

論文

DOI:10.5139/JKSAS.2010.38.4.321

나사잭 메커니즘을 이용한 비폭발식 분리장치

박현준*, 이민수*, 조재욱*, 김병규**

Non-explosive separation device using screw jack mechanism

Hyunjun Park*, Minsu Lee*, Jaewook Jo* and Byungkyu Kim**

ABSTRACT

The non-explosive release device using jack mechanism is designed and fabricated for the small satellite. As a triggering actuator for the release device, a piezo rotary motor with torque of more than 1.7 kgf·cm is employed to guarantee stable activation. For performance tests of separation device, we conducted release time test, preload test and shock test. The device was operated within 1.172sec and activated stably under load of 45kgf. Maximum shock was measured as 18G that is much less than the pyro-separation device produces. We confirmed the possibility as a satellite separation device through above presented tests.

초 록

본 논문에서는 나사잭의 메커니즘을 이용한 인공위성의 비폭발식 분리장치를 설계 및 제작하였다. 분리장치의 구동기로는 정격토크가 1.7kgf·cm의 성능을 가진 회전형 피에조모터를 사용하여 분리장치의 안정적인 작동이 이뤄지도록 하였다. 또한 인공위성의 분리장치로의 성능을 검증하기 위하여 반응속도 실험, 준정적 하중실험, 충격실험을 수행하였다. 실험을 수행한 결과, 반응속도는 약 1.172초로 측정되었고, 45kgf의 하중에서도 안정적으로 견딜 수 있음을 확인하였다. 최대 충격 가속도는 18G가 측정되었는데 이것은 폭발식 분리장치에 비해 매우 작은 값이다. 우리는 이러한 실험을 통하여 제안한 분리장치의 신뢰성을 확인하였으며, 인공위성 분리장치로서의 가능성을 제시하였다.

Key Words : Pyro separation device(폭발식 분리장치), Non-explosive separation device(비폭발식 분리장치), Screw jack(나사잭), Leadscrew(리드 스크류)

기 호

n : 리드스크류의 회전수
 p : 리드스크류의 피치
 l : 분리 전까지 너트부가 이동한 거리
 t : 분리장치의 반응시간
 F_s : 스프링 힘(spring force)

F_p : 사전하중(preload)
 γ : 강구(ball bearing)와 분리부(release cap)가 맞대고 있는 빗면의 각도
 Q : 리드스크류에 작용하는 수직력
 ω : 커넥트가 수평면과 이루는 각도
 d : 리드스크류의 유효 지름
 μ : 마찰계수(friction coefficient)
 α : 리드스크류 나사산의 각도
 β : 리드각(lead angle)

† 2009년 12월 23일 접수 ~ 2010년 2월 18일 심사완료

* 정회원, 한국항공대학교 기계공학과 대학원

** 정회원, 한국항공대학교 기계공학과
 교신저자, E-mail : bkim@kau.ac.kr
 경기도 고양시 덕양구 화전동 200-1

I. 서론

위성은 성공적으로 정상궤도에 올라가기까지 여러 번의 분리과정을 겪게 된다. 대표적으로 추진체의 단 분리, 위성을 덮고 있는 페어링(fairing)의 분리, 발사체와 위성의 분리와 태양전지판 전개를 위한 분리 등이 있다. 이러한 분리과정의 실패는 곧 위성의 임무 실패와 직결되기 때문에, 계획된 시간에 정확한 분리가 이루어져야 한다.

지금까지 이러한 분리를 위해서 주로 폭발식(pyro) 분리장치를 사용해 왔다. 하지만 폭발식 분리장치는 취급 및 운용에 있어 여러 가지 단점을 가지고 있으며, 분리 시 발생하는 미세먼지는 각종 전자장비 고장의 원인이 된다. 또한 분리장치 작동 시 발생하는 큰 충격은, 모든 탑재체가 집약적으로 설계되어 있는 소형위성에게 치명적일 수밖에 없다[1].

이러한 이유로, 소형위성에 적용할 수 있는 비폭발식 분리장치에 대한 연구가 해외에서는 활발하게 진행되고 있고, 일부 기업에서는 이미 비폭발식 분리장치를 상용화하여 위성 분리장치로써 사용이 되고 있다[2-4]. 향후 5년 안에 위성무게 500kg이하로 분류되는 소형위성의 발사 계획을 살펴보면, 전체 위성의 30%를 차지하고 있으므로 [5] 비폭발식 분리장치가 가지고 있는 시장성은 매우 크다고 할 수 있다.

우리는 앞서 소형위성의 분리장치로써 스프링 타입의 형상기억합금을 이용한 분리장치를 제안 했었으며[6], 본 논문에서는 나사잭(screw jack)의 메커니즘을 이용한 새로운 분리메커니즘을

제안하였다. 나사잭은 회전운동과 직선운동과의 상호변환 기능을 지니고 있어서 작은 회전모멘트로 축방향의 큰 힘을 얻을 수 있다. 잭은 네 개의 링크(link)가 힌지로 연결이 되어 있고, 리드스크류로 한 쌍의 마주보는 두 힌지를 연결하여 다른 한 쌍의 힌지가 직선운동이 가능하게 구성이 되어있다.

이러한 메커니즘을 적용해서 큰 힘으로 분리장치를 안정적으로 체결시키고, 분리 시에는 작은 회전모멘트로 쉽게 작동시킬 수 있는 비폭발식 분리장치를 제안하였다. 또한 45kgf정도의 사전하중(preload)을 가지는 소형위성의 태양전지판에 사용되는 분리장치로써 가능성을 입증하기 위하여 반응속도 실험, 준정적 하중실험, 분리충격실험을 수행하였다.

II. 본론

2.1 분리장치의 구조 및 작동원리

잭(jack)이란, 무거운 것을 들어 올리거나 큰 힘을 발생시킬 때 쓰이는 기계장치이다. 보통 나사나 유압을 이용하여 직선운동의 큰 힘을 발생시킨다. 본 연구에서는 나사를 이용한 잭을 응용하여 체결력을 높여주고, 분리 시에는 작은 회전력으로 동작이 가능한 분리장치를 제안하였다.

제안한 분리장치의 구조는 Fig. 1에 나타내었으며 주요 명칭을 표기하였다. 고정부몸체(main body)는 모터하우징(motor housing)과 함께 위성 본체에 고정되며, 분리부(release cap)는 태양전지 판과 같은 분리체에 고정된다. 고정부몸체와 분리부는 강구(ball bearing)에 의해서 체결이 되어 있으며, 이 강구는 고정부몸체 안에 있는 나사잭에 의해서 움직임이 제어 된다. 나사잭 중심에 있는 리드스크류(lead screw)는 모터에 의해 구동이 되며, 회전 시 나사잭의 링크(upper nut, lower nut, connector, supporter)들이 리드스크류와 함께 회전이 일어나지 않도록 설계하였다. 나사잭의 리드스크류는 그 중심으로부터 위쪽으로는 왼나사와 아래쪽으로는 오른나사로 나누어져 있어, 리드스크류의 회전방향에 따라서 너트부들은 동시에 멀어지거나 가까워진다.

이렇게 구성된 분리장치의 작동원리는 Fig. 2와 같으며, 각 상태에 대한 설명은 다음과 같다.

- (1) 고정부몸체를 분리부 안에 끼우고, 리드스크류를 회전시켜 강구에 의해 고정부몸체와 분리부를 체결시킨다.

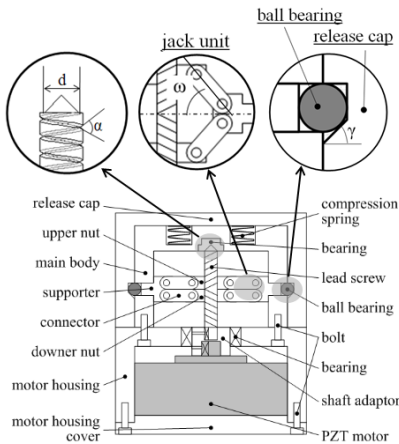


Fig. 1. Structure of separation device using screw jack

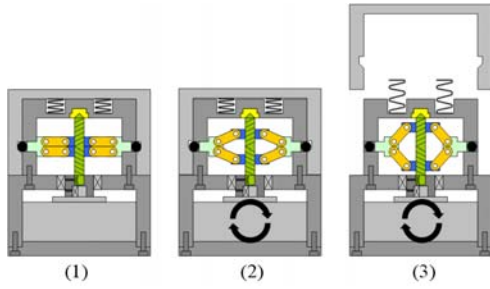


Fig. 2. Working principle

(2) 구동모터를 작동시켜서 연결된 리드스크류를 체결 시와 반대 방향으로 회전시켜 강구에 의한 체결을 풀어주면, 압축스프링의 복원력에 의해 분리부가 고정부품체로부터 분리가 시작된다.

(3) 분리부가 고정부품체로부터 완전히 분리된다.

이러한 메커니즘을 이용하여 분리장치의 체결 및 작동에 대한 과정을 매우 간소화 하였으며, 재사용이 가능한 분리장치를 고안하였다.

2.2 분리장치 설계 및 제작

제안된 분리장치를 Table 1과 같은 요구조건을 목표로 설계한 후, Fig. 3에서 보이는 바와 같이 제작/조립을 하였으며, 제작된 분리장치 내부에서 나사잭의 체결 시 상태와 분리 시 상태를 나타내었다. 조립된 분리장치의 중요 부품의 제원은 Table 2와 같으며, 분리장치의 크기는 최대 직경이 60mm이며, 모터를 포함한 길이는 83mm, 전체 무게는 약 1,026g 이다.

분리장치의 제원을 이용하여 분리장치의 반응 시간과 분리에 필요한 토크를 계산하였다.

리드스크류의 피치(p)와 분리가 일어날 때까지 너트부가 이동한 거리(l), 분리가 일어날 때까지 리드스크류의 회전수(n)는 다음의 식(1)과 같이 쓸 수 있다.

$$n = \frac{l}{p} \tag{1}$$

Table 1. Performance requirements

Response time	< 1sec
Preload	45kgf
Shock output	< 100G
Power consumption	< 20W
Reusable	Yes

Table 2. Separation device specification

Release part (stainless steel)	
Diameter(D_r)	60mm
Length(l_r)	40mm
Weight(g)	331g
Main body (stainless steel)	
Diameter(w_b)	49mm
Length(l_b)	40mm
Weight(g)	440.6g
Motor housing (aluminum)	
Diameter(w_m)	60mm
Length(l_m)	43mm
Weight(g)	163g
Jack (stainless steel)	
Max. distance between two nut	16mm
Max. supporter stroke	6mm
Weight(g)	26g
Piezo motor (PUMR40)	
Diameter	53mm
Length	19mm
Weight	91g
Rated torque	1.7kgf · cm
Max. RPM	200rpm
Rated voltage	120V

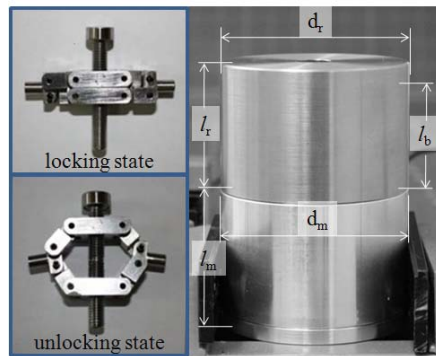


Fig. 3. Fabricated separation device

또한, 모터의 회전수(rpm)을 이용하면 분리가 일어날 때까지 걸리는 시간, 즉, 분리장치의 반응 시간(t)는 식(2)와 같이 구할 수 있다.

$$t = \frac{l}{rpm \times p} \tag{2}$$

이와 같이 분리장치에 사전하중과 부품 사이에 마찰과 같은 저항이 없다고 가정할 때, 분리 시 반응시간을 계산할 수 있다.

분리부는 분리체로부터 사전하중에 의한 분리

력을 받고 있으며, 이러한 사전하중이 작용하지 않을 경우에도 분리가 이루어 질 수 있도록 내부 압축스프링에 의한 분리력을 받고 있다. 이 분리력들은 강구와 분리부가 맞대고 있는 빗면에 의해 다음의 식(3)과 같이 쓸 수 있다.

$$F_1 = (F_s + F_p)\cos\gamma \tag{3}$$

이때 힘 F_1 에 의해 너트부가 리드스크류에 작용하는 수직력 Q 는 식(4)와 같이 된다.

$$Q = 2F_1 \times \tan\omega \tag{4}$$

책은 분리되기 직전에 너트부가 가장 멀리 떨어져 있으며, 리드스크류에 작용하는 수직력 또한 가장 큰 것을 알 수 있다. 이러한 수직력을 받을 때 나사를 돌리기 위한 모터의 토크는 식(5)과 같이 나타낼 수 있으며, 리드스크류와 너트부에 작용하는 마찰력 이외의 마찰력은 무시하였다.

$$T = d \times Q \times \frac{\left\{ \mu / \cos \frac{\alpha}{2} \right\} \times \cos\beta - \sin\beta}{\cos\beta + \left\{ \mu / \cos \frac{\alpha}{2} \right\} \times \sin\beta} \tag{5}$$

분리장치가 사전하중 없이 스프링에 의한 분리력만 작용하고 있을 때, 너트부의 위치에 따른 ω 의 값의 변화에 따라 분리 시 필요한 토크를 계산하여 Fig. 4에 나타내었다. ω 가 40°부근에서 서서히 증가하다가 60°를 지나면서 급격하게 증가함을 알 수가 있다. 나사책 분리장치는 ω 가 41.4°에서 분리가 이뤄지며 이때 필요한 토크 값은 0.418kgf·cm이다.

Fig. 5는 사전하중에 따른 제안된 분리장치가 분리 시 필요한 토크를 나타내었으며, 사전하중이 45kgf정도 작용한다고 가정하면, 분리에 필요

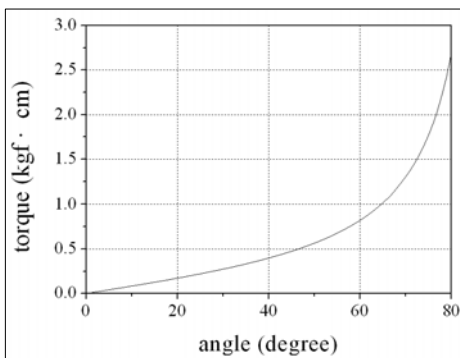


Fig. 4. Torque for separation according to connecting angle ($F_s = 0.8kgf, F_p = 0$)

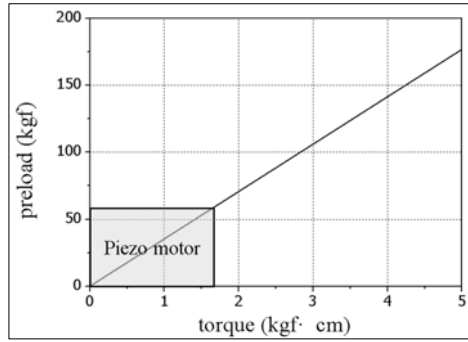


Fig. 5. Torque for separation according to preload

한 토크는 1.28kgf·cm임을 알 수 있다. 이러한 조건을 충분히 만족시키기 위하여 정격토크가 1.7kgf·cm 인 Piezoelectric Technology Co., Ltd[7]의 회전형 피에조모터인 PUMR40을 분리장치의 구동기로 사용하였다. 사용한 피에조모터는 정격전압 120V에서 최고 200rpm의 성능을 나타낸다.

2.3 준정적 하중실험

분리장치는 위성과 분리체의 체결을 유지하며, 임무수행 전까지 분리장치에 전달되는 하중을 견뎌야 한다. 그러므로 분리장치가 안정적으로 어느 정도의 하중을 견딜 수 있는지 알아보기 위하여 준정적 하중실험을 수행하였다. 실험은 Fig. 6과 같이 선형구동장치에 분리장치와 로드셀을 직렬로 연결한 후, 선형구동장치의 모터를 구동시켜서 분리장치의 고정부와 분리부를 당길 때, 로드셀에 발생하는 하중을 측정하였다. 분리장치에 가하는 하중은 단계별로 5초간의 지연시간을 두고 최대 45kgf까지 증가시켜주었으며, 측정된 결과는 Fig. 7에 나타내었다. 하중시험 결과 분리장치에 가한 하중범위에서 분리장치의 내구성을 확인하였으며, 하중실험 이후에도 분리장치가 아무런 이상 없이 작동되는 것을 확인하였다.

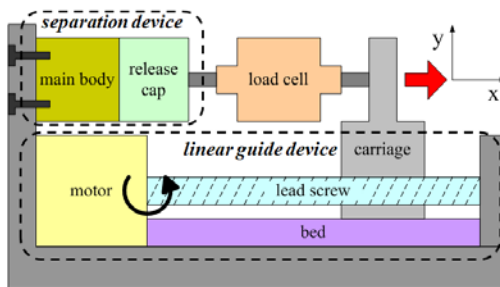


Fig. 6. Load test configuration

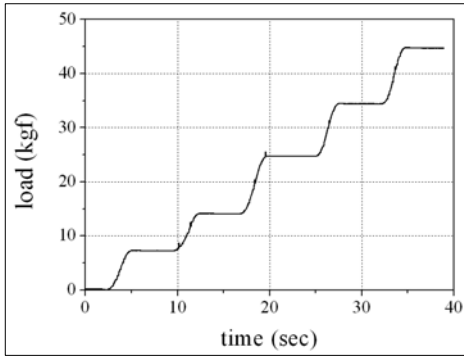


Fig. 7. Quasi-static load test result

또한 하중 시험 이후, 분리장치에 45kgf의 사전하중(preload)이 가해진 상태에서도 분리가 이뤄지는 것을 확인하였다.

2.4 분리충격실험

분리장치의 분리 시 충격량을 알아보기 위해서, 참고문헌 [8]을 참고하여 Fig. 8과 같이 넓이 0.5×0.5m, 두께 6mm의 사각 알루미늄패널에 번지케이블을 이용하여 강제운동(rigid body motion)이 가능하도록 한 상태에서 분리충격실험을 수행하였다. 패널 중심에 분리장치를 설치하고 패널중심으로부터 60mm 떨어진 곳에 설치한 가속도계(Bruel & Kjaer. 4514-B-001)에서 나오는 충격량을 National Instruments Corp.의 DAQ board(USB-9233)를 이용하여 PC에 설치된 Labview를 통해서 분석하였다.

측정결과는 Fig. 9와 같이, 사전하중 45kgf를 가한 상태에서 분리장치가 발생시키는 충격량은

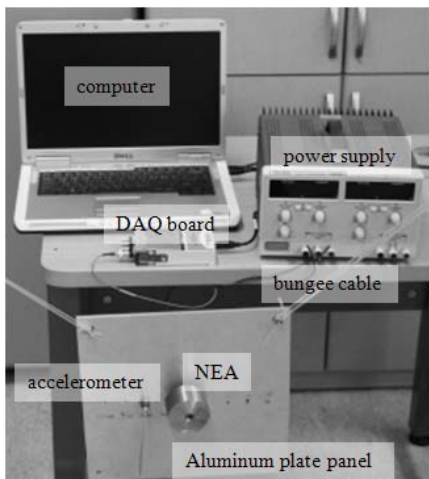


Fig. 8. Shock test configuration

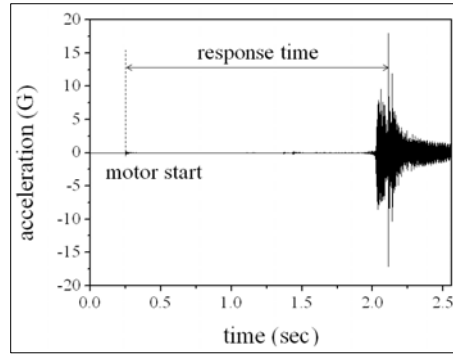


Fig. 9. Shock test result

약 18G로 측정되었다. 일반적으로 폭발식 분리장치가 1000G이상의 큰 충격을 발생시키고, 비폭발식 분리장치의 충격요구수준이 500G이하인 점을 고려할 때, 고안된 분리장치의 충격 발생량이 매우 작다는 것을 알 수 있다.

또한, 분리충격실험을 통해서 분리장치 구동시 구동기의 작동으로 발생하는 충격의 발생시점부터 분리 시 발생하는 최대 충격량 사이의 시간을 분석하면 분리장치의 반응시간도 측정이 가능함을 알 수 있었다.

2.5 반응시간 실험

분리장치에 사전하중 없이 내부의 스프링에 의한 분리력만을 주고 5회의 반복실험을 통해 반응시간을 측정하였다. 분리시간의 측정은 구동모터에 전압이 인가되는 시점부터 분리부가 고정부에서 완전히 분리될 때까지의 시간이며, 초당 1000프레임의 고속카메라(MIKROTRON, EoSens)로 분리장치의 동작을 촬영한 후, 실험영상을 판독하는 방법으로 수행하였다. 총 5회의 반복실험을 통해 최소 1.146초에서 최대 1.199초까지 측정

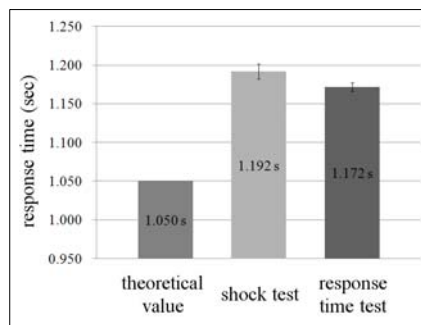


Fig. 10. Response time of device according to measurement method

되었으며, 평균 1.172초의 반응시간을 보여주었다.

영상관독을 통해서 얻은 반응시간과 앞서 언급한 식(2)에 피에조모터의 최대회전수를 적용하여 계산한 반응시간 및 충격실험을 통해 얻은 반응시간을 Fig. 10에 함께 비교해 보았다. 이론식을 통한 반응시간은 1.050초, 사전하중이 없는 상태에서의 충격실험을 통한 반응시간은 평균 1.192초로, 영상관독을 통한 반응시간과 백밀리초 내외의 작은 오차만 발생함을 알 수 있다. 특히, 이론적인 계산을 통한 반응시간은 분리장치 내부의 스프링에 의한 하중과 분리장치를 이루는 각 부품들 사이의 마찰과 같은 저항을 고려하지 않은 값이므로, 제안된 분리장치는 비교적 양호한 반복성능을 보여줄 수 있다.

III. 결 론

본 논문은 상용 피에조 모터와 나사잭 메커니즘을 이용하여 저진동, 저충격 비폭발식 위성용 분리장치를 제안, 설계하였다. 또한 위성 분리장치로써 사용되기 위해 준정적 하중실험과 분리충격실험, 분리 시 반응시간실험을 수행하였다.

준정적하중실험을 통해서 사전하중이 45kgf인 상태에서 분리동작을 수행하는 것을 확인함으로써, 장치의 견고함을 검증하였다.

분리충격실험으로 제안한 분리장치의 분리 시 충격량을 측정해본 결과, 충격원의 중심으로부터 60mm 떨어진 곳에서 약 18G의 작은 충격이 발생하는 것을 검증하였다.

영상관독을 통한 반응시간 실험을 통해 분리장치는 약 1.172초의 시간 내에 분리가 완료됨을 알 수 있었다. 이와 함께 이론식으로 구한 반응시간과 충격실험으로 구한 반응시간도 함께 비교해 보았을 때, 제안된 분리장치는 백밀리초 내외의 반복오차만이 나타나는 것을 알 수 있었다. 비록 목표로 한 분리시간보다 조금 더 소요되지만, 추가적으로 키 역할을 하는 강구의 크기와 잭 나사의 피치의 크기를 조절하거나, 속도가 빠른 구동기로 대체하면 해결할 수 있을 것이다.

결과적으로 제안된 위성용 비폭발식 저충격 분리장치는 검증된 구조와 구동기를 이용하여 반

복성능이 우수하고, 신뢰도를 높였으므로, 기존의 분리장치가 가지고 있는 문제점을 해결할 수 있을 것으로 기대된다.

향후, 탑재체의 사전하중에 부합하는 구동기를 채택하여 분리장치의 성능을 다양화할 예정이며, 우주환경 및 발사환경 실험인 열진공실험, 진동 실험 등을 수행하여 분리장치의 신뢰도를 더욱 높이는 연구를 수행할 것이다.

후 기

본 연구개발은 교육과학기술부의 특정연구개발 사업의 우주원천기술개발사업(과제번호 : 2009 - 0082428) 지원에 의해 수행된 결과의 일부이며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Andrew Peffer, "Development and Transition of Low-Shock Spacecraft Devices for Small Satellite", 14th Annual/USU Conference on Small Satellites
- 2) www.tiniaerospace.com
- 3) www.spacedev.com
- 4) Kei Miyamoto, Kyochi Ui, Naoki Miyashita, Masafumi Iai, Takeshi Usuda, Saburo Matunaga, "Tokyo tech separation demonstraion tsd as m-v roket sub-payload for nanosatellite separation mechanism", IAC-05-B.6.A
- 5) 장영근, 이병훈, "소형인공위성 시장의 현황과 전망", 한국항공우주학회지, 춘계학술발표회 논문집, 2008 pp. 1101~1105
- 6) 박현준, 탁원준, 한범구, 광동기, 황재혁, 김병규, "소형 위성용 비 폭발식 저 충격 분리장치", 한국항공우주학회지 2009, pp. 457~463.
- 7) www.piezo-tech.com/
- 8) Jens Müller, Christoph Zauner, "Low shock release unit-easy resettable and 100% reusable", Proceedings of the 10th European Space Mechanisms and Tribology Symposium, 24~26 September 2003.