

위성용 전개형 SAR 안테나 구속분리장치

최준우¹ · 황보현¹ · 김병규^{1,†} · 김동연² · 김현국²

¹한국항공대학교 항공우주및기계공학과

²한화시스템 항공우주연구소

Separation Device of Deployable SAR Antenna for satellite

Junwoo Choi¹, Bohyun Hwang¹, Byungkyu Kim^{1,†}, Dong-yeon Kim² and Hyun-guk Kim²

¹Korea Aerospace University

²Hanwha Systems

Abstract

This paper proposes a non-explosive separation device for the deployable SAR antenna. This device utilises a Ni-Cr wire to restrain the antenna's belt mechanism, and joule-heating is used to minimise the impact of deployment. After the Ni-Cr wire has been cut, the device is deployed through the preload of the belt mechanism. Considering the design load(99g) and preload conditions, FEM analysis for AL7050 and Ti was performed. This analysis revealed that the amount of deformation for AL7050 was 0.256 mm with a margin of +0.09. In addition, by performing orbital thermal analysis, the temperature distribution for AL7050 in the worst cold case is confirmed as -50 to +2°C and -10 to +90°C in the worst hot case. This analysis confirmed that the separation device would remain stable even in the worst environment.

초 록

본 연구는 전개형 SAR 안테나에 적용하기 위한 비폭발 분리장치를 제안하였다. Ni-Cr 와이어를 감아 제작된 분리장치를 이용하여 SAR 안테나의 벨트가 전개되지 않도록 구속한다. 분리 장치를 구속하는 Ni-Cr 와이어는 발열을 통해 절단함으로써 벨트 전개 시 충격량을 최소화한다. 분리장치의 설계를 위해 설계하중(99g)과 preload를 고려하여 AL과 Ti을 대상으로 유한요소 해석을 수행하였다. AL을 이용 시 해석결과, 최대 변형량이 0.256 mm 발생하였고, 안전마진은 +0.09로 확인되었다. 또한 궤도상 열분석을 수행하여 온도분포를 확인한 결과, 최저온 궤도와 최고온 궤도에서 -50~+2°C의 온도분포와 -10~+90°C의 온도분포를 각각 나타내어 우주환경에서도 구속분리장치가 안정적임을 입증하였다.

Key Words : Non-explosive Separation Device(비폭발식 구속분리장치), Deployable SAR Antenna(전개형 SAR 안테나), Ni-Cr Wire Cutting Method Actuator(니켈-크롬 와이어 절단 방식 액츄에이터)

1. 서 론

SAR 안테나는 가시광선이나 적외선보다 파장이 긴 마이크로파를 이용하여 구름 등의 영향을 받지 않고 악천후에도 관측이 가능하며, 밤낮에 관계없이 일정한 영상 획득이 가능하기 때문에 지구 관측, 자연재해 감

시 등 민간분야에서의 활용뿐만 아니라 군사적인 활용도 역시 높다. 하지만 높은 해상도를 획득하기 위해서는 개구면의 크기가 클수록 유리하기 때문에 수납형상으로 발사하고 궤도상에서 전개하는 형태의 연구가 지속적으로 이루어지고 있다[1~4]. 이러한 추세에 따라 국내에서도 전개형 SAR 안테나의 개발을 진행하고 있으며, 수납형상에서의 구속 및 전개를 위한 구속분리장치, 전개 시 개구면을 안정적으로 유지하기 위한 전개장치 등의 부속장치들에 대한 연구도 함께 수행되고 있다[5]. 특히 전개형 SAR 안테나에 특화된 구속분리

Received: Oct. 31, 2022 Revised: Dec. 07, 2022 Accepted: Dec. 12, 2022

† Corresponding Author

Tel: +82-02-300-0101, E-mail: bkim@kau.ac.kr

© The Society for Aerospace System Engineering

장치 개발은 수요의 한계로 인해 많은 연구가 진행되지 않아 주로 pyro를 이용한 폭발식 구속분리장치를 적용해왔으며 이로 인한 충격 요구조건이 주요하게 다루어져왔다. 이를 반영하여 본 논문에서는 국내에서 개발 중인 전개형 SAR 안테나를 고려하여 충격량을 최소화한 비폭발식 구속분리장치의 설계와 구동원리를 제시하고 구조해석과 궤도 열해석을 통한 해석적 검증 결과에 대해 서술하고자 한다.

2. 비폭발식 구속분리장치 설계

2.1 비폭발식 구속분리장치 구성

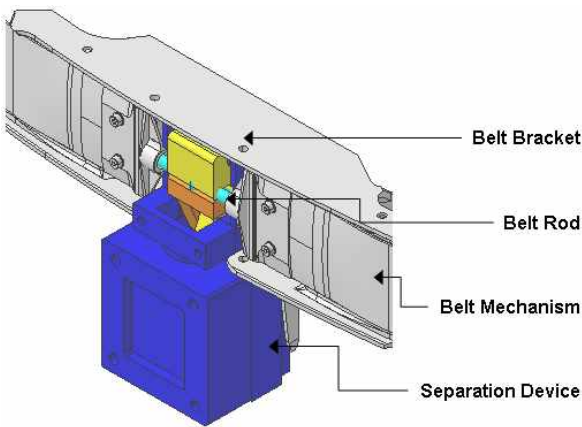


Fig. 1 Configuration of Separation Device on the Belt Mechanism

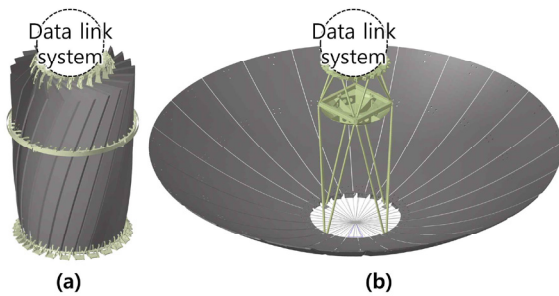


Fig. 2 Deployable SAR Antenna Configuration (a) Stowed, (b) Deployed

전개형 SAR 안테나의 반사판은 SAR 안테나에 장착

된 벨트 메커니즘에 의해 수납상태의 형상으로 구성한 다음 벨트 메커니즘과 연결된 브라켓을 통해 Fig. 1과 같이 구속분리장치가 장착된다. 이 때, 벨트 메커니즘에 장착되어 있는 Belt rod를 구속분리장치가 구속하고 있으며 안테나의 수납된 형상은 Fig. 2-(a)와 같다. 안테나 전개를 위해 전력을 인가하면 Ni-Cr wire가 절단되어 구속력이 해제되고 SAR 안테나가 Fig. 2-(b)와 같이 전개된다.

Figure 3는 제안된 분리장치의 각 파트의 명칭 및 구조를 보여준다. 각 파트의 역할은 다음과 같다.

- Upper/Lower Housing : Ni-Cr Wire 및 Holder, Linkage 등 구속분리장치의 주요 파트들을 외부 환경으로부터 보호하며, 벨트 메커니즘과의 체결 인터페이스를 제공한다. 구속 상태에서의 Holder 위치를 고정하기 위한 stopper 기능을 포함한다.
- Linkage 1/2 : 전개형 SAR 안테나 구속분리장치의 구동부 파트로 Ni-Cr wire와 Holder에 의해 벨트 메커니즘의 분리부를 구속한다.
- Body Pin : 구속 및 해제 시 Linkage 1/2와 벨트 메커니즘 분리부의 간섭을 최소화하여 안정적인 구속해제가 가능하도록 하는 회전축을 제공한다.
- Pin Clip : Body Pin과 연결되는 Linkage 1의 위치를 고정시킨다.

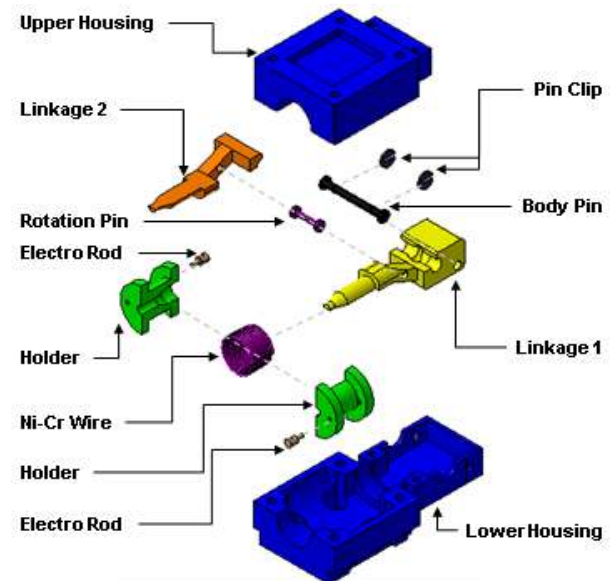


Fig. 3 Components Description

- Rotation Pin : 구속 해제 시 Linkage 1/2 간의 회전축을 제공한다.
- Holder : Ni-Cr wire로 감겨있어 벨트 메커니즘의 preload에 의한 Linkage 1/2가 회전하는 것을 억제한다. Electro Rod에 전력 인가 시 Ni-Cr Wire가 절단되어 Linkage 1/2에 대한 구속이 해제된다.
- Ni-Cr Wire : 구속분리장치의 구속력을 제공하며, 구속해제를 위한 trigger 역할을 한다. Ni-Cr Wire의 두께 및 감는 횟수에 따라 구속력을 결정할 수 있으며, 그에 따라 구속해제를 위한 절단에 필요한 전력량도 달라진다. 본 논문에서의 구속분리장치는 preload를 고려하여 Φ 0.4 mm Ni-Cr Wire를 12회 적용하였으며, 필요한 전력량은 24W이다.
- Electro Rod: 구속해제 시 Ni-Cr Wire의 절단을 위한 전력을 전달한다. Redundancy 개념을 적용하여 2 개가 장착되어 있다.

2.2 비폭발식 구속분리장치 구동원리

벨트 메커니즘은 전개 상태의 형상으로 돌아가고자 하는 복원력을 지니고 있으며, 이로 인해 구속분리장치의 Linkage에 복원력만큼의 preload가 작용하게 된다. 구속분리장치는 Holder에 Ni-Cr Wire를 감아 Linkage에 구속력을 작용시켜 벨트 메커니즘의 복원력에 의한 preload를 상쇄시켜 구속 형상을 유지하며 분리 시에는 반대로 preload를 이용하여 전개 형상을 만들어 줄 수 있도록 설계되었다. Figure 4은 구속분리장치의 구동원리를 나타내었으며, 내부 구성 파트에 작용하는 힘을 표현하기 위해 Upper Housing은 표현하지 않았다.

구속분리장치의 구동순서는 아래와 같다.

[1] 벨트 메커니즘에 의해 발생하는 preload는 Linkage를 통해 작용하게 되고 이는 다시 Linkage를 구속하고 있는 Holder에 작용하게 된다. Holder는

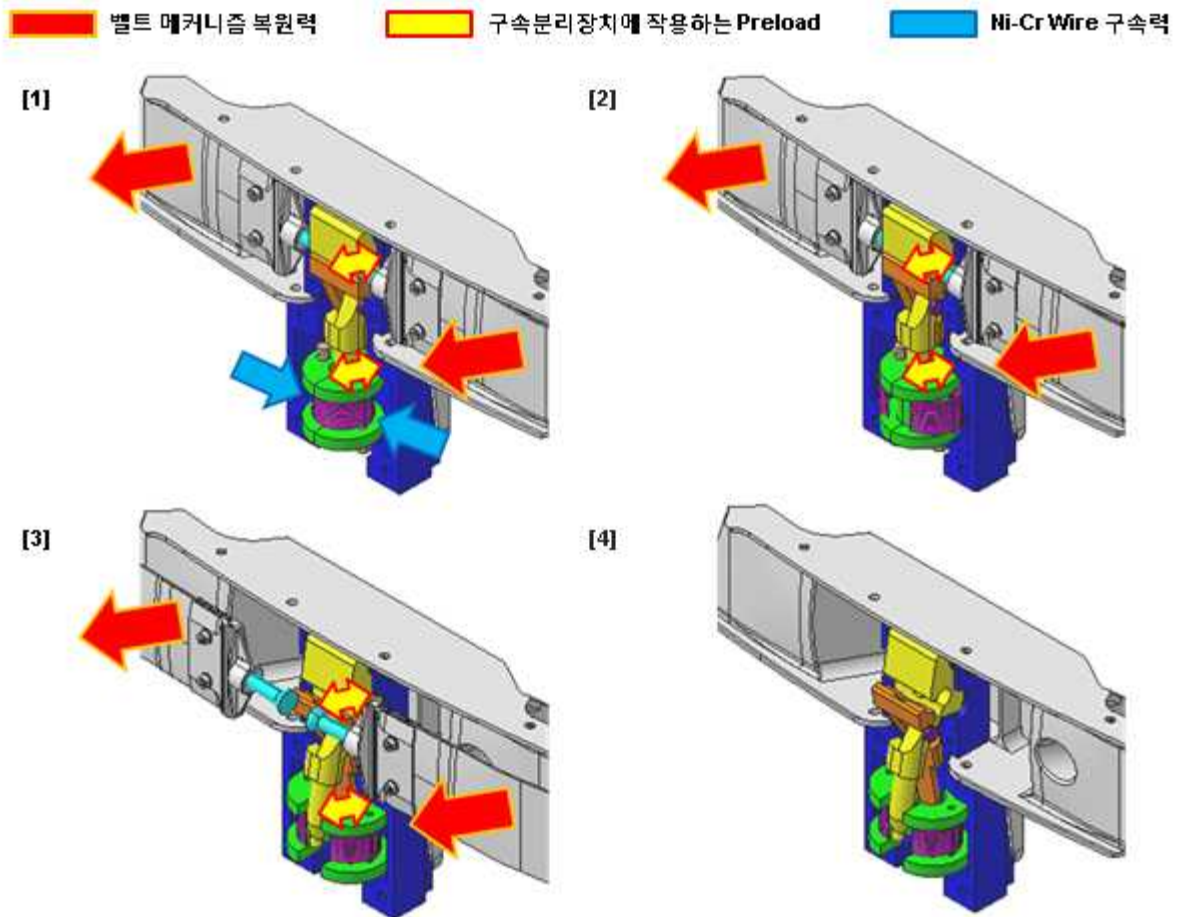


Fig. 4 Separation device operating sequence

Ni-Cr Wire의 구속력으로 구속 상태를 유지한다.
 [2] Electro Rod를 통해 전력 인가 시 Ni-Cr Wire에 열이 발생하게 되고 이로 인해 Ni-Cr Wire가 절단되면 구속력이 해제된다.
 [3] 구속력이 해제되면 벨트 메커니즘의 Rod가 preload에 의해 Linkage를 밀어내고, Linkage가 회전하면서 벨트 메커니즘이 전개된다.
 [4] Belt Rod가 분리장치부터 이탈하고 전개 후 구속 분리장치는 벨트 메커니즘의 브라켓에 장착된 상태를 유지한다.

3. 비폭발식 구속분리장치 해석

3.1 비폭발식 구속분리장치 구조해석

비폭발식 구속분리장치의 구조해석은 NASTRAN을 사용하였으며, 유한요소모델은 Fig. 5-(a)와 같다. 각 구성 파트간의 체결 조건은 RBE2를 이용하여 자유도에 대한 구속 유무로 통제하였으며, 벨트 메커니즘의 브라켓과 체결되는 인터페이스를 고려하였다. 해석모델에 대한 요약정보는 Table 1과 같다.

재질은 AL7050과 Titanium으로 두 가지 경우에 대해 분석을 수행하였으며, 설계하중은 적용 SAR 안테나의 질량 가속도 곡선(mass acceleration curve)을 통해 구속벨트 조립체에 인가 되는 설계하중을 각 축

Table 1 Summary for FEM Information

구분		개수
NODE	GRID	34,178
3D ELEMENT	CTETRA	152,598
RIGID BODY	RBE2	17
OD Mass	CONM2	4
재질		무게
AL7050		0.213 kg
Titanium		0.330 kg

방향으로 99 g를 적용하였으며, 안테나 조립체 수준의 준정적해석을 통해 구속분리장치에 인가되는 preload를 계산하여 벨트 메커니즘에 의한 preload는 5,000 N을 적용하였다[6]. AL7050 재질 적용 시 Y축 방향 하중이 작용할 때 Linkage의 Belt Rod 구속부에서 최대 287.4 MPa의 응력이 발생하면서 최소 마진은 +0.09로 나타났다. 최대 변위는 Z축 방향 하중 작용 시 0.256 mm로 Holder에서 나타났다. Titanium 재질 적용 시 Y축 방향 하중이 작용할 때 Linkage의 Belt Rod 구속부에서 최대 298.2 MPa의 응력이 발생하여 최소 마진은 +1.18로 나타났다. 최대 변위는 Z축 방향 하중 작용 시 0.183 mm로 Holder에서 나타났다.

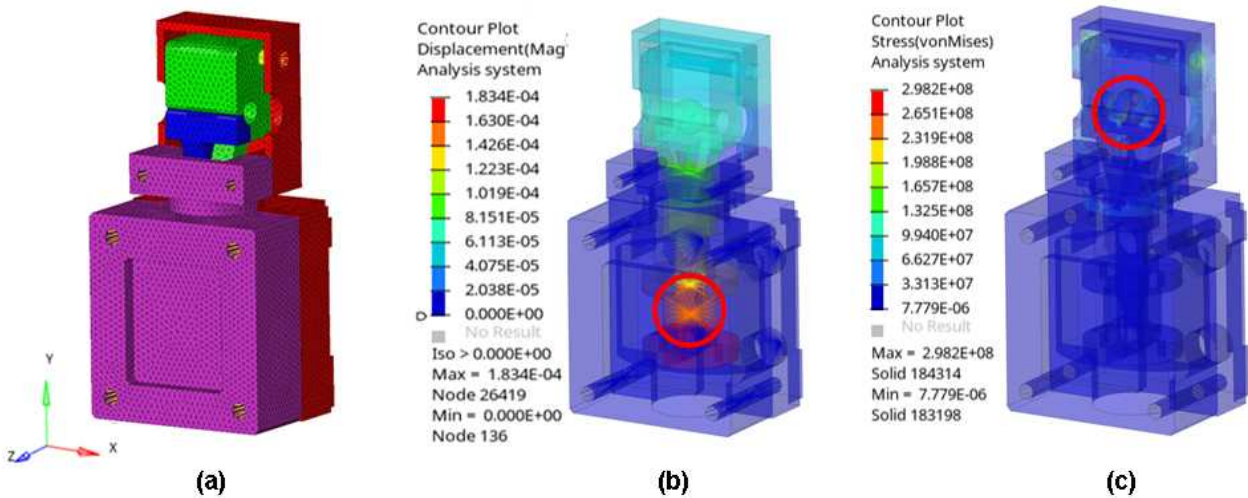


Fig. 5 Structural Analysis Model and Results (a) Finite Element Model (b) Displacement (Titanium, Z-axis) (c) Von-Mises Stress (Titanium, Y-axis)

Von-Mises Stress 해석 결과 재질에 관계없이 최소 안전마진은 확보되는 것을 확인하였으며, 하중에 의한 최대 변위 발생 부위와 최대 응력 발생 부위가 동일한 것을 확인하였다. Figure 5-(b)는 최대 변위 발생 부위를 나타내었으며, Fig. 5-(c)는 최대 응력 발생 부위를 나타내었다. 재질별 각 축 방향 하중에 의해 발생하는 Von-Mises Stress 및 Displacement 해석 결과는 Table 2와 같다.

Table 2 Structural Analysis Results

AL7050		
Axis	Displacement	Von-Mises
X	Max. 0.167 mm	Max. 285.7 MPa (Mos: +0.10)
Y	Max. 0.175 mm	Max. 287.4 MPa (Mos: +0.09)
Z	Max. 0.256 mm	Max. 286.4 MPa (Mos: +0.10)
Titanium		
Axis	Displacement	Von-Mises
X	Max. 0.106 mm	Max. 295.5 MPa (Mos: +1.20)
Y	Max. 0.111 mm	Max. 298.2 MPa (Mos: +1.18)
Z	Max. 0.183 mm	Max. 296.6 MPa (Mos: +1.20)

3.2 비폭발식 구속분리장치 궤도해석

본 구속분리장치는 발열 구성품이 아니므로 구속분리장치에 대한 열해석이 아닌 궤도 열해석으로 수행하였으며, Thermal Desktop((주)에이블맥스, 한국)을 이용하였다. 궤도 조건은 다목적실용위성의 한 궤도를 선정하여 수행하였으며, 궤도 열해석을 위한 Worst Hot, Worst Cold 조건은 Table 3에 나타내었다.

궤도 열해석 결과 구속분리장치에 대한 온도 변화는

AL7050 재질 적용 시 Worst Cold 조건에서는 -50~+2 °C, Worst Hot 조건에서는 -10~90 °C로 나타났으며, Titanium 재질 적용 시 Worst Cold 조건에서는 -44~9 °C, Worst Hot 조건에서는 -27~73 °C로 나타났다. 외부 Housing에서의 온도 변화가 크게 나타났으며, 내부에 위치한 주요 파트는 AL7050 적용 시 -33~65 °C, Titanium 적용 시 -25~43 °C 수준으로 나타났다. 분석 결과를 토대로 궤도환경에서의 구속분리장치의 안정적인 구동을 위해서 추가적인 열적 설계 필요는 없을 것으로 판단되나 MLI 등의 blanket을 적용할 경우 내부 파트의 온도 변화는 더 안정적으로 나타날 것으로 보인다. AL 재질 적용 시 궤도 열해석 결과에 대한 구성품 온도변화는 Fig. 6과 같다.

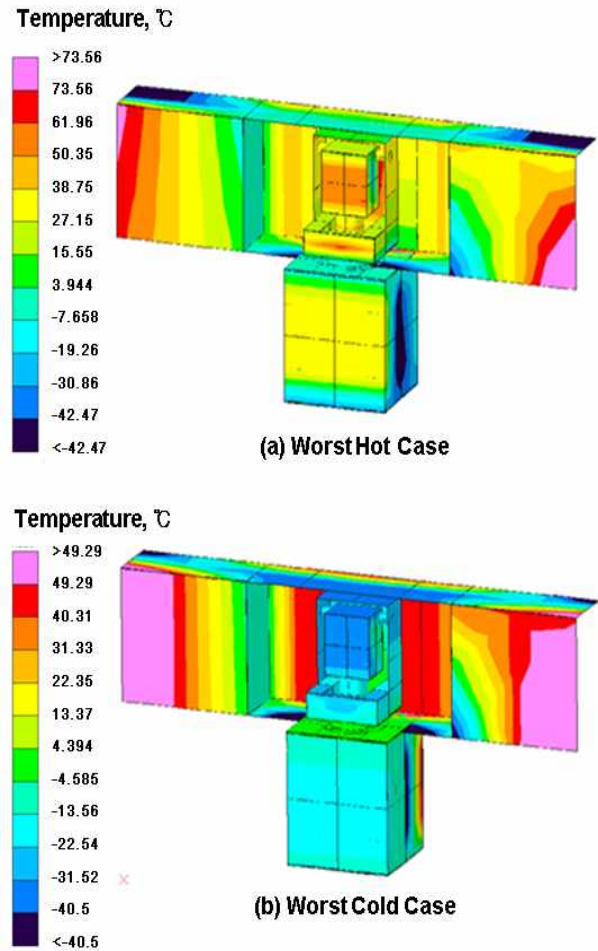


Fig. 6 On-orbit Thermal Analysis Results (AL7050)

Table 3 On-orbit Condition for Thermal Analysis

Orbit	
Orbit Inclination	97.513 deg
Altitude	528 km
Eccentricity	0
Period	5711.68 sec
Worst Hot Case	
RAAN	301 deg
Argument of Periapsis	-23.44 deg
SUN RAAN	270 deg
Worst Cold Case	
RAAN	121 deg
Argument of Periapsis	23.44 deg
SUN RAAN	90 deg

4. 결 론

본 논문에서는 국내에서 개발 중인 전개형 SAR 안테나에 적용 가능한 비폭발식 구속분리장치 설계 및 해석 결과를 서술하였다. 전개 충격량을 최소화하기 위해 Ni-Cr wire를 이용한 joule heating 방식을 적용하였으며, Wire 사용에 따른 고정력 설계 하중 및 preload 조건을 고려하여 AL7050와 Titanium 두 가지 재질에 대한 구조해석을 수행하였다. 또한 열해석은 구속분리장치가 발열하지 않으므로 궤도 열해석으로 수행하여 궤도 환경에서의 내부 구성품의 온도변화를 확인하였다.

AL7050 재질 적용 시 중량이 가벼운 장점이 있고 설계하중에 대한 최소 마진을 확보하고 있는 것을 확인하였으나, 궤도 환경에서의 내부 구성품 온도 변화가 큰 것으로 확인되었다. 이는 필요 시 MLI 등의 blanket을 적용할 경우 단점을 보완할 수 있을 것으로 보이나 그만큼의 중량이 추가되는 점을 고려할 필요가 있다.

Titanium 재질 적용 시 중량은 상대적으로 무거우나 하중 조건에서 좀 더 안정적인 경향을 보이며, 궤도 환경에서의 내부 구성품의 온도 변화도 안정적인 것으로 나타났다. 이러한 결과를 바탕으로 전개형 SAR 안테나용 구속분리장치는 Titanium 재질이 더 적합할 것으로 판단된다.

추후 가공성, 중량 절감 필요 유무 및 안테나 조립체 수준의 상세 열해석을 통한 blanket 필요 유무 등을 추가적으로 검토하여 재질을 선정하고 제작 및 환경시험을 통해 검증하고자 한다.

후 기

이 논문은 2022년 한화시스템의 지원을 받아 작성되었습니다.

References

- [1] J. Lim, Y. Kim, I. Jang, H. Kim and H. Oh, "Parabolic deployable mesh antenna with a hingeless system of superelastic SMA ribs and composite tape springs," *Acta Astronautica*, 200, pp. 149-162, 2022.
- [2] Z. Chen, C. Shi, H. Guo, R. Liu and Deng, Z, "Design and optimization of new space modular planar antenna," *Aerospace Science and Technology*, 123, 107442, 2022.
- [3] H. Saito, J. Hirokawa, T. Tomura, ... and K. Ijichi, "Development of compact SAR systems for small satellite." *In IGARSS 2019-2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, IEEE, pp. 8440-8443, July, 2019.
- [4] Y. Tian, Y. Yang, L. Tao, and X. Zhang, "A novel deployable array mechanism with two-dimensional expanding applied to SAR antenna." *In 2016 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA)*, IEEE, pp. 391-397, Aug, 2016.
- [5] D. Kim, J. Lim, T. Jang, W. Cha, S. Lee, H. Oh and K. Kim, "Optimal design of stiffness of torsion spring hinge considering the deployment performance of large scale sar antenna," *Journal of Aerospace System Engineering*, vol. 13, no. 3, pp. 78-86, 2019.
- [6] M. Trubert, "Mass acceleration curve for spacecraft design." *JPL D-5882*, NASA Jet Propulsion Laboratory, 1989.