

공명초음파분광법에 의한 광컨넥터용 결합소자의 비파괴검사

김성훈¹⁾ · 이길성¹⁾ · 김동식²⁾ · 김영남³⁾ · 정상화³⁾ · 양인영³⁾

조선대학교 대학원¹⁾ · 에이지광학(주)²⁾ · 조선대학교³⁾

Nondestructive Test of Optical Connector by Resonant Ultrasound Spectroscopy Method

Sunghoon Kim¹⁾ · Kilsung Lee¹⁾ · Dongsik Kim²⁾ · Youngnam Kim³⁾ · Sanghwa Jeong³⁾ · Inyoung Yang³⁾

¹⁾Department of Mechanical Design Engineering, Graduate School, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea

²⁾A.G.Optics.Co.Ltd, Anchenong-Dong, Gwangsan-Gu, Gwangju 506-258, Korea

³⁾Department of Mechanical Information Engineering, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea

(Received 22 July 2004 / Accepted 15 September 2004)

Abstract : In this paper, resonant ultrasound spectroscopy(RUS) was used to determine the natural frequency of a ceramic ferrule and a ball lens. The ceramic ferrules are cylindrical shape with $\varnothing 2.56\text{mm}$ diameter and 10mm in length. Crack lengths of these ferrules are $10.40\mu\text{m}$, $21.18\mu\text{m}$ and $32.35\mu\text{m}$. The spherical ball lens was made of BK-7 glass, one's diameter in 2mm and 5mm. RUS system is consisted of spectrum analyzer, power amplifier, PZT sensor and support frame. The principle of RUS is that the mechanical resonant frequency of the materials depends on density and the coefficient of elasticity. Rus system is based on that given resonant frequency of the materials can be represented by the function of density and the coefficient of elasticity, and it is applied to excite specimen and to inspect the difference of natural frequency pattern between acceptable specimen and defective ones. Defect evaluation by RUS are performed to investigate the natural frequency measure of ferrule and ball lens.

Key words : Resonant ultrasound spectroscopy(공명초음파분광법), Natural frequency(공진주파수), Ferrule(페룰), Ball lens(볼렌즈), PZT(압전진동자), Crack(크랙)

1. 서론

현재 광섬유 응용제품에 많이 이용되고 있는 광커넥터는 광전송/수신기의 전반에 걸친 성능을 좌우한다. 광산업의 주요부품 중 하나인 광커넥터는 광섬유(optical fiber), 페룰(ferrule) 및 볼렌즈(ball lens)로 구성되며, 광원의 손실을 줄이기 위해서는 이들 부품의 조정밀 가공이 필수적이다.¹⁾

광커넥터용 페룰은 미세한 광섬유를 일정한 위치

에 고정시키는 역할을 하는 세라믹 제품으로써 빛이 광섬유로 들어갈 때 삽입손실을 줄이기 위해 결합이 없어야 하며 높은 형상 정밀도를 요구한다. 이러한 페룰의 형상결합 평가에 있어 기존의 광학현미경이나 조도 측정기를 사용하는 경우에는 상당한 판별 소요시간이 필요하게 되며, 관찰자의 숙련도에 따라 그 정확성은 차이가 있다. 이에 따라 현재 산업현장에서는 세라믹제 페룰의 결합 판별을 위한 높은 신뢰성을 갖는 검사기법 및 비파괴 평가 시스템이 요구되어지고 있다.²⁾

볼렌즈는 구형부품으로서 그 형상오차가 시스템

*To whom correspondence should be addressed.
nyk21c@hanmail.net

전체에 미치는 영향을 무시할 수 없고 마이크로 단위의 형상 측정정도가 필요하며, 현재 제조시 각 공정마다 형상검사가 이루어지고 있다. 기존의 구형상 측정법으로서는 JIS B 501규격에 따른 진구도(眞球度) 측정법 및 Laser 간섭계 시스템을 이용하는 방법이 있다. 그러나 이러한 방법들은 고가의 장치가 필요하며 시간이 많이 걸리기 때문에 중간 가공과정 중 짧은 시간에 측정가능한 새로운 구형상 측정 시스템의 구축이 필요하다.

공명초음파분광법(Resonant Ultrasound Spectroscopy ; RUS)은 Fig. 1과 같이 측정하려는 시험편을 발신기에 의해 가진하고 그 주파수 응답을 수신기에서 측정하는 방법으로서 연성재료, 취성재료, 특히, 1mm³ 이하의 작은 재료 및 소결체 등 많은 종류의 고체재료에 적용이 가능하다. 또한 공명초음파분광법에서는 시험편에 큰 힘을 가할 필요도 없으며 시험편의 형상을 반드시 제한하지도 않기 때문에, 종래의 방법으로는 측정할 수 없었던 형상의 재료 측정이 가능하다.³⁾

지금까지의 이와 유사한 연구결과들을 살펴보면 Paul Heyliger와 Hassel Ledbetter⁴⁾는 steel block의 표면 크랙과 복합적층물의 내부 손상을 검출하는데 RUS를 사용하여 표면균열이 있는 시험편에 대해서 실제로 측정된 시험편의 공진 주파수 측정값과 유한요소법을 이용한 공진 주파수 해석 값과의 비교로부터, 균열의 크기를 분류하였으며, Jay G. Saxton⁵⁾은 공명초음파분광법을 이용하여 chops, cracks, voids 등을 검출하므로써 공명초음파분광법의 비파괴 검사 기능으로서의 가능성을 확인한 바 있다.

본 연구에서는 세라믹제 페롤에서 많이 발생하는 표면크랙 결함에 따른 공진주파수 특성 변화를 고찰하고, 공명초음파분광법을 활용함으로써 볼렌즈의 완성가공을 위한 연마시간 추정등에 활용가능한 지표를 제시함으로써 광 커넥터용 결합소자의 비파괴 검사에 대한 타당성을 확인하고자 한다.

2. 시험편

페롤은 Zirconia에 CaO, Y₂O 및 MgO 등의 산화물을 안정화제로 고용시킨 안정화 지르코니아와 세라믹으로 제조된 기계부품의 하나로서 사출 성형 후

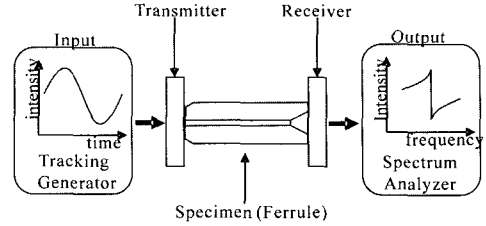


Fig. 1 Principal of resonant ultrasound spectroscopy

기계적인 연삭·연마에 의해서 제조되고 있으며 광섬유 정렬부품으로 사용되고 있다. 세라믹제 페롤의 제조공정과정시 가장 많이 발생하는 결함은 광원이 통과하는 원공의 표면 크랙이며, 이러한 표면 크랙은 대부분이 표면연마, 총길이 제작 및 외경 제작 등의 공정에서 발생한다.²⁾

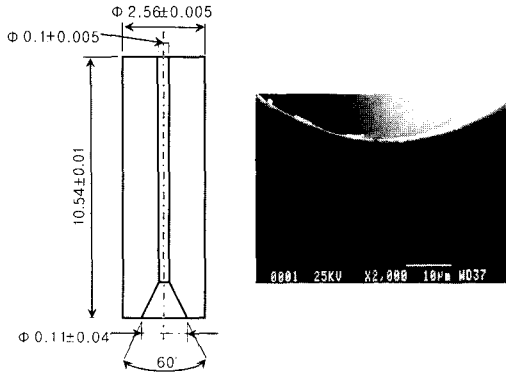
또한 볼렌즈의 재질은 BK-7이며, 현재 광커넥터용 결합소자의 부품으로 사용되는 표준사이즈는 직경 0.15~10mm이며, 본 연구에서는 직경 2mm와 5mm를 갖는 볼렌즈를 선택하였으며, 볼렌즈의 공정 과정의 단계별로 랜덤하게 선택하여 비파괴 검사를 행하였다.

Fig. 2는 본 연구에서 사용된 페롤 시험편의 개략도 및 크랙을 갖는 페롤의 SEM(JSM 840A ×2000) 촬영 사진을 나타냈으며, Fig. 3에 각 공정 과정의 단계별 볼렌즈의 형상을 나타냈다. Fig. 3(a)에 BK-7 유리소재를(2.4×2.4mm), Fig. 3(b)에 Fig. 3(a)의 정육면체 소재를 1차 연마하여 얻어진 직경 2mm 볼렌즈용 시험편을, Fig. 3(c)에 완성 연마된 직경 2mm 볼렌즈를 나타냈다. 이 때 1차 연마를 통하여 얻어진 직경 2mm 볼렌즈용 시험편의 실제 직경은 2.1mm였다. 또한 Fig. 3(d)에 완성 연마된 직경 5mm 볼렌즈를 나타냈다.

페롤의 제조과정 중 발생하는 표면 크랙에 대한 정량적인 데이터 분석을 행하고자, 크랙이 없는 시험편과 크랙이 있는 시험편으로 세분하여 그 종류 및 크랙 길이를 Table 1에 나타냈다. Table 1의 내용 중 A는 크랙이 없는 양품 페롤을, CA는 크랙을 갖는 페롤을 의미하며, 각 페롤에 대한 크랙길이를 마이크로메타 단위로 표시하였다.⁶⁾

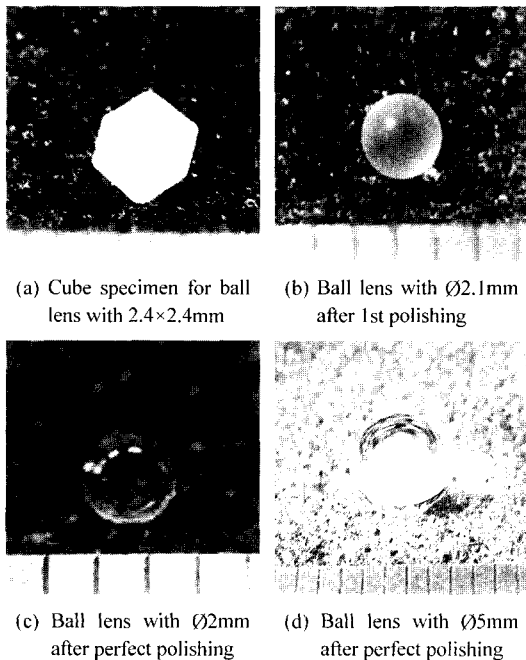
또한 볼렌즈의 가공 완성도에 따른 결과를 고찰하고자, Table 2에 직경 2mm 볼렌즈를 위한 정육면체 소재 및 1차 연삭과 완성연삭된 볼렌즈 시험편

을 나타냈다. Table 3은 본 연구에서 사용된 페룰과 볼렌즈의 기계적 불성치이다.



(a) The shape of ferrule-A (b) The upper side of cracked-ferrule

Fig. 2 The shape of ferrule specimen



(a) Cube specimen for ball lens with 2.4×2.4mm (b) Ball lens with Ø2.1mm after 1st polishing (c) Ball lens with Ø2mm after perfect polishing (d) Ball lens with Ø5mm after perfect polishing

Fig. 3 The shapes of ball lens specimens

Table 1 Ferrule specimens

	Specimen	Crack	Crack length
Ferrule	A	×	-
	CA01	○	10.40 μ m
	CA05	○	21.18 μ m
	CA11	○	32.35 μ m

Table 2 Ball lens specimens

Ball lens	Process	Size [mm]
Ø2mm	Cube	2.4×2.4
	After 1st polishing	Ø2.1
	Perfect polishing	Ø2.0
Ø5mm	After 1st polishing	Ø6.7
	Perfect polishing	Ø5.0

Table 3 The mechanical properties both ferrule and ball lens

Spec.	Elastic modulus E [Gpa]	Poisson's Ratio	Density [kg/m ³]
Ferrule	206	0.31	6.05×10 ³
Ball lens	82.1	0.21	2.51×10 ³

3. 비파괴 검사

3.1 비파괴 검사 시스템

공명초음파분광법을 이용한 비파괴 검사 시스템의 구성도를 Fig. 4에 나타냈다. 비파괴 검사 시스템은 파워앰프(power amplifier, BK_2706)와 스펙트럼 분석기(spectrum analyzer, Advantest R3132) 및 압전 진동자(PZT 센서)로 구성되어 있다.^{1,2,6)}

공명초음파분광법을 활용한 비파괴 검사 시스템의 문제점은 측정시 순수한 시험편의 공진주파수만이 측정되어지는 것이 아니라, 비파괴 검사 시스템의 공진주파수 대역 또한 측정된다는 것이다. 따라서 페룰의 공진 주파수를 측정하기에 앞서 측정시스템의 공진 주파수를 측정해야 할 필요가 있다. 이러한 영향을 고려하여 시험편을 제외하고 비파괴 검사 시스템만의 공진주파수를 측정한 결과 비파괴 검사 시스템의 공진주파수는 0~600kHz 범위에서 나타났으며, 그 결과 페룰과 볼렌즈의 비파괴 검사 실험은 측정시스템의 측정 주파수대역을 고려한 600~2000kHz 범위에서 비파괴검사 평가를 수행하는게 타당하였다.⁶⁾

또한, 본 연구를 통해 제작된 공명초음파분광법을 이용한 비파괴 검사 시스템의 신뢰성을 검증하고자 상용 유한요소해석프로그램인 Nastran을 이용하여 모델링하고 공진주파수 해석을 행하였다. 유한요소해석을 통해 얻어진 공진주파수 해석결과 및 실험결과 700~900kHz에서 획득된 공진주파수를 대표적으로 Fig. 5에 나타냈다. 획득된 공진주파수

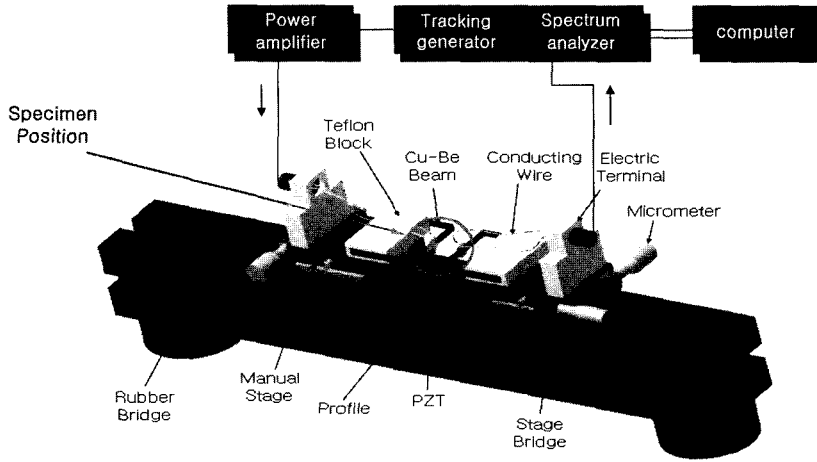


Fig. 4 The schematic diagram of measuring part

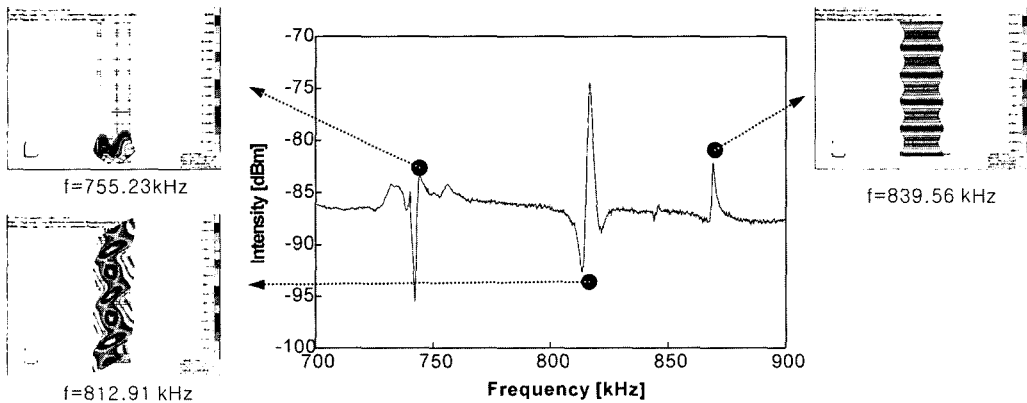


Fig. 5 Experiment and FEM analysis of A specimen (12, 13 and 14th mode)

는 0Hz를 기준으로 12, 13 및 14번째 모드이며, 유한 요소해석과 실험에 의해 얻어진 공진주파수 대역이 거의 같음을 확인할 수 있었다. 공진주파수 FEM 해석결과는 실험결과와 모두 10% 이내의 오차를 보였으며, 10% 이내의 오차가 발생한 이유는 균질체 모델링을 통해 해석된 유한요소해석 결과와는 달리 실험은 시험편 밀도의 불균일성등을 내포하고 있기 때문으로 사료된다.

따라서 본 연구에서 제작된 공명초음파분광법을 활용한 비파괴 검사 시스템의 타당성을 확인하였다.⁶⁾

3.2 페롤의 비파괴 검사

본 절에서는 표면 크랙을 갖지 않는 페롤 A와 표면 크랙을 갖고 있는 페롤 CA에 대한 비파괴 검사

결과를 Figs. 6, 7에 나타냈다. 페롤 A는 크랙이 없는 시험편이며, 페롤 CA는 표면크랙을 갖는 시험편이다.

Fig. 6에 크랙을 갖지 않는 페롤 A 시험편과 10.40 μm의 크랙길이를 갖는 페롤 CA01 시험편의 1500~1600kHz 주파수 대역에서 획득된 결과를 나타냈다. Fig. 6를 살펴보면, 페롤 A의 공진 주파수 대역보다 페롤 CA01의 공진주파수가 고주파대역으로 이동됨을 볼 수 있으며, 이러한 결과로부터 페롤에 발생한 표면 크랙의 여부를 비파괴적으로 평가하는 것이 가능하였다.

또한, Fig. 7에 크랙을 갖는 CA 시험편 중 21.18 μm의 크랙길이를 갖는 CA05 시험편과 32.35 μm의 크랙 길이를 갖는 CA11 시험편의 1500~1600kHz 주파수

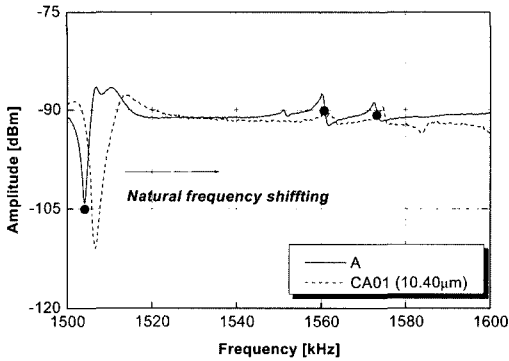


Fig. 6 Resonant frequency between A and CA01 specimen(1500~1600kHz)

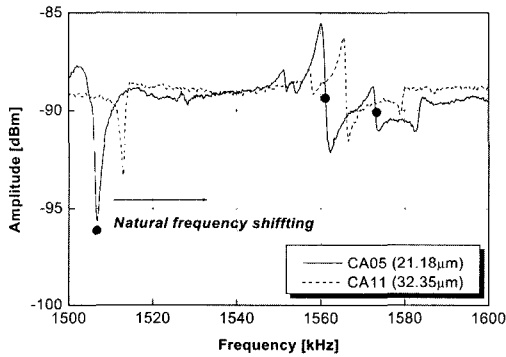


Fig. 7 Resonant frequency between CA05 and CA11 specimen(1500~1600kHz)

대역에서 획득된 결과를 나타냈다. Figs. 6, 7을 살펴보면, 일반적으로 모든 실험 결과에 있어 크랙 길이가 커질수록 공진주파수 대역이 고주파 대역으로 이동됨을 알 수 있었다.

3.3 볼렌즈의 비파괴 검사

본 연구에서는 직경 2mm와 5mm를 갖는 볼렌즈를 시험편으로 선택하였으며, 볼렌즈의 공정 단계별 공진주파수를 측정함으로써 특정 사이즈를 갖는 볼렌즈의 완성을 위한 연마시간 추정 등에 활용가능한 기본 데이터를 확립하고자 비파괴 검사를 하였다.

Fig. 8에 직경 2mm 볼렌즈를 완성하기 위한 초기 소재인 정유면체형 시험편의 공진주파수 측정결과를 나타냈으며, Fig. 9에 직경 2mm를 갖는 볼렌즈의 1차 연마가공만을 행한 시험편(after 1st polishing)과 완성시험편(perfect polishing)에 대한 공진주파수 측

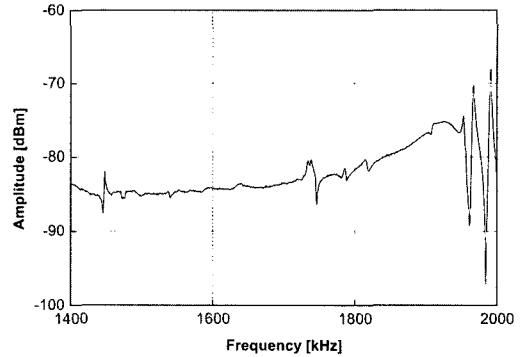


Fig. 8 Frequency of cube for ball lens with Ø2mm

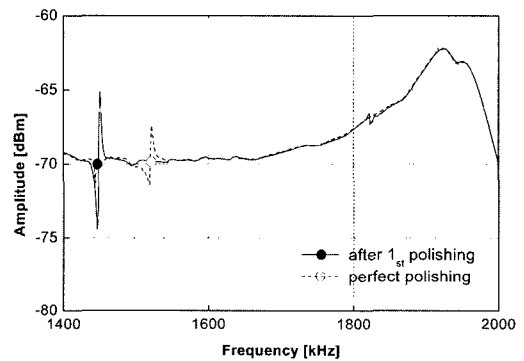


Fig. 9 Frequency of ball lens with Ø2mm

정결과를 나타냈다.

Fig. 9를 살펴보면, 1차 연마만을 행한 시험편의 공진주파수보다 완성시험편의 공진주파수가 고주파 대역으로 이동됨을 알 수 있었다. 왜냐하면, 공진주파수는 질량의 제곱근에 반비례하며, 1차 연마만을 행한 시험편 보다 완성 시험편의 질량이 더 적기 때문에 고주파 대역으로 이동된다고 사료된다. 또한, 이러한 경향은 직경 5mm를 갖는 볼렌즈의 경우에도 동일한 결과를 보였다.

이러한 결과를 이용함으로써 볼렌즈의 완성을 위한 연마량 및 연마시간을 예측할 수 있으리라 사료된다.

4. 결과 및 고찰

4.1 폐물의 크랙길이 변화에 따른 공진주파수

본 연구에서는 공명초음파분광법을 활용한 광부품 결합소자의 비파괴검사실험의 타당성을 3.1절에

서 확인하였으며, 제작된 비파괴 검사시스템을 활용하여 폐물 제조공정 과정에서 가장 많이 발생하는 원공주변의 표면 크랙에 대하여 비파괴 검사실험을 행하였다. 기존에 발표된 논문^{1,6)}의 결과와 유사하게 0~2000kHz 측정 범위 중 0~600kHz 범위에서는 압전진동자의 길이방향 진동 특성 및 감쇠의 영향으로 폐물의 결함을 측정하는데 어려움이 있었으며, 600~2000kHz에서 측정해야함을 확인하였다. 이와 더불어 본 연구에서는 크랙길이 변화에 따른 폐물의 공진주파수를 측정하였으며, 그 결과를 Fig. 10에 나타냈다. Fig. 10은 1000~1200kHz 범위에서 측정된 18, 19, 20, 22번째 모드의 공진주파수 결과로서, x-축을 공진주파수 대역으로, y-축을 모드 넘버로 나타냈다. Fig. 10의 모드 넘버는 측정가능 범위인 0~2000kHz 사이에서 나타난 공진주파수의 순서를 결정하기 위한 것으로서, 0Hz로부터 처음 발생한 공진주파수를 1_{st} mode로 하여 표기하였다. Fig. 10을 살펴보면, 각 모드에 있어 크랙 길이가 증가함에 따라 공진주파수는 고주파 쪽으로 이동됨을 알 수 있으며, 이러한 결과로 공진주파수를 측정함으로써 폐물에 발생한 크랙의 길이를 예측가능하리라 사료된다. 그러나 본 연구에서는 크랙의 진행 방향 및 형태는 고려되지 않았으며, 이에 따라 다양한 연구가 필요하리라 생각된다.

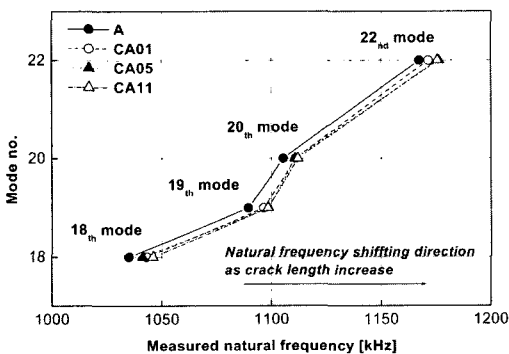


Fig. 10 Relationship between measured natural frequency and mode no.(1000~1200kHz)

4.2 볼렌즈의 질량변화에 따른 공진 주파수

3.3절의 Fig. 9의 결과를 확대하여 Fig. 11에 나타냈다. Fig. 11을 살펴보면, 1차 연마가공을 마친 시험편의 공진주파수 대역보다 완성이공된 볼렌즈의 공

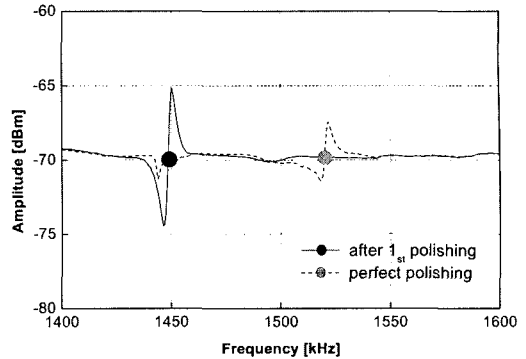


Fig. 11 Detail graph of Fig. 9(1400~1600kHz)

진주파수 대역이 고주파 대역으로 이동됨을 알 수 있으며, 이는 공진주파수가 수식 (1)과 같이 질량의 제공근에 반비례하기 때문이다.

$$f \propto \frac{1}{\sqrt{m}} \quad (1)$$

여기서 f 는 공진주파수를 의미하며, m 은 질량을 의미한다.

볼렌즈의 질량과 주파수의 관계를 보다 명확하게 고찰하기 위하여 다음과 같이 공진 주파수 대역 측정 파라메타인 β 를 도입하였다. 공진주파수 대역 측정 파라메타란 볼렌즈의 질량만 알게되면, 그 볼렌즈의 공진주파수가 측정되는 대역을 예측할 수 있는 파라메타로서 실제 작업현장에서 다양한 크기 및 질량을 갖는 볼렌즈의 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 4에 볼렌즈의 각 시험편에 대한 직경과 질량, 측정된 공진주파수 및 β 를 나타냈으며, Fig. 12에 질량과 β 의 관계 그래프를 나타냈다. Table 4 및 Fig. 12를 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 볼렌즈

Table 4 Comparison of resonant frequency for ball lens

Spec	Ø2mm		Ø5mm	
	1st	perfect	1st	perfect
Diameter[mm]	Ø2	Ø2.1	Ø5	Ø6.7
Mass [g]	0.0104	0.0119	0.1646	0.4075
Resonant frequency [kHz]	1444	1455.2	1608.2	1981
	1520		1832.6	
β [10 ⁻³ g ^{1/2} /sec]	147.25	162	652.56	1264.6
	155.01		743.61	

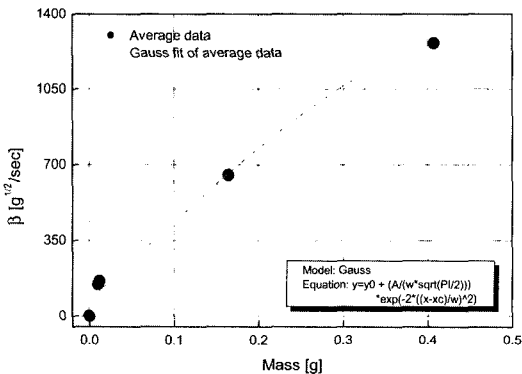


Fig. 12 Relationship between β and mass

의 완성가공정도를 파악가능하리라 사료된다. 또한 볼렌즈의 질량을 알 경우 볼렌즈의 공진주파수가 측정되는 주파수 대역을 β 를 이용하여 예측할 수 있다고 사료된다.

5. 결론

공명초음파분광법을 활용한 비파괴 검사시스템을 사용하여 광 부품 결합소자인 페들의 표면 크랙 결함평가 및 볼렌즈의 연마정도에 따른 공진주파수 특성 변화를 위한 비파괴검사를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 공명초음파 분광법을 활용한 비파괴 검사시스템의 결함평가가 가능한 주파수 대역은 600kHz ~ 2MHz까지이며, 이는 600kHz이하에서는 압전진동자의 종방향 진동모드의 특성으로 인한 감쇠 및 측정장치의 고유진동수가 측정되었기 때문이다.
- 2) 공명초음파 분광법을 활용한 공진주파수를 측정함으로써 페들의 연마가공 중 가장 많이 발생

하는 원공의 표면크랙에 대한 결함 검출이 가능하였다.

- 3) 크랙길이변화에 따른 공진주파수 특성을 평가해 본 결과 크랙길이가 길어질수록 일반적으로 공진주파수 대역이 고주파 대역으로 이동됨을 확인할 수 있었다.
- 4) 볼렌즈의 가공 단계에 따른 공진주파수 특성 변화가 확인되었으며, 볼렌즈의 질량이 감소할수록 공진주파수 대역이 고주파 대역으로 이동되었다. 이러한 결과를 볼렌즈의 가공연마 시간의 추정에 이용하기 위해서는 볼렌즈 가공단계별 비파괴검사 실험을 할 수 있는 자동화 시스템을 구축함과 동시에 피드백 제어에 의한 볼렌즈 가공을 할 경우에 가능하리라 생각된다.

후 기

이 논문은 2004년 산업기술재단 지역혁신인력 양성사업의 지원에 의해 연구되었음.

References

- 1) S. H. Kim, K. Y. Baek, N. S. Park, H. G. Min, S. H. Jung and I. Y. Yang, "The Nondestructive Evaluation of the Ferrule and Ball lens by Resonant Ultrasound Spectroscopy," KSAE 2004 Spring Conference, pp.936- 941, 2004.
- 2) K. Y. Baek, "The Nondestructive Evaluation of the flaw in a Ceramic Product by Resonant Ultrasound Spectroscopy," Chosun University, 2004.
- 3) J. Maynard, Resonant Ultrasound Spectroscopy, Physics Today, 1996.
- 4) 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.
- 5) J. G. Saxton, "Resonant Inspection of Production Parts," The American Ceramic Society Bulletin, Vol.75, No.10, pp.48-50, 1996.
- 6) S. H. Kim, Y. N. Kim and I. Y. Yang, "Nondestructive Evaluation of the Flaw in a

- Ceramic Ferrule by Resonant Ultrasound Spectroscopy,” Transactions of KSAE, Vol.12, No.5, 2004.
- 7) J. L. Sarrao, S. R. Chen, W. M. Visscher, M. Lei, U. F. Kocks and 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.
 - 8) T. W. Darling, A. Migliori, G. Strouse, B. Swanson, S. Johnson, M. F. Hundley and 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 and A. Migliori, “Resonant Ultrasound Measurements of Elastic Constants in Melt-spun R₂Fe₁₄B Compounds(R=Ce, Pr, Nd, Er),” Journal of Applied Physics, Vol.75, No.15, pp.6625-6627, 1994.
 - 10) K. H. Im, N. S. Park, Y. N. Kim and I. Y. Yang, “A Study on Impact Characteristics of The Stacking Sequences in CFRP Composites Subjected to Falling Weight Impact Loading,” Int. J. Automotive Technology, Vol.4, No.4, pp.203-211, 2003.