

우주환경모사를 위한 대형열진공챔버 국산화 구축

조혁진*, 문귀원**, 서희준***, 이상훈****, 최석원*****

Domestic Construction of a Large Thermal Vacuum Chamber for Space Environment Simulation

Hyok-jin Cho*, Guee-Won Moon**, Hee-Jun Seo***, Sang-Hoon Lee****, Seok-Weon Choi*****

Abstract

A Large thermal vacuum chamber (LTVC) for space environment simulation on large satellites was successfully developed and constructed by KARI (Korea Aerospace Research Institute) in Korea with a local company. This chamber has an effective diameter of 8 meters and depth of 10 meters, and is composed of vacuum system, thermal control system, and anti-vibration system. Temperature below $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$ is maintained over the thermal shroud wrapping a satellite under $3.7\times 10^5\text{ Pa}$ ($5\times 10^7\text{ torr}$) vacuum level, and optical test can be done in this chamber by seismic mass with $10^5\text{ g}_{\text{rms}}$ or lower vibration level. In addition, the shroud temperature can be increased up to $123\text{ }^{\circ}\text{C}$ using halogen lamps. Chamber control program based on PLC (Programmable Logic Controller) could control this large thermal vacuum chamber automatically.

초 록

차세대 대형위성에 대한 우주환경모사를 위한 대형열진공챔버가 한국항공우주연구원에 의해 성공적으로 국산화 구축되었다. 유효직경 8미터, 유효깊이 10미터의 대형열진공챔버는 크게 진공계와 열제어계, 방진계로 구분되며, $3.7\times 10^5\text{ Pa}$ ($5\times 10^7\text{ torr}$) 이하의 진공 환경에서 액체질소를 이용해 위성을 감싸는 쉬라우드의 온도를 $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$ 이하로 유지할 수 있고, $10^5\text{ g}_{\text{rms}}$ 이하의 진동레벨을 갖는 방진시스템을 갖추어 우주환경에서의 광학시험을 가능하게 한다. 또한 챔버내에 설치된 할로겐램프를 이용하여 쉬라우드의 온도를 섭씨 123도까지 상승시켜 베이커아웃 시험을 수행할 수 있으며, PLC(Programmable Logic Controller)를 기반으로 한 제어프로그램을 이용하여 대형열진공챔버의 자동화 제어를 수행할 수 있다.

키워드 : 열진공챔버(thermal vacuum chamber), 열제어(thermal control), 우주환경(space environment), 쉬라우드(shroud), 진공용기(vacuum vessel), 위성(satellite), 방진(anti-vibration)

1. 서 론

고진공, 극저온 및 극고온 조건의 우주환경에서 인공위성이 정확한 기능을 수행하기 위해서는

* 우주환경시험팀/wittycho@kari.re.kr

*** 우주환경시험팀/seohj@kari.re.kr

***** 우주환경시험팀/schoi@kari.re.kr

** 우주환경시험팀/aeromoon@kari.re.kr

**** 우주환경시험팀/leesh@kari.re.kr

지상에서의 우주환경 모의시험을 통해 위성의 성능이 검증되어야 한다. 지상환경시험과 관련하여, 실제 우주에서의 진공도($10^{-11} \sim 10^{-5}$ Pa) 및 온도조건(3~4 K)을 동일하게 재현하는 것은 경제적인 관점에서 매우 비효율적이다. 일반적으로 상용 진공펌프 및 액체질소, 냉동기 등을 사용하여 위성에 대한 우주환경을 모사하며, 그 중 가장 효율적인 시스템은 터보분자펌프(Turbo molecular Pump) 또는 저온펌프(Cryo Pump)를 이용해 10^{-4} Pa 이하의 진공 환경을 제공하고, 액체질소를 이용하여 77 K의 온도조건을 제공하는 것이다.[1]

위성의 온도가 상온근처일 때 오차에 대한 평가 결과에 의하면, 우주의 냉암흑 모사의 경우 인공위성 직경의 2배 정도의 크기를 갖는 100 K 이하로 냉각된 열교환슈라우드를 인공위성을 뒤덮을 때, 열오차를 1% 이하로 줄이는 것이 가능하다. 또한 열진공챔버 내부의 진공도를 10^{-3} Pa 이하로 낮출 경우, 존재하는 희박 가스에 의한 열이동량 및 복사에 의한 열이동량의 오차가 실제와 비교하여 1% 이하가 되도록 하는 것이 가능하다.[2]

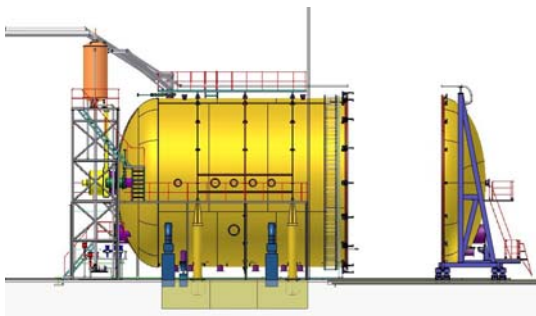


그림 1. 대형열진공챔버 형상

본 논문에서는 한국항공우주연구원에서 개발 중인 차세대대형위성에 대한 우주환경시험 수행을 위해 2006년 11월에 국산화 개발을 성공시킨, 대형열진공챔버(유효직경 8 m, 유효깊이 10 m)의 구성 및 성능에 대해 상세히 기술하고자 한다.

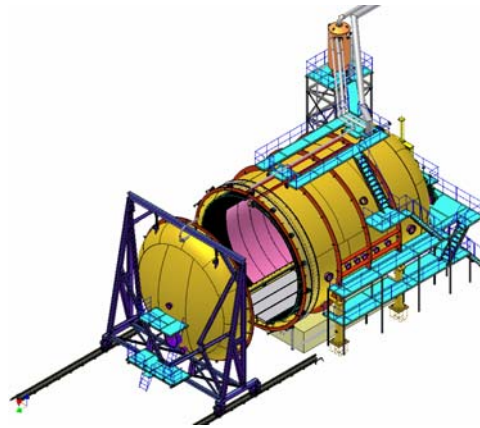


그림 2. 대형열진공챔버 3차원 모식도

2. 본 론

3.7×10^{-5} Pa(5×10^{-7} torr) 이하의 진공환경과 -190 °C 이하의 온도조건, 10^{-5} g_{rms} 이하로의 방진조건 구현이 가능한 대형열진공챔버는, 진공환경 모사를 위한 진공계, 온도조건 구현을 위한 열체이체, 방진조건 구현을 위한 방진계로 구성되어 있으며, 모든 시스템을 통합 관리하기 위한 제어프로그램을 갖추고 있다.

2.1 진공계

대형열진공챔버의 진공계는 진공밀폐를 위한 진공용기 및 진공배기를 위한 진공펌프로 구성되어 있다. 내경 9 m, 깊이 10 m의 스테인리스스틸(SUS304L) 재질의 실린더 형상 진공용기는 움직임이 가능한 도어시스템을 갖추고 있으며, 진공 형성시 도어와의 접촉면에 설치된 직경 9 m 이상의 일체형 2단 오링과 자동 공압 클램핑 시스템을 이용해 밀폐를 가능하게 한다. 또한 진공용기의 양쪽 끝은 타원형 형상으로 제작하여 단위 두께당 압력 저항력을 최대화 하였으며, 이를 통해 제작비용의 효율성을 극대화 하였다.(그림 1,2)

진공용기의 내용적은 약 750 m^3 이며, 이를 배기하기 위해 저진공 형성을 위한 건식펌프와 고진공 형성을 위한 터보분자펌프 및 저온펌프 시스템을 구축하였다.

2.1.1 진공용기의 제작

진공용기의 실린더부 제작을 위해 두께 22 mm의 스테인리스스틸 후판(厚板)이 사용되었으며 도어 및 후면 파트에는 28 mm 두께의 스테인리스스틸 후판이 사용되었다. 큰 규모로 인해 일단 여러 개로 나누어진 각각의 파트들은 대형 크레인(50 ton) 2대와 정반을 이용해 서로 용접되었으며, 이 후 최종 형상의 진공용기가 완성되었다. 용접부위는 모두 진공밀폐에 적합한 TIG 용접 방식을 이용하여 용접되었다.(그림 3,4,5)



그림 5. 완성된 진공용기의 이동



그림 3. 여러 파트로 나누어진 진공 용기



그림 4. 진공용기의 조립 및 용접

도어부는 위성의 반출입을 위해 바닥에 설치된 레일 및 모터를 통해 원격 제어를 통해 움직임이 가능한 시스템으로 제작되었다.

2.1.2 진공배기 시스템의 구축

진공용기 내부의 진공배기를 위해 건식펌프(2 sets, 각 600 m³/hr)와 부스터펌프(2 sets, 각 6,800 m³/hr)로 구성된 저진공 형성을 위한 저진공계, 터보펌프(2 sets, 각 3,000 l/s) 및 저온펌프(7 sets, 60,000 l/s 1대, 11,000 l/s 6대)로 구성된 고진공 형성을 위한 고진공계가 각각 설치되었다.(그림 6) 설치된 저진공계를 이용하여 챔버 내부의 압력을 상압에서 수 Pa까지 낮추며, 그 후 cold plate를 통해 10⁻¹-10⁻² Pa 까지 진공을 형성하고, 최종 고진공계를 이용하여 챔버의 진공도를 3.7×10⁻⁵ Pa 까지 구현한다.

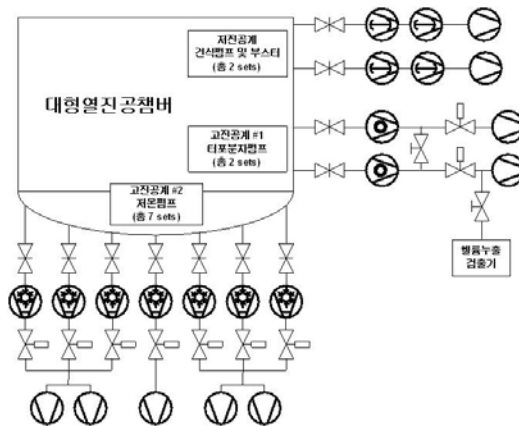


그림 6. 대형열진공챔버의 진공계 구성



그림 7. 저진공계



그림 8. 고진공계 #1



그림 9. 고진공계 #2

적절한 진공펌프의 선정을 위해 진공배기시간에 대한 예측이 수행되었으며, 그 결과 총 4시간 이내에 목표진공도에 도달할 수 있음을 확인하였다.[3] 저진공 배기시간의 경우 식 (1)을, 고진공 배기시간의 경우 식 (2)를 이용해 그 값을 도출하였다.

$$Time_{low} = \frac{Vol_{chamber}}{S_{pump}} \ln \frac{P_1}{P_2} \quad (1)$$

$$Time_{high} = \frac{q_{1h} \times A}{P \times S_{pump}} \quad (2)$$

여기서, $Vol_{chamber}$ 는 챔버의 내용적, S_{pump} 는 펌프의 배기속도, P_1 은 초기 진공도, P_2 는 저진공 배기시의 목표진공도, q_{1h} 는 1시간 경과후의 스테인리스 표면에서의 가스탈착률, A 는 챔버 내부

및 쉬라우드 표면적, P 는 최종 목표 진공도를 나타낸다.

2.2 열제어계

대형열진공챔버의 열제어계는 액체질소를 이용한 극저온 환경 구현 및 할로겐램프를 이용한 고온 베이카아웃 시험 수행을 그 목적으로 한다. 극저온계는 열교환쉬라우드, 극저온 펌프 및 밸브, 상분리기, 액체질소탱크, 극저온 이중진공배관(그림 20) 등으로 구성되어 있으며, 고온(100℃ 이상) 베이카아웃 시험을 위해 총 336개의 할로겐램프 및 공급 전력 제어기를 갖추고 있다.

2.2.1 열교환쉬라우드의 개발

국내에서는 처음으로 개발된 대형열진공챔버의 열교환쉬라우드는, 진공용기의 내부에 설치되어 진공환경에서 기밀이 전혀 새지 않는 밀폐구조를 가지며, 내부에 액체질소의 흐름을 통해 극저온을 모사할 수 있게 하는 장치이다. 열교환쉬라우드는 부식방지 및 구조적 안정성을 위해 스테인리스스틸(SUS304L)로 제작되었으며, 열교환쉬라우드의 챔버 중심을 향하는 내부 표면에는 위성으로부터의 복사에너지를 최대한 받아들여, 위성과 쉬라우드간의 복사열전달을 최대화하기 위하여 표면에 검정 페인트를 칠하였다.(그림 10)



그림 10. 열교환쉬라우드의 설치

쉬라우드 표면에 사용된 페인트는 PU1 (Polyurethane1)으로 흡수율(α) 0.96 ± 0.04 , 방사율($\epsilon_{s,in}$) 0.88 ± 0.04 의 특성을 갖는다. 반면 진공용기와 마

주보고 있는 쉬라우드의 외부표면의 경우, 진공용기 내부표면($\epsilon_{v,in}=0.15$)에서의 복사열전달량을 최소화하기 위해서 페인트를 사용하지 않고 매끄럽게 표면처리를 함으로써 방사율($\epsilon_{s,out}$)을 0.2까지 낮추었다.[4]

액체질소를 이용한 극저온 유지를 안정적으로 구현하기 위해 엠보싱, 코일, 덤플의 총 세 가지 쉬라우드 형태가 제안되었으며, 각각의 쉬라우드에 대한 액체질소 흐름시험을 통하여 표면의 온도 분포 및 냉각특성이 평가되었고, 이 중 가장 균일한 온도 분포 및 빠른 냉각 특성을 보인 덤플(dimple)형태의 쉬라우드가 최종적으로 선택되었다.(그림 11)



그림 11. 덤플타입 샘플 쉬라우드의 냉각특성 평가

2.2.2 극저온계

대형열진공챔버의 극저온계는 액체질소(상압에서의 끓는점 : 77 K)를 사용하여 위성을 둘러싼 직경 8 m의 쉬라우드 온도를 $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$ 이하로 유지시키는 것을 목적으로 한다. 기본적으로 극저온계는 대기압에 노출된 개방회로로써(그림 12), 작동 모드는 초기 냉각 모드와 $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$ 도달 후의 냉각 유지 모드로 나뉜다.

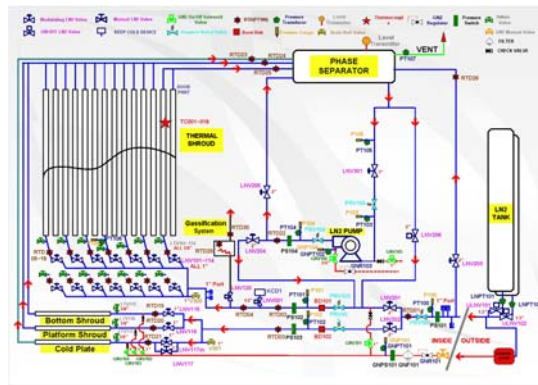


그림 12. 극저온계 구성도

초기 냉각 모드는 액체질소탱크로부터 직접 쉬라우드에 액체질소를 공급하는 단계로써 절대압 약 5기압 이하의 액체질소를 극저온 유량 조절 밸브(그림 16)를 이용하여 17개로 분리된 쉬라우드에 각각 공급하는 방식을 사용한다.(그림 13)

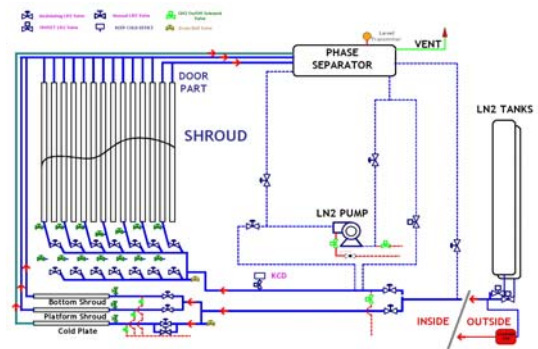


그림 13. 초기 냉각 모드의 유동 흐름

쉬라우드의 최상단에 부착된 열전대(T type)의 지시값이 $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에 도달하게 되면 냉각 유지 모드로 제어 방식이 변경되는데, 우선 $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 냉각된 쉬라우드에는 액체질소 탱크로부터의 액체질소 공급이 차단되고, 상분리기(Phase Separator)로부터의 액체질소 공급이 시작된다.(그림 19) 진공용기의 상단에 설치된 상분리기에 는 쉬라우드에서 넘쳐난 액체질소와 액체질소 탱크로부터 공급된 액체질소가 합쳐지며, 모여진

액체질소는 높이차에 의한 액체질소 자중(自重)을 이용하여 각 슈라우드에 공급된다. 냉각 유지 모드에서의 상분리기 내의 액체질소 수위는 레벨미터를 통해 일정하게 유지된다. 수두압에 의한 액체질소의 공급압력은 절대압력 1.8 기압 이상이다.

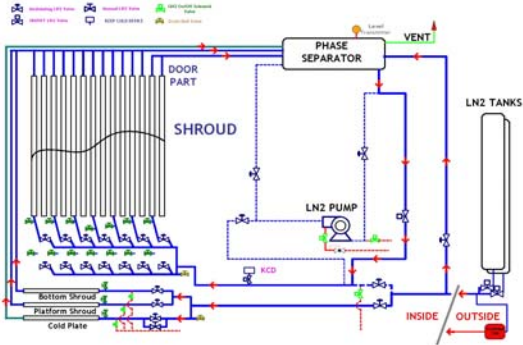


그림 14. 냉각 유지 모드의 유동 흐름

냉각 유지 모드에서 진공용기 내부에서의 과도한 열소산(Heat Dissipation) 및 예기치 않은 상황에 의해 수두압을 이용한 정상 냉각 유지 모드의 사용이 불가능할 경우에는 액체질소펌프(LN2 pump, 그림 17)를 이용하여 액체질소 공급압력 및 유량 증대시켜 극저온계의 정상 운용을 도모한다.(그림 15)

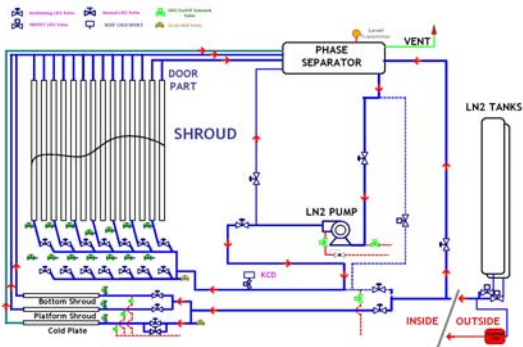


그림 15. 액체질소펌프를 이용한 냉각 유지 모드



그림 16. 액체질소 유량 조절을 위한 극저온밸브



그림 17. 액체질소펌프



그림 18. 도어부의 배기 배관 자동클램핑 장치



그림 19. 액체질소 상분리기



그림 20. 극저온 이중진공배관

2.2.3 극저온계의 액체질소 증발량 예측

극저온계를 구성하는 열교환쉬라우드 및 극저온 이중진공배관, 액체질소펌프, 상분리기의 사양을 결정하고, 액체질소 운용량을 파악하기 위해서는 시험 중의 열전달량에 따른 액체질소 증발량 예측이 요구된다. 액체질소의 증발은 쉬라우드 자체의 냉각(식 (3)), 쉬라우드와 진공용기와의 복사열전달(식 (4)), 쉬라우드 지지대를 통한 열전도(식 (5)), 시험 대상체의 열소산, 극저온상태에서 누설로 인한 챔버 내부부의 상온 공기 유입에 의해 발생된다. 쉬라우드 온도 감소가 선형적이고, 냉각목표시간(Time_T)을 2시간이라 가정하면, 예측 결과 초기 냉각시 시간당 3,700 리터, 안정상태에서 시간당 1,000 리터, 누설 발생시 최대 시간당 11,230 리터의 액체질소 증발이 발생할 수 있음을 확인하였다.

$$E_{shroud,c} = C_{p,s} \times M_s \times (T_{amb} - T_{target}) \quad (3)$$

$$E_{rad,c} = \int_0^{Time_T} \left[\frac{\sigma A_{equ} \left\{ (T_{amb})^4 - \left(T_{amb} - \frac{T_{amb} - T_{target}}{Time_T} t \right)^4 \right\}}{\frac{1}{\epsilon_{s,out}} + \frac{1}{\epsilon_{v,in}} - 1}} \right] dt \quad (4)$$

$$E_{cond,c} = \int_0^{Time_T} \left[k \times A_s \times \frac{T_{amb} - \left(T_{amb} - \frac{T_{amb} - T_{target}}{Time_T} t \right)}{l_s} \right] dt \quad (5)$$

여기서, C_{p,s}는 쉬라우드의 비열, M_s는 쉬라우드의 질량, T_{amb}는 상온, T_{target}은 목표 온도, σ는 슈테판-볼츠만 상수, A_{equ}는 쉬라우드 외부와 진공용기 내부의 평형면적, A_s는 쉬라우드 지지대의 총 단면적, l_s는 지지대의 길이를 나타낸다.

액체질소 증발량의 예측 결과를 바탕으로, 각 쉬라우드로의 액체질소 공급 배관의 내경은 1인치, 배출 배관의 내경은 4인치, 쉬라우드의 내부 틈길이는 10 mm, 상분리기의 용량은 2,500리터로 결정하였다.

2.2.4 할로겐램프를 이용한 고온계

쉬라우드에 흡착된 오염물질의 탈착을 위한 베이카아웃 시험을 수행하기 위해 총 336개(42개 그룹)의 할로겐램프가 쉬라우드 표면에 설치되었다.(그림 21)



그림 21. 베이카아웃 시험을 위한 할로겐램프 시스템

각 램프는 336 W의 발열을 통해 총 114 kW의 에너지를 쉬라우드에 전달한다. 쉬라우드 자체의 온도 상승을 위한 에너지 소모 및 쉬라우드에서 상온의 진공용기로의 복사열전달을 고려하여 상온에서 123 ℃까지의 온도 상승 시간을 예측한 결과 약 2시간이 소요됨을 알 수 있었다.

2.3 방진계

위성에 탑재되는 광학계의 경우 수백 km 떨어진 우주 궤도에서 수 m, 수 cm의 해상도를 가지고 지구 영상을 촬영해야 하기 때문에, 광학계 자체에 대해 매우 높은 정밀도를 요구한다. 이에 우주환경에서의 광학계에 대한 검증은 필수적이며, 이를 위해서 광학계에 대한 열진공챔버내에서의 광학성능시험이 반드시 수행되어야 한다. 열진공시험시 발생하는 진동은 광학계의 성능에 영향을 미치게 되기 때문에, 요구조건을 만족하며 챔버를 포함한 외부 환경으로부터 챔버내의 광학시험장비로의 진동전달을 방지하는 역할을 수행하는 방진계가 설치되어야 한다.(그림 22)

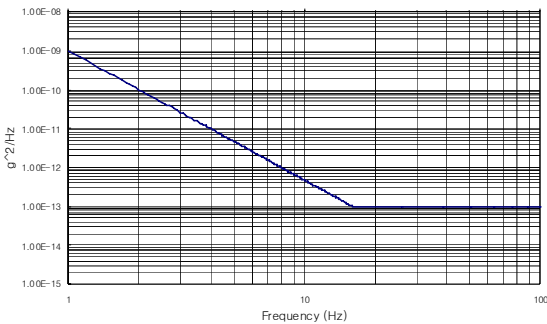


그림 22. 방진계의 요구 조건

방진대는 강성을 가지며 isolator를 설치하기 위해 "T"자 형태를 갖도록 하였고, 1차 고유진동수는 100 Hz 이상이 되도록 설계하였다. 방진대와 isolator의 강제모드에 대한 고유진동수를 0.8Hz 로 하기 위하여 그림 23과 같이 최종 15개의 isolator를 설치하도록 하였다.[5]

표 1. 설치된 방진계의 사양

Dimension (L×W×H)	7.7×5.0(8.0)×2.0m
Weight	185 Ton
Material	reinforced concrete C 30/35
Air mount spring Constant	$k_f=3,080,000\text{N/m}$
Support weight	about 6,000kg

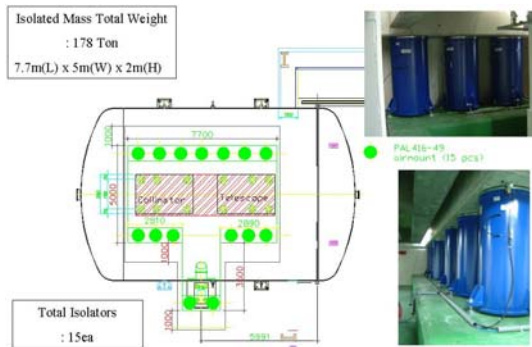


그림 23. 방진계의 구성도 및 isolator

고진공 환경에서 z축 진동센서를 이용하여 측정한 방진계의 진동차단 성능은 그림 24와 같다. 설계된 1차 고유진동수는 100 Hz이나, 최종 측정된 1차 고유진동수는 73 Hz에서 나타났다. 측정된 결과를 바탕으로 계산된 g_{rms} 값은 방진블럭 위 가장자리에서 최대값, 8.41×10^{-6} 을 가졌으며, 모두 $10^{-5} g_{rms}$ 이하의 진동레벨을 나타내었다.

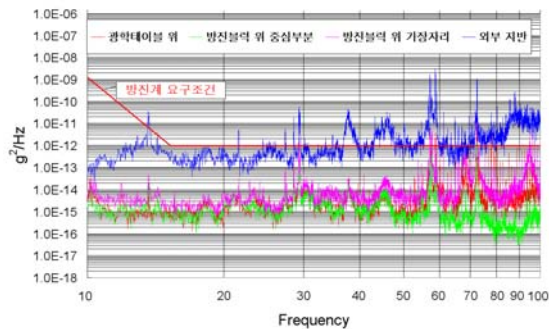


그림 24. 방진계 성능 시험 결과



그림 25. 방진계가 설치된 챔버 바닥 연결부

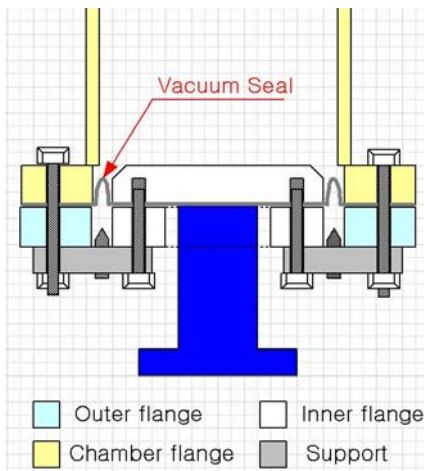


그림 26. 진공유지를 위한 방진계와 챔버와의 인터페이스 방법

2.4 제어 프로그램

진공계, 열제어계의 제어는 모두 PLC를 기반으로 한 제어프로그램에 의해 이루어지며, 각각의 프로세스는 내부잠금장치(interlock)에 의해 요구조건이 모두 만족될 경우에만 그 기능이 수행될 수 있도록 제어 로직이 반영되었다.

제어 프로그램은 명령을 주는 메뉴, 진공계에 관련된 메뉴, 열제어계에 관련된 메뉴, 압축공기, 냉각수, 질소 가스 공급에 관련된 유틸리티 메뉴, 액체질소 탱크의 수위 및 압력, 실험실 내의 산소 분압, 온도, 습도, 차압, 청정도를 나타내 주는

메뉴로 구성되어 있다.

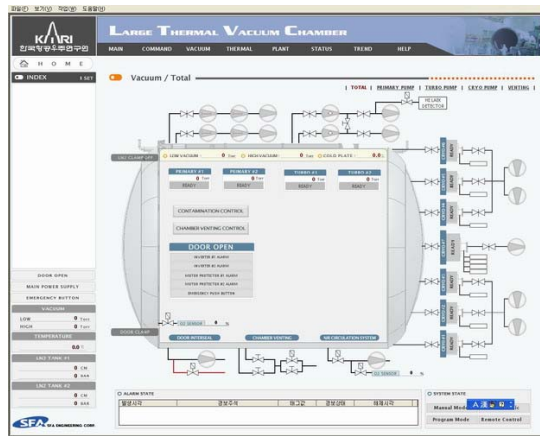


그림 27. 진공계에 대한 제어 프로그램 화면

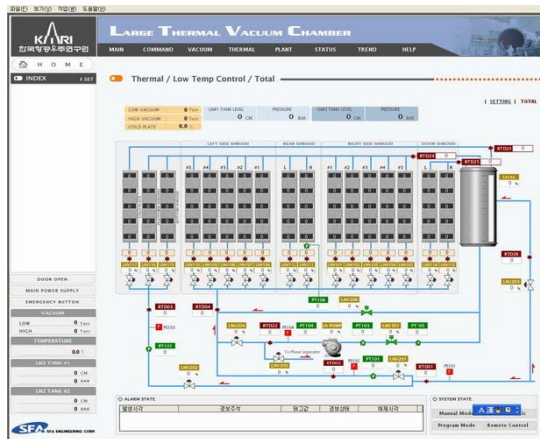


그림 28. 열제어계에 대한 제어 프로그램 화면

총 8차례에 걸친 승인시험을 통하여, 제어 프로그램의 성능을 검증하였으며, 그 결과 모든 하드웨어가 정상적으로 정확히 제어됨을 확인하였다.

4. 결 론

대형위성에 대한 우주환경시험을 위한 대형열진공챔버의 국산화 개발이 성공적으로 수행되었

으며, 승인시험 결과를 그림 29에 도시하였다.

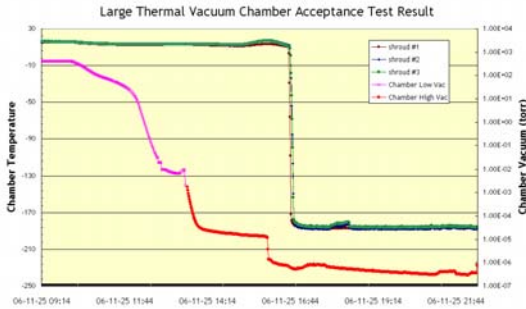


그림 29. 대형열진공챔버의 승인시험 결과



그림 30. 완공된 대형열진공챔버의 정면 모습



그림 31. 대형열진공챔버 기계실 측면 모습

국산화 개발된 대형열진공챔버는 유효직경 8미터, 유효깊이 10미터의 대형 우주환경 모사장비로써, 세계적으로도 미국, 러시아, 중국, 일본, 프랑스, 네덜란드, 캐나다, 총 7개국 정도만이 보

유한 첨단 장비이다. 이는 우리나라가 위성개발 기술 수준과 더불어 우주환경 시험장비 분야에서도 세계적 기술 수준을 갖추게 되었음을 의미하며, 이번 대형열진공챔버의 구축을 통해 차세대 대형위성에 대한 우주환경시험을 국내에서 성공적으로 수행할 수 있게 되었다.

참 고 문 헌

1. 조혁진, 이상훈, 문귀원, 서희준, 최석원, "대형우주환경 모사장비의 극저온 시스템 설계 및 개발", 한국항공우주학회 2006 추계학술발표회 논문집, pp.547-550, KSAS06-2410.
2. 北山尙男牛島, 勇服後盛長, 澤田勇村田, "13 mφSpace Chamber, NASDA", 1990.
3. 서희준, 조혁진, 이상훈, 문귀원, 조창래, 최석원, "우주환경 모사장비의 진공 시스템 설계 및 검증", 한국항공우주학회 2006 추계학술발표회 논문집, pp.733-736, KSAS06-2954.
4. 조혁진, 문귀원, 이상훈, 서희준, Calvin Winter, "대형우주모사장비(Φ8m×L10m) 열교환 슈라우드 설계", 대한기계학회 2004년도 추계학술대회 논문집, pp.1236-1240.
5. 이상훈, 조혁진, 서희준, 문귀원, 최석원, "열진공챔버용 방진장치 개발 및 시험", 한국항공우주학회 2006 추계학술발표회 논문집, pp.721-724, KSAS06-2951.