

## 심랭식공기분리공정에서 질소증류탑의 엑서지 해석

### Exergy Analysis of Nitrogen Distillation Column in the Cryogenic Air Separation Process

용평순\*, 이성철\*\*

Pyeong Soon Yong\*, Sung Chul Yi\*\*

**Abstract:** The distillation column is one of large energy consumable units in the cryogenic air separation process and the accurate energy analysis of this unit is necessary for choice of energy saving process. In this work, the exergy method was adopted for energy analysis of a cryogenic nitrogen distillation column. In order to designing the energy saving distillation column, the exergy distribution of feed air, exergy efficiency and exergy loss for process condition was investigated and the optimal process condition to minimize the exergy loss was found. The result from this work can be used as a guideline for the choice of the process design conditions and efficiency improvement of cryogenic distillation column.

**Key Words:** exergy, exergy loss, nitrogen, cryogenic distillation

#### 1. 서 론

공기로부터 질소를 분리하는 방법에는 심랭분리, 흡착분리, 막분리가 있다. 중소 규모나 저순도의 경우에는 흡착분리법 및 막분리법이 주로 이용되나, 대용량 및 고순도를 갖는 질소를 분리하기 위해 가스를 저온 상태로 액화시켜 가스의 비점차를 이용하여 분리하는 심랭분리가 일반적으로 사용된다[1].  $-170^{\circ}\text{C} \sim -196^{\circ}\text{C}$ 의 저온 상태에서 이루어지는 심랭분리법의 저온증류는 대기온도보다 높은 온도에서 이루어지는 고온증류와 원리적으로 동일하나, 상온이나 고온증류가 원료를 가열하기 위해 재비기(reboiler)를 통한 고온의 열원이 필요로 한 것에 비해 저온증류방식에서는 재비기와 같은 고온의 열원이 별도로 필요하지 않고 원료공기의 열원을 직접 이용한다. 응축기(condenser)에서의 액화에너지도 원료가스의 압력변화를 통한 줄탐슨(Joule-Thomson)효과를 이용하여 자체적으로 공급 받는다는 특징이 있다. 또한 저온증류공정은 원료의 냉각 및 액화 등을 모두 원료가스의 열역학적 특성 변화를 이용하게 되며, 분리에 필요한 에너지는 압축기를 통해 공급받아 증류탑에서 사용하게 된다. 심랭분리법에서 증류탑은 가장 핵심이 되는 부분으로 대부분의 분리에너지가 이곳에서 사용되기 때문에 효율 높은 장치의 설계와 운전비용의 절감을 위해서 증류탑의 에

너지 소비 형태를 규명하는 것이 매우 중요한 작업이다.

일반적으로 이러한 효율평가 및 효율적인 에너지소비 규명을 위해 열역학 1법칙에 근거한 핀치기술(pinch technology)과 같은 에너지 합성 평가와 열역학 2법칙에 근거한 엑서지(exergy)평가 등이 사용된다. 열역학 1법칙에 의한 평가는 온도와 열량 관계로부터 도입된 핀치 기술이 많이 사용되고 있다[2]. 이 방법은 공정상의 모든 공정단위를 하나의 열교환기로 취급하여 최적의 열교환망을 합성하는 방법을 취하고 있다. 이 방법은 공정상의 모든 에너지가 온도만의 함수로만 표현된다면 훌륭한 방법이 될 수 있을 것이나 실제 공정에서는 온도와 압력의 변화 또는 화학적 결합상태에 따른 여러 가지 형태의 에너지가 복합되어 존재하기 때문에 적용에 무리가 많다. 따라서 복합 형태로 존재하는 공정상의 에너지를 어떻게 해석하고 평가하며, 또 어떻게 실제에 적용해야 하는가는 많은 연구자의 관심대상이다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 도입된 방법이 엑서지를 이용하는 방법이다[3]. 특히 저온 증류상치는 에너지 효율이 장치의 경제성과 직결되기 때문에 엑서지를 이용한 해석은 최적 공정설계를 위하여 좋은 수단이 될 수 있다.

열역학 제1법칙으로 표현되는 에너지가 에너지의 양을 표현하는 것에 비해 제2법칙에 의한 엑서지는 에너지의 질을 표현하기 때문에 공정에 대해 엑서지 해석을 실시하면 여기에 사용되는 유효에너지에 대한 정보를 얻을 수 있으며, 장치에서 엑서지손실이 발생하는 위치, 크기 등을 정확히 파악할 수 있다.

본 연구는 보다 효율 높은 저온 증류장치 설계를 하기 위한 방안의 하나로 99.999%의 질소를 생산

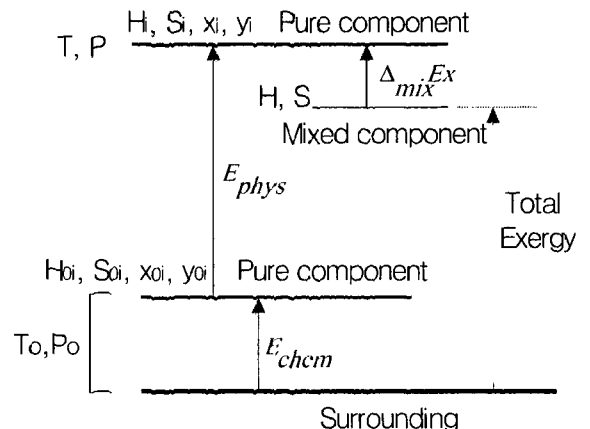


그림 1. 혼합물의 총엑서지  
Fig. 1. Total exergy of mixture

\* 정 회 원 : 대성초저온연구소 주임연구원  
\*\* 정 회 원 : 한양대학교 화학공학과 부교수  
원고접수 : 2002년 04월 01일  
심사완료 : 2002년 05월 22일

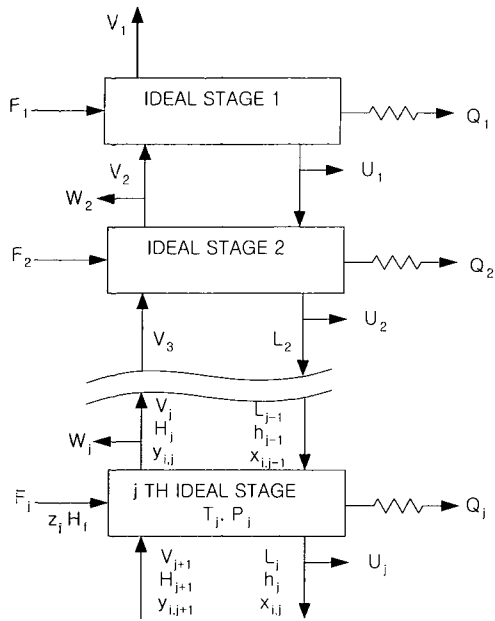


그림 2. j 단에서의 물질 및 에너지 흐름  
Fig 2. General countercurrent cascade of j stages

하는 증류탑에 대한 엑서지 해석을 실시하였으며, 에너지 소비 분포 및 효율, 공정조건 변화에 따른 엑서지 손실량 등을 고찰하였으며, 이를 통해 엑서지 손실이 적은 최적의 증류공정 조건을 찾아보았다.

## 2. 본 론

### 2.1. 엑서지 이론

엑서지는 물질중의 이용 가능한 에너지의 개념으로 정의되며, 무한대의 열용량을 갖고 있는  $T_0, P_0$ 의 기준 환경 하에서 일정량의 물질로부터 원리적으로 얻을 수 있는 에너지의 최대량(열기관), 혹은 일정량의 물질로부터 열을 제거하는데 소요되는 에너지의 최소량(냉동기)을 의미한다. 엑서지는 Riekert(1974), Kotas(1986), Szargut et al(1988), Hinderink (1996)의 연구를 통하여 체계화되었다[4,5,6].

물질흐름에서 물질의 총엑서지( $Ex_{total}$ )는 그림 1과 같이 온도와 압력에 의한 물리적엑서지( $Ex_{phys}$ ), 화학성분에 의한 화학엑서지( $Ex_{chem}$ ), 혼합물의 혼합엑서지의 합으로 표현되며, 식으로 표현하면 식(1)과 같다. 일반적으로 공기분리 공정에서 혼합엑서지 항은 영향이 많지 않으므로 무시를 한다[6].

$$Ex_{total} = Ex_{phys} + Ex_{chem} + \Delta_{mix} Ex \quad (1)$$

물리적엑서지는 운동에너지항목과 위치에너지 항목을 무시하고, 수식적으로 나타내면 식(2)와 같다.

$$Ex_{phys} = (H - H_0) - T_0(S - S_0) \quad (2)$$

여기서 하첨자 0는 기준상태를 말하며, H는 엔탈피(kcal/kg), S는 엔트로피(kcal/kgK)를 의미한다.

기상과 액상의 흐름을 고려한 다성분계의 화학엑서지는 식(3)로 표현된다. 여기서,  $L_0$  및  $V_0$ 는 액상 및 기상의 유량이며,  $x_0$  및  $y_0$ 는 액상 및 기상의 조성이다.

또한  $Ex_{chem,i}$ 는 순성분 i의 화학엑서지이다.

$$Ex_{chem} = L_0 \sum_{i=1}^n x_{0,i} Ex_{chem,i} + V_0 \sum_{i=1}^n y_{0,i} Ex_{chem,i} \quad (3)$$

또한 엑서지 손실은 일반적으로 비가역성 또는 엑서지 파괴 등으로 불려지는데, 이것은 정상상태 물질흐름의 엑서지밸런스에 의해 식(4)를 통해 계산되어질 수 있으며, 또한 외기와의 열교환이 없다고 가정하여 유도된 Guoy-stoda공식인 식(5)에 의해 계산되어질 수 있다. 공정설계에 있어 물질수지 및 에너지수지는 반드시 고려하여야 하는데, 여기에 엑서지수지를 추가하여 고려하면 에너지의 질을 평가할 수 있고, 엑서지손실 부위 및 크기를 파악할 수가 있기 때문에 이를 통하여 공정개선 및 최적공정을 찾을 수 있다.

$$Ex_{loss} = \sum_{inlet} Ex_i - \sum_{outlet} Ex_j \quad (4)$$

$$Ex_{loss} = T_0 \left( \sum_{outlet} S_j - \sum_{inlet} S_i \right) = T_0 \Delta S \quad (5)$$

엑서지 효율을 정의하는 방법에는 여러 가지가 있겠으나[4], 본 증류탑 장치의 엑서지효율( $\eta$ )은 식(6)을 이용하여 정의하였다.

$$\eta = \frac{\sum_{outlet} Ex_j}{\sum_{inlet} Ex_i} = 1 - \frac{Ex_{loss}}{\sum_{inlet} Ex_i} \quad (6)$$

### 2.2. 증류탑 계산 이론

증류공정의 계산은 평형단 모델 및 비평형단 모델 등의 방법에 의해 수행되어지는데, 본 저온분리공정에 적용한 모델은 평형단 모델로서, 각 이론단에서의 물질흐름은 평형이 이루어지고 있다는 것을 가정하였다. 연속증류탑을 일반적인 모델화 시켜 콘덴서를 1단으로 하고, 그림 2와 같이 j단을 기준으로 하여 각 단마다 원료공기 유량  $F_j$ , 액체사이드컷  $L_j$ , 기체사이드컷  $W_j$ , 상승증기를  $V_j$ , 하강액을  $L_j$ , 상승증기의 엔탈피를  $H_j$ , 액체엔탈피를  $h_j$ , 상승증기의 조성을  $y_{i,j}$ , 액상의 조성을  $x_{i,j}$ , 열손실을  $Q_j$ 을 고려한 후 각 성분 및 이론단에 따른 물질수지(Material Balance), 상평형관계(Phase Equilibrium), 물분율의 합(Summation of Mole fraction), 엔탈피수지(Enthalpy Balance)를 동시에 만족시키는 공정조건을 계산하게 된다.

첫 번째 각 성분의 물질수지식은 식(7) 및 식(8)과 같이 표현된다. 이 식은 각 단 및 각 성분에 대해 성립하면서, 탑 전체의 유량으로서도 성립되어야 한다.

$$L_{j-1} + V_{j+1} - L_j - V_j + F_j = 0 \quad (7)$$

$$L_{j-1}x_{i,j-1} + V_{j+1}y_{i,j+1} - L_jx_{i,j} - V_jy_{i,j} + F_jz_i = 0 \quad (8)$$

$j = 1, 2, \dots, C$

여기서, L은 액상유량, V는 기상유량, F는 원료의 유량이며, x, y, z는 각각 액상, 기상 원료의 조성이다.

두 번째로 상평형관계식은 기상과 액상의 상평형 관계가 각 단 및 각 성분에 대해 성립하여야 하며, 식(9)와 같이 표현된다. 여기서 K는 평형상수이다.

$$y_{i,j} = K_{i,j}x_{i,j} \quad (9)$$

표 1. 증류탑 엑서지 계산 조건 및 결과

Table 1. The exergy calculation conditions and results of distillation column

Stream	Temp[°C]	Press [atm]	Flow Rate [Nm <sup>3</sup> /h]	Exergy			Exergy Distribution (%)
				Physical [kW]	Chemical [kW]	Total (kW)	
Feed Air	-171	6.4	3,514	319.7	66.6	386.3	100
Product GN2	-175	6.3	1,500	154.2	13.6	167.8	43.5
Product LN2	-175	6.3	50	11.1	0.5	11.6	3.0
Waste Gas	-180	3.1	1,946	125.3	52.0	117.3	45.9
Waste liquid	-180	3.1	18	4.2	0.5	4.7	1.2
Exergy Loss						24.9	6.4

세 번째로 상평형 계산 결과가 각단의 기상 및 액상의 물분율의 합이 1이 되어야한다. 이 식은 식(10), 식(11)과 같이 표현된다.

$$\sum_{i=1}^n x_{i,j} = 1 \tag{10}$$

$$\sum_{i=1}^n y_{i,j} = 1 \tag{11}$$

네 번째로는 식(12)와 같이 각단의 에너지수지(Enthalpy Balance)가 성립되어야 한다.

$$L_{j-1}h_{j-1} + V_{j+1}H_{j+1} - L_jh_j - V_jH_j + F_jH_f = 0 \tag{12}$$

윗 식들을 이용하여 본 연구에서는 원료공기의 조건과 각단의 압력이 주어진 상태에서 각단의 평형온도 및 기상 및 액상의 조성을 구하였다. 위의 방정식은  $N(2C+3)$  개의 식이 되며, 본 연구에서는 Tridiagonal Matrix법을 이용하여 계산하였다.

### 2.3. 평가 대상계

본 연구에서는 엑서지 기법을 적용하여 질소생산을 위한 증류탑을 대상으로 하여 엑서지손실을 통한 최적 공정 및 공정개선 방향을 찾아보았다. 대상을 선택한 증류탑 모델은 그림 3과 같으며, 공정조건은 표 1과 같다. 온도가 비점상태까지 떨어진 저온의 압축공기가 증류탑 하부로 유입되게 되며, 이 저온의 공기는 증류탑에서 각 성분의 비점 차이에 따라 저비점 성분인 질소는 탑 상부로 모이게 되고, 고비점성분인 산소를 포함한 액체공기는 탑 하부로 모이게 된다. 증류탑 상부에서 액화질소 및 기상의 질소를 생산하게되며, 탑하부에서는 산소분이 풍부한 액체공기가 J-T 밸브에 의해 등엔탈피 팽창을 하여 질소응축기의 응축열원으로 에너지를 제공해주고 기화가 되어 장치 외부로 배출되게 된다. 이 장치는 -180°C이하의 서온에서 이루어지기 때문에 단열성능이 장치의 효율을 결정하는 인자가 된다(7). 또한 질소생산장치에서 분리에너지가 많이 필요로 한 곳이 증류탑이기 때문에 증류탑에 대한 에너지 소비 분포 및 엑서지 손실을 규명하는 것은 보다 효율적인 장치 구성 및 설계를 위해 필요하다.

## 3. 결 과

### 3.1. 증류탑 엑서지 계산

본 연구에서 먼저 질소의 순도가 99.999%이상의 질

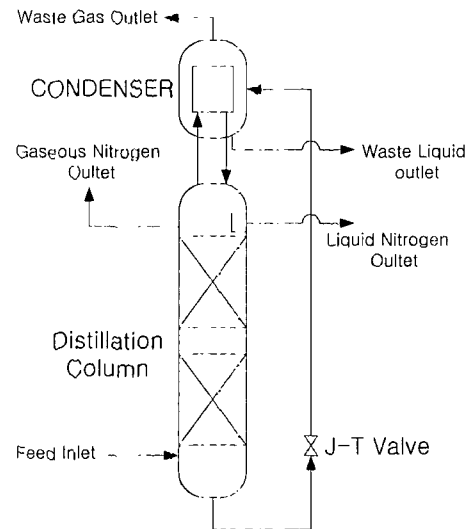


그림 3. 증류탑 개략도

Fig. 3. Schematic diagram of distillation column

소를 생산해 낼 수 있는 이론단수계산을 통해 필요 이론단수는 44단이 됨을 알았으며, 각단의 에너지 흐름을 규명하기 위하여 각단의 기상과 액상의 흐름에 대한 엔탈피, 엔트로피 계산을 L'air Liquide사의 Gas Encyclopaedia를 기초로 하여 수행하였고(8), 이를 기초로 하여 식(1)~식(3)을 이용하여 물리적엑서지, 화학엑서지 및 총엑서지계산을 하였다. 본 연구에서의 환경기준은 20°C, 1atm으로 하였으며, 이 결과는 표 1에 나타내었다. 원료공기를 질소 및 산소 등으로 분리하기 위해서는 분리에너지가 필요한데, 이것은 엑서지밸런스를 통하여 규명이 가능하다. j단을 기준으로 해서 들어오는 물질의 총엑서지와 나가는 물질의 총엑서지를 계산하여 이 차이를 계산하면, 분리에너지로 소비된 양을 규명할 수 있다. 단수 증가에 따른 질소 순도의 변화는 그림 4와 같으며, 단수 증가에 따른 엑서지 소비분포는 그림 5와 같다. 그림 4에서 보면 공기가 증류탑으로 유입되어 각 성분의 비점 차이에 따라 비점이 가벼운 질소성분은 상부로 올라가고 비점이 높은 산소 및 알곤 성분은 탑하부로 모이게 된다. 증류탑의 농도프로파일을 보면 25단 이상에서 질소의 농도는 99.5%이상 이 되며, 25단에서 1단으로 올라감에 따라 99.999%까지 질소농도가 높아짐을 알 수 있다. 그림 5에서 보면, 35단에서 44단 사이에서 저순도의 질소가 산소 및 알곤 성분과 분리될 때 분리에너지가 많이 필

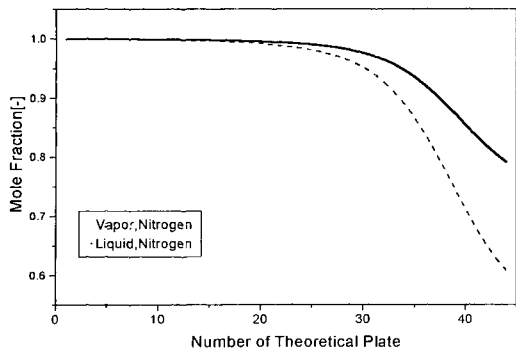


그림 4. 증류탑 이론단수에 따른 질소 순도  
Fig. 4. Nitrogen purity on NTP of distillation column.

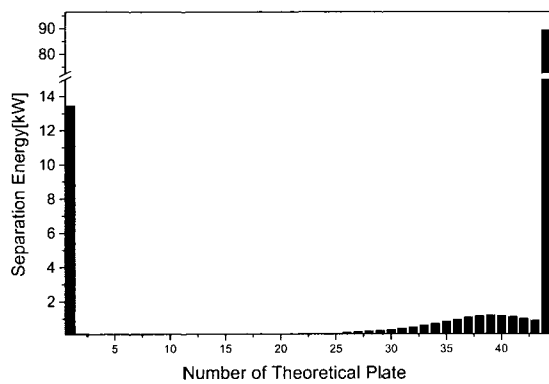


그림 5. 이론단수에 따른 분리에너지 분포  
Fig. 5. Separation energy distribution on NTP of distillation column

요로 하며, 2단에서 25단 사이는 질소순도가 99.5%에서 99.999%로 높아지는 단계로 엑서지 손실이 25단에서 44단 사이의 값에 비해 상대적으로 적고, 값 또한 0.1~0.5 kW사이 존재하고 있음을 알 수 있다. 44단은 본 증류탑의 가장 하부에 위치한 곳으로 비점 상태의 원료공기 및 43단에서 하강하는 액체공기, 43단으로 올라가는 기체공기 그리고 환류액으로 증류탑을 빠져나가는 액체공기가 함께 공존하는 영역으로 이들 공기의 조성 및 원료공기의 온도차에 의해 엑서지 손실 크기가 탑상부에 비해 크게 나타났다. 이 부위의 엑서지 손실이 큰 원인은 원료공기의 조성은 질소 78.11%, 산소 20.96%, 알곤은 0.93%이지만, 탑하부 44단의 액체공기 조성은 질소 63.26%, 산소 35.17%, 알곤 1.56%이기때문에 조성차이에 의한 엑서지 손실이 발생하였기 때문이다. 또한 원료공기는 비점 온도 근처에서 증류탑으로 유입되는데 이 온도가 증류탑 44단의 상평형 온도와의 차이가 클수록 엑서지 손실이 크게 된다. 증류탑 상부 1단에서는 제품질소 등이 생산이 되고, 응축된 환류액과 함께 열교환이 일어나기 때문에 에너지가 많이 소모된다. 이것은 응축기에서 기상의 질소가 액상의 질소로 상이 바뀌면서 발생된 것과 한랭원으로 쓰이는 액체공기와의 열교환 과정에서 발생된 것이며, 이곳의 엑서지 손실을 줄이기 위한 방법으로는 열교환 온도차를 줄이는 방법이 있다. 또한 하부 44단의 엑서지 손실을 줄이는 방법은 원료공기의 조성과 44단의 조성차이를 줄이는 것과 원료공기의 온도조건을 변경시키는 방법이 있다. 원료

공기는 노점과 비점이 약 3℃ 차이가 발생하며, 원료공기의 온도는 노점과 비점 사이에 존재하게되며, 온도에 따라 원료 공기중의 기상과, 액상 분율이 차이가 나게된다. 또한 원료공기를 비점상태까지 냉각시켜 주는 열교환기가 증류탑 전단에 설치되는데, 이 열교환기의 운전조건에 따라 비점 이하의 공기 또는 과냉된 공기가 유입되게된다. 따라서 온도조건이 비점 근처가 되도록 하여 설계를 하면 엑서지 손실을 줄일 수가 있다. 증류탑 하단의 조성 차를 줄이는 방법은 원료공기의 입구를 각 단의 조성이 비슷한 위치로 넣는 방법이 있겠으나, 이 경우 증류탑의 높이가 높아지는 단점이 있다. 표1에서 보면 장치 내로 들어오는 원료공기의 총엑서지는 386.3kW, 장치내 물질흐름의 엑서지손실은 24.9kW로 엑서지 효율은 93.6%가 됨을 알 수 있다. 원료공기의 총엑서지는 질소를 생산하기 위한 중요 결정인자로 작용할 수 있으며, 총엑서지는 질소 증류탑의 회수율 및 질소증류탑의 운전압력과 밀접한 관련이 있기 때문에 원료공기의 총엑서지량을 줄이고, 각 장치의 엑서지손실을 줄이는 것이 장치의 효율을 증대시키는 방법이 될 것이다.

**3.2. 질소회수율과 엑서지 손실**

장치의 성능은 질소회수율과 밀접한 관계를 가지고 있다. 본 장에서 고려한 질소회수율은 원료공기대비 질소생산량이 되겠다. 질소회수율의 결정은 제품의 순도를 기준으로 하여 공정모사에 의해 결정되는데 일반적으로 운전중인 질소플랜트의 회수율은 35~42%가 된다. 질소회수율이 높을수록 증류탑 상부의 환류비가 낮아져서 순도가 저하가 되며, 환류비가 적을 경우는 증류불량이 발생하게 된다. 본 장치의 경우 그림 6과 같이 제품질소순도가 99.999%이상이 되기 위해서는 41%이하의 질소회수율을 가져야만 한다. 또한 이 장치에서의 환류비 부족에 의한 증류불량 조건은 43%이상에서 발생하였다 질소회수율과 엑서지 손실관계를 보면 그림 7과 같이 질소회수율이 1% 증가할수록 장치의 엑서지 손실은 평균 14%감소함을 보였다. 이것은 원료공기로 적은 양의 엑서지가 유입되어 질소분리에 필요한 에너지가 적게들었기 때문이다. 따라서 장치설계를 할 때 제품회수율을 최대로 하는 것이 엑서지 손실을 줄이는 최선의 방법이 되겠다.

**3.3. 증류탑내 압력손실과 엑서지 손실**

엑서지손실을 줄이기 위한 방법의 일환으로 두 번째로 증류탑내의 압력손실에 따른 엑서지 손실량 관계를 고찰하여 보았다. 그림 7에서 보면, 압력손실이 0.05atm 증가할 때마다 평균 2.5%엑서지 손실이 증가함을 보였으며, 질소회수율이 38%의 경우의 탑내 압력손실이 0.05atm 증가할 때 1.8%의 엑서지손실이 증가하고, 질소회수율43%의 경우는 3.6% 엑서지손실이 증가하여 질소회수율이 높을수록 탑내의 압력손실 영향이 크음을 알 수 있었다.

탑내의 압력손실은 주로 탑내의 구성형태에 따라 좌우된다. 본 공기분리장치에 사용되는 다공판형태의 sieve tray는 평균압력손실이 0.1atm으로, bubble cap tray에 비해 압력손실이 적으며, 또한 규칙충전물(structure packing)은 압력손실이 0.05 atm이하로 sieve tray에 비해 적어 경제적으로 널리 사용되고 있다. 따라서 장치의 엑서지 손실을 줄이는 방법의 일환으로 규칙충전물을 채택하는 것이 경제적이라 할 수 있겠다. 탑내의 압력손실을 줄이면, 원료공기의 압력을 낮출 수 있어, 공기압축기의 소비동력을 절감할 수 있으며, 또한 질소를 생산하기 위한 총엑서지량을 줄일 수 있다.

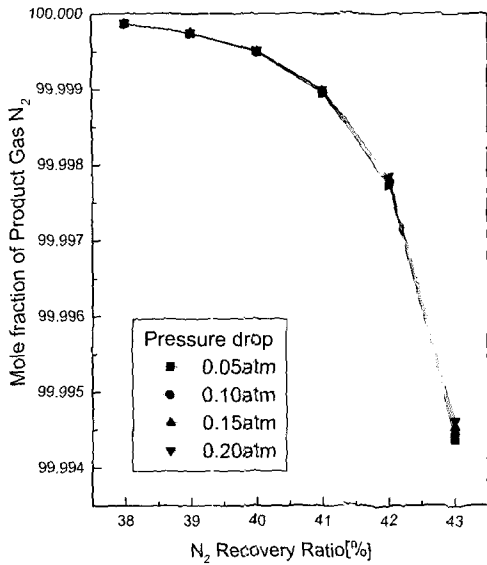


그림 6. 질소회수율에 따른 순도  
Fig. 6. Purity on nitrogen recovery ratio

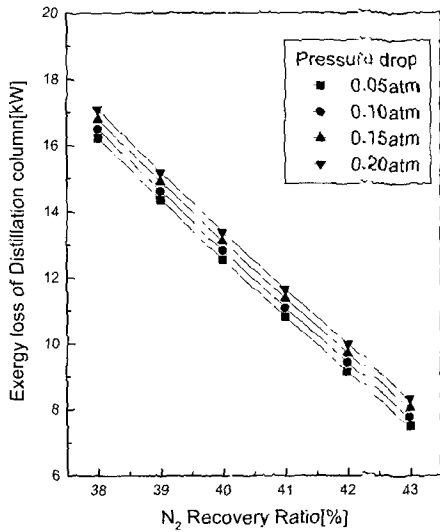


그림 7. 질소회수율에 따른 엑서지손실  
Fig. 7. Exergy loss on nitrogen recovery ratio

### 3.4. 증류탑내 원료공기압력과 엑서지손실

본 장에서는 질소증류탑으로 도입되는 원료공기의 압력과 엑서지손실과의 관계를 고찰하여 보았다. 그림 8과 같이 원료공기의 압력이 0.2atm이 증가함에 따라 질소증류탑에서 발생하는 엑서지손실이 평균 48%가 증가됨을 보이고 있다. 따라서 원료공기의 압력을 낮게 조건을 설정을 하는 것이 엑서지 손실을 최소화할 것이다. 원료공기의 압력은 제품질소의 압력과 관련이 되고, 이 제품질소의 압력은 현장에서의 사용압력에 따라 결정되기 때문에 현장에서 제품질소 압력이 결정이 되면, 질소증류탑 및 기타장치에서 발생하는 압력손실량을 최대를 줄이는 것이 공기압축기의 소비동력을 절감시키는 한편 엑서지 손실을 최소한으로 줄이는 방법이 되겠다. 엑서지관점에서의 장치의 효율은 원료

공기의 총엑서지가 어떻게 사용되고, 엑서지손실량이 얼마나 적은가에 따라 다르게 된다. 따라서 질소회수율이 낮거나 압력손실이 클 경우, 질소 1Nm<sup>3</sup>을 생산하기 위한 엑서지가 많이 필요하게 된다. 질소회수율이 낮다는 것은 질소 1Nm<sup>3</sup>을 생산하기 위한 원료 공기량이 많이 필요하다는 것이고, 압력손실이 크다는 것은 원료공기의 압력이 높아져야한다는 것을 의미한다. 그림 9에는 99.999% 질소 1Nm<sup>3</sup>을 생산하기 위한 필요엑서지를 나타내었다. 원료공기압력 증가에 따라 필요엑서지는 증가가 되는데, 이것은 압력증가에 따라 엑서지손실량이 증가되기 때문이다. 질소 1Nm<sup>3</sup>을 생산하기 위한 필요엑서지 값을 통해 공정설계시 원하는 제품질소량 및 조건에 따른 총엑서지를 추산할 수가 있기 때문에, 이를 이용하면 공정설계시 에너지절감의 기준자료로 활용될 수 있다.

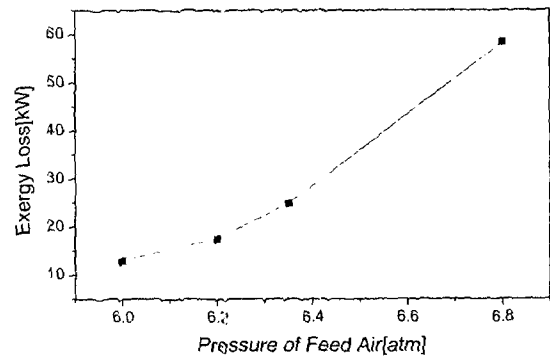


그림 8. 원료공기압력에 따른 엑서지손실  
Fig. 8. Exergy loss on feed air pressure

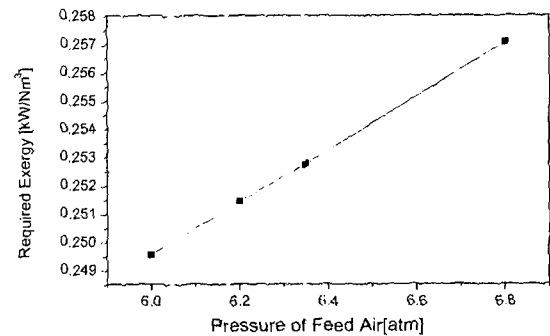


그림 9. 질소 1 Nm<sup>3</sup> 생산에 필요한 총엑서지  
Fig. 9. Required exergy for nitrogen producing of 1 Nm<sup>3</sup>

### 3. 결 론

본 연구에서는 엑서지손실이 적은 효율 좋은 증류탑을 설계하기 위하여 각 공정조건에 따른 엑서지손실관계를 고찰하여 최소의 엑서지 손실을 갖는 공정조건을 찾았다. 공정조건에 따른 엑서지 관계는 첫 번째로 질소회수율은 높을수록 엑서지손실은 적어지며, 엑서지효율은 증가한다. 두 번째로 질소증류탑내의 압력손실이 적을수록 엑서지 손실이 적다. 세 번째로 질소증류탑으로 유입되는 원료공기의 압력이 낮을수록 엑서지손실이 적다. 이를 통하여 99.999%의 순도를 갖는 질소증류탑의 경우 이론단수 44단 기준에서 볼 때 엑

서지 손실이 적은 41%의 회수율을 가질 때, 또한 질소증류탑의 압력손실은 0.05atm 이하가 되는 장치를 사용할 때 최소의 엑서지손실을 갖는 최적의 공정조건이 될 것이다. 이와 같이 원료의 엑서지가 손실되는 위치 및 크기를 파악하면 에너지를 절감할 수 있는 공정조건을 찾을 수 있으며, 이 결과는 에너지 절감형 질소제조장치를 제작하거나, 평가하는데 기준으로 활용될 수 있다.

### 참 고 문 헌

[1] 문홍만, 박두선, 손무룡, "저온공기분리기술", 화학공업  
과학기술, vol.11, No.3, pp.33-39, 1993

[2] B.Linnhoff, "Pinch Technology for the Synthesis  
of Optimal Heat and Power Systems", J of  
Engineering Resources Technology, Vol.  
111, pp.137-147, 1989

[3] T.J. Kotas, "Exergy Method of Thermal  
and Chemical Plant Analysis", Chem. Eng.  
Res Des. Vol.64, pp.212-229, 1986

[4] M.A. Rosen, "Second-law Analysis:  
Approaches and Implications, Int.J. Energy  
Res., Vol.23, 415-429, 1999

[5] J.Szargut, "Chemical Exergy of the  
Elements", Applied Energy, Vol.32, pp.269-286,  
1989

[6] A.P. Hinderlink and H.J. Van Der Kooi,  
"Exergy Analysis with a Flowsheeting  
Simulator-I.Theory; Calculating Exergies  
of Material Streams", Chemical Engineering  
Science, Vol.51, pp.4693-4700, 1996

[7] P.S.Yong, H.M.Moon and S.C.Yi, "A study on the  
development of a cryogenic air separation unit to  
produce high purity nitrogen", J.of the Korea  
Institute of Applied Superconductivity and  
Cryogenics, vol.3, No.1., pp.69-73, 2001

[8] L'air Liquide, "Gas Encyclopaedia", Elsevier, 1976

### 저 자 소 개



#### 용평순(龍平淳)

1967년 11월 01일생, 1993년 강  
원대 공대 화학공학과 졸업, 1995년  
동 대학원 화학공학과 졸업(공학석  
사), 현재 대성산소(주) 초저온연구  
소 주임연구원 및 한양대학교 화학공  
학과 박사과정



#### 이성철(李晟澈)

1958년 1월 22일생, 1981년 한양  
대 화학공학과 졸업, 1984년 Univ.  
of Iowa 화학공학과 졸업(공학석  
사), 1987년 Brigham Young  
Univ. 화학공학과 졸업(공학박사),  
현재 한양대학교 화학공학과 부교수