

액체로켓엔진용 산화제펌프 회전체의 하중 예측

김대진^{a,*} · 최창호^a

Thrust Estimation Acting on Rotor of LOX Pump for Liquid Rocket Engine

Dae-Jin Kim^{a,*} · Chang-Ho Choi^a

^aTurbopump Team, Korea Aerospace Research Institute, Korea

*Corresponding author. E-mail: rain301@kari.re.kr

ABSTRACT

Excessive thrust acting on the rotor of pump can cause the damage of pump or the decrease of pump lifetime. Therefore, for ensuring the safety of LOX pump of a liquid rocket engine, the thrust of pump rotor is estimated by similarity tests. Axial thrust is indirectly measured by an axial thrust measurement unit positioned outside pump. Radial thrust is calculated based on pressure distribution of volute scroll. As a result, axial and radial thrust are increased when the flowrate of pump decreases. However, both thrusts do not affect the stability of pump rotor since their values are not large.

초 록

회전체의 과도한 하중은 펌프의 손상이나 수명 감소의 원인이 된다. 이에 액체로켓엔진용 산화제펌프의 안정성 확보를 위해 펌프 회전체에 작용하는 하중을 상사 시험을 통해 예측하였다. 축방향 하중은 펌프 외부에 설치된 축추력 측정 장치를 통해 간접적으로 계측하였으며, 반경방향 하중은 볼류트의 압력 분포를 토대로 계산하였다. 그 결과, 펌프의 유량이 작을수록 축방향 하중과 반경방향 하중 모두 증가하는 것으로 확인되었다. 그러나, 하중의 크기가 크지 않아 펌프의 안정성에 영향을 끼치지 않을 것으로 예측되었다.

Key Words: Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), Turbopump(터보펌프), LOX Pump(산화제펌프), Axial Thrust(축방향 하중), Radial Thrust(반경방향 하중)

Received 1 June 2015 / Revised 21 September 2015 / Accepted 29 September 2015

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

[이 논문은 한국추진공학회 2015년도 춘계학술대회(2015. 5. 28-29, 부산 해운대 그랜드호텔) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

1. 서 론

한국항공우주연구원(항우연)에서는 한국형발사체 개발 사업의 일환으로 진공추력 75톤급 및 7

톤급 액체로켓엔진에 필요한 터보펌프를 개발 중에 있다. 두 터보펌프 모두 산화제인 액체산소를 고압으로 연소기에 공급하기 위한 산화제펌프, 연료인 케로신을 고압으로 연소기에 공급하기 위한 연료펌프와 이 두 펌프를 구동하기 위한 터빈으로 구성되며, 산화제펌프와 연료펌프 사이에는 추진제의 혼합을 방지하기 위한 혼합방지 실(inter-propellant seal)이 장착된다. 이 중 두 개의 펌프는 연소실에 필요한 고압의 추진제를 작은 크기로 공급할 수 있는 편흡입 방식의 단단 원심펌프를 채택하였다. 또한 펌프의 성능을 극대화하기 위해 10000-30000 rpm의 비교적 높은 회전수에서 구동된다[1-3].

높은 회전수에서 펌프를 구동시킬 때에는 펌프 회전체에 작용하는 하중을 고려해야 한다. 편흡입 방식의 펌프는 구조적으로 임펠러 전후의 압력 차이에 의한 축방향 하중이 발생하며, 볼류트의 비대칭성은 펌프의 로터에 반경방향 하중을 가할 수 있다. 더욱이 회전수가 증가할 때 펌프의 양정뿐만 아니라 내부 압력 역시 회전수의 제곱에 비례하여 증가하기 때문에 고속 펌프의 회전체는 그만큼 많은 하중을 받게 된다.

회전체의 과도한 하중은 베어링에 영향을 주어 터보펌프의 작동 안정성을 해치고 작동 시간 감소의 원인이 된다. 심한 하중으로 베어링이 손상되는 경우 인듀서, 임펠러와 같은 펌프의 주요 구성품의 손상으로 이어질 수 있다. 특히 작은 불꽃에도 쉽게 반응하는 액체 산소를 이송하는 산화제펌프에서의 회전체의 손상은 펌프의 유실로 이어질 수 있는 중요한 문제이다. 따라서 회

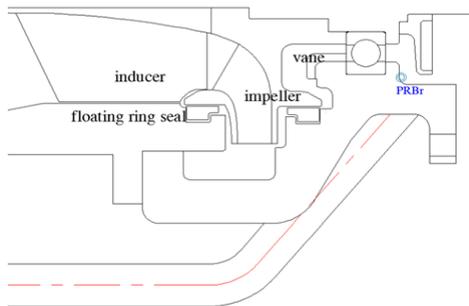


Fig. 1 Layout of LOX pump[4].

전체의 하중은 터보펌프의 안정성을 입증하기 위해 반드시 검증해야 할 요소이다.

이에 본 논문에서는 한국형발사체 1단 및 2단에 사용 예정인 75톤급 액체로켓엔진용 터보펌프의 구성품 중 하나인 산화제펌프의 상사 축추력시험 결과를 토대로 펌프 회전체에 가해지는 하중을 예측하여 산화제펌프의 작동 안정성에 대해 분석하였다.

2. 시험 개요

2.1 시험품 개요

시험품인 산화제펌프는 한국형발사체의 1단 및 2단에 적용 예정인 진공 추력 75톤급 액체로켓엔진의 구성품 중 하나이다(Fig. 1 참조). 펌프의 로터는 추진제를 가압하기 위한 임펠러와 임펠러에서의 과도한 캐비테이션을 방지하기 위한 인듀서로 이루어지며, 임펠러와 인듀서 전후에는 로터에서 발생하는 하중을 지탱하기 위한 베어링이 있다. 임펠러에서 운동 에너지를 얻은 유체는 스파이럴 형태의 통로인 볼류트를 통해 압력 에너지로 변환되어 토출된다. 그리고 임펠러에서 토출된 유체 중 일부는 임펠러의 전방과 후방의 좁은 틈인 이차 유로(누설 유로)로 흘러가게 된다. 이차 유로에는 플로팅 링 실과 축추력 조절용 베인이 있어 누설 유량과 축방향 하중을 조절하는 역할을 한다. 특히 축추력 조절용 베인은 임펠러 후방 공동의 압력 분포를 바꾸어 임펠러나 케이싱의 교체 없이 펌프의 축방향 하중을 조절하는 역할을 한다[4-6].

2.2 시험 설비

산화제펌프의 축추력시험은 75톤급 산화제펌프 및 연료펌프의 상사 시험을 위해 항우연 원내에 구축된 터보펌프 대형상사 시험설비[7,8]에서 진행되었다. 시험은 상온의 물을 폐회로 방식으로 순환시키며 이루어진다. 시험기는 성능시험용 스탠드와 축추력시험용 스탠드로 나뉘며, 펌프 구동에 필요한 모터와 유체 공급에 필요한 물탱크는 공유된다. 모터는 양축식으로 축 끝단

에 연결된 커플링을 탈부착 하여 하나의 스탠드에서만 시험이 이루어지게 조절하며, 물탱크에는 시험 조건에 맞게 탱크의 압력을 제어할 수 있는 가압장치와 진공펌프가 연결되어 있다. 한편 폐회로의 하류에는 유량조절밸브와 터빈 유량계가 설치되어 있으며, 축추력시험용 스탠드에는 펌프를 고속으로 회전시키기 위한 증속 기어박스, 축추력을 측정하기 위한 축추력 측정 장치를 배치하였다(Fig. 2).

이 중 축추력 측정 장치(Fig. 3)는 펌프의 외부에서 펌프의 로터에서 발생하는 축추력을 측정하기 위해 별도로 제작된 장치이다. 작동 원리는 이전 연구에서 적용했던 것[9]과 유사하나 높은 토크와 회전수에서 작동 가능할 수 있게 크기를 키웠으며 축방향 마찰을 최소화 할 수 있도록 개선하였다. 축추력 측정 장치의 규격은 Table 1에 정리하였다.

2.3 시험 내역 및 주요 측정 변수

축추력시험은 설계 유량비(flow ratio; 설계유량계수와 측정유량계수의 비율, Q_d)에서 회전수에 따른 펌프의 성능을 파악하는 시험과 일정한 회전수에서 유량비에 따른 펌프의 축추력을 측정하는 시험으로 나누어 실시하였다. 구체적인 시험 범위는 Table 2와 같다.

시험 분석에 사용한 주요 변수는 양정, 효율, 압력 계수 C_p , 축방향 하중 계수[10], 반경방향 하중 계수가 있으며 각각의 정의는 Eq. 1-5와 같다. 여기서 P_{o_i} 는 펌프 출구 전압, P_{i_i} 는 펌프 입구 전압, Q 는 부피 유량, T 는 토크, w 는 회전수, U_{t_2} 는 임펠러 끝단속도, P_s 는 측정 위치에서의 정압, P_{i_s} 는 펌프 입구 정압, r_{t_2} 는 임펠러 반지름, F_A 는 축방향 하중(입구 유동 방향이 +), F_R 은 반경방향 하중이다.

$$head = (P_{o_i} - P_{i_i}) / (\rho g) \tag{1}$$

$$efficiency = (P_{t_o} - P_{t_i}) Q / (T w) \tag{2}$$

$$C_p = (P_s - P_{i_s}) / (0.5 \rho U_{t_2}^2) \tag{3}$$

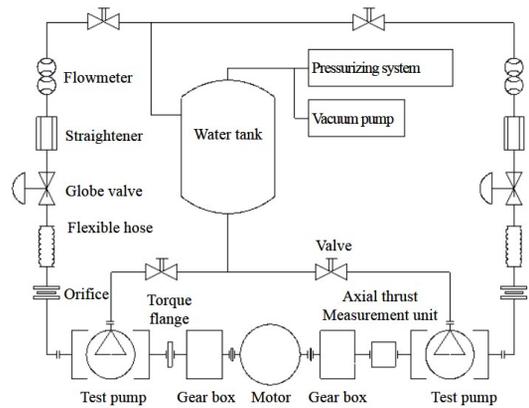


Fig. 2 Schematics of the facility.

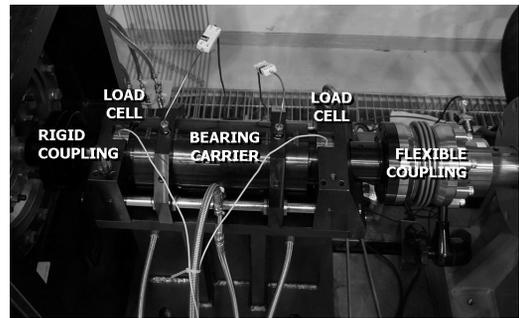


Fig. 3 Axial thrust measurement unit.

Table 1. Specification of axial thrust measurement unit.

Parameter	Value
Speed	9000 rpm
Torque	1300 N-m
Axial thrust	10000 N

Table 2. Test regions.

Speed	2000 rpm-8000 rpm	7000 rpm
Flow ratio	1.0 Q_d	0.86 Q_d -1.19 Q_d

$$axial\ thrust\ coefficient = F_A / (\pi r_{t_2}^2) / (0.5 \rho U_{t_2}^2) \tag{4}$$

$$radial\ thrust\ coefficient = F_R / (\pi r_{t_2}^2) / (0.5 \rho U_{t_2}^2) \tag{5}$$

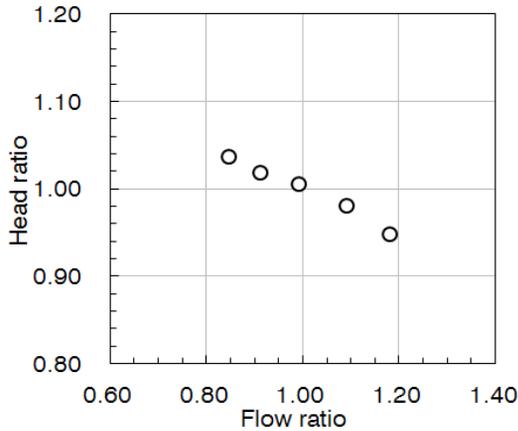


Fig. 4 Head ratio according to flow ratio.

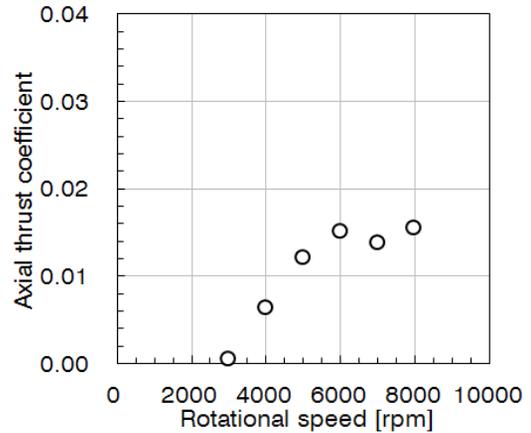


Fig. 6 Axial thrust coefficient according to rotational speed.

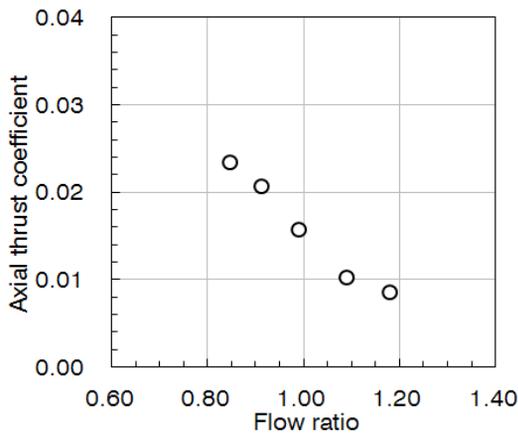


Fig. 5 Axial thrust coefficient according to flow ratio.

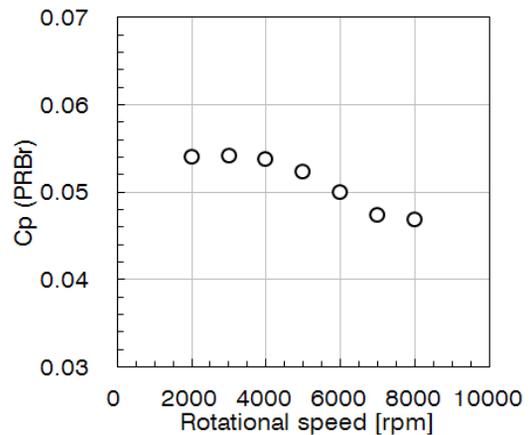


Fig. 7 Bearing outlet pressure according to rotational speed.

펌프의 양정은 입출구 배관에 압력 센서를 연결하여 측정하며, 펌프의 내부 압력 분포는 볼류트 스크롤과 이차 유로에 센서를 연결하여 측정하였다. 축방향 하중은 앞서 설명한 축추력 측정 장치를 사용하였고, 반경 방향 하중은 볼류트 스크롤의 분포를 토대로 간접적으로 추정하였다.

3. 시험 결과

3.1 축방향 하중 측정

7000 rpm에서 유량을 바꾸어가며 측정한 양정의 변화는 Fig. 4에 나타내었다. 양정과 유량은

설계점에서의 값으로 무차원화하여 표현하였다. 산화제펌프의 양정은 유량비가 작아질수록 완만하게 증가하는 전형적인 원심펌프의 특성이 잘 나타났다.

Fig. 5는 같은 조건에서 측정된 산화제펌프의 축방향 하중 특성이다. 유량비가 작을수록 하중이 증가하는데, 이는 양정이 증가하는만큼 내부 압력도 증가했기 때문으로 풀이된다. 이러한 경향은 일반적인 원심펌프의 경향[11]과 일치하며, 이전 시험 결과[4]와도 유사하다.

2000 rpm부터 8000 rpm까지 회전수를 바꾸어가며 측정한 축방향 하중을 Fig. 6에 정리하였다. 각 시험마다 유량비가 조금씩 다르기 때문에

측정된 하중을 Fig. 5의 경향을 참고하여 설계유량비에서의 값으로 환산하여 표기하였다. 저회전수에서는 회전수가 증가하면서 축방향 하중 계수가 대체로 증가하고 있어 축방향 하중이 회전수 상사 법칙을 따르지 않았다. 이는 축방향 하중에 영향을 주는 내부 유동의 압력 중 일부가 회전수 상사 법칙을 따르지 않기 때문으로 추정된다. 또한 측정 규격에 비해 측정값이 작아 측정불확도가 높은 것도 이유로 꼽을 수 있다. 반면 6000 rpm 이상의 고회전수에서는 축방향 하중 계수가 어느 정도 수렴하였다.

같은 조건에서 베어링 출구에서 측정한 압력 (PRBr)을 Fig. 7에 정리하였다. 이론적으로 베어링 출구 압력은 이차 유로 중 베어링 출구부터 펌프 입구까지 구간에서의 압력 손실로 표현된다. Fig. 6과는 달리 베어링 출구에서의 압력 계수는 저회전수 구간에서 회전수가 증가할수록 대체로 감소하여 상사 법칙을 따르지 않았다. 이는 이차 유로의 형상이 복잡(좁은 단면, 단면에 비해 긴 유로)하여 점성의 영향이 상대적으로 크기 때문으로 추정된다. 한편 베어링 출구가 임펠러 뒤쪽에 위치하기 때문에 이곳의 압력이 작아지면 펌프 로터는 양의 방향으로 힘을 받게 된다. 따라서 베어링 출구 압력 감소는 저회전수에서의 축방향 하중 계수 현상의 원인 중 하나가 될 수 있다.

3.2 반경방향 하중 측정

7000 rpm에서 유량을 바꾸어가며 측정한 볼류트 스크롤의 압력 변화를 Fig. 8과 같이 표현하였다. 시험품인 산화제펌프는 고유량으로 갈수록 스크롤에 서의 압력 상승 폭이 작아졌다. 다른 시험에서 측정된 산화제펌프의 유량에 따른 효율(Fig. 9)을 보면 산화제펌프의 효율이 가장 높은 점(BEP: best efficiency point)이 설계유량비보다 높은 것을 알 수 있다. 따라서 산화제펌프의 스크롤 압력 변화는 BEP에서 볼류트 압력 변화가 가장 작다는 원심펌프의 일반적인 특성[11]과 부합한다.

볼류트 스크롤에서 측정된 압력 분포를 토대로 펌프 유량이 0.9Qd, 1.0Qd, 1.1Qd일 때 펌프

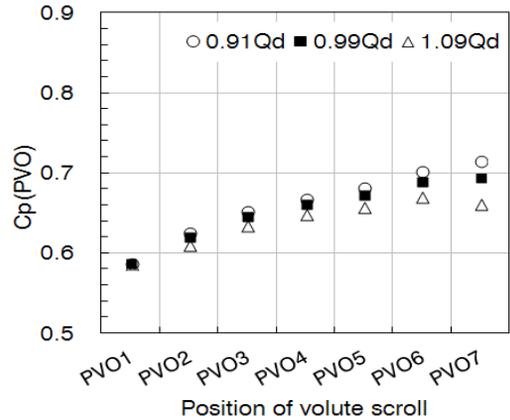


Fig. 8 Pressure distribution of volute scroll.

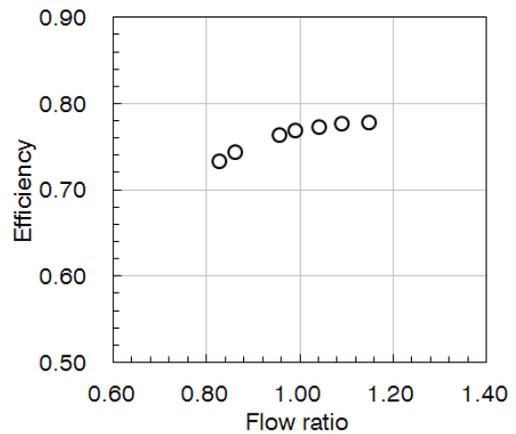


Fig. 9 Efficiency according to flow ratio.

로터에 작용하는 반경 방향 하중을 계산하여 Fig. 10에 나타내었다. 계산의 편의상 볼류트 스크롤의 외벽에서 측정된 압력이 임펠러 출구에 작용한다고 가정하여 반경방향 하중을 계산하였다. 그림에서 확인할 수 있듯이 반경 방향 하중의 방향은 유량비와 무관하며, 스크롤에서의 압력 상승이 완만했던 고유량 영역에서 하중의 크기가 상대적으로 작게 나타났다. 일반적인 원심펌프의 경우 압력 변화가 가장 작은 BEP에서 반경방향 하중이 최소가 된다고 알려져 있기 때문에 시험 결과는 원심펌프의 일반적인 경향과 일치한다.

앞서 계산된 하중으로 산화제펌프의 후방 베

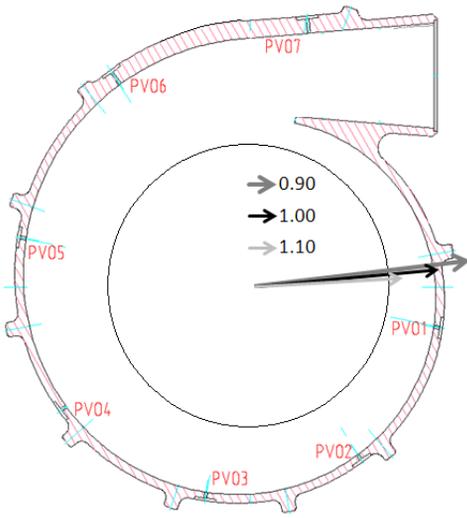


Fig. 10 Radial thrust of LOX pump.

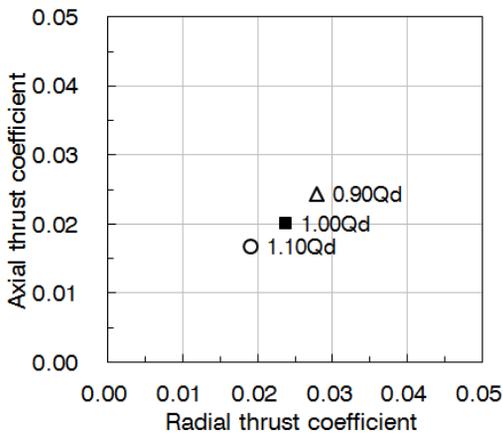


Fig. 11 Thrusts on rotor of LOX pump.

어링에 작용되는 하중을 계산하여 Fig. 11과 같이 나타내었다. 반경방향 하중과 축방향 하중 모두 유량비가 작을수록 증가하는 경향을 보였다. 한편 측정된 하중의 크기가 적절한지 알기 위해서는 베어링의 하중과 수명에 대한 다양한 시험이 필요하지만 이는 시간과 비용이 많이 소요된다. 대신에 항우연에서는 예상되는 베어링의 하중을 미리 선정하여 베어링의 내구 성능 시험 [12]을 성공적으로 완료한 바 있으며, 본 시험에서 측정된 하중은 내구 성능 시험에서 적용한 값보다 작다. 또한 Fig. 10의 하중은 크기가 같

은 산업용 베어링의 정격 하중에 비해 크지 않다. 따라서 산화제펌프 로터에 작용하는 하중은 펌프 작동 안정성을 해치지 않을 것으로 생각된다.

4. 결 론

상사 시험을 통해 한국형발사체에 적용 예정인 75톤급 액체로켓엔진용 산화제펌프의 축방향 하중과 반경방향 하중을 예측하여 펌프의 작동 안전성을 알아보았다. 펌프의 축방향 하중은 회전수 상사 법칙에 부합하지 않았는데, 이는 이차 유로의 압력 분포와 연관이 있을 것으로 추정된다. 펌프의 축방향 하중은 양정이 높은 저유량 영역에서 더 높은 것으로 측정되었다. 또한 펌프의 반경방향 하중 역시 유량이 작을수록 증가하였는데, 시험품인 산화제펌프의 BEP가 고유량 영역에 있는 것과 연관이 있어 보인다. 시험 결과를 토대로 베어링에 작용하는 하중을 계산한 결과, 산화제펌프의 하중은 펌프 성능에 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

References

1. Kim, J., Choi, C.H., Jeong, E., Jeon, S.M. and Hong, S.S., "Development Status of a Turbopump for Korea Space Launch Vehicle(KSLV-II)," *Proceedings of the Korean Society for Aeronautical & Space Science Fall Conference*, Jeju, Republic of Korea, pp. 254-263, Nov. 2012.
2. Kwak, H.D., Kim, D.J., Kim, J.S., Kim, J., Noh, J.G., Park, P.G., Bae, J.H., Shin, J.H., Yoon, S.H., Lee, H., Jeon, S.M., Jeong, E., Choi, C.H., Hong, S.S., Kim, S.L., Kim, S.H. and Han, Y.M., "Performance Test of a 7 Tonf Liquid Rocket Engine Turbopump," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 19, No. 2, pp.

- 65-72, 2015.
3. Choi, C.H., Hong, S.S. and Kim, D.J., "Development of Pumps for Liquid Rocket Engine Turbopumps," *Proceedings of the Korean Society of Propulsion Engineers Fall Conference*, Jeongsun, Kangwon-do, Republic of Korea, pp. 899-902, Dec. 2014.
 4. Kim, D.J., Choi, C.H., Noh, J.G. and Kim, J., "Axial Thrust Control of High-speed Centrifugal Pump with Cavity Vanes," *Journal of Fluid Machinery*, Vol. 15, No. 6, pp. 46-50, 2012.
 5. Choi, C.H., Noh, J.G., Kim, D.J. and Kim, J., "Study on the Control of the Axial Thrust of a Pump for Liquid Rocket Engine Turbopumps," *Journal of Fluid Machinery*, Vol. 15, No. 1, pp. 36-40, 2012.
 6. Choi, C.H., and Kim, J., "Centrifugal Turbomachine with Axial Thrust Control Member," US Patent No. 7354240B2, Apr. 2008.
 7. Kim, D.J., Choi, C.H., Hong, S.S. and Kim, J., "Design of Single-Pump Test Facility for Turbopump," *Proceedings of the KSME Fluid Engineering Division Spring Conference*, Jeju, Republic of Korea, pp. 311-312, May 2013.
 8. Kim, D.J., Kwak, H.D., Choi, C.H., Lee, J.G., Lim, J.W. and Cho, H.G., "Construction of Single-Pump Model-fluid Test Facility for Turbopump," *Proceedings of the Korean Society of Propulsion Engineers Spring Conference*, Busan, Republic of Korea, pp. 606-610, May 2015.
 9. Kim, D.J., Hong, S.S., Choi, C.H. and Kim, J., "Axial Thrust Measurement of Fuel Pump for Liquid Rocket Engine," *Proceedings of the Korean Society of Propulsion Engineers Fall Conference*, Daejeon, Republic of Korea, pp. 358-362, Nov. 2005.
 10. Kurokawa, J., Kamijo, K. and Shimura, T., "Axial Thrust Behavior in LOX-Pump of Rocket Engine," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 10, No. 2, pp. 244-250, 1994.
 11. Stepanoff, A.J., *Centrifugal and Axial Flow Pumps*, 2nd ed., John Wiley & Sons Inc., New York, N.Y., U.S.A., 1957.
 12. Jeon, S.M., Kwak, H.D. and Kim, J., "Evaluation of Friction Torque for a Turbopump Ball Bearing," *Journal of the Korean Society of Tribologists and Lubrication Engineers*, Vol. 27, No. 1, pp. 25-33, 2011.