

터보펌프 인듀서에 대한 극저온 성능시험

홍순삼* · 김진선* · 김진한**

Cryogenic Performance Test of a Turbopump Inducer

Soon-Sam Hong* · Jin-Sun Kim* · Jinhan Kim**

ABSTRACT

A test facility was developed where an inducer for a liquid rocket engine turbopump can be tested using liquid nitrogen as a working fluid. At the facility, a hydrodynamic performance test and a cavitation performance test for an oxidizer turbopump were carried out. Head-flow relation at liquid nitrogen test was similar to the case at water test. However, cavitation performance at the liquid nitrogen was superior to the case at water test, which results from the thermodynamic effect of cavitation.

초 록

액체로켓엔진용 터보펌프의 인듀서에 대하여 액체질소를 매질로 하는 성능시험장치를 개발하였다. 그리고 이 시험장치에서 산화제펌프의 인듀서를 대상으로 수력 성능시험 및 캐비테이션 성능시험을 수행하였다. 액체질소를 매질로 하는 경우와 상온의 물을 매질로 하는 경우를 비교하면, 양정-유량의 수력 성능은 두 경우 비슷하였으나, 캐비테이션 성능은 액체질소의 경우가 우수한 결과를 보였다. 이는 캐비테이션의 열역학적 효과로 인한 것이다.

Key Words: Turbopump(터보펌프), Inducer(인듀서), Performance Test(성능시험), Liquid Nitrogen(액체질소), Cavitation(캐비테이션)

1. 서 론

터보펌프는 액체로켓에서 추진제를 연소실로 공급하는 역할을 한다. 높은 양정과 많은 유량이 요구되는 터보펌프의 펌프에서는 주 임펠러 전방에 인듀서를 장착함으로써 압력 상승을 통하

여 캐비테이션 현상을 억제한다. 한국항공우주연구원(이하 항우연)에서는 개발 중인 터보펌프에 [1] 사용될 인듀서에 대한 연구를 계속 수행하여 왔다[2-4].

극저온 유체인 액체산소 펌프의 인듀서에 대한 시험은 시험의 편의를 위하여 보통 상온의 물을 매질로 한다[3-5]. 이 때 양정-유량, 효율-유량 등의 수력 성능에는 매질의 영향이 매우 적지만 캐비테이션 성능에는 매질의 영향이 적지 않다고 알려져 있으며 극저온 유체를 매질로 하

† 2006년 8월 3일 접수 ~ 2006년 12월 5일 심사완료

* 정회원, 한국항공우주연구원 터보펌프팀

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

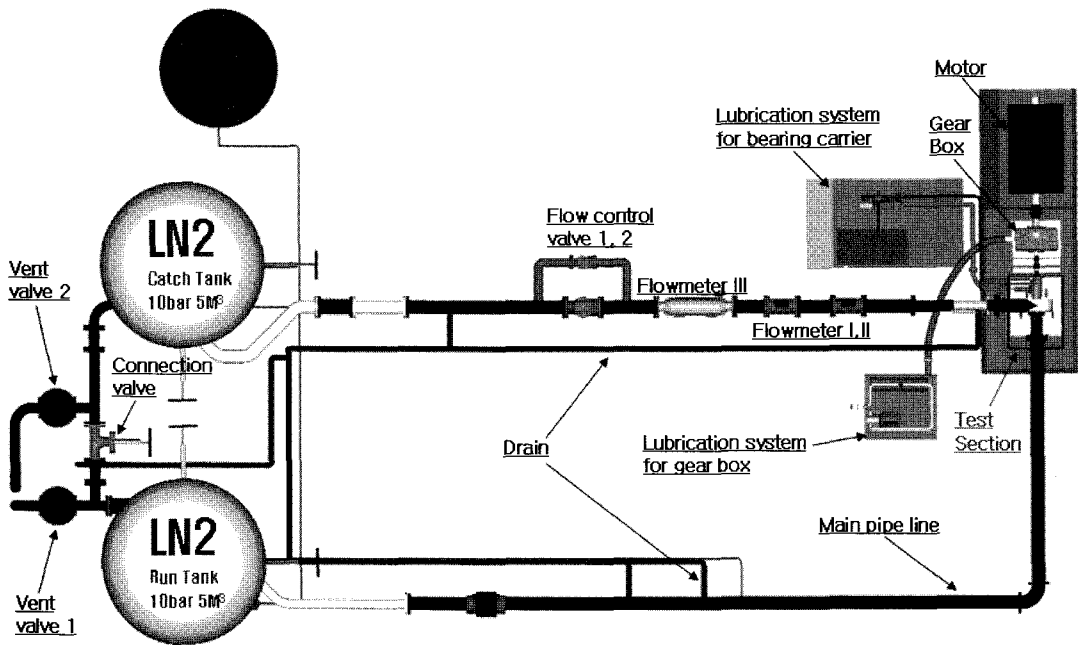


Fig. 1 Cryogenic turbopump test facility

는 경우가 상온의 물을 매질로 하는 경우보다 캐비테이션 성능이 우수하다.

항우연에서는 최근에 극저온 유체인 액체질소(LN2)를 매질로 하는 시험기를 개발하였다[6]. 본 연구에서는 이 시험기에 대한 소개와 함께, 액체산소(LOX) 터보펌프용 인듀서에 대하여 액체질소를 매질로 하는 성능시험 결과를 제시하며 또한 동일한 인듀서에 대하여 상온의 물에서 시험한 결과를 서로 비교한다. 참고로 Table 1에 액체산소, 액체질소, 물의 주요 물성치를 서로 비교하였다.

Table 1. Properties of pump fluids

Item	LOX	LN2	Water
Temperature [K]	90.2	77.4	293
Saturation pressure [MPa]	0.1013	0.1013	0.0023
Density [kg/m ³]	1,140	808	998
Viscosity [N · s/m ²]	1.96×10^{-4}	1.63×10^{-4}	1.01×10^{-3}
Kinematic viscosity [m ² /s]	1.72×10^{-7}	2.02×10^{-7}	1.01×10^{-6}

2. 시험장치

항우연에서 개발한 극저온 펌프 성능시험장치에서는 액체질소를 매질로 하여 인듀서와 펌프에 대한 수력 성능시험 및 흡입 성능시험이 가능하다. Fig. 1은 극저온 시험설비의 전체 개략도를 보여주고 있다. 액체질소는 공급탱크(Run tank)에서 시험부(Test Section)를 거쳐 회수탱크(Catch Tank)로 흐른다. 시험 후 액체질소를 회수탱크에서 공급탱크로 다시 보내어 새로운 시험이 이루어진다. 액체질소를 저장하는 두 개의 이중진공 단열 질소탱크는 각각 5 m³의 용량으로 최대 10bar까지 가압이 가능하다. 이 두 탱크의 가압은 기체질소(GN2)저장탱크에 의해 이루어진다. 주배관은 4 인치이며 모두 이중진공 단열을 사용하여 외부와의 열전달을 억제하였다.

유량 측정의 정확도를 높이고자 시험부 하류에 세 개의 유량계를 직렬로 설치하였다. 이 중에서 전방에 위치하는 두 개는 터빈식 유량계로 최대 78 L/s까지 측정이 가능하며, 세 번째 유량

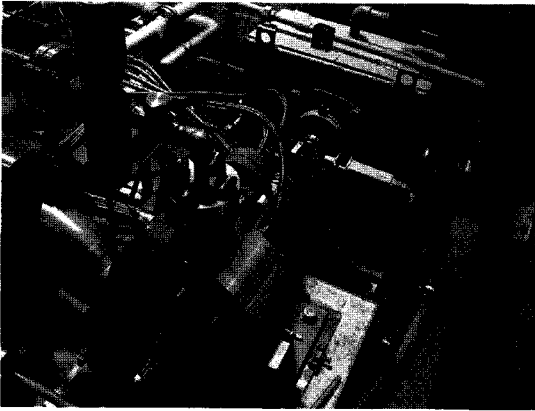


Fig. 2 Test section and speed increaser

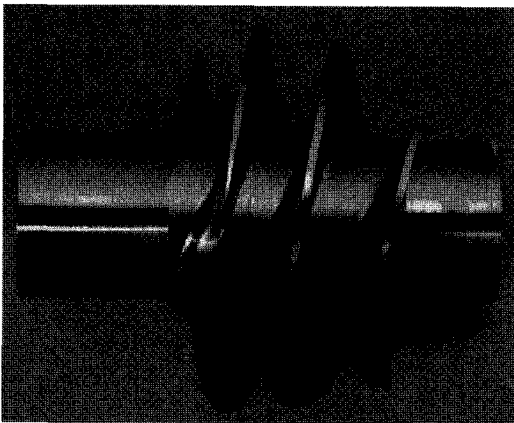


Fig. 3 Test inducer

계는 코리올리형 질량 유량계로 37.8 kg/s까지 측정이 가능하다. 유량계 하류에는 4 인치와 1 인치인 공압식 글로브밸브 두 개를 두어 세밀한 유량조절이 가능하도록 하였다.

Figure 2는 인듀서가 장착된 컬렉터, 토크미터, 증속기가 왼쪽 하단에서 오른쪽 상단으로 배치되어 있으며 증속기 뒤에 모터가 일부 보인다. 모터는 최대 동력이 320 kW 이고 최고 속도 1782 rpm까지 연속적으로 조절이 가능하고, 증속기를 거쳐 인듀서를 최대 30,650 rpm으로 회전시킬 수 있다.

시험에 이용된 인듀서는 현재 항우연에서 개발 중인 터보펌프의 산화제펌프 인듀서의 기본이 되는 형상이다. 시험모델의 형상과 제원을

Table 2. Inducer geometry and operating condition

Item	Specification
Flow coefficient	0.096
Inlet hub/tip diameter ratio	0.426
Outlet hub/tip diameter ratio	0.488
Inlet back sweep angle [°]	20
Tip solidity	2.75
Blade number	3
Tip clearance [mm]	1
Rotational speed [rpm]	5000~8000

Fig. 3과 Table 2에 제시하였다. Fig. 3에서 유체는 왼쪽에서 오른쪽으로 흐른다. 인듀서 날개의 개수는 세 개이고, 인듀서 날개와 케이싱간의 간극은 1 mm이며, 시험은 회전수 5000~8000 rpm 영역에서 이루어졌다.

3. 시험결과 및 고찰

3.1 액체질소에서의 인듀서 성능

액체질소에서 측정된 인듀서의 양정과 유량을 Fig. 4에 제시하였다. 시험은 5000~8000 rpm 범위의 네 가지 회전수에서 이루어졌다. 회전수가 높을수록 양정은 높으며, 각 회전수에서 양정은 유량이 증가하면서 선형적으로 감소하는 경향을 보였다.

Figure 5에는 Fig. 4의 시험결과를 무차원으로 표시하였다. 무차원 성능 파라미터인 양정계수 ψ 와 유량계수 ϕ 의 정의는 다음과 같다.

$$\phi = Q / (A_1 U_{1t}) \quad (1)$$

$$\psi = H / (U_{1t}^2 / 2g) \quad (2)$$

여기서, Q 는 유량, A_1 은 인듀서의 입구단면적, U_{1t} 는 입구 날개팁 속도, H 는 컬렉터 출구에서 측정한 전양정을 의미한다. Fig. 5를 보면, 네 가지 회전수에서 양정계수와 유량계수가 한 곡선으로 표현되는 것을 알 수 있다. 즉, 수력 성능의 경우에 시험된 회전수 범위에서 회전수 상사

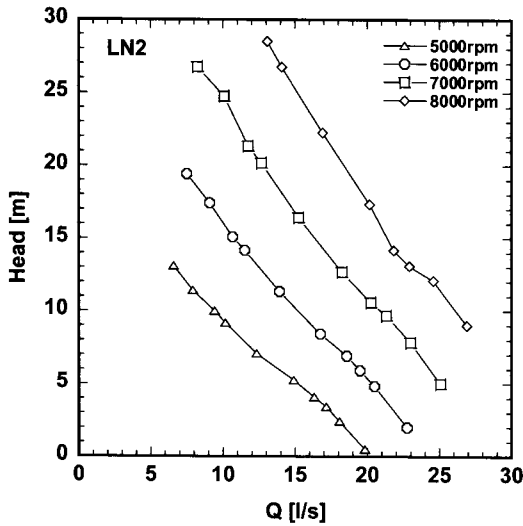


Fig. 4 Head vs. flow rate at LN2 test

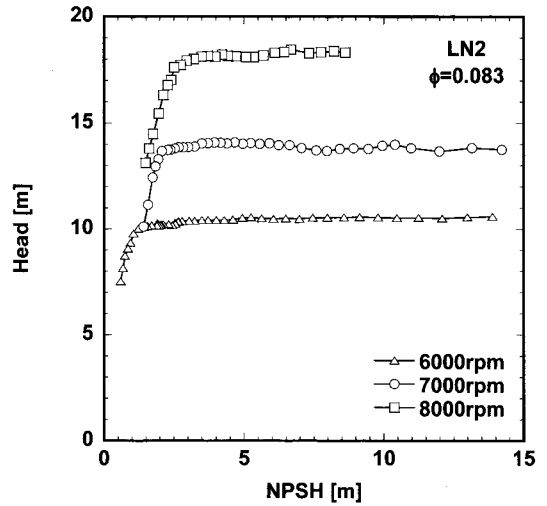


Fig. 6 Head vs. NPSH at LN2 test

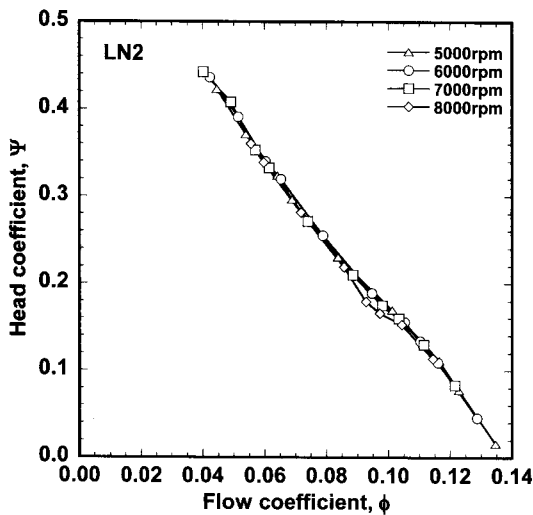


Fig. 5 Head coefficient vs. flow coefficient at LN2 test

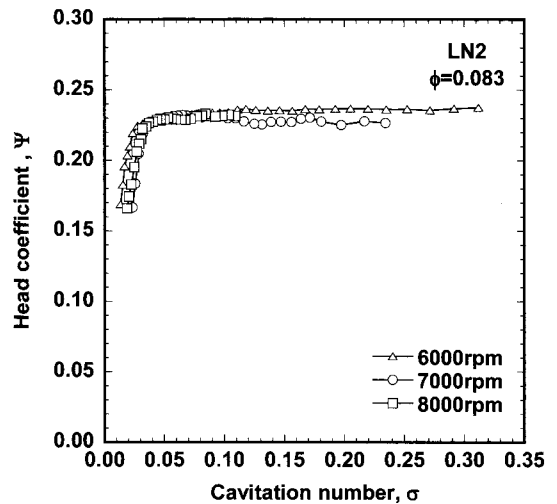


Fig. 7 Head coefficient vs. cavitation number at LN2 test

가 잘 이루어지고 있는 것이다. 또한 이는 본 시험의 측정 정확도를 간접적으로 보여주고 있다.

액체질소에서 측정된 인두서의 캐비테이션 특성 곡선을 Fig. 6에 제시하였다. 6000~8000 rpm 범위의 세 가지 회전수에서 시험이 이루어졌으며 이때의 유량계수는 0.083으로 하였다. 회전수가 높을수록 양정은 높으며 캐비테이션으로 인한 양정 강하가 발생하는 NPSH가 높다. 여기서

NPSH는 유효흡입양정 (Net Positive Suction Head)으로서, 인두서 입구 배관위치에서 유체의 전압력과 유체의 포화증기압력의 차이이다. NPSH가 감소하면서 캐비테이션이 점차 많이 발생하여 인두서 양정이 조금씩 감소하게 되며 어느 값 이하로 NPSH가 감소하면 양정은 급격히 저하된다. 보통 인두서에서는 캐비테이션이 발생하지 않을 때의 양정을 기준으로 양정이 30%

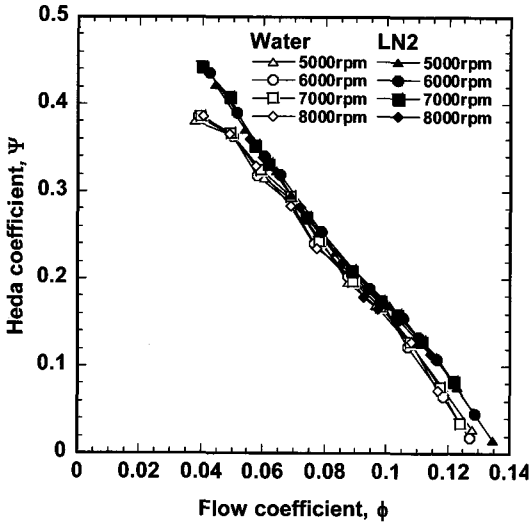


Fig. 8 Comparison of hydrodynamic performance of LN2 test with water test

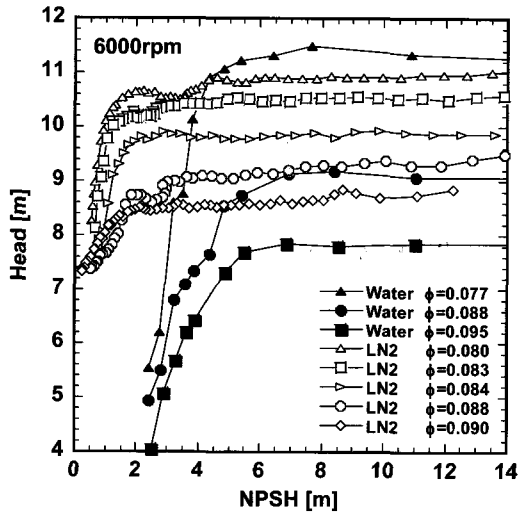


Fig. 9 Comparison of cavitation performance of LN2 test with water test

(적게는 10%, 많게는 50%) 저하되는 지점의 NPSH를 임계 NPSH로 본다. Fig. 7에는 Fig. 6의 시험결과를 무차원으로 표시하였다. 캐비테이션수 σ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\sigma = NPSH / (U_{1t}^2 / 2g) \quad (3)$$

Figure 7을 보면, 세 가지 회전수에서 양정계수와 캐비테이션수가 한 곡선으로 표현되는 것을 알 수 있다. 캐비테이션 성능의 경우에도 시험된 회전수 범위에서 회전수 상사가 비교적 잘 이루어지고 있다.

3.2 액체질소 시험과 물시험 결과 비교

항우연에는 액체질소를 매질로 하는 인듀서 성능시험장치뿐 아니라 상온의 물을 매질로 하는 인듀서 성능시험장치 [3, 4]도 있다. 동일한 인듀서에 대하여 두 가지 매질, 즉 액체질소와 상온의 물에서 시험된 인듀서의 성능을 비교하여 보았다.

두 매질에서의 수력 성능 시험결과를 Fig. 8에 나타내었다. 네 가지 회전수에서 무차원으로 표시된 양정-유량 곡선을 보면 전반적인 영역 ($\phi = 0.07 \sim 0.1$)에서 거의 동일한 양정특성을 보인다. 저유량 및 고유량 영역에서는 다소 차이가 있었는데, 이는 유체의 점도에 대한 차이가 있기 때문인 것으로 사료된다. 액체질소의 경우 물에 비하여 낮은 점도를 가지므로 입구에서 예선회(pre-swirl)가 더 적고, 따라서 양정이 더 큰 것으로 판단된다.

두 매질에서 캐비테이션 성능시험 결과를 Fig. 9에 제시하였으며 시험 회전수는 6,000 rpm이다. 동일 유량계수에서 비교할 때 물시험에 비하여 액체질소 시험의 경우가 캐비테이션 성능이 훨씬 우수한 결과를 보임을 알 수 있다 (예를 들면, 유량계수 0.088에서 양정이 10% 강하되는 NPSH가 물시험의 경우는 약 4.5 m이고 액체질소의 경우는 약 1.5 m이다). 즉, 액체질소시험의 경우에 더 낮은 NPSH에서 양정강하(head breakdown)가 발생하고 있으며 이는 두 매질의 물성치 차이로 인해 발생한다. 이를 보통 캐비테이션의 열역학적 효과라고 부르며 이 효과를 부연설명하면 다음과 같다. 인듀서 입구 날개 부근에서 캐비테이션이 진행되어 발생하는 기포는 주위 압력이 포화증기압 이하로 되면서 액체가 증발하여 생성된다. 액체가 증발하면서 열을 빼앗아 가기 때문에 액체 온도가 저하되고 따라서

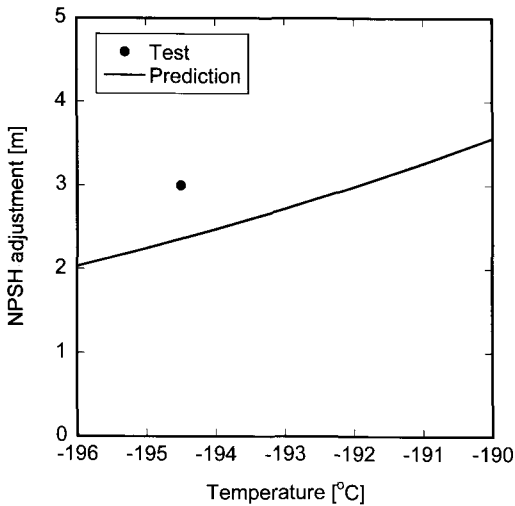


Fig. 10 NPSH adjustment at LN2 test

포화 증기압도 감소하게 되어 캐비테이션 발생이 억제되는 효과를 가져오게 되며 이를 캐비테이션의 열역학적 효과라고 한다. 액체질소의 경우 온도 저하에 따른 포화증기압 저하가 크기 때문에 열역학적 효과가 크며, 상온의 물에서는 온도 저하에 따른 포화증기압 감소가 상대적으로 매우 작기 때문에 액체질소에 비하면 열역학적 효과가 무시할 만하다.

동일한 펌프에 대하여 매질이 바뀌면 열역학적 효과로 인하여 캐비테이션 성능이 바뀌게 되는데 이 때 기준이 되는 매질로는 보통 상온의 물을 사용하며, 기준 대비 향상된 캐비테이션 성능, 즉 임계 NPSH 감소량을 NPSH 교정량(NPSH adjustment)이라고 한다. Stepanoff[7]는 몇 가지 액체에 대한 3,500 rpm 회전수의 펌프 시험결과로부터 경험식을 도출하였으며, 본 인듀서 시험에 이 경험식을 적용하여 Fig. 10에 제시하였다. 이 그림에서 경험식[7]으로 예측된 결과를 실선으로 표시하였고 본 연구의 시험결과를 한 점 (온도는 -194.5°C , NPSH 교정량은 3 m)으로 표시하였다. 10% 양정강하점을 임계NPSH로 볼 때 Fig. 9로부터 유량계수 0.088에서 물시험의 경우는 임계 NPSH가 약 4.5 m이고 액체질소의 경우는 약 1.5 m이다. 따라서 NPSH 교정

량은 약 3 m이다. 경험식은 온도의 함수이며 온도가 증가하면 캐비테이션 성능이 향상된다. Fig. 10에서 보면 시험값이 예측값보다 더 크다. 그 이유는 시험의 경우 회전수가 6,000 rpm으로서 경험식의 3,500 rpm보다 더 크며 따라서 캐비테이션 성능이 더 좋아진 것으로 판단된다.

4. 결 론

액체로켓엔진용 터보펌프의 산화제펌프 인듀서에 대하여 액체질소를 매질로 하여 성능시험을 수행하였으며 주요 시험 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 액체질소에서도 상온의 물시험과 마찬가지로 인듀서의 양정-유량 성능 특성이 회전수 상사 법칙을 잘 만족시켰다.

둘째, 인듀서의 양정은 액체질소를 매질로 하는 경우와 물을 매질로 하는 경우가 서로 비슷하였으며 저유량과 고유량에서는 액체질소의 경우에 양정이 더 높았다.

셋째, 캐비테이션 성능은 액체질소를 매질로 하는 경우가 물을 매질로 하는 경우보다 우수하였으며 (6,000 rpm, 유량계수 0.088에서 액체질소의 임계 NPSH가 물시험 경우의 1/3 수준임) 이는 캐비테이션의 열역학적 효과 때문이다.

참 고 문 헌

1. 김진한, 홍순삼, 정은환, 최창호, 전성민, "30톤급 액체로켓엔진용 터보펌프 개발현황," 한국추진공학회 추계학술대회 논문집, 2005, pp.375-383
2. 홍순삼, 김대진, 김진선, 최창호, 김진한, "터보펌프의 수력 성능시험," 한국추진공학회 춘계학술대회 논문집, 2005, pp.243-247
3. 홍순삼, 김진선, 최창호, 김진한, "터보펌프 인듀서의 비정상 캐비테이션에 관한 실험적 연구," 유체기계저널, 제8권 1호, 2005,

pp.23-29

4. 홍순삼, 구현철, 차봉준, 김진한, "터보펌프 인듀서의 출구 유동 및 성능 특성," 유체기계저널, 제6권 4호, 2003, pp.38-44
5. Tsujimoto, Y., Yoshida, Y., Maekawa, Y., Watanabe, S., Hashimoto, T., "Observations of Oscillating Cavitation of an Inducer," ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 119, 1997, pp.775-781
6. 김진선, 홍순삼, 김진한, "액체질소를 이용한 터보펌프 인듀서의 수력성능시험," 유체기계연구개발 발표회 논문집, 2005, pp.348-353
7. Stepanoff, A. J., Pumps and Blowers, John Wiley & Sons, Inc., 1965