

주파수 영역 필터링을 통한 콘크리트 시편 내부 레이더 탐사

Radar Probing of Concrete Specimens Using Frequency Domain Filtering

임 홍 철* 이 윤 식**
Rhim, Hong Chul Lee, Yoon Sik

국문요약

지진 발생시 건축물의 내부상태를 탐사하는데 있어 콘크리트 구조물의 두께, 철근의 피복깊이, 공동의 유무를 탐사하게 되고, 이것을 통해 건축물의 손상을 추정할 수 있다. 이때 콘크리트 내부를 탐사하는 방법으로 지중 탐사 레이더(ground penetrating radar)가 효과적으로 이용될 수 있다. 기존의 레이더 측정 방법에서는 콘크리트 내부를 탐사하기 위해 시간영역에 있는 데이터로 콘크리트의 유전상수를 구하고 시간을 거리로 환산하여 육안 식별에 의해서 결과를 분석하였다. 본 연구에서는 콘크리트 시편을 측정 후 측정된 데이터를 주파수 영역으로 변환하여 스펙트럼 분석과 필터링을 통한 방법으로 신호 처리하여 시간영역에서의 데이터 분석능력을 향상시켰다. 데이터 획득을 위해 주로 사용되는 900MHz, 1GHz, 그리고 1.5GHz의 중심 주파수를 갖는 세 개의 안테나를 사용하여 철근시편을 탐사하였다, 주파수 영역에서 차단 주파수(cutoff frequency)를 1/3 옥타브에 의하여 변화시키면서 저역 통과, 고역 통과, 그리고, 대역 통과 등의 필터링을 하였고, 각각의 중심 주파수에 대한 가장 효과적인 차단 주파수를 찾으려고 했다. 차단 주파수의 범위는 최대 하위 2옥타브에서 상위 1옥타브와 최소 하위 2옥타브에서 하위 1옥타브가 적합하였고, 주파수 영역에서 필터링을 통해 콘크리트 내부 정보 분석력 향상을 위한 토대를 마련하였다.

주요어 : 지중 탐사 레이더, 콘크리트, 주파수, 필터링

ABSTRACT

Radar method can be effective in probing concrete structures damaged by earthquake. Data analysis is usually performed in time domain, by considering time delay of the wave due to the dielectric constant of concrete. In this study, improved data analysis has been performed using signal processing scheme of spectra analysis and filtering. Three antenna with 900MHz, 1GHz, and 1.5GHz center frequency were used to detect a steel bar or delamination in specimens for obtaining data. Frequency spectrum was filtered in low pass, high pass, and band pass varying cutoff frequency with 1/3 octave in frequency domain. The most effective cutoff frequency for each frequency has been determined as the range for 2 octave lower to 1 octave higher and 2 octave lower to 1 octave lower. This result provided a basis in improving data analysis capability using frequency domain filtering.

Key words : ground penetrating radar, concrete, frequency, filtering

1. 서 론

지진 발생 후 지진에 의한 건축물 손상을 측정하기 위해 레이더를 이용한 콘크리트 구조물 탐사를 실시할 수 있다. 이것을 위해 콘크리트의 두께와 철근, 공동 등 내부를 탐사하는 연구가 진행되어 왔고, 이것은 향후 균열이나 손상도를 측정하는데 발판이 될 수 있다. 레이더를 이용한 구조물의 비파괴 검사는 안테나의 주파수를 변화시켜 해상도와 탐사심도를 조정할 수 있고⁽¹⁾, 작은 에너지를 사용하기 때문에 X-ray 등의 방법보다 안전하고 신속하게 데이터를 획득하여 분석할 수 있다는 장점이 있다.⁽²⁾ 또한, 초음파 방법과 비교해 비접촉 방식으로 탐사가 가능하기 때문에, 검사속도가 빠르고, 접근이 불가능한 지중 구조물 등의 검사에도 활용될 수 있을 만큼 그 대상이 넓다.

기존의 레이더 비파괴 검사법에 관한 연구는 측정된 데이터로 콘크리트 유전상수를 측정하고 거리로 환산해주어 식별하거나⁽³⁾, 일반화 Hough변환을 응용한 철근위치 검출 해석에 대한 연구⁽⁴⁾ 등이 이루어졌다. 이것은 레이더 탐사법에

있어 향상된 연구들이지만 대부분 시간 영역에서 이루어진 것이었다.

주파수 영역에서의 연구는 ground penetrating radar(GPR) 데이터 처리를 완비한 패키지⁽⁵⁾를 제안하는 것이 있지만 본 논문에서는 콘크리트 시편을 탐사하여 얻어진 데이터를 고속 푸리에 변환을 하여 기존의 시간영역에서 이루어지던 연구를 주파수 영역에서 새로운 정보를 이용해 이를 수 있도록 하였다. 이를 위해 레이더 탐사에 주로 사용되는 안테나인 900MHz, 1GHz, 그리고 1.5GHz의 중심 주파수를 갖는 안테나를 사용해 철근시편을 측정하였고, 주파수 영역으로 변환 후 얻어진 주파수 스펙트럼에서 차단 주파수를 다양하게 변화시켜 주며 저역 통과, 고역 통과, 대역 통과 등의 필터링을 통하여 적절한 차단 주파수를 설정해주었다. 이를 통해 중심 주파수에 따른 적정 차단 주파수를 파악하고 실제 비파괴 검사에 있어 필터링 적용에 대한 근거를 제시하려고 한다.

2. 신호처리 data 획득을 위한 레이더 측정

주파수 영역에서의 필터링을 위한 데이터를 얻고, 또한, 본 연구의 필터링의 결과를 적용하기 위해 실제 레이더 탐사에 주로 사용되는 표 1의 900MHz, 1GHz, 1.5GHz 중심 주파수를 갖는 세 개의 안테나를 사용하여 측정을 하였다.

* 정회원 · 연세대학교 건축공학과 부교수(대표저자 : hcrhim@yonsei.ac.kr)

** 연세대학교 건축공학과 석사과정

본 논문에 대한 토의를 2002년 10월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다. (논문접수일 : 2002. 5. 13 / 심사종료일 : 2002. 7. 8)

표 1 실험에 사용된 안테나

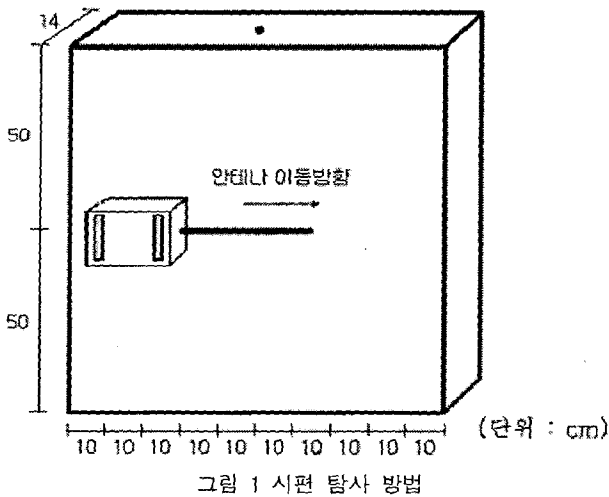
Center frequency of antenna, f_c	Frequency bandwidth, B(MHz)
900MHz antenna	450~500
1000MHz antenna	1000
1500MHz antenna	3000

철근 탐사를 위한 표 2의 시편 3개를 제작하고 레이더를 사용하여 실험을 실시하였다. 철근 탐사 시편에는 직경 19mm의 철근이 표면에서 철근 중심 위치까지 2cm, 4cm, 6cm, 8cm, 그리고, 10cm로 중앙에 매립되어 있다.

표 2 실험 시편

Specimen		Length(mm) × Width(mm) × Thickness(mm)	Cover depth
With steel bar 19 mm ϕ	1	1000 × 1000 × 140	2cm
	2	1000 × 1000 × 140	4cm, 10cm
	3	1000 × 1000 × 140	6cm, 8cm

측정 방법은 시편에 안테나를 철근 방향과 송수신기의 방향이 일치되도록 놓은 후 좌우 모서리에서 10cm 떨어진 지점부터 시작하여 10cm의 간격으로 marker로 표시하면서 안테나를 이동하며 측정한다. 시편의 전체 길이에서 측정되는 부분은 80cm가 된다(그림 1). 전체 측정 길이의 중앙값인 철근이 있는 부분의 측정값을 철근이 없는 시편과 비교함으로써 철근의 위치를 찾을 수 있다.



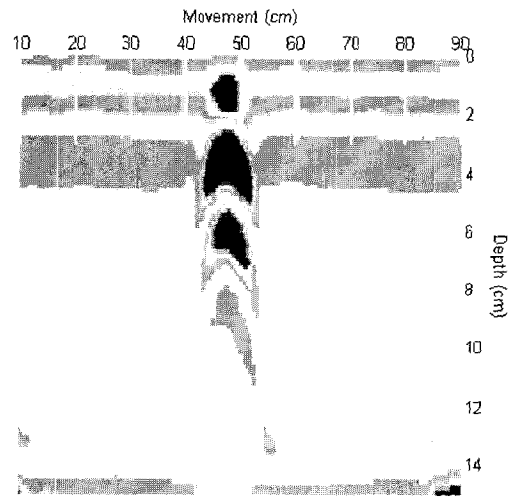
3. 시간 영역 데이터 처리

3.1 시간 영역 데이터

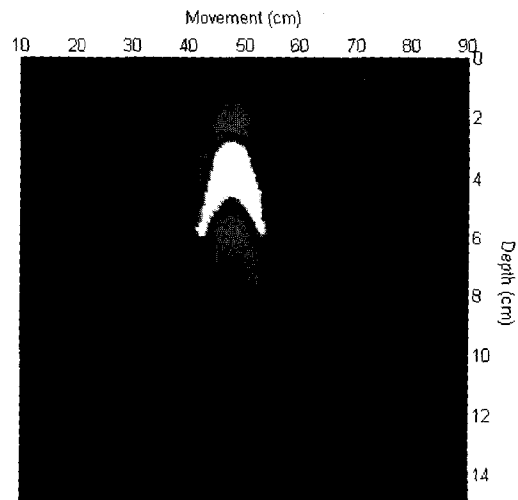
시간 영역에서의 데이터를 처리하기 위해 레이더를 이용하여 100cm × 100cm × 14cm(길이 × 폭 × 두께) 크기의 콘크리트 시편에 매립된 직경이 19mm인 한 개의 철근을 탐사하였다. 그림 2(a)는 1GHz 중심주파수를 갖는 안테나로 탐사한 일반 상용 장비에서의 측정 영상으로 movement의 중간 정도의 위치에 depth 방향으로 약 1cm, 4cm, 6cm에 확인되지

않은 목표물이 보이고 14cm 정도에 층 모양이 보이는 측정 결과 영상이 나타나 있다.

철근으로 보이는 영상이 반복적으로 보이고 이것만으로 어느 것이 정확히 철근인지 구분하기 어렵기 때문에 기존 연구에서는 이를 시간 영역에서 데이터처리 해주어 그림 2(b)와 같은 영상을 얻어 철근 위치를 찾는 것에 대한 정확성을 높여 주었다.⁽⁶⁾ 이는 movement 방향의 철근이 없는 위치에 있는 depth 방향의 데이터를 철근이 있는 부분의 데이터로부터 감해주는 방법을 이용한 처리 결과이다. 분석은 먼저 콘크리트 시편의 앞표면과 뒷표면에 대한 신호를 찾고, 이것을 각각 0cm와 14cm로 depth를 맞춰준 후에 그 사이에 존재하는 탐사의 목적인 철근의 위치를 찾는 것이다. 정확한 분석을 하기 위해서는 2차원 영상이 아닌 그림 3과 같이 그림 2에서의 depth 방향의 철근이 있는 부분(with rebar)과 철근이 없는 부분(without rebar) 샘플인 반사파의 진폭 데이터를 이용하여야 한다. 이들의 차이값(difference value)에서 절대값이 가장 큰 부분인 A가 철근의 위치이다.



(a) 시간영역 데이터 처리 전 영상



(b) 시간영역 데이터 처리 후 영상

그림 2 직경 19mm의 철근이 피복 두께 4cm로 매립된 100cm × 100cm × 14cm(길이 × 폭 × 두께) 크기의 콘크리트 시편을 1GHz로 탐사한 시간 영역에서의 2차원 영상

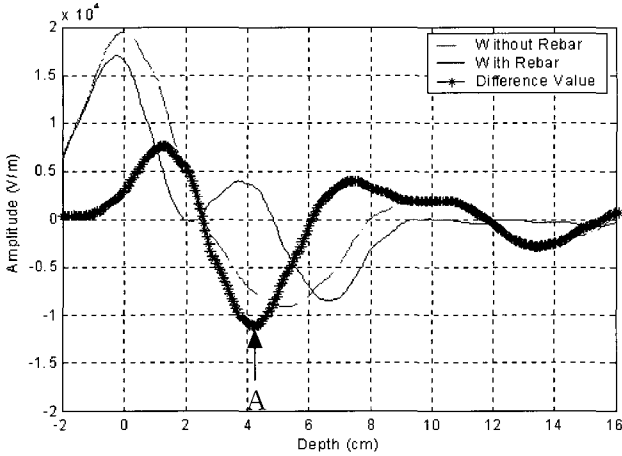


그림 3 직경 19mm의 철근이 피복 두께 4cm로 매립된 100cm×100cm×14cm(길이×폭×두께) 크기의 콘크리트 시편을 1GHz로 탐사한 시간 영역 반사파형

3.2 측정 data 판독을 위한 값

레이더(radar)의 탐사 원리는 마이크로파 대역의 전자파가 목표물 혹은 매질을 통과할 때, 그 전자파의 투과와 반사가 목표물 혹은 매질의 전자기적 특성과 모양에 영향을 받는 성질을 이용한 것이다. 실측 과정에서는 송신 안테나로부터 탐사하고자 하는 콘크리트 시편에 전자파를 방사하면, 이 전자파는 전자기적 성질이 다른 물질, 예를 들면, 철근, 공동, 또는 시편의 뒷표면 등의 경계면에서 반사되어 수신 안테나에 도달한다. 이 전자파의 반사파형으로부터 매립된 물체의 모양과 재질을 판정하거나 뒷표면까지의 두께를 측정하게 된다.⁽⁷⁾

즉, 매질의 경계면에서의 전자기파의 반사와 투과는 매질의 전자기적 특성에 직접적인 영향을 받는다. 전자기적 특성이 서로 다른 두 매질의 경계에서 발생하는 전자기파의 반사계수(Γ)는 다음과 같다.

$$\Gamma = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1} = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \quad (1)$$

여기서, η_1 과 η_2 는 특성임피던스(characteristic impedance)를 나타내고, ϵ_1 과 ϵ_2 는 유전상수(dielectric constant)를 나타낸다. 아래첨자 1과 2는 각각 첫 번째 매질과 두 번째 매질을 가르킨다. 이러한 반사계수의 부호에 따라서 반사파의 위상이 달라지게 된다.⁽⁸⁾ 따라서 전자파가 콘크리트 속을 진행하다가 매질이 다른 물질, 즉 철근, 공동, 뒷표면 등에 다 다르면 반사파의 위상이 틀려지는데, 이 위상을 해석하여 측정하는 것이다. 그림 2, 3에서 보는 바와 같이 차이값을 구해주어 철근의 위치를 측정하는 이유는 바로 이 반사계수에 의해서 매질이 달라지는 순간 파형에 가장 변화가 크기 때문에 그 순간에서의 차이값이 가장 크기 때문이다.

4. 주파수 영역 데이터 처리

앞서 본 영상과 같은 시간 영역 상의 정보에서는 앞표면

이나 철근이나 공동에 대한 정보가 noise나 철근, 공동의 영향 등에 의한 간섭이나 산란과 같은 정보와 섞여 있다. 신호나 잡음 모두 전 대역에 걸쳐서 골고루 퍼져 있기 때문에 시간 영역 상에서는 쉽게 구별할 수 없기 때문이다. 이러한 시간 영역 신호에서는 명확하지 않은 중요한 정보를 주파수 영역에서는 구분할 수 있기 때문에 시간 영역에서의 데이터를 주파수 영역으로 바꿔줄 필요가 있다.⁽⁹⁾

시간 영역의 데이터를 주파수 영역으로 변환시켜주기 위해 고속 푸리에 변환을 이용한 후 주파수 스펙트럼 분석을 하였다. 고속 푸리에 변환을 사용하는 것은 잡음이 넓은 대역 걸쳐 있는 반면에 신호에 대한 스펙트럼 에너지는 한 곳에 집중되어 시간 영역 상에서는 쉽게 구별할 수 없는 것을 주파수 영역 상에서 신호와 잡음으로 구분할 수 있기 때문이다. 그림 4는 1GHz 안테나를 사용하여 깊이 4cm로 매립된 D19 철근을 탐사했을 때 철근이 있는 곳(rebar)과 없는 곳(mortar) 각각에 대한 샘플을 512 포인트로 FFT한 결과이다.

콘크리트 시편을 탐사한 반사파는 1GHz 보다 작은 부분에서 더 큰 스펙트럼 에너지를 갖고 있는 것을 나타낸다. 중심 주파수가 1GHz이고, bandwidth가 1GHz임에도, 주파수 스펙트럼 에너지의 변형이 큰 것으로 나타나서 콘크리트와 철근의 영향으로 간섭이나 산란이 발생하여 스펙트럼 에너지가 왜곡되었다는 것을 알 수 있다. 이러한 간섭이나 산란, 그리고 noise를 감소시켜주기 위해서는 어떤 스펙트럼 에너지가 중요 정보이고 아닌지를 구분해 주는 일이 필요하고, 이를 위해서 차단주파수를 이용한 filtering이 필요하다.

주파수 영역에서 필터링을 하는 방법으로 frequency window method⁽¹⁰⁾를 사용하였다. 여기서 직사각형 창(rectangular window)이 사용되었는데 주파수 영역에서 사용한 직사각형 창은 주파수 선택적 필터의 역할을 한다. 즉, FFT 결과에서 스펙트럼 분석이 이루어지고 차단 주파수⁽¹¹⁾를 설정해주어 주요 스펙트럼 에너지가 집중된 곳을 제외한 영역을 제거해 준다. 본 연구에서 주파수 영역에 다른 창 함수의 사용은 주요

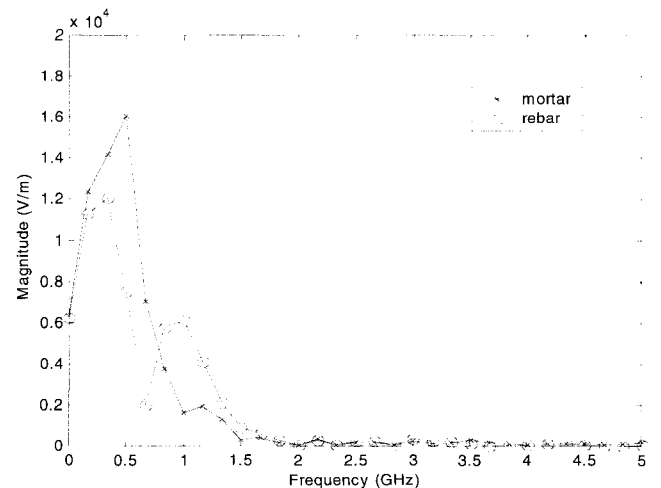


그림 4 직경 19mm의 철근이 피복 두께 4cm로 매립된 100cm×100cm×14cm(길이×폭×두께) 크기의 콘크리트 시편을 1GHz로 탐사한 주파수 스펙트럼

부분에 주파수 스펙트럼 에너지의 감소를 가져오고 중요한 부분인 앞표면과 철근의 신호를 감소시켜주어 역 푸리에 변환을 하였을 때 시간 영역에서 데이터 분석이 용이하지 않았다. 그러므로 주파수 영역에서 필터의 역할을 하는데 있어 직사각형 창⁽⁶⁾을 사용하였다.

$$w[n] = \begin{cases} 1 & 0 \leq n \leq M \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

4.1 Filtering 적용

레이더로 철근을 탐사한 시간 영역의 데이터를 주파수 영역으로 변환하여 저역 통과, 고역 통과, 대역 저지, 그리고 대역 통과 필터링을 하였다. 주파수가 2배로 늘어났을 때의 주파수 폭을 1옥타브라 하고 $\sqrt[3]{2}$ 배로 늘어났을 때의 주파수 폭을 1/3 옥타브라 하는데, 저역 통과 필터링은 차단 주파수 이하의 영역만 선택하여 하는 것이고, 그림 5에서 A점의 값을 125MHz부터 1/3옥타브씩 변화시켜 가며 4GHz 까지 해주었다. 고역 통과 필터링은 차단 주파수 이상의 영역만 선택하여 행하는 것으로 저역 통과와 반대로 B점의 값을 4GHz부터 125MHz까지 1/3옥타브씩 변화시키면서 필터링을 하였다.

대역 저지와 대역 통과 필터링을 하였는데, A점과 B점을 각각 125MHz와 4GHz에서 같이 출발하여 그림 5의 (a)와 같이 저역 통과와 고역 통과가 겹쳐지지 않게 하는 것이 대역 저지 필터링이고, 더 나아가면 A점과 B점이 지나치게 되는데 그 순간 전 영역이 다 포함되게 되므로 필터링의 의미

가 없어 그림 5의 (b)에서 C와 같이 겹쳐지는 부분만을 선택하게 되는데 그 영역만 통과하게 하는 필터링이 대역 통과 필터링이다.

4.2 Parameter

FFT 변환 결과에서 저주파수로 갈수록 스펙트럼 에너지가 집중되어 있고 고주파수로 갈수록 퍼져있기 때문에 1/3 옥타브에 의한 차단 주파수 설정이 스펙트럼 분석에 있어 효율적이다. 여기서 차단 주파수의 설정은 이 옥타브의 개념을 사용하였고, 표 3은 중심주파수에 따른 1/3 옥타브를 이용한 차단 주파수이다.

4.3 Filtering 결과

철근 탐사 실험을 수행하고 시간 영역에서 데이터 처리를 하여 철근 중심의 위치를 기존의 방법에 의해 측정하고, 주파수 영역에서 스펙트럼 분석을 통해 필터링을 위해 적절히 차단 주파수를 설정해주고 시간 영역으로 신호를 복원하는 방법으로 측정하였을 때의 결과를 비교했다.

예를 들어 철근의 중심 깊이가 2cm일 때 900MHz 안테나로 측정된 결과의 A-scan 신호를 필터링하기 전의 철근의 위치(그림 6의 A)와 옥타브에 의한 parameter중에 하위 2옥타브와 상위 1옥타브로 필터링한 후의 철근 위치의 변화(그림 6(b)의 A')를 그림 6에서 볼 수 있다. 필터링 전에 비해 철근의 깊이가 더 2cm에 가까워지는 것을 알 수 있다.

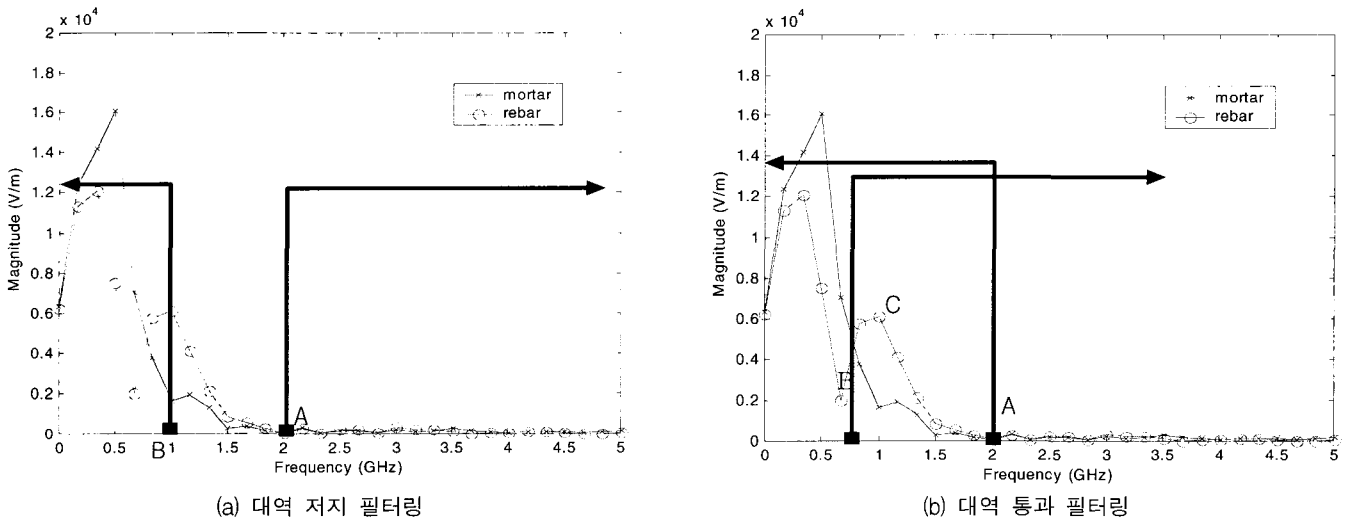


그림 5 주파수 스펙트럼의 필터링을 통한 분석 방법

표 3 1/3 옥타브에 따른 주파수(단위 : MHz)

Lower octave than f_c									f_c	Upper octave than f_c					
3	$2\frac{2}{3}$	$2\frac{1}{3}$	2	$1\frac{2}{3}$	$1\frac{1}{3}$	1	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$	1	$1\frac{1}{3}$	$1\frac{2}{3}$	2	
113	142	179	225	283	357	450	567	714	900	1134	1429	1800	2268	2857	3600
125	157	198	250	315	397	500	630	794	1000	1260	1587	2000	2520	3175	4000
188	236	298	375	472	595	750	945	1191	1500	1890	2381	3000	3780	4762	6000

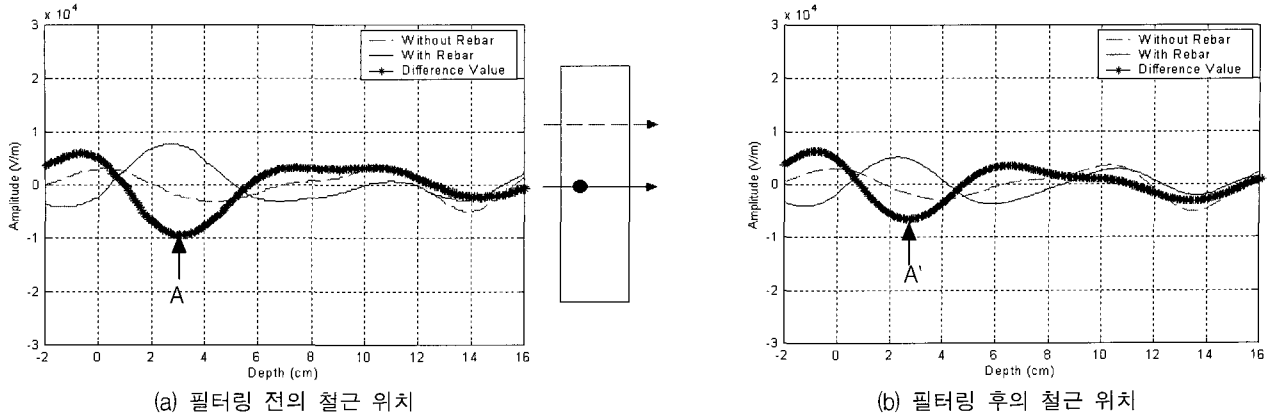


그림 6 직경 19mm의 철근이 피복 두께 2cm로 매립된 100cm×100cm×14cm(길이×폭×두께) 크기의 콘크리트 시편을 900MHz로 탐사한 후 필터링 전후의 시간영역에서의 신호

철근이 깊이 6cm로 매립된 100cm×100cm×14cm 크기 콘크리트 시편을 1GHz로 탐사한 주파수 스펙트럼을 필터링 하였는데 표 4와 같이 1/3옥타브에 의한 주파수 영역별로 철근의 위치를 찾았다. 여기서 철근의 위치는 시간 영역에서 철근이 없는 곳의 데이터와 철근이 있는 곳의 데이터의 차이값의 절대값이 가장 큰 것을 선택하였다.

Bandwidth sensitivity를 보기 위해 대역 저지에서 대역 통과까지 1/3옥타브에 따른 모든 차단주파수에 대해서 필터링을 해주었지만 레이더 안테나는 주어진 주파수 대역에서 신호를 전송한 것을 받는 것이어서 표 4에서처럼 좌측 상단의 삼각형 부분과 같은 대역 저지 영역은 결과를 제외하였다. 그리고, 우측 하단 삼각형 부분의 대역 통과 필터를 사용하여 1/3옥타브 차단 주파수별로 필터링을 수행하여 신호의 주파수 대역에 포함되지 않는 원하지 않는 간섭이나 잡음

성분을 제거하는 적절한 대역 필터를 선택하였다.

진하게 명암이 들어간 부분은 실제 철근 위치 5.9cm에서 5%내 오차를 갖는 부분으로 최소 영역인 315MHz부터 500MHz까지 영역만을 선택한 경우 5% 안의 오차가 발생했으며, 최대 영역은 125MHz에서 2GHz까지 선택한 경우로 역시 5% 안쪽의 오차가 발생하였다. 그러나, 철근 위치가 각각 2cm, 4cm, 6cm, 8cm, 10cm일 때 측정된 값들을 모두 표 4와 같이 만들어 필터링 하였을 때 공통적으로 최소 315MHz에서 500MHz까지의 영역부터 최대 250MHz에서 2000GHz까지의 영역을 선택하였을 때가 가장 필터링 결과가 좋게 나타났다.

900MHz 중심주파수를 가진 안테나로 측정된 데이터와 1.5GHz 중심주파수를 가진 안테나로 측정된 데이터 모두 표 4와 같이 1/3 옥타브에 의해 차단 주파수를 달리해서 필터링을 했을 때 1GHz 중심주파수를 가진 안테나와 동일한

표 4 직경 19mm의 철근이 피복 두께 6cm로 매립된 100cm×100cm×14cm(길이×폭×두께) 크기의 콘크리트 시편을 1GHz로 탐사한 주파수 스펙트럼을 대역 통과에 따라 필터링 한 후의 철근 깊이

실제 깊이 5.9 cm			High pass																												
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16													
			4000~	3175~	2520~	2000~	1587~	1260~	1000~	794~	630~	500~	397~	315~	250~	198~	157~	125~													
Low pass	1	~125																5.52													
	2	~157															5.52	X													
	3	~198														5.52	X	X													
	4	~250													5.52	X	X	X													
	5	~315													5.52	X	X	X	X												
	6	~397													5.52	X	X	X	X												
	7	~500													5.52	X	5.80	5.74	5.74	5.74	5.74										
	8	~630													5.52	X	5.58	5.74	5.69	5.69	5.69	5.69									
	9	~794													5.52	X	5.35	5.52	5.63	5.63	5.63	5.63	5.63								
	10	~1000													5.52	X	5.02	5.35	5.52	5.63	5.63	5.63	5.63	5.63							
	11	~1260													5.52	X	5.08	5.02	5.30	5.47	5.63	5.63	5.63	5.63	5.63						
	12	~1587													5.52	X	5.35	5.35	5.24	5.35	5.47	5.58	5.58	5.58	5.58	5.58					
	13	~2000													5.52	X	3.85	5.24	5.19	5.30	5.35	5.64	5.64	5.64	5.64	5.64					
	14	~2520													5.52	X	5.52	X	3.85	3.85	3.85	5.13	5.08	5.24	5.41	5.58	5.58	5.58	5.58	5.58	
	15	~3175													5.52	X	5.52	X	3.85	3.85	3.85	3.85	3.85	4.96	5.35	5.47	5.58	5.58	5.58	5.58	5.58
	16	~4000													5.52	X	5.52	X	3.85	3.85	3.85	3.85	3.85	3.85	5.08	5.24	5.47	5.53	5.53	5.53	5.53

결과를 가졌다.

5. Signal processing 결과 및 분석

직경 19mm의 철근이 피복 두께 2cm, 4cm, 6cm, 8cm, 10cm로 매립된 100cm×100cm×14cm(길이×폭×두께) 크기의 콘크리트 시편을 900MHz, 1GHz, 1.5GHz로 탐사한 시간 영역의 데이터를 주파수 영역으로 변환한 주파수 스펙트럼에서 전체 영역을 선택했을 때와 본 연구를 통한 차단 주파수로 필터링 한 후의 철근 깊이 측정 결과는 표 5, 표 6, 표 7과 같다.

피복 두께가 2cm인 철근을 탐사했을 경우, 900MHz, 1GHz 안테나를 이용해 측정했을 때는 오차가 매우 크기 때문에 필터링을 한 후에도 오차율이 10% 이하로는 줄지 않았지만 나머지 경우는 10% 이상의 오차일 때 하위 2옥타브에서 상위 1옥타브로 필터링하면 10% 이하의 오차율을 가질 수 있었다. 특히, 피복두께 6cm이상에서는 하위 2옥타브에서 하위 1옥타브 사이의 영역을 선택하였을 경우에 하위 2옥타브에서 상위 1옥타브를 선택하였을 때보다 오차율이 더 많이 줄어들었다. 그러나, near effect의 영향으로 피복두께가 2cm일 경우에는 향상도가 더 떨어지는 경우가 있었다.

전영역을 선택했을 때와 하위 2옥타브에서 상위 1옥타브로 필터링 했을 때, 그리고 하위 2옥타브에서 하위 1옥타브로 필터링 했을 때의 각각의 주파수에 대한 오차율의 평균치를 추세선으로 나타낸 차트를 그림 7에 나타내었다. 전영

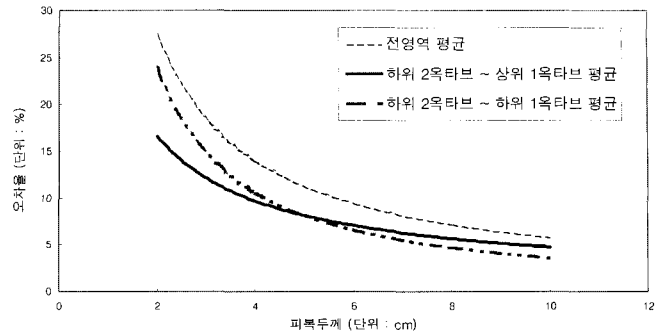


그림 7 필터링 영역별 평균 오차율 추세선

역을 선택해주었을 때보다 필터링을 해주었을 때 0인 부분은 피복두께를 필터링 전부터 근사하게 찾은 경우에 더 향상될 부분이 없어서이다.

6. 결 론

본 연구는 레이더를 이용하여 직경 19mm 철근이 피복 두께 2cm, 4cm, 6cm, 8cm, 10cm로 달리하여 포함된 콘크리트를 900MHz, 1GHz, 1.5GHz 중심 주파수를 갖는 안테나를 사용하여 측정하고 각각에 대하여 bandwidth sensitivity를 알기 위해 1/3옥타브로 차단 주파수를 설정한 후 필터링을 위한 16×16의 테이블을 만들어 적절한 차단 주파수를 찾아 주었다. 중요 정보를 갖는 주파수 대역과 그렇지 않은 주파수 대역을 모두 필터링 하여 원하지 않는 간섭과 산란에 의한 영향 및 노이즈 등을 감소시키는 주파수 대역을 찾을

표 5 대역 통과 필터링에 따른 철근 탐사 결과(900MHz 안테나)

실험에 사용한 주파수		900MHz				
철근 깊이(cm)		2	4	6	8	10
실제 철근 깊이(cm)		2.0	4.2	5.9	8.1	9.8
필터링 후 깊이(cm)	전 영역 선택	3.36	4.57	6.55	7.03	8.74
	하위 2옥타브~상위 1옥타브	3.12	4.38	6.31	7.10	8.82
	하위 2옥타브~하위 1옥타브	3.18	4.51	6.31	7.35	8.94

표 6 대역 통과 필터링에 따른 철근 탐사 결과(1GHz 안테나)

실험에 사용한 주파수		1GHz				
철근 깊이(cm)		2	4	6	8	10
실제 철근 깊이(cm)		2.0	4.2	5.9	8.1	9.8
필터링 후 깊이(cm)	전 영역 선택	2.70	4.20	5.52	7.34	9.67
	하위 2옥타브~상위 1옥타브	2.53	4.20	5.64	7.73	9.67
	하위 2옥타브~하위 1옥타브	2.79	4.26	5.74	7.62	9.96

표 7 대역 통과 필터링에 따른 철근 탐사 결과(1.5GHz 안테나)

실험에 사용한 주파수		1.5GHz				
철근 깊이(cm)		2	4	6	8	10
실제 철근 깊이(cm)		2.0	4.2	5.9	8.1	9.8
필터링 후 깊이(cm)	전 영역 선택	2.12	3.45	5.73	7.08	9.26
	하위 2옥타브~상위 1옥타브	2.00	3.80	5.73	7.35	9.43
	하위 2옥타브~하위 1옥타브	2.28	3.80	5.79	7.30	9.55

수 있었고 레이더를 이용한 실제 구조물 측정 시에 더 나은 결과를 얻을 수 있는 토대를 마련하였다.

- (1) 대역 통과 필터링을 통해서 나온 각각의 900MHz, 1GHz, 그리고 1.5GHz에 대한 주파수 필터링을 위한 차단 주파수의 값은 스펙트럼 분석을 통해서 중심 주파수에서 하위 2옥타브와 상위 1옥타브의 값으로 그 사이의 영역을 선택했을 때 세 주파수 모두 10%이하의 오차범위 안에서 철근을 찾았고, 하위 2옥타브에서 하위 1옥타브의 영역만 선택해도 10%이하의 오차범위 안에서 철근을 찾을 수 있었다. 이것은 기존의 시간영역에서 처리한 결과와 비교해 정확도가 높아진 것으로 실제 레이더 탐사에서 주파수 필터링 적용이 유용함을 알 수 있고, 차단주파수는 하위 2옥타브에서 상위 1옥타브의 값이 제안된다.
- (2) 피복두께가 6cm이상일 경우에는 하위 2옥타브에서 상위 1옥타브까지의 범위를 선택했을 때보다 하위 2옥타브에서 하위 1옥타브까지 선택했을 때의 필터링이 정확도 향상면에서 더 좋은 결과를 얻을 수 있었지만, 하위 2옥타브에서 하위 1옥타브까지의 범위는 송신파의 주파수 대역을 포함하지 않는 범위이므로 연구의 측면에서 제한적인 결과로 볼 수 있다.
- (3) 900MHz, 1GHz로 피복 두께가 2cm인 철근을 탐사할 때 철근에 의한 반사파와 표면에 의한 반사파가 중첩되어 나타나는 near effect에 의해서 철근 깊이의 오차가 매우 크게 나타나서 필터링 이후에도 오차율을 10%이하로 낮출 수 없었다. 하지만, 해상도 높은 1.5GHz 안테나로 탐사하였을 때는 필터링에 의해 오차가 5%이하로 감소하였다. 그러므로, 철근 피복두께가 2cm 정도로 작은 경우의 탐사에 있어서 1.5GHz 안테나의 사용과 제안된 필터링은 더 나은 결과를 얻을 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단(KOSEF)에서 설립한 서울대학교 지진공학 연구센터(KEERC)로부터 연구비의 일부를 지원 받았고, 연세대학교 공과대학 건축과학기술연구소 비파괴 구조실험실이 보유하고 있는 교육부 지원 이공계대학 첨단 기자재를 사용하였다.

기호정리

Γ : 반사계수

η_1 : 특성임피던스(characteristic impedance)

ϵ_1 : 유전상수(dielectric constant)

참고 문헌

1. Udaya, B. H., Chen, H. L., Vasudev, B., and Zahid, S., "Detection of sub-surface anomalies in concrete bridge decks using ground penetrating radar," *ACI Materials Journal*, Vol. 94, No. 5, 1997. 9-10, 1997, pp. 396-408.
2. Rhim, H. C., Buyukozturk, O., and Blejer, D. J., "Remote radar imaging of concrete slabs with and without a rebar," *Materials Evaluation*, American Society for Non-destructive Testing, Vol. 52, No. 2, 1995, pp. 295-299.
3. 임홍철, 김우석, "레이더를 이용한 콘크리트 시편내 수평 배근 간격 탐사," 한국지진공학회 논문집, Vol. 4, No. 2, 2000, pp. 65-72.
4. 박석균, Uomoto Taketo, "일반화 Hough변환을 응용한 콘크리트 레이더 화상 내 실제 철근위치의 검출 해석," 한국콘크리트학회지, Vol. 12, No. 1, 2000, pp. 23-31.
5. Grandjean, G. and Durand, H., "Radar unix: A complete package for GPR data processing," *Computer & Geosciences*, Vol. 25, No. 1, 1999, pp. 141-149.
6. Rhim, H. C. and Park, K. H., "Imaging of steel bars embedded inside mortar specimens for nondestructive testing," *KCI Concrete Journal*, Korea Concrete Institute, Vol. 12, No. 1, 2000, pp. 139-144.
7. 이종득, 콘크리트 구조물의 비파괴검사, 일광, 1996.
8. Fruhwirth, R. K. and Schmöller, R., "Some aspects on the estimation of electromagnetic wave velocities," *Proceedings of 6th International Conference on Ground Penetrating Radar*, Tohoku University, Sendai, Japan, 1996. 9-10, pp. 135-138.
9. Lynn, P. A. and Fuerst, W., *Introductory Digital Signal Processing With Computer Applications*, 1st edition, John Wiley & Sons, 1998.
10. Randall, R. B., *Frequency Analysis*, Bruel and Kjaer, 1987, pp. 187-192.
11. Ingle, K. V. and Proakis, J. G., *Digital Signal Processing*, PWS Publishing Company, 1999.