

# 충격 시험의 출력 데이터에 기초한 유사잔향 시간을 이용한 도자기의 결함 탐지법

## Fault Detection Method for Ceramic Cup by Pseudo Reverberation Time Based on Output Data by Impact Test

박 석 태\*  
(Seok-Tae Park\*)

\*주성대학 음향과

(접수일자: 2006년 5월 29일; 수정일자: 2006년 6월 30일; 채택일자: 2006년 8월 30일)

도자기 컵의 결함여부를 판정하는 간편한 방법으로 실내에서 충격 시험으로 추정된 유사잔향시간을 사용하는 방법을 제시하였다. 정상적인 도자기 컵과 미세한 균열이 있는 컵에 대하여 충격 시험을 하여 발생하는 충격음에서 구한 슈레더 곡선에서 잔향 시간을 추정하였다. 충격 가진 막대의 종류와 가진 위치, 경계 조건에 따라 잔향 시간을 추정하였고 추정된 잔향 시간으로부터 도자기 컵의 결함 유무를 효과적으로 파악할 수 있는지를 기술하였다.

**핵심용어:** 결함 탐지법, 충격 시험, 슈레더 곡선, 유사잔향 시간

**투고분야:** 구조음향 및 진동분야 (11.6), 건축음향 분야 (7.1)

To determine the faults of ceramic cup it is proposed to use pseudo reverberation time concept estimated by impact test in room. Schroeder curves estimated from impact test for a cup with small crack and without one are utilized to estimate pseudo reverberation time. Pseudo reverberation times are compared and discussed according to a sort of impact hammers and impact points and also boundary conditions. As a result, proposed method is proved to be very useful to detect the existence of faults for candidate cups.

**Key words:** Fault detection method, Impact test, Schroeder curve, Pseudo reverberation time

**ASK subject classification:** Structural Acoustics and Vibration (11.6), Architectural Acoustics (7.1)

### 1. 서 론

과일 장수는 과일을 두드려봄으로써 과일이 잘 익었는지를 파악할 수 있고 철도 안전원은 철차 바퀴를 쇠망치로 가볍게 두드려서 나는 소리를 들어봄으로써 바퀴의 이상 상태를 확인하는 방법을 사용하고 있다. 그렇다면 철도 안전원은 바퀴에서 방사되는 충격음의 어떤 특성으로 인해 바퀴의 이상 유무를 확인할 수 있을까? 안전원은 정상적인 바퀴를 가진 하였을 때에 방사되는 소리를 기억 속에 데이터베이스화하여 경험치 속에 넣어두게 된다. 비 정상적인 바퀴에서 나는 소리를 들었을 때에는 이 소리를 정상적인 바퀴에서 들었던 소리와 감각적으로

비교하여 바퀴에 이상이 있을 확률이 높다고 판정을 내리게 된다. 그것을 제조하는 회사에서도 비슷한 방법으로 제품의 불량 여부를 결정하고 있다. 대량으로 자동 생산되는 완성품을 검사원이 두드려보고 들어보아 특이한 또는 비정상적인 소리가 나면 불량품으로 의심하여 육안으로 확인하여 불량 여부를 처리하고 있다. 이처럼 생활 속에서도 특별한 장치를 사용하지 않고도 제품의 이상 유무를 파악하는 방법이 실용적으로 사용되고 있다. 그러나, 이러한 방법을 사용하려면 경험 있는 시험자가 제품을 두드려보고 경험에 따라 이상 유무를 결정하게 된다. 만약에 이러한 시스템을 무인으로 작동케 하기 위해서는 제품에 충격을 주어 나오는 충격음을 취득하는 장치와 충격음 데이터의 어떠한 특성을 이용하여 정상품과 불량품을 판별하는 방법이 제시되어야 한다. 본 논문에서는 도자기 컵의 경우에 대하여 충격 음향 응

책임저자: 박 석 태 (stpark@jsc.ac.kr)

충북 청주시 상당구 내덕 2동 201-31청주시 문화산업 진흥재단 내  
주성대학 음향과

(전화: 043-219-1202; 팩스: 043-219-1224)

답 데이터를 이용하여 유사잔향 시간 (이후에는 잔향 시간)을 추정하였다. 추정된 잔향 시간을 이용하여 제품의 불량 여부를 판단하는 방법을 제시하여 시험자가 직접 소리를 듣지 않고도 데이터만으로 불량 여부를 판단할 수 있는지를 기술하였다. 또한 충격 가진 위치와 경계 조건 등에 따라 제품의 불량 여부를 판단하는 것의 정확성도 파악하고자 한다.

## II. 충격 응답의 주파수 특성

어떤 물체에 충격을 주면 충격음을 방사하게 된다. 충격 입력이 디랙 델타 함수의 형태라면 응답은 충격 응답이 된다. 도자기 컵에 주어지는 충격 크기를 알 수 없을 때에 그리고 충격의 크기가 다를 때에 불량 여부를 판단하는 방법은 충격 응답을 들었을 때에 맑은 소리가 나면 정상품이고 둔탁한 소리가 나면 불량품일 경우라고 여겨진다. 본 장에서는 충격음을 듣지 않고 충격음 데이터를 사용하여 충격 응답 데이터의 주파수 스펙트럼을 분석하여 정상품과 불량품을 쉽게 구별할 수 있는지를 기술하고자 한다. 이것이 가능하다면 무인 자동 측정을 하여 제품의 불량 여부를 파악할 수가 있게 된다. 1개의 마이크로 폰과 노트 북 컴퓨터에 장착된 사운드 카드를 이용하여 충격 시험을 수행하였다. 그림 1은 충격 시험을 위한 셋업으로 탁자 위에 두께 5cm인 흡음재 위에 도자기 컵을 놓았다. 마이크로 폰은 탁자 위 20cm 지점에 장착하였고 마이크로 폰과 컵 상단과는 각도는 약 7° 이고 직선 거리는 약 50cm 를 나타냈다. 그림 2는 흡음재 위에 정상품 컵 3개와 불량품 컵 1개를 각각 놓고 플라스틱 막대로 충격을 주어 마이크로 폰으로 취득한 충격 응답에서 구한 파워 스펙트럼을 나타낸다. 샘플링 주파수는

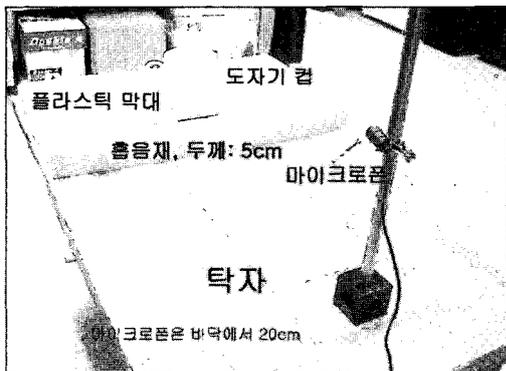


그림 1. 충격 시험 셋업  
Fig. 1. Test setup 1 for impulse test.

16kHz로 하였다. 가진점 1의 위치는 도자기 컵의 손잡이를 기준으로 위에서 볼 때에 반 시계 방향 90° 인 지점이였다. 가진점 2, 가진점 3 및 가진점 4를 가진점 1에서 반 시계 방향으로 각각 90° 위치로 선택하였다.

그림 2(a)는 정상품 1에 대하여 가진점 1에서 5번의 충격을 주어 구한 음향 파워 스펙트럼을 나타냈다. 충격 세기에 따라 응답 크기가 다르게 나타났으며 공진 주파수라 여겨지는 피크들이 나타났다. 그러나, 충격력의 크기에 따라 공진이라 여겨지는 피크가 뚜렷한 경우와 없는 경우가 있음을 알 수 있다. 그림 2(b)는 정상품 2의 결과이다. 정상품 1과 같은 조건에서 시험 하였는데도 5kHz 이상에서 약간 다른 경향을 나타낸다. 그림 2(c)는 정상품 3의 결과이다. 3개의 정상품에서 3개의 피크들이 공통적으로 나타나지만 피크의 크기는 제품에 따라 또한 같은 제품이라도 충격의 경우 수에 따라 다르게 나타났다. 그림 2(d)는 불량품의 경우로 1,500Hz와 3,100Hz 부근의 주파수에서는 정상품들과 같은 공진 주파수를 보이고 있으나 4,000Hz 이상의 주파수에서는 뚜렷한 피크가 없음을 나타낸다. 이것은 크랙 발생한 부위에서 진동 에너지를 흡수하여 특별한 공진이 발생하지 않음을 의미한다. 전문가라면 정상품과 불량품의 주파수 스펙트럼만으로 불량품이 어느 것이라는 것을 추측할 수 있으리라 보여진다. 그러나, 크랙의 종류와 위치 및 가진 위치와 측정 위치에 따라 나타나는 주파수 스펙트럼으로 일반 현장 작업자가 불량품을 쉽게 판정하기는 어렵다고 본다.

마이크로 폰과 도자기 컵의 각도 변화에 따라 음향 파워 스펙트럼이 변동하는지를 분석하기 위하여 마이크로

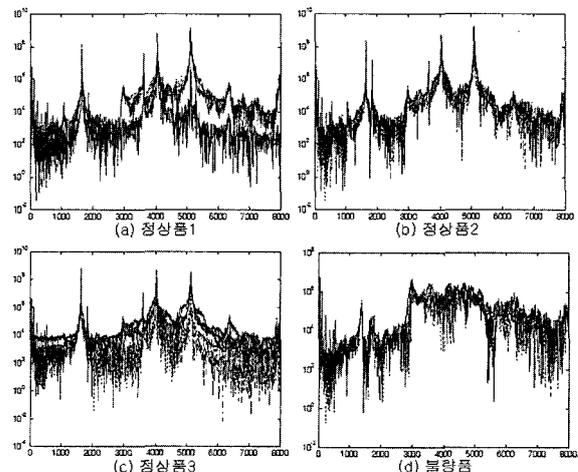


그림 2. 충격 응답의 파워 스펙트럼 비교, 컵과 마이크로 폰 거리와 각도: 0.5m, 7°, 흡음재 위, 가진점 1  
Fig. 2. Comparison with power spectrums of impulse responses, distance and angle between ceramic cup and microphone: 0.5m, 7°, on absorption material, exciting point 1.

폰과의 각도를 약 7°에서 약 25°로 변경하였다. 그림 3에 시험 모습을 나타냈다. 정상품 1에서 충격을 4 군데 위치에서 가하여 측정된 충격응답을 각각 분석한 결과를 그림 4에 나타냈다. 충격 위치에 따라 다양한 양상을 보이며 충격의 경우 수에 따라 다르게 나타났다. 이 주파수 스펙트럼으로 이 제품이 정상품인지를 판단하는 것은 용이하지가 않다. 만일 충격 입력의 크기를 측정할 수 있는 힘 센서가 장착된 충격 망치를 사용한다면 충격음/충격력을 나타내는 주파수 응답 특성을 측정하여 여러 번 평균을 하면 주파수 응답특성이 비교적 깨끗하게 나올 수 있을 것이다. 그러나, 최소한의 장비를 사용하므로 충격력을 알 수가 없었고 출력만을 사용하여 분석할 경우에 비 반복적인 충격력에 대한 응답에 대하여 구한 파워 스펙트럼을 평균하는 것은 의미가 없다. 따라서,

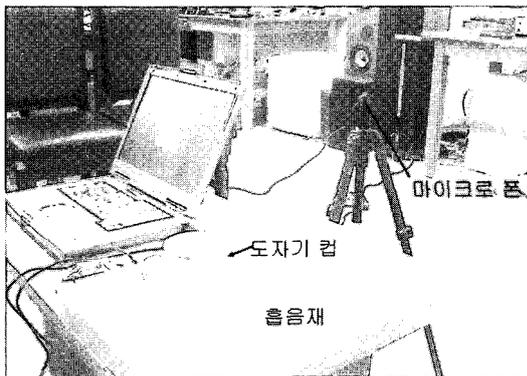


그림 3. 충격 시험 셋업 2, 탁자 위에 놓인 흡음재 위에 있는 도자기 컵. 마이크로 폰과의 거리 및 각도: 0.5m, 25°  
 Fig. 3. Test setup 2 for impact test, distance and angle between ceramic cup and microphone: 0.5m, 25°, on absorption material.

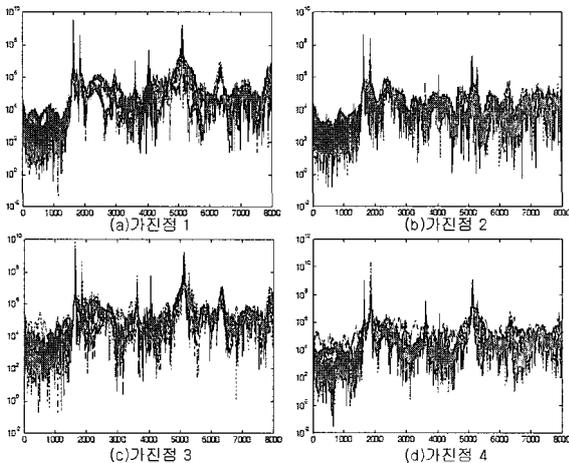


그림 4. 정상품 1의 충격 응답의 파워 스펙트럼 비교, 컵과 마이크로 폰 거리와 각도: 0.5m, 25°, 흡음재 위  
 Fig. 4. Comparison with power spectrums of impulse responses for normal cup 1 according to exciting points, distance and angle between ceramic cup and microphone: 0.5m, 25°, on absorption material.

거친 상태의 파워 스펙트럼을 나타냈다.

정상품 1에 대하여 마이크로 폰과 도자기 컵과의 거리는 50cm로 일정하게 하고 경사각이 7° 인 경우 (그림 1)와 25° 인 경우 (그림 3)에 가진점 1을 가진하여 충격음에 대한 파워 스펙트럼을 그림 5에 비교하였다. 마이크로 폰의 위치와 각도 변동에 따라 파워 스펙트럼이 매우 다른 양상을 나타냈다. 경사각 7° 인 경우인 그림 5(b)에서 하단의 그림을 보면 정상품인지 불량품인지 파악하기가 어렵다. 결론적으로 동일한 제품이라도 충격 위치와 충격 크기에 따라 음압의 파워 스펙트럼이 다르게 나타남을 알 수 있었다. 따라서, 무인 자동 작동장치로 도자기 컵에 충격을 주고 측정된 파워 스펙트럼의 크기와 형상을 사용하여 도자기 컵의 불량 여부를 파악하기는 매우 어려운 작업이라 예상된다. 따라서, 대안으로 유사진행 시간 개념을 제안하여 사용하기로 하였다.

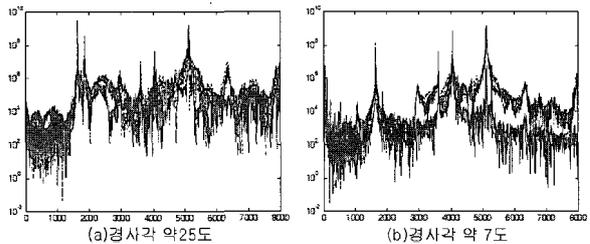


그림 5. 정상품 1의 충격응답의 파워 스펙트럼비교, 컵과 마이크로 폰 거리와 각도: 0.5m, 25°와 0.5m, 7°, 흡음재 위  
 Fig. 5. Comparison with power spectrums of impulse responses for normal cup 1 according to angles: 0.5m, 25° and 0.5m, 7°, on absorption material.

### III. 유사진행 시간 이론

어떤 물체를 충격 힘으로 가진 시키면 이 충격 에너지는 운동 에너지, 음향 에너지 및 열 에너지 등으로 변환되는 작용이 일어나게 된다. 진동 에너지는 그 물체와 경계를 접하는 물체에 에너지를 전달시켜 또 다른 진동과 소리, 열 에너지 전달이 일어나게 된다. 방사된 음향 에너지는 주변 환경에 따라 물체 자체의 감쇠 특성에 주변의 흡음과 반사등 여러 가지 복잡한 과정을 거치는 실내 음향학적 현상을 일으킨다. 실내의 음향 특성을 나타내는 실내 음향 매개변수를 추정하기 위해서는 실내를 음향적으로 충분히 가진 시킬 수 있는 음원을 사용하여야 한다. 가진 입력 음원으로는 백색 잡음 또는 디랙 델타 함수 형태를 가진 신호등을 사용하게 되며 이러한 입력 신호들에 대한 정보를 충분히 알고 있어야 한다. ISO

표준방법 [1]에 따르면 잔향 시간 측정법은 2 가지로 구분된다. 첫번째는 interrupted noise method로 광 대역 또는 대역 제한 잡음으로 실내를 충분한 시간 동안 가진 후에 신호를 갑자기 중단하고 시간에 따라 감소하는 음압 감소 데이터를 저장하고 이 데이터로부터 음압 감쇠 곡선을 구하는 방법이다. 두번째 방법은 적분 충격 응답 방법 (integrated impulse response method)으로 디랙 델타 함수 형태의 입력으로 실내를 가진하여 측정 한 충격 응답을 시간의 함수로 측정하는 방법이다. 즉, 피스틀을 이용하여 충격 가진음을 발생시키거나 또는 MLS (maximum length sequence)를 이용한 충격음으로 실내를 가진하고 직접음과 실내 반사음들의 합이 시간에 따라 실내의 흡음과 반사 특성에 따라 감소하는 실내 충격 응답들을 측정하여 이 데이터들을 이용하여 잔향 시간을 추정한다. 이 결과를 슈레더의 역진 적분법으로 표현하여 슈레더 곡선이라 불리는 잔향 감쇠 곡선을 얻은 후에 잔향 시간을 추정하게 된다 [2]. 잔향시간은 슈레더 곡선에서 -5dB에서 -35dB로 감소하는 시간을 계산하여 2를 곱하여 구하는  $RT_{30}$  을 사용하거나 -5dB에서 -25dB로 감소하는 시간에 3을 곱하여 얻는  $RT_{20}$  을 사용할 수 있다. 어느 경우이나 주변 잡음에 의한 잔향 시간 추정 오차를 줄이기 위해서는 주변잡음의 크기가 잔향시간을 계산하는데 이용한 슈레더 곡선에서 사용한 최소 dB 값보다 10dB 이상 작아야 하는 조건이 필요하다. 즉  $RT_{30}$  방법을 이용하려면 주변 잡음은 최대 -45dB 이고  $RT_{20}$  를 사용하는 경우에는 주변 잡음이 최대 -35dB을 넘게 되면 잔향 시간을 부정확하게 추정하게 된다. 슈레더 곡선은 특정 시간에 수음점에서의 음압의 제곱의 앙상블 평균은 그 시점에서 무한 시점까지의 충격 응답의 제곱을 적분한 것과 같음을 나타낸다. 즉, 한번의 충격 응답을 측정하면 그 지점에서 시간에 따라 음압이 감소하는 데이터를 여러 번 측정하여 평균한 결과와 같다는 것이다 [2]. 1개의 슈레더 곡선으로 나타낸 음압 제곱은 동일한 수음점에서 측정한 음압 제곱을 10번 정도 평균한 결과와 비슷하다고 알려졌다 [3]. 이제 잔향 시간을 추정할 실내를 가진하기 위한 스피커 시스템의 입력이  $x(t) = \sqrt{N}\delta(t)$  일 때에 앰프와 마이크로 폰, 라우드스피커, 전달점과 수음점 사이의 특성 등이 포함된 수음점에서의 복합적인 충격 응답을  $h(t)$  라 할 때에 수음점에서의 음압  $p(t)$ 는 식 (1)과 같다 [2,3].

$$p(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)h(t-\tau)d\tau \tag{1}$$

식 (1)에서 음압  $p(t)$ 를 제공하면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$p^2(t) = \int_{-\infty}^{\infty} d\tau \int_{-\infty}^{\infty} d\theta x(\tau)x(\theta)h(t-\tau)h(t-\theta) \tag{2}$$

잡음을 제거하기 위하여 식(2)에 앙상블 평균을 취하면 [4]

$$\langle p^2(t) \rangle = N \int_{-\infty}^{\infty} h^2(\tau)d\tau \tag{3}$$

이 된다. 한편 임의의 충격음으로 실내 공간을 가진 하였을 때의 충격 응답을  $h_r(t)$ 이라고 가정하면

$$D(t) = \langle p^2(t) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} h_r^2(\tau)d\tau \tag{4}$$

이 얻어진다. 이 곡선을 잔향 감쇠곡선 또는 슈레더 곡선이라 하며 근사화된 디지털 형태는 식 (5)와 같다.

$$D(t_k) = \sum_{s=0}^L h_r^2(s) \tag{5}$$

여기서,  $t_k$ 와  $L$ 은 이산 시간이고, 충격 응답을 무한정 측정할 수 없으므로 유한 시간  $L$ 까지 측정함을 나타낸다. 유한 시간을 얼마로 할 것인가 따라 잔향 시간 추정값도 달라질 수가 있다.

정규화된 슈레더 곡선  $d(t_k)$ 는 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$d(t_k) = \frac{1}{N} \langle p^2(t_k) \rangle \tag{6a}$$

$$= \frac{1}{N} \sum_{s=0}^L h_r^2(s) \tag{6b}$$

$$= 1 - \frac{1}{N} \sum_{s=0}^L h_r^2(s) \tag{6c}$$

여기서,  $N = \sum_{s=0}^L h_r^2(s)$  를 나타낸다.

한편 실내 충격 응답  $h_r(t)$ 가 주변 잡음  $n(t)$ 에 오염되어 있다고 볼 수도 있으므로 이 경우에 실내 충격 응답은 식 (7)과 같은 형태로 나타낼 수 있다 [3].

$$h_r(t) = h_r'(t) + n(t) \tag{7}$$

여기서  $k_i(t)$ 는 참 실내 충격 응답이다. 만일,  $k_i(t)$ 와  $n(t)$ 가 상관 관계가 없다면 식 (7)은 식 (8)과 같이 표현할 수 있다.

$$d(t_k) = \frac{1}{N} \sum_{s=1}^L k_i^2(s) + \frac{n^2}{N} (L - t_k) \quad (8)$$

여기서,  $n^2$ 은 잡음의 평균 제곱을 의미한다.

실내에서 음압과 음향 파워 레벨의 관계는 식 (9)와 같다 [5].

$$L_p = L_w + 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) + 10 \log \rho_0 c - 20 \log (2 * 10^{-5}) - 120, \text{ dB} \quad (9)$$

여기서,  $L_p$ 는 음압 레벨,  $L_w$ 는 음향 파워 레벨,  $Q$ 는 지향 계수 (directivity factor),  $R$ 은 실 상수 (room constant),  $\rho_0$ 는 공기 밀도,  $r$ 은 가진 원에서 측정 점까지의 거리,  $c$ 는 공기중에서의 음속을 나타낸다. 따라서, 실내에서 시간에 따른 수음 점에서의 음향 파워의 감소는 음압 레벨의 감소와 같다. 즉  $\Delta L_p = \Delta L_w$ 이 성립한다. 즉 식 (6b)에서 구한  $d(t_k)$ 의 dB 값인  $10 \log(d(t_k))$ 가 초기 상태보다 -60dB 감소될 때까지의 시간이 잔향시간  $RT_{60}$ 이 된다. 잔향 데이터에서 추정되는 여러 가지 실내 음향 매개 변수들은 인간의 주관적 지각을 정량화 시키는 데에 사용되어 실내 음향을 이해하고 실내 음향을 설계하는 데에 널리 사용되고 있다 [4, 6, 7]. 한편, 입력 신호에 대한 정보가 충분하지 않고 입력의 정확한 크기와 지속시간을 사용자가 임의로 조절할 수 없는 경우와 이 신호가 충격 신호와 유사하다고 가정할 수 있는 경우에도 이러한 신호를 이용한 실내 잔향 시간을 예측하는 것은 정성적으로 가능하다고 볼 수 있다. 만일, 실내에 있는 어떤 물체에 유사 충격을 주어 충격을 발생시키고 특정한 위치의 수음점에서 측정된 음압이 감소하는 잔향 감쇠 곡선을 얻었다고 할 때에 이 곡선에서 얻어지는 잔향 시간이 엄밀한 의미에서는 실내의 잔향 시간이라고 주장할 수는 없다고 본다. 이러한 경우는 가진 음원이 무지향성 단일 음원이라는 기본 가정을 충족시키지 못할 경우와 실내 공간을 충분히 가진할 만한 파워가 부족한 가진 방법 및 반복 재현성의 결여 등이 나타날 경우라 할 수 있다. 그리고 물체에 충격을 가했을 때에 충격력이 사라진 다음에도 충격을 받은 물체 자체가 2차 음원으로 작동하므로 실내 음향 잔향 시간을 위한 가진 음원의 기본 조건을 만족시키지 못한다. 또한, 수음점과 가진점이 가까울 경

우에는 직접음의 영향을 배제하는 적절한 방법이 없기 때문이다. 이리므로, 물체에 충격력을 주어 방사하는 충격음 응답으로부터 구한 슈레더 곡선은 엄밀한 의미의 잔향 감쇠 곡선이 아니므로 이 곡선에서 추정된 잔향 시간을 유사잔향 시간이라 정의하며 간편히 잔향 시간이라 정의하고자 한다. 한편, 세빈 (Sabine)에 따르면 실내 잔향 시간은 식 (10)과 같다 [5].

$$T = 0.161 \left( \frac{V}{A} \right) \quad (10)$$

여기서,  $T$ 는 잔향 시간이고,  $V$ 는 실내의 부피( $m^3$ )를  $A$ 는 실내 벽면의 흡음력을 나타낸다. 평균 흡음률이 큰 경우에는 식 (11)과 같은 Eyring 식을 사용한다.

$$T = 0.161 \frac{V}{S \left[ -\ln(1 - \bar{\alpha}) \right]} \quad (11)$$

$V$ 는 실내의 부피 ( $m^3$ )를  $S$ 는 벽면의 면적( $m^2$ )을  $\bar{\alpha}$ 는 평균 흡음률을 나타낸다. 또한, 음원과 수음점 사이의 거리  $d_{min}$ 는 식 (12)와 같다.

$$d_{min} = 2 \sqrt{\frac{V}{cT}} \quad (12)$$

여기서,  $V$ 는 실내의 부피 ( $m^3$ ),  $c$ 는 공기 중에서의 음속을,  $T$ 는 실내에서의 잔향 시간을 나타낸다. 유사잔향 시간법으로 도자기 컵의 불량 여부를 판단하기 위하여 도자기 컵에 충격을 주어 잔향 시간을 추정하는 방법은 기본적으로는 실내 잔향 시간을 추정하는 방법과 같다. 그러나, 도자기 컵을 플라스틱 막대로 충격을 주는 경우에 실내를 가진 시킬 수 있을 정도의 큰 힘으로 컵에 충격을 줄 필요는 없다고 본다. 큰 충격을 줄 경우에는 정상적인 컵도 파손될 경우가 있으며 시험 목적이 실내의 잔향 시간을 측정하는 것이 아니라 충격력을 받은 컵에서 방사하는 음향의 감쇠 곡선을 얻는 것이 목적이기 때문이다. 방의 크기가 4.5\*9\*2.6m 인 경우에는 잔향시간이 대략 1.2초 이내에 있다고 볼 수 있으며 식 (12)에서  $d_{min}$ 은 최소한 1m 이상이 되어야 한다. 그러나, 현실적으로 도자기 컵의 가진점과 수음점의 거리를 크게 할 수도 없다. 다음 절에서는 도자기 컵에 대한 잔향 시간을 이용한 제품의 불량 여부를 판별하는 법을 기술하고자 한다.

### IV. 측정 시스템 및 실험

2장에서 파워 스펙트럼을 사용하여 제품의 불량 여부를 판단하고자 할 때의 문제점을 기술하였다. 본 장에서는 유사잔향 시간을 이용하여 도자기 컵의 불량 여부를 판단하는 방법을 기술하고자 한다. 최소한의 장비를 사용하여 도자기 컵에 대한 충격음 측정 시스템을 구성하였고 이를 이용하여 생산하고 있는 컵이 정상품인지 불량품인지를 판별하기 위하여 충격시험을 실시하였다. 가진 방법은 플라스틱 막대를 사용하여 컵에 충격을 주는 방법을 사용하였다. 그림 6에 대상 컵을 나타냈고 4개의 가진점도 나타냈다. 컵의 크기와 형상 등은 동일하였다. 왼쪽은 정상품을 오른쪽은 불량품을 나타냈다. 컵의 높이는 8.8cm 이고 컵의 윗 지름은 8.4cm, 아랫 지름은 6.6cm 이며 손잡이가 있다.

불량품은 컵의 안쪽 손잡이 부근에 길이 30mm 정도의 미세한 균열이 있고 바깥쪽에서는 표시가 없는 상태였다. 측정 마이크로 폰은 사이언스 큐브사의 모델 soundMBL이며 측정 소프트웨어는 어도비사의 오디오션 1.5 소프트웨어를 사용하여 충격 응답을 측정하였다 [8]. 샘플링 주파수는 16kHz였고 해상도는 16비트로 하였다. 컵을 위에서 내려다볼 때에 컵 손잡이 쪽을 각도 0°로 하여 90° 간격으로 반 시계 방향으로 4개의 가진 점들을 선택하였고 수평 방향으로 가진하였다. 잔향 시간 추정은 식 (6c)에 로그를 취한 식 (13)을 이용하여 주변 소음의 영향을 최대한 줄이기 위하여 의 값이 -5dB에서 -10dB로 되는 두 지점사이의 데이터를 이용하여 오차 제곱을 최소화하는 선형 재귀법 (linear regression)으로 구한 시간에 12를 곱하여 구하였다 [3]. 또한, 유사잔향 시간 추정에 사용되는 데이터 하한값 보다 주변 잡음의 크기가 10dB이상 [1,3] 작으면 주변잡음의 영향이  $L_d$

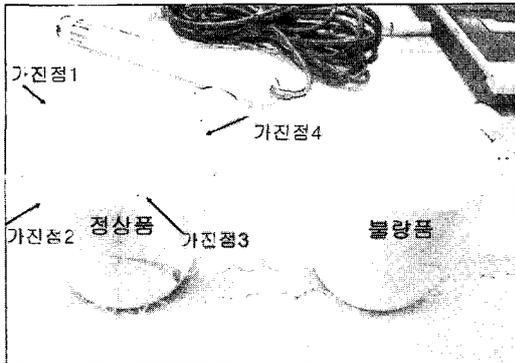


그림 6. 도자기 컵 모습, 왼쪽: 정상품, 오른쪽: 불량품  
Fig. 6. Photographs of cup, left: normal cup, right: abnormal cup.

의 크기에 미치는 영향이 0.1dB 이하가 된다. 컵과 마이크로 폰의 거리가 가까운 경우에 충격 시험을 하면 작업장에서의 주변 잡음의 크기는 충격음의  $L_d$ 보다 20dB 이하로 유지하는 것이 유사잔향 시간의 정확도를 유지하는데 필수적이다.

$$L_d = 10 \log(d(t_k)) \tag{13}$$

#### 4.1. 충격 위치에 따른 정상품과 불량품의 잔향 시간 비교

2장에서 충격 위치에 따라 충격음의 파워 스펙트럼이 다르게 나타남을 알 수 있었다. 충격위치에 따라 잔향 시간이 변동하는 것을 파악하기 위하여 충격 위치에 따른 잔향 시간을 추정하였다. 테이블 위에 두께 5cm인 흡음재 판을 두고 그 위에 도자기 컵을 설치하였다 (그림 3). 마이크로 폰과 도자기 컵과의 거리는 약 50cm로 하였다. 실내는 조용한 상태를 유지하였고 플라스틱 막대로 정상품과 불량품 도자기 컵을 가진점 1에서 가진점 4까지 각각 5번씩 충격을 주고 마이크로 폰으로 충격음을 측정하였다. 그림 7(a)는 정상품에 대한 충격응답을 나타냈고 그림 7(b)는 그 중에서 하나의 충격 응답만을 나타낸 것이다. 유한 시간  $L_d$ 의 크기에 따라 잔향 시간 추정이 다르게 나올 수 있으므로 [3] 초기 응답에 비해 충분히 작은 응답이 나오는 시간으로  $L=1$  초를 택하였다.

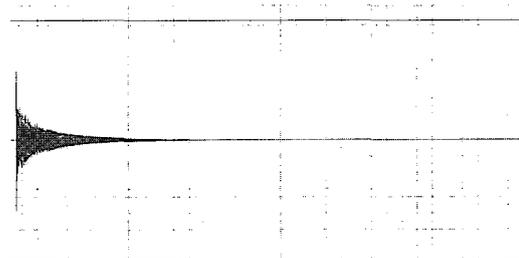
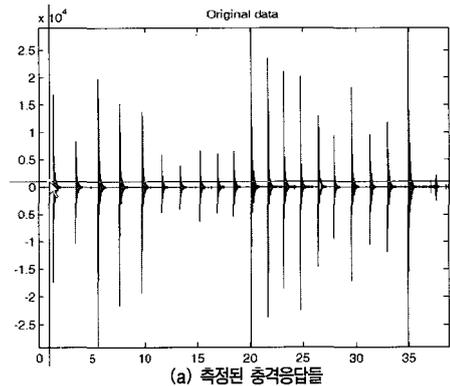


그림 7. 정상품 도자기 컵에서 측정된 충격응답 곡선들  
Fig. 7. Impulse responses for normal cup.

충격 응답에서 잔향 시간을 추정하고 이를 근거로 하여 제품의 불량 유무를 판단하는 프로그램의 흐름도를 그림 8에 나타냈다. 프로그램을 구동하면 사용자에게 데이터베이스를 만들 것인지 임의의 제품에 대한 불량 유무를 판단할 것인지를 선택하게 한다. 제품의 불량 유무를 판단하려면 정상품들의 잔향 시간 분포를 나타내는 데이터베이스가 선행되어야 하므로 정상품들에 대한 충격 응답들이 있는 파일을 선택해야 한다. 특정한 수음점에서 측정한 충격 응답들의 데이터를 이용하여 정상품들의 잔향 시간 분포를 계산하여 파일로 저장한다. 이러한 데이터베이스가 존재하고 판정하고자 하는 제품의 충격 응답 파일이 준비되었을 때에 프로그램을 실행하여 대상 제품의 잔향 시간을 추정하여 추정된 잔향 시간이 정상품의 68% 또는 95% 신뢰도 구간 내에 있으면 정상품으로 판단하고 그 외에는 불량품으로 판단하게 된다 [9].

그림 9는 충격 응답을 식 (6)으로 표현한 감쇠 곡선

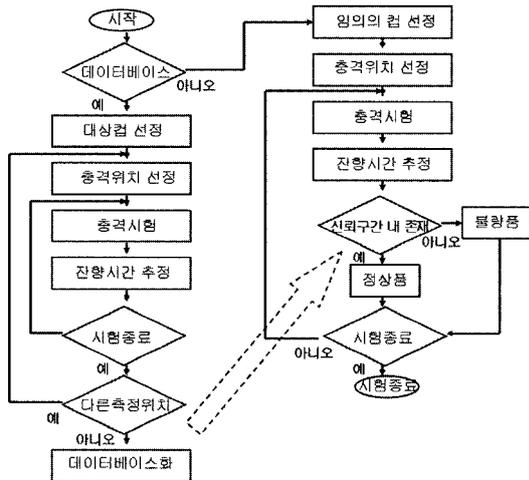


그림 8. 잔향 시간 추정 및 도자기 컵의 불량 여부를 판단하는 프로그램 흐름도

Fig. 8. Flowchart for estimating reverberation time and fault detection for a cup.

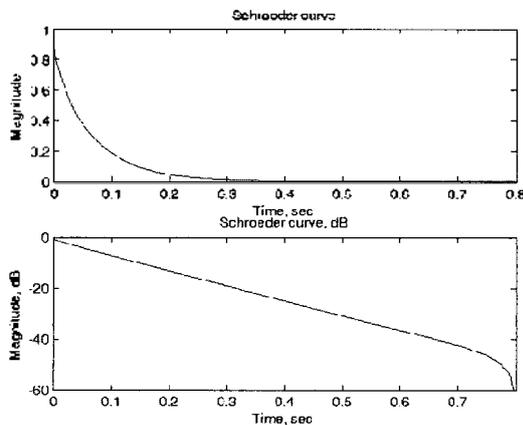


그림 9. 슈레더 곡선. 위:  $d(t_s)$ , 아래:  $L_s = 10 \log(d(t_s))$

Fig. 9. Schroeder curve, upper:  $d(t_s)$ , lower:  $L_s = 10 \log(d(t_s))$ .

$d(t_s)$ 를 위에 나타냈고 아랫 그림은 잔향 시간을 추정하기 위하여 식 (13)의 표현식을 나타냈다. 식 (13)의 잔향 감쇠 곡선에서 -5dB에서 -10dB 사이의 데이터를 선형 재귀법으로 추정한 결과를 그림 10에 나타냈다.

그림 3과 같은 상태에서 측정한 충격음으로부터 잔향 시간을 추정한 결과를 그림 11에 나타냈다. 가로 축의 번호는 가진점의 위치를 나타낸 것이고 세로축은 잔향 시간을 나타냈다. 가진점 1을 수평 방향으로 5번 가진하여 추정된 잔향 시간의 분포를 'o' 표식으로 나타냈다. 가진점 2의 경우에는 'x' 표식으로, 가진점 3의 경우에는 '+' 표식으로 그리고 가진점 4의 경우에는 '\*' 표식으로 잔향 시간 분포를 나타냈다. 상단부는 정상품의 경우를 나타낸다. 정상품과 불량품에 대하여 각각의 가진 위치에서 추정된 잔향 시간 분포에서 파선은 95% 신뢰도 구간을 나타냈고 실선은 68% 신뢰도 구간을 나타낸다. 하단부는 불량품의 경우를 나타냈다. 정상품과 불량품의 잔향

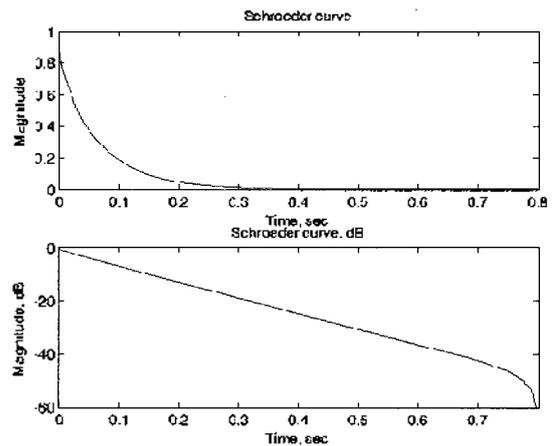


그림 10. 잔향시간 추정. 실선: 시험 데이터, 점선: 추정된 직선  
Fig. 10. Estimating reverberation time, solid line: test, dotted line: estimated line.

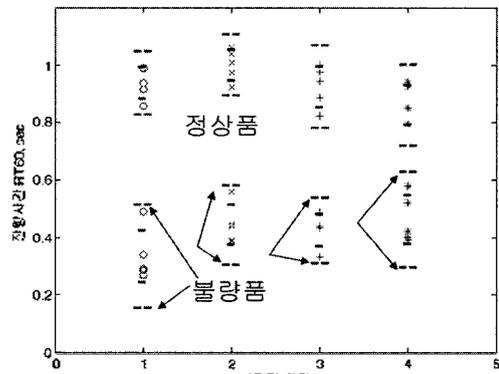


그림 11. 도자기 컵에 대한 가진 위치에 따른 잔향 시간 분포, 위: 정상품, 아래: 불량품, 흠집, 플라스틱 막대 가진  
Fig. 11. Reverberation time distribution for a ceramic cup, upper: normal cup, lower: cup with crack, plastic stick impact.

표 1. 정상품과 불량품의 잔향 시간의 95% 신뢰도 구간, 흡음재 위, 가진재: 플라스틱 막대, 거리 및 각도: 0.5m, 25°, 단위: 초  
 Table 1. 95% Confidence interval of reverberation time for a cup with and without crack, on absorption material, plastic stick impact, distance and angle between cup and microphone: 0.5m, 25°. unit: sec.

	가진점 1	가진점 2	가진점 3	가진점 4
정상품	0.938(0.828~1.049)	1.002(0.895~1.109)	0.926(0.782~1.070)	0.862(0.721~1.002)
불량품	0.335(0.154~0.516)	0.444(0.305~0.584)	0.425(0.312~0.538)	0.463(0.296~0.630)

시간이 확실하게 분리됨을 보였다. 가진점 2에서 가진점 4의 경우에도 정상품과 불량품의 잔향 시간 대역이 구분될 수 있음을 보였다. 표 1에는 정상품과 불량품의 잔향 시간의 95% 신뢰도 구간을 나타냈다. 가진점에 따라 잔향 시간이 약간씩 차이를 나타냈지만 잔향 시간 분석을 통하여 정상품과 불량품을 구분할 수 있음을 나타냈다.

#### 4.2. 충격 매질에 따른 정상품과 불량품의 잔향 시간 비교

앞 절에서는 플라스틱 막대로 도자기 컵을 가진하여 취득한 충격음을 분석하였다. 만일 가진 재료를 알루미늄 또는 나무 막대를 사용할 경우에는 도자기 컵에 작용하는 주파수 대역의 변화가 있을 것으로 예측되었다. 이 경우에도 잔향 시간 분석으로 제품의 이상 유무를 확인할 수 있는지를 시험하였다. 4.1절과 같이 테이블 위에 두께 5cm 되는 흡음재 판을 두고 그 위에 도자기 컵을 설치하였다. 그림 12는 알루미늄 막대로 도자기 컵을 가진하여 얻은 충격 응답을 사용하여 추정한 잔향 시간을 나타냈다. 플라스틱 막대로 가진한 결과와 마찬가지로 정상품과 불량품의 잔향 시간 차이가 분명하게 구분되었다. 정상품에 비하여 불량품의 경우에는 균열 부위의 에너지 소모로 인한 잔향 시간 감소가 있음을 알 수 있다. 표 2에 알루미늄 막대 가진에 대한 잔향 시간에 대한 평

균값과 95% 신뢰도 구간을 나타냈다. 나무 막대를 이용하여 가진한 결과를 그림 13에 나타냈다. 이때에도 불량품의 경우에는 정상품에 비하여 짧은 잔향 시간을 나타내서 정상품과 쉽게 구분할 수 있음을 보였다. 표 3에 나무 막대 가진에 대한 잔향 시간에 대한 평균값과 95% 신뢰도 구간을 나타냈다. 그림 11에서 그림 13의 결과를 종합하면 흡음재 위에 도자기를 설치한 경우에 4군데 가진 위치를 플라스틱, 알루미늄, 나무 막대를 가지고 충격을 주었을 때에 측정된 충격음을 식(13)을 이용하여 구한 잔향 시간을 이용하면 도자기 컵의 정상과 불량 상태를 충분히 구분할 수 있음을 알 수 있었다. 다음 절에서는 도자기 컵 하단의 경계 조건이 다를 때에도 잔향 시간 추정 결과로 도자기 컵의 불량 여부를 판단할 수 있는지를 기술하였다.

#### 4.3. 경계 조건에 따른 정상품과 불량품의 잔향 시간 비교

앞 절들에서는 정상품과 불량품을 같은 경계조건하에서 추정한 잔향 시간을 비교하여 불량여부를 판정하였다. 여기에서는 경계 조건이 다를 경우에 잔향 시간의 변화를 검토하였다. 테이블에 흡음재가 있는 경우와 없는 경우에 플라스틱 막대로 정상품 도자기 컵을 가진하였을 경우를 비교하였다. 그림 14에 결과를 나타냈다.

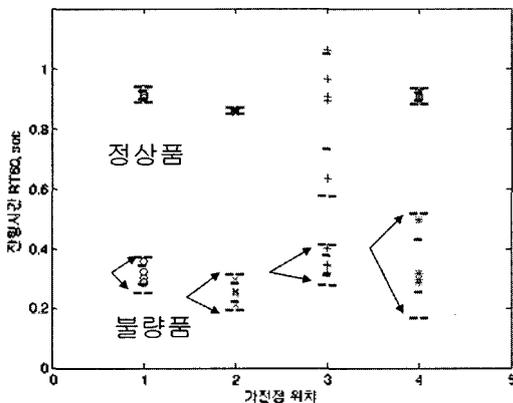


그림 12. 도자기 컵에 대한 가진 위치에 따른 잔향 시간 분포, 위: 정상품, 아래: 불량품, 흡음재, 알루미늄 막대 가진  
 Fig. 12. Reverberation time distribution for a ceramic cup, upper: normal cup, lower: cup with crack, aluminum stick impactul.

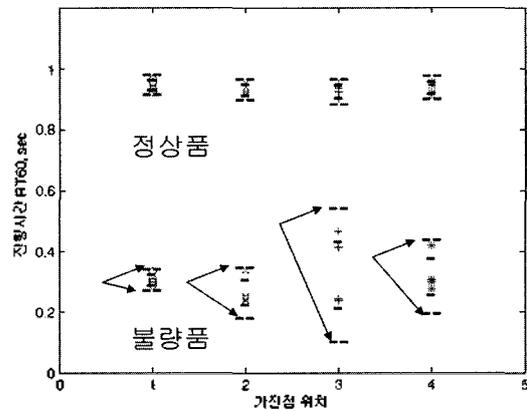


그림 13. 도자기 컵에 대한 가진 위치에 따른 잔향 시간 분포, 위: 정상품, 아래: 불량품, 흡음재, 나무 막대 가진  
 Fig. 13. Reverberation time distribution for a ceramic cup, upper: normal cup, lower: cup with crack, timber stick impact.

표 2. 정상품과 불량품의 잔향 시간의 95% 신뢰도 구간, 흡음재 위, 가진재: 알루미늄 막대, 거리 및 각도: 0.5m, 25°, 단위: 초  
 Table 2. 95% Confidence interval of reverberation time for a cup with and without crack, on absorption material, aluminum stick impact, distance and angle between cup and microphone: 0.5m, 25°, unit: sec.

	가진점 1	가진점 2	가진점 3	가진점 4
정상품	0.915(0.889~0.941)	0.861(0.851~0.871)	0.892(0.576~1.208)	0.909(0.883~0.935)
불량품	0.312(0.252~0.372)	0.254(0.195~0.313)	0.346(0.279~0.413)	0.344(0.168~0.519)

표 3. 정상품과 불량품의 잔향 시간의 95% 신뢰도 구간, 흡음재 위, 가진재: 나무 막대, 거리 및 각도: 0.5m, 25°, 단위: 초  
 Table 3. 95% Confidence interval of reverberation time for a cup with and without crack, on absorption material, timber stick impact, distance and angle between cup and microphone: 0.5m, 25°, unit: sec.

	가진점 1	가진점 2	가진점 3	가진점 4
정상품	0.946(0.914~0.978)	0.930(0.897~0.964)	0.923(0.882~0.964)	0.938(0.901~0.975)
불량품	0.305(0.270~0.341)	0.264(0.181~0.346)	0.321(0.102~0.540)	0.315(0.195~0.435)

흡음재가 없이 테이블 위에 올려놓은 도자기에서의 충격 음은 더욱 빨리 감쇠하는 것을 보여주었다. 즉, 충격 에너지가 도자기에서 테이블로 전달 되었음을 의미한다.

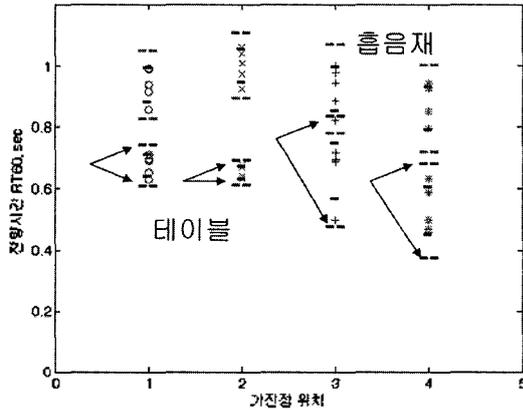


그림 14. 도자기 컵에 대한 가진 위치에 따른 잔향 시간 분포. 위: 흡음재 위, 아래: 흡음재 없음, 플라스틱 막대 가진

Fig. 14. Reverberation time distribution for a ceramic cup according to exciting points, upper: with absorption material, lower: without absorption material, plastic stick impact.

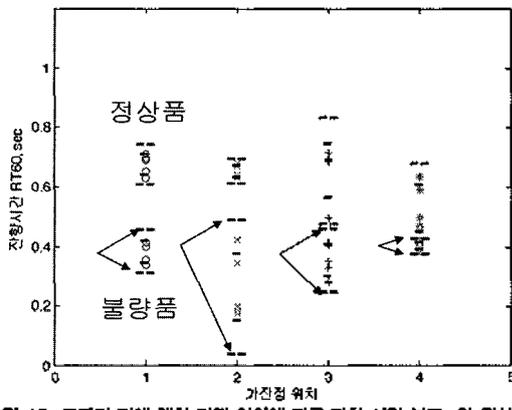


그림 15. 도자기 컵에 대한 가진 위치에 따른 잔향 시간 분포. 위: 정상품, 아래: 불량품, 흡음재 없는 테이블, 플라스틱 막대 가진  
 Fig. 15. Reverberation time distribution for a ceramic cup according to exciting points, upper: normal cup, lower: cup with crack, plastic stick impact, without absorption material.

따라서, 경계 조건이 바뀔 때에는 주어진 경계 조건하에서 정상품의 잔향 시간 범위를 다시 측정하여야 하며 대 상 컵들도 같은 조건에서 시험하여야 한다.

그림 15는 흡음재가 없는 테이블 위에 도자기 컵을 놓고 가진한 경우에 정상품과 불량품의 잔향 시간을 비교 하였다. 흡음재가 있는 경우인 4.1절에서와 같이 정상품과 불량품의 차이를 구분할 수 있음을 보였다. 다만, 흡음재가 없는 경우가 있는 경우보다 전체적으로 잔향시간이 짧게 나타났다. 가진점 4의 경우에는 정상품의 95% 신뢰도 하한값이 불량품의 95% 신뢰도 상한값에 근접함을 나타냈다. 따라서, 흡음재가 있는 상태에서 시험하는 것이 정상품과 불량품을 판정하기가 용이함을 나타냈다.

#### 4.4. 수음점 거리에 따른 잔향 시간 차이

도자기 컵과 수음점까지의 거리를 0.5m 에서 1m로 변경하였을 경우에 도자기 컵의 불량 여부를 판정하기 위한 시험을 하였다. 수음점 거리가 1m 일 경우에도 정상품과 불량품의 차이를 구별할 수 있음을 보였다 (그림 16).

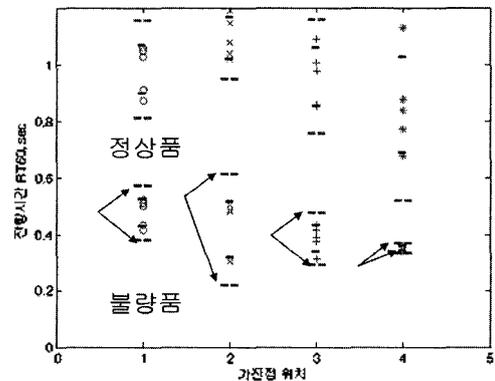


그림 16. 도자기 컵에 대한 가진 위치에 따른 잔향 시간 분포. 위: 정상품, 아래: 불량품, 흡음재, 플라스틱 막대 가진, 1m  
 Fig. 16. Reverberation time distribution for a ceramic cup according to exciting points, upper: normal cup, lower: cup with crack, plastic stick impact, on absorption material.

### 4.5. 주변 잡음에 의한 영향

정상적인 도자기 컵을 흡음재 없는 테이블 위에 두고 플라스틱 막대로 충격 시험을 수행하였다. 저잡음 환경은 평상적인 조용한 실내 환경을 유지한 상태로 하였고, 고잡음 환경은 실내에서 컴퓨터와 냉장고등을 가동시키고 주변의 소음이 평소보다 큰 경우에 측정된 결과를 나타낸다 (그림 17). 가진점 1과 가진점 2에서는 고잡음 환경에서 추정된 잔향 시간의 95% 신뢰도 구간의 크기가 거의 비슷함을 나타냈다. 그러나, 가진점 3과 가진점 4에서는 고잡음 환경에서 구한 잔향 시간의 95% 신뢰도 구간이 저잡음 환경의 95% 신뢰도 구간내에 포함됨을 알 수 있었다. 저잡음 환경의 95% 신뢰도 구간이 고잡음 환경의 경우보다는 넓음을 나타냈다.

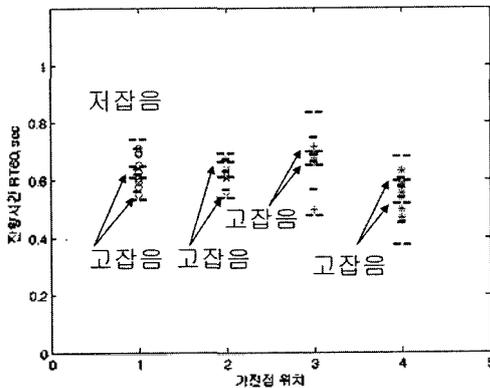


그림 17. 정상품 도자기 컵에 대한 가진 위치에 따른 잔향 시간 분포. 위: 저잡음, 아래: 고잡음, 흡음재없는 테이블, 플라스틱 막대 가진  
 Fig. 17. Reverberation time distribution for a normal ceramic cup according to exciting points, upper: low noise, lower: high noise, plastic stick impact, without absorption material.

### 4.6. 무향실에서 정상품과 불량품의 잔향 시간 비교

실내의 잔향 특성에 의해 도자기 컵에서 나오는 충격음 감쇠 영향을 파악하기 위하여 무향실에서 충격음 시험을 하였다. 무향실은 cutoff 주파수가 63Hz 이고, 배경 소음이 20dBa 이하였다. 가진점 1에 12번 충격을 주고 측정하여 분석한 잔향시간을 그림 18에 나타냈다. 95% 신뢰도 구간이 넓게 나타났으나 정상품과 불량품을 잔향 시간으로 구분할 수 있음을 보였다. 불량품의 잔향 시간이 정상품에 비하여 짧게 나타났다.

### 4.7. 도자기 컵에 대한 충격 시험 결과에 따른 불량 유무 판정

그림 8과 같은 흐름도를 갖는 개발한 프로그램을 사용하여 불량품을 판정하는 작업을 수행하였다. 그림 1과 같은 상태에서 측정된 정상품 3의 잔향 시간 분포를 'o'

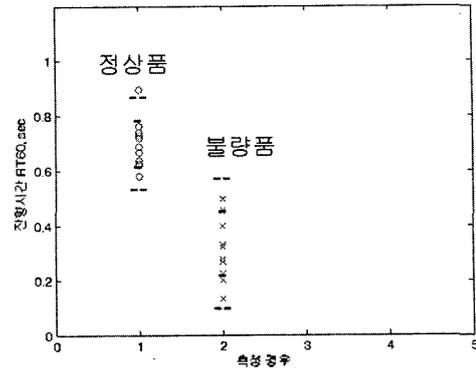


그림 18. 무향실에서 도자기 컵에 대한 가진 위치에 따른 잔향 시간 분포. 좌:정상품, 우: 불량품, 플라스틱 막대 가진  
 Fig. 18. Reverberation time distribution for a ceramic cup on anechoic chamber according to exciting points, upper: normal cup, lower: cup with crack, plastic stick impact, without absorption material.

으로 나타냈다 (그림 19). 정상품에 대해 가진점 2를 가진하여 측정된 충격음 데이터에서 추정된 잔향 시간은 68% 신뢰도 구간 내에 존재하여 정상품 판정을 받음을 나타냈다 (그림 19(a)). 불량품에 대하여 가진점 2를 가진하여 측정된 데이터에서 추정된 잔향 시간을 별표로 그림 19(b)에 나타냈다. 이 값이 95% 신뢰도 구간 밖에 있으므로 “불량품” 판정이 나타냄을 표시하고 있다.

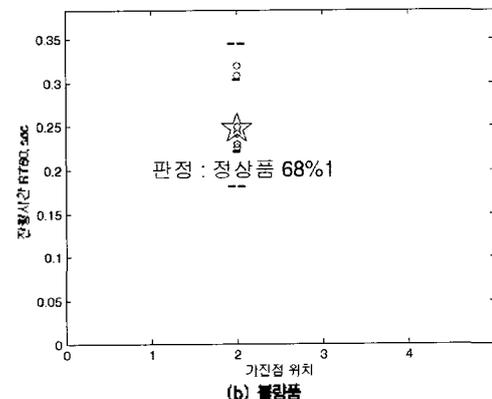
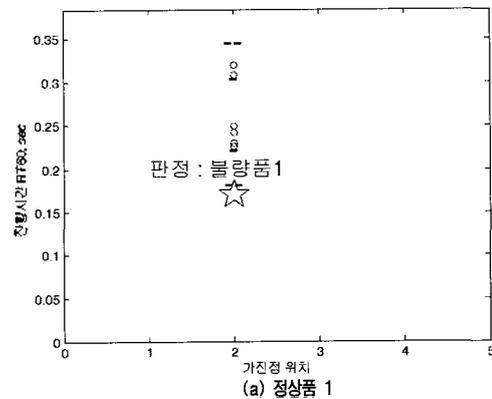


그림 19. 도자기 컵에 대한 잔향 시간 분석으로 결함 판정 예. 가진점 2, 흡음재, 플라스틱 막대 가진  
 Fig. 19. Examples of fault detection by reverberation time for ceramic cups, exciting point 2, plastic stick impact. (a) normal cup, (b) cup with crack.

### 4.8. 초강 자기 컵들에 대한 불량 유무 판정

본 논문에서 제안한 유사잔향 시간을 이용하여 크랙이 있는 불량품을 판정하는 유용성을 검증하였다. 한국 도자기의 협조를 받아 정상품과 불량품 초강 자기 컵을 각각 10개씩 구하였다. 불량품들에서 발생한 크랙은 주로 컵의 손잡이 안쪽에서 발생하였고 크랙의 길이는 28mm에서 80mm로 다양하게 나타났다. 각 샘플들에 대하여 가진점 1을 각각 7번씩 충격 시험을 하여 얻은 총 70개의 충격 응답 데이터들로 추출한 70개의 유사잔향 시간과 잔향 시간의 68% 신뢰도 구간 및 95% 신뢰도 구간을 그림 20(a)에 나타냈다. 불량품 샘플 중에서 가장 긴 잔향 시간을 나타내는 샘플에 대한 불량 여부를 판정한 결과를 그림 20(b)에 나타냈다. 따라서, 본 논문에서 제안한 방법으로 크랙이 발생한 초강 자기 불량품을 추정하여 효과적인 방법임을 나타냈다.

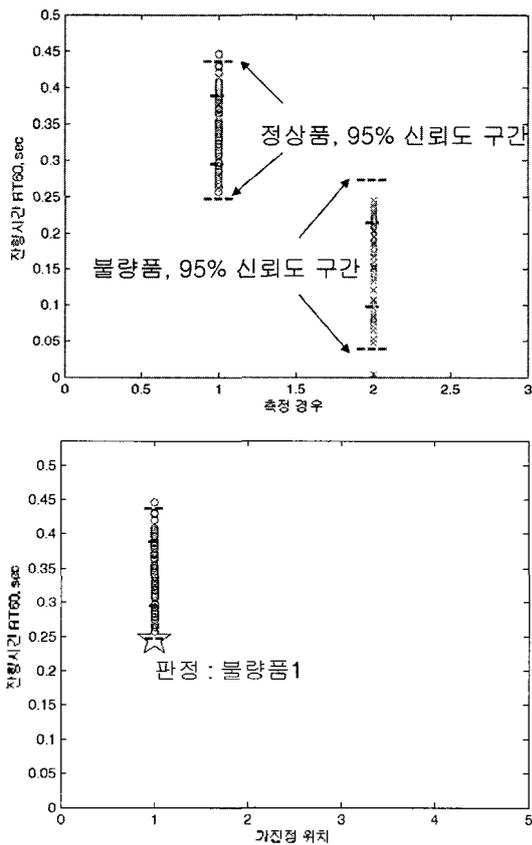


그림 20. 초강자기 도자기 컵에 대한 잔향 시간 분포와 결함 판정 예, 가진점 1, 흡음재, 플라스틱 막대 가진. (a) 정상품과 불량품의 잔향 시간 신뢰도 구간. (b) 결함 판정 결과

Fig. 20. Example for fault detection for super strong ceramic cups, exciting point 1, plastic stick impact, on absorbent material. (a) 95% and 68% confidential intervals for pseudo-reverberation time for normal 10 cups and 10 cracked cups. (b) fault detection result for the largest pseudo-reverberation time of sample #9.

## V. 결 론

본 논문에서는 산업 현장에서 불량품을 판별하기 위하여 경험적이며 감각적으로 사용하고 있는 충격음을 이용한 방법을 대신하여 추정된 잔향 시간을 이용하여 불량 여부를 판별하는 방법을 제안하였다. 개발된 방법은 도자기 컵의 불량 여부를 판단하는 데 사용되어 효과를 입증하였다. 개발된 방법은 간편한 방법으로 도자기 컵의 불량 유무를 파악하기 위하여 컵에 충격을 가하여 발생하는 충격음의 유사잔향 시간을 추정하였다. 임의의 4군데 위치를 정하여 가진 막대의 재질을 변경하는 경우, 경계 조건을 변경하는 경우, 수음점의 거리 변경, 주변 잡음의 크기 정도에 따라서 잔향 시간을 분석하였다. 그 결과로 잔향 시간 측정을 이용하면 이러한 여러 가지 경우에도 도자기 컵의 불량 유무를 판단하는 데 유용한 도구가 될 수 있음을 알 수 있었다. 충격 시험으로 추정된 유사잔향 시간을 이용하여 불량품을 추정하는 개발한 프로그램을 이용하면 여러 가지 제품의 결함을 실용적으로 쉽게 판정할 수가 있을 것으로 예상된다.

## 감사의 글

본 연구는 충북공고 이오준 선생님의 지원도움 요청으로 시작되었다. 결함 판정 전문가들은 도자기에 충격을 주었을 때에 방사하는 충격음을 들어보아 결함 여부를 알 수가 있다고 하는데 이러한 결과를 소리를 듣지 않고도 충격음 데이터를 이용하여 판정할 수가 없을까? 만일 방법이 있다면 이를 이용하여 산업 현장에서 제품의 고장 또는 불량품 진단을 위한 자동화 장치를 개발하면 유용하게 사용될 것이며 이를 체계화 시켰으면 좋겠다는 의견이 있었다. 이에 착안하여 본 연구를 착수하게 되었음을 밝힌다. 본 방법을 이용한 충격 발생 장치와 분석법은 2006년 제 52회 충북과학전람회에서 산업 및 에너지 분야에서 특상을 수상하였고 제 52회 전국과학전람회에 출품되어 심사 결과를 기다리고 있다. 본 논문에서 제안한 방법을 검증할 수 있도록 도자기 컵들을 제공하여 도움을 주신 한국 도자기 관계자 분들께 감사를 드립니다.

## 참고 문헌

1. ISO 3382:1997 Acoustics - Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other Acoustical parameters, 1997
2. M. R. Schroeder, "New method of measuring reverberation time," J. Acoust. Soc. Am. 37, 409-412, 1965
3. Ning Xiang, "Evaluation of reverberation times using a nonlinear regression approach," J. Acoust. Soc. Am. 98 (4), 2112-2121, 1995
4. L. Tronchin, A. Farina, "Acoustics of the former teatro "LA FENICE" in Venice," J. Audio Eng. Soc., 45 (12), 1051-1062, 1997
5. J. D. Irwin, E. R. Graf, *Industrial noise and vibration control*, (Prentice Hall, 1979)
6. 안상태, 김양한, "잔향의 객관적 평가량에 근거한 5자유도 실내 잔향 모델," 한국음향학회지 19, 48-53, 2000
7. 이희원, "임펄스응답을 이용한 실내음향 측정 시스템," 한국음향학회지 18, 63-66, 1999
8. Adobe Audition 1.5 User Guide, *Adobe System Incorporated*, 2004
9. J.S.Bendat and A.G.Piersol, *Random Data*, 2nd edition, (Wiley, 1991)

---

## 저자 약력

---

### • 박 석 태 (Seok-Tae Park)

한국음향학회지 제24권 3E호 참조