

터보펌프용 전진익형 인듀서 흡입성능 유동해석

최창호*† · 노준구* · 김진한*

Numerical Simulation of Suction Performance of a Forward-Sweep Inducer for Turbopumps

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

Key Words : Inducer(인듀서), Turbopump(터보펌프), Backflow(역류), Suction performance(흡입성능)

ABSTRACT

Computational and experimental studies on a forward-sweep inducer for turbopumps were performed to see the effect of the blade sweep on the suction performance of the inducer. Computational results show that backflows at the inlet decrease in the case of the forward-sweep inducer by inhibiting pre-rotation of the inflow and the low pressure region near the tip also diminishes, which is presumed to improve the suction performance of the inducer. The predicted suction performance of the inducer is compared with the experimental result. The result shows that the computation overestimates the suction performance of the inducer compared to the value from the experiment.

1. 서론

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.⁽¹⁾

Fig. 1은 인듀서, 임펠러, 벌류트 및 누설유로를 포함한 액체로켓엔진 터보펌프용 펌프의 일반적인 구조를 나타낸다. 터보펌프용의 펌프에는 일반적으로 인듀서가 임펠러 앞에 장착되어있는데, 인듀서는 고속으로 회전하는 임펠러 앞에 장착되어 유효흡입수두(NPSH)를 낮춰주어 임펠러/벌류트로

구성된 원심펌프가 캐비테이션으로 인한 성능저하 없이 작동하게 한다.⁽²⁾

국내에서도 터보펌프의 흡입성능을 향상시키기 위한 노력의 일환으로 터보펌프에 대한 실험 및 수치해석적 연구^(3~10)가 활발하게 시도되고 있으며, 최근에는 어뢰용 터보펌프에 대한 연구도 시도되고 있다.⁽¹¹⁾ 이들 연구는 터보펌프의 구성품 중에서도 흡입성능과 밀접한 관련이 있는 인듀서에 대해서 대부분의 연구가 집중되어 수행되고 있다. 국내에서 인듀서에 대해서 수행된 대부분의 수치해석적인 연구는 수력성

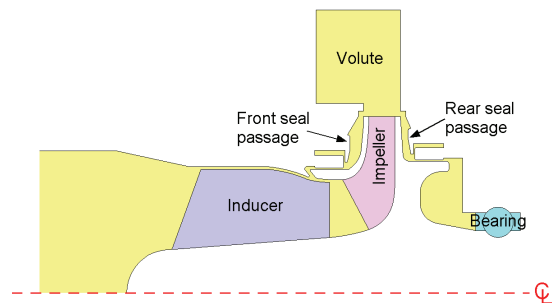


Fig. 1 Typical layout of a turbopump

* 한국항공우주연구원 터보펌프팀 (Korea Aerospace Research Institute, Turbopump Dept.)

† 교신저자(Corresponding Author), E-mail : cch@kari.re.kr

능계산에 국한되어 최근에서야 흡입성능에 대한 연구가 시도되고 있는 반면⁽¹²⁾ 외국에서는 인듀서에 대한 직접적인 흡입성능해석에 대한 시도가 활발하게 이루어지고 있다.^(13~16) 인듀서의 핵심적인 역할은 터보펌프의 흡입성능 향상에 있으므로, 인듀서의 흡입성능을 높이기 위한 최적설계를 위해서는 흡입성능의 정확한 예측 및 유동분석이 매우 중요하다. 따라서 인듀서의 흡입성능을 직접 수치해석하는 기법은 인듀서의 흡입성능향상에 매우 유용하게 적용될 수 있다.

일반적인 인듀서는 인듀서 앞전이 팁에서 허브에 비해 뒤쪽으로 밀리는 형상을 가지고 있다. 이러한 인듀서 블레이드의 형상을 후진익형(backward sweep) 인듀서라고 한다. 기존의 인듀서에 대한 연구는 대부분 후진익형에 대해서 집중되어왔다.⁽⁶⁾ 그러나 본 연구에서는 앞전 허브에 응력이 집중되는 구조적인 문제로 터보펌프에 많이 채택되지 않아서 연구수행이 미진하였던, 팁이 허브에 비해서 앞으로 나온 전진익형(forward sweep) 인듀서에 대해서 연구를 수행하였다. 이전 연구에서는 최 등^(7, 17)이 전진익형 인듀서에 대한 수력성능 수치해석을 수행한 바 있으나, 본 연구에서는 수치해석적 기법을 사용하여 전진익형 인듀서의 흡입성능을 예측하였으며, 실험값과 비교하였다.

2. 유동해석 기법 및 인듀서 형상

본 연구에서는 이전의 유동해석^(4~6)에서 실험결과와 비교를 통하여 충분히 검증된 Fine/Turbo⁽¹⁸⁾를 이용하여 해석을 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.

캐비테이션 계산은 기본적으로 액체와 기체가 혼합되어있는 단일 유체(single fluid) 모델을 사용하여 상온의 물에 대하여 수행하였다.^(13~14) 즉, Fig. 2와 같이 실선으로 표시된 실제 압력과 밀도의 상관관계를 점선으로 모사하여 압력에 따라서 순수 기체, 기체와 액체 혼합물, 순수 액체로 각각 가정하고, 이러한 압력과 밀도의 상관관계를 이용하여 계산된 압력으로 유체의 밀도를 결정하는 기법을 사용한다. 압력-

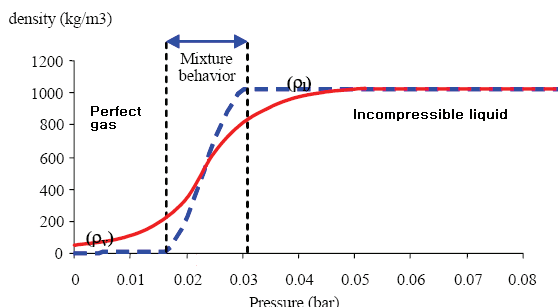


Fig. 2 Barotropic state law for cold water

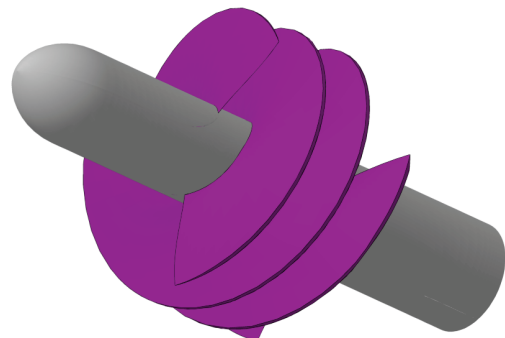
밀도 관계식은 순수 기체 상태에서는 이상기체방정식을 사용하고 순수 액체 상태에서는 Tait 식⁽¹⁹⁾을 사용하며, 기체와 액체 혼합물에서는 최소 음속($C_{min}^2 = \partial P / \partial \rho$)을 이용하여 압력-밀도 곡선의 최대 기울기($1/C_{min}^2$)를 결정하는 방법⁽¹⁴⁾을 사용한다. 따라서 Ugajin 등⁽¹⁵⁾ 및 Hosangadi 등⁽¹⁶⁾과 같은 특별한 이송방정식은 사용하지 않는다.

난류모델은 계산시간을 줄이기 위해 확장된 표준 k-ε 모델을 채택하였다. 입구경계조건으로 축방향으로의 균일유동을 주었으며, 출구에서는 정압을 주었다. 정상유동해석을 수행하였기 때문에, 인듀서의 날개는 3개지만, 주기경계조건을 사용하여 날개의 1개 유로에 대해서만 유동해석을 수행하였다.

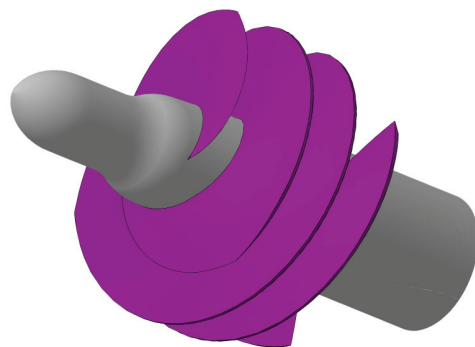
Table 1 및 Fig. 3에 인듀서의 형상을 나타내었다. Table 1에서 유량계수는 다음과 같이 정의된다.

Table 1 Summary of inducer geometries

Parameter	Forward	Backward
Design flow coefficient (ϕ)	0.11	0.096
Blade number	3	3
Solidity at tip	2.8	2.7
Inlet hub to tip ratio	0.33	0.35
Blade sweep angle at L.E.	-5	+20
Radial tip clearance to blade height ratio	0.016	0.033



(a) Forward-sweep inducer



(b) Backward-sweep inducer

Fig. 3 Inducer geometries

여기서 Q 는 유량, A_1 은 인두서 입구 단면적, U_{1T} 는 인두서 앞전 익단 속도를 나타낸다.

3. 결과 및 토론

Fig. 4에 유동해석에 사용된 전진익형 인두서 격자의 3차원 및 자오면 형상을 나타내었는데, 이전의 연구⁽⁷⁾에서 채택되어 사용된 동일한 격자를 사용하였다. 본 연구에서는 인두서에 대해서만 유동해석이 수행되었다.

Fig. 5에는 설계유량에서 회전방향으로 평균된 유선을 후진익형 인두서의 결과⁽⁸⁾와 비교하여 나타내었는데, 전진익형 인두서의 경우 후진익형에 비해서 역류가 작은 것을 확인할 수 있다. 이는 이전의 연구^(7, 17)에서 나타내었듯이 전진익형 인두서의 경우 블레이드 앞전 허브에서 예선화가 존재하지 않기 때문에 블레이드 앞전에서 양의 받음각을 가지고, 따라서 축방향 역압력구배가 후진익형 인두서에 비해 작기 때문

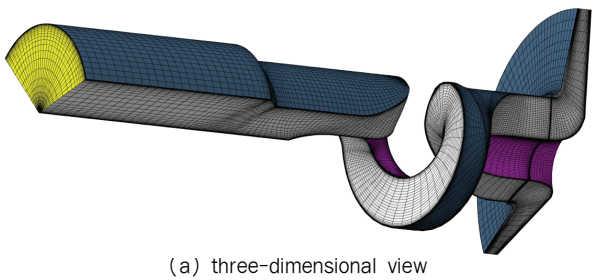


Fig. 4 Computational grids (315,768 cells) for forward-sweep inducer

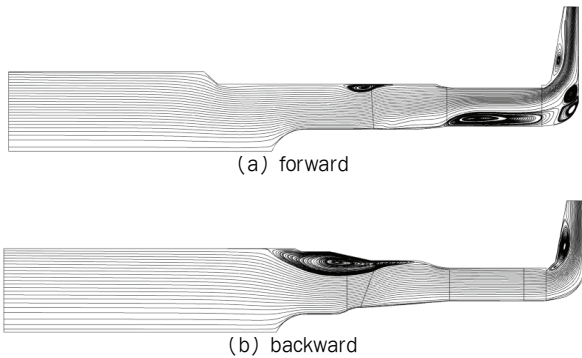


Fig. 5 Predicted circumferentially averaged streamline distributions at 1.0Qd

$$\phi = Q / (A_1 U_{1T}) \quad (1)$$

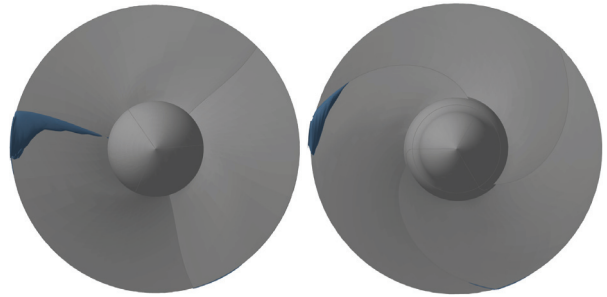


Fig. 6 Predicted iso-density ($\rho = 950\text{kg/m}^3$) surfaces at 1.0Qd

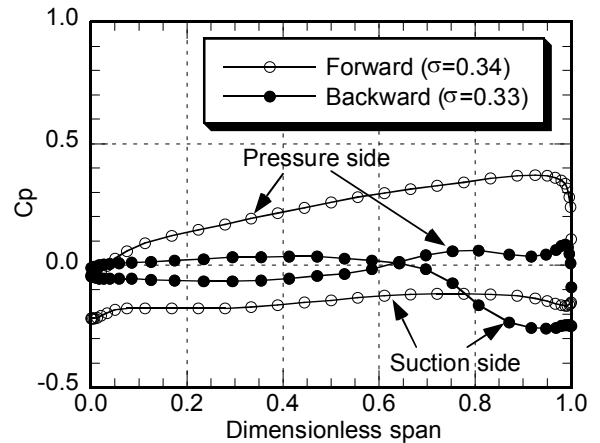


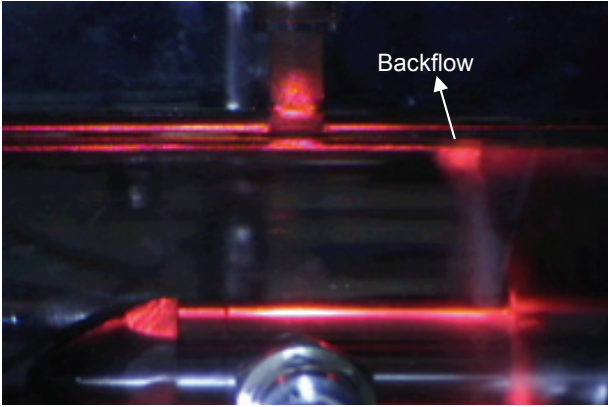
Fig. 7 Predicted static pressure coefficient distributions along the leading edge of the blade surface at 1.0Qd

이다. 또한 전진익형 인두서의 경우 인두서 출구에서부터 역류가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이는 인두서 출구의 면적이 넓게 설계된 때문이다. 그러나 인두서 흡입성능에는 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다. Fig. 5에서 Q_d 는 설계유량을 나타낸다.

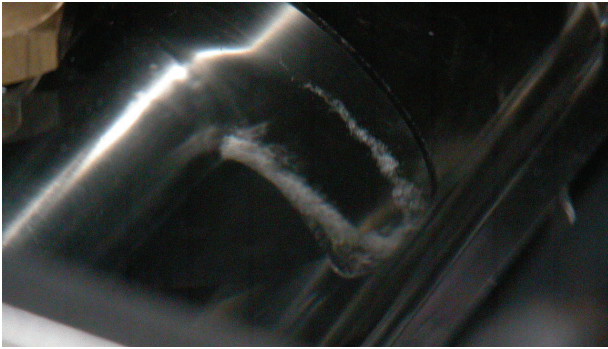
Fig. 6에는 캐비테이션의 진행 정도를 나타내기 위해서 밀도가 950kg/m^3 인 경우의 등밀도면을 나타내었다. Fig. 6에서 캐비테이션 수는 다음과 같이 정의된다. p_v 는 증기압, ρ 는 밀도, p_{1t} 는 인두서 입구 전압력을 나타낸다.

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

등밀도면은 하나의 블레이드에 대해서만 나타내었는데, 전진익형의 경우 기포가 블레이드 허브에서 팁까지 비교적 고르게 분포된 것을 알 수 있고, 후진익형의 경우 익단에만 기포가 존재(tip cavity)하는 것을 알 수 있다. 이는 전진익형 인두서의 경우 블레이드 앞전에서 받음각이 양의 값을 가지는 반면 후진익형 인두서의 경우 받음각이 음의 값을 가지기 때문이다. 즉, 전진익형 인두서의 경우 역류가 작고, 양의 받음각을 가지기 때문에 앞전 흡입면에서 압력이 고르게 분



(a) backflow



(b) cavity

Fig. 8 Flow visualization of forward-sweep inducer

포된다. 따라서 기포도 고르게 분포된다. 반면, 후진익형 인듀서의 경우 역류가 크고, 받음각이 음의 값을 가지기 때문에, 흡입면에서의 압력이 고르게 분포하지 않는다. 따라서 역류로 인해 압력이 상대적으로 낮은 팁에서 먼저 기포가 생성된다.

Fig. 7에 블레이드 앞전에서 압력분포를 나타내었는데, 전진익형의 경우 양의 받음각을 가지기 때문에 흡입면과 압력면의 압력차가 존재하고, 흡입면의 압력이 고르게 분포되는 것을 볼 수 있다. 반면, 후진익형의 경우 음의 받음각으로 인하여 흡입면과 압력면의 압력이 span이 0.6보다 작은 경우에 역전되고, 팁 부근에서만 흡입면의 압력이 급격히 저하되는 현상을 관찰할 수 있다. 정압계수(C_p)와 Dimensionless span(r^*)는 다음과 같이 정의된다. r_h 는 허브반경, r_s 는 쉬라우드 반경을 나타낸다.

$$C_p = 2(p - p_{1T}) / (\rho U_{1T}^2) \quad (3)$$

$$r^* = (r - r_h) / (r_s - r_h) \quad (4)$$

Fig. 8에 전진익형 인듀서 유동가시화 실험결과를 나타내었는데, 계산결과와 같이 역류가 매우 작게 형성되어 있고, 기포가 앞전 허브에서 팁까지 고르게 분포되어 있는 것을 확인할 수 있다.

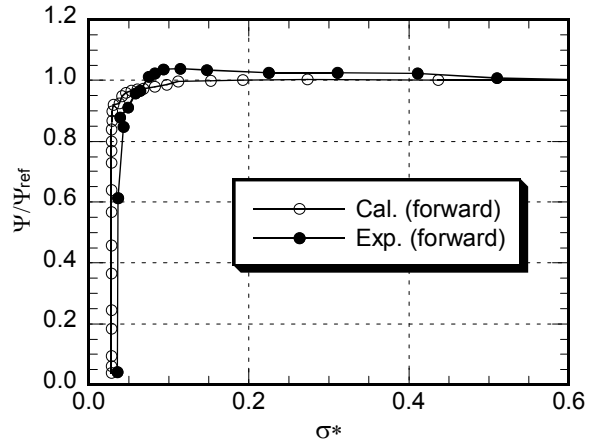


Fig. 9 Suction performance curves at 1.0Qd

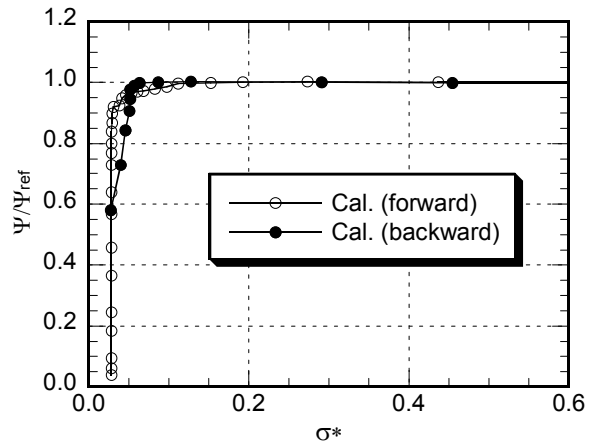


Fig. 10 Predicted suction performance curves at 1.0Qd

Fig. 9에 계산된 흡입성능곡선을 실험값과 비교하여 나타내었다. Fig. 9에서 σ^* (무차원 입구 압력)는 서로 다른 형상의 인듀서 흡입성능을 비교하기 위한 무차원화된 NPSH(유효흡입수두)를 나타내며, ψ/ψ_{ref} 는 인듀서 양정을 기준양정으로 각각 나눈 값을 나타낸다. σ^* 가 0.1이하로 낮아지면 인듀서의 기포발생이 증가하여 인듀서의 압력면과 흡입면의 압력차가 줄어들게 되므로 인듀서의 양정이 떨어지는 것을 확인할 수 있다.⁽¹²⁾ Fig. 9에서 계산이 실험에 비해 좋은 흡입성능 값을 예측하는 것을 알 수 있다. 이는 이전 연구⁽¹²⁾에서 보고된 바와 같은 경향인데, 실제 실험에서 인듀서 입구로 불순물 및 기포가 다수 유입되기 때문으로 판단된다. 이는 계산에서 고려할 수 없는 부분으로 흡입성능을 저하시키는 역할을 하는 것으로 판단된다. 그러나 양정이 거의 0이 되는 조건까지 계산이 수행되는 실험과 같은 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다. 이는 전진익형 인듀서의 특징으로, 앞의 Fig. 7에 나타낸 바와 같이 인듀서 흡입면에서의 압력이 고르게 분포되어 있기 때문이다.

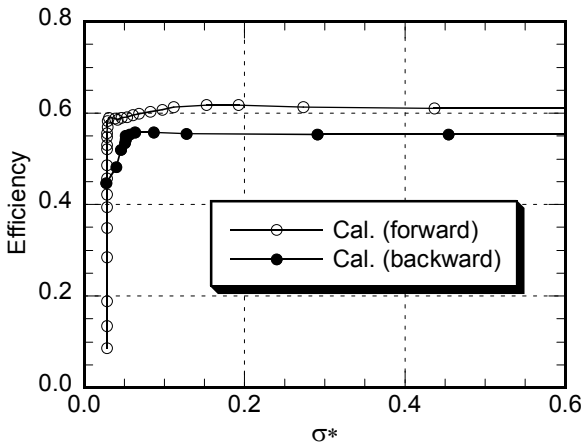


Fig. 11 Predicted efficiency curves at 1.0Qd

Fig. 10에 전진익형과 후진익형 인두서의 흡입성능을 비교하여 나타내었는데, 유량계수가 큰(또는 크기가 작은) 전진익형 인두서의 흡입성능이 우수한 것을 알 수 있다. 이는 전진익형 인두서의 우수한 수력특성(작은 역류) 및 작은 익단간극⁽²⁾ 때문인 것으로 판단된다. 또한 후진익형 인두서의 경우 양정이 0이 되는 조건까지 계산을 수행할 수 없는 것을 알 수 있는데, 실험^(6, 12)에서도 같은 경향을 보였다.

Fig. 11에는 효율곡선을 비교하여 나타내었는데, 전진익형 인두서의 효율이 매우 좋은 것을 확인할 수 있다. 이는 전진익형 인두서의 익단 간극 및 수력 특성이 좋기 때문인 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 터보펌프용 전진익형 인두서에 대한 캐비테이션 유동해석이 수행되었다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 전진익형 인두서의 경우 후진익형 인두서에 비해 역류의 크기가 작아 블레이드 앞전 흡입면 허브에서 팁까지 압력이 고르게 분포되어있는 것을 확인하였으며, 이로 인하여 양정이 0이 되는 조건까지 계산 및 실험을 수행할 수 있었다.
- (2) 계산값을 실험값과 비교한 결과 계산이 실험보다 좋은 흡입성능을 예측하는 것을 알 수 있었다. 이는 계산에서 실험의 입구조건 및 매질의 물성치를 정확하게 반영하지 못하였기 때문으로 판단된다.

References

(1) Huzel, D. K. and Huang, D. H., 1992, Modern Engineering for Design of Liquid-Propellant Rocket Engines, AIAA Press.

(2) Brennen, C. E., Hydrodynamics of Pumps, Concepts ETI, Inc. and Oxford University Press, Oxford, 1994.

(3) 김진한, 홍순삼, 정은환, 최창호, 전성민, 2005, “30톤급 액체로켓엔진용 터보펌프 개발 현황”, 제25회 한국추진공학회 추계학술발표대회 논문집.

(4) 최창호, 홍순삼, 김진한, 2003, “인두서 성능예측에 대한 수치해석적 연구”, 한국항공우주학회지, 제 31권, 제 6호, pp. 72~78.

(5) 최창호, 노준구, 김대진, 홍순삼, 김진한, 2006, “유동해석을 이용한 터보펌프 성능예측”, 한국항공우주학회지, 제 34권, 제 4호, pp. 70~74.

(6) 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.

(7) 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.

(8) Hong, S. S., Kim, J. S., Choi, C. H., and Kim, J., 2006, “Effect of Tip Clearance on the Cavitation Performance of a Turbopump Inducer,” Journal of Propulsion and Power, Vol. 22, No. 1, pp. 174~179.

(9) 김대진, 홍순삼, 최창호, 김진한, 2006, “로켓엔진용 산화제 펌프의 수류시험”, 제 4회 한국유체공학학술대회 논문집, 제 1권, pp. 523~526.

(10) 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.

(11) 강병윤, 추성환, 강신형, 2013, “흡입 유로 형상이 터보펌프의 성능 및 캐비테이션에 미치는 영향에 관한 실험적 연구”, 한국유체기계학회 논문집, 제16권, 제2호, pp. 21~26.

(12) 최창호, 노준구, 김진한, 2010, “터보펌프용 인두서에 대한 캐비테이션 유동해석”, 유체기계저널 제 13권, 제 3호, pp. 49~53.

(13) Flores, N. G., Rolland, J., Goncalves, E., Patella, R. F., and Rebattet, C., 2006, “Head Drop of Spatial Turbopump Inducer,” Sixth International Symposium on Cavitation, CAV2006, Wageningen, Netherlands September 2006.

(14) Delannoy Y., and Kueny, J. L., 1990, “Two phase approach in unsteady cavitation modelling,” Cavitation and Multiphase Flow Forum, ASME-FED Vol. 98, pp. 153~158.

(15) Ugajin, H., Kawai, M., Okita, K., Ohta, T., Kajishima, T., Nakano, M., and Tomaru, H., 2007, “Numerical Analysis of the Unsteady Cavitating Flow in a 2D-Cascade and a 3D-inducer,” 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit,

- AIAA paper 2007-5535, July 2007.
- (16) Hosangadi, A., Ahuja, V., and Ugenwitter, R., J., 2007, "Simulations of Rotating Cavitation Instabilities in the SSME LPFP Inducer," 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, AIAA paper 2007-5536, July 2007.
- (17) 최창호, 김진한, 2005, "터보펌프용 전진익형 인듀서의 성능에 대한 수치해석적 연구," 한국항공우주학회지, 제 33권 제 11호, pp. 74~79.
- (18) Fine/Turbo 8.7-2 Manual, 2009, Numeca Inc.
- (19) Knapp, R. T., Daily, J. T., and Hammit, F. G. 1970, Cavitation, Mc Graw Hill.