

터보펌프의 수력 성능시험

홍순삼* · 김대진* · 김진선* · 최창호* · 김진한**

Hydrodynamic Performance Test of a Turbopump

Soon-Sam Hong* · Dae-Jin Kim* · Jin-Sun Kim* · Chang-Ho Choi* · Jinhan Kim**

ABSTRACT

Hydrodynamic performance test was conducted for a fuel pump of a liquid rocket engine turbopump. The pump driven by an electric motor was tested using water. It is experimentally shown that the inducer had very small effect on the pump's head and efficiency but great effect on the pump's cavitation performance. Additionally, inducer test was carried out to investigate the effect of the inducer on the pump in detail, and it was found that the pump reached a critical cavitation number when the inducer head dropped by 55%.

초 록

액체로켓엔진용 터보펌프에서 연료펌프에 대한 수력시험을 수행하였다. 작동유체는 상온의 물이며 펌프는 모터로 구동된다. 인듀서가 펌프의 양정 및 효율에 미치는 영향은 작지만 펌프의 캐비테이션 성능에는 지대한 영향을 미치는 것을 실험으로 확인하였다. 또한 인듀서 단독의 성능을 살펴보기 위한 시험을 수행하였는데, 캐비테이션 시험 중 인듀서에서 55% 양정저하가 발생할 때 펌프에서 캐비테이션 임계점에 도달하는 것을 알 수 있었다.

Key Words: Liquid Rocket Engine Turbopump(액체로켓엔진용 터보펌프), Fuel Pump(연료펌프), Inducer(인듀서), Performance Test(성능시험), Cavitation(캐비테이션)

1. 서 론

2002년 11월 발사에 성공한 KSR-III 액체로켓 이후 한국항공우주연구원 (이하 항우연)에서는 KSLV-I 개발사업의 일환으로 케로신과 액체산소

를 추진제로 사용하는 30톤급 개방형 액체로켓 엔진에 적용 가능한 터보펌프를 개발하고 있다. 이 터보펌프는 산화제펌프, 연료펌프, 터빈이 일체인 형태이다. 본 연구에서는 이 중에서 연료펌프에 대하여 시험한 결과를 제시하고자 한다. 그리고 Table 1에 이 펌프의 설계요구 조건을 나타내었다.

보통 터보펌프의 펌프에서는 캐비테이션 성능을 향상시키기 위하여 주 입펠러 전방에 인듀서

† 2005년 8월 31일 접수 ~ 2005년 11월 21일 심사완료

* 정회원, 한국항공우주연구원 터보펌프그룹

** 종신회원, 한국항공우주연구원 터보펌프그룹
연락처, E-mail: sshong@kari.re.kr

를 장착한다. 본 연구에서는 먼저 펌프의 수력 성능 및 캐비테이션 성능을 측정하며 다음으로 인두서의 영향을 고찰하기 위하여 인두서를 제거한 펌프에 대하여 동일한 수력 시험을 수행하였다. 또한 인두서 자체의 특성을 고찰하기 위하여 인두서 단독 시험도 수행하였다.

2. 시험장치

본 시험장치에서는 산화제펌프 및 연료펌프에 대한 수력 성능 및 캐비테이션 성능 시험이 이루어진다[1-3]. 실제 터보펌프에서는 터빈이 펌프를 구동하지만 본 시험장치에서는 펌프에 대한 다양한 시험이 가능하도록 하기 위하여 전기 모터를 이용하여 펌프를 구동하였다. 작동유체로는 상온의 물을 사용하였으며 시험 중에 펌프의 양정, 유량, 동력, 효율, 캐비테이션 특성 등이 측정된다. 주요 구성품에는 물탱크, 모터, 기어박스, 토크미터, 유량계 등이 있다. 구동 모터의 최대 동력은 320 kW 이고 기어박스를 통하여 펌프 회전수 20,000 rpm까지 시험가능하다. 물탱크는 3 m³ 용량이고 가압 또는 감압이 가능하다. 물탱크로부터 물이 흡입되고 펌프에 의하여 가압된 물이 다시 물탱크로 배출하는 폐회로 형식이며 그 구성도는 Fig. 1과 같다. Fig. 2는 시험장치 사진이며 펌프, 토크미터, 기어박스가 좌측에서 우측으로 배치되어 있다.

시험된 펌프는 비속도가 0.278 (미국단위로 760)이고 주요 구성품은 직경 170 mm의 원심형 임펠러와 직경 82 mm의 축류형 인두서 (Fig.

3), 볼류트 등이다. 보통의 터보펌프와 마찬가지로, 캐비테이션 성능을 향상시키기 위하여 임펠러 전방에 인두서가 장착되어 있다. 그리고 본

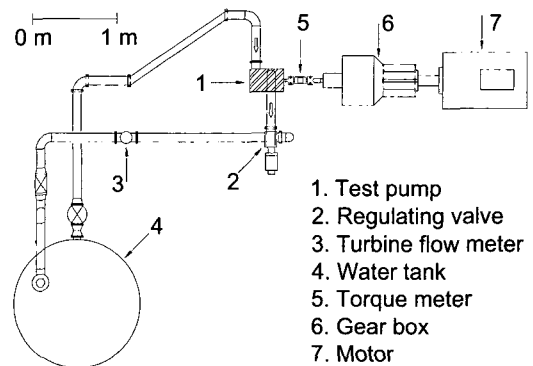


Fig. 1 Plane View of Pump Test Facility

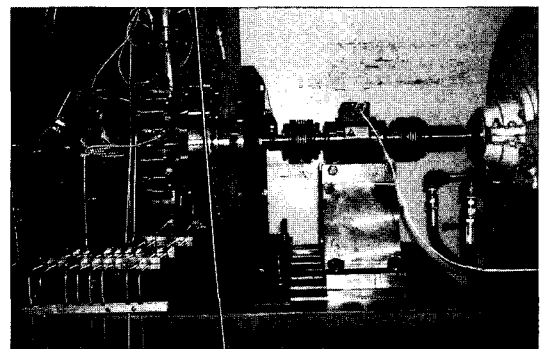


Fig. 2 Pump Test Facility

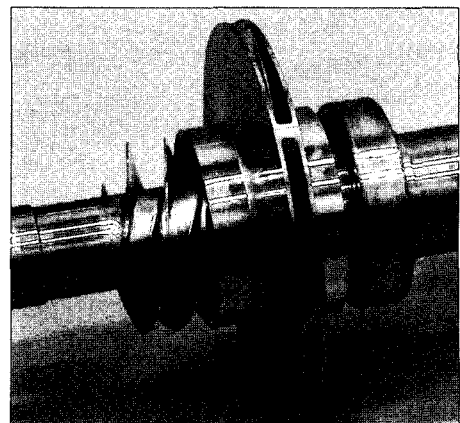


Fig. 3 Inducer and Impeller of Test Pump

Table 1. Design Requirement of Test Fuel Pump

Item	Unit	Specification
Fuel	-	kerosene
Mass flow rate	kg/s	29.1
Inlet total pressure	MPa	0.28
Outlet total pressure	MPa	13.24
Inlet total temperature	K	288
Fuel density	kg/m ³	796.7
Rotational speed	rpm	20,000

연구에서는 정상적인 연료펌프 시험 (with inducer)뿐만 아니라, 인듀서의 영향을 살펴보기 위하여 실험 목적상 인듀서를 제거하고 그 자리에 인듀서 허브 형상을 가진 일종의 스페이서를 조립한 상태의 시험 (without inducer)도 수행하였다.

3. 시험결과 및 고찰

3.1 펌프의 성능

펌프 성능측정에는 케로신 대신 물을 사용하며 상사시험 조건으로부터 두 매질에서 체적유량 및 양정은 동일하게 하여 시험을 수행하였다. 측정된 펌프의 양정 특성을 Fig. 4에 나타내었다. 펌프 시험은 약 8,300 rpm에서 수행되었으며 20,000 rpm으로 환산하여 표시하였다. 환산할 때 양정은 회전수의 제곱에 비례하고 유량은 회전수에 비례한다는 통상적인 가정이 이용되었다. 보통의 원심펌프와 마찬가지로 양정은 유량에 대하여 감소하는 경향을 보였다. 측정된 양정은 설계 요구 조건보다 약 12% 큰 상태인데 차후에 임펠러 팁 제거 등을 통하여 양정을 감소시킬 여지를 가지고 있다. 그리고 인듀서는 펌프 양정에 거의 영향을 주지 않았다.

측정된 양정, 유량, 토크로부터 계산된 펌프 효율을 Fig. 5에 나타내었다. 펌프 효율은 유량에 대하여 증가하는 경향을 보였다. 그리고 인듀서 없는 경우가 인듀서가 있는 정상적인 경우보다 효율이 약 1% 높았다. 이는 긴 유로를 가진 인듀서의 효율이 원심 임펠러보다 낮기 때문인 것으로 판단된다.

캐비테이션 성능 시험은 설계 유량계수 조건에서 수행되었고 시험 회전수는 약 8,300 rpm이었으며 그 결과를 20,000 rpm으로 환산하여 Fig. 6에 나타내었다. 환산할 때는 양정 및 유효흡입양정 (NPSH)이 회전수의 제곱에 비례한다는 통상적인 가정이 이용되었다. 예측했던 대로 인듀서를 제거하면 캐비테이션 성능이 현저하게 저하되는 것을 관찰할 수 있다. 3% 양정 저하점을

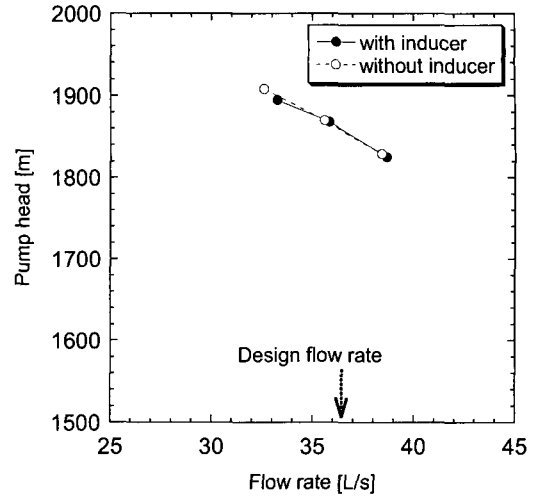


Fig. 4 Inducer Effect on Pump Head

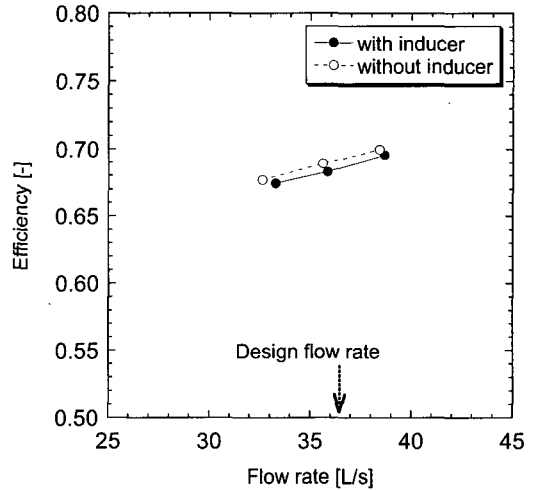


Fig. 5 Inducer Effect on Pump Efficiency

펌프의 임계 유효흡입양정이라고 할 때 인듀서가 있는 정상적인 펌프에서 임계 유효흡입양정은 약 11 m였다. 임계 유효흡입양정의 설계 요구조건이 35.8 m인 것을 감안할 때 상당한 여유가 있음을 알 수 있다. 인듀서가 없는 경우에는 인듀서가 있는 경우에 비하여 임계 유효흡입양정이 약 네 배로 커졌다. 즉, 캐비테이션 성능이 크게 저하된 것이다. 펌프 양정에는 거의 영향을 미치지 않았고, 펌프 효율에는 약간의 감소 요인

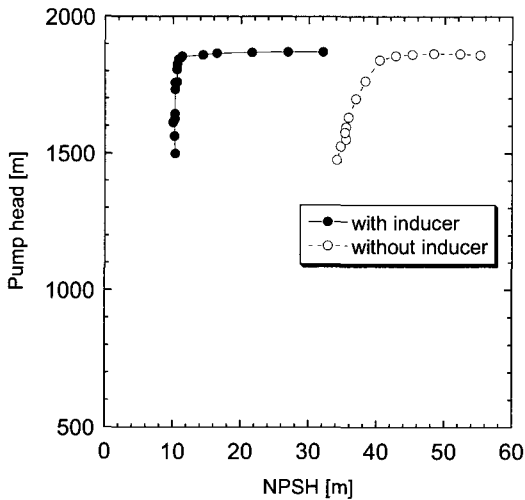


Fig. 6 Inducer Effect on Pump Cavitation Performance

으로 작용하던 인듀서가 캐비테이션 성능에는 절대적인 영향을 미치고 있는 것을 단적으로 보여주고 있다.

3.2 인듀서의 성능

인듀서가 펌프에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 펌프 시험에 사용된 인듀서를 대상으로 인듀서 단독 시험을 수행하였다. 시험장치는 항우연에 설치되어 있는 인듀서 수력 성능시험 장치를 이용하였다[4, 5]. 인듀서는 모터로 구동되며 작동 유체는 상온의 물이고 수력 성능 시험 및 캐비테이션 성능 시험이 가능하다. 인듀서 단독 시험의 경우 본 연구에서는 시험 회전수를 6,000 rpm으로 설정하였다. 인듀서 하류에는 유로 면적이 원주 방향으로 일정한 직사각형 단면을 가진 컬렉터가 설치되어 있으며 컬렉터에서 측정된 정압과 인듀서 입구 압력의 차이를 인듀서 양정으로 보았다. 물론 실제 인듀서 출구 단면에서 측정된 전압은 컬렉터에서 측정된 정압보다 크며, 홍순삼 등[5]은 형상이 본 연구의 인듀서와는 약간 다른 인듀서에 대하여 하류에서 3공프роб를 이용하여 유동장을 측정하여 인듀서 양정을 구하였는데 컬렉터 정압으로부터 측정된 양정은 인듀서 하류 전압으로부터 측정된 양정의 약 60%에 해당되었다.

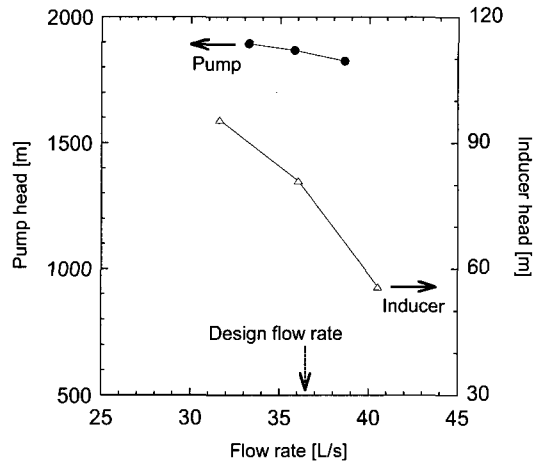


Fig. 7 Head of Pump and Inducer

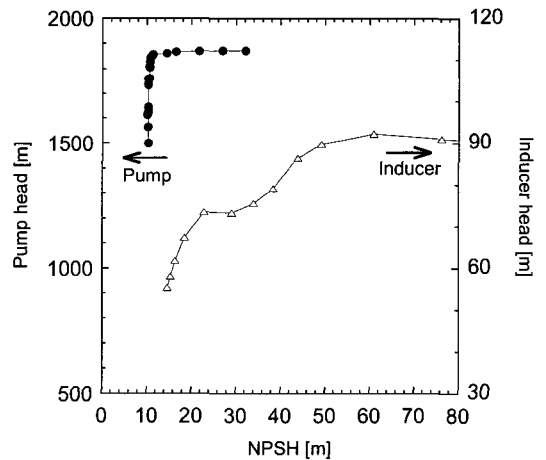


Fig. 8 Cavitation Performance of Pump and Inducer

컬렉터에서 측정된 인듀서의 양정을 전체 펌프 양정과 함께 Fig. 7에 제시하였는데 20,000 rpm으로 환산하여 표시하였다. 인듀서의 양정도 펌프 양정과 마찬가지로 유량에 대하여 감소하는 경향이였다. 설계 유량 조건의 경우 컬렉터에서 측정된 인듀서 양정은 펌프 전체 양정의 약 4%였으며, 홍순삼 등[5]의 결과로부터 추정해볼 때 인듀서의 실제 양정은 펌프 양정의 약 7%일 것이다. 보통 인듀서 양정은 펌프 양정의 2~10%로 설계한다고 알려져 있다[6].

Figure 7의 결과를 볼 때 인듀서 없이 임펠러

만 조립한 경우 (without inducer) 펌프 전체 양정이 인듀서 양정만큼 감소할 것으로 생각할 수 있으나, Fig. 4의 시험 결과를 보면 인듀서가 펌프 양정에 거의 영향을 주지 않고 있다. 그 이유는 임펠러만 있을 경우에는 임펠러 입구 날개에서 예선회 (preswirl)가 거의 없는 반면에 인듀서가 임펠러 상류에 조립된 경우에는 임펠러 입구에서 예선회가 발생하여 입력 일이 감소되고 따라서 임펠러 자체의 양정이 감소되기 때문이다. 즉, 인듀서가 있으면 인듀서 양정만큼 양정이 추가되지만 동시에 임펠러 자체의 양정이 감소되어 펌프 전체 양정은 인듀서가 없는 경우와 비슷해지는 것으로 판단된다.

인듀서의 캐비테이션 성능을 펌프 전체 캐비테이션 성능과 비교하여 Fig. 8에 제시하였는데 이때의 유량은 설계 유량 조건이다. 보통 터보펌프에서는 상류의 인듀서에서 캐비테이션이 먼저 발생한다. 그리고 이 인듀서 캐비테이션이 점차 발달하여 어느 임계값에 이르면 펌프 임펠러에서도 캐비테이션이 급격히 진행되어 펌프가 캐비테이션 임계점에 이른다. Fig. 8에서 보면 인듀서 양정이 40% 가량 저하되어도 펌프는 정상적인 양정 특성을 보인다. 본 연구에 사용된 펌프의 경우 Fig. 8의 시험결과로부터, 인듀서 양정이 약 55% 저하될 때 펌프가 캐비테이션 임계점에 (3% 양정저하 기준) 이르는 것을 알 수 있었다. 액체로켓용 터보펌프의 인듀서에서 캐비테이션 임계점은 최소 10% 양정저하를 기준으로 하는데 50% 양정저하를 기준으로 하는 경우도 많다[7, 8].

4. 결 론

액체로켓엔진용 터보펌프의 연료펌프에 대하여 수력 상사 시험을 수행하였다. 본 연구에 사용된 펌프에 대한 주요 시험 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 인듀서가 펌프의 양정에 미치는 영향은 매우 작았고 펌프 효율의 경우 인듀서가 있을

때가 없을 때보다 그 값이 약 1% 낮았다.

둘째, 인듀서가 펌프의 캐비테이션 성능에 미치는 영향은 매우 컸으며 인듀서가 없으면 있을 때에 비하여 임계 유효흡입양정이 네 배로 증가하였다.

셋째, 캐비테이션으로 인하여 인듀서에서 약 55% 양정 저하가 발생할 때 펌프에서는 캐비테이션 임계점에 이르렀다.

참 고 문 헌

1. 김대진, 홍순삼, 최창호, 김진한, "로켓엔진용 연료펌프의 축추력 측정," 한국추진공학회 2005년도 추계학술대회 논문집, 2005, pp. 358-362
2. 강정식, 임현, 김진한, "터보펌프의 진동이 캐비테이션에 미치는 영향," 제3회 한국 유체공학 학술대회, 제주, 2004
3. 홍순삼, 임현, 김대진, 차봉준, 강정식, 임병준, 김진한, "터보펌프 성능시험 장치," 제3회 한국 유체공학 학술대회, 제주, 2004
4. 홍순삼, 김진선, 최창호, 김진한, "터보펌프 인듀서의 비정상 캐비테이션에 관한 실험적 연구," 유체기계저널, 제8권 1호, 2005, pp.23-29
5. 홍순삼, 구현철, 차봉준, 김진한, "터보펌프 인듀서의 출구 유동 및 성능 특성," 유체기계저널, 제6권 4호, 2003, pp.38-44
6. Sutton, G. P. and Biblarz, O., Rocket Propulsion Elements, 7th ed., John Wiley & Sons Inc., 2001, p.377
7. Furukawa, A. and Kshizaka, K., "Experimental Data for Basic Design of Pump Inducer," Proceedings of the 9th ISROMAC, Hawaii, 2002
8. Japikse, D., "Overview of Commercial Pump Inducer Design," Proceedings of the 9th ISROMAC, Hawaii, 2002