

삼극 진공관의 기원과 드 포리스트(Lee de Forest)

오 동 훈

서울대학교 과학사 및 과학철학 협동과정

The Origin of the Triode Vacuum Tube and Lee de Forest

OH Dong Hoon

Program in History and Philosophy of Science

Seoul National University

ABSTRACT

The triode vacuum tube (so-called "Audion") was invented in 1906 by Lee de Forest (1873-1961), an American inventor-scientist. It was the most important electronic device until the transistor was developed in 1948. Most Historians of technology who had investigated the origin of triode vacuum tube argued that de Forest's invention resulted from the modification of the Fleming valve.

In this thesis, I argue that the invention of the triode vacuum tube originated from de Forest's independent research. Since his graduation from Yale Sheffield Scientific School in 1899, de Forest had worked on the detectors for wireless communication. He succeeded in developing the electrolytic detector in 1903 and the flame detector in 1905, which consolidated his belief that the control of ions would play an important role in these devices. His grid "Audion" in 1906 was the fruit of this line of research, and it made his conviction even stronger that ionized gases were the main charge carriers in Audion. In this respect, his understanding of vacuum tube, whether it was Audion's or Fleming's valve, was quite different from Fleming's; in the latter case, the "electrons" rather than "ions" were the charge carriers. In conclusion, the triode vacuum tube originated not from the modification of the Fleming valve but from de Forest's original research on detectors. In the whole process of invention and modification, the most important factor was de Forest's belief on the role of ions in tube. However, it prevented him from improving the Audion to higher vacuum tube, which would be carried out by the new generation of engineer-scientists.

1. 머리말

19세기 말부터 20세기 초에 걸쳐 진행된 교통과 통신의 혁명은 미국을 비롯한 서양 사회의 산업과 생활양식에 지대한 영향을 주었다.¹⁾ 철도와 자동차로 대표되는 교통혁명은 계절과 기후에 구애받지 않고 많은 사람과 화물을 수송할 수 있도록 했고, 전신과 전화에 의한 통신혁명은 정보의 신속한 전달을 가능하게 했다. 특히 통신혁명은 마르코니(Guglielmo Marconi, 1874-1937)가 1890년대에 발전시킨 무선통신의 상업화와 그 뒤를 이어 로지(Sir Oliver Lodge, 1878-1955), 알렉산더슨(Ernest Alexanderson, 1878-1975), 플레밍(John Ambrose Fleming, 1849-1945) 등이 발명한 효과적인 기구들 덕분에 다른 어떤 분야보다도 빠른 성장을 할 수 있었다.

이렇게 통신혁명을 가능하게 했던 여러 장치 중에서 가장 중요했던 것은 전자기파를 검파·증폭·발진할 수 있는 삼극진공관이었다. 발명자인 드 포리스트(Lee de Forest, 1873-1961)가 “Audion”이라 명명하였던 삼극진공관은 이전의 어떤 검파기보다도 우수한 검파기능을 가지고 있었으며 미약한 신호를 증폭할 수도 있었기 때문에 통신거리의 한계를 근본적으로 해결할 수 있었다. 뿐만 아니라 오디온은 연속파(continuous wave)를 발생시킬 수 있었기 때문에 음성을 전자기파에 실어 보낼 수 있었다. 이 장치는 처음에는 무선통신에 사용하기 위한 검파기로 고안되었지만 그 기술적 가능성이 알려지면서 전화의 자동중계 장치, 무선통신의 연속파 발진기, 전자기파의 증폭기 등으로 사용되었고 나아가 라디오 수신기와 텔레비전 수상기 등에 응용되면서 전자 통신 분야에 있어서 가장 핵심적 장치가 되었다. 간단히 말해 삼극진공관의 개발은 실리콘칩이 오늘날 우리에게 미치는 영향만큼이나 당시 큰 영향을 주었으며, 초보적 단계에 있던 라디오기술을 한 단계 더 발전시켜 전자시대의 막을 올렸던 것이다.²⁾

드 포리스트의 오디온은 플레밍의 2극진공관과 그 형태가 유사하였기 때문에 지금까지 기술사학자들은 그 발명의 독자성에 대해서 의문을 품어왔다.³⁾ 그 중에서도 가장 큰 문제는 오디온의 기원 문제, 즉 ‘오디온이 단순히 플레밍 밸브의 모방인가 아니면 드 포리스트의 독자적 연구에서 비롯되었는가’ 하는 것이었다. 대부분의 연구자들은 드 포리스트의 발명을 단지 플레밍 밸브의 모방 정도로 평가절하하였는데, 예를 들어 애플튼(Edward Appleton)과 칩먼(Robert A. Chipman)은 드 포리스트가 원리는 알지 못한 채 단순히 경험적인 연구를 통해 자신의 장치를 발명하였으며, 그것은 플레밍 밸브에 약간의 수정을 가한 모방에 지나지 않았다고 주장하였다.⁴⁾ 반면 에이트켄(Hugh G. J. Aitken)은 이러한 주장이 드 포리스트의 작업에 대한 잘못된 가정에서 비롯된 오류

1) 서양에서의 교통·통신혁명의 영향에 대해서는 Alfred D. Chandler, Jr., *The Visible Hand* (Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1977), 79-206면; *Scale and Scope: The Dynamics of Industrial Capitalism* (Cambridge, Mass.: The Belknap Press of Harvard University Press, 1990), 53-61, 252-260, 411-414면을 참조할 것.

2) 이 글에서 라디오기술이라 함은 라디오 수신기만을 말하는 것이 아니라 전파공학 전반을 다 일컫는 말이다.

3) Hugh G. J. Aitken, *The Continuous Wave: Technology and American Radio, 1900-1932* (Princeton: Princeton University Press, 1985); Edward Appleton, “Thermionic Devices from the Development of Triode up to 1939”, Institute of Electrical Engineers ed., *Thermionic Valves 1904-1954* (London, 1955), 17-25; Robert A. Chipman, “De Forest and Triode Detector”, *Scientific American*, Vol. 212, No. 3 (March 1965), 92-100.

4) Appleton, “The Thermionic Devices from the Development of the Triode up to 1939”, 17면; Chipman, “De Forest and Triode Detector”, 100면.

라고 주장하면서 오디온은 드 포리스트의 독자적 연구의 산물이었다고 주장하였다.⁵⁾ 그는 이전의 연구자들이 범한 두 가지 잘못된 가정을 제시하고 이를 논박하였다. 첫번째 가정은 ‘드 포리스트가 자신의 오디온을 고진공으로 만들려고 하였으나 현실적으로 실패했다’는 것이었는데, 에이트킨은 드 포리스트가 처음부터 ‘이온화된 기체’가 전하의 운반체라고 생각했기 때문에 이는 틀린 생각이라고 보았다. 두번째 가정은 ‘오디온이 실제로는 전자에 의해서만 작동했는데도 불구하고 드 포리스트는 이온화된 기체에 의한 것이라고 생각했다’는 것이다. 이에 대해서도 에이트킨은 실제 발명 당시의 오디온이 순수하게 전자에 의해서만 작동한 것이 아니라 전자와 이온화된 기체 양자에 의한 것이었다는 점을 들어 드 포리스트가 오디온의 작동을 제대로 파악하지 못한 것은 아니었다고 주장하였다.

위와같은 논의의 쟁점을 요약해 보면, 첫째 과연 ‘드 포리스트가 오디온의 작동원리를 제대로 이해하고 있었는가’, 둘째 ‘드 포리스트가 플레밍의 발명에 의존하지 않고 독자적으로 오디온을 발명하였는가’로 압축될 수 있다. 이에 필자는 플레밍 밸브와 오디온이 어떠한 과정을 거쳐 발명되었는가를 살피고 삼극진공관의 진정한 기원이 어디에 있었는가를 규명해 보고자 한다.

우선 2절에서는 1900년 경의 무선통신기술계의 상황을 살피기 위해 마르코니의 무선통신체계에 대한 간략한 개관을 시도하고, 이를 통해 마르코니의 체계에서는 검파기가 지속적인 문제점으로 남아있었다는 점을 지적할 것이다. 이어 3절에서는 드 포리스트의 연구과정을 1899년의 박사학위 논문에서부터 1906년의 삼극진공관 발명까지 살펴보면서 삼극진공관의 발명이 플레밍 밸브의 단순한 모방에서 비롯된 것이 아니라 그의 독자적 연구의 산물임을 주장할 것이다. 이 절에서는 드 포리스트가 검파기를 연구하게 된 동기가 마르코니의 검파기보다 우수한 새로운 검파기를 찾으려는 노력에서 비롯되었음을 지적한 다음, 오디온의 발명이 플레밍 밸브의 단순한 변형이라는 많은 다른 학자들의 주장과는 달리 1899년 이후에 계속된 연구의 결과에서 비롯되었음을 여러 측면에서 보일 것이다. 특히 이온화된 기체에 대한 그의 관심이 결과적으로 오디온의 발명을 이끌어냈다는 점을 보일 것이다. 아울러 3절에서는 플레밍 밸브가 어떠한 과정을 거쳐서 발명되었는가를 살펴보는 데, 플레밍은 드 포리스트와는 달리 이극진공관이 탄소필라멘트에서 튀어나오는 어떤 입자, 즉 음전기를 띤 전자에 의해 작동된다고 생각하였음을 보일 것이다. 이러한 검토를 통해 우리는 오늘날 흔히 생각하는 것과는 달리 삼극진공관과 이극진공관은 전혀 다른 이론과 연구과정에 바탕하여 발명되었음을 알게 될 것이다. 마지막으로 4절에서는 오디온의 개량과정을 다루면서, 드 포리스트가 이온화된 기체에 대해서 계속해서 집착을 한 것이 개량과정에서는 오히려 그의 한계로 작용했다는 점을 보일 것이다.

2. 마르코니의 통신체계와 검파기

헤르쯔(Heinrich R. Hertz, 1857-1894)는 1886년에서 1888년동안 일련의 실험을 통해서 전자기파를 발생시킬 수 있는 방법과 그것을 추적할 수 있는 방법을 고안하였다. 그는 스파크간극에서 발생하는 전기방전의 진동운동을 이용하여 전자기파를 발생시킨 다음 링 모양의 도선에 간극을 둔 수신기를 이용해 발진기에서 발생한 진행파와 벽에서 반사되어 오는 반사파가 이루는 정상파를 이용하여 전자기파의 파장을 측정하고 그 속도가 유한함을 밝혔다.⁶⁾ 따라서 무선통신기술은

5) Aitken, *The Continuous Wave*, 219-22면.

6) 이 시기 동안 헤르쯔의 실험들이 구체적으로 어떠한 방식으로 진행되었는가에 대해서는 이은경, “헤르쯔

맥스웰의 전자기 이론과 헤르츠의 실험적 검증에서 그 기초가 마련되었다고 볼 수 있다. 그러나 이렇게 순수한 과학적 관심에서 비롯된 실험장치를 효과적인 통신체제로 전환시키기 위해서는 많은 기술적 발명들이 뒤따라야만 했다. 특히 발진기가 보낸 전자기파를 효과적으로 검출할 수 있는 검파기를 찾는 일은 무선통신체계를 구성하는 데 있어서 무엇보다도 중요한 문제였다.

이 문제는 프랑스의 물리학자 브랑리(Edouard Branly, 1844-1940)에 의해 그 실마리가 풀리게 되었다. 1890년 브랑리는 금속조각들이 느슨하게 차 있는 튜브가 보통때에는 직류를 잘 통과시키지 않지만, 관의 근처에서 전기스파크, 즉 급속한 전기장의 변화가 일어나면 금속조각을 포함한 튜브의 전도도가 급격히 증가한다는 사실을 발견하였다.⁷⁾ 이 현상은 전자기파가 튜브 속을 통해서 지나갈 때 생기는 전기장의 변화에 의해서 금속조각들이 한 데 뭉치기 때문에 일어나는 것으로 이해되었으며, 로지는 이 관을 “coherer”라 이름붙였다.⁸⁾ 그런데 금속조각들이 계속해서 서로 엉겨 붙어 있었기 때문에 한 번 전자기파가 받아들여지고 난 후 다시 원래의 상태로 금속조각들을 떼어놓아야만 했다. 로지와 포포프(Alexander S. Popoff, 1859-1906)는 브랑리의 코히어러에 전기벨과 같이 스스로 작동하는 해머(automatic tapper)를 부착함으로써 이 문제를 해결하였다. 자동해머는 계속적으로 코히어러를 톡톡치면서 전자기파에 의해 엉겨 붙은 금속조각들을 다시 느슨한 금속 가루의 상태로 만들어 전자기파가 수신된 후 관을 절연상태로 만들었다.⁹⁾ 이와같이 코히어러가 효과적인 검파기로 사용할 수 있게 되자 적어도 실험실 차원에서는 전자기파의 발생과 검출이 보다 수월하게 되었고, 무선통신의 실용적 가능성이 한층 더 높아졌다.

1895년 마르코니는 실험실 차원에서만 다루어지던 장치들을 실제로 무선통신이 가능할 정도의 규모로 바꾸어 무선통신체계를 구성하는 데 성공했다. 마르코니는 우선 브랑리-로지 코히어러를 개량하는 작업부터 착수하여 성능을 보다 향상시켰다. 하지만 마르코니의 가장 독창적인 발명은 접지된 공중도선의 설치에서 찾을 수 있다. 그는 스파크간극에서 나오는 전자기파를 좀 더 멀리 보내기 위해 접지시킨 긴 도선을 송신 안테나로 사용하였고, 보내진 전파는 역시 접지된 도선으로 된 수신안테나를 통해 받도록 만들었다. 스파크 간극을 통해 발생한 전자기파는 송신 안테나를 통해서 공중으로 발사되었다. 공중을 날아간 신호는 수신안테나에 의해 받아들여지게 되고 이것은 다시 접지판과 안테나 사이에 설치된 코히어러를 거쳐서 기록기로 전달되어 신호로 기록되었다. 마르코니는 1895년에 이 장치를 이탈리아에 설치하였고, 1896년에는 영국으로 가서 특허를 신청하였다. 이후 그는 성공적인 시험을 해 보이면서 자신의 통신체계가 실용적임을 입증하였고, 마침내 1899년에 도버 해협을 가로지르는 무선통신에 성공하였다. 이렇게 하여 초기적인 형태이기는 했지만 무선통신체계의 대략적인 골격은 잡힌 셈이었다.

그러나 마르코니가 1899년에 제시한 무선통신체계는 두 가지 약점을 가지고 있었는데, 하나는 “동조”(syntony) 개념이 없었다는 것이었고, 다른 하나는 검파기에 있었다. 우선 동조의 문제를 살펴보자. 1899년의 마르코니의 무선체계는 동조회로로 꾸며져 있지 않았기 때문에 스파크 간극에서 발생하는 파의 주파수를 결정할 수 없었다. 뿐만 아니라 수신기도 발신기에서 보내진 특정 파만을 받아들이는 것이 아니라 대기 속의 전자기파의 방해로 발생하는 잡음인 ‘空電’

의 1886년-1888년 전자기 실험”, 『한국과학사학회지』 제15권 제2호(1993년 12월), 188-210면과 Hugh G. J. Aitken, *Systony and Spark* (Princeton: Princeton University Press, 1985), 48-79면을 참조할 것.

7) Chipman, “De Forest and Triode Detector”, 93면.

8) John A. Fleming, *Fifty Years of Electricity* (London: The Wireless Press, 1921), 295면. coherer의 작동 원리에 대한 당시의 이론들에 대해서는 E. C. Green, “The Development of the Coherer and Some Theories of Coherer Action”, *General Electric Review*, Vol. 20, No. 5 (1917), 369-374면을 참조할 것.

9) Fleming, *Fifty Years*, 296면.

(atmospherics)에 의한 신호도 함께 받아들였기 때문에 수신된 모스신호가 무엇을 뜻하는지가 불분명할 때가 많았고, 때로는 전혀 다른 신호가 수신되기도 했다. 마르코니는 영국해협 횡단 무선통신에 성공한 직후인 1900년 초 동조무선체계 연구에 성공해서 원하는 주파수의 신호만을 선별적으로 발생시키고 받아들일 수 있게 되어 대기중의 잡음을 효과적으로 제거할 수 있었다.¹⁰⁾ 그리고 1901년 12월에는 대서양을 가로지르는 3000마일의 무선통신에 성공하였다.¹¹⁾

한편 마르코니 체계의 또 다른 약점이었던 검파기문제는 코히어러가 공전에 의해 쉽게 교란되었다는 데 있었다.¹²⁾ 따라서 공전이 있을 경우 발신된 신호가 변형되거나 공전잡음과 뒤섞여 기록지에 기록된 신호가 무엇을 뜻하는지 알 수 없을 때가 많았고 때로는 송신된 신호와는 전혀 다른 신호가 받아들여지기도 하였다. 동조체계를 이용해 대서양을 가로질러 "S"자를 송신하는 데 성공한 마르코니는 이 문제를 해결하기 위해 'magnetic receiver'라 불리는 새로운 검파기를 발명하였다.¹³⁾ 이 장치는 러더퍼드(Earnest Rutherford, 1871-1937)가 밝힌 '매우 빠른 전기의 흐름이 철선의 자기상태를 없앨 수 있다'는 원리에 기초한 것이었다.¹⁴⁾ 이 자기검파기는 코히어러보다 감도도 좋았고 공전의 영향도 비교적 덜 받았으며 '자동해머'와 같은 복잡한 기계적 장치도 필요없었기 때문에 1903-14년사이에 마르코니 체계에서 가장 많이 사용되었다.¹⁵⁾

하지만 마르코니가 개발한 자기검파기는 전화를 통해 소리만으로 들을 수 있었고 신호를 테이프에 기록할 수 없었기 때문에 검파기능이 우수함에도 불구하고 신호기록지를 이용한 무선체계에서는 사용할 수 없었다.¹⁶⁾ 당시 마르코니가 수신체계에서 사용한 신호전달방법으로는 신호기록지를 이용하는 것과 전화수화기를 통한 방법 두 가지가 있었는데 전자는 주로 신문의 기사 등에 필요한 긴 정보를 전달하는 데 사용되었고, 후자는 배에서 배 혹은 배에서 육지로 비교적 짧은 전문을 보내는 데 사용되었다. 이 중 전화수화기를 이용하는 방법은 속도가 빠르다는 장점이 있었지만 신호를 오판할 우려가 있었다. 반면 신호기록지를 사용하는 무선체계는 정보전달에 있어서 속도가 느리다는 단점이 있었지만 그 나름대로의 장점이 있었다. 예를 들어 무선신호가 기록될 경우에는 주의를 기울여 조사하면 알파벳 신호가 아닌 잘못된 신호를 구별해 낼 수 있지만, 음성신호로만 들어야 하는 경우에는 그렇지 못했다. 따라서 '신호기록지를 사용할 수 있으면서 감도가 뛰어난' 새로운 검파기의 필요성이 대두되었던 것이다.

3. Audion의 발명과 이온화된 기체, 1899-1907

3-1. 1899년부터 1905년까지의 검파기에 관한 연구

리드 포리스트는 1873년 7월 26일 미국 아이오와주의 카운슬 블러프스(Council Bluffs)에서 회중교회(Congregational Church)의 목사였던 Henry Swift De Forest(1833-1896)와 Anna Margaret Robbins(1848-1927) 사이에서 태어났다. 그의 부친은 노예해방 이후 흑인들을 위한 학교의 교장

10) Guglielmo Marconi, British Patent No. 7777

11) Chipman, "De Forest", 93면.

12) John A. Fleming, *Memories of a Scientific Life* (London, 1934), 139면.

13) Stanley Leinwoll, *From Spark to Satellite: A History of Radio Communication* (New York: Charles Scribner's Sons, 1979), 30면.

14) Fleming, *Memories*, 139면.

15) T. H. O'Dell, "Marconi's Magnetic Detector: Twentieth Century Technique Despite Nineteenth Century Normal Science?", *Physics* 25 (1983), 525-48면 중 525면. 자기 검파기의 자세한 작동원리에 대해서는 부록(545-48면)을 참조할 것.

16) Fleming, *Memories*, 140면.

으로 근무하였는데, 드 포리스트도 탈라데가(Taladega)에서 흑인들과 함께 초등교육을 받았다. 그는 어릴 때부터 과학과 기계적 장치들에 대해 많은 관심과 소질을 보였으며, 탈라데가의 학창시절부터 테슬라(Nicola Tesla, 1857-1943)와 같은 유명한 발명가가 되기로 결심하였다. 1893년 마운트 허몬(Mount Hermon)에서 중등교육을 마친 드 포리스트는 부친의 반대를 무릅쓰고 예일대학의 셰필드과학학교(Sheffield Scientific School)에 진학하였다. 1896년에 학부를 마친 그는 대학원에 진학하여 1899년 도선에서 고주파전류의 특성에 관한 논문으로 박사학위를 받았다.¹⁷⁾ 그의 논문은 무선통신과 관련하여 미국인이 쓴 최초의 논문으로 알려져있다.¹⁸⁾

드 포리스트의 박사학위논문은 헤르쯔의 전자기파 검증실험에서 비롯되었다. 1887년 헤르쯔는 전자기파를 검증한 유명한 실험에서 고주파 전류의 특성에 관한 두 가지 문제를 제기하였는데, 하나는 긴 파장을 가진 전자기파를 사용할 경우 도선내의 전파속도가 공기중의 그것보다 느리다는 것이었고, 다른 하나는 도선을 따라 파장을 측정할 경우 도선 끝의 마지막 1/4파장이 도선상의 다른 파장보다 짧아지는 현상(이를 end effect라 한다)이었다. 드 포리스트 논문의 주제는 바로 이 'end effect'에 관한 것이었다. 그는 정밀한 측정을 통해서 레허도선(Lecher wire)의 끝에 존재하는 정전 용량이 도선을 따라 진행하는 전자기파의 주파수와 위상에 어떠한 영향을 미치는가를 연구하였다.¹⁹⁾ 그러나 드 포리스트의 연구는 예측되는 결과를 좀 더 정확하게 측정한 것이었기 때문에 그 자체로서는 획기적인 것은 아니었고 새로운 이론적 설명을 제시하지는 못하였다.

이것은 그의 연구 스타일과 깊은 관련이 있었다. 그는 자신이 행하는 실험이나 장치에 필요한 아이디어를 얻기 위해 과학 문헌들을 이것 저것 훑어 보고 이 중에서 자신의 관심을 끄는 것을 직접 실험해 본 다음 필요에 맞는 장치를 개발하기 위해 반복실험을 계속하는 “에디슨식 연구 습관”을 가지고 있었다.²⁰⁾ 그는 이러한 과정을 거쳐서 자신이 원하던 실험결과나 발명이 성취되고 나면 이에 대한 이론적인 설명에 대해서는 그다지 관심을 기울이지 않았던 것이다.

예일에서 받은 교육도 이러한 드 포리스트의 태도에 기여했다.²¹⁾ 그의 박사학위논문의 주제는 셰필드 과학학교의 젊은 조교수였던 범스태드(Harry Bumstead)의 조언으로 정해졌고, 논문 연구 진행에 많은 조언을 해준 사람은 전자기 실험 담당 조교수였던 라이트(A. W. Wright)였다. 그러나 예일에는 드 포리스트의 논문을 이론적 배경에 바탕하여 체계적으로 지도할 사람이 없었다. 예를 들어 당시 예일대학에는 유명한 통계물리학자인 깁스(Willard Gibbs)가 있었지만 그는 전자

17) 드 포리스트의 생애와 활동에 대해서는 그의 자서전 *Father of Radio: The Autobiography of Lee de Forest* (Chicago: Wilcox & Follett, 1950)과 Geoette Carneal, *A Conqueror of Space: An Authorized Biography of the Life and Work of Lee de Forest* (New York: Liverght, 1930)을 참조할 것. 한편 최근에 드 포리스트에 관한 전기적 연구가 James A. Hijiya에 의해 이루어졌다. James A. Hijiya, "The De Forests: Three American Lives" (Ph. D. dissertation, Cornell University, 1977), Part III; *Lee De Forest and the Fatherhood of Radio* (Bethlehem: Lehigh University Press, 1992).

18) Lee de Forest, "Reflection of Electric Waves of Very High Frequencies at the Ends of Parallel Wires", *American Journal of Science*, 4th ser., 8 (1899). 이하 "Reflection"으로 표기함. Leinwoll, *From Spark to Satellite*, 43면.

19) de Forest, "Reflection", 67, 70면.

20) 여기서 에디슨식의 연구습관이라 함은 구체적인 이론적 기반을 갖추고 그에 입각하여 한 단계 한 단계 연구를 진행시켜 나가는 것이 아니라, 이론적 기반보다는 실험적 사실에만 의존하여 시행착오를 통해 연구를 수행해 나가는 방식을 말한다.

21) 예일대학의 Sheffield Scientific School에서의 교육에 대해서는 Russel H. Chittenden, *History of the Sheffield Scientific School of Yale University, 1846-1922*, 2vols. (New Haven, 1928); George W. Piercon, *Yale College, An Educational History, 1871-1921* (New Haven, 1952)을 참조할 것.

기학 강의를 통해서 드 포리스트의 전자기학에 대한 이해에 ‘일반적인 도움’을 주었을 뿐이었다. 또한 드 포리스트의 불평대로 당시 예일대학은 주로 교과서 위주의 교육에만 치중하였기 때문에 실험설비들은 그야말로 보잘것 없는 상태였다. 사실 그는 학위논문을 작성하기 위해 거의 혼자서 기구를 만들고 측정하고 이론적 설명을 제시해야만 했다. 그가 보기에 셰필드 과학학교에서의 교육은 교과서를 통해서 ‘일반적인 물리이론’을 가르치기만 했지 ‘실험교육과 실험을 통한 이론적 사실의 확립, 나아가 실험과 이론과의 연결’에는 소홀하였다.²²⁾ 따라서 그는 자신의 실험 결과들을 이론과 유기적으로 연결시킬 수 있는 교육을 받았다고보다는 이론과 실험이 유리된 교육을 받았던 셈이었다.

하지만 드 포리스트의 박사학위논문은 그 자체의 중요성과는 별도로 이후 그의 연구에 있어서 이온화된 기체에 대한 관심을 불러일으키는 시발점으로 볼 수 있는데, 이 점은 그의 실험장치에서 잘 드러난다. 드 포리스트는 고주파 발생기로 불롱들로 진동기(Blondlot oscillator)를, 전자기파를 방출하기 위해서는 레허 도선을, 그리고 무엇보다도 검파장치로 ‘진공관’을 사용하였다.²³⁾ 그는 레허 도선의 끝에 ‘공기를 살짝 뺀 유리구’를 설치하고 이 유리구의 밝기를 관찰함으로써 레허 도선상에서 생기는 정상파의 마디와 배를 찾아 도선의 정전용량이 전자기파의 파장과 위상의 변화에 어떠한 영향을 미치는가를 측정하였다. 드 포리스트는 기체는 열에 의해 이온화되며, 이러한 조건에서 전도체가 된다는 사실을 알고 있었는데, 유리구 속의 이온화된 기체가 전자기파의 영향을 받아 밝기의 변화를 가져온다고 생각하였다.²⁴⁾ 특히 그는 유리구의 온도를 높이면 전자기파에 감응하는 정도가 더 크다는 사실을 실험을 통해서 알았기 때문에 공기를 살짝 뺀 유리구를 가열하였을 때 생기는 이온화된 기체를 전자기파의 검파기로 이용할 수 있으리라 생각하였다.²⁵⁾

22) de Forest, *Father*, 84-90면. 드 포리스트는 당시를 회고하면서 예일에서의 생활은 자신의 연구에 별다른 도움을 주지 못했으며 허송세월이었다고 말하였다. 그에 따르면 당시의 예일은 유명한 발명가가 되겠다는 그의 희망을 충족시켜줄 수 있는 곳이 되지는 못하였다.

23) de Forest, "Reflection", 59-61면. 1889년 독일의 레허는 평행2선 상에서 전도하는 전파를 조사하였다. 그는 헤르츠의 스파크 간극 가까이에 같은 크기의 도체판을 설치하고, 두 장의 콘덴서를 만들어 그것들의 끝을 각각 평행2선에다 연결하였다. 이는 고압회로에서 발생하는 전파를 정전적인 결합을 이용해서 평행2선에다 전달하려는 것이었다. 이 평행2선 위에 실려진 전파는 도선을 따라 진행하여 이속고 평행2선의 다른 끝에 전달되고 거기서 반사되어 스파크 간극 쪽으로 되돌아온다. 이렇게 되면 진행되는 파동과 후퇴하는 파동이 겹쳐져서 정상파(standing wave)가 생긴다. 레허는 이 정상파의 성질을 조사하였다. 한편 프랑스의 불롱들로는 1893년에 유도코일의 출력단자를 금속판과 함께 원형으로 구부려서 루우프 모양으로 만들고, 한편으로는 평행2선의 한 끝을 루우프모양으로 해서, 이들 두 루우프 사이의 상호유도결합을 이용하여 전파를 평행2선에 흘려보냈다. 또한 그는 평행2선위의 전압분포에 대해서도 방전불꽃을 직접 관찰하는 것이 아니라, 긴 방전관을 평행2선을 따라 설치하여 그것의 주기적인 밝기의 변화를 측정하였다. 드 포리스트는 자신의 실험장치를 불롱들로 진동기와 레허 도선의 장점만을 살려 구성한 것이라고 말하고 있다. 즉 그는 전파를 보내는 데는 레허의 장치를, 전자기파의 파장에 대한 정량적인 측정에서는 불롱들로의 장치를 모델로 삼았다. 불롱들로와 레허의 실험과 장치에 대해서는 G. W. Pierce, *Principles of Wireless Telegraphy* (New York: McGraw-Hill Book Company, 1910), 70-72면을 참조할 것.

24) 기체가 열에 의해 이온화된다는 것은 당시에 잘 알려져 있던 사실이었다. 이 시기에 미국과 영국에서는 X-선에 대한 연구와 기체방전에 대한 실험적 연구가 활발하였으며 톰슨(J. J. Thomson, 1856-1940)의 기체방전이론도 잘 알려져 있었다. 톰슨은 전기가 액체매질을 통과하기 위해서나 기체에서 방전을 일으키기 위해서는 매질 분자의 ‘분해’가 일어나야한다는 점이 본질적이라고 생각했다. 그는 기체분자의 ‘분해’를 위해 전기장을 걸어주는 방법과 기체를 가열하여 온도를 높여주는 방법을 제시하였다. 톰슨의 기체방전 이론에 대해서는 J. J. Thomson, *Conduction of Electricity through Gases* (Cambridge, 1903)을 참조할 것. 그리고 톰슨의 초기 기체방전 연구에 대해서는 손영란, "J. J. Thomson's Early Work on Electric Discharge through Gases, 1882-1899", 『한국과학사학회지』 제16권(1994), 203-33면을 참조할 것.

하지만 드 포리스트가 박사논문연구에서 얻은 성과들이 곧바로 무선통신으로 연결된 것은 아니며 오디온이 바로 이 실험장치에서 비롯된 것도 아니었다. 왜냐하면 그것은 기체를 가열하기 위한 필라멘트도 없었으며 그 작동도 필라멘트에서 방출되는 전자에 의한 것이 아니라 순전히 유리구 속에 남아 있던 이온화된 기체에 의한 것이었기 때문이다. 하지만 이온화된 기체가 전자기파에 잘 감응한다는 사실은 그에게 강한 인상을 남겼으며 비록 그것이 무선통신의 검파기로 즉시 사용되지는 않았지만 드 포리스트가 이온화된 기체에 대하여 관심을 가지게 된 중요한 계기를 만들어 주었다. 나중에 살펴보겠지만 ‘공기를 뺀 유리구’와 ‘이온화된 기체’는 이후 그의 검파기 연구에 있어서 매우 중요한 역할을 하였다. 전자는 오디온의 최종 형태에 대한 힌트를 제공하였으며, 후자는 그가 계속적으로 관심을 가진 가장 주요한 연구주제였던 것이다.

1899년 예일을 떠난 드 포리스트는 웨스턴 전기회사(Western Electric Company) 발전기부의 전기기사로 고용되었다가 곧 제품의 검사를 맡는 연구실로 옮기게 되었다. 이 연구실에서 그는 여가 시간을 이용하여 무선장치에 대한 연구를 할 수 있었다. 그는 코히어러를 대신할 새로운 검파기를 찾는 작업부터 시작하였다.²⁶⁾ 그는 자동해머를 부착한 코히어러가 복잡한 기계적 구조를 갖고 있을 뿐만 아니라 감도가 좋지 못하다는 점을 발견하고, 이보다 간단하고 빠르면서 공전의 영향을 덜 받는 검파기를 모색하였다. 물론 그가 마르코니의 코히어러와 다른 새로운 형태의 검파기를 개발하려 한 것은 마르코니의 특허 때문이었다. 마르코니가 이미 영국과 미국동지에 자신의 검파기에 대한 특허를 획득한 상태였기 때문에 코히어러를 사용하는 것은 특허침해에 해당하였고, 따라서 새로운 검파기를 개발하여야만 무선통신분야에 뛰어들 수 있었다. 이에 따라 드 포리스트는 1900년 이후 줄곧 전해질 검파기나 불꽃검파기와 같은 새로운 형태의 검파기를 찾으려는 연구를 계속하였고, 마침내 1906년에는 3극진공관을 발명하기에 이르렀다.

1900년 드 포리스트는 자신이 “responder”라고 부른 전해질 검파기를 개발하였는데, 이것은 새로운 검파기를 발명하기 위한 실질적인 최초의 시도였다. 그는 전지가 부착된 금속판 양쪽에 물이나 알콜같은 전해질 용액을 채워 계속해서 전기가 흐를 수 있게 했는데, 이러한 상태에서 무선신호가 수신되면 유체의 저항이 증가하여 전류의 흐름이 차단된다. 그는 이 현상이 유체가 작은 전기의 흐름에 의해 전기적으로 ‘분해’되어서 생기는 것으로 보았다.²⁷⁾ 또 금속판 사이의 유체가 전기장에 의해 이온화되어 있는 상태에서 눈에 보이지는 않지만 전하를 띤 매우 작은 입자—그는 이를 “tiny ferryboats”라고 불렀다—들이 강한 전기장의 영향 때문에 금속전극으로부터 떨어져나온다고 생각했는데, 이 작은 금속조각들이 유체의 이온들과 함께 전극 사이를 징검다리처럼 연결하기 때문에 전기가 한쪽 전극에서 다른쪽 전극으로 흐른다고 생각하였다. 그리고 이 상태에서 헤르쯔파가 수신될 때 유체에 발생한 작은 수소기체 방울들이 이온들이 형성한 부교를 파괴하여 전류의 흐름이 차단되면 이것이 전화수화기에서 소리의 변화로 전달되는 것으로 보았다.²⁸⁾ 따라서 이 전해질 검파기는 브랑리의 코히어러와는 정반대의 작동원리를 가지고 있었다. 즉 코히어러는 전자기 신호에 반응하여 검파기의 전도도가 증가하는 현상을 이용한 것이었다면 리스폰더는 무선신호에 의해 ‘이온의 흐름’이 파괴되어 전해질의 저항이 증가되는 현상을 이용한 검파기였던 것이다. 드 포리스트는 이러한 점을 염두에 두고 이 전해질 검파기를 액체 안티코히어러(liquid anti-coherer)라 부르기도 하였다.²⁹⁾ 이러한 초기 형태의 전해질 검파기는 1901년에 쥘

25) de Forest, “Reflection”, 68면.

26) Aitken, *The Continuous Wave*, 181면.

27) de Forest, *Father*, 109면.

28) 같은 책, 119면.

29) 같은 책, 106면.

더 개량되어 그림 1과 같은 구조로 되었다. 드 포리스트는 절연된 튜브 속에 1/1200인치 정도의 간격을 두고 두 금속판을 평행하게 설치한 다음, 금속 가루들을 포함한 전해질 용액으로 금속판 사이의 공간을 채웠다. 그는 1900년의 모델처럼 리스폰더를 가로지르는 전지와 전화수화기를 직렬로 연결하였고, 검파기의 한 전극은 안테나에 연결하고 다른 전극은 접지시켰다. 전파가 수신되면 전극 사이의 금속조각을 포함한 전해질의 저항이 증가되는데, 이 때 수화기에서 딸각거리는 소리를 들을 수 있었다.³⁰⁾

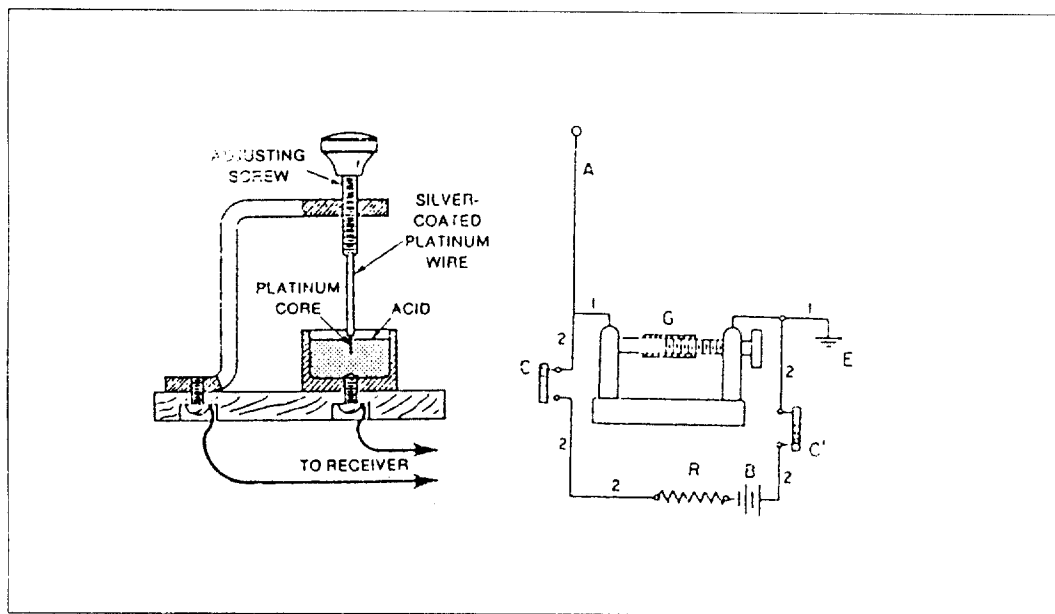


그림 1. 페센덴의 전해질 검파기(왼쪽)와 드 포리스트의 리스폰더

출처: Stanley Leinwoll, *From Spark to Satellite: A History of Radio Communication* (New York: Charles Scribner's Sons, 1979), 32면; John A. Fleming, *Principles of Electric Wave Telegraphy and Telephony* (Longmans, 3rd ed., 1916), 508면.

그 후 드 포리스트는 1903년경에 당시 경쟁적 발명가였던 페센덴(Reginald R. Fessenden, 1866-1932)이 발명한 전해질 검파기(liquid barretter)를 모방하여 자신의 전해질 검파기를 만들었다.³¹⁾ 페센덴의 전해질 검파기는 그림 1과 같이 은을 도금한 '윌러스턴 도선'(Wollaston wire)을

30) 좀 더 자세한 사항은 John A. Fleming, *The Principles of Electric Wave Telegraphy*, 3rd ed. (London, 1916), 491-2, 508면; V. J. Phillips, *Early Radio Wave Detectors* (London, 1980), 68-69면; de Forest, US Patent No. 716000, 716334(1901년 7월 5일 특허출원)를 참조할 것.

31) 전해질 검파기에 대한 드 포리스트의 실험에 대해서는 Lee de Forest, "Electrolytic Receiver in Wireless Telegraphy", *The Electrician* 54 (Nov. 4, 1904), 94-98면을 참조할 것. 페센덴에 대해서는 Helen M. Fessenden, *Fessenden: Builder of Tomorrow* (New York, 1940); Ormond Raby, *Radio's First Voice: The Story of Reginald Fessenden* (Toronto, 1970); Orrin E. Dunlap, Jr., *Radio 100 Men of Science* (New York: Harper & Brothers Publishers, 1944), 137-140면; Aitken, *The Continuous Wave*, ch. 2를 참조할 것. 페센덴과 드 포리스트의 경쟁적 관계에 대해서는 Thomas P. Hughes, *American Genesis: A Century of Invention and Technological Enthusiasm 1870-1970* (Penguin Books, 1989), 61-64면을 보라.

질산이나 황산 용액에 담근 구조였는데, 백금선과 산용액에 연결된 배터리는 검파기 내부에 전력을 공급하였다. 산용액은 은을 녹이면서 수소기체를 발생시키고, 이 때 생겨난 작은 기포는 백금선과 산용액 사이를 통과하는 전류의 흐름을 순간적으로 방해하였다. 안테나를 통해 수신된 무선전파는 이 기포를 없애서 백금선과 산용액 사이의 이온의 흐름, 즉 전류의 흐름을 복구하며, 이 경우 흐르는 전류의 세기는 입력파의 세기에 비례하였다. 따라서 페센덴의 검파기는 드 포리스트의 리스폰더와는 달리 무선신호의 수신으로 검파기의 저항이 감소하는 원리를 이용한 것이었다.³²⁾ 그리고 이 장치는 코히어러보다 감도가 좋았으며 자동해머와 같은 복잡한 기계적 장치도 필요없었다. 1903년 봄 드 포리스트는 버지니아주의 포트리스 먼로(Fortress Monroe)에 있던 페센덴의 실험실을 방문하였다가 페센덴의 '액체 검파기'가 작동하는 것을 본 후 자신의 연구실로 돌아와 '월러스턴 전'이나 그와 유사한 것을 이용해서 새로운 검파기를 고안하였다. 그는 월러스턴도선을 사용한 이전의 실험들을 조사한 결과 퍼핀(Michael Pupin)이 페센덴 보다 먼저 이 도선을 산 용액에 담궈 실험한 것을 발견하고 특허에 등록되어 있지 않았던 퍼핀의 실험을 기초로 전해질 검파기를 고안하여 자신의 무선통신체계에 사용하였다.³³⁾

한편 1902년 1월 American De Forest Wireless Telegraph Company를 설립한 드 포리스트는 해군의 작전에 필요한 무선통신장비들을 제작하여 판매하였다.³⁴⁾ 그는 자신의 무선체계를 "미국식 무선체계"라고 부르면서 마르코니의 통신체계와는 달리 처음부터 '음성'을 직접 전달할 수 있는 무선체계를 구상하였다.³⁵⁾ 그는 자신의 무선체계를 구성하는 데 있어서 무엇보다도 검파기를 가장 핵심적인 문제로 생각하였다. 사실 그가 페센덴의 전해질 검파기를 개량하여 자신의 통신체계에 사용한 것도 페센덴의 장치가 음성신호를 전달하기에 적당한 검파기였고 그 감도도 마르코니의 코히어러나 자기검파기보다 우수하다고 생각하였기 때문이다.³⁶⁾ 하지만 드 포리스트회사에서 사용한 "responder"의 개량형인 전해질검파기가 퍼핀의 실험을 기초로하여 구성되었다고는 하나 페센덴의 검파기의 특허를 침해한 것이었으므로, 1906년 연방법원의 소송에서 패소하였고 이에 따라 드 포리스트는 회사를 떠나게 되었다.³⁷⁾ 이처럼 드 포리스트의 전해질 검파기는 페센덴

32) 위와 같이 전해질 검파기는 대체로 두 가지의 종류가 있었다. 즉 처음에 드 포리스트가 생각한 것과 같은, 전자기파에 의해 저항이 커지는 것과 반대로 저항이 작아지는 것이었다. 전해질 검파기의 원리와 종류에 대한 자세한 설명은 Vivian J. Philips, *Early Radio Wave Detectors* (London, 1980), 65-84면을 참조할 것.

33) de Forest, *Father*, 161면.

34) L. S. Howeth, *History of Communications-Electronics in the United Navy* (Washington, 1963), 48면.

35) 이러한 점은 Susan J. Douglas에 의해서도 지적된 바 있다. 그녀에 의하면 드 포리스트 뿐만 아니라 미국의 무선통신 연구자들이었던 John S. Stone과 Reginald R. Fessenden 등은 유럽의 연구자들과는 달리 마르코니와 다른 체계를 구상하였다. 더글라스에 의하면 마르코니의 지향점이 유선전신에 대항할 수 있는 무선전신에 있었다면 미국의 무선통신 연구자들의 목표는 처음부터 무선전화를 통한 음성의 전달에 있었다. 이에 대해서는 Susan J. Douglas, "Exploring Pathways in the Ether: The Formative Years of Radio in America, 1896-1912" (Ph. D. Dissertation, Brown University, 1979), 97-132면을 참조할 것.

36) de Forest, "Electrolytic Receivers", 95, 98면. 드 포리스트는 세 가지 점에서 전해질 검파기가 코히어러보다 우수하다고 생각하였다. 즉 전해질 검파기가 코히어러보다 감도가 좋았고, 동조회로를 구성하는 데 있어서 자기검파기나 코히어러보다 우수하였으며, 내구성 또한 뛰어났기 때문이었다.

37) 하지만 1907년 드 포리스트는 De Forest Radio Telegraph Company라는 새로운 회사를 세웠다. 이후 이 회사는 Radio Telephone Company로 개칭되었고, 1911년에는 North American Wireless Company로 이름이 바뀌었다. 휴즈(Thomas P. Hughes)는 에디슨에 대한 많은 연구를 통해서 에디슨이 단순한 '발명가'가 아니라 '혁신적 기업가'이기도 했다는 점을 강조하고 있다. 드 포리스트의 경우에도, 기업가로서 실패하기는 했지만, 이러한 혁신적 기업가로서의 면모를 엿볼 수 있다. Thomas P. Hughes, "Edison and

의 검파기를 모방한 것이었기 때문에 특히 침해로 그의 회사가 소송에 휘말리는 결과를 가져왔다. 그러나 1900년의 리스폰더에서 1903년의 전해질 검파기까지 일련의 연구를 통해 이온을 이용하면 효과적인 검파기를 만들 수 있다는 것을 안 그는 ‘이온의 흐름을 제어한다’는 생각을 굳게 가지게 되었으며, 이후의 연구에서도 이러한 이온의 흐름을 제어하여 새로운 검파기를 고안할 수 있으리라는 생각을 하게 되었다.

이온의 흐름을 이용하여 새로운 검파기를 찾으려는 드 포리스트의 또 다른 시도는 1900-1905년에 걸친 불꽃검파기에 대한 연구였다.³⁸⁾ 그는 1900년 9월 10일 벨스바흐버너(Welsbach burner)를 이용한 일련의 실험에서 헤르쯔파에 의해 불꽃의 밝기가 변한다는 사실을 발견하고 이를 이용한 새로운 검파기의 가능성을 모색하였다.³⁹⁾ 그는 여기서 이온화된 기체를 이용한 검파기가 가능하다는 생각을 하게 되었다.⁴⁰⁾ 1903년 드 포리스트는 자신이 오디온과 직접적인 관련을 가지는 것으로 말한 불꽃검파기에 대한 실험을 했다.⁴¹⁾ 이것은 그가 이온화된 기체를 이용하여 만든 최초의 실용적인 무선검파기였다. 그림2의 Fig. 1, 2, 3, 4는 이 장치를 보여주고 있는데, 두 개의 백금전극이 분젠버너의 양쪽에 가까이 있고 안테나는 그 중 한 전극(그림에서 A)에 연결되어 있으며 다른 전극은 접지되어 있다. 그리고 전극을 가로질러 배터리(B)와 전화수화기(T)가 붙어있었다. 이 장치에서 그가 생각한 무선신호의 흐름은 다음과 같다. 송신기에서 보낸 신호가 안테나 A에 의해 받아들여지면 불꽃 주위의 이온화된 기체의 전도도가 증가된다. 이렇게 되면 배터리 B에서 공급되는 전류가 회로를 흐르게되어 수화기 T에서 신호음을 들을 수 있게 된다.

드 포리스트는 이 2전극 불꽃검파기를 개량하여 1905년 2월에 네 개의 전극을 가진 불꽃검파기(그림 2의 Fig. 5)를 고안하였다.⁴²⁾ 그는 불꽃검파기의 전극을 두 개에서 네 개로 늘림으로써 ‘고주파회로와 전화회로를 분리’시켰는데, 이렇게 함으로써 안테나에서 수신된 전자기파가 분젠버너의 가장자리에 있는 이온화된 기체의 전도도를 증가시켜, 2차회로에 연결된 B-배터리가 공급하는 큰 전류가 2차회로에 흐를 수 있도록 만들었다. 2차회로에는 수화기가 연결되어 있었으므로 전자기파가 수신되어 전류가 흐르면 신호를 들을 수 있었다. 그러나 이 장치들은 실험실 차원에서만 사용되었을 뿐 아직 상업적 무선통신에 사용될 정도는 아니었다. 그의 불꽃검파기는 비록 실용적으로 사용되지는 못하였지만 전해질 검파기와 마찬가지로 이온의 흐름을 제어한다는 생각에서 나

Electric Light” in Donald MacKenzie and Judy Wajcman eds., *The Social Shaping of Technology* (Milton Keynes: Open University Press, 1985), 39-52면을 참조할 것.

38) Lee de Forest, “The Audion: A New Receiver for Wireless Telegraphy”, *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers* 25(1906), 735-79면 중 735면. 이하 “The Audion”(1906)으로 표기.

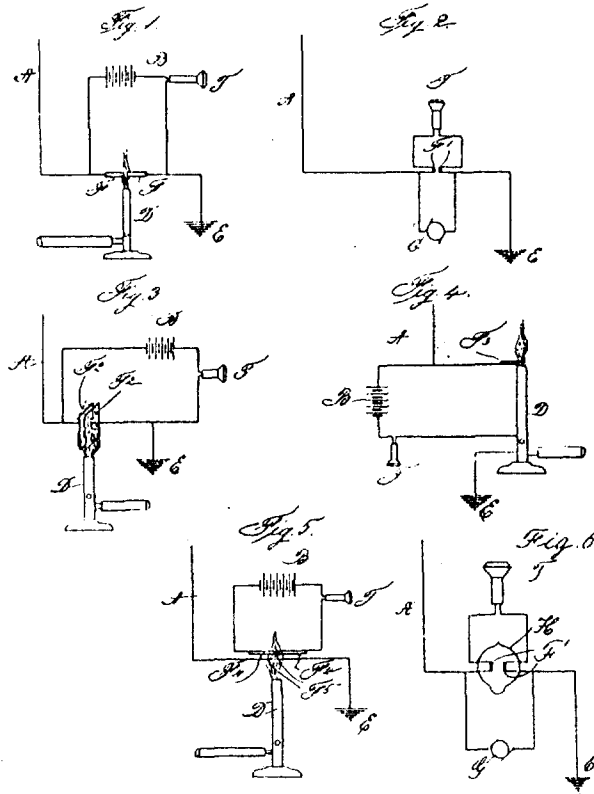
39) 같은 글, 736면. 그러나 그의 이러한 해석은 잘못된 것이었다. 그 해 11월경에 다시 행한 불꽃실험에서 드 포리스트는 불꽃이 깜박거리는 원인이 전자기파가 아니라 스파크가 일어날 때의 소리라는 것을 알게 되었던 것이다.

40) Aitken, *The Continuous Wave*, 198면.

41) Lee de Forest, “The Audion-Its Action and Some Recent Applications”, *Journal of the Franklin Institute* 190 (July 1920), 3면. 이하 “The Audion”(1920)으로 표기. 오디온이란 이름은 그의 연구동료였던 Badcock이 만든 말로 이것은 ‘소리’, ‘음성’ 혹은 ‘가청주파’를 뜻하는 ‘audio’와 ‘ion’의 합성어이다. Audion이란 이름의 유래에 대해서는 *Father*, 215면을 참조할 것.

42) 같은 글, 6면; Lee de Forest, “Art of Detecting Oscillation”, US Patent No. 867877. Original application filed Feb. 2, 1905. Patented Oct. 8, 1907; “Oscillation-Detector”, US Patent No. 867878. Original application filed Feb. 2, 1905. Patented Oct. 8, 1907.

L. DE FOREST.
OSCILLATION RESPONSIVE DEVICE.
APPLICATION FILED FEB. 8, 1908.
979,275. Patented Dec. 20, 1910.



WITNESSES
Frank H. Parker
John Buckler

INVENTOR
Lee de Forest
By Fred Woodward
Associate Attorney.

그림 2: 2전극 불꽃검파기(Fig. 1)와 4전극 불꽃검파기(Fig. 5)

출처: Lee de Forest, "Oscillation-Responsive Device", US Patent No. 979275.

온 검파기였다는 점에서 중요한 의의를 지닌다. 특히 불꽃 검파기는 이온화된 기체를 이용한 형태를 취함으로써 1906년에 개발된 그리드 오디온에 더욱 근접한 것이었다. 그는 불꽃검파기 이후의 연구에서 이온화된 기체를 이용하여 검파기를 발명하려는 끈질긴 노력을 계속했는데, 유리구를 사용한 검파기도 이온화된 기체를 좀 더 안정적으로 만들려고 한 노력—즉 안정적이고 효과적인 가열수단을 찾으려는 시도—에서 비롯되었던 것이다.

1905년의 4전극 불꽃검파기에서 안테나회로와 수화기회로가 분리하여 설계되었다는 점도 주목할 만하다. 이것은 오디온이 ‘플레밍 밸브와 같이 단순히 전자기파를 정류하는 것이 아니라 수화기회로의 전류를 제어하는 장치’라는 주장과 관련되어 있다. 즉 4전극 불꽃검파기는 안테나와 연결된 1차회로에서 B-전지와 수화기가 연결된 2차회로로 신호가 전달되는데, 이 때 1차회로의 미약한 신호가 일종의 스위치 역할을 하여 2차회로의 B-배터리에서 공급되는 큰 전류를 제어한다는 것이다. 드 포리스트는 이것을 “relay” 혹은 “triggering effect”라 불렀다. 그는 “나는 처음부터 릴레이 검파기를 발견하려는 생각에 사로잡혀 있었다”고 술회하였다.⁴³⁾ 다시 말하면 드 포리스트는 4전극 불꽃검파기를 ‘릴레이’ 검파기로 생각하였던 것이다. 한편 드 포리스트가 회로를 분리한 것은 공전의 영향을 최소화하기 위한 시도로 보인다. 2전극 불꽃검파기의 경우에는 송신기가 보낸 신호는 물론 공전에 의한 전자기파도 수화기로 바로 전달되게 설계되었으나 4전극 불꽃검파기는 회로가 분리되어 있었기 때문에 일정한 강도 이상의 신호만이 2차회로로 전달되어 공전에 의한 미약한 신호들은 2차회로에 전달되지 않았다.

결론적으로 드 포리스트가 어떤 과정을 거쳐서 3극진공관의 발명에 이르게 되었나를 밝히려면 1905년의 불꽃검파기가 상당한 중요하다는 것을 알 수 있다. 즉 그 형태는 비록 오디온과 많이 달랐지만 기본적인 작동원리와 연구의 초점은 유사하였던 것이다. 결국 오디온에 사용된 핵심적 아이디어들인 ‘이온화된 기체의 이용’과 ‘릴레이’는 불꽃검파기를 연구하는 과정에서 비롯되었음을 알 수 있다.

3-2. 제어 그리드의 삽입과 오디온의 발명

드 포리스트가 1900-1905년에 개발한 불꽃검파기는 물리적인 불안정성 때문에 무선통신분야의 주요한 시장이었던 선박에 설치할 수 없었다. 따라서 그는 전류를 이용하여 기체를 가열할 수 있는 수단을 찾게 되었고, 얼마 지나지 않아서 두 개의 필라멘트를 가진 새로운 형태의 검파기를 고안하였다. 그는 우선 불꽃을 없애고 두 개의 백금전극 대신 두 개의 필라멘트를 공기를 살짝 뺀 유리구 속에 집어넣었다.⁴⁴⁾ 왜냐하면 바람이나 주위의 충격에 약한 불꽃을 이용해 기체를 이온화시키는 것보다 유리구 속의 백열필라멘트를 이용하는 것이 더욱 안정적이었기 때문이다.⁴⁵⁾ 결국 그가 삽입한 필라멘트들은 유리구 안의 기체를 가열하기 위한 것이었고, 그에게 있어서 유리구를 사용한 검파기는 불꽃검파기의 연장이었다. 그의 이러한 생각은 다음의 인용문에서 잘 드러난다.

[불꽃검파기의] 기체불꽃 속의 가열된 백금전극주위에서는 백열등의 필라멘트와 마찬가지로의 검파작용이 일어난다. 전자는 타는 기체가 전극을 가열하며, 후자의 경우

43) de Forest, “The Audion”(1920), 3면.

44) Lee de Forest, “Oscillation-Responsive Device”, US Patent No. 824637. Application filed Jan. 16, 1906. Patented June 26, 1906; “The Audion”(1920), 4면.

45) de Forest, *Father*, 212면.

는 필라멘트가 [유리구 속에 남아 있는] 기체를 가열한다.⁴⁶⁾

그러나 필라멘트는 하나만 있어도 유리구 속의 기체를 충분히 효과적으로 가열할 수 있었기 때문에 필라멘트 하나를 없애고 대신 그림 3과 같이 한 개 혹은 두 개의 금속판으로 대체하였다.⁴⁷⁾ 이 장치의 신호전달과정을 살펴보면, 안테나를 통해 들어온 전자기파 신호가 전도성을 가진 이온화된 기체에 영향을 주며, 이에 따라 수화기회로에 전류가 흘러 신호음을 들을 수 있게 된다. 특히 이 장치는 금속판에 양전압을 유지하게 하는 전지를 달아줌으로써, 정류를 통해서가 아니라 파형의 비대칭을 이용하여 신호를 전달하는 것이었다.⁴⁸⁾ 그러나 이 장치 역시 실용적으로 사용되지는 못하였다.

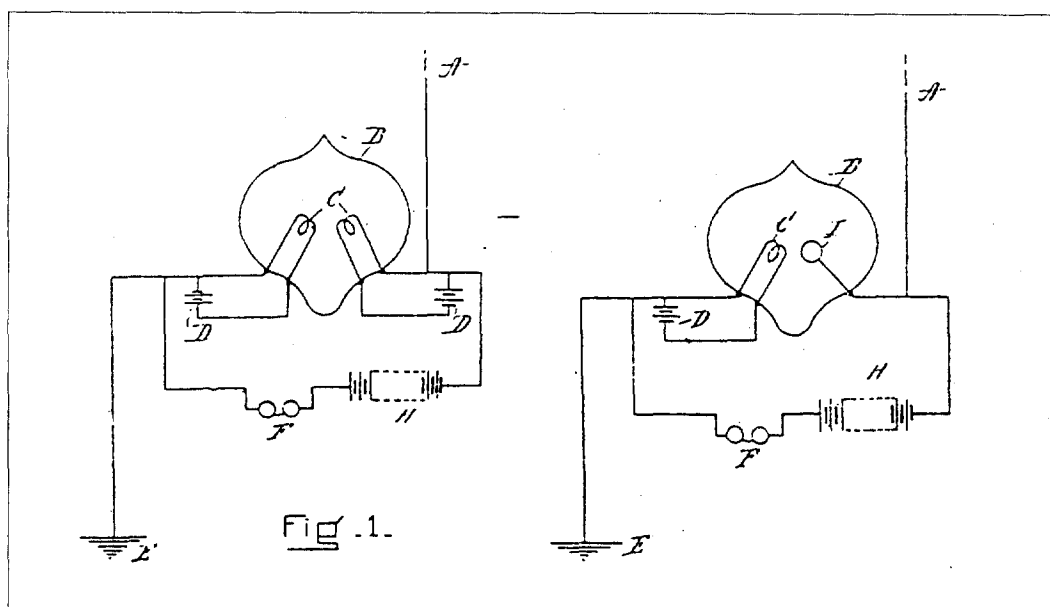


그림 3: 2 필라멘트 검파기(1905년)(A: 안테나, B: 유리구, C: 필라멘트, D: 배터리, F: 수화기, H: 배터리)와 1필라멘트-1플레이트 검파기(1905년)(A: 배터리, B: 배터리, F: 필라멘트, P: 플레이트, T: 수화기)

출처: Lee de Forest, "Oscillation Responsive Device", US Patent, No. 824637.

46) de Forest, "The Audion"(1920), 2-3면.

47) Lee de Forest, "Oscillation-Responsive Device", US Patent No. 836070. Original application filed Jan. 18, 1906. Patented Nov. 13, 1906; "The Audion"(1920), 5면.

48) 이에 대한 자세한 설명은 Chipman, "De Forest and the Triode Detector", 97-99면을 참조할 것. 이를 칩먼은 "forward-biased thermionic diode"라고 부르고 있다. "forward-biased"는 그의 장치가 플레밍의 그것과는 달리 플레이트에 계속해서 양전압을 걸어주는 전지가 있다는 의미에서, "thermionic"은 가열된 필라멘트에서 전자가 튀어나온다는 의미에서, diode는 전극이 두 개라는 뜻에서이다.

이 연구가 있는 후, 드 포리스트는 1906년 10월 26일 미국전기공학자학회(American Institute of Electrical Engineers)에 제출한 논문에서 제어 그리드에 대한 아이디어를 내놓았다. 여기서 그는 필라멘트와 금속판 사이에 제어그리드를 직접 넣는 대신 제3의 전극을 유리구 외부에 감아 전자기파를 제어하는 구조를 채택하였다.⁴⁹⁾ 그러나 1907년 1월 29일의 특허 출원에서는 필라멘트와 금속판 사이에 지그재그 모양의 제어그리드를 삽입한 오디온을 제시했다.⁵⁰⁾ 그는 이전의 장치들과는 달리 안테나에 들어온 신호를 4-12볼트의 양전압을 걸어준 제어그리드가 받아들이게 했고, B-배터리와 연결된 금속판에는 약 15-40볼트의 높은 양전압을 걸어줌으로써 안테나가 수신한 신호가 플레이트의 큰 전류를 효과적으로 제어하면서 신호를 '릴레이'할 수 있게 만들었다. 그는 제어그리드를 삽입한 구조를 채택한 이유를 다음과 같이 설명하고 있다.

나의 2극검파기에서는 고주파에너지의 일부가 플레이트와 필라멘트 사이의 이온에 집중되지 않고 전화와 배터리회로를 통해 지구(earth)로 흘러가 버렸다. 이러한 결점을 보완하고 검파기의 감도를 높이기 위해 얇은 금속판을 실린더 모양의 유리관 외부에 감싸고 이 세번째 전극을 안테나에 연결시켰다. 그 이후 나는 이 세번째 전극이 유리관 내부에 있으면 효율이 더 높아진다는 것을 알게 되었다. 나는 특히 제3의 전극이 필라멘트와 플레이트 사이에 위치할 경우 가장 효율적임을 알았고 금속판에 구멍이 뚫린 구조가 더욱 바람직스러웠다. 그런데 이는 비용이 많이 들고 구조가 복잡하여 폭이 좁은 금속가지를 지그재그로 구부린 그리드형태를 취하였다.⁵¹⁾(강조는 필자)

삼극증폭기의 기본적인 형태(그림 4)는 이렇게 하여 탄생하였다.⁵²⁾

위에서 보듯이 드 포리스트의 생각은 이전과 달라진 것이 없었고, 제3의 전극(그리드)을 삽입한 것은 단지 오디온의 효율을 높이기 위해서였다. 그리고 그는 앞에서 지적하였듯이 오디온이 필라멘트에서 방출된 열전자에 의해서가 아니라 유리구 속에 있던 이온화된 기체에 의해서 작동한다고 생각하였다. 이러한 그의 생각은 1906년 10월 26일 AIEE에 제출된 논문에서 “나는 그것(전하의 운반)이 [오디온에] 남아있는 기체 이온에 의해서 일어난다고 생각한다. 금속의 먼지(전자를 지칭)보다는 기체입자가 운반체이다”라고 말한 것에서 명백히 알 수 있다.⁵³⁾ 또한 그에게 있어서 빛을 내는 필라멘트는 플레밍의 그것과는 달리 하전입자의 원천이 아니라 유리구 속의 기체를 가열하는 수단이었다. 따라서 드 포리스트가 생각한 신호의 전달을 간단히 정리해 보면, 우선 가열된 필라멘트가 유리구 속의 기체를 가열하여 이온화시키고, 안테나가 그리드에 연결되어 있으므로 이를 통해 신호가 받아들여지며, 이 신호는 이온화된 기체를 매개로 B-전지에서 공급되는 큰 전류를 제어하여 양극에 큰 전류의 변화를 주게되며, 다시 이 전류의 변화가 수신기로 전달된다.

49) de Forest, “The Audion”(1906), 758-63면; “Device for Amplifying Feeble Electrical Currents”, US Patent No. 841387. Application filed Oct. 25, 1906. Patented Jan. 15, 1907.

50) Lee de Forest, “Space Telegraphy”, US Patent, No. 879532. Application filed Jan. 29, 1907. Patented Feb. 18, 1908.

51) de Forest, *Father*, 214면.

52) 제어그리드를 삽입한 오디온이 정확하게 언제 고안되었는지에 대한 1차 사료는 없다. 하지만 그 시기는 드 포리스트가 AIEE에 논문을 제출한 1906년 10월 26일과 특허를 출원한 1907년 1월 29일 사이일 것이다. 오디온을 생산했던 Mackendless의 말에 따르면 그가 1906년 12월 경에 드 포리스트로부터 그리드 오디온의 제작의뢰를 받았다고 한다.

53) de Forest, “The Audion”(1906), 769, 778면.

No. 879,532.

PATENTED FEB. 18, 1908.

L. DE FOREST.
SPACE TELEGRAPHY.
APPLICATION FILED JAN. 29, 1907.

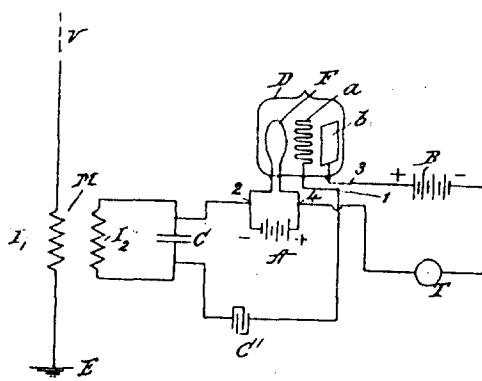


FIG. 1.

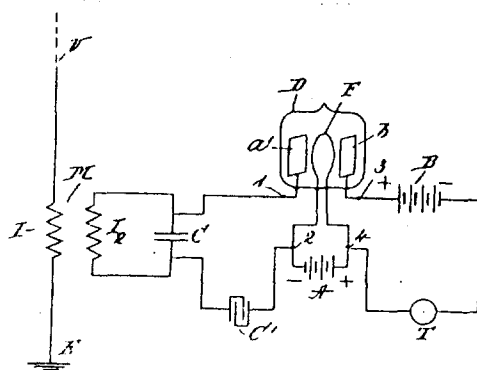


FIG. 2.

WITNESSES-
E. B. Johnson
Patrick J. Conroy

INVENTOR:
Lee de Forest
by Geo. K. Woodworth,
Atty.

그림 4: 제어그리드를 삽입한 오디온(1907)

출처: Lee de Forest, "Space Telegraphy", US Patent, No. 879532

이러한 드 포리스트의 생각은 1920년대 이후에 고진공(high vacuum)에 익숙해 있던 세대의 과학자들과 엔지니어들의 생각과는 사뭇 다른 것이었다. 신세대들이 생각한 삼극진공관의 증폭원리는 다음과 같다. 그리드가 음극 가까이 설치되어 있으므로 양극전류에 대한 영향은 양극에 가해진 전위보다 훨씬 효과적이다. 그리드 전위를 음극보다 낮은 전위로 해도 양극전위에 높은 전위를 가하는 경우에는 전류가 흐르는데, 이 때 그리드 전위를 약간 변화시키면 양극전류가 민감하게 변화되어 양극전위의 큰 변화와 같은 효과를 얻게 된다. 따라서 그리드에 작은 신호의 변화만 주어도 양극전류가 크게 변화되어 증폭작용을 하게 된다. 따라서 이들은 진공관이 어떠한 용도로 쓰여지는가에 상관없이 진공관에 여분의 기체가 남아있어서는 안된다고 생각하였다. 실제로 이 장치의 작동을 느리게 만드는 기체를 완전히 제거하는 문제는 진공관의 제조과정에서 가장 큰 어려움이었다. 그러나 드 포리스트의 생각은 그것과는 반대였다. 즉 그는 그의 튜브가 제대로 작동하기 위해서는 여분의 기체가 필수적인 것으로 여겼고 완전한 진공이 될 경우 자신의 오디온이 부도체가 되어버릴 것이라고 생각하였던 것이다.⁵⁴⁾ 이러한 점을 염두에 두고 애플튼과 칩먼은 드 포리스트가 자신의 발명품의 작동원리는 제대로 알지 못한 채 단순히 경험적인 방법에 의해 오디온을 발명하였으며 나아가 오디온의 발명은 단지 플레밍 밸브에 제3의 전극인 그리드를 삽입한 것에 불과하다고 혹평하였다.⁵⁵⁾ 하지만 드 포리스트의 오디온에 대한 이해가 오늘날과 달랐다고 해서 그가 오디온의 작동원리를 잘못 파악한 것이라고 단정할 수 있을까?

이 문제는 앞서 밝힌 대로 오디온의 기원과 관련된 이전의 기술사학자들의 논쟁과 관련된다. 먼저 드 포리스트의 오디온이 정확히 어떻게 작동하였는가를 살펴보자. 오디온에는 음극에서 양극으로 진행하는 전자에 의해 그 내부에 있던 소량의 기체들이 이온화된 상태로 존재했는데, 양이온은 때로는 전자와 합쳐져서 중화되기도 했다. 만약 낮은 양전압이 그리드에 걸리면 음극을 출발한 전자의 속도가 빨라지게 되며 이에 따라 더욱 많은 양이온이 생성되었다. 즉 그리드의 전압이 높아짐에 따라 전자의 속도는 그만큼 더 증가하여 기체의 이온화가 가속되었다. 그런데 양이온이 많아지면 전자를 중화시켜서 공간전하(space charge)를 감소시키게 되고, 이것은 필라멘트와 플레이트 사이에 전류가 많이 흐를 수 있게 했다. 따라서 그리드, 필라멘트, 플레이트 구조에서 기체의 존재는 전혀 기체가 없는 것보다 'relaying action'을 효과적으로 할 수 있었다. 또한 오디온의 경우 주로 그리드에 콘덴서를 직렬로 연결해 사용하였기 때문에 그리드에 지나친 음전압이 걸리는 것을 막기 위해서도 일정량의 이온화된 기체가 필요하였다. 그러나 공간전하를 없애기 위해 필요한 이온화된 기체의 양은 매우 작았으며, 기체가 많이 존재할 경우 오디온의 안정성에 커다란 문제를 일으켰다.⁵⁶⁾ 결론적으로 오디온에서 기체이온이 전하의 운반체라는 생각은 틀린 것이었지만 릴레이 기능만을 생각했을 때는 이온화된 기체가 존재하는 것이 작동에 보탬이 될 수

54) 같은 글, 778면.

55) Appleton, "The Thermionic valve", 17면; Chipman, "De Forest and the Triode Detector", 100면. 그러나 칩먼은 1906년까지의 오디온의 발명과정에 있어서는 드 포리스트의 개인적 연구가 발명의 주요한 동인이었다고 인정하고 있다.

56) 왜냐하면 이온화된 기체가 너무 많으면 공간전하 거의 전부를 중화시켜버리며, 이러한 조건에서 오디온은 'relaying action'을 잃어버리고 '푸른 안개' 현상을 보이게 되기 때문이다. 다시 말하면 정확한 기체의 양을 조절하기가 어려웠고 특성곡선의 왜곡이 뒤따랐으며 더우기 기체의 양이 조금만 더 많거나 적어도 푸른안개현상을 동반하였던 것이다. 당시 오디온의 작동원리에 대한 자세한 설명은 Irving Langmuir, "The Pure Electron Discharge and Its Application in Radio Telegraphy and Telephony", *General Electric Review*, Vol. 18, No. 5 (1915), 329-331면을 참조할 것.

있었고 오디온을 증폭기로 인식하지 못하였다면 드 포리스트의 설명은 타당한 것이었다고 볼 수 있다.

따라서 오디온에 관한 기존 기술사가들의 상반된 입장은 오디온의 발명 당시의 목적을 강조하느냐, 아니면 오늘날처럼 증폭기로서의 역할을 중시하느냐의 문제에 달려있다. 즉 칩먼이나 애플튼과 같은 연구자들은 증폭기의 작동원리를 염두에 두고 드 포리스트의 업적을 평가한 반면, 에이트컨은 드 포리스트가 애초에 어떠한 발명의도를 가지고 자신의 장치를 고안하였으며 실제 작동에 있어서—드 포리스트가 생각한 것처럼—전자 뿐만 아니라 이온화된 기체도 오디온의 작동에 기여했다는 점을 중시하고 있는 것이다. 이에 필자는 발명 당시인 1906년에 드 포리스트는 자신의 오디온을 전자기파의 새로운 검파기 혹은 릴레이로 고안하였지 증폭기로 고안한 것이 아니었다고 주장한다. 이것은 그의 1906년 논문의 제목과 특허에 나타난 그의 ‘발명 목적’에서 잘 드러나는데, 드 포리스트는 자신의 그리드 오디온의 발명목적이 ‘감도가 더 좋은 검파기’를 고안하는 것이라고 밝히고 있다.⁵⁷⁾ 실제로 오디온이 증폭기 역할을 할 것이라는 인식은 1907년 이후에야 얻어졌으며 오디온의 ‘진정한 작동원리’는 무엇인가 하는 문제는 1912년경에 랭미어(Irving Langmuir, 1881-1957)나 아놀드(Harold D. Arnold, 1883-1933)같은 ‘과학자’들에 의해 해명되었던 것이다.⁵⁸⁾

물론 필자의 이러한 주장에 대해 반론의 여지는 있다. 예를 들어 드 포리스트는 1907년 1월 15일에 “미약한 전류를 증폭하는 장치”로 특허를 받았다.⁵⁹⁾ 에이트컨은 이에 대해 발명 당시인 1906년경에 이미 드 포리스트가 오디온을 증폭기로 인식하고 있었다고 주장하였다.⁶⁰⁾ 그러나 드 포리스트는 이 특허 이후 1912년까지 ‘증폭’이라는 용어를 한번도 사용하지 않았다. 또한 그가 “증폭”작용을 한다고 주장한 이 특허의 장치는 증폭작용이 실제로 일어날 수 없었기 때문에 1907년 당시에는 증폭에 대한 인식이 없었던 것으로 보인다. 필자의 견해로는 에이트컨의 잘못된 판단은 증폭을 릴레이와 동일시 한 것에서 비롯된 것이라고 생각한다. 릴레이는 서로 분리된 2개 이상의 전기회로가 있을 때 한 회로의 신호를 다른 회로로 보내는 장치를 말하는데 이 과정에서 신호의 절대적 크기가 커질 수도 작아질 수도 있다. 간단히 말해 릴레이는 일종의 스위치와 같은 중계장치이다. 반면 증폭은 회로 자체에서 신호의 파형이 왜곡됨이 없이 그대로 전달되면서 그 출력은 강화되는 것을 지칭하는 것이다. 따라서 신호를 다른 회로로 전달한다는 넓은 의미에서는 증폭을 릴레이의 한 종류라고 볼 수도 있겠으나 엄밀한 의미에서의 증폭에 대한 인식은 분명히 드 포리스트에게는 없었다고 보이며, 그가 말한 ‘증폭’의 의미는 ‘릴레이’를 염두에 둔 것으로 판단된다.

3-3. 오디온과 플레밍 밸브: 플레밍과의 우선권 논쟁

마르코니의 자기검파기의 약점을 극복한 새로운 검파기가 1904년 영국의 물리학자이자 엔지니어였던 플레밍에 의해 발명되었다.⁶¹⁾ 플레밍의 새로운 검파기는 1880년대 초 에디슨(Thomas A.

57) de Forest, US Patent, No. 879532.

58) 1912년 경부터 삼극진공관의 작동원리는 랭미어와 아놀드가 오디온이 고진공으로 되어야 한다는 사실을 보인 뒤 급속하게 진전되었다. 특히 General Electric에서는 일군의 과학·기술자들이 3극진공관의 작동원리에 대한 수학적·이론적 해석을 제공함으로써 그 이해가 더욱 깊어졌다. 이 시기에 GE에서 진공관 연구에 기여한 과학·기술자로는 Irving Langmuir, Lloyd P. Smith, H. J. van der Bijl 등이 있다.

59) Lee De Forest, “Device for Amplifying Feeble Electrical Currents” US Patent, No. 841387.

60) Aitken, *The Continuous Wave*, 217면.

Edison, 1847-1931)이 발견한 ‘에디슨 효과’(Edison effect)에 그 기원2을 두고 있다.⁶²⁾ 1883년 에디슨은 자신이 발명한 전구가 사용하면 할수록 점점 더 어두워질 뿐만 아니라 필라멘트가 점점 더 가늘어진다는 것을 알게 되었다. 에디슨은 이 현상이 탄소필라멘트에서 어떤 입자가 튀어나오기 때문으로 생각하였고 방출입자의 전하를 측정하기 위해 머리핀 모양으로 된 탄소필라멘트 고리 사이에 얇은 금속판을 넣어 실험을 하였다. 그는 그림 5와 같이 전구 속에 얇은 금속판을 넣고 필라멘트와 금속박막 사이를 갈바노미터로 연결하여 전위의 변화에 따른 전류의 흐름을 조사한 결과 금속박막에 플러스 전압을 걸어줄 경우에는 강한 전류가 흐르지만 마이너스 전압을 걸어줄 경우에는 아주 약한 전류가 흐른다는 것을 발견하였다.⁶³⁾ 이 실험을 통해 에디슨은 탄소필라멘트에서 ‘음전하를 띤 어떤 입자’가 튀어나와 전구의 유리벽에 붙어서 전구가 흐려지는 것이라고 결론지었다. 그러나 그는 필라멘트에서 튀어나오는 이 입자가 무엇인가에 대한 과학적 설명을 제시하지 않았고 전신에 응용할 생각도 하지 못했다.⁶⁴⁾

한편 이와는 독립적으로 유럽에서는 1860년대 후반부터 기체를 통한 전도현상에 대한 실험들이 여러 사람들에 의해 진행되었다. 히토르프(Wilhelm Hittorf)는 전구의 음극이 뜨거울수록 비워진 공간의 저항이 작아지며 전류의 흐름도 一方的(unilateral)이라는 것을 알아내었다. 또한 엘스터(Julius Elster)와 가이텔(Hans Geitel)은 1882년에서 1889년동안 가열된 기체의 광전도도(photo-conductivity)에 대해서 연구해서 하전입자가 빛을 받으면 전극에서 균일하게 방출됨과 이때 그 전도 방향은 일방적임을 밝혔다.⁶⁵⁾ 그러나 독일에서의 연구는 과학적 관심에서 비롯된 것이었으며 실용적 발명으로 연결되지는 못했다.⁶⁶⁾

이와같이 이론적 기반이 없었던 ‘기술자’들의 실제적 작업과 ‘과학자’들에 의한 순수한 과학적 연구는 무선통신기술의 혁신을 가져오지 못하고 ‘과학자-엔지니어’ 플레밍의 손을 기다리고 있었다. 1882년 영국의 에디슨-스완 전구회사(Edison-Swan Electric Light Company)의 자문에 임명된 플레밍은 에디슨의 전등에서 탄소필라멘트가 증발하여 유리구를 흐리는 현상에 대해서 이미 알고 있었다. 1884년 플레밍은 에디슨으로부터 직접 에디슨효과에 대한 얘기를 듣고 연구를 시작하였다. 그는 이 현상을 ‘molecular shadow’라 불렀고, 유니버시티 칼리지에 있던 자신의 실험실에서 이 현상과 관련된 두 가지 사실을 확인하였다. 하나는 필라멘트에서 나오는 입자가 ‘음전하를 띠고 있다’는 사실이었고 다른 하나는 전지로부터 나오는 음전기가 필라멘트에서 플레이트로는 흐르지만 그 반대방향으로는 흐르지 않는다는 사실이었다.⁶⁷⁾ 플레밍은 이러한 결과를 1890년

61) 플레밍은 1849년 11월 영국의 랭카스터에서 태어나 1870년 유니버시티 칼리지(University College)를 졸업하였고 1877년에는 캠브리지 대학에 진학하여 맥스웰 아래서 수학하였다. 이후 플레밍은 유니버시티 칼리지의 전기공학과의 교수로, 에디슨전기회사와 마르코니전신회사의 과학자문으로 활동하면서 이론과 실제적인 경험을 겸비한 과학적 엔지니어로 명성을 날렸다. 플레밍의 삶과 과학적 업적에 대한 자세한 사항은 John A. Fleming, *Memories of a Scientific Life* (London, 1934)와 J. T. MaGregor-Morris, *The Inventor of the Valve* (London, 1954)를 참조할 것. 특히 *Memories*는 플레밍 자신이 담담한 문체로 당시 과학계의 동향과 자신의 삶과 과학적 업적에 대해서 서술하고 있다.

62) Edison effect에 대한 자세한 내용은 Fleming, *Memories*, 134-139면; MaGregor-Morris, *The Inventor of the Valve*, 66-69면; Mathew Josepson, *Edison* (New York: McGraw-Hill, 1959), 274-284면; George Shiers, “The First Electron Tube”, *Scientific American* 220 (March, 1969), 104-112면 등을 참조할 것.

63) Fleming, *Memories*, 136면.

64) 대신 에디슨은 전류를 측정하고 제어하는 장치를 만들었다. Thomas A. Edison, “Electrical Indicator”, US Patent No. 307031, issued on 21 October 1884.

65) Jerald F. J. Tyne, *Saga of Vacuum Tube* (Indianapolis: Howard W. Sam & Co., 1977), 35면.

66) Shiers, “The First Electron Tube”, 107면.

2월 왕립연구소(Royal Institution)에서 발표하였고, 1896년 3월 영국 물리학회에서 “A Further Examination of Edison Effect in Glow-Lamps”라는 제목으로 발표하였다.⁶⁸⁾ 그러나 이 시기의 플레밍의 연구는 순수한 과학적 관심에 국한되어 있었다.

플레밍이 자신의 연구결과를 검파기로 실용화한 것은 1904년에 이르러서였다. 1899년 플레밍은 마르코니 전신회사(Marconi Telegraph Company)의 자문이 되었다. 1904년 고주파를 정류할 수 있는 장치에 대해 골똘히 생각하던 플레밍에게 에디슨 효과에 대한 생각이 불현듯 떠올랐다.⁶⁹⁾ 이에 대해 플레밍은 다음과 같이 술회하고 있다.

이 문제에 대하여 골똘히 생각하고 있던 나에게 1904년 10월에 갑자기 매우 행복한 생각이 떠올랐다. 나는 ‘에디슨 효과’에 대한 나의 실험들을 회상하였다. 특히 나는 가열된 탄소필라멘트에서 차가운 금속판으로 전기가 일방적으로 흐른다는 사실에 주목하였다. 나는 내 자신에게 이것이야말로 고주파진동을 ‘정류’할 수 있는 적당한 기구라고 말했다.⁷⁰⁾

플레밍은 자신의 조수였던 다이크(G. B. Dyke)에게 약한 고주파전류와 자신이 실험하던 전구들을 가지고 실험을 하도록 하여, 이 새로운 장치가 효과적인 정류기로 작동한다는 사실을 확인하였다.⁷¹⁾ 이 실험 이후, 플레밍은 에디슨-스완 전구 공장에서 금속판을 부착한 여러 형태의 전구들을 얻어 정류작용을 가장 효율적으로 할 수 있는 구조를 탐색하였고, 결국 금속판을 실린더의 형태로 만들어 필라멘트를 감싸는 모양을 채택하였다. 플레밍은 1904년 11월 16일 영국특허국에 자신의 발명품에 대한 특허를 출원하였다.⁷²⁾

플레밍의 정류기의 구성과 작동원리는 그림 5와 같았다. 만약 안테나에서 양전압을 가진 신호

67) Fleming, *Memories*, 136면.

68) John A. Fleming, “A Further Examination of the Edison Effect in Glow Lamps”, *Philosophical Magazine* 42 (1896), 52-102면.

69) 플레밍은 1903년 12월 마르코니회사의 자문 계약의 갱신에 실패하였고, 1905년 3월에 재계약에 성공할 때까지 이 회사의 자문이 아니었다. 따라서 플레밍 밸브를 발명할 무렵에는 마르코니회사와 직접적 연관은 없었다. 하지만 그의 회고에 의하면, 당시 그는 1865-6년경 켈빈 경(Lord Kelvin, 이전은 Sir William Thomson, 1824-1907)이 개발한 syphon recorder를 사용할 수 있는 고주파 정류기를 계속해서 생각하였다고 한다. 이에 대해서는 Fleming, *Memories*, 140, 141면을 참조할 것. 이 부분에 대한 다른 주장도 없지 않다. 예를 들어 필자와의 서신교류에서 홍성욱은 플레밍이 플레밍 밸브를 발명하였던 직접적인 동기는 ‘사이펀 리코더’를 사용하기 위한 정류기의 필요성이 아니라 전자기파를 정량적으로 측정할 수 있는 장치를 개발하려는 데 있었던 것으로 해석하고 있다.

70) Fleming, *Memories*, 141면.

71) MacGregor-Morris, *The Inventor of Valve*, 67면. 1904년 11월에 마르코니에게 보낸 서신에서 플레밍은 다음과 같이 말하고 있다. “나는 전기진동을 정류할 수 있는 방법 즉 전기가 같은 방향으로만 흐르게 할 수 있는 방법을 알아내었습니다. 그리고 보통의 미러 갈바노미터로 전기진동을 검파할 수 있습니다. 나는 미러 갈바노미터와 나의 장치만으로 안테나의 신호를 받아들이는데 성공하였습니다. 그러나 현재는 실험실 규모에서만 가능합니다. 이제 나는 발전기의 효과를 정확히 측정할 수 있기때문에, 이것은 넓은 작업 가능성을 열어줍니다.” 플레밍이 마르코니에게 보낸 편지. 1904년 11월에 씌어짐. Shiers, “The First Electron Tube”, 110면에서 재인용.

72) J. A. Fleming, “Instrument for Converting Alternating Electric Currents into Continuous Currents”, Patent No. 24,850 of Nov. 16, 1904, in Great Britain. Patent No. 803,684 of Apr. 12, 1905, in the United States.

가 들어오면 필라멘트에서 튀어나온 전자가 그 주위를 감싸고 있는 원통형의 금속판으로 전달되고 반대로 음전압을 가진 신호가 들어오면 필라멘트에서 방출된 전자는 음전기를 가지고 있기 때문에 금속판에 전달되지 않았다. 이러한 과정을 거쳐 플레밍의 장치는 안테나에서 받아들여진 전기진동을 교류에서 직류로 정류할 수 있었다. 고주파전류의 효과적인 정류기가 발명된 것이다. 플레밍은 이 장치가 정맥의 판막과 같이 ‘밸브’의 작용을 한다 하여 “oscillation valve”라고 불렀으며, 또한 가열된 필라멘트에서 음전하를 가진 입자가 튀어나온다고 하여 “thermionic valve”라고 부르기도 했는데, 이것이 후에 ‘Fleming valve’라 불리는 장치였다.⁷³⁾

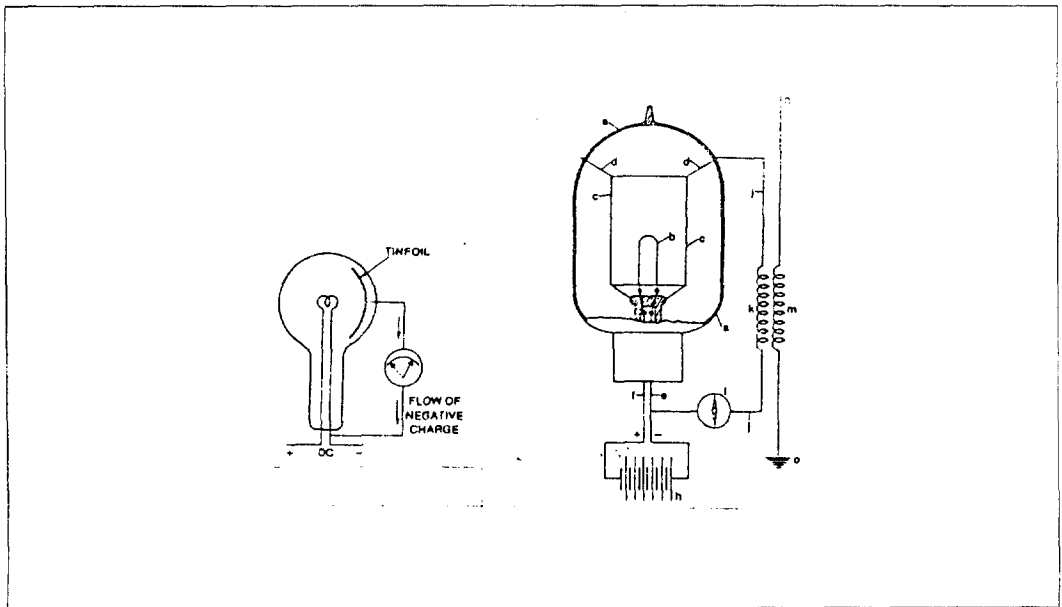


그림 5. 에디슨의 실험 장치와 플레밍 밸브(1904) (a: 유리구, b: 필라멘트, c: 원통형 금속판, l: 갈바노미터, n: 안테나)

출처: Stanley Leinwoll, *From Spark to Satellite: A History of Radio Communication* (New York: Charles Scribner's Sons, 1979), 42면.

플레밍은 1904년 당시에는 막연히 자신의 밸브가 ‘음전하를 가진 탄소원자’에 의해 작동된다고 생각하였으나 1905년이 되면 필라멘트에서 방출되는 입자가 1899년 J. J. 톰슨이 발견한 ‘copuscle’, 즉 전자임을 깨닫게 된다.⁷⁴⁾ 플레밍은 영국과학계의 중심인물 중의 하나였을 뿐만 아니라 대학에도 몸담고 있었고, J. J. 톰슨과 리차드슨(Owen W. Richardson, 1879-1959)과도 개인적인 친분이 있었기 때문에 전자기론에 대해서도 잘 알고 있었던 것이다. 1899년 톰슨은 매우 낮은 압력을 가진 수소기체에 들어 있는 탄소필라멘트에서 수소원자의 약 1/1800의 질량을 가진 음전기를 띤 입자가 방출됨을 밝혔고, 1903년 리차드슨은 뜨거운 금속에서 방출되는 입자가 톰슨이

73) Fleming, *Memories*, 142면. 오늘날은 통상적으로 2극진공관을 diode라 부르는데 이것은 전극이 두 개라는 의미이다.

74) Fleming, *Memories*, 137, 143면.

발견한 ‘corpuscle’임을 알고 이에 대한 이론적 작업을 수행하였다.⁷⁵⁾ 리차드슨의 이론에 따르면, 금속은 온도가 상승함에 따라 더욱 많은 전자를 방출하며 어떤 주어진 온도에서 가열된 금속은 그 주위의 전기장과는 무관하게 일정한 비율로 전자를 방출한다. 만약 가열된 필라멘트 주위에 양으로 대전된 금속이 있으면 전자들은 필라멘트로부터 양전하를 띤 금속으로 흡수될 것이며, 반대로 음으로 대전된 금속이 있을 경우 방출되었던 전자들은 다시 필라멘트로 재흡수되어 전기가 흐르지 않게 된다. 이것은 1904년에 플레밍이 그의 정류기를 발명하는 데 사용한 원리이기도 했다. 플레밍이 자신의 밸브를 ‘thermionic’ valve라 부른 이유도 이러한 열전자 방출을 염두에 둔 것이었다.

이상에서 보듯이 플레밍 밸브의 핵심적 작동원리는 ‘정류’였다. 그리고 그는 1904년 발명당시에는 밸브의 작동이 ‘전자’에 의한 것이라는 사실을 인식하지 못했지만 1905년경이 되면 자신의 장치에서 전하의 운반체는 바로 전자임을 알게 된다. 따라서 그는 필라멘트에서 방출되는 전자가 유리구 속에 남아있는 기체 입자에 의해 방해받지 않고 자신의 밸브가 제대로 작동하기 위해서는 유리구 속이 고진공으로 되어야 한다고 생각하였다.⁷⁶⁾

이와같이 플레밍의 생각과 연구과정은 판이하게 달랐다. 하지만 그 형태의 유사성 때문에 오디온의 기능과 기원에 관한 논쟁은 이미 플레밍과 드 포리스트 사이에도 있었다. 플레밍은 *The Electrician*에 보낸 편지에서 “드 포리스트의 장치는 내가 이전에 고안한 밸브와 비슷하며, 실제 구조에 있어서 조금 차이가 있다고 볼 수는 있으나 탄소필라멘트 주위에 플레이트를 달아서 검파기로 사용한다는 생각은 내가 처음했다”라고 주장하였다.⁷⁷⁾ 이에 대해 드 포리스트는 “내 장치의 진정한 기원은 1882년의 엘스터와 가이텔의 실험이다. 나의 장치에는 분명히 전화회로에 ‘local battery’가 부착되어 있다. 이것은 플레밍 밸브가 단순히 정류작용을 하는 것과는 달리 내 장치가 릴레이 작용을 한다는 것을 보여주고 있다”라고 반박하였다.⁷⁸⁾ 이들의 논쟁은 한동안 잠잠하다가 1913년에 이르러 재개되었다. 1913년에 드 포리스트는 *The Electrician*에 기고한 “The Audion-Detector and Amplifier”란 논문에서 ‘오디온은 릴레이 장치이며 B-배터리(local battery)가 증폭작용을 설명하는 데 있어서 중요하다’는 논지의 주장을 폈다.⁷⁹⁾ 이를 반박하는 글에서 플레밍은 “유리구 속에 금속플레이트를 넣은 무선검파기를 고안한 것에 있어서 드 포리스트에게는 절대로 우선권이 주어질 수 없다. 그가 엘스터와 가이텔의 실험에서 기초하였다는 것은 잘못이다. 왜냐하면 이들 중 아무도 “vacuum valve”를 고안하지 않았기 때문이다”라고 주장하였다.⁸⁰⁾ 이에 대해 드 포리스트는 “플레밍의 특허에는 2차회로에 전류를 공급하는 2차배터리가 없다. 따라서 그의 장치와 나의 오디온 사이에는 진정한 유사성이 없다”고 말하면서 이제까지의 다소 수세적인 입장에서 벗어나 플레밍 밸브의 기원이 검파기를 발명하려는 데 있지 않았다고까지 주장하였다.⁸¹⁾

75) J. J. Thomson, “On the Masses of the Ions in Gases at Low Pressures”, *Philosophical Magazine* 48 (1899), 547-567면 중 547면; Owen E. Richardson, *Philosophical Transactions* 201 (1903), 516면.

76) John A. Fleming, “Conduction through Vacuum”, *Scientific American Supplement*, No. 1568, 25129면.

77) John A. Fleming, “Correspondence: Oscillation Valve, or Audion”, *The Electrician* 65 (November 30, 1906), 263면.

78) Lee de Forest, “Correspondence: Oscillation Valve or Audion”, *The Electrician* 65 (November 30, 1906), 425면.

79) Lee de Forest, “The Audion-Detector and Amplifier”, *The Electrician* 72 (1913), 285-288면.

80) John A. Fleming, “Correspondence: The Audion-Detector and Amplifier”, *The Electrician* 72 (December 5 1913), 337-8면.

81) Lee de Forest, “Correspondence: The Audion-Detector and Amplifier”, *The Electrician* 73 (January 23,

플레밍과 드 포리스트 사이의 이러한 우선권 논쟁은 ‘드 포리스트가 플레밍의 발명에 의존하지 않고 독자적으로 오디온을 발명하였는가’라는 문제로 귀착된다. 이 문제는 드 포리스트가 언제부터 오디온에 대해 연구하였으며 그 과정에서 어떤 현상에 주목하였는가를 추적함으로써 밝혀질 수 있는 것이다. 필자는 이미 3-1, 3-2절의 긴 논의를 통해 ‘오디온의 발명이 그의 독자적 연구에서 비롯되었다’고 밝혔다. 즉 드 포리스트는 플레밍의 발명 이전인 1900년부터 계속해서 ‘이온화된 기체’를 중심으로 검파기에 대한 연구를 수행하였고 이러한 연구가 결실을 맺은 것이 바로 1906년의 그리드 오디온이었다는 것이 필자의 주장이다.

그렇다면 ‘과연 드 포리스트는 언제부터 ‘유리구를 사용한 검파기’를 사용하기 시작하였는가, 플레밍의 특허가 나오기 이전에 그가 검파기에 유리구를 사용하였는가’라는 문제가 남는다. 플레밍은 자신의 검파기를 발명한 후 1904년 11월 16일에 영국특허를, 1905년 4월 12일에 미국특허를 각각 신청하였고, 1905년 2월 9일에 영국 왕립학회에서 자신의 장치를 선보였다. 따라서 미국에 있던 드 포리스트는 1905년 2월 9일 이전에는 플레밍 밸브에 대해서는 알지 못했으며, 이 점은 플레밍도 인정하였다. 하지만 플레밍은 자신의 왕립학회의 발표 이후 드 포리스트가 자신의 아이디어를 알고 이를 도용했다고 주장하면서 이에 대한 근거로 드 포리스트의 US Patent No. 823402를 문제삼았다. 이 특허는 1905년 12월 9일이 출원일로 되어 있는데, 플레밍은 여기서부터 드 포리스트가 ‘유리구 속에 전극을 넣은’ 구조를 택하고 있다고 주장하였다.⁸²⁾ 그러나 이러한 플레밍의 입장은 옳지 않은 것으로 보인다. 왜냐하면 드 포리스트가 1902년 2월 3일에 출원한 특허(앞의 그림 2)에서 바로 유리구를 사용한 검파기가 보이기 때문이다.⁸³⁾ 따라서 드 포리스트는 플레밍의 발명을 알기 이전부터 ‘유리구 속에 전극을 포함한 검파기’를 생각하고 있었던 것이다. 물론 필자도 드 포리스트가 플레밍의 특허 이후에 좀 더 많이 그리고 본격적으로 ‘유리구 속에 필라멘트를 포함한 검파기’에 대해서 생각했다는 것은 인정해야 할 것으로 생각한다. 왜냐하면 1905년 2월 9일 이후에 출원된 특허들부터 비로소 본격적으로 유리구를 사용한 검파기가 등장하기 때문이다.⁸⁴⁾ 하지만 이를 두고 드 포리스트가 플레밍의 밸브의 구조를 모방했다고 볼 수는 없으며, 다만 플레밍의 특허를 보고 난 후 자신이 시도한 유리구의 아이디어에 대해서 좀 더 확실하게 되었을 것이다. 결국 드 포리스트는 유리구를 사용한 오디온을 플레밍 밸브 발명 이전에 이미 사용하고 있었으며 플레밍의 발명 이후 유리구 모형이 더욱 안정적임을 더욱 확실하게 되어 본격적으로 사용하였다고 말할 수 있다.

1914), 659-60면. 드 포리스트는 플레밍의 특허설명서에는 플레밍이 검파기를 발명하려는 의도가 없었다고 주장하였다. 자신의 주장을 뒷받침하기 위해 드 포리스트는 다음의 인용문을 제시하면서 플레밍의 특허설명서의 어디에도 “detector”를 개발하려 하였다는 언급이 없음을 지적하고 있다. “This invention relates to new devices for converting alternating electric currents, and especially high-frequency currents or oscillations into continuous electric currents, for the purpose of making them detectable by and measureable with ordinary direct-current instruments such as a mirror galvanometer &c.”, “It is of great practical importance to be able to detect feeble electrical oscillations such as are employed in Hertzian wave telegraphy by an ordinary movable coil, or needle, galvanometer.”

82) Fleming, “Correspondence: The Audion: Detector and Ampolifier”, 378면.

83) de Forest, US Patent No. 979275. 드 포리스트는 특허설명서에서 “이러한 기체는 공기가 될 수 있을 것이며, 전극은 적당한 기체에 의해 감싸질 것이다. 그림 6에서 전극은 용기 H에 포함되어 있다”고 설명하고 있다.

84) 예를 들어 US Patent No. 823402, 824637, 836070, 836071, 837901, 841386, 841387, 867876, 943969에서는 대부분 유리구를 사용한 검파기를 사용하고 있다.

4. 오디온의 개량과정과 이온화된 기체, 1907 - 1913

그렇다면 오디온의 발명과정에서 가장 중요한 요소였던 이온화된 기체에 대한 드 포리스트의 집착은 그 이후 개량과정에서 어떠한 역할을 하였을까? 오디온은 원리적으로는 증폭기로서 기능할 수 있었지만 기술적 문제 때문에 증폭효과는 거의 나타나지 않았으며, 실제로 1907년 당시 오디온은 단지 검파기로만 사용되었다. 또한 1906-1909년 사이에는 오디온의 실질적인 개량은 거의 없었고 단지 여러 엔지니어들에게 좀 더 잘 알려지는 정도였다. 오디온의 진정한 잠재력이 인식된 것은 1911,12년 경에 이르러서였고, 그 때서야 삼극진공관의 역사에 있어서 제2막이 시작된 것이다.

드 포리스트는 1907년 자신의 회사가 파산한 후, 1911년 팔로 알토(Palo Alto)에 있던 연방전신회사(Federal Telegraph Company)에 들어갔다. 새 회사에서 그의 임무는 진공관과는 별다른 관련이 없었고, 회사도 오디온에 대한 관심이 없었다.⁸⁵⁾ 하지만 1912년경부터 아크송신기의 출력을 높이는 문제로 신호를 강력하게 하기 위한 증폭기가 필요하게 되면서부터 경영진은 빠른 시일 내에 효과적인 증폭기를 개발하기로 결정하였다. 드 포리스트는 1906년에 개발한 자신의 발명품이 증폭기로 기능할 것이라는 것을 회사에 알렸고, 이에 회사는 드 포리스트와 공동작업을 할 로그우드(Charles V. Logwood)와 반 이튼(Herbert van Etten) 두 사람을 소개하였다.⁸⁶⁾

연방전신회사의 소개로 훌륭한 연구조수들을 얻었음에도 불구하고 드 포리스트는 이들을 데리고 회사를 떠나 독자적인 연구를 진행하였다. 그와 새 조수들은 어떤 이론적인 근거에 의해서라기 보다는 이전에 드 포리스트가 하던 대로 시행착오를 통해 자신들의 연구를 수행하였다.⁸⁷⁾ 오디온의 증폭효과에 대한 실험에 성공한 1912년 6-8월 경에 이르러서도 이들에게는 오디온의 작동 원리에 대한 정확한 이해가 없었다. 즉 이 시기까지도 드 포리스트는 오디온 내부의 전하의 운반체는 '필라멘트에서 방출된 전자가 아니라 이온화된 기체'라고 생각했으며, 따라서 1906년에 개발된 삼극오디온의 기본적 구조에서 변형된 점은 거의 없었다. 다만 그도 이때부터 고진공이 필요하다는 점을 어렵게나마 알고있었다. 로그우드와의 공동실험과정에서 플레이트의 전압을 높이면 '푸른안개' 현상이 생기는 것을 관찰한 그는 오디온이 완전한 진공상태로 되어서는 안되지만 어느 정도 고진공이 필요함을 알았던 것이다.⁸⁸⁾ 하지만 드 포리스트는 '전자이론'을 받아들인 사람들과는 다른 이유에서 오디온 내부의 기체를 줄여야 한다고 생각하였다. 플레밍처럼 전자이론을 받아들이고 전자가 진공관의 전하운반체라고 생각한 사람들은 진공관 내부의 기체를 제거하면 할수록 진공관이 더 잘 작동할 것이라고 생각하였던 반면 드 포리스트는 오디온 내부의 기체가 너무 많을 경우에는 푸른안개 현상이 생겨서 오디온의 작동이 방해되기 때문에 푸른안개 현상이 생기지 않을 정도까지만 기체를 제거해야한다고 생각하였던 것이다.

한편 드 포리스트는 1912년에 두 가지의 획기적인 발명을 하였다. 그는 지속적인 실험과 개량작업을 통해 오디온의 증폭효과를 확인한 다음, 1912년 6월에 증폭물을 대폭적으로 향상시킬 수

85) 연방전신회사에서의 드 포리스트의 초기 임무는 한 동선을 통해 동시에 두 군데의 지구국으로 신호를 보낼 수 있는 "diplex system"을 개발하는 것이었는데, 1912년 그는 이를 성공적으로 개발하였다.

86) de Forest, *Father*, 286, 290면.

87) 이러한 사실은 그들의 교육적 배경에서 그 이유를 찾을 수 있다. 로그우드는 대학에서 정식으로 전기공학 교육을 받지않았기 때문에 전기이론이나 수학은 많이 알지는 못했으나 전기회로를 구성하는 데 있어서는 매우 뛰어났다. 반 이튼은 스티븐스 공대(Stevens Institute)를 졸업하고 샌프란시스코에 있던 Pacific Telephone and Telegraph Company에서 전화엔지니어로 일하던 사람이었다.

88) de Forest, *Father*, 291-2면.

있는 ‘캐스캐이드형 증폭기’(cascade type amplifier)를 고안하였다. 캐스캐이드형 회로는 한 오디온의 출력단자를 다른 오디온의 입력단자에 직렬로 연결하여 증폭률을 높이는 방식이다. 예를 들어 1개의 오디온이 3배의 증폭률을 가질 경우 3개의 오디온을 캐스캐이드형으로 연결하면 33, 즉 27배의 증폭률을 얻을 수 있는 것이다. 이렇게 함으로써 드 포리스트는 약 120배에 달하는 만족할 만한 증폭률을 얻을 수 있었다.⁸⁹⁾ 또한 이 시기에 드 포리스트는 ‘피드백 회로’(feedback circuit)를 고안함으로써 연속파발전기의 문제를 해결하였다. 1912년 8월 16일 그는 한 오디온의 출력을 그 오디온의 입력에 연결했을 때 에너지가 재순환되면서 연속파가 발생한다는 것을 알았다. 음성을 전자기파에 실어보내기 위해서는 연속파의 발생이 필수적인데, 이 문제는 알렉산더슨이 고주파교류발전기를 발명함으로써 어느 정도 해결되었으나 완전하지는 못했다. 하지만 피드백 회로로 꾸며진 오디온은 연속적인 전자기진동을 안정적으로 발생시킬 수 있었기 때문에 연속파의 문제를 성공적으로 해결할 수 있었다.⁹⁰⁾

드 포리스트는 자신의 발명품을 가지고 미국전신전화회사(AT&T)에 접근하였다.⁹¹⁾ 1912년 당시 미국 대륙횡단 전화서비스를 계획했지만 마땅한 증폭기가 없어서 실현하지 못하고 있었던 AT&T는 드 포리스트의 오디온이 그들이 찾고 있던 증폭기임을 알고 이를 사들였다. 드 포리스트는 자신의 발명품을 10만 달러에 팔려고 했으나 AT&T는 5만 달러를 제시하였고, 재정난에 허덕이던 그는 결국 1913년에 5만 달러를 받고 오디온 증폭기의 특허권을 AT&T에 넘겨주었다.⁹²⁾ 사실 AT&T는 전화신호를 증폭하기 위해 일찍부터 노력을 기울이고 있었다. 처음에 AT&T는 전화의 자동중계장치(repeater)로 Campell-Pupin Loading coil을 사용하다가 1903년에 쉬리브(Herbert Shreeve)가 개발한 전기기계식 자동중계장치(electromechanical repeater)를 사용하려 하였다. 그러나 이 장치는 신호의 왜곡이 심해서 사용할 수가 없었으며 신호의 왜곡을 줄이기 위해서는 전자식 자동중계장치(electronic repeater)의 개발이 필요하였다.⁹³⁾ 즉 전화회사로서는 제한없는 장거리전화 서비스가 가능하기 위해서는 전자식 자동중계장치의 개발이 필요하였으며, 동시에 이러한 ‘전자기술’은 무선통신 분야에서 기술적 우위를 점하는 열쇠였던 것이다.⁹⁴⁾ 그리고 자동

89) 같은 책, 277-78면; Carneal, *Conquer*, 243-44면; Hijiya, *The De Forests*, 393면.

90) De Forest, *Father*, 292-95면; Carneal, *Conquer*, 245면. 이 발견은 이후 암스트롱(Edwin H. Armstrong)이 1913년 1월 31일 그의 피드백 회로를 완성함으로써 그 의미가 확실해 졌고, 이것은 이후 피드백 회로의 우선권에 대한 20여년 간의 치열한 논쟁으로 비화되었다. 이에 대해서는 Maclaurin, *Invention and Innovation*, 78-79면을 참조할 것. 사실 오디온의 기술적 중요성은 검파, 증폭, 그리고 발전의 세 가지 작동을 한다는 데에 있다. 이러한 기능으로 말미암아 3극진공관의 개발은 곧 전자공학의 시작으로도 평가할 수 있는 것이다.

91) Bell Telephone Company는 1877년 7월 9일에 창립되었고, 1885년 자회사로 American Telephone and Telegraph Company를 설립하였다. AT&T는 뉴욕주법에 의해 세워졌기 때문에 자본의 동원이 쉬웠고 급성장하였다. 이내 AT&T는 Bell System의 모회사(holding company)로 자리잡게 되었다. 드 포리스트가 1900년에 들어갔던 웨스턴 일렉트릭은 바로 이 회사의 통신 장비들을 생산하는 회사였다. 이러한 초기 ‘벨체계’에 대해서는 Peter Temin, *The Fall of Bell System* (New York: Cambridge University Press, 1987)의 제1장을 참조할 것.

92) 한 가지 재미있는 사실은 당시 GE는 물론 Bell도 자신들의 연구소에서 직접적 연구를 하였지만, 경쟁사들을 물리치고 기술적 우위를 점하기 위해 많은 특허들을 사들이기도 했다는 점이다. 당시 미국의 반독점법 때문에 합병을 통한 독점적 지위를 유지하기 어려웠던 대기업들은 이러한 기술적 우위를 점함으로써 자신들의 독점적인 지위를 계속적으로 유지할 수 있으리라 생각하였다.

93) Reich, *The Making of American Industrial Research*, 157면. 자동중계장치의 간단한 역사와 자동중계장치가 갖추어야 할 요건들에 대해서는 Bancroft Gherardi and Frank B. Jewett, “Telephone Repeaters”, *Proceedings of the AIEE*, Vol. 38, No. 2 (1919), 1255-1313면을 참조할 것.

중계장치의 문제를 타개할 수 있는 열쇠는 바로 ‘전자의 방출’을 이용하는 것이었다.

이때 AT&T 안에서 전자방출의 기술적 가능성을 안 사람은 1902년 박사학위를 받고 MIT에서 전임강사로 재직했으며 최신 물리이론에도 밝았던 연구개발 담당 책임자 주윳(Frank Jewett)이었다.⁹⁵⁾ 주윳은 이 연구를 위해서는 최신 물리이론에 능통하면서 실용적인 일을 잘 할 수 있는 ‘숙련된 물리학자’를 찾아야 한다고 결론을 내리고 증폭기 연구를 전담할 연구실 설립을 추진하였다.⁹⁶⁾ 1911년 주윳은 ‘숙련된 물리학자’로 아놀드(Harold D. Arnold, 1883-1933)를 고용하는 데 성공하였다. 아놀드는 시카고대학에서 당시 미국 최고의 실험물리학자였던 밀리칸(Robert A. Millikan, 1868-1953) 아래에서 ‘새로운 물리학’을 공부하였으며, 밀리칸의 추천에 의해서 AT&T의 연구소로 옮겨 온 사람이었다.⁹⁷⁾ 주윳과 카티 그리고 아놀드는 증폭기를 연구하는 데 수은증기관(mercury-vapor tube)을 이용하기로 결정하고, 아놀드가 이에 대해서 집중적으로 연구하였다. 1년 가량의 연구 끝에 1912년 아놀드는 수은증기관을 사용한 증폭기를 개발하였다.⁹⁸⁾ 그러나 이 장치는 특성곡선의 왜곡이 심하고, 자주 보수를 해야 했고, 또한 특별한 시동과정(start-up)을 거쳐야만 했기 때문에 전화나 무선통신의 증폭기로 사용할 수가 없었다.

드 포리스트의 오디온이 AT&T의 연구자들의 주목을 끈 것이 바로 이때였다. 드 포리스트의 오랜 친구였던 스톤(John S. Stone)은 당시 AT&T의 기술자문으로 오디온의 증폭작용에 대해 알고있었으므로 1912년 10월 주윳에게 드 포리스트의 발명품을 소개하였다.⁹⁹⁾ 아놀드와 주윳은 드 포리스트의 오디온이 1/100와트 정도의 출력밖에 낼 수 없었지만 양전극 사이에 설치한 그리드 때문에 전자식 자동중계장치의 문제를 푸는 열쇠가 되리라는 것을 알았다. 즉 그리드가 필라멘트에서 방출되는 전자를 효과적으로 제어해서 오디온이 전화 자동중계장치에 알맞은 증폭기로 기능

94) 1909년 4월에 작성한 보고서에서 당시 AT&T의 엔지니어였던 카티(John J. Carty)는 새로운 전자식 자동중계장치의 중요성에 대해서 다음과 같이 언급하고 있다. “..... 그러므로 성공적인 전화 자동중계장치는 우리의 유선전화사업에 유용하게 사용될 수 있을 뿐만 아니라 무선통신기술에 있어서도 우리가 이 분야를 통제할 수 있는 위치에 놓이게 해 줄 것이다.” John J. Carty, “Additional Force Required - Engineer”, 8 April 1904, in Federal Communications Commission, *Investigation of the Telephone Industry* (Washington, D.C., 1939), 189-90면. Reich, *The Making of American Industrial Research*, 158면에서 재인용.

95) 주윳에 대해서는 Oliver Buckley, “Frank Jewett”, National Academy of Sciences Biographical Memories 27 (1952)을 참조할 것.

96) Reich, *The Making of American Industrial Research*, 159면. 1909년부터 1911년 사이에 연구실을 위한 기금이 조성되었고, 1911년 이를 조직한 Research Branch가 구성되었는데, 이 연구분과는 회사 수뇌부의 전폭적인 지원을 받았다. 연구분과는 두 가지의 주요한 프로젝트를 가지고 있었다. 하나는 전자증폭기를 개발하는 것이었고, 다른 하나는 한 개의 전화선을 통해 서로 반대방향으로 동시에 통신이 가능한 duplex telephone cable을 개발하는 것이었다.

97) M. D. Fagen, ed., *A History of Engineering and Science in the Bell System: The Early Years (1875-1925)* (Bell Telephone Laboratories, 1975), 258면. 아놀드는 처음에 Bell System에 사용되던 장비들을 생산하던 Western Electric의 연구부서인 Research Branch에서 전신에 대한 연구를 맡았었다. 이후 아놀드는 1925년 설립되는 Bell Laboratory의 초대 소장이 되었다. 아놀드의 삶과 과학적 업적에 대한 자세한 사항은 Charles Süsskind, “Arnold, Harold De Forest”, *Dictionary of Scientific Biography*, Vol. I, 292-3면을 참조할 것.

98) H. D. Arnold, US Patents 1118172 (1912특허출원, 1914년 획득) [여기서부터 (1912/1914)로 표기]; 1118173 (1912/1914); 1118174 (1912/1914); 1118175 (1912/1914); J. W. Emling, “The Telephone Transmission - The Wire Plant”, in Fagan ed., *History of Engineering and Science in the Bell System*, 258면; Reich, *The Making of American Industrial Research*, 160면.

99) Reich, *The Making of American Industrial Research*, 161면.

할 수 있다고 생각하였던 것이다.

하지만 드 포리스트의 오디온이 효과적인 증폭기로 기능하는 데에는 여전히 한계가 있었는데, 그 이유는 바로 고진공으로 만들어지지 않았기 때문이었다. 저진공상태의 3극진공관은 대체로 세 가지의 문제를 안고 있었다. 우선 전자의 흐름이 튜브 속에 남아있던 이온화된 기체에 의해서 방해 받아 증폭률이 좋지 못했다. 두번째 문제는 출력과 관련된 수명 문제였다. 출력을 높일 경우 내부의 기체 때문에 “blue haze”현상이 생겨 작동이 되지 않아 출력에 한계가 있었고, 진공관을 더 이상 사용할 수 없었다. 마지막으로 특성 곡선의 문제를 들 수 있다. 증폭은 단순한 검파와는 달리 입력신호의 파형의 모양을 왜곡됨이 없이 그대로 전달할 수 있어야 한다. 그런데 여분 기체의 존재는 이 파형의 모양을 왜곡시켰던 것이다.

오디온에 대한 특허를 사들인 AT&T는 아놀드가 주축이 되어 곧바로 이러한 문제의 해결에 착수하였다. 아놀드는 우선 오디온의 작동원리를 연구하기 시작했고, 다른 연구원들은 아놀드의 지도하에 체계적인 연구를 수행하였다.¹⁰⁰⁾ 연구에 착수한지 약 한 달 뒤 아놀드의 연구그룹은 오디온이 이온화된 기체가 아니라 필라멘트에서 방출되는 전자에 의해서 작동함을 확인하였다. 아놀드는 오디온에서 일어나는 ‘푸른 안개’가 튜브 내부에 남아있는 여분 기체에 의한 것임을 발견하고, 오디온을 고진공으로 만들어야 특성곡선의 뒤틀림이나 ‘푸른 안개’ 현상, 그리고 수명의 문제 등이 해결될 것이라고 결론을 내렸다. 따라서 이들에게 남은 문제는 고진공을 얻어내는 방법이었으며 이 때문에 AT&T는 1913년 4월에 독일로부터 개데분자진공펌프(Gaede molecular vacuum pump)를 들여왔다. 아놀드그룹은 이 고성능 진공펌프를 이용하여 10-5mm Hg 정도의 고진공을 얻어서, 오디온이 순수한 전자의 방출에 의해서만 작동할 수 있도록 만들었다.¹⁰¹⁾

또한 아놀드 그룹은 오디온에 사용되었던 필라멘트를 개량하는 작업도 수행하였다. 드 포리스트에게 있어서 필라멘트는 유리구 내부의 기체를 가열하는 것이었기 때문에 고온에 잘 견디는 텅스텐이나 탄탈륨 필라멘트가 적격이었지만 필라멘트를 ‘전자를 방출하는 도구’로 생각한 아놀드에게는 더 이상 탄탈륨 필라멘트를 사용할 이유는 없었으며 전자의 방출이 용이한 필라멘트가 필요하였다. 아놀드는 드 포리스트가 사용한 탄탈륨 필라멘트 대신 1904년 독일의 물리학자 베넬트(Arthur Wehnelt)가 개발한 산화막을 입힌 필라멘트(oxide-coated filament)를 사용하여 필라멘트의 전압을 높이지 않고도 많은 전자를 방출할 수 있도록 만들었다.¹⁰²⁾ 탄탈륨 필라멘트는 상당한 고온이 되어야 충분한 전자를 방출할 수 있었기 때문에 많은 전력을 소비하였고 너무 빨리 타버리는 문제가 있었는데, 베넬트 필라멘트는 저온에서도 많은 전자를 방출할 수 있었기 때문에 오디온의 수명이 대폭적으로 늘어나 약 1000시간 가량 사용할 수 있게 되었다. 결국 아놀드의 연구그룹은 베넬트 필라멘트를 사용함으로써 전자방출을 손쉽게 만든 동시에 진공관의 수명을 대폭 확장시켰던 것이다.

이상에서 살펴본 바와 같이 드 포리스트는 1907년 이후에도 계속해서 자신의 오디온에 이온화

100) 같은 책, 161면.

101) Lloyd Espenschied, “Progress in Understanding the Audion”, unpub. MS (1948), 3면; Reich, *The Making of American Industrial Research*, 163면에서 재인용. 개데분자진공펌프는 독일의 개데가 분자의 확산현상을 이용한 것으로 이 펌프는 이전의 기계식 진공펌프보다 훨씬 더 높은 진공을 얻을 수 있었다. 개데펌프의 원리와 자세한 구조에 대해서는 Irving Langmuir, “The Condensation Pump: An Improved Form of High Vacuum Pump”, *General Electric Review*, Vol. 10, No. 12 (1916), 1060-1071면을 참조할 것.

102) Tyne, *Saga of Vacuum Tube*, 90면. 구체적인 내용은 Harold D. Arnold, “Phenomena in Oxide-Coated Filament Electron Tubes”, *Physical Review* 16 (1920)을 참조할 것.

된 기체가 존재해야만 한다는 생각에 집착하고 있었으며 오디온을 고진공으로 만들려는 시도를 하지 않았다. 따라서 드 포리스트의 한계이자 오디온 개량의 핵심적 문제였던 고진공 문제의 해결을 위한 노력은 오디온의 정확한 작동원리와 전자기론을 깨우치고 있던 아놀드와 같은 신세대 과학자들의 손으로 넘어갔다.¹⁰³⁾ 이들은 리차드슨의 전자기론에 기반하여 열전자 방출에 대한 체계적인 연구를 수행하였고, 마침내 진공관 내부에 이온화된 기체가 불필요함을 밝혔던 것이다.

그러면 왜 드 포리스트는 리차드슨이 전자기론을 발표한 1903년 이후 심지어 1912,3년까지도 계속해서 오디온에 ‘이온화된 기체가 남아있어야된다’고 생각했을까? 이 문제에 대하여 곰곰히 생각해 보면 대체로 두 가지 요인을 꼽을 수 있다. 우선 그의 실험과정에 주목할 기율일 필요가 있다. 앞서 살펴본 바와 같이 드 포리스트는 1899년 자신의 박사학위 논문에서부터 이온화된 기체를 사용하였으며, 그 이후의 검파기에 관한 연구들에서도 계속 이온화된 기체를 이용하였다. 특히 1900년에서 1905년에 걸쳐 진행된 전해질검파기와 불꽃검파기에 대한 연구는 그에게 ‘이온의 흐름’을 제어한다는 생각을 강하게 심어주었다. 따라서 그가 그리드 오디온을 이전의 검파기들의 연장선에서 이해했음을 감안하면, 당연히 그에게는 전하의 운반체가 전자가 아니라 이온화된 기체로 생각되었을 것이다.

두번째로 생각할 수 있는 것은 당시 미국과 유럽의 과학계에서는 ‘진공관 내부에 여분의 기체가 있어야한다’는 생각이 더 자연스럽게 받아들여졌다는 점이다. 1903년부터 리차드슨의 열전류 이론(theory of thermionic current)은 많은 과학자들의 연구 대상이 되었다. 윌슨(H. A. Wilson)은 백금이 질산이나 산소에 싸여있을 때 전자를 훨씬 많이 방출함을 알았고, 베넬트(Arthur Wehnelt)는 백금에 석회를 물렸을 때 전자의 방출이 더 수월함을 밝혔다.¹⁰⁴⁾ 그런데 대부분의 연구자들의 얻은 중요한 결론 중의 하나는 ‘가열된 금속에서 전자가 방출되기 위해서는 여분의 기체가 필요하다’는 것이었다. 예를 들어 프링(Pring)과 파커(Parker)는 “가열된 탄소로부터 얻어지는 전류는 탄소 자체에서 방출되는 전자에 의한 것이라고 볼 수 없으며, 그것은 아마도 고온에서 탄소 혹은 탄소 속에 섞여있는 불순물이 탄소 주위의 기체와 상호작용하기 때문”이라 결론지었다. 또 프레덴하겐(Fredenhagen)과 쿠스터(Kuster)는 “칼륨에서의 광전자방출(photoelectric electron emission)이나 열전자 방출(thermionic electron emission)은 기체의 존재에 전적으로 의존한다”고 주장하였다.¹⁰⁵⁾ 뿐만 아니라 비트만(Wiedmann)과 할바흐스(Hallwachs)도 광전자 방출에 대한 자세한 실험을 통해 “기체의 존재는 광전자방출에 있어서 필수적이다”고 결론을 내렸다.¹⁰⁶⁾ 이와같이 1913,14년 경에 이르러서도 대부분의 과학자들은 가열된 금속에서 전자방출이 일어나기 위해서는 금속 주위에 여분의 기체가 존재해야만 한다고 생각하였던 것이다. 따라서 진공

103) 물론 3극진공관과 관련한 또 다른 주요 발명인 1911,2년 경의 캐스캐이드형 증폭기나 피드백 발진기도 그의 손에 의해 이루어 졌다. 하지만 이온화된 기체에 대한 역할에 주목해서 오디온을 실용화할 수 있는 수준으로 개량하는 작업을 검토해 보면 분명히 이온화된 기체에 대한 드 포리스트의 계속된 집착은 그의 한계로서 작용하는 것을 볼 수 있다. 또한 이러한 사실은 그가 오디온의 발명과정에서 이온화된 기체를 얼마나 중요시했는가를 단적으로 보여주는 것이기도 하다.

104) H. A. Wilson, *Philosophical Transactions* 202 (1903), 243면; Arthur Wehnelt, *Annalen Physics* 14 (1904), 425; *Philosophical Magazine* 10 (1905), 80면. 이외에도 Soddy, *Phys. Zeit.* 9 (1908), 8면; Fredenhagen, *Verh. deut. phys. Ges.* 14 (1912), 384면; Pring and Parker, *Phil. Mag.* 23 (1912), 192면; Pohl and Prinsheim, *Phys. Zeit.* 14 (1913), 1113면 등 당시의 많은 학자들은 금속에서의 전자방출에 관한 일련의 실험들을 수행하여 비슷한 결과를 얻었다. 이들은 백금이나 탄소 뿐만 아니라 오스뮴, 나트륨, 칼륨 등 많은 원소들에 대한 실험을 통하여 각각의 구체적인 결과들을 얻어내었다.

105) Fredenhagen and Kuster, *Phys. Zeit.* 15 (1914), 65, 68면.

106) Weidmann and Hallwachs, *Ber. d. Deut. Phys. Ges.* 16 (1914), 107면.

관이 그 내부에 존재하는 이온화된 기체에 의해 작동하는 것이 아니라 탄소필라멘트에서 방출되는 전자에 의한 것이라고 생각한 사람들도 ‘여분의 기체는 존재해야 한다’라고 생각하였고, 완전한 진공에서 전자방출을 고려하지 않았다. 이러한 사실들을 염두에 두면 당시 과학계에서는 전자방출이 일어나기 위해서는 필라멘트 주위에 기체가 존재해야 한다는 생각이 더욱 일반적이었으며 아놀드와 랭미어의 실험 결과는 오히려 ‘새로운’ 사실이었던 셈이다. 이러한 상황에서 드 포리스트가 여분의 기체가 진공관 내부에 남아있어야 한다는 생각한 것은 어쩌면 너무도 당연하였던 것이다.

5. 요약 및 결론

지금까지 필자는 이온화된 기체에 초점을 맞추어 드 포리스트의 오디온의 발명과정에 대해서 살펴보면서 오디온이 플레밍 밸브의 단순한 모방이 아니라 드 포리스트의 독자적 연구에서 비롯되었음을 밝혔다. 그 내용을 간략하게 요약해 보면 다음과 같다.

드 포리스트의 무선통신 연구는 마르코니체계에서 사용되던 검파기보다 감도가 더욱 뛰어나고 음성신호도 보낼 수 있는 새로운 검파기를 찾는 데서 비롯되었다. 그는 1899년 박사학위 논문에서부터 이온화된 기체를 이용하여 전자기파를 검출하는 실험을 하였으며, 이후 계속된 불꽃 검파기나 전해질 검파기에 대한 연구들을 통해 이온화된 기체를 이용하면 무선통신에 사용할 수 있는 효과적인 검파장치를 만들 수 있다고 생각하였다. 특히 전해질 검파기와 불꽃검파기는 실용적, 상업적으로 성공을 거두지는 못했지만 드 포리스트로 하여금 전자기 신호가 ‘이온의 흐름을 제어한다’는 생각을 깊게 심어주었으며, 이러한 일련의 연구들이 결실을 맺은 것이 바로 1906년에 발명한 그리드 오디온 검파기였다.

플레밍의 밸브가 고주파전류를 ‘정류’하는 장치였다면, 드 포리스트의 오디온은 1차회로의 미약한 전류로 2차회로의 큰 전류를 제어하는 방식의 ‘릴레이’였다. 그리고 드 포리스트의 오디온의 작동원리에 대한 이해는 오늘날 전자기론에 입각하여 삼극진공관의 증폭원리를 생각할 때는 명백한 잘못이지만, 1906년 당시의 오디온은 실제로 이온화된 기체에도 의존하였기 때문에 완전히 잘못된 것은 아니었다. 결국 오디온의 개발은 단순히 플레밍 밸브의 개량이라기보다는 드 포리스트의 일관된 연구의 성과로 판단되며, 이온화된 기체에 대한 그의 관심은 가장 중요한 발명의 동인이었다. 드 포리스트는 1907년 이후에도 자신의 장치의 전하의 운반체가 이온화된 기체라고 생각하였는데 이로 인해 고진공으로의 개량연구에서는 중심부에서 물러나야만 했다. 그리고 고진공으로의 개량작업은 전자기론에 익숙해 있던 새로운 과학자들에 의해 주도되었다.

한편 오디온의 개량작업은 어떤 기술이 발명의 단계에서 실용화되는 단계로 진입할 때 애초의 발명의도와는 다른 양상으로 발전되어 나가기도 한다는 것을 잘 보여주는 예이기도 하다. 오디온의 경우 처음에는 무선통신에 사용할 효과적인 검파기를 발명하려는 노력에서 시작되었으나 1913년 이후 실용화단계에 접어들어서면서 검파기뿐만 아니라 증폭기, 연속파 발진기로까지 사용되어 전파(혹은 전자)공학 전체에서 가장 중요한 장치가 되었다. 어떤 새로운 기술이 사회적 파급효과를 일으키기까지는 대체로 발명-개발-혁신의 세단계를 거친다고 말하여진다.¹⁰⁷⁾ 그런데 이러한

107) Stephen J. Kline and Nathan Rosenberg, "An Overview of Innovation" in R. Landau and N. Rosenberg, eds., *The Positive Sum Strategy: Harnessing Technology for Economic Growth* (Washington D. C.: National Academy Press, 1986), 285-8면. 이 글에서 클라인과 로젠버그는 혁신의 선형모델(연구-개발-생산-판매)을 비판하면서 혁신의 과정을 구성하는 네 단계가 단순히 선형적이지만은

과정을 거치면서—오디온의 발전과정에서 볼 수 있듯이—발명당시에 의도된 것과는 전혀 다른 결과를 나타내거나 훨씬 더 광범위한 결과를 나타내기도 한다. 이런면에서 우리는 1907년 이후의 삼극진공관 개량과정, 나아가 1913년 이후에 삼극진공관이 증폭기와 연속파의 발진기로서 광범위하게 사용되는 과정을 살펴봄으로써 새로운 기술이 어떠한 과정을 거쳐 산업에 적용되며, 어떻게 발명 당시와는 사뭇 다른 행로를 밟게 되는가를 알 수 있는 것이다.

또한 AT&T에서의 ‘진공관 연구’는 20세기 초반의 과학이론에 기반한 체계적인 산업적 연구의 한 전형으로서 좋은 연구사례를 제공하고 있다. 일찌기 와이즈(George Wise)는 제너럴 일렉트릭에서의 전등의 개량과 관련된 연구에서 전문과학자들의 새로운 역할에 대해 다루었다.¹⁰⁸⁾ 오디온의 개량과정에서도 잘 조직된 연구소에서의 전문과학자들의 역할이 드 포리스트와 같은 ‘독립적 발명가’와는 사뭇 다르다는 것을 알 수 있다.¹⁰⁹⁾ 이러한 것은 AT&T의 아놀드, 주윳, GE의 랭미어, 스미스(Lloyd P. Smith), 반 데르 비즐(H. J. van der Bijl)과 같은 이들을 살펴으로써 가늠할 것이다.

않다고 비판하면서 자신들의 chain-linked model을 제시하였다. 그러나 이들도 혁신과정을 위의 네 단계로 개념화시키는 데는 반대하지 않는 것으로 보인다.

108) George Wise, "A New Role for Professional Scientists in Industry: Industrial Research at General Electric, 1900-1916", *Technology and Culture* 21 (1980), 408-29면.

109) independent inventor에 대한 자세한 논의는 Hughes, *American Genesis*, 138-83면을 참조할 것.