

근거리 초광대역 레이더를 활용한 콘크리트 내부 고해상도 SAR 영상 형성

High-Resolution SAR Imaging of Concrete Using Near-Field UWB Radar

유 용 선 · 권 민 종 · 이 우 경

Yong-Sun Yoo · Min-Jong Kwon · Woo-Kyung Lee

요 약

초광대역 레이더를 이용한 비파괴 검사 기법은 콘크리트 내부 구조물 평가에 매우 유용하다. 본 논문에서는 임펄스 라디오-초광대역(IR-UWB, impulse radio-ultra wideband) 레이더를 활용하여 콘크리트 내부의 고해상도 영상을 형성하기 위한 합성개구레이더(SAR, synthetic aperture radar) 신호처리 기법을 제안한다. 이를 위해, 정확한 BP(back-projection) 알고리즘을 적용하여 콘크리트 내부의 굴절을 보상하였으며, 내부 불순물로 인한 클러터와 수신 신호의 잡음을 효과적으로 제거하는 기법을 도입하였다. 이러한 기법을 통해 실제 콘크리트 내부의 철근 구조물에 대해 SAR 영상을 실험적으로 획득하여 방위 해상도와 잡음지수 품질 성능이 향상되었음을 실험적으로 검증하였다.

Abstract

Ultra-wideband (UWB) radar is highly effective for nondestructive testing of concrete structures. In this study, we propose a near-field synthetic aperture radar (SAR) signal processing technique using an impulse radio ultra-wideband (IR-UWB) radar to generate high-resolution images of the internal structures of concrete materials. For this purpose, we developed an accurate back-projection (BP) algorithm to compensate for the electromagnetic refraction and attenuation of a radar traveling through a concrete medium. A novel technique was implemented to suppress noisy clutter caused by internal impurities in concrete structures. For the experimental demonstration, concrete structures were constructed with metal bars inside, and the performance of the imaging system was evaluated by measuring the azimuth resolution and signal-to-noise metrics of the generated SAR images.

Key words: SAR, IR-UWB, BP Algorithm, Refraction Compensation, Clutter Removal

I. 서 론

최근 콘크리트 구조물의 붕괴와 안전사고로 인해 안정성과 내구성 평가가 더욱 중요해졌다. 기존 지표 투과 레

이다(GPR, ground penetration radar) 기법의 경우, 방위 방향 해상도의 한계로 인해 철근의 존재 유무는 판단할 수 있으나, 내부 구조를 정확히 파악하기 어렵다^[1].

본 논문의 목적은 합성 개구 레이더(SAR, synthetic

「이 연구는 2024년 한국건설기술연구원 주요 사업 “(23주요-대1-임무) 안전보장 콘크리트 구조물 비파괴진단 핵심기술 개발 (2/3)”의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.」

한국항공대학교 항공전자정보공학부(School of Electronics and Information Engineering, Korea Aerospace University)

· Manuscript received July 5, 2024 ; Revised August 7, 2024 ; Accepted September 19, 2024. (ID No. 20240705-002S)

· Corresponding Author: Woo-Kyung Lee (e-mail: wklee@kau.ac.kr)

aperture radar) 신호처리 기법을 적용하여 콘크리트 내부의 고해상도 영상을 획득하고, 철근 배근 여부 및 위치를 평가하는 것이다. 이를 위해 IR-UWB(impulse radio ultra wideband) 레이더를 기반으로 실내 근거리 SAR 시스템을 구성하였다. 특히, 본 논문은 콘크리트 투과 시 전파의 굴절을 보상하기 위한 기법을 적용하여 고해상도 SAR 영상을 형성한다. 또한, 콘크리트 내부 클러터를 효과적으로 제거하는 기법을 구현하여 영상 품질을 개선하였다.

II. 본 론

2-1 IR-UWB 레이더

IR-UWB 레이더는 매우 짧은 임펄스형 신호로 넓은 대역폭을 가져 정밀한 거리 해상도를 제공한다. 또한 기저대역에서 신호를 전송하므로 콘크리트 등과 같은 건축 자재에 대해 우수한 투과 능력을 보인다^[2]. IR-UWB 레이더의 수신 신호는 5차 가우시안 펄스의 형태로 식 (1)과 같이 표현된다.

$$p(t) = \frac{A}{\sqrt{2\pi}} \left(-\frac{t^5}{\sigma^{11}} + \frac{10t^3}{\sigma^9} - \frac{15t}{\sigma^7} \right) \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

식 (1)에서 A 는 수신 신호의 진폭, t 는 시간, σ 는 펄스 폭을 결정한다.

2-2 OMP 기반 클러터 제거 기법

본 연구에서는 콘크리트 내부 탐사 시 발생하는 신호 감쇠 및 불균질한 매질 특성으로 인해 감소하는 신호 대 잡음비(SNR, signal to noise ratio)와 클러터 문제를 해결하기 위해 회소 신호 복원 기법인 OMP(orthogonal matching pursuit) 알고리즘을 적용하였다. OMP 알고리즘은 신호에서 가장 적합한 회소 성분을 반복적으로 선택하고, 해당 성분의 위치와 크기를 계산하여 신호를 복원한다^[3]. 레이더 수신 신호 y 는 다음과 같은 선형 방정식으로 정의된다.

$$y = Ax + n \quad (2)$$

여기서 x 는 복원하고자 하는 회소 신호, n 은 잡음 벡터를 의미한다. A 는 sensing dictionary로서, 회소 신호 x

를 표현하기 위한 기저 벡터들의 집합이다.

본 연구에서는 가우시안 2차 미분 형태의 Marr 웨이블릿 변환 필터 $h(t)$ 를 sensing dictionary A 의 열벡터로 사용하여 구성하였다. 웨이블릿 변환 필터 $h(t)$ 는 시간 t 에 대해 식 (3)과 같이 정의된다.

$$h(t) = \left(1 - \frac{t^2}{s^2}\right) \exp\left(-\frac{t^2}{2s^2}\right) \quad (3)$$

식 (3)에서 s 는 스케일 파라미터로, 웨이블릿의 폭을 조절한다. Sensing dictionary A 는 식 (4)와 같이 표현된다.

$$A = \begin{bmatrix} h(t_1 - b_1) & h(t_1 - b_2) & \dots & h(t_1 - b_n) \\ h(t_2 - b_1) & h(t_2 - b_2) & \dots & h(t_2 - b_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h(t_m - b_1) & h(t_m - b_2) & \dots & h(t_m - b_n) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n$ 일 때, $h(t_i - b_j)$ 는 Marr 웨이블릿 변환 필터 $h(t)$ 를 시간 이동 파라미터 b_j 만큼 이동시킨 벡터를 의미한다. t_i 는 샘플링된 시간 인덱스를 나타내며, A 의 각 열은 특정 시간 이동 파라미터에 따라 웨이블릿 필터를 이동시켜 구성된다.

위와 같이 Marr 웨이블릿 변환 필터로 구성된 sensing dictionary는 IR-UWB 신호 파형처럼 시간 영역에서 급격한 변화를 가지는 신호의 특징을 효과적으로 추출하여 신호의 회소성을 높인다^[4]. 이를 통해 복원 성능을 향상시켜 잡음과 클러터를 효과적으로 제거할 수 있다.

표 1은 OMP 알고리즘의 수행 과정을 보이며 최종적으로 복원된 회소 신호 x_A 와 이에 해당하는 sensing

표 1. OMP 알고리즘

Table 1. OMP algorithm.

Input : Measurements y , sensing dictionary A
Initialization : $R_0 = y, \Lambda = \phi$
Until convergence repeat :
Identify : $j = \underset{j}{\operatorname{argmax}} \mid \langle R_m, A_j \rangle \mid$
Augment : $\Lambda = \Lambda \cup j$
Estimate : $x_A = \underset{x_A}{\operatorname{argmin}} \mid \mid y - A_\Lambda x_A \mid \mid_2^2$
Update : $R_{m+1} = y - A_\Lambda x_A$
Output : x_A, A_Λ

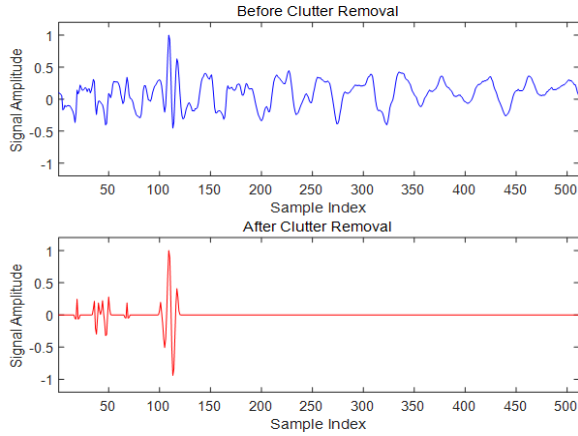


그림 1. 클러터 제거 전/후 수신 신호
Fig. 1. Before/after clutter removal.

dictionary A_A 를 이용해 신호를 재구성하여 잡음과 클러터가 제거된 레이더 수신 신호를 얻게 된다.

그림 1은 실제 실험 환경에서 수신된 잡음 신호에 대해 식 (1)의 5차 가우시안 펄스를 기반으로 한 레이더 수신 신호를 모의실험으로 구현한 결과를 보인다. OMP 기반 클러터 제거 기법을 적용하기 전 수신 신호의 SNR은 -8.91 dB, 해당 기법을 적용한 후에는 SNR이 7.78 dB로 약 17 dB 개선됨을 보인다.

2-3 근거리 바이스태틱 Back-Projection 알고리즘

그림 2는 본 논문의 데이터 획득 기하 구조를 보인다. 송·수신 안테나가 분리된 바이스태틱 구조의 레이더가 x축 방향으로 플랫폼을 따라 이동하며 SAR 신호를 획득

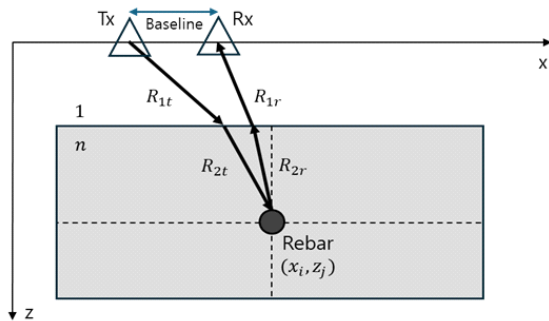


그림 2. SAR 데이터 획득 기하 구조
Fig. 2. Geometry of SAR data acquisition.

한다. 시간 영역 SAR 신호처리 기법인 BP(back-projection) 알고리즘은 각 측정 지점에서 수신된 신호를 역투영하여 영상의 임의의 픽셀 (x_i, z_j) 에서의 반사도 I 를 재구성한다^[5]. 이 과정에서 BP 알고리즘은 송·수신 안테나와 픽셀 지점 사이의 정확한 왕복 시간 지연 계산을 통해, 모든 레이더 측정 지점에서의 수신 신호를 일관되게 합산하여 고해상도의 SAR 영상을 형성한다.

전파가 공기 중에서 콘크리트 내부로 입사하거나 그 역의 경우, 유전율 차이로 인해 전파의 굴절 및 속도 변화 변화가 나타난다^[6]. BP 알고리즘을 사용한 콘크리트 내부 SAR 영상 형성 시 이러한 전파의 굴절 및 속도의 변화를 고려한 왕복 시간 지연 계산이 요구된다. 이때 전파의 속도는 콘크리트의 상대 유전율의 제곱근에 반비례하며, 식 (5)와 같이 표현될 수 있다.

$$v_c = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{rc}}} \quad (5)$$

식 (5)에서 v_c 는 콘크리트 내부에서의 전파의 속도, c 는 자유공간에서 전파의 속도, ϵ_{rc} 는 콘크리트의 상대 유전율을 의미한다. 콘크리트 내부에서의 단일 시간 지연은 식 (6)와 같으며, 이 시간 지연은 콘크리트 매질의 굴절률에 따라 달라진다.

$$t_c = \frac{nR_c}{c} \quad (6)$$

여기서 n 은 균질 매질에서 발생하는 굴절률을 나타내며, 이는 유전체에서 $n = \sqrt{\epsilon_{rc}}$ 이다. 본 연구에서는 콘크리트를 균질 매질로 가정하며, 그림 2의 바이스태틱 레이더 구조에서의 콘크리트 내부 지점에 대한 왕복 시간 지연 $t_d(m)$ 은 식 (7)과 같다.

$$t_d(m) = \frac{R_{1t} + nR_{2t}}{c} + \frac{R_{1r} + nR_{2r}}{c} \quad (7)$$

식 (7)에서 $(R_{1t} + nR_{2t})$ 와 $(R_{1r} + nR_{2r})$ 은 각각 송신 거리와 수신 거리를 나타내며 각 거리는 최소 시간 경로(fermat's principle)에 의해 결정된다^[7]. 콘크리트 내부 지점에 대한 왕복 시간 지연 식 (7)을 반영한 BP 알고리즘은 식 (8)과 같이 표현할 수 있다.

$$I(x_i, z_j) = \sum_m A_m p(t - t_d(m)) \quad (8)$$

식 (8)에서 콘크리트에 의해 감쇄된 수신 신호의 진폭을 A_m , 표적까지의 왕복 지연 시간을 $t_d(m)$ 로 반영하며 m 은 레이더 각 측정 위치 인덱스를 나타낸다. 이를 통해 콘크리트 내부 지점에 대한 반사도를 정확히 얻을 수 있으며 최종적으로 영상의 모든 픽셀 지점에 대해 식 (9)과 같이 반사도를 획득함으로써 콘크리트 내부 고해상도 SAR 영상을 획득한다.

$$SAR\ image = \sum_i \sum_j I(x_i, y_j) \quad (9)$$

III. 실험 및 결과

3-1 실험 구성 및 파라미터

그림 3은 본 실험의 구성을 보이며, 그림 3(a)는 송·수신 안테나가 분리된 근거리 초광대역 SAR 시스템, 그림 3(b)는 그림 3(a)의 실험 구성도로 실험체는 레이더로부터 40cm 떨어진 위치에 배치되어 있다. 표 2는 본 실험에서 사용된 SAR 시스템 파라미터를 보인다.

3-2 실험 결과

그림 4는 실험 결과를 단계별로 보여주며, 그림 4(a)는 철근 배근 깊이가 5 cm 인 콘크리트 블록, 그림 4(b) 및 그림 4(c)는 각각 굴절 보상 전과 후, 그림 4(d)는 본 논문의 제안 기법인 굴절 보상 및 클러터 제거 후의 영상이다.

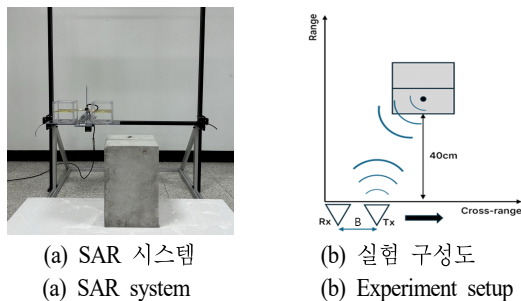


그림 3. SAR 시스템 및 실험 구성
Fig. 3. SAR system and experiment setup.

표 2. SAR 시스템 파라미터
Table 2. SAR system parameters.

SAR parameter	Value
Center frequency	2 GHz
Bandwidth	3 GHz
Sampling rate	38 GHz
Range sampling number	512
Azimuth sampling number	500
Azimuth sampling step	1.6 mm
Scan length	0.8 m
Baseline	0.2 m

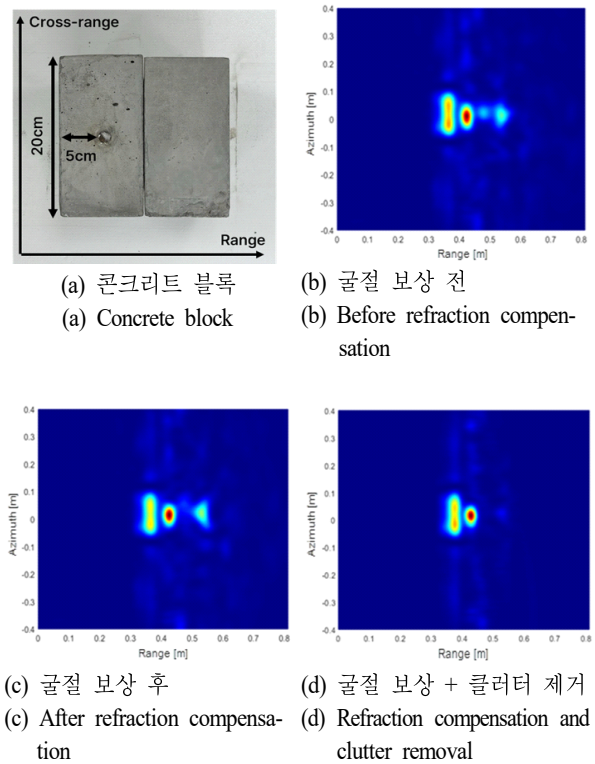


그림 4. 단일 철근 SAR 영상 형성 결과
Fig. 4. SAR imaging results of a single rebar.

그림 5는 그림 4(b)~그림 4(d)의 방위 방향 IRF(impulse response function)를 비교한 그래프로 콘크리트 내부 철근 표적의 방위 방향 응답을 시각적으로 나타낸다.

본 연구에서는 영상 품질 지표로 방위 해상도와 PSLR

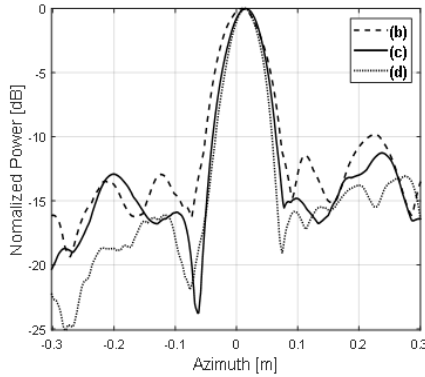


그림 5. 방위 방향 IRF
Fig. 5. Azimuth IRF.

(peak sidelobe ratio)을 사용하였으며 표 3에서 그 결과를 보인다. 본 논문에서 제안하는 굴절 보상 및 클러터 제거 기법 적용 시 방위 해상도는 5.1 cm로 개선되며 PSNR은 약 -13 dB로 향상됨을 보인다.

그림 6(a)는 철근 배근 깊이가 10 cm인 3개의 철근 콘크리트 블록과 일반 콘크리트 블록 2개로 구성된 실험체 구성이다. 그림 6(b)는 해당 실험체에 대해 본 논문에서

표 3. 영상 품질 비교

Table 3. Comparison of image quality.

	Azimuth resolution	PSNR
Before refraction compensation	7 cm	-9.93 dB
After refraction compensation	5.8 cm	-11.14 dB
Refraction compensation and clutter removal	5.1 cm	-13.08 dB

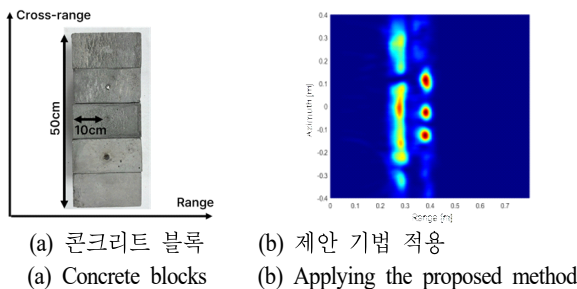


그림 6. 다중 철근 SAR 영상 형성 결과

Fig. 6. SAR imaging results of multiple rebars.

제안한 굴절 보상 및 클러터 제거 기법을 적용하여 생성한 영상이다. 그림 6(b)에서 콘크리트 내부의 3개의 철근의 위치와 배열을 명확하게 식별 가능함을 확인할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 근거리 초광대역(UWB) 레이더를 활용한 SAR 신호처리 기법을 적용하여 콘크리트 내부의 고해상도 영상을 형성하는 방법을 제시하였다. IR-UWB 레이더를 기반으로 한 시스템을 구성하고, BP 알고리즘을 적용하여 콘크리트 내부 전파의 굴절에 의한 시간 지연을 보상하였다. 또한, OMP 기반 클러터 제거 기법을 도입하여 영상 품질을 개선하였다.

실험 결과, 제안된 기법은 SAR 영상의 방위 해상도와 잡음지수 품질 성능에서 우수한 성능을 보였다. 이러한 결과는 제안된 기법 기반의 초광대역 레이더를 활용한 비파괴 검사 기법이 콘크리트 내부 구조물 평가에 효과적임을 시사하며 향후 콘크리트 구조물의 안전성 평가 분야에 실질적인 기여를 할 것으로 기대된다.

References

- [1] P. Manase, R. D'Errico, and L. Ferro-Famil, "Improving azimuth resolution of GPR with small array aperture in near field," in *International Conference on Radar Systems (RADAR 2022), Hybrid Conference*, Edinburgh, Oct. 2022, pp. 673-678.
- [2] G. Barrie, "Ultra-wideband synthetic aperture: Data and image processing," *Technical Memorandum Defence R&D(DRDC)*, Ottawa, ON, Jan. 2003.
- [3] T. T. Cai, L. Wang, "Orthogonal matching pursuit for sparse signal recovery with noise," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 57, no. 7, pp. 4680-4688, Jul. 2011.
- [4] W. Y. Liu, J. G. Han, "The optimal Mexican hat wavelet filter de-noising method based on cross-validation method," *Neurocomputing*, vol. 108, pp. 31-35, May 2013.

- [5] M. I. Duersch, "Backprojection for synthetic aperture radar," Ph.D. dissertation, Brigham Young University, Provo, 2013.
- [6] M. Aftanas, "Through-wall imaging with UWB radar system," Ph.D. dissertation, Technical University of Kosice, Kosice, 2009.

- [7] J. A. Góes, G. Oré, K. A. Lukin, and H. E. Hernandez-Figueroa, "Refraction effect in SAR processing for focused subsurface tomography," in *2023 SBMO/ IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference(IMOC)*, Castelldefels, Nov. 2023, pp. 256-258.

유 용 선 [한국항공대학교/학사과정]

<https://orcid.org/0009-0005-3834-8111>



2019년 3월: 한국항공대학교 항공전자정보 공학부 학사과정
[주 관심분야] SAR 신호처리, 레이더 신호처리

이 우 경 [한국항공대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0003-2092-2048>



1994년 2월: 한국과학기술원 전자 및 전자 공학과 (공학사)
1996년 2월: 한국과학기술원 전자 및 전자 공학과 (공학석사)
1999년 12월: 런던대학교(UCL) 전기전자 공학과 (공학박사)
1999년 10월~2002년 12월: 한국과학기술원 인공위성센터 연구교수
2003년 1월~2004년 8월: 삼성종합기술원 책임연구원
2004년 9월~현재: 한국항공대학교 항공전자정보공학부 교수
[주 관심분야] 위성탐지체, SAR 영상, 레이더 시스템 및 신호처리

권 민 중 [한국항공대학교/학사과정]

<https://orcid.org/0009-0007-6310-2759>



2019년 3월: 한국항공대학교 항공전자정보 공학부 학사과정
[주 관심분야] SAR 신호처리, 레이더 신호처리