

초저온 공기분리장치의 설계

문홍만, 용평순
대성산소(주) 초저온연구소

1. 서론

과학기술의 발전 추이를 살펴볼 때 석탄이나 금속과 같은 고체중심의 기술시대에서, 석유와 같은 액체중심의 기술시대를 거쳐, 이제는 가스가 기술의 중심에 서는 가스기술시대로 접어들고 있다. 가스가 산업에서 차지하는 비중이 커짐에 따라 가스를 원료로 하여 보다 많은 부가가치를 창출하려는 산업이 앞으로 점점 더 많이 생길 것으로 예상된다. 초저온 공기분리장치는 약 100년 전에 개발된 가스분리장치이나 고압, 저온, 액화, 단열, 정제등의 공정을 포함하고 있어서 초저온이 수반되는 가스공정을 이해

하는데 있어서 좋은 모델이 될 수 있다. 본고에서는 초저온 공기분리 플랜트를 설계하는 기본적인 과정을 통하여 저온액화를 응용하는 가스플랜트의 공정특성을 살펴보고자 한다.

2. 설계기본

초저온 공기분리장치는 공기를 원료로 하여 공기의 주성분인 질소, 산소, 아르곤 등의 가스를 분리해 내는 장치다. 장치의 구성은 크게 나누어 상온부와 저온부로 구성되어 상온부에서는 공기를 압축시키는 압축기, 수분과 이산화탄소를 제거하는 흡착탑 등이 있고, 저온부에서는 열교환기, 팽창터

어빈, 증류탑, 액화설비 등으로 구성되어 있다(그림1). 공기분리장치는 공기가 원료이기 때문에 원료에 드는 비용은 전혀 없으나 운전에 소요되는 에너지를 전적으로 전기에 의존하므로 많은 전기에너지가 소요된다.

그리고 공기를 액화, 증류하기 위한 증류탑은 -180°C 전후의 온도에서 운전되기 때문에 저온부의 모든 설비는 Cold Box라는 단열장치 내부에 설치된다. 초저온 공기분리장치는 장치산업의 특성상 초기 시설투자비가 많이 들고, 공정설계와 장치제작이 얼마나 효율적인가에 따라서 운전비용에 많은 차이가 생긴다. 따라서 장치의



문홍만
 ■ 1960년 생
 ■ 일본 Nihon University (공학박사)
 ■ 대성산소(주) 초저온연구소 책임연구원



용평순
 ■ 1967년 생
 ■ 강원대학교(석사)
 ■ 대성산소(주) 초저온연구소 연구원

로 논하면 다음과 같다.

3-1 물성계산

가스의 물성계산은 그 정밀성에 따라 공정설계의 성패가 판가름난다. 특히 가스 플랜트에서는 가스가 상변화를 포함하여 넓은 온도와 압력범위에서 성질이 변화하며, 가스의 특성상 적은 열량변화에 따라서 온도와 압력의 변동폭도 커지기 때문에 엄밀한 물성계산이 무엇보다 중요하다. 가스의 밀도계산에 많이 쓰이는 식으로는 $PV=ZRT$ 로 표현되는 기체 방정식이 있다. 상온, 상압에서는 $Z=1$ 로 사용해도 무방하나 저온, 고압에서는 $Z \neq 1$ 이므로 정확한 계산을 위해서는 상태 방정식을 많이 이용한다. 공업용 가스의 물성계산에는 BWR식, SRK식, Peng-Robinson식 등이 주로 사용되고 있으나 BWR식이 다른 식에 비하여

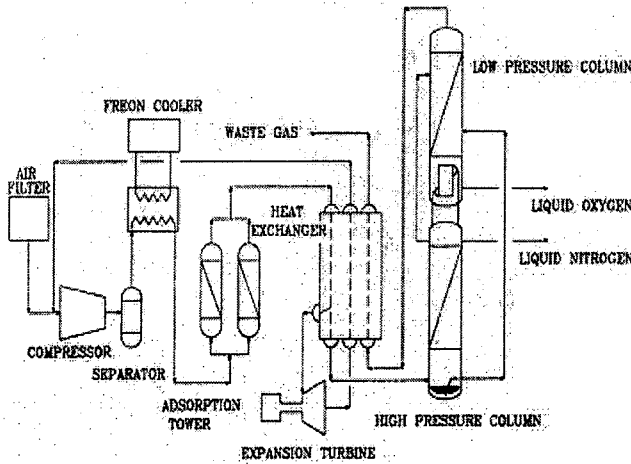


그림 1. 초저온 공기 분리장치의 개략도

초기설계는 매우 중요하다.

장치의 설계에 앞서서 가장 먼저 수행하는 작업은 설계기본(Design Basis)으로 가스의 수요자와 함께 장치의 가스 생산조건을 결정하는 일이다.

이때 요구되는 사항으로는 가스의 종류(산소, 질소, 아르곤), 상태(액체, 기체), 사용압력, 유량, 순도 등이 있으며 이러한 기본사항에 맞추어 플랜트의 규모나 형식을 결정하게 된다. 이외에 고려할 사항은 대기의 온도와 습도조건, 전기나 냉각수 등의 유틸리티 조건, 지형조건, 제조원가, 관련법규 등이 있고 이런 모든 사항이 결정된 후 공기분리 플랜트의 공정설계에 착수하게 된다.

다음의 표1은 질소전용 플랜트의 설계기본의 한 예를 나타내고 있다.

3. 기본설계

설계기본을 토대로 장치의 기본설계에 착수하게 된다. 기본설계의 순서는 먼저 가스의 물성계산식을 정리하고 공정구성을 확정하고 이 때의 물질수지와 에너지수지를 계산하여 각 부분별로 온도, 압력, 유량, 엔탈피를 구하여 공정설계도를 작성하게 된다. 이를 구체적으

1. 장치의 형식	공기를 액화, 증류에 의해 분리
2. 원료공기의 상태	- 온도 : 30℃ (최고 36.4℃, 최저 -12.6℃) - 압력 : 1.013 bar - 습도 : 80 % R.H
3. 공기의 조성	질소 78.09% 산소 20.94% 아르곤 0.93% 이산화탄소 0.033% 기타성분 미량
4. 생산량	질소가스 2,500 Nm ³ /h 액화질소 100 Nm ³ /h
5. 순도	산소 3 ppm 이하 수분 1 ppm 이하
6. 제품입력	5.3 kg/cm ² .G 이상

표 1. 질소생산 플랜트의 설계기본

1.평형물성	- 물리적 성질 : PVT성질(밀도, 비용적, 압축계수, 압축율, 열팽창율), 임계성질, 융점, 비점, - 열역학적 성질: 엔탈피, 엔트로피, 비열, 줄-끓음계수 - 상평형 성질 : 증기압, 퓨가시티 계수, 용해도, 기액평형 잠열, 표면장력
2.비평형물성	- 이동성질 : 점도, 열전도도

표 2. 플랜트 설계에 필요한 가스물성

비교적 정확한 물성치를 예측하고 있다. 그러나 이러한 상태방정식도 넓은 온도, 압력 범위의 물성계산을 수행함에 따라 특정부분의 물성계산에서 오차가 발생하는 경우가 생기게 되므로 가스 플랜트를 설계하는 회사마다 자기 자신들의 고유한 계산방식을 개발하여 설계에 사용하고 있다. 가스플랜트 설계에서 필요로 하는 중요 물성은 다음의 표2와 같다.

수용하며, 새로이 개발된 요소 기기의 특성을 최대한으로 이용하고, 운전효율과 장치비 등을 고려하여 최적의 플랜트가 되도록 구성을 한다. 가스의 액화가 이루어지는 플랜트에서는 액화에 소요되는 에너지를 거의 전력에 의존하게 되므로 액화 에너지가 최소가 되도록 에너지 회수에 중점을 두어 공정 구성을 한다.

3-2 공정구성

공정설계(Process Design)의 첫 단계로 설계기본에 따라 목표로 하는 가스의 생산이 가능하도록 공정도를 구성하는 작업이 수행된다. 여기서 논하는 공정설계는 도면으로 나타낼 수 있는 좁은 의미의 설계를 뜻하는 것으로 경제성 검토 등은 생략한다.

실제로는 경제성 검토가 수반되어 공정설계와 경제성 검토가 반복되어 수행되게 된다. 공정구성에는 기존의 플랜트를 참고로 하여 공정상의 문제점을 개선하고 수요자의 요구를

3-3 공정설계

기본적인 공정구성이 끝나면 목표로 하는 가스생산이 이루어지도록 공정구성의 각 요소별로 온도, 유량, 압력 등을 기입하는 PFD(Process Flow Diagram)를 작성하게 된다. PFD 작성을 위해서는 전 공정에 걸친 물질수지와 에너지수지를 계산하는 공정설계 계산을 실시하게 된다.

플랜트의 공정설계에 있어서는 설계의 기준이 되는 요소는 반드시 존재한다. 초저온 공기분리장치의 경우에는 공기분리에 필요한 거의 대부분의 에너지가 공기압축기를 통해

공급되므로 설계의 초점은 어떻게 압축기의 동력을 최소로 하느냐에 달려있다. 이를 위해서 압축기의 토출압력을 최대한 낮게 운전하는 것이 바람직하다. 압축기 토출부의 압력설정은 폐가스의 배출압력과 제품가스의 압력을 기준으로 각 기기 및 배관의 압력손실을 고려하여 역산하여 구한다.

한편 공기분리와 같은 초저온 증류에서는 탑상부에 초저온 가스가 모이기 때문에 이를 어떻게 액화하여 환류시키느냐가 중요한 과제이다. 공기분리의 경우에는 탑 상부에 질소가 모이기 때문에 이를 응축시키기에는 질소보다 더 낮은 온도의 냉매가 필요하다. 질소보다 더 온도가 낮은 냉매로는 액화된 헬륨이나 수소, 혹은 네온과 같은 희가스가 있으나 이것들은 경제성 문제로 인해 사용하지 않고 있으며, 실제로 온도를 낮추는 방법으로는 원료공기를 이용하여 증류탑과 응축기의 압력차에 의한 온도차를 만들어 쓰고 있다.

그림 2에서와 같이 산소와 질소의 혼합물은 압력이 높아질수록 비등점이 상승하므로, 같은 원료가스를 이용하여 압력차이에 의한 온도변화로 열교환이 가능하게 된다. 이러한 방법은 공기분리 이외에도 기타 저온가스 분리공정에서 많이 사용되는 방법이다.

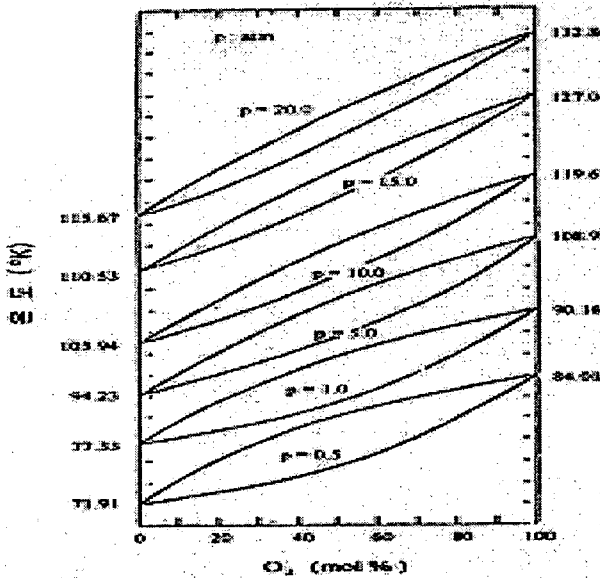


그림 2. 산소(1) ~ 질소(2)의 기액평형곡선

증류탑의 공정계산은 전체 공정계산의 핵심이 되기 때문에 증류조건이 만족되도록 전체 공정계산과 함께 이루어지게 되는데 계산결과로는 각 기기 입출구의 온도, 압력, 유량, 밀도, 조성, 엔탈피, 엔트로피 값과 증류탑 내의 이론단수가 얻어진다.

4. 상세설계

4-1 배관

배관은 유체를 일정시간 내에 한 기기에서 다른 기기로 이송하는 것을 목적으로 한다. 배관에 소요되는 비용이 전 플랜트 건설비의 1/3을 차지하는 경우가 있으며 배관설계는 설치비, 운전비, 전력비 등에 직접적인 영향을 미친다. 배관설계의 기본인 방법은 관내 유속

의 경제적인 표준치를 정하고, 관경을 결정하고, 압력손실을 허용치 내로 되게 하며, 배관의 길이를 최소로 하는 것이다. 그러나 저온 가스배관에서는 배관의 열용력을 우선적으로 고려하여 설계해야 하기 때문에 1자나 2자 형태로 배관의 경로를 돌리거나 주름관을 사용하여 열용력을 흡수하는 방법을 사용한다. 저온에서 재질의 수축율은 20°C를 기준으로 할 때 질소액화온도인 -196°C에서 스테인레스틸은 3.2mm/m, 알루미늄은 3.9mm/m, 청동은 3.3mm/m가 된다. 그러므로 길이 10m의 스테인레스틸 강관은 질소액화온도에서 32mm가 수축되는 셈이다. 탄소강 강관의

경우는 보통 상온에서만 사용하고 저온에서는 사용하지 않는다.

배관설계에서 유속은 관경을 결정짓는 중요 요인이므로 적당한 유속 결정은 공정의 안정성과 함께 경제성 검토에서 중요한 사안이다. 일반적으로 관경 선정에서 액체는 유속을, 가스는 유속보다 압력손실을 중요시한다. 그러나 같은 가스 배관일지라도 산소를 사용하는 경우에는 관 재질에 따라서 유속이 너무 빠르거나 압력이 급격히 증가하면 배관 전체가 순식간에 연소하는 사고가 생길 수 있다.

기체산소를 공급하는 경우 동관은 유속과 무관하게 사용할 수 있으나 관의 연소를 방지하기 위하여 스테인레스강관은 최대 60m/sec, 탄소강관은 25m/sec 이하의 유속을 유지해야 한다. 다음의 표3은 관 재질 중에서 산소와 강한 순서대로 표시한 것이다. 액체 산소의 경우에는 표4에 관 직

금속	비금속
Copper	PTFE(Tefluon, Fluon) Kel-F Viton Neoprene Buna N Polythene Nylon Natural rubber
Bronze	
Brass	
Nickel	
Monel	
Carbon steel	
Stainless steel	
Zinc	
Aluminium	

표 3. 산소에 안전한 재질의 순서

관 직경(mm)	20	25	40	50	75	100	150	200	250
유속(m/sec)	1.6	1.7	2.0	2.1	2.4	2.6	3.0	3.2	3.6

표 4. 액체산소의 경제적 유속

경에 해당되는 경제적인 유속을 나타내고 있다.

단 이때의 물성은 액화가스에 있어서 대기압하의 비점을 기준으로 하고 있다. 그러나 펌프의 입구나 Cold Box 내부와 같은 경우는 안전성을 고려해 이보다 적은 유속을 취하는 것이 보통이다. 그리고 질소, 아르곤의 액체배관 압력손실은 액체산소의 압력손실을 기준으로 밀도에 비례하여 구할 수 있다. 한편 저온배관의 설계시에는 이중금속의 용접문제가 종종 발생한다.

일반적으로 열교환기는 알루미늄이나 동으로 만들어지나 배관재질은 스테인레스틸일 경우가 많기 때문에 서로 용접이 되지 않는다. 이런 경우에는

서로 다른 종류의 금속판을 폭약에 의하거나 마찰에 의하여 결합시킨 후 플랜지 형태로 가공하여 사용하는 방법이 있다. 표5는 현재 시판되고 있는 이중금속판의 조합을 나타내고 있다.

4-2 증류탑

공기분리장치에서 증류탑은 가장 핵심적인 장치로 특히 증류탑 내부에 장착되는 충전물은 장치의 성능을 결정적으로 좌우한다. 공기분리장치에서 주로 사용되는 충전물은 sieve tray와 structure packing이다.

공기분리장치의 sieve tray은 0.5~1mm 두께의 알루미늄 다공판으로, 증기는 다공판을 통과하여 그 위로 흐르고 있는 액체와 접촉이 이루어진다. 이

때 비점차이에 의하여 가벼운 증기는 액체를 통과하여 윗단으로 이동하고 비점이 높은 성분은 액체와 함께 하강관을 타고 아래 단으로 흐른다. Tray 각단에서는 십자류 흐름이 형성되며 액체하강 속도와 증기의 상승속도에 따라 현상이 많이 달라지므로 sieve tray의 기본설계를 위해서는 entrainment나 flooding, weeping의 영향을 고려해야 한다.

Tray의 설계순서는 탑내기 액유량과 함께 밀도, 점도, 표면장력을 구하고 각 단의 간격을 가정하여 유효단면적과 함께 탑의 지름을 구한다. 그리고 이때의 %flooding이 70~80% 되는지를 확인하여 이보다 높은 수치가 나오면 tray의 직경을 크게 하거나 단의 높이를 높인다.

보통 sieve tray의 하강관은 탑면적의 10~15%를 차지하며, 기포를 발생시키는 유효단면적은 70~80% 정도이다. 공기분리장치는 불순물의 순도가 ppm 수준을 유지해야 하므로 증류탑마다 tray가 5~12 cm 간격으로 60~140장 가량 장착된다. Tray의 제작은 플랜트 제조회사마다 독자 모델을 개발하여 사용하고 있으며 성능향상을 위하여 여러 형태로 변형된 sieve tray를 제작하고 있다(그림 3).

Structure packing은 1960년

Steel	○											
Alloy Steel	○	○										
Stainless Steel	○	○	○									
Al	○	○	○	○								
Cu & Cu Alloy	○	○	○	○	○							
Ni Alloy	○	○	○	○	○	○						
Ti	○		○	○	○	○	○					
Ag	○		○	○	○			○	○			
Au	○		○							○		
Pt											○	
Mg	○	○		○			○	○				○
	Steel	Alloy Steel	Stainless Steel	Al	Cu & Cu Alloy	Ni Alloy	Ti	Ag	Au	Pt	Mg	

표 5. 제조가능한 이중금속판의 조합표

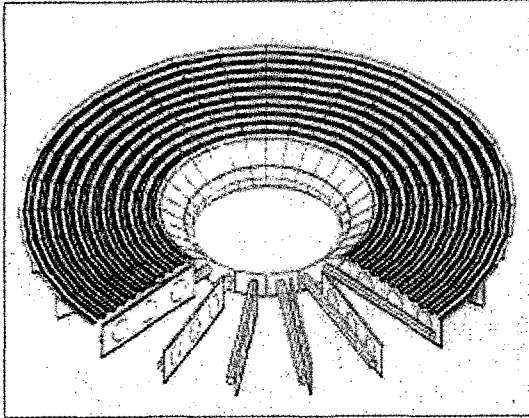


그림 3. 공기분리장치용 Sieve Tray

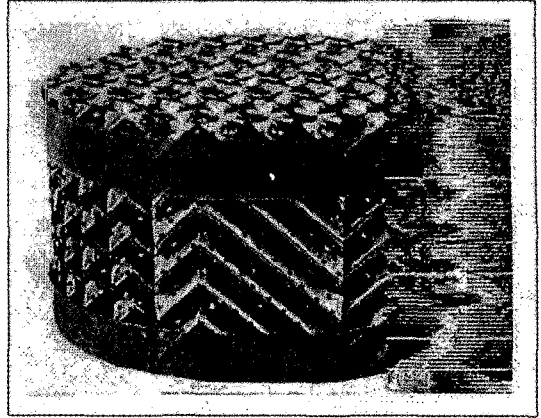


그림 4. Structure Packing

경수와 중수를 분리하기 위해서 개발된 이래 석유화학중심으로 사용이 확대되어 왔으나 공기분리에 본격적으로 사용되기 시작한 것은 1990년대에 들어서면서 부터이다.

Structure packing은 tray에 비해 탑내의 압력손실이 적어 운전비를 줄일 수 있다는 것이 가장 큰 장점이다. 압력손실은 tray방식이 tray 1장당의 압력손실이 3~7.5mmHg 임에 비해 structure packing은 0.4~0.9 mmHg로 tray 방식에 비하여 1/10 정도로 작다. 또한 운전범위가 넓고, hold-up이 작아서 초기안정이 빠르며 탑의 직경이 작아지는 장점이 있다.

그러나 가격이 비싸고 탑의 높이가 높아지며 고압탑에서는 tray 탑에 비하여 성능차이가 없다는 단점이 있다. 따라서 structure packing이 사용되는 부분은 주로 아르곤탑이나 저압

탑에 사용하며, 고압탑에서는 아직도 tray를 사용하거나 structure packing과 tray를 혼합하여 사용한다. 그림4는 structure packing을 나타내고 있다.

4-3 열교환기

공기분리에 사용하는 초저온 열교환기는 Brazed Al-uminium Plate-Fin식으로, 그 구조는 그림 5과 같이 2장의 평판 사이에 주름핀을 끼우고 양 끝단에 sealing-bar를 대고 이것을

다층으로 쌓은 형태를 취하고 있다. 이것은 매우 열교환 효율이 좋아서 동일 용적의 관형 열교환기에 비하여 수배에서 수십배의 전열면적을 갖고 있다. 재질은 알루미늄을 사용하고 있으며 조립 방법에 따라서 여러 유체가 하나의 열교환기로 열교환이 가능하다.

공기분리장치에서는 이 열교환기를 사용하여 열교환기 내부의 유체간 최소온도차를 1℃~4℃ 정도로 매우 좁게 설정하고 있다.

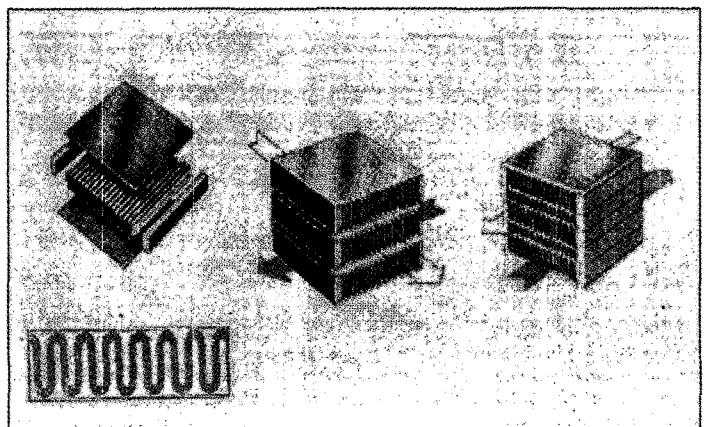


그림 5. Plate-Fin 형 열교환기

4-4 흡착탑

공기중의 불순물은 filter를 통해 1차로 걸러지고 수분과 이산화탄소는 M/S Tower라고 하는 흡착탑을 통해 제거된다. 흡착탑의 구성은 하부에 Activated Alumina가 장착되어 수분을 흡수하고 상부에 있는 Molecular Sieves가 이산화탄소를 제거하게 된다. 운전은 두개의 탑을 사용하여 한쪽에 불순물이 흡착될 때 다른 쪽은 탈착하게 된다. 흡착과 탈착은 보통 온도를 이용하는 TSA (Thermal Swing Adsorption) 방식을 주로 사용한다. 흡착탑의 설계는 원료공기중에 포함되어 있는 수분과 이산화탄소량을 근거로 흡착제 양을 결정하고 운전시간에 근거한 흡탈착 유량을 설정한 후 탈착시 필요한 열량이 히터를 통해 공급되도록 히터의 용량을 계산한다.

4-5 팽창터어빈

팽창터어빈은 Cold Box에서 필요한 한랭을 공급하는 장치로 가스의 등엔트로피 팽창을 이용한다. 팽창터어빈의 임펠러는 10,000~30,000 rpm의 속도로 고속회전하기 때문에 팽창터어빈 내에서온도 하강으로 인한 액적의 발생은 장치에 치명적인 손상을 미치게 된다. 설계시에는 정확한 엔트로피

계산을 통하여 가스의 토출온도를 계산해야 한다.

5. Cold Box 설계

Cold Box는 내부에 장착되어 있는 초저온 장치의 한랭이 외부로 누출되지 못하도록 하는 단열기능과 함께 각종 장치 및 배관을 지지하는 두 가지의 역할을 하게 된다. 단열과 지지는 서로 상반되는 성격을 갖고 있기 때문에 단열을 강조하면 지지가 약해지고 지지를 강조하면 단열이 불충분해지는 경향이 있다.

Cold Box 내부는 외부와의 온도차이가 200℃이상 생기므로 운전중에 모든 장치에 수축이 일어난다. 이때의 응력을 흡수하기 위해서 증류탑을 비롯한 모든 장치는 Cold Box내에서 하나의 고정점을 갖게되고 이곳을 중심으로 수축이 집중된다. 만일 장치의 지지를 강화하기 위하여 서로 다른 고정

점을 갖는 서포트를 보강하면 서포트를 통하여 단열이 파괴되거나 초저온 운전시 장치의 수축으로 인해 서포트의 절단 및 장치의 훼손이 생길 수 있다.

한편 Cold Box의 단열을 위해 주로 쓰이는 방법으로 대형 장치에서는 분말단열을, 소형장치에서는 분말진공단열을 사용한다. 다음의 그림 6은 31℃와 -196℃사이에서 perlite를 사용한 분말단열의 진공에 따른 열전도도 변화를 보여주고 있다. 분말진공단열을 사용하는 Cold Box에서는 진공도를 10-2 torr 이하로 유지한다.

6. 결론

초저온 공기분리장치의 설계에 대하여 극히 일부분만 소개하였다. 최근에는 공기분리기술로 PSA(Pressure Swing Adsorption)나 막분리 기술이 등장하였으나 아직도 대용량,

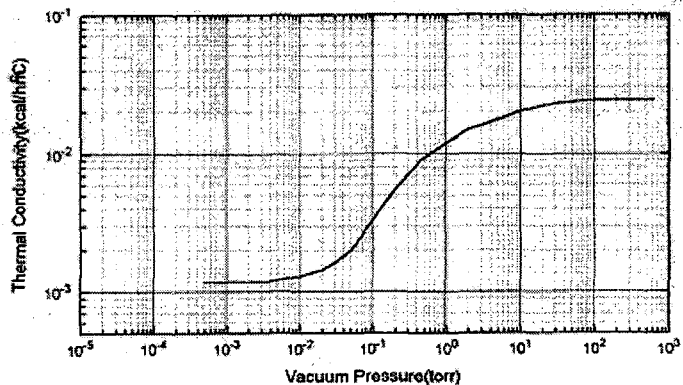


그림 6. Perlite진공에서의 열전도도

고순도에는 초저온 분리가 유리하다.

가스를 액화, 분리시키는 공정은 공기 이외에도 수소, 헬륨이나 천연가스, N₂O, SF₆ 등과 같은 가스분리에도 이용된다. 이러한 가스분리를 위한 장치 설계에는 이론으로 규명되는 기술은 물론이고 교과서적 설명이 어려운 많은 부분의 노하우가 요구된다.

또한 장치산업의 특성상 한 부분의 지식만으로는 전체를 설계할 수 없고 여러 부분의 전문지식이 어우러져야만 하나의 장치가 제대로 완성될 수 있다. 국내의 장치산업에 대한 기본기술이 취약하다는 사실은 어제, 오늘 지적되어 온 것이 아니다. 더욱이 초저온 가스설비 분야의 기술은 선진국과 비교할 수 없을 정도로 미약하다. 우주, 항공, 원자력, 의료, 국방 분야에 이르기까지 다양한 첨단분야가 초저온 가스기술과 연관이 있다는 사실을 고려해 볼 때 선진국과의 기술격차에 좁히기 위해서 초저온 가스분야에 좀더 적극적인 관심과 과감한 투자가 있어야 할 것이다.

참고문헌

1. 문홍만, 박두선, 손무룡, “저온공기분리기술”, 화학공업과 기술, 11(3), 177(1993)
2. 문홍만, 박두선, 손무룡, “공기분리 기술과 전망”, 화학공업과 기술, 15(3), 177(1997)
3. 용평순, 문홍만, 손무룡, 이성철, “질소, 산소, 아르곤에 대한 상태방정식의 신뢰도”, 한국가스학회지, 1(1), 41(1997).
4. 井出 進, “規則充填塔の設計と操作におけるポイント”, 分離技術, 25(6), 17(1995)
5. Hands, B.A., Cryogenic Engineering, Academic Press, (1986)