

# 공명초음파 분광법에 의한 광학기기용 렌즈의 비파괴 검사

김성훈\*, 박상국<sup>+</sup>, 김영남<sup>++</sup>, 양인영<sup>++</sup>

## Nondestructive Examination of Optical Lens by Resonant Ultrasound Spectroscopy

Seung-Hoon Kim\*, Sang-Guk Park<sup>+</sup>, Young-Nam Kim<sup>++</sup>, In-Young Yang<sup>++</sup>

### Abstract

As optical connectors dominate the performance of optical transmitters or receivers, they need an ultra-precise processing and are composed of optical fibers, ferrule and optical glass lenses. Therefore, this study suggests a nondestructive evaluation technique or a system using resonant ultrasound spectroscopy to evaluate flaws in a optical glass lens. It also conducted a nondestructive evaluation for flaws that are commonly found in a optical glass lens and reviewed the results.

**Key Words :** Resonant Ultrasound Spectroscopy(공명초음파분광법), Optical Glass Lens(광학렌즈), Nondestructive Evaluation(비파괴 평가), Flaw(결함)

### 1. 서론

현재 광통신 분야의 급속한 발전과 함께 광부품의 양산화가 진전됨에 따라 광부품 소자인 광학렌즈의 결함 판별을 위한 높은 신뢰성을 갖는 검사기법 및 평가 시스템이 요구되고 있다. 현재의 구형상 측정법으로서는 JIS B 501규격이 널리 적용되고 있으며, 강구를 진원도 측정기에서 서로 90°를 이루는 2개 또는 3개의 적도 표면상의 강구표면 윤곽을 측정하여 각각의 거리의 최대치를 진구도(眞球度)로 결정하는 방법이 이용되고 있다. 또한, Laser 간섭계 시스템에 의한 파장을 기준으로 한 광학적 평가는 고가의 장치가 필요하며 시간이 많이 걸리기 때문에 중간 가공과정 중 짧은 시간에 측정 가능한 새로운 측정 시스템의 구축이

필요하다. 본 연구에서는 광전송기기와 광전송매체에 사용되고 있는 구면 렌즈와 비구면 렌즈의 결함에 대해 공명초음파분광법을 사용한 비파괴 평가를 수행하고, 그 결과를 고찰하였다. 공명초음파분광법인 RUS는 고체재료의 기계적인 공진주파수가 그 재료의 밀도, 형상 및 탄성상수에 의존하는 것을 이용하여 측정하려는 시험편을 발진기에 의해 가진하고 그 주파수 응답을 수신기에서 측정하는 방법으로서 종래에 측정할 수 없었던 다양한 형상 및 이방성의 재료에도 측정가능하다는 장점이 있다.<sup>(1)</sup>

Paul Heyliger와 Hassel Ledbette<sup>(2)</sup>는 RUS를 사용하여 표면균열이 있는 시험편에 대한 공진주파수 해석값으로부터 균열의 크기를 분류하였고, Jay G. Saxton<sup>(3)</sup>은 RUS를 이용하여 chops, cracks, voids등을 검출한바 있다.

\* 김성훈, 조선대학교 대학원 기계설계공학과 (aml-ksh@hanmail.net)  
주소: 501-759 광주광역시 동구 서석동 375

+ 조선대 기계공학부

++ 조선대 기계정보공학과

본 연구에 사용된 광학렌즈는 광통신용 송수신 모듈(LD, PD Module)로 부터 광(빛)을 일정하게 보내주고 받는 역할을 하는 Coupling Lens나 Fiber에 집광(빛을 모아주는)시키는 역할을 하는 Collimator Lens에 사용되고 있는 광소자로서 그 형상에 오차가 없어야한다. 광학렌즈의 비파괴 검사를 위하여 Zircon-Titan 산화물로 구성된 전기기계결합계수가 0.5를 넘는 압전진동자인 PZT를 사용한 측정시스템의 주파수 특성을 측정하고 상용유한요소 프로그램인 Nastran 해석을 통하여 평가하였다. 또한, 실험에 사용된 시험편의 형상을 Fig. 1에 나타내었다. 직경 2mm와 5mm를 갖는 구면렌즈의 시험편은 각각 1차, 2차 연삭과정 후 선별하여 검사하였으며, 두께 3.4mm, 직경 7mm를 갖는 비구면 렌즈 시험편은 양품시험편과 연삭가공 중 발생하는 결함을 갖는 시험편에 대하여 공진주파수를 측정 하였다. 측정 시스템을 통하여 측정된 시험편의 공진 주파수에 대한 고찰을 통하여 양품 시험편과 결함 시험편을 구분할 수 있으며, 구면렌즈의 공정 단계별 공진주파수를 측정함으로써 특정 사이즈를 갖는 구면렌즈의 완성을 위한 연마시간 추정 등에 활용 가능한 기본 데이터를 확립할 수 있다. 따라서 본 연구를 통하여 측정된 데이터를 바탕으로 더 많은 연구가 이뤄진다면 급격히 변화하고 있는 광통신 부품 시장의 대량 수요에 따른 제품의 수율과 원가에 크게 이바지 할 것으로 기대된다.

## 2. 시험편

Spherical Glass Lens의 시험편은 BK-7 glass 재질의 block을 2.4mm로 자른 후 1차, 2차 연삭과정을 통하여 50nm의 표면 거칠기를 갖도록 정밀한 공정 과정을 통하여 완성되어진다. 광커넥터용 결합 부품으로 사용되는 구면렌즈의 표준사이즈는 직경 0.15~10mm이다. 그 중 본 연구에서는 직경 2mm와 5mm를 갖는 구면렌즈를 선택하였으며, 구면렌즈의 공정과정 중 1차 연삭과정을 마친 시험편과 2차 연삭과정 후의 완성품인 시험편을 Fig. 1 (a), (b)에 나타내었다. (c)에 aspherical Glass Lens의 시험편을 나타내었으며, 비구면 렌즈의 초정밀 자유 곡면을 가공하면서 생기는 결함 중 대표적인 결함을 Fig. 2에 나타내었다. 비구면 렌즈의 대표적인 결함으로는 (a)얼룩, (b)스크래치, (c)찍힘, (d)기포가 있으며, 25 $\mu$ m이상의 크기를 갖고 있다. 또한 렌즈의 가공 완성도를 고찰하고자, Table 1에 직경 2mm와 5mm 구면렌즈를 위한 1, 2차 연삭되어진 시험편

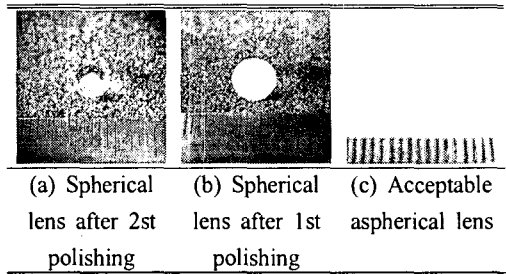


Fig. 1. The shapes of spherical and aspherical lens

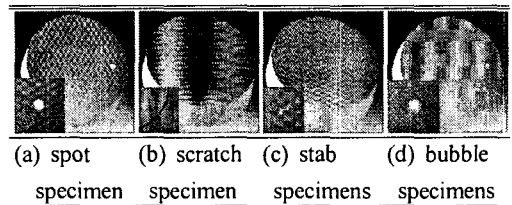


Fig. 2. The types of aspherical lens which has some flaws

Table 1 Optical glass lens specimens

Spherical glass lens	Process	Size[mm]
$\phi$ 2mm	After 1st polishing	$\phi$ 2.1
	After 2st polishing	$\phi$ 2.0
$\phi$ 5mm	After 1st polishing	$\phi$ 6.7
	After 2st polishing	$\phi$ 5.0
Aspherical glass lens	Process	Size[mm]
	Acceptable specimens	d=7, t=3.4
	The specimens which has some defect	

Table 2 The mechanical properties of optical glass lens

Spec.	Elastic modulus E [Gpa]	Poisson's ratio	Density [kg/m <sup>3</sup> ]
Optical glass lens (BK-7)	82.1	0.21	2.51 $\times$ 10 <sup>3</sup>

의 종류와, 비구면 렌즈의 결함판별을 위한 시험편의 종류를 나타내었다. 비구면 렌즈의 결함을 갖는 시험편은 광

확현미경을 사용한 조도검사를 통하여 선별되어졌다. Table 2에 본 연구에서 사용된 광학렌즈 재질인 BK-7의 기계적 물성치를 나타내었다.

### 3. 측정 시스템

#### 3.1 시험편 측정시스템

본 연구를 통해 제작된 RUS 비파괴 측정시스템은 Fig. 3과 같으며, 스펙트럼 어널라이저와 PZT, 신호를 증폭시키는 파워앰플리파이, PZT를 미소 이동시키는 마이크로 메타와 기타 지지구조로 구성되어 있다.

사용된 PZT는 기계진동과 전기 진동을 변환하는 transducer로서 전기기계 결합계수가 0.5를 넘는 압전진동자이고 직경 15mm 두께1mm의 원반형이다. PZT는 폭 5mm 두께0.3mm의 양단지지 형태의 Cu-Be Beam에 의해 지지되고, Cu-Be Beam은 전기절연체인 Teflon Block에 고정되어있다. 광학렌즈는 Fig. 3과 같이 두 개의 PZT사이에 놓이게 되며, 스펙트럼 어널라이저에 의해서 공진주파수를 측정한다.

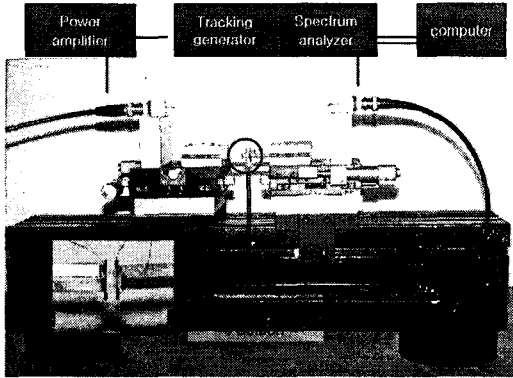


Fig. 3. The schematic of measuring part

#### 3.2 측정시스템의 평가

공명 초음파 분광법을 활용한 비파괴 검사 시스템의 공진 주파수 측정 시 시험편의 순수 공진 주파수만 측정되어지는 것이 아니라, 비파괴 검사 시스템의 공진 주파수 대역 또한 측정되어지므로 광학렌즈의 공진주파수를 측정하기에 앞서 시험편을 제외한 측정 장치만의 공진주파수를 측정된 결과를 Fig. 4에 나타냈다. 그 결과 134kHz, 348kHz, 546kHz 부근의 저주파 측에 해당되는 Stage1에서 PZT의 종방향 진동모드특성들이 나타났고 600kHz~2MHz사이인 Stage

2에서 PZT의 두께 방향의 진동모드 특성이 나타났다. 감쇠 폭이 크고 장치의 공진주파수 특성을 보이는 Stage 1에 비해 stage 2는 매우 안정적이므로 stage 2의 주파수 대역에서 비파괴 결합 평가를 수행하였다.

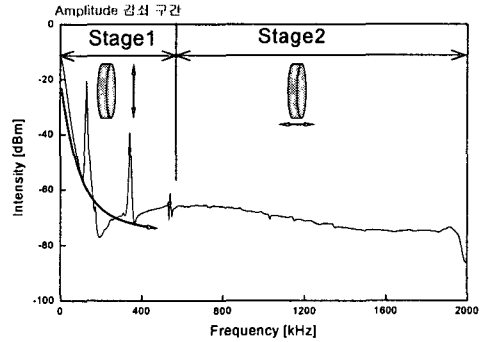


Fig. 4. The resonant frequency of measuring part

### 4. 실험결과 및 고찰

#### 4.1 Optical glass lens의 공진 주파수 측정

측정되어진 공진주파수에 의해 연마되어진 구면 렌즈 시험편은 2개의 공진 모드를 나타내었으며, 완전히 연마되지 않은 시험편과 확실하게 구분되었다.

Fig. 5에 직경 2mm를 갖는 구면렌즈의 1차 연삭가공만을 행한 시험편(after 1st polishing)과 2차 연삭가공을 행한 시험편(after 2st polishing)에 대한 공진주파수 측정결과를 나타냈다.

Fig. 5를 살펴보면, 1차 연삭만을 행한 시험편의 공진주파수보다 2차 연삭을 행한 시험편의 공진주파수가 고주파 대역으로 이동됨을 알 수 있었다. 공진주파수는 질량의 제거에 반비례하며, 1차 연삭만을 행한 시험편 보다 2차 연삭후의 시험편 질량이 더 작기 때문에 고주파 대역으로 이동된다고 생각된다. 또한, 이러한 경향은 직경 5mm를 갖는 구면렌즈의 경우에도 동일한 결과를 보였다. 비구면 렌즈의 결합평가에 대한 공진주파수 실험결과를 Figs. 6~9에 나타내었다. 양품 시험편과 결함을 갖는 시험편의 공진 주파수를 비교하였을 때 특정 대역에서 주파수가 이동함을 알 수 있었다. 이 외의 주파수대역에서는 공진주파수 peak가 노이즈 성분과 유사하게 나타나거나 각 시험편의 공진주파수 대역이 겹치기 때문에 결함을 평가하기 어려웠다. Fig. 6은 완성된 양품시험편과 기포를 갖는 불량시험편과의 공진주파수, Fig. 7은 양품시험편과 스크래치를 갖는 불량시

시험편의 공진주파수, Fig. 8은 양품시험편과 얼룩을 갖는 불량시험편의 공진주파수, Fig. 9는 양품시험편과 찍힘을 갖는 불량시험편의 공진주파수를 나타내었다. Fig. 10~13에 모드에 따른 비구면 렌즈의 공진주파수를 나타내었으며, 4~6모드 사이인 1800kHz 대역 부근에서 비구면 렌즈의 결함판별 가능성을 알 수 있다.

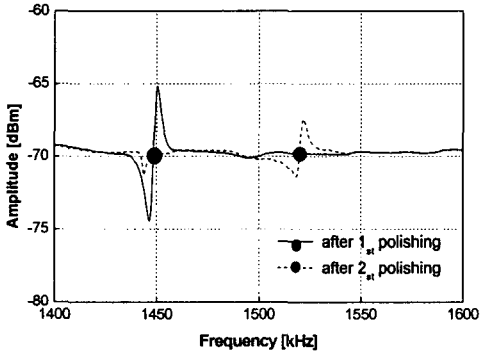


Fig. 5. Frequency for spherical glass lens with Ø2mm

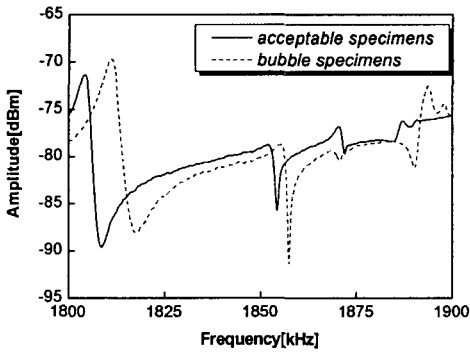


Fig. 6 Frequency for unspherical glass lens which has bubble

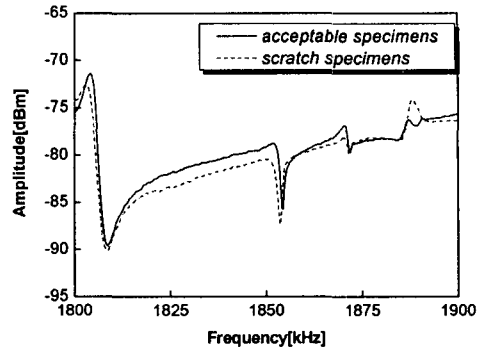


Fig. 7. Frequency for unspherical glass lens which has scratch

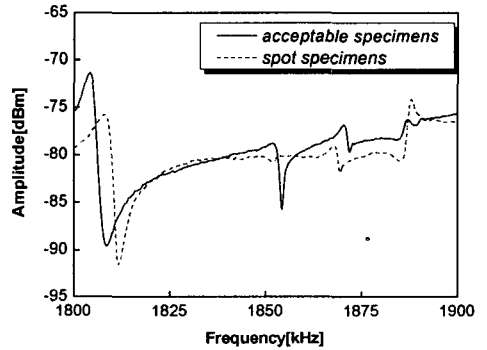


Fig. 8. Frequency for unspherical glass lens which has spot

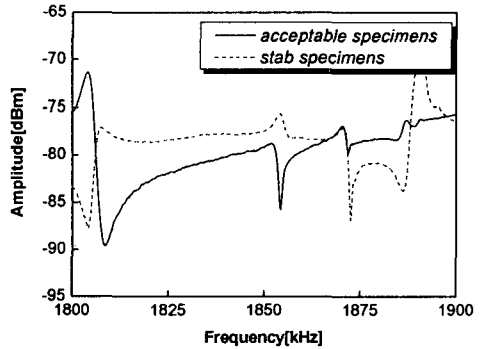


Fig. 9. Frequency for unspherical glass lens which has stab

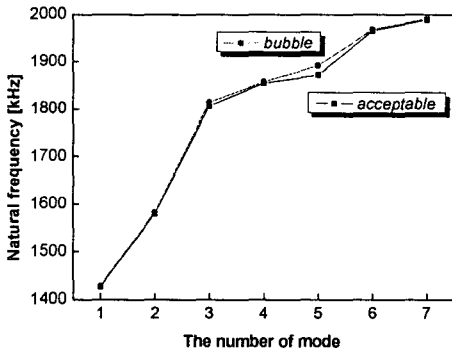


Fig. 10. Frequency for unspherical glass lens which has bubble

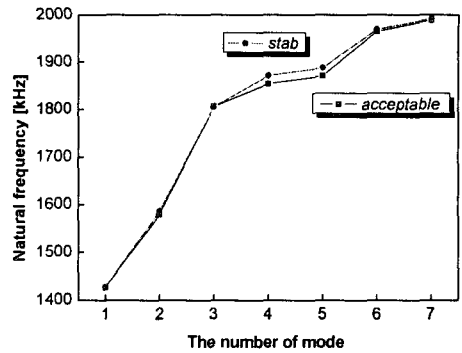


Fig. 13. Frequency for unspherical glass lens which has stab

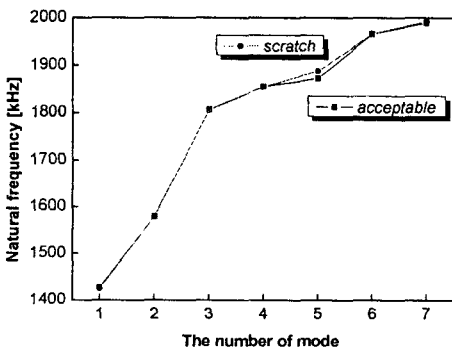


Fig. 11. Frequency for unspherical glass lens which has scratch

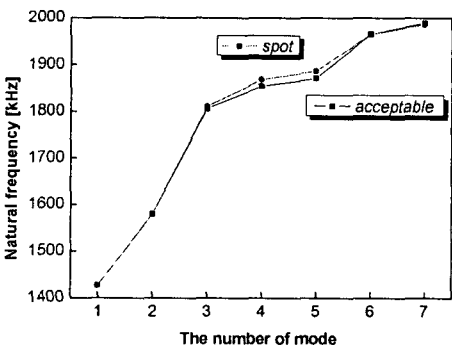


Fig. 12. Frequency for unspherical glass lens which has spot

#### 4.2 Optical Glass Lens 질량변화에 따른 공진 주파수

Table 3에 렌즈의 각 시험편에 대한 직경과 질량, 측정된 공진주파수 및  $\beta$ 를 나타냈으며, 1차 연삭가공을 마친 구면렌즈의 공진주파수 대역보다 2차 연삭가공을 마친 구면렌즈의 공진주파수 대역이 고주파 대역으로 이동됨을 알 수 있다. 렌즈의 질량과 주파수의 관계를 보다 명확하게 고찰하기 위하여 다음과 같이 공진 주파수 대역 측정 파라메타인  $\beta$ 를 도입하였다. 공진주파수 대역 측정 파라메타란 렌즈의 질량만 알게 되면, 그 렌즈의 공진주파수가 측정되는 대역을 예측할 수 있는 파라메타로서 실제 작업현장에서 다양한 크기 및 질량을 갖는 렌즈의 공진주파수 대역을 측정하는데 이용가능하리라 사료된다. 주파수 대역 측정 파라메타를 수식 (1)에 나타냈다.

$$\beta = \sqrt{m} \cdot f \quad \dots \dots \dots (1)$$

여기서  $\beta$ 는 질량의 제곱근과 공진주파수의 곱이며, 단위는  $[g^{1/2}/sec]$ 이다.

Table 3을 살펴보면, 질량이 증가함에 따라 주파수 대역 측정 파라메타인  $\beta$ 는 증가하는 경향을 보였으며, 가우스 커브 피팅(gauss curve fitting)을 통하여 임의의 질량에 대한 측정가능한 공진주파수 대역을 알 수 있다.

위의 결과를 활용함으로써 공명초음파분광법을 활용한 비파괴 검사시스템의 이용을 통하여 렌즈의 완성가공정도를 파악가능하리라 사료된다.

Table 3 Comparison of resonant frequency for optical lens

Spec	spherical Ø2mm		spherical Ø5mm		aspherical
	1st	perfect	1st	perfect	
Polishing					acceptable
Diameter [mm]	Ø2	Ø2.1	Ø5	Ø6.7	3.45*7 mm2
Mass [g]	0.0104	0.0119	0.1646	0.4075	0.3202
Resonant frequency [kHz]	1444	1455.2	1608.2	1981	1.8027
$\beta$ [10 <sup>-3</sup> g <sup>1/2</sup> /sec]	147.25	162	652.56	1264.6	1020
	155.01		743.61		

#### 4. 결론

공명초음파 분광법을 이용한 Optical glass Lens의 비파괴 검사를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 공명초음파 분광법을 이용한 측정시스템의 검사 가능한 공진주파수 대역은 600kHz~2MHz이며, 이는 PZT 모드특성에 기인한다.

2) 구면렌즈에 있어서 질량과 형상이 클수록 고주파수 대역에 공진 주파수가 존재하였고 주파수 대역 측정 파라메타인  $\beta$ 함수를 사용하여 임의의 질량에 대한 측정가능한 공진주파수 대역을 알 수 있었다.

3) 비구면 렌즈의 결함 유·무는 4~6모드 사이의 1800kHz대역에서 판별가능하다.

4) 광학렌즈의 마이크로 결함에 대한 더욱 정도 높은 결함검사를 하기 위해서는 PZT 및 크랙의 유·무와 형상오차에 대한 더 많은 연구가 수행되어야 한다.

#### 참고 문헌

(1) Seung-Hoon. Kim, Kyung-Yun. Baek, Young-Nam. Kim, In-Young. Yang, 2004, "Nondestructive Evaluation of the Flaw in a Ceramic Ferrule by Resonant Ultrasound Spectroscopy",

*Transactions of KSAE*, Vol. 12, No. 5, pp. 108~117.

(2) P. Heyliger, H. Ledbetter, "Detection of Surface and Subsurface Flaws in Homogeneous and Composite Solids by Resonant Ultrasound", *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol.17, No.2, pp.79-87, 1998

(3) J. G. Saxton, "Resonant Inspection of Production Parts", *The American Ceramic Society Bulletin*, Vol.75, No.10, pp.48-50, 1996

(4) A. Migliori, T. W. Darling, "Resonant ultrasound spectroscopy for materials studies and non-destructive testing", *Ultrasonics*, Vol.34, pp.473-476, 1996