

터보펌프 인듀서의 출구 유동 및 성능 특성

홍순삼* · 구현철* · 차봉준* · 김진한*

Characteristics of Exit Flow and Performance of a Turbopump Inducer

Soon-Sam Hong*, Hyun-Chul Koo*, Bong-Jun Cha*, Jin-han Kim*

Key Words: Turbopump (터보펌프), Inducer (인듀서), Performance (성능), Flow Field (유동장)

ABSTRACT

Flow field downstream of an inducer was measured to see the flow and performance characteristics of a turbopump inducer. A large axisymmetric collector instead of a volute casing was installed to obtain circumferentially uniform flow - without interaction of the inducer and the volute. A conventional 3-hole probe was used to measure the flow. At inducer exit, axial component of absolute velocity decreased on hub region with decrease in flow rate. Tangential velocity component, static pressure, and total pressure increased from hub to tip. Relative flow angle from tangential direction was a little higher than outlet blade angle at flow coefficient $\Phi=0.087$ and 0.073 . Dynamic pressure was 53% of the mean total pressure at inducer exit at $\Phi=0.073$.

1. 서 론

액체로켓에서는 연료와 산화제를 연소실에 공급하기 위하여 터보펌프를 사용한다. 특별히 경량화 및 고양정과 고유량을 요구하는 액체로켓의 펌프 시스템에서는 주 임펠러 전방에 인듀서를 장착하여 정압을 상승시켜 캐비테이션 현상을 줄이며 더불어 임펠러의 성능을 최대화하게 된다. 따라서 액체로켓에 사용되는 터보펌프의 성능을 증가시키기 위한 노력의 일환으로 인듀서의 캐비테이션 억제와 인듀서 유동장 특성에 관한 연구는 현재까지 계속되어 오고 있다. 현재까지 유동장에 관한 연구는 해석에 많이 의존하고 있다.

따라서 인듀서 유동장의 시험결과^(1~5)는 유동해석^(6,7)의 검증에 있어 좋은 자료가 될 것이다.

본 연구에서는 새로 설계된 인듀서의 성능 및 유동 특성을 살펴보기 위하여 인듀서 출구에서의 유동장을 3공 프로브를 이용하여 측정하였다. 측정된 유동 데이터는 인듀서의 1차원 설계 모델 및 3차원 유동해석의 검증에 이용되고 따라서 궁극적으로는 보다 효율적인 인듀서 설계에 이용될 것으로 기대된다.

2. 시험장치

인듀서 시험기는 폐쇄형으로 Fig. 1과 같이 구성되었다. 시험기는 크게 구동부와 시험부, 배관부, 물저장 탱크로 구성 되어있다. 시험기는 37 kW출력의 최대 10,000 RPM까지 조절할 수 있는 BLDC 전기 모터로 구동하게 되어있다. 물저장 탱크는 0.9톤의 용량으로 압축공기 및 진공펌프를 이용하여 탱크 상부의 압력을 조절하므로, 관로 전체의 압력을 조절할 수 있게 되어

* 한국항공우주연구원
책임저자 E-mail : sshong@kari.re.kr

터보펌프 인듀서의 출구 유동 및 성능 특성

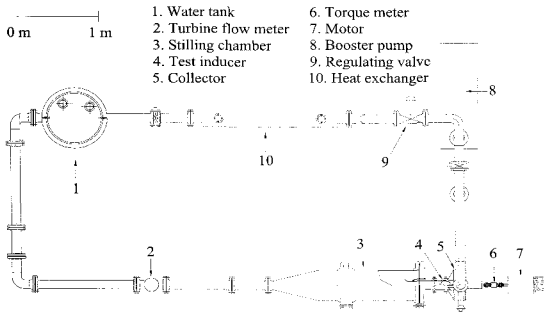


Fig. 1 Plane view of test loop

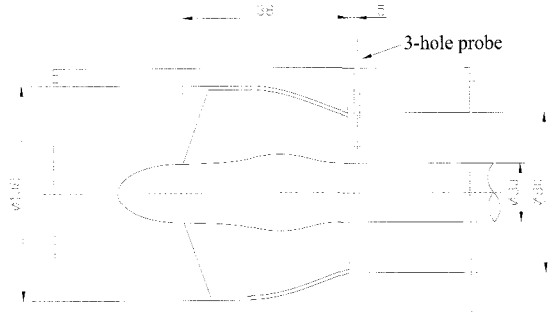


Fig. 3 Test section and measurement location

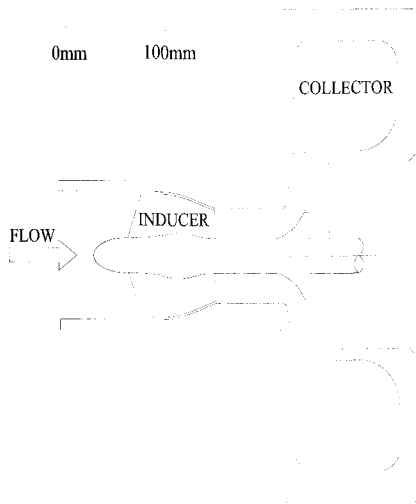


Fig. 2 Assembly of inducer and collector

있다. 탱크에서 공급된 물은 유량계를 통과하여 안정실에서 유질이 정류된 후 시험부로 유입되게 되어 있다. 유량측정은 터빈 유량계를 사용하였고, 최대 측정 유량은 270 m³/hr 이다. 한편 임펠러 없이 양정이 작은 인듀서만의 단독 시험시에는 운용유량이 부족하기 때문에 부스터 펌프를 설치하여 가용유량을 증가시켰다. 시험기의 유량은 시험부 하류 배관에 설치되어 있는 유량조절 밸브를 이용하여 조절하였다. 시험장치에 대한 보충 설명은 손동기 등^(8,9)에 있다.

시험부를 지난 인듀서 하류의 유동은 콜렉터에서 모아지게 되어있다. 본 시험기에서는 벌류트 대신 Fig. 2에 나타난 축대칭 형상의 컬렉터를 이용하였는데 그 이유는 인듀서 또는 임펠러의 성능 및 유동 측정할 때 유량에 따라 원주방향으로 변화하는 하류의 영향을 제거하기 위함이다. 또한 인듀서 하류에서 콜렉터까지는 급격한 단면적 변화에 따른 손실이 작도록 설계하였다. 토크측정은 구동모터와 펌프 사이에 설치된 20 N·m

Table 1 Inducer geometry

Inlet tip diameter	106 mm
Outlet tip diameter	78 mm
Inlet tip blade angle	7.86°
Outlet tip blade angle	17.69°
Blade number	2
Tip solidity	2.76
Axial length of blade on the hub	88 mm

* blade angles from tangential direction

용량의 토크미터를 이용하였다. 탱크 상류에는 열교환기를 설치하여 시험시 유동 온도를 일정하게 하였다.

시험에 사용된 인듀서는 홍순삼 등⁽¹⁰⁾이 성능측정을 수행한 기본 인듀서와 동일한데 Table 1에 그 제원을 나타내었다. 시험할 때 인듀서 팁과 케이싱간의 간격은 1 mm로 하였다.

인듀서 하류에서의 유동측정은 인듀서 후류 익단으로부터 5 mm지점에서 3공 프로브 (United Sensor CA-156 모델)를 이용하여 측정하였다. 속도 및 압력 측정시 프로브의 위치는 Fig. 3과 같다. 프로브는 상하 이동과 각도가 자동이송장치에 의해 이송될 수 있도록 하였다. 측정은 허브에서 팁 방향으로 자동 이송장치를 이용하여 프로브를 이동해가면서 수행되었다.

3공 프로브 측정의 정확성을 간접적으로 검토하기 위하여 프로브에서 구해진 축방향 속도 성분을 적분한 결과와 터빈유량계에서 측정된 유량을 비교하여 보았는데 유량계수 $\Phi=0.029\sim 0.087$ 범위에서는 두 값의 차이가 6% 이내였다.

3. 시험결과 및 고찰

콜렉터에서 측정된 인듀서의 성능을 Fig. 4(a), (b)에 나타내었는데 7000, 6000, 5000 rpm의 세 가지 회

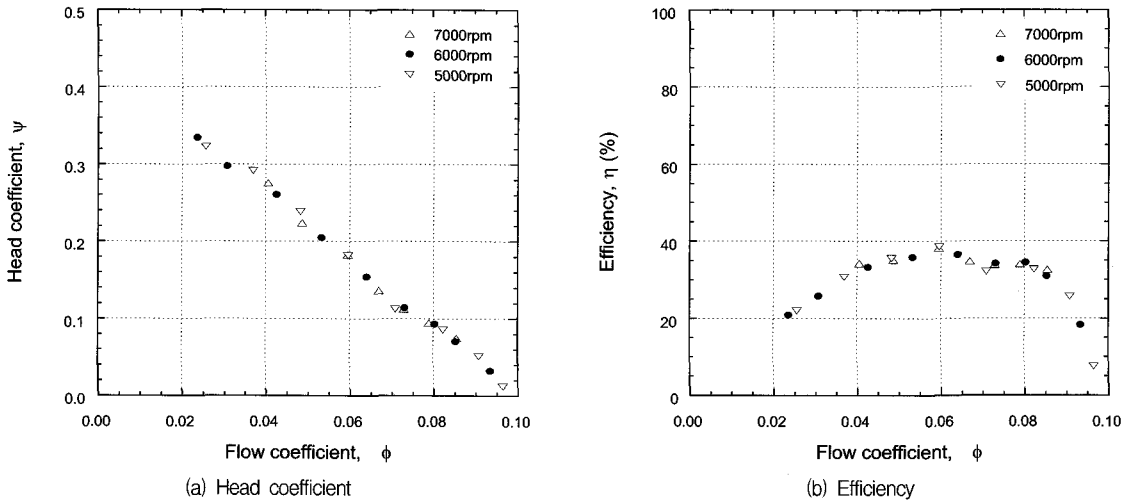


Fig. 4 Inducer performance measured at collector exit

전수에 대하여 무차원 형식으로 표시하였다. 무차원 계수는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \text{유량계수} & \quad \phi = Q/(A_1 U_{1r}) \\ \text{양정계수} & \quad \Psi = H/(U_{1r}^2/2g) \\ \text{효율} & \quad \eta = \rho g H Q / (T \omega) \end{aligned}$$

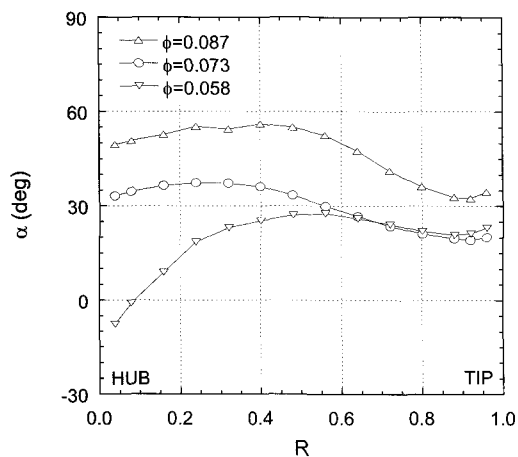
여기서 Q 는 유량, A_1 은 인듀서 입구 유로 단면적, U_{1r} 는 날개 입구팁 속도, H 는 양정 (total head), T 는 토크, ω 는 회전 각속도를 나타낸다. 그림을 보면 시험된 회전수 범위에서 성능의 회전수에 대한 상사가 잘 이루어지는 것을 알 수 있다. 양정계수 Ψ 와 유량계수 ϕ 의 관계를 나타낸 Fig. 4(a)를 보면 양정계수는 대체적으로 유량계수에 대하여 직선적으로 감소하는 경향을 보인다. Fig. 4(b)에는 효율과 유량계수의 관계를 나타냈다. 한 가지 유의 할 점은 측정된 성능이 인듀서만의 값이 아니라는 점이다. 양정은 콜렉터에서 측정된 값을 사용하기 때문에 실제 인듀서 출구에서의 양정보다 작은 양이 측정되는 것이다. 인듀서 출구에서 양정이 측정된다면 양정 및 효율은 더 높은 값이 될 것이다. 따라서 인듀서만의 성능을 평가하기 위해서는 인듀서 출구에서의 유동 측정이 필요하게 된다.

날개 뒷전으로부터 하류 5 mm에서 3공 프로브로 측정된 유동 특성을 Fig. 5(a)~(f)에 나타내었는데 시험은 6000 rpm에서 수행되었다. 회좌표 R은 무차원화된 반경으로서 허브로부터의 거리를 허브에서 팁까지

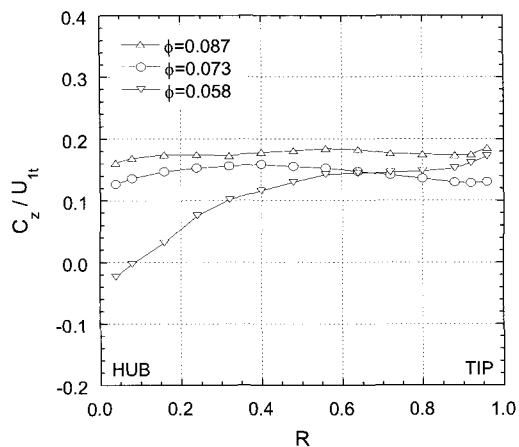
거리로 나눈 값이다. α 는 절대 유동각을 표시하며, C_z 는 절대속도의 축방향 성분, C_t 는 절대속도의 접선방향 성분, P 는 정압, P_t 는 전압을 표시하고 $P_{t,0}$ 는 인듀서 상류의 전압으로서 정체실에서 측정된 정압이며, β 는 상대 유동각을 표시한다. 유동각은 접선방향으로부터의 값이다.

절대 유동각의 분포를 나타낸 Fig. 5(a)를 보면, 유량계수 $\phi=0.087$ 과 $\phi=0.073$ 에서는 반경에 대한 분포가 비슷한 형태를 보이며 단지 유량이 클수록 수준이 높아지고 있다. 그런데 $\phi=0.058$ 로 유량이 감소하면 절대 유동각 분포 형태가 $\phi=0.087$, 0.073 과는 상당히 다른데 허브 근처에서 절대 유동각이 감소하며 역류까지 발생한다. Fig. 5(b)의 축방향 성분은 유량계수 $\phi=0.087$, 0.073 에서는 반경에 대하여 균일한 분포를 보였고 $\phi=0.058$ 에서는 허브영역에서 급격히 감소하는 경향을 보였다. Fig. 5(c)에는 접선방향 속도 성분을 나타냈는데 허브로부터 팁으로 가면서 그 값이 증가하는 경향을 보인다. 또한 유량이 감소하면서 그 값이 증가하는 경향을 보이는데 특히 $\phi=0.087$ 에서 $\phi=0.073$ 으로 감소하면서 큰 변화를 보인다. $\phi=0.073$ 과 $\phi=0.058$ 에서는 접선방향 속도의 분포가 비슷하다.

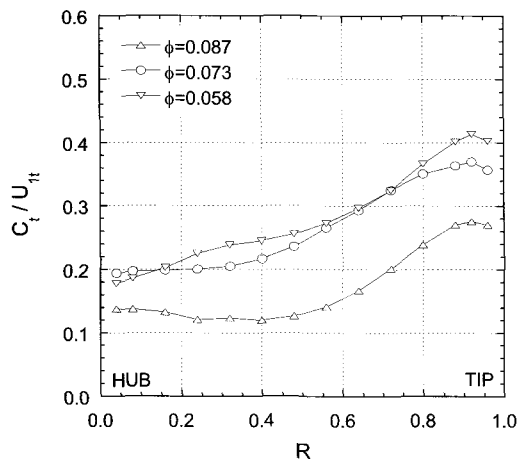
Fig. 5(d)에는 정압의 분포를 나타냈다. 세 유량에서 모두 허브로부터 팁으로 가면서 원심력으로 인하여 정압이 증가하고 있다. 3공 프로브 측정위치와 동일한 지점에서 압력탭으로부터 측정된 정압과 3공 프로브로 측정된 팁에서의 정압은 그 측정 방법은 다르지만 서



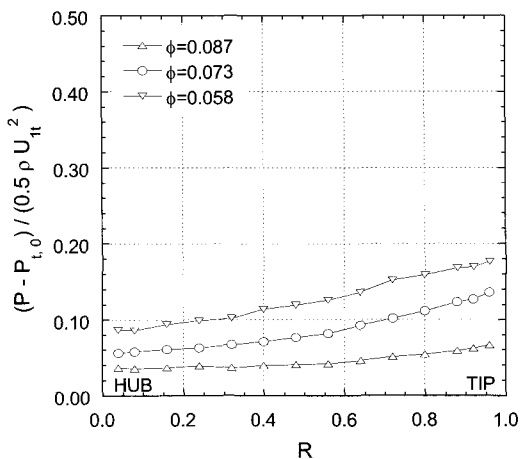
(a) Absolute flow angle



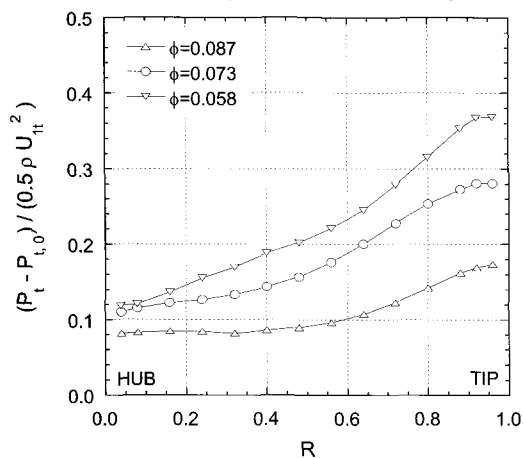
(b) Axial component of absolute velocity



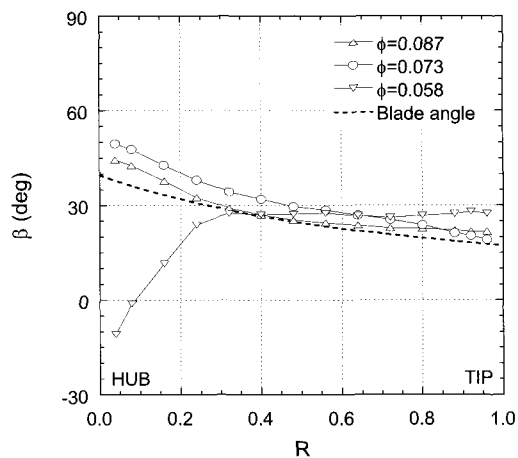
(c) Tangential component of absolute velocity



(d) Static pressure coefficient



(e) Total pressure coefficient



(f) Relative flow angle

Fig. 5 Flow parameters measured at inducer exit (flow and blade angles from tangential direction)

로 같아야 할 것이다. 비교해 본 결과, Fig. 5(d)에서 팁방향으로 외삽하여 추정한 팁에서의 정압을 케이싱 표면 정압과 비교한 결과 두 값의 차이는 7% 이내였으며 이로부터 3공 프로브의 정확도를 간접적으로 확인할 수 있었다. 벽근처에서는 3공 프로브의 정확도가 저하된다는 것을 고려할 때 7%의 차이는 적은 양인 것으로 판단된다. 전압의 분포를 Fig. 5(e)에 표시했는데 허브로부터 팁으로 가면서 증가한다. 허브에서는 전압의 유량간 차이가 작는데 팁으로 가면서 커진다.

상대 유동각의 분포를 Fig. 5(f)에 나타내었는데 점선은 인듀서 깃 뒷전의 날개각을 나타낸다. $\phi=0.087$ 에서 0.2 이상의 R에서는 상대 유동각과 날개각의 차이가 매우 작다. $\phi=0.073$ 에서는 $\phi=0.087$ 에서보다 두 각의 차이가 더 커진다. 한 가지 특이한 것은, $\phi=0.073$ 에서 상대 유동각이 날개각보다 더 크다는 것이다. 미끄럼 계수를 계산한다면 1.0 보다 더 크게 될 것이다. 이런 현상이 생기는 이유는 아직 분명하지는 않지만, 인듀서의 형상을 볼 때 날개 뒷전으로 가면서 단면적의 감소로 인하여 절대 속도의 축방향 성분이 증가하게 되고 따라서 상대유동각이 날개각보다 더 커지는 현상이 발생하는 것으로 추정된다. $\phi=0.073$, $R=0.4\sim 0.8$ 에서 측정된 상대 유동각은 날개각보다 약 45° 더 큰데 수치 해석(10)에서도 $R=0.4$ 에서는 상대 유동각이 날개각보다 1.2° 작지만 $R=0.8$ 에서는 상대 유동각이 날개각보다 2.6° 더 큰 결과를 보였다. $\phi=0.058$ 에서는 0.3 이하의 R에서 상대 유동각이 날개각에 비하여 매우 작은 값을 가지는데 이는 Fig. 5(a), (b)의 절대 유동각, 축방향 속도의 분포에서 예측되는 현상이다.

접선속도의 분포를 표시한 Fig. 5(c)를 보면 허브에서 팁으로 가면서 증가하던 접선속도가 팁 근처 ($R=0.96$)에서는 약간 감소하는데 이는 인듀서 팁과 케이싱 사이 간극의 영향인 것으로 판단된다. 그리고 감소한 접선속도는 Fig. 5(a)의 절대 유동각 및 Fig. 5(e)의 전압 계수에도 영향을 미치는 것으로 추정된다.

세 유량에서 비교된 전압손실계수를 Fig. 6에 나타내었다. 상대 전압의 인듀서 입구와 출구에서의 차이로 정의되는 전압손실계수 K는 입구 접선속도 성분을 무시할 때 다음과 같이 된다.

$$K = \{ P_{t,0} - (P_t - \rho UC_t) \} / (0.5 \rho U_{t,0}^2)$$

$\phi=0.073$ 에서 허브에서는 거의 0 이던 손실계수는 팁으로 가면서 점차 증가하여 팁에서는 약 0.25가 된다.

허브에서 팁으로 가면서 손실계수가 증가하는 경향은 여러 인듀서 유동 측정 결과^{(1),(3),(11)}에서도 볼 수 있다.

Fig. 5(d), (e)의 정압 및 전압을 측정 단면, 즉 인듀서 출구에서 질량 평균하여 보았다. 그리고 동일한 위치에서 압력탭으로부터 측정된 케이싱 정압과 함께 Fig. 7에서 서로 비교하여 보았다. $\phi=0.073$ 에서 단면에서 평균된 정압은 단면에서 평균된 전압의 47%이었다. 즉 동압성분이 전압의 53%에 해당되는 매우 큰 양임을 알 수 있다. 케이싱 정압은 원심력으로 인하여 단면에서 평균된 정압보다 높으며 $\phi=0.073$ 에서 단면에서 평균된 전압의 81%이었다. 압력계수는 다음과 같이 정의된다.

$$\text{압력계수} \quad C_p = (P - P_{t,0}) / (0.5 \rho U_{t,0}^2)$$

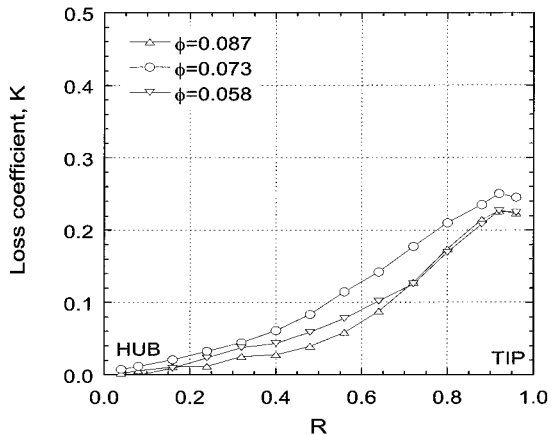


Fig. 6 Loss coefficient at inducer exit

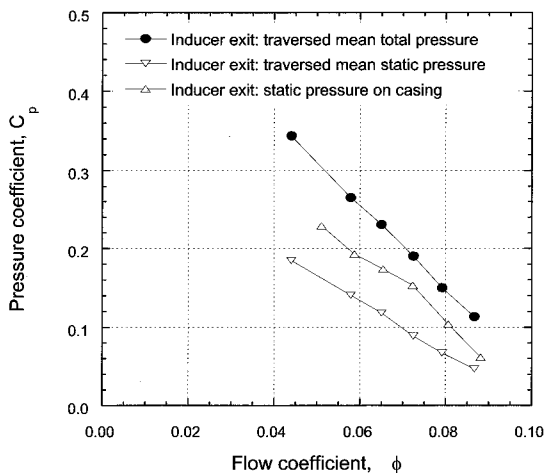
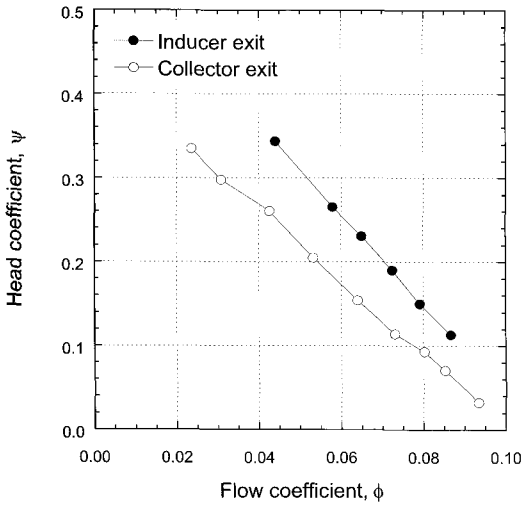
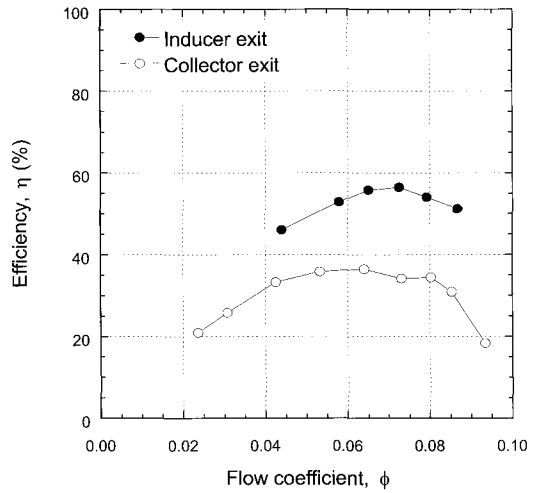


Fig. 7 Pressure coefficients at inducer exit



(a) Head coefficient



(b) Efficiency

Fig. 8 Comparison of inducer performance measured at inducer exit and collector exit

인듀서 출구에서 질량 평균된 전압은 인듀서만의 전압, 즉 양정을 나타내게 된다. Fig. 8(a)에는 측정 단면에서 질량 평균한 전압과, 동일한 6000 rpm에서 콜렉터 출구에서 측정된 양정을 함께 나타내었다. $\phi = 0.073$ 에서 콜렉터에서 측정된 전압은 인듀서 출구 전압의 약 60%이었다. 즉 전압의 40%가 인듀서 하류 이후의 통로에서 손실되는 것을 알 수 있다. Fig. 7에서 인듀서 출구, $\phi = 0.073$ 에서 동압성분이 전압의 53%이었는데, 이렇게 높은 비율의 동압성분이 콜렉터에서 정압으로 충분히 변환되지 못했기 때문에 Fig. 8(a)에서와 같은 양정계수의 차이가 생기게 된다.

측정된 토크 및 유량과 Fig. 8(a)의 전압으로부터 구한 인듀서 효율을 Fig. 8(b)에 나타내었다. 인듀서 출구의 전압이 콜렉터 출구 전압보다 크기 때문에 그 양만큼 효율도 인듀서 출구의 경우에 더 높다. 인듀서 출구에서는 $\phi = 0.073$ 에서 최고 효율을 보였으며 그 값은 57 %이었다.

4. 결론

인듀서의 출구유동 특성 및 성능 특성을 살펴보기 위하여 3공 프로브를 이용하여 인듀서 출구에서 유동을 측정하였는데 본 연구에 사용된 인듀서에 대하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

절대속도의 축방향 성분은 유량계수 $\phi = 0.087, 0.073$ 에서는 반경에 대하여 균일한 분포를 보였고 $\phi = 0.058$

에서는 허브영역에서 급격히 감소하는 경향을 보였다. 접선방향 속도, 정압, 전압은 $\phi = 0.087, 0.073, 0.058$ 에서 모두 허브에서 팁으로 가면서 증가하는 경향을 보였다. 상대 유동각은 $\phi = 0.087, 0.073$ 에서 인듀서 출구 날개각보다 더 컸다. 세 유량에서 손실계수도 허브에서 팁으로 가면서 증가하는 경향을 보이는데 $\phi = 0.073$ 에서 허브에서는 거의 0 이던 전압손실계수는 팁으로 가면서 점차 증가하여 팁에서는 약 0.25가 된다.

인듀서 출구, $\phi = 0.073$ 에서 단면에서 평균된 정압은 단면에서 평균된 전압의 47%이며 따라서 동압성분이 53%로서 상대적으로 매우 큰 것을 알 수 있었고, 케이싱 정압은 원심력으로 인하여 단면에서 평균된 정압보다 훨씬 높았는데 단면에서 평균된 전압의 81%이었다. 또한 본 연구에 사용된 콜렉터에서 측정된 전압은 $\phi = 0.073$ 에서 인듀서 출구 전압의 약 60%이었다.

참고문헌

- (1) Lakshminarayana, B., 1982, "Fluid Dynamics of Inducers - A Review," ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 104, pp. 411~427.
- (2) Atif, A. and Howard, J. H. G., 1993, "Near-exit Flow-field Investigation in an Inducer Including Laser-Doppler Velocimetry," International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 14, No. 1, pp. 86~93.

- (3) Offtinger, C., Henry, C., Morel, R., and Spettel, F., 1997, "Experimental Comparison of Flow Fields at the Inlet and the Outlet of an Inducer with Shrouded and Unshrouded Configurations," *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 119, pp. 954~959.
- (4) Yamada, J., Hasegawa, S., Watanabe, M., Hashimoto, T., Kimura, T., Takita, J., and Kubota, I., 2002, "Observation of the Inner Flow in the Inducer," *ISROMAC-9*, February 10-14, 2002, Honolulu, Hawaii.
- (5) 염기태, 2002, 터보펌프 인듀서의 성능 실험, 서울대학교 공학석사 학위논문.
- (6) 최창호, 이기수, 김진한, 양수석, 이대성, 2002, "액체로켓용 터보펌프 성능예측에 대한 수치해석적 연구," *유체기계저널*, 제5권, 제2호, pp. 15~21.
- (7) 심창열, 강신형, 2001, "터보펌프 인듀서의 내부유동 해석," *대한기계학회 춘계학술대회 논문집 E*, pp. 631~636.
- (8) 손동기, 김춘택, 윤민수, 차봉준, 김진한, 양수석, 2001, "터보펌프 Cavitation 성능시험기 개발 및 성능시험에 관한 연구," *대한기계학회 춘계 학술대회 논문집 E*, pp. 619-624.
- (9) 손동기, 구현철, 차봉준, 양수석, 이대성, 2002, "터보펌프 인듀서의 흡입성능에 대한 직경과 회전속도의 영향," *유체기계저널*, 제5권, 제1호, pp. 27~32.
- (10) Choi, C. H., Hong, S. S., Cha, B. J., and Yang, S. S., 2003, "Study on the Hydraulic Performance of a Turbopump Inducer," *Proceedings of FEDSM'03*, Paper No. FEDSM2003-45095, July 6-10, Honolulu, Hawaii.
- (11) Lakshminarayana, B., 1973, "Three-Dimensional Flow Field in Rocket Pump Inducers, Part 1: Measured Flow Field Inside the Rotating Blade Passage and at the Exit," *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 95, pp. 567~578.