

## KSLV-I 상단부 고전압 부하용 TVC 배터리 개발

김명환\*, 마근수\*\*, 임유철\*\*\*, 이재득\*\*\*\*

### Development of the TVC Battery for High Voltage Loads in KSLV-I Upper Stage

Myung-Hwan Kim\*, Keun-Sum Ma\*\*, You-Chol Lim\*\*\*, Jae-Deuk Lee\*\*\*\*

#### Abstract

This paper gives a brief summary of the TVC battery design description, specifications and test results. The TVC battery for KSLV-I upper stage contains 168 Sony 18650VT high power lithium-ion cells. It configured as 2 strings in parallel, with each string containing 84 series connected cells. This allows to meet nominal 270V voltage and capacity requirements specified for the mission of the Thrust Vector Control(TVC) system. The loads profile of the TVC system has short duration, high current pulse. To power such a system with minimal mass, the battery employed 18650VT Cells. This cell is specifically designed for high rate applications and is capable of a 10C continuous discharge.

#### 초 록

본 논문에서는 TVC 배터리의 설계 개념, 특성과 환경 및 성능 시험 결과에 대해 간략히 보인다. KSLV-I 상단에 탑재되는 TVC 배터리는 168개의 소니 18650VT 고전력 리튬이온 셀을 사용하며, 84개의 셀을 직렬로 구성한 후 각 열을 병렬로 2개 연결하여 추력 벡터 제어(TVC) 시스템의 미션에 요구되는 전압(공칭 270V)과 전류를 공급한다. TVC 시스템의 부하 특성은 짧은 시간 동안 높은 전류 출력을 요구하는 펄스의 형태를 가진다. 무게를 최소화하며 시스템 요구 전력을 공급하기 위해 18650VT 셀을 적용하였다. 18650VT 셀은 고전력 응용분야를 위해 설계된 모델로 10C 연속 방전 능력을 갖고 있다.

키워드 : Lithium-ion Cell(리튬이온 셀), TVC Battery(TVC 배터리), 18650VT, KSLV-I, Upper Stage(상단부)

#### 1. 서 론

TVC 배터리는 KSLV-I 상단부에 장착되며, 추력 벡터 제어 시스템(Thrust Vector Control System)의

구동을 위한 전기모터에 전력을 공급하는 역할을 한다. 모터 구동을 위한 공칭 전압은 270V의 고전압이며 요구된 설계 전력은 5200W에 이른다. 시스템에서 요구하는 전압 범위를 충족시키며 모터 구

접수일(2007년12월18일), 수정일(1차 : 2008년 10월 23일, 2차 : 2008년 10월 27일, 게재 확정일 : 2008년 11월 1일)

\* 전자그룹/micelle@kari.re.kr

\*\* 전자그룹/ksma@kari.re.kr

\*\*\* 전자그룹/yclim1002@kari.re.kr

\*\*\*\* 전자그룹/jdlee@kari.re.kr

동 구간 동안 요구되는 높은 전류를 공급하기 위해 18650VT 리튬이온 셀을 사용하였다.

TVC 배터리에 사용된 리튬이온 2차 전지 셀은 10C의 고전력을 연속적으로 출력할 수 있는 모델로 KSLV-I 상단부의 전장, 기동 및 FTS 배터리에 사용한 18650HC 리튬이온 셀과 성능 및 특성이 다른 모델이다. 18650HC 리튬이온 셀은 내부 보호회로와 셀 특성으로 인해 3C이상의 전류를 연속적으로 공급할 수 없다. 18650VT는 리튬이온 셀의 특성인 높은 중량에너지 밀도를 가짐과 동시에 TVC 시스템에서 요구하는 것과 같이 상대적으로 짧은 시간동안 높은 전력을 공급할 수 있는 능력을 갖고 있어 TVC 배터리 제작에 필요한 셀의 수를 줄일 수 있다.

본 논문에서는 TVC 배터리에 사용된 고전력 리튬이온 배터리 셀을 소개하며, 배터리 설계 및 제작과 그 특성을 기술하였다. 그리고 예상되는 우주 및 발사체 환경에서 배터리 동작의 신뢰성을 검사하는 환경시험에 대해 소개하고 그 결과를 간략히 보였다. 마지막으로 제작된 배터리를 이용해 실시한 실부하 시험 결과를 보임으로써 TVC 배터리 성능을 검증하였다.

## 2. 배터리 제작 및 시험

### 2.1 리튬이온 셀

KSLV-I 상단부 전자탑재부에 전력을 공급하는 전장, 기동 및 FTS 배터리는 소니 18650HC 리튬이온 셀을 사용한다. 반면 TVC 배터리는 고전력 출력에 적합한 소니 18650VT 셀을 사용한다. 제작에 사용된 리튬이온 셀은  $\text{LiMO}_2$  (M=Ni, Co, Mn 등)형 산화재 양극물질과 소니에서 개발된 음극(Layered Carbon anode) 기술이 결합되어 내부구조를 형성하며, 직경이 18mm이고 높이가 65mm인 원통형의 외형을 갖는다. 원통형이 갖는 효율적인 공간 활용으로 인해 다른 구조의 셀보다 중량에너지 밀도 및 부피에너지 밀도가 높다. 표 1에 각 셀의 특성을 비교 정리하였다. 용량과 에너지 밀도에선 18650HC 셀이 우수하나 10C 방전 특성은 없다. TVC 시스템을 위한 전기모터

표 1. 리튬이온 셀 특성 비교

	18650HC	18650VT
Total Capacity	1.5Ah	1.08Ah
Nameplate Energy	5.4Wh	3.95Wh
Capacity at 10C	N/A	1.03Ah, 3.55Wh
Maximum Voltage	4.2V	4.1V
Nominal Voltage	3.6V	3.6V
Minimum Voltage	2.5V	2.5V
Cell Mass	40.5g	41.2g

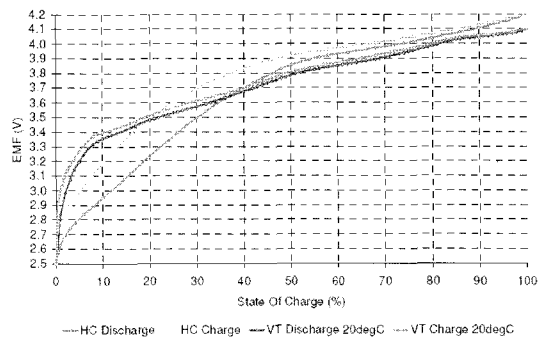


그림 1. 배터리 셀 기전력 비교

구동과 같이 고전력이 필요한 경우 18650VT 셀이 적합함을 알 수 있다. 참고로 혹독한 부하 조건으로 시험했을 때 22A의 전류를 25초간 공급할 수 있으며, 65A 이상의 전류에 대해선 2초 이내 출력할 수 있다고 18650VT 셀의 가이드라인은 제시한다. 그림 1은 배터리 셀의 기전력에 따른 충전용량을 비교한 그래프이다. 18650HC 셀이 유용한 전압 범위에서 상대적으로 보다 많은 용량을 갖고 있음을 알 수 있다.

리튬이온 셀의 핵심 구성인 전해액, 양·음극 재료 모두는 발화와 폭발 가능성이 있다. 이러한 위험성을 상쇄하기 위한 것이 전지 안에 내장된 보호 회로이다. 18650VT 셀에 적용된 보호회로에는 과충전 차단 회로 및 압력 배출구가 있으며, 18650HC 셀을 비롯한 일반적인 리튬이온 전지에 적용되는 단락전류 방지용 PTC(Positive Temperature Coefficient) 소자는 제외되어 있다. PTC 소자는 배터리 셀이 장기간 단락회로를 형성하는 것을 막는 것으로, 단락 등의 이유로 과

또한 전류가 흐르면 셀 온도가 상승하여 PTC 저항값이 증가하게 되고 커진 저항값은 전류를 억제하게 된다. 18650VT 셀의 경우 10C의 높은 전류를 출력하는 것이 가능하도록 만든 리튬이온 셀이기 때문에 PTC 소자는 적용되지 않았다. 과충전 차단 장치는 충전 시 리튬이온 셀 기전력이 4.5V를 넘어 5.0V에 접근하면 셀의 양극에 침가된  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ 가 분해되어 가스가 발생하는 현상을 이용한 것이다. 증가된 압력은 양극에 위치한 알루미늄 디스크를 변형시켜 접점을 떨어뜨리고 그

결과 셀은 개방상태가 되어 충전을 막는다. 그림 2는 과충전 차단 회로의 동작을 나타낸다. 압력 감쇠 배출구는 셀에 과도한 열( $>120^\circ\text{C}$ )이 가해졌을 때 화학 분해로 인한 가스를 배출하는 통로이다. 가스 압으로 인해 알루미늄 디스크가 변형된 후에도 계속적으로 열이 가해지면 디스크 표면에 미세하게 가공된 홈들이 파괴되며 압력을 배출하여 셀의 파열을 방지한다. 18650VT 리튬이온 셀을 둘러싼 용기(can)의 파열 압력과 배출 압력사이의 비는 3:1이 되도록 제작되었다. 그림 3에 리튬이온 셀을 직접 비교한 시험 결과가 있으며 조건을 충족함을 알 수 있다. 앞서 설명한 두 가지 보호회로는 한 번 발생할 경우 셀이 기능을 상실하며 비가역적인 성격이 있다. 따라서 배터리를 사용 및 보관할 경우 셀 보호회로가 동작하지 않도록 주의하는 것이 필요하다.

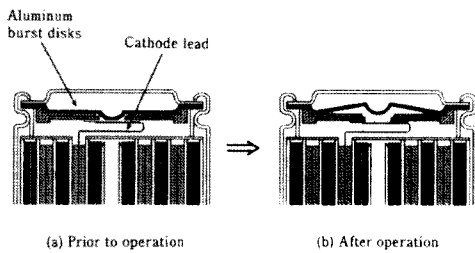


그림 2. 과충전 차단회로 동작

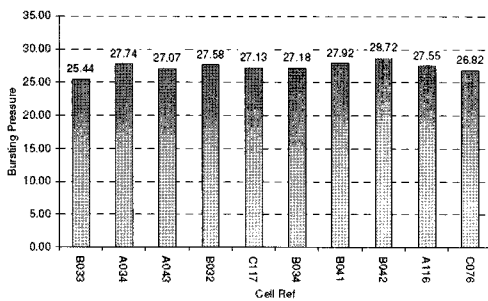


그림 3. 18650VT 셀 배출 압력 비교

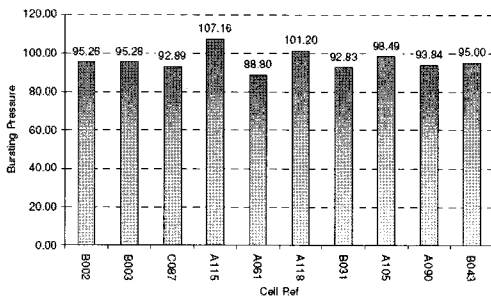


그림 4. 18650VT 셀 파열 압력 비교

그림 5는 온도 및 충전상태(SOC)를 달리하여 셀을 39일간 보관한 후 잔여 용량을 비교한 그래프이다.  $30^\circ\text{C}$  이하로 보관된 조건에서는 2% 이하의 소실이 측정되었다.  $30^\circ\text{C}$  이상의 경우 충전 상태에 따라 잔여 용량이 급격히 떨어지지만 80% 이상의 충전상태에선 그 경향이 감소한다. 18650VT 셀의 자가 방전(Self Discharge)은  $20^\circ\text{C}$ 에서 보관하였을 경우 7일이 경과했을 때 1.1% 이내로 측정되었다. 리튬이온 셀의 일반적인 자가 방전 특성은 초기에 높다가 시간이 지남에 따라 점진적으로 감소하는 경향을 갖는다. 낮은 자가 방전율은 장기간 보관에 있어 전압 측정 등의 추가 작업 필요성을 줄여준다.

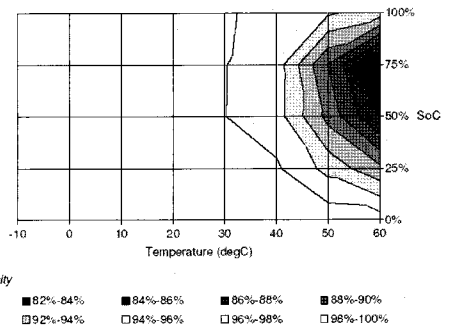


그림 5. 온도 및 충전상태별 잔류 용량 비교

## 2.2 배터리 제작

과거 우주용 배터리 제작은 대용량 셀을 사용하여 하나 또는 두 개의 스트링을 이용하여 제작되었다. 리튬이온 셀 기술이 상업적으로 사용되며 안정된 수준까지 발전한 현재까지 과거의 제작방식은 많이 사용되고 있다. 이런 설계 방식은 배터리 제작시 부수적인 셀 안정화 회로와 보호 회로의 추가를 요하며 그에 수반된 고가의 외부 소프트웨어 및 장비가 필요하다. TVC 배터리 설계는 상대적으로 용량이 작은 셀을 2차원적으로 배열하여 요구조건을 충족시키는 's-p' 설계를 적용하여 과거 설계 방식의 단점을 배제하였다. 's-p' 설계 방식은 셀을 직렬('s':series)로 연결하여 배터리 전압을 결정하고, 만들어진 직렬 스트링(string)을 병렬('p':parallel)로 연결하여 배터리 용량을 정하는 방법이다. 's-p' 방식은 배터리 용량과 체적 구성을 유연하게 할 수 있으며, 설계의 간략화와 비용 절감의 이점이 있다. 그림 6은 's-p' 설계 방식의 구성을 보여준다.

TVC 배터리는 's-p'설계 방식을 적용하여 168개의 18650VT 리튬이온 셀을 이용해 제작하였다. 84개의 셀을 직렬로 구성한 후 그 열을 2개 병렬로 연결하여 요구된 전압과 용량을 충족시킨다. 직렬로 구성된 셀들은 니켈(Nickel) 연결 태그(Tag)를 사용하여 연결되며 그림 7과 같다. 니켈 태그는 열을 확산 시키는 동시에 구조적으로 배터리 모듈을 지지하는 역할을 한다. 직렬로 연결된 셀 스트링은 한쌍의 GRP(Glass Reinforced Polymer) 마운팅 판넬에 의해 기구적으로 하나의 셀 블록(Block)으로 구성되며, 2개의 셀 블록이 모여 TVC 배터리가 된다. 앞서 설명한 내용은 그림 8의 TVC 배터리 분해도에서 확인할 수 있다. TVC 배터리의 충전 완료 전압은 344.4V에 이르기 때문에 배터리 제작 및 설치의 안전을 위해 하나의 스트링을 4개로 분리하였다. 분해된 4개의 하위 스트링은 84개의 셀로 직렬 구성된 스트링을 20, 22, 22 그리고 20개의 셀로 이루어진 하위 스트링으로 구분한다. 짝수로 나누어진 하위 스트링의 양극과 음극은 그림 7과 같이 한쪽 방향을 향하게 되어 하니스 배선을 쉽게 한다. 하위 스트링의 연결은 TVC 배터리 충전 플러

그가 장착되었을 경우 이루어지며, 장착 후 하나의 직렬 스트링이 되어 요구된 전압을 출력한다. 그림 9는 충전 플러그의 모습이다. 배터리 모듈을 감싸는 구조물은 셀이 발산하는 열을 잘 전도하는 특성을 갖도록 알루미늄을 사용하였다. 리튬이온 셀 간의 온도차는 각 셀의 성능에 직접적으로 영향을 미치기 때문에 배터리 모듈에 열이 고르게 분산되도록 하는 것은 중요한 요소이다.

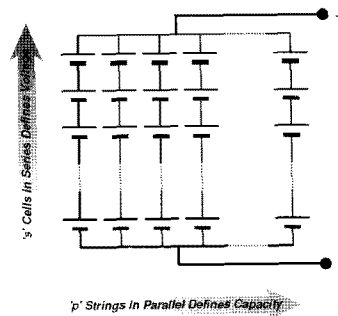


그림 6. 's-p' 설계 방식

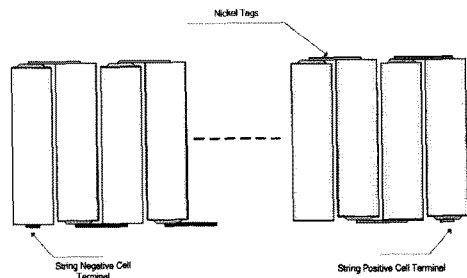


그림 7. 니켈 태그 직렬 스트링 구성

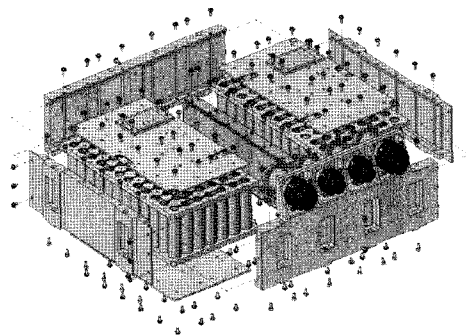


그림 8. TVC 배터리 분해도

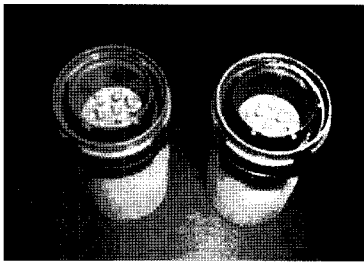


그림 9. TVC 배터리 충전 플러그

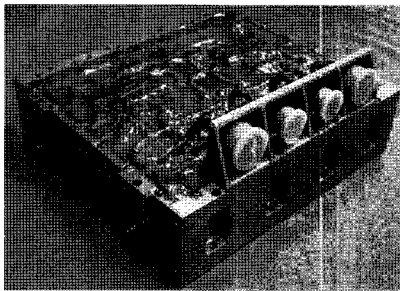


그림 10. TVC 배터리 형상

표 2. TVC 배터리 특성

Electrical	
Maximum Voltage	344.4V
Minimum Voltage	210.0V
Nominal Capacity	2.2Ah
Maximum Continuous Load	22A
Physical	
Configuration	84s2p
Mass	10.4kg
Size	Length=255mm Height=127mm Width=290mm

직사각형 형상의 TVC 배터리의 전기적 특성과 물리적 규격은 표 2와 같다. 전기적 인터페이스는 4개의 커넥터를 통해 이루어진다. 좌·우 끝에 배치된 두 개의 8핀 커넥터는 각 셀 블록별 충전 플러그 장착을 위한 것이다. TVC 배터리 전력 출력은 4핀으로 구성된 커넥터를 통해 이루어지며, 10핀 커넥터는 텔레메트리(Telemetry) 전압 모니터링, 충전 라인, 2개의 써미스터(Thermistor) 연결을 담당한다. 전압 모니터링 단자와 배터리의 양극 버스

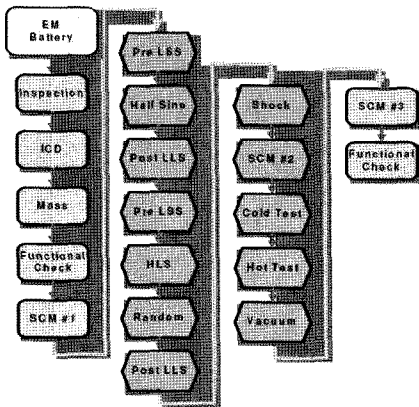
사이에는 보호 저항이 있어 측정 라인에서 발생할 수 있는 단락 등의 오류가 배터리에 직접 영향을 미치는 것을 차단한다. 배터리 셀 사이에 삽입되어 온도를 측정하는 써미스터는 온도가 올라갈수록 저항값이 감소하는 NTC(Negative Temperature Coefficient)형이다. 최종적으로 제작된 TVC 배터리의 형상은 그림 10에 있다.

### 2.3 환경시험

발사체가 이륙에서부터 지구 저궤도에 위성을 투입하기까지 겪게 되는 극한 환경에서 TVC 배터리가 성능을 유지할 수 있는지를 판단하기 위해 QT(Qualification Test) 레벨의 환경시험을 실시했다. EM(Engineering Model) 이후의 TVC 배터리는 QT레벨보다 완화 또는 면제된 환경시험 조건을 갖는 AT(Acceptance Test) 레벨의 환경시험을 받고 입고된다. TVC 배터리는 발사체 이륙 전·후의 진동과 페어링 분리에 따른 충격 그리고 대기권을 지나 진공상태인 우주환경을 겪게 된다. 이런 환경 하에서 요구되는 성능을 발휘하는가를 검증하기 위해 정현진동, 랜덤진동, 파이로 충격, 반정현파 충격, 온도시험 그리고 진공시험을 실시하였으며 각각의 시험 내용은 표 3과 같다. 시험은 그림 11의 절차에 따라 수행되었으며 TVC 배터리는 5200W의 설계 정전력을 이상 없이 출력하여 각각의 환경에 충분한 내성을 가지고 있음을 보여주었다. 그림 12는 TVC 배터리의 열·진공시험 설정 모습을 보여주고 있다.

표 3. QT 레벨 환경시험 내역

시험 종류	시험 내역
정현진동	Acceleration 12g, along 3axes
랜덤진동	16.8grms, along 3axes
반정현파 충격	50g(peak), 11msec, 3times/axis along 3axes
파이로 충격	3000g(SRS), 3times/axis along 3axes
저온	0℃까지 강하(-3℃/min), 1.5시간 유지 후 방전
고온	40℃까지 상승(+3℃/min), 1.5시간 유지 후 방전
진공	10 <sup>-5</sup> torr(±80%) for 30 minutes



- ICD: Interface Control Document(인터페이스 검사)
- SCM: Standard Capacity Measurement
- Pre LSS: Pre-vibration Low-level Sine Sweep
- Post LLS: Post-vibration Low-Level Sine Sweep
- HLS: High-Level Sine

그림 11. QT 레벨 환경시험 절차

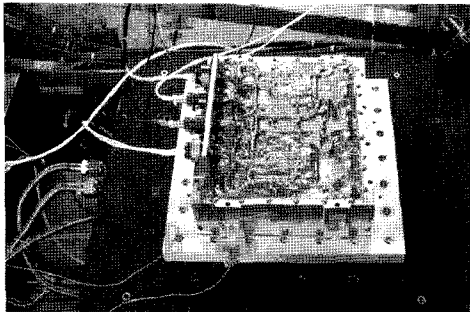
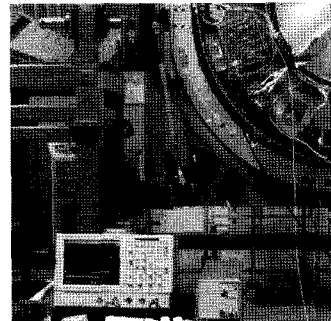


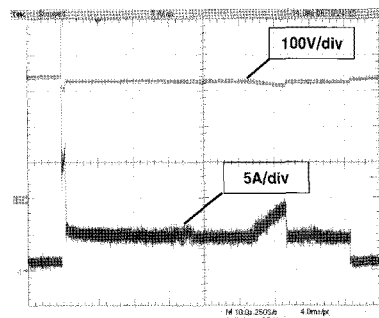
그림 12. TVC 배터리 환경시험 설정

## 2.4 성능시험

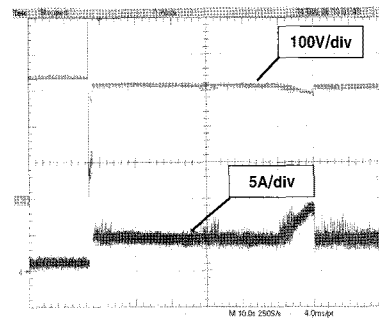
제작 및 환경시험을 거쳐 입고된 TVC 배터리에 대한 성능 시험을 실시하였다. 0.22A(0.1C)로 완전 충전된 TVC 배터리를 이용해 KSLV-I 상단부에 있는 TVC 시스템을 직접 구동하는 시험을 하였고, TVC 배터리가 시스템을 구동하는 데 필요한 전력을 충분히 공급함을 확인하였다. 부가적으로 TVC 배터리 내부 2개의 스트링 중 1개의 스트링만을 이용해 시스템을 구동하는 시험도 실시하였다. 시험결과 TVC 배터리 출력 전압이 2개의 스트링을 이용할 때 보다 낮아지긴 하지만 요구되는 전압 조건을 충족시키며 TVC 시스템



(a) 시험 구성



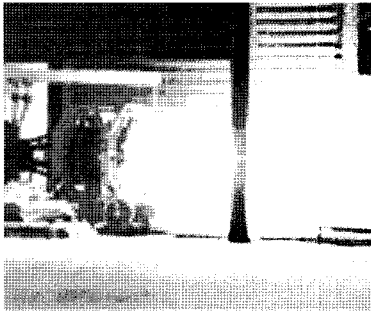
(b) 2 스트링 출력 전압 및 전류



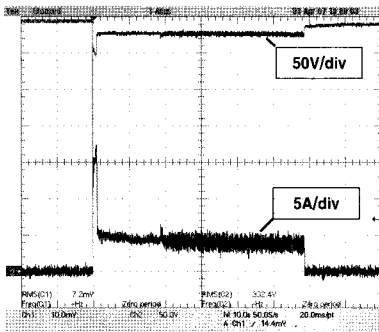
(c) 1 스트링 출력 전압 및 전류

그림 13. TVC 배터리 성능시험

을 안정적으로 구동시켰다. 시험 모습과 측정 데이터가 그림 13에 나와 있다. 1 스트링을 이용한 출력 시험을 통해 TVC 배터리 셀의 여유 용량을 확인할 수 있다. 또한 특정 셀에 문제가 발생해 하나의 스트링이 출력을 못내는 결과가 발생하더라도 나머지 하나의 스트링으로 시스템을



(1) GT 연소



(b) 출력 전압 및 전류

그림 14. GT 연소시험 지원

유지할 수 있음도 알 수 있다.

성능 시험을 통해 검증된 TVC 배터리를 이용하여 GT 연소시험을 지원하였다. 킥모터 연소 중 TVC 시스템 구동을 위한 전력을 이상 없이 공급하였다. 관련 사진과 측정된 출력 전압 및 전류가 그림 14에 있다.

### 3. 결 론

기존 리튬이온 셀에 비해 고전력 출력의 특성을 갖는 18650VT 셀을 사용하여 KSLV-I 상단부 TVC 시스템에 사용되는 전력을 공급하는 TVC 배터리를 제작하였다. 본 논문에서는 TVC 배터리를 구성하는 18650VT 셀에 대해 소개하였으며, 셀을 직·병렬 구성하여 임무에 필요한 전압 및 용량에 맞도록 제작한 TVC 배터리의 설계에 대해 기술하였다. 그리고 배터리의 동작 신뢰성

검증을 위한 환경시험과 성능시험에 대해 소개하고 그 결과를 보였다. 시험 결과 제작된 고전력 리튬이온 셀 기반 TVC 배터리는 발사과정 및 우주에서 겪게 될 환경에서 동작 신뢰성을 가짐을 알 수 있었고, 임무 수행을 위한 용량도 만족함을 확인하였다.

### 참 고 문 헌

1. 김명환, 마근수, 임유철, 이재득, "우주발사체 탑재용 리튬이온 배터리 개발", 한국항공우주학회지, 제35권, 제4호, 2007, pp.363~368.
2. C.Pearson, A.Bennetti, Dr.K.Ma, Ka Lok Ng and C.Chetwood, "Qualification of Next-Generation Lithium-ion Small Space Cells By ABSL Space Products", IECEC, 2006
3. "TVC Li-Ion Battery User Manual and Design Description", ABSL Space Products, 2006
4. "KSLV1 TVC EM Batteries Test Summary Report", ABSL Space Products, 2006