

베인 디퓨저의 솔리디티와 출구 유동각에 따른 성능변화

조성국* · 강신형** · 차봉준*** · 이대성***

Performance Variations of Vaned Diffusers with Solidity and Exit Vane Angle

S-K Cho, S-H Kang, B-J Cha and D-S Lee

Key Words: low-solidity (낮은 솔리디티), vane number (베인 개수), turning angle (회전각), operating range (작동 범위), surge condition (서지 조건)

Abstract

The design of low-solidity vaned diffusers and the effect on the performance of a turbocharger compressor is discussed. The effect of vane number and turning angle was investigated while maintaining a basic design with a leading edge angle of 70°, leading and trailing edge radius ratios of 1.1 and 1.3. All results are compared with those obtained with the standard vaneless diffuser configuration and it was shown that all designs increased and shifted the pressure ratio to reduced flowrates. Despite the low-solidity configuration none of the vane designs provided a broad operating range, and the vane leading edge angle was not main factor that system went into the surge condition. The diffuser of higher trailing edge angle improved the flow range for the compressor to operate at lower flow region.

기호설명

- B : 디퓨저의 폭 (mm)
- c_p : 공기의 정압 비열 (J/kg · K),
압력 회복계수
- m_r : 기준 대기압, 기준 온도로 환산한 보정
질량 유량 (= $m \sqrt{\frac{T_{01}}{T_{ref}}} / \frac{P_{01}}{P_{ref}}$)
- A : 유로 면적 (m²)
- C : 유동의 절대 속도 (m/s),
베인의 코드길이
- N : 임펠러의 회전 속도 (rpm)
- S : 베인과 베인 사이의 원호길이

- γ : 공기의 비열비 (= c_p/c_v)
캠버선의 접선각도
- η : 등엔트로피 효율
- λ : 스윙계수 (= C_θ / C_r)
- α : 자오면 방향에 대한 유동각도
- σ : 솔리디티 (C/S)
- ψ : 회전각 (Turning angle)

아래첨자

- 0 : 정체점 성분, 기준값
- 2 : 임펠러 출구, 디퓨저 입구
- 3 : 디퓨저 베인입구
- 4 : 디퓨저 베인출구
- 5 : 디퓨저 출구
- ref : 기준 대기값 및 기준 온도
- V : 베인

* 정회원, 서울대학교 대학원 기계공학과
 ** 정회원, 서울대학교 기계항공공학부
 *** 정회원, 한국항공우주연구소

3. 성능 시험

본 실험에 사용된 임펠러는 직경 150mm의 반경방향 임펠러이며, 9개의 주날개와 9개의 부날개로 구성되어 있다. 임펠러의 제원은 Table 2에 간략하게 나타내었다. 본 실험에 사용된 실험장치와 계측장비에 대한 자세한 제원은 앞선 연구에 제시되어 있다.⁽⁶⁾

Table 2 Specification of the tested impeller.

Impeller radius (r_2)	75 mm
Inducer tip radius (r_{1h})	31.25 mm
Inducer hub radius (r_{1l})	47.65 mm
Impeller tip width (b_2)	8.2 mm
Impeller exit angle (β_2)	0
Number of blade (Z)	18

4. 실험 결과 및 토의

압축기의 성능시험은 30,400 rpm에서 수행되었으며, 최대 유량으로부터 서지에 도달하게 되는 유량까지 점진적으로 줄여가면서 시험을 수행하였다. 기준상태를 각각 20°C, 1기압으로 정하여 질량유량과 회전수를 환산하였다.

4.1 솔리디티와 디퓨저 출구각에 따른 성능변화

베인 디퓨저의 설치 목적은 베인 내에서 효과적으로 압력을 상승시켜, 베인의 짧은 길이에서 높은 압력상승이 일어나게 하여, 전체적인 압축기의 압력비와 효율을 높이는 것이다. 따라서 설계변수를 다양하게 변화시켜 각 설계변수들의 변화와 디퓨저의 성능과의 상관관계를 알아내는 것은 중요하다.

Fig. 2에서 4까지는 베인의 입구각은 70°로 일정하게 하고, 출구각을 각각 53°와 58°로, 베인의 개수를 각각 11, 13, 15개로 하여 시험한 결과를 성능과 효율, 압력회복계수에 대하여 나타낸 그림이다.

출구반경을 고정하였기 때문에, 출구각을 증가시키면 솔리디티가 증가하게 되고, 또한 베인 개수의 증가로 솔리디티는 증가하게 된다.

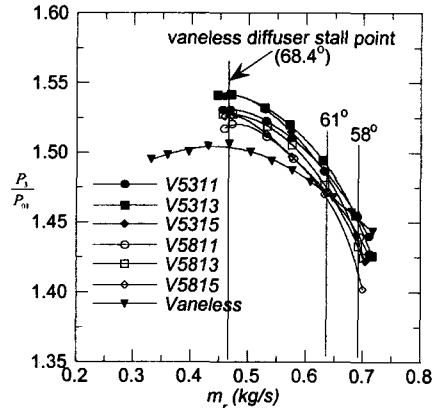


Fig. 2 Total to static pressure ratio at diffuser exit with various diffusers. (30,400 rpm)

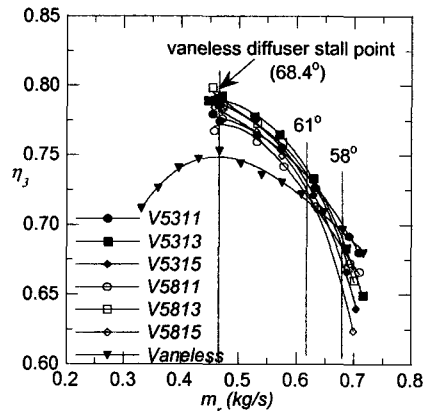


Fig. 3 Isentropic efficiency

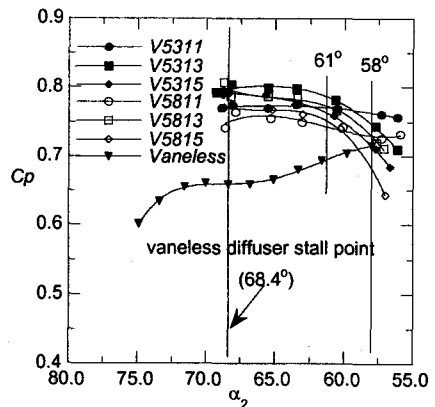


Fig. 4 Pressure recovery coefficient

베인을 설치한 경우가 대부분의 작동범위($\alpha_2 > 61^\circ$)에서 베인리스 디퓨저보다 압력비와 효율면

에서 크게 나타났으며, 최대 압력비와 효율 지점이 저유량쪽으로 이동하는 것으로 나타났다.

베인리스의 경우, 스톨이 발생한 이후 서지 지점까지 넓은 작동범위를 가진 반면, 베인 디퓨저의 경우는 베인 입구각과 거의 유사한 유량조건에서 서지가 발생하였기 때문에, 베인리스 디퓨저의 경우가 보다 넓은 작동범위를 가졌다. 이는 디퓨저의 베인구간에서 접선방향의 속도성분이 정압으로 회복되어지는 과정에서 과도한 부하 (loading)가 유동에 가해짐으로써, 베인리스 디퓨저보다 비교적 높은 유량범위에서 서지가 발생한 것으로 생각된다. 이 결과로부터 본 압축기의 경우는 서지를 발생시키는 주요 원인이 베인 디퓨저의 입구각이라기 보다 베인 내에서의 과도한 부하 (loading)가 원인이라고 판단된다. 이에 대해서는 뒤에 좀더 설명되어질 것이다. 우선 베인 출구각도가 53° 인 경우를 살펴보면, 고유량 영역 ($\alpha_2 < 58^\circ$)에서는 솔리디티가 작은 V5311의 성능이 높게 나타났으며, 저유량 영역에서는 솔리디티가 상대적으로 큰 V5315가 성능이 높게 예측되었고, 대부분의 유량범위에서 V5313의 성능이 가장 우수하였다. 그림에서 표시하였듯이 0.68 kg/s 의 유량에서 임펠러 출구의 유동각도는 계산결과 58° 였는데, 이보다 큰 유량에서 베인의 입구각을 고려한다면 베인의 입구에서 큰 입사각을 가지게 되어 입사각 손실 (incidence angle loss)이 증대되게 된다. 따라서 베인의 개수가 증가하면 베인에 의한 블로키지의 증가로 손실이 증가하게 되어, 상대적으로 베인의 개수가 적은 V5311의 성능이 가장 우수하게 나타난 것으로 판단된다. 유동각이 61° 이상이 되면 모든 베인 디퓨저가 베인리스 디퓨저보다 성능과 효율면에서 크게 나타났다. 그림에서 알 수 있듯이 출구각도 58° 의 경우에도 앞서 기술한 53° 의 경우와 전체적으로 비슷한 결과를 나타내었다.

4.3 디퓨저 회전각과 작동범위와의 관계

저유량 영역에서의 작동범위를 넓히기 위해 디퓨저 출구각을 64° 로 증가시켜 디퓨저 내에서의 부하 (loading)를 적게 설계하고, 베인의 개수를 11, 13, 15개로 바꾸어 성능시험을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 5에서 7에 나타내었다.

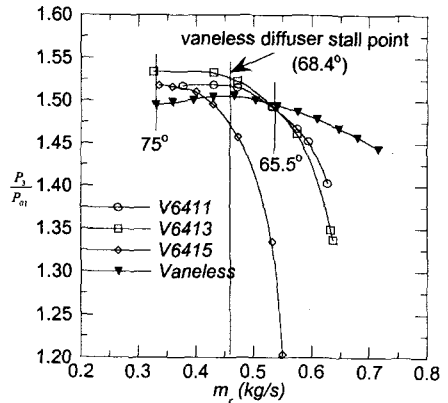


Fig. 5 Total to static pressure ratio at diffuser exit with various diffusers at 30,400 rpm.

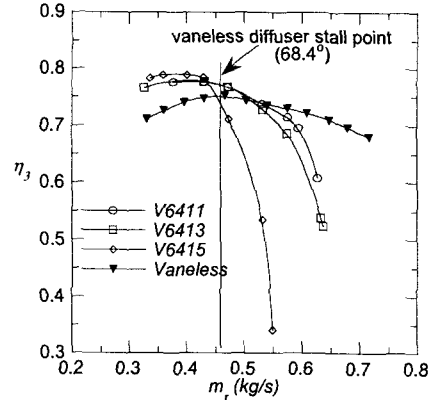


Fig. 6 Isentropic efficiency

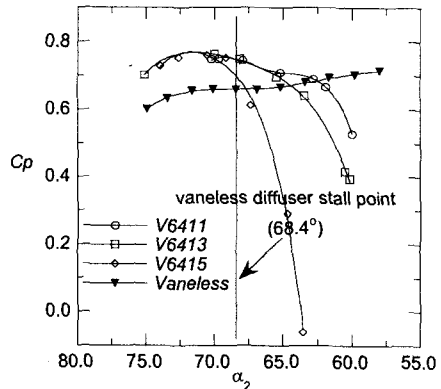


Fig. 7 Pressure recovery coefficient

디퓨저 베인의 입구각이 70° 이므로 고유량 영역 ($\alpha_2 < 65.5^\circ$)에서 입사각 손실과 베인 내에서의 부하 (loading) 감소에 의해 베인리스 디퓨저보다 베인 디퓨저의 압력비와 효율이 낮게 나타났으

며, 이보다 큰 출구 유동각도에서는 베인 디퓨저의 성능이 좋은 것으로 나타났다. 주목할 사항은 이전의 출구각 53°, 58°의 베인 디퓨저 성능시험의 결과와는 달리 유동각 70°근처에서 서지가 발생하지 않고, 75°의 유동각도까지 압력비와 효율이 상승하여, 저유량 영역에서의 작동범위가 넓어졌다는 것이다. 따라서 만약 압축기의 설계조건이 스톨지점을 포함한 저유량 영역에 맞추어진 경우라면 디퓨저 베인의 출구각을 크게 설계하여 작동점 근처에서 높은 압력비와 효율을 가지도록 설계할 수 있다는 것이다. 이로서 본 압축기의 경우, 디퓨저 내에서의 압력변화가 전체 압축기 시스템의 서지를 좌우한다는 것을 알 수 있었다. Dean⁽⁷⁾은 원심압축기와 캠버, 스톨을 가지는 단순 압축시스템에 대하여 다음과 같은 경우에 유동이 안정한 영역에 있다고 하였다.

$$\frac{\partial PR}{\partial m} \leq 0 \quad (3)$$

이때 PR은 전체 압축기의 전대정 (total-to-static) 압력비를 나타내고, m은 질량을 나타낸다. 이 식은 각각의 요소(임펠러, 디퓨저)의 불안정성을 판별하는 데도 사용할 수 있다. 압축기의 어느 요소에서 압력대 유량곡선이 우상향의 값 즉, 위의 식이 양의 값을 가지게 된다면 그 요소에 대하여 불안정하다고 판단할 수 있다.

임펠러 출구에서 원주방향 정압분포를 측정함으로써 베인 디퓨저와 임펠러와의 상호간섭의 효과를 베인리스 디퓨저와 비교할 수 있다. 본 실험에 사용된 9가지 베인 디퓨저에 대하여 임펠러 출구에 원주방향으로 10개의 정압홀을 내어, 벽정압을 측정하였으며, 그 결과 중 V5315와 V6415에 대하여 Fig. 8에 나타내었다.

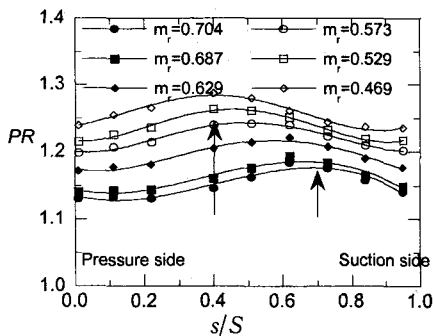


Fig. 8(a) Pressure distribution at impeller exit with V5315. (30,400 rpm)

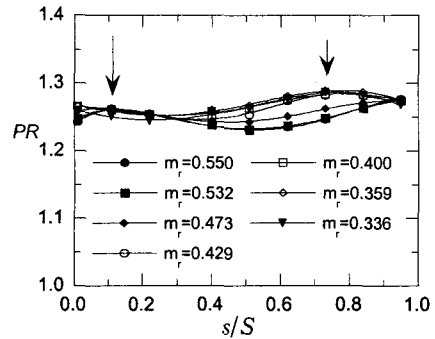


Fig. 8(b) Pressure distribution at impeller exit with V6415 (30,400 rpm)

그림에서 왼쪽면은 압력면을 오른쪽면은 흡입면을 나타낸다. 그림에서 보듯이 고유량에서는 유동각이 반경방향에 대해 작기 때문에 베인과 베인사이의 압력 최대치가 흡입면 쪽으로 치우치고, 유량이 줄어들어 따라 유선이 원주방향으로 치우쳐 형성되기 때문에 최대치는 압력면 쪽으로 옮겨감을 알 수 있었다. 유량의 변화에 따라 V5313의 경우보다 V6415가 원주방향으로 압력분포의 변화가 적었으며, 이의 평균값 또한 그 크기의 차이가 적었다. 그림으로 나타내지 않았지만 V6415를 제외한 다른 디퓨저는 V5315와 유사한 결과를 보였다. 임펠러 출구에서의 정압을 얻기 위해 베인 디퓨저의 경우, 임펠러 출구에서 측정된 원주방향의 정압치들을 산술평균하여 그 결과를 Fig. 9에 제시하였다.

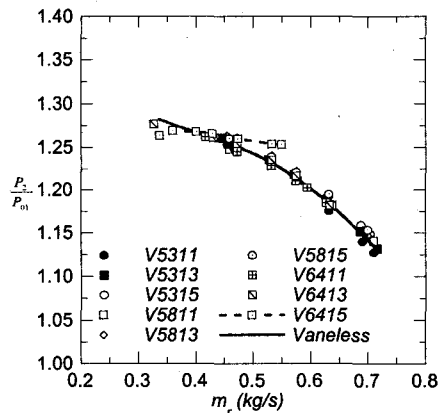


Fig. 9 Total to static pressure ratio at impeller exit at 30,400 rpm with various diffusers.

대부분의 베인 디퓨저는 베인의 개수가 증가함

에 따라 베인과 임펠러의 상호간섭에 의해 임펠러 출구의 벽정압이 상승하였으나, V6415의 경우를 제외하고 베인리스 디퓨저로 측정된 벽정압과 2%의 오차범위에서 일치하였다. 그러나 V6415의 경우는 유량이 증가하여도 정압치가 거의 일정하게 유지되어 다른 디퓨저와는 확연히 다른 임펠러 출구에서의 정압분포를 보여주었다.

Dean이 제시한 위의 불안정성 조건식을 이용하여 본 실험의 디퓨저 내에서의 불안정성을 검토하여 보기 위해 디퓨저의 입구와 출구에서의 정압비를 구하였으며 그 결과를 Fig. 10에 나타내었다.

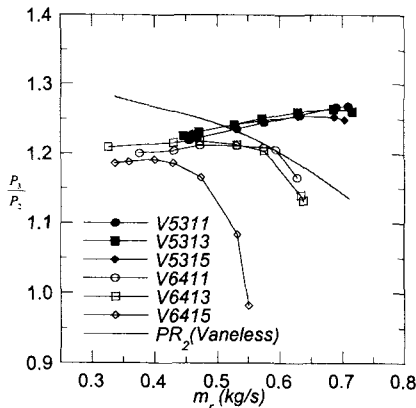


Fig. 10 Pressure rise between impeller exit and diffuser exit at 30,400 rpm with various diffusers.

V53시리즈와 그림으로 나타내진 않았지만 V58시리즈는 디퓨저 내에서 양의 기울기(우상향)의 정압비를 보였으며, V64시리즈의 경우는 저유량 영역에서도 영이나 음의 기울기를 가짐을 알 수 있었다. 이를 통해 상대적으로 V64시리즈가 저유량 영역에서 안정되게 작동되는 이유를 알 수 있었고, 이것이 저유량 영역까지 작동범위를 넓힐 수 있는 주 원인인 것으로 생각된다.

5. 결론

낮은 솔리디티 베인 디퓨저의 입구각과 입구와 출구의 반경비는 고정시키고, 베인의 개수와 베인 출구 각도를 변화시켜 실험한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 베인 디퓨저의 경우, 낮은 솔리디티는 고유

량에서, 상대적으로 높은 솔리디티는 저유량에서 성능이 우수하였으며, 베인리스 디퓨저에 비해 작동범위는 작게 측정되었다. 또한 유동의 베인에 대한 입사각보다 베인내의 부하(loading)가 서지를 유발시키는 원인인 것으로 판단되었다. 전 작동범위에 대해 최적의 베인은 V5313($\alpha_4=53$, $\sigma=0.715$)인 것으로 나타났다.

2. 베인의 출구각도를 줄이고, 날개의 수를 증가시켜, 솔리디티를 증가시킴으로써 저유량 영역의 작동범위를 넓힐 수 있었으며, 이는 압축기의 불안정성에 가장 큰 영향을 미치는 베인구간에서 유량에 따른 압력비가 영 또는 음의 기울기를 가짐으로써 가능하게 된다는 것을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 과학기술처지원 항공기 엔진용 압축기 성능평가기술연구의 일부로 수행되었으며, 관계자 여러분에게 감사한다.

참고문헌

- (1) Senoo, Y., 1983, "Low solidity cascade diffusers for wide flow range centrifugal blowers", ASME Paper 83-GT-3.
- (2) Senoo, Y., 1984, "Low solidity cascade diffusers for wide flow range centrifugal blowers", Von Karman Institute for Fluid Dynamics, Brussels, Lecture series 7.
- (3) Aungier, R.H., 1988, "A systematic procedure for the aerodynamic design of vaned diffusers", Flows in Non-Rotating Turbomachinery Components, ASME FED-Vol. 69, pp 27-34.
- (4) N.A.Cumpsty, 1989, "Compressor aerodynamics", Longman Scientific & Technical.
- (5) D.Japikse, 1996, "Centrifugal compressor design and performance", Concepts ETI, Inc.
- (6) 조성국, 강신형, 1998, "소형 원심압축기의 성능평가에 대한 실험적 연구", 대한기계학회논문집, 제22권 제8호, pp. 1052-1063.
- (7) Dean, R.C., 1974, "The fluid dynamic design of advanced compressors", Von Karman lectures, I bestilling fra NTUB.