

액체질소를 이용한 터보펌프 인듀서의 수력성능시험

김진선* · 홍순삼* · 김진한**

Hydraulic Performance Test of a Turbopump Inducer using Liquid Nitrogen

Jin-Sun Kim*, Soon-Sam Hong*, Jinhan Kim*

Key Words : Cryogenic test facility (극저온 시험설비), Liquid nitrogen(액체질소), Turbopump(터보펌프)

ABSTRACT

A cryogenic test facility has been developed to perform inducer and pump tests using liquid nitrogen. Performance tests of a turbopump in the maximum 50ton-thrust class can be performed with cryogenic fluid in the facility which operates at a temperature around -196°C with the rotational speed up to 30,000rpm. To verify the reliability of the cryogenic pump test facility, hydraulic performance tests of an inducer were accomplished, and their results were compared with the result from a water test. The results confirm the reliability of the cryogenic test facility, and it is expected to contribute for on-going development of a turbopump for liquid rocket engines.

1. 서론

한국항공우주연구원 (이하 항우연)은 2002년 11월 액체로켓 KSR-III의 발사성공과 더불어, KSLV-1의 개발 사업으로 우주개발 중장기계획에 박차를 가하고 있다⁽¹⁾. 이러한 배경에서 연료와 산화제를 고압으로 연소실에 공급하는 터보펌프의 독자적인 개발은 액체로켓에서 반드시 이루어야 할 과제이다. 액체로켓에 사용되는 터보펌프는 높은 회전수와 고압의 조건이 요구되어지며 그 중량의 제한도 따른다⁽²⁾. 뿐만 아니라, 산화제 펌프의 경우는 극저온 환경에서 그 작동이 이루어져야 한다. 개발 초기단계에서는 물을 이용한 상온에서 펌프의 수력성능 및 흡입성능 시험이 이루어지며,

이와 관련된 연구가 최근 활발히 이루어지고 있다^{(3),(5)}. 항우연에서는 현재 물을 이용한 상온에서의 수력시험 뿐만 아니라, 극저온 환경 하에서 펌프의 성능 및 흡입성능시험을 수행할 수 있는 극저온 시험설비를 구축하였다⁽⁴⁾. 본 연구에서는 이러한 극저온 유체를 이용하는 터보펌프 시험설비를 바탕으로 산화제펌프 인듀서를 실매질의 환경과 유사한 조건에서 그 성능확인 및 시험설비의 검증에 목적이 있다.

2. 시험설비

2.1. 시험설비 전체개요

항우연에서 개발한 극저온 시험설비는 극저온 환경 하에서 50톤 급 추력 이하의 인듀서 단독시험과 산화제 펌프에 대한 성능시험 (hydraulic performance test)

* 한국항공우주연구원
E-mail : jsk@kari.re.kr

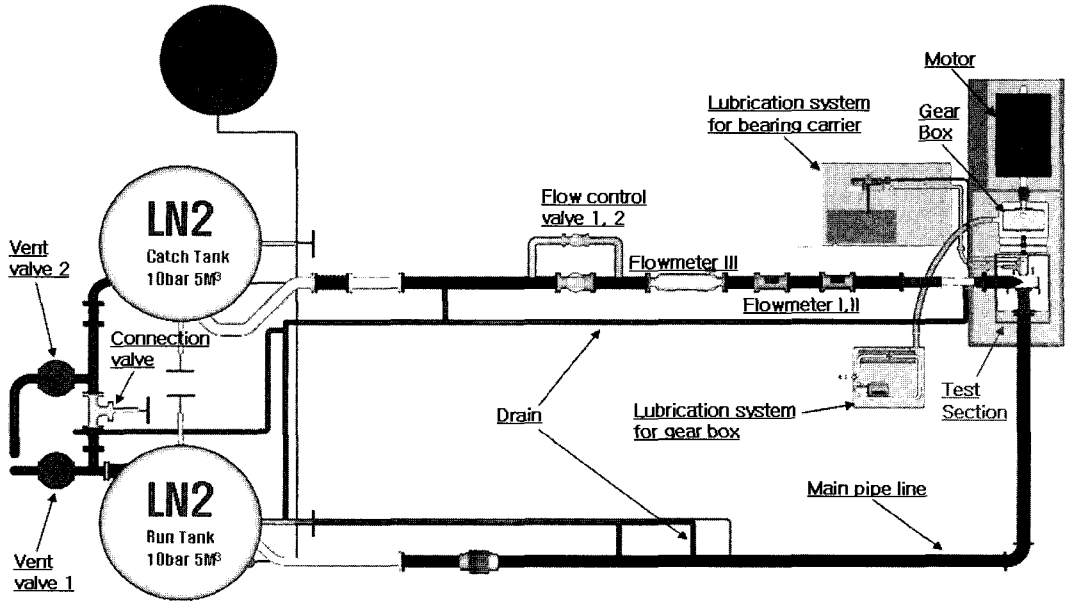


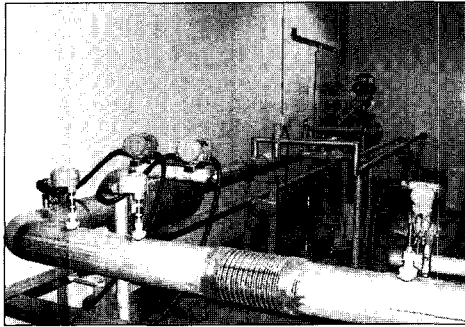
Fig. 1 Cryogenic pump test facility

및 흡입성능 시험 (cavitation performance test)을 병행하여 수행할 수 있도록 설비를 구축하였다. Fig. 1은 극저온 시험설비의 전체 개략도를 보여주고 있다. 먼저 외부에 액체질소 (liquid nitrogen, LN2)를 저장하는 두 개의 이중진공 질소탱크 (LN2 tank)는 공급탱크 (run tank)와 회수탱크 (catch tank)로 구분된다. 5m³의 용량으로 최대 10 bar까지 가압이 가능한 탱크로써 인두서나 산화제펌프의 성능시험 시, 탱크자체의 압력을 조절함으로써 상류에서 발생하는 캐비테이션 (cavitation)을 억제시킬 수 있다. 이 두 탱크의 가압은 탱크하부에 장착된 자체 기화기에 의한 승압방식과 고압의 질소 가압펌프와 기화기를 거쳐 최대 35 bar까지 저장할 수 있는 기체질소 저장탱크 (GN2 tank, 3m³)에 의한 승압방식으로 구성되어 있다. 성능시험 과정에서는 상류의 상태를 일정한 압력으로 유지해 주기 위해 주로 기체질소 저장탱크를 이용하며, 흡입성능 시험에서는 자체 기화기에 의한 가압이 이루어진다. 공급탱크에서 시험부 (test section)를 거쳐 회수탱크로 이어지는 주배관 (main pipe line)은 4-inch (100A)배관으로서, 모두 2중 진공단열배관을 채택하여 외부로부터의 열전달을 가능한 차단시켜 시험과정에서 온도상승에 의한 기화를 최소화 하였다. 또한, 전방 주배관과 출구라인 상에서 3차 질량 유량계 (flowmeter III; mass flowmeter)까지 2중 진공단열배관의 구성이 불가능한 플랜지 이

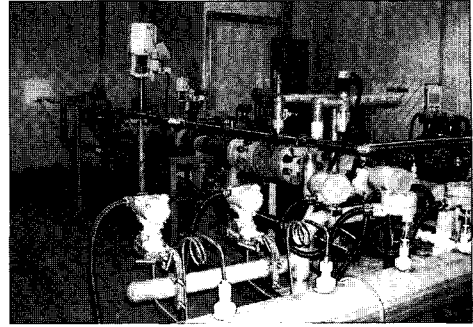
음부이나 배관용접부분도 별도의 단열작업을 함으로써 시험부 전방의 액상 (liquid state)유지와 유량값을 측정하는데 유체의 2상 (2-phase)에 의한 불확실성을 줄였다. 3개의 유량계 중, 전방에 위치하는 두 개는 터빈식 유량계로 최대 78 L/s (uncertainty: ±0.05%)까지 측정이 가능하며, 세 번째 유량계는 유체의 질량을 측정할 수 있는 코리올리 질량 유량계로 37.8 kg/s (uncertainty: ±0.03%)까지 측정이 가능하다.

Figure 2에서 실제 시험부 입구배관 (a)과 출구배관 (b)의 2중 진공단열배관을 보여주고 있다. 공급탱크에서부터 시험부 전방 주배관은 최대 10 bar까지 가압할 수 있고, 펌프출구에서 3개의 유량계를 거쳐 그 크기가 4인치와 1인치인 유량조절밸브 (flow control valve I, II)까지는 최대 110 bar까지 시험이 가능하도록 배관을 구성하였다. 유량조절밸브는 시험 시, 유량조절의 기능도 수행하지만 고압의 유체가 직접 회수탱크로 유입되지 않게 하여 탱크를 보호하는 기능도 수행하게 된다. 인두서 단독시험인 경우는 10 bar 미만에서 시험이 수행되지만, 임펠러를 포함한 산화제펌프의 경우, 높은 토출압력이 형성되므로, 두 번에 걸쳐 감압을 하게 되는데 펌프출구에서 오리피스 등에 의한 1차 감압을 시킨 다음, 이 두 개의 유량조절밸브에서 2차 감압이 이루어지게 된다.

Figure 3은 Fig. 1에서 시험부 (test section)에 해당

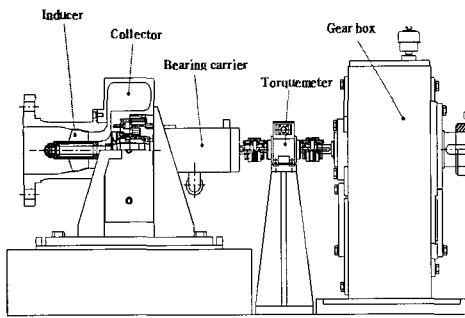


(a) Inlet pipe line

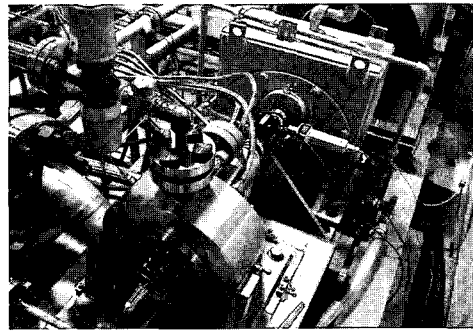


(b) Outlet pipe line

Fig. 2 View of the main pipe line for cryogenic test facility



(a) Schematic of test rig



(b) Picture of test section

Fig. 3 Test section and speed increaser

되는 부분의 실제 모습인데, 인듀서가 장착된 컬렉터 (collector)와 베어링 캐리어 (bearing carrier), 토크미터 그리고 증속기와 모터 순으로 정렬된 것을 볼 수 있다. 본 설비에서 사용된 모터는 최대 1,782 rpm (320 kW) 까지 연속적으로 조절이 가능하며, 이를 최대 30,650 rpm으로 증속시킬 수 있도록 입출력 일렬정렬방식의 증속기 (기어비 17.2:1)를 설치하였다.

2.2. 윤활시스템과 주배관 냉각

시험부에 있어서 가장 중요한 부분은 극저온 환경에서 인듀서를 비롯한 회전체의 고속회전이 가능하게 하는 것이다. 이러한 시험부의 고속회전을 위해서는 베어링의 윤활을 원활히 시킬 수 있는 베어링 윤활시스템 (bearing lubrication system)이 필요한데, -196°C 의 극저온 시험에서는 시험부의 초저온 환경으로 인하여 윤활유의 점도가 급격히 상승하여 최종적으로는 응고되어 회전체의 고속회전이 불가능하게 된다. 하지만, 극저온 펌프 성능시험을 위해서는 이러한 문제점을 받

시 극복하여야 하는데, 본 시험설비에서는 시험부의 극저온 환경에서도 베어링의 상온윤활을 가능하게 하는 베어링 캐리어 (bearing carrier)를 개발하여 장시간 동안 극저온 시험을 수행할 수 있도록 하였다.

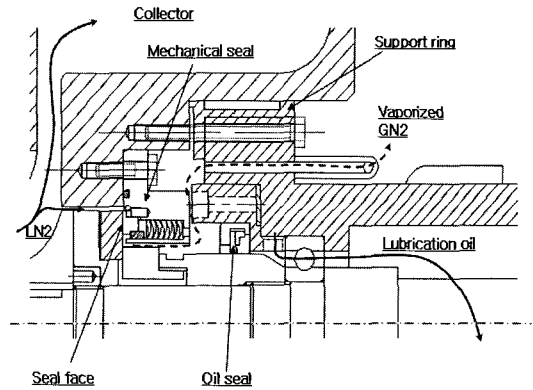
Figure 4 (a)에서 극저온용 미케니컬 실 (mechanical seal)을 포함하여 상온윤활이 가능한 베어링 캐리어의 내부구조를 보여주고 있다. 컬렉터의 내부유로에 액체 질소가 흐르게 되고, 그 중 미량의 액체질소가 미케니컬 실로 흐르게 된다. 이렇게 유입된 액체질소는 실면 (seal face)을 통과하면서 얇은 막을 형성시켜 회전부의 원활한 회전을 가능하게 하며, 또한 컬렉터 내부의 액체질소가 누설되지 않도록 한다. 하지만, 이 미케니컬 실은 기본적으로 일정량의 누설을 가지게 되는데, 이렇게 누설된 질소는 바로 기화되어 배출포트를 통하여 외부로 배출된다. 하지만, 컬렉터와 베어링 캐리어의 접촉에 의한 열전달이 일어나기 때문에 베어링 캐리어의 윤활유 온도는 점차 낮아지게 되는데, 이러한 영향을 최대한 줄이기 위해서 베어링 캐리어와 컬렉터의 접촉부분에 지지링 (support ring)을 두어 접촉면을

최소화함으로써, 윤활유의 온도저하를 최대한 방지하였다. 베어링 윤활유는 원주방향으로 4개의 포트에 공급되도록 하였으며, 유량은 15L/min로 공급하게 된다. 윤활유의 선정에 있어서도 -74℃까지 사용가능한 초저온용으로 하였으며, 오일의 온도저하로 인한 점성력 증가를 방지하도록 공급 전에 미리 예열시킬 수 있는 구성으로 하였다. Fig. 4(b)에서는 실제 시험과정에서 극저온 환경의 컬렉터와 상온윤활이 이루어지는 윤활 시스템의 원활한 작동상태를 가시적으로 보여주고 있다. 컬렉터 부분은 내부유로에 극저온 매질인 액체질소가 직접 접촉하게 되면서 외부표면에 다량의 성애가 형성되고 있는 반면, 후방 윤활부는 성애현상이 전혀 보이지 않아 윤활부의 원활한 작동을 간접적으로 확인할 수 있었다.

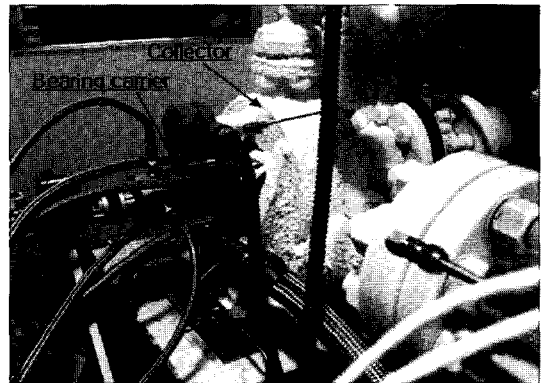
Figure 5에는 주배관 냉각과정에서 시험부의 컬렉터와 윤활부의 온도상태를 정량적으로 나타내었다. 시험부의 컬렉터에서 온도가 -180℃ 이하인 상태에서도 베어링윤활 후 측정된 윤활유의 온도는 27℃의 상온을 유지하고 있음을 확인할 수 있었다. 주배관 냉각과정은 두 액체질소 저장탱크의 압력차를 이용하여 성능시험 시 유체의 흐름방향과 반대로 회수탱크의 액체질소를 공급탱크 방향으로 보내면서 이루어진다 (Fig. 1 참조). Fig. 5에서 보면 시험부의 컬렉터가 극저온 상태에 도달하는데 5분 정도의 시간이 소요되지만, 주배관 전체가 충분히 냉각되는 데는 최소 30분 정도의 시간이 필요하다. 배관이 충분히 냉각된 다음, 공급탱크의 액체를 회수탱크로 보내어 다시 역방향으로 회수하는 과정을 거치면서, 전체배관의 완전냉각과 함께 배관내부를 액체질소로 채우게 되면서 극저온 성능시험 사전준비과정이 이루어진다.

3. 극저온 유체를 이용한 인듀서 성능시험

본 연구에서 극저온 펌프 시험설비를 검증하기 위하여 인듀서 단독 성능시험에 사용된 모델은 현재 항우연에서 개발 중인 터보펌프 인듀서의 기본이 되는 형상으로 산화제 펌프용 인듀서이다. 시험모델의 재질은 시험부 전체의 재질과 동일하면서 극저온 환경과 열변형을 고려하여 스테인리스강 계열 (stainless steel 304)로 되어 있다. 시험모델의 형상과 재질을 Fig. 6과 Table 1에서 각각 보여주고 있는데, 인듀서 날개의 개수는 3개이고,



(a) View of bearing lubrication system



(b) Lubrication part in cryogenic environment

Fig. 4 Lubrication and seal system

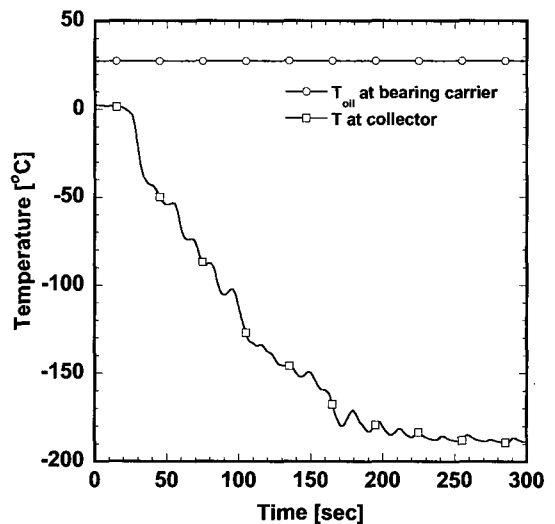


Fig. 5 Lubrication oil temperature in the process of chill-down

인듀서 날개와 케이싱 간의 간격은 1mm이며, 시험은 회전수 5,000~8,000 rpm 영역에서 이루어 졌다.

시험부에서 측정된 수두와 유량은 무차원 형식으로 표현하였으며, 그 정의는 각각 식 (1), (2)와 같다.

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

$$\psi = H / (U_{1t}^2 / 2g) \quad (2)$$

식 (1)은 유량계수 (flow coefficient), 식 (2)는 양정계수 (head coefficient)를 나타낸다. 여기서, Q는 유량, A₁은 인듀서의 입구단면적, U_{1t}는 입구 날개팁 속도, H는 컬렉터 출구에서 측정된 전양정을 의미한다.

극저온 환경 하에서 인듀서 및 산화제 펌프의 성능 시험에서는 배관내부의 질소를 항상 액체상태 (liquid state)로 유지시켜야 하며, 이것은 또한 시험결과와 신뢰성을 높이는 중요한 요소 중의 하나이다. 하지만, 질소는 -147.21°C 이하에서만 액체상태로 존재할 수 있는 극저온 매질 (cryogenic fluid)이다. 만약 배관내의 액체질소가 외부로부터의 열전달에 의한 온도상승으로 인하여 국부적으로 기화하기 시작하면 액상과 기상이 혼합된 2상 유체 (2-phase fluid)가 시험부로 유입되고, 이는 성능시험 과정에서는 측정수두, 흡입성능 시험과정에서는 캐비테이션이 일어나는 유효흡입수두 (NPSH)의 결과에 대한 일관성이 없는 측정값을 초래하게 되고, 결과적으로 시험에 대한 신뢰성이 떨어지게 된다. 그래서 모든 주배관을 2중 진공배관으로 하였으며, 배관연결부와 시험부를 단열재를 이용하여 외부와의 열전달이 일어나지 못하도록 하였으며, 또한 시험과정에서 인듀서의 양정과 더불어 시험부 상류에서 온도와 압력을 정확히 측정함으로써 유체의 상태를 동시에 파악하였다.

본 극저온 성능시험에서는 인듀서 상류에서 측정 한 온도와 압력으로 배관 내에 액체질소의 상태를 파악하였으며, Fig. 7에서 그 결과를 보여주고 있다. 인듀서 전방 1,300 mm에서 측정 한 온도와 압력으로 매질의 상태를 파악하였는데, 그 결과 성능시험 과정에서 인듀서 상류의 배관내부는 완전한 액체질소로 채워져 있음을 확인하였다. 시험과정 중 인듀서 전방 입구압력은 160~220 kPaA이었으며, 온도는 -195~-194 °C로 나타났다.

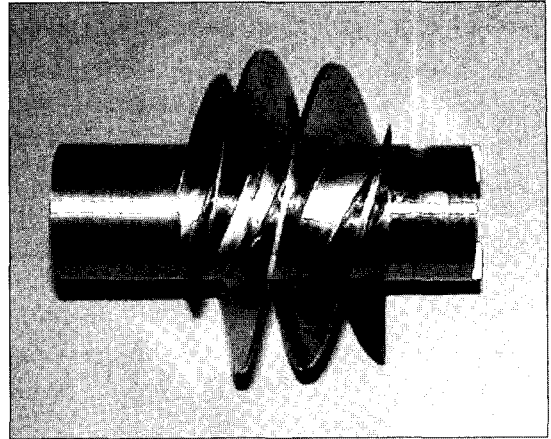


Fig. 6 Picture of a tested inducer

Table 1 Inducer geometry and operating condition

Flow coefficient	0.096
Inlet hub/tip diameter ratio	0.426
Outlet hub/tip diameter ratio	0.488
Inlet back sweep angle [°]	20
Tip solidity	2.75
Blade number	3
Tip clearance [mm]	1
Rotational speed	5000~8000rpm

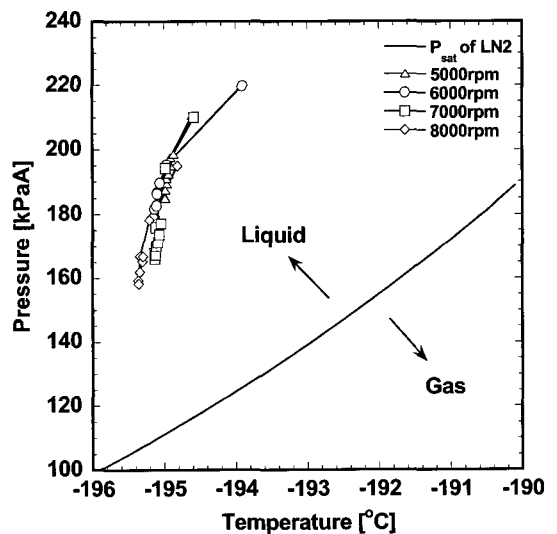


Fig. 7 Inlet state at 5000, 6000, 7000, 8000rpm

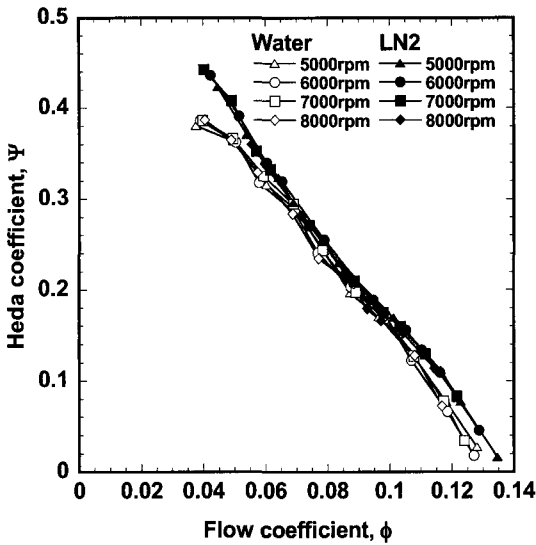


Fig. 8 Performance of an inducer

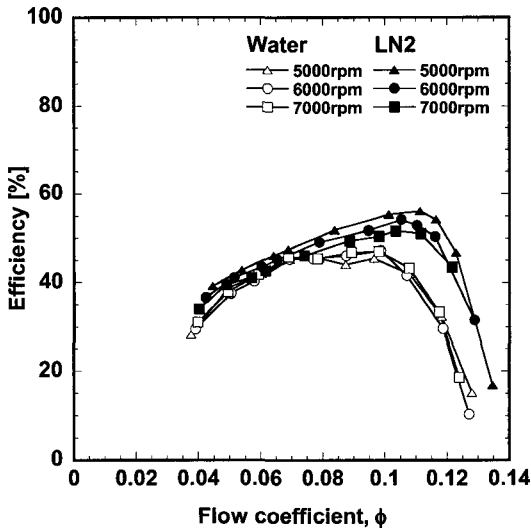


Fig. 9 Efficiency of an inducer

Figure 8에서는 시험에 사용된 인두서에 대한 양정 계수 대 유량계수의 결과를 무차원화 하여 물과 액체 질소의 경우를 비교하였다. 시험은 회전수가 5,000, 6,000, 7,000, 8,000 rpm인 경우에 대하여 수행되어졌으며, 액체질소를 이용한 극저온 환경에서도 모든 회전수에 대하여 무차원화 함으로써 물 시험의 경우와 마찬가지로 회전수에 대한 상사가 잘 이루어지는 것을 확인할 수 있었다. 물에서 시험한 결과와 비교하면, 유량계수 (ϕ)가 0.07~0.1 영역에서는 거의 일치하는 것

으로 나타났다. 그 외 영역, 즉 고유량과 저유량 영역에서는 다소 차이가 있었는데, 이는 유체의 점도에 대한 차이가 있기 때문인 것으로 사료된다. 액체질소의 경우 물에 비하여 낮은 점도를 가지므로 입구에서 예선회 (pre-rotation)가 더 적고, 따라서 양정이 더 큰 것으로 판단된다.

Figure 9에서는 인두서의 극저온 효율로 수류시험의 경우와 비교한 결과이다. 동일 인두서에 대하여 액체질소를 이용한 극저온 시험의 경우가 수류시험의 경우보다 약 5% ($\phi=0.096$, 6,000 rpm기준) 상승된 효율 특성을 보이고 있는데, 이는 액체질소가 상온의 물에 대하여 낮은 점도 (시험온도와 압력기준에서 액체질소가 상온의 물보다 1/5정도의 낮은 점도를 가짐)를 가져 유체의 마찰손실 (disk friction loss)이 줄어들기 때문인 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 액체질소를 이용한 극저온 터보펌프 시험설비를 개발하여 인두서를 통한 극저온 환경 하에서 성능시험을 수행하여 그 상사성을 보임으로써 인두서의 성능검증 및 시험설비의 신뢰성을 검증하였다. 극저온 시험에서 인두서의 성능은 상온수류시험에 대하여 양정은 유사하게 나타났으며, 효율은 수류시험의 경우보다 높게 나타났다.

본 설비는 극저온 환경에서 50톤급 인두서와 산화제 펌프를 최대 320 kW, 30,000 rpm으로 시험을 수행할 수 있으며, 시험과정에서 입구압력을 조절할 수 있는 방식으로 설비를 구성함으로써 성능시험과 더불어 인두서 단독 및 산화제 펌프의 흡입성능시험도 가능하게 하였다. 그리하여 로켓엔진의 개발에서 필수적인 극저온 환경의 검증된 시험설비를 보유하게 되었으며, 나아가 이러한 설비구축과 경험은 액체질소를 이용한 실험실의 극저온 시험수행을 가능하게 하는 데에 크게 기여할 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) 채연석, 2003, "KSR-III 성공과 우리나라의 우주개발 방향," 대덕과학포럼, pp. 23~33.
- (2) 홍순삼, 김진선, 최창호, 김진한, 2003, "터보펌프 인두서의 비정상 캐비테이션에 관한 실험적 연구," 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 333~339.

- (3) 김진한, 이은석, 홍순삼, 최창호, 전성민, 정은환, 2004, “액체로켓엔진용 터보펌프 개발현황,” 제5회 우주발사체기술 심포지움, pp. 38~51.
- (4) 강정식, 김진선, 김진한, 2004, “극저온 펌프 성능시험 설비의 개발,” 유체기계저널, 제7권, 제4호, pp. 47~52.
- (5) Kim, J., Lee, E.S., Choi, C. H., Jeon, S. M., 2004, “Current Status of Turbopump Development in Korea Aerospace Research Institute,” 55th International Astronautical Congress, Vancouver, IAC-04-S.P.17.