

## 초고진공시스템의 실현에 관한 연구

### A Study on the Actualization of Ultra-high Vacuum System

백 용 현\* · 이 복 희\*\* · 전 덕 규\*\*\*

(Yong-Hyun Paek · Bok-Hee Lee · Duk-Kyou Jeon)

#### 요 약

본 논문은 3단배기계의 구성으로  $10^{-7}$ [Torr]이하의 진공도를 얻을 수 있는 초고진공시스템을 시제작하고, 이에 대한 동적 특성과 유지 및 관리방법에 대하여 기술하였다. 초고진공배기계의 구성에 있어서는 진공재료와 부품의 선정, 펌프조합, 다단식 펌프조합, 탈가스처리와 잔류기체의 성분분석이 대단히 중요함이 밝혀졌다. 또한 진공용기의 내표면의 공기중예의 노출은 배기성능을 대단히 저하시키게 된다. 본 연구결과와 관련기술은 각종 실험장치의 배기계의 최적화 설계는 물론이고 다용도로 이용될 것이다.

#### ABSTRACT

This paper describes the dynamic characteristics and maintenances of the ultra-high vacuum systems. The trial ultra-high vacuum system within the pressure range less than  $10^{-7}$ [Torr] by using the three-stage pumping combinations is actualized. It is known that the material and component selections, multi-stage pump combinations, degas processes and ingredient analysis of remaining gases are very important to product the ultra-high vacuum evacuation systems. Also, the inner surface of vacuum chamber need not expose to air and the discussed technology in this paper can provide the guidance for the optimization of the evacuation design of the experimental apparatus for a great variety of uses.

---

\* 인하대 공대 전기공학과 교수 · 공학박사

\*\* 인하대 공대 전기공학과 교수 · 공학박사

\*\*\* 인하대 공대 전기공학과 대학원 · 박사과정

## 1. 서 론

진공기술은 급속히 발달하는 공학분야의 과학적 연구수단이 되었으며, 진공기술의 주요 공학분야에의 응용은 진공코팅, 증류, 금속탈가스제조, 반도체, 전자부품 등의 제조기술의 발달을 가속시켰다. 고품질의 반도체 및 첨단기술제품, 핵융합연구, 우주과학의 연구에 대한 요구가 선진국에서는 초고진공기술을 공학화로 바꾸어 놓았다<sup>1~3)</sup>.

최근 초고진공중에서 저온의 청정표면을 다루는 기술이 요구됨에 따라 실험장치를 설계하고 제작하는 과정에서 사용하는 재료, 공작방법 등이 연구되어 왔으며, 이는 과학기술의 다원화와 고도화에 따라 급진적인 초고진공분위기의 작성에 대한 기술의 향상과 기초과학분야의 발전에 원동력이 되었다.

핵융합 실험연구장치나 입자가속기 또는 플라즈마 실험용기 내에서 운동하고 있는 높은 에너지의 입자나 전자파가 진공용기의 내벽표면과 상호작용하여 방출되는 입자 또는 분자가 플라즈마의 온도를 저하시키거나 가속중인 입자의 수명을 단축시키는 문제점이 대두되기 때문에 진공용기 내벽표면의 청결과 고순도를 유지하기 위해서는 초고진공의 분위기가 절대적으로 중요하며, 양질의 진공상태가 요구된다. 진공용기의 재료로 사용되는 금속의 표면에서의 기체방출을 포함하여 표면물성에 대하여는 아직도 정성적 또는 정량적으로도 밝혀지지 않은 현상들이

많이 있으며, 이들의 메카니즘 해석을 위한 물성적 연구가 선행되어야 하고, 기초과학분야의 연구가 철저히 요구되고 있다<sup>4,5)</sup>.

본 연구에서는  $10^{-7}$ [Torr] 이하의 초고진공시스템의 작성을 위한 배기계를 설계하고 모델배기시스템을 시제작하여 설계의 적합성 및 실용성에 대하여 검토하고, 배기-시간특성을 측정 한 후 이의 이론적 설계의 적합성을 평가하였으며, 가스방출량과 리이크의 정도를 파악하여 보다 우수한 진공도를 얻을 수 있는 설계 및 작성기법 등에 대하여 검토 고찰하였다.

## 2. 초고진공의 배기이론

초고진공상태로 되면 금속용기내에 포함되어 있던 기체와 흡착되었던 가스가 진공용기의 표면에서 탈리되기도 하고 진공펌프에서 유입되기도 한다. 이들의 방출가스는 냉각트랩에 의하여 배출시킬 수 있으며, 냉각트랩을 사용하는 진공배기계를 그림1에 나타내었으며, 배기의 원리는 다음과 같다<sup>6)</sup>.

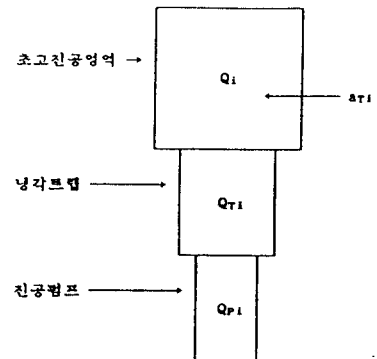


그림 1. 초고진공배기계의 개략도

Fig. 1. A schematic diagram of ultra-high vacuum system

그림 1. 초고진공배기계의 개략도

Fig. 1. A schematic diagram of ultra-high vacuum system

초고진공용기내의 여러가지 가스방출원을 고려하게 되면 초고진공배기계의 전체압력은

$$P = \sum_i \frac{Q_i}{S_i} \dots\dots\dots(1)$$

로 된다. 초고진공용기내에서 탈리되는 기체나 증기의 분압은 탈리유량을 그 배기속도로 나누면 된다.

진공펌프에서 기화된 가스는 냉각트랩을 경유하여 진공용기내로 유입하게 되는데 이중의 일부는 냉각트랩계수  $a_{\pi}$  비율로 포착된다. 가스량  $Q_{pi}(1-a_{\pi})$  가 진공 용기로 역류하여 재차 진공펌프나 냉각트랩으로 배기된다. 이 작용에 의한 진공용기의 압력은

$$P = \sum_i \frac{Q_{pi}(1-a_{\pi})}{S_i} \dots\dots\dots(2)$$

로 된다.

진공용기와 확산펌프사이에 냉각트랩이 설치되어 있으며, 가스방출도 있으나 일부는 표면에 포착되기도 하고 진공용기에 유입하기도 한다. 이것에 의한 진공용기 내부압력에의 기여는

$$P = \sum_i \frac{K_{ai}Q_{Ti}}{S_i} \dots\dots\dots(3)$$

로 나타난다. 여기서  $K_{ai}$ 는 냉각트랩계수  $a_{\pi}$ 와 가스분자의 냉각트랩내의 위치에 의존하는 계수이다.

초고진공배기시스템의 전체압력은

위에서 기술한 모든 발생원에 의하여 다음식으로 주어진다.

$$P = \sum_i \frac{Q_i}{S_i} + \frac{Q_{pi}(1-a_{\pi})}{S_i} + \frac{K_{ai}Q_{\pi}}{S_i} \dots\dots\dots(4)$$

식 (4)의 제1항은 배기속도가 크게 되면 압력이 감소함을 나타내고, 제2항, 제3항은 냉각트랩 표면적이나 확산펌프의 크기가 커지면 역류량과 배기속도도 비례적으로 증가함을 나타내고 있다.

냉각트랩의 효율만을 고려할 때 일정의 유효도달압력  $P_0$ 라 하면 식(4)는

$$P = \sum_i \frac{Q_i}{S_i} + P_0 \dots\dots\dots(5)$$

로 된다. 따라서 초고진공배기계의 구성에는 진공펌프와 진공용기의 재료가 중요하고, 이들이 도달진공도에 결정적인 역할을 하게 된다.

초고진공배기계(도달진공도 :  $10^{-8}$  [Torr])의 설계시 일반적으로 유확산펌프와 유회전 펌프의 조합에 의한 배기계의 구성이 이용되며, 이러한 배기계의 압력분포는 그림 2와 같다. 동작 상태에 있어서의 배기량과 진공도에 따라 필요한 배기속도가 결정되며, 진공용기의 용적, 배관과 냉각트랩 및 밸브의 콘덕턴스에 따라 펌프의 배기속도와 용량이 결정되므로 이들의 상관관계가 설계지침이 된다.

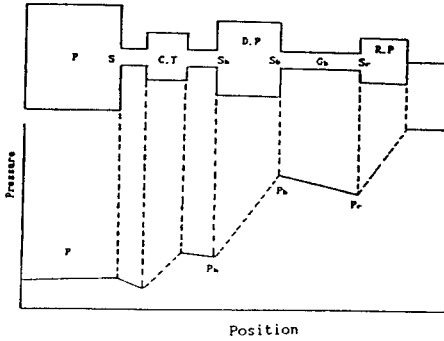


그림 2. 진공배기계의 압력분포  
Fig. 2. Pressure distribution of vacuum exhaustion system

### 3. 실험장치 및 방법

#### 3.1. 진공용기의 설계

진공용기에서는 최초에 용기내의 가스가 배기되고, 다음에 표면탈리 및 고체내부에서의 확산에 의한 방출가스와 용기의 벽을 통과하는 투과가스가 배기되게 된다. 진공용기 내부에 존재하는 가스의 배기 이외에는 모두 온도의 의존성이 크다. 실온에서의 압력감소는 대단히 서서히 이루어지며, 투과효과에 의하여는 한계에 도달하지 않는다.

실용적인 배기시간내에서 초고진공 상태를 얻기 위하여는 고온에서의 처리가 필요하게 된다. 따라서 진공용기나 내장부품의 구성품으로 사용되는 재료와 밀폐재료는 가열처리 온도는 견딜 수 있는 재료를 사용하여야만 된다. 스테인레스는 안정화된 성질을 가지며, 초고진공재료로 적합하므로 본 연구에서 용기재료로는 SUS304를 사용하였다.

모델 시제작품의 진공용기에는 관측

창, 진공도 측정용 감지기, 주배기 밸브 부착용 후렌지 설비가 포함되어 있으며, 이의 단면도를 그림 3에 나타내었다. 진공용기의 체적은 약 10.6[l] 이고, 스테인레스의 내표면적은 약 2695[cm<sup>2</sup>]이다.

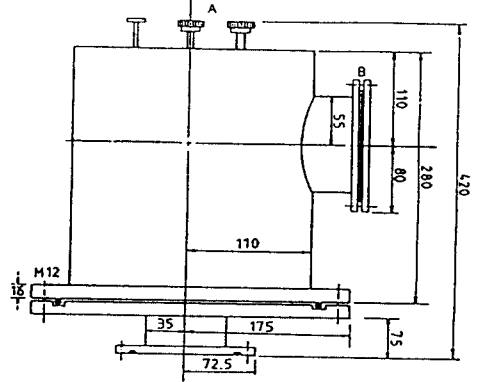


그림 3. 진공용기의 단면도  
Fig. 3. Cross sectional view of the vacuum chamber

진공용기의 누설이 없고 가스방출을 무시할 수 있는 조건으로 되었을 때 도달진공도상태의 압력은  $P_{\infty}$ [Torr]라고 하면<sup>7)</sup>

$$P_{\infty} = \frac{Q_1}{S} + \frac{Q_v}{S_v} + P_0 \dots\dots(6)$$

로 표현되며,  $Q_1$ : 리이크량[Torr · l/sec],  $S$ : 배기계의 공기에 대한 유효배기속도 [1/sec],  $Q_v$ : 방출가스량[Torr · l/sec],  $P_0$ : 펌프의 도달압력[Torr],  $S_v$ : 방출가스에 대한 유효배기속도 [1/sec]이다.

본 연구에서는 설계시 리이크량  $Q_1$ 은 없는 것으로 가정하고 방출가스량만을 고려하였다.

### 3.2 배기계의 구성

본 연구에서는 유회전 펌프와 2대의 유확산 펌프의 조합에 의한 3단배기계를 설계·구성하였으며, 이의 계통도를 그림 4에 나타내었다. 또한 유확산 펌프의 상단부에는 작동유체(실리콘유: DC-705) 증기의 역류 및 확산에 의해서 진공용기 내부의 오염 또는 가스의 역류를 방지하고 진공배기 효율을 증가시키기 위하여 액체질소로 작동되는 냉각트랩을 설치하였다<sup>9)</sup>.

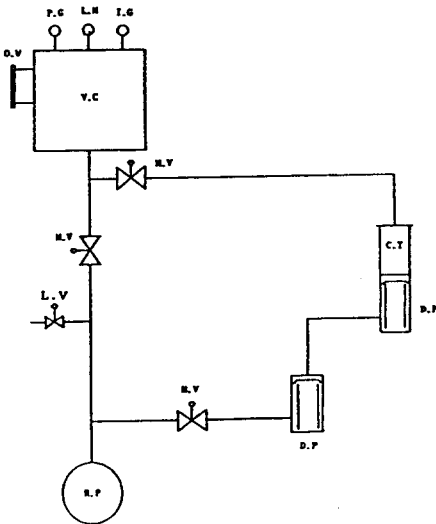


그림 4. 3단배기계의 계통도  
Fig. 4. Systemic diagram of three-stage exhaustion system.

배기배관으로는 원형도관을 선택하였으며, 원형도관의 기체흐름에 대한 콘덕턴스는  $12.1D^3/l$  ( $D$ : 도관의 직경,  $l$ : 길이)이고 도관양단의 압력차  $\Delta P = Q/G$ 로 표현되며, Van Atta의 기준에 따르면<sup>9,10)</sup>

$$S \cdot l/D^3 = 2.42 \dots\dots\dots (7)$$

로 된다. 여기서  $S$ 는 펌프의 배기속도

이다. 따라서 본 연구에서는 식 (7)을 적용하여 배기관의 굵기와 길이를 선정하였다.

### 3.3 실험방법

실험장치의 설계시에는 진공용기, 배관, 또는 진공밸브 등, 구성품의 청결상태 및 진공구리스의 세척상태에 특히 주의하여야 한다. 초고진공배기시스템의 운전은 우선 유회전펌프의 단독 운전에 의해서 진공용기내의 압력이  $10^{-3}$ [Torr]로 되었을 때 유확산 펌프를 작동시켜 유확산 펌프와 유회전 펌프의 3단배기로 최종도달진공도가 얻어질 때까지 운전한다.  $10^{-4}$ [Torr]까지의 진공도는 피라니압력계(Edward-1001S)로 측정하고,  $10^{-4}$ [Torr]이하의 범위는 전리진공계(HFT-4)로 측정하였으며, X-Y 리코더를 이용하여 진공도의 시간적 변화를 기록하였다.

진공도의 향상을 위하여 용기와 배기관을  $250^\circ\text{C}$ 로 열처리하였으며, 압력상승법을 적용하여 리이크량과 가스방출량을 평가하고  $1.5 \times 10^{-7}$ [Torr]인 진공상태에서의 잔류기체성분 및 가열처리에 따른 잔류기체의 성분을 분석·검토하였다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 배기특성

시제작된 초고진공배기계에서 냉각트랩을 사용하지 않은 경우의 배기곡선은 그림 5와 같다. 유확산펌프와 유회전펌프에 의한 3단 배기계의 구성시

진공용기와 배기배관은 가열처리하지 않은 상태에서의 배기-시간특성은 작동개시후 약 20분까지는 거의 지수함수적으로 배기되지만 그 이후부터는 거의 평형상태로 되어 배기-시간특성의 변화는 대단히 적다.

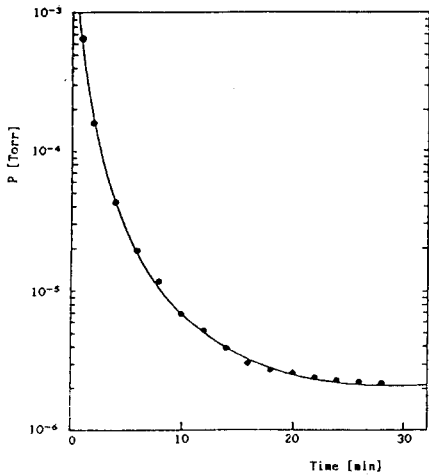


그림 5. 초기배기특성

Fig. 5. Initial exhaustion characteristic

냉각트랩을 동작시킨 때와 1주일동안 에이징시킨 후의 배기곡선은 그림 6과 같으며, 그림 5에 나타난 초기배기특성에 비하여 약 10배 이상 향상된 진공도를 얻을 수 있었으며, 약  $8 \times 10^{-8}$  [Torr]정도가 최고의 도달진공도였다. 시제작된 배기시스템을 1주일 동안 에이징시킨 결과 도달진공도는 약간 향상되었으며, 전반적인 배기-시간특성은 거의 동일하였다.

배기후 30분이 경과했을 때의 압력변화를 X-Y 레코우더로 측정된 결과를 그림 7에 나타내었다.

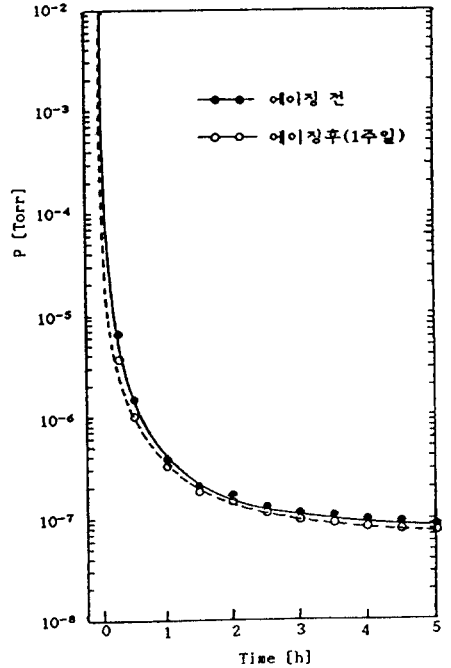


그림 6. 1주일 에이징후의 배기특성

Fig. 6. Exhaustion characteristics after aging of one week

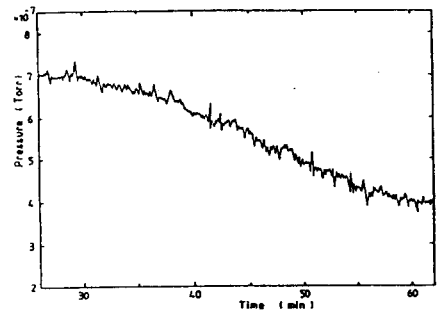


그림 7. 압력변화와 기록

Fig. 7. Record of the pressure variation

그림 7의 결과를 보면 고진공도로 되었을 때 순시적 압력변화가 보다 크게 나타났으며, 이에 대한 원인으로서 진공용기인 금속에서의 가스탈리와 전자방출이 고진공상태일수록 보다 활

성적으로 일어나며, 금속에서의 가스방출 또는 탈리가 연속적으로 일어나는 것이 아니라 순시다발적으로 일어나고 있음을 알 수 있다. 또한 진리진공계의 감지기인 필라멘트로부터의 전자 방출에 의한 전리효과가 고진공상태에서는 보다 민감하게 나타남으로써 기인되는 영향도 포함되어 있는 것으로 예측된다.

또한 진공도의 향상을 위해서는 초고진공배기계의 구성품인 진공용기, 배관 등에 대한 가열처리(baking)를 하여 도달진공도를 향상시키는 방법이 최후의 처리 방법이다. 따라서 진공용기를 석면사로 전기적으로 절연된 전열선을 이용하여 250°C 정도로 2시간 동안 가열처리한 후 배기시켜 보았다. 이 때의 측정결과는 그림 8에 나타내었으며, 베이킹시킨 후의 배기속도 및 최종도달진공도 등 배기특성이 매우 향상되었다.

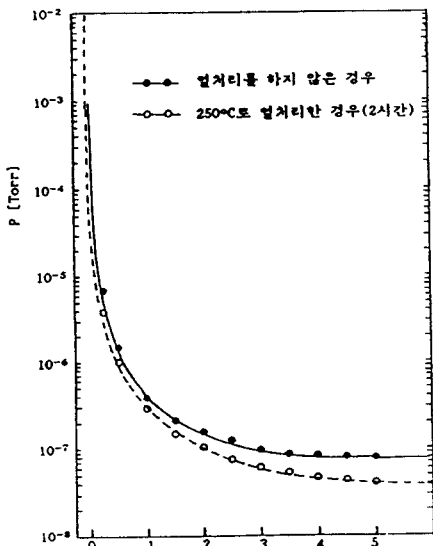


그림 8. 가열처리후의 배기특성  
Fig. 8. Exhaustion characteristics after baking

이것은 진공용기를 가열처리함으로써 용기내벽 등에 흡착되었던 가스방출원인 불순입자들의 탈착에너지가 낮게 되었기 때문이라 생각된다. 결과적으로 가열처리 후 최종도달진공도는  $4 \times 10^{-8}$  [Torr]이었다. 따라서 진공배기계의 구성 후 가열처리는 초고진공배기시스템의 작성에 있어서 중요한 과정이라는 것이 입증되었다.

#### 4.2 초고진공배기계의 관리

초고진공상태의 도달에 있어서는 금속표면으로부터의 가스방출 및 리이크의 검출이 매우 중요하며, 초고진공기술에 있어서 없어서는 안될 요소기술이다. 리이크를 탐지하는 방법에는 공기압측법, 할로젠측정법, 가이스러관법, 헬륨리이크탐지법, 분압계법 등이 있는데<sup>11)</sup>, 본 연구에서는 압력상승법을 적용하여 리이크량을 평가하여 보았다.

최고도달진공상태에서 주밸브를 닫았을 때 진공용기내의 상승압력을 측정된 결과는 그림 9와 같다.

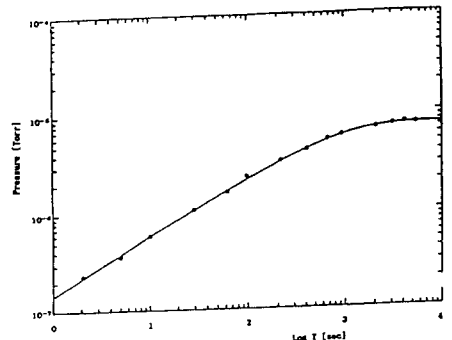


그림 9. 압력상승곡선  
Fig. 9. Pressure rising curve

$6 \times 10^{-5}$ [Torr]의 압력까지는 시간에 따라 용기내의 압력은 거의 직선적으로 증가하였다. 이 측정결과를 기초로 하여 진공용기내의 가스방출량과 리이크량의 합인 가스발생량  $Q_1$ 은 약  $1.78 \times 10^{-6}$ [Torr · l/sec]이었다. 또한 진공용기 및 패킹재료로부터 방출되는 이론적 가스방출량은 약  $9.95 \times 10^{-7}$ [Torr · l/sec]이므로 리이크량  $Q_2$ 은 약  $7.85 \times 10^{-7}$ [Torr · l/sec]인 것으로 추정된다.

설계시 리이크량은 무시하였지만 실제로 제작된 진공시스템으로 측정한 결과의 리이크량은  $7.85 \times 10^{-7}$ [Torr · l/sec]으로써 거의 진공용기의 벽면에서 방출되는 가스량과 같은 정도이나 이 정도의 리이크량은 실제 진공시스템에서는 간과할 수 있는 양이므로 만족스러운 결과라 하겠다.

진공용기의 대기증예의 노출과 다른 가스의 봉입에 의한 도달진공도 및 배기특성을 측정해 보았으며, 그 결과를 그림 10에 나타내었다.

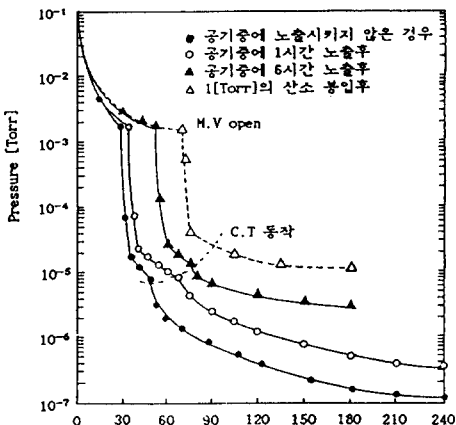


그림 10. 여러가지 조건에서의 배기-시간특성

Fig. 10. Exhaustion-time characteristics in various conditions

그림 10의 결과로부터 공기중에 진공용기를 오랫동안 노출시킴에 따라 배기특성도 바뀌며, 최종도달진공도도 현저히 저하됨을 알 수 있다. 특히 대기증예에 1시간 정도 노출시켰을 때의 최종도달진공도는 상당히 저하되며, 냉각트랩(C.T)의 동작에 의한 배기효율의 증배도 대단히 저하됨을 나타내고 있다. 또한 1[Torr]의 산소를 봉입시킨 후 배기시켰을 때의 최종도달진공도는 약 1/100배 정도로 저하되며, 배기시간도 대단히 오래 걸린다.

이상의 결과를 요약해 보면 진공용기를 공기중에 장시간 노출시키게 되면 진공계의 배기특성이 저하됨을 알 수 있으며, 특히 공기중에 함유되어 있는 산소와 습기의 영향이 지배적임을 알 수 있다.

따라서 진공시스템을 장시간 공기중에 노출시켰을 때는 대단히 오랫동안 배기시켜야만 양호한 진공상태의 조건을 작성할 수가 있으며, 특히 봉입기체로서 산소를 사용하였을 때는 반드시 가열처리를 하지 않으면 안되고, 진공배기시스템의 관리에 있어서는 용기내부의 산소성분의 유입이 없도록 보전되고 사용되어야 됨이 필수조건임을 알 수 있었다.

### 4.3 성분기체의 분석

초고진공상태의 도달을 위해서는 진공중에 포함되어 있는 기체성분을 분석해 볼 필요가 있으며, 초고진공의 물리적 의미와 보다 양호한 배기계의 구



성을 위해서는 필수적인 사항이라 하겠다.

따라서 본 연구에서도, 초고진공분위기중에 포함되어 있는 기체성분의 분석을 위하여 질량분석계를 사용하여 검출한 결과를 그림 11에 나타내었다. 질량분석계로는 INFICON사의 Quadrex 200을 사용하였으며, 이의 질량검출 범위는 1~200 AMU이며, 센서부분에는 전자증배관이 설치되어 있으므로 고감도(검출 가능한 최소분압은 질소의 경우  $3.5 \times 10^{-7}$ [Torr]이고, 샘플링 시간간격은 32[msec])이다.

그림 11의 결과는 베이킹전의  $1.5 \times 10^{-7}$ [Torr]의 진공상태에 있어서의 성분기체이며, 주로 수소, 질소, 공기, 일산화탄소 등이 주성분으로 나타났다. 이들 성분구성은 진공상태와 베이킹의 여부에 의해서 변화되며, 진공시스템의 최고도달진공도를 결정하는 중요한 파라미터로서 작용한다. 배기과정에 있어서 가열처리의 여부와 가열처리중에 있어서 함유되어 있는 성분기체의 분석결과를 표 1에 나타내었다.

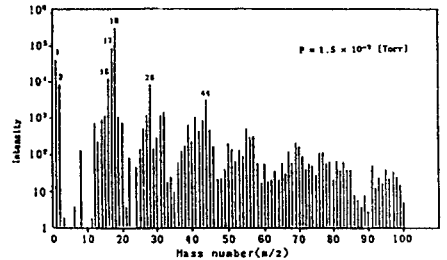


그림 11. 초고진공중의 성분기체  
Fig. 11. Ingredients of gas included in ultra-high vacuum

표 1. 배기상태에 따른 잔류기체성분의 구성비

Table 1. Component ratio of the ingredients of remaining gases

기체의 종류	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	프로판	Ar
대 기 압	—	78.08	20.95	—	0.03	—	—	—	0.9
10 <sup>-5</sup> Torr 베이킹 전	33.0	0.4	0.4	3.5	0.8	—	0.8	0.8	—
베이킹 중	17.5	17.5	0.4	21.9	0.87	21.9	2.63	17.15	—
10 <sup>-7</sup> Torr 베이킹 후	0.2	7.5	—	7.6	0.2	75.5	6.67	2.2	—
10 <sup>-7</sup> Torr 베이킹 전	79.0	0.79	3.1	16.1	0.3	—	0.8	—	—

가열처리과정 동안 성분기체의 구성비의 변화는 대단히 현저하며, 가열처리 전의 주요성분은 수분이며, 가열처리 후의 잔류기체는 수소이다. 따라서 초고진공상태의 도달을 위해서는 가열처리가 필수요건을 알 수 있고, 극초고진공의 도달을 위해서는 수소성분의 배기가 문제점으로 대두되며, 수소가스

의 배기에 적합한 펌프의 선정과 화학적 갱터의 사용이 필요할 것으로 예상된다.

### 5. 결 론

모델 시제작품의 배기특성을 측정하여 배기계 구성에 대한 설계법의 타당

성과 응용성 및 진공시스템의 관리법 등에 대하여 검토해 보았다. 그 결과 진공배기계 구성은 재료의 적절한 선정으로 방출가스를 극력 적게 하고, 다단식 펌프의 최적조합과 배기배관의 합리적 설계로 배기효율을 극대화시키며, 리이크의 억제와 탈가스처리 등이 필수요건임이 확인되었다.

또한 모델 시제작품의 최고도달진공도는  $4 \times 10^{-8}$  [Torr]였으며 설계조건

적합성이 확인되었다. 진공용기의 대기중에서의 노출은 초고진공시스템의 배기특성에 악영향을 미치므로 가능한한 초고진공시스템은 대기중에 노출시키지 않도록 관리하여야만 된다. 모델 시제작 초고진공시스템의 리이크량은 대략  $7.85 \times 10^{-7}$  [Torr · l/sec] 정도로 추정되며, 앞으로 리이크의 검출 및 방지에 대하여 보다 심층적인 연구가 요구되고 있다.

### 참 고 문 헌

- 1) S. Salimian, C.B. Cooper, and M.E. Day : "Dry etching of via connections for GaAs monolithic microwave integrated circuits fabrication", J. Vacuum Science & Technology, pp. 1606-1616, 1987.
- 2) Y Tuzi : "Science of Ultra high Vacuum", J. of IEEJ, UDC 533.59, Vol. 38, No. 11, pp. 487-494, 1986.
- 3) P.A. Redhead, J.P. Hobson, and E. V. Kornelsen : The Physical Basis of Ultrahigh Vacuum, Chapman & Hall, pp. 11-46, 1978.
- 4) Albert. D : "Ultra-high Vacuum Technology", transactions of the 2nd Vacuum Symposium, pp. 69-76, 1955.
- 5) M. Semeno : "Surface Treatment and Outgassing of Material for Ultra-high Vacuum", J. of Vacuum Society of Japan, Vol. 2, No. 10, pp. 326-330, 1963.
- 6) J.F. O'Hanlon : A User's Guide to Vacuum Technology, John Wiley & Sons, Inc., pp. 255-306, 1980.
- 7) A Roth : Vacuum Technology, North-holland Pub. Co., 1979.
- 8) 白龍鉉, 李福熙, 金廷燮, 趙成郁 : "헬륨기체중에서 電子群의 輸送係數 測定에 관한 研究", 대한전기학회 논문지, Vol. 37, pp.115-121, 1988.
- 9) C.M. Van Atta : Vacuum Science and Engineering, Mcgraw Hill Book Co., pp. 459-486, 1965.
- 10) 熊谷寛夫, 他 : 眞空の物理と應用 褒華房 pp. 389-423, 1971
- 11) ULVAC Co. : Vacuum Handbook, Ulvac corporation, pp. 32-34, 1986.

(1991년 8월 17일 접수)