

플로팅링 실 간극이 터보펌프용 펌프의 성능에 미치는 영향

최창호* · 노준구* · 김대진* · 홍순삼* · 김진한*

Effects of floating-ring seal clearance on the performance of the pump

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

Key Words : Turbopump(터보펌프), Floating ring(플로팅링), Seal(실), Pump(펌프)

ABSTRACT

Pumps for a turbopump generally operate under high rotational speeds and large head rise conditions. Therefore, reliability is a prime design requirement. Floating-ring type seals are frequently employed in a turbopump because of robustness despite of low hydraulic efficiency. There are many researches on the floating-ring seal itself, but the effects of the floating ring seals on the performance of the whole pump are not widely studied in spite of their importance.

In the present study, experimental and computational studies on the effects of the radial clearance of the floating ring seals on the performance of a pump were performed. The experimental results showed that the head rise and efficiency increased as the floating-ring seal clearance was decreased. The results also showed the possibility that the leakage flow which was injected to the inlet of the inducer could enhance the suction performance of the inducer by diminishing the size of the 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 간단하다는 장점이 있지만, 고압을 유지하기 위하여 탱크의 무게가 증가하게 되고 결국 발사체가

무거워 지는 단점이 있다. 반면, 터보펌프 방식은 고속으로 회전하는 터보펌프와 관련한 진동 및 공동화(cavitation) 제어 등의 고도의 기술을 필요로 하지만 공급탱크의 경량화가 가능하며 추진기관을 가볍게 할 수 있는 장점이 있다⁽¹⁾.

Figure. 1은 인듀서, 임펠러, 벌류트 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/벌류트로 구성된 원심펌프가 캐비테이션으로 인한 성능저하 없이 작동하게 한다. 임펠러의 양쪽 옆에는 실이 위치해 있다. 앞쪽 실을 통한 누설유는 인

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

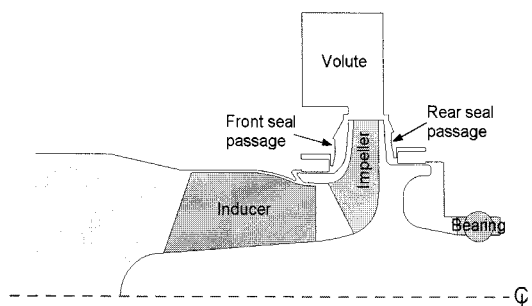


Fig. 1 Typical layout of a turbopump

듀서와 임펠러의 사이로 유입되고, 뒤쪽 실을 통한 누설유는 뒤쪽에 위치한 베어링을 냉각한 뒤 파이프를 통하여 인듀서 앞쪽으로 다시 유입된다. 터보펌프에서는 주로 비접촉실인 레버린스 실 및 플로팅링 실의 2가지 타입의 실이 사용된다. 이중 플로팅링 실의 경우 누설손실이 다소 크기는 하지만, 작동 안정성이 좋고 축추력의 조절에 용이하기 때문에 터보펌프용으로 많이 사용된다. 현재 한국항공우주연구원에서는 추력 30톤급의 액체로켓에 작용할 수 있는 터보펌프를 개발중에 있는데⁽²⁾, 펌프의 실로 플로팅링 실을 사용하고 있다. 따라서 본 연구에서도 플로팅링 실에 대하여 연구하였다.

터보펌프의 성능을 향상시키기 위한 노력의 일환으로 최근에는 터보펌프에 대한 실험 및 수치해석적 연구가 많이 시도되고 있다^(3~9). 그러나 터보펌프에 대한 연구는 이전에 연구가 미흡했던 분야인 인듀서 및 펌프의 흡입성능에 대해서 주로 이루어졌다. 최근에는 터보펌프에 주로 사용되는 플로팅링 실에 관한 연구도 수행 중에 있는데, 주로 플로팅링 실만을 독립적으로 연구하였다^(10~12). 그러나 플로팅링 실의 경우 펌프의 수력성능에 상당한 큰 영향을 미치는 부분이므로 펌프와 연계해서 플로팅링 실의 영향을 파악하는 것이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 실제 펌프에서 플로팅링 실의 간극이 펌프의 성능에 미치는 영향을 연구하였다. 본 연구의 결과로 플로팅링 실의 간극이 펌프의 수력성능 뿐 아니라 흡입성능에도 영향이 미치는 것을 알 수 있었다.

2. 유동해석 기법

본 연구에서는 항우연에서 개발한 설계 S/W 및 이

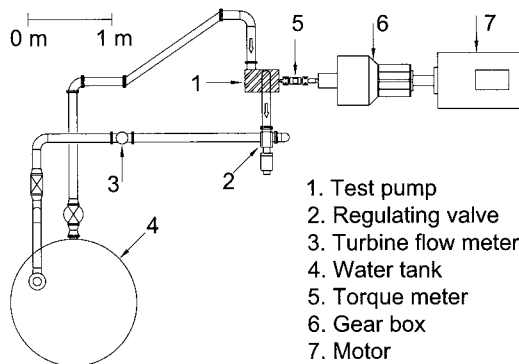


Fig. 2 Schematic of test section

전의 유동해석^(3~5)에서 실험결과와의 비교를 통하여 충분히 검증된 Fine/Turbo⁽¹³⁾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-ε모델을 채택하였다. 입구경계조건으로 축방향으로의 균일유동을 주었으며, 출구에서는 반경방향 힘평형을 고려한 정압을 주었다.

3. 시험장치 및 펌프형상

터보펌프 성능시험설비는 물과 공기를 사용하여 터보펌프에 대한 상사시험을 수행하기 위해 개발되었으며, 크게 주시험기와 부대설비로 구별된다. 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^(8,9).

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, 터빈 유량계, 진공펌프 등이 있다. 모터와 기어박스는 터빈

Table 1 Pump design specifications

Parameters		case1	case2	case3
inducer design flow coefficient (ϕ)				0.09
inducer inlet hub to tip diameter ratio (v)				0.35
pump design head coefficient (ψ)				0.85
impeller inlet to outlet diameter ratio				0.50
impeller outlet blade angle (degree)				23.0
floating ring gap/floating ring diameter	front	0.0021	0.0016	0.0011
	rear	0.0020	0.0015	0.0010

을 대신하여 펌프를 구동하는 목적으로 사용되며, 최고 출력 320 kW, 최대 회전수 20,000 rpm까지 시험 가능하다. 물탱크는 3 m³의 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 토크미터, 유량계 이외에 몇 개의 압력센서와 온도센서가 사용된다. 우선 펌프폐회로의 센서를 살펴보면, 양정측정에 필요한 펌프 입구 및 출구압력은 입구배관과 출구 배관에서 측정되며, 유체의 온도는 입구배관에 설치된 온도센서에 의해 측정된다. 펌프 본품에는 내부압력 분포를 알기 위해 볼류트와 임펠러 출구, 이차 유로에 여러 개의 압력센서를 설치하였다. 또한 펌프의 안정성을 확인하기 위해, 펌프 볼류트의 축방향과 반경방향에 진동센서를 설치하고, 입출구 배관에 압력섭동센서가 설치하였다. 진동센서와 압력섭동센서는 고속 샘플링 센서로서 측정데이터는 별도로 저장된다.

Table 1에 연구에 사용된 펌프의 규격을 나타내었다. Case 1에서 Case 3의 차이점은 플로팅링 실의 반경방향 간극이다. 나머지 형상은 동일하다. Case 1에서 Case 3으로 가면서 플로팅링 실의 간극을 감소시켰다. 인듀서는 일반적으로 터보펌프에 주로 사용되는 후진익형(backward-sweep inducer, Fig. 1참조)을 사용하였다. Table 1에서 유량계수 및 양정계수는 다음과 같

이 정의된다.

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

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

여기서 Q 는 유량, A_1 은 인듀서 입구 단면적, U_{T1} 는 인듀서 앞전 익단 속도, ρ 는 밀도, p_{1t} 및 p_{2t} 는 입/출구 전압력, U_{T2} 는 임펠러 출구 익단속도를 나타낸다.

4. 결과 및 토론

Figure. 3에 펌프의 성능을 비교하여 나타내었다. 플로팅링 실의 간극이 줄어들수록 양정과 효율이 증가되는 것을 알 수 있다. 이는 플로팅링 실을 통한 누설유량이 줄어들어 유량효율(volumetric efficiency)이 증가하기 때문이다. 펌프를 설계할 때 흡입성능을 고려해서 인듀서 및 임펠러 입구직경을 다소 크게 설계하기 때문에 Fig. 3의 효율곡선과 같이 유량이 증가하면 효율이 증가하게 된다.

Table 2에 설계유량에서 양정과 효율을 유동해석결과⁽⁵⁾와 비교하여 나타내었다. 유동해석의 조건은 Case1과 동일하다. Case 1과 3을 비교해보면 플로팅링의 간극이 반으로 줄어들면서 양정이 3% 이상 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 펌프의 큰 설계변경 없이 펌프의 양정을 증가시킬 수 있음을 나타낸다. Case 3의 플로팅링 실 간극이 작음에도 불구하고 펌프의 운용에는 문제가 없었다.

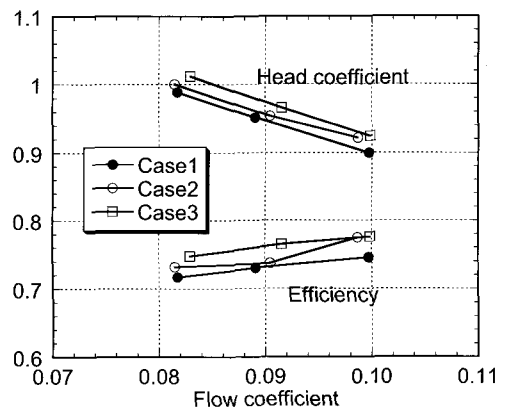


Fig. 3 Measured pump performance curves

Table 2 Head coefficient and efficiency at 100%Qd

	Case1	Case2	Case3	CFD
Head coefficient	0.940	0.950	0.967	0.936
Pump total Efficiency (%)	73.3	74.1	76.4	72.1

Table 3 1D calculation results at 100%Qd

	Case1	Case2	Case3
Volumetric efficiency (%)	91.6	93.3	95.6
Head coefficient	0.976	0.984	0.990
Pump total efficiency (%)	73.7	75.1	76.8

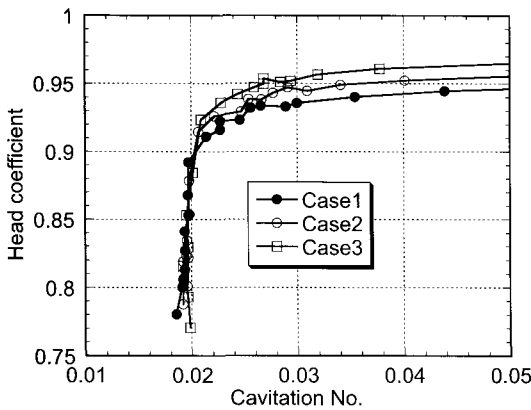


Fig. 4 Measured suction performance curves

실험 및 유동해석에서는 정확한 누설유량을 파악하기 힘들기 때문에 누설유량은 1D 계산식을 이용하여 구하였다. Table 3에는 간단한 1D 식을 사용하여 플로팅링 간극에서의 누설유량을 계산한 결과를 나타내었다. Table 3의 양정 및 효율 또한 1D 펌프설계 S/W를 사용하여 얻은 값인데, 실험값과 4% 이내로 잘 일치하고 있으므로 누설유량도 잘 일치한다고 판단할 수 있다. Case 1의 경우에는 한쪽의 플로팅링 간극으로 약 4.5%의 누설유가 발생하고, Case 2의 경우는 약 3.5%, Case 3의 경우는 약 2.5%의 누설유가 발생하는 것을 알 수 있다. 플로팅링 간극의 누설유량을 구하는데 사용한 식은 다음과 같다.⁽¹⁴⁾

$$Q_L = C_d A_{cd} \sqrt{2gH} \quad (3)$$

여기서 C_d 는 마찰저항계수, A_{cd} 은 간극면적, H 는 양정을 나타낸다.

Figure. 4에는 설계유량에서 흡입성능시험결과를 나타내었다. 흡입성능은 3가지 모두 비슷한 결과를 나타내었다. 누설유량이 3가지 경우에 대하여 설계유량의 1~2% 정도로 차이가 크지 않지만, 일반적으로 Case 3의 경우 누설유량이 가장 적으므로 인두서 입구유량이 적어서 흡입성능이 가장 좋아야하나, 실제로는 입구유량이 가장 많은 Case 1과 흡입성능이 비슷하다. 이는 Jakobson⁽¹⁵⁾이 주장한 바와 같이 인두서 입구에 주입된 누설유량이 입구유동에 영향을 미치지 않으므로 판단되며, 적절한 주입유량은 펌프의 흡입성능을 향상시킬 수 있음을 의미한다. Fig. 4에서 캐비테이션 수(σ)는 다음과 같이 정의된다. 여기서 p_v 는 증기압을 나타낸다.

$$\sigma = \frac{(p_{1t} - p_v)}{\rho U_{T1}^2 / 2} \quad (4)$$

입구 누설유가 인두서의 주유동에 미치는 영향을 파악하기 위해서 유동해석을 수행하였다. 유동해석시간을 절약하기 위해서 유동해석은 인두서와 입구부분에 대해서만 수행되었다. 또한 유동해석의 편의를 위해서 입구부와 인두서 형상을 간소화하였다.

Figure. 5에 입구부 및 인두서의 형상을 나타내었다. 실험에 사용된 터보펌프에서 Fig. 1과 같이 뒤쪽 실을 통과한 후 입구부로 유입되는 유동은 입구 슈라우드 주위의 작은 구멍으로 분산되어 유입되기 때문에 Fig. 5와 같이 모델링하였다. Fig. 6에 유동해석 결과인 유선과 블레이드표면 정압분포를 나타내었다. 누설유가 주유동 및 베어링 지지부와 상호작용을 하는 것⁽¹⁶⁾을 확인할 수 있다. Fig. 7에 인두서 입구에서 절대유동각을 입구 누설유(injection)가 있을 경우와 없을 경우를 비

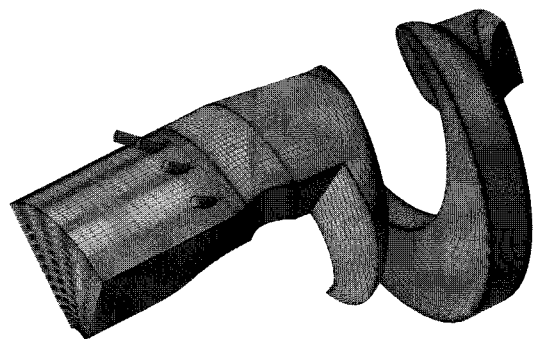


Fig. 5 Computational grid for the calculation

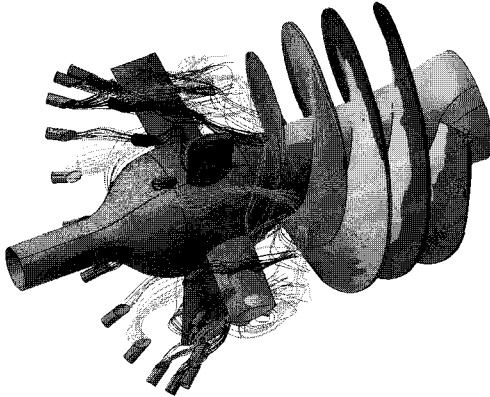


Fig. 6 Streamline and static pressure distributions

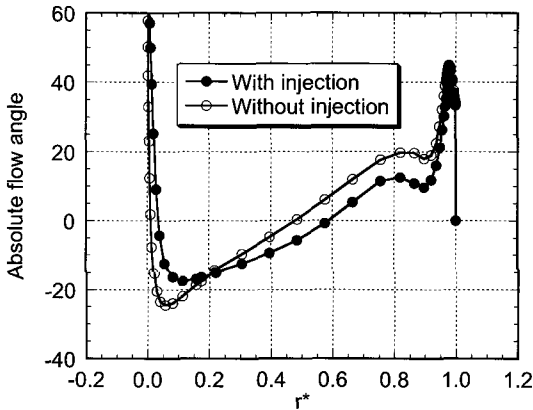


Fig. 7 Calculated absolute flow angle distributions

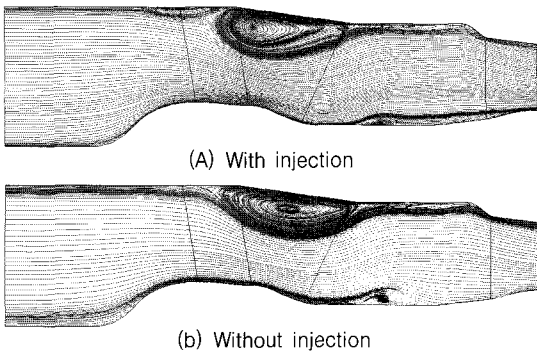


Fig. 8 Calculated streamline distributions

교하여 나타내었다. 누설유가 없을 경우에 입구유량은 100%Qd이며, 누설유량은 Case 2를 기준으로 3.5%Qd를 선정하였다. 최창호와 김진한⁽¹⁷⁾ 및 최창호 등^(16,18)

은 본 연구에 사용된 후진익형 인듀서의 경우, 인듀서 앞전의 후진이 인듀서 입구유동의 예선회(pre-whirl) 및 입구역류의 성장을 유도하고, 결과적으로 흡입성능의 저하를 초래한다는 것을 확인하였다. 따라서 Fig. 7의 절대유동각을 관찰해 보면 허브에서 슈라우드로 갈수록 절대유동각이 증가하는 예선회가 존재하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 누설유가 존재할 경우 예선회의 절대량이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 즉, 전반적으로 절대유동각의 절대값이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 따라서 누설유가 있는 경우에 입구유동의 예선회를 방해하여 유량증가에 따른 흡입성능의 저하를 완화하는 작용이 있음을 알 수 있다. Fig. 7에서 r^* 는 다음과 같이 정의된다. r_h 는 허브반경, r_t 는 익단반경을 나타낸다.

$$r^* = (r - r_h) / (r_t - r_h) \quad (5)$$

Figure. 8에 계산된 유선분포를 비교하여 나타내었다. 누설유가 있을 경우에 누설유가 입구유동의 예선회를 방해하여 역류의 상류전파 및 성장을 억제하는 것을 확인할 수 있다.

5. 결론

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

- (1) 플로팅링의 간극을 줄임으로서 양정과 효율이 증가되는 것을 확인하였다. 플로팅링의 간극이 1/2로 줄어들 경우 양정은 약 3%, 효율은 약 4% 정도 증가되는 것을 펌프실험에서 확인하였다.
- (2) 플로팅링의 간극이 클수록 누설유량이 많아지는데, 흡입성능실험에서 간극이 클수록 흡입성능의 저하가 발생하지 않음을 알 수 있었다. 이것은 간극으로 누설되는 유량이 입구로 재유입되는 과정에서 입구유동의 예선회를 억제하여 입구역류의 크기를 줄여주는 작용이 있었기 때문으로 판단된다.

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, 제31권, 제6호, pp. 72~78.
- (4) 최창호, 김진한, 2004, “터보펌프용 산화제 펌프 설계/해석,” 유체기계저널, 제7권, 제3호, pp. 57~62.
- (5) 최창호, 노준구, 김대진, 홍순삼, 김진한, 2005, “유동해석을 이용한 터보펌프 설계,” 한국항공우주학회 2005년도 춘계학술발표회 논문집.
- (6) 노준구, 최창호, 김진한, 2006, “터보펌프 축추력 조절용 캐비티 베인에 대한 수치해석적 연구,” 유체기계저널, 제9권, 제2호 pp. 39~43.
- (7) 홍순삼, 최창호, 김진한, 2004, “현열비가 터보펌프 인듀서의 성능에 미치는 영향,” 대한기계학회논문집 B권, 제28권, 제4호, pp. 382~388.
- (8) 김대진, 홍순삼, 최창호, 김진한, 2005, “로켓엔진용 연료펌프의 성능시험,” 항공우주기술, 제4권, 제1호, pp. 143~149.
- (9) 김대진, 홍순삼, 최창호, 김진한, 2006, “로켓엔진용 산화제펌프의 수류시험,” 제4회 한국유체공학학술대회 논문집, 제1권, pp. 523~526.
- (10) 신성광, 이용복, 곽현덕, 김창호, 장건희, 2003, “고압터보펌프용 플로팅링 실의 거동과 동특성의 상관관계에 관한 실험,” 한국소음진동공학회 추계학술대회 논문집, pp. 471~477.
- (11) 곽현덕, 전성민, 김진한, 2004, “국산화 터보펌프용 플로팅링 실의 누설특성 및 소재검증,” 한국군사과학기술학회 종합학술대회 논문집, pp. 583~586.
- (12) 곽현덕, 전성민, 김진한, 2005, “터보펌프용 극저온 베어링/실 성능시험설비,” 2005년 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 341~347.
- (13) Fine/Turbo 7.1-4 Manual, 2006, Numeca Inc.
- (14) Stepanoff, A. J., 1957, Centrifugal and Axial Flow Pumps 2nd Edition, Krieger publishing company, Malabar, Florida.
- (15) Jakobsen, J. K., 1971, Liquid Rocket Engine Turbopump Inducers, NASA SP-8052.
- (16) Choi, C. H., Noh, J. G., Kim, J. S., Hong, S. S., and Kim, J., “Effects of a Bearing Strut on the Performance of a Turbopump Inducer,” Journal of Propulsion and Power, Vol. 22, No. 6, 2006, pp. 1413~1417.
- (17) 최창호, 김진한, 2005, “터보펌프용 전진익형 인듀서의 성능에 대한 수치해석적 연구,” 한국항공우주학회지, 제33권, 제11호, pp. 74~79.
- (18) 최창호, 김진선, 홍순삼, 김진한, 2006, “터보펌프용 전진익형 인듀서에 대한 연구,” 유체기계저널, 제9권, 제2호, pp. 25~29.