

## 로켓엔진용 산화제펌프의 수류 시험

김대진\* · 홍순삼\*\* · 최창호\*\*\* · 김진한\*\*\*\*

### The Hydraulic Tests of LOX Pumps for a Liquid Rocket Engine

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

**Keywords :** Turbopump(터보펌프), LOX pump(산화제펌프), head(양정), floating ring seal(플로팅 링 실), NPSH(유효흡입양정), cavitation(캐비테이션)

#### Abstract

A series of hydraulic and cavitation tests are performed in water environment in order to verify the hydraulic and cavitation performance of three types of LOX pumps. All the performances of the pumps are found to be satisfied with each design requirement. In the hydraulic tests, the head and efficiency are increased as the gap between floating ring seals and the impeller shoulder is decreased. In the cavitation tests, some pumps show decrease in the cavitation performance as the flowrate of the pump is decreased.

#### 1. 서론

한국항공우주연구원(항우연)은 2002년 KSR-III 액체로켓의 성공적 발사 이후 위성발사용 발사체 개발이라는 또 다른 목표를 위해 매진하고 있다. 알려진 바와 같이 KSR-III 로켓엔진은 가압식 엔진(pressure-fed type engine system)을 채택했기 때문에 고압 연소를 통한 성능의 극대화에는 한계가 있다. 즉, 가압식 엔진으로 위성을 실기 위해 필요한 고압의 산화제와 연료를 엔진 시스템에 재공하려면 로켓의 전체 질량 부담이 크게 늘어난다. 따라서 위성 발사라는 더 큰 목표를 달성하기 위해, 엔진 성능의 극대화에 필수적인 터보펌프를 장착한 새로운 엔진 시스템(turbopump type engine system)의 개발이 이루어져야 한다. 터보펌프를 사용할 경우, 비교적 저압의 산화제와 연료를 효과적으로 가압하여 연소실에 전달할 수 있어 로켓의 고성능화, 고추력화에 기여할 수 있다[1].

현재 항우연에서는 발사체 실용화를 최종 목표로 액체산소와 케로신을 추진제로 하는 30톤급 개방형(open cycle) 터보펌프를 개발하고 있다. 개발 중인 터보펌프는 산화제와 연료를 공급하기 위한 두 개의 단단 원심형 펌프와 펌프 구동을 위한 단단 총동형 터빈으로 구성된 일축식 모델이다. 산화제펌프와 연료펌프 사이에는 IPS(Inter-propellant seal)를 두고 있어 액체산소와 케로신이 만나는 것을 방지토록 하였다[2]. 그리고 각각의 펌프는 플로팅 링 실(floating ring seal)을 통해 임펠러 출구에서 나오는 누설 유량을 제어한다[3].

이러한 터보펌프 조립체 중 산화제펌프에 대한 성능 시험을 수행하였다. 성능 시험은 크게 수력 성능 시험과 흡입 성능 시험으로 구분된다. 이 중 수력 성능 시험은 유량에 따른 양정, 효율 등이 설계 의도와 의 부합 여부를 확인하기 위한 시험이고, 흡입 성능 시험은 유효흡입양정(Net Positive suction head; NPSH)의 측정을 통해 펌프 안정성에 중요한 요소인 흡입 성능을 확인하기 위해 실시한다. 모든 시험은 상온의 물을 매질로 하여 실시되었으며, 항우연 내에 설치된 터보펌프 성능시험설비에서 이루어졌다.

#### 2. 시험 설비

터보펌프 성능시험설비는 물과 공기를 사용하여 터보펌프에 대한 상사시험을 수행하기 위해 건설되었으며, 크게 주시험기와 부대설비로 구분된다. 주시험기는 펌프시험기, 터빈시험기, 조립체시험기로 구성되며, 부대설비는 고압공기 공급 시스템(Pressure Automatic Regulation System; PARS)과 고압질소 공급 설비로 구성된다. 터보펌프 중 산화제펌프와 연료펌프에 대한 성능 시험은 펌프시험기에서 이루어지며, 부대설비 중 PARS를 이용한다.

펌프시험기는 펌프 단품에 대한 수력 성능 시험과 흡입 성능 시험이 이루어진다. 펌프시험기는 탱크의 물을 펌프로 흡입하여 다시 물탱크로 보내는 폐회로 형식의 시험기로 시험기 형상은 Fig. 1과 같다. 설비 내 주요 구성 요소로는 모터, 기어박스, 물탱크, 토크미터, 터빈 유량계, 진공 펌프 등이 있다. 모터와 기어박스는 터빈을 대신하여 펌프를 구동하는 목적으로 사용되며, 최고 출력 320 kW, 최대 회전수 20000 rpm까지 시험 가능하다. 물탱크는 3 m<sup>3</sup>의 용량으로 펌프 시험에 필요한 유체(물)를 공급한다. 펌프 구동을 위한 동력을 측정하는 용도로 쓰이는 토크미터는 기어박스와 펌프 사이에 위치한다. 터빈 유량계는 작동 유량의 측정에 쓰이며, 펌프 하류에 설치하였다. 진공 펌프는 흡입 성능 시험 중 펌프 시험기 폐회로 내부 압력을 대기압 이하로

\* 한국항공우주연구원 터보펌프그룹, rain301@kari.re.kr

\*\* 한국항공우주연구원 터보펌프그룹, sshong@kari.re.kr

\*\*\* 한국항공우주연구원 터보펌프그룹, cch@kari.re.kr

\*\*\*\* 한국항공우주연구원 터보펌프그룹, jhkim@kari.re.kr

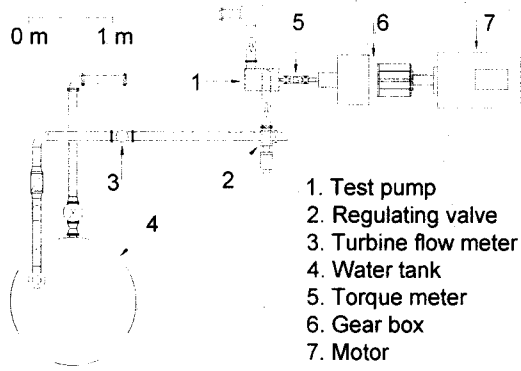


Figure 1. Schematic of test section

낮추는데 사용되는데 정격 용량은 960 lpm, 최대 적용 압력은  $10^{-4}$  Torr이다[4][5].

터보펌프의 성능 검증을 위해, 앞에서 언급한 토크미터, 유량계 이외에 몇 개의 압력 센서와 온도 센서가 사용된다. 우선 펌프 폐회로의 센서를 살펴보면, 양정 측정에 필요한 펌프 입구 및 출구 압력은 입구 배관과 출구 배관에서 측정되며, 유체의 온도는 입구 배관에 설치된 온도 센서에 의해 측정된다. 펌프 본품에는 내부 압력 분포를 알기 위해 볼류트와 임펠러 출구, 이차 유로에 여러 개의 압력 센서를 설치하였다. 또한 펌프의 안정성을 확인하기 위해, 펌프 볼류트의 축방향과 반경방향에 진동 센서를 설치하고, 입출구 배관에 압력 침동 센서가 설치하였다. 진동 센서와 압력 침동 센서는 고속 샘플링 센서로서 측정 데이터는 별도로 저장된다.

PARS는 압축기 및 320 bar, 20 m<sup>3</sup> 용량의 공기 저장 탱크 등으로 구성되어 있으며, 이 중 일부가 펌프시험기에 설치된 물탱크에 연결되어 펌프 시험 특성에 따라 탱크 내부를 가압 또는 감압하여 설비를 제어할 수 있게 한다.

### 3. 성능 시험 개요

#### 3.1 시험 종류 및 조건

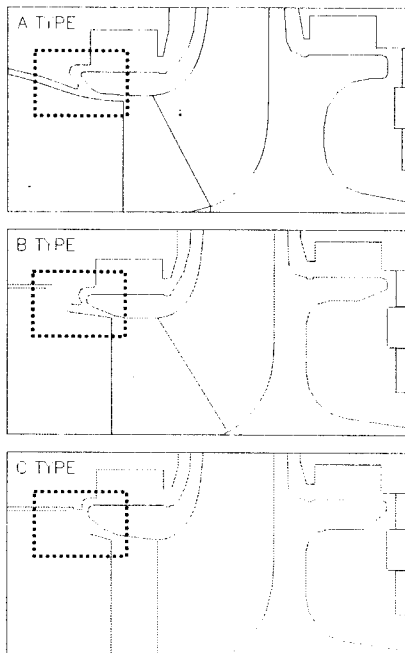


Figure 2. LOX pump rotors

Table 1. Design parameter of each pump

Pump type	A	B	C
Impeller/inducer tip diameter ratio	1.43	1.32	1.32
Impeller outlet blade angle (°)	23	25	25
Inducer hub/tip diameter ratio	0.351	0.313	0.313
Inducer tip clearance / tip diameter ratio	0.0106	0.0063	0.0063

시험 대상은 2004년과 2005년에 제작된 세 기의 산화제펌프이다. Table 1은 각 펌프의 주요 설계 변수이고, Fig. 2는 각 산화제펌프의 로터를 비교한 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 C형 산화제펌프의 임펠러 전방은 조립성 강화를 위해 수정되었다. 그러나 이러한 설계 변경으로 인해 임펠러 전방 쪽의 누설 유량이 증가할 것으로 예상된다. 각 펌프의 설계요구조건외 물리량은 모델에 무관하나, 주요 형상 치수에 따라 그 무차원 값이 달라지기도 한다.

수류성능시험은 기본적으로 설계 요구 조건에서의 성능 확인을 목적으로 하되 다양한 조건에서의 성능을 검증하기 위해 시험조건에 변화를 주었다. 수력 성능 시험의 경우 유량에 따른 영향을 살펴보기 위해 설계 유량 대비 80%~120%의 범위에서 시험이 이루어졌다. 흡입 성능 시험은 기본적으로 설계 유량에서 시험을 하되, 유량 변화에 따른 흡입 성능의 변화를 알기 위해 저유량과 고유량에 대해서도 실시하였다. 앞서 설명했듯이 산화제펌프에는 이차 유로의 유량을 줄이기 위해 두 개의 플로팅 링이 장착된다. 플로팅 링과 펌프 로터(임펠러) 사이의 간극에 따라 이차 유로의 유량이 바뀌는 것인데, 이 유량이 바뀌면 펌프의 성능에도 변화가 생긴다. A형 펌프의 경우 이 간극의 영향을 살펴보기 위해 간극을 0.20 mm(A1), 0.15 mm(A2), 0.10 mm(A3)의 세 가지로 나누어 시험을 실시하였다. B형과 C형 펌프는 간극 0.15 mm인 경우에 대해서만 시험하였다.

#### 3.2 주요 무차원 변수

수력 성능 시험의 주요 무차원수에는 유량계수( $\Phi$ ), 양정계수( $\Psi$ ), 효율( $\eta$ ) 등이 있으며 각각의 정의는 다음과 같다.

$$\Phi = Q / (A_1 U_1) \quad (1)$$

$$\Psi = H / ((U_1)^2 / 2g) \quad (2)$$

$$\eta = HQ\rho g / (TN\pi/30) \quad (3)$$

여기서  $A_1$ 은 인듀서 입구 단면적,  $U_1$ 은 인듀서 입구 블레이드 팁 속도,  $U_2$ 는 임펠러 출구 블레이드 팁 속도,  $Q$ 는 유량,  $H$ 는 양정,  $\rho$ 는 유체 밀도,  $T$ 는 축 토크,  $N$ 은 회전수(rpm)를 의미한다.

흡입 성능 시험의 주요 무차원수에는 캐비테이션 수( $\sigma$ )가 있으며 정의는 다음과 같다.

$$\sigma = NPSH / (U_1^2 / 2g) \quad (4)$$

캐비테이션 수의 임계값( $\sigma_{cr}$ )은 정상 상태의 양정 대비 3%의 양정 감소가 일어난 지점( $\Psi_{cr}$ )의 캐비테이션 수로 정하였다. 이  $\sigma_{cr}$ 값이 작을수록 흡입 성능이 좋다고 할 수 있다.

Table 2. Hydraulic test results

type	design		test				
	A	B/C	A1	A2	A3	B	C
$\phi$	0.0996	0.0901	0.0996	0.0996	0.0996	0.0901	0.0901
$\psi$	0.857	0.954	0.941	0.951	0.968	1.027	1.009
$\eta$	0.640	0.720	0.722	0.741	0.764	0.764	0.766

#### 4. 시험 결과 및 분석

##### 4.1 수력성능시험

Figure 3은 각 산화제펌프의 양정계수와 유량계수의 관계를 그린 그림이다. 각 시험 결과는 모두 설계 유량에서 설계 요구 조건을 잘 만족(Table 2)하였고, 전산 해석 결과와도 잘 일치하였다. 플로팅 링 설의 간극을 바꾸어 시험한 A형 펌프의 결과에서 간극이 작을 경우 펌프의 양정이 증가하는 일반적인 경향을 확인할 수 있다. B형과 C형의 경우 양정이 소폭 감소하였는데, 이는 로터의 형상 차이가 원인이 된 것으로 추정된다. 즉, 조립성 강화를 위해 인두서 쪽 이차 유로의 저항을 줄이면서 이차 유로를 통한 누설 유량이 증가하고, 이것이 전체 양정에도 영향을 미쳤을 것으로 생각된다.

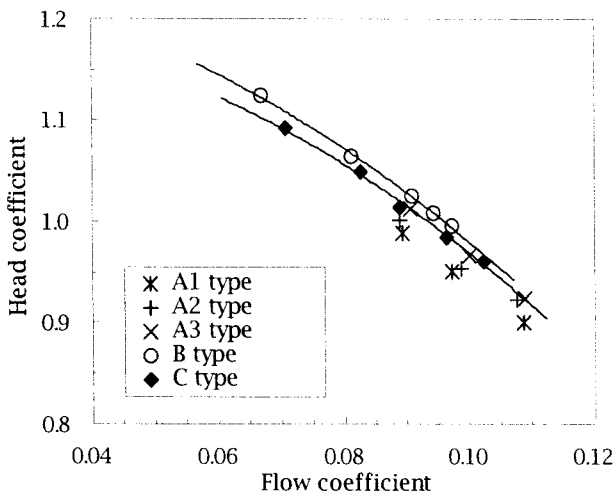


Figure 3. Head vs flowrate

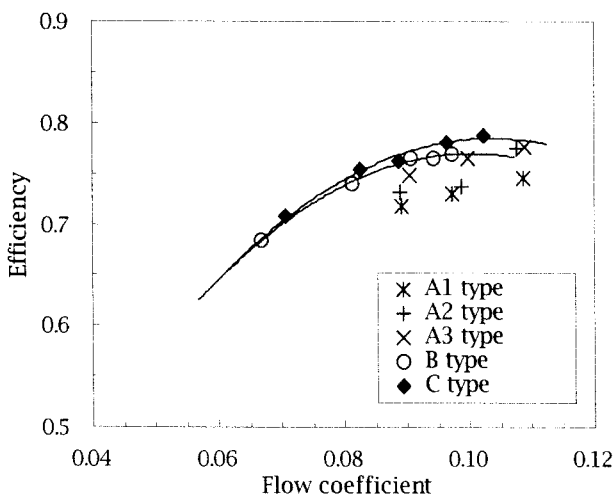


Figure 4. Efficiency vs flowrate

Figure 4는 유량 변화에 따른 효율의 변화를 그린 그림이다. 효율 역시 설계 요구 조건을 잘 만족하였고, 전산 해석 결과와도 비교적 일치하였다. 시험 대상 펌프 모두 효율의 최대점이 설계 유량보다 높은 곳에 있다. 플로팅 링 설의 간극이 작을수록 펌프의 효율이 좋아진 것을 확인할 수 있다. C형 터보펌프는 B형에 비해 양정 감소가 있었음에도 불구하고 효율은 오히려 더 높게 나타났다.

##### 4.2 흡입성능시험

Table 3은 각 산화제펌프의 흡입성능 중 설계유량 부근에서 이루어진 시험을 정리한 표이다. 세 펌프 모두 설계요구조건을 만족하였고, 시험 결과만으로는 B형 펌프가 가장 흡입성능이 좋은 것으로 보인다. 그러나 시험회전수에 따라 시험의 정밀도가 크게 좌우되는 흡입성능시험의 특성을 고려하면 형상에 따른 차이를 정량적으로 파악하기에는 무리가 있다.

Figure 5는 Table 3에서 나타난 시험에 대한 흡입성능곡선이다. A형 펌프가 캐비테이션 임계점 이후의 양정 감소가 급격하게 이루어지는 반면, B형과 C형 펌프는 감소폭이 상대적으로 작게 나타났고 이로 인해 캐비테이션 붕괴점이 낮아진 것을 확인할 수 있다. 만일 펌프가 임계점 이하의 극한 조건에서 운전하게 될 경우 B형과 C형 펌프가 더 안정적인 특성을 보일 것으로

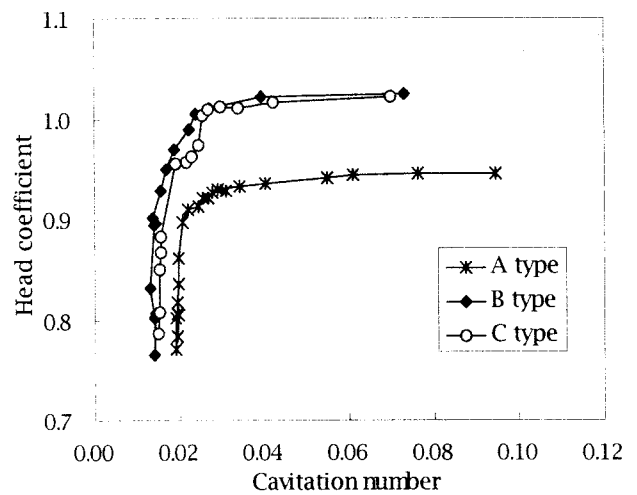


Figure 5. Cavitation curve at the design flowrate

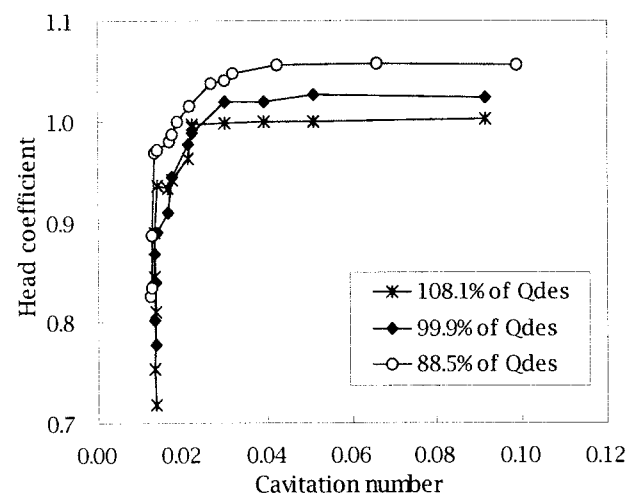


Figure 6. Influence of flowrate on cavitation curve

Table 3. Cavitation test results

pump type	A	B	C
rotational speed(rpm)	9331	10405	11410
flow ratio	0.990	0.995	0.970
$\sigma_{cr}$	0.0253	0.0231	0.0250

기대된다. 펌프에 따른 흡입성능곡선의 모양도 조금씩 다른데, C형 펌프의 경우 크게 두 번의 꺾인 곳이 나타난다.

Figure 6은 B형 산화제펌프의 유량에 따른 흡입성능곡선을 모아서 그린 것이다. 세 시험 모두 산화제펌프의 설계요구조건을 잘 만족하였다. 그러나 대부분의 원심펌프의 경우 유량이 증가할수록 흡입성능이 떨어지는 경향을 보이는 데 반해, B형 펌프는 저유량에서의 흡입성능이 오히려 떨어지는 경향을 보인다. A형에서 나타나지 않았던 이런 현상은 C형에서도 나타났는데, 현재 설계 변경 사항을 중심으로 원인을 파악하고 있다.

#### 4. 결론

로켓엔진용 산화제펌프 개발의 일환으로 각기 다른 세 기의 산화제펌프에 대한 성능시험을 실시하였고, 다음의 결론을 얻었다.

- 세 기의 산화제펌프 모두 설계요구조건을 잘 만족하였다.

- A형 펌프에 대한 시험을 통해, 플로팅 링 실과 임펠러의 간극이 작을수록 펌프의 양정 및 효율이 증가하는 것을 확인할 수 있었다.
- B형과 C형 산화제펌프의 흡입성능시험 결과, 저유량에서의 흡입성능이 설계유량에 비해 오히려 낮게 나타났다.

#### 참고문헌

- [1] Huzel, D. K. and Huang, D. H., 1992, Modern Engineering for Design of Liquid- Propellant Rocket Engines, AIAA Press.
- [2] 김진환, 홍순삼, 정은환, 최창호, 전성민, 2005, “30톤급 액체 로켓엔진용 터보펌프 개발 현황”, 제25회 한국추진공학회 추계학술발표대회 논문집
- [3] 노준구, 최창호, 김진환, 2005, “터보펌프 축추력 조절용 케퍼티 베인에 대한 수치해석적 연구”, 2005 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 354-358
- [4] 김대진, 홍순삼, 최창호, 김진환, 2005, “로켓엔진용 연료펌프의 성능시험”, 항공우주기술 제4권 제1호, pp. 143~149
- [5] 홍순삼, 임현, 김대진, 차봉준, 강정식, 임병준, 김진환, 2004, “터보펌프 성능시험 및 평가”, 유체기계저널, 제7권, 제3호, pp. 84-87.
- [6] 최창호, 노준구, 김대진, 홍순삼, 김진환, 2005, “유동해석을 이용한 터보펌프 설계”, 2005년도 한국항공우주학회 춘계학술대회 논문집