소리의 과학 '음계'와 '표준음고'

글 | 성굉모 _ 서울대학교 전기 · 컴퓨터공학부 교수 kmsung@acoustics.snu.ac.kr

학문의 영역을 구분할 때 흔히 인문과학, 사회과학, 자연과학, 공학, 예술, 체육 등으로 분류하거나 아주 크게 문과(인문사회), 이과(이공계), 예체능의 3개 계열로 나눈다. 이러한 3개 계열 분류법은 오랫동안 고등학교에서의 학급 편성이나 대학 입시에서 굳건히 사용되어 왔고, 이는 마치 인간 자체를 적성에 따라 나누어 평생의 직업 선택에도 큰 영향을 미치는 인간 분류법처럼 사용되어 왔다. 그러나 근래에 학문 영역간의 융합화, 복합화의 필요성과 중요성이 제기되면서, 영역간의 벽을 허물어야 보다 더 성공적인 결과를 얻을 수 있다는 것을 우리는 느끼고 있다.

피타고라스의 모노코드와 화음의 발견

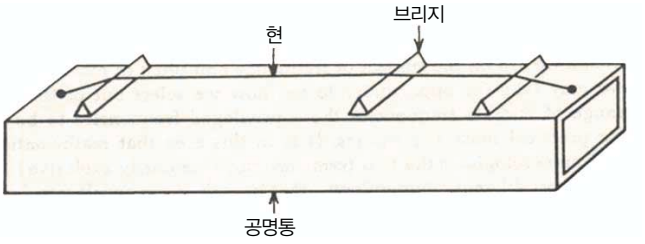
자연과학의 관점에서 볼 때, 예술은 과학(여기에서는 자연과학을 의미함)과 밀접한 관계가 있다. 세계적인 예술가였던 백남준 씨의 비디오아트는 그 도구가 공학적 산물인 TV 모니터가 아닌가? 남보다 먼저 TV 모니터를 이해하고, 이를 예술적인 용도로 사용해 보겠다는 아이디어가 그를 역사에 남을 만한 예술가로 만든 것이다.

한편 음악은 어떠한가? 음악에서 쓰이는 도구인 악기는 그 동작 원리가 모두 물리적인 현상, 즉 소리의 과학인 음향학으로 설명될 수 있다. 이번에 연재되는 '과학으로 보는 예술'에서는 주로 음악을 대상으로 한 내용을 다루게 될 것이며, 그 중 첫 순서로 가장 과학적인 문제인 음계와 표준 음고에 대해 알아본다.

음악의 3대 요소는 멜로디, 리듬, 화음이다. 이 중 멜로디와 화음이 존재하기 위해서는 여러 개의 음높이가 다른 음들이 존재해야 하며, 서양음악에서는 피아노 건반에서 보는 바와 같이 한 옥타브 내에 12개의 반음을 만들어 사용하고 있다.

두 개의 음이 동시에 울릴 때, 우리 귀에 어울리게 들리면 (협)화음이라 한다. 화음을 처음 발견하여 서술한 사람은 기원전 500년경 그리스의 철학자이자 수학자인 피타고라스로 알려져 있다. 그는 하나의 현이 장착된 모노코드에서 중앙의 브리지를 이동시키며 브리지 양쪽의 현의 두 부분을 동시에 튕긴 결과, 현의 길이가 1:1, 1:2, 2:3, 3:4… 등으로 간단한 정수비가 될 때 두 음이 어울리게 들리는 것을 알게 되었다.

모노코드에서 현의 장력이 같을 때, 음고를 결정하는 기본음의 주파수는 현의 길이에 반비례하므로, 주파수(이하 기본음의 주파수를 의미)의 비도 간단한 정수비가 된다. 현의 길이의 비가 3:4일 때 주파수의 비는 (1/3):(1/4)이 되고 이것은 (4/12):(3/12)이 되어 결과



피타고라스가 사용했던 모노코드

화음으로 정의된 음정과 주파수비

음정	주파수비	피아노 건반상 반음 개수
동음(완전1도)	1 : 1	0
옥타브(완전8도)	2 : 1	12
완전5도	3 : 2	7
완전4도	4 : 3	5
장3도	5 : 4	4
단3도	6 : 5	3
장6도	5 : 3	9
단6도	8 : 5	8

적으로 4:3이 되므로, 길이가 짧은 쪽이 주파수가 크게 되어 당연히 높은 음이 된다. 결과적으로 화성학에서는 이 같은 음정을 화음으로 정의하고 있으며, 주파수 비와 반음 개수로도 표시되어 있다.

순정률 음계에서 생기는 오차, 평균율 음계로 수정

어느 기본음, 예를 들어 피아노건반의 중앙에 있는 네 번째 옥타브의 C음인 C_4를 기준으로 완전5도, 즉 주파수의 비가 2:3이 되도록 계속 쌓아가면서 한 옥타브 영역을 벗어나면 한 옥타브를 내리고, 다시 완전5도씩 쌓아가는 것을 반복하면 한 옥타브 내의 12개의 반음을 모두 얻을 수 있다. 이것은 소위 '완전5도의 원' 으로도 설명될 수 있다.

'완전5도의 원' 에서 C를 C_1에서 시작하고 옥타브를 벗어나도 계속 허용하며 완전5도를 12번 쌓아간다면 7옥타브 위의 자기음, 즉 C_8이 된다. 완전5도를 12번 올라가면 C_8의 주파수가 C_1에 비해 $(3/2)^{12}$=129.746배가 되어야 하나, 다른 한편으로는 7옥타브 위의 자기음이므로 동시에 2^7=128도 되어야 한다. 이 두 숫자의 비, 즉 $(3/2)^{12}/2^7$=1.0136을 '피타고라스의 콤마' 라고 부르며, 이는 조율의 근본적인 문제점 때문에 생기는 오차이다.

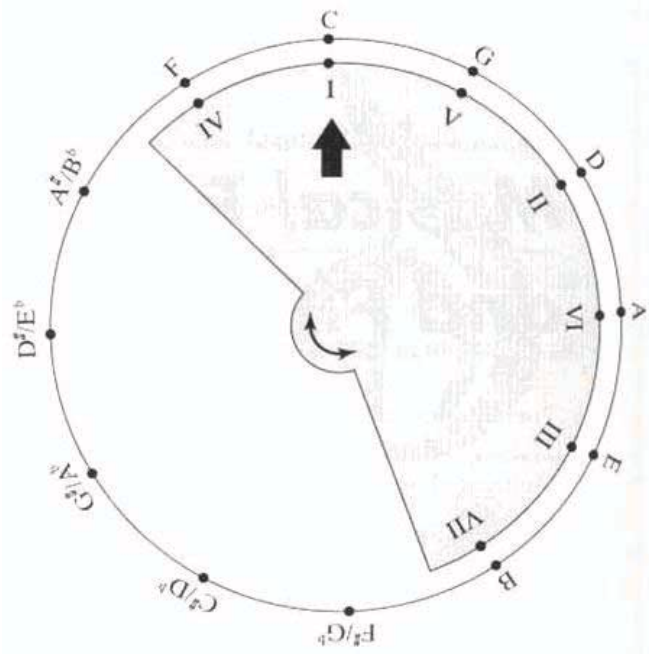
순정률 음계는 도, 미, 솔의 장3화음, 즉 주파수의 비가 4:5:6을 기준으로 음계를 쌓아가는 방법이다. 그러나 여기서도 오차가 생긴다. 즉, 한 옥타브에는 12개의 반음이 있고, 장3도는 4개의 반음 간격이므로 장3도를 3회 반복하여 올라가면 한 옥타브 위의 자기음이 된다. 그러나 계산해보면, 장3도의 3회 반복은 $(5/4)^3$=125/64=1.953이 되어 한 옥타브인 2보다 조금 작게 된다. 이 역시 조율의 근본적인 문제점, 즉 모든 화음을 간단한 정수비가 되게 유지하면서 한 옥타브 내에 12개의 반음만 존재하도록 하는 원천적으로 불가능한 문제 때문에 발생하는 것이다.

피타고라스 음계에서는 장3도는 너무 넓고, 단3도는 너무 좁게 된다. 피타고라스 음계의 단점인 3도 음정을 보완하기 위해 순정률 음계의 방법을 가미한 것이 중간음 음계이다. 그러나 중간음 음계에서도 전조(조바꿈)시 음정 간격이 유지되지 못하는 경우가 발생한다.

결국 피타고라스 음계나 순정률 음계에서 생기는 오차를 한 옥타브 내의 12개의 반음에 균등분배하고, 전조시 음정간격이 일정하게 유지되는 방법은 평균율밖에 없다. 평균율에서는 한 옥타브 속의 12개의 반음 간격을 똑같이 하므로 반음간격, 즉 반음간의 주파수비는 $2^{1/12}$=1.05946이 된다. 이것은 주파수를 로그눈금으로 표시한 후, 주파수의 비가 2:1이 되는 구간을 정확하게 12등분한 것과 같다. 평균율을 사용하여 음계를 만들면 화음이 되는 음정에서도 정확한 정수배가 되지 않으므로 3도, 4도, 5도 등 음정에서 완벽한 화음이 되지 않고 얼마간의 맥놀이 현상이 발생한다. 그러나 이것은 대부분의 사람들에게 참을 만한 정도이며, 전조의 경우에도 동일한 음정을 유지할 수 있어 피아노 등의 조율에 사용되고 있다.

A_4음을 주파수 440Hz로 표준음고 채택

앞에서 음계를 구성하는 음들의 음정에 대해, 즉 상대적인 주파



완전5도의 원

각 음계의 비교

음이름	피타고라스 음계		순정률 음계		평균율 음계	
	주파수비	센트	주파수비	센트	주파수비	센트
C	1	0	1	0	1	0
D	1.125	204	1.125	204	1.122	200
E	1.266	408	1.250	386	1.260	400
F	1.333	498	1.333	498	1.335	500
G	1.500	702	1.500	702	1.498	700
A	1.688	906	1.667	884	1.682	900
B	1.898	1110	1.875	1088	1.888	1100
C′	2.000	1200	2.000	1200	2.000	1200

수의 비에 대해 주로 알아보았다. 그러나 악보상 또는 피아노 건반의 구체적인 음, 예를 들면 A_4 음의 절대적인 주파수를 얼마로 맞추느냐 하는 문제가 남는다.

1877년 경 헬름홀츠가 기록한 바에 의하면, 그 당시 유럽의 파이프 오르간의 A_4음은 374Hz 에서 567Hz 사이에 있었다고 전해진다. 이렇게 큰 편차가 있었던 것은 도량형의 표준이 없었고, 도시나 마을 간의 교류가 적었던 것이 원인이었을 것이다. 역사적으로는 1619년에 프래토리우스가 424Hz를 제안하였으며, 작곡가 헨델의 소리굽쇠는 422.5Hz였다. 아마도 바로크 시대부터 베토벤 시대까지는 A_4음이 420~425Hz 정도의 범위에 있었던 것으로 추측된다.

조선조 편경을 복원 제작한 현대의 편경

1859년에 프랑스 정부에 의해 구성된 위원회(위원 : 베를리오즈, 마이어베르, 로시니 등)에서는 435Hz를 표준으로 채택하였으며, 20세기 초기에는 과학적 음고라고 하여 C음을 128, 256, 512 등으로 현대의 반도체 메모리 용량처럼 2의 몇 제곱의 숫자로 표시하는 방법이 제안되었고, 이에 따르면 A_4가 431Hz가 된다.

1939년에는 런던에서 열린 국제회의에서 A_4음을 440Hz로 정하는 표준안이 채택되어 오늘에 이르고 있으나, 많은 지휘자들이 음악이 찬란하게 들리도록 음고를 올리는 경향이 많아서 A_4음을 442Hz 또는 심지어 444Hz까지 올리는 경우도 있다.

한편 우리 나라의 국악계나 국악기의 경우, 조선조에는 온도나 습도의 변화에 대해 비교적 정확한 주파수로 진동하는 편경의 음고를 표준으로 하였다고 알려져 있는데, 이는 매우 과학적이며 타당한 방법이다.

현대에 와서 국악에서도 표준 음고를 숫자로 정할 필요성이 대두되었으나, 많은 국악인들의 과학적인 음고 측정이나 음고 표준을 숫자로 정하는 것에 대한 거부감 때문에 어려움이 많았던 것으로 알려져 있다. 다행히도 최근에 국악의 표준 음고 제정을 위해 국립국악원의 노력으로 의견을 모으는데 성공하고 있다고 하니, 유럽의 중세기 풍에서 벗어나 세계 속의 한국 음악을 전파시키는 데도 큰 도움이 될 것으로 기대된다. ST

글쓴이는 독일 아헨공대에서 음향공학 박사학위를 받았다. 독일 아헨공대 음향공학 연구소 연구원, 서울대 뉴미디어 통신연구소 소장, 한국 음향학회 회장, 대한 전자공학회 회장 등을 지냈다.