

# Super-ROM/RENS 디스크 구조의 재생신호 해석을 위한 유한차분시간구역 (FDTD) 방법을 이용한 시뮬레이터 개발

안덕원<sup>†</sup>·유천열<sup>\*</sup>

## Developing a simulator for Super-RENS/ROM disk using finite difference time domain method

Duck-Won Ahn, Chun-Yeol You

**Key Words:** Super-resolution, Super-RENS, Super-ROM, FDTD

### ABSTRACT

We developed a numerical simulator in order to study the Super-RENS/ROM (Super REsolution Near-Field Structure, Read Only Memory) using 3-dimensional FDTD (finite difference time domain) method. The simulation can be performed by three steps. In the first step, we utilized the vector-diffraction theory to calculate the characteristics of incident laser beam from the object-lens to the surface of the disk. At the second step, we fed the calculated result as an input for the main FDTD simulations on the optical layers in the disk structure. After performed the FDTD simulations, we took near-to-far field transformation for the reflected signal, from the surface of the disk to the detector. Finally, we can get reflected signal at the photo-diode. Using this developed simulator, we were able to study about the reading signal from various disk structures as a function of a laser beam position. We calculated reading signals for various pit sizes for Super-ROM structure, and it is found that the simple optical diffraction theory can not explain the reading mechanism of Super-ROM, and more complicated temperature dependent physics must be involved.

### 1. 서론

기록밀도가 100 GB 이상이 되는 광정보 저장 시스템을 개발하기 위해서는 물리적인 한계인 회절한계(diffraction limit)를 극복해야 한다. 이러한 회절한계를 극복하기 위해서 많은 방법이 제안되고 있는데, 그 중 가장 각광을 받고 있는 방법이

소위 Super-RENS(Super REsolution Near-Field Structure) 라고 하는 방법이다[1][2][3]. 이 방법은 근접장(near field)을 이용하기 위한 광학적 구조를 헤드 부분이 아닌 디스크 자체에 구현함으로써 헤드와 디스크의 거리를 충분히 확보 할 수 있고, 디스크의 제작에 큰 어려움이 없으므로 많은 관심을 받고 있다. 그러나 광원으로 사용되는 빛의 파장보다 작은 영역에 정보를 기록하고, 판독하는 현상에 대한 물리적 이해가 부족한 현실이다. 광 디스크의 기록층 내에서 발생하는 물리적 현상을 제대로 이해하기 위해서는 맥스웰 방정식을 근사적으로 푸는 스칼라 회절(scalar diffraction)이론으로는 한계가 있고, 벡터 회절

---

<sup>†</sup> 인하대학교 자연과학대학 물리학과

E.mail: cyyou@inha.ac.kr

TEL: (032)872-7090

\* 인하대학교 자연과학대학 물리학과

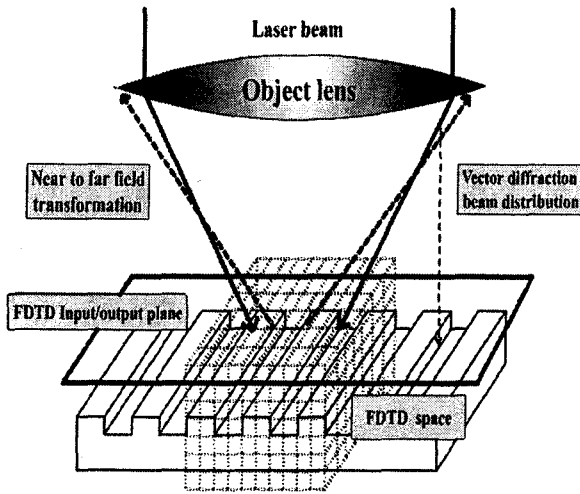


Fig. 1 Concept of FDTD simulator.

(vector diffraction)이론을 사용해서 맥스웰 방정식을 정확히 풀어야만 한다.

이러한 벡터 회절이론과 맥스웰 방정식을 정확히 풀기 위한 이론은 광통신(microwave communication), 레이더(radar), 포토닉 크리스탈(photonic crystal) 등의 영역에서 많은 연구가 진행되었고, 특히 Finite-Difference Time Domain (FDTD) 라고 하는 방법이 성공적으로 널리 사용되고 있다[4]. 따라서 본 연구에서는 FDTD 방법을 Super-RENS/ROM 구조에 적용하여 광디스크의 기록 층 내에서 일어나는 물리적인 현상을 이해하고 궁극적으로 Super-RENS/ROM 구조의 광디스크의 재생신호의 원리를 이해하기 위해서 Super-RENS/ROM 광디스크 구조에 적합한 FDTD 시뮬레이터를 개발하였으며, 제작된 전산모사 프로그램을 이용해서 디스크 구조의 변화 등의 조건 변화에 따른 재생신호의 반사율의 차이를 변화를 계산하였다.

## 2. FDTD 시뮬레이터의 특징

### 2.1 FDTD 시뮬레이터의 구조

제작된 FDTD 시뮬레이터의 특징은 Fig. 1과 Fig. 2에 나타내고 있다. Fig. 1은 초해상 전산모사 프로그램의 물리적 시스템을 나타내고 있으며, 먼저 전체 물리적 시스템을 두 부분으로 나누어서 object lens부터 디스크의 표면까지는 Mansuripur의 벡터 회절 방법으로 풀고[5] 그 결과를 FDTD 해석공간의 입력으로 사용한다. 이를

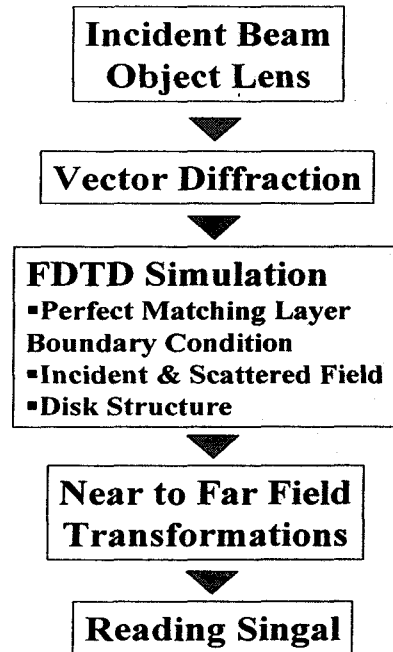


Fig. 2 Structure of FDTD simulator.

도식화하여 표현하면 Fig. 2와 같다. 대물렌즈를 통과한 입사 빔은 벡터 회절이론으로 광디스크 표면까지 도달하는 빛의 분포를 계산을 한 후 이 결과를 FDTD 전산모사를 위한 입력 값으로 상용한다. 이 입력된 전자기파를 이용해서 광디스크의 표면과 광디스크의 기판의 일부를 포함한 영역을 FDTD 계산 영역으로 설정하여 FDTD 계산을 수행한다. 결국 FDTD 계산에 의해서 반사된 전자기파를 다시 광디스크의 표면에서 얻게 되는데, 이 결과를 다시 근접장에서 원격장으로 변환하는 과정을 거치면 렌즈로 반사된 빛의 분포도를 얻게 된다. 이 얻어진 전자기파를 렌즈 표면에서 적분을 취하면 실제 광검출기에서 검출되는 신호를 얻을 수 있게 된다. 이 결과 광디스크에서의 기록마크와 빔의 위치에 따른 반사율의 변화를 계산할 수 있고, 이는 곧 광디스크의 재생신호와 관련된다는 사실을 알 수 있다.

### 2.2 벡터 회절 (Vector diffraction) 이론

일반적으로 근접장(near-field)영역에서는 스칼라 회절이론이 적합하지 못한 것으로 알려져 있다. 이런 경우는 벡터 회절이론을 도입해야 하는 것으로 알려져 있는데, 본 연구에서는 광디스크 분야에서 많이 사용되고 있는 M. Mansuripur의 벡터 회절이론을 이용하여 대물렌즈에서 광디스크

표면에 도달하는 전자기파의 분포를 계산하기 위해서 다음과 같은 관계식을 이용하였다[6].

$$\begin{bmatrix} A_x(x,y,z) \\ A_y(x,y,z) \\ A_z(x,y,z) \end{bmatrix} = \iint \frac{1}{\sqrt{\sigma_z}} \begin{bmatrix} 1 - \frac{\sigma_x^2}{1+\sigma_z} - \frac{\sigma_x\sigma_y}{1+\sigma_z} \\ -\frac{\sigma_x\sigma_y}{1+\sigma_z} & 1 - \frac{\sigma_x^2}{1+\sigma_z} \\ -\sigma_x & -\sigma_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F(A_x(x,y,z=0)) \\ F(A_y(x,y,z=0)) \end{bmatrix} \exp[2\pi i(x\sigma_x + y\sigma_y + z\sigma_z)] d\sigma_x d\sigma_y$$

여기서  $A_i$ 는 전기장이나 자기장의 성분이고  $F$ 는 푸리에 변환(Fourier transform)을 의미한다. 또 여기서  $\sigma_i$ 는 방향 코사인을 나타낸다. 위 식의 의미는  $z=0$ 인 평면에서의 전기장이나 자기장을 알면, 그 푸리에 변환을 이용해서 거리  $z$ 만큼 떨어진 곳의 전기장과 자기장의 분포를 계산할 수 있다는 의미를 나타내고, 적분 가운데 있는 행렬은 렌즈(lens)의 존재에 의해서 굴절되는 효과를 고려하기 위한 것이다.

### 2.3 유한차분시간구역 (Finite-Difference Time-Domain) 방법

전자파의 문제를 풀기 위해 맥스웰 두 curl 방정식은 전파하는 매질이 균일성, 등방성, 균질성을 가지며 손실이 없다는 가정 하에 아래와 같은 수식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} &= -\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{E} \\ \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} &= \frac{1}{\epsilon} \nabla \times \vec{H} \end{aligned} \quad (1)$$

이 방정식들은 전자파의 기본식이며 공간중의 한 지점의  $\vec{E}$ 와  $\vec{H}$ 와 관련된다. 위의 벡터 수식을 직각좌표계로 전개하면 6개의 스칼라 수식으로 분리되고 이를 중심차분 근사를 이용하여 미분식을 이산화하고 Yee에 의해 제안된 Fig.3의 표기법에 의해서  $E_x$  성분과  $H_x$  성분을 나타내면 다음과 같다.

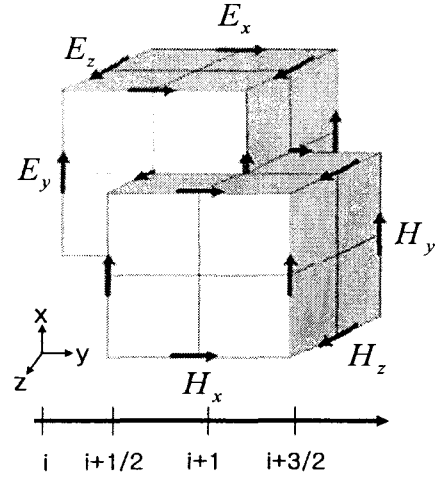


Fig. 3 Three dimensional Yee cell.

$$E_x^{n+1}(i,j,k) = E_x^n(i,j,k) + \frac{\Delta t}{\epsilon} \cdot \left[ \frac{H_z^{n+1/2}(i,j+1,k) - H_z^{n+1/2}(i,j,k)}{\Delta y} - \frac{H_y^{n+1/2}(i,j,k+1) - H_y^{n+1/2}(i,j,k)}{\Delta z} \right]$$

$$H_x^{n+1/2}(i,j,k) = H_x^{n-1/2}(i,j,k) + \frac{\Delta t}{\mu} \cdot \left[ \frac{E_z^n(i,j,k) - E_z^n(i,j-1,k)}{\Delta y} - \frac{E_y^n(i,j,k) - E_y^n(i,j,k-1)}{\Delta z} \right] \quad (2)$$

$E_y$  성분과  $E_z$  성분들도 식(2)와 같은 형태로 구해지며, 이때  $i, j, k$ 는  $E$ 와  $H$ 의 절점의 위치로 정의되며, 절점들 사이의 거리는  $x, y, z$  방향의 공간이산화 간격  $\Delta x = \Delta y = \Delta z$ 로 주어지며, 시간이산화간격은  $\Delta t$ 로 주어진다. 이 방정식들에서 유전율과 투자율은 각 필드성분들의 위치에 따라 적절한 값을 가지게 되며,  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 와  $\Delta t$ 는 안정조건(stability condition)에 맞게 선택되어야 한다[7].

### 2.4 근접장-원격장 변환 (Near to Far Transformation)

FDTD 시뮬레이션의 경우, 유한한 구간에 대한 시뮬레이션을 수행하는 것은 효율적이지만, 실제로 관측하는 위치가 시뮬레이션 구간에서 멀리 떨어져 있는 경우, 모든 영역을 다 FDTD로 계산하는 것은 사실상 불가능하다. 이 연구에 있어서도, 디스크의 표면에서 벌어지는 광학적 현상을

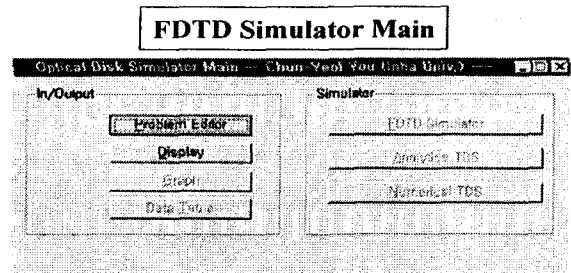
재현하기 위해서는 FDTD를 사용해야 하지만, 디스크 표면에서 반사된 빛이 대물렌즈에 도달하는 과정은 소위 근접장-원격장 변환(near field to far field transformation) 이란 방법을 쓰는 것이 효율적이다. 따라서, 디스크 표면에서의 전기장과 자기장의 분포를 이용해서 원격장(far field)로 적절한 변환을 취하면, 원하는 위치에서의 전기장과 자기장을 얻을 수 있고, 이를 이용해서 관심있는 물리량인 전자기파의 에너지 밀도, 즉 빛의 세기를 구할 수 있다.

### 3. FDTD 시뮬레이터의 결과

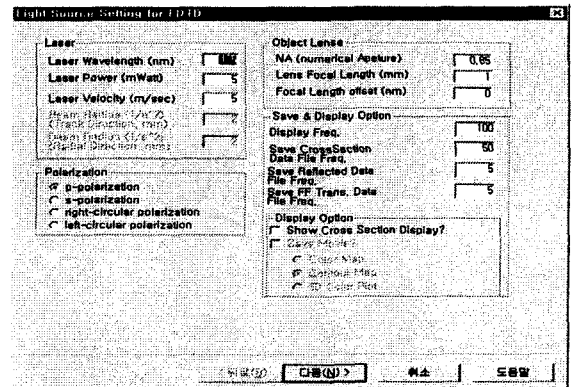
#### 3.1 FDTD 시뮬레이터의 개요

제작된 시뮬레이터는 Fig. 4 (a)에서 보는 바와 같이 상용화된 응용프로그램과 마찬가지로의 형태를 지니고 있어서 사용자에게 친숙한 GUI(Graphic User Interface)를 제공하고 있다. 그리고 Fig. 4 (b)는 레이저 빔에 관한 여러 가지 파라미터들의 설정과 Display and save 설정 메뉴로 구성되어 있다. 각 메뉴에 대한 의미는 다음과 같다. 레이저 빔의 설정메뉴에서 통하여 레이저 빔의 물리적인 파라미터들인 레이저 빔의 파장, 빔의 파워와 빔의 이동속도를 설정 할 수 있고, 실제로는 디스크가 움직이는 것이지만 상대적으로 레이저 빔이 디스크에 대해서 움직인다고 해도 문제가 없으므로 레이저의 파라미터를 설정하는 창에서 속도(디스크의 선속도 혹은 레이저 빔의 속도)를 설정하도록 하였다. 또한, 입사 레이저 빔의 편광상태 설정과 대물렌즈의 NA(Number Aperture), Lens Focal Length(nm) 와 Focal Length offset(nm)를 설정 할 수 있게 되어 있다. 그리고 Display and save 메뉴에서 Display 옵션은 광디스크의 단면(cross section)에 관한 데이터를 저장하고 표시하는 선택에 관련된 설정을 할 수 있도록 제작되어 있다. 또한, Save Movie 옵션은 계산된 결과를 Color Map, Contour Map 와 3D Color Plot로 선택하여 정보를 동영상 파일(avi)로 저장하여서 시간에 따른 온도 변화를 손쉽게 관찰, 이해 할 수 있게 제작되었다.

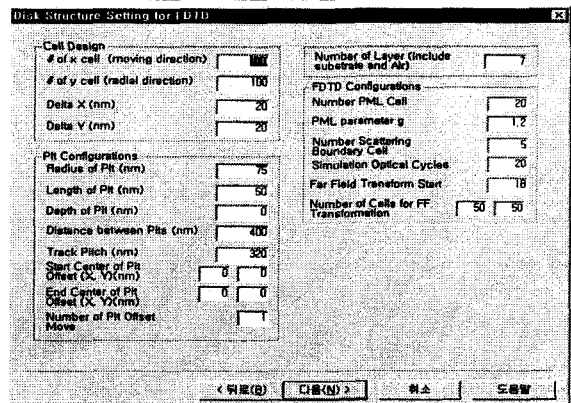
Fig. 4 (c)는 FDTD에 관한 광디스크 구조에 관한 여러 가지 파라미터들을 설정 할 수 있다. 먼저, Cell Design 메뉴에서는 x방향(Track Direction)과 y방향(Radial Direction)의 단위 cell의



#### Light Source Setting



#### Disk Structure Setting



#### Layer Properties Setting

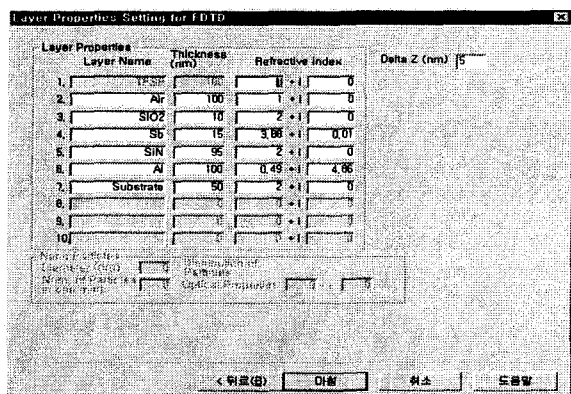
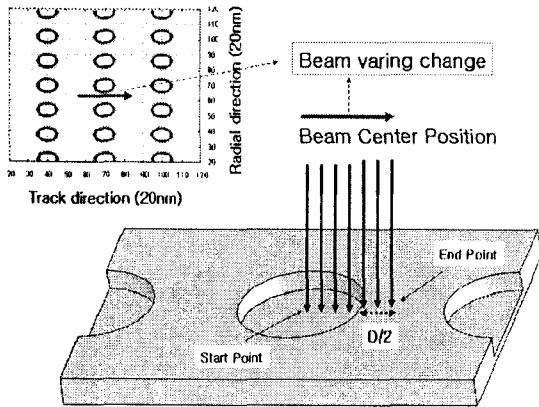


Fig. 4 FDTD simulator windows.



**Fig. 5** A schematic diagram of pit structure with varied laser beam position.

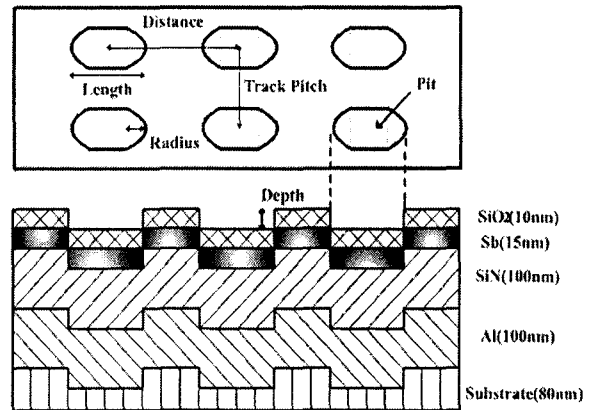
크기와 전체 계산 영역의 크기를 설정할 수 있다. 위 그림에 나타난 수치들은 본 계산과정에서 전형적으로 사용한 파라미터들을 보여주고 있는데, x, y 방향의 unit cell의 크기를 20 nm로 하고 전체 cell의 크기를 약  $20 \times 100 \text{ nm} = 2 \mu\text{m}$ 로 잡은 경우이다. Pit Configurations 메뉴는 ROM 디스크의 Pit 구조, 크기, 깊이, 간격, 길이 등을 설정할 수 있게 제작 되어있다. 또한, Number of Pit Offset Move는 빔의 이동시 측정 시작점과 끝점의 측정회수를 표시한다. 이때, Fig. 5는 측정회수를 6회로 지정 했을 때의 그림을 나타내며, Beam Center Position의 Start Point는 그림에서 보는 바와 같이 레이저 빔이 이동시 Pit Position의 시작점을 의미하고 Beam Center Position의 End Point는 Pit Position의 끝점을 의미한다. Number of Layer(include substrate and Air)는 기판과 공기층을 포함한 Optical disk의 층 개수를 표시하였다.

Fig. 4 (d)는 각 층의 물질의 이름, 두께 와

**Table 1** Refractive indices and thickness of each layer in Super-ROM disk structure.

Material	Refractive index	Thickness (nm)
SiO <sub>2</sub>	1	10
Sb	3.88 +0.01i	15
SiN	2	100
Al	0.49 +4.86i	100
Substrate	2	80

복소 굴절률 등을 층별로 입력할 수 있게 되어



**Fig. 6** Disk structure of Super-ROM.

있다. 이때 층의 구조는 기판/Refraction layer/1st Dielectric Layer/Mask layer/2nd Dielectric Layer/Air의 구조를 가지고 있다. 그리고 두께 방향의 따라 unit cell z의 크기를 설정할 수 있게 되어 제작되었다.

### 3.2 FDTD 시뮬레이터 계산결과

계산에 사용된 광원의 파장은 405 nm 와 대물 렌즈의 NA (Numerical Aperture)를 사용하였으며, ROM 디스크의 구조는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 Kikukawa에 의해 제안된 SiO<sub>2</sub>(10 nm)/Sb(15 nm)/SiN(100 nm)/Al(100 nm)/Substrate(80 nm)구조 이고 Kikukawa의 경우에는 SiN의 두께를 170 nm로 설정하였는데, 그 이유는 광원의 파장이 680 nm를 사용 시  $\lambda/2$ 의 조건을 만족시키는 두께이기 때문이며, 본 계산에서는 파장을 405 nm를 사용하였기 때문에 SiN의 두께를  $\lambda/2$ 의 조건을 만족시키는 100 nm로 설정하였다. 또한, 각 층의 물리상수 값들은 Table 1에 제시되어있다.

다음 Fig. 7은 위와 같은 조건에서 50 nm의 피트 깊이를 가지며, 피트의 크기를 210 nm 일 경우와 190 nm, 160 nm, 130 nm, 100 nm, 70 nm 일 경우에 대한 빔 중심의 위치변화에 따른 반사율의 변화를 나타내고 있다. 각 피트의 크기는 30 nm간격으로 변화를 주었으며, 각 피트 크기의 빔 중심의 위치에 따른 반사율을 한 그림에 표시하여 나타내었다. 여기서 주목해야 할 점은 회절한계 이상의 피트 크기 210 nm와 190 nm, 160 nm, 130 nm일 경우에는 빔 중심의 위치에

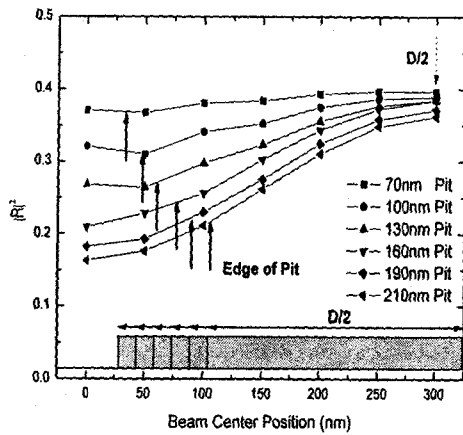


Fig. 7 The variation of reflection about pit size.

따라 큰 반사율의 변화를 나타내는 반면에 회절 한계 이하 100 nm와 70 nm 에서의 중심의 위치에 따른 반사율의 차이가 거의 나타나지 않는 것을 확인 할 수 있었다. 결국, Fig. 6을 통해서 알 수 있는 사실은 회절한계 이하의 피트를 가지는 Super-ROM의 재생신호 해석의 원리는 단순히 피트의 존재의 의한 기하학적 구조에 의한 것이 아닌 것임을 확인 하였다. 추가적으로 이 그림의 검은색 화살표는 각각의 피트 구조의 끝부분을 의미하고, 점선 화살표는 각각의 피트의 크기에 따른 이웃한 두 피트 사이의 중심 부분을 의미하며,  $D/2$ 로 표시하였다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 초해상 광디스크에서 발생하는 난해한 물리적 현상을 이해하기 위하여 Super-ROM/RENS 디스크 구조에 적합한 FDTD 시뮬레이터를 자체 개발하였으며, 제작된 시뮬레이터를 이용해서 디스크 구조의 변화 등의 조건 변화에 따른 재생신호의 반사율의 차이를 변화를 계산하였다. 또한, 제작된 FDTD 시뮬레이터는 초해상 광디스크의 재생신호의 발생원리를 규명하고, 이를 이용 재생신호 품질을 개선하며, 더 나아가서 새로운 방식의 재생원리를 제안할 수 있다.

#### 참고문헌

- [1] J. Tominaga, T.Nakano, and N. Atoda, 1998, "An approach for recording and readout beyond the diffraction limit with an Sb thin film", Appl. Phys. Lett. , Vol. 73, NO. 15, (pp. 2078-2080).
- [2] H. Fuji, J. Tominaga, L. Men, T. Nakano, H. Katayama, N. Atoda, 1999, "A near-field recording technology using a metallic probe in an optical disk", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 39, No. 2B, (pp.980-981).
- [3] T.kikukawa, T. Nakano, T.Shima, and J. Tominaga, 2002, "Rigid bubble pit formation and huge signal enhancement in super-resolution near-field structure disk with platinum-oxide layer", Appl. Phys. Lett. , Vol 81, No 25, (pp. 4697-4699).
- [4] D. Sullivan, 2000, "Electromagnetic simulation using the FDTD method", IEEE press, USA.
- [5] M. Mansuripur, G. A. N. Connell, J. W. Goodman, 1986, "Laser-induced local heating of multilayer", Appl. Phys. Lett. , Vol. 21 (pp.4328-4331).
- [6] Mansuripur, 1995, "The physical principles of magneto-optical recording", Cambridge University Press, United Kingdom.
- [7] A. Taflove and S. C. Hanes, 2000, "Computational electrodynamics: the Finite Difference Time Domain", Artech House, Boston.