

자성센서 기반 지뢰탐지기를 위한 신호처리

Signal Processing for Pulse Induction Metal Detector

신 범 수*, 양 동 원**, 정 병 민*

Beom-Su Shin*, DongWon Yang**, Byung-Min Jung*

Abstract

This paper proposes an algorithm for signal processing which is used in pulse induction metal mine detectors. The detection power can be obtained from magnetic variation on the search coil. The calibration data should be made when there is no target because the detection power is difference between with and without a target. And it is also updated periodically because of surrounding various noises. Lastly, we keep a watch on the signal slope to identify exact position and signal power of mine detection

요 약

본 논문은 자성센서 기반 지뢰탐지기를 개발하는 과정에서 필요한 신호처리 알고리즘을 제안한다. 탐지신호의 세기는 탐지 코일에 수신된 자기장의 변화량을 이용하여 얻는다. 표적이 없을 때 대비 표적이 있을 때의 상대적인 신호세기를 계산하기 때문에 표적이 없는 상태에서 calibration data를 만든다. 자기장은 장비 자체의 전기적인 잡음 또는 주변 환경의 영향을 받으므로 calibration을 지속적으로 수행하고 갱신하는 것이 중요하다. 마지막으로 표적에 의해 발생하는 신호크기의 변화량, 즉 단위 시간 당 그래프의 기울기 값이 일정 수준 이상 도달하는지 감시하여 정확한 탐지시점과 신호크기를 판별한다.

Key words : Metal Detector, Mine Detector, Signal Processing, Graph Slope, Noise, Calibration

1. 서론

지뢰탐지기는 일반적으로 레이더 투과 신호를 확인하거나 자기장을 이용하여 금속의 유무를 판단하는 원리를 이용한다. 본 논문에서는 자성센서로 자기장의 변화를 감지하는 금속탐지 장치를 다룬다. 금속탐지기는 송신 코일에 전류를 인가하여 자기장을 유도하고 이렇게 유도된 자기장은 금속 표적 표면에 전류를 발생시킨다. 금속 표적 표면에

흐르는 전류는 다시 자기장을 유도하고 수신 코일을 이용하여 금속으로부터 유도된 자기장을 탐지한다[1]. 이러한 과정 중에서 특히 신호처리 방안에 대하여 논하고자 한다. 본론 1과 2에서는 신호처리에 필요한 자기장 데이터를 얻는 과정 및 지뢰탐지 방법에 대한 기본 설계에 대해 기술한다. 본론 3에서는 앞서 설계한 내용을 실제 적용했을 때 발생한 문제점을 보여주고 그 원인을 분석한다. 본론 4에서는 시행착오를 통해 얻은 경험을 바탕으로 새롭

* Radar SW Team, Hanwha Systems Co., Ltd.

** Agency for Defense Development(ADD)

★ Corresponding author

E-mail : byungmin75.jung@hanwha.com, Tel : +82-31-8091-7575

※ Acknowledgment

This work was supported by the Defence Acquisition Program Administration Grant under contract number UC120055ID. Manuscript received Jul. 17, 2018; revised Aug. 28, 2018; accepted Sep. 12, 2018

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.

게 개선한 신호처리 알고리즘을 제안하고 본론 3에서 보여준 문제를 해결한다.

II. 본론

1. 신호처리에 필요한 자기장 데이터

지뢰탐지기 신호처리는 코일과 연결된 송수신부로부터 자기장 크기를 포함한 raw-data를 수신하는 단계부터 시작한다. 두 모듈 간에는 이더넷으로 연동되며 raw-data는 60Hz의 주기적인 속도로 들어온다. 여기서 잠시 raw-data를 얻는 과정에 대해서 간략히 살펴보겠다. 송수신부는 수신코일에서 감지된 자기장의 변화, 즉 아날로그 신호를 일정구간에서 추출한다. 이것을 신호처리부로 송신해야하기 때문에 ADC(Analog-Digital Converter) 처리를 거쳐 500개의 샘플링 데이터를 만들고 2byte 크기인 unsigned short 데이터형 500개의 배열에 담아 신호처리로 전달하게 된다. 배열원소가 unsigned short 데이터형이기 때문에 가질 수 있는 수치의 범위는 0부터 65535까지이다. 그림 1은 신호처리가 수신하는 한 개의 raw-data에 대한 기본적인 형태를 보여준다. 주변에 탐지대상 표적이 없고 대기 중인 상태로 유지하고 있는 환경이다.

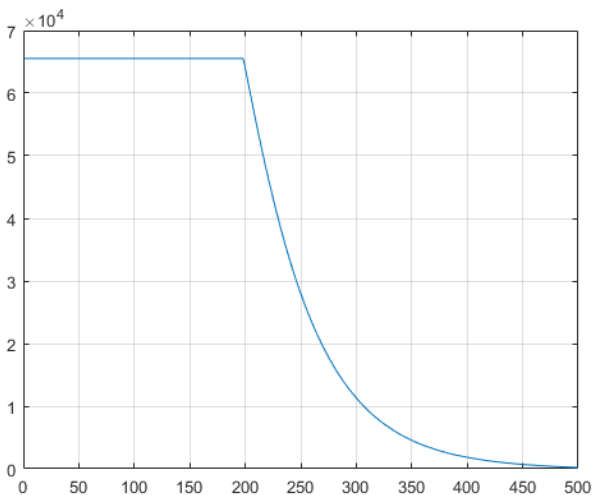


Fig. 1. Basic Pattern of raw-data.

그림 1. raw-data의 기본 형태

그림 2는 탐지 대상의 표적이 수 cm 거리 이내로 매우 근접한 상황에서 수신한 한 개의 raw-data(data 2)와 표적이 없는 대기상태의 raw-data(data 1)를 비교한 그래프이다.

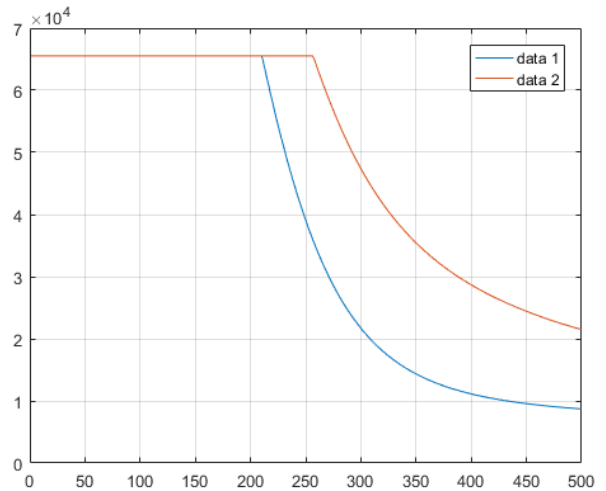


Fig. 2. Comparing the raw-data of Detectable Target with Basic Pattern.

그림 2. 탐지 대상 표적이 있는 raw-data와 비교

탐지 대상 표적이 가까이 있는 경우 그래프의 패턴은 대기상태에 비하여 위쪽으로 올라오는 모습을 보여준다. 그 이유는 코일에 전류가 인가되어 흐르면 자기장이 형성되고 이 자기장은 금속 표적의 표면에 전류를 발생시키게 되며 이 전류는 다시 자기장을 유도하면서 탐지코일에 수신전압을 생성시키는 원리를 이용하기 때문이다[2]. 결국 대기상태에 비해 현재의 신호 상태가 얼마나 올라왔는지 또는 변화했는지에 따라서 탐지 유무를 판별할 수 있다.

2. 신호처리 기본설계

최초 지뢰탐지기 장비에 전원을 인가하면 초기에 장비 자체의 불안정한 전기적 노이즈를 제거한다는 가정 하에 20초 동안 데이터를 버린다. 연동 속도가 60Hz이므로 20 x 60, 즉 1200개의 raw-data를 무시하게 된다. 그 후 10초 동안 데이터를 수집하여 calibration을 수행한다. 마찬가지로 60Hz 속도이므로 총 600개의 raw-data가 calibration에 사용된다. Calibration 방법은 raw-data 600개를 합산하여 산술평균을 하는데 raw-data가 500개 배열로 구성되어 있으므로 각 배열원소의 index마다 따로 계산하여 관리한다. 조금 더 상세히 설명하자면, 배열의 첫 번째 원소가 600개이고 이 값들을 모두 더한 후 600으로 나누면 평균값을 구할 수 있다. 배열의 두 번째 원소부터 배열의 마지막인 500번째 원소까지도 각각 600개이고 모두 같은 방법으로 평균값을

구할 수 있다. 이렇게 해서 500개의 평균값을 도출하는 것이 calibration이며 이것을 cal-data라는 500개의 배열에 기억해두도록 한다. Calibration 과정에 대한 이해를 도울 수 있도록 그림 3에 정리해보았다.

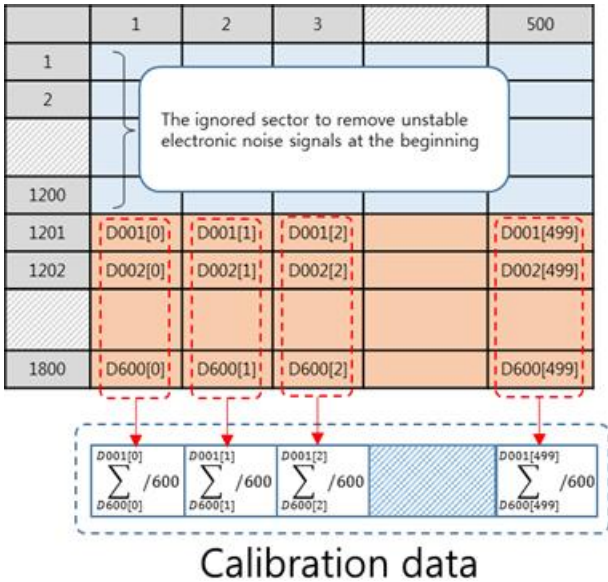


Fig. 3. The Method of Calibration.

그림 3. Calibration 방법

Calibration이 완료되면 그 이후부터 수신되는 데이터들을 모두 cal-data와 비교하여 차이를 확인하면 된다. cal-data와의 차이를 산출하는 과정이 곧 해당 raw-data에 대한 신호처리를 의미하는데 raw-data는 배열의 형태로 이루어져 있기 때문에 신호처리 결과를 직관적으로 비교하기 위해서는 하나의 스칼라 값으로 변환하는 것이 중요하다. 어떤 항목을 스칼라 값으로 선정할 지에 대해서는 여러 가지 방법이 있을 것이다. 예를 들면, 그림 2 그래프 상의 기준으로 다른 곳에 비해 비교적 움직임의 폭이 커 보이는 300번째 배열 원소에 들어있는 값을 사용하거나 아니면 500개의 원소값들을 모두 합산한 수치를 사용할 수도 있다. 본 연구에서는 cal-data를 기준으로 raw-data의 표준편차를 계산하고 이것을 신호처리 결과 값으로 사용하였다. 수식은 다음과 같다.

$$D = \sqrt{\frac{(\alpha_1 - \beta_1)^2 + (\alpha_2 - \beta_2)^2 + \dots + (\alpha_N - \beta_N)^2}{N}} \quad (1)$$

수식 (1)에서 D 는 신호처리 결과값이고 α 는 현재 위치에서의 raw-data, β 는 표적이 없는 위치에

서 계산한 cal-data이다. 만약 표적이 없다면 idle 상태이므로 raw-data와 cal-data는 그림 2에서 data 1의 형태가 되고 두 데이터가 거의 비슷한 수치를 가질 것이기 때문에 신호처리 결과값은 0에 가까운 작은 값을 유지하게 된다. 표적이 근접하게 되면 그림 2와 같이 두 데이터 간 차이가 발생하므로 신호처리 결과값은 일정크기 이상 커질 수 있으며 이론적인 최대값은 65535이다. 토양에 매설한 금속 지뢰를 스캔하는 동안 이 수식을 적용하여 매 프레임마다 신호처리 결과값을 산출하고 시간에 따른 D 값을 그래프로 표현하면 그림 4에서 result data 1과 같다.

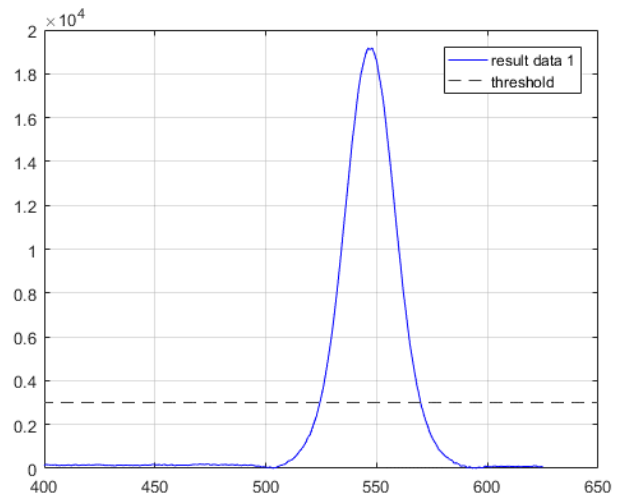


Fig. 4. Ideal Pattern of Signal Processing of Target.

그림 4. 표적에 대한 이상적인 신호처리 결과

표적이 없는 동안에는 0에 근접한 수치를 유지하다가 표적이 다가오면 급격히 상승하게 되고 아마도 표적이 가장 가까웠을 순간으로 예상되는 X축 550 프레임 지점에서 약 19000 정도의 최고점을 기록한 후 표적이 멀어지기 시작하면 다시 0에 근접한 소강상태가 된다는 것을 알 수 있다. 최종적으로 표적을 탐지했음을 판별하기 위해서는 정량적인 기준인 threshold가 필요한데 이 그래프에서는 threshold를 3000으로 설정한 예시를 점선으로 보여주고 있으며 이 값을 돌파한 구간에 한하여 표적이 탐지되었다는 해석을 내릴 수 있다.

3. 시험 과정에서 발견한 문제점

그림 4는 최초 설계 의도에 맞게 표적을 깨끗하고 이상적으로 탐지하여 신호 처리한 결과를 보여

주는 케이스라고 할 수 있다. 그런데 수차례 비슷한 시험을 반복하는 과정에서 예상하지 못한 문제 현상을 발견하게 되었다.

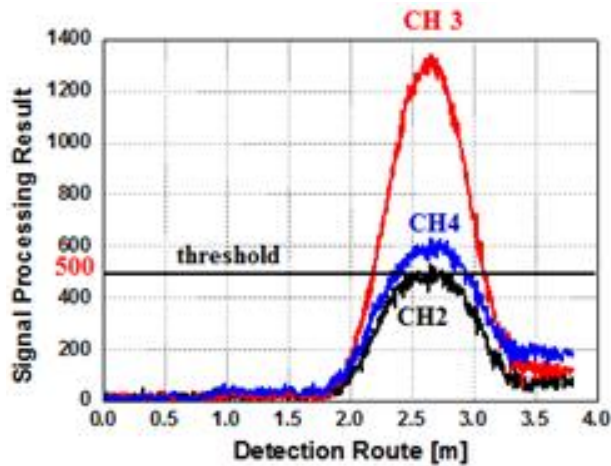


Fig. 5. Various Test Cases of Target Detecting.
그림 5. 표적 탐지를 수행한 몇 가지 시험 케이스들

그림 5는 하나의 고정된 지뢰 표적을 놓고 여러 번 시험했던 결과 중 일부 3가지 신호처리 결과에 대한 그래프이다. 공통적으로 보여주는 문제는 최초에 신호크기가 0에 근접했었고 표적을 완전히 지나간 후 다시 0으로 떨어지는 것이 아니라 100에서 200 이상으로 유지되는 부분이다. 물론 그래프에서 제시한 것처럼 threshold를 500으로 충분히 높게 설정하면 표적 탐지 판별이 가능하긴 하다.

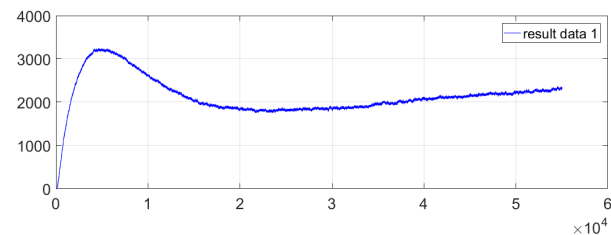


Fig. 6. Signal Processing with No Target for 60 Minutes.
그림 6. 표적이 없을 때 60분 동안의 신호처리 결과

그림 6은 그림 5에서 나타난 문제의 원인을 분석해보기 위하여 약 60분 동안 표적이 없는 상태에서 신호처리 결과값을 그래프로 그려보았다. 표적이 없으므로 계속 0에 근접한 결과를 기대했으나 초반 5분 동안 3000을 돌파할 정도로 급격하게 상승 곡선을 그리고 이후 15분 동안 하강하다가 다시 서서히 상승하는 패턴을 보여주었다. 비슷한 시험을 수

차례 해본 결과 패턴에 특별한 규칙성은 발견할 수 없었다. 그리고 이 시험을 토대로 그림 5의 그래프를 재해석하자면 수십 초 이내의 비교적 짧은 시간 동안 수집한 데이터이기 때문에 threshold 500으로 표적 판별이 가능했지만 만약 표적이 없는 상태에서 수십 분 이상 기다린 후 같은 시험을 했다면 대기하는 동안 이미 신호크기가 500을 넘어버리고 오경보가 발생하므로 정확한 표적 판별이 어려웠을 것이라고 추측된다.

4. 개선된 신호처리 알고리즘

최초에 설계했던 신호처리 방법에 문제가 있다는 것을 그림 7에서 잘 설명해 주고 있다. Threshold를 300으로 설정하고 표적이 완전히 지나간 지점으로 추측되는 X축 600 프레임에 이르기까지 표적이 잘 탐지된 것처럼 보이지만 패턴이 조금씩 상승하는 경향을 보면 그 이후에 표적이 없음에도 불구하고 신호크기는 다시 threshold를 넘을 가능성이 높다.

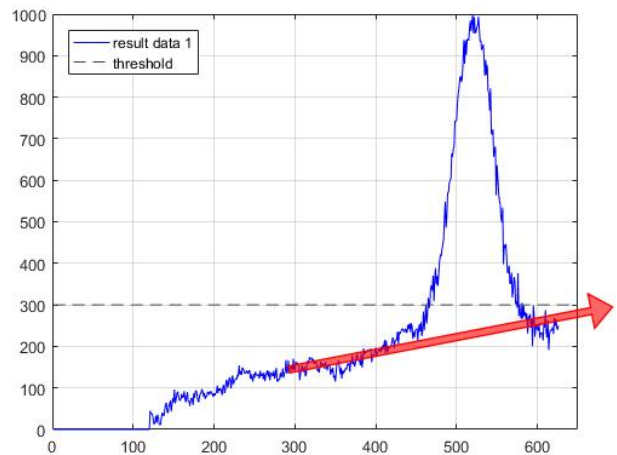


Fig. 7. Signal Processing Before Modifying Algorithm.
그림 7. 알고리즘 개선 전 신호처리 결과

문제의 근본 원인은 잘못된 calibration data를 사용한다는 점이다. 최초에 계산한 값을 고정해 놓고 이후 수신된 신호크기와의 차이만 계산하기 때문에 지속적으로 변화하는 주변 환경의 잡음으로부터 받는 영향을 전혀 고려하지 못하고 있는 것이다. 따라서 가장 먼저 수정되어야 할 부분은 새로운 raw-data를 수신할 때마다 그것을 calibration 계산에 반영하여 갱신하는 일이다. 최신의 cal-data를 신속하게 만들기 위하여 calibration 계산에 사용되는 raw-data 개수를 기존 600개에서 20개로 줄였다. 즉 최근 수신한

raw-data 20개에 대한 평균값을 취하여 cal-data를 갱신하게 되며 소요시간 상으로는 10초에서 0.3초 정도로 단축한 셈이다. 이렇게 하면 표적이 없는 동안에 갱신된 cal-data와 최신 raw-data가 계속 비슷한 값을 가지기 때문에 적어도 그림 6에서 보여준 문제는 해결할 수 있다.

그 다음 고민해야 할 부분은 표적 탐지 신호의 크기를 정확하게 뽑아내는 것이다. 그림 7에서 표적이 탐지되는 신호의 최대 크기는 약 1000인 것으로 보인다. 하지만 이것은 잡음이 포함되어 있는 수치이다. 잡음 제거를 생각한다면 그림 8에서 설명하는 바와 같이 추출하는 것이 타당하며 그래서 신호크기는 1000이 아닌 약 700정도가 되는 것으로 해석해야 한다.

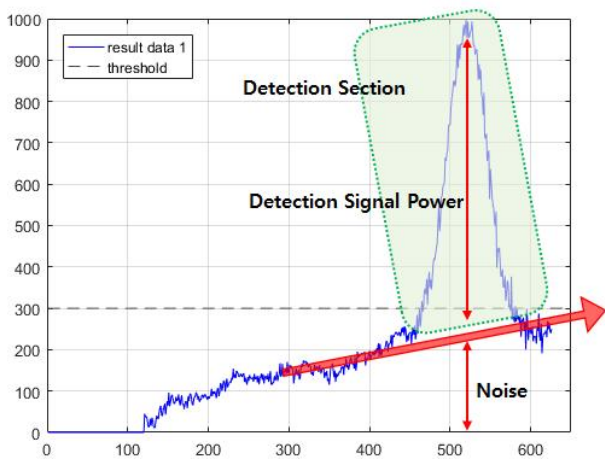


Fig. 8. Analysis of Signal Processing.
그림 8. 신호처리 결과에 대한 해석

노이즈를 제거하고 탐지 신호 크기를 선별하는 방법에 대해 다양한 시도를 해볼 수 있겠지만 본 연구에서 선택한 방안은 raw-data를 수신할 때마다 cal-data 갱신에 포함시키다가 표적 탐지가 시작되는 순간 calibration 계산을 중지하고 마지막 cal-data를 기준으로 이후 탐지되고 있는 동안 표적 신호크기를 계산한다. 그리고 표적이 완전히 지나가면 cal-data 갱신을 다시 이어가는 것이다.

마지막으로 해결해야 할 부분은 표적이 최초 탐지되기 시작하는 지점과 표적이 완전히 지나간 지점을 결정하는 문제이다. 왜냐하면 그 위치에서 calibration 계산 정지와 재시작이 일어나고 이에 따라 최종적인 탐지신호 크기가 정해지기 때문이다. 물론 시험이 끝난 후 수집한 데이터를 나중에 그래

프 상으로 보면 어디서 탐지가 시작되고 어디서 끝났는지 육안으로 구별하는 것은 그리 어렵지 않다. 그러나 지뢰탐지기라는 장비의 특성상 순간순간 들어온 신호크기를 실시간으로 해석하여 사용자에게 탐지 유무를 알려 줘야하기 때문에 신속한 판별이 중요하다. 본 연구에서는 그림 9에서 보는 바와 같이 탐지 지점을 찾는 결정적인 도구로서 그래프의 기울기 값에 주목하였다. 표적이 없는 동안 잡음에 의해 변화하는 크기보다 표적이 다가왔을 때 움직이는 변화량이 훨씬 크기 때문이다. 그리고 이때 사용하는 그래프는 기울기 값의 신뢰성을 높이기 위하여 최근 수신한 20개의 raw-data 신호세기를 평균한 값이고 이 수치를 raw-data-avg라고 칭하겠다.

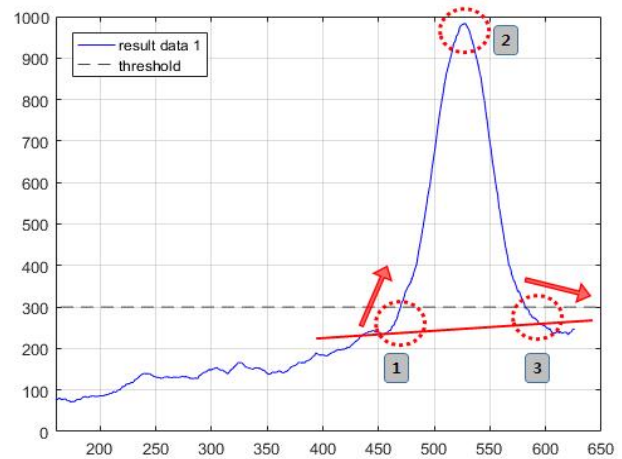


Fig. 9. Finding of Start and End Point for Target Detecting.
그림 9. 표적 탐지의 시작과 끝에 대한 식별

기울기 값은 현 지점의 raw-data-avg 값과 이전 20번째 지점 raw-data-ave 값 사이의 변화량으로 정의하였다. 그림 9의 그래프에 대한 기울기 값은 그림 10으로 표현된다. 표적이 없는 구간에서는 절대값 5를 넘지 않는다는 점에 착안하여 이 안에서는 calibration을 수행한다. 기울기가 그래프 내 1번 지점과 같이 +5를 넘으면 표적 탐지가 시작되는 위치로 판단하고 calibration 수행을 중지하며 이때의 cal-data를 이용하여 탐지신호 크기를 계산한다. 신호크기가 최고점에 도달하면 2번 지점과 같이 기울기가 일시적으로 0을 지나면서 부호가 음수로 전환되고 표적이 멀어지는 순간에 -5 이하로 떨어진다. 마지막으로 3번 지점 이후 기울기가 다시 0으로 수렴하는데 여기가 표적을 완전히 지나가는 위치가 되며 중지했던 calibration을 재개한다.

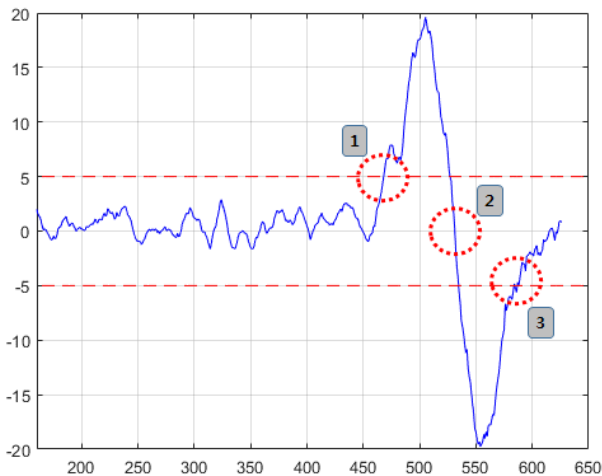


Fig. 10. Slope of The Graph which is in [Fig 9].
그림 10. [그림 9]의 그래프에 대한 기울기

이렇게 개선한 알고리즘을 적용하여 그림 7에서 보여주었던 신호처리를 다시 계산한 결과를 그림 11에서 확인할 수 있다. 이전에 고려하지 않았던 잡음 처리를 했기 때문에 안정적인 패턴을 보여주고 있을 뿐만 아니라 threshold를 기존 300에서 100으로 크게 낮추는 것이 가능해진 만큼 지뢰탐지 성능에 대한 향상도 기대할 수 있게 되었다.

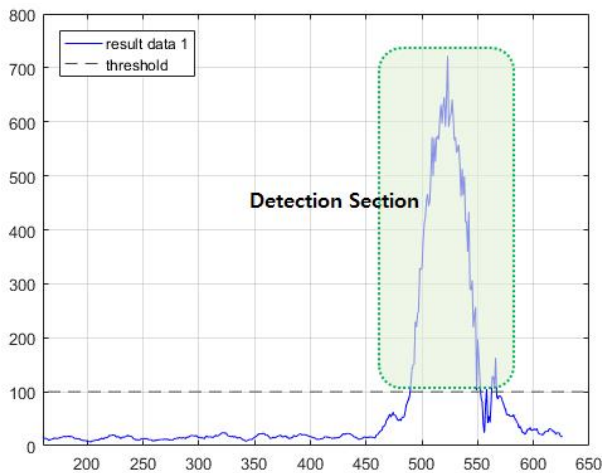


Fig. 11. Signal Processing After Modifying Algorithm.
그림 11. 알고리즘 개선 후 신호처리 결과

III. 결론

본 논문에서는 자성센서를 기반으로 한 지뢰탐지기를 개발하는 과정에서 필요한 신호처리 방법을 설계 및 구현하였다. 최초 설계에 대하여 예상하지 못한 문제를 마주하게 되었고 비록 시행착오를 겪기도 했지만 원인을 면밀히 분석한 후 시험 환경에

적합한 솔루션 찾아 대응한 덕분에 결국은 개선된 신호처리 알고리즘을 완성시켰다. 이번 연구에서 가장 중요했던 부분은 신호처리 결과 패턴에 대한 실시간 기울기 감시라고 생각한다. 신호처리 결과가 장비 자체의 전기적인 잡음 또는 주변 환경의 영향을 받으면 지뢰탐지 여부를 판별하기가 어렵기 때문에 초기에 계산한 calibration data를 기준값으로 고정해 놓고 사용하는 것보다는 표적이 없는 상태인지 감시하며 계속적으로 현재 기준에서의 calibration data를 다시 계산하여 갱신하는 것이 효과적이다. 이때 표적 탐지 유무를 감시하는 도구로 활용한 것이 바로 신호처리 결과 그래프에 대한 기울기 값이었던 것이다. 상황에 맞는 도구를 선택하고 적절하게 이용해서 금속 지뢰의 매설 위치를 정확하게 식별하였고 성공적으로 연구를 마칠 수 있었다.

References

- [1] Byung-Min Jung, Yu-Shin Chang and Seung-Hoon Han, "Coil Design of Pulse Induction Metal Detector," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol.26, no.4, pp.389-396, Apr. 2015. DOI:10.5515/KJKIEES.2015.26.4.389
- [2] Byung-Min Jung, Beom-Su Shin, Yu-Shin Chang and Dong-Won Yang, "Confirmation Method of Target Detection for Vehicle Mounted Metal Detector," *Journal of The Korea Society of Computer and Information*, vol.21, no.10, pp.49-54, Oct. 2016.
- [3] Carl V. Nelson et al, "Wide Bandwidth Time-Domain Electromagnetic Sensor for Metal Target Classification," *IEEE Transaction on geoscience and remote sensing*, vol.39, no.6, pp.1129-1138, Jun. 2001. DOI:10.1109/36.927425
- [4] Claudio Bruschini, "A Multidisciplinary Analysis of Frequency Domain Metal Detectors for Humanitarian Demining," Thesis of Ph.D degree, Brussel University, 2002.
- [5] Bobae Kim, Jungwon Yoon, Seung-eui Lee, Seung-hoon Han, and Kangwook Kim, "Pulse induction metal detector with time-domain bucking

circuit for landmine detection,” *IET Electronics Letters*, vol.51, no.2, pp.159–161, Jan. 2015.

DOI:10.1049/el.2014.3895

[6] Martin Misakian, “Equations for the Magnetic Field Produced by One or More Rectangular Loops of Wire in the Same Plane,” *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, vol.105, no.4, pp.557–564, Jul. 2000. DOI:10.6028/jres.105.045

BIOGRAPHY

Beom-Su Shin (Member)



2007 : BS degree in Computer Engineering, Chung-Ang University.
2013~Present : Junior Engineer, Hanwha Systems Co., Ltd.

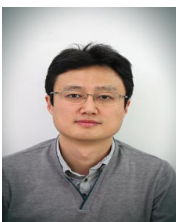
Byung-Min Jung (Member)



2000 : BS degree in Electronic Engineering, Soong-Sil University.
2002 : MS degree in Electronic Engineering, Soong-Sil University.
2007 : PhD degree in Electronic Engineering, Soong-Sil University.

2010~Present : Senior Engineer, Hanwha Systems Co., Ltd.

DongWon Yang (Member)



2001 : B.S. degree in Electrical Engineering, Seoul National University.
2003 : M.S. degree in Electrical Engineering, Seoul National University.
2016 : Ph.D. degree in Electronic Engineering, KAIST.

2003~Present : Senior Research Engineer, Agency for Defense Development (ADD).