

75톤급 액체로켓엔진용 산화제펌프의 수류시험

김대진*, 홍순삼**, 최창호***, 김진한****

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

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

Abstract

A series of water tests of a Lox pump for liquid rocket engines are performed at a room temperature. According to the hydraulic test results, the head coefficient is slightly decreased when the rotational speed of the pump is increased. However the efficiency is high at the high-speed test. Also, according to the cavitation test results, the cavitation performance of the pump is found to be decreased when the flow ratio is less than 92%. Furthermore, the vibration characteristic is analyzed using measured high frequency data.

초 록

액체로켓엔진용 산화제펌프의 수류시험을 상온에서 실시하였다. 수력성능시험 결과, 펌프의 양정 계수는 회전수가 커질수록 약간 감소하였고, 효율은 회전수가 커질수록 증가하였다. 흡입성능시험 결과, 유량비 92% 이하의 낮은 유량비에서 흡입성능이 떨어지는 것으로 나타났다. 또한, 시험 중 측정된 고주파 신호를 이용하여 펌프의 진동 특성을 분석하였다.

키워드 : 터보펌프(turbopump), 산화제펌프(Lox pump), 양정(head), 효율(efficiency), 수력성능(hydraulic performance), 흡입성능(cavitation performance)

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 최소

화하기 위해 펌프가 캐비테이션 환경에 노출되는 등 기술적 난제가 많은 발사체 부품 중 하나이다 [1]. 국내에서는 이러한 터보펌프의 개발이 1999년부터 본격적으로 시작되었는데, 현재는 한국항공우주연구원에서는 한국형 발사체 사업을 위한 75톤급 엔진용 터보펌프를 개발하고 있다.

개발 중인 터보펌프는 액체산소와 케로신을 매질로 하는 75톤급 개방형(open-loop cycle) 액체로켓엔진에 적용 가능한 모델로 단단 원심형

접수일(2010년12월14일), 수정일(1차 : 2011년 6월 5일, 2차 : 2011년 6월 17일, 게재 확정일 : 2011년 7월 1일)

* 터보펌프팀/rain301@kari.re.kr

** 터보펌프팀/sshong@kari.re.kr

*** 터보펌프팀/cch@kari.re.kr

**** 터보펌프팀/jhkim@kari.re.kr

펌프인 산화제펌프, 연료펌프와 이를 구동하기 위한 단단 충동형 터빈으로 구성된 일축식 모델이다. 여기서는 제작된 산화제펌프에 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.

2. 시험 개요

2.1 산화제펌프의 구조

시험에 사용된 산화제펌프의 레이아웃과 시험 중 측정한 내부 압력의 위치를 그림 1에 나타내었다. 산화제펌프는 흡입성능의 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. 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.

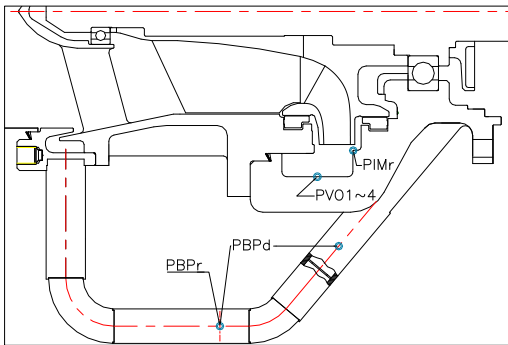


그림 1. 산화제펌프 레이아웃

2.2 시험 설비 및 시험 조건

산화제펌프의 수류시험은 한국항공우주연구원에 있는 터보펌프 성능시험설비[2] 안에 있는 펌프 단품 시험실에서 실시되었다. 펌프 시험실은 모터와 기어박스를 동력으로 사용하여 상온의 물을 폐회로로 순환시키며 펌프의 성능을 측정하는 설비로 75톤급 펌프 규격에 맞추어 기존 설비를 확장하였다. 단품 시험실에서 산화제펌프 시험은 5500rpm까지 가능하다. 표 1은 펌프 단품 시험실의 주요 장비에 대한 규격을 정리한 것이다.

펌프 단품 시험은 수력성능시험, 흡입성능시험, 축추력시험으로 나뉜다. 수력성능시험에서는 정상 상태(캐비테이션이 없는 상태)에서의 펌프의 양정, 효율을 측정하여 펌프의 성능곡선을 파악한다. 또한 흡입성능시험에서는 입구 압력에 따른 펌프의 성능 변화를 관찰하며, 펌프의 운전 가능한 입구 압력의 범위를 도출한다. 축추력시험에서는 펌프의 축방향 하중을 측정하고, 펌프(베어링)의 작동 안정성을 확인한다.

시험 분석에 사용한 주요 무차원 변수와 그 정의는 식 (1)~(4)과 같다. 여기서 Q 는 펌프 체적 유량, A_1 은 입구 단면적, U_{i1} 은 인듀서 끝단속도, P_{o1} 는 펌프 출구전압, P_{i1} 는 입구전압, U_{i2} 는 임펠러 끝단속도, P_s 는 측정 위치에서의 정압, P_v 는 입구 배관에서의 유체 증기압이다.

표 1. 펌프 시험실 규격

Item	Specification
Motor	320 kW
Gear Box	1:3.24
Water Tank	3m ³
Turbine Flowmeter	30-500 lps
Torquemeter	1000 N-m
Vacuum Pump	850 lpm

$$\text{flow coefficient} = Q / (A_1 U_{i1}) \quad (1)$$

$$\text{head coefficient} = (P_{o1} - P_{i1}) / (0.5\rho U_{i2}^2) \quad (2)$$

$$\text{pressure coefficient} = (P_s - P_{i1}) / (0.5\rho U_{i2}^2) \quad (3)$$

$$\text{cavitation number} = (P_{i1} - P_v) / (0.5\rho U_{i1}^2) \quad (4)$$

표 2. 산화제펌프 수류시험 조건

Index	Type	Test speed (rpm)	Flow ratio
T1	Hyd. test	5490 ~ 5510	0.85 ~ 1.18
T2	Hyd. test	2500 ~ 5500	0.99 ~ 1.01
T3	Cavi. test	5500	0.92 ~ 1.10

수력성능시험(Hyd. test)은 일정한 회전수에서 유량비(flow ratio; 설계유량계수에 대한 측정유량계수의 비율)에 따른 펌프의 성능을 파악하는 시험과 설계유량비에서 회전수에 따른 펌프 성능의 변화를 측정하는 시험으로 나누어 진행하였다. 그리고 흡입성능시험(Cavi. test)을 통해서도 유량비에 따른 펌프의 임계 캐비테이션 수를 계산하고 흡입성능곡선을 도출하였다. 두 시험의 시험 조건은 표 2에 정리하였다.

3. 시험 결과

3.1 수력성능시험

그림 2는 시험에서 측정된 유량비와 양정 계수의 관계를 정리한 그림이다. 시험 T1을 보면 유량비가 작아질수록 양정계수가 완만하게 커지고 있어 원심펌프의 일반적인 경향과 일치한다. 시험 T2 결과, 회전수가 커질수록 양정계수가 감소하였는데, 따라서 산화제펌프의 양정은 연료펌프와 달리[3] 회전수 상사 법칙이 온전히 성립하지는 않는다고 할 수 있다.

그림 3은 시험에서 측정된 유량비와 효율의 관계를 정리한 그림이다. 효율은 해당 시험에서의 효율 측정값을 설계유량에서의 효율 추정치로 나누어 표기하였다. 산화제펌프의 효율 역시 회전수에 따라 다르다. 일반적으로 높은 회전수에 비해 낮은 회전수에서 상대적으로 펌프의 기계적 손실(베어링, 임펠러 실, 접촉 실의 손실)의 비중이 크다고 알려져 있다. 그러나 예상되는 기계적 손실[4]에 비해 측정된 효율의 차이가 크다. 따라서 효율 측정에 대한 추가적인 검토가 필요할 것으로 보인다. 또한 시험 T1의 시험 결과를 미루어 짐작할 때, 펌프의 효율이 가장 높은 지점

(BEP)은 유량비 1.13일 때로 추정된다.

회전수에 따른 양정 계수와 효율의 변화는 그림 4와 같이 나타내었다. 그래프의 종축은 시험 T2의 측정값(a)과 시험 T1 결과에서 얻은 성능곡선에서의 추정값(b)의 편차(=(a-b)/b)이다. 회전수가 작을수록 양정 계수가 커지고, 효율은 작아지는 경향을 확인할 수 있다. 회전수가 증가하면서 변화량은 작아지고 있으나, 보다 정확한 산화제펌프의 성능을 얻기 위해서는 설계회전수에 근접한 고회전수에서의 성능 시험이 필요할 것으로 보인다.

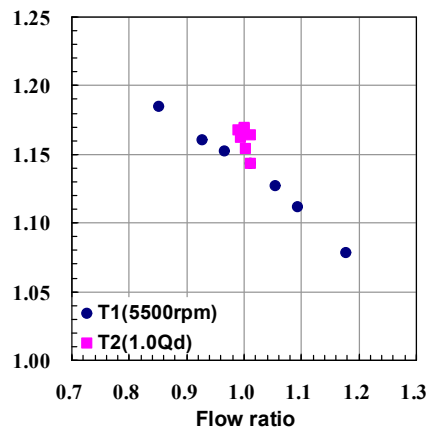


그림 2. 산화제펌프의 양정

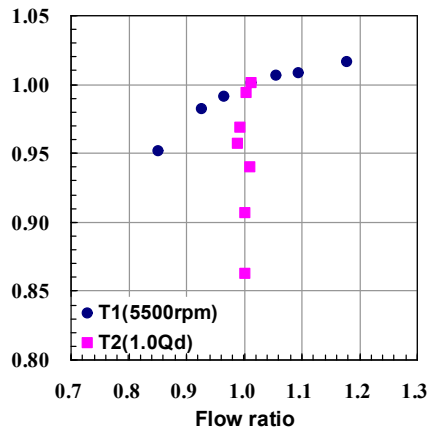


그림 3. 산화제펌프의 효율

표 3은 시험 T1에서 얻은 성능곡선에서 추정된 설계 유량에서의 펌프 성능을 해석 결과와 비교한 표이다. 표 중 1D+3D 해석은 임펠러/인두서에 한해 3D 해석을 한 결과이다. 제작된 산화제펌프는 설계 조건을 만족하였으며, 1D 해석이나 1D+3D 해석 결과가 3D 해석 결과보다 시험값과 비슷하였다.

시험 T2 측정값 중 임펠러를 나온 주유동이 볼류트를 거치면서 상승하는 정압의 비율을 그림 5와 같이 나타내었다. 각 회전수 별로 임펠러 출구(PIMr)에서의 압력 계수를 기준으로 임펠러 출구와 볼류트(PVO1~PVO4)에서의 압력 계수의 비율을 그래프의 종축에 표시하였다. 회전수가 높아지면서 볼류트에서의 압력 상승이 조금 줄어들었는데, 이는 상대적으로 고회전수 시험에서 볼류트에서의 압력 손실이 더 크다는 것을 의미한다. 따라서 이 때문에 산화제펌프의 양정이 회전수 상사법칙을 만족하지 못한 것으로 추측된다.

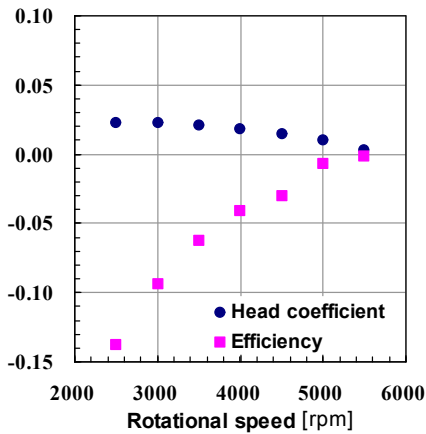


그림 4. 회전수에 따른 산화제펌프의 성능 비교

표 3. 설계유량비에서 산화제펌프의 성능

Index	Head coefficient	Efficiency ratio
1D 해석	1.165	1.007
1D+3D 해석	1.130	1.035
3D 해석	1.067	0.974
시험값	1.138	1.000

바이패스 배관의 곡관부의 차압(PBPd)과 후방 압력(PBPr)을 그림 6에 나타내었다. PBPr은 저유량으로 갈수록 압력이 완만하게 상승하고 있는데, 이는 저유량에서 펌프의 양정(임펠러 토출 압력)이 더 크기 때문이다. 이에 반해 PBPd의 크기는 유량비에 관계없이 대체로 비슷하다. 이는 저유량으로 갈수록 누설 유량이 상대적으로 많아져 곡관부에서의 손실이 증가하기 때문으로 저유량에서의 펌프의 체적 손실이 커지는 것과 관계가 있다.

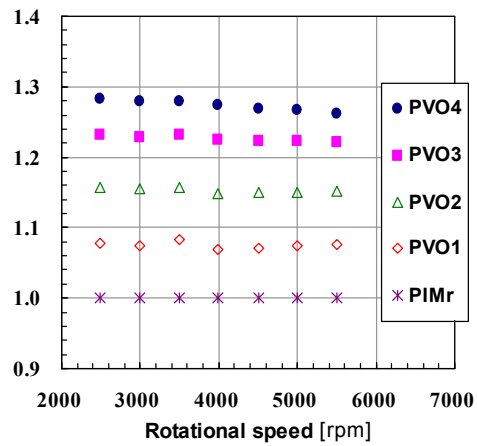


그림 5. 산화제펌프의 볼류트 압력 분포

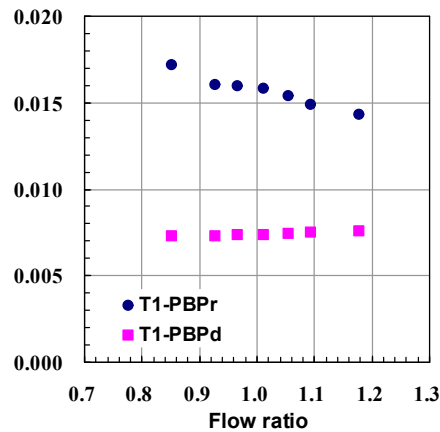


그림 6. 산화제펌프의 이차유로 압력 분포

3.2 흡입성능시험

산화제펌프 흡입성능시험 결과를 표 4와 같이 요약하였다. 흡입성능시험의 기준점(ref)은 시험이 시작되는 시점으로, 임계점(cr)은 기준점 대비 3% 양정 감소가 일어난 시점으로 정의하였다. 산화제펌프의 흡입성능은 유량비가 0.92일 때 가장 안 좋았으며, 나머지 조건에서의 임계 캐비테이션 수는 큰 차이가 없었다. 이러한 경향은 유량비가 작아질수록 흡입성능이 좋아지는 것으로 알려져 있는 일반적인 원심펌프의 경향과는 다른데, 산화제펌프의 이전 개발 모델[5]에서도 이러한 현상이 나타난 바 있다. 그러나 측정된 임계 캐비테이션 수가 실제 엔진에서의 예상 작동 압력(캐비테이션 수)보다 작기 때문에 실제 작동에는 영향이 크지 않을 것으로 보인다.

그림 7은 유량비 1.01에서의 시험에서 나타난 캐비테이션 수에 따른 성능 특성이다. 산화제 펌프의 양정/효율/유량비는 $\sigma = 0.04$ 까지는 거의

표 4. 산화제펌프의 임계 캐비테이션 수

Flow ratio _{ref}	1.008	0.920	0.965	1.095	1.051
Head coefficient _{ref}	1.132	1.153	1.137	1.097	1.109
Cavitation number _{ref}	0.0297	0.0343	0.0286	0.0299	0.0290

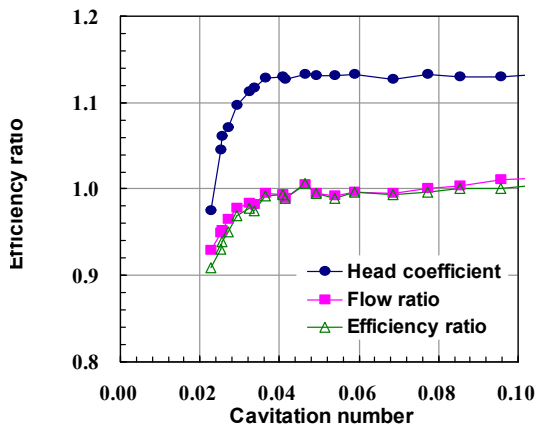


그림 7. 캐비테이션 수에 따른 산화제펌프의 성능

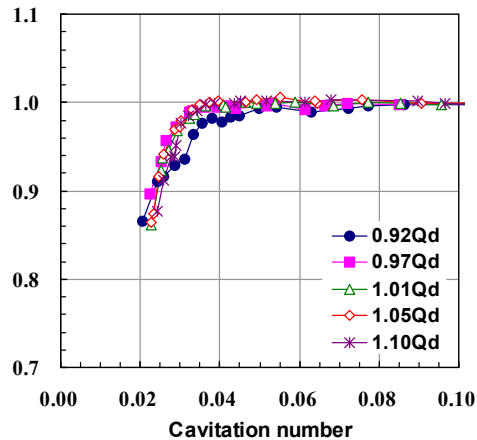


그림 8. 유량비에 따른 흡입성능곡선

변화하지 않다가, 이 이후부터 감소하기 시작한다. 시험 중 양정은 14% 감소하였고, 유량과 효율은 각각 7%와 9% 감소하였다.

그림 8은 유량비에 따른 흡입성능곡선이다 (Qd; 설계유량). 양정 경향을 비교하기 위해 그림의 종축은 기준 양정과 측정 양정의 비율로 표시하였다. 흡입성능이 상대적으로 떨어졌던 유량비가 0.92인 시험의 흡입성능곡선을 보면, $\sigma = 0.05$ 인 지점부근부터 양정이 조금씩 감소하고 있으며 $\sigma = 0.035$ 부근에서 발생하는 양정 감소 역시 다른 경우와는 달리 매우 급격하게 나타난다. 이러한 흡입성능곡선의 차이는 산화제펌프의 양정-유량 관계에도 영향을 주게 되는데 시험 대상이 된 산화제펌프의 경우 $\sigma = 0.02 \sim 0.04$ 인 구간에서 유량이 증가하면서 양정이 증가하는 영역 (positive slope)이 존재한다. 이러한 현상은 일본의 LE-7A 연료펌프의 개발 과정 중 나타났던 현상[6]과 유사한 점이 있다. 그러나 두 현상이 동일한 원인에 의한 것인지 파악하기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다.

그림 9는 유량비가 1.01인 시험 중 후방 베어링 근처 케이싱에서 측정된 가속도의 주파수 분포 중 일부이다. 각 그림에서 별레는 해당 주파수 분포가 나타난 캐비테이션 수이다. 캐비테이션 수에 따라 변화하는 주파수 양상을 살펴보면,

캐비테이션 수가 0.069 근처일 때에는 1x 성분이 두드러지며 1x와 12x 성분이 조금씩 나타난다. 양정/효율/유량비가 감소하기 시작하는 0.041 부근에서는 전체적인 주파수의 크기는 작으나 3x 성분이 탁월주파수로 두드러진다. 이후 캐비테이션 수가 0.033까지 떨어지면 2.3x 성분이 갑자기 증가하며, 양정 감소가 극심해지는 0.023 부근에서는 넓은 범위의 고주파 성분 및 6x 성분이 관찰된다. 임펠러의 주날개 개수가 6개인 것을 고려하면, 임펠러에서의 캐비테이션으로 양정이 감소하는 것으로 추정할 수 있다.

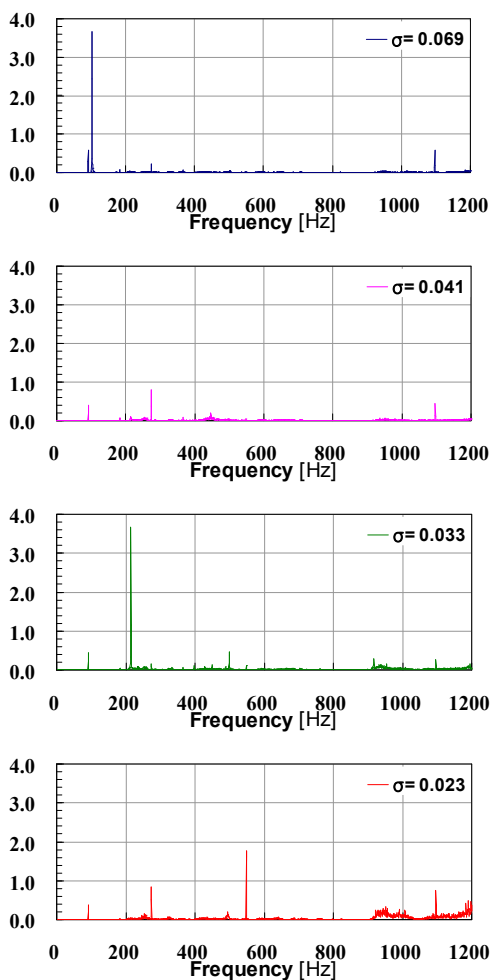


그림 9. 캐비테이션 수에 따른 케이스 진동 스펙트럼

4. 결 론

75톤급 액체로켓엔진용으로 개발 중인 산화제 펌프의 수류시험 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 산화제펌프의 양정계수와 효율은 모두 회전수 상사 법칙을 완전히 만족하지 않았다. 보다 정확한 산화제펌프의 성능을 얻기 위해서는 설계회전수 부근에서의 성능 시험이 필요하다.
- 저회전수에서의 효율 감소는 익히 알려진 기계적 손실 이외의 요인이 있는 것으로 판단되며, 효율 측정 등에 대한 추가적인 검토가 필요하다.
- 산화제펌프의 볼류트 압력 손실은 회전수에 따라 차이가 있었다. 이러한 현상은 양정이 상사 법칙을 만족하지 못했던 것과 관계가 있는 것으로 보인다.
- 산화제펌프 바이패스 배관의 차압 결과로 미루어 보아 펌프의 후방 누설 유량은 유량비와 상관없이 비슷할 것으로 예상된다.
- 유량비 0.92에서 산화제펌프의 흡입성능이 떨어지는 현상이 나타났는데, 이는 이전 산화제펌프 개발 때 있었던 현상과 비슷한 것이다.
- 캐비테이션 수에 따라 펌프 케이스에서 나타나는 탁월주파수의 종류가 달라진다.

참 고 문 헌

1. 김진한, “국내 터보펌프 개발 현황”, 한국추진공학회지, 제12권, 제5호, 2008, pp.73-78
2. 홍순삼, 임현, 김대진, 차봉준, 강정식, 임병준, 김진한, “터보펌프 성능시험 및 평가”, 유체기계저널, 제7권, 제3호, 2004, pp.84-87
3. 김대진, 최창호, 홍순삼, 곽현덕, 김진한, “75톤급 액체로켓엔진용 연료펌프의 수류시험”, 유체기계저널 제14권, 제1호, 2011, pp.61-65
4. 전성민, 곽현덕, 김진한, “터보펌프 볼 베어링의 마찰 토크 평가”, 한국윤활학회 제50회 춘계학술대회 논문집, 2010, pp.67-68

5. 김대진, 홍순삼, 김진선, 김진한, “실매질 시험용 터보펌프의 단품 수류시험”, 항공우주기술 제8권, 제1호, 2009, pp.26-31
6. Shimura, T., Yoshida, M., Kamijo, K., Uchiumi, M., Yasutomi, Y., “A Rotating Stall Type Phenomenon Caused by Cavitation in LE-7A LH2 Turbopump”, JSME International Journal Series B, Vol. 45, No. 1, 2002, pp.41-46