

Technical Paper

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2015.19.3.089>

7톤급 로켓엔진용 펌프 수류 성능시험

홍순삼^{a,*} · 김대진^a · 최창호^a

Water Performance Test of Pumps for a 7 Ton Class Rocket Engine

Soonsam Hong^{a,*} · Daejin Kim^a · Changho Choi^a

^aTurbopump Team, Korea Aerospace Research Institute, Korea

*Corresponding author. E-mail: sshong@kari.re.kr

ABSTRACT

Performance test was conducted for an oxidizer pump and a fuel pump for a 7 ton class rocket engine, by using water. The pumps were driven by an electric motor. The hydrodynamic performance and the suction performance were measured at flow ratio of the design and off-design conditions. Head-flow curve, efficiency-flow curve, and head-cavitation number curve were obtained. It is confirmed that the pumps can satisfy the design requirements of hydrodynamic performance in terms of the head and the efficiency. The pumps also satisfied the design requirements of suction performance.

초 록

7톤급 로켓엔진용 산화제펌프와 연료펌프에 대하여 물을 매질로 하는 성능시험을 수행하였다. 펌프는 전기모터로 구동되었고 설계 및 탈설계 유량비 조건에서 펌프의 수력성과 흡입성능이 측정되었다. 양정-유량 곡선, 효율-유량 곡선, 양정-캐비테이션수 곡선을 얻었다. 개발된 펌프는 펌프 양정과 효율의 수력성에 관한 설계요구조건을 만족시킬 수 있음을 확인하였다. 또한 흡입성능에 관한 설계요구조건을 만족시킨다.

Key Words: Turbopump(터보펌프), Oxidizer Pump(산화제펌프), Fuel Pump(연료펌프), Performance Test(성능시험), Cavitation(캐비테이션)

1. 서 론

터보펌프는 액체로켓엔진에서 추진제를 가압하여 연소실로 공급하는 역할을 한다. 한국항공우주연구원에서는 액체산소와 케로신을 추진제로 하는 가스발생기 사이클의 추력 7톤급 액체로켓엔진에 적용 가능한 터보펌프를 개발하고

Received 8 April 2015 / Revised 30 April 2015 / Accepted 4 May 2015
Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers
pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

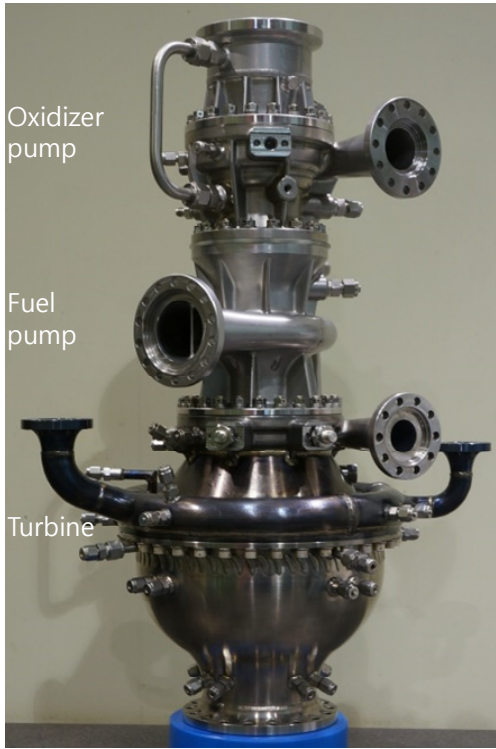


Fig. 1 Turbopump assembly.

있다[1]. 이 터보펌프는 산화제펌프, 연료펌프, 터빈이 동일 축에 위치하고 있고 하나의 터빈이 두 펌프를 구동하는 형식을 취하고 있다(Fig. 1). 산화제펌프와 연료펌프는 단단 원심형이고 터빈은 단단 충동형이다. 제작된 터보펌프 각 구성품에 대하여 단품 상사매질 성능시험이 수행된 후 이들 구성품이 조립된 조립체를 대상으로 상사매질 성능시험 및 실매질 성능시험이 이루어진다.

본 연구에서는 7톤급 로켓엔진용 산화제펌프 및 연료펌프의 단품 상사매질 성능시험에 관하여 기술한다. 시험에 사용된 산화제펌프와 연료펌프에 대한 설계 변수를 Table 1에 제시하였다. 시험에서는 상온의 물을 매질로 하고 전기모터로 펌프를 구동하며 시험을 통하여 펌프의 양정-유량 특성, 효율-유량 특성, 그리고 캐비테이션 특성이 얻어진다[2]. 산화제펌프 시험결과는 발표된 바 있으며[2] 본 연구에는 연료펌프 시험결과를 추가하여 함께 기술하였다.

Table 1. Design parameters of pumps.

Parameter	Unit	Oxidizer pump	Fuel pump
Specific speed	-	0.40	0.19
Head coefficient	-	1.09	1.21
Required minimum cavitation number	-	0.034	0.064
Rotational speed	rpm	27,000	

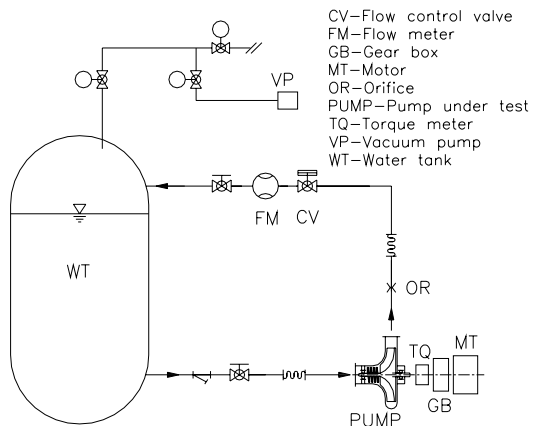


Fig. 2 Schematic of pump test facility.

2. 펌프 시험설비

본 시험장치에서는 산화제펌프 및 연료펌프에 대한 수력 성능 및 캐비테이션 성능이 측정된다 [3]. 실제 터보펌프에서는 터빈이 펌프를 구동하지만 본 시험장치에서는 펌프에 대한 다양한 시험이 가능하도록 하기 위하여 전기 모터를 이용하여 펌프를 구동한다. 작동유체로는 실매질인 액체산소나 케로신 대신에 시험의 용이성과 안전성을 위하여 상온의 물을 사용하였으며 시험 중에 펌프의 양정, 유량, 동력 등이 측정된다. 주요 구성품에는 물탱크, 모터, 기어박스, 토크미터, 유량제어밸브, 유량계 등이 있다. 구동 모터의 최대동력은 200 kW이고 기어박스를 통하여 펌프 회전수 24,000 rpm까지 시험가능하다. 물탱크는 3.3 m³ 용량이고 가압 또는 감압이 가능하

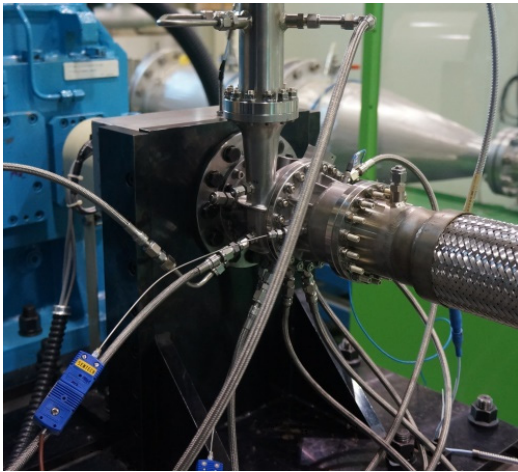


Fig. 3 Oxidizer pump under test.

다. 물탱크로부터 물이 흡입되고 펌프에 의하여 가압된 물이 다시 물탱크로 배출하는 폐회로 형식의 시험기이며 이 펌프시험기의 구성도를 Fig. 2에 나타내었다.

3. 시험결과 및 고찰

3.1 산화제펌프 성능시험

개발 중인 산화제펌프의 주요 구성품은 인두서, 임펠러, 벌류트 등이다[4]. 임펠러는 주날개와 보조날개(splitter)로 구성되어 있고 펌프 흡입 성능을 향상시키기 위하여 임펠러 전방에 인두서가 장착되어 있다. 펌프 성능시험 장면을 Fig. 3에 제시하였다. 본 연구에서는 20,300 rpm에서 수행된 시험 결과를 제시하였으며 이 회전수는 설계 회전수 27,000 rpm의 75%에 해당된다.

시험을 통하여 측정된 산화제펌프의 성능곡선을 Fig. 4에 제시하였는데, 펌프 양정계수와 효율을 유량에 대하여 표시하였다. 양정계수의 정의는 다음과 같다.

$$\text{Head coefficient} = 2\Delta p / \rho u_{2t}^2 \quad (1)$$

여기서 Δp 는 펌프의 압력상승, ρ 는 펌프 유체의 밀도, u_{2t} 는 임펠러 출구 날개끝 속도이다. 효

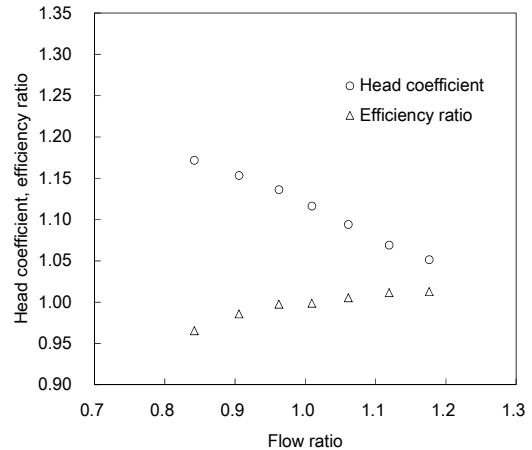


Fig. 4 Performance curve of oxidizer pump.

율과 유량은 각각의 정격의 값에 대한 비율로 표시하였다. 양정의 경우 보통의 원심펌프와 마찬가지로 유량 증가에 따라 감소하는 경향을 보였다. 즉 유량비를 0.84부터 1.18까지 증가시킬 때 양정계수는 1.17에서 1.05로 감소하였다. 양정에 관한 설계요구조건은 Table 1에 제시되어 있다(유량비 1.0에서 양정계수 1.09). 효율은 대체로 유량 증가에 따라 증가하는 경향을 보였으나 그 변화 폭은 작았다. 즉 유량비 0.84~1.18일 때 효율비 범위는 0.97~1.01이었다. 시험 결과를 검토해보면 효율은 설계요구조건을 상회하였다. 양정계수의 경우 설계요구조건을 약간 상회하는 수준으로 추후 개발 과정에서 조정될 계획이다. 따라서 개발된 산화제펌프는 수력성능에 관한 설계요구조건을 만족시킬 수 있음을 확인하였다.

흡입 성능시험 즉 캐비테이션 성능시험 결과를 Fig. 5에 제시하였는데 여기에는 캐비테이션 수를 감소시키며 측정된 펌프 양정계수가 표시된다. 캐비테이션수의 정의는 다음과 같다.

$$\text{Cavitation number} = 2(p_{00} - p_v) / \rho u_{1t}^2 \quad (2)$$

여기서 p_{00} 은 펌프 입구의 전압력, p_v 는 펌프 유체의 포화증기압력, ρ 는 펌프 유체의 밀도, u_{1t} 는 인두서 입구 날개끝 속도이다. Fig. 5를 보면 임의의 일정한 유량비 조건에서 캐비테이션수가

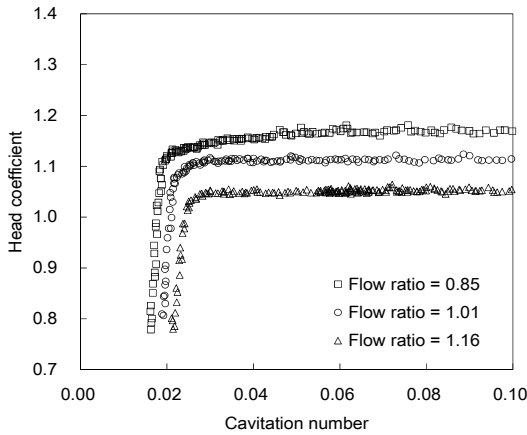


Fig. 5 Suction performance of oxidizer pump.

감소하여도 펌프 양정계수는 변화 없이 일정하게 유지되지만 캐비테이션수가 어느 값보다 낮아지면 양정계수가 급격히 저하되는데 이때의 캐비테이션수를 임계 캐비테이션수라고 부른다. 보통 캐비테이션이 발생하지 않을 때에 비하여 양정계수가 3% 감소하는 지점을 임계점으로 본다. Fig. 5에서 유량비가 작을수록 임계점 근처에서 캐비테이션수 감소에 따른 양정계수 감소가 완만하게 이루어지는 것이 관찰되는데, 유량비 0.85의 경우 캐비테이션수 0.05부터 양정계수가 매우 완만하게 감소하기 시작한다.

흡입성능 시험 결과를 표시한 Fig. 5에서 유량비 1.01에 대하여 시험 중 시간에 따른 물리량의 변화를 Fig. 6에 표시하였다. 여기에는 양정계수 뿐 아니라 회전수비(N/N_{ref})와 캐비테이션수를 표시하였으며 이 그림에서 양정계수를 캐비테이션수에 대하여 그린 것이 Fig. 5에 나타나 있는 것이다. Fig. 6에는 흡입성능시험 과정이 잘 나타나 있는데 펌프의 회전수를 일정하게 유지한 상태에서 진공펌프를 사용하여 물탱크 상부 가스를 계속 빼냄으로써 펌프 입구 압력을 감소시키게 되며 이로써 캐비테이션수가 감소하게 되는 것이다. 일정한 값으로 유지되던 펌프 양정계수가 시험 후반부로 가면서 그 값이 서서히 감소하게 되며 이후 급격히 감소하면 펌프시험을 종료하게 된다. 한편 흡입성능 중에 가속도센서(PCB M353B14 모델)를 펌프 케이싱의 인두

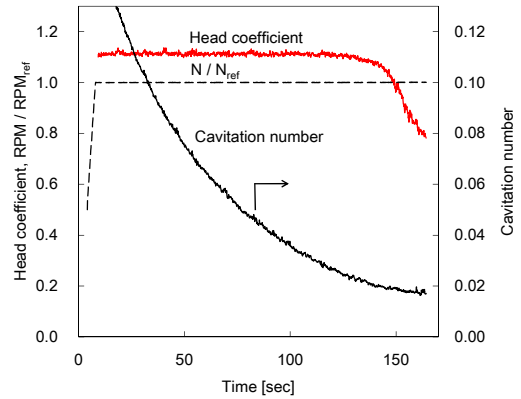


Fig. 6 Time data of cavitation test of oxidizer pump (flow ratio = 1.01).

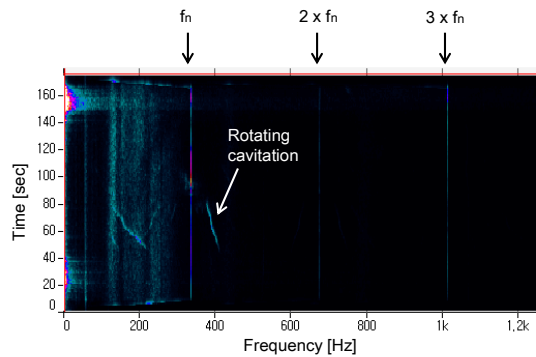


Fig. 7 Spectrum of accelerometer signal of oxidizer pump during cavitation test(flow ratio = 1.01).

서 전방 위치에 부착하여 가속도를 측정하였다. 유량비 1.01의 경우에 대하여 가속도센서로 측정된 진동을 주파수 분석하고 속도로 환산하여 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 펌프 회전수 성분($f_n = 338 \text{ Hz}$)과 그 2배수 및 3배수가 관찰된다. 그리고 Time = 45-80 sec에 특이한 성분이 관찰되는데 그 주파수는 380-410 Hz로서 회전수 성분의 1.12-1.21배에 해당한다. 이 성분은 선회 캐비테이션(rotating cavitation)이라고 알려져 있고 인두서에서 발생하며 일종의 실속 셀(stall cell)이 회전수 성분의 1.1-1.2배[5] 혹은 1.1-1.3배[6]의 속도로 원주방향으로 회전한다. 이 선회 캐비테이션은 Fig. 6에서 보면 캐비테이션수 0.048-0.082 범위에서(Time = 45-80 sec에 해당)

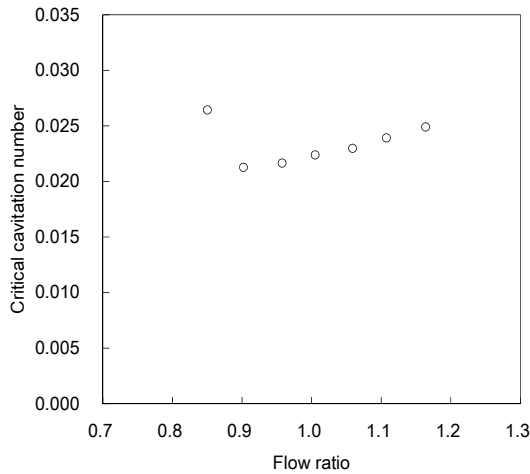


Fig. 8 Critical cavitation number of oxidizer pump.

발생하고 시간이 지나면서 즉, 캐비테이션수가 감소하면서 그 주파수가 감소하는데 이는 다른 연구에서도[6,7] 동일하게 관찰된다. 위 결과는 유량비 1.01의 결과이지만 다른 유량비에서도 선 회 캐비테이션이 관찰된다. 위와 같은 비정상 캐비테이션 현상에 대한 추가 고찰을 위하여 향후 펌프 유입부에 압력섭동센서 설치나 축에 간극 센서를 설치하고 시험할 계획이다.

세 가지 유량계수(Fig. 5)와 추가로 시험된 네 가지 유량계수 조건에서 수행된 흡입성능시험에서 도출된 임계 캐비테이션수를 유량비에 대하여 표시하여 Fig. 8에 제시하였다. 유량비 0.9 이상에서는 유량비가 감소하면 임계 캐비테이션수도 감소한다. 그런데 유량비가 더 작아져 0.85가 되면 임계 캐비테이션수가 다시 증가한다. 보통 인듀서가 적용되지 않는 원심펌프의 경우 유량비가 감소하면 임계 캐비테이션수는 계속 감소하게 된다. 하지만 본 산화제펌프와 같이 인듀서가 적용되는 경우 유량비가 특정 값보다 작아지면 임계 캐비테이션수가 다시 증가하게 된다[8]. 한편 Fig. 8의 시험 결과를 검토해보면 흡입성능은 설계요구조건을 상회하였다. 즉 설계요구조건인 임계 캐비테이션수가 0.034인 반면에 본 시험 결과는 임계 캐비테이션수가 이보다 낮으므로 개발된 산화제펌프는 흡입성능에 관한 설계요구조건을 만족시킨다는 것을 알 수 있다.

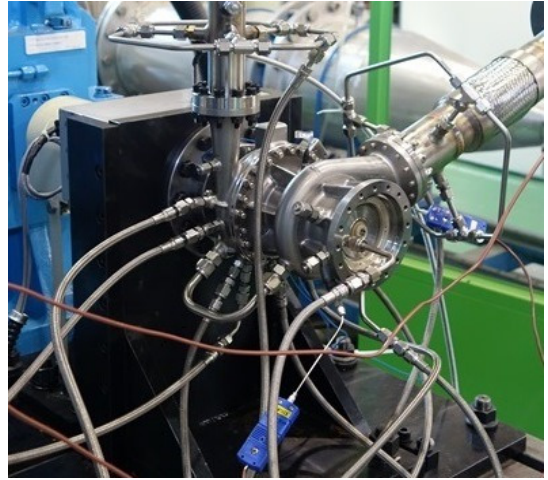


Fig. 9 Fuel pump under test.

3.2 연료펌프 성능시험

개발 중인 연료펌프의 주요 구성품은 인듀서, 임펠러, 벌류트 등으로서 그 구성은 산화제펌프와 동일하다. 연료펌프 성능시험 장면을 Fig. 9에 제시하였는데, 수력성능시험은 18,100 rpm에서, 흡입성능시험은 20,300 rpm에서 수행된 시험 결과를 제시하였다.

시험을 통하여 측정된 연료펌프의 성능곡선을 Fig. 10에 제시하였다. 양정은 산화제펌프와 마찬가지로 유량 증가에 따라 감소하는 경향을 보였는데, 그 감소폭이 산화제펌프에 비하여 더 컸다. 이는 두 펌프의 형상 차이, 즉 임펠러 출구 각도, 비속도, 벌류트 크기 등의 영향을 받았을 것으로 보인다. 양정에 관한 설계요구조건은 Table 1에 제시되어 있다(유량비 1.0에서 양정계수 1.21). 양정계수의 경우 설계요구조건을 조금 상회하는 수준으로 추후 개발 과정에서 조정될 계획이다. 효율의 경우 설계 유량비 근처에서 최댓값을 보이고 그 값이 설계요구조건을 상회하였다. 따라서 개발된 연료펌프는 수력성능에 관한 설계요구조건을 만족시킬 수 있음을 확인하였다.

연료펌프의 흡입 성능시험 결과를 Fig. 11에 제시하였다. 산화제펌프와 유사하게 유량비가 작을수록 임계점 근처에서 캐비테이션수 감소에 따른 양정계수 감소가 완만하게 이루어지는 것

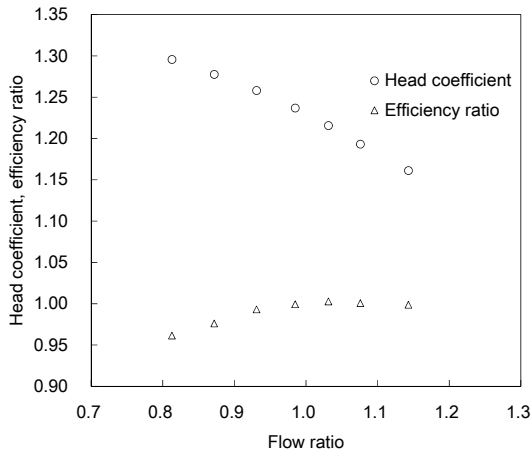


Fig. 10 Performance curve of fuel pump.

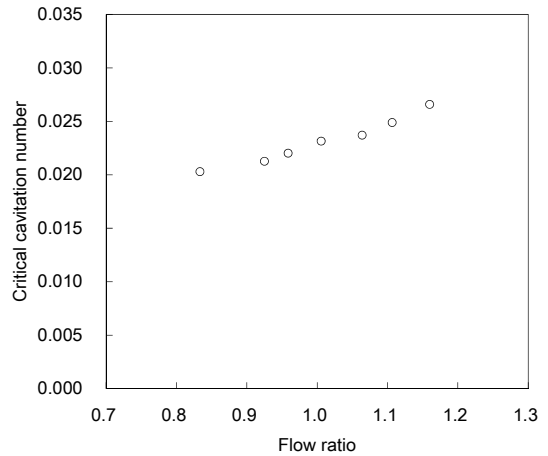


Fig. 12 Critical cavitation number of fuel pump.

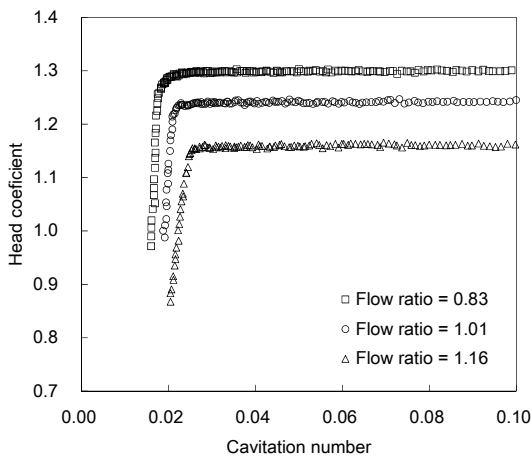


Fig. 11 Suction performance of fuel pump.

이 관찰된다. 산화제펌프와 비교할 때 임계점 근처에서 캐비테이션수 감소에 따른 양정계수 감소가 더 급하게 이루어진다. 이는 펌프 인두서와 케이싱 사이 간극이 연료펌프의 경우가 산화제펌프에 비하여 더 작기 때문인 것으로 파악되며, 이 간극이 작을수록 임계점 근처에서 캐비테이션수 감소에 따른 양정계수 감소가 더 급하게 이루어진다고 알려져 있다[5].

유량에 따른 임계 캐비테이션수를 Fig. 12에 제시하였다. 시험된 유량비에서 유량비가 감소하면 임계 캐비테이션수가 계속 감소한다. 이는 산화제펌프와는 다른 거동이다. 한편 설계요구조건

의 임계 캐비테이션수가 0.064인 반면에 본 시험 결과는 임계 캐비테이션수가 이보다 낮으므로 개발된 연료펌프는 흡입성능에 관한 설계 요구조건을 만족시킨다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

개발된 산화제펌프와 연료펌프에 대하여 수력 성능시험 및 흡입성능시험을 수행하였으며 그 주요 결과는 다음과 같다.

산화제펌프에 대하여 유량비 0.84~1.18 범위에서 수력성능시험이 수행되었다. 펌프 양정-유량 특성은 원심펌프의 전형적인 성능곡선 형태를 보였고 효율은 유량 증가에 따라서 완만하게 증가하는 경향을 보였다.

산화제펌프에 대하여 유량비 0.85~1.16 범위에서 흡입성능시험이 수행되었다. 양정계수-캐비테이션수 관계에서 유량비가 작을수록 임계점 부근에서 캐비테이션수 감소에 따른 양정계수 감소가 완만하게 이루어졌다. 그리고 유량비 0.9 이상에서는 유량비가 감소하면 임계 캐비테이션수도 감소하지만 유량비가 더 감소하면 임계 캐비테이션수가 다시 증가하였다.

연료펌프에 대하여 유량비 0.81~1.14 범위에서 수력성능시험이 수행되었다. 펌프 양정은 산화제

펌프와 마찬가지로 유량증가에 따라 감소하는 경향을 보였다. 펌프 효율은 설계 유량비 근처에서 최댓값을 보였다.

연료펌프에 대하여 유량비 0.83~1.16 범위에서 흡입성능시험이 수행되었다. 산화제펌프와 마찬가지로 양정계수-캐비테이션수 관계에서 유량비가 작을수록 임계점 부근에서 캐비테이션수 감소에 따른 양정계수 감소가 완만하게 이루어졌다. 또한 임계점 부근에서 캐비테이션수 감소에 따른 양정계수 감소가 산화제펌프에 비하여 더 급하게 이루어진다. 그리고 산화제펌프와 달리 시험된 유량비에서 유량비가 감소하면 임계 캐비테이션수가 계속 감소하였다.

개발된 산화제펌프와 연료펌프는 수력성능과 흡입성능의 설계요구조건을 만족시킬 수 있음을 확인하였다.

References

1. Kim, J.H., Choi, C.H., Jeong, E.H., Jeon, S.M. and Hong, S.S., "Development Status of a Turbopump for Korea Space Launch Vehicle (KSLV-II)," *Proceedings of the Korean Society of Aeronautical and Space Sciences Fall Conference*, Jeju, Republic of Korea, pp. 254-263, Nov. 2012.
2. Hong, S.S., Kim, D.J. and Choi, C.H., "Water Performance Test of an Oxidizer Pump for a 7 ton Class Liquid Rocket Engine," *Proceedings of Korean Society of Propulsion Engineers Fall Conference*, Jeongsun, Kangwon-do, Republic of Korea, pp. 861-864, Dec. 2014.
3. Kim, D.J. and Choi, C.H., "Design of Single-Pump Test Facility for Turbopump," *Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineers Fluid Engineering Division Spring Conference*, Jeju, Republic of Korea, pp. 311-312, May 2013.
4. Choi, C.H., Hong, S.S. and Kim, D.J., "Development of Pumps for Liquid Rocket Engine Turbopumps," *Proceedings of Korean Society of Propulsion Engineers Fall Conference*, Jeongsun, Kangwon-do, Republic of Korea, pp. 899-902, Dec. 2014.
5. Brennen, C. E., *Hydrodynamics of Pumps*, Concepts ETI, Inc., Norwich, Vermont, USA and Oxford University Press, Oxford, England, 1994.
6. Tsujimoto, Y., Yoshida, Y., Maekawa, Y., Watanabe, S. and Hashimoto, T., "Observations of Oscillating Cavitation of an Inducer," *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 119, pp. 775-781, 1997.
7. Kim, D.J., Hong, S.S., Kim, J.S., Choi, C.H. and Kim, J.H., "Casing Vibration of Oxidizer Pump for Liquid Rocket Engine," *Proceedings of the Eighth International Symposium on Cavitation (CAV 2012)*, Singapore, pp. 108-112, Aug. 2012.
8. Hergt, P., Nicklas, A., Mollenkopf, G. and Brodersen, S., "The Suction Performance of Centrifugal Pumps Possibilities and Limits of Improvements," *Proceedings of the 13th International Pump User Symposium*, Texas A&M University, College Station, Texas, USA, pp. 13-25, 1996.