

# 점화 명령에 동조된 인공위성 파이로테크닉 회로 설계\*

## (A Design of Fire-Command Synchronous Satellite Pyrotechnic Circuit)

구 자 춘\*, 나 성 웅\*\*

(Ja Chun Koo and Sung Woong Ra)

**요 약** 인공위성은 태양전지판 전개, 통신 안테나 전개, 관측 장비에 대한 오염방지 덮개, 추진계의 파이로테크닉 밸브 및 리튬-이온 셀 모듈 바이패스 장치 등 다수의 분리장치들을 포함하고 있다. 파이로테크닉 회로로 동작되는 분리장치의 기폭제들은 단발성으로 동작되기 때문에 기폭제 구동은 성공적 임무 수행을 위해 필수 요소이다. 파이로테크닉 회로는 안전을 위한 스위칭 네트워크를 포함해야 한다. 일반적인 스위칭 네트워크는 기폭제 점화 동안 스위칭 과도상태 전류를 취급하기 위해 높은 정격 전류 용량의 점화 스위치로 구성되는 단점이 존재한다. 파이로테크닉 회로는 기폭제가 메인버스에서 점화되면 버스에서 요구되는 첨두 전력을 감소시킬 수 있는 전력 조절 기능을 필요로 한다. 본 논문은 기폭제 점화 동안 스위칭 과도상태 전류를 취급하기 위해 높은 정격 전류 용량의 점화 스위치로 구성되는 단점을 극복하기 위해 점화 스위치를 작동시키기 위한 점화 명령에 동조된 파이로테크닉 회로를 설계한다. 파이로테크닉 회로는 점화 스위치들이 점화 전류를 전달만 하고 스위칭을 하지 않는 것을 보충하기 위해 점화 명령에 동조되어 전류 제한된 윈도우 펄스 점화 전류를 제공한다. 전류 제한된 윈도우 펄스 점화 전류는 스위칭 네트워크에서 낮은 정격 전류 용량과 가벼운 무게의 스위치 사용을 가능하게 한다. 파이로테크닉 회로의 전류 제한 기능은 기폭제에 공급하는 전압을 감소시키고 첨두 버스 전력을 감소시키는 전력 조절 효과를 제공한다. 정지궤도 위성 개발에 적용하기 위해 파이로테크닉 회로는 개발 모델에서 시험하여 기능을 검증하였다.

**핵심주제어** : 파이로테크닉 회로, 파이로테크닉 컨버터, 동조 회로

**Abstract** The satellite includes many release mechanisms such as solar array deployment, antenna deployment, cover to protect contamination in scientific equipment, pyro value of the propulsion subsystem, and bypass device in Li-Ion cell module. A drive the initiators is a critical to the successful mission because the initiators of release mechanism driving by the pyrotechnic circuit is operated in single short. The pyrotechnic circuit has to provide switching network for safety. A typical switching network has defect consisting of high current rating fire switch to handle switching transient current during fire the initiator. The pyrotechnic circuit is required some form of power conditioning to reduce the peak power demanded from the bus if the initiators are to be fired from the main bus. This paper design a pyrotechnic circuit synchronized to the fire-command to activate the fire switch to overcome use high current rating fire switch to handle switching transient current during fire the initiator. The pyrotechnic circuit provides a current limited widow pulse for fire

\* 한국항공우주연구원 위성전자팀, 제1저자(jckoo@kari.re.kr)

\*\* 충남대학교 전자공학과, 교신저자(swra@cnu.ac.kr)

current synchronized to the fire-command to insure that fire switch will only carry the current but never switch it. The current limited widow pulse for fire current can be possible to use low current rating and light mass switch in switching network. The current limit function in the pyrotechnic circuit reduces supply voltage to initiator and provides the effect of power conditioning function to reduce peak bus power. The pyrotechnic circuit to apply satellite development on geostationary orbit is verified the function by test in development model.

**Key Words** : Pyrotechnic circuit, Pyrotechnic converter, Synchronization Circuit

## 1. 서 론

인공위성은 태양전지판 전개, 통신 안테나 전개, 관측 장비에 대한 오염방지 덮개 전개, 추진계의 파이로테크닉 밸브 및 리튬-이온 배터리 셀 모듈 바이패스 장치 등 다수의 분리장치들을 포함하고 있다. 태양전지판 전개장치는 인공위성이 발사체로부터 분리된 후 위성에 필요한 전력을 생성하기 위해 사용된다. 통신 안테나 전개장치는 통신위성의 반사경 안테나 등 위성 통신용 안테나를 전개하기 위해 사용된다. 관측 장비에 대한 오염방지 덮개 전개장치는 지상에서 시험, 이동 및 발사과정에서 관측 장비에 대한 오염방지를 위해 사용된다. 추진계의 파이로테크닉 밸브는 가압제 또는 추진제 유체의 이동을 통제하고 필요할 때 배관망에 가압제 또는 추진제를 충전하기 위해 사용된다 [1]. 리튬-이온 배터리 셀 모듈 바이패스 장치는 성능 감소된 셀 모듈을 개방회로 실패로부터 보호하기 위해 단락시킬 때 사용된다[2].

파이로테크닉 회로는 분리장치들을 전개하기 위해 기폭제를 점화(fire)시키는 전력을 제공하고 기폭제를 작동시킬 때 의도되지 않은 스위칭을 방지해야 한다 [3]. 파이로테크닉 회로로 동작되는 분리장치의 기폭제들은 단발성으로 동작되기 때문에 기폭제의 안전한 구동은 인공위성의 성공적 임무 수행을 위해 필수 요소이다.

기폭제 및 파이로테크닉 회로는 잠재적 위험(hazard)으로부터 의도되지 않은 점화를 발생시킬 수 있기 때문에 발사체와 발사장 설비는 간섭 영향으로 인한 잠재적 위험을 최소화 하기위해 일반적으로 파이로테크닉 회로에 대해 적어도 3단계 안전 보호 스위칭 네트워크를 요구한다[3]. 기폭제들은 충분한 점화를 보장하기 위한 일정한 점화 전류 및 점화 시간을

요구한다[3]. 파이로테크닉 회로는 전력 공급원과 기폭제 사이에서 전력 공급원을 보호하기 위해 전류제한 장치가 요구된다[3]. 일반적인 스위칭 네트워크는 기폭제 점화 동안 스위칭 과도상태 전류(transient current)를 취급하기 위해 높은 정격 전류 용량의 점화 스위치로 구성되는 단점이 존재한다. 기폭제가 메인버스에서 점화되면 버스에서 요구되는 첨두(peak) 전력을 감소시킬 수 있는 전력 조절 기능이 요구된다[3].

본 논문은 먼저 정지궤도위성 분리장치에 사용을 고려중인 전기 폭발식 장치 및 비폭발식 작동기의 기폭제와 태양전지판을 전개시킬 때 전개되는 속도를 제어하기 위한 직류 모터에 대해 전기적 특성을 분석한다. 기폭제 점화 동안 스위칭 과도상태 전류를 취급하기 위해 필요한 높은 정격 전류 용량의 점화 스위치로 구성되는 단점을 극복하기 위해 점화 스위치를 작동시키기 위한 점화 명령에 동조된 파이로테크닉 회로를 설계한다. 설계된 파이로테크닉 회로는 파이로테크닉 컨버터 및 3단계 안전 보호 스위칭 네트워크로 구성된다. 릴레이가 점화 전류를 전달만 하고(only carry current) 스위칭을 하지 않을 때 낮은 정격 전류 용량으로 스위칭 네트워크에 사용할 수 있음을 실험을 통해 검증한다. 파이로테크닉 컨버터는 전력 공급원과 기폭제 사이에서 전력 공급원을 보호하기 위해 전자적으로 전류를 제한하고 출력 전압을 조절하는 레귤레이터와 출력 과전류 및 과전압에 대해 파이로테크닉 컨버터를 보호하기 위한 브레이커로 구성되어 있다. 레귤레이터는 점화 스위치들이 점화 전류를 전달만 하고 스위칭을 하지 않는 것을 보증하기 위해 점화 명령에 동조되어 전류 제한된 윈도우 펄스 점화 전류를 제공한다. 전류 제한된 윈도우 펄스 점화 전류는 스위칭 네트워크에서 낮은 정격 전류 용량과 가벼

운 무게의 스위치 사용을 가능하게 한다. 최소 점화 시간에서 기폭제를 점화 시킬 때 파이로테크닉 컨버터가 충분한 점화 에너지를 공급할 수 있는지 분석을 통해 확인한다. 파이로테크닉 구동회로는 정전기에 의해 충전된 에너지가 정전기 방전(ESD, ElectroStatic Discharge)에 의해 의도되지 않는 기폭제 점화를 방지할 수 있게 설계 한다. 파이로테크닉 회로의 전류 제한 기능은 기폭제에 공급하는 전압을 감소시키고 침투 버스 전력을 감소시키는 전력 조절 효과를 제공한다. 점화 동안 감소된 침투 버스 전력은 파이로테크닉 회로에서 안전하게 소산될 것이다. 정지궤도위성 개발에 적용하기 위해 파이로테크닉 회로는 개발 모델에서 시험하여 기능을 검증한다.

## 2. 본 론

### 2.1 기폭제의 전기적 특성

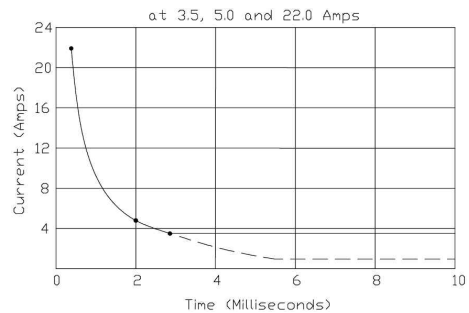
파이로테크닉 구동회로가 사용될 정지궤도위성 분리장치에 사용될 기폭제들은 전기 폭발식 장치, 비폭발식 작동기의 기폭제 및 직류 모터이다.

인공위성 분리장치 기폭제로 전기 폭발식 장치 기폭제가 일반적으로 사용되고 있다[4][5]. 파이로로 불리는 전기 폭발식 장치는 NASA 표준 기폭제(NSI, NASA Standard Initiator)[6] 및 ESA 표준 기폭제(ESI, ESA Standard Initiator)[7]가 사용되며 그 특성은 <표 1>과 같다. NASA 및 ESA 표준 기폭제들은 하나의 소자에 각각 1Ω 저항 값을 갖는 브릿지 전선 2개가 독립적으로 존재한다. 전체 점화 전류(all firing current)는 NASA 표준 기폭제에서 3.5A 이상이고 ESA 표준 기폭제에서 5.0A 이상이나 충분한 점화를 보장하기 위한 권고 점화 전류는 10ms 동안 5A 이상의 일정 전류(constant current)를 공급해야 한다. NASA 및 ESA 표준 기폭제들은 1A/1W/5분 이하에서 점화되지 않는다.

Hi-shear사의 전기 폭발식 장치 기폭제에 대한 점화 특성 곡선은 <그림 1>과 같다[8]. Hi-shear사의 NASA 표준 전기 폭발식 장치 기폭제는 5A 전류에서 2ms에서 점화되고 3.5A 전류에서는 3ms 이하에서 점화되는 특성을 가지고 있다.

<표 1> 전기 폭발식 장치 기폭제 특성

Initiator	NSI	ESI
Number of bridge wire	2	2
Bridge wire resistance	1.05±0.1Ω	1.05±0.15Ω
Recommended firing current	> 5A/10ms	-
All firing current	> 3.5A	> 5A/10ms
No firing current	<1A/1W/5mn	<1A/1W/5mn
Insulation resistance	> 2MΩ	> 100MΩ

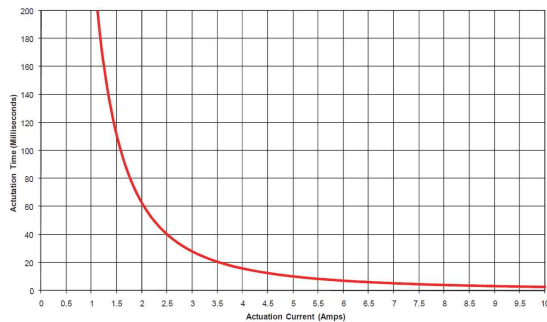


<그림 1> NASA 표준 기폭제의 점화 특성 곡선

전기 폭발식 장치 기폭제는 점화되어 고정 장치를 절단 시 충격이 발생할 수 있는 단점을 가지고 있다 [4][5]. 비폭발식 작동기의 기폭제는 고가이지만 점화되어 고정 장치를 분리 시 충격 및 오염이 적은 장점을 갖고 있어 인공위성 분리장치에 많이 사용되고 있다[4]. NEA사 비폭발식 작동기의 기폭제에 대한 특성은 <표 2>와 같다[9][10]. NEA8043은 리튬-이온 배터리 셀 모듈 바이패스 장치의 기폭제로 사용되고, NEA9103은 태양전지판 전개장치 등의 분리장치 기폭제로 사용되고 있다. NEA8043은 리튬-이온 배터리 셀 모듈의 성능이 감소되는 경우를 대비하여 예비(redundant)로 사용하기 때문에 하나의 기폭제에 퓨즈 전선이 1개가 존재하고, NEA9103은 하나의 기폭제에 퓨즈 전선이 2개가 존재한다. NEA8043 및 NEA9103 비폭발식 작동기의 기폭제들은 각각 1.55Ω 및 2.7Ω 이하의 저항 값을 갖고 최소 작동 전류는 각각 1.2A 및 1.5A 이상이나 충분한 작동을 보장하기 위해 4A 이상의 일정 전류를 공급해야 한다. NEA사의 비폭발식 작동기의 기폭제에 대한 점화 특성 곡선은 <그림 2>와 같다[11]. NEA사 비폭발식 작동기의 기폭제는 5A 전류에서 약 10ms에서 점화되고 3.5A 전류에서는 20ms에서 점화되는 특성을 가지고 있다.

<표 2> 비폭발식 작동기의 기폭제 특성

Actuator model	NEA8043	NEA9103
Application	Battery cell bypass switch	Non-explosive separation nut
Number of fuse wire	1	2
Fuse wire resistance	0.95 to 1.55Ω	1 to 2.7Ω
Min actuation current	> 1.2A	> 1.5A
Max non-actuation current	< 0.6A	< 0.25A



<그림 2> 비폭발식 작동기 기폭제의 점화 특성 곡선

태양전지판을 전개시킬 때 전개되는 속도를 제어하기 위해 사용될 예정인 직류 모터의 특성은 <표 3>과 같다. 직류 모터는 하나의 모터에 코일이 예비로 2개로 구성되어 있다. 각 코일의 저항은 38Ω이며, 인덕턴스는 2600μH 이다. 각 코일의 입력 전압은 19V에서 29V이며, 동작 전류는 코일 당 160mA 이다. 태양전지판을 전개시킬 때 직류 모터의 한 코일을 사용하면 전개 완료까지 8분이 소요되며, 양쪽 코일을 모두 사용하면 전개 완료까지 4분이 소요된다.

정지궤도위성 분리장치에 사용될 기폭제들을 구동하는 파이로테크닉 구동회로에 적용해야 하는 중요 설계 변수는 전기 폭발식 장치 및 비폭발식 작동기의

<표 3> 직류 모터 특성

Actuator	DC Motor
Number of coil	2
Voltage range	19V-29V
Resistance of winding	38±4Ω
Inductance of winding	2600μH±10%
Current at rated torque	0.16A per motor
In-rush current	1.0A per motor
Max Operating time	4mn (operating 2 motors) 8mn (operating 1 motor)

기폭제에 대해 권고 점화 전류를 5A 이상으로 일정하게 제공하고 충분한 점화를 보장하기 위한 작동 시간을 제공하는 것이다. 직류 모터에 대해 안정적인 요구 범위 내의 입력 전압을 제공하고 8분 이상의 동작 시간을 제공하는 것이다.

## 2.2 파이로테크닉 회로 설계

### 2.2.1 파이로테크닉 회로 설계 요구조건

정지궤도위성 분리장치에 사용될 기폭제들의 전기적 특성을 고려하여 파이로테크닉 회로에 적용해야 하는 중요 설계 요구조건은 <표 4>와 같다.

파이로테크닉 회로는 파이로테크닉 컨버터 및 스위칭 네트워크로 구성되어야 한다. 스위칭 네트워크는 3단계 안전 보호 스위치를 제공하기 위해 프리암, 암 및 점화 스위치로 구성되어야 한다. 기폭제와 파이로테크닉 회로 사이의 하니스 단에서 안전/암(safe/arm) 컨넥터를 구성해야 한다. 안전 컨넥터는 기폭제를 파이로테크닉 구동회로와 연결을 차단하고 기폭제 라인을 단락시키는 역할을 한다. 암 컨넥터는 발사 직전에 기폭제를 파이로테크닉 구동회로와 연결한다[3].

파이로테크닉 회로는 42.5V에서 51V 범위의 버스 전압을 입력 받는다. 파이로테크닉 회로는 전기 폭발식 장치 및 비폭발식 작동기의 기폭제를 구동하기 위한 파이로 모드에서 기폭제의 권고 점화 전류 5A에 대해 20% 마진을 확보할 수 있도록 공칭(nominal) 6A로 일정 점화 전류를 제한해야 한다. 파이로테크닉 회로는 파이로 모드에서 충분한 점화를 보장하기 위해 전기 폭발식 장치 및 비폭발식 작동기의 기폭제 작동 시간(5A에서 약 10ms)에 대해 충분한 마진을 확보할 수 있도록 공칭 35ms의 점화시간을 제공해야 한다. 직류 모터를 구동하기 위한 케블라 모드에서 최대 20분의 점화 시간으로 동작할 수 있어야 한다.

점화 스위치들이 점화 전류를 전달만 하고 스위칭을 하지 않는 것을 보증하기 위해 점화 명령에 동조되어 전류 제한된 윈도우 펄스 점화 전류를 제공하기 위해 파이로테크닉 회로는 파이로 모드에서 점화 스위치를 작동시키기 위한 점화 명령에 On/Off 동조된 기능을 제공해야 한다.

파이로테크닉 회로는 케블라 모드에서 직류 모터에 일정 전압(constant voltage)을 제공하기 위해 공칭 21V로 출력 전압을 조절할 수 있어야 한다. 파이로테

<표 4> 파이로테크닉 회로 중요 설계 요구조건

Module configuration	Pyrotechnic converter & switching network
Safety protection	Pre-arm, arm, fire inhibits
Safe/arm connector	Implemented in harness
Input voltage	42.5V to 51V
External command	51ms±0.5ms pulse
Firing current limit	6A±1A electronics current limit in pyro mode
Firing time	35ms ±3ms for pyro mode, max 20mn for kevlar mode
On/Off synchronization	On/Off synchronized to the fire-command in pyro mode
Overcurrent protection	7.5A(nominal) to 8A(max)
Overvoltage protection	27.5V(nominal) to 30V(max)
Power conditioning	Required implement in pyrotechnic converter
Switch command	Sequentially command pre-arm, arm & fire switch
ESD protection	By bleed resistors

크닉 회로는 출력 과전류 및 과전압에 대해 파이로테크닉 컨버터를 보호하기 위해 공칭 7.5A 이상의 과전류와 27.5V 이상의 과전압 보호 회로를 제공해야 한다.

기폭제들은 점화되기 위해 점화 스위치의 단락 시간 동안 단지 25W (5A at 1Ω) 정도의 전력을 필요로 하나 50V 버스에서 5A 전류를 공급할 때 최대 250W 전력, 28V 버스에서 5A 전류를 공급할 때 최대 140W 전력을 제공해야 한다[3]. 파이로테크닉 회로는 전력 원으로부터 공급되는 최대 전력을 안전하게 소산하기 위해 기폭제들을 점화시킬 때 메인 버스로부터 요구되는 최대 전력을 감소시킬 수 있는 전력 조절 기능을 제공해야 한다[3]. 프리암, 암 및 점화 스위치는 순차적 명령으로 구동되도록 해야 한다. 정전기 방전(ESD)은 블리드 저항으로 방지되어야 한다.

### 2.2.2 파이로테크닉 회로 구성

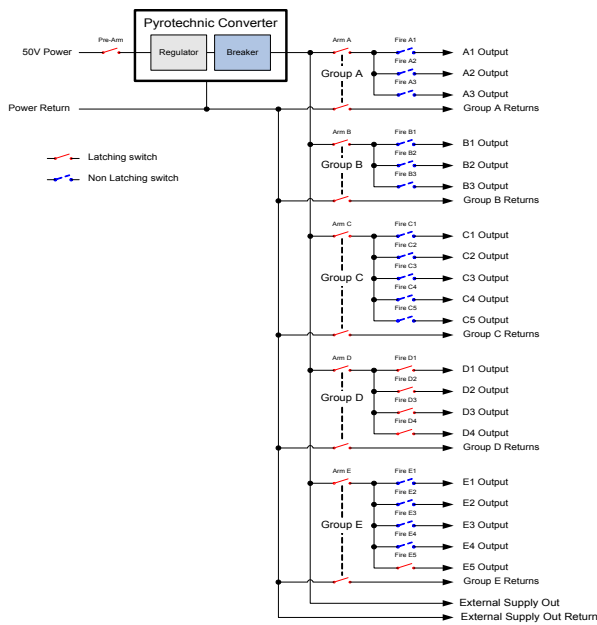
파이로테크닉 모듈은 <그림 3>과 같이 파이로테크닉 컨버터 및 의도되지 않은 스위칭을 방지하기 위해 3단계 안전 보호 스위칭 네트워크로 구성된다. 파이로테크닉 컨버터는 전력 공급원과 기폭제 사이에서 전

력 공급원을 보호하기 위해 전자적으로 전류를 제한하고 출력 전압을 조절하는 레귤레이터와 출력 과전류 및 과전압에 대해 파이로테크닉 컨버터를 보호하기 위한 브레이커로 구성된다. 스위칭 네트워크는 3단계 안전 보호 스위치를 제공하기 위해 프리암, 암 및 점화 스위치로 구성된다. 프리암 스위치는 파이로테크닉 모듈 당 공통으로 사용되며, 5개로 구성된 암 스위치는 각 그룹 당 공통으로 사용되도록 설계한다. 프리암, 암 스위치 및 케블라 채널의 점화 스위치는 랫칭 릴레이로 구성할 수 있다. 파이로 채널의 점화 스위치는 랫칭 릴레이 또는 MOSFET로 구성할 수 있다. 암 스위치는 지상 시험이나 발사를 위해 안전 컨넥터가 암 컨넥터로 교체될 때 파이로테크닉 컨버터와 기폭제를 포지티브 및 리턴 라인에서 분리되도록 설계한다. 파이로테크닉 모듈은 외부의 파이로테크닉 회로에 추가적인 전력 공급라인을 제공할 수 있도록 설계되어야 한다.

### 2.2.3 릴레이 스위칭 능력 시험

위성체에 사용되는 전자부품은 장기간 사용하고 부품에 인가되는 스트레스를 줄여 안전한 회로 구성을 위해 정격보다 낮은 조건에서 동작될 수 있도록 derating이 요구된다. 릴레이는 저항부하에서 스위칭 전류로 사용될 때 스위칭 횟수가 릴레이 정격 사이클의 50% 이하일 경우 75%의 derating이 요구된다[12]. 파이로테크닉 회로에서 릴레이가 점화 전류 6A를 스위칭 하고 75% derating 요구사항을 만족하기 위해서는 8A 이상의 전류 용량이 필요할 수 있다. 파이로테크닉 회로에서 8A 이상의 전류 용량을 갖는 릴레이로 스위칭 네트워크를 구성하면 파이로테크닉 회로 모듈의 무게와 부피가 크지는 단점이 발생한다.

<표 5>는 GP5 및 GP250 릴레이에 대해 스위칭 능력 시험 절차 및 결과이다. GP5 비랏칭(non latching) 릴레이는 50V에서 저항 부하 시 2A 전류 용량으로 점화 스위치로 사용될 수 있다. 파이로테크닉 회로는 파이로 모드에서 점화 스위치에 스위칭 전류가 흐르는 것을 배제하고 전달 전류(only carry current)로만 동작시키기 위해 점화 명령에 파이로 컨버터가 On/Off 동조될 수 있는 동조 및 윈도우 회로를 포함한다. GP5 릴레이는 파이로 모드에서 파이로 컨버터에 의해 하드웨어적으로 전달 전류로만 동작된다. GP5 릴레이는 1분 동안 7A 전달 전류로만 동작될 때



<그림 3> 파이로테크닉 모듈 구성도

100번의 스위칭 이후에도 전기적인 특성 변화가 거의 발생되지 않았다. GP250 래칭(latching) 릴레이는 50V에서 저항 부하 시 2A 전류 용량으로 프리암 및 암 스위치로 사용될 수 있다. GP250 릴레이는 파이로테크닉 회로에서 통상적으로 전달 전류로만 동작된다. GP250 릴레이는 케블라 모드에서 운영 절차의 오류(error)나 조작자(operator)의 실수에 의해 실패모드(failure mode)로 동작될 수 있다. GP250 릴레이는 스위칭 능력 시험에서 실패모드를 가정하였다. 실패모드는 GP250 릴레이 On 시 전달 전류로만 동작되고 릴레이 Off 시 스위칭 전류(switch current)로 동작되는 것을 가정하였다. GP250 릴레이는 On 시 전달 전류로만 동작시키고 1분 동안 5A 전류를 흘린 후 Off 시 5A 스위칭 전류로 동작시킬 때 60,000번의 스위칭 이후에도 파괴되지 않았다. 릴레이는 스위칭 전류가 흐르는 것을 배제하고 전달 전류로만 동작시킬 때 정격 전류 이상의 전류를 흘릴 수 있음이 확인되었다. GP5 및 GP250 릴레이는 스위칭 능력 시험 결과, 릴레이 스위칭 시험 횟수보다 실제 위성에서 기폭제를 구동하는 횟수가 적고, 릴레이 정격 전압보다 낮은 전압에서 동작되기 때문에 파이로테크닉 회로의 프리암, 암 및 점화 스위치로 사용할 수 있음이 검증되었다.

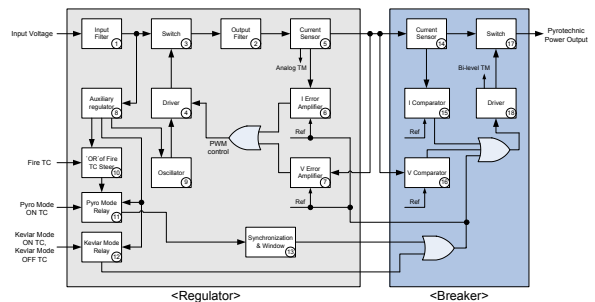
<표 5> GP5 및 GP250 릴레이의 스위칭 능력 시험

Relay	Test step	Test method and results
GP5 Non-latch	Step1	Relay switching ON before current establishment
	Step2	Relay switching OFF after break current of 7A during 1 minute
	Step3	Wait 1 minute between two tests
	Results	After 100 maneuvers at 85°C with 3 samples, the electrical characteristics have shown no significant deviation
GP250 Latch	Step1	Relay switching ON before current establishment
	Step2	Current of 5A during 1 minute
	Step3	Relay switching OFF with the current of 5A
	Step4	Wait 2 minute between two tests
Results	These tests were stopped after 60,000 maneuvers at 85°C since the degradation at this step was insufficient for destruction.	

### 2.2.4 파이로테크닉 컨버터 구성

파이로테크닉 컨버터는 <그림 4>와 같이 전자적으로 전류를 제한하고 직류 전압을 조절하는 레귤레이터와 출력 과전류 및 과전압에 대해 컨버터를 보호하기 위한 브레이커로 구성되어 있다.

파이로테크닉 컨버터의 레귤레이터는 입력(①) 및 출력 필터(②), MOSFET 스위치(③) 및 구동 회로(④), 전류 센서(⑤), 전류(⑥) 및 전압 에러 증폭기(⑦), 보조 전원(⑧), 발전기(⑨), 점화 명령의 ORing(⑩), 파이로(⑪) 및 케블라 모드 릴레이(⑫), 동조 및 윈도우 회로(⑬) 기능으로 구성되어 있다.



<그림 4> 파이로테크닉 컨버터 블럭도

레귤레이터는 buck 타입 컨버터를 바탕으로 설계한다. 파이로테크닉 컨버터는 전력 버스로부터 입력 전

압을 받을 수 있다. 입력 필터는 입력 전압에서 존재하는 노이즈를 제거하고 레귤레이터에 전압을 제공하고, 출력 필터는 레귤레이터에서 발생하는 노이즈를 브레이커로 전달되는 것을 제거한다. 레귤레이터는 전기 폭발식 장치, 비폭발식 작동기의 기폭제에서 요구되는 점화 전류를 제한하기 위해 전류 센서와 전류 에러 증폭기를 포함하고 있고, 전압 에러 증폭기를 통해 출력 전압을 조절한다. 전류 에러 증폭기 및 전압 에러 증폭기에서 기준 전압과 비교된 에러에 해당하는 PWM (Pulse Width Modulation) 신호는 MOSFET 스위치를 제어한다. 동조 및 윈도우 회로는 본 논문의 핵심적인 기능으로 점화 스위치들이 점화 전류를 전달만 하고 스위칭을 하지 않는 것을 보증하기 위해 점화 명령에 동조된 윈도우 펄스 제어 신호를 생성한다. 점화 명령의 ORring은 각 점화 스위치를 작동시키기 위한 점화 명령이 ORring된 후 파이로 모드 릴레이를 통해 동조 및 윈도우 회로로 입력된다. 파이로 및 케블라 모드 릴레이는 레귤레이터의 동작을 각각 파이로 모드 및 케블라 모드로 설정한다.

레귤레이터는 전압 조절 제어와 전류 제한 제어 충돌 시 전기 폭발식 장치 및 비폭발식 작동기의 기폭제에서 요구되는 점화 전류를 제어하기 위해 전류 제한 제어가 전압 조절 제어보다 우선적으로 동작되도록 설계해야 한다. 레귤레이터는 부하 저항이  $3.5\Omega$  이하이면 파이로 모드에서 출력 전류를 6A로 제한하고, 부하 저항이  $3.5\Omega$  이상이면 케블라 모드에서 출력 전압을 21V로 조절한다. 부하저항  $3.5\Omega$ 은 레귤레이터 출력 전압 21V와 점화 제한 전류 6A로 결정된다.

파이로테크닉 컨버터의 브레이커는 레귤레이터의 PWM 제어 동작 실패로 인하여 과전류나 과전압이 발생할 경우에도 불구하고 파이로테크닉 컨버터를 보호하는 기능을 제공한다. 브레이커는 전류 센서(14), 전류(15) 및 전압 비교기(16), MOSFET 스위치(17) 및 구동 회로(18)로 구성되어 있다. 레귤레이터의 출력전압 27.5V 이상에서 전압 비교기의 출력이 브레이커 MOSFET 스위치를 Off 하도록 설계하며, 브레이커의 입력 전류가 7.5A 이상에서 전류 비교기의 출력이 브레이커 MOSFET 스위치를 Off 하도록 설계한다.

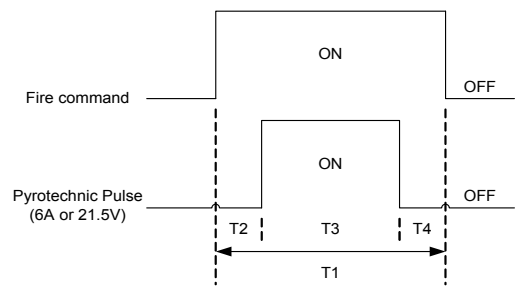
### 2.2.5 파이로테크닉 컨버터 동작 특성

파이로테크닉 컨버터의 레귤레이터는 전기 폭발식 장치 및 비폭발식 작동기의 기폭제를 구동하기 위한

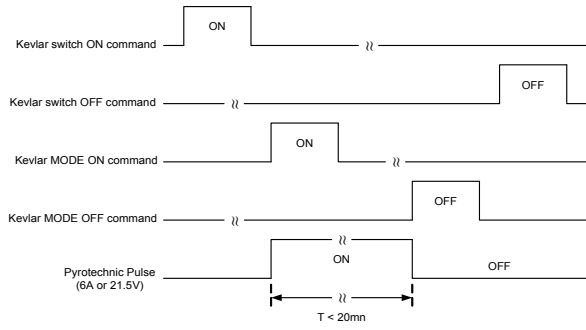
파이로 모드에서 <그림 5>와 같이 점화 명령에 대해 On/Off 동조되고 윈도우 펄스로 동작되어야 한다. 파이로테크닉 컨버터는 점화 명령이 입력되면( $T_1$ , 51ms) 점화 스위치가 전달 전류로만 동작될 수 있도록 지연된( $T_2$ , 7ms to 10ms) 후 동작되어야 한다. 파이로테크닉 컨버터의 지연은 릴레이 바운스(bounce) 최대 시간 (GP250 2.5ms [13], GP5 2ms[14]) 및 릴레이 동작 최대 시간(GP250 및 GP5 4ms[13][14])을 고려하기 위해 7ms에서 10ms로 정하였다. 파이로테크닉 컨버터는 동작될 때 6A로 점화 전류를 제한하고 공칭 35ms의 점화 시간을 제공해야 하며, 점화 명령 종료 전에 0.5ms 시간 이상에서 동작을 멈추도록 설계하였다.

파이로테크닉 컨버터의 레귤레이터는 직류 모터를 구동하기 위한 케블라 모드에서 <그림 6>과 같이 동작된다. 케블라 채널의 점화 스위치는 전달 전류로만 동작될 수 있도록 케블라 스위치 On과 케블라 스위치 Off 명령에 의해 동작된다. 케블라 모드에서 부하에 인가되는 펄스 지속 시간은 케블라 모드 On과 케블라 모드 Off 명령에 의해 임의대로 설정할 수 있으며 최대 20분 이하로 동작하는 것을 고려하였다.

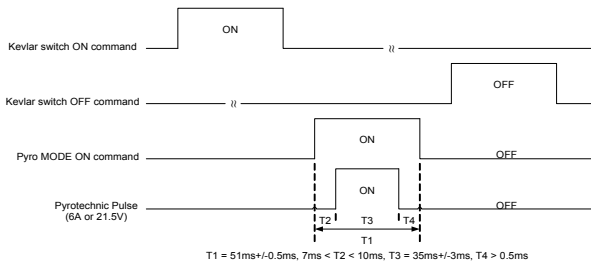
파이로테크닉 컨버터의 레귤레이터는 케블라 채널의 점화 스위치에 대해 <그림 7>과 같이 파이로 모드로도 동작이 가능하다. 케블라 채널의 점화 스위치는 전달 전류로만 동작될 수 있도록 케블라 스위치 On과 케블라 스위치 Off 명령에 의해 동작된다. 파이로테크닉 컨버터는 파이로 모드 On 명령에 대해 On/Off 동조되고 윈도우 펄스로 동작될 수 있다. 파이로 모드 On 명령은 점화 스위치를 구동하지 않으나 파이로 모드에서 점화 명령과 동일한 기능으로 파이로테크닉 컨버터를 동작시킬 수 있다.



T1 = 51ms +/- 0.5ms, 7ms < T2 < 10ms, T3 = 35ms +/- 3ms, T4 > 0.5ms  
<그림 5> 파이로 모드에서 레귤레이터 동작



<그림 6> 케블라 모드에서 레귤레이터 동작

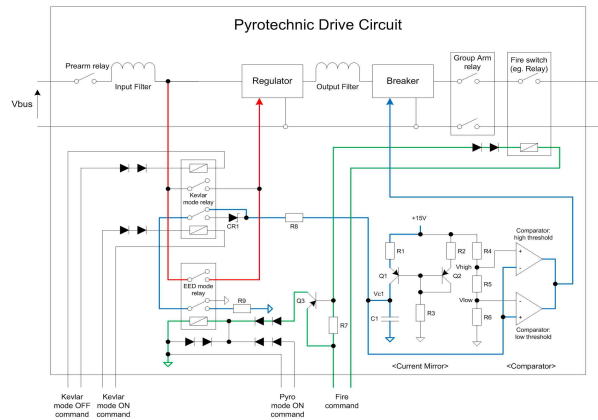


<그림 7> 케블라 채널에서 파이로 모드로 레귤레이터 동작

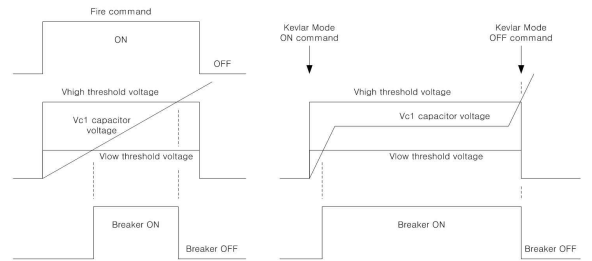
### 2.2.6 파이로테크닉 컨버터 동조 및 윈도우 회로

파이로테크닉 회로는 점화 스위치를 2A[13][14] 정격 전류 용량을 갖는 GP250이나 GP5와 같은 릴레이로 사용하기 위해서는 점화 스위치들은 스위칭 전류가 흐르는 것을 배제하고 전달 전류로만 동작되어야 한다. 점화 스위치들을 전달 전류로만 동작시키기 위해 파이로테크닉 컨버터는 점화 스위치의 동작 후 규정된 지연 시간 이후에 동작되고, 점화 스위치가 개방되기 전에 동작을 멈추어야 한다. 본 논문의 핵심적인 기능으로 파이로테크닉 컨버터의 레귤레이터에서 점화 명령에 동조되어 윈도우 펄스로 동작되는 회로는 <그림 8>과 같이 설계될 수 있고, 동작 특성은 <그림 9>와 같다. 동조 및 윈도우 회로는 전류 미러 및 비교기로 구성되어 설계한다.

<그림 8>의 동조 및 윈도우 회로에 점화 명령이나 파이로 모드 On 명령이 입력되면 Q1 및 Q2로 구성된 전류 미러를 통해 일정 전류가 흐른다. 일정 전류는 캐패시터 C1을 충전하며 Vc1 전압을 선형적으로 증가시킨다. 파이로 모드에서 <그림 9>의 (a)와 같이 Vc1 전압이 비교기의 낮은 임계치 전압(Vl)보다 크면 브레이크를 On 시키고, 비교기의 높은 임계치 전압(Vh)보다



<그림 8> 파이로테크닉 컨버터의 동조 및 윈도우 회로 구성도



(a) Window function by synchronization with fire command in Pyro mode (b) Synchronization circuit output in Kevlar mode

<그림 9> 파이로테크닉 컨버터의 동조 및 윈도우 회로 동작

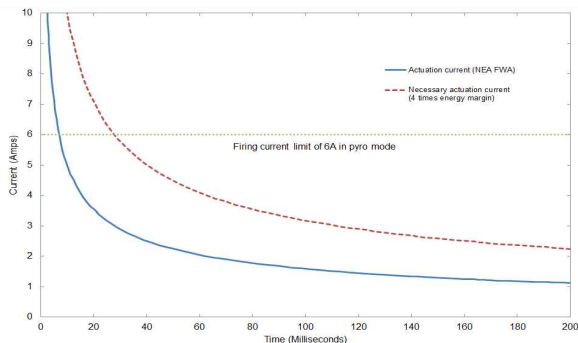
크면 브레이크를 Off 시킨다. 점화 명령이 Off 되기 전에 브레이크를 Off 시켜 점화 스위치들을 전달 전류로만 동작시킬 수 있다.

<그림 8>의 동조 및 윈도우 회로에 케블라 모드 On 명령이 입력되면, 전류 미러를 통해 일정 전류로 캐패시터 C1을 충전하며 Vc1 전압은 선형적으로 증가한다. 케블라 모드에서 <그림 9>의 (b)와 같이 Vc1 전압이 비교기의 낮은 임계치 전압(Vl)보다 크면 브레이크를 On 시킨다. Vc1 전압이 Vl과 Vh 전압 사이에서 <그림 8>의 제너 다이오드 CR1으로 고정(clamp)되어 브레이크를 Off 시키지 않는다. 케블라 모드 Off 명령이 입력되면 제너 다이오드 CR1에 의해 고정된 Vc1 전압이 높은 임계치 전압(Vh) 이상으로 증가되어 브레이크는 Off 상태가 된다.

### 2.2.7 파이로테크닉 컨버터 공급 에너지 마진 기폭제들은 충분한 점화를 보장하기 위한 일정한



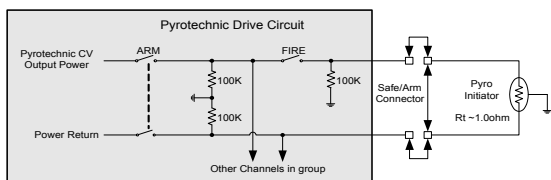
점화 전류 및 점화 시간을 필요로 하기 때문에 파이로테크닉 컨버터는 최소 점화 시간에서 기폭제를 점화 시킬 때 충분한 점화 에너지를 공급할 수 있는지에 대해 반드시 분석되어야 한다. <그림 10>은 파이로테크닉 컨버터가 파이로 모드에서 NEA사의 퓨즈 전선 어셈블리(FWA, Fuse Wire Assembly) 타입 비폭발식 작동기의 기폭제를 점화시킬 때 필요한 작동 전류이다. 비폭발식 작동기의 기폭제는 점화 전류 6A에서 7.5ms에서 점화될 수 있다. 파이로테크닉 컨버터는 점화 전류 6A로 4배의 에너지를 기폭제에 공급하기 위해 요구되는 시간은 27.5ms이다. 파이로테크닉 컨버터는 최소 점화 시간이 32ms이기 때문에 NEA사의 비폭발식 작동기의 기폭제를 점화 시키기 위해 충분한 에너지를 공급할 수 있다.



<그림 10> NEA사 비폭발식 작동기 기폭제를 점화시킬 때 필요한 작동전류

### 2.2.8 정전기 방전 방지

파이로테크닉 구동회로는 정전기에 의해 충전된 에너지가 정전기 방전에 의해 의도되지 않는 기폭제 점화를 방지할 수 있게 설계되어야 한다. 정전기 방전 설계에서는 금속 부품을 부유(floating)로 방치되지 않게 설계하는 것이 요구된다. 파이로테크닉 구동회로는 정전기 방전을 방지하기 위해 <그림 11>과 같이 블리드



<그림 11> 파이로테크닉 컨버터 구동 회로의 정전기 방지

저항을 모듈 새시와 연결하여 설계한다. 파이로테크닉 각 점화 출력 채널의 포지티브 라인 및 암 스위치와 점화 스위치 사이에서 포지티브 및 리턴 라인은 100kΩ 블리드 저항을 통해 모듈 새시와 연결하여 부유로 방치되는 금속 부품이 존재하지 않게 설계하였다.

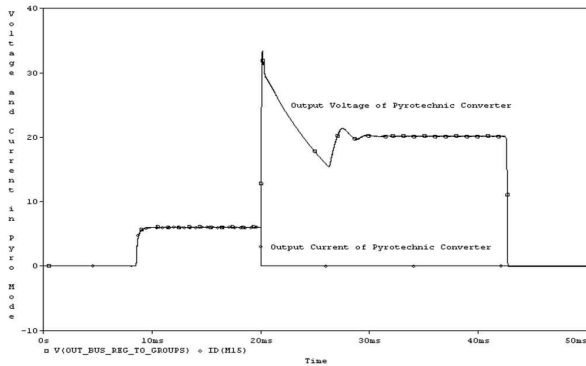
### 2.3 파이로테크닉 개발 모델 제작 및 실험

파이로테크닉 구동회로의 기능을 검증하기 위해 <그림 12>와 같이 개발 모델을 제작하였다. 개발 모델은 파이로테크닉 컨버터 및 스위칭 네트워크 일부로 구성하였다. 스위칭 네트워크는 프리암, 암 스위치를 제외하고 점화 스위치로 파이로 채널 1개와 케블라 채널 1개로 구성하였다.

파이로테크닉 구동회로의 개발 모델을 제작하기 전에 파이로테크닉 컨버터 동작을 분석하기 위해 파이로 모드에서 부하저항 1Ω을 20ms에서 개방시켜 파이로테크닉 컨버터의 동작을 시뮬레이션 한 결과는 <그림 13>과 같다. 레귤레이터는 부하 저항이 3.5Ω 이하이면 점화 전류를 6A 제한한다. 부하를 개방하기 전에 출력 전압은 6V이다. 부하가 개방되면 레귤레이터는 출력 전압을 조절해야 한다. 레귤레이터의 출력 전압은 오버슈트(overshoot) 현상이 발생한다. 레귤레이터는 과도상태(transient)를 지나면 출력 전압을 조절할 수 있음을 알 수 있다. 레귤레이터는 점화 명령 입력 후 8.5ms에서 on 되었고 42.7ms에서 off 되었다. 점화 시간은 34.2ms 정도였다. 레귤레이터는 점화 명령 종료 7.3ms 전에 off 되었다. 파이로 모드에서 레귤레이터는 부하 저항이 3.5Ω 이하이면 점화 전류를 제한하고, 부하 저항이 3.5Ω 이상이면 출력 전압을 조절함을 시뮬레이션 결과를 통해 확인하였다.

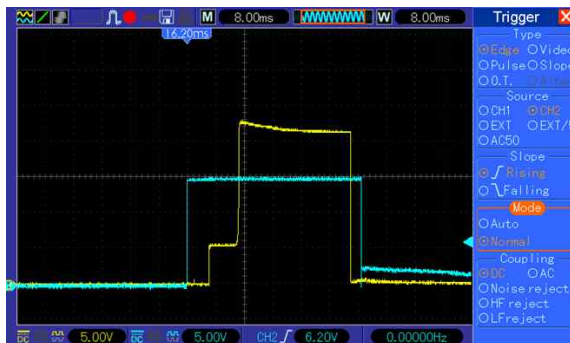


<그림 12> 파이로테크닉 구동 회로의 개발 모델



<그림 13> 파이로 모드에서 파이로테크닉 컨버터 시물레이션

개발 모델의 파이로 모드에서 파이로테크닉 컨버터의 출력 전압 파형은 <그림 14>와 같다. 채널 1은 파이로테크닉 컨버터의 출력 전압이고, 채널 2는 50ms 점화 명령이다. 점화 명령 입력 후 파이로테크닉 컨버터의 동조 및 윈도우 회로는 약 35ms 동안 동작하였다. 파이로테크닉 컨버터는 1Ω 부하가 연결되었을 때 초기 약 8ms 동안 6A로 점화 전류를 제한하였으며, 부하 저항이 개방되면 과도상태를 지나 출력 전압 조절 모드로 복귀하여 21V 전압을 조절하였다. 6A로 점화 전류를 제한할 때 출력 전압은 6V였다. 부하 저항이 개방될 때 시물레이션 결과와 개발 모델 시험 결과가 차이는 것은 시물레이션에서 부품들에 존재하는 기생 인덕턴스를 충분히 모델링 하지 못한 것으로 추정된다. 파이로테크닉 컨버터의 출력 전압은 파이로 모드에서 전류 제한 6A로 제어하면 기폭제 저항이 1Ω일 때 6V로 낮아진다. 기폭제 저항이 1Ω일 때 파이로테크닉 회로는 파이로 모드에서 90% 전력변환 효율을 고려하면 전력 버스에서 약 40W의 전력을 필요로



<그림 14> 파이로 모드에서 파이로테크닉 컨버터 출력 전압

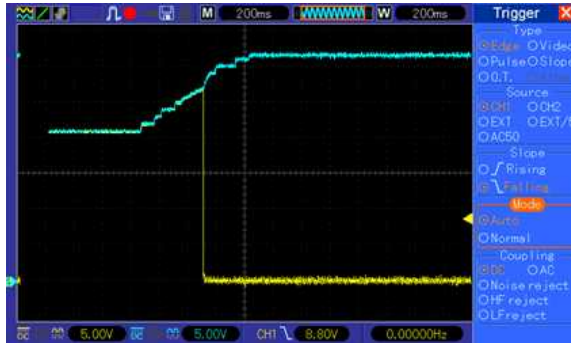
한다. 이처럼 파이로테크닉 회로의 전류 제한 기능은 기폭제에 공급하는 전압을 감소시키고 전력 버스에서 필요한 점화 전력을 감소시키는 전력 조절 효과를 제공한다. 점화 동안 감소된 점화 전력은 파이로테크닉 회로에서 안전하게 소산될 수 있는 전력으로 파이로테크닉 회로에서 열적 문제를 최소화할 수 있을 것으로 예상된다.

개발 모델의 부하전류 1A 케블라 모드에서 파이로테크닉 컨버터 출력 전압 파형은 <그림 15>와 같다. 케블라 모드 On 명령이 입력되면 파이로테크닉 컨버터는 출력 21V의 전압으로 연속적으로 동작함을 알 수 있다.



<그림 15> 케블라 모드에서 파이로테크닉 컨버터 출력 전압

개발 모델의 브레이커에 대한 과전압 보호회로 동작 파형은 <그림 16>과 같다. 브레이커 회로 입력단에 채널 2와 같이 외부에서 전압을 인가하였을 때 브레이커 출력 단의 전압은 채널 1과 같이 27.5V 이상에서 과전압 보호회로가 동작하여 브레이커를 Off 시켜 출력 전압을 차단함을 알 수 있다. 개발 모델의 브레이커에 대한 과전류 보호회로는 8A 이상이 될 때 동작하여 브레이커를 Off 시켜 출력 전압을 차단하였다.



<그림 16> 브레이크의 보호 회로 출력 전압

### 3. 결 론

파이로테크닉 회로로 동작되는 분리장치의 기폭제 들은 단발성으로 동작되기 때문에 기폭제의 안전한 구동은 인공위성의 성공적 임무 수행을 위해 필수 요소이다.

본 논문에서는 정지궤도위성 개발에 적용하기 위해 파이로테크닉 회로를 설계하고 개발 모델에서 시험하여 기능을 검증하였다. 설계된 파이로테크닉 회로는 파이로테크닉 컨버터 및 스위칭 네트워크로 구성되었다. 스위칭 네트워크는 3단계 안전 보호 스위치를 제공하기 위해 프리암, 암 및 점화 스위치로 구성되었다. 파이로테크닉 컨버터는 전력 공급원과 기폭제 사이에서 전력 공급원을 보호하기 위해 전자적으로 전류를 제한하고 출력 전압을 조절하는 레귤레이터와 출력 과전류 및 과전압에 대해 파이로테크닉 컨버터를 보호하기 위한 브레이크로 구성하였다. 파이로테크닉 회로는 기폭제 점화 동안 스위칭 과도상태 전류를 취급하기 위해 필요한 높은 정격 전류 용량의 점화 스위치로 구성되는 단점이 존재한다. 이를 극복하기 위해 본 논문의 핵심적인 기능으로 점화 스위치들이 점화 전류를 전달만 하고 스위칭을 하지 않는 것을 보증하기 위해 점화 명령에 동조된 윈도우 펄스 제어 신호를 생성하는 동조 및 윈도우 회로를 설계하였다. 릴레이는 스위칭 전류가 흐르는 것을 배제하고 전달 전류로만 동작시킬 때 정격 전류 이상의 전류를 흘릴 수 있음을 시험을 통해 확인하고 정격 전압 50V 및 정격 전류 2A 릴레이로 파이로테크닉 회로의 프리암, 암 및 점화 스위치로 사용할 수 있음을 시험을 통해 검증하였다. 파이로테크닉 컨버터가 최소 점화시간에서

기폭제를 점화하기 위한 충분한 에너지를 공급할 수 있음을 분석을 통해 확인하였다. 파이로테크닉 구동회로는 정전기에 의해 충전된 에너지가 정전기 방전에 의해 의도되지 않는 기폭제 점화를 방지할 수 있게 설계하였다. 파이로테크닉 회로의 전류 제한 기능은 기폭제에 공급하는 전압을 감소시키고 버스에서 필요한 침두 버스 전력을 감소시키는 전력 조절 효과를 제공한다. 점화 동안 감소된 침두 전력은 파이로테크닉 회로에서 안전하게 소산될 수 있는 전력으로 파이로테크닉 회로에서 열적 문제를 최소화 할 수 있을 것으로 예상된다.

설계된 파이로테크닉 회로는 정지궤도위성에 사용하기 위해 프로토타입 모델 및 인증 모델을 개발하여 기능, 발사 진동 및 우주환경(전자파 적합성 및 열주기/열진공) 시험 등을 통해 검증한 후 최종 비행모델 개발에 적용될 예정이다.

### References

- [1] “통신해양기상위성 시스템 및 본체 개발사업 최종 보고서,” 항공우주연구원, pp. 306-332, March 2011.
- [2] J.C. Koo, S.W. Ra, “Lithium-Ion Battery Design for Hybrid Satellite in the Geostationary Orbit,” Proceedings of the 31st International Telecommunications Energy Conference, October 18-22, Incheon, Korea.
- [3] D. Levins, “Protection Concepts used in Spacecraft Power Systems,” Proceedings of the European Space Power Conference, pp. 157-162, September 2-6, 1991, Florence, Italy.
- [4] 임재혁, 김경원, 김선원, 이창호, 이주훈, 황도순, “인공위성 비폭발식 분리장치 기술동향,” 항공우주 산업기술동향 7권1호, pp.97-104, 2009.
- [5] 오현웅, 전수현, “열선 절단 방식을 적용한 비폭발식 무충격 구속분리장치 EM의 기능검증,” 한국소음진동공학회 논문집 제23권 제5호, pp. 401-406, 2013.
- [6] “Design and Performances Specification for NSI-1 (NASA Standard Initiator-1),” SKB26100066, Rev. E, Johnson Space Center, 1999.

[7] A. Stepanski, "Lifetime Extension of the ESA Standard Initiator (ESI)," Dassault-Aviation.

[8] PC23 (NSI Equivalent) Data sheet, Hi-Shear Technology corp., <http://www.hstc.com>

[9] Battery Cell Bypass Switch Product Technical Data Sheet, <http://www.neaelectronics.com>

[10] Non-Explosive Separation Nut/Release Mechanism Product Technical Data Sheet, <http://www.neaelectronics.com>

[11] E. Vega, G. Kaczynski, "Cryogenic Temperature Testing of NEA Fuse Wire Mechanism," Proceedings of 41th Aerospace Mechanisms Symposium, pp. 175-180, May 16-18, 2012, JPL, USA.

[12] ECSS-Q-ST-30-11C, "Derating-EEE Components," July 31, 2008

[13] GP250 Relay Data Sheet, <http://www.leachintl.com>

[14] GP5 Relay Data Sheet, <http://www.leachintl.com>

논문접수일 : 2013년 09월 01일  
 1차수정완료일 : 2013년 10월 02일  
 게재확정일 : 2013년 10월 04일



구 자 춘 (Ja Chun Koo)

- 정회원
- 경북대학교 전자공학과 학사
- 경북대학교 전자공학과 석사
- 한국항공우주연구원

• 관심분야 : 인공위성 전력계, 배터리, 전자파양립성



나 성 웅 (Sung Woong Ra)

- 서울대학교 전기공학과 학사
- 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사
- 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사

• 충남대학교 공과대학 전자공학과 교수  
 • 관심분야 : 영상통신, 영상처리