

## 전자식 점화안전장치 회로 시스템 내부 소자 변화에 따른 민감 소자 확인 및 출력 특성에 대한 신뢰성 분석 프로세스

임태흥<sup>1)</sup> · 변강일<sup>2)</sup> · 장승교<sup>3)</sup> · 백승준<sup>4)</sup> · 손영갑<sup>5)</sup> · 추호성<sup>\*1)</sup>

<sup>1)</sup> 홍익대학교 전자전기공학과

<sup>2)</sup> UNIST 전기전자컴퓨터공학부

<sup>3)</sup> 국방과학연구소 제4기술연구본부

<sup>4)</sup> 안동대학교 신뢰성교육연구센터

<sup>5)</sup> 안동대학교 기계자동차공학과

### Identifying Sensitive Components and Analyzing Reliability Process to Output Characteristic for an EAFD Circuit System According to Changes of Internal Component Values

Tae Heung Lim<sup>1)</sup> · Gangil Byun<sup>2)</sup> · Seung-gyo Jang<sup>3)</sup> · Seungjun Back<sup>4)</sup> · Youngkap Son<sup>5)</sup> · Hosung Choo<sup>\*1)</sup>

<sup>1)</sup> School of Electronic Electrical Engineering Hongik University, Korea

<sup>2)</sup> School of Electrical & Computer Engineering, UNIST, Ulsan, Korea

<sup>3)</sup> The 4th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

<sup>4)</sup> Reliability Education and Research Center, Andong National University

<sup>5)</sup> Department of Mechanical & Automotive Engineering, Andong National University

(Received 10 April 2018 / Revised 28 June 2018 / Accepted 24 August 2018)

#### ABSTRACT

In this paper, we analyzed the operation of the ignition circuit for electronic arm and fire device(EAFD), and investigated the sensitive elements of the circuit system. For reliability analysis, the EAFD ignition circuit was modeled using the PSpice simulation tool, and the output results of the circuit were examined by changing the tolerance of each circuit element. Monte Carlo simulation was used by maintaining the values of the observed sensitive elements at  $\pm 10\%$  of the original values and adjusting the values of the other components according to a random distribution. The histogram results of the output peak currents and pulse widths were represented by Weibull and Burr type XII function fittings in three cases(element values are  $+10\%$ ,  $0\%$ ,  $-10\%$  of original). For the output peak currents, mean values were 1.0028, 1.0034, and 1.0050, where the variance values were calculated as 0.0398, 0.0396, and 0.0290 using the Weibull function fitting, respectively. For pulse widths, the mean values of 0.9475, 0.9907, and 1.0293 with the variance values of 0.0260, 0.0251, and 0.0238 were obtained using the Burr Type XII function fittings.

Key Words : EAFD(전자식 점화안전장치), Reliability Analysis of Circuit System(회로 시스템의 신뢰성분석), Output Characteristics of the EAFD Circuit(EAFD 회로 출력 특성), Analysis of Sensitive Components(민감 소자 분석)

\* Corresponding author, E-mail: hschoo@hongik.ac.kr

Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

## 1. 서론

로켓, 미사일, 폭발물 등은 외부에서 발생 가능한 EMI, 정전기, 충격 등의 위협으로부터 보호하기 위한 점화안전장치가 필요하다. 최근에는 기존 전기-기계식 점화안전장치인 EMISD(Electro-Mechanical Ignition Safety Device)에 비해 소형화 및 빠른 점화 반응 속도를 가지는 전자식 점화안전장치인 EAFD(Electronic Arm and Fire Device)를 사용하는 추세이다<sup>[1,2]</sup>. EAFD는 기본적으로 점화회로, LEEFI(Low Energy Exploding Foil Initiator), TBI(Through Bulkhead Initiator)로 나눌 수 있다. 이 중 점화회로는 EAFD의 장전과 높은 고전압을 이용하여 점화가 이뤄지는 부분으로 회로의 오작동이 없어야 하고, 점화를 위한 정상작동이 필수적이다<sup>[3-5]</sup>. 또한, 점화회로가 정상적으로 기폭관을 원하는 시간에 정확히 기폭 시킬 수 있는 정밀한 회로를 설계해야 하며, 제작 공차의 영향을 최소화 하여 LEEFI를 기폭 시킬 수 있는 고전압 및 고전류를 출력하는 것이 필수적이다. 이와 같이 고전압, 고전류를 출력하며 정확한 기폭시간을 요구하는 회로는 시스템 관리 차원에서 회로 시스템에 대한 신뢰성분석을 필요로 한다. 전기전자 시스템의 신뢰성분석에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있으며<sup>[6-8]</sup>, 전자회로시스템에 대한 신뢰성 분석은 시스템의 성능 보다는 부품들의 물리적 고장 현상에 기반한 CFR(Constant Failure Rate), MTBF(Mean Time Between Failure) 방식을 이용하는 연구가 대부분 수행되어 왔다<sup>[9-10]</sup>. 그러나 EAFD 회로와 같이 유도무기에 적용되어 제작 후 수 년에서 수 십년까지 저장하고 있다가 일회성으로 사용되는 원샷 시스템의 경우에는 기존 CFR, MTBF에 근거하는 운용 시스템(operating system)의 신뢰성 평가 방법이 부적합하다. 따라서 EAFD와 같이 일회성으로 사용하는 회로시스템의 신뢰성 평가를 위해서는 시스템 성능의 규격에 대한 순응도로 표현되는, 즉 성공확률로 표현될 수 있는 성능 기반의 새로운 신뢰성 평가방법이 필요하다. 이러한 신뢰성 평가방법은 모델링 및 시뮬레이션 기법을 활용하여 궁극적으로 경제적인 신뢰성분석을 수행하는데 유용하게 적용될 수 있다.

본 논문에서는 성능 기반의 EAFD의 신뢰성분석을 수행한 결과를 제시하였다. 신뢰성분석을 수행하기 위하여 EAFD 기폭회로를 정류회로부, 고전압 생성부, 기폭트리거부, 기폭관 작동부로 분류하고, 각 동작부에 대한 회로 모델링을 진행하였다. 모델링된 기폭회로의

동작원리를 분석하였고, 회로 내의 구성소자들 중 가장 민감한 소자를 관찰하기 위해 소자별 최대 출력 전류값과 펄스폭에 영향을 주는 공차를 변량으로 적용하였다. 민감소자의 소자값을 기본 소자값과 공차( $\pm 10\%$ )를 적용한 값으로 변경하면서 몬테카를로 시뮬레이션을 진행하였다. 이 때 나머지 수동 소자들에는 균일확률분포의 변량을 적용하였다. 몬테카를로 시뮬레이션으로 산포도를 도출하였으며, 도출된 산포도에 따라 커브피팅을 통해 EAFD 회로 시스템에 대한 신뢰성을 최종 확인하였다.

## 2. EAFD의 회로 동작 및 민감소자 분석

Fig. 1은 EAFD 회로의 간략화 된 블록다이어그램으로 회로 시스템은 정류회로부, 고전압 생성부, 충전전압 점검부, 기폭트리거부, 기폭관 작동부로 구분 될 수 있다. 먼저 회로에 장전신호가 입력이 되면, 정류회로부에서 수동소자를 이용한 LC, RC 필터와 레귤레이터에 의해 일정한 전압을 출력한다. 출력된 전압은 고전압 생성부의 DC-DC 컨버터에 의해 보다 높은 전압으로 변환된 후 고전압 커패시터에 충전이 된다. 커패시터에 충전이 완료 시 충전전압 점검부를 통해 확인이 가능하고, 이 때 기폭트리거부에서 기폭신호를 인가할 수 있다. 인가된 기폭신호는 기폭관 작동부의 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor) 소자에 의해 LEEFI를 기폭시킨다<sup>[9]</sup>. Fig. 2는 두 입력 신호인 장전신호( $V_{ARM}$ ) 및 기폭신호( $V_{FIRE}$ )를 나타낸다. 장전신호의 경우 일정한 DC 전압을 인가하고, 기폭신호는 장전이 완료된 상태에서 기폭을 원하는 시간에 스위칭신호를 기폭트리거부에 인가한다. Fig. 3은 최종 기폭관작동

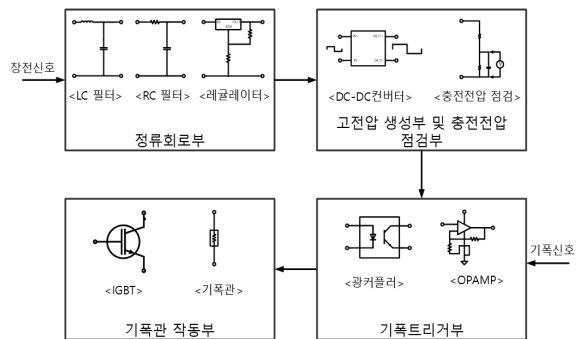


Fig. 1. Block diagram of the EAFD circuit system

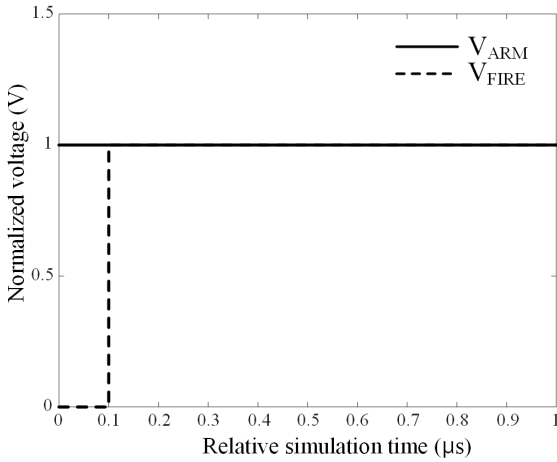


Fig. 2. Arming and fire signals in the time domain

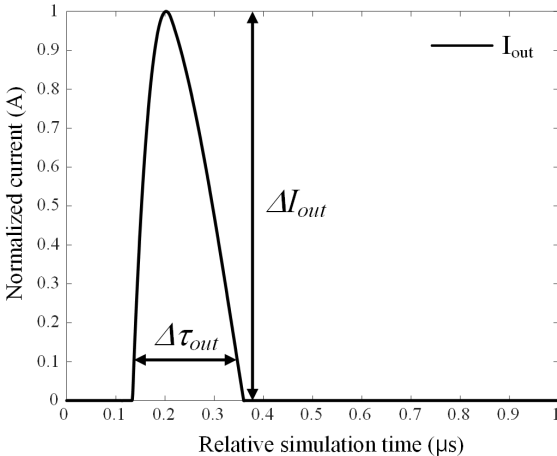


Fig. 3. Applied output signal from the EAFD circuit system

부의 LEEFI의 기폭을 위한 출력전류를 보여주며, 최종 출력신호의 최대전류의 값은  $\Delta I_{out}$ , 신호의 펄스폭은  $\Delta \tau_{out}$ 으로 정의한다.

Fig. 4에서 나타내듯이 EAFD 시스템에 민감한 영향을 주는 수동 및 능동소자의 확인을 위해, 모든 수동 소자와 능동소자에  $\pm 10\%$ 의 공차값을 입력한 후 공차가  $\Delta I_{out}$ 과  $\Delta \tau_{out}$ 에 미치는 영향을 분석하였다. 공차는 온도, 기압, 습도 등 외부 환경적 요인과, 소자의 제작공차, 회로보관기간, 등에 따른 EAFD 회로의 열화 특성을 충분히 포함시키기 위해  $\pm 10\%$ 의 값을 사용하였다. 정류회로부 내에서는  $V_{ARM}$  신호에 가장 큰

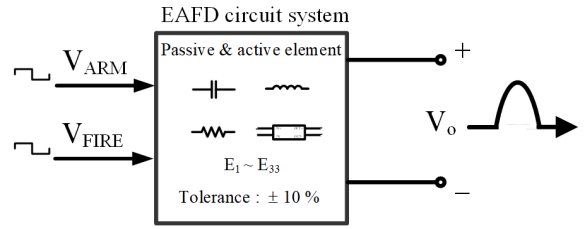


Fig. 4. Analysis of sensitive elements by varying the tolerance of element values

영향을 주는 저항소자들을 관찰하였으며, RC와 LC 필터에서는 노이즈 저감특성을 결정하는 저항, 커패시터와 인덕터를 조사하였다. 기폭관작동부 내에서는 출력전류를 결정하는 고전압 커패시터를 관찰하였고, 고전압 출력 및 고전압 스위칭을 위한 DC-DC 컨버터와 IGBT를 조사하였다. 기폭트리거부 내에서는 기폭신호의 트리거 시간에 영향을 주는 광다이오드를 확인하였다. 총 33개 소자로부터 기존 소자값, 공차  $\pm 10\%$ 의 소자값에 대한  $\Delta I_{out}$ 과  $\Delta \tau_{out}$ 을 확인하고, 공차  $\pm 10\%$  입력에 대한 결과와 기존 소자값 입력에 대한 결과의 차이값을 계산하였다.  $n$ 번째 소자의  $\pm 10\%$  공차에 따른  $\Delta I_{out}$ 의 차이와  $\Delta \tau_{out}$ 의 차이를 각각  $\Delta \sigma_{n, \Delta I_{out}}$ 과  $\Delta \sigma_{n, \Delta \tau_{out}}$ 로 정의하였고,  $\Delta \sigma_{n, \Delta I_{out}}$ 과  $\Delta \sigma_{n, \Delta \tau_{out}}$ 로부터 민감소자를 판단하기 위해 식 (1)과 같이 정량적인 평가기준인 Cost 함수를 정의하였다.  $\alpha$ 와  $\beta$ 의 값은 점화회로 시스템의 출력결과인 최대 전류 값과 펄스폭의 중요도의 비율로부터 결정하였으며, 해당 가중치는 회로의 시스템에 따라 변경될 수 있는 변수이다. 본 연구에서는  $\alpha$ 와  $\beta$ 의 값을 각각 6:4로 적용하여 높은 Cost 값이 나오는 경우에 민감소자로 판단하였다.

$$Cost = \alpha \Delta \sigma_{n, \Delta I_{out}} + \beta \Delta \sigma_{n, \Delta \tau_{out}} \quad (1)$$

$$\alpha = 0.6, \beta = 0.4$$

Fig. 5와 Fig. 6에는 33개 소자들에 대한  $\Delta \sigma_{n, \Delta I_{out}}$ 과  $\Delta \sigma_{n, \Delta \tau_{out}}$ 을 오차막대로 표시하였으며, 기존 소자값에 대한  $\Delta I_{out}$ 과  $\Delta \tau_{out}$ 은 점으로 나타내었다. 또한 Cost 값이 높은 순으로 1번부터 33번까지 나열하였으며, 이는 민감도가 높은 소자의 순서를 의미한다. 네 개의 가장 민감한 소자를 도출하였으며, 그 중 능동소자( $E_1$ )가 하나이고 수동소자( $E_2, E_3, E_4$ )는 세 개이다. Fig. 7-10에서 확인할 수 있듯이 4개의 민감소자가  $\pm 10\%$ 의 공차값을 가지고 변할 때 출력파형 또한 변하는 것을

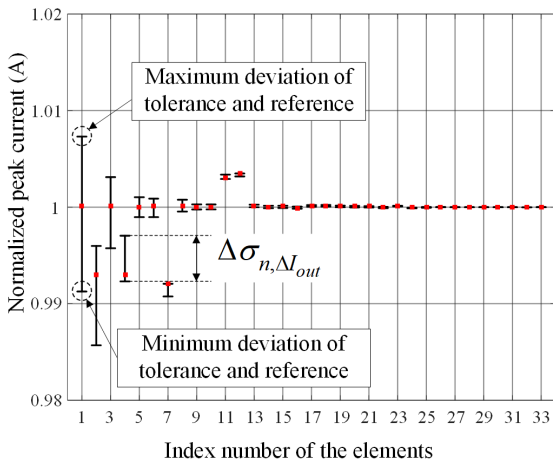


Fig. 5. Variations of the peak currents according to the tolerance for circuit elements

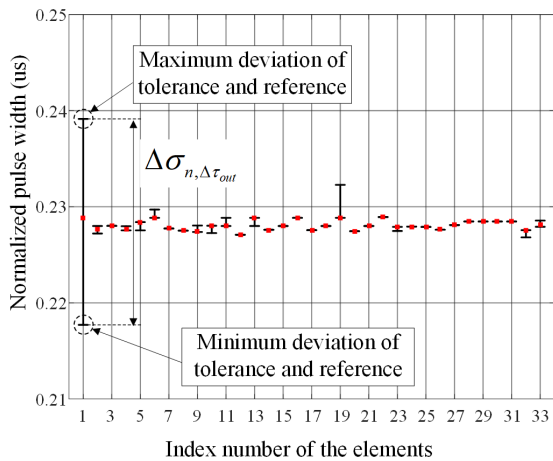


Fig. 6. Variations of the pulse widths according to the tolerance for circuit elements

볼 수 있다.  $E_1$  소자는 Fig. 7에서 볼 수 있듯이,  $\Delta I_{out}$ 에 가장 큰 영향을 주는 것으로 확인하였으며,  $E_2$  소자는 Fig. 8에 나타난 것처럼  $\Delta I_{out}$ 의 크기에만 영향을 준다. Fig. 9에서  $E_3$  소자는 소자값이 줄어들면 최대 전류값이 줄어들고, 출력파형의 펄스폭도 좁아지는 것을 확인할 수 있다. Fig. 10의  $E_4$  소자는 기폭신호 후  $\Delta I_{out}$ 의 출력시간 지연에 영향을 주는 것을 볼 수 있었다. Cost 값에 기초하여 관찰한 결과, 공차가 출력파형의 변이인  $\Delta I_{out}$ 과  $\Delta \tau_{out}$ 에 가장 큰 영향을 주는 최대 민감소자는  $E_1$ 임을 확인하였다.

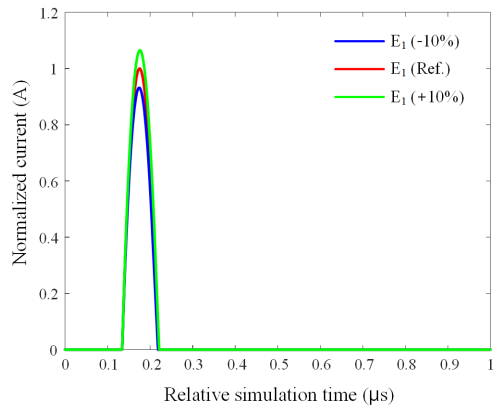


Fig. 7. Output current of the element  $E_1$  according to the tolerance

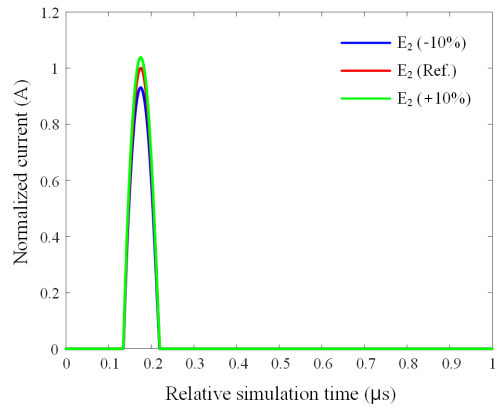


Fig. 8. Output current of the element  $E_2$  according to the tolerance

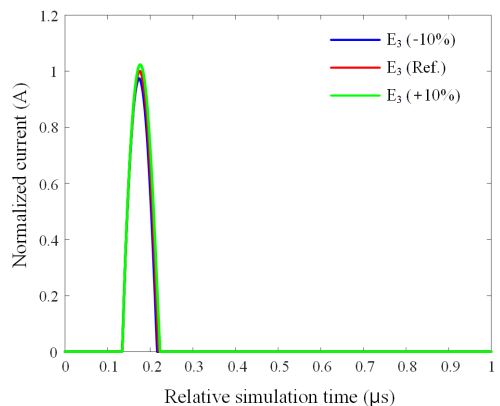


Fig. 9. Output current of the element  $E_3$  according to the tolerance

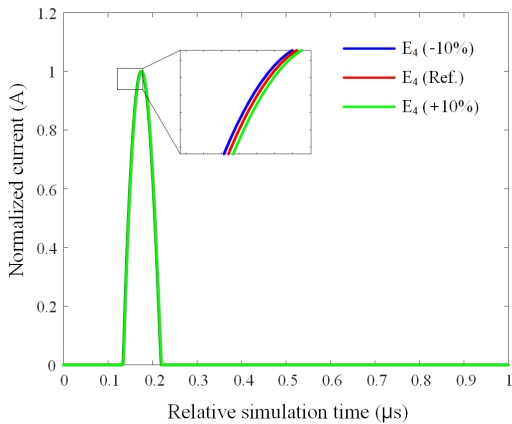


Fig. 10. Output current of the element  $E_4$  according to the tolerance

### 3. EAFD의 신뢰성분석 프로세스

2장에서 언급한 EAFD 회로의 각 동작부 모델링과 민감소자 분석 및 동작원리를 바탕으로 Fig. 11에서 보여 주는 순서도를 통해 신뢰성분석 프로세스를 진행하였다. 먼저 설계된 회로에서 민감소자를 찾고 해당 소자에 대한 공차( $\pm 10\%$ )를 적용하였다. 적용한 공차의 범위 내에서 균일분포에 대한 난수를 발생시키고, PSpice 회로 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 시뮬레이션을 진행하였다. 최대 반복 횟수까지 시뮬레이션을 실행하여 결과에 대한 출력 파형의 최대 전류값과 펄스폭을 도출하였으며, 도출된 결과 값이 규격 하한 값 이상인지 여부에 대해 체크 하였다. 최대 반복 횟수의 시뮬레이션 종료 후 산포도에 대한 히스토그램 및 커브 피팅된 함수 결과를 출력하였다. 일반적인 신뢰성 분야의 커브 피팅의 경우, Normal, Burr Type XII, Log-Logistic, Lognormal, Gamma, Beta, Weibull 등의 다양한 확률 분포 함수를 사용하여 데이터를 피팅한다. 이와 같이 본 논문에서도 서로 다른 분포를 가지는 펄스 폭과 최대 전류 시뮬레이션 데이터에 적합한 Burr Type XII와 Weibull 피팅 함수를 사용하여 커브피팅을 진행하였다. Fig. 12는 공차에 따른 최대 전류값에 대한 히스토그램과 커브 피팅 결과를 보여준다.  $-10\%$  기준값,  $+10\%$  공차에 따른 히스토그램을 각각 빨간색, 초록색, 파란색으로 표시하였으며, Weibull 분포를 사용하여 피팅한 함수를 동시에 표시하였다. 해당 결과의 평균은 각각 1.0028, 1.0034, 1.0050이고, 분산은

0.0398, 0.0396, 0.0290으로 확인 할 수 있다. 펄스폭의 경우는 Fig. 13에서 확인 할 수 있으며, 그래프는 Burr Type XII의 분포로 커브 피팅하였다. Burr Type XII 피팅의 경우 평균값이 공차에 따라 각각 0.9475, 0.9907, 1.0293으로 나타났으며, 분산은 0.0260, 0.0251, 0.0238의 값으로 계산되었다.

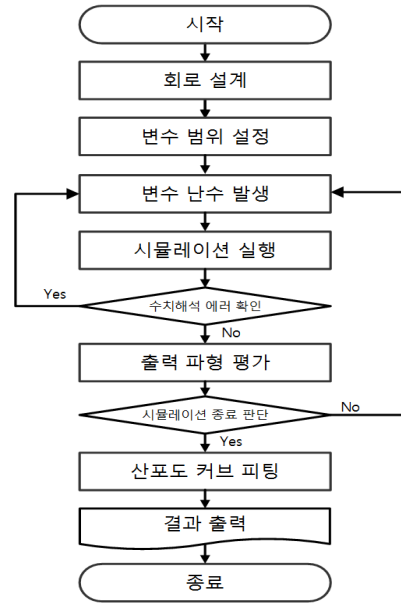


Fig. 11. Flowchart for the analysis of the circuit reliability

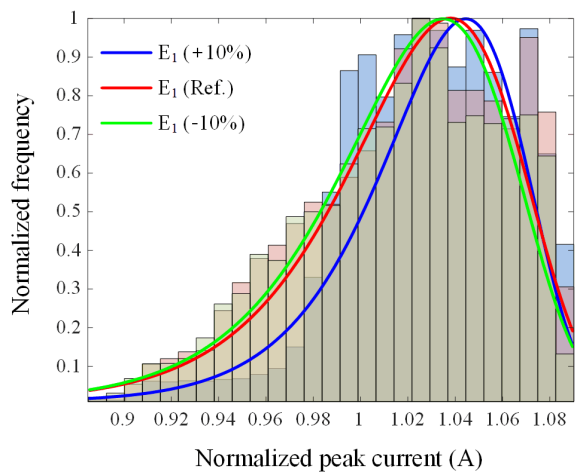


Fig. 12. Histograms of the peak currents and fitted curves

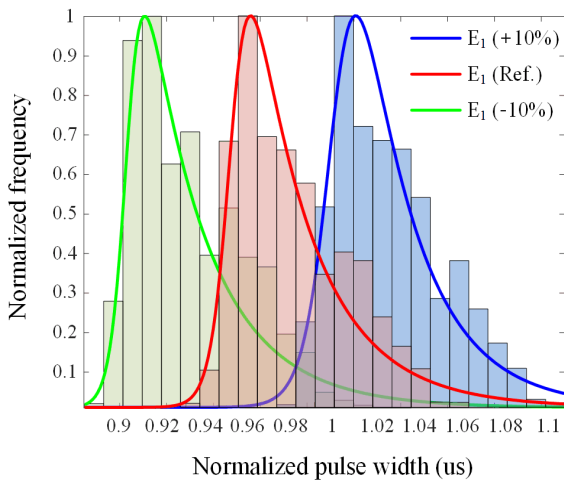


Fig. 13. Histograms of the pulse widths and fitted curves

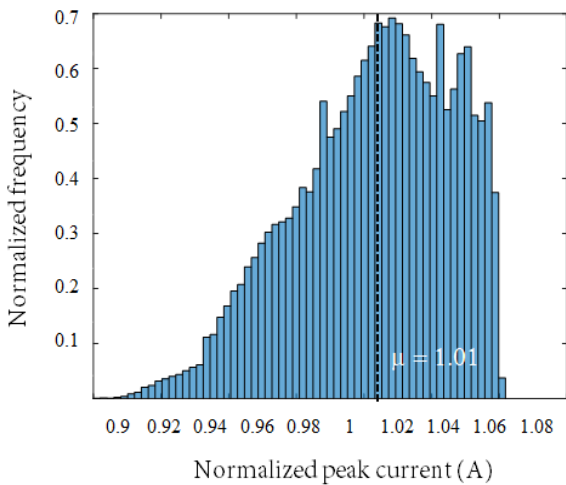


Fig. 14. Histogram of the peak currents from reliability simulation

EAFD를 구성하는 전체 부품의 공차에 대한 변량을 고려하고, DC-DC 컨버터의 경우에는 실측한 출력 전압의 산포를 고려하여 100,000개의 변수벡터를 난수 발생함으로써 얻어진 각각의 시뮬레이션 결과 출력 파형의 최대 전류를 Fig. 14에 나타내었다. 시뮬레이션 결과 100,000개의 최대 전류는  $\mu = 1.01$ 에서 최대 전류는 모두 규격하한 (0.84) 대비 충분한 마진 (0.06)을 확보하고 신뢰수준 99 %에서도 규격 순응도 관점의 작동 신뢰도는 1로써 매우 높은 신뢰도를 확인

하였다. 단, 시뮬레이션 횟수를 매우 크게 증가시키는 경우에 작동 신뢰도는 1이 아닌 0.999999999... 등 다른 값을 나타낼 수 있다. 신뢰구간의 평가에는 정규분포를 기반으로 널리 사용되는 식 (2)을 활용하였다<sup>10)</sup>. 식 (2)에서  $R_C$ 는 참값 신뢰도,  $\widehat{R}_C$ 은 시뮬레이션 결과의 신뢰도,  $N$ 은 시뮬레이션 횟수이며 신뢰수준 99 %의 경우에  $\zeta_c$ 값은 2.58이다.

$$\widehat{R}_C - \zeta_c \sqrt{\frac{\widehat{R}_C(1-\widehat{R}_C)}{N}} \leq R_C \leq \widehat{R}_C + \zeta_c \sqrt{\frac{\widehat{R}_C(1-\widehat{R}_C)}{N}} \quad (2)$$

#### 4. 결론

본 논문에서는 EAFD 회로 시스템에 대한 성능 기반의 신뢰성분석을 위해 정밀한 EAFD 기폭회로의 설계와 설계된 회로에 대해 동작원리를 분석하였다. 또한, 기존의 기계적 장치에 널리 적용되는, 변량을 고려한 신뢰도 분석 방법론을 응용하여 EAFD 회로 신뢰성분석 프로세스를 구축하였다. 신뢰성분석을 위해 기폭회로의 구성요소들 중에서 민감요소들을 찾고, 몇개의 민감한 소자에 공차를 적용하여 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였다. 도출된 최대 전류값 산포도에 대해 Weibull 함수로 커브 피팅한 결과, -10 %, 기준값, +10 % 공차에 대해서 평균은 1.0028, 1.0034, 1.0050이고, 분산은 0.0398, 0.0396, 0.0290으로 계산되었다. 펄스폭에 산포도에 대해서는 Burr Type XII 함수로 커브하였으며, 각각 0.9475, 0.9907, 1.0293 평균값과 0.0260, 0.0251, 0.0238 분산값을 가졌다. 따라서 제안된 EAFD 기폭회로 시스템은 신뢰수준 99 %의 규격 순응도 관점에서 1의 작동 신뢰도가 도출되어 매우 높은 신뢰도를 가짐을 확인하였다. 제안하는 프로세스는 물리적 특성을 고려한 운용환경, 보관환경, 스트레스 등의 다양한 변수를 적용하여 신뢰성을 분석 하지 못하는 한계점을 가지고 있으나, 기존에 많이 발표 되지 않은 점화식안전장치 회로의 출력특성에 대하여 민감소자를 찾고 신뢰성을 분석한 것이 기존 신뢰성 분석과의 차별성을 나타내는 것으로 사료된다. 또한, 유도무기를 구성하는 많은 일회성 부품의 신뢰도 예측에 활용될 수 있으며, 나아가 유도무기 종합 체계에 대한 설계 신뢰도 예측 연구 및 경제적인 신뢰성분석을 위한 기반이 될 수 있을 것으로 사료된다.

## 후 기

본 연구는 국방과학연구소에서 추진하는 “신뢰도 시험 및 평가 용역”의 사업으로 수행되었으며, 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. NRF-2017R1D1A1B04031890)

## References

- [1] S. Jang, H. Lee, J. Oh, and S. Oh, “Design and Output Characteristic Analysis of Electro-Mechanical Ignition Safety Device,” J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Science, Vol. 39, No. 12, pp. 1166-1173, 2011.
- [2] D. Kim, et. al., “Design and Output Characteristic Analysis of Electro-Mechanical Ignition Safety Device,” KSAS 2017 Spring Conference, pp. 150-151, 2017.
- [3] G. J. Rohwein, “An Efficient, Power-enhanced Ignition System,” IEEE Trans. Plasma Sci., Vol. 25, No. 2, pp. 306-310, 2011.
- [4] X. Zhou, R. Shen, Y. Ye, P. Zhu, Y. Hu and L. Wu, “Influence of Al/CuO Reactive Multilayer Films Additives on Exploding Foil Initiator,” J. Appl. Phys., Vol. 110, No. 9, pp. 1-6, 2011.
- [5] S. Jang, J. Hwang and S. Baek, “Analysis on Shock Wave and Sensitivity of Explosives in Through-Bulkhead Initiator,” J. of the Korean Society of Propulsion Engineers, Vol. 21, No. 4, pp. 36-43, 2017.
- [6] B. Yan, J. Qin, Q. Fan and J. B. Bernstein, “Reliability Simulation and Circuit-Failure Analysis in Analog and Mixed-Signal Applications,” IEEE Trans. Device Mater. Reliab., Vol. 9, No. 3, pp. 339-347, 2009.
- [7] Y. Cheon, et. al., “A Study Of Reliability Check Method for Generator Field Ground Detectors,” KIEE 1999 Fall Conference(B), pp. 585-587, 1999.
- [8] M. Liu, W. Li, C. Wang, M. P. Polis, L. Y. Wang and J. Li, “Reliability Evaluation of Large Scale Battery Energy Storage Systems,” IEEE Trans. Smart Grid, Vol. 8, No. 6, pp. 2733-2743, 2017.
- [9] J. B. Bernstein, M. Gurfinkel, X. Li, J. Walters, Y. Shapira and M. Talmor, “Electronic Circuit Reliability Modeling,” Microelectron. Reliab., Vol. 46, No. 12 pp. 1597-1979, 2006.
- [10] M. G. Pecht and F. R. Nash, “Predicting the Reliability of Electronic Equipment [and prolog],” Proc. IEEE, Vol. 82, No. 7, pp. 992-1004, 1994.
- [11] K. Sheng, S. J. Finney and B. W. Williams, “Fast and Accurate IGBT Model for PSpice,” Electron. Lett., Vol. 32, No. 25, pp. 2294-2295, 1996.
- [12] R. D. Yates and D. J. Goodman, “Probability and Stochastic Processes: A Friendly Introduction for Electrical and Computer Engineers,” John Wiley & Sons, Inc. USA, pp. 286-292, 2005.