
TLM법을 이용한 Soret 타입 프레넬 존 플레이트 렌즈 안테나 해석

김태용* · 조형국**

Analysis of Soret-type Fresnel Zone Plate Lens Antenna using TLM method

Tae Yong Kim* · Heung-kuk Jo**

이 논문은 2011년도 동서대학교 교내특별연구비를 지원받았음

요 약

위성 TV 시스템, 진파 망원경, 측지 시스템 등에 응용 가능한 Soret 타입 프레넬 존 플레이트 렌즈 안테나의 수신 이득 특성을 해석하기 위하여 TLM법으로 계산을 수행하였다. TLM법에 의한 계산결과를 확인하기 위하여 키르히호프 및 PO법에 의한 광학 해와 비교하였다. 계산 결과, 12 GHz대의 FZPL의 중심축 상에서의 수신 특성은 설계 초점거리와 비교하여 짧게 형성되는 것을 확인하였으며, 이는 수신기의 위치가 적절히 조정되어야 하는 것을 의미한다.

ABSTRACT

In order to analyze the receiver gain characteristic of the Soret-type FZPL lens antenna which is operated at 12GHz, TLM method can be applied. The application of the FZPL lens antenna is often use the receiver for satellite TV system, radio telescope, and Geodetic System. Some numerical results computed by TLM method are compared with Kirchhoff's approximation and PO method. The focal characteristic of receiver gain on main axis of the FZPL is mostly shown at the front side, which means that the position of the receiver should be properly calibrated.

키워드

프레넬 존 플레이트, PO, TLM, 수신 이득

Key word

Fresnel Zone Plate, PO, TLM, Receiver gain

* 정회원 : 동서대학교(tykimw2k@gdsu.dongseo.ac.kr)

** 정회원 : 동서대학교

접수일자 : 2011. 05. 27

심사완료일자 : 2011. 05. 27

I. 서 론

프레넬 존 플레이트 렌즈[1]는 호이겐스 프레넬의 원리를 응용한 것으로 전파 차폐체와 투과부를 동심원상으로 상호 배치한 구조를 가지고 있다. 이렇게 하면 입사하는 전파는 차폐체에서 일부 반사되고, 전파 투과부에서는 동일 위상의 전파 성분만을 모을 수 있게 되고 초점거리 위치에서 수신 전력이 최대가 되는 일종의 렌즈와 같은 특성을 가지게 할 수 있다. 그리고 정밀도 높은 가공이 필요 없고 저렴한 가격 및 경량 구조, 조립 및 분해가 간단하다는 특징을 가지고 있다[2-4]. FZPL(Fresnel zone plate lens) 안테나는 위성 TV 수신 시스템, 전파 망원경 및 측지 시스템에 응용 가능하다.

이와 같은 프레넬 존 플레이트 안테나 설계를 해석을 위하여 다양한 수치해석 방법을 이용할 수 있다. 대표적으로 유한요소법(FEM), 경계요소법(BEM) 및 모멘트법(MOM) 등은 도체 또는 유전체와 같은 구조물로부터의 전자파 산란문제 해석에 폭넓게 사용 가능하다. 이러한 방법들은 정상파동문제에 적합하지만, 시간영역에서의 응답이 필요한 경우에는 많은 제약이 따른다[1-2].

본 논문에서 이용한 TLM(Transmission Line Matrix) [5-6]법은 본질적으로 시간영역 해석방법으로서 공간을 코일과 콘덴서로 구성되는 등가적인 전달 선로망으로 변환시킨 뒤, 파동전파를 선로상에서 임펄스가 전달되는 것을 모의 추적하는 방법이다. 이것은 호이겐스의 파동전파 과정을 하나의 이산적 모델로 옮겨 놓은 것이다[5-6]. 또한 간단한 계산 알고리즘으로 시간영역 응답을 손쉽게 구할 수 있는 장점이 있고, 주파수 응답이 필요한 경우는 FFT를 이용하거나 계산 과정 중에 DFT를 이용하여 계산종료와 함께 주파수 응답을 구할 수 있다.

본 논문에서는, 위성 TV 수신 시스템, 전파 망원경 및 측지 시스템에 응용 가능한 12 GHz대의 FZPL(Fresnel Zone Plate Lens) 안테나 설계를 목적으로 하였다[2]. TLM법을 도입하여 FZPL에 대한 해석을 수행하고, 키르히호프의 근사식과 PO법에 의한 계산결과와 비교 검토 하였다.

II. 프레넬 존 플레이트 안테나

프레넬 존 플레이트 렌즈 안테나(FZPL)의 기하학적 구조를 그림 1에 나타내었다. 이는 기하학적으로 전파 차폐체와 투과부를 동심원상으로 나열한 간단한 구조를 하고 있어 분해·조립이 간단하다는 장점을 가지고 있다. 그림 1에서 알 수 있듯이, 위성에서 도래하는 통신 신호를 프레넬 존으로 구성되는 안테나 면에서 일종의 렌즈와 같은 기능으로 신호를 증폭하고 집약시키는 역할을 수행하게 할 수 있다. 그리고 초점거리 위치에 수신용 혼 안테나를 설치하여 FZPL로부터 모아진 신호를 효율적으로 수신할 수 있게 된다.

본 논문에서는 12 GHz대에서 동작하는 FZPL 안테나 설계를 위하여 그림 1에 나타낸 바와 같이 오피스 또는 주택의 창호에 삽입하여 위성 신호를 수신할 수 있도록 구성하고, 위성에서 송신되는 신호가 안테나 면에 수직으로 입사하는 경우를 이외에도 적절한 안테나 이득을 가지도록 설계하는 것을 목표로 하고 있다.

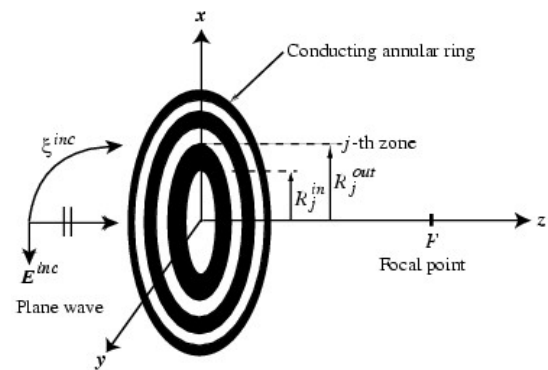


그림 1. FZPL 안테나의 기하학적 모델
Fig. 1 Geometric model of FZPL antenna

그러나 FZPL 구성을 통한 설계 단계에서 실제 안테나 이득이 최대가 되는 위치(초점거리)는 실제 안테나를 설치 장소에 마운트 시킬 경우 정확하게 일치하지 않는 경우도 있다. 따라서 FZPL 안테나에 대한 정밀한 해석이 요구되며 실제 수치 모델과의 차이는 수신용 혼 안테나의 위치를 조정함으로써 수신 이득을 최대화 시킬 수 있다.

그림 1과 같은 수치 모델을 대상으로 맥스웰 방정식을 기본으로 하는 지배방정식에 대해서는 TLM 법을 이용하여 계산하고, 키르히호프의 근사식과 PO법[7]에 의한 계산결과와 비교 검토하였다.

III. TLM 모델링

공학적인 응용에서는 2차원적인 문제보다 3차원 문제를 취급할 수 있는 모델이 필요하다. 따라서 임의 계산공간을 그림 2와 같은 TLM node를 이용하여 이산화시킬 수 있다[5]. 이러한 기본요소를 SCN(Symmetric Condensed Node) 노드라 부르며, 3개의 좌표평면 내에서 12개의 포트를 가진 선로를 등가적으로 표현하고 있다.

예를 들어, 그림 2에서 나타낸 노드의 단자 1에 전압 펄스가 입사하는 것으로 생각하면, 펄스는 인접한 단자로 전달되고, 다시 인접한 노드로 연속적으로 전파하게 된다. 이러한 펄스의 전파는 임의 선로상에 위치해 있는 각 노드간의 입사파 V^i 와 반사파 V^r 은 적절한 산란행렬 $[S]$ 에 의해 다음 식과 같이 관련지을 수 있다[5-6].

$$V^r = [S] V^i \quad (1)$$

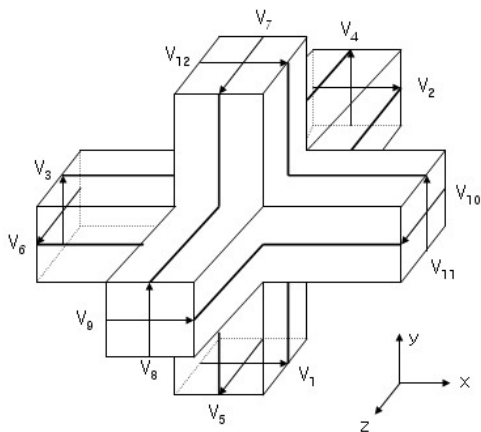


그림 2. TLM SCN 노드
Fig. 2 Symmetric condensed node

여기서 산란행렬 $[S]$ 는 12x12로 주어지며, 구체적인 내용은 참고문헌에 제시되어 있다. 그림 2에서 포트 1에 단위 진폭을 가지는 전압펄스 V_1^i 가 입사한다면, 인접한 노드사이에서 전자계 성분 E_x 및 H_y 와 관련지을 수 있고, 이를 맥스웰 방정식과 연관시키면 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} = \epsilon \frac{\partial E_x}{\partial t} \quad (2)$$

즉 포트 1에 입사하는 펄스는 인접한 포트 1, 2, 9, 12로 전달되는 것을 알 수 있다. 또한 E_x 와 H_y 는 포트 12에서 y -방향의 선로에, 그리고 E_x 와 H_y 는 포트 2와 9에서 z -방향 선로에 결합된 것을 알 수 있다. 한편, E_x 와 H_z 를 포함하는 또 다른 맥스웰 방정식의 경우는 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = \mu \frac{\partial H_z}{\partial t} \quad (3)$$

이 경우는 각 펄스들이 포트 3과 11에서 산란하게 된다. 따라서 그림 2에 나타낸 노드를 이용하여 전자계를 상호 연속적으로 표현하게 되면, 각 노드에서의 전자계는 다음 식들로 표현된다.

$$E_x = \frac{1}{2u} (V_1^i + V_2^i + V_9^i + V_{12}^i)$$

$$E_y = \frac{1}{2v} (V_3^i + V_4^i + V_8^i + V_{11}^i)$$

$$E_z = \frac{1}{2w} (V_5^i + V_6^i + V_7^i + V_{10}^i)$$

$$H_x = \frac{1}{2uZ_0} (V_4^i - V_5^i + V_7^i - V_8^i)$$

$$H_y = \frac{1}{2vZ_0} (-V_2^i + V_6^i - V_9^i + V_{10}^i)$$

$$H_z = \frac{1}{2wZ_0} (-V_3^i - V_1^i + V_{11}^i - V_{12}^i)$$

상기 식에서 Z_0 는 파동 임피던스를 의미하며, 임의 공간을 전파하는 펄스를 반복적으로 추적함으로써 파동현상을 모의하여 시뮬레이션 하는 것이 가능하다.

그러나 일반적인 파동은 분산 없이 펄스가 전파되는 것에 반하여 TLM 공간에서는 거리 Δl 을 전파하는 동안 시간 스텝 Δt 의 2배의 시간이 걸리게 되므로 공간과 시간사이에서의 이산화는 다음 식을 만족할 필요가 있다.

$$c = \frac{\Delta l}{\Delta t} = 2u_{TLM} \quad (4)$$

이것은 TLM 공간에서의 전파속도 u_{TLM} 은 광속 c 보다 2배 느리게 전파되는 것을 의미 한다.

IV. 계산 결과 및 고찰

먼저 계산 모델 A와 B에 대하여 앞에서 논의된 TLM 법을 적용하여 계산을 수행하였다. 여기서 특정 주파수에 대한 시간 응답을 얻기 위해서 입사파는 12 GHz의 정현파 구동으로 가정하였다.

그림 3에 주어진 계산 모델을 대상으로 설계 주파수는 12 GHz, 설계 초점(기하학적 초점) $F=0.4m$ 에 대하여 복수 개의 zone으로 구성된 FZPL 안테나를 대상으로 하였다. Soret[1] 타입의 zone 경계 위치를 산출하는 식은 다음과 같다.

$$R_j = \sqrt{j\lambda_0 F} \quad (5)$$

여기서 (5)에서 j 는 경계위치에 따른 차수를 의미하며, λ_0 는 자유공간상에서의 파장을 의미한다[1].

이러한 렌즈 안테나는 송신 모드로 사용할 경우는 렌즈면 원편에 주어지는 파동의 소스가 각 존 경계에서 회절되어 평면파로서 전파하게 된다. 마찬가지로 수신 모드로서의 동작은 전파되어 온 평면파가 렌즈의 각 존 경계에서 회절되고, 결과적으로 전파되어 온 전자 에너지는 한 점에서 초점을 형성하게 된다.

그러나 이러한 모델을 직접 수치적으로 계산하기 위해서는 방대한 메모리 공간이 필요하다. 따라서 실제 계산 모델은 그림 3과 같이 실제 모델의 4분의 1에 해당하는 축소 모델로서 계산을 수행하는 것이 효율적이다. 우선 FZPL의 원편에서 평면파(x -polarized wave)가 입사하

는 것으로 가정하였다. 이와 같은 경우, 경계조건으로서 $z-x$ 평면은 PMC, $z-y$ 평면은 PEC로 볼 수가 있어 실제 모델의 1/4로 축소시켜 계산을 수행할 수 있다. 계산 공간의 나머지 면은 흡수 경계조건(자연 경계조건)으로 설정하였다.

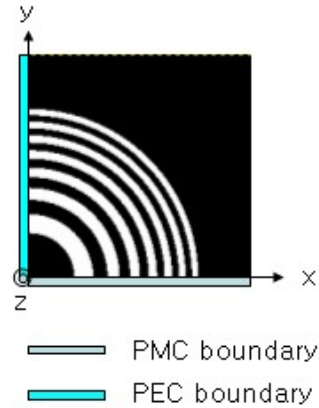


그림 3. 축대칭 모델
Fig. 3 Axial symmetry model

표 1. FZPL 계산을 위한 제원
Table. 1 Specification to compute FZPL

	모델 A	모델 B
설계주파수	12 GHz ($\lambda_0 = 0.025$ m)	
설계 초점	0.4 m ($16\lambda_0$)	
Δl	$\lambda_0/10 = 0.0025$ m	
Δt	4.17 pico sec	
존 구성	Odd zones are open	Even zones are open
이산화	179x179x220	174x174x220
반복횟수	1000회	1000회

식 (5)를 이용하여 도출된 렌즈의 경계면은 그림 3에 나타낸 바와 같이 7개의 존 플레이트로 구성된 모델을 대상으로 하였으며, 계산 수행을 위한 조건은 표 1에 나타내었다. 여기서 존 경계면의 도출에 따라 존 플레이트(도체)가 놓이는 위치는 홀수 차수 또는 짝수 차수 j 를 구분하여 모델 A와 모델 B로 나누어 계산을 수행하였다.

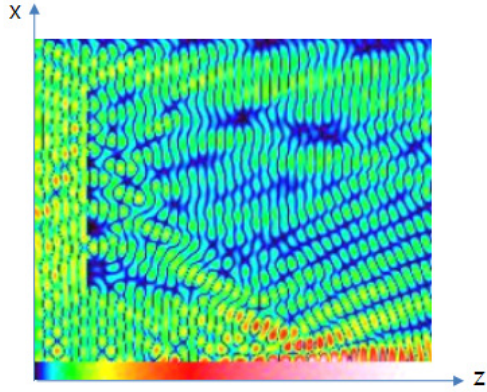


그림 4. 시간영역 응답(모델 A)
Fig. 4 Electric field response in time domain (Model A, $t = 1000\Delta t$)

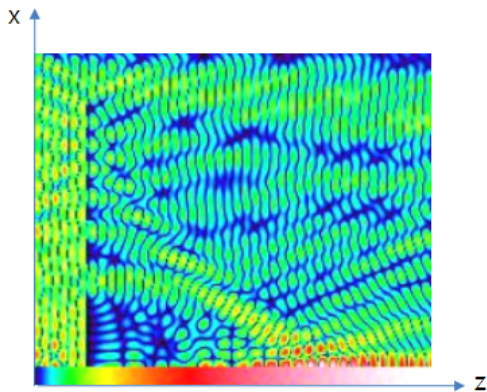


그림 5. 시간영역 응답(모델 B)
Fig. 5 Electric field response in time domain (Model B, $t = 1000\Delta t$)

먼저 모델 A에 대하여 앞에서 논의된 TLM법을 적용하여 계산을 수행하였다. 여기서 특정 주파수에 대한 시간 응답을 얻기 위해서 입사파는 정현파 구동으로 가정하였다.

먼저 렌즈로서의 특성을 확인하기 위하여 렌즈면 좌측으로부터의 입사계가 정상상태에 도달한 시점에서의 전계 E_x 의 특성을 그림 4에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 홀수 차수의 차폐 존들은 입사파를 반사시키고, 홀수 차수의 투과 존에서는 입사계의 전계가 렌즈면 우측 편에서 적절한 위상결합을 통하여 전력이 중첩되고

있다. 따라서 시간응답이 정상상태에 도달하면 FZPL의 중심축 위의 초점거리 F 근방에서 입사파의 전력이 집중되고 있음을 알 수 있고, 이는 프레넬 존 구성을 통하여 신호를 원하는 위치에서 최대 이득으로 수신할 수 있음을 의미한다.

마찬가지로 짝수 차수의 투과 존들로 구성되는 모델 B에 대해서도 동일한 계산을 수행하였다. 이때 정상상태에 도달한 시간응답 특성을 그림 5에 나타내었다.

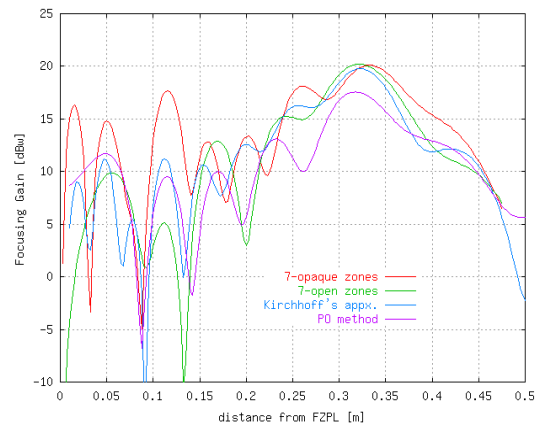


그림 6. FZPL 중심축 상에서 관측된 수신 이득 특성
Fig. 6 Received focusing gain on the central axis of FZPL

다음으로 FZPL의 위치를 기준으로 하여 중심축 상에서의 전계 E_x 의 전력특성(수신이득)을 계산하였다. 그림 6은 키르히호프의 근사와 PO법에 의해 계산된 이득과 TLM법에 의한 이득 특성을 비교한 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 TLM에 의해 계산된 초점이 $F=0.4m$ 에 비하여 약간 전방에서 형성되고 있다. 설계 초점거리 $0.4m$ 에서 벗어난 이유로는 식 (4)를 기준으로 입사파의 전파과정에서 시간과 공간에 따른 분산 효과에 따른 것으로 추정된다. 그러나 모델 A와 모델 B에 대한 입사파의 시간에 따른 전파 과정은 투과 존의 면적과 경계면에서 약간 상이하게 나타나는 것을 알 수 있다. 이를 확인하기 위하여 존 구성 방법에 따른 초점거리 및 수신이득 특성을 계산한 결과를 표 2에 나타내었다. 표에서 알 수 있듯이, 설계 초점거리 $0.4m$ 에 대하여 최대 16%정도 짧게 초점이 형성되는 것을 알 수 있다.

그리고 수신 이득은 7개의 존으로 구성시킨 경우에는 약 18dB로 입사전력을 거의 63배 증폭하는 것을 확인할 수 있다.

표 2. Soret-type FZPL 수신 특성
Table. 2 Receiver characteristic of Soret-type FZPL

zone 수		초점거리	수신 이득
3	odd zones open	0.3675 m	15.81 dB
	even zones open	0.3525 m	12.87 dB
5	odd zones open	0.3525 m	18.47 dB
	even zones open	0.3425 m	16.96 dB
7	odd zones open	0.3350 m	18.22 dB
	even zones open	0.3350 m	18.27 dB

V. 결 론

TLM법을 이용하여 12 GHz대의 FZPL의 산란특성을 해석하여 FZPL의 중심축 상에서의 수신 특성을 계산하였다. 계산에 의해 관측된 초점 위치는 설계 초점거리에 비하여 약 8%에서 16% 전방에서 형성되는 것을 알 수 있었다. 이것은 입사파를 단순한 평면파로 가정하였기 때문에 원편파로 가정한 결과와 약간 다르게 나타난 것으로 생각된다. 또한 TLM법 도입에 따른 분산효과로 실제 전자파의 속도보다도 느리게 전파되는 과정에서 나타난 편차로 보인다.

향후 과제로서 실제 전파의 수신환경을 고려할 때, 유전 특성을 가지는 건물의 유리창과 같은 지지부에 마운트시켜 사용할 경우의 안테나 지지부의 유전율을 고려한 계산이 필요하다. 또한 실제 전파의 수신환경과 같이 FZPL 렌즈 면에 임의의 입사각을 가지고 전파가 수신된 경우에 따른 입사파의 각도에 따른 영향도 분석할 예정이다.

참고문헌

[1] H. D. Hristov, Fresnel Zones in wireless links, zone plate lenses and antennas, Artech House.
[2] T. Y. Kim, Y. Kagawa, and Ling Yun Chai, "Modelling

of a circular Fresnel zone plate lens for electromagnetic wave antenna application," Int. J. Numer. Model., Vol. 18, pp. 429-439, 2005.

[3] T. Y. Kim and Y. Kagawa, "Focusing characteristic analysis of a Fresnel zone plate lens by the method of moment", Proc. of JSST int. conference on modeling, control and computation in simulation, Japan(Tokyo), pp. 362-365, 2000.
[4] T. Y. Kim et al., "Analysis of a Fresnel-zone-plate-lens by the Method of Moments", in Proc. BEM Technology Conference(JASCOME), Vol. 8, pp.7-10, 1998.
[5] P. B. Johns, "A symmetrical condensed node for the TLM method", IEEE Microwave Theory and Techniques, Vol. MTT-35, No. 4, pp. 370-377, 1987.
[6] P. B. Johns, "Numerical results for the symmetrical condensed TLM node", IEEE Microwave Theory and Techniques, Vol. MTT-35, No. 4, pp. 378-382, 1987.
[7] F. A. Jenkins and H. E. White, Fundamentals of optics, McGRAW-HILL.

저자소개

김태용(Tae Yong Kim)

한국해양정보통신학회논문지 제 12권 12호 참조

조형국(Heung-Kuk Jo)

한국해양정보통신학회논문지 제 15권 제4호 참조