

## 중공사형 질소 분리막 모듈의 최적 선정과 유량특성에 관한 연구

김종도† · 이상수\* · 김전하\*\*

(원고접수일 : 2008년 7월 16일, 원고수정일 : 2008년 9월 26일, 심사완료일 : 2008년 9월 25일)

### A Study on Flow Rate Properties and Optimal Selection of Nitrogen Membrane Module of Hollow Fiber Type

Jong-Do Kim† · Sang-Su Lee\* and Jeon-Ha Kim\*\*

**Abstract :** The gas separation technology using membrane is widely used to refine various gases in many industry fields and recently is being applying in CO<sub>2</sub> recovery technology. In the gas and chemical tanker, nitrogen generators for inerting, purging and padding are on board and most of them have membrane modules of hollow fiber type with long life and vibration resisting properties. Because a membrane module is a key component accounting for 50% of total manufacturing cost of nitrogen generator, adequate selection for it is an important problem. In this paper, the flow performance coefficient based on dimension and specification data of membrane module was relatively selected to compare nitrogen generating capacity of module and various performance tests about the selected PARKER ST6010 membrane module were conducted. As a result, the useful coefficient and basic data in selecting a membrane module were achieved.

**Key words :** Membrane module(분리막 모듈), Hollow fiber(중공사), Nitrogen generator(질소 발생기), Gas separation(가스분리), Performance test(성능시험)

#### 1. 서 론

분리막 기술은 현재 수처리 분야에서 활발히 적용되고 있으며, 특히 하수와 정수처리에서 대용량으로 많이 사용되고 있다. 수처리와 함께 분리막 기술이 가장 폭넓게 적용되고 있는 분야는 기체분리 및 정제분야이며, 여기에 사용되는 가장 일반적

인 분리막 모듈의 형태는 중공사형이다. 정제용 중공사 기체 분리막 모듈은 메탄(CH<sub>4</sub>), 수소(H<sub>2</sub>), 헬륨(He), 산소(O<sub>2</sub>), 질소(N<sub>2</sub>) 등의 가스를 고순도로 추출하는데 적용되고 있으며, 최근에는 지구 온난화에 대한 대책으로 CO<sub>2</sub> 회수기술과 연료전지 분야에서의 분리막 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>[1],[2]</sup>. 그 중에서도 산업적, 상업적으로 가장 널리

† 교신저자(한국해양대학교 기관시스템공학부, E-mail: jdkim@hhu.ac.kr, Tel: 051)410-4253)

\* (주)레베산업, 한국해양대학교 대학원

\*\* (주)레베산업 개발부

적용되고 있는 분야가 질소정제이다.

질소는 풍부한 불활성 청정가스로 공기 중에 약 78% 정도가 존재하며, 해양, 식음료, 화학, 금속 가공 등의 산업 전분야에서 폭발 산화, 부패방지용으로 널리 사용되고 있다. 특히 가스 및 화학품 운반선(gas carrier and chemical tanker)들은 화물의 폭발과 산화방지를 위해 이너팅(inerting), 퍼징(purging), 패딩(padding)의 용도로 질소를 사용하고 있다. 질소는 크게 극저온(cryogenic), PSA(pressure swing adsorption), 분리막(membrane)의 3가지 방식으로 생산되고 있다. 극저온방식은 대형 플랜트(plant)화 되어야하므로 큰 공간을 차지하고, PSA방식은 흡착제가 진동에 취약해 육상용으로만 사용되고 있다. 따라서 현재 선박에 적용되고 있는 모든 질소발생기는 진동에 강한 분리막 방식이 채택되고 있다.

국내에서도 제조기술이 개발되어 분리막 모듈을 생산하고 있지만, 질소발생기의 핵심부품인 중공사형 분리막의 제조는 화학, 고분자, 기계공학이 바탕이 된 소재원천 핵심기술을 필요로 하기 때문에 국외 제품에 비해 용량이나 성능면에서 많은 차이를 보이고 있다. 또한 국외에서 생산되고 있는 분리막 모듈들은 개발과 생산과정에서 많은 기술적 데이터들을 축적하여 유효한 데이터들을 제시하고 있지만, 국내에서 생산된 모듈들은 기본적인 유량 데이터만을 제시하고 있는 실정이다. 따라서 질소발생기 제작 시 전체 시스템에서 50% 이상의 비중을 차지하는 분리막 모듈의 선정은 가장 중요한 문제이다.

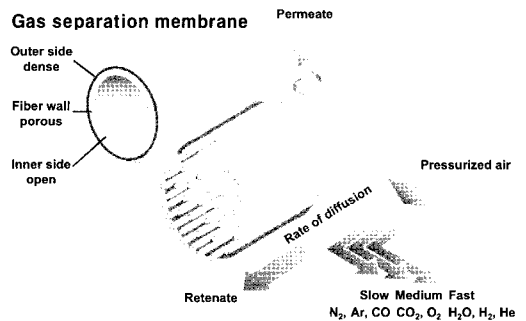
본 연구에서는 국내·외에서 생산되고 있는 분리막 모듈의 치수사양과 조건별 유량 데이터를 바탕으로 성능을 비교할 수 있는 성능계수를 선정하여, 분리막 모듈의 선정 시에 사용할 수 있는 척도를 마련하고자 하였다. 또한 성능계수의 비교 평가를 통해 우수한 것으로 판명된 분리막 모듈(PARKER사 ST6010)을 구매하여 분리막 모듈에 대한 성능시험 장치를 구축하였다. 이를 바탕으로 압력과 순도에 따른 조건별 유량특성, 시간에 따른 연속적인 압력과 유량특성을 파악함으로써 분리막 모듈의 기본 성능에 대한 상관관계를 규명하고, 모듈 선정 시의 유용한 기본 성능시험 방안을

마련하였다.

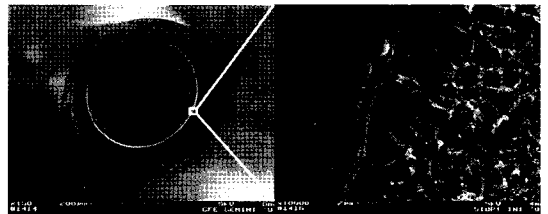
## 2. 질소 분리막 모듈

### 2.1 중공사형 분리막 모듈의 원리

먼저 중공사 기체 분리막의 원리를 간단히 살펴보면, 고분자 소재로 제조된 중공사 내부를 압축된 기체가 통과할 때 기체의 투과속도가 빠른 기체는 중공사를 통과하는 동안 분리막을 통해 투과되고, 투과속도가 느린 기체는 분리막을 투과하지 못하고 통과하게 되는 것이다. Fig. 1(a)는 압축공기가 분리막을 통과할 때 대기 중에 존재하는 기체들의 투과특성을 보여준다. 투과속도가 빠른 수소부터  $H_2 \rightarrow H_2O \rightarrow O_2 \rightarrow CO_2$  등의 순으로 분리막을 통해 투과하게 되고, 투과속도가 느린  $N_2$ 는 분리막을 통과하게 된다. 그리고 Fig. 1(b)는 중공사 1개에 대한 단면 SEM사진과 미세구조를 보여주고 있으며, 두께방향으로 미세한 기공구조를 확인할 수 있는데, 이 기공 사이로 분자크기의 기체들이 통과하게 된다.



(a) Principle of gas separation



(b) Microstructure of hollow fiber by SEM

Fig. 1 Separation principle and micro-structure of hollow fiber membrane<sup>[4]</sup>

통과 및 투과되는 기체의 유량은 분리막 소재특성과 기체의 선택적인 투과도에 의해서 좌우된다. 그리고 분리막의 미세한 기공을 통한 기체의 투과는 분자량이 아닌 분자의 크기에 의해 좌우되며 공기 중 기체의 동력학적 직경은 H<sub>2</sub> 0.28nm, CO<sub>2</sub> 0.33nm, O<sub>2</sub> 0.34 nm, N<sub>2</sub> 0.36nm로 정의되고 있다<sup>(3)</sup>.

2.2 분리막 모듈의 소재

분리막은 분리하고자 하는 기체에 대해 친화적이고 선택성이 우수하며, 투과성이 커야 고순도의 정제된 기체를 얻을 수 있게 된다. 또한 기계적 강도, 화학적 안정성, 내열성이 우수할수록 적용이 쉽고 실용성이 증대되게 된다. 이러한 특성은 분리막의 원소재, 표면처리기술, 제조 공정기술에 의해 좌우된다<sup>(4)</sup>.

기체 분리막 재료로 검토되고 있는 고분자로는 polysulfone과 polycarbonate, silicone polymer, polyvinyls, polyacetylenes, polyamide그룹 등이 있는 것으로 보고되고 있다. Polysulfone과 poly-carbonate의 기체 투과특성은 비슷하나 polysulfone이 polycarbonate보다 용매화합물에 대하여 안정하고 내열성이 높다. Silicone polymer는 고무상으로 유리 전이온도가 낮고 일반적으로 투과계수는 대단히 크며 선택도는 낮다고 한다. Polyamide는 유리상 고분자로서 높은 기계적 강도, 고온에 대한 우수한 내열성, 용매에 대한 화학적 안정성을 가지고 있으며, 높은 투과 선택성 때문에 기체 분리막으로 많은 연구가 이루어지고 있으나, 투과계수가 비교적 낮기 때문에 투과계수가 높은 polyamide를 합성하기 위한 연구가 많이 이루어지고 있는 것으로 조사되고 있다<sup>(4)</sup>.

PARKER사는 분리막 모듈의 소재로 일반적으로 사용되고 있는 polysulfone과 polyimide 소재가 아닌 PPO(polyphenylene oxide) 소재를 사용하고 있으며, 다양한 모듈의 비교시험 결과를 바탕으로 투과성 측면에서 PPO 소재 중공사 분리막 모듈이 월등히 우수함을 제시하고 있다. 일반적으로 선택적 투과성이 우수하면 다량의 고순도 기체

가 통과하게 되므로 유량특성이 향상되게 된다<sup>(5)</sup>.

2.3 국내·외 분리막 모듈의 성능 비교

2.3.1 모듈 성능계수 선정

분리막 모듈의 용량 및 치수대비 동일한 조건에서 상대적인 성능의 비교가 가능한 계수를 만들기 위해 식(1)과 같이 유량의 성능을 나타낼 수 있는 계수를 정하였다.

분리막 모듈은 캡(cap)과 하우징(housing)으로 구성되어 있으며 모듈별로 대부분 유사한 형상을 가지고 있다. 일반적으로 분리막 모듈의 유량특성은 체적에 비례하고, 압력에도 비례하는 상관관계를 가지므로 식(1)과 같이 기준 압력과 체적을 정해둔 상태에서 비교 모듈의 압력과 체적상태를 역으로 곱하여 상대적인 비교 수치가 정해진다. 계산된 수치를 유량성능계수(Flow Performance Coefficient, FPC)로 칭하며, 이것은 단위를 무시한 무차원계수이다. 상대비교를 위해 기준이 되는 분리막 모듈을 1개 정하고 기준 모듈의 7bar, N<sub>2</sub> 98%에서의 유량 데이터를 상수로 하였고 온도와 중량은 유량성능계수에 고려하지 않았다.

$$FPC = Q_x \times \frac{7}{P_x} \times \frac{V_p}{V_x} \quad \text{식(1)}$$

여기서, Q<sub>x</sub>:유량(m<sup>3</sup>/h), P<sub>x</sub>:압력(bar)

V<sub>x</sub>:모듈체적(m<sup>3</sup>), V<sub>p</sub>:PARKER 모듈 체적이다.

2.3.2 분리막 모듈의 성능 비교

국내·외에서 생산되고 있는 분리막 모듈들 중에서 형상이 비슷한 모델을 선정하여 용량, 치수, 중량으로 구분하여 Table 1에 나타낸다. 여기서 A, B, C는 국외 모델이며, D와 E는 국내 모델이다. Table 1에서 알 수 있듯이, 객관적으로 제시된 수치적인 비교를 통해서도 국내의 D와 E 모듈의 사양은 국외 3개 모듈에 비해 상대적으로 치수대비 유량이 많이 떨어진다는 것을 알 수 있다. 따라서 모듈 선정을 위한 비교 대상에서 국내 2개 모듈은 제외하였으며, 나머지 국외 3개 분리막 모듈을 비교하였다.

모듈별로 계산된 유량성능계수 결과를 Table 2에 나타낸다. B와 C 모듈의 성능은 유사하며, 반면 A 모듈은 이들에 비해 2배 이상 성능이 우수하고 중량 또한 Table 1에서 알 수 있듯이 C 모듈에 비해 2배 이상 가볍다는 것을 알 수 있다. 따라서 이후 성능시험에 적용할 분리막 모듈을 A 모듈(PARKER사 ST6010)로 정하였다.

**Table 1 Specifications of Membrane module**

Model	Capacity	Size(mm) /Weight
A	6.9m <sup>3</sup> /h (N <sub>2</sub> 98%-7bar)	ø139×736 5.5kg
B	44m <sup>3</sup> /h (N <sub>2</sub> 98%-13.8bar)	ø250×1,800
C	5.2m <sup>3</sup> /h (N <sub>2</sub> 98%-7bar)	ø165×1,160 12kg
D	0.78m <sup>3</sup> /h (N <sub>2</sub> 98%)	ø95×1,050 5kg
E	0.36m <sup>3</sup> /h (N <sub>2</sub> 99%-6bar)	ø90×830

**Table 2 FPC by model**

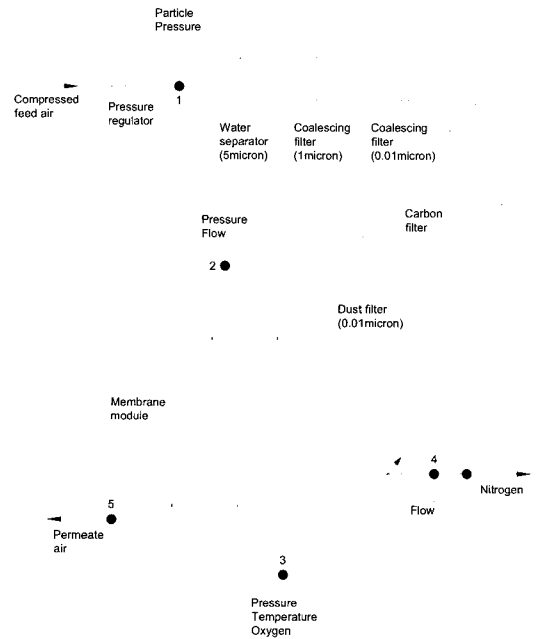
Model	Calculation	FPC
A	6.9×(7/7)×(0.0113/0.0113)	6.9
B	44×(7/13.8)×(0.0113/0.0884)	2.9
C	5.2×(7/7)×(0.0113/0.0248)	2.4

### 3. 시험방법 및 이론

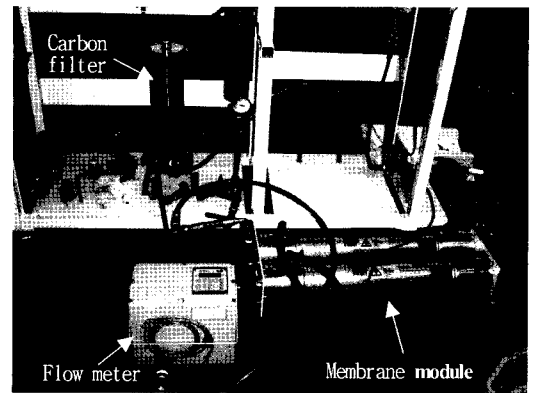
#### 3.1 시험장치 및 방법

N<sub>2</sub> 97%, 7bar에서 10m<sup>3</sup>/h 이상 유량이 발생하도록 ST6010 모듈을 2개 선정하여 병렬로 연결하였다. 분리막 모듈에 상응하는 압축공기는 질소 발생효율을 고려하여 최대압력 11kgf/cm<sup>2</sup>, 유량 1.38m<sup>3</sup>/h 급의 공기 압축기(compressor)를 사용하여 공급하였다.

전체적인 시험장치의 P&ID(Piping & Instrument Diagram)를 Fig. 2에 나타내고, Fig. 3에는 유량시험장면을 나타낸다. 실험장치는 실제적인 질소발생기와 동일한 공정의 P&ID로 크게 전처리필터부, 모듈부, 계측부 3부분으로 구성된다.



**Fig. 2 P & I D test**



**Fig. 3 Experimental setup for flow test**

**Table 3 Instrument and specification for test**

Instrument	Specification
Compressor	1.38Nm <sup>3</sup> /min, 11kgf/cm <sup>2</sup> [Airplus-GSS11]
Pressure transmitter	0~16bar[Allsensor]
Temp. transmitter	-50~100℃[Allsensor]
Air flowmeter	0~150m <sup>3</sup> /h, Thermal mass type [DIELEN-VARIOMASS]
Oxygen sensor	0~25%, galvanic[CITY]
A/D converter	16ch, 250kHz[NI]

이송유량은 모듈 통과전, 질소유량은 모듈 통과 후 2곳에서 측정하였다. 신뢰성 있는 데이터의 확보를 위하여 연속적으로 일정한 압력을 유지한 5bar에서부터 8bar, N<sub>2</sub> 97%까지만 유량을 측정하였다. 압력은 입구에 설치한 압력조정기로 조정하여 일정하게 유지시켰고, 시험 시 배관 내 온도는 16~18℃를 유지하여 온도에 따른 측정데이터의 영향을 무시하였다. 그리고 측정값들은 반복시험을 통한 대표값으로 나타내었다.

먼저 질소 출구 측 유량조절밸브를 조절하여 순도를 조절하면서 압력에 따른 질소유량과 이송유량을 측정하고 그 결과로부터 질소 발생효율을 계산하여 분석하였다. 압력변화에 따른 미소한 질소순도의 변화는 유량조절밸브를 조절하여 설정 순도로 맞춘 후 시험하였다.

측정된 질소유량, 이송유량, 질소순도로 부터 투과공기 산소순도의 예측이 가능한지를 확인하기 위하여, 실제 투과공기 출구측에서 산소순도를 측정하여 예측값과 비교하였다.

분리막 모듈의 시간에 따른 압력, 유량, 질소순도 특성과 질소 발생 유효성을 연속적으로 파악하기 위하여 각 센서들로부터 측정된 데이터를 A/D converter를 사용하여 디지털로 변환하여 LABVIEW 프로그램으로 실시간분석을 행하였다.

### 3.2 이론적 배경

표준대기상의 기체성분을 모두 100%로 보았을 때, N<sub>2</sub> 78%, O<sub>2</sub> 20.9%, 그 외 Ar, He, CO<sub>2</sub> 등이 약 1% 내외로 존재한다. 1% 내외로 미소하게 존재하는 Ar, He 및 CO<sub>2</sub> 등도 불활성기체이므로 모두 질소에 포함시켜, 식(2)와 같이 산소센서로부터 산소순도를 측정한 후 간접적으로 질소순도를 계산하였다.

$$N_2 \text{ purity}[\%] = 100 - \text{Oxygen purity}[\%] \quad \text{식(2)}$$

분리막 모듈에서의 유량관계는 질량보존의 법칙이 성립하므로 Fig. 4와 같이 이송유량은 질소유량과 투과되는 공기유량을 합한 것이 된다. 따라서 유량관계는 식(3)과 같이 표현되고, 질소 발생효율은 이송유량에서 질소유량이 차지하는 비율로 식(4)와 같이 정의된다.

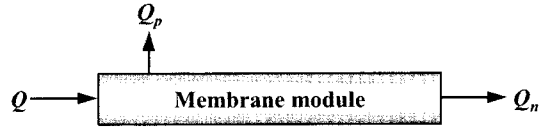


Fig. 4 Flow relation in membrane module

$$Q = Q_n + Q_p \quad \text{식(3)}$$

여기서, Q:이송유량

Q<sub>n</sub>:질소유량, Q<sub>p</sub>:투과 공기유량이고,

$$E_n = \frac{Q_n}{Q} \times 100[\%] \quad \text{식(4)}$$

여기서, E<sub>n</sub>:질소 발생효율이다.

투과되는 공기에 대해 별도로 산소순도를 측정하지 않아도 이송유량과 질소유량, 질소순도를 알고 있으며, 투과공기량과 투과공기의 산소순도를 알 수 있다. 따라서 투과되는 공기에 대한 산소순도는 식(5)의 관계식에 의해 식(6)과 같이 측정값들에 의해 계산된다.

$$\frac{Q_n}{Q} \cdot (100 - N_p) + \frac{Q_p}{Q} \cdot O_p = 20.9 \quad \text{식(5)}$$

$$OP_p = \frac{20.9 \cdot Q - Q_n(100 - N_p)}{Q_p} \quad \text{식(6)}$$

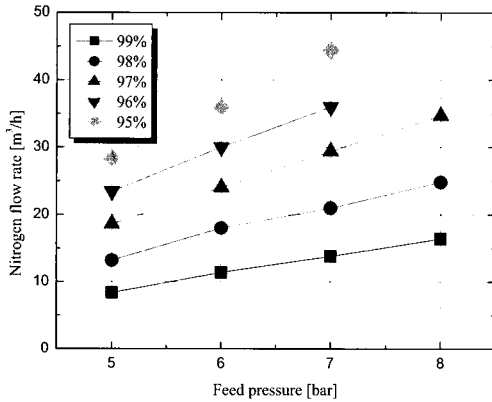
여기서, OP<sub>p</sub>:투과공기 산소순도, N<sub>p</sub>:질소순도이다.

## 4. 시험결과 및 고찰

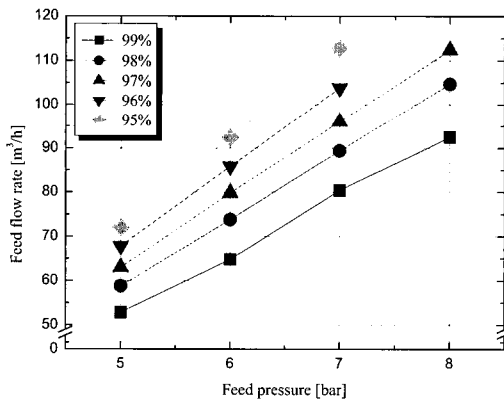
### 4.1 질소유량 특성

압력과 질소 순도별 질소유량과 이송유량은 Fig. 5에서 처럼 비례적이고 직선적 특성을 나타낸다. 따라서 압력과 질소순도에 따른 조건별 직선의 관계식을 정의해 측정범위 이외의 조건에 대해서도 연속적인 유량의 예측이 가능할 것으로 예상된다.

Table 4는 식(4)를 사용해 얻은 압력과 질소 순도별 질소 발생효율을 나타내고 있다. 질소순도에 따라서는 일정한 평균값을 보이고 있으며, 압력에 따라서는 밸브 조절오차, 측정오차 및 온도의 영향이 포함되어 조건별로 조금씩 편차가 있음을 알 수 있다.



(a) Nitrogen flow rate



(b) Feed flow rate

Fig. 5 Nitrogen and feed flow rate

Table 4 Efficiency of nitrogen generation

		<unit:%>				
N <sub>2</sub> purity(%)	Pressure(bar)	99	98	97	96	95
8	8	17.7	23.7	30.9	-	-
7	7	17.2	23.5	30.6	34.7	39.4
6	6	17.6	24.4	30.1	35.0	39.0
5	5	15.9	22.4	29.5	34.5	39.2
Average		17.1	23.5	30.3	34.7	39.2

이상과 같이 질소유량과 질소 발생효율이 정해지면 이송유량이 계산되므로 사용자가 원하는 질소 발생조건에 해당되는 공기압축기의 선정이 가능하게 된다.

#### 4.2 투과공기의 산소순도

투과되는 공기에 대한 산소순도의 예측이 가능한지를 알아보기 위하여 7bar에서 측정된 유량과 질소순도를, 식(6)에 대입하여 투과공기의 산소순도를 계산하였고, 이를 실제 측정값과 비교한 결과를 Table 5에 나타낸다. 오차율은 측정값을 기준으로 한 것이다.

순도별로 조금의 차이는 있지만, 대부분 오차율 3% 이내로 측정값과 예측값이 유사함을 알 수 있다. 100에서 이들을 빼면 투과공기의 질소순도가 된다. 따라서 질소발생기를 사용하면서 투과공기를 다른 용도로 사용하기 위해 산소순도가 필요하다면 이런 방법으로 예측해도 가능하다는 것이 입증되었다.

Table 5 Oxygen purity prediction of permeate air

Nitrogen purity(%)	99	98	97	96	95
Measured Oxygen purity(%)	25.7	28.2	29.5	30.7	32.3
Predicted Oxygen purity(%)	25.2	28.1	29.0	30.9	33.2
Error(%)	1.9	0.4	1.7	0.7	2.8

#### 4.3 연속적인 질소유량 특성

Fig. 6은 시간에 따른 질소 순도별 이송압력 변화 특성을 보여주고 있다. 질소순도 99%의 경우 압력이 계속 상승하다가 9.6bar 근방에서 압축기가 멈추었고, 압축기 작동차압 만큼 떨어진 8.3bar에서 다시 상승해 동일한 압력특성을 계속 보여주었는데, 이는 압축기 발생유량이 이송유량보다 많기 때문이다.

하지만 질소순도 98%이하에서는 순도에 따라 약 150초를 지나면서 일정한 압력상태를 유지하고 있음을 알 수 있다. 이 상태의 압력이 순도별 일정유량을 유지하게 되는 최고 이송압력이 된다. 그리고 96% 이상에서는 압력이 상승하면서 일정해지고, 95%에서는 압력이 하락하면서 일정해지는 특

성을 보이는 데, 이는 상대적으로 순도가 낮은 경우 유량이 급격하게 빠져나가기 때문으로 사료된다. 마찬가지로 압력이 일정하게 유지되는 시점에서는 질소유량과 질소순도도 일정하게 유지되는 결과를 보였다.

이상의 결과로부터, 초기에 선정된 공기압축기를 사용하여 질소의 순도별로 연속적인 질소 발생이 가능한 최대 사용압력범위가 존재하며, 그러한 압력 이하로 사용하면 일정한 질소유량의 사용이 가능할 것이다.

N<sub>2</sub> 98%, 7bar 조건에서 1시간 이상 연속 가동하면서 측정된 질소순도, 질소유량, 이송압력의 변화를 Fig. 7과 같이 양쪽 Y축의 그래프 상에 나타내었다. 이송압력과 질소유량이 압축기의 작동차압에 따라 주기적으로 미소하게 변하지만, 질소순도는 일정한 상태를 유지하고 있음을 알 수 있다.

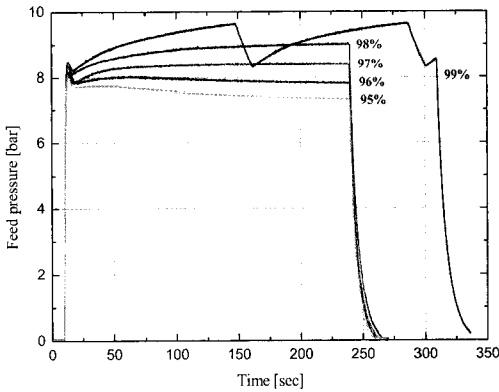


Fig. 6 Variation of feed pressure with time

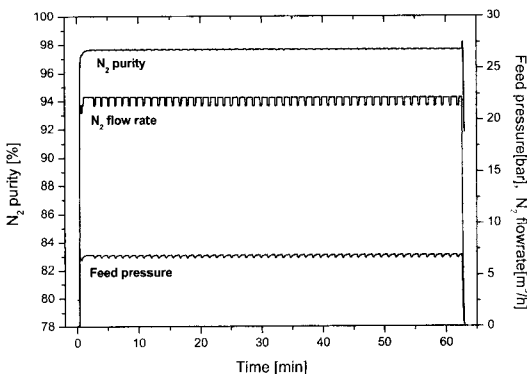


Fig. 7 Variation of feed pressure, nitrogen purity and flow rate by time

## 5. 결 론

중공사형 질소 분리막 모듈의 최적 선정과 유량 특성에 관한 연구를 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

(1) 중공사형 질소 분리막 모듈은 체적과 압력에 비례한다는 관계로부터 모듈 사양 데이터를 이용한 유량성능계수(FPC)를 정의하여 분리막 모듈의 성능을 상대적으로 비교, 검토할 수 있게 되었다.

(2) 압축기, 전처리필터, 센서 및 체크기들을 사용하여 분리막 모듈의 성능을 평가할 수 있는 시험 장치와 방안을 마련하였으며, A/D converter와 LABVIEW를 이용한 실시간 다채널 디지털 데이터 획득시스템을 구축하였다.

(3) 질소유량은 압력과 순도에 따라 비례적인 관계를 나타내기 때문에 직선의 관계식을 정의하여 측정범위 이외의 유량 예측이 가능하며, 평균효율이 정해짐으로써 질소유량만으로 이송유량의 추정이 가능하고 사용조건에 맞는 공기압축기의 선정이 가능해졌다.

(4) 이송유량, 질소유량, 질소순도의 측정값을 식(6)에 대입함으로써 실제 측정값과 오차율 2% 내외의 정확도로 투과공기의 산소순도 예측이 가능하며, 유량에 대한 질량보존의 법칙이 성립됨이 입증되었다.

(5) N<sub>2</sub> 98%, 7bar 조건에서 시간에 따른 압축기의 작동차압에 따라 미소한 유량의 변화를 보였으나, 초기 설정한 질소순도를 거의 일정하게 유지하였으며, 이로써 분리막 모듈의 연속적인 유량특성이 양호한 것으로 평가되었다.

본 연구를 통해 얻어진 분리막 모듈에 대한 유량 성능계수(FPC) 및 기본 성능시험 결과와 방안이 향후 중공사형 분리막 모듈의 선정하는 데 유용한 정보가 될 수 있을 것으로 기대된다.

## 참고문헌

- [1] 조은애, 오인환, "고분자 전해질 연료전지용 분리판 기술개발 현황 및 전망," 한국고분자학회지, 제15권 5호, pp.612~617, 2004.
- [2] 김연욱, 박현수, 김화용, "분리막과 PSA의

- hybrid 시스템에 의한 이산화탄소 회수 공정.”  
한국가스학회추계학술대회, pp.57~62, 2000.
- [3] 하성용, “분리막을 이용한 공기분리기술 및 현황.”  
한국막학회 제15회 심포지엄, pp. 121~134,  
2002.
- [4] 김종표, 염봉열, 민병렬, “고분자 기체 분리막  
기술 동향”, 한국고분자공학회지, 제16권 4호,  
pp.436~446, 2005.
- [5] PARKER, N<sub>2</sub> Generator, 2005

## 저 자 소 개



### 김종도 (金鍾道)

1963년 1월생, 1985년 한국해양대학교  
기관공학과 졸업, 1993~1997년 일본오  
사카대학 생산가공공학과 응용고온공학  
코스(공학석사 및 공학박사), 2003년 1  
월~현재, 대한용접학회 사업이사겸 고  
에너지연구위원회 위원장, 2004년 1월~  
한국레이저가공학회 운영이사, 1998년  
3월~현재, 한국해양대학교 기관시스템  
공학부 교수, 당학회 편집이사, 관심분  
야 : 레이저용접, 가공현상의 고분해능  
계측과 실시간 해석



### 이상수 (李相秀)

1962년 9월생, 1985년 한국해양대학교  
기관학과 졸업(학사), 2007년 한국해양  
대학교 기관시스템공학과(석사), 2008년  
한국해양대학교 기관시스템공학과(박사  
과정), 2000년~현재, (주)레베산업 대표  
이사



### 김전하 (金傳河)

1971년 10월생, 1997년 부산대학교 정  
밀기계공학과 졸업(학사), 1999년 부산대  
학교 정밀기계공학과(석사), 2004년 부  
산대학교 정밀기계공학과(박사), 2005  
년~현재, (주)레베산업 연구개발과장