

## 액체로켓엔진 터보펌프용 펌프의 축추력 조절에 관한 연구

최창호\*\* · 노준구\* · 김대진\* · 김진한\*

### Study on the Control of the Axial Thrust of a Pump for Liquid Rocket Engine Turbopumps

Chang-Ho Choi\*\*, Jun-Gu Noh\*, Dae-Jin Kim\*, Jinhan Kim\*

Key Words : Turbopump(터보펌프), Pump(펌프), Axial thrust(축추력), Vane(베인)

#### ABSTRACT

The magnitude of the axial thrust acting on pump bearings has a great influence on the operational reliability and service life of a pump for turbopumps. In the present study, radial vanes are introduced to the pump casing to control the axial thrust by changing the cavity pressure between the impeller and the casing. To investigate the effect of the vanes on the axial thrust of the pump, experimental and computational studies were performed with and without the vanes. It is shown that the vanes reduce the cavity pressure by preventing the flow from rotating with the impeller. Experimental and computational results show similar trend for the axial thrust difference between two cases with and without the vanes. The results show that the cavity vanes are very effective in controlling the magnitude of the axial thrust.

#### 1. 서 론

액체로켓은 액체연료와 산화제를 연소시켜 분사시킴으로써 추진력을 얻는다. 이 때 액체연료와 산화제가 가압상태로 연소실에 공급되어야 하는데, 가압방식에는 크게 두 가지가 있다. 즉, 고압의 연료를 탱크에 직접 저장하는 가압식과 저압으로 탱크 내에 저장된 연료를 터보펌프로 가압시키는 터보펌프 방식이 있다. 가압식은 구조가 간단한 장점이 있지만, 고압을 유지하기 위하여 탱크의 무게가 증가하게 되고 결국 발사체가 무거워지는 단점이 있다. 반면, 터보펌프 방식은 고속으로 회전하는 터보펌프와 관련한 진동 및 캐비테이션(cavitation) 제어 등의 고도의 기술을 필요로 하지만 공급탱크의 경량화가 가능하여 발사체를 가볍게 할 수 있는 장점이 있다.<sup>(1)</sup>

Fig. 1은 인듀서, 임펠러, 벌류트 및 누설유로를 포함한 터보펌프용 펌프의 일반적인 구조를 나타낸다.

국내에서 터보펌프의 성능을 향상시키기 위한 노력의 일환으로 최근에 터보펌프에 대한 실험 및 수치해석적 연구<sup>(2~</sup>

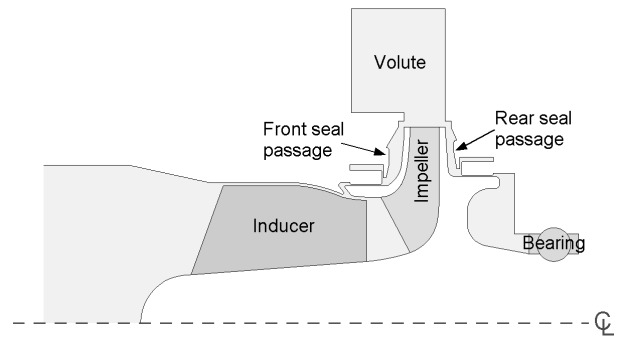


Fig. 1 Typical layout of a turbopump

<sup>5)</sup>가 많이 시도되고 있다. 특히, 터보펌프의 구성품 중에서도 흡입성능과 밀접한 관련이 있는 인듀서에 대해서 대부분의 연구가 집중되어 수행되고 있다. 그러나 펌프의 안정적인 작동을 위해서는 축추력 베어링(thrust bearing)에 작용하는 축추력을 적절하게 조절할 필요가 있다. 터보펌프용 펌프의 경우 고회전/고압력의 작동조건에서 작동하므로 회전체에 작용하는 압력이 매우 높고, 펌프 회전부 앞과 뒤의 형상차이로 인하여 압력이 불일치하므로 축추력이 존재하게 된다.

\* 한국항공우주연구원 터보펌프팀

† 교신저자, E-mail : cch@kari.re.kr

베어링에 이러한 축추력이 작용하므로 축추력이 과도할 경우, 베어링의 안정적인 작동 및 수명에 제약이 받게 된다. 축추력을 적정수준으로 낮추기 위해서 일반적으로 능동 축추력 조절 방식과 수동 축추력 조절 방식이 사용되는데, 능동 축추력 조절 방식의 경우 펌프 출구압이 매우 높은 폐회로 엔진(closed-cycle engine)에 주로 사용되는 방식으로 축추력의 방향에 따라 회전부가 앞뒤로 미세하게 움직이면서 축추력을 조절하는 방식이고, 수동 축추력 조절방식은 한국항공우주연구원에서 개발중인 개회로 엔진(open-cycle engine)에 주로 사용되는데 임펠러 앞뒤나 케이싱의 형상변경 또는 임펠러 후방 2차 유로의 오리피스스를 교환하는 방법<sup>(6)</sup>을 통하여 축추력을 조절해 주는 방식이다. 2차 유로의 오리피스스를 교환하는 방식의 경우 오리피스가 너무 작아지면 오리피스 앞쪽의 압력이 상승하여 펌프 후방의 실(seal)에 문제가 발생할 소지가 있다. 따라서 오리피스의 경우 축추력의 미세조절에 주로 사용된다. 본 연구에 사용된 펌프의 경우 이러한 오리피스가 장착되어 있다. 본 연구에서는 수동 축추력 조절 방식에서 임펠러나 케이싱의 설계변경 없이 케이싱에 착탈이 가능한 반경방향 베인(vane)을 설치하여 축추력 조절을 쉽게 할 수 있는 기법<sup>(7)</sup>을 사용하였다. 노준구 등<sup>(8)</sup>은 베인이 축추력에 미치는 영향을 수치해석적으로 연구한 바 있으며, 김대진 등<sup>(6)</sup>은 펌프의 축추력 측정시험을 수행한 바 있다. 본 연구에서는 베인이 축추력에 미치는 영향을 고찰하기 위해서 수치적 기법과 실험적 기법을 동시에 사용하였다.

## 2. 축추력 측정 시험

한국항공우주연구원에 설치되어 있는 터보펌프 수류 성능 시험설비<sup>(6)</sup>에서 축추력 시험이 수행되었다. 시험 장치는 펌프 수류 시험을 위해 폐회로 방식으로 구성되었으며, 주요 구성은 Fig. 2와 같다. 모터와 기어박스는 펌프를 구동하는 목적으로 쓰이며, 최고 출력 320kW, 최대 회전수 20,000rpm 까지 구동 가능하다. 물탱크는 3m<sup>3</sup>의 용량으로 펌프 시험에 필요한 유체(물)를 공급한다. 축추력 측정장치는 기어박스과 펌프 사이에 위치한다. 축에 작용하는 축추력 측정<sup>(6)</sup>은 펌프 내부에 축추력을 받지 않는 원통롤러베어링을 설치하고, 축추력이 축추력 측정장치에 설치된 로드셀에서 측정되도록 하였다. 터빈 유량계는 작동 유량의 측정에 쓰이며, 펌프 하류에 설치하였다.

실험은 현재 한국항공우주연구원에서 개발중인 추력 75톤급 액체로켓엔진용 터보펌프의 구성품인 산화제펌프에 대해서 수행되었다. 장착되어 있는 축추력 조절용 베인의 형상을 Fig. 3에 나타내었다. 베인이 장착되어 있는 후방 베어링 고정용 너트의 형상과 너트가 케이싱에 장착되어있는 것을 볼 수 있다. 베인이 축추력에 미치는 영향을 정확하게 파악하기 위해서는 펌프의 다른 부위 형상을 동일하게 하고 베인이 있

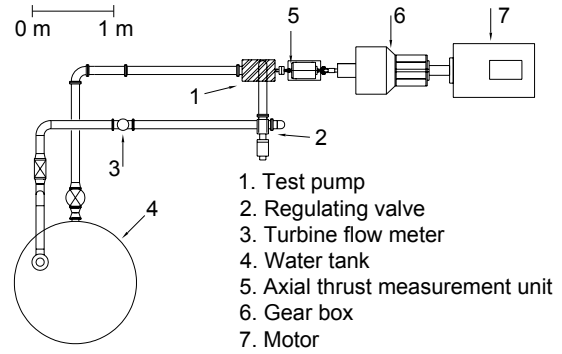


Fig. 2 Plane view of the pump test rig

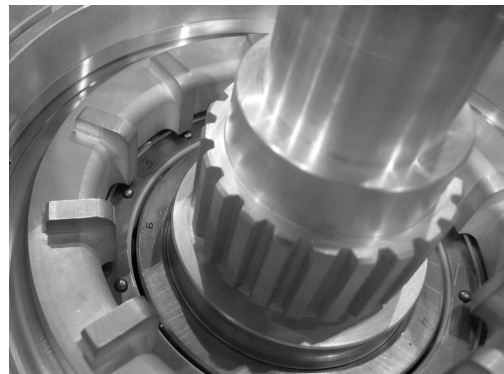
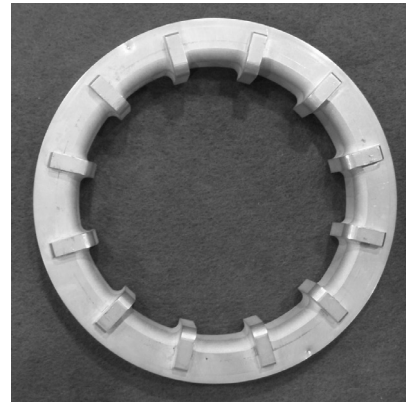


Fig. 3 Vanes adopted for the experiments

을 경우와 없을 경우에 대해서 축추력 실험을 수행해야 하지만, 실제 실험에서는 베인이 있는 경우와 없는 경우에 대해서 양정이 다소 차이가 있는 인두서를 사용하여 수행되었다. 즉, 베인이 없는 경우에 사용된 인두서의 양정이 베인이 있는 경우의 인두서 보다 다소 낮았다. 인두서의 차이로 인한 양정의 차이는 펌프 양정의 약 1~2% 정도로 추정되었다. 이러한 인두서의 양정차이는 펌프 양정에 비하면 작은 값이므로 축추력에는 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단되었다. Table 1에 측정된 축추력 계수를 나타내었다. 축추력은 펌프 앞쪽에서 뒤쪽으로 향하는 방향을 +로 정의하였다. 베인이 없는 경우에는 -0.0119인 축추력이 베인이 있는 경우 +0.0277로 커졌음을 알 수 있다. 베인이 축추력을 +방향으로 변화시킨다

Table 1 Measured axial thrust coefficient

	Without vanes	With vanes
Axial thrust coefficient ( $C_{Tx}$ )	-0.0119	+0.0277

는 것을 알 수 있다. 또한 베인이 있는 경우와 없는 경우의 축추력 계수의 차이는 +0.040정도임을 알 수 있다. 이는 실험에 쓰인 베어링의 설계 축추력 계수가 0.01이하라는 점을 고려하면 큰 값임을 알 수 있다. 따라서 베인을 사용할 경우 베인의 형상을 변화시키면서 축추력을 조절하면 베어링의 설계 축추력 요구조건을 충분히 만족시킬 수 있음을 알 수 있다. Table 1에서 축추력계수는 다음과 같이 정의된다. 식 (1)에서  $T_x$ 는 측정된 축추력 값,  $p_{2t}$ 는 펌프 출구압,  $r_{2t}$ 는 임펠러 출구 반경을 나타낸다.

$$C_{Tx} = T_x / (p_{2t} \pi r_{2t}^2) \quad (1)$$

### 3. 축추력 유동해석

베인이 축추력에 미치는 영향을 정확하게 분석하기 위해 유동해석을 수행하였다. 본 연구에서는 이전의 연구<sup>(3)</sup>에서 실험결과와 비교를 통하여 충분히 검증된 Fine/Turbo<sup>(9)</sup>를 이용하여 계산을 수행하였다. Fine/Turbo는 공간차분법으로 가점성을 포함하는 중심차분법, 시간차분법으로 Runge-Kutta 시간전진법을 사용한다. 또한 비압축성 유동을 해석하기 위하여 예조건화기법을 채택하였다. 수렴가속을 위해 다중격자법, 잔류항평균법 등을 사용한다. 본 연구에서는 계산시간을 줄이기 위해 확장된 표준 k-ε모델을 난류모델로 채택하였다.

정확한 축추력 계산을 위해서는 인두서, 임펠러 등 펌프 전체를 포함하는 계산을 수행해야 하지만, 계산시간을 절약하고 문제를 단순화하기 위해서 Fig. 1에서 베인이 설치되어 있는 후방 누설유로(임펠러와 케이싱 사이의 캐버티)에 대해서만 유동해석을 수행하였다. 계산의 결과로 임펠러의 후면에 작용하는 압력을 계산하고, 이를 이용하여 임펠러 후면에 작용하는 축추력을 계산하였다. 베인이 있을 경우와 없을 경우를 계산하여 베인이 축추력에 미치는 영향 및 유동현상을 파악할 수 있었다. 베인 있는 경우의 계산 경계조건을 Fig. 4에 나타내었는데, 입구에서 유량을 주고, 출구에서는 정압을 주었다. 또한 베인이 있는 경우의 계산격자를 Fig. 5에 나타내었다.

베인이 있을 경우와 없을 경우에 대하여 캐버티의 누설유량( $Q$ )을 변화시키면서 임펠러 후면에 작용하는 축추력 계수를 비교하여 Fig. 6에 나타내었다. 축추력의 방향은 펌프 앞쪽에서 뒤쪽으로 향하는 방향을 +로 정의하였으므로 임펠러 후면에 작용하는 축추력은 -방향으로 나타나게 된다. 누설

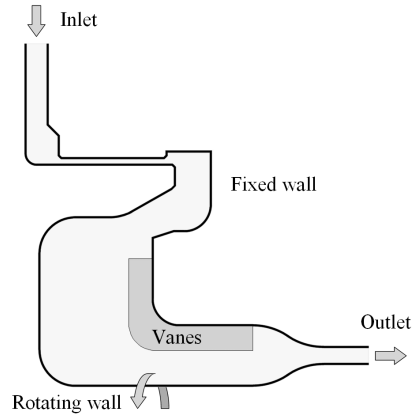
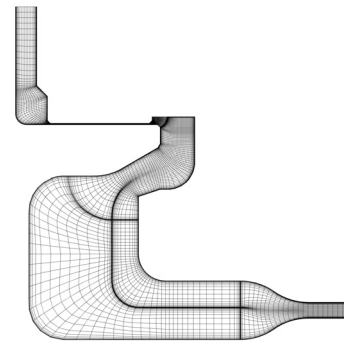
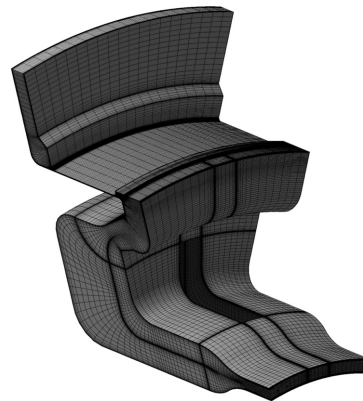


Fig. 4 Boundary conditions for computations



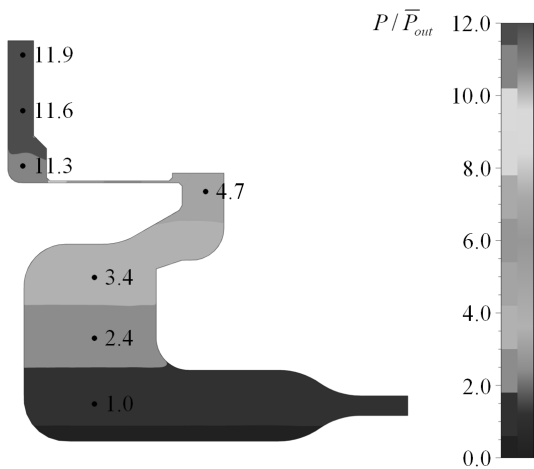
(a) 2-D meridional view



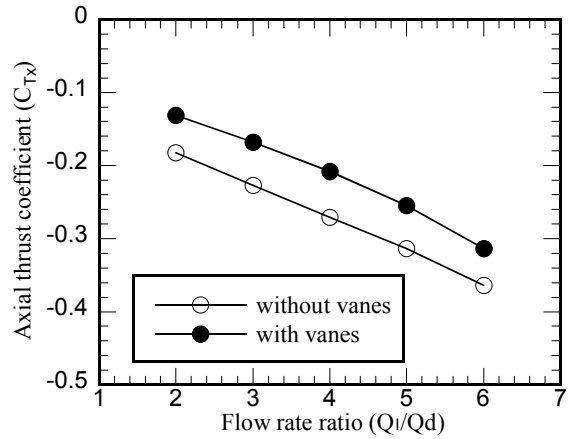
(b) 3-D view

Fig. 5 Computational grids with the vanes

유량이 많아지면 축추력이 커지는 것을 확인할 수 있으며, 베인이 있는 경우에 실험결과와 같이 축추력이 +방향으로 변하는 것을 알 수 있다. 임펠러 후방으로 흐르는 누설유량은 실험에서 측정이 어려우므로 펌프의 설계에 사용한 1D 설계  $S/W^{(4)}$ 로 계산하면, 베인이 없을 경우 설계유량( $Q_d$ )대비 누설유량은 약 2.9%, 베인이 있을 경우 누설유량은 약 3.5% 정도로 예상되므로 이때의 축추력 차이는 약 +0.034이다. 전체펌프가 아닌 캐버티만을 계산영역으로 유동해석을 수

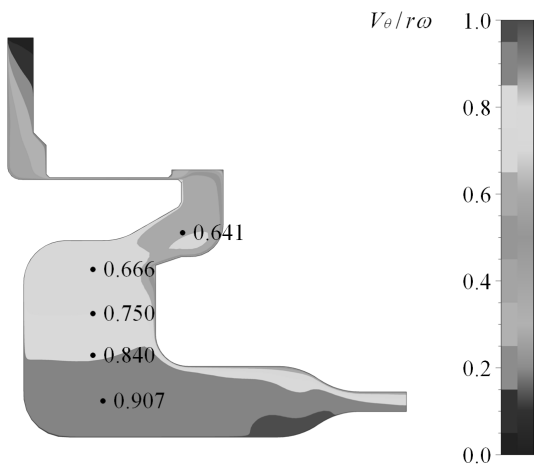


(a) without vanes

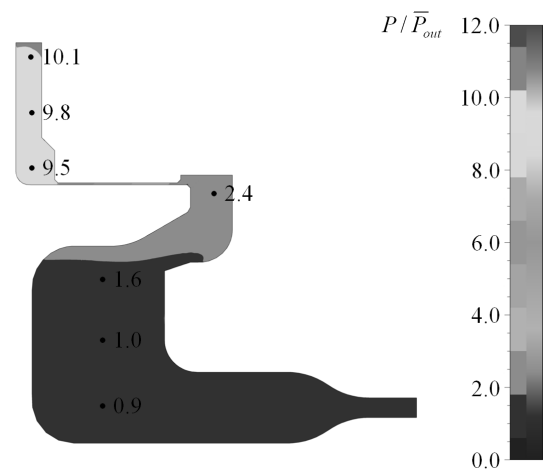


(b) with vanes

Fig. 6 Calculated axial thrust distributions



(a) without vanes



(b) with vanes

Fig. 7 Calculated circumferential velocity ratio distributions

Fig. 8 Calculated pressure ratio distributions

행하였고, 누설유량을 1D S/W를 사용하여 예측하였음을 감안하면 +0.040인 실험값을 비교적 잘 예측한다고 할 수 있다. 이는 계산이 실험을 적절하게 모사하고 있으며, 계산을 통하여 베어링의 축추력 설계요구조건을 만족시키는 베인의

형상을 선정할 수 있음을 나타낸다.

베인이 축추력에 미치는 영향을 정확하게 파악하기 위해서 유동장의 변화를 고찰하였다. 누설유량이 4%인 경우에 유동의 회전속도비와 압력비 분포를 Fig. 7~8에 나타내었다. 베인이 없는 경우 유동이 임펠러를 따라서 회전하므로 회전속도비가 커지고, 따라서 임펠러 후단에 작용하는 압력이 반경이 커질수록 높아지는 것을 알 수 있다. 베인이 설치되면 유동의 회전이 줄어들고 캐버티 하류에서 압력이 낮아지며 균일한 분포를 보이는 것을 확인할 수 있다. 베인이 유체의 회전을 방해함에 따라 압력장의 변화가 오고 축추력의 차이가 발생한다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 베인의 높이와 개수를 적절하게 조절하면 케이싱의 설계변경 없이 축추력을 조절할 수 있음을 알 수 있다. Fig. 7에서  $V_\theta$ 는 유동의 회전방향속도성분,  $r$ 은 반경,  $\omega$ 는 펌프의 회전속도를 나타내며, Fig. 8에서  $\bar{P}_{out}$ 는 계산 영역에서 출구 평균 압력을 나타낸다.

측정된 양정계수 및 효율곡선을 Fig. 9에 나타내었다. 효

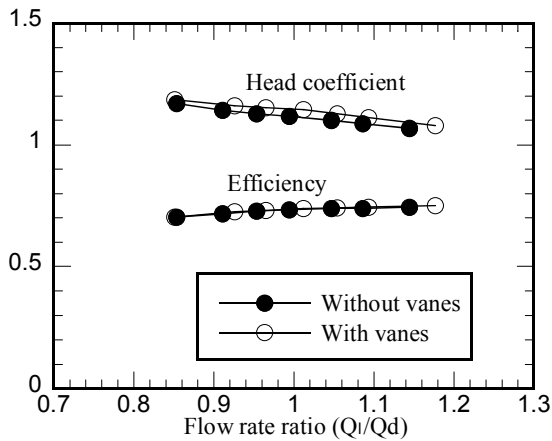


Fig. 9 Measured performance curves

올은 차이가 없으나 양정은 베인이 있는 경우에 2% 정도 높게 측정되었다. 베인이 있는 경우에 캐비티에서 저항이 감소하여 누설유량이 증가하므로 양정이 조금이라도 낮게 나와야 하지만, 앞에서 언급한 바와 같이 실험에 사용한 인두서의 양정차이로 인하여 베인이 있는 경우에 양정이 높게 측정된 것으로 판단된다. 따라서 인두서의 양정차이로 인한 펌프 양정의 차이를 고려하면 베인의 설치 유무가 펌프의 성능에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 판단되었다. Figure 9에서 양정계수는 다음과 같이 정의된다. 여기서  $p_{1t}$ 는 펌프 입구 전압력을 나타낸다.

$$\psi = 2(p_{2t} - p_{1t}) / (\rho U_{2t}^2) \quad (2)$$

#### 4. 결 론

베인이 축추력에 미치는 영향을 파악하기 위해서 베인이 있는 경우와 없는 경우에 대해서 실험을 수행하였다. 또한 베인이 축추력에 영향을 미치는 원인을 정확하게 파악하기 위해서 유동해석도 수행하였다. 베인의 유무에 따른 축추력의 차이를 계산값과 실험값을 비교해본 결과 두 결과가 잘

일치함을 확인하였으며, 베인을 사용할 경우 베인이 유동의 회전을 방해하고 캐비티에서 압력을 낮추어 주어 축추력을 +방향으로 변화시키는 것을 확인하였다. 따라서 베인을 사용하여 베어링에 작용하는 축추력을 적절하게 조절할 수 있음을 파악하였다.

#### 참고문헌

- (1) Huzel, D. K. and Huang, D. H., 1992, "Modern Engineering for Design of Liquid-Propellant Rocket Engines," AIAA Press.
- (2) Hong, S. S., Kim, D. J., Kim, J. S., Choi, C. H., and Kim, J., 2005, "Effect of inducer on hydraulic performance of a turbopump," Proceedings of the 41<sup>st</sup> AIAA/ASME /SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Paper 2005-2289, July 2005.
- (3) Choi, C. H., Noh, J. G., Kim, J. S., Hong, S. S., and Kim, J. H., 2006, "Effects of a Bearing Strut on the Performance of a Turbopump Inducer," Journal of Propulsion and Power, Vol. 22, No. 6, pp. 1413~1417.
- (4) Choi, C. H., Noh, J. G., Kim, D. J., Hong, S. S., and Kim, J. H., 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.
- (5) Choi, C. H., Kim, J. S., and Kim, J., 2009, "Study on the Forward-Sweep Inducer for LRE Turbopumps," Acta Astronautica, Vol. 65, pp. 214-220.
- (6) 김대진, 홍순삼, 김진한, 2005, "로켓엔진용 연료펌프의 축추력 측정," 제25회 한국추진공학회 추계학술발표대회.
- (7) Choi, C. H., and Kim, J., 2008, Centrifugal turbo machine with axial thrust control member. US patent No. US7354240B2.
- (8) 노준구, 최창호, 김진한, 2006, "터보펌프 축추력 조절용 캐비티 베인에 대한 수치해석적 연구," 유체기계저널, 제9권, 제2호, pp. 39~43.
- (9) Fine/Turbo 8.7-2 Manual, 2009, Numeca Inc.