

Rayleigh의 소리의 방향 지각 연구에 대한 과학사적 고찰

A Historical Inquiry about Rayleigh's Research on the Perception of the Direction of Sound

구 자 현*
(Ja-Hyon Ku*)

*서울대학교 과학사 및 과학철학 협동과정

(접수일자: 2002년 9월 9일; 수정일자: 2002년 10월 5일; 채택일자: 2002년 10월 16일)

소리가 나는 방향을 어떻게 사람이 인지하는가라는 질문은 전통적인 심리 음향학적 문제 중 하나이다. Rayleigh는 이미 1870년대부터 이에 대하여 연구를 수행하였고 이에 대한 관심은 수그러들었다가 되살아나는 방식으로 연구 경력 말기까지 그의 머리를 떠나지 않았다. 이 연구 주제는 소리 지각에 대한 Rayleigh의 유일한 관심사이면서도 음향학의 다른 연구 주제보다 더 많은 관심을 쏟은 주제였다. 그는 당초에 세기차에 의한 소리의 방향 지각을 주장하다가 위상차에 의한 방향 지각을 받아들이는 쪽으로 생각이 돌아갔다. 그리하여 그는 높은 진동수의 음에 대해서는 세기차를, 낮은 진동수의 음에 대해서는 위상차를 감지함으로써 소리의 방향 지각이 이루어진다는 현대적인 결론에 도달했다. 이러한 과정에서 Rayleigh는 매우 주의 깊고 정교한 실험 방법을 채용함으로써 탁월한 음향학 실험가로서의 면모를 드러냈을 뿐 아니라 수학적 이론화의 성과를 그의 실험에 연결시킴으로써 설득력 있는 결과를 얻었다.

핵심용어: 레일리, 소리, 방향 지각, 세기차, 위상차, 소리 그늘, 음향학

투고분야: 음악음향 및 음향심리 분야 (8,2)

The question how man can perceive the direction of a sound is one of the traditional psychoacoustical problems. Rayleigh already began to investigate this subject in 1870s and kept on interesting himself intermittently throughout his research career. Rayleigh was only concerned with this subject among those of perception of sound and focused more interest on it than any other acoustical problems. At first he insisted on the perception of the direction of a sound by the difference of intensity of a sound in two ears, but was phased in accepting that by the difference of phase of a sound there. Thus he arrived at the modern view that the perception of the sound direction is caused by the difference of intensity in high frequencies and the difference of phase in low frequencies. Rayleigh presented his ability as an excellent experimenter by employing very cautious and ingenious experimental settings and acquired persuasive results by linking the consequences of his mathematical theorization with his experiments.

Keywords: Rayleigh, Sound, Perception of direction, Difference of intensity, Difference of phase, Sound shadow, Acoustics

ASK subject classification: Musical acoustics and psychoacoustics (8,2)

I. 연구의 시작

소리의 방향 지각 문제는 소리의 위치 지각 문제의 일부로서 일찍부터 자연철학자들의 관심을 끌었다. 하지만 그것이 본격적으로 진지하게 논의되기 시작한 것은 19세기 부터였다[1]. 경험론자였던 George Berkeley (1685-1753) 와 James Mill (1773-1836), Alexander Bain (1818-1903) 은 모두 소리의 위치 지각은 경험에 의해 형성된다고 주장했지만 그들에게는 객관적 논거가 부족했다. 다만 그들은 일반적으로 다른 감각 기관이 이것을 돕는다고 보았다. 예를 들면 Bain은 일렬로 선 사람들 중에서 누군가가 말을 할 때 관찰자가 말하는 사람의 목소리의 특성을 모르거나 그의 입술을 보지 못하면 누가 말했는지 알 수 없다고 했다. 생리학자 Johannes Müller (1801-1858)는 1838년에 소리의 방향 지각이 두 귀의 다른 위치에 의존한다는 것에 주목했다. 그는 두 귀에 들리는 소리 세기의 차이나 머리가 움직일 때 한 귀에 들리는 소리의 세기가 소리의 방향 지각에 대한 실마리를 제공한다고 주장했다. 또한 Müller는 시지각(視知覺)이 소리의 방향을 결정지을 수 있음을 복화술을 예로 들어 설명했다. 복화술을 실행하는 이는 입술의 움직임을 감춤으로써 다른 방향에서 소리가 나오는 것처럼 보이게 만들 수 있었고 이는 소리의 방향 지각이 시지각에 상당히 의존하고 있음을 분명히 보여 주었다.

Rayleigh (3rd Baron Rayleigh, John William Strutt, 1842-1919)는 소리의 방향 지각 문제에 일찍부터 관심을 기울였다. 그는 1876년에 정면에서 오는 순음(pure tone)과 후면에서 오는 순음을 사람이 구분하지 못한다는 사실을 런던 음악협회에서 발표하였다. 이 발표 내용은 *Nature*에 초록이 게재되었고 이듬해 *Philosophical Magazine*에 비교적 상세히 게재되었다[2]. 사람은 일반적으로 전후에서 오는 다양한 소리의 방향을 식별할 수 있는데 소리굽쇠와 공명기 세트에서 나오는 순음의 경우에는 그것이 정확하게 정면이나 후면에서 들려오면 사람은 그것이 어느 쪽에서 오는 소리인지 식별하지 못한다는 사실을 Rayleigh는 실험으로 확인하였다. 이 실험을 수행하면서 Rayleigh는 면밀한 실험 설계자로서의 면모를 일찍부터 보여주었다.

Rayleigh는 먼저 두 벌의 똑같은 소리굽쇠와 공명기 세트 사이에 눈을 가린 관찰자를 두었다[3]. 그는 두 소리굽쇠를 동시에 때려서 진동을 일으키되 한쪽의 소리굽쇠만을 공명기 위에 올려놓아 거기서만 소리가 증폭되게 하였다. 이렇게 하지 않고 한쪽의 소리굽쇠만을 때리면

때릴 때의 소음이 관찰자에게 들려서 이내 관찰자는 그 방향을 알아차렸기 때문에 순음이 아닌 소음을 완전히 제거하기 위해 Rayleigh는 두 소리굽쇠를 동시에 때려서 양쪽에서 모두 소음이 발생하게 하고 한쪽에서만 공명기로 순음이 증폭되게 하였던 것이다. 이로써 레일리는 이 실험의 난점을 효과적으로 제거할 수 있었다.

Rayleigh는 추가적인 짧은 추론을 통해 순음의 방향을 식별할 수 없는 위치가 전후에만 있는 것이 아님을 알았다. 정면에서 오는 소리나 후면에서 오는 소리를 식별하지 못하는 것은 양쪽 귀에 도달하는 소리의 세기가 동일하기 때문인 것으로 생각한 Rayleigh는 다양한 방향에서 오는 소리에 대해 양쪽 귀에서 느끼는 소리의 세기차가 어떠한지 고찰하였다. 오른쪽이나 왼쪽에서 오는 소리는 양쪽 귀에서 느끼는 소리의 세기차가 가장 큰 경우이므로 사람은 혼동의 여지없이 그 방향을 식별하지만 오른쪽 전방에서 오는 소리는 오른쪽 후방에서 오는 소리와 동일한 세기차를 양쪽 귀에서 유발하기 때문에 식별이 불가능했다. 그러므로 Rayleigh는 양쪽 귀와 정수리를 잇는 평면에 대하여 대칭으로 소리의 방향을 식별할 수 없는 점들이 쌍으로 수없이 존재한다고 추론했다.

1877년 9월에 Rayleigh는 이러한 추론을 확인하기 위한 실험을 수행하였다. 이 때 사용된 소리굽쇠는 이전의 실험에서와 같이 256 cps¹⁾의 진동수를 갖는 것이었다. 관찰자가 북쪽을 바라보게 하고 북동쪽과 남동쪽에서 소리굽쇠로 소리를 발생시켰을 때 관찰자는 이 두 방향의 소리를 제대로 식별하지 못했지만 역시 동쪽과 서쪽에서 오는 소리는 정확하게 식별하였다. 이 실험에서 소리가 들리는 상태에서 관찰자가 조금이라도 머리를 움직이면 어렵지 않게 소리나는 방향을 알아낼 수 있었기에 Rayleigh는 관찰자가 머리를 전혀 움직이지 못하게 하고 실험을 수행하는 것이 필요했다. 이러한 엄밀한 실험 과정에서 Rayleigh의 예측은 옳았음이 입증되었다.

그러나 Rayleigh는 소리의 방향 지각이 전적으로 양쪽 귀에서 감지되는 소리의 세기차에 의해 이루어진다고 쉽게 결론짓지 않았다. Rayleigh는 또 다른 가능성으로 소리가 양쪽 귀에 도달하는 시점의 차이를 고려했다. 즉, 사람의 한 쪽 귀에 어떤 소리가 다른 쪽 귀에 비해서 얼마간 먼저 도착하면 그 사람은 소리가 먼저 도달한 귀에 가까운 쪽에서 소리가 오는 것으로 인식할 가능성이 있었다. Rayleigh는 이를 알아보기 위해 관찰자의 두 귀를 모

1) cps는 cycles per second의 줄임말이다. 진동수의 단위로 19세기와 20세기 초에 널리 사용되었기에 이 논문에서는 현대적인 논의를 제외하고는 이 단위를 사용하겠다.

두 막고 소리굽쇠를 울린 후에 양쪽 귀를 동시에 열었을 때 관찰자가 소리의 방향을 제대로 알아내는 지 관찰했다. 관찰자는 이 경우에도 무리없이 소리의 방향을 알아내었다. 이러한 조작이 음원의 방향 식별 능력에 어떠한 차이를 가져오지 않았으므로 Rayleigh는 소리의 도달 시각의 차이에 의해 소리의 방향 지각이 이루어지지 않는다고 결론을 내렸다.

II. 장애물의 효과에 관한 연구

하나의 가능성이 제거되자 이 시점에서 Rayleigh는 양쪽 귀에서의 소리의 세기차가 소리의 방향 식별에 결정적인 판단 기준이 된다는 견해가 가장 설득력이 있다고 생각했다. Rayleigh는 양쪽 귀에서 세기 차이를 느낄 수 있다면, 그것은 주로 머리가 장애물로 작용해서 생기는 현상이라고 판단했고 머리가 어느 정도 소리에 대해서 장애물로 작용하는지 진지하게 고려하기 시작했다. 그러나 머리가 장애물로서 소리의 방향 지각에 미치는 영향에 대한 Rayleigh의 연구는 소리의 방향 지각이 전적으로 세기차에만 의거해 이루어질 수 없다는 것을 찾아내는 계기가 되었다.

Rayleigh는 다양한 진동수의 소리에 대하여 머리가 만드는 소리 그늘 (sound shadow)²⁾이 어떻게 달라지는지를 실험을 통해 조사하였다[4]. 그 결과로 Rayleigh는 머리가 소리 그늘을 만드는 효과는 소리의 진동수에 크게 의존함을 발견했다. 256 Hz의 음을 내는 표준 소리굽쇠의 경우에는 귀가 음원을 향하든 반대 방향을 향하든 소리가 들리는 정도는 거의 차이가 나지 않았다. 그러나 높은 음의 경우에는 머리로 인해 소리 그늘이 확실하게 생겼다. 부하를 실은 바람통 (loaded gas bag)으로 분 호각은 f^m 의 음—피아노의 가운데 음인 c'보다 완전 4도 높은 음인 f보다 3 옥타브 높은 음—을 안정적으로 발생시켰는데 음원의 반대 방향을 향한 귀에서는 이 높은 음이 잘 들리지 않았다. 이것은 입으로 만들어내는 '쉬' 소리 (hiss)도 마찬가지였다. 이러한 사실을 확인하기 위해서 Rayleigh는 소리를 한쪽 귀에 가까운 쪽에서 발생시킨 후 처음에는 이를 양쪽 귀로 듣다가 이후 가까운 쪽 귀만 막아보고 마지막으로 가까운 쪽 귀는 그대로 두고 먼 쪽 귀만 막아보면서 소리의 세기의 변화에 주목하는 방법을

썼다. Rayleigh는 양쪽 귀로 들을 때 감지되는 소리의 세기가 가까운 쪽 귀를 막을 때는 크게 줄지만 먼 쪽 귀를 막을 때는 거의 변화가 없는 것을 통해서 먼 쪽 귀에 전달되는 소리의 세기가 매우 약함을 확인하였다. 이러한 관찰 결과는 낮은 진동수의 음에 대해서는 세기차가 아닌 다른 방식에 의해서 소리의 방향 지각이 이루어진다는 것을 암시했지만 Rayleigh는 이러한 관찰 사실을 발표했을 뿐 그것을 소리의 방향 지각 방식과 직접 연결시키지는 않았다. 이 주제는 한동안 Rayleigh의 관심에서 멀어졌다가 1906년에 다시 Rayleigh의 관심을 끌게 된다[5].

20세기 초에도 사람이 소리의 방향을 분별하는 것은 보통 두 귀에 들리는 소리의 세기 차이를 감지함으로써 이루어진다고 인식되고 있었다. 즉, 대부분의 과학자들이 소리나는 쪽에 더 가까운 귀에 소리가 더 세게 들리는 것으로부터 소리의 방향 지각이 이루어진다고 생각했다. 그러나 Rayleigh는 피치 (pitch)가 매우 높을 때는 이러한 설명이 잘 들어맞지만 피치가 낮은 음의 경우에는 잘 들어맞지 않는다는 것을 알고 있었다. 그는 이미 1877년에 낮은 음의 경우에는 한쪽 귀에 가까운 곳에서 소리를 발생시키고 양쪽 귀를 번갈아 막아보면서 소리의 세기를 비교해 보아도 별로 소리의 세기에 차이가 나지 않는다는 것을 실험을 통해 확인한 적이 있었다. 피아노 건반의 가운데 c(음3)을 칠 경우에 두 귀에서 들리는 소리는 별로 세기에 차이가 없었고 128 cps로 진동수를 더 낮추면 세기 차이를 감지하기가 더 어려웠다. 그럼에도 불구하고 어떻게 낮은 음에 대해서 인간의 소리 방향 지각 능력은 떨어지지 않았다. 이것은 소리의 방향 지각에 대한 '세기차 이론'이 이 파역 (波域)에는 적용되지 않음을 의미했다.

이러한 현상은 Rayleigh가 이미 이론적으로 연구한 적이 있었던 구형의 고체 장애물에 입사된 평면파에 대한 계산 결과로부터 잘 이해될 수 있는 것이었다[6]. Rayleigh는 이 이론에 따라 몇 가지 파장의 소리에 대하여 소리가 오는 방향에 가장 가까운 장애물 구의 지점—이것을 극 (pole)이라고 부른다—과 가장 먼 구의 지점—이것을 대극 (antipole)이라고 부른다—에서의 소리의 세기를 비교해 보았다. 256 Hz의 경우에는 $2\pi c/\lambda$ (c: 구의 반지름, λ : 파장)의 값, 즉 파장에 대한 원주의 비가 1/2에 해당했는데 이 때 극에서의 소리의 세기는 대극에서의 소리의 세기에 비해 10%밖에 크지 않았다. 그리고 128 Hz의 경우에는 겨우 1%밖에 크지 않았다. 물론 파장이 작아져서 파장

2) 소리 그늘은 빛이 장애물에 부딪칠 때 그늘이 만들어지듯이 소리가 장애물에 부딪쳐 그 뒤에 소리가 전달되지 않는 공간을 만들어 낼 때 이를 지칭하는 용어이다.

3) 이것을 Hermann Helmholtz는 c'이라고 불렀고 Rayleigh는 이것을 따랐다. 진동수가 256 cps로 조율되어 있었다.

에 대한 원주의 비가 2에 이르면 (512 Hz), 극에서의 소리의 세기는 대극에서의 소리의 세기의 2배를 넘었다. 그러므로 레일리는 진동수가 512 Hz 이상이면 '세기차 이론'은 설득력을 얻지만 256 Hz 이하의 낮은 음에 대해서는 설득력을 얻지 못한다고 판단했다.

Rayleigh는 이러한 사실을 확인하기 위한 실험을 수행했다 (그림 1). 그는 먼저 두 개의 전기로 구동되는 128 Hz의 소리굽쇠를 멀리 떨어뜨려 놓고 동일 위상으로 진동시키고 각각을 공명기에 연결하여 소리를 증폭시켰다. 그리고 중간에 눈을 가린 관찰자를 두고 두 귀가 두 공명기를 향하도록 한 후에 한쪽 공명기가 작동되지 않게 하였다. 그러자 관찰자는 정확하게 어느 쪽의 소리가 전달되지 않는지를 알아내었다. 그러나 관찰자의 한쪽 귀를 막았을 때에는 실제 소리의 방향에 관계없이 열린 쪽 귀 쪽에서 소리가 들리는 것으로 관찰자는 인식했고 막은 귀를 열어주었을 때에는 올바른 소리의 방향을 알아내었다. 그러나 소리가 옆에서가 아니라 정확하게 앞에서나 뒤에서 들릴 때에는 여러 명의 관찰자들이 소리의 방향이 앞인지 뒤인지를 구별하지 못했다. 이러한 사실들은 '세기차 이론'으로도 잘 설명되었다. 한쪽 귀를 막은 관찰자는 소리의 세기를 비교할 수 없으므로 소리의 방향을 알지 못하는 것이 당연했다. 또한 정면과 후면에서 들리는 소리는 양쪽 귀에서 같은 세기로 들릴 것이므로 앞과 뒤의 소리를 식별하지 못하는 것도 '세기차 이론'과 부합했다. 그러므로 Rayleigh는 이 진동수의 음에 대하여 사람이 진정으로 세기차를 이용해 소리의 방향을 지각하는지를 확인할 수 있는 결정적인 실험으로 장애물에 의한 세기의 약화를 시도했다. 그리하여 종이판 같은 것을 관찰자의 머리 근처에 놓아 소리를 교란시켰는데 예상 밖으로 관찰자는 종이판이 있는지도 알아채지 못했고 종이판의 위치에 관계없이 동일하게 소리의 방향을 식별하였다. 분명히 종이판은 소리의 세기에 차이를 가져왔지만 사람은 그 차이 때문에 소리의 방향 지

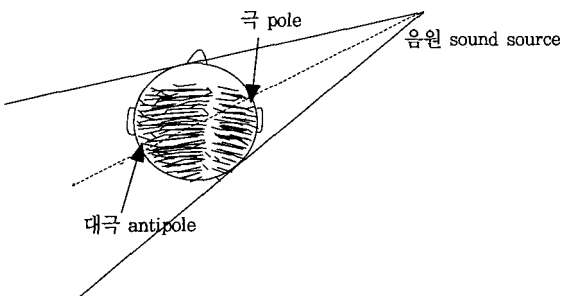


그림 1. 머리 장애물에 의한 소리 그늘 효과
Fig. 1. Sound shadow effect by the obstacle of head.

각에 영향을 받지 않는다면 이 진동수의 음에 대하여 소리의 세기차에 의한 방향 지각은 실제로 일어난다고 볼 수 없었다.

III. 위상차 이론의 수용

이러한 '세기차 이론'에 반(反)하는 결과에 부딪힌 Rayleigh는 소리 방향 지각이 일어나는 다른 방법으로 두 귀에 들리는 소리의 위상차에 의한 방식을 고려했다. 이것은 두 귀에 도달하는 소리의 위상차가 소리의 방향에 따라 달라진다는 사실에서 착안한 것인데 문제는 그것을 사람이 감지할만한가에 있었다. 사실 Rayleigh는 여러 해 동안 이러한 관점에 대하여 찬성하지 않았었다[7]. 한쪽 귀와 다른 쪽 귀에 도달하는 소리의 위상차는 가장 클 경우가 머리 둘레 길이의 절반인 30 cm 정도였다. 이것은 128 Hz (c)의 소리에 대해서는 파장의 1/8배 정도이고 256 Hz (c)의 소리에 대해서는 파장의 1/4 배 정도, 512 Hz (c'')의 경우에는 거의 1/2 파장에 해당하며 1024 Hz (c''')의 경우에는 한 파장에 해당한다 (표 1, 그림 2). 512 cps의 경우 반 파장의 차이는 사실 위상차 식별이 전혀 안 되는 차이에 해당한다. 그 이유는 반 파장이 늦어지는 것과 반 파장이 빨라지는 것은 전혀 차이를 감지할 수 없기 때문이다. 그리고 파장의 정수배의 위상차는 역시 감지할 수 없는 것이라 할 수 있다. 그러므로 다소 높은 피치의 소리에 대해서는 위상차에 의한 소리의 방향 감지는 불가능하다는 것이 Rayleigh의 판단이었다.

1877년에 Silvanus P. Thompson (1851-1916)이 실행한 실험에서 영감을 받은 Rayleigh는 1906년에 두 개의 튜브를 양 귀에 꽂아 귀가 따로 소리를 들을 수 있도록 하는 실험을 수행하였다[5]. Rayleigh는 같은 음원에서 나오는 소리를 인위적으로 위상 변형을 일으켜 위상차가 생기게 하여 두 귀에 들려주었더니 관찰자가 위상차를 음원의 위치로 해석해 내는 것을 관찰했다. 즉, 관찰자는

표 1. Rayleigh가 계산한 구형 머리의 극과 대극에서의 음의 세기와 위상

Table 1. Intensity difference and phase difference of sound on the pole and the antipole of spherical head according to Rayleigh's calculation.

진동수 (Hz)	세기차 (1을 기준)	위상차 (degrees)	그림 참조
128	0.99	45	그림 2 (a)
256	0.91	90	그림 2 (b)
512	0.50	180	그림 2 (c)

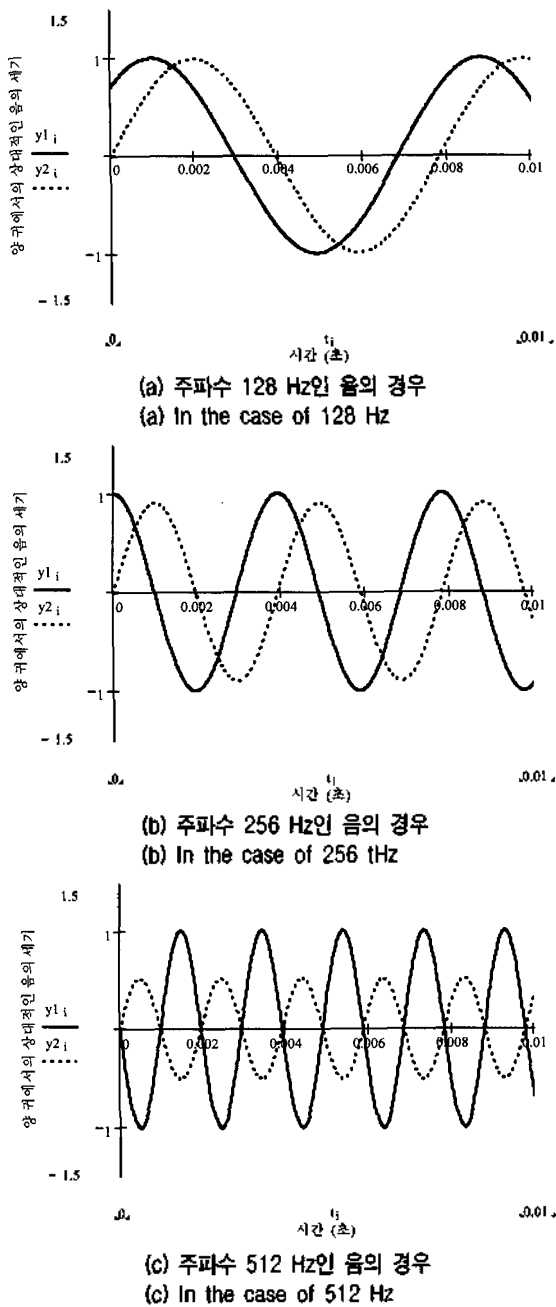


그림 2. Rayleigh의 계산에 따른 양쪽 귀에서의 음의 세기 및 위상 비교

128 Hz와 256 Hz에서는 세기차는 거의 발생하지 않지만 위상차는 감지할만하다. 반면에 512 Hz에서는 위상차를 감지할 수 없는 반면에 세기차는 현격하게 발생한다. 그러므로 주파수가 낮은 음의 경우에는 위상차 이온이 주파수가 높은 음의 경우에는 세기차 이온이 타당함을 알 수 있다.

Fig. 2. Comparison of the intensity and the phase of sound in the two ears according to Rayleigh's calculation. In both 128 Hz and 256 Hz, the intensity differences are ignorable but the phase differences are perceptible. In contrast, the phase difference in 512 Hz is not detectable but the intensity difference is remarkable. Thus the theory of phase difference is applicable to low frequencies but that of intensity difference to high frequencies.

위상이 앞선 곳에서 소리가 들려오는 것으로 인식하였다. Rayleigh는 진동수를 바꿔가면서 위상차에 의한 방향 지각 효과를 조사하였다. 이로써 Rayleigh는 낮은 진동수 대역에서는 위상차에 의해 소리의 방향 식별이 이루어진다는 것을 확인할 수 있었다. g' 이하에서는 3 명의 관찰자가 모두 동의할 수 있는 위상차에 의한 소리의 방향 지각이 이루어졌지만 g' 이상의 진동수에서는 위상차에 의한 소리의 방향 지각은 개인차가 있었다. 이로써 Rayleigh는 이 영역에서는 세기차에 의한 소리의 방향 지각이 이루어진다고 보는 것이 타당하다고 결론지었다.

Rayleigh는 소리의 전후 식별에 대해서도 다시 관심을 가졌다. 그는 1876년경에 동반하는 소음이 없는 순음을 사용해서 실험을 수행하였을 때 앞에서 오는 소리와 뒤에서 오는 소리를 전혀 식별할 수 없었지만 사람의 음성 같은 경우에는 앞이나 뒤에서 오는 소리의 방향을 식별할 수 있었던 것을 기억했다. 그러나 1906년에는 인간의 목소리조차 Rayleigh 같은 64세의 노인에게는 앞에서 들리는 소리인지 뒤에서 들리는 소리인지 구별되지 않았다. 다만 그의 젊은 조수는 순음의 경우에도 전후에서 오는 소리의 방향을 확실히 식별했다. 여기에서 Rayleigh는 소리의 전후 방향 감각이 외이에서 생기는 소리의 특성의 변화에 기인한다는 판단을 내렸다. 이를 확인하기 위해서 Rayleigh는 다시 실험을 수행했다. 그는 넓은 잔디밭에서 관찰자의 눈과 귀를 막고 귀 바깥에는 반사 뚜껑을 설치하였다. 이 반사 뚜껑은 S. P. Thompson이 1879년에 발표한 논문에서 기술하였던 것인데 귀를 연결하는 선과 45도 각도로 설치되어 관찰자가 모르게 자유롭게 회전할 수 있도록 되어 있는 것이었다. 이는 컷바퀴에 의한 소리의 모음 현상을 교란하기 위한 장치라고 할 수 있었다. Rayleigh는 관찰자를 회전 의자에 앉힘으로써 음원을 움직이지 않고도 손쉽게 실험할 수 있었다. Rayleigh는 관찰자를 회전시키고 적당한 위치에서 의자를 정지시킨 후 귀를 열고 소리를 듣도록 했다. Rayleigh가 기대했던 대로 조수의 판단은 귀 바깥에 설치한 반사 뚜껑의 작동 때문에 교란되곤 했다. 반사 뚜껑이 앞에서 오는 소리를 컷속으로 보내는 형태로 되어 있을 때 조수는 문제없이 소리의 방향을 맞힐 수 있었는데 뒤에서 오는 소리를 컷속으로 보내는 형태로 되어 있을 때에는 반대 방향에서 소리가 오는 것으로 착각하였다. 여기에서 Rayleigh는 컷바퀴가 소리의 전후 식별에 중요한 기능을 한다고 확신했다.

IV. Wilson과 Myers의 이론에 대한 비판

Rayleigh가 다시 소리의 방향 지각 문제에 관심을 갖게 된 계기는 이에 대한 H. A. Wilson과 C. S. Myers의 새로운 이론이 1908년에 제기되었기 때문이었다. 이들은 Rayleigh의 주장대로 위상차에 의한 소리의 방향 지각이 가능하다는 것을 다른 방식의 실험으로 보였지만 궁극적으로 좌우 방향 지각은, 좌우의 외이에서의 소리의 위상차와 뼈를 통해 한쪽 귀에서 다른 쪽 귀로 전해지는 소리의 전도 때문에 발생하는 내이에서의 위상차에서 유발되는 세기차를 인식함으로써 이루어진다고 결론지었다[8]. 이들은 Rayleigh가 주장한 위상차에 의한 방향 인식이 가능하다는 것은 인정하였지만 결국은 '세기차 이론'으로 돌아가 버렸던 것이다. 이들이 처음의 유사한 결론에도 불구하고 결국 반대의 결론에 도달한 것은 이들이 위상의 역전 (phasal reversal)이라는 개념을 도입했기 때문이었다. 한쪽 귀에 도달한 소리는 머리뼈를 통해서 다른 쪽 내이에도 전달된다. 그러한 내이 전도에서 발생하는 위상의 지체는 작지만 각 귀에서 직접 수용한 음파와 뼈를 통해 전도된 음파는 반대 방향에서 와서 만나기 때문에 위상 역전이 일어난다는 것이 Wilson과 Myers의 견해였다. 청각 중추는 직접 외이에 도달해서 귓구멍을 통해 내이로

전달된 소리와 다른 쪽 외이에 도달해서 뼈를 통해 이쪽 내이에 도달한 소리를 합쳐서 지각하므로 이때 각각의 귀에 도달하는 소리로 생긴 내이에서의 진동의 세기를 I_1, I_2 라 하면 이 두 세기의 차이는

$$I_1 - I_2 = 4fga^2 \sin a \sin \beta \tag{1}$$

로 얻어졌다. 여기에서 f 는 한쪽 외이에 도착해 귓구멍을 통해 같은 쪽 내이에 도착한 음파의 상대적 진폭, g 는 그 중의 일부가 뼈를 통해 다른 쪽 내이에 도착했을 때 그 진동의 상대적 진폭, a 는 외이에 도착한 음파의 진폭, α 는 첫 번째 귀에 도달한 음파가 두 번째 귀에 도달한 음파보다 앞선 위상, β 는 뼈를 통해 전달되면서 늦어진 위상차를 의미한다. Wilson과 Myers는 이 식이 나타내는 대로 각각의 내이에 도달하는 음파의 총합의 세기차로부터 소리가 오는 방향을 식별하게 된다고 보았다. 그러나 이 견해가 종전의 세기차 이론과 다른 점은 양쪽의 내이에서 감지하는 소리의 세기가 기본적으로 위상차에 의존한다는 점이다. 이 식에서 두 외이에 도달하는 음파의 위상차 a 가 0이 되거나 뼈를 통해 전달되면서 늦어지는 위상차 β 가 0이 되면 우변은 0이 될 수밖에 없어 양쪽 내이에서 감지하는 소리의 세기의 차이는 0이 된다. 이렇게

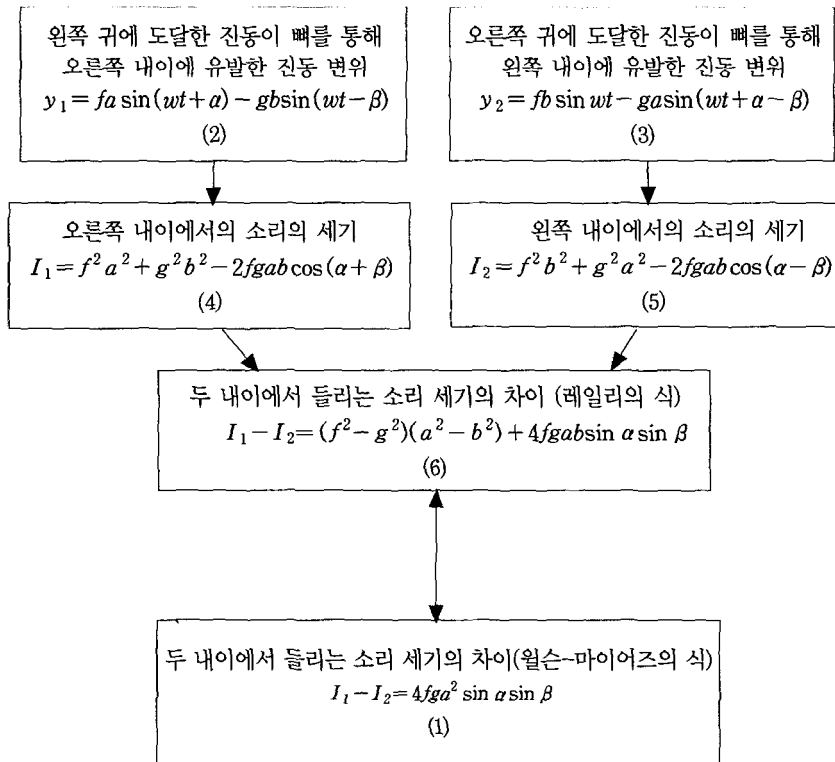


그림 3. 윌슨-마이어드의 식에 대한 레이리의 비판의 유도과정
Fig. 3. Derivation of Rayleigh's criticism of Myers-Wilson's formula.

되면 소리의 방향을 감지할 수 없다는 것이 Wilson과 Myers의 견해였다. 그러므로 이들의 견해는 표면적으로는 위상차 이론을 표방하고 있지만 본질적으로는 세기차 이론을 따르는 것이었다.

여기에서 Rayleigh의 수학자로서의 자질이 논쟁에 있어서 중요한 기여를 하게 된다. Rayleigh는 이들의 견해가 가지고 있는 문제점을 수학적 통찰력으로 파악했다. 그는 Wilson과 Myers의 식 (1)이 기본적으로 양쪽 귀에 도달하는 소리의 세기가 같다고 보았을 때 얻어진 식임을 지적하였다. Rayleigh는 세기가 다른 소리가 양쪽 귀에 도달할 때의 세기차를 다음과 같은 계산을 통해서 구했다 [9] (그림 3).

Rayleigh는 오른쪽 귀에 들어오는 진동을 $y_1 = a \sin(\omega t + \alpha)$ 라 놓고 왼쪽 귀에 들어오는 진동을 $y_2 = b \sin \omega t$ 라 놓았다. 이때 a 는 오른쪽 귀와 왼쪽 귀에 들리는 소리의 위상차를 지칭한다. 그리고 왼쪽 귀에 도달한 진동이 뼈를 통해 오른쪽 귀에 전달됨으로써 오른쪽 내이에 들리는 소리는

$$y_1 = fa \sin(\omega t + \alpha) - gb \sin(\omega t - \beta) \quad (2)$$

로 나타낼 수 있다. 이때 f 와 g 는 적당한 상수로 f 는 g 에 비해 무척 크다. β 는 소리가 머리를 통과할 때 생기는 지체를 나타낸다. 두 번째 항의 (-) 기호는 위상 역전을 나타내고 전체 위상 지체는 $\pi + \beta$ 가 된다. 같은 방식으로 왼쪽 귀에서의 결과는

$$y_2 = fb \sin \omega t - ga \sin(\omega t + \alpha - \beta) \quad (3)$$

라 놓을 수 있다. Rayleigh는 이것을 바탕으로 각 귀에서의 소리의 세기를 구하였다. I_1 이 오른쪽 내이에서의 소리의 세기를 지칭하고 I_2 가 왼쪽 내이에서의 소리의 세기를 지칭한다면

$$I_1 = f^2 a^2 + g^2 b^2 - 2fgab \cos(\alpha + \beta) \quad (4)$$

$$I_2 = f^2 b^2 + g^2 a^2 - 2fgab \cos(\alpha - \beta) \quad (5)$$

가 되어 오른쪽 내이에 들리는 소리와 왼쪽 내이에 들리는 소리의 세기의 차이는

$$I_1 - I_2 = (f^2 - g^2)(a^2 - b^2) + 4fgab \sin \alpha \sin \beta \quad (6)$$

를 얻게 된다.

이 식이 Wilson과 Myers의 식보다 일반적인 것은 분명했다. 이 식에서 a 와 b 가 같으면 첫 번째 항이 0이 되어

서 완전히 Wilson과 Myers의 식과 같아지게 된다. 소리가 정확하게 정면이나 후면 방향을 이어주는 자오선 상에서 들려오지 않는 이상 일반적으로 두 귀에 도달하는 동일한 음원의 소리는 진폭이 달라서 소리의 세기도 달라진다. 그런데 Wilson과 Myers는 외이에 도달하는 소리의 세기 차이는 완전히 무시하고 내이에서의 소리의 세기만을 감지하여 소리를 분별한다는 잘못된 이론을 제시했다는 것이 Rayleigh의 판단이었다. 뼈를 통해 전달되는 소리의 진폭을 나타내는 g 는 f 에 비해 상당히 작고 β 도 일반적으로 작기 때문에 외이에 도달하는 소리의 상대적 세기가 다르다면 이 식에서 두 번째 항은 첫 번째 항에 비해서 매우 작아지게 되어 첫 번째 항이 무시할 수 없게 된다. 따라서 첫 번째 항을 무시한 Wilson과 Myers의 식은 문제가 있다는 것이 Rayleigh의 지적이었다. Rayleigh의 주장은 파장이 어느 정도 긴 경우에는 양쪽 내이에서의 상대적 세기의 차이라는 것이 실제로 소리의 방향 지각에 의미 있는 영향을 미치지 못할 정도로 미미하다는 것을 함축했다.

또한 Rayleigh는 Wilson과 Myers의 이론이 내이에 반대 방향에서 도달하는 두 음파의 위상이 반대이면 서로 보강되고 위상이 동일하면 서로를 상쇄시킨다고 가정된 것에 근본적인 이의를 제기하였다. 이것은 상황에 따라 달라진다는 것이 Rayleigh의 견해였다. Rayleigh는 공기 파동이 민감한 불꽃 (sensitive flame)에 대하여 반대 방향에서 진입해 들어올 때처럼 결과가 진동의 속도에 의존한다면 그 가정은 정당하지만 이 문제가 Helmholtz의 공명기와 유사하다면 음파의 전달 방향은 무관하고 항상 보강은 위상이 같을 때 일어난다고 판단했다[10]. Rayleigh는 이 경우가 둘 중에서 어느 상황에 해당되는가를 정확하게 알 수는 없었지만 두개골이 음의 진동에 따라 진동하게 된다면 이 계는 유한한 계로 보아야 하고 두개골 전체가 동일한 위상으로 진동하여야 하므로 이 경우에 위상차 β 는 0이 되어야 할 것이라고 추측했다. 그것이 사실이라면 위상의 역전으로 일어나는 내이에서의 세기차는 의미가 없었다.

이렇게 Rayleigh는 자신이 긴 파장의 소리에 대하여 당초에 주장하였던 위상차 이론을 세기차 이론에 종속시키는 Wilson과 Myers의 이론에는 반대했다. Rayleigh는 자신의 실험을 근거로 긴 파장의 음에는 위상차 이론을, 짧은 파장의 음에는 세기차 이론이 적용된다는 입장을 기본적으로 고수하였다. 이것이 Rayleigh가 여러 차례에 걸친 실험의 결과로 얻게 된 결론이었고 이론적으로도 설명되는 가장 타당한 결론이었다. 이러한 Rayleigh의 확

신은 실험적 연구와 수학적 연구를 병행하는 가운데 각각 이 서로를 지지하는 결과를 얻음으로써 강화된 것이었다.

V. 결론

소리의 방향 지각에 대한 현대적 이론에서는 지속적인 음의 경우에 소리의 방향 지각이 약 1000 Hz까지의 진동수에 대해서는 주로 두 귀에서의 위상차로 이루어지고, 4000 Hz 이상의 소리에 대해서는 세기차에 의해 이루어지며, 그 사이에서는 두 방법이 혼용하면서 소리의 방향 지각의 정확성이 떨어지는 것으로 알려져 있다[11]. 이는 기본적으로 위상차에 따른 소리 방향 지각 메커니즘을 달라지며 낮은 진동수에서는 위상차, 높은 진동수에서는 세기차에 의한다는 Rayleigh의 이론의 틀을 그대로 유지하고 있는 것이다. 이런 점에서 Rayleigh의 이론이 현대적 이론의 뼈대를 형성했다고 할 수 있으며 이는 그의 치밀한 실험 및 이론 연구의 성과가 인정받고 있다는 점에서 주목할만하다.

Rayleigh가 소리의 방향 지각 문제를 거의 그의 연구 경력 전 시기에 걸쳐서 간헐적으로 꾸준히 다루었다는 점은 특이하다. 그의 음향학 연구는 주로 물리적인 음의 특성에 모아졌으므로 심리 음향학적 문제는 그의 주된 관심사는 아니었다. 그럼에도 불구하고 Rayleigh는 유독 소리의 방향 지각 문제에 대해서만 많은 관심을 쏟았다. 이는 소리의 방향 지각 문제가 다른 심리 음향학적 주제에 비해서 물리적 접근이 용이한 주제였던 것이 중요한 이유인 것으로 보인다.

이 연구 과정에서 이루어진 그의 실험은 철저하게 정교화된 실험 세팅으로 특징 지워진다. 현상에 대한 통찰력을 통해 이론적 고찰이 이루어지면 이것을 확실하게 검증할 수 있는 정교화된 실험 설계를 이루어냄으로써 Rayleigh는 자신의 이론을 입증하는 방식은 주관적 판단이 개입하기 쉬운 이 영역의 연구에 엄밀성을 불어넣었다. 이러한 연구 방법이 그가 다른 진동수 대역에서 소리의 방향 지각 메커니즘이 세기차 감지와 위상차 감지로 나뉘어지는 것을 찾아내는 결정적인 추진력을 제공했다. 또한 그는 수학적 이론에도 정통해 있었기 때문에 머리가 유발하는 소리 그들의 효과를 수학적으로 검토할 수 있었고 이를 근거로 낮은 진동수와 높은 진동수에서 머리에 의한 소리

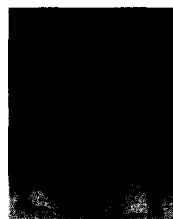
그들의 효과가 상당히 차이가 난다는 것을 인식할 수 있었다. 이러한 그의 수학적 전문성은 Wilson과 Myers의 논문에서 나타난 실험 해석의 문제점을 간파하는데도 능력있게 발휘되었다. 이런 점에서 Rayleigh의 음향학 연구에 있어 실험과 이론의 긴밀한 연결은 탁월한 성과를 내는 기초가 되었다고 평가할 수 있다.

참고 문헌

1. E. G. Boring, *Sensation and Perception in the History of Experimental Psychology*, Appleton-Century-Crofts, New York, 1942.
2. Rayleigh, "Our perception of the direction of a source of sound," *Nature* 14, 32-33, 1876.
3. Rayleigh, "Acoustical observations I," *Philosophical Magazine* 3, 456, 1877.
4. Rayleigh, "On the Acoustic Shadow of A Sphere," *Philosophical Transactions* 203 A, 87-110, 1904.
5. Rayleigh, "On our perception of sound direction," *Philosophical Magazine* 13, 214-232, 1907.
6. Rayleigh, *The Theory of Sound*, 2, 253-258, Dover Publications, New York, 1945.
7. Rayleigh, *The Theory of Sound*, 1, 385, Dover Publications, New York, 1945.
8. H. A. Wilson and C. S. Myers, "Binaural phase differences in the localisation of sound," *British Journal of Psychology* 2, 363-385, 1908; C. S. Myers and H. A. Wilson, "On the perception of the direction of Sound," *Philosophical Transactions* 80, 260-266, 1908.
9. Rayleigh, "On the perception of the direction of sound," *Proceedings of Royal Society A*, 83, 62, 1909.
10. Rayleigh, *The Theory of Sound*, 1, 402, Dover Publications, New York, 1945.
11. T. D. Rossing, *The Science of Sound*, 2nd ed, Addison-Wesley Publishing Company, New York, 1990.

저자 약력

● 구 자 현 (Ja-Hyon Ku)



1966년 9월 30일생
 1989년 2월: 서울대학교 물리학과 (이학사)
 1995년 2월: 서울대학교 과학사 및 과학철학 협동과정 (이학석사)
 논문: '헬름홀츠의 생리학 연구의 특성과 청각의 공명이론,'
 2002년 8월: 서울대학교 과학사 및 과학철학 협동과정 (이학박사)
 논문: '레이리 (1842-1919)의 음향학 연구의 성격과 성과'

1997년 8월~현재: 서울대학교 시간강사
 1999년 9월~현재: 건국대학교 시간강사