

저궤도 인공위성 탑재 보안모듈의 우주방사선 차폐 방안 연구

조 양 찬*, 최 동 윤**, 민 경 령*

요 약

뉴스페이스 시대가 도래하고 양자컴퓨터로 기존 암호체계의 파훼가 수월해진 오늘날 인공위성의 보안모듈은 고성능의 상용 부품을 필요로 한다. 본 연구에서는 PE와 AI의 복합소재를 활용하여 내방사선 능력이 적은 상용 부품을 사용한 인공 위성 탑재 보안모듈의 차폐 방안을 제시하였다. 기존의 AI 단일 소재로 제작된 차폐 하우징의 성능과 경제성을 개선하기 위해 PE와 AI의 복합소재를 연구하였다. 이를 위해 OMERE를 통해 저궤도 위성의 임무 환경을 분석하여 PE와 AI 복합소재의 우주방사선 차폐성능과 AI 단일 소재의 우주방사선 차폐성능을 PHITS와 SRIM을 이용하여 비교분석하였다. 연구 결과, PE와 AI의 복합소재를 활용한 차폐 하우징은 가볍고 경제적인 장점을 가지며, 성능도 크게 향상됨을 확인하였다. 이러한 연구 결과는 보안모듈에 한정되지 않고 위성 부품의 차폐에 새로운 가능성을 제시함으로써, 전반적인 우주산업 발전과 위성의 임무 수행 실패율 감소에 기여할 수 있다.

I. 서 론

오늘날 우주산업 분야에서는 정부주도의 우주산업이 증가 되는 올드 스페이스에서 스타링크를 필두로 다양한 민간 기업들이 초소형, 저궤도 군집 위성 사업에 참여하는 뉴스페이스로 전환하는 추세이다. 그러나 위성 사업의 가장 큰 걸림돌은 해당 위성이 활동해야 하는 가혹한 우주방사선 환경에서도 주요 부품들이 가능한 오랜기간동안 생존하여야 한다는 점이다. 특히 많은 민간 기업들이 참여하는 저궤도 초소형 위성의 경우에는 통신위성인 경우가 많은데, 해당 위성의 핵심 부품인 보안모듈은 고성능과 낮은 가격이 요구되어 낮은 내방사선 성능의 COTS(Commercial off-the-shelf, 상용 기성품)를 사용하는 경우가 대다수이기에 우주방사선으로 인한 수명 단축 문제를 해결하기가 어려운 상황이다.

미국, 러시아, 일본, EU와 같은 우주산업의 선도국들에서는 COTS 부품 사용을 위한 연구들이 진행되고 있다. 주로 적은 비용으로 성능은 향상되고, 전력 효율성과 제작기간 단축, 그리고 충분한 방사선 내성을 제공하는 COTS 부품을 활용하기 위한 목적을 가진다

[1][2]. 우주환경에서는 인공위성의 유지, 보수가 굉장히 어렵기에 지상에서 모의 환경을 조성하여 방사선 차폐 성능을 측정하기 위한 방법들이 고안되고 있으며, 그 중 차폐물질의 조성과 밀도를 통한 방사선 차폐 성능 해석 방법이 시행중이다[3].

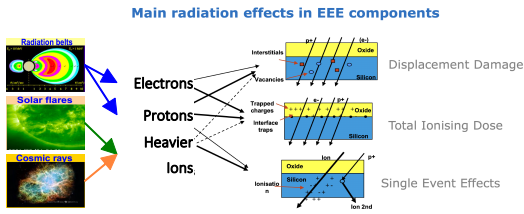
기존 국내의 위성 개발사업에서는 높은 기준의 부품 선정 및 설계 기준으로 COTS 사용이 필요한 시대적 요구와 맞지 않아 국내 시정에 맞는 국제 규격의 테일러링 방안이 제시되었다[4]. 또한, COTS의 우주방사선 피해를 막기 위한 차폐소재에 대한 연구도 활발히 진행중이다. 다양한 소재들 중 PE(폴리에틸렌)이 차세대 차폐 소재로 꼽히고 있다[5][6][7].

이에 본 연구에서는 기존 위성에 적용되던 알루미늄 구조체 형태의 우주방사선 차폐 하우징을 대체할 수 있는 복합소재를 적용한 우주방사선 차폐 하우징을 연구 개발하는 것을 목표로 한다.

이후 부분에서는 인공위성의 임무가 수행되는 우주 환경에서 우주방사선의 개념, 인공위성에 관한 보안 위협의 종류와 대응방안을 소개하고, 그로 인한 피해의 종류와 적용 가능한 대응 방안에 대하여 설명한다. 다음, 차폐 하우징을 적용한 보안모듈이 탑재될 위성의

* (주)스페이스엔빈 (기술총괄이사, silence.cho@spacenbean.com, 대표이사, chrism@spacenbean.com)

** (주)스페이스엔빈 부설연구소 (연구원, cdy@spacenbean.com)



(그림 1) 우주방사선이 우주 전자부품에 미치는 영향

임무환경을 상정하여, OMERE, SRIM, PHITS를 사용한 AI 단일 소재 차폐 성능과 AI과 PE 복합소재의 차폐 성능을 비교 분석하여 제시한다. 이후 해당 분석의 결과로 위성 탑재 보안 모듈의 하우징 방안을 제시하고 결론 및 향후 보강 연구의 방향을 제시한다.

II. 관련 연구

2.1. 우주방사선 개념

위성은 궤도에 따라 다르지만 매우 높은 우주방사선 환경에서 운용된다. 우주방사선은 태양으로부터 조사되는 태양방사선과 심우주에서 날아오는 은하방사선으로 분류하며, 이러한 방사선이 지구 자기장에 의해 특정 고도에서 나선운동을 하며 머물게 되며, 이를 벨앨런벨트 방사선이라고 한다. 이러한 고에너지 방사선은 위성의 전자부품들의 순간적인 오류나 심각한 손상을 유발할 수 있으므로 적절한 차폐조치가 필요하다. 특히 고에너지 양성자는 위성 전자부품의 손상을 일으키는 주원인이 되며 저궤도에 많이 분포하는 양상을 보인다.

2.2. 인공위성 보안위협과 대응기술

인공위성은 궤도상에서 임무를 수행하는 특징을 지니 해당 위성에 가해지는 보안위협을 물리적으로 차단하기 어렵다. 실제로 '07년 스리랑카 타밀족 해방군에 의한 인텔샷사의 통신위성 탈취사례[9], 데프콘, CYSAT 학술대회와 같은 컨퍼런스에서 진행된 해킹 시연과 방법 공개, NOAA 위성의 통신신호를 수신하여 기상위성의 이미지 획득 사례 등을 확인할 수 있다.

이러한 위협에 대응하기 위한 기술의 종류와 방법에는 크게 두가지가 있다. TRANSEC(Transmission Security)와 COMSEC(Communication Security)이다.

TRANSEC은 시스템 가용성 향상, 관제/통신링크

왜곡/간섭 방지, 사용자 인증을 통해 보안위협에 대응하는 것을 목적으로 한다. 그 방법에는 주파수 도약, 대역 확산, 널링 안테나를 통한 재밍신호 탐지/제거 등이 있다.

COMSEC은 데이터 유출/변경/재전송을 방지하여 보안위협에 대처하는 방식으로, 암호화, 해쉬/MAC, 사용자 및 장비 인증, 시스템 접근 통제, 전자서명과 같은 기술을 사용한다.

최근 수행되고 있는 연구에는 HW 솔루션을 통해 데이터 보호를 하는 방식[10], 나노위성을 이용한 양자키 분배 방식[11] 등이 있다.

이처럼 인공위성의 보안위협에 대응하기 위해서는 인공위성에 고성능의 보안모듈 탑재가 필수적이다.

2.3. 우주방사선으로 인한 인공위성 피해

우주방사선으로 인한 인공위성 피해에는 [그림 1]과 같이 크게 세가지가 존재한다. 먼저 지속된 우주방사선 노출로 인해 부품의 성능이 저하되는 TID(Total Ionizing Dose), 방사선이 반도체 부품을 관통하는 과정에서 발생한 전자, 정공 쌍으로 인해 펄스신호가 발생하여 오작동을 유발하는 SEE(Single Event Effects), 마지막으로 고에너지 중이온이 반도체를 관통하는 과정에서 반도체를 구성하는 내부 원소와의 충돌로 내부 원소의 위치가 변화하여 발생하는 DD (Displacement Damage)가 있다.

2.4. 보안모듈의 우주방사선 피해 대응 방안

위에서 언급한 우주방사선에 의한 피해를 대응하기 위해 현재 인공위성 설계에는 크게 두 가지 방법을 사용하고 있다. 먼저 탑재되는 전자부품을 강한 내방사선 성능을 지닌 소재로 제작한 EEE 부품을 사용하는 방식과 약한 내방사선 성능의 COTS 부품을 사용하되 방사선 차폐 하우징을 적용하여 전자부품에 작용하는 우주방사선의 선량 자체를 줄이는 방법이 있다.

그러나 EEE 부품은 COTS 부품에 비하여 매우 단가가 높고, 생산 기간이 오래 소요되며 국내생산이 불가하여 위성의 보안모듈과 같은 부품에 사용하였을 경우 유사시 통제권 탈취와 같은 상황이 발생할 수 있는 위험이 있기에 국내 생산이 가능한 COTS 부품을 사용한 보안모듈에 차폐 하우징을 적용하는 연구를 수행

하였다.

Ⅲ. 위성탑재 보안모듈용 차폐 소재 연구

양자 컴퓨터를 통해 기존의 암호체계를 과회할 위험이 커진 현세대에 고성능의 보안모듈이 필요한 위성, 그 중 특히 저궤도 군집위성에서는 경제성을 이유로 우주방사선 내성 소자를 사용하지 않은 COTS 부품을 사용하는 경우가 많아 운용 중 1년 이내 임무 실패율이 41%로 매우 높은 상황에 주목하여 보안모듈을 포함한 COTS 부품에 복합신소재를 적용하여 비교적 낮은 가격으로 적용 가능한 하우징 소재를 탐색하였다.[5][6][7][8].

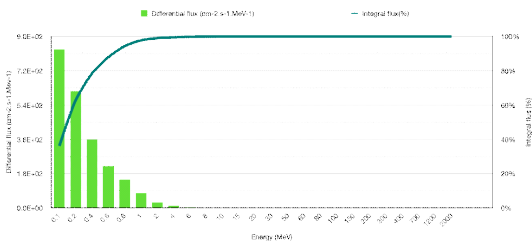
본 연구에서는 보안모듈이 가장 중요하게 기능하는 통신위성, 그 중, [표 1]과 같은 궤도에서 임무를 수행하는 저궤도 군집체를 상정하고 수행되었다.

[표 1] 저궤도 위성 임무궤도 정의

구분	정의
임무궤도	500 km, SSO
궤도 경사각	97.4°
LTDN	10:30

3.1. 우주방사선 환경 연구

위성 탑재 보안모듈에 치명적인 영향을 줄 수 있는 연간 방사선 흡수선량과 LEO 위성 환경에서 [그림 2]와 같이 가장 큰 영향을 주는 양성자빔이 약 30 MeV 이하에서 97.47% 가 분포한다는 OMERE 분석 결과를 토대로 연구를 수행하였다.



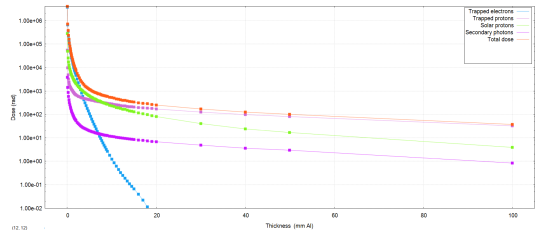
[그림 2] 밴앨런대 양성자빔 밀도

3.2. AI 소재 단일 사용 시

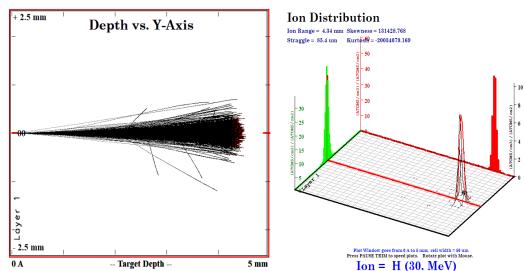
[그림 3]에서 보이는 OMERE를 이용한 LEO 환경에서 AI 소재의 두께에 따른 흡수선량 분석 결과를 토대로 SRIM 코드와 PHITS 코드를 이용하여 30 MeV의 에너지 준위를 가지는 양성자빔의 비정거리를 산출하였다.

[그림 4]에서 보이는 것처럼 SRIM 코드를 이용한 분석에서는 AI 소재 4.34mm, PHITS 코드를 이용한 분석에서는 4.3mm에서는 검출, 4.4mm 이상에서는 양성자가 검출되지 않았다.

기존 위성에서 사용중인 알루미늄 단일 소재 차폐 하우징의 두께를 위의 결과에서 도출한 4.4mm와 같은 값으로 설정하였을 때, [그림 5]에서 보이는 것과 같이 PHITS 코드를 이용하여 계산된 모든 입자에 대한 흡수선량은 $8.97 \times 10^{-4} Gy/year$ 로 나타났다. 이때, 광자 선량은 약 $7.68 \times 10^{-4} Gy/year$, 중성자 선량은 $1.27 \times 10^{-4} Gy/year$ 였으며, 양성자 선량은 검출되지 않았다.



[그림 3] LEO 임무환경에서 AI 두께에 따른 흡수선량



[그림 4] AI 소재의 30MeV 양성자빔 비정거리 분석

3.3. PE와 AI 복합 사용 시

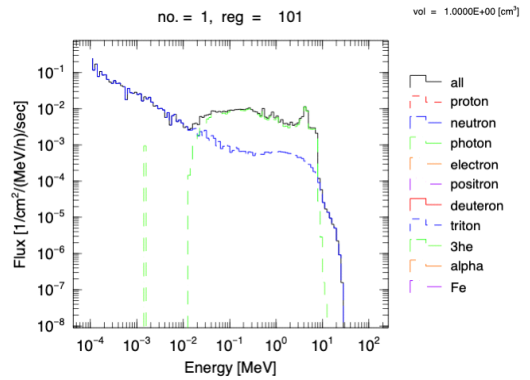
우주방사선 차폐 하우징은 우주방사선 차폐 성능과 더불어 전자부품 박스의 EMC 성능을 함께 고려하여

야 한다. 따라서 우주방사선 차폐 복합소재는 비금속 소재와 금속 소재를 적층한 복합소재로 선정하였다. 또한 비금속 물질 중 수소 원소량이 많아 양성자빔과의 상호작용이 우수한 PE를 선정하였다[5][6][7].

PE와 Al 복합소재 적용 시 양성자빔의 비정거리와 흡수선량을 분석하였다. 본 연구의 목적이 경제성을 띄는 차폐 방안을 연구하는 것이기에 PE보다 경제성이 떨어지는 Al의 두께를 1mm로 설정하고 연구를 수행하였다.

[그림 6]에서 보여지는 SRIM 코드를 이용한 30 MeV 양성자빔의 비정거리는 7mm PE와 1mm Al을 적층하였을 때 7.75mm로 양성자빔을 차폐하였다. PHITS 코드를 이용한 분석의 경우 1mm Al 과 6.569mm PE를 적층한 내경 10cm의 구에서 양성자빔을 차폐하였다.

이후 위의 결과를 토대로 PHITS 코드를 이용한 흡수선량 분석에서 [그림 7]과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 1mm Al과 6.57mm PE를 적층한 내경 10cm의 구에서 모든 입자에 대한 흡수선량은 $2.93 \times 10^{-4} Gy/year$ 로 나타났다. 이때, 광자 선량은



[그림 7] 복합소재 하우징(Al 1mm + PE 6.569mm)의 방사선 흡수선량

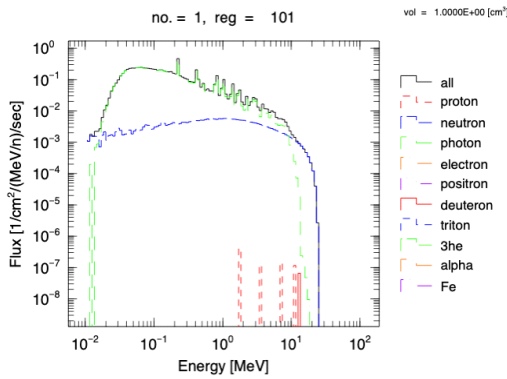
$2.88 \times 10^{-4} Gy/year$, 중성자 선량은 $5.72 \times 10^{-6} Gy/year$ 로 Al 단독으로 하우징을 구성했을 경우에 비하여 현저히 낮은 흡수선량을 보이는 것을 확인하였다.

IV. 결 론

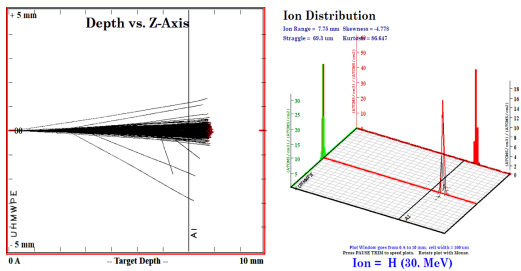
본 연구에서는 COTS로 구성된 보안모듈을 이용하여 하는 저궤도 인공위성을 위한 보안 모듈의 우주방사선 차폐 방안을 제안하였다. 그리고 기존에 사용하던 Al 단일 소재로 구성된 차폐 하우징보다 성능이 월등히 우수한 분석 결과를 얻음으로 그 효용성을 입증하였다. 이렇게 Al과 PE의 복합소재를 사용하여 우주방사선 차폐 하우징을 구성함으로써 경제성과 성능을 모두 챙길 수 있다. 추후 인공위성에 탑재하는 보안모듈, 또한 다른 전자부품들을 위한 차폐 하우징을 개발 및 개선하고자 하는 경우 본 논문에서 제시한 방안이 도움을 줄 수 있을 것이라 본다.

본 연구에서는 PHITS와 SRIM 코드를 사용하여 해당 소재의 차폐 성능을 분석한 결과를 중점적으로 소개하였다. 해당 코드가 성능 분석에 탁월한 점은 분명하나 우주 환경에서 발생가능한 모든 변수에 대한 분석이 가능한 것은 아니다. 또한 PHITS 시뮬레이션의 경우 빈틈이 없는 완벽한 구의 형태를 가정하고 분석하였으나 현실에서 해당 형태를 구현하고 위성에 탑재하기에는 어려움이 있다.

이러한 점을 고려할 때 복합소재를 활용하여 보안모듈의 차폐 하우징을 구현하기 위해서는 실제 적용 가능한 형태로 제작하여 방사 충격과 진동이 가해진



[그림 5] Al 소재 하우징(4.4mm)의 방사선 흡수선량



[그림 6] 복합소재의 30MeV 양성자빔 비정거리 분석

이후에도 같은 방사선 차폐성능을 보이는지, 탑재 시에 타공과 같은 소요가 발생하여 실제 성능에 열화가 발생하는지와 같은 관련 연구와 실험이 충분히 수행될 필요가 있다.

참 고 문 헌

- [1] Conner.R.Julien, “An FPGA-based Radiation tolerant SmallSat computer”, 2015
- [2] Hanson.C.Nguyen, “Robust, Radiation Tolerant Command and Data Handling and Power System Electronics for SmallSats”, 2018
- [3] Tanabashi M, Hagiwara K, Hikasa K, Nakamura K, Sumino Y, Takahashi F, “Review of Particle Physics”, *Physical Review D*, 2018
- [4] 정성근, 초소형SAR 위성개발가이드라인, 2022
- [5] 차지훈, “강화된기계적특성및우주환경적용을위한 우주방사선차폐및전자기흡수구조연구“, 2022
- [6] 장태성등, ”우주방사차폐를위한경량폴리에틸렌복합재료의양성자차폐특성연구“, 2013
- [7] 장태성외, 항공우주산업기술동향, 2017
- [8] T. Siamak, “A study of on-orbit spacecraft failures”, 2009.
- [9] “Intelsat shuts down transponder hijacked by terrorists”, *Satellite Today*, 2007.4.26.
- [10] Y. Michalevsky and Y. Winetraub, “SpaceTEE: Secure and Tamper-Proof Computing in Space hsing CubeSats”, *AHES'17*, pp. 27~32, 2017
- [11] J. A. Grieve et al., “SpooQySat: CubeSats to Demonstrate Quantum Key Distribution Technologies”, *Acta Astronautica, Vol. 151*, pp. 103~106, 2018

<저자 소개>

조 양 찬 (Yang-Chan Cho)

2005년 2월: 서울대학교 전기전자공학 석사
2022년 8월~현재: 스페이스앤빈 기술총괄이사
<관심분야> 전자공학, EMP 차폐, 방사선 차폐



최 동 윤 (Dong-yun Choi)

2018년 3월~현재: 서울과학기술대학교 전기정보공학과 학사과정
2023년 9월~현재: 스페이스앤빈 연구소 연구원
<관심분야> 전기공학, 제어공학, EMP 차폐, 방사선 차폐



민 경 령 (Kyung-ryeung Min)

2008년 8월: 고려대학교 전자공학 석사
2014년 2월: 한국외국어대학교 법학 수료
2021년 6월~현재: 스페이스앤빈 대표이사
<관심분야> 전자공학, 통신공학, EMP 차폐



