

技術論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 44(1), 88-97(2016)

DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2016.44.1.88

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

열진공 챔버용 폐회로 열제어시스템 설계 및 성능평가

서희준*, 조혁진*, 박성욱*, 문귀원*, 정상현**, 허환일***

Design and Performance Test of a Closed Loop Thermal Control System for Thermal Vacuum Chamber

Heejun Seo*, Hyokjin Cho*, Sungwook Park*, Gueewon Moon*,

Sanghun Jung** and Hwanil Huh***

Korea Aerospace Research Institute (KARI)*,

JNK System**,

Department of aerospace Engineering, Chungnam National University***

ABSTRACT

A closed loop thermal control system simulates space thermal environment to verify the satellites' functionality in extremely cold/hot temperature. It is composed of a cryogenic blower, thermal shroud, heater, cryogenic valves. This paper presents an overview of closed loop thermal control system's design parameter and test results for control parameter. A capacity of blower is calculated through energy balance equation and an advantage/disadvantage for a shroud material and a type was analysed. The thermal control system is controlled by a constant density of fluid in the system. A requested performance of closed loop thermal control system was verified by measuring a homogeneity and stability of shroud through control parameter such as density and RPM of blower.

초 록

폐회로 열제어 시스템은 열진공 챔버의 온도를 $-150^{\circ}\text{C} \sim 120^{\circ}\text{C}$ 와 같은 온도 조건으로 모사하기 위한 시스템으로, 극저온 블로워, 슈라우드, 히터, 극저온 밸브 등으로 구성된다. 본 연구는 우주 열환경 모사를 위한 폐회로 열제어 시스템의 설계 요소 정의 및 제어 변수별 실험 결과 등을 포함하고 있다. 폐회로 열제어 시스템 설계를 위해 설계 요소인 블로워 용량, 슈라우드 재질, 형태에 따른 특성 등의 분석을 수행 하였다. 폐회로 열제어 시스템의 극저온 블로워 필요 유량은 에너지 평형 방정식에 의해 결정되며, 제어는 작동 유체의 밀도 제어를 통해 제어된다. 밀도, 회전수와 같은 제어 변수별 실험을 통해 슈라우드 온도 분포 균일도 및 균일도를 측정하여 요구된 폐회로 열제어 시스템의 성능을 확인 하였다.

Key Words : Closed loop thermal Control System(폐회로 열제어 시스템), Thermal Vacuum Chamber(열진공 챔버), Cryogenic Blower(극저온 블로워)

† Received : October 29, 2015 Revised : December 2, 2015 Accepted : December 11, 2015

*** Corresponding author, E-mail : hwanil@cnu.ac.kr

I. 서 론

위성이 우주 궤도에서 경험하는 우주 열환경은 극저온의 우주 심원을 배경으로 하여 위성에 도달하는 태양 복사에너지와 지구 복사에너지의 유입량으로 결정된다[1]. 지상에서 수행되는 우주궤도환경시험은 우주의 진공상태를 구현하는 진공 챔버 내에 우주의 열환경을 모사하는 슈라우드(shroud)가 설치된 열진공 챔버에서 수행된다.

우주환경모사를 위한 열진공 챔버의 핵심 장치인 열제어 시스템은 작동유체(일반적으로 기체 질소 사용)를 대기로 배출하는 개회로(open-loop) 시스템과 작동 유체를 회로내에 지속적으로 순환시키는 폐회로(closed-loop) 시스템으로 구분할 수 있다. 개회로 시스템은 시스템의 구성이 단순하고, 초기 구축비용이 상대적으로 저렴한 장점이 있으나, 작동 유체의 소모가 많아 운용비용이 높다는 단점을 가진다. 반면 폐회로 시스템은 극저온 블로워, 히터, 액체질소 분사 장치 등 복잡한 장치들이 포함되어 있어 초기 구축비용이 상대적으로 높으나, 작동 유체의 소비가 적어 운용비용이 저렴하며, 시스템의 효율이 높다는 장점을 가진다[2].

본 논문은 위성체 우주환경에 대한 지상검증에 사용되는 열진공 챔버의 열환경을 모사하는 열제어 시스템의 설계 요구조건을 도출하고, 한국항공우주연구원에서 보유중인 열진공 챔버를 대상으로 블로워 회전수, 밀도와 같은 제어변수에 따른 성능 실험을 수행하여, 최종적으로 슈라우드 온도분포, 균일도와 같은 성능을 확인하였다. 이를 통해 폐회로 열제어 시스템의 설계, 제어 인자를 도출하고 검증하였다.

II. 본 론

2.1 열진공 챔버 시스템

위성체 부품 및 시스템의 열진공시험에 사용되는 열진공 챔버는 진공용기, 열제어 시스템, 진공 시스템, 제어 시스템 등으로 구성된다. Fig. 1은 열진공 챔버의 형상을 보여주고 있다.

진공용기는 기계적인 연마를 통한 표면처리를 통해 오염방출량을 최소화 하였으며, 슈라우드와의 열복사를 최소화하였다.

슈어우는 $-150^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$ 의 열환경을 복사를 통해 시편에 열환경을 부여하는 역할을 한다. 슈어우드의 안쪽 표면은 복사열전달을 최대화하기 위해 블랙 페인트가 도포 되었으며, 외부표면

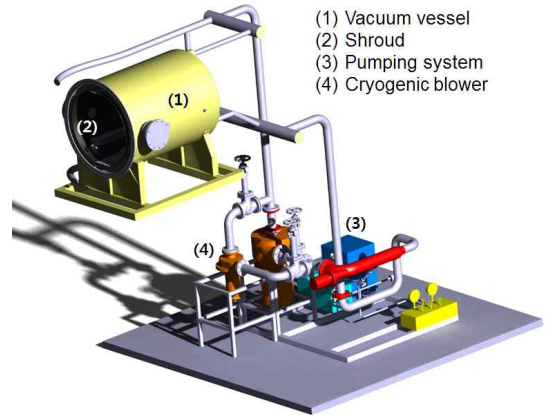


Fig. 1. Overall view of thermal vacuum chamber

은 기계 연마와 같은 표면처리를 통해 진공용기와의 복사열전달을 최소화 하였으며, 또한 지지구조물과의 단열 처리를 통해 진공용기와의 전도를 최소화 하였다.

열제어 시스템은 극저온 블로워, 히터 등으로 구성된 기체질소를 작동 유체로 하는 폐회로 열제어 시스템이 적용되었다.

2.2 폐회로 열제어 시스템

폐회로 열제어 시스템은 고온 및 극저온 유체 순환을 위한 극저온 블로워, 유체를 공급을 위한 액체질소 분사 장치, 시스템내 열량 공급을 위한 카트리지 타입의 전기 히터, 작동 유체를 단속하거나 유량을 조절하는 극저온 밸브, 극저온 작동 유체의 흐름을 가능하게 하는 극저온 이중진공배관, 그리고 시스템의 제어 및 모니터링을 위한 온도 및 압력센서 등으로 구성된다. 위와 같은 구성품들의 효율적인 조합, 제어를 통해 고온 및 극저온과 같은 열환경을 정밀하게 모사할 수 있으며, 지상에서 위성체 시스템 및 부품에 대한 정밀한 우주 열환경을 부여할 수 있다. Fig. 2는 기체질소를 이용한 폐회로 열제어 시스템을 보여주고 있다. 폐회로 열제어 시스템은 극저온 블로워의 성능에 따라 시스템 전체의 성능이 결정되기 때문에 고효율의 극저온 블로워가 필요하다 [3]. 또한, 개회로 시스템의 경우 약 3 bar 이상의 압력강하를 극복할 수 있으나, 폐회로 열제어 시스템의 경우 슈어우드, 배관에서의 압력 강하를 최소화할 수 있도록 설계하여야 한다.

Table 1은 열제어 시스템의 설계 요구조건을 보여주고 있다. 시스템 설계 요구조건 중 슈어우드 온도 균질도, 균일도는 블로워 유량, 슈어우드

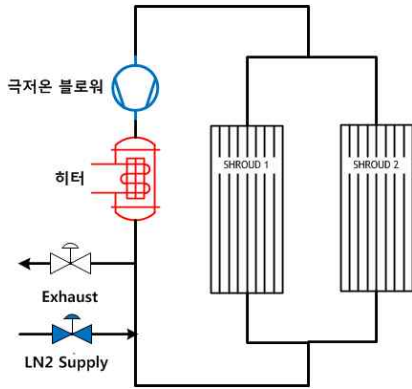


Fig. 2. Schematic diagram of GN₂ closed loop thermal control system (TCS)

Table 1. Design requirement of TCS

구분	Specification
Temperature range	-150°C ~ 120°C
Operating pressure	2.5 kg/cm ² ~ 7.5 kg/cm ²
Temperature stability	< ± 0.5°C
Temperature Homogeneity	10°C (stabilized condition)
Transient rate	more than 3 °C/min
Heat load	less than 5 kW

형태를 결정하는데 중요하다.

2.3 극저온 블로워 유량 산출

기체질소를 이용한 폐회로 열제어 시스템의 핵심 부품은 극저온 블로워로 고온 및 극저온의 유체를 슈라우드에 공급하는 역할을 하며, 각종 배관, 밸브 등에서 발생하는 압력강하(Pressure drop)를 극복하고 시스템내에 유체가 원활한 순환이 되도록 하는 역할을 하게 된다.

폐회로 열제어 시스템내 극저온 블로워의 필요한 유량은 열용량, 슈라우드 온도 분포에 따라 결정된다. 열제어 시스템내 블로워의 필요한 유량은 식(1)과 같은 에너지 평형 방정식(Energy Balance Equation)에 따라 결정된다. 블로워의 필요한 유량은 슈라우드의 열용량에 의해 결정이 되며, 슈라우드에 영향을 미치는 열은 위성체와 같은 시편에서 발생하는 열이 가장 큰 요인이다. 슈raud는 열진공 챔버내에 설치되며, 이에 따라 슈raud와 진공용기와의 전도 열전달, 챔버 벽면과의 복사 열전달에 의해 열손실이 발생된

다. 이와 같은 열손실을 최소화 하여야 블로워 유량을 줄일 수 있다.

열제어 시스템에 온도 제어를 위해 사용되는 유체의 필요 유량은 슈라우드 입구와 출구 온도에 따른 엔탈피 차이로 계산될 수 있으며, 이는 아래 식(1)과 같이 계산될 수 있다. 유체의 필요 유량은 슈라우드 온도 편차, 발열량, 슈라우드 면적, 유체의 종류, 슈라우드의 열손실량 등의 변수로 결정이 된다. 본 연구에서는 슈라우드 표면의 온도 편차, 발열량, 입구 압력 등에 따라 필요 유량을 계산 하였다. 사용되는 유체는 기체 질소를 사용하였으며, 슈raud와 챔버와의 열전도 및 복사에 의한 열손실은 약 5 W/m² 으로 가정하여 유량을 계산 하였다.

$$m = \frac{total}{\Delta h} = \frac{q_{specimen} + (q_{para} \times A_{shroud})}{h_2 - h_1} \quad (1)$$

여기서 \dot{m} (kg/s)은 필요 유량이며, Δh_f (kJ/kg)는 입구와 출구의 엔탈피 차이, $q_{specimen}$ (kW)은 열진공 시험 대상물의 발열량, q_{para} (kW)은 슈raud와 진공용기와의 열전달에 의한 열손실량, A_{shroud} (m²)는 슈raud의 면적을 나타낸다.

폐회로 열제어 시스템내 블로워의 필요 유량은 슈raud 온도 분포가 가장 큰 요인이다. Table 2는 슈raud의 온도 편차, 시편의 발열량과 같은 변수에 따라 시스템에서 필요한 유량이 계산된 결과를 보여주고 있다. Fig. 3은 입구 온도 조건이 -150°C, 입구 압력 조건이 1.8 bara에서의 계산 결과를 보여주고 있다. 계산 결과는 슈raud

Table 2. Required blower flow rate
(T_{in} = -150°C, P_{in} = 2.8 bara)

ΔT (°C)	T _{out} (°C)	Volume flow (CFM, ft ³ /min)		
		Heat load (kW)		
		5	7	10
1	-149	1274.6	1784.4	2549.1
2	-148	642.0	898.8	1284.0
3	-147	431.3	603.8	862.5
4	-146	325.9	456.3	651.9
5	-145	262.8	367.9	525.5
6	-144	220.7	309.0	441.4
7	-143	190.6	266.9	381.3
8	-142	168.1	235.4	336.3
9	-141	150.6	210.9	301.3
10	-140	136.7	191.3	273.3

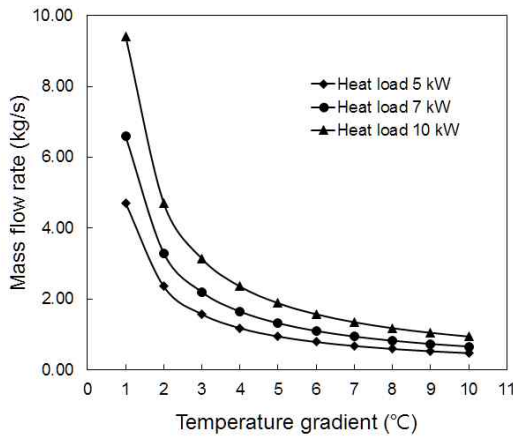


Fig. 3. Required blower flow rate for heat load(P_{in} = 1.8 bara)

드 온도 편차에 따라 필요 유량차이가 크다는 것을 보여주고 있으며, 특히 온도 편차 1°C의 경우에 온도 편차 5°C인 경우에 비해 약 5배의 질량 유량이 필요하며, 필요한 블로워의 질량 유량은 슈라우드 온도 편차에 반비례하는 결과를 보여주고 있다. 질량 유량을 체적으로 환산하여 비교한 결과 또한 슈라우드 온도 편차에 반비례 하는 결과를 보여주고 있다. 슈라우드의 발열량에 따른 필요 유량은 식(1)에서 예측할 수 있으며, 발열량에 비례하는 결과를 보여주고 있으며, 슈라우드의 면적에 따른 열 손실량에 비례한 결과를 보여주고 있다.

Table 2의 결과 중 시스템내의 압력 및 온도에 따라 필요한 기체질소의 질량 유량은 동일한 계산 결과를 보여주고 있으나, 체적 유량의 경우 각 조건에 따라 시스템내의 기체 질소 밀도가 변화에 따라 차이가 있음을 확인할 수 있다. 극저온 블로워의 용량을 선정시 운용 조건을 고려하여 가장 가혹한 조건에서의 블로워 용량을 선정하여야 하며, 운용 조건 선정시 블로워의 용량 등을 고려하여 시스템내 온도 조건 및 압력 조건을 고려하여야 한다.

2.4 슈라우드 형태 및 재질에 따른 특성 분석

열진공 챔버내 위성체 및 위성 부품은 슈라우드와의 복사 열전달을 통해 온도가 조절된다. 따라서 슈라우드의 재질, 형태에 따라 열전달률이 상이하며, 이에 따라 열제어 시스템의 성능 및 효율에 영향이 있다. 따라서 슈라우드의 재질, 형태에 따른 특성 분석이 필요하다.

2.4.1 슈라우드 재질에 따른 특성

열제어 시스템의 슈라우드는 구리, 알루미늄, 스테인리스스틸 등으로 제작이 가능하다.

알루미늄은 구리, 스테인리스스틸에 비해 무게가 가볍고, 열용량은 알루미늄이 가장 크다. 반면에 열전도는 구리가 가장 좋다. 이는 동일한 두께를 갖는 각각의 슈라우드 중 구리 재질 슈라우드가 가장 좋은 온도 분포를 가질 수 있음을 의미한다. 열용량과 각 재료의 무게를 곱하면 스테인리스스틸, 구리, 알루미늄의 순으로 알루미늄 재질의 경우 상대적으로 가벼운 장점을 갖는다. 이러한 사유로 알루미늄으로 슈라우드 제작하는 경우 설치시 구조물의 무게를 줄일 수 있는 장점이 있다. 반면에 알루미늄 판의 경우 누설에 취약한 단점이 있다. 고온 및 저온이 반복되는 시스템내의 유체에 적용시 구리, 스테인리스스틸에 비해 누설에 취약한 것으로 알려지고 있다. 또한, 알루미늄 판에 판을 용접시 누설에 대한 위험을 가지고 있다.

구리 또는 알루미늄으로 제작된 슈라우드의 경우 스테인리스스틸 재질의 주 유체 라인과의 연결시 누설 및 온도 범위를 고려하여 연결 방법을 고려하여 한다. 구리 또는 알루미늄 재질의 배관은 스테인리스스틸 배관과 직접 용접이 되지 않기 때문에 인덱 씰링 또는 이중 금속을 이용하여 하는 단점을 가지고 있다.

2.4.2 슈라우드 형태에 따른 특성

열제어 시스템에 사용되는 슈라우드는 형태에 따라 엠보싱(embossed) 타입, 코일(coil) 타입, 딴플(dimple) 타입, 플레이트 튜브 타입(plate-tube)으로 구분할 수 있다[4].

Figure 4는 엠보싱 타입 슈라우드의 단면을 보여주고 있다. 사용 압력은 5~6 kg/cm²이며, 제작이 간단하여 비용이 저렴하다. 반면에 제작시 확장이 균일하지 않기 때문에 내부 유로가 균일하지 않아 유체가 순환되지 않는 구간(dead zone)이 존재하여 내부저항이 발생하며, 결국 온도 분포가 불균일해 질 수 있다[5].

Figure 5는 딴플 타입 슈라우드의 단면을 보여주고 있다. 플레이트에 금형과 프레스를 이용하여 반원 형태로 성형 후 두 장의 플레이트를 저항 용접하는 방식으로 제작된다[5]. 딴플 타입 슈

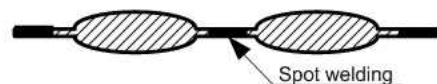


Fig. 4. Cross section of embossed shroud



Fig. 5. Cross section of dimple type shroud

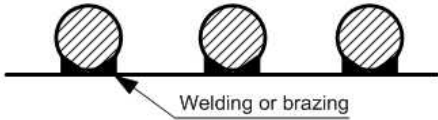


Fig. 6. Cross section of plate tube type

라우드의 특징은 내부 유로가 일정하며 유체가 전 면적에 골고루 분산될 수 있는 형상이다.

Figure 6은 플레이트 튜브 타입 슈라우드의 단면을 보여주고 있다. 플레이트 튜브 타입 슈라우드는 플레이트에 관을 용접한 형태로 제작된다. 따라서 배관과 관사이의 열전도에 의한 열전달을 이용하기 때문에 위의 세 가지 슈라우드에 비해 효율이 좋지 않으며, 관의 위치에 따라 온도 분포가 불균일해 질 수 있다는 단점이 있으나, 관의 효율적인 배치를 통해 균일성을 향상 시킬 수 있다. 소량 제작의 경우 제작비용이 저렴하다는 장점을 갖고 있다. 또한 제작시 형상의 제약이 없기 때문에 복잡한 형태의 시편에 대한 온도 제어시 사용이 가능하다.

2.5 폐회로 열제어 시스템의 제어

폐회로 열제어 시스템은 열진공 챔버내에 설치된 슈라우드 온도를 고온 및 저온으로 변화시키는 역할을 하며, 슈라우드의 온도는 슈라우드 내의 유로에 극저온 블로워를 통해 순환되는 작동 유체인 기체질소의 온도 조절에 따라 제어된다. 저온의 경우 액체질소를 시스템내에 분사하여 -150℃ 이하의 온도를 모사하게 되며, 히터의 출력을 제어하여 120℃와 같은 고온을 모사하게 된다.

고온 및 저온의 운용 범위에서 일정한 열용량을 유지하기 위해서 시스템내 작동 유체의 밀도가 일정하도록 제어를 한다. 극저온 블로워 회전수, 히터용량, 액체질소 분사량, 압력/온도 측정 및 제어는 PLC(Programmable Logic Controller)를 사용하며, PLC는 설정된 온도에 따라 압력을 제어하여 작동 유체인 기체질소의 밀도가 일정하게 유지되도록 제어하게 된다.

폐회로 열제어 시스템의 제어요소는 블로워 회전수, 히터 출력, 액체질소 분사량, 시스템내 압력 등으로 각각의 제어 변수에 따라 시스템의 성능이 결정된다. 특히 블로워의 회전수, 시스템의

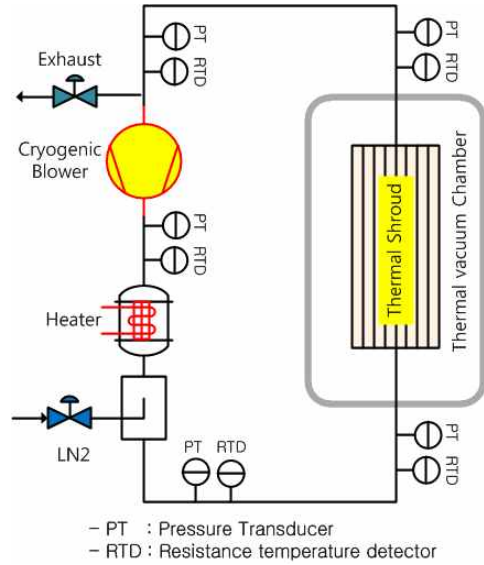


Fig. 7. Sensor location for monitoring and control of TCS

밀도가 가장 중요한 제어변수로 실험을 통해 위의 두 가지 제어 변수에 따른 성능을 검증하여야 한다. 열진공 챔버의 폐회로 열제어 시스템은 슈라우드 형상, 배관 크기, 경로 등에 따라 다양한 형태로 설계 제작된다. 따라서 이를 제어하기 위해서는 모든 시스템이 설치된 후 블로워 회전수, 시스템내의 밀도와 같은 제어요소를 결정할 수 있으며, 폐회로 열제어 시스템의 액체질소 공급 밸브, 히터 출력, 압력 조절을 위한 배기 밸브는 비례-적분-미분제어기(PID 제어기)에 의해 제어되며, PID 제어기의 이득값 (gain)은 실험을 통해 최적화 할 수 있다.

Figure 7은 열제어 시스템내에 설치된 온도 센서 및 압력 센서를 보여주고 있다. 설치된 센서를 통해 온도와 압력이 측정되며, PLC를 통해 제어된다. 폐회로 열제어 시스템의 제어 방법은 유로내의 질소 온도를 제어하는 방법과 열진공 챔버내 슈라우드 온도를 직접 제어하는 방법으로 구분된다. 시스템내의 질소 온도를 제어하는 방법은 유체의 온도를 제어하기 때문에 응답성이 빠르며, 균일도를 최소화 하여 제어할 수 있다는 장점을 있으나, 설정온도와 슈라우드 온도와의 편차가 발생될 수 있다.

슈라우드 온도를 기준으로 제어하는 경우 열제어 시스템을 통해 슈라우드를 직접 제어하여 설정온도와 슈라우드와의 편차를 최소화 할 수 있는 장점이 있다. 반면에, 슈라우드의 열용량이 기체질소에 비해 크기 때문에 응답 속도가 현저하

게 느리다. 이에 따라 슈라우드 자체의 온도 균일도가 요구조건을 만족하지 못하는 경우가 발생할 수 있다. 본 논문에서는 유로내의 질소 온도를 제어하는 방법으로 실험을 수행 하였으며, 온도, 압력의 제어 및 모니터링을 위해 각각 5개의 센서를 설치하였다. 시스템의 온도는 슈라우드 후단 유체의 온도를 기준으로 제어되었으며, 압력은 슈라우드 전단의 압력을 기준으로 제어 되었다.

2.6 실험결과

2.6.1 실험조건

전술한 바와 같이, 극저온 블로워를 이용한 폐회로 열제어 시스템의 핵심 제어변수는 블로워 회전수, 시스템내 유체 밀도이다. Table 3은 제어 변수에 따른 실험조건을 보여주고 있고, 아래의 실험조건에 따라 실험을 수행하여, 제어변수에 따른 폐회로 열제어 시스템의 성능을 확인하였다. 실험은 한국항공우주연구원내의 열진공 챔버에서 수행되었으며, Fig. 8은 실험이 수행된 열진공 챔버를 보여주고 있다.

폐회로 열제어 시스템의 최종 목표는 열진공챔버내에 설치된 슈라우드의 규정된 온도 변화율, 온도 균질도(homogeneity)와 균일도(stability)를 만족하여야 한다. 온도 균질도는 서로 다른 위치에서 각 온도의 편차 최대값을 의미하며, 균일도는 슈라우드 온도가 설정된 온도에 도달한 후 온도 변화 정도를 의미한다. 특히, 슈라우드 표면의 온도 균질도가 열제어 시스템의 최종 성능을 대표한다.

Figure 9는 실험에 사용된 슈라우드를 보여주고 있으며, 스테인리스스틸로 제작 되었으며, 슈라우드 형태는 딥플타입 형태의 슈라우드가 적용되었다. 슈라우드 온도 분포를 측정하기 위해 슈라우드 표면에 T-type 열전대를 부착하였다.

Table 3. Test matrix for performance test

회전수 (RPM)	밀도 (kg/m ³)	예상 유량 (CFM, ft ³ /min)	온도 (°C)
9,000	5.5	360	-150 ~ 100
8,000	5.5	320	-150 ~ 100
7,000	5.5	280	-150 ~ 100
	5.0		
	4.5		



Fig. 8. Thermal vacuum chamber

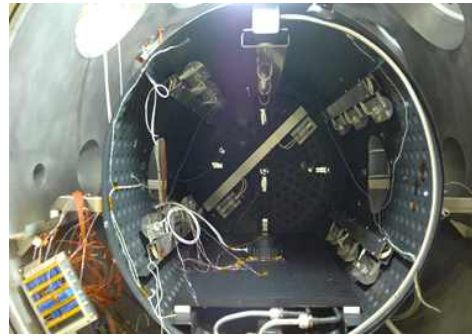


Fig. 9. Thermal shroud (Dimple type)

2.6.2 극저온 블로워 회전수에 따른 실험결과

Figure 10, 11은 극저온 블로워 회전수에 따른 고온 및 저온 조건에서 제어센서의 온도 경향을 보여주고 있다.

고온 조건에서 제어센서는 회전수에 비례하여 설정온도와의 편차가 감소하는 경향을 보여주고

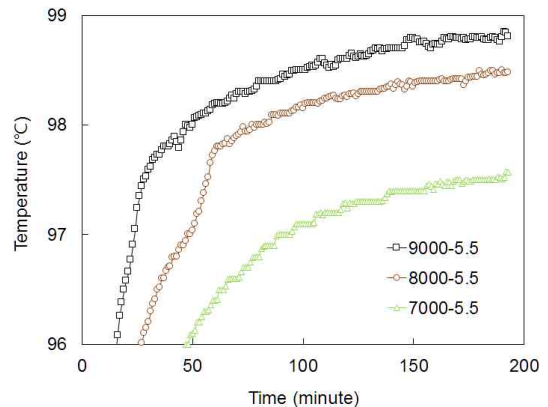


Fig. 10. Temperature trend of control sensor for blower at hot condition

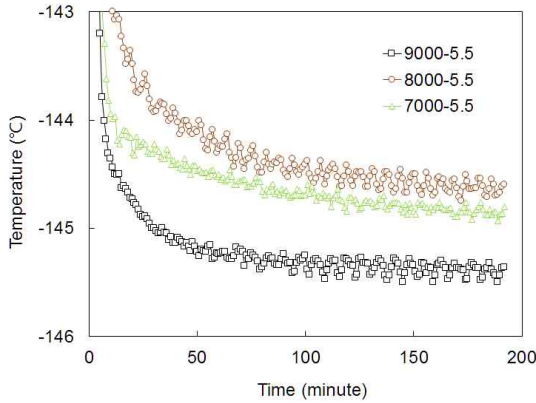


Fig. 11. Temperature trend of control sensor for blower RPM at cold condition

있으며, 온도 안정화에 도달하는 시간 또한 회전수에 비례하여 감소하는 경향을 보여주고 있다.

저온 조건의 실험결과는 9,000 RPM이 가장 작은 편차를 보여주고 있으며, 7,000 RPM이 8,000 RPM에 비해 온도 편차가 작은 결과를 보여주고 있다. 이와 같은 결과는 극저온 블로워의 유량은 회전수에 비례하며, 유량 감소에 따라 온도 편차가 증가함을 의미한다.

Table 4는 블로워 회전수에 따른 제어센서의 온도를 요약해서 보여주고 있다. 저온 조건에서 ΔT_1 값이 고온 조건 보다 큰 결과를 보여주고 있다. 이와 같은 결과는 저온 조건이 고온 조건에 비해 블로워 임펠러 및 유동에서 발생하는 발열에 의한 영향이 큰 것으로 판단된다.

Table 5는 블로워 회전수에 따라 슈라우드에 부착된 온도센서 결과 중 온도 편차, 균일도, 균질도 결과를 보여주고 있다. 고온 조건에서 ΔT_2 는 ΔT_1 과 달리 블로워 회전수에 비례하지 않는 결과를 보여주고 있다. 9,000, 8,000 RPM 조건에서 온도 편차 0.25°C 이하이며, 7,000 RPM은

Table 4. Summary of control sensor temperature for blower RPM ($\Delta T_1 = \text{Set Temp.} - \text{Control Temp.}$)

회전수 (RPM)	설정 온도 (°C)	압력 (bara)	Control Sensor	
			Average (°C)	ΔT_1 (°C)
9000	-150	2.56	-145.38	4.64
	100	6.52	98.76	-1.28
8000	-150	2.48	-144.60	5.40
	100	6.42	98.39	-1.63
7000	-150	2.37	-144.82	5.24
	100	6.33	97.45	-2.53

Table 5. Summary of shroud temperature for blower RPM ($\Delta T_2 = \text{Set Temp.} - \text{Shroud Temp.}$)

회전수 (RPM)	설정 온도 (°C)	평균 (°C)	ΔT_2 (°C)	균질도 (°C)	균일도 (°C)
9,000	-150	-145.53	-4.47	4.48	1.00
	100	100.25	0.25	1.90	0.66
8,000	-150	-145.05	-4.95	4.24	1.00
	100	100.14	0.14	2.07	0.60
7,000	-150	-146.15	-3.85	4.38	1.25
	100	99.43	-0.57	1.99	0.60

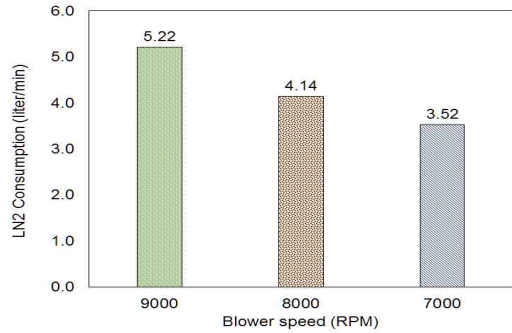


Fig. 12. LN2 consumption for various blower RPM

0.57°C로 차이를 보였다. 저온 조건에서 ΔT_2 는 고온 조건과는 달리 7,000 RPM 조건이 가장 작은 편차를 보여주고 있다.

유량, 유동 속도, 열전달률, 마찰열 등은 블로워 회전수에 비례하여 증가한다. 고온 조건에서 슈라우드 온도는 블로워 회전수와 열전달률의 관계에 따른 결과를 보여주고 있으나, 저온의 경우 블로워 회전수에 의해 마찰열이 증가하여 나타나는 결과로 판단된다.

Figure 12는 블로워 회전수에 따른 액체 질소 소모량을 측정하여 비교한 결과를 보여주고 있다. 액체질소 소모량은 회전수에 반비례 하며, 7,000 RPM의 경우 9,000 RPM에 비해 33%, 8,000 RPM에 비해 18%의 액체질소 소모량을 줄일 수 있는 결과를 보여주고 있다.

2.6.3 시스템 밀도에 따른 실험결과

폐회로 열제어 시스템은 슈라우드가 일정한 열용량을 갖도록 시스템내 작동유체의 밀도를 고정하는 방식으로 제어된다. 즉, 온도 변화에 따라 시스템내 작동유체의 압력을 제어하여 밀도가 일

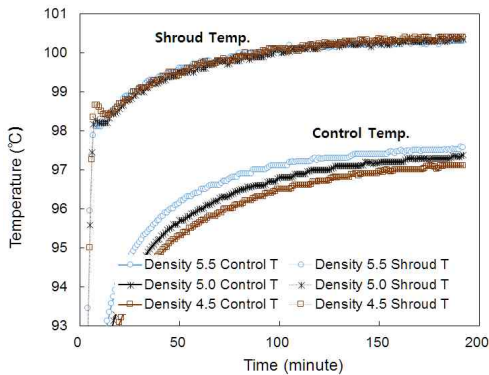


Fig. 13. Temperature trend for various system density at hot condition

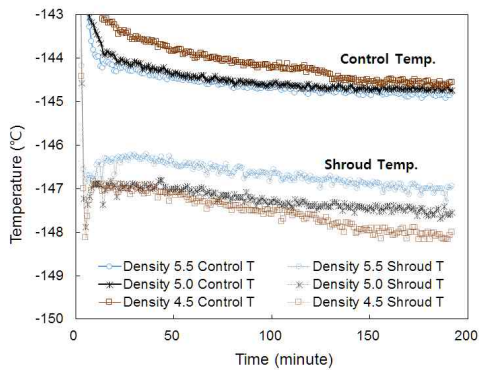


Fig. 14. Temperature trend for various system density at cold condition

정하도록 한다. 시스템내 유체 압력을 고정하여 제어하는 경우, 저온 조건에서 유체의 밀도는 과도하게 높은 값으로 유지되며 동일한 유량을 공급하기 위해 극저온 블로워는 추가적인 전력이 필요하다. 따라서 효율적으로 시스템을 구동하기 위해서는 유체의 밀도를 고정하는 제어 방식이 사용된다.

시스템내의 밀도를 제어 변수로 고온 및 저온 조건에서 작동 유체의 밀도에 따라 실험을 수행하여 폐회로 열제어 시스템의 특성을 분석하였다. Table 3의 실험 조건과 같이 회전수를 고정하고, 작동 유체의 밀도를 5.5, 5.0, 4.5로 변경하여 실험을 수행 하였다.

Figure 13, 14는 고온 및 저온 조건에서 밀도에 따른 제어센서 및 슈라우드 온도 경향을 보여주고 있다. 제어센서와 온도는 밀도가 높을수록 설정온도에 근접하는 경향을 보였다. 고온 조건에서 슈라우드 온도는 밀도에 따른 온도 편차 없는 결과를 보여주고 있으며, 저온 조건에서 슈라

우드 온도는 밀도가 낮을수록 설정온도와 근접한 결과를 보여주고 있다.

시스템내 유체 밀도가 클수록 큰 열유량을 확보할 수 있으나, 이에 따른 영향을 확인하기 위해서는 열진공 챔버 내부에 인위적인 열원 공급한 조건에서 슈라우드 온도 분포에 대한 분석이 추가로 필요할 것으로 판단된다.

2.6.4 슈라우드 특성에 따른 실험결과

열제어 시스템의 설계는 시스템 형태, 온도 균일도, 균질도와 같은 설계 요구조건에 따라 블로워 유무, 슈라우드 형태와 재질을 선정 하여야 한다. 슈라우드의 형태와 재질에 따라 열제어 시스템의 형태가 결정된다. 이에 따라 슈라우드 형태, 재질에 따른 특성 분석이 필요하다. 다른 형태의 슈라우드가 설치된 각각의 열진공 챔버에 동일한 사양을 갖는 극저온 블로워를 설치하여 슈라우드에 따른 실험 및 특성 분석을 수행하였다.

Table 6은 실험에 사용된 열진공 챔버의 제원을 보여주고 있으며, 실험을 통해 슈라우드 형태와 재질에 따른 온도 편차, 온도 분포와 같은 시스템의 경향을 확인 할 수 있다.

Table 6. Test chamber specification

Case	#1	#2
Test chamber	TVC 10	TVC 07
Shroud type (material)	Plate-tube type (Aluminium)	Dimple type (Stainless steel)
Blower Spec. flow rate (dp)	400 CFM (0.5 bara)	400 CFM (0.5 bara)

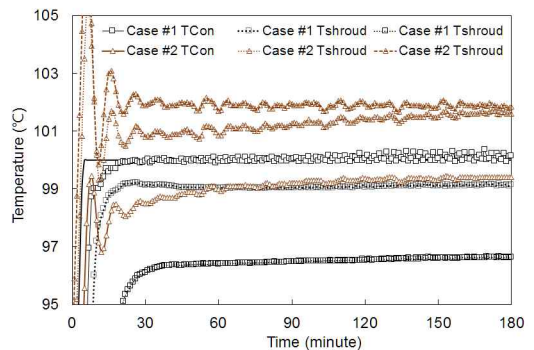


Fig. 15. Temperature trend for shroud design at hot condition

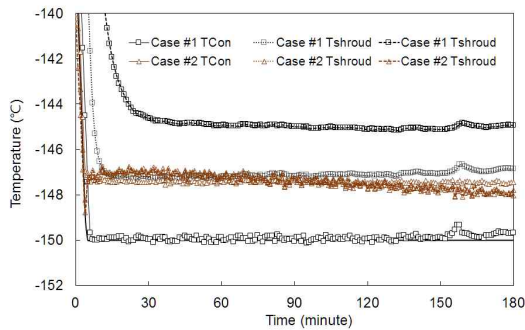


Fig. 16. Temperature trend for shroud design at cold condition

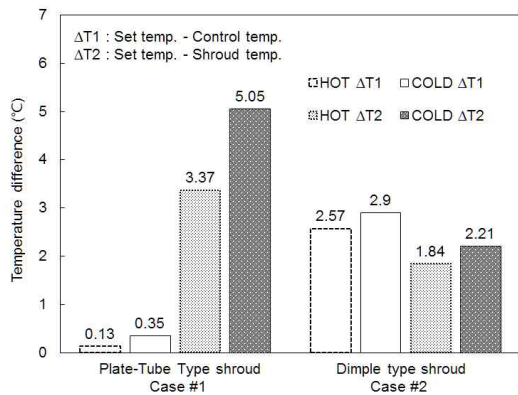


Fig. 17. Temperature difference for shroud design

Figure 15, 16은 고온과 저온 조건에서 슈라우드 재질 및 형태에 따른 제어센서 및 슈라우드의 온도 경향을 보여주고 있으며, Fig. 17은 설정온도와 제어센서, 슈라우드와의 온도 편차를 보여주고 있다.

Case #1(플레이트 튜브 타입 슈라우드)의 제어센서는 Case #2(딴플 타입 슈라우드)의 제어센서에 비해 작은 편차로 설정온도에 도달하였다. $\Delta T1$ 은 슈라우드형태에 따라 큰 차이를 보여주고 있다. 이와 같은 결과는 슈라우드 형태에 따른 유체의 압력 손실, 유동 속도 등의 차이에 의한 결과로, Case #1은 Case #2에 비해 유로가 상대적으로 간단하고, 유동 면적이 넓지 않기 때문에 유체의 온도가 설정온도에 근접한 결과를 보여주는 것으로 판단된다.

$\Delta T2$ 는 $\Delta T1$ 과는 상반된 결과를 보여주고 있다. Case #1의 경우 유체와 슈라우드는 전도에 의한 열이 전달되는데 비해, Case #2의 경우 유체와 슈라우드와의 직접적인 열전달, 넓은 열전달 면

적에 의한 영향으로 판단된다.

III. 결 론

열진공 챔버에 적용되는 열제어 시스템은 시스템내의 압력 강하, 온도 요구조건, 온도 변화율, 온도분포, 균일도와 같은 변수를 고려하여 선정하여야 한다. 특히, 폐회로 열제어 시스템의 경우 극저온 블로워의 유량, 차압과 같은 성능을 고려하여 시스템을 설계하여야 한다. 극저온 블로워 유량은 극저온 블로워의 유량, 열용량, 입출구의 엔탈피 변화를 고려하여 적절한 유량을 선정할 수 있다. 또한, 슈라우드, 배관에 의한 압력 손실을 고려하여 설계하여야 한다.

블로워 회전수, 압력, 밀도와 같은 제어변수 등에 대한 실험을 수행하여 폐회로 열제어 시스템에 대한 특성 결과를 확보할 수 있었다.

유체의 온도는 유량에 비례하여 변화는 경향을 보였으며, 슈라우드의 온도는 임펠러 회전시 발생하는 발열량에 비례하는 결과를 보여주고 있다. 따라서 블로워 회전수는 시스템 설정온도에 따라 가변할 수 있도록 제어로직을 설계하면 효율적으로 사용할 수 있을 것으로 판단되며, 슈라우드 온도 편차, 균일도, 균질도의 요구조건을 고려하여 블로워 회전수를 낮게 운용하면 액체질소 소모량 최대 30%이상 절감할 수 있을 것이다.

플레이트 튜브 타입의 슈라우드는 상대적으로 낮은 차압을 갖는 블로워 적용이 가능하며, 딴플 타입 슈라우드의 경우 높은 차압 및 큰 용량을 갖는 블로워를 적용하여야 한다. 슈라우드 특성의 경우, 동일한 실험조건에서 슈라우드의 형상을 변경하여 실험하는 것은 불가능하다. 따라서 슈라우드 특성에 따른 3차원 유동 해석을 통해 압력 손실, 유동장 분석이 필요하다.

본 연구에서 확보된 제어변수별 성능 자료는 열제어 시스템의 설계에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- 1) David G. Gilmore, Satellite Thermal Control Handbook, thermal testing, 9-17, 1994.
- 2) H.J Seo, H.J Cho, S.H Lee, G.W Moon, "Analysis of Close loop thermal control system and review of test result", KSSS Conference, 2011.
- 3) H.J Seo, S.M Ahn, H.W Huh, "Design

and Performance Test of a Cryogenic Blower for Space Thermal Environment Simulation”, Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences Vol. 41, No. 10, 2013

4) S.H Lee, H.J Cho, H.J Seo, G.W Moon, “Shroud System Development For a Large

Thermal Vacuum Chamber”, ESTECH 2004 Proceedings IEST, 2004

5) H.J Seo, S.H Lee, H.J Cho, G.W Moon, “A Space Environment Simulator Design for Verification of the Large Satellite”, SAREK Conference, 2003