

인듀서 익단간극이 터보펌프용 펌프의 흡입성능에 미치는 영향

최창호^{**} · 김대진^{*} · 김진한^{*}

Effects of Inducer Tip Clearance on the Suction Performance of a Pump for Turbopumps

Chang-Ho Choi^{**}, Dae-Jin Kim^{*}, Jinhan Kim^{*}

Key Words : Inducer(인듀서), Pump(펌프), Tip clearance(익단 간극), Suction performance(흡입성능)

ABSTRACT

The effects of inducer tip clearance on the suction performance of a pump for turbopumps are investigated. Experiments for the pump with inducer tip clearances of 1.8% and 1.4% of blade height were performed. The experimental results showed that the suction performance of the pump increased as the tip clearance decreased. It seems that the suction performance of the pump becomes better with smaller tip clearances because the strength of the inducer backflow becomes weak with the decreased tip clearance.

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.⁽¹⁾

Fig. 1은 인듀서, 임펠러, 벨류트 및 누설유로를 포함한 터보펌프용 펌프의 일반적인 구조를 나타낸다. 터보펌프용의 펌프에는 일반적으로 인듀서가 임펠러 앞에 장착되어있는데, 인듀서는 고속으로 회전하는 임펠러 앞에 장착되어 유효흡입수두(NPSH)를 낮춰주어 임펠러/벨류트로 구성된 원심펌프가 캐비테이션으로 인한 성능저하 없이 작동하게 한다.⁽²⁾

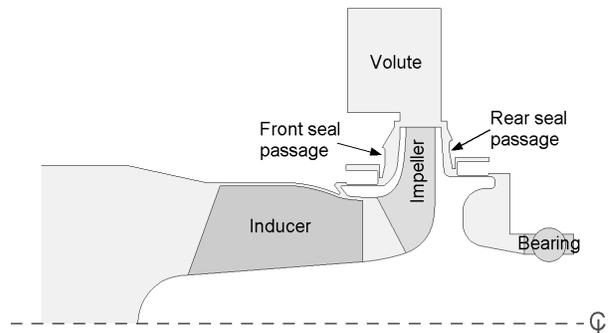


Fig. 1 Typical layout of a turbopump

터보펌프용의 펌프에서는 일반적으로 인듀서는 쉬라우드가 없는 블레이드 형상을 사용하고, 임펠러는 쉬라우드가 있는 블레이드 형상을 사용한다. 본 연구에서 사용된 인듀서 또한 쉬라우드가 없는 형상을 채택하였으며, 따라서 익단간극이 존재한다.

국내에서 터보펌프의 흡입성능을 향상시키기 위한 노력의 일환으로 최근에는 터보펌프에 대한 실험 및 수치해석적 연구가 많이 시도되고 있다.^(3~11) 특히, 터보펌프용 펌프의 구성품 중에서도 흡입성능과 밀접한 관련이 있는 인듀서에 대해서 연구가 집중되어 수행되고 있다. 국내에서도 인듀서의

* 한국항공우주연구원 터보펌프팀

† 교신저자, E-mail : cch@kari.re.kr

흡입성능에 대한 수치해석적 연구⁽¹²⁾ 및 실험적인 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 그러나 인듀서의 핵심적인 역할은 펌프의 흡입성능 향상에 있으므로, 인듀서의 흡입성능을 높이기 위한 최적설계를 위해서는 인듀서가 펌프의 흡입성능에 미치는 영향을 정확하게 파악하는 것은 매우 중요하다.

본 연구에서는 동일한 펌프에서 익단간극 등 인듀서의 형상을 달리하면서 펌프의 흡입성능 변화를 관찰하였다. 또한 인듀서의 설계변경을 위해서 인듀서의 단독 흡입성능계산도 수행하였으며 이를 바탕으로 펌프의 성능변화를 설명하고자 하였다.

2. 펌프 성능시험 설비

한국항공우주연구원에 설치되어 있는 터보펌프 수류 성능 시험설비⁽¹⁰⁾에서 펌프 흡입성능 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 20,000rpm까지 구동 가능하다. 물탱크는 3m³의 용량으로 펌프 시험에 필요한 유체(물)를 공급한다. 축추력 측정 장치는 기어박스와 펌프 사이에 위치한다. 터빈 유량계는 작동 유량의 측정에 쓰이며, 펌프 하류에 설치하였다.

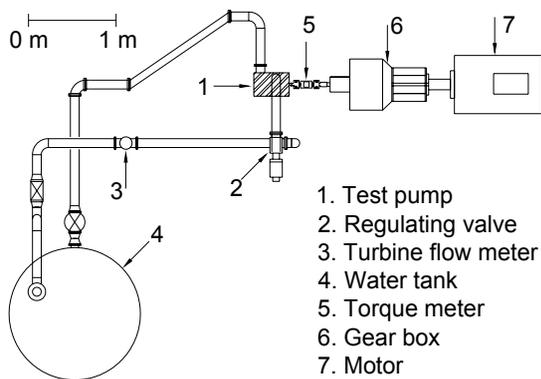


Fig. 2 Plane view of the pump test rig

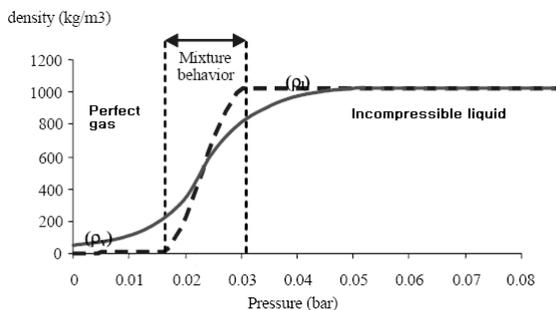


Fig. 3 Barotropic state law for cold water

3. 유동해석 기법 및 인듀서 형상

본 연구에서는 이전의 유동해석^(4~6,12)에서 실험결과와 비교를 통하여 충분히 검증된 Fine/Turbo⁽¹³⁾를 이용하여 해석을 수행하였다. Fine/Turbo는 공간차분법으로 가점성을 포함하는 중심차분법, 시간차분법으로 Runge-Kutta 시간전진법을 사용한다. 또한 비압축성 유동을 해석하기 위하여 예조건화기법을 채택하였다.

캐비테이션 계산은 기본적으로 액체와 기체가 혼합되어있는 단일 유체(single fluid) 모델을 사용하여 상온의 물에 대하여 수행하였다.^(12,14~15) 즉, Fig. 3과 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-밀도 관계식은 순수 기체 상태에서는 이상기체방정식을 사용하고 순수 액체 상태에서는 Tait 식⁽¹⁶⁾을 사용하며, 기체와 액체 혼합물에서는 최소 음속($C_{min}^0 = \partial P / \partial \rho$)을 이용하여 압력-밀도 곡선의 최대 기울기($1/C_{min}^0$)를 결정하는 방법⁽¹³⁾을 사용한다. 따라서 특별한 이송방정식은 사용하지 않는다. 이 기법은 이전의 인듀서에 대한 흡입성능 유동해석⁽¹²⁾에서 실험값과 정확하게 일치하지는 않았지만, 대체적으로 비슷한 경향을 보임을 확인하였다.

난류모델은 계산시간을 줄이기 위해 확장된 표준 k-ε모델을 채택하였다. 입구경계조건으로 축방향으로의 균일유동을 주었으며, 출구에서는 정압을 주었다. 정상유동해석을 수행하였기 때문에 인듀서 날개의 1개 유로에 대해서만 유동해석을 수행하였다.

Table 1에 본 연구에서 사용된 2가지 인듀서의 형상을 나타내었다. 인듀서의 입구 블레이드 각도 및 익단간극을 변경하였으며, 결과적으로 새로운 인듀서의 양정이 줄어들었다. 인듀서를 제외한 나머지 펌프의 형상은 동일하다. Table 1에서 유량계수(ϕ) 및 양정계수(ψ)는 다음 식과 같이 정의된다. 식에서 Q는 유량, A_1 은 인듀서 입구 단면적, U_{1t} 는 인듀서 앞전 익단 속도, p_{2t} 는 펌프 출구전압력, p_{1t} 는 펌프 입구전압

Table 1 Summary of inducer geometries

Parameter	Value	
	Old	New
Blade number	3	3
Solidity at tip	2.7	2.9
Blade angle at inlet mid-span	14.8	14.5
Radial tip clearance to blade height ratio	0.018	0.014
Flow coefficient (ϕ)	0.099	0.099
Head coefficient (ψ)	0.169	0.158

력, U_{2t} 는 임펠러 출구 익단속도를 나타낸다.

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

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

4. 결과 및 토의

인듀서의 설계변경을 위해서 수행된 유동해석결과를 Fig. 4~7에 나타내었다. 기포가 발생하기 전의 유선분포를 비교하여 Fig. 4에 나타내었다. 새로운(New) 인듀서의 입구 블레이드 각도 및 익단간극이 기존(Old) 인듀서보다 작기 때문에 역류가 작게나마 축소된 것을 확인할 수 있다. 이는 인듀서 케이징 부근의 축방향 속도(V_z) 분포를 표시한 Fig. 5에서 확인할 수 있다. 새로운 인듀서의 축방향 속도가 음(-) 값을 가지기 시작하는 부분이 기존 인듀서에 비해 하류에 위치해있음을 알 수 있다. 축방향속도가 음(-)의 값을 나타내는 것은 유동의 역류를 나타내므로 새로운 인듀서의 역류가 소됨을 알 수 있다. 또한 이러한 새로운 인듀서에서 역류가

축소되는 경향은 저유량에서 더 커짐을 Fig. 6과 7에서 확인할 수 있다. Fig. 5와 7에서 L은 인듀서 블레이드의 축방향 길이를 나타낸다.

Fig. 8에는 인듀서의 흡입성능 계산결과를 나타내었다. 새로운 인듀서의 흡입성능이 우수한 것을 확인할 수 있다.

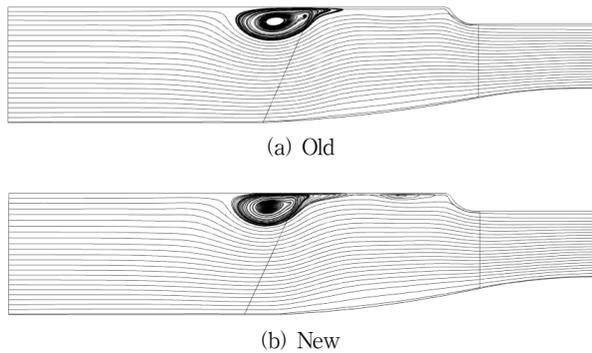


Fig. 4 Predicted circumferentially averaged streamline distributions at the design flow rate

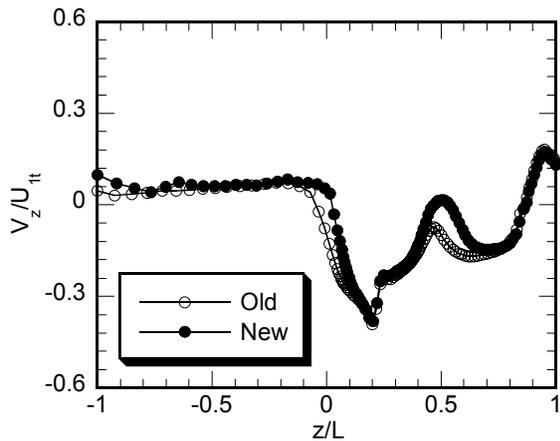


Fig. 5 Normalized axial velocity distributions near the inducer outer casing wall at the design flow rate

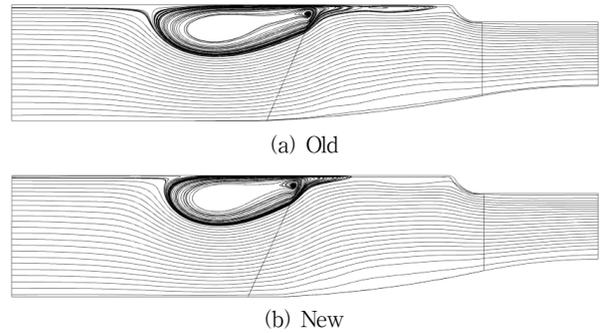


Fig. 6 Predicted circumferentially averaged streamline distributions at the 90% design flow rate

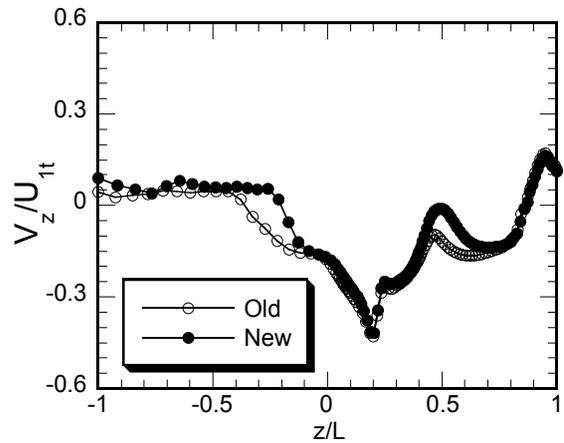


Fig. 7 Normalized axial velocity distributions near the inducer outer casing wall at the 90% design flow rate

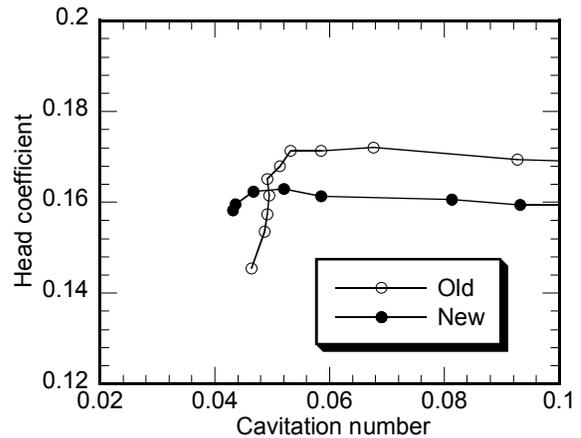


Fig. 8 Predicted suction performance results for the inducers at the design flow rate

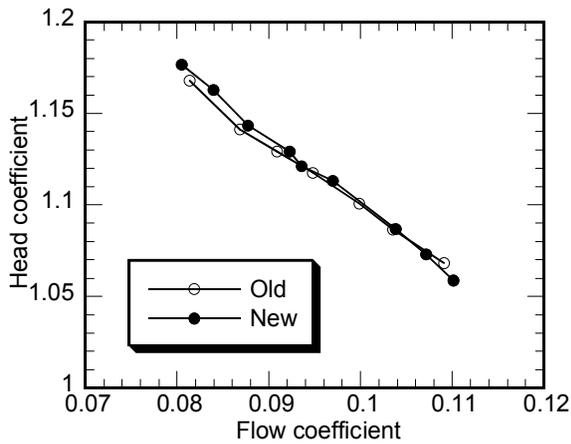
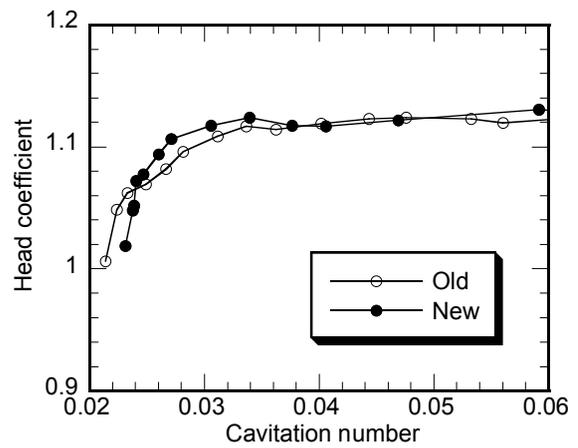


Fig. 9 Measured head coefficient distributions

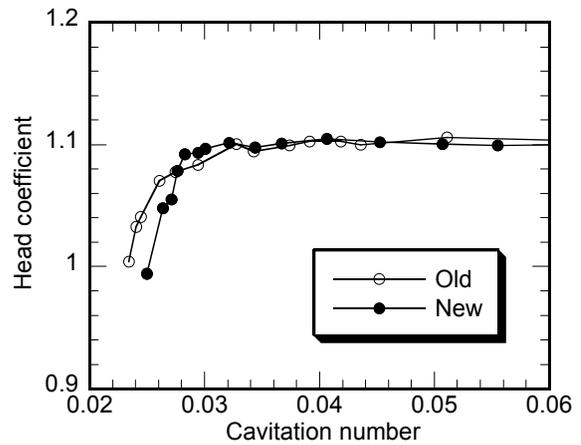
이는 역류의 축소로 인한 것으로 판단된다. Fig. 9에서 캐비테이션 수(σ)는 다음과 같이 정의된다. 식에서 p_v 는 기화압력을 나타낸다.

$$\sigma = 2(p_{1t} - p_v) / (\rho U_{1t}^2) \quad (3)$$

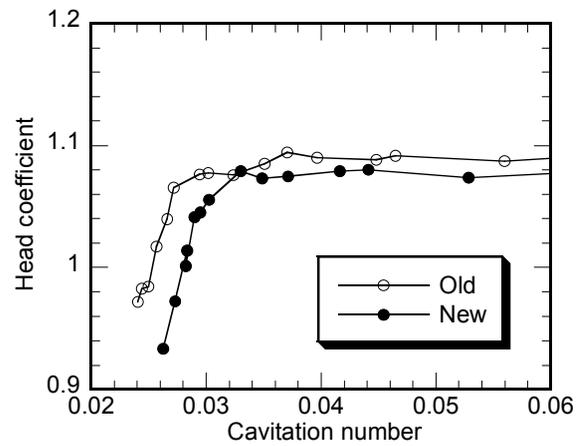
2종류의 인두서를 사용한 펌프 성능 시험결과를 Fig. 9~10에 나타내었다. Fig. 9에 펌프 양정을 비교하여 나타내었는데, 전반적으로 큰 차이는 없지만 새로운 인두서를 사용한 펌프의 양정이 저유량에서는 1% 정도 높고, 고유량에서는 1% 정도 낮은 것으로 측정되었다. 이는 저유량에서는 새로운 인두서에서 역류로 인한 손실이 줄어들고, 고유량에서는 새로운 인두서의 양정이 낮기 때문으로 판단된다. Fig. 10에 측정된 펌프의 흡입성능곡선을 비교하여 나타내었다. 통상 펌프의 양정이 3% 떨어지는 지점에서의 캐비테이션 수를 임계 캐비테이션 수(critical cavitation number)라고 하는데, 이 임계 캐비테이션 수가 낮으면 흡입성능이 좋을 나타낸다. 이러한 기준에서 저유량(Fig. 10 (a))에서는 새로운 인두서를 사용한 펌프의 흡입성능이 상대적으로 우수한 것을 확인할 수 있으며, 고유량(Fig. 10 (c))에서는 새로운 인두서를 사용한 펌프의 흡입성능이 상대적으로 나쁜 것을 알 수 있다. 새로운 인두서의 흡입성능이 저유량에서 상대적으로 좋은 것은 익단간극이 줄어들어서 역류가 약해졌기 때문으로 판단되며, 고유량에서 상대적으로 나빠지는 원인은 인두서의 양정이 낮기 때문으로 판단된다. Fig. 10 (a)에서 새로운 인두서를 사용했을 경우 양정저하가 더 낮은 캐비테이션 수에서 일어나지만(흡입성능이 우수), 양정이 급격하게 떨어지기 시작하는 지점($\sigma=0.03$) 이하에서는 양정저하가 더 급하게 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 Brennen⁽²⁾에 나타난 바와 같이 인두서의 익단간극이 줄어들 경우 나타나는 전형적인 현상이다. 익단간극이 줄어들면 캐비테이션 붕괴점의 차이는 크게 나타나지 않지만 양정저하가 더 낮은 캐비



(a) $\phi=0.090$



(b) $\phi=0.098$



(c) $\phi=0.103$

Fig. 10 Measured suction performance curves for pumps

테이션 수에서 일어나며 떨어지는 각도는 더 큰 것으로 알려져 있다. 이는 Fig. 8의 인두서 흡입성능 해석결과에 나타나 있듯이 인두서의 익단간극이 줄어들면 인두서의 흡입성능이 향상되기 때문으로 판단된다. Fig. 10에서 캐비테이션 붕괴점(breakdown)은 모두 기존의 인두서가 낮은 캐비테이션 수에서 발생하는 것으로 측정되었다. 이는 새로운 인두서보

다 이전의 인듀서가 양정이 높기 때문에 판단되었다. 즉, 펌프의 캐비테이션 붕괴는 인듀서의 양정에 의해서 좌우되는 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 익단간극비가 0.018과 0.014인 형상이 다른 2가지의 인듀서를 사용한 펌프의 흡입성능을 측정하여 비교하였다. 이 때 인듀서의 설계변경 및 성능예측을 위하여 흡입성능 유동해석을 인듀서에 대해서 수행하였다.
- 2) 펌프의 흡입성능 시험결과, 익단간극이 작은 인듀서의 흡입성능이 저유량에서 향상된 것을 확인할 수 있었다. 이는 인듀서 유동해석 결과와 일치하는 것으로 인듀서의 역류가 인듀서의 익단간극이 줄어들어 따라서 약해졌기 때문에 판단된다.
- 3) 익단간극이 작은 인듀서의 경우 익단간극이 큰 인듀서에 비해서 양정이 줄어들게 설계가 되었는데, 저유량에서 임계 캐비테이션 수로 판단한 펌프의 흡입성능은 향상되었으나, 캐비테이션 붕괴점은 더 나빠진 것을 확인할 수 있었다. 따라서 펌프의 캐비테이션 붕괴점은 인듀서의 양정에 의해 결정되는 것으로 판단되었다.

참고문헌

- (1) Huzel, D. K. and Huang, D. H., 1992, Modern Engineering for Design of Liquid-Propellant Rocket Engines, AIAA Press.
- (2) Brennen, C. E., 1994, Hydrodynamics of Pumps, Concepts ETI, Inc. and Oxford University Press, Oxford.
- (3) 김진한, 홍순삼, 정은환, 최창호, 전성민, 2005, "30톤급 액체로켓엔진용 터보펌프 개발 현황," 제25회 한국추진공학회 추계학술발표대회 논문집.
- (4) 최창호, 홍순삼, 김진한, 2003, "인듀서 성능예측에 대한 수치해석적 연구," 한국항공우주학회지, 제31권, 제6호, pp. 72~78.
- (5) 최창호, 노준구, 김대진, 홍순삼, 김진한, 2006, "유동해석을 이용한 터보펌프 성능예측," 한국항공우주학회지, 제34권, 제4호, 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) 홍순삼, 최창호, 김진한, 2004, "현열비가 터보펌프 인듀서의 성능에 미치는 영향," 대한기계학회논문집 B권, 제28권, 제4호, pp. 382~388.
- (9) 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.
- (10) 김대진, 홍순삼, 최창호, 김진한, 2006, "로켓엔진용 산화제펌프의 수류시험," 제4회 한국유체공학술대회 논문집, 제1권, pp. 523~526.
- (11) 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.
- (12) 최창호, 노준구, 김진한, 2010, "터보펌프용 인듀서에 대한 캐비테이션 유동해석," 유체기계저널, 제13권, 제3호, pp. 49~53.
- (13) Fine/Turbo 8.7-2 Manual, 2009, Numeca Inc.
- (14) 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.
- (15) 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.
- (16) Knapp, R. T., Daily, J. T., and Hammit, F. G. 1970, Cavitation, Mc Graw Hill.