

전자식 점화안전장치 회로부 설계 및 검증

김학성¹⁾ · 황정민¹⁾ · 장승교^{*,1)} · 김재훈²⁾ · 황대규²⁾

¹⁾ 국방과학연구소 제4기술연구본부

²⁾ (주)한화 구미사업장 개발 1팀

The Design and Test of the Electronic Arm Fire Device Circuit

Hakseong Gim¹⁾ · Jung-Min Hwang¹⁾ · Seung-gyo Jang^{*,1)} · Jae-Hoon Kim²⁾ · Dae-Gyu Hwang²⁾

¹⁾ The 4th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

²⁾ Research & Development Team 1, Hanwha, Korea

(Received 18 May 2018 / Revised 7 September 2018 / Accepted 2 November 2018)

ABSTRACT

This paper describes about the circuit design and test of the electronic Arm Fire Device. Electronic arm fire device consists of igniter, circuit and housing case and it operates without the actuator such as torque motor or solenoid. A high-voltage DC-DC converter was used to generate the voltage for initiating the LEEFI(Low Energy Exploding Foil Initiator). The MEMS switch was used to detect the acceleration that occurs when missile is launched, and the circuit was designed considering the size, performance, and specification of the electronic devices. The performance test was conducted to verify the designed circuit and we confirmed that it operates well.

Key Words : Arm Fire Device(점화안전장치), Pyrotechnic Mechanical Device(PMD)

1. 서론

고체 추진기관은 액체 및 하이브리드 추진기관에 비해 구조가 간단하고 저장성과 취급 안정성이 우수하여 주로 유도무기에 사용된다^[1]. 고체 추진기관에 충전된 추진제를 점화하는 장치를 점화장치라 하며 적정량의 전기에너지가 인가되면 즉시 점화하는 장점과 전장 환경에서 발생하는 전자기파 간섭 및 표류전압, 정전기 등의 영향으로 우발점화할 수 있다는 위험

성을 내재하고 있다^[2].

추진기관의 우발점화로 인한 사고 사례는 ‘USS Forrester Fire’를 들 수 있는데 1967년 7월 29일 미 해군 항공모함에 탑재된 F-4B 전투기의 로켓탄이 전기적 오작동으로 인하여 우발점화 되어 연쇄 폭발 사고가 발생하였다. 이로 인하여 사망 134명, 부상 161명의 인명피해와 재산손실을 입었고 이 사건을 계기로 미 해군은 무기의 안전장치 개념을 정립하였다^[3].

점화안전장치(Arm Fire Device)는 위 사례와 같이 전기적 오작동, 정전기, 전자기파 간섭 등의 위협으로부터 추진기관의 우발점화를 방지하고 점화장치의 동작을 정밀하게 제어하는 장치이며^[4,6] 장전 기능 수행

* Corresponding author, E-mail: jsg4580@gmail.com

Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

방식에 따라 기계식, 전기기계식, 전자기계식, 전자식 등으로 분류할 수 있다⁶⁾.

최근 유도무기 체계가 점점 발전하고 복잡해짐에 따라 점화안전장치 또한 기존방식과는 차별된 설계조건들이 요구되고 있다. 특히 유도무기의 소형화로 인하여 구성품을 탑재할 공간과 중량 제한 조건이 가혹해 졌고 이를 해결하기 위해 점화안전장치의 소형화가 필요하다. 하지만 기계장치, 솔레노이드, 토크모터를 사용하는 기존의 점화안전장치들은 복잡한 작동 메커니즘과 핵심부품인 구동기 크기 문제로 소형화로 제작할 수 있는 한계가 존재한다.

이를 해결하기 위하여 전자식 점화안전장치의 소형화 기술을 개발 중이며⁷⁾ 이는 기계적 구동부품을 전자회로가 대체하기 때문에 Table 1과 같이 기존의 점화안전장치에 비해 소형화가 가능하다⁸⁾.

Table 1. Arm fire device specification

구분	크기 (직경×길이mm)
전기기계식	Φ136×L121
	Φ46×L121
전자기계식	Φ41×L113
	Φ32×L82
전자식	Φ25×L80

또한 MEMS 스위치를 사용한 가속도 인식 기술을 적용하여 점화안전장치의 작동조건을 추가하여 안정성을 높였고 외부에서 발생하는 가속도를 인식할 수 있으므로 유도탄이 가스발생기에 의해 발사관에서 사출된 후 공중에서 추진기관을 점화하는 폴드런치 시스템에도 적용할 수 있다⁹⁾.

전자식 점화안전장치는 구동부가 전자부품들로 구성되어 있어 전자기파 및 노이즈신호에 대한 안정성을 마련해야 한다. 특히 특정 입력 조건이 충족될 때만 작동할 수 있도록 회로부를 설계해야 하며 착화기를 기폭 시키기 위한 조건, MEMS 스위치 작동 조건, 입력신호 처리 방법 등이 설계 시 고려되어야 한다.

본 논문에서는 전자식 점화안전장치의 전반적인 구성 및 작동개념과 점화안전장치를 구성하는 회로부의 설계 내용을 기술하였고 장전/출력 시험, MEMS 스위치 성능 시험, EMC 시험을 통해 성능을 검증하였다.

2. 점화안전장치 구성

2.1 주요 구성품

전자식 점화안전장치는 Fig. 1과 같이 마이크로착화기(LEEFI: Low Energy Exploding Foil Initiator)/격벽착화기(TBI: Through Bulkhead Initiator), 회로부, 하우징조립체, MEMS 스위치로 구성된다.

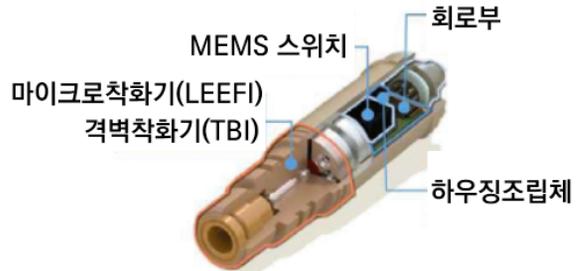


Fig. 1. Electronic arm fire device diagram

마이크로착화기는 고전압을 에너지원으로 사용하는 방전포일 착화기 형태로 제작하였고 격벽 착화기를 추가 설계하여 두 개의 착화기가 차례로 기폭 될 때만 점화기가 점화된다. 회로부는 전원회로, 장전회로, 기폭회로로 구성되며 각각 점화안전장치 작동을 위한 전압 생성, 신호 유효성 판단, 장전회로 작동 신호 생성, 고전압 생성 및 착화기 기폭 역할을 한다. 하우징조립체는 외부환경으로부터 점화안전장치 구성품을 보호하고 내부의 기밀성을 유지한다. MEMS 스위치는 장전회로에 탑재되며 유도탄의 가속도를 감지한다.

2.2 작동순서

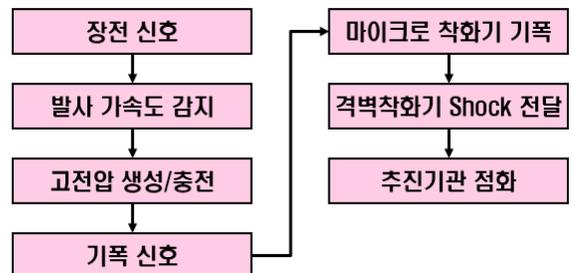


Fig. 2. Electronic operation sequence

전자식 점화안전장치는 Fig. 2와 같이 점화안전장치에 장전 신호가 들어온 후 사출 가속도를 감지하면

마이크로컨트롤러는 신호의 유효성을 판단하여 고전압 생성 신호를 발생하고 고전압 커패시터에 고전압을 충전한다. 기폭 신호가 발생하면 커패시터에 충전된 고전압이 착화부로 흘러 마이크로착화기와 격벽착화기를 차례로 기폭 한다. 최종적으로 격벽착화기가 동작하면 고온 고압의 가스를 분출시켜 로켓의 추진기관을 점화한다.

3. 회로부 설계

Fig. 3은 회로부 설계 개념도를 나타내며 회로부 설계 시 고려해야 할 조건들은 다음과 같다.

- 1) 전자파 간섭에 대한 회로의 안정성 확보
- 2) 전원 입력에 대한 전력 및 내전압이 고려된 전자소자 적용
- 3) 사출가속도 감지를 위한 회로 설계
- 4) 입력신호들의 유효성 판단 및 고전압 충전 제어
- 5) 고전압 생성 및 충전을 위한 전자소자 선정
- 6) 기폭출력 제어를 위한 회로 설계

점화안전장치의 목표성능, 크기, 설계조건을 만족하기 위해 전자소자들의 정격전압, 성능, 크기 등을 고려하여 회로를 설계하였고 FPCB(Flexible Printed Circuits Board)를 사용하여 공간의 활용성을 높였다. 각 부품을 전기적으로 제어하기 위해 마이크로컨트롤러를 사용하였고 제어 코드를 설계하여 탑재하였다. 마이크로컨트롤러에서 처리하는 신호들의 타이밍 차트는 Fig. 4와

같다. 신호는 장전 신호에서 Trigger 신호까지 차례로 발생하며 t_1 , t_2 는 고전압 충전 신호와 Trigger 신호를 발생하기 전 유효성을 판단하는 시간을 의미한다.

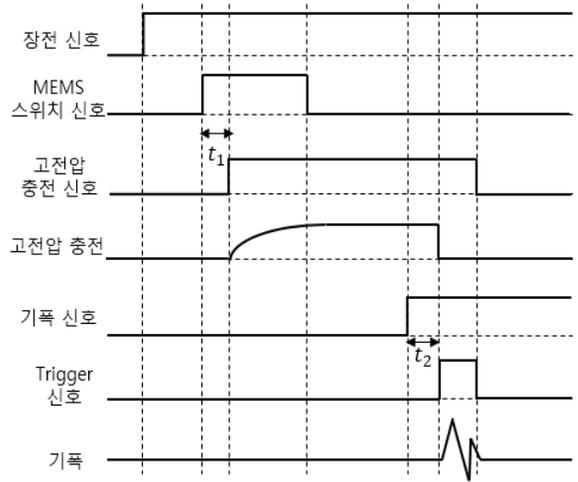


Fig. 4. Signal timing chart

3.1 전원회로

전원회로는 장전신호를 입력받아 장전회로와 기폭 회로를 동작하기 위한 안정적인 전원 생성 역할을 한다. 전자파 간섭에 대한 회로의 안정성 확보를 위하여 전원회로 입력단에 LC 필터를 설계하여 고주파 노이즈를 제거하였다. LC 필터 설계 시 L(Inductance), C(Capacitance) 값에 따른 Cut-off frequency는 다음 식과 같고 회로에 영향을 주는 주파수 영역을 파악하여 필터를 설계하였다.

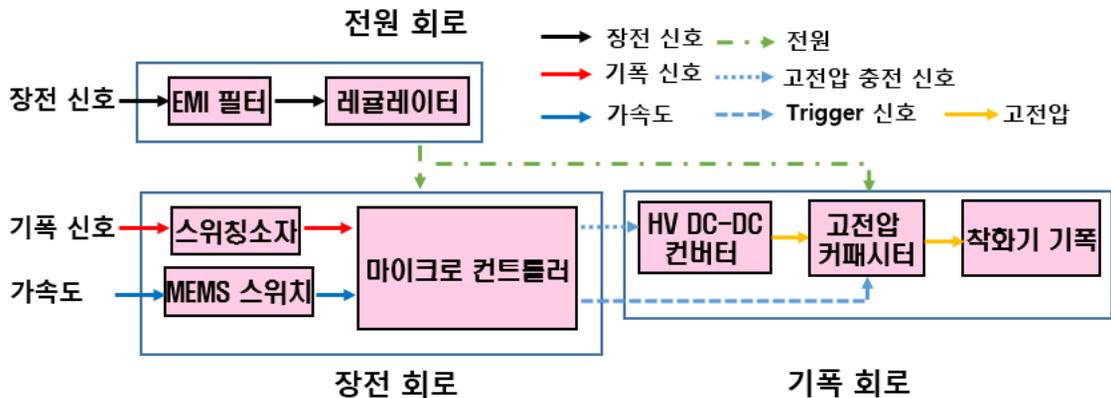


Fig. 3. Circuit diagram

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

장전회로와 기폭회로는 필요한 전원이 다르기 때문에 다수의 레귤레이터를 사용하여 각 회로에 필요한 전원을 생성하여 공급하도록 하였다.

3.2 장전회로

장전회로는 유도탄이 발사관으로부터 사출될 때 발생하는 가속도를 감지하고 점화안전장치의 작동 여부를 판단하여 고전압 충전 신호와 Trigger 신호를 생성하는 역할을 한다. 기존의 상용 가속도 센서는 점화안전장치에 적용하기에는 크기 제한이 있고 별도의 동작 전원이 필요하기 때문에 점화안전장치 소형화에 적합하지 않아 MEMS 가속도 스위치를 적용하였다⁸⁾. MEMS 가속도 스위치의 개념도는 Fig. 5와 같으며 외력이 발생하지 않으면 질량(Mass)과 스위치 접점이 떨어져 있어 전기적으로 단락되어 전류가 흐를 수 없지만, 가속도가 발생하면 관성질량이 아래로 움직여 스위치 접점과 물리적으로 도통된다.

MEMS 가속도 스위치는 질량(Mass)-감쇠기(Damper)-스프링(Spring) 시스템으로 모델링할 수 있으며 입력 가속도 $a(t)$ 에 대한 관성질량의 움직임 $x(t)$ 의 식은 다음과 같다¹⁰⁾.

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = ma(t) \quad (2)$$

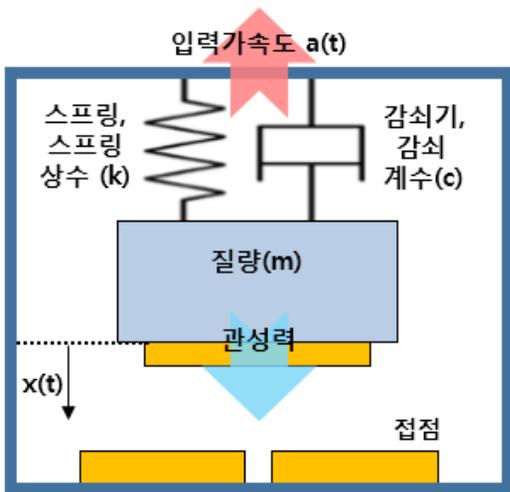


Fig. 5. MEMS switch model

m, c, k 는 각각 관성질량, 감쇠 계수, 스프링 상수를 의미하며 특정 가속도 구간에서 MEMS 스위치가 작동하도록 m, c, k 값을 설정하여 설계하였다.

3.3 기폭회로

기폭회로는 고전압을 생성하고 이를 전기에너지 형태로 마이크로착화기에 전달하여 기폭 하는 역할을 한다. 고전압 생성을 위해 HV(Hight Voltage) DC-DC 컨버터를 사용하였고 생성된 고전압은 고전압 커패시터에 충전된다. 충전된 고전압은 장전회로에서 생성된 Trigger 신호가 들어오면 마이크로착화기로 공급된다. 마이크로착화기에는 수백 암페어 이상의 전류가 1 μ s 이내에 순간적으로 흘러야만 동작하며 이는 전압으로 계산할 시 1000~1500 V에 해당한다. 다음의 RLC 회로 식^{11,12)}을 고려하여 출력되는 고전압이 1.5배의 마진을 갖도록 회로를 설계해야 한다.

$$L \frac{dI(t)}{dt} + R_0 I(t) + R_b I(t) + \frac{1}{C} (Q_0 + \int_0^t I(\lambda) d\lambda) = 0 \quad (3)$$

L, C 는 기폭회로 내 인덕턴스(Inductance)와 커패시턴스(Capacitance)이며 R_0 는 기폭회로의 저항을 의미한다. Q_0 는 커패시터 초기 충전값, R_b 는 시간 t 에서의 마이크로착화기 브릿지 포일 저항값을 의미하며 식 (3)을 이용하여 마이크로착화기에 흐르는 전류 I 를 계산한다^{11,12)}.

기폭회로는 점화안전장치의 최종 동작 단계를 담당하며 오작동 발생 시 우발점화 혹은 미점화를 일으킨다. 이를 방지하기 위해 고전압을 견딜 수 있는 고전압용 스위치(MCT : MOS Controlled Thyristor)를 커패시터와 마이크로착화기 사이에 설계하였고 추가적인 스위칭소자를 배치하여 신호가 여러 단계를 거쳐 전달되도록 안정성을 강화하였다.

4. 성능시험

4.1 장전/출력성능 시험

장전/출력성능 시험은 점화안전장치 조립 전 회로부 성능 검증이 목적이며 시험 결과 이상이 없으면 회로부, 착화기, 하우징 조립체를 조립한다. 구성도는 Fig. 6과 같으며 장전/출력성능 시험에서는 직접 가속도를 발생하여 회로부의 MEMS 스위치를 작동할 수 없기

때문에 MEMS 스위치가 작동하였을 때 발생하는 전압을 직접 회로부에 인가한다.

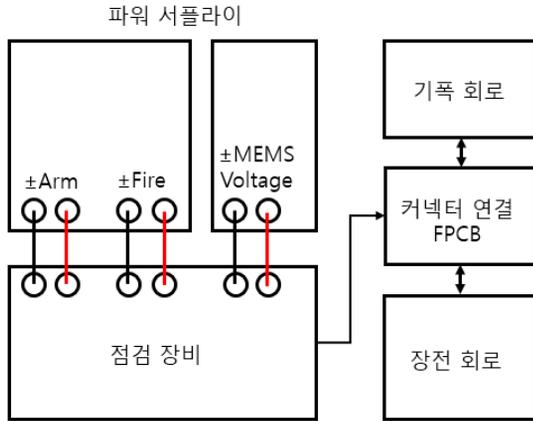


Fig. 6. Arm/Fire test diagram

파워 서플라이에서 장전, 기폭 신호에 해당하는 전압과 MEMS 스위치가 작동하였을 때 회로부 내부에 흐르는 전압을 생성하여 점검장비에 인가한다. 점검장비에는 장전, 기폭, MEMS Voltage의 신호를 제어하기 위한 ON/OFF 스위치가 있어 장전 프로세스에 따른 입력 신호들을 커넥터 연결 FPCB에 차례로 인가할 수 있다. 장전/출력성능 시험 절차는 다음과 같다.

- 1) 장전회로, 기폭회로 및 커넥터 연결 FPCB를 점검장비에 연결한다.
- 2) 파워서플라이와 점검장비를 연결하고 파워서플라이 이 전원을 켜다.
- 3) 장전 프로세스에 따라 점화안전장치 점검장비를 조작하여 차례로 신호를 입력한다.
- 4) 오실로스코프 및 디지털미터를 이용하여 장전회로 및 기폭회로 각 부위를 측정한다.
- 5) 측정된 결과를 저장 및 기록한다.

4.2 MEMS 스위치 성능 시험

MEMS 스위치 성능 시험은 외부에서 가속도를 발생시켰을 때의 MEMS 스위치 작동 여부 검증이 목적이며 성능이 검증된 MEMS 스위치만 회로부에 사용된다. 시험 구성도는 Fig. 7과 같다. 가속도 테이블에 MEMS 스위치를 설치하고 정확한 가속도 측정을 위해 MEMS 스위치 위치에 모니터링용 가속도 센서를 장착하였다.

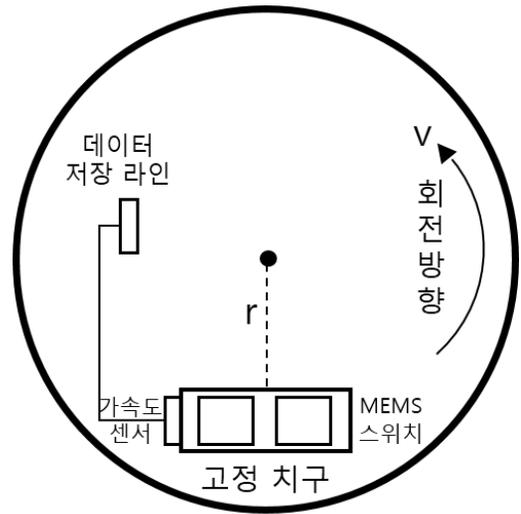


Fig. 7. MEMS switch test diagram

시험의 정확도를 높이기 위해서는 특정 가속도를 반복하여 발생시켜야 하는데 시험조건에 적합한 가속도를 발생하기 위해 다음의 식이 고려된다.

$$F = ma = mrw^2 = \frac{mv^2}{r} \quad (4)$$

F 는 구심력을 의미하며 물체의 질량 m 과 가속도 a 의 곱으로 나타낼 수 있고 원운동을 하는 물체와 원의 중심 사이의 거리 r 과 각속도 w , 속도 v 에 관하여도 정리할 수 있다. 이를 가속도와 속도, 거리에 관한 식으로 정리하면 다음과 같다.

$$a = \frac{v^2}{r} (m/s^2) \quad (5)$$

위의 식을 참고하여 가속 레이트 테이블 중심에서부터 MEMS 스위치 위치 r 과 테이블 회전속도 v 를 설정하였다. 가속 레이트 테이블을 회전시키면 식 (5)와 같이 가속도가 발생하고 MEMS 스위치의 접점이 작동하여 신호가 발생한다. MEMS 스위치 접점 동작 여부와 가속도 데이터는 저장 라인을 따라 컴퓨터에 저장된다.

4.3 EMC 시험

전자식 점화안전장치는 전자회로를 포함하고 있어 전자기 노이즈에 대한 안정성을 확보해야 하며 노이즈

즈에 대한 접화안전장치의 정상작동을 검증하기 위하여 EMC(Electro Magnetic Compatibility) 시험을 수행하였다. EMC 시험은 전자기 간섭과 전자기 내성 시험이 포함되며 전자기 노이즈의 방출량이 규격에서 정한 기준 이하인지, 외부의 전자기 노이즈 환경에서 성능을 유지할 수 있는지를 검증한다. 접화안전장치가 운용될 환경을 고려한 MIL-STD-416F의 Ground, Army에 규정된 항목에 관하여 시험을 진행하였다. 해당 규격에서 명시한 특성 요구조건은 다음과 같다.

Table 2. EMC test requirements

항목		내용
전도방사 (CE)	CE102	10 kHz ~ 10 MHz, Power Leads
전도내성 (CS)	CS101	30 Hz ~ 150 kHz, Power Leads
	CS114	10 kHz ~ 200 MHz, Bulk Cable Injection
	CS115	Impulse Excitation, Bulk Cable Injection
	CS116	10 kHz ~ 100 MHz, Cables and Power Leads, Damped Sinusoidal Transients
복사방사 (RE)	RE102	2 MHz ~ 18 GHz, Electric Field
복사내성 (RS)	RE103	2 MHz ~ 18 GHz, Electric Field

EMC 시험시설은 시험실(Test Chamber), 시험조정실(Control Room), RF 신호발생실(RF Generation Room)으로 구분되며 시험 구성도는 Fig. 8과 같다. LISN(Line Impedance Stabilization Network)는 시험대상에 정밀한 임피던스를 공급하며 시험 항목에 따른 주파수를 인가하였을 때 나타나는 현상을 점검장비와 오실로스코프를 통해 측정한다.

접화안전장치에 시험 조건들을 인가하며 점검장비와 오실로스코프를 통해 정상적으로 고전압을 충전하는지 확인한다. 방사시험(CE, RE)의 경우 접화안전장치가 전자파를 최대로 방사하는 장전상태에서 전자파 방사량이 시험 한계치를 만족하지 못할 때, 내성시험(CS, RS)은 커패시터에 충전된 전압이 비정상적으로 떨어질 때를 불합격 판정 기준으로 한다.

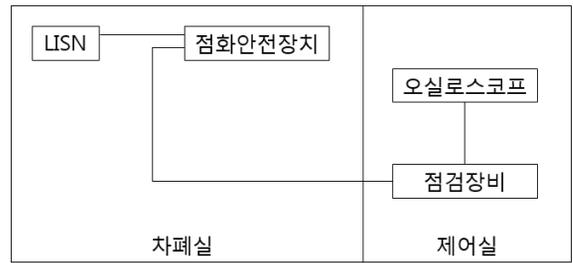


Fig. 8. EMC test diagram

4.4 시험 결과

장전/출력성능 시험으로 고전압 충전시간, 충전전압, 기폭출력크기, 펄스폭을 측정한다. 시험 결과를 통해 회로부 내의 마이크로컨트롤러 정상작동 여부와 고전압 발생 신호, Trigger 신호 정상 출력 여부 등 회로부의 전반적인 출력 성능을 확인할 수 있다. 시험결과는 Fig. 9, 10과 같다.

Fig. 9는 HV DC-DC 컨버터에서 생성한 고전압을 측정한 결과이며 X축은 시간(ms), Y축은 전압(V)을 나타낸다. 고전압의 출력값과 생성 시간을 측정한 결과는 목표 성능을 충족 하였고 고전압 발생 신호가 정상적으로 출력하는 것을 확인하였다.

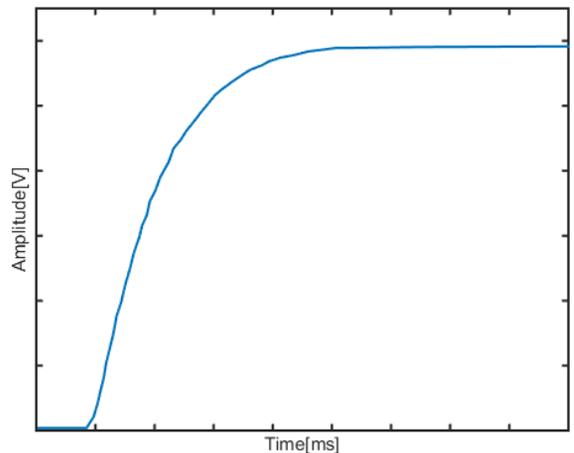


Fig. 9. Arm/Fire test result(High voltage)

Fig. 10은 커패시터에 충전된 고전압이 착화기에 인가될 때 흐르는 전압을 측정한 결과이다. X축은 시간(μs), Y축은 전압(V)을 나타내며 측정된 전압은 옴의 법칙을 이용하여 전류로 변환하였다. 그 결과 착화기 기폭이 가능한 정도로 전류가 흐르는 것을 확인하였

고 펄스폭 dt 도 설계 조건을 만족하였다. Trigger 신호 출력 여부와 고전압용 스위치(MCT)의 정상 작동 여부 또한 확인하였다.

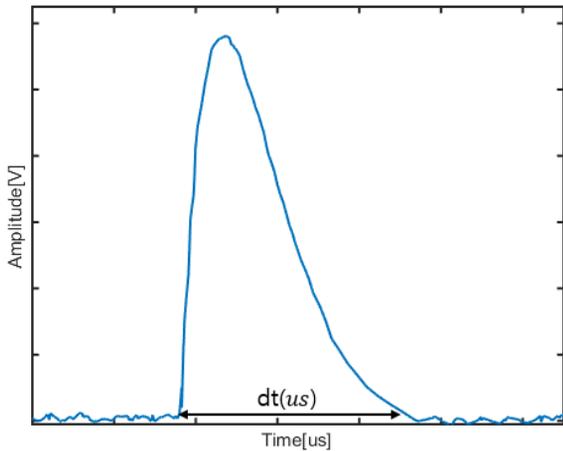


Fig. 10. Arm/Fire test result(Current)

MEMS 스위치 성능시험 결과는 Fig. 11과 같다. 실선은 레이트 테이블이 회전할 때 발생하는 가속도를 나타내며 점선은 적정 가속도가 발생하였을 때 MEMS 스위치에 흐르는 신호를 나타낸다, 가속도가 증가할 때 특정 가속도 구간에 MEMS 스위치가 작동하는 것을 볼 수 있으며 이 때 MEMS 스위치 내부의 매스와 스위치 접점이 도통되어 전류가 흘러 계단 형태의 파장이 나타났다.

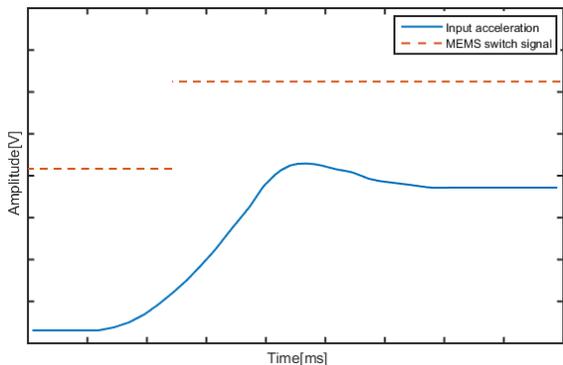


Fig. 11. MEMS switch test result

EMC 시험결과는 Fig. 12와 같다. 점선은 고전압 발생을 위한 신호이며 실선은 고전압 신호에 따른 고전

압 생성 결과이다. MIL-STD-416F의 시험 조건에 따라 시험을 수행하였을 때 Fig. 12와 같이 정상적으로 고전압을 충전하며 전압 강하 없이 충전상태를 유지하였다. 이를 통하여 전자식 점화안전장치가 전자파 간섭 환경에서 정상작동이 가능한 것을 확인하였다.

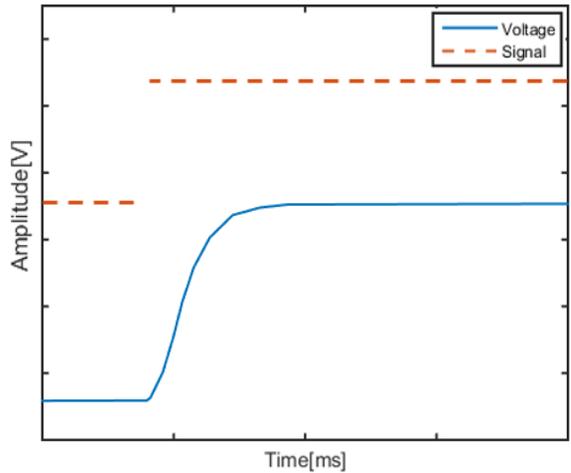


Fig. 12. EMC test result

5. 결론

본 논문에서는 전자식 점화안전장치의 회로부 설계와 장전/출력 성능시험, MEMS 스위치 성능시험, EMC 시험을 통한 점화안전장치의 전반적인 성능검증에 관하여 기술하였다. 시험 항목에서 목표 성능치를 만족하는 결과를 보였으며 추가 환경시험으로 안정성을 보증하며 CBT(Closed Bomb Test)를 통한 점화성능을 확인할 예정이다.

현재 개발 중인 전자식 점화안전장치는 MEMS 스위치 기술을 적용하여 외부 가속도 발생 여부를 측정할 수 있고 장전 프로세서에 따른 신호들의 유효성을 자체 판단할 수 있다. 이는 선진국에서 제작한 전자식 점화안전장치들^[13,14]과 비교했을 때 상당한 수준의 기술이며 다양한 분야에 해당 기술을 적용할 수 있을 것으로 본다.

전자식 점화안전장치는 구동부를 전자회로 기관으로 대체하기 때문에 형상을 다양화할 수 있어 공간 활용성이 우수하고 회로부를 구성하는 부품을 소형화한다면 지금보다 더 소형화된 점화안전장치 개발이

가능하고 다양한 추진기관에 활용 할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 ‘유도탄용 고성능 PMD 기술’ 사업의 일환으로 수행되었음

References

- [1] Hwang J. M., Jang S. G., “Review on the Technical Development of Arm Fire Device,” The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 2016 Spring Conference, pp. 200-203, 2016.
- [2] Jang S. G., Lee H. N., Oh J. Y. and Oh S. J., “Design and Output Characteristic Analysis of Electro-Mechanical Ignition Safety Device,” Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 39, No. 12, pp. 1166-1173, 2011.
- [3] https://en.wikipedia.org/wiki/1967_USS_Forrestal_fire
- [4] “NASA Space Vehicle Design Criteria, Solid Rocket Motor Igniters,” National Technical Information Service, Springfield, Virginia, NASA SP-8051, Mar. p. 51, 1971.
- [5] Sipes W. J., “Reliable Safe and Arm Devices,” AIAA 34th Joint Propulsion Conference, AIAA98-3627, July, 1988.
- [6] Jang S. G., Jung J. S. and Kim I. S., “Development of Arm Fire Device for Solid Rocket,” The Korean Society of Propulsion Engineers 2005 Fall Conference, pp. 169-172, 2005.
- [7] Hwang D. G., Kim J. H., Lee C. I. and Jang S. G., “Study for Miniaturization Technology of Arm Fire Device,” The Society of Propulsion Engineers 2016 Fall Conference, pp. 1118-1121, 2016.
- [8] Hwang J. M., Jang S. G., “The Design and Development of the Arm Fire Device Without Actuator,” The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 2017 Spring Conference, pp. 146-147, 2017.
- [9] Jang J. S., Gil Y. B., Hwang Y. S., Park C. H., Kim J. I. and Jang S. G., “MEMS(Micro Electromechanical Systems) Switch for Ignition SAU(Safe Arm Unit)”, The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, pp. 1017-1021, 2012.
- [10] Hwang J. K., Ryu D. H., Park C. H., Jang S. G., Lee C. I., and Kim Y. K., “Design and Fabrication of a Silicon-based MEMS Acceleration Switch Working Lower Than 10 g”, Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 27, No. 6, 2017.
- [11] Kim K. J., Kim K. H. and Jang S. G., “Prediction Model and Verification of Explosive Ignition in Exploding foil Initiator System,” Proceedings of the 2nd Thermal and Fluid Engineering Conference, TFEC2017, 2017.
- [12] Kim K. J., Kim K. H. and Jang S. G., “Prediction and Analysis of Threshold Charging Voltage for Exploding Foil Initiator in Explosive Charge Detonation System,” The 2016 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology O, 2016.
- [13] [https://www.orbitalatk.com/.../propulsion.../orbital_atk_motor_catalog_\(2012\).pdf](https://www.orbitalatk.com/.../propulsion.../orbital_atk_motor_catalog_(2012).pdf)
- [14] <https://www.e2v.com/resources/account/download-literature/124>