

현절비가 터보펌프 인듀서의 성능에 미치는 영향

홍순삼* · 최창호* · 김진한*

(2003년 5월 30일 접수, 2004년 2월 18일 심사완료)

Effect of Solidity on the Performance of Turbopump Inducer

Soon-Sam Hong, Chang-Ho Choi and Jinhan Kim

Key Words: Turbopump(터보펌프), Inducer(인듀서), Solidity(현절비), Performance(성능)

Abstract

The hydraulic and suction performance of an inducer varies sensitively with the inducer geometry and this paper deals with solidity as the inducer geometry parameter. The typical performance characteristics of a basic inducer was investigated and tests with another three inducers of which the solidity is different from each other were performed, so the effect of solidity on the inducer performance was experimentally investigated. For a fixed flow coefficient, required NPSH of the inducer did not follow the conventional similarity rule, so this paper suggested another empirical formula. The hydraulic and suction performance was measured at four cases of the tip solidity ranged from 1.32 to 2.76. As long as the tip solidity had the value above 1.84, the hydraulic and suction performance of the inducer increased with decrease in the tip solidity. With further decrease in the tip solidity up to 1.32, however, inducer head decreased and the suction performance dropped sharply.

기호설명

- A_1 : 입구 유로 단면적
- C_p : 압력계수, $(p - p_{t,0}) / (0.5\rho U_{1t}^2)$
- H : 양정
- Q : 유량
- $p_{t,0}$: 인듀서 상류의 전압력
- U_{1t} : 날개 입구 팁속도
- ϕ : 유량계수, $Q / (A_1 U_{1t})$

- ψ : 양정계수, $H / (U_{1t}^2 / 2g)$
- ν_P : 동력계수, $BHP / (0.5\rho U_{1t}^3 A_1)$

1. 서론

액체로켓의 터보펌프는 액체 연료와 산화제를 연소실로 공급하는 역할을 하며 높은 양정과 큰 유량에서 작동되는 것이 특징이다. 터보펌프의 임펠러는 20,000~50,000 rpm의 높은 회전수의 영향으로 캐비테이션이 쉽게 일어나게 된다. 그래서 임펠러 전방에 인듀서를 장착하여 정압을 상승시킴으로써 이 캐비테이션을 억제시킨다. 인듀서에서는 현절비 (solidity)가 크고 팁와류, 통로와류 등의 점성효과가 큰 복잡한 난류유동으로 인하여 수치해석이 쉽지 않고 또한 캐비테이션에 대한 예측이 어려우므로 주로 실험적 연구가 이루어져 왔다.

* 책임저자, 회원, 한국항공우주연구원 터보펌프 개발그룹

E-mail : sshong@kari.re.kr

TEL : (042)860-2739 FAX : (042)860-2626

* 회원, 한국항공우주연구원 터보펌프개발그룹

보통 인듀서는 팁와류와 날개를 따라 어느 정도 캐비테이션이 발생한 상태에서 운전하게 되며 입구에서 발생한 기포가 출구로 전파되는 것을 방지하기 위하여 큰 현절비를 가진다. 현절비가 인듀서의 흡입성능에 미치는 영향에 대한 기존의 연구 결과⁽¹⁾는 있지만 흡입성능은 인듀서의 형상에 대하여 매우 민감하기 때문에 형상이 다르면 또 다른 결과를 보일 수 있다. 여기서는 본 연구실에서 개발 중인 인듀서에 대하여 현절비의 영향을 실험을 통하여 살펴보고자 한다. 먼저 기본형 인듀서에 대한 성능 특성을 고찰한 후에 현절비가 변할 경우에 성능이 어떻게 변하는지를 살펴본다.

2. 실험장치

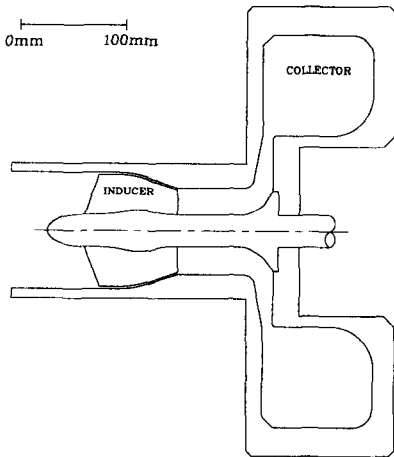
인듀서 성능시험기는 폐쇄형으로서 0.9톤 용량의 탱크에 저장된 물을 사용하며, 진공 펌프 및 압축 공기를 이용하여 탱크내 압력을 조절함으로써 배관 내부의 압력이 조절된다. 탱크 상류에 수냉식 열교환기를 설치하여 실험하는 동안에 온도상승 효과를 최소화하였다. 양정이 작은 인듀서를 단독 실험할 때는 관로손실에 의하여 운용 가능한 유량에 제약이 있으므로 부스터 펌프를 콜렉터 하류에 설치하여 최대 유량을 증가시켰다. 인듀서는 전기모터로 구동되는데 모터의 용량은 37 kW이며 인버터에 의하여 10,000 rpm까지 회전수가 연속적으로 조절된다.

토크측정에는 20 N·m 용량의 토크미터를 사용하였으며 유량측정에는 270 m³/hr 용량의 터빈 유량계를 사용하였다. 양정 및 정압 측정의 기준은 인듀서 상류의 정체실 압력으로 하였는데 정체실의 직경은 400 mm이다. 양정을 도출하는 데 사용되는 출구압력은 콜렉터에서 반경이 137.5 mm 되는 지점에서 측정하였다. 이 지점에서는 동압성분이 매우 작을 것으로 판단된다. 벌류트 대신에 축대칭 형상의 콜렉터를 사용한 것은, 인듀서 또는 임펠리의 성능 및 유동을 측정할 때 유량에 따라 원주방향으로 변화하는 하류의 영향을 제거하기 위함이었다. 정체실 및 콜렉터의 압력은 각각 90도 간격으로 4 곳의 정압탭을 묶어서 평균되도록 하였다. 실험장치에 대해서는 손동기 등⁽²⁾에 상세히 설명되어 있다. 시험부의 개략도를 Fig. 1(a)에 나타내었다. 인듀서 하류에서 콜렉터까지는 급격한 단면적 변화에 따른 손실이 작도록 설계하였다. 회전축에 조립된 인듀서 A형의 사진을 Fig. 1(b)에 나타내었는데 아직 인듀서 케이싱을 조립하지 않은 상태의 사진이다.

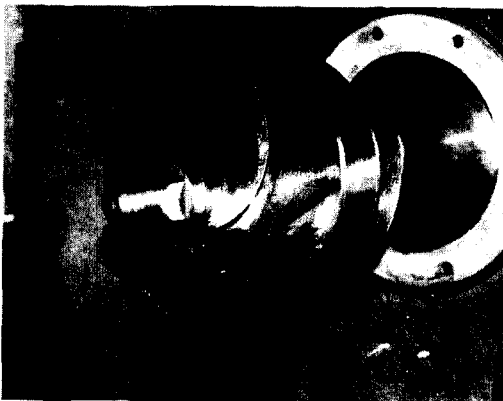
실험에 사용된 인듀서는 A, B-I, B-II, B-III형의 네 가지이다. 기본형태는 A형이며 나머지 세 가지는 A형 인듀서를 후방에서부터 잘라낸 형태를 취하며 이로써 현절비를 변화시킨 것뿐이다. 현절비 s 는 다음과 같이 정의된다.

$$s = l / (\pi D / N_b)$$

여기서 l 은 인듀서 날개 길이, D 는 직경, N_b 는 날개수이다. 네 모델 모두 입구 팁직경은

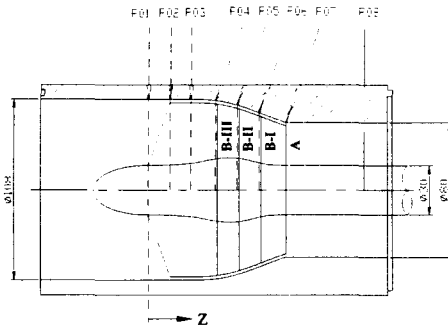


(a) Test section of inducer A



(b) Shape of inducer A

Fig. 1 Test section and shape of inducer A



(a) Inducers and pressure taps



Inducer A Inducer B-I Inducer B-II Inducer B-III

(b) Shape of four inducers tested

Fig. 2 Pressure taps and four inducers tested

106mm, 날개수는 2개, 깃 앞전의 후퇴각은 20°, 깃 앞전의 팁날개각은 7.8°, 깃 앞전의 평균 날개각은 12.1°, 인듀서팁과 케이싱간의 간격은 1mm이다. Fig. 2에 네 인듀서의 모양과 케이싱 압력 측정 위치를 나타냈으며 Table 1에는 네 인듀서의 현절비를 비교하여 나타내었다. Table 2에는 케이싱 압력 측정 위치를 나타내었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 인듀서의 성능

인듀서 A형에서 측정된 성능을 Fig. 3(a), (b), (c)에 나타내었는데 세 가지 회전수에 대하여 무차원 형식으로 표시하였다. 이 성능은 인듀서에서 캐비테이션이 발생하지 않은 상태에서 측정된 것이다. 캐비테이션이 발생하지 않도록 하기 위하여 외부에서 압력을 가하였는데 인듀서 입구압력이 약 300 kPa 절대압이 되도록 하였다. 세 그림을 보면, 낮은 유량 영역을 제외한 영역에서는

Table 1 Geometry of test inducers

Inducer type	A	B-I	B-II	B-III
Axial length of blade on the hub (mm)	88.0	72.0	58.0	44.0
Tip solidity	2.76	2.30	1.84	1.32

Table 2 Location of pressure taps

Tap	P01	P02	P03	P04	P05	P06	P07	P08
z (mm)	0.0	13.8	27.0	43.0	56.7	70.7	88.0	138.0

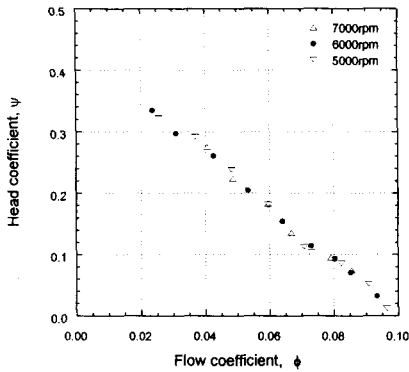
시험된 회전수 범위에서 성능의 회전수에 대한 상사가 잘 이루어지는 것을 알 수 있다. 양정계수 Ψ 와 유량계수 ϕ 의 관계를 나타낸 Fig. 3(a)를 보면 양정계수는 대체적으로 유량계수에 대하여 직선적으로 감소하는 경향을 보인다. 한 가지 특이한 것은 $\phi=0.07$ 근처에서 직선이 한 번 꺾인다는 것이다. 하지만 아직 그 이유는 명확하지 않은 상태이다.

소요동력과 유량의 관계를 나타낸 Fig. 3(b)를 보면 동력은, 유량에 대하여 선형적으로 감소하는 것이 관찰된다. Fig. 3(c)에 효율과 유량계수의 관계를 나타냈는데 유량계수 $\phi=0.07$ 근처에서 발생하는 골은 양정곡선이 이 유량에서 한 번 꺾이기 때문이다.

여러 가지 회전수에서 측정된 흡입성능을 Fig. 4에 나타내었는데 모두 유량계수 $\phi=0.073$ 에서 측정되었다. Fig. 5에는 위 곡선을 양정계수와 캐비테이션수로 무차원화하여 표시하였는데 회전수에 대한 상사가 잘 이루어지지 않고 있다. 여기서 캐비테이션수 σ 는 회전수의 제곱에 비례하는 양으로서 다음과 같이 정의된다.

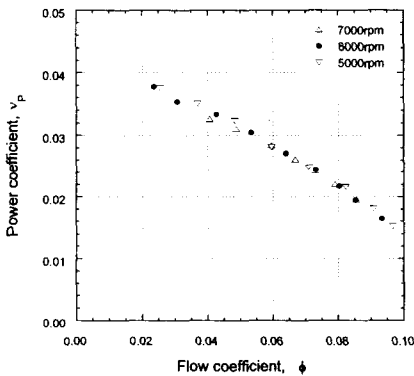
$$\sigma = \frac{NPSH}{U_{ti}^2 / 2g} \quad (1)$$

물론 캐비테이션이 없을 때의 양정계수는 Fig. 5에서 약 $\Psi=0.11$ 로서 상사가 잘 이루어진다. 보통 흡입성능에서도 회전수에 대한 상사가 이루어지는가에 대해서는 상당한 이견들⁽³⁻⁴⁾이 있다. 일반적인 상사이론에 따르면 흡입성능에서 필요 NPSH에 대하여 다음의 식이 성립해야한다.



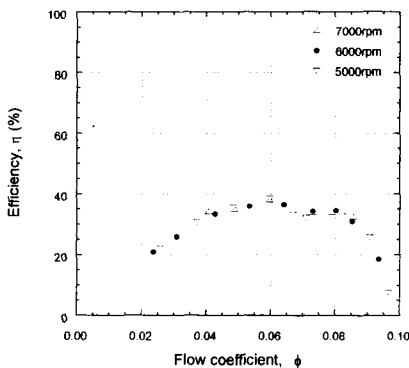
Non-dimensional plot of head vs flow rate at KOPI-A, July 16, 2002

(a) Head



Non-dimensional plot of power vs flow rate at KOPI-A, July 16, 2002

(b) Power



Non-dimensional plot of efficiency vs flow rate at KOPI-A, July 16, 2002

(c) Efficiency

Fig. 3 Performance of inducer A

$$\frac{NPSH_{re,p}}{NPSH_{re,m}} = \left(\frac{N_p}{N_m}\right)^2 \quad (2)$$

여기서 하첨자 p는 원형, m은 모델을 의미한다. 그런데 Yedidiah⁽³⁾는 많은 시험 데이터로부터 원심펌프에 대하여 아래의 경험식을 제안하였다.

$$\frac{NPSH_{re,p}}{NPSH_{re,m}} = \left(\frac{N_p}{N_m}\right)^{1.424} \quad (3)$$

회전수에 대한 지수가 2가 아니고 1.424인 점이 식 (2)와 다르다. 본 실험결과에 대하여 지수를 몇 가지로 바꾸어가며 무차원 곡선을 그려보았는데 지수가 0.5일 때 곡선들이 가장 잘 일치하는 것을 알 수 있었다 (Fig. 6). 여기서 수정된 캐비테이션수 σ' 는 다음과 같이 정의된다.

$$\sigma' = \frac{NPSH}{U_{1t}^{0.5}/2g} \quad (4)$$

Yedidiah⁽³⁾의 경험식은 원심펌프에 대한 것이었는데, 본 연구의 결과 인듀서에서는 다른 식을 사용해야 됨을 알 수 있다.

3.2 인듀서 성능의 비교

인듀서 A, B-I, B-II, B-III형에 대하여 6000rpm에서 측정된 성능을 비교하여 Fig. 7(a), (b), (c)에 나타내었다. 먼저 세 가지 인듀서 A, B-I, B-II를 비교해 볼 때 양정은 A형이 가장 작고 B-I, B-II형이 적은 양이지만 더 컸다. 하지만 현절비가 더욱 작아진 B-III형에서는 양정이 감소하여 가장 작은 값을 보였다. 축동력은 세 가지 인듀서 A, B-I, B-II형에서는 비슷한 분포를 보이는데 B-III형에서는 큰 폭으로 감소하고 있다. 효율은 A형이 가장 작고 B-I, B-II, B-III형이 더 컸다. 즉 B-III형을 제외하면 현절비가 클수록 성능이 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 본 연구에서 실험된 인듀서의 단면을 나타낸 Fig. 2를 보면 현절비가 클 때 인듀서 후단에서 유로면적이 감소하게 되고 따라서 유체의 가속에 의한 손실이 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 하지만 B-III형의 결과를 볼 때 현절비가 지나치게 작아지면 유체에 가해주는 일이 작아지기 때문에 성능이 감소하는 것을 알 수 있다. 한편, $\phi=0.07$ 근처에서 직선이

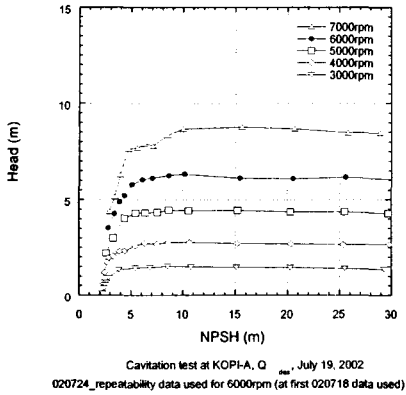
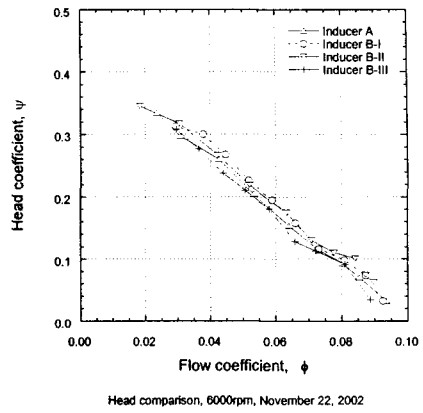


Fig. 4 Cavitation performance of inducer A at $\phi=0.073$



(a) Head

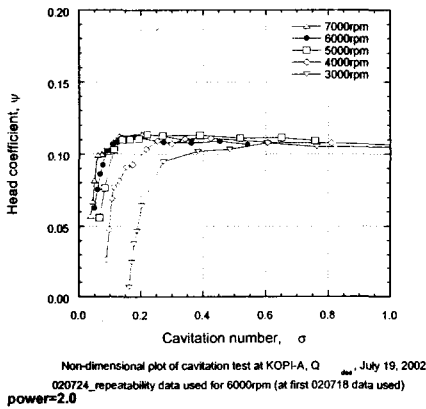
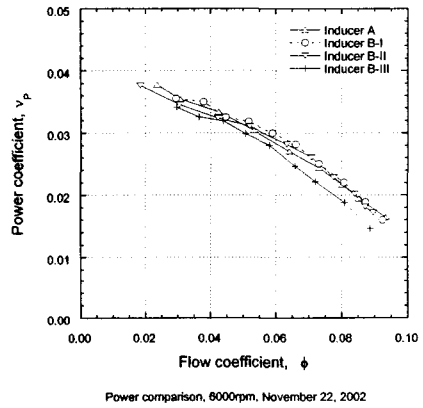


Fig. 5 Non-dimensional cavitation performance of inducer A at $\phi=0.073$: ψ vs σ



(b) Power

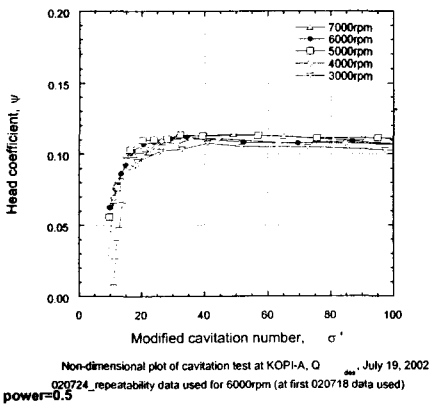
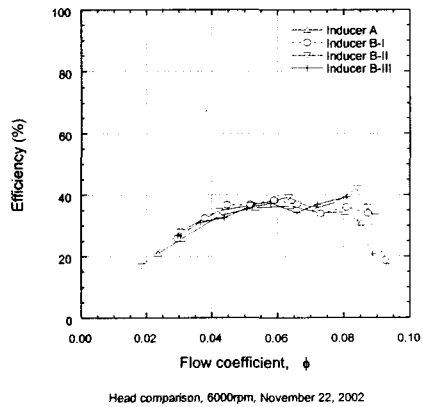
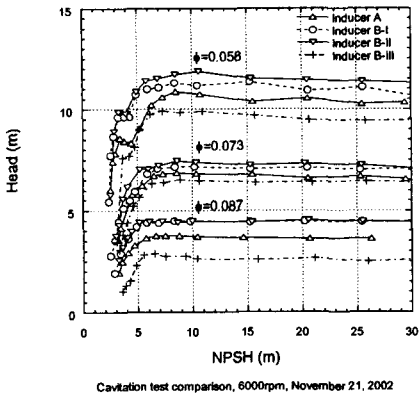


Fig. 6 Modified plot of cavitation performance of inducer A at $\phi=0.073$: ψ vs σ'



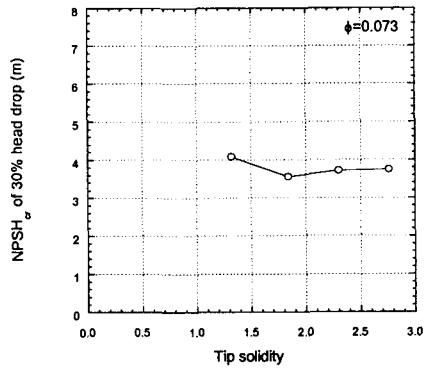
(c) Efficiency

Fig. 7 Performance comparison at 6000rpm



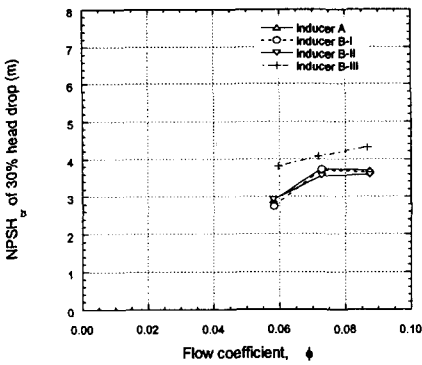
Cavitation test comparison, 6000rpm, November 21, 2002

Fig. 8 Cavitation performance comparison at 6000rpm



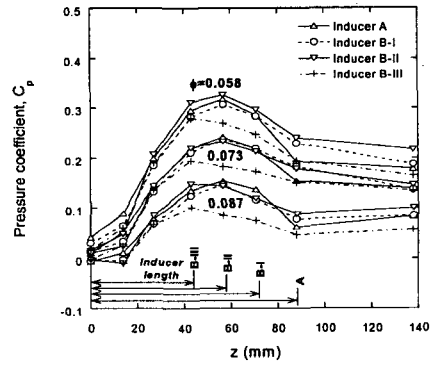
Critical NPSH of 30% head drop, 6000rpm, phi=0.073, November 21, 2002

Fig. 10 Critical NPSH versus inducer tip solidity at 6000rpm, phi=0.073



Critical NPSH of 30% head drop, 6000rpm, November 21, 2002

Fig. 9 Critical NPSH at 6000rpm



Pressure distribution along the inducer casing, 6000rpm, P_in = 300kPa_abs, November 21, 2002

Fig. 11 Pressure distribution on the inducer shroud

한 번 꺾이는 정도가 B-I, B-II, B-III형이 A형에 비하여 더 크고 이 영향은 효율곡선에도 나타난다. 하지만 성능곡선이 중간에 한 번 꺾이는 정도가 인듀서의 형상에 따라 다른 이유는 아직 명확하지 않다.

6000rpm에서 세 가지 유량에 대하여 측정된 흡입성능을 Fig. 8에 나타냈다. 유량계수 $\phi=0.058$ 에서 흡입성능 곡선이 한 번 꺾이는 것이 특이하다. 이는 Kamijo 등⁽⁵⁾의 인듀서에서도 나타나는데 회전 캐비테이션 (rotating cavitation)과 연관이 있는 듯 하다. 흡입성능 곡선에서 캐비테이션이 없을 때의 '양정은 B-II, B-I, A, B-III형 순으로 더 크다. 물론 이것은 Fig. 7(a)의 성능곡선에서 이미

예측된 경향이였다. 캐비테이션 임계점을 양정이 캐비테이션이 없을 때의 양정의 30%만큼 감소하는 점으로 정의할 때 세 모델에 대한 캐비테이션 임계점들을 Fig. 9에 나타내었다. 대체적으로 유량이 증가하면서 임계점도 증가하는 경향을 보인다. 인듀서 A, B-I, B-II형에서는 세 모델간의 차이는 매우 작다. 하지만 B-III형에서는 임계점이 급격히 증가한다. 즉 팁현절비가 1.84 이상에서는 현절비가 흡입성능에 영향을 미치지 않지만 그 이하로 현절비가 감소하면 인듀서의 흡입성능이 급격히 감소하는 것을 알 수 있다. Fig. 10에는 유량계수 $\phi=0.073$ 에서 임계 NPSH 값을 인듀서

딤현절비에 대하여 나타내었다. 딤현절비가 1.84 이하로 되면 임계 NPSH가 급격히 증가하여 흡입 성능이 감소하고 있다.

인듀서 케이싱에서 측정된 정압을 Fig. 11에 나타냈는데 측정은 6000rpm에서 이루어졌다. B-III형 및 $\phi=0.087$ 의 인듀서 B-II형을 제외하면 인듀서 입구에서 하류로 가면서 $z=56.7\text{mm}$ 까지는 정압이 증가하다가 다시 감소하는 경향을 보인다. 이는 상용 CFD인 Fine/Turbo를 이용하여 A형 인듀서에 대하여 계산한 최창호 등⁽⁶⁾의 결과에서도 잘 예측된다. B-III형에서는 $z=43\text{mm}$ 까지 증가하다가 이후에 감소한다. 현절비가 가장 큰 A형에서는 $z=88\text{mm}$ 에서 정압이 큰 폭으로 감소하는 것이 관찰되는데 이는 유로면적 감소에 의한 유체의 가속 때문에 발생하는 정압의 감소로 판단된다. B-III형을 제외하면 인듀서의 하류인 $z=138\text{mm}$ 에서 현절비가 작을수록 높은 정압값을 보인다. 이 영향으로 콜렉터에서 측정된 양정도 현절비가 작을수록 증가하는 경향을 가지는 것으로 판단된다.

4. 결 론

터보펌프 인듀서의 성능 및 흡입성능은 인듀서의 형상에 매우 민감한데 여기서는 형상 파라미터 중에서 현절비의 영향에 대하여 고찰하였다. 먼저 기본 모델에서 인듀서 성능 특성을 살펴보았으며 현절비가 다른 세 모델에 대한 실험을 하여 모두 네 가지 모델에 대한 성능 및 흡입성능을 비교하였는데 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 인듀서의 회전수가 흡입성능에 미치는 영향에 대하여 살펴보았는데 일정한 유량계수에서 필요 NPSH는 일반적인 상사규칙을 - 회전수 수의 제곱에 비례하는 - 따르지 않았다. 본 연구의 인듀서의 경우 필요 NPSH는 회전수의 제곱근

에 비례하는 경향을 보였다.

둘째, 인듀서의 딤현절비를 1.32에서 2.76까지 변화시키며 성능 및 흡입성능에 미치는 영향을 살펴보았는데 딤현절비 값이 1.84에서 2.76까지는 현절비가 작을수록 양정 및 효율은 증가하지만 1.84이하로 감소하면 양정이 감소한다. 딤현절비가 1.84 이상에서는 현절비가 흡입성능에 미치는 영향은 매우 작지만 1.84 이하로 감소하면 흡입성능이 급격히 감소한다. 즉 딤현절비가 작을수록 인듀서의 수력성능 및 흡입성능이 좋지만 그 값이 1.84 이하로 떨어지면 수력성능 및 흡입성능이 감소하는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

- (1) Brennen, C. E., 1994, *Hydrodynamics of Pumps*, Concepts ETI, Inc., pp. 134~138.
- (2) Sohn, D. K., Koo, H. C., Cha, B. J., Yang, S. S. and Lee, D. S., 2002, "The Effect of Diameter and Rotational Velocity on the Performance of a Turbopump Inducer," *KFMA Journal*, Vol. 5, No. 1, pp. 27~32.
- (3) Yedidiah, S., 1996, *Centrifugal Pump User's Guidebook*, Chapman & Hall, pp. 52~55.
- (4) Stepanoff, A. J., 1957, *Centrifugal and Axial Flow Pumps*, John Wiley & Sons, Inc., pp. 248~250.
- (5) Kamijo, K., Yoshida, M. and Tsujimoto, Y., 1993, "Hydraulic and Mechanical Performance of LE-7 LOX Pump Inducer," *ALAA Journal of Propulsion and Power*, Vol. 9, No. 6, pp. 819~826.
- (6) Choi, C. H., Hong, S. S. and Kim, J. H., 2003, "Numerical Study on the Hydrodynamic Performance Prediction of a Turbopump Inducer," *KSAS Journal*, Vol. 31, No. 6, pp. 72~78.