

인듀서와 임펠러 축방향 간극이 터보펌프 성능에 미치는 영향

최창호* · 김대진* · 홍순삼* · 김진한*

Effects of axial distance between inducer and impeller on the performance of the turbopump

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

Key Words : Turbopump(터보펌프), Inducer(인듀서), Impeller(임펠러), Pump(펌프)

ABSTRACT

An inducer is employed in a modern rocket feed system because it allows a turbopump system to operate at a high speed with low inlet pressures so as to minimize the weight and the size of the system. Cavitation performance can be improved by installing an inducer to the pump, enabling to increase the operational speed of the pump. The main purpose of an inducer is to increase the static pressure prior to an impeller to enable the impeller to operate satisfactorily under cavitation environments.

In the present study, the effects of axial distance between the inducer and the impeller on the performance of the pump were studied using both experimental and computational methods. Two inducers with different axial length were used for the experiments and the pump performances were measured. The experimental results show that the suction performance decreases as the axial gap between the inducer and impeller is increased.

1. 서론

액체로켓은 액체연료와 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 터

보펌프로 가압시키는 터보펌프 방식이 있다. 가압식은 구조가 간단한 장점이 있지만, 고압을 유지하기 위하여 탱크의 무게가 증가하게 되고 결국 발사체가 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, 벌류트 및 누설유로를 포함한 터보펌프용 펌프의 일반적인 구조를 나타낸다.

* 한국항공우주연구원 터보펌프팀

† 교신저자, E-mail : cch@kari.re.kr

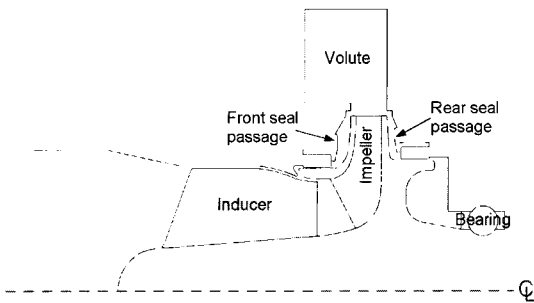


Fig. 1 Typical layout of a turbopump

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.

터보펌프의 성능을 향상시키기 위한 노력의 일환으로 최근에는 터보펌프에 대한 실험 및 수치해석적 연구가 많이 시도되고 있다.^(2~15) 펌프의 흡입성능을 향상시키기 위한 연구는 대부분 인듀서에 집중되어 이루어져 왔다. 그러나 인듀서와 임펠러의 적절한 매칭은 펌프의 흡입성능에 매우 중요한 영향을 미친다. 주어진 임펠러에 대한 인듀서의 적절한 양정에 대한 연구는 많이 수행되었지만, 인듀서와 임펠러의 축방향 간극이 펌프의 흡입성능에 미치는 영향에 대한 연구는 미흡하였다. 따라서 본 연구에서는 인듀서와 임펠러의 축방향 간극이 펌프의 성능에 미치는 영향에 대해서 연구하였다. 본 연구의 결과로 축방향 간극이 펌프의 흡입성능에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

2. 유동해석 기법

본 연구에서는 한국항공우주연구원에서 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 등을 사용하였다.

난류모델은 계산시간을 줄이기 위해 확장된 표준 k-ε 모델을 채택하였다. 입구경계조건으로 축방향으로의 균일유동을 주었으며, 출구에서는 반경방향 힘평형

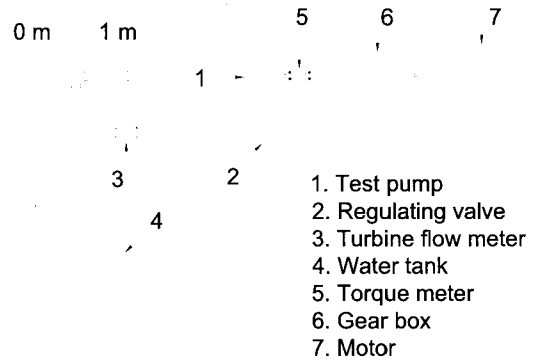


Fig. 2 Schematic of test section

을 고려한 정압을 주었다.

3. 시험장치 및 펌프형상

터보펌프 성능시험설비는 물과 공기를 사용하여 터보펌프에 대한 상사시험을 수행하기 위해 개발되었으며, 크게 주시험기와 부대설비로 구분된다. 주시험기는 펌프시험기, 터빈시험기, 조립체시험기로 구성되며, 부대설비는 고압공기 공급시스템(Pressure Automatic Regulation System; PARS)과 고압질소 공급설비로 구성된다. 터보펌프 중 산화제펌프와 연료펌프에 대한 성능시험은 펌프시험기에서 이루어지며, 부대설비 중 PARS을 이용한다.^(12~15)

펌프시험기는 펌프 단품에 대한 수력성능시험과 흡입성능시험이 이루어진다. 펌프시험기는 탱크의 물을 펌프로 흡입하여 다시 물탱크로 보내는 폐회로 형식의 시험기로 시험기 형상은 Fig. 2와 같다. 설비 내 주요 구성요소로는 모터, 기어박스, 물탱크, 토크미터, 터빈유량계, 진공펌프 등이 있다. 모터와 기어박스는 터빈을 대신하여 펌프를 구동하는 목적으로 사용되며, 최고 출력 320 kW, 최대 회전수 20,000 rpm까지 시험 가능하다. 물탱크는 3m³의 용량으로 펌프시험에 필요한 유체(물)를 공급한다. 펌프구동을 위한 동력을 측정하는 용도로 쓰이는 토크미터는 기어박스과 펌프 사이에 위치한다. 터빈유량계는 작동유량의 측정에 쓰이며, 펌프하류에 설치하였다. 진공펌프는 흡입성능시험 중 펌프시험기 폐회로 내부압력을 대기압 이하로 낮추는데 사용되는데 정격용량은 960 lpm, 최대적용압력은 10⁻⁴ Torr이다.

터보펌프의 성능검증을 위해, 앞에서 언급한 토크미

Table 1 Pump design specifications

Parameters	long	short
inducer design flow coefficient (ϕ)	0.1	
inducer inlet hub to tip diameter ratio	0.49	0.49
inducer axial length to inlet tip diameter ratio	0.61	0.55
inducer and impeller axial distance to inducer inlet tip diameter ratio	0.037	0.038
inducer tip solidity	2.6	2.3
inducer blade number	3	
inducer inlet tip diameter to impeller outlet diameter ratio	0.61	
impeller outlet blade angle (deg.)	23.0	
impeller blade number	9	

터, 유량계 이외에 몇 개의 압력센서와 온도센서가 사용된다. 우선 펌프회로의 센서를 살펴보면, 양정측정에 필요한 펌프 입구 및 출구압력은 입구배관과 출구배관에서 측정되며, 유체의 온도는 입구배관에 설치된 온도센서에 의해 측정된다. 펌프 본품에는 내부압력분포를 알기 위해 벌류트와 임펠러 출구, 이차 유로에 여러 개의 압력센서를 설치하였다. 또한 펌프의 안정성을 확인하기 위해, 펌프 벌류트의 축방향과 반경방향에 진동센서를 설치하고, 입출구 배관에 압력섭동센서를 설치하였다. 진동센서와 압력섭동센서는 고속 샘플링 센서로서 측정데이터는 별도로 저장된다.

Table 1에 연구에 사용된 펌프의 규격을 나타내었다. Long과 short의 차이점은 인듀서의 축방향 길이이다. Fig. 1과 동일한 펌프구조에서 당초 인듀서의 뒷부분을 10% 정도 잘라낸 것이 short 인듀서이다. 따라서 인듀서의 길이만 다를 뿐 나머지 형상은 동일하다. 인듀서의 길이가 달라졌으므로 인듀서와 임펠러의 축방향 간극도 변화되었다. 즉, 인듀서와 임펠러의 축방향 간극이 인듀서를 잘라낸 만큼 커지게 되었다. Table 1에서 유량계수는 다음과 같이 정의된다.

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

여기서 Q는 유량, A_1 은 인듀서 입구 단면적, U_{T1} 는 인듀서 앞전 익단 속도를 나타낸다.

4. 결과 및 토론

Fig. 3에 펌프의 양정을 비교하여 나타내었다. Short

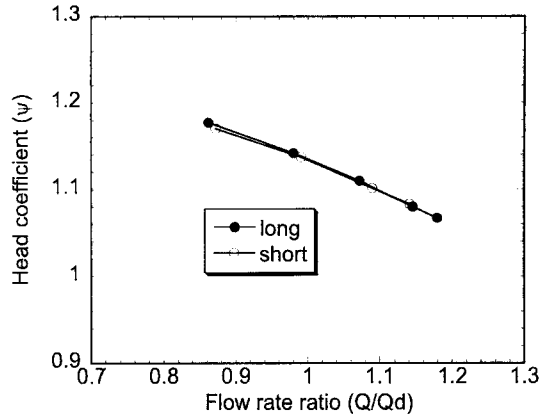


Fig. 3 Measured performance curves

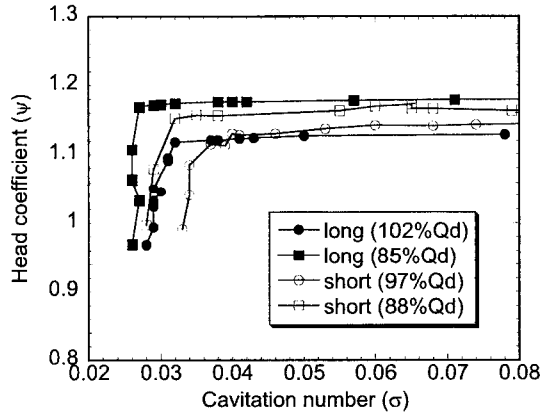


Fig. 4 Measured suction performance curves

인듀서를 사용할 경우에 펌프의 수력성능은 큰 차이가 없다. Fig. 3에서 양정계수는 다음과 같이 정의된다. ρ 는 밀도, p_{1t} 및 p_{2t} 는 펌프 입/출구 전압력, U_{T2} 는 임펠러 출구 익단속도를 나타낸다.

$$\psi = 2(p_{2t} - p_{1t}) / (\rho U_{T2}^2) \quad (2)$$

Fig. 4에 펌프의 흡입성능을 비교하여 나타내었으며, Fig. 5에는 임계 캐비테이션 수(σ_{cr})를 정리하여 나타내었다. Fig. 4에서 캐비테이션 수(σ)는 다음과 같이 정의된다.

$$\sigma = \frac{(p_{1t} - p_v)}{\rho U_{T1}^2 / 2} \quad (3)$$

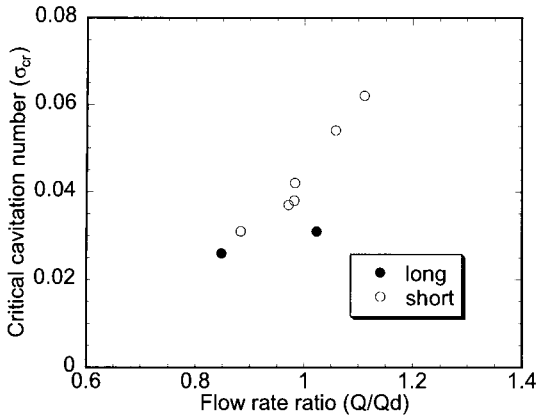


Fig. 5 Measured critical cavitation numbers

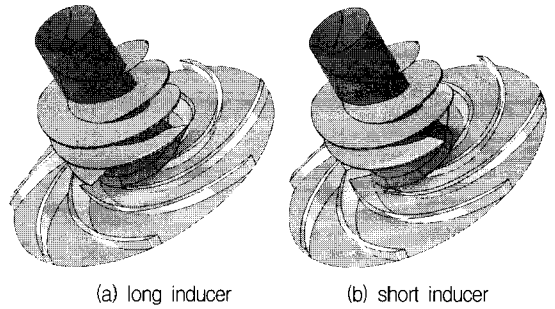


Fig. 7 Inducer/impeller geometries and surface pressure distributions

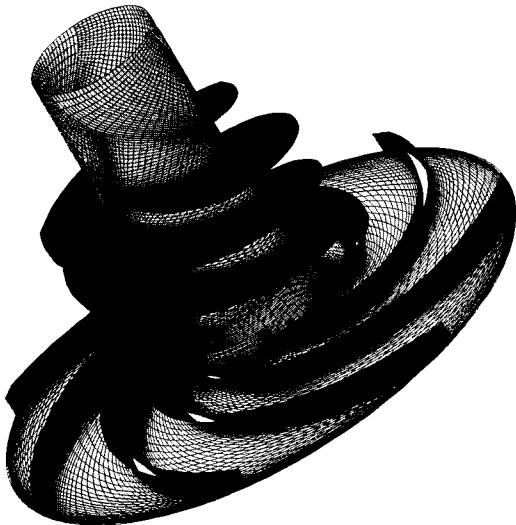
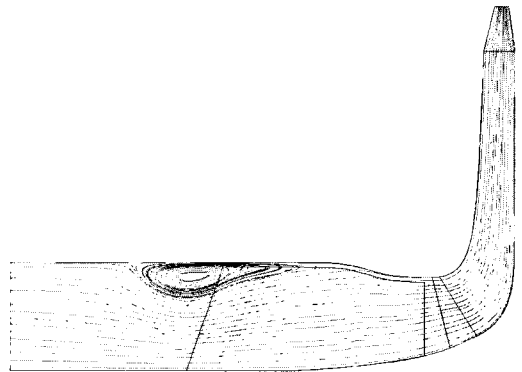


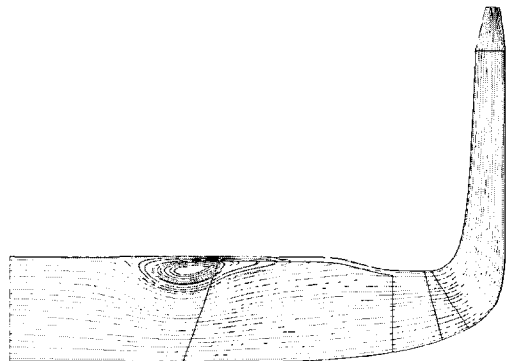
Fig. 6 Computational grid for the calculation (long inducer model, 5 blocks, 314,249 cells)

여기서 p_r 는 증기압을 나타낸다. 임계 캐비테이션 수는 펌프의 양정이 캐비테이션이 없는 경우와 비교하여 3% 떨어진 지점으로 정의하였다. 인듀서/임펠러의 축방향 간극이 커질 경우(short)에 흡입성능이 저유량에서는 큰 차이가 없지만, 고유량에서 크게 저하되는 것을 알 수 있다.

인듀서 단독 흡입성능시험에서 인듀서의 길이가 짧아지면 현절비가 줄어들기 때문에 일반적으로 흡입성능이 저하된다. 그러나 본 연구와 같이 현절비가 2.0이상일 경우에는 인듀서의 흡입성능에는 차이가 없는 것



(a) long inducer



(b) short inducer

Fig. 8 Circumferentially-averaged streamline distributions at design flow rate

으로 알려져 있다.^(11,17) 따라서 단순한 인듀서의 길이 변화에 따른 인듀서 흡입성능의 차이가 펌프전체 흡입성능 차이의 원인은 아닌 것으로 판단된다.

펌프의 흡입성능이 저하되는 원인을 파악하기 위해

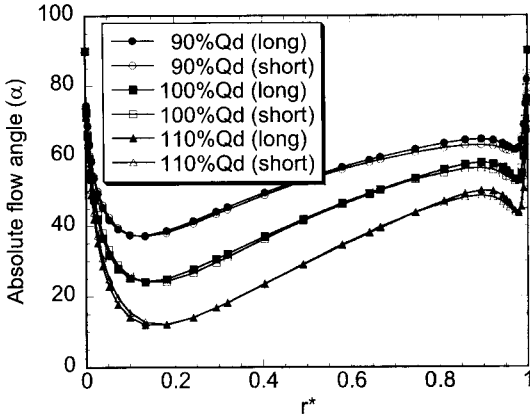


Fig. 9 Circumferentially-averaged absolute flow angle distributions at the impeller inlet

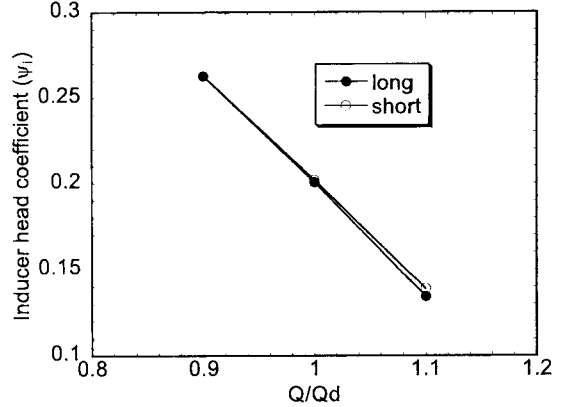


Fig. 10 Calculated inducer head distributions

서 인듀서와 임펠러의 유동해석을 수행하였다. 계산시간을 절약하기 위해서 인듀서와 임펠러의 유동장에 큰 영향을 미치지 않는 벌류트, 실유로 등 나머지 부분은 계산에서 제외하였다.

Fig. 6에 계산격자를 나타내었으며, Fig. 7에 인듀서/임펠러의 형상과 함께 표면 압력분포를 나타내었다. 인듀서에서 임펠러로 가면서 압력이 증가하는 것을 알 수 있으며, long 인듀서와 short 인듀서를 사용한 경우의 펌프 압력분포는 차이가 없음을 확인할 수 있다.

Fig. 8에는 설계유량(100%Qd)에서 자오면으로 평균된 유선분포를 나타내었다. 인듀서/임펠러의 축방향 간극에 관계없이 비슷한 분포를 보이는 것을 알 수 있다. 즉, 인듀서와 임펠러의 간극은 유선분포에 큰 영향이 없는 것을 알 수 있다. 본문에는 나타내지 않았지만 90%Qd 및 110%Qd의 계산결과도 같은 경향을 보였다.

임펠러 입구 유동장을 상세하게 분석하기 위해서 Fig. 9에 임펠러 입구에서 절대유동각 분포를 비교하여 나타내었다. Fig. 9에서 r^* 는 다음과 같이 정의된다.

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

여기서 r_h 는 허브반경, r_t 는 익단반경을 나타낸다. Fig. 9에서 허브와 쉬라우드에서 절대유동각이 약 1~2도 정도 차이가 나지만 대체적으로 인듀서와 임펠러의 축간극에 따른 차이는 크지 않는 것으로 보인다. 이는 Fig. 8의 유선분포와 일치하는 경향을 보인다.

Fig. 10에 계산된 인듀서의 양정분포를 나타내었다.

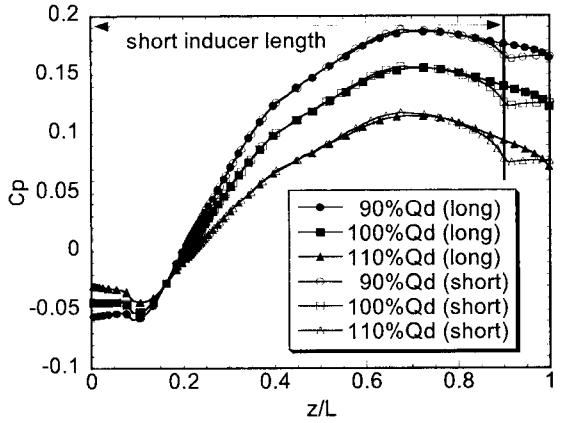


Fig. 11 Circumferentially-averaged pressure coefficient distributions at the inducer mid-span

인듀서의 양정이 부족할 경우에 고유량에서 펌프의 흡입성능이 저하 될 수 있다. 계산의 결과로 고유량에서는 오히려 short 인듀서의 양정이 3% 정도 더 큰 것을 알 수 있다. 따라서 short 인듀서의 양정저하가 펌프 흡입성능저하의 원인이 아님을 알 수 있다. Fig. 10에서 인듀서 양정계수는 다음과 같이 정의된다. 여기서 p_{2i} 는 인듀서 출구 전압력을 나타낸다.

$$\psi_i = 2(p_{2i} - p_{1i}) / (\rho U_T^2) \quad (5)$$

Fig. 11에는 인듀서의 중간반경에서 압력계수분포를 나타내었다. 하류로 가면서 압력이 증가하다 감소하는 것을 관찰할 수 있는데, 이는 본 연구에 사용된 인듀

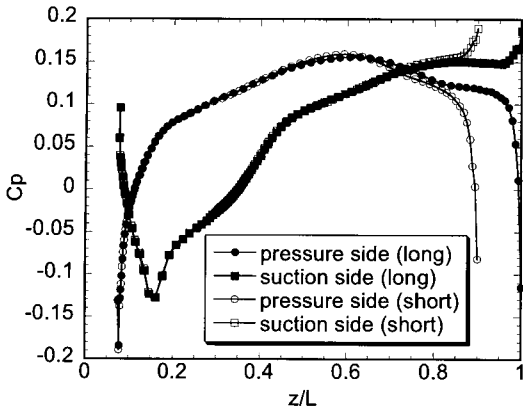


Fig. 12 Inducer blade pressure coefficient distributions at the inducer mid-span

서의 쉬라우드 형상이 Fig. 1과 같이 인두서의 출구쪽으로 갈수록 쉬라우드의 반경이 줄어들게 설계하였기 때문에 유로면적이 줄어들어서 마찰손실이 증가하기 때문이다.⁽³⁾ Short 인두서의 경우 long 인두서에 비해 고유량(110%Qd)에서 양정은 다소 높지만, 인두서 블레이드의 뒷전(z/L=0.9)에서 급격한 압력저하가 발생한다. 반면 long 인두서의 경우 뒷전에서 점진적인 압력의 저하가 발생한다. 이러한 경향은 저유량에서 고유량으로 갈수록 더 커짐을 알 수 있다.

일반적으로 캐비테이션에 의한 인두서 양정저하는 기포발생영역이 인두서의 입구에서 하류로 넓어지면서 커지고, 기포발생영역이 인두서 블레이드 출구까지 확대될 경우에 인두서의 캐비테이션 붕괴가 발생한다. 인두서 단독 흡입성능 시험에서는 인두서 하류에 벌류트가 있어서 동압을 정압으로 변환시켜주는 역할을 하기 때문에 인두서 하류에서 발생한 기포가 다시 역상으로 환원될 수 있으므로 두 인두서의 흡입성능에는 큰 차이가 없었던 것으로 판단된다. 그러나 인두서 하류에 임펠러가 설치된 경우에는 임펠러의 양정이 인두서 양정보다 7~10 배 정도 크므로 임펠러에서 캐비테이션에 의한 양정저하가 발생해야 펌프의 양정저하가 발생한다. 따라서 short 인두서의 경우는 long 인두서와 달리 z/L=0.85에서부터 압력이 급격하게 떨어지므로 여기서 발생한 기포가 임펠러로 전파되어서 임펠러의 양정저하를 발생시킬 수 있다. Fig. 11에서 z는 인두서 허브 시작점을 기준으로 축방향거리를 나타내며, L은 long 인두서의 축방향길이를 나타낸다. 또한 Cp는 다음과 같이 정의된다.

$$C_p = 2(p - p_{1u}) / (\rho U_{1u}^2) \quad (6)$$

Short 인두서의 급격한 압력저하는 아래의 Fig. 12와 같이 인두서 블레이드의 압력분포에서 알 수 있듯이, 블레이드 뒷전(z/L=0.9) 압력면에서 유체의 급격한 미끄럼이 발생하고, 이에 따라서 유체의 상대속도가 증가하고 결과적으로 압력저하가 발생한다. Long 인두서의 경우도 이러한 압력저하가 발생하지만 인두서의 축방향 길이가 길기 때문에 short 인두서보다 하류에서 발생하게 된다.

5. 결론

본 연구에서는 인두서와 임펠러의 간극이 펌프의 성능에 미치는 영향에 대해서 실험 및 유동해석적 방법을 사용하여 연구하였다. 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 인두서와 임펠러의 간극은 펌프의 양정, 유선, 유동각 등의 수력성능에는 거의 영향을 미치지 않는 것을 확인하였다.
- (2) 인두서와 임펠러의 축방향 간극이 클수록 고유량에서 흡입성능이 떨어지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 인두서의 끝에서 급격한 압력강하가 짧은 인두서의 경우 긴 인두서보다 빨리 발생하기 때문인 것으로 판단되었다.

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, “인두서 성능에측에 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 인두서의 성능에 대한 수치해석적 연구,” 한국항공우주학회지, 제 33권, 제 11호, pp. 74~79.
- (6) 최창호, 노준규, 김대진, 홍순삼, 김진한, 2006, “유동

- 해석을 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) 김대진, 홍순삼, 최창호, 김진한, 2005, “로켓엔진용 연료펌프의 성능시험,” *항공우주기술*, 제4권, 제1호, pp. 143~149.
- (13) 홍순삼, 김대진, 김진선, 최창호, 김진한, 2005, “터보펌프의 수력 성능시험,” 한국추진공학회 2005년도 춘계학술대회 논문집.
- (14) 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.
- (15) 김대진, 홍순삼, 최창호, 김진한, 2006, “로켓엔진용 산화제펌프의 수류시험,” 제 4회 한국유체공학술대회 논문집, 제 1권, pp. 523~526.
- (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.