

터보펌프용 전진익형 인듀서에 대한 연구

최창호* · 김진선* · 홍순삼* · 김진한*

Study on the forward-sweep inducer for turbopumps

Chang-Ho Choi*, Jin-Sun Kim*, Soon-Sam Hong*, Jinhan Kim*

Key Words : Turbopump(터보펌프), Inducer(인듀서)

ABSTRACT

Computational and experimental studies on the forward-sweep inducer for the rocket-engine turbopump are presented in comparison with the conventional backward-sweep inducer. It is shown that back flows at the inlet decreases 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. The backward-sweep inducer shows almost the same suction performance as that of the backward-sweep inducers although it has small inlet tip diameter and shorter length. And the efficiency of the forward-type inducer shows better results than the backward-sweep inducer due to the small size of backflows.

1. 서론

액체로켓은 액체 연료와 산화제를 연소시켜 분사시킴으로써 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 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⁾

Figure 1은 인듀서, 임펠러, 벌류트 및 누설유로를 포함한 터보펌프의 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 성

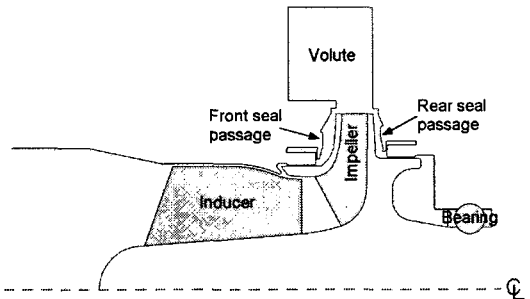


Fig. 1 Typical layout of a turbopump

* 한국항공우주연구원 터보펌프그룹
E-mail : cch@kari.re.kr

능저하 없이 작동하게 한다.

터보펌프의 성능을 향상시키기 위한 노력의 일환으로 최근에는 캐비테이션을 배제한 인듀서에 대한 수치해석적 연구도 많이 시도되고 있지만^(2~7), 캐비테이션에 관한 연구는 해석 및 예측이 어렵기 때문에 주로 실험에 많이 의존하고 있다.^(8~11)

본 연구에서는 인듀서의 성능에 중요한 영향을 미치는 앞전의 형상에 대한 고찰이 이루어졌다. 기존의 인듀서에 대한 연구는 인듀서 앞전의 형상이 익단에서 허브에 비해 뒤쪽으로 밀리는 후진익형 (backward sweep)에 대해서 대부분 집중되었다. 그러나 본 연구에서는 앞전 허브에 응력이 집중되는 구조적인 문제로 터보펌프에 많이 채택되지 않아서 연구수행이 미진하였던, 익단이 허브에 비해서 앞으로 나온 전진익형 (forward sweep)의 인듀서에 관한 연구를 수행하였다.

2. 유동해석 기법

본 연구에서는 항우연에서 개발한 설계 S/W 및 이전의 유동해석^(3,4,7)에서 실험결과와의 비교를 통하여 충분히 검증된 Fine/Turbo⁽¹²⁾를 이용하여 해석을 수행하였다. Fine/Turbo는 공간차분법으로 가점성을 포함하는 중심차분법, 시간차분법으로 Runge-Kutta 시간전진법을 사용한다. 또한 비압축성 유동을 해석하기 위하여 예조각화기법을 채택하였다. 수렴가속을 위해 다중격자법, 잔류형평군법(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. 입구 밸브, 주유동, 익단간극, 뒷전이 몽톡하므로 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.

3. 시험장치 및 인듀서 형상

인듀서 시험기는 폐쇄형으로 Fig. 2와 같이 구성되어 있다.^(9, 11) 0.9톤 용량의 탱크에 저장된 물이 순환되

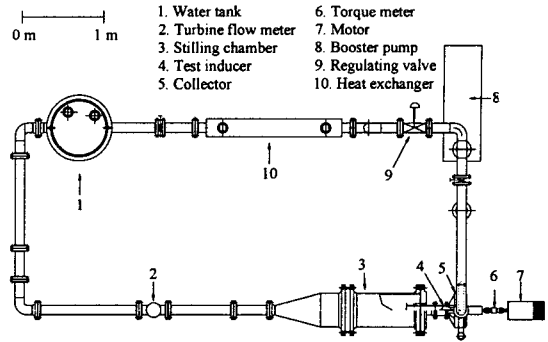


Fig. 2 Plane view of the test loop

며 진공 펌프 및 압축 공기를 이용하여 탱크 내부 압력을 조절함으로써 인듀서 입구 압력이 조절된다. 탱크 상부에 수냉식 열교환기를 설치하여 실험하는 동안에 온도상승 효과를 최소화하였다. 양정이 작은 인듀서를 단독 실험할 때는 관로손실에 의하여 운용 가능한 유량에 제약이 있으므로 부스터 펌프를 콜렉터 하류에 설치하여 운용 유량을 증가시켰다. 인듀서는 전기모터로 구동되는데 모터는 37kW 출력이며 인버터를 이용하여 10,000RPM까지 회전수가 연속적으로 조절된다.

본 연구에서 설계되고 성능시험이 수행된 전진익형 인듀서는 총 2가지이다. 첫 번째 전진익형의 경우 전진각(sweep angle)이 -10도였는데⁽³⁾, 역류가 대폭 감소하는 등의 수력 및 흡입 성능실험에서 좋은 결과를 보였지만, 앞전 허브 및 익단의 구조적인 문제로 인하여 실제 터보펌프에 적용하는 데 문제가 있을 것으로 판단되었다. 따라서 전진각을 -5도로 하고 인듀서 앞전 익단의 약한 부분을 라운딩처리하여 다시 설계/제작/실험을 수행하였다. 두 번째 인듀서의 경우 제작결과 구조적으로도 큰 문제가 없는 것으로 판단되었다. 본 연구에서는 실제로 터보펌프에 적용할 수 있는 가능성이 큰, 두 번째 인듀서에 대하여 고찰하고자 한다. Table 1에 인듀서의 형상을 기존의 후진익형 인듀서와 비교하여 정리하였다. 전진익형 인듀서의 직경이 작은 것을 확인할 수 있으며, 전진익형의 구조적인 특징으로 인하여 축길이가 짧지만 익단 현절비는 같은 것을 알 수 있다. Figure 3에는 인듀서의 형상을 나타내었다. 전진익형 인듀서의 경우 블레이드 앞전이 익단 쪽으로 갈수록 앞으로 돌출되어 있는 것을 확인할 수 있다. Table 1에서 유량계수는 다음과 같이 정의된다.

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

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

Table 1 Summary of inducer geometries

	Forward	Backward
axial length at hub (mm)	50	62
tip diameter (mm)	90	96
inlet hub to tip diameter ratio	0.33	0.31
inlet blade sweep angle	-5	+25
solidity at tip	2.8	2.8
flow coefficient (ϕ)	0.11	0.088

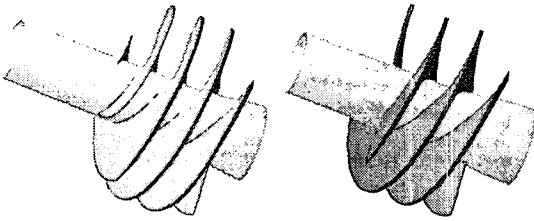


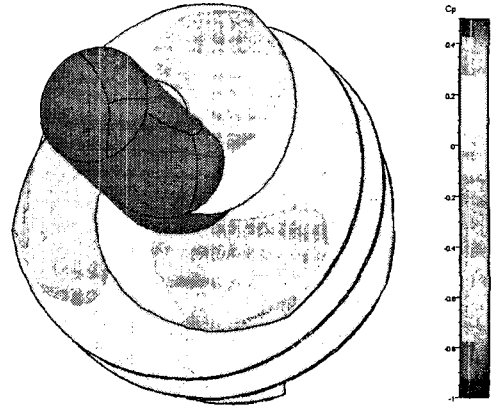
Fig. 3 Backward and forward inducers

4. 결과분석

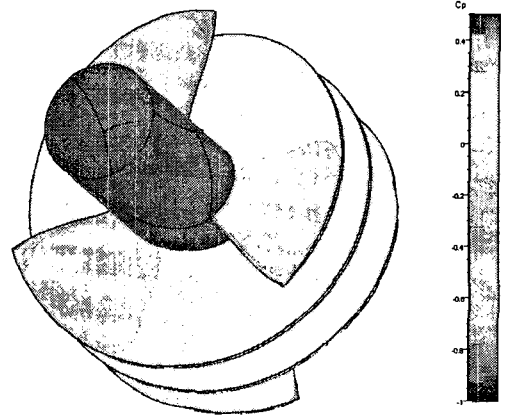
Figure 4에는 인듀서 익형표면에서 압력계수분포를 나타내었는데, 후진익형 인듀서에 비하여 전진익형 인듀서는 앞전 익단에 생기는 국부적인 저압현상이 사라지고 저압영역이 익단에서 허브까지 완만하게 분포되는 것이 보인다. 이는 최창호 등⁽⁵⁾의 연구결과에서 언급하였듯이 후진익형의 경우 허브의 앞으로 돌출된 앞전에 의하여 유동의 예선회가 발생하기 때문이다. Figure 4에서 압력계수 C_p 는 다음과 같이 정의된다. 식 (2)에서 p 는 밀도, p_{1r} 는 입구 전압력을 나타낸다.

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

Figure 5에는 설계유량(100%Qd)에서 회전방향으로 평균된 유선분포를 나타내었는데, 전진익형 인듀서의 경우 쉬라우드에서 후진익형 인듀서에 비해서 역류의 크기가 크게 줄어드는 것을 볼 수 있다.



(a) backward sweep inducer



(b) forward sweep inducer

Fig. 4 Static pressure coefficient distributions



(a) backward inducer



(a) forward inducer

Fig. 5 Streamline distributions at 100%Qd

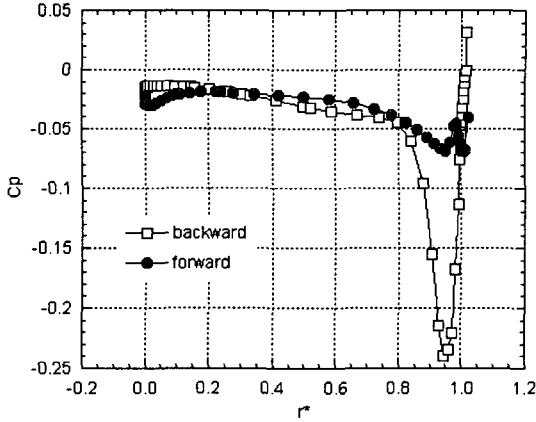


Fig. 6 Inlet pressure coefficient distributions

Figure 6에 인듀서의 흡입성능에 영향을 미치는 입구 정압의 계산결과를 비교하였다. 후진익형 인듀서의 경우 입구 역류의 크기가 크므로 동압성분이 커져서 압력이 익단에서 국부적으로 떨어지게 된다. 그러나 전진익형 인듀서의 경우 역류의 크기가 작기 때문에 입구 정압의 강하가 후진익형에 비해서 작다. 이는 입구 직경이 작음에도 전진익형의 흡입성능이 후진익형에 비해서 떨어지지 않는 것을 설명해 준다. 본 논문에는 나타내지 않았지만, 흡입성능시험에서 캐비테이션 붕괴 직전 후진익형 인듀서의 경우에는 기포가 앞전 익단에서만 발생하지만, 전진익형 인듀서의 경우 앞전 허브에서 익단까지 거의 동시에 발생하게 된다. 이는 Fig. 6과 같이 전진익형 인듀서의 경우 앞전의 압력이 허브에서 익단 까지 비교적 고르게 분포되는 것을 나타낸다. Figure 6에서 r^* 는 다음과 같이 정의된다. r_h 는 허브반경, r_t 는 익단반경을 나타낸다.

$$r^* = (r - r_h) / (r_t - r_h) \quad (3)$$

실험에서 측정된 인듀서의 수력효율을 Fig. 7에 나타내었다. 실험은 6,000RPM에서 수행되었다. 입구 유량계수가 크고 역류가 작기 때문에 전진익형 인듀서의 효율이 큰 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 8에 측정된 흡입성능을 나타내었는데, 100% 설계유량의 경우 후진익형 인듀서의 입구 유량계수가 کم에도 불구하고 흡입성능에는 차이가 없음을 알 수 있다. 이는 역류가 줄어들면서 익단에서의 저압부분이 줄어들었기 때문이다. 120% 설계유량에서는 전진익형의 흡입성능이 후진의

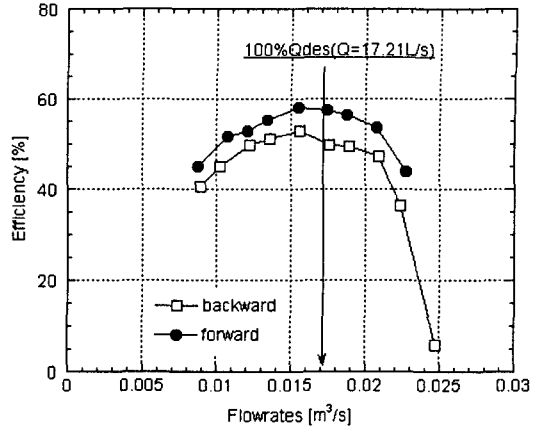


Fig. 7 Efficiency distributions

형에 비해서 다소 떨어진다. 이는 120% 설계유량에서는 후진익형이라도 Fig. 9에 나타난 바와 같이 역류의 크기가 작아지므로 역류가 작기 때문에 발생하는 전진익형의 장점이 소멸되었기 때문으로 판단된다. 역류가 없을 경우에는 일반적으로 입구 직경이 크면 동압성분이 작아져서 흡입성능이 증가하게 된다.

후진익형의 경우 흡입성능 실험을 양정이 0이 되는 시점까지 수행할 수 없는 반면, 전진익형의 경우 양정

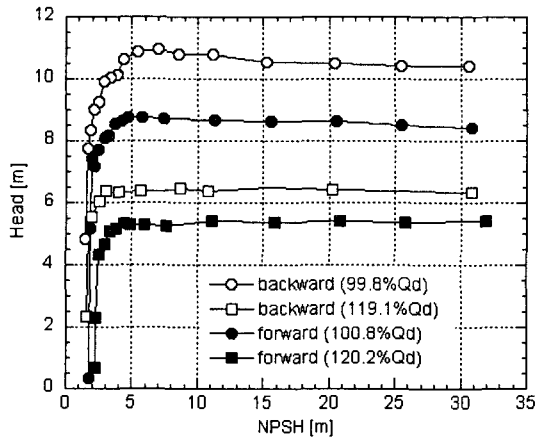


Fig. 8 Suction performances

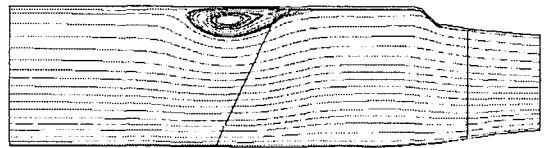


Fig. 9 Streamline distributions for the backward-sweep inducer at 120%Qd

이 0이 되는 시점까지 실험을 수행할 수 있다. 이는 Fig. 6과 같이 전진익형의 경우 인듀서 앞전에서 허브에서 팁까지 압력이 비교적 고르게 분포되어 있는 바, 캐비테이션 붕괴시 동시에 압력이 소멸되기 때문으로 추측된다.

Table 2에 2종류의 인듀서의 설계점에서의 성능을 비교하여 나타내었다. 전진익형이 후진익형에 비해서 흡입성능은 동일하지만, 효율은 증가한 것을 알 수 있다.

Table 2 Experimental results (100%Qd)

	efficiency	NPSH (30% head drop)
backward inducer	50%	1.8
forward inducer	57%	1.8

5. 결론

본 연구에서는 인듀서의 앞전 형상이 수력 및 흡입 성능에 미치는 영향에 대해서 유동해석 및 실험을 통하여 고찰하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 입구 블레이드 익단에서 전진익형 인듀서의 경우 후진익형 인듀서에 비해서 작은 역류가 발생하며, 이로 인하여 상대적으로 완만한 압력구배를 가진다. 후진익형 인듀서의 경우 국부적으로 매우 낮은 압력을 가지는 부분이 앞전 익단에 발생한다.

(2) 전진익형 인듀서의 경우 후진익형 인듀서에 비해서 작은 입구 직경 및 길이를 가지면서도 동일한 흡입성능을 나타내었으며, 작은 입구역류로 인해서 상대적으로 높은 효율을 가짐을 확인하였다.

(3) 전진익형의 유동 특성상 입구 앞전에서의 압력이 반경방향으로 비교적 고르게 분포되어 양정이 거의 0이 될 때까지 실험을 수행할 수 있었다. 이는 캐비테이션 붕괴직전의 특성을 연구하는데 큰 도움이 될 것으로 판단된다.

(4) 전진익형 인듀서의 경우 작은 크기로도 후진익형 인듀서에 비해 우수한 성능을 보였으므로, 구조적인 문제를 보강한다면 터보펌프에 실제로 적용시 좋은 결과가 예상된다.

참고문헌

- (1) Huzel, D. K. and Huang, D. H., 1992, *Modern Engineering for Design of Liquid-Propellant Rocket Engines*, AIAA Press.
- (2) 최창호, 이기수, 김진한, 양수석, 2001, "터보펌프 인듀서의 수치해석을 통한 성능예측," 대한기계학회 춘계 학술대회 학술집, pp. 625-630.
- (3) 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.
- (4) 최창호, 홍순삼, 김진한, "인듀서 성능예측에 대한 수치해석적 연구," 한국항공우주학회지, 제 31권, 제 6호, pp.72~78, 2003.
- (5) 최창호, 김진한, "터보펌프용 전진익형 인듀서의 성능에 대한 수치해석적 연구," 한국항공우주학회 2004년도 추계학술발표회 논문집, 2004.
- (6) 최창호, 김진한, 2004, "터보펌프용 산화제 펌프 설계/해석," 유체기계저널 제 7권 제 3호, pp. 57~62.
- (7) 최창호, 노준구, 김대진, 홍순삼, 김진한, "유동해석을 이용한 터보펌프 설계," 한국항공우주학회 2005년도 춘계학술발표회 논문집, 2005.
- (8) 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.
- (9) 손동기, 구현철, 차봉준, 양수석, 이대성, 2002, "터보펌프 인듀서의 흡입성능에 대한 직경과 회전속도의 영향," 유체기계저널, 제5권, 제1호, pp. 27-32.
- (10) 홍순삼, 구현철, 최창호, 차봉준, 양수석, 2002, "터보펌프 인듀서의 형상변화가 성능에 미치는 영향," 대한기계학회 2002년도 추계학술대회 강연 및 논문초록집.
- (11) 홍순삼, 최창호, 김진한, "현열비가 터보펌프 인듀서의 성능에 미치는 영향," 대한기계학회논문집 B 권, 제 28권, 제 4호, pp. 382-388, 2004.
- (12) Fine/Turbo 6.2-1 Manual, 2004, Numeca Inc.