한국소음진동공학회 2013년 추계학술대회논문집, pp. 708~712

한국 범종의 음질 평가 방법 고찰
Sound Quality Evaluation Method of Korean Bell

성원찬* · 이형래** · 강연준†
Weonchan Sung, HyeongRae Lee, Yeonjune Kang

Key Words : Psychoacoustics(심리음향학), Sound Quality(음질), Korean Bell(한국 범종), Striking Sound(타격음), Subjective Evaluation(주관적 평가), 회귀 분석(Regression Analysis)

ABSTRACT

The appearance of the Korean bell is exceptional comparing to that of other bells. The sound of the Korean bell is also distinguishable because of its remarkable appearance. The sound of the Korean bell is composed of striking sound and residue sound. This study focuses mainly on the striking sound of the Korean bell. The primary purpose of this study is to suggest a proper sound quality evaluation method for Korean bell. To implement this study, examine the formerly established methods which are method using rating method and method using generally used Psychoacoustics metrics. Also, subjective Sound Quality evaluation was conducted to compare the results of method using rating method and the method using psychoacoustics metrics.

1. 서 론

예전에는 종은 시간을 알려주거나 국가의 중요한 행사에서 여러 가지의 용도로 사용되었으나 이후로는 불교예술의 대표적인 예술 작품중의 하나로 발전되었다[1]. 여러 나라의 종들 가운데 한국의 종은 외형, 문양, 종소리 등의 예술성이 세계적으로 가장 우수하다는 평가를 받고 있다. 한국 종은 그 우수한 외형과 문양에 따라 종소리 또한 다른 종소리에 비해 깊고 오묘하다. 이러한 한국 종의 진동특성 및 음향특성에 대해서는 많은 연구가 진행되어왔지만 사람들이 실제로 느끼는 심리음향학적 특성에 관한 연구는 진행이 미비한 상태이다. 이병호가[2] 종성평가법을 통해 한국범종의 음질평가를 진행하였지만 이 또한 한국 종만의 음질을 평가는 방법으로는 부족하다. 따라서, 본 연구에서는 한국 종의 음질을 평가하는 여러 가지 방법을 검토하고 합리적인 방법을 제안하였다.

† 교신저자; 정회원, 서울대학교 기계항공공학부
E-mail : yeonjune@snu.ac.kr
Tel : (02)880-1691, Fax : (02)888-5950
* 정회원, 서울대학교 대학원 기계항공공학부
** 정회원, 서울대학교 대학원 기계항공공학부

한국 종의 음질 평가 방법을 정립하기 위해서는 한국 종의 특성을 잘 파악하는 것이 중요하다. 한국 종의 소리는 타격음(Striking Sound)과 여음으로 나눌 수 있다. 타격시 처음 듣는 소리로 종체의 모든 고유진동모드가 가진되어 소리로 방사되는 타격 순간부터 고차음이 사라질 때까지의 소리를 타격음이라고 한다. 고차음이 사라지고 기본 성분인 최저차음만 남아서 맥놀이를 이루면서 길게 이어지는 소리를 여음이라고 한다[1]. 본 연구에서는 타격음을 기준으로 한국 종의 음질 평가 방법을 제시한다.

타격 직후 종소리의 아름다움은 저주파 성분들에 의한 종소리의 장엄함과 저주파 성분들과 고차 성분들이 얼마나 조화롭게 어울리는가에 따라서 결정된다[3]. 종성평가법을 통한 음질 평가 방법은 서양의 악기 조율법과 유사한 방법으로 여러 주파수 성분들이 얼마나 조화롭게 어울리는지는 평가할 수 있지만 한국 종의 장엄함을 표현할 수는 없다. 9 가지 종의 주관적 음질 평가(Subjective Evaluation)를 통해 평가한 순위와 종성평가법을 통한 순위의 비교를 통해 종성평가법의 적합성을 평가했다. 또한, 한국 종의 소리를 Zwicker 가 제시한 음질 인자와 주관적 음질 평가의 회귀 분석(Regression Analysis)을 통해 나타낼 수 있는지 평가했다[4].

2. 주관적 음질 평가

2.1 음원 정보

7가지의 한국 종과 2가지의 서양 종의 음원을 HEAD acoustics사의 Artemis 프로그램을 이용하여 3000 Hz 저역 필터(Low-pass Filter)를 적용시켜 주관적 음질 평가를 진행했다. 또한, 음원은 HEAD acoustics사의 PEQ V와 고성능 헤드폰을 사용하여 Fig. 1과 같이 무향실에서 재생(play-back)하였다.

2.2 평가자 정보

주관적 음질 평가는 충분히 훈련된 차량 NVH 전공 대학원생 11명과 기계공학 전공 대학원생 4명과 비전공자 5명 총 20명을 대상으로 실시하였다. 평가자의 평균 나이는 약 27세로 청력 손실이 없는 25세에서 35세 사이의 남성이다.

2.3 주관적 음질 평가 방법

평가 방법은 소리를 듣고 점수를 0점에서 7점 사이로 부여하는 레이팅 척도법을 사용하였다. 9가지의 종소리의 타격음만 주관적 평가에 사용했다. 종소리가 익숙하지 않을 경우를 대비하여 평가 전에 여러 가지 종소리를 들려주며 타격음과 여음에 대해 충분히 설명 한 후 실험을 진행하였다. 9가지 종소리를 무제한으로 들을 수 있으며 평가 시간 또한 제한하지 않았다. 평가자들에게 타격음이 가장 좋은 종소리에 7점, 가장 나쁜 종소리에 0점을 부여하도록 사전 교육을 통해 알려주어 음질 평가 점수를 따로 보정하지 않도록 했다. 또한, 평가자에게 종소리를 판단하는 기준을 조사해서 어떤 종의 소리를 사람들이 좋아하고 싫어하는지 판단했다. 비전문가가 포함되어 있는 것을 감안하여 집단의 평균과의 상관관계가 너무 낮은 평가자의 결과는 배제했다.

Fig. 1 Subjective evaluation

Table 1 Result of subjective evaluation

Bell	Score	Ranking
Bell 1	2.70	7
Bell 2	4.13	3
Bell 3	2.80	6
Bell 4	5.55	2
Bell 5	3.73	4
Bell 6	6.27	1
Bell 7	3.08	5
Bell 8	1.87	9
Bell 9	2.39	8

Table 2 Comments of juror

Good	Bad
Magnificent sound Mysterious sound Low frequency sound Profound sound	Dissonance sound Sharp sound High frequency sound Too loud sound Raspy sound

Table 3 The consonance and dissonance series

Rate	Score
1:1, 2:1	11
3:2	9.6
5:3	8
5:4	7.4
4:3	7.3
8:5	6.5
6:5	5.5
9:5	3.6
9:8	2.5
15:8	2.2
36:25	4.3
27:25	1.2

2.4 주관적 음질 평가 결과

Table 1에 주관적 음질 평가 결과를 점수와 순위로 표시하였고, Table 2에 평가자들의 종소리 평가 기준을 좋은 소리와 나쁜 소리로 나타냈다. 평가자들은 웅장하거나 신비한 소리, 그리고 낮은 주파수의 종소리를 선호하였고 높은 주파수의 소리나 탁하고 찌르는 듯한 소리를 싫어했다. 7가지의 한국종과 2가지의 서양종 중에서 서양종이 가장 낮은 주관적 음질 평가 점수를 받았다.

Table 4 Result of rating method

Bell	Score	Ranking
Bell 1	3.51	5
Bell 2	3.21	8
Bell 3	3.72	2
Bell 4	3.25	6
Bell 5	3.24	7
Bell 6	3.53	3
Bell 7	2.71	9
Bell 8	4.19	1
Bell 9	3.51	4

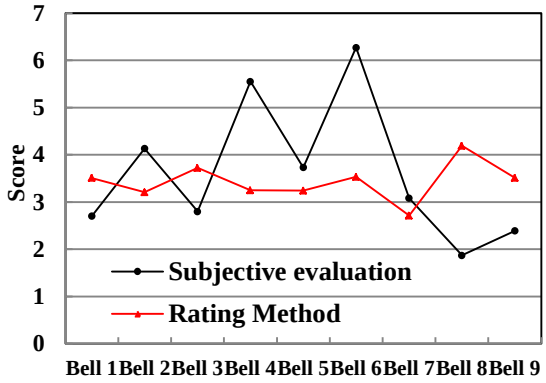

Fig. 2 Result of subject evaluation and rating method

3. 종성평가법

종성평가법은 주파수의 조화로움과 강도(Intensity)를 수식화하여 점수로 환산하는 방법으로 종소리의 점수를 부여하는데 사용하였다. 주파수의 조화로움을 평가하는 방법으로 1차 고유진동수와 그 외에 고유진동수의 비율에 따라 1918년 Malmberg, G.F.가 Table 4와 같이 평점화하였다[5]. 또한, 화음도평점에 강도를 부여하면 식 (1)과 같이 표현할 수 있다[2].

$$m = \frac{\sum_i m_i p_i}{\sum_i p_i} \qquad (1)$$

그리고 이에 따른 종성평가점수가 Table 4에 표시했다. Table 3에 종성평가점수는 원래 11점을 기준으로 구했기 때문에 주관적인 음질 평가 점수와의 비교를 위해서 7점 기준으로 환산해서 제시하였다. 주관적 음질 평가 점수와 종성평가점수의 상관관계가 32.8%로 매우 낮아 상관관계가 없다고 평가할 수 있다(Fig. 2). 종성평가법과 주관적 평가의 상관

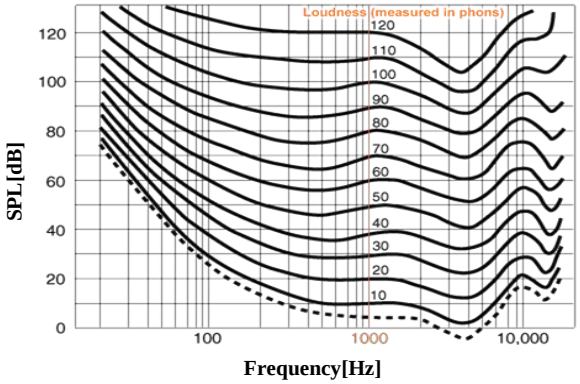

Fig. 3 Equal loudness contour

관계가 낮은 원인이 화음도평점 자체의 오류일 수도 있지만 그보다 종성평가식에 강도(intensity)를 사용하는 것이 더 큰 오류이다. 사람의 귀는 Fig. 3과 같이 등가 라우드니스 곡선을 따라 같은 음압이라도 주파수에 따라 부여되는 비중이 다르다. 즉, 같은 음압에서도 주파수에 따라서 크기를 다르게 느낄 수 있다. 따라서 종성평가식에서 단순히 강도를 측정하여 음압으로 환산하는 것은 심리음향학적인 관점에서 오류를 수반하고 있다고 평가할 수 있다.

4. 음질 인자를 이용한 회귀식 구성

물리적으로 종에서 나는 소리와 사람이 귀로 듣는 종소리는 차이가 있다. 달팽이관에서는 외이, 중이를 통하여 들어온 소리를 주파수에 따라 나누어진 영역에서 분석한다. 따라서 단순히 기계로 측정한 소리와는 다소 차이가 있다. 음질은 사람이 듣는 소리로 평가하기 때문에 물리적인 소리를 사람이 듣는 소리로 변환시켜 줄 수 있는 음질 인자가 필요하다. 대표적인 음질 인자는 소리의 크기를 표현하는 라우드니스(Loudness), 소리의 날카로움을 표현하는 샤프니스(Sharpness), 소리의 떨림을 나타내는 요동강도(Fluctuation strength), 소리의 거칠기를 나타내는 러프니스(Roughness) 등이 있다. 주관적 음질 평가의 평가자의 평가 기준(Table 2)을 바탕으로 여러 가지 음질 인자 가운데 종소리를 표현하기에 적합한 인자들을 선정했다. 그리고 Head acoustics사의 Artemis 프로그램을 이용해서 각 종의 음질 인자를 객관적인 물리량으로 나타냈다. Table 5와 Table 6에 음질 인자의 객관적 물리량을 요약하였다.

Table 5 Peak value of Sound Quality metrics

Bell	Loudness [sone]	Sharpness [acum]	Roughness [asper]	Fluctuation Strength [vacil]
Bell 1	43.77	1.89	3.49	0.200
Bell 2	38.49	1.61	3.86	0.238
Bell 3	50.17	2.25	3.43	0.354
Bell 4	41.37	1.95	3.58	0.288
Bell 5	32.95	1.85	2.94	0.286
Bell 6	41.22	1.66	3.67	0.322
Bell 7	51.44	2.38	4.06	0.234
Bell 8	87.32	3.90	2.88	0.287
Bell 9	76.38	4.09	2.26	0.158

Table 6 Average value of Sound Quality metrics

Bell	Loudness [sone]	Sharpness [acum]	Roughness [asper]	Fluctuation Strength [vacil]
Bell 1	38.9	1.58	2.89	0.073
Bell 2	32.6	1.29	3.26	0.112
Bell 3	27.3	1.51	1.99	0.162
Bell 4	26.5	1.38	2.79	0.124
Bell 5	19.6	1.19	1.72	0.151
Bell 6	26.9	1.27	2.69	0.155
Bell 7	31.6	1.59	2.63	0.111
Bell 8	63	2.96	1.71	0.135
Bell 9	62.7	3.38	1.87	0.034

주관적 음질 평가에 의해서 구해진 점수와 음질 인자의 객관적인 물리량으로 범용 통계 프로그램 Minitab의 Stepwise regression analysis를 이용하여 회귀식을 구성할 수 있다. 그러나 모든 음질 인자를 회귀식 구성에 사용하기 앞서 음질 평가 점수와의 상관관계가 낮은 인자는 제거하고 Stepwise regression analysis를 실행했다. Table 7에 음질 평가 점수와 음질 인자의 상관관계를 요약하였다. 상관관계가 매우 낮은 피크 요동강도와 평균 요동강도를 제거한 후 회귀식을 식 (2)와 같이 구성했다.

$$SQI = -0.9248 + 1.9 \times Ave.Roughness \\ ,R^2(adj) = 48.36 \\ ,p - value = 0.023 \qquad (2)$$

SQI는 음질평가지수를 나타내고, R^2는 회귀식의 적합성을 나타낸다. 또한 p-value는 귀무가설이 참일 경우 구한 검정통계량보다 더 극단적인 결과가 나

Table 7 Correlation between value of subjective evaluation and value of sound quality metric

Metric	Correlation [%]
Peak Loudness	67.8
Peak Sharpness	67.1
Peak Roughness	46.7
Peak Fluctuation Strength	9.2
Ave. Loudness	49.2
Ave. Sharpness	59.4
Ave. Roughness	74.0
Ave. Fluctuation Strength	0.04

올 수 있는 확률을 나타내며 통상적으로 0.05보다 작으면 회귀식을 사용하는데 무리가 없다. 구성된 회귀식은 분석해 보면 평균 러프니스가 클수록 종의 음질이 좋다고 평가할 수 있지만 R^2값이 너무 낮아 식이 적합하지 않다. 게다가 종의 소리를 러프니스 값만 갖고 평가하는 것은 옳지 않다. 따라서 음질 지수만을 이용하여 종의 음질을 평가하는 방법은 옳지 않다.

한국 종의 장엄하고 신비로운 음질을 수치화 하기 위해서는 현재까지 연구된 방법 외에도 새로운 접근 방법을 사용해야 한다. 한국 종의 타격음 소리를 표현하려면 그 소리를 수치화 할 수 있는 새로운 인자를 사용해야 한다. 그 인자는 종소리의 조화로움과 장엄함을 동시해 표현할 수 있어야 한다. 그런 인자를 사용해서 회귀식을 구성한다면 종의 음질을 평가할 수 있는 음질평가지수를 얻을 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 종성평가법과 주관적 음질 평가 방법을 이용하여 한국종의 음질을 평가해봄으로써 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

(1) 주파수 사이에 비율을 계산하고 점수를 부여하는 rating method를 이용한 종성평가법을 이용하여 한국 종의 타격음의 음질을 평가해본 결과 종소리의 조화로움은 평가할 수 있지만 사람 귀의 인지 특성을 반영하지 못했고 종소리의 다른 특성 또한 반영하지 못하기 때문에 음질 평가 방법으로 적합하지 않다.

(2) 주관적 음질 평가와 기존의 음질 인자를 이용하고 회귀식을 구성해본 결과 회귀식의 타당성 자체가 많이 부족하고 기존의 음질 인자 또한 종의 소

리를 표현하기에 부족하다.

(3) 한국 종의 음질을 평가하기 위해서는 한국 종만의 장엄하고 조화로운 소리를 표현할 수 있는 음질 인자를 개발해서 음질평가지수를 만들어야 한다.

후 기

본 연구는 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단과 BK21 사업의 지원으로 이루어 졌습니다.

참 고 문 헌

(1) Kang, Y.J., 2001, A study on the aesthetic and acoustical characteristics of Korean Bell, Final report paper of project, pp. 1~45

(2) Lee, B.H., 1982, A Rating Method for Sound Quality of Brahman Bells, The Acoustical Society of Korea, Vol. 1, No. 1, pp. 6-18

(3) Kim, S.H., Kim, J.H., Jung, J.D., Lee, J.M., 2002, Vibration and Sound Characteristics of King Song-Dok Bell, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering. Vol. 12, No. 7, pp. 534~541

(4) Malmberg, C.F., 1918, The perception of consonance and dissonance, Psychological Monographs, Vol. 25(2), pp. 93~133

(5) Hugo Fastl, Eberhard Zwicker, 2006, Psychoacoustics : Facts and Models, Springer, Berlin.

(6) Hugo Fastl, 2005, Psychoacoustics and Sound Quality, Communication Acoustics, Blauert, J. pp.139~160