

① 헬름홀츠는 19세기에 비약적으로 발전한 음향학의 성과를 토대로 화음을 설명하려고 한 최초의 인물이다. 그는 소리의 물리적 특성에 주의를 기울였을 뿐 아니라 사람이 어떻게 소리를 지각하는지에 관한 심리학적 문제를 해명하기 위하여 노력하였다.

헬름홀츠는 일찍이 ② 악음(樂音)은 파형이 아무리 복잡하더라도 물결 모양의 단순한 파형, 즉 사인파의 형태를 갖는 단순음들의 합으로 구성된다는 주장에 실험적 근거가 부족하다는 사실에 주목하고 ③ 이를 실험을 통해 입증하였다. 이렇게 악음을 구성하는 단순음들을 악음의 부분음이라고 부르며, 어떤 악음의 부분음 중에서 가장 진동수가 작은 것을 기본음이라고 부른다. 헬름홀츠는 악음 속의 부분음의 진동수 배열을  $\{f, 2f, 3f, 4f, \dots\}$ 로 표현했다. 이것은  $f$ 의 진동수를 갖는 악음은  $f$ 의 자연수 배의 진동수, 즉  $f, 2f, 3f, 4f, \dots$ 로 배열된 진동수를 갖는 단순음으로 구성되어 있다는 의미이다. ④ 기본음의 진동수인  $f$ 는 악음의 음고를 결정하며, 사람은 이 악음을  $f$ 의 진동수에 해당하는 음고를 갖는 음으로 인식한다. 일반적으로 ⑤ 이 배열의 뒤쪽으로 갈수록 부분음의 세기는 현저하게 줄어든다. 헬름홀츠는 또 다른 음향 현상으로 조합음에 관심을 가졌다. ⑥ 조합음은 서로 다른 진동수  $f_1, f_2$ 를 갖는 음이 동시에 울릴 때, 함께 발생하는  $mf_1 - nf_2$  또는  $mf_1 + nf_2$  ( $m, n$ 은 자연수, 도출되는 진동수는 양수)의 진동수를 갖는 음이다. 앞의 부류를 차음, 뒤의 부류를 합음이라고 부른다. 헬름홀츠는 미분 방정식의 풀이를 통해서 이러한 조합음들이 발생할 수 있음을 수학적으로 밝혔다. 가령, 300Hz의 음과 350Hz의 음이 있을 때, 차음으로는  $50\text{Hz}(=350-300)$ ,  $250\text{Hz}(=2 \times 300 - 350)$ ,  $200\text{Hz}(=3 \times 300 - 2 \times 350)$  등의 진동수를 갖는 음이 발생하고, 합음으로는  $650\text{Hz}(=300+350)$ ,  $950\text{Hz}(=2 \times 300 + 350)$ ,  $1,000\text{Hz}(=2 \times 350 + 300)$  등의 진동수를 갖는 음이 발생한다.

두 악음이 울리면 ⑦ 두 벌의 부분음 사이에서 조합음이 발생한다. 헬름홀츠는 두 악음의 부분음들 사이에서 형성되는 조합음들과 기존의 부분음들을 전체로 보았을 때 그 음들 사이에서 생기는, 특정 진동수 근처의 맥놀이를 불협화의 원인으로 주목하였다. 이러한 불협화가 없을 때 두 음이 협화음을 이룬다는 것이 그의 주장이었다. ⑧ 맥놀이는 비슷한 진동수를 갖는 두 음이 울릴 때 두 음의 간섭으로 소리의 세기가 두 음의 진동수의 차이에 해당하는 진동수로 커졌다 작아졌다 하는 현상이다. 헬름홀츠는 이러한 음량의 진동이 불쾌감을 일으켜 불협화가 야기된다고 본 것이다. 헬름홀츠는 이는 깜빡이는 불빛이 눈에 불쾌감을 유발하는 것과 유사한 현상이라고 보았다. 악음을 가지고 실험을 해 보니 ⑨ 맥놀이 진동수가 작을 때에는 불쾌감이 일어나지 않지만 맥놀이 진동수가 커지면서 불쾌감이 커졌다. 그러다가 맥놀이 진동수가 충분히 커지면 불쾌감이 다시 줄어들었다. 이는 불빛의 깜빡임의 진동수가 작을 때에는 유발하는 불쾌감이 적고 진동수가 커지면 불쾌감이 커지다가 일정한 진동수 이상으로 깜빡임이 빨라지면 눈에 불쾌감이 줄어드는 것과 유사하다. 맥놀이 진동수가 33Hz일 때 귀에 가장 큰 불쾌감이 유발된다는 것이 그의 실험 결과였다. 부분음과 조합음 전체에 맥놀이 진동수가 33Hz 근처에 있는 조합이 있으면 큰 불쾌감이 나타나게 되는 것이다.

조사해 보면 협화음을 이루는 두 음 사이에서는 ⑩ 그러한 맥놀이가 발생할 여지가 거의 없다. 가령, 진동수의 비가 2:3이어서 완전5도를 이루는 두 음은  $\{2n, 4n, 6n, 8n, \dots\}$ 과  $\{3n, 6n, 9n, 12n, \dots\}$ 의 진동수를 갖는 부분음 배열을 갖게 되므로 이 두 벌의 배열에서 발생할 수 있는 조합음의 진동수는  $\{n, 2n, 3n, 4n, 5n, \dots\}$ 이다. ⑪ 두 벌의 부분음과

조합음 전체에서 발생할 수 있는 맥놀이 진동수는  $\{n, 2n, 3n, 4n, \dots\}$ 에 해당한다. 이때 ⑫  $n$ 은 보통 100~1,000Hz의 범위에 있어 33Hz보다 훨씬 큰 것이 일반적이므로 5도 음정을 갖는 두 음 사이에서 불협화가 일어날 여지는 없다.

이번에는 ⑬ 두 음의 진동수의 비가 2:3에서 약간(20Hz) 어긋난 경우인 두 부분음의 진동수의 배열  $\{2n, 4n, 6n, 8n, 10n, 12n, \dots\}$ 과  $\{3n+20, 6n+40, 9n+60, 12n+80, \dots\}$ 을 생각해 보자. 두 배열에서 생길 수 있는 조합음의 진동수 중 33Hz 근처에 있는 것은  $6n$ 과  $6n+40$ 의 진동수를 갖는 부분음 사이에서 형성되는 40Hz의 차음,  $12n$ 과  $12n+80$ 의 진동수를 갖는 부분음 사이에서 형성되는 80Hz의 차음이 있다. 이 진동수들은 또한 두 벌의 부분음 및 조합음 집합에서 생길 수 있는 맥놀이 진동수이기도 하다. 그러므로 형성되는 40Hz의 맥놀이는 33Hz 근처의 맥놀이로 여기에서 불협화가 형성된다고 판단할 수 있다. 이는 단순한 자연수비인 1:2(옥타브), 2:3(완전5도), 3:4(완전4도), 4:5(장3도)의 진동수비를 갖는 음이 함께 울릴 때에는 협화음이 잘 이루어지지만 이 단순한 비에서 약간 벗어난 진동수의 비로 울리는 두 음은 불협화음을 만들어 낸다는, 음악계의 일상적 상식과 잘 부합한다.

1. 다음은 ①을 통해 알 수 있는 내용입니다. 빈 칸을 채우세요.

헬름홀츠 (이전)에는 음향학의 성과를 토대로 화음을 설명하려고 한 인물이 없었다.

2. ②의 내용에 근거할 때 다음 내용이 맞는지 틀린지 표시하세요.

파형이 간단한 악음은 사인파의 형태를 갖는 단순음들의 합으로 구성된다.	○
파형이 복잡한 악음은 사인파의 형태를 갖는 단순음들의 합으로 구성된다.	○

(※ "악음은 파형이 아무리 복잡하더라도 사인파의 형태를 갖는 단순음들의 합으로 구성된다."에는 '악음은 파형이 간단한 경우 말할 것도 없이 당연히 사인파의 형태를 갖는 단순음들의 합으로 구성된다'는 의미가 내포되어 있다고 보시면 됩니다.)

3. ③을 보고 다음 물음에 답하세요.

(1) '이'가 가리키는 대상을 서술하세요.

악음은 사인파의 형태를 갖는 단순음들의 합으로 구성된다는 주장

(2) 다음은 헬름홀츠가 ②를 한 이유를 정리한 것입니다. 빈 칸을 채우세요.

악음은 사인파의 형태를 갖는 단순음들의 합으로 구성된다는 주장에는 (실험적) 근거가 부족했다. 따라서 해당 주장이 옳다는 것을 (입증)하기 위해서는 (실험적) 근거가 (필요)한 상황이었다. 해당 주장이 옳다는 것을 (입증)하고 싶었던 헬름홀츠는 실험을 통해 실험적 근거를 마련함으로써 해당 주장의 정당성을 (입증)하게 되었다.

4. ④의 이유를 서술하세요.

기본음은 악음의 부분음 중에서 가장 진동수가 작은 것이다. 그런데 악음의 부분음의

진동수는  $f, 2f, 3f, 4f, \dots$ 이다. 따라서 악음의 부분음 중 진동수가 가장 작은 기본음의 진동수는  $f$ 이다.

5. 다음은 ⑤의 의미를 서술한 것입니다. 빈 칸을 채우세요.

악음을 구성하는 부분음의 음고가 (높아)질수록 부분음의 세기는 (감소)한다.

6. ⑥을 보고 '조합음'이 발생하기 위한 요건을 서술하세요.

조합음이 발생하기 위해서는 서로 다른 진동수를 갖는 두 음이 동시에 울려야 한다.

7. ⑦의 의미를 서술하세요.

악음은 여러 부분음들로 구성된다. 따라서 악음 A, B가 울리는 경우 A를 구성하는 부분음들이 존재하고, B를 구성하는 부분음들이 존재하게 되는데 ⑦은 이 부분음들을 의미한다.

8. ⑨를 보고 다음 물음에 답하세요.

(1) 글쓴이가 ⑨와 같이 서술한 이유를 서술하세요.

해당 상황에서의 불쾌감은 맥놀이 진동수의 증가에 따라 증가한 것으로, 이전에 낮은 상태였던 적이 있기 때문이다.

(2) ⑨의 상황을 나타내는 그래프가 어떤 형태인지 고르세요(가로축이 맥놀이 진동수, 세로축이 불쾌감입니다).

n

9. ⑩이 가리키는 대상을 서술하세요.

진동수가 33Hz 근처에 있어서 큰 불쾌감을 유발하는 맥놀이

10. ⑧을 참고하여 ⑪의 이유를 서술하세요.

완전5도를 이루는 두 음은  $\{2n, 4n, 6n, 8n, \dots\}$ 과  $\{3n, 6n, 9n, 12n, \dots\}$ 의 진동수를 갖는 부분음 배열을 갖는다. 그리고 맥놀이는 두 음이 울릴 때 소리의 세기가 두 음의 진동수의 차이에 해당하는 진동수로 커졌다 작아졌다 하는 현상이다.  
 $3n - 2n = n$ 이고,  $6n - 4n = 2n$ 이다. 따라서  $\{2n, 4n, 6n, 8n, \dots\}$ 의 진동수를 갖는 부분음들로 이루어진 음과  $\{3n, 6n, 9n, 12n, \dots\}$ 의 진동수를 갖는 부분음들로 이루어진 음이 울릴 때, 부분음들의 진동수의 차이는  $\{n, 2n, 3n, 4n, \dots\}$ 이 되고, 그에 따라 두 벌의 부분음과 조합음 전체에서 발생할 수 있는 맥놀이 진동수는  $\{n, 2n, 3n, 4n, \dots\}$ 이 된다.

11. ⑫의 이유를 서술하세요.

듣는 이의 불쾌감을 유발하는 불협화음은 맥놀이 진동수가 33Hz 근처일 때 일어난다. 그

런데 발생할 수 있는 맥놀이 진동수가  $\{n, 2n, 3n, 4n, \dots\}$ 인 상황에서  $n$ 이 최소 100Hz이면 발생하는 맥놀이 진동수가 33Hz보다 훨씬 크므로 불협화가 발생하지 않는다.

12. ⑬을 보고 두 음의 진동수의 비가 3:4에서 30Hz만큼 어긋난 경우 두 부분음의 진동수의 배열을 서술하세요.

$\{3n, 6n, 9n, 12n, 15n, 18n, \dots\}, \{4n+30, 8n+60, 12n+90, 16n+120, \dots\}$