2003 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 340~345
선문대학교 아산캠퍼스, 2003. 12. 5~6

극저온 터보펌프 성능시험설비의 개발

강정식* • 김진선* • 김진한*

Development of Cryogenic Turbopump Test Facility

Jeong-Seek Kang*, Jin-Sun Kim*, Jinhan Kim*

Key Words : Cryogenic turbopump test facility(극저온 터보펌프 성능시험설비), Liquid nitrogen(액체 질소) Cavitation test(캐비테이션 시험)

ABSTRACT

Cryogenic turbopump test facility(CTTF) is designed and developed. Hydraulic and cavitation performance of turbopump in cryogenic environment can be measured. Working fluid is liquid nitrogen and operating temperature is -197℃. Liquid nitrogen run tank, catch tank and pressurizing tank has been built and remote tank pressure control system are installed. Maximum power of turbopump is 320kW and its maximum speed is 32000rpm. Cryogenic fluids and lubricating systems are effectively separated that long test times are acquired. Therefore hydraulic and cavitation performance can be measured accurately and effectively. This facility will contribute greatly to the development of turbopump for KSLV.

1. 서 론

우리나라는 2000년 국가우주개발중장기 기본계획의 보완을 통해 2005년까지 자체 기술로 저궤도위성 우주발사체 개발 및 우주센터 건립을 마무리 짓고, 2015년까지 총 20기의 인공위성을 자체 보유한다는 계획을 수립해 두고 우주발사체의 개발에 전력하고 있다[1]. 우주 발사체의 개발에서 가장 핵심적인 기술 중의 하나는 액체로켓의 추진제로 사용되는 산화제와 연료를 고압으로 연소실까지 이송시키는 터보펌프의 개발 기술이다. 액체로켓에 사용되는 터보펌프는 일반적인 펌프와는 다른 여러 가지 특징들이 있지만, 주된 첫 번째 특징은 액체산소나 액체수소 등의 극저온 매질을 사용한다는 점이다. 시험을 통하여 극저온 매질에서 수력성능을 확보하고, 캐비테이션 특성을 확인 하는 것은 터보펌프의 개발에서 필수적인 부분이다. 그리고 캐비테이션 특성의 경우 온도나 매질에 따른 차이가 매우 크므로 극저온 펌프 캐비테이션에 관한 연구는 극저온 매질을 사용하는 액체추진제 로켓엔진용 터보펌프 개발에 있어서 필수적인 핵심기술이 된다. 극저온 문제는 극저온 유체의 수력성능 뿐 아니라, 작동 전 펌프의 예냉문제, 베어링의 작동 신뢰성 문제, 열수축으로 인한 누설문제, 열응력 등으로 인한 문제, 임펠러, 인듀서, 축 등 고속으로 회전하는 회전체의 강도문제, 등 다양한 문제를 일으킨다. 그러므로 터보펌프의 개발에서는 일반적으로 물 등을 사용하는 상온 상사시험을 통하여 수력성능을 확보한 후에 극저온 매질을 적용하여 수력성능 및 캐비테이션 성능을 확인하게 된다.

그런데 그 중에서도 인듀서와 임펠러의 개발 측면에서는 극저온 상태에서 수력성능과 캐비테이션 성능을 신뢰할 만하게 검증하는 작업이 필수적이다. 그런데 액체 산소나 액체 수소의 경우에는 매질이 폭발의 위험성이 매우 크므로 개발단계에서는 대부분 액체산

* 한국항공우주연구원
E-mail : jskang@kari.re.kr

Table 1 Design specifications of CTTF

Design item	Specification
Working fluid	Liquid nitrogen (LN2)
Pump capacity	10 tons
Operating temp.	-197℃
Driving system	Electric motor & speed increaser
Max. power	320 kW
Max. rpm	32000
Max. outlet pressure	11 MPa
Max. Flow rate	80 liter/s

소와 물성치가 가까우면서 안정적인 액체질소를 사용한다. 그리고 개발의 마지막 단계에서 실매질을 사용하여 검증을 거치는 것이 일반적이다.

터보펌프의 또 다른 특징으로는 펌프의 수두(Head)가 약 600m~7000m에 이르는 높은 값이라는 점이다. 터보펌프는 수두 유량이 크고 압력이 높으며 로켓에 탑재되는 특성상 그 크기가 작고 가벼워야 하므로, 이에 따라서 일반적인 펌프에 비하여 높은 수두와 회전수를 가지는 펌프를 사용하게 된다. 이와 같이 회전수가 빨라서 임펠러의 팁(tip) 속도가 빨라지는 경우에는 작동 유체가 기화(cavitation)하여 펌프가 작동하지 못하게 되는 문제가 발생할 수 있다. 작동 유체가 기화하는 캐비테이션 현상은 진동 발생 및 구조적인 문제를 초래하기도 하며 연료 및 산화제의 공급압력에 변동을 가져오고 이에 따라 연소의 불안정성을 초래하거나 인듀서 날개의 파손을 가져오며, 최악의 경우 로켓의 폭발로 이어 질 수 있다는 점에서 매우 중요하다. 이는 일본 H-II 로켓의 지난 2회에 걸친 연속적인 실패원인이 터보펌프 인듀서 캐비테이션에 의한 엔진의 불안정성에 있다는 사실에서도 알 수 있다. 이와 같이 캐비테이션에 관한 기술은 로켓엔진의 안정성 및 고효율 확보에 필수적인 고난도 기술이며 수치적 계산 등으로는 정확한 예측이 어려워 터보펌프의 개발 단계에서는 대부분 시험결과에 의존하고 있다.

한국항공우주연구원(이하 항우연)에서는 우리나라의 액체로켓 개발계획에 따라 지난 수 년간 터보펌프의 개발연구를 수행하였으며, 2002년부터는 극저온 유체를 사용한 터보펌프 성능시험설비의 확보계획을 가지고 시험설비를 설계하고 제작해 왔다. 극저온 유체를 사용한 터보펌프의 연구는 우리나라에서는 처음이므로 안정적이면서도 실제질인 액체 산소와 성질이 가까운

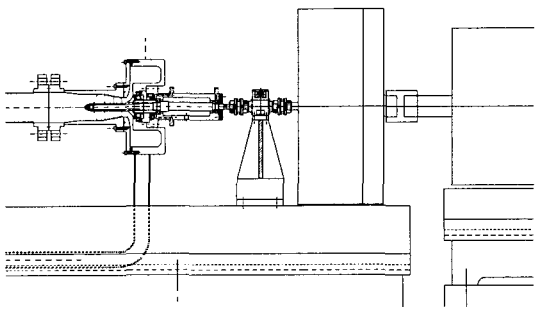

Fig. 1 Layout of turbopump test rig

액체질소를 사용하여 연구를 수행할 계획이다. 첫 번째 단계로 액체 질소를 사용한 극저온 시험기를 설계, 구축하고, 다음 단계에서는 이 실험설비를 이용하여 개발하는 터보펌프의 극저온 성능 및 캐비테이션 성능을 연구하는 것을 목표로 극저온 터보펌프 성능시험기를 개발해 왔으며, 현재 설계를 마치고 시험기 설치공사를 마무리하고 있는 중이다. 본 논문에서는 극저온 터보펌프 성능시험설비(Cryogenic turbopump test facility, CTTF)의 설계과정과 시험기의 사양, 특징, 그리고 앞으로의 계획을 소개하였다.

2. 터보펌프 성능시험부의 설계

항우연이 개발하는 성능시험기는 1단계로 10톤급의 액체로켓에 사용될 터보펌프의 실험에 초점을 맞추었으며, 인듀서의 성능 및 캐비테이션 시험을 위해서는 약 50톤급 이하의 터보펌프용 인듀서를 시험할 수 있도록 개발되었다. 몇 년 뒤 2단계에서는 30톤급 이상의 터보펌프를 시험할 수 있도록 확장될 예정이다. Table 1에는 극저온 터보펌프 성능시험기의 주요 사양을 나타내었다.

2.1. 성능시험부

성능시험부는 시험하고자 하는 임펠러와 인듀서, 컬렉터 등을 장착하여 터보펌프를 회전시키면서 성능을 시험하는 부분으로서 성능시험부의 개념도는 Fig. 1에 나타내었다. 펌프의 구동은 320kW급 전기모터를 사용하여 구동하며, 증속기(기어박스)를 사용하여 회전속도를 최고 32000rpm까지 운용할 수 있게 설계하였다. 기어박스는 토크미터로 연결되어 펌프로 입력되는 토크를 측정하며, 토크미터는 시험용 펌프의 축과 연

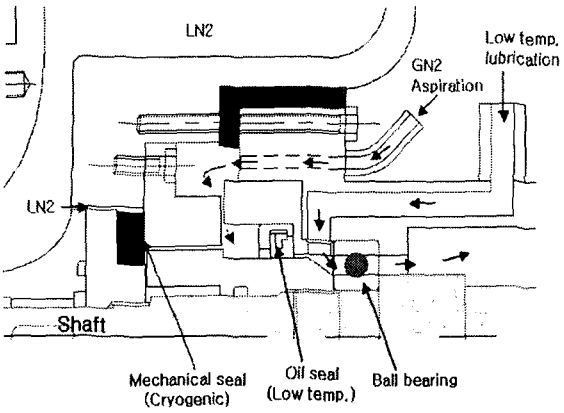

Fig. 2 Conceptual drawing of bearing lubrication and seal system

결되어 있다. 펌프의 회전수는 토크미터에서 측정하며, 모터의 축에서도 엔코더를 사용하여 회전수를 측정한다.

성능시험부는 모터를 장착하는 베드와 펌프 시험부를 장착하는 베드로 구분하여 설계하였으며, 베드는 정반으로 제작하였고 진동의 감쇠를 위하여 시험실 바닥으로부터 방진 설계 되었다.

2.2 베어링 및 윤활 시스템

극저온 터보펌프 시험기의 설계에서 가장 중요한 부분 중의 하나는 긴 시험 시간을 확보하는 것이다. 이것은 질소 저장탱크의 용량을 크게 하는 것과 시험 배관의 단열성을 높이는 것과도 관련이 있지만, 더욱 근본적인 문제는 베어링과 관련된다. 실제 터보펌프에서는 볼 베어링이 사용되는 데, 작동되는 실매질을 사용하여 베어링이 윤활되기 때문에 극저온 상태에서 베어링이 작동할 경우 베어링의 수명이 아주 짧은 것이 일반적이다. 이렇게 짧은 수명을 가진 베어링 시스템으로 펌프의 수력성능과 캐비테이션 성능을 도출하고 기타 연구의 목적으로 실험을 하기에는 베어링을 교체하며 여러 번 극저온 시험을 수행해야 하는 등 많은 어려움이 있다. 이런 문제를 해결하기 위하여 본 시험기에는 베어링을 극저온 상태에서 작동시키지 않고 약 -30℃~-60℃로 작동시키며 윤활유를 사용하여 윤활하는 방식을 채택하여 시험시간을 획기적으로 늘리는 데 성공하였다. 이것은 임펠러와 인듀서, 볼류트 등의 수력성능을 시험할 때에는 극저온용 볼베어링과 실(seal)을 사용하지 않고 장축을 사용하여 시험부를 배

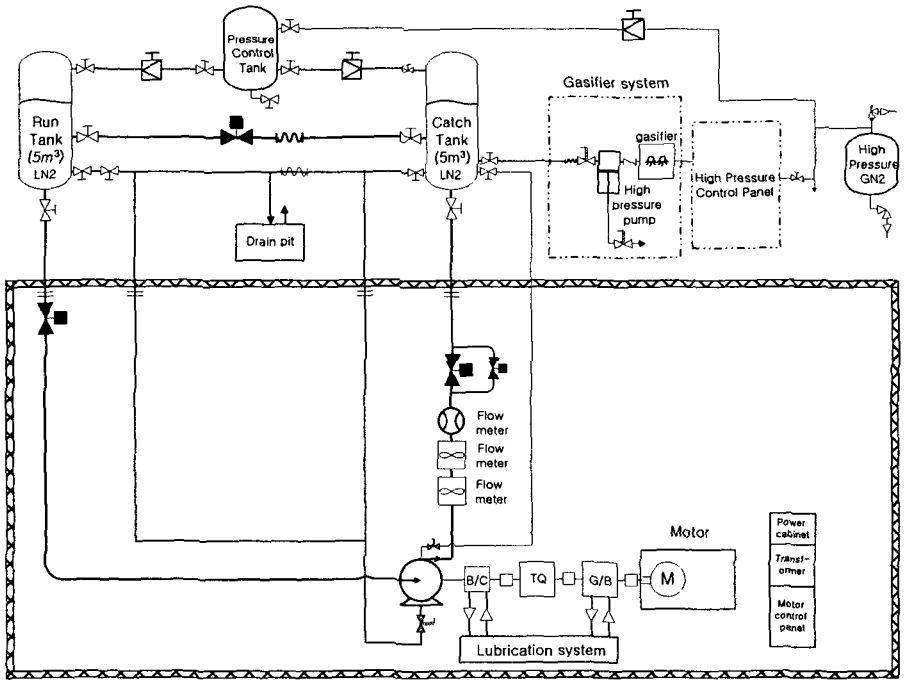

Fig. 3 Conceptual drawing of cryogenic turbopump test facility (CTTF)

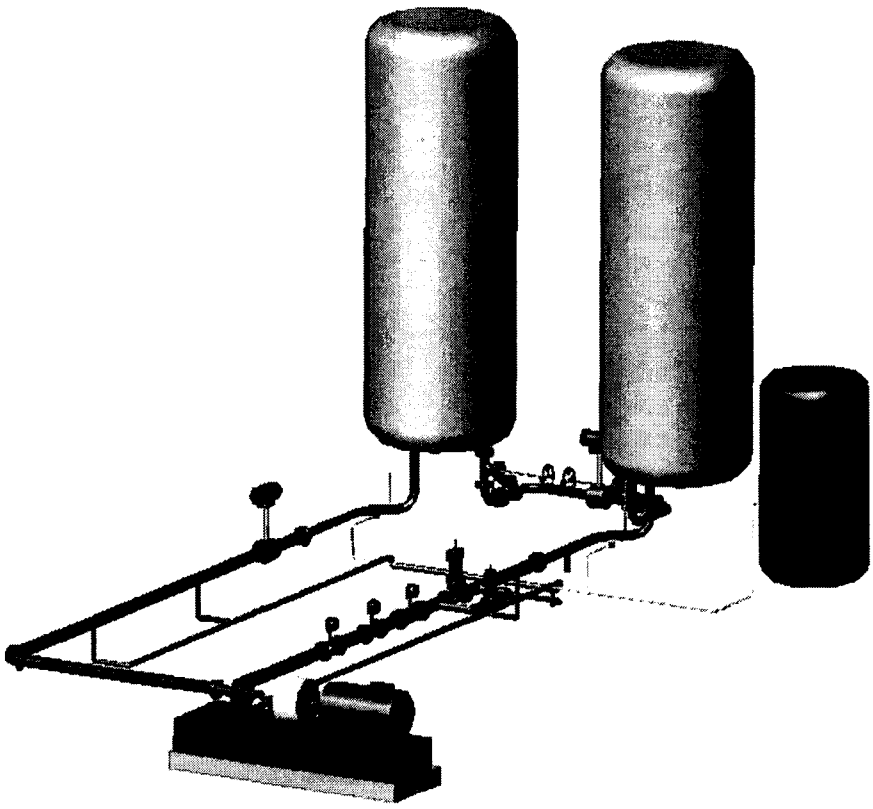

Fig. 4 3D schematic drawing of CTTF

어링 장착부를 분리시키는 방법으로 실현시켰다. Fig. 2 에는 베어링 시스템에 대한 개념도를 나타내었다.

액체질소는 극저온용 메카니컬 실(Mechanical seal)을 사용하여 베어링 쪽으로 극저온 매질이 유입되는 것을 차단하고, 윤활유는 저온용 오일실(oil seal)을 사용하여 차단하였으며, 메카니컬 실과 오일 실 사이에 기체질소를 순환시켜 양쪽의 실(seal)을 넘어온 소량의 매질들이 혼합되거나 저온화 되는 현상을 방지하고 두 실사이의 열전달을 최소화 하였다.

이런 방식으로 극저온 터보펌프 실험을 장기간 시험하는 것이 가능해 졌으며, 성능시험뿐 아니라 캐비테이션 시험에서도 정밀한 시험을 수행할 수 있게 되었다.

2.3 질소 저장 탱크

액체질소 저장탱크는 터보펌프 시험부에 액체질소를 공급하는 탱크(run tank)와 펌프에서 토출되는 질소를 회수하는 탱크(catch tank)로 2개가 있다. run tank는 캐비테이션을 방지하기 위하여 5Bar 이상 가압이 가능하여야 한다. 터보펌프로 공급된 유체는 압력과 유량 등 측정 파라미터를 측정한 후에 스로틀(throttle) 밸브를 통하여 감압한 후에 액체질소는 catch tank 로 회수된다. catch tank는 상황에 따라 10Bar까지 가압할 수 있게 설계되었다. catch tank로 회수된 액체질소는 가압 또는 감압을 통하여 액체질소의 온도를 적절히 조절하여 다시 run tank로 공급할 수 있어야 한다. 두 액체질소 탱크의 압력을 조절하기 위하여 액체질소를 고압의 기체(320 Bar)로 기화시켜서 고압탱크에 저장하고 이것을 압력을 조절하여 압력탱크(35 Bar)를 가압한 후 이 압력탱크로부터 run tank와 catch tank의 압력을 조절한다. run tank는 캐비테이션 시험 시에 입구압력의 강하와 상승을 위하여 제어실에서 압력을 임의로 조절할 수 있게 설계하였으며, catch tank도 제어실에서 압력조절이 가능하도록 설계되었다.

Fig. 5 Picture of run tank and catch tank

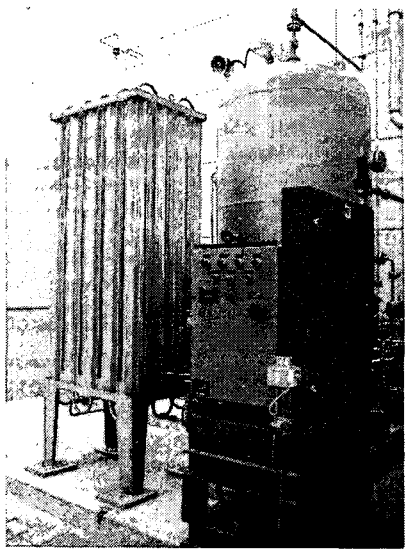

Fig. 6 Picture of pressurizing tank and gassifier system

2.4 배관 시스템

시험설비의 개발에서 개발 대상의 펌프를 설치하고 이 펌프에 액체질소는 공급하고 회수하는 주배관의 크기 선정이 중요하다. 주배관은 모두 진공배관으로 제작되어 배관내부로의 열침입을 최소화 하도록 설계되었다. 시험기 주 배관의 크기는 주배관 내부의 유속과 시스템의 손실을 고려하여 결정하여야 한다. 관의 직경이 너무 작으면 유속이 빨라서 시스템의 손실이 커져서 터보펌프의 시험 조건에 제한을 받는다. 그리고 관의 직경이 필요 이상으로 클 경우에는 배관의 설치 비용이 커지고, 배관의 초기 냉각에 필요한 액체질소가 과다하게 필요할 뿐 아니라, 배관에 부수적으로 필요한 유량계, 밸브 등의 비용이 기하급수적으로 상승하므로 시험하려는 목적에 맞는 배관의 선정이 중요하다. 본 연구에서는 다양한 배관의 크기에 대하여 밸브 및 관내부의 손실과 관내부의 속도, 동압, 시험조간과의 타당성 등을 고려하여 배관의 크기를 선정하였다.

다양한 크기의 유량과 배관의 크기에 대하여 배관 시스템의 손실을 계산하였다. 유량이 증가하면서 배관 시스템의 손실은 증가하는데, 배관의 크기가 클수록 유속이 작아져서 손실이 줄어든다. 시스템의 손실은 두 개의 액체질소탱크의 압력차이보다 작아야하며, 손실이 작을수록 시험기를 운용할 수 있는 영역이 넓어지므로 유리하다. 하지만 앞에서 언급한대로 배관이 커지면서 밸브, 유량계 등 부대적인 장비들의 이용이 크게 증가하므로 배관의 크기는 목적에 맞는 적절한 크기가 바람직하다. 손실이 작아서 충분히 시험 목적을 만족시키며, 2단계에서 30톤급 이상으로의 사용도 가능하도록 100A (4inch) 진공배관을 사용하기로 결정하였다.

주배관 뿐 아니라 시험을 위하여 터보펌프 및 배관을 예냉하는 배관을 catch tank로부터 설치하였으며, 시험이 끝난 후 액체질소를 배출하는 배관도 설치하였다. 그리고 액체질소 저장 탱크와 시험시 배관에 공급된 액체질소는 실험이 끝난 후, 그리고 유사시에 방출할 수 있는 장치를 설계하였다. 그리고 액체질소를 배출하는 배관은 2인치 배관으로서 건물 밖에 배출을 위한 저장소와 증발 타워를 설치하였다.

유량의 측정은 측정 정밀도의 향상과 신뢰성을 위하여 세 개의 유량계를 직렬로 설치하여 짧은 시간에도 신뢰할 만하게 유량을 측정할 수 있게 설계하였다. 두 개의 유량계는 터빈 유량계이며 하나는 질량유량계로서 배관 내부에 미소한 가스가 발생한 경우에도 유량을 정밀하게 측정할 수 있도록 설계하였다. 설계된 성능시험기의 개략적인 시스템은 Fig. 3에 나타내었다. 배관에는 안전밸브와 파열판, 체크밸브, 필터, 압력센서 및 온도센서 등 여러 가지 장치가 설치되어 있으나 상세한 사항은 Fig. 3에서는 생략하였다. Fig. 4에는 건물 외부에 설치되어 있는 질소탱크들과 가압탱크들의 3차원 모델링을 나타내었다. Fig. 5는 설치된 Run

tank와 Catch tank의 사진이며, Fig. 6은 설치된 기화기시스템과 가압탱크의 사진이다.

성능시험기에는 실험과 데이터의 획득뿐 아니라 안전설비를 포함하여 다른 여러 가지 시설이 필요하다. 회전체가 높은 파워를 가지고 고속으로 회전하므로 유사시를 대비하여 방호벽을 설치하였고, 액체질소의 누설을 고려하여 산소 감지기를 실험실과 제어실, 그리고 액체질소 저장 탱크 주변에 설치하였다.

성능시험을 수행하고 데이터를 획득하는 제어실은 시험실의 앞에 설치하였다. 시험 중에 압력, 온도, 비정상 압력, 간극신호 등을 PXI 시스템을 사용하여 측정한다. 그리고 시험 중에 시험실과 건물 외부의 주요장비들의 작동상태를 감시할 수 있는 카메라를 제어실에 설치하였다.

3. 결론

본 연구에서는 극저온 매질을 사용하여 터보펌프의 성능을 시험할 수 있는 설비를 설계하고 제작하였다. 10톤급 터보펌프와 약 50톤급 인듀서를 최대 320kW, 회전수 32000rpm으로 시험할 수 있는 설비를 성공적으로 완성하였다. 액체질소를 공급하는 탱크와 회수하는 탱크, 가압탱크, 가압시스템 등이 설치되어 다양한 조건에서 시험을 수행할 수 있게 설계하였다. 터보펌프의 극저온 시험은 성능시험뿐 아니라 정밀한 캐비테이션 시험을 위하여 충분한 시험시간을 확보하는 것이 중요한데, 이를 위하여 성능시험부를 시험부와 베어링 장착부로 분리하는 방식을 사용하여 장시간 시험가능한 설비를 구현하였다. 이 설비는 현재 개발되고 있는 KSLV용 터보펌프의 연구, 개발에 크기 기여할 것이다.

참고문헌

(1) 채연석, 2003, "KSR-III 성공과 우리나라의 우주개발 방향," 대덕과학포럼, pp. 23-33.