

論文98-35D-11-1

단일 주파수 시간조화 신호를 사용한 손실 매질내에 있는 high-contrast 원기둥 공동의 cross-borehole incoherent 단면영상법

(Cross-Borehole Incoherent Tomography for
High-Contrast Cylindrical Cavity in Lossy Medium by
Using Single-Frequency Time-Harmonic Signal)

康 辰 燮 *

(Jin Seob Kang)

요 약

본 논문에서는 cross-borehole 측정구조에서 단일 주파수 시간조화 원주파가 손실 매질내에 있는 high-contrast 원기둥 공동에 입사되었을 때 순방향에서 얻은 총전계 전력 패턴들을 역투시하여 원기둥 공동의 incoherent 영상을 얻었다. 서로 다른 전파경로를 가진 입사파와 산란파의 중첩에 의해 전력 패턴에 나타나는 간섭무늬들이 역투시 과정에서 제거되는 현상은 수치계산으로 설명되었다. 비유전율이 9이고 도전율이 0.0005, 0.002 S/m인 손실 매질내에 있는 공기로 채워진 원기둥 공동의 영상재현으로 이 영상재현법의 타당성을 보였으며, 보다 좋은 영상을 얻기 위한 조건들을 조사했다.

Abstract

In this paper, an incoherent imaging of a high-contrast cylindrical cavity in a lossy medium illuminated by the time-harmonic cylindrical wave is obtained via the backprojections of the intensity patterns of the forward total electric field in the cross-borehole measurement configuration. The phenomenon that the interference fringes in the intensity pattern, which are caused by the superposition of the incident field and the scattered field with different optical paths, are removed in the backprojection process is interpreted numerically. This imaging method is validated by imaging an air circular cylinder in a lossy medium of $\epsilon_r = 9$ and $\sigma = 0.0005, 0.002$ S/m, and the conditions for obtaining better images are investigated.

I. 서 론

전자파 역산란이란 전자파를 미지의 산란체에 입사

* 正會員, 韓國標準科學研究院 電磁氣研究部 電磁波研究室

(Korea Research Institute of Standards and Science
Division of Electromagnetic Metrology Electromagnetics Lab.)

接受日字:1998年7月20日, 수정완료일:1998年10月21日

시켜 산란 전자파로부터 산란체의 물리적 특성인 모양, 크기 및 유전율 분포 등을 알아내는 것이다. 전자파의 전파 및 산란특성이 산란체와 배경매질의 물리적 성질에 따라 크게 다르므로, 역산란체의 물리적 환경에 따라 효과적인 역산란법을 생각할 수 있다. 본 논문에서는 지표면으로부터 수 m 이상 깊이에 있으며 크기가 수 m 이상이고 배경매질과 유전율 차가 큰 (high-contrast) 원기둥 공동의 전자파 역산란법을 제안하려 한다. 천연동굴과 같은 지하공동의 탐사는 댐이나 원

자력 발전소의 지하구조물 및 핵폐기물이나 산업폐기물 등을 위한 지하저장소 건설 예정지역의 지반검사에 필수적이다^[1].

전자파를 이용한 지표면탐사법^[2,3]은 땅의 전송손실 때문에 지표면으로부터 수 m 내에 얇게 묻혀진 산란체에만 적용이 가능하다. 따라서 지하 깊은 곳에 위치한 유전체 공동을 탐지하기 위해서는 송수신기가 움직일 수 있는 시추공(borehole)을 공동이 위치한 깊이까지 뚫고, 시추공 내에서 송수신기를 움직이며 공동을 탐지하는 것이 바람직하다. 송수신기를 같은 시추공에 넣고 공동에 의한 반사파를 측정하는 것보다는 공동 양쪽에 위치한 두 시추공에 송수신기를 각각 넣고 매질을 지나온 투과파를 측정하는 (cross-borehole 측정) 것이 수신신호의 크기도 크고 송수신기사이의 원하지 않는 직접결합을 최소화할 수 있으므로, 본 논문에서는 cross-borehole 측정구조에서 high-contrast 공동영상법을 고려하였다.

기존의 지하공동 역산란법으로는, 우선 파동이 매질과 산란체에서 직진한다는 가정하에서 의용진단에서 사용되는 computer aided tomography^[4]를 지하공동 탐사에 응용한 computerized geophysical tomography^[5]가 있다. High-contrast 공동의 경계면에서는 파동이 직진하지 않고 회절이나 굴절하므로, 이 방법은 high-contrast 산란체 탐사에 적합하지 않다.

일반적으로 산란파는 산란체의 유전율 분포가 주어지면, 산란체와 배경매질의 비유전율 차와 총전계 곱으로 표시되는 변위전류에 자유공간 Green 함수를 곱한 후 산란체 영역에서 체적적분하여 얻을 수 있다. 기지의 외부전계로부터 산란체의 유전율 분포를 구하기 위해서는 이 비선형 적분방정식을 풀어야 한다. 비선형 적분방정식을 선형방정식으로 근사시켜 물체의 비유전율을 구하는 방법으로 산란체내의 산란파 크기가 입사파의 것에 비해 작다고 가정하여 산란체 내부 총전계를 입사파로 근사하는 Born 근사와 내부 위상변화를 입사파의 것으로 근사하는 Rytov 근사가 있다^[6,7]. 이 방법은 산란체 내부 총전계를 입사파로 근사했기 때문에 Born 근사조건^[6]을 만족하는 작은 산란체나 low-contrast 산란체의 경우에만 적용이 가능하다. 최근 산란파를 역푸리에 변환하여 얻은 투영함수 길이를 다중 주파수를 사용하여 측정된 물체의 크기로 보정함으로써 기존의 Born 근사 한계를 약 10배 정도 확장시킨 개선된 Born 역산란법^[8]이 개발

되었으나, 아직 high-contrast 산란체의 영상재현에는 성공적인 결과를 보이지 못하고 있다.

파수 및 각 스펙트럼 영역에서 비선형 적분방정식에 모멘트법의 역과정을 적용하여 산란체의 유전율 분포를 알아내는 역전원 역산란법^[9,10]이 있다. 이 방법에서는 측정 위치, 소영역 크기 및 위치 등이 분리되어 표현되므로 미소한 측정잡음에 의해서도 재구성된 유전율 분포에 많은 오차가 발생하는 역산란의 근본적인 문제인 ill-posedness에 대한 원인은 규명했으나, 이 문제점을 완전히 해결하지는 못하였다.

모멘트법을 이용하는 다른 방법으로 산란체의 초기 유전율 분포를 가정하고, 가정된 유전율 분포로부터 계산된 산란파와 측정된 산란파의 rms 오차(cost 함수)가 최소가 되는 유전율 분포를 찾아가는 반복기법^[11,12]이 있다. 그러나 이 방법은 역전원 역산란법에 비해 ill-posedness는 다소 극복했지만, high-contrast 산란체나 큰 산란체 경우에는 반복계산할 때 cost 함수에 local minima가 생기기 때문에 계산결과가 원래 유전율 분포로 수렴하는데는 한계가 있다^[12].

한편 Born 근사하에서 유한차분시간영역법(Finite-difference time-domain method)을 이용하여 시간영역 산란파를 계산한 후, 푸리에 변환하여 주파수 영역 산란파를 얻어 반복계산으로 산란체 유전율 분포를 찾는 영상법이 소개되었다^[13]. 이 영상법은 Born 근사 및 반복계산기법을 사용하므로 high-contrast 산란체 역산란에는 적합하지 않다.

High-contrast 지하공동 탐사에 적합한 방법으로 산란체의 특별한 산란특성을 이용한 탐사법^[1,14]이 있다. 이 방법에서는 cross-borehole 측정구조에서 송수신기를 일정한 간격으로 동시에 같이 위로 올리면서 매 위치마다 주파수를 바꾸면서 공동에 의해 산란된 총전계를 측정한다. 이 방법은 매질내에서 공동의 단면 크기에 비해 긴 파장을 가지는 입사파가 공동에 입사되면 순방향(forward direction)에서 수신된 총전계 크기 패턴에 공동중심에 비교적 약한 single dip이 나타나고, 파장이 짧아져 공동크기와 파장이 비슷해지면 공동의 위쪽과 아래쪽 경계 부근에 30 dB 이상 떨어지는 강한 double dip이 발생하다가, 파장이 더욱 짧아지면 double dip 패턴이 사라지는 일종의 공진현상을 이용한다. 이 방법에서는 한번의 평행(parallel)측정과 두번의 경사(offset)측정으로부터 얻은 총전계의 double dip 패턴을 이용하여 복잡한 신호처리 과정을 거

치지 않고 공동위치와 크기를 쉽게 예측할 수 있으나, 공동 영상을 제시하지는 못한다.

한편 다중 주파수 시간조화 신호를 사용한 도체^[15] 및 high-contrast 공동^[16] 영상법이 소개되었다. 시간조화 전자파가 산란체에 입사되면, 순방향에서 얻은 전계 전력 패턴에는 서로 다른 전파경로를 가진 입사파와 산란파에 의해 간섭무늬가 나타난다. lit 영역에서 전계 전력은 입사파 전력을 중심으로 진동하지만 shadow 영역에서는 입사파 전력에 비해 작은 값을 중심으로 lit 영역에 비해 작은 진폭으로 진동한다. 이들 간섭무늬의 주기는 주파수에 의해 결정되므로, 주파수를 바꾸어 가며 각 주파수에서 얻은 전계 전력 패턴들을 평균하면 주기가 다른 간섭무늬들이 서로 상쇄되어 진동 폭이 감소하게 되며, 만약 충분히 넓은 주파수 대역 폭을 사용하면 간섭무늬를 완전히 제거할 수 있다. 따라서 다중 주파수를 사용하여 얻은 주파수 평균 전계 전력 패턴에는 lit 영역에서는 평균 전계 전력이 입사파 전력과 비슷하고 shadow 영역에서는 입사파 전력에 비해 작은 값을 가지는 간섭무늬가 제거된 incoherent shadow 전계 전력 패턴이 나타난다. 이들 영상법에서는 원형회전^[15] 및 cross-borehole^[16] 측정구조에서 여러 입사각에 대해 다중 주파수를 사용하여 얻은 incoherent shadow 전계 전력 패턴들을 영상재현 영역에 역투시하여 2차원 산란체의 incoherent 영상을 재현했다.

최근에는 원형회전 측정구조에서 단일 주파수 시간조화 평면파가 무손실 매질내에 있는 도체기둥에 입사되었을 때 순방향에서 얻은 간섭무늬를 가진 총전계 전력 패턴을 영상재현 영역에 단지 역투시하여 간섭무늬가 제거된 도체기둥의 incoherent 영상을 얻는 효과적인 방법^[17]이 소개되었다. 본 논문에서는 단일 주파수를 사용한 도체기둥 incoherent 영상법을 cross-borehole 측정구조에서 손실 매질내에 있는 high-contrast 원기둥 공동 영상재현에 적용했다. 실제 상황에서는 점전원(dipole source)이 사용되는데, 점전원에 대한 원기둥 공동의 산란이 벡터 산란문제이고 산란해가 무한적분으로 표현되므로 산란해를 계산하기 위해서는 많은 계산시간이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 실제 상황을 2차원 스칼라 산란문제로 단순화시켜, 원기둥 공동에 전계 선전류에 의해 복사된 원주파가 입사된 경우를 고려했다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서는 영상재

현 자료로 사용되는 순방향에서 얻은 총전계 전력 패턴의 물리변수(주파수, 전원 및 측정점의 위치, 매질 도전을 등)에 대한 의존성을 설명했다. III 장에서는 cross-borehole 측정구조에서 영상재현 원리 및 과정을 간략히 설명했다. IV 장에서는 손실 매질내에 있는 공기로 채워진 원기둥 공동의 영상재현으로 이 영상법의 타당성을 보였으며, 좋은 영상을 얻기 위한 조건들을 조사했다. 그리고 V 장에서 결론을 맺었다.

II. 순방향 전계 전력 패턴의 특징

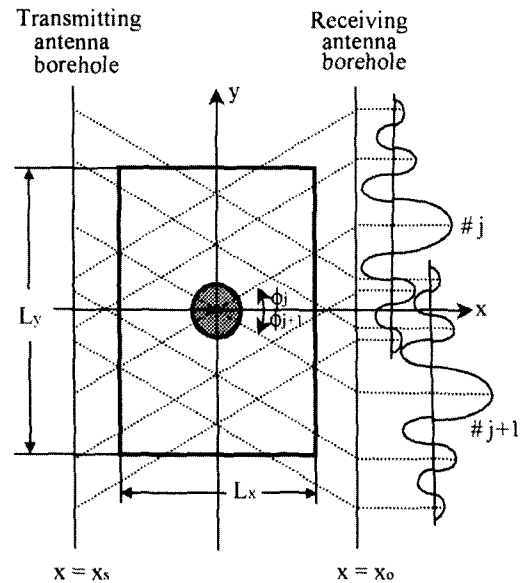
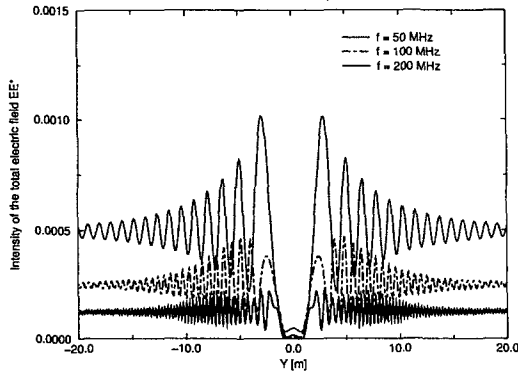


그림 1. Cross-borehole 측정구조에서 손실 매질내에 있는 high-contrast 원기둥 공동에 의해 산란된 순방향 총전계 전력 패턴들의 역투시.

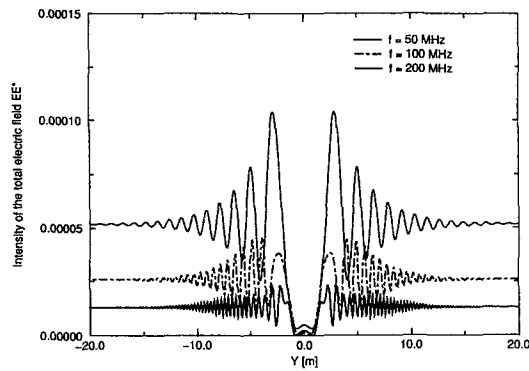
Fig. 1. Backprojection of the intensity patterns of the forward total electric field scattered from a high-contrast cylindrical cavity in a lossy medium in the cross-borehole measurement configuration.

그림 1과 같은 cross-borehole 측정구조에서 비유전율이 9이고 도전율이 0.0005 S/m인 손실 매질내에서 원점에 중심이 있는 반지름이 1 m이고 공기로 채워진 high-contrast 원기둥 공동에 $x_s = -6$ m에 위치한 제2종 0차 Hankel 함수로 표현된 전계 선전류로부터 복사된 시간조화 원주파가 입사됐을 때, $x_o = 6$ m에 있는 측정점을 전원과 y 방향에 대해 같은 높이($\phi = 0^\circ$)로 동시에 같이 움직이며(평행측정) 해석적

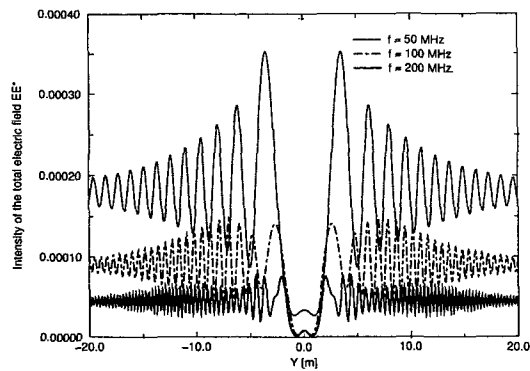
인 해를 사용해 총전계 전력 EE^* 를 계산했다. Lit 영역에서 전계 전력은 입사파 전력을 중심으로 진동하며 원기둥 경계로부터 멀어질수록 진동 폭과 주기가 서서히 감소하나, shadow 영역에서는 lit 영역에 비해 상대적으로 진동 폭이 작은 간섭무늬가 전계 전력 0 부근에 나타난다(그림 2(a)).



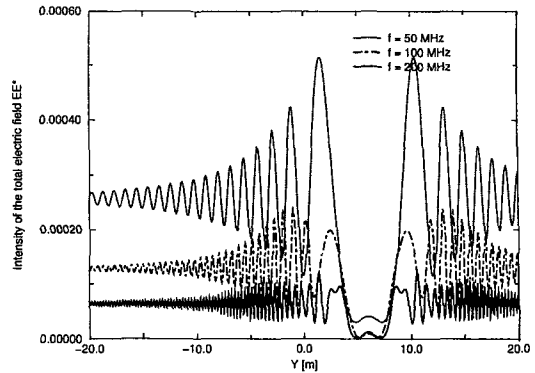
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 2. (a) Cross-borehole 측정구조에서 $x_s = -6$ m, $x_o = 6$ m, $\phi = 0^\circ$ 일 때 50, 100, 200 MHz 에서 계산된 비유전율이 9이고 도전율이 0.0005 S/m인 손실 매질내에 있는 반지름이 1 m이고 공기로 채워진 원기둥 공동의 총전계 전력 패턴. (b) $x_s = -6$ m, $x_o = 6$ m, $\phi = 0^\circ$ 일 때 계산된 도전율이 0.002 S/m인 손실 매질내에 있는 원기둥 공동의 총전계 전력 패턴. (c) $x_s = -10$ m, $x_o = 10$ m, $\phi = 0^\circ$ 일 때 계산된 도전율이 0.0005 S/m인 손실 매질 내에 있는 원기둥 공동의 총전계 전력 패턴. (d) $x_s = -6$ m, $x_o = 6$ m, $\phi = 45^\circ$ 일 때 계산된 도전율이 0.0005 S/m인 손실 매질내에 있는 원기둥 공동의 총전계 전력 패턴

Fig. 2. (a) Intensity patterns of the total electric field scattered from an air circular cylinder of 1 m radius in a lossy medium of $\epsilon_r = 9$ and $\sigma = 0.0005$ S/m calculated at frequencies of 50, 100, and 200 MHz for $x_s = -6$ m, $x_o = 6$ m, and $\phi = 0^\circ$ in the cross-borehole measurement configuration. (b) Intensity patterns scattered from the air circular cylinder in a lossy medium of $\sigma = 0.002$ S/m calculated for $x_s = -6$ m, $x_o = 6$ m, and $\phi = 0^\circ$. (c) Intensity patterns scattered from the air circular cylinder in a lossy medium of $\sigma = 0.0005$ S/m calculated for $x_s = -10$ m, $x_o = 10$ m, and $\phi = 0^\circ$. (d) Intensity patterns scattered from the air circular cylinder in a lossy medium of $\sigma = 0.0005$ S/m calculated for $x_s = -6$ m, $x_o = 6$ m, and $\phi = 45^\circ$.

주파수가 증가하면, 간섭무늬 주기가 감소하여 간섭무늬가 원기둥 경계쪽으로 이동하며 shadow 영역 폭이 감소한다. 그리고 주파수가 증가하면 Hankel 함수의

argument 크기 및 전파 손실 증가로 인해 입사파 전력이 감소하여 두 영역에서 평균 전계 전력 값 및 간섭무늬 진동 폭이 감소한다.

매질 손실이 증가하면 전파 손실 증가로 인해 입사파 전력이 감소하여 lit 및 shadow 영역에서 평균 전계 전력 값 및 간섭무늬 진동 폭이 더욱 많이 감소하고 간섭무늬가 공동부근에만 존재한다(그림 2(b)). 간섭무늬 주기 및 shadow 영역 폭은 매질 손실이 증가하더라도 거의 변하지 않는다. 한편 전원과 측정점이 공동으로부터 멀어지면 입사파 전력의 감소로 두 영역에서 평균 전계 전력 값 및 간섭무늬 진동 폭이 감소하며 간섭무늬 주기 및 shadow 영역 폭이 증가한다(그림 2(c)). 경사측정에서 입사각 ϕ 가 증가하면 전원과 측정점이 공동으로부터 멀어질 때와 같은 효과가 나타난다(그림 2(d)).

III. 영상재현 원리

Cross-borehole 측정구조에서 입사각 ϕ 을 변화시키며 평행 및 경사측정에서 얻은 간섭무늬를 가진 전계 전력 패턴들을 영상재현 영역에 역투시하여 간섭무늬가 제거된 산란체의 incoherent 영상을 얻을 수 있는 것은, 그림 1에서와 같이 한 입사각 ϕ 에 대해 얻은 간섭무늬를 가진 전계 전력 패턴 $\#j$ 를 역투시한 후 다른 입사각 ϕ_{j+1} 에 대해 얻은 전계 전력 패턴 $\#j+1$ 를 역투시하면 주기가 다른 간섭무늬들이 서로 중첩되어 상쇄 제거되기 때문이다. 따라서 보다 많은 입사각에 대해 얻은 전계 전력 패턴들을 역투시하면 간섭무늬가 충분히 제거된 incoherent 영상을 얻을 수 있다.

영상재현과정을 간략히 설명하면 다음과 같다(그림 1).

- 1) 우선 산란 영역중에서 크기가 $L_x \times L_y$ 인 사각형의 영상재현 영역을 정하고,
- 2) 영상재현 영역을 한 번의 길이가 매질내에서 신호 파장에 비해 짧은 정사각형 cell들로 나눈다.
- 3) 원하는 입사각의 평행 및 경사측정에 대하여 영상재현 영역을 포함하는 범위에서 선전원과 측정점을 동시에 같은 간격으로 $+y$ 방향으로 움직이며 총전계 전력을 얻는다.
- 4) 각 측정에서 얻은 총전계 전력 값을 입사파의 전파경로상에 있는 cell에 계속 더한 후
- 5) 각 cell에 저장된 총전계 전력 값을 저장했수

로 나눈다.

그러면 cell들에 저장된 전계 전력 분포로부터 공동의 영상을 얻을 수 있다.

IV. 영상재현 결과

그림 1에서와 같이 비유전율이 9이고 도전율이 0.0005 S/m인 손실 매질내에서 한 번의 길이가 12 m인 정사각형 영상재현 영역 ($-6 \text{ m} < x < 6 \text{ m}$, $-6 \text{ m} < y < 6 \text{ m}$) 중앙에 반지름이 1 m이고 공기로 채워진 high-contrast 원기둥 공동이 있다고 가정하자. 영상재현 영역을 240x240 소영역으로 나누었으므로 소영역 한 번 길이는 5 cm이다. $x_s = -6 \text{ m}$, $x_o = 6 \text{ m}$, 주파수가 50 MHz일 때 -60° 에서 60° 까지 범위에서 입사각을 30° 씩 증가시키며($\Delta\phi = 30^\circ$) 얻은 전계 전력 패턴들을 영상재현 영역에 역투시하여 원기둥 공동의 영상을 얻었다(그림 3(a)). 입사각을 보다 작게 증가시키며($\Delta\phi = 10^\circ$) 얻은 전계 전력 패턴들을 역투시하면 주기가 다른 간섭무늬들이 보다 많이 중첩되어 서로 상쇄되므로, 공동주위에 있던 간섭무늬들이 보다 많이 제거되어 산란체의 존재 및 크기를 쉽게 알 수 있다(그림 3(b)). 시추공 평행 방향에 비해 수직 방향으로 늘어난 영상이 재현되는데, 이는 cross-borehole 측정구조와 같이 제한된 측정범위내에서 얻은 전계 전력 패턴들을 영상재현 자료로 사용했을 때 문으로 이런 현상은 diffraction tomography^[7]에서도 나타난다. 입사각의 측정범위를 -30° 에서 30° 로 줄이면 영상은 더욱 왜곡된다(그림 3(c)). 한편 cross-boreholes 측정구조에서 실제 산란체에 가까운 영상을 얻기 위해서는 일반적으로 입사각이 큰 경사측정에서 얻은 정보가 필요하다. 그러나 땅과 같은 손실 매질내에서는 입사각이 커져 전원과 측정점사이 거리가 증가하면 전파손실이 커져 수신신호의 크기가 작아진다. 크기가 작은 신호는 영상재현에 기여가 작으므로 실제 상황에서는 적당한 입사각내에서 경사측정을 해야 한다. 이 논문에서는 -60° 에서 60° 범위에서 입사각을 변화시키며 얻은 전계 전력 패턴들을 영상재현에 사용하였다.

주파수가 증가하면 그림 2에서와 같이 전계 전력 패턴에서 간섭무늬 주기가 감소한다. 이런 주기가 짧은 간섭무늬를 가진 전계 전력 패턴을 영상재현자료로

사용하여 좋은 영상을 얻기 위해서는 $\Delta\phi$ 를 작게 해야한다(그림 4(a), 4(b)). 그리고 주파수가 증가하면 그림 2에서와 같이 전계 전력 패턴에서 shadow 영역 폭이 산란체 크기로 수렴하므로, 이 패턴으로부터 얻은 영상은 실제 산란체 모양에 가깝게 된다(그림 3(b), 4(b)). 한편 전원과 측정점이 공동으로부터 거리가 증가하면 그림 2(c)에서와 같이 전계 전력 패턴에서 간섭무늬 주기 및 shadow 영역 폭이 증가하므로 이 패턴으로부터 얻은 영상은 열화된다(그림 3(b), 4(c)).

등의 incoherent 영상 (c) -30° 부터 30° 까지의 입사각범위에서 $\Delta\phi = 10^\circ$ 대해 얻은 총전계 전력 패턴들로부터 재현된 원기둥의 incoherent 영상

Fig. 3. (a) Incoherent image of an air circular cylinder of 1 m radius in a lossy medium of $\epsilon_r = 9$ and $\sigma = 0.0005$ S/m obtained from the intensity patterns of the total electric field calculated for an incident angle range from -60° to 60° at an interval of 30° for $x_s = -6$ m, $x_o = 6$ m, and $f = 50$ MHz in the cross-borehole measurement configuration. (b) Incoherent image of the air circular cylinder obtained from the intensity patterns calculated for an incident angle range from -60° to 60° at an interval of 10° . (c) Incoherent image of the air circular cylinder obtained from the intensity patterns calculated for an incident angle range from -30° to 30° at an interval of 10° .

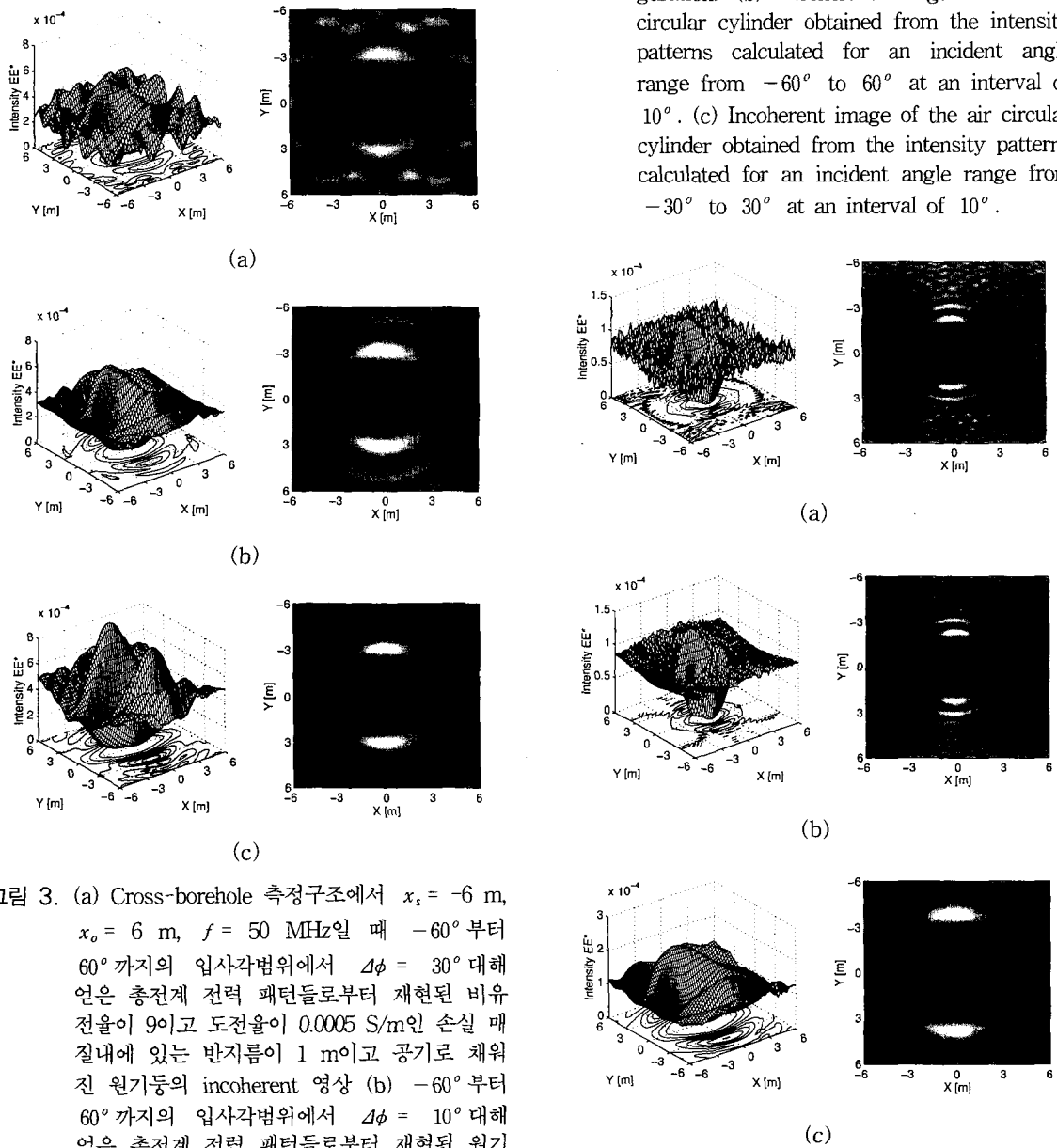


그림 3. (a) Cross-borehole 측정구조에서 $x_s = -6$ m, $x_o = 6$ m, $f = 50$ MHz일 때 -60° 부터 60° 까지의 입사각범위에서 $\Delta\phi = 30^\circ$ 대해 얻은 총전계 전력 패턴들로부터 재현된 비유전율이 9이고 도전율이 0.0005 S/m인 손실 매질내에 있는 반지름이 1 m이고 공기로 채워진 원기둥의 incoherent 영상 (b) -60° 부터 60° 까지의 입사각범위에서 $\Delta\phi = 10^\circ$ 대해 얻은 총전계 전력 패턴들로부터 재현된 원기

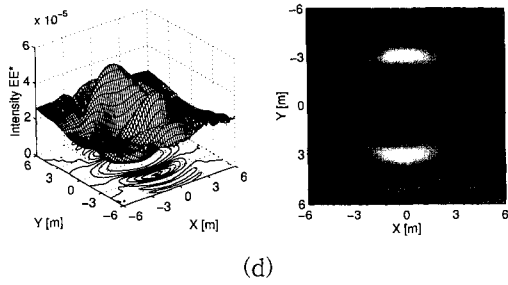


그림 4. (a) Cross-borehole 측정구조에서 $x_s = -6$ m, $x_o = 6$ m, $f = 200$ MHz일 때 -60° 부터 60° 까지의 입사각범위에서 $\Delta\phi = 10^\circ$ 대해 얻은 총전계 전력 패턴들로부터 재현된 비유전율이 9이고 도전율이 0.0005 S/m인 손실 매질내에 있는 반지름이 1 m이고 공기로 채워진 원기둥 공동의 incoherent 영상. (b) -60° 부터 60° 까지의 입사각범위에서 $\Delta\phi = 2.5^\circ$ 대해 얻은 총전계 전력 패턴들로부터 재현된 원기둥 공동의 incoherent 영상. (c) $x_s = -10$ m, $x_o = 10$ m, $f = 50$ MHz일 때 -60° 부터 60° 까지의 입사각범위에서 $\Delta\phi = 10^\circ$ 대해 얻은 총전계 전력 패턴들로부터 재현된 원기둥 공동의 incoherent 영상. (d) $x_s = -6$ m, $x_o = 6$ m, $f = 50$ MHz일 때 -60° 부터 60° 까지의 입사각범위에서 $\Delta\phi = 10^\circ$ 대해 얻은 총전계 전력 패턴들로부터 재현된 도전율이 0.002 S/m인 손실 매질내에 있는 원기둥 공동의 incoherent 영상

Fig. 4. (a) Incoherent image of an air circular cylinder of 1 m radius in a lossy medium of $\epsilon_r = 9$ and $\sigma = 0.0005$ S/m obtained from the intensity patterns of the total electric field calculated for an incident angle range from -60° to 60° at an interval of 10° for $x_s = -6$ m, $x_o = 6$ m, and $f = 200$ MHz in the cross-borehole measurement configuration. (b) Incoherent image of the air circular cylinder obtained from the intensity patterns calculated for an incident angle range from -60° to 60° at an interval of 2.5° . (c) Incoherent image of the air circular cylinder obtained from the intensity patterns calculated for an incident angle range from -60° to 60° at an interval of 10° for $x_s = -10$ m, $x_o = 10$ m, and $f = 50$ MHz. (d) Incoherent image of the air circular cylinder in a lossy medium of $\sigma = 0.002$ S/m obtained from the intensity patterns calculated for an incident angle range from -60° to 60° at an interval of 10° for $x_s = -6$ m, $x_o = 6$ m, and $f = 50$ MHz.

결론적으로 실제 산란체 모양에 가까운 영상을 얻기 위해서는 가능하다면 높은 주파수를 사용하고 전원 및 측정점을 산란체에 보다 근접해서 보다 넓은 입사각에 대해 얻은 전계 전력 패턴들을 영상재현 자료로 사용해야 한다.

한편 영상의 왜곡 정도는 매질 손실이 증가하면 보다 심화된다(그림 3(b), 4(d)). 이는 매질 손실이 증가하는 경우 입사각이 증가하면 전계 전력 값이 급격히 감소하여 입사각이 작을 때 얻은 것에 비해 크기가 매우 작아져, 이들 전계 전력 패턴들을 역투시하여 영상을 재현하면 시추공 수직 방향으로 영상이 더욱 늘어나게 되기 때문이다(그림 2(a), 2(b), 2(d)).

본 논문에서 소개된 단일 주파수 시간조화 신호를 사용한 high-contrast 원기둥 공동의 incoherent 영상재현법은 실제 상황에서 다음과 같은 장점이 있다.

1) 우선 영상재현을 위해 총전계가 사용된다는 점이다. 실제 상황에서 수신안테나에는 산란파가 아니라 총전계가 측정되므로, 산란파를 영상재현 자료로 사용하는 기존의 방법들^[2,3,5-13]에서는 측정된 총전계에서 입사파를 빼서 산란파를 얻는 과정이 필요하다. 그러나 상황에 따라서는(예를 들어 비균일 매질) 이 과정이 용이하지 않으므로, 총전계를 영상재현의 입력자료로 사용한다는 것은 큰 장점이 된다.

2) 영상재현의 자료로 총전계 전력($I = EE^* = |E||E|$)이 사용되므로, 총전계의 진폭정보만 필요하고 위상정보는 필요가 없다. 실제 상황에서는 매질이 균일하지 않고 송수신기사이 거리가 멀어 위상 정보를 정확히 얻기 힘들다. 따라서 위상정보가 필요한 기존의 영상법들^[2,3,5-13]과는 달리 전계측정 시스템이 간단한 구조로 구성될 수 있다.

3) 기존 영상법의 적용이 어려운 손실이 매우 큰 매질에서도 lit 영역에서 수신된 전계 전력이 측정시스템의 최소 측정가능 값보다 크면, 언제든지 본 영상법으로 산란체의 영상을 재현할 수 있다.

4) 영상 열화 및 ill-posedness의 한 요인인 신호 수신할 때 유입되는 잡음은 일반적으로 random한 특성을 가진다. 제안된 영상법에서는 총전계 전력을 측정하는 과정에서 유입된 잡음이 서로 상쇄되어 제거되므로, 측정잡음의 영향을 적게 받는다는 장점이 있다.

5) 모멘트법 및 반복계산기법, 역푸리에 변환 등을 이용한 기존의 영상법들과는 달리 영상재현 과정에서 산란체의 사전정보(크기나 위치)가 필요하지 않으며,

행렬의 역변환과정 및 반복계산기법, Born 근사를 사용하지 않으므로 파장에 비해 크기가 큰 high-contrast 산란체를 영상재현할 수 있다.

6) 단일 주파수를 사용해서 영상을 재현할 수 있으므로, 다중 주파수를 사용하는 기존의 incoherent 영상법^[16]에 비해 짧은 시간 내에 영상을 재현할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 cross-borehole 측정구조에서 단일 주파수 시간조화 원주파가 high-contrast 원기둥 공동에 입사되었을 때 순방향에서 얻은 간섭무늬를 가진 총전계 전력 패턴을 영상재현 영역에 역투시하여, 역투시 과정에서 주기가 다른 간섭무늬들이 서로 중첩되어 제거되는 현상을 이용하여 원기둥 공동의 incoherent 영상을 얻었다. 비유전율이 9이고 도전율이 0.0005, 0.002 S/m인 손실 매질내에 있는 공기로 채워진 원기둥 공동을 본 영상법으로 재현해 본 결과, 제한된 측정범위내에서 얻은 총전계를 영상재현 자료로 사용했기 때문에 diffraction tomography에서와 같이 시추공 평행 방향에 비해 수직 방향으로 늘어난 왜곡된 공동영상이 재현되었다. 가능하다면 높은 주파수를 사용하고 전원 및 측정점을 산란체에 보다 근접해서 보다 넓은 입사각에 대해 얻은 전계 전력 패턴들을 영상재현 자료로 사용했을 때 산란체에 보다 가까운 영상을 얻을 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] R. J. Lytle, E. F. Laine, D. L. Lager, and D. T. Davis, "Cross-borehole electromagnetic probing to locate high-contrast anomalies," *Geophysics*, vol. 44, no. 10, pp. 1667-1676, Oct. 1979.

[2] Y. Michiguchi, K. Hiramoto, M. Nishi, T. Ootaka, and M. Okada, "Advanced subsurface radar system for imaging buried pipes," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. GE-26, no. 6, pp. 733-740, Nov. 1988.

[3] S. Caorsi, G. L. Gragnani, and M.

Pastorino, "Numerical electromagnetic inverse-scattering solutions for two-dimensional infinite dielectric cylinders buried in a lossy half-space," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-41, no. 2, pp. 352-356, Feb. 1993.

[4] H. J. Scudder, "Introduction to computer aided tomography," *Proc. IEEE*, vol. 66, pp. 628-637, 1978.

[5] K. A. Dines and R. J. Lytle, "Computerized geophysical tomography," *Proc. IEEE*, vol. 67, pp. 471-480, 1979.

[6] M. Slaney, A. C. Kak, and L. E. Larsen, "Limitations of Imaging with First-Order Diffraction Tomography," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-32, pp. 860-874, 1984.

[7] J. M. Harris, "Diffraction tomography with arrays of discrete sources and receivers," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. GE-25, no. 4, pp. 448-455, July 1987.

[8] S. G. Kim, K. W. Suh, and J. W. Ra, "Improved Born Inversion for Frequency-Swept Microwave Imaging of Dielectric Cylinder," *Microwave Opt. Technol. Lett.*, vol. 5, no. 7, pp. 340-343, 1992.

[9] J. M. Lee, S. Y. Kim, and J. W. Ra, "A spectral inversion technique for reconstruction of complex permittivity profiles," *Electron. Lett.*, vol. 24, pp. 556-558, 1988.

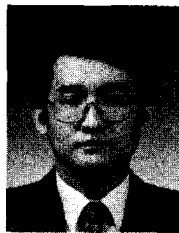
[10] K. S. Lee and J. W. Ra, "Angular spectral inversion for reconstruction of complex permittivity profiles," *Microwave Opt. Technol. Lett.*, vol. 5, No. 8, pp. 359-361, 1992.

[11] N. Joachmowitz, C. Pichot, and J. P. Hugonin, "Inverse Scattering : An Iterative Numerical Method for Electromagnetic Imaging," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-39, pp. 1742-1752, 1991.

[12] C. S. Park, S. K. Park, and J. W. Ra, "Microwave imaging in angular spe-

- central domain based on the improved Newton's procedure," *Microwave Opt. Technol. Lett.*, vol. 7, no. 1, pp. 28-31, Jan. 1994.
- [13] P. Chaturvedi and R. G. Plumb, "Electromagnetic imaging of underground targets using constrained optimization," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. GE-33, no. 3, pp. 551-561, May 1995.
- [14] T. K. Lee, S. O. Park, J. W. Ra, and S. Y. Kim, "Near-field diffraction pattern by an underground void of circular cylinder," *Microwave Opt. Technol. Lett.*, vol. 2, no. 5, pp. 179-183, 1989.
- [15] J. S. Kang and J. W. Ra, "Incoherent imaging method of two-dimensional conducting object by using multi-frequency time-harmonic source," *Microwave Opt. Technol. Lett.*, vol. 17, No. 2, pp. 117-121, Feb. 1998.
- [16] 강진섭, 나정웅, "주파수평균된 전계 전력 패턴을 사용한 high-contrast 원기둥 공동의 incoherent 영상법," *전자공학회지*, 제35권 D편 제2호, pp. 1-12, 1998년 2월
- [17] 강진섭, 나정웅, "단일 주파수 시간조화 신호원을 사용한 도체기둥의 incoherent 영상법," *전자공학회지*, 제35권 D편 제1호, pp. 1-7, 1998년 1월

저 자 소 개



康 辰 燮(正會員)

1963년 12월 30일생. 1977년 2월 한양대학교 전자공학과 공학사. 1989년 8월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학석사. 1994년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학박사. 1994년 3월 ~ 1995년 3월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 위촉연구원. 1995년 3월 ~ 1996년 2월 University of Illinois at Urbana-Champaign Dept. of Electrical and Computer Eng. Postdoctoral Research Associate. 1996년 3월 ~ 1998년 2월 충북대학교 전기전자공학부 초빙조교수. 1998년 3월 ~ 현재 한국표준과학연구원 전자기연구부 전자파연구실 선임연구원. 주관심분야는 전자파 산란 및 역산란, 수치해석, 안테나해석, 표준전자기장발생, 임피던스측정 등임