

論文95-32A-2-4

전파경로 추적에 의한 비균질 유전체의 전자파 산란

(A ray-based approach to scattering from inhomogeneous dielectric objects)

金 炯 東 *

(Hyeongdong Kim)

요 약

비균질 유전체의 전자파 산란을 전파경로를 추적함으로써 계산하였다. 이 방법은 파장에 비해 큰 공동(空洞) 구조나 복잡한 물체로부터의 레이더 단면적(Radar Cross Section)을 계산하기 위해 개발된 SBR(Shooting and Bouncing Ray)방법을 확장한 것이다. 입사 평면파를 나타내는 많은 전파선을 산란체를 향해 주사시켜 비균질 유전체 내부에서 전파경로, 크기, 위상 및 편파를 기하광학 법칙에 의거하여 수치계산적으로 추적한다. 다음 산란체로부터 방출되는 각 전파선에 대하여 "ray-tube 적분"을 수행하여 외부 산란전계를 계산한다. 이 방법을 통신 위성에서 아크젯으로부터 발생하는 비 균질 플라즈마 가스 유전체가 반사형 통신위성 안테나 패턴에 미치는 영향과 비균질 유전체로부터 후방 전자파산란 연구에 적용한 결과를 제시하였다.

Abstract

A ray-based approach is developed to calculate the scattering from inhomogeneous dielectric objects. This approach is a natural extension of the "shooting and bouncing ray(SBR)" technique developed earlier for calculating the radar cross section of cavity structures and complex targets. In this formulation, a dense grid of rays representing the incident field is shot toward the scatterer. The curved trajectory, amplitude, phase and polarization of the ray fields inside the inhomogeneous object are computed numerically based on the laws of geometrical optics. The contributions of the exiting rays to the exterior scattered field are then calculated by using the equivalence principle in conjunction with "a ray-tube integration" scheme. The ray-based approach is applied for the effect of an arcjet plasma plume on satellite reflector performance and backscattering from inhomogeneous objects.

I. 서 론

유전체 렌즈 설계, 미사일 가스로 부터의 레이더 신호 예측, 생체조직의 전력밀도 분포 등의 연구분야에서 비균질 유전체의 전자파 산란은 매우 중요한 관심의

대상이 되고있다. 이러한 비균질 유전체의 전자파 산란을 다루기 위해 지금까지 여러가지 수치해석 방법이 개발되었다. 모멘트 방법(The Method of Moment), 유한 요소법(Finite Element Method)등이 그 대표적인 예이다. 그러나 이러한 "수치적으로 정확함" 방법들은 산란체의 전기적 크기가 작은 저주파 영역에서만 사용될 수있는데, 이는 관련된 계산시간 및 메모리의 제한때문이다. 따라서 전기적으로 큰 산란체에 대해서는, 고주파 전파경로 추적방법(Ray Tracing)같은 고

* 正會員, 漢陽大學校 電波工學科

(Dept. of Radio Science and Eng.)

接受日字 : 1994년 8월 12일

주파 근사 방법이 보다 더 유효하게 쓰일 수있다.

본 연구에서는 비균질 유전체로부터 전자파 산란을 계산하기 위한 방법으로 전파경로 추적방법에 대해서 연구하였다. 이 방법은 이미 공동구조나 복잡한 물체의 레이더 단면적 (Radar Cross Section)을 계산하기 위해서 개발된 "Shooting and Bouncing Ray(SBR)" 방법을 비균질 유전체에 확장시킨 것이다^{[11], [12]}. (그림1)에 보인바와 같이 입사되는 평면파를 나타내기 위해 많은 전파선(Ray)을 산란체를 향해 입사시킨다. 이 전파선들이 비균질 유전체에 도달하면 전파 경로, 크기, 위상, 편파들을 수치적으로 기하광학 법칙에 의거하여 계산하기 시작한다. 다음 산란체의 외부로 방출되는 각각의 전파선의 산란량을 등가원리에 의거하여 "ray-tube" 적분방법을 사용하여 구한다^[11].

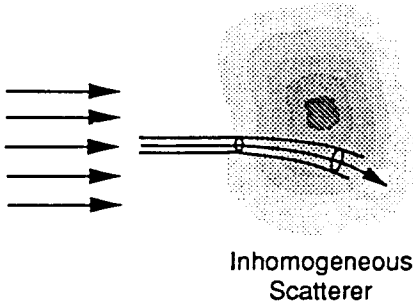


그림 1. 전파경로 추적에 의한 비균질 유전체의 산란

Fig. 1. Scattering from an inhomogeneous object by ray tracing.

본 연구는 원래 통신위성에서 아크젯 스러스터(arcjet thruster)로 부터 발생하는 플라즈마 가스가 탑재된 통신용 반사 안테나의 성능에 미치는 영향에 대한 연구로 부터 시작되었다. 가스를 통해서 전파되는 전파신호의 세기를 계산하기 위해 전파경로 추적방법(ray tracing)을 사용하였다. 플라즈마 가스가 존재할 때 여러가지 반사 안테나와 아크젯 스러스터의 배치구조에 대해서 안테나의 패턴을 계산하였다. 1-kW급의 표준 아크젯 스러스터의 경우 그 영향은 무시할만 하였으나, 높은 전력급의 아크젯 스러스터의 경우는 플라즈마 가스의 전자밀도가 증가하여, 점차적으로 안테나의 주 빔과 부엽준위가 찌그러지기 시작하였으며 주빔이 가스영역으로 부터 기울어지는 현상이 관찰되었다. 이러한 연구결과는 아크젯 스러스터를 통신위성에 장착할 때 그 위치와 최대 전력 선정에 유효하게 사용될 수있다^[3].

다음 위의 아크젯 연구에서 개발된 전파경로 추적 방법을 비 균질 유전체의 후방산란 계산에 확장 적용하였다. 불연속적으로 변하는 경계를 갖는 산란체의 경계에서는, 반사파와 굴절파가 발생한다. 전파선이 산란체의 경계를 만날 때마다 반사파와 굴절파가 발생되는데 외부로 방출되는 전파선에 대해서는 ray-tube 적분을 수행하고 다른 파는 계속 추적하게 된다. 이러한 과정은 추적해야하는 파의 세기가 무시할 만 할때 까지 수행하게된다. 그 확장된 방법을 비균질 유전체의 후방산란에 적용되었다. 간단한 유전율 분포를 갖는 비균질 실린더의 경우, 고주파 영역에서 정확한 급수 방법에 의한 결과와 잘 일치하는 것이 관찰되었다. 이 전파경로 추적 방법은 다른 저주파 방법을 보완할 수있을 뿐만 아니라 유전체로부터의 후방산란의 메카니즘을 잘 설명 해주고 있다^[4].

II. 비균질 유전체에서의 전파경로 추적

비균질 유전체 내부에서 전자파의 전파현상을 계산하기 위해서 기하광학(Geometrical Optics)이 사용된다. 등방성 비균질 유전체에서 기하광학의 해는 이미 오래전에 구해졌으며^[5] Kline 과 Kay^[6], Born 과 Wolf^[7], 그리고 최근에는 Bremmer 와 Lee^[8]에 의해 잘 정리되었다. 다음에 위상, 크기, 편파를 고려한 전파경로에 대한 관계식이 하나씩 설명된다. 먼저 전파경로는 다음과 같은 벡터 미분 방정식에 의해 결정된다.

$$\frac{d}{ds}(N\hat{s}) = \nabla N \quad (1)$$

여기서 \hat{s} 는 전파의 진행방향, s 는 전파경로에 따른 거리를, N 은 매질의 굴절률을 나타낸다(그림 2 참조). $N(\vec{r})$ 의 굴절률 분포를 갖는 임의의 비균질 유전체내에서 위의 미분방정식을 수치적으로 풀어서 전파경로를 추적할 수있다. 예를들면 다음과 같이 이산화 시킴으로서 가능하다.

$$N(\vec{r} + \Delta \vec{r})\hat{k}(\vec{r} + \Delta \vec{r}) = N(\vec{r})\hat{k}(\vec{r}) + \Delta s \nabla N(\vec{r} + \Delta \vec{r}/2) \quad (2)$$

식(2)을 이용해서 \vec{r} 지점에서 초기방향 $\hat{k}(\vec{r})$ 이 주어지면 그 다음 전파통로($\vec{r} + \Delta \vec{r}$)와 그 지점에서 전파 방향 $\hat{k}(\vec{r} + \Delta \vec{r})$ 을 구할 수있다. 균질의 매질에서는 ∇N 이 0 이므로 예상했던 바와 같이 직선의 전파경로가 된다. 또한 전파경로는 굴절률의 경사방향으로 변화하려는 성향을 관찰할 수있다. 따라서 전파경로는 높은 굴절률의 매질로 향하는 경향이 있다. 플라즈마 가스의 굴절률은 항상 1 보다 작기 때문에 전파가 플라스

마 가스로부터 멀리 휘어지리라고 예상할 수있다.

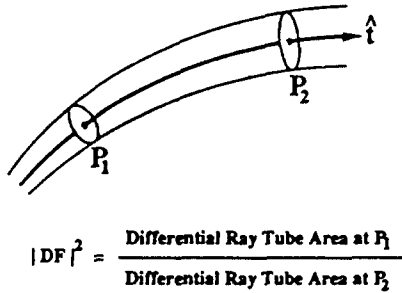


그림 2. 비균질 내부에서 전파경로. 발산계수는 전파선의 퍼짐을 나타낸다.

Fig. 2. Curved ray trajectory in an inhomogeneous medium Ray-tube spreading is accounted for by the divergence factor(DF).

전파경로가 일단 정해지면 전파경로를 따라서 위상 변화가 Fermat의 관계에 의해정해진다.

$$k_0 [S(P_1) - S(P_2)] = k_0 \int_{P_1}^{P_2} N ds \quad (3)$$

k_0 는 자유장 전파상수이고 S 는 광거리(optical length)를 나타낸다. 전파경로 추적에 의해 경로의 모든점에서 완전하게 전장의 세기를 구할 수있다. 전파경로 P_2 의 전장은 전파경로 P_1 의 전장에 의해 다음과 같이 정해진다.

$$\vec{E}(P_2) = \hat{e}_2 E(P_1) \sqrt{\frac{N_1}{N_2}} (DF) \exp(-jk_0 [S(P_2) - S(P_1)]) \quad (4)$$

DF는 발산계수(divergence factor)라고 부르는데 물리적으로 ray-tube가 퍼져나가는 정도를 나타낸다(그림2 참조). 발산계수는 1차 전송방정식으로 다음과 같이 구해진다.

$$DF = \exp \left[-\frac{1}{2} \int_{P_1}^{P_2} (\nabla \cdot \hat{t}) ds \right] \quad (5a)$$

또는

$$DF = \exp \left[-\frac{1}{2} \int_{P_1}^{P_2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) ds \right] \quad (5b)$$

식(5b)에서 R_1 과 R_2 는 파두의 2개의 주곡률반경(principal radii of curvature)을 나타낸다. 식(5b)가 기하학적으로 쉽게 이해될 수있어 수치해석적 구현에 더 적합하다.

편파 벡터 \hat{e}_2 는 P_1 지점에서 편파벡터 \hat{e}_1 와 다음과 같이 관련되어진다.

$$\hat{e}_2 = \hat{n} \cos(\theta_0 - \theta) + \hat{b} \sin(\theta_0 - \theta) \quad (6)$$

$$\theta_0 = \tan^{-1} \left(\frac{\beta_0}{\alpha_0} \right), \quad \theta = \int_{P_1}^{P_2} \tau ds$$

$$\hat{e}_1 = \hat{n} \alpha_0 + \hat{b} \beta_0, \quad \tau = \frac{(\hat{t} \times \hat{t}') \cdot \hat{t}'}{|\hat{t} \times \hat{t}'|^2}$$

식(6)에서 $\hat{n}, \hat{b}, \hat{t}$ 는 (그림3)에 보인 바와 같이 각각 전파경로에 따라 normal, binormal, tangent 벡터를 나타낸다. τ 는 전파경로의 "torsion"이라 불리우고 binormal 벡터의 회전을 나타낸다. 식(6)에서 편파벡터는 전파경로의 torsion에 관계하는 것을 알 수 있다. 평면에 놓여있는 전파경로에 대해서는 torsion이 0이므로 편파벡터는 항상 normal 벡터와 binormal 벡터에 일정한 각을 유지하는 것을 알 수 있다. 위의 식에 기본으로 해서 임의의 비균질 유전체내부에서 전파경로 추적 알고리즘을 구현하였다.

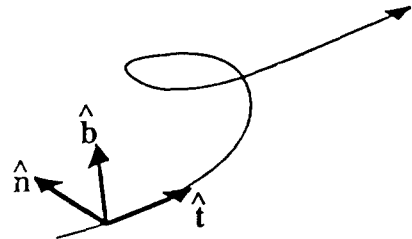


그림 3. 전파경로를 따라 정의되는 normal 벡터, binormal 벡터, tangent 벡터

Fig. 3. Three unit vectors \hat{n} (normal), \hat{b} (binormal) and \hat{t} (tangent) can be defined along the trajectory in space.

III. 아크젯 가스의 통신위성 안테나에 미치는 영향

아크젯 스퍼스터는 미항공우주국 및 항공산업체에 의해 차세대 통신위성의 위치확보와 자세제어등을 위해 개발되는 전기열 추진장치이다. 아크젯 스퍼스터는 고효율때문에 통신위성의 수명을 상당히 연장할 수 있다. 그 동작원리는 가열된 질소와 수소의 혼합물을 노즐을 통해 방출시킴으로서 추진력을 발생시키게 된다. 이때 중요한 것은 그 방출된 아크젯 플라즈마 가스가 마이크로파 통신 시스템 주위를 오염시킨다는 것이다. 방출된 아크젯 가스는 약하게 이온화된 플라즈마 가스

상태로서 안테나의 마이크로파 통로의 굴절률을 변화시켜 송신 또는 수신되는 신호에 영향을 미치게 된다(그림4 참조). 이러한 문제가 실제로 아크젯 스투터가 통신위성에 사용되는데 큰 우려가 되고있다. 따라서 아크젯 가스가 안테나 성능에 미치는 영향을 정량적으로 예측하는 것은 매우 중요하다^[3]. 아크젯 가스는 완만하게 변하는 비균질 유전체로 모델링된다. 굴절률의 공간적 분포는 측정된 결과에 근거한다. 이렇게 비균질 유전체로 모델링된 아크젯 가스를 통해 전달되는 마이크로파 신호를 연구하기 위해 기하광학적 방법인 전파경로 추적 방법이 사용되는데 그 이유는 다음과 같다: (a)가스의 부피가 수백의 파장이고, (b)가스의 유전율이 완만하게 변화하고, (c)전파경로 추적방법이 반사형 안테나 해석에 쓰이고 있다는 점. 일단 근거리장에 놓여 있는 한 평면에서 전파경로 추적에 의해 전계가 구해지면 ray-tube적분 방법에 의해 가스가 있는 상태에서 안테나의 패턴을 구할 수 있게된다.

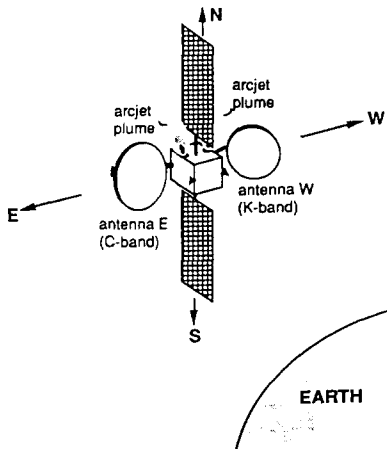
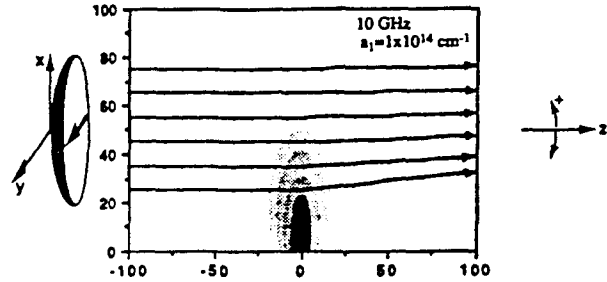


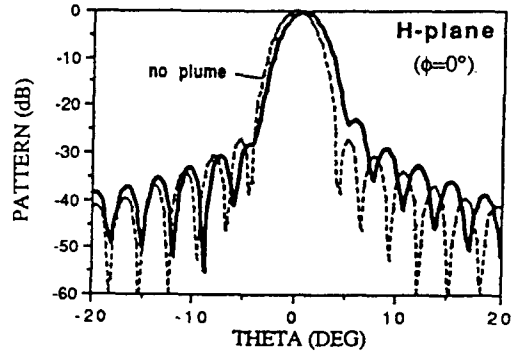
그림 4. 아크젯 가스가 위성통신 안테나성능에 미치는 영향

Fig. 4. Arcjet plume plasma effect on satellite reflector performance.

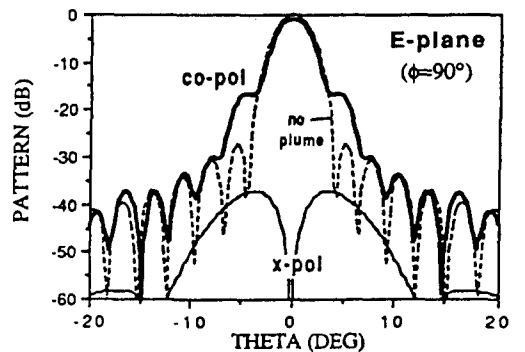
(그림5a)는 연구된 하나의 안테나와 아크젯 가스의 배치상태를 나타내고 있다. 반사형 안테나는 지름이 60cm(10 GHz에서 20λ)이고 10dB 테이퍼를 갖는다고 가정한다. 반사표면으로부터 반사된 후 초기 마이크로파 신호는 완전하게 조준되어 있고 y방향으로 선형편파되어 있다고 가정한다. (그림5a)에 대략 3kW 급(모델링 상수 $a_1=1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-1}$ 에 해당)의 아크젯 스투터에 해당하는 플라스마 가스를 통과하는 전파경로가 나타나있다. 이로부터 전파가 노즐근방의 고전자 밀도 영역으로 부터 멀어지는 현상을 관찰할 수있다.



(a)



(b)



(c)

그림 5. 아크젯 가스에 의한 안테나패턴 왜곡
(a) 안테나와 가스의 배치상태. 안테나는 지름이 60cm(10GHz에서 20λ)이고 테이퍼는 10dB이다. 편파는 y축으로 선형 편파이다. (b) H면 패턴 (c) E면 패턴

Fig. 5. Reflector pattern degradation due to a plasma plume.

(a) Reflector and plume configuration. The reflector has a diameter of 60cm(20λ at 10 GHz) and an assumed aperture taper of 10dB. The polarization is linear in y. (b) H-plane pattern. (c) E-plane pattern.

아크젯 가스를 통과한 개구면($Z=100$ cm)에서 전파 경로를 추적하여 방향, 위상, 세기, 및 편파를 계산한다. 다음 가스가 존재하는 상태에서의 안테나 패턴을 구하기 위해 개구면에서 ray-tube적분을 모든 전파선에 대해서 수행한다. (그림5b)와 (그림5c)에 (그림 5a)의 구조에 대한 안테나의 패턴 계산결과가 제시되어 있다. 주 빔과 부엽준위에 작지만 알아볼 수있는 성능저하를 관찰할 수있다. 특히 H면 패턴에 있어서 주빔의 방향이 기울어지는 것을 관찰할 수있다. 이는 전파가 노즐부근의 고전자밀도 영역으로 부터 멀어지려는 현상으로 부터 쉽게 예상할 수있는 결과이다. 이 예제에서 주빔(빔폭 = 3.0°)은 주방향으로 부터 0.75° (0.25 빔폭) 기울어져 실제적으로 주방향으로 0.94dB 이득손실을 가져오고 있다. 보다 더 방향성이 좋은 안테나의 경우는 훨씬 더 심각한 문제가 된다. (그림5c)의 E면 패턴에는 H면 패턴보다 더 높은 부엽준위와 가스에 의해 발생하는 편파성분이 제시되어 있다. 아크젯 가스의 영향은 실제 안테나와 가스의 구조형태에 따라 매우 다르다. 실제의 아크젯 스퍼스터와 안테나의 구조형태에 대한 사례연구가 미국 GE(General Electric)사의 시리즈 7000위성에 대해 수행되었으며 그 결과가 참고문헌^[9]에 제시되어 있다.

IV. 비균질 유전체의 후방산란

아크젯 연구에서 개발된 방법을 비균질 유전체의 후방산란에 확장한다. 비균질 유전체의 굴절률은 경계면을 제외하고 내부에서는 완만하게 변화한다고 가정한다. 아크젯 연구에서와 마찬가지로 입사되는 평면파를 나타내기 위해 수많은 전파선을 산란체를 향해 입사시킨다. 입사되는 전파선이 산란체의 경계면(즉 그림6의 1지점) 만나면 반사파와 굴절파가 생긴다. 굴절파는 산란체 내부로 전파되어 가고 결국 다시 경계면(즉 그림6의 2지점)을 만나게 된다. 다시 반사파와 굴절파가 생기는데 이번에는 반사파는 경계면으로 부터 반사되어 내부에 남게되고 굴절파는 외부로 방출된다. 반사파의 세기는 경계면에서 반사할 때마다 그 세기가 감소하게 되어 몇 번의 이러한 과정 후 그 세기가 약해져 중단된다. 경계면에서 반사와 굴절을 고려하기 위해서 기하광학 법칙이 사용된다. 전파선이 외부로 방출될 때마다 ray-tube적분을 수행하여 산란전계를 계산한다. 적분은 (그림7)과 같이 임의의 Huygen면에 ray-tube의 투영된 면에서 수행하고 그 투영면의 전장은 추적된 전파선의 전장에 의해 근사계산한다. 자세한 과정은 참고문헌^[4]에 제시되어 있다.

방사상으로 비균질 원형 실린더의 산란계산 결과

(그림8)에 제시되어 있다.

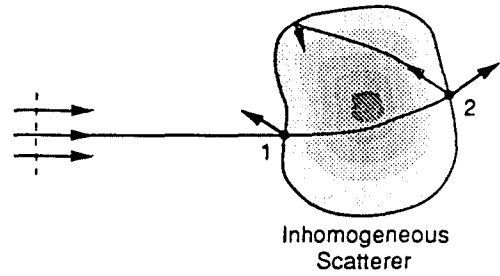


그림 6. 산란체 경계에서 매질의 불연속에 의해 반사파와 굴절파가 생긴다.

Fig. 6. Reflected and refracted rays are generated due to the medium discontinuity at the scatterer boundary.

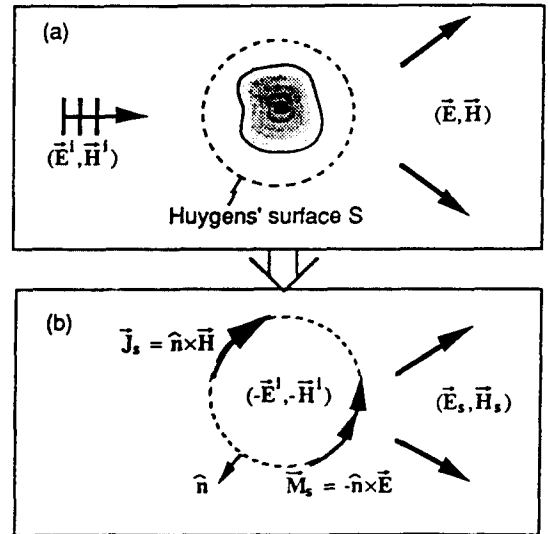


그림 7. 비균질 물체의 산란. (a)실제문제 (b)등가문제

Fig. 7. Scattering formulation for inhomogeneous objects. (a)Original problem. (b)Equivalent problem.

비교할 수있는 표준해를 구하기 위해 방사상 비균질 원형실린더를 서로다른 굴절률을 갖는 많은 다층실린더로 모델링하였다. 비균질 실린더를 정확하게 모델링하기 위해 10개 이상의 실린더가 사용되었으며 급수방법에 의해 산란을 계산하여 표준해를 구하였다. 따라서 이 표준해는 수치적으로 정확한 해로 간주될 수있다. 다음과 같이 완만한 유전율분포를 갖는 실린더에 대해서 산란을 계산하였다.

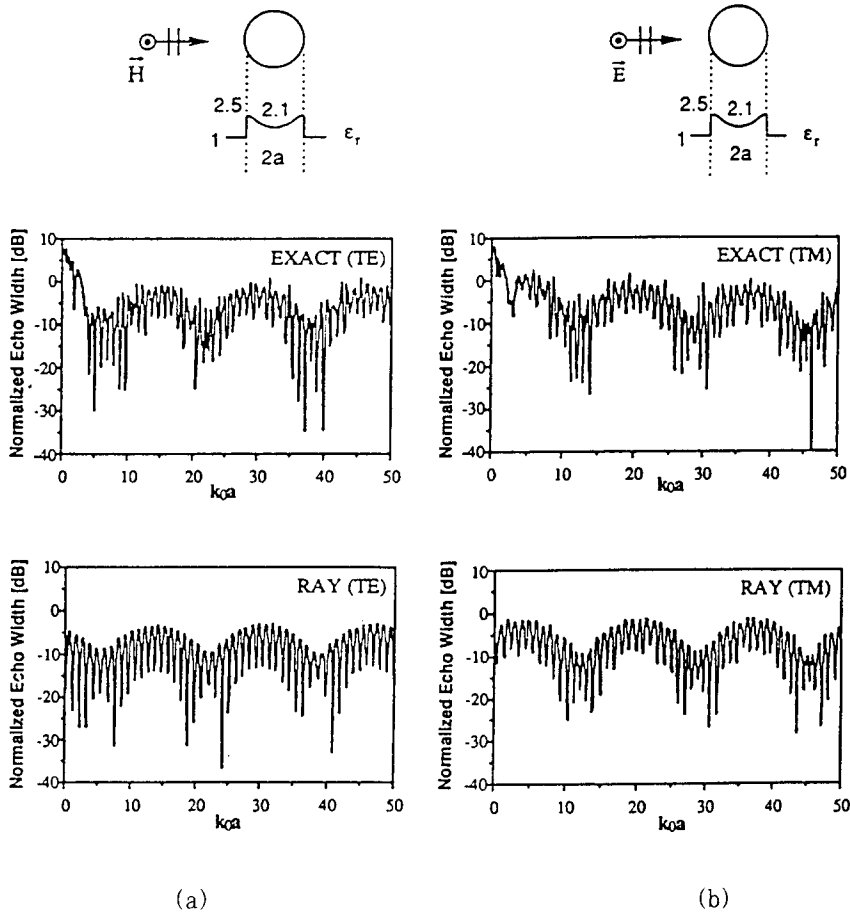


그림 8. 비균질 실린더 후방산란의 표준해와 전파경로추적해의 비료. (a)TE입사. (b)TM입사

Fig. 8. Backscattering from an inhomogeneous cylinder computed from the exact multilayered solution and the ray solution. (a)TE incidence. (b)TM incidence.

$$\begin{aligned} \epsilon_r(\rho) &= n^2(\rho) = d + b\left(1 - c \cos \frac{\pi\rho}{a}\right) \quad (7) \\ d &= \epsilon_r(a) - 1, \quad b = \frac{1 + [\epsilon_r(0) - d]}{2}, \\ c &= \frac{1 - [\epsilon_r(0) - d]}{1 + [\epsilon_r(0) - d]} \end{aligned}$$

식(7)의 유전률 분포는 실린더 중앙에서 $\epsilon_r(0)$, 경계에서 $\epsilon_r(a)$ 를 가지며 완만하게 변하도록 임의로 선택된 분포이다. (그림8)은 $\epsilon_r(0)=2.1$ 과 $\epsilon_r(a)=2.5$ 의 실린더에 대한 산란계산 결과이다. 주파수에 따른 반향폭(echo width: 자유공간 파장에 정규화됨)을 TE편파에 대해 (그림8a)에 제시하였다. 전파경로 추적에 의한 결과가 표준해와 $k_0a > 10$ (지름 $> 3\lambda_0$)의 고주파수 영역에서 잘 일치하는 것을 관찰할 수 있다. 저주파수 영

역에서는 예상대로 전파경로 추적방법이 표준해와 많은 차이가 있다. 이는 전파경로 추적 방법이 고주파 해석법인 기하광학에 근거하고 있기 때문이다. 또한 주파수에 따른 반향폭의 변화에 두가지 형태의 변동이 있음을 관찰할 수 있다. 이러한 현상은 유전체의 서로 다른 두가지의 산란 메커니즘에 해당하는데 이는 전파경로에 의해 쉽게 설명될 수 있다. 작은 규모의 국부적인 변동은 실린더 외부에서 바로 반사된 파와 내부에서 한번 반사되고 방출된 파의 상호간섭에 의해 발생된 현상이다. 큰 규모의 전체적인 변동($k_0a=21$ 와 39에서 국소점을 갖는)은 외부 직접 반사파와 소위 "glory ray"의 상호간섭에 의한 것이다. 전체적인 반향폭의 세기 뿐만 아니라 이 두가지 형태의 변동현상도 정확하게 본 연구의 전파경로 추적에 의해 잘 예견되고 있음

알수있다.

TM편파의 결과가 (그림8)의 오른쪽에 제시되어 있다. 마찬가지로 전파추적 결과가 표준해와 잘 일치하고 있음을 관찰할 수있다. TM편파의 경우에 산란체 경계에서 반사계수와 전송계수를 제외하고는 TE편파와 동일한 전파경로를 갖는다. 실린더 중앙으로 입사하는 전파선의 경우에는 두가지 편파에 대해 같은 반사계수와 전송계수를 갖게되어 국부적인 변동이 동일하게 된다. 실제로 두가지 편파에 대해 면밀하게 비교해보면 국부적인 변동이 일치하고 있음을 살펴볼 수있다. 한편 전체적인 변동은 두 편파에 대해 서로 다른 현상을 보여주고 있음을 알 수있다.

V. 결 론

전기적으로 크기가 큰 비균질 유전체의 전자파산란을 계산하기 위한 전파추적 방법을 제시하였다. 본 연구에서 전파추적 방법이 전기적으로 큰 비균질 유전체의 산란계산을 위한 효과적인 방법임을 보여 주고있다. 완만하게 변하는 비균질 유전체에 대해서 전파추적에 의한 결과는 고주파 영역에서 정확한 급수해와 잘 일치하고 있다. 또한 전파경로 방법은 산란 메카니즘을 쉽게 이해하는데 도움이된다. 개발된 전파경로 추적 방법은 앞으로 고주파 영역에서 저주파 해석법을 보완하면서 널리 사용될 수있으리라 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] H. Ling, R. Chou and S. W. Lee, "Shooting and bouncing rays: calculating the RCS of an arbitrary shaped cavity," IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. AP-37, pp. 194-205, Feb. 1989.
- [2] J. Baldauf, S. W. Lee, L. Lin, S. K. Jeng, S. M. Scarborough and C. L. Yu, "High frequency scattering from trihedral corner reflectors and other benchmark targets: SBR versus Experiment," IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. AP-39, pp. 1345-1351, Sept. 1991.
- [3] H. Ling, H. Kim, G. A. Hallock, B. W. Birkner and A. J. M. Zaman, "Effect of an arcjet plume on satellite reflector performance," IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. AP-39, pp. 1412-1420, Sept. 1991.
- [4] H. Kim and H. Ling, "Electromagnetic scattering from an inhomogeneous object by ray tracing," IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. AP-40, pp. 517-525, May 1992.
- [5] R. K. Luneberg, Mathematical Theory of Optics. Berkely, CA: Univ. California, 1964.
- [6] M. Kline and I. W. Kay, Electromagnetic Theory and Geometrical Optics. New York: Wiley, 1965, ch. 5.
- [7] M. Born and E. Wolf, Principles of Optics. New York: MacMillan, 1964, ch. 3.
- [8] H. Bremmer and S. W. Lee, "Propagation of a geometrical optics field in an isotropic inhomogeneous medium," Radio Sci., vol. 19, pp. 243-257, Sept. 1984.
- [9] G. A. Hallock, H. Ling, D. Hastings, H. Kim and R. Chatterjee, "Arcjet plasma plume analysis," Final Report to GE-Astrospace Contract P.O. 55618080-F66, May 1991.

저 자 소 개



金炯東(正會員)

1960년 10월 13일생. 1984년 2월 서울대학교 공과대학 전자공학 학과(학사). 1986년 2월 서울대학교 공과대학 전자공학과(석사). 1992년 5월 University of Texas at Austin (Ph. D). 1992sus 6dnjf ~ 1993년 1월 The University of Texas at Austin(Postdoctoral Fellow). 1993년 3월 ~ 현재 한양대학교 전파공학과 전임강사