

# CD-ROM 드라이브의 대물렌즈 입자오염이 레이저 다이오드 파워와 포토 다이오드 RF 신호에 미치는 영향

배양일\* · 이재호\* · 황정호†

(2003년 5월 26일 접수, 2003년 12월 12일 심사완료)

## Effect of Particle Contamination of Objective Lens in a CD-ROM Drive on Laser Diode Power and Photo Diode RF Signal

Yangil Pae, Jaeho Lee and Jungho Hwang

**Key Words :** ODD(광 디스크 드라이브), Laser Power(레이저 파워), Objective Lens (대물렌즈),  
Dust Particle(먼지 입자), Contamination(오염), Radio Frequency Signal(라디오파)

### Abstract

Airborne contaminant particles are intruded into optical disk drive(ODD) due to the flow caused by disk rotation and can be adhered to objective lens, which causes read/write errors. Such a phenomenon can be a serious problem for high-density storage devices. The purpose of this paper is to understand the effect of particle contamination of objective lens in a CD-ROM drive on laser diode power and photo diode RF signal. The measurements of laser power and readout RF signal were carried out by using a laser power meter and a time interval analyzer, respectively. The parameters for estimating a readout-signal's distortion were its jitter and amplitude. Alumina( $Al_2O_3$ ) particles were used as test dust particles. The results show that the failure for data access happened as the degree of lens contamination was greater than 20%.

### 1. 서론

#### 1.1 광 디스크 드라이브의 입자오염

최근 광 디스크 드라이브(Optical disk drive, ODD)에서 디스크의 회전 속도 증가(현재 CD-ROM 드라이브는 선속도 약 1.3 m/s, DVD-ROM 드라이브는 3.39-3.84 m/s)와 액츄에이터의 고속화 및 경량화, 기록 밀도 향상을 위한 광 스폿 사이즈의 감소(CD-ROM : 1.7  $\mu$ m, DVD : 1  $\mu$ m)에 의한 렌즈와 디스크 사이의 간격 감소(CD-ROM : 약 2 mm, DVD : 약 0.24 mm)에 따라 자기 디스크 드라이브(Hard disk drive, HDD) 분야에서 중요시 되었던 드라이브 내부의 먼지 입자 오염(Dust particle contamination)

문제가 광 디스크 드라이브(ODD) 분야에서도 이슈로 떠오르고 있다.<sup>(1-9)</sup>

장기간에 걸친 다량의 먼지 입자 오염은 기록, 재생에 걸쳐 에러<sup>(9)</sup>를 발생시키고, 이로 인해 에러 정정 코드가 많이 사용되면 그만큼 속도가 느려지고, 에러가 심해지면 결국 데이터의 기록과 재생이 불가능해지는 경우가 발생한다.<sup>(4)</sup> 그리고 스폿 사이즈가 감소함에 따라 많은 입자상 부유 물질이 디스크 표면이나 렌즈에 부착되는 경우에는 광 산란, 회절이 발생하므로 지터(Jitter)<sup>(10, 11)</sup> 등에 의한 데이터의 기록, 재생의 오류가 발생할 가능성이 높아진다.

#### 1.2 CD-ROM 드라이브 광학시스템

Fig. 1 에서 보는 바와 같이 CD-ROM 드라이브는 광 픽업내의 반도체 레이저다이오드(LD)에서 780 nm의 레이저 광을 발진 시킨다. 그 후 콜리메이트렌즈(Collimating lens)와 빔스프리터를 통과시킨 다음 대물렌즈(Objective lens)를 통해 광을 집광

† 책임저자, 회원, 연세대학교 기계공학부  
E-mail : hwangjh@yonsei.ac.kr  
TEL : (02)2123-2821 FAX : (02)312-2159

\* 연세대학교 대학원 기계공학과

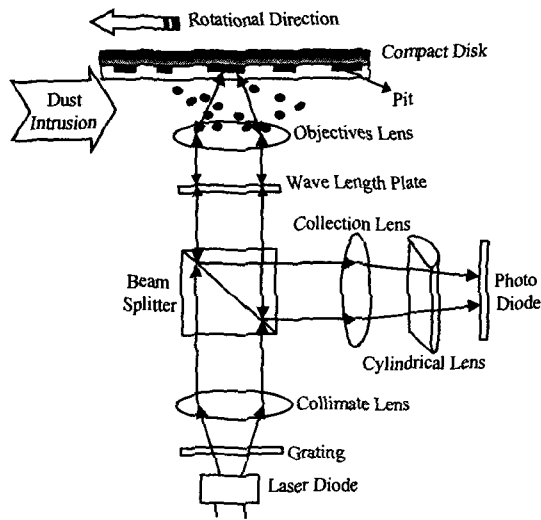


Fig. 1 Optical system

시켜 미디어의 기록면으로 보낸다. 기록면에 입사된 광은 반사를 하게 되는데 그 반사량은 피트(Pit)의 유무에 따라 달라진다. 반사된 광은 다시 대물렌즈를 통과한 후 빔스프리터를 거쳐 포토다이오드(PD)로 가게 되는데, 포토다이오드에 입사된 광 신호에 의해 전기적 신호인 RF 신호로 변환되어 나온다. 이러한 일련의 과정들이 CD-ROM 드라이브가 재생되는 동안 반복되게 된다.

레이저다이오드 파워가 자동 파워 조정기(Auto power control, APC)을 통해 유지된다고 할 때 재생 레이저 파워는 약 0.5 mW로 유지된다. 또한 재생 중 레이저 파워의 변동(Running optimal power control, ROPC)은 미디어의 재생 감도 변화, 지문 및 긁힘, 먼지 등에 의한 재생 방해 요인이 있을 때에도 레이저 파워 손실량을 측정하여 레이저다이오드에 전류를 보상해 준다.

일반적으로 지터는 위상잡음(Phase noise)이라고 하며 불규칙적 패턴으로 발생한다. 광 디스크 드라이브의 디지털 정보를 가지고 있는 기록 마크인 피트를 재생할 때, 재생신호의 변환점이 원신호의 변환점과 시간축 위에서 일치하지 않는 현상인 변환점지터(Transition jitter)가 발생한다. 그리고 아이패턴(Eye pattern)은 오실로스코프를 통해 증첩된 RF 신호를 육안으로 관찰할 때 보이는 4 개의 교차점들로 이루어진 다이아몬드 형태인데, 신호들 사이의 간섭이 심해지면 파형 일그러짐이 발생하여 아이패턴이 명확하게 보이지 않게 된다.<sup>(10)</sup> 재생을 방해하는 요소가 발생할 때 RF 신호의 아이패턴이 찌그러지고 지터가 심하게 발생 되었다는 연구 결과가 있다.<sup>(12)</sup>

### 1.3 기존의 연구들

광 기록/재생 기술이 발달함에 따라 입자상 오염 물질의 영향이 계속 증가될 것이므로 기록/재생의 안정성 향상을 위한 연구의 필요성이 증가하고 있다. 현재에도 광 디스크 드라이브 내의 입자오염 문제를 해결하기 위한 연구가 특허를 비롯하여 많이 진행되고 있다. 연구 특허는 Engler,<sup>(13)</sup> Neyagawa,<sup>(14)</sup> Tsurushima<sup>(15)</sup> 등이 출원한 바가 있다. Engler<sup>(13)</sup>는 CD-ROM 드라이브로 유입되는 외부공기의 유로를 기구 형태의 변형을 통해 제어하고 광부품들을 오염으로부터 보호할 수 있는 드라이브의 내부 구조를 설계 하였다. Neyagawa<sup>(14)</sup>는 미디어가 오염된 상황에서도 광 디스크 드라이브가 기록된 데이터를 왜곡 없이 재생할 수 있는 미디어와 오염감지시스템을 개발하였다. Tsurushima<sup>(15)</sup>는 미디어의 변형 또는 오염을 인식할 수 있는 에러정정 코드를 가진 광 디스크 드라이브를 개발하였다. 연구발표로는 오서영 등<sup>(2)</sup>이 실제로 CD-RW 드라이브의 대물렌즈와 미디어에 입자가 부착되었을 때 그 부착 면적비의 변화에 따른 레이저 파워의 변화와 C1-C2 에러의 변화에 대해 연구한 바가 있다. 대물렌즈 입자 부착 면적에 따른 레이저 파워 변화 실험은 면적비가 0 - 1.6 %인 범위에서 이루어졌으며 렌즈 오염 증가에 따라 선형적으로 감소하는 경향을 보였다. C1-C2 에러는 미디어에서 데이터를 읽을 때 나타나는 에러로서 군집형 에러이며, 이에 대한 실험은 미디어의 입자 오염도가 0 - 2 %에서 이루어졌으며 미디어 오염도 증가에 따라 지수증가적인 경향을 보였다. 오서영 등<sup>(1)</sup>의 연구에 의하면 광 디스크 드라이브의 입자 유입 현상은 자기 디스크 드라이브와는 달리 주변공기와 완전히 밀폐되어 있지 않는 구조이기 때문에 생기는 것이며, 광 디스크 드라이브의 스핀들 모터의 회전 속도가 증가하면 드라이브 주위와 드라이브 내부의 압력차이가 증가하여 입자 등의 오염 물질이 유입될 가능성이 높아져 입자 오염이 더욱 심각해 질 수 있다는 것들을 실험적, 이론적으로 증명하였다. Seo 등<sup>(3)</sup>과 Watanabe 등<sup>(4)</sup>은 미디어의 기판이 얇아짐에 따라 먼지에 의한 에러 발생이 증가하는 경향에 대해 연구 하였다. Sanga 등<sup>(5)</sup>과 Kitawa 등<sup>(6)</sup>은 미디어의 입자오염이 광 디스크 드라이브의 재생 신호에 미치는 영향을 실험적으로 밝히기 위해 스피커의 진동을 이용하여 스피커 위에 용기를 고정시킨 후 용기 안에 분진을 담아 입자를 발생시켰다.

본 연구에서는 CD-ROM 드라이브의 대물렌즈를 인위적으로 오염 시켰는데, 이는 대물렌즈의 오염

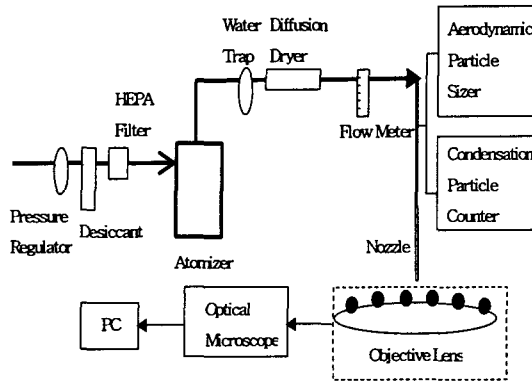


Fig. 2 Experimental set-up for lens contamination

이 직접적으로 드라이브에 어떠한 영향을 미치는지를 알기 위함이다. 대물렌즈의 입자 오염의 정도에 따른 레이저 광 파워 변화를 측정하였고, 재생 신호의 왜곡 현상을 살펴보기 위해 RF 신호 및 지터를 측정/분석하였다.

## 2. 실험

본 연구에서는 대물렌즈의 입자오염이 레이저 광 파워 변화에 미치는 영향을 알아보기 위해 Fig. 2 와 같이 실험 장치를 구성하였다. 모사입자로는 대기중에 존재하는 입자 중 상당 비율을 차지하는 알루미늄입자( $Al_2O_3$ )를 사용하였고, 입자발생을 위해 사용된 용액은 Isopropyl 알코올이다. HEPA 필터 등의 청정 공기 공급부를 통과한 압축 공기가 분무형 입자발생기(Atomizer)에 공급되어 Isopropyl 알코올을 포함한 액적을 생성시킨다. 생성된 액적들은 수분 제거기(Water trap)과 확산 건조기(Diffusion dryer)를 거쳐 고체 알루미늄입자로 노즐에서 분출된다. 렌즈에 입자를 고르게 오염시키기 위해서  $\sqrt{Stk}$  수를 고려하였는데,<sup>(16)</sup> 결과적으로 노즐은 약 2 mm 직경의 SUS 튜브를 사용, 노즐에서 분출된 입자들은 노즐로부터 2mm 거리에 위치한 직경 3 mm 의 대물렌즈에 충돌, 부착되었다. 이때의 유량은 5 lpm, 발생시킨 입자의 기하학적 평균 직경은 약 1.5  $\mu m$  였으며, 수농도(Number concentration) 분포는 약 3000 (#/cm<sup>3</sup>)이고 기하표준 편차는 1.53 였다. 수농도 측정은 응축식 입자 계수기(CPC, TSI 3022), 입자의 평균 입경은 공기역학적 입경 측정 장치(APS, TSI 3321)로 측정하였다. 입자대물렌즈의 오염도 제어는 에어로졸에 의한 노출 시간으로 하였으며 오염도를 광학 현미경(OLYMPUS, BX60M)으로 판독하였다.

대물렌즈의 입자 오염이 광 픽업의 레이저 파워에 미치는 영향을 측정하기 위하여 Fig. 3 과 같이 장치를 구성하였다. 오염시킨 광 픽업을 자동 파

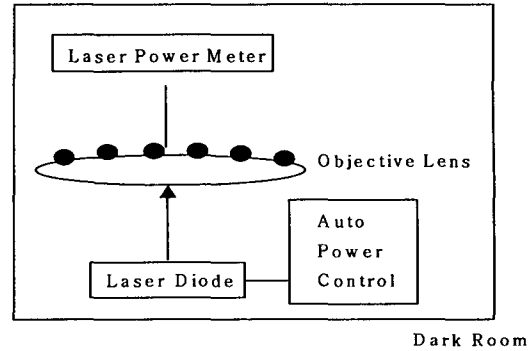


Fig. 3 Experimental set-up for laser power meter

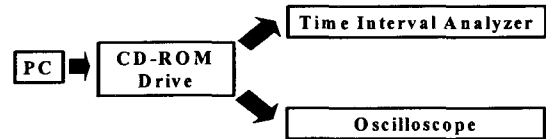


Fig. 4 Experimental set-up for RF signal measurement

워 조정기(APC)에 연결하여 빔을 발진 시키고 레이저 파워 미터(MELLES GRIOT, 18 LAB 250)를 사용하여 광 픽업의 레이저 파워를 측정하였다. 파워 측정 실험에서 사용한 레이저 파워 미터의 유효 파장의 영역대가 넓어 외부광의 차단하였다. 또한 본 연구에서는 대물렌즈의 입자 오염이 RF 신호에 미치는 영향을 실험하기 위하여 Fig. 4 와 같이 장치를 구성하였다. CD-ROM 드라이브의 재생신호를 측정하기 위해 먼저 드라이브를 분해하여 광 픽업의 대물렌즈를 오염시킨 후 다시 조립했다. 이 때, 드라이브의 분해 및 조립은 외부로부터 침입한 입자로부터의 오염을 최소화하기 위해 클린 부스(Clean booth, class 100)에서 수행하였다. 그리고 신호를 측정하기 위해 내부 기판의 RFAC 단자와 접지 단자를 BNC 커넥터에 연결하였다. 그 후 커넥터를 BNC 케이블을 통해 디지털 오실로스코프(Lecroy, LT342L)와 Time Interval Analyzer (Yokogawa, TA320)에 각각 연결하고 CD-ROM 드라이브를 구동시켜 재생신호를 측정/분석 하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 대물렌즈의 입자오염에 의한 레이저 파워 변동

대물렌즈의 입자 오염이 레이저 다이오드 파워에 미치는 영향을 조사하기 위해서 대물렌즈에 인위적으로 입자오염정도를 변화시켜 비레이저 파

위를 측정했다. Fig. 5는 대물렌즈의 입자오염에 따른 비레이저 파워의 변화를 보여준다. 비레이저 파워는 광 디스크 드라이브 내의 대물렌즈가 입자에 의해 오염을 받지 않았을 때의 레이저 파워에 대한 오염이 되었을 때의 레이저 파워의 비로 정의된다. Fig. 5에서 대물렌즈의 입자오염정도가 커짐에 따라 레이저 파워가 감소하고 있음을 보여준다. 실험 결과 대물 렌즈가 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자로 100% 덮여 있는 경우에는 레이저 파워가 0임을 알 수 있었다. 렌즈 오염도 a는 다음식으로 표현된다.

$$a = \frac{\sum (A_i \times Q \times \Delta t)}{A_{Lens}} \eta_d \quad (1)$$

A<sub>i</sub>는 APS 입경 분포로부터 산출한 값이며, APS의 각 채널 i에서의 공기체적에 대한 입자의 단면 면적이다. 단위는 μm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>이다. Q는 유량계로부터 측정된 값, A<sub>Lens</sub>는 대물렌즈의 면적, Δt는 렌즈 오염시간이다. η<sub>d</sub>는 입자부착효율이며 마이크로 저울을 이용하여 약 10%를 얻었고 이 값은 부착시간에 관계없이 거의 일정했다. 즉 노즐에서 분출되는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자의 10%만이 렌즈에 부착되었다. 따라서 식 (1)을 사용, 분출 실험 결과만으로 렌즈 오염도를 산출할 수 있다. 또한 부착된 입자의 수는 공기역학적 입경 측정 장치에서 측정된 개수 농도로 산출되는데 다음의 식으로 표시된다.

$$\sum N_i \times Q \times \Delta t \times \eta_d \quad (2)$$

식 (2)에서 N<sub>i</sub>는 공기역학적 입경 측정 장치의 각 채널 i에서의 에어로졸의 수농도이며, 단위는 #/cm<sup>3</sup>이다. Fig. 5는 또한 렌즈가 입자로 100% 덮일 때까지 실험한 시간이 114초이고 그때까지 부착된 입자 개수가 약 28 × 10<sup>6</sup>개임을 보여준다. 또, Fig. 5는 가정에 의해 계산된 이론식(Theory)을 점선으로 보여 주는데, 이 식은 대물렌즈의 오염도가 증가함에 따라 레이저 파워가 선형적으로 감소한다고 가정한 것이다. 다시 말해서 I<sub>0</sub>가 오염되기 이전의 레이저 파워 값일 때, 각 지점의 비레이저 파워는 아래의 식 (3)과 같다.

$$I/I_0 = 1 - a \quad (3)$$

Fig. 5에서 이론식과 실제 측정 값과의 차이의 원인으로, 우선 렌즈 위에 입자 오염이 일정한 두께로 고르게 쌓였다는 것을 가정하였으나 실제로는 쌓인 두께가 정확히 고르지 않기 때문에 렌즈의 각 지점마다 투과되는 레이저의 세기가 일정치 못한 데에서 오는 오차, 레이저 파워 측정 시

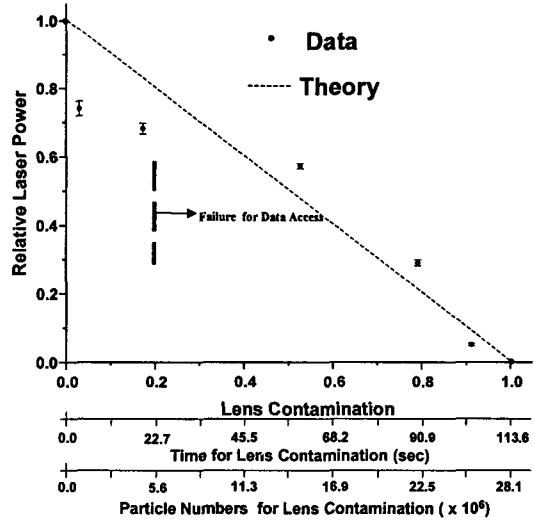


Fig. 5 Lens contamination vs Relative laser power

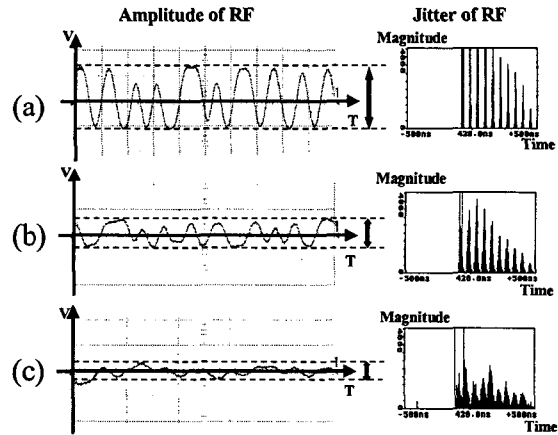


Fig. 6 RF signal at the contamination point of (a) 0% (b) 12.2% (c) 48.7%

진동 등에 의한 측정오차, 광 측정 실험기구 셋팅시 레이저 경로(Path)의 수직에서의 벗어남 등이 있다.

### 3.2 대물렌즈의 입자 오염이 CD-ROM의 재생신호에 미치는 영향

RF 신호는 광 디스크 드라이브의 대물렌즈를 통과하여 출사된 광의 파워를 측정하는데 사용된다. Fig. 6은 대물렌즈의 입자 오염에 의한 RF 신호의 변화에 대한 측정결과를 보여준다. Fig. 6의 RF 신호를 나타내는 왼쪽 그림에서 X축은 시간(T), Y축은 전압(V)을 나타내고 있다. 이 때 전압

의 진폭은 레이저 광의 파워의 상대적 변화를 보고 간편하게 판단할 수 있게 해준다. 그림에서 보는 바와 같이 (a), (b), (c)로 갈수록 신호의 진폭이 감소되었음을 알 수 있다. 이는 대물렌즈의 입자 오염에 의해 광 디스크 드라이브의 레이저 파워가 감소 되었음을 말해준다. 또한 Fig. 6의 오른쪽 그림에서 X 축은 원신호와 재생신호의 시간간격을 Time 으로, Y 축은 각 X 에 해당하는 주파수 (Frequency)로 나타냈다. 이 그림은 Time Interval Analyzer 에서 화면으로 나타내는 그림을 보여주는 것인데, X 축에서 검은색으로 나타나는 각 지점의 영역의 폭이 넓어질수록 지터의 크기가 커지는 것이다. 여기에서 입자 오염의 정도가 커질수록 지터의 크기가 커짐을 알 수 있다.

Fig. 7 은 렌즈오염도에 따른 RF 신호의 진폭비를 보여주는데, 대물렌즈의 입자 오염도가 증가함에 따라 RF 신호의 상대 전압의 진폭이 감소하는

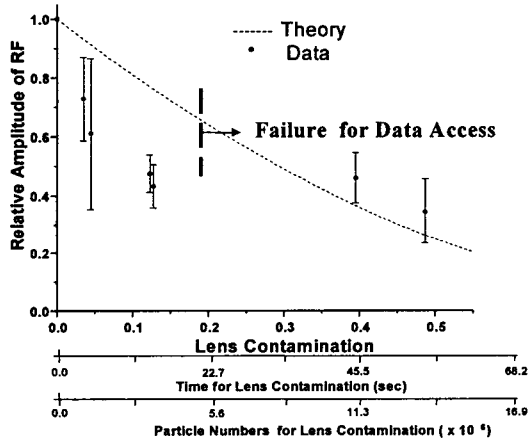


Fig. 7 Lens contamination vs Relative amplitude

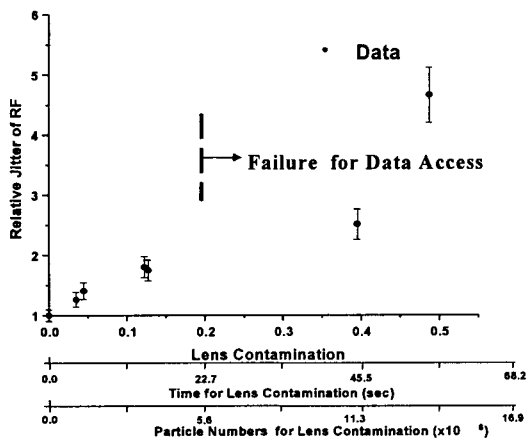


Fig. 8 Lens contamination vs Relative jitter

경향을 나타낸다. 이 실험은 대물렌즈를 입자로 오염 시킨 후 그 오염 정도를 측정후 5 회 반복하여 RF 신호의 상대 진폭을 측정하였다. RF 신호의 상대 진폭비는 광 디스크 드라이브 내의 입자 오염 정도를 판단할 수 있게 해 준다. Fig. 7 에서 각 데이터 지점마다 오차 막대가 표시되어 있는데, RF 신호를 반복 측정 시에 진폭이 최대 오차막대의 길이만큼 값의 차이가 나타남을 보여주는 것이다. 따라서 반복측정의 평균 값을 데이터 점으로 잡았으며 각 데이터 점들은 앞에서 언급했던 것처럼 진동 또는 신호에 섞인 노이즈(Noise) 등에 의하여 이론값과의 차이를 보여준다. 여기서 RF 신호의 상대 진폭이 대물렌즈의 입자 오염도가 증가함에 따라 줄어든다는 사실을 다시 한번 확인할 수 있었다.

Fig. 7 은 또한 이론식을 보여준다. 광 디스크 드라이브의 기록 재생은 레이저다이오드로부터 출사된 레이저 광이 대물렌즈를 통해 포토다이오드로 입사되는 일련의 과정이 반복되는 과정이기 때문에 오염된 렌즈를 광이 두 번 통과하게 된다. 따라서 RF 신호의 상대 진폭비에 관한 이론식은 다음과 같이 대물렌즈의 입자오염에 의한 상대 레이저 파워 변동량의 제곱이 된다.

$$I/I_0 = (1 - a)^2 \quad (4)$$

Fig. 8 은 광 디스크 드라이브의 대물렌즈 오염에 의한 상대적인 지터의 변동을 보여준다. 여기서 상대적인 지터란, 오염이 안된 대물렌즈에서 측정된 지터의 값에 대한 배수를 말한다. 지터의 원인은 일종의 파면 수차(Wavefront error)에 의한 것으로, 파면 수차는 여러 요인에 의해 원래의 파면이 왜곡되어 생기는 수차이며 광 디스크 드라이브의 대물렌즈에 오염이 있을 경우 레이저 광은 회절이나 산란이 일어남으로 파면이 고르지 않게 된다. 이러한 현상으로 인해 입자 오염으로 지터가 증가한다. 왜곡이 없는 레이저 빔은 가우시안 함수의 형태를 보인다. 이러한 형태의 레이저광이 대물렌즈에 붙어 있는 오염 입자에 의해 산란 또는 회절되고 파면이 불규칙적으로 되는데, RF 신호의 지터는 이와 같은 현상이 일어나는 정도를 판단할 수 있게 해준다. 본 실험에서는 지터와 RF 신호의 진폭이 렌즈 오염의 약 50 % 정도일 때까지 측정이 가능하였다. 그 이유는 레이저 파워가 어느 한계 이상 감소하면 광 디스크 드라이브의 스피들 모터가 정지하는 현상이 발생하기 때문이다. 기준 이하의 미약한 레이저 빔으로 광 디스크 드라이브를 재생하는 것은 무리이기 때문에 스피들모터 서보 작용에 의해 정지하도록 프로그래밍

되어 있다.

#### 4. 결론 및 향후계획

이 실험은 대물렌즈의 입자 오염에 의한 레이저 파워의 변동량과 실제 광 디스크 드라이브의 대물렌즈의 입자 오염이 재생 신호인 RF 신호에 미치는 영향을 밝히기 위해 수행되었다.

(1) 광 디스크 드라이브의 대물 렌즈에 인위적으로 입자 오염을 시켜 레이저 파워 미터를 사용하여 레이저 광의 파워를 측정된 결과 대물 렌즈의 입자 오염 정도가 심해 질수록 레이저 광의 파워가 감소하는 것을 볼 수 있었다.

(2) 광 디스크 드라이브의 대물렌즈의 오염이 실제 재생 신호인 RF 신호에 미치는 영향을 분석한 결과에서도 역시 RF 신호의 진폭전압(Amplitude Voltage)과 지터에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

(3) RF 신호의 진폭은 광 디스크 드라이브 대물 렌즈의 입자 오염이 증가함에 따라 줄어드는 경향을 보였으며 RF 신호의 지터는 증가함을 보였다.

최근 개발되는 광 디스크 드라이브는 DVD 드라이브나 블루레이(Blu-ray) 드라이브와 같이 더욱 고용량의 저장능력을 가지고 있다. 이러한 기기와 같이 저장능력을 높이기 위해서는 레이저 광의 파장 감소, 디스크 내의 피트(Pit) 크기의 감소, 또는 픽업의 렌즈와 디스크의 반사층의 간격의 감소 등이 핵심 기술이라 할 수 있다. 이와 같이 갈수록 증대되는 고용량 광 디스크 드라이브에서 디스크 표면 또는 렌즈의 입자 오염은 현재 사용되고 있는 CD-ROM 드라이브의 성능에 미치는 영향보다 더욱 중요하게 고려해야 하는 요소가 될 것으로 전망된다.

#### 후 기

본 연구는 한국 과학 재단 지정 정보 저장 기기 연구센터(과제번호:R11-1997-042-12001-0)의 지원을 받아 이루어졌으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Oh, S. Y., Park, H. S. and Hwang, J., 2001, "Particle Intrusion to Optical Disk Drives," *2nd Asian Aerosol Conf.*, Busan, Korea, pp. 221~222.
- (2) Oh, S. Y. and Hwang, J., 2003, "Control of Particle Contamination and Heat Build-Up for Nobble Design of an Optical Disk Drive," *Trans. of KSME (B)*, Vol. 27, No. 1, pp. 25~31.
- (3) Seo, K., Kawashima, T., Yamagami, T. and Watanabe, T., 1992, "Error Propagation due to Dust on a Thin-Substrate Disk," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 31, pp. 659~661.
- (4) Watanabe, T., Saito, K. and Seo, K., 2002, "Study of Error Propagation due to Dust for Thin-Cover Coat Disk Systems," *Joint Int. Symp. Optical Memory and Optical Data Storage*, TuA.2.
- (5) Senga, H., Kubo, T., Ohta, T., Watanabe, K., Shihara, T. and Ishida, T., 2000, "Testing Method of the Dust Influence on Thin Substrate DVD and the Results," *Int. Symp. Optical Memory*, pp. 146~147.
- (6) Kitawa, H., Kubo, T., Yoshida, H., Ueki, T. and Saruta, K., 1996, "Testing Method for Dust Effects on an Optical Disk Cartridge," *Proc. of Magneto-Optical Recording Int. Symp.*, Vol.20, Supplement No. SI, pp. 411~414.
- (7) Honguh, Y., 1995, "Analysis of Optical Disk Readout Signal Deterioration Caused by Dust on the Substrate," *Optical Review*, Vol. 2, No. 1, pp. 14~19.
- (8) Chong, T. C., 2000, "Contamination Issues in the Slider-based Near-Field Recording," *2nd Int. TBOC Workshop*, Seoul, Korea.
- (9) Turner, I., 1988, "Error Management in Optical Disk Recording," *Comcon Spring '88. Thirty-Third IEEE Computer Society International Conference*, pp. 132 ~ 134.
- (10) Bergmans, Jan W. M., 1996, *Digital Baseband Transmission and Recording*, Kluwer Academic Publishers.
- (11) Golio, M., 2001, *The RF and Microwave Handbook*, CRC Press.
- (12) Choi, J., 2001, "Generation, Recording and Evaluation of Recording Signal for High Density Optical Disk," MS Thesis, Yonsei University.
- (13) Engler, E. M., 1992, "Optical Data Storage System with Reduced Particle Contamination," US Patent Number 5,255,256.
- (14) Neyagawa, I. S., 1996, "Optical Disc and Contamination Detection System in an Apparatus for Recording and Reproducing the Same," US Patent Number 5,513,160.
- (15) Tsurushima, K., 1985, "Optical Disc Player," US Patent Number 4,519,058.
- (16) Sethi, V. and Walter, J., 1993, "Particle Impaction Patterns from a Circular Jet," *Aerosol Science and Technology*, Vol. 18, pp. 1~10.