

## 터보펌프용 연료펌프의 성능 시험

김대진\* · 홍순삼\* · 최창호\* · 김진한\*

### Performance Tests of the Fuel Pump for a Turbopump

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

*Key Words* : Turbopump(터보펌프), Hydraulic test(수력 성능 시험), Cavitation test(흡입 성능 시험)

#### ABSTRACT

Performance tests of the fuel pump for a turbopump unit have been successfully carried out in water environment. The tests are performed to evaluate the hydraulic and cavitation performances. The head and volute pressure distribution of the fuel pump followed the conventional similarity rule - unlike this, the secondary passage pressure distribution showed a small deviation from the conventional similarity rule. Also, critical cavitation number decreased as the rotational speed of the pump increased.

#### 1. 서론

한국항공우주연구원에서 개발 중인 터보펌프 조립체에 부착될 연료펌프에 대한 시험을 수행하였다. 시험은 2003년 완공된 한국항공우주연구원 내에 있는 터보펌프 성능시험설비에서 실시되었다.

액체로켓엔진이 연소되기 위해, 연소실에 공급되는 액체연료와 산화제는 일정 압력 이상으로 가압되어야 한다. 터보펌프는 저압의 액체연료와 산화제를 가압함으로써 액체로켓엔진의 성능 극대화와 발사체 전체 무게 경감에 필수적인 부품이다.

현재 개발 중인 터보펌프 조립체는 산화제펌프, 연료펌프, 그리고 터빈이 일체인 형태이며, 본 논문에서는 이 중 연료 가압에 쓰이는 연료펌프에 대해 성능 시험을 실시하여 그 결과를 정리하였다. 연료펌프 단품 시험을 위해 터보펌프 조립체로부터 일부 부품을 수정하였으며, 펌프의 구동은 모터를 통해 이루어졌다.

연료펌프에 대한 성능 시험은 수력 성능 시험과 흡입 성능 시험 두 종류로 나누어 실시되었다. 수력 성능 시험은 설계 유량 근처에서 펌프의 양정, 소요 동력, 효율 등을 측정하는 시험이며, 흡입 성능 시험은 유효흡입양정을 계산하여 펌프 안정성에 큰 영향을 미치는 캐비테이션 성능을 측정하는 시험이다.

#### 2. 설비 소개

터보펌프 성능시험설비 중 펌프시험기에 대해 간단히 설명하고자 한다. 펌프시험기는 산화제펌프 및 연료펌프에 대한 수력 시험을 수행하게 되는데, 각 펌프의 양정, 효율, 공급 유량, 캐비테이션 특성 등을 측정하게 된다. 펌프시험기는 탱크의 물을 펌프로 흡입하여 다시 물탱크로 보내는 폐회로 형식의 시험기로 전체 구성도는 Fig. 1, 시험기 형상은 Fig. 2와 같다. 설비 내 주요 구성품으로는 모터, 기어박스, 물탱크, 토크미터, 터빈 유량계 등이 있다.

모터와 기어박스는 터빈을 대신하여 펌프의 구동을

\* 한국항공우주연구원 터보펌프개발그룹  
E-mail : rain301@kari.re.kr

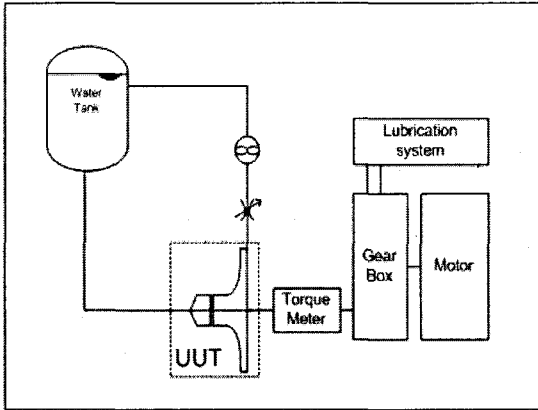


Fig. 1 Schematic of Pump Test Facility

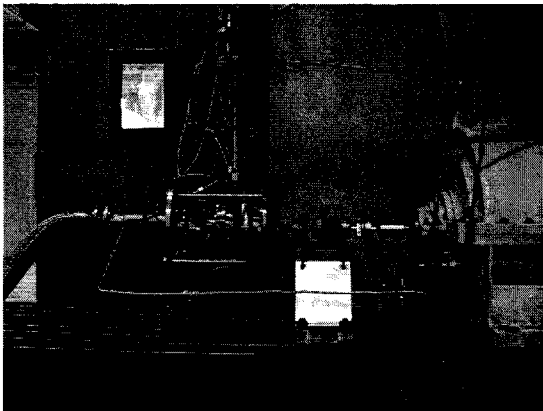


Fig. 2 Pump test facility

위해 쓰이며 최고 출력은 320 kW, 최대 20000 rpm까지 시험이 가능하다. 물탱크는 3m<sup>3</sup>의 용량으로, 탱크 상단에 공압 시스템을 연결하여 시험 특성에 따라 탱크 내부를 가압 또는 감압할 수 있게 되어 있다. 토크미터는 펌프 구동을 위한 동력 측정을 위해 쓰이며, 축 토크 및 회전수를 측정한다. 토크미터는 기어박스과 펌프 사이에 위치한다. 터빈 유량계는 작동 유량의 측정에 쓰이며, 펌프 하류에 설치하였다.

펌프의 성능 및 작동 특성 파악을 위해 입출구 배관 및 펌프 시험품에 압력, 온도 및 진동 센서를 설치하였다. 이를 설치 위치별로 살펴보면, 우선 입구 배관에는 입구 압력 측정을 위한 정압 센서, 압력 섭동량 측정을 위한 고속 응답 특성의 압력 섭동 센서, 작동 유체 온도 측정을 위한 온도 센서를 설치하였다. 출구 배관에는 출구 압력 측정을 위한 정압 센서와 압력 섭동량 측정을 위한 압력 섭동 센서를 설치하였다. 펌프

본품에는 7개의 압력 센서와 1개의 차압 센서, 2개의 온도 센서를 설치하였다. 압력 센서는 연료펌프 불류트의 원주 방향 네 지점에 각각 1개씩, 임펠러 출구와 베어링 후단, 바이패스 관 상류에 각각 1개씩 설치하였다. 차압 센서는 바이패스 관의 오리피스를 기준으로 상부와 하부에 연결하여 오리피스를 통과할 때의 차압을 측정할 수 있게 하였다. 2개의 온도 센서는 각각 베어링의 온도를 측정할 수 있게 하였다.

### 3. 수력 성능 시험 결과

연료펌프에 대한 수력 성능 시험은 유량비(설계 유량 대비 시험 유량) 80% ~ 120%, 설정 회전수 7000 rpm, 8000 rpm, 9000 rpm에 대해 실시되었다. 시험은 특정 회전수로 모터를 돌리면서 펌프시험기의 밸브를 조작하여 시험기 내의 유량을 바꿔가며 실시되었다. 그리고 수력 성능 시험 도중 캐비테이션이 생기지 않도록 시험 시작 전에 물탱크를 가압하였다. 수력 성능 시험의 무차원 변수에는 유량계수  $\Phi$ , 양정계수  $\Psi$ , 압력계수  $C_p$ , 동력계수  $v_p$  등이 있으며 각각의 정의는 다음과 같다.

$$\Phi = Q/(A_1 U_{t_1}) \quad (1)$$

$$\Psi = H/((U_{t_2})^2/2g) \quad (2)$$

$$C_p = \Delta P/(\frac{1}{2} \rho (U_{t_2})^2) \quad (3)$$

$$v_p = 2L/(gpA_1(U_{t_1})^3) \quad (4)$$

여기서  $A_1$ 은 인두서 입구 단면적,  $U_{t_1}$ 은 인두서 끝단 속도,  $U_{t_2}$ 는 임펠러 끝단 속도,  $L$ 은 소요동력을 의미한다. 그리고 압력계수에서 기준압력은 펌프 입구 전압력을 사용하였다.

Fig. 3은 양정과 유량과의 관계를 보여준다. 시험 회전수에서 양정의 회전수에 대한 상사가 잘 이루어지는 것을 알 수 있다. 유량이 증가하면서 양정은 거의 선형적으로 감소하고 있으며, 설계 유량에서의 양정은 설계 요구 양정보다 약 10% 정도 높다. 이는 연료펌프를 설계할 때 양정에 대한 마진을 충분히 고려했기 때

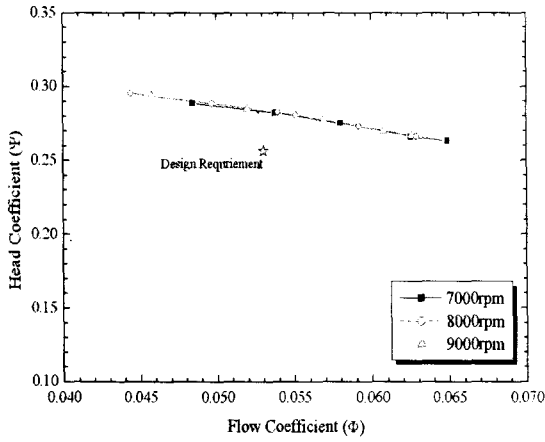


Fig. 3 Head coefficient vs flow coefficient

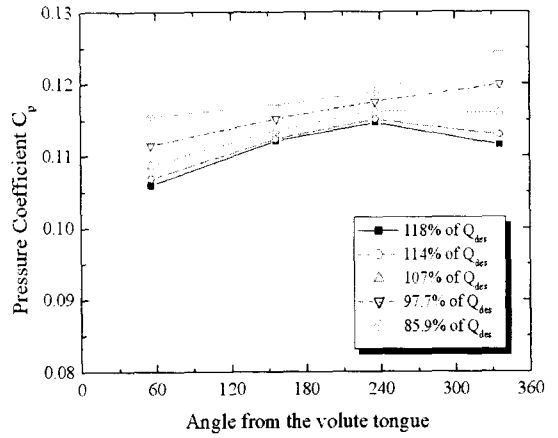


Fig. 6 Pressure distribution along the circumference of the volute

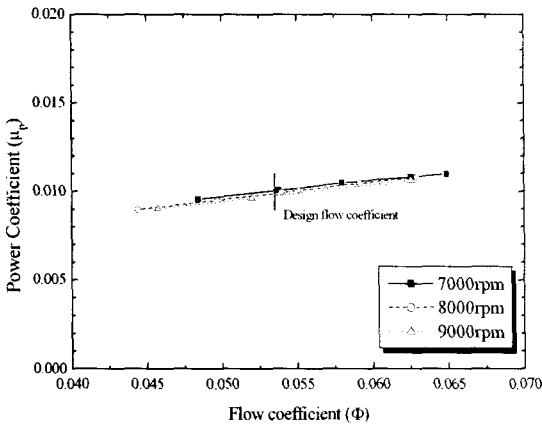


Fig. 4 Power coefficient vs flow coefficient

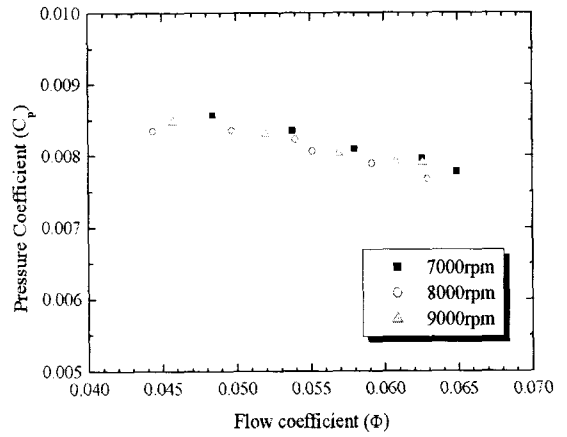


Fig. 7 Bearing outlet pressure vs flow coefficient

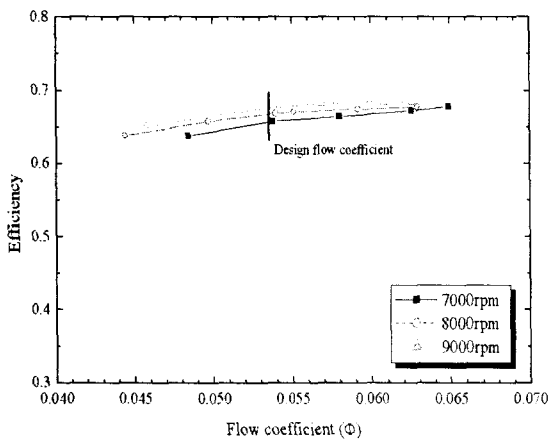


Fig. 5 Efficiency vs flow coefficient

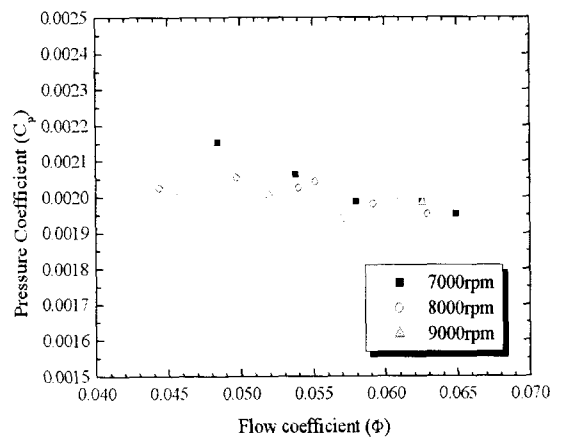


Fig. 8 Upper bypass line pressure vs flow coefficient

문이며, 실제로 연료펌프에 대한 전산 해석 결과, 예측 양정은 시험에서 측정된 양정과 3% 이내로 일치하였다.

Fig. 4는 소요동력과 유량과의 관계를 보여준다. 시험 회전수가 증가할수록 동력계수가 줄어들고 있음을 알 수 있다. 이는 펌프 수력 시험을 위해 설치한 리테이너 셸 등에서 소비되는 동력이 회전수가 증가하면서 상대적으로 감소하기 때문인 것으로 해석된다.

Fig. 5는 효율과 유량과의 관계를 보여준다. 회전수가 증가할수록 효율이 증가하는 모습을 보이는데, 이는 Fig. 4에서 보았듯이 회전수에 따른 소요동력의 경향이 영향을 미쳤기 때문이다. 유량에 따른 효율의 경향은 회전수와 관계없이 비슷한 양상을 보이며, 설계 유량 대비 약 115%의 유량에서 펌프의 효율이 최대가 된다.

Fig. 6은 시험 회전수 9000rpm 시험에서 볼류트의 원주 방향 위치에 따른 압력 분포를 보여준다. 범례의 숫자는 유량비를 나타낸다. 다른 회전수에 대한 시험에서도 대체로 비슷한 압력 분포를 보인다. 설계 유량에서도 볼류트 혀(tongue)를 지나면서 압력이 증가하는 경향을 보이고 있는데, 이로부터 볼류트 단면적을 약간 감소시켜 원주 방향을 따라 볼류트 압력이 균일하게 되도록 해야 할 것으로 판단된다.

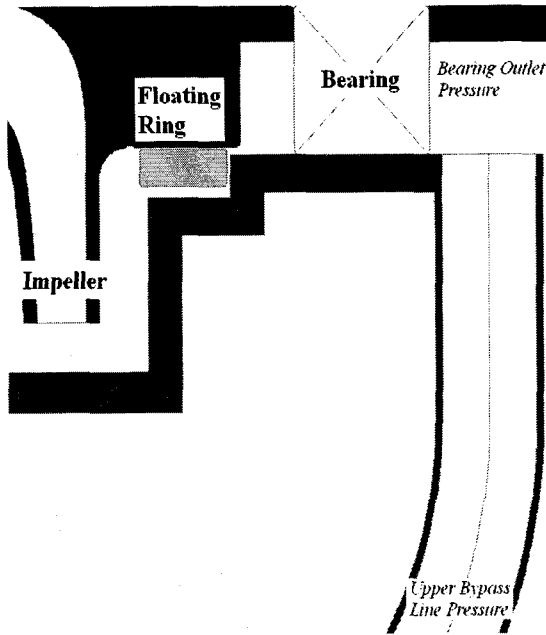


Fig. 9 Secondary flow passage of the fuel pump

Fig. 7과 Fig. 8은 베어링 후단과 바이패스 관 상단의 압력 분포를 보여준다. 임펠러를 통과한 유체의 일부는 베어링과 바이패스 관을 지나 펌프 입구로 돌아가게 된다. 이를 보통 이차 유로(Fig. 9 참조)라 부르며, 이차 유로는 주로 베어링 냉각의 역할을 한다. 이차 유로의 압력 분포에 따라 베어링에 작용하는 축방향 하중이 결정되는데, 과도한 축방향 하중은 베어링 파손의 원인이 되기 때문에 이차 유로의 압력 분포는 터보펌프의 신뢰성과 직결되는 중요한 요소이다. 연료 펌프 시험에서 측정된 이차 유로의 압력계수는 대체로 회전수가 증가하면서 감소되는 경향을 보이는 등 연료 펌프의 양정이나 볼류트 압력 분포와는 달리 상사 법칙이 잘 성립되지는 않았다. 이는 이차 유로에서의 레이놀즈 수 변화의 영향으로 추정되는데, 구체적인 원인에 대해서는 추후 논의가 필요할 것으로 보인다.

#### 4. 흡입 성능 시험 결과

연료펌프에 대한 흡입 성능 시험은 설계 유량에서 설정 회전수 7000 rpm과 8000 rpm에 대해 실시되었다. 시험 과정은 유량, 회전수를 고정시킨 뒤, 펌프를 구동 시키며 입구 압력을 천천히 낮추면서 캐비테이션이 많이 진행되어 심한 양정 저하점(head breakdown)에 도달하면 작동을 멈추는 방법을 택하였다. 펌프의 정지는 출구 압력의 값으로 조절하는데, 보통 설계값 등을 고려하여 약 20% 정도의 양정 감소가 일어나는 시점을 펌프 종료 출구 압력으로 설정한다. 흡입 성능 시험의 무차원 변수에는 캐비테이션 수  $\sigma$ 가 있으며 그 정의는 다음과 같다.

$$\sigma = NPSH / ((U_t)^2 / 2g) \quad (5)$$

Table 1은 흡입 성능 시험 결과를 정리한 표이다.  $\sigma_{cr}$ 은 캐비테이션이 발생하지 않은 조건에서의 양정이며, 임계값(아래 첨자 cr)은 기준 양정 대비 3%의 양정 감소가 일어나는 지점으로 잡았다. 캐비테이션이 일어나기 이전의 양정은 성능 시험 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.  $\sigma_{cr}$ 은 설계 요구 조건인 0.0238을 크게 만족하는데, 이 역시 설계 당시 안전성을 크게 고려했기 때문이다. 그러나 비슷한 유량의 두 시험에서  $\sigma_{cr}$ 에 다소 차이를 보인다. 수식 (5)의 캐비테이션 수는 양정에 대한 상사에서 많이 쓰이는 형태를 취하고 있다.

Table 1 Cavitation test result

RPM <sub>ref</sub>	7290rpm	8300rpm
Q <sub>ref</sub> /Q <sub>des</sub>	101.4%	102.2%
Ψ <sub>ref</sub>	0.282	0.282
Ψ <sub>cr</sub>	0.273	0.273
α <sub>cr</sub>	0.00867	0.00765

그러나 흡입 성능의 회전수 상사에 대해서는 많은 의견이 있으며, 실제로 Yedidiah<sup>(2)</sup> 같은 경우 원심 펌프에 대한 새로운 상사식을 제안하기도 하였다. Yedidiah의 상사식 등 흡입 성능의 회전수 상사에 대한 의견은 회전수(여기서는 인듀서 끝단 속도)에 대한 지수가 2보다 약간 작다는 것이 대다수를 이룬다. 표에서도 알 수 있듯이 이번에 실시한 연료펌프 흡입 성능 시험에서도 회전수가 클 때 더 나은 흡입 성능을 보인 것으로 미루어 연료펌프 역시 지수가 2보다 작다고 판단된다. 따라서 실제 회전수에 대한 α<sub>cr</sub>은 위의 시험 결과보다 작을 것으로 예상된다. 그러나 연료펌프에 대한 흡입 성능을 외삽할 수 있기 위해서는 차후 더 넓은 회전수 범위에 대한 시험이 이루어져야 할 것으로 보인다.

Fig. 10은 흡입 성능 시험 결과를 그림으로 나타

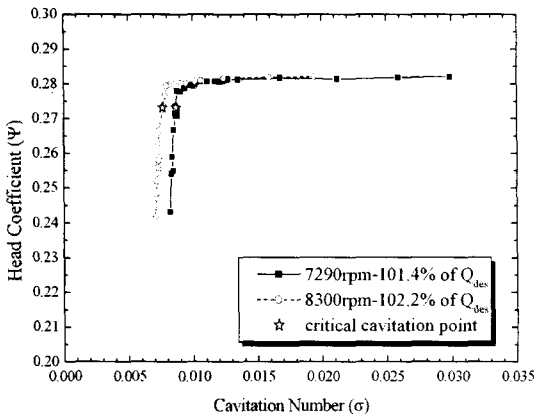


Fig. 10 Head coefficient vs cavitation number

낸 것이다. 앞에서 설명하였듯이 캐비테이션이 발생하기 이전의 양정에 대한 회전수 상사가 잘 이루어지는 것을 확인할 수 있다.

## 5. 결론

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 성능 시험 결과, 연료펌프는 수력 성능 및 흡입 성능 모두 설계 요구조건을 잘 만족하는 것으로 나타났다.
- 2) 수력 성능 시험에서 양정계수는 회전수 상사 법칙을 만족하였으며, 동력계수는 시험 회전수가 증가하면서 감소하였다.
- 3) 수력 성능 시험에서 이차 유로의 압력계수는 양정계수나 볼류트의 압력계수와는 달리 회전수가 증가하면서 감소하는 경향을 보인다. 이는 레이놀즈 수의 영향으로 추정되며 차후 추가 해석이 요구된다.
- 4) 흡입 성능 시험에서의 양정계수는 회전수 상사 법칙을 만족하였으나, 임계 캐비테이션 수는 회전수가 높을수록 낮은 값을 보였다.

## 참고문헌

- (1) 김진한, 이은석, 홍순삼, 최창호, 전성민, 정은환, 2004, "액체로켓엔진용 터보펌프 개발현황," 제 5회 우주발사체 심포지움, 2004. 5. 21, pp. 38~51.
- (2) Yedidiah, S., 1996, *Centrifugal Pump User's Guidebook*, Chapman & Hall, pp. 52~55.
- (3) 홍순삼, 최창호, 김진한, 2004, "현절비가 터보펌프 인듀서의 성능에 미치는 영향," 대한기계학회논문집 B권, 제28권, 제 4호, pp. 382~388.
- (4) 홍순삼, 임현, 김대진, 차봉준, 강정식, 임병준, 김진한, 2004, "터보펌프 성능시험 및 평가," 유체기계저널, 제7권, 제3호, pp. 84~87.