

# 공명초음파법을 이용한 세라믹제 페룰의 미소 크랙 평가법

양인영\*

(논문접수일 2006. 1. 6, 심사완료일 2006. 3. 28)

## Evaluation Method of Micro Crack in a Ceramic Ferrule by Resonant Ultrasound Spectroscopy

In-young Yang\*

### Abstract

In this paper, we suggested an evaluation method of cracks in a ceramic product by resonant ultrasound spectroscopy. For experiment, we manufactured nondestructive measurement system by resonant ultrasound spectroscopy and measured resonance frequencies of acceptable and cracked ferrules. The evaluation criterion of ferrule is based on the comparison of resonance frequencies between acceptable and cracked-ferrule. The criterion value that defined by suggested formula is 2. By using the criterion, it is possible to evaluate both acceptable and cracked-ferrule.

**Key Words** : Ferrule(페룰), Resonant ultrasound spectroscopy(공명초음파법), Acceptable(양품), Crack(크랙), Resonance Frequency (공진주파수)

## 1. 서론

최근, 광산업이 발달함에 따라 고정밀도를 갖는 제조기술에 의해 제조된 세라믹제품의 사용분야가 급격히 확대되고 있다. 세라믹 제품은 광산업에서 광커넥터용으로 주로 사용되고 있으며 광커넥터용 소자로서 광 화이버의 축심을 맞추는 부품으로 페룰이 있다. 페룰은 매우 정밀한 치수를 요구하며 수 $\mu\text{m}$  정도의 결함도 포함되어서는 안 되는 높은 신뢰성이 요구되는 부품이다. 현재 페룰의 내부결함은 주로 가시적인 방법에 의하여 판별되고 있어 판별자의 숙련도에 따라

결함검출 정도에 큰 오차가 있으며, 결함을 검출하는 데 많은 시간이 소요된다. 따라서 생산 중에 발생하는 내부결함을 손쉽게 판별하는 기법의 개발이 없어서는 생산성 향상은 불가능한 일이다.

본 연구에서는 최근 광산업에서 광커넥터용으로 주로 사용되는 세라믹제 페룰의 내부결함을 공명초음파분광법을 이용하여 비파괴적으로 탐상할 수 있는 새로운 내부결함평가 기법을 확립하고자 한다. 본 연구에서 사용하고자 하는 비파괴 평가법은 공명초음파분광법(Resonant Ultrasound Spectroscopy : RUS)으로서 고체 재료의 특성을 평가할 수 있는

\* 조선대학교 기계설계공학과 (iyyang@chosun.ac.kr)  
주소: 501-759 광주광역시 동구 서석동 375

초음파 측정법이다. 재료내부에 있는 음향 임피던스의 불연속부에서 재료를 평가하는 초음파탐상법과는 달리, 공진법은 재료의 치수와 동일한 파장을 갖는 초음파를 이용하여 시험편에 세로진동, 비틀림 진동을 주어 그 공진주파수(Resonant Frequency)로부터 재료의 탄성상수, 점성 등의 물성을 구하는 방법이다<sup>(1-4)</sup>.

RUS는 여러 분야의 측정에 적용되고 있으며, 탄성상수의 측정<sup>(5-7)</sup>, 형상 검사에 적용되는 베어링의 진원도 측정<sup>(8)</sup> 등에 널리 응용되고 있다. 또한 표면균열이 있는 시험편에 대해서, 실제로 측정된 시험편의 공진주파수 측정값과 유한요소법을 이용한 공진주파수 해석 값과의 비교로부터, 균열의 크기를 분류한 Heyliger<sup>(9,10)</sup> 등의 연구도 있다. 그러나 아직까지 세라믹 중의 구조적인 미소결함, 특히 마이크로 크기의 크랙을 갖는 세라믹에 대해 RUS를 활용한 평가는 거의 찾아보기 어렵다.

연구방법으로는, RUS의 원리를 이용한 새로운 측정시스템을 제작하고, 이 측정시스템이 자체적으로 가지고 있는 공진주파수 및 시험편의 공진주파수를 측정한다. 제작한 측정시스템을 사용하여 결함이 없는 시험편을 기계적으로 진동시켰을 때의 공진주파수와 시험편 내의 결함인 특히 크랙이 있는 경우의 공진주파수의 양상을 비교 분석하여 크랙 유무를 검출한다. 또한 실험의 타당성을 검증하기 위해 유한요소해석 프로그램인 MSC/NASTRAN을 이용하여 결함이 없는 시험편에 대한 해석을 실시한다. 이 해석을 통해 얻어진 공진주파수를 실험을 통해 공진주파수를 비교 분석한다.

## 2. 시험편

본 연구에서 사용한 광통신 커넥터용 페룰은 안정화 지르콘니아(Zirconia)로서 광섬유 정렬부품으로 사용되며 광섬유의 광축을 맞추기 위해 치수정밀도나 결함이 없는 높은 신뢰성이 요구되는 부품으로서 사출 성형 후 기계적인 연삭·연마 가공에 의해서 제조되고 있다. 페룰 시험편의 외형 치수는 Fig. 1에 나타낸 바와 같으며, 원통형으로서 모따기를 행한 이유는 기계류에 접촉할 때, 접촉이 용이하도록 하기 위해서이다. 유한요소해석을 위한 일반적인 안정화 지르콘니아 특성을 Table 1에 나타냈다.

Fig. 2에 실제로 현장에서의 페룰 제조 과정을 흐름도(flow chart)로 도시하였다.

시험편은 200배까지 확대되는 광학현미경(NIKON LHS-H100P-2)과 2.5배까지 확대되는 디지털카메라(NIKON Digital Camera COOLPIX950)의 조합(최대 500배까지 확

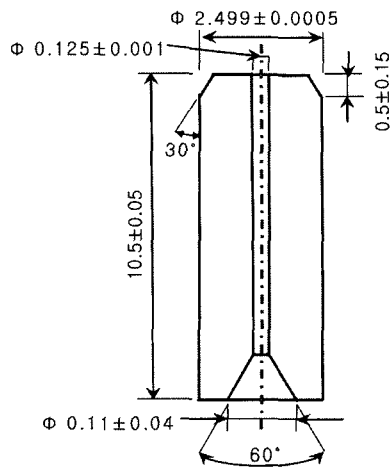


Fig. 1 Shape and size of the specimen(unit : mm)

Table 1 Properties of Zirconia

Elastic modulus, E (GPa)	Poisson's ratio, $\nu$	Density, $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
206	0.31	6.05×10 <sup>3</sup>

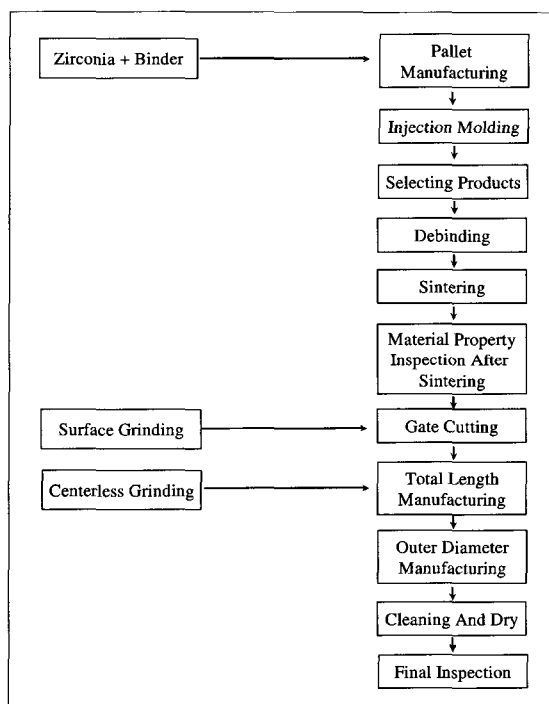


Fig. 2 The flow chart of ferrule manufacturing process

대)에 의해 결함이 보이지 않는 시험편을 양품으로 선정하였으며, 크랙은 이 장치의 조합에 의해 뚜렷이 보이는 것들 중, 다른 결함을 포함하지 않고 오직 크랙만 가진 시험편을 선정하였다. 또한, 크랙의 길이를 정확히 측정하기 위해서 주사전자현미경(SEM, JSM 840A)을 사용하였다. 이 SEM에 의해 크랙의 길이를 측정한 결과는 10.40 $\mu\text{m}$ ~32.35 $\mu\text{m}$ 까지로

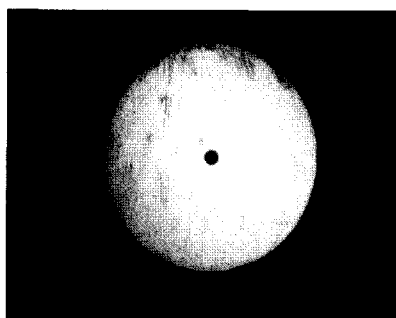
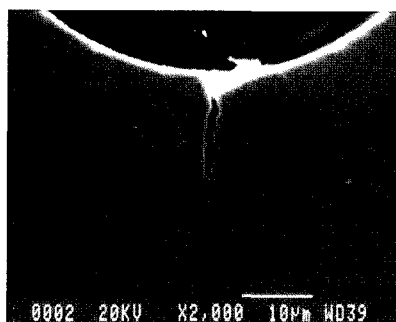
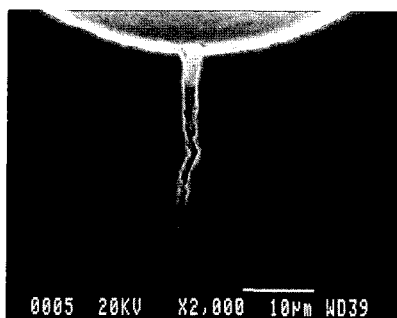


Fig. 3 The upper side of acceptable(by Microscope+D.Ca X50)



(a) crack length, 17.06 $\mu\text{m}$



(b) crack length, 32.35 $\mu\text{m}$

Fig. 4 The Shapes of crack(by JSM 840A X2000)

나타났다. Fig. 3에 양품 시험편을 윗면에서 50배 크기로 촬영한 사진을 나타냈다. Fig. 4에 크랙의 길이가 17.06 $\mu\text{m}$ , 32.35 $\mu\text{m}$ 인 시험편에 대한 SEM 사진을 나타냈다.

### 3. 실험

#### 3.1 실험장치 구성

본 연구에 이용한 RUS 측정시스템의 개략도를 Fig. 5에 나타냈다.

고체 재료의 기계적인 공진주파수가 그 재료의 밀도, 형상 및 탄성상수에 의존하는 것을 이용하는 원리로서 Fig. 5와 같이 측정하려는 시험편을 발진기에 의해 가진하고 그 주파수 응답을 수신기에서 측정하는 방법이다.

전체 시스템은 스펙트럼분석기(Spectrum Analyzer, Advantest R3132), 파워증폭기(Power Amplifier, BK\_2706), 컴퓨터 및 측정부로 구성된다. Fig. 6에 측정장치만의 상세도를 나타냈다. 보는 바와 같이, 전기신호와 기계진동을 효율적으로 변환시키는 PbZrO<sub>3</sub>와 PbTiO<sub>3</sub>의 고용체인 Zircon-Titan산화물인 압전진동자(PZT)는 폭 5mm, 두께 0.3mm인 양단지지형태의 Cu-Be Beam에 의해 지지되고, Cu-Be

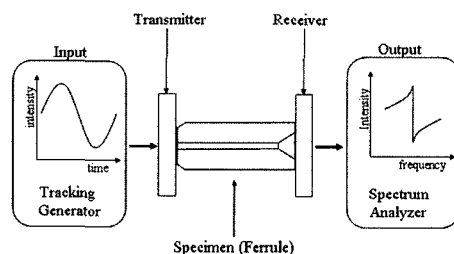


Fig. 5 The schematic of RUS

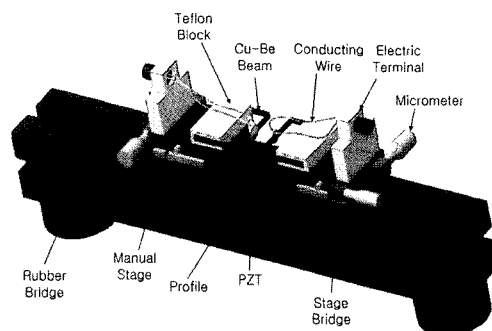


Fig. 6 The detail of RUS measuring part

Beam은 전기절연체인 Teflon Block에 고정되어 있으며, 외부로부터의 진동영향을 되도록 받지 않도록 하기 위해 고정성 하니콤 정반위에 설치하였다.

### 3.2 실험장치 평가

제작한 측정시스템의 특성을 파악하기 전에 스펙트럼분석기에 내장된 Tracking Generator로부터 출력된 전기신호를 바로 스펙트럼분석기에 입력하여 스펙트럼분석기의 특성을 조사하였다. 이때의 Tracking Generator의 출력 설정값은 -10dBm으로 하였으며, 그 때의 측정 결과를 Fig. 7에 나타냈다. 실험에서 사용된 주파수 대역은 거의 일정한 응답이 얻어지고 있음을 알 수 있으며, 출력강도의 피크로서 관찰된 공진주파수가 거의 5dB이상의 진폭을 갖는 것에 반해 스펙트럼분석기에 내장된 Tracking Generator의 출력강도는 균일하므로 본 논문에서 필요한 조건을 갖추고 있음을 알 수 있다.

또한, 스펙트럼분석기의 Tracking Generator로부터 출력

된 전기신호를 직접 파워증폭기에 입력하고 그 출력을 스펙트럼분석기에 입력하여 파워증폭기의 주파수 특성을 조사했다. Tracking Generator의 출력 설정값은 -10dBm으로 하고, 측정결과를 Fig. 8에 나타냈다. 시험편의 공진주파수 측정에 있어 파워증폭기의 증폭 효율이 크게 적음을 감안해 볼 때, 30dBm정도의 폭은 페룰의 공진주파수 측정에 크게 영향을 미치지 않음을 알 수 있었으며, 실험에 사용한 주파수 대역의 측정이 가능함을 확인하였다.

마지막으로, 시험편의 공진주파수를 측정하기 전에, 측정장치만의 공진주파수를 명확히 해둘 필요가 있다. 측정부에 시험편을 장착하지 않고 입력측과 출력측의 압전진동자를 접촉시켰을 때의 주파수에 관한 피크를 관찰하였으며 그 결과를 Fig. 9에 나타냈다. Fig. 9에서 보는 바와 같이, 실험에 사용한 주파수 대역에서 3군데의 공진주파수가 존재하였다. 133.4kHz, 348.8kHz 및 542.3kHz로, 이 공진주파수들은 측정장치가 가지고 있는 고유 주파수이므로 시험편의 공진주파수를 측정할 때 제거해야 할 필요가 있다.

### 3.3 공진주파수 측정

본 논문에서 사용한 페룰의 형상이 원주형이기 때문에 지지방법은 단면을 지지하는 2점지지 방법을 선택하였다. 실험 및 유한요소해석을 이용하여 양품 페룰 시험편의 공진주파수를 측정해 본 결과, 100~1000kHz에서 나타나는 공진주파수의 수는 총 17개였고, 측정된 주파수 중 가장 낮은 공진주파수는 1모드로 하였으며, 가장 높은 공진주파수를 17모드로 하여 세분화하였다. 측정결과와 예로써, 양품 1개의 시험편에 대한 800~900kHz의 주파수 영역에서 기록된 응답을 Fig. 10에 실선으로 나타냈다. 점선으로 나타낸 응답은 측정장치만의 응답이다. 이로부터 측정장치가 시험편의 응

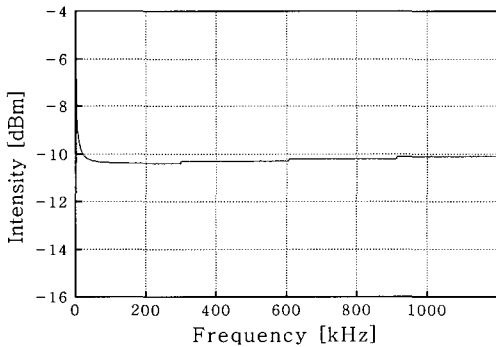


Fig. 7 Frequency characteristics of spectrum analyzer

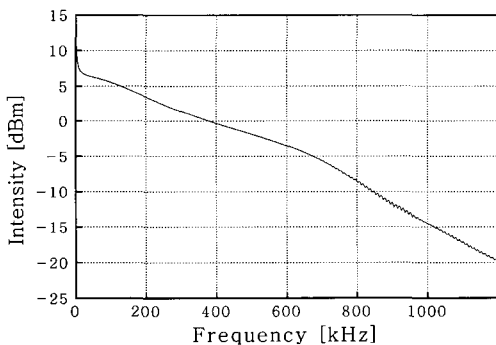


Fig. 8 Frequency characteristics of power amplifier

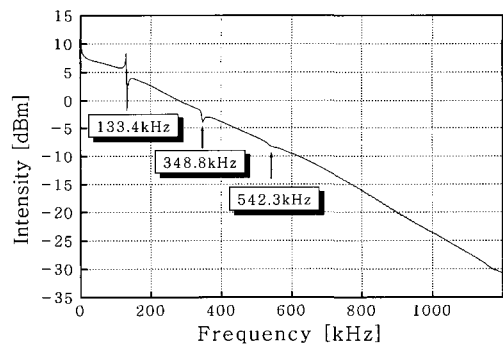


Fig. 9 Frequency characteristics of RUS measuring part

답에 영향을 미치지 않으므로 이 대역에서 나타나는 피크는 모두 공진주파수임을 알 수 있었다. Fig. 10에서 800~825 kHz 사이에 존재하는 공진주파수는 14모드이고, 850kHz 근방에 존재하는 공진주파수는 15 모드이다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 RUS 실험 결과 및 유한요소해석 결과 비교

시험편의 공진주파수를 측정할 때 유한요소해석에 의해 구해진 공진주파수와 비교함으로써 본 연구에서의 실험의 타당성을 검토해야 할 필요성이 있다. 이들 시험편의 공진주파수를 계산하기 위해 양품 시험편은 Fig. 11과 같이 8절점 6면체 요소로 모델링하여 유한요소 해석프로그램인 MSC/NASTRAN으로 해석을 수행하였다. 해석에 필요한 물성값은 앞에 서술한 Table 1의 것을 사용하였으며, 해석모델의 크기는 8640개의 요소수를 갖도록 모델링하였다.

Figs. 12, 13은 양품시험편에 관한 유한요소해석 결과 얻어진 대표적인 공진주파수와 진동모드로서 Fig. 11처럼

8640 요소수를 갖는 모델을 사용하였다.

유한 요소해석에 의한 공진주파수와 측정결과와의 비교 결과, 약 2~3%정도의 오차가 있는 것으로 나타났으며, 그 이유는 시험편 밀도의 불균일성이나 탄성상수가 불확실하기 때문이라고 사료된다.

또한, 12번째 모드를 실험에서 측정하는 것이 불가능하였다. 이는 유한 요소해석에 의한 고유값 계산으로부터 시험편의 12번째 모드가 모두 PZT와 접촉하여 지지되는 단에서 변형되는 모드로 나타나기 때문에 측정이 불가능하였다고 사료된다.

### 4.2 크랙 유·무에 따른 공진주파수

본 절에서는 양품과 크랙의 공진주파수의 존재 패턴을 비교하여 크랙 유·무에 따른 주파수 특성을 분석하고자 하였다. 양품시험편에 대해 측정된 공진주파수의 평균 데이터와 크랙시험편에 대한 데이터를 Table 2에 나타냈다. 여기서  $(f_a)_{avg}$ 와  $(f_c)_{avg}$ 는 각각 양품과 크랙을 갖는 시험편의 공진주파수 평균값을,  $\alpha_a$ 는 양품시험편의 평균한 공진주파수에 관한 표준편차를,  $\alpha_c$ 는 크랙시험편의 평균한 공진주파수에 관

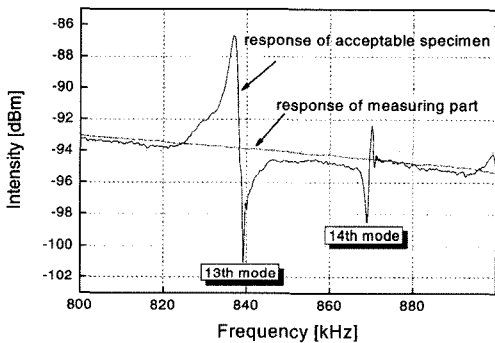


Fig. 10 Output of acceptable specimen

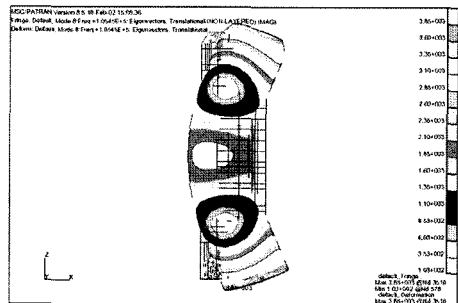


Fig. 12 1st mode

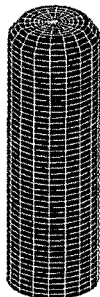


Fig. 11 Model of acceptable

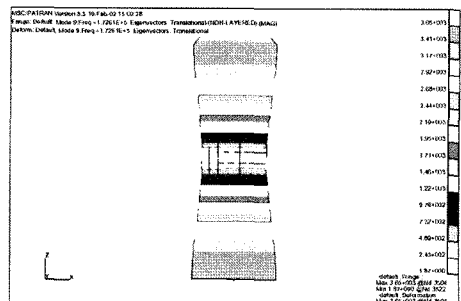


Fig. 13 2nd mode

한 표준편차를 나타내며, 식 (1)과 같다.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_i - f_{avg})^2} \quad (1)$$

양품시험편과 크랙시험편의 공진주파수의 차이를 판별하기 위하여 식 (2)와 같이 판별식에 의해 사용하였다. 이 판별도 A는 각 시험편의 표준편차에 대한 주파수 평균값의 차이를 나타낸 것으로, 양품과 크랙 시험편 사이의 판별정도를 의미한다. 각 모드에 대한 판별도 값이 2.0이상일 경우 양품시험편과 크랙시험편의 공진주파수 대역이 겹치지 않으므로 크랙 유·무가 구분 가능하였다.

$$A = \left| \frac{(f_a)_{avg} - (f_c)_{avg}}{(\sigma_a + \sigma_c)} \right| \quad (2)$$

RUS시스템에 의해 측정된 공진주파수 중 결함판별 가능한 모드를 히스토그램으로 나타낸 결과를 Figs. 14~21에 나타내었다. X축은 주파수 축으로서 단위가 kHz이고, Y축은

실험을 실시한 시험편의 개수를 나타내고 있다. Figs. 14~21까지의 히스토그램은 모드의 판별도 값이 2이상으로서 양품과 크랙시험편의 공진주파수 대역이 겹치지 않는 결함검출이 가능한 모드이다. 또한 주파수를 측정하는데 있어 공진주파수의 피크-피크 진폭(peak-to-peak amplitude)이 미소하면 실제 결함 평가를 수행하는데 어려움이 생기지만, Figs.

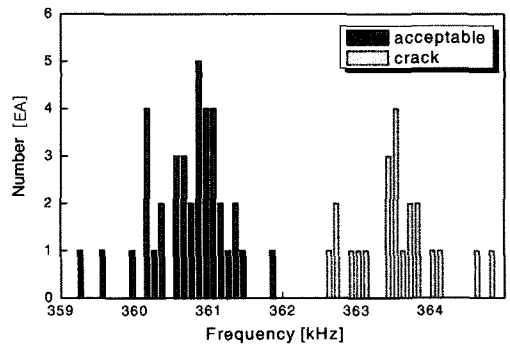


Fig. 14 Histogram of the 5th mode

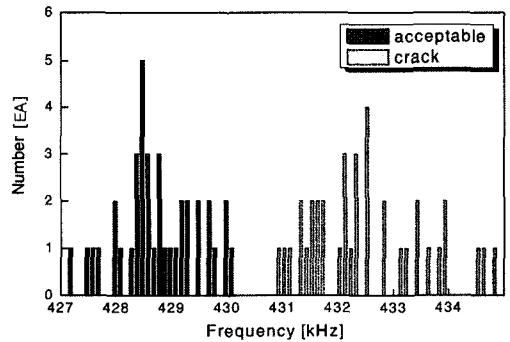


Fig. 15 Histogram of the 6th mode

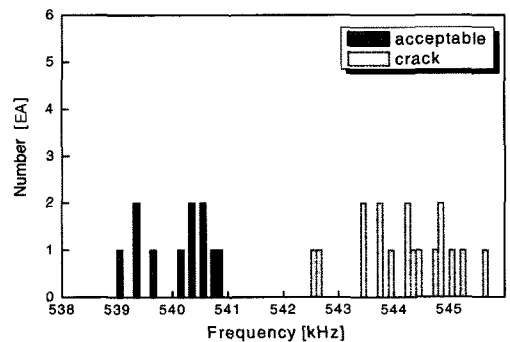


Fig. 16 Histogram of the 7th mode

Table 2 Resonant frequency of Ferrule(unit : kHz)

mode	acceptable		crack		distinction A
	(f <sub>a</sub> ) <sub>avg</sub>	σ <sub>a</sub>	(f <sub>b</sub> ) <sub>avg</sub>	σ <sub>b</sub>	
1	116.1	0.396	116.1	0.816	0
2	182.3	0.917	183.4	0.409	0.82
3	261.0	0.808	263.8	0.864	1.67
4	293.1	0.830	294.5	0.631	0.95
5	360.8	0.568	363.6	0.665	2.27
6	427.9	0.591	432.4	1.09	2.67
7	540.1	0.808	544.4	0.929	2.47
8	574.0	0.763	577.4	1.21	1.72
9	599.1	0.724	604.7	1.30	2.76
10	690.6	0.631	696.5	1.41	2.89
11	764.1	0.737	770.3	1.49	2.78
12	-	-	-	-	-
13	835.6	0.637	840.8	1.96	1.23
14	867.6	0.351	871.4	0.871	1.47
15	898.1	0.514	904.2	1.66	2.80
16	959.6	0.516	965.1	1.56	2.64
17	973.9	0.480	977.2	1.48	1.68

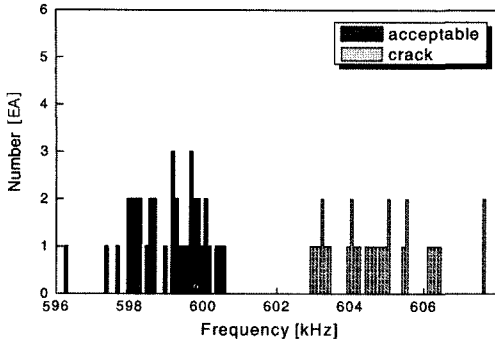


Fig. 17 Histogram of the 9th mode

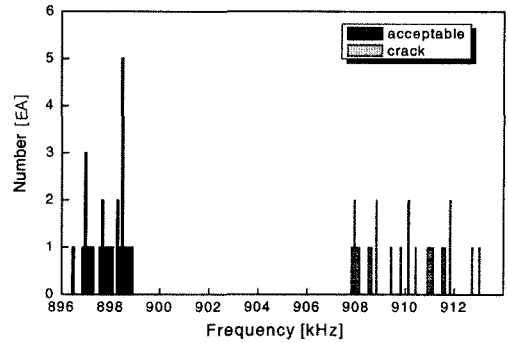


Fig. 20 Histogram of the 15th mode

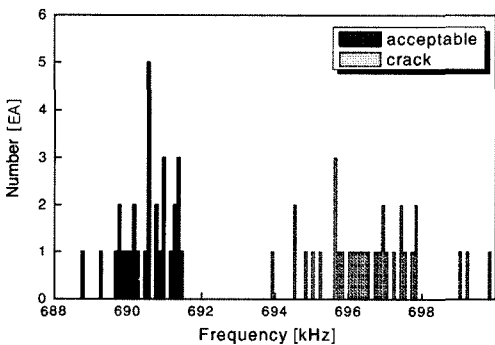


Fig. 18 Histogram of the 10th mode

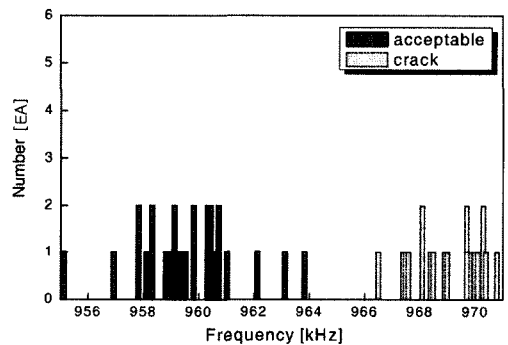


Fig. 21 Histogram of the 16th mode

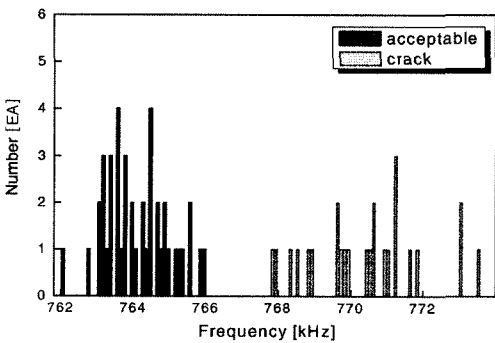


Fig. 19 Histogram of the 11th mode

14~21에서의 각 모드들의 진폭 값은 최소 10dB이상으로서 결함 검출에 적합하게 나타났다.

### 5. 결론

본 장에서는 양품 시험편과 크랙이 있는 시험편의 크랙

유·무에 따른 주파수 특성을 비교하였으며, 마지막으로 결함평가에 이용 가능한 공진주파수 모드에 관하여 고찰하였다.

- (1) RUS 원리를 이용한 측정시스템은 세라믹 제품의 내부 결함 검출에 이용 가능성이 검증되었다.
- (2) 양품시험편과 크랙시험편의 공진주파수 대역이 겹치지 않는 판별도 값은 2이상이며, 판별도 값이 2이상일 경우 크랙 유·무의 판별이 가능하였다.
- (3) 결함평가에 이용 가능한 공진주파수 모드는 5, 6, 7, 9, 10, 11, 15, 16번째 모드이다.
- (4) SEM에 의해 크랙의 길이를 측정한 결과는 10.40 $\mu\text{m}$ ~32.35 $\mu\text{m}$ 까지 나타났으며, 크랙을 갖는 페롤의 공진주파수는 양품 페롤의 공진주파수 보다 높은 대역에 존재함을 확인하였다.

## 후 기

이 논문은 2005년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

## 참 고 문 헌

- (1) Maynard, J., 1996, "RESONANT ULTRASOUND SPECTROSCOPY," *Physics Today*, pp. 26~31.
- (2) Schwarz, R. B. and Vuorinen, J. F., 2000, "Resonant Ultrasound Spectroscopy; Current Status and Limitation," *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 310, Nos. 1-2, pp. 243~250.
- (3) Saxton, J. G., 1996, "Resonant Inspection of Production Parts," *The American Ceramic Society Bulletin*, Vol. 75, No. 10, pp. 48~50.
- (4) Migliori, A., Sarrao, J. L., Visscher, W. M., Bell, T. M., Ming Lei, Fisk, Z. and R. G. Leisure, 1993, "Resonant Ultrasound Spectroscopic Techniques for Measurement of the Elastic Moduli of Solid," *Physica B*, Vol. 183, Nos. 1-2, pp. 1~24.
- (5) Ledetter, H., Fortunko, C. and Heyliger, P., 1995, "Orthotropic elastic constants of a boron-aluminum fiber-reinforced composite; An acoustic resonance spectroscopy study," *Journal of Applied Physics*, Vol. 78, No. 3, pp. 1542~1546.
- (6) Ledbetter, H., Lei, M., Herman, A. and Sheng, Z., 1994, "Low-Temperature Elastic Constants of Y1Ba2Cu3O7," *Physica C*, Vol. 225, pp. 397~403.
- (7) Inohara, M. and Suzuki, T., 1993, "Measurement of Elastic Moduli by Rectangular Parallelepiped Resonance Method II," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 32, Part1, No. 5B, pp. 2238~2242.
- (8) Migliori, A. and Darling, T. W., 1996, "Resonant ultrasound spectroscopy for materials studies and non-destructive testing," *Ultrasonics*, Vol. 34, pp. 473~476.
- (9) Heyliger, P. and Ledbetter, H., 1998, "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.
- (10) Kim, S. H., Park, S. G., Kim, Y. N and Yang, I. Y., 2004, "Nondestructive Examination of Optical Lens by Resonant Ultrasound Spectroscopy," *Proc. Autumn conference on KSMTE*, pp. 257~262.