

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2010.34.4.391

액체질소를 이용한 산화제펌프의 극저온 성능시험

김진선*† · 홍순삼* · 김대진* · 최창호* · 김진한*

* 한국항공우주연구원 터보펌프팀

Cryogenic Performance Test of LOX Turbopump in Liquid Nitrogen

Jin-Sun Kim*†, Soon-Sam Hong*, Dae-Jin Kim*, Chang-Ho Choi* and Jinhan Kim*

* Dept. of Turbopump, Korea Aerospace Research Institute

(Received October 8, 2009 ; Revised February 2, 2010 ; Accepted February 3, 2010)

Key Words: Turbopump(터보펌프), Cryogenic Fluid(극저온 유체), Cryogenic Cavitation Performance (극저온 흡입성능), Liquid Nitrogen(액체질소)

초록: 액체질소를 작동유체로 한 극저온 시험설비를 이용하여 산화제펌프의 성능시험을 수행하였다. 설계회전수의 30~55%영역에서 시험을 수행하였으며, 그 결과를 작동유체로 물을 이용한 상온수류시험의 결과와 비교/분석하였다. 수력성능에 있어서는 회전수에 대한 상사성을 만족시킴으로써, 설계회전수인 20000rpm에서의 성능예측을 가능하게 했다. 펌프의 극저온 흡입성능에서는 설계유량에서 극저온 임계 캐비테이션 수가 0.012으로 나타났으며, 상온수류시험의 경우는 0.024를 보이면서, 모든 시험회전수와 시험유량영역에서 수류시험의 경우보다 향상된 결과를 보였다. 이러한 향상된 극저온 환경에서의 흡입성능은 극저온 유체에서 펌프의 열역학적인 효과로부터 기인하는 것으로 판단된다.

Abstract: Performance tests of a liquid-oxygen pump were carried out using liquid nitrogen (LN2) as a working fluid in a cryogenic turbopump test facility in Korea Aerospace Research Institute (KARI). The tests were performed at 30-55% of the design rotational speed, and the results were compared with those from a water test. The experimental results confirmed the similarity of the hydraulic performance, which allows the prediction of the pump performance at a design rotational speed of 20,000 rpm. The overall cavitation performance of the pump in the cryogenic environment was better than that in the water environment for all ranges of flow rates and rotational speeds. Critical cavitation number at the design flow rate was determined as 0.012 from the cryogenic test, and as 0.024 from the water test. The improved cavitation performance is due to the thermodynamic effect in cryogenic fluids.

- 기호설명 -

Q : 유량
 Q_n : 정격유량
 H : 양정
 A_1 : 입구유로 단면적
 U_{1t} : 인듀서 날개 입구 팁속도
 U_{2t} : 임펠러 날개 출구 팁속도
 $P_{i,t}$: 펌프상류전압력
 P_v : 포화증기압력
 η : 효율
 ρ : 밀도
 ϕ : 유량계수

ψ : 양정계수
 $NPSH$: 유효흡입수두
 σ : 캐비테이션 수
 σ_{cr} : 임계 캐비테이션 수

1. 서론

액체로켓엔진에서 터보펌프(turbopump)는 추진체를 가압하여 연소실로 공급하는데, 이 터보펌프는 크게 산화제펌프, 연료펌프, 터빈으로 구성된다. 여기서 산화제펌프(LOX pump)는 고회전수, 고향정 뿐만 아니라, 극저온 환경으로 인하여 여러 가지 극한조건을 수반하게 된다. 특히, 극저온 유체인 액체산소를 작동유체로 사용하기 때문에 펌프의 구조적인 내구성과 극저온 상태에서 캐비

† Corresponding Author, jsk@kari.re.kr

테이션 성능특성(cavitation performance)을 검증하는 것은 개발단계에서 필수적인 부분이다.

이러한 터보펌프는 초기단계에서 수류시험을 통하여 그 수력성능이 검증 되고나면 액체산소를 이용한 실패질(real propellants) 시험의 수행단계를 거치게 된다. 하지만, 액체산소는 그 특성상 발화의 위험성이 크기 때문에 실패질 시험 이전에 물리적으로 유사한 극저온 환경을 조성하면서 비교적 안정적 유체인 액체질소(LN2)를 이용한 극저온 실험이 많이 이루어지고 있다.^(1,2) 이러한 배경에서 한국항공우주연구원(이하 항우연)에서는 액체질소를 이용한 극저온 터보펌프 시험설비(Cryogenic Turbopump Test Facility, CTTF)를 개발하여 왔으며,⁽³⁾ 최근까지 터보펌프의 흡입성능을 향상시키기 위하여 인두서 단독을 통한 상온수류 시험 및 극저온 시험을 수행하여 왔다.^(4,5)

본 연구에서는 액체로켓엔진을 구성하는 터보펌프에서 산화제펌프에 대한 상온의 물을 매질로 하는 수류시험(water test)과 액체질소를 작동유체로 하는 극저온 시험(cryogenic test)을 수행하여 펌프의 수력성능 및 흡입성능의 특성을 비교/분석하였다.

2. 실험설비 및 산화제펌프

2.1 시험설비

Fig. 1은 항우연에서 개발한 액체질소를 작동유체로 하는 극저온 터보펌프 시험설비의 전체적인 개략도를 3차원적으로 보여주고 있다. 액체질소를 공급 및 회수할 수 있는 두 개의 초저온 탱크(5m³, 10bar)와 이를 가압할 수 있는 기체질소탱크(3m³, 35bar)로 외부설비가 구성되어 있다. 시험부(test section)를 기점으로 크게 공급 및 회수라인으로 구성된 주배관은 모두 114.3mm(외경기준)의 관경을 가지는 이중진공배관으로 제작/설치되었으며, 이 주배관을 따라 시험부, 유량계 및 유량조절밸브가 순차적으로 구성되어 있다. 외부설비에서 두 액체질소탱크는 작동유체를 공급하는 공급탱크(run tank)와 이를 회수하는 회수탱크(catch tank)로 구분되어, 공급탱크를 시작으로 시험부를 거쳐 토출되는 액체질소를 전량 회수함으로써 작동유체의 소진을 최소화하여 반복적인 시험이 가능하도록 하였다. 회수탱크로 들어온 작동유체는 주배관과는 별도의 라인(외경 34mm)을 거쳐 공급탱크로 회수

된다. 이 회수라인 상에는 5000mesh급의 미세필터를 설치하여 시험유체 내에 잔존할 수 있는 이물질을 철저히 제거한 다음 공급탱크로 보내져 재사용하게 된다. 시험부에서 유량조절밸브 사이의 구간은 최대 110bar까지 시험 가능하도록 배관을 구성하였고, 유량측정은 측정방식이 다른 이중유량계(turbine flowmeter, mass flowmeter)를 두어 체적유량과 질량유량을 동시에 측정할 수 있도록 하였다. 유량측정범위에 있어서 체적유량은 최대 78L/s(uncertainty: $\pm 0.05\%$), 질량유량은 37.8kg/s(uncertainty: $\pm 0.03\%$)까지 측정 가능하다.

2.2 시험부 및 시험펌프

Fig. 2에서는 시험부의 펌프를 고회전수로 구동시킬 수 있는 구성을 보여주고 있다. 320kW급 모터를 구동원으로 하여 증속기와 토크미터(200Nm)를 거쳐 시험펌프를 회전시키게 된다. 모터는 최대 1782rpm까지 순차적으로 증속될 수 있으며, 최대 모터회전수에서 증속기(기어비 17.2:1)를 거치면 무부하 상태로 최대 30,000rpm까지 회전이 가능하다. 실제 시험과정에서는 시험펌프의 소요동력과 증속기의 기어비의 상관관계에 따라 시험 가능한 최대회전수가 정해지게 되는데, 본 연구에서 사용된 산화제펌프에 대해서는 펌프의 정격유량(Q_n)에서 시험 가능한 최대 회전수는 약 11,000rpm이다.

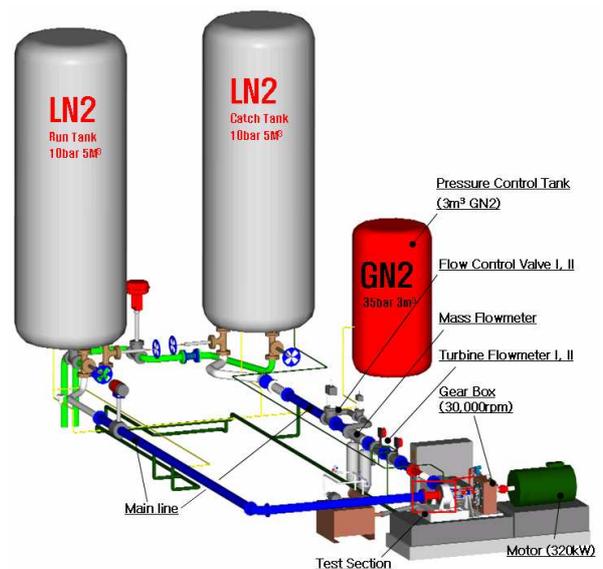


Fig. 1 3D schematic drawing of cryogenic turbopump test facility

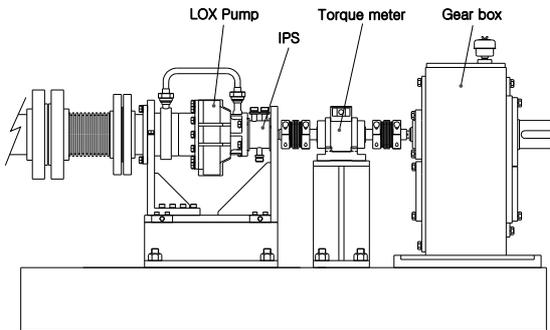


Fig. 2 Drawing of test section

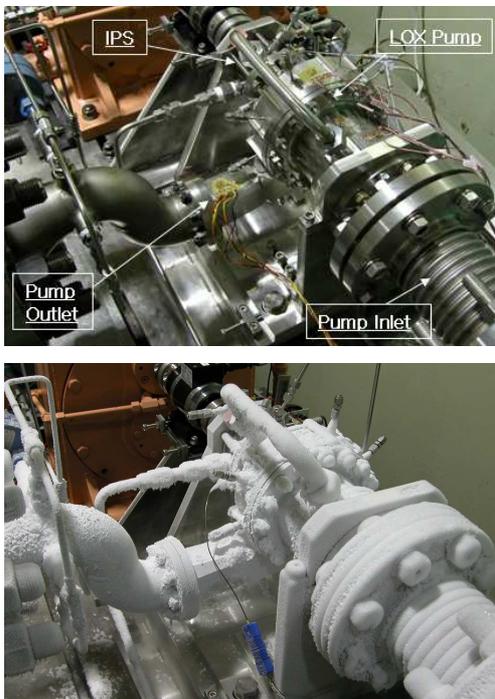


Fig. 3 Picture of LOX pump

Fig. 3에서는 시험을 위해 설치된 산화제펌프의 모습으로 시험과정에서 측정할 온도, 압력, 회전수와 관련된 센서들이 설치되어 있으며, 시험 전 배관 예냉과정에서 액체질소에 의해 극저온 상태로 냉각된 시험펌프의 모습을 보여준다. 본 시험에서는 산화제펌프와 연결된 구동축으로 누설되는 액체질소를 처리하기 위하여 실제 터보펌프에서 사용되는 연료와 산화제의 혼합방지 및 배출기능을 수행하는 IPS(Inter-Propellant Seal)를 장착하여 누설되는 액체질소가 대기로 배출되도록 하였다. 이는 누설되는 작동유체의 처리와 함께 가능한 터보펌프의 실제 운영상황과 유사한 조건에서 펌프의 단독시험을 수행하기 위한 것이다.

Table 1 Design requirements of the pump

Flow coefficient	ϕ	0.092
Head coefficient	ψ	> 0.882
Working fluid (Test fluid)		LOX (LN2)
Inlet temperature (LOX)	K (°C)	< 95 (-178.15)
Rotational speed	RPM	20,000
Efficiency	%	> 65

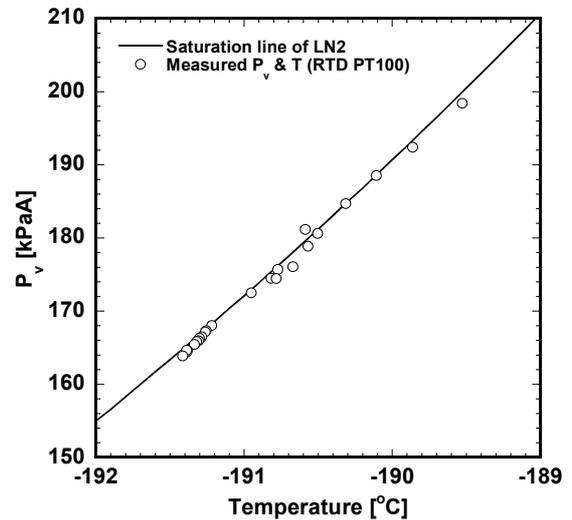


Fig. 4 Verification of a temperature sensor by P_v

3. 시험결과

본 연구에서 액체질소를 이용한 극저온 시험에 사용된 시험펌프는 추력 30톤급 액체로켓엔진에 사용될 산화제펌프로 수류시험을 통해 성능특성이 확보되었으며, 그 설계요구조건을 Table 1에 나타내었다.⁽⁶⁾ 20,000rpm의 고회전수로 작동하는 산화제펌프는 실매질 시험에서 95K(-178.15°C) 이하의 액체산소를 작동유체로 한다. 하지만, 본 시험에서는 작동유체로 액체산소와 그 물리적 성질이 유사한 액체질소를 이용하여 펌프에 공급되는 유체온도를 78~79K(-195.15~-194.15°C)로 일정하게 유지시켜 설계회전수의 30~55% 영역에서 극저온 수력성능시험 및 극저온 흡입성능시험을 수행하였다.

3.1 극저온에서 온도센서의 신뢰성 검증

액체질소와 같은 극저온 유체를 이용한 펌프시험에서는 작동유체의 온도를 정확히 측정하는 것이 중요하며, 높은 정밀도를 가지는 온도센서를 사용하더라도 극저온 환경에서 검교정은 필수적인 부분이다. 극저온 유체에 대한 온도센서의 검증은 주로 유체의 포화증기압력(saturated vapor pressure, P_v)을 이용하여 그 정확성 및 보정치를 구하는데, 이러한 방법으로 본 시험에 사용된 온도센서의 검증결과를 Fig. 4에서 보여주고 있다. 본 시험에서 작동유체로 사용된 액체질소의 온도측정에 RTD(PT100) 형태의 센서를 사용했으며, 압력측정의 경우는 절대압력계(10.34barA, uncertainty: $\pm 0.025\%$)를 사용하여 160~200kPaA의 압력조건에서 그 유체의 포화온도(saturation temperature)를 측정하여 이론적 포화증기압선도와 비교/검증하였다. 그 결과, 압력과 온도에 대한 액체질소의 이론적인 포화곡선과 실험적 결과가 거의 일치하는 것으로 나타났으며, 센서의 온도측정에 대한 정확성은 오차범위가 최대 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 로 극저온 상태에서도 높은 신뢰도를 보이고 있다. 그리하여 본 시험에서 측정온도로부터 산출되는 양정, 효율 및 캐비테이션 수 등의 펌프성능변수는 충분히 신뢰할 수 있을 것으로 판단된다.

3.2 산화제펌프의 극저온 성능특성

액체질소를 작동유체로 수행한 펌프의 극저온 수력성능시험은 시험회전수가 6,000~10,000rpm이며, 각 회전수에 대한 유량범위는 $Q/Q_n=0.7\sim 1.2$ 영역에서 수행되어 졌다. 극저온 흡입성능시험의 경우는 설계유량($Q/Q_n=1.0$)에서 회전수 9,000, 10,000, 11,000rpm의 세 경우에 대하여 시험을 수행하였으며, 특히 회전수 10,000rpm에서는 저유량에서 고유량범위($Q/Q_n=0.9, 1.0, 1.1$)까지 포함한 흡입성능시험이 이루어 졌다. 시험과정에서 측정된 유량(Q), 양정(H) 및 유효흡입수두(NPSH)는 모두 무차원 형식으로 표현하였으며, 그 정의는 식 (1~4)와 같다.

$$\phi = Q/(A_1 U_{1t}) \quad (1)$$

$$\psi = H/(U_{2t}^2/2g) \quad (2)$$

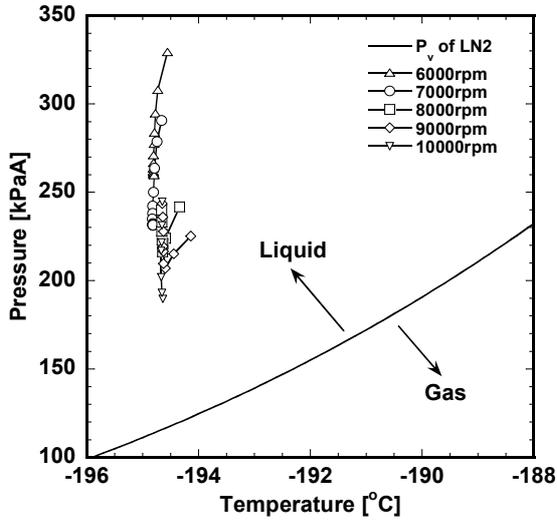
$$NPSH = \frac{P_{i,t} - P_v}{\rho g} \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{NPSH}{U_{1t}^2/2g} \quad (4)$$

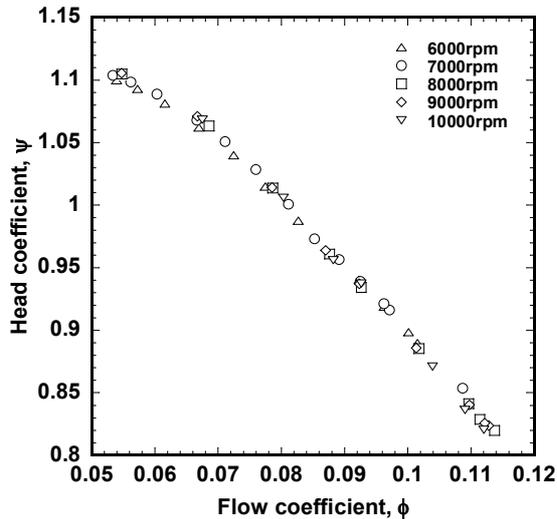
식 (1)은 유량계수(flow coefficient), 식 (2)는 양정계수(head coefficient), 식 (3)은 유효흡입수두(Net Positive Suction Head), 식 (4)은 캐비테이션 수(cavitation number)를 나타낸다. 여기서, Q 는 유량, A_1 은 펌프의 입구단면적, U_{1t} 는 인듀서 날개 입구 팁속도, U_{2t} 는 임펠러 날개 출구 팁속도, H 는 펌프출구에서 측정된 전양정, $P_{i,t}$ 는 펌프의 상류 전압력, P_v 는 작동유체의 포화증기압력을 의미한다.

Fig. 5에서 본 연구에 사용된 산화제펌프의 극저온 수력성능시험에 대한 결과를 보여주고 있다. 시험부로 유입되는 작동유체인 액체질소의 상태를 시험 전반에 걸쳐 점검한 결과와 함께 시험펌프의 양정, 효율 및 흡입성능특성을 무차원화하여 나타내었다. 액체질소와 같이 극저온 매질을 이용하는 펌프시험에서는 시험유체의 온도가 끓는 점(boiling point)에 가깝기 때문에 펌프에 유입되는 작동유체가 쉽게 기화하여 기체상태 혹은 기상과 액상이 혼합된 2상 유체(2-phase fluid)로 펌프로 유입되기 쉽다. 이러한 극저온 유체를 완전한 액체상태(liquid state)로 유지시켜 펌프로 유입시키는 것이 중요한 시험요소 중에 하나이다. 초저온 저장탱크와 이중진공배관을 사용하더라도 주배관의 충분하지 못한 냉각상태와 진공파손 및 플랜지 체결부 등에 의한 외부열전달 등에 의해 내부유체는 2상 유체의 상태로 존재할 가능성이 높기 때문에 본 시험에서는 시험 전과정에서 펌프상류의 온도와 압력을 정밀하게 측정하여 유체상태를 파악할 수 있도록 하였으며, 공급탱크를 300kPaA 이상으로 가압하여 작동유체의 끓는 점을 높여 펌프로 유입되는 유체가 가급적 기화되지 않도록 하여 시험을 수행하였다. Fig. 5(a)에서 펌프입구로부터 1.4m 상류지점에서 액체질소의 상태를 보여주고 있다. 시험과정 동안 펌프로 유입되는 작동유체가 항상 액상을 유지하고 있음을 확인할 수 있었으며, 작동유체의 온도는 $-195^\circ\text{C}\sim -194^\circ\text{C}$ (78~79K)로 나타났다.

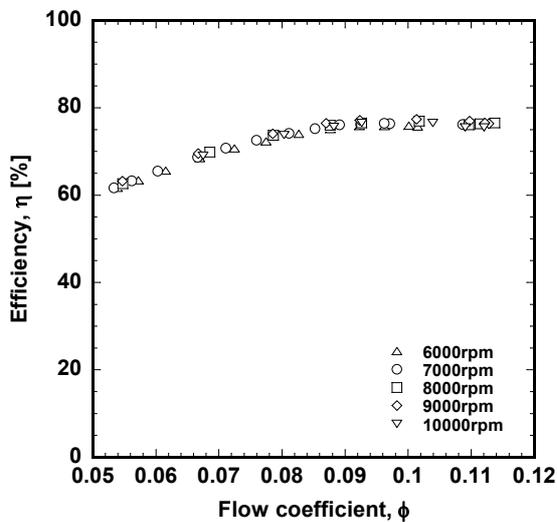
Fig. 5(b), (c)에서는 유량계수(ϕ)에 대한 양정계수(ψ)와 효율(η)특성을 보여주고 있다. 펌프의 시험회전수범위는 6,000~10,000rpm으로 시험결과를 무차원화 한 곡선이 회전수에 대한 상사가 잘 이루어지는 것을 확인할 수 있었으며, 양정계수는 유량계수 증가에 대하여 감소하는 특성을 보였다.



(a) Inlet state of LN2



(b) Head



(c) Efficiency

Fig. 5 Cryogenic performance of LOX pump

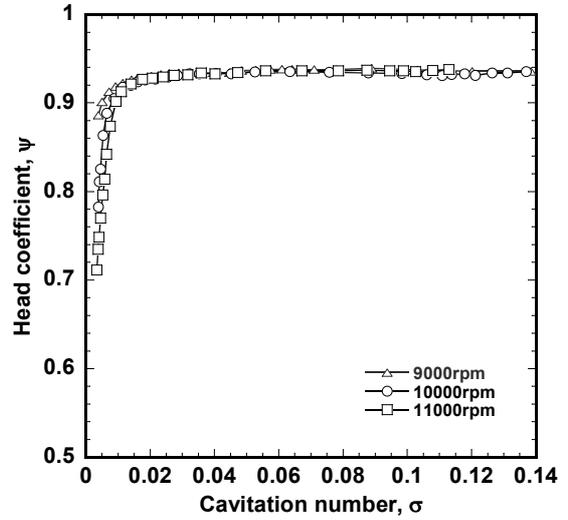


Fig. 6 Cavitation performance of LOX pump at $\phi = 0.092$

이러한 상사성은 Fig. 6에서 보여주는 것과 같이 극저온 흡입성능시험에 대해서도 그 상사특성이 잘 나타나고 있다. 흡입성능시험을 위한 펌프의 시험회전수는 가능한 높은 회전수(9,000, 10,000, 11,000rpm)에서 이루어졌다. Fig. 6은 동일한 유량계수($\phi=0.092$)에서 유효흡입수두와 양정을 무차원화 한 캐비테이션 수(σ)와 양정계수(ψ)로 나타나어 회전수에 대한 상사성을 확인하였다.

3.3 수류시험과 성능비교

액체질소를 이용한 산화제펌프의 극저온 수력 성능특성을 수류시험의 결과⁽⁸⁾와 비교한 것을 Fig. 7에서 보여주고 있다. 실제 시험회전수는 각각 10,000rpm(LN2), 9,300rpm(water)에서 수행하였으며, 두 시험매질에 대한 시험결과를 비교하기 위하여 시험유량(Q)을 정격유량(Q_n)으로 나누어 일반화한 유량에 대한 양정계수로 표현하였다. 전반적인 유량영역에서 양정은 유사하게 나타났으며, 특히, 설계유량($Q/Q_n=1.0$)에서는 거의 일치하는 것으로 나타났다. 시험펌프의 효율측면에서는 액체질소를 이용한 극저온 시험에서 효율이 다소 높게 나타나는 결과를 보였다. 설계유량($Q/Q_n=1.0$)에서 양정계수는 $\psi=0.94$ 로 액체질소와 물의 경우가 거의 동일하였으며, 이 유량에서 효율은 각각 76.4%(LN2), 73.4%(water)로 액체질소를 작동유체로 하는 극저온 시험에서 3% 가량 높게 나타났다.

이러한 극저온 유체에서 효율증가는 액체질소

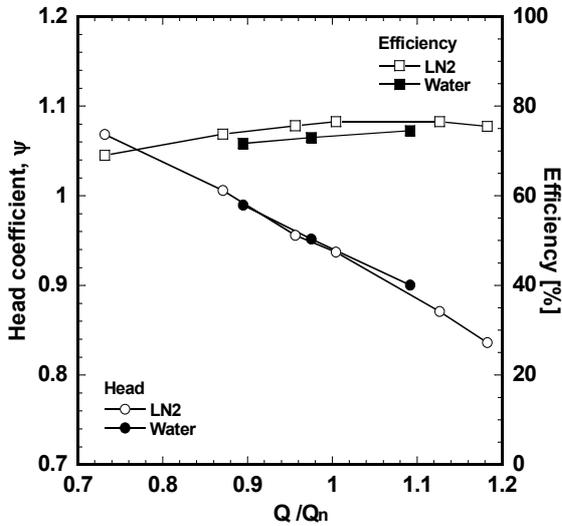


Fig. 7 Performance comparison (LN2 & water)

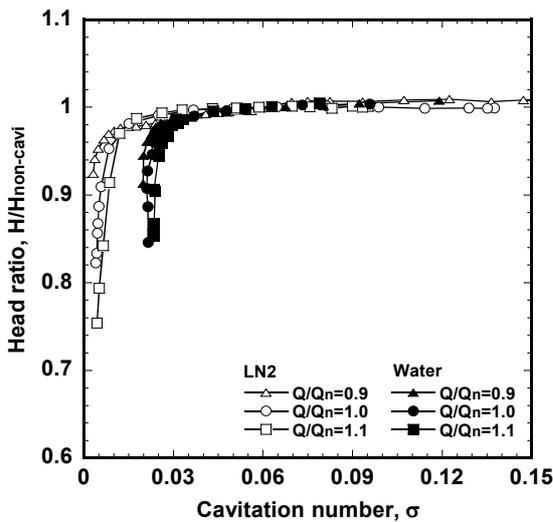


Fig. 8 Cavitation performance comparison (LN2 & water)

의 점도가 물의 경우보다 낮아 유체가 펌프의 내부유로를 통과할 때 발생하는 원판마찰손실(disk friction loss)이 줄어들기 때문인 것으로 판단된다. 포화상태를 기준으로 볼 때, 대기압 상태에서 액체질소의 동점성 계수는 상온(20°C)의 물보다 약 5배 정도 낮은 물리적 특성을 가진다. 극저온 매질에 대한 시험에서 이러한 효율특성에 대한 연구는 Kamijo 등⁽⁷⁾의 연구결과에서도 수류시험보다 2~3% 가량 증가함을 보였으며 본 연구에서도 유사하게 나타났다.

Fig. 8은 흡입성능시험의 경우에 대한 것으로 극저온 시험과 수류시험⁽⁸⁾ 모두 펌프입구압력을

높은 압력에서 낮은 압력으로 진행하면서 저하되는 양정의 크기를 측정하였으며, 각 유량에 대하여 양정계수의 크기가 서로 다르게 나타나기 때문에 그 결과를 캐비테이션 수(σ)에 대한 양정비 ($H/H_{non-cavi}$)로 무차원화 하여 나타내었다. 양정비는 펌프전방에서 캐비테이션이 일어나지 않는 높은 압력조건($\sigma > 0.06$)에서의 양정을 초기양정 ($H_{non-cavi}$)이라고 보고 이 초기양정에 대한 전체 측정양정의 비로 정의하였다. 극저온 시험의 경우는 액체질소의 유입온도를 약 -195°C (78K)로 모든 경우에 대하여 동일하게 유지시켜 시험을 수행하였으며, 시험회전수는 각 시험매질에 대하여 10,000rpm(LN2)과 8,300rpm(water)으로 하였다. 각 매질에 대한 유량범위로는 설계유량($Q/Q_n=1.0$)의 90, 100, 110%에 해당되는 세 경우에 대하여 흡입성능특성을 비교하였다.

모든 시험유량범위에서 설계요구조건 이상의 캐비테이션 수($\sigma > 0.058$) 영역에 대한 양정은 작동유체와 관계없이 동일한 크기를 가지지만, 펌프의 입구압력을 낮추어 캐비테이션 수가 작아질수록 그 양정곡선의 경향은 다르게 나타났다. 설계유량($Q/Q_n=1.0$)을 기준으로 볼 때, 수류시험인 경우는 캐비테이션 수가 $\sigma=0.025$ 근처에서 양정이 급격히 낮아지지만, 극저온 시험의 경우는 $\sigma=0.015$ 근처에서 양정저하가 시작된다. 즉, 동일한 펌프에 대하여 작동유체로 액체질소를 사용할 경우, 상온의 물에 비하여 동일한 양정저하에 대한 캐비테이션 수가가 현저하게 낮은 것으로 나타났다. 그 외 저유량($Q/Q_n=0.9$)과 고유량($Q/Q_n=1.1$) 영역에서도 설계유량에서 흡입성능특성결과와 동일한 현상을 보였다.

이러한 경향은 액체질소와 같은 극저온 유체를 사용하는 펌프에서 주로 나타나는 현상이다. 작동유체가 펌프로 유입될 때, 인두서나 임펠러의 익단팁 등에서 유체의 기화가 국부적으로 발생하기 시작하게 되는데, 이 유체의 기화과정에서 주변의 액상으로 잔존하는 유체는 그 온도가 더욱 낮아지게 된다. 이러한 효과로 펌프로 유입된 작동유체의 포화증기압이 더욱 낮아지게 되어 캐비테이션의 발생이 억제되는 양상을 보이게 된다. 작동유체로 상온의 물을 이용한 수류시험에서도 유체의 국부적인 기화에 의한 동일한 효과가 나타나기는 하지만, 물과 액체질소의 포화증기압선도를 비교해 보면 동일한 크기의 유체온도변화에

대하여 포화증기압력의 변화는 액체질소와 같은 극저온 유체에서 더욱 크게 나타나게 된다. 이는 결과적으로 더 낮은 펌프입구압력에서 양정저하가 발생하게 하여 임계 캐비테이션 수(critical cavitation number, σ_{cr})가 작아지는 효과를 보이게 된다. 이 효과는 극저온 유체를 작동유체로 하는 펌프의 흡입성능시험에서 많이 나타나는 펌프의 열역학적 효과(thermodynamic effect)⁽⁷⁾로 알려져 있다.

Fig. 8에서 펌프의 초기양정에 대하여 3%낮아진 양정($H/H_{non-cavi}=0.97$)에서의 캐비테이션 수를 임계 캐비테이션 수(σ_{cr})라고 정의할 때, 설계유량($Q/Q_n=1.0$)에서 극저온 시험에 대한 임계 캐비테이션 수는 수류시험의 경우보다 약 0.012 정도 더 낮은 임계값을 보였으며, 고유량($Q/Q_n=1.1$)과 저유량($Q/Q_n=0.9$) 영역에서도 액체질소를 이용한 극저온 시험결과가 상온 수류시험의 결과보다 더 낮은 임계 캐비테이션 수를 보이는 것으로 확인되었다.

4. 결 론

액체로켓엔진에서 산화제를 승압하여 연소실로 이송시키는 산화제펌프에 대한 성능특성을 파악하기 위하여 액체질소를 이용한 극저온 시험을 수행하여, 그 결과를 작동유체로 물을 이용한 수류시험의 결과와 비교/검토하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 액체질소를 작동유체로 사용한 극저온 시험의 경우와 상온의 물을 사용한 수류시험의 경우에 설계유량에서 펌프의 양정은 모두 유사하게 나타났다.

(2) 펌프의 효율측면에서는 액체질소의 점도가 물보다 낮아 원판마찰로 인한 손실이 상대적으로 작은 것에서 기인하여 동일펌프에 대하여 극저온 시험의 경우가 수류시험보다 펌프의 효율이 3% 가량 증가하는 경향을 보였다.

(3) 펌프의 흡입성능특성은 극저온 유체의 열역학적 효과로 인하여 시험유량 전 영역에서 액체질소를 작동유체로 하는 극저온 시험의 경우가 수류시험보다 더 낮은 임계 캐비테이션 수를 보

였으며, 특히 설계유량에서는 상온 수류시험보다 임계 캐비테이션 수가 0.012 더 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- (1) Kim, J., Hong, S. S., Jeong, E. H., Choi, C. H. and Jeon, S. M., 2005, "Development Status of a Turbopump for 30-ton Thrust Level of Engine," Proceedings of Korean Society of Propulsion Engineers Fall Conference, Daejeon, Korea, pp. 375~383.
- (2) Kim, J., Hong, S. S., Jeong, E. H., Choi, C. H. and Jeon, S. M., 2007, "Development of a Turbopump for a 30 Ton Class Engine," AIAA 2007-5516.
- (3) Kang, J. S., Kim, J. S. and Kim, J., 2004, "Development of Cryogenic Pump Test Facility," *KFMA Journal*, Vol. 7, No. 4, pp. 47~52.
- (4) Kim, J. S., Hong, S. S. and Kim, J., 2005, "Hydraulic Performance Test of a Turbopump Inducer in Liquid Nitrogen," *Proceedings of the KFMA Annual Meeting*, pp. 348~353.
- (5) Hong, S. S., Kim, J. S., Choi, C. H. and Kim, J., 2006, "Effect of Tip Clearance on the Cavitation Performance of a Turbopump Inducer," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 22, No. 1, pp. 174~179.
- (6) Choi, C. H., Noh, J. G., Kim, D. J., Hong, S. S. and Kim, J., 2006, "Performance Prediction of a Turbopump System," *KSAS Journal*, Vol. 34, No. 4, pp. 70~75.
- (7) Kamijo, K., Hirata, K., 1985, "Performance of Small High Speed Cryogenic Pumps," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 107, pp. 197~204.
- (8) Kim, D. J., Hong, S. S., Choi, C. H. and Kim, J., 2006, "The Hydraulic Tests of LOX Pumps for a Liquid Rocket Engine," *Proceedings of The 4th National Congress on Fluids Engineering August 23-25, Kyungju, Korea*, pp. 523~526.