

Z-Segmentation 알고리즘을 이용한 발사체의 배선 점검 방법

Wiring Test Method of Projectile using Z-Segmentation Algorithm

오 세 권* · 이 대 현 · 김 영 성 · 안 중 흠

LIG 넥스원 L-SAM 체계단.2팀

Se-Kwon Oh* · Dae-Hyun Lee · Yung-Sung Kim · Jong-Heum An

L-SAM PMO, LIG Nex1 Co.,Ltd., Seong-Nam 463-400, Korea

[요 약]

항공 우주 산업의 발전으로 발사체의 연구가 많아지고 있다. 더불어 많은 시험이 진행되고 있고 그에 따라 많은 실패도 발생한다. 발사체는 다른 전자장비보다 위험성이 높기 때문에 실패를 최소화할 수 있어야 한다. 따라서 발사체에 전원을 공급하기 전에 배선을 검증할 필요가 있다. 이에 따라 저항 측정을 통해 배선 상태를 검증하였다. 하지만 이전의 저항측정 방식의 배선 점검은 발사체 회로의 커패시터, 인덕터등의 소자들 때문에 정확한 측정을 할 수 없다. 본 논문에서는 TDR 미터를 이용하여 케이블 및 발사체의 연결 상태에서 임피던스를 측정한다. 측정한 정상상태의 임피던스의 기준 값을 설정하기 위해 Z-Segmentation 알고리즘을 사용한다. Z-Segmentation 알고리즘은 우선 임피던스 파형의 피크 값을 칼만 필터를 이용하여 찾고 찾은 피크 값을 Segmentation을 통해 최종 impedance peak segment를 얻는다. 이런 방법으로 배선의 정상 상태에 대한 기준 값으로 설정하고 이를 기준으로 배선 상태를 판정한다.

[Abstract]

development of the aerospace industry is increasing the research of projectiles. In addition, many tests are under way and many failures occur accordingly. Projectiles should be able to minimize failures because they are more dangerous than other electronic equipment. Therefore, it is necessary to verify wiring before powering the projectile. Accordingly, the wiring status was verified by resistance measurements. However, the wiring test of the previous resistance measurement method cannot be accurately measured due to devices such as capacitors and inductors in the projectile circuit. In this paper, impedance is measured in the connection state of cables and projectiles using a TDR meter. The Z-Segmentation algorithm is used to set the reference value for the measured steady state impedance. The Z-Segmentation algorithm first finds the peak values of the impedance waveform using a Kalman filter and obtains the final impedance peak segment through segmentation. In this way, the wiring status is determined based on the reference value for the normal state of the wiring.

Key word : Projectiles, Line Test, TDR, Z-Segmentation, Impedance.

<https://doi.org/10.12673/jant.2021.25.5.370>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 8 September 2021; Revised 27 September 2021

Accepted (Publication) 20 October 2021 (30 October 2021)

*Corresponding Author ; Se-Kwon Oh

Tel: +82-31-8026-4205

E-mail: neverchief@naver.com

I. 서론

현재 세계 여러 민간 기업들의 축적된 기술력을 바탕으로 항공 우주 산업은 빠르게 발전하고 있다. 그 중에서 스페이스 X와 버진갤러틱 그리고 블루오리진이 대표적인 민간 우주개발업체이다. 스페이스X는 2008년 민간 기업으로 최초로 액체연료 로켓 팰컨1을 지구 계도에 쏘아 올렸으며, 2016년 추진 로켓을 회수에 성공하면서 로켓 재활용 시대를 열었다. 버진갤러틱은 유인 우주비행을 성공에 힘입어 우주관광의 서막을 알렸다. 이러한 성공은 한 번에 이뤄진 것은 아니다. 성공 이전에 많은 실패들을 경험하였다. 그 실패에는 여러 폭발사고가 있었고 이러한 폭발사고에 따른 인명사고도 발생하였다. 이러한 실패를 최소화하기 위해 제작 단계에서 발사체의 정확한 점검을 수행할 필요가 있다. 또한 유도미사일과 같이 대량의 양산을 하는 발사체도 양산 제작 단계마다 점검을 수행해야 한다. 발사체의 점검을 수행하기 위해서는 발사체에 전원을 공급이 필요하다. 발사체에 전원을 공급할 때, 배선장치(wire harness)의 상태에 따라 발사체의 장치들이 망가질 수도 있지만 최악의 경우 폭발 사고가 발생할 수 있다.

이러한 문제를 사전에 방지하기 위해 발사체의 점검 중 배선 상태를 확인할 수 있는 배선 점검을 가장 먼저 수행해야 한다. 배선 점검은 전통적으로 배선의 저항을 측정하는 방법 [1]으로 점검을 수행하여 배선의 상태를 확인하였다. 하지만 저항 측정을 통한 배선 점검은 배선 장치만의 상태를 확인할 때는 효과적이지만 발사체 상태에서의 배선 점검은 배선 장치와 배선 장치로 연결된 디바이스의 보드(PCB)와의 관계로 인해 저항 측정만으로 확인하기가 어렵다. 그 이유는 디바이스의 보드에는 저항뿐만 아니라 회로를 구성하는 커패시터, 인덕터, 다이오드 등 리액턴스 성분의 소자들로 구성되어 있기 때문이다. 따라서 본 논문에서는 발사체의 배선 상태를 확인하기 위해 저항과 리액턴스 성분의 합인 임피던스를 측정할 수 있는 방법을 이용한다. 임피던스를 측정하는 방법에는 여러 가지가 있다. 그 중에 반사파를 측정, 환산하여 임피던스를 계산하는 TDR(time domain reflectometry) 미터를 이용하여 확인하는 방법 [2], [3]을 사용한다. 계측된 임피던스의 특성을 칼만 필터 [4], [5]를 통해 Segment로 변환하여 배선의 상태를 확인하는 방법을 제안한다.

본문에서는 우선 기존의 저항 측정을 통한 배선 점검에 대해 기술하고 다음으로 제안한 Z-Segmentation을 이용한 배선 점검 방법을 기술한다. 그리고 제안한 방법에 대한 시험 결과를 기술하고, 마지막 결론으로 본 논문의 대한 결론과 앞으로 필요한 연구 방향에 대한 내용 기술한다.

II. 저항측정 방식의 배선 점검

2-1 저항측정 방식의 배선 점검 구성

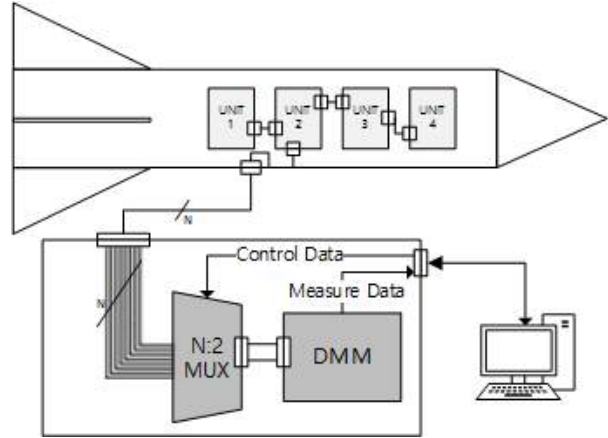


그림 1. 저항측정 방식의 배선 점검 구성도

Fig. 1. Diagram of wiring inspection of resistance measurement method

일반적인 저항측정 방식은 케이블 단독의 검사를 위한 점검 방식이다. 이런 방식의 케이블 검사를 위한 장비는 그림 1과 같은 설계 장비뿐만 아니라 여러 회사에서 제작하여 판매하고 있는 COTS(commercial, off-the-self) 장비들이 있다. 이 장비들은 케이블의 도통, 절연 측정을 통해 해당 케이블의 제작이나 사용에 따른 문제를 검사하기 위해 사용된다. 발사체도 마찬가지로 제작이나 운용에 따른 배선 점검 수행이 필요하다. 또한 발사체의 전원을 공급하기 전에 안전을 위해 배선 점검이 무엇보다 먼저 선행되어야 한다.

위와 같이 발사체의 배선 상태를 확인하기 위해 배선 점검을 수행해야 하는데 그 중 배선장치는 발사체 안쪽에 위치하고 있어 배선장치의 케이블만 따로 점검을 수행하는 것은 불가능하다. 따라서 위 그림 1과 같이 발사체의 구성품, 배선장치, 점검 케이블 모두를 연결한 상태에서 점검을 수행해야 한다. 점검 케이블은 N개의 라인으로 구성되며 N개의 라인은 전원공급, 이산신호, 통신신호 등 여러 가지의 라인으로 구성된다. 이러한 모든 라인의 도통 및 절연을 확인하기 위해 N:2 MUX를 이용하여 모든 라인을 교차선택하고 선택된 2개의 라인은 DMM(digital multimeter)을 통하여 저항을 측정한다. 측정된 결과가 단순히 케이블의 라인 저항만 있는 것이 아니라 구성품의 여러 회로의 성분들과 함께 측정된 결과다. 따라서 복잡한 회로로 구성된 발사체에서의 예상하는 저항 값을 판단할 수 없기 때문에 배선 점검을 반복 수행하여 누적된 측정값들을 해당 라인의 특성에 따라 3시그마~6시그마 수준의 기준 값을 적용하여 판단할 수 있도록 하였다.

2-2 저항측정 방식의 한계점

기본적으로 저항 측정은 아래 그림 2와 같이 DMM 장비를 이용해 정전류 방식으로 저항을 측정한다. 정전류 방식은 정전류원에서 전류 인가하여 해당 라인에 걸리는 전압을 측정

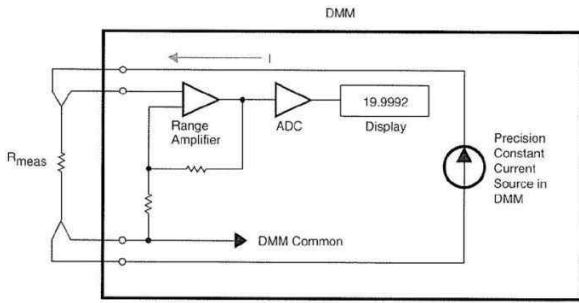


그림 2. 저항 측정 방법
 Fig. 2. Resistance measurement method

하여 옴의 법칙을 통해 계산하여 저항을 구한다. 이런 저항 측정 방식은 구성품의 회로에는 저항뿐만 아니라 커패시터, 인덕터, 다이오드 등 여러 가지의 소자들이 있는 회로에서 정확한 측정을 수행할 수 없다. 그 이유는 소자들은 저항 성분뿐만 아니라 리액턴스 성분을 갖고 있기 때문에 저항 측정만으로 정확한 판단을 할 수 없기 때문이다. 그 중에서 커패시터는 용량성 리액턴스를 갖고 있으며 인덕터는 유도성 리액턴스를 갖고 있다. 이러한 성분은 다음과 같이 저항 측정에 문제를 발생시킨다.

$$Q(t) = CV_0(1 - e^{-t/RC}) \tag{1}$$

커패시터의 용량성 리액턴스에 의해 위 식(1)과 같이 전압을 충전하는 성질을 갖고 있다. 이러한 커패시터를 I 는 일정하고 V 값에 따라 저항을 측정하는 정전류 방식으로 저항 측정을 하면 처음 시점 $t=0$ 일 때 $V_{out} = 0$ 이고 이에 따라 저항은 0 옴으로 측정되며 시간 t 가 증가하면서 커패시터에 전압이 충전되고 전압이 높아짐에 따라 측정된 저항 값도 무한대로 발산하게 된다. 이는 커패시터의 저항을 측정하는 시간에 따라서 저항 값이 발산 할 수 있으며 커패시터의 충전 상태에 따라 측정되는 저항의 값도 달라진다. 또한 배선 교차 검증에 따라 반대극성으로 측정 라인이 선택되면 역방향 누설전류에 의해 마이너스 저항이 측정될 수도 있다. 이러한 능동 소자들로 이뤄진 복잡한 회로에서 이론적으로 저항 값을 예측하고 일정한 값을 측정한다는 것은 매우 어렵다. 따라서 다음 장에 이런 문제들을 보완하기 위해 제안된 알고리즘에 대해 설명한다.

III. Z-Segmentation 알고리즘을 이용한 배선 점검

3-1 TDR 미터

TDR 미터는 시간 영역에서의 임피던스를 측정하는 장비로

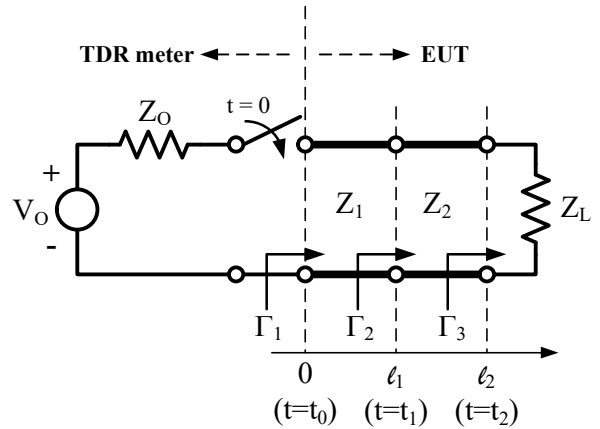


그림 3. TDR 미터 측정 원리
 Fig. 3. Block diagram of TDR circuit

측정 원리는 그림 3과 같다[6]. 임의의 시간 $t=0$ 에 TDR 미터에서 펄스 신호를 EUT(equipment under test)에 인가하고, 반사되는 신호를 측정하여, 반사 계수(Γ , reflection coefficient) 및 부하 임피던스 Z_L 을 측정하게 된다.

$$\Gamma = \frac{V_O^-}{V_O^+} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \tag{2}$$

위 수식 (2)에서 V_O^+ 는 EUT로 전달되는 입사파의 전압이며, V_O^- 는 EUT로부터 반사되는 반사파의 전압, Z_0 는 특성 임피던스이며, Z_L 은 부하 임피던스이다. 위 수식 (2)를 정리하면 다음 식 (3)과 같이 부하 임피던스를 계산할 수 있다.

$$Z_L = Z_0 \times \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \tag{3}$$

그림 4는 불연속 임피던스를 가지는 전송선로에 대한 TDR 미터 측정 결과의 예를 나타낸 것이다.

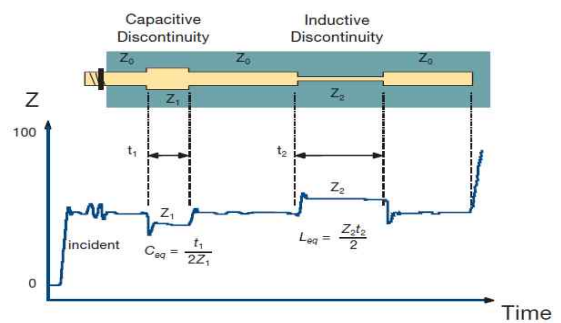


그림 4. 불연속성 TDR 파형
 Fig. 4. TDR waveform reveals trace discontinuities

3-2 Z-Segmentation 알고리즘을 이용한 배선 점검 구성

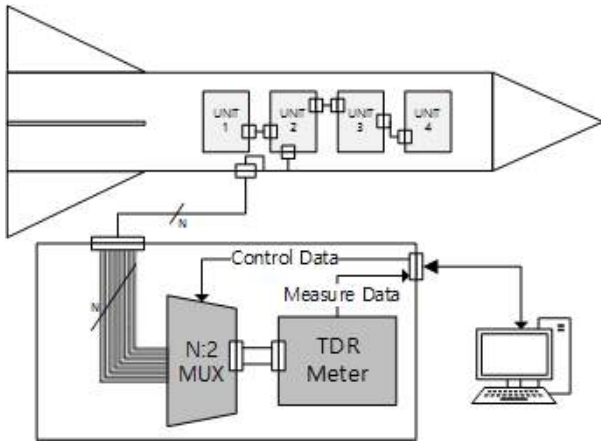


그림 5. TDR 미터를 이용한 배선 점검 구성도
 Fig. 5. Diagram of wiring inspection of using TDR meter

위 그림 5의 구성도는 TDR 미터를 이용한 배선 점검 구성도이다. 이는 기존의 방식인 2-1 저항측정 방식의 배선 점검과 동일하며 DMM 대신 TDR 미터를 사용한다.

3-3 Z-Segmentation 알고리즘

TDR 미터로 이용하여 측정된 배선 점검 값은 임피던스의 파형으로 계측된다. 임피던스의 값은 케이블의 특성 임피던스와 커넥터의 체결에 의한 불연속한 파형으로 측정되며 또한 발사체 내부의 구성품 회로에 의한 불연속한 파형 측정된다. 이러한 임피던스 값을 이용하여 배선의 정상 유무를 판단할 수 있다. 하지만 N개의 케이블을 교차 연결을 통해 NxN 만큼의 측정된 파형을 육안으로 하나하나 확인하기에는 어려움이 있다.

따라서 본 논문에서는 Z-Segmentation 알고리즘을 제안한다. Z-Segmentation 알고리즘은 아래 그림 6과 같이 2단계의 프로세스를 나뉜다. 첫 번째로는 임피던스 파형의 상승/하강 피크 값을 추출하고 두 번째로는 추출된 피크 값들의 Segmentation을 통해 임피던스 Segment를 최종적으로 구한다. 이 Segment는 임피던스 신호의 불연속성의 위치를 의미하며 이는 시험 대상물의 특이점에 해당된다고 볼 수 있다.

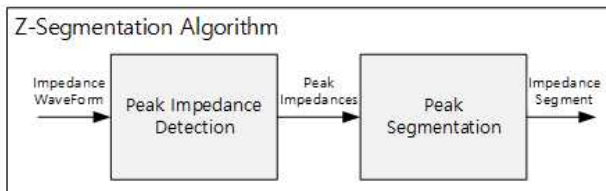


그림 6. Z-Segmentation Algorithm의 블록 다이어그램
 Fig. 6. Block diagram of Z-Segmentation Algorithm

1) Peak Impedance Detection
 본 단계에서는 임피던스 파형의 모든 상/하 피크 값을 수집한다. 피크 값을 찾는 방법은 칼만 필터를 이용하여 임피던스 값의 기울기가 변하는 시점을 찾는다.

$$x = \begin{pmatrix} impedance \\ rate\ of\ change \end{pmatrix} \quad (4)$$

위 식 (4) 와 같이 임피던스와 시간에 따른 임피던스의 변화율을 상태 변수로 정의한다. 이에 따라 상태 공간 방적을 세우면 아래 식 (5) - (7) 과 같다. 그리고 식 (8)에서 측정 오차 공분산(Q)와 칼만 필터 노이즈(R)을 trial and error 방법으로 해당 값을 구하였다. 해당 변수들을 칼만필터의 모델링에 적용하여 임피던스 파형을 분석한다.

$$x_{k+1} = A \cdot x_k + w_k \quad (5)$$

$$z_k = H \cdot x_k + v_k \quad (6)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad H = [1 \ 0] \quad (7)$$

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1.5 \end{bmatrix} \quad R = 2 \quad (8)$$

아래 그림 7과 같이 임피던스 파형은 연속하는 임피던스 $p_0 \dots p_n$ 으로 이뤄져 있고 $p_0 \dots p_n$ 에 대하여 칼만필터를 적용하여 예측 임피던스 기울기(predicted gradient)에 따른 예측 값 \hat{p}_n 을 알 수 있다. 실제 측정된 p_n 이 예측 값 \hat{p}_n 기준으로 지정된 예측범위(range of maxPG)보다 벗어나게 되면 p_{n-1} 을 피크 임피던스로 선정한다. 이러한 방법은 $p_0 \dots p_n$ 에 대해 반복 수행하여 모든 피크 임피던스 값을 추출한다. 예측범위(range of maxPG)의 값은 trial and error의 방법으로 구하였고 해당 값은 \hat{p}_n 값의 $\pm 10\%$ 의 범위로 정의한다.

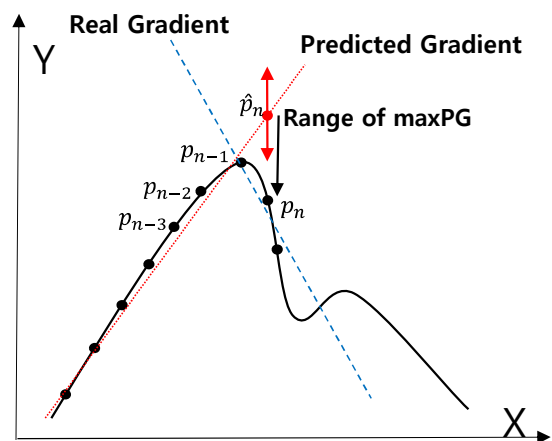


그림 7. 피크 임피던스 탐지
 Fig. 7. Peak impedance detection

2) Peak Segmentation

위 첫 번째 단계를 통해 피크 임피던스들을 추출하였다. 현재 단계까지의 피크 임피던스는 케이블의 임피던스 변화 지점 즉, 케이블의 상태 변화 정보를 가지고 있으며 또한 측정값에 따른 잡음도 포함된 상태이다. 따라서 본 단계에서는 케이블의 상태 변화 정보만 추출할 수 있도록 측정 잡음을 제거하는 방법을 제안한다.

$$N : \text{number of peak impedances} \quad (9)$$

$$\text{peak} : \text{peak impedances}$$

overshoot = 1.2
 segment = 0
 new = 0

```

for k = 0 : N
    if |peakk| > |overshoot * averagenew,k-1|
        segment ++
        new = k
        average = peakk
    else
        averagenew,k = (k - 1 * averagenew,k-1 + peakk) / k
    end
end
    
```

위 식(9)은 피크 임피던스의 측정 잡음을 제거하는 Peak Segmentation 알고리즘이다. 특정 시점 k 의 피크 임피던스 $peak_k$ 를 k 이전 피크 임피던스의 평균 $average_{new,k-1}$ 에 측정 잡음 범위만큼의 임피던스를 만족하면 같은 segment로 판단하여 평균 값에 포함한다. 그러나 측정 잡음 범위를 벗어나면 $peak_k$ 를 다른 segment로 분류한다. 이때 측정 잡음은 20%로 정의하는데 이는 TDR 미터의 상온에서의 overshoot 값으로 판단하였다. 이런 방법으로 모든 피크 임피던스에 반복 수행하여 서로 다른 피크 임피던스 segment를 추출하는 알고리즘이다.

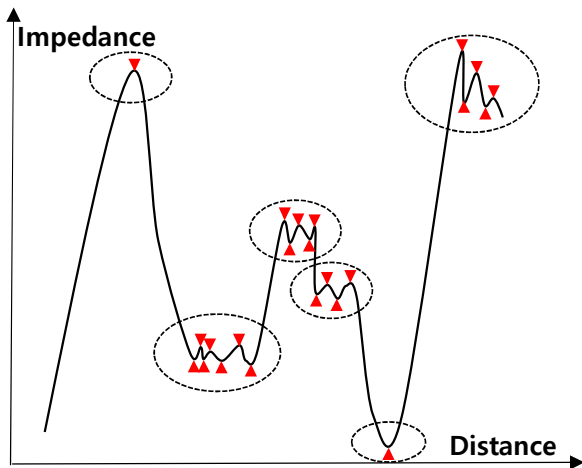


그림 8. 피크 분할
 Fig. 8. Peak Segmentation

위 그림 8의 그림은 해당 알고리즘을 수행하여 segment를 분류한 그림이며, 최종으로 segment는 6의 값을 갖는다. 이 segment 값은 6개의 케이블의 임피던스 변곡점이며, 이는 케이블의 특이점에 해당하고 케이블의 상태를 판단할 수 있는 기준 값이라고 할 수 있다.

IV. 실험 결과

발사체에 연결한 상태에서 제안된 방법을 통해 계측을 수행하였다. 그 중 통신 라인과 전원 라인에 대하여 정상 상태, 단락 상태, 개방상태를 모의하여 실험을 수행하였고 결과는 다음 그림 9, 10과 같다. 그리고 Z-Segmentation 알고리즘을 통해 얻은 segment 결과는 표 1, 2와 같다.

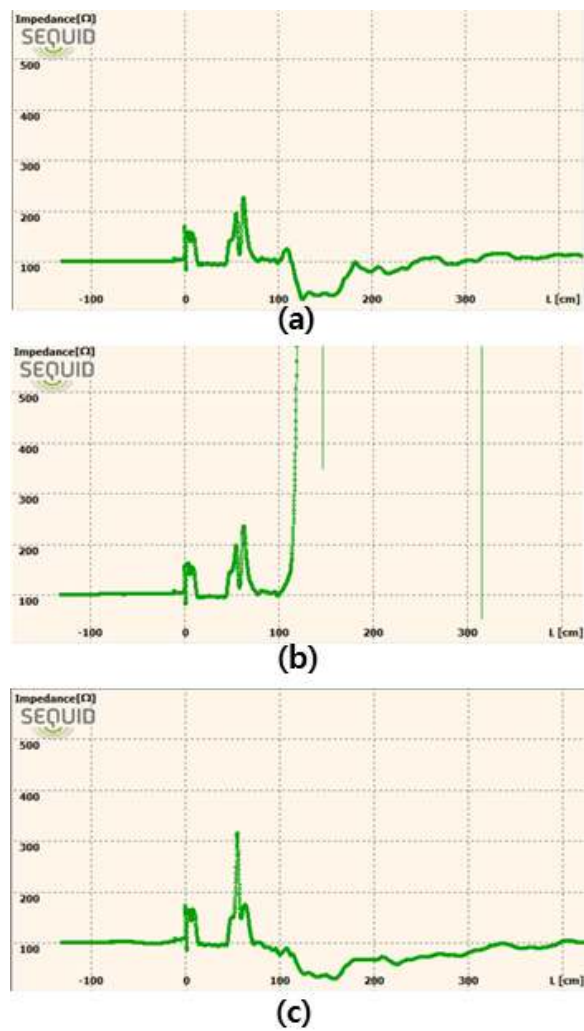


그림 9. 통신 라인 결과 (a) 정상, (b) 개방, (c) 단락
 Fig. 9. Result of communication line (a) normal, (b) open, (c) short

표 1. 통신라인 Z-Segmentation 결과

Table 1. Z-Segmentation result of communication line

State	Segment
Normal	6
Open	9
Short	4

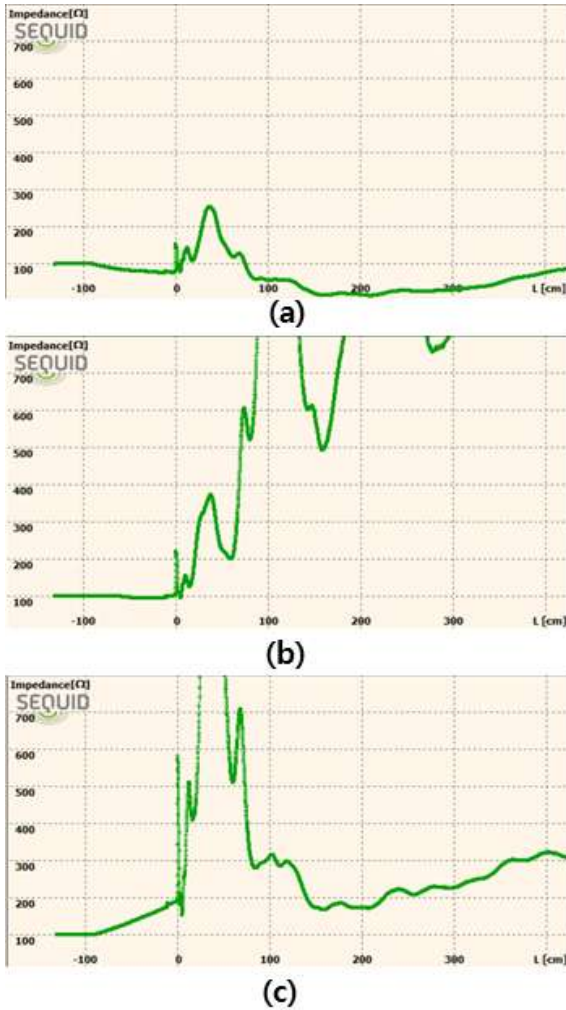


그림 9 전원 라인 결과 (a) 정상, (b) 개방, (c) 단락
Fig. 9 Result of power line (a) normal, (b) open, (c) short

표 2. 통신라인 Z-Segmentation 결과

Table 2. Z-Segmentation result of power line

State	Segment
Normal	5
Open	8
Short	7

V. 결 론

본 논문에서는 기존의 저항측정 방식으로 발사체 배선 점검을 수행할 때 발사체의 회로의 리액턴스 성분에 의하여 정확하게 측정하지 못하는 문제를 인식하고, TDR 미터를 사용하여 측정된 임피던스에 Z-Segmentation 알고리즘을 적용하는 방법을 제안하였다. 제안한 알고리즘을 통해 측정된 케이블의 임피던스의 특이점에 해당하는 segment를 정확히 찾았다. segment는 특이점에 대한 개수로 표현되며 이를 통해 정확하고 빠르게 대상 케이블의 문제점을 찾을 수 있었다.

제안한 알고리즘에 대하여 앞으로 더 많은 데이터를 축적할 필요가 있으며 측정된 데이터를 통해 시계열 데이터 딥러닝 기술을 접목하여 보다 정확도 높은 알고리즘에 대한 연구를 진행할 예정이다. 또한 제안한 알고리즘은 케이블이 문제가 있는지를 판단하기 위한 알고리즘이다. 이를 더 확장하여 문제 유/무 판단뿐만 아니라 segment의 임피던스 값을 이용하여 보다 정확한 특성을 분석할 수도 있다고 생각되며, TDR 미터의 X축에 해당하는 시간/거리에 따라 어느 지점에서 문제가 발생되는지를 판단할 수 있는 방법을 추가적으로 연구할 예정이다.

References

- [1] Yoo-sang Lee, Eui-jae Jung, "Study of wiring inspection method through umbilical interface," Summer Annual Conference of IEIE, JeJu, 1683-1684, 2020.
- [2] C Furse, P Smith, M Safavi, C Lo, "Feasibility of spread spectrum sensors for location of arcs on live wires," *IEEE Sensors Journal*, 2005.
- [3] Eun-Seok Song, Yong-June Shin, Tok-Son Choe, Jong-Gwan Yook, Jin-Bae Park, and Edward J. Powers, "Detection and estimation of a faults on coaxial cable with TFDR algorithm," *The Journal of Korea Navigation Institute*, Vol. 7, No. 1, Oct. 2003.
- [4] G. Welch and G. Bishop, "An introduction to the Kalman filter," Dept. Comput. Sci., Univ. North Carolina, Chapel Hill, Tech. Rep. TR95041, 2000.
- [5] Borges, G.A. and M.-J. Aldon, "Line Extraction in 2D Range Images for Mobile Robotics," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Vol. 40, No. 3, pp. 267-297, 2004.
- [6] DAVID M. Pozar, *Microwave Engineering*, 4th ed, Hoboken, NJ:WILEY, pp.85-87, 2011.



오 세 권 (Se-Kwon Oh)

약력

2011 명지대학교 정보통신공학과

2013 명지대학교 정보통신공학과

2013 ~ 현재 LIG넥스원 선임연구원

※관심분야: 유도무기, 탄 체계, 체계공학, 소프트웨어공학



이 대 현 (Dae-Hyun Lee)

약력

2008 경희대학교 동서의료공학과

2010 경희대학교 동서의료공학과

2013 ~ 현재 LIG넥스원 선임연구원

※관심분야: 유도무기, 탄 체계, 신호처리, 임베디드 시스템



김 영 성 (Young-Sung Kim)

약력

2015 한양대학교 에리카캠퍼스 컴퓨터공학과 학사

2017 한양대학교 컴퓨터공학과 석사

2017 ~ 현재 LIG넥스원 선임연구원

※관심분야: 유도무기, 탄 체계, 신호처리, 임베디드 시스템



안 종 흘 (Jong-Heum An)

약력

2020년 2월 : 광운대학교 로봇학부 정보제어공학과 (공학사)

2020년 1월~현재: LIG넥스원

※관심분야: 임베디드 시스템