

인듀서와 임펠러가 결합된 터보펌프에서의 캐비테이션 유동 특성

김창현* · 최창호** · 백제현***†

Characteristics of Cavitating Flow in Turbopump Inducer/Impeller

Changhyun Kim*, Chang-Ho Choi**, Jehyun Baek***†

Key Words : Turbopump(터보펌프), Inducer(인듀서), Impeller(임펠러), Cavitation(캐비테이션), Numerical analysis(수치 해석)

ABSTRACT

Propellant should be pressurized inside the turbopump to gain high thrust in a projectile. Turbopump is composed of an inducer, which prevents impeller performance deterioration, and an impeller. Several types of cavitation occur inside the inducer, numerous experiments and CFD simulations are conducted. Though, an inducer takes only small portion of total head of the pump and the following impeller determines whole turbopump performance. In addition, low inlet pressure makes the flow to be cavitating not only at the inducer, but also at the impeller in real cases. Therefore, flow through an inducer and an impeller should be considered simultaneously. In this study, LOX pump composed of an inducer and an impeller is analyzed by using commercial CFD code ANSYS CFX 13.0. Non-cavitating flow with high inlet pressure and cavitating flow with low inlet pressure are both simulated and head, suction performances are shown. Evolution of the flow and the cavitation by reducing cavitation number and effect of cavitation on pump performance are studied.

1. 서론

로켓과 같은 발사체 내에서는 큰 추진력을 얻기 위해서 고압의 연료를 연소실에 공급해주는 것이 중요하다. 고압으로 액체 연료를 공급해주는 방법에는 고압탱크방식과 터보펌프방식이 있다. 고압탱크방식은 고압탱크를 발사체 내에 장착하는 것으로 발사체가 무거워지므로 추력 대 중량비가 낮다는 단점이 있다. 반면 터보펌프방식은 터보펌프를 사용해 저압의 연료를 가압시켜 고압 상태로 만드는 것으로, 고압탱크방식보다 효율적인 이유로 현재에는 널리 사용되고 있다.

터보펌프는 장비축소화와 함께, 보다 좋은 성능을 위해 높은 회전수로 작동되며 임펠러 부에서 캐비테이션이 발생하는 경우에는 출력이 급격하게 감소한다. 이를 방지하고자 인듀서가 임펠러 앞에 위치하여 임펠러로 유입되는 유체의 압력을 높여 임펠러 부에서 캐비테이션 발생을 억제하는 역할을 한다. 그 대신 인듀서에서는 복잡한 유동 및 다양한 캐비

테이션 불안정 현상들이 발생하며 진동, 부식 등의 구조적인 문제를 일으킬 수 있다.

현재까지 터보펌프의 개발과 성능 개선을 위해 다양한 방법으로 연구가 진행되어왔다. 초기에는 실험을 통해 유동 특성 파악과 캐비테이션 발생 등에 대해 연구가 되었고, 이후 컴퓨터를 이용한 수치 해석이 발달하여 전산유체역학(CFD)을 이용한 기존 펌프에 대한 성능 해석 및 개발이 진행되고 있다. 최근에는 복잡한 난류 유동과 캐비테이션이 발생하는 인듀서에 대해서 많은 연구가 수행되고 있다. O. Coutier 외(2005)⁽¹⁾는 터보펌프 인듀서에 대해서 캐비테이션이 있을 때와 없을 때 캐비테이션의 발달과 성능 변화에 대해 해석하고 실험결과와 비교하였다. K. Lee 외(2009)⁽²⁾는 터보 펌프용 인듀서에 대한 캐비테이션 실험을 통해 캐비테이션 불안정 현상과 관련하여 비대칭 캐비테이션과 캐비테이션 서지 현상을 관찰하였다. S. Kim 외(2013)^(3,4)는 팁 간극이 터보펌프 인듀서에 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위하여 다양

* 포항공과대학교 기계공학과(Department of Mechanical Engineering, POSTECH)

** 한국항공우주연구원(Korea Aerospace Research Institute)

*** 포항공과대학교 기계공학과, 교신저자(Department of Mechanical Engineering, POSTECH)

† 교신저자(Corresponding Author), E-mail : jhbaek@postech.ac.kr

한 팁 간극에서의 인듀서 성능에 대해서 연구한 바 있다. 인듀서와 임펠러를 모두 고려한 연구도 실험과 해석을 통해 수행되었는데, C. Choi 외(2003)⁽⁵⁾는 혼합면기법과 완전해석 기법을 사용하여 인듀서/임펠러 상호작용에 관해 수치해석적 연구를 진행하였다. J. Lee 외(2005)⁽⁶⁾는 인듀서 단독, 임펠러 단독 그리고 인듀서와 임펠러가 결합된 펌프에 대해 실험을 수행하여 캐비테이션에 의한 성능 저하를 관찰하였다. C. Choi 외(2006)⁽⁷⁾는 인듀서, 임펠러, 볼류트 및 2차 유로를 포함한 전 펌프에 대한 단상유동해석을 수행하여 실험과 유동장 및 성능 등을 비교하였다. 그러나 인듀서와 임펠러를 모두 고려한 캐비테이션 유동 해석은 다상 계산의 어려움 등의 문제로 연구된 바가 적다. 실제로 터보펌프는 인듀서와 임펠러로 구성되어있고 가혹조건에서는 임펠러에서도 캐비테이션이 발생할 수 있어, 전체 펌프의 성능을 평가하기 위해서는 인듀서와 임펠러를 모두 고려한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 항공우주연구원에서 제공받은 터보펌프 인듀서와 임펠러에 대해서 ANSYS CFX 13.0을 이용한 해석을 통해 실험에서의 수력, 흡입 성능과 비교를 수행하였다. 또한 내부유동과 캐비테이션의 발달 과정, 캐비테이션이 펌프 성능에 미치는 영향에 대해서도 살펴보았다.

2. 이론적 배경

2.1 캐비테이션 모델링

캐비테이션은 일반적으로 액체 유동 내에서 다양한 이유로부터 국소적으로 압력이 증기압 아래로 낮아질 때 일어나는 기체 발생 현상을 말한다. 유동 내에서 캐비테이션의 발생 정도는 캐비테이션 수(σ)에 의해 예측된다. 일반적으로는 캐비테이션 수가 작아질수록 캐비테이션의 발생이 심화되는 경향을 보인다. 캐비테이션은 온도 변화로부터 발생하는 상 변화와는 차이가 있으며, 매우 짧은 시간 안에 일어난다.

본 연구에 사용된 ANSYS CFX 13.0에서 캐비테이션 해석에는 동차 다상(Homogeneous multiphase) 모델이, 액체 상과 기체 상 간의 물질 전달 모델로서 Rayleigh-Plesset 모델이 사용된다. Rayleigh-Plesset 모델은 액체 내 기체 생성과 소멸을 결정하는 기준이 되며 액체 속에서 기포의 성장은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$R_B \frac{d^2 R_B}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR_B}{dt} \right)^2 + \frac{2\sigma}{\rho_f R_B} = \frac{P_v - P}{\rho_f}$$

2차항과 표면장력 항을 무시하면 기포 반지름의 시간 변화율은 $\frac{dR_B}{dt} = \sqrt{\frac{2}{3} \frac{P_v - P}{\rho_f}}$ 이며 기포의 체적과 질량의 시간 변화율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

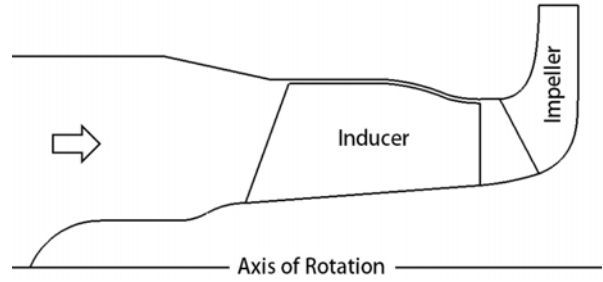


Fig. 1 Configuration of the turbopump

Table 1 Specification of the turbopump

Parameters		Value
Design flow coefficient		0.0916
Inducer	Inlet hub to tip diameter ratio	0.351
	Tip clearance to inlet tip diameter ratio	0.0106
	Outlet hub to tip diameter ratio	0.5
Blade number		3
Impeller	Inlet to outlet diameter ratio	0.5
	Blade number	7

$$\frac{dV_B}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{4}{3} \pi R_B^3 \right) = 4\pi R_B^2 \sqrt{\frac{2}{3} \frac{P_v - P}{\rho_f}}$$

$$\frac{dM_B}{dt} = \rho_g \frac{dV_B}{dt} = 4\pi R_B^2 \rho_g \sqrt{\frac{2}{3} \frac{P_v - P}{\rho_f}}$$

기포 밀도를 N_B , 가스체적율을 r_g 라 하면 증발과 응결 모두를 고려해 준, 총 상간 물질 전달률은 아래와 같다.

$$\dot{m}_{fg} = F \frac{3r_g \rho_g}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{|P_v - P|}{\rho_f}} \text{sgn}(P_v - P)$$

F 는 증발과 응결 시의 상변화 속도의 차이를 고려하기 위해 도입된 경험 상수이며, 증발은 핵형성 구역(대부분 불응축 가스)에서 발생하므로 이것을 고려하여 핵형성 구역의 체적율 r_{nuc} 를 도입하면 증발의 경우 상간 물질 전달률은 다음과 같다.

$$\dot{m}_{fg} = F \frac{3r_{nuc}(1-r_g)\rho_g}{R_{nuc}} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{|P_v - P|}{\rho_f}} \text{sgn}(P_v - P)$$

ANSYS CFX 13.0에서는 위 식에서 사용된 각 인자들의 기본 값으로 $R_{nuc}=1\mu\text{m}$, $r_{nuc}=0.0005$, $F=50$ (증발 시), $F=0.01$ (응결 시)로 설정되어 있다.

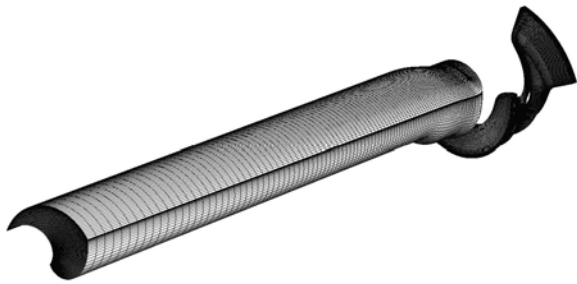


Fig. 2 Grid system of the turbopump

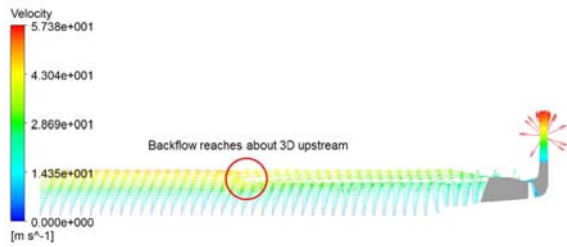


Fig. 3 Meridional velocity vector at 50%Qd condition

2.2 해석 방법

로켓에 쓰이는 산화제 펌프는 Fig. 1과 같은 구조로 이루어져 있으며, 사양은 Table 1과 같다. 인듀서는 임펠러 앞에 위치하여 임펠러로 유입되는 유체의 압력을 높여 펌프의 필요흡입수두를 낮춰주어 임펠러에서 캐비테이션의 발생으로 인한 성능 저하를 방지한다. 그러나 펌프로 유입되는 압력이 충분히 크지 않은 경우에는 인듀서에서 복잡한 유동 및 다양한 캐비테이션 불안정 현상들이 일어나게 된다. 그리고 인듀서와 임펠러 외에도 그림에는 나타나있지 않지만 실제로는 임펠러의 뒤에 위치한 2차 유로를 통해 임펠러 하류의 유동 일부가 인듀서 상류와 임펠러 상류로 다시 유입이 되며, 펌프의 끝단에는 볼류트가 설치되어 동압을 정압으로 바꾸어 양정을 높이는 역할을 한다.

본 연구에서는 2차 유로와 볼류트 등을 제외한 터보펌프 인듀서와 임펠러에서 캐비테이션을 고려한 유동해석을 수행하였다. 해석에는 RANS 식을 풀어 다양한 환경에서의 유동장을 해석할 수 있는 상용해석프로그램 ANSYS CFX 13.0이 사용되었다. 격자 생성은 ANSYS TurboGrid 13.0을 사용하여 1개의 블레이드를 포함하는 유로에 대해서 인듀서와 임펠러 각각 57만개와 35만개의 육면체로 이루어진 격자를 Fig. 2와 같이 생성하였다. 쉬라우드드 타입인 임펠러와 달리, 언쉬라우드드 타입인 인듀서의 경우 틱간극에서 압력면과 흡입면의 압력차로 인한 역류가 발생하므로 발생한 역류로부터 입구가 영향을 받지 않도록 입구의 위치를 인듀서 전연으로부터 인듀서 직경 크기의 5배 앞에 설정하였다. 출구는 계산 안정성을 위하여 임펠러 블레이드 후연 이후 유로면적

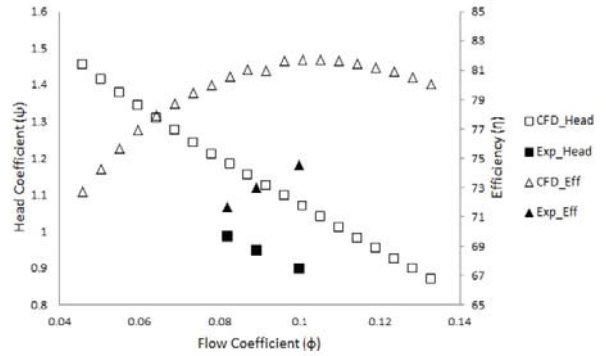


Fig. 4 Head rise and efficiency of the whole pump

일정하게 유지되도록 유로의 높이가 점진적으로 줄어드는 디퓨저 형태로 설계하였다.

해석은 실험에서의 회전수와 같은 8310 rpm으로 회전하는 프레임에서 수행되었다. 인듀서와 임펠러는 같은 속도로 회전하지만 블레이드 개수가 다르므로 인듀서와 임펠러의 격자를 각각 제작하여 경계면에는 혼합면 기법을 사용하였다. 경계조건으로 인듀서 입구에는 전압을, 임펠러 출구에는 유량을 주었다. 출구 유량은 인듀서 입구로 들어오는 2차 유로의 누설 유량을 고려하여 유량계수로부터 나온 유량의 104.5%로 보정하였다.⁽⁸⁾ 난류모델은 동일한 인듀서 단독 해석에서 실험 결과와 가장 잘 일치한 것으로 나타난 standard k-ε 모델을 사용하였다.^(3,4) 작동유체는 25°C의 물로서, 이 때 물의 증기압은 3200Pa이다.

3. 해석 결과

3.1 캐비테이션을 고려하지 않았을 때

펌프의 수력 성능 측정을 위해 캐비테이션이 일어나지 않을 정도의 큰 입구 압력에서 유량을 바꾸어가며 해석을 진행하였다. 가장 역류가 많이 발생하는 설계 유량의 50%의 저유량 경우에 대하여 속도 분포를 살펴본 결과, Fig. 3에서 보이는 바와 같이 인듀서 전연 상류로 인듀서 직경 크기의 약 3배 정도까지 역류가 크게 발생하였으나 입구에는 영향을 미치지 않은 것으로 보아 유동의 영향을 받지 않는 곳에 입구가 위치되었다고 판단되었다. 유량에 따른 양정곡선과 효율곡선을 Fig. 4에 나타내었다.

결과를 실험⁽⁷⁾과 비교해보면, 해석이 실험보다 높은 양정과 효율을 보이는데, 이처럼 해석이 높은 값을 보이는 이유는 볼류트에서의 손실과 임펠러 입구로 들어오는 누설 유량으로 인한 손실 등을 고려하지 않았기 때문이다. 전반적인 경향은 일반적인 펌프에서와 같이 유량이 줄어들어 따라 양정은 상승하며 효율은 설계유량보다 고유량에서 최대치를 보인다.

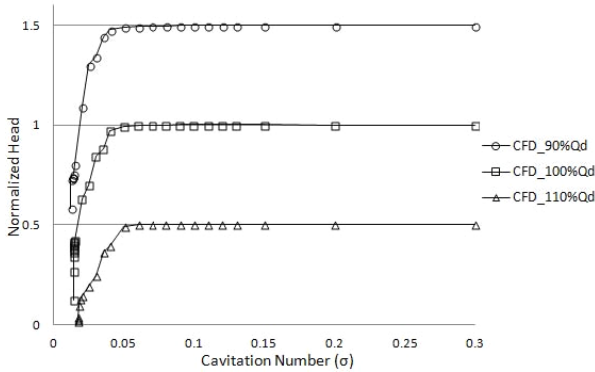


Fig. 5 Suction performance of inducer in the pump

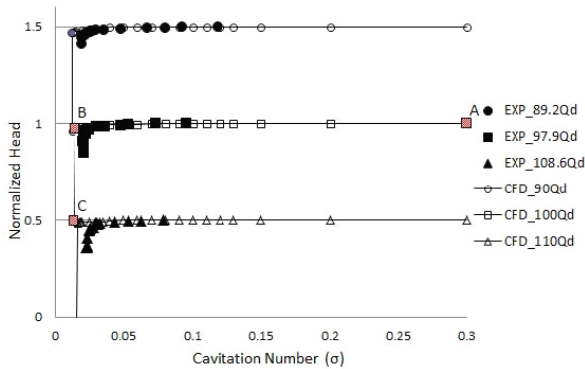


Fig. 6 Suction performance of the whole pump

3.2 캐비테이션을 고려했을 때

입구 압력을 낮추게 되면 흡입수두가 낮아져 캐비테이션이 발생, 성능 저하가 일어난다. 입구 압력을 조절, 캐비테이션 수를 낮추어가며 흡입 성능을 관찰하였다. 흡입성능은 표준화된 수두를 사용하여 각 유량에서 캐비테이션 미발생 시의 수두를 기준으로 무차원화하여 90%, 100%, 110% 설계 유량에서의 결과를 차례로 1.5, 1.0, 0.5에 나타내었다.

Fig. 5의 흡입 성능 곡선은 인두서 입구로부터 인두서와 임펠러의 경계면까지 상승된 양정을 바탕으로 나타낸 것으로서 인두서만의 흡입 성능을 짐작할 수 있다. 그 결과, 인두서는 일반적으로 알려진 것과 같이 고유량일수록 높은 캐비테이션 수에서 양정이 감소하였으며 양정 저하 이후에는 저유량일수록 양정이 급격하게 감소하였다.

Fig. 6에 나타낸 흡입 성능 곡선은 인두서 입구로부터 임펠러 출구까지 상승된 양정을 바탕으로 한 전체 펌프에 대한 흡입 성능이다. 그 결과, 실험에 비해 계산에서 양정이 감소하기 시작하는 캐비테이션 수가 낮았지만 고유량일수록 높은 캐비테이션 수에서 양정이 감소되는 경향은 실험 및 인두서의 경향과 같았고, 인두서에서 양정 감소 시의 기울기보다 더 급격한 기울기로 양정이 감소하는 모습을 보여주었다. 그

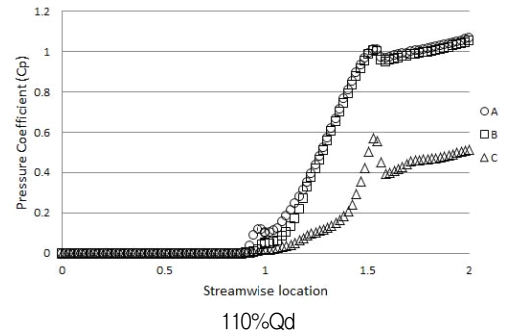
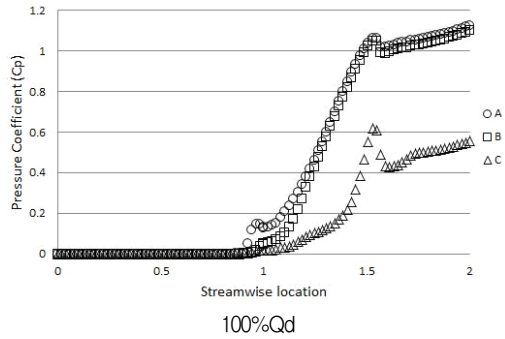
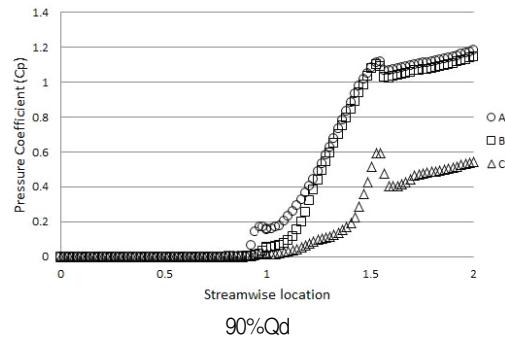


Fig. 7 Pressure development through the whole pump

러나 양정이 감소하기 시작하는 캐비테이션 수에 있어서 실험과 해석 간의 차이가 있었으며 그 이유는 유체 내 불응축 가스의 함유량이 다르고, 실험에서는 유체 내로 공기가 내포되어 캐비테이션 발생의 정도가 달라질 수 있기 때문이다.

인두서의 흡입 곡선과 인두서와 임펠러를 포함한 전체 펌프의 흡입 곡선을 비교해보면 인두서에서 양정 저하가 일어난 이후에도 임펠러에서는 일정 캐비테이션 수까지는 양정 저하가 발생하지 않았다는 것을 알 수 있다. 해석에 사용된 것과 동일한 인두서에서의 양정 저하에 대해서는 블레이드 캐비테이션이 유로의 목(throat)부분을 막음으로서 발생한다는 것이 발견되었으므로^(3,4), 본 연구에서는 인두서에서 이어지는 임펠러의 특성에 보다 자세한 분석을 위해 각 유량에 대해서 캐비테이션이 거의 없이 양정이 일정하게 유지되는 지점 A, 급격한 양정의 저하인 양수불능(head breakdown)이 발생하기 직전 지점 B와 직후 지점 C (설계유량에서의 지점 A~C의 위치는 Fig. 6에 나타내었다) 의 펌프 입구에서 출구까지의 압력 발달 과정을 Fig. 7에 나타내었다. 그래프가

인듀서와 임펠러가 결합된 터보펌프에서의 캐비테이션 유동 특성

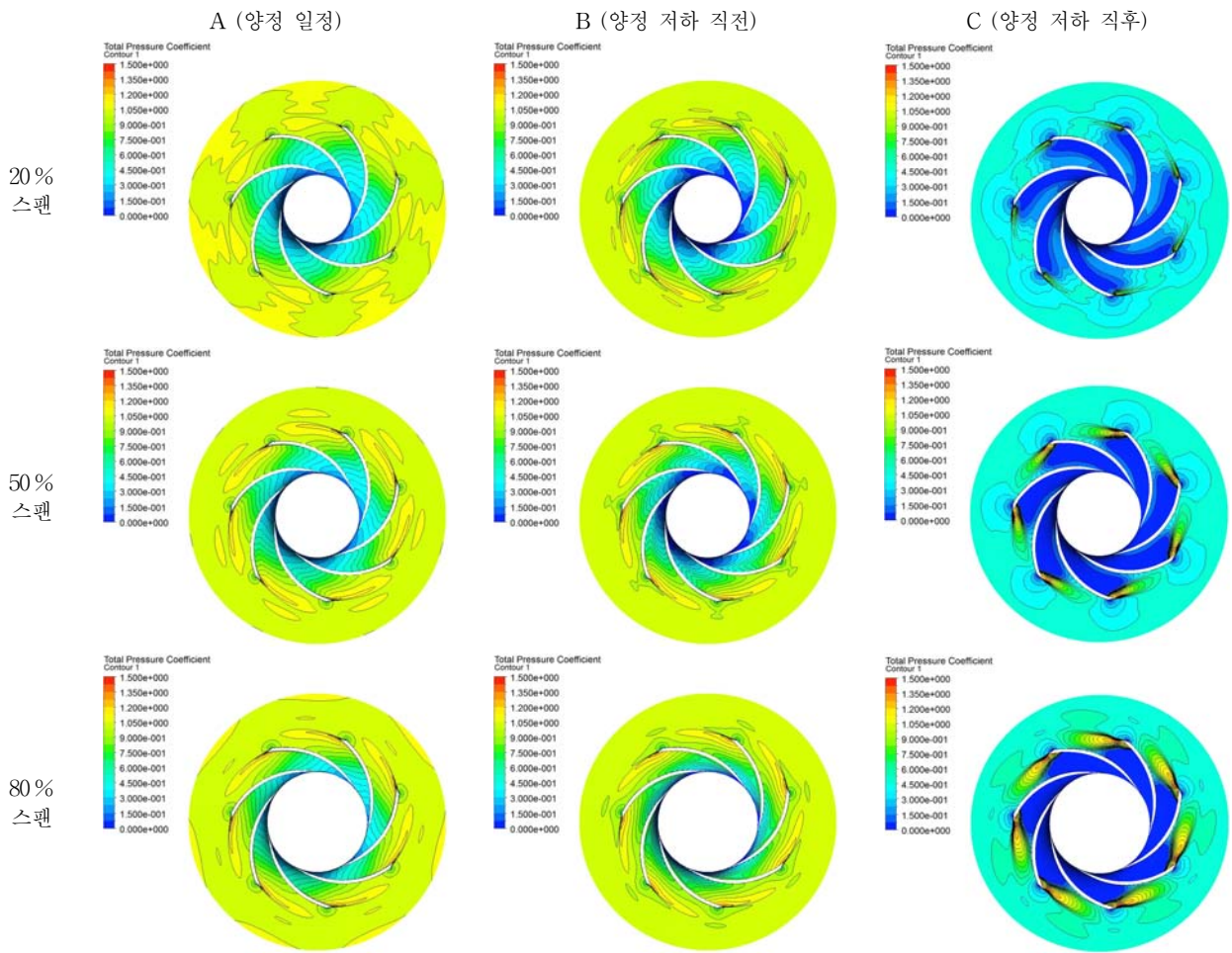


Fig. 8 Pressure distribution of the impeller in the pump (100%Qd)

Table 2 Pressure difference (A-B) at inducer outlet and impeller outlet

	90 %Qd	100 %Qd	110 %Qd
ΔC_p (A-B) at inducer outlet	0.109	0.082	0.056
ΔC_p (A-B) at impeller outlet	0.037	0.026	0.015

로축의 0은 인듀서 도메인의 입구, 1은 인듀서 도메인과 임펠러 도메인의 경계면, 2는 임펠러 도메인의 출구에 해당한다.

Fig. 7의 압력 발달 곡선을 보면 유체는 인듀서에서 가압되어 압력이 높아진 상태로 임펠러 입구로 진행한다. 이렇듯 인듀서는 입구에서보다 압력이 높아진 상태의 유체를 임펠러에 공급해주어 임펠러에서의 캐비테이션 발생을 억제할 수 있다. 임펠러로 들어간 유체는 인듀서에서보다 더 큰 폭으로 가압되어 출구로 빠져나간다. 인듀서와 임펠러 모두 블레이드가 끝나는 지점에서는 유체의 섞임현상으로 인한 압력저하가 발생하였다. 압력곡선의 발달과정은 유량에 관계없이 비슷하였다.

캐비테이션 수가 낮은, 임펠러의 양정 저하 직전에서는 인

듀서에서 상승되는 압력이 매우 작아 인듀서는 제역할을 하지 못함을 보여준다. 그러나 임펠러의 전연에서는 캐비테이션이 거의 발생하지 않는 A보다 캐비테이션이 발생한 B에서 급격한 압력 상승이 일어나며 임펠러 출구에서는 양정의 차이가 임펠러 입구에서보다 크게 줄어든 것을 볼 수 있다. Table 2에서 임펠러 출구에서의 A와 B의 양정차는 인듀서 출구에서의 A와 B의 양정차에 비해 약 1/3 정도로 줄어든 것을 수치적으로도 볼 수 있다.

그리고 캐비테이션의 발달로 급격한 압력 저하가 발생한 C에서는 임펠러 또한 제 기능을 못하고 A와 B 대비 절반 정도의 양정만 상승한다. 이 결과에서 임펠러에서 급격한 양정 저하가 발생하기 직전에 인듀서는 이미 많은 캐비테이션 발생으로 인해 제 기능을 못하나, 임펠러에서는 캐비테이션이 발생하지 않을 때 보다 더 큰 폭의 압력 상승으로 양정을 보상해주었음을 알 수 있다. 즉, 임펠러의 양정 저하 이전에는 캐비테이션 수가 높을 때보다 낮을 때 임펠러에서 더 큰 압력 상승이 있었으며 더 자세한 분석을 위해 설계유량에서의 임펠러 내 20%, 50%, 80% 스패에서의 압력 분포를 Fig. 8에 나타내었다. 또 캐비테이션의 분포가 펌프 양정에 어떠한

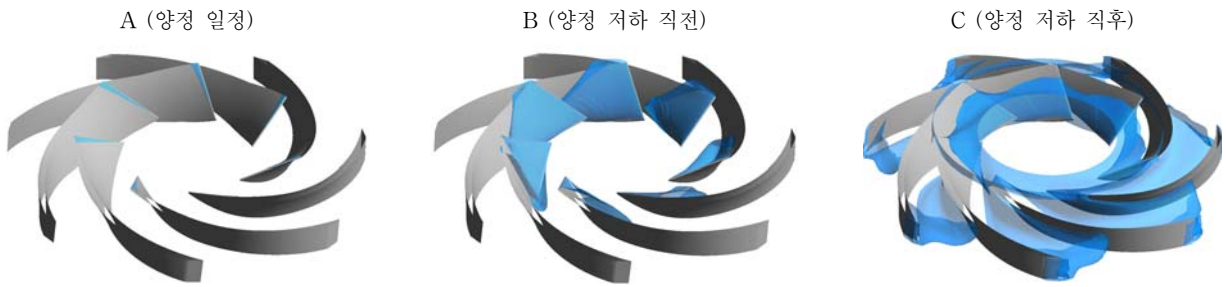


Fig. 9 Iso-surface of 10% vapor volume fraction (100%Qd)

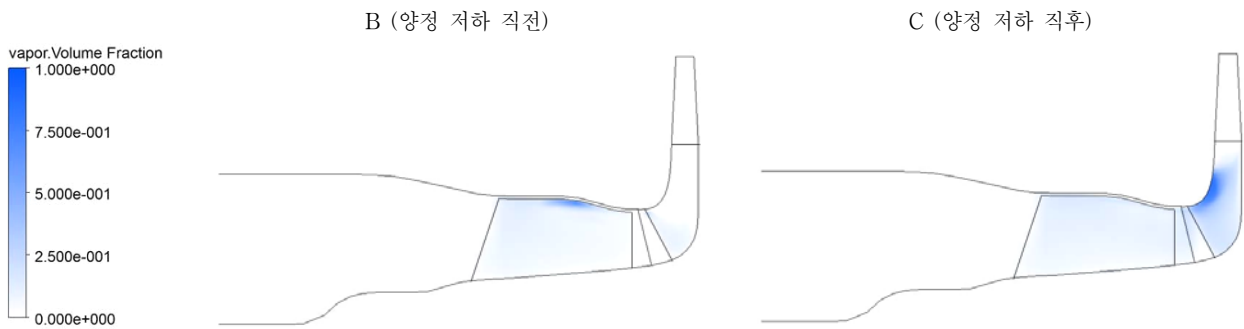


Fig. 10 Vapor volume fraction distribution at meridional plane (100%Qd)

영향을 주었는지 살펴보기 위하여 임펠러 내 증기체적율을 Fig. 9, 10에 도시하였다(유량에 상관없이 비슷한 경향을 보였으므로 설계유량에 대해서만 나타내었다). 그 결과를 살펴보면 압력이 상대적으로 낮은 임펠러 전연 근처의 흡입면에서 캐비테이션이 발생하기 시작하여 캐비테이션 수가 낮아짐에 따라 저압 영역이 후류 쪽으로 확대되는 것을 볼 수 있다. Fig. 8의 A와 B를 비교해보면 B의 경우 임펠러 흡입면의 전연 근처에서는 캐비테이션 발생으로 인해 압력이 증가하지 못하고 있다. 그러나 후류에서는 A에 비해 더 빠른 압력 상승을 보이며 블레이드가 끝난 출구에서는 A와 B간의 압력 차이는 크지 않았다. 반면에 C는 임펠러 흡입면은 물론 압력면에서도 캐비테이션이 발생하였고(Fig. 9 참조) 압력 발달이 압력면을 따라 미미하게 일어나다가 후연근처에서 조금 크게 일어나고 블레이드와 멀어지면서 다시 줄어들었다.

스팬에 따른 압력과 캐비테이션 분포를 살펴보면 Fig. 9, 10의 B에서는 블레이드 캐비테이션이 크게 발생하였으나 주로 임펠러 허브쪽에 집중되어있다. 따라서 Fig. 8의 허브에 가까운 20% 스펬에서는 캐비테이션으로 인한 A와 B간의 임펠러 내 압력 분포의 차이가 크지만 쉬라우드에 가까운 80% 스펬에서는 A와 B간의 압력 분포의 차이가 거의 없고, 그 결과 출구에서 비슷한 수준의 양정을 보였다고 판단된다.

그러나 급격한 양정 저하가 일어난 C의 경우에는 캐비테이션이 인두서로부터 넘어오고 임펠러에서도 쉬라우드쪽으로 크게 캐비테이션이 발생하여 저압영역이 A, B와 달리 임펠러 허브쪽보다 쉬라우드쪽으로 발달하며 압력 상승이 억

제되는 것을 볼 수 있다(Fig. 10 참조). 이러한 결과에서 임펠러의 양정 저하 이전에는 블레이드 캐비테이션이 주로 허브쪽에서 발생하고 이때에는 임펠러의 양정 상승에 큰 영향을 주지는 않지만, 입구 압력이 낮아져 인두서에서 임펠러 영역으로 캐비테이션이 넘어오고 임펠러의 쉬라우드쪽으로 캐비테이션이 확대되기 시작하면 임펠러에서 급격한 양정의 저하인 양수불능이 발생한다고 볼 수 있다. 따라서 펌프 양정 상승에는 임펠러의 허브쪽에 발생하는 캐비테이션 보다 쉬라우드쪽에 발생하는 캐비테이션이 더 큰 영향을 미치고, 임펠러의 쉬라우드쪽에 발생하는 캐비테이션을 제어하는 것이 펌프의 성능 향상에 중요한 요인임을 알 수 있다. 다만, 인두서에서 발생해서 떨어져 나온 캐비테이션이 임펠러에 직접적으로 어떠한 영향을 미치는지에 대해서는 혼합면 기법을 사용한 정상해석에서보다 비정상 해석을 통한 분석이 필요하다.

그리고 임펠러의 미드-스팬에서 캐비테이션을 고려한 유효속도장을 Fig. 11에 나타내었다. B의 경우, 블레이드 캐비테이션으로 인해 유로의 폭이 줄어 유속이 다소 빨라졌으며 이러한 유속의 증가가 Fig. 7에서 나타난 B가 A보다 임펠러에서 더 큰 압력 상승을 가지는 이유로 보인다. C는 B에 비해 유로를 막을 정도로 큰 캐비테이션이 발생하였으며 양수불능으로 이어졌다. 또한 블레이드 캐비테이션의 끝부분이 위치한 후연 부근에서 후류의 일부가 저압영역인 캐비테이션 쪽으로 유도되는 역류현상도 발생하였다.

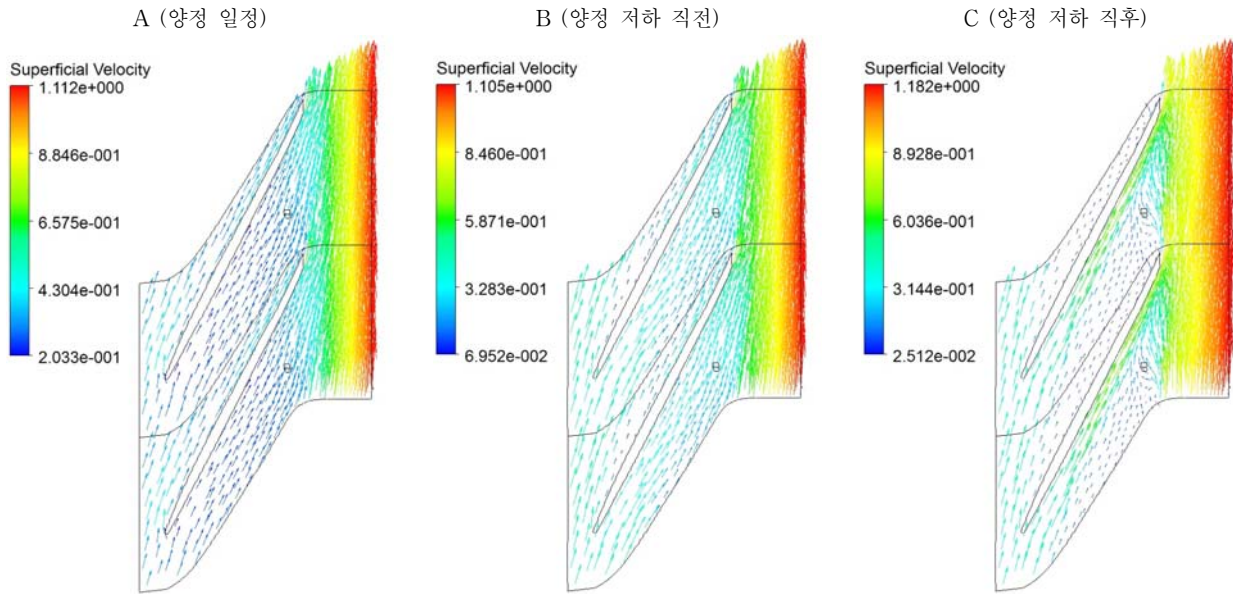


Fig. 11 Superficial velocity vector ($\alpha_1 V / U_{tip2}$) at mid-span (100%Qd)

4. 결 론

본 연구에서는 터보펌프 인듀서와 임펠러에 대해서 혼합면 기법을 사용하여, 캐비테이션을 고려하지 않은 경우와 고려한 경우에 대해서 정상해석을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 캐비테이션을 고려하지 않은 경우, 유량이 감소함에 따라서 양정이 상승하였고, 최대효율은 고유량에서 나타났다. 해석에서 볼류트 및 누설 유량을 고려하지 않아 실험과 오차가 발생하였으나 양정, 효율 곡선의 전체적인 경향성은 일치하였다.
- 2) 캐비테이션을 고려한 경우, 해석과 실험 모두에서 유량에 관계없이 캐비테이션 수가 감소함에 따라 일정 캐비테이션 수보다 작아지면 급격한 양정 저하를 보이는 양수불능 현상이 관찰되었으며 이는 고유량으로 갈수록 더 큰 캐비테이션 수에서 발생하였다.
- 3) 인듀서의 양정 저하는 비교적 큰 캐비테이션 수에서 발생하나 임펠러의 양정 저하는 더 낮은 캐비테이션 수에서 발생한다. 인듀서가 캐비테이션으로 인하여 양정 저하가 일어나고 제 기능을 못하는 경우, 임펠러에서 양정 저하가 발생하기 전까지는 임펠러에서 캐비테이션이 발생하지 않을 때보다 더 높은 압력 상승으로 보상해주어 펌프의 성능저하가 거의 일어나지 않았다.

- 4) 캐비테이션 수가 낮아지면서 임펠러 전연의 저압영역이 확장되며 블레이드 캐비테이션이 발생하였다. 양정 저하 직전까지는 임펠러 허브쪽에 캐비테이션이 집중되어 있으나, 양정 저하 이후에는 쉬라우드쪽에 큰 캐비테이션이 발생한다. 즉, 임펠러에서의 양정 저하는 캐비테이션이 임펠러 허브에서 쉬라우드 쪽으로 확장되면서 일어난다.

NOMENCLATURE

- Φ : flow coefficient, $Q / (A_1 U_{tip1})$
- Ψ : head coefficient, $(p_{t2} - p_{t1}) / (0.5 \rho U_{tip2}^2)$
- α : volume fraction
- η : efficiency, $(p_{t2} - p_{t1}) Q / (\tau \omega)$
- ρ : density
- σ : cavitation number, $(p_{t1} - p_v) / (0.5 \rho U_{tip1}^2)$
- τ : torque
- ω : angular velocity
- A : cross sectional area at inducer leading edge
- C_p : pressure coefficient, $(p_t - p_{t1}) / (0.5 \rho U_{tip2}^2)$
- p : pressure
- Q : volume flow rate
- U : blade velocity
- V : fluid velocity

Subscripts

- 1 : inducer inlet
- 2 : impeller outlet
- d : design
- l : liquid
- tip : blade tip
- v : vapor

References

(1) O.Coutier-Delgosha, P.Morel, R.Fortes-Patella and JL.Reboud, 2005, "Numerical Simulation of Turbopump Inducer Cavitating Behavior," *International Journal of Turbomachinery* 2005:2, pp. 135~142.

(2) Kyoung-Hoon Lee, Joo-Hyung Yoo and Shin-Hyung Kang, 2009, "Experiments on cavitation instability of a two-bladed turbopump inducer," *Journal of Mechanical Science and Technology* 23, pp. 2350~2356.

(3) Semi Kim, Changho Choi, Jinhan Kim, Junyoung Park and Jehyun Baek, 2013, "Effects of tip clearance on performance and characteristics of backflow in a turbopump inducer," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 227(8), pp. 847~857.

(4) Semi Kim, Changho Choi, Jinhan Kim, Junyoung Park and Jehyun Baek, 2013, "Tip Clearance Effects on Cavitation Evolution and Head Breakdown in Turbopump Inducer," *AIAA Journal of Propulsion and Power*, Vol. 29, No. 6, pp. 1357~1366.

(5) Chang-Ho Choi and Jin-Han Kim, 2003, "Numerical Studies on the Inducer/Impeller Interaction Liquid Rocket Engine Turbopump," *Journal of Fluid Machinery*, Vol. 6, No. 4, pp. 50~57.

(6) Jong-Min Lee, Shin-Hyoung Kang and Kyoung-Hoon Lee, 2005, "터보 펌프의 캐비테이션 실험," *Journal of Fluid Machinery*, Vol. 7, No. 4, pp. 16~23.

(7) Chang-Ho Choi, Jun-Gu Noh, Dae-Jin Kim, Soon-Sam Hong and Jin-Han Kim, 2006, "Performance Prediction of a Turbopump System," *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, pp. 70~75.

(8) Chang-Ho Choi, Jun-Gu Noh, Dae-Jin Kim, Soon-Sam Hong and Jin-Han Kim, 2009, "Effects of Floating-Ring Seal Clearance on the Pump Performance for Turbopumps," *AIAA Journal of Propulsion and Power*, Vol. 25, No. 1, pp. 191~195.