

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 45(1), 63-70(2017)

DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2017.45.1.63

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

가항력돛을 이용한 궤도이탈장치 개발

최준우, 김시온, 이주완, 윤태국, 김병규\*

Development of De-orbiter using Drag-sail

Junwoo Choi, Si-on Kim, Joowan Lee, Tae-gook Yun and Byungkyu Kim\*

School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University

ABSTRACT

In this paper, we design and fabricate a de-orbiter using drag-sail and evaluate deployment characteristics. Without employing an actuator to deploy, the de-orbiter is activated by the SMA wire based the release mechanism and driven by the restoring force of the tape-spring. For efficient storage and deployment of drag-sail, an origami method of original ISO flasher is chosen and low priced mylar film is used as the material of the drag-sail. In addition, through the fault tree analysis method which is one of the one-shot device reliability evaluation methods, we confirm the reliability of the de-orbiter(0.997572) and the Roller failure has the highest criticality. Finally, we find feasibility of the proposed de-orbiter through the deployment demonstration of drag-sail.

초 록

본 논문에서는 가항력돛을 이용한 궤도이탈 장치를 설계 및 제작하고 전개 특성을 연구하였다. 형상기억합금을 이용한 분리장치를 개발하고, 형상기억합금의 구동에 따라 테일 스프링의 복원력을 이용해 구동되는 새로운 궤도이탈 장치를 설계하고 실험하였다. 가항력돛의 효율적인 수납 및 전개를 위해 origami flasher 방식 중 original ISO flasher 방식을 선정하였으며, 반복적인 실험을 하기 위해서 다른 재료들에 비해 저렴한 우주재료인 mylar film을 가항력돛의 재료로 사용하였다. 또한, 일회성 장치 신뢰성 평가 방법 중 하나인 FTA(fault tree analysis) 방법을 통해 장치의 신뢰도(0.997572)를 평가하고 가장 치명도가 높은 부분이 Roller failure임을 확인하였다. 최종적으로 가항력돛의 전개장치의 제작 및 실험을 통하여 향후 궤도이탈 장치의 개발 가능성을 확인하였다.

**Key Words :** De-orbiter(궤도이탈 장치), Space Debris(우주 잔해), Drag-sail(가항력돛), Origami Flasher(종이접기), Reliability Analysis(신뢰성 분석)

1. 서 론

2007년 중국의 위성 요격 실험과 2009년 Cosmos 2251와 Iridium 33 위성의 충돌 이후, 우주잔해

의 수가 기하급수적으로 증가하였다[1]. 우주에 존재하는 잔해들은 7.9 ~ 11.2 km/s의 속도로 궤도를 돌고 있기 때문에 크기가 작은 파편도 위성에 심각한 손상을 초래할 수 있다. 실제로 지

† Received : October 24, 2016    Revised : December 27, 2016    Accepted : December 28, 2016

\* Corresponding author, E-mail : bkim@kau.ac.kr

름 1.2 cm의 알루미늄 구체를 두께 18 cm의 알루미늄 판에 6.8 km/s의 속도로 충돌시키면 알루미늄 판에 심각한 손상을 줄 수 있는 것으로 확인되었다[2]. 따라서 전 세계 우주관련 연구기관들은 우주잔해들이 임무 중인 위성에 손상을 주기 전에 미리 제거하기 위해 연구 중이며 2007년 6월 COPUOS의 승인 아래 UN space debris mitigation guidelines을 제시하는 등 우주 폐기물 감축에 힘을 쏟고 있다[3].

우주 잔해 제거 방식에는 포획 방식(Capture method)과 완화 방식(Mitigation method), 지상 제어 방식(Ground control method)이 있다. 포획 방식의 대표적인 예는 스위스연방공대(EPFL)에서 개발 중인 SwissCube-sat으로 궤도상에서 직접 우주잔해를 수거한 후, 지구로 재진입하면서 우주잔해를 모두 태우는 방식이다. 완화 방식의 대표적인 예는 가항력돛을 이용한 방식(sail suicide)으로 2011년 NASA에서 가항력돛을 탑재한 위성인 Nanosail-D2를 발사하여 저궤도 이탈에 성공하였으며[4], 영국 Surrey Space Center에서도 동일한 방식으로 10 m<sup>2</sup> 크기의 가항력돛을 장착한 Cubesail 위성 개발을 진행하고 있다[5]. 마지막으로 지상 제어 방식은 지상에서 궤도로 레이저포를 발사하여 우주잔해를 제거하는 방식이다.

본 논문에서 제안하는 궤도이탈 장치는 가항력돛을 이용해 항력을 발생시켜 지구로 재진입시키는 방식의 완화 방식을 채택하였다. 메커니즘의 단순화와 무게 경량화를 위해 별도의 구동기를 사용하지 않고 형상기억합금(SMA wire)을 이용한 분리장치와 테일 스프링(tape-spring)의 복원력을 이용한 전개장치를 설계하였다. 가항력돛은 mylar film을 사용하였으며 효율적인 수납과 전개를 위해 origami flasher 방식을 적용하였다. 또한, 형상기억합금에 의한 일회성 장치(one-shot device)의 신뢰성 평가를 수행하고 최종적으로 설계한 가항력돛 전개장치를 제작한 후 실험하였으며 결과에 대해 평가하였다.

## II. 본 론

### 2.1 가항력돛 전개장치 요구조건

가항력돛을 이용한 궤도이탈장치 연구의 목표는 수납상태의 최소체적에서 전개 시 최대면적으로 전개 가능한 가항력돛 전개장치를 개발하는 것이다. 따라서 전개 및 분리장치의 우수성은 발사 시 수납체적과 궤도상에서 전개 시 면적이 가

Table 1. Requirement for Drag-sail Deployment Device

Classification	Requirement
궤도이탈 방식	Sail suicide
수납 부피	1 U
전개 넓이	2 m <sup>2</sup>
가항력돛 수납비	1 : 200
장치 질량	0.5 kg

장 중요시된다. 본 논문에서 제안하는 가항력돛 전개장치의 요구조건은 Table 1과 같다.

### 2.2 가항력돛 전개장치 구성

가항력돛 전개장치의 boom은 collapsible boom 구조와 유사한 테일 스프링을 이용한 전개장치이다. 제안된 전개장치는 상부 하우징(Top Housing)과 하부 하우징(Bottom Housing), 측면 하우징(Side Housing), 스펴(Spool), 메인 샤프트(Main Shaft)로 구성되어있으며 메인 샤프트에 장착되어 회전하는 스펴 내부에는 원활히 회전할 수 있도록 베어링을 장착하였다. 또한, 테일 스프링이 복원력에 의해 전개될 때 일정하게 중앙원의 접선방향으로 사출되도록 알루미늄 롤러(Aluminum Roller)를 장착하였다. 4개의 측면 하우징에는 테일 스프링 형태의 홈을 파서 스펴에 고정된 테일 스프링의 끝 부분에 결합을 할 수 있도록 하였다(Fig. 1).

상부 하우징, 하부 하우징을 결합하면 테일 스

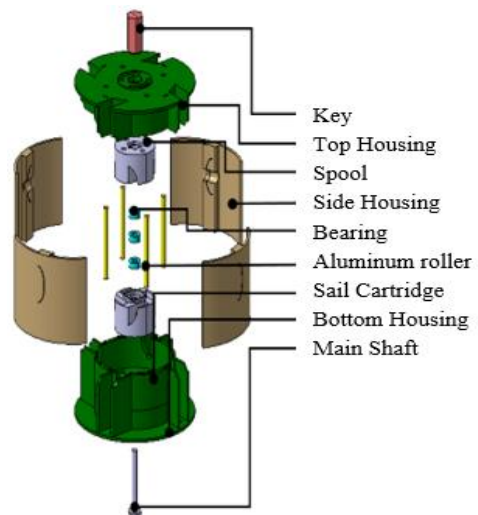


Fig. 1. Configuration of Drag-sail Deployment Device

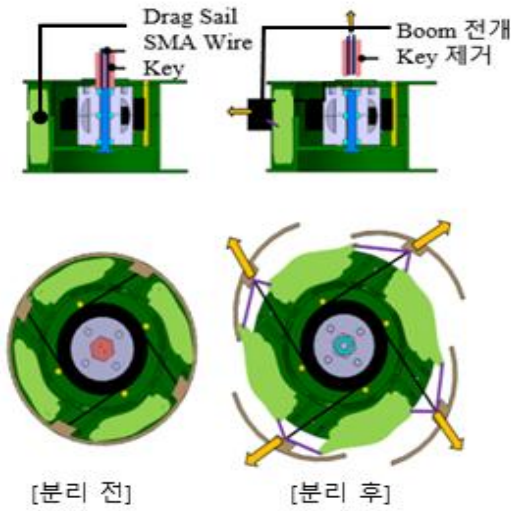


Fig. 2. Mechanism of Deployment and Separation

프링이 원활히 사출되도록 해주는 반달형태의 사출가이드가 생성된다. 또한 가항력돛을 수납하는 공간인 카트리지(Sail Cartridge)는 4개의 측면 하우징에 의해 닫힌다. 분리장치는 형상기억합금과 키(Key)로 구성된다. 키의 중앙에는 형상기억합금을 연결하기 위한 2개의 홈이 있다. 스프링과 상부 하우징의 중앙에는 육각형의 홈이 있으며, 이 홈에 키가 꽂히면 스프링의 회전이 상부 하우징에 의해 억제된다(Fig. 2).

### 2.3 가항력돛 전개장치 메커니즘

형상기억합금에 전류를 가해 저항부에서 열이 발생하면 형상기억합금이 수축하여 키가 수직방향으로 힘을 받아 분리된다. 스프링의 구속이 해제되면 복원력에 의해 테일 스프링이 전개한다. 동시에 테일 스프링 끝에 결합된 측면 하우징이 같이 전개하면서 카트리지에 수납되어 있던 가항력돛이 테일 스프링과 함께 전개한다.

### 2.4 Origami Flasher

제안된 전개장치는 분리된 4개의 카트리지를 가지고 있으며 테일 스프링은 원의 접선방향으로 전개한다. 따라서 origami flasher 방식 중(Fig. 3, Table 2) 4등분이 용이하고 원형 전개장치의 접선 방향이 가항력돛의 대각선 방향과 일치하는 original ISO flasher를 선택하였다. 이 방식은 가항력돛을 일자 형태로 접을 수 있기 때문에 카트리지에 지그재그(zigzag)식으로 수납하면 카트리지의 제한된 공간을 효율적으로 사용할 수 있다(Fig. 4).

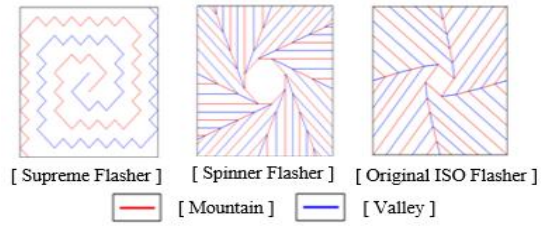


Fig. 3. Types of Origami Flasher[6]

Table 2. Characteristics of Origami Flashers

Supreme Flasher	Spinner Flasher	Original ISO Flasher
<ul style="list-style-type: none"> <li>▷ 2개의 연속된 선으로 구성됨</li> <li>▷ 회전을 하며 전개됨</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▷ 8각형의 빈 공간을 가짐</li> <li>▷ Valley 선에 Boom 설치가 용이함</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▷ 4등분이 용이함.</li> <li>▷ 사각형의 중심 연장선이 대각선으로 이어짐</li> </ul>



Fig. 4. Devided Original ISO Flasher

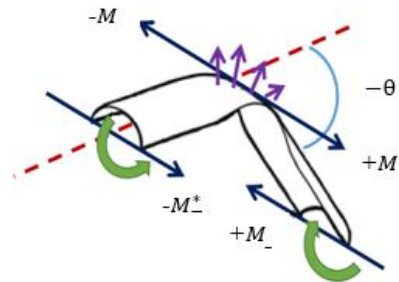


Fig. 5. Moment of tape-spring

### 2.5 이론적 계산

제안한 궤도이탈 장치에서 분리장치의 키는 형상기억합금에 의해서 제거된다. 적절한 형상기억합금을 선정하기 위해서는 테일 스프링의 복원력에 의해 발생하는 키와 상부 하우징사이의 마찰력과 형상기억합금의 수축력을 비교 평가해야 한다. 먼저, 키에 전달되는 테일 스프링의 복원력에 의한 마찰력을 계산하기 위해 Fig. 5와 같이

Table 3. Specification of Tape Spring

테잎 스프링(0.012")	
재질	<i>Stainless Steel</i>
탄성계수 $E$	131 <i>GPa</i>
테잎 스프링 두께 $p$	0.23 <i>mm</i>
포아송 비 $\nu$	0.30
횡방향 각 $\varphi$	1.2217 <i>rad</i>

안쪽 방향으로 굽어진 테잎 스프링에서 발생하는 모멘트( $M^*$ )를 계산한다[7].

테잎 스프링에서 발생하는 모멘트( $M^*$ )는 식 (1)로 표현되며, 여기서, 테잎 스프링을 구부리는 힘에 대한 저항인 굽힘강성  $D$ 는 다음 식 (2)를 이용한다.

$$M^* = (1 - \nu)D\varphi \quad (1)$$

$$D = \frac{E\nu^2}{12(1 - \nu^2)} \quad (2)$$

이 때, 사용된 테잎 스프링의 제원은 Table 3 과 같다.

식 (1)에서 구한 모멘트를 이용해 테잎 스프링의 굽힘강성에 의해 발생하는 토크를 식 (3)을 이용해 구한다.

$$\tau_{UW} = n_b \times M^* = 4(1 - \nu)D\varphi \quad (3)$$

식 (3)에서 구한  $\tau_{UW}$ 와는 반대로 스펴의 회전을 방해하는  $\tau_R$ 가 존재하게 되는데,  $\tau_R$ 는 테잎 스프링과 롤러가 접촉하여 작용하는 토크  $\tau_e$ 와 스펴 내부의 베어링과 메인 샤프트가 발생시키는 마찰에 의한 토크  $\tau_a$ 의 합으로 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\tau_R = \tau_e + \tau_a \quad (4)$$

$$\tau_e = \mu_r \frac{\mu_r \tau_{UW} d_r}{r_r} \quad (5)$$

$$\tau_a = n_a \mu_r \frac{\tau_{UW} d_a}{r_i} \quad (6)$$

식 (5)와 식 (6)에서 쓰인 동마찰계수  $\mu_r$ 은 다음과 같은 식으로 표현된다. 이 때,  $g_1$ 과  $g_2$ 는 정지와 운동 상태에 따라 다르다.

Table 4. Data of selected SMA wire

형상기억합금(0.012")			
수축율	단위길이 당 저항	수축력	전류량
3%	12.2 $\Omega/m$	1280 <i>g</i>	1500 <i>mA</i>

$$\mu_r = g_1 e^{g_2 T} \quad (7)$$

위의 과정을 통해 구한  $\tau_{UW}$ 와  $\tau_R$ 의 합으로  $\tau_E$ 를 구할 수 있다.  $\tau_E$ 는 테잎 스프링의 복원력과 내부 구성요소의 접촉에 의한 마찰을 고려한 값이므로 앞에서 언급된 테잎 스프링의 복원력에 의한 마찰력을 구하기 위해 사용된다.

$$\tau_E = \tau_{UW} - \tau_R \quad (8)$$

$\tau_E$ 는 키와 스펴 또는 상부 하우징 사이의 수직 항력을 증대시키는 역할을 하며 수직 항력은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$N = \frac{\tau_E}{r_k} \quad (9)$$

마찰력은 식 (9)를 통해 구해진 수직 항력에 정마찰계수  $\mu_s$ 를 곱한 값으로 나타낼 수 있다. 여기서 키와 상부 하우징의 접촉은 선 접촉이고,  $\mu_s$ 는 알루미늄 표면의 마찰계수인 1.0을 사용하였다. 계산된 마찰력( $F_R$ )값에 안전계수 2.0을 적용하여 형상기억합금을 선정하였으며, Table 3에 선정한 형상기억합금의 제원을 나타내었다.

$$2F_R = 2\mu_s N = 5.652 N \leq F_T \quad (10)$$

분리를 위해 키가 움직여야 하는 최소변위는 2 mm이다. 이 때, 수축 안전계수를 1.5로 설정하면 3 mm의 변위가 요구된다. 본 장치에서는 U자 형태로 두 가닥의 형상기억합금이 연결되므로 3%의 수축율을 갖는 형상기억합금의 경우 총 200 mm의 길이가 필요하다. 선정된 형상기억합금의 제원은 Table 4와 같다.

## 2.6 신뢰성 분석

전개장치의 신뢰성을 판단하기 위하여 일회성 장치(One-shot device)에 적합한 신뢰도 분석 방법 중 FTA(Fault Tree Analysis; 결함수목분석)를 사용하였다[8].

FTA는 하나의 특정 사고나 주요 시스템에 초점을 맞춘 연역적인 기법으로 사건의 원인을 결

Table 5. Symbols of FT

기호	설명	기호	설명
T	Drag-sail deployment failure	B21	Roller bearing #1 failure
A	Unlocking failure	B22	Roller bearing #2 failure
B	Spool & roller rotation failure	B23	Roller bearing #3 failure
C	Deployment failure	B24	Roller bearing #4 failure
A1	SMA wire failure	B25	Roller bearing #5 failure
A2	Control failure	B26	Roller bearing #6 failure
A3	Holder Key failure	B27	Roller bearing #7 failure
A21	Transmitter failure	B28	Roller bearing #8 failure
A22	Receiver failure	B41	Roller #1 failure
B1	Spool bearing failure	B42	Roller #2 failure
B2	Bearing failure	B43	Roller #3 failure
B3	Spool failure	B44	Roller #4 failure
B4	Roller failure	C1	tape-spring #1 failure
B11	Spool bearing #1 failure	C2	tape-spring #2 failure
B12	Spool bearing #2 failure	C3	tape-spring #3 failure
B13	Spool bearing #3 failure	C4	tape-spring #4 failure

Table 6. Symbols of Basic Event

기호	$X_i$ 기호	기호	$X_i$ 기호
A1	$X_{01}$	B26	$X_{13}$
A21	$X_{02}$	B27	$X_{14}$
A22	$X_{03}$	B28	$X_{15}$
A3	$X_{04}$	B3	$X_{16}$
B11	$X_{05}$	B41	$X_{17}$
B12	$X_{06}$	B42	$X_{18}$
B13	$X_{07}$	B43	$X_{19}$
B21	$X_{08}$	B44	$X_{20}$
B22	$X_{09}$	B51	$X_{21}$
B23	$X_{10}$	B52	$X_{22}$
B24	$X_{11}$	B53	$X_{23}$
B25	$X_{12}$	B54	$X_{24}$

정하는 방법을 제공하기 때문에 장치를 구동하기 전에 장비의 예상되는 결함을 확인할 수 있다. 이를 통해 위험성이 높은 원인에 시스템 고장 예방 및 완화 수단을 집중시켜 결함의 가능성을 줄일 수 있다. 제안된 궤도이탈 장치의 fault tree는 Fig. 6에 나타내었으며, 사용된 기호에 대한 설명은 Table 5와 Table 6에 나타내었다.

2.6.1 FTA 정량적 분석

FTA의 정량적 분석은 기본사건(Basic event)의 확률 계산, 최상위 사건(Top Event)의 확률 계산, 그리고 최상위 사건과 각 고장 확률의 민감도인 구조적 중요도(Structural importance)와 치명도(Critical importance)를 포함한다.

2.6.2 FTA 해석

2.6.2.1 기본 사건(Basic Event)의 확률 계산

기본 사건의 고장 확률을 계산하기 위해선 각 부품의 시간당 고장률과 작동 시간을 사용한다. 다음과 같은 식 (11)를 사용하여 기본 사건의 고장 확률인  $F_i$ 를 계산하였다(Table 7).

$$F_i = \lambda_{p,i} \times t_i \tag{11}$$

이 식에서  $\lambda_{p,i}$ 는 부품  $i$ 의 시간당 고장률이고  $t_i$ 는 부품  $i$ 의 작동 시간이다. 이 때, 시간당 고장률은 NPRD(Nonelectronic Parts Reliability Data) 2011을 참고하였으며[9], 각 부품에 대한 작동시간 및 고장률은 우주환경에서 사용되는 부품의 특수성을 감안하여 발생빈도를 동일하게 설정하였다.

2.6.2.2 최상위 사건(Top Event)의 확률 계산

최상위 사건의 확률 계산은 기본사건과 gate로 이어진 길로 계산된다. AND-gate없이 모두 OR-gate로 이루어진 고장수목에선 다음과 같은 식 (12)을 사용하여 최상위 사건의 확률인  $P(T)$ 를 계산한다.

$$P(T) = \sum_{i=1}^n F_i(t) \tag{12}$$

식 (12)에서  $F_i$ 는 부품  $i$ 의 기본사건 확률이고,  $n$ 은 기본사건의 총 개수이다. 즉, 모든 기본사건의 합으로 최상위 사건의 확률을 계산할 수 있으며, 계산된 최상의 사건의 확률( $P(T)$ )과 신뢰도( $P$ )는 다음과 같다.

$$P = 1 - P(T) \tag{13}$$

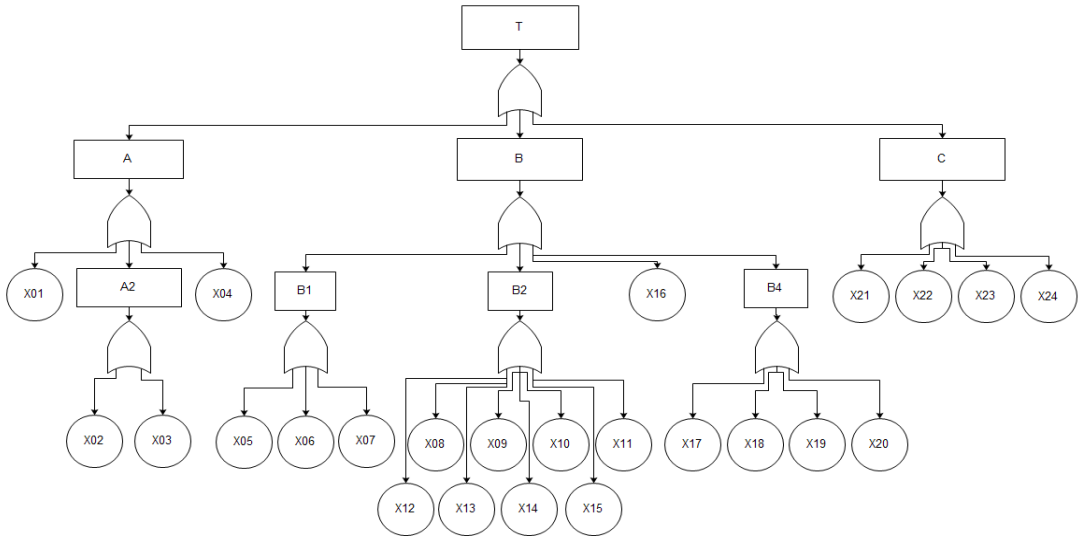


Fig. 6. Fault Tree of Drag-sail Deployment Device

$$P(T) = \sum_{i=1}^{24} F_i(t) = 0.002428004$$

$$P = 1 - P(T) = 0.997571996$$

$$PI_i = \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n [1 - F_j(t)] \quad (16)$$

2.6.2.3 구조적 중요도

FTA는 각 부품이 최상위 사건의 확률에 얼마나 영향을 끼칠 수 있는 민감도(Sensitivity)를 정량적으로 계산할 수 있다. 이를 통해 결함에 위험성이 높은 원인을 개선함으로써 결함의 가능성을 줄일 수 있다. 먼저, 구조적 중요도는 부품의 결함으로 발생하는 최상위 사건의 변화율로써 다음과 같은 식 (14)를 사용하여 구조적 중요도인  $PI_i$ 를 계산한다.

$$PI_i = \Delta g_i(t) = \frac{\partial g(t)}{\partial F_i(t)} \quad (14)$$

이 식에서  $\Delta g(t)$ 는 부품  $i$ 의 구조적 중요도,  $g(t)$ 는 최상위 사건의 확률이고,  $F_i(t)$ 는 부품  $i$ 의 고장 확률이다.

최상위 사건의 확률인  $g(t)$ 는 다음과 같은 식 (15)를 이용하여 계산한다.

$$g(t) = 1 - \prod_{i=1}^{24} [1 - F_i(t)] \quad (15)$$

$$= 0.002425234$$

식 (14)와 식 (15)를 이용하여 다음과 같은 식 (16)으로 구조적 중요도인  $PI_i$ 를 계산한다.

구조적 중요도를 각 부품마다 계산하여 순위화 할 수 있으며, 이를 통해 어떤 부품이 최상위 사건에 영향을 주는지 정량적으로 알 수 있다.

2.6.2.4 치명도 계수

치명도 계수는 구조적 중요도를 사용하여 구한 부품  $i$ 의 결함확률의 변화율과 최상위 사건의 확률의 변화율의 비이다. 따라서 치명도 계수의 정의는 식 (17)과 같다.

$$I_i(t) = \frac{F_i(t)/g(t)}{\partial F_i(t)/\partial g(t)} = \frac{F_i(t)}{g(t)} \frac{\partial g(t)}{\partial F_i(t)} \quad (17)$$

이 식에서  $I_i(t)$ 는 부품  $i$ 의 치명도 계수,  $F_i(t)$ 는 부품  $i$ 의 고장 확률,  $g(t)$ 는 최상위 사건의 확률이다. 치명도 계수는 다음과 같다.

$$I_i = \frac{F_i(t)}{1 - \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n [1 - F_j(t)]} \quad (18)$$

치명도의 크기 순서대로 기본 사건들을 나열하면 다음과 같다(Table 8).

$$X_{17}, X_{18}, X_{19}, X_{20} > X_{04} > X_{05}, X_{06}, \dots, X_{14}, X_{15} > X_{03} > X_{01} > X_{02} > X_{21}, X_{22}, X_{23}, X_{24}$$

Table 7. Probability of Basic Event

기호	설명	시간당 고장률 ( $\lambda_p$ )	작동 시간 ( $t$ )	고장 확률 ( $F_i$ )
X01	SMA wire failure	3.88556E-05	1	3.88556E-05
X02	Transmitter failure	2.07765E-05	1	2.07765E-05
X03	Receiver failure	7.63155E-05	1	7.63155E-05
X04	Holder key failure	0.000175206	1	0.000175206
X05	Spool bearing #1 failure	0.000110649	1	0.000110649
X06	Spool bearing #2 failure	0.000110649	1	0.000110649
X07	Spool bearing #3 failure	0.000110649	1	0.000110649
X08	Roller bearing #1 failure	0.000110649	1	0.000110649
X09	Roller bearing #2 failure	0.000110649	1	0.000110649
X10	Roller bearing #3 failure	0.000110649	1	0.000110649
X11	Roller bearing #4 failure	0.000110649	1	0.000110649
X12	Roller bearing #5 failure	0.000110649	1	0.000110649
X13	Roller bearing #6 failure	0.000110649	1	0.000110649
X14	Roller bearing #7 failure	0.000110649	1	0.000110649
X15	Roller bearing #8 failure	0.000110649	1	0.000110649
X16	Spool failure	2.7753E-06	1	2.7753E-06
X17	Roller #1 failure	0.000210307	1	0.000210307
X18	Roller #2 failure	0.000210307	1	0.000210307
X19	Roller #3 failure	0.000210307	1	0.000210307
X20	Roller #4 failure	0.000210307	1	0.000210307
X21	tape-spring #1 failure	1.39255E-05	1	1.39255E-05
X22	tape-spring #2 failure	1.39255E-05	1	1.39255E-05
X23	tape-spring #3 failure	1.39255E-05	1	1.39255E-05
X24	tape-spring #4 failure	1.39255E-05	1	1.39255E-05

Table 8. Structural Importance and Criticality Factor

기호	$PI_i$	$I_i$	순위
X01	0.997614	0.015983	18
X02	0.997595	0.008546	19
X03	0.997651	0.031393	17
X04	0.99775	0.07208	5
X05	0.997685	0.045519	6
X06	0.997685	0.045519	6
X07	0.997685	0.045519	6
X08	0.997685	0.045519	6
X09	0.997685	0.045519	6
X10	0.997685	0.045519	6
X11	0.997685	0.045519	6
X12	0.997685	0.045519	6
X13	0.997685	0.045519	6
X14	0.997685	0.045519	6
X15	0.997685	0.045519	6
X16	0.997578	0.001142	24
X17	0.997785	0.086524	1
X18	0.997785	0.086524	1
X19	0.997785	0.086524	1
X20	0.997785	0.086524	1
X21	0.997589	0.005728	20

2.6.2.5 FTA해석 결과

FTA해석 결과, 치명도(ii)는 고정키(Holder Key;  $X_{04}$ )와 롤러(Roller;  $X_{17}, X_{18}, X_{19}, X_{20}$ ), 스펀과 롤러에 사용한 베어링( $X_{05}, X_{06}, \dots, X_{15}$ )이 최상위 사건의 실패율에 가장 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다.

2.7 전개 및 분리장치 실험 및 결과

전개 및 분리장치 제작은 3D printer를 이용하여 제작 및 조립하였다. 형상기억합금이 수축하자 스펀의 회전을 억제하고 있던 키가 제거되면서 테일 스프링이 사출가이드를 따라 직선으로 전개하였다. 동시에 테일 스프링과 와이어로 연결되어있던 가항력돛과 테일 스프링의 전개가 완료되었을 때 4초 내에 완전히 펼쳐지는 것을 확인하였다(Fig. 7). 이 때, 장치의 총 질량은 0.48 kg 이며, 수납상태에서의 가항력돛의 체적은  $0.0095 m^3$ 이며, 전개 후 면적은  $1.92 m^2$ 으로 초기에 설정한 요구조건에 부합하도록 설계되었으며, 수납체적 대비 전개 면적비는 1:202 인 것으로 확인되었다.

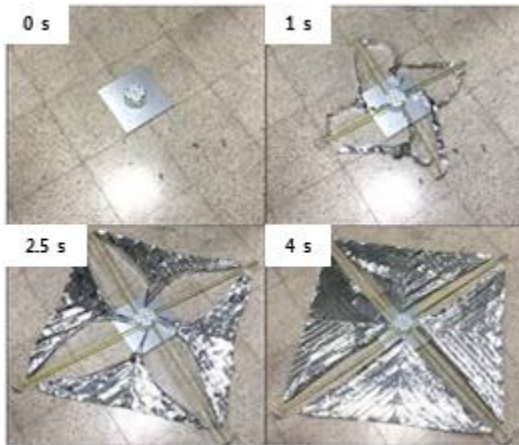


Fig. 7. Process of Deployment

### III. 결 론

본 논문에서는 가항력돛을 이용한 궤도이탈 장치에 대한 연구를 수행하였다. 메커니즘의 단순화와 무게 경량화를 위해 모터 대신 형상기억 합금을 이용한 구동방식을 선정하였으며, 가항력 돛의 효율적인 수납을 위해서 origami flasher 방식 중 original ISO flasher를 사용하였다. 가항력 돛 전개장치는 수납 상태에서 키에 의해 스프링의 회전이 구속되고 있으며, 형상기억합금의 수축으로 인해 키의 구속이 해제되어 가항력돛이 전개된다. 이 때, 키의 분리에 필요한 구동력을 계산하여 적절한 형상기억합금을 선정하였다. 또한, 일회성 장치 신뢰성 평가 방법 중 하나인 FTA (Fault Tree Analysis) 방식을 이용한 신뢰도 평가를 통해 신뢰도(0.997572)를 도출하였으며, Roller failure의 치명도가 가장 높게 나오는 것을 확인하였다. 제안된 장치의 전개실험을 수행한 결과, 가항력돛의 수납체적 대비 전개면적비가 1:202임을 확인하였다. 추후 발사환경 및 우주

환경 시험을 통해 실제 위성에 적용 가능성을 파악할 예정이다.

### References

- 1) Gravity et le syndrome de Kessler, "<http://sciences.blogs.liberation.fr/home/2013/10/gravity-et-le-syndrome-de-kessler.html>"
- 2) Hypervelocity impact damage "<http://www.gizmag.com/space-debris-kessler-syndrome-nasa-debrisat/24911/>"
- 3) United Nations, 2010, "Space Debris Mitigation Guidelines of the Committee on the Peaceful Uses of Outer Space", Space debris mitigation guidelines, pp. 2~4
- 4) Chelsea Katan, 2012, "NASA's Next Solar Sail: Lessons from NanoSail-D2"
- 5) Mr. Hank Heidt, Prof. Jordi Puig-Suari, Prof. Augustus S. Moore, Prof. Shinichi Nakasuka, Prof. Robert J. Twiggs, "CubeSat: A new Generation of Picosatellite for Education and Industry Low-Cost Space Experimentation", SSC00-V-5
- 6) Jeremy shafer origami "<https://www.youtube.com/user/jeremyshaferorigami>"
- 7) Jesse Hiemstra, 2014, "Mechanical Design and Development of a Modular Drag Sail for the CanX-7 Nanosatellite Mission", Analysis of the Deployment Mechanism, pp. 65~85
- 8) Yi Yang, Liyang Xie, Shaoze Yan, Jianing Wu, 2011, "Failure Analysis of Deployment Mechanism of a Satellite Solar Array", IEEE, 2011 9th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety (ICRMS)
- 9) "2011 Nonelectronic Parts Reliability Data", 2011, Quanterion Solution Incorporated