

Technical Paper

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2016.20.6.091>

## 유체점성에 따른 원심형 터보펌프 효율에 관한 실험적 연구

김진선<sup>a</sup> · 최창호<sup>a</sup> · 고영성<sup>b,\*</sup>

### Experimental Study on Fluid Viscosity Effects for Centrifugal Turbopump Efficiency

Jin-Sun Kim<sup>a</sup> · Chang-Ho Choi<sup>a</sup> · Youngsung Ko<sup>b,\*</sup>

<sup>a</sup>Turbopump Department, Korea Aerospace Research Institute, Korea

<sup>b</sup>Department of Aerospace Engineering, Chungnam National University, Korea

\*Corresponding author. E-mail: [yoko5@cnu.ac.kr](mailto:yoko5@cnu.ac.kr)

#### ABSTRACT

Efficiency characteristics of centrifugal turbopumps for a liquid rocket engine were investigated. Predicting the performance of pumps for a turbopump assembly test, the variation on pump efficiency by working fluids was analyzed from pump component tests. Water and liquid nitrogen (LN2) were used for the component test, kerosene (Jet A-1) and liquid oxygen (LOX) were adapted for the turbopump assembly (TPU) test as working fluids. Overall performance of the pumps was investigated covering design/off-design operating points and the pump efficiency on the environment of real media (LOX/kerosene) could be modified from the pump component tests.

#### 초 록

액체로켓엔진에 적용되는 원심형 터보펌프의 효율특성을 실험적으로 고찰하였다. 펌프 단품에 대한 시험결과를 토대로 터보펌프 조립체의 성능을 예측하면서 시험매질에 따른 펌프의 효율특성에 대한 변화를 분석하였다. 펌프에 적용된 작동유체로 단품시험을 위해서는 상온 청수와 액체질소, 터보펌프 조립체 시험에서는 케로신(Jet A-1)과 액체산소(LOX)가 적용되었다. 설계점과 탈설계점 영역을 포함하는 전반적인 작동조건에 대하여 펌프의 효율특성을 파악하였고, 단품시험으로부터 실매질 환경에서 보정된 펌프효율을 구할 수 있었다.

Key Words: Centrifugal Pump(원심형 펌프), Efficiency(효율), Viscosity(점성), Kerosene(케로신), Liquid Oxygen(액체산소)

Received 18 June 2016 / Revised 9 November 2016 / Accepted 13 November 2016

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

[이 논문은 한국추진공학회 2016년도 춘계학술대회(2016. 5. 25-27, 제주 사인빌리조트) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

#### Nomenclature

$A_1$  : pump inlet cross-section area

$C_p$  : specific heat at constant pressure

$c_{ad}$  : adiabatic gas velocity  
 $f_q$  : impeller eyes per impeller;  
 single-entry  $f_q=1$ , double-entry  $f_q=2$   
 $f_\eta$  : correction factor for efficiency  
 $g$  : acceleration due to gravity  
 $H$  : head per stage  
 $k$  : ratio of specific heat,  $k = C_p/C_v$   
 $\dot{m}$  : mass flow rate  
 $N$  : rotational speed  
 $N_d$  : design rotational speed  
 $n_s$  : specific speed  
 $P_{ad}$  : adiabatic available power  
 $P_s$  : shaft power  
 $P_{TB}$  : turbine power  
 $P_h$  : hydraulic power  
 $PR$  : turbine pressure ratio  
 $p_t$  : total pressure  
 $p_b$  : back pressure  
 $Q$  : useful volumetric flow rate  
 $Q_d$  : design volumetric flow rate  
 $Re$  : Reynolds number  
 $Re_{mod}$  : modified Reynolds number  
 $r_1$  : inducer inlet radius  
 $r_2$  : impeller outer radius  
 $T$  : torque  
 $T_t$  : total temperature  
 $TIP$  : turbine inlet pressure  
 $TIT$  : turbine inlet temperature  
 $U_{1t}$  : pump inducer inlet tip speed  
 $U_{2t}$  : pump impeller outer tip speed  
 $u$  : turbine rotor tip speed  
 $\omega_s$  : dimensionless specific speed  
 $z_{st}$  : number of stages  
 $\eta$  : overall efficiency  
 $\eta_a$  : efficiency for changed  $\nu$  or  $N$   
 $\eta_M$  : efficiency at water test ( $Re_{mod} = 10^7$ )  
 $\eta_{Nd}$  : overall efficiency at  $N_d$   
 $\eta_{FP}$  : fuel pump efficiency  
 $\eta_{OP}$  : oxidizer pump efficiency  
 $\eta_{TB}$  : turbine efficiency  
 $\mu$  : absolute(dynamic) viscosity

$\nu$  : kinematic viscosity,  $\nu = \mu/\rho$   
 $\rho$  : density  
 $\phi$  : flow coefficient  
 $\phi_d$  : design flow coefficient  
 $\psi$  : head coefficient  
 $\omega$  : angular rotor velocity

## 1. 서 론

한국형발사체(KSLV-II)의 액체로켓엔진은 모두 터보펌프방식을 채택한 개방형 엔진시스템이다. 터보펌프는 산화제펌프와 연료펌프를 터빈으로 구동하여 고압의 추진제를 연소기에 공급한다. 액체로켓엔진에서는 공급유량 대비 양정이 높은 원심형 펌프(centrifugal pump)가 주로 사용된다 [1]. 설계/제작된 펌프는 단품시험으로 그 성능을 파악하는데, 시험설비 용량과 비용절감 등으로 통상 설계회전수보다 낮은 회전수의 시험결과로 상사성을 고려하여 설계회전수의 성능을 유추하게 된다[2,3]. 단품시험에서는 주로 상온 청수를 작동유체로 사용하는 것이 보편적이다. 하지만 위에 언급된 유사 시험조건에서 회전수와 작동유체가 실제 운전조건과 상이함으로 인하여 펌프의 실제(실매질을 적용한 설계회전수 조건) 성능특성은 유사 시험 시와의 특성과 차이가 있다. 이러한 특성은 터보펌프 조립체 시험이나 엔진 시스템 성능시험에서 동력균형의 불일치로 나타나 정확한 작동점을 설정하는 데에 오차를 발생시키게 된다[4,5].

이러한 문제점을 극복하기 위해서 단품시험에서부터 유사매질이나 실매질을 이용하려는 실험적 노력들이 기울어져 왔다[6-8]. 하지만 시험설비 운용상의 어려움과 개발일정 등을 고려하면 펌프단품에 대해 실매질 전수시험을 수행하는 성능검증은 현실적으로 매우 어렵다. 때문에 유사매질을 통한 시험으로 펌프의 성능을 보정하는 해석적, 실험적 방법들에 대한 많은 연구가 이루어져 왔다[9-12]. 본 연구에서는 단품시험에서 얻어진 펌프의 성능결과로부터 실제 운용회전수와 실매질 환경에서 펌프의 효율을 추정하

기 위한 실험적 연구결과를 소개한다.

## 2. 터보펌프 시험설비

### 2.1 극저온 펌프 단품 시험설비

펌프의 단품시험에서 실패질 환경과 유사한 조건으로 펌프의 성능을 확인하고 내구성을 검증할 필요가 있다. 산화제펌프를 위해 액체산소(liquid oxygen, LOX)와 물리적 성질이 유사하고, 상대적으로 안전한 액체질소(liquid nitrogen, LN2)를 작동유체로 하는 극저온 펌프 시험설비(cryogenic pump test facility)가 본 연구에 활용되었다. Fig. 1에서 극저온 펌프 시험설비의 구성을 보여주고 있다. 공급부에서는 공급탱크에 확보된 시험유체를 시험요구조건(온도 및 압력)에 맞게 시험펌프에 공급한다. 회수부에서는 펌프출구 오리피스를 거쳐 감압된 유체를 회수탱크가 전량 회수할 수 있도록 하였다. 액체질소의 공급/회수탱크는 각각 5 m<sup>3</sup>의 초저온 진공탱크로 구비되어 공급라인 냉각과 추진제 공급 및 공급압력 조절을 가능하게 한다. 시험베드에서는 전기모터(320 kW)와 기어박스를 통하여 시험회전수를 조절하면서 토크미터로 펌프에 전달되는 축동력(*shaft power, P<sub>s</sub>*)을 측정하게 된다. 극저온 환경에서 펌프의 정확한 성능분석을 위해 온도센서는 모두 RTD 타입(PT-100)을 사용하였고, 터빈 유량계와 질량 유량계를 이중으로 설치하여 측정된 체적유량의 정확성을 높였다[6].

### 2.2 터보펌프 조립체 실패질 시험설비

터보펌프 실패질 시험설비는 조립체 상태에서 시스템 성능을 검증하기 위한 설비이다. 터보펌프 조립체(turbopump assembly, TPU)는 각 단품에서 개별적으로 성능이 확인된 산화제펌프와 연료펌프를 구동부인 터빈과 연계한 시스템이다. Fig. 2에서 실패질 시험설비의 기본구성을 보여주고 있다.

터보펌프 실패질 시험설비는 실추진제인 액체산소(LOX)와 케로신(kerosene)을 75톤급 액체로켓엔진의 설계유량에서 최대 280초 동안 연속적

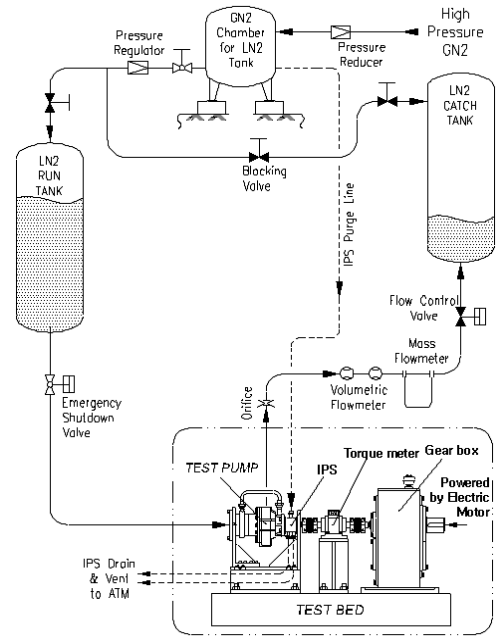


Fig. 1 Schematic diagram of cryogenic (LN2) pump test facility.

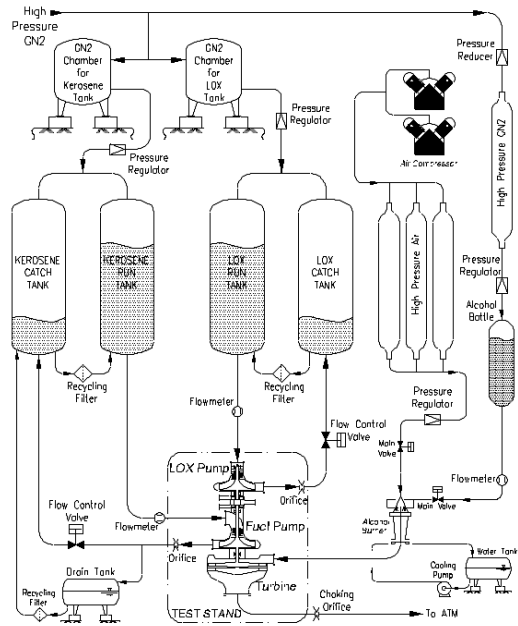


Fig. 2 Schematic diagram of turbopump real-propellant (LOX/kerosene) test facility.

으로 공급/회수처리 할 수 있는 용량(산화제탱

크: 2×70 m<sup>3</sup>, 연료탱크: 2×50 m<sup>3</sup>)을 확보하고 있다. 산화제탱크의 경우 액체산소와 액체질소를 치환하여 공급할 수 있으며, 케로신의 경우는 펌프로부터 토출되는 연료가 전량 회수탱크에 수집된다. 회수된 연료는 재생용 미세필터(10 μm)를 통해 이물질 제거과정을 거쳐 반영구적으로 재사용할 수 있도록 하였다[13].

터보펌프 조립체 시험에서 구동력을 생성시키기 위해 실제 액체로켓엔진에 장착된 가스발생기(gas generator, GG)의 역할을 대신하면서 반영구적으로 사용할 수 있는 고유량(6 kg/s, 900 K) 알코올버너가 사용되었다. 2기의 알코올버너를 동시 점화하여 운용함으로써, 설계점 및 탈설계점을 포함한 터보펌프의 전반적인 운용영역에 대하여 75톤급 터보펌프가 요구하는 동력이 공급될 수 있도록 시험설비를 구성하였다[14].

### 3. 시험결과

#### 3.1 시험펌프 규격 및 시험유체의 물리적 특성

본 연구를 수행하기 위해 총 3종(산화제펌프 2종, 연료펌프 1종)의 펌프가 사용되었으며, 두 시험설비를 이용하여 펌프 단품(pump component) 및 터보펌프 조립체 시험이 이루어졌다. Fig. 3에서 시험펌프(pump A)인 원심형 펌프의 전형적인 내부구조를 보여주고 있다. 인듀서(inducer)와 임펠러(impeller)가 일축선상에서 조립되며, 내부 누설량을 최소화 하기 위한 플로팅 링 씬(floating ring seal)이 임펠러 쉬라우드 전후로 위치한다. 임펠러 씬(impeller seal)은 베어링 냉각을 위한 유체가 작동 중에 외부로 누설되지 않도록 하며, 헬륨(helium, He) 또는 질소(GN2) 퍼지는 터보펌프 조립체 상태에서 산화제와 연료의 혼합을 억제한다. 펌프의 전/후방 베어링은 모두 볼베어링 타입이며, 모든 펌프는 작동유체로 자체 윤활(self-lubrication)과 냉각이 이루어진다.

Table 1에 시험펌프에 대한 주요 설계특성과 함께 시험매질 및 시험회전수 등을 제시하였다. 펌프 단품시험에서 상온 청수에 대한 성능시험

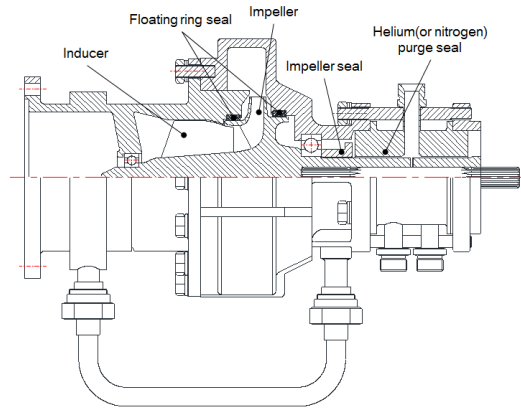


Fig. 3 Shape of centrifugal pump (pump A).

Table 1. Main design characteristics of test pumps.

Test model	Pump A	Pump B	Pump C
Engine Class	30ton	75ton	75ton
Real-propellant	Liquid oxygen, LOX	Liquid oxygen, LOX	Kerosene (Jet A-1)
Design specific speed, $n_s$	27.9 rpm,m <sup>3</sup> /s,m	27.2 rpm,m <sup>3</sup> /s,m	13.8 rpm,m <sup>3</sup> /s,m
Design flow coefficient, $\phi_d$	0.0917	0.0943	0.0945
Diameter ratio, $D_{1t,inducer}/D_{2t,impeller}$	0.70	0.75	0.53
Number of stages, $z_{st}$	1	1	1
Test fluid	Water* LN2*	Water* LOX**	Water* Jet A-1**
Test speed, rpm	7.0~10x10 <sup>3</sup> *	2.0~6.0x10 <sup>3</sup> * 1.0~1.1x10 <sup>4</sup> **	2.0~6.0x10 <sup>3</sup> * 1.0~1.1x10 <sup>4</sup> **

\*Component Test, \*\*Turbopump Assembly(TPU) Test

Table 2. Properties of pump fluids.

Test fluid	Water	Jet A-1	LN2	LOX
Pressure (MPa)	0.1013	0.1013	0.1013	0.1013
Temperature (K)	293	293	77.4*	90.2*
Density (m <sup>3</sup> /kg)	998.2	792.6	806.1*	1141.2*
Absolute viscosity (Pa·s)	1.002×10 <sup>-3</sup>	1.274×10 <sup>-3</sup>	1.607×10 <sup>-4</sup> *	1.958×10 <sup>-4</sup> *
Kinematic viscosity (m <sup>2</sup> /s)	1.004×10 <sup>-6</sup>	1.607×10 <sup>-6</sup>	1.993×10 <sup>-7</sup> *	1.716×10 <sup>-7</sup> *

\*Properties at Saturated Condition

을 수행하였으며, 펌프 A에 대해서는 액체질소를 이용하여 동일펌프에 대해 상온과 극저온 환경에서 성능변화를 추가적으로 분석하였다. 터보펌프 조립체 시험에서는 펌프 B와 C에 대한 실험매질(liquid oxygen/kerosene) 환경에서 펌프의 성능특성을 최종적으로 파악하여 상온 청수를 이용한 펌프 단품의 시험결과와 비교/분석함으로써 시험유체에 따른 성능변화에 대한 경향을 도출하였다.

Table 2에서는 본 시험에 사용된 시험매질에 대한 대표적인 물성치를 제시하였다. 상온 청수(water)와 케로신(Jet A-1)의 경우는 상온(대기압) 조건에서, 액체질소와 액체산소의 경우는 대기압 조건의 포화상태(saturated condition)에서 유체의 밀도와 점성(viscosity)을 열거하였다. 유체의 밀도가 고려된 동점성 계수(kinematic viscosity)의 관점에서 상온 청수보다 Jet A-1의 경우 1.6 배 이상 높은, 극저온 유체인 액체질소나 액체산소의 경우는 5배 이상 낮은 점성을 가진다. 이 차이는 결국 펌프 내부에서 동력손실의 차이로 이어져 펌프 전체효율의 변화를 가져온다.

3.2 펌프 단품에 대한 상온 및 극저온 수력성능시험

펌프 단품의 성능을 파악하기 위해 먼저 30톤 산화제펌프(pump A)를 이용하여 상온 청수에 대한 수류시험과 액체질소를 이용한 극저온 수력성능시험을 수행하였다. 두 가지 매질에 대한 펌프 A의 단품시험에서 시험회전수 차이에 대한 영향을 최소화하기 위해 가급적 유사한 시험회전수 영역( $N=7,000 \sim 10,000$  rpm)을 선정하여 성능시험을 수행하였다. 액체질소를 이용한 극저온 시험의 경우는 설계유량( $\phi_d=0.0917$ )을 포함하여 최대한 넓은 유량비( $\phi/\phi_d=0.6 \sim 1.25$ )에 대한 펌프의 성능특성을 확인하였다. Fig. 4와 5에 시험결과를 도시하였으며, 펌프의 성능과 관련된 무차원 변수인 유량계수( $\phi$ ), 양정계수( $\psi$ ), 효율( $\eta$ ) 및 레이놀즈수(Reynolds number,  $Re$ )에 대한 정의는 Eq. 1~4에 제시하였다.

$$\phi = \frac{Q}{A_1 U_{1t}} \tag{1}$$

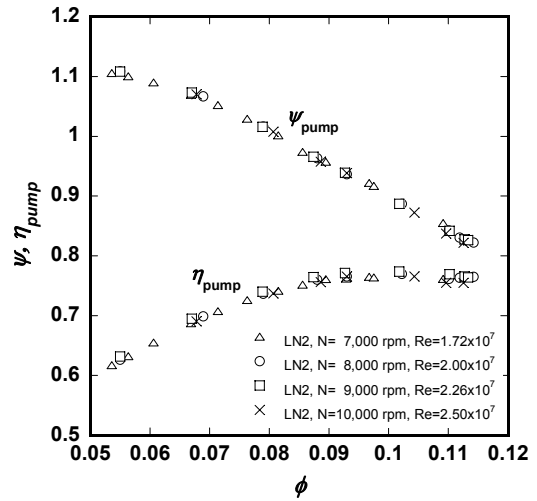


Fig. 4 Overall performance of pump A (LN2 test).

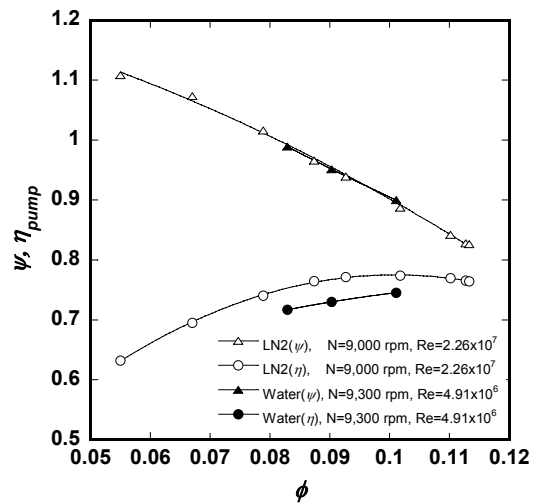


Fig. 5 Performance comparison of pump A for LN2 & water test.

$$\psi = \frac{H}{U_{2t}/2g}, \quad H = \Delta p_t / \rho g \tag{2}$$

$$\eta_{pump} = \frac{P_h}{P_s} = \frac{\rho g H Q}{\omega T} \tag{3}$$

$$Re = \frac{\rho U_{2t} r_2}{\mu} = \frac{\omega r_2^2}{\nu} \tag{4}$$

액체질소를 이용한 시험결과에서 펌프의 양정(head coefficient,  $\psi$ )이나 효율(efficiency,  $\eta$ )은 수행된 시험영역에 대해 Fig. 4와 같이 회전수에 의한 영향이 거의 없이 펌프성능의 상사성(similarity)을 보이는 것으로 나타났다. Fig. 5는 상온 청수를 이용한 펌프의 성능특성과 비교한 결과이다. 양정특성에서 작동유체의 차이로 인한 성능변화는 관찰되지 않았지만, 효율특성에서는 극저온 유체(LN2)를 사용하는 경우, 약 3% ( $\phi_d = 0.0917$ ) 내외로 상승하는 것을 볼 수 있다. Kamijo의 연구결과에서는 이러한 극저온 유체에 대한 효율변화의 원인으로 시험매질에 대한 점성(kinematic viscosity,  $\nu$ )의 차이에 의한 영향이 지배적인 것으로 판단하고 있다[9]. Table 2에서 제시한 것과 같이 극저온 유체인 액체질소는 상온 청수에 비하여 1/5 정도의 낮은 점성을 가지고 있다. 펌프의 작동과정에서 낮은 유체점성은 회전하는 임펠러 쉬라우드와 고정된 펌프 케이싱 내부면 사이에서 발생하는 원판마찰손실(disk friction loss)을 줄이는 효과를 보이게 된다. 결과적으로 상온 청수에 비하여 액체질소의 경우, 펌프 구동을 위한 상대적으로 낮은 축동력이 요구되어 펌프의 효율을 상승시키게 한다.

### 3.3 펌프 단품과 조립체 실험매질 시험에서 효율변화

펌프 B와 C에서는 상온 청수를 이용한 단품의 수력성능과 실험매질(LOX/Jet A-1)에 대한 조립체 성능시험결과를 비교/분석하였다. 두 펌프는 각각 75톤급 액체로켓엔진에 적용되는 산화제펌프(LOX pump)와 연료펌프(fuel pump)이다. Fig. 6에 상온 청수를 시험매질로 하는 단품 성능시험에서 레이놀즈수 증가(회전수 상승)에 따른 펌프 효율의 변화를 나타내었다. 펌프의 레이놀즈수(회전수)가 증가할수록 펌프의 효율이 증가하다가 회전수 증가에 관계없이 수렴하려는 경향을 보인다. 단품시험에서 가급적 실제 설계회전수에 근접한 조건에서 펌프의 수력성능을 파악하는 것이 이상적이지만, 시험설비의 용량 등을 고려하여 저회전수에서 시험한 결과로 토대로 성능변수( $\phi$ ,  $\psi$ ,  $n_s$ )를 이용하여 설계회전수에서의 성능을 도출하는 것이 통상적이다. 하지만, 펌프효

율의 경우 저회전수의 영향이나 시험매질의 차이에서 오는 유체점성의 영향 등으로 인하여 단품에서 측정된 결과는 실험매질을 이용하는 실험회전수 조건에서의 펌프효율과 차이를 보이게 된다. 특히, 시험유체의 변화는 펌프 A의 결과처럼 유체점성으로 인한 손실동력의 차이로 펌프효율에 직접적인 영향을 미치게 된다.

이러한 유체점성으로 인한 펌프의 효율변화에 대한 많은 실험적 연구가 수행되어 왔다[10,11]. Gulich는 상온 청수를 기준으로 상대적 고점도 유체(high viscous fluids)에 대한 펌프효율의 변화를 연구하여 무차원 변수에 의한 효율 보정식을 제시하였다. 다양한 점성을 가지는 작동유체에 대해 형상이 다른 19종의 펌프를 대상으로 펌프의 효율변화를 측정/분석하였다. 수정 레이놀즈수(modified Reynolds number,  $Re_{mod}$ )를 도입함으로써, 개별펌프의 형상이나 성능특성에 독립적으로 적용할 수 있는 효율 보정인자(efficiency correction factor,  $f_\eta$ )의 경험식을 Eq. 6과 같이 규명하였다. 제시하고 있는 효율 보정인자( $f_\eta$ )에서 기준효율( $\eta_M$ )은 상온 청수를 작동유체로 하는 환경에서 펌프의 효율이 충분히 수렴될 수 있는 수정 레이놀즈수 조건( $Re_{mod} \approx 10^7$ )에 대한 펌프의 최대효율을 의미한다. 작동유체로 물을 포함하여 다양한 고점도( $\nu > 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ) 매질에 대한 펌프의 효율을 분석한 이 경험식은 펌프의 비속도(specific speed)가  $6 < n_s < 45$ , 수정 레이놀즈수가  $250 < Re_{mod} < 10^7$ 의 범위에서 유효하며, 그 정의와 관련 수식은 Eq. 5~8에 나타내었다[15].

$$f_\eta = \frac{\eta_a}{\eta_M} \quad (5)$$

$$f_\eta = Re_{mod}^{-y}, \quad y = \frac{19}{Re_{mod}^{0.705}} \quad (6)$$

$$Re_{mod} = Re \omega_s^{1.5} f_q^{0.75} \quad (7)$$

$$w_s = w \frac{\sqrt{Q/f_q}}{(gH)^{3/4}} = \frac{n_s}{52.9}, \quad n_s = N \frac{\sqrt{Q/f_q}}{H^{3/4}} \quad (8)$$

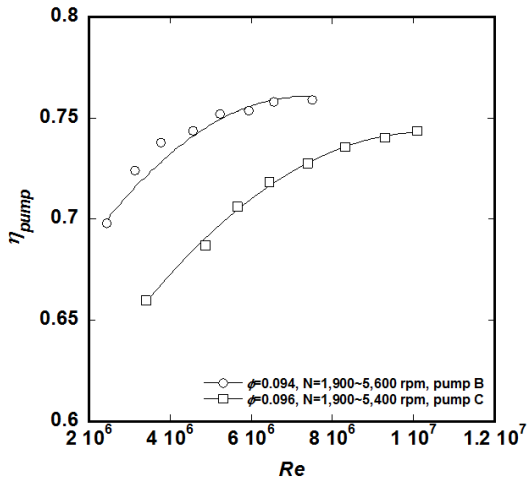


Fig. 6 Pump efficiency vs. Reynolds number with rotational speed increase (water test).

Gulich의 연구결과를 토대로 75톤급 터보펌프 (pump B, C)에 대한 효율을 Fig. 7과 같이 보정할 수 있었다. 펌프효율은 총 3가지로 나타나는데, 상온 청수로 저회전수( $0.5 \sim 0.55N_d$ ) 시험에서 수동력( $P_h$ )과 축동력( $P_s$ )을 직접 측정하여 구한 펌프의 효율( $\eta$ )과 이를 토대로 상온 청수에 대한 설계회전수에서 예상되는 효율( $\eta_{Nd}$ ), 그리고 해당 펌프가  $Re_{mod} \approx 10^7$  조건에 대한 펌프의 최대효율( $\eta_M$ )이다.

상온 청수를 시험매질로 하여 연료펌프(pump C) 단품시험에서 구한 Fig. 7의  $\eta_M$  과 실매질 설계회전수 시험조건에서 산정되는 연료펌프의 수정 레이놀즈수( $Re_{mod} = 1.29 \times 10^6$ )를 Eq. 5와 6에 적용하여 실매질 조립체 시험에서 케로신(Jet A-1)에 대한 연료펌프의 보정된 효율( $\eta_{FP}$ )을 Fig. 8과 같이 얻을 수 있게 된다. 케로신을 사용하는 실매질 시험에서 상온 청수에 비하여 상대적으로 높은 유체점성으로 인하여 증가된 원판마찰 손실로 1% 정도의 효율저하가 발생하는 것으로 산정된다. 추가적으로 터보펌프 조립체 실매질 시험에서 이 보정된 펌프효율과 측정된 펌프의 수동력으로 연료펌프의 구동을 위해 소요된 순수한 축동력을 산정할 수 있게 된다.

Fig. 9와 10은 설계유량( $Q/Q_d \approx 1$ ) 조건에서 조립체 실매질 시험에 대한 터보펌프의 운용결

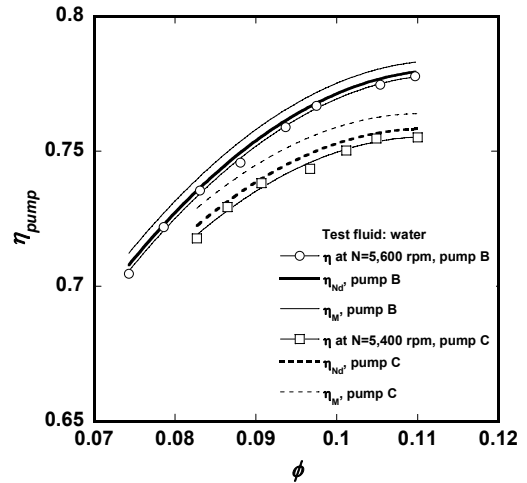


Fig. 7 Tested and predicted efficiencies for flow coefficient of pumps (pump B: LOX pump, pump C: fuel pump).

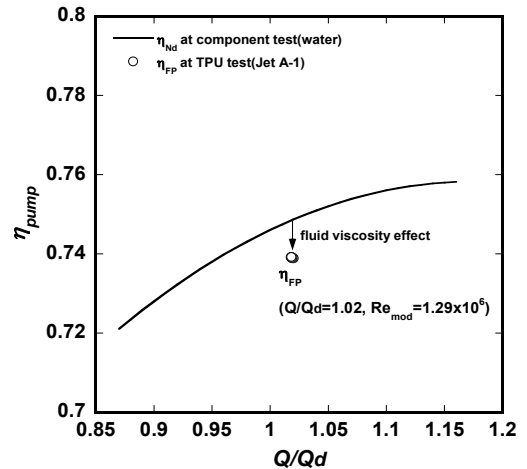


Fig. 8 Efficiency change by viscous fluid for fuel pump (pump C).

과를 보여주고 있다. 터보펌프가 설계회전수에서 운용될 수 있는 터빈의 가용동력( $P_{ad}$ )을 생성시키기 위해 설계 압력비( $PR=18$ ) 보다 높은 터빈 최대 압력비( $PR=50 \sim 60$ )를 선택하였다. 터빈 입구온도( $TIT$ )는 최대한 설계값(900 K)에 근접시켰다. 터빈의 효율은 속도비(velocity ratio,  $u/c_{ad}$ )와 압력비( $PR$ )의 함수로서 터빈 단품시험으로부터 도출된 결과를 적용하였다[16]. 펌프로

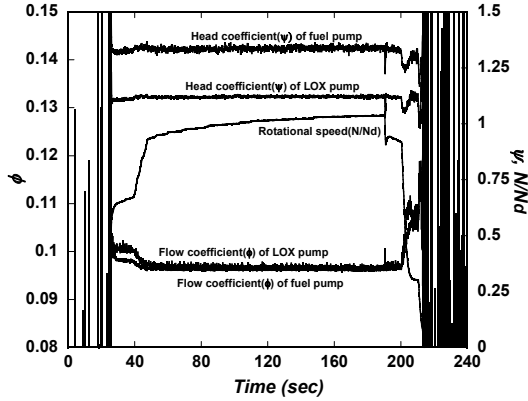


Fig. 9 Test results of pumps from TPU test with real-media (LOX & kerosene,  $Q/Q_d \approx 1.0$ ).

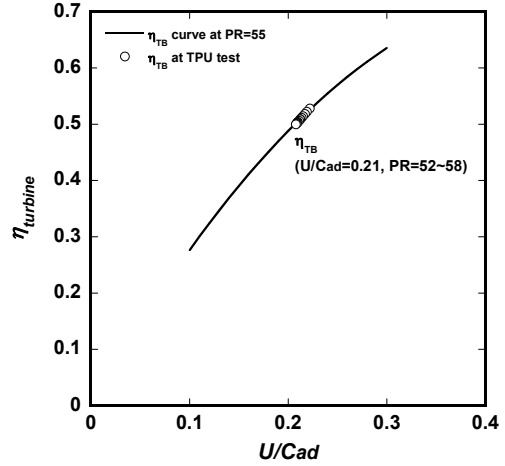


Fig. 11 Turbine efficiency at TPU test.

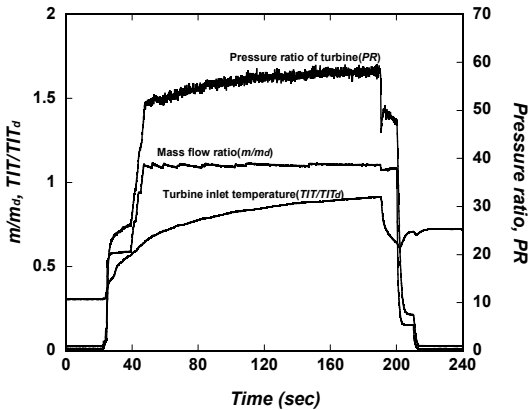


Fig. 10 Test results of turbine from TPU test with hot air (air+ethanol,  $PR_t=18$ ,  $TIT_d=900$  K).

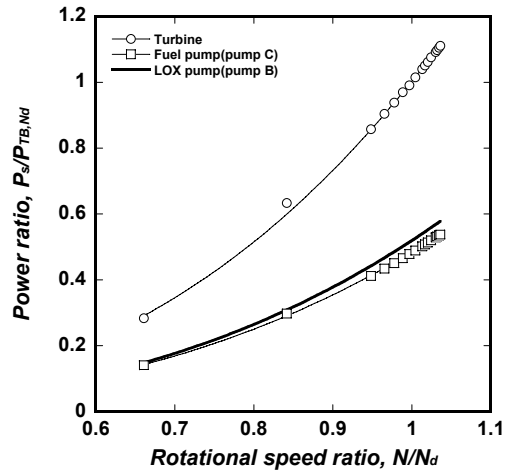


Fig. 12 Shaft power ratio of LOX pump from TPU test at design flow ratio.

전해지는 터빈의 전달동력( $P_{TB}$ )은 터빈효율( $\eta_{TB}$ )과 단열가용동력( $P_{ad}$ )을 통하여 구할 수 있으며, 관련 수식은 Eq. 9~12에 제시하였다.

$$\eta_{TB} = f(u/c_{ad}, PR) \quad (9)$$

$$PR = \frac{TIT}{p_b} \quad (10)$$

$$P_{ad} = \dot{m} \times C_p T_t \left(1 - PR^{-\frac{1-k}{k}}\right) \quad (11)$$

$$P_{TB} = \eta_{TB} \times P_{ad} \quad (12)$$

터보펌프 조립체 시험에서 터빈의 성능은 Fig. 11에서 보여주는 것과 같이 제시한 운용조건 ( $u/c_{ad} = 0.21$ ,  $PR = 52 \sim 58$ )에서 50~53%의 효율 특성을 보였다. 터빈의 전달동력과 앞서 제시한 방법으로 구한 연료펌프(pump C)의 축동력으로 Eq. 13의 터보펌프 조립체의 동력균형을 통해 순수한 산화제펌프만의 축동력을 도출할 수 있게 된다. Fig. 12에서 회전수 증가에 따른 터빈 전달동력과 각 펌프에서 소모되는 동력을 보여 주고 있다.



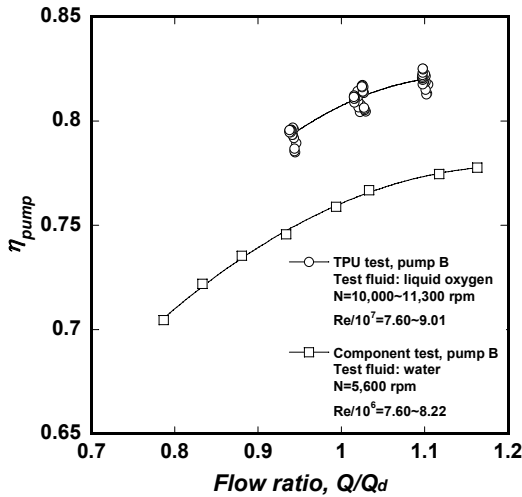


Fig. 13 Modified efficiency of LOX pump (pump B) from TPU test using real media of propellants.

$$\left(\frac{\rho g H Q}{\eta}\right)_{OP} + \left(\frac{\rho g H Q}{\eta}\right)_{FP} = (\eta P_{ad})_{TB} \quad (13)$$

$$\eta_{OP} = \frac{(\rho g H Q)_{OP}}{\left(\eta \dot{m} C_p T_i \left(1 - PR^{\frac{1-k}{k}}\right)\right)_{TB} - \left(\frac{\rho g H Q}{\eta_{Nd}}\right)_{FP}} \quad (14)$$

### 3.4 액체산소 환경에서 산화제펌프의 효율 보정

상온 청수를 이용한 단품시험에서 측정된 산화제펌프의 효율은 조립체 실매질 시험결과에서 보정된다. 터보펌프 조립체 상태에서 산화제펌프의 효율은 Eq. 11~13으로부터 Eq. 14와 같이 표현되어 시험결과로부터 각 단품들의 효율 및 동력을 계산함으로써 얻을 수 있게 된다. Fig. 9의 터보펌프 조립체 실매질 시험의 결과로부터 산화제펌프의 수동력( $P_h = \rho g H Q$ )을 계산하고, Fig. 12의 터보펌프 조립체 동력균형의 결과로부터 산화제펌프의 축동력( $P_s$ )을 산정함으로써 액체산소를 작동유체로 하는 환경에서 산화제펌프의 수정된 효율을 우회적으로 구할 수 있게 된다.

Fig. 9와 10의 터보펌프 조립체 실매질 설계점 ( $Q/Q_d \approx 1.0$ ) 시험결과와 추가적으로 수행한 실매질 탈설계점 ( $Q/Q_d \approx 0.9, 1.1$ ) 시험결과를 포함

한 산화제펌프의 효율변화를 Fig. 13에 도시하였다. 본 시험시제(pump B)에 대한 전체적인 유량영역( $Q/Q_d = 0.9 \sim 1.1$ )에서 액체산소를 매질로 하는 경우가 상온 청수를 이용한 단품시험의 결과보다 작동유체의 낮은 점성으로 인한 손실감소로 약 4~5%의 상승된 효율특성을 보이는 것으로 나타났다.

## 4. 결 론

본 연구를 위해 3종의 원심형 터보펌프가 사용되었으며, 시험매질로는 상온 청수와 유사매질인 액체질소, 실매질인 액체산소와 케로신이 적용되었다. 상온 청수를 이용한 상사시험결과를 토대로 유사매질과 실매질에 대한 펌프의 수력 성능 변화를 분석하였다. 30톤급 산화제펌프 단품시험에서 상온 청수와 액체질소에 대한 수력학적인 시험결과를 비교하여 극저온 환경(저점성 유체)에서 펌프효율이 상승되는 것을 확인하였다. 75톤급 연료펌프에서는 상온 청수를 이용한 저회전수 환경에서의 시험결과로부터 상대적으로 고점성인 케로신에 대한 설계회전수에서 펌프효율의 감소를 산정할 수 있었다. 이러한 펌프 단품효율의 변화특성을 반영하여 실매질 환경의 75톤급 터보펌프 조립체 시험에서 실매질(액체산소)에 대한 산화제펌프의 효율을 보정할 수 있었다. 결과적으로 실매질 환경에서 펌프 단품 수류 시험 대비 연료펌프는 약 1% 감소, 산화제펌프는 4~5% 상승하는 효율변화를 확인하였다.

본 연구결과는 단품시험으로부터 얻은 펌프의 수력성능에서 실매질/실회전수 운용조건에 대한 효율보정 값을 제시하여, 터보펌프 조립체 시험이나 엔진 시스템 시험에서 작동점을 보다 정확하게 예측할 수 있도록 할 것이다.

## References

1. Kim, J., Hong, S.S., Jeong, E.H., Choi, C.H. and Jeon, S.M., "Development of a

- Turbopump for a 30 Ton Class Engine," *43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, Cincinnati, O.H., U.S.A., AIAA 2007-5516, 2007.
2. Hong, S.S., Kim, D.J., Kim, J.S., Choi, C.H. and Kim, J., "Hydrodynamic Performance Test of a Turbopump," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 10, No. 1, pp. 18-22, 2006.
  3. Kim, D.J., Choi, C.H., Hong, S.S., Kwak, H.D. and Kim, J., "Water Tests of Fuel Pump for 75-ton Class Liquid Rocket Engine," *Journal of Fluid Machinery*, Vol. 14, No. 1, pp. 61-65, 2011.
  4. Hong, S.S., Kim, J.S., Kim, D.J. and Kim, J., "Performance Test of Turbopump Assembly for 75 Ton Liquid Rocket Engine Using Model Fluid," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 15, No. 2, pp. 56-61, 2011.
  5. Hong, S.S., Kim, D.J., Kim, J.S. and Kim, J., "Real-Propellant Test of a Turbopump for a 30-Ton Thrust Level of Liquid Rocket Engine," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 13, No. 3, pp. 20-26, 2009.
  6. Kim, J.S., Hong, S.S., Kim, D.J., Choi, C.H. and Kim, J., "Cryogenic Performance Test of LOX Turbopump in Liquid Nitrogen," *Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 34, No. 4, pp. 391-397, 2010.
  7. Uchiyama, M., Kamijo, K., Hirata, K., Konno, A., Hashimoto, T. and Kobayashi, S., "Improvement of Inlet Flow Characteristics of LE-7A Liquid Hydrogen Pump," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 19, No. 3, pp. 356-363, 2003.
  8. Kamijo, K., Sogame, E. and Okayasu, A., "Development of Liquid Oxygen and Hydrogen Turbopumps for the LE-5 Rocket Engine," *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 19, No. 3 pp. 226-231, 1982.
  9. Kamijo, K. and Hirata, K., "Performance of Small High Speed Cryogenic Pumps," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 107, No. 2, pp. 197-203, 1985.
  10. Gulich, J.F., "Pumping Highly Viscous Fluids with Centrifugal Pumps-Part 1," *World Pumps*, Vol. 395, pp. 30-34, 1999.
  11. Gulich, J.F., "Effect of Reynolds Number and Surface Roughness on the Efficiency of Centrifugal Pumps," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 125, No. 4, pp. 670-679, 2003.
  12. Shojaeefard, M.H., Salimian Rizi, B., Khalkhali, A. and Tahani, M., "A New Method to Calculate Centrifugal Pump Performance Parameters for Industrial Oils," *Journal of Applied Fluid Mechanics*, Vol. 8, No. 4, pp. 673-681, 2015.
  13. Kim, J.S., Han, Y.M. and Ko, Y., "Construction and Validation Test of Turbopump Real-propellant Test Facility," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 19, No. 4, pp. 85-93, 2015.
  14. Kim, J.S., Han, Y.M. and Ko, Y., "Development Test of Alcohol Burner for Turbopump Real-propellant Test Facility," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 18, No. 5, pp. 79-86, 2014.
  15. Gulich, J.F., *Centrifugal Pumps*, 2nd ed., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
  16. Jeong, E.H., Lee, H.G., Park, P.G., Kwak, H.D. and Kim, J., "Investigation on the Performance Characteristics of the 75ton Class Turbopump Turbine," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 14, No. 5, pp. 65-71, 2010.