

보조 인듀서가 터보펌프의 흡입성능에 미치는 영향

최창호* · 홍순삼* · 김진한*

Effect of a Booster Inducer on the Suction Performance of Turbopumps

Chang-Ho Choi*, Soon-Sam Hong* and Jinhan Kim*

Key Words: Turbopump(터보펌프), Inducer(인듀서), Booster inducer(보조인듀서), Cavitation(캐비테이션)

ABSTRACT

Effects of a booster inducer on the suction performance of turbopumps are investigated in this paper. To see the effect of the booster inducer, suction performance tests are conducted with and without the booster inducer for three turbopumps. It is shown that the booster inducer can enhance the suction performance of turbopumps when the tip clearance of the main inducers are relatively large. Numerical analysis are also carried out to see the effects of the booster inducer on the performance of the main inducer. The booster inducer is shown to increase the static pressure at the inlet of the main inducer and prevent growing of inlet back flows which are believed to have deleterious effects on the suction performance of the inducer.

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 하지

만 공급탱크의 경량화가 가능하며 추진기관의 구조비를 적게 할 수 있는 장점이 있다⁽¹⁾.

Fig. 1은 인듀서, 임펠러, 벌류트 및 누설유료를 포함한 터보펌프의 일반적인 구조를 나타낸다. 터보펌프용의 펌프에는 일반적으로 인듀서가 임펠러 앞에 장착되어있는데, 인듀서는 고속으로 회전하는 임펠러 앞

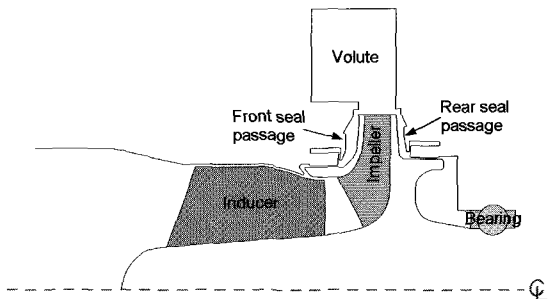


Fig. 1 Typical layout of a turbopump

* 한국항공우주연구원 터보펌프개발그룹

책임저자 E-mail : cch@kari.re.kr

에 장착되어 유효흡입수두(NPSH)를 낮춰주어 임펠러/블류트로 구성된 원심펌프가 캐비테이션으로 인한 성능저하 없이 작동하게 한다.

터보펌프의 성능을 향상시키기 위한 노력의 일환으로 최근에는 캐비테이션을 배제한 인듀서에 대한 수치 해석적 연구도 많이 시도되고 있지만^{(2)~(5)}, 캐비테이션에 관한 연구는 해석 및 예측이 어렵기 때문에 주로 실험에 많이 의존하고 있다^{(6)~(13)}.

터보펌프의 흡입성능을 향상시키기 위해서는 인듀서의 입구 직경을 크게 하거나 길이를 늘이는 방법이 있는데, 이에에는 입구 직경증가에 따른 진동증가 및 길이증가에 따른 펌프의 증량증가 등에 의한 한계가 있다. 러시아의 경우⁽¹⁴⁾ 터보펌프의 흡입성능을 향상시키기 위해서 인듀서 앞에 소형의 보조 인듀서를 설치하여 흡입성능을 개선시키는 방법을 개발하였다. 본 연구에서는 이러한 보조 인듀서가 터보펌프의 흡입성능에 미치는 영향에 대해서 고찰하였으며, 아울러 주 인듀서의 익단간극 크기에 따른 보조 인듀서가 흡입성능에 미치는 상관관계를 조사하였다.

2. 시험장치

인듀서 시험기는 폐쇄형으로 Fig. 2와 같이 구성되어 있다. 0.9톤 용량의 탱크에 저장된 물이 순환되며 진공 펌프 및 압축 공기를 이용하여 탱크 내부 압력을 조절함으로써 인듀서 입구 압력이 조절된다. 탱크 상류에 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 전기모터

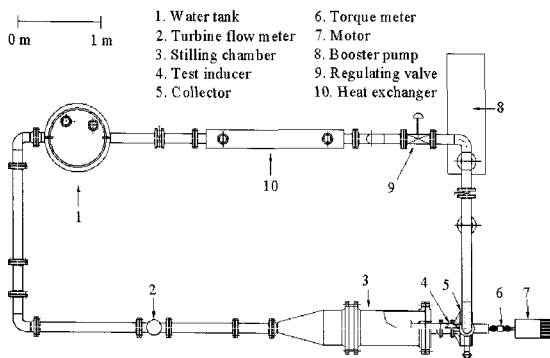


Fig. 2 Plane view of the test loop

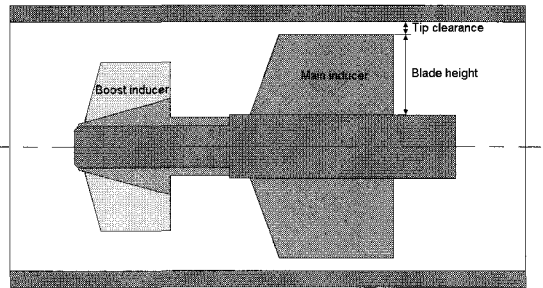


Fig. 3 Configuration of the inducers

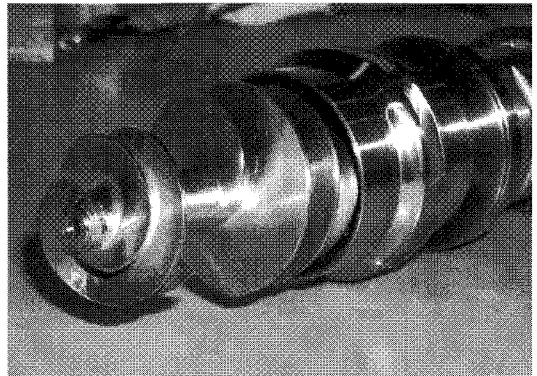


Fig. 4 Turbopump consisting of a booster inducer, main inducer and impeller (case 2)

로 구동되는데 모터는 37 kW 출력이며 인버터를 이용하여 10,000 rpm까지 회전수가 연속적으로 조절된다.

시험에 사용된 터보펌프는 모두 세 가지인데 보조 인듀서, 주 인듀서, 임펠러로 구성되어 있다. Figs. 3과 4에 인듀서의 배치도 및 시험에 사용된 터보펌프를 나타내었다. Table 1에는 시험에 사용된 주 인듀

Table 1 Booster and main inducer geometries and flow parameters

	case 1	case 2	case 3
Main inducer length at hub (mm)	54.0	44.0	36.0
Main inducer tip diameter (mm)	49.0	53.0	56.0
Booster inducer length at hub (mm)	20.5	20.5	20.5
Main inducer inlet hub/tip ratio	0.31	0.28	0.27
Main inducer (tip clearance)/(blade height) ratio	0.15	0.05	0.02
(Booster inducer tip diameter)/(main inducer tip diameter) ratio	0.82	0.75	0.71
Design flow coefficient (Φ)	0.09	0.08	0.07
Test rotational speed (RPM)	8,000		

서와 보조 인듀서의 제원을 나타내었다. 보조 인듀서는 세가지 터보펌프에 대하여 동일한 형상을 사용하였고, 주 인듀서 및 임펠러는 각각의 경우에 대하여 형상을 달리하였다. Table 1에서 유량계수는 다음과 같이 정의된다.

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

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

3. 결과분석

Fig. 5에 흡입성능시험 가시화의 예를 나타내었다. 보조인듀서와 주인듀서에서 캐비테이션이 발생하는 것을 관찰할 수 있다.

Figs. 6~8에 흡입성능시험 결과를 나타내었다. 세가지 경우 모두에서 보조인듀서가 장착되었을 경우에 흡입성능의 향상이 관찰된다. 또한 보조인듀서가 펌프의 양정을 2~4% 정도 떨어뜨리는 것을 관찰할 수 있다. 즉, 보조인듀서 장착이 흡입성능을 향상시키지만, 펌프의 양정에는 나쁜 영향을 미침을 알 수 있다. 이는 보조인듀서의 익단반경이 매우 작기 때문에 익단간극이 커서 효율이 매우 나빠지기 때문이다.

Table 2에 세가지 경우의 흡입성능을 정리하여 나타내었는데 (NPSHcr은 펌프의 양정이 3% 저하되는 점으로 정의), case1에서 case 3의 순으로 보조인듀서의 장착에 따른 흡입성능의 향상정도가 줄어들



Fig. 5 Example of a cavitation test

을 알 수 있다. 이는 앞의 Table 1에서 익단간극의 블레이드 높이에 대한 비가 줄어드는 순서와 같다. 즉, 익단 간극이 상대적으로 클수록 보조인듀서를 장착함으로써 흡입성능을 개선할 수 있음을 나타낸다.

흡입성능은 일반적으로 인듀서의 익단간극이 커지면서 나빠지는 것으로 알려져 있는데 (익단간극/블레이드 높이비가 0.02보다 적을 것을 권고, 익단간극이 클 경우 양정이 완만하게 떨어지는 현상이 발생)⁽¹⁵⁾ 보조인듀서는 익단간극이 클 때 양정이 완만하게 떨어지는 것을 방지하는 역할을 하는 것으로 판단된다. 이는 Figs. 6~8에서 상대 익단간극이 클수록 양정 붕괴점 (cavitation breakdown)은 큰 변화가 없으면서, 양정이 높은 NPSH에서부터 더욱더 완만하게 떨

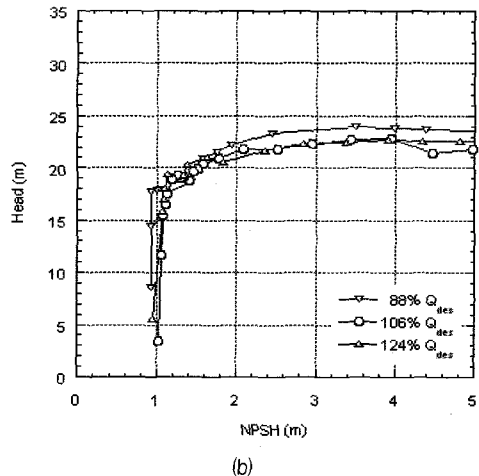
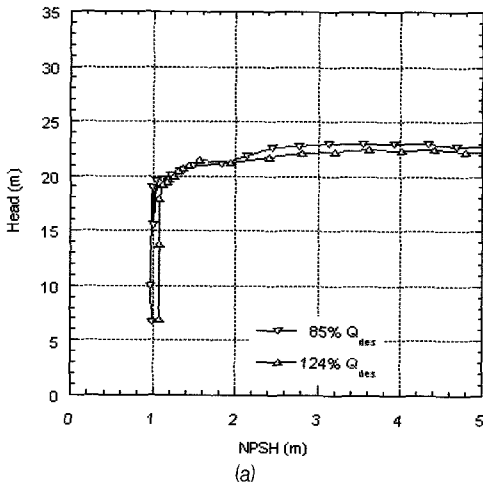


Fig. 6 Cavitation test at 8000rpm for case 1 (a) with booster inducer and (b) without booster inducer

보조 인두서가 터보펌프의 흡입성능에 미치는 영향

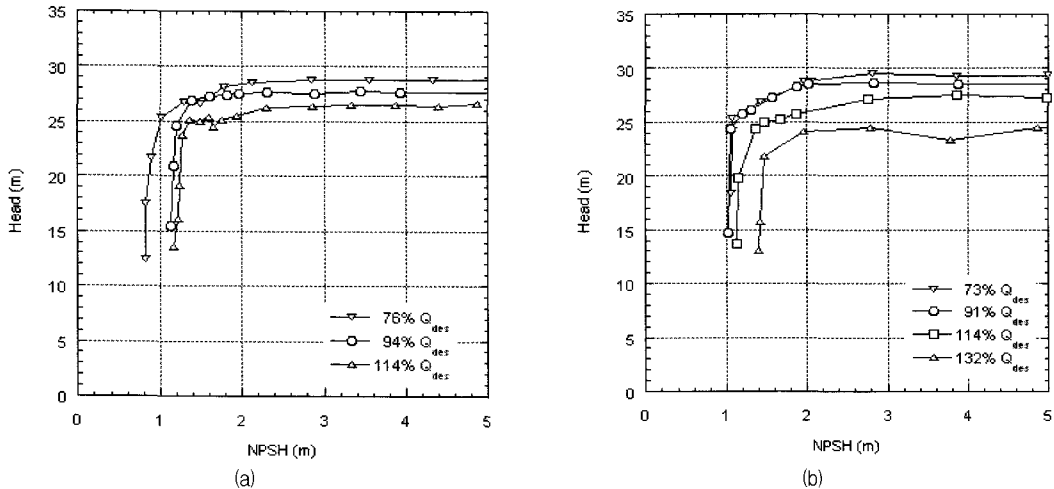


Fig. 7 Cavitation test at 8000rpm for case 2 (a) with booster inducer and (b) without booster inducer

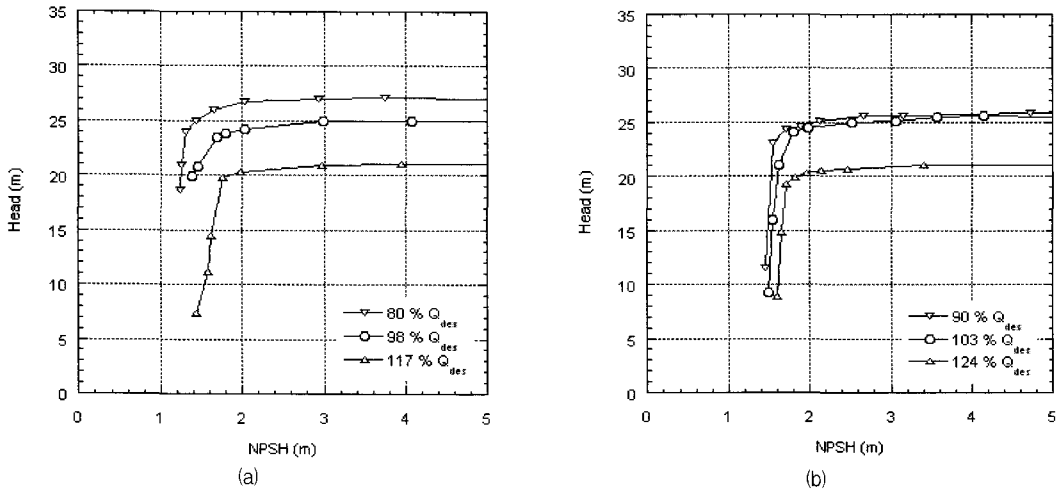


Fig. 8 Cavitation test at 8000rpm for case 3 (a) with booster inducer and (b) without booster inducer

어지는 것으로부터 알 수 있다. 따라서 보조인두서는 이러한 완만한 양정저하를 방지해 줌으로써 흡입성능을 향상시킨다. 그러나 캐비테이션 양정 붕괴점에는 큰 영향이 없는 것을 알 수 있다.

보조인두서가 미치는 영향을 좀더 세부적으로 관찰하기 위해서 case 2의 110% 설계 유량에 대하여 유동해석을 수행하였다. 유동해석은 터보펌프 유동에 많이 적용되었고 유용성이 검증된⁽²⁾⁻⁽⁵⁾ Fine/Turbo⁽¹⁶⁾를 사용하였다. 유동해석시 Fig. 3의 보조인두서의 출구 부분에서 급격하게 반경이 줄어드는 부분은 격자 생성에 문제가 있으므로 부드럽게 반경이 줄어들도록 형상을 수정하였다.

Fig. 9에는 보조인두서와 주인두서를 동시에 유동

Table 2 Suction performance comparison

		Flow rate	Head	NPSHcr	Difference
case 1	With booster	85%	22.5m	2.1m	0.9m
	W/o booster	106%	23.0m	3.0m	
case 2	With booster	94%	27.5m	1.4m	0.3m
	W/o booster	91%	28.5m	1.7m	
case 3	With booster	98%	25.0m	2.1m	0.2m
	W/o booster	103%	25.5m	2.3m	

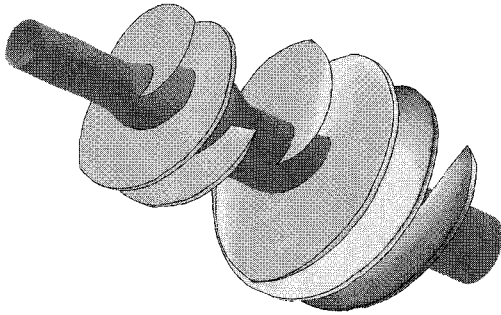


Fig. 9 Geometry of the inducers and surface pressure distributions for the case 2

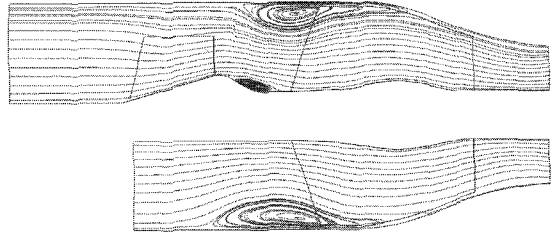


Fig. 10 Streamline distributions with and without the booster inducer at 110% design flow rate

해석한 경우의 형상과 표면압력분포를 나타내었다. 보조인듀서와 주인듀서의 접면 경계조건에는 혼합면기법⁽⁵⁾을 사용하였으며, 약 350,000개의 격자가 사용되었다.

Fig. 10에는 보조인듀서가 있을 때와 없을 때의 유선분포를 비교하였는데, 보조인듀서가 있는 경우에 주인듀서 입구의 역류의 크기가 많이 줄어드는 것을 볼 수 있다. 이러한 입구 역류는 인듀서의 익단간극이 클수록 커지므로, 앞에서 설명한 바와 같이 익단간극이 상대적으로 큰 경우에 보조인듀서의 영향이 커짐을 알 수 있다. Fig. 11에는 인듀서 입구에서의 압력계수를 나타내었는데, 보조인듀서가 장착된 경우에 정압이 상승하는 것을 보여준다. 따라서 흡입성능의 향상이 발생한다. Fig. 11에서 C_p 와 r^* 는 다음과 같이 정의된다.

$$C_p = (p - p_1) / (\rho U_{1t}^2 / 2) \quad (2)$$

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

여기서 p_1 은 입구 정압, ρ 는 밀도, r_h 는 허브반경, r_s 는 쉬라우드 반경을 나타낸다.

Table 3에 계산결과를 비교하였는데, 실험결과와 같이 보조인듀서가 장착된 경우에 효율과 양정이 떨어지는 것을 관찰할 수 있다. Table 3에서 양정계수는 다음과 같이 정의된다.

Table 3 Computational results (case 2, 110% Qdes)

	Efficiency	Head coefficient (Ψ)
With booster inducer	38%	0.098
W/o booster inducer	47%	0.125

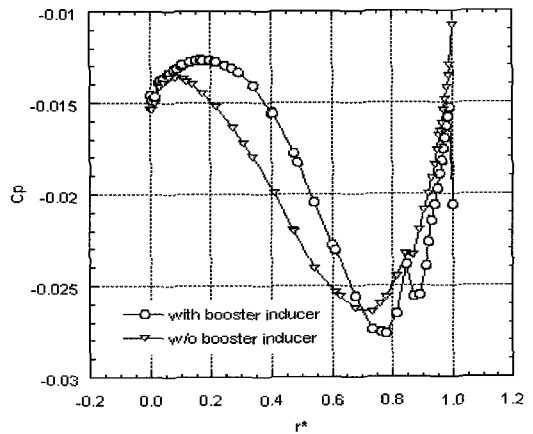


Fig. 11 Pressure coefficient distributions at the main inducer inlet

$$\Psi = H / (U_{1t}^2 / 2g) \quad (4)$$

여기서 H 는 양정, g 는 중력가속도를 나타낸다.

4. 결론

터보펌프의 성능에 미치는 보조인듀서의 영향을 실험 및 유동해석을 통하여 살펴보았다. 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 보조인듀서는 펌프의 양정이 완만하게 떨어지는 것을 방지하여 흡입성능을 향상시키는 효과가 있으나, 펌프의 양정 및 효율을 저하시킨다.
- 2) 보조인듀서는 주인듀서 입구의 정압을 상승시켜 흡입성능을 향상시키는 효과가 있으며, 인듀서 입구 역류가 커지게 되는 인듀서의 익단간극이 상대적으로 클 경우에 더욱 효과적이다.

참고문헌

- (1) Huzel, D. K. and Huang, D. H., 1992, Modern Engineering for Design of Liquid-Propellant Rocket Engines, AIAA Press.
- (2) C. H. Choi, S. S. Hong, B. J. Cha and S. S. Yang, 2003, "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.
- (3) 최창호, 홍순삼, 김진한, 2003, "인듀서 성능예측에 대한 수치해석적 연구," 한국항공우주학회지, 제 31권, 제 6호, pp. 72~78.
- (4) 최창호, 이기수, 김진한, 양수석, 이대성, 2002, "액체로켓용 터보펌프 성능예측에 대한 수치해석적연구," 유체기계저널, 제5권, 제2호, pp.15~21.
- (5) 최창호, 김진한, 2003, "액체로켓용 터보펌프 인듀서/임펠러 상호작용에 대한 연구," 유체기계저널, 제6권, 제4호, pp. 50~57.
- (6) Lee, S., Jung K., Kim, J., Kang, S., 2002, "Cavitation Mode Analysis of Pump Inducer," KSME International Journal, Vol. 16, pp. 1497~1510.
- (7) Tsujimoto Y., Yoshida. Y., Maekawa, Y., Watanabe, S., Hashimoto, T., 1997, "Observations of Oscillating Cavitation of an Inducer," ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 119, pp. 775~781.
- (8) Furukawa, A., Ishizaka, K., Watanabe, S., 2002, "Experimental Study of Cavitation Induced Oscillation in Two Bladed Inducers," 4th International Conference on Launcher Technology, Space Launcher Liquid Propulsion, Liege, Belgium, 3~6 December.
- (9) Yoshida, Y., Tsujimoto, Y., Kataoka, D., Horiguchi, H., Wahl, F., 2001, "Effect of Alternate Leading Edge Cutback on Unsteady Cavitation in 4-Bladed Inducers," ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 123, pp. 762~770.
- (10) 구현철, 홍순삼, 차봉준, 양수석, 2002, "터보펌프 인듀서의 유동특성에 관한 연구," 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 41~46.
- (11) 홍순삼, 구현철, 최창호, 차봉준, 양수석, 2002, "터보펌프 인듀서의 형상변화가 성능에 미치는 영향," 대한기계학회 추계학술대회 논문집, pp. 1997~2002.
- (12) 홍순삼, 구현철, 차봉준, 김진한, 2003, "터보펌프 인듀서의 출구 유동 및 성능 특성," 유체기계저널, 제6권, 제4호, pp. 38~44.
- (13) Jakobsen, J. K., 1971, "Liquid Rocket Engine Turbopump Inducers," Space Vehicle Design Criteria Monograph, NASA SP-8052.
- (14) Kalmykov, G. P., et al., 2001, "Calculation of hydraulic and Geometric Parameters of Pumps," KeRC Report, Contract No. HYSA-99-S001.
- (15) Brennen, C. E., 1994, Hydrodynamics of Pumps, Concepts ETI, Inc. and Oxford University Press.
- (16) Fine/Turbo 5.3 Manual, 2002, Numeca Inc.