

## UWB-RF를 이용한 콘크리트 구조물의 내부 물체 검출 모니터링 시스템

박대혁<sup>1</sup> · 강의선<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>(주)이에스피 전자사업부

<sup>2</sup>송실대학교 베어드학부대학

## Internal Object Detection Monitoring System in Reinforced Concrete Structure using UWB-RF

Dae-Hyuck Park<sup>1</sup> · Eui-Sun Kang<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Automotive Electronics, ESP Company, 362-11, Jongga-ro, Jung-gu, Ulsan, Republic of Korea

<sup>2</sup>Baird Collage University, Soongsil University, 369, Sangdo-ro, Dongjak-gu, Seoul, Republic of Korea

### [요 약]

본 논문에서는 UWB-RF를 이용하여 철근 콘크리트 구조물의 내부 물체 위치를 검출하고 모니터링 할 수 있는 시스템을 소개하고자 한다. 이 시스템은 콘크리트 내부 구조물의 변형을 매질에 대한 투과 특성 및 반사 특성을 이용하여 확인가능하며, 콘크리트 내부 구조물의 철근의 위치를 수치값으로 측정할 수 있다. 이 시스템의 성능을 검증하기 위해서 서로 다른 형태의 시편 3종에 대해서 콘크리트 내부 구성 상태를 분석하고, 구조물의 종류에 따라 측정되는 위치를 확인하기 위하여 구조물의 측정 거리 값을 소프트웨어로써 표현하였다. 그 결과 콘크리트 내에 구조물의 종류에 따라서  $\pm 1\sim 4\text{mm}$  이내의 오차 내에서 측정할 수 있음을 확인하였다.

### [Abstract]

This paper is to introduce the a system which monitors and detects the object position in reinforced the concrete structure using UWB-RF. This system is able to check any changes in the inside of the concrete structure using its penetration and reflection characteristics and it can also numerically measure the position of rebar in the concrete structure. For the verification of the performance of this system, we set up the internal compositions of concrete in 3 different types of test-bed. On the other hand, for the measuring of the location of rebar, which varies depending on the type of structure, the software which shows the distance in the structure were used. The result shows that the position in the concrete could be measured within the tolerance of  $\pm 1\sim 4\text{mm}$  depending on the type of structure in the concrete.

색인어 : 콘크리트 구조물, 초광대역 주파수, 영상처리, 깊이 측정, 모니터링 시스템

Key word : Reinforced Concrete Structure, UWB-RF, Image Processing, Depth Measurement, Monitoring System

<http://dx.doi.org/10.9728/dcs.2017.18.7.1457>



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 31 October 2017; Revised 07 November 2017

Accepted 25 November 2017

\*Corresponding Author; Eui-Sun Kang

Tel: +82-52-1661-0196

E-mail: hotdigi@naver.com

## I. 서론

2016년 9월에 발생한 최대 규모( $M_L$ ) 5.8인 경주 지진을 시작으로 한반도 내에 규모 5.0이상의 지진이 총 9차례 발생하였다. 이로써 우리나라도 더 이상 지진의 위험지역에서 자유롭지 못한 현실을 감안 한다면 시설물 안전관리에 대한 중요성은 더 이상 미룰 수 없는 상황이다. 이중 콘크리트 건축물의 안전관리는 우리의 생명과 재산에 직접적인 영향을 주는 요소로 작용하고 있다[1]. 철근 콘크리트는 시멘트, 모래, 자갈 그리고 물을 일정한 비율로 배합한 콘크리트에 철근이 보강되어 단단히 굳어짐으로써 하중을 지지할 수 있도록 만들어진 구조체이다. 철근 콘크리트는 내구성 및 내화성이 크며 진동에 강하다. 하지만 잘못된 배합 및 건조 정도, 거푸집의 조기 탈형등의 요인으로 균열이 발생된다. 2015년 기준으로 내진 설계 기준이 적용된 건축물의 내진 확보율이 33%이며, 이중 학교 건물은 23.8%에 불과하다. 따라서 비내진 건축물에 대한 안전점검이 필요한 상황이다[1]. 하지만 안전점검 기술이 대부분 인력에 의한 육안 점검으로 이루어져 접근 한계를 극복하지 못하고 있다. 큰 다리나 교각과 같은 대형 구조물이나 원전 격납고의 돔 상부와 같은 구조물은 점검을 위한 접근이 어렵고 근거리 검사가 불가능하여 내외부 결함의 점검이 어렵다. 콘크리트 구조물의 경우 표면 결함도 중요하지만 건축물의 설치 장소에 따라 건전성에 영향을 미칠 수 있는 피복두께 부족, 콘크리트 내부 공동, 균열 깊이, 열화에 의한 강도저하 등 내부 결함을 탐지하는 것 또한 중요하다. 더불어 실시간으로 구조물의 변화와 문제 발생 여부를 확인하기 위한 센서를 개발하여 사물인터넷(IoT) 기술과 융합하여 정보를 수집할 수 있는 시스템을 구축하고 콘크리트 내부 상태 점검 상태를 측정하는 센서 개발이 안전을 위해 시급한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 비파괴적 기법인 UWB-RF(ultra wide band radio frequency)를 활용하여 철근 콘크리트 구조물의 내부 결함상태를 모니터링 할 수 있는 시스템을 소개하고자 한다. 하드웨어로써 목표물 인식을 위한 센서 모듈을 구성하고 주파수 신호로부터 측정된 구조물 심도의 인식율을 개선하기 위하여 영상처리 기술을 활용하여 콘크리트 내부 목표물까지의 정확한 거리를 측정할 수 있는 알고리즘을 소개하고자 한다.

## II. 관련 연구

### 2-1 콘크리트 내 구조물 측정에 대한 연구 현황

최근 6년간 인구밀집지역 도심지인 서울의 크고 작은 도로 합몰사고 건수가 622건이나 발생하였다[2]. 이는 인구밀집지역의 난개발과 과밀화 등에 따른 지하 매설물 공사와 연관이 있기 때문이다. 뿐만 아니라 노후화된 지하공간은 유지 보수의 어려움 및 뒤늦은 대처로 인하여 지하 시설물 관련 재난 사고에 대한 위험률이 시간이 흐를수록 심각한 실정이다. 이를 위해 국내에서는 국가산하 기관을 중심으로 사물 인터넷(IoT)기반 도시 지하매설물 모니터링

하고 관리하는 시스템이 개발되고 있다[3]. 위험성이 예측되는 지반구조물은 재난 사건이 발생하기 전 육안으로 확인하기 힘들며 공사를 통한 직접적인 검사도 진행하기 어렵다. 이를 해결하기 위해 지반 구조물의 경우 품질관리, 기존 구조물의 유지보수 관리 및 도로의 지반 함몰을 검사하기 위해 지표투과레이더(GPR; ground penetrating radar)가 설치된 카터나 차량을 이용하여 조사하고 있다. GPR을 이용한 구조물 상태 검사 방법은 비파괴적 검사방법의 하나로 송신안테나로부터 전자기파를 방출하고 특정 물체에 의해 반사되는 신호를 수신 받아 처리, 해석하는 방법이다[4]. 10MHz~수 GHz 주파수 대역의 전자기 펄스를 이용하여 내층 변화를 탐지하고 파동을 전달하는 매질간의 유전율 차이에 의한 전자기파의 반사와 회절을 측정, 해석하여 시설물 및 지하구조의 내층 변화 등을 파악할 수 있다. 논문[5]는 GPR에 900MHz, 1000MHz, 1500MHz의 세 종류 안테나를 이용하여 콘크리트 두께 측정함으로써 GRP의 가능성을 확인하였다. 보고서[6]은 각종 구조물의 내부 상태를 초광대역 임펄스의 특징을 이용하여 비파괴로 진단할 수 있는 진단 장비를 개발하였다. UWB 안테나는 구조물 내부 환경 및 안테나의 특성을 고려한 저주파용 다이폴 안테나와 고해상도 모노폴 안테나를 개발하였다. 임펄스 발생기는 초광대역 특성을 고려하여 여러 CMOS 게이트들을 이용하여 짧은 펄스를 만들고 다이오드(step recovery diode)를 통과시켜 파형을 정형하였다. UWB 수신장치는 실시간 정보를 얻기 위하여 레이더에 사용되는 threshold detection 방법을 적용하였다. 각 모듈은 GUI(graphic user interface)을 통하여 컨트롤러에 의해 제어되도록 구성하였다. 그리고 GPR 데이터 처리는 지진과 탐사에 사용되는 데이터처리 기술을 적용하여 monostatic 방식과 Migration 처리 후 A-scan 및 B-scan 평균제거 방식을 사용하여 영상을 처리하였다.

원전이나 댐과 같은 콘크리트 구조물의 두께 측정, 공동, 균열, 불량 콘크리트 검출을 위한 비파괴적 기법으로 충격반향(IE; impact echo)기법, 충격응답(IR; impulse response) 기법, 표면파(SASW; spectral analysis of surface wave) 기법 등이 사용되고 있다. 충격반향 기법은 시험체 표면에 기계적 충격을 가하여 발생하는 탄성파가 내부의 균열이나 공동 같은 불연속체와 이질 매질층간의 경계면에 반사되어 돌아온 파형을 측정, 분석하여 탐사하는 방법이다[7]. 충격응답기법은 콘크리트 표면에 충격하중을 가하여 표면에 부착된 감진기로 탄성파를 측정하며 저주파 횡진동을 측정할 수 있는 임펄스 햄머를 사용하여 주파수 응답을 계산하는 방식이다. 즉 탄성파를 이용하여 구조물 내부의 결함을 탐사하는 방법은 충격방향과 동일하나 구조물 결함을 확인하기 위한 신호처리 기법이 다르다는 특징이 있다. 이는 지지력확인이 어려운 콘크리트 궤도의 노반 조건을 평가하는데 적합하다[8]. 표면파(SASW; spectral analysis of surface wave)기법은 표면 충격에 의해 전파되는 표면파를 파의 전파속도와 주파수에 따라 변하는 분산 특성을 이용하여 구조물의 깊이를 파악하는 방법이다[9]. 위 기법들은 적용분야와 응용 목적에 따라 정확성을 높이기 위해 2개 이상이 병행되어 연구되기도 한다[9],[10].

### 2-2 UWB-RF 특징

UWB-RF(ultra wide band radio frequency)는 기존 주파수 개념과 달리 초광대역의 주파수 대역을 가지며, 수십 피코초 또는 수나노초 정도의 극도로 짧은 주기를 가지는 임펄스 신호라고 할 수 있다. 이렇게 짧은 주기 신호를 갖는 UWB를 이용한 통신 시스템은 기존의 연속파 통신시스템에 비하여 전력 소모가 적고, 침투 특성 및 스펙트럼 효율이 우수하며, 다중채널 구성이 용이한 특징들을 가지고 있다. 또한 UWB는 초고속 인터넷 접속 또는 전파 탐지기 뿐만 아니라 레이더 기술에도 적용되고 있는데 기존의 펄스 레이더나 연속파 레이더가 가지는 제한적인 성능을 극복할 수 있는 기술로 평가받고 있다[11].

GPR의 감지 센서와 비교했을 때 GPR은 고 출력인데 반해 UWB는 10dBm이하로 출력이 적으며 사이즈와 무게 또한 작다. 특히 하드웨어 구성이 GPR의 경우 RF 및 Digital Part를 분리하여 구성하지만 UWB는 하나의 칩내에 RF 및 Signal Process를 통합할 수 있으므로 소형화가 가능하다. 정보 활용면에서 UWB-RF는 구조물 변화를 수치화하여 결과치를 통신으로 전송 가능하므로 원격 재난 대응 솔루션으로 용이하다. 콘크리트 내부의 공동 탐사하는 솔루션의 경우 원전의 격납고나 댐과 같은 특수한 환경에서 소형 경량화에 대한 요구는 절대적이라고 할 수 있다. GPR를 이용한 지반 공동 측정의 경우 수평면을 기반으로 공동의 위치를 측정자가 이동하면서 탐측이 가능하지만 원전 격납건물이나 대형구조물을 탐측하기에는 적합한 구조를 갖추지 못하였다. 반면 UWB-RF를 이용한 콘크리트 내부 결함을 측정은 소형의 경량화된 구성으로 시스템을 구성할 수 있어서 다양한 형태의 구조물 탐측에 보다 용이하게 활용될 수 있다. 또한 단일 주파수 대역이 아닌 450MHz~3.55GHz에 해당하는 임펄스를 활용함으로써 면밀한 주파수에 따른 매질의 반응 특성을 광대역 주파수 특성으로 보완할 수 있는 장점을 갖추고 있다.

본 논문은 사람의 접근이 어렵고 근거리 검사가 어려운 원전 격납고나 대형 구조물의 내부 결함을 탐지하는데 목적이 있다. 따라서 비파괴 검사가 가능하면서도 무게가 적고 전력소모량이 적은 UWB-RF를 이용하여 콘크리트 구조물의 내부를 탐지하고자 한다. 이 과정에서 센서 감지 정밀도를 향상하고 노이즈 제거 및 콘크리트 내부 물체의 정확한 거리 측정을 위하여 영상처리 필터 방법을 적용한 알고리즘을 소개하고 센서 측정값을 사용자가 수신 가능하도록 연구를 진행하였다.

### III. UWB-RF를 이용한 콘크리트 구조물 내부 탐사 모니터링 시스템

#### 3-1 콘크리트 구조물 내부 탐사 시스템

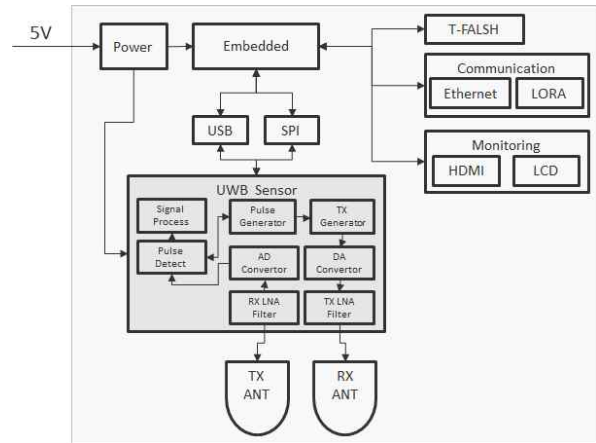


그림 1. 콘크리트 구조물의 내부 탐사 시스템  
 Fig. 1. Internal probing system of reinforced concrete structure

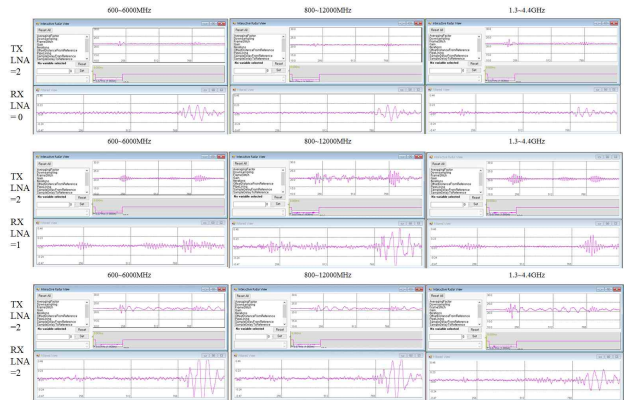


그림 2. UWB의 600Mhz~4.4GHz RX 측정 성능 비교  
 Fig. 2. RX performance comparison about 600Mhz~4.4GHz frequency of UWB

UWB-RF 기술을 이용한 구조물 결함 및 내용 변화를 탐지하는 시스템은 그림 1과 같다. 이 시스템은 크게 UWB 안테나와 RF 모듈을 포함하는 UWB 센서부, UWB 신호 처리를 위한 임베디드 시스템, 동작을 위한 전원부, 탐지 결과를 확인하기 위한 통신부, 모니터링부로 구성된다. UWB 센서부(UWB Sensor)에서 UWB-RF 안테나 및 RF 모듈부는 600Mhz~4.4Ghz 대역의 넓은 주파수대에 좋은 성능을 갖기 위해서 RF 모듈 설계의 주요 고려 사항인 인지거리 향상 및 왜곡 없는 펄스 전송, 주파수 별 신호 수신율을 고려하여, CPWG (coplanar waveguide with ground plane) 구조[14]로 RF 모듈을 설계, 제작, 튜닝 하였다. 그리고 주파수에 따른 좋은 SNR을 얻기 위해서 최적화를 진행하였다.

TX(transmitting) 안테나는 신호를 강하게 하여 콘크리트에 투과할 수 있도록 LNA(low noise amplifier)를 최대화하여 설계하였다. 이 과정에서 UWB-RF 시스템에서는 하드웨어적인 회로 작업에 의해서 TX LNA를 2단으로 설계 제작하였다. 그 이유는 그림 2와 같이 0단~4단 회로 설계의 실험결과 0단, 1단보다는 주파수 신호가 2단이 좋고, 3단으로 신호가 올라가는 경우에는 주파수 특

성이 하이레벨로 올라가서 분석이 불가능한 상태가 되기 때문이다. RX(receiving) 안테나쪽의 신호 또한 회로 설계 및 시험에 의해서 LNA가 최소화 된 상태가 잡음을 구별하기 가장 좋은 상태이지만, LNA 0단에서는 모든 대역의 신호레벨이 너무 낮아 신호처리가 불가능하였다. 또한 LNA 1단에서는 중간 주파수대역은 인식 가능한 레벨이 되었지만, 낮은 주파수대역과 고역 주파수대역에서 LNA 0단계의 레벨로 측정되었다. LNA 2단계로 구성하였을 경우 낮은, 중간, 고역 주파수대 모두 인식이 가능한 신호 레벨로 측정되었다. 하지만, RX 신호 레벨 향상시 신호와 노이즈 신호가 동시에 증폭하여 소프트웨어적인 개선이 반드시 필요하였다. 이를 위한 개선방안은 3.2절에서 소개한다.

임베디드 시스템(Embedded)은 UWB-RF 신호를 받아 알고리즘을 처리할 수 있는 내부, 외부 메모리와 고성능 신호를 처리 할 수 있는 프로세서를 포함한다. 리눅스 운영체제 시스템을 내장하여 멀티프로세싱, 다중처리가 가능하도록 하드웨어 시스템을 구성하였다. 이는 신호처리 결과를 모니터, LCD 및 UART(universal asynchronous receiver/transmitter)를 이용하여 사용자가 실시간으로 모니터링 가능하며 메모리에 기록이 가능하다.

전원부(Power)는 스마트폰의 과워 및 배터리를 이용하여 동작할 수 있도록 UWB 센서부 및 임베디드 시스템 내부에서 DC/DC를 이용하여 전압 변환한 후 5V의 단일 전원을 UWB 센서부에 인가하여 동작 할 수 있도록 하였다.

통신부는 원격지에서 UWB 센서부의 상태를 확인 할 수 있도록 신호 데이터 전송을 담당하는 부분이다. 측정 위치의 근접 작업자에 의한 외란을 최소화하기 위해서 유-무선 인터넷, 저 전력 중장거리 무선통신 기술(LoRa)을 활용한 통신 모델을 연결하여 게이트웨이(Gateway)에서 심도 데이터를 수집한 후 MQTT(message queue telemetry transport) 프로토콜[14]을 이용하여 서버에 업로드하여 원격지에서 모니터링 할 수 있도록 하였다.

모니터부(Monitoring)는 임베디드 시스템에 탑재된 프로그램을 통하여 탐지된 결과를 확인하거나 통신부에서 전송된 신호 결과를 GrayMap으로 모니터링 할 수 있도록 구성하였다.

### 3-2 영상처리를 이용한 센서 정밀도 향상 방법

콘크리트 내부 결함을 탐사하기 위한 UWB 센서부는 단일 모듈에서 측정하고, 내부 분포도를 GrayMap으로 표현하도록 하였다. 그리고 UWB 센서를 통하여 인식된 물체의 거리 및 크기, 반사되는 신호의 크기는 서버에 업데이트되어 관리자가 실시간으로 확인할 수 있도록 구성하였다. 하지만 RX 안테나를 통하여 수신된 Raw Signal은 RX 신호 레벨 향상 시, 노이즈 신호도 함께 증폭되므로 구조물 결함 및 내층 변화 탐지의 정확성을 높일 수 없었다. 이를 해결하기 위하여 본 논문에서는 RX 안테나로부터 수신된 Raw Signal에 그림 3과 같이 영상처리 필터를 단계별로 적용하여 사용자가 콘크리트 내 물체의 깊이 값을 수치로 확인할 수 있도록 하였다.

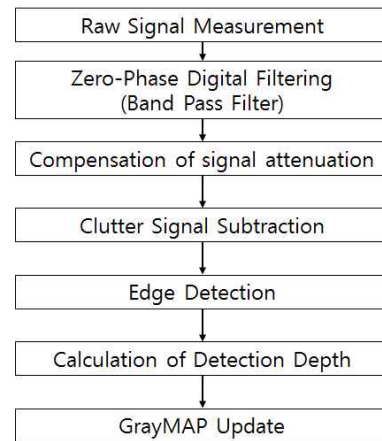
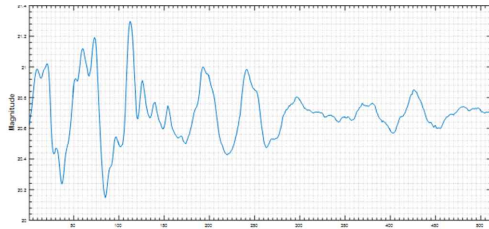


그림 3. Raw signal의 인식을 향상을 위한 흐름도  
 Fig. 3. A flowchart for improving raw signal recognition rate

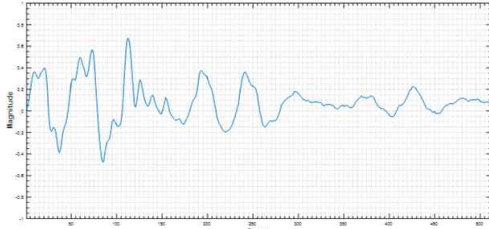
콘크리트 내부 탐사 시스템의 UWB 센서부는 가장 먼저 초광대역 범위의 주파수 신호를 변화하면서 임펄스 레이더를 TX 안테나를 이용하여 송출하고, 반사되는 신호를 RX 안테나에서 수신하여 Raw Signal을 취득한다. 그리고 취득되는 신호에 포함되어 있는 매질의 차이 혹은 유전율, 반사계수의 차이에 의해서 복사되는 신호에 필터를 적용하여 유효한 신호를 추출한다. Zero-Phase Digital Filtering은 신호에 포함되어 있는 DC 성분과 노이즈 성분으로 추정되는 신호를 제거하기 위해서 Band Pass Filter를 적용하여 소정의 광대역을 제외한 노이즈 대역을 제거하는 부분이다.

특정 대역 통과 필터는 1.3~4.4GHz를 적용하고, 샘플링 주파수(Fs)는 25GHz로 설정하여 입력 신호의 위상에는 영향을 주지 않고, 신호의 DC 성분과 노이즈 성분으로 추정되는 신호를 제거하여 진폭 스펙트럼의 변화 데이터를 얻는 단계이다.

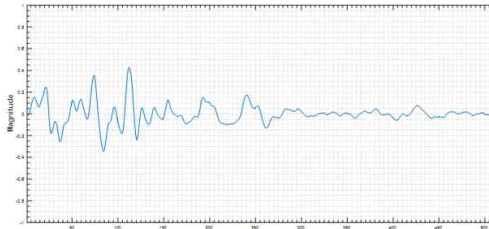
그림 4에서 X축은 신호의 크기이며, Y축은 취득되는 데이터의 Frame 값으로 이는 TX와 RX의 송수신 거리와 상관관계를 가진다. 안테나와 목표물까지의 거리가 멀어질수록 경로 손실로 인하여 수신 신호가 약해지는 현상이 발생하는 것이다. 이러한 현상은 근접 목표물의 신호가 원거리 목표물의 신호보다 크게 신호가 취득되어 동일한 신호처리 알고리즘을 적용했을 때, 원거리 신호 인식이 잘 되지 않는 현상이 발생하기 때문이다. 이를 해결하기 위해서 Compensation of Signal Attenuation 필터에서는 수신 신호의 거리에 따른 감쇠를 보상하기 위해서 수신 신호의 거리에 따라 차등 가중치를 곱하여 수신신호의 감쇠 보상처리를 진행하였다. 이로써 원거리 인식율을 향상시켰다.



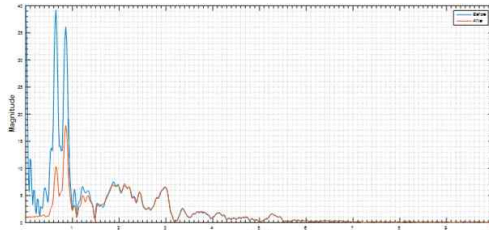
(a) RX 안테나로부터 수신된 Raw Signal



(b) DC성분 제거 결과



(c) Band Pass Filter를 수행한 결과



(d) 배경제거 필터 적용 결과

그림 4. Raw signal를 필터링한 후 결과  
Fig. 4. Result after filtering raw signal

이러한 알고리즘 과정을 신호 레벨로 확인하면 그림 4와 같다. (a)는 RX 안테나를 통하여 수신된 Raw Signal이다. 이 신호에서 DC 성분을 제거한 결과 (b)와 같은 신호를 생성한다. 노이즈 성분의 신호를 Band Pass Filter를 통해서 걸러내면 (c)와 같은 결과를 얻을 수 있다. 마지막으로 배경제거 필터를 거치게 되면, (d)와 같이 신호의 레벨을 확인 할 수 있다. 배경제거 필터(Clutter Signal Subtraction)는 UWB 센서의 측정 영역 내에서 원하는 물체 외에 다른 물체들에 의해 생성되는 반사 신호인 클러터 신호(Clutter Signal)를 제거하는 필터이다. 클러터는 측정 영역 내 목표물 이외의 고정된 물체들이며, 클러터 신호는 원하는 물체의 다른 물체들에 의해 생성되는 반사 신호이다. 배경 클러터 신호를 누적하여 목표물 이외의 다른 신호들을 제거하는 과정을 통하여 목표물의 신호를 보다 정확하게 추적 가능하다. 그림 5는 배경제거 알고리즘 적용하여 노이즈 및 신호의 변화에 의해서 반복적으로 출력되는 신호를 작은 리플의 신호 변화로 생성한 것이다. 이로써 센서

의 이동에 의해서 목표물에 신호가 반사되어서 신호가 크게 수신 되는 것을 확인 할 수 있으며 Y축의 Frame은 목표물의 거리 값을 예측 할 수 있게 된다.

Edge Detection은 철근 주변을 GrayMap으로 확인하는 경우 측정자의 시인성을 향상시키기 위한 부분이다. 신호의 Edge Detection은 미분에 대한 Roberts 근사를 사용하여 모서리를 검출하고, 민감도 임계값을 지정하여 임계값보다 강한 값을 필터 데이터로 표현하였다. Calculation of Detection Depth는 에지 값으로 추출된 데이터를 유전율을 고려한 깊이 데이터로 산출하는 부분이다. 이를 위해서 투과 깊이 또는 검출 깊이(D)를 산출하고, 투과 깊이 또는 검출 깊이(D), 및 투과 속도(V)를 구할 수 있다.

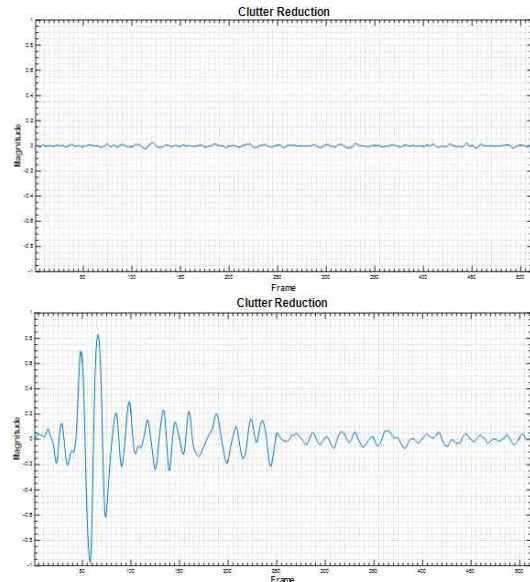


그림 5. 배경 제거 후 철근 유무에 따른 신호 비교  
Fig. 5. After removing the background, signals change of a rebar's existence

$$D = \frac{1}{2} \times V \times T, \quad V = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

여기서 T는 신호 도달 시간, c는 빛의 속도,  $\epsilon_r$ 은 매질의 상대 유전율이며, 주위 환경의 유전율을 고려하여 투과 깊이를 산출하여 콘크리트 내층의 에지 신호의 변화를 탐지할 수 있다.

#### IV. UWB-RF를 이용한 콘크리트 구조물 내부 탐사 시스템의 구현 및 실험 결과

##### 4-1 구현 결과

UWB-RF을 이용한 콘크리트 내부 탐사 시스템에서 UWB 센서 부의 구현 결과는 그림 6과 같다. 그림 7은 UWB-RF를 이용한 내부 탐사 시스템의 의해 검출된 신호를 사용자가 확인이 가능하도록

록 구성한 콘크리트 투과 모니터링 프로그램이다.



그림 6. UWB 센서부의 하드웨어 구현 결과  
 Fig. 6. Hardware Implement result of the part of UWB sensor

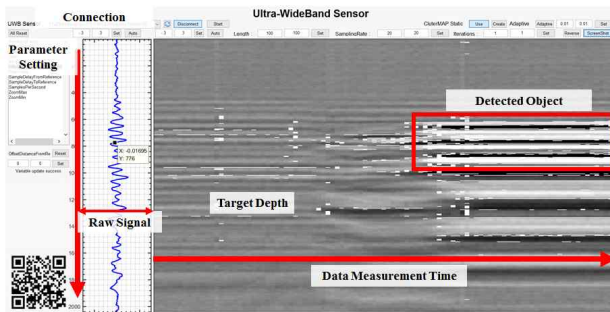


그림 7. 콘크리트 투과 모니터링 프로그램  
 Fig. 7. Reinforced concrete penetration Monitoring Program

이 프로그램은 크게 Raw signal과 GrayMap 수치로 표현된 투과깊이에 대한 정보를 육안으로 확인할 수 있도록 구성되어 있다. 그림 7의 X축은 데이터가 측정되는 시간이며 Y축은 콘크리트의 깊이를 의미한다. Y축이 밑으로 내려갈수록 투과되는 깊이가 큰 값을 투과 깊이로 표현하였다. 그림 7의 그래프는 Frame 단위로 변화하는 신호를 시간으로 수집하여 표현하는 그래프로 신호의 변화 추이를 GrayMap으로 보여준 것이다. 신호 크기의 변화를 0~255 레벨로 변환하여 표현하는 방법으로 사용자가 변화의 크기를 육안으로 판별할 수 있도록 그래프로 표현하였다. 이는 GPR 장비에서 육안 판별을 위해서 많이 사용되는 표현 방식이다. GrayMap은 시간의 흐름에 따라 프레임을 누적하여 2차원의 이미지 형식으로 표현한 것으로 빠르게 변화되는 신호의 변화 척도를 확인할 수 있도록 신호의 레벨을 흰색에서 검정색으로 표현한 것이다. 배경이 제거된 GrayMap은 일반적인 콘크리트 상태의 신호와 철근이 내장된 콘크리트 상태에 대해 신호의 차이를 색상 변화로 확인 할 수 있다. 즉, 학습되는 환경(콘크리트 상태)의 경우 흰색으로 표시되고, 변위가 발생하여 철근이 감지될 경우 검은색으로 표시된다. GrayMap으로 표현하는 경우, 육안으로 인지 할 수 있는 크기만큼의 변화와 변화의 측정 횟수가 필요하고, 레벨의 Peak 크기를 인지하기 힘들다. 이러한 문제점을 개선하기 위해서 영상 처리에서 자주 사용되는 에지 검출 알고리즘을 적용하여 GrayMap을 수정하였다. GrayMap에서 신호의 임계값(threshold)을 기준으로 분포도를 분석하고 Peak 에지 값에 해당하는 값을 빨간색으로 표현하였고 이를 이용하여 치수를 계산하였다. 즉 GrayMap은 콘크리트 구조물에서 철근을 감지하기 위하여 에지

검출 알고리즘을 보정한 것으로 1차 미분을 사용하여 2차원 데이터의 밝기 변화가 급격한 부분을 취득하였다. 그리고 Roberts 방식을 사용하여 임계값 보다 강하지 않은 모든 에지를 제거한 후 센싱 데이터를 취득하여 투과 깊이를 표시하였다. 측정된 치수 값은 통신 모듈에 의해서 MQTT 프로토콜로 원격지로 전송된다. 사용하는 전송된 프로토콜의 결과 값의 변화만을 분석하여 주변의 변화 및 문제점을 예측 할 수 있도록 하였다.

4-2 실험 환경

UWB-RW를 이용한 콘크리트 구조물의 내부 결함 탐사 시스템의 성능평가를 위하여 본 논문에서 UWB 센서가 콘크리트 시편 내에 Pipe의 거리를 측정하는 실험을 진행하였다.

본 논문은 그림 8의 (a)에서 보이는 것과 같이 콘크리트 시편에 구현된 UWB 센서를 위치하고, 위치한 센서가 이동하면서 센싱되는 신호의 크기와 이동된 거리의 신호의 측정된 값을 GrapMap 그래프로 표현하고 측정 물체의 거리 값을 측정하였다. 실험을 위하여 그림 8의 (b)와 같이 3개 Type의 시편을 직접 제작하여 실험에 사용하였다. 구현된 UWB-RF 센서를 이용하여 시편에 내장되어 있는 목표물 측정 시험을 위한 준비로 동일한 크기의 3종의 시편에 서로 다른 구조물의 물체를 내장하였다. 콘크리트 시편 A에는 직경 20mm의 파이프, 콘크리트 시편 B에는 직경 40mm의 파이프, 콘크리트 시편 C에는 200mm(길이)\*600mm(폭)\*5mm(두께)의 plate 철판을 각각 50mm 영역에 매설하고 각 시편 위에 센서를 이동시켜서 측정체의 위치와 크기, 간격을 측정하는 시험을 진행하여 UWB-RF 센서의 정확도를 확인하였다.

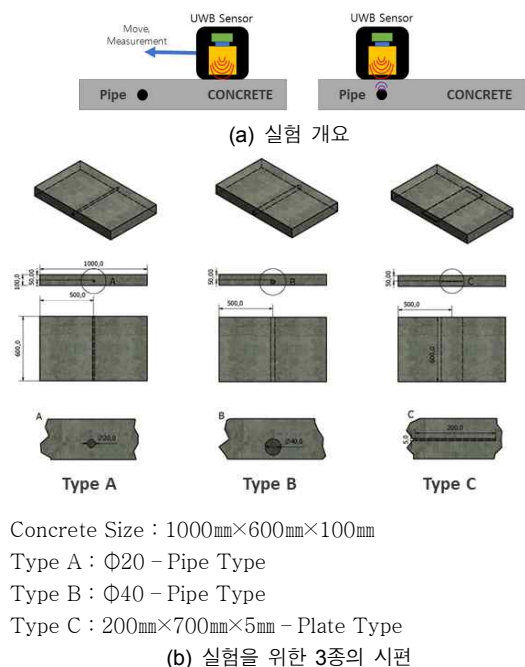


그림 8. 실험 개요 및 실험을 위한 3종의 시편  
 Fig. 8. Test-bed Types for Experiments

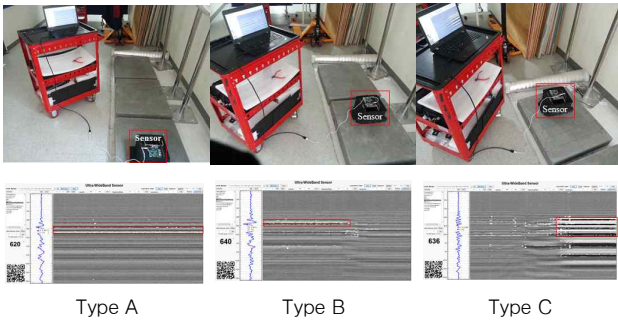


그림 9. 실험 방법 및 결과 이미지  
 Fig. 9. Images of Test method and test result

표 1. 시편 측정 실험 결과  
 Table 1. Result of Repeat Measurement

No.	Type A	Type B	Type C
#1	620	640	636
#2	623	639	635
#3	621	643	635
#4	619	642	636
#5	624	642	634
#6	620	640	635
#7	618	641	636
#8	613	642	635
#9	620	640	635
#10	619	642	635

4-3 실험 결과

본 논문은 실험을 위하여 구현된 UWB-RF 센서를 가장 좌측에 위치하고, 배경제거 알고리즘 처리 후, 좌측에서 우측으로 정해진 시간 동안 이동하면서 측정된 목표물의 거리를 측정하는 방식으로 각 시편당 10번의 실험을 진행하였다. 그 결과는 그림 9와 같다. 표 1은 각 시편에 대한 측정 결과를 정리한 것이다. 시편 A의 경우 20mm 철근이 콘크리트 500mm 영역에 매설되어 있으며, 매설된 철근을 인식하는 거리를 측정 시 620mm정도 측정되었다. UWB-RF 케이스 120mm(센서의 외장부의 케이스 크기인 100mm 및 에어갭 20mm를 포함) 내층을 제외한 500mm가 정확하게 측정 되었으며, 측정 결과의 편차는 ±4mm 정도 발생되었으며, 측정되는 시점에 20mm 철근의 위치에 따라서 편차가 발생하는 것으로 관측되었다. 시편 B의 경우에는 40mm 철근 측정시 ±3mm 오차가 발생되었다. 시편 A에 비하여 넓은 면적을 가지고 있기 때문에 오차의 크기도 작지만 오차의 발생 빈도 역시 시편 A에 비하여 시편 B에서 오차가 적게 발생되었다. 시편 C의 경우 500mm 위치에 설치되도록 제작하였지만 제작 과정에서 오차가 발생하여 515mm 영역에 매설되었으며, 평면적을 갖는 철판의 경우 ±1mm로 측정 되었으며 거리 측정 정확도가 매우 높았다. 시편에 대해서 10회 시험에 의해서 콘크리트 구조물로 예상되는 파이프와 Plate 형태의 물체를 정확하게 찾을 수 있었으며 거리 측정 오차도 mm 단위로 나타나는 것을 확인 할 수 있었다.

V. 결론 및 향후 연구방향

콘크리트 구조물의 설치 장소에 따라 내부 균열, 피복두께 부족과 같은 콘크리트 내부 결함을 탐지하는 것은 한계가 있다. 따라서 본 논문에서는 육안 점검이 어려운 콘크리트 구조물의 내부 결함을 탐지하기 위하여 UWB-RF를 이용한 탐지 센서를 제안하였다. 연구과정에서 RX 안테나로부터 수신된 Raw Signal이 송수신되는 거리에 따라 노이즈 정도가 다름을 확인하였고 이를 해결하고자 영상처리 기법을 적용하여 측정된 신호의 정확도를 개선하였다. 그리고 UWB-RF 시스템의 결과를 사용자가 육안으로 확인 가능한 프로그램을 프로토타입으로 구축하였다. 직접 제작한 3편의 시편 실험을 통하여 콘크리트 구조물내의 철근 깊이를 ±4mm 오차 범위 내에서 확인할 수 있었다. 이로써 기존 탐지 장비들이 가지고 있는 고비용, 고전력, 이동성의 불편함등 고질적 한계를 저가의 저전력 UWB 임펄스 솔루션으로 대체 가능함을 확인할 수 있었다. 하지만 본 논문은 실험을 위하여 제작된 시편에 의해 성능분석이 이루어졌다. 따라서 향후 계획으로 실제 원전 및 대형 구조물 환경과 유사한 시편을 제작하거나 현장 시험을 통하여 시스템을 분석하고 문제점을 개선하고자 한다.

참고문헌

[1] S. J. Kim, "Examples of Earthquake Damage to Reinforced Concrete Structures," *Architectural Institute of Korea*, Vol. 61, No. 3, pp. 11-14, 2017.

[2] Y. S. Bae, K. T. Kim and S. Y. Lee, "The Road Subsidence Status and Safety Improvement Plan," *Journal of academia-industrial technology*, Vol. 18, No. 1, pp. 545-552, 2017.

[3] J. Y. Kim, J. M. Kang, B. C. Kim, S. H. Park, P. J. Kwak and C. H. Chol, "Introduce of Subsidence Monitoring Technology for Safety of Waterworks and Sewerage facility," *Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 17, No. 1, pp. 5-11, March 2016.

[4] J. J. Park, J. G. Han, S. K. Yu and K. K. Hong, "GPR Technology for Searching for Sinkhole in the Geosynthetics," *Korean Geosynthetics Society*, Vol. 14, No. 3, pp. 12-17, June 2015.

[5] H. C. Rhim, Y. S. Lee, S. K. Woo and Y. C. Song, "Measurement of Concrete Thickness with Antenna Frequency Variation of Radar," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 15, No. 2, pp.209-216, April 2003.

[6] Korea Electrotechnology Research Institute: The Study on Development Non-Destructive Testing Equipment using

- UWB, Ministry of Commerce Industry and Energy, 2003.
- [5] Carino. N. J, Sansalone. M and Hsu. N. N, "A Point Source-Point Receiver, Technique for Flaw Detection in Concrete," *ACI Journal, Proceedings*, Vol. 83, No. 2, pp. 199-208, April 1986.
- [7] Lin. Y, Sansalone. M and Carino. N. J, "Impact-Echo Response of Concrete Shaft," *Geotechnical Tesing Journal*, Vol. 14, No. 2, pp. 121-137, 1991.
- [8] D. S. Kim, W. S. Seo and K. M. Lee, "IE-SASW Method for Nondestructive Testing of Geotechnical Concrete Structure: I. Numerical Studies," *Journal of the Korean geotechnical society*, Vol. 18, No. 4, pp. 257-270, August 2002.
- [10] M. G. Noh, S. H. Oh and B. S. Jang, "Integrated Application of GPR, IE and IR Methods to Detection of the Rear Cavity of Concrete," *Journal of Geophysics and Geophysical Exploration*, Vol. 12, No. 4, pp. 338-346, 2009.
- [11] Sisma, Ondrej and et al. "UWB radar: Vision through a wall," *Telecommunication Systems*, Vol. 28, No. 1, pp. 53-59, 2008.
- [12] S. P. Hong. "Design and Implementation of amount of contained water, earth and sand Monitoring System based on IoT," *Journal of Digital Contents Society*, Vol. 18, No. 4, pp. 787-793, July 2017.
- [13] Y. W. Park, "Study on the Single Feed Antenna for 2.64GHz," *JKAIS*, Vol. 14, No. 2, pp.811-815, 2013.
- [14] Alam, Kazi Masudul, and Ashrafī Akram, *A Survey on MQTT Protocol for the Internet of Things*.



**박대혁(Dae-Hyuck Park)**

2004년 : 숭실대학교 미디어학과 대학원(공학석사)  
2007년 : 숭실대학교 미디어학과 대학원(공학박사-미디어공학)  
2007년~2009년: ㈜SK 이노에이스 멀티미디어 사업부  
2009년~2011년: 한국과학기술연구원  
2011년~ 2012년 : ㈜ESP 대표

2012년~2016년: ㈜세인 진장사업부

2016년~현 재: ㈜ESP 진장사업부

※ 관심분야 : 초광대역 통신, 자율주행자동차(Self-driving Car), 스마트카(Smart Car), 사물인터넷(Internet of Things) 등



**강의선(Eui-Sun Kang)**

2002년 : 숭실대학교 컴퓨터학과 대학원 (공학석사)  
2007년 : 숭실대학교 미디어학과 대학원(공학박사-미디어공학)  
2007년~현 재: 숭실대학교 베어드학부대학 교수

※ 관심분야 : 멀티미디어(Multimedia), 사물인터넷(Internet of Things), 컴퓨터 교육(Computational Education) 등