

실매질 시험용 터보펌프의 단품 수류시험

김대진*, 홍순삼**, 김진선***, 김진한****

Water tests of pumps for real-propellant tests of turbopump

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

Abstract

Three Lox pumps and one fuel pump are manufactured for turbopump real-propellant tests and water tests of the pumps are performed in order to estimate the performance characteristics of the pumps. According to the test results, the test region(flow ratio, cavitation number) of the pumps at the water tests cover the operating region at the real-propellant tests and also all the pumps satisfy the design requirement. The head of the Lox pumps shows a 2% difference among them due to the internal geometry, but the efficiency and overall cavitation performance are almost same. It is found that the fuel pump has a similar head and efficiency compared with the previous model of the same internal geometry, while it has a little inferior cavitation performance.

초 록

터보펌프 실매질 시험에 사용하기 위해 제작된 3기의 산화제펌프와 1기의 연료펌프에 대한 단품 수류시험을 실시하였다. 수류시험의 시험 영역(유량비, 캐비테이션 수)은 실매질 시험의 작동 영역을 충분히 포함하였으며, 각 펌프는 설계요구조건을 만족하였다. 시험 결과, 제작된 산화제펌프는 내부 형상에 따라 양정이 약 2% 차이가 났으며 효율 및 흡입성능은 거의 차이가 없었다. 연료펌프의 경우 형상이 같았던 이전 모델과 양정과 효율은 비슷하였으나, 흡입성능은 약간 떨어지는 것으로 나타났다.

키워드 : 터보펌프(turbopump), 산화제펌프(Lox pump), 연료펌프(fuel pump), 수력성능시험(hydraulic test), 흡입성능시험(cavitation test)

1. 서 론

액체로켓엔진에 고압의 산화제와 연료를 공급하는 터보펌프는 그 기능과 중요성 때문에 ‘발사체의 심장’이라고 불리는 액체 로켓의 핵심 요소

중 하나이다. 국내 터보펌프 개발은 1999년 본격화 되었는데 지난 2008년 수행된 터보펌프 실매질 시험 및 가스발생기 연계 시험으로 설계점/탈설계점 모두 성능이 검증되어 실용화의 단계에 이르렀다[1].

접수일(2008년12월17일), 수정일(1차 : 2009년 6월 5일, 2차 : 2009년 6월 17일, 게재 확정일 : 2009년 7월 1일)

* 터보펌프팀/rain301@kari.re.kr

** 터보펌프팀/sshong@kari.re.kr

*** 터보펌프팀/jsk@kari.re.kr

**** 터보펌프팀/jhkim@kari.re.kr

본 논문에서는 터보펌프 실매질 시험 및 가스 발생기 연계 시험용으로 제작된 각 펌프의 단품 수류시험 결과를 정리하여 시험의 적합성을 판단하고 펌프의 개략적인 특성을 살펴보고자 한다. 시험에 사용된 터보펌프는 30톤급 개방형 엔진에 적용할 것을 목표로 개발된, 산화제와 연료를 공급하는 두 개의 단단 원심형 펌프와 구동을 위한 단단 충동형 터빈으로 구성된 일축식 모델이다. 추진제로는 액체산소와 케로신을 사용하며 두 매질이 만나지 않도록 두 펌프 사이에 혼합방지실(inter-propellant seal)을 설치하였다[2]. 이 터보펌프의 설계요구조건은 표 1과 같다. 참고로 임계(critical; cr) 캐비테이션 수(cavitation number)는 설계요구조건의 입구압력에 대한 환산값으로 정의하였다.

Parameter	Lox pump	Fuel pump
head coefficient	0.991	1.103
cavitation number _{cr}	0.056	0.090
efficiency	>0.70	>0.65

표 1. 실매질 시험용 터보펌프의 설계요구조건

2. 시험 모델 및 내역

터보펌프의 실매질 시험 및 가스발생기 연계 시험을 위해 총 3기의 산화제펌프와 1기의 연료 펌프가 제작되었다. 산화제펌프 중 EM2-1은 산화제펌프 실매질 시험에 사용되었고, EM2-2는 터보펌프 실매질 시험 및 연계 시험에 투입되었으며, EM2-3은 예비품으로 제작되었다. 제작된 연료펌프(EM2)는 터보펌프 실매질 시험 및 연계 시험에 사용되었다.

제작된 펌프들은 단품 수류시험을 통해 수력 성능 및 흡입성능을 측정하고 작동 안전성을 검토하여 설계 의도와 부합하는지 판단한다. 이후 액체 질소와 고온 공기를 사용하는 조립체 상사 시험을 통해 온도 적합성을 확인한 뒤 실매질 시험에 투입된다.

펌프의 단품 수류시험은 한국항공우주연구원

에 있는 터보펌프 성능시험설비[3][4]에서 이루어졌다. 구동에 사용하는 모터의 용량 문제로 시험 회전수는 약 1000rpm 이하로 설정하였으며, 실매질 시험에 적용할 수 있도록 설계 유량 대비 90~110% 영역에서 시험을 진행하였다. 수력성능 시험을 통해서 정상 상태에서의 펌프의 양정, 효율을 측정하여 펌프의 작동점 및 성능 곡선을 파악하고, 흡입성능시험을 통해서 펌프의 캐비테이션 임계점(양정이 기준점 대비 3% 감소한 지점)을 계산하여 캐비테이션에 대한 펌프의 안정성을 점검한다.

시험 분석에 사용한 주요 무차원 변수와 그 정의는 식 (1)~(3)과 같다. 여기서 P_o 는 펌프 출구전압, P_i 는 입구전압, U_{t1} 은 인듀서 끝단속도, U_{t2} 는 임펠러 끝단속도, P_s 는 측정 위치에서의 정압, P_v 는 입구에서의 증기압이다.

$$\text{head coefficient} = (P_o - P_i) / (0.5\rho U_{t2}^2) \quad (1)$$

$$\text{pressure coefficient} = (P_s - P_i) / (0.5\rho U_{t2}^2) \quad (2)$$

$$\text{cavitation number} = (P_i - P_v) / (0.5\rho U_{t1}^2) \quad (3)$$

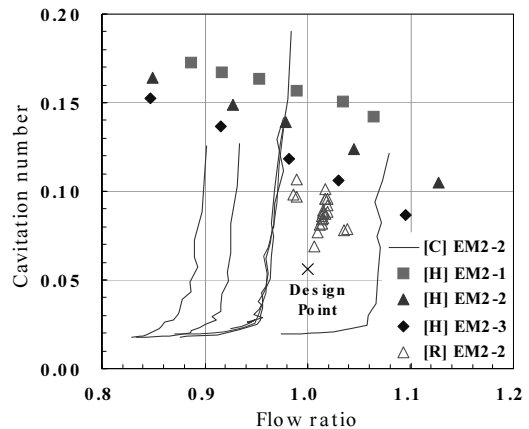


그림 1. 산화제펌프 시험 영역

그림 1은 산화제펌프의 수류시험과 실매질시험의 시험 영역을 표시한 것이다. 수력성능시험([H])은 세 개의 모델을 모두 표시하였으며, 흡입성능시험([C])과 실매질시험([R])은 EM2-2 모델만

표시하였다. 유량비와 캐비테이션 수의 관점에서 볼 때 수류시험의 시험 영역은 실매질시험을 포함할 수 있는 영역에서 진행된 것을 알 수 있다. 그리고 산화제펌프의 흡입성능시험 중에는 지속적으로 유량 감소가 일어난다.

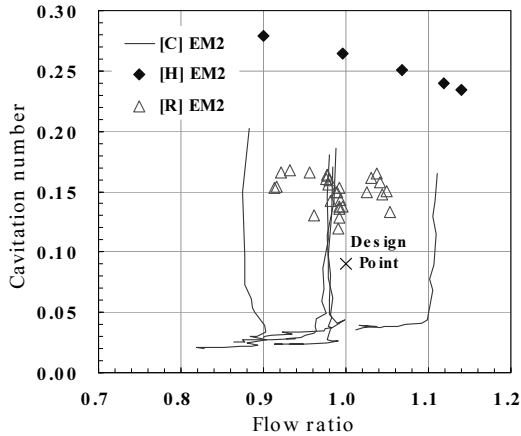


그림 2. 연료펌프 시험 영역

연료펌프의 시험 영역은 그림 2와 같이 표시하였다. 연료펌프 역시 수류시험의 시험 영역이 실매질시험의 범위를 충분히 포함한다. 산화제펌프와는 달리 설계유량 부근에서의 흡입성능시험 중 유량 감소는 크지 않았으며, 저유량 시험에서는 흡입성능이 임계점에 이르기 전 유량이 증가하는 구간이 존재하였다.

3. 시험 결과

3.1 산화제 펌프 수력성능시험

각 모델별 양정 곡선과 효율 곡선을 그림 3과 같이 비교하였다. 모든 모델이 설계요구조건을 만족하였으며 실매질 시험 결과는 수류시험 결과와 잘 일치하였다[5]. 성능 곡선의 기울기는 모두 비슷하였다. 효율은 모델별로 차이가 거의 없었으며, 양정은 EM2-2 모델만 다른 모델에 비해 약 2% 정도 높게 측정되었다. 시험한 모델들의 내부 형상을 비교해보면, EM2-2 모델만 인두서

마찰링 자리에 공동(cavity)이 없는데 이것이 양정 증가의 원인으로 추정된다. 내부 형상이 같았던 EM2-1과 EM2-3의 시험 결과에 차이가 없는 것으로 보아 제작의 일관성이 유지되었다고 판단된다. EM2-2나 EM2-3 모델에서는 축추력 조절을 위해 이차유로의 압력에 변화를 주었지만 펌프의 양정과 효율에는 큰 영향을 끼치지 않았다.

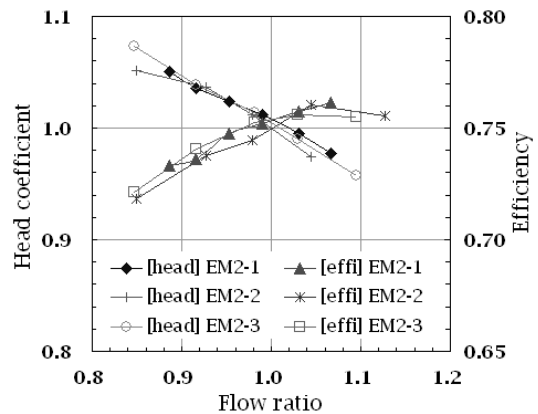


그림 3. 산화제펌프 성능 곡선

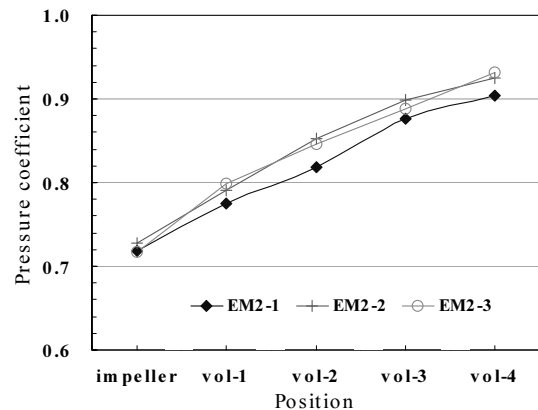


그림 4. 산화제펌프 임펠러-볼류트 압력

다음 그림 4는 산화제펌프의 임펠러 출구와 볼류트에서 측정한 압력 분포이다. 제작 차이로 인해 압력 분포가 모델별로 최대 2% 정도 다르

지만 펌프 작동성에 영향을 줄 정도로 반경 방향 하중이 달라지지는 않았다.

3.2 산화제펌프 흡입성능시험

표 2. EM2-2 산화제펌프 흡입성능시험 결과

Rotational speed [rpm]	10399	10397	10398	9372	8334	10399
Flow ratio _{ref}	0.977	0.902	1.078	0.977	0.984	0.933
Head coefficient _{ref}	1.037	1.061	0.994	1.035	1.031	1.048
Cavitation number _{cr}	0.0232	0.0274	0.0227	0.0241	0.0256	0.0262

표 2의 EM2-2 산화제펌프의 흡입성능시험 결과를 보면 기준점(흡입성능시험 시작점; ref)에서의 양정값들은 모두 수력성능시험에서의 양정 곡선과 일치하였다. 또한 모든 임계 캐비테이션 수는 작동 조건에서의 캐비테이션 수보다 낮았다. 같은 유량비에서 회전수가 올라가면서 흡입성능이 조금씩 좋아졌다. 대개의 원심펌프와는 달리고 유량에서의 흡입성능은 설계유량에서와 비슷하고, 저유량에서는 설계유량보다 나쁜 것으로 나타났다. 이런 특성은 산화제펌프 이전 개발 모델에서 반복적으로 나타났었다[6].

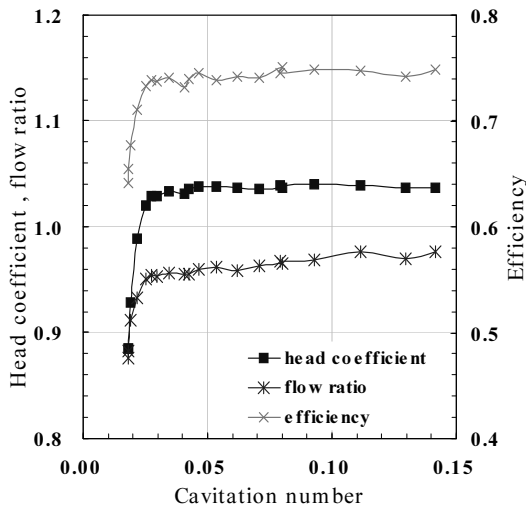


그림 5. 캐비테이션 수에 따른 산화제펌프의 성능

10400rpm, 설계유량 부근에서 진행된 흡입성능시험 중 캐비테이션 수가 변화하면서 나타나는 양정, 유량, 효율의 변화를 그림 5와 같이 정리하였다. 캐비테이션 수 0.08 이상에서는 모든 변수의 측정값이 기준점 대비 1% 이내의 차이를 유지하였다. 캐비테이션이 임계점에 이르기 전 구간에서 성능 변수 중 유량이 기준점 대비 가장 크게 변화였고, 효율이 그 뒤를 따랐다. 설계 캐비테이션 수에서의 효율은 기준점에서의 효율보다 약 1% 정도 낮았다. 따라서 설계점에서 정확한 효율을 예측하기 위해서는 수력성능시험을 설계 캐비테이션 수에서 진행할 필요성이 있다.

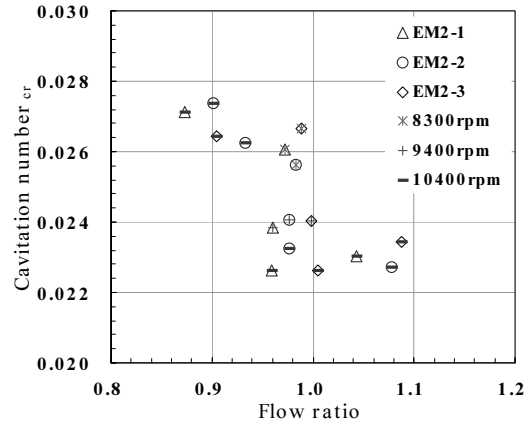


그림 6. 산화제펌프 임계 캐비테이션 수

산화제펌프 세 모델에서 측정한 임계 캐비테이션 수를 그림 6으로 비교하였다. EM2-2가 다른 모델에 비해 성능이 약간 좋지 않으나 큰 차이는 없다. 흡입성능의 특성은 세 모델 모두 유사한 것으로 보아 모델들의 형상 차이가 흡입성능에 많은 영향을 미치지 않은 것으로 보인다.

3.3 연료펌프 수력성능시험

연료펌프 EM2 모델의 성능곡선을 그림 7과 같이 나타내고 내부 형상이 거의 같았던 EM1 모델과 비교하였다. 제작된 연료펌프는 설계요구 조건을 만족하였고 실매질 시험 결과는 수류시험

결과와 잘 일치하였다[5]. 두 모델의 유량에 따른 양정 경향은 일치하며, 효율의 차이는 약 1% 내외로 크지 않았다.

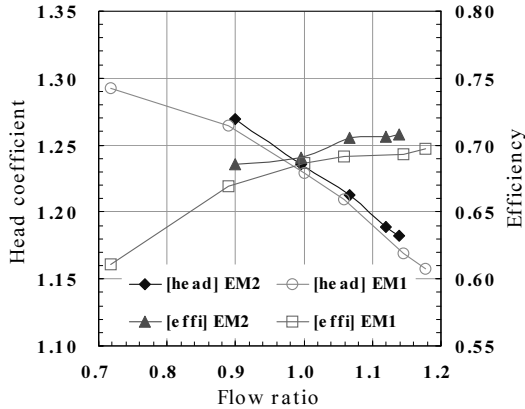


그림 7. 연료펌프 성능 곡선

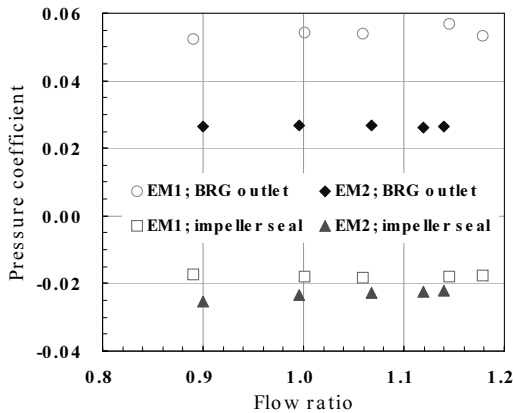


그림 8. 연료펌프 이차유로 압력

수력성능시험 때 측정된 연료펌프의 베어링 냉각에 쓰이는 이차유로의 압력은 그림 8과 같다. EM1과 EM2의 내부 형상에 차이가 없었음에도 이차유로 값은 큰 차이를 보였다. 반면 EM1과 EM2의 실매질 시험 결과에서는 두 모델의 측정값 차이가 크지 않았다. 수류시험에 사용하는 치구나 측정하지 않은 부속품의 제작 차이가 원인으로 작용한 것으로 보인다.

3.4 연료펌프 흡입성능시험

표 3. EM2 연료펌프 흡입성능시험 결과

Rotational speed [rpm]	9364	9340	9361	8311	10373
Flow ratio _{ref}	0.984	1.111	0.882	0.988	0.980
Head coefficient _{ref}	1.238	1.192	1.271	1.234	1.248
Cavitation number _{cr}	0.0260	0.0405	0.0227	0.0350	0.0310

EM2 연료펌프의 흡입성능시험 결과를 표 3에 정리하였다. 기준점에서의 양정값들은 모두 수력성능시험에서의 유량-양정 측정값과 일치하였다. 저유량에서의 흡입성능은 설계유량에서보다 조금 좋고, 고유량에서는 흡입성능이 크게 떨어진다. 이전 모델과 달리 10400rpm에서의 흡입성능이 9400rpm보다 떨어지는 것으로 나타났다.

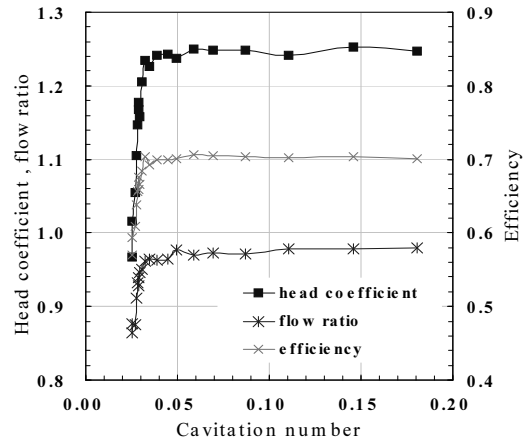


그림 9. 캐비테이션 수에 따른 연료펌프의 성능

10400rpm, 설계유량 부근에서 진행된 흡입성능시험 중 캐비테이션 수가 변화하면서 나타나는 양정, 유량, 효율의 변화를 그림 9와 같이 정리하였다. 설계 캐비테이션 수보다 큰 영역에서는 양정, 효율의 변화가 작고, 캐비테이션 수 0.04까지는 양정, 효율의 감소가 기준값 대비 1%를 넘지 않는다. 이후의 연료펌프 흡입성능곡선은 산화제 펌프에 비해 그 기울기가 급하고 양정 감소가 두드러진다.

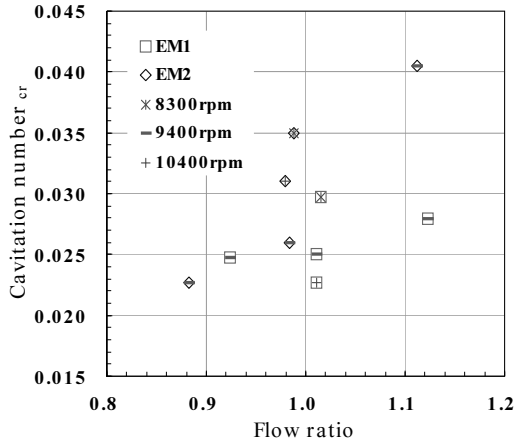


그림 10. 연료펌프 임계 캐비테이션 수

그림 10은 EM1과 EM2 연료펌프의 임계 캐비테이션 수를 비교한 것이다. 연료펌프는 유량비가 커질수록 임계 캐비테이션 수가 높아지는 원심펌프의 경향을 따른다. 모든 시험에서의 임계 캐비테이션 수는 펌프 작동 입구압(캐비테이션 수)보다 낮다. 9400rpm 설계유량, 저유량 시험 결과를 제외하면 EM1 모델의 성능이 EM2 모델보다 좋다.

4. 결 론

실매질 시험용으로 제작된 산화제펌프와 연료펌프의 수류시험 결과 다음과 같은 사실을 확인할 수 있었다.

- 제작된 펌프들은 모두 설계요구조건을 만족하였으며 임계 캐비테이션 수가 설계 캐비테이션 수보다 낮았다.
- 펌프의 수류시험 영역은 실매질 시험 영역을 충분히 포함하였으나, 작동점에서의 예측 정확도를 높이기 위해서는 일부 조정이 필요하다.
- 3기의 산화제펌프는 내부 형상에 따라 양정이 약 2% 차이가 있었으나 효율, 흡입성능에는 거의 차이가 없었다.

- 제작된 산화제펌프는 이전 모델과 마찬가지로 저유량에서 흡입성능이 떨어지는 것으로 나타났다.
- EM2 연료펌프의 양정과 효율은 이전 모델과 거의 같았다.
- EM2 연료펌프의 이차유로 압력 분포는 이전 모델과 달랐는데, 두 모델의 제작 차이가 원인인 것으로 보인다.
- EM2 연료펌프의 흡입성능시험 결과, EM2의 성능은 EM1보다 좋지 않았다.
- EM2 연료펌프는 유량비가 커질수록 흡입성능이 떨어지는 일반적인 원심펌프의 경향을 나타내었다.

참 고 문 헌

1. 김진한, “국내 터보펌프 개발 현황”, 한국추진공학회지, 제12권, 제5호, 2008, pp.73-78
2. 김진한, 홍순삼, 정은환, 최창호, 전성민, “30톤급 액체로켓엔진용 터보펌프 개발현황”, 제25회 한국추진공학회 추계학술대회 논문집, 2005, pp.375-383
3. 홍순삼, 임현, 김대진, 차봉준, 강정식, 임병준, 김진한, “터보펌프 성능시험 및 평가”, 유체기계저널, 제7권, 제3호, 2004, pp.84-87
4. 김대진, 홍순삼, 최창호, 김진한, “로켓엔진용 터보펌프의 성능 시험”, 항공우주기술 제4권, 제1호, 2009, pp.143-149
5. 홍순삼, 김진선, 김대진, 김진한, “30톤급 엔진용 터보펌프 실매질 고온시험”, 2009 한국추진공학회 추계학술대회 논문집, 2009, pp.11-17
6. 김대진, 홍순삼, 최창호, 김진한, “로켓엔진용 산화제펌프의 수류시험”, 제4회 유체공학학술대회 논문집, 2006, pp.523-526