

論文

유동해석을 이용한 터보펌프 성능 예측

최창호*, 노준구*, 김대진*, 홍순삼*, 김진한*

Performance Prediction of a Turbopump System

Chang-Ho Choi*, Jun-Gu Noh*, Dae-Jin Kim*, Soon-Sam Hong* and Jinhan Kim*

ABSTRACT

The performance of a turbopump system composed of an inducer, an impeller, a volute and seals has been computationally analyzed. To save the computational time, only one flow passage of the inducer and impeller is considered for the computations. A steady mixing-plane method is used on the impeller/volute interface for simulating the unsteady interaction phenomena.

The axial thrust is predicted from the turbopump calculation in its entirety, which is necessary for such estimation. Moreover, the effects of each component on the pump performance are investigated at a design condition through the analysis of flow structures.

The predicted performance is in good agreement with experimental data in terms of head rise, efficiency and volute wall pressure distributions despite of highly complex flow structures being present. The computational results also show that the axial and radial thrusts are within the design limit although corresponding experimental measurements were not taken.

초 록

액체로켓용 터보펌프의 설계과정에서 정확한 성능예측을 위해서 인듀서, 임펠러, 볼류트, 실 등의 펌프의 모든 부분을 포함한 유동해석을 수행하였다. 계산시간을 줄이기 위해서 인듀서와 임펠러는 주기조건을 사용하여 하나의 블레이드 통로만 해석하였으며, 인듀서와 임펠러, 임펠러와 볼류트 등의 상호작용은 정상적 해석법인 혼합면 기법을 사용하였다.

펌프의 모든 부분을 포함한 계산을 통하여 인듀서, 임펠러, 볼류트 등의 단독 유동해석을 통해서 예측할 수 없는 펌프설계의 매우 중요한 부분인 축추력 등을 예측할 수 있었으며, 각 부품이 전체 성능에 미치는 영향을 자세히 파악할 수 있었다.

계산결과를 실험결과와 비교하였는데, 양정, 효율, 볼류트 외벽 압력분포 등에서 실험결과와 잘 일치하였다. 또한 실험으로 검증하지는 못하였지만, 축추력, 반경방향 힘 등의 예측값도 설계요구조건을 만족시키는 것으로 나타났다. 따라서 펌프의 전부분을 포함한 유동해석법은 터보펌프의 설계 및 성능예측에 매우 유용하게 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

Key Words : Turbopump(터보펌프), Inducer(인듀서), Volute(볼류트), Computation(수치해석)

† 2005년 12월 1일 접수 ~ 2006년 1월 16일 심사완료

* 정회원, 한국항공우주연구원 터보펌프그룹
연락처, E-mail : cch@kari.re.kr
대전시 유성우체국 사서함 113호

1. 서 론

액체로켓은 액체 연료와 산화제를 연소시켜 분사시킴으로써 추진력을 얻는다. 이 때 액체연료

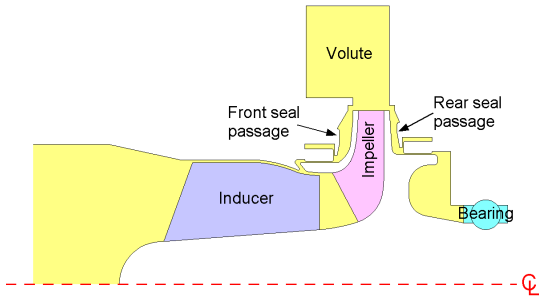


Fig. 1. Schematic sketch of a turbopump unit

와 산화제가 가압상태로 연소실에 공급되어야 하며, 크게 두 가지 방식이 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 발사체의 구조비가 나빠지는 단점이 있다. 반면, 터보펌프 방식은 고속으로 회전하는 터보펌프와 관련한 진동 및 공동화 (cavitation) 제어 등의 고도의 기술을 필요로 하지만 공급탱크의 경량화가 가능하며 추진기관의 구조비를 적게 할 수 있는 장점이 있다[1]. Fig. 1은 인듀서, 임펠러, 볼류트로 이루어진 일반적인 터보펌프의 개요도를 나타낸다.

최근 들어 인듀서나 임펠러와 같은 터보펌프의 구성요소 일부에 대한 유동해석을 수행하여 수력 성능을 예측하거나[2,3] 인듀서와 임펠러 또는 임펠러와 볼류트 등 추진제펌프 일부분의 상호작용에 대한 수치해석적 연구가 활발히 이루어지고 있으며[4], 이 경우 추진제펌프의 전체 성능은 누설유동 등에 의한 손실을 가정함으로써 예측이 가능하다. 그러나 이러한 방법으로는 인듀서/임펠러/볼류트 사이의 상호작용과 펌프의 성능 및 축추력에 큰 영향을 미치는 누설유로에서의 유동을 정확하게 예측하기 어렵다.

본 연구에서는 격자생성에 어려움이 있으나 누설유로를 포함한 터보펌프의 모든 구성요소를 계산영역으로 설정하여 펌프성능 및 축추력 예측의 정확도를 높이고자 하였으며, 계산결과를 실험결과와 비교하였다.

II. 격자생성 및 해석방법

Table 1에 본 연구에 적용된 터보펌프의 설계 요구조건을 나타내었다. 본 터보펌프는 유량과 회전속도가 매우 크며 큰 비속도를 갖는다. 본 연구에서는 터보펌프의 설계보다 유동해석에 초

Table 1. Design requirements of the pump

Mass flow rate (Kg/s)	64.1
Inlet total pressure (Mpa)	0.45
Outlet total pressure (Mpa)	9.8
Working fluid	LOX
Inlet temperature (K)	95
Density (kg/m ³)	1117.0
Rotational speed (RPM)	20,000
Efficiency (%)	> 65.0
Axial thrust (kN)	< 3.0
Radial force (kN)	< 1.0
Cavitation number	0.03

점을 맞추었으므로, 자세한 설계관련 기술은 생략한다[5,6].

본 펌프의 경우, 임펠러 출구 전방으로 흐르는 누설유동은 임펠러 앞쪽 플로팅 링 실을 거쳐 인듀서 중간의 쉬라우드 부분으로 유입되며 임펠러 출구 뒤쪽의 누설유동은 임펠러 후방에 위치하는 플로팅 링 실과 베어링을 지나 바이패스 관을 통해 인듀서 입구로 다시 들어가게 설계하였다. 따라서 전방 누설유량은 임펠러 출구와 인듀서 쉬라우드 사이의 압력차에 의해, 후방 누설유량은 임펠러 출구와 인듀서 입구 사이의 압력차에 의해 결정되며 볼류트 출구에서 설계유량이 빠져나가기 위해서는 인듀서 입구유량이 설계유량에 후방 누설유량을 더한 값이 되어야한다.

유동해석에서는 격자생성 작업을 간단히 하고 계산시간을 줄이기 위해 임펠러 후방 베어링을 동일한 압력손실 특성을 갖는 단순 실로 대체하였고 바이패스 관도 생략하였다. 후방 누설유동이 바이패스 관을 통과하면서 발생하는 압력손실량은 인위적으로 조절가능하기 때문에 바이패스 관을 계산영역에 넣지 않아도 베어링 출구압력을 인듀서 입구압력에 바이패스 관의 특정 압력차를 더한 값으로 설정하여주면 정확한 후방 누설유량을 계산할 수 있다[7,8].

상용 소프트웨어인 FINE™/Turbo[9]를 이용하여 유동해석을 수행하였다. 해석을 위해 생성된 격자는 모두 15개의 정렬격자 블록으로 이루어져 있고 전체 격자점 수는 1,051,641개이다. 벽면에서 첫 번째 격자점의 y+ 값이 20 이하가 되도록 첫 번째 격자의 폭을 0.015mm로 정하였다.

인듀서와 임펠러는 축을 중심으로 블레이드가 주기적으로 배치되어 있으므로 블레이드 통로 하나에 해당하는 격자만 생성하여 각각 3개, 7개의 주기조건을 설정하여 주었고 볼류트는 전체에 해당하는 격자가 생성되었다.

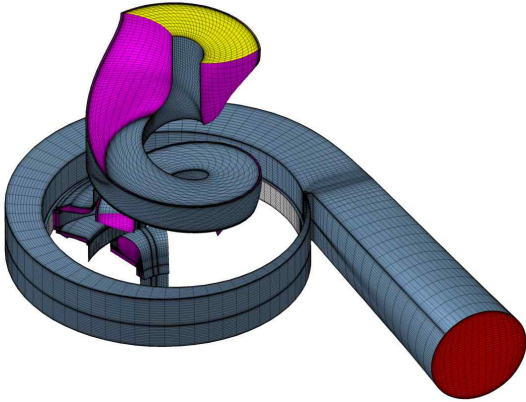


Fig. 2. Computational grid (1,050,641 cells)

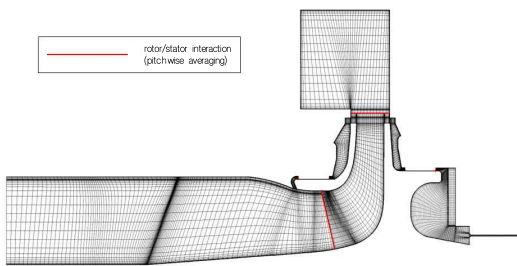


Fig. 3. Meridional computational grid

인듀서 격자의 경우 블레이드 끝부분에 얇은 격자블록을 삽입하여 1.0mm의 틱 간극을 모델링 하였다. 임펠러 출구 전방 누설유로는 0.2mm 간극의 플로팅 링 출구까지는 임펠러와 같은 7개의 주기조건을 갖도록 하였고 나머지 인듀서 쉬라우드와 연결되는 부분은 인듀서와 같은 3개의 주기조건을 주었다.

후방 누설유로 역시 0.2mm 간극의 플로팅 링 출구까지는 임펠러와 같은 7개의 주기조건이고 임펠러 후면 및 베어링 부분은 격자점 수를 줄이기 위해 10개의 주기조건을 갖도록 격자를 생성 하였다.

주기조건이 서로 다른 임펠러, 인듀서, 볼류트, 누설유로 격자는 혼합면 기법으로 연결되었다. 혼합면 기법은 정상해석에서 상류와 하류의 주기조건이 다른 경우 일반적으로 사용되며 성능예측의 정확도가 비교적 높은 편이다. Fig. 2와 3에 산화제펌프의 전체격자와 자오면에 투영된 격자를 나타내었다.

실제 펌프의 작동유체는 밀도 1,117kg/m³의 액체산소이지만 유동해석에서는 실험결과와의 비교의 용이성을 위해 밀도 1,000kg/m³의 물을 선택하여 계산을 수행하였다. 펌프의 회전속도도 수

렴특성과 격자점 수를 고려하여 설계회전수의 25%인 5,000RPM으로 낮추어 해석하였다. 난류 모델로 standard k-ε 모델을 선택하였고 수렴을 가속시키기 위해 3단계의 다중격자기법을 적용하였다.

III. 유동해석 결과 분석

유동해석결과를 Table 2에 정리하여 나타내었다. Table 2에서 기계효율은 97%로 가정하였다. 효율 및 축추력은 Table 1의 설계요구조건을 만족하는 것으로 나타났지만, 양정은 10% 정도 높게 나타났다. 이는 유동해석의 오차를 고려하여 10% 정도 높게 설계하였기 때문이다. 펌프성능 시험을 수행한 후, 임펠러 블레이드를 재가공하여 양정을 보정하는 것이 일반적이므로, 양정을 다소 높게 설계하였다.

Table 2. Pump performance prediction

Parameters	values
Front leakage flow rate ratio (%)	3.2
Rear leakage flow rate ratio (%)	4.7
Inducer total head (m)	126.1
Impeller total head (m)	877.5
Overall total head (m)	940.0
Axial thrust (N)	(+)1,104
Inducer+impeller efficiency(%)	91.3
Leakage efficiency (%)	92.6
Disk efficiency (%)	93.8
Volute efficiency (%)	93.6
Internal efficiency (%)	74.3
Mechanical efficiency (%)	97.0
Overall efficiency (%)	72.1

Fig. 4에 원주방향으로 평균된 펌프 내부의 유선분포를 나타내었는데 인듀서 전연 쉬라우드 앞쪽에서 인듀서 블레이드 틱 간극 부분까지 크게 형성되어 있는 역류영역과 인듀서 쉬라우드로 들어오는 전방 누설유량에 의한 임펠러 전연의 2차 흐름을 볼 수 있다. 인듀서 부분의 역류영역과 임펠러 전연 쉬라우드의 2차 흐름을 제외한 인듀

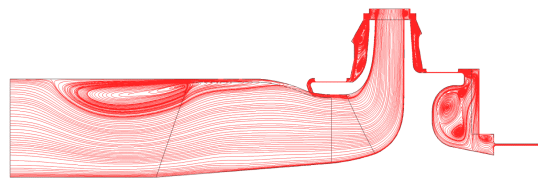


Fig. 4. Streamline distributions

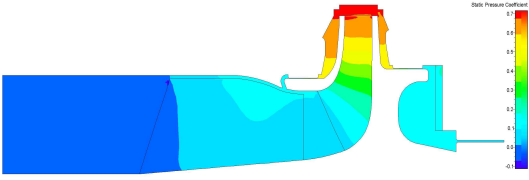


Fig. 5. Static pressure coefficient distributions

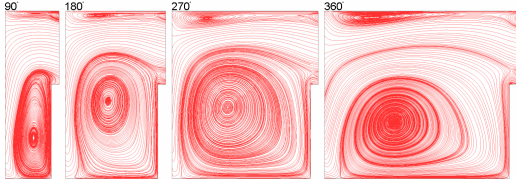


Fig. 6. Streamline distributions at various volute sections

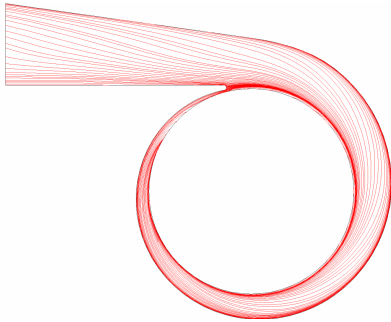


Fig. 7. Streamline distributions at the volute mid height

서와 임펠러 내부의 유동은 인듀서 입구에서 임펠러 출구까지 매끄럽게 흐르고 있는 반면 회전하는 벽면과 정지해 있는 벽면이 근접하여 존재하는 누설유로, 캐버티 부분에는 상당히 복잡한 2차 흐름이 생성된다. 플로팅 링 실 간극의 차이로 인해 전·후방 누설유량이 서로 다르게 예측되었지만 유선분포는 두드러진 차이점 없이 매우 유사한 경향을 보이고 있다.

Fig. 5는 원주방향으로 평균된 펌프 내부의 정압력계수를 나타낸다. 펌프의 정압상승은 대부분 임펠러를 거치는 동안 발생하며 누설유로에서는 플로팅 링 실을 지나며 압력이 크게 떨어짐을 알 수 있다. 인듀서 앞전 전방에 음압영역이 존재하는 것을 볼 수 있는데 이는 실제 펌프를 작동할 때 이곳에서 기화가 발생할 수 있음을 의미한다. Fig. 5에서 압력계수 C_p 는 다음과 같이 정의된다.

$$C_p = 2(p - p_{it}) / (\rho U_{T1}^2) \quad (1)$$

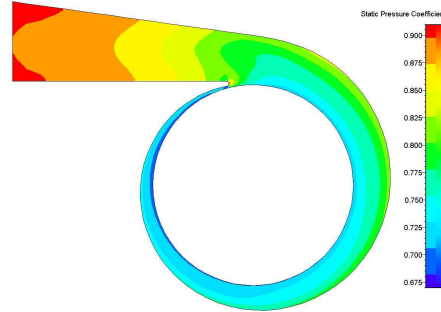


Fig. 8. Static pressure coefficient distributions at the volute mid height

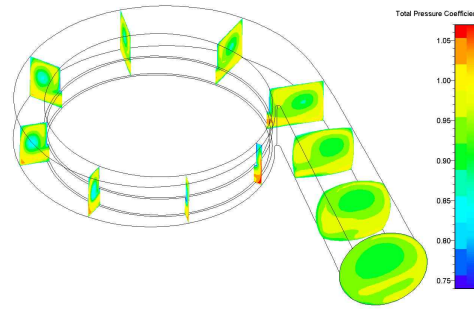


Fig. 9. Total pressure coefficient distributions

여기서 p_{it} 는 입구 전압, U_{T1} 는 인듀서 앞전 익단 날개 회전속도를 나타낸다.

Fig. 6에 볼류트 단면의 유선분포를 나타내었다. 볼류트 내부에 쌍으로 형성되어 있는 2차 흐름을 볼 수 있으며 임펠러와 볼류트를 동시에 계산하였기 때문에 볼류트 입구의 유동이 Fig. 4에 보이는 임펠러 출구 유동과 맞물려 복잡한 형태를 나타낸다.

Fig. 7은 볼류트 중간 높이면의 유선분포이다. 볼류트 허 부분의 흐름이 깨끗한 것으로 보아 볼류트 허의 설계가 잘 된 것으로 판단된다.

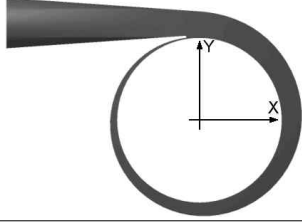
Fig. 8에는 볼류트 중간 높이면의 정압계수분포를 나타내는데, 압력이 점진적으로 증가하는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 볼류트 단면의 전압력계수이다. 임펠러에 의해 상승한 전압력이 볼류트 내부의 2차 흐름, 벽면에서의 마찰, 디퓨저 내부에서 발생하는 박리 등에 의해 감소되고 있음을 알 수 있다.

펌프의 회전축에 가해지는 반경방향의 힘을 적정량 이하로 유지하는 것은 펌프의 안정적인 운용에 있어서 매우 중요하다. 반경방향 힘이 너무 클 경우, 베어링의 과손으로 이어질 수 있기 때문이다. 본 연구에서는 반경방향 힘의 한계를 1.0kN

Table 3. Radial force on the axis

F_x	F_y
-73.6 N	-423.6 N



으로 하였다. 반경방향 힘의 크기와 방향을 Table 3에 정리하였다. Table 3의 각 성분별 힘의 크기는 볼류트 입구 경계면 부근의 압력을 적분하여 산출한 것으로 20,000RPM일 때의 값으로 환산한 크기이다. 임펠러와 볼류트의 상호작용 모사에 혼합면 기법이 이용되었기 때문에 볼류트 입구의 압력을 근거로 산출된 값이 실제 임펠러에 가해지는 힘을 대변한다고 보기는 어렵지만 개략적인 힘의 크기를 파악하는데 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다. 반경방향 힘의 합은 0.43kN으로 설계기준을 만족시키는 것을 알 수 있다.

IV. 실험결과와의 비교

유동해석결과를 실험결과와 비교하였다. 실험은 항우연에 설치된 터보펌프 상사실험기에서 물을 매질로 하여 수행되었다[10,11].

Fig. 10과 11에 양정과 효율을 비교하여 나타내었는데, 계산과 실험이 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. Fig. 11에서 계산효율이 실험효율에 비해 1% 정도 떨어지는 것은 계산은 5,000RPM에서 수행하였고, 실험은 8,300RPM에서 수행했으므로 디스크 효율이 실험에서 상승하였기 때문으로 판단된다. Fig. 10에서 Qd는 설계유량을 나타낸다.

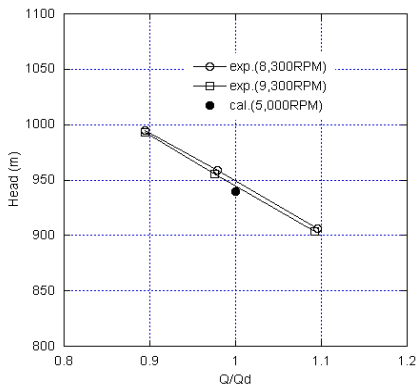


Fig. 10. Measured head rise distributions

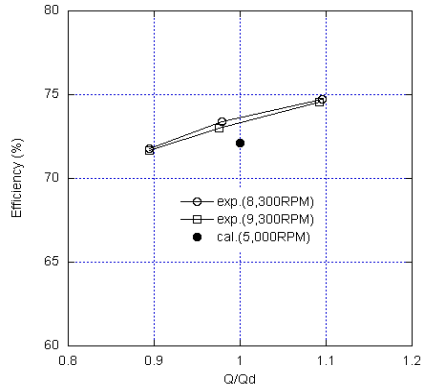


Fig. 11. Measured efficiency distributions

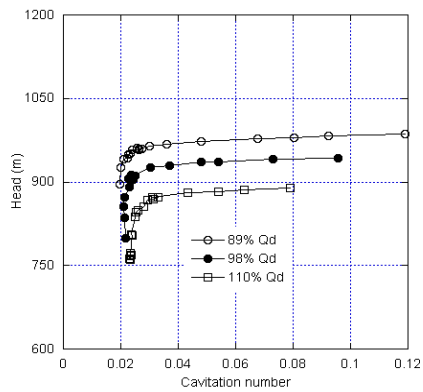


Fig. 12. Suction performance test results

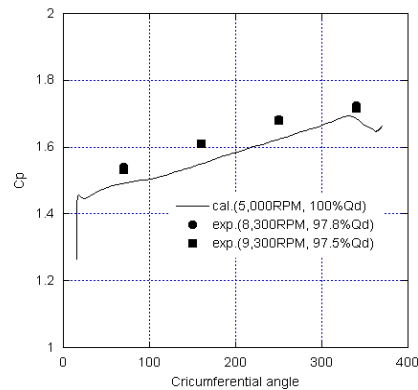


Fig. 13. Volute surface pressure coefficient distribution

터보펌프에서 흡입성능은 매우 중요한 의미를 지닌다. 본 연구에 사용된 유동해석은 2상 유동을 모사하지 않았기 때문에 직접적인 흡입성능을 예측할 수 없지만, 인듀서 1D 설계[12] 및 인듀

서 입구에서의 압력분포 분석을 통하여 대략적인 흡입성능은 예측할 수 있다. 1D 설계에서 예측된 물에서의 캐비테이션 수는 0.024정도이다. Fig. 12에 실험된 흡입성능을 나타내었는데, 입계 캐비테이션 수(3% 양정 손실)는 약 0.025 정도로, 설계와 잘 일치하며, 설계 값인 0.03을 충분히 만족시키는 것을 알 수 있다. 실험이 물에서 수행되었는데, 실매질인 액체산소에서 수행되었으면 극저온 매질의 열역학적 효과에 의해서 흡입성능이 추가로 개선되리라 판단된다. Fig. 12에서 캐비테이션 수는 다음과 같이 정의된다. 여기서 p_v 는 증기압을 나타낸다.

$$\sigma = \frac{(p_{lt} - p_v)}{\rho U_{lt}^2 / 2} \quad (2)$$

블류트 면적이 적절히 설계되었는지의 여부를 판단하기 위해 블류트 벽면의 정압력계수를 구하였는데, 실험값과 비교하여 Fig. 13에 나타내었다. 블류트 각도가 증가함에 따라 압력이 상승하지만 기울기가 완만하여 블류트 단면적이 적절히 설계되었음을 알 수 있다. 실험결과가 계산결과보다 약 4% 정도 크게 예측하는데 이는 실험유량이 약 2.5% 정도 적어서 양정이 커졌기 때문으로 판단된다. 이를 고려하면 계산이 매우 정확하게 예측하고 있음을 알 수 있다.

V. 결 론

터보펌프의 설계과정에서 수력성능 예측에 대한 정확도를 높이기 위해 인듀서, 임펠러, 블류트 및 2차 유로를 포함한 전 펌프를 계산영역으로 유동해석을 수행하였다. 유동해석을 통해 예측된 성능은 실험을 통하여 검증되었는데, 실험과 잘 일치하는 것으로 나타났다. 양정은 설계요구조건보다 약 10% 정도 높게 나타났는데, 이는 임펠러의 직경을 축소하는 재설계를 통하여 설계요구조건을 만족시킬 수 있을 것으로 판단된다. 또한 흡입성능, 축추력, 반경방향 힘 등도 설계요구조건을 만족시키는 것으로 나타났다.

본 연구를 통하여 펌프 전체를 유동해석하여 성능을 예측하는 기법은 매우 정확하게 성능을 예측하는 것을 알 수 있었으며, 향후 터보펌프의 설계/개발에 유용하게 사용될 것이다.

참고문헌

- 1) Huzel, D. K. and Huang, D. H., 1992, *Modern Engineering for Design of Liquid-Propellant Rocket Engines*, AIAA Press.
- 2) 최창호, 홍순삼, 김진한, "인듀서 성능예측에 대한 수치해석적 연구", 한국항공우주학회지, 제 31권, 제 6호, 2003, pp. 72~78.
- 3) 최창호, 김진한, "인듀서 성능향상에 대한 수치해석적 연구", 한국항공우주학회 추계학술발표회 논문집, 2004.
- 4) 최창호, 김진한, "액체로켓용 터보펌프 인듀서/임펠러 상호작용에 대한 연구", 유체기계저널 제 6권, 제 4호, 2003, pp. 50~57.
- 5) 최창호, 김진한, 2004, "터보펌프용 산화제 펌프 설계/해석", 유체기계저널 제 7권 제 3호, pp. 57~62.
- 6) 김진한, 이은석, 홍순삼, 최창호, 전성민, 정은환, "액체로켓엔진용 터보펌프 개발현황", 제5회 우주발사체기술 심포지움 논문집, 2004.
- 7) 노준구, 최창호, 김진한, "로켓엔진용 산화제 펌프 전산유동해석", 한국항공우주학회 추계학술발표회 논문집, 2003.
- 8) 노준구, 최창호, 김진한, "로켓엔진용 연료 펌프 전산 유동해석", 한국항공우주학회 추계학술발표회 논문집, 2004.
- 9) Fine/Turbo 6.2-1 Manual, 2004, Numeca Inc.
- 10) 홍순삼, 임현, 김대진, 차봉준, 강정식, 임병준, 김진한, "터보펌프 성능시험 장치", 제3회 한국 유체공학 학술대회 논문집, 2004.
- 11) 김대진, 홍순삼, 최창호, 김진한, 2004, "터보펌프용 연료펌프의 성능 시험", 유체기계 연구개발 발표회 논문집, 2004.
- 12) 최범석, 윤의수, 오형우, "고압 터보펌프용 연료펌프의 수력설계 및 성능 평가", 유체기계 연구개발 발표회 논문집, 2004.