전자파 산란 및 역산란 문제의 해석 기법

金 世 潤
한국과학기술연구원 응용전자연구실

Ⅰ. 서 언

전자파 문제는 넓은 의미로 산란(scattering)문제와 역산란(inverse scattering)문제로 나눌 수 있다. 먼저 산란 문제는 에너지 또는 정보가 실린 전자파를 한 지점에서 다른 지점으로 보낼 때 통과하는 경로상의 매질 분포에 따라 왜곡 또는 변형되는 정도를 알아내는 것으로 반사(reflection), 굴절(refraction), 회절(diffraction) 등의 현상을 수반한다. 이 때 전자파를 왜곡시키는 물체를 산란체라고 부르며, 이러한 산란체로서는 전송선, 도파관, 광섬유 등과 같은 도파구조(guided wave structure) 자체일 수 있으며 그들 내부에 고의로 부착된 첨가물일 수도 있다. 또한 공기나 지하와 같은 개방 구조 내의 물체나 비균일 매질 분포도 산란체가 될 수 있다.

이와는 반대로 역산란 문제는 알고 있는 전자파를 미지의 산란체에 가한 후, 여기서 산란된 전자파를 측정하여 얻은 자료로 부터 역으로 산란체의 위치, 크기, 모양, 매질 특성 등을 알아내는 것이다. 이러한 역산란 문제는 지하탐사(geophysical probing), 원격탐사(remote sensing), 레이다 영상(radar imaging), 의료 진단(medical diagnosis), 비파괴 검사(nondestructive testing) 등과 같은 많은 응용분야에 걸쳐 있다.

본 원고에서는 전자파 산란 및 역산란 문제에 대한 기존의 다양한 해석기법들을 체계적으로 분류하고, 이들의 적용범위와 한계에 대해 간략히 소개하기로 한다.

Ⅱ. 전자파 산란 문제의 해석 기법

전자파 산란 문제는 주어진 산란체에 따라 정해지는 경계조건(boundary condition), 복사조건(radiation condition), 모서리 조건(edge condition) 등을 만족하는 맥스웰 방정식(Maxwell's equation), 즉 2차 편미분 방정식인 파동 방정식의 해를 구하는 고전적인 수학 문제중의 하나이다. 엄밀한 의미에서 보면 경계, 복사, 모서리 조건들은 각각 서로 다른 매질의 경계, 무한대에서의 경계, 경계의 미분이 정의되지 않는 구조적인 특이점인 모서리(edge)나 구석(corner)에서 이들 영역을 무한소 개념의 영역으로 정의하여 맥스웰 방정식을 만족하는 일종의 특수해를 의미한다. 따라서 전자파 산란 문제는 매질 분포 특성이 고려된 파동 방정식만을 풀기만 하면 된다

고 볼 수 있다.

전자파 산란 문제를 다룰 수 있는 방법들은 해석적인 방법(analytical method), 근사적인 방안(approximate scheme), 수치계산 기법(numerical technique), 계측실험(experimental measurement) 등이 있다. 본 원고에서는 계측 실험법에 대해서는 언급하지 않고, 나머지 방법들에 대해서만 세부적인 해석기법들을 살펴보기로 한다.

Ⅱ-1. 변수 분리법

가장 대표적인 방법으로서는 변수 분리(separation of variables)를 이용하여 2차 편미분 방정식인 파동 방정식을 각 변수들에 대한 상미분 방정식으로 바꾸어서 각각 구한 해들의 곱으로 최종 해를 나타낸다. 그러나 변수분리가 가능한 경우는 극히 제한되어 있다. 즉, 3차원 산란체의 구조가 원기둥, 타원기둥, 구 등과 같이 경계면이 해당 좌표계에서 각각 하나의 변수로 표현 가능한 형태만 가능한 데, 일반적으로 11개의 좌표계에서 변수 분리가 성립한다. 따라서 변수분리로 구한 파동 방정식의 해는 Exponential Bessel, Hankel, Mathieu, Legendre, Hermite, Laquerre, Lame 함수 등의 무한 급수 형태로 표현되며, 이러한 급수들의 계수는 경계조건으로 부터 계산한다.

이 때 계수들의 계산은 급수항들의 직교성을 이용한 적분 값으로 구하게 되는 데, 이러한 적분으로 부터 Fourier, Laplace, Hankel, Mellin, Lebedev 등의 적분 변환(integral transform) 기법들이 차례로 개발되었다. 변수 분리 방법을 이용한 파동 방정식의 해석에 관해서는 Morse와 Feshback[1]의 책에 잘 정리되어 있다.

Ⅱ-2. 전기 영상법

구형 도파관 내의 임의의 전원에 의해 복사되는 전자파는 변수 분리법으로 구할 수 있으나, 4면의 도체판을 경계로 하는 무한개의 영상(image) 전원이 자유공간에 있다고 두고 이들의 복사파들을 중첩시켜서 계산할 수도 있다. 이러한 영상 전원을 이용한 전자파 해석기법을 전기 영상법(image method)라고 부르는 데, 변수 분리법에 비해서도 적용가능한 산란체의 구조가 더 제한된다.

그런데 1896년 Sommerfeld는 도체 반평면(conducting half-plane)에 의한 2차원 전자파 회절 문제를 원래의 구조 평면과 일종의 영상 평면으로 구성된 이중 평면 공간(double sheeted space) 개념을 도입하여 전기 영상법으로 정확히 풀었다[2]. 이와 함께 쐐기형 완전도체의 전자파 회절 문제도 다중 평면 공간 개념을 적용하여 마찬가지로 정확한 산란 문제를 구함으로서, 산란체가 모서리(edge)와 같은 구조적인 특이점을 갖을 경우에도 모서리 조건을 써서 유일한 해를 최초로 얻었다.

전기 영상법은 주로 정전계(elecrostatic)에서 많이 사용하는데, Gilbarg[3]는 임피던스 경계조건(impedance boundary condition)을 만족하는 라플라스 방정식의 해를 영상법으로 해석하였다. Lindell과 Alanen[4]은 Sommerfeld의 이중 평면 개념을 써서 서로 다른 두 유전체 평면상의 자기 쌍극자(magnetic dipole)의 정확한 영상 전원을 계산하였다.

Ⅱ-3. Watson 변환

금세기초 대표적인 전자파 문제는 지평선 너머로 전자파가 전파시 지표면에 의한 산란 영향을 계산하는 것이었다. 이 때 지구는 완전 도체로 된 구라고 두고 전원은 지표면위의 전기 쌍극자(electric diploe)라고 가정하면, 앞에서 언급한 변수 분리법으로 정확한 산란파를 spherical Bessel 함수와 Legendre 함수의 곱으로 된 무한 급수 형태로 구할 수 있다. 그러나 사용 파장에 비해 지구 반경이 너무 커서, 거의 8000항을 더해야만 그런대로 만족할 만한 산란파의 값을 얻을 수 있었다. 그런데 1918년 Watson[5]은 변수 분리된 급수항들을 각각 궤적 적분(contour integral) 형태로 표현한 후, 궤적을 변형(deform)시켜 적분함으로서 새로운 급수 형태로 산란파를 나타내었다. 이러한 방법을 Watson 변환이라고 부르는데, 원래의 급수항을 8000개 더해 구할 수 있는 산란파의 값을 단 한개 또는 두개의 Watson 변환된 급수 항을 재현할 수 있음을 보였다. 그 후 1950년 경 여러 수학자에 의해 Watson 변환된 급수를 변수 분리법으로 부터 직접 유도할 수 있음을 보였는데, 이에 관해서는 Friedman[6] 책을 참조하면 좋을 것이다.

Ⅱ-4. Wiener-Hopf 기법

1931년 Wiener와 Hopf는 반 무한 매질(semi-infinite medium) 내에서 복사이동(radiative transport)에 대한 Miline 적분 방정식을 프리에(Fourier) 변환시켜 피적분 함수를 적절히 분할(factorization)하여 정확한 해를 구하였다. 이러한 해석 방법을 Wiener-Hopf 기법이라고 부르는 데, 2차 대전중 MIT 방사 연구실의 Schwinger는

이 방법으로는 도체 반평면에 의한 전자파 회절 문제도 정확히 풀 수 있음을 보였으며 같은 시기에 소련의 Fock[7]도 이를 입증하였다. 이 후 여러가지 형태의 반 무한(semi-infinite) 산란체에 대해 적용되었는 데, 도파관으로 구성된 위상 배열 안테나의 기본적인 해[8]로서 반 무한 평판 도파관, 반 무한 원형 도파관의 복사 패턴을 Wiener-Hopf 기법으로 정확히 풀었다. 이에 대해서는 Noble[9]의 책에 잘 기술되어 있다.

Wiener-Hopf 기법의 적용 범위를 확대하기 위한 여러가지 시도가 지금까지도 계속되고 있다. 이러한 시도중 하나는 하나의 적분 방정식이 아니고 여러개의 적분 방정식형태로 표현되는 문제에 Wiener-Hopf 기법을 이용하는 것으로, 이를 위해서는 복소 변수에 대한 행렬 형태의 해석 함수(matrix-valued analytic function)의 분할 방법을 알아내야 한다. 또 다른 응용으로 지금까지도 정확한 해를 구하지 못하고 있는 기본적인 구조인 1 / 4 평면 도체(conducting quarter-plane)와 유전체 쐐기(dielectric wedge)에 의한 산란파를 해석하는 것인데, 이 또한 관련 복소 변수에 대한 해석 함수의 분할이 잘 이루어지지 않고 있다.

Ⅱ-5. 변분법

2차 대전중 MIT 방사 연구실에서 도파관 내의 구조물에 의한 영향을 등가 회로로 나타내어 이들 회로 변수 값을 계산하기 위한 방안으로 변분법(variational method)을 Schwinger[10]가 개발하였다. 변분법의 기본 원리를 도파관내에 설치한 산란체의 역할에 대해 적용해 보자. 먼저 도파관에 인가된 전파 모우드(propagation mode)의 크기에 상관없이 산란체의 등가적인 전기회로 값이 정해진다. 그런데 도파관내에서는 전파 모우드(propagation mode)만이 관심이므로, 실제 산란체 근방에서의 산란파의 값이 정확한 값에 비해 약간의 오차가 있을 경우 산란체에서 멀리 떨어진 전파 모우드의 오차는 앞의 오차의 자승에 비례하는 고정적인 성질(stationary property)이 있다. 따라서 산란체 근방에서 임의의 산란파의 값을 변화시킬 때 산란체의 등가 회로 값의 변화는 없다고 둠으로서 등가 회로 값에 대한 적분 방정식을 유도할 수 있으므로, 이를 해석적인 방법이나 수치계산으로 풀어서 등가 회로 값을 구하면 된다.

그러나 변분법을 적용할 수 있는 산란파의 범위에 대해서는 일반적으로 알려져 있지 않다. 이는 정확한 산란파의 값에서 임의의 산란파의 변화율이 최대 또는 최소가 되는 것이 아니라 안장점(saddle point)이기 때문에 변분법의 적용의 상한과 하한 경계(upper and lower bounds)를 알기 어렵다. 제한적이지만 이러한 상한 및 하한 경계를 구하는 방법에 대해서는 Sprunch[11]의 연구 결과에 알려져 있다.

Ⅱ-6. 광학적인 해석 방법

빛에 관한 고전적인 해석 방법이 기하광학(geometric optics)인데, 일반적으로 위상정보를 취급하지 않으며 맥스웰 방정식을 만족하지 못한다. 기하광학에 위상 정보를 취급하도록 확장된 이론이 물리광학(physical optics)이지만 역시 맥스웰 방정식의 해는 되지 못한다. 19세기말 Poincare[12]등에 의해 점근적인 해석(asymptotic analysis)방법이 개발되었는 데, 이 방법은 임의의 함수를 수학적인 특이점(singularity) 근방에서의 급수 전개로 나타내는 것으로 그 후 양자 역학에서 주로 사용하였다. 그런데 1944년 Luneberg[13]는 고주파수 대의 전자파에 대해 맥스웰 방정식을 점근적으로 풀므로서, 기하광학 해를 포함하는 ray 형태의 해를 구하였다. 이 후 Kline and Kay[14]등에의해 파동 방정식에 대한 점근적인 해를 구함으로서, 고주파 대의 전자파 해석 기법의 기초를 마련하였다.

일반적으로 ray 개념은 반사와 굴절 현상을 다룰 수 있지만, 모서리와 같은 구조적인 특이점에서의 회절 현상을 기술하기가 곤란하다. 이러한 특이점에서의 회절현상을 기본구조(canonical structure)의 회절 계수(diffraction coefficient)를 이용하여 ray 개념으로 해석할 수 있도록 한 기하광학적 회절이론(geometrical theory of diffraction)이 Keller[15]에 의해 제안된 이 후 많은 진전이 있었다. 고주파 전자파 해석에 관해서는 본 특집에서 별도로 다루고 있으므로 여기서는 더 이상 언급하지 않기로 한다. 다만 기하광학적 회절이론은 산란체가 도체인 경우에만 가능하며, 유전체의 경우에는 유전체 쐐기와 같은 기본 구조의 회절계수를 정확히 모르므로 적용에 제한을 받는다[16].

Ⅱ-7. 수치계산 기법

최근 30년 동안 컴퓨터의 계산 속도와 저장 능력의 눈부신 발전에 힘입어 전자파 해석 문제를 컴퓨터에 의한 수치계산으로 다룰 수 있는 다양한 기법들이 개발되었으며, 실제 엄밀한 해석 방법으로는 풀 수 없는 수 많은 전

자파 문제를 해결하였다. 수치계산 기법들은 전자파 산란 문제에 대한 파동 방정식인 미분 방정식을 컴퓨터 계산 가능한 차분 방정식 형태로 바꾸어 푸는 기법과 산란체를 등가 유기전원(equivalent induced source)으로 바꾸어 그린 함수(Green function)를 곱한 적분 방정식 형태를 적절한 기저함수(basis function)를 도입하여 행렬 방정식으로 바꾸어 수치계산하는 기법으로 대별할 수 있다.

실제 전자파 산란 문제에 많이 사용되는 수치계산 기법으로는 모멘트 방법(moment method), 유한 요소법(finite element method), 경계 요소법(boundary element method) 등을 들 수 있다. 먼저 모멘트 방법은 Harrington[17]등이 개발한 기초적이며 이해하기 쉬운 수치계산 기법으로 주로 산란체의 크기가 사용 파장에 비해 매우 크지 않을 경우에 사용한다. 이 기법에 대한 자세한 설명이 본 특집에 별도로 마련되어 있으므로 여기서는 더 이상 기술하지 않기로 한다. 다음 유한 요소법은 유한 차분법과 유사하지만, 변분특성(variational feature)을 이용하므로 여러가지 가변적인 요소들이 더 있는 수치계산 기법이다. 산란체를 포함한 관심있는 영역을 여러 개의 소영역으로 나누어 각 영역의 전자파를 적절한 급수 형태의 기저 함수로 표현한 뒤, 파동 방정식과 경계 조건을 대입하여 각 전개 계수들에 대한 행렬 방정식을 만들어 수치계산으로 그 값을 구한다. 이 때 소영역을 어떤 형태로 나눌 것인가와, 어떤 급수 형태로 기저 함수를 표현할 것인가에 따라 계산시간, 저장용량, 계산오차등이 결정되기 때문에 실제에는 많은 경험이 요구된다. 유한 요소법에 대한 이론적인 설명은 Strang과 Fix[18]의 책에 잘 기술되어 있으며, 여러가지 최신 프로그램들이 소개되어 있으므로 이들을 참조 또는 구입하여 사용하면 된다. 경계 요소법은 유한 요소법의 한 종류로, 매질 분포가 이산적으로 변할 경우, 전체 영역을 소영역으로 나누는 대신 매질이 변하는 경계만을 소 구간으로 나누어 계산하는 기법이다. 이 경우 소 구간에서는 전자파의 자체 값과 미분 값도 필요하여 변수 값은 2배가 되나 전체 영역은 유한 요소법에 비해 한 차원이 낮으므로 전체 미지수의 값이 줄어들어 수치계산에 유리하다[19].

이 외에도 수치계산을 전자파에 대한 적분 방정식의 프리에 변환된 식을 수치계산하는 파수 영역 방법(spectral domain method)과 시간 영역에서 전자파의 전파특성을 전송선 개념을 도입하여 등가회로로 바꾸어 해석하는 TLM 방법도 있다. 전자파 문제를 수치계산으로 푸는 여러가지 기법에 관한 훌륭한 책[20,21]들이 많이 있으니 이들을 참고하기 바란다.

Ⅲ. 전자파 역산란 문제의 해석기법

산란 문제를 해석하는 과정을 수학적인 관점에서 하나의 연산자(operator)인 L로 표현할 경우, 역산란 문제를 해석하는 과정을 단순히 역 연산자(inverse operator)인 L^{-1}로 표현 가능하다. 그러나 L^{-1}과 같은 연산자가 실제 해석 가능한 형태로 표현되는 가도 문제이며, L^{-1}로 구한 해의 존재성(existence)와 유일성(uniqueness)이 보장되는 가도 문제이다[22]. 일반적으로 역산란 문제의 해는 산란 문제와는 달리 비유일성(nonuniqueness)이 있으며[23], 이러한 특성을 비복사 전원(nonradiating source)의 존재로서 설명한다[24]. 특히 연산자 L^{-1}은 비선형(nonlinear) 특성이 있어서 수학적으로 근사적인 해를 구하기도 쉽지 않다.

더구나 산란파의 측정시 계측 한계 및 오차등을 피할 수 없는데, 산란파에 약간의 오차가 있더라도 역산란 기법으로 구한 산란체의 정보에는 엄청난 오차가 발생하는 불안전성(unstability)가 존재한다[25]. 그러므로 실제 사용되고 있는 역산란 기법들은 대개 매우 제한적인 경우에 대해 적용 가능하고, 여러가지 사전 정보를 이용하여 역산란 기법을 적용시켜 얻은 산란체 정보에 추가적인 제한을 가하여 물리적으로 타당한 역산란 해를 구하는 것이 보통이다[26].

전자기학적인 관점에서 다시 설명하면 역산란 문제는 측정된 산란파로 부터 알고자 하는 산란체의 정보를 구하는 것이 아니라, 입사파에 의한 산란체에 유기된 등가 전원을 먼저 계산하는 역전원(inverse source) 문제를 푼다. 계산된 등가전원 분포로 부터 산란체 위치, 크기, 모양 등을 알 수 있으나, 산란체의 매질 특성은 등가 전원으로부터 전자기적인 관계식을 풀어야만 구할 수 있다. 그런데 앞에서 언급한 바와 같이 역산란 문제의 어려움은 역전원 문제를 구할 때 발생한다. 산란체로 부터 멀리 떨어진 곳의 산란파는 산란체내의 등가유기 전원 분포의 프리에 변화량과 산란체가 없을 때의 그린함수의 프리에 변환식과의 곱으로 표현됨은 잘 알려져 있다. 이 때 그린 함수의 프리에 변환식은 파수 영역에서 마치 저대역 통과 필터(low-pass filter)와 같아서 산란체의 등기 유기 전원 분포중 매우 빨리 변화하는 성분은 산란파의 거의

나타나지 않는다. 이러한 성분에 의해 복사된 전자파를 감쇄(evanescent)파라고 한다[27]. 따라서 산란파로 부터 등가 유기전원을 구하는 것은 저대역 통과필터의 역을 곱하는 것과 같아서 그 연산이 매우 불안정하게 된다.

그러므로 실제 상황에 적용 가능한 기존의 역산란 기법들은 수학적인 관점에서 보면 매우 유치한 가정하에 구축된 이론에 근거하여 유도된 극히 제한적인 근사 해석 기법이 될 수 밖에 없다. 본 원고에서는 먼저 수학적인 관점에서의 기법들을 살펴본 뒤, 주로 실제적인 역산란 문제 상황에 적용 가능한 주요한 역산란 기법들에 대해 기술하기로 한다.

Ⅲ-1. 수학적인 역산란 기법

폐쇄된 볼록형의 산란체의 모양을 레이다로 재구성하는 것과 같은 역산란 문제를 1903년 Minkowski[28]는 Gaussian curvature를 이용하여 폐쇄 곡면을 단위 크기의 구인위상학적인 영상(topological image)으로 변환시켜 원래의 곡면을 재구성하는 역 미분기하학(inverse differential geometry)를 개발하였다. 또한 양자 역학에서 비균일 파동 방정식으로 부터 산란 potential을 구하는 방법이 Gelfund, Levitan, Marchenko[29]에 의해 개발 되었는데, 1차원의 문제에 한하여 모든 주파수에 대한 산란정보를 알고 있을 경우에만 정확한 해를 구할 수 있다. 특히 이방법은 비선형 파동방정식 문제를 solitary파로 해석하는 새로운 산란해석 방법으로 많이 연구되었다[30].

지하탐사와 같이 산란자료의 측정이 제한될 경우, 결핍된 자료에 의해 역 산란으로 구한 매질분포는 정확한 값과 많은 차이를 갖게 된다. 수학적으로는 이러한 역산란 경우를 불안정(unstable)하다고 하며, 이를 제거하는 방안을 regularization이라고 한다. Backus-Gilbert 방법[31]은 이와같이 결핍된 산란자료로부터 구한 매질분포에 regularization기법을 가함으로써 정확한 값에 근사된 값을 구할 수 있는 역산란 기법으로서 비선형 문제에도 적용가능하다.

Ⅲ-2. Tomography

2차원이나 3차원의 비균일 영역내를 극히 높은 주파수의 파동이 투과시 거의 직진한다고 가정하여, 산란된 정보를 역으로 통과한 경로에 재투영할 수 있는 수학적인 근거를 Radon[32]이 제시하였다. 이후 이러한 수학적인 근거를 재투영 이론[33]에 응용하여 X-선을 이용한 물체 내부의 매질 분포의 재구성[34]이 구현 가능함을 보였는데, 특히 급속한 컴퓨터 기술의 발전에 힘입어 X-선을 이용한 인체의 의료 영상 진단이 가능한 CT (Computational Tomography) 시스템이 개발, 보급될 수 있었다.

이러한 CT 기법은 전자파를 이용한 지하 매질 분포 영상, 초음파를 이용한 의료영상 등의 역산란 문제에도 응용되었다. 그러나 X-선과는 달리 사용 주파수가 상대적으로 낮거나, 매질 분포의 변화가 심할 경우 매질 내에서 파동의 굴절 및 회절 현상이 커지게 되어 CT로 구한 영상이 나빠지는 단점이 있다. 따라서 매질내를 진행하는 파를 직진한다고 하는 대신 임의의 ray 경로로 진행한다고 하여, 이러한 ray경로에 측정된 산란자료를 재투영하는 방안[35]도 제안되었으나, ray 경로의 계산시 어려움 때문에 그리좋은 개선 방안이 되지 못했다.

Ⅲ-3. 회절 Tomography

만약 산란체 내부의 매질 분포가 그리 심하지 않을 경우에는 매질내의 전자파를 Born 또는 Rytov 근사시켜 입사파의 값으로 표현 가능하므로, 산란체 내부의 매질 분포와 원거리 산란파간의 프리에 관계가 성립된다. 이러한 성질을 이용하면 여러 주파수에 대해 여러 각도로 특정한 산란 자료로 부터 산란체의 매질 분포를 구할 수 있는데, 이러한 해석 방법을 역전파(backpropagation) 기법이라고 한다[36]. 엄격한 의미에서는 CT와 개념적으로 상이하지만, 프리에 영역에서 전파 경로를 비교하면 CT와 회절 단층 촬영기법에서 각각 직선과 곡선이라는 차이 이외에는 없기 때문에 회절 현상도 CT 개념으로 다룰 수 있는 역산란 기법이라고 볼 수 있다. 이러한 회절 단층 촬영 기법(diffraction tomography)의 약점인 Born 또는 Rytov 근사에 의해 재구성 가능한 매질 분포의 제한을 제거하기 위한 수정 방안이 요구되고 있다[37].

Ⅲ-4. 물리 광학 기법

레이타의 산란체와 같이 주로 도체로 구성된 산란체에 고주파대의 전자파를 가하여 산란된 파를 원거리에서 측정할 경우, 산란체의 표면중 입사파에 노출된 부분의 등가 전류를 물리 광학으로 구하면 원거리 산란파와는 프리에 변환 관계로 상관지어 진다. 이러한 산란 관계로 부터 산란체의 구조를 알아내는 것을 POFFIS(physical optics for field inverse scattering)이라고 부르며, 혹은

Bojarski identity[38] 이라고도 한다. 이 방법은 주로 비행기나 유도탄 같이 산란체가 축 방향으로 대칭이며 완전도체인 경우에 사용된다.

Ⅲ-5. 공진 해석 기법

임의의 산란체에 펄스형 전자파를 가하여 산란된 파를 프리에 변환시켜 주파수 영역에서 보면, 특정 주파수대의 산란파가 크게 일어남을 볼 수 있다. 그런데 주파수 영역을 복소 평면으로 확장시켜 생각하면 특정 복소 주파수에서 마치 산란파가 무한대가되는 것과 같이 보이는 데, 수학적으로 이를 pole로 표현한다. 이 때 pole의 위치는 산란체의 구조, 매질 분포에 따라 정해지는 고유의 공진 주파수를 의미한다. 따라서 주파수 영역의 산란파로 부터 이러한 pole들의 위치를 알아내면, 역으로 산란체에 대한 정보를 알아 낼 수 있다. 이러한 역산란 기법을 SEM (singularity expansion method)[39]라고 부르는데, 주로 EMP(electromagnetic pulse) 문제나 레이다 목표 인식 (radar target identification) 등의 문제에 많이 사용된다.

Ⅲ-6. 수치 계산 기법

임의의 산란체에 의해 산란된 전자파를 구할 수 있는 다양한 수치 계산 기법이 있는데, 사용 파장에 비해 산란체가 그리 크지 않을 경우 모멘트 방법이 매우 편하다. 그런데 산란파를 계산하는 모멘트 방법의 과정을 역으로 적용하면, 산란파로 부터 산란체의 위치, 모양, 매질 분포를 구할 수 있음을 알려졌다[40]. 이 때 모멘트 방법을 적용하기 때문에 산란체의 매질 분포를 0.1 파장 이내로 구분하여 계산할 수 있지만, 이러한 초분해 능력(super resolution)은 산란파에 약간의 잡음이 더해지더라도 재구성된 매질 분포는 엄청난 오차가 발생하는 불안정성을 수반하게 되어 수치 계산상에 어려움이 많을 뿐 아니라, 실제 문제 상황에 적용하기는 아직 어렵다.

이러한 수치 계산 기법을 공간 영역이 아닌 파수(wave number) 영역에서의 적분방정식에 적용시킴으로서, 모멘트 방법 사용시의 불안정성을 체계적으로 해석하고 이를 개선할 수 있는 방안을 강구하고 있다[27].

Ⅳ. 결 언

전자파 문제를 크게 산란 문제와 역산란 문제로 나누고, 각각의 해석기법들을 간략히 기술하였다. 전자파 산란문제의 해석기법에 관해서는 어떠한 전자기학에 관한 책에도 기본적으로 다루고 있기 때문에 특별히 더 이상 언급할 필요가 없다고 본다. 그러나 역산란 문제의 해석 기법들은 매우 다양한 분야에 걸쳐 있어서 세부기술 모두를 소개하기 어렵다. 이는 기존의 역산란 기법들이 각각의 문제상황에 맞는 여러가지의 근사를 채용하여 수학적인 근거로 삼기 때문에, 해당 분야에 따라 서로 다른 해석기법이 사용되고 있다. 그러나 전자파를 이용한 역산란 해석 기법에 관한 종합적인 기술을 한 자료로는 Collin[41]이 편집한 학술지의 보고서가 있으며, 세부적인 자료로는 1981년 IEEE AP 특집[42]을 참고하면 도움이 될 것이다.

참 고 문 헌

1. P.M.Morse and H.Feshback, *Methods of Theoretic Physics*. New York : McGraw-Hill, 1953.
2. A.Sommerfeld, *Optics*. New York : Academic Press, 1964.
3. D.Gilberg, *Elliptic Partial Differential Equations of Second Order*. New York : Springer-Verlag, 1977.
4. I.V.Lindell and E.Alanen, "Exact image theory for the Sommerfeld half-space problem, Part I : Vertical magnetic dipole," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol.AP-32, no.2, pp.126-133, 1984.
5. G.N.Watson, "The transmission of electric waves around the earth," *Proc. Roy. Soc. Ser. A*, vol.95, pp.546-563, 1918.
6. B.Friedman, *Principles and Techniques of Applied Methematics*. New York : Wiley, 1956.
7. V.A.Fock, *Electomagnetic Diffration and Propagation Problems*. New York : Pergamon, 1965.
8. N.Amitay, V.Galindo, and C.P.Wu, *Theory of Phased Array Antennas*. New York : Wiley, 1972.
9. B.Noble, *Methods Based on the Wiener-Hopf Technique for the Solution of Partial Differential Equations*. New York : Pergamon, 1958.
10. J.Schwinger and D.S.Saxon, *Discontinuities in Waveguides*. New York : Gordon and Breach Science Pub., 1968.

11. L.Sprunch, "Variational Principles, subsidiary extremum principles and variational bounds," in *Physics of Electronic and Atomic Collisions*, J.S. Risley and R.Geballe, eds., Seattle : Univ. of Washington Press, 1976, pp.685-698.
12. H.Poincarê, "Sur les intêgrales irrêguiêres des ê quations linêaires," *Acta Math.*, vol.8, pp. 295-344, 1896.
13. R.K.Luneburg, *Mathematical Theory of Optics*. Berkeley : Univ. of California Press, 1964.
14. M.Kline and I.W.Kay, *Electromagnetic Theory and Geometrical Optics*. New York : Wiley, 1965.
15. J.B.Keller, "Geometrical theory of diffraction," *J. Opt. Soc. Am.*, vol.52, pp.116-130, 1962.
16. S.Y.Kim, J.W.Ra, and S.Y.Shin, "Diffraction by an arbitrary-angled dielectric wedge," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol.AP-39, pp.1272-1292, 1991.
17. R.F.Harrington, *Field Computation by Moment Methods*. New York : Macmillan, 1968.
18. G.Strang and G.J.Fix, *An Analysis of the Finite Element Method*. Englewood Cliffs, NJ : Prentice-Hall, 1973.
19. C.A.Brebbia, *The Boundary Element Method for Engineers*. London : Pentech Press, 1978.
20. T.Itoh, ed., *Numerical Techniques for Microwave and Millimiter-Wave Passive Structures*. New York : Wiley, 1989.
21. E.Yamashita, ed., *Analysis Methods for Electromagnetic Problems*, Boston : Artech House, 1990.
22. B.J.Hoender, "The uniqueness of inverse problems," in *Inverse Source Problems in Optics*, H.P. Baltes, ed., New York : Springer Verlag, 1978.
23. N.Bleistein and J.K.Cohen, "Nonuniqueness in the inverse source problems in acoustics and electromagnetics," *J. Math. Phys.*, vol.19, pp.194-201, 1977.
24. A.J.Devaney and E.Wolf, "Radiating and nonradiating classical current distributions and the fields they generate," *Phys. Rev. D*, vol.8, pp.1044-1047, 1973.
25. M.M.Laverentiev, *Some Improperly Posed Problems of Mathematical Physics*. New York : Springer Verlag, 1967.
26. A.Tikhonov and V.Arsenine, *Solutions of Ill-Posed Problems*. New York : Wiley, 1977.
27. S.Y.Kim, H.C.Choi, J.M.Lee, and J.W.Ra, "Inverse scattering scheme based on the moment method in the spectral domain, I : Theory," *Ultrason. Imag.* vol.14, pp.16-28, 1992.
28. H.Minkowski, "Volumen and ober flache," *Math. Ann.*, vol.57, pp.447-495, 1903.
29. Z.G.Agranovich and V.A.Marchenko, *The Inverse Problem of Scattering Theory*. New York : Gordon and Breach, 1963.
30. P.D.Lax, "Integrals of nonlinear equations of evolution and solitary waves," *Comm. Pure Appl. Math.*, vol.21, pp.467-490, 1968.
31. G.Backus and F.Gilbert, "The resolving power of gross earth data," *Geophys. J. R. Soc.*, vol.16, 169-205, 1968.
32. J.Radon, "Uber die Bestimmung von funktionen durch ihre Integralwerte langs gewisser mannig faltigkeiten," *Ber. Verh. Sachs. Akad. Wiss. Leipzig, Math.-Nat.Kl*, vol.69, pp.262-277, 1917.
33. A.M.Cormack, "Representation of a function by its line integrals, with some radiological application," *J. Appl. Phys.*, vol.34, pp.2722-2727, 1963.
34. G.N.Hounsfield, "Computerized transverse axial scanning(Tomography) : part I : Description of the system," *British J. of Radiology*, vol.46, pp. 1016-1622, 1973.
35. R.J.Lytle and K.A.Dines, "Iterative ray tracing between boreholes for underground image reconstruction," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol.GE-18, pp.234-240, 1980.
36. A.J.Devaney, "A filtered backpropagation algorithm for diffraction tomography," *Ultrason. Imag.*, vol.4, pp.336-360, 1982.
37. M.Slaney, A.C.Kak, and L.E.Larsen, "Limitations of imaging with first-order diffraction tomography," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol.

MTT-32, pp.860-874, 1984.

38. R.M.Lewis, "Physical optics inverse diffraction," *IRE Trans. Antennas Propagat.*, vol.AP-17, pp. 308-314, 1969.
39. C.E.Baum, "The singularity expansion method," in *Trasient Electromagnetic Fields*, L.B.Felsen, ed., New York : Springer-Verlag, 1976.
40. D.K.Ghodgonkar, O.P.Gandhi, M.J.Hagmann, "Estimation of complex permittivities of three-dimensional inhomogeneous biological bodies," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-31, pp.442-446, 1983.
41. L.Collin, *Proc. of the Workshop on Mathematics of Profile Inversion*, Ames Research Center, Moffett Field, CA, NASA Tech. Memorandum X-62. 150, 1972.
42. Special Issue on Inverse Methods in Electromagnetics, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, AP-29, no.2, 1981.