

論文 90-27-9-3

공간영역에서 코히어런트 단층촬영 기법을 이용한

Born 근사하에 유전체 기둥의 영상재현

(Image Reconstruction of Dielectric Cylinder Under Born Approximation

Using a Coherent Tomographic Scheme in the Spatial Domain)

徐 京 煥*, 金 象 基*, 金 世 潤**, 羅 正 雄*

(Kyoung Whoan Suh, Sang Gi Kim, Se Yun Kim, and Jung Woong Ra)

要 約

본 논문에서는 공간과 파수영역의 이중성을 이용하여 공간영역에서 코히어런트 단층촬영 기법을 사용한 새로운 마이크로웨이브 영상방법을 제안하고 유전체 기둥에 대한 영상을 시뮬레이션 및 실험으로 재현하였다. 유전체의 크기와 비유전율의 변화에 따른 수치계산 및 실험적 결과를 통해 Born 근사식의 적용한계 및 주파수대역에 따라 재현된 영상을 살펴보았다.

Abstract

In this paper, using the principle of duality between the spatial and spectral domain, we proposed a new microwave imaging technique of a coherent tomographic formulation in the spatial domain and reconstructed the image of dielectric cylinder through simulation and experiment. The numerical and experimental results for the variety of object size, relative dielectric constant have shown the limitation of Born approximation to be used and the effect of retrieved image for various signal bandwidth.

I. 서 론

물체에 의해 산란된 전자파로부터 영상을 재현하기 위한 파수영역의 방법은 산란전파와 영상으로 재현할 물체의 함수사이에 푸리에 변환관계로 해석을 한다. 따라서 영상을 재현하기 위해서는 푸리에 역변환 과정을 거치게 되며, 이는 직각좌표에서 2차원

푸리에 역변환¹⁾과 극좌표에서 2차원 푸리에 적분을 1차원 원형 convolution 적분²⁾으로 나타내는 것이 있다. 전자는 극좌표형으로 얻어진 각 스펙트럼 데이터를 직교형 좌표로 배열하기 위한 보간 과정이 필요하며, 후자는 보간 과정은 필요없으나, 단일 주파수 사용시 point spread function(psf)의 부엽(side-lobe)이 높아 영상의 동적 영역(dynamic range)를 줄이게 되며, 전자에 비해 많은 계산시간이 소요되는 단점을 지닌다.

본 논문에서는 산란 전자파의 데이터를 파수(wave number)영역이 아닌 공간영역에서 해석을 하게 된다. 따라서 공간영역에서 영상을 재현하는 알고리즘을 사용하게 되어, 파수영역 방법의 문제점들을 완

*正會員, 韓國科學技術院 電氣 및 電子工學科
(Dept. of Electrical Eng., KAIST)

**正會員, 韓國科學技術研究院 應用電子研究室
(Applied Electronics Lab., KIST)

接受日字: 1990年 1月 17日

전히 배제할 수 있게 되어 재현된 영상의 질을 높일 수 있는 여지가 있다. 이러한 공간과 파수영역의 이중성을 이용한 해석은 X-ray 단층촬영에서도 찾아볼 수 있다. 즉, 투영된 양으로부터 영상을 재현하는 방법을 푸리에 영역에서 해석하는 방식인 Fourier slice theorem 및 공간영역에서 해석하는 방법인 convolution or filtered-backprojection과 유사하며,^[3] 후자의 방법에 의해 재현된 영상이 훨씬 탁월하여 오늘날 널리 사용되고 있다.

다음 II 장에서는 2차원 유전체의 적분방정식을 유도하고, Born 근사식을 적용하여 적분방정식을 공간영역에서 해석을 하였으며, III 장에서는 II 장에서 유도된 적분방정식으로부터 영상을 재현하는 방법을 공간영역에서 다룬다. 그리고, IV 장에서는 수치계산 및 실험을 통한 영상재현을 해보았으며, V 장에서는 결론을 맺는다.

II. 2차원 유전체 기둥의 산란

1. 적분방정식

그림 1 과 같이 mono-static 안테나로부터 충분히 멀리 떨어져 있는 단면 S를 갖는 유전체 기둥에 평면파 $u^i(x, y)$ 가 z축으로 편파되어 입사한다고 한다. 단면 S내에 비유전율 $\epsilon_r(x, y)$ 및 도전율 $\sigma(x, y)$ 가 z방향으로 균일한 경우, 산란파 $u^s(x, y)$ 도 z방향의 성분만 갖게되어 3차원 벡터 문제가 2차원 스칼라 문제로 간단하게 된다. 산란체 외부영역인 \bar{S} 에서의 매질은 자유공간과 같으며, 산란체 내부의 투사율은 외부 매질과 같다고 한다. 먼저 전체 전계 $u(x, y)$ 는 다음과 같은 제 2종 Fredholm형 적분방정식으로 간단히 표현된다.^[4]

$$u(x, y) = u^i(x, y) - j \frac{k_0^2}{4} \iint_S dx' dy' J(x', y') H_0^2(k_0 \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2}) \quad (1)$$

$$k_0^2 = \omega^2 \mu_0 \epsilon_0 \quad (2a)$$

$$J(x, y) = [(\epsilon_r(x, y) - j \frac{\sigma(x, y)}{\omega \epsilon_0}) - 1] u(x, y) \quad (2b)$$

여기서, H_0^2 및 k_0 는 각각 제2종 0차 Hankel 함수를 의미하며, 또한 J는 산란체 내부에 유기되는 등가전원이다.

만약 far-field 측정과 산란체내의 매질이 외부 매질에 비해 근소한 차이가 있다고 가정하면, 식 (1)을 선형문제로 근사화시켜 해석적으로 해를 구하는 방법을 현재 사용하고 있다. 이 두가지 가정을 살펴보

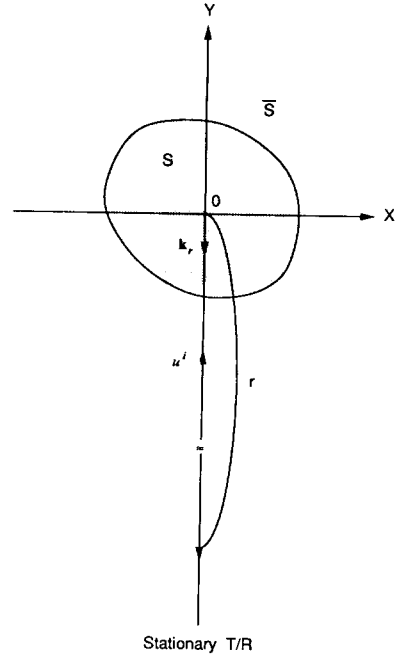


그림 1. 2차원 유전체 기둥에 대한 영상구조
Fig. 1. Imaging geometry for a 2-dimensional dielectric cylinder.

면 첫째, 안테나와 물체 중심간의 거리가 물체의 크기 보다 매우 크다면, far-field 조건을 만족하는 영역에서는 Hankel 함수를 근사적으로 다음과 같이 표현한다.^[4]

$$H_0^2(k_0 \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2}) \approx \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\pi k_0 r}} \exp(j \frac{\pi}{4}) \exp(-j k_0 r) \cdot \exp(j k_0 \mathbf{k}_r \cdot \mathbf{r}' \mathbf{r}') \quad (3)$$

여기서, r과 r'는 각각은 $\sqrt{x^2 + y^2}$, $\sqrt{x'^2 + y'^2}$ 이다. 또한 \mathbf{k}_r 및 \mathbf{r}' 는 각각 파수 및 source 점을 나타내는 단위 벡터이며, \mathbf{k}_r 는 그림 1에서 원점으로부터 안테나로 향하는 방향을 취한다. 둘째, 산란체 내부의 매질이 외부의 매질에 비해 근소하게 차이가 있을 경우 산란체 내부의 산란전계는 입사전계에 비해 매우 적다고 가정을 할 수 있다. 이러한 가정하에서 산란체 내부의 전체전계를 입사전계로 표현하는 born 근사식을 적용한다.

$$u(x, y) = u^i(x, y), \quad S \quad (4)$$

Born 근사식을 적용할 수 있는 한계성을 알아 보면 다음과 같다. 전자파가 물체내를 진행할 때 전체 전계와 입사전계 사이의 위상차이는 거의 물체내의

굴절을 변화에 대해 전파경로에 따른 적분으로 나타낼 수 있다. 그러므로 반경 a 를 갖는 원기둥에 대해서는 물체내의 전체 위상변화는 근사적으로 $4\pi a\delta n/\lambda$ 가 된다. 여기서 λ 는 입사파의 파장, δn 은 $n(=\text{굴절율})-1$ 이며, 굴절율의 변화양을 나타낸다. 따라서 Born 근사식이 타당성을 갖기 위한 필요조건은 입사전계와 전체전계 사이의 위상변화가 π radian보다 적어야 하며, 이를 간단히 표현하면 다음과 같다.

$$a \times \delta n < \frac{\lambda}{4} \quad (5)$$

2. 공간영역에서 해석한 적분방정식 및 해

그림 2는 mono-static 구조를 갖는 초고주파 영상 시스템을 나타내며, 앞에서 가정한 2 가지 조건을 적용하여 본 논문에서 제시한 공간영역의 적분방정식 해를 구해본다. 먼저 첫번째 가정으로부터 송·수신 안테나와 물체사이의 거리가 물체의 크기보다 매우크다면, 물체에 입사되는 전자파가 거의 평면파가 되므로 같은 거리상에 있는 등거리(iso-range) 선은 u 축과 평행하여 같은 위상을 갖는 선이된다. 송신 신호진폭에 대해 점 (x, y) 에 있는 point 물체에 의해 반사된 수신 신호의 비를 반사합수 $g(x, y)$ 라고 정의한다.

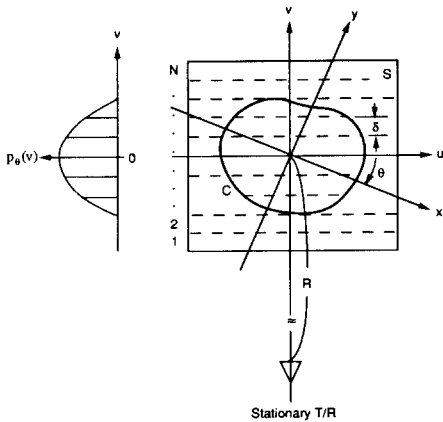


그림 2. 초고파 영상을 위한 평면물체와 투영구조
Fig. 2. Geometry of a planar object and projection for microwave imaging.

처음에 안테나가 y 축과 일직선상에 있다고 가정하며, 물체가 θ 만큼 회전할 때 좌표는 각각 v 축 및 u 축이 된다. 첫번째 가정으로부터 투영 데이터 $p(v, \theta)$

는 물체의 반사합수 $g(x, y)$ 를 u 축에 대해 적분한 형태로서 다음과 같이 표현된다.

$$P_{\theta}(v) = \int_{-\infty}^{\infty} g_{\theta}(u, v) du \quad (6)$$

여기서

$$u = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (7a)$$

$$v = -x \sin \theta + y \cos \theta \quad (7b)$$

$$g_{\theta}(u, v) = g(x, y) \quad (7c)$$

식 (6)은 안테나로부터 등거리 선상인 u 축에 평행한 점들의 선적분한 신호로서, v 축상에 투영된 양을 의미한다. 두번째 조건을 이용하면, 최종적으로 안테나에 수신된 산란전자파의 신호는 왕복 거리에 해당하는 위상부분을 포함한 선적분 형태가 되며, 매질내에서 전파속도가 일정하다면 다음과 같이 정규화된 수신 전자파 $G_{\theta}(k)$ 를 나타낸다.

$$G_{\theta}(k) = \int_{-\infty}^{\infty} P_{\theta}(v) \exp(-j2kv) dv \quad (8)$$

여기서, $G_{\theta}(k)$ 는 수신된 전자파로부터 안테나와 물체 중심간의 거리에 따른 신호의 감쇄 및 위상으로 정규화된 신호를 의미한다.

식(8)을 수치적분으로 구하기위해 투영함수 $p_{\theta}(v)$ 를 임의의 기저함수로 전개하는 모멘트 방법과 Nyquist rate의 ΔR 함수로 표분화하는 두가지가 있다. 먼저 전자의 경우에 대해 그림 2에서와 같이 해상도 ΔR 간격으로 그림 2에서와 같이 v 축으로 N 개의 단층형태로 분할하여 식(8)을 펄스 기저함수로 전개하면 다음과 같다.

$$G_{\theta} = \int_{-\infty}^{\infty} p_{\theta}(v) \exp(-j2kv) dv = \sum_{n=1}^N p_{\theta}(v_n) \int_{v_n - \frac{\Delta R}{2}}^{v_n + \frac{\Delta R}{2}} dv \exp(-j2kv) = \sum_{n=1}^N A_n(k) p_{\theta}(v_n) \quad (9)$$

여기서,

$$A_n(k) = \Delta R B(k\Delta R) \exp(-j2kv_n) \quad (10a)$$

$$B(k\Delta R) = \frac{\sin(k\Delta R)}{k\Delta R} \quad (10b)$$

으로서, $B(k\Delta R)$ 은 펄스 기저함수에 따른 스펙트럼이며, v_n 은 n 번째 단층의 중심을 가르키는 좌표이다. 또한, 각 단층내에서 투영된 양 $p_{\theta}(v_n)$ 은 일정하다고 가정하며, 단층 중심에서의 값으로 대표하는 것

을 의미한다. N개의 각 단층별로 투영된 값 $p_\theta(v_n)$ 을 구하기 위해서는 N개의 서로 다른 주파수 f_1, f_2, \dots, f_n 을 식(9)에 대입하여 선형 연립방정식을 만들므로서 가능하게 된다. 이와 같은 방법으로 물체를 360° 까지 회전시켜가면서, 변수 θ 에 대해 새로운 N개의 투영된 값을 각각 구하게 된다. 식(9)의 투영된 양 $p_\theta(v_n)$ 을 행렬식으로 간단히 표현하면 다음과 같다.

$$p_\theta = [A]^{-1} G_\theta \quad (11)$$

여기서, $[A]$ 는 $[N \times N]$ 크기의 계수 행렬이며, p_θ 및 G_θ 는 $[N \times 1]$ 크기의 벡터로서 투영된 양 및 정규화된 수신 전자파를 나타낸다.

다음은 후자의 방법으로서 Nyquist rate로 해상도 ΔR 을 최소파장의 0.5배 이하로하여 투영함수 $p_\theta(v)$ 를 단층으로 분할하면, 주파수 대역은 최대주파수 (=광속도/최소파장)까지 된다. 표본화 이론을 적용하여 물체의 스펙트럼이 최대 주파수까지 제한된 상태라는 가정하에 공간영역에서 이상적인 delta 함수로 표본화 한다면, 제한된 대역내의 투영함수 $p_\theta(v)$ 를 복원할 수 있다.

이를 해석적인 표현으로 나타내면 다음과 같다. 단층 중심에서 표본화된 투영데이터 $p_{\theta m}$ 을 다음과 같이 정의한다.

$$p_{\theta m} = S_m(v) p_\theta(v) \quad (12a)$$

$$S_m(v) = \sum_{m=1}^N \delta\left(\frac{v}{\Delta R} - m\right) = \sum_{m=1}^N \Delta R \delta(v - m\Delta R) \quad (12b)$$

여기서 $S_m(v)$ 는 물체의 놓여진 공간을 v 축으로 간격 ΔR 마다 이상적인 함수로 표본화함을 의미한다. 따라서 식(12a)을 식(8)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$G_\theta(k) = \sum_{m=1}^N \Delta R p_\theta(m\Delta R) \exp(-j2km\Delta R) \quad (13)$$

식(13)은 일종의 DFT 형태이며, 전자와 같이 N개의 서로 다른 주파수를 선택하므로서 투영데이터 $p_\theta(m\Delta R)$ 은 고속푸리에 역변환(IFFT)에 의해 구할 수 있다.

이상에서 설명한 두가지 방법에 따라 구한 투영데이터로부터 영상재현은 공간영역의 영상재현 방법인 convolution 또는 filtered-backprojection 알고리즘을 적용한다.

III. 영상재현 방법

투영된 양으로부터 공간영역에서 영상을 재현할

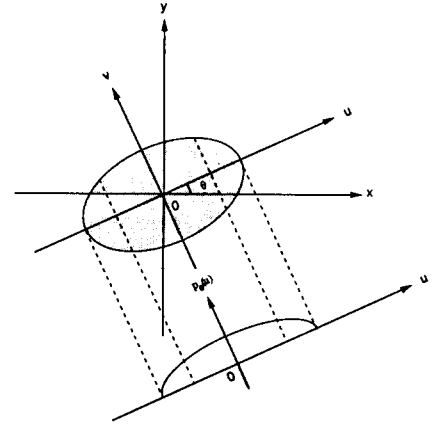


그림 3. 2차원 평행 빔 투영에 대한 구조
Fig. 3. Geometry for a 2-dimensional parallel beam projection.

수 있는 알고리즘은 convolution 또는 filtered-back-projection이다. 이 알고리즘은 매우 간단하고 영상의 질이 가장 탁월하여 X-ray CT 분야에 널리 사용하고 있다. 그림3에서와 같이 물체의 분포함수 $g(x, y)$ 를 직각좌표 (x, y) 로 나타내며, 물체를 θ 만큼 회전할 때 좌표를 (u, v) 으로 정의한다. 보는 각도 θ 에서 평행 빔에 의해 u 축으로 투영된 양을 $p_\theta(u)$ 라하면, 이는 v 축으로 따라서 선적분할 양들의 합을 의미하며 아래와 같이 표현한다.

$$p_\theta(u) = \int_{-\infty}^{\infty} g(u, v) dv = \iint_{-\infty}^{\infty} g(x, y) \delta(x \cos \theta + y \sin \theta - u) dx dy \quad (14)$$

여기서,

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

투영된 양 $p_\theta(u)$ 를 푸리에 변환관계를 나타내면 다음과 같다.

$$p_\theta(k) = \int_{-\infty}^{\infty} p_\theta(u) \exp(-jku) du = G(k_x, k_y) |_{\theta} = G(k, \theta) \quad (15)$$

여기서, $G(k_x, k_y)$ 는 $g(x, y)$ 의 2차원 푸리에 변환이며, $k_x = k \cos \theta$, $k_y = k \sin \theta$ 이다. 또한, (k_x, k_y) 및 (k, θ) 는 각각 파수영역에서 직각 및 극좌표를 나타낸다. 식(15)가 나타내는 의미는 각도 θ 에 대해 투영된 데이터의 1차원 푸리에 변환은 물체의 분포함수 $g(x, y)$ 를 2차원 푸리에 변환하여, 파수영역에서 각도 θ 에 따라 slice한 양과 같음을 보여준다. 이는 2차원 영상재현에 많이 사용

되고 있는 projection slice 이론이며,¹⁶⁾ 이로부터 물체의 분포함수 $g(x, y)$ 를 아래와 같이 구한다.

$$g(x, y) = F_2^{-1}[p_\theta(k)] = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_0^\pi \int_{-\infty}^\infty p_\theta(k) \exp(jk(x \cos\theta + y \sin\theta)) |k| dk d\theta \quad (16)$$

여기서, F_2^{-1} 는 2차원 푸리에 역변환을 의미하는 연산이며, $|k|$ 는 극좌표로 변환할 때 jacobian으로부터 오는 항이다. $u = x \cos\theta + y \sin\theta$ 를 식 (16)에 대입하고 안쪽 적분을 분리하여 아래와 같이 나타낸다.

$$q(u, \theta) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^\infty p_\theta(k) |k| \exp(jku) dk \quad (17)$$

식 (17)은 $p_\theta(k)$ 와 $|k|$ 의 곱이므로 이는 $p_\theta(u)$ 의 Hilbert transform의 미분을 의미한다. 왜냐하면 파수영역에서 $|k| = jk(-j \operatorname{sgn} k)$ 는 미분을 취한 항(jk)와 Hilbert transform($-j \operatorname{sgn} k$)의 곱이기 때문이다.

그러므로 점 (x, y) 에 대한 재현은 θ 값에 대해 $q(x \cos\theta + y \sin\theta, \theta)$ 에 대한 back projection 평균값의 1/2이 된다. 만약 $\phi(u)$ 가 우함수로서 $|k| < \Omega$ 에 대해서 즉, 작은 k 에 대해서 $\phi(k) = |k|$ 이고 $|k| > \Omega$ 에 대해서는 $p(k, \theta)$ 가 작다면, 즉, $g(x, y)$ 가 천천히 변화하는 함수가 되어 근사적으로 $q(u, \theta)$ 을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$q(u, \theta) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^\infty p(k, \theta) \phi(k) \exp(jku) dk = p(\tau, \theta) \phi(u - \tau) \quad (18)$$

만약 $p(\tau, \theta)$ 를 안다면, $\tau = u_k = ia, j=0, \pm 1, \pm 2, \dots$; $\theta = j\pi/n, j=0, 1, 2, \dots, n-1$ 로 정의하고 a 는 각 view에서 평행한 ray 사이의 간격이며, n 은 전체 view의 숫자이다. 식 (16)을 식 (18)의 함으로 달리 표현하면, ϕ 에 대한 함수로서 근사적인 영상재현식 g_s 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$g_s(x, y) = \frac{a}{2n} \sum_{j=0}^{n-1} \sum_{i=-\infty}^{+\infty} p(u_i, \theta_j) \phi(x \cos\theta_j + y \sin\theta_j - u_i) \quad (19)$$

$|u| \geq 1$ 에 대해서는 $p(u, \theta)$ 가 0이기때문에, $x^2 + y^2 \geq 1$ 에서 $f(x, y) = 0$ 이면 식 (19)의 i 에 대한 합은 유한하며, $|i| \leq 1/a$ 이다. 따라서 각 view에서 m 개의 ray가 단위원을 지나간다면 ray 사이의 간격 a 는 $2/m$ 가 된다. 식 (19)의 $\phi(d)$ 는 영상재현할 점 (x, y) 에서 선 $L(u_i, \theta_j)$ 에 주어지는 가중함수이며, d 는 $x \cos\theta_j + y \sin\theta_j - u_i$ 으로서 점 (x, y) 에서 선까지의 거리를 의미한다. g_s 가 함수 $g(x, y)$ 의 근사적인 대역폭 Ω 에 대해

g 와 매우 유사하다면 $|k| < \Omega$ 에 대해서는 $\phi(k) = |k|$ 을 만족해야 함을 알 수 있다. $\phi(u)$ 가 ray와 ray 사이에 선형적이라면,

$$u_i < u < u_{i+1}, i=0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (20)$$

g_s 를 계산할 때 크게 계산시간을 단축할 수 있는 가능성을 지니게 된다. 식 (19)의 convolution kernel $\phi(u)$ 는 $|k|$ 의 역푸리에 변환을 의미하며, 정확한 형태의 $\phi(u)$ 를 재현하기가 어려우므로 몇가지 수정된 필터함수를 사용하고 있다. 본 논문에서는 Shepp and Logan filter¹⁶⁾를 사용하며, 영상할 물체에 따라서 적절한 filter를 선택하는 것이 좋다.

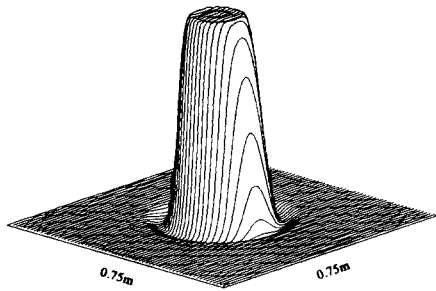
이상에서 설명한 바와 같이 각각의 각도 θ 에 따라 투영된 양만 있으면, 공간영역에서 convolution-back projection 알고리즘을 적용하여 보간없이 영상을 재현할 수 있음을 알 수 있다.

IV. 수치계산 및 실험에 의한 영상재현

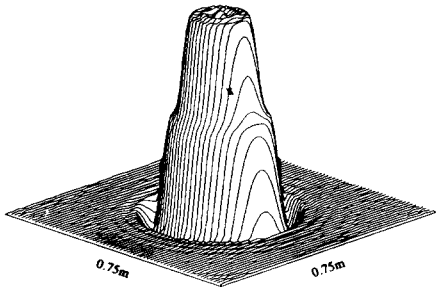
1. 수치계산에 의한 영상재현

앞에서 설명한 공간영역의 적분방정식에서 물체를 단층으로 분할할때, 투영함수를 임의의 기저함수로 전개하는 모멘트 방법과 Nyquist rate로 표본화(sampling)하는 두가지로 분류할 수 있으며, 본 논문에서는 후자의 경우에 대해 수치계산으로 영상을 재현하였다. 본 논문에서 선택한 2차원 산란체는 원통형 유전체로서, 이들은 평면파 입사에 대해 엄밀한 해가 있으므로 쉽게 수치계산에 의해 산란파를 구할 수 있다.

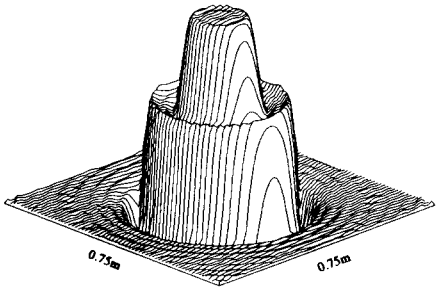
직경 20cm의 원통형 유전체 기둥에 대해 비유전율 ϵ_r 의 허수부는 0이고, 실수부의 값이 1.1, 1.4, 2.0으로서 유전체 외부의 매질에 비해 10%에서 100%까지 변화에 따라 그림 4a, b, c에 나타내었다. 해상도 ΔR 를 3.75cm로 정하고, 물체가 놓여져 있는 1.5m 공간을 40개의 단층으로 분할하였다. 각 단층별로 투영 데이터를 구하기 위해서는 40개의 주파수 선택이 필요하며, 최소파장이 해상도의 2배인 7.5cm가 되는 주파수까지를 대역폭(0-4GHz)으로 정한다. 주파수 간격은 0.1GHz이며, 360° 를 1.8° 간격으로 200개의 각스펙트럼을 입력으로 사용하였다. 공간영역의 해상도를 높이기 위해 88개의 0을 더하여 128point IFFT로 구한 투영 데이터로부터 재현된 영상이다. 비유전율의 값이 증가하여 1.4까지는 Born 근사식(5)을 만족하는 영역이므로 약간의 부엽이 존재하나 상당히 좋은 영상을 보여준다. 그러나, 비유전율이 1.4보다 큰 경우는 Born 근사식을 적용할 수 없으므로 재현된 영상의 부엽이 점점 커 비유전율이 2.0인 경



(a)



(b)



(c)

그림 4. (a) 비유전율이 1.1, 반경이 10cm인 유전체 기둥의 실수부 영상
(b) 비유전율이 1.4, 반경이 10cm인 유전체 기둥의 실수부 영상
(c) 비유전율이 2.0, 반경이 10cm인 유전체 기둥의 실수부 영상

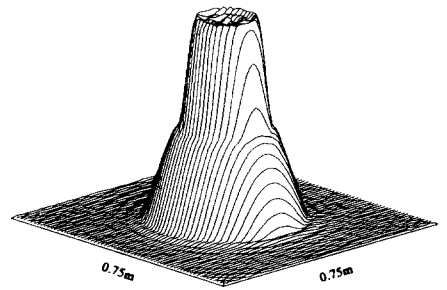
Fig. 4. (a) Real part image for a dielectric cylinder of radius 10cm and 1.1 relative dielectric constant.
(b) Real part image for a dielectric cylinder of radius 10cm and 1.4 relative dielectric constant.
(c) Real part image for a dielectric cylinder of radius 10cm and 2.0 relative dielectric constant.

우는 매우 높음을 알 수 있다.

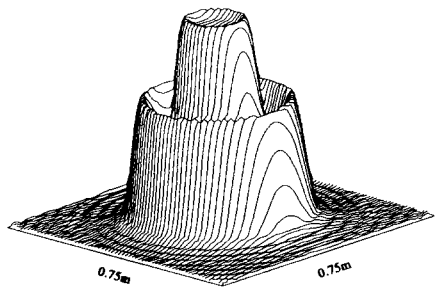
또한 위의 재현된 그림4b, c에 대해 재구성된 비유전율의 허수부 값이 영상에 미치는 영향을 알아보기 위해 복소값의 절대치로 나타낸 것이 그림5a, b이다. 이 그림으로부터 비유전율의 값이 1.4보다 큰 경우에는 부엽이 더욱 높아 영상의 동적 영역(dynamic range)를 줄이며, 또한 유전체내의 영상이 점점 균일하지 않음을 알 수 있다.

한편 일정한 비유전율(1.2, 0.0)에 대해 원통형 유전체 기둥의 크기에 따른 영향을 알아 보기위해 직경이 20cm, 30cm에 대한 영상을 그림 6a, b에 나타내었다. 재현된 영상들은 모두 재구성된 복소유전율의 실수부를 취한 것으로 직경이 20cm까지는 Born 근사식을 만족하는 영역이므로 좋은 영상을 주며, 30cm 이상에서도 점점 부엽은 커지나 유전체내의 영상은 상당히 균일함을 알 수 있다.

다음은 주파수대역 2-6, 4-8GHz의 사용에 따라 재현된 영상을 보기위한 것으로 유전체의 직경이 10cm 비유전율이 1.1에 대해 사용 주파수대역을 0.1GHz 간격으로 전체 41개의 주파수를 사용하여 재현된 영

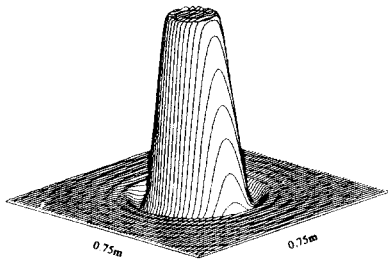


(a)

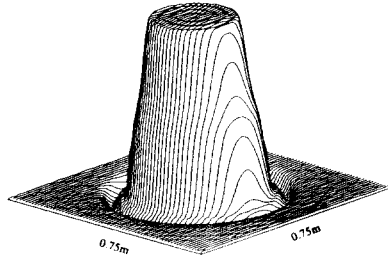


(b)

그림 5. (a) 그림 4(b)에 대한 유전율의 절대치 영상
(b) 그림 4(c)에 대한 유전율의 절대치 영상
Fig. 5. (a) Absolute value image for fig. 4(b).
(b) Absolute value image for fig. 4(c).



(a)



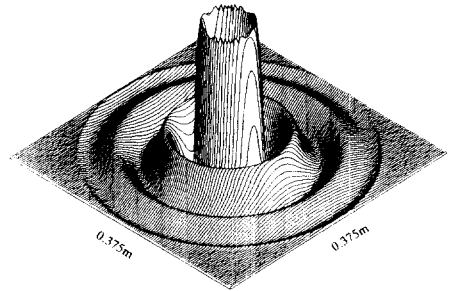
(b)

그림 6. (a) 비유전율이 1.2, 반경이 10cm인 유전체 기둥의 실수부 영상
(b) 비유전율이 1.2, 반경이 15cm인 유전체 기둥의 실수부 영상

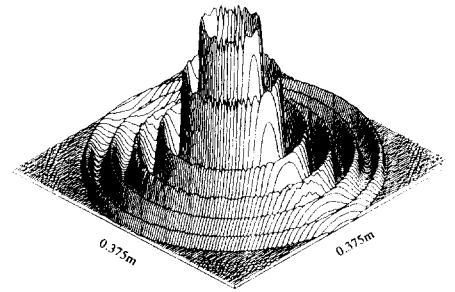
Fig. 6. (a) Real part image for a dielectric cylinder of radius 10cm and 1.2 relative dielectric constant.
(b) Real part image for a dielectric cylinder of radius 15cm and 1.2 relative dielectric constant.

상을 그림 7a, b에 나타내었다. 재현된 영상은 모두 재구성된 복소 유전율의 실수부를 취한 것으로 모두 Born 근사식을 만족하는 경우이다. 주파수대역이 높아짐에 따라 유전체 내부의 영상을 얻기보다는 가장 자리의 detection 효과가 서서히 나타남을 알 수 있다. 이는 D, C에서부터 낮은 주파수대역의 산란 스펙트럼 데이터가 없기 때문이다. 이러한 고주파 산란 스펙트럼으로 재현된 영상의 효과는 물체의 edge detection을 주므로, Born 근사식이 위배되는 영역에서 재현된 영상을 살펴보기로 한다. 주파수 간격 0.08GHz, 주파수대역 7.5GHz-11.5GHz 내에 51개의 주파수를 선택한 경우, 유전체의 직경이 10cm, 비유전율이 2.1에 대한 영상을 그림 7c에 나타내었다. Born 근사식을 위배하므로 실제 직경 크기의 영상 재현은 불가능함을 알 수 있다.

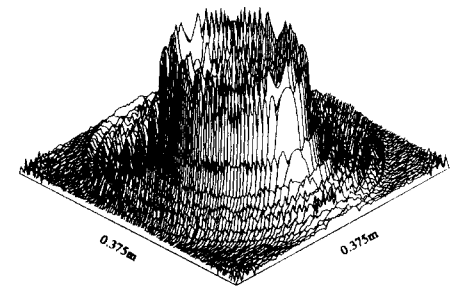
이상으로서 유전체에 대한 영상을 비유전율의 변



(a)



(b)



(c)

그림 7. (a) 2-6 GHz 대역에서 비유전율이 1.1, 반경이 5cm인 유전체 기둥의 실수부 영상
(b) 4-8 GHz 대역에서 비유전율이 1.1, 반경이 5cm인 유전체 기둥의 실수부 영상
(c) 7.5-11.5 GHz 대역에서 비유전율이 2.1, 반경이 5cm인 유전체 기둥의 실수부 영상

Fig. 7. (a) 2-6 Real part image for a dielectric cylinder of radius 5cm and 1.1 relative dielectric constant using 2-6 GHz bandwidth.
(b) Real part image for a dielectric cylinder of radius 5cm and 1.2 relative dielectric constant using 4-8 GHz bandwidth.
(c) Real part image for a dielectric cylinder of radius 5cm and 2.1 relative dielectric constant using 7.5-11.5 GHz bandwidth.

화 및 물체의 크기와 주파수 대역에 따라 재현하였다. 재현된 영상은 Born 근사식을 적용할 수 있는 영역과 낮은 주파수대역(0-4GHz)에서는 상당히 좋은 결과를 얻을 수 있으며, 주파수가 높아짐에 따라 유전체 내부의 영상이 아닌 edge detection 효과의 영상임을 알 수 있었다. 그러나, 식(5)가 위배되는 영역에서는 복소 유전율의 실수보다는 허수부의 영향으로 인한 부엽이 높아 영상을 더욱 열화(degradation)시킴을 알 수 있다.

2. 실험 데이터로부터 재현된 영상

실험은 무반사실(anechoic chamber)내에서 수행된다. 무반사실 내에는 대상 물체를 회전시킬 수 있는 회전반(turn-table), 및 송수신 안테나가 배열된다. 회전반의 중심과 송수신 안테나가 이루는 각은 약 7°로써, 거의 mono-static 한 구성이다. 송신안테나와 회전반은 약 6m, 수신안테나와 회전반은 약 4m 떨어져 far-field 근사조건을 만족시킨다. 실험장치 구성은 산란전자파에 대한 coherent 수신기로서 HP 8510A network analyzer를 중심으로 signal source, S-parameter test set을 사용하였고, 측정신호의 동적영역(dynamic range)을 향상시키기 위하여 X-band(8-12 GHz)진행파관 증폭기를 사용하였다. Signal source 에서의 출력은 10 dBm이며 측정용 cable의 손실등을 고려하여 진행파관 증폭기의 증폭은 약 25 dB로 설정함으로써 송신 안테나에 공급되는 전력을 약 1watt가 되도록 하였다. 회전반을 회전시키는데 필요한 stepping motor 및 driver 등의 구동과 network analyzer가 측정한 데이터를 읽어 들이고 memory에 저장하기 위한 system controller로써 personal computer가 사용되었다.

먼저 Born 근사식을 만족하고 직경이 10cm, 두께가 2.2mm인 속이 빈 p. v. c(비유전율=2.84) 기둥을 turn-table 원점에 놓여져 있을때에 대한 영상을 그림8a에 나타내었다. 재현된 영상은 복소유전율의 실수부를 나타내며, 주파수대역 7.5-11.5GHz를 주파수간격 0.08GHz로 51개를 사용하였다. 시뮬레이션과 같이 X-Band 에서는 물체의 edge detection 효과가 있으며, Born 근사식을 만족하므로 영상이 물체의 직경크기로 재현됨을 알 수 있다.

한편 Born 근사식이 위배되는 물체에 대한 영상을 그림8b에 나타내었다. 재현된 영상은 직경이 10cm이며, 속이 채워진 teflon(비유전율=2.1)으로서 Born 근사식이 위배되므로 시뮬레이션때와 마찬가지로 물체의 직경은 알 수 없으며, 또한 수치계산에 의한 그림7-c와 서로 유사함을 알 수 있다.

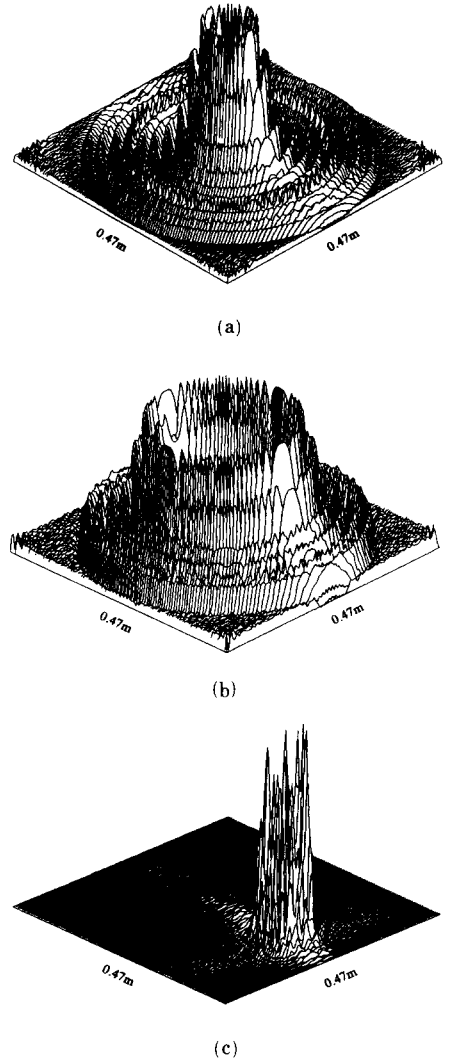


그림 8. (a) X-대역 단층촬영법에 의한 P. V. C의 실수부 영상
 (b) X-대역 단층촬영법에 의한 teflon의 실수부 영상
 (c) X-대역 단층촬영법에 의한 offset을 준 절대치 영상

Fig. 8. (a) Real part image of P. V. C by the X-Band tomography,
 (b) Real part image of teflon by the X-Band tomography,
 (c) Absolute value image of offsetted wood by the X-Band tomography.

다음은 turn-table 중심에서 off-set 되어 놓여져 있는 물체의 영상에 대해 알아본다. 그림 8(c)는 turn table 중앙에서 cross-range 방향으로 15cm 떨어져

농인 사각기둥 (7.5cm×7.5cm)을 갖는 나무(비유전율 = 1.22~1.8)에 대한 영상의 세기이다. 재현된 그림은 거의 놓여진 위치에 영상이 재현되었으며, 4각 모서리와 4면을 선명하게 재현됨으로서 edge 형태를 갖는 물체에 대한 영상도 별 어려움없이 재현할 수 있음을 알 수 있다.

이상으로서 유전체 기둥에 대한 영상을 비유전율의 변화 및 물체의 크기에 따라 재현하였다. 재현된 영상은 Born 근사식을 적용할 수 있는 영역에서는 수치계산과 마찬가지로 물체의 가장자리 영상인 edge detection 효과가 있으나, Born 근사식의 위배되는 물체에 대해서는 가장자리의 영상은 불가능함을 알 수 있다. 따라서 X-Band에서 유전체의 영상을 얻기 위해서는 필수적으로 Born 근사식을 만족하는 시료를 선택하는 것이 중요함을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 마이크로웨이브 영역에서 Born 근사식을 이용하여, 코히어런트 단층촬영 개념으로 공간영역에서 영상을 할 수 있는 새로운 식을 유도하고, 제시된 filtered-backprojection 알고리즘으로 2차원 유전체 기둥의 영상을 수치계산 및 실험을 통해 재현하였다. 유전체의 크기 및 비유전율의 변화와 사용주파수 대역에 따른 수치계산 및 실험을 통한 영상으로부터 Born 근사식의 적용한계를 명확히 확인할 수 있었다. Born 근사식이 만족하는 p.v.c와 나무의 영상은 수치계산과 같이 물체의 가장자리 영상을 얻을 수 있으나, 근사식이 위배되는 teflon의 가장자리 영상재현은 불가능하였다. 특히 사각기둥을 갖는 나무의 영상을 성공적으로 재현함으로써 앞으로 edge 구조를 갖는 물체의 영상도 어려움없이 재

현할 수 있음을 확신할 수 있었다.

끝으로 본 논문에서 제시한 공간영역의 영상재현 방법은 공간과 파수영역의 이중성 성격을 이용한 것으로 마이크로웨이브 영역에서 코히어런트 전자파를 사용한 back scattering tomography이다. 이는 기존 파수영역의 보간법에 따른 문제점을 해결할 수 있어 보다 좋은 영상을 기대할 수 있다.

參 考 文 獻

- [1] T.H. Chu, N.H. Farhat, "Frequency-swept microwave imaging of dielectric objects," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-36, no. 3, pp. 489-493, March 1988.
- [2] D.L. Mensa, S. Halevy, and G. Wade, "Coherent Doppler tomography for microwave imaging," *Proc. IEEE*, vol. 71, no. 2, pp. 254-261, February 1983.
- [3] R.M. Mersereau, A.V. Oppenheim, "Digital reconstruction of multidimensional signal from their projection," *Proc. IEEE*, vol. 62, no. 10, pp. 1319-1338, October 1974.
- [4] R.F. Harrington, *Time-Harmonic Electromagnetic Fields*, McGraw-Hill, 1961.
- [5] L.A. Shepp and B.F. Logan, "The fourier reconstruction of a head section," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, NS-21, pp. 21-43, 1974.
- [6] R.M. Lewitt, "Reconstruction algorithm transform method," *Proc. IEEE*, vol. 71, no. 3, pp. 390-408, March 1983.
- [7] E.O. Brigham, *The Fast Fourier Transform*, Prentice-Hall, 1974.

著 者 紹 介



金 象 基 (正會員)
 1961年 3月 25日生. 1984年 2月 서울대학교 제어계측공학과 졸업. 1986年 2月 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사학위 취득. 1986年 3月~ 현재 국방과학연구소 연구원. 1989年 3月~ 현재 한국과학기술원 전기및 전자공학과 박사과정 재학. 주관심분야는 초고주파 inverse scattering 및 radar 신호처리 등임.

徐 京 煥 (正會員) 第27卷 第2號 參照
 현재 한국과학기술원 전기및 전자공학과 박사과정

●

金 世 潤 (正會員) 第25卷 第8號 參照
 현재 한국과학기술원 연구원 응용전자연구실 선임연구원

●

羅 正 雄 (正會員) 第25卷 第8號 參照
 현재 한국과학기술원 전기및 전자공학과 교수