

공명초음파분광법을 이용한 페롤의 비파괴결함평가

김성훈¹⁾ · 백경윤¹⁾ · 김영남²⁾ · 양인영³⁾

조선대학교 대학원¹⁾ · 조선대학교 BK핵심²⁾ · 조선대학교³⁾

Nondestructive Evaluation of the Flaw in a Ceramic Ferrule by Resonant Ultrasound Spectroscopy

Sunghoon Kim¹⁾ · Kyungyun Baek¹⁾ · Youngnam Kim²⁾ · Inyoung Yang³⁾

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

²⁾Department of Mechanical Information Engineering, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea

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

(Received 22 June 2004 / Accepted 9 July 2004)

Abstract : In this paper, a measuring NDT(nondestructive testing) system using RUS(Resonant Ultrasound Spectroscopy) was built for nondestructive evaluation of the flaw in a ceramic Ferrule. The principle of RUS is that the mechanical resonant frequency of the materials depends on density, and the coefficient of elasticity. The RUS system is the measuring which is to excite specimen and to inspect the difference of natural frequency pattern between acceptable specimen and specimen which has some defects. RUS system is configured of spectrum analyzer, power amplifier, PZT sensor and support frame. For defect evaluation by the RUS, we performed to measure natural frequency of Ferrule, both acceptable and cracked. In the case of Ferrule, the resonant frequency of cracked-Ferrule existed to higher frequency band than acceptable-Ferrule.

Key words : Ferrule(페롤), Resonant ultrasound spectroscopy(공명초음파분광법), Defect(결함), PZT(압전진동자), Acceptable(양품), Crack(크랙), Resonant Frequency(공진주파수)

1. 서론

최근에 광통신 분야의 발전이 급속하게 이루어짐에 따라 광전송기나 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, 페롤, 볼렌즈로 구성되어진다. 페롤은 미세한 광섬유를 일정한 위치에 고정시키는 역할을 하는 세라믹 제품으로써 빛이 광섬유로 들어갈 때의 삽

입손실을 줄이기 위해 결함이 없어야 하며 높은 형상 정밀도를 요구한다. 이러한 페롤의 형상결함 평가에 있어 기존의 광학현미경이나 조도 측정을 사용하는 경우에는 상당한 판별 소요시간이 요하게 되며, 관찰자의 숙련도에 따라 그 정확성은 차이가 있다. 이에 따라 현재 산업현장에서는 세라믹제 페롤의 결함 판별을 위한 높은 신뢰성을 갖는 검사기법 및 비파괴 평가 시스템이 요구되어지고 있다.

따라서 본 연구에서는 세라믹제 페롤의 결함 판별을 위해 공명초음파분광법을 활용한 비파괴 평가 기법 및 시스템을 제시하였으며, 세라믹제 페롤에서 가장 많이 나타나는 크랙 결함에 대해 비파괴 평

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

가를 수행하고, 그 결과를 고찰하였다.

공명초음파법은 고체재료의 기계적인 공진 주파수가 그 재료의 밀도, 형상 및 탄성상수에 의존하는 것을 이용하여 평가하는 방법으로서 공진 주파수를 매우 정확하게 측정할 수 있으며, 연성재료, 취성재료, 1mm³이하의 작은 시료, 소결체 등 많은 종류의 고체재료에 적용이 가능하고 탄성학적인 성질과 이 방성을 결정하는데 이용가능하다.

Migliori¹⁾ 등은 독립탄성상수가 9개의 사방정계를 갖는 La₂CuO₄의 310K, 297K 및 44K에 있어서 탄성상수를 측정하였으며, Lei²⁾ 등은 사방정계 산화물 초전도체인 YBa₂Cu₃O_{7.5} 단결정 시험편의 실온에 있어서 9개의 독립탄성상수를 분류한 바 있으며,

Sarrao³⁾ 등은 RUS을 사용해서 Ta 단결정 시험편의 결정축 방향을 측정하였으며, 그 결과 X선 회절 측정결과와도 거의 일치함을 보여 RUS에 의한 결정축 방향의 측정 가능성을 보였다. Spoor⁴⁾ 등은 준결정인 AlCuLi의 탄성상수를 측정함으로써, 이것이 등방성체임을 밝힌 바 있다.

Sarrao⁵⁾, Darling⁶⁾ 및 Fuerst⁷⁾ 등은 탄성상수가 재료의 결정구조나 원자결합의 변화에 대단히 민감하다는 것에 착안하여 이를 이용한 논문을 발표한 바 있다.

또한 공명초음파법은 취성 재료나 작은 시험편의 경우에도 적용가능하기 때문에 형상의 재료 측정이 가능하다는 장점이 있으며 베어링의 진원도 측정에도 응용되고 있다. Paul Heyliger와 Hassel Ledbetter⁸⁾ 는 steel block의 표면 크랙과 복합적층물의 내부 손상을 검출하는데 RUS를 사용하여 표면균열이 있는 시험편에 대해서 실제로 측정한 시험편의 공진 주파수 측정값과 유사한 요소법을 이용한 공진 주파수 해석 값과의 비교로부터, 균열의 크기를 분류하였으며, Jay G. Saxton⁹⁾은 RUS를 이용하여 chops, cracks, voids등을 검출하므로써 RUS의 비파괴 검사 기능으로서의 가능성을 찾았다.

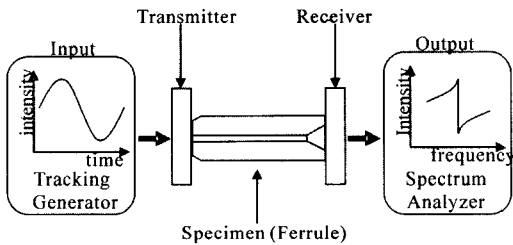
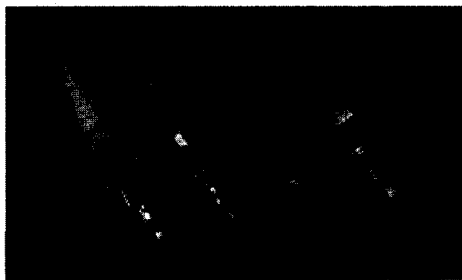
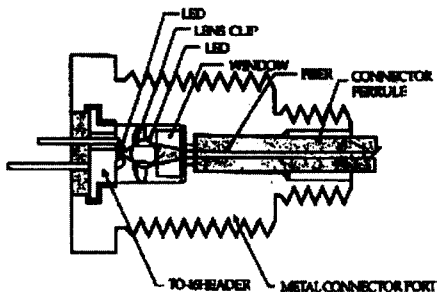


Fig. 1 Pricipal of resonant ultrasound spectroscopy



(a) FC-type ferrule



(b) Schematic diagram of optical connector

Fig. 2 Pricipal of resonant ultrasound spectroscopy

2. 시험편

Ferrule은 Zirconia에 CaO, Y₂O, MgO 등의 산화물을 안정화제로 고용시킨 안정화 지르콘니아와 세라믹으로 제조된 기계부품의 하나로서 사출 성형 후 기계적인 연삭·연마에 의해서 제조되고 있으며 광섬유 정렬부품으로 사용되고 있다.

Fig. 3에 세라믹제 페롤의 제조과정을 나타냈다. Fig. 3에 나타낸 제조공정은 현재 산업현장에서 일반적으로 행해지고 있는 제조공정으로써 본 연구에서 사용된 시험편 또한 Fig. 3과 같은 공정을 거쳐 제작된 페롤 시험편을 사용하였다. 세라믹제 페롤에 있어 가장 많이 발생하는 결함은 표면 크랙이며, 이러한 표면 크랙은 대부분이 표면연마(surface grinding) 및 총길이 제작(total length manufacturing), 외경 제작(outer diameter manufacturing)등의 공정에서 발생한다.

Fig. 3과 같은 공정을 통하여 제작된 페롤의 형상

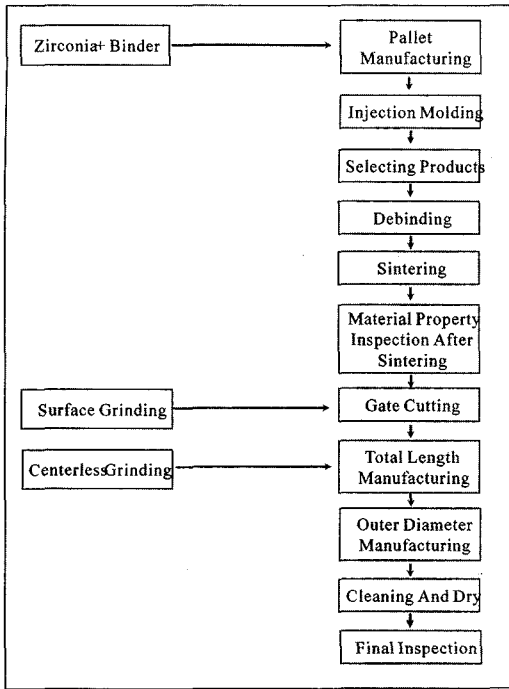


Fig. 3 The flow chart of ferrule manufacturing process

을 Photo. 1에 나타냈다. Photo. 1의 (a)는 A-타입의 페룰을, (b)는 B-타입의 페룰을 나타내며, (c)는 표면 크랙을 갖는 페룰의 SEM(JSM 840A X2000) 촬영 사진을, (d)는 광학현미경(Microscope +D.Ca X500)을 이용하여 촬영된 크랙을 갖는 페룰의 사진이다. B-타입의 페룰은 광부품 결합소자의 접속이 용이하도록 하기위해 A-타입의 페룰을 모따기(chamfering)한 페룰이다.

실제 제조 현장의 제조공정을 거쳐 제작된 페룰을 무작위적으로 선별하고, SEM 및 광학현미경 사진을 통하여 크랙을 갖지 않는 A 시험편과 크랙을 포함한 CA 시험편, 그리고 A-타입의 페룰을 모따기한 페룰인 B-타입으로 나누어, Table 1과 같이 시험편의 종류와 수량을 결정하였다.

크랙을 포함한 CA 시험편을 측정된 크랙길이별로 분류하였으며, 그 결과를 Table 2에 나타냈다. SEM에 의해 측정된 크랙길이는 10.40~32.35 μm 로써 매우 다양하게 나타났다.

Table 3은 본 연구에서 시험편으로 사용된 세라믹제 페룰의 물성을 나타냈다. Table 3을 근거로하여 본 연구에서는 공명초음파분광법을 활용하여 얻어

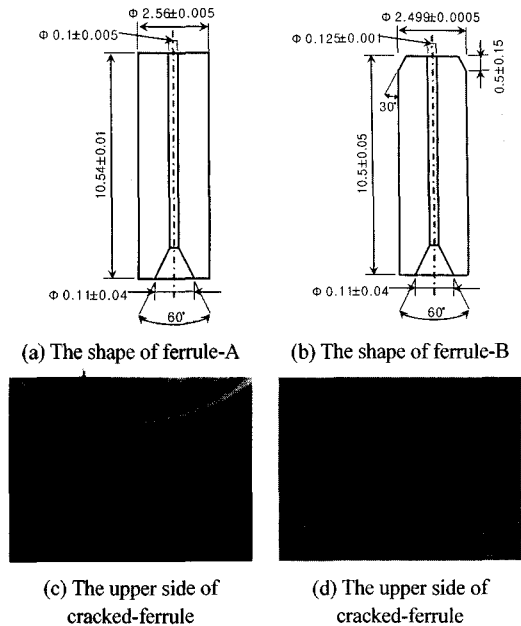


Photo. 1 Type the ferrule

Table 1 Kinds and numbers of specimen

Type	Specimen	Crack	Number
A-type	A	×	20EA
	CA	○	11EA
B-type	B	×	20EA

Table 2 Lengths of crack

Spec.	Crack length	Spec.	Crack length
CA01	10.40 μm	CA07	22.94 μm
CA02	10.59 μm	CA08	24.12 μm
CA03	14.71 μm	CA09	26.47 μm
CA04	17.06 μm	CA10	28.24 μm
CA05	21.18 μm	CA11	32.35 μm
CA06	21.18 μm		

Table 3 The material of specimens, respectively

Spec.	Elastic modulus E [Gpa]	Poisson's Ratio	Density [kg/m ³]
Ferrule	206	0.31	6.05×103

진 공진주파수 대역에 관하여 검증하고자 상용유한 해석 프로그램인 Nastran을 활용하였으며, 그 결과를 4장에서 고찰하였다.

3. 실험장치

3.1 측정시스템

본 연구를 통하여 제작된 공명초음파분광법을 이용한 비파괴검사시스템을 Fig. 4에 나타냈다. 비파괴 검사시스템은 스펙트럼 분석기(spectrum analyzer, Advantest R3132)와 파워앰프(power amplifier, BK_2706) 및 PZT 센서(지르코니아 산화물)로 구성되어 있다.

측정에 사용된 스펙트럼 분석기는 주파수 대역이 9kHz~3GHz이고 최대 분해능이 1kHz로서 가진발생장치(Tracking generator)를 내장하고 있다. 가진발생장치로부터 출력된 스위프(sweep)신호는 앰프를 통하여 증폭되어진 후 직경 15mm, 두께 1mm의 원반형 압전진동자(PZT 센서)에 의해 기계 진동으로 변환해서 시험편을 가진 시킨다. 가진 되어진 시험편의 응답은 출력측 압전진동자에 의해 검출되어지고 스펙트럼 분석기의 CRT화면상에 표시되어진다.

본 실험에 사용되어진 원반형 압전진동자(TDK, PZT-72A, pbZrO3의 고온체인 지르코늄티탄산염)는 압전재료 정수에 따른 고유의 기계적 진동 및 전기적인 에너지 변환을 한다. 시험편의 정확한 공진 주파수를 측정하기 위해 먼저, 압전진동자의 고정 방법에 관하여 문헌을 참고하고 실험해 본 결과 외팔보(cantilever beam) 또는 양단지지보에 의한 결과

가 동일하게 나타났으며, 좀 더 실험적이지 조건이 안정적인 양단지지보 형태로 압전진동자와 고정지지구를 고정하였다. 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 x-축상의 이동거리를 마이크로메타(micrometer)를 활용하여 접촉력에 대한 미세 조절을 가능하게 하였다.¹⁰⁾

3.2 측정시스템 평가

공명초음파분광법을 활용한 비파괴검사 시스템의 문제점은 측정시 순수한 시험편의 공진주파수만이 측정되어지는 것이 아니라, 비파괴검사 시스템의 공진주파수 대역 또한 측정된다는 것이다. 따라서 페롤의 공진 주파수를 측정하기에 앞서 측정시스템의 공진 주파수를 측정해야 할 필요가 있다.

페롤 시험편을 제외하고 비파괴검사 시스템만의 공진주파수를 측정한 결과를 Fig. 5에 나타냈다. 측정 범위는 0~2MHz까지 하였으며, 그 결과 0~600kHz 범위에서는 압전진동자의 종방향 진동모드 특성을, 600~2000kHz 범위에서는 압전진동자의 횡방향 진동모드 특성을 보였다. 종방향 진동모드 특성을 보이는 Stage I에서는 압전진동자 자신의 감

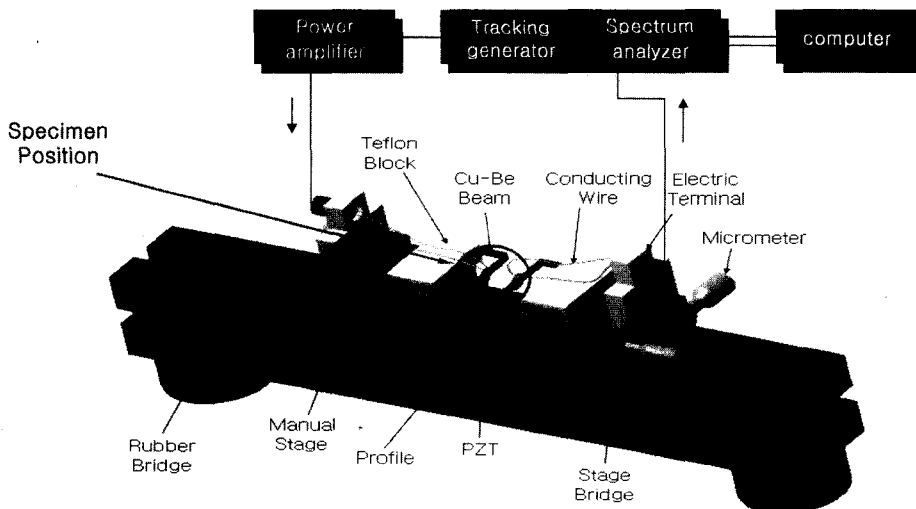


Fig. 4 The schematic diagram of measuring part

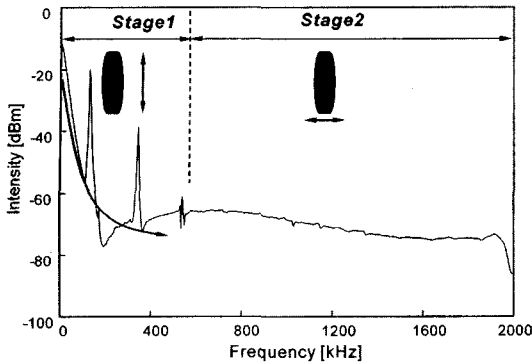


Fig. 5 The resonant frequency of measuring part

쇠 폭이 크게 나타난 반면, Stage 2에서는 감쇠폭이 매우 작게 나타났다. 따라서 본 연구에서는 압전진동자 가진의 감쇠 폭이 작은 Stage 2에서 비파괴 평가를 해야함을 확인하였다.

또한 압전진동자의 종방향 진동모드 특성을 보이는 0~600kHz 범위에서는 3개의 공진주파수가 측정되었다. 즉, 134kHz, 348kHz 및 546kHz에서 비파괴검사 평가시스템 만의 공진주파수가 측정되었다. 따라서 이러한 영향을 고려해 볼 때 좀 더 신뢰성있는 평가를 위해 Stage 2의 600~2000kHz 범위에서 비파괴검사 평가를 수행하는게 타당하리라 사료된다.

4. 실험결과

4.1 형상변화에 따른 공진주파수

본 연구에서는 형상 및 질량변화에 따른 공진주파수 대역을 평가하고자 페룰 시험편 A와 B의 비파괴검사를 행하였다. 그 결과 얻어진 각 시험편에 대한 모드별 공진주파수 대역을 Fig. 6에 나타냈다. 여기서 모드란 0~1000kHz 범위내에서 공진주파수를 측정하고, 0으로부터 가장 가까운 공진주파수를 1 모드(mode 1)으로 하여 멀어질수록 모드의 넘버가 증가하게끔 채택하였다.

Fig. 6을 살펴보면, 모든 시험편에 있어서 모드별 공진주파수는 선형적으로 증가하는 경향을 보였으며, 모따기를 행한 페룰 시험편 B의 공진주파수가 시험편 A의 공진주파수 보다 다소 고주파수 대역으로 이동함을 알 수 있다. 왜냐하면 공진주파수는 수식 (1)과 같이 질량의 제곱근에 역비례하며, 모따기

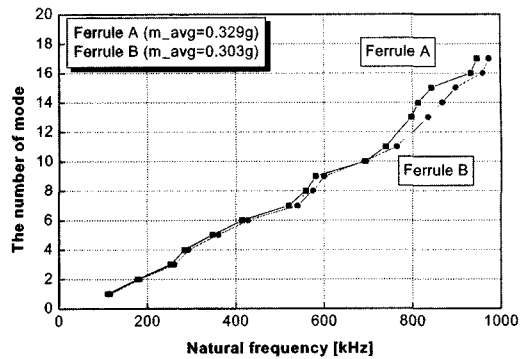


Fig. 6 Comparison of natural frequency between ferrule A and ferrule B according to the number of mode

를 통하여 질량이 다소 감소된 시험편 B가 오른쪽으로 이동한다고 사료된다. 단, 시험편 A의 평균질량은 0.329g이며, 시험편 B의 평균질량은 0.303g이었다.

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

여기서 k 는 스프링 상수를, m 은 측정 대상물의 질량을 의미한다.

4.2 FEM을 통한 비파괴검사시스템 검증

본 연구를 통해 제작된 공명초음파분광법을 이용한 비파괴검사시스템의 신뢰성을 검증하고자 상용 유한요소해석프로그램인 Nastran을 이용하여 모델링하고 공진주파수 해석을 행하였다.

유한요소해석시 사용된 모델은 실제 시험편과 동일한 형상으로 모델링하였으며, 페룰의 가장 기본적인 형상인 페룰 A와 B에 관하여 공진주파수를 해석하고 실험과 비교하였다.

Fig. 7은 유한요소해석에서 사용된 페룰시험편의 모델링 그림이다. Fig. 7의 (a)는 페룰 A를 (b)는 페룰 B를 나타낸다. 각 페룰 시험편은 8절점 6면체 요소로 모델링하였으며, 해석 모델의 크기는 페룰 A의 경우 7920개의 요소수를, 페룰 B의 경우 8640개의 요소수를 갖도록 모델링하였다.

유한요소해석을 통해 얻어진 공진주파수 해석결과와 실험그래프 중 700~900kHz에서 획득된 공진주파수를 대표적으로 Fig. 8에 나타냈다. 획득된 공진주파수는 0Hz를 기준으로 12, 13, 14번 모드이며,

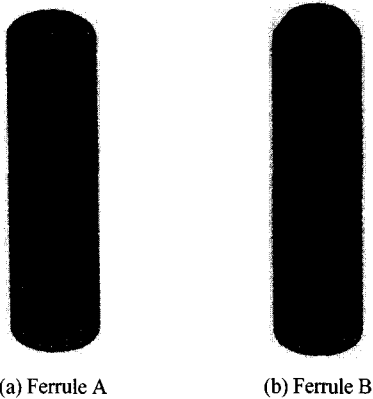


Fig. 7 FEM modeling of ferrule

유한요소해석과 실험에 의해 얻어진 공진주파수 대역이 거의 같음을 확인할 수 있었다.

Tables 4, 5에 공명초음파분광법을 활용한 비파괴 검사시스템에 의해 평가한 공진주파수대역과 각각의 시험편에 대한 표준편차 및 FEM 해석 결과 얻어진 공진주파수를 나타냈으며, 실험결과와 FEM 해석결과의 비를 나타냈다. 여기서 $(f_{exp})_{avg}$ 은 측정된 공진 주파수의 평균값을, σ 는 평균한 공진 주파수에 관한 표준편차를, f_{FEM} 은 유한 요소법 해석에 의해 계산된 공진 주파수를 의미한다. $(f_{exp})_{avg}/f_{FEM}$ 은 유한 요소법에 의한 공진 주파수와 측정결과를 비교한 것이다. 공진주파수 FEM 해석결과는 실험결과와 모두 10% 이내의 오차를 보였으며, 그 원인은 균질체로 모델링을 통해 해석된 유한요소해

석 결과와는 달리 실험은 시험편 밀도의 불균일성 등을 내포하고 있기 때문이다.

따라서 본 연구에서 제작된 공명초음파분광법을 활용한 비파괴검사시스템의 타당성을 확인할 수 있었으며, 페롤뿐만 아니라 더 미세한 재료의 결함 검출등에도 이용가능하리라 사료된다.

Tables 4, 5를 비교해 보면, 작은 질량을 가진 페롤 B의 주파수 대역이 페롤 A 보다 고주파수 대역으로 이동(shifting of frequency-axis)됨을 알 수 있으며, 실험결과 및 해석결과 또한 고주파수 대역으로 이동됨을 알 수 있다. 또한, 시험편 A와 B에서 모두 12 번째 모드를 측정하는 것이 불가능하였다. 이는 유한 요소법에 의한 고유값 계산으로부터 시험편 A와 B의 12번째 모드가 모두 압진동자와 접촉하여 지지되는 단에서 변형되는 모드로 나타나기 때문에 측정이 불가능하였다고 사료된다.

4.3 세라믹제 페롤의 결함 평가

본 절에서는 페롤 A와 표면 크랙을 갖고 있는 페롤 CA에 대한 비파괴 검사 결과를 Fig. 9에 나타냈다. 페롤 A는 크랙이 없는 시험편이며, 페롤 CA는 표면크랙을 갖는 시험편이다. Fig. 9에서와 같이 페롤 A의 공진 주파수 대역보다 페롤 CA의 공진주파수가 고주파대역으로 이동됨을 볼 수 있으며, 이러한 결과로부터 크랙의 여부를 비파괴적으로 평가하는 것이 가능하였다.

공명초음파법을 활용한 비파괴 검사시스템의 결

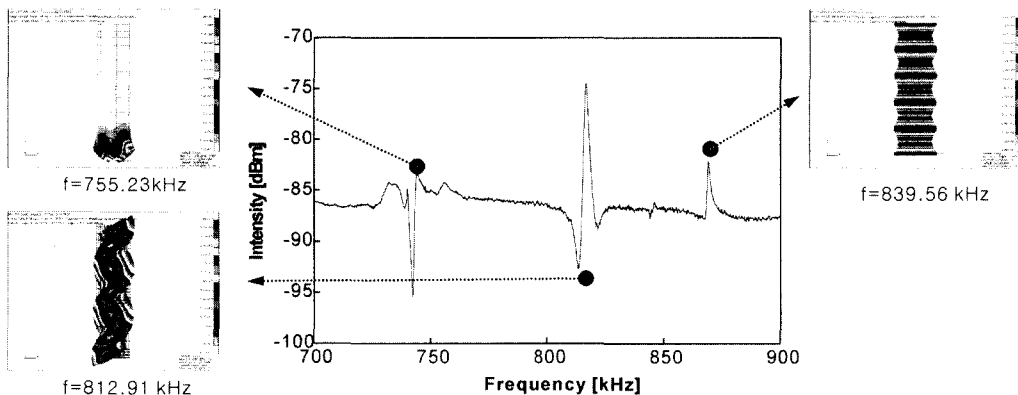


Fig. 8 Experiment and output of acceptable-A (12, 13 and 14th mode)

Table 4 Resonant frequency of ferrule A

Mode	Experiment [kHz]		Calculation [kHz]	(fexp)avg /fFEM
	(fexp)avg	σ	fFEM	
1	110.44	0.892	107.59	1.03
2	177.63	1.233	168.77	1.05
3	252.89	1.345	248.52	1.02
4	283.82	0.688	276.81	1.03
5	347.55	1.599	337.32	1.03
6	414.70	1.013	410.07	1.01
7	520.04	0.597	505.42	1.03
8	557.91	0.789	546.19	1.02
9	579.91	0.907	572.21	1.01
10	692.71	0.684	672.89	1.03
11	738.88	1.089	726.13	1.02
12	-	-	755.23	-
13	797.39	0.680	797.07	1.00
14	812.82	0.744	812.91	1.00
15	843.06	0.582	839.56	1.00
16	933.15	0.744	904.19	1.03
17	947.05	0.616	905.8	1.05

Table 5 Resonant frequency of ferrule B

Mode	Experiment [kHz]		Calculation [kHz]	(fexp)avg /fFEM
	(fexp)avg	σ	fFEM	
1	116.14	0.396	105.45	1.101
2	182.34	0.917	172.61	1.056
3	261.09	0.808	245.97	1.061
4	293.17	0.830	281.21	1.043
5	360.89	0.568	344.91	1.046
6	427.99	0.591	408.77	1.047
7	540.11	0.808	516.6	1.046
8	574.07	0.763	555.09	1.034
9	599.16	0.724	574.73	1.043
10	690.65	0.631	687.41	1.005
11	764.10	0.737	735.6	1.039
12	---	---	780.26	---
13	835.67	0.637	811.19	1.030
14	867.67	0.351	849.55	1.021
15	898.12	0.514	857.06	1.048
16	959.67	0.516	931.25	1.030
17	973.90	0.480	953.65	1.021

함평가에 있어 각 모드별 고찰을 수행한 결과 공진 주파수 대역이 다소 겹치는 모드가 발생하였다. Figs. 10, 11에 각 시험편에 있어 4번째 모드와 8번째

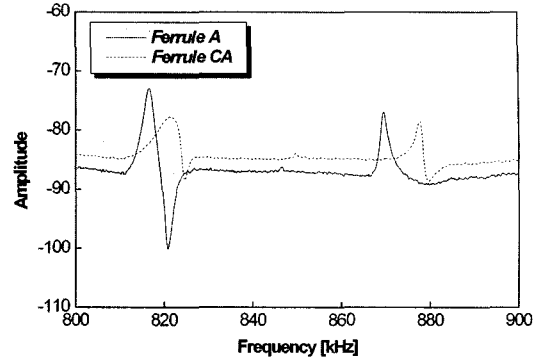


Fig. 9 Resonant frequency between acceptable and crack specimens, 700~800kHz

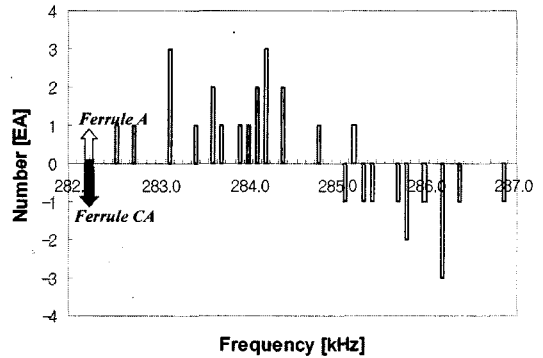


Fig. 10 Histogram of the 4th mode

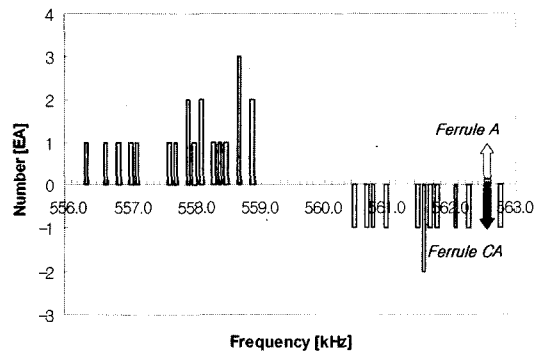


Fig. 11 Histogram of the 8th mode

모드에 대한 측정된 주파수대역별 시험편 개수를 나타냈다. 즉, y-축의 수치는 측정된 시험편 개수를 의미한다.

Figs. 10과 11을 살펴보면, Fig. 10의 위쪽 영역은 페룰 A 시험편의 결과를 아래 영역은 페룰 CA 시험편의 결과를 나타내며, 285kHz 부근에서 페룰 A 시험편과 페룰 CA 시험편의 측정된 개수가 겹침을 볼

수 있다. 따라서 4번째 모드로는 표면크랙을 갖는 결함 평가가 불가능하리라 사료된다. 이에 반해 Fig. 11의 경우에는 페룰 A와 페룰 CA 시험편의 겹침이 없으며, 이러한 결과는 페룰 A에 비해 페룰 CA의 공진주파수가 고주파대역으로 이동되는 량이 크다는 것을 의미한다. 따라서 8번째 모드에 있어서는 페룰에 존재한 표면크랙의 결함 평가가 가능하다고 사료된다.

또한 각 시험편의 공진주파수를 고찰한 결과 표면크랙에 의해 고주파 대역으로 이동되는 량은 많은 반면, 공진주파수의 피크대 피크인 앰플리튜드(amplitude)가 미소하여 실제 결함 평가를 수행하는데 장애가 되는 경우를 발견하였다. Figs. 12, 13에 앰플리튜드가 작은 경우인 11번째 모드와 앰플리튜드가 상대적으로 큰 8번째 모드를 나타냈다. 그 결과 11번째 모드와 같이 앰플리튜드가 작은 경우

의 모드로는 표면크랙에 대한 결함평가를 하는데 무리가 있었으며, 8번째 모드와 같은 큰 앰플리튜드를 갖는 모드에 있어서 결함평가가 가능하리라 사료된다.

앞에서 말한 페룰 A와 페룰 CA의 공진주파수, 공진주파수의 평균 차, 고주파 대역으로의 허용 가능 여부, 앰플리튜드의 허용 가능 여부 및 최종결합평가 가능 모드에 관하여 Table 6에 나타냈다. Table 6을 살펴보면, 최종적으로 페룰의 표면크랙에 대한 결함평가가 가능한 모드는 6~7번째, 9번째, 14번째, 16~20번째, 22번째, 24번째, 29~30번째 및 36번째 모드이다.

5. 결론

공명초음파분광법을 활용한 비파괴 검사시스템을 사용하여 광 부품 소자인 세라믹제 페룰의 비파괴검사를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 공명초음파와 분광법을 활용한 비파괴 검사시스템의 결함평가가 가능한 주파수 대역은 600kHz ~ 2MHz까지이며, 이는 600kHz이하에서는 압진동자의 종방향 진동모드의 특성으로 인한 감쇠 및 측정장치만의 고유진동수가 측정되었기 때문이다.
- 2) 페룰 B 시험편의 공진주파수가 페룰 A 시험편의 공진주파수 대역 보다 다소 크게 나타났다. 왜냐하면 공진주파수는 질량의 제공근에 역비례하며, 모따기를 통하여 질량이 다소 감소된 페룰 B 시험편의 공진주파수가 고주파수 대역으로 이동하였다.
- 3) 제작된 비파괴 검사시스템을 검증하고자, 본 연구에서는 상용 유한요소해석 프로그램인 NASTRAN을 활용하여 페룰 A와 B의 공진주파수를 측정하였으며, 각 페룰에 대해 약 10% 오차를 나타냈다. 이는 실험시 발생한 오차와 페룰의 밀도 불균일성에 의한 오차로 생각되며, 본 연구를 통해 제작된 공명초음파를 활용한 비파괴 검사시스템으로 페룰의 결함평가를 수행하는 것에 대한 타당성을 확인할 수 있었다.
- 4) 세라믹제 페룰의 표면크랙 결함 평가에 있어 중요시 해야 할 사항은 공진주파수 대역의 겹침과

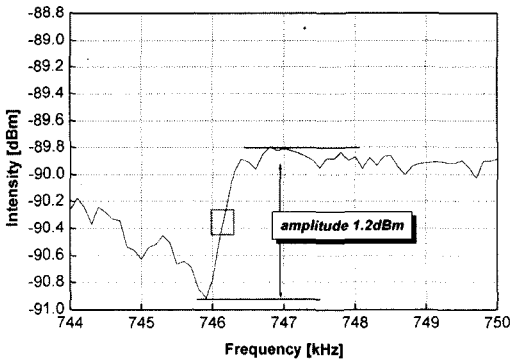


Fig. 12 The resonant frequency and amplitude in the 11th mode

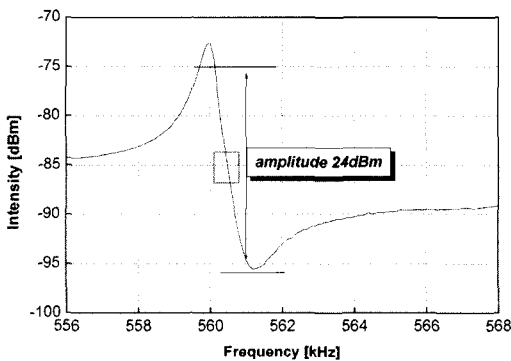


Fig. 13 The resonant frequency and amplitude in the 8th mode

Table 6 Evaluation possibility mode of ferrule

Mode No.	Ferrule A f1	Ferrule CA f2	Δf (f2 - f1)	Possible shifting	Possible dBm	Evaluation possibility mode
1	110.44	113.55	-3.11	x	x	x
2	177.63	179.75	-2.12	x	o	x
3	252.89	256.24	-3.35	x	o	x
4	283.82	285.92	-2.10	x	o	x
5	347.55	351.57	-4.02	o	x	x
6	414.70	419.31	-4.61	o	o	o
7	520.04	524.90	-4.86	o	o	o
8	557.91	561.53	-3.62	x	o	x
9	579.91	586.45	-6.54	o	o	o
10	692.71	698.32	-5.61	o	x	x
11	738.88	745.58	-6.70	o	x	x
12	0.00	0.00	0.00	o	x	x
13	797.39	798.23	-0.84	x	o	x
14	812.82	818.31	-5.49	o	o	o
15	843.06	845.99	-2.93	x	o	x
16	933.15	938.65	-5.50	o	o	o
17	947.05	952.19	-5.14	o	o	o
18	1035.06	1043.13	-8.07	o	o	o
19	1089.38	1096.43	-7.05	o	o	o
20	1105.40	1110.98	-5.58	o	o	o
21	1135.93	1147.77	-11.84	o	x	x
22	1167.42	1171.57	-4.15	o	o	o
23	1226.82	1235.54	-8.72	o	x	x
24	1246.35	1251.47	-5.12	o	o	o
25	1264.07	1265.62	-1.55	x	o	x
26	1327.78	1330.88	-3.10	x	o	x
27	1340.32	1342.25	-1.93	x	o	x
28	1373.30	1382.30	-9.00	o	x	x
29	1506.12	1517.83	-11.72	o	o	o
30	1562.78	1568.27	-5.48	o	o	o
31	1574.62	1581.62	-7.00	o	x	x
32	1649.94	1652.72	-2.78	x	x	x
33	1683.70	1688.95	-5.25	o	x	x
34	1708.78	1711.20	-2.42	x	x	x
35	1737.97	1741.70	-3.73	x	x	x
36	1779.57	1788.92	-9.35	o	o	o

낮은 앰플리튜드이다. 따라서 본 연구에서는 각 시험편에 대한 공진주파수 대역의 평균값과 앰플리튜드의 평균값을 활용하여 Δf 허용범위를 4kHz로, 허용 진폭을 10dBm으로 하여 고찰한 결과, 6~7번째, 9번째, 14번째, 16~20번째, 22번째, 24번째, 29~30번째 및 36번째 모드에서 표면 크랙에 대한 결함평가가 가능하였다.

5) 이러한 연구결과를 토대로 광부품 소자인 페룰 뿐만아니라 더욱 미세한 재료 및 기타 재료에 대한 비파괴 결함검사가 가능하리라 사료된다.

후 기

이 논문은 2004년도 조선대학교 연구보조비의 지원을 받아 연구되었음.

References

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) P. S. Spoor, J. D. Maynard, A. R. Kortan, "Elastic Isotropy and Anisotropy in Quasi-crystalline and Cubic AlCuLi ," *Physical Review Letters*, Vol.75, No.19, pp.3462-3465, 1995.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) J. G. Saxton, "Resonant Inspection of Production Parts," *The American Ceramic Society Bulletin*, Vol.75, No.10, pp.48-50, 1996.
- 10) S. H. Kim, K. Y. Baek, N. S. Park, H. G. Min, S. H. Jung, I. Y. Yang, "The Nondestructive Evaluation of the Ferrule and Ball Lens by Resonant Ultrasound Spectroscopy," 2004 KSAE Spring Conference Proceedings, Vol.II, pp.936-941, 2004.
- 11) 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.