

포항가속기 저장링 진공 Chamber 용접

최만호 · 정상수 · 김효윤 · 김명진 · 이해철 · 한영진 · 최우천

포항공과대학 포항가속기연구소
(1993년 6월 21일 접수)

UHV Welding for The PLS Vacuum Chambers

M. H. Choi, S. S. Jeong, H. Y. Kim, M. J. Kim,
H. C. Lee, Y. J. Han and W. C. Choi

Pohang Accelerator Laboratory, Postech
(Received June 21, 1993)

요 약 - 본 논문은 포항가속기에서 건설 중인 진공 chamber의 용접에 관한 것이다. 저장링에 전자빔을 5시간 이상 저장하기 위하여 10^{-10} torr 이하로 진공도를 유지하도록 설계되어 있기 때문에 초고진공에 적합한 TIG 용접(tungsten inert gas welding)을 하였다. 진공 chamber는 Al 5083-H321이며 flange의 재질은 Al 2219-T852이다. Sector chamber I, II의 총 용접 길이는 각각 27 m, 37 m이며 진공에 유해한 균열과 virtual leak가 생기지 않도록 하는 용접조건 등을 선정하였다.

Abstract - In order to maintain a beam life time of more than 5 hours, the PLS vacuum chamber should be in the pressure of 10^{-10} torr. Thus welding of The PLS chambers should be free of cracks and virtual leaks. Important things related to chamber closed welding and Al-flange welding and described such as welding preparation, welding condition, leak test and welding repair.

1. 서 론

본 논문은 포항방사광가속기(PLS; pohang light source) 진공 chamber의 용접에 관한 것이다. 포항가속기는 168 m의 선형가속기와 둘레가 280 m인 저장링으로 구분된다. 저장링은 12 superperiod로 구성되며 1 superperiod는 2개의 sector chamber와 1개의 straight chamber로 구성되어 있다. Sector chamber는 7 m 길이의 sector I과 10 m 길이의 sector II로 되어 있고 그 재질은 Al 583-H321이다. 각 sector chamber는 상하판으로 구성되고, 상하판을 겹쳐 놓고 외주를 따라 TIG 용접을 실시하게 되며 또한 top, bottom에 여러 크기의 Al flange(Al 2219-T852)를 용접하게 된다.

저장링은 전자빔(electron beam)을 5시간 이상 저장하기 위해 chamber를 10^{-10} torr 이하의 초고진공을

유지하여야 하므로[1] leak가 없고, virtual leak, blow-holes, 용접변형 등을 최소화하는 용접이 요구된다[2-4].

본 논문에서는 저장링 sector chamber를 용접하기 위한 용접준비, 용접설계와 용접공정 그리고 용접검사에 대해서 논의하기로 한다.

2. 용접준비

2.1. 기계가공

Chamber의 재질인 Al 5083-H321은 용접성, 기계적가공성, 기계적강도 등이 우수하며, sector I의 소재 크기는 $102 \times 114 \times 7110$ mm이고, sector II는 $102 \times 165 \times 10160$ mm 크기의 aluminum plate이다.

진공 chamber는 치수와 가공 표면의 정밀도가 매우 높은 제품이다. 가공시 고려되어야 할 사항으로 10 m와

7 m 길이의 긴 제품을 각 공정별로 handling하기 위한 공정이 계획되어져야 하며 가공 cutter와 장비의 bed, spindle 기타 chamber에 접촉되는 부분들은 기름 성분이 없는 깨끗한(clean) 상태로 가공이 되어야 한다. 그리고 가공시 사용하는 절삭유(lubricant)에 sulphur, silicon 등이 함유되어 있으면 초고진공시 가스방출(out gassing)을 하게 되므로 이러한 원소들을 함유하지 않은 Yushiro ken Mic-7(H) 절삭유를 사용한다.

진공 chamber의 전체적인 가공 순서는 상판가공, 하판가공, 상하판의 조립가공, 수작업 사상가공, 화학세척 순으로 이루어지며, 상판과 하판을 각각 분리시켜 가공하여 최종적으로 중요한 위치는 상하판 조립을 하여 동시가공으로 가공이 완료된다[5].

진공 chamber의 가공 장비는 복잡한 형상의 가공이 가능한 CNC 5축 planomiller이고, chamber 3개를 동시 가공할 수 있으며, 가공 가능한 bed 길이는 30 m이다.

2.2. 전처리(UHV Chemical Cleaning)

기계가공 후 chamber 표면에 존재하는 기름(oil), 산화피막(Al_2O_3), 먼지(dust) 등을 제거하기 위해서 화학세척(chemical cleaning)을 실시한다. 세척 후에 불순물이 용접할 표면에 존재하면 용접시 bead 주위에서나 용융되고 있는 bead에 검은 탄소반점들을 동반하게 된다. 오염은 불순물 혼입, blow-holes 등을 형성하거나 용접에 악영향을 끼칠 수 있다. 그리고 다량의 산화막이 있으면 용융되지 않는 산화 Al이 용착 금속 내부에 존재하기 때문에 leak를 유발할 수 있다. 따라서 이것들을 방지하도록 초고진공에 적합한 표준 화학세척을 하여야 한다.

포항가속기 화학세척 방법은[6] 첫째, Diversey 909로 증기세척을 한 후 탈이온수(DI water)로 린스(rinse)한다. 둘째, chamber 표면의 탄화수소(hydrocarbon)나 탄소부착물(carbon deposit)들은 Mirachem 100으로 제거한 후 탈이온수로 린스한다. 셋째, 세척 정도는 pH가 7~8이 될 때까지 계속 린스를 반복한다. 넷째, 세척이 완료되면 질소가스로 건조시킨 후 즉시 포장을 한다.

화학세척을 한 후 시간이 경과함에 따라 표면 산화막이 급격히 증가하기 때문에 48시간 이내에 용접을 시작하도록 하여야 한다.

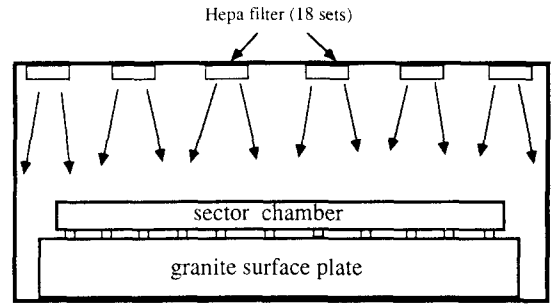


Fig. 1. Clean booth for welding.

2.3. 청정실과 습도

화학세척이 완료된 chamber는 금속증기(fume), 먼지(airborne particles), 습기(moisture) 등으로부터 오염을 막기 위해 양압(positive pressure)이 유지되고, 청정된 공기(filtered air)가 공급되는 청정실(clean booth)에서 용접을 한다. 용접청정실의 청정도(clean grade)는 10,000 zone 이하이며 그 구조는 Fig. 1과 같다. 건조한 공기는 hepa filter를 통해서 청정실 내부로 공급하게 된다.

용접시 상대습도가 80%를 넘으면 용착금속 내부에 micro blow-holes 등이 다량으로 존재하게 되며 이것이 virtual leak의 원인이 되기도 한다. 습기는 용접할 부위의 표면, 용접봉, torch, Ar gas, air에 흡수되어[7] 있다가 용접시 용융 aluminium과 반응하여 수소가스를 방출하여 bubbles을 만든다. Bubbles은 virtual leak를 만들어 진공 중에서 장시간 가스방출을 하게 된다. 따라서, 포항가속기에서는 습도 55% 이내에서 용접하며 용접청정실 내부에서 진공에 유해한 요인들이 발생되지 않도록 작업복, 신발, 장갑 등은 기름기 없고(oil-free), 보푸라기 없고(lint-free), 먼지가 발생되지 않는(dust-free) 것만을 착용한다.

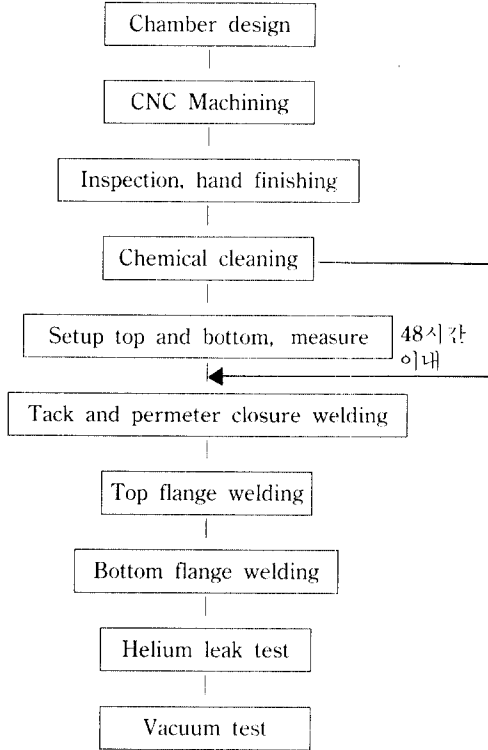
3. 용접설계와 용접공정[8]

Chamber의 초고진공 용접은 용접부위의 강도보다도 기밀이 우선적으로 요구된다. 따라서 기밀을 쉽게 하도록 하기 위해 용접부의 단면적을 최대한 줄인다. Fig. 2는 초고진공을 위한 용접홈(welding groove)이고 sector chamber I, II의 상하판 용접부는 (A)와 같이 돌출시키며, chamber와 end plate는 (B)와 같이 tre-

ch를 가공한다. 그리고 flange 용접을 위해 (C)와 같이 chamber에 trench를 가공한다. 이렇게 가공된 용접부 형상은 열진도량이 적으므로 용접이 쉽다. 그리고 용접결함이 발견되었을 때 보수용접을 하기가 대단히 용이할 뿐만 아니라 용접에 의한 수축변형을 줄일 수

있다. 저장링 chamber의 용접공정은 Table 1과 같고 sector chamber I, II의 초고진공을 목적으로 한 총 용접길이는 27 m, 37 m이다.

Table 1. Welding procedure of sector chamber



3.1. 가접(Tack Welding)

가접은 진공 chamber 내면의 산화를 방지하기 위해 순도 99.999%의 액체 Ar gas를 5l/min으로 내부에 흘려 보내면서, chamber의 안쪽(inside)에서 시작하여 바깥쪽(outside)에서 완료한다. 이것은 본용접에 의한 chamber 변형을 줄이기 위함이다. 가접방법은 먼저 가접할 부분을 직경 0.1~0.2 mm 스테인레스스틸 부러쉬(stainless steel brush)로 문지른 다음 가접길이는 1~2 cm, 간격은 40~50 cm로 하고, chamber 양쪽 끝의 4개소의 본용접 도중에 균열이 생기지 않도록 6 cm 정도로 길게 한다.

가접이 완료되면 본용접을 좋게 하기 위해서 용접 덧살을 금속 cutter로서 제거한다.

3.2. 전둘레 용접(Perimeter Closure Welding)

Chamber 전둘레 용접은 용접시 청정작용(cleaning action)이 있는 고주파 교류 TIG 용접기를 이용한다. 포항가속기 chamber 구조상 진공 특성이 좋은 내면 용접을 할 수 없기 때문에 바깥쪽에서 Fig.3과 같이 root 부분까지 용융하여 gas trap에 의한 virtual leak가 생기지 않도록 Table 2와 같은 용접조건을 설정하였다. 진공용기 제작에 있어서 용접균열이 leak 결함의 대부분을 차지한다. 따라서, Al 5083-H321간의 용접시 강도보다도 균열을 최소화하는 것이 우선이기 때문에

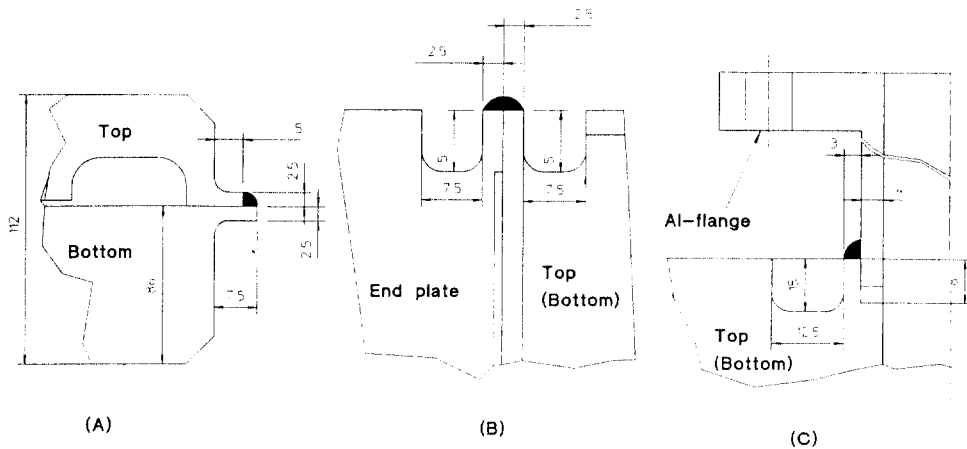


Fig. 2. Welding groove for UHV.

용접봉으로 ER 5356-1.6 mm를 사용하였다.

용접은 Fig. 4와 같이 바깥쪽에서 시작하여 안쪽에서 완료한다. 그 방법은 먼저 용접할 부분을 스테레스틸 부러쉬로 문질러 산화막을 없앤 다음 약 30 cm 정도씩 후진법(backstep sequence)으로 용접을 완성한다. 이것은 종수축(longitudinal shrinkage)과 잔류응력(residual stress)을 방지하기 위함이다. 용접의 시작과 끝은 결합이 생길 우려가 높기 때문에 가접부위를 피하도록 해야 하며 용접을 중단할 때는 bead를 1~2 cm 정도 겹치도록 하여 crater 처리를 한다.

3.3. Chamber와 End Plate 용접

전둘레 용접이 완료되면 chamber 양끝에 입/출구 plate를 조립한 후 용접을 실시한다. 이 부분은 용접 선이 겹쳐 잔류응력이 집중될 우려가 매우 높기 때문에 Fig. 5와 같이 최종적으로 용접한다.

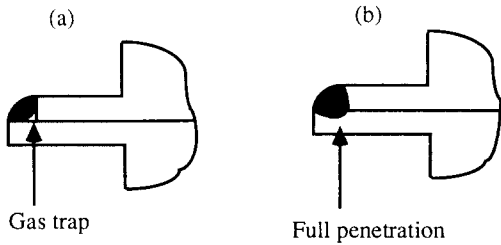


Fig. 3. Comparison of penetration.

3.4. Flange 용접

Chamber에는 port를 가공하고 이 port에 Al-flange를 용접한다. Al-flange는 한 쪽에 Tic coating된 knife-edge를 갖고 있어서 진공표준 부품을 여기에 조립할 수 있다. Al-flange 용접을 위한 groove는 Fig. 2-(C)와 같다.

Sector chamber I에는 10" flange-3개(beamport 1개), 8" flange-6개, 6" flange 1개, 4.5" flange-1개, 2.75" flange-2개를 용접하며, sector II에는 10" flange-2개 (beam port), 8" flange-10개, 6" flange-4개, 2.75" flange-3개를 용접한다. Al-flange의 재질이 Al 2219-T852 이고 chamber는 Al 5083-H321이기 때문에 균열발생이 최소화할 수 있는 ER 4043-2.4 mm 용접봉을 사용한다.

Fig. 6과 같이 sector I의 top flange 용접순서는 Q1, P2, P3, I1이며, bottom flange의 용접순서는 Q1, P2,

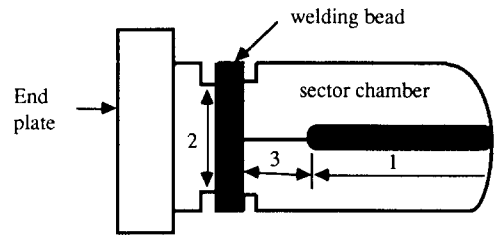


Fig. 5. Sector chamber and End plate welding.

Table 2. The condition of perimeter closure welding for sector chamber I and II

Base metal	Filler rod	Current	Voltage	Asr shield flow
Al 5083-H321	ER 5356-1.6 mm	120~130 Amp	18~20 V	10 l/min
Speed	Preflow time	Postflow time	Room temperature & humidity	Electrode material & diameter
300 mm	6 sec	20 sec	20~29°C, 40~55%	Zirconium 3.2 mm
150~180 sec				

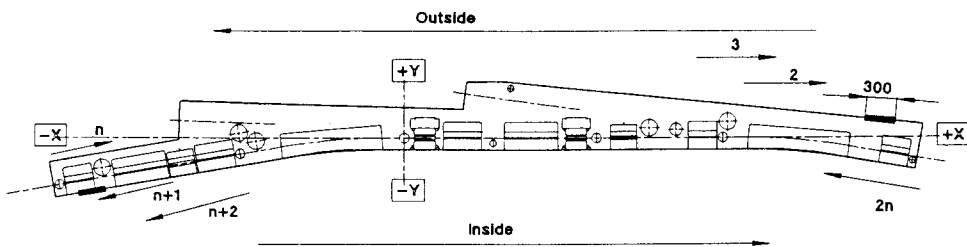


Fig. 4. Welding procedure of sector chamber II (sector chamber I).

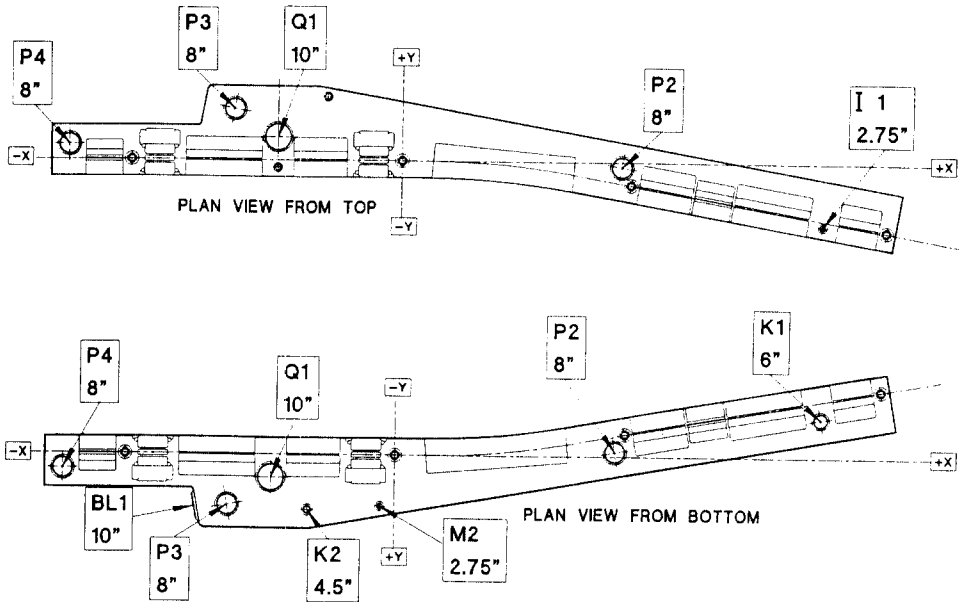


Fig. 6. Sector chamber I flange size.

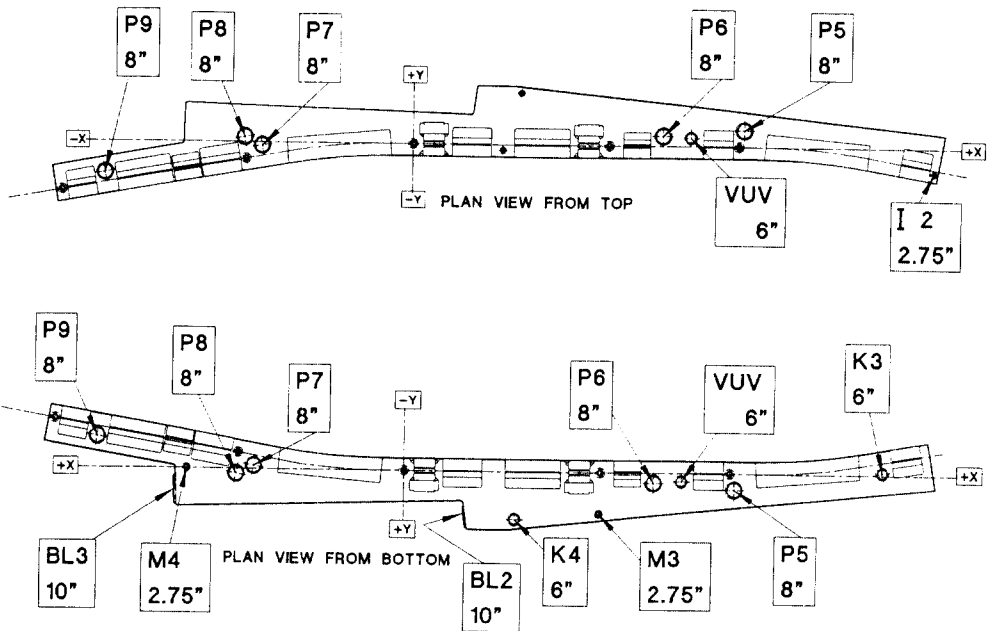


Fig. 7. Sector chamber II flange size.

K1, P4, P3, K2, M2이다. Fig. 7과 같이 sector II의 top flange 용접순서는 I2, P7, VUV, P9, P8, P6, P5이며, sector II bottom flange의 용접순서는 P7, K4, M3, VUV, P9, M4, P8, P6, P5, K3이다. 이러한 용접

순서는 용접시 발생하는 다량의 열을 분산시켜서 열 변형을 최대한 막기 위함이다.

3.4.1. 8" Flange 용접

8" flange(10", 6" 포함)에 맞는 cover block을 올려

놓고 6개소에 가접을 실시한다. 용접 시작점은 beam path의 직각 위치에서 Fig. 8과 같이 1/4씩 bead를 완성한다. 이것은 이 flange에 조립되는 photon stop이 용접 열변형으로 인하여 'Y' 방향으로 기우는 것을 최대한 막기 위함이다. 이 때의 용접조건은 Table 3과 같다.

Flange O.D.와 Port I.D. 사이의 틈새는 가능한 0.2 mm 이내로 줄이는 것이 좋다. 만약 틈새가 이 값보다 크면 용접수축에 의해서 균열을 발생시킨다. 따라서, chamber와 flange의 용접부는 틈새가 없이 접촉되어야 용접 후에 균열을 줄일 수 있다.

3.4.2. 2.75" Flange 용접

용접방법은 8" flange와 같다. 그러나 8" flange의 용접과는 달리 chamber와 2.75"(4.5" 포함) flange 사이에서는 열용량이 큰 차이를 보이기 때문에 변형과 균열을 발생시킨다. 2.75" flange(4.5" 포함) 틈새는 8"보다도 훨씬 균열에 민감하기 때문에 용접하는 동안에 몇 번의 균열이(틈새: 0.2~1.0 mm) 발생하였다. 균열이 생기면 root 부분까지 bead를 제거한 후 보수 용접을 실시하여 해결한다.

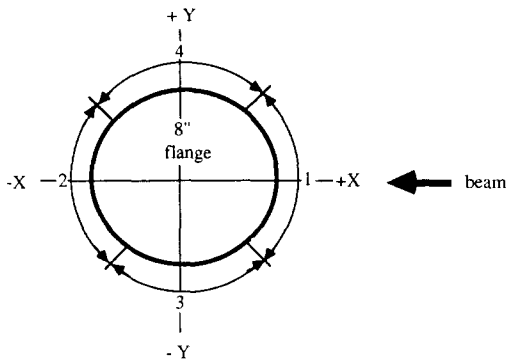


Fig. 8. Flange welding procedure.

Table 3. Welding condition of flange

Base metal	Filler rod	Current	Voltage	Asr shield flow
Al 5083-H321 Al 2219-T852	ER 4043-2.4 mm	165~175 Amp	20~22 V	15 l/min
Speed	Preflow time	Postflow time	Room temperature & humidity	Electrode material & diameter
300 mm 150~180 sec	6 sec	20 sec	20~29°C, 40~55%	Zirconium 3.2 mm

4. 용접검사

Al 합금의 용접부에 발생하기 쉬운 결함은 균열, 융합불량, 비틀림, blow-holes이다. 진공 chamber에 가장 치명적인 것은 leak로서 그 원인의 대부분이 균열에 기인한다. 따라서 용접이 완료되면 육안으로 균열, blow-holes 등의 유무를 조사하며 균열 등의 결함이 발견되면 금속 cutter로서 bead를 root 부분까지 완전히 제거한 후 보수(repair) 용접을 해야 한다[9].

육안검사로 더 이상 결함이 발견되지 않으면 helium leak test를 실시하며[10] leak 존재시 그 부분의 bead를 충분히 제거하여 보수용접을 한 후 다시 leak test를 실시한다. leak test는 1×10^{-10} torr·l/sec 이하의 leak rate를 갖는 helium leak tester로 chamber의 모든 용접부분의 leak의 유무를 조사한다.

Fig 3과 같은 gas trap에 의한 virtual leak를 조사하기 위해서 RGA(residual gas analyzer)로부터 잔류

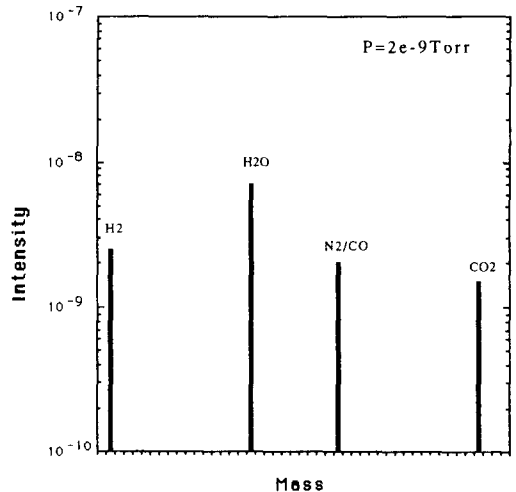


Fig. 9. RGA spectrum of cell #10-1 with 15 hours pumping down after turning off the bake-out.

argon gas의 유무를 조사하였다. 일반적으로 pumping down을 실시하여 48시간 정도이면 Ar gas는 제거된다. Fig. 9는 150°C로 48시간 동안 bake-out을 하고 15시간 경과 후의 RGA 분석이다. 따라서 용접 virtual leak는 무시할 수 있다.

이러한 공정에 의해 제작된 포항가속기 저장링 진공 chamber의 helium leak test는 1×10^{-10} torr·l/sec 이하의 성공적인 결과를 얻었다.

5. 향후 추진 사항

현재까지 chamber와 Al-flange 용접에서 몇 부분이 leak가 있어서 보수를 하였다. 앞으로는 leak의 원인 규명과 대책을 강구하여 용접품질을 높이도록 할 계획이다. 저장링 chamber 용접은 금년 9월말까지 계속될 것이며, 이후에는 straight chamber 용접이 계속될 것이다.

참고문헌

1. C. K. Kim, K. H. Kil, W. C. Choi and S. Y. Park, *J. Kor. Vac. Sci.* **1**, 24 (1992).
2. 최만호, 박승용, 김명진, 이해철, 김효윤, 최우천, 한국진공학회 제3회 학술발표회 논문 개요집, 109-110 (1992).
3. 최만호, 김명진, 이해철, 김효윤, 이재우, 최우천, 대한용접학회 추계학술발표 개요집, 100-102 (1992).
4. 최만호, 류준길, 김명진, 김효윤, 이해철, 한영진, 최우천, 대한용접학회 춘계학술발표 개요집, 50-52 (1993).
5. H. Y. Kim, J. W. Lee and W. C. Choi, Machining Specification of sector chambers for The PLS Storage Ring, EN/SR(VA)-92-019, Nov. 1992.
6. 구선희, 권혁채, 한국진공학회 제3회 학술발표회 논문 개요집, 111-112 (1992).
7. C. H. Lee, R. W. Chang, *J. Kor. Wel. Sci.* **10**(3), 1 (1992).
8. M. H. Choi, S. S. Jeong and W. C. Choi, TIG Welding for The PLS Sector Chamber, TR/SR(VA)-93-003, APPRL, 1993.
9. 최만호, 김명진, 이해철, 김효윤, 한영진, 이재우, 최우천, 한국진공학회 제4회 학술발표회 논문 개요집, 102-103 (1993).
10. M. H. Choi, Y. J. Han, M. J. Kim, H. Y. Kim, H. C. Lee and W. C. Choi, 한국비파괴검사학회 춘계 학술발표회, 33-45 (1993).