

## 터보펌프용 인듀서에 대한 캐비테이션 유동해석

최창호\*† · 노준구\* · 김진한\*

### Numerical Simulation of Cavitating Flow Around Turbopump Inducer

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

Key Words : Turbopump(터보펌프), Inducer(인듀서), Computation(유동해석), Cavitation(캐비테이션)

#### ABSTRACT

The computational studies on the cavitating flow around a turbopump inducer were performed to see the effect of the cavitation on the performance of the inducer. The development of cavities around the inducer blades and the head drop of the inducer are observed as the inlet pressure reduces. The change of the backflow at the inducer inlet is also observed with the development of the cavities. The size of the backflow reduces as the inlet pressure is reduced due to the development of the cavities around the blades. The predicted suction performances of the inducer were compared with the experimental results. The results show that the computations overestimate the suction performances of the inducer than the experiments.

#### 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.<sup>(1)</sup>

Fig. 1은 인듀서, 임펠러, 벌류트 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/벌류트로 구성된 원심펌프가 캐비테이션으로 인한 성능저하 없이 작동하게 한다.<sup>(2)</sup>

국내에서 터보펌프의 흡입성능을 향상시키기 위한 노력의

일환으로 최근에는 터보펌프에 대한 실험 및 수치해석적 연구가 많이 시도되고 있다.<sup>(3-11)</sup> 특히, 터보펌프의 구성품 중에서도 흡입성능과 밀접한 관련이 있는 인듀서에 대해서 대부분의 연구가 집중되어 수행되고 있다. 국내에서 인듀서에 대해서 수행된 대부분의 수치해석적인 연구는 수력성능계산에 국한되고 있는 반면 외국에서는 인듀서에 대한 직접적인 흡입성능해석에 대한 시도가 활발하게 이루어지고 있다.<sup>(12-15)</sup> 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.

본 연구에서는 인듀서에 대한 흡입성능계산을 수행하였고, 이를 실험결과와 비교하여 수치해석기법의 흡입성능에

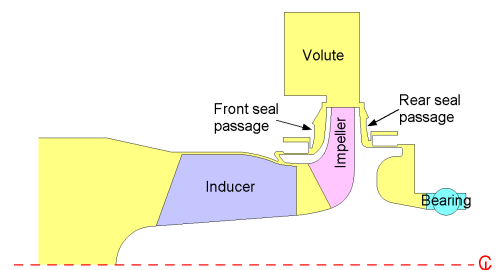


Fig. 1 Typical layout of a turbopump

\* 한국항공우주연구원 터보펌프팀

† 교신저자, E-mail : cch@kari.re.kr

측 유용성을 알아보았다. 또한 입구압력의 변화에 따라 인듀서 블레이드 주위의 기포 발생, 이에 따른 유동장 및 성능의 변화에 대해서도 고찰하였다.

## 2. 유동해석 기법 및 인듀서 형상

본 연구에서는 이전의 유동해석<sup>(4~6)</sup>에서 실험결과와 비교를 통하여 충분히 검증된 Fine/Turbo<sup>(16)</sup>를 이용하여 해석을 수행하였다. Fine/Turbo는 공간차분법으로 가점성을 포함하는 중심차분법, 시간차분법으로 Runge-Kutta 시간진법법을 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.<sup>(12~13)</sup> 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-밀도 관계식은 순수 기체 상태에서는 이상기체방정식을 사용하고 순수 액체 상태에서는 Tait 식<sup>(17)</sup>을 사용하며, 기체와 액체 혼합물에서는 최소 음속( $C_{min}^e = \partial P / \partial \rho$ )을 이용하여 압력-밀도 곡선의 최대 기울기( $1/C_{min}^e$ )를 결정하는 방법<sup>(13)</sup>을 사용한다. 따라서 Ugajin 등<sup>(14)</sup> 및 Hosangadi 등<sup>(15)</sup>과 같은 특별한 이송방정식은 사용하지 않는다.

난류모델은 계산시간을 줄이기 위해 확장된 표준 k-ε 모델

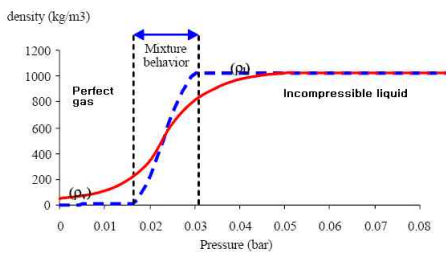


Fig. 2 Barotropic state law for cold water

Table 1 Summary of inducer geometries

Parameter	Value
Design flow coefficient ( $\phi$ )	0.096
Blade number	3
Solidity at tip	2.7
Inlet hub to tip ratio	0.35
Radial tip clearance to blade height ratio	0.033

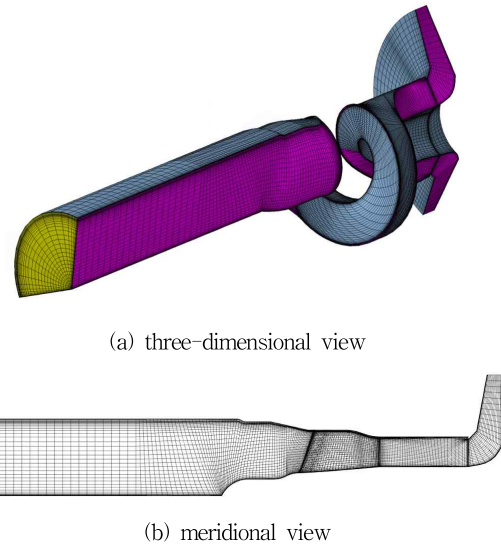


Fig. 3. Computational grids (292,234 cells) for computations

을 채택하였다. 입구경계조건으로 축방향으로의 균일유동을 주었으며, 출구에서는 정압을 주었다. 정상유동해석을 수행하였기 때문에, 인듀서의 날개는 3개지만, 주기경계조건을 사용하여 날개의 1개 유로에 대해서만 유동해석을 수행하였다.

Table 1에 인듀서의 형상을 정리하여 나타내었다. Table 1에서 유량계수는 다음과 같이 정의된다.

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

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

## 3. 결과 및 토론

Fig. 3에 유동해석에 사용된 인듀서 격자의 3차원 및 자오면 형상을 나타내었다.<sup>(6)</sup>

Fig. 4에는 설계유량에서 회전방향으로 평균된 유선을 나타내었는데, 캐비테이션 수( $\sigma$ , 입구압력)가 감소할수록 인듀서 입구부에 발생하는 역류의 강도가 약해지는 것을 볼 수 있다. 캐비테이션 수는 다음과 같이 정의된다.  $p_v$ 는 증기압,  $\rho$ 는 밀도,  $p_{1t}$ 는 인듀서 입구 전압력을 나타낸다.

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

Fig. 5에는 캐비테이션의 진행정도를 나타내기 위해서 밀도가 950kg/m<sup>3</sup>인 경우의 등고선을 나타내었다. 밀도 등고선은 하나의 블레이드에 대해서만 나타내었는데, 캐비테이션 수가 작아질수록 급격하게 밀도가 떨어지는 영역이 확대되

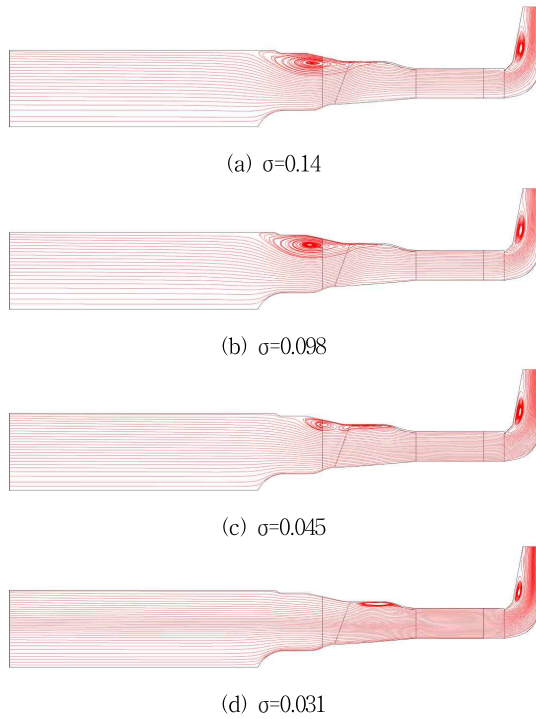


Fig. 4. Predicted circumferentially averaged streamline distributions at the design flow rate

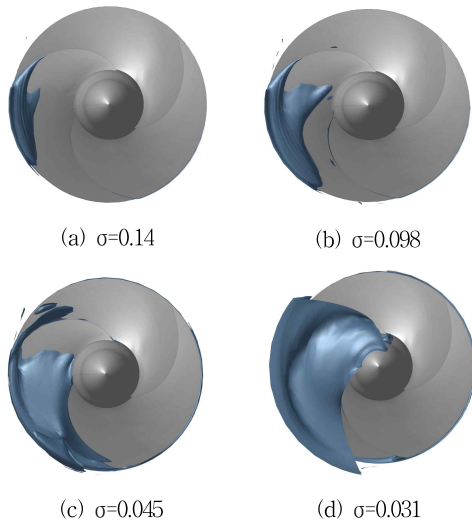


Fig. 5 Predicted iso-density( $\rho=950\text{kg/m}^3$ ) contours at the design flow rate

는 것을 알 수 있다.

Fig. 6에는 블레이드 중간 높이를 따라서 정압계수를 나타내었다. 캐비테이션 수가 큰 경우( $\sigma=0.14$ ), 기포는 블레이드 팁 주변에만 생성되므로(Fig. 5(a) 참조) 블레이드의 중간 높이에서는 캐비테이션의 영향이 없다. 따라서 앞전에서 하류로 가면서 압력이 점차 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 그러나 작은 캐비테이션 수( $\sigma=0.045$ )에서는 블레이드 전면

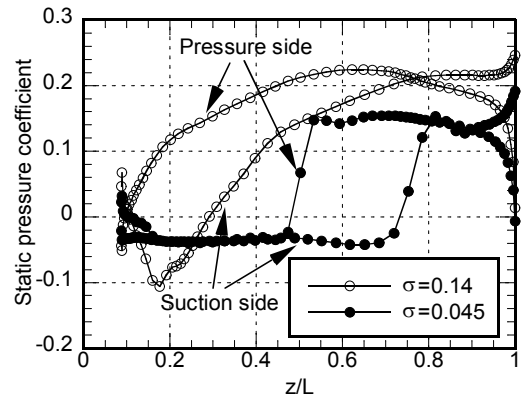


Fig. 6 Predicted static pressure coefficient distributions along the mid-span of the blade surface at the design flow rate

걸쳐서 기포가 발생하므로(Fig. 5(c) 참조) 하류를 따라서 압력증가가  $z/L \approx 0.47$ 이전까지는 일어나지 않으며, 압력면과 흡입면의 압력차가 없는 것을 확인할 수 있다. 이는 블레이드가 일을 하지 않음을 의미하므로 인듀서의 블레이드 면을 따라서 압력상승이 일어나지 않는다. Fig. 6에서  $z$ 는 인듀서 허브 시작점을 기준으로 축방향거리를 나타내며,  $L$ 은 인듀서의 축방향길이를 나타낸다. 또한 정압계수는 다음과 같이 정의된다.

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

Fig. 4와 같이 인듀서의 입구부에서 발생하는 역류는 압력면과 흡입면의 압력차 및 인듀서 앞전 부근에서의 강력한 역압력구배로 인해서 발생하는데<sup>(7)</sup>, 캐비테이션이 심하게 발생할 경우에는 이러한 압력차 및 역압력구배가 존재하지 않으므로 Fig. 4와 같이 캐비테이션 수가 작아지면 역류의 강도가 작아진다.

Fig. 7에는 흡입성능 곡선을 실험결과<sup>(6)</sup>와 비교하여 나타내었다. 전반적으로 계산의 흡입성능이 실험보다 좋은 것을 알 수 있다. 이는 계산에 사용된 캐비테이션 모델의 한계와 계산과 실험의 입구조건 및 매질의 차이로 생각할 수 있다. 계산에 쓰인 캐비테이션 모델은 밀도를 압력만의 함수로 사용하는 단일 유체 모델로 기포의 성장/발전/이동의 과정을 정확하게 묘사하는 데는 무리가 있다. 또한 계산은 입구유동조건 및 매질을 매우 이상적인 상태로 가정하여 수행되지만, 실제 실험에서는 입구에서 약간의 불균일성이 존재하며, 수돗물을 매질로 사용하기 때문에 수돗물에 포함되어 있는 불순물(작은 고체 알갱이 또는 물에 용해되지 않는 기체)들을 완벽하게 제거할 수 없기 때문이다. 이러한 불순물들은 액체의 기화를 촉진시키므로 실제 시험에서 인듀서 주위에 기포가 발생하는 낮은 압력에서 인듀서의 흡입성능 악화로 이어

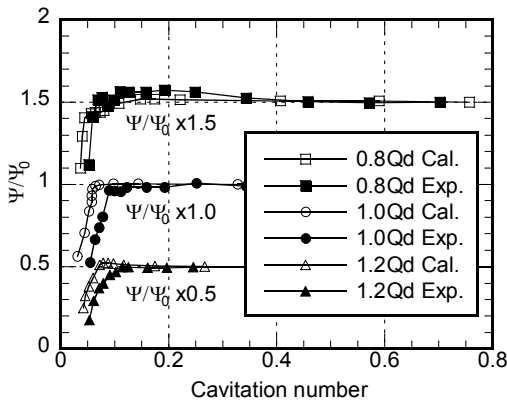


Fig. 7 Suction performance curves at three flow rates

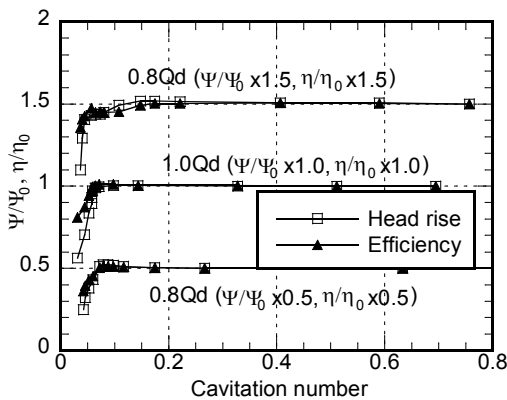


Fig. 8 Predicted efficiency curves at three flow rates

진다. 실제 실험에서 인두서 입구부에서 입구 압력이 떨어지면 용존 기체가 기포로 발전하여 인두서 입구부로 흘러 들어오는 것을 관찰할 수 있었다. 따라서 계산이 실험보다 좋은 흡입성능을 예측하는 것으로 판단된다. 그러나 전반적인 흡입성능 곡선의 형태 및 유량의 변화에 따른 경향은 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. Fig. 7에서  $\psi$ 는 양정계수를  $\psi_0$ 는 높은 캐비테이션 수에서의 양정계수를 나타내며, 그림에서는 이를 무차원하여 표시하였다.

Fig. 8에는 계산된 효율을 무차원하여 양정곡선과 같이 나타내었다. 효율은 양정에 비해 캐비테이션 수가 줄어들에 따라서 나뉘어 심하지 않음을 알 수 있다. 이는 입구압력이 떨어지면, 기포가 커지면서 블레이드 압력면과 흡입면의 압력차이 또한 줄어들므로, 블레이드에 걸리는 토크 또한 감소하기 때문으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 터보펌프용 인두서에 대한 캐비테이션 유동 해석이 수행되었다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 캐비테이션 수가 감소함에 따라서, 기화 영역이 커지

고, 양정이 떨어지며, 입구역류의 강도가 작아지는 것을 확인하였다.

(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. 그러나 계산결과와 실험결과의 전반적인 경향은 잘 일치함을 알 수 있었다.

#### 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., *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) 홍순삼, 최창호, 김진한, 2004, “현열비가 터보펌프 인두서의 성능에 미치는 영향”, 대한기계학회논문집 B권, 제 28권, 제 4호, 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”, 제 4회 한국유체공학학술대회 논문집, 제 1권, 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) 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.
- (13) 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.
- (14) 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.
- (15) Hosangadi, A., Ahuja, V., and Ungenwitter, 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.
- (16) Fine/Turbo 8.7-2 Manual, 2009, Numeca Inc.
- (17) Knapp, R. T., Daily, J. T., and Hammit, F. G. 1970, *Cavitation*, Mc Graw Hill.