

레이놀즈 수가 터보펌프 인듀서 캐비테이션 성능에 미치는 영향 측정

김준호*[†] · 송성진*

Measurement of Reynolds Number Effects on Cavitation Performance in a Turbopump Inducer

Junho Kim*[†] · Seung Jin Song*

ABSTRACT

This study experimentally investigate how the Reynolds number affect cavitation performance in a turbopump inducer using water. Cavitation performance has been determined by the static pressure measured at the inlet of the inducer. Reynolds number has been varied by varying water temperature and inducer rotational speed to maintain constant non-dimensional thermal parameter. At low non-dimensional thermal parameter, the critical cavitation number is insensitive to Reynolds number. However, at high non-dimensional thermal parameter, the critical cavitation number increased as Reynolds number increases. Thus, cavitation performance is deteriorated as Reynolds number increases when thermal effect exists.

초 록

터보펌프 인듀서에서 레이놀즈 수가 캐비테이션 성능에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였다. 인듀서 입구에서 압력을 측정하여 캐비테이션 수에 따른 양정계수 변화를 구하였다. 물의 온도와 인듀서 회전수를 변화시켜 일정한 무차원 열적 변수에서 레이놀즈 수를 변경시켜 캐비테이션 성능을 측정하였다. 낮은 무차원 열적 변수에서는 캐비테이션 성능 곡선이 레이놀즈 수 변화에 영향을 받지 않는다. 하지만 높은 무차원 열적 변수에서는 레이놀즈 수가 증가함에 따라 입계 캐비테이션 수가 증가하였다.

Key Words: Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), Turbopump(터보펌프), Inducer(인듀서), Cavitation Performance(캐비테이션 성능), Reynolds Number(레이놀즈 수), Thermal Effect(열적 효과)

1. 서 론

* 서울대학교 기계공학부

[†] 교신저자, E-mail: kimjonah@snu.ac.kr

액체 산화제와 연료를 연소기로 공급하는 터

보펌프는 액체 로켓 추진 시스템의 주요한 부품이다. 로켓 전체의 크기와 무게를 줄이기 위해서 터보펌프는 고속으로 회전해야하며, 액체 산화제와 연료는 저압의 상태로 존재해야한다. 그런 요구조건으로 인해 터보펌프는 캐비테이션 발생에 취약하다. 펌프 임펠러에서 발생하는 캐비테이션을 억제하기 위해 인듀서를 임펠러 상류에 설치한다. 하지만 인듀서에서의 캐비테이션이 심해지게되면 인듀서의 성능 저하를 야기하며, 심할 경우 인듀서의 불안정성을 불러일으킨다. 캐비테이션 성능은 캐비테이션 수에 따른 양정계수를 의미한다. 임계 캐비테이션 수는 양정계수가 캐비테이션이 없는 조건에서의 양정계수보다 3% 하락할 때의 캐비테이션 수를 의미하며, 캐비테이션 성능을 평가하는 지표로 사용한다.

캐비테이션 성장 과정에서 주변으로부터 잠열을 흡수하면서 버블의 온도와 증기압이 감소한다. 그렇기 때문에 bulk flow에서의 캐비테이션 수보다 낮은 캐비테이션 수에서 동일한 크기의 캐비테이션이 형성된다. 이러한 효과를 열적 효과라고 한다[1]. 물성치가 온도 변화에 민감한 극저온 유체 혹은 고온의 물에서는 열적 효과가 강하지만, 낮은 온도의 물과 같이 물성치가 온도 변화에 둔감한 경우에는 열적 효과가 무시된다. 이러한 열적 효과를 정량적으로 표현하기 위해 Brennen[1]은 차원화된 열적 변수인 Σ 를 사용하였고 Franc 등[2]은 터보기계에서의 캐비테이션 열적 효과를 적용하기 위해 길이와 속도를 고려한 무차원 열적 변수, Σ^* 를 제안하였다.

$$\Sigma^* = \frac{1}{R\omega^{3/2}} \frac{(\rho_v L)^2}{\rho_l^2 \sqrt{\alpha_l} c_{p,l} T_\infty} \quad (1)$$

이때, R 은 인듀서 반지름, ω 는 회전수, ρ_l 은 액체의 밀도, ρ_v 는 기체의 밀도, L 은 잠열, α_l 은 thermal diffusivity, $c_{p,l}$ 은 액체의 specific heat, T_∞ 는 유체의 bulk 온도를 의미한다.

이러한 열적효과는 일반적으로 유체의 온도를 변화시켜가며 연구한다. Ruggeri and Moore[3]는 다양한 액체에서 온도와 회전수를 바꾸어가며 캐비테이션 성능을 측정하였고, 온도

가 증가할수록 회전수 낮을수록 캐비테이션 성능이 좋아지는 것을 발표하였다. Yoshida 등[4]은 액체 질소의 온도가 증가함에 따라 캐비테이션 성능이 좋아지고, 캐비테이션 영역의 길이가 짧아지는 것을 실험적으로 확인하였다. Torre 등[5]은 물의 온도가 증가함에 따라 임계 캐비테이션이 감소하는 것을 확인하였다. Kim and Song[6]은 Σ^* 가 증가함에 따라 임계 캐비테이션 수가 낮아지는 것을 확인하였다.

기존 연구자들은 열적효과를 무차원 변수차원에서 연구하지 않고 차원 변수인 온도와 회전수 효과에 대해 연구하였다. 하지만 무차원 변수인 레이놀즈 수의 영향에 대한 연구는 진행되지 않았다. 따라서 이번 연구에서는 레이놀즈 변화에 따라 터보펌프 인듀서 캐비테이션 성능의 변화에 대해 연구하고자 한다.

2. 실험 설비 및 측정 장비

2.1 실험 설비

실험은 서울대학교 내에 설치된 터보펌프 인듀서 수류 시험 장비[6]에서 진행하였다. 시험 장비의 개략도와 사진은 Figure 1에서 볼 수 있다. 시험 장비는 크게 물탱크, 회전부, 자동 조절

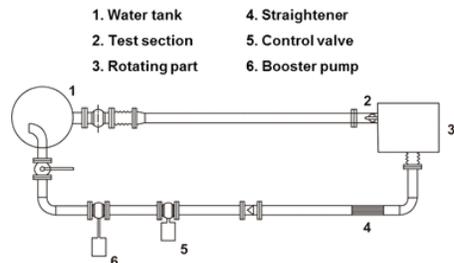


Fig. 1 SNU Turbopump Inducer Test Facility

Table 1. Characteristics of inducer

특성	값
설계유량계수	0.096
날개 수	3
solidity at tip	2.7

벨브, 부스터 펌프(booster pump)로 구성되어있다. 회전부는 모터, 컬렉터(collector), 시험부, 인듀서 및 축으로 구성되어있다. 인듀서는 60 kW, 10,000 rpm의 용량을 가진 모터에 의해 회전한다.

실험에서 사용한 인듀서의 사양[7]은 Table 1에 기록하였다. 인듀서는 항공우주연구원에서 제작하여 제공하였고, 높은 solidity와 무난한 입구 날개 팁 각도를 가지고 있다.

2.2 측정 장비 및 실험 과정

인듀서 캐비테이션 성능 연구를 위해 인듀서 상·하류에서 측정된 압력을 바탕으로 양정계수(ψ)와 캐비테이션 수(σ)를 각각 도출하였다.

$$\psi = \frac{p_2 - p_1}{\frac{1}{2}\rho(r\omega)^2} \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{p_{inlet} - p_v}{\frac{1}{2}\rho(r\omega)^2} \quad (3)$$

이번 연구에서는 각 실험 조건마다 설계 유량에서 진행하였다. 인듀서의 회전 속도는 ± 1 rpm의 정확성을 갖으며, 유량은 0.25% 정확도를 갖는 유량계를 사용하여 측정하였다. 인듀서 상류와 하류에서 0.04%의 정확도의 정압센서를 사용하여 압력 차이를 측정하였다.

Table 2. Test Condition

온도[K]	회전수[rpm]	레이놀즈 수	Σ^*
24.3	4,500	2.30×10^6	0.0129
27.5	5,800	3.17×10^6	0.0123
73.5	4,100	4.68×10^6	1.22
80	5,400	6.85×10^6	1.27

3. 실험 결과 및 논의

3.1 낮은 무차원 열적 변수에서 레이놀즈 수 변화에 따른 캐비테이션 성능 변화

레이놀즈 수만의 영향을 보기 위해서 무차원 열적 변수를 고정시킨 상태에서 레이놀즈 수만을 변화시켜 실험을 진행하였다. 실험 조건은 Table 2에 정리하였다.

무차원 열적 변수가 0.0129에서 레이놀즈 수를 2.30×10^6 와 3.17×10^6 에서의 캐비테이션 성능을 측정된 결과를 Figure 2에 정리하였다. 무차원 열적 변수가 낮은 경우 레이놀즈 수에 따라 캐비테이션 성능 곡선이 Figure 2에서 볼 수 있는 것처럼 변화가 없다. 이는 열적 효과가 무시할만큼 작은 경우에는 인듀서에서의 캐비테이션 특성은 레이놀즈 수에 의해 변화하지 않는다는 것을 알 수 있다.

3.2 높은 무차원 열적 변수에서의 캐비테이션 성능 변화

무차원 열적 변수가 1.25일 때는 레이놀즈 수

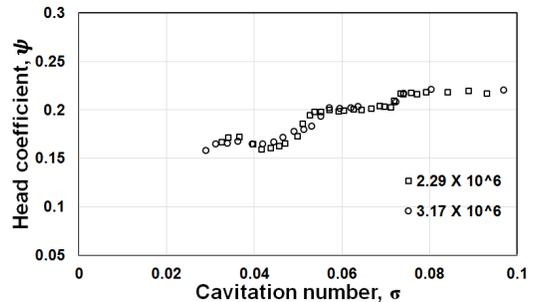


Fig. 1 Cavitation performance at different Reynolds number for a constant Σ^* ($\Sigma^*=0.0125$)

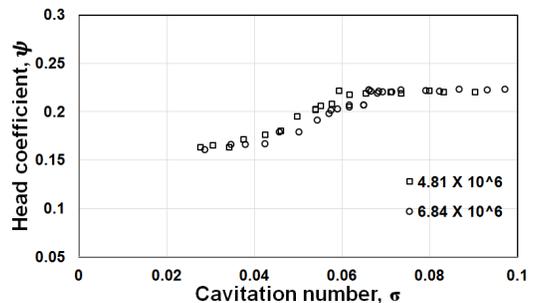


Fig. 2 Cavitation performance at different Reynolds number for a constant Σ^* ($\Sigma^*=1.25$)

4.01 X 10⁶와 5.94 X 10⁶에서 캐비테이션 성능을 측정하였다. Figure 3에서 볼 수 있듯이 무차원 열적 변수가 1.25일 때는 0.0129일때보다 캐비테이션 성능 저하가 더 낮은 캐비테이션 수에서 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 무차원 열적 변수의 증가가 캐비테이션 성능의 향상 시킨다는 것을 재확인하였다[6].

또한 낮은 무차원 열적변수일 때와 달리 임계 캐비테이션 수가 레이놀즈 수가 높은 경우에 더 높다. 이를 통해 열적 효과가 강한 경우에 레이놀즈 수가 인두서 캐비테이션 성능에 영향을 줄 수 있다는 것을 확인할 수 있으며, 레이놀즈 수가 증가함에 따라 캐비테이션 성능 저하가 더 높은 캐비테이션 수에서 발생한다.

4. 결론

터보펌프 인두서에서의 레이놀즈 수 변화에 따른 캐비테이션 성능 변화를 측정하였다. 무차원 열적 변수가 낮은 경우(열적 효과가 무시될 수 있는 경우)에는 캐비테이션 성능에 대한 레이놀즈 수 효과는 무시된다. 높은 무차원 열적 변수의 경우(열적 효과가 강한 경우)에는 레이놀즈 수가 증가함에 따라 캐비테이션 성능이 향상된다. 실제 터보펌프의 레이놀즈 수와 무차원 열적 변수는 실험의 경우보다 크기 때문에 이러한 레이놀즈 효과는 더 크게 나타날 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 BK 21+ 프로그램과 NSF 과제 (Project number: 2011-0020908)의 지원을 받았습니다. 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Brennen, C. E., Hydrodynamics of Pumps, Concepts ETI, Inc. and Oxford University Press, 1994.
2. Frac, J. P., Rebattet, C., and Coulon, A., "An experimental investigation of thermal effect in a cavitating inducer," Journal of Fluids Engineering, Vol. 126, 2004, pp. 716-723.
3. Ruggeri, R. S., and Moore, R. D., "Method for Prediction of Pump Cavitation Performance for Various Liquids, Liquid Temperatures and Rotative Speeds," NASA Report. TN-5292, 1969.
4. Yoshida, Y., Sasao, Y., Okita, K., Hasegawa, S., Shimagaki, M., and Ikohagi, T., "Influence of thermodynamic effect on synchronous rotating cavitation," Journal of Fluids Engineering, Vol. 129, pp. 871-876.
5. Torre, L., Cervone, A., Pasini, A. and d'Agostino, L., "Experimental Characterization of Thermal Cavitation Effects on Space Rocket Axial Inducers," Journal of Fluids Engineering, Vol. 133, 2011, pp. 111303.
6. Kim, J., and Song, S. J., "Measurement of Temperature Effects on Cavitation in a Turbopump Inducer," Journal of Fluid Engineering, Vol. 138, 2016, pp. 011304
7. Choi, C., Noh, J., Kim, J., Hong, S., and Kim, J., "Effects of a bearing strut on the performance of a turbopump inducer," Journal of propulsion and power, Vol. 22, pp. 1413-1417.