

레이더의 주파수대역 변화에 따른 콘크리트 시편의 두께 측정

Measurement of Concrete Thickness at Different Frequency Ranges Using Radar

김 유 석* 임 홍 철**
Kim, You-Sok, Rhim, Hong-Chul

ABSTRACT

For imaging of concrete specimens using radar, the principles of radar, microwave, and the electromagnetic properties of concrete are discussed. Experimental data obtained from radar measurement of concrete specimens with no steel bars at three different frequency bandwidths of 2~3.4 GHz, 3.4~5.8 GHz and 8~12 GHz are processed to determine the thickness of the specimens. A signal processing scheme has been implemented to visualize the concrete specimens. The purpose of this study is to determine particular frequency range appropriate for measuring the thickness of concrete specimens using radar.

1. 서론

건물이나 일반 구조물은 세월이 흐름에 따라 서서히 노화되거나 지진과 같은 갑작스런 충격에 의해서 손상을 입게 된다. 이에 따라 구조물의 안전성과 사용성에 많은 문제점을 야기시키게 되는데 이들의 사용성과 안전성 검토를 위해서 레이더를 이용한 비파괴실험 (Nondestructive Testing, NDT)이 행해지고 있다. 레이더를 이용한 비파괴실험에 영향을 주는 인자 (parameter)에는 레이더의 중심주파수, 주파수 대역, 측정거리와 측정각도, 대상물의 기하학적 특성 및 전자기적 특성 등이 있다 [1]. 그러나 현재 상용화된 비파괴 실험 장비들은 주파수 대역이 고정되어 있기 때문에 이들 주파수대역의 변화가 실험결과에 미치는 영향은 고려되지 못하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 레이더를 이용하여 콘크리트 시편의 두께를 측정하기 위해 레이더의 기본적인 원리와 신호처리를 통한 영상화 방법을 소개한다. 3개의 주파수 대역(2~3.4 GHz, 3.4~5.8 GHz, 8~12 GHz)으로 측정된 결과를 토대로 영상화하는 방법을 찾고, 콘크리트 시편의 두께 측정을 위해 가장 적합한 주파수 대역을 제시하는데 그 목적이 있다.

2. 레이더를 이용한 비파괴실험 (NDT)의 기본원리

레이더를 이용한 콘크리트의 비파괴실험을 위해서는 레이더의 기본적인 원리와 전자파의 특징, 그리고 콘크리트의 전자기적 특성에 대한 이해가 필요하다.

* 연세대학교 건축공학과 인턴연구원
** 정회원, 연세대학교 건축공학과 조교수

2.1 레이더의 기본원리

본 연구에서 사용된 레이더는 FM (Frequency Modulated) CW (Continuous Wave) 레이더로서 주파수 대역 f_1 과 f_2 사이에서 일정한 주파수 Δf 를 증가시키면서 일정크기의 전자파를 연속적으로 방출하는 레이더이다. 이렇게 방출된 전자파는 측정대상으로부터 반사되어 같은 주파수 대역 내에서 크기 (power)의 변화를 가지고 다시 안테나로 되돌아 오게된다. 이들 방출파와 반사파간의 크기의 변화를 통해서 대상을 인식하게 된다.

2.2 콘크리트의 전자기적 특성

콘크리트는 유전체이며, 2개의 독립적인 전자기적 특성에 의해서 구분된다. 즉, 복소 permittivity (ϵ^*)와 복소 permeability (μ^*)이다. 이 중에서 비파괴 실험과 직접적으로 관계가 있는 콘크리트의 전자기적 특성은 ϵ^* 의 실수부 (유전상수)로서 이것은 진공상태에서의 permittivity값에 대한 상대적인 값으로서 ϵ_r 로 표현된다 [2, 3]. 콘크리트의 유전상수 (ϵ_r)와 콘크리트 내에서의 전자파 속도 (ν)와의 관계를 나타내면 식 2.1과 같다. (진공상태에서의 전자파의 속도 $c=3.0 \times 10^8$ m/s)

$$\nu = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.1)$$

2.3 Range resolution과 투과도 (penetration capability)

레이더의 안테나로부터 방출된 전자파의 진행방향에 대한 거리를 나타내는 것이 range이다. 이는 방출된 전파와 반사된 전파사이의 시간 차이에 의해서 결정된다 [4]. 안테나로부터 대상물과의 거리를 R이라고 하고, 파의 왕복시간을 τ 라고 하면

$$\tau = \frac{2R}{c} \quad (2.2)$$

가 성립하며 range의 증분

$$\Delta R = \frac{cT}{2} \quad (2.3)$$

가 된다. (T는 주파수대역의 지속시간) 여기서 ΔR 를 해상도 (resolution)라 하며 식별할 수 있는 두 물체간의 최소 인접거리라고 할 수 있다. 즉, range resolution보다 더 작은 거리에 있는 2개의 물체는 구별 할 수 없게 된다. 위에서 나타낸 식은 다시 주파수 대역 B로써 표현하면 다음과 같다 [5].

$$\begin{aligned} \text{(대기중)} \quad \Delta R &= \frac{c}{2B} \\ \text{(콘크리트중)} \quad \Delta R &= \frac{(c/\sqrt{\epsilon_r})}{2B} \end{aligned} \quad (2.4)$$

따라서 주파수대역의 지속시간 T를 줄이거나 주파수대역 B를 늘림으로써 보다 좋은 해상도를 얻을 수 있다. 다음으로 전자파의 대상물에 대한 투과능력은 투과 깊이에 대해서 표현되며 여기서 투과 깊이는 전자파가 콘크리트 속을 통과하면서 에너지 흡수에 의해서 전기장의 세기가 원래 전기장의 세기의 $1/e$, ($e=2.7183$)로 감소할 때의 깊이를 의미한다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$d_p = \frac{1}{k'} \quad (2.5)$$

여기서 k' 는 초기 전자파의 주파수와 콘크리트의 전자기적 특성에 의해서 결정되는 값이다 [3].

이 관계에 의하면 투과 깊이 d_p 는 주파수가 증가할수록 감소하는 특성을 가지고 있다. 따라서 감도

(detectability)와 관계되는 해상도는 중심주파수가 높고 주파수 대역이 높을수록 향상되며 이에 반해 투과 깊이는 주파수가 낮을 수록 향상되므로 콘크리트의 비파괴실험에 적절한 주파수 대역의 제안이 본 연구의 목적이 되고 있다.

3. 실험 시편 및 실험 장치

레이더를 이용한 콘크리트의 비파괴실험을 위하여 일정 크기의 콘크리트 시편이 제작되었으며 레이더의 주파수 대역을 달리하여 아래와 같은 방식으로 실험이 실시되었다.

3.1 콘크리트 시편

시편은 아래 그림과 같이 장방형의 무근콘크리트로 제작하였으며 물 : 시멘트 : 모래 : 골재의 중량비는 1 : 2.22 : 5.16 : 7.12로 하였다. 이 콘크리트 시편은 대기중에서 28일 이상 완전 양생, 건조시킨 후 실험을 실시하였다.

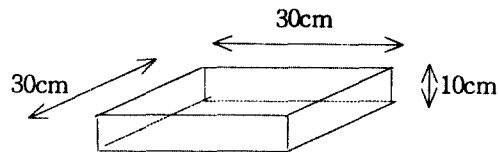


그림 1. 콘크리트 시편

3.2 실험장치

본 연구에서 사용한 레이더의 주파수 대역은 2~3.4 GHz, 3.4~5.8 GHz, 8~12 GHz의 3개 대역을 택하였다. 이들 주파수 대역에 대한 중심주파수 (f_c)와 주파수 대역 (B)을 표 1에 정리하였다.

표 1. 주파수 대역 비교

	중심주파수 (f_c)	주파수 대역폭 (B)
2~3.4 GHz	2.7 GHz	1.4 GHz
3.4~5.8 GHz	4.6 GHz	2.4 GHz
8~12 GHz	10 GHz	4 GHz

이와 같이 서로 다른 주파수 대역을 택한 이유는 전술한 바와 같이 중심주파수와 주파수대역의 변화가 해상도와 전자파의 대상물체에 대한 투과도에 서로 상반된 효과를 나타내므로 콘크리트 시편의 비파괴실험에 적합한 주파수대역을 찾기 위함이다. 이들 각각의 주파수 성분들은 일정한 power를 가지고 0.1 GHz씩 증가하면서 레이더로부터 연속적으로 방출된다.

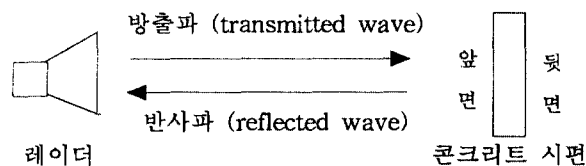


그림 2. 실험장치 개요도

4. 측정 데이터의 신호처리를 통한 영상화

FM CW 레이더를 이용하여 얻은 데이터를 분석하며 적절한 신호처리 방법을 이용하여 range에 대하여 영상화한다.

4.1 측정 데이터의 분석

주파수 대역을 달리한 레이더를 통해서 얻은 데이터는 각각의 주파수에 대해서 진폭 (amplitude)과 위상 (phase, degree)에 대한 정보를 가지고 있다. 이는 일정한 크기로 방출된 파가 콘크리트 시편에 도달하여 반사된 파로서 위상과 진폭이 변화된 것을 나타내주고 있다.

4.2 측정 데이터의 영상화

레이더를 통해서 얻은 데이터의 영상화를 위해서 진동수영역에 대한 측정 데이터를 역 푸리에변환 (Inverse Fourier Transform)하여 시간영역에 대해서 변환시킨 후 range에 대해서 표현해준다. 이를 위해서 우선 데이터의 진폭과 위상값을 복소수의 형태로 표현해주면 식 4.1과 같다.

$$data의\ 복소수값 = 진폭 * e^{i\theta(위상)} \quad (4.1)$$

이들은 연속적인 주파수에 대한 값들이 아니라 2~3.4 GHz, 3.4~5.8 GHz, 8~12 GHz와 같이 일정 주파수 대역에 대한 값들이므로 이를 바로 역 푸리에변환(Inverse Fourier Transform)을 시키게 되면 스펙트럼 누수(spectral leakage)에 의해서 많은 오차가 발생하므로 이를 방지하기 위해서 일종의 가중합수인 window를 사용하였으며 본 연구에서는 식 4.2와 같은 Hamming Window를 사용하였다 [6].

이렇게 변환된 데이터를 역 푸리에변환을 통해서 시간영역으로 변환시켜주었으며 이를 range에 대해서 표현하였다.

$$w[n] = \begin{cases} 0.54 - 0.46 \cos(2\pi n/M) & 0 \leq n \leq M \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (4.2)$$

5. 주파수 대역별 신호의 영상화결과 분석

3개의 주파수 대역에 걸쳐서 같은 두께를 갖는 콘크리트 시편에 대해 레이더를 이용한 비파괴실험을 실시하였으며 이를 통해 얻은 데이터를 전술한 신호처리 방법으로 영상화 하였다. 이들의 영상화된 결과를 그림 3~5에 나타내었다. 이들은 모두 range와 진폭에 대해서 나타내었으며 주파수 대역에 따라서 다른 range resolution을 나타내고 있다. 그림에 나타난 영상화 결과를 분석해 보면 우선 각각의 그림에서 2개의 peak값을 볼 수 있다. 여기서 range값이 0인 지점의 peak값은 콘크리트의 앞면에서 전자파가 반사되어 돌아온 것을 의미하며 두 번째 peak는 콘크리트 시편 속으로 투과된 전자파가 시편의 뒷면에서 다시 반사된 것을 의미한다. 따라서 이들 두 개의 peak에 대한 range값을 통해서 콘크리트 시편의 두께를 확인할 수 있다. 이와 같은 현상은 서로 다른 매질의 경계면에서 반사가 일어나게 되는 전자파의 특징을 나타내 주고 있는 것이다.

그림 3의 경우는 중심주파수가 낮아서 콘크리트에 대한 투과도가 좋으므로 뒷면에서의 반사가 확실히 일어나고 있으며 그림 5의 경우는 중심주파수가 높으므로 투과도가 떨어져 뒷면에서의 반사가 명확히 나타나지 않고 있다. 또한 3개의 그림을 비교해보면 주파수대역의 폭이 넓을수록 해상도가 좋아짐을 직접 확인할 수 있다. 이로써 그림 4의 경우가 적절한 해상도와 투과도를 나타내고 있음을 알 수 있다.

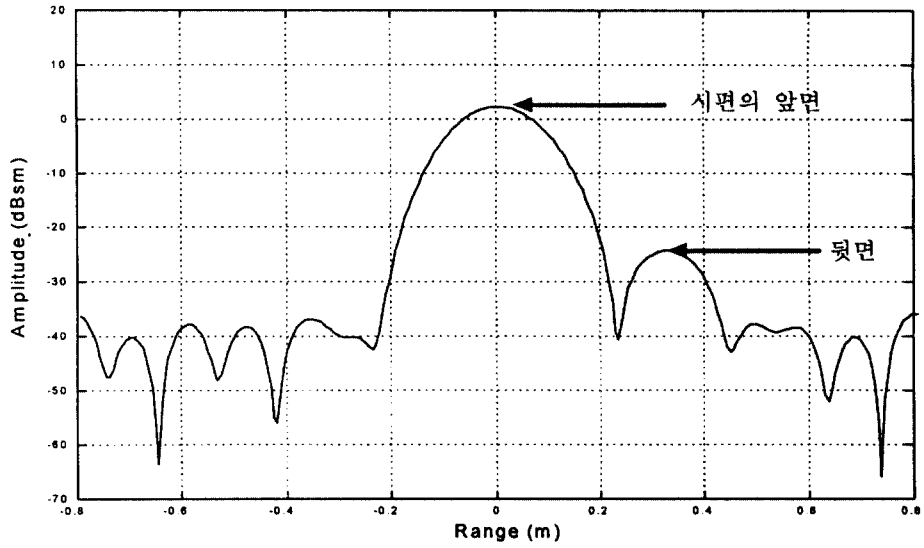


그림 3. 2~3.4 GHz 대역의 영상화 결과

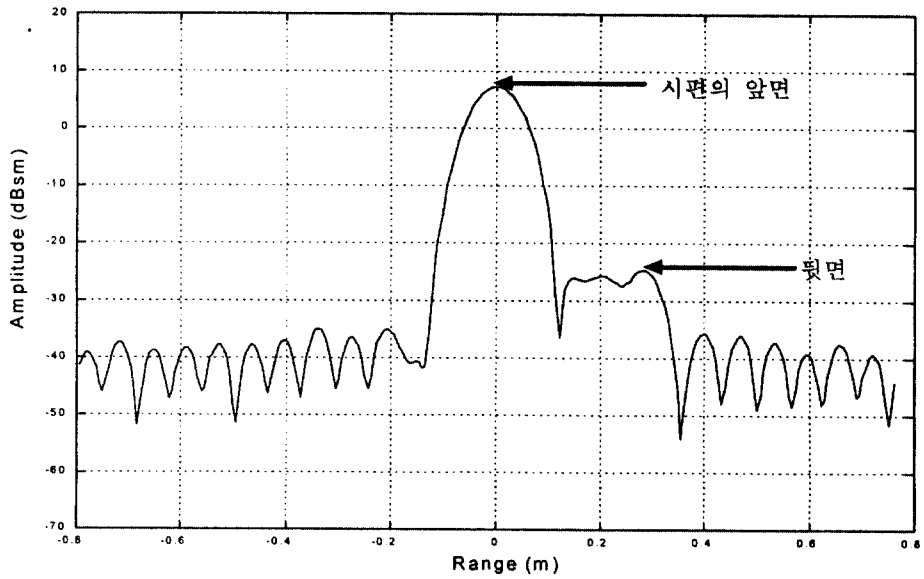


그림 4. 3.4~5.8 GHz 대역의 영상화 결과

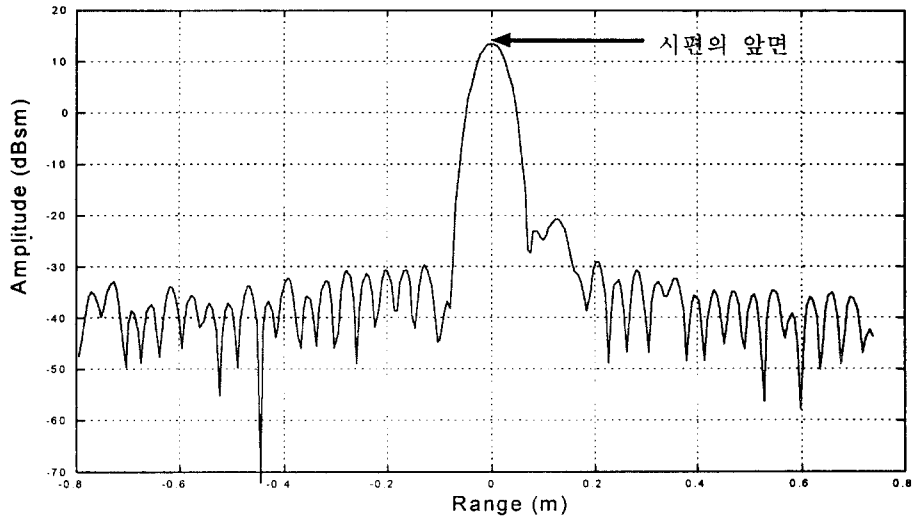


그림 5. 8~12 GHz 대역의 영상화 결과

6. 결 론

- (1) 레이더의 서로 다른 주파수대역에 대한 영상화결과를 통해 주파수 대역이 전자파의 투과능력과 해상도에 미치는 영향을 확인하였다.
- (2) 중심주파수가 높을수록 전자파의 투과도는 떨어지지만, 해상도는 향상된다는 결과를 통해서 보다 정확한 비파괴실험을 위해서는 상용화된 비파괴 실험 장비에서 주파수 변화가 가능하도록 하는 연구 개발이 필요하다고 본다.
- (3) 콘크리트의 두께측정을 위해서 가장 적합한 주파수 대역으로는 콘크리트에 대해 적절한 투과능력과 해상도로 표현가능한 3.4~5.8 GHz 대역임을 확인하였다.
- (4) 여러 분야에서 널리 사용되고 있는 기본적인 신호처리방법 (역 푸리에변환, window)을 레이더의 신호처리에 적용, 영상화하였다.
- (5) 서로 다른 매질의 경계면에서 전자파가 반사된다는 사실을 통해서 콘크리트속에 포함된 다른 내용물이나 내부 상태의 탐사를 위한 레이더의 이용도 가능하다고 본다.

본 연구는 한국과학재단(KOSEF)에서 설립한 서울대학교 지진공학 연구센터(KEERC)의 연구비 일부 지원과 한국 과학재단의 인턴연구원 활용계획에 의거한 지원을 받았고, 연세대학교 공과대학 건축과학기술연구소 비파괴 구조실험실이 보유하고 있는 1996년도 교육부 지원 이공계대학 첨단 기자재를 사용하였다.

7. 참고 문헌

- [1] Gershon J. Wheeler, "Radar Fundamentals", Prentice Hall.
- [2] David K. Cheng, " Fundamentals of Engineering Electromagnetics", Addison-Wesley Publishing Company.
- [3] David M. Pozar, "Microwave Engineering", John Willey & Sons.
- [4] Dean L. Mensa, "High Resolution Radar Cross-Section Imaging", Artech House, Inc.
- [5] Eugene F. Knott, "Radar Cross Section", Artech House, Inc.
- [6] Alan V. Oppenheim, "Signals & Systems", Prentice Hall.