

터보펌프 축추력 조절용 캐비티 베인에 대한 수치해석적 연구

노준구* · 최창호* · 김진한*

Numerical Study on the Effect of Cavity Vanes to Control the Axial Thrust of a Turbopump

Jun-Gu Noh*, Chang-Ho Choi*, Jinhan Kim*

Key Words: Turbopump (터보펌프), Axial thrust (축추력), Cavity (공동), Vane (갓), Passive balancing (수동밸런싱)

ABSTRACT

The magnitude of the axial force acting on turbopump bearings has a great influence on the operational reliability and service life of a turbopump. In the turbopump under current investigation the cavity vanes are introduced to the pump shroud casing to control the axial thrust of the turbopump. To investigate the effect of the cavity vanes, 3D computational flow analyses for a propellant pump stage including an inducer, impeller, volute and secondary flow passages are performed with and without the vanes. The results show that the cavity vanes are very effective in reducing the magnitude of axial thrust without notable changes on the overall performance of the turbopump.

1. 서론

낮은 압력의 추진제를 흡입하여 높은 압력으로 연소실에 공급하는 역할을 하는 터보펌프는 액체로켓엔진의 신뢰성을 좌우하는 중요한 시스템으로 추진제펌프와 이를 구동하는 터빈으로 구성된다. 추진제펌프는 고유량의 추진제를 높은 압력 조건에서 이송시켜야 하는 동시에 소형경량이어야 한다. 따라서 추진제펌프에는 축류형 인듀서와 결합된 편흡입 (single suction) 원심형 임펠러가 사용되는 것이 일반적이다⁽¹⁾.

Fig. 1은 편흡입 임펠러에 작용하는 펌프 내부의 압력분포를 나타낸 것으로 낮은 흡입압력 (P_1)으로 인해 임펠러 앞면과 뒷면에 작용하는 힘이 평형을 이루지 못하여 펌프 입구 방향으로 임펠러를 미는 축하중이 발생한다. 회전속도와 토출압력이 낮은 펌프의 경우

스러스트 베어링 (thrust bearing) 만으로도 이러한 축추력을 충분히 감당할 수 있지만 산업용 펌프와 달리 매우 빠른 속도로 회전하며 높은 압력을 발생시키는 추진제펌프의 경우 축하중이 과다하게 작용하여 이를 보정하지 않으면 베어링의 수명이 단축되고 심하면 베어링이 파손되어 폭발로 이어질 수 있다. 따라서 베어링이 안정적으로 작동하도록 추진제펌프의 축추력을 적절히 조절하는 것은 터보펌프 작동에 대한 신뢰성 확보에 매우 중요한 요소가 된다.

한국항공우주연구원에서 개발하여 현재 성능시험 중인 30톤 추력급 액체로켓엔진용 터보펌프⁽²⁾의 설계 과정에서도 축추력은 중요한 설계변수로 다루어졌으며 축추력 크기가 베어링이 충분히 견딜 수 있는 범위 안에 들도록 보정하여 주는 방안에 대한 연구가 선행되었다. 본 논문에서는 터보펌프의 산화제펌프에 적용된 축추력 경감방법에 대해 설명하고 그 효과를 3차원 유동해석을 통해 증명하였다.

* 한국항공우주연구원 터보펌프그룹
책임저자 E-mail : jgnoh@kari.re.kr

2. 축추력 경감장치

편흡입 원심펌프의 축추력 감소방법은 여러 가지가 있으나 일반적으로 사용되는 것은 Fig. 2와 같이 임펠러 전후방 쉬라우드 케이싱에 동일한 면적의 웨어링 링 실 (wearing ring seal)을 설치하고 임펠러 허브 표면에서 뒤쪽의 캐비티까지 연결되는 평형공 (balance hole)을 뚫는 것이다. 평형공을 통해 캐비티 내부압력이 임펠러의 입구압력 (P_1)과 비슷한 수준으로 조정되어 펌프 입구 방향으로 작용하는 축추력의 크기가 줄어든다. 그러나 임펠러 뒤쪽 웨어링 링 실을 지나 평형공을 통해 다시 임펠러로 유입되는 누설유동 (leakage flow)은 임펠러 내부 주유동 (main flow)에 방해가 되므로 임펠러 입출구의 압력차가 큰 추진제펌프에 이와 같은 방법을 적용하는 것은 적절하지 않다⁽³⁾.

따라서 한국항공우주연구원에서 개발한 산화제펌프의 경우 임펠러에 평형공을 뚫지 않고 케이싱 외부에 캐비티와 펌프 입구를 연결하는 바이패스관 (bypass pipe)을 설치하여 이를 통해 임펠러 후방 누설유동이 펌프 입구로 유입되도록 설계하였다. 캐비티를 지나는 누설유동은 바이패스관으로 들어가기 전에 베어링에서 발생하는 열을 냉각시키기 위해 베어링 내륜과 외륜

사이의 복잡하고 좁은 틈을 통과하게 되어 있는데 이 부분의 압력손실이 크기 때문에 베어링을 통과하기 전 캐비티 압력은 베어링 통과 후 바이패스관 입구압력보다 매우 큰 값을 갖는다. 바이패스관을 지나는 누설유동의 압력손실을 고려하면 펌프 입구의 압력은 바이패스관 입구의 압력보다 낮기 때문에 결과적으로 캐비티 내부압력은 펌프 입구의 압력보다 높은 상태가 되고 이로 인해 펌프 입구방향으로 작용하는 축추력이 평형공을 뚫는 경우에 비해 커지게 된다. 따라서 바이패스관 설치만으로는 산화제펌프의 축추력을 충분히 줄여 주지 못함을 알 수 있다.

축추력 경감 목적의 베인은 Fig. 3과 같이 임펠러 뒷면에 일체형으로 형성되는 것이 일반적이다. 임펠러와 케이싱 사이의 작동유체는 점성에 의해 임펠러를 따라 회전하는데 여기에서 원심력이 발생하여 반경이 커질수록 압력이 높아지며 반경이 최대인 곳의 압력은 임펠러 출구압 (P_2)과 같다. 임펠러와 함께 회전하는 베인이 있는 경우에는 임펠러와 케이싱 사이의 작동유체가 더욱 빠른 속도로 회전하기 때문에 원심력에 의한 반경방향 압력편차가 심해지며 최대 반경의 압력은 임펠러 출구압과 같으므로 회전축 부근의 압력이 상대적으로 더 낮아져 임펠러 뒷면에 작용하는 힘이 줄어든다⁽³⁾.

그러나 이처럼 베인과 일체화된 임펠러를 사용하는

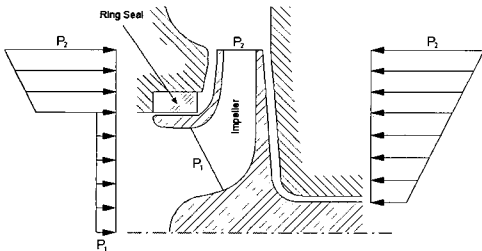


Fig. 1 Pressure distribution on a closed impeller with front wearing ring seal

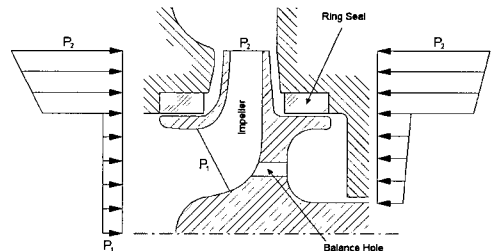


Fig. 2 Pressure distribution on a closed impeller with wearing ring seals and balance holes

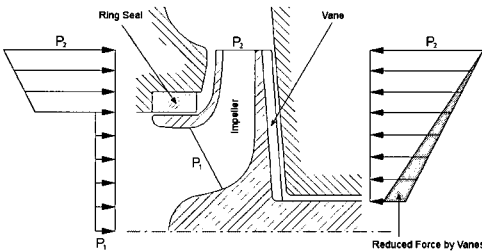


Fig. 3 Pressure distribution on a closed impeller with vanes on back side and front wearing ring

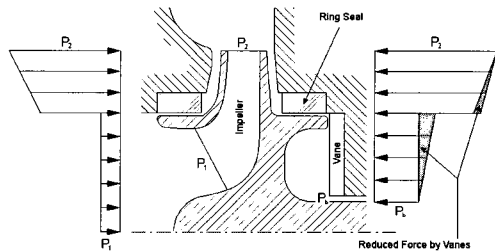


Fig. 4 Pressure distribution on a closed impeller with wearing ring seals and cavity vanes

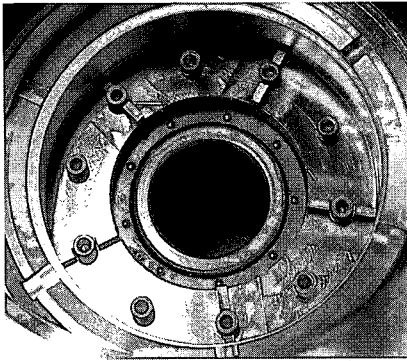


Fig. 5 Bolted cavity vanes with the lox pump casing

방법은 베인이 추가적인 동력을 소모하며 임펠러를 새로 제작하지 않는 한 베인의 형상이나 개수를 변경하기 어렵다는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 캐비티 후방 쉬라우드 케이싱에 베인을 도입하였다. 펌프 캐비티 부근의 케이싱에 탈부착 가능한 베인을 설치하여 필요한 경우 베인의 형상과 개수를 쉽게 바꿀 수 있게 하였다. 캐비티 베인은 고정되어 있기 때문에 임펠러에 설치된 베인의 역할과는 반대로 캐비티 내부의 작동유체가 임펠러를 따라 회전하는 것을 방해하여 원심력에 의한 반경방향 압력편차를 줄여준다. Fig. 4는 캐비티 베인의 설치로 인한 펌프내부의 압력분포 변화를 나타낸 것이다. 펌프의 운전조건이 바뀌지 않으면 임펠러 출구압 (P_2)과 캐비티 출구압 (P_b)이 변하지 않기 때문에 베인에 의해 캐비티 내부압력이 균일해지면 임펠러 뒷면에 작용하는 힘의 크기는 줄어들어 축추력이 감소한다.

Fig. 5는 실제 산화제펌프의 케이싱에 볼트로 체결되어 있는 캐비티 베인으로 5개의 베인이 하나의 원판 위에 일체형으로 가공되어 있으며 베인의 높이나 개수를 변경해야 할 필요가 있을 때는 해당 부품만 새로

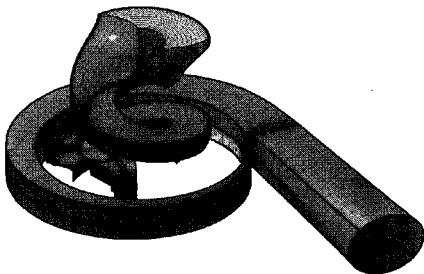


Fig. 6 3D computational grid of the oxidizer pump stage

제작하여 교체하면 된다.

3. 격자생성 및 해석방법

캐비티 베인의 유무에 따른 축추력 변화를 확인하기 위해 산화제펌프에 대한 3차원 유동해석을 수행하였다. 해석에는 상용 소프트웨어인 FINE™/Turbo가 사용되었는데 선행된 여러 연구를 통해 터보펌프 관련 성능예측 결과를 신뢰할 수 있었다^(4~7).

Fig. 6은 인두서, 임펠러, 볼류트 및 2차 유로로 이루어진 산화제펌프의 계산격자이다. 전체 16개의 정렬 격자 블록으로 이루어져 있고 격자점 수는 베인이 없는 경우 867,711개, 베인이 있는 경우 1,050,641개이다. 벽면에서 첫 번째 격자점까지의 거리는 벽함수를 사용하는 $k-\epsilon$ 난류모델을 적용하는 것을 고려하여 $y+$ 값이 20~50이 되도록 분포시켰다. 주기조건이 서로 다른 인두서, 임펠러, 볼류트 및 캐비티를 포함한 2차 유로의 격자는 혼합면기법으로 연결되었다. 혼합면기법은 정상해석에서 상류와 하류의 주기조건이 다를 때 일반적으로 사용되며 회전수가 낮지 않은 경우 전체성능 예측의 정확도가 높은 편이다⁽⁸⁾. Fig. 7은 자오면 격자를 나타낸 것으로 베인의 유무에 따라 캐비티 부분의 격자만 다르게 구성되어 있음을 보여준다.

앞서 설명한 바와 같이 산화제펌프의 임펠러 후방으로 흐르는 누설유동은 결국 펌프 입구로 다시 유입되기 때문에 펌프 출구에서 설계유량이 빠져나가려면 펌프 입구유량이 설계유량에 후방 누설유량을 더한 값이 되어야 한다. 유동해석에서는 격자생성을 간단히 하고 계산시간을 줄이기 위해 임펠러 후방 베어링을 동일한 압력손실 특성을 갖는 좁은 유로로 대체하였고 바이패스관도 생략하였다. 바이패스관 내부의 압력손실은관의 직경을 바꾸거나 오리피스를 사용하여 인위

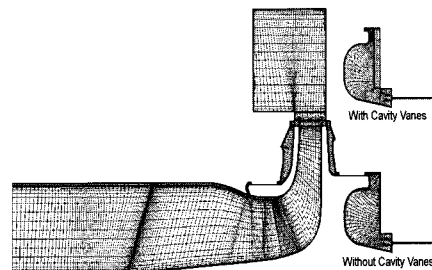


Fig. 7 Meridian grid of the oxidizer pump stage with and without cavity vanes

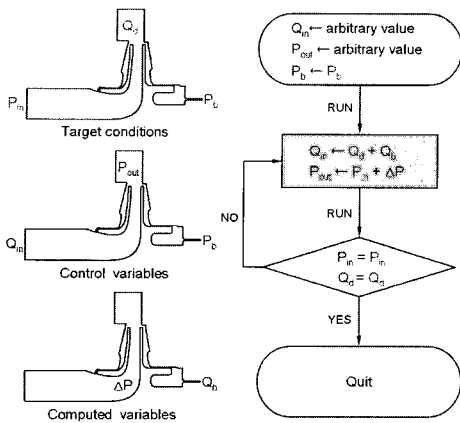


Fig. 8 Process of Boundary condition setup

적으로 조절가능하기 때문에 바이패스관을 계산영역에 넣지 않아도 베어링 출구 압력을 펌프 입구 압력에 바이패스관에서 예상되는 압력차를 더한 값으로 설정하여주면 정확한 후방 누설유량을 계산할 수 있다. 그러나 비압축성 유동해석의 특성상 펌프 입구압력은 펌프 출구에 경계조건으로 설정된 압력에 의해 결정되므로 계산을 하기 전에 미리 그 값을 알 수 없다. 후방 누설유량 역시 계산을 통해 나오는 값이므로 계산 전에 펌프 입구유량을 결정할 수 없다. 이는 유동해석에 필요한 경계조건을 계산 전에 명확히 알 수 없음을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 8과 같이 펌프의 입구유량과 출구압력에 임의의 값을 주고 반복계산을 수행하며 설계점에 맞는 경계조건을 찾아 나갔다.

실제 산화제펌프의 작동유체는 밀도 1,117 kg/m³의

액체산소이지만 수류시험 결과와 쉽게 비교하기 위해 밀도 1,001 kg/m³의 물로 계산을 수행하였다. 펌프의 회전속도도 수류특성과 경제적인 계산시간을 고려하여 설계회전수의 25%인 5,000 rpm으로 낮추어 해석하였다. 난류모델로 standard k-ε 모델을 선택하였고 수류를 가속시키기 위해 3단계의 다중격자기법을 적용하였다.

4. 해석결과 비교

Fig. 9에 원주방향으로 평균된 산화제펌프 내부의 유선분포를 캐비티 베인이 없는 경우와 있는 경우를 비교하여 나타내었다. 인듀서 앞쪽에서부터 블레이드 팁 간극 부분까지 크게 형성되어 있는 역류영역과 쉬라우드로 유입되는 전방 누설유동에 의한 임펠러 앞전의 2차 유동을 제외하면 인듀서와 임펠러 내부의 유동은 펌프 입구에서 임펠러 출구까지 매끄럽게 흐르고 있다. 그러나 회전하는 면과 정지해 있는 면이 인접해 있는 누설유로와 캐비티 부분에는 상당히 복잡한 2차 유동이 생성되며 캐비티 부분의 유선은 베인의 유무에 따라 분명한 대조를 보인다. 이러한 흐름의 차이가 내부압력에 미치는 영향을 파악하기 위하여 Fig. 10에 산화제펌프 내부의 정압력계수를 나타내었는데 캐비티 베인이 없는 경우 원심력에 의한 반경방향 압력편차를 관찰할 수 있는 반면 캐비티 베인이 있는 경우 캐비티 내부의 압력이 균일해짐을 알 수 있다. 캐비티 부분을 제외한 나머지 펌프 내부의 압력분포는 두 경우가 거의 유사하며 이는 임펠러 앞면에 작용하는 압력분포가 비

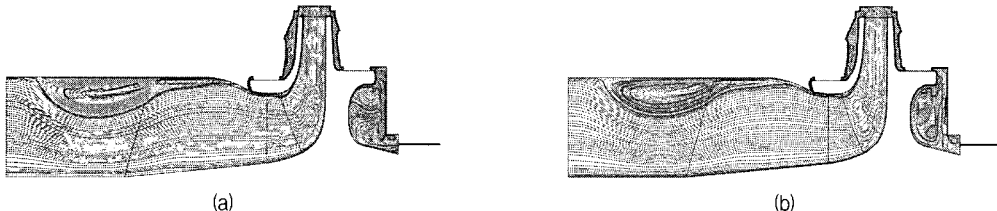


Fig. 9 Pitchwise-averaged streamlines : (a) Without cavity vanes (b) With cavity vanes

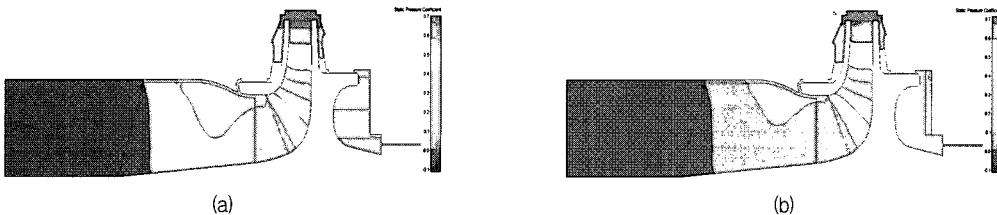


Fig. 10 Pitchwise-averaged static pressure coefficient : (a) Without cavity vanes (b) With cavity vanes

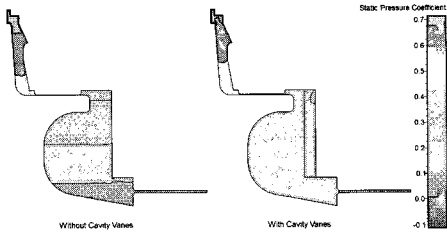


Fig. 11 Pitchwise-averaged static pressure coefficient of rear leakage flow passages

Table 1 Predicted performance of the oxidizer pump

Parameter	Without Vane	With Vane
Flow Coefficient, ϕ	0.192	0.192
Head Coefficient, ψ	0.920	0.937
Efficiency, η	0.744	0.743
Front Leakage Ratio	0.00299	0.00320
Rear Leakage Ratio	0.00281	0.00475
Axial Thrust (kN)	-3.920	-1.104

숫하다는 것을 의미한다. 따라서 축추력의 크기는 Fig. 11에 자세히 나타낸 캐비티를 포함한 임펠러 뒷면의 압력분포에 의해 영향을 받는다는 결론을 내릴 수 있다.

Table 1에 유동해석에 의한 산화제펌프의 성능예측 결과를 나타내었다. 설계점에서 캐비티 베인의 유무에 따른 양정과 효율의 차이는 크지 않으나 펌프 입구방향으로 작용하는 축추력의 크기는 베인이 있는 경우 약 3kN 가량 감소하는 것으로 예측되었다. 또한 임펠러 전방의 누설유량은 설계점 유량의 약 3% 정도로 큰 차이가 없지만 임펠러 후방의 누설유량은 베인이 없는 경우 설계점 유량의 3%, 있는 경우 5% 정도로 예측되어 캐비티 내부의 압력분포에 의해 영향을 받는 것으로 나타났다.

5. 결론

30톤 추력급 액체로켓의 터보펌프 개발과정에서 산화제펌프의 축추력을 조절하기 위해 캐비티 부분 쉬라우드 케이싱에 교체가 가능한 형식의 베인을 도입하였다.

3차원 유동해석을 이용하여 산화제펌프의 성능을 예측한 결과 캐비티 베인을 부착하는 경우 펌프의 효율과 양정에는 큰 영향을 미치지 않으면서 축추력을 크게 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다.

최근 한국항공우주연구원에서는 터보펌프의 축추력 값을 측정할 수 있는 실험장치의 개발을 완료⁽⁹⁾하였으며 현재 이를 이용한 실험을 진행하고 있으므로 빠른 시일 내에 캐비티 베인에 의한 추진제펌프의 축추력 감소효과를 실험적으로 증명할 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

- Huzel, K. D. and Huang, D. H., 1992, Modern Engineering For Design of Liquid-propellant Rocket Engines, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., Washinton DC, pp. 155~157.
- 김진한, 이은석, 홍순삼, 최창호, 전성민, 정은환, 2004, “액체로켓엔진용 터보펌프 개발현황,” 제5회 우주발사체기술 심포지움 논문집, pp. 38~51.
- Karassik, I. J. and McGuire, T., 1998, Centrifugal Pumps, Chapman & Hall, New York, NY, pp. 92~96.
- 최창호, 김진한, 2003, “액체로켓용 터보펌프 인두서/임펠러 상호작용에 대한 연구,” 유체기계저널, 제6권, 제4호, pp. 50~57.
- 최창호, 홍순삼, 김진한, 2005, “보조 인두서가 터보펌프의 흡입성능에 미치는 영향,” 유체기계저널, 제8권, 제3호, pp. 42~47.
- 노준구, 최창호, 홍순삼, 김진한, 2005, “터보펌프 인두서에 대한 수치해석적 연구,” 한국전산유체공학회 2005년도 추계학술대회 논문집, pp. 299~303.
- Chang-Ho Choi, Jun-Gu Noh, Jin-Sun Kim, Soon-Sam Hong, Jinhon Kim, 2005, “Effects of a Bearing Strut on the Performance of a Turbopump Inducer,” Proceedings of 41th AIAA/ASME/ASE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Tucson, AZ.
- Erds, J. I., Alzner, E. and McNally, W., 1997, “Numerical Solution of Periodic Transonic Flow Through a Fan Stage,” AIAA Journal, Vol. 15, No. 11, pp. 1559~1568.
- 김대진, 홍순삼, 최창호, 김진한, 2005, “로켓 엔진용 연료펌프의 축추력 측정,” 한국추진공학회 2005년도 추계학술대회 논문집.