

工學碩士 學位論文

고밀도 HDD용 Write Head 최적화  
설계에 관한 연구

A Study on the Optimum Design of a High Density Write  
Head in Hard Disk Drives

指導教授 朴 寬 秀

2003 年 2 月

韓國海洋大學校 大學院

電 氣 工 學 科

元 革

本 論文을 元革의 工學碩士 學位論文으로 認准함

委員長：工學博士 全 泰 寅 ㉠

委 員：工學博士 金 潤 植 ㉠

委 員：工學博士 朴 寬 秀 ㉠

2003年 2月

韓國海洋大學校 大學院

電氣工學科 元 革

# 목 차

## Abstract

제 1 장 서 론 .....	1
1.1. 연구 배경 및 목적 .....	1
1.2. 연구의 개요 .....	3
제 2 장 Write Head의 3차원 유한요소해석 방법 .....	5
2.1. 3차원 유한요소해석의 필요성 .....	5
2.2. 3차원 정자계 유한요소이론 .....	5
2.2.1. 지배 방정식 .....	7
2.2.2. 정식화 ( fomulation ) .....	9
2.2.3. 이산화 ( discretization ) .....	11
2.3. Field Gradient 해석 방법 .....	17
2.3.1. 해석영역 .....	18
2.3.2. Magnetic Potential for 3D analysis .....	19
2.3.3. Gap Field of the Recording Head .....	25
제 3 장 Write Head의 구성 재료의 특성 .....	30
3.1. Write Head의 다층구조에 따른 기록자계의 영향 분석 .....	32
3.2. 기록헤드의 투자율 및 포화자속밀도 영향 .....	36
제 4 장 Write Head의 Shape Design에 따른 기록자계의 영향분석 ..	38
4.1. Back Throat의 길이 변화에 따른 Write Field의 변화 .....	38
4.2. Pole Tip의 길이 변화에 따른 Write Field의 변화 .....	40
4.3. Back Throat의 너비의 변화에 따른 Write Field의 변화 ..	42

4.4. 첫 번째 모델에 대한 Write Field 의 결과 및 개선방안 ...	44
4.5. Head Shape Design에 따른 기록 Field의 변화 .....	48
4.6. 고 기록용 Write Head의 최적설계 .....	51
<b>제 5 장 Head Field Delay에 관한 연구 .....</b>	<b>63</b>
5.1. Inductance에 의한 Field Delay .....	64
5.2. Eddy Current에 의한 Field Delay .....	70
5.3. 초 고기록 밀도를 위한 기록헤드 설계 .....	76
<b>제 6 장 결 론 .....</b>	<b>77</b>
<b>참 고 문 헌 .....</b>	<b>79</b>

A Study on the Optimum Design of a High  
Density Write Head in Hard Disk Drives

*by Won, Hyuk*

Department of Electrical Engineering  
The Graduate School of Korea Maritime University  
Busan, Republic of Korea

## Abstract

Hard Disk Drive(HDD) is widely used as a storage system in PC and other information devices. Although another storage devices such as optical devices(ex CD R/W, MODD etc.) and flash memory are developed, recording density and access time of such devices are yet under developing. The main advantages of the HDD is rapidly growing density and fast access of the data.

At this time, the growing of the recording density of HDD depends on the write head. To achieve high recording densities, the size of recording head should be small so that the magnetic field of the recording head is focused at the small region; In this thesis, magnetic fields of the recording heads are analyzed by three dimensional nonlinear finite element method. Optimum design scheme for highly focused recording head has been developed and head for  $100\text{Gb/in}^2$  has been designed.

In addition, the method to achieve high data rate has been presented using eddy current analysis with flux damping.

## 기호설명

$\phi$	:	퍼텐셜함수
$\mu_o$	:	진공중의 투자율
$\mu_r$	:	비투자율
NE	:	요소의 갯수
$M_n$	:	자화의 법선성분
J	:	전류밀도
B	:	자속밀도
A	:	벡터자기포텐셜
$\tau$	:	시정수
R	:	저항
L	:	인덕턴스
$\sigma$	:	도전율
H	:	자계의 세기
J	:	전류밀도
F	:	주파수

# 제 1 장 서 론

## 1.1. 연구 배경 및 목적

정보의 표현이 종이에서 디지털(Digital)로 변환되어 기록·전파되어짐에 따라서 개인이 접촉하고 필요하게 되는 정보의 양은 급격히 늘어나게 되었다. 이러한 정보들은 통신망(Network)의 보급으로 인하여 더욱 쉽고 빠르고 원하고자 하는 정보를 얻을 수 있게 되었다. 통신망들은 시간이 지남에 따라 고 대역폭으로 변화가 되었고 이로 인해서 개인이 얻을 수 있는 정보는 더욱 광대해 졌다. 이로 인하여 개인이 보관해야 할 정보의 양도 일반적인 텍스트에서 사진 그리고 동영상에 이르기까지 다양해 지고 광대해 졌다. 따라서 이를 위한 개인용 정보저장기기가 요구되어졌고 이를 만족하는 많은 저장 장치들이 개발되어 왔다. 이와 같은 정보기기들 중에서 가장 보편적이고 성능이 뛰어난 장치로 많은 비중을 차지하고 있는 것이 바로 하드 디스크 드라이브(Hard Disk Drive)이다.

하드 디스크 드라이브는 지금까지 개인용 기록장치의 영역분야에서 개인 PC용으로만 많은 사용이 있었으나 현시점에서 다양한 정보장치(PDA, PVR, MP3 Player 등)에 대용량화를 위하여 사용되어짐으로 그 시장은 더욱 넓어지고 있다. 따라서 고 기록 밀도의 하드 디스크 드라이브를 위한 연구는 현 정보화 시대에 핵심이 되는 연구이다.

하드 디스크 드라이브는 1960년에 영국에 위치한 IBM 원체스터 연구소에서 처음 개발 되었다. 하드 디스크 드라이브는 시간이 지남에 따라 점차 소형화, 고 기록 밀도화, 고속화 되어 졌고 이로 인하여 가장 보편적인 개인용 정보기록 장치로 자리 잡을 수 있었다. 하드 디스크 드라이

브의 고 기록 밀도화가 진행됨에 따라서 자기 기록적 한계점들이 나타나기 시작하였다. 하지만 이러한 한계점들은 많은 연구자들에 의해서 해결이 되었고 그 좋은 한 예가 Giant Magnet Resistive(GMR) 효과를 이용한 GMR HEAD이다. 1997년 GMR HEAD의 사용으로 인하여 하드 디스크 드라이브의 기록밀도의 증가는 매년 두 배씩 증가하게 되었다. 또한 Tunnel Magnet Resistive(TMR) HEAD의 개발로 인해서 하드 디스크 드라이브의 읽기적 한계는 극복되었다. 그로 인하여 하드 디스크 드라이브의 HEAD에 있어서 고 기록 밀도화를 방해하고 있는 것은 write head이다. [1]

고 기록 밀도용 write head의 조건은 첫째로 고 보자력 매디아를 충분히 over-write 시킬 수 있는 크기의 쓰기 필드(write field)를 발생시켜야 한다. 충분한 write field를 발생시켜야만 고 보자력 매디아를 자화시켜 기록이 가능할 수 있다. 둘째로 높은 면 기록 밀도(areal densities)를 위해서는 발생 필드가 한점에 포커싱(focusing) 되어야만 하고 그 자계 경도(field gradient)가 커야만 한다. 발생 필드가 한점에 포커싱 되어 기록할 수 있는 한 비트의 크기가 작아져야만 높은 면 기록 밀도를 가질 수 있게 된다. 셋째로 빠른 데이터 레이트(high data rate)를 가져야 한다. 하드디스크는 고용량화만이 아닌 고속력화 되어야만 하기 때문에 빠른 속도로 비트들을 기록 매디아에 기록할 수 있어야만 한다. [2]

본 논문에서는 고 기록 밀도용 하드 디스크 드라이브를 위한 write head를 디자인하기 위한 방법을 제시하였다. 첫째로 고 기록 밀도용 하드 디스크 드라이브를 위한 write head를 구성할 재료에 관한 특성을 연구 분석 제시하였고, 둘째로 write head에서 발생한 필드의 자계 경도를 정확히 해석할 수 있는 방법을 제시하였다. 셋째로 write head를 구성하는 재료들의 구성 형태에 따른 최적화 연구 방법과 연구 결과를

제시하였으며, 넷째로 write head의 형상(shape design)에 따른 최적화 디자인 기법과 최적화 디자인을 연구 제시하였고, 마지막으로 인덕턴스(inductance)와 와전류(eddy current)에 의한 필드 지연(field delay)와 시간 지연(time delay)에 대한 영향과 해결 방법을 제시하였다.

## 1.2. 연구의 개요

고 기록 밀도 하드 디스크 드라이브용 write head에 대한 연구하기 위해서 본 연구에서는 3차원 유한요소법(3D finite element method)를 사용하였다. 3차원 유한요소법을 이용하여 write head에 대한 연구를 진행하기 위해서는 write field에 대한 분석이 정확히 이루어져야 한다. 하지만 현존하는 유한요소패키지들에는 그 해석적 한계 때문에 정확한 분석을 할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 제2장에서 write head의 field 요소를 해석하는데 중요한 자계 경도를 해석함에 있어서 일반적 유한요소패키지의 한계를 극복하여 정확한 분석을 할 수 있는 방법에 대하여 기술하였다. [3]-[7]

고 기록 밀도 하드 디스크 드라이브용 write head를 위해서는 설계 뿐만이 아닌 그 write head를 구성하는 구성 매체(material)의 특성이 중요하다. 따라서 그 재료의 특성과 그 재료들을 이용하여 head를 구성하는 방법에 대한 연구가 필요하게 된다. 이러한 연구에 대한 내용은 제3장에서 다루고 있다. [8]-[10]

또한 write head를 설계함에 있어서 가장 중요한 것이 바로 write head의 디자인(shape design)이다. 같은 재료와 같은 구성을 사용하였다

고 하여도 디자인에 따라서 그 특성의 차이가 확연해 진다. 이러한 디자인을 이용한 최적화 방법에 대한 내용이 제4장에서 다루고 있다. 이장에서는 수직과 수평 방식의 기록에 따른 write head 디자인에 대한 연구 내용도 포함하고 있다.<sup>[11]-[22]</sup>

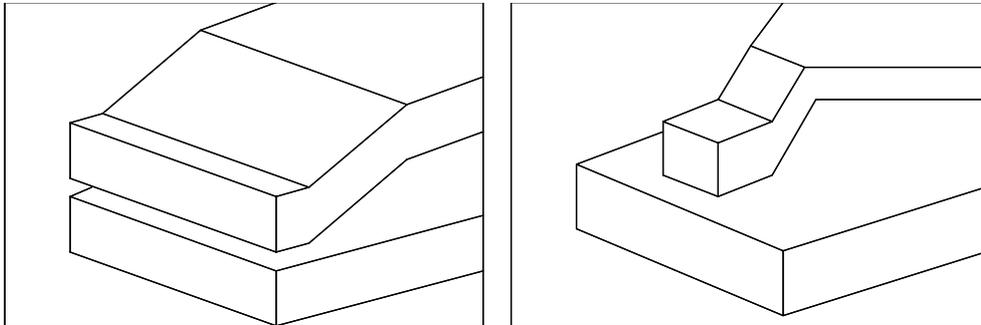
하드 디스크 드라이브는 고밀도화와 함께 고속화를 요구한다. 따라서 고속화에 대한 연구가 필요하게 된다. 고속화를 방해하는 요인인 인덕턴스와 와전류에 따른 영향을 분석하고 이에 대한 내용은 제5장에서 기술하였다.<sup>[23]-[27]</sup>

## 제 2 장 Write Head의 3차원 유한요소해석 방법

### 2.1. 3차원 유한요소해석의 필요성

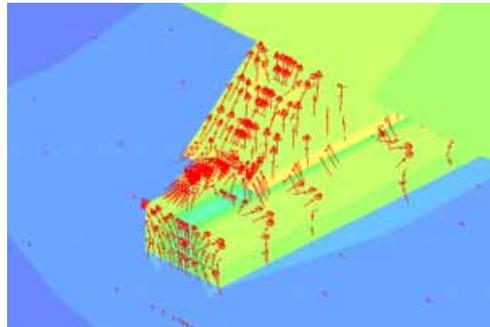
하드 디스크 드라이브의 write head의 디자인에 따른 write field 특성을 해석함에 있어서 하드 디스크 드라이브가 고밀도화 되기 이전까지는 2차원 해석으로도 그 결과를 해석하는데 충분한 값을 보여 왔다. 하지만 하드 디스크 드라이브가 고밀도화 되어 감에 따라 write head의 디자인적 요소 중 aspect ratio가 극히 작아짐에 따라서 2차원 유한요소해석의 결과가 더더욱 부정확하게 나타나게 되어 실제 상황에 적용하기에는 부정확하게 되었다. 이렇게 2차원 유한요소해석의 결과가 부정확하게 나타나는 이유는 2차원 유한요소해석법에서는 깊이라는 개념이 동일하게 나타나기 때문이다. 따라서 실제의 모델은 그림 2.1의 (b)와 각각의 깊이가 다르게 계산되어야만 하는데 2차원 유한요소해석법은 그 계산의 한계 상 그림 2.1의 (a)와 같은 계산을 할 수 밖에 없기 때문이다. 따라서 실제 모델에서는 그림 2.1의 (c)와 같이 top pole과 bottom pole에서의 발생 field의 밀집도가 다르게 나타나야 하는데 2차원 해석법은 그런 표현을 할 수 없기 때문에 디자인에 따른 정확한 해석을 할 수가 없다. 이러한 이유 때문에 고밀도 하드 디스크 드라이브용 write head에 대한 유한요소해석에서는 3차원 유한요소해석이 절대적으로 요구되어진다. 그런 이유로 본 논문에서는 write head의 디자인에 대한 field 특성을 해석함에 있어서 3차원 유한요소해석법을 이용하였다.

### 2.2. 3차원 정자계 유한요소이론



(a) 2차원 해석

(b) 3차원 해석



(c) 필드의 발생 경로

그림 2.1 2차원 유한요소법의 한계와 3차원 유한요소법의 필요성

유한 요소법은 1950년대에 개발된 이후에 많은 공학적인 분야에서 사용되어 오던 중 1970년에 이르러 캐나다의 Macgill 대학의 Silvester에 의해 전기기기의 자기적 특성 해석에 적용하면서부터 전기기기에 유한 요소법이 적용되어졌다. 전기 유한요소법은 정자계에서 성립하는 Maxwell 방정식으로부터 지배방정식을 유도한 후 유한요소 이론으로부터 요소 방정식을 유도하고 이 요소 방정식을 전체의 해석영역에 적용하여 시스템 행렬식을 만들고 이 행렬식으로부터 자기 벡터 포텐셜과 자계의 세기를 구하는 과정으로 진행된다.

### 2.2.1. 지배 방정식

변위 전류를 무시한 전자장 Maxwell 방정식과 보조 방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_\theta + \vec{J}_0 \quad (2.2.1)$$

$$\nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.2.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.2.3)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.2.4)$$

$$\vec{B} = \sigma \vec{E} \quad (2.2.5)$$

여기서 각 기호의 의미는 다음과 같다.

$\vec{H}$ : 자기장의세기 [ $A/m$ ]

$\vec{B}$ : 자속밀도 [ $Wb/m^2$ ]

$\vec{E}$ : 전기장의세기 [ $V/m$ ]

$\vec{J}_0$ : 여자전류밀도 [ $A/m^2$ ]

$\vec{J}_\theta$ : 와전류밀도 [ $A/m^2$ ]

$\sigma$ : 도전율 [ $V/m$ ]

$\mu$ : 자기투자율 [ $H/m$ ]

식 (2.2.3)으로부터 자기 벡터 포텐셜(magnetic vector potential)  $\vec{A}$ 는 식 (2.2.66)의 관계로 정의되고

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (2.2.6)$$

식 (2.2.2)와 식 (2.2.6)으로부터 다음 식이 성립한다.

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \nabla \phi \quad (2.2.7)$$

여기서  $\phi$  : 전위 (electric scalar potential)

식 (2.2.4), (2.2.5), (2.2.6), (2.2.7)을 조합하여 식 (2.2.1)에 대입하면 다음과 같은 편미분 방정식이 유도된다.

$$\nabla \times (\nu \nabla \times \vec{A}) = -\sigma \left( \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \nabla \phi \right) + \vec{J}_o \quad (2.2.8)$$

여기서  $\nu$ 는 자기 저항율이며  $\frac{1}{\mu}$ 로 주어진다.

지배 방정식 (2.2.8)은 벡터 식이 3개인데 반해 미지수는 4개 ( $A_x, A_y, A_z, \phi$ )이므로 한 개의 수식이 더 필요하게 된다. 필요한 또 하나의 지배 방정식은 전하의 축적을 무시한 전류 연속 방정식 (current continuity equation)에 식 (2.2.7)을 대입하여 얻을 수 있다.

$$\nabla \cdot \left( \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \sigma \nabla \phi \right) = 0 \quad (2.2.9)$$

단,  $\nabla \cdot \vec{J}_o = 0$  이다.

### 2.2.2. 정식화 ( fomulation )

앞 절에서 도출한 지배 방정식 (2.2.8), (2.2.9)에 대하여는 형상 함수 (shape function)를 가중 함수 (weighting function)하여 Galerkin법으로 정식화 (formulation) 하였다. 그리고 지배 방정식에서의 시간 미분 항에 대하여는 정상 상태 해석을 하였다.

지배 방정식 (2.2.8)에 대한 잔차 (residual)  $\vec{R}$ 는 다음과 같다

$$\begin{aligned} \vec{R} = & \int \int \int N_i \nabla \times (\nu \nabla \times \vec{A}) dV + j\omega\sigma \int \int \int N_i \vec{A} dV \\ & + \sigma \int \int \int N_i \nabla \phi dV - \int \int \int N_i \vec{J}_o dV \end{aligned}$$

여기서

$$\begin{aligned} \phi(\nabla \times \vec{F}) &= \nabla \times (\phi \vec{F}) - \nabla \phi \times \vec{F} \\ &= \int \int \int \nabla \times (N_i \nu \nabla \times \vec{A}) dV + \int \int \int \nabla N_i \times (\nu \nabla \times \vec{A}) dV + \\ & \quad j\omega\sigma \int \int \int N_i \vec{A} dv + \sigma \int \int \int N_i \nabla \phi dV - \int \int \int N_i \vec{J}_o dV \end{aligned}$$

따라서

$$\begin{aligned}
\int \int \int \nabla \times \overline{F} dV &= \int \int \overline{n} \times F dS : Gauss정리 \\
&= \int \int \overline{n} \times (N_i \nu \nabla \times \overline{A}) dS \\
&\quad - \int \int \int \nabla N_i \times (\nu \nabla \times \overline{A}) dV \\
&\quad - j\omega\sigma \int \int \int N_i \overline{A} dV + \sigma \int \int \int N_i \nabla \phi dV \\
&\quad - \int \int \int N_i \overline{J}_o dV \tag{2.2.10}
\end{aligned}$$

$N_i$  : 형상 함수 (shape function)

$\overline{n}$  : 평면 S의 법선 벡터

$i = 1, \dots, n$

잔차  $\overline{R}$ 의 첫 번째 항은 경계 적분항으로서 직접 적분한다는 것은 매우 복잡하므로 이를 고려 하지 않아도 되는 경계를 잡게 되면 잔차 (residual)는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
&\int \int \overline{n} \times (N_i \nu \nabla \times \overline{A}) dS = 0 \\
\overline{R} &= - \int \int \int \nabla N_i \times (\nu \nabla \times \overline{A}) dV \\
&\quad + j\omega\sigma \int \int \int N_i \overline{A} dV + \sigma \int \int \int N_i \nabla \phi dV \\
&\quad - \int \int \int N_i \overline{J}_o dV \tag{2.2.11}
\end{aligned}$$

지배 방정식 (2.2.9)에 대한 잔차 (residual)  $R_\phi$ 는

$$\begin{aligned}
R_\phi &= \iiint N_i \nabla \cdot (j \omega \sigma \vec{A} + \sigma \nabla \phi) dV \\
&= \iiint \nabla \cdot N_i (j \omega \sigma \vec{A} + \sigma \nabla \phi) dV \\
&\quad - \iiint \nabla N_i \cdot (j \omega \sigma \vec{A} + \sigma \nabla \phi) dV \\
&= \iint N_i (j \omega \sigma \vec{A} + \sigma \nabla \phi) \cdot \vec{n} dS \\
&\quad - \iiint \nabla N_i \cdot (j \omega \sigma \vec{A} + \sigma \nabla \phi) dV \tag{2.2.12}
\end{aligned}$$

잔차  $R_\phi$ 에서도 경계 적분항이 나타나는데 경계 적분을 고려하지 않아도 되는 경계를 잡게 되면 잔차 (residual) 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
&\iint N_i (j \omega \sigma \vec{A} + \sigma \nabla \phi) \cdot \vec{n} dS = 0 \\
R_\phi &= - \iiint \nabla \cdot (j \omega \sigma \vec{A} + \sigma \nabla \phi) dV \tag{2.2.13}
\end{aligned}$$

### 2.2.3. 이산화 ( discretization )

(2.2.2)에서 정식화하여 유도한 식 (2.2.11), (2.2.13)을 이산화하기 위해 성분별로 나누면 다음과 같다.

x 성분

$$\begin{aligned}
R_x &= \iiint \left( \frac{\partial N_i}{\partial y} \nu_z \frac{\partial A_x}{\partial y} - \frac{\partial N_i}{\partial y} \nu_z \frac{\partial A_y}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \nu_y \frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial N_i}{\partial z} \nu_y \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) dV \\
&\quad + j \omega \sigma \iiint N_i A_x dV + \sigma \iiint N_i \frac{\partial \phi}{\partial x} dV - J_x \iiint N_i dV
\end{aligned}$$

y 성분

$$R_x = \iiint \left( \frac{\partial N_i}{\partial x} \nu_z \frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial N_i}{\partial x} \nu_z \frac{\partial A_x}{\partial y} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \nu_x \frac{\partial A_y}{\partial z} - \frac{\partial N_i}{\partial z} \nu_x \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) dV \\ + j \omega \sigma \iiint N_i A_y dV + \sigma \iiint N_i \frac{\partial \phi}{\partial y} dV - J_y \iiint N_i dV$$

z 성분

$$R_x = \iiint \left( \frac{\partial N_i}{\partial x} \nu_y \frac{\partial A_z}{\partial x} - \frac{\partial N_i}{\partial x} \nu_y \frac{\partial A_x}{\partial z} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \nu_x \frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial N_i}{\partial y} \nu_x \frac{\partial A_y}{\partial z} \right) dV \\ + j \omega \sigma \iiint N_i A_z dV + \sigma \iiint N_i \frac{\partial \phi}{\partial z} dV - J_z \iiint N_i dV$$

$\phi$  성분

$$R_x = -j \omega \sigma \iiint \left( \frac{\partial N_i}{\partial x} A_x + \frac{\partial N_i}{\partial y} A_y + \frac{\partial N_i}{\partial z} A_z \right) dV \\ - \sigma \iiint \left( \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial \phi}{\partial y} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) dV \quad (2.2.14)$$

식 (2.2.14)를 이산화하기 위해 우리가 다루는 함수 분포의 영역을 유한 개의 사면체 요소로 분할하고 사면체 요소내의 미지 함수 A를 일차 함수로 근사 시킬 경우 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\vec{A}^{(\theta)} = \sum_{j=0}^4 N_{j\theta} N_{j\theta}$$

$$\phi^{(\theta)} = \sum_{j=0}^4 N_{j\theta} N_{j\theta}$$

$$N_{j\theta} = \frac{1}{6V^{(\theta)}} (a_{j\theta} + b_{j\theta}x + c_{j\theta}y + d_{j\theta}z)$$

$$V^{(\theta)} = \frac{1}{6} (a_{1\theta} + a_{2\theta} + a_{3\theta} + a_{4\theta})$$

$$a_i = (-1)^i \{ x_j (y_1 z_k - y_k z_1) + x_k (y_j z_1 - y_1 z_j) \\ + x_1 (y_k z_j - y_j z_k) \}$$

$$b_i = (-1)^i \{ y_j (z_k - z_1) + y_k (z_1 - z_j) + y_1 (z_j - z_k) \}$$

$$c_i = (-1)^i \{ z_j (x_k - x_1) + z_k (x_1 - x_j) + z_1 (x_j - x_k) \}$$

$$d_i = (-1)^i \{ x_j (y_k - y_1) + x_k (y_1 - y_j) + x_1 (y_j - y_k) \}$$

$$\int \int \int N^a N^b N^c N^d dV = \frac{a! b! c! d!}{(a + b + c + d + 3)!} 6 V^{(\theta)}$$

이러한 관계식을 식 (2.2.14)에 대입하여 이산화하면 다음과 같이 된다.

$$R_{xi} = \frac{1}{36V^\theta} \frac{1}{\mu_o \mu_r} \sum_{j=1}^4 \{ (c_i c_j + d_i d_j) A_{xj}^\theta - c_i b_j A_{yj}^\theta - d_i b_j A_{zj}^\theta \} \\ + j\omega\sigma \frac{V^\theta}{20} \sum_{j=1}^4 (1 + \delta_{ij}) A_{xj}^\theta + \frac{\sigma}{24} \sum_{j=1}^4 b_j \phi_j^\theta - \frac{V^\theta}{4} J_{ox}^\theta$$

$$\begin{aligned}
R_{yi} &= \frac{1}{36 V^\theta} \frac{1}{\mu_o \mu_r} \sum_{j=1}^4 \{ -b_i c_j A_{xj}^\theta + (b_i b_j + d_i d_j) A_{yj}^\theta - d_j c_j A_{zj}^\theta \} \\
&\quad + j\omega\sigma \frac{V_\theta}{20} \sum_{j=1}^4 (1 + \delta_{ij}) A_{yj}^\theta + \frac{\sigma}{24} \sum_{j=1}^4 c_j \phi_j^\theta - \frac{V^\theta}{4} j_{oy}^\theta \\
R_{zi} &= \frac{1}{36 V^\theta} \frac{1}{\mu_o \mu_r} \sum_{j=1}^4 \{ -b_i d_j A_{xj}^\theta - c_i d_j A_{yj}^\theta + (c_i c_j + b_i b_j) A_{zj}^\theta \} \\
&\quad + j\omega\sigma \frac{V_\theta}{20} \sum_{j=1}^4 (1 + \delta_{ij}) A_{zj}^\theta + \frac{\sigma}{24} \sum_{j=1}^4 d_j \phi_j^\theta - \frac{V^\theta}{4} j_{oz}^\theta \\
R_{\phi i} &= -j\omega\sigma \frac{V}{24} \sum_{j=1}^4 (b_i A_{xj} + c_i A_{yj} + d_i A_{zj}) \\
&\quad - \frac{\sigma}{36 V^\theta} \sum_{j=1}^4 \{ (b_i b_j + c_i c_j + d_i d_j) \phi_j \} \tag{2.2.15}
\end{aligned}$$

이것으로부터 도체 영역에서는  $16 \times 16$  요소 행렬 (element matrix), 공기 영역에서는  $\sigma=0$ 이므로  $12 \times 12$  요소행렬(element matrix)을 구성할 수 있게 된다.

행렬은  $[K][U]=[F]$  형태로 표시되고 각 기호는 식(2.2.16)과 같은 식으로 표현된다..

$$\begin{aligned}
K_{ij} &= \begin{bmatrix} k^{xx} & k^{xy} & k^{xz} & k^{x\phi} \\ k^{yx} & k^{yy} & k^{yz} & k^{y\phi} \\ k^{zx} & k^{zy} & k^{zz} & k^{z\phi} \\ k^{\phi x} & k^{\phi y} & k^{\phi z} & k^{\phi\phi} \end{bmatrix}_{ij} & U_i &= \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \\ \phi \end{bmatrix}_i & F_i &= \frac{V^\theta}{4} \begin{bmatrix} J_{ox}^\theta \\ j_{oy}^\theta \\ j_{oz}^\theta \\ 0 \end{bmatrix}_i \\
& & & & & \tag{2.2.16}
\end{aligned}$$

$$k^{xx} = \frac{1}{36 V^\theta} \frac{1}{\mu_o \mu_r} (c_i c_j + d_i d_j) + j\omega\sigma \frac{V^\theta}{20} (1 + \delta_{ij})$$

$$k^{xy} = -\frac{1}{36 V^\theta} \frac{1}{\mu_o \mu_r} c_i c_j$$

$$k^{xz} = -\frac{1}{36 V^\theta} \frac{1}{\mu_o \mu_r} d_i b_j$$

$$k^{x\phi} = \frac{\sigma}{24} b_j$$

$$k^{yx} = -\frac{1}{36 V^\theta} \frac{1}{\mu_o \mu_r} b_i c_j$$

$$k^{yy} = \frac{1}{36 V^\theta} \frac{1}{\mu_o \mu_r} (b_i b_j + d_i d_j) + j\omega\sigma \frac{V^\theta}{20} (1 + \delta_{ij})$$

$$k^{yz} = -\frac{1}{36 V^\theta} \frac{1}{\mu_o \mu_r} d_i c_j$$

$$k^{y\phi} = \frac{\sigma}{24} c_j$$

$$k^{zx} = -\frac{1}{36 V^\theta} \frac{1}{\mu_o \mu_r} b_i d_j$$

$$k^{zy} = -\frac{1}{36 V^\theta} \frac{1}{\mu_o \mu_r} c_i d_j$$

$$k^{zz} = \frac{1}{36 V^\theta} \frac{1}{\mu_o \mu_r} (c_i c_j + b_i b_j) + j\omega\sigma \frac{V^\theta}{20} (1 + \delta_{ij})$$

$$k^{z\phi} = \frac{\sigma}{24} d_j$$

$$k^{\phi x} = \frac{\sigma}{24} b_i$$

$$k^{\phi y} = \frac{\sigma}{24} c_i$$

$$k^{\phi z} = \frac{\sigma}{24} d_i$$

$$k^{\phi\phi} = -j \frac{1}{\omega} \frac{1}{36 V^{\theta}} (b_i b_j + c_i c_j + d_i d_j)$$

이를 전 요소에 대하여 조립하여 계 행렬(system matrix)을 만들고 경계 조건을 대입한 후 행렬식을 풀어서 해석한다.

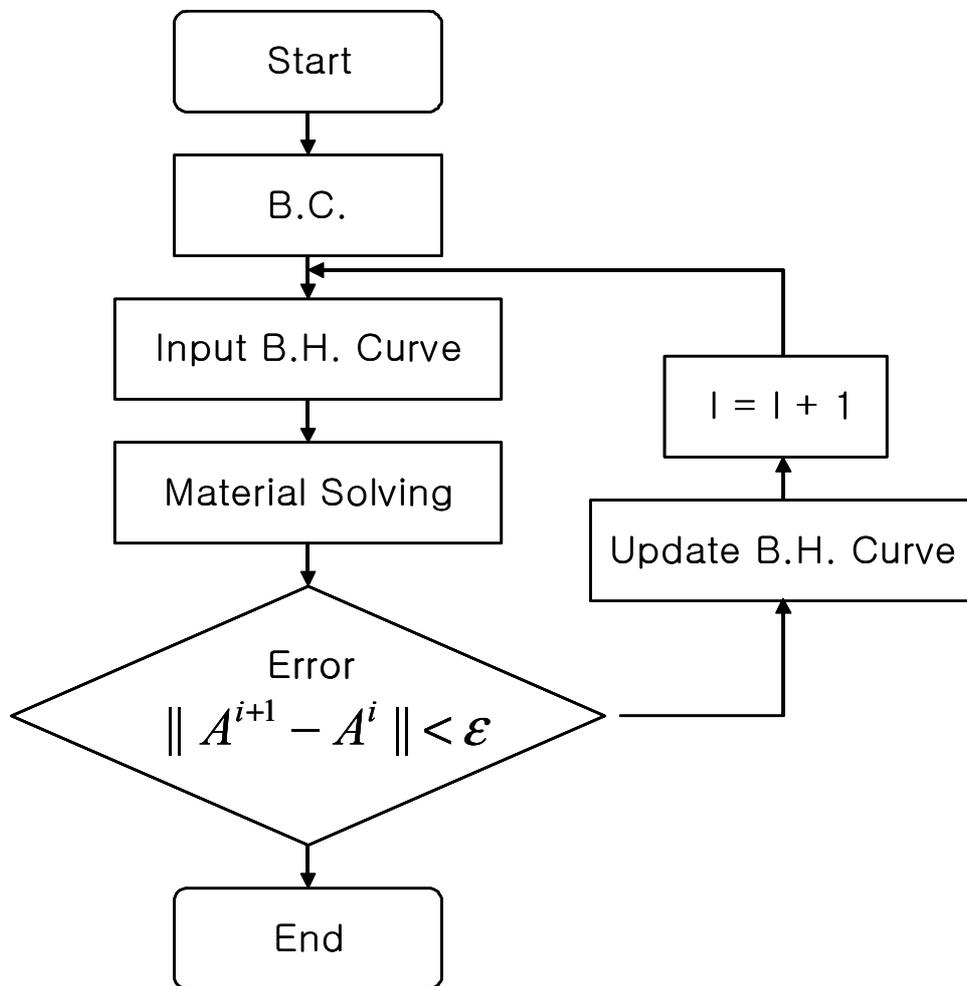


그림 2.2. 유한요소해석법의 흐름도(flow chart)

### 2.3. Field Gradient 해석 방법

하드 디스크 드라이브의 write head에서의 기록자계를 해석하기 위하여 유한요소해석법을 사용함에 있어서 head의 전체크기에 비하여 head gap의 크기가 수천분의 일로 매우 작기 때문에 일반적인 유한요소 해석으로는 그 계산 한계로 인하여 gap 부위의 기록자계와 경도를 정밀하게 해석할 수가 없다. gap 부위의 해석 정밀도를 높이기 위해서는 요소수를 대폭 늘려야 하는데 이 경우 전체 해석시스템이 지나치게 증가하여 해석이 어려워진다. 본 연구에서와 같이 고기록밀도를 달성하기 위해서는 gap 부분이 더욱 작아지기 때문에 3차원 비선형 자기포화해석이 정밀하게 수행되어야 하기 때문에 본 연구에서는 gap 주위의 자계와 자계경도를 정밀하게 해석할 수 있는 program을 개발하였다. 먼저 일반 유한 요소 패키지로 head를 모델링하여 대략적인 magnetic potential 값들을 구해낸 후 이 값들을 이용하여 본 연구에서 개발된 program을 다시 적용하여 gap 주위의 자계와 자계경도를 해석하였다. 그림 2.2는 본 계산과정에 대한 순서도를 도식화 한 것이다.

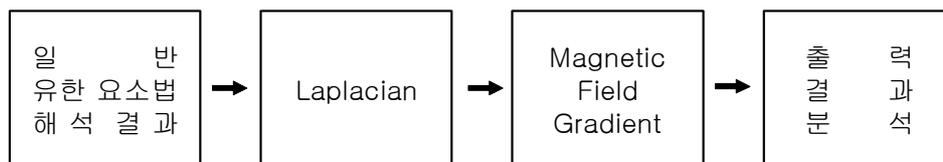


그림 2.2. field gradient 해석 순서도(flow chart)

gap field를 정밀하게 해석하기 위한 program은 Laplacian을 적용하였는데, Gap에서 발생하는 헤드자계에 의하여 기록이 일어나는 공간에는 current source가 없기 때문에 Laplacian의 적용이 가능하기 때문이다.

### 2.3.1. 해석영역

HDD head의 field를 Laplacian을 통한 해석법으로 해석할 영역을 Fig. 2.3.2에서 나타내었다. 이 부분은 기록헤드의 자계가 발생하는 부분이다. 기록헤드의 최상위 면을 0으로 보았을 때 기록매체의 위치는  $0.06 \sim 0.075 \mu\text{m}$ 에 위치해 있고 해석영역은  $0.1 \mu\text{m}$ 가 되는 지점으로 설정하였다.

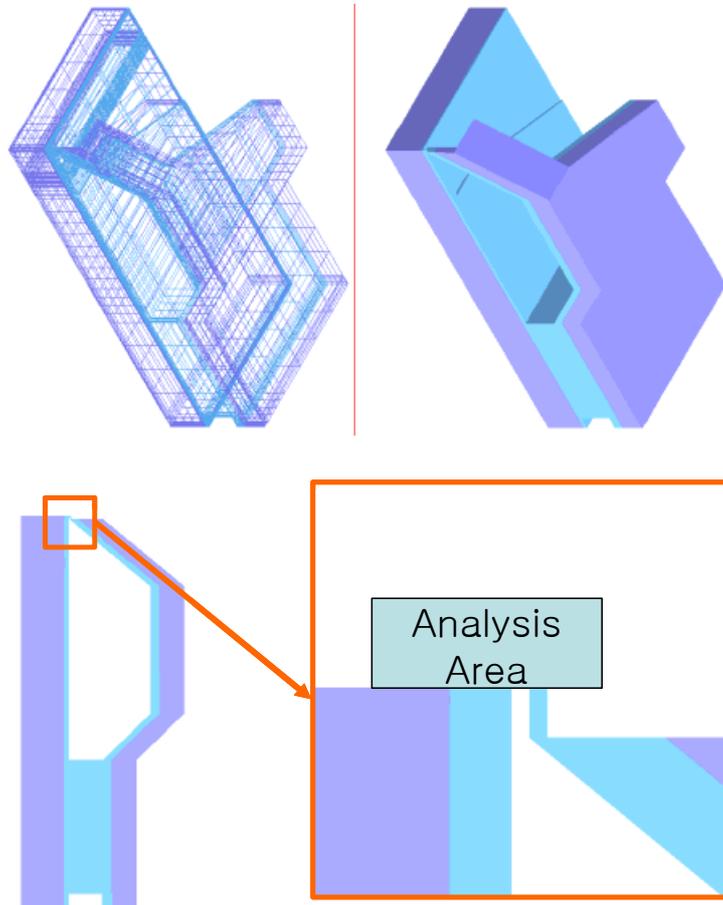


그림 2.3. Laplacian 적용 영역

HDD head의 field gradient를 해석하는데 있어서 일반적인 유한요소의 해석방법으로는 그 해석 방법으로 인해서 head design의 결과 값을 실제 모델에 적용하기에는 부적합했다. 그 이유는 그림 2.4에서 보는 바와 같이 head의 전체적인 size에 비하여 gap의 size가 너무 작기 때문에 gap 부근의 요소를 충분히 나누기가 어렵기 때문이다.

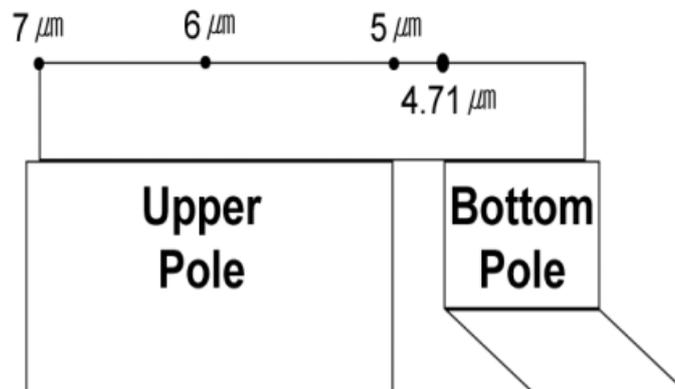


그림 2.4. head의 pole과 gap의 size

### 2.3.2. Magnetic Potential for 3D analysis

그림 2.3과 같이 해석 영역을 나누었다고 보았을 경우 각 요소에 있는 지점의 값들은 정확한 값으로 나타나지만 요소와 요소 사이의 값은 일반적인 유한 요소 프로그램에서는 평균값으로 나타나게 된다. 기록헤드의 field gradient의 가장 중요한 부분이 gap 부분에 있기 때문에 이 방법으로는 정확한 field gradient를 해석하는데 있어서 부적합하다. 이러한 이유로 일반 유한요소법으로 구해진 값들 사이의 값에 대한 보정이 요구되게 되었다.

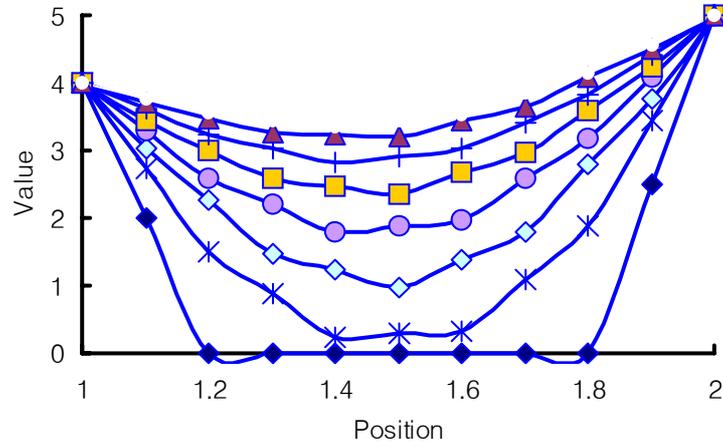


그림 2.5. 주어진 값으로 부터의 값의 보정

일반 유한요소법에서 얻어진 각 요소의 potential 값을 바탕으로 Laplacian을 이용 요소사이의 potential 값들을 보정하였다.

$$\nabla^2 \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \quad (2.3.1)$$

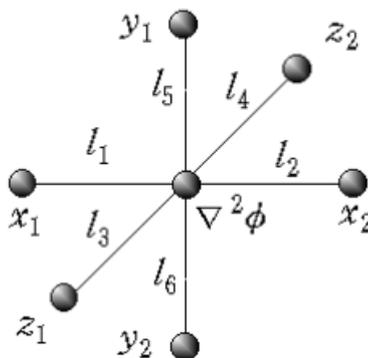


그림 2.6. 3차원 요소에서의 Laplacian 적용

그림 2.6으로 부터 (2.3.1)식을 적용하여 근사식을 구하면

$$\nabla^2 \phi \simeq \frac{\frac{x_1}{l_1} + \frac{x_2}{l_2} + \frac{y_1}{l_3} + \frac{y_2}{l_4} + \frac{z_1}{l_5} + \frac{z_2}{l_6}}{\frac{1}{l_1} + \frac{1}{l_2} + \frac{1}{l_3} + \frac{1}{l_4} + \frac{1}{l_5} + \frac{1}{l_6}}$$

와 같이 되고 이식을 적용하여 일반 유한요소법으로 얻어진 head의 potential 값들을 보정하였다.

하지만 이를 이용하여 potential 값을 얻는 과정에서 그림 2.7에서 보는 것과 같이 많은 오차가 생기는 요소군이 발생하였다. 그림에서와 같이 경계값이 있는 부분-요소 값이 주어진 부분-의 값 가까이 위치한 값들만이 잘 보정 되었을 뿐이고 나머지 값들은 실제 적용할 수 없는 값이 된다. 이는 주어진 값에 대한 보정공간이 넓기 때문에 발생하는 해석상의 오차로서 이를 해결하기 위한 방법이 필요하다.

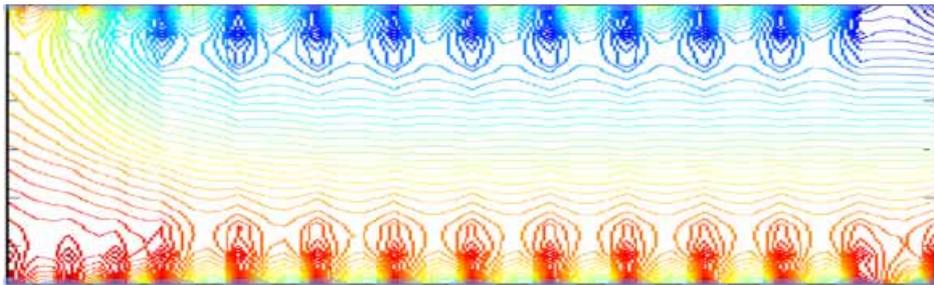


그림 2.7. 경계값에서 많은 에러가 발생

이를 해결하기 위하여 그림 2.8에서 나타난 것과 같이 요소에서의 가장 외곽의 값들을 먼저 Laplacian으로 보정 계산한 후 그 값을 바탕으로 2D 평면을 계산해 내는 방법을 사용하였다. 그 결과 그림 2.9와 같이 오차를 많이 줄일 수 있었다.

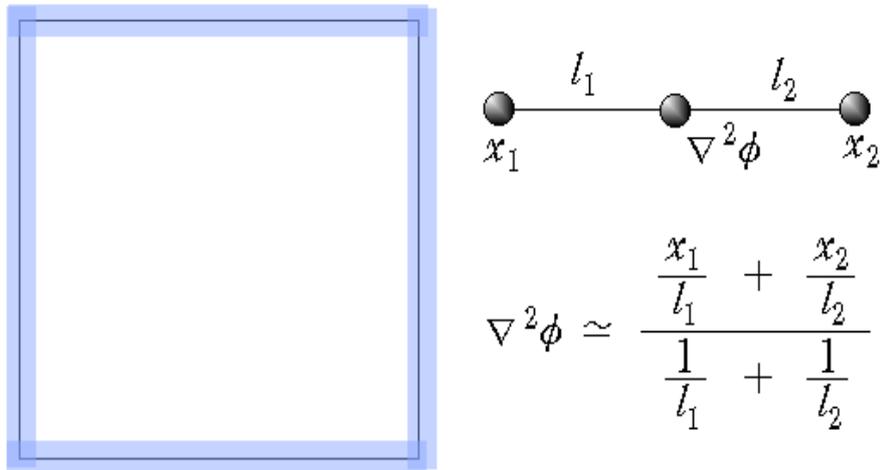


그림 2.8. 평면에서 요소 값 중 최외각 요소부터 Laplacian 연산 실행

하지만 그 역시 아직은 많은 오차를 포함하고 있음을 그림 2.9에 나타난 것처럼 알 수 있다. 실 데이터로 사용하려면 이를 다시 보정하여 신용할 수 있는 데이터로 만들어야 한다.

그림 2.9에서 나타난 오차를 줄이기 위하여 그림 2.10에서 표현한 것처럼 가장 먼저 최외각을 그리고 경계값이 주어진 줄(line) 부분을 먼저 Laplacian으로 보정한 후 면을 보정하였다. 그 결과 오차들이 그림 2.11에서와 같이 사라졌다.

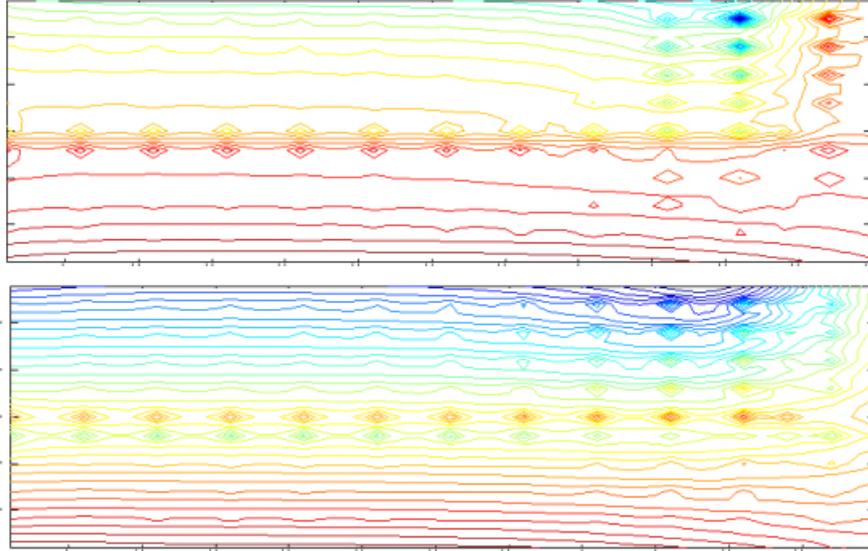


그림 2.9, 최외각 요소 값을 최우선 계산한 결과

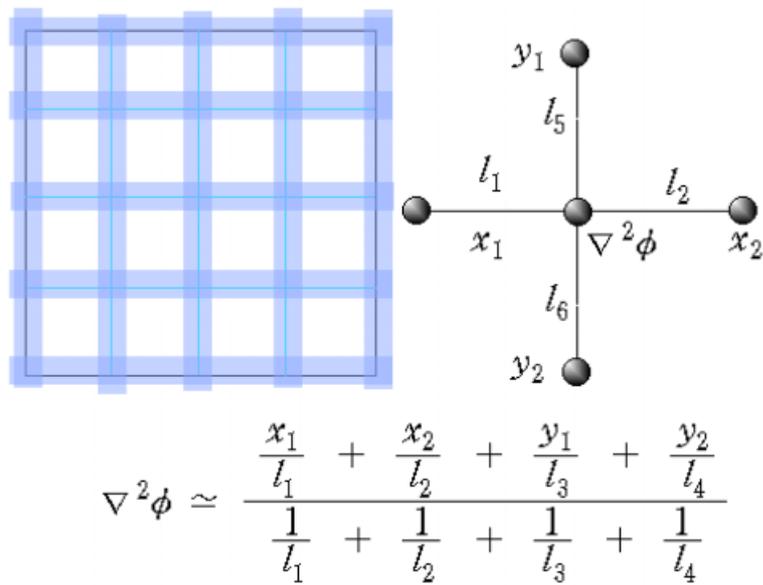


그림 2.10. 두 번째 연산으로 경계 값이 있는 곳을 먼저 계산

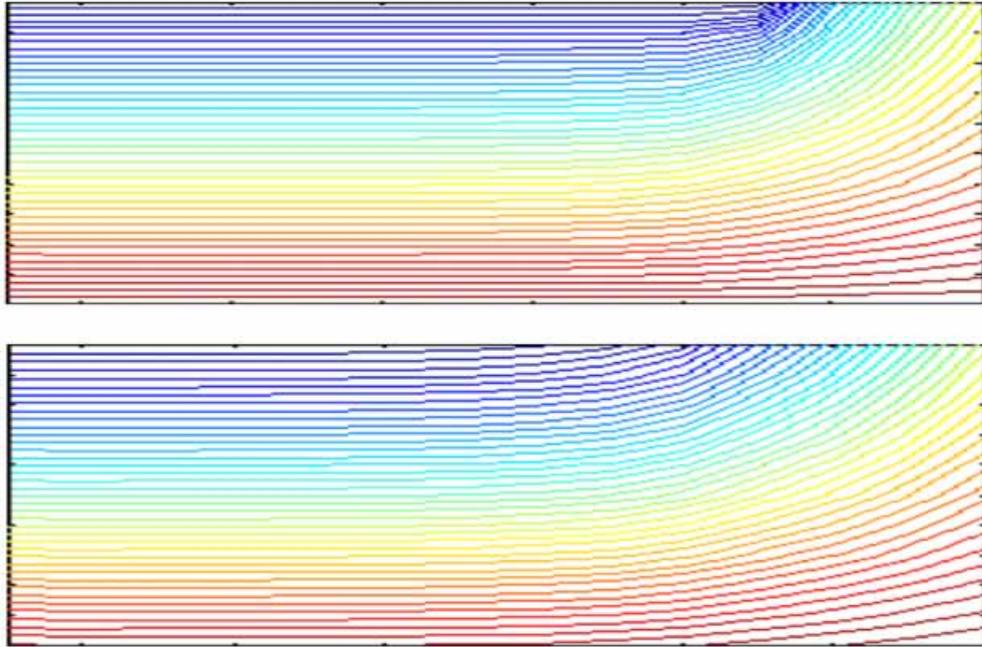


그림 2.11. 2차원 평면을 Laplacian 연산을 적용하여 얻은 결과

이와 같은 방법을 적용하여 구해진 평면들은 오차가 실제 적용할 수 있는 정도가 된다. 하지만 지금 까지 구한 것은 각 최 외곽 평면의 요소라고 할 수 있다. 전술한 바와 같이 구하려는 값은 2D의 평면 값이 아닌 3D의 입체 값들이다. 따라서 위에서 구해진 평면을 바탕으로 3D 평면의 potential 값들을 구해 내었다. 그 결과 그림 2.12와 같은 안정적인 3D potential 값이 구해졌다.

본 계산결과는 좌우 대칭에 의하여 track 방향으로 기록헤드의 절반을 해석한 것이다. 붉은 색과 푸른색으로 나타나는 potential 값의 미분치가 기록자계의 vector field가 된다.

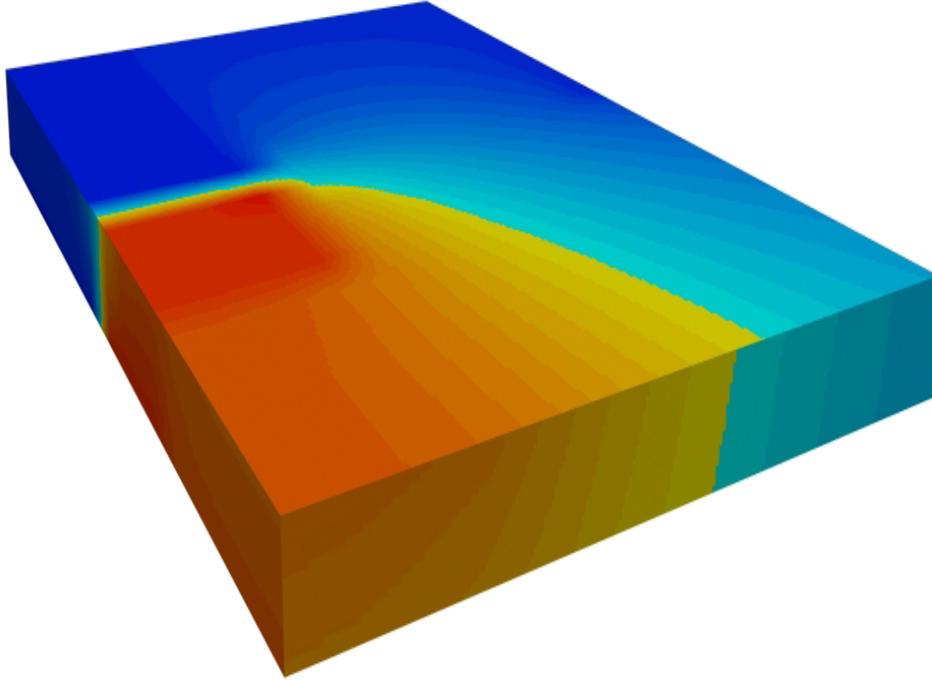


그림 2.12. Laplacian을 적용하여 구해진 3차원 포텐셜 평면

### 2.3.3. Gap Field of the Recording Head

HDD head의 field를 구하기 위하여 구해진 전체 3D의 potential 값에 gradient를 취한다.

$$\begin{aligned}
 \vec{H} &= -\nabla \phi(x, y, z) \\
 &= -\left( \frac{\partial \phi}{\partial x} \vec{a}_x + \frac{\partial \phi}{\partial y} \vec{a}_y + \frac{\partial \phi}{\partial z} \vec{a}_z \right) \quad (2.3.2)
 \end{aligned}$$

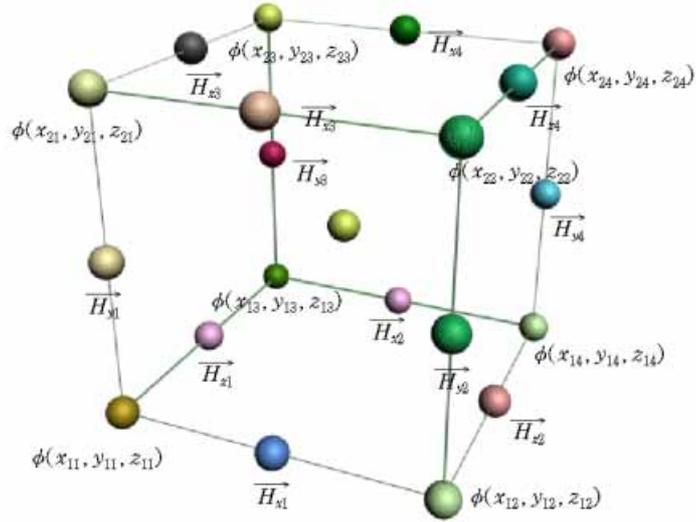


그림 2.13. head의 write field 계산을 위한 간단한 모델

그림 2.13으로 부터 (2.3.2)식을 적용하여 근사식을 구하면

$$\begin{aligned} \vec{H}_{x1} &= \frac{\phi_{x12} - \phi_{x11}}{l_{12} - l_{11}}, & \vec{H}_{x2} &= \frac{\phi_{x14} - \phi_{x13}}{l_{14} - l_{13}} \\ \vec{H}_{x3} &= \frac{\phi_{x22} - \phi_{x21}}{l_{22} - l_{21}}, & \vec{H}_{x4} &= \frac{\phi_{x24} - \phi_{x23}}{l_{24} - l_{23}} \\ \\ \vec{H}_{y1} &= \frac{\phi_{y21} - \phi_{y11}}{l_{21} - l_{11}}, & \vec{H}_{y2} &= \frac{\phi_{y22} - \phi_{y12}}{l_{22} - l_{12}} \\ \vec{H}_{y3} &= \frac{\phi_{y23} - \phi_{y13}}{l_{23} - l_{13}}, & \vec{H}_{y4} &= \frac{\phi_{y24} - \phi_{y14}}{l_{24} - l_{14}} \\ \\ \vec{H}_{z1} &= \frac{\phi_{z13} - \phi_{z11}}{l_{13} - l_{11}}, & \vec{H}_{z2} &= \frac{\phi_{z14} - \phi_{z12}}{l_{14} - l_{12}} \\ \vec{H}_{z3} &= \frac{\phi_{z23} - \phi_{z11}}{l_{23} - l_{11}}, & \vec{H}_{z4} &= \frac{\phi_{z24} - \phi_{z22}}{l_{24} - l_{22}} \end{aligned}$$

위의 식으로부터

$$\left. \begin{aligned} \vec{H}_x &= \frac{\phi_j - \phi_i}{x_j - x_i} \\ \vec{H}_y &= \frac{\phi_j - \phi_i}{y_j - y_i} \\ \vec{H}_z &= \frac{\phi_j - \phi_i}{z_j - z_i} \end{aligned} \right] \quad (2.3.3)$$

(2.3.3)의 식을 이용 Laplacian으로 얻어진 모든 potential 데이터들을 gradient 값으로 모두 변환하였다. 그 결과 다음과 같이 원하는 영역의 모든 3D head field와 field gradient 값을 구해 낼 수 있다.

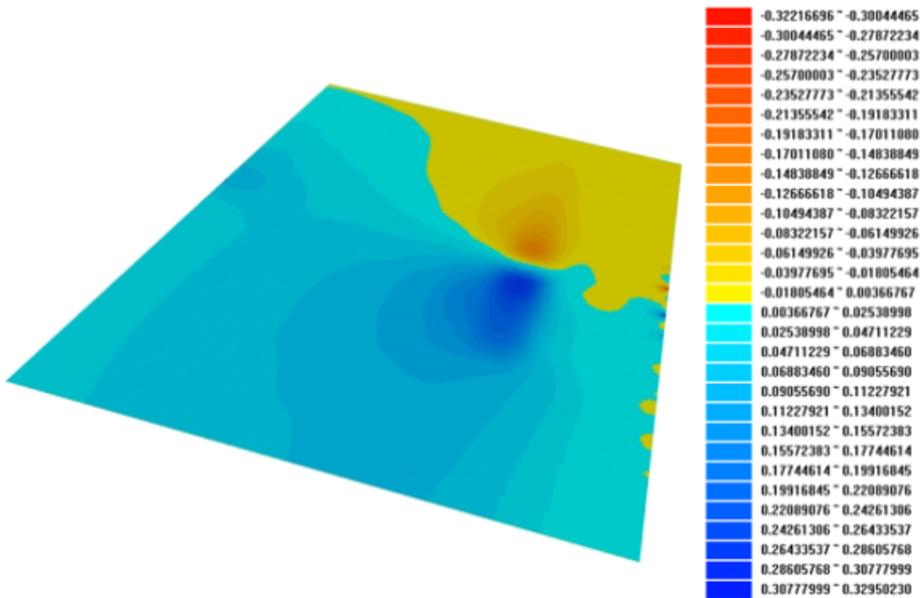


그림 2.14. 자기 퍼텐셜

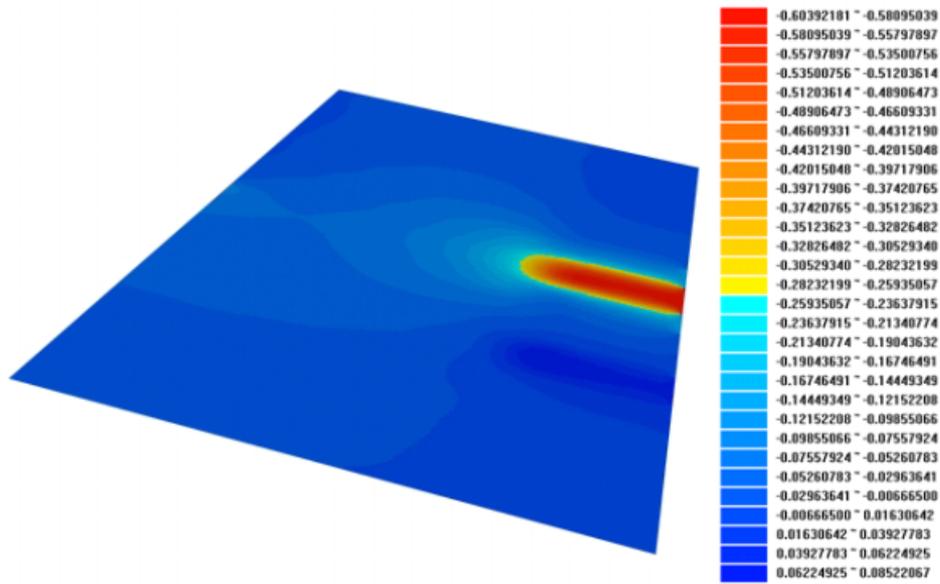


그림 2.15. 수평 자기 필드 분포

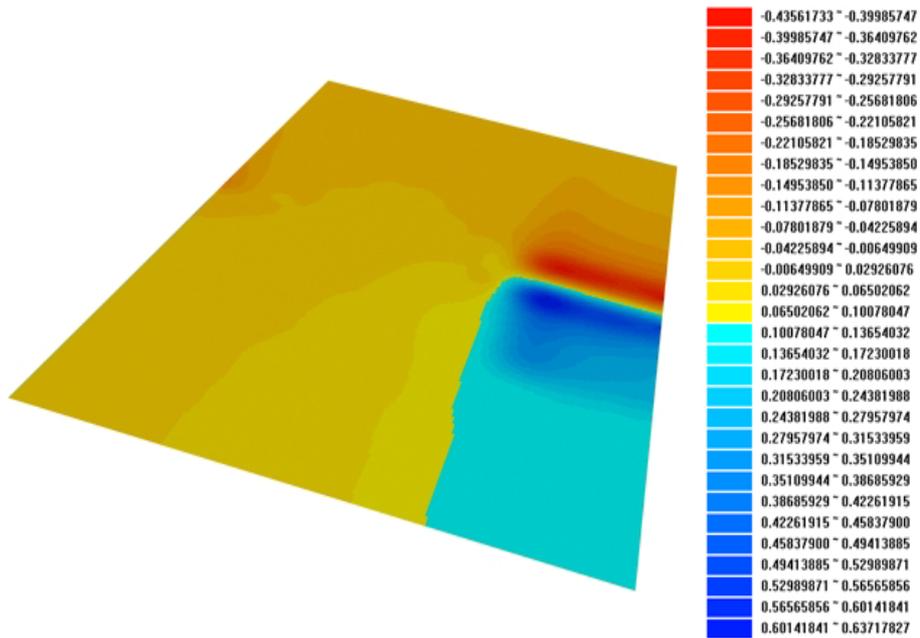


그림 2.16. 수직 자기 필드 분포

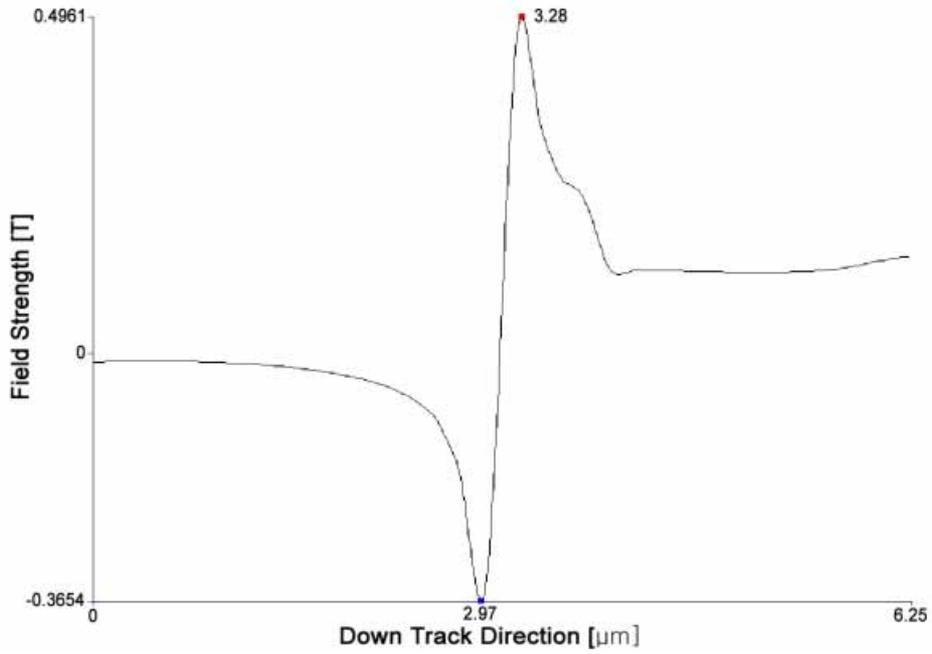


그림 2.17. 수평 필드 분석 결과 그래프

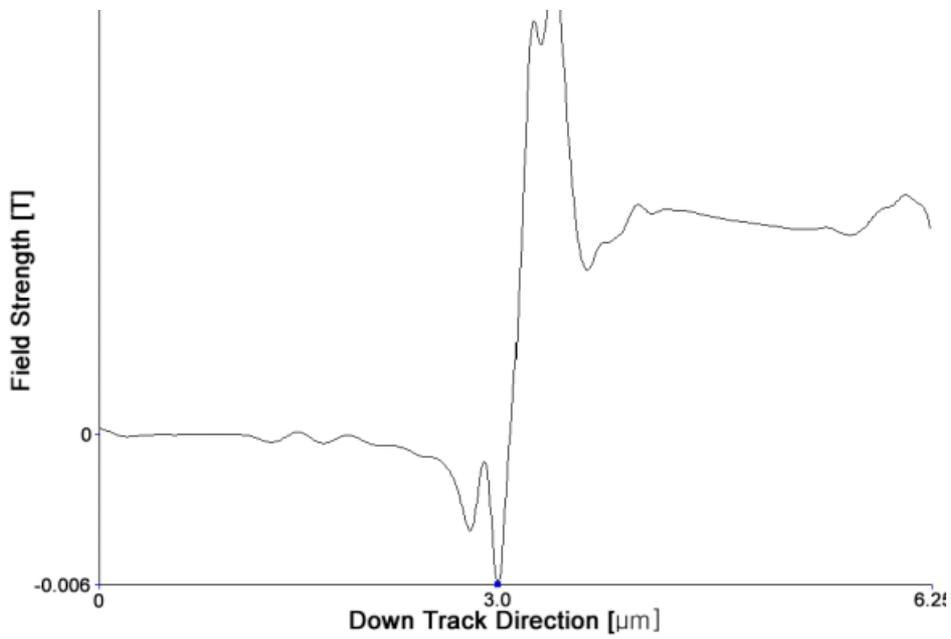


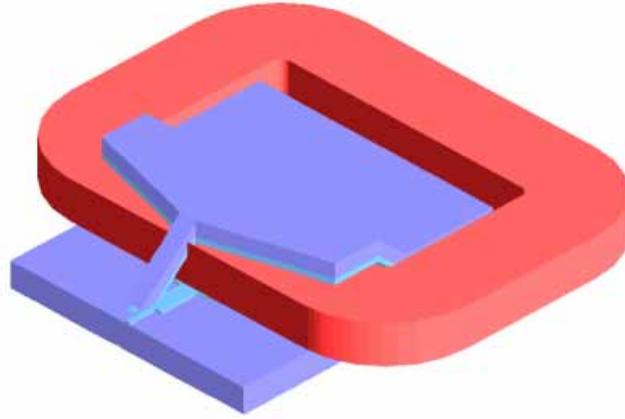
그림 2.18. 수직 필드 분석 결과 그래프

### 제 3 장 Write Head의 구성 재료의 특성

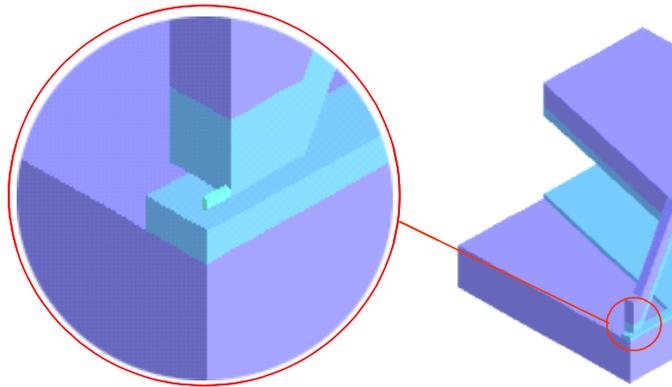
기록헤드의 자계를 좁은 공간에서 높게 유지하기 위하여 기록헤드의 특정부위에 높은 투자율과 포화자속밀도를 갖는 재료를 사용하는 다층구조를 사용한다. 본 연구에서는 다층구조의 기록헤드에서 다층구조 또는 사용되는 재료의 투자율 및 포화자속밀도가 기록자계에 미치는 영향을 분석하였다.

먼저 write head의 기본 design model을 그림 3.1과 같이하고 write head를 구성하는 방법에 따른 field의 변화를 해석하기 위하여 그림처럼 write head를 재료에 따라 세부적으로 구성하였다. 또한 재료의 특성에 따른 field의 변화를 해석하기 위하여 그림 3.2에 나타나 있는 것과 같은 BH curve를 각각 인가하였다.

높은 기록자계를 좁은 영역에서 발생시키면 head의 pole tip에서 필연적으로 자기포화가 발생하게 되며 자기 포화에 따라 자계의 분포가 크게 영향을 받게 된다. 본 연구에서는 head 재료의 비선형 자기포화의 영향을 분석하기 위하여 기록헤드의 자기포화특성을 자기 투자율과 포화자속밀도값으로 분류하고 그림 3.1과 같이 서로다른 투자율과 포화자속밀도를 갖는 재료를 이용하여 다층구조의 기록헤드 특성을 분석하였다. 즉 다층구조의 방식, 투자율, 포화자속밀도값 등이 기록자계에 미치는 영향을 각각 분석하였다.



(a) 전체 Write Head 모양



(b) 폴 부분의 디자인 모양

### Simulation Parameters

Type	Inductive Ring Head
Pole Tip	80nm×80nm×1μm
Untrimmed Poles Length	3.5μm
Untrimmed Poles Width	8μm
Current	300mA

그림 3.1. 해석 모델

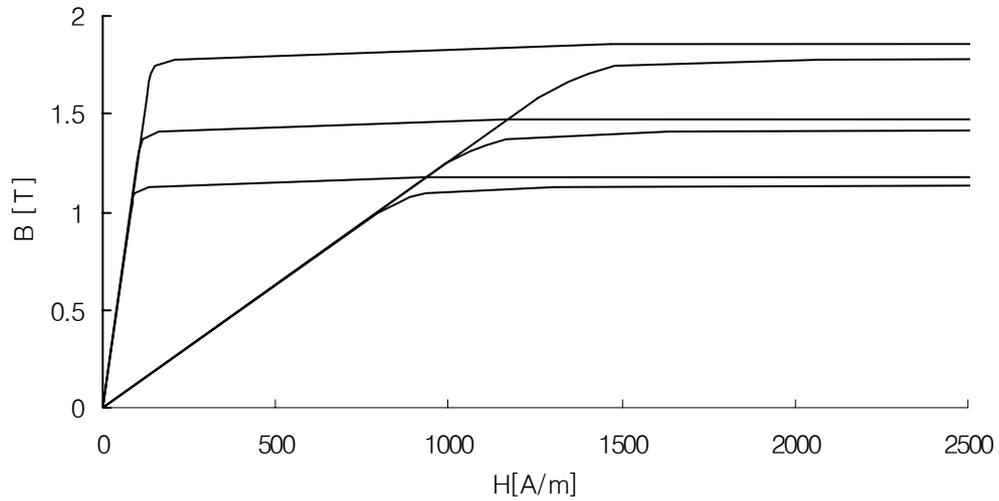


그림 3.2. 해석모델에 적용된 B-H curve

### 3.1. Write Head의 다층구조에 따른 기록자계의 영향 분석

가장 처음 적용된 모델은 그림 3.3과 같이 단일 재료로 write head가 구성되었던 경우이다. 이 경우 그림 3.2에 나타난 BH 커브들을 인가하여 F.E.M. 해석을 하였을 경우 그림 3.4와 같은 결과를 얻을 수 있었다. 그림에서 기록헤드의 비 투자율이 1000일 경우와 10000일 경우는 기록자계의 크기가 거의 차이가 없지만 포화자속밀도가 커짐에 따라 기록자계는 증가함을 알 수 있다.

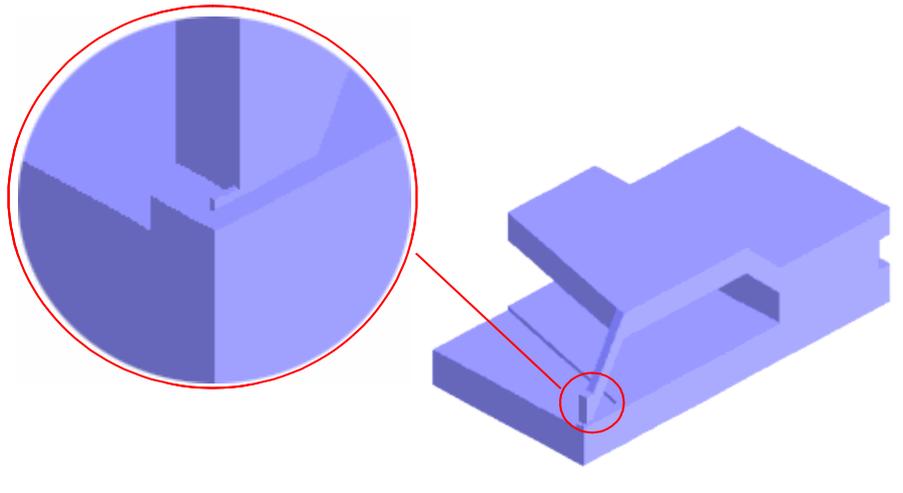


그림 3.3. 단일 재료로 구성된 헤드 모델

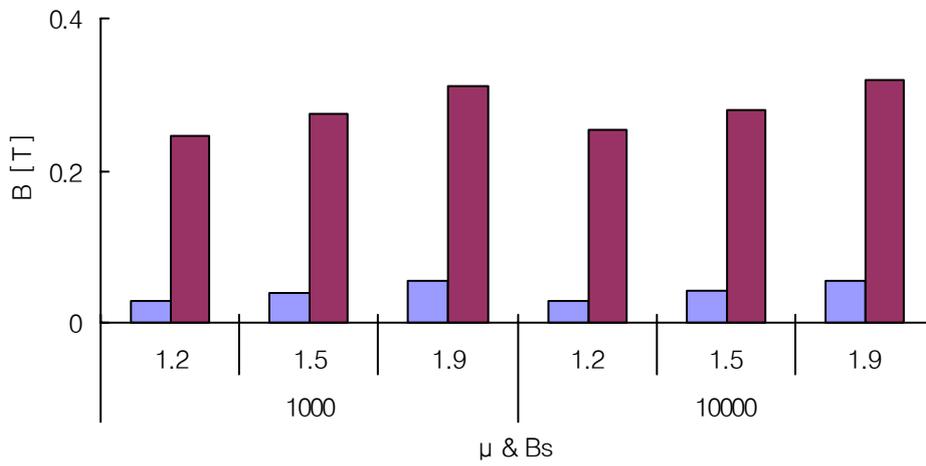


그림 3.4. 단일 재료로 구성된 헤드의 해석 결과

두 번째 모델을 그림 3.5에 나타난 것과 같이 write head의 바깥쪽에 하나의 재료를 그리고 안쪽과 풀 팁 부분에 하나의 재료를 인가하는 방법을 적용한 모델이다. 첫 모델과 같은 방법으로 두 번째 모델을 해석한 결과 그림 3.6과 같은 결과를 보였다.

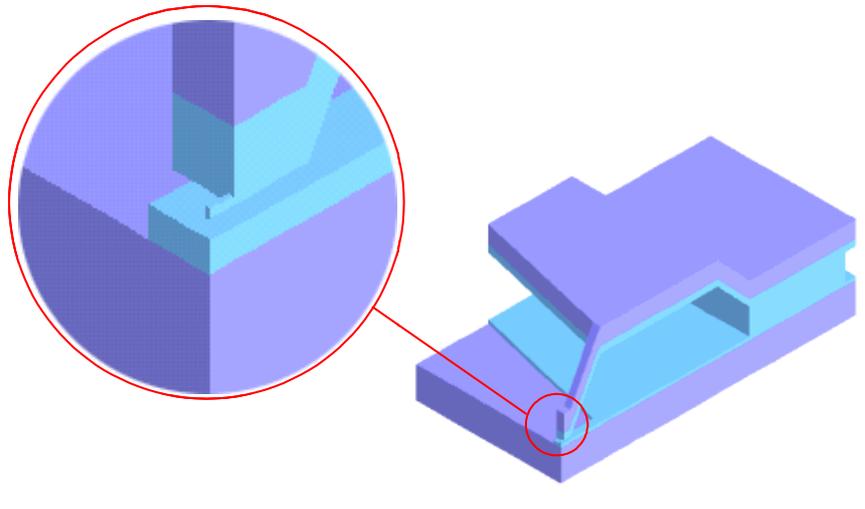


그림 3.5. 두개의 재료로 구성된 헤드 모델

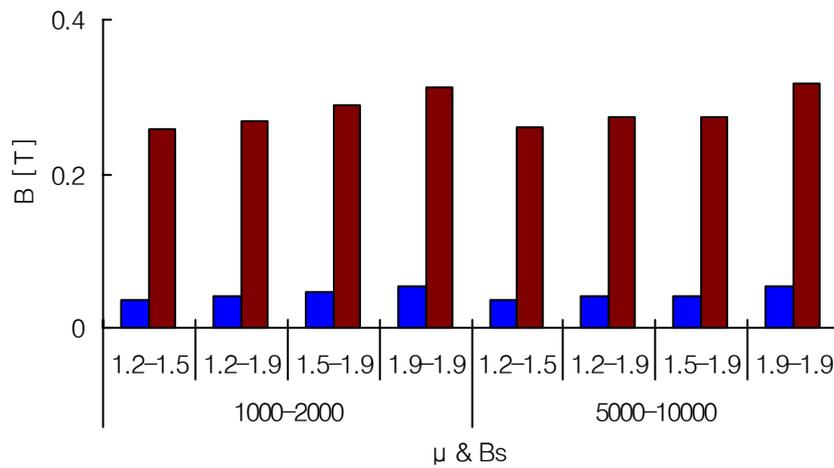


그림 3.6. 두개의 재료로 구성된 헤드의 해석 결과

세 번째 모델은 그림 3.7에 나타난 것처럼 head의 바깥 부분과 안쪽 부분, 그리고 풀 팁 부분의 세 부분에 각각 특성의 재료를 인가하는 방법을 적용한 모델이다. 두 모델과 같은 방법으로 세 번째 모델을 해석한 결과가 그림 3.8에 나타나 있다.

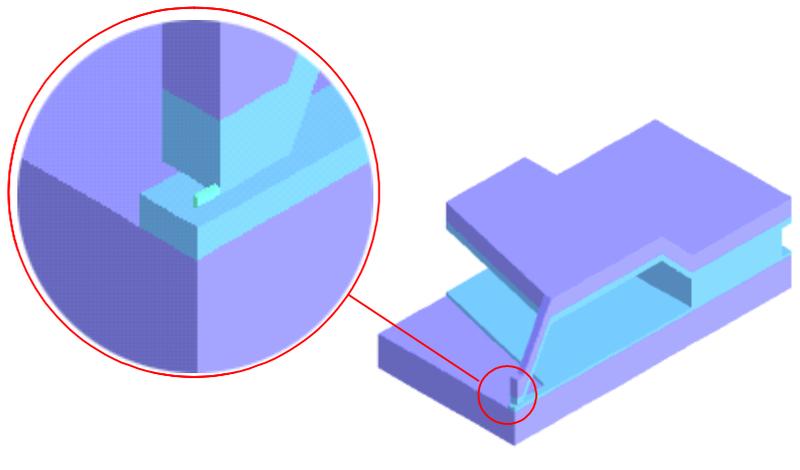


그림 3.7. 세 개의 재료로 구성된 헤드 모델

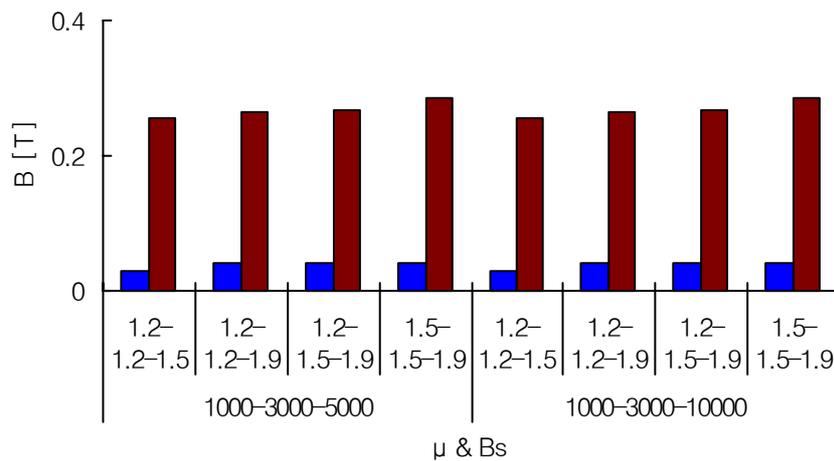


그림 3.8. 세 개의 재료로 구성된 헤드의 해석 결과

각각 구해진 결과 중에서 가장 큰 field의 값을 비교한 것이 그림 3.9에 나타나 있다. 결과에서 보듯이 write head를 구성하는 매체가 2가지로 구성되어 있을 경우 가장 좋은 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 이후에 연구에서는 본 연구에서 최적의 결과를 보인 두 가지 매체의 구성으로 이루어진 write head design을 이용하였다.

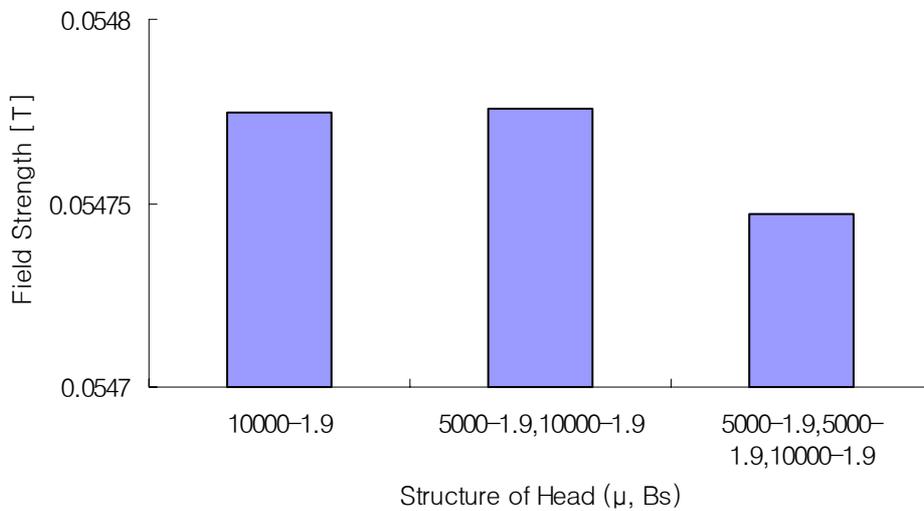


그림 3.9. 헤드 구성에 따른 해석 결과 비교

### 3.2. 기록헤드의 투자율 및 포화자속밀도 영향

본 연구에서는 매체의 구성 방법이 write head의 미치는 영향 뿐만 아니라 매체의 특성에 따른 write field의 변화를 알기 위해서 각각의 특성을 가진 매체를 인가하여 시뮬레이션 하였다. 그 결과는 그림 3.4, 그림 3.6, 그림 3.8에서 확인할 수가 있다. 각각 그래프를 살펴 볼 때 일정한 크기의  $\mu$  값을 가진다면  $\mu$  값을 크게 하는 것보다 Bs의 값을 크

게 하는 것이 write field의 크기에 더 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 따라서 고 밀도 하드디스크를 위한 write head의 재료를 개발하려면  $\mu$ 값이 큰 재료보다는 일정 크기의  $\mu$ 값을 가진 재료로서 Bs값을 크게 하는 것이 좋다는 것을 알 수 있었다.

## 제 4 장 Write Head의 Shape Design에 따른 기록자계의 영향분석

write head 의 shape design에 따른 write field의 변화에 대한 연구를 하기 위하여 그림 3.1과 같은 모델의 각 구성요소의 design 따른 영향을 해석하였다.

### 4.1. Back Throat의 길이 변화에 따른 Write Field의 변화

그림 4.1에 나타나 있는 그림처럼 back throat의 길이를 변화를 주면서 해당 모델을 해석하였다. 이 때 인가한 BH 커브는 그림 4.2에 보여진 것과 같다. 이 때 재료의 자기적 특성이 좋은 재료는 head field에 영향을 많이 미치는 head 안쪽과 폴 팁 부분에 인가하였다. 나머지 재료를 head 바깥쪽 나머지 부분에 인가하였다. 이 때 sloping region의 길이는 0 ~ 3.5 $\mu\text{m}$ 로 변화를 주었다. 이 길이가 길면 자기저항이 증가하여 지계의 세기가 약해지며, 이 길이가 짧으면 자기장이 pole tip으로 모여지지 않고, pole tip 옆의 경로를 통하여 bottom pole로 새 버리므로 기록영역의 자계는 작아진다. 해석결과 0.5 $\mu\text{m}$ 에서 가장 좋은 결과를 보였다.

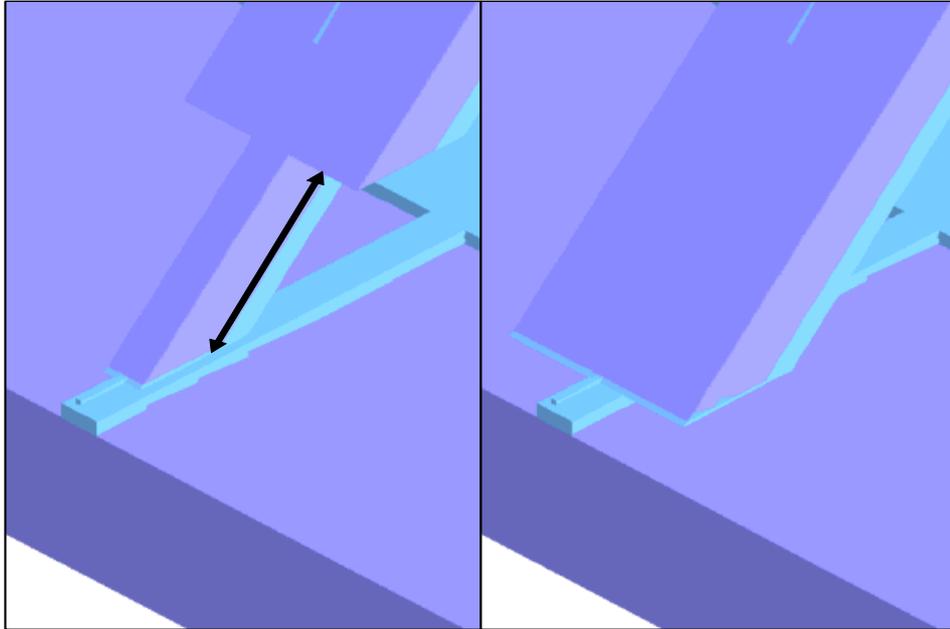


그림 4.1. back throat의 길이 변화에 따른 write field의 변화

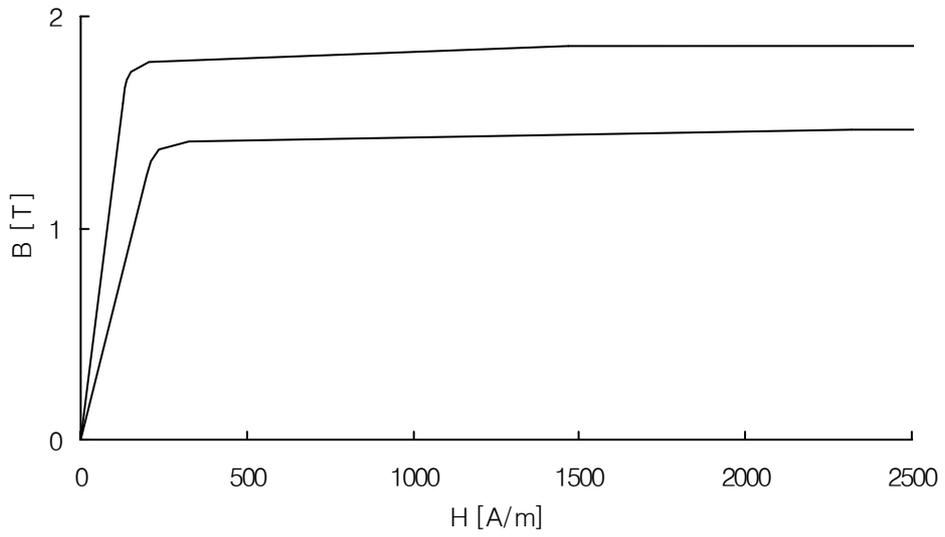


그림 4.2. B-H curves of the head material

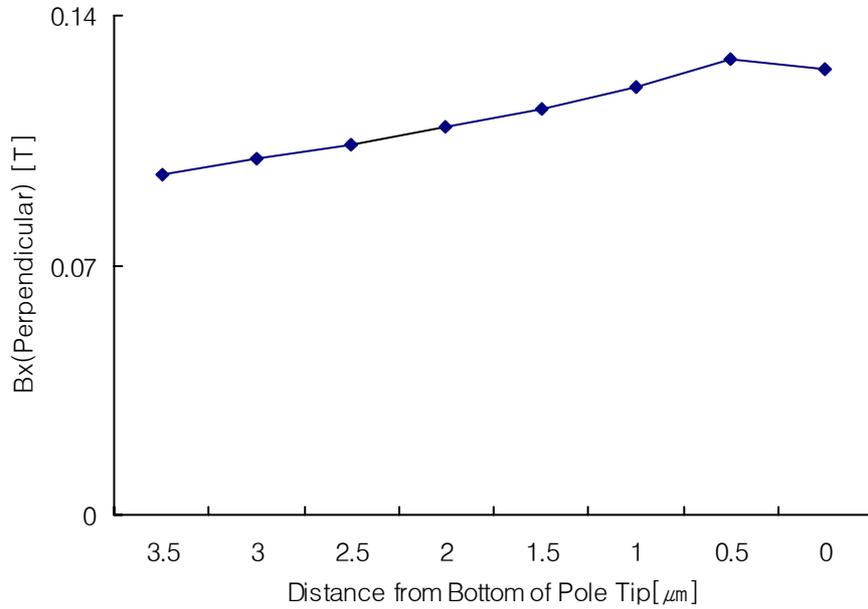


그림 4.3 back throat의 길이 변화에 따른 해석 결과

## 4.2. Pole Tip의 길이 변화에 따른 Write Field의 변화

위의 연구결과에서 최적화된 sloping region의 길이를 적용한 모델에 Fig. 13에서 보는 바와 같이 pole tip의 길이 변화를 주어 write field의 변화를 살펴보았다. 인가한 B-H 커브는 전 모델과 같은 것을 사용하였고, pole tip의 길이는 그림 4.4에 나타난 것처럼  $0.25 \sim 1\mu\text{m}$ 까지 변화를 주었다. 이 경우 그림 4.5에서 나타난 바와 같이  $0.25 \mu\text{m}$ 의 경우 최적화된 결과를 보임을 알 수 있다.

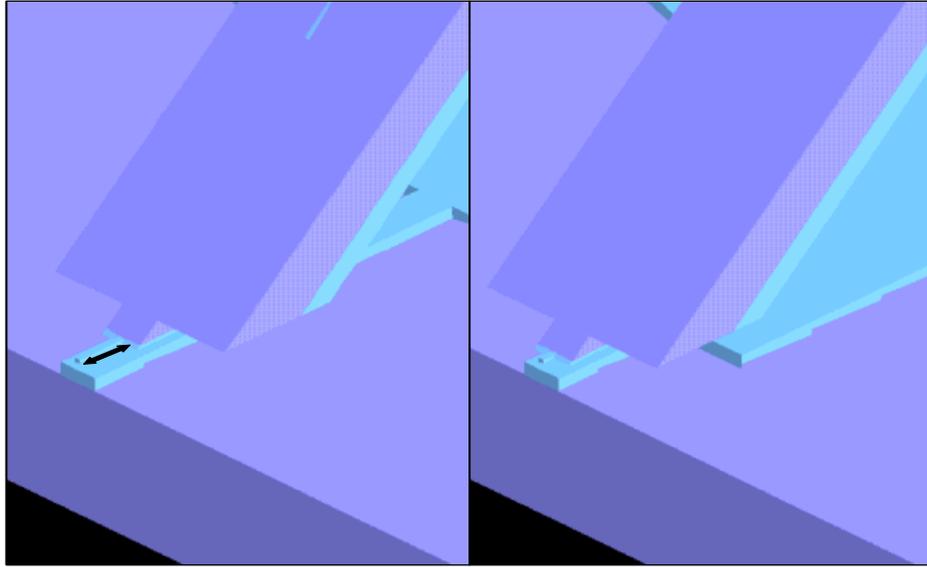


그림 4.4 pole tip 길이 변화에 따른 write field의 변화

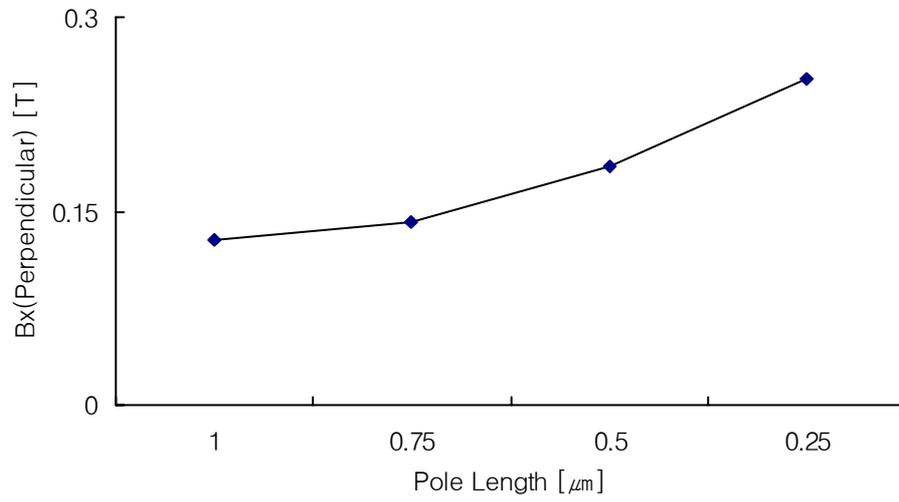


그림 4.5 pole tip 길이 변화에 따른 해석 결과

### 4.3. Back Throat의 너비의 변화에 따른 Write Field의 변화

앞 모델의 최적화된 모델을 바탕으로 그림 4.6에 나타난 것과 같이 back throat의 너비를 변화시키며 시뮬레이션을 진행하였다. 이 때 주어진 BH 커브 역시 앞 모델에서 사용한 커브를 사용하였다. 이 경우 그림 4.7에 나타난 것과 같이 1 ~ 8 $\mu\text{m}$ 까지 변화를 주며 시뮬레이션 하였다. 그 결과 그림 4.7에 나타난 것처럼 5 $\mu\text{m}$ 일 경우 최적화 됨을 알 수가 있었다.

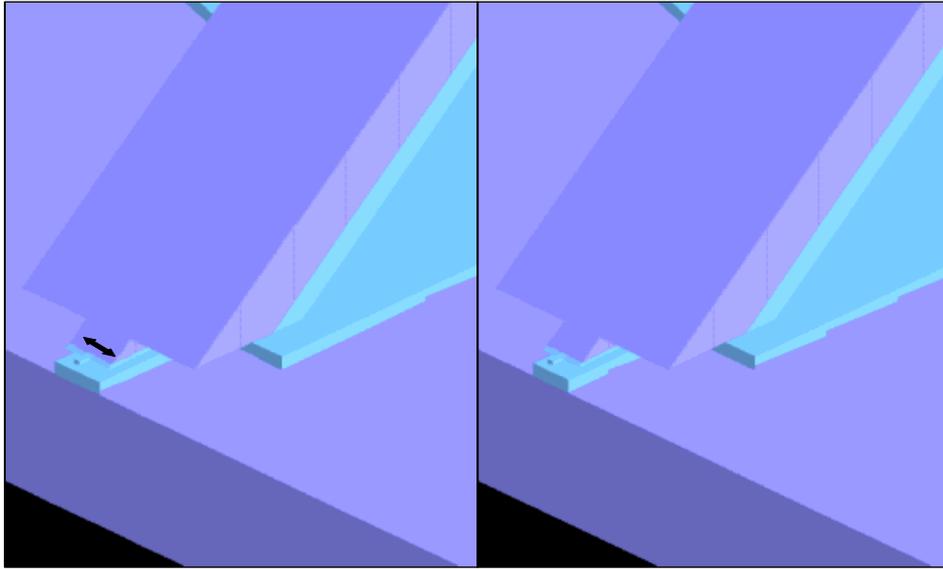


그림 4.6. back throat 너비 변화에 따른 write field의 변화

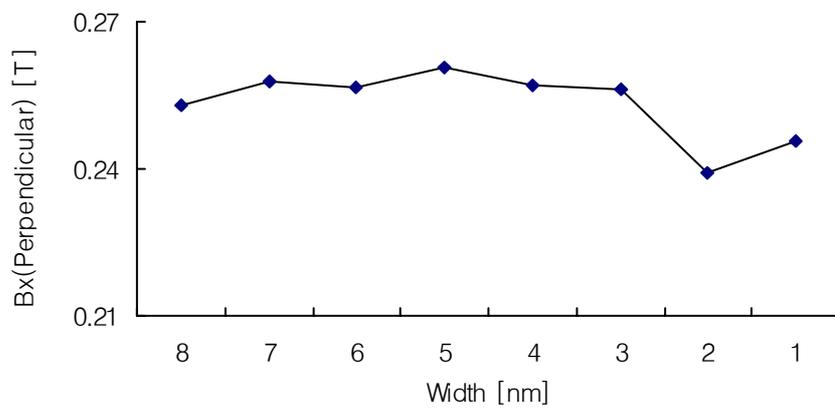


그림 4.7. back throat 너비에 따른 해석 결과

#### 4.4. 첫 번째 모델에 대한 Write Field 의 결과 및 개선방안

pole tip 헤드의 형상에 따른 기록자계의 변화에 대하여 해석하였다. 결과를 살펴보면 알 수 있듯이 수직 field의 크기는 0.39[T] 정도이고 수평 field의 크기는 0.15[T] 정도이다. 이 결과에서 얻어진 수치들은 pole tip의 길이, back throat의 폭과 길이에 대하여 최적화 되었음에도 불구하고 고 보자력의 미디어를 over-write 하기에는 부족한 값이다. 또한 수직과 수평자계의 분포에서 알 수 있듯이 field의 focus된 grain size 역시 요구 조건보다 크다는 것을 알 수 있다.

고 밀도 하드디스크를 위한 write head를 설계하기 위해서는 지금 나타난 결과에서 문제를 찾아서 고쳐야만 했다. 따라서 이 결과를 분석한 결과 그림 4.10과 그림 4.11에서와 같은 문제점을 찾을 수가 있었다. 하드디스크의 write head는 gap에서 발생하는 leakage를 이용하여 기록하는 것인데 그림 4.10에서와 같이 일반 ring head에서는 충분한 leakage가 발생하여 write field를 형성하는데 그림 4.11에서 보여 지는 것처럼 modified된 pole tip head에서는 충분한 leakage가 발생하지 않았다. 이러한 이유는 top pole과 bottom pole의 마주보는 면적이 넓어 pole tip에 focusing 되어 자기력이 발생하는 것이 아니고 직접 top pole의 바닥에서 bottom pole로 자기력이 전달되기 때문에 생기는 문제이다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해서는 top pole에서 bottom pole로 향하는 major field를 최대한 억제하는 design을 하여야 한다.

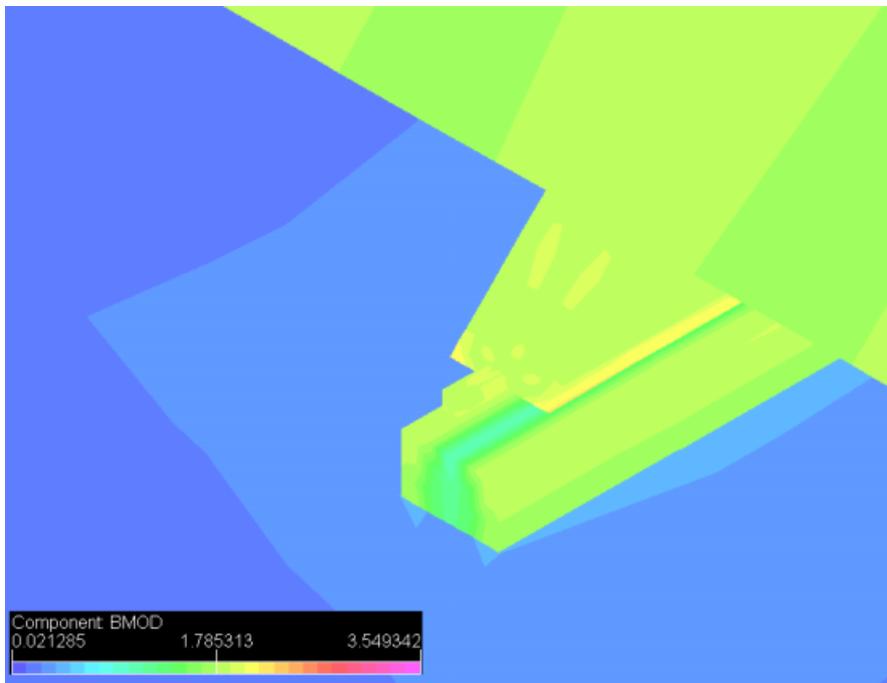
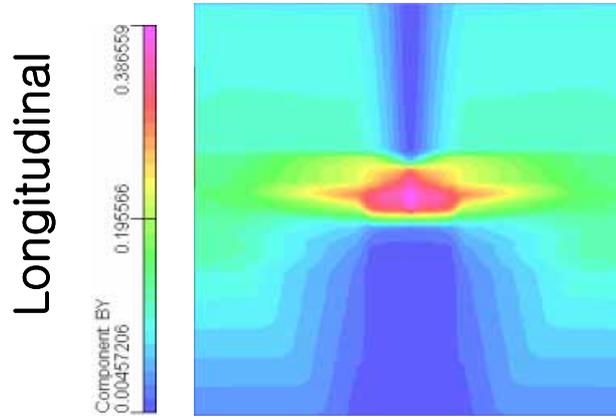
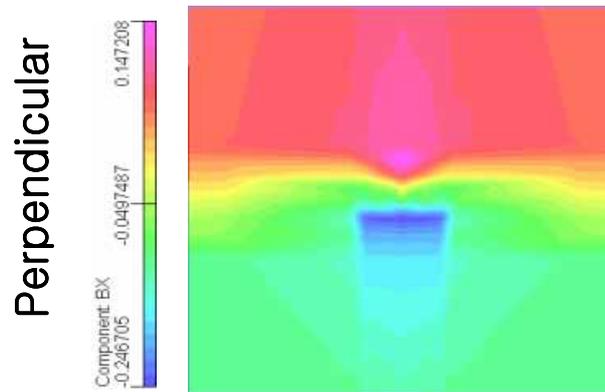


그림 4.8. 첫 번째 모델의  $B^2$  field



(a) 수평 필드 분포 ( $2\mu\text{m} \times 2\mu\text{m}$ )



(b) 수직 필드 분포 ( $2\mu\text{m} \times 2\mu\text{m}$ )

### Simulation Parameters

---

Gap Length	0.2 $\mu\text{m}$
Untrimmed Poles Length	0.5 $\mu\text{m}$
Untrimmed Poles Width	5 $\mu\text{m}$
Pole Tip Length	80nm $\times$ 80nm $\times$ 250nm
Current	300mA

---

Max By(Longitudinal) : 0.386559 [T]

Max Bx(Perpendicular) : 0.147208 [T]

그림 4.9. 첫 해석 모델의 수직·수평 필드

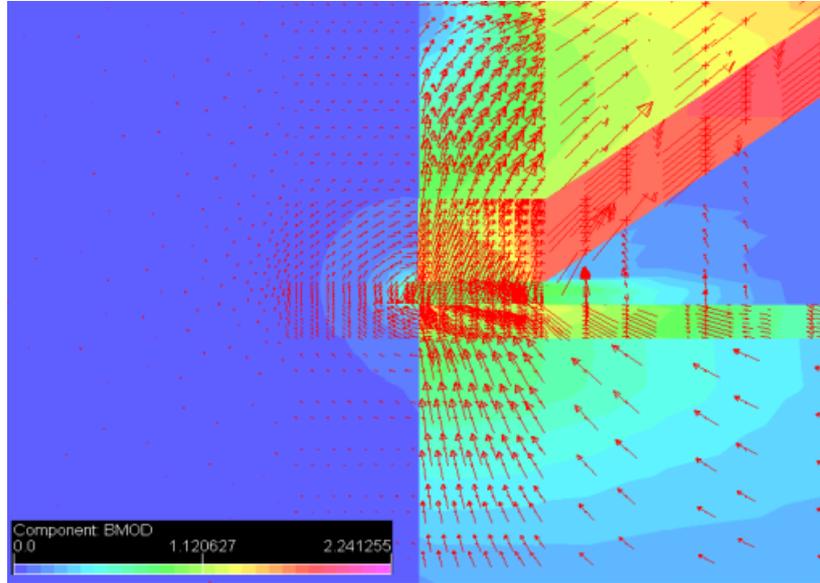


그림 4.10. inductive ring head에서의 write field

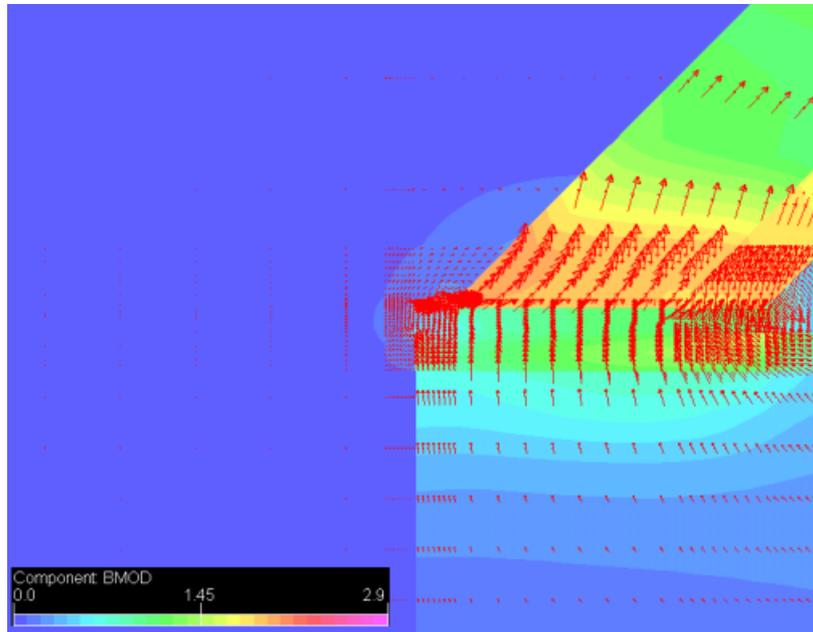


그림 4.11. pole tip head에서의 write field

#### 4.5. Head Shape Design에 따른 기록 Field의 변화

write head의 디자인에 따른 수직 기록 field와 수평 기록 field의 변화를 연구하였다. 이 연구를 위해 적용한 모델은 그림 4.12에 나타나 있는 모델이다. 이 모델 역시 최적화 디자인을 적용하지 않았으므로 초기 모델에서 발생한 결과와 비슷한 유형의 문제를 안고 있는 결과를 보이고 있다. 동일한 모델에서 gap size에 차이에 따라서 발생하는 field가 달라지므로 그림 4.13과 그림 4.14에 나타난 것처럼 gap의 size를  $1\mu\text{m}$ ,  $0.5\mu\text{m}$ ,  $0.3\mu\text{m}$ ,  $0.05\mu\text{m}$ 로 변화를 주었다. 그 결과 그림 4.15에서 보여지는 것처럼 수직 field의 값은 gap의 size가 넓을수록 커지고 수평 field의 값은 gap의 size가 좁을수록 커진다는 것을 알 수 있다. 이 결과에서 알 수 있는 것은 수직 field의 크기는 gap의 size가 무한정 넓다고 해서 커지는 것이 아니라는 것이다. 모델의 디자인에 따라 다소 차이가 있겠지만  $0.2 \sim 1\mu\text{m}$  사이의 값에서 최적화된 수직 field를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

위와 동일한 방법으로 여러 가지 모델을 적용하여 수직 field를 원하는 크기만큼 키우려고 했지만 가장 큰 필드가  $5500[\text{Oe}]$  정도의 크기를 얻을 수 있었다. 이 field는 고 밀도의 기록 미디어를 over-write 하기에는 역시 부족하다. 따라서 이 후 연구에서는 기록 밀도 목표를  $100 \text{ Gbit}/\text{in}^2$ 로 설정하고 head design을 연구함에 있어서 기록 미디어를 충분히 over-writing 할 수 있는 field 발생이 가능한 수평 field에 대한 최적화 연구를 진행하였다.

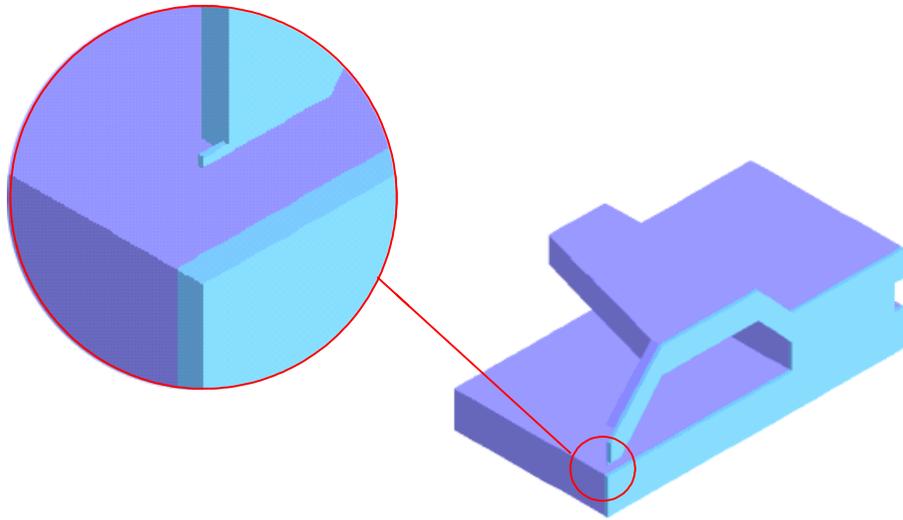


그림 4.12. gap 크기에 따른 write field 변화 적용 모델

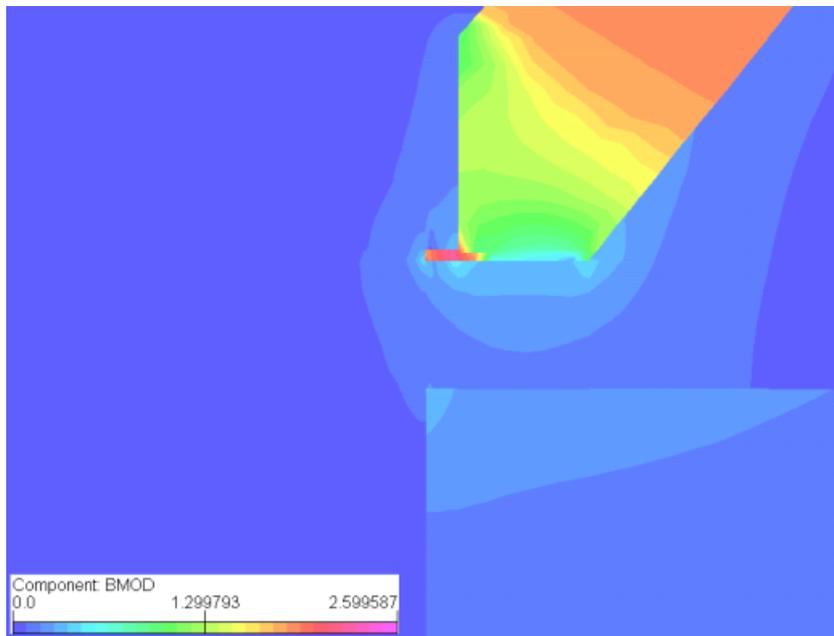


그림 4.13. gap size가  $1\ \mu\text{m}$ 일 경우

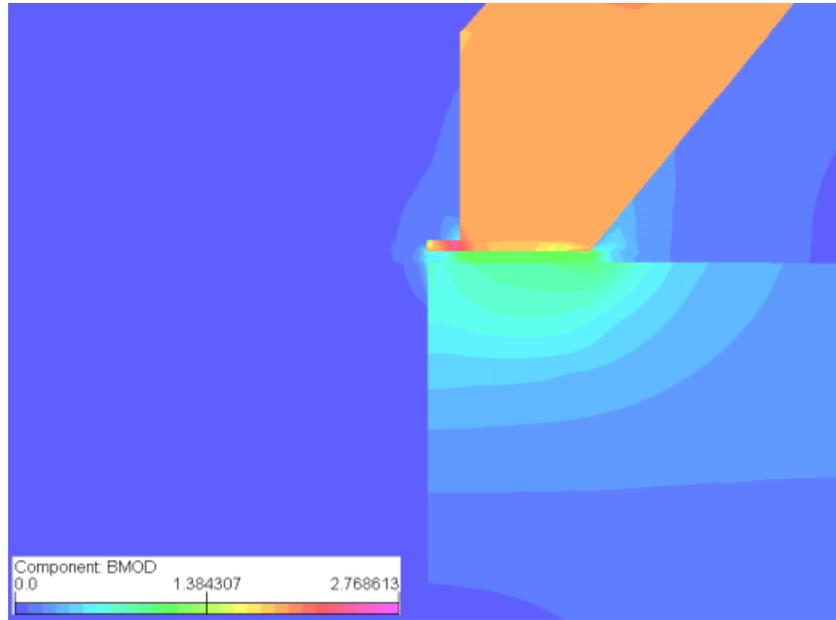


그림 4.14. gap size가 0.05  $\mu\text{m}$ 일 경우

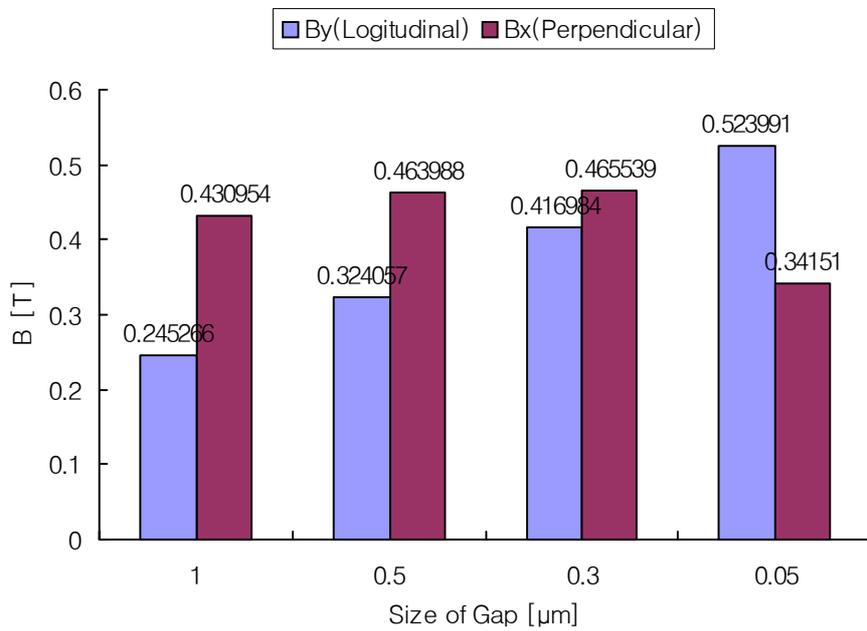
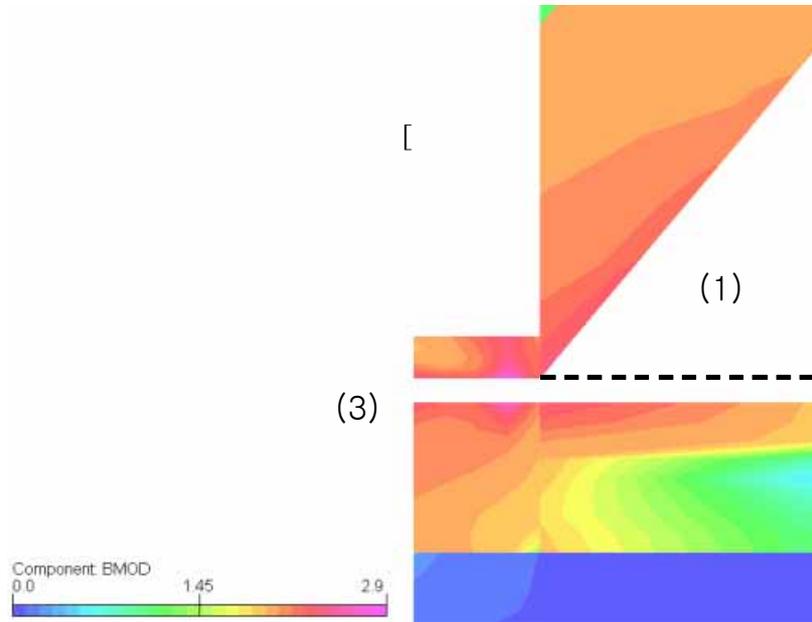


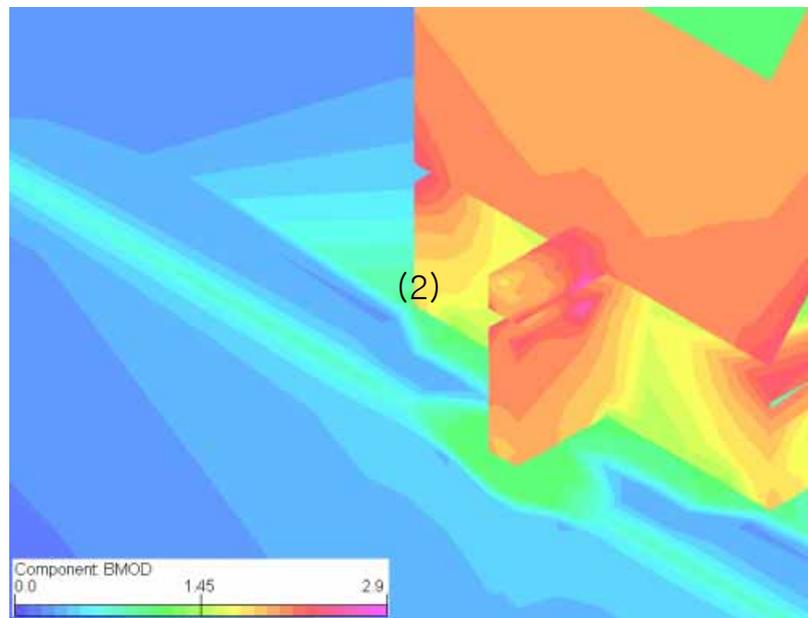
그림 4.15. gap size에 따른 수직 · 수평 write field 결과 비교

#### 4.6. 고 기록용 Write Head의 최적설계

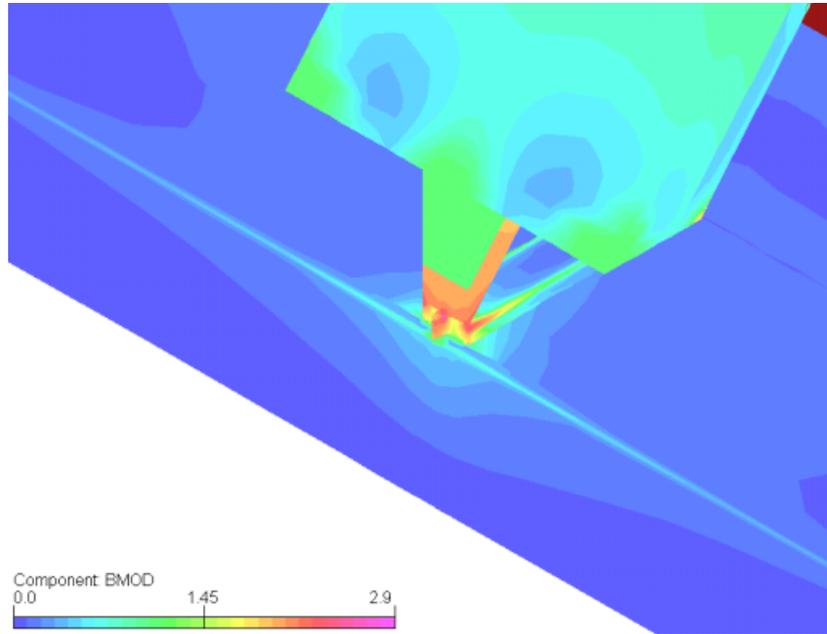
전술했던 바와 같이 초기에 디자인한 write head는 그 디자인의 특성으로 인하여 고 기록 미디어를 위한 write field를 충분히 발생시키지 못했다. 이러한 디자인적 단점을 점검하고 따라서 이 디자인을 보완하는 연구를 진행했다. 그 첫 번째 개선방안은 그림 4.16에 나타나 있다. top pole에서 bottom pole로 발생하는 major field의 양을 줄이기 위해서 top pole의 밑면의 면적을 줄이는 디자인을 하였고, field의 focusing을 위해 bottom pole을 변형하여 좀더 강한 field가 나올 수 있게 디자인 하였다. 또한 수평 field를 사용한 기록을 하기로 결정하였으므로 gap size를 50nm로 설정하였다. 이와같은 디자인을 적용하여 write head를 디자인 하고 난후 다시 전술했던 최적화 모델링을 거쳐 디자인을 최적화 한 후 F.E.M. 해석을 하고 난 결과가 그림 4.17에 나타나 있다. 이 결과를 분석해 볼 때, 수평 field의 최대 값이 7577.01[Oe]으로 고 보자력 미디어를 over-write 할 수 있는 충분한 필드를 얻었고, bit size : 70nm, track size : 190nm의 비교적 고밀도의 grain size를 얻을 수 있었다. 하지만, 초 고 기록 밀도인 100Gb/in<sup>2</sup>의 기록 밀도를 위해서 요구되는 grain size인 bit size : 60nm, track size : 100nm의 요구 조건은 충족하지 못했다. 따라서 이를 위해서는 더 낫은 최적화 디자인이 요구되었다. 이 디자인을 적용하여 얻을 field를 바탕으로 recording simulation 한 결과 그림 4.18에 나타난 결과인 56.6Gb/in<sup>2</sup>의 기록 밀도를 달성할 수 있었다. 그림 4.19에 나타난 그림은 flying height에 따른 field의 크기를 나타낸 것이다. 고도에 따른 field 감소 폭이 그렇게 크기 않다는 것을 알 수 있었다.



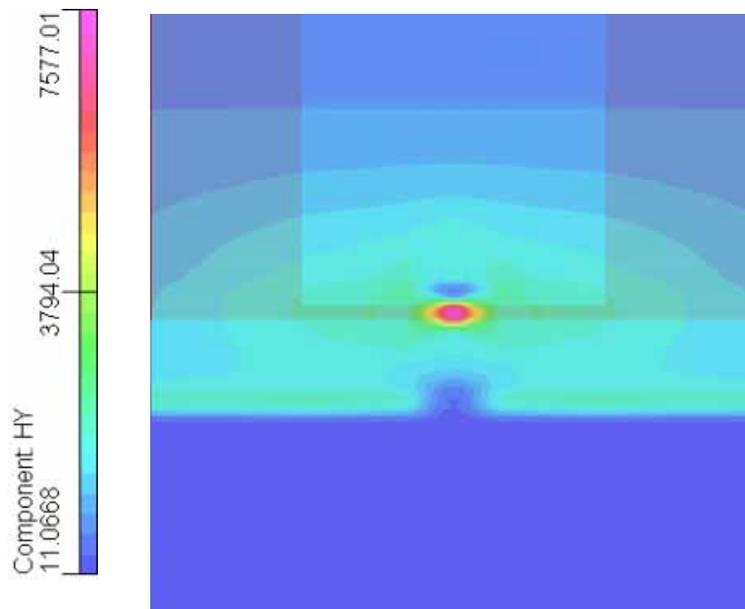
(a) top pole의 밑 면적과 gap size 디자인 변경



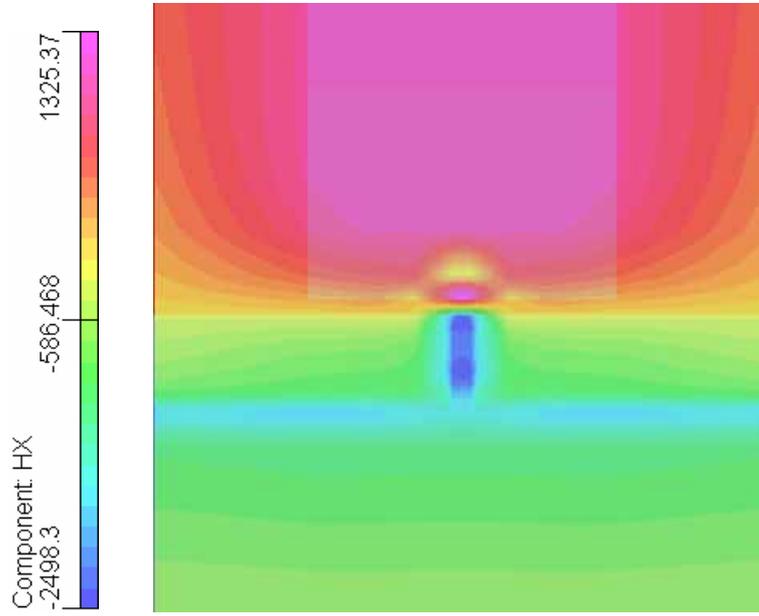
(b) bottom pole의 돌출 부분의 디자인 변경



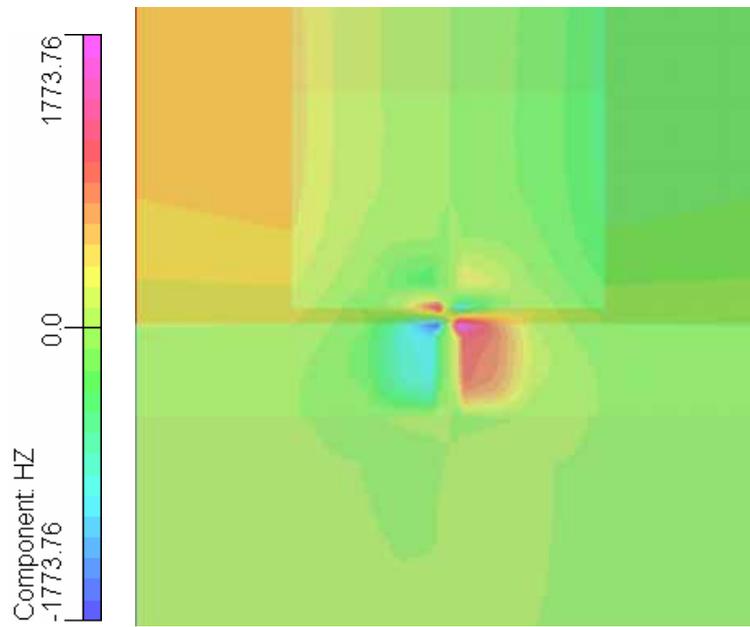
(c) 최적 디자인을 위한 개선 방안 적용 모델의 폴 부분  
 그림 4.16. 최적 디자인을 위한 개선 방안



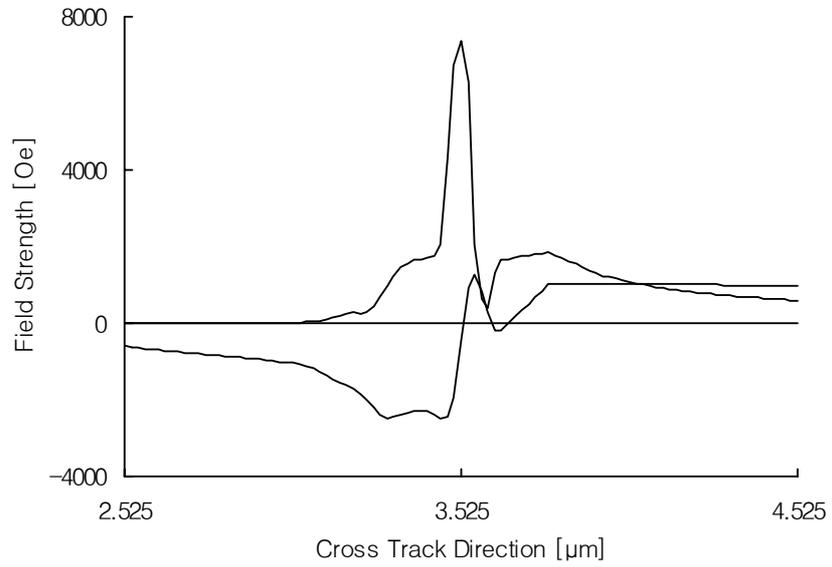
(a) Longitudinal Field (2 $\mu$ m X 2 $\mu$ m)



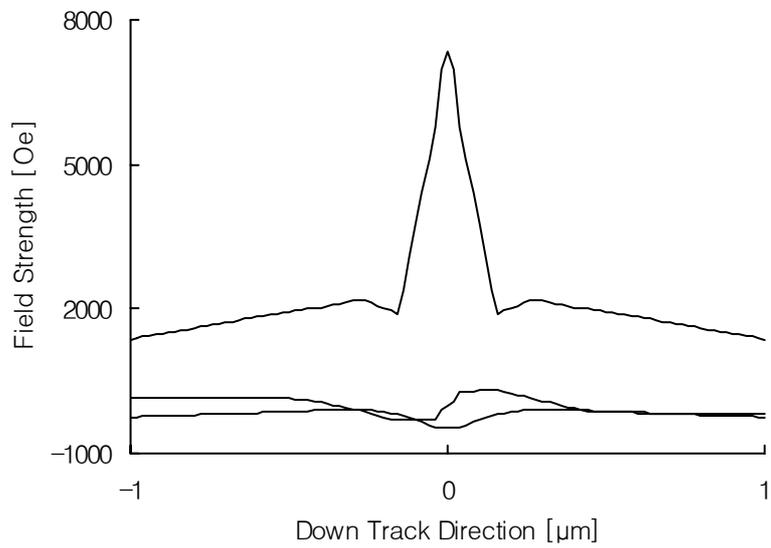
(b) Perpendicular Field (2 $\mu$ m X 2 $\mu$ m)



(c) Track Field (2 $\mu$ m X 2 $\mu$ m)



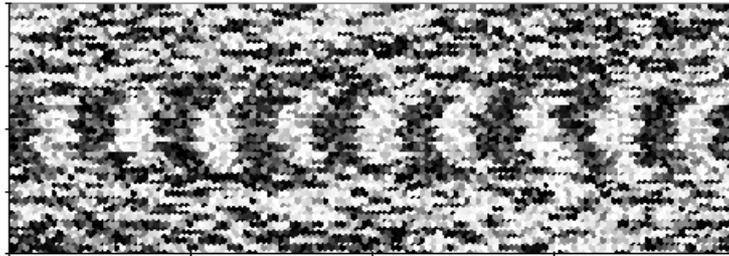
(d) down track 방향의 Field Strength



(e) cross track 방향의 field strength

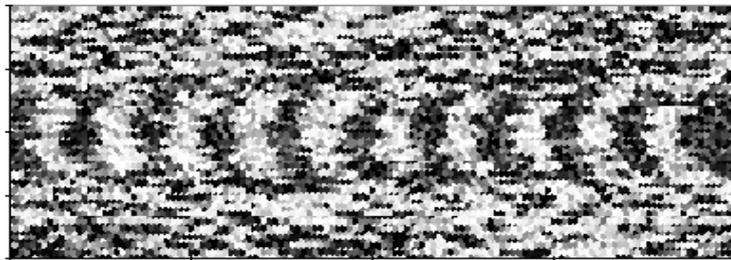
그림 4.17. 개선 디자인 적용 결과

(a) 454 kfcI



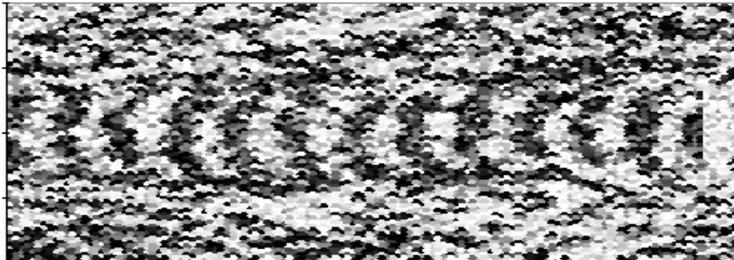
(Bit Length:56nm, 49.4 Gb/in²)

<b) 520 kfcI



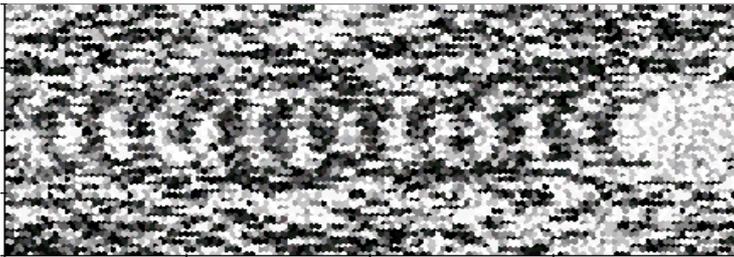
(Bit Length:48nm, 56.6 Gb/in²)

(c) 625 kfcI



(Bit Length:40nm, 68 Gb/in²)

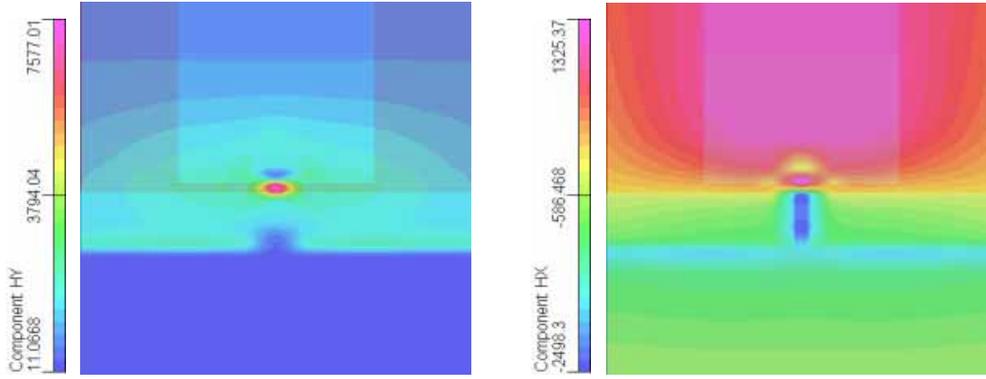
(d) 781 kfcI



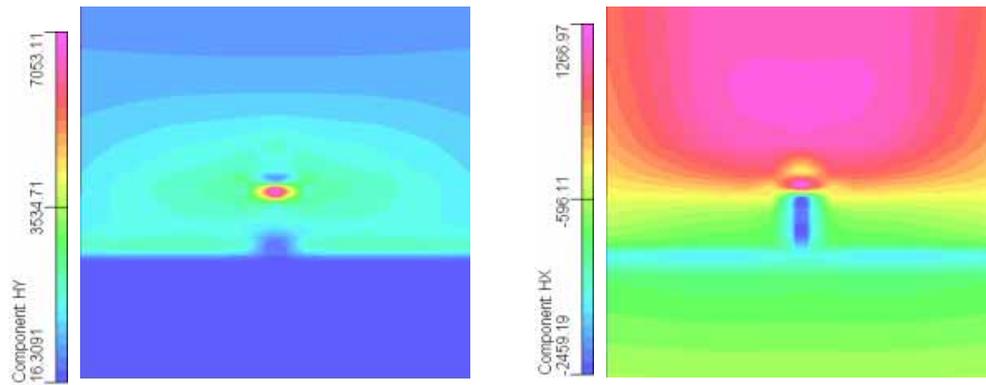
(Bit Length:32nm, 85 Gb/in²)

그림 4.18. 정보 기록 시뮬레이션 결과

Longitudinal FH:10nm Perpendicular



FH:15nm



FH:25nm

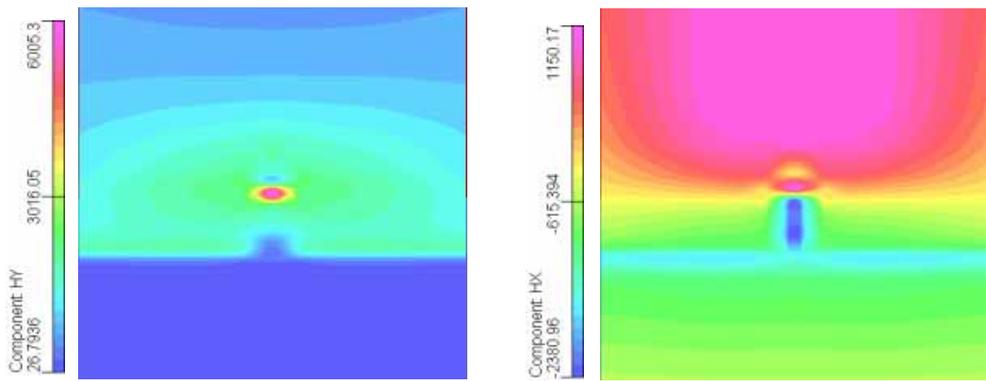
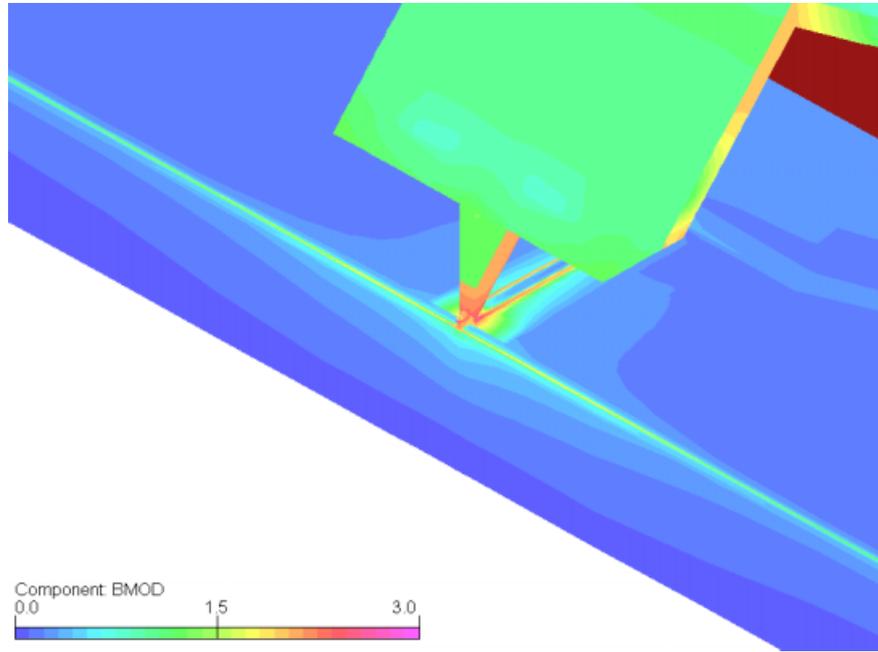


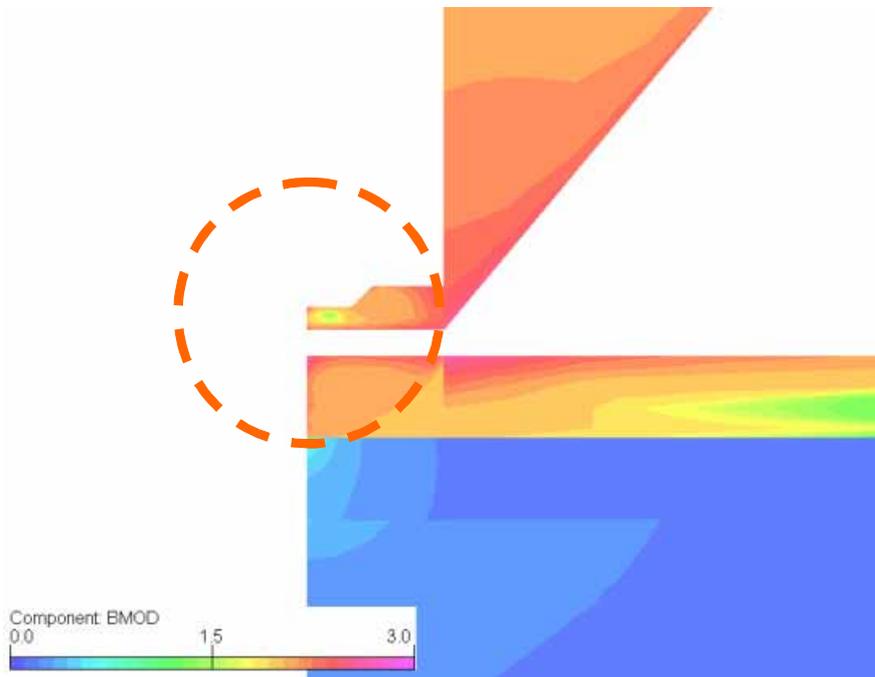
그림 4.19. flying height에 따른 write field의 크기 비교

이 모델에 대해 다시 최적화 디자인을 적용한 모델이 바로 그림 4.20에 나타나 있는 모델이다. field의 focusing을 위해 pole tip의 형태를 변형하였고 bottom pole 역시 조금 더 untrimmed 시켰다. 그 결과 그림 4.21에 나타난 것처럼 bit size와 track size가 작아져 보다 고 밀도를 기록할 수 있는 write head를 설계할 수가 있었다.

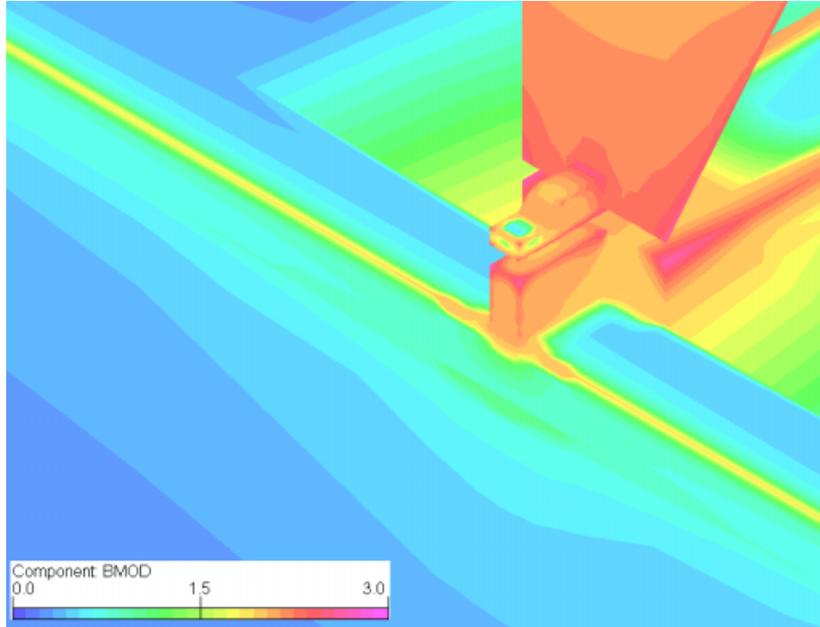
결과에서 보여 지는 것처럼 7410.46[Oe]의 field strength로 고 보자력 매디아를 충분히 over-writing 할 수 있는 크기이고 bit size는 60[nm], track size 140[nm]로 목표 용량에 상당히 근접한 크기이다. 하지만 전술했듯이 이 방식은 기존의 writing 방식을 따른 수평 field 기록 방식으로 여러 모델을 적용하여 최적하는 연구과정에서 최대 9000[Oe] 정도의 field strength를 얻을 수 밖에 없다는 연구 결과를 얻었다. 또한 더욱 고 밀도에 적용하기 위한 헤드는 더욱 작아진 bit size와 track size를 만족시켜야만 한다. 하지만 지금까지 연구해온 수평 방식으로는 아주 어렵다는 결론을 얻을 수 밖에 없었다. 따라서 이를 극복하기 위해서는 single layer를 이용한 방법이 아닌 double layer하에서의 기록 방법과 수평기록 방식보다 더욱 고 기록화 할 수 있는 수직기록방식을 이용하는 연구를 진행해야만 한다.



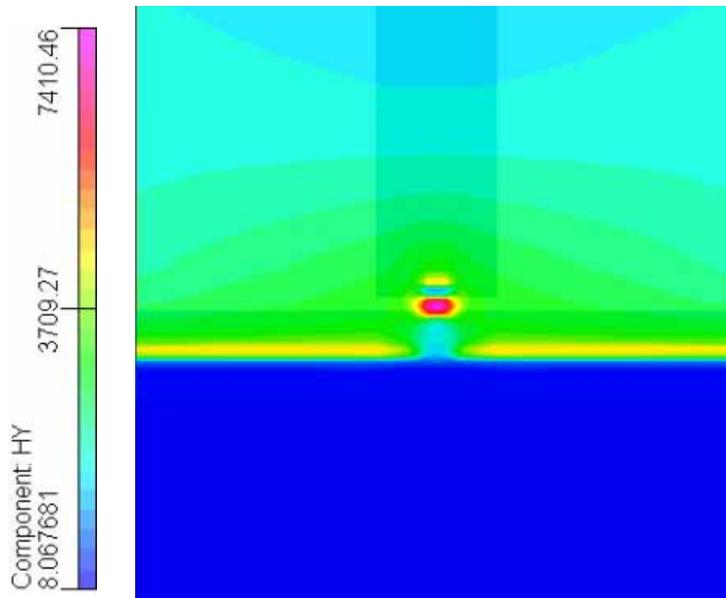
(a) 최적 디자인 적용 모델의 폴의 전체 모습



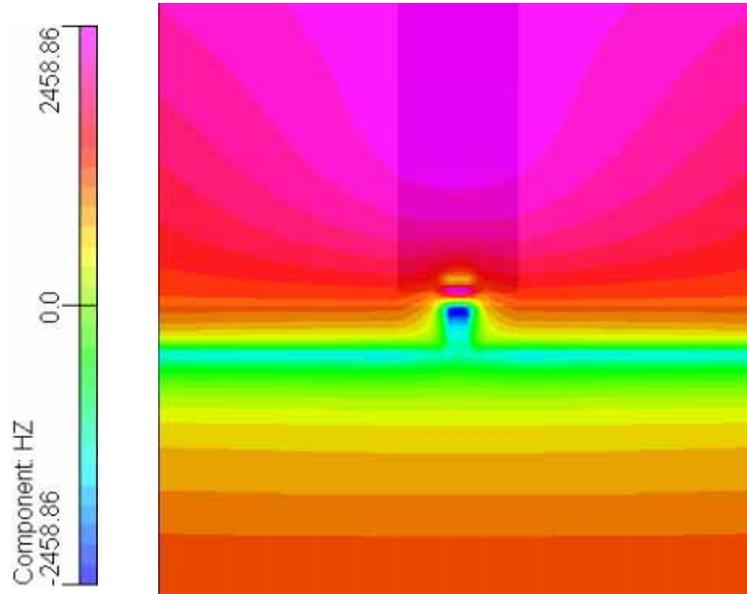
(b) 더 낮은 write field 발생을 위한 pole tip 디자인 적용



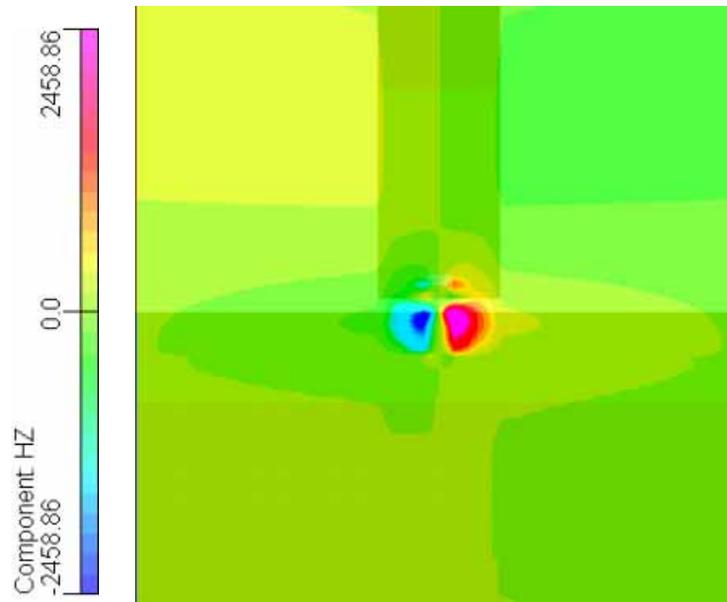
(c) 최적 디자인 적용 모델의 풀 확대 모습  
그림 4.20. 최적 디자인 적용 모델



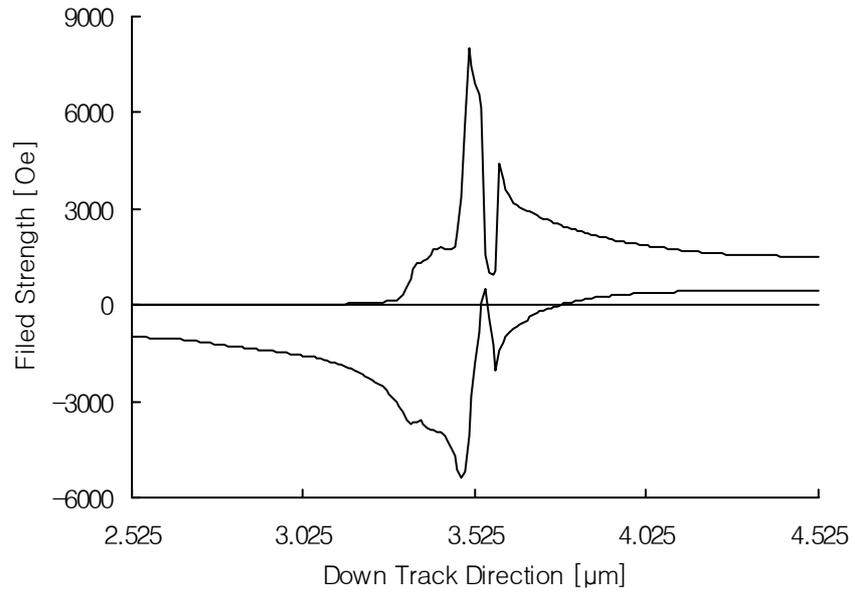
(a) Longitudinal Field (2 $\mu$ m X 2 $\mu$ m)



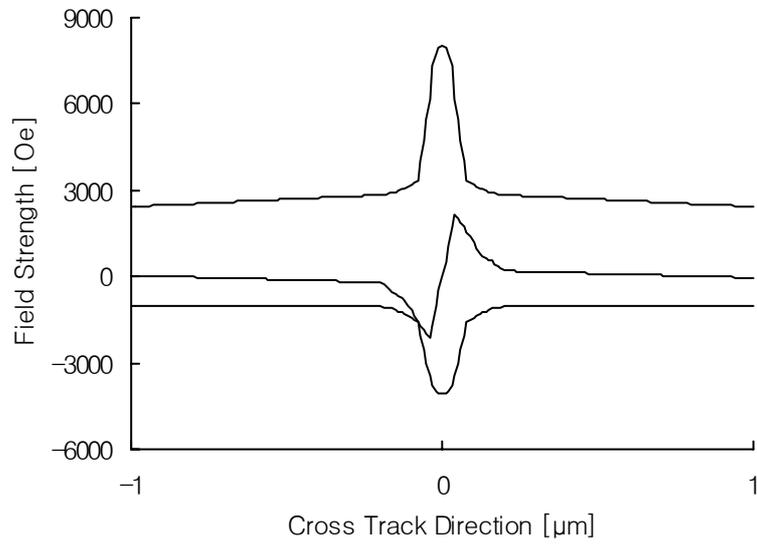
(b) Perpendicular Field (2µm X 2µm)



(c) Track Field (2µm X 2µm)



(d) down track 방향의 write field 그래프



(e) cross track 방향의 write field 그래프

그림 4.21. 최적 디자인 적용 모델에 대한 해석 결과

## 제 5 장 Head Field Delay에 관한 연구

고 기록밀도를 달성하기 위해서는 앞절에서와 같이 자기헤드의 크기를 줄이고 기록자계의 크기와 field gradient를 높여 공간적으로 기록밀도를 올리는 것과 함께 data rate를 높일 필요가 있다. 기록밀도의 증가에 발맞추어 헤드에 기록하는 속도도 함께 증가시킬 필요가 있기 때문이다. 따라서 자기헤드의 기록자계가 발생하는 속도를 높이는 연구가 필요하다.

자기헤드에 기록자계를 발생시키기 위하여 디지털 구형파의 전압을 인가하게 되는데, 자기헤드는 그 구조가 고 투자율 재료에 자속을 높이기 위하여 코일이 감겨있는 inductor와 같은 구조를 하고 있다. 즉 기록자계의 값을 올리기 위하여 자기저항을 줄여서 발생하는 자속양을 올려주어야 하는데, 이 경우 불가피하게 자기헤드의 inductance도 함께 증가하게 된다. 즉 단위전류에 의하여 발생하는 자속양의 비율이 inductance이므로, 기록자계를 높이기 위하여 자속양을 증가시킬수록 헤드의 inductance도 함께 증가한다. 헤드의 inductance가 증가하면 인가전압에 의하여 발생하는 전류의 시간지연을 발생시키며, data rate가 높아지면 전류의 증가속도가 전압을 따라가지 못하는 경우가 생기게 된다. 즉 일정치 이상의 data rate에 대해서는 자기헤드에 기록자계의 발생양이 현저히 줄어들게 된다.

기록헤드의 data rate를 올릴 경우 발생하는 두 번째 문제는 재질에 따라 자기헤드에 와전류가 발생하는 것이다. 자기헤드의 투자율과 포화 자속밀도가 높은 재료를 개발할 경우 재질의 도전율(conductivity)도 함께 증가할 경우가 있는데, 자기헤드의 도전율이 증가하면 고주파에서 발생하는 와전류의 양도 급격하게 증가한다. 자기헤드에 와전류가 발생하면 와전류에 의한 자계는 위상이 뒤지므로 자기헤드의 발생자계를 차단하는 역할을 하게 된다. 따라서 고주파로 갈수록 자기헤드의 inductance

및 eddy current에 의하여 기록헤드의 자계발생이 억제되므로 data rate를 높이기 위해서는 이 두 가지 영향에 대한 분석과 회피설계 기술이 필요하게 된다.

본 연구에서는 고기록밀도용 기록헤드의 field delay를 해석하기 위하여 앞절에서 최적 설계된 고 기록 밀도용 write head를 바탕으로 이 head의 인덕턴스의 영향에 의한 time delay에 관한 연구와 eddy current 효과를 해석하였다.

## 5.1. Inductance에 의한 Field Delay

write head가 high data rate를 만족하려면 짧은 시간 이내에 많은 기록이 가능해야한다. 현재 가장 빠른 HDD의 data rate는 63.9 Mbytes/sec 정도의 속도를 갖는다. 이를 주파수로 환산하면 500Hz 정도이며 이를 시간으로 환산하면  $1 / 500M = 2.0e-09$  Sec 이다. 따라서 HDD head는  $2.0e-09$ 초 동안 1번의 recording을 할 수 있어야 한다. 이와 같은 조건을 만족 시키려면 제한된 시간 내에 recording을 하여야 하므로 시정수  $\tau$ 가 이 제한된 시간범위 이내에 고 보자력 미디어를 충분히 over-writing 할 수 있는 write field가 발생할 수 있어야 한다.

그림 5.1은 자기기록헤드의 inductance에 의한 등가회로를 나타내었다. 헤드 시스템은 코일의 저항과 헤드의 inductance가 있고, capacitance는 무시할 수 있다. 이와 같은 R-L 등가회로에서는 그림 5.2와 같이 인가 전압에 의한 전류의 시간지연(time delay)이 발생하게 된다. 그림 5.2에서 시정수  $\tau$ 는 전류가 전압의 약 63%에 도달하기까지의 시간을 나타내며 아래 식에서 유도된 바와 같이 inductance에 비례하고 저항에 반비례한다. 즉 inductance가 커지면 time delay가 발생하게 되어 recording을 할 수 있는 임계점까지 도달하지 못 하게 된다. 이

는 곳 recording이 이루어 질 수 없다는 것이다. 따라서 high data rate를 위해서는 시정수  $\tau$ 가 인가 주파수보다 작아야 함을 알 수 있다. 본 연구에서는 최종값의 95%에 달하는 시정수의 3배 정도의 시간을 기준으로 한다. 즉 인가 전압의 주기가 시정수의 3배보다 작을 경우 헤드의 inductance로 인하여 기록자극 발생이 불완전해지므로 기록이 어렵다고 보고 기준으로 삼기로 한다. 따라서 high data rate를 위해서는 아래 수식에 나타나 있는 것처럼 저항 R이 커져야 하고 인덕턴스 L이 작아져야 한다는 것을 알 수 있다.

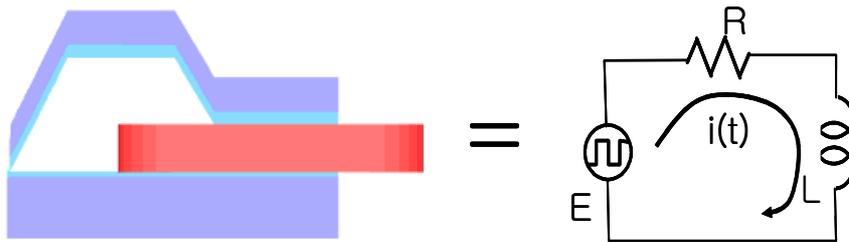


그림 5.1. write head와 등가 자기 회로

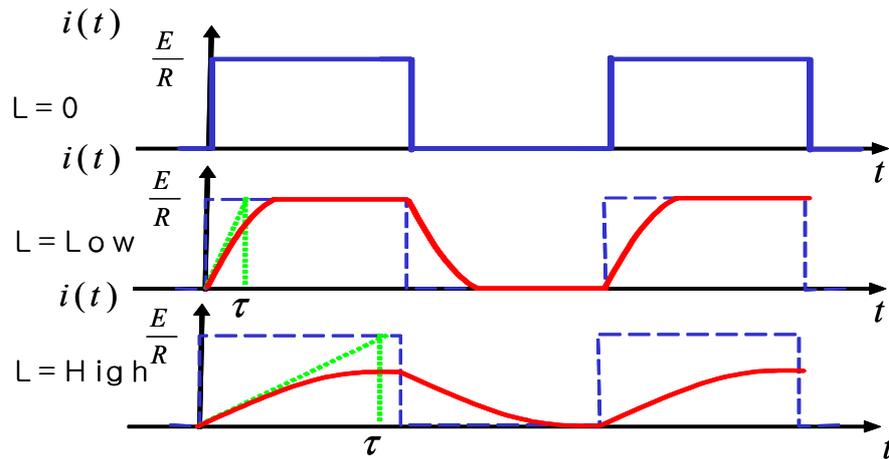


그림 5.2. 시정수  $\tau$ 와 시간 지연

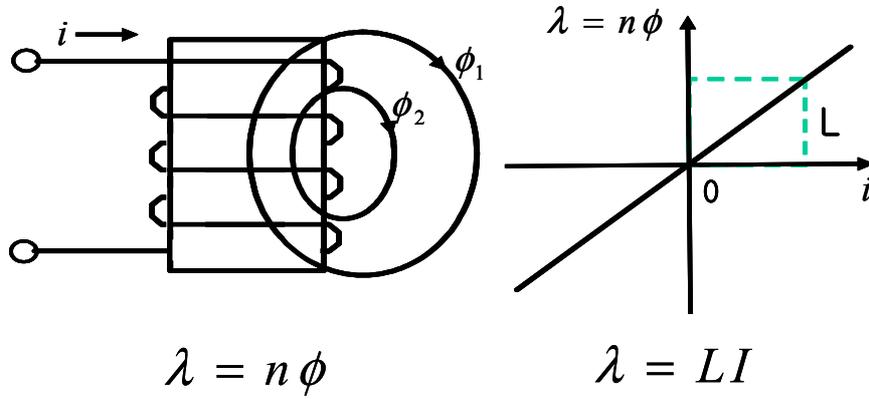


그림 5.3. Magnetic flux 와 Inductance

$$R_i + L \frac{d_i}{d_t} = E, \quad t \geq 0^+$$

$$R_i + L \frac{d_i}{d_t} = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{L}{R} \frac{d_i}{d_t} + t = 0 \quad (5.1.1)$$

$$i = K e^{-\frac{t}{\tau}} \left( \tau = \frac{L}{R} \right)$$

하드디스크의 write head를 자기 회로법으로 치환하면 그림 5.1과 같다.

그림 5.1에 나타나 있는 write head와 자기 등가 회로를 바탕으로 write head의 인덕턴스를 구하였다. 그림 5.3에 나타난 것과 같이 인덕턴스는 단위 전류에 의한 자속의 쇄교수이므로 write head에서 발생하는 자속과 coil의 turn 수를 알면 인덕턴스를 구할 수 있다는 것을 알 수 있다.

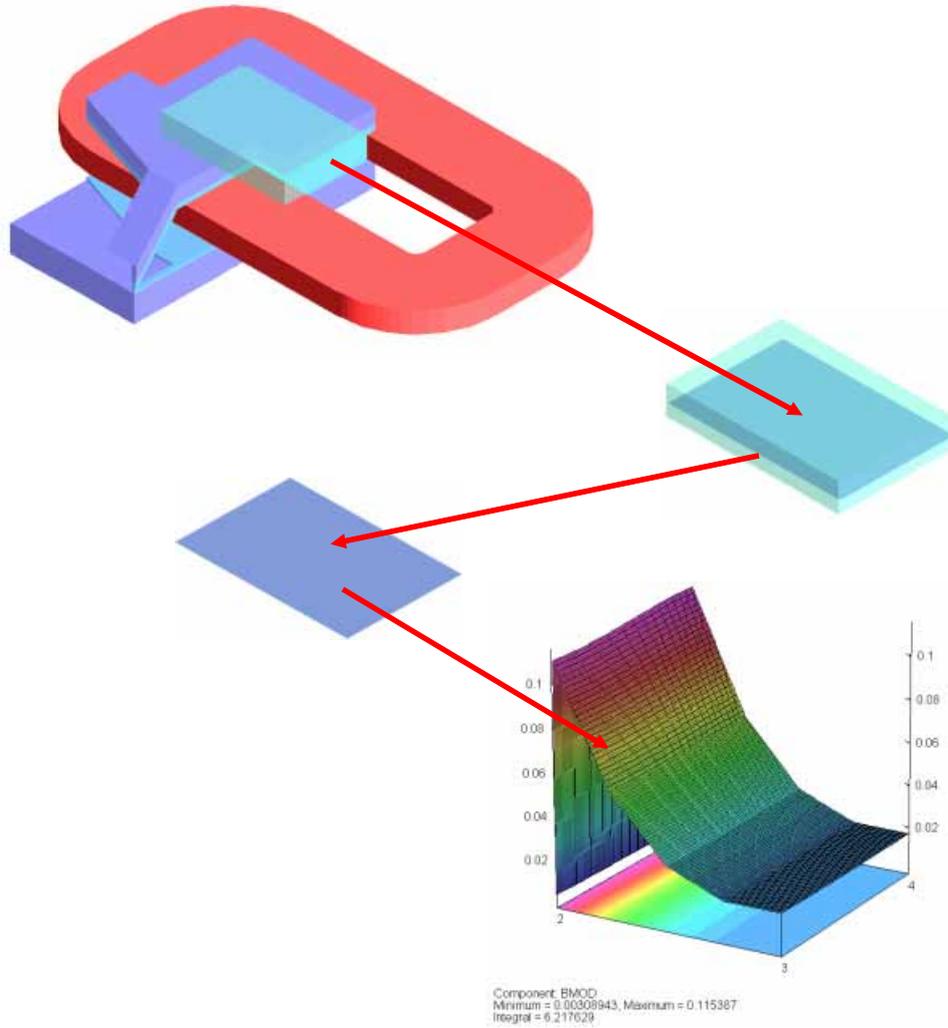


그림 5.4. 주어진 모델로부터 인덕턴스 계산

그림 5.4에 나타내어진 그림처럼 write head에서 가장 자속의 손실이 없는 부분의 단면에 있는 자속을 구해낸 후 이를 다시 면적으로 나누어 단위 자속을 구했다. 그리고 그 후 write head에 인가된 전류와 그 turn수를 대입하여 인덕턴스를 구했다.

$$\begin{aligned}
L &= \frac{n\phi}{I} \\
\phi &= 1.2088 [T] \times 15 [\mu m] \times 10 [\mu m] \\
&= 1.81325 \times E^{-10} [Wb] \\
L &= \frac{1 [turn] \times 1.81325 \times E^{-10} [Wb]}{0.2 [A]} \\
&= 906.62 [pH]
\end{aligned}
\tag{5.1.2}$$

앞절에서 설계된 write head에 인덕턴스를 구하면 수식 (5.1.2)와 같다. 이 때 코일턴수는 1로 하였으며 구해진 인덕턴스는 906.62 pH이다.

write head의 시간 응답을 구하기 위해서는 저항을 구해야 한다. 저항은 그림 5.5에 나타난 그림처럼 사용된 코일의 단면적과 길이, 재료의 도전율로부터 구할 수 있다.

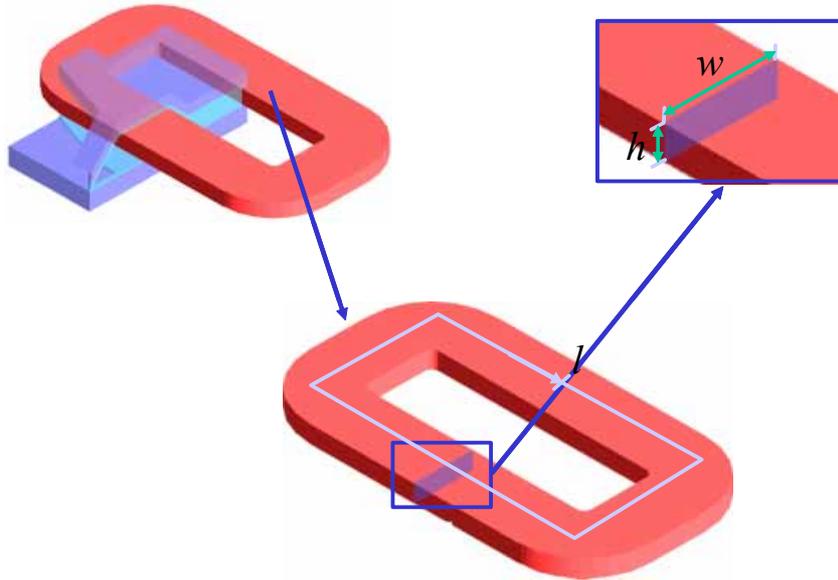


그림 5.5. 주어진 모델로부터 저항 계산

$$\begin{aligned}
R &= \frac{n \times l}{\sigma \times A} \\
&= \frac{1 [\text{turn}] \times 100 [\mu m]}{5.8 \times 10^{-7} [\Omega m] \times 0.5 [\mu m] \times 0.5 [\mu m]} \\
&= 6.8966 [\Omega]
\end{aligned} \tag{5.1.3}$$

따라서 write head의 저항을 구하는 식은 (5.1.3)과 같이 되고 식 (5.1.4)로부터 시정수를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
\tau &= \frac{L}{R} \\
&= \frac{906.62 [\text{pH}]}{6.08964 [\Omega]} \\
&= 1.31463 \times 10^{-10}
\end{aligned} \tag{5.1.4}$$

식 (5.1.4)에서와 같이 구한 시정수  $\tau$ 의 값은  $1.315 \times 10^{-10}$ 이며 안전을 위하여 최종치의 95%까지 도달하는  $3\tau$ 를 기준으로 하면  $3.945 \times 10^{-10}$ 이 된다.

head의 data rate를 구하기 위해서 주파수를 구하면 식(5)와 같고, 식 (5.1.5)에서 구해진 값을 보면 2.54 GHz의 주파수까지 안정적인 recording 동작을 보임을 알 수 있다.

$$\begin{aligned}
\frac{1}{3\tau} &= \frac{1}{3 \times 1.31459 \times 10^{-10}} \\
&= 2.53564 \\
&\cong 2.54 [\text{GHz}]
\end{aligned} \tag{5.1.5}$$

이것을 Bytes/Sec로 환산하면 약 317 MByte/sec 정도의 high data rate를 가짐을 알 수 있다.

## 5.2. Eddy Current에 의한 Field Delay

write head에는 inductance에 의한 time delay와 함께 high data rate가 됨으로 인해서 발생하는 eddy current에 의한 field delay가 존재한다. 그림 5.6에 나타난 것처럼 자성체에 전류를 인가하여 자화를 시키면 도전율을 갖는 재질의 내부에 Faraday 법칙에 의하여 90도의 위상차를 갖는 와전류가 발생한다. 와전류에 의한 자계는 외부자계의 변화를 억제하므로(Lenz) 헤드자계의 생성을 방해하게 된다.

그림 5.7을 보면 eddy current는 주파수가 커짐에 따라 아주 크게 증가 하는 것을 알 수 있다. 따라서 write head의 gap에서 발생하는 자계도 data rate가 증가할수록 와전류에 의한 영향으로 줄어들어 알 수 있다.

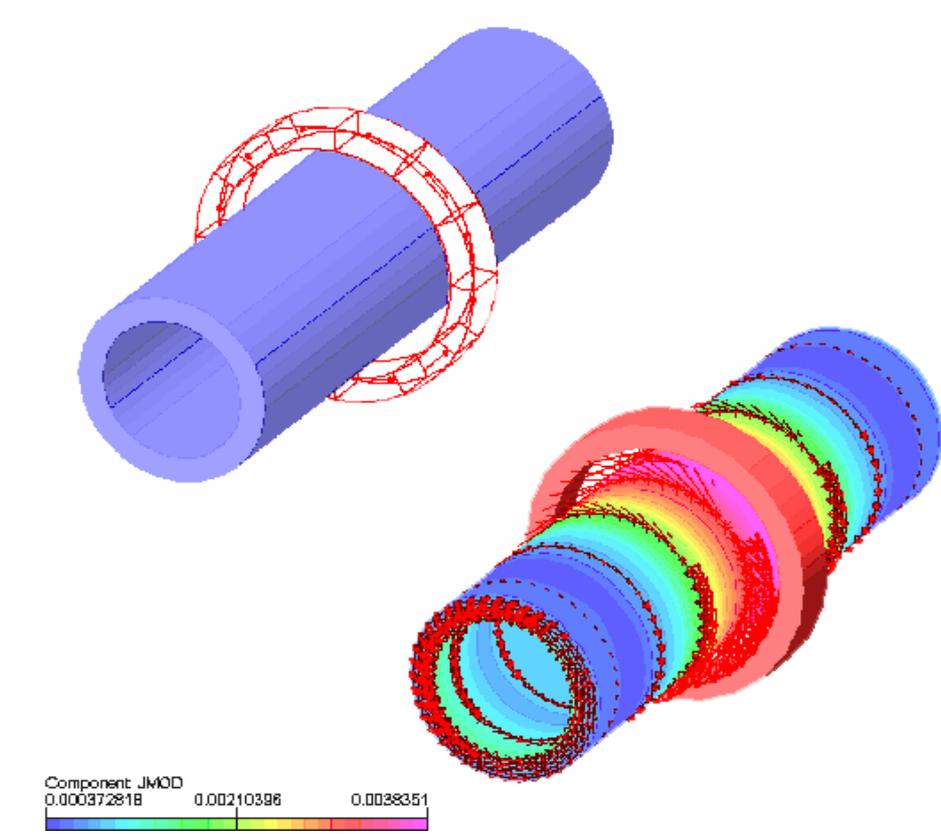


그림 5.6. eddy current의 발생

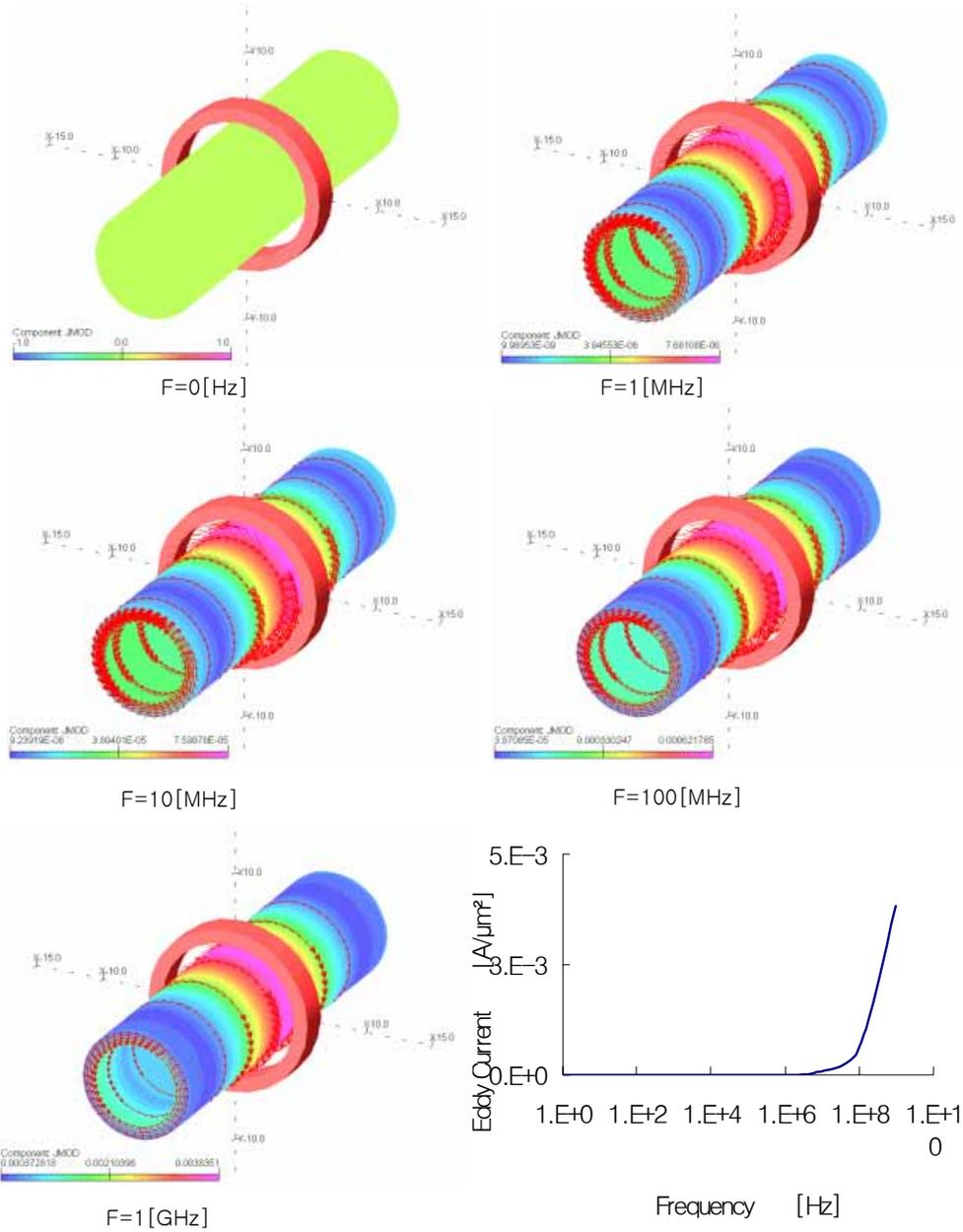


그림 5.7. 주파수 변화에 따른 eddy current 발생

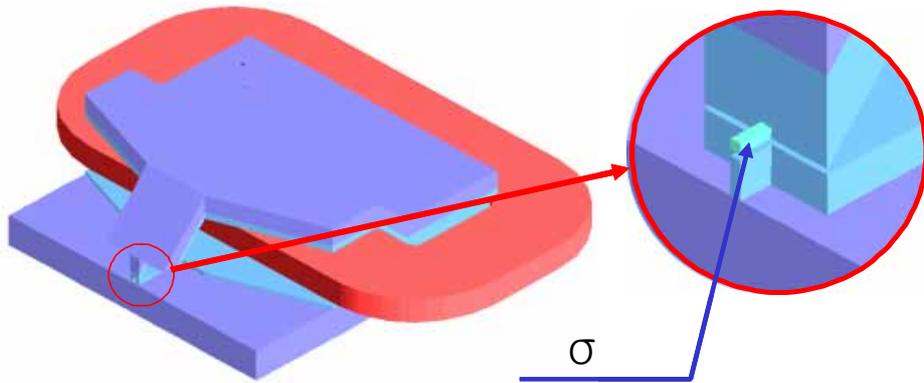
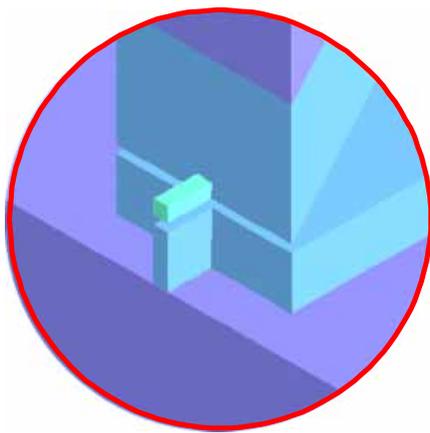
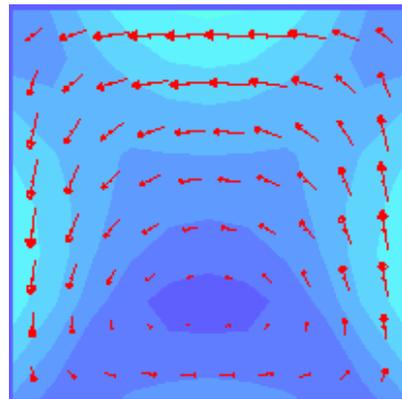


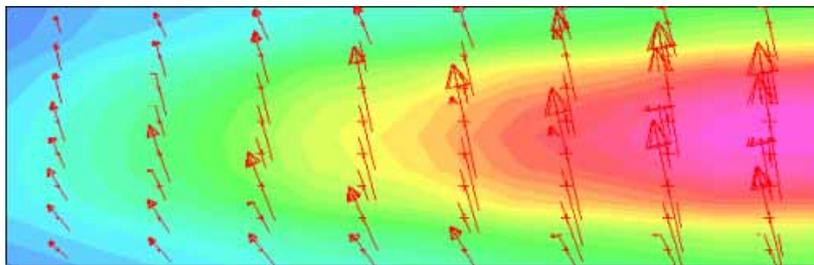
그림 5.8. 도전율에 따른 eddy current 발생 비교 적용 모델



(a) pole tip



(b) front view (0.08 $\mu$ m X 0.08 $\mu$ m)



(c) side view (0.25 $\mu$ m X 0.08 $\mu$ m)

그림 5.9. pole tip에서 발생한 eddy current

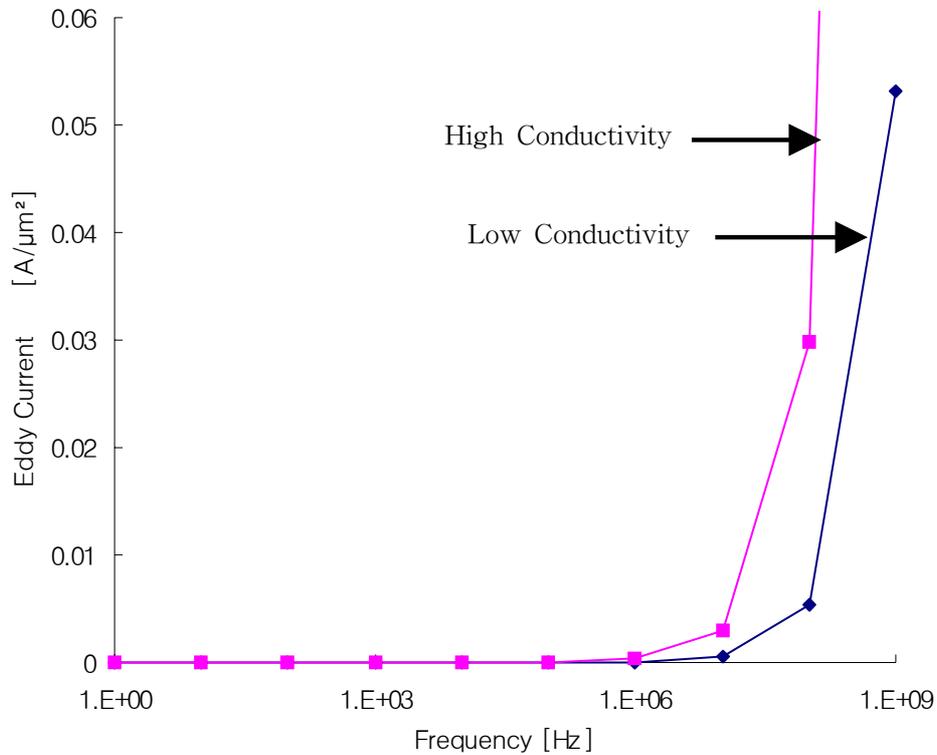


그림 5.10. 주파수에 따른 pole tip에서 발생하는 eddy current

그림 5.9는 도전율에 따른 eddy current의 영향에 대한 것이다. 도전율이 큰 재료의 경우(5E07) 10MHz부터 와전류가 생성되기 시작하여 100MHz에서 급격하게 증가하지만 비교적 도전율이 작은 경우(6E07) 100MHz부터 와전류가 생성되며 1GHz의 주파수에서는 높은 도전율 재료에 비하여 현저히 작은 와전류가 생성됨을 알 수 있다.

또한 그림 5.10에서 나타나 있는 것처럼 write head를 단일 층으로 구성하지 않고 여러층으로 적층해서 구성한다면 eddy current의 발생을 줄일 수 있으므로 따라서 field delay에 의한 효과도 줄어들 것이다.

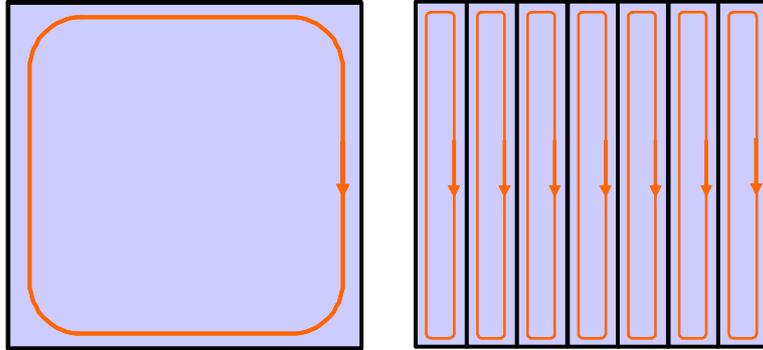


그림 5.11. 적층과 eddy current 경로

### 5.3. 초 고기록 밀도를 위한 기록헤드 설계

inductance에 의한 전류 지연문제를 해결하기 위한 방법으로는 첫째 자기헤드에서 inductance는 코일턴수의 제곱에 비례하므로 자기헤드 코일턴수를 줄이는 방법이 있다. 이 경우 같은 기자력(magneto motive force)를 유지하기 위하여 전류값을 높여주어야 한다. 둘째는 시간지연 시정수는 inductance에 비례하고 저항값에 반비례하므로 회로의 코일 저항값을 증가시키는 방법이 있다. 이 경우 저항증가에 따른 전류감소를 막기 위해서는 전압값을 높여주어야 한다. 셋째는 회로에 capacitance를 인가하여 목표로 하는 주파수에서 공진이 일어나도록 하여 inductance의 효과를 상쇄시키는 방법이 있다. 이 경우 공진 주파수 이외의 주파수에서는 전류의 overshoot 또는 undershoot가 발생하므로 그 영향에 따른 검토와 억제방안이 필요하다.

자기헤드에서 발생하는 와전류를 억제하기 위한 방법으로는 자기헤드를 적층하는 방법이 효과적이거나 nano scale의 구조물에 적층구조를 만들기가 쉽지 않으며 특히 앞절의 연구결과에서도 확인되듯이 pole tip의

모양에 따라 자계의 세기와 분포가 민감하게 반응하므로 적층구조 제작 시의 공차나 동작중 열적 팽창계수차이 등에 의한 뒤틀림이 설계치와 다른 자계를 발생시킬 수도 있다. 또한 적층구조에 따른 점적율 하락에 따라 투자율이나 자속량의 하락이 일어나기도 한다. 와전류 발생을 억제하는 또다른 방법으로는 자기헤드의 재질에 저항성분을 조절하여 저항성분이 있도록 하는 방법이 있다. 그러나 이 방법은 투자율 및 포화자속밀도와 깊은 연관이 있으며 와전류 관점에서는 헤드재료의 저항성분이 클수록 와전류가 억제되므로 투자율이나 포화자속밀도의 저하를 피하는 한도 내에서는 저항치가 높은 재료가 유리하다고 할 수 있다.

## 제 6 장 결 론

고밀도의 자기기록 장치를 설계를 위한 여러 연구를 진행하였다. 그 결과 일반적인 유한요소 패키지 프로그램에서의 디자인적 환경으로 인하여 실제 적용 가능한 값을 얻을 수 없다는 한계를 극복하기 위하여 정밀한 자계 경도를 구할 수 있는 프로그램을 자체 개발하였고 고밀도 자기기록용 헤드를 위한 3차원 비선형 해석 기법을 개발하였다. 또한 자기헤드를 구성하는 구성 매체의 특성과 field를 해석함으로써 write Head를 구성하는 매체가 가져야할 조건 및 방향에 대하여 제시하였다. 또한 write head의 pole tip의 shape design과 bottom pole의 shape design에 수평 write field를 극대화 할 수 있는 최적디자인하는 방법을 연구 제시함으로써 인해 매체의 효과를 극대화 하는 방법을 개발 제시하였고 현재 수평 기록 방식에서 field strength 7500[Oe] 이상을 발생 시킬 수 있는 헤드를 최적화 기술을 개발하였다. 그리고 이와 같은 공간적 제약만이 아닌 시간적 제약을 극복하기 위하여 기록 헤드에 발생하는 inductance로 인한 효과를 분석하여 전류 지연에 대한 해석 기술 및 eddy current에 인한 효과를 분석하여 필드 지연에 대한 해석 기술을 개발하였다.

현 시점에서 하드 디스크 드라이브는 더욱 고밀도화 되어가고 있다. 따라서 본 논문에서 제시한 수평 기록방식으로는 곧 그 한계점에 다다르게 된다. 이러한 기록한계를 극복하기 위한 방법으로 현재 가장 주류를 이루고 있는 double layer의 기록 매디아를 이용한 방식이다.[28]-[29] 이 경우 soft magnetic under layer(SUL)의 영향으로 single layer를 이용한 경우의 기록 결과 보다 2배정도의 좋은 결과를 보이고 있다. 또한 수평 기록 방식의 한계를 극복하기 위하여 가장 핫 이슈가 되고 있는 새로운 기록 방식인 수직 기록 방식용 write head에 관한 연구도 보완 진행하여야만 하겠다. 그리고 지금의 기록 방식의 magnetic head만을 사용하는 방식을 사용하고 있지만 현존하는 기록적 한계를 극복하기 위해서는 단일 기록 방식 헤드를 이용하는 것이 아닌 hybrid head를 이용해야만 한다. 현재 가장 주류를 이루는 방식의 hybrid head는 optical head와

magnetic head를 복합하는 방식이다. 따라서 본 연구도 이와같은 hybrid head 방식을 적용하여 보완 연구 진행해 나갈 것이다.

## 참 고 문 헌

- [1] <http://www.ibm.com>
- [2] Thomas Chang, "Modeling Assessment of the Side Writing Properties of a Notch Write Head", IEEE Trans. on Mag., Vol. 33, No. 5, pp2842 - 2844, September 1997.
- [3] R. H. Gallagher, "Finite Element Analysis : Fundamental", Prentice Hall, 1975.
- [4] S. S. Rao, "The Finite Element Method in Engineering", Pergamon, 1982.
- [5] O. C. Zienkiewicz, "The Finite Element Method", McGraw-Hill, 1977.
- [6] J. N. Reddy, "Applied Functional Analysis and Variational Methods in Engineering", McGraw Hill, 1986, reprinted by Krieger, Melbourne, Florida, 1992.
- [7] Brezzi, F. and Fortin, M., "Mixed and Hybrid Finite Element Methods", Springer-Verlag, 1991.
- [8] S. Wang, E. Louis, J. Wolfson, R. Anderson, and M. H. Kryder, "A Perpendicular Contact Recording Head with High Moment Laminated FeAlN/NiFe Pole Tips", IEEE Trans. On. Mag., Vol. 30, No. 6, pp. 3897 - 3899, November 1994.
- [9] W.P. Jayasekara, A. Roesler and M. H. Kryder, "Study of Narrow Tracks Written with FeAlN Write Heads", IEEE Trans. On. Mag., Vol. 32., No. 5., pp. 3548 - 3550, September 1996.
- [10] W. P. Jayasekara, S. Khizroev, M. H. kryder, W. Weresin, P. Kasiraj and J. Fleming, "Inductive Write Heads Using High Moment FeAlN Poles", IEEE Trans. On Mag., Vol. 35. No. 2., pp. 613 - 618, March 1999.
- [11] Josh Schare, Sakhrat Khizroev, Prof. Mark Kryder, "Design of 100Gbit/ $in^2$  Perpendicular Recording Heads", Data Storage Systems Center Electrical and Computer Engineering Dept. Carnegie Mellon University, 1999.
- [12] Ingrid Petri, Tanja Zimmermann, Josef Zweck and H. Hoffmann, "Investigations on the stray-Fields of Magnetic Read/Write Heads and their Structural Reasons", IEEE Trans. On. Mag., Vol. 32, No. 5, pp. 4141 -4143, September 1996.
- [13] S. X. Wang and P. R. Webb, "Modeling of Submicron Trackwidth Inductive Write Head Designs", IEEE Trans. On. Mag., Vol. 31, No. 6, pp. 2687 - 2689, November 1995.

- [14] Mark H. Kryder and Weng-Yew Lai, "Modeling of Narrow Track Thin Film Head Fields", *IEEE Trans. On. Mag.*, Vol. 30, No. 6, pp. 3873 - 3875, November 1994.
- [15] Takayuki Ichihara, Shigeki Nakagawa, Hiroaki Matsumiya and Masahiko Naoe, "Three-Dimensional Analysis of Dual Track Complementary Type of Heads for Perpendicular Magnetic Recording", *IEEE Trans. On. Mag.*, Vol. 34, No. 4, pp. 1489 - 1491, July 1998.
- [16] T. Koshikawa, A. Nagai, Y. Yokoyama, T. Hoshino, "A New Write Head Trimmed at Wafer Level by Focused Ion Beam", *IEEE Trans. On. Mag.*, Vol. 34, No. 4, 1471 - 1473, July 1998.
- [17] Michael P. Salo, "Write Induced Track Misregistration Due to Magnetic Center Shifts in Thin Film Inductive Heads", *IEEE Trans. On. Mag.*, Vol. 30, No. 6, pp. 3882 - 3884, November 1994.
- [18] Y. Hirayama, Y. Honda, T. Takeuchi and M. Futamoto, "Recording Characteristics of Single-Layer Perpendicular media Using Ring-Shaped Heads", *IEEE Trans. On. Mag.*, Vol. 35., No. 5, pp. 2766 - 2768, September 1999.
- [19] Tsutomu Ishi, Yoshihiro Nonaka, Takao Matsubara and Nobuyuki Ishiwata, "Highly defined Narrow Track Write Heads Fabricated by Focused Ion Beam Trimming with the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Refilling Process", *IEEE Trans. On. Mag.*, Vol. 35, No. 5, pp. 2541 - 2543, September 1999.
- [20] Michael Madison, Thomas, Thomas Arnoldussen, Mustafa Pinarbasi, Thomas Chang, M. Parker, Jinshan Li, Shanlin Duan, Xianoping Bian, Mohammad Mirzamaani, Robert Payne, Ciaran Fox, Run Han Wang, "Beyond 100Gb/in<sup>2</sup> : Using a Merged Notched Head(FIB-Defined Writer and GMR Reader) on Advanced Low Noise Media", *IEEE Trans. On. Mag.*, Vol. 35., No. 2., pp. 695 - 699, March 1999.
- [21] C. Tsang, M. Pinarbasi, H. Santini, E. Marinero, P. Arnett, R. Olson, R. Hsiao, M. Williams, R. Payne, R. Wang, J. Moore, B. Gurney, T. Lin & R. Fontana, "12Gb/in<sup>2</sup> recording demonstration with SV read heads & conventional narrow pole-tip write heads", Vol. 35, No. 2, pp 689 - 694, March 1999.
- [22] Yoichiro Tanaka and Tomoki Komai Taguchi, "The Effects of Head Configuration on Write Resolution for Submicron track Recording", *IEEE Trans. On. Mag.*, Vol. 31, No. 6, pp 2684 - 2686, November 1995.
- [23] Ikuya Tagawa, takao Koshikawa and Yuji Sasaki, "High Performance

- Write Head for 10krpm HDD with High Data Rate Recording up to 45MB/s", IEEE Trans. On. Mag., Vol. 36, No. 1, pp. 177 -182, January 2000.
- [24] Zhu-Pei Shi, "Nonlinear, Eddy Current Damped Writer Model", IEEE Trans. On. Mag., Vol. 35, No. 5, pp. 2514 - 2516, September 1999.
- [25] Jason Jury, Peter George and Jack H. Judy, "Frequency and Transient Response of Yoke Flux for 45/55 NiFe and CoTaZr Thin Film Write Heads", IEEE Trans. On. Mag., Vol. 35., No. 5, pp. 2508 - 2510, September 1999.
- [26] H. Takano, K. Itoh, Y. Shiroishi, M. Fuyama, Y. Sugita, "High-Frequency Write Characteristics of Thin Film Heads for HDDs", IEEE Trans. On. Mag., Vol. 31, No. 6, pp. 2651 - 2656, November 1995.
- [27] Jason Jury, Anand Gopinath and Jack H. Judy, "Design of a Single-turn Microstrip Write Head for Ultra-high Data Rate Recording", IEEE Trans. On. Mag., Vol. 35, No. 5, pp. 2547 - 2549, September 1999.
- [28] H. Muraoka, K. sato, Y. Sugita and Y. Nakamura, "Low Inductance and High Efficiency Single-Pole Writing Head for Perpendicular Double Layer Recording Media", IEEE Trans. On. Mag., Vol. 35, No. 2, pp. 643 - 648, March 1999.
- [29] S. Iwasaki, "Gbit/in<sup>2</sup> Perpendicular recording Using Double Layer Medium and MIG Head", IEEE Trans. On. Mag., Vol. 32, No. 5, pp 3795 -3800, September 1996.
- [30] H. Won, G.S. Park, "HDD Head에서의 Field Gradient 해석 방법", 대한 전기 학회 2000년도 춘계 학술 대회 논문집, pp. 212-217, April 2000.
- [31] H. Won. G.S. Park, "HDD Write Head의 자기적 성질과 형상에 따른 Write Field의 특성 해석", 대한 전기 학회 부산지부 2001년도 춘계학술대회 논문집, pp. 40 - 46, May 2001.
- [32] H. Won, G.S. Park, "100Gbit/in<sup>2</sup> 기록밀도를 위한 HDD Write Head의 설계", 대한 전기 학회 2001년도 하계 학술 대회 논문집, B권 pp. 626 - 680, July 2001.
- [33] H. Won, G.S. Park, K.S. Kim, S.H. Lim, "고 기록 밀도를 위한 HDD Write Head의 설계", 한국 자기 학회 2001년도 추계 학술 대회 논문집, U1, October 2001.
- [34] K.S. Kim, C.E. Lee, S.H. Lim, H. Won, G.S. Park, "고밀도 자기기록을 위한 자기헤드 설계", 한국 자기 학회 2001년도 추계 학술 대회 논문집, U2, October 2001.