

# 임베디드 시스템을 위한 스퀴브 착화 회로 및 점검 신뢰도 개선

김대옥, 이민석\*  
국방과학연구소

## Reliability Improvement of Squib Ignition Circuit and the Inspection in Embedded Systems

Daeok Kim, Min-Seok Lee\*  
Agency for Defense Development

**요약** 자동차, 군용 항공기, 미사일, 우주 비행체 등에는 에어백, 폭발 볼트와 같은 1회성 품목을 동작시키기 위해 스퀴브가 적용되는데 이러한 스퀴브를 착화시키기 위한 회로는 신뢰도가 매우 중요하며 운용 전 자체 점검 기능을 통해 스퀴브의 상태를 확인하는 것이 요구된다. 특히, 방위 산업과 항공 우주 분야에서는 더욱 강화된 신뢰성을 요구하고 있다. 하지만, 스퀴브를 착화시키기 위한 회로는 불량 검출이 쉽지 않고 사용 후 원상복구가 불가능한 장치이다. 또한, 폭발물에 스퀴브가 연결된 활성 상태에서의 점검은 오기폭의 위험이 상존하여 점검할 때 과전류가 흐르지 않도록 설계되어야 한다. 기존 연구를 분석하여 부족한 부분을 보완하기 위해서 본 연구를 진행하였다. 본 논문에서는 스퀴브 착화 회로를 High-side 기폭 회로와 Low-side 기폭 회로로 나누어 점검할 수 있도록 설계하여 활성 상태에서 미소 전류만으로도 스퀴브의 상태를 점검할 수 있고 착화 회로의 작동 점검까지도 수행할 수 있는 방안을 제시하고, 제안된 점검 방식과 회로는 방위 산업의 임베디드 시스템을 통해서 사용되고 검증되었다.

**Abstract** Squib is applied to automobiles, military aircraft, missiles, and space vehicles to operate single-use items, such as airbags and explosion bolts. The reliability of the squib ignition circuit is essential, and it is necessary to check its status through a self-inspection function before operation. In particular, the defense industry and aerospace fields are demanding more reliability of the inspection of the squib ignition system for the embedded system. On the other hand, the squib ignition circuit cannot easily detect defects and cannot be restored to its original state after use. In addition, an inspection in the active state where the squib is connected to the explosive should be designed to prevent an overcurrent from flowing during the inspection because of the risk of erroneous detonation. This study was conducted to compensate for the fault by analyzing existing studies. This paper proposes a method to check the status of the squib by dividing the squib ignition system into High-side and Low-side squib activation circuits so that it can check the status of the squib with only a minute current in an active state and perform an operation inspection of the ignition circuit. In addition, the proposed inspection method and circuit were used and verified through the embedded system of the defense industry.

**Keywords** : Embedded System, Squib, Squib Ignition Circuit, Inspection of Squib Ignition Circuit, Reliability of Squib Ignition Circuit

---

\*Corresponding Author : Min-Seok Lee(Agency for Defense Development)

email: mslee@add.re.kr

Received February 5, 2024

Accepted March 8, 2024

Revised March 7, 2024

Published March 31, 2024

## 1. 서론

최근 다양한 분야에서 임베디드 시스템의 소형화, 저가화를 시도하고 있어 시스템의 신뢰도 저하가 우려되고 있다. 특히, 방위 산업과 항공 우주 분야에서는 더욱 강화된 신뢰성을 요구하고 있어 신뢰성 제고를 위한 연구가 필요하다. 본 논문에서는 임베디드 시스템 중에서도 신뢰성이 가장 우선시되는 스쿼브 착화 회로의 신뢰성 및 안전성을 향상시킬 수 있는 설계 및 점검 방안을 제안한다.

### 1.1 스쿼브 착화 회로 개요

방위 산업 및 항공 우주 분야의 임베디드 시스템에는 열전지 착화와 같은 비행과 관련된 중요한 역할을 하는 스쿼브 장치가 탑재되어 있다. 해당 스쿼브 시스템은 고위험 장비들이므로 시스템이 운용되기 전에 충분한 점검과 적절한 운용 절차가 필요하다.

즉, 오작동에 대한 안전 보호기능으로 스쿼브 착화 회로에 과도한 전류가 흐르는 것을 방지하는 기능 구현이 반드시 필요하다[1,2]. 추가적인 안전 보호기능으로 임무 단계별 선택적으로 스쿼브 착화를 막을 수 있는 통제 기능도 필요하다[3].

Fig. 1은 스쿼브 착화 시스템의 개념도이다. 해당 시스템의 제어부를 통해서 착화신호 안전성 강화와 착화시 과전류를 방지했고[4], 임무 단계별 선택적 스쿼브 착화 통제를 구현했다[3]. 또한, 앞선 연구를 통해서 안전조치 회로가 기계식 릴레이들의 조합 회로의 문제점을 보완하여 MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor)과 BJT (Bipolar Junction Transistor)의 조합으로 개선되었다[3,5,6]. 기계식 릴레이 방식은 비행 중에 불특정 외부요인으로 인한 오동작의 가능성이 있었고, 이를 개선한 것이 MOSFET을 이용하여 스쿼브 착화 전원과 스쿼브 점검 전원을 선택적으로 공급할 수 있게 만든 회로이다[3].

Fig. 1의 착화전원 감속회로는 기폭 전원의 전압을 천천히 상승시키는 Slow Starter회로이다[7]. 해당 기능은 전압의 상승시간을 지연시켜 기생 커패시턴스에 의해 전계효과와 트랜지스터의 오동작 동작을 방지한다[4]. 스쿼브(파이로)와 연결된 High-Side/ Low-Side 기폭회로는 제어부를 통한 각각의 착화 명령 신호에 의해서 동작한다.

기존 연구의 부족한 부분을 보완하기 위해서 본 연구를 진행하였다. 제안하는 스쿼브 착화 회로와 점검에 대해서는 다음 장부터 상세히 설명하며, 제시한 점검 방법이 신뢰도 향상에 기여할 것으로 기대된다.

## 2. 본론

### 2.1 기존 스쿼브 착화 회로 및 점검

Fig. 2는 스쿼브 점검을 위한 회로이다[4]. Test 전원은 전류 제한 기능으로 전원 감속 회로가 포함되어 있으며, 스쿼브 상태 감지 회로를 통해서 스쿼브의 정상 유무

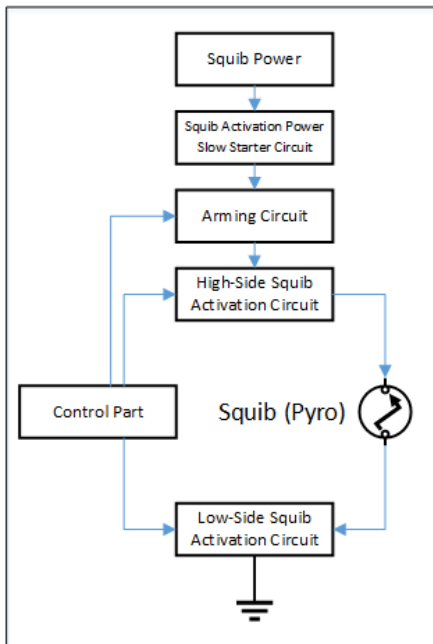


Fig. 1. Conceptual diagram of the squib ignition systems

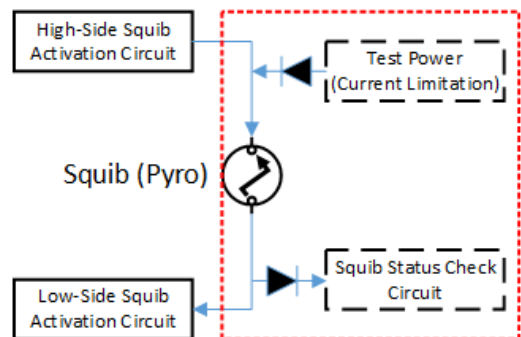


Fig. 2. Circuit for the ignition and squib status check[4]

를 판단할 수 있다. Fig. 2의 회로에서는 스퀴브 점검을 위한 전류가 약 2~3mA가 흐른다[4]. 3mA 수준의 전류는 오기폭의 우려가 없는 안전한 양이지만 만약 점검을 위한 전원 소스에 고장이 발생하여 기폭이 가능한 전류가 흐르게 될 경우 이를 방지할 수 있는 대책이 없다. 또한 해당 기술은 스퀴브의 정상 유무만 판단할 수 있고, 전체 스퀴브 착화 시스템의 정상 유무를 판단하는데 제한적이다. 이러한 문제들을 해결하기 위해서 전체 스퀴브 착화 시스템의 정상 유무를 판단할 수 있고 오기폭을 방지할 수 있는 회로와 점검 방식을 제안한다.

### 2.2 제안하는 스퀴브 착화 회로 및 점검

Fig. 3에는 전체 스퀴브 착화 시스템을 점검하기 위한 첫 번째 방안을 보였다. 그림에서 볼 수 있듯이 점검용 전원 회로를 통해서 High-Side와 Low-Side의 기폭회로와 스퀴브까지 모두 점검한다. High-Side 점검과 Low-Side 점검으로 나눠서 설명하면 High-Side 점검은 점검용 전원 회로를 켜고 제어부에서 High-Side 점검 명령을 받아서 High-Side 기폭회로의 정상 유무와 스퀴브의 연결성을 확인한다. 점검 방법은 점검용 전압이 인가되고 High-Side가 On 되었을 때 A/D 변환기에서 스퀴브 하단의 전압을 읽어 기준전압(점검용 전압 -

x[volt]) 이상이 계속되면 정상으로 판정하고 미만이면 비정상으로 판정한다. Low-Side 점검은 점검용 전원 회로를 켜고 제어부에서 High-Side 점검 명령과 Low-Side 점검 명령을 받아서 Low-Side 기폭회로의 정상 유무를 확인한다. 점검 방법은 점검용 전압 인가, High-Side On, Low-Side On 되었을 때 A/D 변환기에서 스퀴브 하단의 전압을 읽어 0V 근처의 값이 계속되면 정상으로 판정하고 그렇지 않으면 비정상으로 판정한다. 이때 High-Side 점검용 전원 회로에서 제한된 전류만큼 스퀴브에 전류가 흐르게 된다. 통상적인 제한 전류가 수 mA 이므로 해당 전류가 점검 중 매번 스퀴브에 흐르게 된다. 수 mA 수준의 전류로 스퀴브가 기폭되지는 않지만 스퀴브에 가해지는 스트레스를 줄이기 위해서는 점검 전류를 최소화하는 것이 점검 중 안전성을 향상시킬 수 있다.

본 논문에서 제시한 첫 번째 방안은 매 점검 중 스퀴브에 수 mA의 전류가 흐르는 문제와 2.1절에서 언급한 점검용 전원 회로의 오작동으로 인한 과전류가 스퀴브에 흘러 오기폭이 될 수 있는 단점이 있다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 Fig. 4와 같이 두 번째 방안을 제안한다. 첫 번째 제시한 방안과 가장 큰 차이점은 High-Side 점검용 전원 회로와 Low-Side 점검용 전원

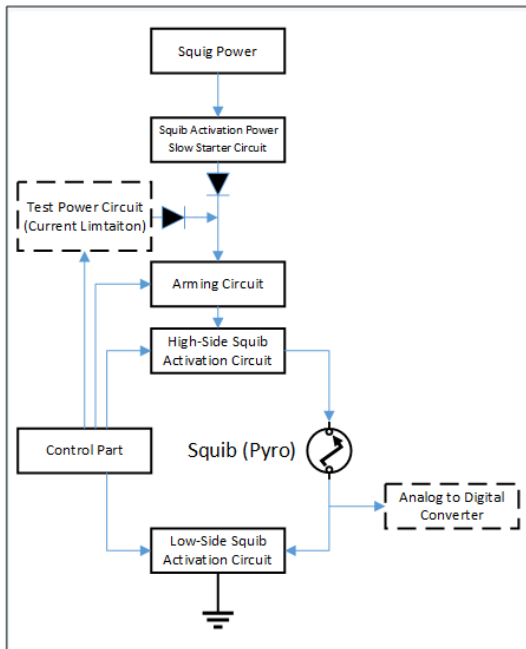


Fig. 3. The 1st proposed squib ignition systems

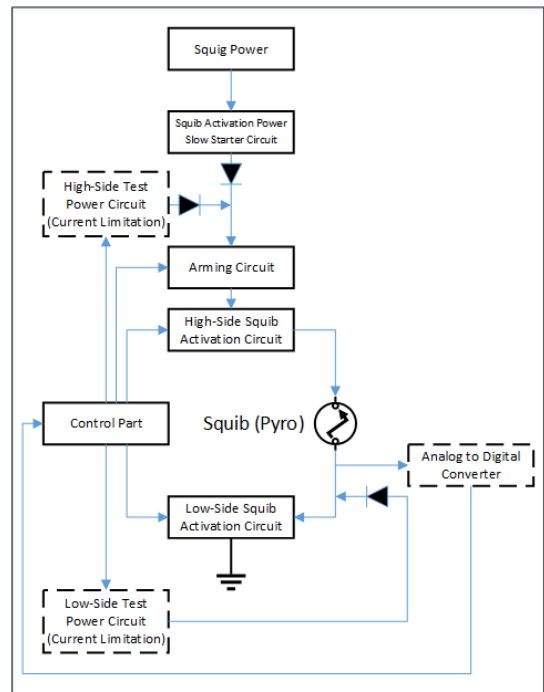


Fig. 4. The 2nd proposed squib ignition systems

회로를 각각 따로 사용하여 High-Side 기폭회로와 Low-Side 기폭회로를 분리하여 점검하는 것이다. High-Side 점검은 Low-Side를 끈 상태에서 High-Side 점검용 전원을 사용하여 점검한다. 이때 Low-Side는 Off 상태이므로 점검용 전류가 리턴 패스로 흐르지 못 한다. Low-Side 점검은 High-Side 점검용 전원과 High-Side를 끄고 Low-Side 점검용 전원만 켜 상태에서 점검한다. 따라서 스쿼브 하단에 점검용 전원이 인가되더라도 High-Side가 꺼진 상태이므로 점검 전류가 스쿼브로 흐르지 못한다. Fig. 5와 Fig. 6은 각각 Fig. 3과 Fig. 4를 간략화한 그림이다. Fig. 5는 High-Side와 Low-Side 점검 시 점검용 전원회로에서 공급하는 전류가 모두 스쿼브에 흐를 수 있는 구조이고 Fig. 6은 High-Side 점검 시 Low-Side가 Off 상태이므로 스쿼브에 흐르는 전류는 A/D 변환기 입력단의 분압 저항에 의해 제한된다.

따라서 점검 전류와 상관없이 스쿼브에 흐르는 전류를 A/D 변환기의 분압 저항값을 조정하여 수십  $\mu\text{A}$  수준으로 제한 할 수 있고, 점검 전원의 오작동으로 큰 전류가 출력 될 수 있는 상황에서도 역시 스쿼브에 흐르는 전류를 수십  $\mu\text{A}$  수준으로 제한하여 오기폭을 방지할 수 있는 장점이 있다.

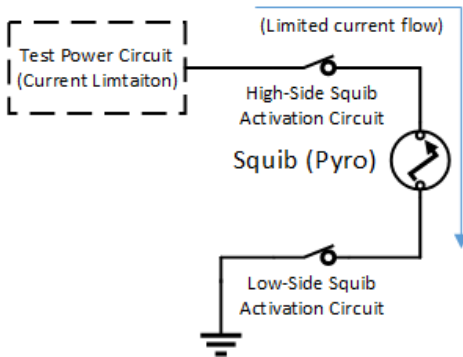


Fig. 5. The squib current of the 1st proposed squib ignition systems

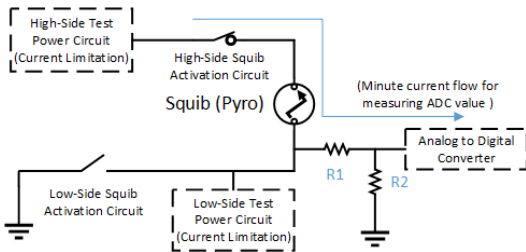


Fig. 6. The squib current of the 2nd proposed squib ignition systems

Table 1. ADC value for the checking squib ignition system

Inspection Type	Initial Status Check	L-Side Check1	L-Side Check2	H-Side Check1	H-Side Check2
High-Side Test Power Circuit	OFF	OFF	OFF	ON	ON
High-Side Check Command	OFF	OFF	OFF	OFF	ON
Low-Side Test Power Circuit	OFF	ON	ON	OFF	OFF
Low-Side Check Command	OFF	OFF	ON	OFF	OFF
ADC Value	Under 0.5V	Upper 10V	Under 0.5V	Under 0.5V	Upper 10V

Table 1에는 각 점검 별로 점검용 전원 회로와 점검 명령에 대한 동작 결과 및 ADC의 값을 정리한 결과를 보였다. Table 1에서 L-Side/ H-Side는 Low-Side/ High-Side를 의미한다. Low-Side 점검 시에는 초기 상태 점검/ Low-Side 점검1/ 점검2을 통해서 ADC의 값을 확인한다. 즉, Low-Side 점검1에서는 ADC Value가 10V 이상이면 정상이고, Low-Side 점검2에서는 ADC Value가 0.5V 이하이면 정상이다. High-Side 점검 시에는 H-Side 점검1/ 점검2를 통해서 ADC의 값을 확인한다. 즉, High-Side 점검1에서는 ADC Value가 0.5V 이하이면 정상이고, High-Side 점검2에서는 ADC Value가 10V 이상이면 정상이다. 그러므로, 해당 점검들을 통해서 전체 스쿼브 착화 시스템을 점검함과 동시에 스쿼브에 흐르는 전류를 최소화한다. 이를 증명하는 데이터는 다음 장에서 확인하고 결과를 분석한다.

### 3. 실험 결과

실험의 온도 조건은 실온 24 $^{\circ}\text{C}$  기준으로 진행됐으며, 회로 장치의 보드에 온도 센서는 특정 위치에서 35~45 $^{\circ}\text{C}$ 이다. 실험 결과는 Fig. 4와 같은 스쿼브 착화 시스템에서 High-Side/ Low-Side 점검 시 각 단계에서 측정된 ADC의 값을 보여준다. Table 1의 L-Side 점검1/ 점검2, H-Side 점검1/ 점검2의 ADC Value와 동일한 결과임을 볼 수 있다. 따라서 해당 결과로 전체 스쿼브 착화 시스템이 정상이라는 것을 검증할 수 있다. 입력 전

원의 전압을 변경하며 테스트를 진행했다. 20V~38V 사이의 입력 전원을 순차적으로 측정했지만, 대표적인 20V, 28V, 38V의 실험 결과를 Fig. 7, Fig. 8, 및 Fig. 9에 보여준다. 각 결과에서 Message-10 ~ Message-13의 측정치를 보면 모두 정상 동작했음을 확인할 수 있다.

```
VIN = 20.0V =====
Message Response -----
Message-01(SQ_TEST_RESULT) : 0000
Message-02(SQ_CHAN_INF01)  : 0000
Message-03(SQ_CHAN_INF02)  : 0000
Message-04(SQ_SS_PWR1)     : 17.138140
Message-05(SQ_SS_PWR2)     : 0.000000
Message-06(SQ_PWR1)        : 16.635700
Message-07(SQ_PWR2)        : 0.000000
Message-08(LSIDE_PWR1)     : 15.328080
Message-09(LSIDE_PWR2)     : 0.000000
Message-10(CHK_VOLT)       : 15.324420 // Low-Side Off
Message-11(CHK_VOLT)       : 0.069540 // Low-Side On
Message-12(CHK_VOLT)       : 0.081740 // High-Side Off
Message-13(CHK_VOLT)       : 16.793301 // High-Side On
value = 0 = 0x0
```

Fig. 7. ADC Value of each inspection step of the squib ignition systems (Input power: 20V)

```
VIN = 28.0V =====
Message Response -----
Message-01(SQ_TEST_RESULT) : 0000
Message-02(SQ_CHAN_INF01)  : 0000
Message-03(SQ_CHAN_INF02)  : 0000
Message-04(SQ_SS_PWR1)     : 25.094980
Message-05(SQ_SS_PWR2)     : 0.000000
Message-06(SQ_PWR1)        : 24.594980
Message-07(SQ_PWR2)        : 0.000000
Message-08(LSIDE_PWR1)     : 21.759920
Message-09(LSIDE_PWR2)     : 0.000000
Message-10(CHK_VOLT)       : 21.789200 // Low-Side Off
Message-11(CHK_VOLT)       : 0.071980 // Low-Side On
Message-12(CHK_VOLT)       : 0.081740 // High-Side Off
Message-13(CHK_VOLT)       : 23.425220 // High-Side On
value = 0 = 0x0
```

Fig. 8. ADC Value of each inspection step of the squib ignition systems (Input power: 28V)

```
VIN = 38.0V =====
Message Response -----
Message-01(SQ_TEST_RESULT) : 0000
Message-02(SQ_CHAN_INF01)  : 0000
Message-03(SQ_CHAN_INF02)  : 0000
Message-04(SQ_SS_PWR1)     : 34.833019
Message-05(SQ_SS_PWR2)     : 0.000000
Message-06(SQ_PWR1)        : 34.334240
Message-07(SQ_PWR2)        : 0.000000
Message-08(LSIDE_PWR1)     : 29.661860
Message-09(LSIDE_PWR2)     : 0.000000
Message-10(CHK_VOLT)       : 29.680161 // Low-Side Off
Message-11(CHK_VOLT)       : 0.068320 // Low-Side On
Message-12(CHK_VOLT)       : 0.073200 // High-Side Off
Message-13(CHK_VOLT)       : 31.702921 // High-Side On
value = 0 = 0x0
```

Fig. 9. ADC Value of each inspection step of the squib ignition systems (Input power: 38V)

앞에서 수행한 Squib 점검 방법만으로는 스퀴브에 흐르는 전류가 수십  $\mu A$ 로 제한된다는 것을 보일 수 없어 이는 Fig. 5의 R1과 R3값으로 유추했다. 예를 들어, 입력 전압이 28V일 때 R1이 300k $\Omega$ 이고, R2가 100k $\Omega$  이라면 A/D 컨버터 쪽으로 흐르는 전류는 대략 70 $\mu A$ 이다. 해당 회로에서 다른 부분의 저항은 무시할 정도이다. 이 정도의 미세 전류라면 기존 방법 대비 점검 시 스퀴브가 받는 스트레스가 무시할 만하다고 할 수 있다. 또한, 전류 제한 회로의 오동작으로 발생하는 과전류에도 스퀴브는 보호될 수 있다.

#### 4. 결론

임베디드 시스템에서 하드웨어와 소프트웨어의 신뢰도 강화에 대한 요구는 점점 커지고 있고, 그 중에서도 가장 신뢰도를 필요로 하는 스퀴브 착화 회로의 신뢰성과 안전성을 개선시키는 설계 및 점검 방안을 제안하였다.

본 논문에서는 기존 스퀴브 착화 회로와 점검 방식의 문제점들을 분석하여 신뢰도 강화 방법을 제안했으며 점검 시 전체 스퀴브 착화 시스템의 정상 유무를 판단할 수 있고, 스퀴브에 흐르는 전류를 최소화할 수 있음을 확인하였다. 또한, 과전류로 인한 스퀴브 오기폭의 방지가 가능함을 확인하였다. 이로 인해 전체 스퀴브 착화 시스템의 신뢰도를 향상시킬 수 있고, 스퀴브에 대한 신뢰도와 안전성을 보다 강화하였다.

자동차, 군용 항공기, 우주 비행체, 등에서 사용되는 스퀴브는 1회성 품목으로 불량 검출이 쉽지 않고 사용 후 원상복구가 불가능한 장치이다. 제안된 방안을 다양한 임베디드 시스템을 위한 스퀴브 착화 회로 및 동작 점검에 적용한다면 해당 회로의 신뢰도 개선에 크게 기여할 것으로 기대된다.

추후 연구에서는 환경시험을 통해서 다양한 환경과 조건을 추가하고, 장기간 운용에 대한 평가를 통해서 신뢰도를 강화하겠다.

#### References

[1] G. A. Gonzalez, M. H. Lucy, and J. J. Massier, "Guidelines of the Design of Electropyrotechnic Firing Circuit for Unmanned Flight and Ground Test Projects," *Technical Memorandum(NASA/TM-2013-217997)*, NASA Langley Research Center, 2013.

<https://ntrs.nasa.gov/citations/20130013693>

- [2] R. Ouaida, J. F. Palma, and G. Gonthier, "Hybrid Protection based on Pyroswitch and Fuse Technologies for DC Applications," in Proc. *Symposium de Genie Electrique*, pp.1-7, June, 2016, <https://hal.science/hal-01361696>
- [3] H. C. Lee, Y. S. Kwon, "Selective squib activation and check circuit design for safeguarded multi-phase missions," *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, Vol. 21, No.5, pp. 684-696, 2018, DOI: <https://doi.org/10.9766/KIMST.2018.21.5.684>
- [4] W. S. Kim, K. H. Ahn, M. S. Lee, "Squib Ignition and Status Check Circuits Design for Compact Embedded Systems in Guided Missiles," *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, Vol. 26, No.1, pp. 64-71, 2023, DOI: <https://doi.org/10.9766/KIMST.2023.26.1.064>
- [5] Y. S. Kwon, N. R. Park, G. M. Kwak, S. S. Jung, and D. G. Roh, "Designing of Verifiable Driving Circuit for Checking the Pyro System Separately," in Proc. *17<sup>th</sup> Precision Guided Missile Conference*, pp. 283-285, Oct., 2014
- [6] S. S. Jung, G. M. Kwak, D. G. Roh, H. C. Lee, and Y. S. Kwon, "A Reliable Constant-Current Driving Circuit Design for the Stable Check and Activation of Pyro Systems," in Proc. *2016 KIMST Fall Conference*, pp. 559-560, Nov., 2016.
- [7] A. Kaknevičius and A. Hoover, "Managing Inrush Current," *Texas Instruments Application Report (SLVA670A)*, pp. 1-13, Aug. 2014, <https://ti.com/lit/an/slva670a/slva670a.pdf>

이 민 석(Min-Seok Lee)

[정회원]



- 1996년 2월 : 전북대학교 정보통신공학과 (공학석사)
- 2015년 2월 : 충남대학교 컴퓨터공학과 (공학박사)
- 1996년 1월 ~ 현재 : 국방과학연구소 수석연구원

<관심분야>

실시간시스템, 저전력 컴퓨팅, 고신뢰 착화시스템

김 대 옥(Daeok Kim)

[정회원]



- 2007년 2월 : 광주과학기술원 정보기전공학부 (공학석사)
- 2007년 3월 ~ 2011년 7월 : LG 전자 주임연구원
- 2011년 9월 ~ 2021년 12월 : 삼성전자 수석연구원
- 2021년 12월 ~ 현재 : 국방과학연구소 선임연구원

<관심분야>

임베디드 시스템, 고신뢰 착화시스템