

# 가속기 저장링 삽입장치 진공 챔버의 용접

최만호\* · 한영진\*\* · 김창균\*\* · 정진화\*\* · 권영각\*\*\*

## The Welding Characteristics of the Insertion Device Vacuum Chamber of PLS Storage Ring

M. H. Choi\*, Y. J. Han\*\*, C. K. Kim\*\*, C. W. Chung\*\* and Y. G. Kweon\*\*\*

**Key Words** : Ultra-high vacuum(초고진공), GTAW(Gas tungsten arc welding), Leak rate(누설률), Chemical cleaning(화학세정), Residual gas(잔류가스), Welding deformation(용접변형), Welding procedure(용접시공)

### Abstract

PAL(Pohang Accelerator Laboratory) designed and manufactured a 5m-long straight vacuum chamber to adopt U7 undulator that is the first insertion device. Top and bottom plates of the vacuum chamber were made of Al alloy A5083-H321, and welded together by the GTAW welding. The leak rate is less than  $1 \times 10^{-10}$  torr · l/s with negligible welding deformation. The pressure has been maintained below  $10^{-10}$  torr after installation. This paper reports the welding process and the test method applied to achieve ultimate vacuum performance and to satisfy integrity of welds.

### 1. 서 론

제 3 세대 방사광 가속기를 특징 짓는 것은 전자빔 에미턴스(emittance)가 낮고 삽입장치<sup>1)</sup>(insertion device)를 설치할 수 있는 직선구간을 많이 보유하고 있어야 하며, 삽입장치란 저장링<sup>2)</sup> 직선구간에 설치하여 고휘도의 방사광을 발생시키는 장치이다. 포항 가속기는 10대의 삽입장치를 설치할 수 있는 직선 구간을 보유하고 있으며, 현재 저장링 8번 셀에 삽입장치(U7)가 1대 설치되어 있다. 7cm 주기의 복합

(hybrid)형 언들레이터(undulator)인 U7은 높은 에너지 분해능과 높은 집속성의 방사광을 제공하므로 고분해능 분광학과 분광 현미경학 실험에 이용된다. 여기서 나오는 방사광의 에너지 영역은 20~2000 eV, 에너지 분해능은 500~10000 이며 시료에 집속되는 광의 크기는  $50\mu\text{m} \times 1000\mu\text{m}$  이내로  $10^{16}$  m/sec의 광속을 얻을 수 있다. U7 언들레이터는 휨자석(bending magnet) 보다 약 1,000배<sup>3)</sup> 정도의 휘도를 향상시킬 수 있는 삽입장치이며, 이 장치에서의 빔을 이용함으로써 금속, 반금속, 반도체, 결정, 다층, 중합체, 액체 결정, 기체 및 생체 시료 등 다양한 분야에

※ 1999년 5월 17일 접수

\* 정회원, 포항공과대학교 포항가속기연구소

\*\* 비회원, 포항공과대학교 포항가속기연구소

\*\*\* 정회원, 포항산업과학기술연구원

# 최만호 : mhc@postech.ac.kr

대한 재료 과학 연구를 할 수 있다<sup>4)</sup>.

저장링용 진공 챔버는 포톤 에미션, 전자빔에 의한 rf field 영향 및 PID(Photon Induced Desorption)에 영향을 받기 때문에 챔버용 재료, 정렬 방법, 변형, 용접, 표면 처리 및 그 취급 방법 등에 관계된다<sup>5)</sup>. 또한, 저장링은 전자빔을 10시간 이상 저장하기 위하여  $10^{-10}$  torr 이상의 초고진공이 요구되고 있기 때문에, U7 진공 챔버<sup>6)</sup>의 진공도는 다른 저장링 챔버들과 동일하여야 한다. 따라서, 용접 설계 조건<sup>7,8)</sup>은 첫째,  $1 \times 10^{-10}$  torr의 초고진공을 얻기 위해서 모든 용접부는 공기누설(real leak)이나 혹은 의사누설(virtual leak) 등이 없어야 하고, 허용 누설율(leak rate)은  $1 \times 10^{-10}$  torr · l/s 이하여야 한다. 둘째, 진공 챔버는 진공 배기 및 벤팅, 100℃ 베이킹을 수습되 되풀이 하여도 모든 용접부는 외압(대기압)에 대해 기밀이 유지되어야 한다. 셋째, 전자빔을 측정 및 제어하기 위한 BPM(beam position monitor)<sup>9)</sup>의 중심 위치도는 0.05mm 이내여야 한다. 용접부의 진공 누설<sup>10)</sup>과 관계되는 용접 결함은 주로 균열, 용입 불량, 기공이며, 이들은 용접 이음형상, 용접봉의 종류, 용접 환경, 용접 조건 등과 같은 시공 인자에 의해, 용접 변형이나 잔류 응력은 가접 및 용접 순서<sup>11)</sup>, 베이킹<sup>12)</sup> 등에 의해 영향을 받는다.

본 연구에서는, 용접과 관계되는 BPM hole의 정밀도, 화학세정 효과에 따른 용접부 표면 상태, 용접 조건, 헬륨 누설검사 및 잔류 가스분석, 초고진공 성능 및 운전특성과 관계되는 건전성에 대하여 검토하였다.

## 2. 제작 및 실험 방법

A5083-H321 알루미늄 합금으로 제작된 U7 진공 챔버는 길이 4,778mm, 폭 368 mm이며, 가장 얇은 곳의 두께는 1.0mm 이다. Fig. 1은 챔버의 단면 구조를 보여주며, 진공 기밀에 영향을 미치는 용접부의 길이는 대략 15,000mm 이다. 제작 공정은 설계, CNC 가공<sup>13)</sup>, 측정 및 수작업, 화학세정, 상·하판 조립 및 측정, 가접 및 본 용접, 헬륨 누설검사, 진공 부품 조립 및 진공 실험 등으로 섹터 진공 챔버 제작공정<sup>7,8)</sup>과 거의 같다. 따라서 본 논문에서는 제작에 따른 실험에 대해서만 언급하고자 한다.

### 2.1 화학세정 및 용접환경

U7 챔버는 기계 가공 후 용접에 유해한 불순물이 챔버 표면에 부착하여 있을 경우, 용접시 용융을 방해하거나 용착 금속 내부에 잔류하여 진공누설을 야기시킨다. 진공 챔버의 용접성과 초고진공 특성이 우수하도록 화학세척은 다음과 같은 절차를 수립하여 적용하였다. 먼저, diversey 909로 증기세척후 탈이온수(DI water)로 행구고, 챔버 표면의 탄소 부착물들은 미라캠(mirachem) 100으로 제거후 행군다. 세척 정도는 pH 5~7이 되도록 하며, 세척 후 질소 가스로 건조시킨다. 시간이 경과함에 따라 산화막이 증가하기 때문에 48 시간 이내에 용접을 시작하였다.

용접시 상대습도가 50~60 % 이내가 되도록 하였

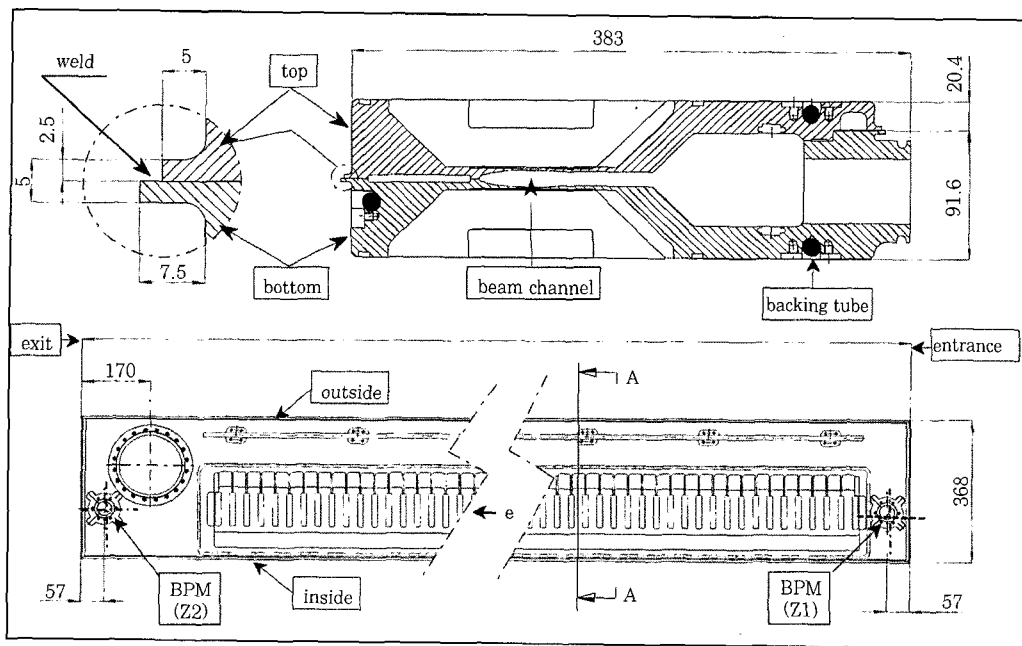


Fig. 1 Chamber dimensions and cross section

으며 용접실은 외부로 부터의 오염을 막기 위해 청정한 공기가 해파 필터를 통해서 내부로 공급되어 양압이 유지되게 하는 구조를 가지도록 하였다<sup>8)</sup>.

### 2.2 용접전의 상·하판 조립 및 용접

하판을 기준으로 한 상·하판 hole의 위치 오차는 hole 중심에서 0.05mm 이내로, 면의 기울기는 0.1 mm 이내가 되게 BPM을 조립하여 용접하였다. Al-Mg 합금에서 균열 감수성은 1~2 wt% Mg일 때가 가장 높기 때문에<sup>14)</sup> A5083 끼리의 용접이므로 용접부에 충분한 연성을 확보할 수 있는 ER 5356(~5 wt% Mg) 용접봉을 사용하였으며, 용접 조건은 Table 1과 같다.

Table 1 Welding condition

Base metal	A 5083-H321
Filler rod	ER 5356-1.6mm
Current	AC 120~130A
Voltage	18~20V
Ar gas	99.999%, 10ℓ/min
Speed	$\frac{300\text{mm}}{150\sim 180\text{sec}}$
Post flow time	20sec
Room temp & humidity	20~29℃, 50~60%
Electrode & diameter	Zr 3.2mm

용접 시공시 미리 시편을 제작하여 용접 성능에 영향을 미치는 가스 순도의 영향 및 용접 조건을 검토하였다. 가스 순도에 대해서는 bead-on-plate를 하여 용접 비드의 외관과 청정 구역 범위를 관찰하였으며, 용접 조건에 대해서는 동일한 두께와 형상을 갖는 시편을 제작, 용접 단면부의 내부 결함 및 용입 상황을 조사하였다.

용접 후 모든 용접부에 대해서는 헬륨 누설검사<sup>15)</sup>를 실시하였고, 용입불량에 의한 의사누설은 잔류가스 분석기<sup>7)</sup>(RGA ; residual gas analyzer)로 조사하였다.

### 2.3 진공 배기 장치

챔버 내부의 총면적은 대략  $5 \times 10^4 \text{cm}^2$  로  $10^{-10}$  torr의 초고진공 압력을 유지하기 위해서는 대략 1000

L/s의 배기 속도가 필요하다. 이를 위해 1대의 이온 펌프와 4.5 m의 Strip NEG(nonevaporable getter)펌프를 설치하였다. 초벌 배기를 위해 챔버 측면에 240 L/s TMP (turbo-molecular pump)도 함께 조립하였으며, 진공도를 측정하기 위해 4개의 이온 게이지(ion gauge)를 부착하였다. Fig. 2는 U7 챔버의 진공배기 장치를 도식적으로 나타내고 있다.

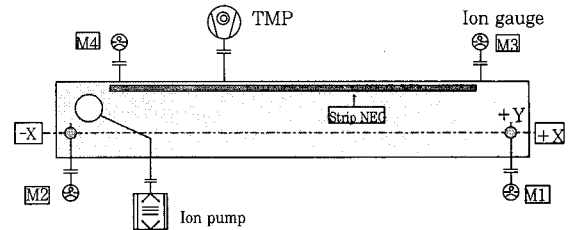


Fig. 2 Layout of the vacuum system

## 3. 용접 결과 및 고찰

### 3.1 BPM hole 변위 및 외주 변형 측정

상·하판 조립후 BPM(Z1, Z2)을 측정된 위치 오차는 각각 -Y 방향으로 0.08 mm, 0.04 mm로 나타났다. 또한, BPM 중심을 기준으로 한 외주부의 용접 이음부의 공차는 기준 2.5 mm에 대하여 외측에서 2.35~2.45 mm, 내측에서 2.70~2.80 mm로 각각 측정되었다(Fig. 3). 이것은 기계 가공 후 수개월간 보관하여 가공 잔류응력의 이완에 따른 것으로 추정된다.

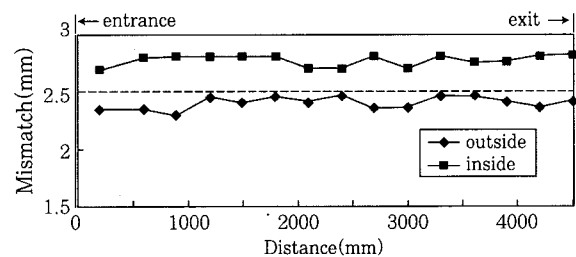


Fig. 3 Mismatch of welding lip

가접후 BPM hole 변위 변화는 없었지만, 외주부는 Fig. 4에서와 같이 외측, 내측 용접후 D1, D2 에서 -Y 방향으로 0.02, 0.01mm가 측정되었으며, D3, D4에서는 0.01mm씩 각각 측정되었다. 여기서 D1, D2의 값을 D3, D4 값으로 소거하면 0.01, 0.00mm로 변형량은 극히 미소하기 때문에 무시할 수 있다. Fig. 4와 같은 용접 순서(후진법)에 의한 BPM 변위 결과는 Table 2와 같다. 입구쪽에서의 BPM(Z1) hole 위치 공차는 상·하판 조립시 0.08mm에서 0.04mm로 50 %가 감소되었으며, 출구쪽(Z2)에서

는 변화가 없었다. 또한, BPM hole 가까이에 용접 이음부가 존재하게 되면 거리의 가까운 정도에 따라 변형량은 비례적으로 증가하게 되며, 기밀부의 표면 경도는 저하하게 된다<sup>16)</sup>. 그러나, BPM hole 가까이에 있는 상·하판 203mm 포트는 용접 형태가 아닌 금속 O-링 접합 형태이며, 외주 용접부 근방에 트렌치를 가공하여 용접 입열을 줄였기 때문에 BPM 썰링부의 기울기(평면도)변화는 전혀 없었다.

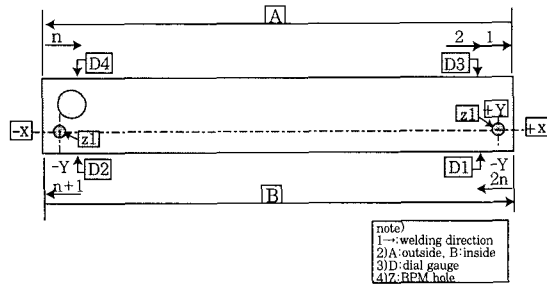


Fig. 4 Welding process and measurement points

Table 2 Results of the BPM hole measurement

	Z1 hole		Z2 hole	
	X1	Y1	X2	Y2
Wel. before	0.00	0.08	0.05	0.05
Wel. after	0.01	0.04	0.05	0.05

unit : mm

U7 챔버를 언들레이터 본체와 결합 상태에서 열변형 시험을 하기 위하여 100 °C에서, 40시간 베이킹하였다. 베이킹 도중의 최대 변형은 Fig. 4의 D1, D2에서 -Y방향으로 0.38, 0.42 mm가 각각 측정되었으며, 베이킹 후 상온에서의 최종 변형량은 -Y방향으로 0.03, 0.09 mm가 각각 측정되었다. 이것은 Fig. 1에서와 같이 하판에는 2 개의 베이킹 라인, 상판에는 1 개가 있기 때문에 열응력 분포 차이에서 오는 것으로 추정되며, 이러한 변형량은 저장링 설치후에는 측량 및 정렬에 의해 재조정된다. Table 3에서 나타낸 바와 같이 용접에서의 최종 변형량 0.01, 0.00 mm은 베이킹 잔류 변형량 0.03, 0.09 mm 이내이기 때문에 용접 잔류 변형은 무시할 수 있었으며, 가접 및 용접 순서에 의해서 챔버의 가공 능력과 조립에 의한 공차를 상쇄시킬 수 있었다. 따라서 변형 등에 의해서 발생되기 쉬운 전자빔에 의한 rf field 영향은 무시된다.

### 3.2 용접 시편 및 챔버 검사

일반적으로 알루미늄 용접시 수소 용해도는 고체 상

Table 3 Results of deformation after welding & baking

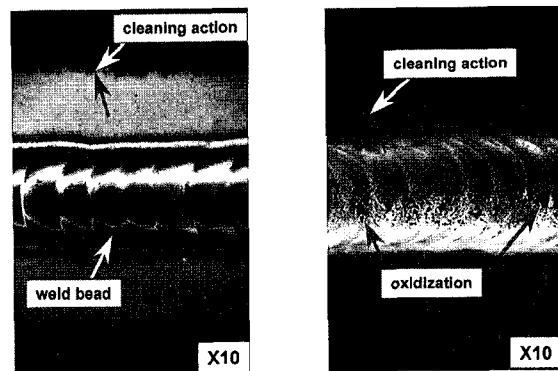
Position		D1	D2
Welding deformation		0.01	0.00
backing	Max deformation	0.38	0.42
	Final deformation	0.03	0.09

unit:mm

태에서 액체 상태로 변화할 때 용해도 차이는 20배 정도로 급격히 증가하게 된다. 과포화된 수소의 일부는 대기중으로 방출되지만, 일부는 용착 금속 내부에 잔류하여 기공<sup>17)</sup>을 형성한다. 기공 발생은 용접시 주위 환경 특히, 습도의 영향을 크게 받으며, 기공은 주로 수소 가스로 구성된다. 챔버 내부가 초고진공 영역(10<sup>-7</sup> torr 이하)에서는 대부분의 잔류가스가 수소가스이기 때문에, 초고진공을 달성하기 위해서는 수소를 줄이는 것이 대단히 중요하다. 한번 잔류된 기공은 가상누설을 만들어 진공중에서 장시간 가스 방출을 하게 되어 최종 도달압력에 영향을 주게 된다.

또한, 보호 가스인 Ar 순도에 대한 영향을 수차례 시편 시험을 통해 조사하였다. 고순도(Ar, 99.999% 이상)와 보통 순도(Ar, 99.9% 이상)를 적용시켰을 때 용접부의 표면 상태는 Fig. 5와 같다. Fig. 5(a)는 비드 토우로 부터 대략 5 mm 떨어진 위치까지 청정작용의 구역이 존재하며 표면은 특유의 광택을 가지고 있다. Fig. 5(b)는 비드 표면에 검은 탄화물<sup>11)</sup>들이 다량 존재한 상태를 보여주고 있으며, 청정작용 범위는 대략 2 mm 정도로 한정되어 나타났다. 이것은 합금 성분 중의 Mg가 산소와 반응하여 활성화되어 청정작용을 방해한 것으로 보여진다.

Fig. 6(a)는 건조한 고순도 알곤가스, 60% 미만의 습도, 화학세척 절차의 적용과 Table 1의 조건으로

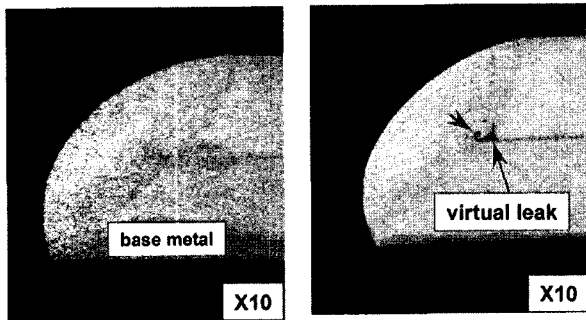


(a) Ar gas(99.999% >>) (b) Ar gas(99.9% >>)

Fig. 5 Influence of Ar gas purity on the formation of weld bead

용접했을 때의 단면부를 나타내고 있다. 용접 단면부는 균열 및 기공 등과 같은 내부 결함이 없고, 의사누설의 공간이 존재하지 않기 때문에 용접부는 건전하다고 할 수 있다. 그러나 앞서 적용한 용접 조건과 시공 조건에서 벗어났을 때의 즉, 용접전류는 낮고 용접속도가 빠른 경우의 단면부 형상은 Fig. 6(b)와 같이 나타났다. 루트부는 용입이 완전하지 않고 용접 금속부는 기공이 존재하며, 불순물들이 집적되어 있다. 따라서, 보호 가스 순도에 의해서 비드 표면이 크게 영향을 받으며, 용접 조건, 습도와 화학세척과 같은 시공 인자에 의해서 용접 금속부의 건전성(soundness)은 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있었다.

육안 검사에 의해 용접 균열, 크레이터와 기타 용접 부위에 유해한 불연속이 존재하지 않음을 관찰할 수 있었다. 모든 용접부는 Fig. 5(a)와 같이 특유의 광택을 가지고 있으며, 청정 작용이 일어난 부분이 명확히 관찰되었다.



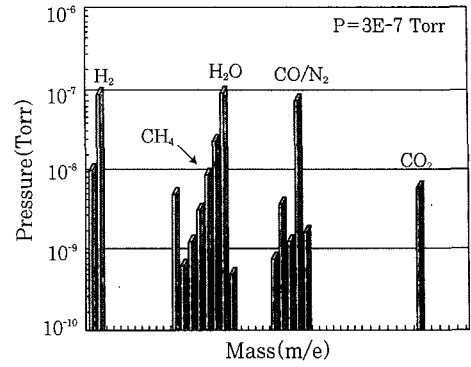
(a) Full penetration (b) Incomplete penetration

Fig. 6 Cut views of test piece

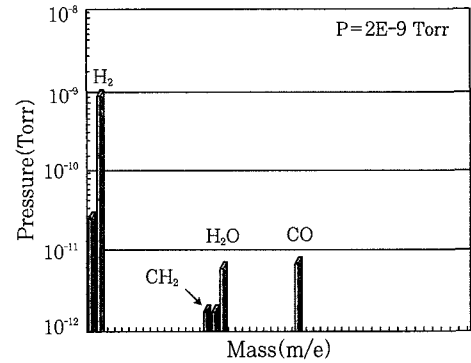
### 3.3 헬륨 누설검사 및 잔류 가스 분석

대형 초고진공 장치의 헬륨 누설검사 방법에 대해서는 참고 문헌<sup>15)</sup>에 잘 나타나 있으며, 용접 외관 검사 후에  $1 \times 10^{-10}$  torr · l/s 이하의 누설감도를 갖는 교정된 헬륨 누설검출기로 모든 용접 부위에 대하여 검사한 결과, 누설율은  $1 \times 10^{-10}$  torr · l/s 이하였다.

불완전 용융 등과 같은 불연속에 의한 의사누설은 잔류가스 분석기로 검사하였다. 20시간 배기 후 진공도가  $3 \times 10^{-7}$  torr 일때의 잔류가스 분석기 스펙트럼을 Fig. 7(a)에 나타낸 바와 같다. 여기서 40번인 Ar 가스의 분압은 보이지 않고, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>/CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> 피크만이 보여지고 있다. 또 다시 100℃로 20시간 베이킹 후, 20시간 배기 한 후의 진공도가  $2 \times 10^{-9}$  torr 일때의 잔류가스 분석기 스펙트럼은 Fig. 7(b)에 나타났다. Fig. 6(b)와 같은 불완전 용융에 의한 의사 누설은 존재하지 않는다고 할 수 있다.



(a) after 20 hours vacuum pumping



(b) after 20 hours baking(100℃) followed by 20 hours vacuum pumping

Fig. 7 RGA spectrum

또한, 100℃에서 베이킹이 수회 반복되는 동안에도 U7 챔버의 기밀 유지가 계속되었으며, 부착 수분에 의한 누설의 일시 막힘 현상<sup>13)</sup>도 없었다.

### 3.4 초고진공 성능 및 운전 특성

240 l/s TMP와 이온펌프 1대만으로 약 20시간 동안 펌핑하였을 때의 진공도는  $10^{-7}$  torr 이었다. 첫 번째 베이킹을 90℃로 20시간 펌핑한 후의 챔버 진공도는  $10^{-9}$  torr이었다. 두 번째 100℃에서 20시간 베이킹과 NEG 활성화가 끝난 뒤 진공도의 변화는 Fig. 8에 나타낸 바와 같으며, 약 20시간 후,  $10^{-10}$  torr 도 달하였다.

방사광을 이용하는 실험자를 위하여 고광도와 안전성이 요구되기 때문에, 전자를 일정한 에너지로 모아 두는 전자빔 궤도의 안전성 측면과 더불어 전자빔의 수명이 10시간 이상으로 길어야 한다. U7 챔버가 저장링에 설치되고 1년 6개월 후 빔운전 중 전자빔의 저장전류가 130.4 mA 일때의 진공도를 측정해 본 결과 다른 저장링 챔버들과 같이 대략  $5.32 \times 10^{-10}$  torr (Fig. 9)이기 때문에 10시간 이상 방사광을 제공한다. 이것은 다른 가속기<sup>18-21)</sup>의 저장링에 전자빔이 운

전중일 때 진공도와 비교해 보아도 유사한 값을 가지고 있다. 따라서, 모든 GTA 용접부는 초고진공 필요 조건을 만족하고 있는 것으로 확인되었다.

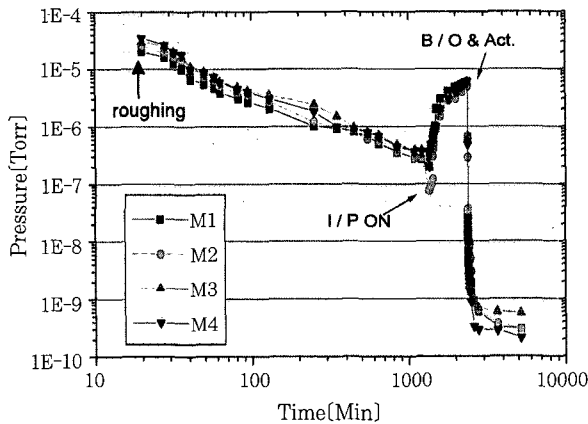


Fig. 8 Vacuum pressure profiles in different stages

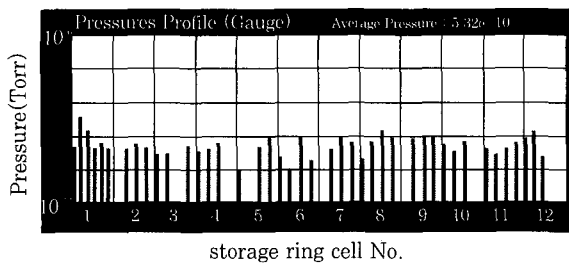


Fig. 9 Vacuum pressure distributions of storage ring  
(beam energy ; 2.404 GeV )  
(beam current ; 130.414 mA)  
(beam lifetime ; 25h 15 min)

#### 4. 결 론

포톤 에미션, 전자빔에 의한 rf field 영향 및 PID 영향을 고려한 방사광 가속기의 U7 챔버의 진공 견전 성과 용접에 의한 챔버 변형 등을 실험에 의하여 조사한 결과는 다음과 같다.

- 1) 위에서 실시한 용접 순서에 의해 BPM hole의 위치 공차를 줄였으며, 기밀부 평면의 변화를 없앨 수 있었다.
- 2) 적용된 용접시공 조건과 환경 조건에 의한 비드 표면은 광택이 있고, 용접 금속은 완전 용입이며, 육안에 의한 외관상의 결함은 나타나지 않았다.
- 3) 챔버 외주부의 용접 변형량은 베이킹 후의 잔류 변형량 이내로 나타났다.
- 4) 용접부의 누설율은  $1 \times 10^{-10}$  torr · l/s 이하였으며, 챔버의 최종 도달압력은  $10^{-10}$  torr 이하를 유지하였다.

#### 참 고 문 헌

1. 포항가속기연구소 : 엔지니어링실 업무수행보고서, 1995.3, pp106
2. 김창균, 길계환, 최우천, 박수용 : 포항가속기 저장링 진공 Chamber 설계, 한국진공학회지, 제1권, 제1호, (1992), pp.24~27
3. Tong-Nyong Lee, Moohyun Yoon, Young soo Kim and Hogil Kim : The Pohang Light Source, Aust. J. Phys., (1995), 48, pp 321~331
4. 포항가속기연구소 : 년차보고서, (1996), pp. 242
5. 포항가속기연구소 : 저장링부 진공실, 가속기저장링 건설 보고서, (1995), Vol.1
6. 포항가속기연구소 : 년차보고서, (1997), pp.93
7. C.D.Park, H.Y.Kim, H.S.Youn and W.C.Choi : Performance of a Prototype Sector Chamber of the PLS Storage Ring, J. kor. vacuum society, Vol 1, No: 3, (1992), pp336~340
8. 최만호, 정상수, 김효운, 김명진, 이해철, 한영진, 최우천 : 포항가속기 저장링 진공 Chamber 용접, 한국진공학회지, 제2권, 제3호, (1993), pp.275~281
9. J. Y. Huang, M. K. Park, S. S. Chang, S. C. Won : Analysis of the Electrical signal Induced on a Pickup Electrode in PLS BPM System, TR/SR(CO)-90-009
10. 原 清明 외, 알루미늄 합금超高眞空 시스템의 構築技術とその應用·例 (株) 技研情報センター-1992, pp109~126
11. J.R.Chen, G.S.Chen, D.J.Wang, G.Y.Hsing and Y.C.Liu : An aluminum vacuum chamber for the bending manet of the SRRC synchrotron light source, J.Vac.Sci, Vol.41, No.7-9, (1990), pp2079~2081
12. 한영진, 최만호, 김명진, 이해철, 김효운, 최우천, 포항 방사광 가속기 저장링 sector 챔버의 진공실험, 한국진공학회지, 제 3권, 제 4호, (1994), pp389~394.
13. H.Y.Kim, J.W.Lee and W.C.Choi : Machining Specification of sector chamber for The PLS Storage, EN/SR(VA)-92-019, Nov. (1992)

14. Pumphrey W.I. and Lyons J.V. : Journal of Institute of Metals, 74, 1946, pp.439
15. 최만호, 김형중, 최우천, 포항가속기 저장링 챔버의 헬륨누설검사, 비파괴검사학회지, 제 13권, 제 3호, (1993), pp.31~38
16. 土屋和之, 超高眞空 システム, 溶接學會誌, 第 53 卷, 第 4 , (1984), pp23~27
17. 輕金屬溶接構造協會, 알루미늄 合金 ミグ 溶接部の氣孔 防止 マニュアル, (1979), pp.2
18. SPring-8(japan) : Annual Report, (1997), pp25
19. H.F.Dylla 외 : Initial conditioning of TFTR vacuum vessel, J.Vac.Sci.Technol. A2(2), Apr-June,(1984), pp1188-1192
20. G.Y.Hsiung 외 : Construction and commissioning of the Sycrotron Radiation Research Center vacuum system, .Vac.Sci.Technol. A12(4), Jul-Aug.(1984), pp1639-1643
21. J.C.Schuchman : Vacuum system design and fabrication of electron storage rings, J.Vac.Sic.Technol. A8(3) May./June., (1990), pp2826-2835