

무차원 온도 변수가 터보펌프 인듀서 캐비테이션 시작점에 미치는 영향 분석

윤영국* · 박창규** · 송성진*†

Effects of Non-dimensionalized Thermal Parameter on Turbopump Inducer Cavitation Inception

Youngkuk Yoon*, Changkyoo Park**, Seung Jin Song*†

Key Words : Inducer(인듀서), Cavitation inception(캐비테이션 시작점), Non-dimensionalized thermal parameter(무차원 온도 변수)

ABSTRACT

This paper investigate the impact of non-dimensionalized thermal parameter on inducer cavitation inception with controlled Reynolds number. Cavitation inception was judged by the visual inspection, but with elaborative criteria which minimize the observer dependency and stochastic nature of the cavitation inception. It is shown that with Reynolds number of 4.2 million, the cavitation inception was unaltered in the thermal parameter range of 0.12 to 1.05

1. 서 론

소형화된 발사체 추진기관용 터보펌프 시스템이 기존과 동일한 성능을 유지하기 위해서는, 같은 운용 조건을 전제하였을 때 보다 더 빠른 회전 속도가 요구된다. 이와 같은 요구 조건은 터보펌프 인듀서 팁 영역의 동압을 증가시키고 와류를 형성함으로써, 팁 영역에서 캐비테이션이 쉽게 발생하게 한다⁽¹⁾. 이렇게 형성된 캐비테이션 기포들은 인듀서 운용시 발생하는 소음 및 블레이드 파손의 주 원인으로, 대부분의 경우에서 인듀서 내부 캐비테이션 발생은 기포된다. 따라서, 캐비테이션이 발생하지 않는 영역에서 인듀서 운용 조건을 선정하는 것이 필요한데, 이를 위해서는 모델 테스트를 통하여 실제 인듀서 팁 영역에서 캐비테이션 기포가 발생하는 시점을 예측하여야 한다. 만약 인듀서 내부의 유동이 이상적(손실 및 와도가 없는 비점성 유동)이고, 캐비테이션 기포 내부의 압력이 항상 해당 액체의 증기압(인듀서 내부 유동의 온도는 입구 유동 온도로 균일하다고 가정함)과 동일하다고 가정한다면, 흐름 계수와 캐비테이션 수만을 상사하는 것으로 실제 인듀서와 모델 인듀서 간의 동역학적 유동 상사성을

확보할 수 있다. 그러나 실제 유동에서는 점성 및 온도 효과(캐비테이션 발생시 필요한 잠열을 공급하기 위해 기포 내부의 온도가 주위에 비해 낮아지는 효과)로 인해, 흐름 계수와 캐비테이션 수가 상사되었음에도 관심 영역에서의 오일러 수가 상사되지 않을 수 있다. 즉, 동역학적 상사가 이루어지지 않는다. 캐비테이션 발생에 있어서, 이와 같이 동역학적 상사를 깨트리는 요인들로 인해 일차적인 무차원 변수들이 상사되었음에도 불구하고 같은 정도의 캐비테이션이 발생하지 않는 것을 ‘스케일 효과’라고 하며⁽²⁾, 이는 모델과 실제 기계의 레이놀즈 수 및 무차원 온도 변수가 다르기 때문에 나타난다. (이 외에도 웨버 수, 프루드 수 등 스케일 효과를 지배하는 여러 다른 무차원 변수들이 있지만, 본 논문에서는 일반적으로 제일 큰 영향을 미치는 두 가지의 무차원 변수를 언급하였다.)

인듀서 팁 캐비테이션에서의 스케일 효과는 기존 연구자들에 의해, 크게 두 가지 상황에서의 그 역할이 조사되었다. 첫 번째는 충분히 발달한 캐비테이션에서의 스케일 효과이며, 주로 무차원 온도 변수에 의해 나타나는 효과가 논의됐다. Franc 등⁽³⁾은 동일한 캐비테이션 수 하에서, 캐비테이션

* 서울대학교 기계항공공학부 (School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University)

** 국방과학연구소 (Korean Agency for Defense Development)

† 교신저자, E-mail : sjsong@snu.ac.kr

기포와 주변 유동간의 주 열전달 메커니즘이 전도일 때와 대류일 때로 나누어, 무차원 온도 변수에 따라 캐비테이션의 크기가 어떻게 달라지는지를 예측하였다. 또한, Yoshida 등⁽⁴⁾은 무차원 온도 변수로 인한 스케일 효과가 정상 유동 하에서의 캐비테이션 크기뿐만 아니라, 캐비테이션 불안정성과도 같은 비정상 유동 하에서의 캐비테이션 특성 역시 변화시킴을 실험적으로 확인하였다. 두 번째 상황으로는 캐비테이션 시작점 부근이 있다. 스케일 효과가 캐비테이션 시작점에 미치는 영향은, 충분히 발달한 캐비테이션과는 다른 방식으로 측정된다. 캐비테이션 시작점의 정의는 “캐비테이션 발생”이라는 사건을 야기하는 캐비테이션 수이기 때문에, 일반적인 스케일 효과를 논의할 때와 같이 캐비테이션 수를 고정시킨 뒤, 다른 무차원 변수를 변화시켜 가며 캐비테이션 양상이 어떻게 달라지는지를 파악하는 것이 아니라, 동일한 캐비테이션 양상(캐비테이션 발생)을 형성하는 캐비테이션 수의 변화를 파악하는 방식으로 스케일 효과를 포착한다. 대표적으로, McCormick 등⁽⁵⁾은 실험 및 이론을 통해서 팁 부분에 형성되는 경계층의 두께에 의해 캐비테이션 시작점이 결정된다는 것을 보였다. 또한, 이를 통해 레이놀즈 수가 캐비테이션 시작점에 미치는 영향을 예측하였다. Hsu 등⁽⁶⁾ 역시 팁 부분에서의 와도 분포를 해석적으로 모델링함으로써, 레이놀즈 수가 캐비테이션 시작점에 미치는 영향을 정량적으로 예측하였다. 그러나 캐비테이션 시작점의 경우, 레이놀즈 수에 의한 영향에 대해서는 많은 조사가 이루어 졌으나, 스케일 효과를 지배하는 또 다른 변수인 무차원 온도 변수가 미치는 영향에 대한 논의가 이루어지지 않았다.

따라서, 본 연구는 무차원 온도 변수가 인두서 팁 캐비테이션 시작점에 미치는 영향을 파악하고자 한다. 본 연구에서는 모델 실험에서 흐름 계수 및 레이놀즈 수를 고정한 뒤, 오로지 무차원 온도 변수만을 변화시킴으로써, 모델과 실제 인두서에서 점성이 동역학적 상사에 미치는 정도가 동일한 경우, 어떠한 방식으로 온도 효과가 캐비테이션 시작점의 동역학적 상사에 영향을 미치는지를 파악하였다.

2. 이론적 논의

온도 효과가 캐비테이션 시작점에 미치는 영향은 구형 기포 방울의 크기가 외부 압력과 증기압의 차이에 의해서 어떻게 변하는지를 기술하는 레일리-플레셋 방정식으로부터 예측될 수 있다. Franc 등⁽⁷⁾은 특성 속도 U 로 움직이는 구형 캐비테이션 기포의 정규화된 반지름이 근사적으로 아래와 같은 식을 따른다는 것을 보였다.

$$\bar{R} \frac{d^2 \bar{R}}{dx^2} + 3 \left(\frac{d\bar{R}}{dx} \right)^2 + \Sigma^* \sqrt{x} \frac{d\bar{R}}{dx} = - \frac{C_p + \sigma}{2} \quad (1)$$

\bar{R} 는 특성 길이 D 로 무차원화 된 반지름, \bar{x} 는 무차원화 된 길이 ($\bar{x}=0$ 은 캐비테이션 기포가 외부 압력과 차이로 인해 팽창하기 시작한 지점을 의미한다), C_p 는 무차원 압력 계수이다. 식 (1) 좌변의 세 번째 항은 캐비테이션 기포 발달에 있어서 온도 효과의 영향을 나타내는 항이다. 해당 항은 온도 효과로 인해 캐비테이션 기포 내부의 증기압이 처음 가정하였던 입구 유동 온도 하에서의 증기압에 비해 얼마나 감소하였는지를 무차원화하여 나타내는 항으로, $d\bar{R}/d\bar{x}$ 및 $\sqrt{\bar{x}}$ 에 비례하는 것으로 나타내는데, 이는 온도 효과가 기포 팽창률 및 열 경계층 두께에 비례하여 나타난다는 것을 의미한다. 이에 대한 물리적 해석은 다음과 같다. 구형 캐비테이션 기포가 외부의 낮은 압력으로 인해 팽창하게 될 때, 캐비테이션 기포의 온도 감소는 기포가 팽창하면서 추가적인 상변이가 이루어지기 위해 공급되어야 하는 잠열의 양에 비례하므로 해당 시점에 캐비테이션 기포의 부피가 팽창하는 비율과 비례한다. 또한, 열 경계층의 두께가 얇은 경우, 기포와 주변 액체 간의 온도 차이가 작아도 충분한 양의 열이 전달될 수 있으므로, 온도 효과가 거의 나타나지 않는다.

인두서에서 발생하는 캐비테이션 시작점 근처에서의 기포는, 외부 압력이 증기압과 크게 다르지 않은 상황에서 발생하고 열 경계층이 충분히 발달할 시간이 없기 때문에 $d\bar{R}/d\bar{x}$, $\sqrt{\bar{x}} \ll 1$ 이라고 가정될 수 있다. 그러므로 본 실험에서 진행한 것과 같이 Σ^* 가 서로 상이한 상황들에 대해서도 식 (1) 좌변의 세 번째 항은 캐비테이션 시작점 부근에서는 그 크기가 매우 미미하여 Σ^* 가 온도 효과의 크기 자체(혹은 해당 항)에 영향을 미치지 어렵다. 이러한 이유로 인해 캐비테이션 시작점이 무차원 온도 변수의 영향을 받지 않을 것이라고 예측할 수 있다. (앞선 논의에 따르면, 무차원 온도 변수의 영향은 캐비테이션이 충분히 발달되어서 $d\bar{R}/d\bar{x}$ 및 $\sqrt{\bar{x}}$ 값이 클 때 더욱 확연히 드러날 것이다. 이는 기존에 팁 간극 누설 유동으로 인한 캐비테이션의 크기가 커질수록, 캐비테이션 내부의 온도가 더 많이 감소한다는 Yoshida 등⁽⁸⁾의 결과와도 일치하며, 해당 논의의 일반적인 적용에 대한 정당성을 부여한다.)

3. 실험 방법

본 실험은 서울대학교 인두서 테스트 리그에서 진행되었으며, 해당 실험 장비에 대한 자세한 설명은 Kim 등⁽⁹⁾에 상세히 기술되어 있기 때문에 본 논문에서는 테스트 리그 및 무차원 변수 상사 과정만 간략하게 소개하고자 한다. 테스트 리그의 도식은 Fig. 1에 나타나 있다. 인두서 테스트 리그는 인두서 입구 유동 압력, 입구 유동 온도, 인두서 회전 속도 및 유량을 조절할 수 있다. 인두서 입구 유동 압력의 경우 물 탱크에 부착된 진공 펌프를 통해서 조절할 수 있고, 입구 유

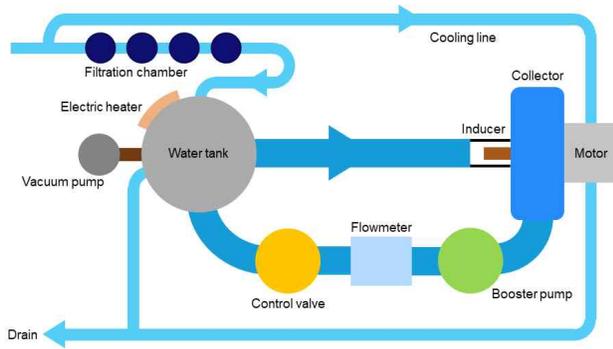


Fig. 1 Schematic diagram of the SNU inducer test rig

동 온도의 경우 마찬가지로 물탱크에 부착된 전기 히터를 통해서 최대 70도까지 물의 온도를 상승시킬 수 있다. 인듀서 회전 속도는 인버터를 통해 조절할 수 있으며, 유량의 경우 부스터 펌프와 컨트롤 밸브를 조절함으로써 원하는 유량에 도달할 수 있다. 실험에서 사용한 인듀서의 디자인은 국방과 학연구소에서 제공하였고, 본 실험에서는 해당 인듀서를 기하학적으로 상사하여 테스트 리그에 맞는 사이즈로 확대한 뒤 실험하였다.

본 실험에서 결정된 무차원 수는 유량 계수, 캐비테이션 수, 레이놀즈 수 및 무차원 온도 변수로 각각의 무차원 변수들에 대한 정의는 아래 수식에 나타나 있다.

유량 계수:

$$\phi = \frac{Q}{UA} \quad (2)$$

Q 는 유량, U 는 인듀서 블레이드 팁 속력, A 는 유효 유로 단면적을 의미한다.

캐비테이션 수:

$$\sigma = \frac{p - p_v}{\frac{1}{2} \rho_l U^2} \quad (3)$$

p 는 입구 유동 압력, p_v 는 입구 유동 온도에서 해당 액체의 증기압, ρ_l 은 액체의 밀도를 의미한다.

레이놀즈 수:

$$Re = \frac{DU}{\nu_l} \quad (4)$$

D 는 인듀서 직경, ν_l 은 액체의 동점성 계수를 의미한다. 무차원 온도 변수:

$$\Sigma^* = \sqrt{\frac{D}{U^3}} \frac{(\rho_v L)^2}{\rho_l^2 C_{pl} T_{\infty} \sqrt{\alpha_l}} \quad (5)$$

ρ_v 는 포화증기의 밀도, L 은 잠열, C_{pl} 은 액체의 정압 비열, T_{∞} 은 인듀서 입구 유동의 온도, α_l 은 액체의 열 확산계수를 의미한다. 본 실험에서 변인으로 사용된 무차원 온도 변수의 물리적 의미는 다음과 같이 설명될 수 있다. 캐비테이션이 발생하면서 액체에서 기체로의 상변화가 일어날 경우, 상변화에 필요한 잠열을 액체로부터 공급받아야 한다. 만약, 이 잠열이 순수하게 주변 액체로부터의 전도 현상에 의해 공급 받는다고 가정한다면, 캐비테이션 기포의 표면 온도가 주변 액체 온도에 비해서 얼마나 낮아야 되는지 결정할 수 있는데, 이러한 온도 감소는 실질적인 캐비테이션 기포의 증기압을 추가로 감소시킨다. 이 때, Σ^* 는 온도 효과로 인한 증기압 감소 정도를 무차원화 하여 나타낸 변수이다. 즉, Σ^* 가 클수록 동일한 ϕ , σ , Re 에서 더 적은 정도의 캐비테이션이 발생할 것이다.

ϕ , σ , Re 를 고정한 채 Σ^* 만을 변화시키는 방법은 다음과 같다. 우선 입구 유동 온도를 자유 변수로 하여 여러 케이스를 형성한 뒤, 모든 케이스에서 동일한 레이놀즈 수를 달성하기 위한 인듀서 회전 속도를 각각의 케이스 별로 설정한다. 이렇게 결정된 인듀서 회전 속도에 맞춰, 부스터 펌프 및 컨트롤 밸브로 유량을 조절함으로써 모든 케이스에서 동일한 유량 계수를 달성할 수 있다. 마지막으로 캐비테이션 수의 경우, 인듀서 회전 속도 및 입구 유동 온도가 정해져 있기 때문에, 각 케이스에서 같은 값을 가지도록 입구 유동 압력을 조절함으로써 모든 케이스에서 동일한 캐비테이션 수를 달성할 수 있었다. 실제 실험의 경우, 인듀서 입구 유동 압력을 연속적으로 낮춰가면서 실험이 진행되었기 때문에, 모든 케이스에서 넓은 범위의 캐비테이션 수 아래 실험이 진행되었다. 그러므로, 넓은 범위의 캐비테이션 수에 대해서 같은 캐비테이션 수를 가지는 케이스들을 비교하는 방식으로 각각의 케이스들이 동일한 ϕ , σ , Re 를 갖도록 할 수 있었다.

4. 실험 결과

본 연구 결과에 앞서, 캐비테이션 시작점을 판단하는 과정에서 존재하는 여러 가지 난점에 대해 먼저 언급할 필요가 있다. 우선 첫 번째로, 캐비테이션 시작점 부근의 캐비테이션 수에서는 캐비테이션 발생 자체가 확률적으로 나타난다는 사실이다. 이는 캐비테이션 시작점 측정값이 넓게 산개되는 것을 초래한다. 캐비테이션의 발생이 확률적으로 나타나는 이유로는 크게 두 가지가 있는데, 하나는 캐비테이션이 나타나는 영역에서의 유동 특성 때문이고, 또 다른 하나는 캐비테이션 핵의 확률적 분포 때문이다. 인듀서에서 캐비테이션이 발생하는 영역은 주로 강력한 전단층으로 인해 와류가 형성되고, 유동 섭동이 큰 영역이다. 즉, 평균 압력은 캐비테이션을 발생시킬 만큼 낮지 않더라도, 특정 시점에 음의 압력 섭동이 크게 일어나는 경우 캐비테이션이 발생할 수 있

는 것이다. 이러한 난류 유동의 확률적 특성으로 인해 캐비테이션 수가 변하는 특성 시간이 난류 유동 특성 시간보다 충분히 길지 않으면 캐비테이션 시작점이 넓게 산개될 수 있다. 또한, 앞서 언급된 압력 조건이 충족되더라도 충분히 큰 캐비테이션 핵이 (~20 μm) 해당 영역에 진입하여야 가시적 크기의 캐비테이션 기포로 발달할 수 있다. 만약 캐비테이션 핵의 크기가 너무 작다면 압력이 충분히 낮더라도 표면장력을 이기지 못하여 캐비테이션 핵이 기포로 성장하기 힘들다. 이러한 캐비테이션 핵의 분포 자체가 입구 유동으로부터 확률적 분포를 가지고 유입되기 때문에 실험 변수가 상당히 천천히 변하지 않는 이상, 캐비테이션 개시점이 실험에 따라 넓은 분산을 가지고 측정된다.

본 연구에서는 이러한 난점을 최대한 제거하기 위해, 캐비테이션 시작점을 측정할 때 압력을 낮추는 방향이 아닌, 압력을 미리 낮춘 뒤, 압력을 높여가면서 캐비테이션이 사라지는 지점(desinent cavitation)을 캐비테이션 시작점으로 정의하였다. 캐비테이션이 이미 발생한 이후에는, 캐비테이션 자체가 추가적으로 발생하는 캐비테이션에 대해서 캐비테이션 핵 역할을 수행하기 때문에 캐비테이션 시작점 정의에 있어서 캐비테이션 핵의 확률적 분포에 의한 영향이 미미하다. 이는 압력을 낮춰가면서 캐비테이션 시작점을 측정하는 방식에 비해 액체 내부에 존재하는 불용 가스의 양에 영향을 적게 받고, 탈가스된 상태의 액체가 아닌 일반적인 작동 유체를 사용할 경우(캐비테이션 핵이 전 영역에 걸쳐 상당수 존재하는 경우)의 캐비테이션 시작점을 반영할 수 있다는 이점이 있으며, 실험값의 과도한 분산으로 인한 캐비테이션 시작점 판단의 어려움 역시 방지할 수 있다.

캐비테이션 시작점 판단에 있어 존재하는 또 다른 난점은, 캐비테이션 시작점에서의 캐비테이션 발생 형태 자체가 관측자에 따라서 그 발생 여부를 다르게 판단할 수 있다는 것이다. 특히 간헐적인 기포 형태의 캐비테이션 발생은 관측자에 따라 캐비테이션이 발생되지 않았다고 판단할 여지가 다분하다. 인두서에서 발생하는 캐비테이션의 경우, 캐비테이션이 처음 가시적인 스케일로 나타날 때, 인두서 리딩 에지에서 다소 떨어진 위치에 개별 방울 형태의 캐비테이션 기포들이 산발적으로 나타났다 사라지는 것을 반복하는데 이러한 불규칙성은 캐비테이션 시작점에 대한 판단을 어렵게 한다. 따라서, 본 연구에서는 Boulon 등⁽¹⁰⁾의 방법을 차용하여, 팁 간극 유동 와류 내부에서 발생하는 캐비테이션 기포 클러스터가 어느 정도 발달하여 인두서 리딩 에지와 연결되는 시점을 캐비테이션 시작점이라고 정의하였다. Fig. 2는 본 연구에서 캐비테이션 시작점이라고 정의한 지점에 대한 초고속 카메라 촬영 사진이다.

Fig. 3는 레이놀즈 수를 4.2백만으로 일정하게 유지된 상태에서 무차원 온도 변수를 0.12에서 1.05까지 변화시켜가며 캐비테이션 시작점을 측정한 결과이다. 캐비테이션 시작점

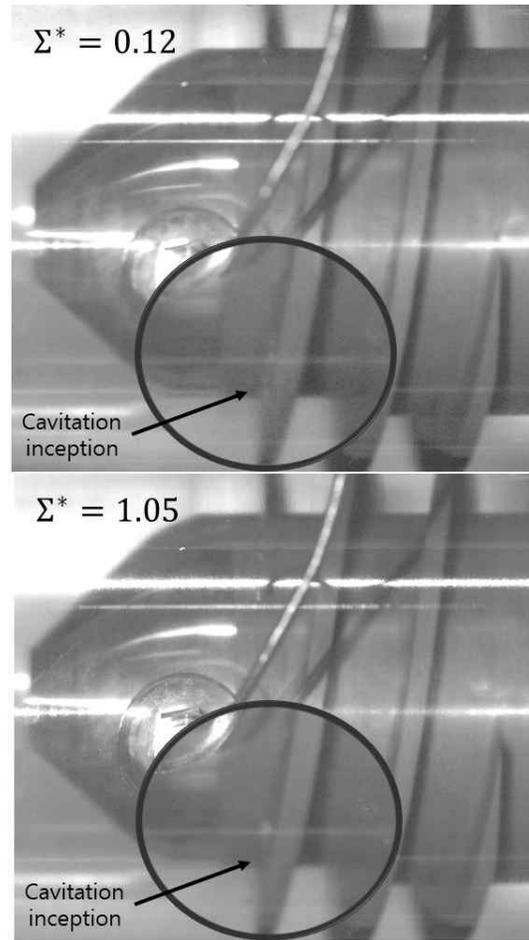


Fig. 2 Visualization of cavitation inception

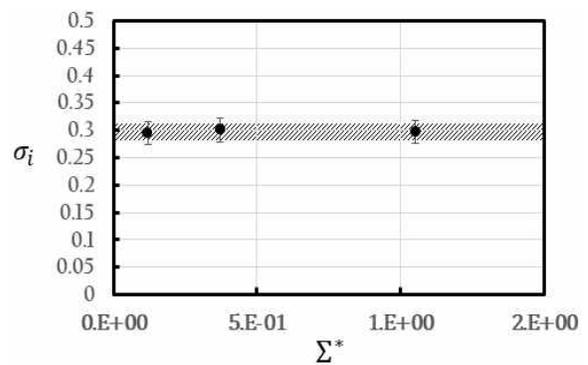


Fig. 3 Cavitation inception number plotted against non-dimensional thermal parameter

은 앞서 언급된 바와 같이 압력을 미리 낮춘 뒤, 다시 압력을 높여가면서 측정하였고, 앞서 Fig. 2에 나타난 기준을 적용하여 서로 다른 세 명의 관측자에 의해 각각 다섯 번씩 반복 측정되었다. 이는 캐비테이션 시작점이 본질적으로 가지고 있는 측정 오차를 최소화하기 위함이다. Fig. 3에서의 오차는, 캐비테이션 시작점이 가지고 있는 통계적 특성을 반영하여, 측정된 데이터들의 표준 편차로 표기되었다. Fig. 3에서 확인할 수 있듯이 본 연구에서 진행된 무차원 온도 변수 범

위 내에서는 온도 변수의 변화가 오차 범위 내에서 캐비테이션 시작점에 영향을 미치지 않는다.

5. 결 론

본 연구에서는 통제된 레이놀즈 수 하에서 온도 효과가 터보펌프 인듀서의 캐비테이션 시작점에 미치는 영향을 분석하였다. 레일리-플레셋 방정식을 통하여, 캐비테이션 시작점에 무차원 온도 변수가 영향을 끼치지 않음이 예측되었다. 또한, 0.12에서 1.05 사이의 넓은 무차원 온도 변수 영역에서 캐비테이션 시작점이 무차원 온도에 의한 영향을 받지 않았으며, 그 값이 0.29가량으로 오차 범위 내에서 일정함을 관측하여 해당 예측을 실험적으로 검증하였다.

후 기

본 연구는 일반기초연구 프로그램의 일환으로 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었음.

References

- (1) Liu, Y., and Tan, L., 2019, "Spatial-Temporal Evolution of Tip Leakage Vortex in a Mixed-Flow Pump With Tip Clearance," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 141, No. 8, pp. 081302.
- (2) Holl, J. W., and Wislicenus, G. F., 1961, "Scale Effects on Cavitation," *Journal of Basic Engineering*, Vol. 83, No. 3, pp. 385-395.
- (3) Franc, J.-P., and Pellone, C., 2007, "Analysis of Thermal Effects in a Cavitating Inducer Using Rayleigh Equation," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 129, No. 8, pp. 974-983.
- (4) Yoshida, Y., Sasao, Y., Okita, K., Hasegawa, S., Shimagaki, M., and Ikohagi, T., 2007, "Influence of Thermodynamic Effect on Synchronous Rotating Cavitation," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 129, No. 7, pp. 871-876.
- (5) McCormick, B., 1962, "On cavitation produced by a vortex trailing from a lifting surface," *Journal of Basic Engineering*, Vol. 84, No. 3, pp. 369-378.
- (6) Hsu, C., 1991, "Studies of scaling of tip vortex cavitation inception on marine lifting surfaces," *Journal of Fluids Engineering*, 113(3), pp. 504-508.
- (7) Franc, J.-P., Rebattet, C., and Coulon, A., 2004, "An experimental investigation of thermal effects in a cavitating inducer," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 126, No. 5, pp. 716-723.
- (8) Yoshida, Y., Kikuta, K., Hasegawa, S., Shimagaki, M., and Tokumasu, T., 2007, "Thermodynamic effect on a cavitating inducer in liquid nitrogen," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 129, No. 3, pp. 273-278.
- (9) Kim, J., and Song, S. J., 2016, "Measurement of temperature effects on cavitation in a turbopump inducer," *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 138, No. 1, pp. 011304.
- (10) Boulon, O., Callenaere, M., Franc, J. -P., and Michel, J. -M., 1999, "An experimental insight into the effect of confinement on tip vortex cavitation of an elliptical hydrofoil," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 390, pp. 1-23.