

적외선 윈도우 냉각장치 유로 설계

박연정*

A Flow Channel Design on IR Window Cooling Device

Youn-Jung Park*

ABSTRACT

This paper presents the flow passage design for a window cooling device, which have a conical poppet valve and an emissive orifice. Computational flow analysis and experiment are conducted according to the poppet strokes. The results show satisfactory flow characteristics that pressure is reduced enough to endure material strength and the flow does not choked inside window. The correction factor of discharge coefficients is found between 2-dimensional analysis and experiments, which is applied to control coolant flow rates of the window cooling device.

초 록

본 연구에서는 적외선 윈도우의 냉각을 위해 포핏 밸브와 방사형 오리피스로 구성된 냉각장치 유로를 설계하였다. 필요한 냉각제의 양은 운용조건에 따라 달라지므로 포핏 행정거리에 따른 유동장의 유량과 윈도우 전후단 압력 변화를 유동해석을 통해 예측하고 실험을 통해 이를 확인하였다. 설계된 포핏과 방사형 오리피스 유로는 윈도우 냉각에 필요한 유량을 공급하며 윈도우 구조 강도를 만족하도록 내부 압력을 낮추고 적외선 이미징 신호의 왜곡이 없도록 아음속으로 유지하여 요구 조건을 충족시켰다. 실험으로 측정된 유량을 이용하여 윈도우에서의 송출계수와 2차원 해석결과 사이의 보정계수를 확인하였으며 이를 냉각장치의 유량제어에 사용하였다.

Key Words : Window Back Surface Cooling(윈도우 내부 냉각), Window Cooling(창 냉각), Internal Cooling(내부 냉각), Cooling Device(냉각 장치)

1. 서 론

유도탄에서 적외선 영상 탐색기를 사용하기 위해서는 탐색기를 외부 환경으로부터 보호하고 적외선 에너지를 효과적으로 전달하는 탐색기 창 설계가 필요하다. 투과율(transmissivity)과 방사율(emissivity) 등의 광학적 특성이 우수한 사파이어(sapphire, Al_2O_3)가 적외선 탐색기의 창으로 사용되고 있다. 그러나 극초음속(hypersonic)

의 운용 환경에서 공력에 의한 급격한 온도 상승은 탐색기 창의 흡수율(absorptivity)과 방사율을 증가시키며 열충격으로 인하여 강도, 경도의 저하를 가져올 수 있다. 따라서 Sapphire 탐색기 창의 온도를 일정수준 이하로 유지시켜주는 냉각장치가 필요하다.

상온의 기체나 액체를 이용하여 적외선 탐색기 창을 냉각하는 방법이 있으나 국내에서는 그 연구가 미미한 실정이다[1-3]. 본 논문에서는 기체(N_2)를 이용해 적외선 윈도우를 냉각시키는 방법을 다루었다. 기체를 이용한 냉각 방식에는 냉각제의 초음속 유동을 탐색기 창 외부로 흘러 냉각하는 외부 막 냉각(external film cooling) 방식

† 2011년 4월 5일 접수 ~ 2011년 5월 23일 심사완료

* 정회원, 국방과학연구소

교신저자, E-mail : zarapark@gmail.com

대전시 유성구 수남동 111

과 냉각제를 아음속으로 윈도우 내부로 통과시키는 내부 냉각(internal cooling) 방식이 있다. 외부 막 냉각 방식은 냉각제 유량이 많이 필요하고 고도, 속도, 자세 등의 유도탄 운용조건에 따라 냉각 효과가 달라지며 외부 난류 영향으로 인해 Aero-optical noise가 발생할 수 있다. 이에 반해 내부 냉각 방식은 외부 유동에 의한 영향이 없고 윈도우의 온도를 균일하게 조절 가능하므로 본 연구에서는 내부 냉각 방식을 선택하였다.

내부 냉각은 탐색기 창 내부에 채널을 뚫어 냉각제가 흐르게 하는 방식이며 탐색기 창은 내부 창(inner window)과 외부 창(outer window), 지지대(support)로 구성된다. 운용조건에서 윈도우에 발생하는 열을 감소시키기 위해 필요한 냉각제 양을 계산을 통해 추정하였다. 윈도우 내부는 재료의 구조 강도를 만족하도록 냉각제 압력을 일정 압력 이하로 유지해야 하므로 냉각장치 유로에 오리피스스를 배열하여 공급압을 충분히 감소되도록 하였다. 또한, 적외선(IR)의 왜곡이 생기지 않도록 윈도우 내부의 속도를 아음속으로 유지시키기 위해 방사형 오리피스스를 적용해 유로를 설계하였다. 유도탄의 고도나 속도에 따라 필요한 냉각제의 양은 달라지므로 밸브를 사용하여 유로의 면적을 변화시켜 능동적으로 유량을 조절하였다. 밸브 행정거리에 따른 유동장의 유량과 윈도우 전후단 압력 및 속도 변화를 유동해석을 통해 예측하고 실험을 통해 이를 확인하였다.

II. 이론적 유로 설계

2.1 유량 추정 및 공급유로 설계

냉각에 필요한 유량을 계산하기 위해서는 윈도우 표면조건을 알아야한다. 고도 20 km에서 윈도우가 속도 2100 m/s의 외부에 노출될 경우 열용량(heat flux)은 220 W/cm²이며 윈도우의 크기가 50×80 mm² 일 때 8.8 kW의 열(\dot{q})이 발생한다. 질소 가스를 이용해 윈도우를 냉각할 경우 허용되는 상온 질소의 온도차(ΔT)는 38 °C이며 식 (1)에 의해 필요한 냉각제의 유량(\dot{m})은 0.22 kg/s로 추정된다.

$$\dot{m} = \frac{\dot{q}}{C_p \Delta T} \quad (1)$$

(여기서, C_p : 정압비열)

열전달 해석과 구조해석 및 사파이어 제작 가능성, 지지대(support)에 의한 적외선(IR) 차단율을 고려하여 사파이어 윈도우 내부유로의 면적

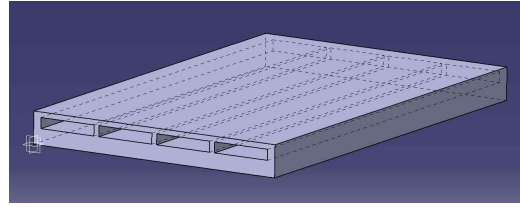


Fig. 1. Configuration of a Sapphire window

(11 mm × 2 mm × 4개)은 Fig. 1과 같이 설정되었다[4].

냉각제의 공급유로는 다음의 조건을 만족하도록 설계되어야 한다. 즉,

- 1) 윈도우 내부는 충격파로 인한 적외선 왜곡 방지를 위해 아음속(subsonic)으로 유지되어야 한다.
- 2) 구조응력을 견디기 위해 사파이어 윈도우 내부를 통과하는 질소의 압력은 163 psia 이하로 유지되어야 한다.
- 3) 냉각제의 유량은 0.22 kg/s 이하이며 운용조건에 따라 요구 유량은 조절 가능해야 한다.

냉각제의 유량(\dot{m}_{cr})은 주어진 사파이어 윈도우 형상과 챔버의 전압력에 의해 결정되며 다음 식 (2)를 이용하여 계산된다.

$$\dot{m}_{cr} = \frac{P_0 A^* C_d}{\sqrt{T}} \sqrt{\frac{\gamma}{R} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (2)$$

(여기서, R: 기체상수, γ : 비열비)

여기서, 공급되는 냉각제는 압력 500 psia, 온도(T) 300K인 질소가스로 설정하고 유로면적(A^*)은 채널의 면적인 88 mm²이며 송출계수(C_d , discharge coefficient) 값을 0.8로 가정하면 윈도우 전단 챔버의 전압력(P_0)은 약 190 psia 로 예측된다.

윈도우 전단 챔버의 압력을 190 psia 이하로 만들기 위해서는 공급되는 압력의 감압이 필요하다.

공압의 압력과 유량을 제어하는 수동적인 방법으로 고정 오리피스스를 사용하는 방법이 있으며 그 형태에 따라 노즐형, 사각형, 썬기형(sharp-edged) 오리피스스가 있다. 능동적인 방법으로는 밸브를 사용하여 유로의 면적을 변화시켜 압력과 유량을 제어하는 방법이 있다. 본 연구에서는 고도와 속도에 따라 냉각제의 유량 조절을 하기 위해서 Conical Poppet을 사용하여 포켓과 시트부와의 면적 변화에 따라 유량을 조절하는 방법을 사용하였다.

500 psia의 질소가스가 오리피스를 통과할 때, 최대 유량이 통과하기 위해서 필요한 면적은 식 (2)를 이용해 구할 수 있다. 단, 식 (2)는 최소면적(A^*)에서 압력이 초킹(choking) 될 때 사용할 수 있는 식이며 초킹되지 않는 유동의 경우 아래 식 (3-4)을 사용하여야 한다.

$$\dot{m} = \frac{P_1 A_{12} N_{12} C_d}{\sqrt{T_1}} \sqrt{\frac{\gamma}{R} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (3)$$

where,

$$N_{12} = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_{cr}} = \left[\frac{P_2 \frac{2}{\gamma} - P_1 \frac{\gamma+1}{\gamma}}{\frac{\gamma-1}{2} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \right]^{1/2} \quad (4)$$

(여기서, N_{12} : 유량비, P_1 : 전단압, P_2 : 후단압)

일반적으로 Conical Poppet의 송출계수(C_d)는 0.72~0.87 사이에 존재하며 여기서는 오리피스의 송출계수를 0.8로 가정한다[5]. 500 psia의 공급가스가 초킹될 경우 최대 유량(\dot{m}) 0.22 kg/s가 통과하기 위한 포펫과 시트부의 최대 면적(A_{12})은 약 34 mm²이 되므로 시트부의 직경을 6.5 mm로 결정하였다.

2.2 오리피스 배열

먼저 공급압을 163 psia 이하까지 낮추고 유량을 조절하기 위해 냉각제 탱크 다음 단계 Conical Poppet을 위치시킨다. 포펫과 시트부의 간격 변화에 따른 압력, 유량 민감도를 떨어뜨리기 위하여 Fig. 2와 같이 포펫의 각도를 18도로 작게 선정하고 직경 6.5 mm의 시트부에 닿도록 위치시킨다. 포펫을 이용한 가변오리피스 다음 단계는 Fig. 3과 같이 오리피스를 하나 더 배열하여 윈도우 전단압력이 190 psia 이하까지 충분히 떨어지도록 하였다.

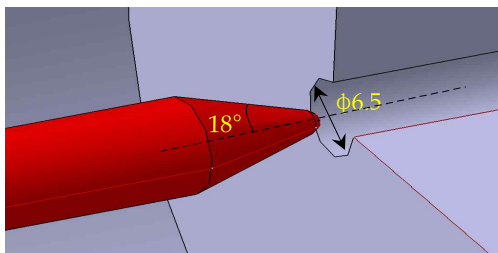


Fig. 2. Configuration of a conical poppet and seat

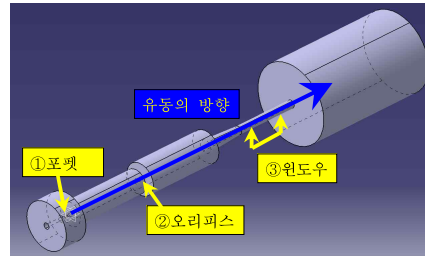
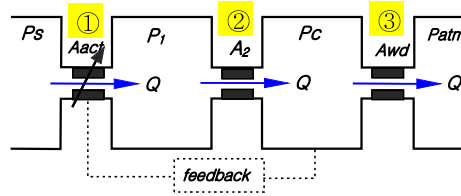


Fig. 3. Sketch and configuration of a flow channel on window cooling device

III. 유동해석 및 성능분석

윈도우의 요구조건을 충족하는 냉각제를 공급하기 위해 몇 가지 형태의 공급유로를 모델링하고 유동해석을 수행하였다. 최적의 형상을 선택하여 포펫의 행정거리 변화에 따른 유동해석을 통해 유량과 유로특성을 파악하고 그 결과를 이론식과 비교하여 유로에서의 송출계수를 계산하였다.

3.1 해석격자 및 경계조건

윈도우 냉각장치 유로는 Fig. 4와 같이 하나의 가변오리피스와 두 개의 고정 오리피스로 구성되어 먼저 기본 오리피스에 대한 유동특성을 파악하였다. 냉각장치의 크기를 줄이고 유속과 압력을 효율적으로 감소시키기 위해 Figs. 5, 6과 같이 윈도우 전단 챔버 앞의 고정 오리피스를 방사형으로 만들어 챔버 내의 유속을 최소화하고자

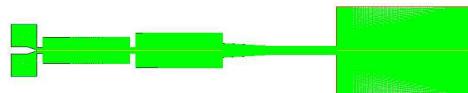


Fig. 4. Flow channel with basic orifices

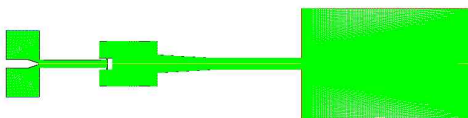


Fig. 5. Flow channel with an emissive orifice

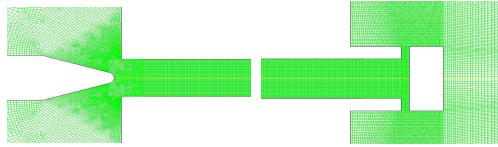


Fig. 6. Enlarged configuration of poppet and emissive orifice

Table 1. Number of meshes and boundary conditions

Δx [mm]	Cell No.	P_s [psia]	P_{atm} [psia]
8.7	59,074	500	14.7
2.9	56,160	703	14.7
1.9	55,601	771	14.7
1.2	55,013	810	14.7

하였다. 윈도우 내부 유로의 면적은 선정된 형상과 동일하게 유지하고 2차원 축대칭으로 모델링하여 계산의 효율을 높이고자 하였다.

제안된 형상으로 정상상태(steady state) 계산을 수행하기 위해 네 가지 경우의 행정거리(포펫과 시트부의 간격)에 대해 상용프로그램인 Gambit 2.2를 이용하여 형상과 격자를 생성하였으며 해석에 사용된 격자수는 Table 1과 같다. 경계조건으로 입구부에 pressure inlet, 출구부에 pressure outlet, 중심축은 axis symmetric, 그 밖의 부분은 wall 조건을 적용하였다. 오리피스 유동을 정확하게 계산하기 위해 벽부분에 경계층(boundary layer) 조건을 적용하고 격자를 집중시킨 후 사각형 격자를 생성하였다.

해석은 유동해석 도구로 널리 사용되는 Fluent 6.3을 이용하여 공간으로는 셀중심법, 시간으로는 정상상태, 내재적 시간 적분법을 적용하였다. 난류모델은 S-A Viscous Model을 사용하여 계산하였다[6]. 사용된 유체는 이상기체인 상온(300 K)의 질소 가스이고 각 스트로크에서의 압력 경계조건은 Table 1에 나타내었다. 입구 압력 조건이 다른 것은 시험과 동일한 조건에서 결과를 비교하기 위함이다.

3.2 유동 분석 및 유로 최적화 설계

3.2.1. 기본 오리피스 유로

고정 오리피스 3개를 가지는 형상에 대해 유동해석을 실시하였으며 포펫은 8.70 mm로 최대로 열려있는 조건이다.

Figs. 7, 8은 유동해석을 통해 얻은 냉각유로의 압력과 속도 분포이다. 500 psia로 공급된 압력은 첫 번째 오리피스(포펫)를 통과하면서 390

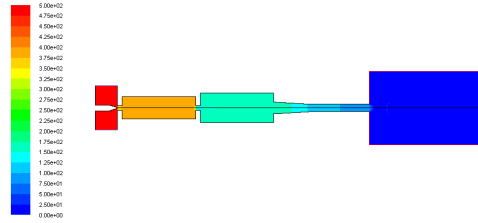


Fig. 7. Static pressure distribution

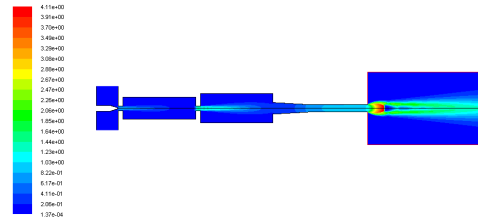


Fig. 8. Mach number distribution

Table 2. Static pressure and mach number inside a flow channel

구분	공급 챔버	중간 챔버	윈도우 전단 챔버	윈도우 내부	출구
Ps	500	390	155	110-90	14.7
M.	-	0.05	0.3	0.75-1	-

psia로 감압한 후 두 번째 오리피스에서 다시 155 psia로 감압되고 윈도우를 통과하여 빠져나간다. 윈도우 내부 압력은 110~90 psia를 유지하므로 요구규격인 163 psia 이하 조건을 만족한다. 그러나 윈도우 전단 챔버의 속도는 마하 0.3 이상으로 챔버 내부에 유속이 존재하므로 유량에 측이 어렵다.

따라서 윈도우 전단 챔버에 속도가 없는 정체 상태가 되도록(즉, 정압=전압) 챔버의 크기 증가나 유로 수정이 필요하다.

3.2.2. 방사형 오리피스 유로

윈도우 전단 챔버의 속도를 효과적으로 줄이기 위하여 유로의 방향을 90도 바꾼 형상에 대해 유동해석을 실시하였다. 유로는 Fig. 6과 같이 90도로 꺾이고 면적은 오리피스 면적과 동일하게 유지한다. Figs. 4, 5를 보면 유로의 변경으로 유동방향의 길이를 크게 줄일 수 있다.

네 가지 형상에 대해 유동해석을 실시하였다. Figs. 9, 10은 포펫 행정거리 변화에 따른 냉각유로의 압력과 속도 분포이다. 실험과의 비교를 위해서 행정거리와 해석의 입구조건인 공급챔버 압력을 동일하게 Table 3과 같이 설정하였다. 행정거리 감소에 따라 정압이 크게 감소하는 경향을

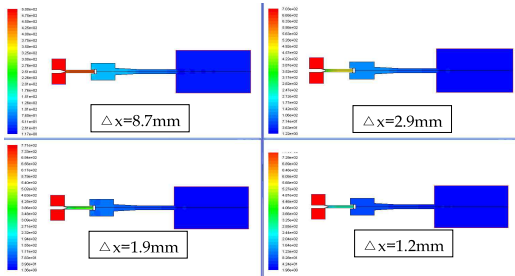


Fig. 9. Static pressure distribution (poppet strokes Δx)

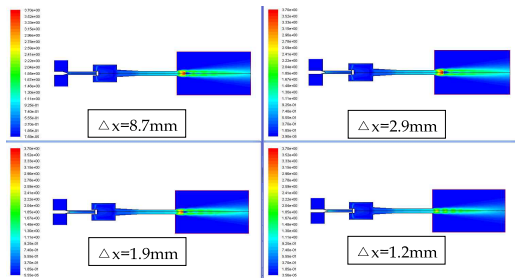


Fig. 10. Mach number distribution (poppet strokes Δx)

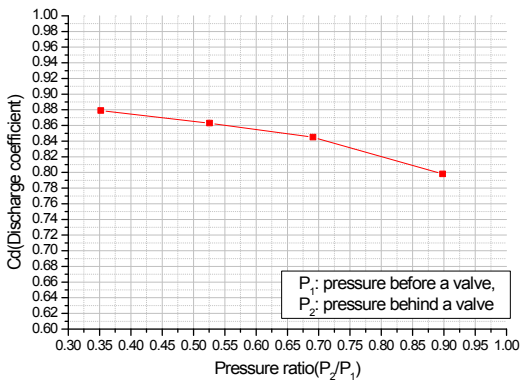


Fig. 11. Discharge coefficients(Cd) for a poppet valve

Table 3. Flow characteristics (poppet valve)

Δx [mm]	공급 챔버	튜브 내부	포펫힘 [N]	유량 [kg/s]
8.7	Ps	500	450	0.134
	M.	-	0.4	
2.9	Ps	703	490	0.145
	M.	-	0.4	
1.9	Ps	771	405	0.121
	M.	-	0.4	
1.2	Ps	810	285	0.085
	M.	-	0.4	

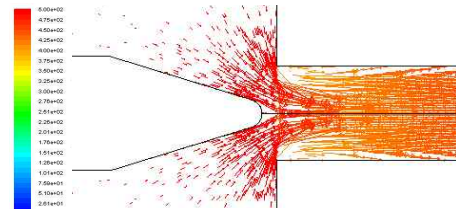


Fig. 12. Velocity vector contour around poppet valve($\Delta x=8.70$ mm)

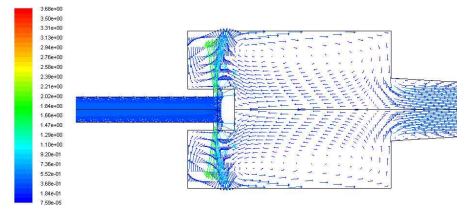


Fig. 13. Velocity vector contour around a emissive orifice($\Delta x=8.70$ mm)

Table 4. Flow characteristics (window channel)

Δx [mm]	원도우 전단챔버	원도우 내부	출구	유량 [kg/s]	
8.7	Ps	110	75-60	14.7	0.134
	M.	0.05	0.75-1	-	
2.9	Ps	127	80-60	14.7	0.145
	M.	0.05	0.75-1	-	
1.9	Ps	101	70-50	14.7	0.121
	M.	0.05	0.75-1	-	
1.2	Ps	70	50-35	14.7	0.085
	M.	0.05	0.75-1	-	

보이며 상세결과는 Table 3에 함께 나타내었다.

공급 챔버에서 공급된 압력은 첫 번째 오리피스인 포펫을 통과하면서 감압되며 행정거리가 작은 1.9, 1.2 mm의 경우에는 초킹된다. Fig. 11은 포펫 전후의 압력비에 따른 송출계수를 나타낸 것이다. 압력비가 증가할수록 손실이 증가함을 알 수 있으며 이는 일반적인 오리피스의 특성과도 일치한다. 질소 가스는 0.528의 압력비에서 초킹이 일어나며 초킹이 일어나지 않는 조건에서 압력손실이 0.8로 가장 큼을 알 수 있다. 유동해석에서 얻어진 송출계수를 이용해 포펫의 행정거리를 조절하면 정밀한 유량 조절이 가능하다.

Fig. 12는 스트로크 8.7 mm일 때 포펫을 통과하는 유동을 나타낸 것으로 압력값을 색깔로 나타내었다. 포펫에 작동하는 압력힘은 Table 3에 나타난 바와 같이 모든 경우 100 lbf(450 N) 이하로 유지된다.

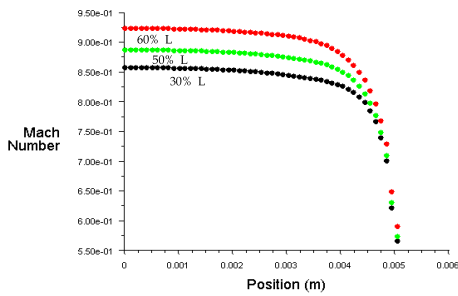


Fig. 14. Mach number distribution along radial direction(window distance 30%, 50%, 60% length)

두 번째 오리피스는 유동을 방사형으로 배출하여 윈도우 전단 챔버에서의 속도를 마하수 0.1 이하로 감소시킨다(Table 4, Fig. 13). 따라서 윈도우 전단 챔버에는 전압이 존재한다고 볼 수 있으며 이 압력을 제어하여 윈도우에 원하는 유량을 공급할 수 있다.

윈도우 내부 압력은 80~35 psia를 유지하므로 요구규격인 163 psia 이하 조건을 만족하며 윈도우의 내부 속도는 마하 0.75~1.0을 유지한다(Table 4). Fig. 14는 윈도우 내부에서 유로 원주방향으로의 속도 분포로 비교적 균일한 유동이 흐르는 것을 알 수 있다. 발달되지 않은 유동이 유입되면 유로의 원주방향으로 속도구배가 존재하여 윈도우 표면의 냉각에 좋지 않기 때문에 균일한 유동이 흐를수록 효율적이다.

IV. 실험 및 결과분석

실험을 통하여 윈도우에 공급되는 질소의 유량과 윈도우 전단 챔버 압력, 윈도우 내부 압력, 포켓 행정거리를 측정하여 유동의 특성을 확인하였다. 그리고 측정된 유량과 측정된 압력으로 계산되는 유량을 이용하여 윈도우에서의 송출계수를 구한 후 해석 결과와 비교하였다.

4.1 실험장치 구성

윈도우 냉각 시스템의 실험 장치는 아래 Figs. 15, 16과 같이 제어 장비와 시험물, 공압 공급장치, 각종 센서들로 구성된다. 공급되는 질소는 Fig. 16에서 보는바와 같이 압력센서와 유량계를 지나 구동기로 공급되고 구동기와 방사형 오리피스를 통과하여 윈도우 전단 챔버를 거쳐 윈도우에 공급된다. 이때 윈도우의 전단압과 내부압은 압력센서를 이용해 측정하여 요구조건을 만족하

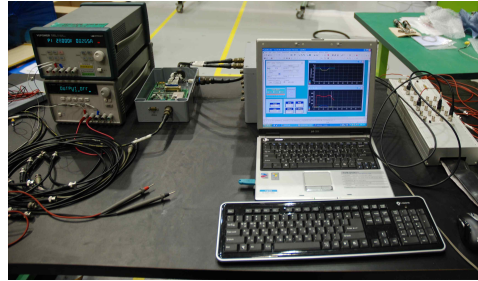


Fig. 15. Test controller

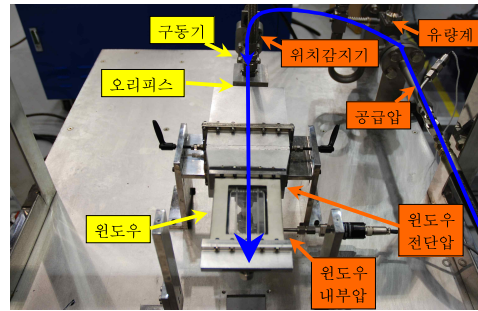


Fig. 16. Configuration of window cooling device

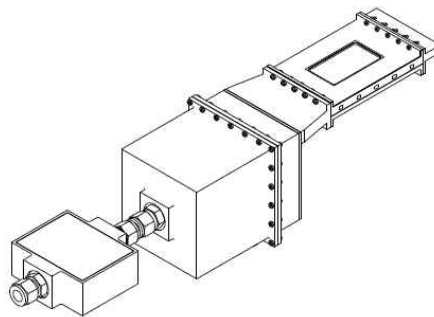


Fig. 17. Drawing of products

는지 확인하고 위치감지기를 이용해 구동기의 행정거리도 측정한다. Fig. 17은 제작된 시험물 형상으로 실제 3차원의 윈도우는 유로의 중앙이 아닌 위쪽에 위치하며 윈도우 전단 챔버는 확실한 전압 확보를 위해 해석에 사용된 설계보다 크게 제작되었다.

포켓의 구동 및 압력센서, 위치감지기, 온도센서의 신호처리 등 시스템 제어와 신호 계측 및 저장을 위해 D-Space 및 제작된 구동 드라이버 모듈을 제어기로 사용하였다. 질소 펌프로부터 500~850 psi의 압력을 공급하였으며 전기식 구동기를 사용하여 포켓을 작동하였다.

제어기는 윈도우 전단의 챔버 압력을 피드백

받아 유량을 계산하고 냉각제의 요구유량이 공급 되도록 포펫 행정거리를 조절한다.

4.2 실험결과 및 분석

윈도우 전단압이 65, 90, 115 psia로 유지되도록 실험을 실시하였다.

주어진 윈도우 전단압을 유지하기 위해서 제어기는 냉각제 공급 유량과 포펫 행정거리를 계산하여 명령을 내보낸 후 그 위치와 윈도우 전단압력 결과값을 피드백 받아 오차를 보상한다. 아

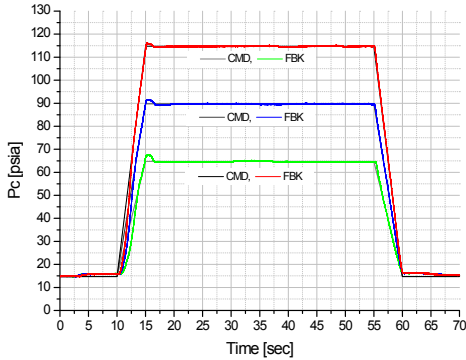


Fig. 18. Pressure command(CMD) and feedback(FBK) in front of a window

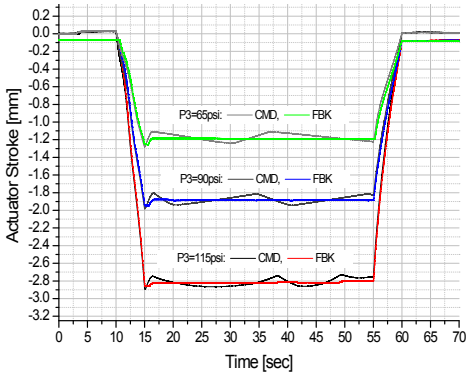


Fig. 19. Poppet stroke command(CMD) and feedback(FBK)

Table 5. Test Results according to poppet strokes

포펫 스트로크 [mm]	공급압 (P ₁) [psia]	윈도우 전단압(P ₃) [psia]	냉각제 유량 [kg/s]
2.8	703	115	0.1287
1.9	771	90	0.0980
1.2	810	65	0.0696

Table 6. Flow rate comparison

윈도우 전단압(P ₃) [psia]	냉각제 측정유량 [kg/s]	이상적 이론유량 [kg/s]	송출계수 (C _d) [-]
115	0.1287	0.16645	0.77
90	0.0980	0.13026	0.75
65	0.0696	0.09408	0.74

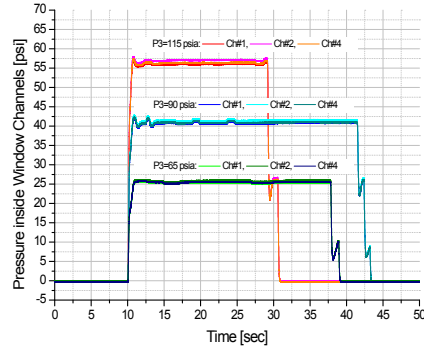


Fig. 20. Pressure inside a window channel

래 Figs. 18, 19는 실험에 사용된 압력과 포펫 위치 명령 및 피드백 결과이며 Table 5는 측정된 유량을 포함한 상세 결과이다. 시험 장치의 공급 유량 한계로 부하(포펫 행정거리)에 따라 Table 5의 공급압(P₁)이 다소 변동이 있으나 윈도우 전단압(P₃)을 제어하여 유량을 결정하므로 시험을 진행하였다. Fig. 18과 19에서 윈도우 전단압과 포펫 위치는 명령을 잘 추종하며 동작함을 알 수 있다.

Table 6에 윈도우 전단압 변화에 따른 냉각제 유량 변화를 나타내었다. 여기서 이론 유량은 유동이 손실없이 이상적으로 통과한 경우, 즉 C_d 값을 1로 가정했을 때 초극된 유량을 계산한 것이다. 실험결과 송출계수는 0.77~0.74의 범위에 존재하며 이는 일반적인 사각형 오리피스 C_d값보다 작은 범위이다. 윈도우 전단 챔버에서 윈도우 출구까지의 형상은 면적 감소부와 유지부로 구성되어 있는 비교적 긴 오리피스이므로 내부 손실이 사각형 오리피스보다는 많을 것이다. 유동해석 결과와 비교(0.83)해보면 송출계수는 실험치보다 10% 높은 경향을 나타낸다. 이는 2차원 축대칭 모델링의 경우 실제 3차원의 사각 기둥 형상을 원기둥 형태로 모델링하기 때문에 손실이 작게 계산되기 때문이다. 따라서 실험시 송출계수는 2차원 유동해석보다 10% 보정하여 압력을 제어하였다.

Fig. 20은 윈도우 내부 각 채널의 압력 차이를 알기 위해 4개의 채널 중 1, 2, 4번 채널에서 측정된 압력을 나타내었으며 윈도우 전단 챔버 압

력이 동일할 경우 채널별 압력 공급의 편차는 없
이 균일하게 압력이 형성되었다.

V. 결 론

사파이어 윈도우의 냉각을 위해 윈도우 내부
압력과 아음속 속도 조건을 만족하도록 냉각장치
의 유로를 설계하였다. 필요한 냉각제의 양은 운
용조건에 따라 달라지므로 밸브를 사용하여 유로
의 면적을 변화시켜 유량을 조절하였다. 포켓 행
정거리에 따른 유동장의 유량과 윈도우 전후단
압력 변화를 유동해석을 통해 예측하고 실험을
통해 이를 확인하였다.

설계된 포켓과 방사형 오리피스 유로는 윈도
우 냉각에 필요한 유량을 공급하며 압력 및 속
도 조건을 충족시켰다. 이론식으로 계산된 유량
과 실험으로 측정된 유량을 이용하여 윈도우에
서의 송출계수와 2차원 해석결과 사이의 보정
계수를 확인하였으며 이를 냉각장치의 유량제
어에 사용하였다. 추후 3차원 해석을 통해 보다
정확한 송출계수를 얻어 유량제어에 사용할 계
획이다.

참고문헌

- 1) Goldman L. M., Collins S. R., James D. B., Blanchard D. M., Wirth S., "Internal Fluid Cooled Window Assembly", Patent US 6530539 B2, 2003.
- 2) Hodge R. A., Murray A. L., Street T. A., "Window Cooling Technology Program", AIAA 92-2803, 1992.
- 3) Wojciechowski C. J. et al, "Internally Cooled Window for Endoatmospheric Homing", AIAA 93-2684, 1993.
- 4) Merrigan M., Wurden G. A., "Tokamak Physics Experiment: Diagnostic Windows Study", Los Alamos National Lab., LA-13053-MS, 1995.
- 5) Andersen B. W., *The Analysis and Design of Pneumatic Systems*, Robert E. Krieger Publishing Company, 1976, pp. 30~39.
- 6) GAMBIT 2.0/FLUENT 6.3 Documentation, Fluent Inc., 2006.