

## 論文

## 터보펌프용 전진익형 인듀서의 성능에 대한 수치해석적 연구

최창호\*, 김진한\*

Numerical Study on the Hydrodynamic Performance of  
a Forward-Sweep Type Inducer for Turbopumps

Chang Ho Choi\* and Jinhan Kim\*

## ABSTRACT

Computational studies on the hydrodynamic behavior of the forward-sweep inducers for the rocket-engine turbopump are presented in comparison with the conventional backward-sweep inducers. In the present study, two kinds of forward-sweep inducers are designed and numerically investigated. Forward-sweep inducers have bigger tip solidity compared to backward-sweep inducers even with shorter axial length due to their forward-sweep leading edge profiles. It is shown that back flows at the inlet decreases dramatically for forward-sweep inducers. And the low pressure region at the back flow are also decreased, which is assumed to promote the suction performance of the inducers. It seems that the hub located upstream of the tip at the leading edge induces pre whirl at the inlet blade tip for the backward sweep inducer. And this pre whirl leads to the big back flow.

## 초 록

액체로켓용 터보펌프 인듀서의 성능향상을 위해서 전진익형 인듀서를 설계하고 유동해석하였다. 전진익형 인듀서의 경우 형상의 특징상 후진익형 인듀서에 비해서 짧은 축길이에 대해 상대적으로 큰 익단 현절비를 가지고 있으며, 큰 현절비에서도 불구하고 수력효율의 저하가 없었다. 또한 전진익형 인듀서의 경우 일반적인 후진익형 인듀서에 비해서 인듀서 입구에서 발생하는 역류의 크기가 작고, 또한 인듀서 블레이드 팁에서의 국부적인 저압영역이 작은 영역에서 발생하는 것이 관찰되었다. 따라서 전진익형 인듀서의 경우 인듀서 입구의 정압이 높아서 흡입성능의 향상이 있을 것으로 판단되었다. 후진익형 인듀서의 경우 허브의 블레이드가 입구 유동을 교란하여 입구 역류가 커지지만, 후진익형 인듀서의 경우 이러한 교란효과가 없기 때문에 역류가 줄어든 것으로 나타났다.

**Key Words :** rocket engine(로켓엔진), turbopump(터보펌프), inducer(인듀서), computation (수치해석)

## 1. 서 론

액체로켓은 액체 연료와 산화제를 연소시켜 분

사시킴으로써 추진력을 얻는다. 이 때 액체연료와 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

† 2005년 3월 9일 접수 ~ 2005년 8월 19일 심사완료

\* 정희원, 한국항공우주연구원 터보펌프개발그룹  
연락처, E-mail: cch@kari.re.kr  
대전시 유성우체국 사서함 113호

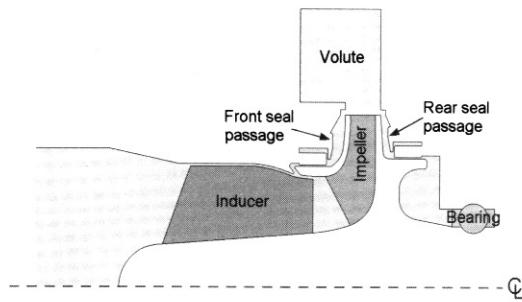


Fig. 1. Schematic sketch of a turbopump unit

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.

인듀서는 이러한 액체로켓용 터보펌프시스템의 주요한 구성품의 하나로서 고속으로 회전하는 원심펌프의 공동화방지를 위해 임펠러 앞에 장착되어 성능저하 없이 펌프시스템의 최소 유효흡입양정 (NPSH)를 낮춰주는 역할을 한다[2]. 인듀서의 장착으로 낮은 입구전압으로도 펌프가 작동 가능하게 되므로 탱크의 무게를 줄일 수 있다. 일반적으로 인듀서는 익단와류(tip vortex flow)와 블레이드를 따라 어느 정도 공동화가 발생한 상태에서 운전하게 되며, 입구에서 발생한 기포가 출구로 전파되는 것을 방지하기 위하여 큰 현절비를 갖는다. 또한, 임펠러에 비해 효율이 낮으므로 상대적으로 작은 양정을 갖도록 설계한다.

인듀서에 대한 연구는, 현절비가 매우 크고 익단와류, 통로와류 등의 점성이 강한 복잡한 난류 유동장이 형성되며 또한 공동화예측에 대한 수치적 어려움으로 인하여, 유로내부유동의 가시화, 흡입성능, 공동화의 발생이 흡입 성능에 미치는 영향 등의 시험적 연구가 주로 이루어져왔다[3-7]. 그러나 90년대에 이르러 전산처리장치의 비약적인 성능발전과 공동화예측을 위한 수학적 모델에 대한 접근이 이루어지기 시작하면서 최근 많은 수치해석적 연구가 진행되고 있다[8-14].

본 연구에서는 인듀서의 공동화를 배제한 수력 성능에 대한 수치해석적 연구가 수행되었는데, 인듀서의 성능에 중요한 영향을 미치는 앞전의 형상에 대한 고찰이 이루어졌다.

기존의 인듀서에 대한 연구는 대부분 인듀서

앞전의 형상이 팁에서 허브에 비해 뒤쪽으로 밀리는 후진익형 (backward sweep)에 대해서 집중되어왔다. 그러나 본 연구에서는 앞전 허브에 응력이 집중되는 구조적인 문제로 터보펌프에 많이 채택되지 않아서 연구수행이 미진하였던, 팁이 허브에 비해서 앞으로 나온 전진익형 (forward sweep)의 인듀서에 대해서 연구를 수행하였다.

## II. 수치해석 방법

본 연구에서는 이전의 인듀서 유동해석[13, 14]에서 실험결과와 잘 일치하는 결과를 얻어서 충분히 검증된 Fine/Turbo[15]를 이용하여 인듀서를 해석하였다. Fine/Turbo는 공간차분법으로 가점성을 포함하는 중심차분법, 시간차분법으로 Runge-Kutta 시간전진법을 사용한다. 또한 비압축성 유동을 해석하기 위하여 예조건화기법을 채택하였다. 수렴가속을 위해 다중격자법, 잔류항평균법(residual smoothing) 등을 사용하였다.

난류모델은 계산시간을 줄이기 위해 확장된 표준 k-ε모델을 채택하였다. 입구경계조건으로 축방향으로의 균일유동을 주었으며, 출구에서는 반경방향 힘평형을 고려한 정압을 주었다.

계산 영역은 크게 4가지의 블록으로 나누었다. 입구밸브, 주유동, 익단간극, 뒷전이 문턱하므로 뒷전영역 등으로 나누어 격자를 생성하였다. 약 23만개 정도의 격자점이 사용되었으며, 확장된 표준 k-ε난류모델이 채택되었으므로 벽면으로부터 첫 번째 격자의 y+ 값이 10~50 정도가 되도록 격자를 분포하였다[14]. 계산은 COMPAQ DS20E workstation에서 수행되었다. 계산시간은 1회 계산에 약 17초가 소요되었으며, 수렴하는데는 약 400회 정도의 반복계산이 요구되었다. Fig. 2에 계산에 사용된 격자를 나타내었다.

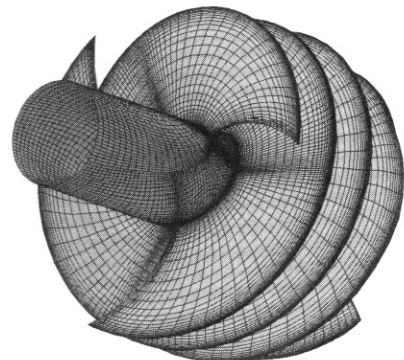


Fig. 2. Computational grid for the forward facing inducer (228,515 cells)

### III. 계산결과 및 토론

Table 1에 계산에 사용된 기본 인듀서의 형상 및 유동해석결과를 나타내었다. 앞전이 앞쪽으로 나온 전진익형 인듀서와 뒤쪽으로 밀리는 후진익형 인듀서 등의 2종류에 대해서 유동해석이 수행되었다. 전진익형 인듀서의 경우 특성상 후진익형 인듀서와 비교해서 축길이가 짧아져도 익단 현절비는 크게 증가하는 구조를 가지고 있다. 유량계수( $\phi$ ) 및 양정계수( $\psi$ )는 다음과 같이 정의된다.

$$\phi = Q / (A_1 U_{T1}) \quad (1)$$

$$\psi = 2(p_{2t} - p_{1t}) / (\rho U_{T1}^2) \quad (2)$$

여기서  $Q$ 는 유량,  $A_1$ 은 입구면적,  $U_{T1}$ 은 입구 익단속도,  $p_{1t}$ 는 입구 전압력,  $p_{2t}$ 는 출구 전압력을 나타낸다.

Table 1. Geometries and hydraulic performances

	Forward	Backward
axial length at hub (mm)	52	62
inlet hub to tip diameter ratio	0.31	0.31
inlet blade sweep angle	-10	+25
solidity at tip	3.7	2.8
flow coefficient ( $\phi$ )	0.088	0.088
head coefficient ( $\psi$ )	0.255	0.256
efficiency (%)	65.9	66.7

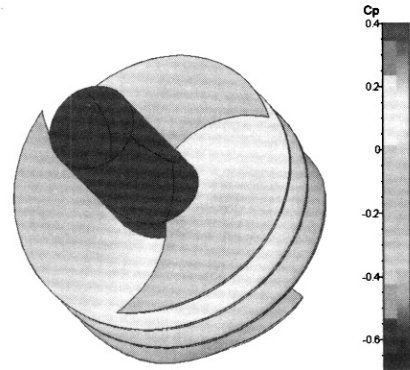
Fig. 3에 2종류의 인듀서의 압력면 표면압력 계수분포를 나타내었는데, 후진익형 인듀서에 비하여 전진익형 인듀서는 앞전 익단에 생기는 국부적인 저압현상이 사라지고 저압영역이 완만하게 분포되는 것이 보인다. Fig. 3에서 압력계수  $C_p$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$C_p = 2(p - p_{1t}) / (\rho U_{T1}^2) \quad (3)$$

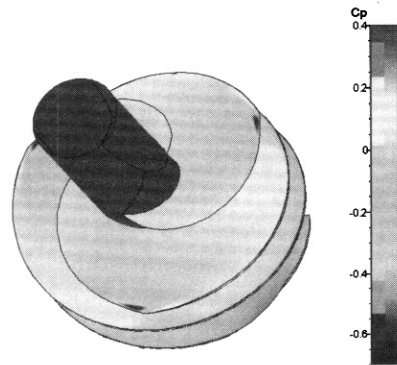
Fig. 4에 회전방향으로 평균된 유선분포를 나타내었는데, 전진익형 인듀서의 경우 쉬라우드에서 후진익형 인듀서에 비해서 역류의 크기가 크게 줄어드는 것을 볼 수 있다. 그러나 허브에서는 작은 역류가 발생하고 있다.

Fig. 5에 블레이드 표면 정압분포를 나타내었는데, 전진익형 인듀서의 경우 후진익형 인듀서와는 달리, 입구에서 흡입면과 압력면의 압력역

전현상이 없다. 이는 받음각이 양의 값을 가짐을 나타낸다. 후진익형 인듀서의 경우 입구에서 압력역전현상을 보이며, 흡입면의 압력이 감소하다가, 인듀서 익단이 시작되는 위치 ( $x/L=0.25$ ) 부근에서 압력이 상승하기 시작한다. 이 때 압력면

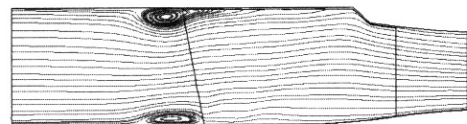


(a) forward sweep inducer

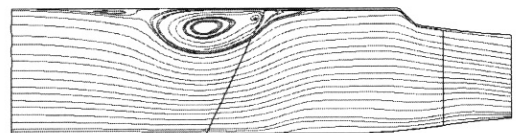


(b) backward sweep inducer

Fig. 3. Surface static pressure distributions

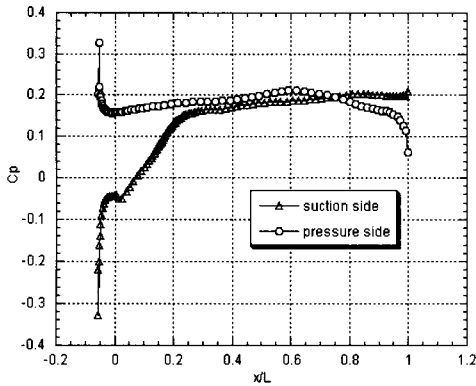


(a) forward facing inducer

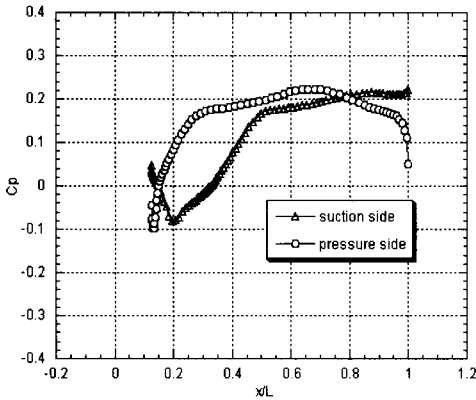


(b) backward facing inducer

Fig. 4. Streamline distributions



(a) forward facing inducer



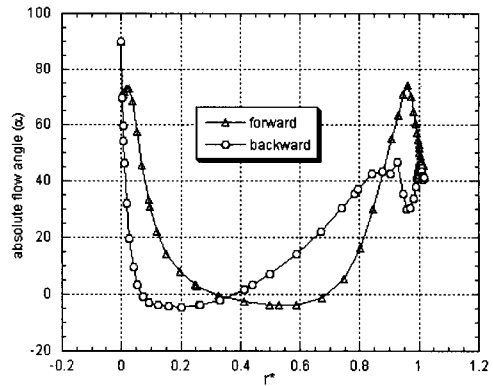
(b) backward facing inducer

Fig. 5. Static pressure coefficient distributions along the mid-blade surfaces

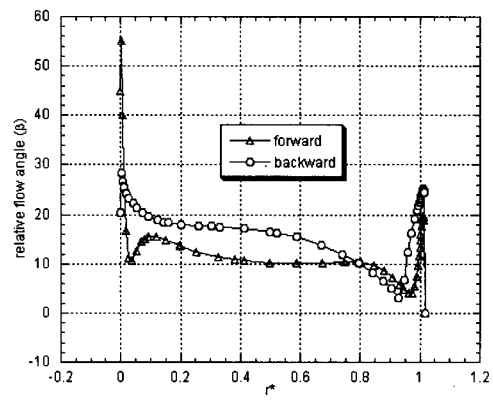
의 압력은 급격하게 상승하다가 완만하게 상승한다. 참고로  $x/L=0.0$ 이 인두서 허브의 시작점이다.  $L$ 은 인두서의 허브에서 축방향 길이를 나타낸다. Fig. 3(b)의 국부압력저하는 이러한 후진익형 인두서의 압력역전현상에 의해서 압력면의 압력이 낮아지기 때문에 발생한다.

Fig. 6에 인두서 입구에서의 절대각 및 상대각을 비교하였는데, Fig. 6(a)에서 후진익형 인두서의 경우 절대유동각이 허브에서 쉬라우드로 갈수록 증가하는 것을 볼 수 있다.

이는 backward sweep으로 인하여 허브에서 앞으로 나온 블레이드가 위쪽의 유동에 영향을 미침을 의미한다. 반면, 전진익형 인두서의 경우 그 정도는 매우 적지만 쉬라우드에서 허브로 가면서 유동각이 증가한다. 따라서 허브부근에 역류가 발생한다. 유동각은 역류가 일어나는 부분을 제외하고는 대체로 일정한 값을 가진다. Fig. 6(b)



(a) absolute flow angle



(b) relative flow angle

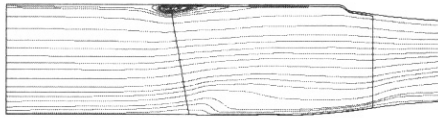
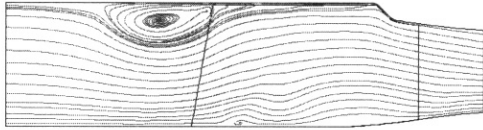
Fig. 6. Flow angle distributions at the inlet

와 같이, 유동의 절대유동각이 크면 인두서 입구에서 상대각이 커져서 받음각이 줄어드는 것을 의미하므로 Fig. 4(b)와 같이 후진익형 인두서의 경우 역류가 크게 발생하게 된다. 익렬 앞전에서 받음각이 적으면, 블레이드를 따라서 압력상승이 급격하게 나타나므로 역압력구배가 커져서 역류가 커진다. Fig. 5(b)가 (a) 보다 앞부분에서 역압력구배가 큰 것을 관찰할 수 있다. 참고로 인두서의 중간에서 ( $r^*=0.5$ ) 블레이드각은 두 인두서 모두 13.4도이다. Fig. 6(b)에서 후진익형 인두서의 경우 받음각이 음의 값을 가지는 것을 알 수 있다. Fig. 6에서  $r^*$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$r^* = (r - r_h) / (r_t - r_h) \tag{4}$$

여기서  $r_h$ 는 허브 반경,  $r_t$ 는 팁 반경을 나타낸다.

Fig. 7에는 후진익형 인두서의 경우에는 입구 직경을 줄인 경우와 전진익형 인두서의 경우에는

(a) forward facing inducer ( $\phi=0.11$ )

(b) backward facing inducer (10 deg.)

Fig. 7. Streamline distributions

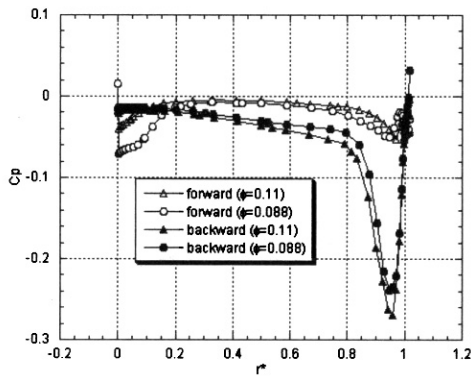
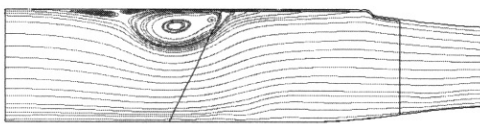


Fig. 8. Static pressure coefficient distributions along inlet leading edges

Fig. 9. Streamline distributions ( $\phi=0.11$ , tip solidity=2.6)

sweep 각도를 줄인 경우를 나타내었다. 입구직 경을 줄인 경우 역류가 현저히 줄어드는 것을 확인할 수 있으나, backward sweep 각을 줄인 경우에는 큰 차이를 발견할 수 없다. 그러나 입구 받음각이 음의 값을 가지는 것은 조금 개선되는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 8에 인듀서의 흡입능에 영향을 미치는 입구 정압을 비교하였다. 후진익형 인듀서의 경우 입구 유량계수를 높여주더라도 Fig. 9와 같이 입구 역류의 크기가 크게 변하지 않는다. 따라서 입구 정압역시 크게 변하지 않는다. 그러나 전진익형 인듀서의 경우 입구 유량계수가 커짐에 따

라서 역류의 크기가 줄어들어서 입구 정압이 올라가는 것을 확인할 수 있다. Fig. 3(b)의 후진익형 인듀서의 익단에서 국부적인 저압영역이 발생하는 것은 이처럼 역류에 의해서 압력이 떨어지기 때문이다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 인듀서의 앞전 형상이 수력성능에 미치는 영향에 대해서 유동해석을 통하여 고찰하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 입구 블레이드 익단에서 전진익형 인듀서의 경우 후진익형 인듀서에 비해서 상대적으로 완만한 압력구배를 가진다. 후진익형 인듀서의 경우 국부적으로 매우 낮은 압력을 가지는 부분이 발생한다.

(2) 후진익형 인듀서의 역류가 큰 것은 허브의 앞으로 돌출된 인듀서 블레이드가 유동을 회전시키므로, 위쪽의 유동절대각이 커져서 음의 받음각을 가지게 되기 때문이다. 전진익형 인듀서의 경우 반대로 팁 블레이드가 교란되지 않은 유동과 만나므로 설계된 바와 같이 입구에서 받음각이 양의 값을 가지게 되어, 역류가 작아지고, 압력면과 흡입면에서의 역압력구배가 존재하지 않는다.

(3) 전진익형 인듀서의 경우 후진익형 인듀서에 비해서 역류가 작으므로 높은 입구정압이 형성된다.

#### 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.
- 3) Lakshminarayana, B., 1981, Analytical and Experimental Study of Flow Phenomenon Noncavitating Rocket Pump Inducers, NASA contractor Reports No. 3471.
- 4) Kamijo, K., Yoshida, M. and Tsujimoto, Y., 1993, "Hydraulic and Mechanical Performance of LE-7 LOX Pump Inducer", Journal of Propulsion and Power, Vol. 9, No. 6, pp. 819-826.
- 5) 손동기, 구현철, 차봉준, 양수석, 이대성,

2002, "터보펌프 인듀서의 흡입성능에 대한 직경과 회전속도의 영향", 유체기계저널, 제5권, 제1호, pp. 27-32.

6) 홍순삼, 구현철, 최창호, 차봉준, 양수석, 2002, "터보펌프 인듀서의 형상변화가 성능에 미치는 영향", 대한기계학회 2002년도 추계학술대회 강연 및 논문초록집.

7) 홍순삼, 최창호, 김진한, "현절비가 터보펌프 인듀서의 성능에 미치는 영향", 대한기계학회 논문집 B권, 제 28권, 제 4호, pp. 382-388, 2004.

8) Deshpande, M., Feng, J. and Merkle, C., L., 1994, "Cavity Flow Predictions Based on the Euler Equations", ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 116, pp. 36-44.

9) Vaidya, N., Athavale, M. M. and Singhal, A. K., 1998, "Numerical Simulation of Cavitating Flows in an Axial Pump Using a PDF-Based Cavitation Model", ISROMAC-7, Honolulu, Hawaii.

10) Kunz, R. F., Boger, D. A., Chyczewski, T. S., Stineberg, D. R., Gibeling, H. J. and Govindan, T. R., 1999, "Multi-Phase CFD.

Analysis of Natural and Ventilated Cavitation About Submerged Bodies", Proceedings of ASME FEDSM-99.

11) 최창호, 이기수, 김진한, 양수석, 2001, "터보펌프 인듀서의 수치해석을 통한 성능예측", 대한기계학회 춘계 학술대회 학술집, pp. 625-630.

12) 최창호, 이기수, 김진한, 양수석, 이대성, 2002, "액체로켓용 터보펌프 성능예측에 대한 수치해석적 연구", 유체기계저널, 제 5권, 제 2호, pp. 15-21.

13) Choi, C. H., Hong, S. S., Cha, B. J. and Yang, S. S., "Study on the Hydraulic Performance of a Turbopump Inducer", Proc. of the 2003 Joint ASME-JSME Fluids Engineering Summer Conference, July 6-10, Honolulu, Hawaii, FEDSM 2003-45095.

14) 최창호, 홍순삼, 김진한, "인듀서 성능예측에 대한 수치해석적 연구", 한국항공우주학회지, 제 31권, 제 6호, pp.72~78, 2003.

15) Fine/Turbo 6.2-1 Manual, 2004, Numeca Inc.