

지수감쇠 기법을 이용한 반사경 손실측정 시스템의 오차특성 연구

조민식[†]

국방과학연구소 기술연구본부

Ⓣ 305-600 대전광역시 유성우체국 사서함 35-5호

(2000년 11월 23일 받음, 2001년 2월 19일 수정본 받음)

손실 200 ppm급과 30 ppm급인 두 종류의 시험 반사경을 대상으로, 지수감쇠 방법을 이용한 반사경 손실측정 시스템의 오차 특성이 조사되었다. 공진기 길이 떨림에 의한 공진기 감쇠신호의 지수함수 왜곡을 보상하기 위하여 감쇠신호 데이터 평균 기법을 적용하였다. 감쇠신호 6개의 평균이 취해졌을 때, 감쇠신호의 지수함수 곡선맞춤 오차개선이 뚜렷이 관측되었으며, 손실 200 ppm급 시험 반사경의 경우 약 2.4배, 손실 30 ppm급 시험 반사경의 경우 약 1.3배의 반사경 손실 측정오차 개선효과를 얻을 수 있었다. 시험 공진기에서의 일별(day-to-day) 반사경 손실측정 반복도 오차가 조사되었다. 손실 200 ppm급 시험 반사경의 경우 약 5.0%, 30 ppm급 시험 반사경의 경우 약 26.4%의 손실측정 반복도 오차가 관측되었다. 저손실 반사경 평가에서 확인된 낮은 감쇠신호 데이터 평균효과와 높은 손실측정 반복도 오차는 손실측정 시스템 자체의 측정오차 이외에 시험 반사경 표면의 불균일한 손실 공간분포와 주변 오염원 유입의 결과로 분석되었다. 또한, 공진기 길이 떨림의 크기와 공진기 길이 측정오차가 손실측정 시스템의 정확도에 미치는 영향을 계산을 통해 조사한 결과, 분해능 수 ppm급 현재의 측정 시스템의 성능에 미칠 수 있는 공진기 길이오차의 영향은 충분히 적은 것으로 확인되었다.

분류코드 : SM.020.

I. 서 론

저산란율과 저흡수율로 특징지어지는 저손실, 고반사율 반사경은 링레이저 자이로, 고분해능 분광학, 레이저 증력파 안테나, 단원자 레이저 등의 응용분야에서 비중있게 사용되고 있다. 특히, 최근 1 Å 이하의 표면 거칠기를 얻을 수 있는 반사경 기판 초연마 가공기술 개발과 다층박막 증착기술의 발전은 저손실 반사경의 제작에 새로운 전기를 마련하였다. 이에 따라, 반사율이 1에 근접하는 저손실 반사경의 측정이 매우 중요한 기술분야로 주목받게 되었다. 손실율이 수십 ppm급인 반사경의 손실 측정기법으로는 위상변화 방법(phase shift method)^[1,2]과 지수감쇠 방법(exponential decay method)^[2-5]이 보고되어 있다. 이들 두 가지 측정기법이 특성상 나름대로의 장단점을 지니고 있지만 대체로 지수 감쇠시간 방법이 선택되고 있는 추세이다.

지수 감쇠시간 방식에 의한 반사경 손실측정 시스템에서 가장 중요시 되는 사항은 첫째로, 안정된 기준 공진기(reference cavity) 구조이다. 외부의 진동이나 충격에 취약한 측정시스템의 공진기 구조는 큰 측정오차의 개입을 배제할 수 없기 때문이다. 공진기 길이의 불안정성을 개선하는 방법으로 PZT를 이용한 광경로 제어 방법이나, 여러 회 반복측정을 통한 데이터 평균기법을 적용하여 공진기 길이 떨림 영향을 감소시키는 방법이 사용되기도 한다. 두 번째로 고려해야 할 사항은 기준 공진기를 구성한 반사경의 공간적인 손실분포 균일도이다. 공간적으로 불균일한 기준 반사경(reference mirror)의 손실분포는

측정시스템의 분해능을 저하시켜서 시험 반사경(test mirror)에 대한 정확한 손실평가를 제한한다. 셋째로, 공진기 길이의 측정 정확도이다. 공진기 길이측정 오차가 클수록 반사율 측정값은 참값으로부터 더욱 벗어나게 된다. 따라서, 반사경 손실 측정시스템의 성능을 결정하는 이들 오차항의 특성을 파악하는 작업은 해당 측정시스템을 활용한 신뢰성있는 시험 반사경의 손실평가를 위해 반드시 필요한 일이라 할 수 있다.

본 논문에서는 손실 200 ppm급과 30 ppm급인 두 시험 반사경을 대상으로, 지수감쇠 방법을 이용한 반사경 손실측정 시스템의 오차 특성을 조사하였다. 공진기 길이 떨림 효과를 보상하기 위하여 공진기 감쇠신호 데이터의 평균기법을 적용하였으며, 이에 따른 감쇠신호의 지수함수 일치도 개선여부를 조사하였다. 또한, 두 시험 반사경의 손실측정 반복도 오차를 측정하고 그 원인을 분석하였다. 마지막으로, 공진기 길이 떨림의 크기 및 공진기 길이 측정오차 크기가 손실측정 시스템의 정확도에 미치는 영향을 조사하였다.

II. 지수감쇠 방법에 의한 반사경 손실측정 이론

지수 감쇠시간 측정방식은 공진기 안에 갇힌 광자의 감쇠시간을 측정하여 공진기를 구성한 반사경의 손실을 평가하는 기법이다. 지수감쇠 방법에는 펄스 폭이 수십 ns 이내로 매우 짧은 펄스 레이저나, 광학 차단기(optical shutter)를 통해 짧은 시간 안에 레이저 입사광의 차단이 가능한 연속 레이저 시스템이 광원으로 사용될 수 있다. 본 연구에서 사용한 레이저 광원은 후자의 경우이다. 공진기 안으로의 레이저 광선 입사가 차단되었을 때, 공진기로부터 방출되는 레이저 강도 출력

[†]E-mail: minsjo@sunam.kreonet.re.kr

신호는 시간상수 τ 를 가지는 지수 감쇠형 곡선을 따른다. 이때, 감쇠시간 τ 는 공진기 내부의 왕복 손실(round-trip loss), 공진기 왕복거리와 광속(speed of light)의 함수로서, 공진기의 레이저 출력 감쇠시간을 측정하면 공진기 손실값은 쉽게 구할 수 있다.

공진기 감쇠시간 측정에 의한 반사경 손실평가 원리는 공진기 안에 갇힌 광속(photon flux)의 변화를 통하여 접근할 수 있다. 공진기의 길이가 d 이고, 반사율이 각각 R_1, R_2 인 두 개의 반사경으로 이루어진 공진기를 가정할 때, 공진기를 N 회 왕복하는 동안 광파의 강도는 다음과 같이 지수 함수적으로 변화한다.

$$I_0(R_1R_2)^N = I_0 \exp\left(-\frac{Nt_R}{\tau}\right), \quad t_R = \frac{2d}{c} \quad (1)$$

여기서, I_0 는 광파의 초기강도이고, t_R 은 광파의 공진기 왕복 시간(round-trip time), τ 는 공진기 내부의 광자 감쇠시간이다.

관계식 (1)에서 반사경의 반사율 R_1 과 R_2 가 1에 근사한 경우, 기준 공진기 감쇠시간 τ_R 은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\tau_R = \frac{t_R}{1 - R_1R_2} \quad (2)$$

한편, 위의 관계식 (2)를 반사율이 각각 R_1 과 R_2, R_T 인 3개의 반사경으로 구성된 시험 공진기 구조로 확장하면, 시험 공진기 감쇠시간 τ_T 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\tau_T = \frac{t_R}{1 - R_1R_2R_T^2} \quad (3)$$

지수감쇠 기법에 의한 반사경의 손실 측정은, 식 (2)의 기준 공진기에서 측정된 감쇠시간 τ_R 로부터 R_1, R_2 을 구한 후, 이를 식 (3)에 대입하여 아래와 같은 시험 반사경의 반사율 R_T 와 손실을 L_T 를 얻게 된다.

$$R_T = \left[\frac{1 - \frac{t_R}{\tau_T}}{1 - \frac{t_R}{\tau_R}} \right]^{1/2} \quad (4)$$

$$L_T = 1 - R_T$$

이때, 시험 반사경 손실 L_T 의 측정오차 δL_T 를 관련 측정 변수들의 변화량으로 정리하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$L_T = L_T(\tau_R, \tau_T, d)$$

$$(\delta L_T) = \frac{1}{\left(1 - \frac{t_R}{\tau_T}\right)\left(1 - \frac{t_R}{\tau_R}\right)} \times \left\{ \left[\frac{\left(1 - \frac{t_R}{\tau_T}\right) t_R}{\left(1 - \frac{t_R}{\tau_R}\right) 2\tau_R^2} \right]^2 (\delta\tau_R)^2 + \left[\frac{t_R}{2\tau_R^2} (\delta\tau_T)^2 + \frac{1}{c^2} \left[\frac{\left(1 - \frac{t_R}{\tau_T}\right) 1}{\left(1 - \frac{t_R}{\tau_R}\right) \tau_R} - \frac{1}{\tau_R} \right]^2 (\delta d)^2 \right\} \quad (5)$$

즉, 샘플에 대한 손실측정 신뢰도는 기준 공진기와 시험 공진기의 감쇠시간 불안정도, 그리고 공진기의 길이 불안정도에 긴밀하게 연관되어 있다. 따라서 반사경 손실 측정시스템의 측정 성능을 판정하고 해당 측정시스템을 이용한 시험 반사경의 정확한 성능평가를 수행하기 위하여, 반사경 손실 측정값에 영향을 미치는 각 측정변수들의 영향을 조사하는 것은 중요한 일이다.

III. 반사경 손실측정 시스템 성능실험 및 오차분석

3.1. 반사경 손실측정 시스템

지수감쇠 방법에 의한 반사경의 손실측정 시스템의 구성도가 그림 1에 간략하게 나타나 있다. 공진기에 입사되는 레이저 광원은 He-Ne 레이저(Melles-Griot, Model 05 LHP 171, $\lambda = 633 \text{ nm}$)가 사용되었다. 편광기, 분광기 그리고 Pockels Cell로 이루어진 광학 스위치(optical switch, Quantum Technology Inc., Model 26-50)는 공진기에 입사되는 레이저 광선을 짧은 시간 안에 차단하여 공진기 내부로의 레이저 광선 입사를 제한하였다. 광학 스위치에 의해 절단된 레이저 광선의 후미 fall time은 약 11 ns로 짧았다. 광학 스위치 동작 전 후 레이저 광선의 contrast ratio는 300:1 이상으로 확인되었다. 공진기 안의 레이저 광선은 선형 s-편광을 갖으며, TEM₀₀ 공간모드가 유지되었다. 기준 공진기(Ref. Cav.)는 구면경 R_1 (곡률반경 1 m)과 평면경 R_2 로 이루어진 "—"자형 공진기로서, 공진기 길이는 65.5 cm였다. 출력단의 레이저 광선 감쇠신호는 고속 광검출기 PD1(New Focus, Model 1801, Risetime 3 ns)에 의해 감지되었다. 시험 공진기(Test Cav.)는 시험 반사경 R_T 가 45도로 삽입되고 기준 공진기의 반사경 R_2 가 90도 회전된 "ㄱ"자 구조를 가지며 출력신호는 PD2(New Focus Model 1801)에서 감지하게 된다. 기준 공진기와 시험 공진기의 길이는 동일하게 유지되었다. 광검출기에서 감지된 신호는 디지털 오실로스코프(Tektronix, Model TDS 420A, Bandwidth 200 MHz)를 통해 저장되어 공진기의 감쇠시간 측정이 이루어졌다.

3.2. 반사경 손실측정 실험 및 오차 분석

3.2.1. 공진기 감쇠신호의 데이터 평균과 지수함수 곡선맞춤 오차 관계

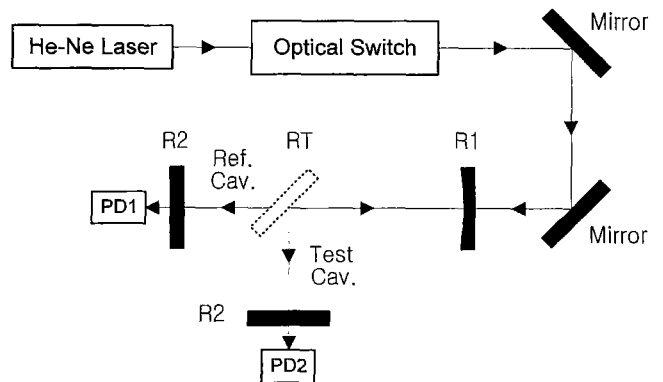


그림 1. 반사경 손실측정 시스템 구성도.

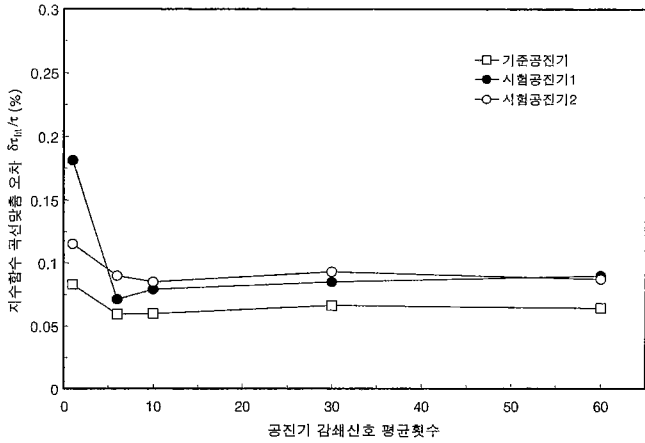


그림 2. 공진기 감쇠신호 평균횟수와 지수함수 곡선맞춤 오차 관계.

지수 감쇠시간 측정 시스템에서 얻은 공진기 감쇠신호의 지수함수 곡선맞춤(curve fitting) 오차가 조사되었다. 기준 공진기와 시험 공진기 모두에서, 반사경 손실 측정시간 동안에 발생하는 공진기의 길이 변화나 외부의 진동 영향 등은 공진기 감쇠신호를 지수함수 형태로부터 왜곡시킬 수 있다. 지수함수 형태에서 왜곡된 감쇠신호는 측정시스템의 손실평가 신뢰도를 크게 저하시킨다. 따라서 기준 공진기와 시험 공진기의 감쇠신호가 충분히 지수함수에 근사하는 측정시스템이 우선적으로 구현되어야 한다. 공진기 감쇠신호 데이터 평균과 지수함수 곡선맞춤 관계에 대한 조사는 두 종류의 시험 공진기를 대상으로 수행되었다. 시험 공진기 1에는 기준 공진기 사이에 손실량이 200 ppm급인 시험 반사경을 적용하였으며, 시험 공진기 2에는 손실량이 30 ppm급인 시험 반사경을 적용하였다. 먼저, 공진기 감쇠신호의 시간 파형을 실험적으로 측정하였다. 다음으로, 이 측정 결과를 이론적 지수함수 $I(t) = I_0 + I_1 \exp(-t/\tau)$ 에 곡선맞춤을 수행하여 감쇠시간 τ 와 감쇠신호 곡선맞춤 오차 $\delta\tau_{fit}$ 를 구하고, 이들 두 측정치의 비율($\delta\tau_{fit}/\tau$)을 통해 지수함수 곡선맞춤 일치도를 조사하였다. 기준 공진기와 시험 공진기 1, 2에서 측정된 감쇠신호의 데이터 평균횟수와 지수함수 곡선맞춤 일치도 관계가 그림 2에 나타나 있다.

그림 2의 결과에서도 알 수 있듯이, 공진기 감쇠신호 1개를 곡선맞춤 했을 때에 비교하여 여러 개의 감쇠신호를 평균하여 처리한 경우가 적은 지수함수 곡선맞춤 오차를 보였다. 또한, 공진기 감쇠신호를 6회 이상 평균하였을 때, 오차 개선 효과가 대체로 포화되는 양상을 보였다. 감쇠신호 데이터 평균에서 관측된 지수함수 곡선맞춤 오차 감소는 감쇠신호의 반복성 개선을 의미한다. 이는, 공진기 감쇠신호의 데이터 평균기법이 측정을 수행하는 동안에 야기되는 공진기 길이의 떨림이나 주변 환경의 고주파수 진동 영향을 효과적으로 상쇄시킨 결과로 판단할 수 있다. 그림 3은 시험 공진기 1에서 감쇠신호 데이터를 6회 측정하여 평균한 출력과 지수함수 곡선맞춤 결과를 보여준다. 공진기 감쇠신호가 지수감쇠 함수와 충분히 일치하고 있다. 이로써, 감쇠신호의 데이터 평균기법을 활용하여 두 종류의 시험 공진기에서 공통적으로 공진기 감쇠신호의 지수함수 곡선맞춤 일치도를 향상시킬 수 있었으며, 그 결과 공진

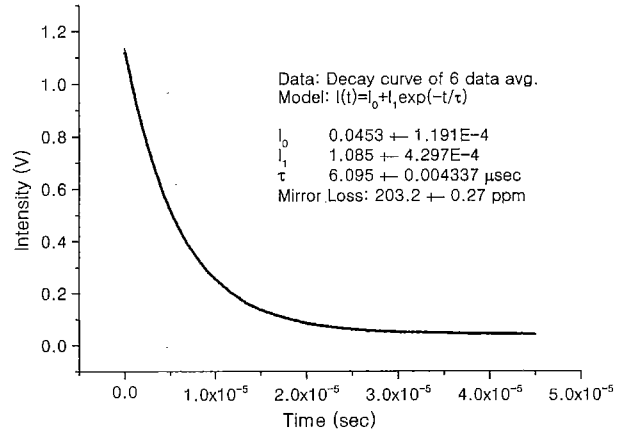


그림 3. 시험 공진기의 레이저 감쇠신호 시간 파형(공진기 감쇠신호 6개 평균), 시험 반사경 손실 203.2 ppm.

기 감쇠신호 데이터 6회 평균 조건에서 반사경 손실측정 불확정도의 상당한 개선을 확인할 수 있었다.

표 1은 위의 실험에서 얻은 기준 공진기와 시험 공진기 감쇠신호의 평균횟수와 이에 따라 측정된 시험 반사경의 손실과 손실 측정오차를 정리한 것이다. 시험 반사경의 손실값은 관계식 (5)에 따라 계산되었으며, 공진기 길이 떨림에 의한 δd 오차항은 계산에서 제외하였다. 데이터 평균이 공진기 길이 떨림크기 δd 의 오차를 개선시키는 효과가 있다면, 평균에 따른 손실 측정오차 δL_T 의 개선이 확인될 수 있을 것이다. 시험 공진기 1의 경우, 1개 감쇠신호와 6개 감쇠신호 데이터를 평균하여 얻은 시험 반사경의 손실은 각각 $203.37 \text{ ppm} \pm 0.66 \text{ ppm}$, $203.25 \text{ ppm} \pm 0.27 \text{ ppm}$ 이었다. 시험 공진기 2에서도, 감쇠신호 평균에 사용된 데이터의 수가 1개와 6개일 때, 시험 반사경의 손실이 각각 $30.34 \text{ ppm} \pm 0.25 \text{ ppm}$ 과 $30.46 \text{ ppm} \pm 0.19 \text{ ppm}$ 으로 측정되었다. 공진기 감쇠신호의 데이터 평균횟수가 6회일 때 시험 반사경은 데이터 평균을 취하지 않은 경우보다 적은 손실 측정오차를 보이고 있다. 감쇠신호 1개와 감쇠신호 6개의 데이터 평균을 취하였을 때, 손실 200 ppm급 시험 반사경의 손실측정 불확정도($\delta L_T/L_T$)는 각각 0.32%에서 0.13%로 약 2.4배 개선되었으며, 손실 30 ppm급 시험 반사경의 경우는 0.82%에서 0.62%로 약 1.3배 개선되었다. 즉, 손실 200 ppm급 시험 반사경 평가에서 손실 30 ppm급 시험 반사경의 경우에 비해 뚜렷한 손실 측정오차 개선이 확인되었다. 손실 30 ppm급 저손실 반사경의 손실측정 불확정도가 손실 200 ppm급 고손실 반사경에 비교해서 낮은 개선도를 갖는 이유는

표 1. 공진기 감쇠신호 데이터 평균횟수와 시험 반사경의 손실 측정 불확정도 관계

감쇠신호 평균횟수	시험 반사경 1의 손실		시험 반사경 2의 손실	
	$L_T \pm \delta L_T$ (ppm)	$\delta L_T/L_T$ (%)	$L_T \pm \delta L_T$ (ppm)	$\delta L_T/L_T$ (%)
1회	203.37 ± 0.66	0.325	30.34 ± 0.25	0.824
6회	203.25 ± 0.27	0.133	30.46 ± 0.19	0.624
10회	202.77 ± 0.30	0.148	30.16 ± 0.18	0.597
30회	203.91 ± 0.32	0.157	29.56 ± 0.20	0.677
60회	204.68 ± 0.34	0.166	28.85 ± 0.19	0.659

고손실 반사경에 비해 상대적으로 주변의 오염원에 대해 매우 취약하고, 반사경 기관의 가공이나 세척 등 제작 전 공정이 손실성능에 민감하여 반사경의 공간 손실분포 균일도가 낮은 까닭으로 판단된다. 반사경의 공간적 손실분포 영향에 대한 자세한 추가 조사는 다음 장에서 다루어졌다.

3.2.2. 시험 반사경의 손실측정 반복도 오차 조사

앞에서와 동일한 기준 공진기와 시험 공진기 1, 2에서의 일별(day-to-day) 반복도 오차가 조사되었다. 손실측정 반복도 실험은 6일간에 걸쳐서 수행되었다. 매일 6개의 감쇠신호를 평균하여 각 공진기에 대한 감쇠시간 τ 를 결정하였으며, 6일간 얻은 6개의 감쇠시간 데이터를 이용하여 기준 공진기와 시험 공진기 1, 2의 감쇠시간 반복도를 조사하였다. 시험 반사경의 손실값은 관계식 (5)에 따라 계산되었으며, 공진기 길이 떨림에 의한 δL 오차항은 앞장에서의 실험결과를 근거로 감쇠신호 데이터 평균에 의한 보상을 가정하여 무시하였다. 공진기 감쇠시간 측정 반복도 오차 $\delta\tau$ 는 6일간 측정된 6개 데이터의 표준편차를 나타낸다. 표 2는 6일간 측정된 기준 및 시험 공진기의 감쇠시간 변화를 보여준다. 반복도 실험 결과, 기준 공진기의 경우, 6일간 공진기의 감쇠시간 측정오차가 약 2.2% 정도로 비교적 안정된 상태를 유지하고 있었다. 이때의 기준 공진기 총손실 반복도 오차는 약 7 ppm으로서, 현재의 손실측정 시스템의 측정 분해능에 해당한다. 한편, 시험 공진기 1과 2에서의 공진기 감쇠시간 측정 반복도 오차는 각각 약 2.7%와 4.1%로 크게 측정되었다. 저손실 시험 공진기 2 (시험 반사경의 손실: 30 ppm)에서 손실측정 반복도 오차가 매우 큰 값을 보이고 있다. 이에 따른 시험 공진기 1과 2에서의 시험 반사경 손실측정 반복도 오차는 각각 약 5.0%와 약 26.4%로 측정되었다.

이러한 측정 반복도 오차 증가의 원인으로 두 가지 요인을 고려해 볼 수 있다. 첫 번째는, 반복 측정기간 동안 발생할 수 있는 반사경 표면의 오염이다. 저손실 반사경일수록 반복 측정시 주변 대기중의 오염원이 반사경의 표면에 유입되었을 때, 반사경 손실 측정값 변화에 큰 영향을 줄 수 있다. 두 번째 요인으로는, 앞장에서 언급한 시험 반사경의 손실 공간분포 불균일도를 들 수 있다. 6일 동안 수행된 반복 측정에 있어서 공진기 내의 레이저 광선이 시험 반사경의 정확히 동일한 위치에서 반사될 것이라는 단정은 무리가 있다. 즉, 매일 임의의 중심 반사지점에서 미소하게나마 벗어난 다른 위치에서 레이저 공진이 일어날 수 있으며, 이때 그 지점의 반사경 손실값이 중심지점의 수치와 다르다면 공진기 손실의 변화가 관측될 것이다. 이는 측정시스템의 기계적인 불안정성과 시험 반사경의 손실 공간분포 불균일성이 함께 반영된 결과이다.

시험 공진기의 감쇠시간 반복도 오차에 대한 반사경 손실분

표 2. 기준 공진기와 시험 공진기에서의 공진기 감쇠시간 측정 반복도 오차

	공진기 감쇠시간 $\tau \pm \delta\tau(\mu \text{ sec})$	$\delta\tau/\tau$ (%)	공진기 총손실 $L(\text{ppm})$	시험 반사경 손실	
				$L_T + \delta L_T(\text{ppm})$	$\delta L_T/L_T(\%)$
기준 공진기	14.05±0.31	2.18	310.79 ± 6.76	-	-
시험 공진기 1	5.91±0.16	2.74	738.37±20.21	213.86±10.66	4.98
시험 공진기 2	11.68±0.47	4.06	373.86±15.17	31.53 ± 8.31	26.36

표 3. 시험 반사경의 공간 손실분포 측정; 샘플의 중심과 중심으로부터 0.6 mm 주변 두 지점에서의 손실값 측정

	반사경 손실 $L_T(\text{ppm})$		
	중앙	주변 1	주변 2
시험 반사경 1	219.5	218.0	216.0
시험 반사경 2	40.6	33.0	40.5

포 관계를 규명하기 위하여 시험 반사경 1과 2의 손실값 공간분포를 조사하였다. 반사경의 중앙부분과 중앙으로부터 0.6 mm 주변 임의의 두 지점에서 반사경 손실이 측정되었다. 공진기 안에서 레이저 광선의 직경은 0.4 mm 정도이다. 표 3은 시험 반사경 1과 2의 표면 세 위치에서 측정된 손실값을 나타낸다. 시험 반사경의 손실값이 앞장의 측정값과 다른 것은 일별 반복도 오차로 볼 수 있다. 동일 반사경 세 위치에서의 손실측정은 같은 날 짧은 시간 안에 완료하였기 때문에, 측정 환경의 변화 원인이 대체로 배제된 반사경 자체의 위치별 손실분포 정보를 제시할 수 있을 것이다. 예측했던 대로 손실 200 ppm급 시험 반사경 1은 세 지점의 손실값의 편차가 그다지 크지 않았다. 반면, 저손실 시험 반사경 2는 큰 손실분포 차이를 보였다. 이는 저손실 반사경일수록 고손실 반사경에 비해 높은 공간 손실분포 균일도의 반사경 제작이 어렵다는 사실을 보여주고 있다. 이로서, 저손실 반사경에서 관측된 높은 일별 손실 반복도 오차는 반사경 자체의 공간 손실분포의 불균일성이 개입된 결과로 분석할 수 있음이 확인되었다.

3.2.3. 공진기 길이와 반사경 손실 측정오차 관계 분석

지수감쇠 방법에 의한 반사경 손실평가에서 공진기 길이 측정오차와 공진기 길이 떨림 크기가 반사경의 손실 평가에 미치는 영향이 조사되었다. 그림 4는 관계식 (5)의 공진기 길이 떨림 항으로부터 계산된 반사경 손실측정 오차 결과이다. 시

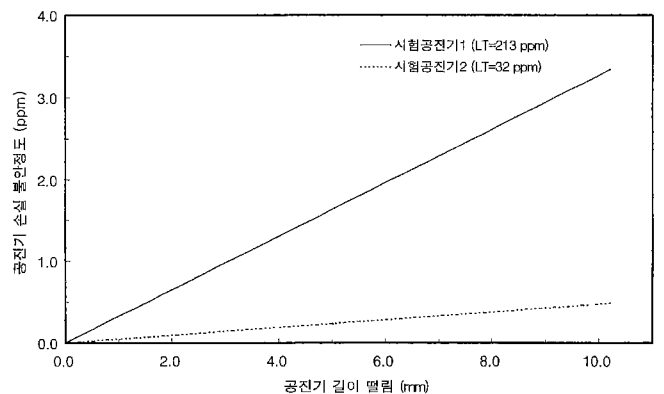


그림 4. 공진기 길이 떨림 크기에 따른 공진기 손실 불안정도 계산 결과.

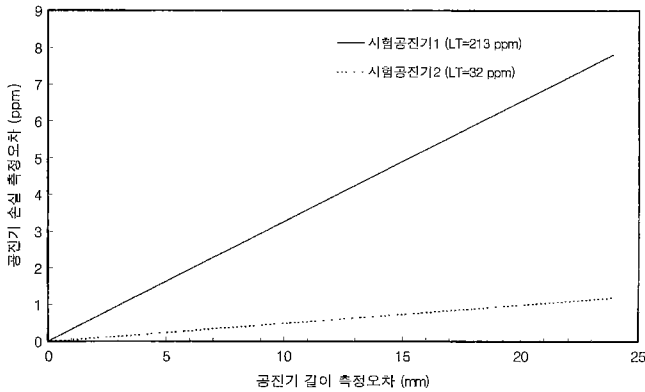


그림 5. 공진기 길이 측정오차에 따른 공진기 손실 측정오차 계산 결과.

험 공진기 1과 2에서 공진기 길이 떨림의 크기가 3 mm라 할 지라도 시험 반사경의 손실 측정오차는 1 ppm이하로서, 공진기 길이 떨림의 효과는 매우 낮은 수준임을 확인하였다. 한편, 앞장에서 얻은 표 1를 보면, 감쇠신호 데이터 1개로부터 계산된 반사경 손실측정 오차는 시험 공진기 1(시험 반사경 손실 200 ppm급)과 시험 공진기 2(시험 반사경 손실 30 ppm급)에서 각각 0.66 ppm과 0.25 ppm이었다. 이때의 손실 측정오차가 전적으로 공진기 길이 떨림에 의해서 야기되어 지수함수 곡선 맞춤을 왜곡시킨 결과라고 가정한다면, 길이 떨림 크기가 각각 약 2 mm, 5 mm 발생했다는 계산이다. 또한, 감쇠신호 데이터 6개를 평균하였을 때, 개선이 확인된 두 시험 공진기의 반사경 손실측정 오차는 각각 0.27 ppm과 0.19 ppm으로, 공진기 길이 떨림 크기 1 mm 미만과 약 4 mm에 해당한다. 시험 공진기 2에서 반사경 손실 측정중에 공진기 길이 4 mm의 떨림이 실제로 일어났다는 가정은 실험 중에 환경의 특이변화를 감지하지 못했던 점에서 미루어 그다지 신뢰성이 없다. 따라서, 이는 앞장에서 언급하였듯이, 저손실 시험 반사경을 측정 샘플로 하게 될 때, 공진기 길이 떨림 영향 이외에 반사경 자체의 공간 손실분포 불균일성이나 반사경 표면의 오염원 유입이 손실측정 시스템의 측정 불확정도를 결정하는 주요 원인으로 작용하고 있음을 재확인 시켜주고 있다.

다음으로, 공진기 길이측정 오차에 대한 반사경 손실 측정오차 영향이 조사되었다. 공진기 길이의 정확한 측정이 이루어지지 않아서 측정 공진기 길이가 실제 공진기 길이 참값과 다를 경우 발생하는 시험 반사경의 손실 오차 계산결과가 그림 5에 나타나 있다.

현재의 반사경 손실측정 시스템에서 공진기 길이는 ± 2 mm 이내의 오차를 가지고 측정이 가능하다. 이에 해당하는 공진기 손실오차는 1 ppm 이내로서 현재 측정 시스템의 분해능 7 ppm보다 충분히 적은 수치임을 알 수 있다. 즉, 공진기 길이 측정오차는 현재의 상황에서 고려의 대상이 안되는 미미한 수준이다.

IV. 결 론

손실 200 ppm급과 30 ppm급 시험 반사경을 대상으로, 지수

감쇠 방법에 의한 반사경 손실 측정시스템의 오차 특성이 조사되었다. 우선, 공진기 길이 떨림에 의한 공진기 감쇠신호의 지수함수 일치도를 개선하기 위하여 감쇠신호 데이터 평균기법을 적용하였다. 감쇠신호 데이터의 평균을 취한 결과, 공진기 감쇠신호의 지수함수 곡선맞춤 오차는 뚜렷이 개선되었으며, 감쇠신호 데이터 갯수 6개 이상에서 감쇠신호의 지수함수 맞춤 오차 개선도의 포화경향을 보였다. 공진기 감쇠신호 데이터 6개 평균을 취했을 때, 손실 200 ppm급 고손실 반사경의 경우 약 2.4배, 손실 30 ppm급 저손실 반사경의 경우 약 1.3배의 반사경 손실 측정오차 개선효과를 얻었다. 다음으로, 두 시험 공진기에서의 일별 반사경 손실측정 반복도 오차가 조사되었다. 손실 200 ppm급 시험 반사경에서 약 5.0%, 30 ppm급 시험 반사경에서 약 26.4%의 반복도 오차가 관측되었다. 저손실 반사경 평가에서 확인된 낮은 감쇠신호 데이터 평균효과와 높은 손실측정 반복도 오차는 손실측정 시스템 자체의 측정오차 이외에 반사경 표면의 불균일한 손실 공간분포와 주변 오염원 유입의 결과로 분석되었다. 따라서, 저손실 반사경의 정확한 손실 평가를 위해서는 반사경 손실 공간분포 조사가 병행되어야 할 것이며, 그 결과를 고려하여 지수감쇠 기법에 의해 측정된 반사경 손실값을 분석해야 할 것이다. 마지막으로, 공진기 길이 떨림의 크기와 공진기 길이 측정오차가 손실측정 시스템의 성능에 미치는 영향이 이론적 계산을 통해 조사되었다. 그 결과, 현재의 분해능 수 ppm급 측정 시스템의 성능에 영향을 줄 수 있는 공진기 길이 관련 오차의 영향은 충분히 적은 것으로 판정되었다.

감사의 글

반사경 손실 측정장비 개발을 위해 수고하신 신명진씨께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] J. M. Herbelin, J. A. McKay, M. A. Kwok, R. H. Ueunten, D. S. Urevig, D. J. Spencer, and D. J. Benard, "Sensitive measurement of photon lifetime and true reflectances in an optical cavity by a phase-shift method," *Appl. Opt.*, vol. 19, no. 1, pp. 144-147, 1980.
- [2] M. Bilardon, M. E. Couprie, J. M. Ortega, and M. Velghe, "Fabry-Perot effects in the exponential decay and phase shift reflectivity measurement methods," *Appl. Opt.*, vol. 30, no. 3, pp. 344-351, 1991.
- [3] D. Z. Anderson, J. C. Frisch, and C. S. Masser, "Mirror reflectometer based on optical cavity decay time," *Appl. Opt.*, vol. 23, no. 3, pp. 1238-1245, 1984.
- [4] G. Rempe, R. J. Thompson, H. J. Kimble, and R. Lalezari, "Measurement of ultralow losses in an optical interferometer," *Opt. Lett.*, vol. 17, no. 5, pp. 363-365, 1992.
- [5] N. Uehara, A. Ueda, K. Ueda, H. Sekiguchi, T. Mitake, K. Nakamura, N. Kitajima, and I. Kataoka, "Ultralow-loss mirror of the parts-in- 10^6 level at 1064 nm," *Opt. Lett.*, vol. 20, no. 6, pp. 530-532, 1995.

Study of the error characteristics in a mirror loss measurement system using an exponential decay method

Min-Sik Jo[†]

Technology Research Center, Agency for Defense Development, Taejon 305-600, KOREA

[†]*E-mail: minsjo@sunam.kreonet.re.kr*

(Received November 23, 2000 ; Revised manuscript received February 19, 2001)

Error characteristics of a mirror loss measurement system using an exponential decay method were studied, with the two samples having about 200-ppm-loss and 30-ppm-loss, respectively. In order to minimize the decay signal deviation from an exponential curve due to cavity length fluctuation, a data average method was tried. The data average method significantly improved the exponential curve fitting error of the decay signal, so that for a 6 decay signal data average the loss measurement error was reduced by about 2.4 times for the 200-ppm-loss mirror and 1.3 times for the 30-ppm-loss mirror compared with a single shot measurement. Day-to-day mirror loss repeatability error for the two samples was investigated. The repeatability error was measured to be about 5% for the 200-ppm-loss mirror and about 26.4% for the 30-ppm-loss mirror. Low decay signal average effect and high repeatability error in the low loss mirror measurement were explained with non-uniform spatial loss distribution of the sample and contamination from the environment, in addition to the error sources of the mirror loss measurement system itself. The influence of cavity length fluctuation and cavity length measurement error on the mirror loss measurement system performance was theoretically calculated. It confirmed that the requirement for the cavity length parameters was not so strict in the mirror loss measurement system of several ppm resolution.

Classification code : SM.020.