

## 고진공 운송계에서의 정밀 압력제어 장치의 설계 및 성능시험

장원익\*, 장기호\*, 정기로\*\*, 이종현\*

\* 한국전자통신연구소 반도체연구단 공정장비연구부  
\*\* 코닉 시스템 (주)

### ABSTRACT

In the cluster tool, it is necessary to precisely control the vacuum pressure for the wafer transportation between transport module and cassette or process modules with the range of  $10^{-4}$  to  $5 \times 10^{-5}$  torr. So we have designed the pressure control system for the transport module of the cluster tool and have evaluated its performance. Digital PID is utilized with the weighted sum of both three previous errors and one current error. The feedback signal is put into the nitrogen mass flow controller using the transport module controller. This pressure control system can prevent the transport module from the particle generation and backstreaming of hazardous process gases of the process chamber.

### 1. 서론

반도체 제조공정의 통합화(integration)는 각기 다른 장비로 실행되는 복수의 연속 공정을 하나의 클러스터 장비(cluster tool)로 통합하는 것을 말한다. 이러한 통합화 공정은 수율의 향상, 사이클 시간의 단축, 장비 구매 가격의 감소 등 많은 장점을 제공하기 때문에 기술적인 필요성과 경제적인 요구로 인하여 필연적으로 통합화 방향으로 반도체장비 산업이 진행되고 있다. 현재 반도체 공정장비 분야에서는 서로 다른 공정상의 요구조건을 만족시키기 위해서 많은 비용과 시간이 요구되며, 공정기술의 세대교체마다 이에 적합한 장비의 개발이나 개조를 반복해야 하는 문제점이 있다. 또한 차세대 공정의 가장 큰 문제점인 미소오염(micro-contamination) 제어에 대한 기술적인 문제점을 해결하고, 소자기술의 향상에 따라 새로운 청정실 설치에 소요되는 막대한 설비투자비의 절감 요구에 대응하기 위해서 반도체 장비의 통합화와 공정의 자동화가 필수적인 기술이 된다.<sup>(1)</sup>

본 연구소는 이와 같은 기술변화 요구에 따라 국제 SEMI/MESC 표준규격<sup>(2)</sup>에 의한 클러스터 장비를 개발중에 있으며, 클러스터 장비의 기본 플랫폼인 반송챔버(transport chamber)의 청정도 향상 및 오염방지를 위해 고진공 정밀 압력제어 기능이 요구되고 있다.

본 논문은 수초내에  $1 \times 10^{-4}$  에서  $5 \times 10^{-5}$  torr 범위의 고진공 반송압력으로 조절하기 위하여 진공센서에서 나오

는 압력신호중 과거의 3개 오차값과 현재의 오차값인 4개의 오차값들이 고려된 디지털 PID 압력제어 방법을 사용하였다. 출력신호는 질소의 미소유량을 조절하도록 자동 유량조절기에 피드백(feedback)되며, 이와같이 설계 제작된 고진공 압력 제어장치에 대한 성능시험을 수행하였다.

### 2. 이론적인 배경

본 연구에 적용된 디지털 PID 압력제어 방법에 대해 설명하면 다음과 같다.<sup>(3)</sup> 일반적인 PID 제어는 피드백(feedback)에 의해 물리량을 제어할 때에 가장 많이 응용되는 제어방식으로서, 제어부는 크게 세가지로 구성된다. 첫째는 제어대상인 물리량을 검출하는 센서(sensor)이고, 둘째는 기준값과의 오차로부터 출력 값을 계산하는 제어부, 마지막으로 실제 물리량을 조절할 수 있는 출력부이다. PID 제어부에서 출력값은 설정값(setpoint value)과 실제값(actual value)의 차인 압력오차에 의해 결정된다. 제어기의 출력값은 오차, 시간에 대한 오차의 적분, 오차의 변화율들의 weighted-sum 이다. 즉 비례성분(proportional term)은 오차의 크기에 비례하여 결정되며, 적분성분(integral term)은 오차를 시간에 대해서 적분한 값이고, 정상상태 오차(steady state error)를 없애기 위해 사용된다. 미분성분(derivative term)은 오차의 변화를 감쇄시키기 위해서 사용되며, 모멘텀(momentum)이 있는 시스템

에 적용된다. 각 성분에서 고려될 영향요소는 제어 대상의 특성에 따라 다르며, 실험에 의해서 최적의 값들이 결정된다.

디지털 PID 제어는 일정한 주기로 물리량을 추출하고 소프트웨어에 의해 비례, 적분 및 미분 성분들을 계산한 후 출력값을 계산한다. 보통 물리량은 아날로그/디지털 변환기(A/D converter)에 의해 디지털 수치로 변환되며, 출력값은 디지털/아날로그 변환기(D/A converter)에 의해서 아날로그 값으로 출력된다. 이러한 PID제어는 연속적인 값을 갖는 출력수단에 의해서 역시 연속적인 값을 갖는 물리량을 제어하고자 하는 분야에 적용될 수 있다. 이때 입력값과 출력값은 모두 유한한 범위를 가져야 한다. 일반적인 디지털 PID 제어방법에 대한 알고리즘(algorithm)이 적용된 방정식은 다음과 같이 표시된다.

$$O(k) = K_p \cdot E(k) + K_i \cdot \sum_{k=1}^n E(k) + K_d \cdot (E(k) - E(k-1)) / T_s \quad (1)$$

여기서  $O(k)$ 는 물리량을 조절하기 위한 출력값(output),  $E(k)$ 는 유지하고자 하는 물리량의 기준값과 실제값 사이의 차이인 오차값,  $E(k-1)$ 는 이전오차 (previous error),  $K_p$ 는 비례성분,  $K_i$ 는 적분성분,  $K_d$ 는 미분성분,  $T_s$ 는 제어 동작의 주기인 샘플링시간(sampling time)이고, 오차의 적분 성분은 처음부터 현재까지의 오차값들의 합이다. 보통 디지털 제어기의 경우 유한한 메모리(memory)와 계산시간을 고려하여 현재로 부터 한개의 오차값만을 계산에 고려한다.

실험에서 실제 사용된 클러스터 모듈 제어기의 출력계산에는 고진공 센서에서 나오는 마지막 3개의 오차값들과 현재의 오차값인 4개의 오차값들에 대한 weighted-sum에 의한 출력값이 자동 유량조절기에 피드백 되도록 하는 아래의 디지털 PID 알고리즘이 적용되었다.

$$O(k) = K_0 \cdot E(k) + K_1 \cdot E(k-1) + K_2 \cdot E(k-2) + K_3 \cdot E(k-3) \quad (2)$$

$$K_0 = f_1(Gr, Lt, Ts)$$

$$K_1 = f_2(Gr, Lt, Ts)$$

$$K_2 = f_3(Gr, Lt, Ts)$$

$$K_3 = f_4(Gr, Lt, Ts)$$

여기서  $K_0$ - $K_3$  상수들은 개회로(open-loop) 시스템에서 실험으로 측정된 데이터로부터 계산되는 몇가지 변수들로 결정된다.  $Gr$ 은 단위스텝(unit step)으로 입력을 가했을 때 측정되는 최대의 기울기,  $Lt$ 은 단위스텝의 입력을 가한 순간부터 물리량이 증가하기 시작하기까지의 지연시간(lag time)이다. 이 값은 단위스텝 입력에 대한 시간대 물리량의 그래프에서, 최대 기울기가 생긴 점에서 그 기울기에

해당하는 직선을 그었을 때, 이 직선이 시간축과 만나는 교차점으로 정의된다.  $T_s$ 는 제어동작의 주기이다. 실제 고진공 압력제어 기능에 적용된 입력변수는 이온게이지(ion gauge)의 출력신호로 0-10V ( $10^{-10}$ - $10^0$  torr)이고, 출력변수는 자동 유량조절기의 설정신호로 0-5V (0-5sccm)이다. 반송압력 범위는  $3.1 \times 10^{-4}$  torr 이하의 molecular flow인 경우이므로 초기값을  $1 \times 10^{-4}$  torr로 하였다.<sup>(4)</sup> 최종값은 현재 부착된 공정모듈의 생산성을 고려하여, 진공배기계가 수십 또는 수백 mtorr의 공정압력에서 30 sec 이내 배기할 수 있는 진공압력인  $5 \times 10^{-5}$  torr로 선정하였다.

### 3. 실험장치 및 방법

본 연구에 사용된 실험장치는 Fig.1과 같이 구성되어 있는 클러스터 장비이다. 즉, 웨이퍼를 자동으로 운송할 수 있는 로봇이 중앙에 위치한 팔각형의 다면체 반송모듈이 기본 플랫폼(platform)이고, 그 각면에 주위모듈과 격리가 가능하도록 사각 스롯밸브(rectangular slot valve)들이 부착되어 있다. 이중 두면은 작업자가 카세트의 반출입을 가능하게 하는 load lock 개념의 반입용 및 반출용 카세트모듈(cassette module)이 부착되어 있으며, 그 모듈의 전면은 청정실(clean room)로 향하도록 되어 있다. 반입용 카세트모듈 다음에는 웨이퍼를 공정모듈로 운송하기 전에 정렬하기 위한 정렬모듈(aligner)이 있고, 각모듈들 사이에는 사각 스롯밸브에 의해 격리되어 있다. 나머지 면에는 서로 다른 반도체 제조공정을 수행할 수 있는 여러개의 공정모듈(process module)들이 부착되어 있다.

클러스터 장비의 진공배기계는 구성모듈에 각각 설치되어 있으며, 이온게이지, convectron 게이지, 격리밸브,

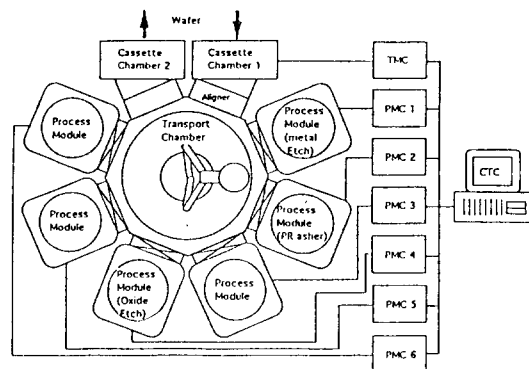


Fig.1 The schematics of the cluster tool.

터보펌프, 진공밸브, 보조펌프 순으로 구성되어 있다. 저진공센서는 대기압(760torr)에서  $10^{-3}$  torr 범위의 진공압력을 측정하며, 고진공센서는  $10^{-3}$  torr 이하의 진공압력을 측정할 수 있다. 보조펌프는 격리밸브와 진공밸브를 열고 반송모듈을 10 torr 까지 배기하면, 터보펌프가 작동되어 반송모듈을  $10^{-6}$  torr 이하의 고진공 상태로 배기한다. 이때 웨이퍼를 카세트 모듈이나 공정모듈로 운송하기 위해서는 반송모듈의 고진공 압력을 정밀하게 제어해야 한다. 만약 반송모듈에 고진공 압력제어 기능이 없으면, 반송모듈이 사각 스톱밸브의 개폐시 두 모듈 사이의 압력차에 의한 흐름형성으로 먼지발생(particle generation)이나 여러가지 반응가스의 역류(back streaming) 현상이 발생한다. 이로 인하여 반송모듈이 오염(contamination)에 노출되거나<sup>(1)</sup> 또는 사각 스톱밸브의 개폐시 22.5 mtorr로 규정된 최대 압력차 보다 큰 압력차로 인하여 밸브수명이 단축되어 생산성에 악영향을 미치게 된다.

이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 디지털 PID 방법을 이용하여 설계된 고진공 압력제어 장치의 구성도를 Fig.2에 나타내었다. 시스템은 크게 입력부, 제어부, 출력부로 구성되며, 입력부는 고진공 측정용 센서인 이온게이지를 사용한다. 센서출력은 MKS 146 제어기에 의해 0-10V의 전압으로 변환되며, 이때의 압력은 log scale로 전환된 값이다. 제어부는 압력제어에 필요한 입출력 채널(channel)을 config file에 추가한 후, PID loop를 형성해 주고 반송모듈 제어기의 PAL(Process Automation Language)<sup>(5)</sup> 프로그램으로 이를 구현한다.

여기에서 압력제어를 위한 변수는 주입되는 질소가스이며, 주의할 점은 자동 유량조절기 자체가 또한 하나의 closed-loop 제어기라는 점이다. 따라서 Fig.3의 특성곡

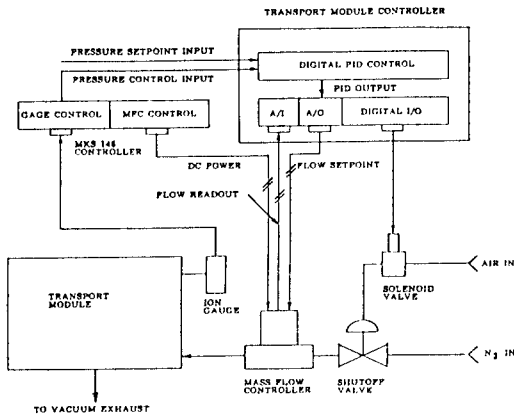


Fig.2 The schematics of pressure control system in the range of high vacuum.

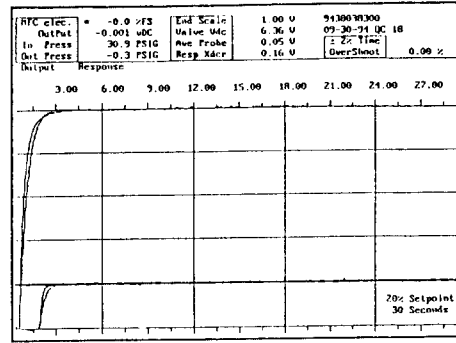


Fig.3 Characteristic curve of the mass flow controller for the nitrogen gas.

선을 보면, 자동 유량조절기는 지연시간인 1초를 포함하여 설정값(setpoint)의 2%이내로 안정화되는 시간이 약 4 초 정도이다. 그러므로 제어초기에는 open-loop로 자동 유량조절기를 안정화시킨 다음, PID 제어 단계로 진입하는 것이 매우 중요하다. 여기에 사용되는 질소는 압력조절기, 흐름스위치(flow switch), 필터(filter)를 통해 40 psig의 압력으로 유입되어 질소 공급용 밸브, 자동 유량조절기를 지나 반송모듈에 주입된다. 이때 이온게이지에서 나오는 압력신호는 반송모듈 제어기로 입력되며, 출력은 위에 기술된 디지털 PID 알고리즘으로 계산된다. 계산된 PID 출력값은 디지털 출력부를 거쳐 자동 유량조절기로 피드백되어 질소의 미세유량을 조절하는 방법으로 압력을 조절한다. 여기서 자동 유량조절기의 전원과 이온게이지의 전원 및 입력값은 MKS 146 제어기에서 공급된다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

제작된 고진공 압력제어장치를 반송모듈에 부착한 후, 짧은 시간내에 반송압력으로 안정하게 도달시키기 위하여 open-loop 시스템으로 Gr, Lt, Ts를 변화시키는 예비실험을 수행하였으며, 그 실험결과를 Fig.4(a), (b)에 나타내었다. Gr은  $6.4 \times 10^{-5}$  torr/sec, Lt는 1 sec 이하로 추정되지만 반송압력 조건에 따라 실제적으로 많은 차이를 보이고 있으며, Ts는 자동 유량조절기가 충분히 피드백될 수 있도록 반송압력 조건에 맞추어 조정되었다.

이들 값에 따라 3가지 형태의 실험결과를 얻었다. 첫 번째는 Gr이 0.02 torr/sec, Lt가 0.1 sec, Ts가 0.25 sec 인 경우로서, 시간에 따른 질소 유량의 변화량을 Fig.5(a)에, 압력변화량은 Fig.5(b)에 나타내었다. 반송모듈의 초기압력인  $2.2 \times 10^{-6}$  torr에서 반송압력인  $5 \times 10^{-5}$  torr로 보냈을 때, 안정화 시간은 20 sec, 안정화 후의 압력오차는  $\pm 5.0 \times 10^{-7}$  torr로서 설정값에 대해  $\pm 1\%$ 이며, 최대 도달

압력은  $8.6 \times 10^{-5}$  torr로 설정값에 대해 99%이다. 이 경우는 초기에 자동 유량조절기의 반응시간이 너무 늦어 압력의 변동량이 크므로 상하로 fluctuation 현상이 발생하였으며, 이것은 반응모듈 내부의 갑작스런 압력변동에 따른 기류로 인하여 먼지들이 발생될 수 있으므로 바람직하지 않다.<sup>(6)</sup> 두번째는 Gr이 0.02 torr/sec, Lt가 0.2 sec, Ts가 0.5 sec인 경우로서, 시간에 따른 질소 유량의 변화량과 압력변화량을 Fig.6(a), (b)에 각각 나타내었다. 반응모듈의 초기압력인  $2.2 \times 10^{-6}$  torr에서 반응압력인  $5 \times 10^{-5}$  torr로 보냈을 때, 안정화 시간은 25 sec, 안정화 후의 압력오차는  $\pm 0$  torr로서 설정값에 대해  $\pm 0\%$ 이며, 최대 도달압력은  $5.3 \times 10^{-5}$  torr로서 설정값에 대해 6% overshoot가 발생했다. 위 방법들은 자동 유량조절기 자체가 또한나의 closed-loop 제어기이므로 지연시간인 1초를 포함하여 설정값의 2% 이내로 안정화되는 시간이 약 4 sec이므로 그 반응시간에 너무 늦기 때문이다.

따라서 초기유량을 일정한 값으로 주고 4초가 지난 다음에 반응모듈 제어기로 PID 제어하는 방법으로 바꾸어 실험하였다. Gr이 0.02 torr/sec, Lt가 0.25 sec, Ts가 0.5 sec, 초기유량은 1 sccm이고 4초 후에 PID제어를 시작하였을 때, 시간에 따른 질소 유량의 변화량을 Fig.7(a)에, 압력변화량을 Fig.7(b)에 나타내었다. 반응모듈의 초기압력인  $2.1 \times 10^{-6}$  torr에서 반응압력인  $5 \times 10^{-5}$  torr로 보냈을 때, 안정화 시간은 8 sec, 안정화 후의 압력오차는  $\pm 5 \times 10^{-7}$  torr로서 설정값에 대해  $\pm 1.0\%$ 이며, 최대 도달압력은  $5.0 \times 10^{-5}$  torr로 설정값과 동일하다. 다른 반응압력으로서  $1 \times 10^{-4}$  torr에 대해 실험한 결과는 다음과 같다. Gr이 0.02 torr/sec, Lt가 0.15 sec, Ts가 0.5 sec, 초기유량은 2.1 sccm이고 4 sec 후에 PID제어를 시작할 때, 시간에 따른 질소 유량의 변화량을 Fig.8(a)에, 압력변화량을 Fig.8(b)에 나타내었다. 반응모듈의 초기압력인  $2.1 \times 10^{-6}$  torr에서 반응압력인  $1 \times 10^{-5}$  torr로 보냈을 때, 안정화 시간은 9 sec, 안정화 후의 압력오차는  $\pm 5 \times 10^{-7}$  torr로서 설정값에 대해  $\pm 0.5\%$ 이며, 최대 도달압력은  $1.0 \times 10^{-4}$  torr로 설정값과 동일하다.

이상의 결과를 종합하면, 초기압력인  $2.1 \times 10^{-6}$  torr에서 반응압력이  $1 \times 10^{-4}$ 이나  $5 \times 10^{-5}$  torr로 제어하기 위해서 질소의 유량을 초기에 각각 2.1 sccm, 1 sccm으로 설정하고 4초 후에 디지털 PID 제어를 수행하여야 10 sec 이내에 안정화되며, 안정화 후에 최대 압력오차는 설정값에 대해  $\pm 1.0\%$  이내 제어가 가능함을 알 수 있다.

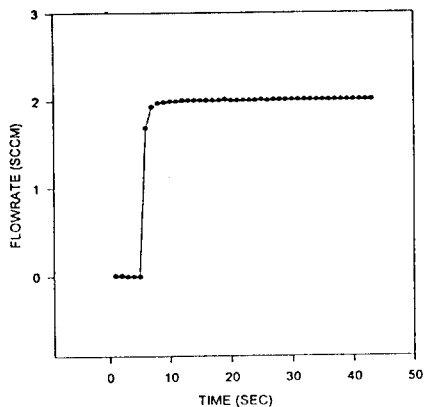
## 5. 결론

반도체 제조공정의 통합화를 위한 클러스터 장비용 반응모듈에 대해 디지털 PID 압력제어 방법을 적용하여 고진공의 정밀 압력제어장치를 구현하였다. 성능시험결과, 초기압력인  $2.1 \times 10^{-6}$  torr에서 반응압력인  $1 \times 10^{-4}$ 이나  $5 \times 10^{-5}$  torr로 제어하기 위하여 질소의 2.1 sccm 이하로 초기유량을 설정하고, 4초 후에 디지털 PID 제어를 수행한 경우에 10 sec 안에 최대 압력오차  $\pm 1.0\%$ 이내의 성능을 얻을 수 있었다.

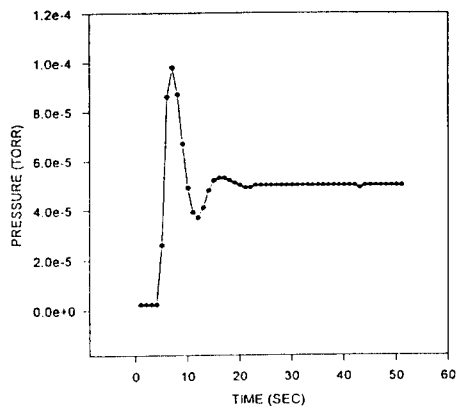
이러한 고진공 압력제어장치는 카세트모듈이나 공정모듈과의 웨이퍼운송시 먼지발생이나 공정가스들의 역류에 의한 오염방지, 고가인 사각밸브의 수명유지에 기여하게 될 것이며, 결과적으로 공정성능이 향상되고 유지보수 시간이 절감되어 생산성이 증대될 것이다.

## 참고문헌

1. M.E.Bader, R.P.Hall and G.Strasser, "Integrated Process Equipment", Solid State Technology, pp.149-154, May 1990.
2. Semiconductor Equipment and Materials International, "SEMI International Standards 1994", 1994
3. B.C.Kuo, "Digital Control Systems", Holt, Rinehart and Winston, Inc., pp.452-578, 1980.
4. A.Roth, "Vacuum Technology", North-Holland Publishing Company, pp.1-146, 1976.
5. Techware System Corporation, PAL Customer Pascal Programming Kit for OS9, Ver.2.5, 1993.
6. D.Chen and S.Hackwood, "Vacuum particle generation and the nucleation phenomena during pumpdown", J. Vac. Sci. Technol. A, Vol.8, No.2, pp.933-940,

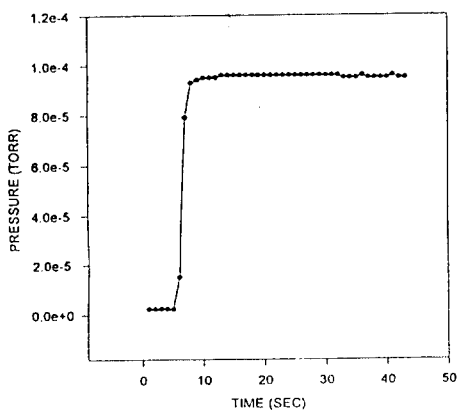


(a)



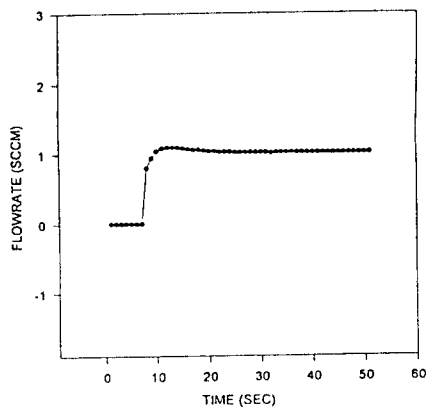
(b)

Fig.5 Flow rate (a) and pressure (b) variations as a function of time. (transport vacuum= $5 \times 10^{-5}$  torr, Gr=0.02 torr/sec, Lt=0.1 sec, Ts=0.25sec)

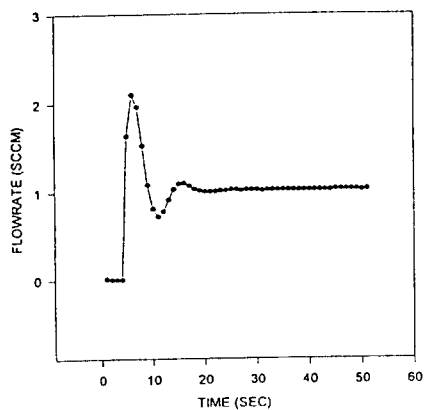


(b)

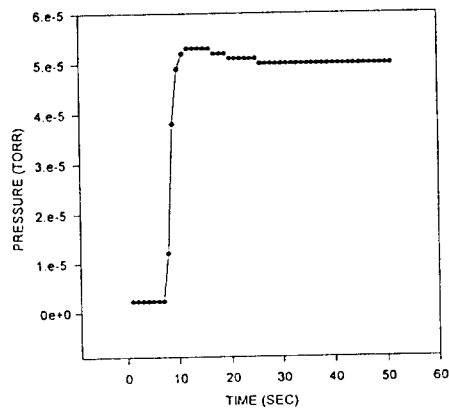
Fig.4 Flow rate (a) and pressure (b) variations as a function of time for the 2 sccm step input of the nitrogen gas.



(a)

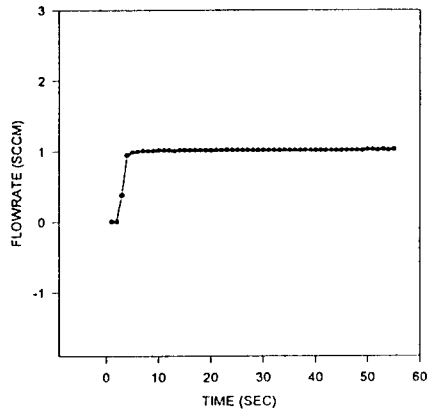


(a)

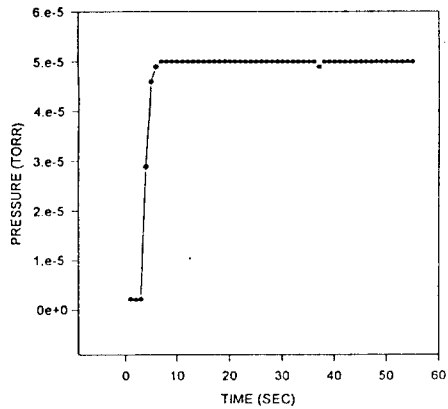


(b)

Fig.6 Flow rate (a) and pressure (b) variations as a function of time. (transport vacuum= $5 \times 10^{-5}$  torr, Gr=0.02 torr/sec, Lt=0.2 sec, Ts=0.5 sec)

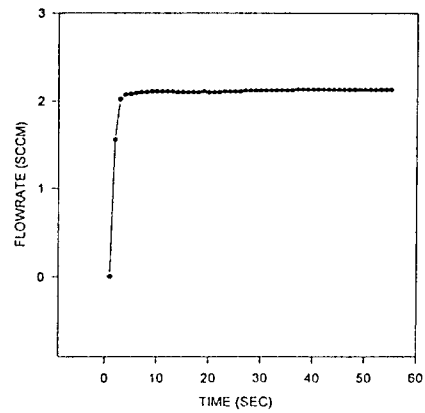


(a)

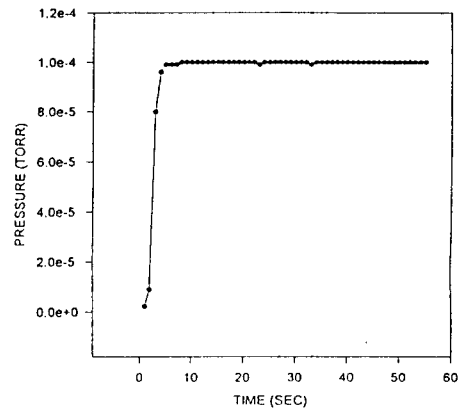


(b)

Fig.7 Flow rate (a) and pressure (b) variations as a function of time. (transport vacuum= $5 \times 10^{-5}$  torr, Gr=0.02 torr/sec, Lt=0.25 sec, Ts=0.5 sec, N<sub>2</sub>=1 sccm)



(a)



(b)

Fig.8 Flow rate (a) and pressure (b) variations as a function of time. (transport vacuum= $1 \times 10^{-4}$  torr, Gr=0.02 torr/sec, Lt=0.15 sec, Ts=0.5 sec, N<sub>2</sub>=2.1 sccm)