

평과리의 음향특성 분석 및 음량저감에 관한 연구

이 동 식*, 두 세 진, 성 광 모
 서울대학교 공과대학 전자공학과

Analysis of Acoustical Characteristics of Kwaenggwari-Korean Traditional Musical Instrument and Reduction of Its Sound Intensity

Dongsik Yi, Sejin Doo, Koeng-mo Sung
 Dept. of Electronics Eng., Seoul Nat'l Univ.

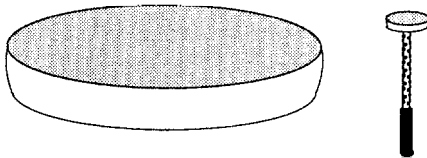
I 서론

평과리는 쇠 또는 강대기라고도 하는데 중요제례악과 농악(農樂), 무속(巫俗)에 주로 쓰인다[1]. 평과리는 중앙부가 곡면판 구조로서 연주시 비선형 영역에서 많이 사용되는데, 중국공이나 우리나라의 장에서와 같이 진폭이 커짐에 따라 고유진동수가 내려가는 소프트닝(softening) 등 비선형에 따른 여러가지 재미있는 현상을 보인다. 이러한 평과리는 주물이 아닌 열간단조법으로 여러명이 메질(망치질)을 해야 하는 전통적인 방짜법을 이용하여 만들어 오직 구전과 경험에 의지하고 있다. 우리 고유의 악기에 대한 창조적인 계승을 위해 이러한 과학적이고 체계적인 연구가 요구되고 있다. 한편 야외공간에서 연주되어 오던 평과리가 시대의 변화에 따라 실내공간에서도 연주를 하게 되었는데 이 경우 음량이 과대하게 커서 청중들에게 거부감을 야기하기도 한다.

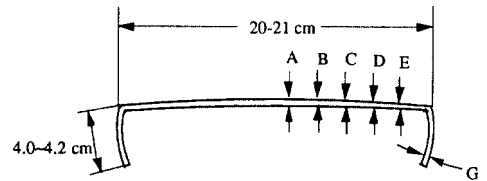
따라서 본 연구에서는 우리의 대표적 타악기이며 전통적인 방짜방법에 의해 제작되는 평과리에 대해 배음구조, 파형, 비선형 현상, 고유모드의 형상, 그리고 맥놀이 등에 관련된 음향특성을 조사하였다. 또한 전통 방짜기법으로 제작된 평과리를 그대로 유지시키고 약간의 후처리와 체의 변형만을 통하여 평과리의 고유 음색을 크게 변형시키지 않으면서 음량만을 줄일 수 있는 방법을 모색해 보았다.

II 평과리의 구조

그림 II-1(a)는 평과리의 외관과 체이며 (b)는 단면도이다. 원판은 평면이 아닌 만곡모양의 곡면판이며 중앙부에서 가장자리로 갈수록 두께가 얇아진다.



(a) 평과리의 외관과 평과리체



(b) 평과리의 단면도

그림 II-1. 평과리의 외관과 단면도

표 II-1은 실험에 사용된 여러 평과리의 입판의 두께를 캘리퍼스를 이용하여 그림 II-1의 (b)에 표시된 여섯 위치에서 구한 평균값이다 (각 점 A B C D E는 중심에서부터 각각 2cm씩 떨어져 있다).

표 II-1. 실험에 사용된 평과리의 두께

단위: mm

평과리 번호	측정지점					
	A	B	C	D	E	G
1	1.2	1.2	0.8	0.5	1.0	0.9
2	1.0	1.0	0.9	0.9	0.8	1.0
3	1.2	1.2	1.0	0.9	0.9	0.9
4	1.6	1.4	1.3	1.0	1.0	1.1

III. 음향특성 분석

반사음이 없는 평과리 자체의 직접음만을 채취하기 위해 국립공업시험원 무향실에서 16bit 디지털 방식인 Denon의 DAT DTR-100P에 녹음하였다. 녹음한 테이프를 재생시켜 DSP Sonagraph KAY5500와 Analogic사의 DATA6000A를 이용하여 분석하였다.

그림 III-1은 나무채로 2번 평과리의 중앙부를 강하게 친 경우의 파형과 스펙트로그램이다. 파형은 초기 타격시 진폭이 최대가 되었다가 거의 지수적으로 감쇠한다. (b)의 스펙트로그램을 보면 초기의 쇠와 나무채가 강하게 만나

면서 잡음성 소리가 나게 되어 어떻게 들으면 매우 시끄러운 느낌을 받을 수도 있다. 이렇게 강하게 타격하는 경우 여러 공진모드로 가진되어 매우 풍부한 스펙트럼을 얻을 수 있다. 타격 직후의 이렇게 풍부한 스펙트럼은 모드마다 각각의 감쇠율을 가지고 감쇠하여 대체로 시간이 지남에 따라 낮은 부분음들이 우세하게 된다.

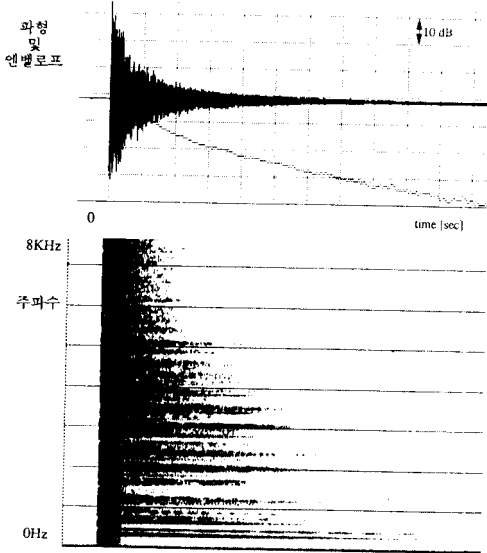


그림 III-1. 쟁과리의 파형 및 스펙트로그램

총 4개의 쟁과리에 대해 고유진동수를 측정하여 각 부분음들의 진동수를 기본음 진동수로 나눈 비(ratio)를 구하고 정규화하여 각 쟁과리에 대한 진동수의 비율 그림 III-2에 나타내었다. 쟁과리의 기본진동수는 치수와 형상에 따라 결정되므로 일률적으로 말할 수는 없으나 대략 300Hz 근방의 것이 많이 제작되는 것으로 보이며 각 쟁과리가 모두 독특하게 다른 음색을 가짐을 볼 수 있다.

마지막으로 언급할 것은 645Hz에 해당하는 성분인데 이 성분은 고유의 진동모드가 아니라 기본 진동수 322Hz의 비선형에 의해 발생된 배음이다.

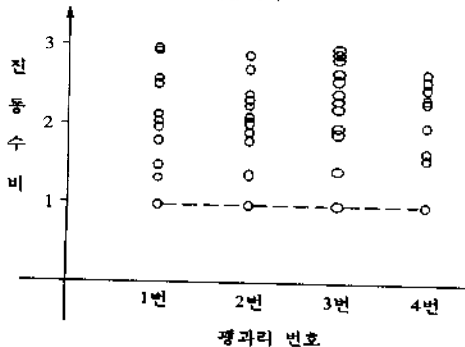


그림 III-2. 쟁과리 부분음의 기본진동수에 대한 비

IV. 진동 모드 해석

일정 구조를 가지는 물체는 경계조건이 주어질 때 진동할 수 있는 모드 형태(mode shape)가 결정되며 각 모드는 고유한 진동수로만 진동하게 된다. 이 장에서는 쟁과리의 고유진동 모드 형상에 대해서 살펴 보았다. 그림 IV-1은 III장에서 구한 고유진동수 중 하나를 파형합성기 DATA 2020에서 발생시켜 쟁과리를 공진시킨 후 찾아낸 Chladni 패턴이다.

모우드 형태					
모우드명	(0,1)	(1,1)	(2,1)	(0,2)	(2)
진동수	322.5Hz (기본진동수)	447.51Hz 449.5Hz	622.8Hz	658.2Hz	757.51Hz
기본진동수에 대한 비	1	1.34 1.35	1.93	2.04	2.34

그림 IV-1. 쟁과리의 여러 진동 모드

그림에서 굵은 선은 쟁과리의 가장자리 어께를 나타내며 실선은 진동하지 않는 부위, 즉 파절선(nodal line) 혹은 파절원(nodal circle)을 나타낸다. 괄호안의 첫숫자는 파절선의 수를 나타내고 두번째 숫자는 파절원의 수를 나타낸다. 예를 들어 (0, 1) 모드는 파절선이 없고 한개의 파절원만을 갖는 것을 의미한다. 그림의 +, - 진동의 위상(phase)을 나타낸다.

쟁과리는 치는 부위에 따라 음색이 다른 것을 들 수 있는데 이것은 치는 위치에 따라 진동이 용이한 모드들이 달라지기 때문이다. 일반적으로 파절선(파절원)을 가격하면 해당 모드는 가진이 되지 않고 파절선(파절원)들간의 사이 부분인 배를 가격하면 해당 모드가 크게 진동하게 된다. 예를 들어 쟁과리의 한 가운데를 치는 경우 (0, 1)모드와 (0, 2)모드는 파절선이 아닌 배부분이므로 크게 가진되어 322.5Hz와 658.2Hz 성분은 큰 음을 내게 되는 반면, (1, 1)모드와 (2, 0)모드와 같이 파절선이 쟁과리의 중앙을 지나가는 경우는 가진이 되지 않아 이들 모드에 해당하는 447.5Hz, 449.5Hz와 622.8Hz의 음은 거의 발생하지 않게 된다.

그림 IV-1에서 파절선이 쟁과리의 중앙을 지나가는 모드 들은 모드 형상은 같되 파절선의 각도는 서로 다른 2개의 모드를 갖는 것을 볼 수 있다. 파절선이 한개인 (1, 1) 모드는 그림에서 보는 바와 같이 서로 약 90°의 방향으로 서

로 다른 파절선을 갖는 2개의 모드가 존재하며, 이들의 주파수는 447.5Hz, 449.5Hz로서 인접하여 있어 이 둘이 모두 가진될 경우 2Hz의 맥놀이를 일으키게 된다. 2개의 파절선을 갖는 (2, 1)모드에서는 모드 형태는 같되 파절선이 서로 약 45°로 어긋난 3.6Hz의 맥놀이 진동수의 2개의 모드가 존재하리라고 생각됐지만 찾을 수 없었다. 이렇게 하나의 모드가 서로 다른 파절선을 갖는 2개의 모드로 분리되는 것은 팽과리가 완전한 대칭이 아니고 미소한 비대칭을 이루기 때문에 야기되는 현상으로서라, 비대칭이 있으면 이와 같이 2개의 분리된 모드로 맥놀이가 발생하고 파절선의 위치도 고정된다. 이와 같은 현상은 종의 진동에서도 마찬가지로 관찰되는 현상이다[3].

비대칭이 심하면 분리되는 모드들이 진동수차가 커져 맥놀이가 속도가 빨라지고 대칭이 유지될수록 맥놀이의 주기가 길어져 은은한 음색이 된다. 하지만 파절선이 팽과리의 중심을 지나는 이러한 모드에서의 맥놀이를 가지는 팽과리는 실제 연주 경우 워낙 잔가락을 치기 때문에 잘 들리지는 않는다.

V. 팽과리의 음량저감

V-1. 감쇠의 성질

진동의 현상은 운동에너지와 위치에너지를 순환적인 변환이다. 이와 함께 고려해야 할 것이 감쇠 메카니즘(damping mechanism)이다. 감쇠한 에너지가 방사에 의해 다른 계로 전달되거나 계내에서 소멸되어 차차로 에너지를 잃어 버리는 현상이다.

감쇠의 정도는 일반적으로 한 주기당 잃는 에너지와 최고 위치에너지를 비로써 구해진다. 손실계수(loss factor) η 는 식 (V-1)과 같이 정의한다. 식에서 V 는 최고 위치에너지, W 는 한 주기당 잃는 에너지이다. 보통 손실계수 η 는 선형의 진동에서는 진폭에 무관하나 주파수에는 크게 좌우된다.

$$\eta = \frac{W}{2\pi V} \quad (1)$$

감쇠의 원인은 대체로 내부에서의 손실과 외부로의 방사 에너지에 의한 손실로 생각할 수 있다. 내부에서의 손실은 고체감쇠, 이력감쇠(hysteresis damping), 구조감쇠 등에 의한 것으로 물질을 바꾸거나 테이프의 접착 등으로 손실을 변화시킬 수 있다. 외부에 의한 것도 방사하기에 적당한 물체와 연결(coupling)시켜 손실을 증가시킬 수 있다[4].

V-2. 음량저감의 방법

3dB대역폭을 이용한 팽과리의 손실계수 값은 4.6×10^{-4} 이다. 방파힘금이 금속이므로 매우 작은 값을 나타내고 있다. 또한 금속은 대체로 진동수에 대해 일정한 값의 손실계수를 가지므로 이것을 팽과리의 그것으로 생각할 수 있다. 따라서 팽과리의 음량을 줄이기 위해서는 지금의 작은 손실계수를 크게 해주어야 한다. 우선 감쇠물질을 가하여 음량을 줄이고자 한다.

보통의 감쇠물질은 진동수에 좌우되어 균일하게 감쇠물질에 가하면 팽과리의 소리는 기존의 것과는 달리 고음이 저음에 비해 많이 줄어들게 되어 음색이 답답하게 된다. 따라서 기존의 팽과리의 음색을 많이 바꾸지 않고 음량을 줄이기 위해서, 팽과리의 감쇠물질 처리와 함께 본 연구에서는 체의 질량을 감소시켜 저음의 가진을 작게 함으로써 음색을 원래의 것과 크게 다르지 않도록 하였다.

V-2-1. 팽과리체 변형의 효과

팽과리체의 변형은 2가지 효과를 가져온다. 첫째로 질량변화에 따른 음량의 변화와 둘째로 고음이 표준체에 비해 많이 발생하는 것이다. 종합하면, 가볍고 작은 체는 작은 음량이면서 고음 성분이 많은 음을 낸다.

본 연구에서는 팽과리체를 다음과 같은 크기로 제작하여 실험하였다. 팽과리의 표준 체의 직경을 d_0 , 두께 t_0 , 질량 m_0 라 할 때,

- 1) 직경 d_0 , 두께 t_0 , 질량 m_0 인 표준체 (1번째)
- 2) 직경 $(2/3)d_0$, 두께 $(2/3)t_0$, 질량 $(8/27)m_0$ 인 체 (2번째)
- 3) 직경 $(1/2)d_0$, 두께 $(1/2)t_0$, 질량 $(1/8)m_0$ 인 체 (3번째)
- 4) 직경 $(2/3)d_0$, 두께 t_0 , 질량 $(4/9)m_0$ 인 체 (4번째)

를 사용하여 실험하였다. 팽과리 표면에 체가 닿는 속도를 일정하게 하기 위하여 체의 자루 끝부분을 고리에 끼워 시게 추와 같이 90°만큼 자유낙하하도록 하였다. 치는 위치는 정가운데이었으며 체의 종류에 관계없이 같은 위치를 타격하도록 노력하였다. 팽과리로부터 20 cm 떨어진 위치에 마이크로폰을 위치시켜 음을 잡아 분석하였다.

체에 따라 어느 부분음이 어느 정도 크기가 변하는가를 알아보기 위해서 스펙트럼 차를 구하도록 하였다. 우선 각 스펙트럼의 피크값만을 추출하여 FFT window의 영향을 배제한 부분음들의 크기만을 데이터로 사용하였다. 그 다음, 측정하고자 하는 체의 부분음 크기로부터 표준체의 부분음들의 크기를 뺀다. 결과가 음수가 되면 측정하는 체의 부분음 크기가 표준체의 해당 부분음 크기보다 작아진 것이다. 그림 V-1 이 각 체의 경우 계산한 결과이다.

그림에서 + 표로 나타난 점들이 계산한 데이터인데 편차가 많으므로 본 연구에서는 least square 방법을 사용하여 1차 직선으로 근사화하였다. 질량이 가장 작은 3번 체가 음량이 가장 작은 것을 알 수 있는데, 여기서 중요한 것은 직선의 기울기이다. 3번 체는 질량이 가장 작은 것 외에 크기가 가장 작아 상대적으로 고음이 많이 발생하는 것을 볼 수 있다.

V-2-2. 감쇠물질 부착의 효과

체의 소형화에 의해서는 음량을 감소시키는 외에 고음이 우세하게 되므로 본 연구에서는 팽과리에 감쇠물질을 부착하여 이를 보완하고 음량을 더욱 감소시킬 수 있도록 하였다.

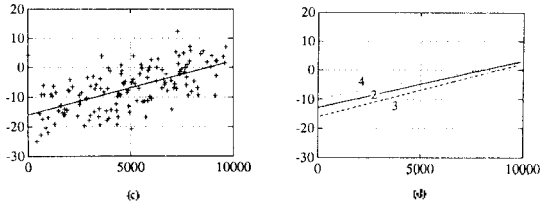
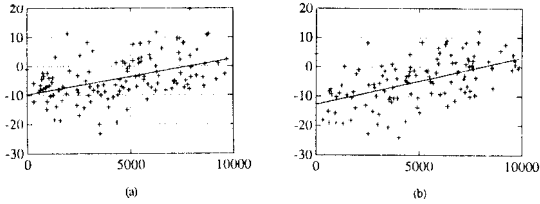


그림 V-1. 부관음의 상대적인 크기와 curve fitting 결과
 (a) 4번 차 (b) 2번 차 (c) 3번 차
 (d) 각 차의 비교(그림 안의 숫자는 차 번호)

평균과에 감쇠물질을 부착하면 고음일수록 한 주기당 잃는 에너지가 더욱 많아져 고음의 감쇠가 빨라지게 된다. 감쇠물질의 부착은 채의 소형화와는 반대효과를 나타내어 고음이 적은 음을 만들어낸다.

그림 V-2는 감쇠물질 부착의 여러가지 형태이다. 감쇠물질로는 테이프를 사용하였으며, 평균리 안쪽 면에 부착하였다. 그림 V-3은 감쇠물질을 부착한 상태에서 표준 채로 타격하여 얻은 스펙트럼과 감쇠물질을 부착하지 않은 상태의 음향 스펙트럼과의 차를 보인 것이다.

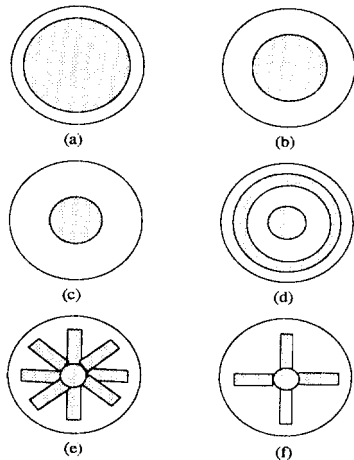


그림 V-2. 감쇠물질 부착의 여러 형태

그림에서 볼 수 있듯이 감쇠물질 부착은 음량을 감소시키는 것 외에 고음의 감쇠량을 더 크게 한다. 대략 감쇠물질 부착 면적에 비례하게 기울기가 결정되는 것을 볼 수 있다.

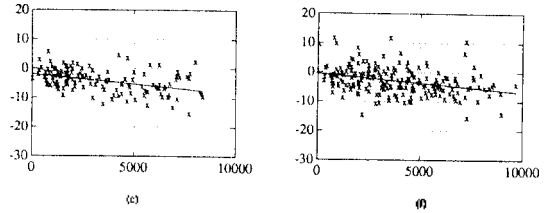
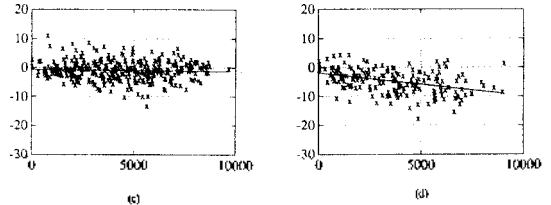
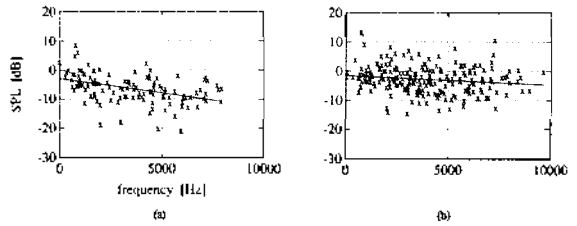


그림 V-3. 감쇠물질 부착 상태와 부착 이전과의 스펙트럼 차 (그림 V-2의 각 번호에 해당하는 것임.)

V-2-3. 감쇠물질 부착과 채의 변형의 조합

처리 이전과 이후의 음색이 크게 변하지 않았다고 느끼기 위해서는 모든 음역에 걸쳐 스펙트럼 형상의 변화가 적어야 한다. 처리 후의 스펙트럼으로부터 처리 이전의 스펙트럼을 뺀 결과가 zero의 기울기를 가지면 음색에 큰 변화가 없다고 보아도 좋을 것이다. 평균리 채의 변형에 의한 스펙트럼 차(그림 V-1)와 감쇠물질 처리에 의한 스펙트럼 차(그림 V-3)를 살펴 보아 이 둘을 조합했을 경우의 기울기가 zero에 가까운 것을 찾는 것이 음색 변화가 적고 음량만 감소한 결과를 찾아내는 것이 된다.

그림 V-1에서 2번 채를 사용한 경우 기울기는 10.57×10^{-4} 이며 그림 V-3에서 이와 비슷한 기울기이고 부호가 반대인 것을 찾으면 (d)번이 해당되며 그 기울기는 -7.91×10^{-4} 이다. 이 둘을 조합한 결과를 그려보면 그림 V-4를 얻는데 기울기가 평평한 것을 볼 수 있어 처리 이전과 음색에는 별 변화가 없는 것을 예측할 수 있다. 또한 전체적으로 음의 레벨이 10dB 가량 낮게 나타나는 것을 볼 수 있다.

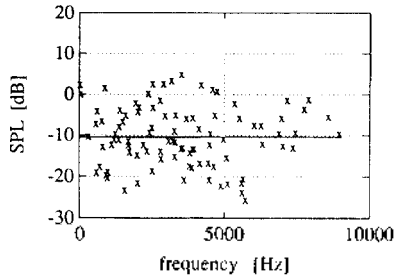


그림 V-4. 2번 채를 사용하고 그림 V-4의 (d) 번과 같은 감쇠물질 부착을 한 경우의 처리 이전과의 스펙트럼 차.

VI. 결론

본 연구에서는, 전통적인 방법대로 평과리를 만들어 온 무형 문화재를 비롯한 방짜 유기 장인들에 의뢰하여 제작한 평과리에 대하여 그 음향 및 진동특성에 대해 조사하였다.

보름 연주시 치는 것과 같이 평과리의 중앙부를 타격할 경우, 초기의 타격시 발생하는 소리는 매우 풍부한 스펙트럼을 가지고 고음이 상대적으로 빠르게 감쇠하여 점차로 낮은 부분음의 성분이 우세해진다. 진동 모드 해석으로 알 수 있게 된 사실은 치는 부위에 따라 발생하는 스펙트럼은 다르며, 특히 중앙부가 아닌 가장자리를 치는 경우 중앙부 타격시에 존재하지 않던 부분음들이 포함되고 이로 인해 맥놀이가 발생하는 것이다.

실내연주를 위해서는 평과리의 음량저감이 필요하여 본 연구에서는 음량저감을 행하였다. 우선 평과리의 안쪽면에 테이프 형태의 감쇠물질을 부착하고 채를 작게 제작하였다. 이 두가지로 음색변화가 적고 음량만이 10dB 감소한 평과리로 개선시킬 수 있게 되었다.

소위 물음질로 음향을 만들어내는 원리와 평과리의 소리가 형성되는 이론을 체계화하기 위해서는 평과리의 진동 중 비선형 진동현상에 대한 물리적, 수학적인 정확한 해석이 필요하다. 현재까지는 장인들의 경험과 귀에 의존하여 평과리를 제작하여 왔으나 평과리의 제작시 어느 부위를 어떻게 다듬음으로써 원하는 소리를 만들어 낼 것인가에 대한 객관적인 지침을 마련하기 위해서는 더욱 깊이 있고 계속적인 연구가 필요하다고 하겠다.

참고문헌

- [1] 장사훈, **한국 악기 대관**, 서울대학교 출판부, 1986.
- [2] 홍진선, "미소한 비대칭이 부가된 축대칭 설의 진동 및 음향에 관한 연구", 공학박사학위 논문, 서울대학교 기계설계학과, 1989.
- [3] 두세진, 성경모, "보신각 신종의 음향분석에 관한 연구", 한국음향학회 학술발표회 논문집, 1985.

- [4] Crandal, S.H., "The Role of Damping", *J. Sound Vib.*, 11(1), 1970, pp3.-18.
- [5] Nashif, A.D., et al., *Vibration Damping*, John Wiley & Sons, 1985.