

# 손실 매질내에 있는 3차원 지하공동의 Incoherent 역산란

## Incoherent Inverse Scattering of 3-Dimensional Underground Cavity in Lossy Medium

홍성용\* · 강진섭\*\*

Sung-Yong Hong\* · Jin-Seob Kang\*\*

### 요 약

시간조화 평면파가 손실 매질내에 있는 high-contrast 구형 공동에 입사되었을 때 순방향에서 입사파 진행 방향에 대해 수직인 측정면에서 계산된 입사파 분극방향(co-polarized) 총전계 전력을 주파수 평균하여 incoherent shadow 전계 전력패턴을 얻었다. 공동의 incoherent 영상은 구좌표 회전측정구조에서 얻은 incoherent shadow 전계 전력패턴을 역투시하여 얻었다. 비유전율이 2이고 도전율이 0.001, 0.003 S/m인 손실 매질내에 있는 공기로 채워진 구형 공동의 영상재현으로 이 영상재현법의 타당성을 보였으며, 보다 좋은 영상을 얻기 위한 조건들을 조사했다.

### Abstract

When the time-harmonic plane wave is incident upon a high-contrast spherical cavity in a lossy medium, the incoherent shadow intensity pattern is acquired by averaging out the multi-frequency intensities of the co-polarized total electric field calculated at the measurement plane perpendicular to the propagating direction of the incident wave in the forward direction. In the spherical rotational measurement configuration, an incoherent imaging of the spherical cavity is obtained via the back-projections of the incoherent shadow intensity pattern. This imaging method is validated by imaging an air sphere in the lossy medium of  $\epsilon_r = 2$  and  $\sigma = 0.001, 0.003$  S/m and the conditions for obtaining better images are investigated.

### I. 서 론

전자파 역산란이란 전자파를 미지의 산란체에 입사시켜 산란파로부터 산란체의 물리적 특성(모양, 크기 및 유전율·도전율·투과율 분포 등)을 알

아내는 것으로 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 배경매질과 유전율 차가 큰 (high-contrast) 3차원 공동을 위한 전자

「이 논문은 1997년 한국학술진흥재단 학술연구조성비에 의하여 지원되었음.」

\*충남대학교 전파공학과(Department of Radio Science and Engineering, Chungnam National University)

\*\*한국표준과학연구원 전자기표준부(Division of Electromagnetic Metrology, Korea Research Institute of Standards and Science)

· 논문 번호 : 990208-012

· 수정완료일자 : 1999년 3월 19일

파 역산란법을 제안하려 한다. 천연동굴과 같은 지하공동의 탐사는 댐이나 원자력 발전소의 지하구조물과 핵 및 산업폐기물 등을 위한 지하저장소 건설 예정지역의 지반검사에 필수적이다<sup>[1]</sup>.

High-contrast 지하 원기둥 공동 탐사에 적합한 방법으로는 복잡한 신호처리 과정이 요구되거나 배경매질과 유전율 차가 작은 low-contrast 유전체에만 적용 가능한 일반적인 역산란방법<sup>[2]~[10]</sup>들과는 달리 산란체의 특별한 산란특성을 이용한 탐사법<sup>[1]</sup>이 있다. 이 방법에서는 cross-borehole 측정구조에서 공동 양쪽에 위치한 두 시추공에 송·수신기를 각각 넣고 일정한 간격으로 동시에 같이 위로 올리면서, 매 위치마다 주파수를 바꾸며 원기둥 공동에 의해 산란된 총전계(total electric field)를 수신기에서 측정한다. 이 방법은 매질내에서 공동의 단면 크기에 비해 긴 파장을 가지는 입사파가 공동에 입사되면 순방향(forward direction)에서 수신된 총전계 크기패턴에는 공동 중심에 비교적 약한 single dip이 나타나고, 파장이 짧아져 공동 크기와 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 방법으로는 한번의 평행(parallel) 측정과 두번의 경사(offset) 측정으로부터 얻은 총전계의 double dip 패턴을 역투시하여 복잡한 신호처리 과정을 거치지 않고 공동 위치와 크기를 쉽게 예측할 수 있으나, 산란체를 영상재현하기는 어렵다. 한편 앞에서 언급된 특정한 주파수 대역의 연속 전자파가 high-contrast 원기둥 공동에 입사되었을 때 순방향 총전계 크기 패턴에 나타나는 특이한 double dip이 근거리 shadow 영역에서 double null이나 강한 double dip이 되는 것<sup>[11]</sup>과, 손실매질에서 이들의 발생주파수 및 위치는 알려져 있다<sup>[12]</sup>. 그리고 3차원 산란체인 구형 공동에 의한 근거리 영역 회절 패턴도 또한 연구되었다<sup>[13],[14]</sup>.

최근에는 다중주파수 시간조화신호를 사용한 원

기둥 공동 incoherent 영상법<sup>[15]</sup>이 소개되었다. 시간조화 평면파가 원기둥 공동에 입사되면, 순방향에서 얻은 전계 전력패턴에는 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 간섭무늬 주기는 신호원 주파수에 의해 결정되므로 주파수를 바꾸어 가며 각 주파수에서 얻은 전계 전력패턴들을 평균하면 주기가 다른 간섭무늬들이 서로 상쇄되어 진동폭이 감소하게 되며 만약 충분히 넓은 주파수 대역폭을 사용하면 간섭무늬를 완전히 제거할 수 있다. 따라서 다중 주파수를 사용하여 얻은 주파수평균 전계 전력패턴에는 lit 영역에서는 평균 전계 전력이 입사파 전력과 비슷하고 shadow 영역에서는 입사파 전력에 비해 작은 값을 가지는 간섭무늬가 제거된 incoherent shadow 전계 전력패턴이 나타난다. 이 영상법에서는 cross-borehole 측정구조에서 여러 입사각에 대해 다중주파수를 사용하여 얻은 incoherent shadow 전계 전력패턴을 영상재현 영역에 역투시하여 원기둥 공동의 incoherent 영상을 재현했다.

한편 단일주파수 시간조화신호를 사용한 원기둥 공동 incoherent 영상법<sup>[16]</sup>도 소개되었다. 이 영상법에서는 단일 주파수 전자파가 공동에 입사되었을 때 순방향에서 얻은 총전계 전력패턴에 있던 간섭무늬들이 총전계 전력패턴을 영상재현 영역에 역투시하는 과정에서 서로 상쇄되어 제거되는 효과를 이용하여 산란체 영상을 재현한다.

본 논문에서는 다중주파수를 사용한 2차원 공동 incoherent 영상법을 일반화시킨 3차원 공동의 incoherent 영상재현법을 제안하려 한다. 실제 상황에서는 3차원 공동이 임의의 모양이다. 산란체가 임의의 모양을 가지면 산란파를 계산하기 위해서 수치해석기법을 사용해야 되는데 산란체 크기가 커지면 많은 계산시간과 컴퓨터 메모리가 필요하

다. 따라서 본 논문에서는 이와 같은 어려움 때문에 해석적인 해가 존재하는 구형 공동에 의한 평면파 산란문제를 고려했다. 그리고 cross-borehole 측정구조에서 영상을 재현하면 제한된 영역에서 측정된 정보가 사용되어 왜곡된 영상이 재현되므로<sup>[15],[16]</sup>, 구좌표 회전(spherical rotational) 측정구조에서 영상을 재현했다. 또한 2차원 문제에서 단일주파수 incoherent 영상법을 사용해서 좋은 영상을 얻기 위해서는 다중주파수 incoherent 영상법을 사용했을 때에 비해 보다 많은 입사각에 대해 얻은 충전계 전력패턴을 사용해야 되는데<sup>[16]</sup>, 이 효과가 3차원 문제에서 보다 강하게 나타나므로 본 논문에서는 다중주파수 incoherent 영상법을 사용하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서는 우선 유전체 손실 매질내에 있는 high-contrast 구형 공동에 평면파가 입사되었을 때, 순방향에서 입사파 진행방향에 대해 수직인 측정면에서 얻은 co-polarized(입사파 편향방향) 충전계 전력패턴에 발생하는 간섭무늬를 다중 주파수를 사용해서 제거할 수 있음을 수치계산으로 보였다. III 장에서는 구좌표 회전측정구조에서 주파수평균하여 계산된 간섭무늬가 제거된 incoherent shadow 전계 전력패턴을 영상재현 영역에 역투시하여 high-contrast 구형 공동의 영상을 얻는 과정을 소개했다. IV 장에서는 영상재현할 때 고려할 사항 및 유한 주파수 대역을 사용하면서도 보다 좋은 영상을 얻을 수 있는 조건을 설명하고, 영상재현 결과를 제시했다. 그리고 V 장에서 결론을 맺었다.

## II. 주파수평균된 순방향 co-polarized 충전계의 전력패턴 특성

그림 1과 같이 비유전율 ( $\epsilon_r$ )이 2이고 도전율 ( $\sigma$ )이 0.001 S/m인 손실 매질내에서 좌표계 원점에 중심이 있는 반지름( $a$ )이 1m이고 공기로 채워진 high-contrast 구형 공동에  $x$  방향으로 편향된

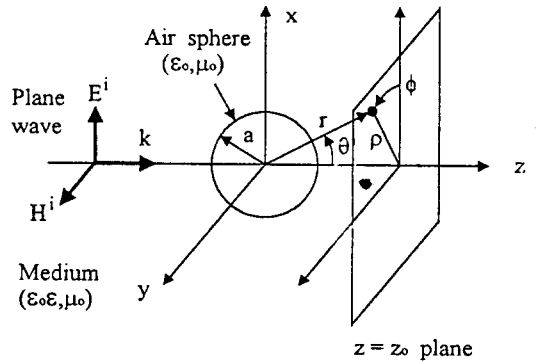


그림 1. 구형 공동에 의한 평면파 산란

Fig. 1. Plane wave scattering by a spherical cavity.

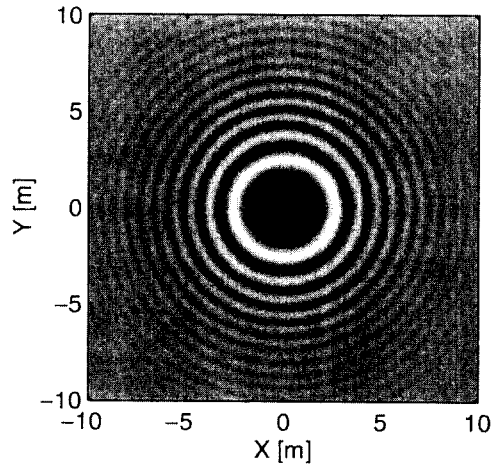
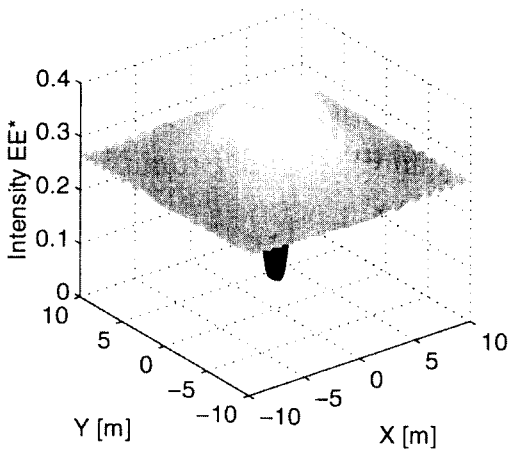
주파수가 400 MHz인 시간조화 평면파가 입사되었을 때, 순방향에서 공동 중심으로부터 5m 떨어진 입사파 진행방향에 대해 수직인 측정면( $z_0 = 5m$ )에서 해석적인 해<sup>[17]</sup>를 사용해 얻은 co-polarized 충전계 전력  $EE^*$ 를 계산했다. 그림 2(a)에서와 같이 전계 전력패턴은 전계 전력값 중에서 최대값(흰색), 최소값(검은색)을 먼저 구한 후, 그 사이 전계 전력 값을 명암으로 표현했다. Lit 영역에서 전계 전력은 입사파 전력을 중심으로 진동하며 공동 경계로부터 멀어질수록 진동 폭과 주기가 서서히 감소하나, shadow 영역에서는 lit 영역에 비해 상대적으로 진동 폭이 작은 간섭무늬가 전계 전력 0 부근에 나타나는 것을 그림 2(a), 2(c)로부터 알 수 있다. 주파수가 1600 MHz로 증가하면, 그림 2(b), 2(c)에서와 같이 간섭무늬 주기가 감소하여 간섭무늬가 공동 경계쪽으로 이동하고 shadow 영역 폭이 공동 크기로 수렴하며 평균 전계 전력값이 감소한다. 한편 그림 1과 같은 구조의 도체 및 유전체 구의 산란문제에서 입사파 진행방향에 대해 수직인 측정면에서 얻은 co-polarized 충전계는 일반적으로  $C_1 + C_2 \cos 2\phi$  형태로 표현되므로,  $\phi$ 에 대해  $180^\circ$  주기를 가진다<sup>[14]</sup>. 여기서  $C_1$ ,  $C_2$ 는  $\phi$ 에 대해서는 상수이다. 구형 공동의 경우에는  $C_2$ 크기가  $C_1$ 크기보다 작으므로 그림

2(a), 2(b)에서와 같이 그 의존성을 육안으로 인식할 수는 없었다.

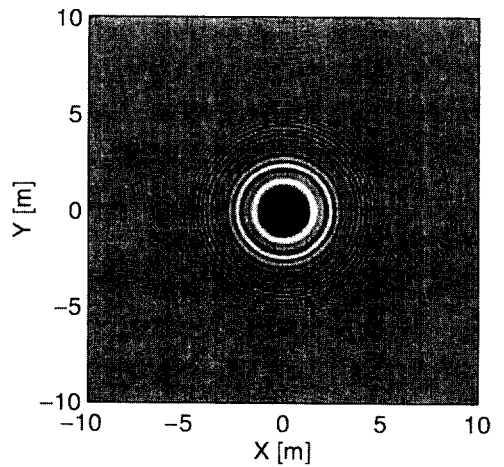
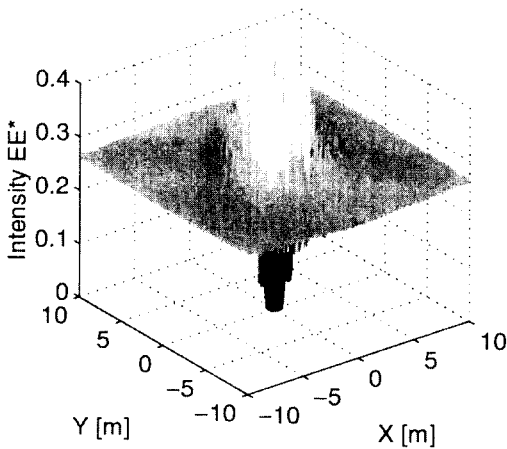
매질 손실이 0.003 S/m로 증가하면 그림 3(a)에서와 같이 전파 손실 증가로 인해 입사파 전력이 감소하여 lit 및 shadow 영역에서 평균 전계 전력이 많이 감소하고 간섭무늬가 공동부근에만 존재한다. 그러나 간섭무늬 주기 및 shadow 영역 폭은

매질 손실이 증가하더라도 거의 변하지 않는다. 한편 측정면이 공동으로부터 멀어지면( $z_0 = 10$  m), 그림 3(b)에서와 같이 입사파 전력의 감소로 두 영역에서 평균 전계 전력 값 및 간섭무늬 진동 폭이 감소하며 간섭무늬 주기 및 shadow 영역 폭이 증가한다.

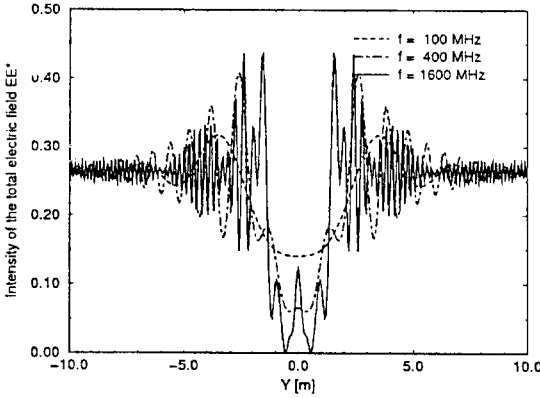
다중주파수 효과를 보기 위해 50 MHz부터 시작



(a)



(b)



(c)

= 5 m in the case of the plane wave incidence, (b) intensity pattern scattered from the spherical cavity for  $f = 1600$  MHz, and (c) intensity patterns scattered from the spherical cavity calculated at  $z_0 = 5$  m and  $\phi = 0^\circ$  for  $f = 100, 400, 1600$  MHz.

하여 주파수 대역을 증가시키면서 주파수 대역내에서 주파수를 25 MHz씩 증가시키며 ( $\Delta f = 25$  MHz) 각 주파수에서 얻은 co-polarized 총전계  $E(f_n)$ 의 주파수평균 전계 전력  $I_{ave}$ 를 다음 유한급수식을 사용해서 계산했다.

$$I_{ave} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N E(f_n)E^*(f_n) \quad (1)$$

여기서  $N$ 은 사용하는 주파수 갯수를 의미하고, \*는 공액복소수를 의미하고,  $f_n$ 은 사용하는 주파수 대역을 같은 간격으로  $N-1$  등분했을 때  $n$  번째 주파수를 의미한다. 일반적으로 간섭무늬 주기가 신호원 주파수에 의해 결정되므로, 다중주파수를 사용하여 얻은 총전계 전력들을 중첩하면 주기가 다른 간섭무늬가 서로 상쇄되어 공동 경계로부터 멀리 떨어진 간섭무늬 진동폭이 먼저 감소하는 것을 그림 4(a)에서 볼 수 있다. 만약 주파수 대역폭이 더욱 넓어지면, 주기가 다른 간섭무늬들이 보다 많이 중첩되므로 진동폭이 더욱 감소하여 간섭무늬가 경계부근에만 존재하는 것을 그림 4(b)로부터 알 수 있다. 따라서 충분히 넓은 주파수 대역폭을 사용하면, 평균 전계 전력이 lit 및 shadow

그림 2. (a) 평면파 입사의 경우  $f = 400$  MHz,  $z_0 = 5$  m일 때 비유전율이 2이고 도전율이 0.001 S/m인 손실 매질에 있는 반지름이 1 m이고 공기로 채워진 구형 공동에 의한 co-polarized 총전계 전력패턴, (b) 주파수가 1600 MHz일 때 구형 공동에 의한 전력패턴, (c) 주파수가 100, 400, 1600 MHz일 때  $z_0 = 5$  m,  $\phi = 0^\circ$ 에서 계산된 구형 공동에 의한 전력패턴들

영역에서 각각 입사파 전력과 0으로 수렴되어 간섭무늬가 제거된 incoherent shadow 전계 전력패턴을 얻을 수 있다. 또한 그림 4(b)로부터 주파수 대역폭이 넓어질수록 평균 전계 전력패턴에서 shadow 영역폭이 공동크기로 수렴하는 것을 알 수 있다. 매질 손실이 증가하면 전파 손실 증가로 인해 입사파 전력이 감소하여 lit 및 shadow 영역에서 평균 전계 전력 값이 감소하나 shadow 영역 폭은 매질 손실이 증가하더라도 거의 변하지 않는 것을 그림 4(c)로부터 알 수 있다. 한편 측정면이 공동으로부터 멀어지면 그림 4(d)에서와 같이 입사파 전력의 감소로 두 영역에서 평균 전계 전력 값이 감소하며 shadow 영역 폭이 증가한다.

### III. 구좌표 회전축정구조에서 영상재현 원리

구좌표 회전축정구조에서 입사파 입사각  $(\theta^i, \phi^i)$ 을 변화시키며 순방향에서 입사파 진행방향에 대해 수직인 측정면에서 얻은 co-polarized 총전계의 간섭무늬가 제거된 incoherent shadow 전계 전력패턴들을 영상재현 영역에 역투시하여 구형 공동의 incoherent 영상을 얻을 수 있는 것은, 여러

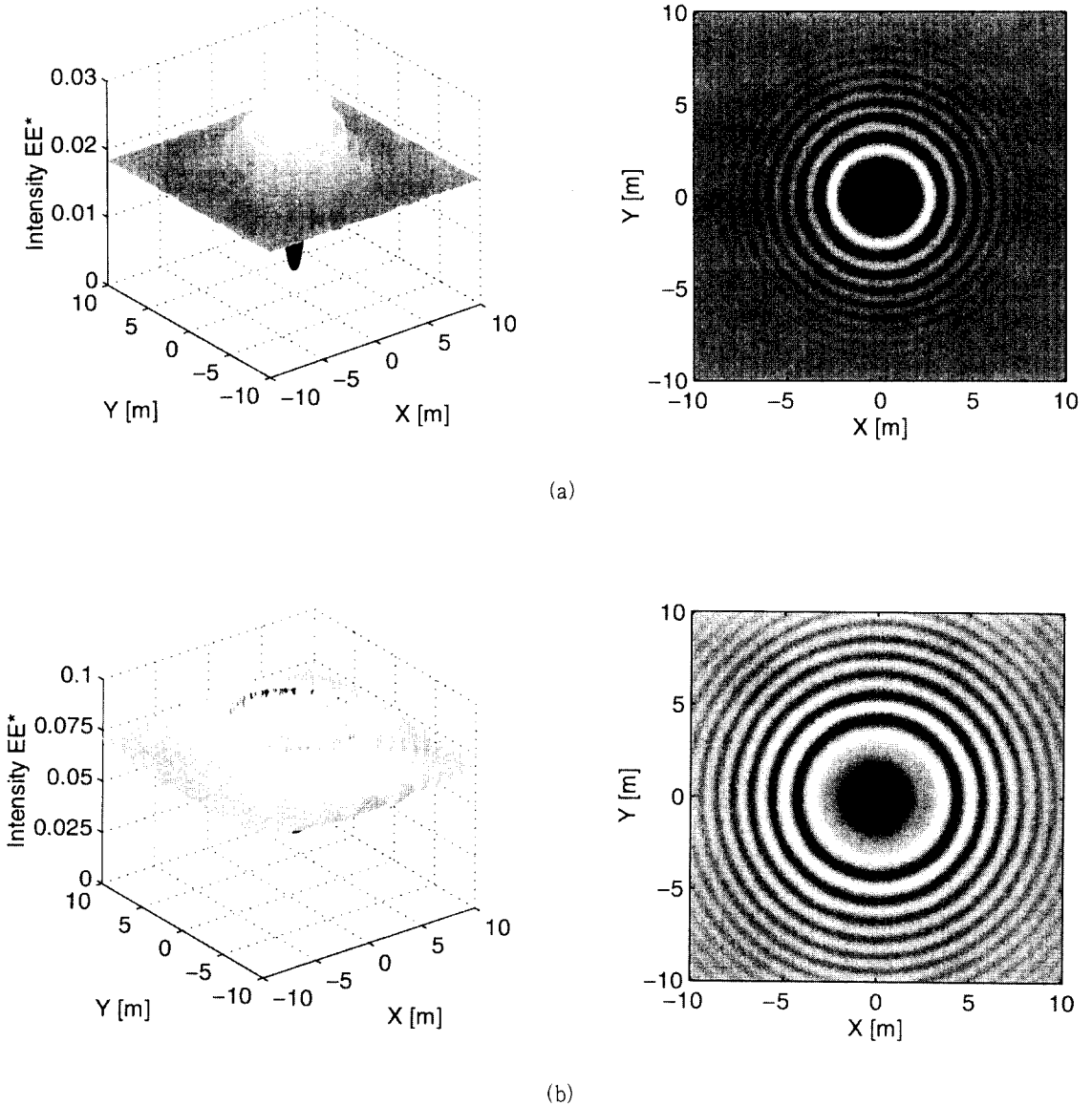


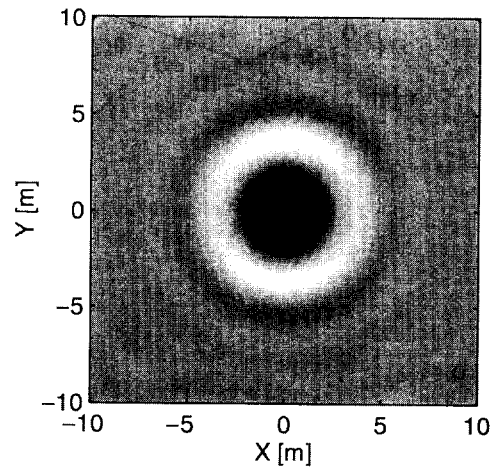
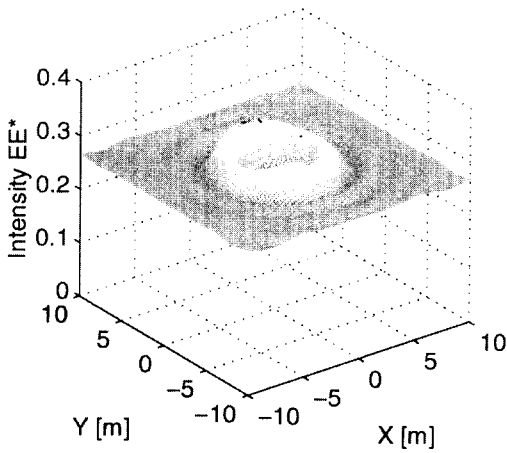
그림 3. (a) 평면파 입사의 경우  $f = 400$  MHz,  $z_0 = 5$  m일 때 비유전율이 2이고 도전율이  $0.003$  S/m인 손실 매질에 있는 반지름이 1 m이고 공기로 채워진 구형 공동에 의한 co-polarized 총전계 전력패턴, (b)  $f = 400$  MHz,  $z_0 = 10$  m일 때 비유전율이 2이고 도전율이  $0.001$  S/m인 손실 매질에 있는 구형 공동에 의한 전력패턴

Fig. 3. (a) Intensity pattern of the co-polarized total electric field scattered from the air sphere of 1 meter radius in a lossy medium of  $\epsilon_r = 2$  and  $\sigma = 0.003$  S/m for  $f = 400$  MHz and  $z_0 = 5$  m in the case of the plane wave incidence, and (b) intensity pattern scattered from the spherical cavity in a lossy medium of  $\epsilon_r = 2$  and  $\sigma = 0.001$  S/m for  $f = 400$  MHz and  $z_0 = 10$  m.

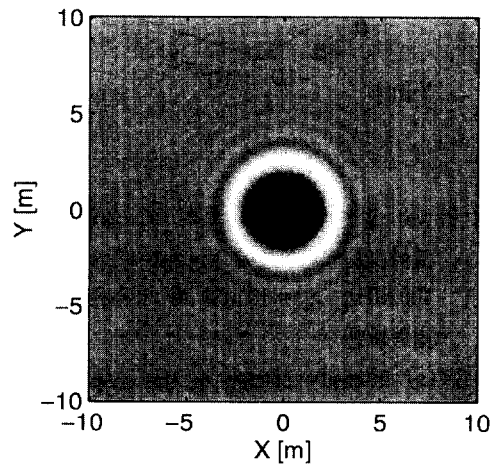
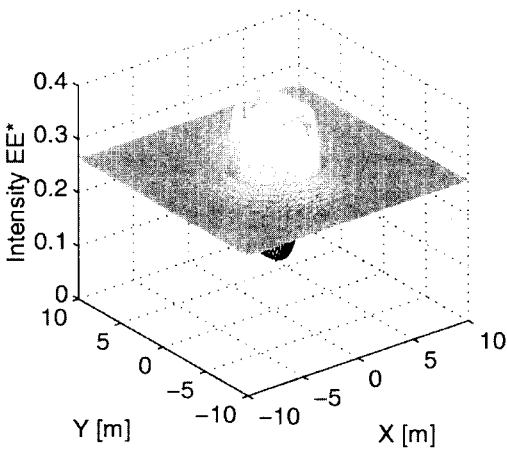
입사각에 대해 얻은 incoherent shadow 전계 전력 패턴들을 영상재현 영역으로 역투시하면 공동 위치로 shadow 영역 패턴이 역투시되기 때문이다. 따라서 영상재현 영역을 작은 cell들로 나누고, 각 입사각에서 얻은 incoherent shadow 전계 전력패턴을 입사파가 지나온 전파경로상에 있는 cell들에 계속 더해 준다면, 공동 영역내 cell들에는 주위 영

역의 cell들에 비해 작은 값들이 저장된다. 따라서 각 cell들에 저장된 전계 전력 분포로부터 간섭무늬가 충분히 제거된 incoherent 구형 공동의 영상을 얻을 수 있다.

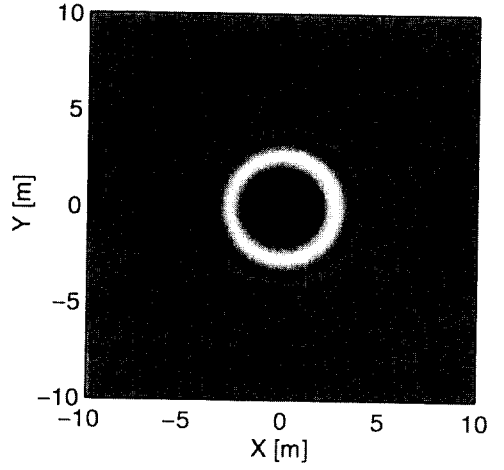
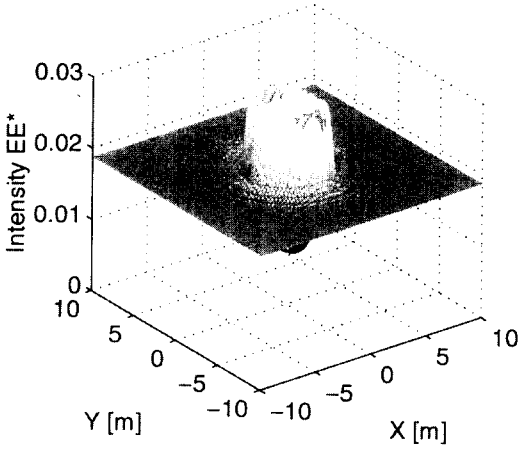
영상재현 과정을 간략히 설명하면 다음과 같다.  
 Step 1. 사용할 주파수 대역 ( $f_a, f_b$ )와 갯수  $N$ 을 정하고, 정한 대역폭을 같은 간격



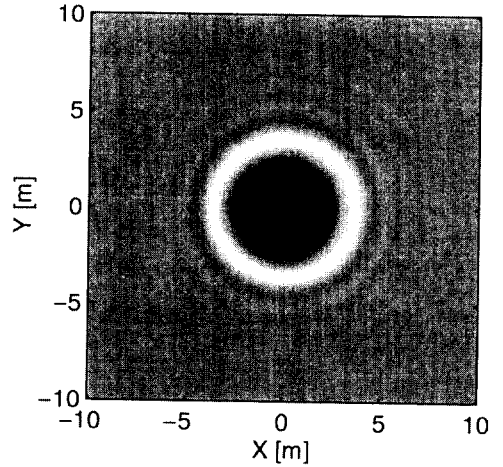
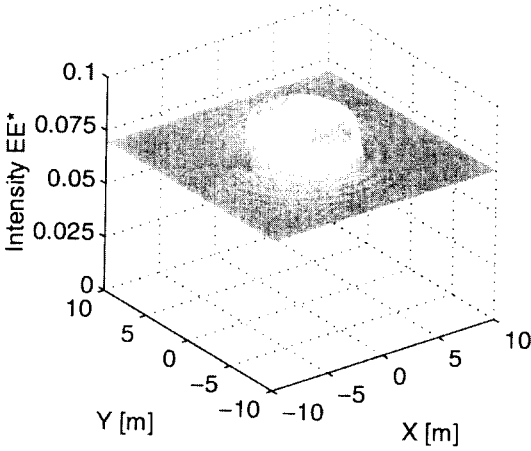
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 4. (a) 평면파 입사의 경우 주파수 대역이 (10 MHz, 100 MHz), 주파수 간격이 25 MHz이고  $z_0 = 5$  m 일 때 비유전율이 2이고 도전율이 0.001 S/m인 손실 매질에 있는 반지름이 1m이고 공기로 채워진 구형 공동에 의한 co-polarized 총전계의 주파수평균 전력패턴, (b) 주파수 대역이 (10 MHz, 400 MHz)일 때 구형 공동에 의한 주파수평균 전력패턴, (c) 주파수 대역이 (10 MHz, 400 MHz)이고  $z_0 = 5$  m일 때 비유전율이 2이고 도전율이 0.003 S/m인 손실 매질에 있는 구형 공동에 의한 주파수평균 전력패턴, (d) 주파수 대역이 (10 MHz, 400 MHz)이고  $z_0 = 10$  m일 때 비유전율이 2이고 도전율이 0.001 S/m인 손실 매질에 있는 구형 공동에 의한 주파수평균 전력패턴

Fig. 4. (a) Frequency-averaged intensity pattern of the co-polarized total electric field scattered from the air



sphere of 1 meter radius in a lossy medium of  $\epsilon_r = 2$  and  $\sigma = 0.001$  S/m for the frequency band of (10 MHz, 100 MHz) by the interval of 25 MHz and  $z_o = 5$  m in the case of the plane wave incidence, (b) frequency-averaged intensity pattern scattered from the spherical cavity for the frequency band of (10 MHz, 400 MHz), (c) frequency-averaged intensity pattern scattered from the spherical cavity in a lossy medium of  $\epsilon_r = 2$  and  $\sigma = 0.003$  S/m for the frequency band of (10 MHz, 400 MHz) and  $z_o = 5$  m, (d) frequency-averaged intensity pattern scattered from the spherical cavity in a lossy medium of  $\epsilon_r = 2$  and  $\sigma = 0.001$  S/m for the frequency band of (10 MHz, 400 MHz) and  $z_o = 10$  m.

으로  $N-1$  등분하여 사용할  $N$  개의 주파수  $f_k$  ( $k = 1, 2, \dots, N$ )를 정한다.

- Step 2. 크기가  $L_x \times L_y \times L_z$  인 직육각형의 영상재현 영역을 정한다.
- Step 3. 영상재현 영역을 한 번의 길이( $d$ )가 매 질내에서 최소 신호파장보다 짧은 정육각형 cell로  $x, y, z$  방향으로 각각 ( $N_x, N_y, N_z$ )개로 나눈다. 그리고 각 cell의 값을 영으로 초기화한다. (참고로 주파수 평균된 전계 전력패턴에 존재할 수 있는 간섭무늬의 제일 짧은 주기는 최소 신호파장과 비슷하다. 정확한 영상재현을 위해서는 cell의 크기가 간섭무늬 최소 신호파장에 비해 작아야 하므로, cell 크기가 신호 최소파장보다 작으면 된다.)
- Step 4. 원하는 입사각 ( $\theta_j^i, \phi_j^i$ )에 대하여 순방향에서 입사파 진행방향에 대해 수직인 측정면에서 측정점을 움직이며 co-polarized 총전계 전력을  $N$  개의 주파수에 대해 얻는다. 이때 측정점의 이동 간격은 cell 한 번의 길이  $d$ 보다 작게 한다.
- Step 5. 측정면에서  $N$  개의 주파수에 대해 얻은 총전계 전력들을 유한급수식 식 (1)에 대입해 주파수평균 총전계 전력  $I_{ave}$ 를 계산한다.
- Step 6. 각 측정점 위치에서 계산된 주파수평균 총전계 전력을 입사파가 지나온 전파경

로상에 있는 cell들에 더한 후, 더한 횟수를 기억시킨다.

- Step 7. 모든 입사파 입사각에 대해 Step 4부터 Step 6까지 과정을 반복 수행한다.
- Step 8. 영상재현영역의 중앙부분이 주위 영역에 비해 전계 전력 값이 가산되는 횟수가 많으므로, 이 효과를 보상시키기 위해 각 cell에 저장된 전계 전력값을 저장횟수로 나눈다.

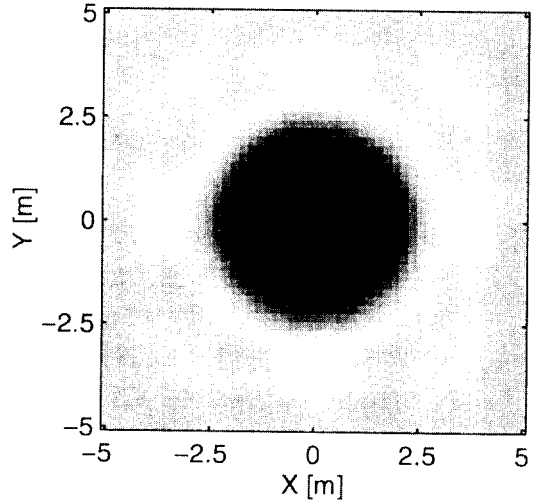
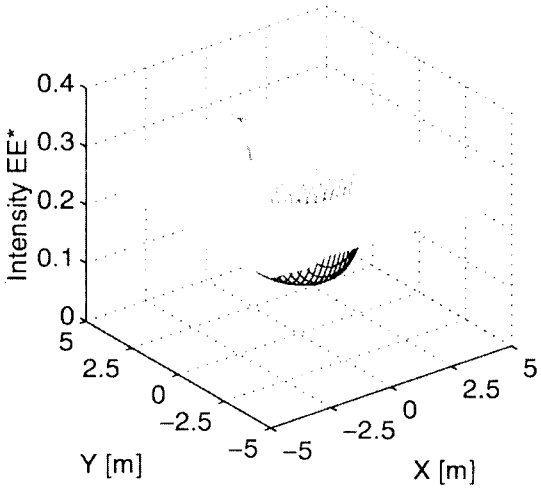
#### IV. 구형 공동의 영상재현

다중 주파수를 사용해 얻은 평균 전계 전력패턴을 역투시하여 구형 공동의 영상을 얻으므로, 재현될 영상 질은 평균 전계 전력패턴의 주파수, 측정점 위치 및 매질 손실량에 대한 의존성을 조사함으로써 예측할 수 있다. 보다 좋은 영상을 얻기 위해서는 shadow 영역에서 평균 전계 전력이 입사파 전력에 비해 가능한한 작고, shadow 영역 폭이 산란체 크기에 가까울수록 좋을 것이다. 그림 4(a), 4(b)에서와 같이 사용 주파수 대역폭이 넓어질수록, 이런 현상들이 나타나므로 보다 넓은 주파수 대역폭을 사용하는 것이 유리하다고 생각할 수도 있다.

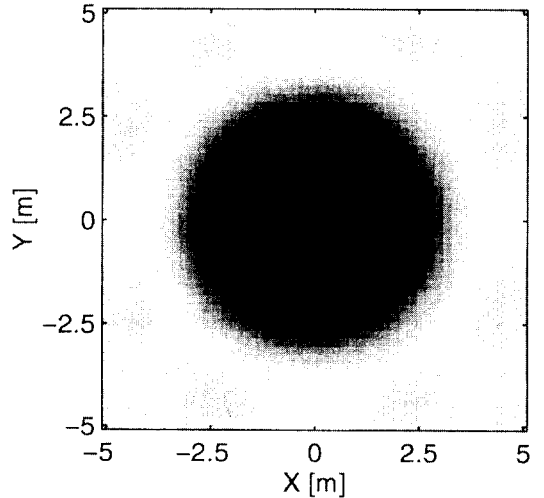
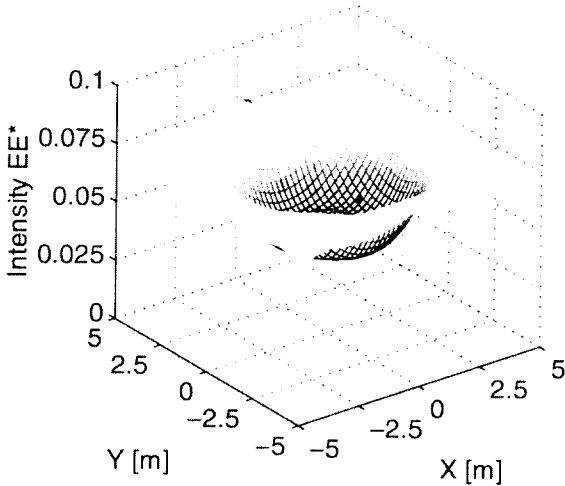
그러나 땅과 같이 손실매질에서는 주파수 대역폭이 넓어져 주파수가 높아지면 전송손실이 증가하므로 실제 상황에서는 저주파수 대역을 사용하는 것이 바람직하다. 따라서 가능하다면 저주파수 대역을 사용하고 같은 대역폭이라도 공동의 sha-

dowing 효과가 강하게 나타나는 주파수 대역을 사용하는 것이 요구된다. 손실매질에 있는 구형 공동에 의한 근거리 회절현상이 해석되었는데<sup>[13],[14]</sup>, 그 결과에 의하면 비유전율이 2인 매질내에 있는 반지름이 1m이고 공기로 채워진 구형 공동의 근거리영역에서 전개 크기패턴의 shadow 영역에 double null이나 강한 double dip이 발생하는 null 주파수

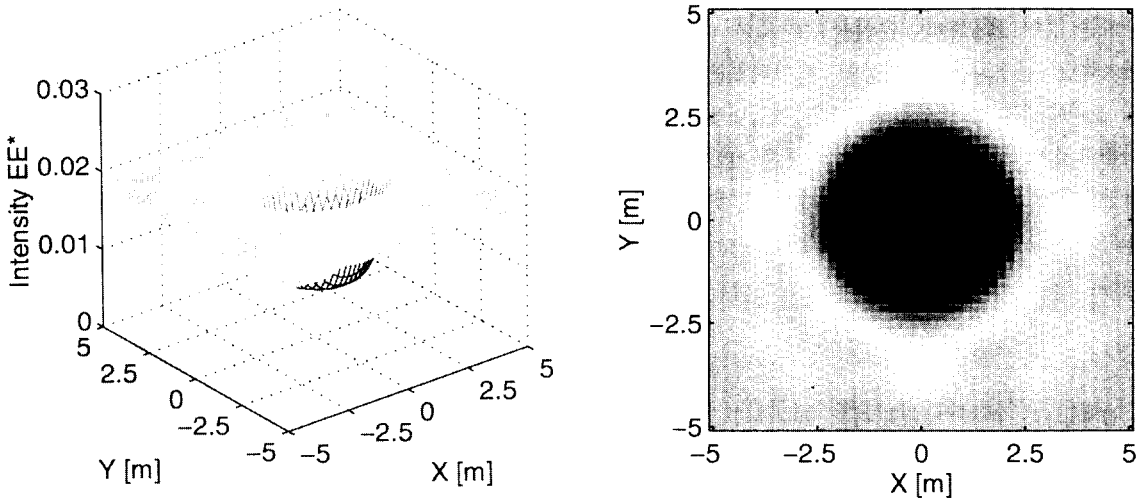
대역들이 존재하는데 이들 중에서 가장 낮은 null 주파수 대역 즉, 첫 번째 모우드의 null 주파수 대역이 120 MHz ~ 300 MHz이고 두 번째 모우드의 null 주파수 대역이 260 MHz ~ 870 MHz이며, 이 주파수 대역들은 매질 손실량에 영향을 받지 않는 것으로 알려졌다<sup>[12]</sup>. Double null과 강한 double dip이 발생하는 null 주파수 대역에서는 강한 그늘이



(a)



(b)



(c)

그림 5. (a) 구좌표 회전축정구조에서 26개 입사각을 사용하는 경우에 주파수 대역이 (50 MHz, 870 MHz), 주파수 간격이 25 MHz일 때 비유전율이 2이고 도전율이 0.001 S/m인 손실 매질에 있는 반지름이 1 m이고 공기로 채워진 구형 공동 중심으로부터 5 m에서 계산된 co-polarized 총전계의 주파수평균 전력패턴으로부터 얻은 공동 영상, (b) 비유전율이 2이고 도전율이 0.001 S/m인 손실 매질에 있는 구형 공동 중심으로부터 10 m에서 계산된 co-polarized 총전계의 주파수평균 전력패턴으로부터 얻은 공동 영상, (c) 비유전율이 2이고 도전율이 0.003 S/m인 손실 매질에 있는 구형 공동 중심으로부터 5 m에서 계산된 co-polarized 총전계의 주파수평균 전력패턴으로부터 얻은 공동 영상.

Fig. 5. (a) Incoherent image of the air sphere of 1 meter radius in a lossy medium of  $\epsilon_r = 2$  and  $\sigma = 0.001$  S/m obtained from the frequency-averaged intensity patterns calculated at the distance of 5 m from the scatterer center for the frequency band of (50 MHz, 870 MHz) by the interval of 25 MHz in the spherical rotational measurement configuration with 26 incident plane waves, (b) incoherent image of the spherical cavity in a lossy medium of  $\epsilon_r = 2$  and  $\sigma = 0.001$  S/m obtained from the frequency-averaged intensity patterns calculated at the distance of 10 m from the scatterer center, and (c) incoherent image of the spherical cavity in a lossy medium of  $\epsilon_r = 2$  and  $\sigma = 0.003$  S/m obtained from the frequency-averaged intensity patterns calculated at the distance of 5 m from the scatterer center.

shadow 영역에서 나타나므로, 같은 주파수 대역폭을 사용하더라도 사용하는 주파수 대역이 null 주파수 대역과 일치할 때 shadow 영역에서 평균 전계 전력이 가장 작게 나타난다<sup>[15]</sup>. 따라서 손실매질에서는 가능하면 이 null 주파수 대역을 사용하는 것이 효과적이다. 한편 첫 번째 모우드의 null 주파수 대역에서 발생하는 double null 및 강한

double dip이 공동에 매우 가까운 거리에서만 발생하므로<sup>[13],[14]</sup>, 본 논문에서는 다중주파수 효과와 null 주파수 대역 사용 장점을 모두 이용하기 위해, 다음에 소개되는 영상재현 수치계산에서는 주파수를 50 MHz부터 두 번째 모우드의 null 주파수 대역까지 사용했으며 주파수 증분량 ( $\Delta f$ )은 25 MHz를 사용했다.

비유전율이 2이고 도전율이 0.001 S/m인 손실 매질내에서 좌표계 원점에 중심이 위치한 한변의 길이가 10m인 정육각형 영상재현영역 ( $5m < x, y, z < 5m$ )이 있다고 가정하고, 그 중앙에 반지름이 1m이고 공기로 채워진 구형 공동이 있다고 하자. 여기서 영상재현영역을  $50 \times 50 \times 50$  cell로 나누었으므로 정육각형 cell의 한변 길이는 20 cm이다.

구좌표 회전축정구조에서 26개 입사각으로 평면파가 구형 공동에 입사되었을 때, 각 입사각에 대해 공동 중심으로부터 5 m 떨어진 측정면에서 얻은 총 26개의 주파수평균된 co-polarized 총전계 전력패턴을 이용하여 III 장에서 소개한 알고리즘으로 산란체 영상을 재현하여  $z = 0$  평면에서 영상 단면을 구해보면 그림 5(a)와 같다. 원점에 대해 대칭인 원형 영상이 재현되고, 공동 영역이 최소값으로 표시되어 주위 영역으로부터 쉽게 구별되는 것을 알 수 있다. 한편 영상 주위에 나타나는 잔상들은 보다 많은 입사각을 사용하여 얻은 전체 전력패턴들을 역투시하면 제거할 수 있다.

측정거리가 10m로 증가하면 역투시되는 평균전계 전력패턴에서 shadow 영역폭이 커지므로 영상이 열화되는 것을 그림 5(b)에서 볼 수 있다. 한편 그림 4(b), 4(c)에서와 같이 shadow 영역폭은 매질 손실량이 증가하더라도 거의 변하지 않으므로 재현된 영상질은 거의 변하지 않는 것을 그림 5(c)에서 볼 수 있다.

본 논문에서 소개된 손실 매질에 있는 구형 공동 incoherent 영상법은 영상재현의 입력자료로 총전계 전력을 사용하므로 산란파나 위상정보가 필요하지 않고, 산란체의 사전정보(크기나 위치)가 필요하지 않으며, 모멘트법, 반복계산기법, 역푸리에 변환과 같은 복잡한 신호처리과정 없이 간단한 산술계산만으로 영상을 재현할 수 있고, null 주파수 대역을 사용하므로 대역폭이 좁은 저주파수 대역을 사용하면서도 좋은 영상을 얻을 수 있다는 장점이 있다. 그리고 산란체 영상재현과정에 행렬의 역변환과정 및 반복계산기법, Born 근사를 사용

하지 않으므로 파장에 비해 크기가 큰 high-contrast 산란체를 영상재현할 수 있다. 또한 영상 열화 및 ill-posedness의 한 요인인 전체측정시 도입될 수 있는 잡음은 일반적으로 random한 특성을 가지는데 총전계 전력을 중첩하는 과정에서 서로 상쇄되어 제거되므로 본 영상법은 측정잡음의 영향을 적게 받는다는 장점이 있다.

## V. 결 론

손실 매질내에 있는 구형 공동의 영상을 구좌표 회전축정구조에서 공동의 의해 산란된 입사파 편향방향의 순방향 총전계 전력을 주파수평균하여 얻은 incoherent shadow 전계 전력패턴을 영상재현 영역에 역투시하여 얻었다. 비유전율이 2이고 도전율이 0.001, 0.003 S/m인 손실 매질내에 있는 공기로 채워진 구형 공동을 영상재현하여 본 영상법의 타당성을 보였다. 보다 좋은 영상을 얻기 위해서는 null 주파수 대역을 포함하는 보다 넓은 저주파수 대역을 사용해야 하며, 좀더 산란체에 접근해서 얻은 전체 전력패턴을 사용해야 한다. 사용 주파수 대역이 고정된 경우 매질 손실량은 영상질에 크게 영향을 주지는 못했다.

## 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] K. A. Dines and R. J. Lytle, "Computerized geophysical tomography," *Proc. IEEE*, vol. 67, pp. 471-480, 1979.
- [3] M. Slaney, A. C. Kak, and L. E. Larsen, "Limitations of imaging with first-order diffraction tomography," *IEEE Trans. Micro-*

- wave Theory Tech.*, vol. MTT-32, pp. 860-874, 1984.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] C. S. Park, S. K. Park, and J. W. Ra, "Microwave imaging in angular spectral domain based on the improved Newton's procedure," *Microwave Opt. Technol. Lett.*, vol. 7, no. 1, pp. 28-31, Jan. 1994.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 강진섭, 나정웅, "Diffraction pattern of cylindrical cavity for line source excitation in lossy medium," 전자공학회지, 제33권 A편 제1호, pp. 12-20, 1996년 1월.
- [13] J. S. Kang and J. W. Ra, "Near-field pattern diffracted by a spherical cavity in a denser medium," *Microwave Opt. Technol. Lett.*, vol. 6, no. 9, pp. 549-552, Jun. 1993.
- [14] 강진섭, 나정웅, "Near-field diffraction pattern by a spherical air cavity in a dielectric medium," 전자공학회지, 제32권 A편 제2호, pp. 19-30, 1995년 2월.
- [15] 강진섭, 나정웅, "Incoherent imaging method for high-contrast cylindrical cavity by using frequency-averaged electric field intensity pattern," 전자공학회지, 제35권 D편 제2호, pp. 1-12, 1998년 2월.
- [16] 강진섭, "Cross-borehole incoherent tomography for high-contrast cylindrical cavity in lossy medium by using single-frequency time-harmonic signal," 전자공학회지, 제35권 D편 제11호, pp. 1-9, 1998년 11월.
- [17] J. A. Stratton, *Electromagnetic Theory*, McGraw-Hill. New York, 1941.

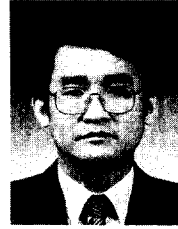
홍 성 용



1985년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학사)  
1988년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학석사)  
1994년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학박사)  
1994년 2월~1996년 8월: 한국쌍신

전기 연구소장.  
1996년 9월~현재: 충남대학교 전파공학과 교수

강 진 섭



1987년 2월: 한양대학교 전자공학과(공학사)  
1989년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학석사)  
1994년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학박사)  
1994년 3월~1995년 3월: 한국과학

기술원 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 전자기표준부 전자파연구실 선임연구원