

유한한 유전체 격자구조에서 필드패턴 분석을 위한 모드연구

김민년^{1*}

The Mode Analysis for field pattern analysis of a Finite Periodic Dielectric Structure

Min-Nyun Kim^{1*}

요약 본 논문은 유한한 유전체 격자구조 내부에 형성되는 모드를 좀 더 정확하게 계산함으로써 근거리, 원거리 방사 필드 패턴을 분석하고자 한다. 유전체 내부의 필드 분포는 TE 모드가 형성되는 것으로 가정하여 각 층의 필드를 경계조건을 이용하여 계산하였다. 결과적으로 유한한 유전체 격자구조에서 필드들은 모드들을 형성하며 형성되는 모드의 수는 격자구조의 구조적 특징에 따라 달라진다. 본 논문은 특정 주파수에서 유전체 내부에 형성된 모드와 이들의 필드 분포를 계산하였다. 또한 계산된 모드의 FFT를 이용하여 원거리 방사패턴도 계산하였다.

Abstract In this paper, we analyze inner- and far-field emitted field pattern by more exactly calculating modes formed from a finite periodic dielectric structure(FPDS). It is assumed that TE-modes are generated in FPDS, and the fields in each layer are determined by proper boundary conditions. Consequently, the fields generate modes in the FPDS and the number of modes depends on its structural characteristics. In this work, the modes between dielectric layers and their field patterns are calculated in a specific frequency. In addition, far field patterns are given by using FFT of the calculated modes.

Key Words : finite periodic dielectric structure, near field pattern, far field pattern, mode

1. 서론

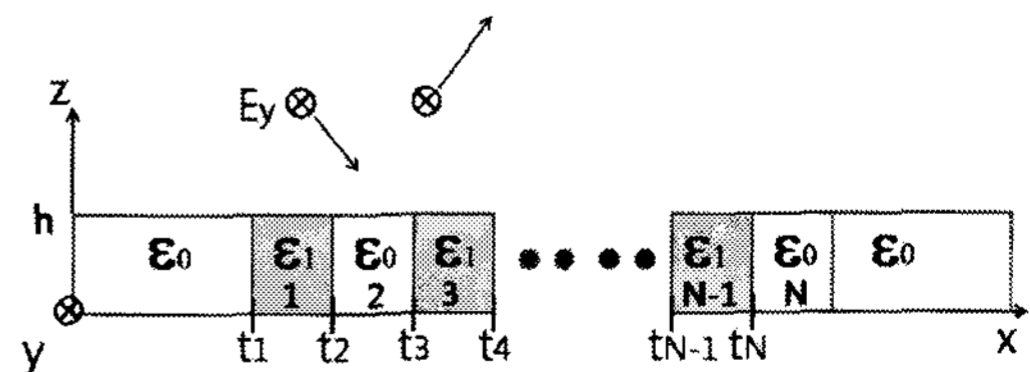
유전체 격자구조는 주파수 선택 특성 등을 갖고 있어 여러 가지 용도로 사용가능성을 평가 받고 있다[1]. 특히, 표면 방출안테나, 결합기 등으로 적용할 수 있다. 종래에 격자구조 해석은 무한한 구조를 가정하여 Floquet-Bloch 해석법, Coupled-Mode 해석법, Rigorous-coupled 해석법 등이 쓰이고 있었으나[2][3] 본 논문에서는 수직경계조건을 이용한 방법을 통해 거의 정확한 근거리 필드를 계산하였다. 실제 제작 시 무한한 격자구조가 아닌 유한한 구조를 갖는 유전체 격자구조가 격자구조 내부의 전자계는 형성하는 모드를 분석하고 이러한 모드들이 방출하는 필드 패턴을 분석하고자 한다.

2장에서는 유전체 격자구조 내부의 모드를 분석하였으며 3장에서는 전산모의 계산을 통해 모드들을 계산하고 이들의 원거리 필드패턴을 계산하였다.

2. 모드분석

그림 1은 N개의 격자가 일정한 주기성을 가진 유전체의 변화에 따라 형성되어 있는 경우이다.

입사되는 TE 모드의 전자기파를 가정하며 유한한 길이를 갖는 유전체 격자구조에서 내부에 형성되는 모드를 구하고자한다.



[그림 1] 격자구조의 입사파와 반사파

무한한 격자구조 유전체 내부에 Floquet-Bloch 모드를 형성하는 것으로 알려져 있다[4]. Floquet-Bloch 모드 이론에 따르면 전파상수가 격자주기에 의존하여 형성되는 것으로 알려져 있다. 형성되는 필드는 격자주기의 절반정도 주기의 정수배를 갖는 무한개의 필드가 형성될 수 있다. 그러나 격자의 수가 적은 유한한 구조에서는 격자주

¹백석대학교 정보통신학부

*교신저자: 김민년(myki@bu.ac.kr)

기성이 감소되어 유한개의 모드만이 형성된다.

격자구조 내부에는 경계조건을 만족하는 필드분포를 형성한다. 각 경계에서 존재하는 필드 분포를 구하기위해서는 우선 아래의 파동방정식을 풀어야한다.

$$\nabla^2 E(x,y,z) - k^2 E(x,y,z) = 0$$

여기서 E는 전계밀도이며 k는 전파상수이다. 입사파는 아래의 식 1과 같이 정의될 수 있다.

$$E(x,z) = E_y e^{-j(k_z z - k_x x)} \quad (\text{식 1})$$

이때 각 영역에서 필드는 아래와 같이 정의될 수 있다.

$$E(x,z) = E_{inc} e^{-j(k_z z - k_x x)} + R E_{inc} e^{j(k_z z + k_x x)}, \quad z \geq h \quad (\text{식 2})$$

$$E(x,z) = E_{y_0} e^{-j(k_z z - k_{x_0}(x - t_1))}, \quad x \leq t_1, 0 \leq z < h \quad (\text{식 3})$$

$$E(x,z) = A_n \cos(k_{x_n}(x - t_{n-1})) + B_n \sin(k_{x_n}(x - t_{n-1})) e^{-jk_z z}, \quad n = 1 \dots N, \quad t_1 < x \leq t_N, 0 \leq z < h \quad (\text{식 4})$$

$$E(x,z) = E_{y_0} e^{-j(k_z z - k_{x_0}(x - t_N))}, \quad x \geq t_N, 0 \leq z < h \quad (\text{식 5})$$

$$E(x,z) = E_{y_0} e^{j(k_z z + k_{x_0} x)}, \quad z \leq 0 \quad (\text{식 6})$$

$$\text{여기서 } k_{x_n} = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0 \epsilon_{r_n}}, \quad k_{x_0} = \omega \sqrt{\mu \epsilon_0},$$

R은 반사율, ϵ_{r_n} 은 n 번째 유전율

위에 정의된 식 (2)-(5)를 사용하여 경계조건을 h, t_1, t_2, \dots, t_N 에서 적용하는 것은 복잡한 수치해석적 방법을 초래한다. 따라서 본 논문은 수직면 경계인 $t_1, t_2, t_3, \dots, t_N$ 에서의 연속조건을 사용하여 수평면으로 분포하는 필드를 구함으로써 존재할 수 있는 모드를 구했다. 이때 h는 매우 작다고 가정하여 수평 방향으로 존재하는 필드를 구하기 위해서는 경계조건을 적용하면 식 6과 같다.

$$E_{y_0} e^{-jk_{x_0} t_1} = A_1 \cos(k_{t_1} t_1) + B_1 \sin(k_{t_1} t_1)$$

$$-jk_{x_0} E_{y_0} e^{-jk_{x_0} t_1} = -k_{t_1} A_1 \sin(k_{t_1} t_1) + k_{t_1} B_1 \cos(k_{t_1} t_1)$$

$$A_n \cos(k_{t_n} t_n) + B_n \sin(k_{t_n} t_n) = A_{n+1} \cos(k_{t_{n+1}} t_{n+1}) + B_{n+1} \sin(k_{t_{n+1}} t_{n+1})$$

$$-k_{t_n} A_n \sin(k_{t_n} t_n) + k_{t_n} B_n \cos(k_{t_n} t_n) = -k_{t_{n+1}} A_{n+1} \sin(k_{t_{n+1}} t_{n+1}) + k_{t_{n+1}} B_{n+1} \cos(k_{t_{n+1}} t_{n+1})$$

$$n = 1 \dots N-1$$

$$A_N \cos(k_{t_N} t_N) + B_N \sin(k_{t_N} t_N) = E_{y_0} e^{-jk_{x_0} t_N}$$

$$-k_{t_N} A_N \sin(k_{t_N} t_N) + k_{t_N} B_N \cos(k_{t_N} t_N) = -jk_{x_0} E_{y_0} e^{-jk_{x_0} t_N} \quad (\text{식 7})$$

$$k_{x_0} = \sqrt{k_0^2 - k_z^2}$$

$$k_{t_1} = \sqrt{k_0^2 \epsilon_{t_1} - k_z^2}$$

$$k_{t_N} = \sqrt{k_0^2 \epsilon_{t_N} - k_z^2} \quad (\text{식 8})$$

식 7에서 파수와 계수를 전산모의 실험을 통해 구하기 위해서 마지막 식을 아래의 식 9와 같이 변형한다.

$$\Delta_1 = A_N \cos(k_{t_N} t_N) + B_N \sin(k_{t_N} t_N) - E_y e^{-jk_{x_0} t_N}$$

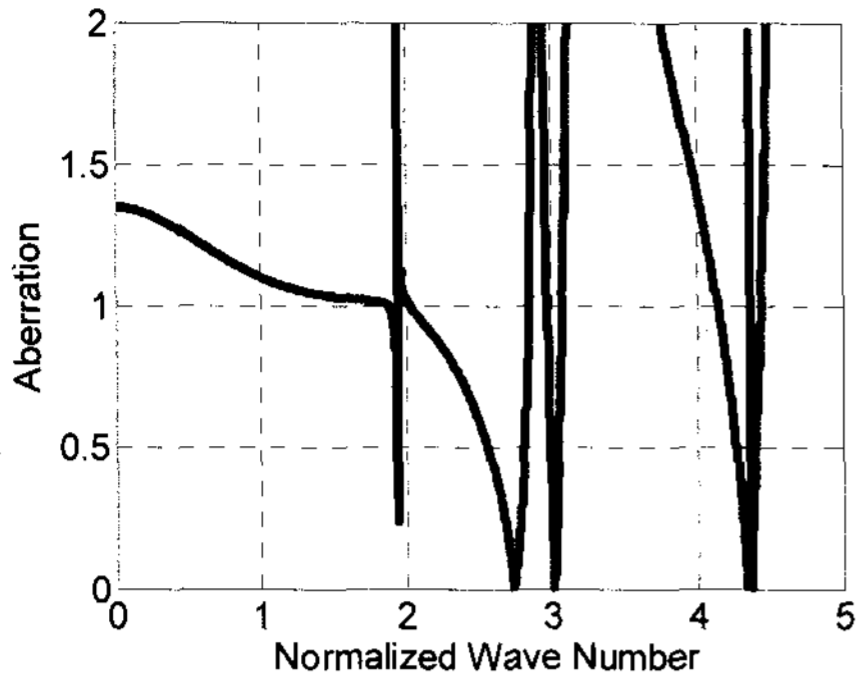
$$\Delta_2 = -k_{t_N} A_N \sin(k_{t_N} t_N) + k_{t_N} B_N \cos(k_{t_N} t_N) + jk_{x_0} E_0 e^{-jk_{x_0} t_N}$$

$$\text{Aberration} = |\Delta_1 - \Delta_2| \quad (\text{식 9})$$

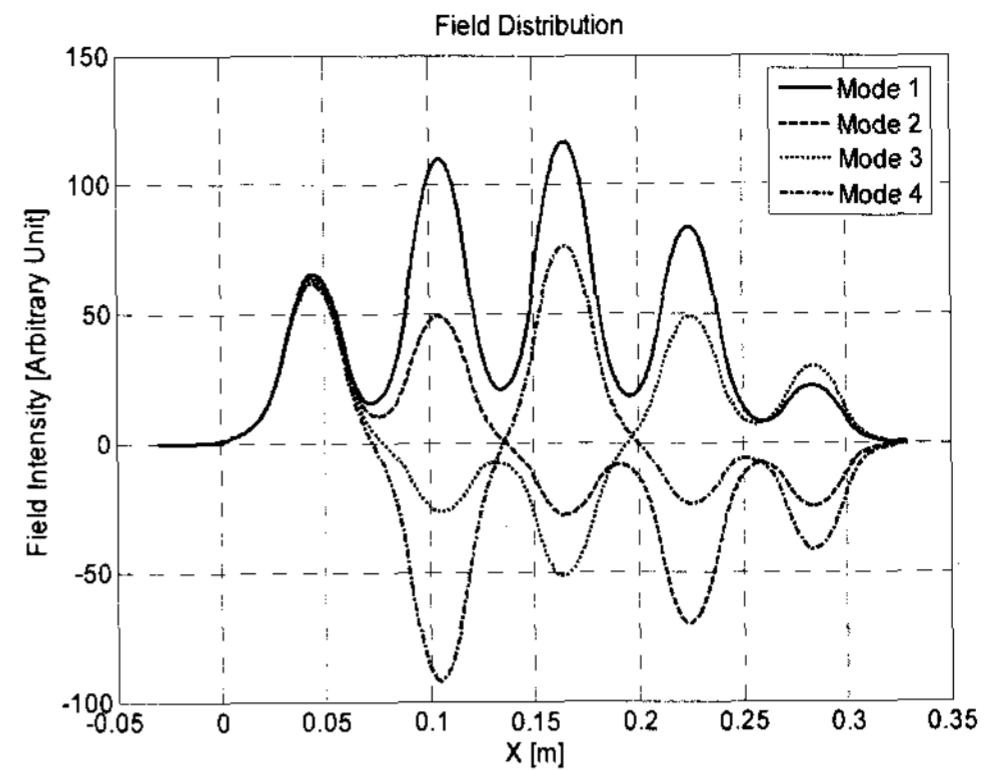
3. 시뮬레이션 및 결론

그림 3,4,5에서 x축은 정규화된 파수(wave number)이고 y축은 오차 값(Aberration)을 나타내고 있다. 식 7에 따라 오차 값이 '0'에 접근하는 곳이 경계조건을 만족하는 모드가 존재하게 된다. 시뮬레이션은 $E_{y_0}=1$ 로 가정하여 식 7을 계산한다. 이때 식 8에서와 같이 정의된 전파상수 k_z 를 증가시켜 식 9의 Aberration이 '0'이 되는 각 상수 A,B의 값을 구한다.

시뮬레이션은 모두 3GHz에서 하나의 격자 크기가 3cm로 하고 유전율이 2.56, 1.44인 격자가 차례로 존재하는 경우로 하였다. 그림 3은 격자수가 4개이고 그림 4는 격자수가 10개이며 그림 5는 격자수가 20개인 경우이다. 예를 들어 그림 4의 경우에 나타나는 모드들을 찾아 유전체 격자구조 내부에 나타나는 필드의 분포는 그림 6과 같다.

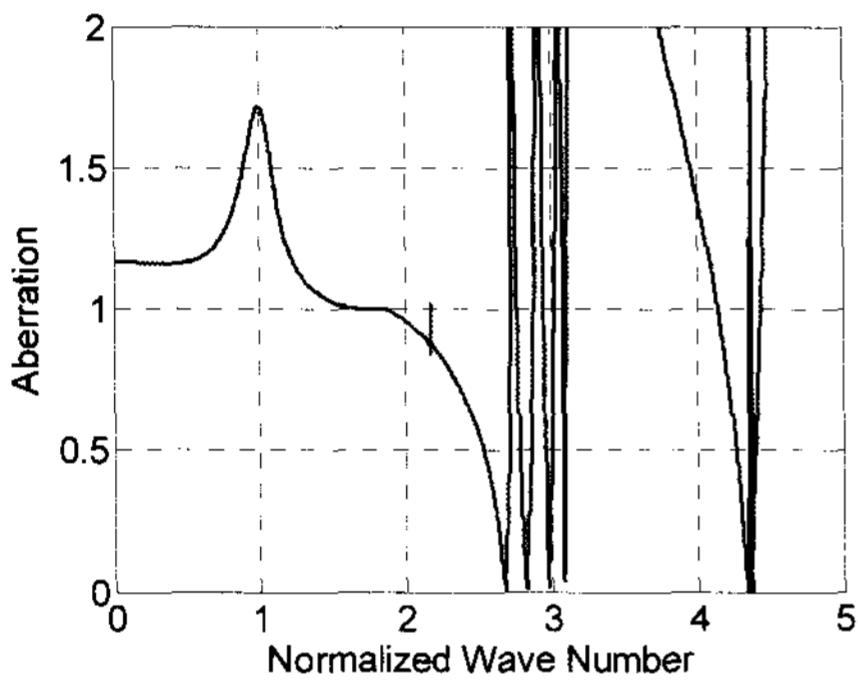


[그림 3] 모드분포(주파수 3GHz, 유전율 2.44, 1.56, 격자수 N=4)

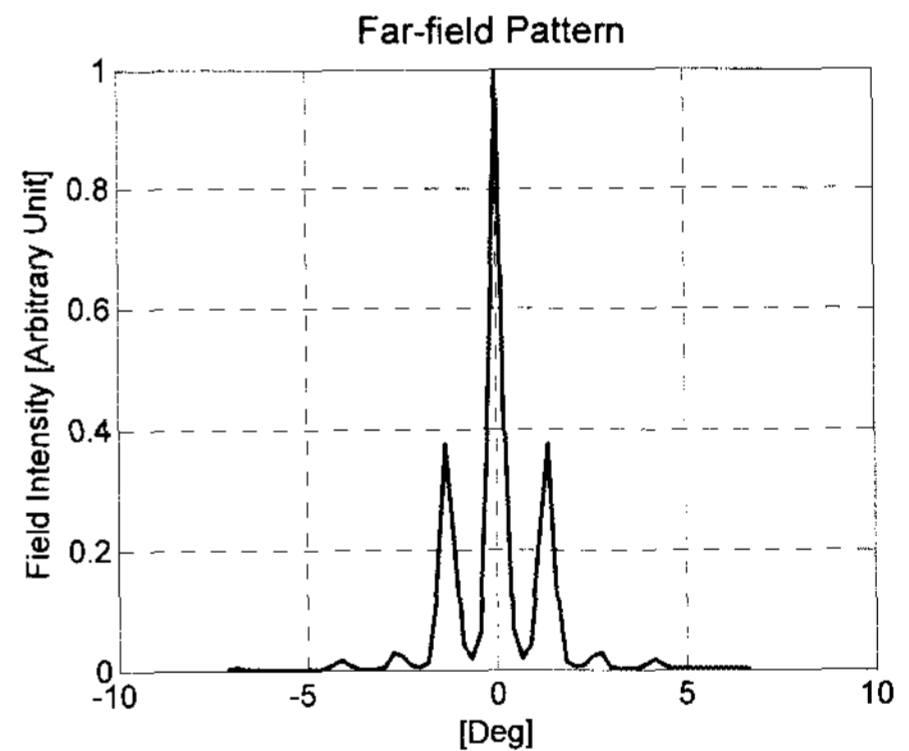


[그림 6] 격자구조내의 모드분포

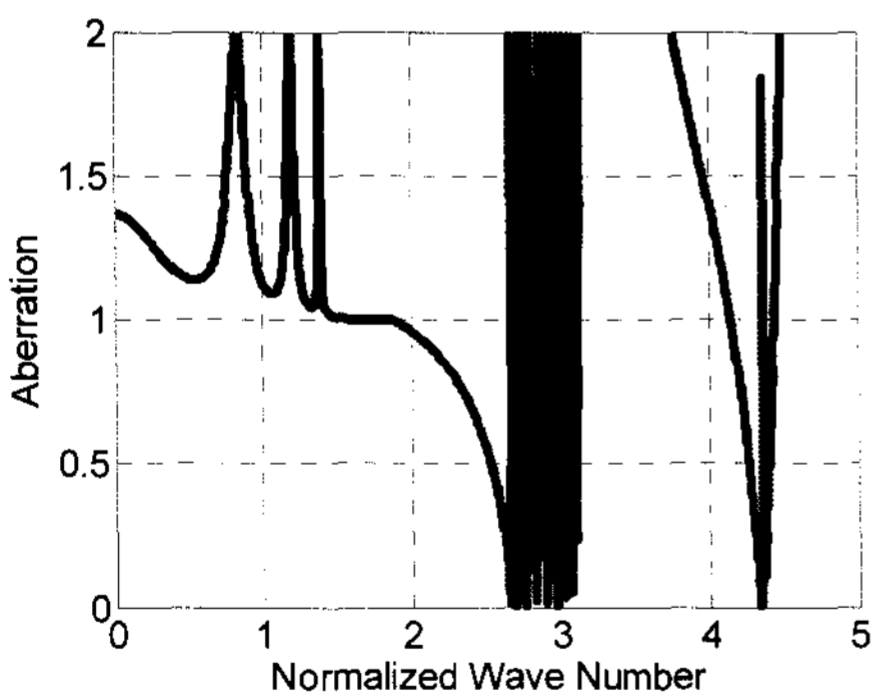
그림 7,8,9은 앞에서 구한 4개의 근거리필드들 중에 3개의 원거리 필드를 각각 구하기 위해서 FFT를 이용하여 계산한 결과이다. 첫 번째 모드(그림6의 mode 1)는 메인 로브의 지향성이 좋으나 두 번째 모드부터는 나누어져 나타나고 있다.



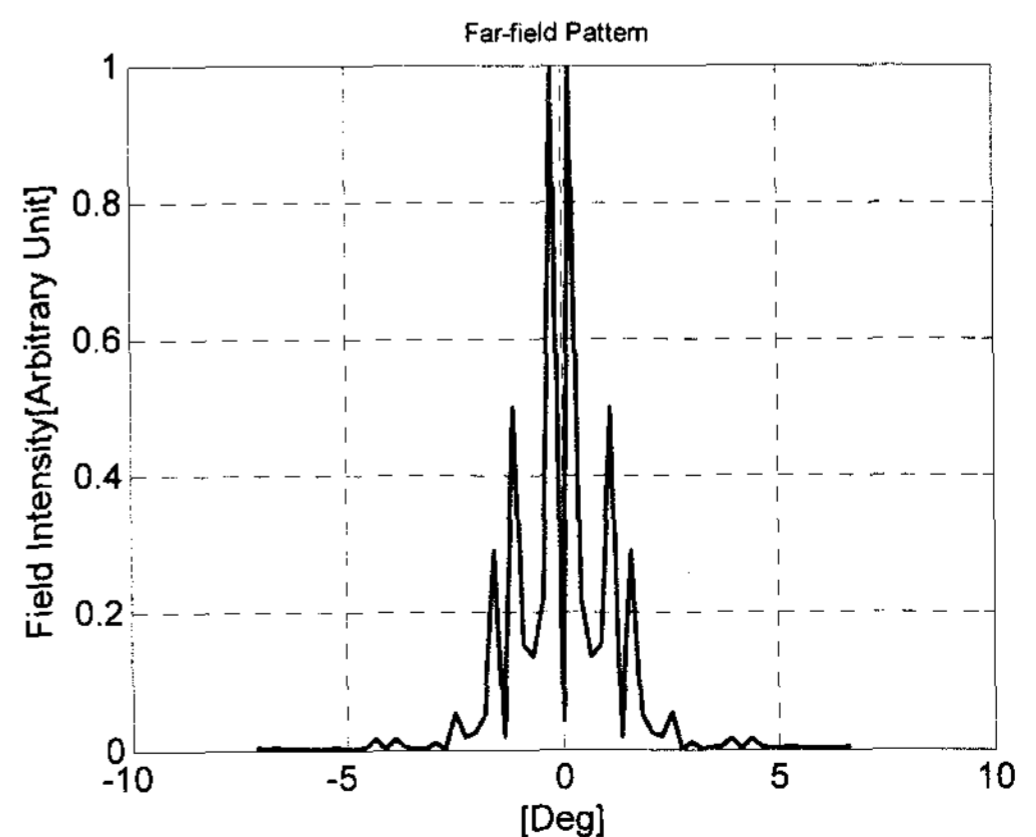
[그림 4] 모드분포(주파수 3GHz, 유전율 2.44, 1.56, 격자수 N=10)



[그림 7] Mode 1의 원거리 패턴(격자수 N=10)



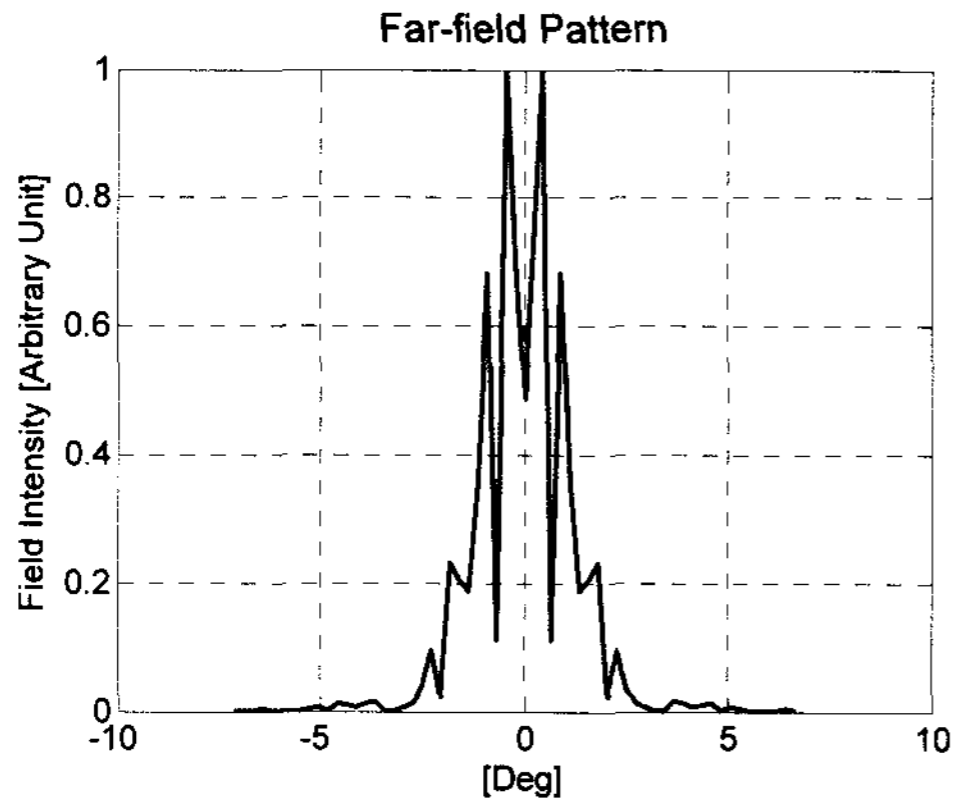
[그림 5] 모드분포(주파수 3GHz, 유전율 2.44, 1.56, 격자수 N=20)



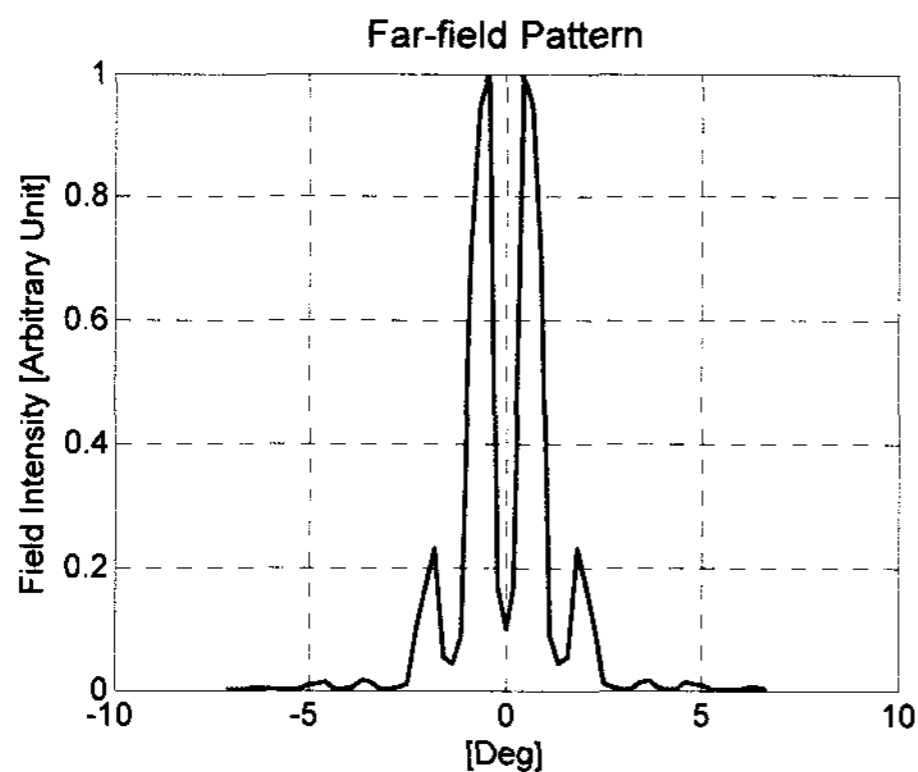
[그림 8] Mode 2의 원거리 패턴(격자수 N=10)

모드 수는 유전체 격자의 수에 따라 다르게 나타나며 격자수가 4개, 10개, 20개로 증가하면 모드의 수는 거의 비례하여 증가하였다.

그림 6은 격자가 10개인 그림 4의 경우에 모드들 중에 첫 번째로부터 4개까지 모드의 필드 분포를 나타낸 것이다. 이들은 모두 격자 내부에서는 유한한 격자의 주기성을 갖고 있게 된다.



[그림 9] Mode 3의 원거리 패턴(격자수 N=10)



[그림 10] Mode 4의 원거리 패턴(격자수 N=10)

4. 결론

본 논문에서는 유한한 격자구조의 근거리, 원거리 필드 패턴에 대하여 분석하였다. 종래의 무한한 격자구조가 아닌 유한 격자구조를 가정하여 특정한 주파수에서 존재하는 모드들을 계산하였으며 모드들의 근거리 필드 패턴을 구하였다. 유한한 구조가 갖는 특성에 의해 유한개의 모드 수가 존재하였다. 근거리 필드 패턴을 이용하여 원거리 방출 필드를 모드별로 분석하고자 하였다. 원거리 모드 방출패턴은 FFT를 이용하여 계산하였는데 첫 번째는 단일로브의 특징이 나타났다.

본 연구는 유한한 구조를 갖고 있는 유전체 격자를 정확한 필드 패턴을 구하고자 하였으며 표면방출 안테나 또는 결합기등의 소자로 제작 시 정확한 분석에 도움이 될 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] Bertoni, H. L., et. al "Frequency-selective reflection and transmission by periodic dielectric layer," *IEEE Trans.*, vol. 37, no. 1, Jan. 1989.
- [2] M. G. Moharam and T. K. Gaylord, "Rigorous coupled-wave analysis of planar-grating diffraction," *J. Opt. Soc. Am.* 71, 811-818 1981
- [3] Kogelnik, H., and Shank, C. V. " Coupled-wave theory of distributed-feedback lasers," *J. Appl. Phys.*, 1972, 43 pp. 2327-2335
- [4] K. O. Hill and G. Meltz, "Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 15, no. 8, pp. 1263-1276, 1997.
- [5] J. A. Kong "Electromagnetic-Wave Theory " McGraw-Hill. 1986

김민년(Min-Nyun Kim)

[종신회원]



- 1993년 2월 : 홍익대학교 전자공학과 (공학사)
- 1995년 2월 : 홍익대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)
- 1995년 대우전자 영상연구소
- 2003년 6월 : 홍익대학교 대학원 전자공학과(공학박사)
- 2002년 3월 : 백석대학교 정보통신학부 교수

<관심분야>
초고주파, 전파산란, 광파