

주파수 대역 확장을 이용한 콘크리트 시편의 레이더 영상 분해능 향상

Radar Imaging of Concrete Specimens with Improved Resolution Using Expanded Frequency Bandwidth

임 홍 철* 이 주 희**
Rhim, Hong Chul Lee, Ju Hee

국문요약

Inverse synthetic aperture radar(ISAR)를 이용하여 콘크리트의 비파괴 검사를 위한 적정 주파수 대역폭을 결정하기 위해 주파수 합성을 실시하였다. 콘크리트 시편의 내부를 영상화하기 위한 레이더 신호처리 기법을 이용하여 레이더 주파수 2~3.4 GHz, 3.4~5.8 GHz 대역에서 무근 콘크리트 시편과 내부 공동 또는 철근이 있는 콘크리트 시편을 대상으로 실험하였다. 분해능을 높이기 위해 두 측정 주파수 대역을 합성한 2~5.8 GHz 대역에서 신호처리를 하여 영상화 결과를 향상시켰다. 주파수 대역폭 변화에 따른 콘크리트 시편 비파괴 검사 결과의 영향을 분석하였다.

주요어 : 주파수 대역폭, 콘크리트, 레이더, 영상화

ABSTRACT

Frequency bandwidth has been combined to determine adequate frequency bandwidth which is necessary for nondestructive testing when using inverse synthetic aperture radar(ISAR). For imaging inside of concrete specimens using radar, the principles of radar and signal processing are discussed. Experimental data obtained from radar measurement of three different concrete specimens at two different frequency bandwidths of 2~3.4 GHz, 3.4~5.8 GHz and these two frequencies are combined to obtain improved imagery. A signal processing scheme has been implemented to visualize inside concrete specimens. The influence of frequency bandwidth was analyzed in nondestructive testing by changing frequency bandwidth for concrete specimen.

Key words : frequency bandwidth, concrete, radar, imaging

1. 서 론

건축, 토목 분야에서 비파괴 검사를 위해, 100MHz~1GHz까지의 주파수를 사용하는 ground penetrating radar(GPR)가 지반 내부의 매설물 조사와 콘크리트의 두께 측정⁽¹⁾, 철근 탐색⁽²⁾ 등에 이용되고 있다. Inverse synthetic aperture radar(ISAR)는 0.1GHz~18GHz까지의 주파수를 방출할 수 있으며, 콘크리트 비파괴 검사에 쓰이는 상용 레이더 장비인 GPR과 비교하여 높은 주파수와 주파수 대역폭의 조절이 자유롭고 물체에 접촉하지 않고도 떨어져서 실험을 실시하기 때문에 넓은 범위를 측정할 수 있는 장점이 있다.

ISAR는 비행기와 선박 등의 영상화⁽³⁾에 사용되고 있으며, 최근에는 자연물을 대상으로 한 전나무의 3차원 영상화⁽⁴⁾ 및 콘크리트의 비파괴 검사⁽⁵⁾ 등의 새로운 분야에 연구가 진행되고 있다. 레이더를 이용한 비파괴 검사법은 사용하는 주파수에 따라 분해능(resolution)과 투과깊이가 달라지기 때문에 이론적 분석과 체계적인 실험을 할 필요가 있다. 이 논문에서는 ISAR를 이용하여 콘크리트 시편을 대상으로 2~3.4GHz, 3.4~5.8GHz의 2개의 주파수 대역에서 측정하여 영상화한

결과⁽⁶⁾와 주파수 대역을 합성하여 분해능을 높인 2~5.8GHz 대역에서 영상화를 실시한 결과를 다룬다. 그리고, 주파수 대역폭을 변화시키며, 콘크리트의 비파괴 검사에 필요한 주파수 대역폭을 살펴보고, 비파괴 검사를 통해 콘크리트 구조물 내부의 상태를 판단할 수 있는 근거를 제시하고자 한다.

2. 레이더를 이용한 비파괴 실험의 기본원리

2.1 ISAR system

레이더를 통한 영상화는 range와 cross-range에 대한 신호처리를 통하여 이루어진다. Range는 레이더로부터 방출된 전자파의 진행방향에 대한, cross-range는 파의 진행방향에 대해서 수직인 평면에 대한 대상물의 정보를 나타낼 때의 거리이다. 레이더는 전자파를 방출하며, 전자파는 물체에 반사되어 크기(power)의 변화를 가지고 다시 안테나로 되돌아오게 된다. Range에 대한 정보를 얻기 위해서 위상은 거리에 비례해서 선형으로 변하는 것을 이용한다. Cross-range에 대한 정보를 얻기 위한 방법으로 synthetic aperture radar(SAR)의 방식을 사용하는데 이는 물체와 레이더간의 상대적인 위치가 변함에 따라서 각각의 위치에서 얻어지는 반사파를 저장한 후 연속적으로 합성하여 하나의 커다란 안테나로부터 동시에 처리되는 것과 동일한 효과를 갖는 방법이다.

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

** 연세대학교 건축공학과, 석사

본 논문에 대한 토의를 2002년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2001. 10. 17 / 심사종료일 : 2001. 12. 7)

ISAR는 SAR의 한 종류로 안테나가 고정되어 있고, 대상물이 회전하는 방식을 사용한다. SAR의 종류는 그림 1과 같으며 물체와 레이더간의 상대적인 위치관계에 의해서 결정된다.⁽⁷⁾

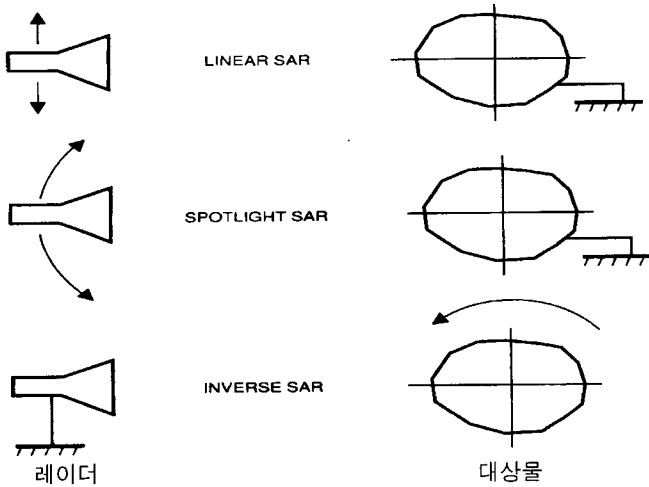


그림 1 SAR의 종류

2.2 주파수 대역폭과 중심주파수

레이더 주파수는 2~3.4GHz, 3.4~5.8GHz의 2개 대역을 사용하였고, 분해능을 높이기 위해 2~3.4GHz 대역과 3.4~5.8GHz 대역의 두 대역을 합성한 2~5.8GHz 대역으로 영상화를 실시하였다. 이들 주파수 대역에 대한 중심주파수(f_c)와 주파수 대역(B)을 표 1에 정리하였다. 각 주파수 대역에서 주파수 성분들은 0.1GHz씩 증가시키는 방식을 택하였다.

표 1 주파수 대역 비교

	중심주파수(f_c)	주파수 대역폭(B)
2~3.4GHz	2.7GHz	1.4GHz
3.4~5.8GHz	4.6GHz	2.4GHz
2~5.8GHz	3.9GHz	3.8GHz

2.3 Range resolution and cross-range resolution

대상물과 레이더와의 거리를 구하는 기본 원리는 방출파와 반사파간의 시간차이에 의해서 이루어진다. 즉, 레이더와 대상물간의 거리를 R , 전자파의 왕복시간을 τ , 파의 속도를 c 라 하면 식 (1)과 같은 관계가 성립한다.

$$R = \frac{c\tau}{2} \quad (1)$$

일정 주파수 대역의 전자파의 지속시간을 T (ns)라고 하고, 주파수 대역폭을 B (GHz)라 하면 식 (2)와 같은 관계가 성립한다.

$$T = \frac{1}{B} \quad (2)$$

Range resolution(ρ_r)은 식 (3)과 같으며, 분해능은 가까

이 인접해 있는 2개의 물체의 식별 가능한 거리로서 분해능보다 더 가까이 위치한 2개의 물체는 구별할 수 없게 된다.⁽⁸⁾

$$\rho_r = \frac{cT}{2} = \frac{c}{2B} \quad (\text{대기 중}) \quad (3)$$

콘크리트 안에서 전자파의 속도는 콘크리트의 전자기적 특성에 의해서 변하여 식 (4)와 같이 표시된다.⁽⁹⁾

$$\rho_{r, conc.} = \frac{c\sqrt{\epsilon'}}{2B} \quad (\text{콘크리트 중}) \quad (4)$$

여기서, c : 진공중 전자파의 속도($= 3 \times 10^8$ m/s)

T : 주파수대역의 전자파의 지속시간(ns)

ϵ' : 콘크리트의 유전상수

B : 주파수 대역폭(GHz)

주파수 대역폭을 늘림으로써 보다 좋은 분해능을 얻을 수 있다. 연구에서 사용한 레이더의 주파수 대역은 2~3.4GHz, 3.4~5.8GHz의 2개 대역을 사용하여 각각 실험을 실시하였고, 분해능을 높이고자 2~3.4GHz 대역과 3.4~5.8GHz 대역의 두 대역을 합성한 2~5.8GHz 대역으로 영상화를 실시하였다.

Cross-range resolution(ρ_{xr})은 전자파에 수직인 방향으로 물체를 식별가능한 거리이며 식 (5)와 같다.

$$\rho_{xr} = \frac{\lambda_c}{2(\Delta\theta_{rad})} = \frac{c/f_c}{2(\Delta\theta_{rad})} \quad (\text{대기 중}) \quad (5)$$

콘크리트 안에서 전자파의 속도는 콘크리트의 전자기적 특성에 의해서 변하여 식 (6)과 같이 표시된다.

$$\rho_{xr, conc.} = \frac{\left(\frac{c}{f_c\sqrt{\epsilon'}}\right)}{2(\Delta\theta_{rad})} \quad (\text{콘크리트 중}) \quad (6)$$

여기서, f_c : 중심주파수(GHz)

c : 진공에서의 전자파의 속도($= 3 \times 10^8$ m/s)

ϵ' : 콘크리트의 유전상수

$\Delta\theta_{rad}$: 시편의 총회전각

Range resolution을 결정하는 것은 주파수 대역폭이며, 주파수 대역폭이 넓을수록 향상된 range resolution을 얻을 수 있음을 알 수 있다. Cross-range resolution을 결정하는 것은 중심주파수와 회전각이며 중심주파수와 회전각이 클수록 향상된 cross-range resolution을 얻을 수 있다. 콘크리트 안에서는 콘크리트의 유전상수로 인해 range resolution과 cross-range resolution이 공기중에서보다 더 좋아지며, 콘크리트의 유전상수는 영상화 결과로부터 구할 수 있다. 표 2에 무근 콘크리트 시편 안에서 주파수 대역별 range resolution과 cross-range resolution을 정리하였다.

표 2 무근 콘크리트 시편 안에서 주파수 대역별 range, cross-range resolution

	Frequency bandwidth(GHz)	Center frequency(GHz)	Range resolution(m)	Cross-range resolution(m)
2~3.4GHz	1.4	2.7	0.039	0.058
3.4~5.8GHz	2.4	4.6	0.023	0.034
2~5.8GHz	3.8	3.9	0.014	0.040

2.4 콘크리트의 전자기적 특성

모든 물질은 전자기파의 전계와 자계에 영향을 주는 고유한 특성을 가지며, 일반적으로 전도율(conductivity), 복소유전율(complex permittivity), 복소투자율(complex permeability)로 나타낸다. 콘크리트는 전기전도성이 없고 자성을 띄지 않으므로 유전체(dielectric material)이며, 전도율이 거의 0이다. 그리고, 강자성체(ferromagnetic)가 아니므로 복소투자율은 진공의 투자율과 거의 같다. 따라서 유전체의 전자기적 특성은 복소유전율로 규정되며 식 (7)과 같다.⁽¹⁰⁾

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' \quad [F/6m] \quad (7)$$

여기서, ϵ' : 유전상수 (dielectric constant)

ϵ'' : 손실계수 (loss factor)

유전상수는 콘크리트 안에서 전자파의 속도를 저감시켜 영상화시 피크사이의 거리를 실제 거리보다 유전상수의 제곱근을 곱한 거리만큼 크게 하며, 유전상수와 손실계수는 콘크리트 안으로 들어간 전자파의 감쇠에 영향을 준다. 유전상수와 콘크리트 안에서의 전자파 속도와의 관계를 나타내면 식 (8)과 같다. 실험에 사용된 무근 콘크리트 시편의 경우, 유전상수로 인해 콘크리트 안에서는 전자파의 속도가 2.75 배만큼 저감되었다는 것을 알 수 있다.

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon'}} \quad (8)$$

3. 실험시편과 실험장치

3.1 콘크리트 시편

콘크리트 시편은 304.8mm(width)×304.8mm(height)×101.6mm(thickness)의 장방형으로 내부상태에 따라 무근 시편, 공동이 있는 시편, 철근이 있는 시편의 3종류이다. 시편의 재료적 구성은 물 : 시멘트 : 모래 : 골재로 되어있으며, 중량비는 1

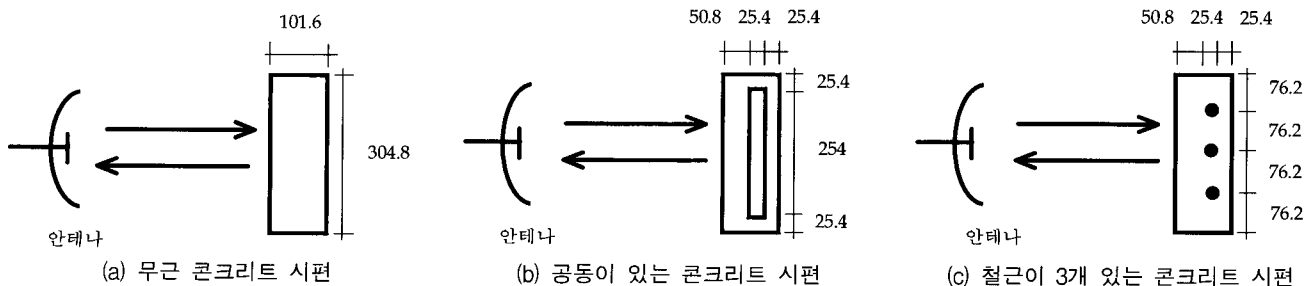


그림 2 콘크리트 시편(단위 : mm)

: 2.22 : 5.16 : 7.12 이다. 시편의 4주 압축강도는 214kgf/cm² 이고 양생된 콘크리트의 수분함량이 콘크리트의 전자기적 특성인 유전상수에 영향을 주므로 실험 전에 대기중에서 28일 이상 양생, 완전 건조시켜서 동일 조건하에서 실험을 실시하였다. 각 시편은 그림 2와 같다.

3.2 실험장치

콘크리트 시편은 anechoic chamber 안에서 스티로폼 타워 위에 올려놓고 측정을 했으며, 스티로폼 타워가 지지할 수 있는 무게를 고려하여 콘크리트 시편의 무게를 22.7kg으로 제작하였다. 안테나는 연속형 전자파를 주파수 대역에서 초기 주파수 성분에서 마지막 주파수 성분까지 0.1GHz씩 증가시키는 stepped frequency waveform(SFWF)으로 방출하였다. 콘크리트 시편은 -10°에서 +10°까지 회전시켰으며, 각도의 증가는 1°로 하여 실험하였다. 그림 3은 실험에 대한 개요도이다.

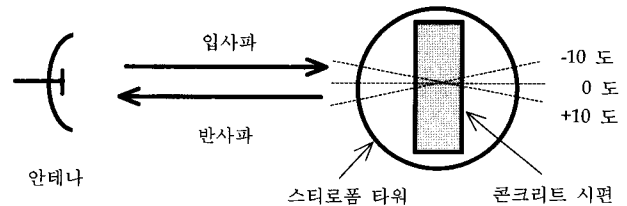


그림 3 실험장치 개요도

4. 영상화를 위한 신호처리

4.1 측정 데이터

레이더로부터 방출된 전자파는 콘크리트 시편에 반사되어 다시 레이더로 돌아오게 되며 이들 신호는 주파수성분에 대해서 진폭(amplitude)과 위상(phase)에 대한 정보를 가지고 있다. 진폭의 단위는 dB이며 위상은 degree로 표현된다. 측정된 데이터의 예를 표 3에 나타내었다.

영상화를 위해 이들 데이터를 진폭과 위상정보를 모두 표

표 3 무근 콘크리트 시편의 2~3.4GHz 대역에서의 측정 데이터

Aspect angle(degree)	Frequency (GHz)	Amplitude (dB)	Phase (degree)
-10	2	-9.56	0.81
	2.1	-12.54	-0.42
	.	.	.
.	3.4	-13.06	176.67
.	.	.	.
0	2	-0.83	-8.13
	2.1	-1.57	-7.41
	.	.	.
.	3.4	2.65	8.73
.	.	.	.
10	2	-8.34	-2.72
	2.1	-10.77	0.85
	.	.	.
.	3.4	-17.05	166.15

현해줄 수 있도록 식 (9)와 같이 복소수의 형태로 변환시켜 주었다.

$$X(k, l) = 10^{\text{amplitude}/20} \cdot \cos(\text{phase}) + j \cdot 10^{\text{amplitude}/20} \cdot \sin(\text{phase}) \quad (9)$$

여기서, X : 주파수 영역에서 측정된 데이터
 k : 주파수 성분
 l : 각도 성분
 j : $\sqrt{-1}$

4.2 1차원 영상화

1차원 영상화는 표 3과 같은 측정데이터 중에서 측정각도가 0°에 해당하는 값을 취하여 이루어지며, $X(k)$ 는 0°에서 측정된 데이터의 복소수표현이다. 레이더를 통해서 얻은 데이터는 모두 주파수 대역에 대한 값이므로 이를 거리의 개념인 range로 영상화하기 위해서는 시간영역으로의 변환이 필요하며, 연속적인 구간에 대한 값이 아니라 일정 구간에 대한 값이므로 스펙트럼 누수현상을 방지하기 위해서 window를 사용하였다. 연구에서는 식 (10)으로 표현되는 Hamming window를 사용하였고⁽¹¹⁾, 고밀도 스펙트럼을 얻기 위해 zero padding을 실시하였다.

$$w(k) = \begin{cases} (0.54 - 0.46 \cos(2\pi k/N)) & 0 \leq k \leq N \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

N 은 주파수 대역의 데이터 개수로 2~3.4GHz 대역은 15개, 3.4~5.8GHz 대역은 25개, 2~5.8GHz 대역은 39개이다. 1차원 영상화는 식 (11)과 같이 0°에서 측정된 값인 $X(k)$ 에 Hamming window를 적용한 후 1차원 역푸리에 변환(one dimensional inverse Fourier transform)을 통하여 이루어진다.⁽¹²⁾

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} w(k) X(k) e^{j(2\pi kn/N)} \quad n=0, 1, \dots, N-1 \quad (11)$$

여기서, x : 시간 영역으로 변환된 데이터
 n : range에 대한 시간 지수

4.3 2차원 영상화

2차원 영상화는 range 뿐만 아니라, cross-range에 대한 정보를 얻기 위해 표 3과 같은 -10°부터 10°까지 측정된 데이터를 이용하여 이루어진다. $X(k, l)$ 은 -10°~10°까지 측정된 데이터의 복소수표현으로, $X(k, l)$ 역시 연속적인 구간에 대한 값이 아니라 일정 구간에 대한 값이므로 스펙트럼 누수현상을 방지하기 위하여 식 (12)와 같이 표현되는 Hamming window를 사용하였고, 고밀도 스펙트럼을 얻기 위해 zero padding을 실시하였다.

$$w(k, l) = \begin{cases} (0.54 - 0.46 \cos(2\pi k/N)) \cdot (0.54 - 0.46 \cos(2\pi l/M)) & 0 \leq k \leq N, 0 \leq l \leq M \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

N 은 주파수 대역의 데이터 개수이고 M 은 각도의 데이터의 개수로 -10°부터 10°까지 21개이다. 2차원 영상화는 식 (13)과 같이 $X(k, l)$ 에 식 (12)의 Hamming window를 적용한 후 2차원 역푸리에 변환(two dimensional inverse Fourier transform)을 통하여 이루어진다.

$$x(m, n) = \frac{1}{MN} \sum_{l=0}^{M-1} \sum_{k=0}^{N-1} w(k, l) \cdot X(k, l) e^{j(2\pi ml/M)} e^{j(2\pi kn/N)} \quad n=0, 1, 2, \dots, N-1 \quad m=0, 1, 2, \dots, M-1 \quad (13)$$

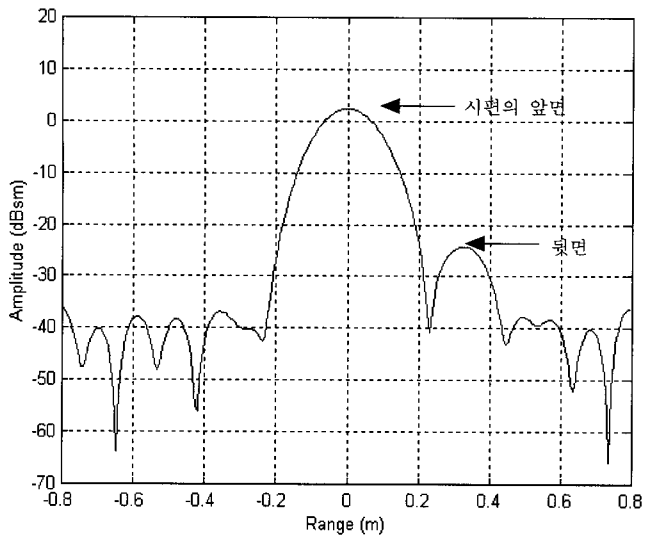
여기서, x : 시간 영역으로 변환된 데이터
 n : range에 대한 시간 지수
 m : cross-range에 대한 시간 지수

5. 주파수 대역 합성

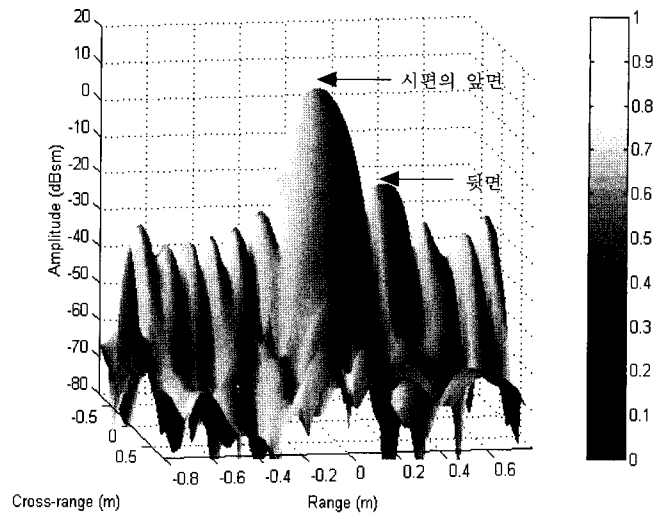
5.1 주파수 대역 합성에 따른 영상화

콘크리트 시편의 2~3.4GHz, 3.4~5.8GHz 대역에서의 영상화는 측정된 데이터를 가지고 직접 실시하였고, 2~5.8GHz 대역에서의 영상화는 주파수 합성을 통해 이루어졌다. 2~3.4GHz와 3.4~5.8GHz의 주파수 대역의 합성은 3.4GHz를 기준으로 하여 두 대역의 phase 차를 구했다. 그리고, 각 주파수별로 phase 보정을 한 후 합성하였다. 이런 방법으로 합성된 데이터를 신호처리하여 2~5.8GHz 대역의 영상화를 얻을 수 있었다.

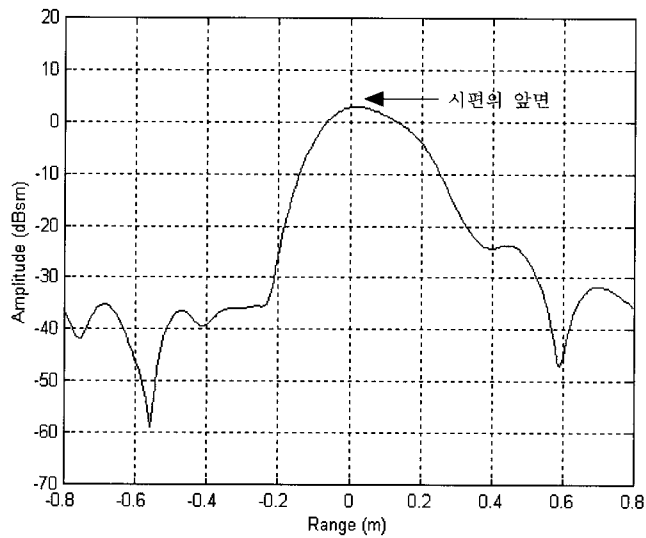
영상화 결과를 보면 이들은 모두 range와 진폭에 대해서



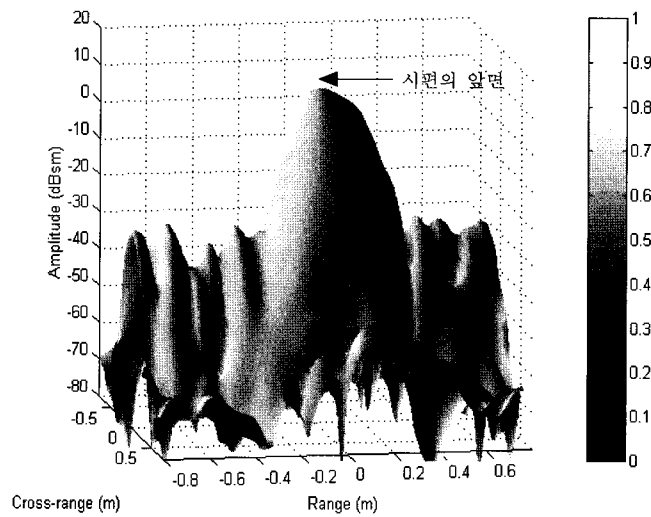
(a) 무근 콘크리트 시편의 1차원 영상화



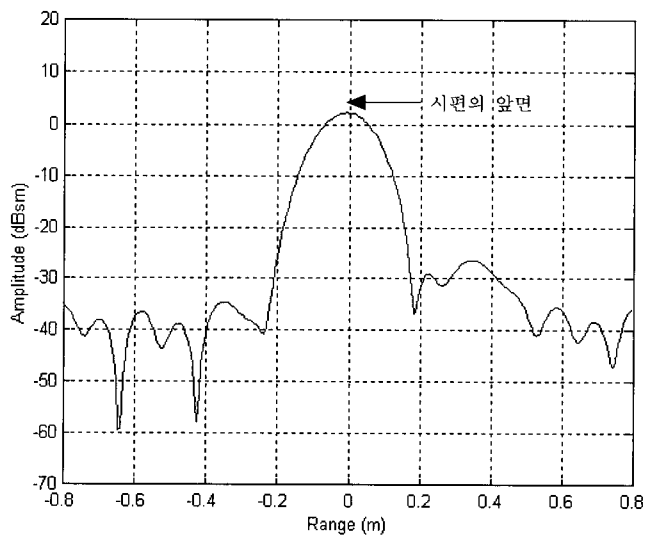
(b) 무근 콘크리트 시편의 2차원 영상화



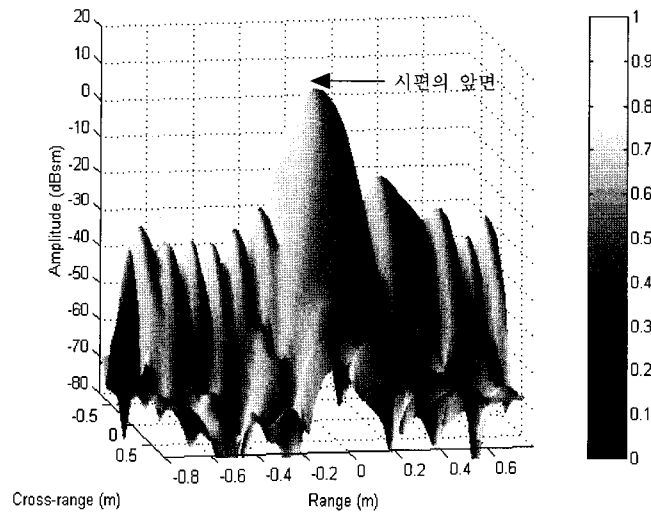
(c) 공동이 있는 콘크리트 시편의 1차원 영상화



(d) 공동이 있는 콘크리트 시편의 2차원 영상화

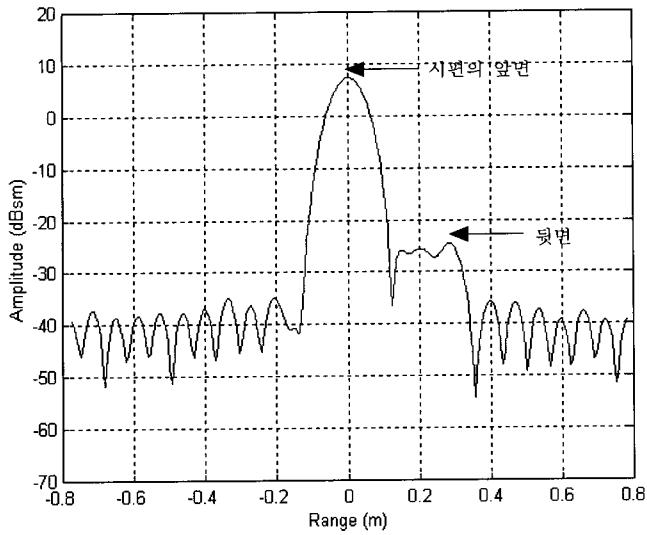


(e) 철근이 3개 있는 콘크리트 시편의 1차원 영상화

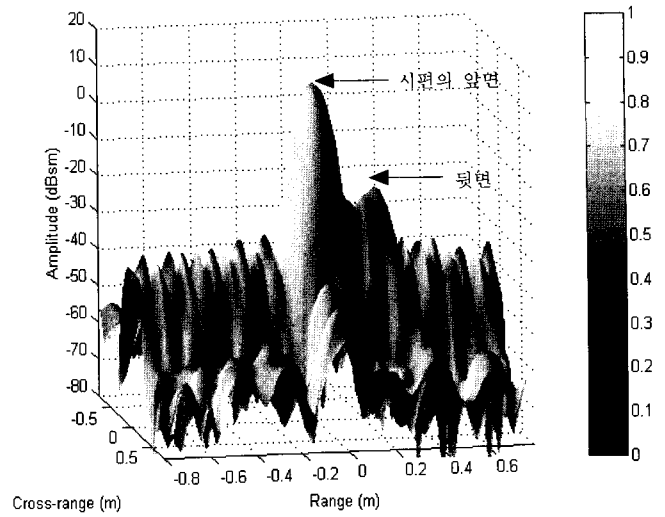


(f) 철근이 3개 있는 콘크리트 시편의 2차원 영상화

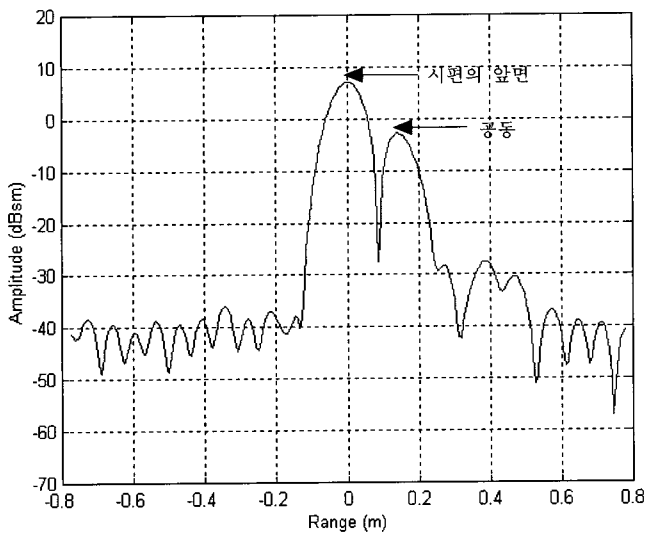
그림 4 2~3.4GHz 대역의 영상화 결과



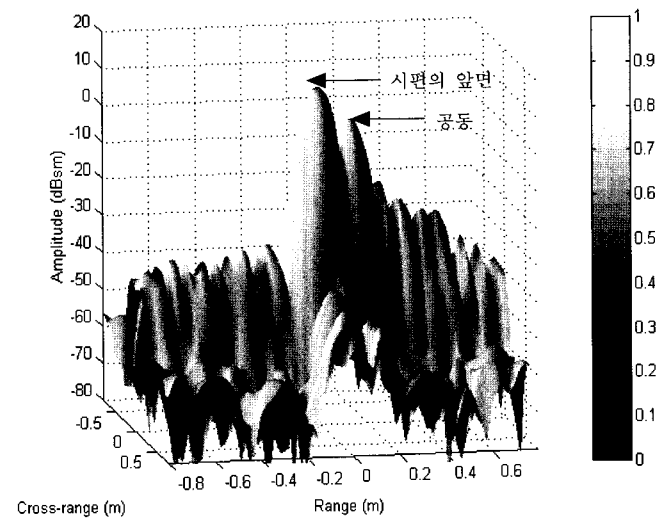
(a) 무근 콘크리트 시편의 1차원 영상화



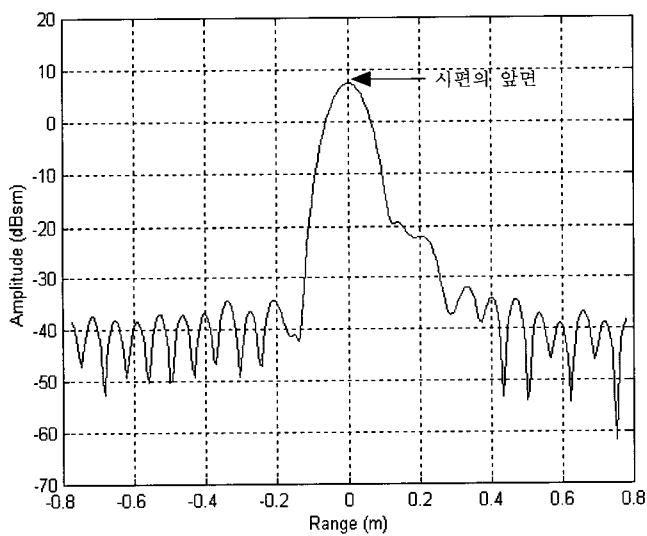
(b) 무근 콘크리트 시편의 2차원 영상화



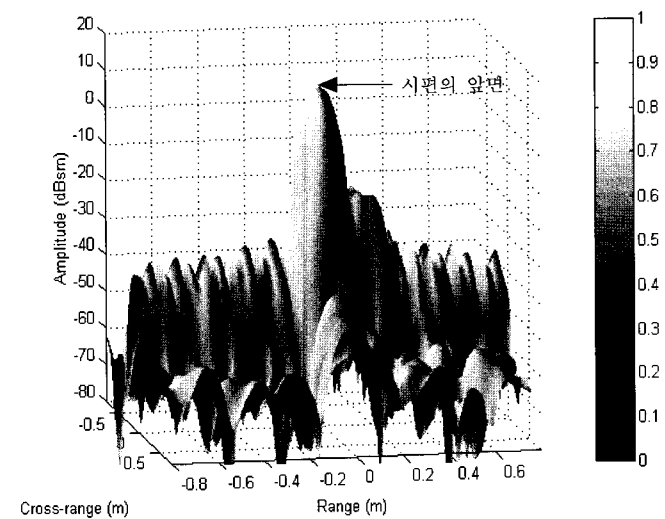
(c) 공동이 있는 콘크리트 시편의 1차원 영상화



(d) 공동이 있는 콘크리트 시편의 2차원 영상화

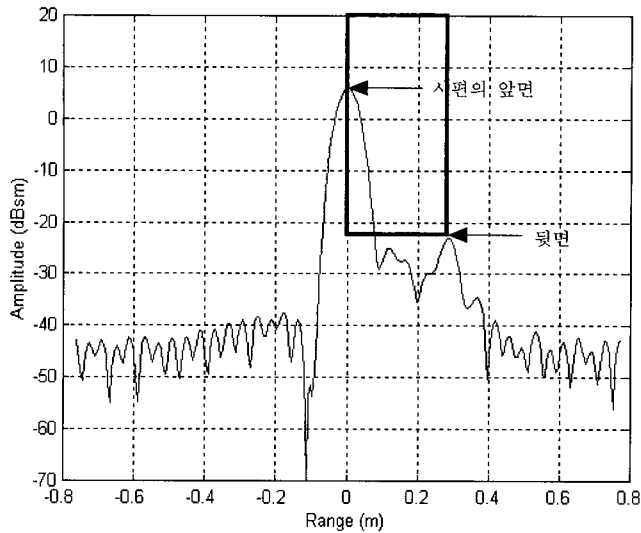


(e) 철근이 3개 있는 콘크리트 시편의 1차원 영상화

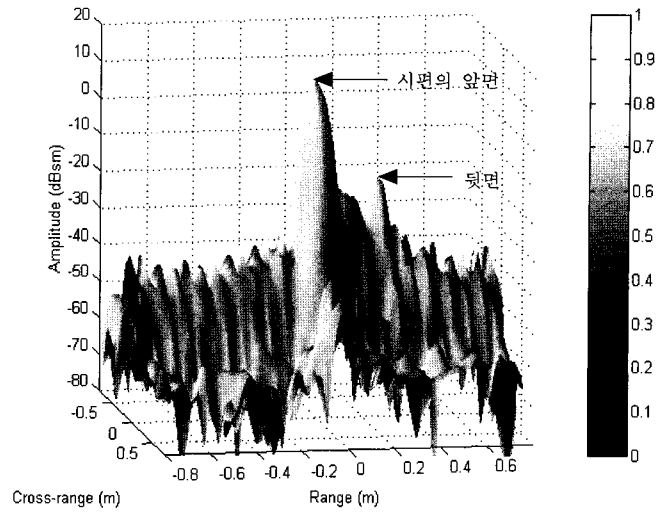


(f) 철근이 3개 있는 콘크리트 시편의 2차원 영상화

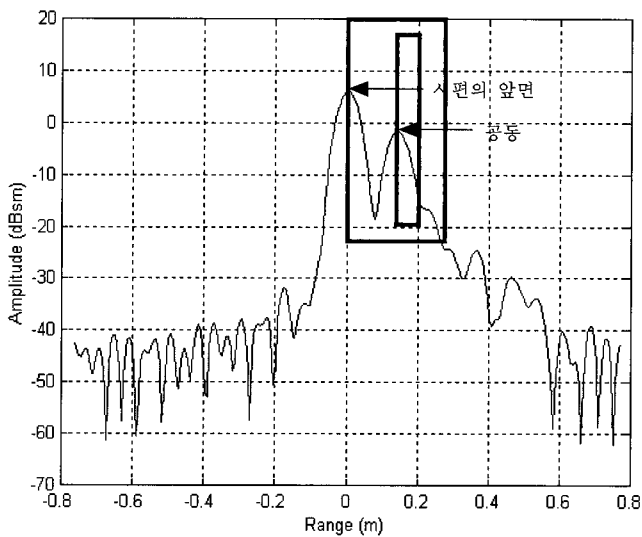
그림 5 3.4~5.8GHz 대역의 영상화 결과



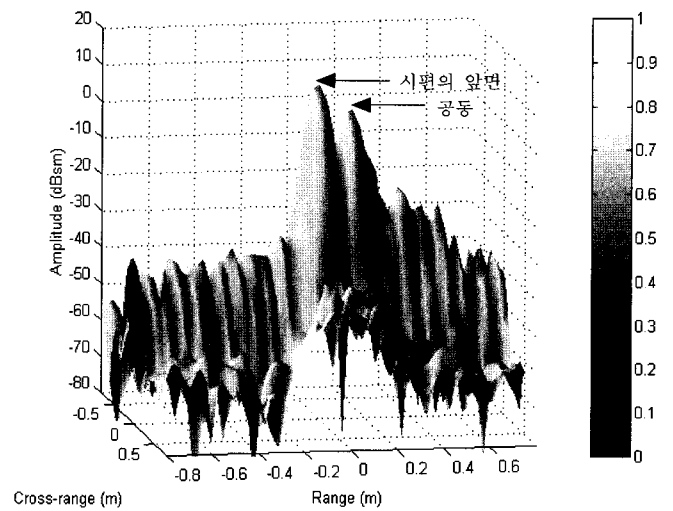
(a) 무근 콘크리트 시편의 1차원 영상화



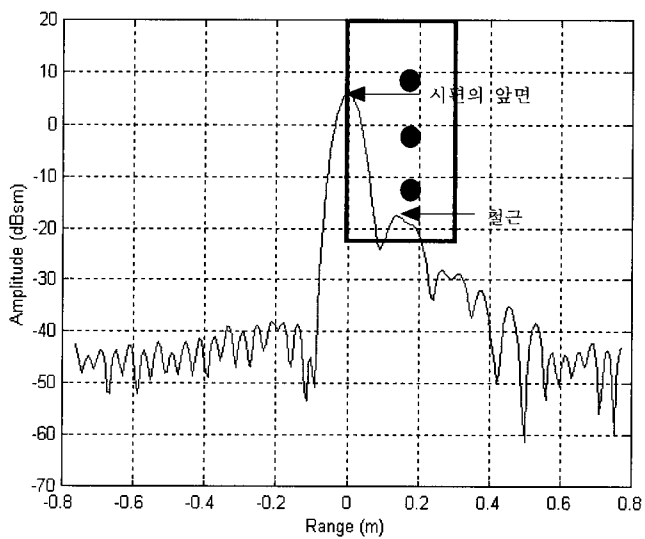
(b) 무근 콘크리트 시편의 2차원 영상화



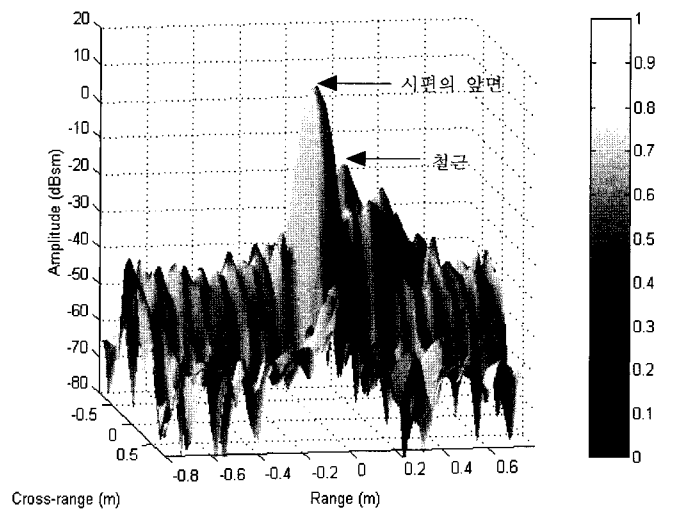
(c) 공동이 있는 콘크리트 시편의 1차원 영상화



(d) 공동이 있는 콘크리트 시편의 2차원 영상화



(e) 철근이 3개 있는 콘크리트 시편의 1차원 영상화



(f) 철근이 3개 있는 콘크리트 시편의 2차원 영상화

그림 6 콘크리트 시편의 모양과 함께 나타낸 2~5.8GHz 대역의 영상화 결과

나타내었으며 무근 콘크리트 시편의 경우 range값이 0 인 지점의 피크는 콘크리트의 앞면에서 전자파가 반사되어 돌아온 것을 의미하며 두 번째 피크는 콘크리트 시편 속으로 투과된 전자파가 시편의 뒷면에서 반사된 것을 의미한다. 따라서 이들 두 개의 피크에 대한 range값을 통해서 콘크리트 시편의 두께를 확인할 수 있다. 공동이 있는 콘크리트 시편의 경우 range값이 0 인 곳의 피크는 콘크리트 시편의 앞면을 나타내며 두 번째 피크는 공동을 나타낸다. 철근이 있는 콘크리트 시편의 경우 역시 range값이 0 인 곳의 피크는 시편의 앞면을 나타내고 두 번째 피크는 철근을 나타낸다.

2~3.4GHz 대역의 영상화 결과를 보면 그림 4(a), (b)의 무근 콘크리트 시편의 경우 시편의 뒷표면을 볼 수 있으나, 그림 4(c), (d)의 공동이 있는 콘크리트 시편과 그림 4(e), (f)의 철근이 있는 콘크리트 시편의 경우 공동과 철근을 탐지하지 못함을 알 수 있다. 3.4~5.8GHz 대역의 영상화 결과를 보면 그림 5(a), (b)의 무근 콘크리트 시편의 경우 시편의 뒷표면을 탐지할 수 있었다. 그림 5(c), (d)의 공동이 있는 콘크리트 시편의 경우 공동은 탐지가 됨을 알 수 있으나, 그림 5(e), (f)의 철근이 있는 콘크리트 시편의 경우에는 철근을 탐지할 수 없음을 알 수 있다. 분해능을 높이고자 주파수 대역을 합성한 2~5.8GHz 대역의 영상화 결과를 보면 그림 6(a), (b)의 무근 콘크리트 시편의 경우 뒷면, 그림 6(c), (d)의 공동이 있는 콘크리트 시편의 경우 공동과 그림 6(e), (f)의 철근이 있는 콘크리트 시편의 경우 철근이 모두 확인이 됨을 알 수 있다.

5.2 주파수 대역 변화에 따른 영상화

무근 콘크리트 시편의 영상화 결과를 보면, 두 피크사이의 거리는 2~3.4GHz에서 0.33m이고 3.4~5.8GHz 대역에서는 0.28m이다. 주파수 대역을 합성한 후 주파수 대역을 변화시켜 가며 두 피크 사이의 거리를 구해보았다. 동일한 시편에서 두 피크 사이의 거리가 주파수 대역에 따라 다른 것은 주파수 대역이 커짐에 따라서 ISAR의 resolution이 좋아지기 때문이다. 즉, 주파수 증분(Δf)이 일정한 경우 주파수 대역폭(B)이 커지면 더 많은 데이터를 얻을 수 있고, 이것으로 신호처리를 하면 영상화 결과가 향상된다는 것을 의미한다. 콘크리트 시편의 유전상수는 식 (13)을 이용하여 영상화 결과로부터 구할 수 있으며, 주파수 대역폭이 3.9GHz 일 때 식 (13)을 이용하여 무근 콘크리트 시편의 유전상수를 구하면 7.56이 됨을 알 수 있다. 주파수 대역을 합성한 후 주파수 대역폭을 변화시키며 무근 콘크리트 시편의 뒷표면의 위치를 구한 결과가 표 4에 나타나 있으며, 그림 7에 뒷표면 위치의 오차변화를 나타내었다.

$$s_1 = \sqrt{\epsilon'} \times s_2 \quad (13)$$

여기서, s_1 : 두 피크 사이의 거리

s_2 : 시편의 두께(=0.1016m)

표 4 주파수 대역에 따른 무근 콘크리트 시편의 뒷표면 위치변화

주파수 대역 (GHz)	데이터 갯수	Range resolution (m)	두 피크 사이의 거리 (m)
3.7~4.1	5	0.375	-
3.6~4.2	7	0.25	0.75
3.5~4.3	9	0.1875	0.53
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
2.2~5.6	35	0.0441	0.24
2.1~5.7	37	0.0417	0.28
2.0~5.8	39	0.0395	0.275

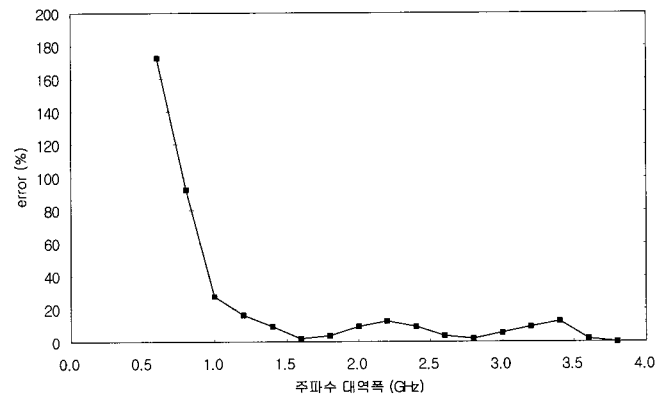


그림 7 주파수 대역폭에 따른 무근 콘크리트 시편의 뒷표면 위치의 오차변화

그림 7에서 무근 콘크리트 시편의 뒷표면 위치의 기복 (fluctuation)이 생기는 것은 신호처리시 시편의 뒷표면이 나타나는 bin이 바뀌기 때문이다.

6. 결 론

ISAR를 이용하여 콘크리트 시편의 비파괴 실험을 실시한 결과는 다음과 같다.

- (1) 무근 콘크리트 시편의 경우, 2~3.4GHz 대역, 3.4~5.8GHz 대역, 주파수 대역을 합성하여 분해능을 높인 2~5.8GHz 대역 모두에서 시편의 뒷표면의 위치를 찾을 수 있었다.
- (2) 공동이 있는 콘크리트 시편의 경우, 2~3.4GHz 대역에서는 공동을 찾지 못했으나, 이보다 분해능이 좋은 3.4~5.8GHz 대역과 주파수 대역을 합성한 2~5.8GHz 대역에서는 공동을 찾을 수 있었다.
- (3) 철근이 있는 콘크리트 시편의 경우, 2~3.4GHz 대역과 3.4~5.8GHz 대역에서는 철근을 찾지 못했으나, 주파수 대역을 합성하여 이 두 대역보다 좋은 분해능을 갖는 2~5.8GHz 대역에서는 철근을 찾을 수 있었다.
- (4) 2~5.8GHz 대역은 ISAR를 이용한 콘크리트의 비파괴 검사에 필요한 적절한 투과 능력과 분해능을 가짐을 확인하였다.

(5) 역푸리에 변환과 window를 이용한 신호처리방법을 레이다의 신호처리에 적용, 영상화하였다.

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

- B : 주파수 대역(GHz)
- c : 진공중 전자파의 속도($=3 \times 10^8$ m/s)
- f_c : 중심주파수(GHz)
- ϵ' : 유전상수(dielectric constant)
- ϵ'' : 손실계수(loss factor)
- ρ_r : 공기중에서의 range resolution
- $\rho_{r, conc.}$: 콘크리트 안에서의 range resolution
- ρ_{xr} : 공기중에서의 cross-range resolution
- $\rho_{xr, conc.}$: 콘크리트 안에서의 cross-range resolution

참고 문헌

1. 임홍철, 이지훈, 손병오, "레이더를 이용한 콘크리트의 두께 측정과 유효 측정 범위 설정에 관한 연구", 한국비파괴검사학회지, Vol. 20, No. 4, 2000, pp. 296-304.
2. 임홍철, 김우석, "레이더를 이용한 콘크리트 시편 내 수평

- 배근 간격 탐사", 한국지진공학회 논문집, Vol. 4, No. 2, 2000, pp. 65-71.
3. Steinberg, B. D., "Microwave imaging of aircraft," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 76, No. 12, 1988, pp. 1578-1592.
4. Joaquim, F. and Alois, J. S., "Three-dimensional synthetic aperture radar imaging of a fir tree : first results," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 37, No. 2, 1999, pp. 1006-1014.
5. Dube, F. N. and Devlin, J. C., "High resolution ISAR radar for nondestructive testing," *IEEE Africon 4th*, Vol. 2, 1996, pp. 897-902.
6. Rhim, H. C. and Buyukozturk, O., "Wideband microwave imaging of concrete for nondestructive testing," *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 126, No. 12, 2000, pp. 1451-1457.
7. Mensa, D. L., "High resolution radar cross-section imaging," Artech House, Inc., 1995.
8. Scheer, J. A. and Kurz, J. L., "Coherent radar performance estimation," Artech House, Inc., 1993.
9. Cheng, D. K., *Field and Wave Electromagnetics*, Addison-Wesley, Inc., 1989.
10. Pozar, D. M., *Microwave Engineering*, Addison-Wesley, Inc., 1990.
11. Harris, F. J., "On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 66, No. 1, 1978, pp. 51-83.
12. Oppenheim, A. V., *Signals & Systems*, Prentice Hall, 1991.