논문 2023-3-10 http://dx.doi.org/10.29056/jsav.2023.09.10

지하매설물 탐지를 위한 다채널 GPR 평단면 영상 구성에 관한 연구

최종성*, 이승환*, 오재곤**†

A study on the construction of multi-channel GPR plan view images for underground object detection

Jong Sung Choi*, Seung Hwan Lee*, Chae-Gon Oh**†

요 약

지하탐사레이다(GPR)을 이용한 매설물탐지는 송수신 안테나의 위치를 일정한 간격으로 이동하면서 획득한 탐사데이터에서 안테나와 매설물 간의 상대적인 거리 차이에 의해 발생하는 반사 신호의 변화를 스캔 방향과 깊이 방향의 단면으로 영상화한 쌍곡선을 통해 이루어진다. 그러나 이러한 쌍곡선 신호는 탐지 대상뿐만 아니라 지하에 묻혀있는 다양한 물체에 의해서도 만들어지게 되어 탐지 목표로 하는 대상의 식별을 어렵게 한다. 이러한 어려움을 극복하기 위해 일정한 채널 간격으로 정의된 다채널 GPR은 채널과 스캔 방향, 깊이 축의 3차원 데이터를 기반으로, 기존과 동일한 각 채널별 단면 영상의 쌍곡선과 함께 위에서 내려다 본 평단면 영상을 구성할 수 있다. 이러한 평단면 영상은 채널과 스캔 방향을 축으로, 깊이를 달리하여 각 채널에서 수신되는 신호의 변화를 통해 탐지 대상의 크기를 유추할 수 있다.

본 논문에서는 지하매설물 탐지를 위해 다채널 GPR의 평단면 영상을 구성하기 위한 송수신 안테나 배열과 신호처리 절차에 대해 논하였으며, 크기를 알고 있는 물체에 대한 탐지시험을 통해 다채널 GPR 탐사데이터를 이용해 구성한 평단면 영상의 효용성을 확인하였다.

Abstract

The detection of buried objects using Ground Penetrating Radar utilizes hyperbolic curves visualized by the variation of reflected signals due to the relative distance difference between the antenna and the buried objects. However, these hyperbolic signals are also created by various objects buried underground, making it difficult to identify and detection target. This difficulty can be solved through a plan-view image viewed from above along with the same hyperbolic image for each channel as the existing one created based on the 3D data of multi-channel GPR. In this paper, we discussed the transmitter-receiver antenna array and signal processing procedure for constructing plan-view images using multi-channel GPR for underground object detection. And we also verified the effectiveness of the plan-view images constructed using multi-channel GPR survey data through detection tests on object with known sizes.

한글키워드 : 지하탐사레이다, 다채널 GPR, 매설물탐지, GPR 신호처리

keywords : Ground Penetrating Radar, Multi-channel GPR, Buried Object Detection, GPR Data Signal Processing

* 이성 주식회사 GPR사업부/기술연구소
** 한국공학대학교 전자공학부
† 교신저자: 오재곤(email: cgoh@tukorea.ac.kr)

접수일자: 2023.08.28. 심사완료: 2023.09.09.
게재확정: 2023.09.20.

1. 서 론

지하탐사레이다(Ground Penetrating Radar, GPR)는 전자파를 이용한 광대역 레이더 시스템으로 지표면 내부의 물체나 구조물의 탐지 및 식별이 가능하여 건축, 토목 공사의 기초 지반 조사와 도로, 터널, 교량 등 인공구조물의 비파괴 검사 및 고고학의 유적 발굴, 군사 목적의 땅굴 탐사 및 지뢰 탐지 등 지하 매설물에 대한 정보를 얻는 방법으로 널리 이용되고 있다[1-4].

GPR은 송신 안테나에서 방사된 전자파가 매질을 통해 탐사 대상까지 전달되고, 이로부터 반사되거나 산란되어 돌아오는 신호를 수신안테나에서 수신하여 이를 처리하고 분석하는 과정을 통해 대상물을 판단한다. 이때 사용하는 전자파의 주파수가 낮을 경우, 긴 파장으로 큰 물체의 탐지와 매질 내 전파경로에서 감쇠가 상대적으로 낮아 투과 심도가 깊어지나 작은 물체 감지에는 불리하다. 이와 반대로 높은 주파수의 전파는 짧은 파장으로 작은 물체의 감지에는 유리하나 매질 내 전파경로에서 감쇠가 커서 투과 심도가 짧아진다[5-8].

이와 같이 탐사 대상의 크기와 매설 위치는 GPR 시스템 구현을 위한 중요한 요소로 이에 따라 탐지대상 식별을 위한 전자파의 주파수 선정 및 배경 매질과 투과 심도에 따른 원할한 전자파 송수신을 위한 링크 버짓(Link Budget) 등이 시스템 사양을 결정한다[1-3,5]. 이와 함께 탐사 대상과 이를 감지하기 위한 시스템의 탐사 위치에 따라 반사형, 투과형, 표면형, 시추형 등으로 운용방식이 구분된다.

이렇게 탐지대상으로부터 반사된 신호는 탐지대상과 GPR 시스템의 탐지 위치에 의해 달라지며, 시스템의 탐지 위치를 변화시켜 상대적 거리를 달리하는 스캔을 이용해 반사 신호의 변화를 영상화한 쌍곡선(hyperbolar)의 유무를 통해 탐지대상의 식별에 이용한다. 그러나 이러한 쌍곡선 신호는 탐지대상뿐만 아니라, 탐지대상 이외의 물체와 물질, 지층 등에서도 발생된다. 클러터 신호로 통칭되는 지하의 비균일 매질 경계면에서 발생하는 반사신호는 탐지 목표로 하는 대상의 식별을 어렵게 한다[9-11].

이러한 어려움을 극복하기 위해 일정한 간격으로 정의된 다채널 GPR은 채널과 스캔 방향, 깊이 축의 3차원 데이터를 기반으로, 기존과 동일한 각 채널별 단면 영상의 쌍곡선과 함께 위에서 내려다본 평단면 영상을 구성할 수 있다. 이러한 평단면 영상은 채널과 스캔 방향을 축으로, 깊이를 달리하여 각 채널에서 수신되는 신호의 변화를 통해 탐지대상의 크기를 유추할 수 있다. 이렇게 유추된 크기 정보는 이미 알고 있는 탐지대상의 크기 정보와 비교하여 클러터 신호를 무시할 수 있어 탐지대상의 식별 가능성을 높여준다[12-14].

본 논문에서는 지하매설물 탐지를 위해 다채널 GPR의 평단면 영상을 구성하기 위한 송수신 안테나 배열과 신호처리 절차에 대해 논하였으며, 크기를 알고 있는 물체에 대한 탐지시험을 통해 다채널 GPR 탐사데이터를 이용해 구성한 평단면 영상의 효용성을 확인하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성하였다. 1장 서론에 이어 2장에서는 GPR 신호 파형의 구성과 이를 이용한 탐사 방법을 기술하고, 3장에서는 다채널 GPR 구성을 위한 안테나의 배열과 신호처리절차를 기술한다. 4장에서는 구현한 시스템을 이용한 탐지대상별 시험 결과를 보이고, 5장에서는 결론 및 앞으로의 연구방향에 대해 기술한다.

2. GPR 탐사

2.1 고정탐사(A-Scan)

송수신 안테나 1쌍으로 이루어진 GPR 시스템

을 특정 지점에서 획득한 파형을 A-Scan 파형이라고 하며 이러한 방식의 탐사를 고정탐사라고 한다. 이처럼 시스템의 움직임 없이 수신된 파형은 그림 1과 같이 송신안테나에서 방사된 전자파가 시스템 내부 및 수신안테나로 직접 전달되는 직접 전달파(D), 지표면에서 반사되는 지표반사파(S), 탐사대상에서 반사되는 표적반사파(T)로 구성된다. 이상적인 매질환경과 탐사대상과의 거리, 이에 적합한 전자파 사양에서는 각각의 신호가 분리되어 수신될 수 있으나, 일반적인 상황에서는 중첩되어 수신되며 탐사대상과의 거리에 따라 반사신호가 수신되는 시간이 변화되므로 이를 잘 분리하는 신호처리 알고리즘이 요구된다. 이러한 A-Scan 방식은 일반적인 GPR 시스템의 탐사방식에서는 시스템이 고정되므로 사용하지 않으나, 시스템은 고정되고 탐지대상이 움직이는 벽투과 레이다 등으로 활용된다[15,16].

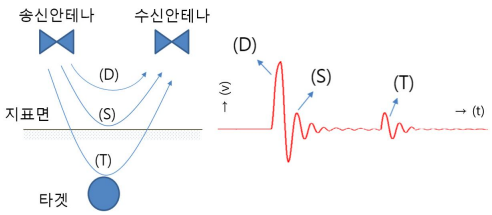


그림 1. A-Scan 파형 구성
Fig. 1. A-Scan Waveform

2.2 선형탐사(B-Scan)

일반적인 GPR 시스템은 지하에 매설된 위치가 고정되는 탐사대상을 찾기 위해 그림 2와 같이 일정한 간격으로 이동하면서 A-Scan 파형을 얻게 된다. 이동과정에서 시스템의 위치와 탐사대상의 거리가 달라져 반사신호(T)는 크기와 시간이 변화하게 된다. 즉 거리가 멀수록 반사신호의 크기가 작고 반사신호의 수신시간(t)이 멀어지며, 탐사대상 위에서는 상대거리가 최소가 되어 반사신호의 세기가 가장 커지고 수신시간이 가까워진다. 이렇게 획득된 A-Scan 파형을 그림 3의 좌측과 같이 중첩하여 나타내면 이러한 상대거리에 따른 수신신호의 변화가 쌍곡선 형태로 나타나게 되어 탐사대상의 유무 식별에 사용하게 된다. 이러한 이동을 통한 탐사방식을 선형탐사라고 하며 각 지점에서 획득한 A-Scan 파형의 중첩 표현을 B-Scan이라고 한다. B-Scan 파형에서 탐사 대상의 식별을 보다 쉽게 하도록 그림 4와 같이 다양하게 영상화할 수 있다. A-Scan 파형의 단순한 중첩 형태인 그림 4의 (A)를 wiggle-graph라고 하며, A-Scan의 신호 크기에 따라 색을 달리하여 흑백과 컬러 색상표를 적용한 예시를 그림 4의 (B)와 (C)에 나타내었다. 이렇게 적절한 색상표(Color-Map)의 적용은 가시성을 향상시켜 탐사대상의 식별을 용이하게 한다. 여기에 탐지대상의 매설 깊이와 크기 정보의 추출을 위해 거리 변화에 따른 신호의 크기와 입력 시간을 보정한 신호처리 결과를 그림 4의 (D)에 나타내었다.

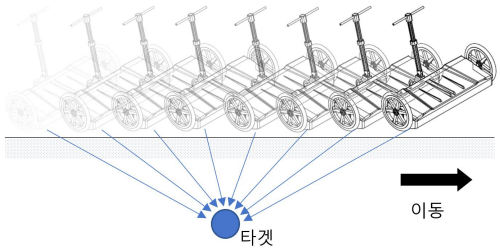


그림 2. GPR 시스템의 이동 탐사
Fig. 2. GPR Scan for underground object detection

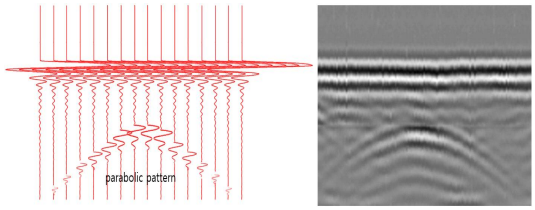


그림 3. B-Scan 파형 구성 및 영상화
Fig. 3. B-Scan waveform construction and imaging

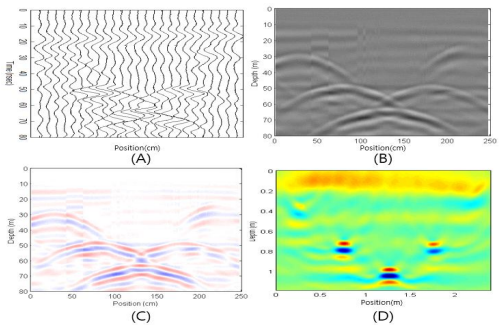


그림 4. B-Scan 파형의 신호처리
Fig. 4. Signal processing of B-Scan

2.3 면적탐사(C-Scan)

선형탐사(B-Scan)는 1채널 GPR의 탐사 방향에 대한 단면 영상을 얻는다. 이러한 단면 영상을 그림 5와 같이 일정한 간격으로 반복하여 획득하게 되면 면적에 대한 3차원의 탐사 데이터를 획득할 수 있다.

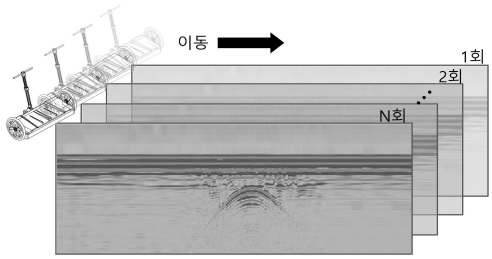


그림 5. 선형탐사 반복을 통한 면적탐사
Fig. 5. Repetitive B-Scan for C-Scan

그러나 이러한 방법은 각 회차 별 이동 축선을 정확하게 파악하여 선형탐사 간격을 일정하게 유지해야 하는 어려움이 있다. 더욱이 축선 간격에 따라 탐지 가능한 매설물의 크기가 결정되는데 간격 유지의 어려움과 탐지 데이터의 정렬이 필요해 작은 크기의 매설물 탐지를 어렵게 한다.

이러한 어려움을 극복하기 위해 다채널 GPR을 구성하여 다수의 채널로 한 지점에서 전체 채널 폭만큼의 B-Scan을 획득하고, 이를 이동하면서 반복하는 그림 6과 같은 방식이 가능하다. 이러한 방식은 채널 간격과 탐사 간격의 해상도로 작은 크기의 매설물 탐지를 가능하게 한다.

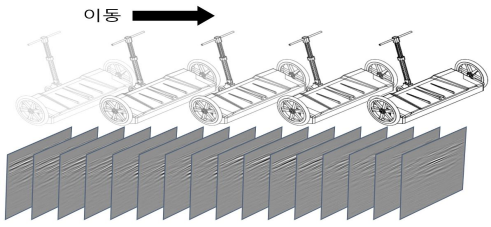


그림 6. 다채널 GPR을 이용한 면적탐사
Fig. 6. C-Scan using multi-channel GPR

다채널 GPR을 이용한 3차원 데이터 구성과 이를 이용한 단면영상의 정의를 그림 7에 나타내었다. 채널 축을 X축, 이동방향을 Y축, 깊이방향을 Z축으로 정의하여, 채널과 깊이 방향을 축으로 특정지점(Y)에서 획득한 단면영상을 횡단면으로 정의하며 이는 탐지방향을 기준으로 정면에서 바라보는 영상을 구성한다. 특정채널(X)의 A-Scan(Z)을 이동방향(Y)으로 획득한 단면영상을 종단면으로 정의하며, 탐지방향을 기준으로 선택된 채널의 측면 영상을 구성한다. 전체 채널(X)과 이동방향(Y) 데이터 중 A-Scan의 특정 시간에서 선택한 단면을 평단면으로 정의하며, 탐지방향을 기준으로 위에서 아래로 내려다보는 깊이 방향의 영상을 구성한다. 본 논문에서는 지하매설물 탐지에 평단면 영상을 활용하기 위한 방법을 논하였다.

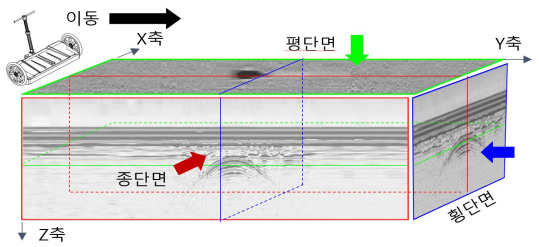


그림 7. 다채널 GPR의 3차원 데이터 정의
Fig. 7. Definition of 3D Data for Multi-channel GPR

3. 시스템 구성 및 신호처리

3.1 안테나 배열

다채널 GPR 구현을 위한 송수신 안테나의 배열과 매설물 식별을 위한 해상도의 개념을 그림 8에 나타내었다. 송수신 안테나를 1:1로 배열할 경우 안테나 크기 이하로 채널 간격을 구성하기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 송신안테나 17개와 수신안테나 8개를 3:1로 교차 배열하여 안테나의 크기보다 작은 22.5mm 간격의 31채널 GPR을 그림 8의 (A)와 같이 구성하였다. 이런 경우 각 채널의 송수신 안테나 사이의 거리가 달라서 채널별 수신 신호의 도착 시간이 달라진다. 채널별 도착 시간은 안테나 거리뿐 아니라 시스템 내부의 송수신 단계별 경로의 길이 차이도 달라지므로 A-Scan 파형의 직접 전달파를 기준으로 신호처리 과정에서 보상해야 한다. 이렇게 구성한 다채널 GPR을 10mm 간격으로 이동하며 데이터를 획득하여 3차원 데이터를 그림 7과 같이 구성한다. 이렇게 설정된 채널 간격과 이동 간격은 평단면 영상의 매설물 탐지를 위한 해상도로, 매설물 크기 식별의 기준으로 사용할 수 있다.

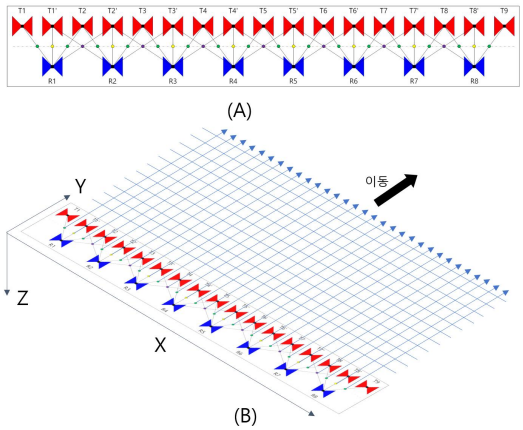


그림 8. 다채널 GPR 안테나 배열 및 탐사 해상도
Fig. 8. Multi-channel GPR antenna array and detection resolution

3.2 신호처리 절차

매설물 탐지를 위한 다채널 GPR의 일반적인 신호처리 절차를 아래 그림 9에 나타내었다. 본 논문의 전처리(Pre-Processing)단계에서는 각 채널의 A-Scan 파형이 수신되는 샘플링 과정의 가중치(DC Offset)를 제거하는 과정과 앞서 설명한 안테나 배열과 시스템 내부 수신 경로가 다름으로 인해 발생하는 도착시간을 횡단면 상에서 직접 전달파를 기준으로 그림 10과 같이 보정한다. 이후 탐사대상 신호 이외의 클러터 신호를 제거하고 탐사대상 신호를 강화하는 신호처리를 수행하게 된다. 이러한 신호처리를 평단면과 종단면에 적용한 단계별 결과를 그림 11에 나타내었다.

그림 9. GPR 신호처리 절차
Fig. 9. GPR Signal Processing Procedure

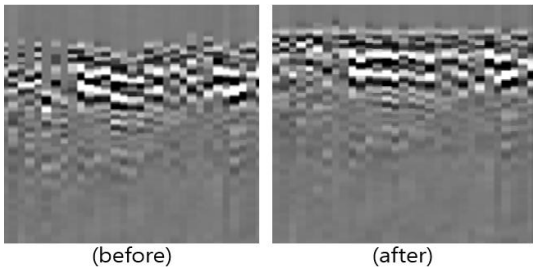


그림 10. 채널 초기화 전후 영상 비교
Fig. 10. Channel initialization

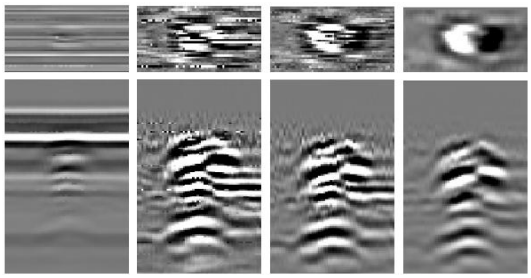


그림 11. 배경신호제거 및 표적신호 강화 결과
Fig. 11. Background removal & Target signal enhancement

4. 시험 및 평가

4.1 탐지대상 물체 및 시험 방법

탐지 시험을 위한 타겟의 크기와 재질을 표 1에 나타내었다. 이러한 시험대상을 구현한 31채널 GPR을 이용하여 스캔방향으로 이동하면서 10mm 간격으로 횡단면 데이터를 획득하여 3차원 데이터를 확보하였다. 이중 매설된 영역의 데이터를 X축 700mm, Y축 400mm 영역으로 구성한 평단면 영상으로 타겟의 식별여부를 평가하였다.

표 1. 시험대상 물체
Table 1. target object characteristics

구분	크기(mm)	외피재질
A	∅ 101 × h 198	금속
B	∅ 336 × h 124	금속
C	w, d 332 × h 94	플라스틱

4.2 탐지 대상별 시험 결과

표 1의 탐지 대상별 시험결과 평단면 영상을 그림 12, 13, 14에 나타내었다.

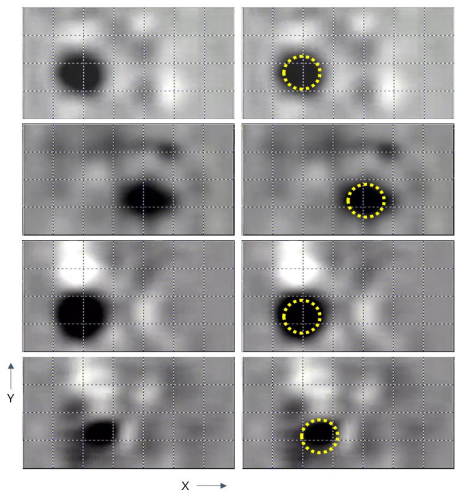


그림 12. 탐지 대상 (A)의 평단면 영상
Fig. 12. Plan View Image of target A

각각의 평단면에서 시험 대상 크기에 해당하는 반사신호를 각각의 반복 시험 모두에서 확인할 수 있었으며, 시험 대상의 크기에 해당하는 영역을 그림 12, 그림 13, 그림 14의 우측에 표시하였다. 그림 내 격자의 크기는 가로 세로 100mm.이다.

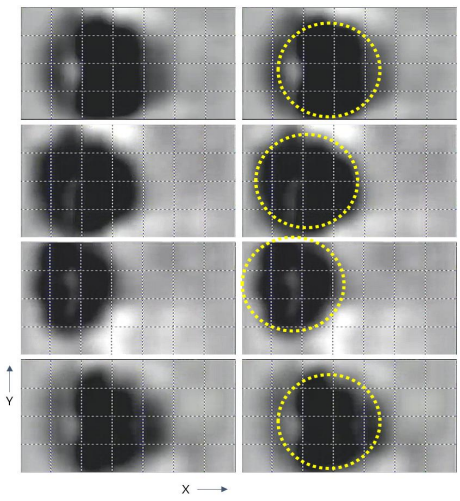


그림 13. 탐지 대상 (B)의 평단면 영상
Fig. 13. Plan View Image of target B

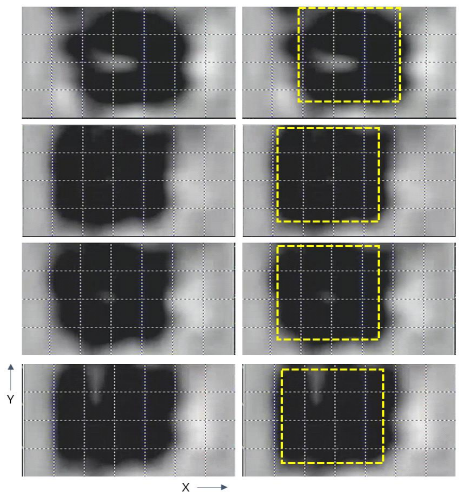


그림 14. 탐지 대상 (C)의 평단면 영상
Fig. 14. Plan View Image of target C

5. 결 론

본 논문에서는 지하매설물 탐지를 위해서 다채널 GPR의 평단면 영상을 이용하는 방법에 대하여 논하였다. 반복된 탐지시험을 통해 채널 간격과 탐사 간격으로 구성된 해상도를 이용하여 알고 있는 크기의 물체에 대해 그와 비슷한 크기의 평면 영역 반사 신호를 통해 식별이 가능함을 검증하였다. 그러나 평단면 영상 안에는 탐지 목표인 타겟의 신호뿐만 아니라 여러 클러터 신호들이 섞여 있어, 이로 인해 탐지 목표의 식별을 어렵게 한다. 따라서 기존의 종단면과 횡단면의 쌍곡선 파형과 함께 본 논문에서 제시한 평단면 영상의 종합적인 분석을 통해 매설된 물체에 대한 탐지 가능성을 높일 수 있을 것으로 기대된다. 이러한 종합 분석은 여전히 운용자의 몫으로 남아 있어 많은 데이터의 분석에 한계를 보이고 있으므로 향후 클러터 신호의 저감 및 제거를 위한 다양한 신호처리 기술과 함께 학습을 통한 3차원 패턴 분석 등 인공지능(AI)의 적용을 통해 이러한 한계점을 극복해 나가야 할 것이다.

"본 연구는 2022년도 한국공학대학교 연구년 교수 연구비에 의해 연구되었음"

참 고 문 헌

[1] D.J. Daniels, D.J. Gunton and H.F. Scott, "Introduction to subsurface radar" Radar and Signal Proc, IEE, vol. 135, no. 4, pp. 278-320, Aug. 1988.

[2] L.P. Peters Jr., J.J. Daniels and J.D. Young, "Ground penetrating radar as a subsurface environmental sensing tool," IEEE, Vol. 82, no. 12, pp. 1802-1822, Dec. 1994

[3] Pîrnău, Radu Gabriel et al. "GROUND PENETRATING RADAR AS NONINVASIVE METHOD USED IN SOIL SCIENCE AND ARCHAEOLOGY." Soil Forming Factors and Processes from the Temperate Zone 13 (2014): 15-31.

[4] Jol, H.M. Ground Penetrating Radar: Theory and Applications; Elsevier Science: Amsterdam, The Netherlands, 2009; p. 544.

[5] H. M. Jol and C. S. Bristow, "GPR in sediments: advice on data collection, basic processing and interpretation, a good practice guide," Geological Society, London, Special Publications, 211, 9-27, January 2003, https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2001.211.01.02

[6] U. Spagnolini, "Permittivity measurements of multilayered media with monostatic pulse radar," in IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 35, no. 2, pp. 454-463, March 1997, doi: 10.1109/36.563284.

[7] J. L. Davis and A. P. Annan, "Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy", Geophys. Prospect., vol. 37, pp. 531-551, 1989.

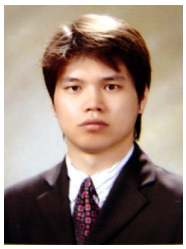
[8] B. Ursin and K. . -A. Berteussen, "Comparison of some inverse methods for wave propagation in layered media," in Proceedings of the IEEE, vol. 74, no. 3, pp. 389-400, March 1986, doi: 10.1109/PROC.1986.13481.

[9] A. Bhuiyan and B. Nath, "Anti-personnel Mine Detection and Classification Using GPR Image," 18th International Conference on Pattern Recognition (ICPR'06), Hong Kong, China, 2006, pp. 1082-1085, doi: 10.1109/ICPR.2006.274.

[10] A. van der Merwe and I. J. Gupta, "A novel signal processing technique for clutter reduction in GPR measurements of small, shallow land mines," in IEEE Transactions on Geoscience and Remote

Sensing, vol. 38, no. 6, pp. 2627-2637, Nov. 2000, doi: 10.1109/36.885209.
[11] V. Kovalenko, A. G. Yarovoy and L. P. Ligthart, "A Novel Clutter Suppression Algorithm for Landmine Detection With GPR," in IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 45, no. 11, pp. 3740-3751, Oct. 2007, doi: 10.1109/TGRS.2007.903694.
[12] X. Shi, D. Cheng, Z. Song and C. Wang, "A Real-time Method For Landmine Detection Using Vehicle Array GPR," 2018 17th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR), Rapperswil, Switzerland, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICGPR.2018.8441584.
[13] T. Fukuda, Y. Hasegawa, Y. Kawai, S. Sato, Z. Zakariya and T. Matsuno, "Automatic Land-mine Detection System using Adaptive Sensing with Vector GPR," IECON 2006 - 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics, Paris, France, 2006, pp. 4498-4503, doi: 10.1109/IECON.2006.347962.
[14] D. J. Daniels, D. Brooks, J. Dittmer, O. Mitchell and N. Hunt, "Wide swathe multi-channel GPR systems for mine detection," RADAR 2002, Edinburgh, UK, 2002, pp. 210-216, doi: 10.1109/RADAR.2002.1174684.
[15] M. Dogan and G. Turhan-Sayan, "Through-the-wall target detection using gpr A-Scan data: Effects of different wall structures on detection performance," 2017 IV International Electromagnetic Compatibility Conference (EMC Turkiye), Ankara, Turkey, 2017, pp. 1-5, doi: 10.1109/EMCT.2017.8090366.
[16] P. K. Verma, A. N. Gaikwad, D. Singh, and M. J. Nigam, "Analysis of clutter reduction techniques for through wall imaging in UWB range," Progress In Electromagnetics Research B, Vol. 17, 29-48, 2009. doi:10.2528/PIERB0906090

저 자 소 개



최종성(Jong Sung Choi)

2006.2 한국산업기술대학교 전자공학과 학사
2009.2 한국산업기술대학교 전자공학과 석사
2011.5-현재 : 이성주식회사 GPR사업부/기술연구소 이사/연구소장
<주관심분야> 지하탐사레이다, UWB 시스템 구현

이승환(Seung Hwan Lee)

2018.2 한국산업기술대학교 전자공학부 학사
2020.2 한국산업기술대학교 전자공학과 석사
2021.3-현재 : 이성주식회사 GPR사업부/기술연구소 주임 연구원
<주관심분야> 지하탐사레이다, 레이다 신호처리

오재곤(Chae-Gon Oh)

1989.2 금오공과대학교 전자공학과 학사
1995.2 경희대학교 전자공학과 석사
1999.8 경희대학교 전자공학과 박사
1989.12-1997.9 삼성전자(주) 영상사업부 선임연구원
1997.10-현재 : 한국공학대학교 전자공학부 교수
<주관심분야> 지하탐사레이다, ASIC & SoC, Smart Farming & Fishery System