

논문 2018-13-29

소형 지구 관측 위성용 플래시 기반 저장장치 설계 및 시험

(Design and Test Flash-based Storage for Small Earth Observation Satellites)

백인철*, 박형식, 황기선

(Inchul Baek, Hyoungsic Park, Kiseon Hwang)

Abstract : Recently, small satellite industries are rapidly changing. Demand for high performance small satellites is increasing with the expansion of Earth Observation Satellite market. A next-generation small satellites require a higher resolution image storage capacity than before. However, there is a problem that the HW configuration of the existing small satellite image storage device could not meet these requirements. The conventional data storing system uses SDRAM to store image data taken from satellites. When SDRAM is used in small satellite platform of a next generation, there is a problem that the cost of physical space is eight times higher and satellite price is two times higher than NAND Flash. Using the same satellite hardware configuration for next-generation satellites will increase the satellite volume to meet hardware requirements. Additional cost is required for structural design, environmental testing, and satellite launch due to increasing volume. Therefore, in order to construct a low-cost, high-efficiency system. This paper shows a next-generation solid state recorder unit (SSRU) using MRAM and NAND Flash instead of SDRAM. As a result of this research, next generation small satellite retain a storage size and weight and improves the data storage space by 15 times and the storage speed by 4.5 times compare to conventional design. Also reduced energy consumption by 96% compared to SDRAM based storage devices.

Keywords : SSRU, MRAM, NAND Flash, Flash file system

1. 서 론

최근 소형 인공위성의 운용 패러다임이 빠르게 변화하고 있다. 지구관측용 인공위성 (Earth Observation System, EOS) 시장의 확대와 함께 고성능 소형위성에 대한 수요가 늘어나고 있다 [1]. 소형위성 여러 기를 이용해 저비용 고효율로 지구관측을 수행하는 등 새로운 위성 운용 모델이 구축되고 있다 [2]. 이처럼 인공위성의 소형화와 고성능화가 진행됨에 따라 차세대 소형위성 플랫폼

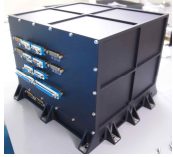


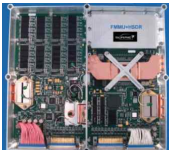
역시 높은 성능을 요구하게 되었다. 지금까지 인공 위성 시스템은 위성에서 촬영된 이미지 데이터를 저장하기 위해 주로 SDRAM (Synchronous Dynamic Random Access Memory)을 사용하였는데 소형위성 플랫폼에서 SDRAM을 사용하는 경우 동일 용량의 NAND Flash 대비 물리적 공간은 8배 비용은 2배 이상 드는 문제가 있다. 기존과 같은 하드웨어 구성으로는 부피가 커질 수밖에 없고 부피 때문에 구조 설계, 환경시험, 위성 발사에 추가적인 비용이 소모되게 된다. 따라서 소형위성의 강점인 저비용 고효율 시스템을 구성하기 위해 SDRAM 대신 MRAM (Magnetoresistive random-access-memory)과 NAND Flash를 사용하는 차세대 소형위성용 대용량 저장장치 (Solid State Recorder Unit, SSRU)를 설계하게 되었다.

* Corresponding Author (icbaek@satreci.com)

Received: Aug. 14. 2018, Revised: Oct. 1. 2018, Accepted: Oct. 2. 2018

I. Baek, H. Park, K.Hwang : SatrecI

표 1. 국 내 외 SSRU 시스템 비교
Table 1. SSRU system comparison

	SatrecI	AP [5]	Airbus D&S [6]	SSTL
Photo Configuration				
Application	EO	EO	EO	EO
Heritage	DS 2[7]/DM2 [8]	KOMPSAT-3, KOMPSAT-3A [9]	Spot6,Spot7 [10]	DMC-3 constellation [11]
Mass	9Kg	35Kg	8.2Kg	2.5 kg
Volume (WxDxH)	220 x 220 x 240 mm	652 x 344 x 201 mm	365 x 135 x 235 mm	310 x 310x 60 mm
Power Consumption	25W	300W	10W	20W
Input Data I/F	Up to 1.2 Gbps	Up to 10Gbps	Up to 960 Mbps	Up to 1 Gbps
Sotrage Capacity	256Gbit	1Tbits	2Tbits	1Tbits
Technology	SDRAM	SDRAM	NAND Flash	NAND Flash

II. 관련연구

1. SSRU 시스템

위성의 데이터 저장장치는 데이터 전송 및 관리 시스템의 핵심 요소이다. 위성에서는 저장 밀도가 높고 내진성이 강한 반도체를 기반으로 한 SSRU가 대용량 저장장치의 주류로 자리 잡고 있다. 최근 상용 Flash 메모리뿐만 아니라 우주용 Flash 메모리도 집적도가 높아지고 단가도 낮아지게 되어 Flash 메모리를 이용한 위성이 점차 늘어나고 있다 [3]. Flash 메모리의 Space application 사용가능성에 대한 연구에 따르면 Flash를 사용함으로써 임무 중 획득한 데이터를 전원이 소실되더라도 유지할 수 있게 되었고 메모리 집적도가 높아 SDRAM대비 위성의 공간을 크게 절약 할 수 있다고 설명했다 [4]. 이미 발사되어 널리 알려진 기존 위성의 SSRU 시스템 스펙은 표 1과 같다. NAND Flash를 사용한 경우 데이터 집적도가 높고 부피가 작으며 전력소모량도 적음을 알 수 있다. 더욱이, SDRAM을 사용하는 경우 위성의 임무 수행을 통해 획득한 데이터를 지상으로 전송하기 전까지는 SSRU의 전원을 차단할 수 없다. 이런 문제 때문에 대기 시간 동안 소비한 에너지의 SSRU의 총 에너지 소모량은 NAND Flash를 사용할 때보다 훨씬 커지게 될 것임을 알 수 있다.

III. 본 론

1. 차세대 소형 위성 요구사항

차세대 소형 위성이 목표로 하는 플래시 기반 저장장치의 요구사항은 다음과 같다.

- 지구 관측용 소형 위성으로 질량은 최대 400Kg로 한다.
- 영상 촬영과 촬영된 영상을 지상으로 전송 할 수 있어야 한다.
- 위성의 임무 기간은 최소 5년 이상이 되어야 한다.
- Ariane 5, Dnepr, Falcon 9 등의 발사체에 탑재 가능한 크기여야 한다.
- 위성 소프트웨어는 운영 도중 업데이트가 가능해야 한다.


기존 구성의 SSRU는 차세대 소형 위성의 크기 및 성능 요구사항을 만족시킬 수 없었기 때문에 요구사항을 충족시키기 위해 NAND Flash와 MRAM을 이용한 SSRU HW를 표 2와 같이 새롭게 구성하였다.

2. SSRU HW 구성

차세대 소형 위성의 요구사항에 맞추어 용량과 부피 조건을 만족하면서 메모리 저장능력을 최대한 높인 결과 구성된 SSRU HW제원은 표 2와 같다.

표 2. SSRU HW 제원

Table 2. SSRU HW specification

Photo Configuration	
Mass	10Kg
Volume	380mm x 300mm x 80 mm
Power Consumption	38~42W
Input Data I/F	Up to 5.4Gbps
Storage Capacity	3.84Tbit (5Tbit without redundant module)
Technology	NAND Flash

SSRU는 지상 촬영 임무가 수행되면 SPM (Signal Processing Module)으로부터 데이터를 수신받고 SSRU SW의 제어명령에 따라 그림 1과 같은 HW 구성을 이용해 Flash 메모리에 데이터를 기록 하게 된다. 지상으로 데이터를 전송할 때에는 Flash 메모리에 기록된 데이터를 SSRU SW의 제어 명령에 따라 XTU (X-band Transmission Unit)로 데이터를 전송한다.

SSRU 시스템을 제어하는 CPU는 LEON3를 사용한다. 보통 OBC와 서브 모듈의 프로세서가 다르게 구성되는 일이 많지만 차세대 소형 위성에서는 CPU를 OBC (Onboard Computer)와 동일한 제품을 사용하여 OBC와 개발환경과 시험환경을 동일하게 구축하였다. 서브 모듈에서도 동일한 CPU를 사용하도록 했기 때문에 모듈별로 동일한 HW 테스트를 수행 할 수 있어 개발 효율을 높일 수 있다.

일반적으로 위성시스템은 Application 코드를 EEPROM에 저장하여 사용한다. 만약 위성에 문제가 발생하면 필요시에 EEPROM에 SW 업데이트를 수행하여 새로운 코드를 동작시키도록 한다. 하지만 차세대 SSRU SW가 사용하는 메모리는 SDRAM과 MRAM으로 구성되어 있다. 차세대 소형 위성은 MRAM의 장점인 비휘발성을 이용하여 Application 코드를 저장하고 SW 문제 발생시 업데이트를 수행 할 수 있도록 구성하였다.W

EEPROM과 달리 MRAM은 Write시에 소요되는 시간이 짧고 Write Protection을 해제하지 않아도 되기 때문에 사용면에 있어 유리하다. 하지만 SW 오동작으로 인해 코드영역에 데이터가 Write되는 경우 복구할 수 없는 문제가 있어 Bootloader영역

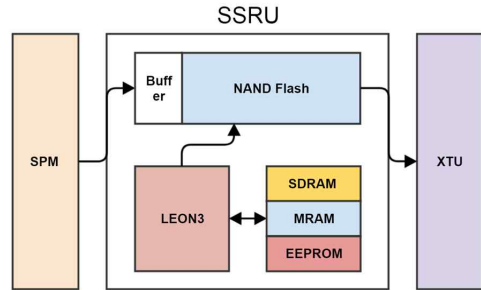


그림 1. SSRU HW 블록 구성도
Fig. 1 SSR HW block diagram

은 EEPROM을 그대로 사용하여 오작동으로 인한 손상을 방지하였다. 또한 MRAM에 NAND Flash 블록을 관리하는 자료구조를 기록하여 별도의 파일 시스템 마운팅 없이 빠르게 Flash 블록을 제어할 수 있도록 하였다.

3. SSRU SW 구성

3.1 File System

플래시기반 데이터 저장장치를 제어하기 위해 File System 사용을 고려해야 했다. 임베디드용으로 사용하는 Raw Flash File system (yaffs, jffs) [12] 는 log structured 기반 File system으로 소형위성용 File System으로 적합해 보였지만 본 논문에서 구현한 SSRU 시스템은 HW 제약사항에 의해 NAND Flash 내에 파일시스템을 기록하지 못하는 구조여서 적용 할 수 없었다. 이 문제를 해결하기 위해 간단한 Bitmap 기반 자료구조를 생성하여 MRAM에 블록의 상태를 기록하도록 하였다.

Flash에서 제어 해야 할 블록 상태를 2bit를 이용하여 4가지로 나타냈다.

- Free Block 상태는 해당 블록에 데이터를 쓸 수 있음을 나타낸다.
- Used Block 상태는 해당 블록에 데이터가 기록되어 있음을 나타낸다.
- Unknown Block 상태는 블록의 상태가 알려지지 않은 것을 나타낸다.
- Bad Block 상태는 해당 블록에 이상이 생겨서 사용할 수 없는 경우 기록을 위한 상태이다.

여러 데이터 채널로부터 고속으로 데이터를 기록하는 HW구조 때문에 Bad block이 발생하면 Bad block과 연관된 타이밍 문제로 접근할 수 없는 블록이 생기는데 해당 블록을 Unknown 상태로 처리하여 사용 할 수 없도록 하였다.

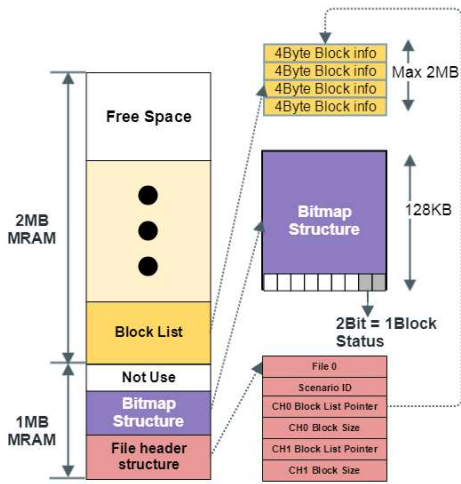


그림 2. 비트맵 구조
Fig. 2 Bitmap structure

5Tbits의 정보를 관리하는 524,228개의 플래시 블록의 state를 기록하기 위하여 총 128Kbyte의 Bitmap Structure를 사용하였다. 해당 블록을 리스트로 묶는 자료구조를 사용하여 위성 오퍼레이션을 수행할 때에 블록 리스트에 기록된 블록들을 HW로 전달하도록 하였다. Bitmap에 접근하는 위치 값이 4byte의 하드웨어 플래시 블록의 물리적 위치 정보로 변환되어 그림 2와 같이 전달되게 된다.

File Header Structure는 오퍼레이션에 사용할 플래시 블록 리스트를 관리하는 헤더 구조이다. 파일의 Index와, 오퍼레이션 시나리오 ID를 맵핑하고 NAND Flash HW에 사용될 블록 리스트 시작주소를 보관한다.

3.2 Wear Leveling

Wear-leveling의 경우 위성의 임무 시간을 고려하여 표 3과 같이 플래시 장치의 write-erase 횟수를 분석 해 본 결과 wear-leveling 없이 임무 수행 시간을 충족 할 수 있다고 판단하여 해당 기능을 구현하는 것은 고려하지 않았다. 플래시 wear-leveling 횟수는 플래시 삭제 연산 시 감소하므로 삭제 카운트를 블록별로 세지 않는 상태에서 삭제가 이루어지면 모든 플래시 블록의 수명을 1감소시키는 방법으로 계산 하였다.

3.3 Bad Block Management

NAND Flash는 데이터 용량을 저비용 고집적으로 사용할 수 있는 장점이 있지만 사용 중에

표 3 소형 영상 위성 임무 간 플래시 수명
Table 3. Flash life time in small EO satellite mission

	Scenario	Flash Lifetime
Worst Case	Imaging 1 time Download 1 time Data Delete 1 time Perform the above course 50 times per day	100,000 Cycle / 50 Cycle Per Day = 2000 Day = 5.4 Year
Normal Case	Imaging 10 time Download 1 time Data Delete 1 time Perform the above course 5 times per day	100,000 Cycle / 5 Cycle Per Day = 20000 Day = 54 Year

Bad Block이 발생하여 Flash Block이 사용불능이 되는 경우가 생긴다. 이미 발생한 Bad Block에 읽기 쓰기 연산을 수행하게 되면 주변 블록까지 전기적 테미지를 입혀 오동작을 일으키거나 Bad Block이 되는 상황이 발생 할 수 있다. 따라서 파일 오퍼레이션 수행 중 발생하는 Bad Block은 HW에서 감지하여 인터럽트를 통해 SW로 알려 처리하도록 한다. 위성 임무가 종료 되고나면 Bad Block Buffer에 기록된 Block의 인덱스 정보를 이용하여 그림 3처럼 Bitmap 자료구조에 접근하여 bit를 Bad Block으로 마스킹 하여 다시 사용할 수 없도록 한다.

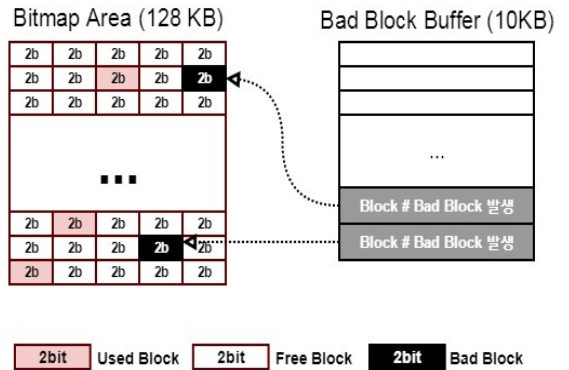


그림 3. 배드 블록 처리
Fig. 3 Bad block masking

IV. 검증 및 평가

1. SSRU 검증

테스트는 그림 4와 같은 환경에서 수행된다. 가상 시험 지원 장비 (Electrical Ground Support Equipment, EGSE)PC를 이용하여 자동화 된 환경에서 Power Supply, DEB (Data Encryption Board),

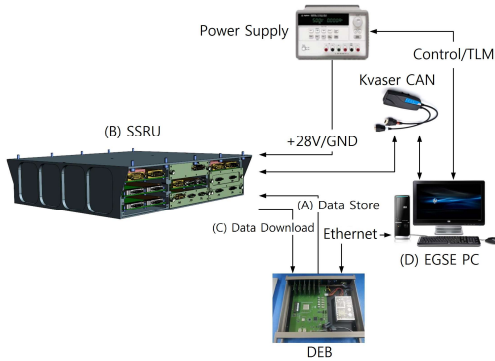


그림 4. 검증 환경 구성도
Fig. 4 Test configuration

SSRU를 제어하도록 하였다. DEB장치는 SPM의 역할을 대신해주는 모듈로 영상장치나 패턴 데이터를 SSRU로 입력하고 시리얼 통신을 이용하여 다운로드 받을 수 있도록 해준다.

시험 절차는 다음과 같다.

- A) DEB를 이용하여 SSRU HW에 테스트 패턴 데이터 입력
- B) SSRU SW는 사용할 플래시 블록 정보를 SSRU HW에 전달.
- C) 데이터 입력 종료 후 SSRU 에 저장된 데이터를 DEB를 통해 가상 시험 지원 장비 PC로 수신
- D) 입력한 테스트 패턴 데이터와 수신된 데이터의 동일성 검증

2. 저장능력 비교

NAND Flash와 MRAM을 이용한 소형위성용 SSRU 표 2의 저장용량은 3.84Tbit 이다. 비슷한 부피의 DS2/DM2 SDRAM 표 1의 저장장치의 용량은 256Gbit 이다. 따라서 NAND Flash를 이용한 구성이 15배 이상 저장능력을 키울 수 있음을 알 수 있다.

3. 전력소모 비교

위와 같은 구성을 사용했을 때 얻는 전력 소모 상 이득을 계산해 보았다. 256Gbit SDRAM을 사용한 DM2 위성에서 수신한 텔레메트리 정보를 이용하여 2016년 1월 1일부터 2016년 12월 31일까지 수집된 운용 결과는 표 4와 같다. 여기에 지상에서 측정한 평균 소모 전력값을 이용하여 일평균 전력 소모량을 계산해 보았다. SDRAM으로 구성된

표 4 SDRAM SSRU의 연간 사용량
Table 4. SDRAM SSRU Annual Usage

	Image Store (File Write)	Image Download (File Read)	Standby Power
Times	15,610 times	1661 times	-
Elapsed time	183,124 seconds	725,824 seconds	30,713,452 seconds
Average power consumption	21W	18.2W	14.8W

SSRU는 전원이 꺼지지 않기 때문에 영상 저장과 영상 다운로드를 수행하지 않는 상태는 모두 대기 상태에서 전력을 소모한다.

$$183,124_{(s)} \times 21W \div 366_{(day)} = 10,507 (J/day) \quad (1)$$

$$725,824_{(s)} \times 18.2W \div 366_{(day)} = 36,092 (J/day) \quad (2)$$

$$30,713,452_{(s)} \times 18.2W \div 366_{(day)} = 1,241,964 (J/day) \quad (3)$$

$$10,507 + 36,092 + 1,241,964 = 1,288,567 (J/day) \quad (4)$$

수식 (1)~(3)는 각각 DM2 SSRU의 영상 저장, 영상 다운로드, 대기전력의 하루 에너지 소모량이고 수식 (4)는 수식 (1)~(3)에서 계산한 하루 에너지 소모량의 합이다. 그 결과 DM2 SSRU의 일평균 소모 에너지는 1,288,563J 이었으며 SDRAM 구성 때문에 생기는 대기전력이 전체 에너지의 96%를 차지함을 알 수 있었다.

차세대 소형위성의 실제 운용 데이터가 없으므로 DM2 운용 데이터를 바탕으로 표5의 차세대 SSRU의 일평균 소모 에너지를 계산해 보았다. NAND Flash의 경우 저장된 데이터를 유지하기 위해 전원 유지를 하지 않아도 되므로 대기 상태에 머무르는 시간이 DM2에 비해 상당히 짧지만 Flash 메모리 특성상 이미지 삭제 시간이 필요하다. 이미지 삭제는 이미지 획득과 동일한 시간이 들어간다고 가정하였다. NAND Flash는 전원을 꺼도 데이터가 사라지지 않으므로 대기전력 없이 운용된다. 따라서 대기전력은 무시하였다.

표 5 NAND SSRU의 연간 사용량
Table 5. NAND SSRU Annual Usage

	Image Store (File Write)	Image Download (File Read)	Image Delete (File Delete)
Times	15,610 times	1,661 times	15,610 times
Elapsed time	183,124 seconds	725,824 seconds	183,124 seconds
Average power consumption	19.2W	18.6W	14.1W

$$183,124_{(s)} \times 19.2W \div 366_{(day)} = 9,606 (J/day) \quad (5)$$

$$725,824_{(s)} \times 18.6W \div 366_{(day)} = 36,886 (J/day) \quad (6)$$

$$183,124_{(s)} \times 14.1W \div 366_{(day)} = 7,054 (J/day) \quad (7)$$

$$9,606 + 36,886 + 7,054 = 53,546 (J/day) \quad (8)$$

수식 (5)~(7)는 각각 차세대 SSRU의 영상 저장, 영상 다운로드, 영상 삭제의 하루 에너지 소모량이고 수식 (8)는 수식 (5)~(7)에서 계산한 하루 에너지 소모량의 합이다. 계산 결과 NAND Flash SSRU에서 총 일 평균 소모 에너지는 53,546J이었으며 DM2 SSRU 대비 전력 소모량이 96%만큼 감소했음을 알 수 있었다. SDRAM 용량을 NAND Flash 만큼 높였을 경우에는 대기전력이 더 커지기 때문에 동일한 용량으로 비교 시험을 한다면 훨씬 큰 차이를 보였을 것으로 생각된다.

V. 결 론

차세대 지구 관측 소형 위성은 고해상도의 대용량 이미지 처리 능력을 요구한다. 하지만 기존 소형위성용 SSRU는 이러한 요구사항을 만족하지 못했다. 만약 기존 소형위성용 저장장치 하드웨어 구성을 사용하여 차세대 지구관측 소형위성용 저장장치를 설계한다면 무게와 부피 때문에 소형위성의 장점인 저비용 고효율 시스템을 구축할 수 없는 문제가 있다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 MRAM과 NAND 플래시 기반 SSRU 시스템을 설계하였다.

제작된 SSRU를 검증하기 위해 EGSE 기반 테스트 환경을 구축하여 실제 운용에 준하는 기준으로 HW 및 SW테스트 항목을 도출하여 구현된 시스템이 문제없이 동작함을 검증하였다.

위와 같은 시스템으로 기존 시스템 대비 동일한 부피에서 데이터 저장 공간을 256Gbits에서 3.84Tbits로 15배 증가시키고 데이터 전송 속도를 1.2Gbps에서 5.4Gbps로 4.5배 시켰으며 기존 위성 운영 데이터 기반으로 전력소모량을 측정해 본 결과 SSRU가 소모하는 에너지가 하루 평균 1,288,563J에서 53,546J로 96%만큼 감소시켰다. 따라서 본 연구에서 사용한 NAND Flash 기반 SSRU 시스템을 사용할 경우 소형위성에서 기존 시스템 대비 높은 데이터 저장능력과 낮은 에너지 소모 성능을 보일 것으로 예상된다.

Reference

- [1] Jongmin Park, Dae-Sub Oh. "Analysis of Global Satellite Industry Status and Consideration of Future Satellite Technologies," Journal of Satellite, Information and Communications Vol. 12, No. 3, pp. 86-92, 2017.
- [2] Foreman, Veronica L., Jacqueline Le Moigne, Olivier De Weck. "A Survey of Cost Estimating Methodologies for Distributed Spacecraft Missions," Proceedings of the 18th Conference on AIAA SPACE. 2016.
- [3] Song, Qi, S. Li, Y. Zhu, J.S. An, "Design and Research of Multiple Data Channels in Solid State Recorder of the satellite SJ-10," Advanced Materials Research. Vol. 1073, pp. 1977-1981, 2015.
- [4] M. Caramia, S. Di Carlo, M. Fabiano, P. Prinetto, "Flash-memories in Space Applications: Trends and Challenges," pp. 18-21, 2009.
- [5] APSI. Solid State Recorder. Available on: http://www.apsi.co.kr/product/manufacture/pdh_u.php. [Accessed 2 October 2018].
- [6] AIRBUS. NEMO. Available on: <https://spaceequipment.airbusdefenceandspace.com/payload-products/payload-%20data-handling-with-memory/nemo/>. [Accessed 2 October 2018].
- [7] eoPortal. DubaiSat-2. Available on: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/d/dubaisat-2>. [Accessed 2

- October 2018].
- [8] eoPortal. Deimos-2. Available on: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/d/deimos-2>. [Accessed 2 October 2018].
- [9] eoPortal. KOMPSAT-3A. Available on: [https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/k/kompsat-3A](https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/k/kompsat-3a). [Accessed 2 October 2018].
- [10] eoPortal. SPOT-6 and 7. Available on: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/s/spot-6-7>. [Accessed 2 October 2018].
- [11] eoPortal. DMC-3. Available on: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/d/dmc-3>. [Accessed 2 October 2018].
- [12] Di Carlo, M. Fabiano, P. Prinetto, M. Careamia, "Design Issues and Challenges of File Systems for Flash Memories." Flash Memories. InTech, 2011.

InChul Baek (백 인철)



He is received B.E. and M.A. degree in Computer Science from Chung-Nam National University in 2012 and 2018 respectively. He is currently working at

Satrec Initiative for developing Flight Software and Embedded Software since 2013.

Email: icbaek@satreci.com

Kiseon Hwang (황기선)



He is received B.E. degree in Electronic Engineering from ChunBuk National University in 2008. He is currently working at

Satrec Initiative for developing Flight electronic hardware since 2008.

Email: kshwang@satreci.com

Hyongsic Park (박형식)



He is received B.E. and M.A. degree in Computer Science from Chung-Nam National University in 2006 and 2008 respectively. He is currently working at

Satrec Initiative as flight SW team leader and develop flight SW and embedded SW since 2008.

Email: hspark@satreci.com