

고주파 전자파의 해석 기법 및 응용

본 논문에서는 전자파 해석에 관련된 기존의 해석 기법들을 간략하게 비교, 검토하고 GTD / UTD를 기본으로 하여 고주파 해석 기법에 관련된 몇가지 문제들을 다룬다.

전자파 해석이란 전자파의 복사(radiation), 산란(scattering) 및 결합(coupling)에 관련된 문제의 해석을 의미한다. 전자파 해석은 여러 목적을위해 응용되고 있으며 EMC / EMI문제의 분석 및 대책 수립에도 응용될 수 있다.

EMC / EMI 문제의 근원은 전자파의 간섭(interference) 현상이다. Emitting source로부터 복사(radiation)되는 간섭파는 여러 경로를 통해서 receptor로 coupling된다. 일반적으로 emitter와 receptor사이에는 여러 복잡한 구조물이 산란체로 작용하고 있으므로, emitter와 receptor사이의 직접경로(direct path)를 통한 coupling과 함께 구조물에 의한 전자파의 반사 및 회절을 통한 간접경로(indirect path)의 coupling도 고려되어야 한다. 따라서 EMC / EMI문제는 자유공간(free space) 상에 있는 antenna 사이의 송수신 문제보다 매우 복잡하고 정확한 coupling의 계산에 적지않은 어려움이 있다. EMC / EMI 대책수립은 일차적으로 coupling path의 차단을 통해서 가능하므로 전자파의 coupling path의 분석과 전자파의 복사 및 산란 mechanism에 대한 해석이 필수적이다.

II. 전자파 해석 기법

본 절에서는 전자파 해석에 관련된 몇가지 기법을 비교 검토한다. 전자파의 해석 기법은 여러가지 방법이 개발되어 있고, 이 방법들은 전자파의 복사, 산란 및 coupling을 발생하게 하는 구조물의 형태 및 크기에 따라 적용할 수 있는 범위가 결정된다. 이 방법들은 크게 세가지로 구분될 수 있는데 우선 몇가지의 canonical structure에 대한 정확한 고유함수해(eigenfunction solution)가 있고 수치해석적인 방법에 기초를 둔 저주파 해석기법 및 본 논문에서 주로 다루게 될 고주파 해석 기법으로 분류될 수 있다. 여기서 고주파 혹은 저주파의 구분은 사용 주파수의 절대적 크기로 결정되는 것이 아니라, 전자파

김 호 태

포항공과대학 전자전기공학과

파장에 대한 구조물의 상대적 크기에 따라 결정된다. 저주파 해석 기법이나 고주파 해석 기법은 정확한 고유함수해를 구할 수 없는 경우에 대한 일종의 approximation method로 저주파 해석 기법은 구조물의 크기가 파장에 비해 작을수록 computer처리 시간이 짧고 그 해가 정확한 반면 고주파 해석 기법은 파장에 비해 클수록 보다 정확한 해를 구할 수 있다. 저주파 혹은 고주파를 구분하는 절대적 기준은 없으나 대략 구조물의 크기가 수 파장 이하에서는 저주파 해석 기법을 그 이상에서는 고주파 해석을 사용하는 것이 일반적이다. 고주파 및 저주파 구분의 경계선 근처, 즉 구조물의 크기가 수 파장 정도에서는 두 방법의 적용이 모두 가능하므로 따라서 이 영역에서 두가지 해석 기법을 사용한 결과를 비교함으로써 실험없이 그 결과의 타당성을 입증하는 검증방법이 흔히 사용되어 오고 있다. 본 절에서는 고유함수해와 저주파 해석 기법을 간략하게 검토하고 고주파 해석 기법은 다음 절에서 다루기로 한다.

II - 1. 고유함수해(Eigenfunction solution)

전자파 해석의 가장 기본이 되는것은 정확한 고유함수해이다. 고유함수해는 전자기학의 기본법칙인 Maxwell 방정식으로부터 유도되는 Helmholtz방정식과 경계조건(boundary condition)을 만족하는 해이다. Helmholtz 방정식은 2차의 편미분 방정식이므로 고유함수해를 구하는 것은 경계조건을 만족하는 2차의 편미분 방정식의 해를 구하는 경계치문제(boundary value problem)에 해당된다. 고유함수해는 경계조건이 간단히 표현될 수 있는 몇가지 표준구조물(canonical structure)에 대해서만 그 해를 구할 수 있고 경계조건이 복잡하면 그 해를 구하기 매우 어렵고 복잡해진다. 현재까지 고유함수해가 구해져 있는 표준구조물은 구(sphere), 무한 길이를 갖는 cylinder, 무한길이를 갖는 wedge 구조등 몇가지 구조물에 한정되어있다. 일반적으로 고유함수해는 주어진 경계조건을 만족하는 여러 mode의 합으로 이루어진 series형태로 되어 있다. 이때 산란체의 크기가 파장에 비해 클 경우 series의 수렴속도가 매우 느리므로 실제계산에서는 포함시켜야 할 항의 수가 많아지므로 error가 누적되어 정확한 계산에 어려움이 있다. 또한 series형태의 해로부터 전자파의 복사 및 산란 mechanism을 파악하는 것은 불가능하다는 단점이 있다. 그러나 고유함수해는 저주파 혹은 고주파 해석의 타당성을 실험없이 증명할 수 있는 기준

이 된다는 점에서 매우 중요하다. 즉 저주파 혹은 고주파 해석의 여러 방법들은 구조물을 고유함수해가 가능한 표준구조물로 단순화 시킨후 그 값을 비교검토함으로써 정확성을 입증할수 있다. 또한 고주파 해석 기법이 표준구조물에 대한 고유함수해의 series 형태를 Watson transformation을 이용하여 적분형태로 변환하고 그 결과를 적절한 방법으로 asymptotic evaluation하여 forming 함으로써 유도된다는 점에서 고유함수해는 또 다른 중요한 의미를 갖는다.

II - 2. 저주파 산란 해석

전자파 해석의 또 다른 방법은 수치해석적인 방법이다. 이 방법은 기본적으로 구조물을 여러개의 작은 element로 분리시키고 각 element에서 Maxwell 방정식 및 경계조건을 만족하도록 하는 방법이다. 수치해석적인 방법은 미분형태의 Maxwell방정식과 경계조건으로부터 구해진 미분방정식에 대한 수치해석적인 방법과 적분형태의 EFIE(Electric Field Integral Equation), 혹은 MFIE(Magnetic Field Integral Equation)에 의한 적분방정식에 대한 수치해석적인 방법으로 구분될 수 있다. 미분방정식에 따른 수치해석적인 방법으로 현재 개발되어 있는 것으로는 FEM(Finite Element Method), BEM(Boundary Element Method), FDM(Finite Difference Method) 및 CGM(Conjugate Gradient Method)등이 있다. 이들 방법을 기본 tool로 한 전자파 산란 및 복사의 해석에 관해서는 국외의 많은 논문들이 발표되고 있고 최근에는 국내에서도 이들 방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

EFIE 혹은 MFIE와 같이 적분 방정식에 기본을 둔 또 다른 수치해석적인 방법은 Harrington에 의해 제시된 MM(Moment Method)이다. MM은 응용수학에서의 수치해석 방법인 하나인 Galerkin's method를 전자기학 문제해결에 적용한 방법으로 전자파 산란 및 antenna의 복사 등, 광범위한 분야에서 적용되고 있으며 이 방법을 적용한 많은 논문과 computer code들이 개발되어 있다. 현재 국내에서도 MM은 전자파의 복사 및 산란해석에 가장 많이 사용되는 방법의 하나이다.

이상에서 언급된 수치해석적인 방법에서는 기본적으로 구조물을 많은 element로 분할하여 Maxwell방정식과 경계조건을 적용하고 각 element 사이의 관계를 나타내는 impedance matrix를 구한다. 산란체 혹은 안테나 표면에

유기되는 전류는 이 matrix를 inversion하여 구하며 산란 혹은 복사되는 전계 및 자계는 유기전류에 대한 radiation integral로부터 계산한다. 이상의 수치해석적인 방법이 저주파 해석 방법으로 분류되는 것은 computer의 memory용량 및 계산속도의 한계에 기인한다. 구조물의 크기가 전자파의 파장에 비해 큰 고주파 영역에서는 분할해야 할 element수가 증가되어 inversion해야 할 matrix size가 증가한다. 또한 matrix element의 계산과 radiation integral에 포함된 적분에 대한 numerical integration은 많은 CPU time을 요하게 된다. 그밖에 matrix size의 증가는 memory용량의 문제뿐만 아니라 matrix inversion에서의 illposedness problem등을 발생시키므로 현재 computer 성능의 급속한 성장에도 불구하고 고주파 영역에서의 적용은 많은 어려움이 뒤 따른다.

수치해석적인 방법을 사용하여 antenna radiation 및 전자파 산란계산을 위한 computer code는 여러가지가 있다. 그 중에서 FDTD는 미국 North Westem대학에서 개발된 code로 FDM을 기본 tool로 하고 있다. 적분방정식에 기본을 둔 computer code의 대표적인 것은 Lawrence Livermore Lab.에서 개발된 NEC(Numerical Electromagnetic Code)와 MININEC이 있다. NEC 및 MININEC은 EMC / EMI에 관련된 저주파 전자파 해석에 가장 흔히 사용되고 있는 code이다. Ohio 주립대학의 ElectroScience Lab.에서 개발된 SPC(Surface Patch Code)는 reaction concept과 PWS(PieceWise Sinusoidal) 함수를 basis function 및 weighting function으로 하는 Richmond교수의 방법을 적용한 computer code이다. 그밖에 특수한 사용목적에 따라 MSC(Main Scattering Code), GEMACS, TWTD, COBRA등의 code가 개발되어 있으나 일부는 미국의 반출이 허용되지 않고 있다.

III. 고주파 해석 기법

구조물의 크기가 전자파의 파장에 비해 상대적으로 큰 경우에는 고주파 해석 기법을 사용한다. 일반적으로 저주파 해석 방법은 구조물의 크기가 작을수록 더욱 정확한 산란값을 얻을 수 있는 반면 고주파 해석 방법은 구조물의 크기가 클수록 더욱 정확한 계산값을 얻을 수 있다. 고주파 해석방법은 여러가지가 개발되어 있으나 크게 ray solution과 non-ray solution으로 구분할 수 있다.

III-1. Non-ray solution

Non-ray solution에서는 전자파 산란의 mechanism을 다음과 같이 생각한다. 즉 산란체에 입사되는 전자파는 산란체 표면에 전류를 유기하고 이 산란체 표면의 전류가 field point에 산란된 전자파를 복사(radiation)시킨다. 따라서 non-ray solution으로부터 정확한 산란값을 계산하기 위해서는 산란체 표면에 유기되는 전류를 정확하게 구해야 하고 산란체 표면에서의 전류가 복사하는 전자파를 정확히 계산해야하지만 복잡한 구조물의 경우에는 많은 어려움이 있다.

Non-ray solution의 대표적인 것은 Kirchoff의 PO (Physical Optics) approximation이다. PO approximation에서의 산란체 표면에 유기되는 전류는 입사파가 직접 도달되는 lit영역에서는 $\vec{J}_s = 2\hat{n} \times \vec{H}^i$ 가 되고 shadow 영역에서는 영(zero)이 된다. 물론 이것은 approximation이며 실제로는 shadow 영역에서 유기전류가 영(zero)이 되지는 않는다. 표면에 유기된 전류가 자유 공간상에서 전자파를 복사하는 것으로 approximation하므로 산란된 전자파는 radiation integral로부터 계산할 수 있다. 이상의 PO에 의한 산란 해석은 무한평면의 경우는 shadow 영역이 없고 또 image method가 적용됨으로 그해는 정확하다. 그러나 유한한 크기의 산란체에서의 PO해는 정확한 값이 될 수 없다. 또한 산란체에 기하학적인 discontinuity가 있을 경우에는 이 discontinuity에서의 diffraction이 고려되어 있지 않으므로 그 값은 부정확하며 PO에 의한 산란 계산은 적분식이 포함되어 있으므로 계산에 번거로움이 있다. 그러나 산란체에 기하학적인 discontinuity가 없는 경우에는 backscattering 방향의 산란값이 비교적 정확하다. 완전도체구의 경우 PO의 방법으로 radiation integral을 구하고 이 integral을 stationary phase method에 의한 approximate evaluation을 취하면 그 결과가 ray-solution의 GO해와 동일함을 확인할 수 있다. PO의 부정확함을 개선한 것이 PTD (Physical Theory of Diffraction)이다. PTD는 Keller에 의해 GTD가 개발된 것과 같은 시기에 소련의 P. Ya. Ufimtsev에 의해 개발된 방법이다. 이는 GTD가 GO를 개선하여 edge diffraction항을 포함시킨 것과 같은 방법으로 PO의 단점을 보완한 방법이다. 그러나 현재까지는 edged body형의 구조물의 경우에만 적용가능한 방법이며 GTD / UTD에서와 같이 일반적인 구조물에 대한 해석 방법이 될 수는 없다.

PO와 유사한 개념으로 aperture에 의한 복사나 산란을 계산하는 방법으로 Huygens 원리에 의한 AI(Aperture Integration)이 있다. 이 방법은 horn antenna, parabola antenna, waveguide antenna 등의 aperture antenna 해석에 이용되는 고전적인 방법으로 aperture에 입사되는 전자파에 의한 등가의 전류를 가정하고 이 등가의 전류가 산란파에 대한 radiation source가 됨을 기본원리로 한다. 또한 이 방법은 edge에서의 diffraction이 고려되어 있지 않고 radiation integral의 계산에도 많은 번거로움이 있으며 그 값도 정확하지 않다. 그러나 AI 방법도 antenna의 main beam 방향에서는 비교적 정확한 값을 구할 수 있다.

III -2. Ray Solution

Ray solution은 고주파 해석에서 가장 편리하고 광범위하게 응용되는 방법이다. 전자파는 고주파 영역으로 갈수록 ray의 특성을 지니게 되어 전자파의 전파(propagation)를 기하광학적인 방법으로 해석하는 것이 가능하다. Ray solution에서의 산란 및 coupling mechanism은 다음과 같다. 산란체에 입사되는 전자파는 산란체 표면에 유기되는 전류를 고려할 필요없이 직접반사, 투과 또는 회절한다. 또한 ray solution에서는 산란 mechanism이 명확히 파악 될 수 있기 때문에 전자파 산란 및 coupling을 제어하기 위한 적절한 방법이 강구될 수 있는 장점이 있다.

Ray solution의 기본은 GO(Geometrical Optics)이다. GO는 전자파를 파수(k)의 inverse power series로 expansion시키는 Luneberg-Kline series를 Maxwell 방정식에 대입한 후 leading term을 적절하게 forming하면 전자파의 전파(propagation)를 astigmatic ray tube 형태로 나타낼 수 있다. 따라서 전자파 flux가 energy 보존의 법칙을 만족한다. 이 GO ray는 Fermat's principle에 따라 반사(reflection)와 굴절(refraction)된다. GO에 의한 approximation은 전자파의 전파(propagation)를 입사, 반사, 굴절만으로 해석하므로 간편하고 산란 mechanism의 개념이 명확하다. 그러나 실제 계산에 있어서 임의의 곡면에 대한 반사는 caustic distance의 계산 및 반사가 발생하는 specular point를 찾는 문제가 있기 때문에 결코 간단하지 않다.

GO에 의한 전자파 해석은 중요한 문제점을 가지고 있다. 즉 field point가 기하광학적인 shadow region(입사

파나 반사파가 도달될 수 없는 영역)에서는 전자파가 존재할 수 없다. 따라서 경계면인 shadow boundary에서 전자파의 불연속이 발생하게 되는데 이는 물리적으로 불가능하다. 전자파가 shadow영역에서 영(zero)이 되는 것은 GO에서 회절파(diffraction)를 고려하고 있지 않기 때문이다. 이 GO solution에 적절한 회절파(diffraction)를 추가한 것이 1951년 Keller에 의해 제시된 GTD(Geometrical Theory of Diffraction)이다. 즉 edge형의 기하학적 불연속을 갖는 구조물에서 edge에 의한 회절파를 고려하여 shadow영역에서의 전자파 전달 현상을 설명하였고 이후 발표된 논문에서는 curved surface에서의 creeping wave에 의한 diffraction현상을 설명하였다. Keller에 의한 GTD해는 exact eigenfunction해를 Watson transformation에 의해 적분형태로 변환하고 이를 기하광학적인 lit영역에서는 적분에 대한 asymptotic evaluation하고 shadow 영역에서는 Cauchy의 residue theorem에 따라 새로운 series 형태로 변환하는 방법으로 유도되었다. Keller에 의한 GTD는 GO에서와 같이 ray concept을 사용하고 있으므로 산란 및 coupling의 계산에서 그 적용이 매우 간편하지만 보완되어야 할 중요한 단점을 갖고 있다. 즉 Keller에 의한 GTD해는 shadow boundary 근처인 transition 영역에서 전자파의 discontinuity가 존재한다. 전자파의 discontinuity가 존재하기 위해서는 불연속면에 전류가 존재해야 하는데 이는 물리적으로 불가능하다. Keller의 GTD해가 갖는 중요한 단점이 보완되어 shadow boundary에서 field가 연속이 되는 uniform해로 개발된 것이 UAT(Uniform Asymptotic Theory)와 UTD(Uniform Geometrical Theory of Diffraction)이다. UAT는 S. W. Lee 등에 의해 개발된 방법으로 shadow boundary에서 field가 연속이며 transition 영역 밖에서는 GTD와 동일하게 된다. 그러나 UAT는 wedge 형의 불연속에서는 적용가능하지만 curved surface에 의한 diffraction이 개발되어있지 않으므로 임의의 구조물에 대한 산란 및 coupling해석에는 부적합하다.

최근에 고주파 산란 및 coupling 해석에 가장 널리 사용되는 방법은 UTD이다. 이는 Kouyoumjian 및 Pathak에 의해 개발된 방법으로 GTD와 같은 ray format을 사용하고 있으나 GTD에서의 diffraction coefficient를 수정, 보완하여 transition 영역에서 uniform한 결과를 얻도록 하고 있다. UTD에 사용되는 diffraction coefficient는

Fock의 transition함수등을 포함한 비교적 복잡한 형태이지만 이들에 대한 computer subroutine등이 이미 개발되어 있으므로 실제 사용에는 큰 어려움이 없다. GTD 및 UTD의 ray format에 관해서는 다음절에서 다루기로 한다. UTD는 정확하고 편리한 방법이지만 기본적으로 ray solution이므로 다른 모든 ray solution과 같이 ray가 한 곳에 집중되는 caustic region에서 전자파의 세기가 무한대로 발산한다. 이는 ray solution이 편리한 반면 피할 수 없는 단점이다. GTD / UTD등을 포함한 ray solution이 caustic region에서 무한대로 발산하는 단점을 수정한 것이 ECM(Equivalent Current Method)이다. 이 방법은 1969년 Peters등에 의해 개발된 방법으로 caustic region을 제외한 부분에서는 ray solution을 적용하고 caustic region에서는 equivalent current에 의한 radiation integral을 적용하는 방법이다. 예를 들어 parabola antenna의 경우 축방향은 rim 부분에서의 edge diffraction에 의해 caustic region이 되며 ray solution으로는 field가 무한대로 발산한다. 그러나 ECM에서는 rim 부분에 equivalent current를 가정하고 이 equivalent current에 의한 radiation integral을 취하면 전자파 세기의 발산문제를 쉽게 해결할 수 있다.

III-3. 기 타

앞에서 언급된 방법 이외에 관심의 대상이 되는 것들은 Hybrid Method와 Gaussian Beam Method등이 있다. Hybrid Method는 1975년 Thiele등에 의해 시도된 방법으로 고주파 해석 방법인 GTD / UTD와 저주파 해석 방법인 Moment Method를 혼합한 형태이다. 파장에 비해 큰 구조물이 부분적으로 파장에 비해 작은 부속물을 포함하고 있을때 큰 부분에 대해서는 GTD / UTD를 사용하고 작은 부분에 대해서는 Moment Method를 적용하는 방법이다.

그 밖에 Felsen등에 의한 Gaussian Beam Method가 있다. 이는 전자파의 진행을 단선의 ray에 의한 것이 아니라 다발의 beam의 개념으로 해석하는 방법으로 광범위한 전자파 문제 해석을 위해서는 보다 많은 연구의 진전이 필요하다.

IV. GTD 및 UTD 해

앞절에서는 GTD 및 UTD에 대해 간략하게 언급하였

다. 본 글에서는 기본 구조물에 대한 GTD / UTD해의 반사파 및 회절파의 ray format에 대해 설명하기로 한다. GTD / UTD는 기본적으로 고주파 ray solution이고 전자파의 산란 및 coupling은 구조물에서의 국부적 현상(local phenomena)에 의해 결정되므로 일반적인 구조물은 몇가지 기본 구조물인 wedge 구조, 곡면 구조, tip 구조 등의 조합으로 이루어져 있다. 따라서 몇몇 기본 구조물의 반사와 회절을 해석함으로써 전자파의 산란 및 coupling을 복잡한 구조물에 대해서도 비교적 용이하고 정확하게 계산할 수 있다.

IV-1. 곡면에서의 반사파

입사파가 반사점 Q_R 에 부딪쳐서 나가는 반사파의 ray tube를 그림(4.1)에 나타내었고 반사파에 대한 ray format은 다음과 같다.

$$\vec{E}^r(P) = \vec{E}^i(Q_R) \cdot \vec{R} \sqrt{\frac{\rho_1^r}{\rho_1^r + s^r} \frac{\rho_2^r}{\rho_2^r + s^r}} e^{-jks^r}$$

위의 식에서 dyadic 반사계수 \vec{R} 은 산란체 표면의 전자기적 성질에 따라 결정되며 반사파의 caustic distance 인 ρ_1^r 과 ρ_2^r 은 반사점 Q_R 에서 산란체의 미분기하학적인 특징으로 반사파의 spreading factor를 결정한다.

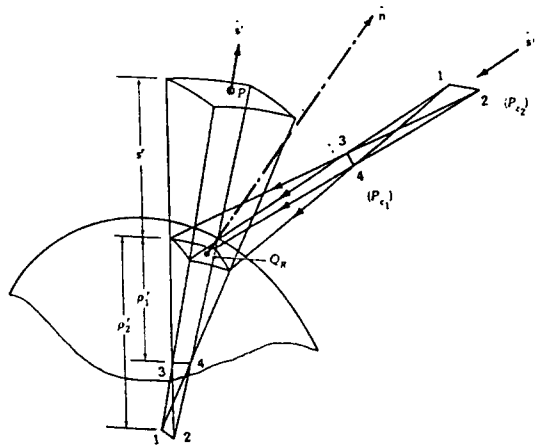


그림 4.1 반사파의 ray tube.

IV-2. Wedge/ edge 구조에 의한 회절파

Wedge / edge 구조에서의 회절파에 대한 ray tube는 그림(4.2)와 같은 ray format은 다음과 같다.

$$\bar{E}^d(P) = \bar{E}^i(Q_E) \cdot \bar{D}_e(\phi, \phi', \beta_o; k) \sqrt{\frac{\rho_e}{s^d(\rho_e + s^d)}} e^{-jks^d}$$

위의 ray format에서 edge구조에 대한 dyadic 회절계수 \bar{D}_e 는 edge 점 Q_E 에서의 source와 field point의 위치 및 edge각도의 함수일 뿐 아니라 파수(k)의 함수이다. ρ_e 는 edge 구조에서의 caustic distance이며 회절파의 spreading factor를 결정한다.

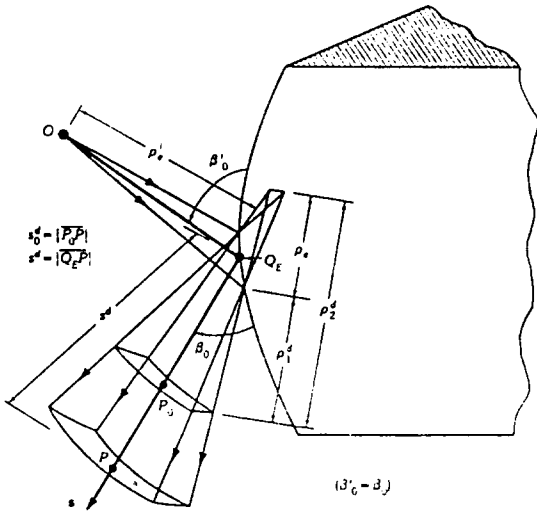


그림 4.2 Wedge / edge 구조의 회절파에 대한 ray tube.

IV-3. 곡면 구조의 creeping wave에 의한 회절파

Creeping wave에 의한 표면 회절파의 ray tube를 그림(4.3)에 나타내었고 ray format은 다음과 같다.

$$\bar{E}^d(P_S) = \bar{E}^i(Q_1) \cdot \bar{T}(Q_1, Q_2) \sqrt{\frac{d\eta(Q_1)}{d\eta(Q_2)}}$$

$$\sqrt{\frac{\rho_s}{s^d(\rho_s + s^d)}} e^{-jks^d}$$

creeping wave는 Q_1 과 Q_2 를 잇는 곡면의 geodesic path를 따라 진행한다. dyadic표면 회절계수 \bar{T} 는 geodesic path상의 기하학적인 특징과 전자기적인 성질에 따라 결정되며 $d\eta(Q_1)$ 과 $d\eta(Q_2)$ 는 Q_1 과 Q_2 에서 creeping wave의 surface-ray strip의 폭(width)에 해당된다. 또한 ρ_s 는 Q_2 에서 launching되는 회절파의 caustic distance이며 spreading factor를 결정한다.

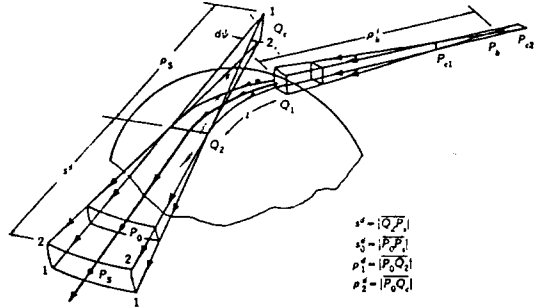


그림 4.3 creeping wave에 의한 회절파의 ray tube.

V. 결 언

본 논문에서는 전자파 해석의 여러 기법들에 관해 소개하고 고주파 ray solution 중에서 가장 보편화 되어 있는 GTD / UTD의 ray format에 관해 간략하게 기술하였다. GTD / UTD해는 전자파의 산란 및 coupling mechanism을 쉽게 파악할 수 있으므로 EMC / EMI 대책 수립에도 응용될 수 있다. 현재 GTD / UTD를 사용하여 여러 목적으로 개발된 computer code들이 있다. ElectroScience Lab.의 Rudduck에 의해 개발된 NEC Reflector Antenna Code, Burnside에 의해 개발된 Airborne Antenna Radiation Pattern Code, Marhefka에 의해 개발된 NEC-BSC등의 code는 GTD / UTD를 기본 tool로 한 code들이다. 그 밖에 군사적 목적으로 개발된 여러 computer code들이 있을 것으로 판단된다.

본 논문에서 언급한 전자파 해석 기법들은 기본적으로

완전도체의 산란체에 적용 가능한 방법들로써 surface impedance를 갖는 불완전도체나 전파 흡수체로 코팅된 도체에 대한 전자파 산란 해석은 완전도체에서의 GTD/UTD 기본 ray format을 그대로 유지하고 반사 계수와 회절계수를 적절히 조절하여 적용하며 이와 같은 연구가 최근에 계속 진행되고 있다.

참 고 문 헌

1. R.F.Harrington, *Time-Harmonic Electromagnetic Field*, New York : McGrawHill Book Co., 1961.
2. S.A.Schelkunoff and H.T.Friis, *Antennas : Theory and Practice*, New York : John Wiley & Sons, 1952.
3. A.J.Poggio and E.K.Miller, "Integral equation solutions for three-dimensional scattering problem," in *Computer Techniques for Electromagnetics*, ed. by R.Mitra, New York : Pergamon Press, pp. 159-264, 1973.
4. G.J.Burke and A.J.Poggio, "Numerical electromagnetic code(NEC)-method of moments, vol.1, pt. I : program description-theory ; vol.1, pt. II : program descriptioncode ; vol.2, pt. III : user guide," *Tech. Doc. 116*, San Diego, CA 92152 : Naval Ocean System Center, 1977.
5. R. Mittra, "Integral equation methods for transient scattering," in *Transient Electromagnetic Fields*, ed. by L.B.Felsen, New York : Springer-Verlag, 1973.
6. E.K.Miller, A.J.Poggio, and G.J.Burke, "An integro-differential equation technique for the time-domain analysis of thin-wire structures, I : the numerical method," *J.Comput. Phys.*, vol.12, no.1, 1973.
7. R.F.Harrington, *Field Computation by Moment Methods*, New York : Macmillan Co., 1968.
8. J.B.Keller, "Geometrical theory of diffraction," *J. Opt.Soc.Am.*, vol.52, pp.116-130, 1962.
9. J.B.Keller, "A geometrical theory of diffraction." in *Calculus of Variations and Its Application*, ed. by L.M.Graves, New York : McGraw-Hill Book Co., 1958, pp.27-52.
10. B.R.Levy and J.B.Keller, "Diffraction by a smooth object," *Commum. Pure Appl. Math.*, vol.12, pp. 159-209, 1959.
11. R.G.Kouyoumjian, "The geometrical theory of diffraction and its applications," in *Numerical and Asymptotic Techniques in Electromagnetics*, ed. by R.Mitra, New York : Springer-Verlag, 1975.
12. R.G.Kouyoumjian, P.H.Pathak, and W.D.Burnside, "A uniform GTD for the diffraction by edges, vertices, and convex surfaces," in *Theoretical Methods for Determining the Interaction of Electromagnetic Waves with Structures*, ed. by J.K.Skwirzynsky, Amsterdam, the Netherlands : Sijthoff and Noordhoff, 1981.
13. S.W.Lee and G.A.Deschamps, "A uniform asymptotic theory of EM diffraction by a curved wedge," *IEEE Trans, Antennas Propag.*, vol. AP-24, pp.25-34, January 1976. Also see D.S. Ahluwalia, R.M.Lewis, and J.Boersma, "Uniform asymptotic theory of diffraction by a plane screen," *SIAM J. Appl. Math.*, vol.16, pp.783-807, 1968.
14. C.E.Ryan, Jr., and L.Peters, Jr., "Evaluation of edge diffracted fields including equivalent currents for caustic regions," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.AP-7, pp.292-299, 1969.
15. W.D.Burnside and L.Peters, Jr., "Axial RCS of finite cones by the equivalent current concept with higher-order diffraction," *Radio Sci.*, vol.7, no.10, pp.943-948, October, 1972.
16. P.Ya.Ufimtsev, "Method of edge waves in the physical theory of diffraction"(from the Russian "Method Krayevykh voln v fizicheskoy teorii difraktsii," *Izd-Vo Sov.Radio*, pp.1-243, 1962), translation prepared by the U.S.Air Force Foreign Technology Division, Wright-Patterson AFB, Ohio ; released for public distribution September 7, 1971.
17. S.W.Lee, "Comparison of uniform asymptotic theory and Ufimtsev's theory of EM edge diffraction," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. AP-25, no.2, pp.162-170, March 1977.

18. S.Choudhary and L.B.Felsen, "Analysis of Gaussian beam propagation and diffraction by inhomogeneous wave tracking," *Proc. IEEE*, vol.62, 1530-1541, 1974.
19. W.D.Burnside, C.L.Yu, and R.J.Marhefke, "A technique to combining the geometrical theory of diffraction and the moment method," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.AP-23, pp.551-558, July 1975.
20. G.A.Thiele and T.H.Newhouse, "A hybrid technique for combining moment methods with the geometrical theory of diffraction," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.AP-23, no.1, January 1975.
21. R.G.Kouyoumjian, "Asymptotic high-frequency methods," *Proc. IEEE*, vol.53, pp.864-876, August 1965.
22. P.H.Pathak and R.G.Kouyoumjian, "The dyadic diffraction coefficient for a perfectly conducting wedge," *Rep. 2183-4*, ElectroScience Lab., Dept. Elec.Eng., Ohio State Univ., Columbus. Prepared under Contract AF 19(628)-5929 for AF Cambridge Res. Labs. (AFCRL-69-0546), also *ASTIA Doc. AD 707 827*, June 5, 1970.
23. R.G.Kouyoumjian and P.H.Pathak, "A uniform geometrical theory of diffraction for an edge in a perfectly conducting surface," *Proc. IEEE*, vol.62, pp.1448-1461, November 1974.
24. P.H.Pathak, N.Wang, W.D.Burnside, and R.G.Kouyoumjian, "Uniform GTD solution for the radiation from sources on a smooth convex surfaces," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. AP-29, no.4, pp.609-621, July 1981.
25. J.H.Richmond, "A reaction theorem and its application to antenna impedance calculations," *IRE Trans. Antennas Propag.*, Vol.AP-9, no.6, pp. 515-520, November 1961.