

비구면 렌즈의 질량변화 평가를 위한 RUS의 적용

Evaluation of Mass Variation of Aspheric Glass Lens Using Resonant Ultrasound Spectroscopy

허 옥*, 임광희**, 양인영***, 김지훈***†

Uk Heo*, Kwang Hee Im**, In Young Yang*** and Ji Hoon Kim***†

초 록 광산업 발전과 더불어 초정밀 가공부품이 요구되고 있다. 광산업 분야의 중요부품인 광커넥터의 페룰(ferrule) 및 광학기기용 렌즈이다. 특히, 이 렌즈는 높은 형상정밀도와 결함이 포함되지 않는 등 높은 신뢰성이 요구되는 실정이다. 이들 광소자들은 광원의 손실을 줄이기 위해서는 이들 부품의 초정밀 가공이 필수적이며 양품과 불량품을 판별하기 위해 완성단계에서 다양한 비파괴 검사가 이루어지고 있다. 공명 초음파 분광법은 물체의 형상, 탄성, 결정의 방향, 밀도 등에 의해 결정되는 공진주파수 응답 특성을 비교 분석하여 재료의 형상변화, 탄성정수 및 결함의 유·무를 검출해내는 방법이다. 따라서 현재 레이저용 프린터에 사용되는 비구면 렌즈의 질량 변화에 따라 공진크기 및 공진주파수 응답 특성을 통하여 분석하였다.

주요용어: 공명 초음파 분광법, 공진주파수, 비구면 렌즈, 공진크기, 압전진동자

Abstract Ultra precise processed parts are required together with the development of optoelectronics industry. As important parts of optoelectronics industry, there are ferrule of optical connector and lens for optical devices. In particular, the lens requires high reliability with high precision without including flaws. These optical modules need ultra precise processing in order to reduce the loss of light sources and various nondestructive inspections are carried out in the finishing stage to separate good and bad quality products. Therefore, it was analyzed through the characteristics of response of amplitude and resonant frequency according to the mass variations of aspheric lens that is used currently in laser printers.

Keywords: RUS(Resonant Ultrasound Spectroscopy), Resonant Frequency, Aspheric Glass Lens, Amplitude, PZT

1. 서 론

나노크기의 초정밀 가공 기술의 발전은 광산업분야의 높은 형상 정밀도를 요구하는 부품들의 많은 발전을 가져왔다. 이러한 미세가공 기술에 의해 제작된 광부품 소자들은 출하 전 육안 비파괴 검사를 통해 결함여부를 판별하게 된다. 광커넥터의 페룰(ferrule)은 미세한 광섬유를 일정한 위치에 고정시

키는 역할을 하는 세라믹 제품으로써 빛이 광섬유로 들어갈 때의 삽입손실을 줄이기 위해 결함이 없어야 하며 높은 형상 정밀도를 요구한다. 이러한 페룰의 형상결함 평가에 있어 기존의 광학현미경이나 조도 측정기를 사용하는 경우에는 상당한 판별 소요시간이 요하게 되며, 관찰자의 숙련도에 따라 그 정확성은 차이가 있다. 이에 따라 현재 산업현장에서는 세라믹제 페룰의 결함 판별을 위한 높은 신뢰

(접수일: 2007. 11. 20, 심사완료일: 2007. 1. 22) * 조선대학교 대학원 기계설계공학과, ** 우석대학교 기계자동차공학과, *** 조선대학교 기계설계공학과, † Corresponding author: Department of Mechanical Design Engineering, Chosun University, Gwangju 501-759 (E-mail: kjh@chosun.ac.kr)

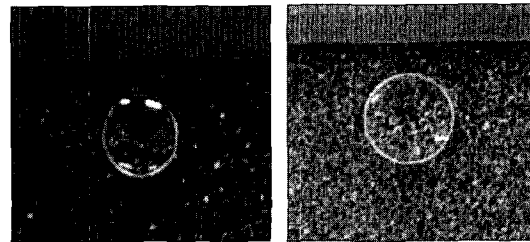
성을 갖는 검사기법 및 비파괴 평가 시스템이 요구되어지고 있다[1]. 또한 구면수차로 인해 빛이 한부분에 모이지 않는 단점을 보완하기 위해 구면수차를 줄여 정확한 초점이 맺어 지도록 하는 비구면 렌즈(aspheric glass lens)의 경우 할로겐화 램프를 사용하여 빛의 반사를 이용한 결함판별을 실시하고 있다. 이러한 육안을 통한 비파괴검사는 장시간 동안 많은 빛에 노출되어 있어 작업자로 하여금 눈에 대한 피로를 가중시켜 결함판별에 오류를 범할 수 있게 한다. 이러한 문제점을 해소하며 더 정확하고 효율적인 검사를 위해 공명초음파 분광법(resonant ultrasound spectroscopy: 이하 RUS라 한다.)이 적용되어 많은 논문들이 발표되어 왔으며 Paul Heyliger와 Hassel Ledbetter는 steel block의 표면 크랙과 복합적층물의 내부 손상을 검출하는데 RUS를 사용하여 표면균열이 있는 시험편에 대해서 실제로 측정된 시험편의 공진주파수 측정값과 유한요소법을 이용한 공진주파수 해석 값과의 비교로부터, 균열의 크기를 분류하였으며[2], Jay G. Saxton은 RUS를 이용하여 chops, cracks, voids 등을 검출함으로써 RUS의 비파괴검사 기능으로서의 가능성을 확인한 바 있다[3]. 또한 RUS는 고체상태 물질의 공진 스펙트럼은 그물체가 갖는 결정의 물리적 구성의 특성과 상당히 유사하다는 점을 이용하여 공진 스펙트럼을 측정하여 많은 분야의 고체상태 재료들에 탄성성질을 측정하는데 이용하였다[4]. RUS는 상대적으로 큰 시험편에 대해 측정하는데 어려움이 있으며, 개개 시험편에 대한 독립적인 측정들은 재료의 탄성 성질을 완전하게 기술하는 것을 필요로 하는 것이다. 본 논문에서는 실험에 앞서 위 두 가지 제한사항에 대하여 충분히 만족하였으며 높은 형상 정밀도를 요구하는 비구면 렌즈는 질량차가 발생하는데 공명초음파 분광법을 이용한 제작된 측정시스템을 적용하여 광 전송기와 광 전송매체에 사용되고 있는 세 가지 종류의 비구면 렌즈를 동일조건하에서 질량변화에 따른 공진주파수와 공진크기(amplitude)의 변화를 측정하였다. 연구에 사용된 광학렌즈는 레이저프린터의 레이저 다이오드에서 발산되는 빔을 평행광으로 변환시키는 역할을 하는 광소자로서 그 형상에 오차가 없어야 한다. 이러한 광소자의 비파괴 평가를 위해서 RUS를 이용한 측정시스템을 제작하였고, 측정시스템을 사용하여 측정된 시험편의 공진주파수와 공진크기에 대한 고찰을 통하여 양품 시험편에 대한 주파수

와 공진크기의 변화를 통해 시험편의 질량 변화를 구분할 수 있었으며, RUS를 통해 특정 사이즈를 갖는 비구면 렌즈의 질량에 대한 데이터를 확립할 수 있다. 따라서 본 연구를 통하여 측정된 데이터를 바탕으로 더 많은 연구가 이뤄진다면 급격히 변화하고 있는 광통신 부품의 체계적인 출하관리로 생산비 절감과 효율성 증대라는 두 가지의 목표를 달성 할 수 있을 것이다.

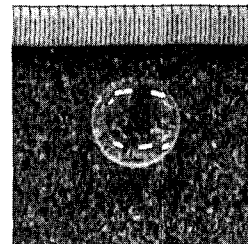
2. 실험

2.1. 시험편

비구면 렌즈는 유리 소재 가공, 유리 성형, 품질 측정, centering, AR coating, 출하검사의 단계를 통하여 제작되는데 AR coating 단계에서 dual-side single-layer 코팅이 된 렌즈는 출하검사단계에서 할로겐화 램프를 이용하여 불량품 검사를 하게 된다. 본 연구에서는 동일한 재료의 형상이 다른 세 가지 종류의 비구면 렌즈를 선택하여 시험편으로 사용하였으며, 렌즈의 형상은 Fig. 1과 같다. 디지털 카메라 광학계의 컴팩트화 및 고해상력을 위해 사용되는 렌즈는 직경이 9.2 mm, 두께가 2.48 mm 인 렌즈와 직경이 9.2 mm, 두께가 3.9 mm 렌즈 그



(a) The aspheric glass lens with 6.35 × 3.0 mm (b) The aspheric glass lens with 9.2 × 2.48 mm



(c) The aspheric glass lens with 9.2 × 3.9 mm

Fig. 1 The shapes of aspheric glass lens specimens

리고 레이저 프린터의 레이저 다이오드에서 발산되는 빔을 평행광으로 변환시키는 역할을 하는 직경이 6.35 mm, 두께가 3.0 mm 렌즈를 사용하였다. 시험편의 질량은 전자저울을 이용하여 10^{-6} g 까지 측정하였으며 비구면 렌즈에 대한 물성(properties)은 Table 1과 같다.

Table 1 The mechanical properties of aspheric glass lens

Specimen	Elastic modulus E [Gpa]	Rigidity module G [Gpa]	Poisson's ratio	Density [kg/m ³]
Aspheric glass lens	89.1	35.7	0.247	3.05×10^3

2.2. 시험편 측정시스템 및 평가

제작된 RUS 비파괴 측정시스템은 Fig. 2 같으며 piezoelectric transducer(이하 압전진동자라 한다.) 사이에 마이크로 메타를 이용하여 시험편을 고정시키는 측정부, 전기적인 신호 발생 및 압전진동자에서 발생한 신호를 받아 스크린으로 볼 수 있게 하는 Advantest사의 R3132 spectrum analyzer 그리고 데이터 분석 및 데이터 베스화를 위한 컴퓨터로 구성되어 있다. 측정부는 압전진동자의 미소 이동 및 실험하는 시험편들에 대해 동일한 압력을 주기 위한 마이크로 메타(micro meter)와 기타 지지구조로 구성되어 있다. 실험에서 양단에 고정된 마이크로미터는 각 시험편 마다 1.5 mm, 2 mm, 2.5 mm를 움직여 시험편을 고정하였다. 사용된 압전진동자는 기계적 진동을 전기적 진동으로 전기적 진동을 기계적 진동으로 변환하는 transmitter와 receiver 역할을 하는 transducer로 압전진동자이고 직경

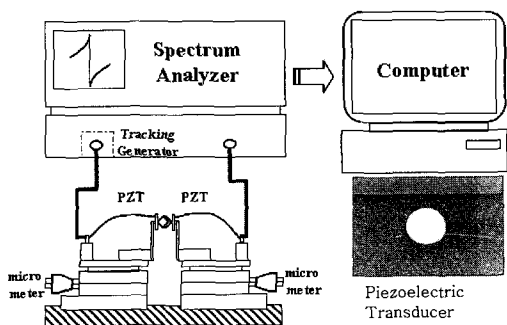
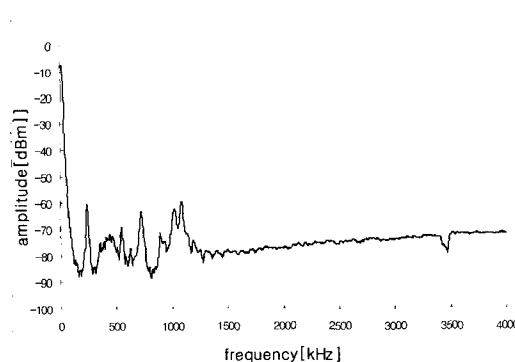
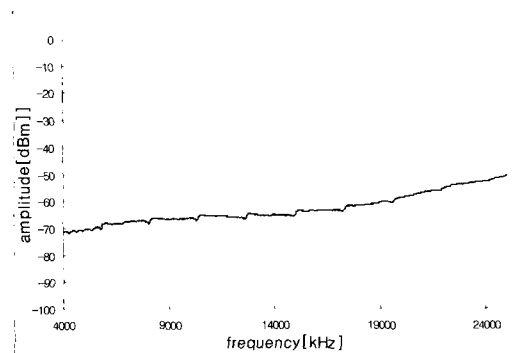


Fig. 2 The schematic of measuring system

10 mm 두께 2 mm의 원반형을 사용하였다. 압전진동자는 폭 5 mm 두께 0.3 mm의 양단지지 형태의 Cu-Be beam에 의해 지지되며 Cu-Be beam은 전기 절연체인 teflon block에 고정되어있다. R3132 spectrum analyzer는 공진크기와 주파수 특성을 측정하는 것으로, 측정 가능한 주파수 대역은 9 kHz~3 GHz, 최대분해능 1 kHz이며 tracking generator가 내장되어있다. tracking generator에 의해 발생된 신호는 BNC cable을 통하여 electric terminal과 연결된 압전진동자를 가진시키며 시험을 통과한 주파수는 반대편 압전진동자를 통하여 기계적 에너지가 전기적 에너지로 바뀌어 spectrum analyzer로 입력되어 주파수에 대한 분석이 스크린에 나타나게 된다. RUS 검사 시스템을 이용한 비구면 렌즈의 공진주파수 측정은 RUS 검사 시스템 장비의 공진주파수에 의해 영향을 받기 때문에 장치만의 공진주파수를 측정하였으며 측정 한 결과는 Fig. 3와 같다. 측정결과는 244 kHz, 552 kHz, 732 kHz, 900 kHz, 1036 kHz, 1092 kHz,



(a) The resonant frequency in the range of 0 ~ 4 MHz



(b) The resonant frequency in the range of 4 ~ 25 MHz

Fig. 3 The resonant frequency of measuring system

3472 kHz에서 공진주파수가 나타났으며, 4 MHz~25 MHz 사이에는 일정한 간격으로 공진주파수가 나타남을 볼 수 있다. 25 MHz 이상에서는 장비에 대한 공진 주파수가 나타나지 않았다. 압전진동자 사이에 시험편을 고정한 후에 공진주파수 측정하였을 때 4 MHz 이상의 주파수에서는 장비와 동일한 주파수의 형태를 보였다. 본 연구에서는 4 MHz 이하의 주파수를 사용하여 분석하였다. Fig. 3에서 보면 1.4 MHz 이후에 매우 안정적인 모습을 보이는데 이는 1.4 MHz 이전에는 압전진동자의 종방향 진동모드 특성에 의한 영향이며 1.4 MHz 이후에는 압전진동자의 두께 방향의 진동모드 특성에 의한 것이다. 질량 변화에 대한 비구면 렌즈의 평가는 렌즈의 공진주파수를 기준으로 평가 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 비구면 렌즈의 공진주파수 측정

질량 변화에 대한 공진주파수 및 공진크기의 측정 신뢰도를 높이기 위해 직경과 두께가 다른 세 가지 종류 시험편을 적용하여 실험을 실시하였으며 렌즈 내부에 결함이 없는 양품의 표준 시험편(질량 및 공진주파수가 평균에 근사함)을 선택하여 공진주파수를 측정하였다. 이에 대한 주파수는 Fig. 4~Fig. 6에 나타나있다. 시험편들의 공진주파수는 동일한 재질로 만들어 졌을 지라도 형상과 질량에 따라 공진주파수가 달라지는 것을 알 수 있다. 1.5 MHz 이후에는 주파수에 대한 뚜렷한 변화가 보이지 않지만 3.5 MHz 부근에서 세 개의 시험편 모두 공진주파수가 발생함을 알 수 있다. 이는 장비의 공진주파수와 비교하면 거의 일치하는 것을 알 수 있는데 비구면 렌즈는 1.5 MHz에 이하에서 민감하게 반응하지만 1.5 MHz 이상은 장비의 영향을 많이 받는 것으로 사료된다. 그러므로 질량변화에 대한 공진주파수 관찰은 1.5 MHz 이하의 주파수를 주로 사용하여 비교하였다. Fig. 4은 직경이 6.35 mm인 비구면 렌즈의 공진주파수는 432 kHz, 539 kHz, 556 kHz, 881 kHz, 900 kHz, 993 kHz, 1012 kHz, 1063 kHz, 1092 kHz에 나타나는 것을 확인할 수 있었으며, Fig. 5는 직경이 9.2 mm 두께가 2.48 mm인 렌즈로서 225 kHz, 244 kHz, 533 kHz, 572 kHz, 736 kHz, 880 kHz, 920 kHz, 956 kHz, 1096 kHz, 1276 kHz에서 공진주파수가 나타남을 알

수 있다. Fig. 6는 직경이 9.2 mm 두께가 3.9 mm인 비구면 렌즈의 공진주파수는 664 kHz, 728 kHz, 868 kHz, 879 kHz, 932 kHz, 1024 kHz, 1088 kHz, 1148 kHz, 1692 kHz, 2969 kHz에 나타났다.

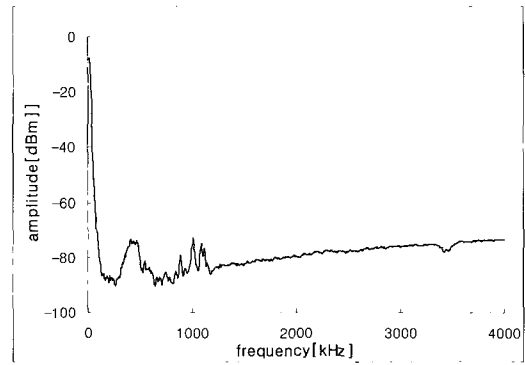


Fig. 4 The resonant frequency for a standard aspheric glass lens with $d = 6.35$ mm, $t = 3.0$ mm and 0.244012g

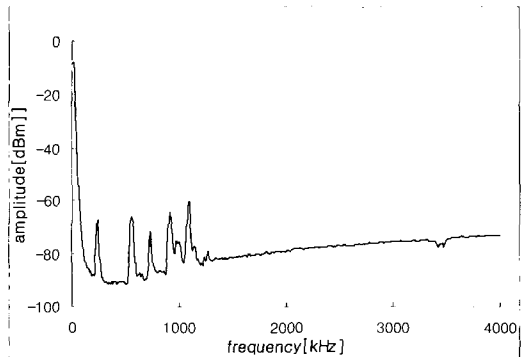


Fig. 5 The resonant frequency for a standard aspheric glass lens with $d = 9.2$ mm, $t = 2.48$ mm and 0.378588g

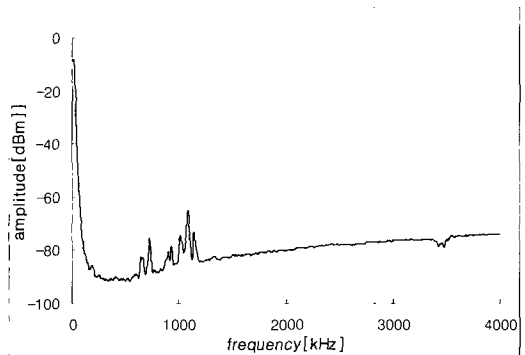
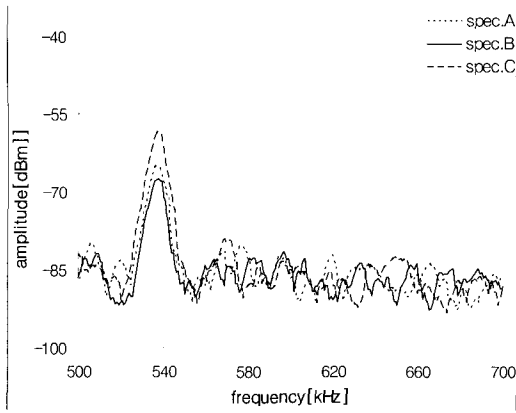
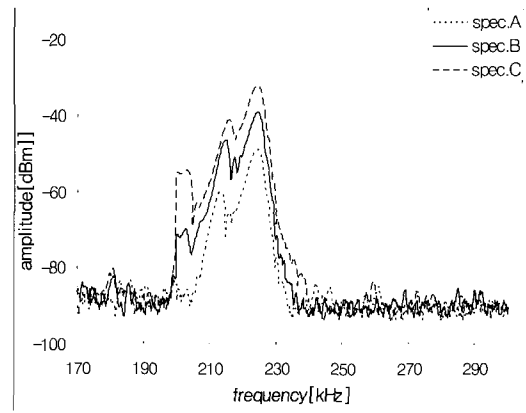


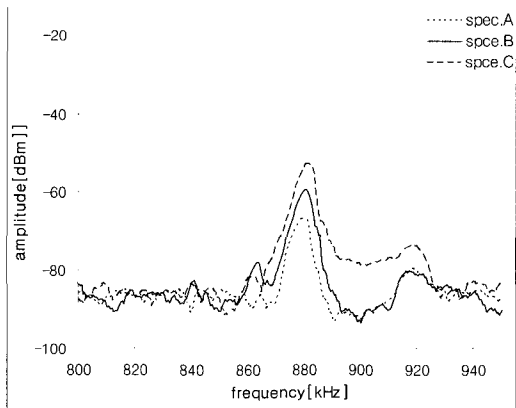
Fig. 6 The resonant frequency for a standard aspheric glass lens with $d = 9.2$ mm, $t = 3.9$ mm and 0.472076g



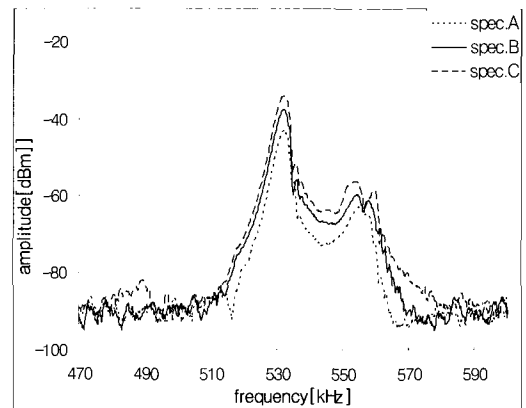
(a) The analysis of resonant frequency from 500 kHz to 700 kHz



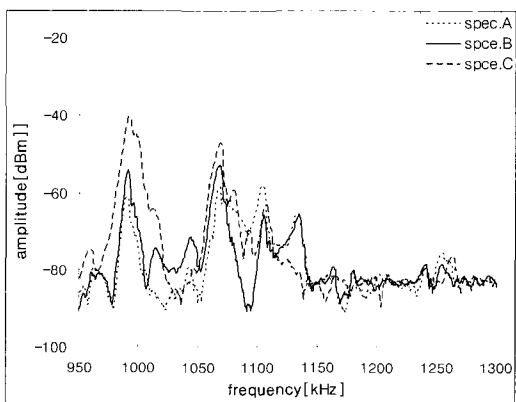
(a) The analysis of resonant frequency from 170 kHz to 300 kHz



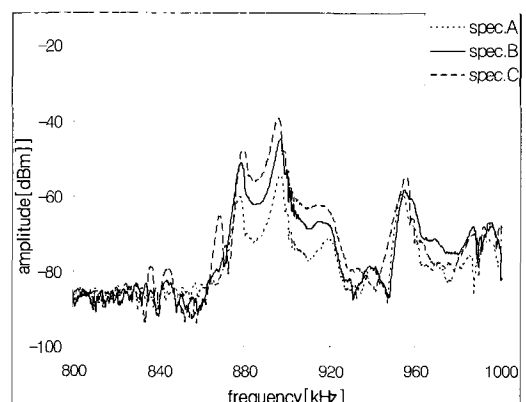
(b) The analysis of resonant frequency from 800 kHz to 950 kHz



(b) The analysis of resonant frequency from 470 kHz to 600 kHz



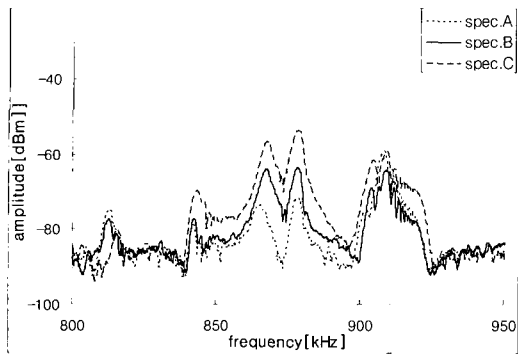
(c) The analysis of resonant frequency from 950 kHz to 1300 kHz



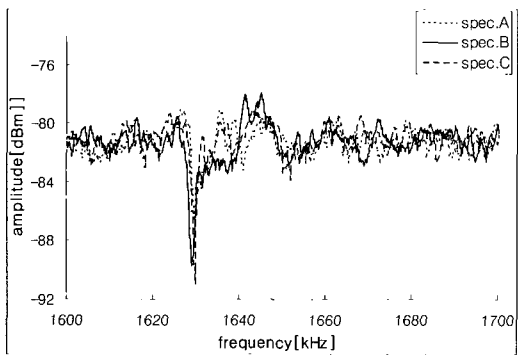
(c) The analysis of resonant frequency from 800 kHz to 1000 kHz

Fig. 7 The analysis of resonant frequency and amplitude with $\phi 6.35$ and $t=3.0$

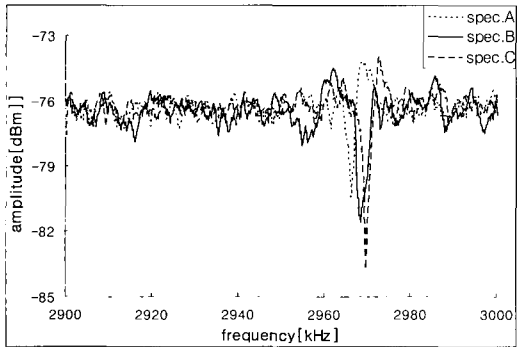
Fig. 8 The analysis of resonant frequency and amplitude with $\phi 9.2$ and $t=2.48$



(a) The analysis of resonant frequency from 800 kHz to 950 kHz



(b) The analysis of resonant frequency from 1600 kHz to 1700 kHz



(c) The analysis of resonant frequency from 2900 kHz to 3000 kHz

Fig. 9 The analysis of resonant frequency and amplitude with $\phi 9.2$ and $t=3.9$

Table 2. The mass of aspheric glass lenses

Specimen	Spec.A	Spec.B	Spec.C
$\phi 6.35 \times t 3.00$	0.24562	0.24514	0.24492
$\phi 9.20 \times t 2.48$	0.37995	0.37708	0.37507
$\phi 9.20 \times t 3.90$	0.47465	0.47198	0.47071

3.2. 공진주파수 측정결과

질량의 차이가 공진주파수와 공진크기에 어떠한 영향을 미치는지 확인하기 위해 직경과 두께가 다른 비구면 렌즈를 임의로 각 3개씩 선택하여 종류별로 질량 및 공진주파수를 측정하였다. 시험편의 질량은 Table 2와 같았으며 시험편의 질량이 큰 쪽부터 정리하였다.

Fig. 7~Fig. 9은 각 렌즈들의 질량에 따른 공진주파수와 공진크기를 나타내었다. 그림을 보면 동일한 종류의 경우 공진주파수가 동일하게 나타나지만 공진크기의 차이가 있을 수 있다. Fig. 7은 직경이 6.35 mm와 두께가 3.0 mm인 비구면 렌즈의 각 질량에 대한 공진주파수와 공진크기를 나타낸 것이다. Fig. 7(a)를 보면 539 kHz에서 공진주파수가 나타났지만 질량 증감에 따른 공진크기의 일정한 변화를 보이지 않았다. Spec.A가 0.24562g으로 가장 큰 질량을 가지고 있으나 공진크기는 두 번째로 높은 반응을 나타내고 있다. Fig. 7(b)에 보면 881kHz에서 공진주파수가 나타났으며 Spec.A에서 Spec.C로 갈수록 공진크기가 증가함을 알 수 있는데 이는 질량이 감소함에 따라 공진크기가 증가한다는 것을 알 수 있다. Fig. 7(c) 993 kHz, 1063 kHz에서 공진주파수가 발생하였으면 Fig. 7(b)와 동일하게 질량이 감소함에 따라 공진크기가 증가한다는 것을 알 수 있다. Fig. 8은 직경이 9.2 mm이고 두께가 2.48 mm인 비구면 렌즈를 측정하는 것이라면 각 시험에 대한 질량은 Table 2와 같다. Fig. 8(a)에서는 225 kHz를 Fig. 8(b)에서는 533 kHz를 Fig. 8(c)에서는 880 kHz, 896 kHz, 956 kHz에서 공진주파수가 나타났으며 질량이 감소함에 따라 공진크기가 증가함을 볼 수 있다. Fig. 9은 직경이 9.2 mm이고 두께가 3.9 mm인 비구면 렌즈의 공진주파수와 공진크기를 측정하는 것이다. Fig. 9(a)에서는 868 kHz, 879 kHz, 909 kHz를 Fig. 9(b)에서는 1692 kHz를 Fig. 9(c)에서는 2969 kHz에서 주파수가 나타남을 알 수 있다. Fig. 9도 Fig. 7, Fig. 8과 마찬가지로 질량이 감소함에 따라서 공진크기 크게 나타남을 알 수 있다. RUS 검사 시스템은 1.4 MHz 이상에서 압전진동자의 두께방향 진동으로 인해 안정적인 진동모드 특성을 관찰할 수 있음을 앞서 설명하였다.

$\phi 9.2 \times t 3.90$ 렌즈가 1.5 MHz 이상에서 공진주파수의 공진크기가 작게 발생하는 것을 알 수 있었는

데, Fig. 9는 RUS 검사 시스템의 이러한 특성 때문에 분해능을 높여 관찰하였다. Fig. 9(c)에서 보면 질량 감소에 따라 공진주파수가 미세하게 지연되는 현상과 공진크기가 증가함을 볼 수 있는데 주파수의 차가 매우 미세하므로 동일하게 간주하며 공진 크기를 관찰하였다.

4. 결 론

RUS 검사 시스템을 이용한 비구면 렌즈 질량에 따른 공진주파수와 공진크기의 변화를 측정 한 결과 다음과 같은 결론을 도출 하였다.

- 1) 동일한 기계적인 물성을 갖는 재질로 제작된 비구면 렌즈일지라도 형상에 따라 다른 공진주파수 특성을 갖는다.
- 2) 동일한 렌즈일지라도 제작과정 중 $10^{-3}g$ 이하의 미세한 질량 차가 생기지만 이러한 질량 차이는 동일한 렌즈의 경우 공진주파수에 큰 영향을 주지 못한다.
- 3) 제작과정 중 발생한 렌즈의 미소한 질량 차는 질량이 감소할수록 공진크기를 증가 시켰다.

후 기

이 논문은 2007년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

참고문헌

- [1] Sunghoon Kim, Kyungyun Baek, Youngnam Kim and Inyoung Yang, "Nondestructive evaluation of the flaw in a ceramic ferrule by resonant ultrasound spectroscopy," Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 12, No. 12, pp. 108-117, (2004)
- [2] P. Heyliger and 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] D. Litwiller, "Resonant ultrasound spectroscopy and the elastic properties of several selected materials," Ames Laboratory and Department of Physics and Astronomy, Iowa State University, Ames, Iowa 50011, pp. 1-7, (2000)
- [5] R. G. Leisure and F. A. Willis, "Resonant ultrasound spectroscopy," J. Phys., Condens. Matter 9, pp. 6001-6029, (1997)
- [6] Masahiro Nishida, Tomio Endot, Tadaharu Adachi and Hiroyuki Matsumoto, "Measurements of local elastic moduli by amplitude and phase acoustic microscope," NDT&E International, Vol. 30, No. 5, pp. 271-277, (1997)
- [7] Masahiro Nishida, Tomio Endot, Tadaharu Adachia and Hiroyuki Matsumoto, "An acoustic lens to measure wave velocities with the complex $V(z)$ curve method," NDT&E International Vol. 32, Vol. 4, pp. 219-224, (1999)
- [8] R. B. Schwarz and J. F. Vuorinen, "Resonant ultrasound spectroscopy: applications, current status and limitations," Journal of Alloys and Compounds 310, pp. 243-250, (2000)
- [9] T. Lee, R. S. Lakes and A. Lal, "Resonant ultrasound spectroscopy for measurement of mechanical damping: comparison with broadband viscoelastic spectroscopy," Review of Scientific Instruments Vol. 71, No. 7, pp. 2855-2861, (2000)