

고압 상황에서 작동되는 극저온 기액 분리기와 액체 계면 측정기의 개발

Development of cryogenic liquid-vapor separator and liquid-level meter operating under high pressure condition

이천규¹, 황규완^{1,*}, 정상권²

Cheonkyu Lee¹, Gyuwan Hwang^{1,*}, Sangkwon Jeong²

Abstract: In this study, the liquid-vapor (L-V) separator equipped with liquid-level meter is developed. In the developed L-V separator, the flange is designed to be attachable so that the separator can be flexibly applied under any cases where the volumetric capacity of L-V separator is varied by the system requirement. The leak-tightness between the attachable flange and the chamber is experimentally confirmed with the use of double groove indium wire sealing even under the high pressure up to 20 bar. In addition, the liquid-level meter is designed and fabricated to figure out the inner state of L-V separator. It consists with 19 carbon composition resistors in series. All resistors are separately calibrated in the temperature range from 77 K to 200 K. The performance of the L-V separator and the liquid-level meter is investigated with experimental tests, and the result is presented in this paper.

Key Words: liquid-vapor separator, level meter.

1. 서 론

기액 분리기는 기상과 액상을 분리하는 실험기구로 가스 액화 분리 사이클의 정제 공정 (distillation process) 이나 냉동 공정 (refrigeration process) 외에도 혼합 냉매 JT 냉동기의 상 분리 과정 등 다양한 분야에 걸쳐 사용된다. 공정 과정 중 기액 분리기는 주로 혼합물의 분리와 액상의 회수를 위해 사용된다 [1-3].

기존의 기액 분리기는 고압 및 극저온 상황에서 작동되는 경우, 그 기밀성을 유지하기 위해 완전히 밀폐된 구조로 제작되는 것이 대부분이다. 이러한 경우 그 내부 상황을 확인하기가 쉽지 않기 때문에 시스템의 운전 상황을 파악하기가 어렵다. 반면, 대기압 또는 저압 상황에서 작동되는 기액 분리기는 그 내부 상황을 확인하기 비교적 쉽지만 고압 상황에서 기밀성을 유지하기 어려워 적용할 수 없다는 단점이 있다. 본 논문

에서는 고압의 극저온 유체를 다루는 상황에 적용 가능한 기액 분리기의 개발에 대한 연구를 서술하였다. 본 연구에서 고안된 기액 분리기는 다양한 실험 상황에 적용할 수 있도록 탈부착이 가능한 형태로 제작하여 시스템의 적용 범위에 있어 유연성을 갖도록 하였으며, 내부의 상황을 쉽게 파악하기 위해 개발된 액체 계면 측정기를 설치하여 측정되는 액상의 양을 간접적으로 계량할 수 있도록 하였다.

액상의 양을 가늠하기 위해 사용되는 극저온 액체 계면 측정기 (liquid level meter)는 정전형 (capacitance type) 이 주로 많이 사용되며, 상황에 따라 초전도체 (superconductor) 나 광섬유 (optical fiber), 로드셀 (load cell) 등 매우 다양한 방법을 적용할 수 있다 [3-6]. 본 연구에서는 가압된 액체 질소 온도 (77 K ~ 126 K) 범위에서 적용하고자 하는 극저온 액체 계면 측정기를 적용하고자 하였다. 다양한 극저온 액체 계면 측정기 중 가장 많이 사용되고 있는 상용 정전형 계면 측정기로 액체와 기체의 유전율의 차이를 이용하여 수위를 측정하도록 제작되어 있다. 하지만, 가격이 비싸고 기액 분리기 내부에서 측정되는 액체 계면 신호를 외부에 전달하기 위한 피드 쓰루 (feedthrough) 가 극저온 환경에서 사용할 용도로 제작된 것이 아니기 때문에 그 신뢰성 및 안정성을 보장할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 저항형 (resistance type) 계면 측정기를 선정하여 직접 제작하였다. 저항이 온도에 따라 바뀌는 성질을 이용하여 액상에 잠긴 저항과 기상에 노출된 저항의 차이를 정확히 읽어낼 수 있다면 계면을 손쉽게 측정할 수 있다. 본 연구에서 개발된 저항형 계면 측정기의 경우 상 분리기 내부에서 측정된 신호를 외부로 보내는 데에 있어 극저온 피드 쓰루를 사용하여 극저온 환경에서도 신뢰도가 높은 신호를 얻을 수 있다는 장점 외에도 가격이 싼 저항을 사용하여 쉽게 제작할 수 있다는 이점이 있다.

2. 탈부착식 기액 분리기

2.1. 기액 분리기의 구성 및 개략

제작된 기액 분리기의 개략도가 Fig. 1 에 나타나 있다. 유입된 기액 혼합물은 황동 소결 필터 (Taylor-Wharton) 를 통해 1차적으로 기액 분리된다. 사용된 황동 소결 필터는 액체 질소의 비산을 막기 위해 표면 장력을 이용해 액상을 포집하는 장치이다. 황동 소결 필터에서 1차적으로 분리된 액상과 분리되지 않고 비산되는 액상은 모두 중력에 의해 용기 하단에 분리되어 쌓이고, 이로써 완전히 분리된 액상은 용기의 하단부까지 길게 이어진 액상 배출관을 통해 밖으로 배출된다. 기상 배출관은 상부의 플랜지에 용접되

¹학생회원 : 한국과학기술원 기계공학전공

²정 회 원 : 한국과학기술원 기계공학전공 교수

*교신저자 : hyuwan@kaist.ac.kr

원고접수 : 2010년 10월 08일

심사완료 : 2011년 03월 18일

게재확정 : 2011년 03월 18일

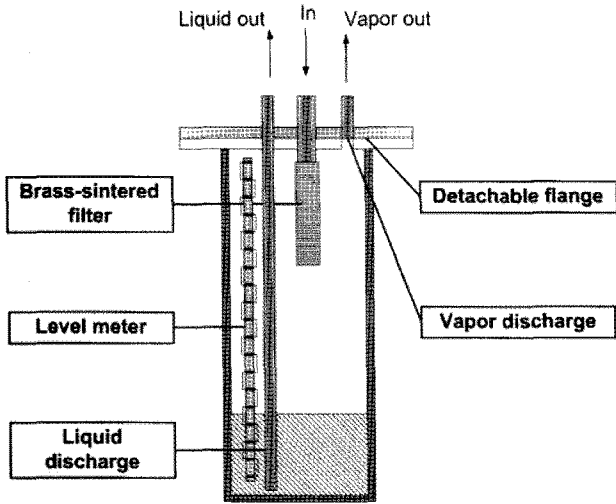


Fig. 1. Schematic diagram of cryogenic demountable liquid-vapor separator and level meter.

어 액적의 유입 없이 기상만 외부로 방출될 수 있도록 구성되어 있다. 이 때, 하단부에 액상이 과다하게 축적될 경우에는 황동 소결 필터에서 기액 분리가 제대로 이루어지지 못할 뿐 아니라, 기상 배출관으로 액적이 유입되어 기액 분리가 제대로 이루어지지 못하는 원인이 된다. 이러한 문제가 발생하지 않기 위해서는 하단 용기의 크기를 적절히 크게 설계하는 것이 매우 중요하다. 본 연구에서는 기액 분리기의 플랜지와 하단 용기를 쉽게 탈부착할 수 있는 구조로 설계하여 공정에서 요구되는 유량에 따라 크기나 형상이 다른 용기를 플랜지의 수정 없이 유연하게 적용할 수 있도록 하였다. 기존의 밀폐형 기액 분리기에서는 고압 상황에서의 기밀성 때문에 플랜지와 하단 용기를 용접 또는 브레이징 등으로 반영구적 체결을 하고 사용하므로 하단 용기의 변경 시 기존의 플랜지를 재사용하기 어려운 반면, 본 연구에서 개발된 탈부착식 기액 분리는 하단 용기를 변경해도 기존에 제작된 플랜지를 쉽게 사용할 수 있다는 장점이 있다.

2.2. 탈부착식 기액 분리기의 제작 및 작동

일반적으로 밀폐형 기구를 탈부착이 가능한 형태로 제작하기 위해서는 오링이나 개스킷과 같은 밀봉 기구를 사용하여 구현할 수 있다. 하지만, 본 연구에서처럼 기구 전체가 고압 및 극저온 상황에 놓여 있는 경우에 적용할 수 있는 방법은 매우 제한적이다. 극저온, 고압 상황을 고려하여 금속 개스킷을 이용하는 경우에는 개스킷의 소재, 표면의 거칠기, 플랜지와 개스킷 사이의 마찰 등을 고려해야 한다[7]. 다양한 소재 중 인듐(indium)은 극저온으로의 온도 변화에서도 변형이 적으며, 무른 성질을 가지고 있어 표면과의 접촉성이 매우 좋아 극저온 상황에서 접촉 열저항을 줄이기 위해 많이 적용되는 소재이다. 와이어 형태로 가공된 인듐을 제작된 홈(groove)에 넣고 상하로 압력을 가하면 그 내부를 밀폐시킬 수 있다. 이 때, 고압 상황에서도 충분한 기밀성을 유지하기 위해서는 단일 홈으로 구성된 경우보다는 이중 홈으로 구성된 인듐 밀봉이 탁월한 성능을 보여 주었다. Fig. 2에는 실제로 제작된 용기의 도면과 그 입체도가 나타나 있다. 직경 76 mm로 제작된 플랜지에서 직경 46 mm, 52 mm에 깊이 0.5 mm의 홈을 가공하여 이중 인듐 밀폐를 실시하고 그 기밀성을 예비 실험에서 테스트하였다. 내부를 20 bar의 헬륨으로 충전한 상태에서 헬륨 누설 감지기

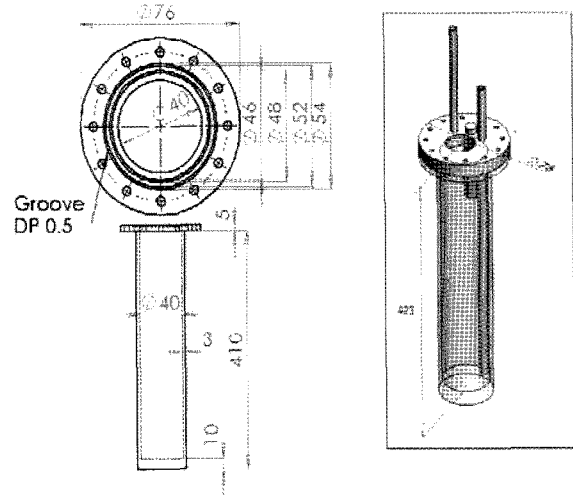


Fig. 2. Configuration of flange and 3-D diagram of LV separator.

(helium leak detector)로 누설되는 헬륨을 확인한 결과 대기에서의 헬륨 농도와 동일함을 확인할 수 있었다. 이는 내부의 헬륨이 전혀 외부로 누설되지 않았음을 뜻한다. 극저온 상황에서의 기밀성 유지 여부를 확인하기 위해 제작된 기액 분리기를 액체 질소에 담가서 냉각시킨 후, 기밀성을 테스트한 결과에서도 역시 누설을 찾을 수 없었다.

제작된 기액 분리기의 기액 분리 성능을 육안으로 확인해 보기 위해 진공 단열 용기(Dewar)에 넣은 상태에서 액체 질소를 주입해보았다. Fig. 3에서 보이는 바와 같이 황동 소결 필터에서 대부분의 액상이 포집되고 중력에 의해 용기의 하단부에 쌓인 후에 액상 배출구로 배출되며, 기상 배출구에서는 액적 없이 기상만 분리되는 것으로부터 황동 소결 필터 및 중력에 의한 기액 분리가 성공적으로 이루어짐을 확인할 수 있었다.

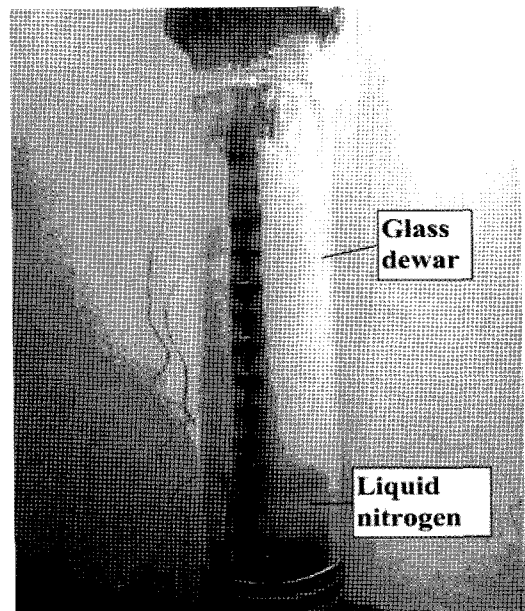


Fig. 3. Experimental test in liquid nitrogen.

3. 액체 계면 측정기

3.1. 저항형 액체 계면 측정기의 원리

밀폐된 기액 분리기는 앞에서 언급한 바와 같이 육안으로 실험기구 내부를 관측하기 매우 어렵기 때문에 내부 상황을 간접적으로 유추하기 위한 측정 기기가 필요하다. 본 연구에서 개발된 저항형 액체 계면 측정기는 내부 극저온 액체의 계면을 실시간으로 측정하여 내부 상황을 파악하기 위한 측정 기기로서, 극저온 상황에서 온도에 따른 저항 (resistivity)의 차이를 이용한다. 좀 더 자세히는 Fig. 4에 나타난 것처럼 길이 방향으로 다수 개의 탄소 저항들을 직렬로 배열하여 부착시킨 판을 액체의 일부에 잠기도록 하면, 액상부의 탄소 저항은 액체의 온도에, 기상부의 탄소 저항은 기체의 온도에 노출된다. 이 때, 적절한 단열과 함께 저항에 전류를 가하면 저항 소자에 발열이 발생하고, 이에 따라 기상에 노출된 저항들은 포화 온도보다 높은 온도에 해당되는 저항값을 가진다. 액상에 잠겨있는 저항들은 액체 질소의 충분한 열용량으로 온도 상승이 억제되어 포화 온도에 해당되는 저항값을 가지게 되고, 저항값은 가해진 전류와 측정된 전압을 통해 얻을 수 있다 (4선식 저항 측정법, four-wire method). 최종적으로 직렬로 연결된 총 저항값과 기액 분리기 내부의 압력을 측정하여 얻어진 포화온도를 가지고 액체에 잠겨있는 저항의 개수를 추정할 수 있으며 이로 부터 액체 계면 높이를 알 수 있다. 저항들은 같은 포화 온도에 대해서도 서로 다른 저항값을 가질 수 있으므로 내부 액체 계면의 높이의 정확성과 신뢰성을 높이기 위해서는 온도에 따른 각 저항값의 보정이 필수적이며 이에 탄소 저항의 보정 실험을 수행하였다.

3.2. 탄소 저항의 보정

온도에 따른 저항값을 측정하기 위한 실험은 Fig. 5와 같은 절차를 통해 수행하였다. 실리콘 다이오드 온도 센서 (Lakeshore, DT-670SD)를 탄소 저항 (Allen-Bradley, carbon composition resistor)에 부착하여 저항의 온도를 읽을 수 있도록 하고, 액체 질소를 사용하여 온도 변화를 주면서 온도에 따른 탄소 저항의 저항값을 측정하였다. 사용된 실리콘 다이오드 센서는 적용 온도 범위 내에서 ± 0.5 K의 오차를 가지고 있으며, 탄소 저항과 온도 센서는 열전도도가 높은 그리스 (Apiezon N grease)를 사용해서 부착하여, 열 접촉 저항이 최소화된 상태에서 정확한 탄소 저항의 온도를 측정할 수 있도록 하였다. 단열된 액체 질소 극저온

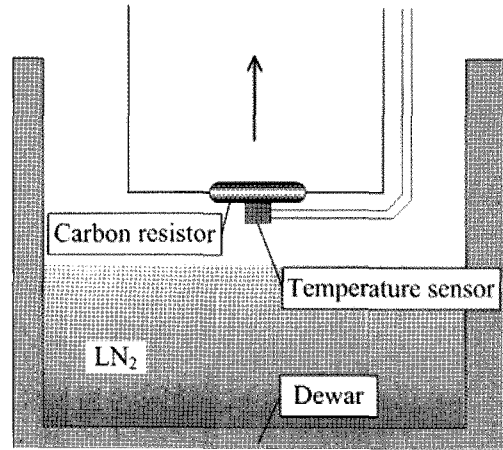


Fig. 5. Calibration procedure of carbon resistor.

용기에 부착된 온도 센서와 탄소 저항을 함께 넣어서 액체 질소에 잠긴 상태에서의 온도와 저항값을 측정한 후, 조금씩 들어 올려서 대기에 노출된 상태에서 온도와 저항값을 측정하였다. 실험 상황에서 측정된 온도는 대기압 액체 질소의 포화온도 (77 K)에서부터 약 200 K까지로, 측정 과정에서 온도와 저항값이 충분히 안정 상태에 도달되었다고 판단된 경우의 온도 및 저항값만을 사용하여 보정을 실시하였다. 액체 계면 측정기에 사용된 모든 탄소 저항에 대해 개별적으로 보정을 실시하였으며, 그 중 3개 탄소 저항 (CR6, CR7, CR8)의 온도-저항값의 보정 결과가 Fig. 6에 나타나 있다. 각 탄소 저항들은 높은 온도에서 낮은 저항값을 가지고 있으며, 그 변화 양상은 비슷하지만 절대값은 저항마다 모두 다르다는 것을 알 수 있다. 또한, 150 K 이상의 높은 온도에서는 온도에 따른 저항의 변화가 적어진다. 이러한 특징은 기체부에 노출된 저항들이 가해진 전류에 따른 발열과 단열 설계에 의해 액체부의 저항들보다 높은 온도에 노출될 경우 그 온도에 관계없이 거의 같은 저항값을 가지게 된다는 점에서 계면 측정기의 개발에 유리한 장점을 가진다.

3.3. 탄소 저항의 단열 설계

앞에서 언급한 바와 같이 탄소 저항에 적절한 단열과 발열 설계를 통해 기상에 노출되어 있는 탄소 저항들의 온도와 액상에 잠긴 탄소 저항들의 온도 차이를 더욱 크게 할 수 있다면 계면 측정의 정확도와 신뢰성

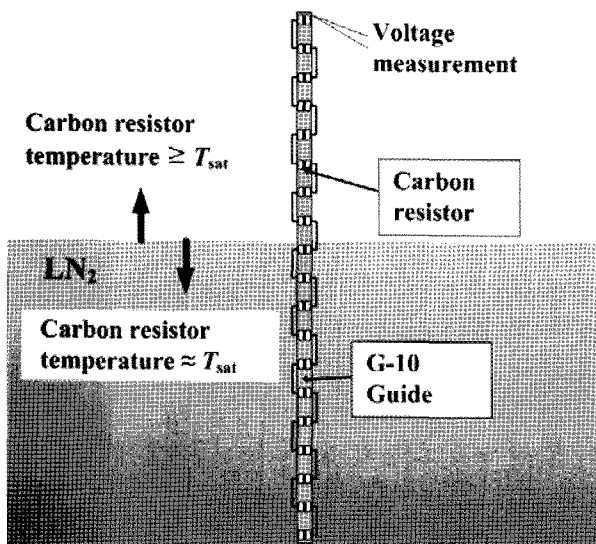


Fig. 4. Operating principle of liquid level meter.

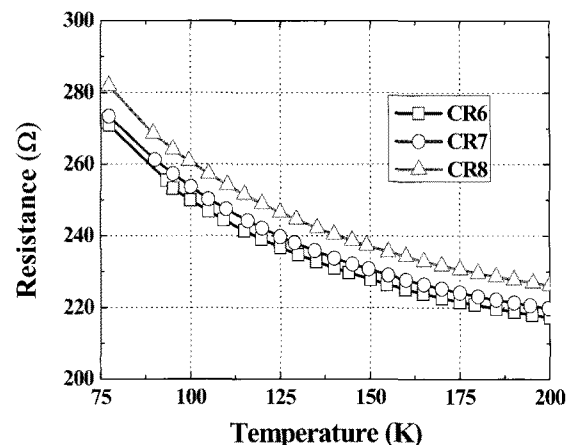


Fig. 6. Calibration results of carbon resistor.

은 더욱 높아진다. 열적 설계를 위해 기액 분리기의 내부 유동 상황을 정의해야 하는데, 실제로 기액 분리기 내부는 초기 냉각 시에 비등 열전달에 의해 매우 활발한 대류 현상이 발생하고, 냉각이 완료된 후 가압 시에는 내부 유동이 억제된 양상을 보이는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 기액 분리기 내부의 유동이 활발한 상태로 가정하고, 강제 대류 열전달식을 식 (1)과 같이 적용하였다 [8]. 이러한 가정은 결과적으로 보수적인 단열 설계를 가져오므로 실제 상황에서 저항의 단열 효과는 더 크다고 할 수 있다.

$$\bar{h} = \frac{k_f}{D} 0.193 Re_D^{0.618} Pr^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

(4000 < Re_D < 40000)

$$Re_D = \frac{VD}{\nu}$$

여기서 *k_f*는 유체의 열전도도, *D*는 탄소저항의 직경, *V*는 유체의 속도 (1 m/s로 가정), *ν*는 유체의 동적 점성도이다.

탄소저항의 자체 발열로 인한 열량은 다음 식 (2)와 같이 표현된다.

$$Q = I^2 R = \frac{\Delta T}{R_{th}} \quad (2)$$

$$R_{th} = \frac{\ln(1+t/r)}{k_{ins}A} + \frac{1}{hA}$$

*I*는 가하는 전류, *R*은 저항, ΔT 는 탄소 저항과 주변간의 총 온도차이, *R_{th}*는 열저항을 나타낸다. 열저항식에 나타난 *r*은 탄소 저항의 반지름, *A*는 탄소 저항의 표면적, *t*는 단열재의 두께, *k_{ins}*는 단열재의 열전도도를 나타낸다. 식 (2)에서 탄소 저항의 크기는 결정되어 있으므로 단열재의 두께의 계산이 가능하다.

3.4. 액체 계면 측정기의 구현

실험 상황에 사용할 액체 계면 측정기에는 17 mA의 전류가 가해진다. 이 전류량을 기준으로 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 약 0.55 mm의 테플론 수축 튜브를 단열재로 사용한 경우 (열전도도는 0.167 W/m·K), 약 35 K의 온도차를 구현할 수 있다. 제작된 탄소 저항의 구조는 Fig. 7에 나타내었다. 탄소 저항을 단열재로 완전히 밀폐하게 되면 액상에 잠겨 있는 탄소 저항도 단열되어 액상의 온도와 차이가 날 수 있으므로, 액체가 단열 구조 안쪽으로 흘러 들어갈 수 있도록 하였다.

탄소 저항이 부착되어 고정되는 판재는 축방향 열전달을 막기 위해 열전도도가 낮은 G-10 판으로 제작되었다. 또한, 판재는 ‘C’자 형태로 제작되어 계면 바로 위에 있는 탄소 저항이 비산되는 액체에 쉽게 노출되어 계면을 잘못 측정하는 일이 없도록 설계하였다. 제작된 계면 측정기는 황동 소결 필터의 반대쪽을 바라보도록 하여 유입되는 액체 질소의 비산에 저항이 노출되지 않도록 설치하였다. 제작된 계면 측정기가 기액 분리기의 플랜지에 설치된 모습이 Fig. 8에 나타나 있다. 제작된 액체 계면 측정기는 총 길이 380 mm에 19개의 탄소 저항들이 연결되어 약 20 mm의 분해능을 가진다. 탄소 저항간의 간격이 좁을수록 계면 측정기의 분해능 (resolution)은 높아지지만, 지나치게 간격이 좁은 경우에는 활발하게 이동하는 유체의 계면

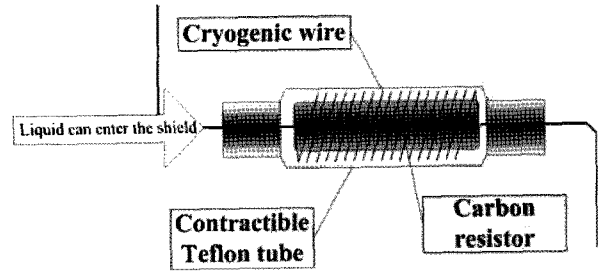


Fig. 7. Thermal insulation of carbon resistor.

이 오히려 신호의 진동을 가져와 측정에 어려움을 겪을 수 있다.

3.5. 액체 계면 측정기의 성능 실험

제작된 액체 계면 측정기는 Fig. 3에 보이는 바와 같은 액체 질소 용기에서 육안으로 그 수위를 판측하면서 그 신호를 측정하여 정상 작동하는 것을 확인하였다. 한편, 고압 상황에서는 내부의 압력 변화에 따라 유체의 포화 온도가 변하게 되고 이에 따라 온도에 따른 저항 값 또한 바뀌기 때문에 계면 측정기의 신호를 기액 분리기의 압력에 해당되는 포화 온도에 맞추어 변환하는 과정이 필요하다. 액체 계면 측정기의 신호 변환 곡선이 Fig. 9에 나타나 있다. 전압으로 표현되는 측정 신호와 액체 수위는 선형적인 관계로 표현되며, 계면의 수위가 낮아질수록 많은 저항이 높은 온도 (극저온 유체 기상의 온도)에 의해 낮은 저항 값을 가지게 되고, 압력이 높아질수록 포화 온도도 높아지므로 낮은 신호를 얻게 된다.

제작된 기액 분리기와 액체 계면 측정기가 특정 공정에 사용된 실험 결과의 일부가 Fig. 10에 나타나 있다. 수행된 공정은 15 bar로 선가압된 액체 질소 용기에서 배출되는 약 6 bar의 액체 질소를 상 분리하는 공정으로, Fig. 10에 나타난 바와 같이 기액 분리기 내부에 액체 질소가 충전되면서 저항이 하나씩 잠기고 이에 따라 전체 저항이 단계적으로 상승하는 과정을 명확하게 보이고 있다.

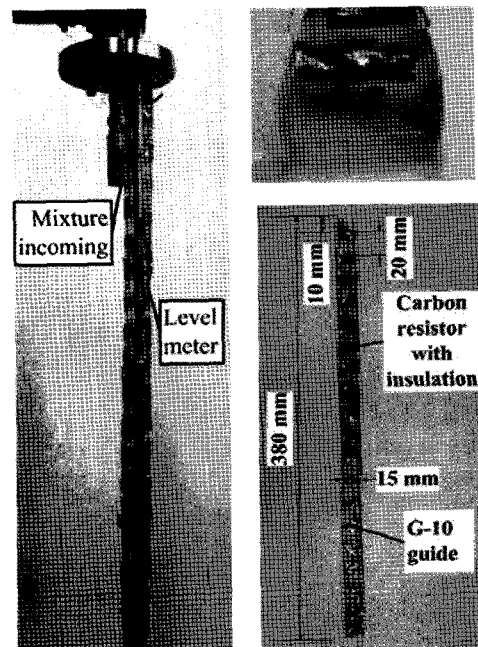


Fig. 8. Configuration and fabrication of level meter.

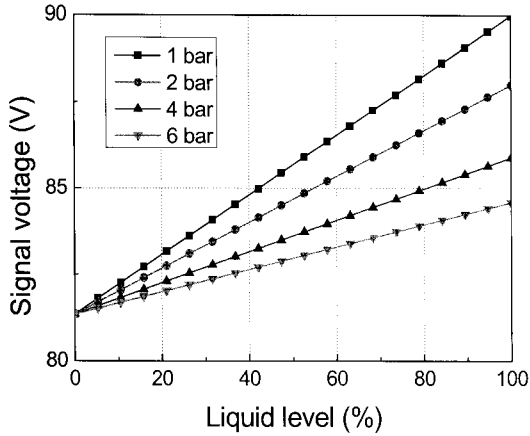


Fig. 9. Liquid level and level meter signal.

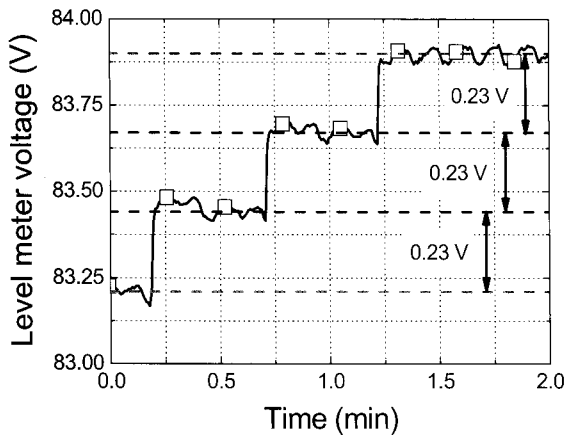


Fig. 10. Typical experimental result of liquid level meter.

4. 결 론

본 논문에서는 고압 상황에 적용할 수 있는 극저온 기액 분리를 설계 및 제작하였으며, 그 내부에 탄소 저항으로 제작한 극저온 액상 계면 측정기를 설치하여 내부 상황을 파악할 수 있도록 하였다. 제작된 기액 분리기에는 이중 인듐 밀폐를 이용하여 20 bar의 고압, 액체 질소 온도의 극저온 환경에서 뛰어난 기밀성을 보이며, 또한 탈부착이 가능한 형태로 제작되어 공정의 변화에도 유연하게 적용할 수 있도록 하였다. 내부 상황을 확인하기 위한 액체 계면 측정기로 탄소 저항을 사용하여 액체 계면 측정기를 개발하였으며, 제작된 측정 기기는 실험을 통해 내부 액상의 양을 정확하게 측정할 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2010-0018918).

참 고 문 헌

- [1] B.V. Elkonin, "Phase separator for liquid nitrogen supply lines", *Cryogenics*, 35, pp. 347-348, 1995.
- [2] A. Nakano, D. Petrac and C. Paine, "He II liquid/vapour phase separator for large dynamic range operation", *Cryogenics*, 36, pp. 823-828, 1996.
- [3] K. Kajikawa, K. Tomachi, N. Maema, M. Matsuo, S. Sato, K. Funaki, H. Kumakura, K. Tanaka, M. Okada, K. Nakamichi, Y. Kihara, T. Kamiya, I. Aoki, "Fundamental investigation of a superconducting level sensor for liquid hydrogen with MgB₂ wire", *Journal of Physics: Conference Series*, 97, 2008.
- [4] Katya E Romo-Medrano, Sergei N Khotiaintsev, "An optical-fibre refractometric liquid-level sensor for liquid nitrogen", *Measurement Science and Technology*, 17, pp. 998-1004, 2006.
- [5] Randall Barron, *Cryogenic Systems*, New York, McGRAW-HILL, pp 429-441, 1996.
- [6] Thomas M. Flynn, *Cryogenic Engineering*, New York, Marcel Dekker Inc., pp 489-499, 1997.
- [7] A. Roth, *Vacuum Sealing Techniques*, New York, American Institute of Physics, pp 358-359, 1994.
- [8] Frank P. Incropera, David P. Dewitt, Theodore L. Bergman, Admrienne S. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer 6th edition*, Danvers, John Wiley & Sons, pp. 425-428, 2007.

저 자 소 개



이천규(李天揆)
1987년 4월 22일생, 2009년 한국과학기술원 기계항공시스템학부 기계공학전공 졸업, 현재 한국과학기술원 대학원 기계항공시스템학부 기계공학전공 석사과정.



황규완(黃圭完)
1979년 10월 3일생, 2005년 한양대 공대 기계공학부 졸업, 현재 한국과학기술원 기계공학과 통합과정.



정상권(丁常權)
1962년 8월 16일생, 1985년 서울대 기계공학과 졸업, 1992년 MIT 기계공학과 졸업(공학박사), 1992~1995년 MIT-Plasma Fusion Center 연구원, 현재 한국과학기술원 기계항공시스템학부 기계공학전공 정교수.