

공명초음파분광법을 활용한 광학기기용 렌즈의 결함평가

김성훈*(조선대 대학원) 백경윤 김영남 양인영(조선대)

Defect Evaluation of Optical Lens by Resonant Ultrasound Spectroscopy

S. H. Kim, K. Y. Beak, Y. N. Kim and I. Y. Yang (Mech. Eng. Dept. CSU)

ABSTRACT

In this paper, resonant ultrasound spectroscopy(RUS) was used to determine the natural frequency of a spherical and a aspherical lens. The objective of the paper is to evaluate defect and shape error by using nondestructive evaluation method with Resonant Ultrasound Spectroscopy(RUS). The principle of RUS is that the mechanical resonant frequency of the materials depends on density, and the coefficient of elasticity. We evaluated existence of flaws through comparison with resonant frequency of a spherical and a aspherical lens. The spherical glass lenses were made of BK-7 glass, one's diameter in 2mm and 5mm. The polished spherical glass lenses had no deflection or a deflection below 2.0μm. Also, The aspherical lens were made of same material and ones diameter in 7mm and thickness in 3.4mm. In the experiment, we were performed to investigate relationship between frequency measuring parameter(β) and mass of each specimens. The difference between resonant frequency and mode of aspherical glass lens which has no defect was distinguished from aspherical glass lens which has some defects.

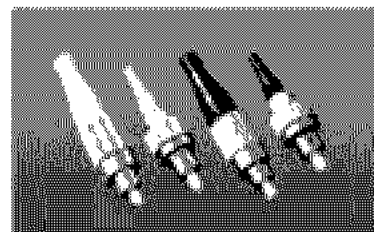
Key Words : RUS (Resonant ultrasound spectroscopy), Natural Frequency (고유주파수), Spherical Glass lens(구면 렌즈), aspherical Glass lens(비구면 렌즈), defect(결함)

1. 서론

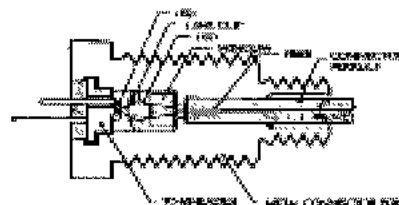
최근에 광통신 분야의 발전이 급속하게 이루어짐에 따라 광전송기기나 중계기에 있는 광원으로부터 전송 매체인 광케이블을 연결하기 위해 쓰이는 광커넥터의 이용에 관한 연구가 급속히 진행되고 있다. 광커넥터는 광전송/수신기의 전반에 걸친 성능을 좌우하게 되므로 초정밀 가공을 필요로 하며 광섬유, 페룰, 광학렌즈로 구성되어진다.

본 연구에서 사용된 광학용 렌즈는 광통신용 제품에 일반적으로 사용되는 유리질의 구로서 Fig. 1의 송수신 모듈(LD,PD Module)에서 광(빛)을 일정하게 보내주고 받는 역할을 하는 Coupling Lens와 Fiber에 집광시키는 역할을 하는 Collimator Lens에 사용되기 때문에 초 정밀한 표면 거칠기와 높은 형상 정밀도를 요구한다. 특히 비구면렌즈는 기존의 구면 렌즈보다 구면수차 등의 성능향상과 렌즈의 구성매수 감소에 따른 광학계의 Compact화, 중량감소, 비용 절감의 효과증대 및 그 사용이 대중화 되어지고 있다. 이에 따라 비구면 렌즈의 결함을 짧은 시간 안에

판별하기 위해 기존의 검사방법인 형상 및 조도측정 기술을 대체할만한 연구가 시급한 실정이다.



(a) FC-type ferrule



(b) Schematic diagram of optical connector

Fig. 1 Pricipal of resonant ultrasound spectroscopy

본 연구에서는 RUS를 이용하여 광통신용 렌즈의 내부결함에 따른 형상도를 비파괴적인 방법으로 평가하고자 하였다.¹⁰ 비파괴 시스템은 압전진동자를 이용하여 자체 제작하였으며, 자체 제작되어진 RUS 장치는 고주파 영역에서도 공진에 의한 초음파 강도가 확보되기 때문에 1mm³ 이하의 작은 시험편에 대한 측정이 가능하며, 또한 시험편에 생기는 strain이 작아 취성 재료의 측정도 가능하다는 장점이 있다.

Migliori³⁾ 등은 독립탄성상수가 9개의 사방정계를 갖는 La₂CuO₄의 310K, 297K 및 44K에 있어서 탄성상수를 측정하였으며, Lei⁴⁾ 등은 사방정계 산화물 초전도체인 YBa₂Cu₃O_{7-δ} 단결정 시험편의 실온에 있어서 9개의 독립탄성상수를 분류한 바 있으며, Sarrao⁵⁾ 등은 RUS를 사용해서 Ta 단결정 시험편의 결정축 방향을 측정하였으며, 그 결과 X선 회절 측정결과와도 거의 일치함을 보여 RUS에 의한 결정축 방향의 측정 가능성을 보였다. Spoor⁶⁾ 등은 준결정인 AlCuLi의 탄성상수를 측정함으로써, 이것이 등방성 체임을 밝힌 바 있다. Sarrao⁷⁾, Darling⁸⁾ 및 Fuerst⁹⁾ 등은 탄성상수가 재료의 결정구조나 원자결합의 변화에 대단히 민감하다는 것에 착안하여 이를 이용한 논문을 발표한바 있다. 또한 공명초음파법은 취성 재료나 작은 시험편의 경우에도 적용가능하기 때문에 형상의 재료 측정이 가능하다는 장점이 있으며 베어링의 진원도 측정에도 응용되고 있다. Paul Heyliger와 Hassel Ledbetter¹⁰⁾는 steel block의 표면 크랙과 복합적층물의 내부 손상을 검출하는데 RUS를 사용하여 표면균열이 있는 시험편에 대해서 실제로 측정된 시험편의 공진 주파수 측정값과 유한 요소법을 이용한 공진 주파수 해석 값과의 비교로부터, 균열의 크기를 분류하였으며, Jay G. Saxton¹¹⁾은 RUS를 이용하여 chops, cracks, voids등을 검출하므로써 RUS의 비파괴 검사기능으로서의 가능성을 찾았다.

2. 시험편

2.1 시험편의 형상 및 재질

Spherical Glass lens 의 시험편 제조과정을 Fig. 2의 flow chart에 나타냈다. 렌즈의 재질은 BK-7이며, 현재 광커넥터용 결합소자의 부품으로 사용되는 구면렌즈의 표준사이즈는 직경 0.15~10mm이다. 그 중 본 연구에서는 직경 2mm와 5mm를 갖는 구면렌즈를 선택하였으며, 구면렌즈의 공정 과정의 단계별로 랜덤하게 선택하여 비파괴 검사를 행하였다.

Fig. 3에 각 공정 과정의 단계별 구면렌즈의 형상을 나타냈다. Fig. 3(a)에 유리소재를 1차 연마하여 얻어진 직경 2mm 구면렌즈용 시험편을, Fig. 3(b)에 완성 연마된 직경 2mm 구면렌즈를 나타냈다.

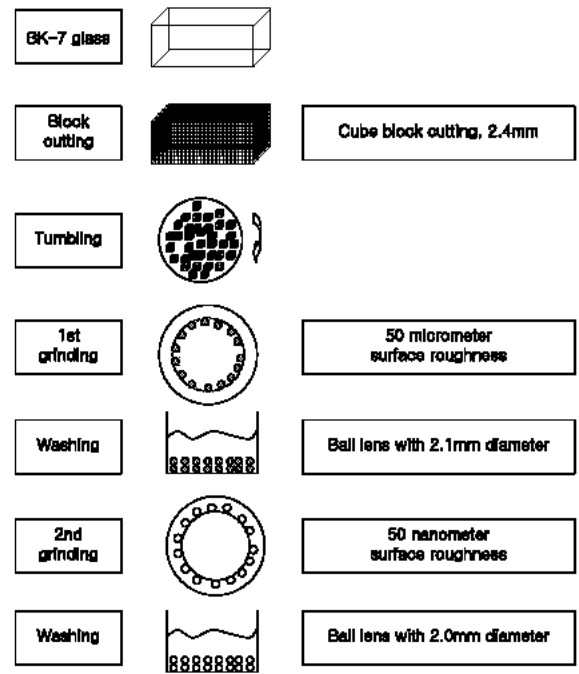
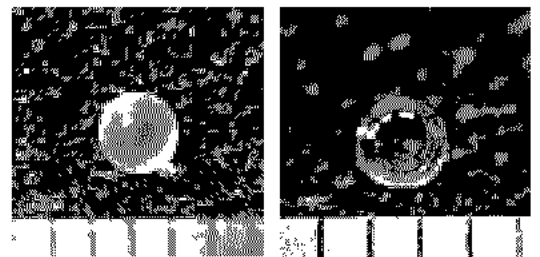
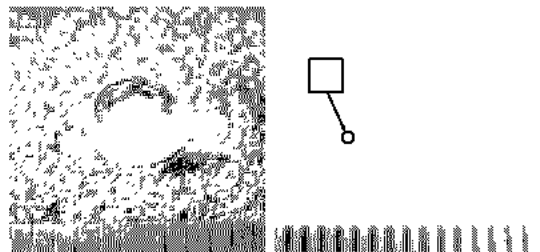


Fig. 2 The flow chart of spherical glass lens manufacturing process



(a) Spherical Glass lens with $\varnothing 2.1\text{mm}$ after 1st grinding (b) Spherical Glass lens with $\varnothing 2\text{mm}$ after perfect polishing



(c) Spherical Glass lens with $\varnothing 5\text{mm}$ after perfect polishing (d) Aspherical Glass lens with $\varnothing 5\text{mm}$ after perfect specimen which has some defect

Fig. 3 The shape of optical glass lens specimen

이때 1차 연마를 통하여 얻어진 직경 2mm 구면렌즈용 시험편의 실제 직경은 2.1mm이었다. 또한 Fig. 3(c)에 완성 연마된 직경 5mm 구면렌즈를 나타냈으며 Fig. 3(d)에 찍힘 결함을 갖는 비구면 렌즈를

나타냈다. 또한 렌즈의 가공 완성도에 따른 결과를 고찰하고자, Table 2에 직경 2mm 구면렌즈를 위한 1차 연삭과 완성연삭 된 구면렌즈 시험편을 나타냈다. 비구면 렌즈의 결함판별을 위한 시험편의 종류를 Table 3에 나타냈으며 직경 7mm, 두께 3.4mm로서 결함이 없는 완성품과 제조과정 중 발생하는 결함인 기포와 찍힘에 대한 시험편을 조도검사를 통하여 선택하였다. Table 4는 본 연구에서 사용된 광학 렌즈의 기계적 물성치이다.

Table 2 spherical glass lens specimens

spherical glass lens	Process	Size (mm)
Ø2mm	After 1st polishing	0.11
	Perfect polishing	0.10
Ø3mm	After 1st polishing	0.07
	Perfect polishing	0.10

Table 3 aspherical glass lens specimens

aspherical glass lens	Process	Size (mm)
	Perfect polishing	
	The specimen which had 7.1 μm rms were detect	4.1 x 3.4

Table 4 The mechanical properties of optical glass lens

Spec.	Elastic modulus E (Gpa)	Poisson's ratio	Density (kg m ⁻³)
Optical glass lens (BK-7)	83.1	0.21	2.51 × 10 ³

3. 측정시스템

3.1 시험편 측정시스템

시험편의 정확한 공진주파수를 측정하기 위한 측정부를 Fig. 4와 같이 제작하였고 압전진동자와 시험편의 지지방법에 대한 실험을 하였다.

본 실험에 사용되어진 원반형 압전진동자(TDK, PZT-72A, PbZrO₃)의 고온체인 지르코늄티탄산염)는 압전재료 정수에 따른 고유의 기계적 진동 및 전기적인 에너지 변환을 하는 것으로서 시험편의 자유진동이 강하게 구속되지 않도록 비교적 탄성계수가 작은 폭 5mm 두께 1mm의 탄성체에 절연테이프를 감아서 장착하였다. 또한 접촉력에 의한 공진 주파수에 미치는 영향을 최소화하기 위해서 2개의 stage bridge를 micrometer로 이동시킴으로서 접촉력에 대한 미세 조절을 가능하게 하였다.

3.2 측정시스템 평가

공명초음파분광법을 활용한 비파괴검사 시스템의 문제점은 측정 시 순수한 시험편의 공진주파수만이 측정되어지는 것이 아니라, 비파괴검사 시스템의 공진주파수 대역 또한 측정된다는 것이다. 따라서 시험편의 공진 주파수를 측정하기에 앞서 측정시스템의 공진 주파수를 측정해야 할 필요가 있다. 이러한 영향을 고려하여 시험편을 제외하고 비파괴검사 시스템만의 공진주파수를 측정한 결과를 Fig. 5에 나타냈다. 비파괴 검사 시스템의 공진주파수는 0~600kHz 범위에서 나타났으며, 그 결과 렌즈의 비파괴 검사 실험은 측정시스템의 측정 주파수대역을 고려한 600~2000kHz 범위에서 비파괴검사 평가를 수행하는게 타당하였다.

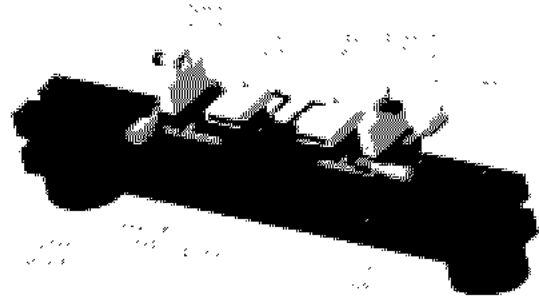
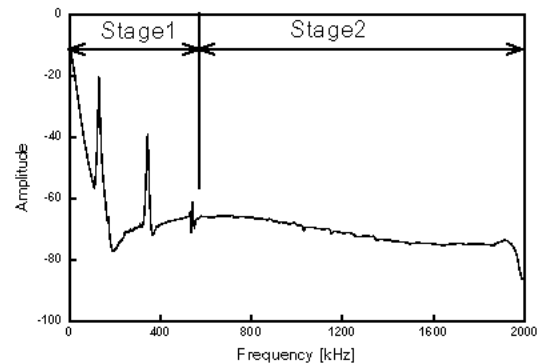


Fig. 4 The schematic of measuring part.

Fig. 5 The resonant frequency of measuring part.



4. 실험결과 및 고찰

4.1 Optical glass lens의 공진 주파수 측정

측정되어진 공진주파수에 의해 연마되어진 구면 렌즈시험편은 2개의 공진 모드를 나타내었으며, 완전히 연마되어지지 않은 시험편과 확실하게 구분되었다.

Fig. 6에 직경 2mm를 갖는 구면렌즈의 1차 연마 가공만을 행한 시험편(after 1st polishing)과 완성시험

면(perfect polishing)에 대한 공진주파수 측정결과를 나타냈다.

Fig. 6을 살펴보면, 1차 연마만을 행한 시험편의 공진주파수보다 완성시험편의 공진주파수가 고주파 대역으로 이동됨을 알 수 있었다. 공진주파수는 질량의 제공근에 반비례하며, 1차 연마만을 행한 시험편 보다 완성 시험편의 질량이 더 작기 때문에 고주파 대역으로 이동된다고 생각된다. 또한, 이러한 경향은 직경 5mm를 갖는 볼렌즈의 경우에도 동일한 결과를 보였다. Fig. 7에 완성된 가공 후 양품시험편과 적힘을 갖는 불량시험편과의 공진주파수를 나타냈다.

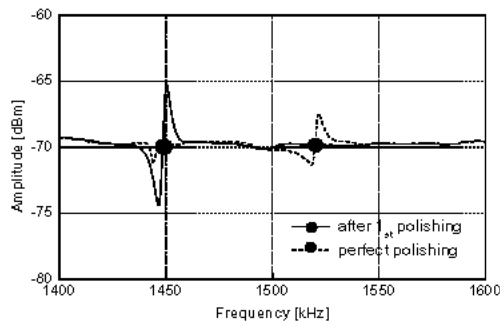


Fig. 6 Frequency for spherical glass lens with $\varnothing 2$ mm

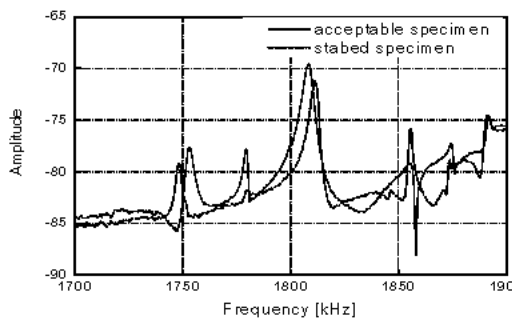


Fig. 7 Frequency for unspherical glass lens

4.2 Optical Glass Lens 질량변화에 따른 공진 주파수

Table 5에 렌즈의 각 시험편에 대한 직경과 질량, 측정된 공진주파수 및 β 를 나타냈으며, Fig. 8에 질량과 β 의 관계 그래프를 나타냈다. Fig. 8의 결과를 살펴보면, 1차 연마가공을 마친 시험편의 공진주파수 대역보다 완성 가공된 렌즈의 공진주파수 대역이 고주파 대역으로 이동됨을 알 수 있으며, 이는 공진주파수가 수식 (1)과 같이 질량의 제공근에 반비례하기 때문이다.

$$f_{res} \propto \frac{1}{\sqrt{M}} \quad (1)$$

여기서 f_{res} 는 공진주파수를 의미하며, M 은 질량을 의미한다.

렌즈의 질량과 주파수의 관계를 보다 명확하게 고찰하기 위하여 다음과 같이 공진 주파수 대역 측정 파라메타인 β 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 (2)에 나타냈다.

$$\beta = \sqrt{M} \cdot f \quad (2)$$

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

Table 5 Comparison of resonant frequency for optical lens

No. lens	spherical lens		spherical lens		unspherical
	1st	perfect	1st	perfect	
Diameter [mm]	2	2	2	2	3.2, 5.0, 6.0
Mass [g]	0.0004	0.0010	0.0046	0.0075	0.0020
Resonant frequency [kHz]	1444	1452	1392.0	1401	1800, 1850
β [g ^{1/2} /sec]	14.25	14.25	13.2.6	13.49	17.00

Fig. 8 Relationship between β and mass

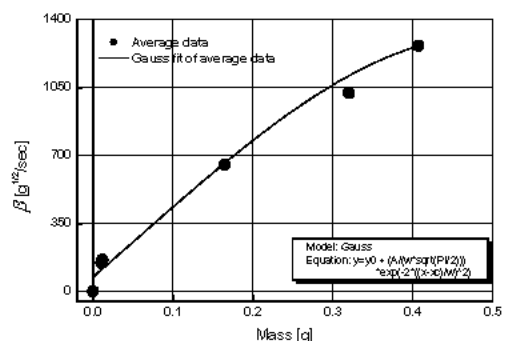


Table 5 및 Fig. 8을 살펴보면, 질량이 증가함에 따라 주파수 대역 측정 파라메타인 β 는 증가하는 경향을 보였으며, 가우스 커브 피팅(gauss curve fitting)을 통하여 β 함수를 얻을 수 있었다.

위의 결과를 활용함으로써 공명초음파분광법을 활용한 비파괴 검사시스템의 이용을 통하여 렌즈의 완성가공정도를 파악가능하리라 사료된다. 또한 렌즈의 질량을 알 경우 렌즈의 공진주파수가 측정되는 주파수 대역을 β 를 이용하여 예측할 수 있다고 사료된다.

5. 결론

공명초음파분광법을 활용하여 광통신 부품소재인 Optical Glass Lens의 결함에 따른 공진 주파수를 측정된 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 비파괴검사시스템의 검사가능한 주파수 대역은 600kHz~2MHz 까지이며, 이는 시편을 가진하기 위해 사용된 PZT의 모드 특성에 기인한다.
- 2) Optical Glass Lens의 연마 전·후 및 결함에 따른 공진주파수는 1.4MHz~2MHz에서 판별가능하였으며, 질량과 형상이 커짐에 따라 고주파 대역으로 공진주파수가 이동함을 알 수 있었다. 또한 공진 주파수 측정 파라메타(β)를 도입하여 임의의 질량에 대한 공진주파수 대역을 쉽게 찾아낼 수 있었다.
- 3) 렌즈의 마이크로 결함에 대한 더욱 정도 높은 검사를 하기 위하여 PZT 및 크랙의 유·무와 형상 오차에 대한 더 많은 연구가 수행되어야 한다.

참고문헌

1. S. H. Kim, K. Y. Baek, Y. N. Kim, I. Y. Yang, "The Nondestructive Evaluation of the Flaw in a Ceramic Ferrule by Resonant Ultrasound Spectroscopy", Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol.12, No.5, pp.108-117, 2004
2. S. H. Kim, "The Nondestructive Evaluation of the Ferrule and Ball lens by Resonant Ultrasound Spectroscopy", The Korean Society of Automotive Engineers, Vol.2, No.148, pp.936-941, 2004
3. A. Migliori, W. M. Visscher, S. E. Brown, Z. Fisk, S. W. Cheong, B. Alten, E. T. Ahrens, K. A. Kubat-Martin, J. D. Maynard, Y. Huang, D. R. Kirk, K. A. Gillis, H. K. Kim, M. H. W. Chan, "Elastic constants and specific-heat measurements on single crystals of La_2CuO_4 ", Physical Review B, Vol.41, No.4, pp.2098-2102, 1990
4. M. Lei, J. L. Sarrao, W. M. Visscher, T. M. Bell, J. D. Thompson, A. Migliori, U. W. Welp, B. W. Veal, "Elastic constants of a monocrystal of superconducting $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ ", Physical Review B,

- Vol.47, No.10, pp.6154-6156, 1993
5. J. L. Sarrao, S. R. Chen, W. M. Visscher, M. Lei, U. F. Kocks, A. Migliori, "Determination of the crystallographic orientation of a single crystal using resonant ultrasound spectroscopy", Review of Scientific Instruments, Vol.65, No.6, pp.2139-2140, 1994
6. P. S. Spoor, J. D. Maynard, A. R. Kortan, "Elastic Isotropy and Anisotropy in Quasicrystalline and Cubic AlCuLi ", Physical Review Letters, Vol.75, No.19, pp.3462-3465, 1995
7. J. L. Sarrao, D. Mandrus, A. Migliori, Z. Fisk, I. Tanaka, H. Kojima, P. C. Canfield, P. D. Kodali, "Complete elastic moduli of $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ ($x=0.00$ and 0.14) near the tetragonal-orthorhombic structural phase transition", Physical Review B, Vol.50, No.18, pp.13125-13131, 1994
8. T. W. Darling, A. Migliori, G. Strouse, B. Swanson, S. Johnson, M. F. Hundley, J. D. Thompson, "Resonant Ultrasound Spectroscopy and Comparative Studies of a 1-D Linear Chain (MX) Material", Synthetic Metals, Vol.86, pp.2153-2154, 1997
9. C. D. Fuerst, J. F. Herbst, J. L. Sarrao, A. Migliori, "Resonant ultrasound measurements of elastic constants in melt-spun $\text{R}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ compounds ($\text{R}=\text{Ce}, \text{Pr}, \text{Nd}, \text{Er}$)", Journal of Applied Physics, Vol.75, No.15, pp.6625-6627, 1994
10. 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
11. J. G. Saxton, "Resonant Inspection of Production Parts", The American Ceramic Society Bulletin, Vol.75, No.10, pp.48-50, 1996