Journal of the Korean Vacuum Society
Vol. 5, No. 4, December 1996, pp. 269~277

PLS 선형가속기 진공계의 운전특성

김임경 · 박용정 · 김경렬 · 남궁원

포항가속기연구소, 포항공과대학교

(1996년 6월 17일 접수)

Operational characteristics of the PLS linac vacuum system

Y. K. Kim, Y. J. Park, K. R. Kim and W. Namkung

Pohang Accelerator Laboratory, POSTECH

(Received June 17, 1996)

요 약 - PLS 선형가속기 진공계는 클라이스트론 첨두출력 54 MW, 펄스폭 4.1 μs, 반복율 10 Hz의 마이크로파 전력 공급상태에서 2.6×10^{-6} Pa의 진공도를 유지하고 있으며, 45°C 운전조건에서 마이크로파 전력이 공급되지 않았을 때 진공도는 2.4×10^{-6} Pa이다. 설치 초기에 3.0×10^{-11} Torr-l/sec-cm^2 이었던 가스방출율은 각 가속단위마다 약 140 GJ의 마이크로파 에너지가 전파된 현재 1×10^{-12} Torr-l/sec-cm^2 이다. 주 장비로 사용중인 이온펌프는 모두 포화된 상태이며 60 l/s, 120 l/s, 230 l/s 이온펌프의 유효배기속도는 운전 영역에서 각각 45 l/s, 65 l/s, 140 l/s 이다. 진공계 운전중 야기된 문제점들로는 이온펌프 및 진공 게이지 전원제어기의 오동작, 에너지 배가장치의 출력창, 전자총 및 가속관 종단부하의 진공누출 등이었다. 최근 일년간 총 41회에 140.8시간 운전 중지를 경험하여 98 %의 가용도(availability)를 나타내었다. 추후 시험중인 도파관 밸브와 개발중인 가속관 종단부하가 설치된다면 가용도를 99.5% 이상으로 증가시킬 수 있을 것으로 기대한다.

Abstract - The vacuum system of PLS linac provides average pressure of 2.6×10^{-6} Pa under high power microwave loading of 54 MW peak with 4.1 μs pulse width and 10 Hz repetition rates. The base pressure of system is 2.4×10^{-6} Pa with 45°C cooling water. The outgassing rate of the system is decreased from 3×10^{-11} Torr-l/sec-cm^2 at the initial stage after installation to 1×10^{-12} Torr-l/sec-cm^2 at present. Total accumulated microwave energy dose is about 140 GJ per module. All ion pumps are working under saturated regime and effective pumping speeds of 60 l/s, 120 l/s, 230 l/s ion pumps are 45 l/s, 65 l/s, 140 l/s under the operating range. Main problems occurred in recent year are troubles of ion pump controller and vacuum gauge controller, vacuum leak of energy doubler window and electron gun ceramic, and water leak in the dummy load of accelerating columns. Total of 41 troubles with 140.8 hours down time give good system availability of 98%. Down time can be reduced by high power waveguide valves and water dummy loads under development, and then availability is expected to be increased up to 99.5%.

1. 서 론

선형가속기 진공계의 주 기능은 대출력 마이크로파를 가속관까지 전송하기 위한 도파관과 전자 가속을 위한 가속관의 적절한 진공을 유지하는 것이다[1]. '93년 12월 설치 완료 후 정비를 위하여 진공계를 연 경우를 제외하고 전 가속단위는 초고진공 상태를 유지하고 있다. 현재 평균 2.6×10^{-6} Pa 수준의 진공도를 유지하는 선형가속기 진공계에 투입된 마이크로파 에너지는 각 가속단위별로 1994년 말까지 평균 70 GJ이었으며, 1996년 3월말까지 약 64 GJ의 에너지가 추가로 투입되었다. 따라서 마이크로파 에너지를 전파하기전 45°C 정밀온도 제어용 냉각수의 순환상태에서 3.0×10^{-11} Torr-l/sec-cm^2 이었던 가스방출율은 현재 동일조건에서 1.0×10^{-12} Torr-l/sec-cm^{2}로 크게 감소하여 전체 진공계는 매우 안정적인 상태를 유지하고 있다.

본 논문에서는 진공계의 운전을 중심으로 진공계의 특성들을 기술하였다. 첫째, 운전조건에 따른 진공도 변

화, 가스방출율 측정, 그리고 잔류가스를 분석하여 진공계의 특성을 파악하였으며 둘째, 전자증배 현상에 의한 여러 유형의 진공방전을 정리하였다. 셋째, 주 장비인 이온펌프의 운전이력을 살펴보았으며 넷째, 전자총의 누출 및 가속관 종단부하와 클라이스트론 교체에 대하여 기술하였다. 마지막으로 최근 일년간의 고장 및 문제점들을 종합하고, 이를 항목별로 구분하여 분석하였으며 각 고장의 원인을 규명하였다. 그리고 운전 중지시간으로부터 가용도를 구하여 진공계가 기본 보조계통으로써 역할을 충분히 수행하고 있는지를 살펴보았다.

2. 진공계의 특성조사

2.1 운전조건에 따른 진공도 변화

그림 1은 선형가속기 빔 가속계에서 운전조건에 따른 진공계의 압력 변화를 나타낸 것으로 각 가속관 입력단에 설치한 이온펌프의 전류값을 진공도로 환산한 것이다. 즉, 가속관 및 도파관계에 45°C 정밀온도 제어용 냉각수를 공급하였을 때와 하지 않았을 때, 그리고 2-GeV 빔 운전조건인 첨두출력 약 54 MW의 마이크로파를 공급했을 때의 진공도 변화이다. 운전조건별 평균 진공도는 45°C 냉각수 유무에 따라 2.4×10^{-6} Pa, 1.4×10^{-6} Pa이며, 전자빔 운전 없이 마이크로파 전력 공급 상태에서 2.6×10^{-6} Pa이다. 또한 각 이온펌프의 진공도는 주위 환경, 이온펌프의 위치, 설치한 진공부품의 이력 및 설치시기가 달라 동일 조건에서도 다소 차이를 나타내고 있다.

45°C 정밀온도 제어용 냉각수가 차단된 상태에서의 진공도는 95년 7월 24일 하계예방 정비기간에 측정한 것으로, 가속단위 K1을 제외한 모든 빔 가속계는 평균 진공도 1.4×10^{-6} Pa 근방에서 비교적 균일한 분포를 유지하고 있다. 가속단위 K1은 '94년 7월 다지관 배기방식에서 다른 가속단위와 동일한 분산 배기방식으로 전환하면서 이온펌프를 포함한 진공부품 전체를 교체하였다. 따라서 다른 가속단위에 비해 운전기간이 짧아 가스방출율이 상대적으로 크기 때문에 비교적 높은 압력을 나타내고 있다. 또한 삼중사극 전자석 근방의 진공계는 컨덕턴스가 6 l/s로 유효배기속도가 크지 않아 비교적 나쁜 진공도인 5.2×10^{-6} Pa을 유지하고 있으나 설계값 6.5×10^{-5} Pa 이하를 만족하므로 빔 운전에는 영향을 주지 않는다.

실온상태를 유지하던 진공계에 45°C 정밀온도 제어용 냉각수를 공급하였을 때 온도부하에 의한 열 탈착(thermal desorption)으로 인하여 압력은 전체적으로 상승하여 2.4×10^{-6} Pa을 나타내었다. 표면에 흡착된 원자나 분자들의 단위시간당 방출량은 표면온도 및 진공함 재질표면과 가스의 결합에너지에 관계되므로[2], 동일 조건에서 표면온도의 증가는 진공도 상승을 초래한다. 선형가속기 진공계는 45±0.2°C 온도로 정밀제어하기 때문에 초고진공용 진공계에서 흔히 볼 수 있는 "the early morning effect" 를 찾아볼 수 없었다[2].

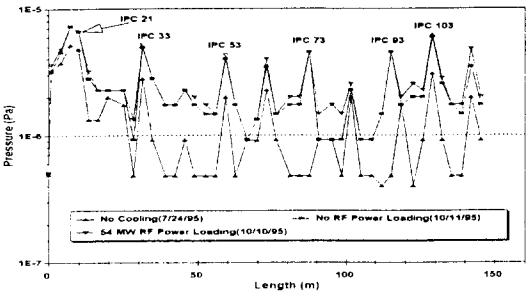


그림 1. 빔 가속계에서의 운전조건별 진공도 변화.

45°C 정밀온도 제어상태에서 마이크로파 전력을 공급하였을 때 흡착가스의 방출은 전장(electric field)에 의한 것으로 클라이스트론의 출력에 따라 달라지게 된다. 클라이스트론의 출력을 최대 80 MW로 하였을 때 에너지 배가장치를 통과한 마이크로파 출력은 약 449 MW이다[3]. 이때 전장의 세기는 TE_{10} Mode의 도파관계에서 20 MV/m이며 TM_{01} Mode의 가속관에서 38 MV/m이다[4]. 2-GeV 전자빔을 인출할 수 있는 동일조건으로 전자빔 없이 클라이스트론을 운전하였을 때 이온펌프의 평균 진공도는 2.6×10^{-6} Pa이다. 각 클라이스트론의 출력 차이로 인하여 도파관계 및 가속관에서 전장의 세기변화, 가속관의 표면조도 및 청정도, 그리고 구성품목의 이력으로 인하여 가속단위 마다 운전조건별 압력상승비는 다소 차이를 보이고 있다. 같은 마이크로파 전력에서 2-GeV 전자빔을 얻기 위하여 2 ns로 전자총을 운전하였을 때 빔 가속계의 진공도는 마이크로파 전력만을 공급하였을 때와 차이가 없으며, 또한 전하량을 20배 증가시킨 40 ns로 전자총을 운전하였을 때도 진공도는 거의 변화하지 않았다. 따라서 요구하는 진공도 이하에서 전자빔의 유무는 진공도 변화에 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.

2.2 가스방출율의 측정

온도, 진공계의 형상, 재질, 표면상태, 진공계의 노출대기 시간, 그리고 압력 등에 영향을 받는 가스방출율은

초고진공을 형성하는 중요한 요소로서 계의 최종압력에 영향을 미친다. 진공계에 흡착된 가스들을 방출하는 방법으로 열, 전자, 이온, 광양자 같은 입자 빔, 초음파, 그리고 전장 등으로 에너지를 흡착된 입자에 공급함으로써 가능하다. 이 중에서 계의 온도 증가에 의한 열 방출법이 가스방출율을 감소시키는데 가장 널리 이용되고 있다.

PLS 선형가속기의 경우 45°C 정밀온도 제어용 냉각수의 온도부하에 의한 열 방출 및 전자빔 가속을 위한 마이크로파 전력공급에 의한 고전장의 형성이 가스방출율을 감소시키는 에너지원이다. 마이크로파 전파에너지로 길들이기전 45°C 냉각수 순환시 3.0×10^{-11} Torr-l/sec-cm^{2}이었던[5] 가스방출율은 0.5 GJ의 에너지가 투입되었을 때 5.4×10^{-12} Torr-l/sec-cm^{2}로 크게 감소하였다. 그림 2는 압력상승법으로 측정한 가스방출율로[6] 각 가속단위별로 축적된 전파에너지에 따라 가스방출율이 감소함을 보여주고 있다. 또한 온도부하에 의한 영향을 보기 위하여 45°C 냉각수가 공급되지 않는 실온에서의 가스방출율도 함께 정리하였다. 길들이기 초기의 급격한 감소를 제외하면 가스방출율은 마이크로파 에너지가 축적됨에 따라 서서히 감소하여 가속단위당 약 100 GJ의 에너지가 투입되었을 때 1.0×10^{-12} Torr-l/sec-cm^{2}을 유지하고 있다. 위의 가스방출율 비에 의하면 충분히 길들여져 진공계가 안정적인 상태를 유지하는 현재의 가스방출율은 마이크로파 전송에너지 보다는 온도 부하에 의한 열 방출이 지배적이다. 길들이기 초기에 가속관 및 도파관계에 마이크로파 전력이 공급되었을 때 표면의 미세 돌출부에서 전장은 임계값 이상으로 증가하게 된다. 첨예한 미세 돌출부에서 전장에 의한 전자의 방출(electric field emission)로 인하여 방전이 발생하므로 마이크로파 길들이기 초기에는 마이크로파 전송 에너지가 압력 상승의 주 요인이었음을 경험하였다[7].

그림 2에서 보듯이 구성품의 진공이력, 제작 후 설치시까지의 기간, 설치시기 등이 모두 다르므로 각 가속단위별로 가스방출율은 다소 차이를 보이고 있다. 먼저 가속단위 K1의 경우 94년 2월 1.2×10^{-12} Torr-l/sec-cm^{2}이었던 가스방출율은 95년 5월 오히려 2.0×10^{-12} Torr-l/sec-cm^{2}로 증가하였다. 이는 94년 7월 다지관 배기방식에서 분산 배기방식으로 전환하면서 2년 이상 잘 길들여진 구성품 전체를 교체하였기 때문이다. 그리고 가속단위 K3은 도파관 조립이 허용오차 ±150 μm를 넘어 마이크로파 전송에 영향을 주어 3.9 m 도파관을 교체하였으므로, K10은 가속관 종단부하의 누수로 인하여 진공계 내부에 물이 스며들어 길들이기 초기에 다른 가속단위 보다 높은 값을 나타내었다. 그러나 각 가속단위당 약 1.65 GJ의 에너지가 투입되었을 때 가속단위별로 가스방출율의 차이를 거의 찾아볼 수 없었다. 95년도 하계 정비기간인 8월 4일 가속단위 K3의 거침배기용 밸브 조작 실수로 가속단위 K3 및 K4의 압력이 수십 Pa까지 상승하는 사고가 발생하여 두 가속단위의 8월 11일 측정값이 다른 가속단위에 비하여 크다.

2.3 잔류가스 분석

가속단위 K3 클라이스트론 출력창 근처에 설치되어 있는 잔류가스 분석기에서는 주로 H_2, H_2O, CH_2OH, CO, 그리고 소량의 C, N, O_2 등이 검출되었다. 가스의 구성비는 수소 56%, 물 23%, 메칠 알코올 10%, 일산화탄소 5%였으며 분압은 7.8×10^{-7} Pa, 6.6×10^{-7} Pa, 3.9×10^{-11} Pa, 4.2×10^{-7} Pa이었다. 측정시 마이크로파 전력은 공급되지 않았으며 클라이스트론 출력창 근처의 진공도는 2.0×10^{-6} Pa이었다. 그림 3은 '95년 11월 29일 아날로그 방식으로 측정한 자료로 '94년 8월 27일 측정값[7]과 비교할 때 잔류가스는 전체적인 구성비를 유지하면서 감소

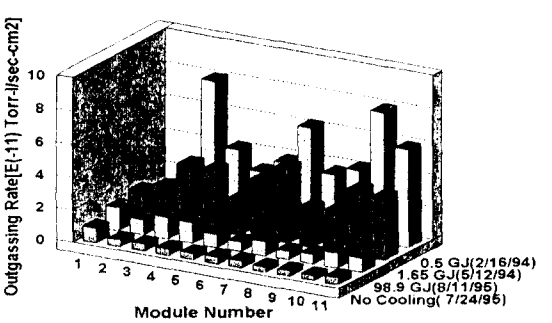


그림 2. 마이크로파 투입에너지에 따른 가스방출율의 변화.

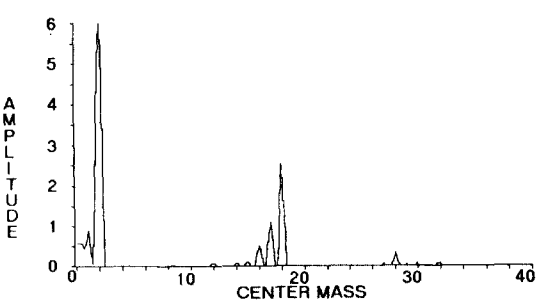


그림 3. 잔류가스 분석 결과.

하는 경향을 띄고 있다. 그림 3은 한 시간 동안 작동한 후 측정한 것으로 이때 전자 배가 전압 1 kV, 주사 시간 6.6초, 감도 1.3×10^{-2} A/Pa, 그리고 이득은 10^{9} A이다.

3. 전자증배(Electron Multipactoring) 현상의 관찰 및 분석

3.1 전자증배 현상에 의한 방전 이론

전자증배 현상에 의한 방전은 마이크로파 전력 공급시 진공내부의 표면상태와 기하학적 구조가 다음과 같은 특정한 조건을 만족할 때 발생되는 현상이다. 만일 표면의 이차전자 방출계수가 1 보다 크고 이 이차전자가 공급된 마이크로파와 동기 되어 움직일 수 있고 반주기 후에 맞은편 표면에 도달하여 충돌하게 되면 이차전자가 더 많이 방출되며 이러한 과정이 계속적으로 반복될 수 있으면 방전으로 발전하게 된다. 물론 이차전자 방출율은 입사전자의 에너지와 입사각도, 그리고 표면재료 및 표면구조, 표면온도 및 오염상태에 따라 달라진다. 마이크로파와의 동기조건이 고차모드가 되어 이러한 방전이 되기 위해서는 이차전자가 맞은편 표면에 도달하는데 걸리는 시간이 반주기의 홀수배가 되면 가능하다. 고차모드를 포함하는 전자증배 현상에 의한 방전 전압 V_n은 식 (1)과 같이 된다[8].

$$V_n = 4\pi^2\frac{(fd)^2}{(e/m)\Phi_n} \tag{1}$$

여기서 $\Phi n = \left(\frac{k+1}{k-1}\right)(2n-1)\pi\cos\phi+\sin\phi$

f: 주파수
d: 전극간 거리
e: 전자 전하량
m: 전자 질량
n: 모드 수
ϕ: 이차전자 방출시의 위상각

$$k = \frac{\upsilon_f}{\upsilon_o}$$

υ_f: 맞은편 표면에 도달한 이차전자의 속도
υ_o: 방출 이차전자의 속도이다.

마이크로파와 동기 되기 위해서는 이차전자 방출위상각 ϕ는 $-60^{\circ}\le\phi\le15^{\circ}$ 이어야 하며 방출속도비 k는 $2.5\le k\le4$ 이어야 한다. 그리고 이차전자발생율이 1 보다 크기 위해서는 가속되어 맞은편 표면에 충돌하는 이차전자의 운동에너지 E_f는 $25\text{ eV}\le E_f\le100\text{ eV}$이어야 한다. 이러한 조건을 만족시키는 영역은 제한적으로 존재하게 된다.

일반적으로 주어진 주파수 f, 동작전압 V_n에서 식 (1)을 만족시킴으로써 전자증배 현상에 의한 방전을 피하는 여러 가지 방법이 있다. 첫째, 자장을 이용하여 전자궤도를 수정함으로써 전자 진행거리를 증가시키는 방법 둘째, 전자증배 현상으로 전자가 집중되는 부위의 표면에 요철을 주어 방출 이차전자를 가둘 수 있게 하는 방법 셋째, 이차전자 방출계수가 적은 티타늄계 박막을 입혀 이차전자 방출율을 줄이는 방법 등이 있다[9, 10]. 이외에 마이크로파 펄스폭을 충분히 짧게 하면 이차전자가 증가하여 방전으로 이어질 만큼 그 양이 커지기 전에 마이크로파를 차단할 수 있게 되어 전자증배 현상에 의한 방전을 피할 수 있다. 또한 전자증배 현상에 의한 방전조건을 만족시키는 마이크로파 출력 영역에서 운전을 피하는 것도 한가지 방법이다.

3.2 선형가속기 진공계에서의 전자증배 현상

PLS 선형가속기에서 사용하는 마이크로파 주파수는 2856 MHz로 일정하나 도파관이나 가속관 등에서 전자증배 현상에 의한 방전이 일어날 가능성이 큰 위치에서의 구조적 형상의 차이로 주파수와 전극간의 거리의 곱인 fd값은 10~100 MHz-m 사이이다. 따라서 대부분의 방전은 반주기 이상의 고차모드로 한정된 특정 마이크로파 출력 범위 내에서 가능하다[11].

전자증배 현상에 의한 방전은 여러 가지 유형으로 나타나는 것을 발견할 수 있었다. 이미 진공계가 잘 길들여져 있으므로 평상시 간헐적으로 압력이 상승하긴 하지만 즉시 원래 출력 값으로 정상화되어 운전에 거의 영향을 주지 않았다. 그러나 한번 압력이 상승한 후 설정 연동값 이하로 복귀되어 마이크로파 전력을 재 공급할 때 어떤 특정한 마이크로파 전력값(PLS의 경우 대략 ~5 MW[11])에서 압력이 상승하여 마이크로파 출력 값이 더 이상 올라가지 못하고 반복적으로 같은 현상이 발생하는 것을 경험하였다. 이같은 현상이 전형적인 전자증배 현상에 의한 방전에 해당되며 특별한 조치를 취하지 않는다 할지라도 시간이 경과하면 정상화되어 지속적으로 안정된 마이크로파 전력을 공급할 수 있다.

단시간 마이크로파 전력을 공급하지 않다가 마이크로파 에너지를 전송할 때 진공계가 잘 길들여졌다 할지라

도 부하 초기에 전자증배 현상에 의한 방전을 경험할 수 있었다. 이와 달리 마이크로파 전력을 장시간 공급하지 않았던 진공계에 전력 공급 초기에 충분한 시간이 경과하였다 할지라도 방전현상이 멈추지 않는 것을 경험하였다. 잘 길들여진 안정상태에서 진공계의 가스는 내부표면과 물리적 흡착현상을 일으킬 것이다. 가스는 표면과 물리적으로 약하게 결합된 상태이므로 결합에너지 보다 큰 마이크로파 전력을 공급하면 가스는 내벽에서 분리되어 압력 상승원인이 되고, 이 분리된 가스가 에너지를 받아 내벽을 때려 이차전자를 유발시켜 방전현상은 지속된다. 방전현상을 피하는 한 방법으로 길들이기 초기에 경험하였듯이 마이크로파 펄스폭을 4.1 μs에서 1.0 μs로 줄여 출력을 증가시켜 정상상태에 도달한 후 펄스폭을 서서히 4.1 μs까지 변환하는 방법이 효과적이다[7]. 클라이스트론 첨두출력은 같다할지라도 펄스폭의 감소로 평균출력은 감소하므로 이러한 "short pulse processing" 법을 이용하면 전자증배 현상에 의한 방전을 피할 수 있다.

4. 이온펌프의 운전이력

현재 진공계는 67개의 이온펌프가 3625 l/s로 배기하고 있으며, 이 때 소모하는 총 배기 전력은 3.8 W, cell 당 배기 전류는 평균 159 nA이다. 주 펌프로 사용중인 이온펌프의 유효배기속도는 동작 진공이력, 배출 가스의 종류, 포화 정도, 그리고 동작 진공도에 따라 달라진다. 각 이온펌프들의 포화 가스량 및 포화 유무에 따른 유효배기속도 등 여러 특성을 표 1에 정리하였다.

각 가속관 입력단에 설치된 60 l/s Starcell 이온펌프의 포화 가스량 Q_{sat}이 332.5 Pa-l이므로 운전 진공도 2.6×10^{-6} Pa에서 약 710시간 사용하면 이온펌프는 포화상태가 되어 유효배기속도 50 l/s에서 45 l/s로 감소하게 된다[12]. 이온펌프들은 초기 동작을 제외하고 현재 진공도에서 연속 운전되고 있으며 배기가스를 공기라 가정하고 계산하였다. 동일한 방법에 의해 포화 가스량이 399 Pa-l인 120 l/s 이온펌프는 1.3×10^{-6} Pa에서 약 950시간, 포화 가스량이 798 Pa-l인 230 l/s 이온펌프는 6.0×10^{-7} Pa에서 약 1850시간 사용하면 포화되어, 현재 진공도에서 각각 65 l/s, 140 l/s로 배기하고 있다[13].

위와 같은 특성을 가진 이온펌프들은 선형가속기의 조립이 단계적으로 진행되었으므로 각 가속단위 마다 동작시간에 차이를 보이고 있다. 약 27400시간 사용한 가속단위 K2의 동작시점은 '92년 10월이며, '93년 12월 설치 완료한 가속단위 K11은 약 17300시간이다. 그리고 전단 입사장치인 K1은 94년 7월 다지관 배기방식에서 다른 가속단위와 동일한 분산 배기방식을 취하면서 이온펌프들을 Diode형에서 저진공(~1 Pa)에서 초기 동작이 가능하고, 불활성 기체의 배기 능력이 좋으며, 또한 수명이 긴 triode형 Starcell로 교체하였으므로 사용시간이 다른 가속단위에 비하여 짧은 약 12200시간이다. 실제 운전시간으로부터, 가장 많이 사용한 가속단위 K2의 경우 60 l/s이온펌프 한대가 배기한 가스량은 7.9×10^{4} Pa-l이며, 120 l/s 이온펌프 한대는 1.6×10^{5} Pa-l의 양을 배기하였다. 이 양은 각 이온펌프가 약 2.3×10^{6} Pa-l, 4.6×10^{6} Pa-l의 공기를 배기할 수 있는 양과 비교하면 현저한 차이를 나타낸다.

배출가스의 종류 및 동작 진공도에 관계하는 펌프의 수명은 음극의 재질로 사용된 티타늄의 감소와 수소 흡수량에 의해 결정되며 그 조건은 1.3×10^{-4} Pa의 진공도에서 80000 시간동안 공기를 배기하였을 때이므로[12, 13] 10^{-6} Pa을 유지하고 있는 이온펌프들의 수명은 약 100배정도 연장될 것이다. 그러나 음극에서 많은 양이 배기되는 수소가스는 음극판의 뒤틀림 현상을 초래하여 대부분의 이온펌프들은 1.3×10^{-4} Pa에서 80000시간을 사용하기 전에 펌프 내부의 인입 전극부의 단락으로 인하여 사용이 불가능하게 된다. 그러나 Starcell 펌프는 음극의 뒤틀림 현상을 경험할 수 없으므로[7] 단락으로 인한 펌프의 폐기는 없을 것으로 추정한다.

표 1. 용량별 이온펌프의 특성비교

	기 호	단 위	60 l/s	120 l/s	230 l/s
동작 진공도	P_{op}	Pa	2.6×10^{-6}	1.3×10^{-6}	6.0×10^{-7}
포화 가스량	Q_{sat}	Torr-l	2.5	3	6
포화되는데 소요되는 시간	τ_{sat}	Hour	710	948	1848
실제 운전 시간	τ_{op}	Hour	12200~27400	12200~27400	12200
비포화상태에서 유효배기속도	$S_{non\text{-}eff}$	l/s	50	90	200
포화상태에서 유효배기속도	$S_{sat\text{-}eff}$	l/s	45	65	140

5. 진공누출 및 교체

본절에서는 현재까지 진공계에서 야기되었던 문제 중 누출 및 구성품 교체에 관한 몇 가지를 유형별로 요약하였다. 에너지 배가장치 및 전자총의 진공누출은 운전을 일시적으로 중단하게 하였으며, 가속관 종단부하의 누수는 종단부하의 교체가 불가피하였다. 진공계 문제는 아니라 할지라도 클라이스트론의 고장은 계의 대기 노출을 피할 수 없었다.

5.1 전자총의 진공누출

전자빔 인출상태에서 4.7×10^{-7} Pa의 진공도를 유지하던 전자총의 압력은 95년 4월 24일 오후 1.3×10^{-4} Pa까지 순간적으로 상승한 후 1.3×10^{-6} Pa로 감소하였다가 점점 증가하는 경향을 띄면서 2.8×10^{-6} Pa까지 상승하였다. 진공이력을 조사한 바 누출로 추정되어 누출검사를 수행하였다. 먼저 요철진 세라믹 몸체 및 금속과 세라믹의 브레이징 부위에 쌓인 먼지를 제거한 후, 브레이징 부위에 고진공용 sealant를 분사하였으나 수 분이 지나도록 진공도 변화를 찾아볼 수 없었다. 다음 전자총의 절연을 위하여 사용한 세라믹 몸체에 sealant를 분사하였을 때, 압력은 서서히 감소하여 약 20분 후에 3.9×10^{-7} Pa에 도달하였다.

전자총에 진공누출이 발생함으로써 음극의 필라멘트 공급전압이 불안정하여 빔 전류 측정장치 1번(beam current monitor No. 1)에서 측정된 전류값도 불안정하였다. 표 2는 진공도 및 전자총 필라멘트 전원에 따른 전류값을 측정한 것으로 누출 전후를 비교하면 진공도가 상승함에 따라 필라멘트 인가전압을 증가시켜야 같은 양의 전자빔을 인출할 수 있었다. 누출부위의 조치 후 전자총의 진공계는 안정된 상태를 유지하여 필라멘트 공급전압 및 빔 전류 측정장치에서의 전류값도 동일조건에서 일정하게 유지되고 있다.

누출시 진공도가 2.8×10^{-6} Pa을 유지하였으므로 전자총의 음극 보호를 위하여 설정한 연동값 4.0×10^{-6} Pa에 미치지 못하여 전자총은 18일간 429시간 동안 누출상태로 방치되어졌다. 음극보호를 위하여 설정한 연동값이 상기와 같은 미세 균열시 제 기능을 수행하지 못할 만큼 높아 전자총은 누출상태에서 빔 운전을 계속하였다. 전자총 진공도는 빔 운전 유무에 따라 9.0×10^{-7} Pa에서 4.0×10^{-7} Pa까지 변하므로 연동값을 요구 진공도 1.3×10^{-6} Pa의 두 배인 2.6×10^{-6} Pa로 하향 조정하였다. -80 kV 전압을 인가하여야 하는 전자총 음극에 4월 24일 빔 운전시 -100 kV 이상의 전압을 인가하여 내전압 100 kV인 세라믹의 절연파괴 현상으로 인한 균열이 진공누출의 원인인 것으로 추정한다. 연동 설정치의 하향 조정은 진공도 변화시 단순히 빔 운전을 할 수 없게 하는 것에 불과하므로 추후 유사한 사고가 재발되지 않게 하기 위하여 고전압 전원제어기의 최대 인가영역을 -90 kV로 제한하도록 조치하였다.

진공도 변화로부터 전자총 진공계의 가스방출량을 추정하여 누출부위의 크기를 계산하였다. 진공계에서 가스방출량은 관계식 (2)로 표현할 수 있다.

$$Q_{tot} = S_{eff} P \tag{2}$$

여기서 Q_{tot}은 진공계의 총 가스량으로 외부에서 주입하는 가스량 Q_i, 진공용기 내벽표면에서의 가스방출량 Q_g, 실제 누출(real leak)로 인하여 진공용기 벽을 통과하여 들어오는 가스량 Q_l, 진공용기 벽을 침투하여 들어오는 가스량 Q_p를 모두 합한 양이다. S_{eff}는 유효배기속도로 230 l/s인 이온펌프가 설치되어 있는 전자총의 경우 51 l/s이며, P는 진공도 이다. 식 (2)의 총 가스방출량 Q_{tot}은 $Q_i+Q_g+Q_l+Q_p$로 표현할 수 있으며 전자총의 경우 외부로부터 주입되는 가스가 없으므로 Q_{tot}은 $Q_g+Q_l+Q_p$이다. 유효배기속도가 일정하고 닫힌 계인 전자총 진공계에서 압력의 상승은 총 가스방출량의 증가로 볼 수 있다. 여기서 Q_g 및 Q_p는 시간적 변화가 거의 없어 일정하다고 가정할 수 있으므로 진공도 증가는 진공용기의 누출을 통한 침투이다. 누출의 유무에 따른

표 2. 진공누출에 따른 전자총의 진공도 및 상태변화

	진공도 (Pa)	필라멘트		빔 전류 (A)
		전압 (V)	전류 (A)	
누출 전('95. 4. 10)	8.4×10^{-7}	5.97	4.68	1.12
누출 후('95. 5. 10)	2.8×10^{-6}	7.29	5.42	1.15
수리 후('95. 5. 29)	7.2×10^{-7}	6.00	4.61	1.15

총 가스방출량을 비교하면 누출에 의한 가스투입량 Q_l을 식 (3)으로 정리할 수 있다.

$$Q_l = S_{eff}(P_a - P_i) \quad (3)$$

P_a는 누출이 있을 때의 진공도로 2.8×10^{-6} Pa이고, P_i는 누출이 없을 때 전자총의 진공도로 4.7×10^{-7} Pa이므로 Q_l는 9.0×10^{-7} Torr-l/s이다. 따라서 가스방출량으로부터 두께 5~8 mm인 요철진 세라믹 몸체에 균열이 생긴 누출부위의 직경은 4.1~4.8 m로 추정된다. 또한 누출이 없을 때 가스방출량은 1.8×10^{-7} Torr-l/s이다. Q_l은 Q_g와 Q_p을 합한 것보다 약 5배 큰 값으로 전자총 진공계는 진공용기 내벽표면에서의 가스방출량 및 진공용기 벽을 침투하여 용기에 들어오는 가스량을 합한 것보다 누출에 의해 투입되는 가스량에 지배를 받는다.

5.2 가속관 종단부하 및 클라이스트론의 교체

선형가속기 진공계는 가속단위별로 각각 4개의 전자가속관이 일렬로 정렬되어 있으며 각 가속관의 출력단에는 마이크로파를 반사 없이 흡수하는 종단부하가 설치되어 있다[1]. 공급 마이크로파 전력의 잉여분을 소산시키는 종단부하의 정밀온도 제어는 직접 냉각법에 의해 행해지므로 종단부하의 누수는 진공도 저하를 유발하여 교체가 불가피하였다. 설치 완료후 현재까지 총 9회가 발생하여 진공 가열후 진공상태로 보관하였던 종단부하로 교체하여 마이크로파 길들이기 과정을 거쳐 정상상태로 회복시켰다. 해체한 종단부하의 진공 누출 검사 결과 모두 측면 모서리 용접부위에 누출이 있음을 확인하였으며, 누출원인으로 용접부의 냉각수 접촉에 의한 부식, 과도한 열 부하에 의한 열 응력 집중에 의한 균열 혹은 미세기공의 발생 등으로 추정할 수 있다.

그림 4는 95년도 10월에 발생한 가속단위 K11의 첫 번째 종단부하 누수 및 조치에 따른 진공도 변화와 클라이스트론 운전의 상관관계를 보여주고 있다. 첫번째 종단부하의 누수는 두번째 가속관 입력단에 설치된 이온펌프 112번에 크게 영향을 미치므로 해당 전원제어기의 진공도를 정리하였다. 그림에서 보는바와 같이 클라이스트론 출력 63 MW에서 1.7×10^{-6} Pa을 유지하던 압력이 5.5×10^{-6} Pa로 증가하여 클라이스트론 운전을 중지하고 진공도 변화를 관찰하였다. 마이크로파 전력이 공급되지 않는데도 압력은 계속 상승하였으므로 7.8×10^{-6} Pa에서 45°C, 2기압으로 순환하는 종단부하 정밀제

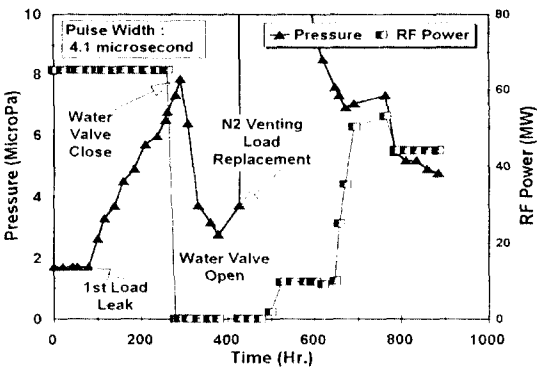


그림 4. 종단부하 교체 후의 진공도 변화.

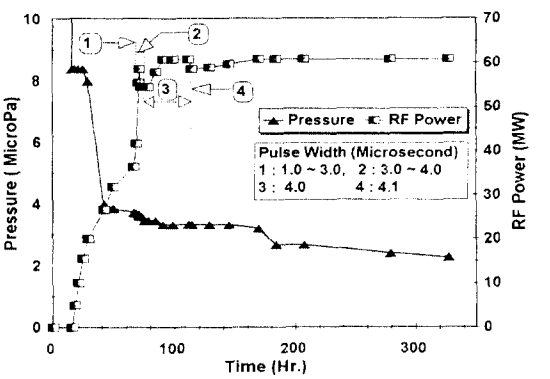


그림 5. 클라이스트론 교체 후의 진공도 변화.

어용 냉각수를 차단하였다. 냉각수 차단 후 압력은 서서히 감소하였으므로 3.5×10^{-6} Pa일 때 냉각수를 재 공급하였을 때 압력이 급격히 상승하는 것으로 누수를 확인하였다. 종단부하 교체 후 마이크로파 길들이기는 진공도 3.3×10^{-5} Pa에서 펄스폭 4.1 μs, 클라이스트론 출력 1.9 MW로 시작하였다. 진공도가 감소함에 따라 펄스폭의 변화 없이 클라이스트론 출력을 증가시키는 방법으로 길들이기를 진행하였으며, 정상상태로 복귀하는데 약 3주일이 소요되었음을 알 수 있다.

가속단위 K2 클라이스트론의 집속용 전자석 코일중 한개가 전자석 몸체와 단락 되는 고장이 발생하여 클라이스트론을 교체하였다. 클라이스트론의 교체는 종단부하 교체와 마찬가지로 해당 가속단위 진공계 전부가 질소에 노출되어야 하기 때문에 교체 후 마이크로파 길들이기 과정을 거쳐야 했다. 그림 5는 마이크로파 길들이기시 클라이스트론의 출력에 따른 진공도 변화를 보여주는 것으로, 펄스폭을 변화시키면서 출력을 증가시키

는 방법으로 정상화시켰다. 먼저 펄스폭 3.0 μs에서 클라이스트론 출력을 58.8 MW까지 증가시켰으며, 2단계로 클라이스트론 출력을 54.6 MW로 고정시킨 후 펄스폭을 4.0 μs까지 단계적으로 늘렸다. 동일한 방법으로 펄스폭 4.0 μs에서 클라이스트론 출력을 60 MW까지 증가시킨 후 펄스폭을 빔 운전 조건인 4.1 μs로 변환하였다. 길들이기가 진행됨에 따라 진공도는 서서히 좋아져서 약 6일 후에 정상상태로 복귀하였다.

6. 고장분석 및 가용도

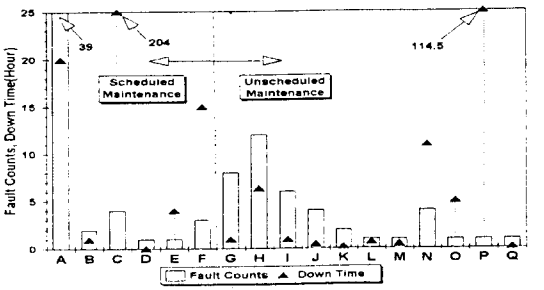
6.1 고장 분석

93년 12월 설치완료 후 계획된 정비를 위하여 진공계를 연 것을 제외하고 전 가속단위는 고진공상태로 유지되어 오고 있다. 그림 6의 Pareto Chart[14]는 최근 일년간 진공계에서 발생한 각종 문제점들을 종합적으로 보여주는 것으로, 정기점검 및 마이크로파 전력 공급상태에서 발생한 문제점들을 분리하여 정리하였다.

마이크로파 전력 공급 및 빔 운전을 방해하는 주 요인은 이온펌프 전원제어기 팬의 성능저하에 의한 장비의 오동작, 냉음극형 진공게이지 전원제어기의 오동작, 에너지 배가장치의 출력창 및 전자총의 누출, 그리고 클라이스트론의 교체 등으로 고장 원인을 유형별로 정리하였다.

첫째, 각종 전원제어기의 고장에 관한 것이다. G, H, I항은 이온펌프 전원제어기 팬의 고장으로 인하여 발생한 것으로 팬을 교체하여 해결하였다. 세 항목을 합하면 전체 문제의 63 %인 26회를 차지하며 정상화하는데 8.3시간이 소요되었으나 정비기간 중 팬을 교체함으로써 이온펌프 전원제어기의 고장은 찾아볼 수 없었다. J항의 마이크로파 전력 공급 유무를 결정하는 모듈레이타 방아쇠(trigger)용 진공 동적 연동장치(dynamic interlock)에 연결되어 있는 냉음극형 진공게이지 전원제어기의 동작중단은 불량에 의한 것으로 L항의 전원제어기를 교체함으로써 해결하였다. K항의 진공게이지 자동 제어장치 운전정지는 전기적인 간섭으로 인한 통신장해로 추정되며, M항의 밸브 전원제어기의 오동작은 K항에 의해 연동설정치가 변함으로써 발생한 문제이다.

둘째, 진공계의 누출에 관한 것으로 진공계 길들이기 및 시운전 과정에서 24번을 경험하였던[7] N항의 에너지 배가장치 세라믹 출력창의 누출은 세라믹 표면에서 발생한 진공방전으로 인하여 세라믹에 미세한 균열이



A. 이온펌프 전원제어기의 팬 교체 B. 이온펌프 전원제어기의 교체
C. 가속관 종단부하의 교체
D. 에너지 배가장치의 모드 전환용 핀 조립 플랜지(CF40)의 체결부위 누출
E. 거침배기용 밸브 조작 실수 F. 정전 G. 이온펌프 전원제어기의 교체
H. 이온펌프 전원제어기의 동작중지 I. 이온펌프 전원제어기의 과열현상
J. 냉음극형 진공게이지의 동작중지 K. 진공게이지 자동 제어장치 오동작
L. 진공게이지의 전원제어기 교체 M. 밸브 오동작
N. 에너지 배가장치 출력창의 누출 O. 전자총 누출
P. 클라이스트론의 교체 Q. Power Trip

그림 6. 진공계에 영향을 준 각 고장의 횟수와 운전중지 시간.

생겨 발생한 것이다. O항의 전자총 누출은 고전압에 의한 절연파괴로 절연 세라믹에 누출부위가 발생한 것으로 V장 1절 전자총의 누출에서 언급하였다.

셋째, 진공계가 질소 가스 및 대기에 노출되었던 경우를 정리하였다. 가속관 종단부하 교체 4번, 클라이스트론 교체 1번, 하계예방 정기점검중 거침배기용 밸브 조작 실수 1번등 진공계는 6개의 가속단위(K2, K3, K4, K8, K9, K11)가 질소 및 대기 중에 노출되었다. 정상화하는데 약 20일이 소요되는 가속관 종단부하 교체는 정기점검 기간에 이루어져 빔 운전에는 영향을 주지 않았으나 클라이스트론의 교체는 예정된 정비기간이 끝난 8월 13일에 이루어져 정상운전에 영향을 미쳤다. 종단부하 및 클라이스트론의 교체에 관한 것은 V장 2절 가속관 종단부하 및 클라이스트론의 교체에서 언급하였다. 거침배기용 밸브 조작 실수로 가속단위 K3과 K4는 공기에 오염되었으나 각 가속단위를 진공 분리하는 수동 밸브로 인하여 다른 가속단위의 오염을 방지할 수 있었다.

6.2 가용도

표 3은 11개의 가속단위에 대한 최근 일년간의 운전일지를 분석한 것으로 정기점검을 포함하여 전반적으로 행해진 유지보수와 운전중 발생한 문제로 분류하여 가용도를 조사하였다.

표 3. 진공계의 가용도 분석(1995. 5~1996. 4)

항 목	관 계 식	단 위	기 호	진공계전체	마이크로파 전력 공급상태
운전시간		Hr	TO	8784	6714
운전중지 횟수		회	FC	91	41
운전중지 시간		Hr	TD	384.8	140.8
고장간 평균시간	TO/FC	Hr	MTBF	96.5	163.8
가용도	1-TD/TO		A	0.96	0.98

총 16종류에 91번 문제가 야기되었으며, 이로 인한 운전중지 시간은 384.8시간 이었다. 운전중지간의 평균시간(mean time between failure)은 운전시간(TO)을 운전중지 횟수(FC)로 나눈 96.5시간이며, 운전중지 시간에 관여하는 가용도는 0.96이다. 이중 마이크로파 전력 공급에 영향을 준 결정적인 운전중지는 41회, 140.8시간으로 가용도는 0.98이다. 운전중지의 대부분 시간은 부품 교체에 의한 진공계 노출이었다. 클라이스트론 교체에 소요된 114.5시간을 제외한 실제 진공계 자체 고장은 26.3시간에 불과하며, 비교적 가벼운 고장으로 대부분 30분 이내에 복귀할 수 있었다. 또한 빈번히 발생했던 이온펌프 전원제어기의 고장은 하계 정비기간에 팬을 교체한 후, 추가로 문제를 일으키지는 않았다.

7. 결 론

현재 선형가속기 진공계는 2-GeV 전자빔 인출조건에서 평균 2.6×10^{-6} Pa를 유지하고 있으며, 진공계의 압력 변화는 주위 환경에 따라 가스방출율 변화에 기인하여 진공도가 변화함을 알 수 있었다. 금년 3월까지 진공계에 투입된 마이크로파 에너지는 가속단위별로 평균 134 GJ로 전체 진공계는 매우 안정적인 상태를 유지하고 있다. 이미 잘 길들여진 선형가속기 진공계의 가스방출율은 마이크로파 에너지의 전파보다는 정밀온도 제어용 냉각수에 의한 열 방출에 더 많은 영향을 받음을 확인하였다.

3월 말 현재 정비기간을 제외한 마이크로파 전력 공급일은 총 280일로 고장횟수는 41번이었으며, 이로 인한 운전 정지시간은 140.8시간으로 진공계의 가용도(availability)는 98%였다. 빈번히 발생했던 고장요인이 이온펌프 전원제어기로 인한 고장이었는데 이는 하계 정비기간에 교체한 후 문제를 일으키지 않았다. 주기적으로 이온펌프 전원제어기 및 진공게이지 전원제어기의 성능을 점검하고, 개발중인 가속관 종단부하 및 대출력 시험중인 마이크로파 진공밸브가 설치되면 운전정지 시간을 줄일 수 있어 가용도를 더 향상시킬 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

1. *Pohang Light Source Design Report Revised Edition*, (PAL, Pohang, 1992).
2. G. L. Weissler and R. W. Carlson, *Vacuum Physics and Technology*, (Academic Press, New York, 1979).
3. W. Namkung, *et al., Proc. 66th Korean Physical Society Conference*, (1993).
4. N. Marcuritz, *Waveguide Handbook*, (Peter Peregrinus Ltd., London, 1986).
5. 박주식, 김임경, 오형석, 남궁원, *한국진공학회지* **2**(2), 282 (1993).
6. Leybold-Heraeus' Vacuum Components and Standard Systems Works Group, *Vacuum Technology its Foundations Formulae and Tables*, 70/AO 15. 1. 2., (Leybold-Heraeus, 1986).
7. 박주식, *포항 방사광원의 20억 전자볼트 선형가속기 진공계통에 관한 연구*, PAL/LINAC ME/VAC Gr. (1994).
8. A. J. Hatch and H. B. Williams, *Phy. Rev.*, **112**(3), 681 (1958).
9. W. Peter, *J. Appl. Phys.*, **56**(5), 1546 (1984).
10. R. B. Neal, *The Stanford Two-Mile Accelerator*, (Benjamin, New York, 1968).
11. W. Namkung, *et al., Proc. 68th Korean Physical Society Conference*, (1994).
12. 87-400-255-01, *Starcell VacIon Pump Instruction Manual*, (Varian Associates, Inc., 1989).
13. 87-900-018-01, *Starcell VacIon Pump Instruction Manual*, (Varian Associates, Inc., 1990).
14. A. R. Donalson and J. R. Ashton, *"SLAC Modulator Operation and Reliability in the SLAC Era," IEEE Conf. Proc. 20th Power Modulator Symposium*, pp. 152-156 (1992).