

工學碩士 學位論文

질소발생용 중공사 기체 분리막 모듈의
유량특성에 관한 연구

**A Study on Flow Rate Properties of Hollow Fiber
Gas Membrane Module for N₂ Generation**


指導教授 金 鍾 道


韓國海洋大學校 海事産業大學院


機關시스템工學科

李 相 秀

本 論 文 을 李 相 秀 의 工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함

主 審 工 學 博 士 李 明 勳 

副 審 工 學 博 士 金 由 澤 

副 審 工 學 博 士 金 鍾 道 

2008年 2月

韓 國 海 洋 大 學 校 海 事 產 業 大 學 院

機 關 시 스템 工 學 科

李 相 秀

목 차

Abstract

제1장 서 론	1
1.1 연구배경	1
1.2 연구목적 및 내용	4
제2장 질소발생 용량 및 분리막 모듈의 특성	6
2.1 증공사 기체 분리막	6
2.2 질소발생 용량	8
2.3 분리막 모듈	11
제3장 분리막 모듈에 대한 시험평가	15
3.1 시험장치 및 시험방법	15
3.1.1 시험장치	15
3.1.2 시험방법 및 이론	22
3.2 시험결과 및 고찰	27
3.2.1 공정별 공기질의 측정	27
3.2.2 압력, 순도 및 유량과의 상관관계	30
3.2.3 유량특성	34
3.2.4 모듈 병렬연결시의 유량특성	41
제4장 질소발생 시스템에 대한 평가	47
4.1 질소발생 시스템의 구성과 특성	47
4.2 시험장치 및 시험방법	51
4.2.1 시험장치	51
4.2.2 시험방법	55

4.3 시험결과 및 고찰	56
4.3.1 공기질의 측정	56
4.3.2 유량특성	59
4.3.3 연속 압력, 순도 및 유량과의 상관관계	61
4.3.4 연속 유량특성	64
제5장 결 론	69
참고문헌	71

A Study on Flow Rate Properties of Hollow Fiber Gas Membrane Module for N₂ Generation

Sang-Su, Lee

**Department of Marine System Engineering
Graduate School of Maritime industry of Korea Maritime University**

Abstract

In cargo ships, such as gas carrier or chemical tanker, depending on the characteristics of transportation, inert gas has been used in storage tank and freight docks for separation from the atmosphere and prevention of explosion, and it is used for such uses as inerting, padding, purging, and blanketing. The use of inert gas is for safe transportation and storage, and in general carbon dioxide(CO₂) is used for oil tanker or chemical tanker, while nitrogen gas(N₂) is used for liquefied gas carrier that transports LNG.

In previous large-scale chemical tankers, boiler combustion gas with abundant CO₂, generated from the large-capacity IGG(Inert Gas Generator) and IGS(Inert Gas System) has been used as inert gas. However, due to the issues like the contamination of freight by SO_x or NO_x oxides generated from boiler combustion gas and global warming by the increase of CO₂, the application of large-capacity Nitrogen generator to produce inert and clean gas, nitrogen, has become a growing trend.

Nitrogen generators that are currently used in cargo ships all use the membrane type because the cryogenic type requires to be a large-scale plant including cooling device and the PSA type has limited usage due to vulnerability of the absorbent to the vibration of freighters. Therefore, all nitrogen generators that are currently used in cargo ships choose the membrane type which is strong against vibration.

Except for large-scale gas carrier and chemical tanker, small- and medium-sized LPG or chemical tankers in thousands of tons use 10~30 high-pressure nitrogen bottles for inerting or padding depending on volume. However, these high-pressure nitrogen bottles should be transported to the shore and recharged, after nitrogen gas is exhausted, so it is disadvantageous in terms of cost, time and manpower. Thus, a demand for nitrogen supply method is growing.

This study is a preliminary stage in the development of recharging system by nitrogen generators which replace nitrogen-bottle supply method for small and medium-sized LPG or chemical tankers. It aims to examine hydraulic characteristics on gas membrane module for PARKER ST6010 for nitrogen generation which is used for land use and to evaluate validity of its nitrogen-generation processing.

First, the volume of nitrogen usage from nitrogen bottles for cargo ship was calculated to select gas membrane module in the same volume. And then, performance test was performed by the numbers and connection of the selected module. In order to understand hydraulic properties of modules in actual products, a prototype of nitrogen generator was fabricated and tested.

As a result of the study, gas membrane module was selected based on the survey of nitrogen charging capacity and using flow rate in the high-pressure bottle nitrogen supply method for small and medium-sized LPG or chemical tanker, and a testing system was built to measure complex signals of pressure, temperature, flow, and oxygen purity. Flows of two modules showed slight differences by pressure and purity. When two modules are connected in parallel, nitrogen flow was a little

lower than the numerically doubled value of the flow in one module, but its efficiency of nitrogen generation was high. By measuring air quality, the validity of nitrogen-generation process was supported and the flow of the prototype was found to be higher than in module testing, due to processing optimization. And, with the capacity of the compressor used in the test, the ranges of pressure and purity which could allow continuous production of nitrogen flow were determined.

제1장 서론

1.1 연구배경

화물 선박인 가스 운반선(gas carrier) 및 화학제품 운반선(chemical tanker)에는 수송하는 매체의 특성에 따라 대기와의 분리 및 폭발방지를 위하여 저장탱크와 화물격납설비에 불활성가스가 이너팅(inerting), 패딩(padding), 퍼징(purging), 블랭크팅(blanketing) 등의 용도로 사용되고 있다. 이와 같이 불활성가스는 안전한 수송과 저장을 목적으로 하고 있으며, 보통 유조선(Oil tanker) 및 화학제품 운반선에는 이산화탄소(CO₂), LNG를 운송하는 액체화물 운반선(liquefied gas carrier)에는 질소(N₂)가스가 각각 사용되고 있다^[1].

기존의 대형 화학제품 운반선에서는 대용량의 IGG(inert gas generator)와 IGS(inert gas system)에서 생산된 CO₂가 풍부한 보일러 연소가스가 불활성가스로 사용되고 있지만, 최근 들어 보일러 연소가스에서 나오는 SO_x, NO_x산화물에 의한 화물의 오염, CO₂ 발생에 의한 지구온난화 문제로 인해, 불활성 청정가스인 질소를 생산하는 분리막형(membrane type)의 대용량 질소발생기(nitrogen generator)의 적용이 증가하고 있는 추세이다.

국내에서도 개발 사업을 통해 중공사형 기체 분리막 기술 연구와 모듈 개발이 이루어졌지만, 현재까지 소용량의 질소와 산소발생기용의 분리막 모듈이 판매되고 있는 상황이다^[2,3]. 그리고 최근 2000년 이후 수소 연료전지, 이산화탄소 배출 저감, 혼합기체의 특정기체 정제 등의 분야에서 효율 높은 분리막과 기술 개발을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다^[4~9].

현재 선박에 적용되고 있는 질소발생기는 모두 분리막 방식이다. 왜냐하면 극저온방식은 냉각장치를 포함한 대형 플랜트(plant)화 되어야하므로 공간적인 문제가 발생하고, PSA(pressure swing adsorption)방식은 흡착제가 선박의 진동에 취약하기 때문에 사용이 제한되고 있기 때문이다. 따라서 현재 선박에 적용되고 있는 모든 질소발생기는 진동에 강한 분리막 방식이 채택되고 있다.

LNG 운반선용으로 100m³/h급, 대형 화학제품 운반선용으로 500~1,500m³/h급으로 육상용에 비해 대용량의 질소발생기가 탑재되고 있다. 국내 조선산업이 세계 1위를 선점하고 있지만, 국내에서 건조되는 선박에 적용되는 질소발생기는 전량 국외제품이며, UNITOR, AIR PRODUCT, SMIT GAS SYSTEM 등이 주요 메이커들이다. 이처럼 국외의 경우는 육상용 뿐만아니라 선박용의 대용량 질소발생기가 상용화되어 있지만, 국내의 경우는 대부분의 기업이 고가의 분리막 모듈이나 시스템을 전량 수입하고 있는 상황이다^[10~13].

대형 가스 운반선 및 화학제품 운반선을 제외한 수천톤 정도의 중·소형 LPG 및 화학제품 운반선에서는 이너팅과 패딩용으로 용량에 따라 10~30개 가량의 고압 용기(bottle)에 저장된 질소가 사용되고 있다. 하지만 이러한 고압 질소용기 방식은 Fig. 1.1에서 처럼 질소가스 소진시 다시 육상으로 이송하여 충전해야 하므로 비용, 시간, 인력측면에서 단점을 가지고 있기 때문에 대체 질소공급 방식에 대한 요구가 증대되고 있는 실정이다.

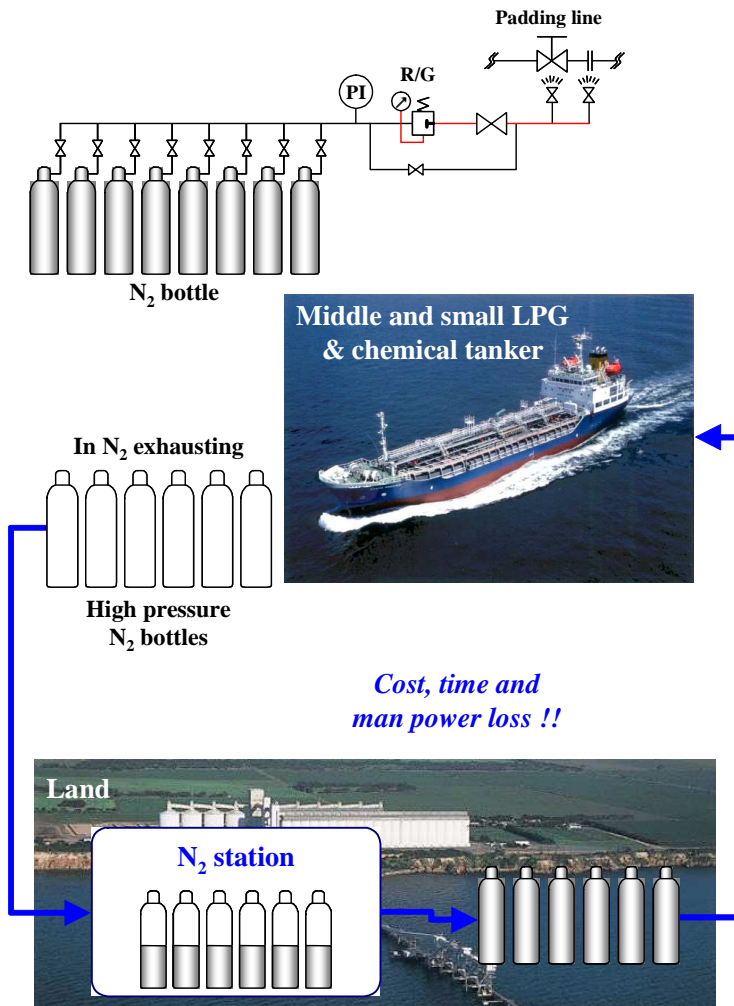


Fig. 1.1 Demerits of N₂ supply method by bottles

1.2 연구목적 및 내용

본 연구는 현재 비용, 인력, 시간측면에서의 많은 단점적인 요소들로 인해 현장에서 개선 요구가 증대되고 있는 기존의 중·소형 LPG 및 화학제품 운반선용 질소용기 공급방식을 대체한 질소발생기에 의한 재충전 시스템 개발을 위한 전 단계로, 핵심 부품인 기체 분리막 모듈에 대한 유량특성을 평가하고, 이를 적용한 질소발생 공정의 유효성을 입증하고자 하는 것이 목적이다.

중공사 기체 분리막은 제조공정상의 가공조건에 따라 중공사의 특성이 변하거나, 수천에서 수만 개의 중공사들이 다발형태로 집착, 절단 등의 조립공정을 거치면서 성능이 저하할 수도 있다. 또한 질소발생기 용량 증대 시 모듈의 병렬연결에 따른 유량특성이 변하거나, 모듈시험 시와 실제 제품 공정상에서의 유량 특성에서 차이가 발생할 수도 있다. 그리고 전처리 필터와 배관공정에 따라 분리막의 성능과 수명을 좌우하는 공기질이 달라지므로 질소발생공정에 대한 검증이 필요하다고 할 수 있다.

먼저 시험에 사용될 중공사 기체 분리막 모듈과 용량을 선정하기 위하여, 실제 선박의 고압 질소용기에서 사용되고 있는 질소에 대해 유량을 측정하고 체적에 대한 사용시간을 계산하였다. 측정과 계산결과를 바탕으로 PARKER ST 6010 분리막 모듈을 선정하였으며, 성능시험과 공기질 측정을 위한 장치들을 구축하였다. 각 모듈 및 병렬연결에 따른 시험을 수행하였으며, 질소발생 공정별 ISO 기준에 따른 공기질을 측정하였다. 모듈에 대한 시험 후, 실질적인 질소발생기 제품과 유사한 공정을 갖춘 상태에서의 질소발생 유량특성을 파악하기 위하여, 기본적인 전처리필터를 갖춘 질소발생 시스템 전반에 대하여 시험을 수행하였다. 이러한 단계별 연구 내용을 Fig. 1.2에 나타내었다.

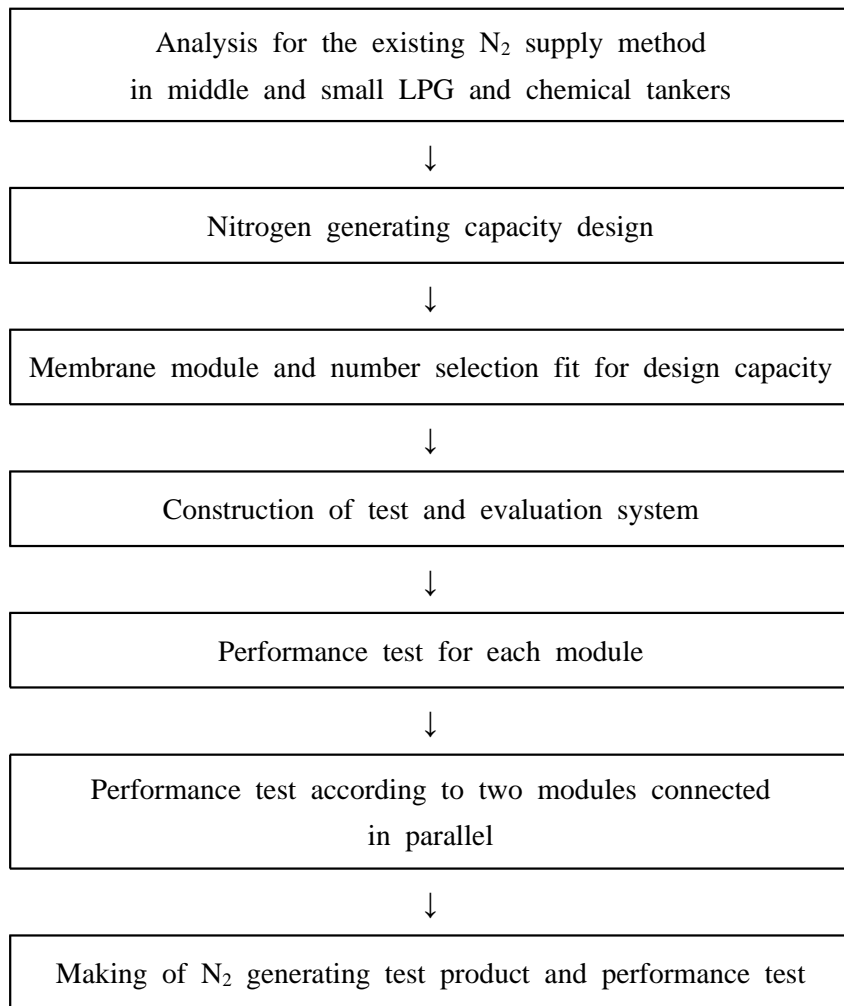


Fig. 1.2 Study purpose and paper constitution

제2장 질소발생 용량 및 분리막 모듈의 특성

2.1 중공사 기체 분리막

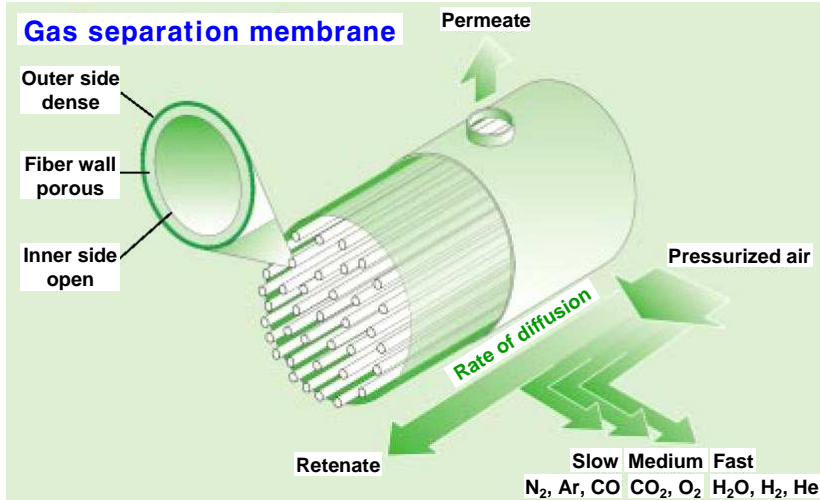
분리막 기술은 오랜 역사에 걸쳐서 현재 수처리 분야에서 적용이 활발하며, 특히 하수와 정수처리에서 대용량으로 많이 적용되고 있다. 분리막 모듈은 다양한 고분자(polymer)재료, 금속 및 세라믹재료가 사용되고 있으며, 형태에 따라 나권형(spiral wound type), 중공사형(hollow fiber type), 관상형(tubular type), 평판형(plate type)의 모듈로 제조된다. 또한 분리막은 여과방법에 따라 정밀여과(micro-filtration), 한외여과(ultra-filtration), 나노여과(nano-filtration), 역삼투(reverse osmosis)법으로도 나뉜다.

수처리와 함께 분리막 기술이 가장 폭넓게 적용되고 있는 분야가 기체분리 분야이다. 그리고 기체분리에 사용되는 가장 일반적인 분리막 모듈의 형태는 중공사형이다. 현재 중공사 기체 분리막 모듈은 고순도 메탄(CH₄), 이산화탄소(CO₂), 수소(H₂), 헬륨(He) 등의 가스를 추출하는 데 적용되고 있으며, 그 중에서도 산업적, 상업적으로 가장 널리 사용되고 있는 가스가 질소이다.

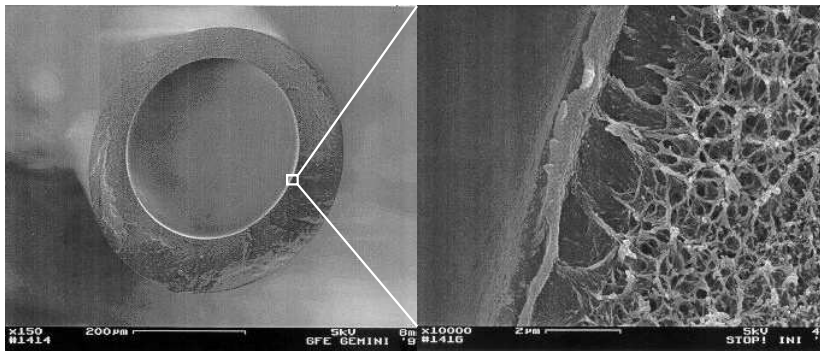
먼저 중공사 기체 분리막의 원리를 간단히 살펴보면, Fig. 2.1과 같이 고분자 소재로 제조된 중공사 내부를 기체가 통과할 때 기체의 투과속도차에 의해 선택적으로 투과속도가 빠른 기체는 중공사를 통과하는 동안 분리막을 통해 투과되고, 투과속도가 느린 기체는 투과되지 못하고 중공사를 통과하게 되는 것이다. 분리막의 미세한 기공을 통한 기체의 투과는 분자량이 아닌 분자의 크기에 좌우되며, 공기 중 기체의 동력학적 직경은 수소 0.28nm, 이산화탄소 0.33nm, 산소 0.34nm, 질소 0.36nm라고 정의하고 있다^[7].

Fig. 2.1(a)는 중공사 분리막 모듈의 투과원리를 보여주고 있으며, 직경이 큰 질소는 중공사를 통과하는 동안 투과되지 못해 분리막 모듈의 출구로 통과하게 되고, 투과속도가 빠른 수소부터 H₂ → H₂O → O₂ → CO₂ 등의 순으로 분리막을 통해 투과하게 된다. 그리고 Fig. 2.1(b)는 중공사 1개에 대한 SEM사진 단면

과 미세구조를 보여주고 있으며, 중공사의 내경과 달리 외경의 치수가 일정하지 않음을 알 수 있는데, 이것은 제조공정상의 기계적 요인으로 사료된다. 또한 오른쪽 사진에서 처럼 중공사막 두께방향으로 미세한 기공구조를 확인할 수 있는데, 이 기공 사이로 분자크기의 기체들이 통과하게 된다^[14].



(a) Air separation principle



(b) Hollow fiber micro-structure by SEM

Fig. 2.1 Air separation principle and micro-structure of hollow fiber membrane module

2.2 질소발생 용량

기체 분리막 모듈의 용량을 선정하기 위하여 먼저 현재 재화중량톤수(dead weight tonnage, DWT) 5,600톤급 오일 및 화학제품 운반선에 적용되고 있는 고압 질소용기 10개에 대한 질소 사용용량을 계산해 보았다. Fig. 2.2와 같이 용기내 150kg/cm²의 고압 질소는 1차적으로 5kg/cm²로 감압되고, 최종적으로 0.14kg/cm²로 2차 감압되어 화물탱크에 공급된다^[15].

최종적으로 감압된 질소는 0.14kg/cm²의 낮은 저압상태로 배출되며 이는 탱크내의 압력을 대기상태와 유사한 상태로 유지하기 위한 것이다. 질소용기 1개의 체적이 0.068m³이고, 실제 사용용량을 측정한 결과 약 18m³/h이었으므로, 전체 질소용기에 충전된 질소량과 1회 충전으로 연속 사용할 수 있는 시간은 아래와 같이 계산된다^[16].

* 총 충전 질소량 : 150 kg/cm² × 0.068m³ × 10 EA ≃ 102 m³

* 총 사용시간 : 102 m³ ÷ 18m³ ≃ 5.7h

하지만 실제 이너팅을 위해 필요한 질소순도는 95% 이상으로 규정되어 있고, 고압 질소용기에는 99.999% 이상의 고순도 질소가 충전되어 있기 때문에 이미 화물탱크내 빈 공간 속에 포함된 약 78% 정도의 질소와 혼합된다고 볼 수 있다. 따라서 목표 질소순도 95% 이상으로 도달하는 데 탱크내부 질소농도가 0% 일 때보다는 더 빨리 목표 질소순도에 도달할 수 있으며, 이로써 사용 용량과 공간체적은 더 늘어나게 된다. 이처럼 추가사용이 가능한 체적은 식 (2.1)과 식 (2.2)에 의해 계산된다.

$$\frac{1}{V_B + V_a} (V_B \cdot NP_B + 78 \cdot V_a) = NP_n \dots\dots\dots (2.1)$$

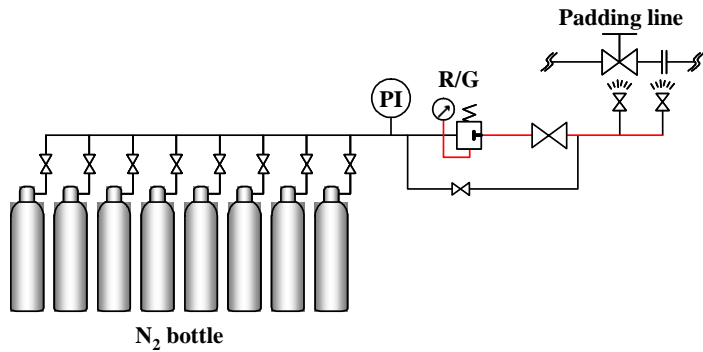
여기서, V_B : 충전 질소 체적용량
 V_a : 추가 체적용량
 NP_B : 용기내 질소순도
 NP_n : 목표 질소순도
78% : 표준대기에서의 질소농도

$$V_a = \frac{V_B(NP_B - NP_n)}{NP_n - 78} \dots\dots\dots (2.2)$$

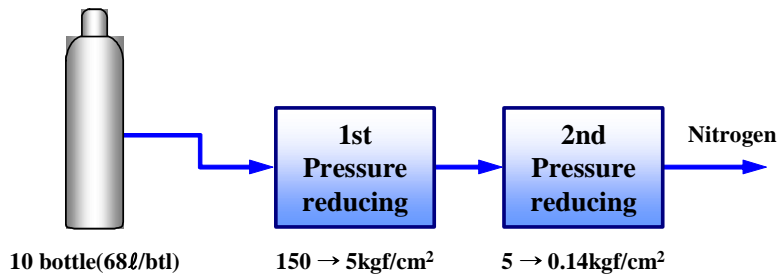
단, $NP_B > NP_n$

식 (2.2)로부터 충전질소 체적용량 102m³, 용기내 질소순도 100%(99.999%이므로 100%로 근사), 목표 질소순도 95%일 때, 추가 체적용량은 30m³가 된다. 따라서 추가 체적용량에 의해 충전질소 체적용량보다 약 30% 정도 더 많은 공간에 사용이 가능함을 알 수 있으며, 사용유량이 일정하다면 사용시간은 약 7.3시간 정도로 늘어나게 된다.

따라서 본 연구에서는 질소순도 97%, 질소유량 20m³/h를 발생시킬 수 있는 용량의 분리막 모듈을 선정하였다. 앞서 질소용기 유량 계산에 사용된 선박의 질소용기 충전량과 사용유량을 고려하여 8bar로 충전될 경우, 1회 충전으로 약 21분간 사용할 수 있는 유량이며, 재충전을 약 19회 정도 하게 될 것으로 예상된다.



(a) N₂ bottles and use in ship



(b) Pressure reducing process from N₂ bottles

Fig. 2.2 N₂ supply method by the high pressure bottles

2.3 분리막 모듈

분리막 모듈을 적용한 질소발생시스템은 크게 여과(filtration)와 분리(separation)기술로 구성된 복합 공기처리시스템이라고 할 수 있으며, 가격대비와 공정별 중요도에 있어서 전처리필터에 의한 여과는 약 20%, 분리막 모듈에 의한 분리는 약 60%, 기타 컨트롤 관련이 약 20% 정도를 차지하며, 여과와 분리 두 공정은 전체 시스템의 약 80% 이상을 차지할 정도로 중요하다. 현재 전처리 필터들은 일반화되어 선정에 큰 문제가 없지만, 중공사 분리막 모듈의 생산은 소재와 제조 측면의 기술이 요구되는 분야이므로, 성능, 내환경성 및 수명을 고려한 선정이 필요하다.

분리막 모듈이 갖추어야 할 가장 큰 조건은 투과성이다. 이러한 투과성(permeability)은 먼저 분리막 모듈이 선택적으로 질소가 분리되지 못하도록 하는 기능을 폴리머 소재와 제조공정조건으로도 만들어져야 한다. 그리고 분리막의 투과성능은 압력에 좌우되므로 저압에서도 높은 투과성을 지녀야 한다. 따라서 반드시 압축공기가 사용되어야 하며, 부수적으로 온도의 영향에 따라 투과성능이 조금씩 달라진다. 그리고 청정한 압축공기가 공급되어야 분리막 모듈의 수명을 향상시킬 수 있다.

PARKER사는 현재 분리막 모듈과 육상용 질소발생시스템 완제품을 제조하여 판매하고 있다. 크기, 형상, 용량 및 순도별 다양한 모듈과 데이터들을 보유하고 있기 때문에 사용자 측면에서는 선택의 폭이 넓다고 할 수 있으며, 자체적인 평가를 통해서 분리막 모듈의 성능을 좌우하는 모듈의 투과성이 타사 모듈보다 우수하기 때문에 저압에서도 충분한 성능을 발휘하므로 히터가 필요 없고, 전력소비가 적으며, 소형 멤브레인 모듈의 적용이 가능하다는 것을 보여주고 있다^[14,17].

앞서 설계한 용량에 맞는 분리막 모듈로 현재 유럽을 중심으로 트럭 타이어 충전용으로 판매되고 있는 PARKER 질소발생기 TyreSaver에 사용되는 ST6010 모듈을 선정하였다. 데이터표상의 ST6010 모듈 1개의 용량이 8bar, 질소 97%에서 10.7m³/h이므로 목표 유량 10.7m³을 만족시키기 위해 2개를 선정하였다.

ST6010 분리막 모듈의 소재는 PPO(poly phenylene oxide)이다.

그리고 이 모듈은 길이에 비해 직경이 굵어 내구성이 있고, 동급의 다른 모듈에 비해 무게가 5.5kg으로 가볍기 때문에 선박용으로 유리할 것으로 사료되어 선정하였다. **Fig. 2.3**에 ST6010모듈의 단면상세도를, 그리고 **Fig. 2.4**에는 그 외관형상과 내부 중공사막의 확대한 형상을 각각 보여주고 있다.

Fig. 2.4에서 알 수 있듯이 개개의 중공사막은 규칙적인 간격으로 나열되어 있지 않고 랜덤(random)하게 원형으로 배열되어 있으며, 중공사의 수량은 대략 직경 90mm에 약 10,000개 내외일 것으로 예상된다. 양쪽 끝단은 에폭시수지로 투과 및 통과되는 공기를 분리하고 있으며, 양쪽 에폭시수지를 지지하는하우징(housing)은 알루미늄 소재이다.

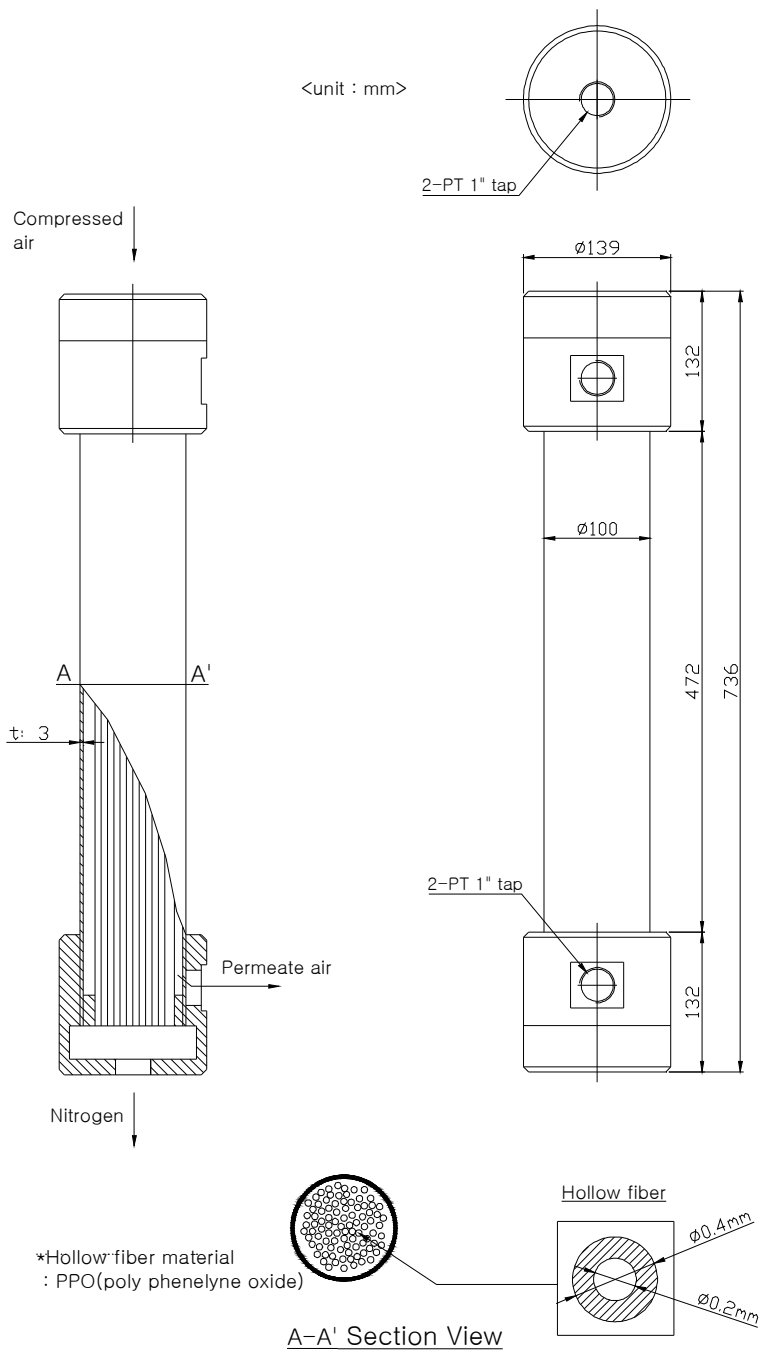
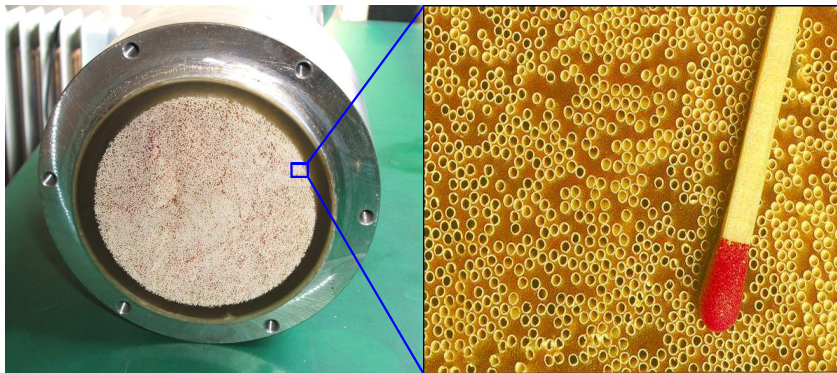


Fig. 2.3 Section detail diagram of ST6010 membrane module



(a) Appearance of module



(b) Structure of membrane

Fig. 2.4 Appearance and structure of ST6010 membrane module

제3장 분리막 모듈 시험평가

모듈에 대한 시험평가를 통해 모듈의 성능 뿐만 아니라 압축공기의 입구에서부터 질소발생후의 출구까지의 공정 위치별 공기상태를 측정, 분석하여 모듈과 질소발생공정의 유효성을 확인하고자 하였다. 기본적인 압력, 유량, 산소순도 외에 입자계수와 입자농도, 이슬점(Dew point)을 포함하는 공기질을 측정하였다.

3.1 시험장치 및 시험방법

3.1.1 시험장치

분리막 모듈에 대한 성능과 질소발생공정상의 공기상태를 분석하기 위하여 분리막 모듈을 비롯한 주요 부품들과 측정포인트 및 측정요소를 나타낸 시험장치의 P&ID(pipe & instrument diagram)를 Fig. 3.1에, 그리고 이러한 P&ID로 구성된 실제 시험장치를 Fig. 3.2에 각각 나타내었으며, 그리고 시험에 사용된 장치와 사양은 Table 3.1과 같다.

분리막의 최대 사용압력은 소재에 따라 다르지만 대부분 10bar 내외이므로 사용하는 압축공기도 동일한 압력범위에서 선정되어야 한다. 그리고 전처리필터와 분리막을 거치면서 압력손실이 생기므로 목표로 하는 압력을 위해서는 발생 차압을 고려하여 압축기 용량이 선정되어야 한다. 따라서 목표로 하는 질소 발생 압력이 8bar, 질소순도 97%에서 데이터표상의 모듈 2개에 대한 소모공기 유량은 약 75m³/h임을 파악하여, 압축기를 최대압력 11kgf/cm², 유량 1.38m³/h 급으로 선정하였다.

모든 공정별 압력과 온도상태를 관찰하기 위하여 부품을 지날 때 마다 압력게이지와 온도게이지를 설치하였고, 부품들의 조립과 연결이 용이하도록 배관은 우레탄튜브를 사용하였다. 분리막을 통과한 질소가 풍부한 공기에 대해서는

정확한 데이터 측정을 위하여 온도와 압력 트랜스미터를 설치하여 인디케이터(indicator)에 표시된 측정값을 기록하였다.

모듈의 성능은 압력과 순도에 따른 유량측정과 분석을 통해 평가하였으며, 유량은 모듈 통과전과 모듈 통과 후 2곳에서 측정하였다. 질소발생공정은 구간별 압력의 변화와 공기질의 측정, 분석을 통해 평가하였다. 압력은 입구에 설치한 압력조정기(pressure regulator)로 조정하여 일정하게 유지시켰으며, 필터링 전, 필터링 후 및 모듈 후부 3곳에서 측정하였다.

분리막은 미세한 기공구조로 되어 있기 때문에 입자와 수분 및 유분이 포함된 공기가 통과하게 되면 성능 및 수명저하의 원인이 될 수 있으므로 전처리 필터를 거쳐 청정한 압축공기가 공급되어야 한다. 따라서 공기질 측정을 위하여 레이저 광산란(laser scatter light)방식을 이용한 입자계수기와 입자농도계를 사용하였으며, 센서를 이용하여 이슬점을 측정하였다.

KS B ISO8573-4에는 고체입자 함유량을 시험하기 위해 사용하는 샘플공기(sample air) 추출방법과 추출 탐침장치의 기준이 제시되어 있다. 여기서 탐침은 주공기의 주흐름을 방해하지 않아야 하고, 교축으로부터 탐침 파이프 직경의 10배 이상의 거리에 있어야 하며, 난류유동이어야 한다는 것이 주요 3가지 구비조건이다. 규격의 정량적인 탐침 설계치와 유사하고, 위 3가지 구비조건을 만족하는 간이적인 샘플공기 추출용 탐침을 Fig. 3.3(a)와 같이 제작하여 시험하였다^[18].

공기질은 대기, 필터링 전, 필터링 후 및 모듈 통과 후 총 4곳에서 측정하였다. 입자계수와 농도 측정결과는 단위체적 m³당 수치이며, 입자계수는 3초 간격으로 연속 측정하면서 여러번 시험한 후 대표값을 기록하였고, 입자농도는 대기와 필터링 전은 3분, 필터링 후와 모듈 통과 후는 보다 정밀하게 10분간을 측정하였다. 추출된 샘플공기는 Fig. 3.3(c)와 같이 투명 원통 내에서 분사되도록 하여 분사속도가 계측기의 흡입유량에 영향을 미치지 않도록 하였으며, 입자계수와 입자농도 모두 동일한 투명 원통을 사용하였다.

이슬점과 MAXTEC 산소센서는 유로가 가공된 블록에 센서를 장착하여 동일

한 샘플공기에 의해 동시에 측정되도록 하였으며, 샘플유량은 미소유량계로 조정하여 일정하게 유지하였다.

Table 3.1의 산소센서의 경우 3종류를 나타내었는데, 이는 센서별 산소순도를 비교하기 위해서이다. 실제 동일한 조건에서의 측정결과 산소순도 값이 많게는 0.5%의 차이를 보이기도 했다. 또한 보통 응답시간이 15초 이상이고, 정밀도가 0.1%로 낮으며, 센서수명이 2년 이내라는 단점을 가지고 있다. 본 연구에서는 비교를 통해 가격대비 안정적이고 제품화시 사용이 용이한 CITY사 T7OXV모델을 선정하였다.

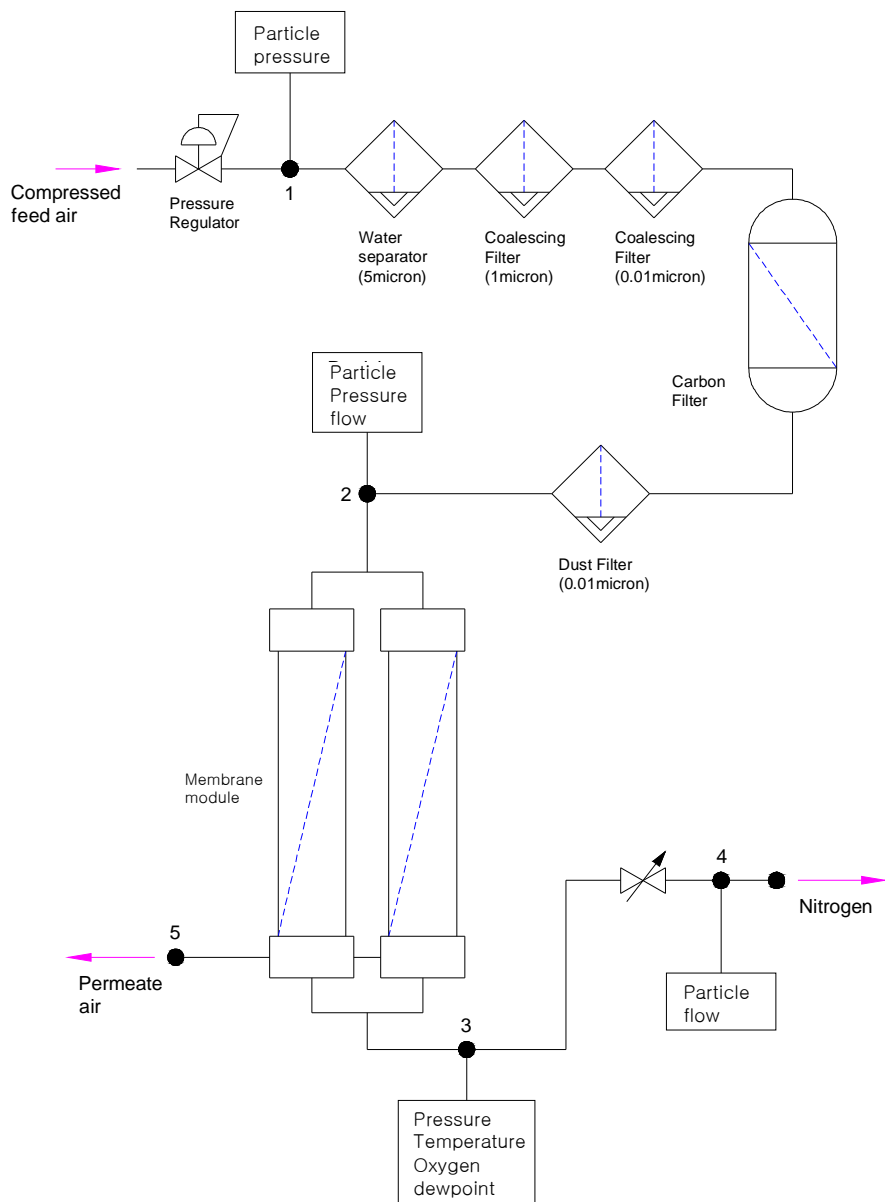
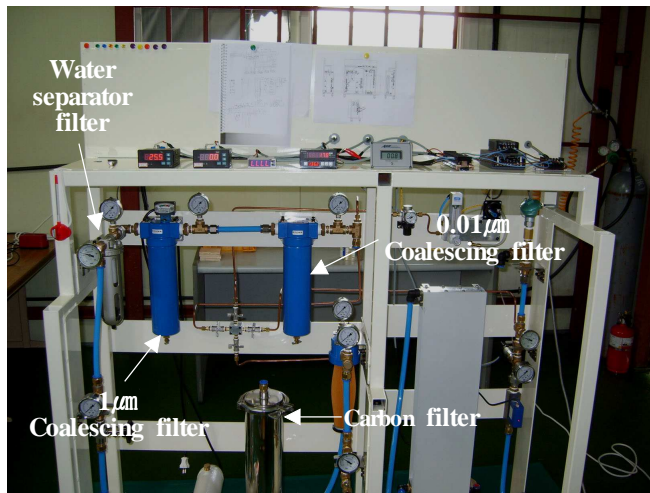
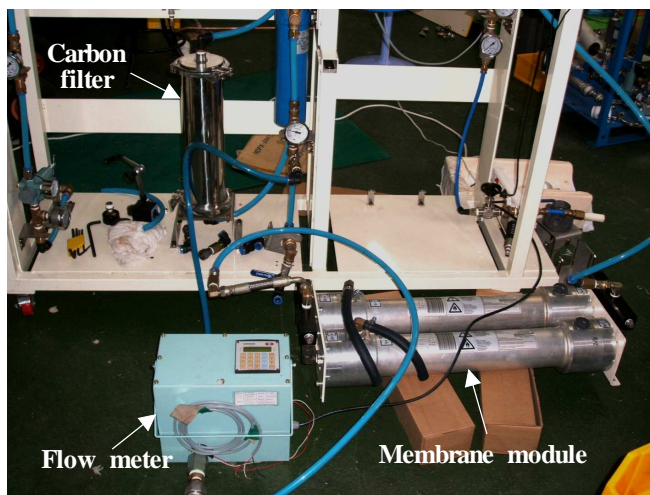


Fig. 3.1 N₂ generating P&ID and measuring points



(a) Upper part

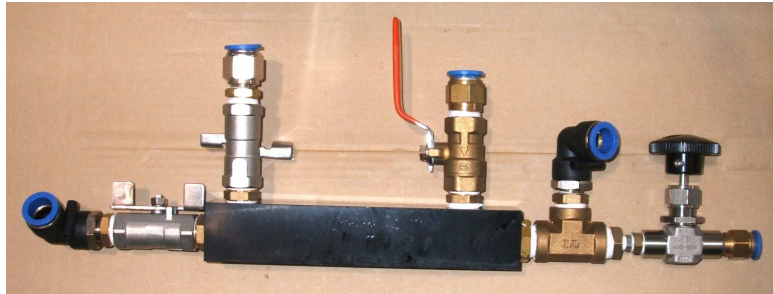
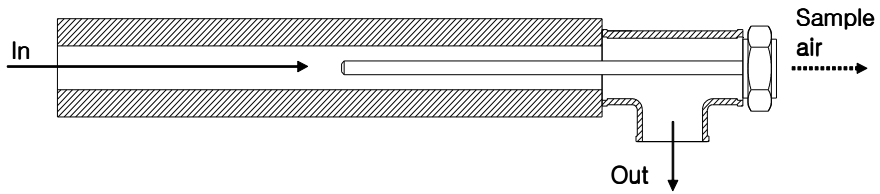


(b) Lower part

Fig. 3.2 Test bench setup

Table 3.1 Instrument and specification for test

Instrument	Specification
Compressor	1.38N ³ /min, 11kgf/cm ² [Airplus-GSS11]
Microscope	×500 [SomeTech-ICS 305B]
Pressure transmitter	0~16bar [Woojin]
Temp. transmitter	0~100°C [Woojin]
Air flowmeter	0~150m ³ /h, Thermal mass type [DIELEN-VARIOMASS]
Oxygen sensor	0~25%, zirconium [AMI] 0~99%, galvanic [MAXTEC] 0~25%, galvanic [CITY]
Dew point transmitter	-100+20°C [MICHELL]
Particle counter	0.3~5.0 μ m [IQAIR]
Particle concentration meter	0.001~3.999mg/m ³ [KANOMAX]



(a) Probe and manifold for air sampling



(b) Particle count



(c) Particle concentration

Fig. 3.3 Sample air extraction and air quality measurement

3.1.2 시험방법 및 이론

표준대기상의 기체성분은 질소 78%, 산소 20.9%, 그 외 아르곤, 헬륨, 이산화탄소 등이 약 1% 내외로 존재한다. 1% 내외로 미소하게 존재하는 아르곤, 헬륨 및 이산화탄소 등도 불활성기체이므로 모두 질소에 포함시켜, 식 (3.1)과 같이 산소농도를 측정한 후 질소순도를 계산하였다.

$$N_2 \text{ purity [\%]} = 100 - \text{Oxygen purity [\%]} \dots\dots\dots (3.1)$$

ISO8573-1은 Fig. 3.4와 같이 고체입자, 물 및 오일에 의한 공기의 오염도 기준을 정량적인 등급으로 규정하고 있고, 등급에 따른 장치의 사용과 적용을 구분하고 있다^[19]. 이러한 ISO 기준에 근거하여 단계적인 전처리 필터들을 선정하였으며, 측정된 입자계수, 입자농도 및 노점은 공기질의 등급을 정한 후에 평가하였다.

분리막 모듈에서의 유량관계는 질량보존의 법칙이 성립하므로 Fig. 3.5와 같이 전체 소모유량은 질소유량과 투과되는 공기유량을 합한 것이므로 식 (3.2)와 같이 표현되고, 질소발생 효율은 식 (3.3)으로 정의된다.

$$Q = Q_n + Q_p \dots\dots\dots (3.2)$$

여기서, Q : 전체 소모유량, Q_n : 질소유량, Q_p : 투과 공기유량

$$E_n = \frac{Q_n}{Q} \times 100 [\%] \dots\dots\dots (3.3)$$

여기서, E_n : 질소발생 효율

입구측 압축기 유량과 이송유량은 동일하기 때문에 이송유량으로 명하였고, 질소유량은 Fig. 3.1의 3번 위치에서 측정하였다.

전체 소모 공기유량과 질소유량 및 질소순도를 측정하면, 투과공기량과 투과

공기의 산소순도를 알 수 있으므로 투과되는 공기에 대해서는 유량과 산소순도를 측정하지 않았다. 따라서 투과되는 공기에 대한 산소농도는 식 (3.4)의 관계식에 의해 식 (3.5)와 같이 정의된다.

$$\frac{Q_n}{Q} \cdot (100 - N_p) + \frac{Q_p}{Q} \cdot O_p = 20.9 \dots\dots\dots (3.4)$$

$$OP_p = \frac{20.9 \cdot Q - Q_n(100 - N_p)}{Q_p} \dots\dots\dots (3.5)$$

여기서, OP_p : 투과공기 산소순도, N_p : 질소순도

모듈내의 증공사 소재나 공정조건 및 조립에 따라 성능이나 특성이 다를 수 있으므로 모듈 2개에 대해 모듈 1과 모듈 2로 지정하여 유량특성을 평가하였다. 모듈 1개에 대한 시험은 대부분 모듈 1로 수행하였으며, 모듈 2는 모듈별 유의차를 평가하기 위해 정해진 조건에서의 유량특성만 비교하였다. 이렇게 각각의 모듈에 대한 측정과 분석을 거친 후, 모듈 1과 모듈 2를 병렬로 연결하여 모듈 2개에 대한 목표 사양에 대한 시험을 수행하였다. Fig. 3.6은 모듈 연결방식에 대해 보여주고 있다.

아래에는 이후 본문 내용에서 사용될 압력, 유량 및 모듈의 명칭을 나타내었으며, 숫자는 Fig. 3.1에서의 측정 포인트를 나타낸 것이다.

■ 압 력

- Pressure 1 = 입구압력(inlet pressure)
- Pressure 2 = 이송압력(feed pressure)
- Pressure 3 = 모듈압력(module pressure)
- Pressure 4 = 출구압력(delivery pressure)

■ 유 량

Flow 1 = 입구유량(inlet flow rate)

Flow 2 = 이송유량(feed flow rate)

Flow 3, 4 = 질소유량(nitrogen flow rate)

Flow 5 = 투과공기 유량(permeate air flow rate)

■ 모 들

Module 1 = 모듈1

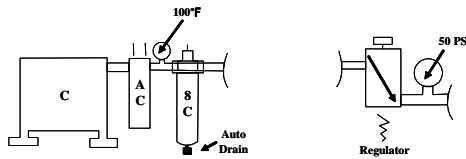
Module 2 = 모듈2

Module 1-2 = 모듈1+모듈2 병렬연결

위 명칭에서 Flow 1과 Flow 2는 같은 유량이므로 이후 내용에서는 이송유량으로만 나타내었으며, 앞의 식 (3.2)의 전체 소모유량(Q)도 이송유량이 된다.

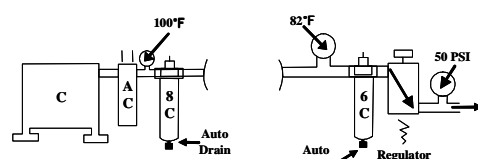
Class	Solid		Water		Oil	
	Maximum particle size* (μm)	Maximum concentration** ppm (mg/m^3)	Maximum pressure dew point °F (°C)	Maximum concentration** ppm (mg/m^3)	Maximum concentration** ppm (mg/m^3)	Maximum concentration** ppm (mg/m^3)
1	0.1	0.08 (0.1)	-94 (-70)	0.008 (0.01)	0.008 (0.01)	0.008 (0.01)
2	1	0.8 (1)	-40 (-40)	0.08 (0.1)	0.08 (0.1)	0.08 (0.1)
3	5	4.2 (5)	-4 (-20)	0.83 (1)	0.83 (1)	0.83 (1)
4	15	6.7 (8)	37 (+3)	4.2 (5)	4.2 (5)	4.2 (5)
5	40	8.3 (10)	45 (+7)	21 (25)	21 (25)	21 (25)
6	-	-	50 (+10)	-	-	-

ISO Class **2 1 3**
 Any compressor with aftercooler. Air intended for use with lubricated air tools, air motors, cylinders, shot blasting, non-frictional valve.



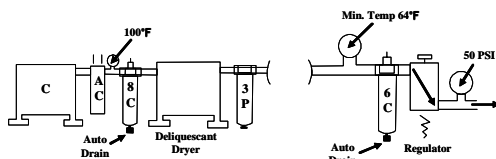
ADDITIONAL SPECS : CGA-G7.1 (Grades A&Ba1)

ISO Class **1 1 1**
 Any compressor with aftercooler and 2-stage coalescing. Air intended for use as lubricated control valves, cylinders and parts blow-down.



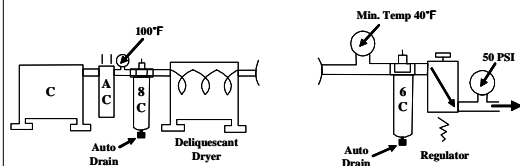
ADDITIONAL SPECS : Mil. Std. 282 H.E.P.A. U.S.P.H.S. 3A accepted particles for milk.

ISO Class **1 1 1**
 Any compressor with aftercooler, 2-stage coalescing and deliquescent dryer. Air intended for use with general pneumatics system.



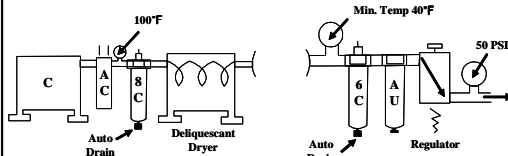
ADDITIONAL SPECS : CGA-G7.1 (Grade C)

ISO Class **1 4 1**
 Any compressor with aftercooler, 2-stage coalescing and refrigerated dryer for use with instrument quality air.



ADDITIONAL SPECS : CGA-G7.1 (Grade D&E) ISA S7.3, Fed. Std. 290 (Class 100)

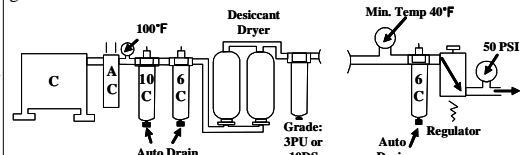
ISO Class **1 4 1**
 Any compressor with aftercooler, 2-stage coalescing, refrigerated dryer and carbon adsorber. Air intended for use as industrial breathing air decompression chamber.*



ADDITIONAL SPECS : O.S.H.A. 29CFR 1910.134

*CO Monitor required.

ISO Class **1 2 1**
 Any 2-stage compressor with aftercooler, double coalescing and a regenerative-type desiccant dryer. Air intended for use in applications involving critical instrumentation and high purity gases.



ADDITIONAL SPECS : CGA-G7.1 (Grade F)

Fig. 3.4 ISO 8573-1 standards

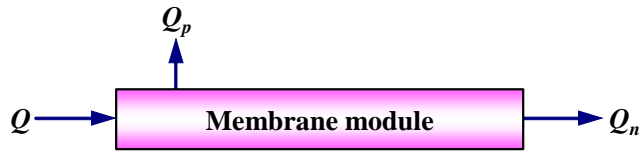
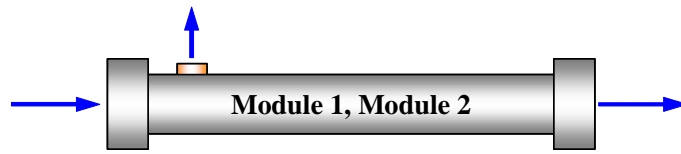
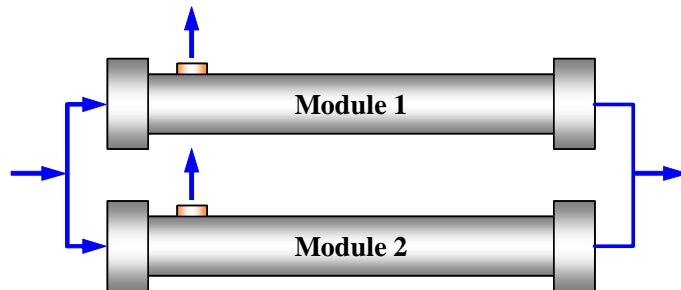


Fig. 3.5 Flow relation in membrane module



(a) Each module test



(b) Connection in parallel

Fig. 3.6 Two module connection in parallel

3.2 시험결과 및 고찰

3.2.1 공정별 공기질의 측정

질소발생 공정별 공기질의 측정 결과를 Table 3.2에 나타내었다. 공기질 측정 시 배관내 조건은 7bar, 98% 질소를 발생시키는 유량이었으며, 질소발생 공정에서의 배관내 온도는 약 27°C였다.

입자계수의 경우 5 μ m 이하에서 대기보다 필터링 전의 압축공기에 입자가 많다는 것을 알 수 있다. 이는 압축기의 오일성분과 외부에 설치된 압축기로부터 10m이상의 긴 배관에 응축된 고체와 액체입자의 영향으로 사료되고, 특히 고품 입자가 대부분인 대기보다 입자수가 많은 것은 오일입자일 가능성이 높다는 것을 의미한다. 그리고 그런 오일입자들이 코알레싱(coalescing)필터와 카본필터를 거치면서 거의 여과되어 필터링 후에는 0.5 μ m 이하의 입자만 조금 존재함을 알 수 있다. 그러나 이러한 미세한 입자도 존재해서는 안되며, 특히 오일입자인 경우에는 분리막 모듈의 성능에 영향을 줄 수 있으므로 가능하면 제거되어야 한다.

이슬점의 경우 습도가 높은 관계로 대기의 노점이 18°C로 높게 나옴을 알 수 있는데, 이는 현 대기온도인 23°C에서 5°C정도 더 떨어지면 수분이 맺힌다는 것을 의미한다. 필터링 전 7°C로 떨어진 것은 압축탱크와 장치까지의 배관내에서 많은 수분이 응축되었기 때문으로 사료된다. 다시 5단계의 필터링 후에는 -9°C로 조금 낮아지고, 모듈 통과 후에는 -21°C까지 떨어졌다. 전처리필터에 의한 수분제거효과는 미약하고, 분리막 모듈에 의한 수분제거 효과가 크다는 것을 알 수 있다.

입자농도의 경우는 필터링 후와 질소 출구에서는 측정되지 않았고, 대기과 필터링 전에서만 검출되었다. 입자계수와 마찬가지로 필터링 전 압축공기에서 입자농도가 높게 나오고 있음을 알 수 있다.

이상의 결과를 통해 입자농도 결과도 고체입자보다 오일입자의 영향이 클 것으로 사료되므로, 측정된 입자농도는 ISO기준의 오일농도로 평가하였다. 따라

서 ISO 등급기준으로 공기질을 평가하면, 필터링 전의 압축공기는 ISO 3-4-1, 필터링 후의 압축공기는 ISO 2-4-1, 출구측 질소는 ISO 1-3-1로 정해졌다.

필터링 전의 압축공기의 질이 나쁘면, 전처리 필터링에 영향을 미쳐 결국에는 분리막 모듈의 성능과 수명에 영향을 미칠 수 있으므로 성능이 우수한 압축기가 선정되어야 하고, 압축기에서 충분히 오일이 여과되어야 할 것으로 생각된다.

Table 3.2 Particle count, dew point and particle concentration

- Humidity(room): 80%, Room temp. : 23°C

(a) Particle count

Point Size, μm	Atmosphere	Before filtering	After filtering	Nitrogen outlet
0.3<d≤0.5	4.05×10^4	3.43×10^5	57	No measured
0.5<d≤0.7	2.39×10^3	2.769×10^4	No measured	"
0.7<d≤1.0	819	4.57×10^3	"	"
1.0<d≤2.0	428	1.3×10^3	"	"
2.0<d≤5.0	561	778	"	"
d>5.0	14	No measured	"	"
ISO class	4	3	2	1

(b) Dew point

Point	Atmosphere	Before filtering	After filtering	Nitrogen outlet
Dew point, °C	18	-7	-9	-21
ISO class	6	4	4	3

(c) Particle concentration

Point	Atmosphere	Before filtering	After filtering	Nitrogen outlet
Concentration mg/m^3	0.003	0.015	No measured	No measured
ISO class	1	1	1	1

3.2.2 압력, 순도 및 유량과의 상관관계

공정별 압력변화, 압력에 따른 순도와 유량변화를 먼저 알아보기 위하여 질소 97%의 발생 조건에서 모듈 1에 대해 시험을 행하였다.

공정별 압력변화를 알아보기 위하여 7bar, 질소 97%로 초기 설정한 후 입구 압력을 압력조정기로 9~1bar까지 1bar씩 일정하게 조정하면서 조정된 입구 압력을 기준으로 이송압력과 모듈압력을 측정하여 Fig. 3.7에 그래프로 나타내었다. 전처리 필터를 거치면서 약 6.7% 정도의 압력손실이 발생하고, 이후 모듈을 거친 후 다시 누적 압력 손실이 약 12% 정도 발생함을 알 수 있다. 예를 들어 입구압력이 9bar라면 모듈압력은 8bar 정도 된다는 것이다. 따라서 이러한 공정별 압력손실을 고려하여 질소발생조건에 적합한 성능과 사양의 압축기가 선정되어야 할 것이다.

실제 분리막 모듈에 가해지는 압력은 입구압력이 아니라 이송압력이므로 이후 모듈의 성능평가지 사용되는 가해지는 압력은 이송압력을 일정하게 유지하면서 시험을 수행하였다.

7bar, 질소 97%로 초기 설정한 후 압력변화에 따른 질소유량의 변화를 측정한 결과 Fig. 3.8처럼 일정한 비율로 증감하는 직선적인 경향을 보이고 있음을 알 수 있었다. 따라서 압력과 유량은 비례적인 관계임을 알 수 있다.

하지만 압력변화에 따른 순도 측정결과는 Fig. 3.9에서 처럼, 압력이 감소하면서 5bar까지는 순도가 점진적으로 감소하지만, 5bar 이후로는 급격하게 감소하는 비선형적인 경향을 나타내었다. 이러한 현상은 압력이 낮아질수록 분리막의 특성상 투과성능이 떨어지기 때문이며, 순도가 낮을수록 더 급격한 변화를 보일 것으로 사료된다. 따라서 이후 시험에서는 압력변화에 따라 감소한 질소순도 만큼 유량조절밸브를 조절하여 유량을 줄여나가면서 순도를 일정하게 유지하면서 유량을 측정하였다.

온도에 따른 시험은 별도로 행하지 않고, PARKER사 모듈에 대해 정해져 있는 Table 3.3의 온도 수정계수를 사용하였다. 표에서 알 수 있듯이 순도가 낮아질수록 10°C에서는 계수가 작아지고, 30°C와 40°C에서는 커지는 것을 알 수 있

었다. 또한 온도가 높아지는 경우에도 99% 이상으로 순도가 높아지면 유량이 떨어진다는 것을 알 수 있었다. 이것은 고분자 분리막이 온도에 따라 변형하면서 투과성이 달라지고, 중공사의 랜덤한 배치와 변화의 영향인 것으로 사료된다.

일반적으로 압력은 압축기에서 작동차압에 의한 약 1.5bar 내외에서 일정하게 유지되면서 사용되기 때문에 압력변화에 대해 질소순도의 변화는 둔감한 편이지만, 정밀한 순도제어를 요구하는 경우에는 엄격한 압력 유지가 되어야 할 것으로 사료된다.

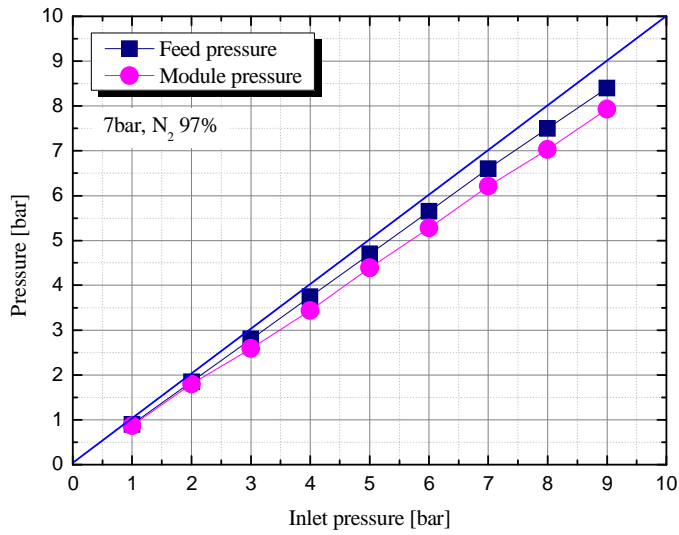


Fig. 3.7 Pressure loss of before and after module

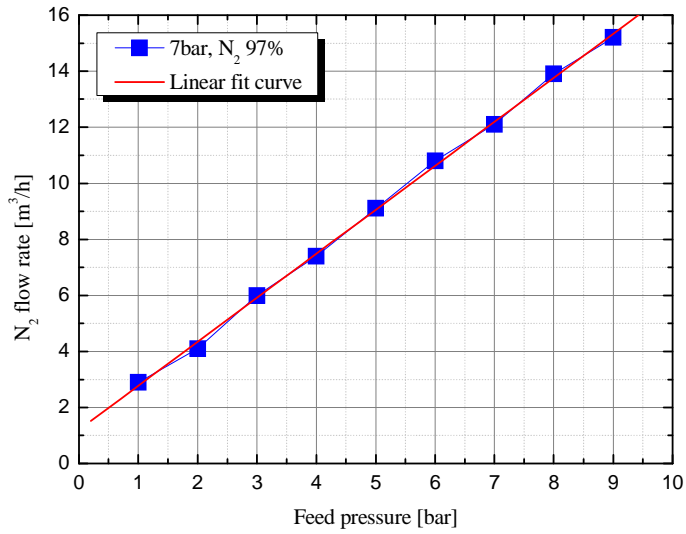


Fig. 3.8 N₂ flow rate variation according to pressure

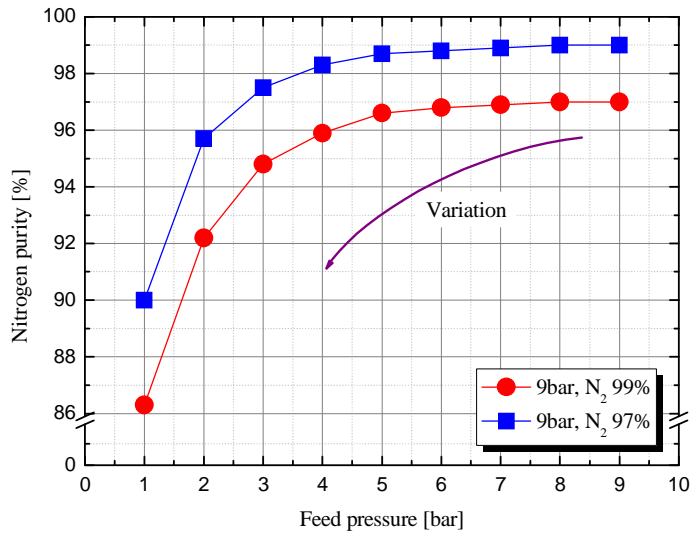


Fig. 3.9 N₂ purity variation according to pressure

Table 3.3 Temperature correction factor^[14]

N ₂ purity, % \ Temperature	99.5	99	98	97	96	95
10°C	0.98	0.93	0.91	0.9	0.89	0.89
30°C	0.86	1.00	1.05	1.07	1.09	1.10
40°C	0.57	0.9	1.03	1.08	1.12	1.15

3.2.3 유량특성

Fig. 3.10과 Fig. 3.11는 모듈 1에 대한 순도별 압력에 따른 입구유량과 질소 유량의 경향을 보여주고 있으며, 수치적인 비교를 위하여 Table 3.4와 Table 3.5를 그래프와 같이 나타내었다. 압력과 순도에 따라 거의 직선적으로 비례하는 유량특성을 보임을 알 수 있다.

Table 3.6(a)는 모듈 1에 대한 압력과 순도별 측정된 질소발생 효율이며, Table 3.6(b)는 PARKER 데이터표상의 효율이다. 순도별 측정된 효율의 평균값이 기준 효율보다 99%에서는 10%, 95%에서는 2.4% 정도로 높게 나오며, 순도가 낮아질수록 차이는 줄어들고 있다. 압력별 효율 편차를 알아보기 위하여 Fig. 3.12의 그래프로 나타낸 결과, 측정된 효율에서는 순도가 높아질수록, 기준 데이터에서는 순도가 낮을수록 편차가 커지는 경향을 보이고 있다. 이러한 차이는 랜덤한 중공사의 배열로 제작된 분리막 모듈 투과성 차이, 이송압력 및 온도 등의 설정조건 차이 등의 영향으로 사료된다.

PARKER사에서는 사용자들이 쉽게 소모되는 이송유량을 알 수 있도록 질소 유량에 대해 질소발생 효율로 나타내지 않고, 역으로 질소유량에 대한 이송유량의 비를 식 (3.6)과 같이 Air Factor로 정하여 두고 이송유량을 계산하여 압축기를 선정하도록 하고 있다. Air Factor는 질소발생 효율의 역수관계이므로 본 논문에서는 제시하지 않았다.

$$A.F[Air\ factor] = \frac{Q[Feed\ flow\ rate]}{Q_n[N_2\ flow\ rate]} \dots\dots\dots (3.6)$$

투과되는 공기에 대한 산소순도의 예측이 가능한 지를 알아보기 위하여 7bar에서 측정된 유량과 질소순도를 식 (3.5)의 계산식에 대입하여 투과공기의 산소순도를 예측하였고, 이를 실제 측정값과 비교한 결과를 Table 3.7에 나타내었다. 오차율은 측정값을 기준으로 한 것이며, 투과공기에 대한 산소측정 시에는 산소범위가 넓은 MAXTEC사 MAXO2모델(0~99%)을 사용하였다.

순도별로 조금의 차이는 있지만 대부분 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.

모듈 1과 모듈 2의 유의차를 확인하기 위하여 모듈 1에서 수행한 모든 순도와 압력별 유량데이터를 측정하지 않고, 모듈 2에 대해 7bar일 때 순도별 질소유량과 질소 출구측 밸브를 닫아 압력별 투과되는 공기유량을 측정하여 모듈 1에서 획득한 데이터와 비교하였으며, 그 결과를 **Table 3.8**에 나타내었다.

측정결과 질소순도 99와 98%에서는 동일하였으나, 97% 이하에서는 5% 내외로 모듈 2의 유량이 증가하였다. 그리고 투과공기의 경우 8bar 이상에서는 마찬가지로 5% 내외로 모듈 2의 유량이 증가하였다. 유량 차이는 모듈 1을 기준으로 한 증감 비율이다.

동일한 조건에서 2번 시험을 행하였으나 동일한 결과를 얻었다. 분리막 모듈이 동일한 제조와 조립공정을 통해 제작되어도 순도와 압력에 따라 조금씩 유량특성에 차이가 있다는 것을 알 수 있으며, 이는 제조와 조립공정상의 조건변화가 분리막의 특성에 영향을 미쳤고, 그 외 시험시의 온도와 측정오차의 영향도 다소 있을 것으로 사료된다.

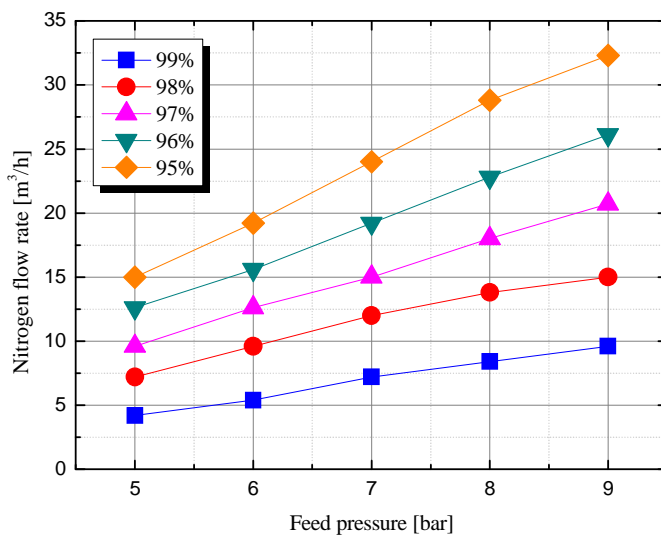


Fig. 3.10 N₂ flow rate according to pressure and N₂ purity

Table 3.4 N₂ flow rate of Module 1

<unit: m³/h>

N ₂ purity, %	99	98	97	96	95
Pressure, bar					
9	9.6	15.0	20.7	26.1	32.3
8	8.4	13.8	18.0	22.8	28.8
7	7.2	12.0	15.0	19.2	24.0
6	5.4	9.6	12.6	15.6	19.2
5	4.2	7.2	9.6	12.6	15.0

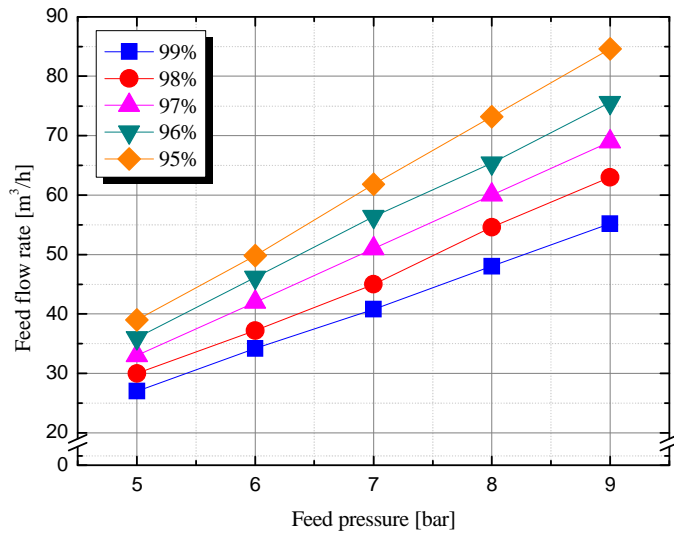


Fig. 3.11 Feed flow rate according to pressure and N₂ purity

Table 3.5 Feed flow rate of Module 1

<unit: m³/h>

N ₂ purity, % \ Pressure, bar	99	98	97	96	95
9	55.2	63.0	69.0	75.6	84.6
8	48.0	54.6	60.0	65.4	73.2
7	40.8	45.0	51.0	56.4	61.8
6	34.2	37.2	42.0	46.2	49.8
5	27.0	30.0	33.0	36.0	39.0

Table 3.6 N₂ generation efficiency comparison of Module 1

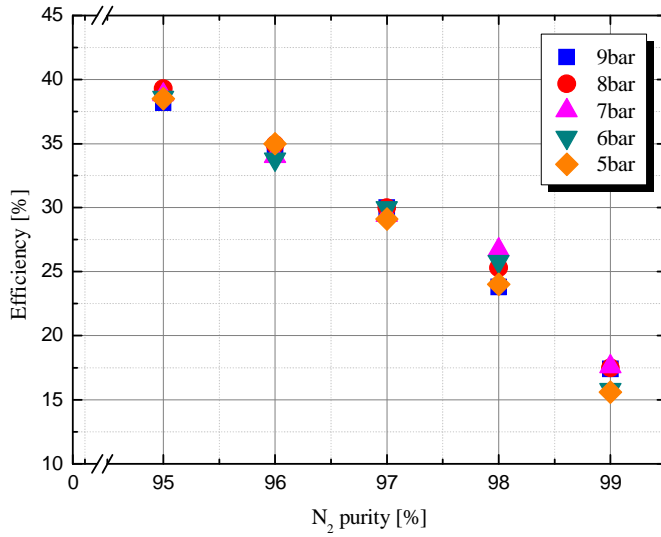
<unit:%>

(a) Efficiency of Module 1

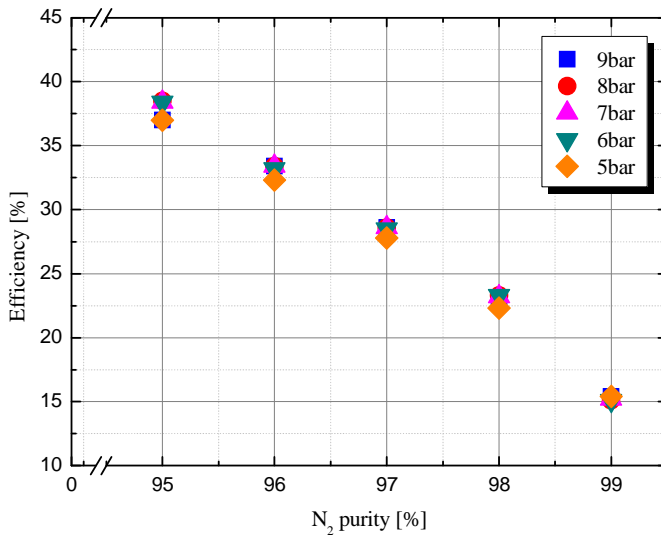
N ₂ purity, % \ Pressure, bar	99	98	97	96	95
9	17.4	23.8	30.0	34.5	38.2
8	17.5	25.3	30.0	34.9	39.3
7	17.6	26.7	29.4	34.0	38.8
6	15.8	25.8	30	33.8	38.6
5	15.6	24.0	29.1	35.0	38.5
Mean	16.8	25.1	29.6	34.4	38.8

(b) Efficiency of standard data [PARKER]

N ₂ purity, % \ Pressure, bar	99	98	97	96	95
9	15.4	22.3	27.8	32.2	37.0
8	15.1	23.3	28.5	33.2	38.4
7	15.2	23.2	28.6	33.4	38.4
6	15.1	23.3	28.6	32.4	38.5
5	15.2	22.8	28.6	33.4	37.0
Mean	15.2	23.0	28.4	32.9	37.9



(a) Module 1



(b) Standard data on PARKER catalogue

Fig. 3.12 Comparison of N_2 generation efficiency

Table 3.7 Oxygen purity 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

Table 3.8 Flow rate comparison of Module 1 and Module 2<unit: m³/h>

(a) Nitrogen flow rate in feed pressure 7bar

Nitrogen purity, %		99	98	97	96	95
Nitrogen flow	Module1	7.2	12.0	15.0	19.2	24.0
	Module2	7.2	12.0	15.6	20.4	25.2
Difference, %		0.0	0.0	+4.0	+6.3	+5.0

(b) Permeate air flow rate

Module \ Pressure, bar		9	8	7	6	5
Permeate flow	Module 1	41.4	36.6	30.6	25.8	21.0
	Module 2	43.8	37.2	30.6	25.8	21.0
Difference, %		+5.8	+1.6	0.0	0.0	0.0

3.2.4 모듈 병렬연결시의 유량특성

모듈 1개에 대한 성능시험 후 모듈 1과 모듈 2, 그리고 2개를 병렬로 연결한 모듈 1-2에 대하여 동일한 시험을 수행하였다. 모듈 1개에 대해서는 이송유량이 충분하였으나, 2개의 경우에는 이송유량이 부족하여 신뢰성 있는 데이터의 확보를 위하여 일정한 압력을 연속적으로 유지한 7~5bar까지에서 만 유량을 측정하였다.

Table 3.9에 모듈 2개일 때의 유량과 비교를 위해 모듈 1개일 때의 유량에 산술적으로 2를 곱한 값을 나타내었으며, 질소유량을 (a)에, 그리고 이송유량을 (b)에 각각 정리하였다. 그리고 Fig. 3.13과 Fig. 3.14에는 유량 증감의 경향을 알아보기 위하여 압력과 순도에 따른 질소유량과 이송유량을 그래프로 나타내었다. 그리고 이러한 경향이 비례적인 직선관계이므로 Table 3.10과 Table 3.11에는 질소순도별 압력에 따른 최소자승법(least square method)에 의한 직선의 식을 식 (3.7)과 같이 나타내어 정리하였다.

$$Y = A \cdot X + B \dots\dots\dots (3.7)$$

여기서, Y: Flow rate, X: Feed pressure, A and B: Coefficient

모듈 1개일 때와 마찬가지로 질소유량의 기울기는 순도가 낮아질수록 증가함을 알 수 있으며, 질소유량은 압력이나 순도에 상관없이 모든 영역에서 모듈 1개의 산술적인 2배 값과 비교했을 때 조금 낮게 나오며 그 비율은 순도와 압력에 따라 차이가 있었다.

이송유량 또한 질소유량과 유사한 경향을 보임을 알 수 있다. 따라서 이송유량과 질소유량의 감소 비율이 유사하므로 질소발생 효율은 유사할 것으로 예상되었으나, 실제로 Table 3.11과 같이 질소발생 효율을 비교해 보면, 순도와 압력에 따라 조금의 차이는 있지만 모듈 2개일 때가 질소순도 98%를 제외하고는 전체적으로 보았을 때 조금 높다는 것을 알 수 있다.

따라서 모듈의 수량, 병렬연결에 따라 이송유량과 질소유량의 차이는 있을

수 있지만, 온도와 측정오차 등의 영향을 고려한다면 질소발생 효율에는 큰 차이가 없는 것으로 판단된다. 그러므로 다수의 모듈을 병렬로 연결했을 때 모듈 1개에 대한 압력과 순도별 유량 데이터를 안다면 전체 질소유량과 이송유량을 선정하는 것이 가능할 것이다.

Table 3.13에는 압력별로 모듈 1, 모듈 2 및 모듈 1-2의 경우에 대해 압력별 질소유량이 없는 상태에서의 투과공기량을 비교해 보았다. 앞서 모듈 1과 모듈 2에 대한 비교에서처럼 모듈 1-2의 투과공기 유량도 모듈 1과 모듈 2를 산술적으로 더한 유량과 거의 유사하였으며, 7bar와 6bar에서는 일치하는 결과도 보였다.

Table 3.9 Flow rate comparison of Module 1 and Module 1-2<unit: m³/h>

(a) Nitrogen flow rate

N ₂ Purity, % Pressure, bar		99	98	97	96	95
		7	Module 1×2	14.4	24.0	30.0
Module 1-2	13.8		21.0	29.4	36.0	44.4
6	Module 1×2	10.8	19.2	25.2	31.2	38.4
	Module 1-2	11.4	18.0	24.0	30.0	36.0
5	Module 1×2	8.4	14.4	19.2	25.2	30.0
	Module 1-2	8.4	13.2	18.6	23.4	28.2
Difference, %		0~5.6	8~12.5	2~4.8	3.8~7.1	6~7.5

(b) Feed flow rate

N ₂ Purity, % Pressure, bar		99	98	97	96	95
		7	Module 1×2	81.6	90.0	102.0
Module 1-2	80.4		89.4	96.0	103.8	112.8
6	Module 1×2	68.4	74.4	84.0	92.4	99.6
	Module 1-2	64.8	73.8	79.8	85.8	92.4
5	Module 1×2	54.0	60.0	66.0	72.0	78.0
	Module 1-2	52.8	58.8	63.0	67.8	72.0
Difference, %		1.5~5.3	0.7~2	4.5~5	5.8~8	7.2~8.7

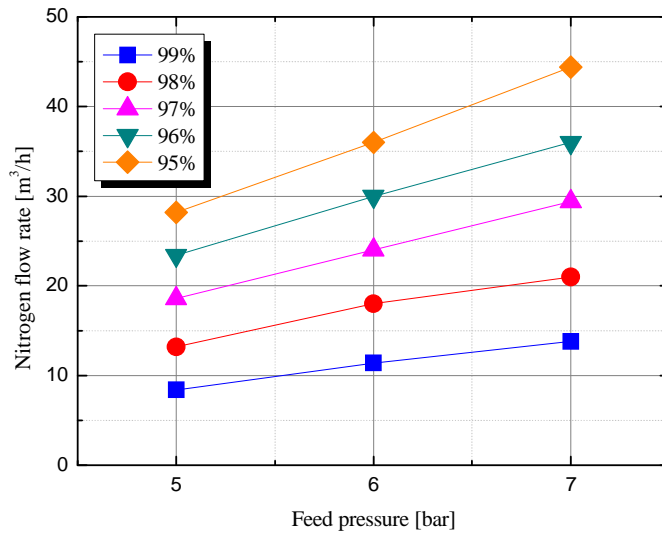


Fig. 3.13 N₂ flow rate of Module 1-2

Table 3.10 Linear equation of N₂ flow rate

N ₂ purity, %	N ₂ flow rate, Y	Standard deviation
99	$2.7 \cdot X - 5$	0.245
98	$3.9 \cdot X - 6$	0.735
97	$5.4 \cdot X - 8.4$	0
96	$6.3 \cdot X - 8$	0.245
95	$8.1 \cdot X - 12.4$	0.245

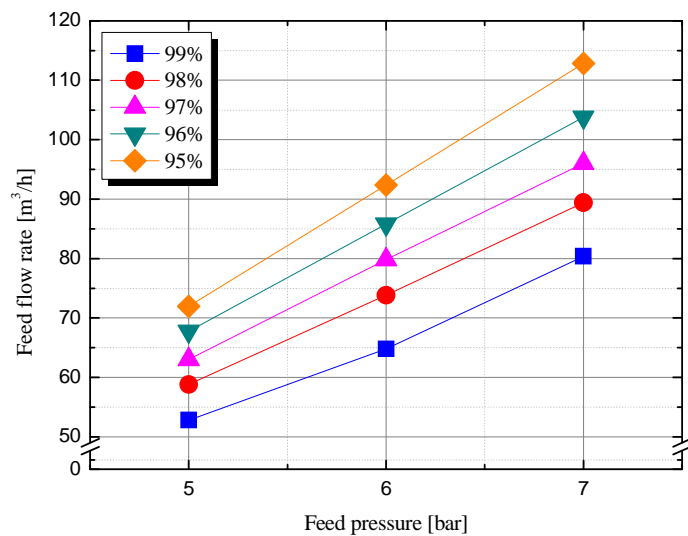


Fig. 3.14 Feed flow rate of Module 1-2

Table 3.11 Linear equation of feed flow rate

N ₂ purity, %	Feed flow rate, Y	Standard deviation
99	13.8·X - 16.8	1.470
98	15.3·X - 17.8	0.245
97	16.5·X - 19.4	0.245
96	18.0·X - 22.2	0
95	20.4·X - 30.0	0

Table 3.12 Efficiency comparison of Module 1 and Module 1-2

		<unit:%>				
N ₂ purity, %	Pressure, bar	99	98	97	96	95
		7	17.2	23.5	30.6	34.7
6	17.6	24.4	30.1	35.0	39.0	
5	15.9	22.4	29.5	34.5	39.2	
Mean		16.9	23.4	30.1	34.7	39.2
Module1		16.8	25.1	29.6	34.4	38.8

Table 3.13 Permeate air flow rate of Module 1, 2 and 1-2

		<unit: m ³ /h>				
Pressure, bar	Module	9	8	7	6	5
		Module1	41.4	36.6	30.6	25.8
Module2	43.8	37.2	30.6	25.8	21.0	
Module1+Module2	85.2	73.8	61.2	51.6	42.0	
Module 1-2	-	75.6	61.2	51.6	41.4	

제4장 질소발생 시스템에 대한 시험평가

분리막 모듈 개개의 유량특성, 모듈 병렬연결에 따른 유량특성 및 공정별 공기질에 대한 정량적인 데이터와 경향을 파악하였다. 또한 시험결과를 바탕으로 목표 용량을 만족하는 ST6010모듈 2개를 병렬연결하고 기본적인 공정과 내구성을 고려한 질소발생 시스템을 구축하여 시스템 전반에 대한 공기질과 유량특성을 비교·분석하였다.

4.1 질소발생 시스템의 구성과 특성

질소발생의 주요공정은 공기압축 → 전처리 필터링 → 산소분리 → 질소발생의 4가지로 구성된다. 별도의 공기 압축기로부터 압축공기가 공급되므로, 실질적으로 질소발생기를 구성하는 부품들은 전처리 필터와 분리막 모듈이다. 그 외 밸브, 측정을 위한 게이지와 센서들이 사용된다. 공정설계된 시스템의 주요 부품들과 측정센서를 표시한 P&ID를 Fig. 4.1에 나타내었다.

전처리 필터는 총 5단계로 구성되어 있으며, 1차는 수분제거용 5 μ m, 2차는 입자/유분/수분제거 1 μ m, 3차는 입자/유분/수분제거용 0.01 μ m의 엘리먼트(element)를 사용하였고, 4차는 입경 3mm의 NORIT사 활성탄(activated carbon)을 사용하였으며, 5차는 활성탄필터를 통과한 입자들을 여과하기 위해 0.01 μ m의 엘리먼트를 사용하였다. 필터 하우징은 PARKER HN4L을 사용하였으며, 2차와 3차 필터는 공기가 안쪽에서 바깥으로 통과하면서 유분과 수분이 응결되어 아래로 응축되도록 하는 코알레싱 엘리먼트를 사용하였다.

전처리 필터와 분리막 모듈을 설치하기 위한 프레임은 채널(channel)과 사각파이프로 제작하였으며, 선박 적용성을 고려하여 진동에 강인하고 공간절약형 배치를 위하여 질소발생 공정순으로 순차적으로 부품들이 배치되도록 설계하였다^[20].

압력 게이지 4개, 압력 트랜스미터 4개, 온도 1개, 산소농도 1개 총 4개의 게이지와 6개의 센서들은 모두 상부에 배치되도록 하여 조립과 조작이 용이하도록 하였으며, 측정위치별 배관으로부터 샘플에어를 추출할 수 있도록 튜브를 이용해 상부로 연결, 취합하여 압력을 감지하도록 하였다. 이렇게 구축된 질소 발생 시스템의 사진을 **Fig. 4.2**에 나타내었다.

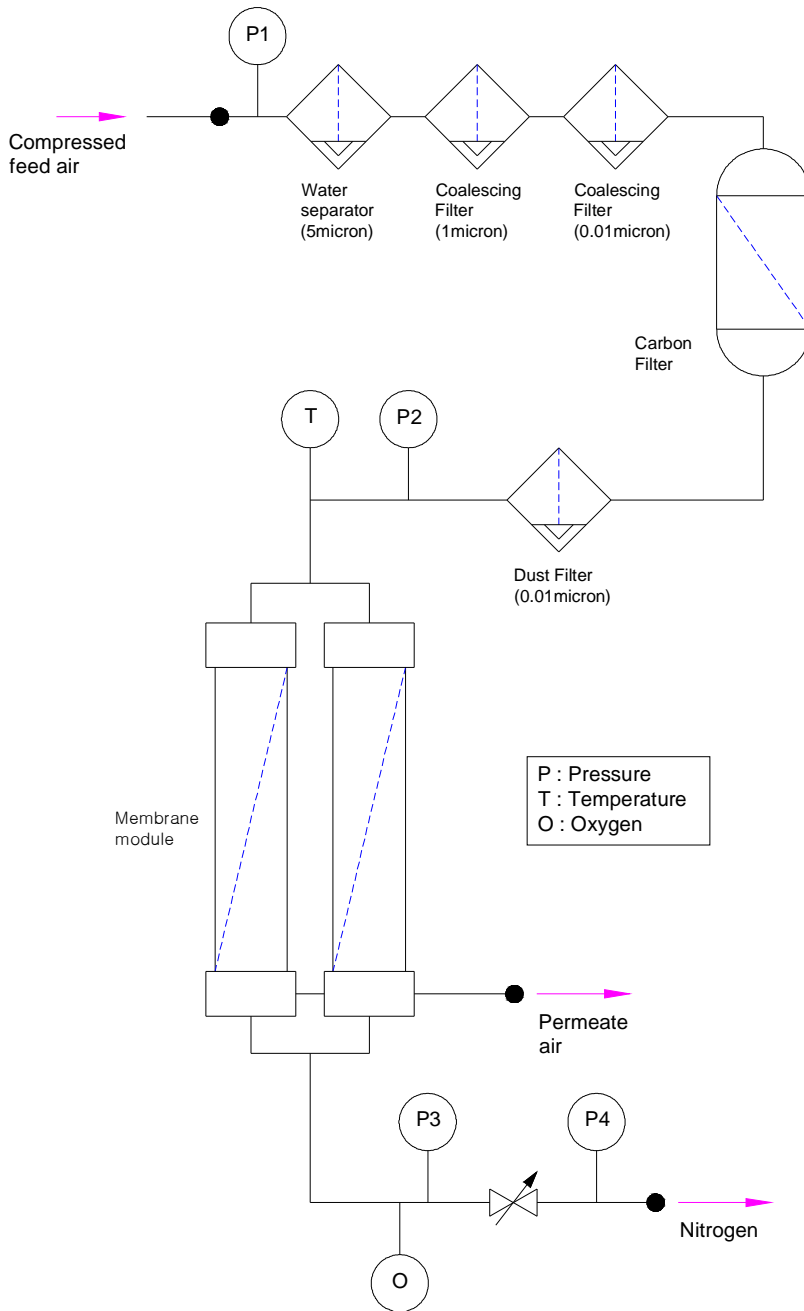
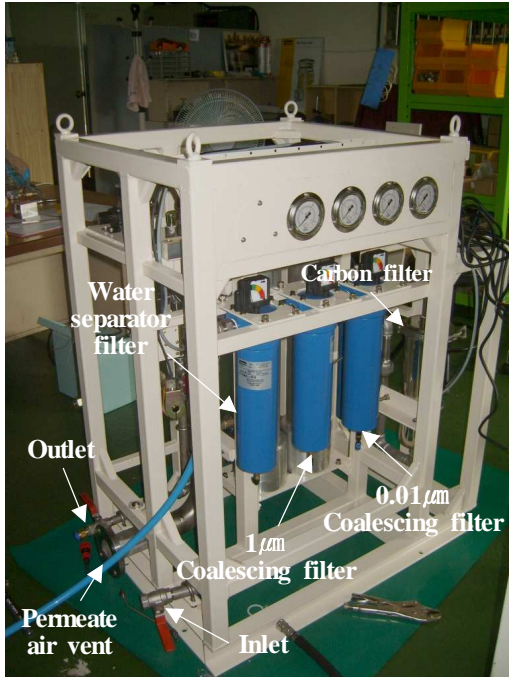
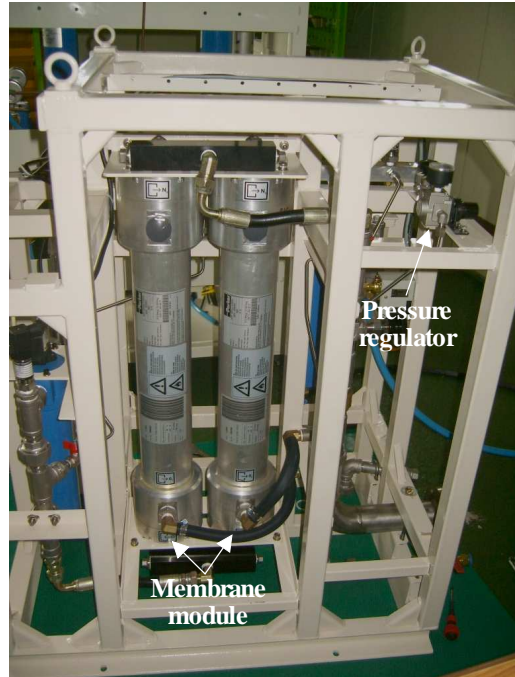


Fig. 4.1 P&ID of N₂ generating process



(a) Front photo



(b) Rear photo

Fig. 4.2 N₂ generating test product

4.2 시험장치 및 시험방법

4.2.1 시험장치

질소발생 시스템에 대한 시험평가 시에는 모듈시험 시와 용량이 동일한 ATLAS COPCO사 공기압축기를 사용하였고, 압력조정기를 입구측에 설치하여 수동 유량시험시와 연속 유량시험시의 초기 압력을 일정하게 유지하도록 하였다. 압축기의 최대 압력은 10bar이며, 작동차압은 1.5bar로 설정되어 있으므로, 8.5bar로 압력이 떨어지면 가동하고 압력이 10bar로 올라가면 멈추게 된다. 시스템 제작과 시험에 사용된 추가 장치들의 사양을 **Table 4.1**에, 그리고 전체 시스템에 대한 시험장면을 **Fig. 4.3**에 나타내었다.

압력, 온도 및 산소센서의 출력값들은 4~20mA이므로 저항 변환기를 거쳐 1~5V 전압신호로 출력되도록 한 후, 케이블을 채널별로 A/D 컨버터에 연결하였다. 여기서 압력, 온도 및 산소센서들은 2wires이고, DC전압값이므로 동일한 24V 전원과 공통 접지를 하여 단일신호방식(single ended)으로 연결하였고, 유량의 경우는 별도 계측되므로 차동(differential)으로 연결하여 사용하였다. **Fig. 4.4**는 NI-9152 A/D 컨버터와 여기에 연결된 센서 케이블의 배선도를 보여주고 있다.

A/D 컨버터를 통해 디지털 신호로 변환된 연속적인 압력, 온도, 산소순도 및 유량 데이터는 LabVIEW로 만든 데이터 획득 프로그램으로 저장되도록 하였다. 이 데이터는 응답이 빠르지 않고 DC 전압신호이므로 디지털 샘플링주파수를 1 kHz로 낮게 하였다. 더욱이 노이즈에 의한 영향을 줄이기 위하여 획득된 데이터를 0.1sec 간격으로 평균값을 나타내도록 데이터 샘플을 압축하여 저장하였다. **Fig. 4.5**는 LabVIEW로 제작한 데이터 획득 프로그램의 메인화면(main screen)과 소스 블록 다이어그램(block diagram)을 보여주고 있다.

Table 4.1 Instrument and specification

Instrument	Specification
Compressor	1.38Nm ³ /min, 10.5kgf/cm ² [AtlasCopco-GX11]
A/D converter	16ch, 250k Sample/s [NI-9206]
Pressure transmitter	0~20bar [All sensor]
Temp. transmitter	-50~100°C [All sensor]
Oxygen sensor	0~25%, galvanic [CITY]

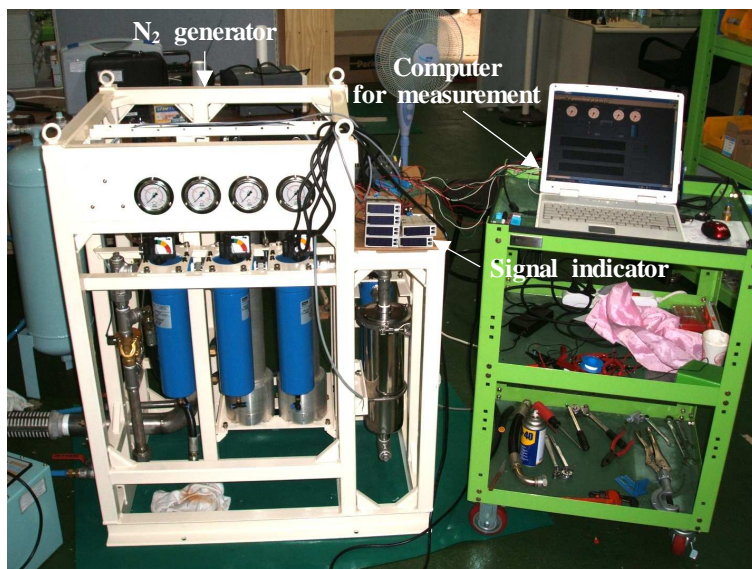
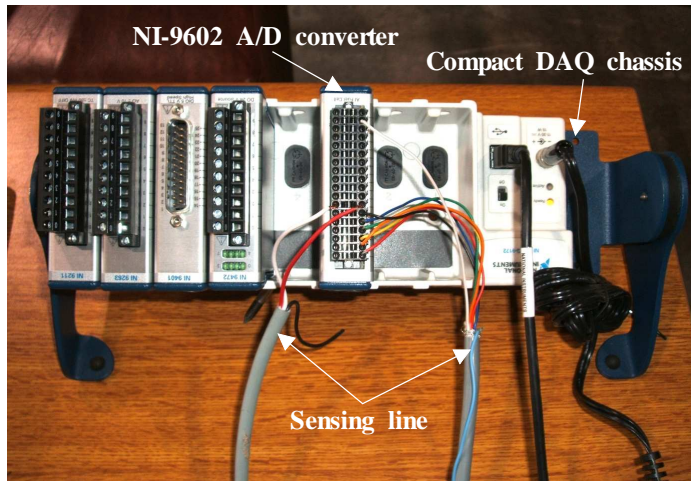
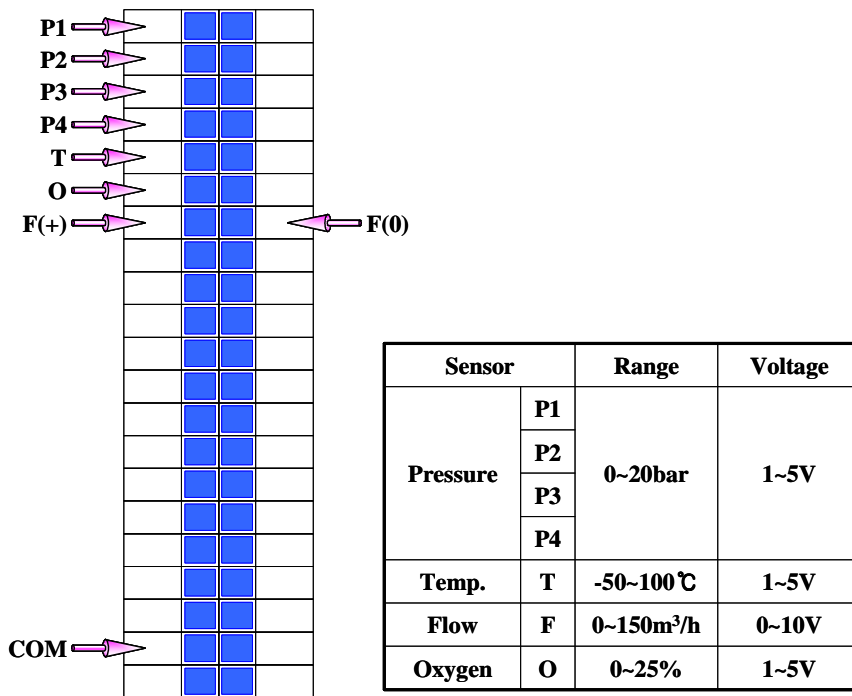


Fig. 4.3 Test setup for the N₂ generating test product

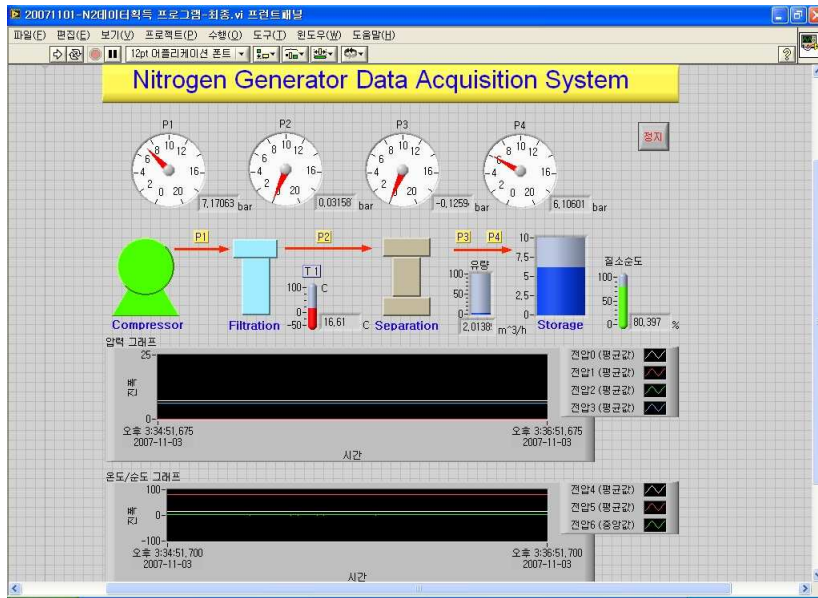


(a) A/D converter and sensor connection

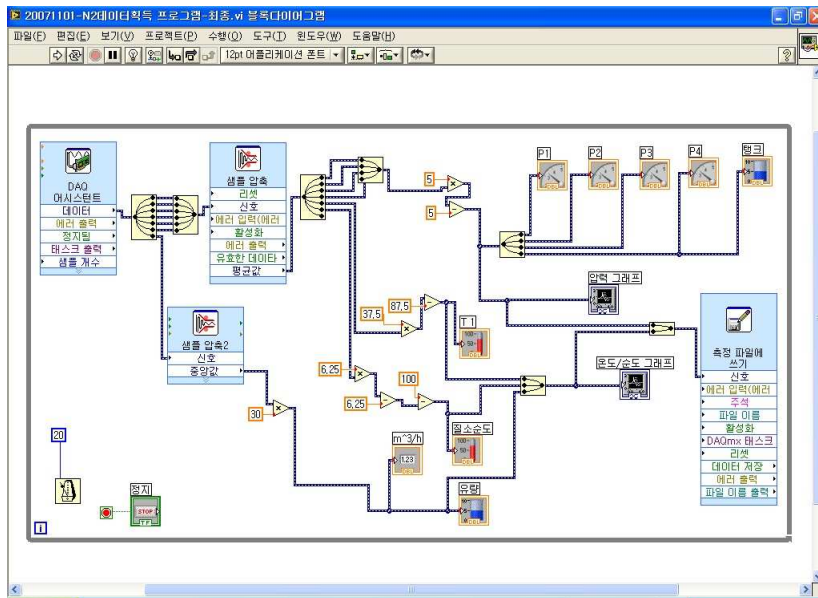


(b) Connection diagram and sensing range

Fig. 4.4 A/D converter and sensor connection



(a) Main screen of data acquisition program



(b) Block diagram of data acquisition program

Fig. 4.5 Data acquisition program based on LabVIEW

4.2.2 시험방법

공기질 측정은 모듈시험 시와 마찬가지로, 시험실 대기, 필터링 전과 후의 이송유량, 모듈 후부의 질소유량 총 4곳의 시스템 공정별로 입자계수, 이슬점, 입자농도를 측정하여 모듈시험 시의 결과와 비교하였다.

구축된 질소발생 시스템에 대한 질소유량 시험방법은 모듈시험 시와 동일하며, 먼저 유량이 발생하는 상황에서 압력조정기로 압력과 유량조절밸브로 순도를 일정하게 유지하면서 측정 가능한 압력과 순도조건에서 질소유량을 측정하였으며, 모듈 1-2의 유량 결과와 비교하였다.

압력, 질소순도 및 유량과의 상관관계를 연속적으로 확인하기 위하여 시간에 따른 조건별 디지털 데이터를 연속적으로 측정하여 모듈시험 결과인 아날로그 측정값과 비교하였다. 압축기를 최고 압력까지 높인 후 압축기를 끄고, 입구 밸브를 열어 분리막 모듈로 압축공기가 공급되어 자연적으로 2bar까지 압력이 감소하는 상태에서 연속적인 데이터를 획득하였다.

시험에 사용된 공기압축기의 용량으로 연속적으로 일정한 질소발생이 가능한 조건을 찾기 위하여, 압축기의 작동에 따라 연속적인 압력, 온도, 순도 및 유량 데이터를 실시간으로 동시에 획득하여 분석하였다. 시험결과를 통해 순도별로 일정한 질소발생이 가능한 압력을 정하였고, 연속적인 디지털 데이터 획득 시에는 시간에 따른 공정별 압력 변화를 관찰하기 위하여 압력조정기를 사용하지 않았다.

4.3 시험결과 및 고찰

4.3.1 공기질 측정

구축된 질소발생 시스템에 대한 공정별 공기질 측정결과를 Table 4.2에 나타내었다. 전처리 필터링 전의 입자계수와 농도값이 '0'으로 입자가 측정되지 않았다는 것은 ATLAS COPCO 압축기가 생성한 공기가 압축기에 설치된 오일분리기(oil separator)와 필터에 의해 거의 다 여과된 것으로 사료되며, 모듈시험 시 사용했던 국산 압축기에 비해 성능이 우수한 것으로 사료된다.

이 정도의 청정한 압축공기가 공급된다면 분리막 모듈의 수명은 훨씬 늘어날 것으로 예상되며, 심지어 질소발생기 내의 전처리 필터 없이 바로 압축공기를 분리막 모듈에 공급해도 사용이 가능할 것으로 예상된다. 실제로 ATLAS COPCO에서는 질소발생기와 압축기가 혼합된 질소발생기 모델이 판매되고 있다. 하지만 압축기의 상태가 변할 수 있고, 필터의 수명과 상태에 따라 상태가 좋지 않은 압축공기가 질소발생기로 공급될 수 있으므로 가능하면 어떠한 공기 상태에서도 사용이 가능하도록 질소발생기 내에 전처리 필터는 반드시 있어야 할 것이다.

마찬가지로 청정한 압축공기의 공급으로 인해 필터링 후의 압축공기와 질소에서는 입자가 측정되지 않았다. 이슬점의 경우에서도 필터링 전과 후 -11°C 로 동일한 결과를 나타내었는데 입자와 마찬가지로 수분도 압축기 내에서 대부분 걸러지기 때문으로 사료된다. 그리고 발생된 질소는 이슬점이 -27°C 로 기체 분리막 모듈이 수분제거에도 큰 역할을 하는 것으로 사료된다.

질소발생 시스템에 대한 공기질 측정결과, 모듈 시험시보다 사용된 압축기가 수분, 유분 및 입자의 여과능력이 우수하다는 것이 입증되었으며, 성능이 우수한 압축기에 의한 청정한 압축공기의 공급으로 필터링 전단계의 입자계수와 농도가 거의 '0'상태이며, 이슬점도 낮아진 것으로 측정되었다. 하지만 결과적인 ISO 공기질 등급은 모듈 전 ISO 1-4-1, 모듈 후에는 모듈시험 시와 마찬가지로 ISO 1-3-1을 나타내었다. ISO 기준에 따라 호흡용이나 진공 챔버에 사용되는

공기 이상의 공기질 특성을 보였다.

따라서 질소발생기로 공급되는 압축공기가 청정하면, 전처리 필터와 분리막 모듈의 수명이 향상되지만, 질이 나쁜 공기의 유입에 대비해 전처리 필터의 교환주기를 설정하고 분리막 모듈의 상태를 점검하는 것이 필요할 것이다.

Table 4.2 Particle count, dew point and particle concentration

- Humidity: 60%, room temp. : 27°C

(a) Particle count

Point Size, μm	Atmosphere	Before filtering	After filtering	Nitrogen outlet
0.3<d≤0.5	27,538	No measured	No measured	No measured
0.5<d≤0.7	1,917	"	"	"
0.7<d≤1.0	1,068	"	"	"
1.0<d≤2.0	783	"	"	"
2.0<d≤5.0	980	"	"	"
d>5.0	29	"	"	"
ISO class	4	1	1	1

(b) Dew point

Point	Atmosphere	Before filtering	After filtering	Nitrogen outlet
Dew point, °C	17	-11	-11	-27
ISO class	6	4	4	3

(c) Particle concentration

Point	Atmosphere	Before filtering	After filtering	Nitrogen outlet
Concentration mg/m ³	0.006	No measured	No measured	No measured
ISO class	1	1	1	1

4.3.2 유량특성

2개의 모듈 1-2를 장착한 시스템에 대한 유량시험 결과 압력조정기로 압력을 조정하면서 8bar, 질소 97% 까지 유량 측정이 가능하였으며, 96% 이하는 압축기의 유량 부족으로 일정한 유량의 유지가 어려운 것으로 사료되어 데이터를 기록하지 않았다. 이렇게 측정한 압력과 순도별 질소유량을 **Table 4.3**에 나타내었고, **Fig. 4.6**에는 시스템에서 측정한 질소유량과 함께 모듈 1-2에 대한 유량 데이터를 내부개방 마크(mark)로 비교하여 나타내었다. 모듈시험 시의 모듈 1-2의 경향과 마찬가지로 압력과 순도별 비례적 선형적인 특성을 보이고 있음을 알 수 있다.

측정시 배관내 온도는 모듈 시험 시와 동일한 18℃였으며, 측정결과 모듈시험 시보다 질소유량이 전체적으로 조금 높게 나옴을 알 수 있었다. 특히 질소 99%에서 질소유량이 약 20% 가까이 증가한 것은 유량이 적은 상태에서 공정 최적화에 의한 효과가 커졌기 때문으로, 즉 압력손실이나 누설이 최소화되면서 그것이 유량의 증가로 이어진 것으로 사료된다.

Table 4.3 Nitrogen flow rate of N₂ generating test product

Pressure, bar	N ₂ Purity, %				
	99	98	97	96	95
8	18.0	27.0	35.4	-	-
7	16.2	24.0	31.2	37.2	43.8
6	13.2	18.6	25.8	31.2	36.6
5	10.2	14.4	19.2	24.0	29.4

<unit: m³/h>

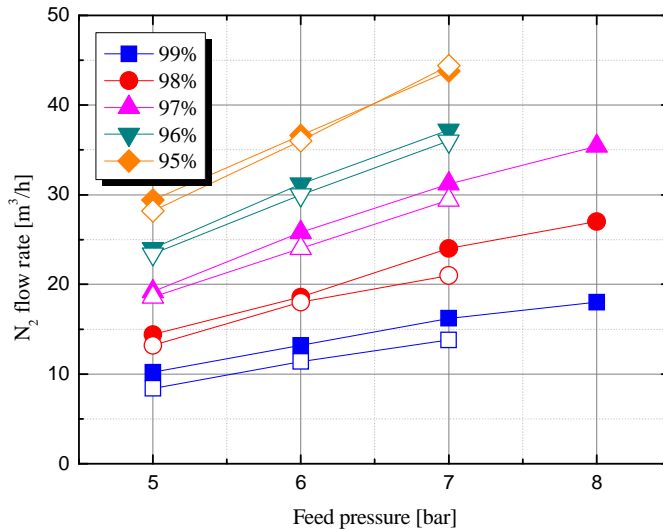


Fig. 4.6 Nitrogen flow rate comparison of Module 1-2 and test product

4.3.3 연속 압력, 순도 및 유량과의 상관관계

Fig. 4.7에는 질소발생기로의 압력 무부하시 획득된 압력 4개, 온도 1개, 산소 순도 1개, 유량 1개의 총 7개 기준센서 출력값들을 나타내었다. 질소는 79.16%, 입구압력은 9.25bar, 배관온도는 28.3°C로 측정되었다. 압력, 순도 및 유량의 변화에서 센서신호의 응답특성과 속도가 다르기 때문에, 동시에 획득하였어도 압력과 순도별 유량은 정확한 데이터가 아니므로 여기에서는 전체적인 압력, 순도 및 유량의 경향만을 파악하고자 하였다.

먼저 시간에 따른 연속적인 이송압력의 변화를 **Fig. 4.8**에 나타내었다. 일반적으로 탱크내의 압축공기가 자연적으로 배기될 때의 압력변화와 동일하며, 이는 압력이 낮아질수록 유량이 줄어들면서 시간이 지연되기 때문이다. 순도별로 비례적인 관계를 보이고 지수적인 감소특성을 나타내고 있다.

Fig. 4.9는 초기 설정된 질소순도별 시간에 따른 질소순도의 변화를 보여주고 있다. 초기에 설정된 질소순도까지 상승했다가 시간에 따라 질소순도가 낮아지고, 특히 산소센서의 느린 응답속도로 인해 질소순도가 낮을수록 설정 순도까지 도달하지 못하고 바로 질소순도가 떨어짐을 알 수 있다. 이러한 결과는 앞선 Fig. 3.9의 데이터와 유사하며, 초기 설정된 질소순도가 높으면 압력저하에 따라 순도변화가 적고 질소순도가 낮으면 순도변화가 커지는 현상은 분리막 모듈의 고유한 투과특성 때문으로 사료된다.

Fig. 4.10은 질소순도별 시간에 따른 질소유량의 변화 상태를 보여주고 있다. 질소유량이 이송압력과 질소순도가 시간에 따라 감소하는 것과 동일한 특성을 보여주고 있다.

이상의 결과로부터 질소유량과 질소순도는 이송압력과의 큰 상관관계를 보이고 있으므로, 향후 분리막 모듈의 적용시 압력에 따른 질소순도와 질소유량의 변화를 고려하여 질소발생 조건을 선정해야할 것이다.

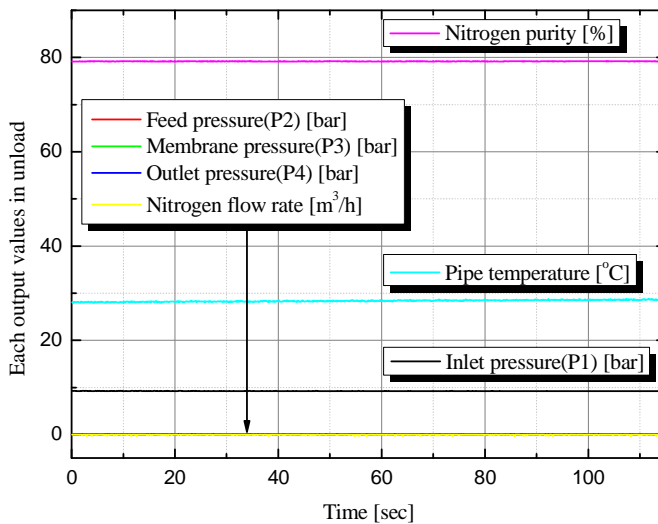


Fig. 4.7 Measuring values according in no pressure load

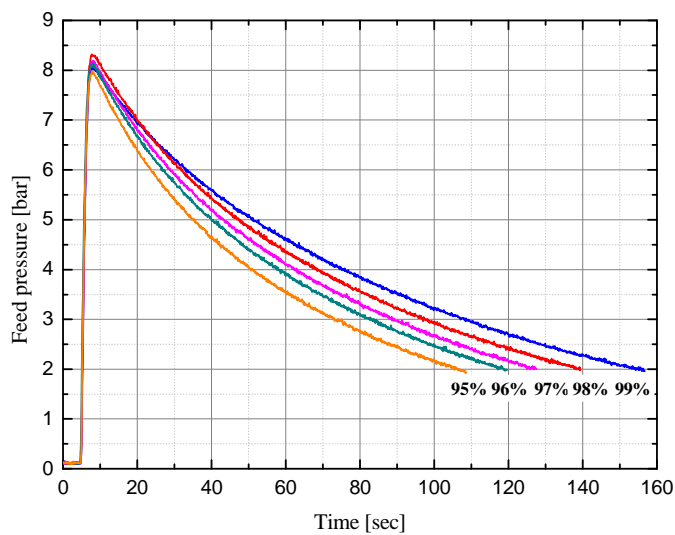


Fig. 4.8 Pressure variation according to time

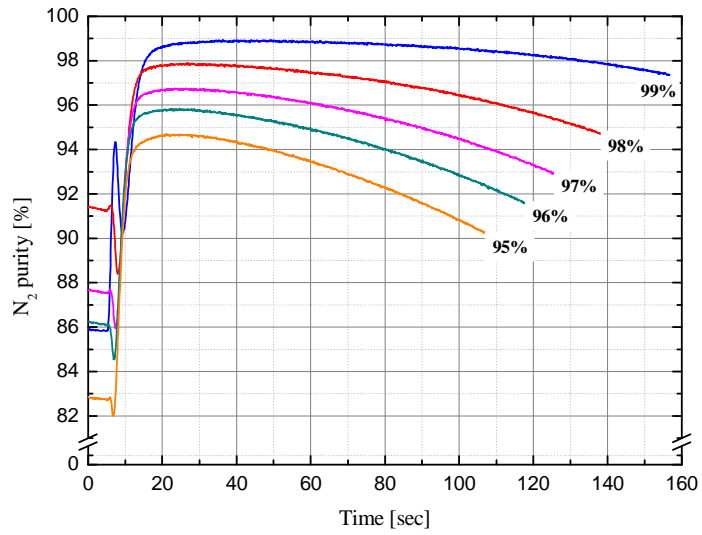


Fig. 4.9 Nitrogen purity according to time

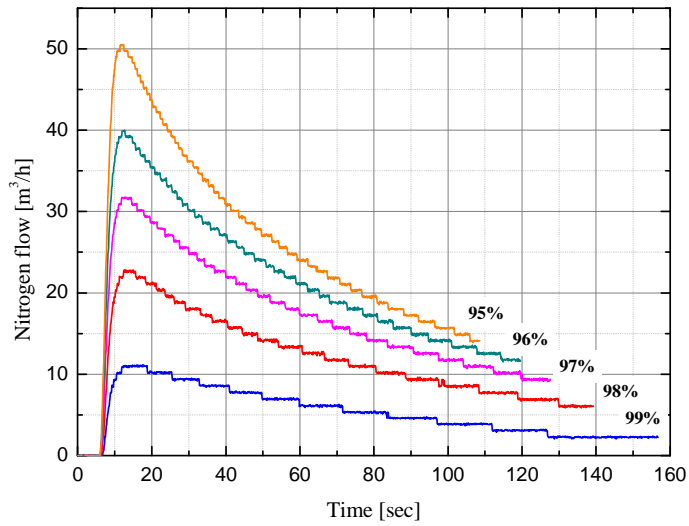


Fig. 4.10 Nitrogen flow rate according to time

4.3.4 연속 유량특성

일정한 유량조건에서의 순도를 정수값으로 맞추기 위하여, 먼저 압력조정기로 7bar에서 유량조절밸브를 조절하여 순도를 설정한 후 압력조정기를 분리하여 시험하였다. 이렇게 함으로써 시험시 설정압력 이상으로 상승하는 질소순도의 영향은 유량조절밸브를 이용하여 조금만 조절하면 되기 때문이다.

Fig. 4.11은 시간에 따른 이송압력 변화 특성을 보여주고 있다. 질소순도 99%의 경우 압력이 계속 상승하다가 9.6bar 근방에서 압축기가 멈추고, 압축기 작동차압 만큼 떨어진 8.3bar에서 다시 상승해 동일한 압력특성을 계속 보여주고 있으며, 이는 압축기 발생유량이 이송유량보다 많기 때문이다. 여기서 이송압력은 입구압력보다 0.4bar 정도 떨어진 상태이다.

하지만 질소순도 98% 이하에서는 순도에 따라 약 150초를 지나면서 일정한 압력상태를 유지하고 있음을 알 수 있다. 이 상태의 압력이 순도별 일정한 유량을 유지하게 되는 최고 이송압력이 된다. 그리고 96% 이상에서는 압력이 상승하면서 일정해지고, 95%에서는 압력이 하락하면서 일정해지는 특성을 보이는데, 이는 상대적으로 순도가 낮은 경우 유량이 급격하게 빠져나가기 때문으로 사료된다.

동일한 조건에서의 질소순도의 변화 결과를 **Fig. 4.12**에 나타내었다. 질소순도 99%에서는 일정한 순도를 보였고, 98% 이하의 약 150초 이내에서 순도 변화가 있는 것은 설정압력보다 상승한 압력으로 인해 미소하게 증가한 순도를 조절했기 때문이다. 그리고 입구밸브를 닫아 순간적으로 압력이 떨어지는 경우 질소순도가 0.5% 이내로 상승한다는 것을 알 수 있으며, 반대로 산소순도는 동일한 수준으로 떨어졌다는 것을 의미한다.

마찬가지로 동일한 조건에서의 질소유량의 변화를 **Fig. 4.13**에 나타내었다. 앞서 언급했듯이 유량신호는 스텝응답특성을 보이고 있으며, 이송압력특성에서 처럼, 질소순도 96% 이상에서는 유량이 증가하다가 일정해지고, 95%에서는 유량이 감소하다가 일정해지는 특성을 보이고 있다.

이상의 결과, 초기 예상했던 대로 순도별로 일정한 압력과 유량을 나타내는

조건이 있다는 것을 알 수 있었다. 따라서 Fig. 4.11의 그래프에 나타난 데이터로부터 일정한 시간대의 30초 데이터의 평균값을 구하여 정량적인 이송압력을 Table 4.4에 나타내었다. 그리고 Fig. 4.14처럼 질소순도별 최고 이송압력을 그래프로 나타낸 결과 2차 다항식 그래프와 아주 일치하는 경향을 보였다. 이러한 2차 다항식을 Fig. 4.14의 아래에 나타내었으며, Table 4.4의 질소순도 99%에서의 이송압력은 2차 다항식을 통해 구한 값이다.

또한 Fig. 4.14에는 시험에 사용된 10bar, 80m³/h급 압축기를 사용해 일정한 질소유량을 나타내는 압력과 순도별 가능한 영역과 가능하지 못한 영역을 그래프를 경계로 하여 화살표로 표시하였다.

97%에서 연속적으로 가능한 유량이 Fig. 4.13의 그래프로부터 약 33m³/h임을 알 수 있다. 따라서 초기 목표로 한 97%, 20m³/h를 60% 이상 초과하므로 분리막 모듈과 압축기의 선정, 질소발생 고정의 유효함이 확인되었다.

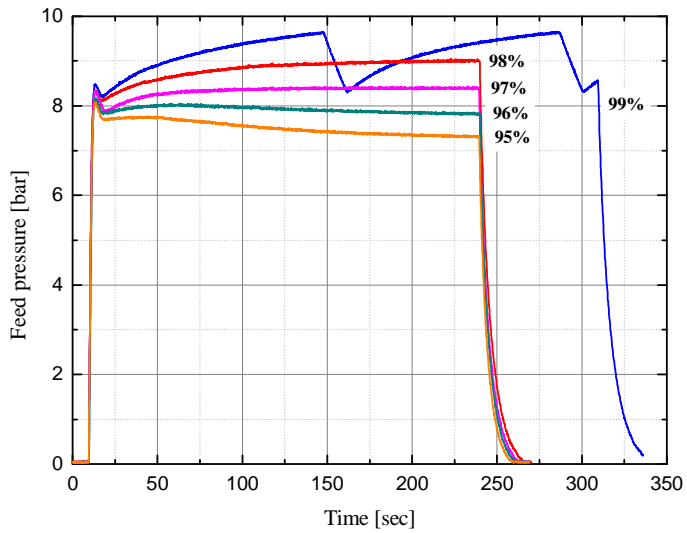


Fig. 4.11 Feed pressure variation according to time in compressor operating

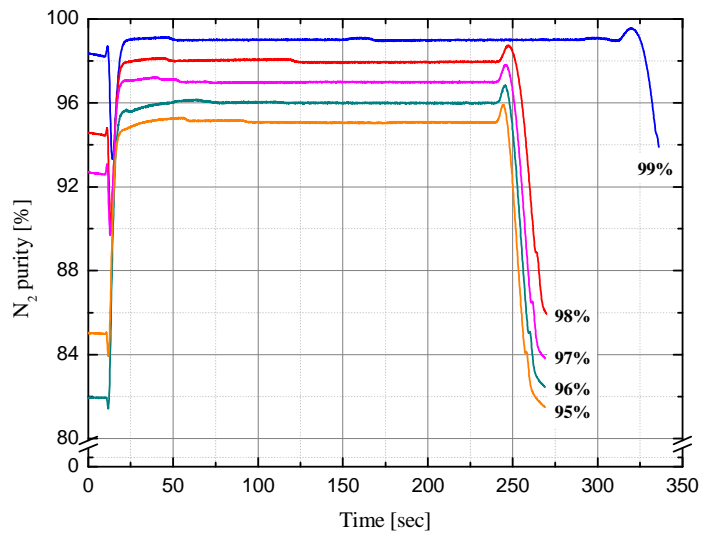


Fig. 4.12 N₂ purity variation according to time in compressor operating

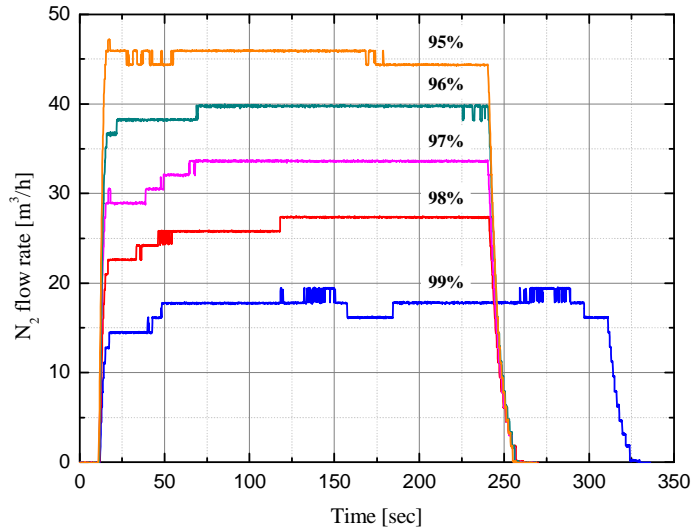
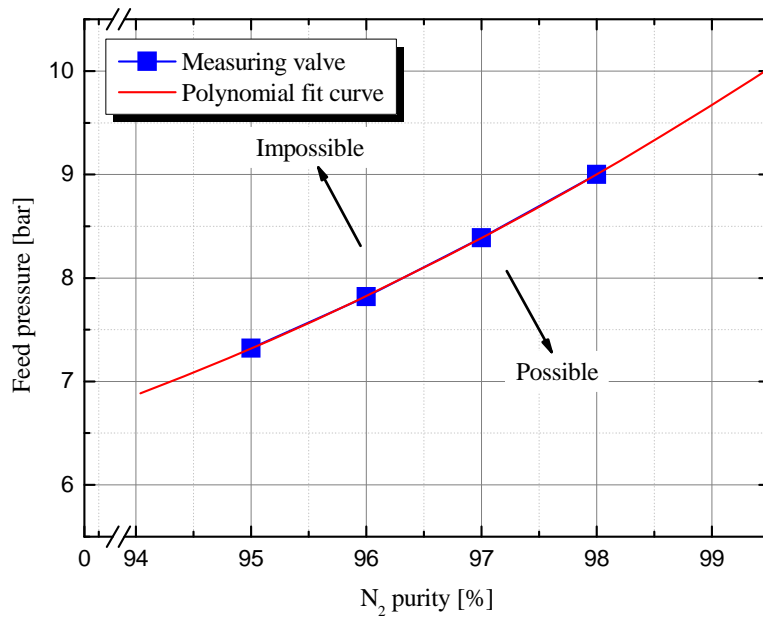


Fig. 4.13 N₂ flow rate variation according to time in compressor operating

Table 4.4 Maximum feed pressure according to N₂ purity to generate constant N₂ flow rate

N ₂ Purity, %	99	98	97	96	95
Pressure, bar	9.7	9.0	8.39	7.82	7.32
Constant feed pressure, bar	9.7	9.0	8.39	7.82	7.32



$$\text{Feed pressure} = 210.05 - 4.75 \times (\text{N}_2 \text{ purity}) + 0.0275 \times (\text{N}_2 \text{ purity})^2$$

Fig. 4.12 Trend of maximum feed pressure according to N₂ purity to generate constant N₂ flow rate

제5장 결 론

본 연구에서 수행한 기체 분리막 모듈에 대한 유량특성 평가와 질소발생기 공정 분석에 대한 연구 결과는 다음과 같다.

- (1) 중·소형 선박용 고압 질소용기 공급방식에서의 질소 사용유량이 약 $18\text{m}^3/\text{h}$ 로 측정되었고, 이를 근거로 질소발생 기체 분리막 모듈의 용량 $20\text{m}^3/\text{h}$ 급으로 정하였으며, 선박 적용을 고려하여 내구성과 경량화를 갖춘 PARKER ST6010 모듈 2개를 선정하였다.
- (2) 기체 분리막 모듈에 대한 압력, 온도, 유량 및 산소순도의 복합 신호 측정이 가능한 시험평가시스템을 구축하였으며, 질소발생 공정별 이슬점, 입자계수와 농도에 대한 공기질을 측정, 평가하였다.
- (3) 모듈 1의 경우 실제 기준 데이터보다 유량이 우수하였고, 질소발생 효율은 압력과 순도에 따라 차이가 있으며 1% 내외로 높게 나왔다. 동일한 모듈 2에 대한 비교시험에서 질소는 7bar, 97% 이하, 투과공기는 8bar 이상에서 모듈 2의 유량이 조금 높은 차이를 나타내었다.
- (4) 이송유량과 질소유량 및 질소순도를 산소순도 추정 관계식(본문중 식 3.5)에 대입하여 얻은 투과공기 산소순도 예측값은 실제 측정값과 3% 이내의 차이를 보이며 질량보존의 법칙과 예측값의 유효성이 입증되었다.
- (5) 모듈 1과 모듈 2를 병렬 연결한 모듈 1-2에 대한 유량시험 결과, 모듈 1에 대한 산술적인 2배 유량보다는 조금 낮게 나왔으며, 반대로 질소발생 효율은 조금 높게 나왔다. 그리고 모듈 1과 모듈 2의 투과공기 유량의 합은 모듈 1-2와 거의 유사했으며, 7bar와 6bar에서는 동일한 값을 나타내었다.
- (6) 질소발생기 제품과 유사한 상태에서의 유량특성을 파악하기 위하여 공정설계와 부품선정을 통해 질소발생 시스템을 별도로 구축하였으며, 공기질 측정 결과 발생한 질소에 대해서는 ISO 8573-1의 기준에 따라 1-3-1의 등급을 나타내었으므로, 본 시스템에 대한 질소발생 공정의 유효함이 확인되었다.

- (7) 구축된 질소발생 시스템에 대한 유량시험 결과, 모듈 2개를 병렬연결한 모듈 1-2의 유량보다 전체 조건에서 높게 나왔으며, 특히 질소순도 99%에서는 10% 넘게 차이를 보이는 조건도 있었다. 이는 공정 최적화로 시험장치와는 달리 누설이나 압력손실이 최소화되었기 때문으로 사료된다.
- (8) 연속적인 압력, 산소순도 및 유량의 총 7개 센싱신호를 분석하여 공정별 압력, 질소순도 및 유량의 변화를 관찰함으로써 압력과 질소순도에 따라 비례적인 관계가 있음을 확인하였으며, 질소 순도변화에 대한 아날로그 기록 데이터의 유효성을 확인하였다.
- (9) 시험에 사용된 압축기 용량으로 일정한 유량과 압력을 유지할 수 있는 조건을 선정하기 위하여 질소순도별로 최대 가능한 압력을 측정한 결과, 95%-7.32bar, 96%-7.82bar, 97%-8.39bar, 98%-9.0bar로 선형적인 압력특성을 나타내었다. 이로써 10bar, 80m³/h급 용량의 압축기로 일정한 유량특성을 보이는 압력과 질소순도 영역을 선정할 수 있게 되었다.

향후 유량특성이 검증된 PARKER ST6010 기체 분리막 모듈과 유효성이 입증된 질소발생 공정에 대한 연구 결과를 기반으로 개발된 질소발생기가 선급기준에 맞는 진동과 고온 등의 환경시험을 통과한다면, 기존 선박에서 행하고 있는 육상이송에 의한 질소용기 공급방식을 대체할 수 있는 on-site 재충전시스템의 적용이 가능할 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 한국해양연구원, 선박의 이해, 2002
2. 케미코아(주), 질소 분리용 분리막 소재 및 generator 개발, 2002
3. (주)에어레인, 폴리이미드를 소재로한 산소분리막 제조 및 모듈 개발, 2003
4. 이필경, 장호남, “고분자 분리막 제조조건에 대한 산소 및 질소의 투과현상에 대한 연구”, 한국화학공학회지, 제27권 1호, pp.1~6, 1989
5. 김연욱, 박현수, 김화용, “분리막과 PSA의 hybrid 시스템에 의한 이산화탄소 회수 공정”, 한국가스학회 추계학술대회, pp.57~62, 2000
6. 이승영, 원창환, 이시우, 이기성, 우상국, “산소투과 분리막의 투과특성에 미치는 미세구조의 영향”, 한국막학회 춘계학술대회, pp.55~61, 2002
7. 하성용, “분리막을 이용한 공기분리기술 및 현황”, 한국막학회 제15회 심포지움, pp.121~134, 2002
8. 조은애, 오인환, “고분자 전해질 연료전지용 분리판 기술개발 현황 및 전망”, 한국고분자학회지, 제15권 5호, pp.612~617, 2004
9. 황선웅, 정용찬, 전병철, 이성재, “제올라이트 입자를 첨가한 폴리에틸렌 필름의 기체 투과성”, 한국고분자학회지, 제28권 5호, pp.374~381, 2004
10. Smit Gas Systems, Nitrogen Generator, 2003
11. Air Products, Nitrogen Generation System, 2004
12. Unitor, Nitrogen Generator, 2005
13. 김종표, 염봉열, 민병렬, “고분자 기체 분리막 기술 동향”, 한국고분자공학회지, 제16권 4호, pp.436~446, 2005
14. PARKER, N₂ Generator Seminar, 2005
15. Sea Plus, N₂ Inert System, 2003
16. 서호원, 엄현식, 유공압공학, 기한재, 2004.
17. PARKER Filtration, Compressed Air and Gas Filtration Products, 2006
18. 한국표준협회, KS B ISO 8573-4, 압축공기-고체입자 함유량 시험방법, 2003

19. ISO 8573-1, Contaminants and purity classes, 2003
20. 한국선급, 제조법 및 형식승인 등에 관한 기준, 2006

감사의 글

대학원이라는 단어가 왠지 낯설은 저에게 작으나마 이런 성과를 가지고 무사히 졸업하게 된다는 것에 대하여 개인적으로 무한한 기쁨을 가집니다.

이러한 결실이 맺어지기까지 많은 관심과 배려로써 이끌어주신 김종도 교수님께 우선 감사를 드리며 아울러 많은 조언과 격려로써 논문심사를 해주신 이명훈 교수님, 김유택 교수님 이 자리를 빌어 다시 한번 감사의 말씀을 드립니다.

짧으면 짧고 길면 길다고도 할 수 있는 2년간의 석사생활에서 사회에서 느끼지 못한 또 다른 저의 존재를 확인하게 되어서 이 또한 기쁘고 저의 학교생활을 위해 주위에서 물심양면 격려와 힘을 주는 우리 레이저가공실험팀 창제, 명섭이, 정한, 무근, 수진이를 만나서 기쁘고 또한 항상 불 때마다 존경심이 절로 우러나오는 태경봉 선배님, 윤희종친구, 박현준, 황현태후배, 그리고 대우에서 열심히 근무하고 있는 강운주후배, 이 모두가 살아가면서 소중한 인연으로써 인생의 값진 보람으로 간직하겠습니다.

괜히 공부한다는 핑계로 토요일마다 잠시 업무에 소홀한 점이 있었으나 말없이 회사를 잘 이끌어가고 있는 레베식구들 특히 이런 성과를 낼 수 있게 연구 결과에 많은 도움을 준 김전하 과장, 빼놓을 수 없는 우리가족... 특히 마누라, 이 모든 분들에게 감사의 마음을 전합니다.

끝으로 영원한 스승이자 친구이자 동료인 김종도 교수님에게 다시 한번 감사의 마음을 전하며 이 모든 분들이 항상 건강하고 행복하시길 바랍니다.

2008년 2월

이 상 수