

베어링 지지부가 터보펌프용 인듀서의 성능에 미치는 영향

최창호* · 노준구** · 김진선*** · 홍순삼**** · 김진한*****

The Effect of Bearing Strut on the Performance of the Inducer

Chang-Ho Choi*, Jun-Gu Noh**, Jin-Sun Kim***, Soon-Sam Hong**** and Jinhan Kim*****

Keywords : Turbopump(터보펌프), Inducer(인듀서), Bearing Strut(베어링 지지부), Backflow(역류)

Abstract

Experimental and computational studies on an turbopump inducer with and without a bearing strut were performed to evaluate the effects of a strut on the performance of an inducer. Global performance data such as head rise and efficiency, and detailed flow characteristics such as surface static pressures were measured and compared with computational results. Generally a good agreement is observed between experimental and computational results, but some discrepancies are observed due to complex flow features such as backflows at the inlet and strut/inducer interactions. For the flow rates where the backflow region is large, installing a strut enhanced the hydraulic performance of the inducer by diminishing the size of the backflows. The results also show that the strut has negligible effect on the suction performance of the inducer.

1. 서론

액체로켓은 액체연료와 산화제를 연소시켜 분사시킴으로써 추진력을 얻는다. 이 때 액체연료와 산화제가 가압상태로 연소실에 공급되어야 하는데 이에는 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 위

하여 탱크의 무게가 증가하게 되고 결국 발사체의 구조비가 커지는 단점이 있다. 반면, 터보펌프 방식은 고속으로 회전하는 터보펌프와 관련한 진동 및 공동화(cavitation) 제어 등의 고도의 기술을 필요로 하지만 공급탱크의 경량화가 가능하여 추진기관의 구조비를 적게 할 수 있는 장점이 있다[1].

Fig. 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 낮춰 주어 임펠러/벌류트로 구성된 원심펌프가 캐비테이션으로 인한 성능저하 없이 작동하게 한다[2,3].

대부분의 터보펌프는 Fig. 2와 같이 베어링 및 지지부를 인듀서 하류에 위치시킨다. 이렇게 함으로써 인듀서 상류의 장애물을 제거하여 펌프의 흡입성능을 최대화할 수 있다. 따라서 대부분의 인듀서에 관한 연구들은 인듀서 상류에 장애물이 없이 수행되었다[2-5]. 그러나 인듀서 앞에 베어링이 위치하게 되면, 펌프의 설계가 간단해지고, 진동이 가장 많이 발생하는 인듀서 앞 전 부위를 튼튼하게 지지할 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 인듀서 전방에 설치된 베어링 및 지지부의 영향을 실험 및

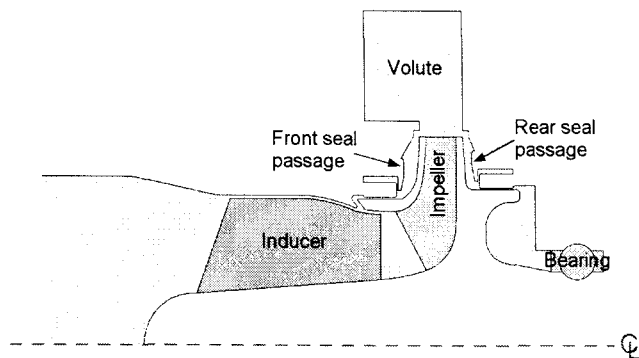


Fig. 1 Typical layout of a turbopump

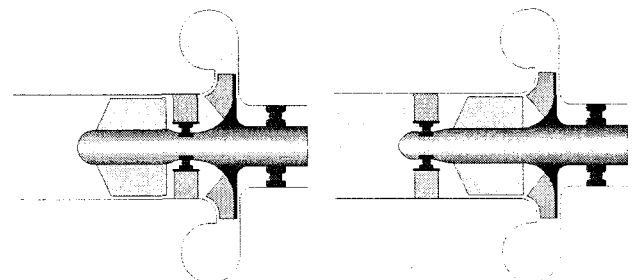


Fig. 2 Pump layout without and with the bearing upstream of an inducer

* 한국항공우주연구원 터보펌프그룹, cch@kari.re.kr
** 한국항공우주연구원 터보펌프그룹, jgnoh@kari.re.kr
*** 한국항공우주연구원 터보펌프그룹, jsk@kari.re.kr
**** 한국항공우주연구원 터보펌프그룹, sshong@kari.re.kr
***** 한국항공우주연구원 터보펌프그룹, jhkim@kari.re.kr

해석적 방법으로 고찰하였다.

2. 실험장치 및 인듀서 형상

인듀서 시험기는 폐쇄형으로 Fig. 3과 같이 구성되어 있다[6]. 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 전기모터로 구동되는데 모터는 37kW 출력이며 인버터를 이용하여 10,000rpm까지 회전수가 연속적으로 조절된다. Table 1에 인듀서의 형상을 나타내었다. Table 1에서 유량계수는 다음과 같이 정의된다. 식 (1)에서 Q는 유량, A_1 은 인듀서 입구 단면적, U_n 는 인듀서 앞전 익단 속도를 나타낸다.

$$\phi = Q / (A_1 U_n) \quad (1)$$

Fig. 4에는 시험부를 확대하여 나타내었다. 슈라우드에 압력 측정을 위한 탭이 있고, 인듀서 상류에 베어링 지지부가 위치하고 있다. 또한 인듀서는 하류로 갈수록 슈라우드의 직경이 적어지도록 설계하였다. 이는 임펠러의 입구/출구 직경비를 작게 하여 펌프의 효율을 좋게 하기 위해서이다.

3. 유동해석 기법

본 연구에서는 항우연에서 개발한 설계 S/W 및 이전의 유동 해석[7]에서 실험결과와의 비교를 통하여 충분히 검증된 Fine/Turbo[8]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. 베어링 지지부와 인듀서의 상호작용해석에는 혼합면 기법[9]이 사용되었다.

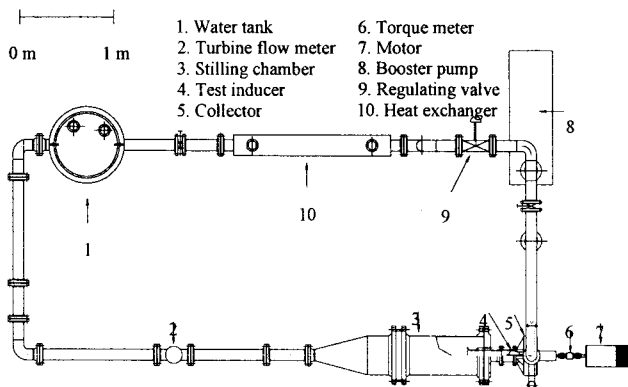


Fig. 3 Plane view of the test loop

Table 1 Summary of inducer geometries

Parameter	Value
Design flow coefficient (ϕ)	0.096
Blade number	3
Solidity at tip	2.7
Radial tip clearance (mm)	1.0

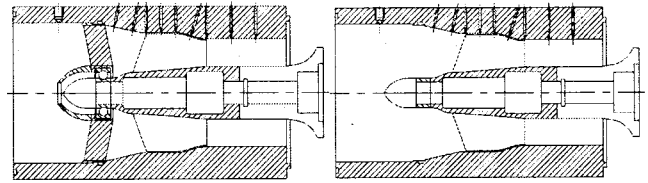


Fig. 4 Inducer test section with and without a bearing strut

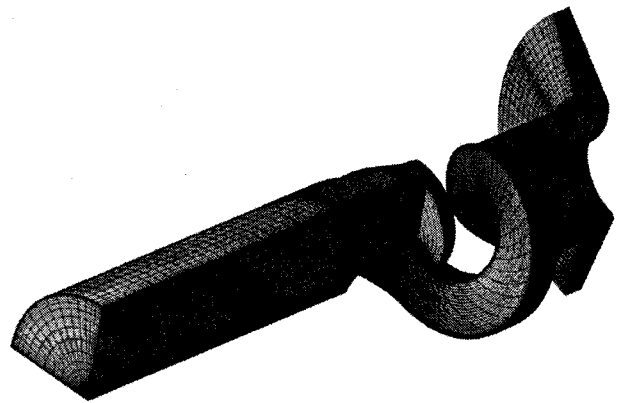


Fig. 5 Computational grids (351,249 cells)

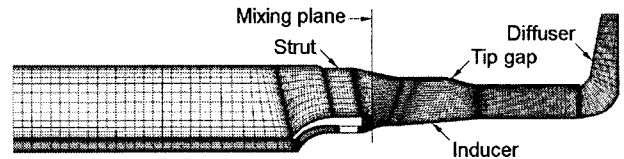


Fig. 6 Meridional grid for computations with the strut

베어링 지지부가 있는 경우의 계산에 약 35만개 정도의 격자점이 사용되었으며, 확장된 표준 k-ε 난류모델이 채택되었으므로 벽면으로부터 첫 번째 격자의 y+ 값이 10~50 정도가 되도록 격자를 분포하였다. Fig. 5와 6에 베어링 지지부가 있을 경우의 계산격자 및 자오면 형상을 나타내었다. 계산격자의 조밀도는 이전의 연구[7] 및 격자의 조밀도를 바꾸어 계산한 결과를 바탕으로 선정하였다.

4. 결과분석

Fig. 7에 3가지 유량조건에서 회전방향으로 평균된 유선분포를 나타내었다. 인듀서 입구에서 역류가 발생하며, 유량이 작아질수록 역류가 커지는 것을 알 수 있다. 인듀서 앞전에서 큰 받음각으로 인하여 급격한 압력의 증가가 발생하여 역압력 구배가 형성되는데, 인듀서 슈라우드에는 익단간극이 존재하므로 이를 통하여 역류가 발생한다. 일반적으로 인듀서의 구조적인 안정성을 위하여 앞전형상이 후진(backward sweep)하도록 설계하는데 이러한 앞전후진이 역류를 촉진하기도 한다[10].

베어링 지지부가 있는 경우에 역류의 크기가 줄어드는 것을

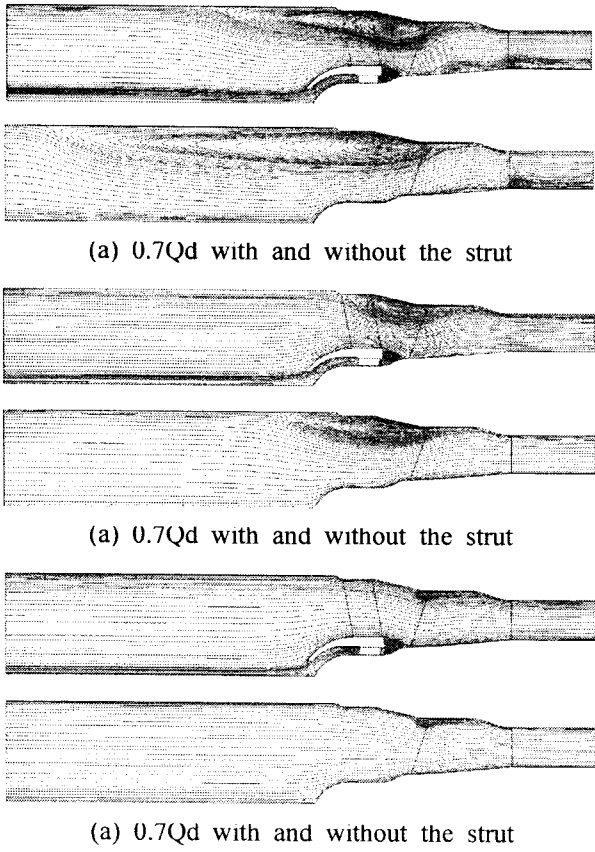


Fig. 7 Circumferentially-averaged streamline distributions at three operating points

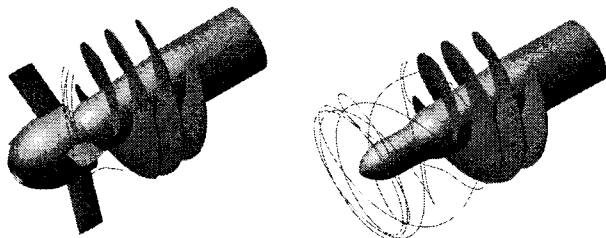


Fig. 8 Streamlines with and without the strut at 0.7Qd

확인할 수 있다. 이는 베어링 지지부가 역류의 회전을 막아서 상류로 전파되는 것을 방지하기 때문이다. Bario 등[11]은 역류가 탱크까지 전파될 경우에는 심각한 진동을 유발시킬 수 있다는 점을 언급하였다. 따라서 베어링 지지부가 역류의 상류전파를 막아주어 탱크와 연동해서 진동이 발생하는 것을 줄여주는 역할을 하는 것을 알 수 있다. Fig. 8에 인듀서 입구에서 유선분포를 나타내었는데, 역류가 인듀서 회전방향으로 회전하면서 상류로 전파되는 것을 확인할 수 있다. 또한 베어링 지지부가 역류의 회전을 막아 상류로 전파되는 것을 방해하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 9에 인듀서 슈라우드 압력분포를 유동해석과 비교하여 나타내었다. 베어링 지지부가 없는 경우에는 입구 역류부만 제외하고는 유동해석이 실험과 잘 일치하지만, 베어링 지지부가 있는 경우에는 역류가 베어링 지지부까지 전파되는 저유량에서 잘 맞지 않는 것을 알 수 있다. 이는 계산시간을 절약하기 위해서 정상 혼합면 기법을 베어링 지지부와 인듀서의 상호작용에 적용하였기 때문으로 판단된다. 유동이 혼합면을 거치면서 다소

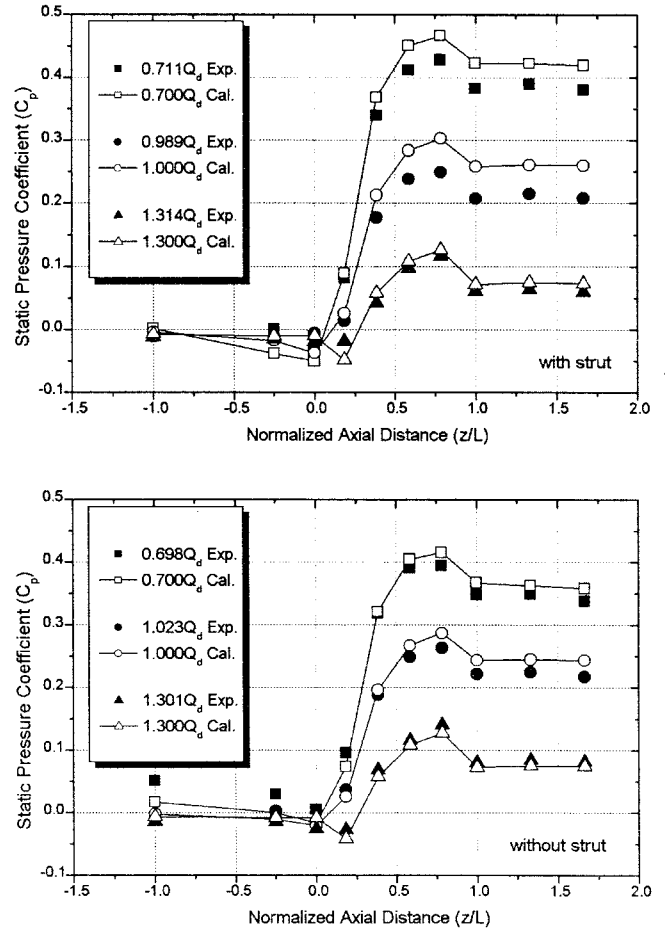


Fig. 9 Static pressure distributions along the shroud surface

교란되기 때문이다. 그러나 전반적인 경향은 일치하는 것을 알 수 있다. 유동해석의 정확도를 높이기 위해서는 비정상 기법을 사용해야 하는데, 이는 격자수를 고려하였을 때 계산시간이 길어져 현실적으로 불가능한 것으로 판단된다. 입구 역류가 커지는 저유량에서는 베어링 지지부가 없는 입구에서도 계산이 부정확해지는데 이것은 역류가 상류의 입구경계까지 전파하여 입구 경계조건의 영향을 받기 때문으로 판단된다. 따라서 입구 역류가 경계면까지 전파되지 않는 고유량에서는 계산이 잘 예측하는 것을 알 수 있다. 계산 경계를 정할 때 0.7Qd와 같은 저유량에서는 입구 역류가 상류 먼 곳까지 전파되기 때문에 입구경계면이 역류에 의해 교란 받지 않은 곳까지 상류에 위치시키는 데는 한계가 있다. 또한 저유량에서 익형 받음각이 커지기 때문에 역압력 구배가 커지는 것을 확인할 수 있다. $z/L > 0.6$ 영역에서 정압이 떨어지는 데 이것은 인듀서 슈라우드의 직경을 하류로 갈수록 작아지게 설계하였기 때문이다. Fig. 9에서 압력계수 C_p 는 다음과 같이 정의된다. 식 (2)에서 ρ 는 밀도, p_u 는 입구 전압력을 나타낸다.

$$C_p = 2(p - p_u) / (\rho U^2_n) \quad (2)$$

Fig. 10에 인듀서의 양정과 효율을 유동해석과 비교하여 나타내었다. 베어링 지지부가 없을 경우에 저유량에서 성능이 급격하게 떨어지는 것을 관찰할 수 있다. 이는 저유량에서 역류가 커져서 손실이 증가하기 때문이다. 베어링 지지부가 설치된 경우에는 저유량에서 역류를 억제하므로 성능이 개선되는 것을 확인할 수 있다. 그러나 고유량에서는 역류가 작고, 베어링 지지부

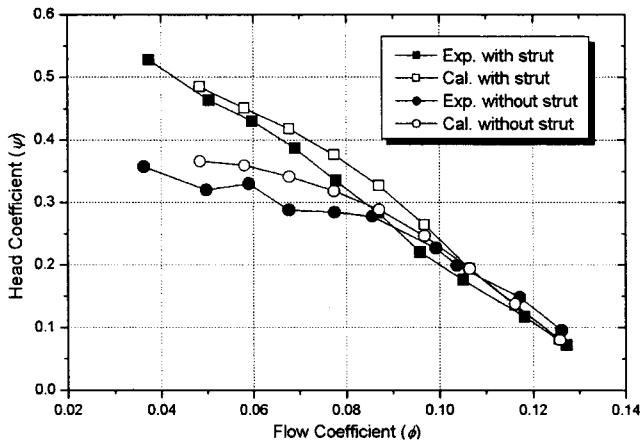


Fig. 10 Static head coefficient distributions

에서 마찰손실이 증가하므로 베어링 지지부가 있을 경우에 성능이 떨어지게 된다. 전반적으로 유동해석이 잘 예측하고 있는 것을 알 수 있다. Fig. 10에서 양정계수는 다음과 같이 정의된다. 여기서 p_2 는 출구 정압력을 나타낸다.

$$\psi = 2(p_2 - p_1) / (\rho U^2 T) \quad (3)$$

Fig. 11에는 흡입성능시험결과와 측정된 진동분포를 나타내었다. 유동해석으로는 흡입성능 및 진동을 예측할 수 없으므로 나타내지는 않았다. 흡입성능의 경우는 베어링 지지부가 있는 경우에도 흡입성능의 저하가 없음을 알 수 있다. 진동은 인두서와 토크축정기 사이의 베어링 지지부에서 측정된 값을 나타내었다.

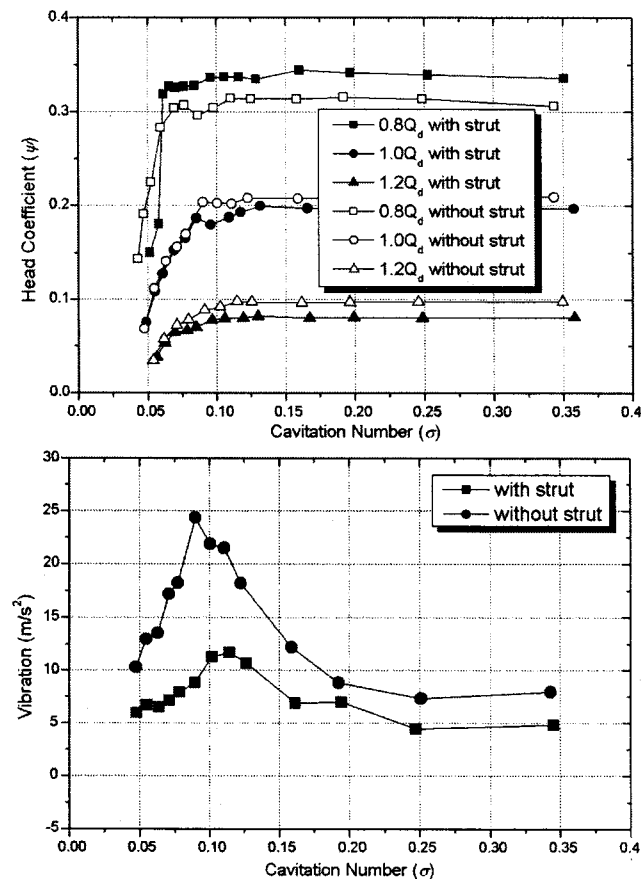


Fig. 11 Suction performance and vibration distributions

데, 베어링 지지부가 있는 경우에 진동이 크게 줄어드는 것을 알 수 있다. 또한 진동은 캐비테이션에 의해 양정이 급격하게 떨어지는 지점인 $\sigma=0.1$ 부근에서 가장 크게 나타난다. Fig. 11에서 캐비테이션 수는 다음과 같이 정의된다. 여기서 p_v 는 증기압을 나타낸다.

$$\sigma = 2(p_t - p_v) / (\rho U^2 T) \quad (4)$$

5. 결론

베어링 지지부가 터보펌프용 인두서의 성능에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 양정, 효율, 인두서 슈라우드 압력 분포 등이 측정되었으며, 유동해석결과와 비교하여 전체적으로 잘 일치하는 결과를 얻었다. 그러나 입구의 역류가 심해지는 저유량에서는 계산과 시험값이 약간의 차이를 보였다. 베어링 지지부가 인두서의 성능에 미치는 영향은 다음과 같다.

1. 입구에 설치된 베어링 지지부가 입구역류의 순환을 방해하여 역류의 크기가 줄어드는 것을 확인하였다. 따라서 저유량에서 급격한 양정저하를 방지하는 것을 확인하였다.
2. 흡입성능 실험에서는 베어링 지지부가 흡입성능에 큰 영향을 미치지 않음을 확인하였다.

참고문헌

- [1] Huzel, D. K., and Huang, D. H., 1992, *Modern Engineering for Design of Liquid-Propellant Rocket Engines*, AIAA Press, Washington DC, Chap. 6.
- [2] Lakshminarayana, B., 1982, "Fluid Dynamics of Inducers-A Review," *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 104, No. 4, pp. 411-427.
- [3] Brennen, C. E., 1994, *Hydrodynamics of Pumps*, Concepts ETI, Inc. and Oxford University Press, Oxford.
- [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] Lakshminarayana, B., 1981, *Analytical and Experimental Study of Flow Phenomenon in Noncavitating Rocket Pump Inducers*, NASA contractor Reports No. 3471.
- [6] 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.
- [7] 최창호, 홍순삼, 김진한, 2003, "인두서 성능예측에 대한 수치해석적 연구," *한국항공우주학회지*, 제 31권, 제 6호, pp. 72-78.
- [8] Numeca Inc., 2004, *Fine/Turbo Manual for Version 6.2-3*.
- [9] Choi, C. H., and Yoo, J. Y., 2000, "Unsteady Blade-Row Flows Calculations Using a Low-Reynolds Number Turbulence Model," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 16, No. 5, pp. 768-776.
- [10] 최창호, 김진한, 2005, "터보펌프용 전진익형 인두서의 성능에 대한 수치해석적 연구," *한국항공우주학회지*, 제 33권, 제 11호, pp. 74-79.
- [11] Bario, F., Faure, T. M., Jondeau, E., Normand, J. L., and Duc, J. M. N., 2003, "Analysis of Inducer Recirculating Inlet Flow," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 19, No. 4, pp. 521-528.