금속/비금속 복합센서기반 위험물 탐지기술 개발

Development of Hazardous Objects Detection Technology based on Metal/Non-Metal Detector

유 동 수, 김 석 환, 이 정 엽, 이 석 재*

(Dong-su Yoo¹, Seok-hwan Kim¹, Jeong-yeob Lee¹, and Seok-jae Lee^{2,*})

¹Mechanical Engineering Team, Hyundai-ROTEM Company

²Department of Radiologic Technology, Daegu Health Collage

Abstract: Conventional handheld metal detectors use a single induction coil to detect the metallic parts of explosive objects, and the detector generates an acoustic signal from its magnetic response to a metallic object so that an operator can confirm the existence of mines. Though metal detectors have very useful detection mechanisms to find mines, it is easy to cause a high false alarm ratio due to the detection of non-explosive metallic items such as cans, nails and other pieces of metal, etc. Also, because of the physical characteristic of a metal detector it is hard to detect non-metallic objects such as mines made of wood or plastic. Furthermore, the operator must move it to the left and right slowly and repeatedly to attain enough sensor signals to confirm the existence of mines using only a monotonous acoustic signal. To resolve the disadvantages of handheld detectors, many new approaches have been attempted, such as an arrayed detector and a visualization algorithm based on metal/non-metal sensor. In this paper, we introduce a visualization algorithm with a metal/non-metal complex sensor, an arrayed metal/non-metal sensor and the their testing and evaluation.

Keywords: mine, detection, MD, GPR, visualization, array

I. 서론

전 세계적으로 살포 및 매설된 지뢰로 인해, 매년 수많은 사람들이 사망하거나 부상당하고 있다. 특히, 내전 이후 민간인 거주 지역에 매설된 지뢰로 인해 민간인 사상자가 발생하고 있으며, 이는 지뢰 매설 이후 발생한 산사태 및 홍수와 같은 자연적 현상으로 인해 매설된 지뢰의 정확한 위치를 파악할 수 없기 때문에 이와 같이 의도치 않은 사고가 발생한다. 매설된 지뢰를 탐지하는 수단은 20세기 초 중반부터 사용되어온 탐침봉이나 금속탐지센서이며, 이중에 금속탐지센서는 오늘날까지도 군사 및 민간 분야에서 널리 사용되고 있다.

금속탐지센서(MD; Metal Detector)의 금속성 폭발물 탐지 능력은 매우 탁월하나, 캔, 못, 금속 폐기물 등과 같은 비폭발성 금속성 물체도 탐지하기 때문에 오탐지율이 높다는 단점을 가지고 있다. 또한 금속탐지센서는 목함지뢰 또는 플라스틱 지뢰와 등은 탐지하기가 어려운 단점을 지니고 있다[1]. 이와 같은 금속탐지 센서의 탐지 신뢰성의 저하 및 높은 오탐지율로 인해 지뢰탐지 운용병의 사망 또는 부

상의 위험이 도사리고 있다.

그리고 단일 센서를 사용함에 따라 센서를 좌/우로 세밀하게 스캔을 해야 하므로 탐지시간이 많이 소요되며, 운용자가 헤드셋을 통하여 탐지신호 음향으로 감지해야 하므로, 탐지 결과가 직관적이지 못하고 운용자가 쉽게 피로감을 느끼는 단점을 가지고 있다.

이와 같은 금속탐지센서의 단점을 보완하기 위해, 최근에는 금속탐지센서와 지표투과레이더, 적외선 탐지센서, 초음파 센서, 중성자 센서, 화학/생물학 센서 등을 융합하여 사용하는 복합탐지기법이 각광을 받고 있다. 특히, 지표투과레이더(GPR; Ground Penetrating Radar)는 일반적인 레이더와는 달리 지반 투과성이 좋은 초광대역 주파수의 전자기파를 땅 속에 투사하여 매설물을 탐지는 방식으로, 고고

그림 1. 금속/비금속 기반 복합센서 (출처 : Vallon GmbH).

Fig. 1. Metal/Non-metal Complex Sensor (Vallon GmbH).

* Corresponding Author

Manuscript received November 20, 2013 / revised December 20, 2013 / accepted December 31, 2013

유동수, 김석환, 이정엽: 현대로템 주식회사 기술연구소

(fireball130@hyundai-rottem.co.kr/bigblaze@hyundai-rottem.co.kr/yeobbi@hyundai-rottem.co.kr)

이석재: 대구보건대학교 방사선과(leejs@dhc.ac.kr)

※ 본 논문의 일부 내용은 민군겸용 다목적 견마로봇 지뢰탐지장치 과제와 연관된 연구내용임.

그림 2. 배열식 GPR - Husky Mounted Detection System with VISOR2500 (출처 : Chemring NIITEK).

Fig. 2. Arrayed GPR - Husky Mounted Detection System with VISOR2500 (Chemring NIITEK).

학, 토목공사 및 하수도 배관 검사 등에 널리 사용되어 왔다[2]. 근래에 개발되는 휴대형 지뢰탐지 센서도 그림 1과 같이 금속탐지 및 GPR을 복합하여 폭발물을 탐지한다.

또한 탐지속도를 증대하기 위한 방편으로 다수의 센서들을 일렬로 배치한 배열식 탐지 센서를 개발하는 추세이다. 일반적인 휴대형 탐지 센서는 센서를 좌/우로 천천히 왕복하고 전진하면서 탐지를 해야 하기 때문에 탐지속도가 매우 느리다. 반면, 그림 2와 같은 배열식 지뢰탐지 센서는 좌/우 스캔 과정이 필요 없으므로 고속탐지가 가능하며, 기존의 휴대형 센서에 비해 탐지 시간이 단축되는 장점이 있다.

이와 더불어, 폭발물 탐지 결과에 대한 직관적인 판단을 위해 탐지 신호를 음향신호 대신 그림 3과 같이 영상신호로 변화하여, 탐지 결과의 가독성과 객관적인 판단을 증대시킬 수 있도록 탐지 영상 가시화에 대한 연구도 진행되고 있다[3].

본 연구에서는 상용 휴대형 금속/비금속 복합센서를 활용하여 신호융합기법과 영상 가시화 알고리즘을 개발하고, 이를 야지 시험평가 및 분석을 통하여 실 매설형 지뢰 탐지에 적합함을 검증하였다. 또한, 시험결과 획득된 기술을 기반으로 탐지속도를 향상시키는 배열식 금속/비금속 복합센서를 개발하고 야지 실물시험을 통하여 복합신호처리, 영상가시화 및 탐지기법의 타당성을 입증하였다.

그림 3. GPR 탐지결과 영상 가시화 (출처 : Chemring NIITEK).

Fig. 3. Visualization of GPR Detection (Chemring NIITEK).

II. 복합센서탐지 및 매설물 영상 가시화 시험

1. 지뢰탐지장치 개발 및 시험 환경

복합센서탐지 및 매설물 영상 가시화 시험을 수행하기 위해, 복합센서 기반의 금속/비금속 지뢰탐지 센서를 지뢰탐지 구동장치에 장착하고, 군에서 사용하고 있는 3종의 연습용 지뢰를 매설하여 복합센서 탐지시험 및 영상가시화 시험을 수행하였다.

복합센서는 Vallon사의 VMR2 Minehound를 사용하였고 지뢰탐지 구동장치에 장착하기 위해 센서 모듈을 개조하였다.

표 1. 시험용 연습지뢰 사양.

Table 1. Specifications of Training Mines.

명칭	형상	사양
KM15		<ul style="list-style-type: none"> • 재질 : 스틸 • $\Phi 334\text{mm} \times 124\text{mm}$ • 중량 : 6.7kg
KM16		<ul style="list-style-type: none"> • 재질 : 스틸 • $\Phi 101.5\text{mm} \times 135\text{mm}$ • 중량 : 2.8kg
KM19		<ul style="list-style-type: none"> • 재질 : 플라스틱 • $335\text{mm} \times 335\text{mm} \times 94\text{mm}$ • 중량 : 13.6kg

표 2. 복합탐지센서 모듈 사양 (출처 : Vallon Minehound VMR2 Operation Manual).

Table 2. Specifications of Complex Mine Detector (Vallon Minehound VMR2 Operation Manual).

명칭	사양	형상
전원	• 5VDC	
중량	• 1.2kg	
탐지방식	<ul style="list-style-type: none"> • 금속탐지(MD) • 비금속탐지(GPR) 	
스캔 속도	<ul style="list-style-type: none"> • MD : 최대 1.0m/s • GPR : 최대 0.5m/s 	
기타	<ul style="list-style-type: none"> • 0.2m 수심 방수 • MD모드 우천 운용 가능

그림 4. 지뢰탐지 구동장치 및 지뢰탐지 제어기.

Fig. 4. A manipulator and a controller for mine detector.

그림 5. 전동시험장치대 제작.

Fig. 5. An Electrically-motorized Cart for Mine Detection Experiments.

또한 지뢰탐지를 수행하기 위한 지뢰탐지 구동장치와 구동장치 제어 및 센서 신호 획득/처리를 위한 지뢰탐지 제어기를 개발하였다. 지뢰탐지 제어기는 지하에 매설된 표적의 탐지 데이터를 획득하기 위해 다자유도 지뢰탐지구동장치의 구동제어를 수행하고, 구동장치에 장착된 위치센서 기반의 기구학 정보를 통하여 지뢰탐지센서의 이동 위치와 이에 대응되는 지뢰탐지센서 데이터를 획득하는 역할을 한다. 또한 C++로 구현된 영상가시화 알고리즘을 제어기에 설치하여 지뢰탐지 제어기가 알고리즘을 수행할 수 있도록 하였다.

또한, 실외 시험장소까지 지뢰탐지장치 이동을 위해 지뢰탐지장치용 전동시험장치대를 개발하였고, 전동시험장치대에 장착된 지뢰탐지장치를 이용하여 지뢰탐지 실험을 실시하였다.

2. 영상가시화 알고리즘

복합탐지센서모듈은 아래 그림과 같이 안테나 및 코일을 통하여 방사된 전자기파 및 전자기장의 반사신호를 통하여 그림 6과 같은 이미지를 획득한다.

상기 이미지는 거리-시간 영역의 신호로써 지하에 매설된 물체가 발견될 경우 곡선 무늬의 형태가 나타난다. 이러한 형태는 직관적이지 않기 때문에, 영상 가시화 알고리즘을 통하여 위치-위치 영역의 신호로 변화시켜 상기 우측 그림과 같이 사용자가 직관적으로 알 수 있는 패턴으로 변

그림 6. MD/GPR 탐지 데이터.

Fig. 6. Mine Detection Data of MD/GPR.

그림 7. 안테나와 표적의 위치.

Fig. 7. The Antenna Distances from Target with Respect to Time.

화시키는 것이다. 이러한 이미지 패턴을 생성하는 알고리즘은 여러 가지가 있으나, 본 지뢰탐지장치에는 DSBP (Delayed Sum Back Projection) 알고리즘[3,4]을 사용하였다. DSBP 기법은 상기 그림 6과 같이 위치-시간 영역의 데이터인 B-Scan 데이터를 그림 8과 같은 위치-위치 영역의 데이터로 변화시키는 알고리즘이다. DSBP 알고리즘의 장점은 로직이 단순하여, 프로그래밍언어로 구현이 간단하여, 지뢰탐지 구동장치 소프트웨어에 쉽게 결합이 가능하고, 계산 부하가 낮아서 지뢰탐지 구동장치를 동작하면서 영상 출력이 가능하다는 것이다.

그림 7은 좌/우로 왕복 스캔하는 지뢰탐지 센서의 임의의 위치와 탐지물 간의 위치를 나타낸다. x축은 임의의 시간에 대한 지뢰탐지 센서(안테나)의 위치를 나타내고 이를 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 으로 정의하며, z축은 깊이를 나타낸다. 임의의 시간에 대해 안테나의 위치를 의미한다. 임의의 안테나의 위치에서 거리 r 만큼 떨어진 곳에 표적(x_0, z_0)이 존재한다고 가정한다면, ($x, 0$)에 위치한 안테나에서 방출된 신호가 표적에 반사되어 다시 수신되는 시간 t는 아래와 같다.

$$t = \frac{2r}{c} = \frac{2\sqrt{(x-x_0)^2 + z_0^2}}{c} \quad (1)$$

(c는 진공에서 전자기파 속도 : $\approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$)

위 식 (1)을 정리하면 x_0 및 t_0 에 대한 쌍곡선 방정식 유도 가능하다.

$$\frac{c^2 t^2}{4z_0^2} - \frac{(x-x_0)^2}{z_0^2} = 1 \quad (2)$$

$$t_0 = \frac{2z_0}{c}$$

(t_0 는 안테나와 표적의 최단 거리를 왕복하는 시간)

위 식은 그림 6의 좌측 그림과 같은 쌍곡선을 나타내고, 쌍곡선이 지나는 곳에 대한 신호값을 아래 (3)식을 이용하여 누적시키면 특정 이미지가 생성된다.

$$u_c(x, z) = \sum_{i=1}^N u_m(x_i, t_i), \quad (3)$$

$$t_i = \frac{2\sqrt{(x_i-x)^2 + z^2}}{c}$$

여기서 u_m 은 안테나 상의 지점 x_i 에 위치한 안테나의 수신 시간영역 신호이며, u_c 는 처리 영상에서 임의의 (x, z) 에 해당되는 화소 값을 나타낸다. 시간 t_i 는 전자기파가 $(x_i, 0)$ 에 위치한 표적 사이를 왕복하는데 소요되는 시간이다. 식 (3)의 연산을 완료하면 위치-위치 영역의 이미지가 생성되며, 표적이 위치한 지점인 (x_0, z_0) 주위에 상대적으로 큰 값이 나타난다. 해당 이미지는 그림 8과 같은 이미지가 나타나게 된다.

이 알고리즘은 지뢰탐지제어기 운용 소프트웨어에 이식하기 위해 MATLAB으로 개발된 소스를 C++ 언어로 코딩하였으며, 소스코드를 소프트웨어 모듈화하여, 기존 동일한 언어로 개발된 지뢰탐지구동제어 소프트웨어에 쉽게 이식할 수 있도록 하였다.

3. 복합센서탐지/매설물 영상가시화 시험

표 1의 연습용 지뢰를 토양에 매설하고 지뢰탐지센서가 장착된 지뢰탐지 구동장치를 이용하여 탐지 시험을 수행하였다. 아래 그림과 같이 야지에 연습용 지뢰를 실제로 매설하여 탐지 시험을 수행하였다.

표적의 탐지깊이, 탐지높이, 탐지속도 등의 시험 파라미터를 변화시켜 다양한 시험 조건에서의 MD/GPR 데이터 획득 및 DSBP 기법에 의한 영상 이미지 데이터를 획득하

그림 8. 영상가시화 알고리즘을 통한 이미지 생성.
Fig. 8. Image Generation by the Visualization Algorithm.

그림 9. 복합센서 지뢰탐지 시험.
Fig. 9. Test Environments for MD/GPR Complex Sensor.

그림 10. MD/GPR 기반 복합탐지 시험 및 영상가시화 결과 (위에서부터 KM15, KM16, KM19).
Fig. 10. Detection and Visualization Results of MD/GPR Complex Sensor (Training Mines : KM15, KM16, KM19).

였다. 센서 탐지속도는 상용센서의 탐지성능이 가장 뛰어난 0.2m/s로 설정하였고, 표적은 5cm/10cm/15cm로 매설하였다.

매설된 시험대상 3종의 지뢰에 대하여 금속/비금속 센서를 활용하여 시험한 결과 그림 10과 같이 융합신호처리를 통한 가시화 영상을 획득하였다. 또한, 매설된 지뢰별로 영상 가시화 기반의 탐지기법이 우수함을 확인하였다.

III. 배열식 지뢰탐지센서 개발 및 시험

복합센서 기반의 지뢰탐지 탐지 및 영상 가시화 시험 이외에 다수의 센서를 이용한 배열식 지뢰탐지 센서를 개발하고 탐지 시험을 수행하였다. 개발된 배열식 지뢰탐지 센서는 배열식 지표투과레이더와 배열식 금속탐지장치로써 배열식 복합센서 연동 시험을 수행하였다.

1. 배열식 지표투과레이더

배열식 지표투과레이더는 5개의 GPR 모듈을 직렬로 장착하여 5채널의 GPR 신호를 동시에 획득할 수 있도록 구성되었다.

5개의 GPR 모듈은 송신/수신 안테나 일체형이며 안테나 모듈 중앙에 GPR 신호처리 보드가 장착되어, Ethernet 통신을 이용하여 5채널의 GPR 신호를 동시에 획득할 수 있다.

표 3. 배열식 지표투과레이더 사양.

Table 3. Specifications of Arrayed Ground Penetrating Radar.

명칭	사양
크기 (mm)	• 800(W) × 370(L) × 90(H)
중량 (kg)	• 12.4kg
센서배열	• 5 × 1
구성	<ul style="list-style-type: none"> • GPR Board - 5대 • I/F Board - 1대 • Power Board - 1대 • Ethernet Board - 1대

2. 배열식 금속탐지장치

배열식 금속탐지장치는 5개의 자기장 발생 및 수신 코일 일체형의 센서를 장착하여, 5채널의 금속탐지 신호를 동시에 수신할 수 있도록 개발하였다.

5개의 자기장 코일은 송신부와 수신부 일체형으로 되어 있고, 신호처리 보드를 통하여 5채널의 신호를 동시에 확인할 수 있도록 되어있다.

3. 배열식 복합센서 탐지시험

배열식 금속탐지장치 및 지표투과레이더를 동시에 장착하여 아래와 같이 각 센서의 5채널 데이터 획득 시험을 수행하였다.

시험장치의 구성은 그림 13과 같이 시험용 로봇 매니퓰레이터에 배열식 금속탐지장치와 배열식 지표투과레이더를 부착하였고, 시험용 수조에 KM15, KM19 대전차지뢰 및 KM16 대인지뢰를 매설하였다. 시험용 토양은 마사토를 사용하였다.

시험결과 그림 14 및 그림 15와 같이 배열식 금속탐지장치(MD) 및 배열식 지표투과레이더 영상을 획득하였으며, 결합된 배열식 MD/GPR 센서 및 인접한 5채널의 동종 센서들 간의 상호 간섭없이 센서신호가 동시 획득되어 정상적으로 매설물 탐지가 가능함을 확인하였다.

그림 13. 배열식 복합센서 탐지시험.

Fig. 13. A Test of Arrayed Complex Mine Detector.

그림 11. 배열형 GPR 지뢰탐지 센서.

Fig. 11. An Arrayed Ground Penetrating Radar.

그림 12. 배열형 자성 센서.

Fig. 12. An Arrayed Metal Detector.

표 4. 배열식 금속탐지장치 사양.

Table 4. Specifications of Arrayed Metal Detector.

명칭	사양
크기 (mm)	• 800(W) × 400(L) × 160(D)
중량 (kg)	• 24.0kg
센서배열	• 5 × 1
구성	<ul style="list-style-type: none"> • 자기장 송수신 코일 - 5개 • 신호처리 Board - 5대 • Power Board - 1대

그림 14. 배열식 MD 탐지결과.

Fig. 14. The Test Result of Arrayed Metal Detector.

그림 15. 배열식 GPR 탐지결과.

Fig. 15. The Test Result of Arrayed Ground Penetrating Radar.

IV. 결론

본 연구에서는 지하에 매설된 지뢰를 효과적으로 탐지하기 위하여 기존 금속탐지기의 단점을 보완하는 금속/비금속 복합센서 기반의 지뢰탐지장치를 위한 신호융합 및 영상가시화 알고리즘을 제안하였다. 또한, 영상가시화 알고리즘을 시험 및 평가하기 위해 자동 스캔이 가능한 지뢰탐지 구동장치를 개발하였다. 복합센서 기반 영상가시화 알고리즘을 시험하기 위해 실외 야지에 연습용 지뢰를 매설하였고, 지뢰종류, 탐지깊이, 매설깊이 및 탐지 속도를 변경하여 다양한 시험을 수행하였다. 또한 본 기술을 기반으로 배열식 금속탐지센서 및 배열식 지표투과레이더를 개발하였고 두 센서를 연동하여 다채널 센서 수신 시험 및 복합센서기반 탐지 및 영상가시화 시험을 수행하였다.

향후 현 보유 기술을 바탕으로 탐지센서의 해상도 증대를 위한 센서 모듈 집적화, 다채널 신호 동시 수신을 위한 고속 신호처리 시스템 개발, 다양한 환경에서 도출된 탐지 데이터 기반의 센서 설계 요소 도출, 탐지데이터베이스 기반의 자동 탐지 알고리즘 개발, 클러터(clutter) 제거 알고리즘 개발, 영상가시화 고속 출력 알고리즘, 비정형 지형 노면추종 탐지 알고리즘 개발 등을 수행할 예정이다.

REFERENCES

- [1] J. Lim and C. Oh, "Implementation of the pulse induction metal detector," *Proc. of Information and control, The Korean Institute of Electrical Engineers (in Korean)*, pp. 404-405, Oct. 2011.
- [2] Y. J. Park, K. H. Kim, and W. T. Lee, "High resolution ground penetrating image radar using ultra wideband (UWB) impulse waveform," *Journal of the Electronics and Information Engineers (in Korean)*, vol. 42, TC, no. 11, pp. 101-106, Nov. 2005.
- [3] D. Kim, J. Y. Hong, and K. Kim, "Comparison of time-domain imaging algorithms for ultra-wideband radar with one dimensional synthetic aperture," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science (in Korean)*, vol. 19, no.10, pp. 1175-1184, Oct. 2008.
- [4] L. Wentai, H. Chunlin, and S. Yi, "A realtime back projection imaging algorithm for impulse surface penetrating radar," *IEEE, International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pp. 1734-1737, 2005.

유 동 수

2002년 한양대 제어계측공학과 졸업. 2004년 동 대학원 석사. 2005년~현재 현대로템 주식회사 기술연구소 근무, 주임연구원.

김 석 환

1997년 영남대 기계공학과 졸업. 2000년 동 대학원 석사. 2006년 일본 나가사키 대학교 대학원 박사. 2006년~현재 현대로템 주식회사 기술연구소 근무, 책임연구원.

이 정 업

1991년 한양대 기계공학과 졸업. 1993년 동 대학원 석사. 2011년 동 대학원 박사. 2004년~현재 현대로템 주식회사 기술연구소 근무, 수석연구원.

이 석 재

1990년 경북대 전기공학과 졸업. 1992년 동 대학원 석사. 2008년 충남대 전자공학과 박사. 1992년~2012년 국방과학연구소 연구원. 2012년~현재 대구보건대학교 교수.