

방사광 차단용 진공부품의 냉각수 누설 특성

박종도*

포항가속기연구소 진공 연구실, 포항 790-784

(2007년 11월 5일 받음)

포항가속기연구소 저장링에 설치된 방사광 차단용 진공부품에서 냉각수가 누설되었을 때의 진공도 분포, 압력 변화, 잔류 기체의 변화 등을 측정하여 그 특성을 분석하였다. 냉각수 누설 시에 압력 상승은 국부적으로 나타났으며 잔류 기체의 변화 양상은 누설 위치로부터 잔류기체 분석기까지 거리와 이온펌프 및 전자빔의 On/Off에 따라서 크게 달랐으며 특정 기체의 선택적 상승도 나타났다. 냉각수 누설의 발견은 전압변화 측정으로 가능하였으며 잔류기체 분석기로는 물분자를 직접 측정하기보다는 CH₄, CO, NO 등 특성 기체의 증가를 분석함으로써 누설 여부를 판단할 수 있었다.

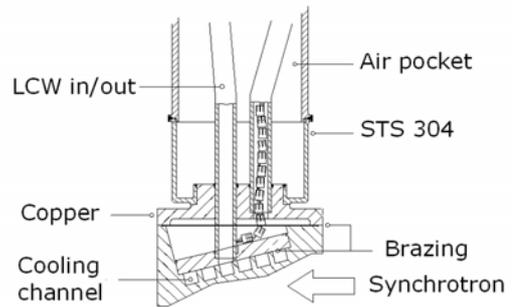
주제어 : 방사광, 냉각수 누설, RGA, 잔류기체 분석

I. 서론

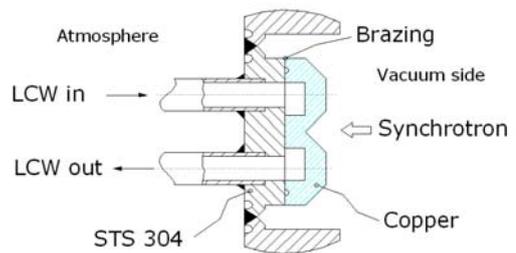
포항가속기 연구소의 저장링과 같은 방사광 발생장치에 사용되는 방사광을 막거나 빔라인이 설치되기 전에 저장링에서 방출되는 방사광을 차단할 목적으로 다양한 형태의 방사광 차단용 부품이 설치된다. 불필요한 방사광을 막아 주는 부분은 주로 무산소동을 사용하며, 저전도수(deionized water)로 냉각하여 방사광에 의한 온도 상승을 줄여준다 [1,2].

방사광 차단용 냉각 부품에서 누수가 발생하면 진공 용기 내부로 냉각수가 유입되는 경우가 있으며 진공 용기 내부가 물에 젖게 되고 저장링 운전을 할 수가 없게 되므로 방사광을 사용하는데 문제가 발생하게 된다. 따라서 냉각 부품의 누설 여부를 조기에 알아내어 신속히 처리함으로써 방사광 사용에 지장이 없도록 하는 것이 진공시스템 유지보수의 중요한 임무 중의 하나 라고 할 수 있다. 본 보고에서는 지금까지 운전 중 발생한 냉각수 누설의 이력과 진공 특성을 살펴보고 이를 토대로 누설 문제의 조기 진단에 필요한 정보를 파악하고 공유하고자 한다.

로 저장링에서 발생되어 사용되지 않는 대부분의 방사광을 차단한다. 이 부품은 최초 118 세트가 설치되었으며 빔라인



(a)



(b)

Fig. 1. Cross sectional view of the cooling components: (a) Photon stop and (b) water cooled flange. LCW indicates low conductivity water.

II. 냉각 부품의 구조와 운전 이력

Fig. 1에 포항가속기 저장링에서 사용되고 있는 방사광 차단용 진공부품의 2가지 대표적인 예를 나타내었다. Fig. 1(a)는 광자막이(photon stop)라 부르는 방사광 차단 장치

* [전자우편] cdp@postech.ac.kr

이 증설됨에 따라서 현재까지 8 세트가 제거 되었다. 앞으로 4세트가 더 제거될 예정이며 그 나머지는 계속 사용된다. 그림에서 보듯이, 이 부품의 특징은 냉각수가 지나가는 통로에서 누설이 발생한다고 하여도 냉각수가 진공 용기 내부로 직접 들어가지 않고 진공 용기 외부로 흘러나오도록 제작되었다. 그러나 누설이 발생되면 진공 용기로 냉각수가 들어가는 것은 막을 수가 있으나, 교체 작업은 불가피하다.

Fig. 1(b)는 수냉플랜지(water cooled flange)라 부르는 냉각 부품의 단면을 나타낸 그림이다. 이 부품은 광자막이와는 달리 소위 “water-to-vacuum” 접합으로 되어 있어서 접합부에 누설이 발생하면 진공 용기 내부로 냉각수가 들어가는 구조로 되어있다. 수냉플랜지에서 냉각수 누설은 현재까지 13년 운전하는 동안 4회 발생하였으며 그 중 한번은 큰 누설 ($\sim 2 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$)이 단시간에 발생하여 저장링 운전에 영향을 주었다. 그 나머지 경우는 헬륨 누설률이 $2 \times 10^{-8} - 6 \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 로 상대적으로 적었고 신속히 교체함으로써 운전에 미치는 영향을 최소화 하였다.

Fig. 2에서 보는바와 같이 수냉플랜지와 광자막이에서의 냉각수 누설 발생횟수는 수냉플랜지의 경우 저장링 운전을 시작한 1년 후부터 1년 이내에 모두 4개가 발생되었고, 광자막이의 경우 3번의 냉각수 누설이 있었으며 운전 후 3~5년째에 모두 발생되었다. 수냉플랜지는 최초 운전

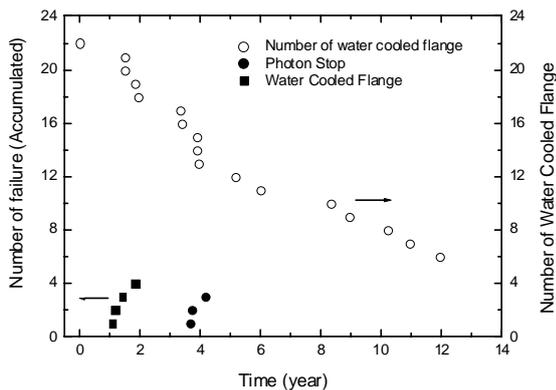


Fig. 2. Accumulated numbers of the water leak as a function of the operation time: (■) water cooled flange (WCF) and (●) photon stop. Decrease of the total number of WCFs (○) installed in the storage ring (SR) is also displayed. About one WCF per year was removed from the SR.

시 22세트가 설치되었으며 그동안 방사광 빔라인이 계속 증설되어서 해당 빔라인의 수냉플랜지를 제거하여왔다. 그 결과 현재 저장링에는 6개의 수냉플랜지가 남아 있다. 이들 중 2세트는 가속기의 수명이 다할 때까지 사용된다.

지금까지 발생한 4번의 수냉플랜지의 냉각수 누수의 발생 원인은 구리-스테인리스강 브레이징 결함으로 판명되었다. 이는 제작시에 접합이 불완전하여, 즉 접합면 전부분이 고르게 접합이 되지 않고 일부분만이 브레이징 되어서, 이 부분이 저전도수와 금속접촉(galvanic) 부식으로 인하여 누설이 발생하였다. 수냉플랜지의 누설부위는 방사광의 진행 방향에서 보아, 좌우 양쪽 끝의 냉각수 공급라인의 위 또는 아래 모서리 부분이었다, 특히 접촉 면적이 작은 곳에서 집중적으로 발생하였다.

III. 냉각수 누설 특성

3.1 진공도 분포

Fig. 3에 수냉플랜지에서 냉각수 누설이 발생되었을 때의 진공도 분포를 나타내었다. 그림의 화살표 부위에서 비교적 큰 누설이 발생하였음에도 불구하고 인접한 진공 용기까지는 눈에 띄는 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 이것은 대형진공 시스템에서 나타나는 일반적인 특징으로 특히 가속기 저장링에서와 같이 얇고 길이가 긴 진공 용기에

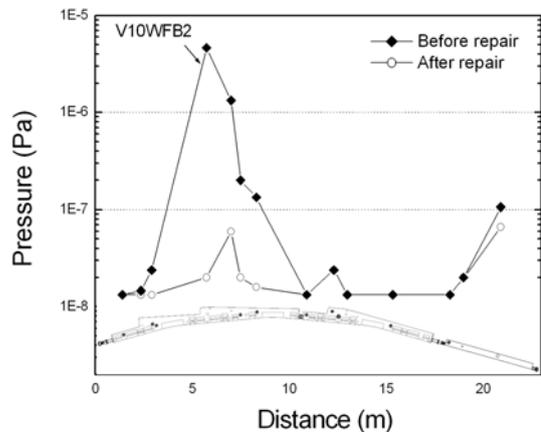


Fig. 3. Pressure distribution caused by the water leakage that developed at V10WFB2.

서는 더욱 그러하다. 포항가속기 저장링 진공 용기는 평균 높이×너비가 4×50 cm이며 길이는 ~5, ~7, ~10 m로 단면적이 작고 길이가 긴 진공 용기 모양이다. 따라서 압력 분포는 길이 방향, 즉 전자의 진행 방향으로 아주 작은 컨덕턴스(conductance, ~40 L/s/m)와 진공 용기를 연결하는 벨로우즈에서의 작은 컨덕턴스(~15 L/s/m)의 영향을 크게 받는다고 할 수 있다. 분자류 영역에서 기체 분자가 표면에서 떨어져 나올 때에 코사인 법칙을 따르므로 이 같이 얇고 긴 진공 용기에서는 분자들이 상하 방향으로 여러 번 운동 한 후에 길이 방향으로 진행 하게 된다[3]. 이 때 물 분자는 다른 구성 기체와는 달리 금속 표면에서의 부착률(sticking coefficient)과 탈리 에너지가 상대적으로 크기 때문에 표면에서 탈착될 때 까지 오랜 시간을 머물게 된다. 그 결과 길이 방향으로 진행이 매우 느리게 되는 것이다. 또한 길이 방향으로 설치되어 있는 여러 대의 진공 펌프가 배기를 하고 있기 때문에 누설 발생시 압력 변화는 해당 진공 용기에 국부적으로 영향을 미치게 된다.

따라서 누설의 초기 단계 (즉, 압력 상승이 작을 때)와 누설 부위가 진공케이지에서 멀리 떨어져 있는 경우 냉각수 누설을 재빨리 알아차리기는 그리 쉽지 않다. 포항가속기 저장링에서는 진공케이지가 평균 6 m 간격으로 설치되어 있고 잔류기체 분석기(RGA)는 23 m 간격으로 설치되어 있어 누설시 압력 변화를 쉽게 알기는 어려웠다. 한 가지 예로, 냉각수 누설 위치에서 약 20 m 떨어진 곳에 설치된 RGA로는 누수 여부를 알아낼 수가 없었다. Fig. 4(a)에서 보듯이 누설 당시 20 m 떨어진 곳에서의 측정된 잔류 기체의 구성은 정상일 때와 큰 차이점을 나타내지 않았다. 이에 반하여 Fig. 4(b)와 같이 누설 지점으로부터 약 5 m 떨어진 곳에 설치된 RGA에서는 비교적 쉽게 누설로 인한 H₂O(m/e=18)의 증가를 측정 할 수 있었다.

한편, 어느 특정 부위에서 냉각수 누설이 의심이 되더라도 그 부분의 어떤 부품에서 누설이 발생하였는지 찾아내는 데에도 상당한 시간과 어려움이 따랐다. 누설이 의심되는 부위에 설치되어 있는 각각의 진공 부품을 차례대로 냉각수의 압력(~3 Kgf/cm²)을 제거함으로써 일어나는 진공 용기 내부의 압력 변화를 통하여 누수 여부를 판단할 수가 있다. 그러나 이 방법은 시간이 너무 소요되기 때문에 차례대로 진공 부품들의 냉각수 공급라인을 진공 펌프로 배기하고 이때 용기 내부의 압력 변화를 측정하여 누설 여부를 판단하였다. 누설이 클 경우에는 즉시 압력이 낮아지지만

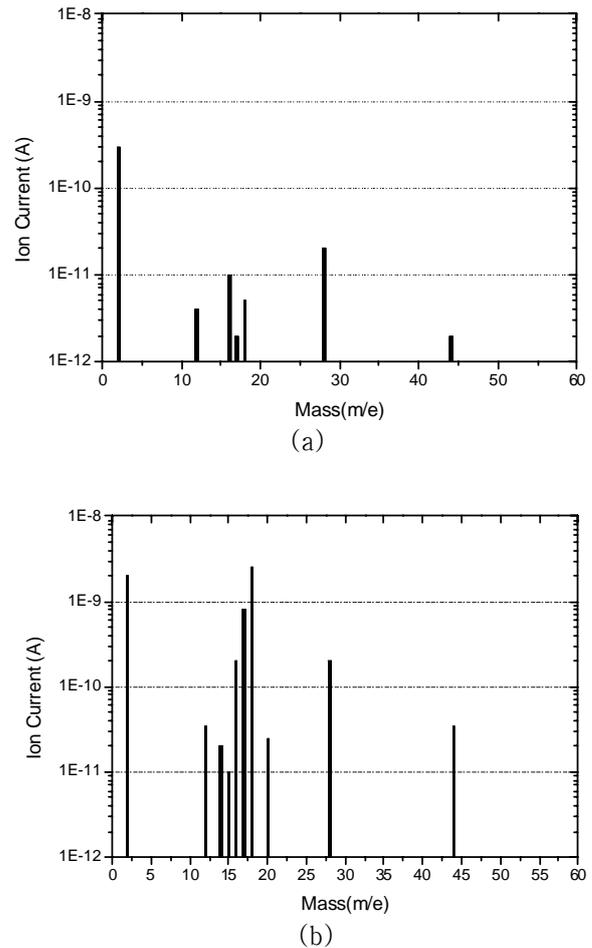


Fig. 4. RGA spectra measured at (a) ~20 m and (b) ~5 m apart from the point of water leak. Ion pumps: On. Electron beam: Off.

누설률이 작은 경우에는 압력의 변화가 늦게 나타났다. 누설 통로에 있던 냉각수가 먼저 배기가 되고 난 후에 압력의 변화가 나타나기 때문이다. 누설률이 작은 경우에는 냉각수를 제거하는데도 어려움이 따르므로 가열하거나 헬륨 등의 기체를 가압함으로써 압력 변화를 측정할 수 있었다.

누설 테스트의 한 예로, 6×10^{-8} Pam³/s의 헬륨 누설률을 가진 부품의 경우, 냉각수 공급 라인을 진공으로 만들어도 즉시 반응을 보이지 않았다. 배기후 약 8시간 후에 인근 진공케이지의 압력이 서서히 감소하기 시작하였으며 그 감소율은 3.3×10^{-7} Pa/day로 매우 작았다. 또 다른 경우에는 냉각수 공급 라인을 진공으로 만들어 누설 경로의 수분이 없어진 약 10시간 경과한 후에 잔류 기체의 변화가 나타나기 시작했다. 이때 수증기의 감소뿐만 아니라 H₂, CH₄, CO/N₂, O₂, CO₂도 감소하였다.

3.2 진공도 변화

Fig. 5에 진공 용기에 냉각수 누수가 있을 때에 나타나는 압력 변화의 특징을 나타내었다. 압력의 변화는 누수 위치로부터 약 3 m 떨어져 있는 곳에서 이온게이지 아날로그 출력을 측정하여 기록하였다. 그림에서 보듯이 압력이 $1-3 \times 10^{-4}$ Pa 사이에서 변할 때에, 천천히 증가하여 빨리 떨어지는 경우, 완만하고 느린 경우, 변화의 빈도가 높은 등 여러 가지의 경우를 볼 수 있다. 이 현상은 작은 누수

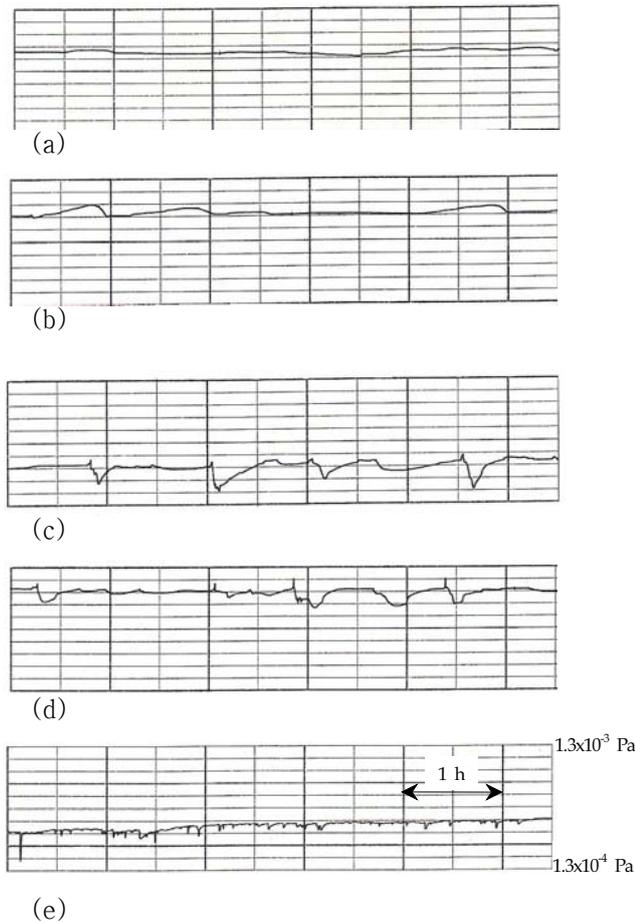


Fig. 5. Variations of the total pressure caused by the water leakage. The vertical axis shows the pressure in Pa and the abscissa displays the time in h. All scales are the same as shown in (e). (a)–(d) show the pressure changes measured at 3 m apart from the point of water leak, while (e) measured at 12 m apart from the source point. Ion pumps: On. Electron beam: Off.

경로를 통하여 물이 누설되어 진공 중으로 탈착(증발)될 때에 주변의 열을 앗아 가기 때문에 누설통로 끝 부분에서 물이 얼고 녹는 현상이 반복되며 이것이 압력의 변화로 나타난 것으로 이해할 수 있다.

한편, 위치에 따른 압력 변화도 다르게 나타나는데, 한 예로 Fig. 5(d), (e)에 측정 위치가 각각 3 m, 12 m 떨어진 곳에서 동시에 측정한 진공도 변화를 나타내었다. 12 m 떨어진 곳에서 측정한 압력 변화[Fig. 5(e)]는 그 모양이 3 m에서 측정한 것[Fig. 5(d)]보다 그 크기가 작을 뿐만 아니라 모양이 다름을 볼 수 있다. 누수 부위에 인접한 경우에 수증기 압력의 변화를 직접 볼 수 있지만 먼 곳에서는 수증기 때문에 발생하는 CH_4 와 같은 다른 기체의 압력 변화가 측정된 것이다. (3.3절 참조)

3.3 잔류 기체 변화

수냉플랜지에서 냉각수 누설이 발생하였을 때 잔류 기체의 구성이 달라지는데 누설 위치로부터 RGA까지 거리(또는 위치)에 따라서, 이온 펌프의 On/Off에 따라서, 전자빔의 On/Off 따라서 크게 달라진다.

앞 절 Fig. 4에서 살펴보았듯이 누설 위치로부터 RGA까지 거리가 가까운 곳에서는 누설 여부를 비교적 쉽게 판단할 수가 있었으나, 누설 위치로부터 20 m 떨어진 곳에서의 측정된 잔류 기체의 구성으로는 누설 여부를 판단하기가 불가능하였다. 그러나 이때 이온 펌프를 Off 하고 잔류 기체를 측정하면 특징적인 변화가 일어나므로 누설 여부를 판단이 가능하다. Fig. 6의 기호 \blacksquare 는 누수가 발생되었을

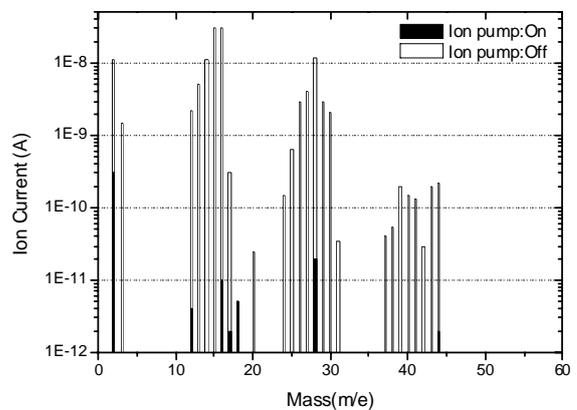


Fig. 6. RGA spectra measured at ~ 20 m apart from the point of water leakage. (\blacksquare) Ion pumps: On. (\square) Ion pumps: Off.

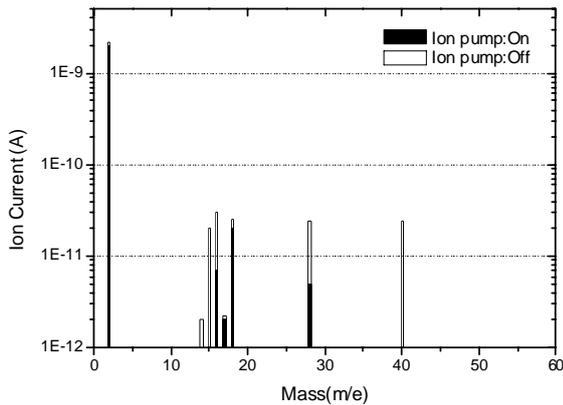


Fig. 7. RGA spectra measured without leaks. (■) Ion pumps: On. (□) Ion pumps: Off.

때 이온 펌프를 Off 하고, 누수 위치에서 20 m 떨어진 곳에서 측정된 잔류 기체를 보여주고 있다(전자빔 Off). Fig. 6에서 물분자의 변화가 여전히 측정되지 않음을 볼 수 있지만, 잔류 기체의 특징적인 변화를 나타내고 있다. 즉, 부분압의 증가는 CH₄, CO/N₂, H₂, NO, Ar이 주도하는 것을 알 수 있다.

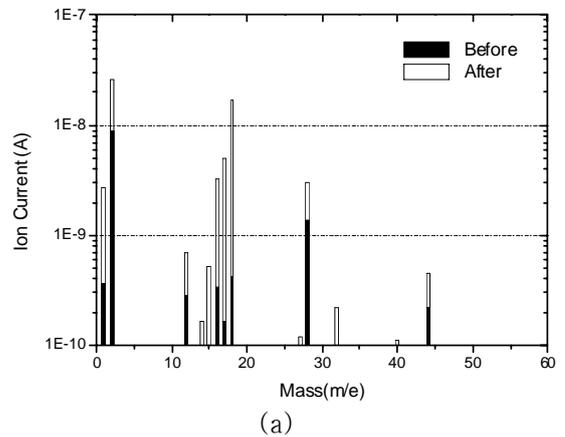
이러한 특징은, 누수가 없을 때 측정된 잔류 기체의 구성 변화와 비교해보면 그 차이점을 쉽게 알 수 있다. 한 예로 정상적으로 운전되고 있는 진공 시스템에서 측정된 잔류 기체를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7(■)는 이온 펌프 On, Fig. 7(□)는 이온 펌프 Off 하였을 때 측정된 것이다. 이온 펌프를 Off 하였을 경우 잔류 기체의 크기 변화는 주로 CH₄와 Ar임을 알 수 있으나 그 크기는 매우 작음을 알 수 있다.

누수 유무에 따른 잔류 기체 구성을 비교해보면, 누수가 있을 때 탄화수소(특히 CH₄)의 증가가 가장 크게 나타났으며 그 다음으로 N₂/CO, H₂, NO, Ar의 순으로 증가하는 것을 볼 수 있다(Fig. 6). 이는 저장링의 주펌프로 사용하고 있는 NEG 펌프(ST707; WP950 모듈 형태)에서 누수가 진행될 때 표면이 포화되고 그 결과 수소를 비롯한 활성 기체의 배기 속도가 크게 감소하기 때문이며, 특히 탄화수소 계열에 대한 NEG의 배기 작용이 거의 없기 때문이다 [4].

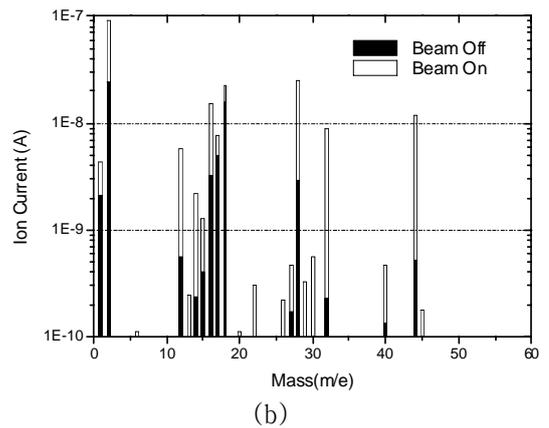
이 그림에서 N₂/CO, H₂, Ar의 증가량 중 일부는 냉각수 속에 녹아 있는 공기의 구성 성분들이 누수가 될 때 진공 용기 내부에서 측정이 되는 것으로 생각된다. 탄화수소와 일산화탄소의 증가의 또 다른 원인은 공기 또는 수증기가 이온 게이지와 이온 펌프 내에서 분해 또는 화학 반응을

통하여 생성된 것으로 판단된다. 진공 용기 내부로 들어온 물분자는 열음극형 이온게이지에서 고온의 텅스텐 필라멘트와 화학적인 반응을 일으킨다. 이 반응 중에서 중요한 것으로 H₂O → 2H+W_xO_y 그리고 H₂O → O, CO, W_xO_y, H, H₂가 있다 [5,6]. 이러한 반응에서 발생한 기상의 원자들은 화학적으로 활성 상태에 있으므로 필라멘트 주위의 용기 표면에서 다음과 같은 반응이 일어난다: H+H → H₂, H+C → C_xH_y, H+C+M_xO_y → CO. 결국 H₂, C_xH_y, CO의 발생이 선택적으로 일어나게 된다. 이때 NEG 펌프에서는 H₂, CO에 대한 배기속도가 어느 정도 존재하므로, 상대적으로 배기작용이 없는 C_xH_y(특히 CH₄)의 증가가 더 크게 나타나는 것으로 이해된다.

Fig. 8에 냉각수 누설 전후의 잔류기체 구성과 누설 후



(a)



(b)

Fig. 8. (a) Compositions of residual gases before and after water leakage. Ion pumps: On. (b) Compositions of residual gases before and after the electron beam injection into the storage ring. Ion pumps: On.

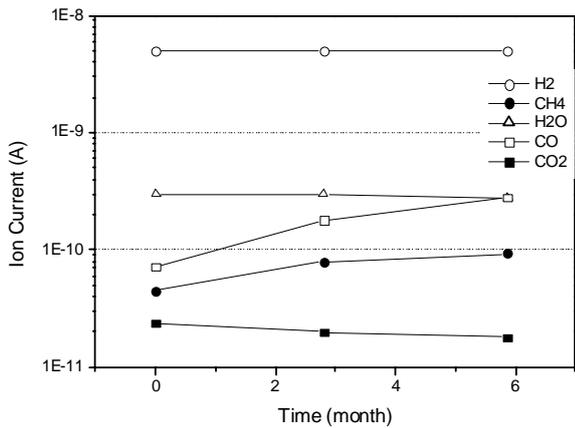


Fig. 9. Changes of partial pressures in the storage ring caused by a water leakage. Compositions of residual gases were measured during the machine operation for 6 months.

전자빔 On/Off 때의 잔류 기체를 나타내었다. 그림 Fig. 8(a)와 같이 누설이 없을 때(■)에는 작은 공기 누출을 제외하고는 초고진공의 잔류 기체 구성을 나타내 주고 있다. 수냉플랜지에서 누설이 발생한 후(□)에는, 앞에서 살펴본 듯이, 수증기 뿐 만 아니라 H₂, CO/N₂, O₂, Ar, CO₂의 증가도 볼 수 있는데 이들은 냉각수 속에 녹아 있는 공기의 구성 성분들과 수증기가 이온 게이지에서 분해되는 것과 이온 펌프 내에서 분해되어 생성된 것으로 보인다. 이것은 냉각수 누설 위치 부근의 이온 펌프를 끄면 H₂, CO, O₂의 크기가 오히려 감소되는 것으로도 확인할 수 있다.

전자가 저장되었을 때는 방사광과 수냉플랜지의 구리 표면과의 상호 작용에 의하여 광자유도 기체방출이 발생되는데 H₂>CO>CO₂>CH₄>Ar의 크기 순서로 기체가 방출된다 [7]. Fig. 8(b)와 같이 누설시 잔류 기체의 구성은 누설이 없을 때의 광자유도 기체방출에 의한 기체 증가에 더하여 CH₄, O₂, NO의 증가량이 선택적으로 큰 것을 관찰할 수가 있다. 이 현상은 진공 용기 내부로 들어온 물분자가 이온 펌프(인가전압 6 KV)의 배기 작용중 이온화 과정에서 일어나 증가하는 것으로 판단된다. 수증기는 이온 펌프에서 H₂O → 2H+O로 분해되며 이때 발생한 기상의 수소, 산소 원자는 진공 용기 표면에서 H+H → H₂, O+O → O₂, H+C → C_xH_y, H+C+M_xO_y → CO와 같이 반응하여 H₂, CH₄, CO, O₂와 같은 기체를 만들어 내므로 이들 기체의 증가가 두드러진다. 이 그림에서 물분자의 소량 상승은 수냉플랜

지의 온도가 상승함에 따라서 탈착되기 때문에 나타나는 것으로 방사광에 직접 노출되지 않는 수냉플랜지 구리 표면에서 발생하는 것이다. 한편 Fig. 6(□)과 8(b)에서 NO(m/e=30)의 증가도 볼 수 있는데 이온게이지, 이온펌프 내부에서 공기 분자의 이온화 과정에서 HNO₃가 생성되며 RGA에서 이온화될 때 NO의 형태로 측정된다 [8]. 이 잔류기체는 방사광과 공기 물분자의 반응에서도 생성 가능하며 물분자의 부분압이 낮을 때에 NO는 사라진다.

마지막으로 저장링 운전중 누수의 크기 변화를 Fig. 9에 나타내었다. 그림은 누수 위치로부터 6 m 떨어진 곳에서 6개월 동안 측정한 그래프이다. 누수 발생 전 진공도는 7×10⁻⁸ Pa이었으며 누수량이 점차 증가하여 6개월 후에는 3×10⁻⁷ Pa로 압력이 증가 하였다. 그림에서 보듯이 이 기간 동안 수증기의 증가는 측정 가능하지 않았으며 앞에서 설명했듯이 CH₄, CO의 소량 증가가 발견되었다. 이렇게 장기간에 걸쳐 누설이 발전될 때에도 잔류기체 구성 변화는 크지 않기 때문에 누설 여부를 알아내는 데에는 CH₄, CO의 소량증가를 주의 깊게 살펴보아야 함을 알 수 있다.

IV. 결 론

포항가속기연구소 저장링에 설치된 방사광 차단용 진공 부품의 냉각수 누설 이력과 진공 특성을 진공도 분포, 압력 변화, 잔류기체의 변화 등을 통하여 살펴보았다. 냉각수 누설 시에는 가속기 저장링 진공용기의 특성상 압력상승 부위가 제한적이라는 특징을 나타내었다. 누설 압력상승은 이온게이지의 압력 변화로 판단할 수 있었으며 잔류 기체의 변화 양상으로도 측정 가능하였다. 잔류 기체의 변화 특성은 누설 위치로부터 잔류기체 분석기까지의 거리와, 이온 펌프의 On/Off, 전자빔의 On/Off 따라서 크게 달랐으며 CH₄, H₂, CO, NO 등 특정 기체의 상승이 두드러지게 나타났다. 냉각수 누설의 조기 발견에는 물분자를 측정하기보다는 이들 기체의 비정상적인 증가를 분석함으로써 판단할 수 있으며 잔류기체 분석이 유용함을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] C. D. Park, K. H. Kil, C. K. Kim and S. M. Chung, *American Institute of Physics Conference Proceeding*, No **236** (AIP, New York, USA, 1990), p. 202.
- [2] K. H. Gil, C. K. Kim, and C. W. Chung, *J. Kor. Vac. Soc.* **16**, 46 (2007).
- [3] 배석희, 인상렬, 정광화, 이영백, 신용현, “진공공학”, 한국경제신문 (2000).
- [4] C. D. Park, Y. J. Han, H. J. Kim, H. S. Youn and W. C. Choi, *J. Kor. Vac. Soc.* **1**, 336 (1992).
- [5] J. M. Lafferty, “*Foundation of Vacuum Science and Technology*”, John Wiley & Sons, Inc. p. **472**, 638 (1998).
- [6] M. H. Hablanian, “*High-Vacuum Technology. A practical guide*”, Marcel Dekker, Inc. p.451 (1990).
- [7] C. D. Park, Y. J. Han, C. K. Kim, and S. M. Chung, *Proceedings of the 1997 Particle Accelerator Conference PAC97*, (IEEE, Piscataway, USA, 1997), p. 3633.
- [8] J. Miertusova, F. Giacuzzo, F. Daclon, *Proceedings of the 1994 European Particle Accelerator Conference EPAC94*, p. 2470.

Characteristics of Water Leakage from Cooling Components in a Storage Ring

C. D. Park*

Vacuum Lab., Pohang Accelerator Laboratory, Pohang 790-784

(Received November 5 2007)

We analyzed the characteristics of water leakage from cooling components of the storage ring in the Pohang Light Source. The water leaks led localized pressure bumps and abnormal pressure changes. The leakage also changed the residual gas compositions depending not only on the position between leakage place to gas analyzer but also on on/off switching of ion pump and electron beam. We found that the residual gas analysis of CH₄, CO, NO was useful in determining water leaks.

Key words : Synchrotron, Water leakage, Residual Gas Analysis

* [E-mail] cdp@postech.ac.kr