

진공기술 발전의 역사

정 광 화

한국표준과학연구원, 진공연구소
(1992년 9월 21일 접수)

1. 진공이란?

진공(眞空)의 한문 뜻 그대로는 아무것도 없이 비어 있는 공의 상태를 의미하며 진공을 뜻하는 영어 vacuum 또한 비어 있음을 뜻하는 그리스어 vacua로부터 유래된 말이다. 진공을 정의할 때에는 일정한 공간을 설정하고 그 공간내부가 비어 있는 상태를 논하게 된다. 공간내에 전혀 아무 물질도 없는 절대적 진공상태는 자연계에는 존재하지 않으므로 실제로는 그 공간을 채운 가스의 압력이 대기압보다 낮을 때를 진공이라 정의하며 공간내의 가스양을 나타내는 진공의 정도는 압력으로 나타낸다.

지구상에는 인위적으로 발생시킨 것 말고는 고진공상태가 존재하지 않아 그리스 사람들은 자연은 진공을 무서워한다고까지 표현하였으나 실제 천우주로 눈을 돌려 보면 우주는 거의 대부분 진공상태인 것을 알 수 있다. 스페이스 셔틀(space shuttle)이 위성을 발사하는 해발 약 120 km 지점은 대략 10^{-4} mbar, 우리별 1호가 도는 1300 km 궤도의 진공도는 약 10^{-10} mbar, 정지위성궤도 36,000 km 지점의 진공도는 10^{-13} mbar 정도, 별과 별사이 공간의 압력은 대략 10^{-16} mbar이며 은하계와 은하계 사이는 평균 1 m^3 의 체적에 양자가 한개 밖에 없는 약 10^{-22} mbar(10^{-20} Pa) 정도의 진공도를 가진다.

실험이나 생산 등의 응용을 위해서는 지상에 진공 환경을 조성하여야 하는데 지상에서는 자연진공이 없으므로 진공용기(vacuum chamber)를 사용하여 주변으로부터 일정공간을 구분시키고 이 용기로부터 각종 펌프를 이용하여 가스를 용기밖으로 배출시킴으로써 인공적인 진공상태를 얻는다. 진공의 정도는 용기에 남아 있는 가스의 양에 비례하며 압력에 의하여 표시한다. 진공기술이라 함은 인공적인 진공을

발생, 측정 그리고 응용하는 기술을 총칭한다. 역사적으로 진공기술의 발전은 과학기술의 혁명을 가져다 주어왔으며 이 역할은 앞으로도 계속될 것이다. 여기에서는 간단하게 진공기술 발전의 역사와 그것이 인류 과학기술 발전에 끼친 영향을 고찰해 보기로 한다.

2. 진공기술의 태동

아리스토텔레스를 위시한 그리스의 학자들은 자연에는 진공이 없다고 생각하였으며 17세기 위대한 철학자 데카르트까지도 진공의 존재를 부정하였으며 이러한 부정적인 생각은 오랫동안 진공과학의 발전을 방해하였다. 그러나 많은 공학자들은 물뿜프나 사이 폰이 물을 10 m 이상 끌어 올릴 수 없음을 알고 있었으며 진공의 존재와 대기압의 영향을 어렵듯이 짐작하고 있었다. 1640년 이태리의 Gasparo Berti는 물을 가득 채운 35 ft(10.6 m) 높이의 납튜브를 물통에 거꾸로 세워 납튜브의 물이 어느정도 내려오다 그치고 튜브윗면에 공간을 남기게 하므로써 최초로 인공적 진공을 만드는데 성공하였다(그림 1). 그러나 그의 실험은 아직도 사람들의 진공에 대한 편견을 씻어주지는 못했다.

1643년 Evangelista Torricelli는 수은과 한쪽 끝이 막힌 유리관을 사용하여 Berti와 똑같은 실험을 행하였다. 즉 유리관에 수은을 가득 채우고 역시 수은을 채운 그릇에 거꾸로 세워 놓으면 유리관의 수은이 어느정도 내려 오다가 멈추고 반복된 실험에서도 수은의 높이는 항상 일정하게 760 mm임을 발견하였다. 이 현상은 비이커 수은면에 작용하는 대기압 때문으로 생각되었으며 이 생각은 1650년 불란서의 파스칼의 제안에 의하여 Perier가 1000 m 높이의 Puy de Dome

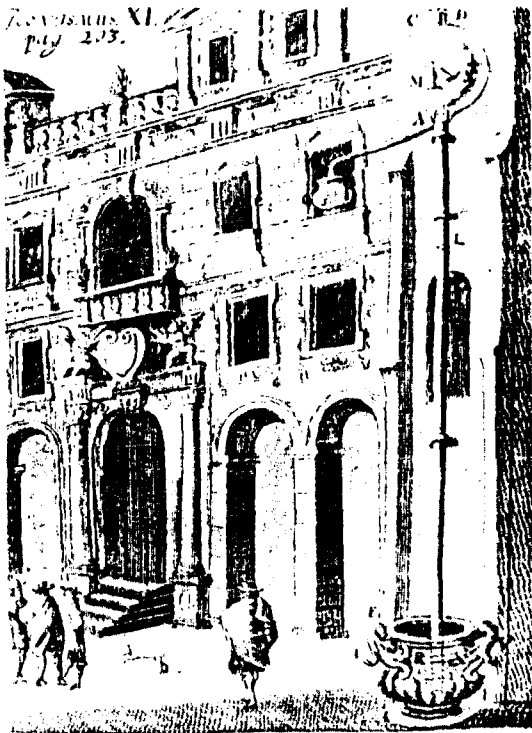


그림 1. Berti의 실험장치.

산에 올라가서 같은 실험을 했을 때 수은주의 높이가 750 mm 밖에 안됨을 확인하므로써 증명되었다. 토리첼리의 실험 이후 많은 진공의 특성들이 연구되었다.

3. Otto von Guericke의 실험과 기체운동학 (Gas Kinematics)의 발전

독일의 Otto von Guericke는 air pump를 발명하므로써 17세기 과학에 많은 공헌을 하였다. 그는 그가 발명한 펌프를 사용하여 1654년 그 유명한 “마그데부르크 반구(Magdeburg hemisphere)” 실험을 행하였다(그림 2). 이것은 두 개의 반구를 붙여 구성한 지름 119 cm의 구에서 공기를 뽑아내 진공을 만들면 한쪽에 8마리씩 16마리의 말로 반구들을 끌어 당겨도 떼어낼 수 없었던 반면 간단히 코크만 열어 구속에 공기를 주입시키면 반구들이 저절로 떨어짐을 보인 실험이다.

이 실험은 곧 전 유럽에 알려졌으며 수많은 사람들이 이와 관련된 실험을 행하였다. 대표적인 사람은 영국의 Robert Boyle로서 그는 Guericke 펌프를 여러

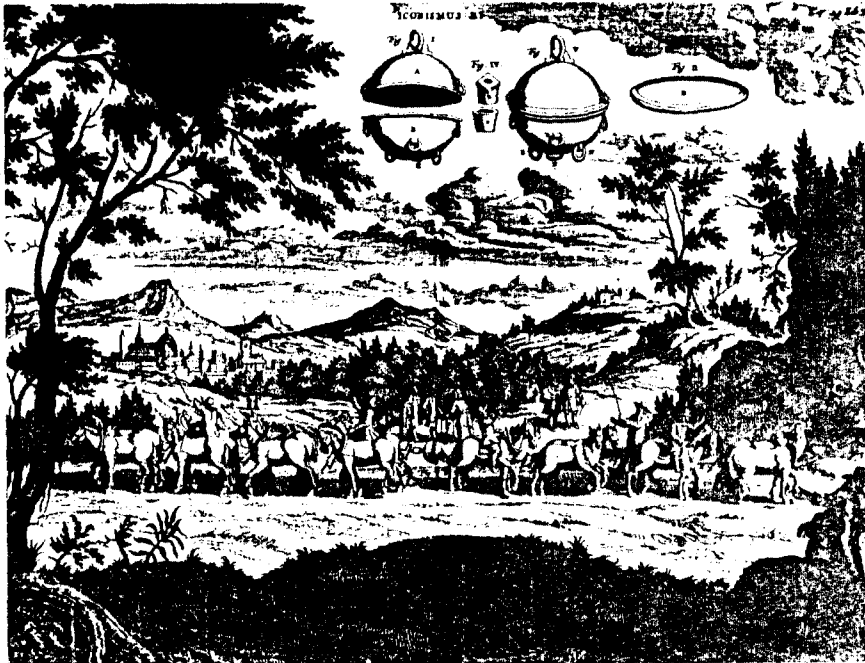


그림 2. Otto von Guericke의 마그데부르크 반구실험장면.

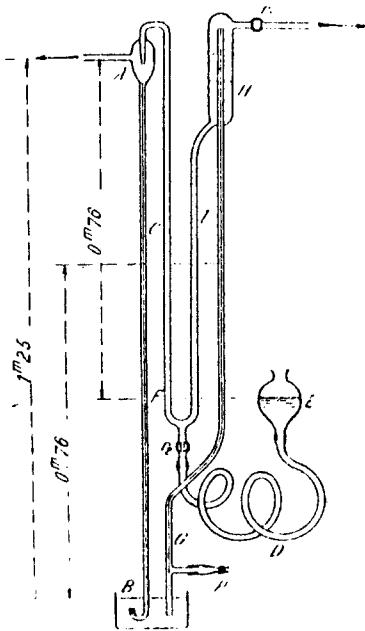


그림 3. Geissler-Sprengel 펌프; A로 분사되는 수은은 B로 떨어지면서 공기를 배기시킨다.

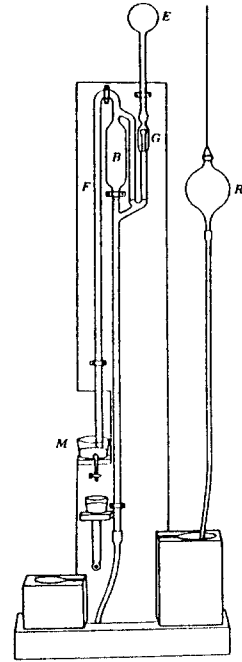


그림 4. Toepler 펌프; E에서 B로 확산된 공기를 R을 들어올려 압축시키면 F와 M을 통하여 배기된다.

면에서 개선하였고 그 펌프를 이용하여 기체의 특성을 연구한 결과 1662년 일정한 온도에서는 기체의 압력과 부피의 곱은 일정하다는 보일의 법칙을 발견하였다. 이후 1850년대까지는 샤를(Charles), 게이뤼삭(Gay-Lusac), 베르누이(Bernoulli), 아보가드로(Avogadro), 맥스웰(Maxwell), 볼츠만(Boltzmann) 등에 의해 기체에 대한 이론적 실험적 기초지식이 확립되었다. 이들 기체운동법칙은 진공의 기초를 이해하는데 매우 중요한 역할을 하였다.

Guericke의 실험은 특히 대기압에 의한 힘을 보여준 것으로서 많은 창의적인 공학자들이 응용방안을 생각해 내었다. 1712년 Thomas Newcomen은 “atmospheric pumping engine”을 개발하였는데 이것은 광산이나 기타 장소에서 양수작업을 하는데 쓰였다. 또 1846년 Brunel이 만든 “atmospheric railways” 기차는 4마일 구간을 시속 64마일로 달렸다. 비슷한 원리의 기관인 “pneumatic-vacuum transport system”이 1886년 British Post Office에 설치되어 우편물 이동에 사용되었고 1897년 뉴욕, 보스턴, 필라델피아 우체국에도 설치되었다. 이 시스템은 지금도 런던과 파리에서는 사용되고 있다.

4. 19세기 말(1860~1900) : 초기 진공 기술과 기초물리 및 화학의 탄생

이 무렵까지 진공은 주로 피스톤 실린더를 사용하는 Guericke식 air pump이고 고진공을 얻는 방법은 토리첼리의 방법이였으며 진공측정계기는 토리첼리관이었다. 그런데 1850년 수은 분사 펌프인 Geissler-Toepler 펌프(그림 3), 1865년 수은을 피스톤으로 사용하는 Sprengel 펌프(그림 4) 그리고 1874년 맥레오드 게이지(McLeod Gauge 그림 5)가 개발되므로써 19세기 후반의 진공발생 및 진단의 능력은 10^{-4} torr 수준에 도달하였다. 이 당시 실험들은 수은 펌프를 이용하고 용기는 모두 유리였으며 백금선을 유리에 접합한 것을 electrical feedthrough로 사용하였다. 접합(sealing)은 주로 왁스(wax), 탄성글루 또는 고무를 사용하였으며 발브들은 그리스 칠한 유리, 황동 스톱코크 또는 수은 U자관을 이용하였다.

현재와 비교하여 엄청나게 비효율적이었지만 이 진공기술은 현대 물리학 및 화학을 탄생시켰다. 1879년 Crookes는 일련의 방전실험을 수행하여 cathod

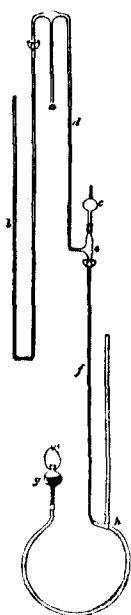


그림 5. 원래의 맥레오드 게이지.

ray들이 음전하를 띤 입자들에 의한 것임을 밝혔으며 곧 이어 Elster Geitel은 철사를 가열하면 온도에 따라 음극선 발생량이 급격히 증가함을 발견하였으며 Wehnelt는 산화금속이 더 효과적임을 발견하였다. 1898년 J.J. Thomson은 음극선의 입자들이 전자(electron)임을 밝히므로써 전자발견이라는 대업을 이룩하였다. 1895년 W.K. Roentgen은 X-선을 발견하였다. 1890년 William Ramsay와 Lord Rayleigh는 아르곤을 비롯한 희귀가스들을 발견, 분리하고 그들의 특성을 조사하였다.

공기의 액화는 1885년에 이루어졌지만 이 액체공기를 담을 그릇은 없었다. 1892년 Dewar는 진공용기를 이용하여 액체공기통을 개발하였으니 지금도 액체질소통들은 발명자의 이름을 따서 그냥 듀아(Dewar)라고 부른다. 이 듀아의 발명은 극저온 물리학의 태동을 가능케 하였다. Dewar는 동시에 극저온 숯(cryogenically cooled charcoal)이 가스흡착능력이 뛰어나 펌프로도 사용될 수 있음을 발견하였다.

5. 에디슨의 백열등 발명

1879년 에디슨은 탄소 필라멘트를 사용한 백열등을 발명하였다. 그가 사용한 펌프는 Sprengel 펌프였는데

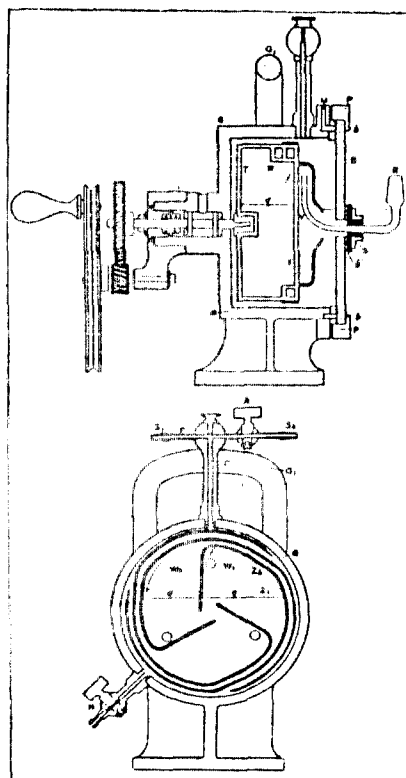


그림 6. Gaede가 개발한 수은 로타리 펌프.

배기속도는 4 cc/s에 불과하여 전구하나 배기시키는데 한사람이 붙어 5시간동안 수은주머니를 계속 들었다 내렸다 해야만 했다. 1896년 Malignani(Udine, Italy)가 게터로서 붉은 인을 전구안에 넣고 필라멘트가 가열됨에 따라 증발케 하는 방법을 도입하므로써 배기 시간은 1분으로 단축되었다. 곧 이어 2극 진공관(1902), 3극진공관(1905)이 개발되었고 1909년 텅스텐 필라멘트가 쓰이게 되면서 진공관 및 배열등의 수요는 급증하였고 생산성을 높이고 좀 더 수명이 긴 전구를 개발하기 위해서는 더 편하고 빠른 펌프와 더 나은 진공도가 요구되었다. 따라서 진공펌프 및 측정의 연구가 산업체를 중심으로 활발히 전개되었다.

6. 1900~1940년대 : 고진공기술 발전

Gaede가 로터리 수은 펌프를 발표한 것은 1905년의 일이었으며(그림 6), 이 펌프는 20 rpm에서 0.15 L/s의 배기속도를 가졌으며 7×10^{-5} torr까지 도달하였다.

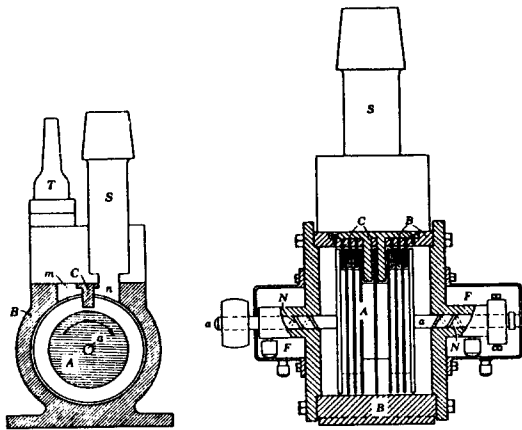


그림 7. Gaede가 개발한 분자펌프.

Gaede는 나아가서 1913년 molecular pump를 개발하였다(그림 7). 그러나 그 당시 고속회전체 가공기술이 워낙 뒤떨어져 있어 쓸만한 분자펌프의 제작은 50년을 더 기다려야 했다. Gaede는 곧 이어 1915년 확산펌프(diffusion pump)를 개발하였고(그림 8) 1916년 General Electric의 Irving Langmuir가 condensation diffusion pump를 개발하였다. 1906년 Marcello Pirani가 피라니 게이지를 개발하였다. 같은 해 von Bayer는 3극 진공관이 진공계기로 쓰일 수 있음을 발표하였으며 1916년 O.E. Buckley가 열음극 진공계이지(hot cathode ion gauge)를 개발하여 10^{-8} torr 영역까지 진공측정가능 영역을 넓혔다. 피라니 게이지, 확산펌프 그리고 이온게이지의 개발로 고진공기술이 시작되었다.

7. 진공기술의 산업에의 응용

1920년대부터 진공기술은 진공증류, 진공야금, 식품 및 의약품 제조 등 여러 분야에 응용되기 시작했으며 그에 따라 조작하기가 더 쉽고 더 견고하며 많은 양의 가스나 수분을 배기시킬 수 있는 기술이 요구되었다. 1928년 영국 Metropolitan-Vickers의 C.R. Burch가 낮은 증기압의 기름을 소개하므로써 진공기술발전의 중요한 전기를 마련하였으니 이후 특수용도를 제외하고는 진공펌프에 수은의 사용은 없어지고 대용량 펌프개발의 문이 열린다. 1929년부터 1937년 사이 Eastman Kodak사의 K.C.D. Hickman과 그 그룹은

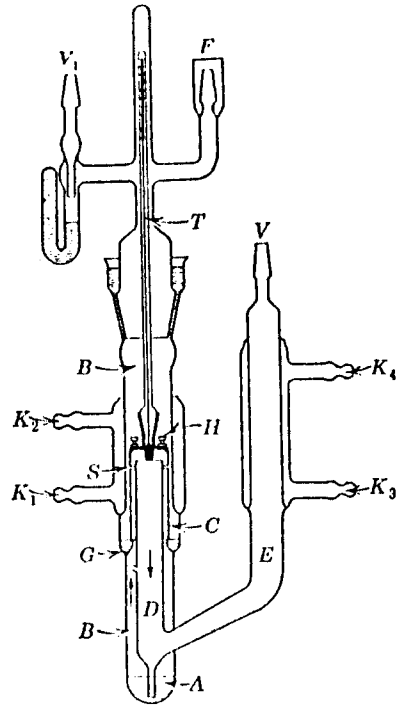


그림 8. Gaede가 개발한 확산펌프; F가 입구이고 V가 roughing 포트이다.

영화필름 피막의 진공증류를 연구하는 과정에서 기름확산펌프 구조를 계속 개선하여 냉각트랩 없이도 진공도를 5×10^{-8} torr까지 도달시켰다. 1935년 Gaede는 Gas Ballast Pump를 개발하였다. 1937년 F.M. Penning이 냉음극이온게이지를 개발하였다. 이 게이지는 발명자의 이름을 따서 페닝게이지라 불리며 10^{-6} torr가 측정하한선이며 압력에 따른 직선성이나빠 정확도는 떨어지지만 견고하고 단순하여 아직 까지도 여러 응용분야에 널리 쓰이고 있다. 이 당시 까지 정밀한 시스템 제작은 주로 유리로 되었기 때문에 유리나 금속선의 접합기술은 상당히 발전하였고 Kovar나 Fernico 등도 개발이 되어 있었으나 금속 재료의 발달은 되어 있지 않아 금속시스템 겉면에 에나멜이나 니스(Glyptal varnish)를 도포하였다.

8. 제 2차 세계대전과 진공기술

제 2차 세계대전은 진공기술의 발전에 큰 획을 그었다. 1941년 큰 가스부하를 다룰 수 있는 부스터 펌프

(booster pump)가 개발되어 전지의 마그네슘 생산 및 페니실린, 혈장 그리고 음식물 등의 진공건조에 사용되었다. 레이더 및 진공관들의 제작을 위해 각종 복잡한 진공봉입부품(sealed off vacuum devices)들의 제작기술이 개발되었다. 특히 중요한 기술은 세라믹과 금속의 봉합기술로서 전쟁 중에는 독일에서 쓰이다가 전후 집중적으로 발전되었다. 전쟁중 항공기들의 유압시스템에 쓰이는 고무 O-링들이 개발 규격화되어 있었으므로 이들이 그대로 진공시스템의 발브 및 부품연결에 사용되었다. 핵폭탄 제조를 위한 만하탄사업(Manhattan project)은 대단히 큰 규모의 진공시스템을 필요로 하였으며 따라서 대형 진공발브와 다단고속대용량(multi stage high speed high capacity) 금속유확산펌프(metal oil diffusion pump)들이 제작되었고 1943년에는 30인치짜리 펌프가 제작되어 Caultron electromagnetic isotope separation unit에 사용되었다. 이 사업도중 개발된 또 하나의 중요장비는 질량분석누설검출기(mass spectrometer leak detector)이다.

9. 초고진공기술의 발전

전후 진공기술 발전에 있어 가장 중요한 사건은 1950년의 Bayard-Alpert 이온게이지의 발명이다. 이 게이지의 발명으로 비로서 10^{-10} torr까지의 초고진공 측정이 가능하게 되었고 전후 상품화된 누설검출기와 더불어 초고진공 시스템을 진달할 수 있게 되므로써 초고진공기술 개발이 가능케 되었다. 초고진공기술은 발브 및 플랜지 등을 400°C 까지 구울 수 있어야 하므로 가스켓 재료로 알루미늄, 금, 구리 등 연한 금속재료와 여러 가지의 플랜지 타입이 제안되었다. 1962년 Varian의 W.R. Wheeler가 제안한 콘플랜플랜지(conflat flange)가 현재 초고진공시스템에 가장 보편적으로 사용되고 있다. 50년대에 TIG 용접(tungsten inert gas welding) 기술이 도입되었고 진공기술의 수요에 따라 용접기술은 더욱 발전하여 여러 복잡한 부분들의 용접이 가능해졌고 특히 고품위 벨로우즈가 제작되어 각종 조작기구(manipulator) 및 발브에 사용되었다. 1940년경부터 가스방전도중 가스가 배기된다는 사실과 이온게이지 특히 페닝게이지가 약간의 펄핑성질을 가짐이 알려져 왔다. 1953년 H.J.

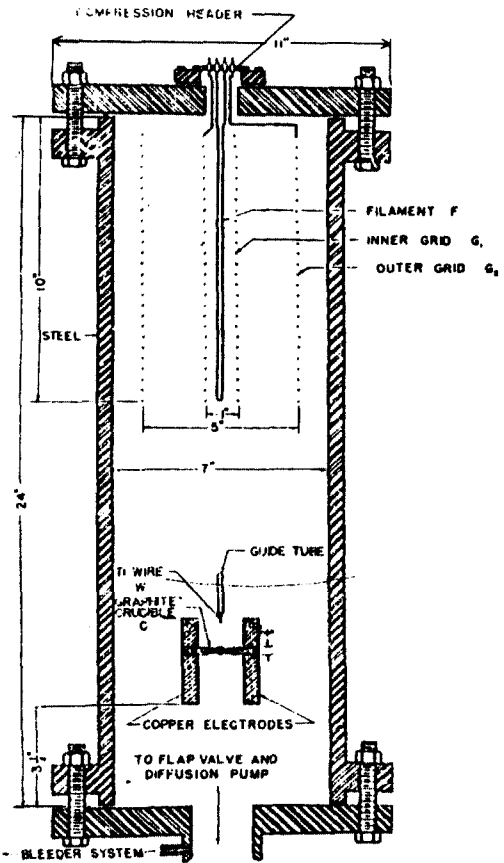


그림 9. 초기의 스파타 이온펌프.

Schwartz와 R.G. Herb가 티타늄 게터를 사용하는 스파타 이온펌프를 개발하였으며 많은 공학자들이 이온펌프의 성능을 선구적으로 계속 연구하였고 흡착펌프 등도 발전시켰다. 이온펌프의 등장으로 10^{-10} torr 이하의 깨끗한 진공의 도달이 가능해졌다.

10. 1960년 이후 : 거대 초고진공 시스템들 (우주환경실험, 가속기) 제작

1957년 10월 소련의 Sputnik의 발사로 촉발된 미 소간의 우주경쟁은 진공기술을 도약시킨다. 대규모의 우주환경 모의실험장치(space simulation chamber)에는 장치전체를 냉동시킴(cryogenic shroud)이 보편적이었고 여러 가지의 우주시험을 위해 새로운 펌프와 게이지 및 재료들의 개발이 빠른 속도로 진행되었다.

1959년 Gifford와 McMahon이 소형 헬륨 냉동기를 개발하므로써 크라이오 펌프(cryo pump) 실용화가 시작되었다. 전세계적으로 60년대부터 본격적으로 시작된 입자가속기의 제작에는 10^{-10} torr 이하의 거대 초고진공기술이 요구되어 많은 문제를 제기하여 펌프, 재료, 측정면의 기초연구가 실시되었으며 특히 CERN 그룹이 많은 기여를 하였다. 쿨배이온펌프(distributed ion pump)의 개념이 도입되었고 광여기탈착(photo induced desorption) 문제가 심각하게 연구되었다. 대형금속 게이트 발브(large all metal gate valve)가 개발되고 BA 이온게이지의 측정한계를 주는 X-선 효과에 대해 집중적인 연구가 수행되어 modulated ion gauge, extractor gauge 등이 개발되었다. 알루미늄 소재를 사용한 가속기 링이 곳곳에서 성공적으로 작동되고 있으며 우리나라에서 건설중인 포항 방사광 가속기도 알루미늄을 사용한다.

11. 반도체 산업의 발전과 진공산업

진공기술의 산업화에 가장 큰 역할을 한 것은 반도체산업이다. 지금까지의 반도체제작에 필요한 진공도는 그다지 높지 않았으나 복잡한 공정이 진공 중에서 이루어지므로 박막제작, 리소그라피, 시료조작이나 기타 여러 작동의 자동화 등 다양하고 집중적인 진공 응용기술의 발전을 가져왔다. 반도체 산업의 번성과 더불어 진공산업계가 급성장하였고 연계하여 마이크로전자공학(microelectronics), 반도체과학, 재료과학이 붐을 이루게 되었고 박막 및 표면의 미세 분석을 위해 전자, 이온 X-선 등의 고품질 선원을 요구하고 더 깨끗한 초고진공과 다양한 시료(sample)의 조작이 필요함에 따라 초고진공 부품들이 많이 개발되었고 다양한 응용기술이 발달되어 초박막 제조장비, 전자현미경류, 표면분석장비의 새로운 기종들이 숨가쁘게 개발되어 나오고 있다.

앞으로도 반도체 산업이 진공산업 및 진공기술의 발전을 이끌어갈 것은 틀림없다. 16 MDRAM의 제조에 이미 초고진공 공정의 필요성이 대두되고 있으며 스파터링, 이온주입, 에칭 등의 일련의 공정을 대기로 내음이 없이 진공 중에서 연속적으로 진행하도록 하는 멀티챔버(multi chamber) 이용이 늘고 있다. 깨끗하고 배기속도가 빠른 진공펌프가 요구되므로 크라이오 펌프의 이용이 늘어날 것으로 전망되며 뜨거운 진공(hot vacuum) 즉 레이저, 플라즈마, 고속 이온이나

분자등 뜨거운 입자를 제어 측정하는 기술이 요구될 것이다. 소재와 표면연구가 더 강화되어야 하며 앞으로는 표면분석기가 일부 공정 중에 포함되어 in-situ 분석을 하게 될 것이다. 3차원 IC회로 개발, 양자소자(quantum device)를 비롯한 신소재의 개발을 위해서 그리고 또 여러 가지 방법의 표면분석을 in-situ로 하기 위해 10^{-13} torr 정도의 극고진공(extremely high vacuum)이 필요해질 전망이다.

12. 결 론

진공의 개념은 17세기에 도입되어 기체 열역학을 탄생시켰으며 19세기 말엽의 물리학 및 화학의 발전에 크게 기여하였고 또한 에디슨의 백열등 발명을 가능케 하였다. 백열등의 대량수요는 20세기초의 진공과학을 발전시키고 다시 펌프와 게이지개발을 촉진시켜 현재 사용하고 있는 진공 펌프 및 게이지들 대부분의 기본원리가 이 무렵 1900~1920 사이에 소개되었다. 1928년 도입된 유탄산펌프는 진공기술의 응용범위를 의약품 및 식품의 증류, 진공야금, 진공코팅 등으로 넓혀 진공산업을 일으켰으며 1916년 개발된 이온게이지와 더불어 고진공시대의 막을 열어 제2차 세계 대전 중에는 원자핵 연구에 기여하였다. 전후 재료 기술의 발전과 BA-게이지와 헬륨 누설검출기의 개발로 초고진공기술이 가능해졌다. 이어 60년대부터 가속된 우주개발과 가속기 같은 거대 구조물 제작은 우주과학과 소립자과학을 발전시켰으며 초고진공기술은 급성장하였다. 70년대 이후 반도체산업의 융기로 진공제품이 대량 소요되었으며 따라서 진공산업이 활성화되었다. 마이크로전자공학(microelectronics)의 발전과 연계하여 반도체과학, 표면과학, 재료과학 등의 연구활동이 활발하여졌으며 관련장비들의 개발이 무척 활발하다. 앞으로도 반도체산업 및 반도체 관련과학의 발전이 진공기술 발전의 주 원동력이 될 것이 확실하다.

진공에 대한 지식과 기술은 항상 물리, 화학 등의 기초과학과 산업의 혁신을 가져다 주었고 역으로 혁신된 과학 및 산업은 진공기술발전의 동기를 주어왔다. 현재에 이르러 이와 같은 관계는 더욱 밀접해졌으며 진공기술과 응용기술 발전사슬의 앞뒤를 따질 수도 없이 기술발전의 속도는 엄청나게 빨라지고 있다.