

레이리의 실험 음향학 연구의 성과: 도구의 개선과 정밀성의 증진

Accomplishments of Rayleigh's Experimental Research: Improvement of Instruments and Enhancement of Precision

구 자 현*
(Ja-Hyon Ku*)

*서울대학교 과학사 및 과학철학 협동과정
(접수일자: 2002년 9월 2일; 채택일자: 2003년 1월 19일)

레이리는 수학적 이론에 능했을 뿐 아니라 실험 음향학자로서 중요한 기여를 했다. 그는 리케의 열에 의한 음발생 장치와 노래하는 불꽃을 순음 발생 장치로 개선했다. 무엇보다도 그가 만든 인공 새소리 발생장치는 실험용 음원의 개선에서 결정적으로 기여했다. 이 장치는 초음파를 발생시켜 실험실 안에서 소리의 직진, 굴절, 회절, 간섭의 실험을 교란없이 수행할 수 있게 해주었다. 또한 레이리는 소리의 검출장치로서 민감 불꽃을 개선했다. 그는 또한 정밀한 회전속도 조절장치 (소리 바퀴)와 소리의 절대 세기를 측정하는 장치 (레이리 원반)를 만들어 실험 음향학의 정밀성의 증진에 기여했다.

핵심용어: 레이리, 노래하는 불꽃, 인공 새소리, 민감 불꽃, 소리 바퀴, 레이리 원반

투고분야: 일반 분야 (0.1)

Rayleigh was an excellent experimenter as well as a theorist. Rayleigh improved Rijke's sounding device by heat and the singing flame into sources of pure tones. Above all, his making of the artificial bird whistle was a critical achievement in the improvement of experimental sound sources. This source made supersonic waves available in the laboratory and thus paved the way to confirmable observations of reflection, refraction, diffraction and interference of sound in the laboratory. Furthermore, Rayleigh augmented the sensitivity of sensitive flames as detectors for sound wave. Besides, he devised a phonic wheel which could precisely control the angular velocity of some acoustical instruments and made the Rayleigh-disk that enabled experimenters to measure the absolute value of the sound intensity. These devices enhanced the exactness of acoustical experiments.

Keywords: Rayleigh, Singing flame, Artificial bird call, Sensitive flame, Phonic wheel, Rayleigh-disk

ASK subject classification: General (0.1)

I. 서론

19세기 말과 20세기 초의 영향력 있는 영국의 과학자이자 1904년 노벨 물리학 수상자인 레이리의 주된 과학적 관심사는 음향학적 연구였다. 케임브리지 대학을 졸업하면서 1860년대 후반에 시작된 레이리의 과학자로서의 경력 내내 레이리는 음향학적 진동과 연관된 실험적 및 이론적 연구에 매진하여 중요한 성과들을 많이 배출하였다[1].

헬름홀츠의 공명기를 사용하는 실험으로 음향학 연구를 시작한 레이리는 실험적 연구를 계속 진행할 뿐 아니라 케임브리지 대학의 수학 우등졸업시험 (Mathematical Tripos) 1위의 영예를 차지한 수학적 능력을 발휘하여 수학적 진동 연구도 병행하여 1877년과 1878년에 『음향 이론』 (*The Theory of Sound*)을 출판하였다[2]. 음향학자 린제이 (R. Bruce Lindsay)가 현대 음향학의 신기원을 열었다고 평가한 이 책은 수학적 논의와 실험적 논의를 긴밀히 연결시킨 통합된 음향학 저술의 효시가 되었다[3]. 이전의 음향학적 진동에 관계된 실험적 연구와 이론적 연구를 정리할 뿐 아니라 레이리 자신의 독창적인 연

책임저자: 구자현 (taramdgc@netian.com)
151-742 서울시 관악구 신림동 산56-1
서울대학교 과학사 및 과학철학
(전화: 02-3285-2185)

구를 망라한 『음향 이론』은 이후의 음향학 연구자들에게 의해 수학적 및 실험적 논의에서 권위적인 저술로 사용됨으로써 음향학이 단일한 분야라는 인식을 확장시켰다. 뿐만 아니라 이 책은 진동 및 파동에 관한 일반론을 중요시하고 물리적 계를 수학적으로 취급하는 새로운 방법을 제시하여 비음향학적 물리학에서도 영향력을 행사했다[4].

레이리의 수학적 이론가로서의 명성 때문에 그가 탁월한 음향학 실험 연구자였다는 사실은 덜 알려져 있다. 레일리는 중요한 도구의 개선을 통해서 이후의 음향학 연구에 기여했을 뿐 아니라 자신의 실험실에서 직접 제작한 실험 장치를 사용하여 중요한 실험적 발견을 이루어내었다. 레일리는 실험실에서 음향학적 연구를 용이하게 만들거 줄 수 있는 도구로서 조절 가능한 음원을 제작하였다. 특히 인공 새소리 발생장치는 짧은 파장의 소리를 발생시켜 실험실 규모의 음향학 실험을 용이하게 만들어 주었다. 또한 레일리는 음파를 감지하기 위한 시각적인 도구에 대한 요구에 부응하여 민감 불꽃의 민감성을 향상시켰으며 민감 분사물에 대한 치밀한 연구를 수행하여 의미있는 성과를 내어놓았다. 또한 레일리는 음향학 실험을 정밀하게 수행하기 위한 회전속도 제어기와 소리의 절대적 세기를 측정할 수 있는 공기진동 측정기를 고안하여 음향학 실험에 정밀성을 증진시켰다.

II. 소리 취급 기술의 개선

19세기 후반 동안 소리 취급 기술의 진보는 두드러졌다. 이것에 진보라는 말을 쓸 수 있는 이유는 인간의 소리에 대한 통제력이 그만큼 향상되었기 때문이다. 이제 소리는 실험자가 다루기 쉬운 형태로 생산되고 실험자가 객관적으로 검출할 수 있는 대상이 되었다. 이는 단조화 진동으로 표현되는 순음(純音)을 원하는 진동수로 지속적으로 발생시킬 수 있는 음원의 확보와 공간상에서 소리를 국소적으로 검출할 수 있는 정밀한 검출 장치의 사용을 통해 가능해졌다[4,5].

이러한 소리 취급 기술의 진보에 있어 레일리의 기여는 주동·활판한 것이었다. 이는 레일리의 꾸준한 노력의 결과였다. 레일리는 다른 실험 연구자들이 고안하고 사용한 실험 장치를 자신의 작업실에서 직접 제작하여 실험을 수행하는 경우가 많았지만 그것의 단순한 재현에서 그치지 않고 그러한 실험 기구를 더 나은 기능을 갖도록 개선하거나 다른 목적을 가진 기구로 전용함으로써 그 기구의 가치를 높였다. 또한 레일리는 다른 연구자들의 연구를

재현하면서 그들에 의해 검토되지 않은 사항에 착안하여 이를 알아내기 위한 새로운 실험을 고안해 냄으로써 기존의 성과를 확장시켰다.

2.1. 음원에 관한 실험 연구

음향학적 실험 탐구에서 레일리 이전까지 사용되었던 음원들은 대부분이 일상적으로 들을 수 있는 소리들을 발생시키는 장치들이었다. 그러나 이런 소리들은 복합음이었기 때문에 단순한 파형을 갖지 않았고 음향학 실험 연구자들이 취급하기에 불편했다. 음향학자들은 순음을 지속적이고 안정하게 발생시켜 주고 더 나아가 음의 진동수나 세기를 원하는 대로 쉽게 조절할 수 있는 장치를 요구하였다.

레이리가 음원에 대한 연구에 뛰어 들게 된 것은 개선된 음원에 대한 음향학 연구자들의 요구가 무르익은 시점에서였다. 그는 소리를 발생시키는 장치를 개선함으로써 음향학 실험 연구에 실질적인 도움을 주기를 원했다. 그런 점에서 노래하는 불꽃(singing flame)은 탐구될 가치가 있었다. 레일리는 1870년대 후반에 노래하는 불꽃을 음향학 실험에서 다양하게 활용하였고 실험의 용도에 부합하도록 이것을 개선하였다. 당시까지 일반적인 노래하는 불꽃은 수소 불꽃 위에 양쪽이 열린 원통형 관을 수직으로 세운 것으로 수소 불꽃으로 가열된 공기 기둥이 일정한 진동수의 음을 발생시키게 되어 있었다. 이때 보통 원통형 관은 순음이 아닌 복합음을 발생시켰으므로 음원으로서 별로 적당하지 않았다. 레일리는 순음을 발생시키는 음원으로 사용하기 위해 이 장치를 개선하였다.

레이리는 1875년에 우선 유리 공명기와 수소 불꽃을 이용해서 95 cps¹⁾의 순음을 만들어 내었다[6]. 일반적으로 노래하는 불꽃으로는 높은 진동수의 음보다 낮은 진동수의 음을 만들어 내기가 더 어려웠는데 레일리는 같은 종류의 더 큰 공명기--산소 속에서 황의 연소를 보여주 기 위해 만들어진 짧은 목을 가진 유리구--를 이용해서 64 cps의 순음을 만들어냈다. 레일리는 더 낮은 진동수의 음을 내는 노래하는 불꽃을 만들 수 있는자를 알아보기 원했다. 그는 자연 진동수가 64 cps인 공명기에 직경 2인치, 길이 14인치인 종이관(paste board tube)을 연결하였다. 레일리는 계산을 통해서 이 경우에는 25 cps의 음을

1) cps는 cycles per second의 줄임말로 19세기에는 진동수의 단위로 같은 의미의 Hz 대신에 널리 쓰였다. vibrations per second라는 단어도 19세기에 널리 쓰였으나 이 논문에서는 모두 cps로 통일하여 적기로 한다.

낼 수 있을 것이라고 예상했는데 실제로도 수소 불꽃이나 다른 일반 가스 불꽃을 사용해서 동일한 진동수의 음을 얻을 수 있었다[6]. 잠깐 동안 단일한 진동수의 순음을 얻기 위해서는 다른 형태의 공명기, 예를 들면 입구가 넓은 병이나 항아리(jar)를 불꽃 위에 거꾸로 설치하는 것으로 충분했다. 그러나 이것으로는 원하는 순음을 지속적으로 얻을 수 없었다. 위가 막힌 병의 경우에 내부의 공기가 제한되어 있어 시간이 경과함에 따라 소리가 점차 약화되기 때문이었다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 레일리는 가운데가 부풀어 있지만 위아래로 통기(通氣)가 가능한 전구 모양의 파라핀 램프의 등피(paraffin-lamp chimney)를 사용하였다. 그는 좀더 확실한 음을 내기 위해서 구멍이 뚫린 나무판으로 아래 구멍을 막고 밀랍으로 밀착시켜 주었다. 이로써 레일리는 지속적으로 원하는 낮은 진동수의 순음을 얻을 수 있었다. 또 노래하는 불꽃이 일정한 진동음을 내게 하기 위해서는 수소 불꽃의 세기를 일정하게 조절하는 것이 중요했다. 순음이 나오더라도 불꽃의 세기가 일정하지 않으면 진동수가 불안정해 좋은 음원이 될 수 없었기 때문이었다. 이를 해결하기 위해서 레일리는 일반적으로 사용하는 수소병 대신에 가스의 압력을 일정하게 유지시켜 줄 수 있는 가스 용기(gas holder)를 사용하였다.

레일리는 이렇게 만든 지속적 순음 발생 장치에서 나오는 음이 진정으로 순음인지 그리고 그 진동수는 일정한지 확인해 볼 필요가 있었다. 이를 위해 레일리는 맥놀이(beat)를 이용하였다. 표준적인 소리굽쇠는 일정한 진동수의 순음을 지속적으로 발생시키므로 표준적인 소리굽쇠와 새로 만든 장치에서 비슷한 진동수의 순음을 동시에 내게 하면 이들 사이에 맥놀이가 나타나고 맥놀이 진동수가 일정한 것으로부터 새 장치가 순음을 안정적으로 발생시키는 것을 확인할 수 있었다. 레일리는 이 확인 실험에서 자신의 장치와 표준적인 소리굽쇠 사이에서 2초 이상의 주기를 갖는 맥놀이를 일으킬 수 있었다. 이때 그는 두 음원에서 나오는 순음의 세기가 거의 같으면 거의 소리가 안 들리는 현상 즉, '근사적인 침묵'(approximate silence)이 일정한 간격으로 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이로써 개선된 노래하는 불꽃은 지속적 순음 발생 장치로서 사용될 수 있었다.

레일리는 또 다른 흥미로운 음 발생 현상인 열에 의한 음의 발생 장치를 개선하여 그 효과를 보다 확실하게 만들었다. 이는 새로운 현상에 대한 탐구이면서 동시에 사용하기 편리한 새로운 음원을 찾아내려는 노력의 일환이었다. 1859년에 리케(Peter Leonhard Rijke)는 가열된

금속 그물(metal gauze)에 의해 관 속에서 소리를 만드는 특이한 장치에 관해 발표하였다. 레일리는 이 장치를 대규모로 꾸며서 효과가 더 확실한 장치로 재현하는데 성공했다. 그는 5피트 길이에 4.75인치의 직경을 갖는 주철 파이프를 자신의 실험실 지붕에 있는 들보에 매달아 테이블 위로 늘어뜨렸다. 그는 이 파이프의 내부에 꼭 끼일 정도의 직경을 갖도록 주물을 망치로 두드려 금속 그물을 만들었다. 그는 이 금속 그물을 파이프의 아래에서 1피트 높이까지 밀어 올려 마찰에 의해 제 높이를 유지하도록 하였고 파이프 아래 열린 구멍을 통해서 커다란 장미 버너(rose burner)에서 나오는 불꽃으로 이 금속 그물을 밝은 붉은색이 될 때까지 가열했다. 또한 그는 가열되는 금속 그물의 색을 보기 위해서 파이프의 아래쪽 구멍에 거울을 설치해서 안을 들여다볼 수 있도록 했다. 레일리는 금속 그물이 원하는 색까지 가열되면 가스의 공급을 중단하거나 버너를 제거하였다. 그로부터 약 1초 후부터 일정한 진동수의 음이 나오기 시작했다. 처음에는 방을 흔들 정도로 큰 소리가 났는데 잠시 후 그 소리는 점차 줄어들었다. 소리의 지속 시간은 10초 정도 되었다. 레일리는 다른 연구자가 고안한 실험 장치를 이렇게 대규모로 꾸밈으로써 작은 장치로는 미미한 효과밖에 낼 수 없었던 것을 확실한 효과를 낼 수 있도록 만들어 음원으로서의 가치를 향상시켰다.

레일리가 개발한 음원으로서 특히 주목할만한 것은 새 소리 발생 장치이다. 이 장치는 초음파까지 발생시킬 수 있는 장치로서 극히 짧은 파장의 소리를 발생시킴으로써 소리의 취급을 훨씬 용이하게 만들어 주었다. 이로써 실험실 내에서 안정하고 지속적인 초음파 음원을 레일리는 확보할 수 있었다. 초음파의 사용은 실험 음향학상 중요한 발전이었다. 보통의 가청 음파는 파장이 길어 여러 가지 취급상의 어려움이 있었지만 초음파의 경우에는 파장이 2 cm 이내에 불과하여 여러 가지 음향학적 현상들을 실험실 내에서 관찰하는 것을 가능하게 만들어 주었다. 레일리가 이 장치를 개발하기 전에 일반적으로 알려진, 겨우 들을 수 있는 단파장(短波長)의 음파로는 새소리가 있었다. 그리하여 레일리는 새소리를 닮은 높은 음을 발생시키는 장치를 개발하였다. 그 이전에 초음파를 발생시키는 장치가 없었던 것은 아니지만 레일리의 인공 새소리 발생 장치처럼 적극적으로 음향학 실험에 도입되어 중요한 실험상의 진보를 가져온 장치는 없었다.

레일리는 인공 새소리를 얇은 판의 원형 구멍으로부터 나온 공기의 흐름이 이 구멍으로부터 약간의 거리에 평행하게 유지되는 원형 구멍에 주입되도록 하여 만들었다

[7,8]. 레일리는 주석으로 된 지름 1 내지 2 cm의 원형 판에 지름 0.5 mm의 구멍을 뚫고 여기에 꼭 맞는 튜브를 연결하였다. 그리고 주석판의 반대편에 가운데 구멍이 있는 삼각형의 주석판을 1 mm의 간격을 두고 나란히 접근시킨 상태에서 삼각형의 변들을 아래 원판에 납땀하였다. 그런 상태에서 공기를 빠르게 주입시키면 파장이 1 cm인 고음을 얻을 수 있었고 주의 깊게 공기의 흐름을 조절하면 파장 0.6 cm, 진동수로 따지면 50,000 cps의 초음파를 얻을 수 있었다. 이때 진동수를 일정하게 유지시키기 위해서는 바람의 세기를 일정하게 유지시킬 필요가 있었는데 이를 위해서는 액주식 압력계가 요긴하게 사용되었다. 다소 강한 압력은 나사식 핀치콕을 연결 고무 튜브에 설치하여 제어될 수 있었다.

레이리가 이렇게 짧은 파장의 소리를 얻을 수 있게 됨으로써 실험실 규모의 음향학 실험은 훨씬 용이해졌다. 그 이전에는 좀처럼 좋은 결과를 내지 않았던 소리의 반사, 회절, 간섭 등의 실험이 실험실 내에서 이루어질 수 있었다. 실험실이라는 닫힌 공간은 일반적으로 음향학 실험에서 사용되었던 낮은 주파수의 소리로 반사, 회절, 간섭 실험을 하기에는 적당하지 않았다. 그 이유는 파장이 긴 소리가 파장이 짧은 소리에 비해서 실험실의 벽과 가늀에서 더 심하게 교란되었기 때문이었다. 그러나 이제는 새소리를 실험에서 사용하게 됨으로써 교란을 줄여 주었기에 정밀한 실험이 가능해졌다.

단파장 음원의 또 다른 유익은 소규모의 재현 실험에서 사용될 수 있다는 점이다. 레일리에 의해 새소리를 사용해서 재현된 소규모 실험의 대표적인 예는 속삭임 회랑 (whispering gallery)의 재현 실험이다[9]. 속삭임 회랑은 이해하기 힘든 기이한 현상으로 일찍부터 음향학 연구자들의 관심을 끌었다. 레일리 자신도 일찍이 이에 대한 관찰 연구를 수행하였고 소리가 바다 근처에서 원형 회랑의 호를 따라 기어간다는 주장을 한 적이 있었다. 반면에 에어리는 이 건물이 작은 소리를 놀랍게 잘 전달하는 것은 반구형의 돔에서 소리가 반사되기 때문이라고 보았다. 1904년경에 레일리는 에어리의 주장을 비판하고 자신의 주장을 입증하기 위해 소규모 실험을 계획하였다. 여기에 레일리의 새소리 발생 장치가 요긴하게 사용되었다. 레일리는 2피트의 폭과 12피트의 길이를 갖는 아연판을 반원 형태로 구부려 놓고 한쪽 끝 부분에 파장이 2 cm인 새소리 발생 장치를 설치하고 소리가 접선 방향으로 방출되도록 하여 속삭이는 사람 (whisperer)의 역할을 하게 하고 다른 쪽 끝 부분에는 민감 불꽃을 설치하여 듣는 사람의 역할을 하게 하였다. 여기에서 새소리 발생 장치

를 써야 하는 이유는 속삭임 회랑이 소규모로 만들어졌기 때문에 거기에서 전파되는 음파도 소규모로 만들어 주어야 했기 때문이다. 레일리는 설치된 민감 불꽃이 플레어링 (flaring)²⁾을 일으키는 것을 통해서 소리가 그곳에도 달한 것을 확인할 수 있었다. 이때 레일리는 장애물을 새소리 발생 장치와 민감 불꽃 사이에 놓아서 소리가 직접 전달되지 못하게 하였지만 불꽃은 여전히 플레어링을 일으켰다. 그러나 아연판의 안쪽 곡면을 따라 중간 부분에 폭이 2인치가 넘지 않는 나무판을 놓았을 때 불꽃은 안정을 되찾아 소리가 효과적으로 차단되었음을 나타냈다. 이것은 확실히 소리가 곡면의 안쪽을 따라 둥글게 퍼져간다는 것을 입증해 주었고 레일리의 주장과 일치하는 결과였다. 이와 같은 축소화된 모형 실험은 대규모의 상황을 실험실 안에서 재현할 수 있도록 해 줌으로써 공간의 제약으로 오는 실험의 오차 요인들을 줄일 수 있는 효과를 발휘하였다[10]. 이렇게 음향학 실험 연구에서 초음파는 소리에 대한 연구자의 통제력의 범위를 확장시켜 주었다.

2.2. 민감 불꽃의 개선

실험에서 소리의 검출은 객관적이면서 정확해야 했다. 이를 위해서는 어떠한 특정한 공간에 소리, 즉 매질의 진동이 존재하는가 그렇지 않은가를 확인하는 것이 필요했다. 그러나 거의 유일하게 사용되어 왔던 소리의 검출 도구인 사람의 귀는 많은 약점을 가지고 있었다. 우선 귀는 국소적 검출에 불리했다. 사람의 귀가 들이기 때문에 음파의 존재 위치를 귀로 확인할 때 그것은 머리 크기 정도의 오차의 범위를 가질 수밖에 없었다. 이는 사람이 소리를 들었을 때 그것을 오른쪽 귀로 들었는지 왼쪽 귀로 들었는지를 정확하게 분별할 수 없기 때문이다. 이를 피하기 위한 방안으로 한쪽 귀를 막는 방법이 널리 사용되었는데 귀를 막고도 소리가 뺨을 통해 전달되기 때문에 이러한 노력이 그렇게 성공적이지는 못했다.

소리 검출 장치로서 귀의 또 다른 약점은 객관성 확보의 어려움에 있었다. 청력이 있어 개인차는 의외로 심해서 훈련받은 민감한 귀와 평범한 사람, 특히 나이드는 사람의 귀는 들을 수 있는 소리의 세기와 진동수에 있어 매우 차이가 컸다. 그러므로 실험의 재현 가능성이 개인차에 의해 크게 달라졌고 이로써 실험의 객관성의 확보도 상당한 장애가 뒤따랐다. 그러므로 훈련받지 않은 귀로도 특정 음을 들을 수 있게 만들어 주는 장치가 부지런히 연구되었다. 헬름홀츠 공명기도 그런 목적으로 활용되었다.

2) 불꽃이 크게 요동하는 현상을 지칭한다.

이 도구는 귀가 감별하기 어려운 배음을 분리시켜 증폭시킴으로써 훈련받지 않은 일반인이 손쉽게 배음을 검출할 수 있게 만들어 준 장치였지만 미약한 순음을 증폭시키는 데에도 활용되었다.

귀를 써서 하는 실험이 갖는 또 다른 약점은 청각이 시각에 비해 신뢰도가 무척 낮다는 점에 있었다. 사람은 청각보다 시각에 대한 의존도가 매우 커서 귀로 하는 관찰보다 눈으로 하는 관찰이 더 객관적이라고 믿는 경향이 있다. 따라서 소리의 존재를 귀로만 알 수 있고 눈으로 확인할 수 없다는 것은 음향학 실험 연구자들에게 걸림돌이었다. 이러한 문제를 해결하기 위해 19세기 실험 음향학자들은 진동의 시각화를 추구하고 많은 성과를 얻어내었다.

이런 이유에서 레일리는 음원의 개선뿐 아니라 소리 검출 장치의 고안 및 개선을 위해 부단히 노력했다. 레일리가 시각적 소리 검출 장치로서 우선적으로 주목한 것은 민감 불꽃이었다. 1880년에 레일리는 이미 탄들이 소리 검출 장치로 개량하여 소개하였던 민감 불꽃을 더 나은 장치로 만들어내려는 시도에 관해 발표했다[11]. 이 장치는 기본적으로는 탄들의 민감 불꽃과 그 원리가 크게 다르지는 않았다. 탄들의 민감 불꽃은 불꽃의 기부(基部)인 분사 부위가 소리를 감지하는 부분이었고 불꽃은 단지 지시자(indicator)의 역할을 하게 되어 있었다. 그러므로 민감 불꽃은 수 밀리미터 정도의 지름을 갖는 작은 영역인 불꽃의 기부 근처에 존재하는 공기의 진동을 불꽃의 흔들림으로 가시화하는 점에서 국소화의 능력이 귀에 비해 탁월했다. 또한 민감 불꽃은 청력의 개인차에 관계없이 누구나 불꽃의 흔들림에 의해 소리의 존재를 시각적으로 확인할 수 있고 심지어 가청 주파수의 영역 밖에 있는 소리까지 그 존재를 눈으로 확인할 수 있다는 장점을 가졌다.

그러나 민감 불꽃이 실험에서 소리 검출 도구로 쓰이는데에는 한 가지 제약이 따랐다. 민감 불꽃은 소리에 민감하지만 미세한 외풍(外風)에도 쉽게 불꽃이 교란되는 단점을 가졌다. 이러한 단점을 제거하기 위해서 1870년대에는 버너의 가스 분출구 주위를 관으로 둘러싸서 공기가 스며들지 못하도록 밀봉하고 이 관의 끝에 분사물이 도달해야 불이 불도록 하는 장치가 제안되었다. 그러나 이 경우에는 외부 공기의 진동이 민감성의 장소인 불꽃의 기부에 도달하기가 어렵고 도달하더라도 세기가 매우 약화된 상태에서 도달하여 민감성을 극도로 저하시켰다.

레일리는 이러한 종전의 민감 불꽃들이 갖는 단점을 보완하는 장치를 고안하려고 애썼다. 그는 외풍에 쉽게

교란되지 않으면서도 민감성을 떨어뜨리지 않는 새로운 장치를 고안하기를 원했던 것이다. 마침내 레일리는 이러한 요건을 충족시키는 민감 불꽃 장치를 고안해냈다. 레일리가 개선한 민감 불꽃은 다음과 같은 모양을 하고 있었다. 바늘구멍 버너(pin hole burner)에서 석탄 가스의 분사물이 공기를 빼버린 공동(cavity) 안으로 수직으로 주입되었고 그것은 몇 인치 정도의 길이의 낫쇠관으로 유입되어 그 위 끝에 이르면 바깥 공기를 만나 불이 붙어 타게 되어 있었다. 그 공동의 앞쪽 벽은 탄력이 있는 박엽지(tissue paper)의 막으로 막아 놓아 그것을 통해서 외부의 소리의 진동이 버너에 도달할 수 있게 되어 있었다. 이것은 종전의 장치처럼 가스의 압력을 그렇게 높이지 않아도 민감성을 충분히 확보할 수 있었다. 민감성의 장소가 공동의 앞부분의 탄력적인 막으로 대체됨으로써 외풍에 의해 불꽃이 요동하는 것을 막아주면서도 소리의 진동은 잘 전달될 수 있게 되었다. 이렇게 개선된 소리 검출 장치는 이후에 레일리의 정교한 음향학 실험을 위한 기초가 되었다.

III. 정밀성의 증진

음향학을 엄밀과학으로 승격시키려는 레일리의 이상은 그의 수학적 작업뿐 아니라 실험에서도 정밀성을 증진시킬 수 있는 여러 가지 방안을 끊임없이 모색하게 만들었다. 레일리는 이론에서는 계산 수학의 진작을 통해서 정확한 상수값들을 얻어 정밀한 이론적 유도값을 내어놓았고 실험에서는 되도록 정밀한 관측을 가능하게 해주는 장치를 만들어 내려고 부단히 노력했다. 여기에서는 실험에서의 정밀성의 증진을 위한 레일리의 노력 중 두드러진 두 가지 사례를 살펴도록 하겠다.

너무 빨리 진동해서 볼 수 없는 물체를 가시화하려는 노력은 19세기 후반기에 상당한 성과를 거두었다. 그것은 회전 거울, 진동 현미경, 스트로보스코프 등을 통해서 가능해졌는데 특히 토폴러의 스트로보스코프는 빠르게 반복되는 운동을 느리게 볼 수 있게 해주는 장치로서 감각의 한계를 뛰어 넘게 해주는 요긴한 도구였다[12]. 이것은 단순한 관찰 도구가 아닌 측정 도구로서 빠르게 진동하는 물체의 진동 주기를 측정하는데도 사용되었다. 이러한 진동 주기에 대한 정밀한 측정을 위해서는 스트로보스코프의 회전판을 회전시켜 주는 속도를 손쉽게 조절하고 일정하게 유지시켜주는 것이 꼭 필요했다.

이러한 필요성에 부응해서 레일리는 회전 속도 조절기

의 고안을 위해 노력하였다. 그 결과로 1878년에 발표된 것이 회전 속도를 일정하게 유지시켜 주는 회전 속도 조절 장치였다[13]. 이 장치가 고안되기 이전까지는 등속 원운동이 요구되는 축은 보통 작은 수평 수력 엔진이나 전자석 조절 장치에 의해 근사적인 등속으로 구동되었다. 이러한 장치는 엄밀하게 등속 원운동을 하는 것이 아니기 때문에 정밀한 실험을 위해서는 부적절했다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 레이리에 의해 고안된 것이 소리굽쇠에 의해 제어되는 조속기(調速機)였다. 레이리는 회전축 주위에 등간격으로 4개의 연철 접극자(armature)를 배열하고 그것이 회전하면서 주기적으로 그로브 전지(Grove cell)의 회로에 연결된 말굽 전자석의 극 앞에 오게 하였다. 말굽 전자석에 전류가 일정한 주기로 단속적으로 공급되면 접극자는 말굽 전자석의 밑고 당기는 힘에 의해서 일정한 속력으로 회전했다. 레이리는 전자석에 단속적인 전류를 공급하기 위해서 1초에 40회 진동하는 소리굽쇠의 가지 끝이 작은 백금 압편에 주기적으로 닿도록 하고, 이 소리굽쇠와 압편이 회로의 일부가 되게 하였다. 이렇게 만들어진 초당 40회의 단속적 전류를 소리굽쇠의 두 가지 사이에 놓인 다른 전자석에 흐르게 하면 이 전자석의 인력에 의해 소리굽쇠의 진동이 계속 유지되면서 처음의 전자석에 단속적 전류를 공급할 수 있었다. 회전축은 소리굽쇠가 4번 진동할 때마다 한 번씩의 회전을 하기 만들어져 있었으므로 이 장치는 초당 10회의 회전을 하기 되어 있었다. 추진력이 원하는 속력을 만들어내기에 적당하면, 접극자는 전자석에 의해 끌려서 전자석의 자화(磁化) 주기의 중간에 정확하게 전자석의 맞은편에 도달했다. 이 위치가 유지되면 자석은 전반적으로 그것에 영향을 미치지 않게 되지만 만약 추진력에 교란이 생겨 접극자가 본래의 위치에서 벗어나게 되면 이 잘못이 보스될 때까지 자석에 의해 끌리게 되어 있었다.

레이리는 이러한 작동이 더욱 원활하게 일어나게 하기 위하여 접극자가 부착되어 있는 회전축에 물이 차 있는 동심의 원형 금속 튜브를 설치하였다. 이것은 회전축의 회전 속도가 증가할 때나 감소할 때 속도의 증감을 저지하는 역할을 했다. 그리고 더불어 회전축이 등속으로 운동하는가를 확인할 수 있는 보조장치로서 회전축과 함께 회전하는 검은색 원반에 동심의 고리 모양으로 숫자를 갈라 한 구멍들을 뚫어 이 구멍으로 진동하는 소리굽쇠를 관찰할 수 있게 하였다. 회전 속도가 등속으로 유지될 경우 4개의 구멍이 뚫린 고리를 통해서 소리굽쇠를 들여다보면 소리굽쇠의 가지가 정지해 있는 것으로 보였고, 이를 통해 등속 원운동이 지속되고 있는지를 정확하게

알 수 있었다. 이 조속기는 스트로보스코프를 정밀하게 등속 원운동시키는 것을 가능하게 해주었고 이로써 고속 진동체의 진동의 관찰이나 진동 주기의 측정이 정확해졌다. 이 장치와 유사한 장치가 라쿠르(La Cour)에 의해 수년 전 '소리 바퀴'(phonic wheel)라는 이름으로 고안되었지만 레이리는 독립적으로 이 장치를 고안하였다.

실험 음향학의 정밀성을 증진시키려는 레이리의 시도는 또 다른 방면에서 결실을 보았다. 1880년 11월에 레이리는 미세한 공기 진동을 측정할 수 있는 장치를 고안하였다. 이 장치는 레이리가 케번디시 연구소에 부임한 후, 맥스웰이 남겨 둔 장치를 사용하여 시작하게 된 전기 저항의 표준을 정하려는 실험을 수행하는 가운데 착안된 것이었다[14]. 레이리는 코일의 전기 저항을 측정하기 위하여 지구 자기장 속에 원형 코일을 수직으로 세워서 대칭축을 회전축으로 삼아 회전시켜서 유도 전류를 만들고 그것에 의해 코일 안에 매달려 있는 자침이 편향을 일으키도록 해서 그 각도를 측정하고자 했다. 이 과정에서 레이리는 코일이 담겨 있는 상자 안에서 발생하는 기류에 의해 자침과 거기에 부착된 거울이 흔들리는 것을 발견했다. 이러한 현상에 착안하여 만들어진 것이 공기 진동 세기 측정기였다[15](그림). 그림에서 볼 수 있듯이 레이리는 낫쇠로 만든 튜브(A)의 한쪽 끝을 유리판(B)으로 막고 그 뒤에 슬릿을 설치하고 이것을 등으로 비추었다. 그리고 자석이 달린 가벼운 거울(D)을 낫쇠 튜브의 중간에 가는 명주실로 매달고, 슬릿에서 들어온 빛이 거울에 45도로 비추도록 하여 거울에 반사된 후에는 유리창(E)를 통해서 밖으로 빠져나와 렌즈(F)를 통과하여 눈금자(G)를 비추도록 했다. 낫쇠 튜브의 다른 쪽 끝은 박엽지로 된 박판(H)으로 막았는데 CD의 거리와 DH의 거리를 같게 조절했으며, 박판 뒤쪽에는 미끄럼 튜브 I를 끼워서

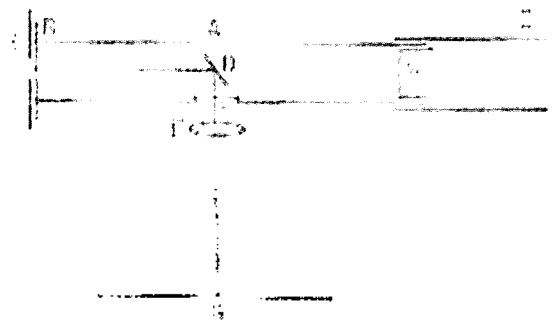


그림 1. 공기 진동 세기 측정기 (레이리 원반)
Fig. 1. A device for measuring the intensity of air vibration (Rayleigh-disk).

연장시켜 놓았다.

이 장치는 공기압과 자기력의 평형에 의해 공기 진동의 세기를 쥘 수 있도록 만들어진 것이었다. 이 원통의 CH의 거리가 반 파장에 해당하는 음이 I쪽으로 들어오게 되면 H는 튜브 안에 형성된 정상파의 마디가 된다. 이를 위해서 박판 H는 음파의 진행에 거의 방해가 되지 않아야 한다. 즉, 박판의 역할은 추가적인 공기의 흐름이 유입되는 것을 막는 것이다. 이때 D에는 배가 위치해 저울이 큰 공기의 요동에 노출되게 되어 튜브의 축에 대하여 직각이 되게 하려는 힘을 받게 된다. 이러한 경향이 자기력에 의해 저지되어 눈금자에 나타나는 상은 가해진 소리의 세기에 비례하여 이동하게 된다. 이로써 레일리는 가해진 소리의 세기를 비교할 수 있었다.

레일리는 이 장치의 민감성을 증진시키기 위해 지지기의 효과를 외부 자석을 설치하여 감소시키는 것 이외에도 매달린 자석의 관성 모멘트를 줄임으로써 이를 작은 힘에도 움직일 수 있도록 만드는 것이 중요하다고 지적했다. 레일리는 자신이 만든 이 장치가 만족스럽게 작동하는 것을 확인했고 이 장치를 사용하기 전에는 비슷한 세기로 생각했던 소리가 의외로 큰 세기 차이를 보이는 것을 확인하였다. 이후에 이 장치는 공기 중에서 발생한 소리의 세기 측정의 표준적 도구가 되었다. 레일리는 인간이 들을 수 있는 가장 작은 소리의 압력 진폭을 측정하는 데 이 장치를 사용하였고 50 cps의 음의 경우에 0.001 dyne/cm²의 압력 변이를 인간의 귀는 감지할 수 있다고 보고했다. 이러한 정밀 측정 도구는 이후의 실험 음향학의 엄밀성 증진에 중요한 기여를 했다.

IV. 결론

현대 음향학의 기초를 놓은 레일리는 그의 이론적 성과에 못지 않게 실험적 성과에 있어서 탁월했다. 특히 레일리가 실험적 연구에 매진하고 있었던 시기는 음향학에 있어서 소리의 취급 기술이 크게 향상되고 있었던 시기였다. 실험적으로 통제가 용이한 순음 발생장치의 요구에 따라 레일리는 리체가 발견한 열에 의한 음 발생을 대규모로 재현해 내었으며, 노래하는 불꽃을 순음 발생 장치로서 개선하였다. 무엇보다도 레일리가 실험용 음원의 개선에 결정적으로 기여한 것은 인공 새소리 발생장치였다. 이것은 일정한 압력의 공기를 작은 틈으로 불어넣으로써 초음파나 그에 가까운 높은 음을 발생시킬 수 있었다. 이 장치는 이후에 레일리의 음향학 실험에 실질적으

로 기여하였다. 이는 초음파를 음향학 실험에 본격적으로 사용하게 된 첫 케이스에 속한다. 초음파의 사용은 소리의 반사, 회절, 간섭 현상을 실험적으로 관찰하는데 중요한 기여를 하였다.

레일리의 또한 실험 음향학적 연구 성과로서 두드러진 것은 민감 불꽃에 대한 연구였다. 이것들은 소리의 검출 장치로서 귀의 약점을 극복하기 위한 실질적인 도구였다. 레일리는 민감 불꽃의 민감성을 유지하면서 외풍에 대한 교란을 줄이는 장치를 만들었다. 레일리는 음향학 실험의 정밀성을 확보하기 위한 장치를 고안하는 데 있어서도 중요한 기여를 했다. 그는 '소리 바퀴'를 스스로 고안하여 회전 속도를 정밀하게 제어할 수 있도록 했고 소리의 진동 세기의 절대값을 정밀하게 측정할 수 있는 장치를 제작하여 사용하였다. 이는 그의 전기 표준 연구 중에서 발견한 현상을 응용한 것이었다.

이러한 레일리의 실험 기구의 개선은 계속된 레일리의 실험 연구에 있어 중요한 역할을 감당하였고 다른 실험 음향학 연구자들의 연구에도 실질적으로 기여하였기에 레일리의 음향학에의 기여는 이론과 실험 양방면에 걸친 것이었다고 평가할 수 있다.

참고 문헌

1. Robert John Strutt, 4th Baron Rayleigh, *Life of John William Strutt, Third Baron Rayleigh*. London: Edward Arnold & Co., 1924.
2. J. W. S. Rayleigh, *The Theory of Sound*, Dover Publications, New York, 1945.
3. R. Bruce Lindsay, "Historical introduction" in J. W. S. Rayleigh, *The Theory of Sound*, Dover Publications, 1, xxvii, New York, 1945.
4. 구지현, 「레일리 (1842-1919)의 음향학 연구의 성격과 성과」, 서울대학교 이학박사학위논문, 2002.
5. Dayton C. Miller, *Anecdotal History of the Science of Sound: To the Beginning of the 20th Century*, The Macmillan Co., New York, 1935.
6. Robert T. Beyer, *Sounds of Our Times: Two Hundred Years of Acoustics*, Springer-Verlag, New York, 1999.
7. Rayleigh, "Acoustical observations. II," *Philosophical Magazine*, 7, 149-162, 1879.
8. Rayleigh, "Interference of sound," *Royal Institution Proceedings*, 17, 1-7, 1902.
9. Rayleigh, "Acoustical observations IV," *Philosophical Magazine*, 13, 340-347, 1882.
10. Rayleigh, "Shadows," *Royal Institution Proceedings*, Jan. 15, 1904.
11. W. D. Hackmann, "Scientific instruments: model of brass and aids to discovery," in David Gooding, Trevor Pinch, Simon Schaffer, eds., *The Uses of Experiment: Studies in the Natural Sciences*, Cambridge University Press, Cambridge, 1985.

- 31-65.
12. Rayleigh, "On a new arrangement for sensitive flames," *Cambridge Philosophical Society Proceedings*, 4, 17-18, 1880.
 13. G. Magnus, "Hydraulic researches," *Philosophical Magazine*, 11, 161-107, 178-197, 1856.
 14. Rayleigh, "Uniformity of rotation," *Nature*, 18, 111, 1878.
 15. Rayleigh and Arthur Schuster, "On the determination of the ohm [B. A. Unit] in absolute measure," *Proceedings of Royal Society*, 32, 104-141, 1881.
 16. Rayleigh, "On an instrument capable of measuring the intensity of aerial vibrations," *Philosophical Magazine*, 14, 186-187, 1882.

저자 약력

• 구 자 현 (Ja-Hyon Ku)



1989년 2월: 서울대학교 물리학과 (이학사)
 1995년 2월: 서울대학교 과학사 및 과학철학 협동과정 (이학석사)
 논문: 「헬름홀츠의 환원주의 생리학과 창각의 공명이론」
 2002년 2월: 서울대학교 과학사 및 과학철학 협동과정 (이학박사)
 논문: 「레이리 (1842- 1919)의 음향학 연구의 성격과 성과」
 1997년 7월 ~ 현재: 서울대학교 시간강사