◎ 논 문

DOI: 10.5293/KFMA.2011.14.1.061
ISSN (Print): 1226-9883

75톤급 액체로켓엔진용 연료펌프의 수류시험

김대진*†· 최창호* · 홍순삼* · 곽현덕* · 김진한*

Water Tests of Fuel Pump for 75-ton Class Liquid Rocket Engine

Dae-Jin Kim*†, Chang-Ho Choi*, Soon-Sam Hong*, Hyun D. Kwak*, Jinhan Kim*

Key Words : Turbopump(터보펌프), Fuel pump(연료펌프), Head(양정), Efficiency(효율), Hydraulic performance(수력성능), Cavitation performance(흡입성능)

ABSTRACT

A series of water tests of a fuel pump for liquid rocket engines are performed at a room temperature. According to the test results, the head coefficient of the pump follows the conventional similarity rule - unlike this, the pump shows better efficiency with higher rotational speed. Also, it is found that the pressure at the rear bearing outlet is higher than expected because the inlet of bypass pipe line is narrow. Furthermore, the cavitation performance of the fuel pump is found to be sufficient for the engine operation and is better at the lower flow ratio and higher rotational speed.

1. 서 론

액체로켓엔진에 고압의 산화제와 연료를 공급하는 터보펌프는 그 중요성과 함께 고압으로 연료와 산화제를 공급해주는 그 기능상 '발사체의 심장'이라 불린다. 터보펌프는 저온의 산화제와 고온의 터빈구동가스가 공존하며, 엔진에서 가장 높은 압력으로 작동되는 반면 고속으로 회전하는 회전체를 갖고 있고, 추진제 탱크의 압력을 최소화하기 위해 펌프가 캐비테이션 환경에 노출되는 등 기술적 난제가 많은 발사체 부품 중 하나이다[1]. 국내에서는 이러한 터보펌프의 개발이 1999년부터 본격적으로 시작되었는데, 2008년 30톤급 액체로켓엔진에 적용 가능한 터보펌프에 대한 실매질 조건에서의 검증이 설계점/탈설계점 모두 완료[2]되어 실용화의 단계에 이르렀다. 현재 한국항공우주연구원에서는 KSLV-I 사업의 후속으로 진행될 한국형 발사체 사업을 위한 75톤급 엔진용 터보펌프를 개발 중에 있다.

개발 중인 터보펌프는 액체산소와 케로신을 매질로 하는 75톤급 개방형(open-loop cycle) 액체로켓엔진에 적용 가능한 모델로 단단 원심형 펌프인 산화제펌프, 연료펌프와 이를 구동하기 위한 단단 충동형 터빈으로 구성된 일축식 모델이며 작동 온도 환경과 흡입성능을 고려하여 산화제펌프-연료펌프-터빈 순서로 배치되어 있다. 여기서는 제작된 연료펌프에 대한 수류시험(수력성능시험, 흡입성능시험)에서 얻은 결과를 토대로 정상 상태에서의 펌프 성능을 파악하고 펌프의 입구압력(캐비테이션 수)에 따른 성능 변화를 측정하여 설계의 적합성을 확인하도록 하겠다.

* 한국항공우주연구원 터보펌프팀
† 교신저자, E-mail : rain301@kari.re.kr

2. 시험 개요

2.1 연료펌프의 구조

시험에 사용된 연료펌프의 레이아웃을 Fig. 1과 같이 나타내었다. 연료펌프는 산화제펌프와 터빈 사이에 위치해 있기 때문에 입구 배관이 반경 방향으로 연결되어 있다. 또한 흡

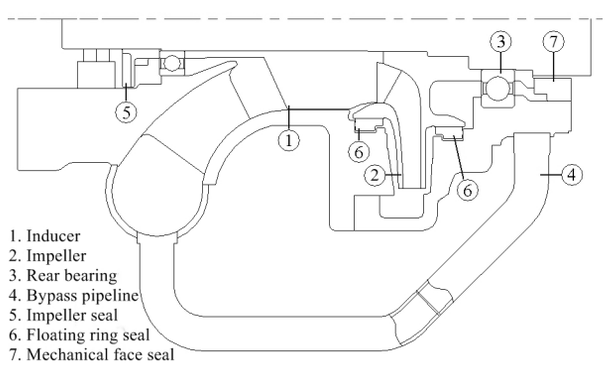

Fig. 1 Fuel pump layout

입성능의 향상을 위해 임펠러 앞에 날개가 3개인 인듀서가 장착된다. 임펠러는 6개의 주 날개와 6개의 보조 날개로 구성되어 있다. 인듀서와 임펠러를 통해 가압된 유체는 볼류트를 통해 펌프 출구로 나가며 이 중 일부는 임펠러의 앞뒤로 유입되는데 이 통로를 이차유로라고 하며 임펠러 쇼울더(shoulder) 주변에 장착된 플로팅 링 실에서 그 유량이 제어된다[3]. 이차유로의 전방으로 흐르는 유체는 임펠러 출구에서 전방 플로팅 링을 거쳐 인듀서 후단으로 순환된다. 그리고 이차유로의 후방으로 흐르는 유체는 임펠러 출구, 후방 플로팅 링을 거쳐 후방 베어링을 냉각시킨 뒤 바이패스 배관을 통해 입구 케이싱으로 순환된다. 이 때 후방 이차 유로에서 터빈 쪽으로의 누설을 막기 위해 기계평면실을 사용한다.

2.2 시험 설비 및 시험 조건

연료펌프의 수류시험은 한국항공우주연구원 내에 있는 터보펌프 성능시험설비[4]에 있는 펌프 단품 시험실(Fig. 2 참조)에서 이루어졌다. 시험설비는 30톤급 터보펌프 개발 때 확장한 설비를 개량하여 사용하였는데, 모터와 기어박스를 이용하여 펌프를 구동시키며 상온의 물을 폐회로로 순환시킨다. 펌프 단품 시험실에서 연료펌프의 단품 시험은 모터 용량의 한계 때문에 최대 5500 rpm까지 가능하다.

펌프 단품 시험은 수력성능시험, 흡입성능시험, 축추력시험으로 나누어 진행된다. 이 중 수력성능시험을 통해서는 정상 상태에서의 펌프의 양정, 효율을 측정하여 펌프의 성능곡선과 작동점을 파악한다. 또한 흡입성능시험을 통해서는 입구 압력이 작아질 때의 펌프의 성능 변화를 관찰하며, 펌프가 운전 가능한 입구 압력의 임계점을 도출한다. 마지막으로 축추력시험에서는 펌프의 축방향 하중을 측정하여 펌프(베어링)의 작동 안정성을 확인한다.

수력성능시험에서는 유량비(설계유량계수 Q_d에 대한 측정 유량계수의 비율) 0.9~1.1 근방의 5점 이상에서 실시하여 성능곡선을 도출한다. 또한 엔진 운용 중 시동 및 종료 상황에서의 펌프 상태를 파악하기 위해 유량이 없을 때를 포함한 저유량 조건에서의 시험도 실시하는데, 이 시험은 펌프에 과도한 부하를 피하기 위해 저회전수에서 실시한다. 또한 흡입성능시험은 유량과 회전수를 바꾸어가며 각 조건에서의 임계 캐비테이션 수를 파악한다. 각 시험의 구체적인 조건은 Table 1에 정리하였다.

시험 분석에 사용한 주요 무차원 변수와 그 정의는 식 (1)~(3)과 같다. 여기서 P_{ot}는 펌프 출구전압, P_{it}는 입구전압, U_{t1}은 인듀서 끝단속도, U_{t2}는 임펠러 끝단속도, P_s는 측정 위치에서의 정압, P_v는 입구 배관에서의 유체 증기압이다.

$$head\ coefficient = (P_{o_t} - P_{i_t})/(0.5\rho U_{t_2}^2) \quad (1)$$

$$pressure\ coefficient\ C_p = (P_s - P_{i_t})/(0.5\rho U_{t_2}^2) \quad (2)$$

$$cavitation\ number\ \sigma = (P_{i_t} - P_v)/(0.5\rho U_{t_1}^2) \quad (3)$$

3. 시험 결과 및 분석

3.1 연료펌프의 수력성능

Fig. 3은 수력성능시험[5]에서 측정된 유량비와 양정 계수의 관계를 정리한 그림이다. 일반적으로 원심펌프의 경우 설계점 부근에서는 유량비가 작아질수록 양정계수가 완만하게 커지는데, 시험 결과 역시 이와 비슷한 경향을 보인다. 참고로 그림에는 표시되지 않았지만 시험 T2 중 유량비가 작은

Table 1 Test conditions of the fuel pump

Index	Test type	Test speed	Flow ratio	Test sets
T1	hydraulic	5270-5280 rpm	0.87-1.10Q_d	5 sets
T2	hydraulic	3490 rpm	0.00-1.13Q_d	6 sets
T3	cavitation	4970-4980 rpm	0.91-1.09Q_d	3 sets
T4	cavitation	4480-5390 rpm	1.00-1.01Q_d	3 sets

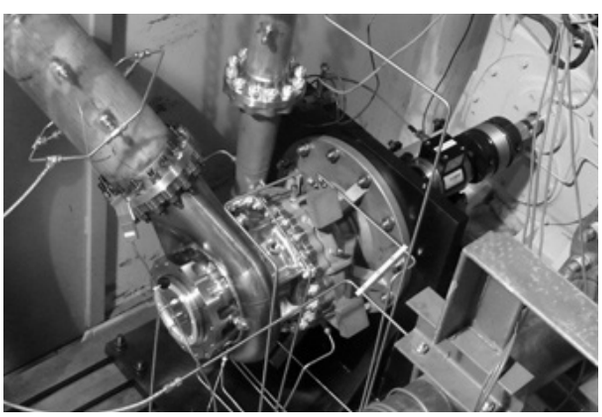

Fig. 2 Fuel pump in the pump test cell

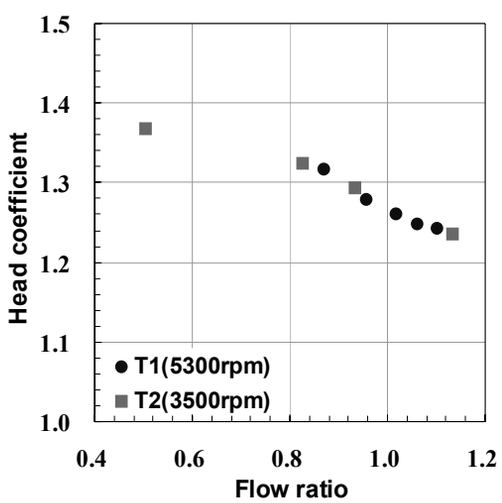

Fig. 3 Head coefficient of the fuel pump

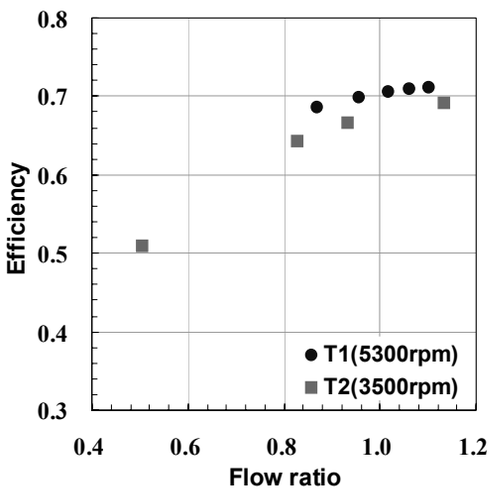

Fig. 4 Efficiency of the fuel pump

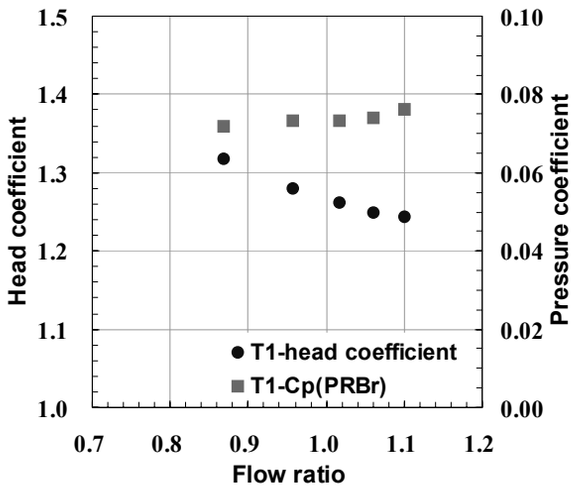

Fig. 5 Bearing outlet pressure of the fuel pump

Table 2 Hydraulic performance at the design flow ratio

Index	Head coefficient	Efficiency
1D+3D 해석	1.280	0.670
3D 해석	1.200	0.694
시험값	1.273	0.702

Table 3 Critical cavitation number of the fuel pump (test T3&T4)

Rotational speed	4482	4969	5385	4972	4975
Flow ratio$_{ref}$	1.010	0.996	0.995	0.906	1.095
Head coefficient$_{ref}$	1.263	1.267	1.265	1.302	1.239
Cavitation number$_{cr}$	0.0515	0.0437	0.0452	0.0389	0.0505

영역에서는 유량비가 작아지면서 양정계수 역시 줄어들었다. 시험 T1과 T2의 결과가 유사하므로 연료펌프의 양정계수는 회전수 상사 법칙을 만족한다고 할 수 있다.

Fig. 4는 시험에서 측정된 유량비와 효율의 관계를 정리한 그림이다. 양정계수와는 달리 효율은 회전수에 따라 그 측정값에 차이가 있다. 이는 높은 회전수에 비해 낮은 회전수에서 상대적으로 펌프의 기계적 손실(베어링, 임펠러 실, 접촉 실의 손실)이 많기 때문으로 알려져 있다. 설계유량비 이상에서 펌프의 효율이 최대가 되는데, 이는 펌프를 설계할 때 흡입성능을 고려해서 인듀서 및 임펠러 입구 직경을 다소 크게 설계하였기 때문이다[6].

Table 2는 시험 T1에서 얻은 성능곡선에서 추정한 설계 유량에서의 펌프 성능을 수치 해석 결과와 비교한 표이다. 표에서 3D 해석은 이전 연구에서 검증된 Fine/Turbo로 계산한 결과이고, 1D+3D 해석은 인듀서와 임펠러는 3D 해석을 한 뒤 펌프의 나머지 부분은 항우연에서 자체 보유한 1D 설계 S/W를 적용한 값이다[6]. 제작된 연료펌프는 설계 목표를 만족하며, 3D 해석의 양정계수를 제외한 대부분의 해석값이 시험값과 비슷하다.

Fig. 5는 시험 T1에서 측정된 펌프 내부 압력 중 후방 베어링 출구 압력(PRBr)의 분포를 양정계수와 함께 그린 것으로 유량비에 따른 펌프 양정의 분포와는 달리 유량비가 클수록 PRBr이 크게 나타났다. 또한 PRBr의 값은 예상보다 컸는데, 후방 베어링과 터빈 로터 사이에 장착되는 기계평면실의 작동 환경에 대한 압력 여유(margin)를 확보하기 위해서는 PRBr의 값을 줄이는 방향으로 설계가 변경되는 것이 바람직하다. 시험 이후 후방 베어링 부근에 대한 추가적인 유동 해석을 실시한 결과, 베어링 출구에서 바이패스 배관으로 통하는 입구의 면적이 좁아서 유체 흐름이 원활하지 않게 되고, 이런 이유로 PRBr의 값이 커졌던 것으로 분석되었다.

3.2 연료펌프의 흡입성능

Table 3은 시험 T3과 T4의 결과를 요약한 것이다. 흡입성능의 임계점(cr)은 기준점(ref) 대비 3 % 양정 감소가 일어난 시점으로, 기준점은 시험이 시작되는 시점으로 정의하였다. 75톤급 연료펌프의 임계 캐비테이션 수는 30톤급 연료펌프[7]보다 높았으나 엔진의 운용에는 영향이 없을 것으로 예상된다. 임계 캐비테이션 수로 판단해 볼 때 대체로 회전수가 높을수록, 유량비가 작을수록 흡입성능이 좋다. 이러한 특징은 30톤급 연료펌프에서 나타났던 특성과 일치한다.

5385 rpm-0.995 Q_d에서 진행된 흡입성능시험 중 측정된 양정, 효율, 유량비의 변화를 Fig. 6과 같이 나타내었다. 흡입성능시험 중 양정은 12 % 감소하였고, 이 때 유량비와 효율은 각각 6 %씩 감소하였다. 그래프에서 캐비테이션 수가 0.09 이상인 지점에서는 양정, 효율 및 유량비의 변화가 크지 않았다. 양정계수는 캐비테이션 수가 0.06인 지점부터 본격적으로 감소하기 시작하고, 효율과 유량비는 임계 캐비테이션 수 근처인 0.05부터 본격적으로 감소하기 시작하였다.

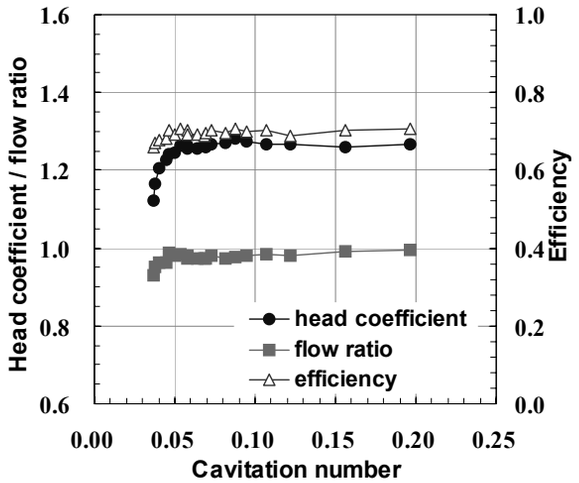

Fig. 6 Fuel pump performances according to the cavitation number (5385rpm-0.995Qd)

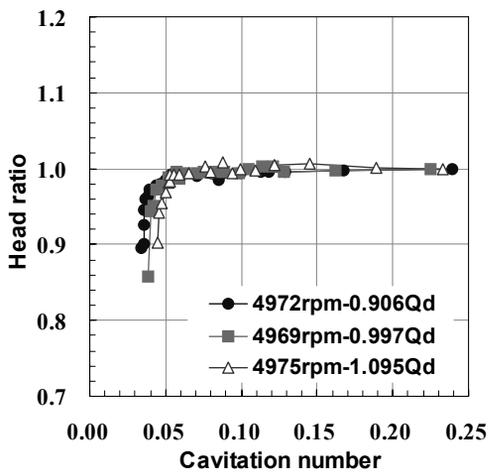

Fig. 7 Cavitation curves according to the flow ratio (test T3)

비슷한 회전수에서 유량을 바꿔가며 실시한 흡입성능시험인 시험 T3에서 얻은 흡입성능곡선을 Fig. 7과 같이 나타내었다. 세 흡입성능곡선을 비교하기 위해 종축은 양정비(=측정양정/기준양정)로 표기하였다. 그래프를 보면 유량비가 클수록 흡입성능곡선에서 양정이 급격히 감소할 때의 기울기가 커지는 것을 볼 수 있다. 또한 유량비에 따라 캐비테이션 붕괴점(임계점 이후 캐비테이션이 더욱 심화될 때의 캐비테이션 수)이 각기 달랐다.

다음으로 흡입성능시험 중 나타난 후방 베어링 출구 압력의 변화를 살펴보도록 하겠다. 캐비테이션 수가 작을 때 펌프 내부 압력은 안정적이지 않기 때문에 측정값에 다소 편차가 있을 수 있다. Fig. 8을 보면 PRBr 값은 양정계수가 일정하게 유지되는 구간에서도 변하기 시작하는데, 캐비테이션 수가 0.09인 시점부터 값이 상승하다가 양정계수가 본격적으로 감소하는 시점에서는 급감한다. 참고로 후방 플로팅 링

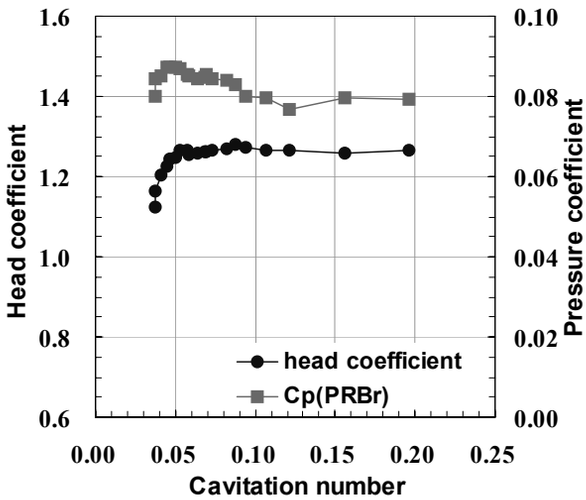

Fig. 8 Bearing outlet pressure at the cavitation test (5385rpm-0.995Qd)

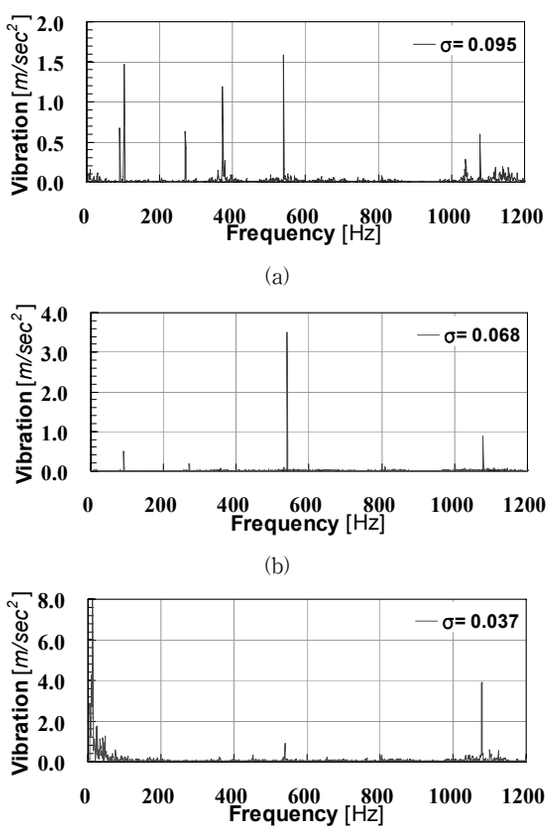

Fig. 9 Casing acceleration according to the cavitation number (5385rpm-0.995Qd)

출구 압력 역시 비슷한 형태의 압력 분포를 보인다. 캐비테이션 수에 따른 이러한 내부 압력 변화는 양정계수가 변하지 않은 상태에서 일어나기 때문에 펌프의 축방향 하중 분포에 영향을 끼칠 것으로 보이나, 변화폭이 크지 않기 때문에 영향 역시 제한적일 것으로 예상된다.

Fig. 9는 5385 rpm-0.995 Q_d 시험 중 인듀서 부근의 입구 케이싱에서 측정한 가속도의 주파수 분포 중 일부를 표시한 것이다. 각 그림에서 범례는 해당 주파수 분포가 나타난 캐비테이션 수이다. 캐비테이션 수에 따라 각기 다른 주파수 분포 양상을 보이는데, 캐비테이션 수가 0.095 근처에는 탁월주파수 성분으로 103Hz(1.15x)와 372Hz(4.14x)이 나타나며, 1x, 3x, 6x 성분도 골고루 나타난다. 이에 반해 입구 압력이 감소하여 캐비테이션 수가 0.068 정도가 되었을 때에는 탁월주파수 성분으로 6x 성분이 두드러지며, 캐비테이션이 심화되는 0.037 부근에서는 50Hz 이하에서 넓게 분포하는 저주파 성분 및 12x 성분이 관찰된다.

4. 결 론

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 제작된 연료펌프는 설계 목표를 만족하며, 해석값 중 3D 해석값의 양정계수는 시험값과 차이가 있다.
2) 양정계수는 회전수 상사 법칙을 만족한 반면, 효율은 회전수가 높을 때가 상대적으로 좋다.
3) 후방 베어링 출구에서 바이패스 배관으로 들어가는 유입구의 형상 때문에 후방 베어링 출구 압력이 예상보다 높았다.
4) 임계 캐비테이션 수로 판단하였을 때 제작된 연료펌프는 회전수가 높을수록, 유량비가 작을수록 흡입성능이 좋다.
5) 유량비가 클수록 흡입성능곡선에서 양정이 급격히 감소할 때의 기울기가 급하다.

참고문헌

(1) 김진한, 2008, “국내 터보펌프 개발 현황,” 한국추진공학회지, 제12권, 제5호, pp. 73~78.
(2) 홍순삼, 김진선, 김대진, 김진한, 2009, “30톤급 엔진용 터보펌프 실매질 고온시험,” 제32회 한국추진공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 11~17.
(3) 김대진, 홍순삼, 최창호, 김진한, 2005, “로켓엔진용 연료펌프의 축추력 측정,” 제25회 한국추진공학회 추계학술대회 논문집, pp. 358~362.
(4) 홍순삼, 임현, 김대진, 차봉준, 강정식, 임병준, 김진한, 2004, “터보펌프 성능시험 및 평가,” 유체기계저널, 제7권, 제3호, pp. 84~87.
(5) 김대진, 홍순삼, 최창호, 김진한, 2009, “75톤급 로켓엔진용 연료펌프의 수력성능시험,” 제33회 한국추진공학회 추계학술대회 논문집, pp. 78~81.
(6) Choi, C. H., Noh, J. G., Kim, D. J., Hong, S. S. and Kim, J., 2009, “Effects of Floating-Ring Seal Clearance on the Pump Performance for Turbopumps,” Journal of Propulsion and Power, Vol. 25, No. 1, pp. 191-195.
(7) 김대진, 홍순삼, 김진선, 김진한, 2008, “실매질 시험용 터보펌프의 단품 수류시험,” 항공우주기술, 제8권, 제1호, pp. 26~31.