

인공위성용 비폭발식 분리장치 기술동향

임재혁*, 김경원**, 김선원***, 이창호****, 이주훈*****, 황도순*****

Non-Explosive Actuator Technology for Satellite Applications

Jae Hyuk Lim*, Kyung-Won Kim**, Sun-Won Kim***, Chang-Ho Lee****, Ju-Hun Rhee*****, Do-Soon Hwang*****

ABSTRACT

Successful separation of satellites from launch vehicles and release its appendages such as solar arrays and antennas are one of the most important tasks for mission accomplishment during in-orbit maneuver. Especially, specific release devices called NEA(Non-Explosive Actuator) have been widely adopted to perform safe separation and release due to its outstanding performance of low functional shock (below 500g), no contamination and easy handing as opposed to the pyroshock device. In the paper, various kinds of NEA and its history of development are reviewed along with a summary on the domestic research trend.

초 록

위성이 궤도에서 성공적인 임무수행을 하기 위해서는 위성시스템에 손상이 없도록 발사체로부터 분리되어야 하며 태양전지판과 안테나와 같은 부속장치의 전개를 성공적으로 수행하여야 한다. 이를 위해 분리장치가 사용되며, 특히 분리 시의 충격(500g이하) 및 오염이 적은 비폭발식 분리장치가 널리 쓰이고 있다. 본 논문에서는 우주산업에서 사용되고 있는 비폭발식 분리장치의 종류 및 기술현황에 대해 정리하였으며, 국내연구동향에 대해 살펴보았다.

Key Words : Non-Explosive Actuator(비폭발식 분리장치), Pyroshock Device(폭발식 분리장치), Separation Shock(분리충격), Separation Time(분리시간), Shape Memory Alloy(형상기억합금)

* 임재혁, 한국항공우주연구원 위성연구본부 위성기술실 위성구조팀
ljh77@kari.re.kr

** 김경원, 한국항공우주연구원 위성연구본부 위성기술실 위성구조팀
kwkim74@kari.re.kr

*** 김선원, 한국항공우주연구원 위성연구본부 위성기술실 위성구조팀
sunwkim@kari.re.kr

**** 이창호, 한국항공우주연구원 위성연구본부 위성기술실 위성구조팀
chlee@kari.re.kr

***** 이주훈, 한국항공우주연구원 위성연구본부 위성기술실 위성구조팀
jrhee@kari.re.kr

***** 황도순, 한국항공우주연구원 위성연구본부 위성기술실 위성구조팀
dshwang@kari.re.kr

1. 서론

위성시스템이 궤도상에서 성공적으로 임무수행하기 위해서는 발사체로부터 완전히 분리되어야 하며, 태양전지판과 안테나와 같은 부속장치를 손상이 없도록 전개하여야 한다. 이 때 사용되는 분리장치는 분리 및 전개 시 위성시스템에 전달되는 충격 및 오염을 최소화해야 한다. 위성개발 초창기에는 작동개념이 간단하고, 신속한 분리가 가능한 폭발식 분리장치(pyroshock devices)가 널리 사용되었다. 그러나, 폭발식 분리장치는 화약과 같은 위험물질로 구성되어 취급 및 보관에 매우 주의가 필요하고 우주왕복선과 같은 유인우주선 임무에는 우주인에게 끼치는 영향까지 고려해야 하는 등 임무수행에 그 어려움이 더했다. 게다가 분리 시의 충격량이 5000g 이상으로 매우 높고, 이 때 생긴 화염으로 인해 전자장비의 파손 및 탑재장비 광학렌즈의 오염을 끼치는 등, 직접적인 임무실패의 원인이 되기도 하였다. 1985년에 발표된 보고서에 따르면, 1963년부터 1984년까지 수행된 600회의 위성발사 중에 83회가 분리충격에 의한 문제가 있었으며, 그 중에 50% 가량이 직접적인 임무실패를 야기하였다[1]. 이로 인해 우주분야와 관련된 연구소, 대학, 산업체 등에서 분리충격이 적고, 취급이 용이하며, 재활용성이 있는 비폭발식 분리장치의 개발을 시도했다. 대표적인 성과물이 electro-mechanical separation nut/spool, paraffin actuator, thermal knife, SMA(Shape Memory Alloy) devices이다[2]. 그중에 SMA device는 니켈과 티타늄의 합금인 니티놀(nitinol)이 갖는 온도에 따른 형상기억특성 및 초탄성을 이용해 비폭발식 분리장치를 개발한 것으로 개념이 간단하면서 적용이 용이해 우주분야에 다양한 응용이 이루어지고 있다. 표 1에서와 같이 이러한 비폭발식 분리장치를 상품화에 성공한 기업들이 나타나기 시작하였고 다양한 임무에 적용되어 우주산업에서 대중화되기 시작하였다.

최근 연구동향을 살펴보면, 비폭발식 분리장치는 나노셋(nanosat), 피코셋(picosat)과 같은 소형위성 임무의 증가로 인해 주목을 받고 있다. 그 이유는 소형 위성들은 무게가 가볍고 탑재공간이 매우 작기 때문에

충격감쇠가 매우 어렵기 때문이다. 이에 맞춰 분리장치를 소형화시키는 일 또한 중요한 이슈로 부각되고 있다. 다른 한편으로는 비폭발식 분리장치는 폭발식 분리장치에 비해 체결력이 낮아 높은 체결력과 짧은 분리시간을 요구하는 부스터로켓 분리나 위성체의 발사체로부터의 분리 등의 임무에는 소형위성에만 제한적으로만 사용되므로, 이러한 한계를 극복하기 위한 노력이 있다[2-3]. 본 논문의 2장에서 비폭발식 전개장치의 개발역사 및 현황에 대해 기술하고 국내 연구동향에 대해서도 살펴보기로 하겠다. 3장에서는 요약하도록 하겠다.

표 1. 비폭발식 분리장치 개발회사 및 연구소

국가/주/도시	회사
미국/캘리포니아	G&H Technology, Inc.
미국/캘리포니아	TiNi Aerospace, Inc.
미국/콜로라도/볼더	Starsys Research Corp.(SRC)
미국/캘리포니아/LA	NEA Electronics, Inc.
미국/콜로라도/덴버	Lockheed Martin Astronautics-Denver(LMA)
미국/캘리포니아	Astro Aerospace, Co.
미국/캘리포니아	Lockheed Martin Missile and Space Co.(LMMSC)
미국/워싱턴/시애틀	Boeing Defense and Space Group (BDGS)
미국/캘리포니아	HSTC(Hi-Shear Technology Co.)
네덜란드/레이덴	Dutch Space

2. 현황

2.1 개발역사

SMA를 이용한 비폭발식 분리장치의 본격적인 개발은 1993년 미국공군연구소(AFRL, Air Force Research Laboratory)에 지원에 의해 LMA사가 수행한 것이 그 대표적이다. 이 때 비폭발식 분리장치의 충격에 관한 성능요구조건이 처음 개념적으로 명시되었다[2-3]. 성능요구조건을 살펴보면 아래와 같다.

1) 폭발식 분리장치와의 성능 동등성

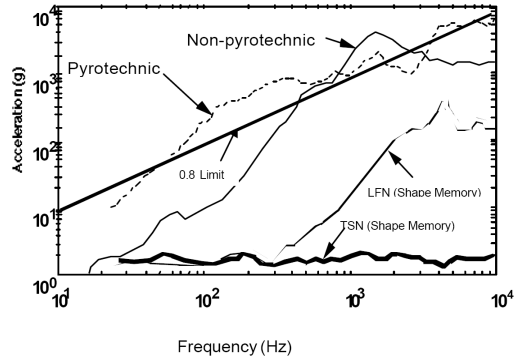
- 분리시간(20~50ms)
- 장치의 크기 및 무게(장착성을 고려해 충분히 작고 가벼울 것)
- pyro pulse(전류 5amps 이하에서 작동성)
- 기타(작동온도범위, 우주용소재 사용 등)

2) 저충격(500g 이하, 전 주파수 대역에서 폭발식 분리장치의 80%이하 분리충격을 보유할 것)

3) 취급 및 보관 안전성

4) 재사용성(resettable)

이 연구를 통해 최초로 개발된 분리장치는 SMA를 사용한 LFN(Low Force Nut)과 TSN(Two Stage Nut)이다. 이 장치는 미국공군연구소에서 수행한 우주환경시험과 1999년에 Mightysat I 위성에 발사 시 사용되어 그 성능을 검증되었다. 그러나, LFN과 TSN은 폭발식 분리장치에서 사용되는 전류요구량(pyro pulse, 5amps이하)보다 과도한 전류(100amps 이상)를 작동기 구동에 필요로 하는 문제 때문에 상용화되지는 못하였다[3]. 그러나, 그림 1에 나타난 것처럼 폭발식 분리장치와 SMA가 채용되지 않는 기존의 linkwire 구동방식의 비폭발식 분리장치에 비해 현저하게 낮은 분리충격량을 보여줌에 따라 SMA를 이용한 비폭발식 분리장치의 가능성을 보여줬다. 이후 비폭발식 분리장치에 대한 연구는 LMA사와 SRC사가 공동으로 진행하였으며, LFN의 개량형인 QWKNUT이 개발되었다. QWKNUT은 낮은 분리충격량, 짧은 전개시간, 재사용이 가능할 뿐만 아니라 아울러 3.5amps 전류로 작동이 가능함으로써 pyro pulse조건을 만족하고 있다. 또한 그 자리에서 간단한 조작을 통해 재사용이 가능하다(표 2 참조). 이외에도 미국공군연구소 지원에 의해 NEA Electronics사가 기존의 linkwire 구동방식을 개량한 fuselink 구동방식의 저충격분리장치 9101를 개발하는 데에 성공하였다. 이 장치는 재사용을 위해서 분리볼트의 교체가 필요하다. 이렇게 개발된 QWKNUT(그림 2 참조) 및 9101(그림 3 참조)은 성능개선을 거쳐 QWKNUT 및 9101 series로 판매되고 있다. 대표적인 비폭발식 분리장치를 표 3에 기술하였다.

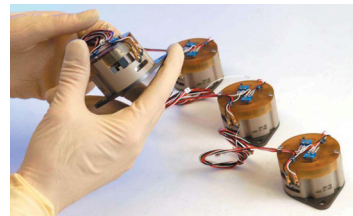


자료 : Peter, A., 2000, "Development and Transition of Low-Shock Spacecraft Release Devices for small satellites", 14th Annual/USU Conference on Small Satellites, SSC00-XI-5

그림 1. 분리장치의 분리충격량 비교

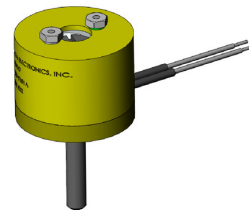
표 2. 분리장치의 특성(1/4inch 볼트 사용 시)

	Pyro	LFN	TSN	9101	QWKNUT
무게(gram)	3990	1300	2500	1134	1360
충격량(g)	7,200	400	<150	<50	<100
무게(gram)	120	250	300	80	200
전개시간(ms)	15	62	22	25	35
재사용성(resettable)	No	Yes	Yes	Yes	Yes
Pyro pulse	Y	N	N	Y	Y



자료 : <http://starsys.spacedev.com/starsysproducts/sepnuts/product.asp?ID=qwknut3000>

그림 2. QWKNUT 3000

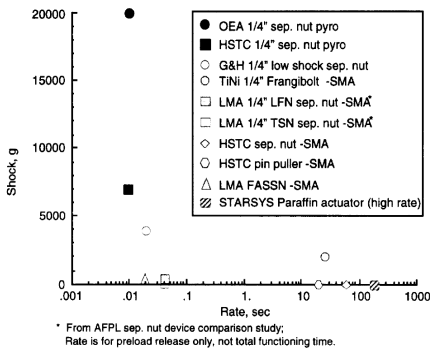


자료 : <http://www.neaelectronics.net/cgi-bin/shopper.cgi?search=action&category=0001&keywords=all>

그림 3. SSD9101A

표 3. 비폭발식 분리장치의 예

품 명(제조사)	형 상	성 능
Mechanical Spool and Separation Nut : 1/4" Separation Nut (G&H Technology Inc.)		<ul style="list-style-type: none"> ▪ 체결력 : 9,000kgf이하 ▪ 분리시간 : 25msec 이하 ▪ 충격량 : 2,000g 이하 ▪ 재사용성 : 3회 이하 ▪ 전류입력 : 5 amps ▪ 구동방식 : linkwire trigger
High Output Paraffin Actuators: EH-35055 (Starsys Research Corp)		<ul style="list-style-type: none"> ▪ 체결력 : 226kgf이하 ▪ 분리시간 : 360sec이하 ▪ 충격량 : 100g 이하 ▪ 재사용성 : - ▪ 전류입력 : - ▪ 구동방식 : Paraffin melting
Frangibolt® Actuator FC6-32-7SR2: SMA (TiNi Aerospace)	 <p style="font-size: small;">Rev. 5/02 Dimensions shown in inches</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 체결력 : 2,200 kgf 이하 ▪ 분리시간 : 60msec 이하 ▪ 충격량 : 2,000g이하 ▪ 재사용성 : 60회 이하 ▪ 전류입력 : - ▪ 구동방식 : SMA Recovery
FASSN 35K (Starsys Research Corp)		<ul style="list-style-type: none"> ▪ 체결력 : 15,560 kgf이하 ▪ 분리시간 : 40msec 이하 ▪ 충격량 : 400g 이하 ▪ 재사용성 : 100회 이하 ▪ 전류입력 : 3.3~5.5 Amps ▪ 구동방식 : fuselink trigger
QWK NUT 3K: SMA (Starsys Research Corp)		<ul style="list-style-type: none"> ▪ 체결력 : 1,334 kgf이하 ▪ 분리시간 : 35msec 이하 ▪ 충격량 : 450g 이하 ▪ 재사용성 : 100회 이하 ▪ 전류입력 : 3.3~5.5 amps ▪ 구동방식 : SMA trigger
SSD9101A: SMA (NEA Electronics)		<ul style="list-style-type: none"> ▪ 체결력 : 2,800 kgf이하 ▪ 분리시간 : 25msec 이하 ▪ 충격량 : 50g 이하 ▪ 재사용성 : - ▪ 전류입력 : 4.0 Amps ▪ 구동방식 : SMA trigger



자료 : Lucy, M.H., Hardy, R.C., Kist, E.H., Watson, J.J. and Wise, S.A., 1996, "Report on alternative devices to pyrotechnics on spacecraft," NASA Langley Research Center

그림 4. 폭발식/비폭발식 분리장치의 분리충격 및 분리시간의 비교

표 4. 비폭발식 분리장치의 작동환경

	MODEL 9421-600(G&H)	QWK NUT 3K (Starsys Research Corp.)
무게	186grams	200grams
작동방식	Linkwire	SMA trigger
허용환경온도	-100°C~+130°C	-45°C to +65°C
랜덤진동	40.9Grms이하	-
허용외부충격량	10,000G이하	-
재사용횟수	3회이하	100회이하

2.2 성능에 따른 분류

분리장치의 주요한 성능은 크게 세 가지 요소로 구분할 수 있는데, (1) 분리충격량(separation shock or source shock) (2) 분리시간(separation time) (3) 최대체결력(tensile load)이 그것이다. 1996년에 작성된 분리장치의 종류에 따른 분리시간과 분리충격량을 그림 4에 나타내었다[2]. OEA사의 폭발식 분리장치와 LMA, HSTC, STARSYS, G&H사의 비폭발식 분리장치를 비교해보면, 폭발식 분리장치는 20msec의 짧은 작동시간에 거동하지만 5,000g이상의 높은 분리충격량을 보유하고 있다. 비폭발식 분리장치는 이에 비해 전반적으로 낮은 분리충격량을 갖지만, 분리시간이 20msec~200sec으로 다양하다. 제품별로 살펴보면, G&H사의 separation nut의 분리충격과

분리시간이 각각 4000g와 20msec이며, STARSYS사의 paraffin actuator는 100g와 200sec이다. 이 중에 200g와 20msec의 성능을 갖는 FASSN(Fast Acting Shockless Separation Nut, 1/4inch bolt 기준으로 4500~5900kgf의 체결력을 보유)이 2.1절에서 언급한 성능요구조건을 잘 만족하고 있다(표 3, 그림 5 참조).

2.3 검증시험

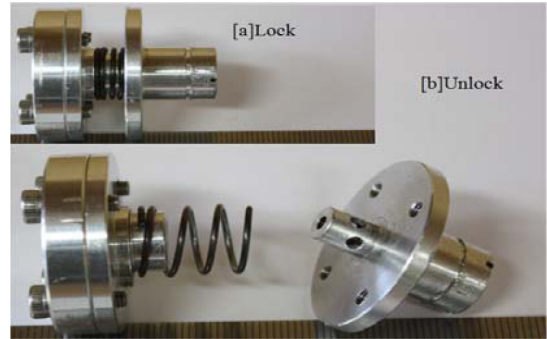
이와 같이 2.1절에서 언급한 성능요구조건을 만족하는 분리장치는 우주환경에서 정상작동여부를 판가름하기 위한 검증시험을 거치게 된다. 검증시험의 요구조건은 발사체 요구조건 및 제품의 무게, 재료특성 등을 모두 고려해서 결정하며, G&H사의 비폭발식 분리장치 9421-600의 경우 표4와 같은 환경에서 정상적으로 작동이 가능하다. 분리방식이 다른 QWK NUT 3K와 같은 SMA를 사용한 제품들은 SMA의 특성온도(상변태온도 : 75°C)이하의 환경온도를 요구한다. 재사용은 약 100회까지 가능하다. 검증시험으로는 정적가진시험(sine burst), 정현과가진시험(sine vibration), 랜덤진동시험(random vibration), 열진공시험(thermal vacuum)등이 수행되며, 또한 실제 위성에 장착되어 임무를 수행함으로써 궤도상에서의 작동성을 시험한다. 1993년 미국공군연구소가 LFN장치의 검증을 위해 MightySat I 위성에 탑재하여 수행한 것이 대표적인 예라 하겠다[3]. 모든 상용제품들은 다양한 위성발사에 통해 검증된 flight heritage를 보유하고 있다.

2.4 국내 연구동향

인공위성용 비폭발식 분리장치는 외국에서는 이미 상품화되어 다양한 임무에 활용되고 있다. 관련 특허도 표 5와 같이 17건 정도 등록된 상태이다. 우리나라에서는 대학을 중심으로 비폭발식 분리장치개발이 진행되고 있는 상태이며, 아직 등록된 특허는 없다. 주요 연구분야는 비폭발식 분리장치의 소재인 SMA가 갖는 재료의 특성(형상기억특성, 초탄성)을 모사하기 위한 구성방정식 구현[4-5] 및 새로운 복합재료로의 응용[6-12]이다.

표 5. 해외특허 현황

년도	특허내용
1975	"Internal Ejector Mechanism", Thaddeus Jakubowski, Jr., No. 3887150
1982	"Mechanical and Electrical Coupling Device for Charges Particularly Military charges", Jean P. Rouget, No. 4350074
1992	"Non-explosive Separation Device", Alfred D. Johnson, No. 5119555
1992	"Fastening Apparatus having Shape Memory Alloy Actuator", McKinnis Darin N., No. 5160233
1993	"Non-pyrotechnic Release System", Thomas E. McCloskey, No. 5192147
1993	"Method for Securing Together and Non-explosive Separating Multiple Components", Alfred D. Johnson, No. 5245738
1994	"Shape Memory Metal Actuator and Cable Cutter", Dominick A. DeAngelis, No. 5344506
1994	"Shape Memory Metal Actuated Separation Device", William H Woebkenberg, Jr., No. 5312152
1996	"Tie-down and Release Mechanism for Spacecraft", Geoffrey W. Marks, No. 5520476
1998	"Release Device for Retaining Pin", Michael D. Bokaie, No. 5771742
1998	"Separation Device Using a Shape Memory Alloy Retainer", Bradley K. Lortz, No. 5722709
2002	"Reduced Shock Separation Fastener", Jerry E. O'Quinn, No. 6352397
2004	"Spool assembly with integrated link-wire and electrical terminals for non-explosive actuators used in electro-mechanical structural separation devices", Andrew Holt, No. 6747541
2005	"High Load Capability Non-explosive Cable Release Mechanism", Jui-Yu Wu, No. 6896305
2005	"Releasable Locking Mechanism", Rafiq Ahmed, No. 6939073
2006	"Non-pyrolytically Actuated Reduced shock Separation Fastener", Andrew Tuszynski, No. 7001127
2008	"Non-explosive Releasable Coupling Device", A. David Johnson, No. 7422403



자료 : 박현준, 탁원준, 한범구, 곽동기, 황재혁, 김병규, 2009, "소형 위성용 비폭발식 저충격 분리장치", 한국항공우주학회지, 제37권, 제5호, pp.457-463

그림 5. 비폭발식 분리장치

비폭발식 분리장치에 대한 연구는 KAIST의 기계공학과(이정주교수)에서 SMA의 양방향 형상기억효과를 고려한 작동력 측정[13-16], 서울대학교 기계항공공학부(조맹효교수)에서 양방향 형상기억효과를 고려한 작동기의 거동 해석[17-18], 한국항공대학교의 항공우주 및 기계공학부(김병규교수)에서 소형위성용 비폭발식 분리장치개발[19-20]등의 주제로 진행되어왔다. 앞의 두 연구는 주로 SMA 재료특성의 측정 및 해석을 위한 이론적인 연구이며, 한국항공대에서 실시한 연구는 실제 비폭발식 분리장치 하드웨어를 개발하는 데에 있다. 그림 5와 같이 개발된 장치의 성능에 대해 살펴보면 분리시간 1.37sec, 소비전류 3.1ampere, 분리충격 26.7g, 최대체결력 44kgf으로 분리시간을 제외하고는 2.1장에서 언급한 성능요구 조건을 만족한다. 이를 우주산업에 사용이 가능한 FM(Flight Model)수준으로 끌어올리기 위해서는 성능 시험과 검증시험을 통해 성능개선에 대한 연구가 더 필요한 실정이다.

3. 요약

본 논문에서는 우주산업에 활용도가 높은 비폭발식 분리장치의 종류 및 개발동향에 대하여 소개하고, 이와 관련된 국내의 연구동향에 대해 살펴보았다. 앞서 언급되었듯이, 비폭발식 분리장치는 낮은 분리충격, 재사용성, 취급의 편의성 등의 장점으로 인해 앞으로도

우주관련산업에 지속적으로 사용될 것으로 여겨진다. 미국의 경우 이러한 장치의 개발을 위해 미국공군 연구소와 같은 국가기관이 전폭적으로 민간기업인 Lockheed Martin Astronautics, Starsys Research Corp., NEA Electronics사를 지원하였으며, 개발 이후 검증시험을 주도하는 등 개발에 적극적인 역할을 하였다. 우리나라는 50여년의 긴 역사를 가진 미국, 러시아 등의 우주선진국을 단 20여년에 따라잡는 눈부신 성장을 통해 명실상부한 세계10위권의 위성 개발기술을 보유하게 되었다. 그러나, 비폭발식 분리 장치와 같은 위성개발에 사용되는 다양한 소재와 부품에 대한 자체개발은 매우 부족한 실정이다. 게다가 현재 이러한 부품들은 매우 고가이면서도 수출승인이 필요한 품목이라 국내도입 시 외국의 허가가 있어야 하며, 이로 인한 위성발사 지연과 같은 기술종속은 피할 수 없는 실정이다. 이와 같은 문제의 해결을 위해서는 앞선 선진국의 사례와 같이 국가차원의 적극적인 지원과 투자 및 민간기업의 참여를 유도해 주요한 소재 및 부품의 국산화를 통한 기술확보를 하는 것이 우주산업 발전에 필요하다.

참고문헌

1. Moening, C.J., 1985, "Pyroshock flight failures," *Proceedings of 31st Annual Technical Meeting of the Institute of Environmental Sciences*
2. Lucy, M.H., Hardy, R.C., Kist, E.H., Watson, J.J. and Wise, S.A., 1996, "Report on alternative devices to pyrotechnics on spacecraft," NASA Langley Research Center
3. Peffer, A., 2000, "Development and transition of low-shock spacecraft release devices for small satellites," *SSC00-XI-5, 14th Annual/USU Conference on Small Satellites*
4. Jung, J.-H., Heo, J.-S. and Lee, J.-J., 2006, "Modeling and numerical simulation of the pseudoelastic behavior of shape memory alloy circular rods under tension-torsion combined loading," *Smart Materials and Structures*, Vol. 15, pp. 1651-1660.
5. Jung, J.-H., Heo, J.-S. and Lee, J.-J., 2007, "Implementation strategy for the dual transformation region in the Brinson SMA constitutive model," *Smart Materials and Structures*, Vol. 16, pp. N1-N5
6. 김철, 이성환, 조맹효, 2003, "3차원 거동이 고려된 형상 기억합금 작동기 부착 복합재 셀의 변형해석", 한국항공우주학회지, 제31권, 제4호, pp. 44-52.
7. Choi, S. and Lee, J.-J., 1998, "The shape control of a composite beam with embedded shape memory alloy wire actuators," *Smart Materials and Structures*, Vol.7, pp.759-770
8. Lee, H.-J., Lee, J.-J. and Heo, J.-S., 1999, "A simulation study of the thermal buckling behavior of laminated composite shells with embedded shape memory alloy (SMA) wires," *Composite Structures*, Vol.47, pp.463-469
9. Choi, S., Lee, J.-J., Seo, D.C. and Choi, S.W., 1999, "The active buckling control of laminated composite beams with embedded shape memory alloy wires," *Composite Structures*, Vol.47, pp.679-686
10. Lee, J.-J. and Choi, S., 1999, "Thermal buckling and postbuckling analysis of a laminated composite beam with embedded SMA actuators," *Composite Structures*, vol.47, pp.695-703
11. Lee, H.-J. and Lee, J.-J., 2000, "A numerical analysis of the buckling and postbuckling behavior of laminated composite shells with embedded shape memory alloy wire actuators," *Smart Materials and Structures*, Vol.9, pp.780-787
12. 김은호, 노진호, 이인, 2007, "형상기억합금을 삽입한 복합재료 평판의 저속 충격 해석", 한국항공우주학회 추계학술발표회, pp.799-802
13. Lee, H.-J. and Lee, J.-J., 2000, "Evaluation of the characteristics of a shape memory alloy spring actuator," *Smart Materials and Structures*, Vol.9, pp.817-823
14. Lee, H.-J. and Lee, J.-J., 2004, "Time delay control of a shape memory alloy actuator," *Smart Materials and Structures*, Vol.13, pp. 227-239, 2004
15. Lee, H.-J. and Lee, J.-J., 2004, "Modeling and Time Delay Control of SMA Actuators," *Advanced Robotics*, Vol.18, pp. 881-904
16. Kim, H.-C., Yoo, Y.-I. and Lee, J.-J., 2008, "Development of a NiTi actuator using a two-way shape memory effect induced by compressive loading cycles," *Sensors and Actuators: A. Physical*, Vol. 148, pp. 437-442,
17. Kim, S. and Cho, M., 2007, "Numerical simulation of a double SMA wire actuator using the two-way shape memory effect of SMA," *Smart Materials and Structures*, Vol. 16, pp.372-381

18. Cho, M. and Kim, S., 2005, "Structural Morphing Using Two-way Shape Memory Effect of SMA," *International Journal of Solids and Structures*, Vol.42, pp.1759-1776
19. 박현준, 탁원준, 김병규, 2008, "형상기억합금 구동기를 이용한 비폭발식 저충격 분리장치 개발", 한국항공우주학회 추계학술발표회, pp. 1359-1364.
20. 박현준, 탁원준, 한범구, 곽동기, 황재혁, 김병규, 2009, "소형위성용 비폭발식 저충격 분리장치", 한국항공우주학회지, 제37권, 제5호, pp.457-463