

論文98-35D-1-1

단일 주파수 시간조화 신호원을 사용한 도체기둥의 incoherent 단면영상법

(Incoherent Tomography for Conducting Cylinder by Using Single-Frequency Time-Harmonic Source)

康辰變*, 羅正雄**

(Jin Seob Kang and Jung Woong Ra)

요 약

본 논문에서는 원형회전 측정구조에서 단일 주파수 시간조화 평면파가 도체기둥에 입사되었을 때 얻은 순방향 총전계 전력패턴을 역투시하여 도체기둥의 incoherent 영상을 얻었다. 전력패턴에 있던 간섭무늬가 역투시 과정에서 제거되는 현상은 수치계산으로 설명되었다. 도체 원기둥의 영상재현으로 이 영상법의 타당성을 보였으며, 좋은 영상을 얻기 위한 조건을 조사했다.

Abstract

In this paper, an incoherent imaging of a conducting cylinder illuminated by the single-frequency time-harmonic plane wave is obtained via the back-projections of the intensity patterns of the forward total electric field scattered from this object in the circular rotational measurement configuration. The phenomenon that interference fringes generated in the intensity patterns is removed in the back-projection process is interpreted numerically. This imaging method is validated by imaging conducting circular cylinders and the conditions to get better image are investigated.

I. 서론

전자파를 사용하는 역산란 중에서 도체 역산란은 도체에 의한 산란파로부터 산란체 모양을 재현하는 것으로 많은 연구가 되어 왔다. 일반적으로 전자파가 도체에 입사되면 도체표면에는 경계조건을 만족시키기 위한 유기전류가 흐르게 되며, 이 유기전류에 의해 발생

되는 산란파는 유기전류에 2차원 자유공간 Green 함수를 곱한 것을 도체표면을 따라 적분하여 얻을 수 있다^[1]. 유기전류가 입사파와 산란파 합인 총전계의 함수이고 산란파가 미지 물리량이므로, 도체 모양을 재현하기 위해서는 비선형 적분방정식을 풀어야 한다. 현재 사용되는 도체기둥 역산란방법에는 비선형 산란 적분방정식 해법에 따라 근사기법과 반복계산기법을 사용하는 방법이 있다.

근사기법을 사용하는 영상법에서는 도체 산란문제에 물리광학 및 원거리 근사를 적용하여 원거리에서 측정된 산란파와 도체 모양함수 사이에 푸리에 변환관계가 있게 한 후, 측정된 산란파를 파수영역에서 역푸리에 변환하여 도체 모양을 얻는다^[1-3]. 이 방법은 물리광학근사가 적용 가능한 즉, 도체 크기가 파장에 비해

* 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9月24日, 수정완료일:1997年11月25日

큰 경우에만 사용이 가능하다. 만약 저주파수 대역에서 이 영상법으로 도체를 역산란하면 열화된 영상을 얻게 된다.

반복계산기법을 사용하는 영상법에는 도체 모양을 모드함수로 전개하고, 측정된 bistatic scattering cross section을 반복계산기법인 Newton-Kantorovich 알고리즘의 입력자료로 사용하여 모드함수 계수를 구함으로서 위상정보를 사용하지 않고 산란체 모양을 재현하는 방법^[4]이 있다. 한편 잡음에 의한 ill-posedness를 해결하기 위해 기존 영상법에 입사파 다중입사 및 pseudo-inverse 방법을 사용하여 도체 모양을 재현하는 방법도 있다^[5]. 이들 방법에서는 역산란체 위치를 먼저 알아야 모드함수를 각도에 대한 single-valued 함수로 전개할 수 있으므로 산란체 영상을 얻기 위해서는 도체 중심과 같은 사전정보가 필요하다. 그리고 이 방법은 반복계산과정이 local minima에 포획될 수 있어 global minimum으로 수렴하는데 한계가 있다^[6]. 최근에 이 두가지 문제점을 해결하기 위해 원거리에서 측정된 산란파의 각 스펙트럼을 개선된 Newton 알고리즘의 입력자료로 사용하여 도체 모양을 재현하는 방법이 개발되었다^[7]. 반복계산기법을 이용한 영상법에서는 모든 반복계산과정에서 모멘트방법을 사용하여 산란파를 계산하는데 이를 행하기 위해서는 행렬을 역변환해야 한다. 따라서 이 영상법은 행렬의 크기가 작아 역변환이 가능한 작은 도체에 대해서만 사용이 가능하다.

최근에는 다중 주파수를 사용하여 얻은 간섭무늬가 제거된 incoherent shadow 전계전력패턴을 역투시하여 도체기둥의 incoherent 영상을 재현하는 방법이 제안되었다^[8, 9]. 위상특성이 시간에 대해 변하지 않는 coherent 신호인 시간조화 평면파가 도체기둥에 입사되면, 순(forward)방향에서 측정된 총전계 전력패턴에는 입사파와 산란파의 중첩으로 간섭무늬가 나타난다. Lit 영역에서 전계전력은 입사파 전력을 중심으로 진동하지만, shadow 영역에서는 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^[8]. 따라서 다중 주

파수를 사용하여 얻은 평균 전계전력패턴에는 lit 영역에서는 평균 전계전력이 입사파 전력과 비슷하고 shadow 영역에서는 입사파 전력에 비해 작은 값을 가지는 간섭무늬가 제거된 incoherent shadow 전계전력패턴이 나타난다. 원형회전 측정구조에서 여러 입사각에 대해 다중 주파수를 사용하여 얻은 incoherent shadow 전계전력패턴을 영상재현하려는 영역에 역투시하여 도체기둥의 incoherent 영상을 얻었다^[9].

본 논문에서는 원형회전 측정구조에서 단일 주파수 시간조화 평면파가 도체기둥에 입사되었을 때 얻은 간섭무늬를 가진 순방향 총전계 전력패턴을 역투시하여 도체기둥의 incoherent 영상을 얻는 방법을 소개하였다. 간섭무늬를 가진 전계전력패턴을 역투시하여 간섭무늬가 제거된 incoherent 영상을 얻을 수 있는 것은 전력전력패턴이 역투시되는 과정에서 간섭무늬가 제거되기 때문이다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 영상재현 원리인 도체기둥에 의해 산란된 총전계 전력패턴에 있던 간섭무늬가 역투시 과정에서 제거되는 현상을 설명했다. III장에서는 영상재현원리를 수치계산으로 설명하고, 도체 원기둥의 영상재현으로 이 영상법의 타당성을 보였으며, 좋은 영상을 얻기 위한 조건을 조사했다. 그리고 IV장에서 결론을 맺었다.

II. 영상재현 원리

평면파 진행방향에 대해 수직인 측정선상에서 입사각(ϕ)이 변함에 따라 측정선도 같은 방향, 같은 양만큼 회전하면서 전계전력을 측정하는 원형회전 측정구조를 생각하자(그림 1). 이 측정구조에서 입사각을 변화시키며 얻은 간섭무늬를 가진 전계전력패턴을 영상재현영역에 역투시하여 산란체의 incoherent 영상을 얻는 과정을 간략히 설명하면 다음과 같다^[9].

- 1) 우선 그림 1에서와 같이 산란영역중에서 사각형의 영상재현영역을 정하고,
- 2) 영상재현영역을 산란체의 크기에 비해 작은 cell 들로 나눈다.
- 3) 각 입사각에 대해 얻은 전계전력패턴을 입사파의 전파경로상에 있는 cell에 계속 더한 후
- 4) 각 cell에 저장된 전계전력 값을 저장회수로 나눈다.

그러면 cell들에 저장된 전계전력 분포로부터 도체기둥

의 영상을 얻을 수 있다.

원형회전 측정구조에서 간섭무늬를 가진 전계전력패턴을 역투시하여 간섭무늬가 제거된 incoherent 영상을 얻을 수 있는 것은 전력전력패턴이 역투시되는 과정에서 간섭무늬가 제거되기 때문이다. 즉, 그림 1에서와 같이 한 입사각에 대해 얻은 간섭무늬를 가진 전계전력패턴을 역투시한 후, 다른 입사각에 대해 얻은 전계전력패턴들을 역투시하면 주기가 다른 간섭무늬들이 서로 중첩되어 상쇄제거되기 때문이다. 따라서 보다 많은 입사각에 대해 얻은 전계전력패턴들을 역투시하면 간섭무늬가 더욱 제거된 incoherent 영상을 얻을 수 있다.

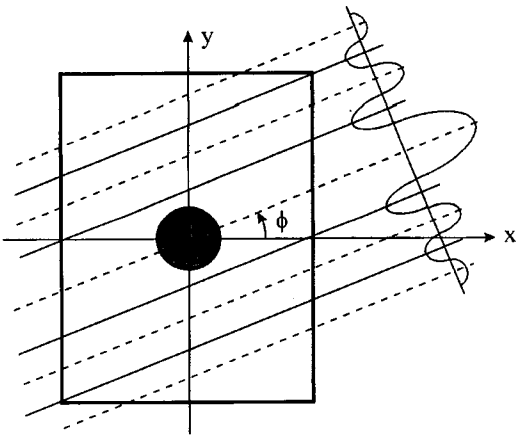


그림 1. 원형회전 측정구조에서 도체기둥에 의해 산란된 총전계 전력패턴의 역투시

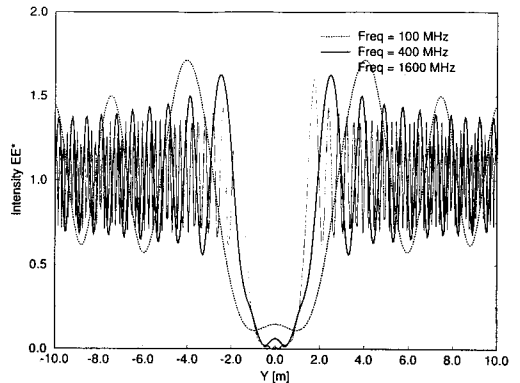
Fig. 1. Back projection of the intensity pattern of the total field scattered from a conducting cylinder in the circular rotational measurement configuration.

III. 수치계산 결과

비유전율(ϵ_r)이 2인 유전체 매질내에서 좌표계 원점에 중심이 있는 반지름이 1 m인 도체 원기둥에 전계가 축(z_0)방향으로 분극되고 $+x_0$ 으로 진행하는 단위크기의 시간조화 평면파가 입사됐을 때, 무한급수로 표현된 해석적인 해^[10]를 이용해 $x = 5$ m에서 입사파와 산란파로 구성된 총전계의 전력 EE^* 를 계산했다(그림 2(a)). Lit 영역($|y| > 1$ m)에서 입사파와 반사파 및 회절파(creeping wave)들로 구성된 총전계 전력은 입사파 전력 1을 중심으로 진동하며 원기둥 경계($|y| = 1$ m)로부터 멀어질수록 진동폭과 주기가

서서히 감소한다. 한편 shadow 영역($|y| < 1$ m)에서는 lit 영역에 비해 상대적으로 진동폭이 작은 간섭무늬가 전계전력 0 부근에 나타난다. 주파수가 증가하면, lit 영역에서는 간섭무늬 진동폭이 작아지고 주기가 감소하므로 간섭무늬가 원기둥 경계쪽으로 이동하나 shadow 영역에서는 회절파 크기의 감소로 인해 전계전력이 감소하여 0으로 수렴한다. 그리고 주파수가 증가하면 전계전력이 입사파 전력보다 작은 shadow 영역 폭이 산란체의 크기로 수렴한다. 측정거리가 증가하면 간섭무늬 주기가 증가하고, 회절파가 도체표면을 따라 돌아오는 길이가 감소하여 회절파 크기가 증가하게 되므로 shadow 영역에서 평균 전계전력이 증가하며, shadow 영역 폭이 증가하는 것을 볼 수 있다(그림 2(b)).

그림 1에서와 같이 비유전율이 2인 유전체 매질내에서 한변의 길이가 10 m인 정사각형 영상재현영역($-5 \text{ m} < x_y < 5 \text{ m}$) 중앙에 반지름이 1 m인 도체 원기둥이 있다고 가정하자. 여기서 영상재현영역을 200×200 cell로 나누었으므로 정사각형 cell의 한변 길이는 5 cm이다. 원형회전 측정구조에서 주파수가 400 MHz인 평면파가 도체기둥에 입사되었을 때 산란체 중심으로부터 5 m 떨어진 거리에서 얻은 전계전력패턴을 영상재현영역에 입사각을 0° 에서 360° 까지 30° 씩 증가시키며 ($\Delta\phi = 30^\circ$) 역투시하여 산란체의 영상을 재현했다(그림 3(a)). 간섭무늬가 남아있으나 산란체 영역을 주위 영역으로부터 쉽게 구별할 수 있다. 입사각을 10° 씩 증가시키며 ($\Delta\phi = 10^\circ$) 전계전력패턴을 역투시하면 주기가 다른 간섭무늬들이 보다 많이 중첩되어 서로 상쇄되므로 간섭무늬 진동폭이 많이 감소하게 된다(그림 3(b)).



(a)

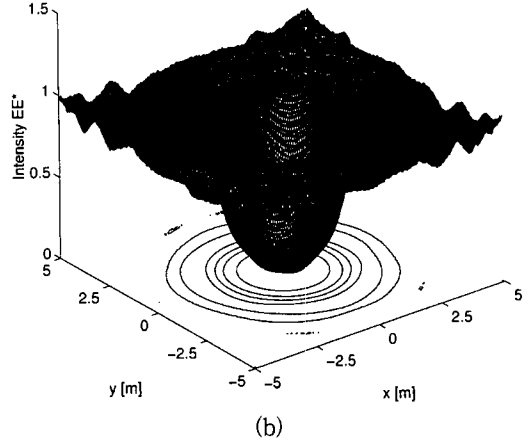
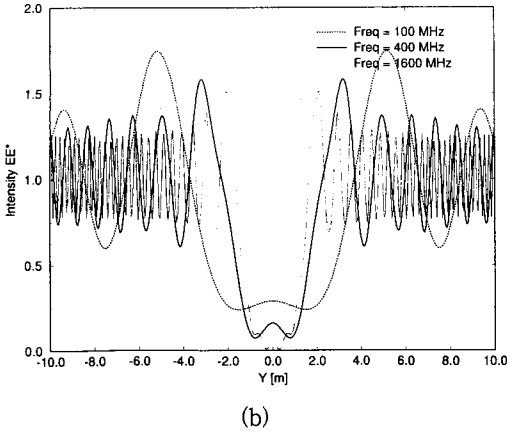


그림 2. (a) 주파수가 100 MHz, 400 MHz, 1600 MHz 일 때, 비유전율(ϵ_r)이 2인 매질내에서 산란체 중심으로부터 5 m 거리에서 측정된 반지름이 1 m인 도체 원기둥의 전계전력패턴, (b) 산란체 중심으로부터 10 m 거리에서 측정된 도체 원기둥의 전계전력패턴

Fig. 2. (a) Intensity patterns scattered from the conducting circular cylinder of 1 meter radius in a dielectric medium of $\epsilon_r = 2$ measured at the distance of 5 m from the scatterer center for the frequencies of 100 MHz, 400 MHz, and 1600 MHz, and (b) intensity patterns scattered from the conducting circular cylinder measured at the distance of 10 m from the scatterer center.

따라서 산란체의 존재 및 등전계 전력선의 모양으로부터 산란체의 모양을 쉽게 알 수 있다. 그림 3(a)와 (b)로부터 입사각 증가정도($\Delta\phi$)가 충분히 작아지면 간섭무늬가 r 만의 함수가 됨을 볼 수 있다. 이런 경우에는 $\Delta\phi$ 를 더 작게하더라도 남아 있는 간섭무늬는 제거되지 않는다.

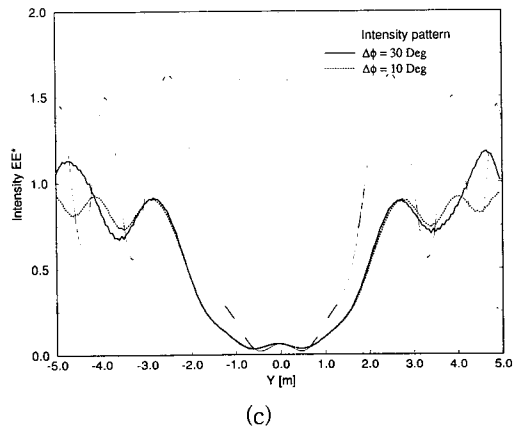
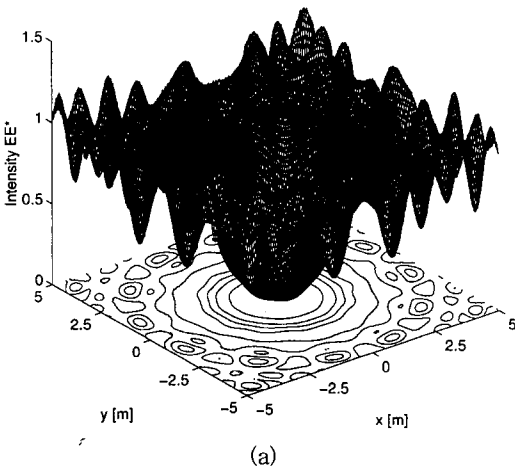
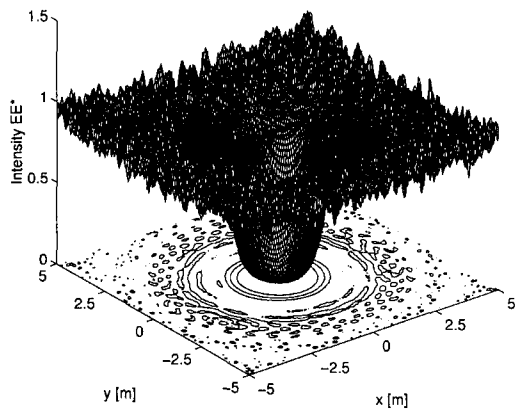


그림 3. (a) 원형회전 측정구조에서 12개 입사각을 사용하는 경우($\Delta\phi = 30^\circ$)에 주파수가 400MHz 일 때, 비유전율이 2인 매질내에서 산란체 중심으로부터 5 m 거리에서 측정된 전계전력패턴으로부터 얻은 반지름이 1 m인 도체 원기둥의 incoherent 영상, (b) 36개 입사각을 사용하는 경우($\Delta\phi = 10^\circ$)에 얻은 도체 원기둥의 incoherent 영상, (c) 주파수가 400 MHz일 때, 비유전율(ϵ_r)이 2인 매질내에서 산란체 중심으로부터 5 m 거리에서 측정된 반지름이 1 m인 도체 원기둥의 전계전력패턴과 incoherent 영상 그림 3(a)와 (b)의 단면 전계전력분포

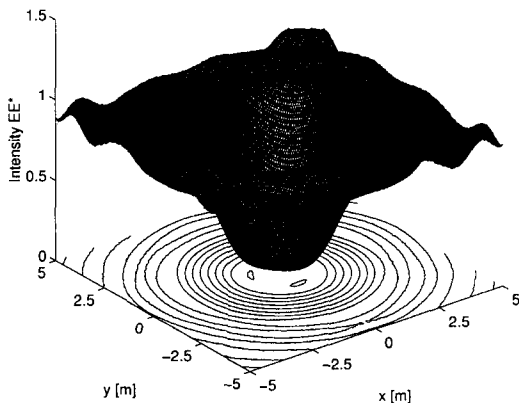
Fig. 3. (a) Incoherent image of the conducting circular cylinder of 1 meter radius in a dielectric medium of $\epsilon_r = 2$ obtained from the intensity patterns measured at the distance of 5 m from the scatterer center for the frequency of 400 MHz in the circular rotational measurement configuration with 12 incident plane waves ($\Delta\phi = 30^\circ$), (b) incoherent image of the conducting circular cylinder obtained with 36 incident plane waves ($\Delta\phi = 10^\circ$), and (c) intensity pattern scattered from the conducting circular cylinder of 1 meter radius in a dielectric medium of $\epsilon_r = 2$ measured at the distance of 5 m from the scatterer center for the frequencies of 400 MHz, and the cross-sectional intensity distributions of incoherent images Fig 3(a) and (b).



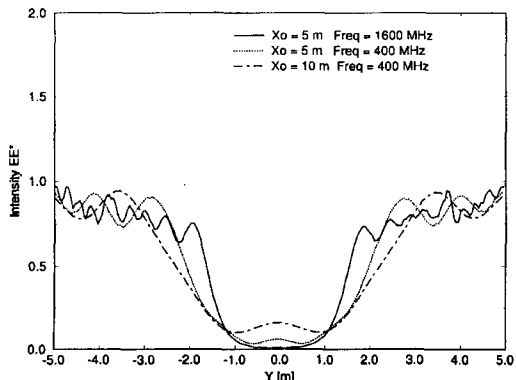
한편 $\Delta\phi$ 가 감소할수록 모든 영역에서 간섭무늬가 보다 잘 제거되는 것은 실제 전계전력패턴과 $\Delta\phi$ 가 30° 와 10° 일 때 재현된 영상의 단면모양을 서로 비교해보면 쉽게 알 수 있다(그림 3(c)). 그리고 그림 3(c)로부터 전계전력패턴이 역투시되는 과정에서 shadow 영역폭이 넓어지는 것을 볼 수 있다.



(a)



(b)



(c)

그림 4. (a) 원형회전 측정구조에서 36개 입사각을 사용하는 경우($\Delta\phi=10^\circ$)에 주파수가 1600 MHz일 때, 비유전율이 2인 매질내에서 산란체 중심으로부터 5 m 거리에서 측정된 전계전력패턴으로부터 얻은 반지름이 1 m인 도체 원기둥의 incoherent 영상, (b) 주파수가 400 MHz일 때, 산란체 중심으로부터 10 m 거리에서 측정된 전계전력패턴으로부터 얻은 도체 원기둥의 incoherent 영상, (c) incoherent 영상 그림 3(b), 그림 4(a)와 (b)의 단면 전계전력분포

Fig. 4. (a) Incoherent image of the conducting circular cylinder of 1 meter radius in a dielectric medium of $\epsilon_r = 2$ obtained from the intensity patterns measured at the distance of 5 m from the scatterer center for the frequency of 1600 MHz in the circular rotational measurement configuration with 36 incident plane waves ($\Delta\phi = 10^\circ$), and (b) incoherent image of the conducting circular cylinder obtained from the intensity patterns measured at the distance of 10 m from the scatterer center for the frequency of 400 MHz, and (c) their cross-sectional intensity distributions of incoherent images Fig 3(b), Fig 4(a), and (b).

주파수가 증가하면 그림 2에서와 같이 전계전력패턴에서 간섭무늬 주기가 감소하는데, 이런 전계전력패턴을 영상재현자료로 사용하면 역투시되는 과정에서 간섭무늬가 보다 잘 제거되는 것을 볼 수 있다(그림 3(b), 그림 4(a), (c)). 따라서 산란체 크기에 비해 매우 짧은 파장을 가진 주파수 신호를 사용하여 충분히 많은 입사각에 대해 얻은 전계전력패턴을 작은 크기의 cell들로 구성된 영상재현영역에 역투시하면 간섭무늬가 제거된 incoherent 영상을 얻을 수 있다. 그리고 주파수가 증가하면 그림 2에서와 같이 전계전력패턴에서 shadow 영역 폭이 산란체 크기로 수렴하므로, 이 패턴으로부터 얻은 영상은 실제 산란체 모양에 가깝게 된다(그림 4(c)). 한편 거리가 증가하면 그림 2(b)에서와 같이 전계전력패턴에서 간섭무늬 주기와 shadow 영역 폭이 증가하므로 이 패턴으로부터 얻은 영상은 열화된다(그림 4(b), (c)). 결론적으로 실제 산란체 모양에 가까운 영상을 얻기 위해서는 가능하다면 높은 주파수를 사용하고 산란체에 근접해서 보다 많은 입사각에 대해 얻은 전계전력패턴을 영상재현자료로 사용해야 한다.

본 논문에서 소개된 도체 영상재현법은 영상재현의 입력자료로 총전계전력을 사용하므로 산란파나 위상정보가 필요하지 않으며, 산란체의 사전정보 및 복잡한 신호처리과정 없이 간단한 산술계산만으로 영상을 재현할 수 있다는 장점이 있으며, 손실매질에서도 사용이 가능하다. 그리고 산란체 영상재현과정에 행렬의 역변환이 없으므로 파장에 비해 큰 산란체를 역산란할 수 있으며, 근거리 영역에서 얻은 전계를 영상재현 자료로 사용할 수 있다. 또한 전계측정시 도입될 수 있는 잡음은 일반적으로 random한 특성을 가지는데 총전계전력을 중첩하는 과정에서 서로 상쇄되어 제거되므로 본 영상법은 측정잡음의 영향을 적게 받는다는 장점이 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 원형회전 측정구조에서 단일 주파수 시간조화 평면파가 도체기둥에 입사되었을 때 얻은 순방향 총전계 전력패턴을 역투시하여 도체기둥의 incoherent 영상을 얻었다. 전력패턴에 있던 간섭무늬가 역투시 과정에서 주기가 다른 것들과 서로 중첩되어 제거되는 것을 수치계산으로 보였다. 도체 원기둥의 영상재현으로, 가능하다면 높은 주파수를 사용하고 산란체에 근접해서 보다 많은 입사각에 대해 얻은 전계전력패턴을 사용하면 산란체에 보다 가까운 영상을 얻을 수 있음을 보였다.

참 고 문 헌

- [1] R. M. Lewis, "Physical optics inverse diffraction," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-17, pp. 308-314, May, 1969.
- [2] N. N. Bojarski, "A Survey of the physical optics inverse scattering identity," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-30, pp. 980-989, Sept., 1982.
- [3] T. H. Chu and D. B. Lin, "On microwave imagery using Bojarski's identity," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-37, pp. 1141-1144, Jul., 1989.
- [4] A. Roger, "Newton-Kantorovitch algorithm applied to an electromagnetic inverse

problem," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-29, pp. 232-238, Mar., 1981.

- [5] C. C. Chiu and Y. W. Kiang, "Electromagnetic imaging for an imperfectly conducting cylinder," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-39, pp. 1632-1639, Sept., 1991.
- [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. 6, no. 1, 1994.
- [7] S. K. Park, C. S. Park, and J. W. Ra, "Iterative angular-mode inversion of a conducting cylinder," *Microwave Opt. Technol. Lett.*, vol. 10, no. 3, Oct., 1995.
- [8] 강진섭, 나정웅, "다중주파수 시간조화신호를 사용한 도체기둥의 초고주파 incoherent 영상 : Part I - 다중주파수 시간조화신호를 사용한 incoherent 전력패턴," *전자공학회지*, 제33권 B편 제2호, pp. 47-55, 1996년 2월
- [9] 강진섭, 나정웅, "다중주파수 시간조화신호를 사용한 도체기둥의 초고주파 incoherent 영상 : Part II - 도체기둥의 초고주파 incoherent 영상," *전자공학회지*, 제33권 B편 제2호, pp. 56-64, 1996년 2월
- [10] D. A. McNamara, C. W. I. Pistorius, and J. A. G. Malherbe, *Introduction to the uniform geometrical theory and diffraction*, Artech House, Boston, 1990.

저 자 소 개

**康 辰 燮(正會員)**

1963년 12월 30일생. 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 전기 및 전자공학과 교수. 현재 대한전자공학회 회장 및 IEEE MTT-S AdCom 회원임. 주관심분야는 초고주파공학, 지하불체탐지, 산란 및 역산란 등임