

論文98-35D-2-1

주파수평균된 전계전력패턴을 사용한 high-contrast 원기둥 공동의 incoherent 영상법

(Incoherent Imaging Method for High-Contrast Cylindrical Cavity by Using Frequency-Averaged Electric Field Intensity Pattern)

康 辰 變 * , 羅 正 雄 **

(Jin-Seob Kang and Jung Woong Ra)

요 약

본 논문에서는 cross-borehole 측정구조에서 시간조화 원주파가 high-contrast 원기둥 공동에 입사되었을 때 공동에 의해 산란된 총전계전력을 주파수 평균하여 얻은 incoherent 전계전력패턴을 역투시하여 공동의 incoherent 영상을 얻었다. 다중주파수 효과는 주파수 영역에서 정의된 mutual coherence 함수를 이용해서 해석적으로 설명되었으며 수치계산으로 입증되었다. High-contrast 원기둥 공동의 영상재현으로 이 영상재현법의 타당성을 보였으며, 좋은 영상을 얻기 위한 조건을 조사했다.

Abstract

In this paper, an incoherent imaging of a high-contrast cylindrical cavity illuminated by the time-harmonic cylindrical wave is obtained via the back-projections of the incoherent intensity patterns, which is acquired by averaging out the multi-frequency intensities of the total electric field scattered from this object in the cross-borehole measurement configuration. Multi-frequency effect is shown numerically and is interpreted analytically by the mutual coherence function defined in the frequency domain. This imaging method is validated by imaging high-contrast cylindrical cavities and the conditions to get better image are investigated.

I. 서 론

본 논문에서는 지표면으로부터 수십 m 깊이에 있는 크기가 수 m이고 배경매질과 유전율 차가 큰 (high-

contrast) 원기둥 공동을 전자파를 사용해서 영상재현하는 방법을 제안하려 한다. 천연동굴과 같은 지하공동의 탐사는 댐이나 원자력발전소의 지하구조물 및 핵 폐기물이나 산업폐기물 등을 위한 지하저장소 건설 예정지역의 지반검사에 필수적이다^[1].

전자파를 이용한 지표면에서의 탐사법^[2,3]은 땅의 전송손실 때문에 지표면으로부터 수 m 내에 얇게 묻혀진 산란체에만 적용이 가능하다. 따라서 지하 수십 m 깊이에 있는 유전체 공동을 탐지하기 위해서는 송수신기가 움직일 수 있는 시추공(borehole)을 공동이 위치한 깊이까지 뚫고, 시추공내에서 송수신기를 움직

* 正會員, 忠北大學校 電氣電子工學部

(Chungbuk National University School of Electrical and Electronic Engineering)

** 正會員, 韓國科學技術院 電氣 및 電子工學科

(Korea Advanced Institute of Science and Technology Department of Electrical Engineering)

接受日字:1997年8月28日, 수정완료일:1998年1月30日

이며 공동을 탐지하는 것이 바람직하다. 탐사방법으로는 송수신기를 같은 시추공에 넣고 공동에 의한 반사파를 측정하는 방법이나 공동 양쪽에 위치한 두 시추공에 송수신기를 각각 넣고 매질을 지나온 투과파를 측정하는(cross-borehole 측정)방법^[1,4]이 가능한데, 공동에 의한 반사파는 크기가 작으므로 투과파를 측정하는 것이 보다 효과적이다. 따라서 본 논문에서는 cross-borehole 측정구조에서 high-contrast 공동영상법을 고려하였다.

High-contrast 지하공동 탐사에 적합한 방법으로는 복잡한 신호처리 과정이 요구되거나 배경매질과 유전율 차가 작은 low-contrast 유전체에 적용 가능한 일반적인 산란방법들^[3-7]과는 달리 산란체의 특별한 산란특성을 이용한 탐사법^[11]이 있다. 이 방법에서는 cross-borehole 측정구조에서 두 시추공에 송수신기를 각각 넣고 일정한 간격으로 동시에 같이 위로 올리면서, 매 위치마다 주파수를 바꾸며 원기둥 공동에 의해 산란된 총전계를 수신기에서 측정한다. 이 방법은 매질내에서 공동의 단면 크기에 비해 긴 파장을 가지는 입사파가 공동에 입사되면 순방향(forward direction)에서 수신된 총전계 크기패턴에 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 방법으로는 한번의 평행(parallel)측정과 두번의 경사(offset)측정으로부터 얻은 총전계의 double dip 패턴을 역투사하여 복잡한 신호처리 과정을 거치지 않고 공동위치와 크기를 쉽게 예측할 수 있으나, 그 단면모양을 예측하기는 어렵다. 한편 앞에서 언급한 특정한 주파수대역의 연속 전자파가 high-contrast 원기둥 공동에 입사되었을 때 순방향 총전계 크기패턴에 나타나는 특이한 double dip이 근거리 shadow 영역에서 double null이나 강한 double dip이 된다고 알려져 있으며 이들의 발생주파수 및 위치도 알려져 있다^[8,9].

최근에는 다중주파수 시간조화신호를 사용한 도체기둥 영상법^[10,11]이 소개되었다. 시간조화 평면파가 도체기둥에 입사되면, 순방향에서 측정된 전계전력패턴에는 서로 다른 전파경로를 가진 입사파와 산란파에 의해 간섭무늬가 나타난다. Lit 영역에서 전계전력은 입사파 전력을 중심으로 진동하지만 shadow 영역에서

는 입사파 전력에 비해 작은 값을 중심으로 lit 영역에 비해 작은 진폭으로 진동한다. 이들 간섭무늬의 주기는 시간조화 신호원의 주파수에 의해 결정되므로 주파수를 바꾸어 가며 각 주파수에서 얻은 전계전력패턴들을 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 전계전력패턴에는 lit 영역에서는 평균 전계전력이 입사파 전력과 비슷하고 shadow 영역에서는 입사파 전력에 비해 작은 값을 가지는 간섭무늬가 제거된 incoherent shadow 전계전력패턴이 나타난다^[10]. 이 영상법에서는 원형회전 측정구조에서 여러 입사각에 대해 다중 주파수를 사용하여 얻은 incoherent shadow 전계전력패턴을 영상재현하려는 영역에 역투사하여 도체기둥의 incoherent 영상을 재현했다^[11].

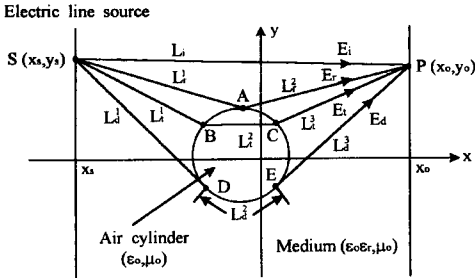
본 논문에서는 원형회전 측정구조에서 다중주파수 시간조화신호를 사용한 도체기둥 영상법을 cross-borehole 측정구조에서 high-contrast 원기둥 공동의 영상재현에 적용했다. 실제 상황에서는 점전원(dipole source)이 전원으로 사용되는데, 점전원에 대한 원기둥 공동의 산란이 벡터 산란문제이고 산란해가 무한적분으로 표현되므로, 복잡하게 표현된 산란해를 계산하기 위해서는 많은 계산시간이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 점전원에 대한 원기둥 공동의 산란문제를 2차원 스칼라 산란문제로 단순화시켜, 원기둥 공동에 전계 선전류에 의해 복사된 전자파가 입사되는 경우를 고려했다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서는 우선 유전체 매질내에 있는 high-contrast 원기둥 공동에 선전류로부터 복사된 원주파가 입사되었을 때, 전계전력패턴에 발생하는 간섭무늬를 다중 주파수를 사용해서 제거할 수 있음을 주파수평균 mutual coherence function을 이용해서 해석적으로 보이고, 수치계산으로 입증했다. III 장에서는 cross-borehole 측정구조에서 계산된 간섭무늬가 제거된 incoherent shadow 전계전력패턴을 영상 재현하려는 영역에 역투사하여 high-contrast 원기둥 공동의 영상을 얻는 방법을 소개하고, 유한한 주파수대역을 사용하면서도 보다 좋은 영상을 얻을 수 있는 방법에 대해 설명하고, 영상재현 결과를 제시했다. 그리고 IV 장에서 결론을 맺었다.

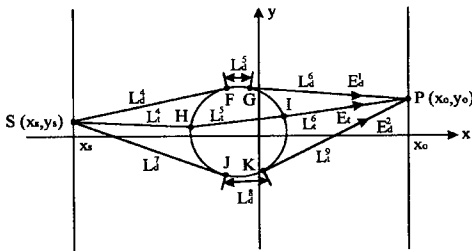
II. 원기둥 공동에 의한 다중주파수 효과

1. 주파수평균 mutual coherence function을 이용한 해석

비유전율이 ϵ_r 인 매질내에서 전계 선전류로부터 복사된 시간조화 원주파가 공기로 채워진 원기둥 공동에 입사된 경우를 생각하자(그림 1). 입사파가 조사되는 lit 영역에서 (총)전계 E 는 점근적으로 입사파 E_i 와 공동 표면 A에서 반사된 반사파 E_r 과 공동을 B에서 C까지 투과해서 온 투과파 E_t 와 공동 표면을 따라 D에서 E까지 L_d^2 만큼 돌아온 회절파(creeping wave) E_d 들로 구성된다(그림 1(a))^[12]. 한편 입사 파가 조사되지 않는 shadow 영역에서 전계는 공동을 H에서 I까지 투과해서 온 투과파 E_i 와 공동 위쪽(F에서 G까지)과 아래쪽 표면(J에서 K까지)을 따라서 돌아온 회절파 $E_d^{1,2}$ 들로 구성된다(그림 1(b)).



(a)



(b)

그림 1. Cross-borehole 측정구조에서 원기둥 공동에 의한 산란의 광선해석; (a) lit 영역, (b) shadow 영역

Fig. 1. Ray interpretation of scattering by a cylindrical cavity in the cross-borehole measurement configuration; (a) the lit region and (b) the shadow region.

$$E = \begin{cases} E_i + E_r + E_t + E_d, & \text{lit 영역,} \\ E_i + E_d^1 + E_d^2, & \text{shadow 영역.} \end{cases} \quad (1)$$

여기서 lit 영역 전계성분들은

$$E_i = \lim_{kL_i \gg 1} -\frac{j}{4} H_0^{(2)}(kL_i), \quad (2)$$

$$= \frac{a}{\sqrt{kL_i}} e^{-jkL_i},$$

$$E_r = \frac{a}{\sqrt{kL_r^1}} R(A)S(A) e^{-jk(L_i^1 + L_r^1)}, \quad (3)$$

$$E_t = \frac{a}{\sqrt{kL_t^1}} T(B)S(B)T(C)S(C) e^{-jk(L_i^1 + k(L_i^1 + L_t^1))}, \quad (4)$$

$$E_d = \frac{a}{\sqrt{kL_d^1}} D(L_d^2) e^{-jk(L_i^1 + L_d^2)} \quad (5)$$

를 의미하고, shadow 영역 전계성분들은

$$E_i = \frac{a}{\sqrt{kL_i^4}} T(H)S(H)T(I)S(I) e^{-jk(L_i^4 + k(L_i^4 + L_s^4))}, \quad (6)$$

$$E_d^1 = \frac{a}{\sqrt{kL_d^4}} D(L_d^5) e^{-jk(L_i^4 + L_d^5)}, \quad (7)$$

$$E_d^2 = \frac{a}{\sqrt{kL_d^7}} D(L_d^8) e^{-jk(L_i^4 + L_d^8)} \quad (8)$$

를 의미한다. 그리고 $H_0^{(2)}$ 는 제2종 0차 Hankel 함수를 의미하며, 상수 a 는 $\frac{e^{-j\pi/4}}{\sqrt{8\pi}}$ 를 의미하고, k_o 와 k 는 각각 공동 및 배경매질의 파수 ($k_o = \omega\sqrt{\mu_o\epsilon_o}$, $k = k_o\sqrt{\epsilon_r}$) 를 의미한다. 또한 $R(\cdot)$, $T(\cdot)$, $D(\cdot)$ 는 각각 반사계수, 투과계수, 회절계수를 의미하고, $S(\cdot)$ 는 spreading factor를 의미하고, $L_{i,r,t,d}$ 는 각 파동의 전파경로 길이를 의미한다. 이 논문에서는 시간조화 함수 $e^{j\omega t}$ 을 사용했으며, 이를 모든 표현식에서 생략했다.

본 논문에서는 원기둥 공동의 다중주파수 효과를 해석하기 위해 다음과 같이 정의된 주파수평균 전계전력 I_{ave} ^[10] 를 사용했다.

$$I_{ave} = \frac{1}{f_b - f_a} \int_{f_a}^{f_b} E(f)E^*(f)df. \quad (9)$$

여기서 *는 공액복소수를 의미하고, f_a 와 f_b 는 각각 사용하는 주파수대역의 시작 및 끝 주파수를 의미한다. Lit 및 shadow 영역에서 주파수평균 전계전력은 식 (1)을 식(9)에 대입해서 얻을 수 있다.

$$I_{ave} = \begin{cases} I_i + I_r + I_t + I_d + 2\text{Re}[\Gamma_{ir} + \Gamma_{it} + \Gamma_{id} + \Gamma_{rt} + \Gamma_{rd} + \Gamma_{td}], & \text{lit 영역,} \\ I_i + I_r^2 + I_t^2 + 2\text{Re}[\Gamma_{ir}^2 + \Gamma_{it}^2 + \Gamma_{id}^2], & \text{shadow 영역.} \end{cases} \quad (10)$$

여기서 첨자 i, r, t, d 는 각각 입사파, 반사파, 투과파, 회절파를 의미하고, $\text{Re}[A]$ 는 A 의 실수부를 의미한다. 그리고 I_m 은 전계 E_m 의 주파수평균 전력으로서

$$I_m = \frac{1}{f_b - f_a} \int_{f_a}^{f_b} E_m(f) E_m^*(f) df, \quad m = i, r, t, d, \frac{1}{d}, \frac{2}{d} \quad (11)$$

으로 정의되며, 두 전계 E_m 과 E_n 중첩에 의해 발생하는 간섭무늬를 나타내는 Γ_{mn} 은 두 전계 곱의 주파수평균으로서 주파수평균 mutual coherence 함수라 한다.

$$\Gamma_{mn} = \frac{1}{f_b - f_a} \int_{f_a}^{f_b} E_m(f) E_n^*(f) df, \quad mn = ir, it, id, rt, rd, td, \frac{1}{d}, \frac{2}{d}, \frac{1}{d}, \frac{2}{d}. \quad (12)$$

한편 Γ_{mn} 을 관련된 두 전계의 주파수평균값 I_m 과 I_n 으로 정규화한 값 $\gamma_{mn} (= \frac{\Gamma_{mn}}{\sqrt{I_m I_n}})$ 인 complex degree of coherence의 크기는 0과 1사이 값을 가진다. 식(10)에서 발생하는 간섭무늬 $2\text{Re}[\Gamma_{mn}]$ 은 정현파 진동으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$2\text{Re}[\Gamma_{mn}] = 2\sqrt{I_m I_n} |\gamma_{mn}| \cos[\angle \gamma_{mn}]. \quad (13)$$

식(13)으로부터 간섭무늬 진폭폭이 정규화된 주파수평균 mutual coherence 함수 크기 $|\gamma_{mn}|$ 에 의해 결정되는 것을 알 수 있다. 그러므로 만약 $|\gamma_{mn}| = 0$ 이면, 진폭폭이 0 이 되므로 두 전계 중첩에 의한 간섭무늬는 발생하지 않게 되는데 이를 complete incoherence라 한다^[13].

Lit 및 shadow 영역 평균 전계전력패턴에서 큰 진폭의 간섭무늬를 발생시키는 성분을 생각해 보자. 간섭무늬 진폭이 식(13)에서와 같이 간섭무늬 발생에 관련된 두 전계의 주파수평균 전력에 의해 결정되므로, 전계 성분들 중에서 크기가 큰 성분을 찾아보자. 일반적으로 주파수가 증가하거나, 측정점이 shadow 영역에서 lit 영역으로 이동하여 회절파가 공동 표면을 따라 돌아오는 길이 L_d 가 증가하면, 회절계수 크기 $|D(L_d)|$ 가 급격히 감소하므로 회절파 크기도 따라서 급격히 감소한다^[12]. 그러므로 주파수가 어느 이상 증가하면, 회절파는 다른 전계성분인 입사파와 반사파

및 투과파 (기하광학 성분들)에 비해 크기가 감소하므로 lit 및 shadow 영역에서 무시될 수 있다. 따라서 낮은 주파수 대역을 사용하더라도 충분히 넓은 주파수 대역을 사용하면, 식(10)의 성분들 중에서 회절파에 관련된 항들을 무시할 수 있으므로 평균 전계전력은 기하광학 성분들로 구성된다.

$$I_{ave} \approx \begin{cases} I_i + I_r + I_t + 2\text{Re}[\Gamma_{ir} + \Gamma_{it} + \Gamma_{rt}], & \text{lit 영역,} \\ I_i, & \text{shadow 영역.} \end{cases} \quad (14)$$

식(14)로부터 사용하는 주파수 대역이 충분히 넓으면, shadow 영역에서는 간섭무늬가 제거되어 평균 전계전력이 I_i 값을 가지며, lit 영역에서는 기하광학 성분 전계들의 중첩에 의해 발생하는 간섭무늬가 그 성분들의 주파수평균 전계전력 합 $I_i + I_r + I_t$ 을 중심으로 진동하는 것을 알 수 있다. 일반적으로 반사 및 투과계수 크기는 1 보다 작으므로 반사파 크기는 입사파 크기보다는 작으나 투과파 크기보다는 크므로 식(14)에서 간섭무늬 발생에 가장 큰 기여를 하는 주파수평균 mutual coherence 함수는 입사파와 반사파에 의한 Γ_{ir} 이고, 그 다음은 입사파와 투사파에 의한 Γ_{it} 이며, 가장 적은 기여를 하는 것은 반사파와 투과파에 의한 Γ_{rt} 이다.

이제 다중주파수를 사용하여 입사파와 반사파에 의한 간섭무늬를 제거할 수 있는지를 알기위해 $|\gamma_{ir}|$ 의 주파수 대역폭에 대한 의존성을 조사해 보자. 우선 필요한 Γ_{ir} 은 식(2), (3)을 식(12)에 대입해서 얻을 수 있다.

$$|\Gamma_{ir}| = \frac{a^2 R(A)^* S(A)}{b L_i L_r^2} \frac{[C_i(bL_{ir}f) - C_r(bL_{ir}f)] - \int_{f_a}^{f_b} S_i(bL_{ir}f) - S_r(bL_{ir}f)}{f_b - f_a}. \quad (15)$$

여기서 $L_{ir} (= L_i - (L_r^2 + L_i^2))$ 은 입사파와 반사파의 전파경로차를 의미하며, b 는 $\frac{2\pi}{\nu}$ 를 의미하며 ν 는 파동의 매질 전파속도이다. 그리고 $S_i(x)$, $C_i(x)$ 는 다음과 같이 정의되는 Sine 적분과 Cosine 적분을 의미한다^[14].

$$S_i(x) = \int_0^x \frac{\sin t}{t} dt, \quad C_i(x) = -\int_x^\infty \frac{\cos t}{t} dt = \gamma + \ln x + \int_0^x \frac{\cos t - 1}{t} dt. \quad (16)$$

여기서 $\gamma (= 0.577216)$ 는 Euler 상수를 의미한다. 한편 Sine 적분과 Cosine 적분은

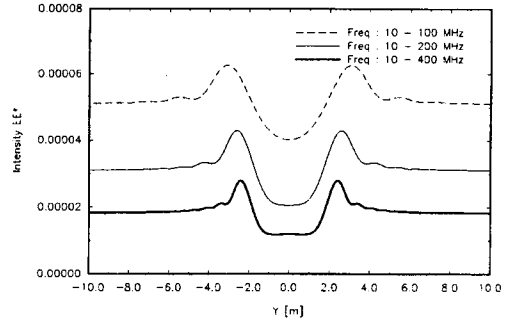
$$\lim_{x \rightarrow 0^+} Si(x) \approx x, \quad \lim_{x \rightarrow 0^+} Ci(x) \approx -\ln \frac{1}{\gamma x}, \quad (17)$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} Si(x) \approx \frac{\pi}{2} - \frac{\cos x}{x}, \quad \lim_{x \rightarrow \infty} Ci(x) \approx \frac{\sin x}{x}$$

와 같은 성질을 가지며, $x \geq 0$ 이면 $0 \leq Si(x) < 2$, $x > \frac{1}{2}$ 이면 $|Ci(x)| < \frac{1}{2}$ 사이의 유한한 값을 가진다. 식(2), (3)를 식(1)에 대입해 얻은 입사파와 반사파의 주파수평균 전력 I_i , I_r 과 식(15)로부터 $|\gamma_{il}|$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$|\gamma_{il}| = \frac{\sqrt{[Ci(bL_{ifb}) - Ci(bL_{ifa})]^2 + [Si(bL_{ifb}) - Si(bL_{ifa})]^2}}{f_b - f_a} \quad (18)$$

원기둥 공동의 산란문제에서 반사파의 전파경로는 입사파의 것보다 항상 길므로 두 파동의 경로차는 $L_{ir} \neq 0$ 이 된다. 따라서 사용주파수 대역폭이 넓어질 수록($f_a \ll f_b$) 식(18)의 $|\gamma_{il}|$ 은 $\frac{1}{f_b - f_a}$ 에 의해 작아지므로 간섭무늬 진동폭은 감소하게 되며, 만약 무한 주파수 대역폭이 사용된다면($(f_b - f_a) \rightarrow \infty$) $|\gamma_{il}| = 0$ 이 되므로 입사파와 반사파에 의한 간섭무늬는 완전히 제거된다.

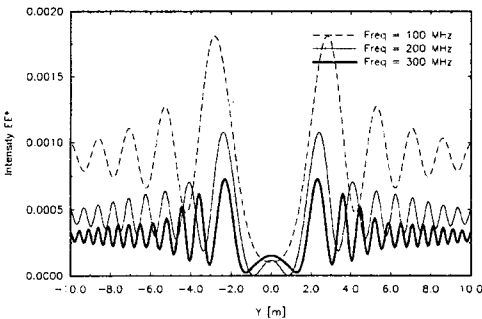


(c)

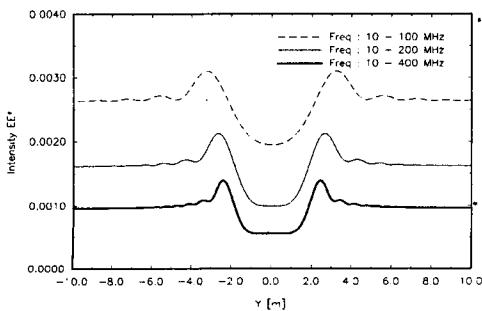
그림 2. (a) $x_s = -7.5$ m, $x_o = 7.5$ m 인 경우 주파수가 100 MHz, 200 MHz, 300 MHz 일 때 비유전율(ϵ_r)이 2인 무손실매질에 있는 반지름이 1 m 이고 공기로 채워진 원기둥 공동에 의한 전계전력패턴, (b) 주파수대역이 (10 MHz, 100 MHz), (10 MHz, 200 MHz), (10 MHz, 400 MHz) 이고 주파수 간격이 10 MHz 일 때 비유전율이 2인 무손실매질에 있는 원기둥 공동의 평균 전계전력패턴, (c) 주파수대역이 (10 MHz, 100 MHz), (10 MHz, 200 MHz), (10 MHz, 400 MHz) 이고 주파수 간격이 10 MHz 일 때 비유전율이 2이고 도전율이 $0.001 \sigma/m$ 인 손실매질에 있는 원기둥 공동의 평균 전계전력패턴

Fig. 2. (a) Intensity patterns scattered from the air cylinder of 1 meter radius in a lossless medium of $\epsilon_r = 2$ for the frequencies of 100 MHz, 200 MHz, and 300 MHz in the case of $x_s = -7.5$ m and $x_o = 7.5$ m, (b) average intensity patterns scattered from the cylindrical cavity in a lossless dielectric medium of $\epsilon_r = 2$ for the frequency bands of (10 MHz, 100 MHz), (10 MHz, 200 MHz), and (10 MHz, 400 MHz) by the interval of 10 MHz, and (c) average intensity patterns scattered from the cylindrical cavity in a lossy dielectric medium of $\epsilon_r = 2$ and $\sigma = 0.001 \sigma/m$ for the frequency bands of (10 MHz, 100 MHz), (10 MHz, 200 MHz), and (10 MHz, 400 MHz) by the interval of 10 MHz.

이제 입사파와 투과파 및 반사파와 투과파에 의한 간섭무늬를 다중주파수를 사용해서 제거할 수 있는지를 알기 위해, 입사파와 투과파에 의한 $|\gamma_{il}|$ 와 반사파와 투과파에 의한 $|\gamma_{rl}|$ 의 주파수 의존성을 생각해 보자. 기하광학 성분인 입사파와 반사파 및 투과파는 식(2), (3), (4), (6)에서와 같이 서로 유사한 형태로 표현되므로, 이 관계를 이용해서 $|\gamma_{il}|$ 와 $|\gamma_{rl}|$ 를 구해 보면 식(18)에서 L_{ir} 대신에 $|\gamma_{il}|$ 인 경우는 입사파



(a)



(b)

와 투과파의 경로차인 L_{it} ($=L_i - (L_i^1 + L_i^3 + \frac{L_i^2}{\sqrt{\epsilon_r}})$) 를 대입하면 얻을 수 있고, $|r_{it}|$ 인 경우는 반사파와 투과파의 경로차인 L_{it} ($= (L_i^1 + L_i^2) - (L_i^1 + L_i^3 + \frac{L_i^2}{\sqrt{\epsilon_r}})$) 를 대입하면 얻을 수 있다. 따라서 사용하는 주파수대역폭이 넓어질수록 $|r_{it}|$ 와 $|r_{rt}|$ 는 $\frac{1}{f_b - f_a}$ 에 의해 의해 작아지므로 입사파와 투사파 및 반사파와 투과파에 의한 간섭무늬 진동폭은 감소하게 되며, 만약 무한 주파수 대역폭을 사용한다면 $|r_{it}| = |r_{rt}| = 0$ 이 되므로 이들 파동에 의한 간섭무늬는 완전히 제거된다. 결론적으로 공동의 순방향 평균 전계전력패턴에 발생하는 간섭무늬는 주파수대역 폭이 넓어질수록 진동폭이 감소하며, 만약 무한 주파수 대역폭을 사용한다면 간섭무늬를 완전히 제거할 수 있다.

2. 수치계산 결과

Cross-borehole 측정구조에서 비유전율(ϵ_r)이 2인 비손실 매질내에 있는 반지름이 1 m이고 공기로 채워진 high-contrast 원기둥 공동에 $x_s = -7.5$ m에 위치한 전계 선전류로부터 복사된 시간조화 원주파가 입사됐을 때, $x_o = 7.5$ m에서 전원과 측정점을 y 방향에 대해 같은 높이로 동시에 같이 움직이며($y_s = y_o$) 무한급수로 표현된 해석적인 해^[12]를 사용해 전계전력 EE^* 를 계산했다. Lit 영역($|y| > 1$ m)에서 전계전력은 입사파 전력을 중심으로 진동하며 원기둥 경계($|y| = 1$ m)로부터 멀어질수록 진동폭과 주기가 서서히 감소하나, shadow 영역($|y| < 1$ m)에서는 lit 영역에 비해 상대적으로 진동폭이 작은 간섭무늬가 전계전력 0 부근에 나타난다(그림 2(a)). 주파수가 증가하면, 간섭무늬 주기가 감소하여 간섭무늬가 원기둥 경계쪽으로 이동하며 식(2)로부터 입사파를 표현하는 Hankel 함수의 argument kL_i 가 증가하므로 입사파 전력이 감소하여 lit 영역에서는 평균 전계전력 값 및 간섭무늬 진동폭이 작아지고 shadow 영역에서는 전계전력이 감소하여 0으로 수렴한다.

다중주파수 효과를 보기 위해 시작주파수가 10 MHz일 때 주파수대역을 증가시키며 주파수대역내에서 주파수를 10 MHz씩 증가시키면서($\Delta f = 10$ MHz) 각 주파수에서 얻은 전계 $E(f_n)$ 의 주파수평균 전계전력 I_{ave} 를 다음 유한급수식을 사용해서 계산했다.

$$I_{ave} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N E(f_n) E^*(f_n). \quad (19)$$

여기서 N 은 사용하는 주파수 갯수를 의미하고, f_n 은 사용하는 주파수대역을 같은 간격으로 $N-1$ 등분했을 때 n 번째 주파수를 의미한다. 간섭무늬 주기가 시간조화 신호원의 주파수에 의해 결정되므로, 다중주파수를 사용하여 얻은 전계전력들을 중첩하면 주기가 다른 간섭무늬가 서로 상쇄되어 원기둥 경계로부터 멀리 떨어진 간섭무늬 진동폭이 먼저 감소하는 것을 볼 수 있다(그림 2(b)). 만약 주파수 대역폭이 더욱 넓어지면, 주기가 다른 간섭무늬들이 보다 많이 중첩되므로 진동폭이 더욱 감소하여 간섭무늬가 경계부근에만 존재하게 된다. 따라서 충분히 넓은 주파수 대역폭을 사용하면, 평균 전계전력이 lit 및 shadow 영역에서 각각 입사파 전력과 0으로 수렴되어 간섭무늬가 제거된 incoherent shadow 전계전력패턴을 얻을 수 있다. 또한 그림 2(b)로부터 주파수 대역폭이 넓어질수록 평균 전계전력패턴에서 최대값 사이거리(shadow 영역크기)가 공동크기로 수렴함을 알 수 있다.

한편 손실매질에서는 산란현상을 광선추적법(ray tracing)으로 해석적으로 설명할 수 없으므로, 본 논문에서는 손실매질에서 원기둥 공동에 의한 다중 주파수효과를 수치계산으로 설명하려 한다. $x_s = -7.5$ m, $x_o = 7.5$ m, $\sigma = 0.001$ σ /m일 때, 주파수 대역폭을 넓게 하며 평균 전계전력패턴을 계산해 보면, 대역폭이 넓어질수록 매질손실 때문에 입사파전력이 감소하고 간섭무늬 진동폭이 감소하는 것을 볼 수 있다(그림 2(c)). 그러나 간섭무늬 주기가 전원 주파수에 의해 결정되므로, 매질에 손실이 있는 경우에도 충분히 넓은 주파수 대역폭을 사용하면, 간섭무늬가 제거된 incoherent shadow 전계전력패턴을 얻을 수 있다. 한편 매질에 존재하더라도 평균 전계전력패턴에서 최대값 사이거리는 거의 변하지 않는다(그림 2(b), (c)).

III. 원기둥 공동의 incoherent 영상

1. 영상재현방법

Cross-borehole 측정구조에서 입사파 입사각을 변화시키며 얻은 incoherent shadow 전계전력패턴을 영상재현하려는 영역에 역투시하면, 공동위치로는 shadow 영역 패턴이 역투시된다(그림 3). 만약 영상재현하려는 영역을 작은 cell들로 나누고, 각 입사각에

서 얻은 incoherent shadow 전계전력패턴을 입사파의 전파경로상에 있는 cell에 계속 더해 준다면, 공동 영역내 cell들에는 주위 영역의 cell들에 비해 작은 값들이 저장된다. 따라서 각 cell들에 저장된 전계전력 분포로부터 원기둥 공동의 영상을 얻을 수 있다.

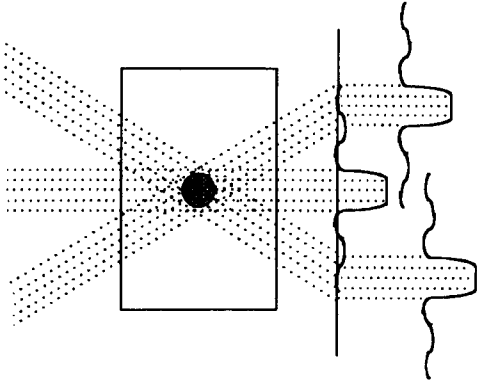


그림 3. Cross-borehole 측정구조에서 원기둥 공동에 의해 산란된 incoherent shadow 전계전력 패턴의 역투시

Fig. 3. Back-projections of the incoherent shadow intensity patterns scattered from a cylindrical cavity in the cross-borehole measurement configuration.

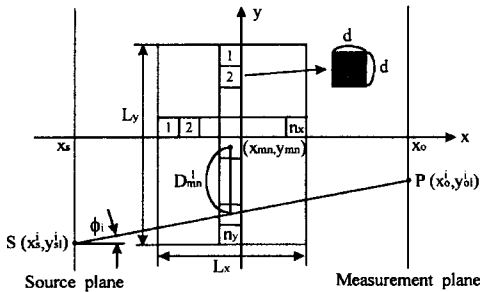


그림 4. Cross-borehole 측정구조에서 원기둥 공동의 영상재현

Fig. 4. Imaging of a cylindrical cavity in the cross-borehole measurement configuration.

Cross-borehole 측정구조에서 각 입사각에 대해 얻은 incoherent shadow 전계전력패턴을 역투시하여 원기둥 공동의 영상을 재현하는 과정은 다음과 같다 (그림 4).

Step 1 사용할 주파수 대역 (f_a, f_b)와 주파수 갯수 N 을 정하고, 정한 대역폭을 같은 간격으로 $N-1$ 등분하여 사용할 N 개의 주

파수 f_k ($k = 1, 2, \dots, N$)을 정한다.

Step 2 영상재현하려는 영역의 위치 및 크기를 정하고, 그 영역을 한변의 길이가 d 인 정사각형 cell로 x, y 방향으로 각각 n_x, n_y 개로 나눈다. 그리고 각 cell의 값을 영으로 초기화한다.

Step 3 각 입사각 ϕ_i ($i = 1, 2, \dots, M$)에 대해 전원 및 측정점의 위치 ($x_s^i, y_s^i, (x_o^i, y_o^i)$)를 정한다 ($l = 1, 2, \dots, L$). 이때 전원과 측정점의 이동 간격 Δy ($= y_{sl}^i - y_{s(l-1)}^i = y_{ol}^i - y_{o(l-1)}^i$)는 cell 한변의 길이 d 보다 작거나 같게 한다.

Step 4 i 번째 입사각 (ϕ_i)의 l 번째 측정점 (x_o^i, y_o^i)에서 전계 $E(f_k)$ 를 N 개의 주파수에서 측정한 후, 유한급수식 식(19)을 사용해서 주파수평균 전계전력 I_{ave} 를 계산한다.

Step 5 n 번째 행의 cell 중에서 전원 (x_s^i, y_s^i)과 측정점 (x_o^i, y_o^i)을 지나는 입사파의 전파경로와 cell 중심 (x_{mn}, y_{mn})과의 거리 (D'_{mn})가 가장 가까운 cell에 I_{ave} 값을 합하고, 합한 회수를 기억시킨다. 이 과정을 모든 행에 대해 수행한다 ($n = 1, 2, \dots, n_x$).

Step 6 전원과 측정점을 같은 간격(Δy)으로 이동시키며 모든 l 에 대해 Step 4, Step 5을 반복 수행한다 ($l = 1, 2, \dots, L$).

Step 7 모든 입사각 ϕ_i ($i = 1, 2, 3, \dots, M$)에 대해 Step 4에서 Step 6까지 과정을 반복 수행한다.

Step 8 영상재현영역의 중앙부분이 주위 영역에 비해 전계전력 값이 가산되는 횟수가 많으므로(그림 3), 이 효과를 평균시키기 위해 각 cell에 저장된 모든 전계전력값을 역투영된 횟수로 나눈다.

2. 영상재현할 때 고려사항들

다중 주파수를 사용해 얻은 평균 전계전력패턴을 역투시하면 원기둥 공동의 영상이 재현되므로, 재현될 영상 질은 평균 전계전력패턴의 주파수대역, 측정점

및 전원위치, 매질손실에 대한 의존성을 조사함으로써 예측할 수 있다. 보다 좋은 영상을 얻기 위해서는 shadow 영역에서 평균 전계전력이 입사파 전력에 비해 가능한한 작고, shadow 영역의 폭이 산란체 크기에 가까울수록 좋을 것이다. 사용하는 주파수 대역폭이 넓어질수록, 이런 현상들이 나타나므로 보다 넓은 주파수 대역폭을 사용하는 것이 유리하다.

그러나 땅과 같이 손실매질에서는 주파수 대역폭이 넓어져 주파수가 높아지면 전송손실이 증가하므로 실제 상황에서는 저주파수대역을 사용하는 것이 바람직하다. 따라서 가능하다면 저주파수 대역을 사용하되 같은 대역폭이라도 공동의 shadowing 효과가 강하게 나타나는 주파수대역을 사용하는 것이 요구된다. 최근에 손실매질에 있는 원기둥 공동에 의한 근거리 회절 현상이 해석되었다^[9]. 이 결과에 의하면 비유전율이 2인 매질내에 있는 반지름이 1 m이고 공기로 채워진 원기둥 공동의 근거리영역에서 전계패턴 shadow 영역에 double null이나 강한 double dip이 발생하는 null 주파수대역들이 존재하는데 이들 중에서 가장 낮은 null 주파수대역(첫번째 모드)의 null 주파수대역이 100 MHz - 300 MHz이며, 이 주파수대역은 매질손실량에 영향을 받지 않는 것으로 알려졌다.

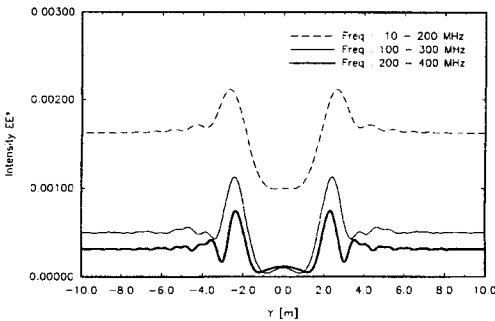
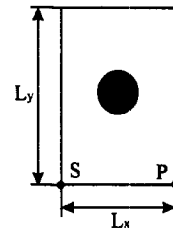


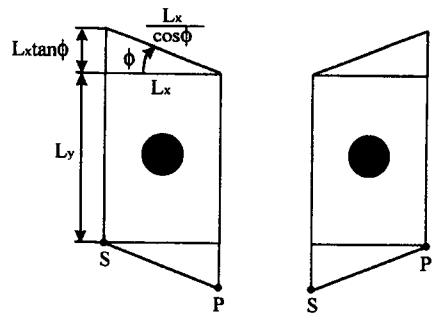
그림 5. $x_s = -7.5$ m, $x_o = 7.5$ m인 경우 주파수대역이 (10 MHz,200 MHz), (100 MHz,300 MHz), (200 MHz,400 MHz)이고 주파수 간격이 10 MHz일 때 비유전율이 2인 무손실매질에 있는 반지름이 1 m이고 공기로 채워진 원기둥 공동의 평균 전계전력패턴

Fig. 5. Average intensity patterns scattered from the air cylinder of 1 meter radius in a lossless dielectric medium of $\epsilon_r = 2$ for the frequency bands of (10 MHz,200 MHz), (100 MHz,300 MHz), and (200 MHz,400 MHz) by the interval of 10 MHz in the case of $x_s = -7.5$ m and $x_o = 7.5$ m.

Double null과 강한 double dip이 발생하는 null 주파수대역에서 shadow 영역 평균 전계전력은 입사파전력에 비해 작으므로, 이 주파수대역에서는 강한 그들이 shadow 영역에서 나타나게 된다. 이를 수치계산으로 보이면, 같은 대역폭(200 MHz)을 사용하더라도 사용하는 주파수대역이 첫번째 모드의 null 주파수대역과 일치할 때 shadow 영역에서 평균 전계전력이 가장 작게 나타나므로(그림 5), 손실매질에서는 가능하다면 이 주파수 대역을 사용하는 것이 효과적이다. 이 논문에서는 모든 수치계산에서 첫번째 모드의 null 주파수대역(100 MHz - 300 MHz)을 사용했다.



(a)



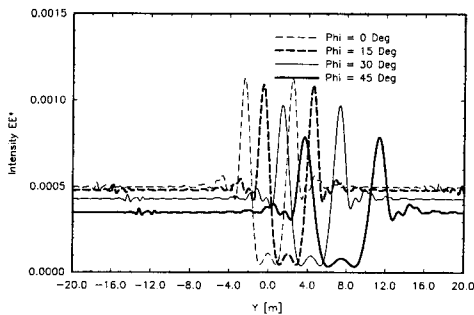
(b)

그림 6. Cross-borehole 측정구조에서 측정형태; (a) 평행측정, (b) 경사측정

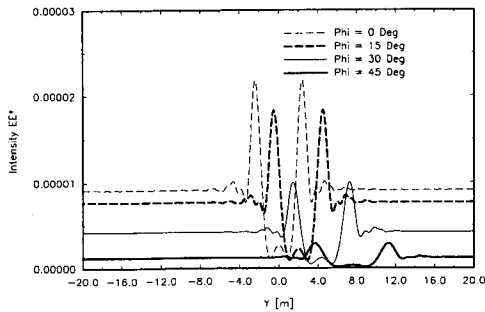
Fig. 6. Measurement types in the cross-borehole measurement configuration; (a) the parallel measurement and (b) the offset measurement.

한편 cross-boreholes 측정구조에서 전계측정방법으로는 전원과 측정점을 y 방향에 대해 같은 높이로 동시에 움직이며 ($\phi=0^\circ$) 측정하는 평행측정(그림 6(a))과 측정점을 전원보다 y 방향에 대해 높거나 낮게 한후 ($\phi \neq 0^\circ$) 함께 움직이며 측정하는 경사측정을 생각할 수 있다(그림 6(b)). 평행측정에서는 전계를

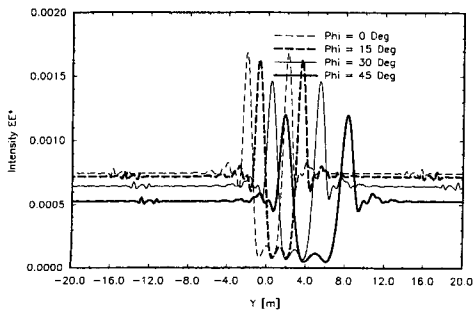
L_y 길이만큼 측정하면 되나, 입사각이 ϕ 인 경사측정에서는 전원과 측정점의 높이차가 $L_x \tan \phi$ 이므로 측정길이는 $L_y + L_x \tan \phi$ 로 길어지게 된다. 여기서 L_x 와 L_y 는 각각 두 시추공사이의 거리와 깊이이다. 일반적으로 실제 산란체에 가까운 영상을 얻기 위해서는 입사각이 큰 경사측정에서 얻은 정보도 필요한데, 입사각이 커지면 전원과 측정점사이 거리 $\frac{L_x}{\cos \phi}$ 가 길어지게 된다. 그러나 땅과 같이 손실매질에서는 전원과 측정점사이 거리가 증가하면 전송손실이 커지므로(그림 7), 실제 상황에서는 적당한 입사각내에서만 경사측정을 해야 한다.



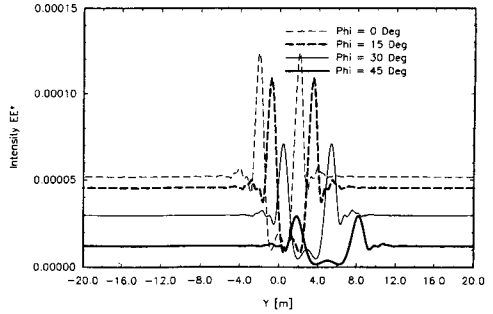
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 7. (a) $x_s = -7.5$ m, $x_o = 7.5$ m, 주파수대역이 (100 MHz, 300 MHz), 주파수 간격이 10 MHz 인 경우 입사각이 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 일 때 비유전율이 2인 무손실매질에 있는 반지름이 1 m이고 공기로 채워진 원기둥 공동의 평균 전계전력패턴, (b) $x_s = -7.5$ m, $x_o = 7.5$ m인 경우 비유전율이 2이고 도전율이 $0.001 \sigma/m$ 인 손실매질에 있는 원기둥 공동의 평균 전계전력패턴, (c) $x_s = -5$ m, $x_o = 5$ m인 경우 비유전율이 2인 무손실매질에 있는 원기둥 공동의 평균 전계전력패턴, (d) $x_s = -5$ m, $x_o = 5$ m인 경우 비유전율이 2이고 도전율이 $0.001 \sigma/m$ 인 손실매질에 있는 원기둥 공동의 평균 전계전력패턴

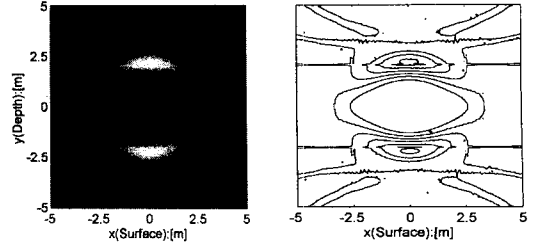
Fig. 7. (a) Average intensity patterns scattered from the air cylinder of 1 meter radius in a lossless dielectric medium of $\epsilon_r = 2$ at the incident angles of $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$, and 45° for the frequency band of (100 MHz, 300 MHz) by the interval of 10 MHz in the case of $x_s = -7.5$ m and $x_o = 7.5$ m, (b) average intensity patterns scattered from the cylindrical cavity in a lossy dielectric medium of $\epsilon_r = 2$ and $\sigma = 0.001 \sigma/m$ in the case of $x_s = -7.5$ m and $x_o = 7.5$ m, (c) average intensity patterns scattered from the cylindrical cavity in a lossless dielectric medium of $\epsilon_r = 2$ in the case of $x_s = -5$ m and $x_o = 5$ m, and (d) average intensity patterns scattered from the cylindrical cavity in a lossy dielectric medium of $\epsilon_r = 2$ and $\sigma = 0.001 \sigma/m$ in the case of $x_s = -5$ m and $x_o = 5$ m.

이 논문에서는 모든 수치계산에서 $0^\circ, \pm 15^\circ, \pm 30^\circ, \pm 45^\circ$ 입사각에 대해 얻은 평균 전계패턴을 사용하였다. 전원과 측정점 위치 변화에 대한 평균 전계전력패턴의 의존성을 알기위해, 첫번째 모드의 주파수 대역에서 $x_s = -5$ m, $x_o = 5$ m일 때 평균 전계전력패턴을 계산했다(그림 7(c), (d)). 전원과 측정점이 공동에 가

가을수록 전력패턴의 최대값사이 거리가 공동크기로 수렴하므로 실제 공동 크기에 가까운 shadow 패턴을 얻기 위해서는 전원 및 측정점이 공동에 가까이 있어야 한다. 결론적으로 좋은 영상을 얻기 위해서는 null 주파수 대역을 포함하는 저주파수 대역의 다중주파수를 사용하여 공동 가까이에 전원을 두고, 공동에 근접해서 전계전력을 측정해야 한다.

3. 원기둥 공동의 영상재현 결과

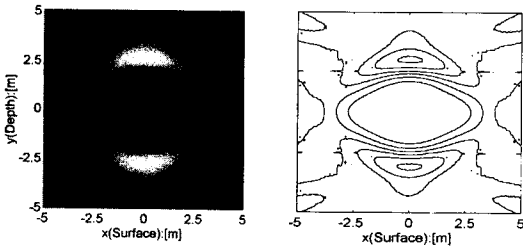
Cross-borehole 측정구조에서 $x_s = -7.5$ m, $x_o = 7.5$ m, 주파수대역이 (100 MHz,300 MHz)인 경우 입사각이 $0^\circ, \pm 15^\circ, \pm 30^\circ, \pm 45^\circ$ 일 때 얻은 평균 전계전력패턴(그림 7(a))을 영상재현영역(10 m X 10 m)에 역투사하여 비유전율이 2인 무손실매질에 있는 반지름이 1 m이고 공기로 채워진 high-contrast 원기둥 공동의 incoherent 영상을 얻었다(그림 8(a)). 시추공 평행방향에 비해 그와 수직인 방향으로 늘어난 영상이 재현되므로 평행방향 해상도가 수직방향 것에 비해 좋음을 알 수 있는데, 이는 cross-borehole 측



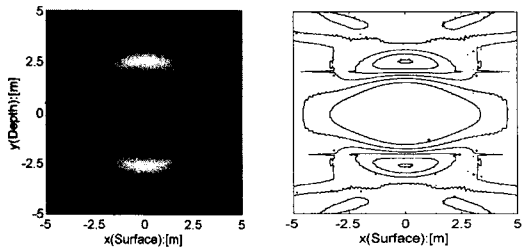
(d)

그림 8. (a) $x_s = -7.5$ m, $x_o = 7.5$ m, 주파수대역이 (100 MHz,300 MHz), 주파수 간격이 10 MHz 인 경우 입사각이 $0^\circ, \pm 15^\circ, \pm 30^\circ, \pm 45^\circ$ 일 때 얻은 평균 전계전력패턴을 사용한 비유전율이 2인 무손실매질에 있는 반지름이 1 m 이고 공기로 채워진 원기둥 공동의 incoherent 영상과 등전력선, (b) $x_s = -7.5$ m, $x_o = 7.5$ m인 경우 얻은 평균 전계전력패턴을 사용한 비유전율이 2이고 도전율이 $0.001 \sigma/m$ 인 손실 매질에 있는 원기둥 공동의 incoherent 영상과 등전력선, (c) $x_s = -5$ m, $x_o = 5$ m인 경우 얻은 평균 전계전력패턴을 사용한 비유전율이 2인 무손실매질에 있는 원기둥 공동의 incoherent 영상과 등전력선, (d) $x_s = -5$ m, $x_o = 5$ m인 경우 얻은 평균 전계전력패턴을 사용한 비유전율이 2이고 도전율이 $0.001 \sigma/m$ 인 손실매질에 있는 원기둥 공동의 incoherent 영상과 등전력선

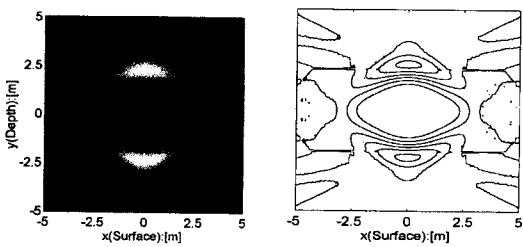
Fig. 8. (a) Incoherent imaging and its equi-intensities of the air cylinder of 1 meter radius in a lossless dielectric medium of $\epsilon_r = 2$ obtained from average intensity patterns for the frequency band of (100 MHz,300 MHz) by the interval of 10 MHz at the incident angles of $0^\circ, \pm 15^\circ, \pm 30^\circ$, and $\pm 45^\circ$ in the case of $x_s = -7.5$ m and $x_o = 7.5$ m, (b) incoherent imaging and its equi-intensities of the cylindrical cavity in a lossy dielectric medium of $\epsilon_r = 2$ and $\sigma = 0.001 \sigma/m$ obtained from average intensity patterns in the case of $x_s = -7.5$ m and $x_o = 7.5$ m, (c) incoherent imaging and its equi-intensities of the cylindrical cavity in a lossless dielectric medium of $\epsilon_r = 2$ obtained from average intensity patterns in the case of $x_s = -5$ m and $x_o = 5$ m, and (d) incoherent imaging and its equi-intensities of the cylindrical cavity in a lossy dielectric medium of $\epsilon_r = 2$ and $\sigma = 0.001 \sigma/m$ obtained from average intensity patterns in the case of $x_s = -5$ m and $x_o = 5$ m.



(a)



(b)



(c)

정구조와 같이 제한된 측정범위내에서 얻은 전계만을

영상재현 자료로 사용했기 때문으로 이런 현상은 diffraction tomography^[3]에서도 나타난다. 입사각이 증가하면 그림 7(a)에서와 같이 평균 전계전력패턴에서 최대값사이 거리가 증가하고 전원과 측정점과의 거리가 멀어져 평균 전계전력 값이 감소하므로, 보다 큰 입사각에 대해 얻은 평균 전계패턴을 사용하더라도 왜곡된 영상은 크게 개선되지 않는다. 한편 영상의 왜곡 정도는 매질에 손실이 존재하면 보다 심화된다(그림 8(b)). 이는 그림 7(b)에서와 같이 매질에 손실이 있으면 입사각이 증가할수록 평균 전계전력 값이 급격히 감소하여 입사각이 작을 때 얻은 것에 비해 크기가 작아져, 이들 평균 전계전력패턴들을 역투시하여 영상을 재현하면 시추공과 수직인 방향으로 영상이 더욱 늘어나게 되기 때문이다. 전원과 측정점이 공동으로 접근하면($x_s = -5$ m, $x_o = 5$ m), 그림 7(c)에서와 같이 전원과 측정점과의 거리가 가까와져서 평균 전계전력 값이 증가하고 평균 전계전력패턴에서 최대값사이 거리가 공동크기로 수렴하므로 보다 좋은 영상이 재현된다(그림 8(c)), 만약 매질에 손실이 존재하면 영상은 열화된다(그림 8(d)).

Cross-borehole 측정구조에서 null 주파수대역의 전계전력패턴을 주파수평균해 얻은 incoherent shadow 전계전력패턴을 역투시하여 손실매질내에 있는 high-contrast 지하 원기둥 공동의 영상을 재현하는 이 방법은 실제 상황에서 다음과 같은 장점이 있다.

첫째로 영상재현의 입력자료로 총전계전력($I = EE^* = |E| |E|$)이 사용된다는 점이다. 실제 상황에서 수신안테나에는 산란파가 아니라 총전계가 측정되므로, 산란파를 영상재현 자료로 사용하는 기존의 방법들^[3,4,6,7]에서는 측정된 총전계에서 입사파를 빼서 산란파를 얻는 과정이 필요하나 경우에 따라서는 이 과정이 용이하지 않으므로, 총전계를 영상재현의 입력자료로 사용한다는 것은 큰 장점이 된다. 그리고 전계의 진폭정보만 필요하고 위상정보는 필요가 없으므로 전계측정시스템이 간단한 구조로 구성될 수 있다.

둘째로 null 주파수대역을 사용하므로 대역폭이 좁은 저주파수대역을 사용하면서도 좋은 영상을 얻을 수 있다.

세째로 측정된 전계를 산술평균하여 영상재현 자료로 사용하므로, 전계 측정시 발생할 수 있는 측정잡음의 영향을 적게 받는다.

네째로 기존의 모멘트법 및 반복계산기법을 이용한

영상법^[6]과는 달리 영상재현과정에서 산란체의 사전 정보(크기나 위치)가 필요하지 않으며, 행렬의 역변환 과정이 없다. 그리고 전계를 산술평균하여 얻은 incoherent shadow 전계전력패턴을 역투시하여 산란체의 영상을 얻을 수 있으므로 복잡한 신호처리과정을 거치지 않고 간단한 산술계산만으로 짧은 시간내에 영상을 재현할 수 있다.

IV. 결 론

이 논문에서는 주파수 영역에서 간섭무늬 발생에 관련된 두 전계 곱의 주파수평균으로 정의되는 주파수 평균 mutual coherence 함수를 이용해서 high-contrast 원기둥 공동에 의해 산란된 전계전력패턴을 무한 주파수 대역폭에 대해 주파수평균하면 간섭무늬가 제거된 incoherent 전계전력패턴을 얻을 수 있음을 해석적으로 보였다. 그리고 수치계산으로 cross-borehole 측정구조에서 원기둥 공동에 시간조화 원주파가 입사되었을 때, 사용하는 주파수 대역폭이 충분히 넓으면 lit 및 shadow 영역에서 평균 전계전력이 각각 입사파 평균전력과 0 값으로 수렴되어 간섭무늬가 제거된 incoherent shadow 전계전력패턴을 얻을 수 있음을 보였다.

그리고 cross-borehole 측정구조에서 얻은 incoherent shadow 전계전력패턴을 역투시하여 손실매질내에 있는 high-contrast 지하 원기둥 공동의 영상을 재현했다. 제한된 측정범위내에서 얻은 전계만을 영상재현 자료로 사용했기 때문에 diffraction tomography에서와 같이 시추공 평행방향에 비해 그와 수직인 방향으로 늘어난 왜곡된 공동영상이 재현되었다. 영상은 매질에 손실이 존재하면 더욱 왜곡되었다. 보다 좋은 영상을 얻기 위해서는 null 주파수 대역을 포함하는 저주파수 대역을 사용하며 공동 가까이에 전원을 두고 공동에 근접해서 전계를 측정해야 한다. 이 영상재현법은 영상재현의 입력자료로 총전계전력을 사용하므로 산란파나 위상정보가 필요하지 않으며, 산란체의 사전정보 및 복잡한 신호처리과정 없이 간단한 산술계산만으로 영상을 재현할 수 있다는 장점이 있다.

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] 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] K. A. Dines and R. J. Lytle, "Computerized geophysical tomography," *Proc. IEEE*, vol. 67, pp. 471-480, 1979.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 강진섭, 나정웅, "손실매질내에서 선전류에 의해 여기된 원기둥 공동의 회절패턴," *전자공학회지*, 제33권 A편 제1호, pp. 12-20, 1996년 1월
- [10] 강진섭, 나정웅, "다중주파수 시간조화신호를 사용한 도체기둥의 초고주파 incoherent 영상 : Part I - 다중주파수 시간조화신호를 사용한 incoherent 전력패턴," *전자공학회지*, 제 33권 B편 제2호, pp. 47-55, 1996년 2월
- [11] 강진섭, 나정웅, "다중주파수 시간조화신호를 사용한 도체기둥의 초고주파 incoherent 영상 : Part II - 도체기둥의 초고주파 incoherent 영상," *전자공학회지*, 제33권 B편 제2호, pp. 56-64, 1996년 2월
- [12] D. A. McNamara, C. W. I. Pistorius, and J. A. G. Malherbe, *Introduction to the uniform geometrical theory and diffraction*, Artech House, Boston, 1990.
- [13] M. Born and E. Wolf, *Principles of optics*, Pergamon, 1980.
- [14] Edited by M. Abramowitz and I. Stegun, *Handbook of mathematical functions with formulas, graphs, and mathematical tables*, Dover Publications, INC., New York.

저 자 소 개

康辰燮(正會員)

1963년 12월 30일생. 1987년 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 ~ 현재 충북대학교 전기전자공학부 초빙조교수. 주관심분야는 전자파 산란 및 역산란, 수치해석과 안테나해석 등임

羅正雄(正會員)

1941년 7월 10일생. 1963년 3월 서울대학교 전자공학과 공학사. 1968년 6월 Polytechnic Institute of Brooklyn, Electrophysics 이학석사. 1971년 6월 Polytechnic Institute of Brooklyn, Electrophysics 이학박사. 1971년 9월 ~ 현재 한국과학기술원 전기및전자공학과 교수. 1997년 1월 ~ 1997년 12월 대한전자공학회 회장. 현재 IEEE MTT-S AdCom 회원임. 주관심분야는 초고주파공학, 지하물체탐지, 산란 및 역산란 등임