

헤르츠의 1886-1888년 전자기 실험

이 은 경

서울대 대학원 과학사 및 과학철학 협동과정

Electromagnetic Experiments of H. R. Hertz during 1886-1888

LEE Eun-Kyoung

Program in History and Philosophy of Science

Seoul National University

ABSTRACT

In February, 1888, Heinrich R. Hertz published an experiment which illustrated the existence of electromagnetic waves in the air. It also proved that their velocity of propagation is the same order as that of the light velocity. The result was soon regarded by the "Maxwellian physicists" as the crucial experimental proof of Maxwell's electromagnetic theory of light. Since then, most of continental physicists, who had been under the influence of action-at-a-distance theory, evaluated Hertz's experiment in the same way and accepted Maxwell's electromagnetic field theory. However, Hertz did not interpret his result like that; in his opinion, what was proved by his experiment was just the electromagnetic action of dielectric materials, not Maxwell's theory, because the propagating velocity was different from the value that Maxwell's theory predicted.

In this paper, I will show three points: first, the experiment in 1888 was not intended to confirm Maxwell's theory, but to investigate Helmholtz's ideas on the electromagnetic action of dielectric in the case of open circuit; second, as experiments went on, at least by 1887, Hertz came to deny action-at-a-distance in electromagnetic phenomena, but he still had Helmholtz's physical concepts which were different from Maxwell's; finally, the interpretation that Hertz confirmed Maxwell's theory was made by the "Maxwellians" who did not have any practical means to support Maxwell's theory which they believed as true.

Keywords : H. R. Hertz, electromagnetic waves, action-at-a-distance, dielectric polarization, proof of Maxwell's electromagnetic theory

I. 머리말

19세기 후반의 전자기 이론들은 전자기력의 작용양식을 어떻게 파악하는가에 따라 전위론(potential theory)과 장론(field theory)으로 대별될 수 있었다. 전위론에서는 전자기 현상을 일으키는 힘이 매질의 존재 여부나 두 물체가 떨어진 거리에 관계없이 원거리 작용에 의해 순간적으로 작용하는 것으로 보았다. 반면 장론에서는 기본적으로 전자기 작용을 매질에 의한 것으로 파악하였기 때문에 힘이 작용하는 데 시간이 걸리고 따라서 힘의 전달 속도가 유한하였다. 전자에 속하는 이론들은 주로 대륙 쪽에서 발전된 것들로서 쿨롱(C. A. Coulomb, 1736-1806)과 앙페르(A. M. Ampère, 1775-1836)의 법칙을 계승한 노이만(F. E. Neumann, 1798-1895)과 베버(W. E. Weber, 1804-1891)의 전위론이 있었다.¹⁾ 후자에 속하는 이론으로는 영국에서 발전된 패러데이(M. Faraday, 1791-1867)의 전자기 이론과 이를 보다 체계적으로 발전시킨 맥스웰(J. C. Maxwell, 1831-1879)의 전자기장론이 있었다.²⁾ 그리고 엄밀하게 말하자면 이들 두 부류중 어디에도 속하지 않지만, 원거리 작용의 입장에서 제한된 경우에만 매질의 역할을 도입했던 헬름홀츠(H. von Helmholtz, 1821-1894)의 전자기 이론이 존재하였다.³⁾

이 이론들은 물리적 의미가 완전히 다른 관점들에 각각 근거하고 있었음에도 불구하고 닫힌 회로와 관련된 여러가지 전자기 현상에 대해서는 모두 만족스러운 설명을 제공할 수 있었다. 그러나 열린 회로에서 일어나는 현상들에 관해 각 이론들이 예측하는 바에서는 서로 차이를 보였는데 헤르츠(H. R. Hertz, 1857-1894)의 실험 이전까지는 각 이론들에 의해 예측된 현상들 중 어떤 것도 실험으로 검증된 적이 없었기 때문에 어느 한 이론에 뚜렷하게 우월성을 부여하기란 사실상 어려운 일이었다.⁴⁾

- 1) 19세기의 전자기 이론들 중에서 원거리작용에 기반을 둔 이론들을 폭넓게 다루고 있는 것으로는 A. E. Woodruff, "Action at a Distance in Nineteenth Century," *Isis* 53(1962), 439-459가 있다. 독일 전기역학과 전자기학의 초기 역사에 관해서는 K. L. Caneva, "From Galvanism to Electrodynamics," *Historical Studies in the Physical Sciences*(이하 HSPS로 약칭하겠음) 9(1978), 63-159를 참고할 것.
- 2) 장론의 발달 과정에 대해서는 P. M. Harman, *Energy, Force, and Matter* (Cambridge Univ. Pr., 1982), 4장에서 간략히 다루고 있다.
- 3) 헬름홀츠의 전자기 이론에 대해서는 C. Jungnickel & R. McCormach, *Intellectual Mastery of Nature* 2 vols. (Univ. of Chicago Pr., 1986), 특히 vol. 1, pp. 130-134, vol. 2, pp. 22-29; A. E. Woodruff, "The Contributions of Hermann von Helmholtz to Electrodynamics," *Isis* 59(1968), 300-311을 참조할 것.
- 4) 당시 대부분의 물리학자들이 위의 이론들 중에서 어느 하나를 받아들이고 있었던 것은 사실이지만 이런 불확실한 상황에 대한 인식이 널리 퍼져 있었다는 것을 H. R. Hertz, *Principles of Mechanics* (London, 1893; N. Y., Dover Pub. Inc., 1956) (독일어 원판은 1894년에 출판되었음) (이하 PM이라 약칭하겠음)에 헬름홀츠가 쓴 서문으로부터 알 수 있다. 또한 핏제랄드는 1888년 9월 6일에 Bath에서 열린 제 58차 British Association for the Advancement of Science 모임의 연설을 통해 당시의 상황에 대해 같은 식으로 평가했다. 이 연설문은 G. F. FitzGerald, *The Scientific Writings* (Dublin: Hodges, Figgis,

이러한 상황에서 1888년에 전자기파가 공기중에서 유한한 속도로 전파된다는 헤르츠의 실험 결과가 발표되자⁵⁾ 이것은 곧 맥스웰 이론을 검증하는 것으로 인식되면서 큰 반향을 불러일으켰다. “이 실험은 금세기 최고의 실험들 중의 하나로 꼽힐 수 있는 것으로서”⁶⁾ “맥스웰 이론을 검증해 주었다”⁷⁾는 핏제랄드(G. F. FitzGerald, 1851-1901)의 말은 헤르츠의 실험 결과에 대한 영국 “맥스웰주의자들”의 반응을 단적으로 드러내주었다. 또한 영국 “맥스웰주의자들”과는 달리 원거리 작용의 강한 전통 안에서 베버의 전위론을 받아들이고 있거나 헬름홀츠를 통해 맥스웰 이론을 이해하고 있었던 대다수의 독일 물리학자들도 이 실험을 계기로 맥스웰의 이론을 널리 받아들이게 되었다.

따라서 Mulligan⁸⁾이나 Süsskind⁹⁾ 등의 논의에서와 같이 헤르츠의 전자기 이론이나 실험에 관해 다루고 있는 논문들의 상당수에서는 그를 1888년의 실험을 통해 전자기파를 ‘발견’함으로써 맥스웰의 전자기 이론을 검증한 사람으로 평가하였다. 이러한 논문들은 위에서 말한 것과 같이 헤르츠의 실험을 맥스웰 이론과 관련지었을 때의 결과적인 측면에만 관심을 둔 것들로서 헤르츠의 전자기 이론이나 실험 자체에 대해 분석하지는 않았다.

비록 헤르츠의 실험들이 결과적으로는 맥스웰 이론을 널리 받아들이게 하는 역할을 했지만 이 실험들을 하는 동안 헤르츠는 맥스웰주의자가 아니었으며 그의 실험이 맥스웰 이론을 입증하려는 목적을 가지고 수행된 것은 더욱 아니었다. 실험이 진행되는 동안에도 헤르츠는 독일의 다른 물리학자들과 마찬가지로 헬름홀츠 이론을 통해 간접적으로 맥스웰 이론을 이해하고 있었고 전자기 현상과 관련하여 1888년까지 헤르츠가 수행했던 일련의 실험들도 “맥스웰 이론에 대한 연구로부터 나온 것은 아니었다.”¹⁰⁾ 더구나 1888년의 실험이 맥스웰 이론을 입증하는 것으로 인식된 이후에도 헤르츠가 받아들인 것은 맥스웰의 방정식이었을 뿐 변위전류(displacement current)나 전기의 본질에 대한 물리적 해석에서는 맥스웰이나 그밖의 영국 “맥스웰주의자들”과

& Co., Ltd.; London: Longmans, Green, & Co., 1902), J. Larmor (ed.), pp.229-240에 전문이 수록되어 있다. 특히 p.234를 볼 것.

5) H. R. Hertz, “Über die elektromagnetische Wellen im Luftraume und deren Reflexion,” *Wiedemann's Annalen der Physik und Chemie* (이하 *Wiedemann's Ann.*으로 약칭하겠음), 34(1888), 610. 이 논문은 Hertz의 논문집, *Untersuchungen über die Ausbreitung der elektrischen Kraft* (Leipzig, 1892)의 영역본인 *Electric Waves* (London, 1893; N.Y., 1962), D. E. Jones (tr.), pp.124-136에 수록되어 있다(앞으로 헤르츠의 논문은 번역되어 *EW*에 수록된 페이지를 인용하겠다).

6) 핏제랄드가 1888년 6월 22일에 헤르츠에게 보낸 편지. J. G. O'Hara, *Hertz and the Maxwellians: A Study and Documentation of the Electromagnetic Wave Radiation, 1873-1894* (IEE History of Technology Series, 8) (London: P. Peregrinus in Association with the Science Museum, 1987), p. 24에서 재인용.

7) 핏제랄드는 주5)에서 언급한 연설에서 헤르츠의 실험 결과를 영국학자들에게 소개하면서 이와 같이 평가했다. *The Scientific Writings*, p. 235.

8) J. F. Mulligan, “Heinrich Hertz and the Development of Physics,” *Physics Today* (1989 no.5), 50-57; “The Influence of Hermann von Helmholtz on Heinrich Hertz's Contribution to Physics,” *American Journal of Physics* 59(1987), 711-719. Mulligan은 이 논문들에서 전자기학의 발전에 기여한 헤르츠의 공헌은 맥스웰 이론을 입증한 것이라고 보았다.

9) C. Süsskind, “Heinrich Hertz and the Electromagnetic Wave Propagation,” *Endeavour* 12(1988), 84-85.

10) Hertz, “Introduction”, *EW*, p. 20.

다른 견해를 가지고 있었다.¹¹⁾

헤르츠의 실험 자체에 관심을 두고 구체적인 분석을 하고 있는 것으로서 D'Agostino와 Buchwald의 논의를 들 수 있다. 이들은 모두 헤르츠가 전자기 실험을 시작하기 전인 1884년에 발표한 이론적인 논문¹²⁾에서 드러난 전자기 현상에 대한 견해와 이후의 실험이 어떤 관련을 맺고 있는지에 대해서 다루었다. 1884년의 논문에서 헤르츠는 전자기 현상을 일으키는 원인이 무엇이든 상관없이 그 결과로서 나타나는 현상만으로 전자기 현상을 기술할 수 있다는 가정을 도입함으로써 전위론으로부터 닫힌 회로에 대한 맥스웰 방정식을 유도했는데, D'Agostino와 Buchwald는 모두 이 가정의 역할을 강조하였다.¹³⁾ 그러나 이들은 헤르츠의 실험과정이나 실험결과들에 대한 헤르츠 자신의 해석을 문제삼지는 않았다.

이 논문에서는 1886년부터 1888년 2월에 걸쳐 이루어진 헤르츠의 전자기 실험들의 전개과정과 내용에 대해 구체적으로 분석하여 그의 전자기 실험의 성격이 어떠했는지를 알아보겠다. 물론 헤르츠는 1888년 2월 이후에도 전자기 현상과 관련된 실험들을 많이 하였지만 이 논문에서 분석 시기를 1888년 2월까지로 제한하는 것은 맥스웰 이론을 입증하는 문제와 관련된 다른 물리학자들에게 중요한 영향을 끼쳤던 실험 결과들이 대부분 이 시기에 이루어졌기 때문이다. 또한 1888년 2월의 실험이 맥스웰 이론을 검증한 것으로 받아들여지게 된 후에는 헤르츠가 전과 달리 맥스웰 이론을 염두에 두고 실험을 행하였다는 사실도 분석 시기를 1888년 2월까지로 제한하는 한 이유이다.

이 논의를 통해 1888년 2월까지 헤르츠가 실험을 진행해 가는 동안 맥스웰 이론을 입증하는 문제를 염두에 두고 있거나 맥스웰 이론에 따라 실험을 구성하지도 않았을뿐 아니라 실험의 목적이나 결과에 대한 분석과 해석에서는 오히려 헬름홀츠 이론의 영향을 보이고 있음을 밝히고자 한다.¹⁴⁾ 또한 실험이 전개되어 감에 따라 헤르츠는 원거리 작용을 더 우선적으로 간주했던 헬름홀츠와는 달리 전자기 현상에서의 원거리 작용을 포기하고 매질의 역할에 더 큰 관심을 가지게 되었다는 것, 그리고 일반적으로 알려진 바와 달리 자신은 1888년 2월의 실험결과를 맥스웰 이론의 검증이라고 생각하지 않았다는 것을 보이겠다. 이러한 점들은 지금까지 전자기파를 발견함으로써 맥스웰 이론에 승리를 가져다 주었다는 결과적 측면만이 주로 부각되어 오던 헤르츠의 전자

11) Hertz, "Introduction", *EW*, pp. 26-28의 헤르츠의 해석을 참고할 것. 맥스웰 방정식의 여러 개념들에 대한 맥스웰과 헤르츠의 물리적 해석의 차이에 대해 다루고 있는 것으로 P.M. Heimann, "Maxwell, Hertz and the Nature of Electricity," *Isis* 62(1970), 149-157이 있다.

12) H.R. Hertz, "Über die Beziehungen zwischen den Maxwell'schen elektrodynamischen Grundgleichungen und den Grundgleichungen der gegnerischen Elektrodynamik," *Wiedemann's Ann.*, 23(1884), 84-103. 이 논문은 H.R. Hertz, *Schriften Vermischten Inhalts*(Leipzig, 1895), pp. 295-314에 수록되어 있다.

13) Salvo D'Agostino, "Hertz's Researches on Electromagnetic Waves," *HSPS* 6(1975), 261-323; Jed Z. Buchwald, "The Background to Heinrich Hertz's Experiment in Electrodynamics," T.H. Levere & W.R. Shea (eds.), *Nature, Experiment, and the Sciences* (Dordrecht: Reidel, 1990), pp. 275-306.

14) Mulligan, "The Influence of", 헬름홀츠가 헤르츠에 끼친 영향에 대해서 Mulligan은 첫째, 헤르츠의 일생을 통한 스승으로서 그에게 맥스웰 이론을 가르쳐 주었고 둘째, 베를린 아카데미 문제를 제기함으로써 헤르츠가 열린 회로의 문제에 관심을 가지게 했다는 점을 지적하였을 뿐, 실험이 진행되는 것과 관련시켜 논의하고 있지 않다.

기 실험의 성격과 내용을 올바르게 파악하는 데 도움을 줄 것이다.

II. 1870-1880년대 전자기학과 헤르츠

원거리 작용을 기반으로 한 당시의 여러 전자기 이론들 가운데 가장 대표적이라고 볼 수 있는 것은 베버의 이론이었다. 베버는 독립적으로 다루던 정전하(static charge)와 전류소(current element)에 의한 현상을 모두 설명할 수 있는 단일한 이론을 세우려고 시도했다. 이를 위해 그는 개별적으로 이해되고 있던 정전하와 전류 사이의 관계에 대해 “두 종류—양과 음—의 전하들이 서로 반대 방향으로, 같은 크기의 속도로 운동하는 것이 전류”라는 가설을 세웠다.¹⁵⁾ 베버는 이 가설에 기반해서 쿨롱의 법칙과 앙페르의 법칙을 포괄하는 형태로 힘을 나타내는 식을 얻을 수 있었고 이 힘을 기초로 전개된 베버의 전자기 이론은 당시까지 알려졌던 모든 전자기 현상들을 설명할 수 있는 매우 성공적인 이론이었다.

이에 반해 패러데이의 전자기 이론이나 맥스웰의 전자기장론은 전자기 작용에서 매질의 역할을 강조하였다. 이들에 따르면 공간에서 일어나는 전자기 작용의 전파는 공간을 채운 유전체나 에테르(ether)의 인접입자 작용에 의한 것으로서 유한한 속도를 가진 현상이었다. 맥스웰은 여기에서 더 나아가 빛의 전자기 이론을 통해 전자기 작용을 매개하는 매질이 빛을 매개하는 빛에테르(luminiferous ether)와 동일한 특성을 가진다는 점에 바탕해서 빛이 전자기파의 특성을 가진다고 보았다. 그리고 그의 전자기 방정식으로부터 계산해 낸 공기 중에서 전자기적 교란의 전파속도가 정전기 단위와 전자기 단위의 변환상수인 공기 중의 광속과 같은 값을 가질 것이라고 예측하였다.¹⁶⁾

한편 헬름홀츠의 전자기 이론에서는 원거리 작용에 의한 설명을 기본으로 하면서 열린 회로의 문제에만 매질의 작용을 고려하는 절충된 형태였다. 특히 그의 이론에서 다음의 세 가정을 도입하면 맥스웰의 이론과 똑같은 결과——매질에서 전기력이 광속으로 진행되는 횡파의 형태로 나타난다——를 얻을 수 있었다.¹⁷⁾ 첫째, 열린 회로의 경우에 매질——에테르 포함——에 전하의 변위에 해당하는 분극(polarization)이 존재하고 이것의 변화는 전류와 같이 전자기 작용을 발생시킨다. 둘째, 전자기력도 정전기력과 마찬가지로 유전체 분극을 일으킨다. 셋째, 공기나 진공도 훌륭한 유전체——이것은 공기나 진공의 분극도(polarizability)가 매우 크다는 뜻으로서 헬름홀츠는 이 내용이 맥스웰 이론의 핵심이라고 생각했다¹⁸⁾——이며 다른 유전체들과 마찬가지로 전자기 작용을 발생시킨다.¹⁹⁾

15) 이 가설은 페크너(G. T. Fechner, 1801-1887)가 베버보다 먼저 세웠기 때문에 베버의 이론을 베버-페크너의 이론이라고도 한다. Woodruff, “Action at Distance ……,” 444.

16) J. C. Maxwell, “Electromagnetic Theory of Light,” *A Treatise on Electricity and Magnetism* 2 vols. 3rd ed. (Oxford Univ. Pr., 1892), vol. 2. ch. 20. 특히 pp. 431-436.

17) 헬름홀츠의 전자기 이론의 내용 및 그것이 독일 전자기학에 끼친 영향에 대해서는 Woodruff, “The Contributions of ……,” 을 참조할 것. 특히 헬름홀츠가 자신의 이론으로부터 맥스웰과 같은 결과를 얻는 과정에 대해서는 306-309에서 자세히 다루고 있다.

18) Jed Z. Bechwald, *From Maxwell to Microphysics* (The University of Chicago Pr. 1985), p. 184.

19) Woodruff, “The Contributions of ……,” 310.

이와 같이 헬름홀츠의 이론은 열린 회로에서, 공기나 진공처럼 유전율이 큰 매질의 경우에만 맥스웰 이론과 같은 결과를 보였다. 그 때문에 헬름홀츠뿐만 아니라 헬름홀츠를 통해 맥스웰의 이론을 이해했던 당시의 대다수 독일 물리학자들은 맥스웰 이론을 헬름홀츠 이론의 제한된 경우로 받아들였고²⁰⁾ 이 점에서는 초기의 헤르츠도 예외가 아니었다.²¹⁾

비록 헬름홀츠 이론과 맥스웰 이론이 유전율이 큰 매질에 제한된 경우에 같은 결과를 낳기는 했지만 이 이론들은 원거리 작용에 대한 해석 및 매질에 분극을 일으키는 힘에 관한 물리적 해석에서 서로 달랐다.²²⁾ 즉 헬름홀츠가 전하들 사이의 원거리 작용을 인정하는 기초 위에서 “원거리 작용은 분극에 의해 감소된다”²³⁾고 본 것과 달리 맥스웰은 원거리 작용을 부정하고 이를 매질의 작용으로 완전히 대체하였던 것이다. 또한 헬름홀츠는 열린 회로의 양 끝에서의 정전하나 전류에 의한 원거리 작용이 매질의 분극을 발생시킨다고 생각했다.²⁴⁾ 이같은 생각에 의하면 방전 회로에서와 같이 전류나 정전하의 세기가 시간에 따라 계속적으로 변하는 경우 그에 따른 분극의 변화는 인접 매질 입자의 분극을 변화시키는 방식으로 매질 안에서 퍼져나갔고 그 효과는 열린 회로에 연속성을 주었다.²⁵⁾ 이에 비해 맥스웰의 전자기장론에 따르면 공간에 독립적으로 분포하는 변위(D, displacement)가 매질 안에서 전자기 작용을 일으키는 원인이었고 전도전류의 전하나 정전하는 매질 입자에 대해 아무런 힘도 작용하지 않았다. 왜냐하면 전하는 물리적 실재가 아니기 때문이었다. 또한 이 변위의 시간에 따른 변화($\partial D/\partial t$)는 매질 입자에 전기의 분극을 낳게 되는데 이것이 변위전류로서 도체의 전도전류와 같은 전자기 작용을 하였다.²⁶⁾

이처럼 열린 회로에서의 전자기 현상을 설명하는 데에서 각 이론들은 두드러진 차이를 보였다. 이런 상황에서 열린 회로의 전자기 작용에 대한 관심이 커진 것이나 어느 이론이 현상을 가장 잘 예측하는 것인지를 알아보려는 노력이 있었던 것은 자연스러운 일이었다. 그 노력들은 다음과 같이 정리될 수 있다. 첫째, 매질의 역할과 관련하여 맥스웰 이론의 핵심적 개념들 중의 하나인 변위전류의 효과를 검류계로 측정하는 것이 있었으나 이것은 거의 실현불가능한 실험이었다.²⁷⁾

20) Buchwald, 앞의 책, p. 117; pp. 182-183.

21) Hertz, “Introduction,” *EW*, p. 24.

22) 헤르츠는 맥스웰 이론을 헬름홀츠 이론의 제한적인 경우로 이해했음에도 불구하고 두 이론의 물리적 기반이 서로 다르다는 점에 대해 인식하고 있었다. Hertz, “Introduction,” *EW*, p. 20. 그리고 매질에 분극을 일으키는 힘과 이 힘이 작용할 때 매질에 일어나는 분극에 대한 맥스웰과 헬름홀츠의 해석이 서로 달랐던 것에 대해서는 Buchwald, 앞의 책, ch. 21(pp. 177-186); M.N. Wise, “German Concepts of Force, Energy and the Electromagnetic Ether 1845-1880,” G.N. Cantor & M.J.S. Hodge (eds.), *Conceptions of Ether* (Cambridge Univ. Pr., 1981), pp. 269--340; D.M. Siegel, “Thomson, Maxwell, and the Universal Ether in Victorian Physics,” 같은 책, pp. 239-265.

23) Helmholtz, *Wissenschaftliche Abhandlungen*, vol. 1, pp. 556-557; Woodruff, “The Contributions of ……,” 279에서 재인용.

24) Wise, “German Concepts of ……,” 299.

25) Buchwald, 앞의 책, pp. 183-184.

26) J.C. Maxwell, “On Physical Lines of Force,” W.D. Niven (ed.), *Scientific Papers* 2 vols. (Cambridge Univ. Pr., 1890; Dover Pubs. Inc., 1965), 특히 vol. 1, pp. 491-513. 이 부분과 관련해서는 vol. 1, pp. 491-492를 볼 것. 맥스웰의 전도전류에 관해서는 Buchwald, 앞의 책, ch. 2, ch. 3; 맥스웰의 변위전류에 관해서는 D.M. Siegel, “The Origin of the Displacement Current,” *HSPS* 17 (1986), 99-146을 참조할 것.

27) 이 문제에 대해 맥스웰은 변위전류가 전도전류와 같은 것이라고 생각했기 때문에 “…… 이를 검류계로

둘째는 매질 안에서 전자기 작용의 전파속도가 유한하고 특히 이 속도는 광속과 같음을 보이는 것이었다. 만약 매질의 작용에 의해 전자기 작용이 전파된다면 전파에 시간이 필요하기 때문에 속도가 유한해질 수밖에 없으며, 맥스웰의 “빛의 전자기적 가설”에 따르면 이 속도는 광속과 같았기 때문이다.²⁸⁾ 셋째는 공기중에서 전자기파의 존재를 보이는 것이었다. 맥스웰 자신이 전자기파의 발생에 대해 명백히 언급한 적은 없지만 이것은 그의 방정식에서 이론적으로 유도될 수 있는 것이었고 실제로 핏제랄드는 1882년부터 1883년까지 발표한 일련의 논문들에서 전자기파의 발생을 예측하고 이와 함께 구체적인 방법을 제시하였다.²⁹⁾

실제로 이런 여러가지 효과들과 관련된 실험들이 물리학자들이나 전기 엔지니어들에 의해 직·간접적인 여러가지 방법으로 행해졌다. 먼저 맥스웰의 학생이었던 히스(W. M. Hicks, 1850-1934)는 전자기 작용이 공기중으로 전파되는 데 따른 공간 상에서의 변화를 측정하려고 하였으나 실패하였다.³⁰⁾ 한편 로지(O. J. Lodge, 1851-1940)는 도선에서의 전자기 작용이 진동임을 보였다. 그러나 로지의 실험은 도선에서 일어나는 현상에 국한된 것이었고 그가 얻은 속도값 또한 이론값보다 자리수가 하나 모자라는 것이어서 여전히 맥스웰의 이론을 검증하기에는 부족함이 있었다.³¹⁾

영국뿐 아니라 독일에서도 열린 회로에서 발생하는 전자기 현상과 관련된 효과를 밝히려는 시도가 있었다. 특히 헬름홀츠는 1879년에 자신이 주관하고 있던 베를린 아카데미의 현상 공모에 다음과 같은 문제를 출제하여 열린 회로에서의 전자기 현상에 대해 밝혀보려 하였다.

측정할 수 있을 것이다. 이 목적에 적합한 검류계는 기존의 것이 아니라 새로이 적당하게 설계된 것이어야 한다. 그러나 이 실험은 실제로 이루어지기에는 너무 어렵고 지금까지 이루어진 적도 없다”고 하였다. J. C. Maxwell, “On a Method of Making Direct Comparison of Electrostatic with Electromagnetic Force; With a Note on the Electromagnetic Theory of Light,” *Philosophical Transactions* 158(1868), 643-657. 이 논문은 Maxwell, *Scientific Papers*, vol. 2, pp. 125-143에 수록되어 있다. 특히 p. 139를 볼 것.

28) 핏제랄드는 이것을 기준으로 헤르츠가 맥스웰의 이론을 “검증”하는 실험에 성공했다고 보았다. FitzGerald, *Scientific Writings*, p. 235.

29) G. F. FitzGerald, “On the Possibility of Originating Wave Disturbances on the Ether by Means of Electric Forces,” *Scientific Transactions of the Royal Dublin Society* (Nov., 17. 1879); “On the Possibility of Originating Wave Disturbances on the Ether by means of Electric Forces. Part 2,” *Ibid.* (May, 19. 1880); “On the Possibility of Originating Wave Disturbances on the Ether by Means of Electric Forces—Corrections and Additions,” *Ibid.* (May, 5. 1882); “On the Quantity of Energy translated to the Ether by a Variable Current,” *Ibid.* (Nov., 19. 1883); “On the Method of Producing Electromagnetic Disturbances of Comparatively Short Wave Lengths,” *British Association for the Advancement of Science Report* No. 24(1883). 이들은 각각 FitzGerald, *Scientific Writings*, pp. 90-92, pp. 93-98, pp. 98-101, pp. 122-126, pp. 128-129에 실려 있다.

30) Schuster, “The Clerk Maxwell Period,” *A History of Cavendish Laboratory 1871-1910* (London, Longmans, Green, and Co., 1910), pp. 14-39, 특히 p. 19를 볼 것. 이보다 훨씬 이전에 패러데이도 매질에 의한 작용에 시간이 걸린다는 것을 중요하게 생각하고 같은 방식으로 이를 측정해보려고 시도하였다. Lord Kelvin, *EW*의 서문.

31) T. K. Simpson, “Maxwell and the Direct Experimental Test of His Electromagnetic Theory,” *Isis* 57(1966), 411-432. 특히 414를 볼 것.

부도체(insulator)의 유전체 분극과 동전기력(electrodynamic force)의 관계를 실험으로 밝히기 위해 동전기력에 의한 부도체의 유전체 분극이 다시 동전기력을 발생시킨다는 것을 보이라.³²⁾

즉 부도체에서 일어나는 유전체 분극에 의한 전자기 효과를 검출하는 문제였다. 헬름홀츠는 문제를 출제만 한 것이 아니라 당시 자신의 학생으로서 박사학위 논문을 준비하고 있던 헤르츠로 하여금 이 문제를 풀도록 격려하고 중용하기도 하였다.³³⁾

1879년 당시에 헤르츠는 몇차례 이 실험을 시도했으나 당시의 기구들로서는 실험의 목적에 적합한 크기의 진동수를 얻을 수 없다는 결론을 얻고 그만 두었다.³⁴⁾ 그 뒤 그는 다른 주제로 박사학위 논문을 마쳤고³⁵⁾ 이후 몇 년간 베를린에서 헬름홀츠의 조수로 있다가 키일 대학의 수리물리학 사강사(Privatdozent)로 가게 되었다. 키일 대학의 불충분한 실험 설비들로 인해 이 시기의 그의 연구들은 주로 여러가지 이론적인 문제들로 국한되었으나³⁶⁾ 1879년의 베를린 아카데미 문제는 키일 대학 시절뿐만 아니라 칼스루에 고등기술학교(Karlsruhe Technische Hochschule)로 옮겨간 후에도 계속 그의 관심사였다.³⁷⁾

비록 많은 물리학자들이 시도했으나 실패했고 1879년 당시에는 헤르츠도 실험에 적합한 크기의 진동수를 얻지 못할 것이라고 생각하고 포기했으나 이 시기나 또는 1879년 이전에도 방전회로에 의한 매질의 전자기적 효과, 즉 전자기파를 발생시킨다는 것이 기술적으로 불가능한 일은 아니었다. 전자기파의 송신기나 수신기로 쓰일 수 있는 기구들이 이미 존재하고 있었고 이들 간의 공명 관계에 관한 이론도 상당히 정립되어 있었기 때문이었다.³⁸⁾ 뿐만 아니라 이 기구들을 사용하여 실제로 전자기파의 효과를 검출했던 사람들도 여러명 있었다.³⁹⁾ 그러나 대부분 전기 엔지니어였던 이들의 상당수는 맥스웰 이론에 대한 지식이 별로 없었기 때문에 자신들이 발견한 현상을 맥스웰이나 맥스웰주의자들과는 다른 방식으로 이해했거나 또는 그 현상이 전자기 이론에서 차지하는 중요성에 대해서 알지 못했다.⁴⁰⁾ 결국 물리학자에 의해 공기 중에서 전자기파의 존재가 직접적인 방법으로 확인되는 것은 “이론적인 지식과 실험을 실제로 수행해 낼 능력을 함께 갖춘”⁴¹⁾ 헤르츠가 실험에 성공할 때까지 기다려야 했다.

32) O'Hara, 앞의 책, 서문.

33) Helmholtz, *PM*, 서문. 베를린 아카데미 문제와 관련하여 헬름홀츠가 헤르츠에 미친 영향에 대해 간략하게 다룬 논의로는 Mullgan, "The Influence of Herman von Helmholtz",가 있다.

34) Hertz, "Introduction," *EW*, p. 1; H. R. Hertz, *Heinrich Hertz: Erinnerungen, Briefe, Tagebücher* (Lipzig, 1927; San Francisco Pr. Inc., 1977) (이하에서 *HH*로 약칭하겠음) M. Hertz & C. Süßkind (eds.) p. 115.

35) H. R. Hertz, "Über die Induktion im rotierenden Kugeln," *Schriften Vermischten Inhalts*, pp. 37-134.

36) 이 시기의 헤르츠의 연구업적의 대부분은 *Schriften Vermischten Inhalts*에 실려 있다.

37) 헤르츠가 1887년 10월 30일과 11월 13일자로 그의 부모에게 보낸 편지와 같은 해 11월 5일에 헬름홀츠에게 보낸 편지에 그의 이러한 관심이 나타나 있다. *HH*, pp. 233-237.

38) Simpson, "Maxwell and the Nature", 특히 이 문제에 관해서는 416-421을 볼 것.

39) 헤르츠 이전에 전자기파의 효과를 검출했던 여러 실험들에 관해서는 C. Süßkind, "Observations of Electromagnetic Wave Radiation before Hertz," *Isis* 55(1964), 32-42를 참조할 것.

40) Süßkind, "Observations of Electromagnetic Wave", 41.

41) Helmholtz, *PM*, 서문.

Ⅲ. 방전 회로에 관한 실험들 : 1886-1887년 10월

1886년부터 1887년 10월까지의 기간 동안에 헤르츠의 주요 관심사는 방전 회로의 빠른 진동에 의해 부도체에서 일어나는 전자기 효과였다. 그러므로 이 시기에 행해진 그의 실험들은 전자기파를 직접 다루는 것이 아니라 부도체의 전자기 효과에 관한 1879년의 베를린 아카데미 문제와 관련된 것이었다. 또한 이의 전개 과정에서 헤르츠가 실험 결과를 해석하기 위해 도입했던 개념들도 주로 헬름홀츠 이론으로부터 온 것이었고 그 결과로서 그는 열린 회로에서 매질의 역할을 보일 수 있었다. 뿐만 아니라 이 실험들에서 사용된 방법과 여기에서 얻은 결과에 대한 해석의 일부는 전자기파를 직접 다루는 이후의 실험들을 가능하게 만드는 중요한 요소를 이루었다.

헤르츠의 실험은 우연히 그의 눈에 띈 한 현상, 즉 Knochenhauer 코일⁴²⁾의 스파크에 의해 시작되었다. 헤르츠는 키일 대학과 비교해서 실험 설비가 훌륭하게 갖춰진 칼스루에 고등기술학교로 옮겨온 첫 해인 1885년에 연구과제로서 이전에도 다룬 적이 있는 “희박한 기체 내에서의 전도”를 택했고⁴³⁾ 실험에 사용하기 위하여 배터리와 전하축적기를 만들었다. 이 기구들을 가지고 방전 실험을 하고 있던 중 1886년 봄에 그는 우연히 Knochenhauer 코일을 쓰면 대형 배터리가 없어도 1차코일에 연결되어 있지 않은 2차코일에 스파크를 일으킬 수 있다는 것을 알게 되었다.⁴⁴⁾ 이 현상은 헤르츠에게 매우 흥미로운 것이었다. 왜냐하면 그가 1879년에 베를린 아카데미 문제를 포기해야 했던 가장 큰 이유가 열린 회로 주변 매질의 분극에 영향을 끼칠 수 있는 현실적인 방법이 없다는 것이었는데 이제 그 문제가 해결되었기 때문이다.

자신이 가지고 있는 실험 기구들을 이용해서 방전 회로 주변의 매질에 영향을 끼칠 수 있다는 것을 알게 되자 헤르츠는 곧 원래의 연구 과제였던 “희박한 기체 내에서의 전도”문제를 포기하고 이 방전 회로의 진동의 특성과 그것에 의한 전자기적 작용에 대해 조사하기 시작하였다.⁴⁵⁾ 이때부터 1887년 10월 말까지 행한 일련의 실험들을 통해 그는 방전 회로 진동의 특성과 그것에 의한 전자기적 작용 및 전자기 작용에 있어 유전체 분극의 역할에 대해 중요한 몇가지 결론들을 얻을 수 있었다.

우선 헤르츠는 방전 회로가 보여주는 진동의 특성부터 조사하였다. 이를 위해 그가 택한 방법은 “방전할 때 발생하는 전기파가 도체에서 유한한 속도로 전파되는 파동”⁴⁶⁾이라는 점과 진동하

42) 헤르츠는 이 코일을 칼스루에의 실험실에서 우연히 발견하였다. 이것은 양 끝에 방전 꼭지가 달린 두 개의 납작한 원형 코일이 약간의 거리를 두고 서로 평행하게 배치되어 있는 것으로서 유도 실험에 쓰이던 것이었다. 헤르츠의 전자가 실험에 사용된 기구들에 대해서는 J. H. Bryant, *Heinrich Hertz: The Beginning of Microwaves* (N. Y. Institute of Electrical and Electronic Engineers, 1988)에서 다루고 있으며 이 책의 p. 44에 Knochenhauer 코일의 그림과 사진이 있다.

43) Hertz, *HH*, p. 207.

44) Hertz, “Introduction,” *EW*, p. 2; *HH*, pp. 207-213.

45) 이 당시에 이미 라이덴병이나 열린 유도코일의 방전이 진동의 형태로 이루어진다는 것이 알려져 있었고 헤르츠도 이 사실을 알고 있었다. Hertz, “Über sehr schnelle elektrische Schwingungen,” *Wiedemann's Ann.*, 31(1887), 421. 이 논문은 *EW*, pp. 29-53에 수록되어 있다 특히 p. 29와 주1) (p. 269)을 볼 것.

46) 헤르츠는 이미 “도선 내에서 전류는 광속으로 움직이는 파동”이라고 알고 있었던 것으로 보인다. 그의 이러한 생각은 Hertz, “Über sehr schnelle …,” *EW*, pp. 31-33의 여러 군데에 드러나 있다.

는 두 회로 사이의 공명 관계를 이용하는 것이었다.⁴⁷⁾ 헤르츠는 “방전 회로 내의 전기파는 속도가 유한하기 때문에 두 전기파가 진행한 거리가 다를 경우 각각은 서로 다른 위상을 가지게 된다”⁴⁸⁾는 사실을 이용하기 위해 그림1과 같이 실험 장치를 꾸몄다.

그림1에서 보듯이 헤르츠는 Knochenhauer 코일 대신 단일 유도코일(A)에 스파크 간격(spark gap)을 가진 두 개의 직선 도체(C)를 연결하여 방전 회로로 사용하고 이것과 측면회로(side circuit, B)를 저항이 작은 도선(M)으로 연결하였다. 이 장치에서 도선(M)을 통해 측면회로에 전달된 방전 회로 내의 전기파가 경로 a를 따라 꼭지 1에 도달했을때와 경로b를 따라 꼭지2에 도달했을 때 각각의 전기파는 진행한 거리가 다르기 때문에 서로 다른 위상을 가지게 되었다. 꼭지 1, 2에서 전기파의 위상차는 각 꼭지에서서의 전위 차이를 나타내는 것으로서 이 차이에 의해 발생하는 현상이 측면회로의 스파크였다. 계속된 실험에서 그는 측면 스파크의 세기가 실험의 다른 조건들—예를 들어 측면코일의 스파크 간격의 길이와 위치 및 측면코일 전체의 길이와 재질 등—과는 무관하고 오직 전기파가 측면코일의 양 꼭지에 도달하는 경로의 차이에 의해서만 영향을 받는다는 것을 알게 되었다.⁴⁹⁾ 이 사실은 경로차로 인해 두 꼭지에 도달하는 전기파 간에 발생하는 위상차 때문에 측면스파크가 일어난다는 그의 생각을 더욱 뒷받침해 주는 것이었다. 이와 함께 측면코일 내에 측면스파크가 최소로 되거나 또는 측면스파크의 효과가 없어져버리는 영점(null point)이 있다는 것도 확인되었다. 헤르츠는 영점이 도선 내에서 진행파와 반사파에 의해 생긴 정상파의 마디(node)에 해당하기 때문에 이 위치에 스파크 간격이 놓이게 되면 측면스파크를 일으키는 양 꼭지 사이의 위상차가 없어서 측면스파크가 일어나지 않는다고 보았다.⁵⁰⁾ 진행한 거리가 다르면 꼭지에 도달한 전기파의 위상이 달라진다는 사실은 전기파가 회로 내에서 유한한 속도로 전달된다는 것을 의미하는 것으로서 이러한 사실들은 방전 회로 내에 존재하는 전기파가 유한한 속도의 파동이라는 것을 말해주었다.

또한 헤르츠는 방전 회로의 자체 유도전류가 측면스파크를 일으키는 전기파를 이룬다고 생각했다. 만약 이러한 견해가 정확하다면 Knochenhauer 코일의 경우에는 1차코일의 자체 유도전류가 2차코일에 전달될 수 없기 때문에 2차코일 내에 새로운 전기파가 발생해야 했다. 그는 2차코일에 발생한 전기파는 1차코일에 의해 ‘유도’된 전류이고 이것이 자체

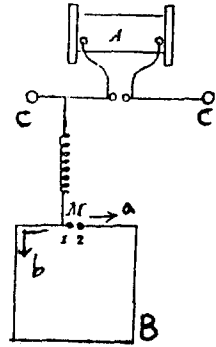


그림 1

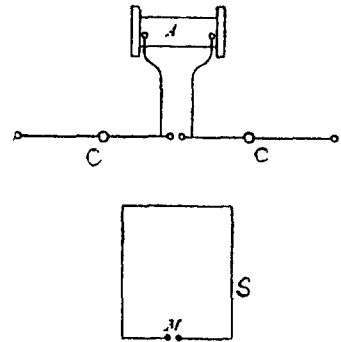


그림 2

47) Hertz, “Über sehr schnelle …”, *EW*, pp. 46. 방전이 진동임을 밝히기 위해 다른 과학자들, 예를 들어 Feddersen과 같은 사람은 회전하는 거울을 사용하였다. 이에 대해서는 Bryant, 앞의 책, pp. 12-13을 참조할 것.

48) Hertz, “Über sehr schnelle …”, *EW*, pp. 31.

49) Hertz, “Über sehr schnelle …”, *EW*, pp. 33.

50) Hertz, “Über sehr schnelle …”, *EW*, pp. 33.

유도전류와 같은 역할을 한다고 보았다.⁵¹⁾ 이를 확인하기 위해 그는 방전 회로에 연결되어 있던 측면회로를 없애고 2차회로를 방전 회로 부근에 갖다놓는 새로운 실험 장치를 구성하였고(그림 2) 이 새로운 장치에서도 전과 다름없이 활발한 2차스파크가 생기는 것을 보일 수 있었다. 이것은 방전 회로의 진동에 의해 2차회로(S)에 전기파가 유도되었음을 의미하는 것이었다.

이제 헤르츠는 방전 회로에 의해 유도된 2차회로의 전기파와 방전 회로 내의 전기파 사이에 공명 관계를 적용시킬 수 있게 되었다. 그는 회로의 용량이나 인덕턴스(inductance) 상수를 변화시킴으로써 두 회로 간의 공명 관계를 얻을 수 있었는데⁵²⁾ 이는 방전 회로와 2차회로 내에 각각 규칙적인 진동이 존재한다는 것을 확실히 보여주는 것이었다. 이 때 그가 얻은 진동수는 약 10^8 에 해당하는 값으로서 이는 헤르츠에 앞서 Fedderson이나 헬름홀츠가 얻었던 진동수보다 훨씬 큰 값이었다.⁵³⁾ 헤르츠가 사용한 방전 회로의 진동수가 10^8 정도 크기였다는 점은 다음 절에서 다루게 될 1887년 10월 이후의 실험들에서 중요한 의미를 가지는 것이었다. 왜냐하면 이 정도 크기의 진동수를 가지는 전자기파의 파장은 수미터로서 Fedderson이 얻은 10' m 크기의 파장과는 달리 실험실 규모에서 다룰 수 있는 크기였기 때문이다.

이 공명 실험을 통해 헤르츠는 열린 유도회로의 방전과 그에 의해 2차회로에 유도되는 전기파가 같은 진동수를 가진 진동이라는 사실과 방전 회로와 2차회로 사이의 공명 관계를 이용해 이들의 상호작용을 조사하는 기법을 알 수 있었다. 두 가지 사실과 함께 여기에서 사용한 실험기구들의 배치 방법은 이후에 행해질 그의 실험에서 기본적인 요소를 이루는 것이었다.

열린 방전 회로에서 일어나는 진동의 이러한 특성들은 곧 헤르츠로 하여금 1879년의 베를린 아카데미 문제를 떠올리게 했다. 이 문제를 풀기 위해 그가 처음에 생각해낸 가장 간단한 방법은 방전 회로의 콘덴서(스파크 간격)에 부도체를 직접 삽입하고 그에 따른 2차스파크의 변화를 관찰하는 것이었다.⁵⁴⁾ 그는 결과로서 부도체가 있을 때는 부도체의 전자기 작용으로 강한 2차스파크가, 없을 때는 약한 2차스파크가 발생할 것을 기대하였다. “부도체가 없다면 정전기력만이 작용할 것이다. 정전기력이 닫힌 2차회로에 일으키는 전위차는 0에 가깝게 되기 때문에 스파크 간격이 아주 좁은 이 경우에는 스파크가 일어나지 않거나 일어난다고 하더라도 아주 약할 것”⁵⁵⁾이라고 생각했기 때문이다. 그러나 기대와는 달리 실제로는 부도체의 존재 여부에 상관없이 강한 스파크가 일어났다. 이 결과 헤르츠는 자신의 이론이 정적(stationary)인 경우에만 적용될 수 있는 것이며 빠른 진동일 때는 정전기력에 의한 전위차만으로도 스파크를 일으킬 수 있다는 결론을 얻어냈다.⁵⁶⁾

이제 부도체의 전자기 작용을 보이는 베를린 아카데미의 문제에 제대로 접근하기 위해서 헤르

51) Hertz, “Über sehr schnelle ……,” *EW*, pp. 33-37.

52) 헤르츠가 1차회로와 2차회로의 공명을 얻기 위해 수행한 실험의 내용과 용량이나 인덕턴스 상수를 변화시키기 위해 그가 사용한 방법은 Hertz, “Über sehr schnelle ……,” *EW*, pp. 42-46.

53) 당시까지 이루어진 방전회로의 진동수와 관련된 연구들에 대해서는 *EW*, p. 269의 주1)을 참조할 것.

54) Hertz, “Introduction” *EW*, p. 4

55) Hertz, “Introduction” *EW*, p. 5. 헤르츠는 2차회로의 스파크 간격(1-2mm)이 전체 회로의 길이(60-70cm)에 비해 아주 짧기 때문에 이것을 거의 닫힌 회로나 마찬가지로 간주할 수 있다고 생각했다. 따라서 이 회로의 전위차가 완전히 닫힌 회로에서와 같이 정확하게 ‘0’이 될 수는 없더라도 아주 작은 값이 되어야 한다고 생각했다.

56) Hertz, “Introduction” *EW*, p. 4

츠는 방전 회로 주변에서 정전기력과 전자기력이 어떻게 분포되어 있는지를 알아야 할 필요에 직면했다. 이를 위해서 그는 먼저 방전 회로와 2차회로와의 상대적 위치 변화에 따른 2차스파크의 변화를 조사하였다.⁵⁷⁾ 그리고 이 결과를 이론적으로 분석하기 위해 그는 방전 회로 주변에서 다음의 두 가지가 항상 성립한다고 가정했다. 즉 “전기력은 모든 지점에서 시간의 주기 함수로 나타나고 시간이 지나도 그 방향은 변하지 않는다”는 것과 “시간에 따라 변하는 정도가 모든 지점에서 같다”는 것이었다.⁵⁸⁾ 이 가정들을 도입하면 방전 회로 주변의 한 지점에 놓인 2차회로의 회로소(circuit element)가 받는 힘의 세기 — 스파크의 세기로 나타나는 — 는 그 지점에서의 전자기력과 정전기력의 세기 및 전기장의 방향이 2차회로의 스파크 간격을 지나는 반지름과 이루는 각에만 영향을 받았다.⁵⁹⁾ 따라서 헤르츠는 어떤 한 지점에서 2차회로를 회전시켜 그 지점에서의 전자기력과 정전기력에 의한 스파크의 효과를 따로 검출해 낼 수 있었다. 즉 방전 회로 주변의 각 지점에서 전자기력과 정전기력의 크기와 방향을 각각 따로 결정할 수 있게 되었던 것이다.

이 방법을 써서 헤르츠는 먼저 방전 회로 주변에 작용하는 힘이 두 전하 사이에 작용하는 정전기력과 비슷하게 분포하는 것을 보았다.⁶⁰⁾ 이는 당시의 모든 전자기 이론에서 공통적으로 나타나는 것처럼 쌍극자의 정전기력은 거리의 제곱에 반비례하고 전자기력은 거리에 반비례하기 때문에 방전 회로에서 가까운 위치에서 주로 작용하는 힘은 정전기력이고 멀리 떨어진 곳에서 주로 작용하는 힘은 전류소들 간에 작용하는 전자기력이라는 그의 분석과 부합되는 결과였다.⁶¹⁾ 그는 또한 “이 힘들에 의한 스파크가 관찰되는 거리의 한계를 정할 수가 없었고 실험실이 전기력의 진동으로 가득 찬 것 같이”⁶²⁾ 느꼈다. 이 사실은 열린 회로에서의 전자기 작용 즉, 매질에 의한 전자기 작용을 보이는 베를린 아카데미 문제와 관련해서 특히 중요했다. 왜냐하면 이것은 전자기력이 주로 작용하는 먼 거리에서도 전자기 작용의 의해 충분히 스파크가 일어날 수 있음을 의미하기 때문이었다. 이제 베를린 아카데미 문제를 해결하기 위해 전과 같이 방전 회로의 콘덴서 사이에 부도체를 적절 넣지 않고 방전 회로와 2차회로 사이의 거리를 멀리한 뒤 그 주변 어딘가에 부도체를 놓는 것이 가능하게 되었다.

이 실험에서 헤르츠는 또한 공기중에서 전기력의 전파가 유한한 속도로 이루어질 수 있다는

57) 방전회로 실험의 결과에 관해서는 Hertz, “Über die Einwirkung einer elektrischen Schwingung auf eine benachbarte Strombahn,” *Wiedemann's Ann.*, 34(1888), 155. 이 논문은 *EW*, p. 80-94에 실려 있다. 헤르츠는 보다 완전한 대칭을 얻기 위해 원형코일을 2차회로로 사용하기 시작했다.

58) Hertz, “Über die Einwirkung ……,” *EW*, p. 82.

59) 방전회로 주변에서의 힘을 각 성분들로 나타내면 다음과 같다.

$$\sum = A + B \cos(2s\pi/S) + B \sin(2s\pi/S) + \dots$$

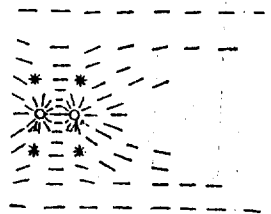
(s: 스파크 간격에서 전류소까지의 거리, S: 2차회로의 전체길이)

이 식에서 첫째 항은 전자기력을 의미한다. 전자기력은 특정 위치에서 2차회로가 자르는 역선의 수에만 관련이 있으므로 2차회로의 회전에 따라 변하는 각 $2s\pi/S$ 와는 무관하다. 또한 세번째 항은 회로 위의 모든 점에서 대칭이므로 2차회로에 진동을 일으키지 않고 두번째 항만 2차회로의 진동과 관련이 있다. 이 식에 대한 자세한 분석은 Hertz, “Über die Einwirkung ……,” *EW*, p. 82-84를 볼 것.

60) 방전회로 주변에서 힘의 분포는 다음 그림과 같았다.

61) 정전기력의 크기가 거리의 제곱이 아니고 거리의 제곱에 비례하는 것은 스파크 간격의 양 쪽지가 쌍극자를 이루기 때문이다.

62) Hertz, “Über die Einwirkung ……,” *EW*, p. 91.



암시를 얻었다. 그는 방전 회로 주변의 거의 대부분의 지점에서 힘의 방향과 크기를 결정할 수 있었으나 힘의 방향을 일의적으로 결정할 수 없는 지점도 있다는 것을 발견했다.⁶³⁾ 그는 이들 지점에서는 힘의 크기가 변하지 않는 상태에서 방향만 계속 변하고 있다고 생각하는 것 외에 달리 이 현상에 대해 설명할 수가 없다고 결론지었다.⁶⁴⁾ 그렇다면 왜 그 지점에서는 힘의 방향이 계속 변하는 것일까? 이에 대해 헤르츠는 “직접적인 원거리 작용에 기반을 둔 어떤 이론도 이 현상을 설명할 수 없고 단지 정전기력과 전자기력의 전파 속도가 다르다고 가정할 경우에만 이 현상이 쉽게 설명될 수 있다”⁶⁵⁾고 생각하고 그 근거로서 힘들의 전파 속도가 다르다면 각각의 위상은 매시간 다른 비율로 변하기 때문에 서로 상쇄될 수가 없다는 점을 들었다. “두 전기력의 전파 속도가 다르다는 것”은 헤르츠에게 “이 두 힘들 중 최소한 어느 하나가 유한한 속도로 전파됨”⁶⁶⁾을 의미하는 것이었다.

그러나 헤르츠는 이 결론에 기반해서 전기력이 유한한 속도로 전파된다는 것을 보이려고 하지 않고 첫번째 결론을 적용해서 부도체나 유전물질 내에서 일어나는 전자기 작용의 효과에 대한 실험을 먼저 시작했다는 점을 주목할만 하다. 당시의 그에게 보다 관심이 있었던 것은 전기력의 전파 속도에 관한 것이 아니라 베를린 아카데미 문제였기 때문이었다. 따라서 그는 부도체의 전자기 작용에 관한 실험을 끝내고 난 뒤에야 비로소 공기중에서 전기력의 전파 속도가 유한함을 보이려 했다.⁶⁷⁾ 이 절의 나머지 부분에서는 헤르츠가 부도체 내의 전자기 작용을 보임으로써 베를린 아카데미 문제를 성공적으로 해결하는 과정과 여기에 나타난 헤르츠의 전자기적 견해들에 대해 살펴보겠다.

부도체나 유전물질 내에서 일어나는 전자기 작용을 조사하기 이전에 헤르츠는 도체를 방전 회로 주변에 놓고 어떤 효과가 나타나는지를 먼저 조사하였다. 이것은 만약 도체의 전자기 작용에 의해 일어나는 현상이 부도체의 경우에도 일어난다면 부도체도 도체와 같은 전자기 작용을 한다고 간주할 수 있기 때문이었다.⁶⁸⁾ 헤르츠는 그림3과 같이 방전 회로 주변에 도체(C)를 놓고 방전 회로(A), 도체(C), 2차회로(B) 간의 상대적 위치의 변화와 2차스파크의 관계에 대해 조사하였고 그 결과 상대적 위치의 변화가 2차스파크의 발생에 영향을 끼친다는 것을 보일 수 있었다. 또한 고정된 2차회로의 경우에도 도체의 위치에 따라 스파크가 강해지기도 하고 약해지기도 하며 심지어는 아주 나타나지 않게 되는 것을 발견하였다. 헤르츠는 2차회로에서 스파크가 사라지는 현상에 관해서 “도체 내의 전류가 방전 회로에 의해 발생한 전기장의 방향과 반대방향으로

63) 주60)의 분포도에서 *로 표시된 지점.

64) Hertz, “Über die Einwirkung ……,” *EW*, p. 92.

65) Hertz, “Über die Einwirkung ……,” *EW*, p. 93.

66) Hertz, “Über die Einwirkung ……,” *EW*, p. 93.

67) 실패로 끝난 이 시도에 대해서는 부도체 내의 전자기 작용을 다룬 “Über Induktionserscheinungen, hervorgerufen durch die elektrischen Vorgänge in Isolatoren,” *Sitzungsberichte der Berliner Akademie der Wissenschaften* (이하에서 *Sitzungsber. d. Berl. Akad. d. Wiss.*라 약칭하겠음) (Nov. 10. 1887), 880, *Wiedemann's Ann.*, 34(1888), 273, *EW*, pp. 96-106의 끝에 부가되어 있다. 그러나 “Über Induktionserscheinungen ……,”의 초고를 헬름홀츠에게 보낸 날은 1887년 11월 5일이었고 최초로 속도를 측정하려고 시도한 날은 1887년 11월 12일이었던 점으로 보아 속도를 측정하려는 시도가 부도체의 전자기 작용에 대한 것보다 나중에 이루어졌음을 알 수 있다. *HH*, pp. 233-235를 참조할 것.

68) Hertz, “Über die Einwirkung ……,” *EW*, p. 101.

흐르거나 또는 전류에 해당되는 다른 작용이 발생하기 때문”⁶⁹⁾이라고 설명하였다. 말하자면 새로 도입된 도체 안에 방전 회로에 의해 유도된 전류가 흐르거나 또는 그와 같은 작용을 할 수 있는 현상이 발생하고 이들의 작용이 기존의 2차스파크를 상쇄시킨다는 것이었다. 이 점을 보다 분명히 하기 위해 도체 덩어리(C) 대신 전류의 효과가 더 잘 나타나는 가는 도선을 사용하는 실험이 반복되었고 그 결과는 도체에 유도된 전류의 작용이 방전 회로에 의한 작용을 상쇄시킨다는 헤르츠의 생각을 더욱 분명하게 해 주었다.⁷⁰⁾

방전 회로 주변에 놓여진 도체의 전자기 작용에 대해 알게 되자 헤르츠는 부도체의 경우에도 같은 효과가 발생하는지에 대해 실험을 계속하였다. 그는 방전 회로의 진동이 충분히 빠르다면 부도체에서도 유전체 분극에 의해 도체에 유도된 것과 똑같은 양의 전기가 발생할 수 있다고 생각하고 부도체에 의해 2차스파크에 일어나는 효과가 도체에 의한 것과 같은 것이라고 기대하였다.⁷¹⁾ 이것은 부도체의 유전체 분극에 의해 변위되는 전기량이 도선 내에 유도된 전류와 같은 작용을 한다는 뜻으로서 2절에서 언급한 헬름홀츠의 세 가정들 중 첫번째와 같은 생각이었다.⁷²⁾ 실험을 통해 이 효과를 직접 보여주는 것이 바로 1879년의 베를린 아카데미 문제가 요구하는 바였고 헤르츠도 이 사실을 알고 있었다. 그는 다양한 종류의 부도체와 유전물질들—아스팔트, 석탄에서 얻은 인공피치, 종이, 나무, 모래, 황, 파라핀, 원유—에 대하여 이들의 작용이 2차스파크에 미치는 영향을 조사한 결과 이들 각각이 보여주는 효과들은 정도에서는 차이가 있으나 작용 양식만은 도체의 경우와 일치함을 보여줄 수 있었다.⁷³⁾ 결국 그는 1879년 베를린 아카데미 문제를 성공적으로 해결했다.

이 실험에 대한 헤르츠 자신의 해석에는 주목할 만한 점이 있었다. 헤르츠는 이 실험에 대한 논문의 결론부에서 “패러데이-맥스웰의 견해가 맞다면 실험 결과들은 위에 말한 것과 같은 효과를 두드러지게 보여줄 수 있어야 한다. 그리고 실험들은 이러한 기대를 완전히 충족시켰다”⁷⁴⁾고 하였다. 그는 패러데이-맥스웰 견해의 핵심을 “부도체의 분극에 따른 전하의 변위가 도체에 유도된 전류와 같은 전자기 작용을 일으키는 것”⁷⁵⁾으로 파악했기 때문에 이같이 결론지었는데 그의 이러한 생각이야말로 헬름홀츠의 영향을 받은 것이었다. 왜냐하면 헤르츠가 패러데이-맥스웰 이론의 핵심이라고 파악했던 부도체의 분극에 의한 전자기 작용은 실제로 영국의 “맥스웰주의자들”이 별로 관심을 두지 않았던 것으로서 헬름홀츠 이론에서만 중요성을 가지는 문제였기 때문이다. 따라서 헤르츠의 위의 언급은 문자 그대로 패러데이-맥스웰 이론의 검증을 뜻하는 것이 아니라 열린 회로의 전자기 작용에 있어 매질의 유전체 분극의 역할이 밝혀졌음을 의미하는 것으로 보아야 한다.

이 실험에서 헤르츠가 얻은 결과는 전자기력의 원거리 작용을 인정하면서 열린 회로에 대해서만 부분적으로 매질의 역할을 도입한 헬름홀츠 이론이나 원거리 작용을 완전히 부정하고 전자기

69) Hertz, “Über die Einwirkung …”, *EW*, p. 99.

70) 유도전류의 효과는 고체덩어리보다 가는 도선에서 더 잘 나타난다. Hertz, “Über die Einwirkung …”, *EW*, p. 100을 볼 것.

71) Hertz, “Über die Einwirkung …”, *EW*, pp. 95-96.

72) Hertz, “Über die Einwirkung …”, *EW*, p. 101.

73) Hertz, “Über die Einwirkung …”, *EW*, pp. 103-104.

74) Hertz, “Introduction” *EW*, p. 26; “Über die Einwirkung …”, *EW*, p. 101

75) Hertz, “Über die Einwirkung …”, *EW*, p. 95; p. 101.

현상을 매질에 의한 작용으로만 파악한 패러데이-맥스웰의 이론에 모두 적용될 수 있는 것이었다. 이러한 점들로 보아 그는 1887년 10월까지의 원거리 작용만으로 열린 회로의 전자기 현상을 설명하려고 했던 베버의 이론이 틀렸다는 것을 밝혔을 뿐 아직도 헬름홀츠 이론의 영향 내에 있었다고 볼 수 있다.

IV. 공기 중에서 전자기 작용의 전파에 관한 실험들 : 1887년 10월 말-1888년 2월

3절에서 본 바와 같이 부도체의 전자기 작용에 관한 헤르츠 실험의 결과는 전위론으로부터 맥스웰 방정식과 같은 결과를 얻기 위해 헬름홀츠가 도입한 첫번째 가정, 즉 열린 회로에서 매질의 분극은 전하의 변위를 나타내고 이의 변화가 전류와 같은 전자기 작용을 한다는 것을 입증해 주었다. 이에 성공한 헤르츠는 전자기력도 정전기력과 마찬가지로 유전체 분극을 일으킨다는 두 번째 가정을 실험으로 보이는 것도 가능하다고 생각하였다. 그러나 두 번째 가정을 위한 실험을 하던 중 그는 곧 공기나 진공도 다른 물질들과 마찬가지로 유전체이라는 헬름홀츠의 세 번째 가정이 패러데이-맥스웰 이론의 핵심으로서 더 큰 중요성을 갖는다는 것을 알게 되었다.⁷⁶⁾ 헤르츠는 만약 이 가정의 내용대로라면 공기 중에서 전자기 작용이 유한한 속도로 전파된다는 사실에 의해 앞의 두 가정들이 저절로 증명될 수 있다고 보았다. 그 이유는 “만약 첫째, 둘째 가정들이 성립한다면 그 결과 부도체 내에서는 맥스웰이 예언한 것과 같은 종류의 파동이 유한한 속도—크기가 광속과 다를 수도 있으나—로 전파될 것이다. 따라서 만약 공기도 유전물질이라면 공기 중에서도 부도체에서 일어나는 것과 똑같은 현상이 일어날 것”⁷⁷⁾이기 때문이었다. 이에 따라 헤르츠의 관심은 자연스럽게 부도체의 전자기 효과로부터 전자기 작용이 공기중에서 유한한 속도로 전파되는 효과를 찾는 문제로 옮겨가게 되었다.

먼저 헤르츠는 그림 3의 장치에서 도체와 방전 회로 사이의 거리를 약 1 내지 1.5m로 멀게 하였다. 이 경우 방전 회로로부터 직접 2차회로에 작용하는 전기력과 방전 회로에 의해 도체에 유도된 전류로부터 2차회로에 작용하는 전기력 간에는 위상차가 생기고 이 위상차에 의해 2차회로에 나타나는 두 전기력 간의 간섭효과는 도체와 방전 회로 사이의 거리에 따라 변하리라는 것을 기대할 수 있었다. 그러나 실험을 주의깊게 반복했음에도 불구하고 헤르츠는 처음의 기대와 달리 전파 속도가 무한하다는 부정적인 결과 밖에 얻지 못하였다.⁷⁸⁾

결국 헤르츠는 이 방법을 포기해야 했다. 대신 그는 도체에 유도된 전기파에 의한 2차스파크와 공기 입자의 분극을

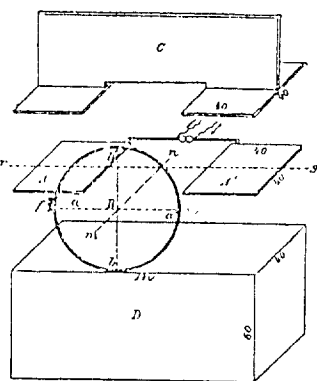


그림 3

76) Hertz, "Introduction" *EW*, p. 7. 이 시도에 관해서는 발표된 논문이 없기 때문에 그의 "Introduction"에 의존할 수 밖에 없다.

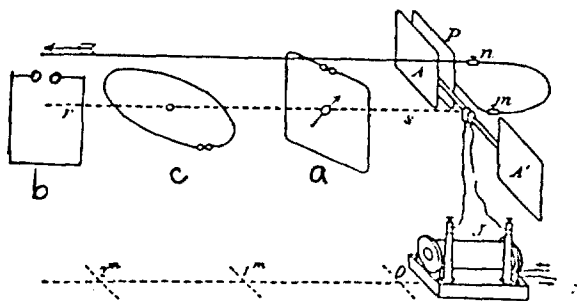
77) Hertz, "Introduction" *EW*, p. 7.

78) *HH*, pp. 235-239; Hertz, "Über die Ausbreitungsgeschwindigkeit", *EW*, pp. 105-106.

통해 직접 전파된 전자기 작용에 의한 2차스파크를 동시에 발생시키면 두 2차스파크가 서로 간섭을 일으켜 각각이 따로 발생했을 때와는 다른 형태로 나타날 것이라고 기대하였다.⁷⁹⁾ 그에 따라 도체덩어리가 도선으로 대체되었고 헤르츠는 곧 도선에 유도된 전기파와 공기중으로 직접 전파된 전자기 작용이 함께 일으키는 2차스파크의 변화를 확인할 수 있었다.⁸⁰⁾ 이러한 2차스파크의 변화는 도선에서의 전기파의 속도와 공기중에서 전자기력의 전파 속도에 영향을 받을 것이므로 이 변화를 확인한 것은 헤르츠로 하여금 공기중에서의 전자기력의 전파 속도에 대해 더 큰 관심을 가지고 구체적인 측정을 시도하게 했다. 반복된 실험의 결과 1887년 말에 그는 전자기 작용이 공기중에서 전파되는 속도가 유한하다는 것을 확증하게 되었다.⁸¹⁾

그는 우선 그림 4와 같이 실험 기구들을 장치하였다.

그림 4



여기에서 a, b, c는 2차회로이고 도선(L)은 충분히 긴 것으로 한쪽 끝이 아무 데도 연결되어 있지 않았기 때문에 도선에는 정상파가 발생했다. 이 때 2차회로가 b의 위치에 있으면 도선에 의한 효과는 2차스파크에 아무런 영향을 끼치지 못하고 단지 1차 방전 회로에 의한 스파크 효과만 검출될 뿐이었다. 그러나 스파크 간격을 지나는 수직축에 대해 이 2차회로를 90°회전시키면 a의 위치에 놓이게 되는데 이 위치에서는 앞에서와 반대로 도선 내의 전기파에 의한 스파크 효과만 검출되었다. 그리고 b에서 a의 위치로 2차회로가 회전하는 동안 이들 두 작용에 의한 2차스파크들이 혼합된 형태로 나타났다.

이 과정에서 2차회로가 수직축에 대해 360°회전하는 동안 2차회로의 법선(normal line)이 P쪽을 향할 때와 P의 반대쪽(A')을 향할 때의 스파크의 크기가 서로 다르다는 것이 발견되었다. 헤르츠는 방전 회로에서부터 2차회로까지의 거리를 변화시키면서 각 지점에서 2차회로의 법선이 P를 향했을 때의 스파크가 더 작은 경우를 '+', 반대일 때를 '-', 그리고 이 두 위치에서 스파크 세기에 차이가 없으면 'O'로 표시했다. 그리고 도선의 길이 mn의 변화에 따른 각 지점에서의 간섭효과들은 최종적으로 아래 표 1에서와 같이 얻어졌다.

79) 헤르츠는 방전회로에 의해 도선 속에 유도되는 전기파가 적당한 길이의 도선 내에서 정상파를 이룬다는 사실을 실험을 통해 이미 알고 있었다. 이에 대해서는 1887년 11월 7일의 일기 (HH, p.253)를 참조할 것.

80) 1887년 12월 8일의 일기, HH, p.239. 이 실험의 과정과 결과는 "Über die Ausbreitungsgeschwindigkeit", EW, pp.107-123에 수록되어 있다.

81) 1887년 12월 8일의 일기, HH, p.247.

〈표 1〉

mn	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
100	—	—	—	—	0	0	0	0	+	+	+	+	+	+
200	0	+	+	+	+	+	+	0	0	0	0	—	—	—
400	+	+	+	+	0	0	0	—	—	—	—	0	0	0

이 표에 실린 결과를 분석하려면 먼저 도선 내의 전기파의 특성에 대해서 알아야 했다. 이를 위해 헤르츠는 2차회로에 스파크를 발생시키지 않는 마디들의 위치를 확인함으로써 도선 안에 생기는 정상파의 파장을 조사하였다. 또한 그는 도선 안의 전기파는 방전 회로의 진동과 공명관계에 있으므로 정상파의 주기도 계산할 수 있었다. 이 때 그가 얻은 결과는 정상파의 마디와 마디 사이의 길이 즉 진행파의 반(半) 파장은 2.8m였고 이에 해당하는 방전 회로의 주기는 1.4×10^{-8} 초였다. 따라서 도선 내 정상파의 속도는 2×10^8 m/sec였다.

도선 내의 정상파에 대한 정보들을 바탕으로 실험 결과를 분석하기 위해 헤르츠는 다음과 같은 전제를 세웠다. 첫째, 만약 전자기 작용이 공기를 통해 무한한 속도로 전파된다면 2차회로의 스파크는 도선에서와 같이 2.8m마다 주기적인 변화를 보일 것이다. 왜냐하면 무한한 속도로 전파되는 전자기 작용은 2차회로와 방전 회로 사이의 거리에 상관없이 위상이 일정할 것이기 때문이다.⁸²⁾ 둘째, 만약 공기를 통한 직접 작용의 전파 속도가 도선에서의 속도와 같다면 2차회로와 방전 회로 간의 거리에 관계없이 두 작용의 위상차는 일정할 것이다. 따라서 이 경우에 2차스파크는 모든 지점에서 항상 같은 형태를 보일 것이다. 그리고 마지막으로 공기를 통한 직접 작용의 전파 속도가 유한하지만 도선에서의 값과 다르다면 스파크의 변화는 위의 두 경우에서와는 달리 불규칙하게 나타날 것이다. 뿐만 아니라 그 변화하는 양상들이 반복되는 구간도 2.8m가 넘을 것이다.⁸³⁾ 이러한 전제들에 따라 표를 분석한 결과는 간섭효과가 위치에 따라 변하고 그 변하는 주기도 2.8m보다 크게 나타났고 이로부터 헤르츠는 공기중에서의 전파 속도는 도선에서의 속도와는 다르지만 유한한 값이라는 결론을 얻을 수 있었다.⁸⁴⁾

이 실험결과들로부터 알 수 있는 공기 중에서의 전파 속도는 얼마였을까? 표 1에 대한 헤르츠의 분석에 의하면 간섭효과의 부호는 7.5m지날 때 마다 '+'에서 '-'로 바뀌었는데 이것은 공기 중으로 전파되는 전자기 작용이 7.5m 움직이는 동안 도선 속으로 전파되는 전자기 작용은 4.7m (=7.5-2.8) 움직인다는 의미였다. 도선 내의 전기파의 반파장이 2.8m임을 고려하면 공기 중에서 전자기 작용의 반파장은 4.5m (=2.8m×75/47)인 셈이고 이 길이는 1.4×10^{-8} 초 동안 움직인 거리에 해당한다. 따라서 공기 중에서 전자기 작용의 전파 속도가 3.2×10^8 m/sec의 값을 가진다고 볼 수 있다. 따라서 이 실험 결과에 의하면 도선 내에서 전기파의 속도와 공기중에서 전자기 작용의 전파 속도의 비는 28 : 45였다.

당시의 전자기 이론들과 관련시켜서 볼 때 이 결과들은 헤르츠에게 매우 중요한 물리적 의미를 지니는 것이었다. 그는 측정에서 일어날 수 있는 모든 오차를 인정하더라도 전자기 작용이 공기

82) Hertz, "Über die Ausbreitungsgeschwindigkeit", *EW*, p. 120.

83) Hertz, "Über die Ausbreitungsgeschwindigkeit", *EW*, p. 121.

84) Hertz, "Über die Ausbreitungsgeschwindigkeit", *EW*, p. 121.

중에서 유한한 속도로 전파된다는 것을 이 실험의 분명하고도 직접적인 결론이라고 보았다. 이러한 생각은 “가장 직접적인 결론은 패러데이의 견해의 확증이다. 이에 따르면 전기력은 공간에서 독립적으로 존재하는 매질의 분극이다”⁸⁵⁾라는 그의 언급에서 가장 잘 드러난다. 한편 자신이 얻은 결과가 광속과 거의 비슷한 값이었음에도 불구하고 이를 맥스웰 이론의 확증이라고 보지 않았던 것은 헤르츠가 도선에서의 전파 속도와 공기중에서 전파 속도의 비가 1:1이라는 것이 맥스웰 이론의 핵심이라고 보았기 때문이었다.⁸⁶⁾

또한 이 결과는 전자기력 뿐 아니라 정전기력도 원거리 작용이 아니라는 쪽으로 헤르츠의 생각을 바꾸어 버렸다. 사실 이 실험을 통해서 직접 밝혀진 바는 거리에 반비례하는 힘(전자기력)이 유한한 속도로 전파된다는 것이었다. 그러나 그는 전류소들 간에 작용하는 정전기력과 전류소들의 유도작용에 의한 전자기력(Lorentz force)이 서로 반대로 작용함으로써 에너지보존의 원리를 만족시킨다고 이해했기 때문에 이 결과가 거리의 제곱에 반비례하는 힘(정전기력)에 대해서도 중요한 영향을 끼친다고 보았다. 따라서 그로서는 이러한 관계에 있는 두 작용이 하나는 속도가 유한하고 또 하나는 속도가 무한하다는 것을 받아들일 수 없었던 것이다.⁸⁷⁾

위의 실험결과는 방법의 측면에서도 헤르츠에게 중요한 의미를 가지는 것이었다. 그는 자신의 방법이 당시까지 해결되지 않고 있던 열린 회로에서의 문제들의 해답을 줄 수 있다고 보았다. 그의 견해로는 몇 개의 상수값들만 보완된다면 이 방법에 의해 어느 전자기 이론이 정확한 것인지를 결론지어줄 수 있는 결과들을 얻을 수 있고 이 방법은 특히 빛과 전자기파의 관계를 밝히는 데 결정적인 것이었다. 왜냐하면 전자기파의 전파 속도가 광속이라는 점이 빛의 회파가 전자기파라는 데 대한 기존의 어떤 이유들보다도 중요하다고 생각했는데 자신이 이 실험에서 사용한 방법이야말로 공기중에서 전자기파의 속도를 실험으로 결정할 수 있었기 때문이었다.⁸⁸⁾

비록 간접적인 방법이긴 하였으나 공기 중에서 전자기 작용이 유한한 속도로 전파됨을 보인 후에도 헤르츠는 방전 회로와 2차회로의 관계에 대한 실험을 계속했다. 이 둘 사이의 관계가 공기중에서의 전자기 작용의 전파에 대한 힌트를 줄 수 있을 것이라고 생각했던 것이다.⁸⁹⁾ 그러던 중 그는 방전 회로의 유도작용이 나타나기 힘든 위치에 2차회로가 놓여 있음에도 불구하고 스파크가 발생하는 현상을 보게 되었다. 이 현상은 특히 2차회로가 방전 회로에서 멀리 떨어져 있어서 가령 스파크가 일어난다고 하더라도 약하게 일어나야 하는 벽 근처에서 자주, 그리고 강하게 일어났다.

이에 대해 헤르츠가 생각해 낸 가장 쉽고 단순한 설명은 열린 회로의 도선 끝 점에서 반사가 일어나 정상파를 이루는 것과 같이 벽에 의해 반사된 전자기파와 진행하는 전자기파에 의해 정상파가 발생한다는 것이었다.⁹⁰⁾ 이 생각을 확인해 보기 위해 그는 실험실 내의 조건을 반사에 보다 적절하게 해 주었다. 그 결과 실험 조건들이 반사에 유리해질수록 2차회로에서의 스파크

85) Hertz, “Über die Ausbreitungsgeschwindigkeit ……,” *EW*, p. 122.

86) 이 두 속도의 비가 1:1이어야 한다는 것은 맥스웰이 직접 언급한 것이 아니라 공기 중에서 전자기파의 전파에 대한 헤르츠의 해석이다. Hertz, “Über die Ausbreitungsgeschwindigkeit ……,” *EW*, p. 122; p. 131

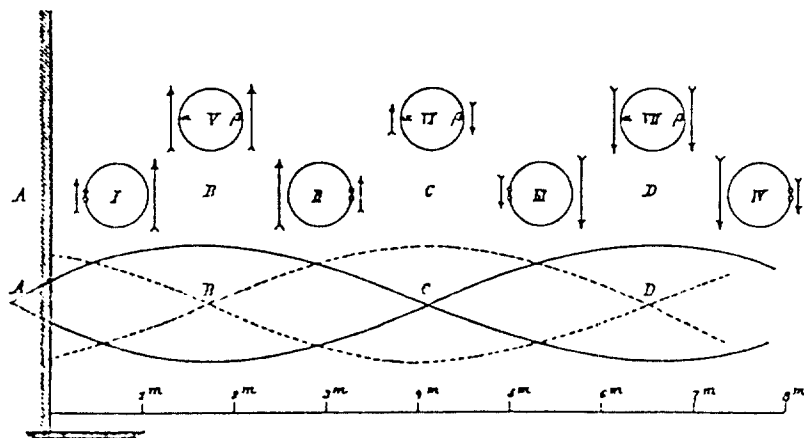
87) Hertz, “Über die Ausbreitungsgeschwindigkeit ……,” *EW*, p. 123.

88) Hertz, “Über die Ausbreitungsgeschwindigkeit ……,” *EW*, p. 123.

89) Hertz, “Über die elektromagnetische Wellen ……,” *EW*, p. 124.

90) Hertz, “Über die elektromagnetische Wellen ……,” *EW*, p. 125.

그림 5



현상도 두드러지는 것이 관찰되었다. 그의 생각대로 공기 중에 전자기파의 정상파가 존재했던 것이다.

이제 헤르츠는 이 정상파를 이용해 공기 중에서 전자기 작용의 전파 속도를 직접 측정해 보려고 시도하게 되었다. 전자기파의 입사파와 반사파가 이루는 정상파에 의해 2차회로에서 발생하는 스파크 변화는 그림 5와 같았다.

여기에서 A는 벽면이고 1차 방전 회로의 위치는 8m지점이다. 그리고 화살표는 그 지점에 스파크 간격이 위치할 때의 스파크의 세기를 나타내는 것으로서 화살표의 방향은 진동방향을, 길이는 스파크의 세기 즉 정상파의 진폭과 비례하는 양을 나타내는 것이었다.

이 결과를 놓고 처음에 헤르츠는 좌우 화살표의 길이가 같은 위치가 정상파의 마디를 나타낸다고 생각했다. 정상파의 마디 좌우에서는 진폭이 대칭이기 때문이었다. 그러나 그는 곧 A, B, C, D가 모두 마디는 아니라고 생각하게 되었다. 만약 A, B, C, D가 모두 마디라면 I, II, III, IV의 위치가 모두 배(loop)가 되어야 하고 그럴 경우 I, II, III, IV에서는 좌우 스파크의 세기가 같아야 하기 때문이었다. 따라서 그는 스파크가 강한 B와 D는 정상파의 배에 해당하고 스파크가 약한 A와 C가 마디에 해당하는 위치라고 분석했다. 또한 마디에 해당하므로 스파크가 나타나지 않을 것으로 기대되는 C에서 약하게나마 나타나는 스파크는 이 진동면에 수직인 전기력의 다른 성분 때문이라고 보았다.

위의 분석은 이들 스파크의 세기 변화가 단순히 주기적인 증가와 감소에 의한 것이 아니라 파동 운동에 의한 정상파임을 보여주었다.⁹¹⁾ 관련된 모든 요소들을 고려한 결과 헤르츠는 이 정상파를 형성하는 진행파의 1/4 파장에 해당하는 BC의 간격으로 2.4m의 값을 얻을 수 있었고 이것은 입사한 전자기파의 반파장이 4.8m임을 의미했다.⁹²⁾ 이 값은 앞 논문에서 그가 얻은 실험 결과를 확증해 줄 만한 것이었다.⁹³⁾

91) Hertz, "Über die elektromagnetische Wellen", *EW*, p. 130.

92) Hertz, "Über die elektromagnetische Wellen", *EW*, p. 132. 헤르츠가 벽면에서부터 C까지의 거리를 측정하여 이 값을 직접 구하지 않았던 이유는 벽면에서의 감쇄(damping) 효과를 고려했기 때문이었다. 또한 방전 회로에서 가까운 거리에 있는 D점 부근에서는 정전기력의 영향 및 다른 영향으로 복잡한 간섭 현상이 나타났기 때문에 배의 위치를 정확하게 측정하는 것이 쉽지 않았다. Hertz, "Über die elektromagnetische Wellen", *EW*, pp. 129-130.

93) 헤르츠는 공기와 도선에서의 전기파들에 의한 2차스파크들 간의 간섭 실험을 주의깊게 다시 하여 7.5m를

그러나 여전히 공기 중에서의 전파 속도와 도선에서의 전파 속도의 비는 1:1이 아니었으며 공기 중에서의 전파 속도 값도 $3.42 \times 10^8 \text{m/sec}$ ($= 4.8 \text{m}/(1.4 \times 10^{-8} \text{sec})$) 로서 광속과 차이를 보였기 때문에 헤르츠는 앞의 실험 결과에서와 마찬가지로 공기중에서의 전파 속도가 도선 내에서의 속도와는 다른 값이지만 크기가 유한하고 광속과도 같은 자리수를 가진다는 것에 만족해야만 했다.⁹⁴⁾ 물론 그는 이 실험에 사용한 장치들의 여러 조건들—방전 회로와 반사벽면과의 거리 및 방전 회로와 2차회로와 반사벽면과의 상대적 위치, 그리고 방전 회로의 주기 등—을 변화시켜가면서 실험을 반복했으나 만족스러운 결과를 얻지는 못하였다.⁹⁵⁾ 결국 헤르츠는 바로 앞의 실험에 비해 보다 직접적인 방법으로 파동성을 보였다는 것 외에 더 이상 새로운 결과를 얻지는 못했다고 생각했다.⁹⁶⁾

물론 공기중에서 전자기 작용의 전파가 파동이고 속도가 광속과 자리수가 같다는 점은 패러데이-맥스웰 이론의 “빛의 전자기적 특성에 관한 가설”을 상당히 지지해주는 것으로 볼 수 있으나 헤르츠 자신은 이 사실을 맥스웰 이론의 검증이라고 생각하지 않았으며 그것은 다음의 언급으로부터 알 수 있다.

… 따라서 맥스웰의 이론을 확증해 줄 수 있는 증거가 많이 있음에도 불구하고 그 이론이 이미 받았거나 아직은 아니지만 곧 받을지도 모르는 확증만으로 부족하다는 점이 도체와 공기중에서 전기 작용이 서로 같은 속도로 전파되지 않는다는 사실에 의해 증명되었다.⁹⁷⁾

이러한 그의 결론은 같은 실험결과를 보고 영국의 맥스웰주의자들이 보인 반응과 뚜렷한 대조를 보였다. “공기 중에서 전자기 작용의 파동성을 직접적으로 보여주었다”는 점 때문에 당시의 “맥스웰주의자들”은 헤르츠의 이 실험이 맥스웰의 이론을 확증해 주는 것이라고 보았다. 이에 비해 헤르츠는 빛의 전자기적 특성에 대한 가설보다 전자기 작용이 도체와 부도체에서 같은 속도로 전파된다는 점이 맥스웰 이론에서 더 중요한 요소라고 보았기 때문에 이 실험이 기여하는 바는 이전의 실험에 비해 ‘직접’ 전파 속도를 측정하는 방법상의 개선에 지나지 않는다고 보았던 것이다.

V. 맺음말

지금까지 1886년부터 “전자기파를 발견”했다고 일컬어지는 1888년 2월의 실험에 이르기까지 헤르츠의 실험 연구 과정을 구체적으로 살펴보았다. 이를 통해 실험결과와 분석과 그에 대한 해석에 드러난 헤르츠의 전자기적 관점이 실험의 진행과 함께 변화해 갔음을 볼 수 있었다. 결론적으로 말하자면 1888년 2월까지의 실험들을 계획하고 전개할 때 맥스웰 이론은 거의 고려되지

7. 1m로, 2.8m를 2.9m로 수정한 값을 얻었다. 이 값들에 따르면 공기중에서의 반파장은 4.9m에 해당하는 것이었다. Hertz, “Über die elektromagnetische Wellen ……,” *EW*, p. 135.

94) Hertz, “Über die elektromagnetische Wellen ……,” *EW*, p. 133.

95) Hertz, “Über die elektromagnetische Wellen ……,” *EW*, pp. 134-135.

96) Hertz, “Über die elektromagnetische Wellen ……,” *EW*, p. 136.

97) Hertz, “Über die elektromagnetische Wellen ……,” *EW*, p. 136.

않았다. 오히려 그의 전자기 실험은 헬름홀츠 이론의 영향 아래 전개되었기 때문에 부도체의 전자기 작용에 더 큰 관심을 보였다. 또한 헤르츠가 부도체의 전자기 작용에서 공기의 전자기 작용으로 관심을 돌리게 된 계기 역시 헬름홀츠의 가정들을 증명하기 위한 것이었다. 그러나 1887년 10월의 실험이 끝났을 무렵에 그는 헬름홀츠와 달리 원거리 작용에 의해 매질의 분극이 일어난다는 것을 부정하고 분극을 방전 회로 주변의 공간에 독립적으로 존재하는 것으로 파악하게 되었다. 그리고 1888년 2월에는 공기중에서 전자기파가 존재하고 그것의 전파 속도가 유한한 것을 실험으로 밝히기에 이르렀다. 그럼에도 불구하고 이 시기까지도 그는 매질의 분극이 공간에 독립적으로 존재한다는 것 외에는 맥스웰 이론에 대해 영국의 “맥스웰주의자들”과는 다른 견해를 가지고 있었기 때문에 이 실험이 맥스웰 이론을 검증했다고까지 생각하지는 않았다.

3절에서 다른 헤르츠의 실험들을 보면 헬름홀츠 이론의 영향은 주로 실험의 목적에서 드러났다. 이 실험들은 헬름홀츠가 그의 이론으로부터 맥스웰과 같은 결과를 얻기 위해 도입한 세 가정들을 차례로 증명하는 순서로 진행되었던 것이다. 이것은 헤르츠가 방전 회로 주변의 힘의 분포로부터 전자기 작용이 유한한 속도로 전파될지도 모른다는 암시를 얻었지만 즉시 이를 확인하려고 시도하지 않고 부도체의 전자기 작용을 조사했던 것에서 잘 드러난다. 부도체의 전자기 효과를 검출해 낼 가능성이 그의 주의를 더 많이 끌었기 때문이었다.

이와 함께 현상에 대한 해석에서 드러나는 헬름홀츠의 영향은 헤르츠가 1886년의 첫 실험에서부터 방전 회로에서 작용하는 전기력을 정전기력과 전자기력의 합이라고 생각했다는 점이다. 비록 닫힌 회로의 문제에 제한되었으나 1884년의 논문에서 이미 헤르츠는 전기력의 통일성 개념을 도입해서 맥스웰 방정식을 유도한 적이 있었음에도 불구하고 이 개념을 실험의 분석에는 사용하지 않았다. 또한 이 사실은 그가 실험과 관련해서 맥스웰 이론을 염두에 두지 않았다는 것을 뒷받침해 준다. 왜냐하면 전기를 띤 물체들 사이에 작용하는 정전기력이 매질의 분극에 아무런 작용도 하지 않는다고 보는 맥스웰 이론에 비해 헬름홀츠 이론에서는 이 정전기력의 원거리 작용도 매질의 분극을 일으키고 변화시키는 요소들 중의 하나였기 때문이다. 그래서 “힘을 정전기력과 전자기력으로 나누는 것 자체가 맥스웰 이론에서는 낯선 것”⁹⁸⁾이었으나 헬름홀츠 이론에서는 당연한 것이었다. 그리고 헤르츠가 방전 회로 주변의 힘의 분포에 대한 실험에서 전자기 작용의 유한한 속도에 대한 암시를 얻을 수 있었던 것도 이같이 전기력을 정전기력과 전자기력으로 구분해서 생각한 결과였다.

실험의 측면에서 헤르츠가 원거리 작용을 부정하고 맥스웰 이론에서와 같이 매질의 역할에만 관심을 가지기 시작하는 것은 1887년 10월 이후 공기중에서 전자기 작용이 유한한 속도로 전파되는지 여부에 관한 것으로 실험의 목적이 바뀌면서부터였다. 그러나 이 때에도 그는 헬름홀츠와 마찬가지로 맥스웰 이론의 핵심을 부도체의 유전체 분극의 전파가 전도전류와 같은 전자기 작용을 한다는 점과 공기도 유전체로서 다른 부도체와 같은 전자기적 효과를 일으킨다는 점이라고 생각했다. 다시 말해서 이것은 공기의 유전체 분극이 도선 내의 전도전류와 같은 속도로 전파된

98) H. R. Hertz, “Die Kräfte elektrischer Schwingungen. behandelt nach der Maxwellschen Theorie,” *Wiedemann's Ann.*, 36(1889), 1, *EW*, pp.137-159, 특히 p.137을 볼 것. 헤르츠도 자신의 초기의 분석이 맥스웰 이론이 아니라 헬름홀츠 이론에 근거하였음을 인식하고 있었다. 그러나 1888년 이후 맥스웰 이론의 우월성을 인정하게 되면서 전기력에 대한 이러한 구분없이 방전회로 주변에서의 힘의 분포에 대해 설명하려고 시도하였다. O'Hara는 헤르츠가 이 논문에서 맥스웰 이론과 헬름홀츠 이론의 절충을 시도하였다고 평가하였다. O'Hara, 앞의 책, pp.28-29.

을 의미했다. 따라서 이 논문에서 다루고 있는 1886년에서 1888년 2월에 이르는 시기의 헤르츠는 공기중에서의 전파 속도가 다른 부도체나 도체에서와 같이 광속이어야 한다는 점을 강조했고 상대적으로 “빛의 전자기 이론”에 관해서는 관심이 적었음을 알 수 있다.

헤르츠의 이러한 생각은 전자기 작용의 속도를 간접적인 방법으로 측정한 실험에 대한 그의 결론에서 보다 분명히 드러났다. 그는 공기중에서 전파 속도가 유한한 값이지만 도선에서의 속도보다 크다는 것 때문에 자신의 실험결과가 매질의 작용을 주로 강조하는 패러데이의 견해만을 확증할 뿐 패러데이-맥스웰 이론 또는 맥스웰 이론을 증명해 주지는 못한다고 보았던 것이다. 또한 전자기파의 정상파를 다룬 1888년 2월의 실험이 “빛의 전자기적 특성에 관한 가설”을 상당히 지지해 줄 수는 있지만 맥스웰 이론을 검증한다고까지 생각하지 않았던 것도 같은 이유에서였다.

또한 이 논문에서 직접 다루지 않았던 1888년 이후의 연구들도 1886년에서 1888년 2월에 이르는 시기의 헤르츠가 전자기파의 존재 여부보다 전자기 작용의 전파 속도 문제에 더 큰 관심이 있었다는 사실을 보여준다. 그는 방전 회로에 관한 실험들이 진행되는 과정에서 자외선이 전자기 작용에 영향을 끼친다는 사실을 발견하였으나 이에 대해서는 더 이상의 연구를 진행하지 않고 있다가⁹⁹⁾ 1888년 2월 이후 자신의 실험 결과가 맥스웰 이론을 검증하는 것으로 받아들여지게 되고 나서야 전자기 작용이 가지는 빛의 특성에 관한 실험이나 빛과 전기와의 관계에 대한 실험을 하였다.¹⁰⁰⁾ 이러한 사실은 1888년 2월 이후에야 헤르츠에게 “빛의 전자기 이론”에 대한 관심이 생겼음을 뜻하는 것이다. 또한 그는 공기 중에서의 전파 속도를 측정하기 위해 정상파의 효과를 이용하는 것이 정확하고도 직접적으로 방법이므로 전파 속도의 비가 같지 않은 이유가 도선의 경우에서 밝혀져야 한다고 판단하고 1888년 2월의 전자기파 실험 이후에 도선에서의 전자기 작용에 관해 많은 실험들을 수행했다.¹⁰¹⁾

지금까지의 논의를 요약하자면 1888년까지의 헤르츠의 실험 연구에서 맥스웰 이론은 거의 고려되지 않았으며 처음에는 헬름홀츠 이론이 실험의 길잡이였다. 즉 그의 실험들은 헬름홀츠의 세 가정들을 보이려는 의도를 가지고 진행된 것이었고 그가 실험의 분석에서 사용한 개념들도 맥스웰 이론보다는 헬름홀츠 이론에 더 가까웠다. 실제로 그는 1887년 11월까지의 실험들을 통해 부도체에 의해 전자기 작용이 일어나고 그 전파 속도가 유한하면서 광속과 거의 같은 값이라는 것을 밝혔기 때문에 이 때까지의 연구들이 헬름홀츠 이론을 증명했다고 볼 수도 있었다. 그러나 1887년 10월말에서 11월에 이루어진 간접적인 전자기 작용의 속도 측정 실험을 분석하는 과정에서 헤르츠는 전기력의 원거리 작용을 부정하게 되었다. 한편 헬름홀츠의 이론에 따르면 매질의 유전체 분극도 정전기력의 원거리 작용에 의한 것이었기 때문에 원거리 작용을 포기하게 된 헤르츠는 이 실험에서 헬름홀츠의 이론이 아니라 “모든 전자기 작용이 공간에 독립적으로 존재하는

99) H. R. Hertz, “Über einen Einfluß des ultravioletten Lichtes auf die elektrische Entladung,” *Sitzungsber. d. Berl. Akad. d. Wiss.*, (June, 9. 1887), *Wiedemann's Ann.* 31(1887), 983, *EW*, pp. 63-70.

100) H. R. Hertz, “Über Strahlen elektrischer Kraft,” *Sitzungsber. d. Berl. Akad. d. Wiss.*, (Dec., 1888. 13), *Wiedemann's Ann.* 36(1889), 769, *EW*, pp. 172-185.

101) H. R. Hertz, “Über die Fortleitung elektrischer Wellen durch Drähte,” *Wiedemann's Ann.* 37(1889), 395, *EW*, pp. 160-171; “Über die mechanischen Wirkungen elektrischer Drahtwellen,” *Wiedemann's Ann.* 4(1891), 407, *EW*, pp. 187-194.

분극”¹⁰²⁾에 의해 일어난다는 것이 증명되었다고 결론지었다. 이것은 동시에 기본적으로는 정전기력의 원거리 작용에 기반하고 있는 헬름홀츠의 견해를 더 이상 받아들이지 않게 되었다는 의미이기도 하다. 그는 곧이어 행한 전자기파의 정상파 실험에서나 1890년에 발표한 논문¹⁰³⁾에서 더 이상 정전기력과 전자기력을 구분하여 생각하지 않았다.¹⁰⁴⁾

그럼에도 불구하고 헤르츠는 영국의 “맥스웰주의자들”과 달리 전자기 작용이 도체와 유전체에서 같은 속도로 전파된다는 것이 맥스웰 이론의 가장 중요한 내용이라고 생각했기 때문에¹⁰⁵⁾ 전자기파의 존재를 직접적인 방법으로 입증하고도 맥스웰 이론을 검증하였다고 생각하지는 않았다.

102) H. R. Hertz, “Über die Ausbreitungsgeschwindigkeit ……,” *EW*, p. 122.

103) Hertz, “Die Kräfte elektrischer ……,”.

104) 1890년 이후 맥스웰에 대한 헤르츠의 생각이 헬름홀츠의 해석에서 벗어났다는 점에 대해서는 Buchwald도 지적한 바 있다. Buchwald, 앞의 책, p. 177.

105) 헤르츠의 실험이 영국에서는 맥스웰 이론의 검증으로 받아들여졌다는 것을 알게 된 뒤 핏제랄드나 헤비사이드와 같은 사람들과 교환한 편지에서 그는 도선과 유전체에서의 속도가 다르다는 문제점을 제기하였다. 그러나 이들의 답장에서는 이 문제에 대한 언급이 없는 것으로 보아 영국 “맥스웰주의자들”은 헤르츠와 달리 이 문제를 중요하게 고려하지 않았음을 알 수 있다. O'Hara, 앞의 책, pp. 24-26.