

인듀서의 크기가 터보펌프의 흡입성능 상사에 미치는 영향에 관한 연구

강병윤* · 강신형**

Put Effect of the inducer scale on the suction performance similarity of a turbopump

Byung Yun Kang[†], Shin-Hyoung Kang^{**}

Key Words : Turbopump(터보펌프), Inducer(인듀서), NPSH(유효흡입양정), Similarity(상사성)

ABSTRACT

An inducer is forward-attached to an impeller to improve the suction performance. This paper described the experimental and numerical investigations on the concept of NPSH similarity about the inducer scale. As Reynolds number decreased for the same scale inducer, the hydraulic performance is slightly reduced because of the viscosity. The suction performance similarity is in good agreement. For different scale inducers, the NPSH similarity did not follow the conventional rule which is proportional to the square of the inducer diameter. A cavity of two times scale inducer grows faster under cavitation inception, and the head is more drop as the fluid passes blades. Because of the simplified cavitation model and vapor pressure, the NPSH similarity dose not have an accuracy. This study suggested an empirical formula for the NPSH similarity.

1. 서 론

액체로켓은 액체연료와 산화제를 연소시켜 얻은 추력에 의하여 비행을 한다. 액체연료와 산화제는 고압의 상태로 연소실에 공급되어야 하는데, 이를 위한 방법은 크게 두 가지가 있다. 고압의 연료를 탱크에 직접 저장하는 가압식과 탱크에 일반적인 연료를 터보펌프를 이용하여 가압시키는 터보펌프 방식이다. 가압식은 구조가 간단한 장점이 있지만, 고압의 상태를 항상 유지해야하기 때문에 탱크의 무게가 증가하게 된다. 하지만 터보펌프 방식은 탱크의 경량화가 가능하기 때문에 현재 많이 쓰이는 방식이다. 터보펌프 방식은 고회전으로 구동되기 때문에 회전차(Impeller) 입구에서 공동화 현상이 발생하게 되고, 이를 방지하기 위하여 회전차의 앞쪽에 인듀서(Inducer)를 장착한다.⁽¹⁾ 인듀서 입구에서 공동화 현상(Cavitation)이 진행되더라도 일반적으로 큰 현절

비(Solidity)를 갖는 인듀서로 인하여 점진적인 압력 상승이 일어나 발생 기포의 소멸을 통해 회전차의 높은 흡입성능(Suction performance)을 유지할 수 있다. 인듀서 역시 유체기계의 한 종류이기 때문에 유량, 양정 및 동력의 상사관계가 유지된다. 상사법칙을 이용하면 유체의 종류, 회전속도, 또는 크기를 바꾸었을 때 기하학적으로 상사한 임의의 인듀서에 대하여 예측이 가능하다. 유효흡입양정(Net positive suction head)에 대한 상사는 일반적으로 양정의 상사와 같은 회전수의 제곱과 직경의 제곱에 비례한다고 알려져 있다. 하지만 최근의 연구들을 보면 크기가 변하면 틈새(Tip clearance)가 변하게 되고, 회전수가 변하면 인듀서 입구의 속도가 변하기 때문에 유효흡입 양정의 상사가 불일치한다는 연구가 보고되고 있다.⁽²⁾ Yedidiah는 원심펌프에 대한 경험식을 근거로 회전수의 1.424배에 비례하는 상사식을 제시하였고⁽³⁾, 홍순삼 등은 인듀서의 흡입성능 상사는 팁 속도의

* 서울대학교 기계항공공학부 대학원(Mechanical & Aerospace Engineering, Graduate School, Seoul National University)

** 서울대학교 기계항공공학부(Mechanical & Aerospace Engineering, Seoul National University)

† 교신저자(Corresponding Author), E-mail : acekby@turbo.snu.ac.kr

Table 1 Parameters of a turbopump

Inducer	Diameter	116.6 mm
	Blade Number	2
	Tip Clearance	1.68 %
Impeller	Diameter	169.8 mm
	Blade Number	5
	Inlet Blade Angle	71.5°
	Outlet Blade Angle	68.7°

2. 연구방법

2.1. 시험방법

Fig. 1은 전체 시험장치의 도식도이다. 용량 2500 L의 탱크 아랫부분에서 배출된 물이 인듀서와 회전차를 지나 윗부분으로 들어가는 폐순환(Closed loop) 구조이다. 유량은 상부 배관에 설치된 전자기 방식의 유량계를 통해 측정하며, 유량 조절은 게이트 밸브를 이용하였다. 인듀서는 인버터 방식의 모터로 제어되며, 축 동력 계산은 토크미터를 이용하여 측정하였다. 입구 정압 측정에는 정압를 사용하였고, 인듀서 입구와 출구의 압력차는 차압계를 이용하여 측정하였다. 흡입성능 시험에는 진공펌프를 이용하여 입구압력을 낮추었고, 캐비테이션 유동가시화를 위해 투명 아크릴로 제작한 케이싱을 사용하였고, 스트로보스코프와 고속 카메라를 이용해 촬영을 하였다. Fig. 2는 본 연구에서 사용된 인듀서와 회전차를 나타낸 사진이고, 이에 대한 제원은 Table 1과 같다.

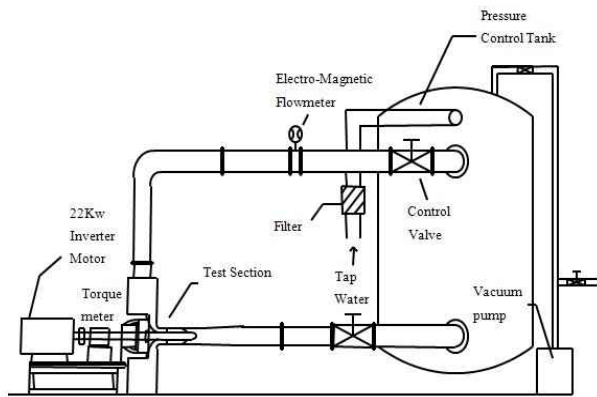


Fig. 1 Schematic of turbopump test rig



Fig. 2 Test inducer and impeller

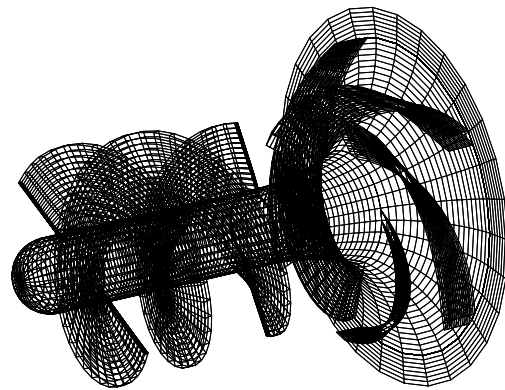


Fig. 3 Computational domain and grid

0.5승에 비례한다고 보고하였다.⁽⁴⁾ 이와 같이 회전수에 대한 연구는 진행되었지만 크기에 대한 연구는 명확하게 규정되어 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 인듀서 직경에 대한 유효흡입양정의 상사성을 평가해 보고자 한다. 먼저 유체의 기본 특성이 되는 레이놀즈 수(Reynolds number)에 대한 영향을 살펴보고, 같은 레이놀즈 수를 갖는 인듀서에서 직경 변화에 대한 흡입성능 상사의 영향을 평가하였다. 시험과 유동해석을 수행하여 결과를 비교해 보았고, 유동해석을 통한 캐비테이션의 시작점(Inception)과 임계점(NPSHr, 3% Head drop point)의 특성을 파악하여 인듀서 크기에 대한 상사를 분석하였다.

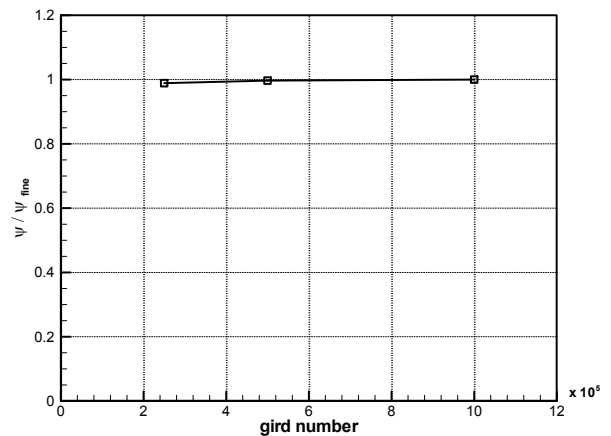


Fig. 4 Grid dependency test: Comparison of pressure rise coefficient at the design point

Table 1에 나타난 제원이 기본 터보펌프이고, 이에 대하여 두 배 확대한 형상으로 크기에 대한 영향을 평가 하였다. 두 배가 커진 인두서의 직경은 실제로 많이 사용되지 않는 크기이지만 각각의 크기를 다음과 같이 설정한 이유는 두 경우에 대하여 시험 데이터가 확보되었기 때문에 시험 값과의 비교를 위하여 다음과 같이 선정하였다.

2.2. 수치해석 방법

수치해석을 위한 계산 격자는 TurboGrid 11.0과 ICEM 11.0을 이용하여 정렬 격자로 생성하였다. 흡입성능 계산은 오랜 시간이 걸리는 관계로 인두서와 회전차의 날개 각각 1 개씩을 적용하여 계산을 하였다. 총 3가지에 대한 격자를 생성하였고, 격자 검증을 통하여 총 500,000개의 격자를 사용 하였다. Fig. 3은 이에 대한 격자를 나타낸 그림이고, Fig 4는 터보펌프의 양정을 기준으로 격자 검증을 나타낸 그래프 이다. 상용 프로그램인 ANSYS CFX 11.0을 이용하여 유동해석을 수행하였다. 경계 조건으로 입구에는 전압을 적용하였고, 출구에는 질량유량을 사용하여 압력 상승에 따른 성능을 평가하였다. 다른 좌표계의 사용으로 경계면의 인터페이스 (Interface)는 프로즌로터(Frozen-rotor) 기법으로 가정하여 계산하였다. $k - \epsilon$ 난류모델을 채택하였으며, 벽에서의 전체적인 $y+$ 는 10~50을 유지하였다. 캐비테이션 모델로는 증기방울의 생성과 붕괴에 대한 거동을 표현한 Rayleigh-Plesset Equation 모델을 적용하였다.

3. 레이놀즈 수 변화에 대한 흡입성능 특성

레이놀즈 수에 대한 영향을 알아보기 위하여 동일한 크기의 인두서를 기준으로 흡입성능을 평가 하였다. Fig. 5는 흡입성능과 양정을 무차원 하여 나타낸 성능곡선이고, 양정계수와 흡입성능계수는 식(1)과 식(2)와 같이 정의 하였다.

$$\psi = \frac{gH}{U_t^2} \tag{1}$$

$$\tau = \frac{gNPSH}{U_t^2} \tag{2}$$

흡입성능계수와 양정계수 모두 인두서 팁 속도로 무차원 하였고, 양정계수의 양정은 정양정을 사용하였다. 두 경우 모두 같은 경향을 보이는 것을 알 수 있었다. 캐비테이션의 영향이 없는 경우, 즉 높은 입구압력에 해당하는 경우 레이놀즈 수가 감소할수록 양정은 최대 1.6% 정도 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 점성에 의한 영향으로 인두서 날개를 지나 오면서 표면 마찰에 의한 손실이 증가하는 것으로 판단되었

다. Fig. 6은 레이놀즈 수에 대한 NPSHr값을 무차원한 결과를 나타낸 그래프이다. 레이놀즈 수가 변하더라도 전체적인 흡입성능은 변화가 없는 것으로 나타났다. 결론적으로 레이놀즈 수에 대한 흡입성능의 경우에는 일반적으로 알려진 상사법칙이 잘 맞음을 확인하였다.

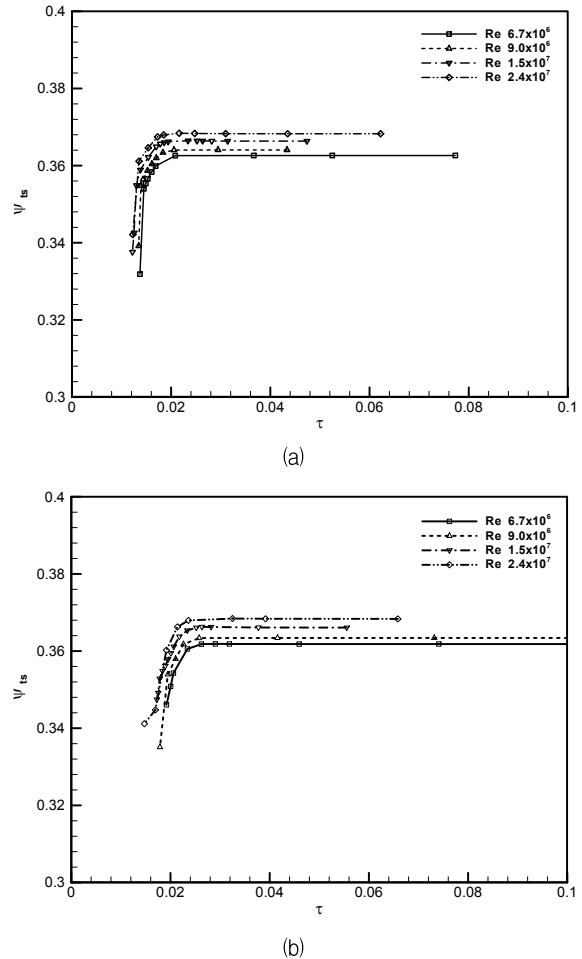


Fig. 5 Comparison of the non dimensional NPSH performance curve : (a) x 1 Scale and (b) x 2 Scale

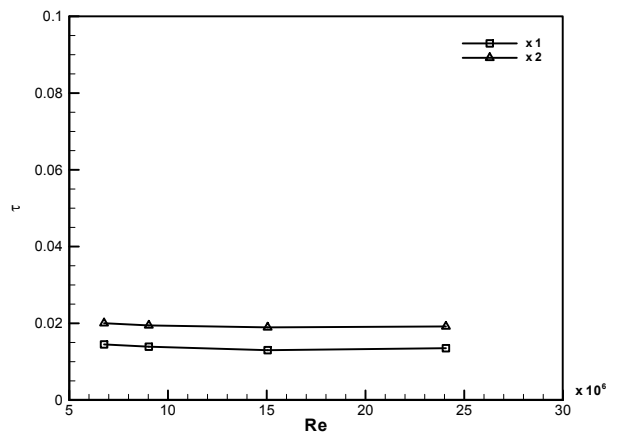


Fig. 6 Non dimensional 3% drop NPSH in respect of Reynolds number

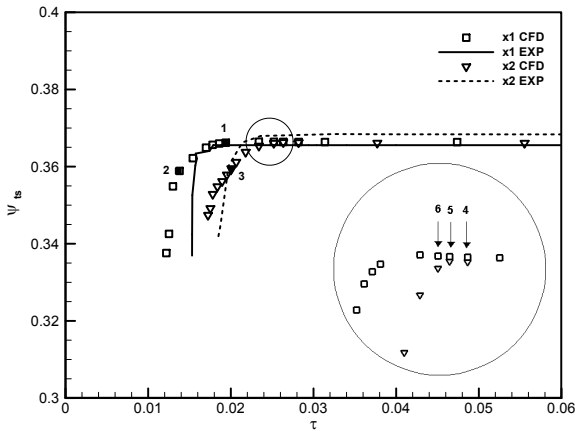


Fig. 7 Non dimensional NPSH performance curve in respect of inducer scale

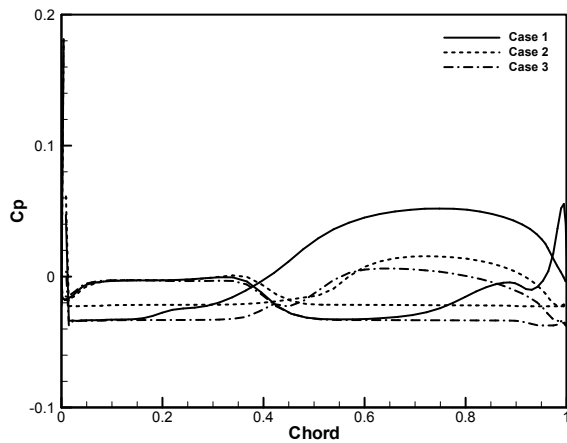


Fig. 8 Comparison of the static pressure coefficient at inducer

4. 크기 변화에 대한 흡입성능 특성

인듀서 크기에 대한 흡입성능의 특성을 알아 보고자 기존의 인듀서 크기의 2배에 해당하는 인듀서의 흡입성능 결과와 비교하였다. 유량계수의 상사법칙을 이용하여 설계 유량을 설정하였는데 이때 점성에 의한 효과를 제거하기 위하여 같은 레이놀즈 수에 해당하는 회전수를 선택하였다. Fig. 7은 크기가 다른 인듀서에 대한 무차원 흡입성능 곡선을 나타낸 그래프이다. 두 경우 모두 시험 값에 비하여 유동해석의 NPSH 값이 더 작게 예측되었다. 두 인듀서에 대한 무차원된 NPSHr 값이 시험의 경우 25.66% 차이가 발생하였고, 유동해석에 의한 결과는 31.85% 차이가 나는 것으로 나타났다. 두 결과 값이 일반적으로 크기의 제곱에 비례하는 상사식과는 큰 차이를 보였기 때문에 유동해석을 통하여 이에 대한 특성을 분석해 보았다. 같은 입구 압력에 대한 경우와 같은 NPSHr에 해당하는 경우를 선택하였고, 이를 1, 2, 그리고 3이라고 명하였다. Fig. 8은 각 경우에 대한 압력회복계수를

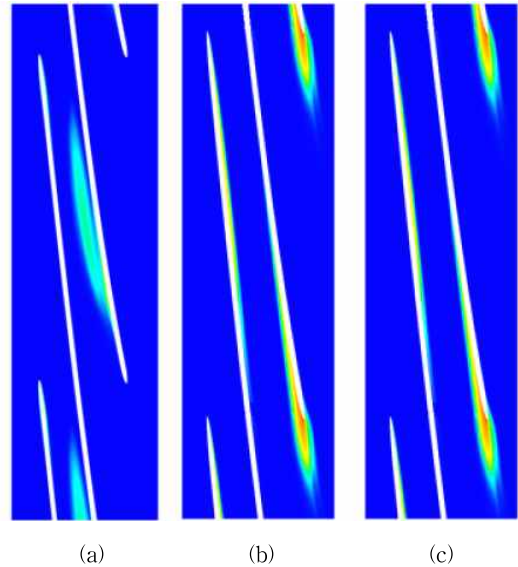


Fig. 9 Comparison of cavity at inducer blade tip :
(a) Case 1 (b) Case 2 (c) Case 3

나타낸 그래프이다. 압력회복계수는 식(3)와 같이 정의하였다. Fig. 9는 인듀서 날개에서 발생하는 캐비테이션의 형상을 나타낸 그림이다.

$$C_p = \frac{P - P_{in}}{\frac{1}{2} \rho U_t^2} \quad (3)$$

위의 두 결과를 보면 인듀서 입구에서는 같은 입구압력에 대한 결과(1&2)들이 같은 경향을 보이지만, 인듀서 날개를 지나면서 같은 양정에 해당하는 경우(2&3)끼리 일치하는 결과를 알 수 있었다. 이는 인듀서의 앞전에서는 크기와 상관 없이 입구 압력에 의하여 성능이 결정되지만 날개를 지나도록 크기에 대한 영향으로 양정이 더 빨리 감소하는 것을 알 수 있었다. 캐비테이션의 시작점(Inception)에서의 특성을 알아보기 위하여 캐비테이션이 발생하기 시작하는 지점의 3가지 경우를 선택하였고, 이를 4, 5, 그리고 6으로 명하였다. Fig. 10은 캐비테이션 시작점에서 기포의 형상을 각 경우에 대하여 나타낸 그림이다. 4~6으로 지나오면서 인듀서의 크기가 큰 경우가 기포가 더 빨리 커지고 이로 인하여 양정 하락이 더 먼저 발생하는 것을 알 수 있었다. Fig. 11은 위의 경우에 대한 압력회복계수를 나타낸 그래프이다. 기포 형상의 결과에서 보았듯이 크기가 한 배인 인듀서는 시작점에서 압력회복계수가 큰 차이 없이 동일하게 나타났지만, 두 배인 인듀서는 입구 압력이 낮아질수록 압력회복계수가 감소하는 것을 알 수 있다. 결론적으로 크기가 큰 인듀서가 캐비테이션 시작점에서 기포가 더 빠르게 성장을 하고 이로 인하여

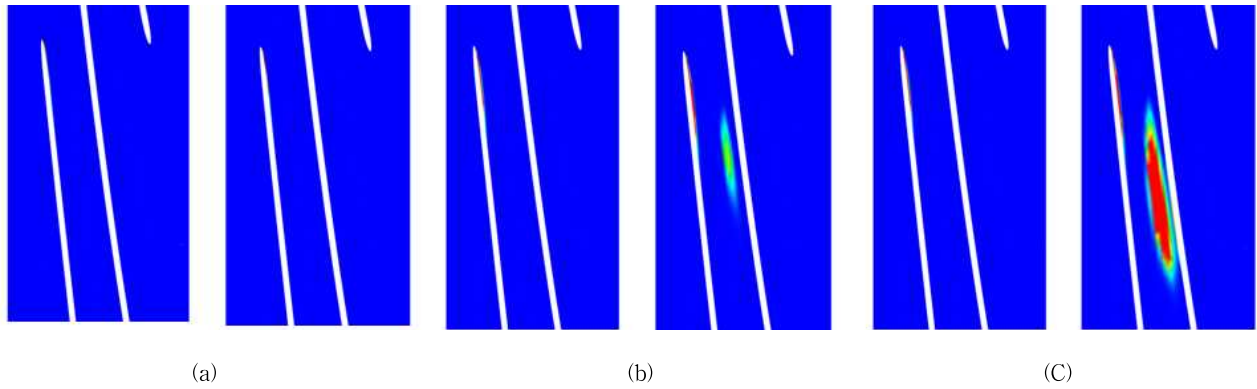
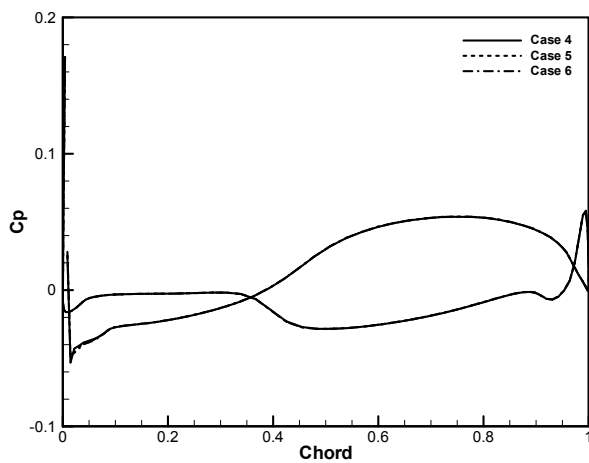
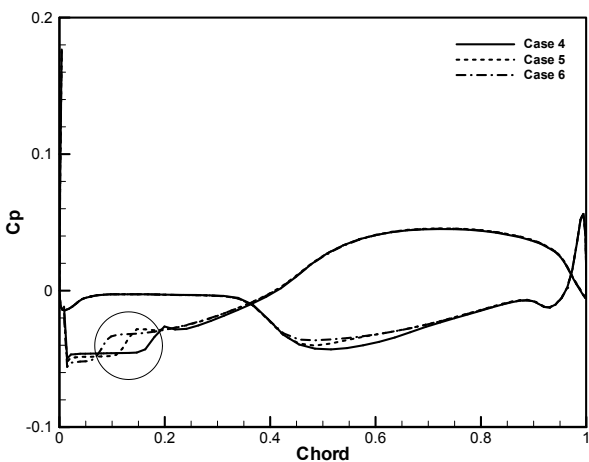


Fig. 10 Comparison of cavity at inducer blade tip under cavitation inception :

(a) x 1 and x 2 :Case 4, (b) x 1 and x 2 :Case 5, and (C) x 1 and x 2 :Case 6



(a)



(b)

Fig. 11 Comparison of the static pressure coefficient at inducer under inception : (a) x 1 Scale and (b) x 2 Scale

양정 하락이 더 급격하게 발생하는 것으로 판단되었다. 양정 하락이 지속 될수록 같은 입구 압력에 해당하는 경우보다 같

은 양정을 갖는 경우에서 유체의 성능 특성이 일치하는 것을 알 수 있었다. 이러한 상사의 차이가 발생하는 원인을 파악해보면 첫 번째로는 유동해석에서 사용되는 캐비테이션 모델을 들 수 있다. 상용프로그램인 ANSYS CFX11.0에서는 위에서 언급한 것처럼 Rayleigh-Plesset Equation 모델을 사용하고 있다. 이는 식(4)와 같이 정의된다.

$$R_B \frac{d^2 R_B}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{R_B}{dt} \right)^2 + \frac{2\sigma}{R_B} = \frac{P_v - P}{\rho_l} \quad (4)$$

$$\frac{3}{2} \left(\frac{R_B}{dt} \right)^2 = \frac{P_v - P}{\rho_l} \quad (5)$$

$$\frac{dR_B}{dt} = \sqrt{\frac{2}{3} \frac{|P_v - P|}{\rho_l}} \quad (6)$$

이는 비선형 방정식이기 때문에 유동해석 프로그램에서는 식을 선형화 된 식으로 나타내기 위하여 첫 번째 항을 소거하고, 표면장력에 의한 거동을 무시한다는 가정을 하여 세 번째 항도 소거를 한다. 이렇게 된 식(5)를 정리하면 식(6)과 같이 나타난다. 이와 같이 간략화 된 캐비테이션 모델 식을 사용하기 때문에 유동해석의 경우 서로 다른 상사를 보이는 것으로 판단하였다. 흡입성능상사 결과로도 시험에서의 결과 차이보다 유동해석에서의 결과차이가 더 큰 것으로 나타났다. 두 번째 이유는 증기압의 상사 불일치이다. 일반적으로 흡입성능의 상사는 회전수의 체공과 직경의 체공에 비례한다고 알려져 있다. 이는 식(7)으로 나타 낼 수 있는데, 이를 바꾸어 서술하면 식(9)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{NPSH_1}{N_1^2 D_1^2} = \frac{NPSH_2}{N_2^2 D_2^2} \quad (7)$$

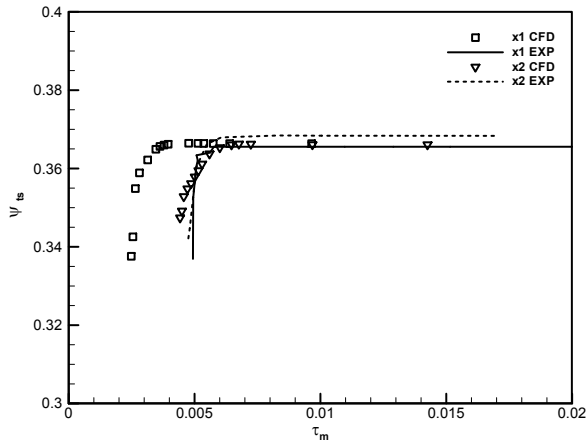


Fig. 12 Modified non dimensional NPSH performance curve in respect of inducer scale

$$\frac{P_{t,1} - P_v}{\rho g N_1^2 D_1^2} = \frac{P_{t,2} - P_v}{\rho g N_2^2 D_2^2} \quad (8)$$

$$\frac{P_{t,1} - P_v}{P_{t,2} - P_v} = \left(\frac{N_1 D_1}{N_2 D_2} \right)^2 \quad (9)$$

$$\tau_m = \frac{g NPSH}{U_t^{2.364}} \quad (10)$$

위의 식을 살펴보면 증기압을 제외한 나머지 항들은 각기 다른 경우에 대하여 다른 값을 갖지만 증기압은 항상 같은 값을 갖게 된다. 그렇기 때문에 유체역학적으로 상사법칙이 달라질 수 있다고 판단된다. 일반적으로 압력에 대한 상사는 회전수와 크기의 제곱에 비례하다고 알려져 있고, 이는 여러 경우에서 상사성이 일치한다는 결과가 보고되었다. 하지만 흡입성능의 경우 상사성이 다르기 때문에 증기압이 달라진 상사에 원인이 될 수 있다고 볼 수 있다. 본 연구에 사용된 인두서에 대하여 상사법칙이 가능한 지수를 구하였을 때 지수가 2.364인 경우 무차원 흡입성능 곡선이 일치하는 것으로 나타났다. 위에서 설명한바 유동해석보다 시험을 통한 결과 값이 더 적합하다고 판단하였기 때문에 시험 값을 기준으로 상사 지수를 구하였다. 그래서 여전히 유동해석에 의한 상사법칙은 일치하지 않는 값을 나타내고 있다. 수정된 흡입양정계수를 식(10)에 타내었고, Fig. 12는 이에 대한 흡입성능 곡선을 나타낸 그래프이다.

5. 결 론

터보펌프의 흡입성능 상사성을 파악하기 위해 인두서의 크기가 다른 터보펌프를 대상으로 시험과 유동해석을 수행하였다. 흡입성능을 무차원화 하여 나타난 결과를 분석하여 얻은

결론은 다음과 같다.

- 1) 크기가 같은 인두서의 경우 레이놀즈 수 변화에 따른 흡입성능 상사는 일치하는 것으로 나타났다. 하지만 점성에 의한 영향으로 터보펌프의 양정은 최대 1.6% 차이가 나는 것으로 나타났다.
- 2) 같은 레이놀즈 수를 갖고, 크기가 다른 인두서의 경우에 대하여 무차원화 된 NPSHr은 시험의 결과 25.66%, 유동해석의 결과는 31.85%의 차이를 보였다.
- 3) 캐비테이션 특성을 살펴 본 결과 시작점(Inception)에서 크기가 큰 인두서의 경우 기포가 더 빠르게 생성되었고, 이로 인하여 양정이 급격하게 떨어지는 것을 확인하였다.
- 4) 유동해석의 결과가 더 큰 편차를 보이는 것은 캐비테이션 모델을 적용하는데 표면장력의 효과를 무시한다는 가정을 하였고, 비선형 방정식을 선형 방정식으로 바꾸는 데서 오는 부정확성을 들 수 있다.
- 5) 본 연구에 사용된 터보펌프 인두서에 대해서는 2.364승에 비례하는 흡입성능 상사식을 얻을 수 있었다.

후 기

본 연구는 초공동 수중운동체 통합연구의 일환으로 진행되었으며 연구에 도움을 주신 국방과학기술원(ADD) 분들께 감사드립니다.

References

- (1) 최창호, 2010, "터보펌프용 인두서에 대한 캐비테이션 유동해석," 유체기계저널 제13권 제3호 pp. 49~53.
- (2) Stepanoff, A. J., 1957, "Centrifugal and Axial Flow Pump," John Wiley&Sons, pp. 248~250.
- (3) Yedidiah, S., 1996, "Centrifugal Pump User's Guidebook," Chapman&Hill, pp. 52~55.
- (4) 홍순삼, 2004, "현열비가 터보펌프 인두서의 성능에 미치는 영향," 대한기계학회논문집 B권 제28권 4호 pp. 382~388.