

터보펌프용 인듀서 블레이드 수가 성능에 미치는 영향에 대한 연구

최창호*† · 김진한*

Effects of number of blades on the performance of the turbopump inducer

Chang-Ho Choi*†, Jinhan Kim*

Key Words : Turbopump(터보펌프), Inducer(인듀서), Computation(유동해석), Backflow(역류)

ABSTRACT

The effects of number of blades on the hydraulic performance of the inducer were studied using a computational method. Inducers with number of blades from 2 to 4 were used for computations and the hydraulic performances of the inducers were compared. The computational results showed that the hydraulic performance decreased due to the increase of the skin friction loss at blade passages as the blade number increased. The results also showed that the strength of the backflow became weak because of the decrease of unfavorable pressure gradient as the blade number increased.

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 공동화(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

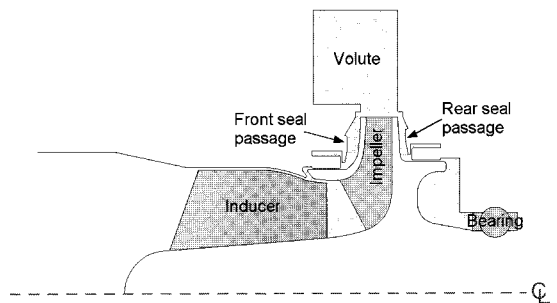


Fig. 3 Typical layout of a turbopump

* 한국항공우주연구원 터보펌프팀

† 교신저자, E-mail : cch@kari.re.kr

인한 성능저하 없이 작동하게 한다.

터보펌프의 성능을 향상시키기 위한 노력의 일환으로 최근에는 터보펌프에 대한 실험 및 수치해석적 연구가 많이 시도되고 있다.^(2~15) 펌프의 흡입성능을 향상시키기 위한 연구의 대부분은 인듀서에 집중되어 이루어져 왔다. 주어진 인듀서의 흡입성능의 향상을 위한 유량계수, 현절비, 익단간극 등에 대한 연구는 많이 수행되었지만, 인듀서의 블레이드 수에 대한 연구는 미흡하였다. 인듀서의 블레이드 수는 펌프의 흡입성능 및 진동특성에 매우 중요한 영향을 미친다. 따라서 본 연구에서는 인듀서의 블레이드 수가 수력성능에 미치는 영향에 대해서 수치해석적으로 연구하였다. 본 연구의 결과로 인듀서의 블레이드 수가 수력성능에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 본 연구결과를 바탕으로 향후 블레이드 수가 흡입성능에 미치는 영향에 대한 실험적 연구를 수행할 계획이다.

2. 유동해석 기법

본 연구에서는 항우연에서 개발한 설계 S/W 및 이전의 유동해석^(3~9)에서 실험결과와의 비교를 통하여 충분히 검증된 Fine/Turbo⁽¹⁶⁾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(residual smoothing) 등을 사용하였다.

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

3. 인듀서 형상

Table 1에 인듀서의 형상을 정리하여 나타내었다. 본 연구에서는 인듀서의 블레이드 수만을 2~4개로 달리하여 수력성능의 변화를 관찰하였다. 블레이드 수가 증가함에 따라서 현절비가 증가하는 것을 볼 수 있다. Figure 2에는 블레이드 수가 3개인 인듀서의 3차원 형상을 나타내었다. 블레이드 수가 2개 및 4개인 인듀서의 형상은 블레이드 수만 제외하고 동일하다. Table 1에서 유량계수는 다음과 같이 정의된다.

Table 1 Inducer design specifications

Parameters	2 blade	3 blade	4 blade
blade number	2	3	4
design flow coefficient (ϕ)	0.1		
inlet hub to tip diameter ratio	0.29		
axial length to inlet tip diameter ratio	0.69		
tip solidity to tip solidity of 2 blade ratio	1.0	1.5	2.0

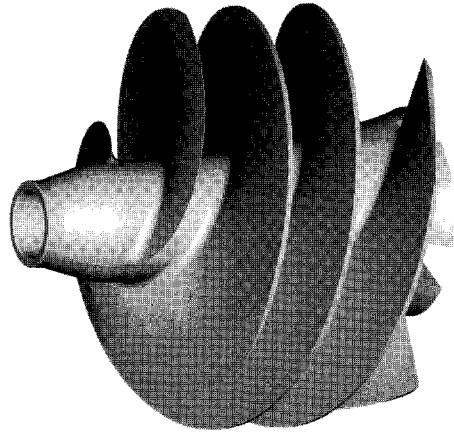


Fig. 4 3 Geometry of 3-bladed inducer

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

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

4. 결과 및 토론

Figure 3에 유동해석에 사용된 인듀서 격자를 나타내었다. 블레이드 수가 3개인 인듀서에 대해서만 나타내었다.

Figure 4에는 계산결과를 나타내었는데, 블레이드 수가 늘어날수록 양정과 효율이 떨어지는 것을 볼 수 있다. 특히 고유량에서 블레이드 수가 늘어날수록 효율이 급격하게 떨어지는 것을 볼 수 있다. Figure 4에서 양정계수는 다음과 같이 정의된다. ρ 는 밀도, p_{1t} 및 p_{2t} 는 인듀서 입/출구 전압력, U_{2T} 는 임펠러 출구 익단속도를 나타낸다.

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



Fig. 5 Computational grid for 3-bladed inducer (3 blocks, 277,551 cells)

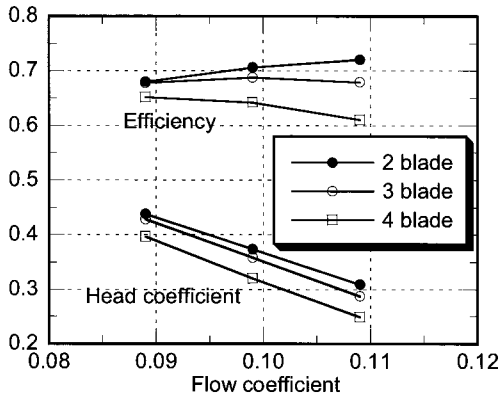


Fig. 6 Performance curves

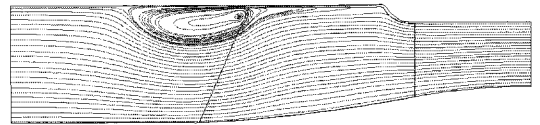
Figure 5에는 회전방향으로 평균된 유선분포를 나타내었다. 블레이드 수가 적을수록 역류가 커지는 것을 관찰할 수 있는데, 이는 Fig. 6에 나타난 바와 같이 블레이드 수가 적을수록 $z/L \approx 0.4$ 이후에 상대적으로 압력상승이 급격하여 역압력구배가 크게 형성되기 때문이다. Figure 6에서 z 는 인두서 허브 시작점을 기준으로 축방향거리를 나타내며, L 은 인두서의 축방향길이를 나타낸다. 또한 정압계수(C_p)는 다음과 같이 정의된다.

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

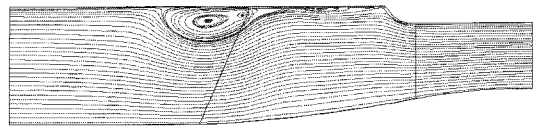
블레이드 표면 압력분포를 Fig. 7에 나타내었는데, 블레이드 수가 많을수록 압력면과 흡입면의 압력차가 $z/L \approx 0.4$ 이후에 급격하게 작아져 역압력구배가 작아

지는 것을 알 수 있다. Figure 8에는 입구 유동각 분포를 나타내었는데, 블레이드 수가 적을수록 절대유동각이 작은 반경부터 증가하기 시작하는 것을 알 수 있다. 이는 블레이드 수가 적을수록 역류가 커져서 예선 회가 증가함을 나타낸다. Figure 8에서 r^* 는 다음과 같이 정의된다. r_h 는 허브반경, r_s 는 쉬라우드 반경을 나타낸다.

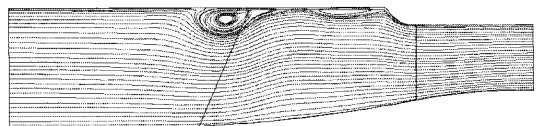
$$r^* = (r - r_h) / (r_s - r_h) \quad (4)$$



(a) 2 blade



(b) 3 blade



(c) 4 blade

Fig. 7 Circumferentially averaged streamline distributions at design condition

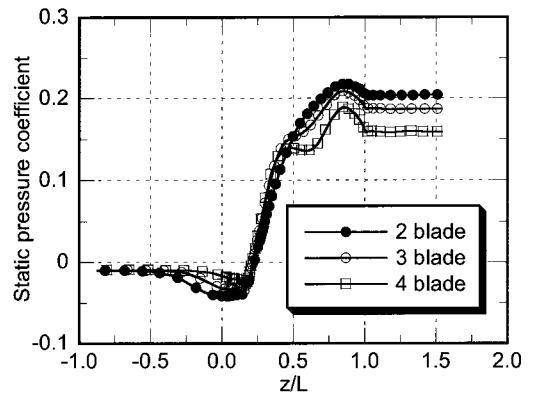


Fig. 8 Static pressure distributions at midspan

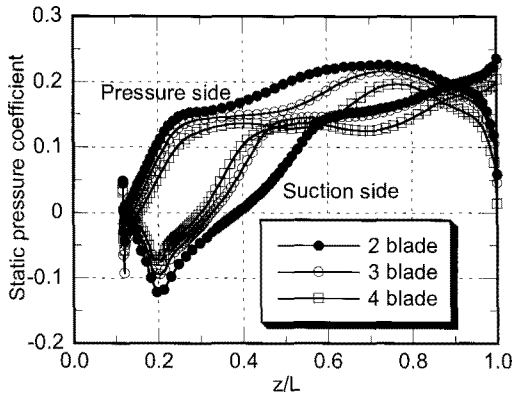


Fig. 9 Static pressure distributions at blade surfaces

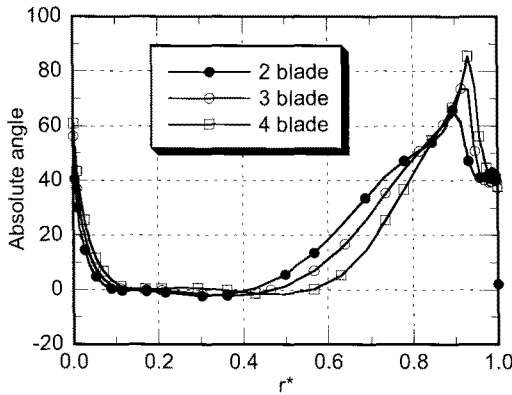


Fig. 10 Absolute flow angle distributions near the inducer leading edge

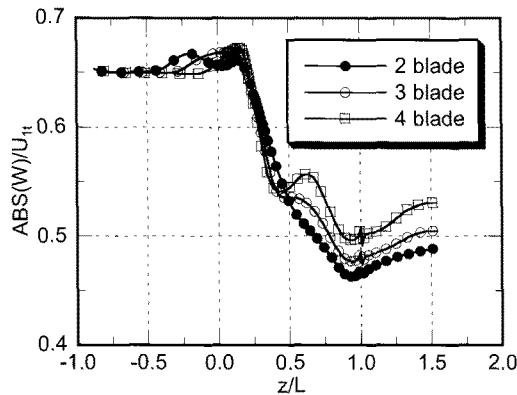


Fig. 11 Relative velocity magnitude distributions at midspan

블레이드 수가 많을 경우 $z/L \approx 0.4$ 이후에 압력이 떨어지는 원인을 파악하기 위해서 Fig. 9에 상대속도 분포를 나타내었다. 블레이드 수가 많을수록 $z/L \approx 0.4$ 이후에 상대속도가 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 따라서 블레이드 수가 늘어날수록 유로가 좁아져 유속이 증가하고, 이로 인해서 블레이드 내부에서의 표면마찰손실이 증가하기 때문에 압력이 급격하게 떨어지는 것으로 판단할 수 있다. 이상에서 인듀서 블레이드 수가 많아질수록 표면마찰손실이 커져서 양정이 떨어지고, 이에 따라서 역류가 감소하는 것을 관찰하였다.

블레이드 수가 4개일 경우, 표면마찰손실을 줄여 양정을 높이기 위해서 블레이드의 두께만을 약 25% 정도 줄인 인듀서를 설계하여 유동해석을 수행해 보았다. Figure 10에 계산된 유선분포를 나타내었는데, 블레이드의 두께가 얇은 경우 Fig. 5 (c)의 블레이드 4개 인듀서의 경우보다 역류가 다소 커진 것을 알 수 있다. 또한 양정의 경우 증가해서 블레이드 수가 3인 경우와 비슷한 결과(약 12% 증가)를 얻었다. 즉, 블레이드의 수가 많아질 경우 유로가 좁아져 마찰손실이 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 블레이드 두께를 줄여서 이를 보상할 수 있음을 알 수 있다. 그러나 블레이드 수 4개일 경우 블레이드 두께를 줄이면 수력특성이 향상되지만, 블레이드 두께가 지나치게 얇으면 제작상의 어려움이 있으므로, 본 연구에서는 Fig. 11에 나타난 바와 같이 블레이드 두께 및 입·출구 블레이드 각도를 고정하고 내부 블레이드 각도분포만을 변경하여 양정을 증가시키는 방향으로 블레이드를 재설계하였다. 즉, 마찰손실이 증가하는 $z/L \approx 0.4$ 이후의 유로면적이 커지게 블레이드 각도를 부분적으로 증가시켰다. Figure 12에 유선분포를 나타내었는데, 역류가 기존의 블레이드 4개인 경우와 동일한 크기인 것을 알 수 있다. 이 때 양정은 기존의 블레이드 4개인 경우보다 약 7% 정도 증가하였다. Figure 13 상대속도분포를 비교하여 나타내었는데, 재설계된 인듀서의 경우 $z/L \approx 0.4$ 이후에서 절대속도 증가가 완화된 것을 알 수 있다.

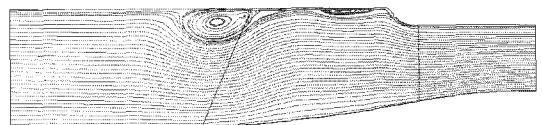


Fig. 12 Circumferentially averaged streamline distributions at design condition for 4-bladed inducer with thin blades

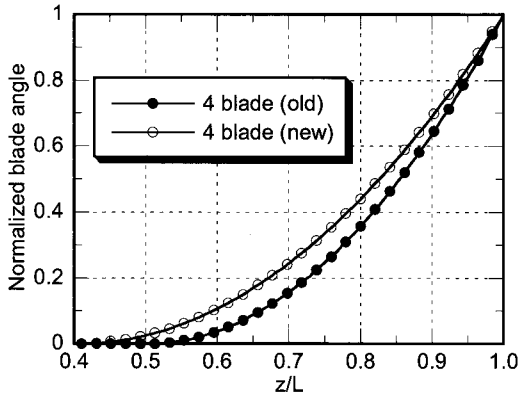


Fig. 13 Blade angle distributions for 4-bladed inducers

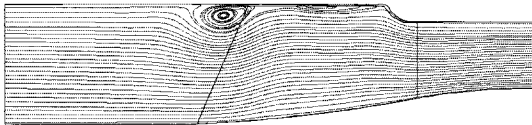


Fig. 14 Circumferentially averaged streamline distributions at design condition for 4-bladed inducer with redistributed blade angle

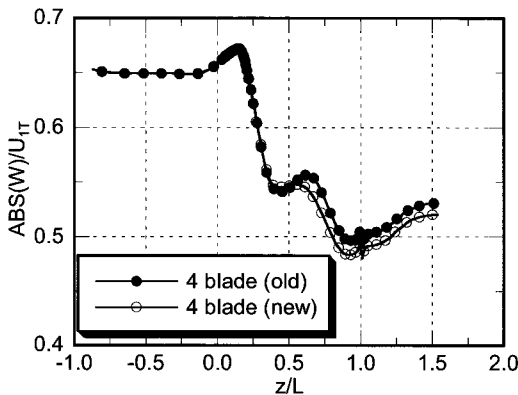


Fig. 15 Relative velocity magnitude distributions at midspan for 4-bladed inducers

Table 2 Inducer performance data at design condition

	2 blade	3 blade	4 blade	4 thin blade	4 redesigned blade
head coefficient	0.37	0.36	0.32	0.36	0.34
efficiency	0.71	0.69	0.64	0.66	0.66

Table 2에 계산된 인듀서의 수력특성을 정리하여 나타내었다.

5. 결론

본 연구에서는 블레이드 수가 인듀서의 수력성능에 미치는 영향에 대하여 고찰하기 위해서 블레이드 수(2~4개), 두께, 각도 등을 변화시키면서 유동해석을 수행하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 블레이드 수가 증가하면 $z/L \approx 0.4$ 이후에 블레이드 내부의 마찰손실이 상대적으로 증가하여 양정과 효율이 떨어진다. 그러나 블레이드 수가 증가하면 역압력구배 또한 약해지기 때문에 인듀서 입구의 역류의 크기는 줄어들게 된다.

(2) 블레이드의 두께를 줄이면 마찰손실이 감소하기 때문에 양정이 증가하는 효과를 확인하였으며, 블레이드 각도분포를 적절하게 조절하여 작은 크기의 역류를 가지면서 양정저하를 최소화한 인듀서를 설계할 수 있었다.

참고문헌

- (1) Huzel, D. K. and Huang, D. H., 1992, *Modern Engineering for Design of Liquid-Propellant Rocket Engines*, AIAA Press.
- (2) 김진한, 홍순삼, 정은환, 최창호, 전성민, 2005, "30톤급 액체로켓엔진용 터보펌프 개발 현황," 제25회 한국추진공학회 추계학술발표대회 논문집.
- (3) 최창호, 홍순삼, 김진한, 2003, "인듀서 성능예측에 대한 수치해석적 연구," 한국항공우주학회지, 제 31권, 제 6호, pp. 72~78.
- (4) 최창호, 김진한, 2004, "터보펌프용 산화제 펌프 설계/해석," 유체기계저널, 제 7권, 제 3호, pp. 57~62.
- (5) 최창호, 김진한, 2005, "터보펌프용 전진익형 인듀서의 성능에 대한 수치해석적 연구," 한국항공우주학회지, 제 33권, 제 11호, pp. 74~79.
- (6) 최창호, 노준구, 김대진, 홍순삼, 김진한, 2006, "유동해석을 이용한 터보펌프 성능예측," 한국항공우주학회지, 제 34권, 제 4호, pp. 70~74.
- (7) 노준구, 최창호, 김진한, 2006, "터보펌프 축추력 조절용 캐비티 베인에 대한 수치해석적 연구," 유체기계저널, 제9권, 제2호 pp. 39~43.
- (8) 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.
- (9) 최창호, 김진선, 홍순삼, 김진한, 2006, "터보펌프용 전진익형 인듀서에 대한 연구," 유체기계저널, 제 9권, 제 2호, pp. 25~29.
- (10) 김진선, 홍순삼, 최창호, 김진한, 2004, "터보펌프 인듀서의 흡입성능에 대한 실험적 연구," 한국항공우주학회 2004년도 추계학술발표회 논문집.
- (11) 홍순삼, 최창호, 김진한, 2004, "현절비가 터보펌프 인듀서의 성능에 미치는 영향," 대한기계학회논문집 B권, 제 28권, 제 4호, pp. 382~388.
- (12) 홍순삼, 김대진, 김진선, 최창호, 김진한, 2005, "터보펌프의 수력 성능시험," 한국추진공학회 2005년도 춘계학술대회 논문집
- (13) 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.
- (14) 김대진, 홍순삼, 최창호, 김진한, 2006, "로켓엔진용 산화제펌프의 수류시험," 제 4회 한국유체공학 학술대회 논문집, 제 1권, pp. 523~526.
- (15) 최창호, 김대진, 홍순삼, 김진한, 2007, "인듀서와 임펠러 축방향 간극이 터보펌프 성능에 미치는 영향," 2007 유체기계 연구개발 발표회 논문집.
- (16) Fine/Turbo 7.1-4 Manual, 2006, Numeca Inc.
- (17) Brennen, C. E., *Hydrodynamics of Pumps*, Concepts ETI, Inc. and Oxford University Press, Oxford, 1994.