초 이상의 이원추진제 엔진으로 통신해양기상위성의 자세제어 및 유지유지에 사용된다. 블로우다운 모드로 작동하며, 최소 임펄스 비트(minimum impulse bit)는 15~25 mNs이다. 또한 추력기가 작동하는 최소 펄스폭은 5ms로 매우 정밀한 세동제어(fine motion control)가 가능하다. 이 추력기는 요구되는 펄스 수의 1.5배 이상 시험을 수행해 인증되었다.



**Fig. 5 COMS CPS engines**

○ 압력조절기(pressure regulator, PR)  
가압제 탱크로부터 유입되는 310~30 bar의 압력을 기계적 방식으로 변환하여, 일정압력(17 bar, +3%, -2%)의 가압제를 추진제 탱크에 공급한다. 10,000 유동의 사이클 수명을 가진다.

○ 역지 밸브(non-return valve, NRV)  
2개가 일련으로 한 쌍이 되어 추진시스템 내

누설과 연료 및 산화제 증기 간의 혼합을 미연에 방지한다.

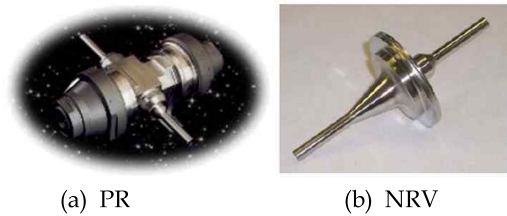


Fig. 6 CPS components

그 외의 주요 구성 부품들로서는 파이로 밸브 등의 작동으로 생긴 오염물질을 걸러내는 필터(filter)와, 지상명령으로 작동하며 필요시까지 유체(가압제/추진제)의 배관 내 이동을 통제하는 파이로 밸브(pyrotechnic valve, PV), 가압제/추진제 탱크 및 배관망의 압력을 계측하는 압력변환기(pressure transducer, PT), 그리고 주/부(primary/secondary) 추력기 그룹을 각각 분리하는 래치밸브(latching valve, LV)와, 추진제/가압제의 충전/배출시 사용되는 충전/배출 밸브(fill and drain valve, FDV) 등이 있다.

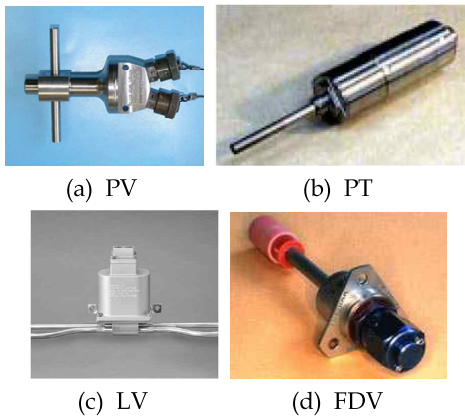


Fig. 7 CPS components

### 3. CPS 제작, 조립 및 시험

통신해양기상위성 추진시스템의 설계는 규정된 요구조건을 충족하였으며, CPS 설계에 사용된 부품들의 인증 과정을 통해 완결되었다. 통신해양기상위성의 이원추진시스템에 사용되는 제작 기법은 이전의 위성 프로그램에서 개발 및 인증

되어 수립된 범용 절차에 준하고 있으며, 영국 스티브니지 소재 EADS Astrium의 전문 지식과 시설을 이용하여 관련 제작을 수행했다.

### 3.1 제작 준비작업(Preparation Activities)

추진시스템의 전 제작 과정은 통제된 청정실(clean room) 조건 하에서 수행되었다. 구조물 인도에 대비해 다양한 작업들이 완료되었다. 이 같은 작업들은 모두 마무리되어 구조물 수령 후 바로 장착 작업을 시작할 수 있도록 대비되어야 한다.

우선 기본 단품류인 가압제용 헬륨 탱크, 추진제 탱크, 추력기 및 액체원지점엔진(LAE) 등의 부품수준 조립을 수행했다. 그 뒤 모든 브래킷(bracket) 류의 조립 준비를 했다.

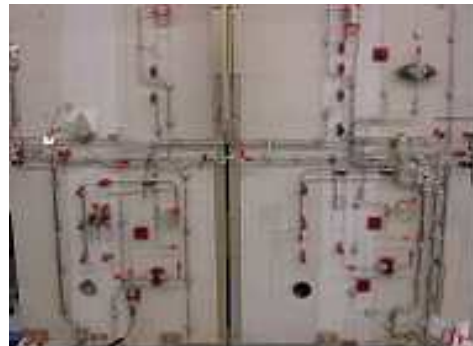


Fig. 8 CPS Pipework and Components

CPS를 구성하기 위해 사용되는 티타늄 배관을 제작하면서, 티타늄 피팅(fitting)을 정밀 세척했다. 이후 배관망(pipework)과 부품은 툴링 지그(tooling jig)를 사용하며 용접되었으며, 이 툴링 지그는 제작 과정에서 규정된 부조립체들(sub-assemblies)을 지지하기 위해 사용되었다. 병행해 CPS 열제어 부품들(배관망 열제어 부품)을 장착 준비했다.

### 3.2 조립 작업 (Integration Activities)

한국에서 구조체가 항공편으로 이송되어 영국 현지 도착 후, 레이저를 이용한 정렬상태 확인(laser tracking) 등 모든 준비 과정을 완료했으며 모든 추진장비(propulsion equipment)들을 구조체로 조립하는 작업을 시작했다.



Fig. 9 CPS Pipework Integration

우선 헬륨 탱크를 장착하고, 배관망 조립 후 배관망을 지지하기 위해 부품 브래킷과 일부의 배관 지지 브래킷을 장착했다. 그 후 용접을 마무리해 완료하면서 나머지 배관 지지 브래킷 장착을 병행했다. 전기 콘넥터 브래킷도 장착되었다.

배관망에 열제어 부품 장착을 위해 용접이 완료되면, 모든 열제어 부품을 장착해야 하는 배관들에 전도성 접착제가 도포된 접착 구리포일인 초포일(chofoil)을 감아야 한다. 이는 배관을 따라 열이 균일하게 분포되도록 하기 위함이다. 모든 열제어 부품들이 배관 상에 부착 가능하도록 준비되어 있으므로, 이 부품들을 관련 도면에 규정된 바와 같이 장착했다.

열제어 부품들이 장착되면 전기 회로를 구성할 수 있으며, 하니스를 적절한 터미네이션 영역으로 배선할 수 있다. 이 작업은 콘넥터를 뽑아 이들을 관련된 콘넥터 브래킷에 매칭(mating)하는 작업을 수반한다. 이 시점에서 CPS 시스템의 특정 부위는 다층박막단열재(MLI blanket)로 감쌌다.

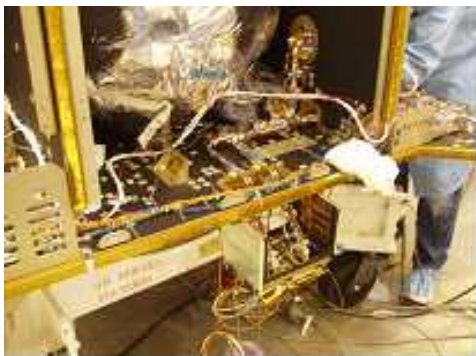


Fig. 10 Installation of Propellant Tank

모든 하니스가 추진제 탱크 위치 뒤쪽으로 배선되면, 추진제 탱크를 기계적으로 장착한다. 이 탱크들은 전체 추진시스템에 용접되며, 최종 두 개의 시험 포트도 추진시스템에 장착되었다. 탱크 하니스는 관련 전기 회로에 연결되어 배선되었으며, 할당된 콘넥터 브래킷으로 배선되었다.

### 3.3 관련 시험 및 최종 조립

제작품이 요구되는 설계 기준에 부합하는지를 확인하기 위해 COMS CPS에는 일련의 기능시험(functional test)이 수행되었다. 이 시험들은 시스템 수준에서 CPS 부품들의 기계적, 기능적 및 전기적 시험을 망라하며 다음의 사항들을 확인하게 된다.

- 시스템 수준에서 CPS 부품들의 기능 유지 여부
- CPS 시스템의 오작동 여부
- 필수 제작기준이 충족되어, 누설이 없는 안전하고 기능적인 시스템의 인도 여부

기능시험의 첫 순서로 Westcott에서 수행되는 고압 검증 시험(Westcott proof test)이 수행되었다. 이 시험은 조립장에서 완전히 벗어난 외부인 Westcott 시험장에서 수행되며, 구조물을 포함한 추진시스템은 약 1 주간 시험을 위해 조립장을 떠났다.



Fig. 11 Westcott Proof Testing

실제 COMS CPS의 압력검증 시험시 헬륨 가압제 탱크는 387.5 bar로 가압되어 10분간 유지되었으며, 추진제 탱크는 25.65 bar로 가압되어 30초간 유지되었다. 이후 24 시간 동안 전체시스템 누설시험(box leak test)을 다음의 압력 조건 하에서 수행했다.

- 헬륨 가압제 탱크: 310 bar
- 추진제 탱크: 21.5 bar
- 압력조절기 부위: 2 bar
- LAE 공급배관: 2 bar
- RCT 공급배관: 0 bar

계산된 전체 누설율(overall leak rate)은 0 scc/hr로 한계치인 <7 scc/hr의 조건을 만족하여 시험은 통과되었다.

이후 LAE 및 추력기 장착과 전기적 배선 최종 조립 작업이 수행되었으며, 파이로 밸브 기폭 장치(initiator)는 오프라인(offline) 상에서 시험한 뒤 장착하고 재시험했다.

### 3.4 고압시험 이후의 CPS 인수시험

전 항에 기술한 최종 조립작업과 수반되어 진행되는 시험이며, 주요 시험은 다음과 같다.

- 압력조절기 성능 시험(pressure regulator performance test)
- 역지밸브 시험(non-return valve test)
- 반동제어추력기 밸브 시트 누설
- 액체원지점엔진 밸브 시트 누설
- 전기 검사(electrical check)
- 유량 감쇠 시험(flow decay test)



Fig. 12 Test Section of Pressure Regulator

모든 시험이 성공적으로 통과되었으며, 이중 압력조절기 성능 시험에 대해 간략히 상술한다.

비행 중 성능을 검증하기 위해 310, 150, 30 bar인 3개의 유입구 압력(inlet pressure)을 이용해 압력조절기를 시험했다. 조절된 출구 압력(outlet pressure)은 주(primary) 압력조절기의 경우 16.66 ~ 17.51 bar 이며, 이차(secondary) 압력

조절기의 경우는 17.15 ~ 18.03 bar 이어야 한다. 시험 절차에 따라 도출된 시험 결과는 압력조절기의 주 및 잉여계통(redundant branch) 모두에서 성공적이었다. 이 압력조절기 시험 결과는 추후 발사 전 전이궤도 성능해석 체계산시에 Fig. 13에 도시된 바와 같은 압력조절기 모델의 정밀도를 높이는 데도 사용된다.

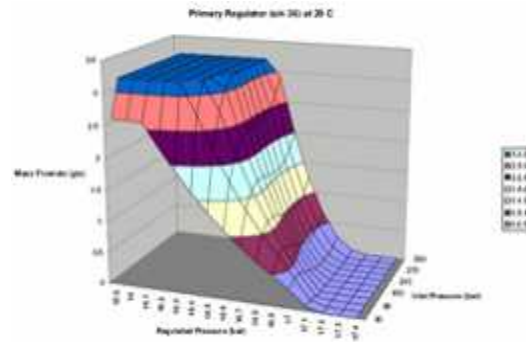


Fig. 13 Pressure Regulator Performance @ 20°C

## 4. 결론

전술한 바와 같이 모든 작업이 완료되어 추진 시스템의 인수시험(acceptance test)을 최종 마무리했다. 최종적으로 COMS CPS는 시험 절차에 규정된 시험 기준을 충족했고 설계 규격에 합당하므로, 이로써 COMS CPS의 발송을 승인할 수 있었다.

이후 영국 스티브니지 현지에서 개최된 납품 점검회의(delivery review board, DRB)를 통해 항우연의 검토를 득하고 발송이 승인되었으며, 최종적으로 위성 컨테이너에 위성을 수납 후 한국으로 위성체 조립을 위해 발송되었다. 이로써 통신해양기상위성의 개발과정 중 영국 현지에서 수행한 통신해양기상위성 이원추진시스템의 개발 과정이 성공적으로 완료되었다. 이후 통신해양기상위성 전체시스템 조립/시험 과정을 거쳐, 남미 프렌치기아나 꾸르 우주센터에서 통신해양기상위성은 2010년 6월 말에 발사되었다. 개발된 이원추진시스템은 정지궤도로의 전이과정에서 만족스러운 성능을 발휘했으며, 정지궤도로의 안착 후에도 위치유지 및 자세제어에 안정적인 운용을 가능케 했다.

본 천리안 이원추진시스템 개발 과정에서 얻어진 경험 및 기술적 자산은 후속 정지궤도복합

위성[11]의 이원추진시스템 개발 시에 귀중한 기술적 근거 자료로 활용될 것이다.

## 후 기

본 논문은 교육과학기술부 특정연구개발사업의 지원으로 수행중인 통신해양기상위성 개발사업의 일환으로 진행되었습니다.

## 참고문헌

- [1] 이호형, 김방엽, 최정수, 한조영, "아리안-5 발사체를 이용한 통신해양기상위성 발사," 한국항공우주학회지, 제 36권, 제 3호, 2008, pp.291~297.
- [2] 이호형, "통신해양기상위성의 개발," 위성통신과 우주산업, 제 13권, 제 1호, 2006, pp.72~80.
- [3] 한조영, "우주비행선 추진공학," 경문사, 2006
- [4] Baek, M. J., and Han C. Y., "Introduction of COMS System," Joint Conference of International Symposium on Remote Sensing (ISRS) and Pan Ocean Remote Sensing Conference (PORSEC) 2006, Korea, 2006
- [5] 한조영, "영국산 화학추진시스템의 기술이력과 통신해양기상위성 이원추진제 추진시스템," 항공우주시스템공학회지, 제 2권, 제 1호, 2008, pp.28~36.
- [6] 채종원, 한조영, 유명중, "천리안 위성의 LEOP 기간 동안의 추진계 성능 연구," 한국항공우주학회 2010년도 추계학술발표회 논문집, 2010, pp.1020~1023.
- [7] 박종석, 김창호, 김성훈, 최정수, "통신해양기상위성의 기계 시스템 설계," 항공우주기술, 제 5권, 제 2호, 2006, pp.119~125.
- [8] 한조영, "국내의 대표적 인공위성 화학추진시스템의 형식 및 특성," 한국항공우주학회지, 제 35권, 제 8호, 2007, pp.747~752.
- [9] 박응식, 한조영, 채종원, S. Bucknell, "통신해양기상위성 추진시스템 시스템 설계," 한국추진공학회 2005년도 추계학술대회 논문집, 2005, pp.426~430.
- [10] 채종원, 한조영, 박응식, "통신해양기상위성 화학 추진 시스템의 구성 및 특성," 한국항공우주학회 2006년도 춘계학술발표회 논문집, 2006, pp.207~210.
- [11] 박종석, 김성훈, 김창호, 최정수, "정지궤도 복합위성의 기계 시스템 설계," 한국우주과학회보, 제 15권, 제 1호, 2006.