

베인각도의 변화에 따른 디퓨저의 성능특성에 관한 실험적 연구

조성국* · 강신형**

Experimental study on the performance characteristics of the diffuser due to the variation of vane angle

S. K. Cho*, S. H. Kang**

Key words : Vaned diffuser (베인 디퓨저), Turning angle (회전각)

ABSTRACT

Recently for the impressive gains of performance and efficiency over vaneless diffuser with apparently little or no loss in flow range, the use of LSVD(Low Solidity Vaned Diffuser) is well recommended. The experiments on the effect of the vane turning angle variation(positive, negative, zero) with other design parameters fixed on the performance and flow range were carried out. Diffuser with zero turning angle has the best characteristics in terms of performance and efficiency and The FFT results show the different frequency characteristics due to the vane turning angle in low flow range.

1. 서론

원심압축기는 소형 가스터빈 엔진, 터보차저, 냉동기, 화학처리 분야 등에서 다양하게 사용되고 있다. 최근에는 높은 효율을 가지며 또한 넓은 작동범위가 요구됨으로써 디퓨저에 대한 새로운 개념의 설계에 관심을 가지게 되었다. 따라서 최근에 산업용 원심압축기에서 저 솔리디티 베인 디퓨저(LSVD)의 사용이 증가되고 있다.

이는 압력회복에서의 증가, 효율의 상승, 작동범위의 향상 등 많은 장점을 보이고 있다. Senoo⁽¹⁾는 기존의 베인에서 목에 의해 제한되는 현상을 제거하면 작동범위가 넓어질 수 있을 것

이라고 추측했다. 목은 이웃한 두 베인 간의 최소 면적으로 정의된다. 만약 베인이 적당한 코드 길이와 피치를 가진다면 진정한 의미에서의 디퓨저 목은 존재하지 않게 되고, 따라서 초크 마진이 증가하게 된다고 하였다. Senoo⁽²⁾ 등은 원심 블로워에 1열과 2열의 LSVD(Low Solidity Vane Diffuser)를 설치하여 베인의 스테이지 각과 반경비 등의 다양한 조합에 대한 결과에 대해 제시하였다. Osborne과 Sorokes⁽³⁾는 다양한 비속도와 작동 유체에 대해 원심식과 사류식 임펠러의 단단 및 단단 압축기에 1열의 LSVD를 사용하여 높은 비속도에도 LSVD가 효율과 작동영역 면에서 우수하다는 것을 보여주었다. Sorokes와 Welchs⁽⁴⁾는 솔리디티가 0.735인 회전 가능한 LSVD를 만들어서 스테이지각의 영향과 베인의 선단 반경비(1.08, 1.15)에 대한 영향을 연구한 바 있다.

* 회원, 서울대 대학원 기계공학과

** 회원, 서울대 기계공학과

본 연구에서는 지금까지 진행되지 않은 베인 자체의 turning angle을 변화시켜서 성능 및 효율에 미치는 영향과 작동영역 면에서의 영향, 저유량 영역에서의 주파수 특성 등에 대한 연구를 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1에 시험용 압축기를 도시하였다.

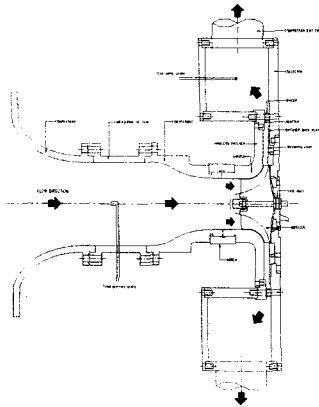


Fig. 1 Schematic diagram of the test sections.

디퓨저에서의 원주방향 불균일성을 없애기 위하여 블류트 대신 4개의 배출관을 가지는 컬렉터를 사용하였다. 임펠러 입구에 설치된 기 보정된 노즐을 이용하여 유량을 측정하였다. 압축기의 회전수는 마그네틱 픽업센서를 사용하여 측정하였다. 기타 실험 설비와 임펠러의 제원은 앞선 연구⁽⁵⁾에 자세히 제시되어 있다. 본 연구에 사용한 디퓨저는 낮은 솔리디티의 디퓨저(LSVD)로서 그 주요 제원은 Table 1에 나타내었고, 측정점을 포함한 각각의 형상을 그림 2에 제시하였다.

Table 1. parameters of vaned diffusers.

Diffuser shape data	
Number of vanes(Z)	9
Stagger angle	60°
Inlet radius ratio(r_3/r_2)	1.1
Exit radius ratio(r_4/r_2)	1.4



(a) zero (b) neg.(-3°) (c) pos.(+6°)

Fig. 2 Vaned diffusers

Fig. 3에는 자료획득장치가 도시되어 있다. 노즐 입·출구의 차압과 디퓨저 벽정압, 대기압을 측정하기 위해 각각 저압용, 고압용 및 대기압용 센서(MKS Co.)를 사용하였다. 압력센서로부터 나온 아날로그 신호는 PC에 내장된 A/D 변환기(Data translation Co.)에 의해 디지털화 되어 PC에 저장되게 된다. 또한 T-형 열전대 및 마그네틱 픽업용 센서로부터 나온 신호는 다채널 기록계(Fluke Co.)와 회전수계(PM6665)를 통해 각각 디지털화 되어, GPIB 통신에 의해 PC로 전달된다. 저유량 영역에서의 불안정성과 스톨점을 알아내기 위해 임펠러 입구에 열선(hotwire)을 설치하였고, 스트레인 게이지 형 압력센서를 디퓨저 출구 벽면에 부착하였다.

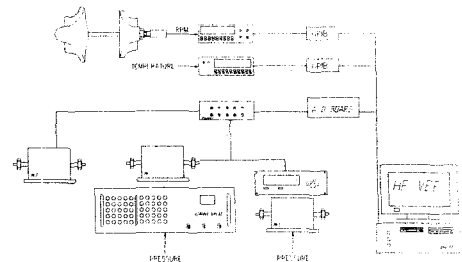


Fig. 3 Data acquisition system.

2.2 실험방법

본 연구에 사용된 임펠러의 설계 회전수⁽⁵⁾인 43,000 rpm을 포함하여, 36,000 rpm과 50,000 rpm에 대해 성능시험을 수행하였으며, 저유량 영역에서의 실험은 안전성을 고려하여 36,000 rpm에서 수행하였다. 각 회전수에서 고유량 영역으로부터 유량을 줄여가면서 성능평가를 수행하였으며, 성능평가를 수행한 후 스톨 지점을 포함한 저유량 영역에서의 성능을 적은 유량범위에서 자세히 측정하였다.

3. 실험결과 및 토의

1. 베인의 회전각이 성능과 작동범위에 미치는 영향

베인 설계변수 중에 베인의 입사각을 60도로, 베인의 출구반경을 $r_4/r_2 = 1.4$ 로 고정시키고, 베인의 turning angle 만을 3가지 형태로 하여 성능평가를 수행하였다. 베인의 출구 반경을 고정하였기 때문에 형상에 의해서 베인의 솔리디티(피치길이/코드길이)도 또한 변화하게 된다. 각각의 베인을 설치한 경우에 대한 성능을 비교하기 위해서 전회전수에 대해 디퓨저 출구에서의 정압치와 등엔트로피 효율을 Fig. 4와 5에 도시하였다.

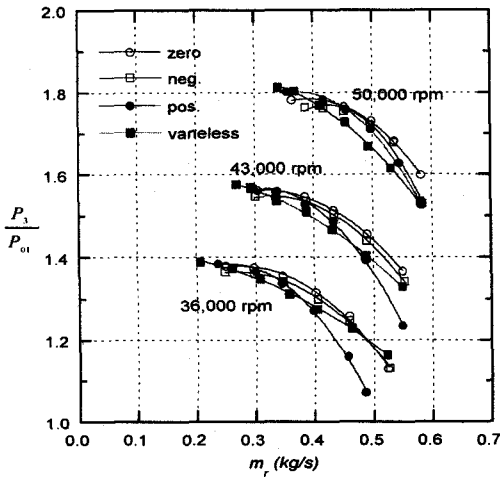


Fig. 4 Comparison of diffuser exit pressure ratio.

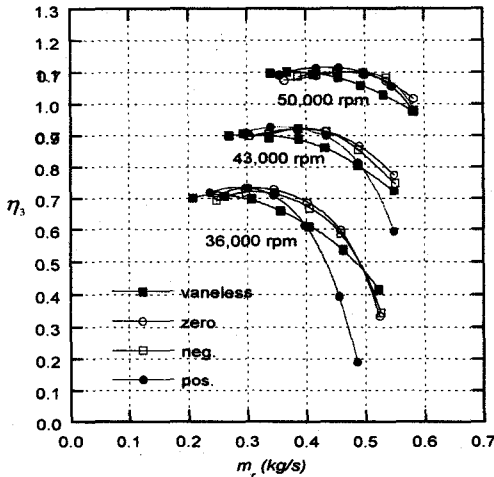


Fig. 5 Comparison of stage total to static efficiency.

베인의 입사각에 의한 손실이 상대적으로 큰 고유량 영역과 저유량 영역을 제외한 대부분의 작동영역에서 베인이 있는 경우가 베인리스 디퓨저보다 정압치가 높게 예측되었다. 베인 자체의 turning 각이 없는 zero의 경우가 전체적으로 가장 우수한 정압 상승량을 보였다. neg.는 역방향으로 turning 각을 주어 회전방향으로의 유동성분을 압력으로 회복시키려는 의도로 설계하였으나, 이에 의해 발생하는 과도한 역압력 구배에 의한 손실로 전체적인 성능이 zero의 경우보다 적게 예측된 것으로 생각되어진다. neg.의 경우는 turning 각이 큼으로써 고유량 영역에서 실제 throat는 존재하지 않지만 유로 단면적의 감소로 인하여 정압 상승량이 급격히 감소하는 경향을 보였다. 정압 분포와 마찬가지로 효율도 또한 zero의 경우가 작동영역에서 가장 좋은 결과를 나타내었다.

베인이 있는 경우에 디퓨저 출구에서의 압력분포는 임펠러와 디퓨저의 간섭효과에 의해 원주방향으로 균일한 값을 가지지 못한다. 따라서 동압을 계산하기 위해서 베인리스 디퓨저에서 측정된 정압치를 이용하여 전압을 계산한 결과를 기준으로 하여 각각의 베인에 이 값을 적용시켰다.⁽⁴⁾ 이러한 계산을 통해 얻어진 결과를 Fig. 6에 제시하였다.

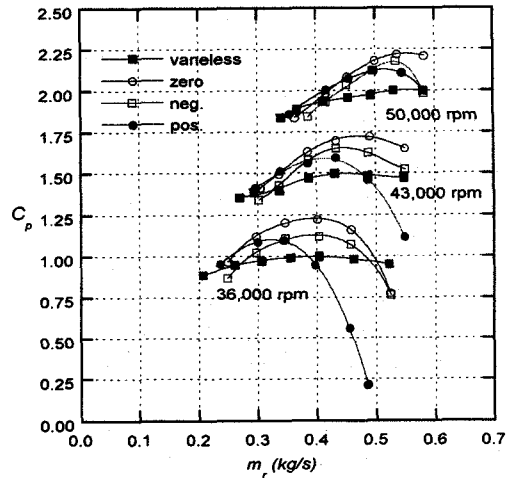


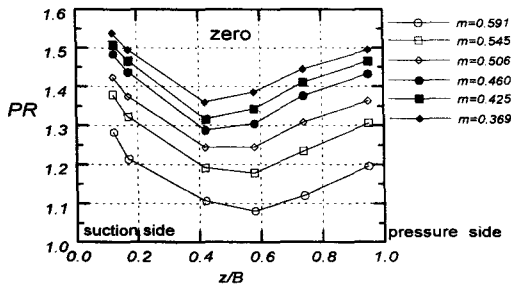
Fig. 6 Comparison of diffuser pressure recovery ($r/r_2 = 1.88$)

전체 압축기 성능과 마찬가지로 zero의 경우가 전유량 범위에서 가장 우수한 경향을 보였다. pos.의 경우는 유동각이 큰, 적은 유량영역에서

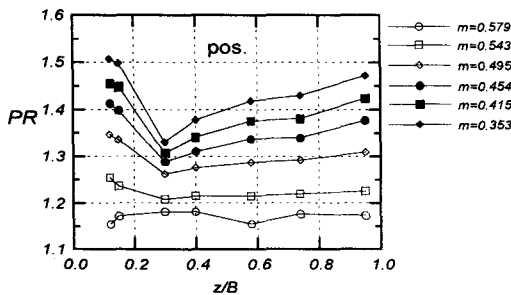
정압 상승량이 크게 예측되었다. 설계단계에서는 역방향으로의 turning 각이 원주방향 유속을 최대한 감소시킴으로써 정압 상승량이 크게 될 거라는 기대를 하였으나, 과도한 역압력 구배에 의한 손실이 증가됨으로써 정압 상승량이 작게 예측됨을 알 수 있었다.

2.2 회전차 출구에서의 압력분포

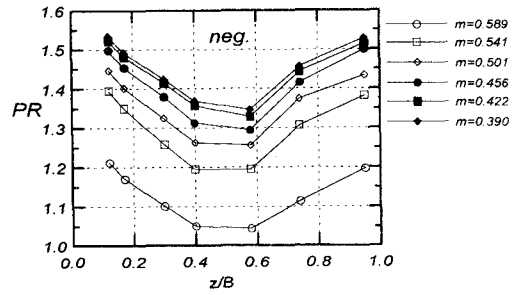
앞에서 언급하였듯이 회전차 출구에서의 압력분포는 베인이 설치되어 있기 때문에 원주방향으로 균일한 분포를 가지지 못하게 된다. 베인에 따른 영향을 살펴보기 위해서 회전차 출구에서 회전차 출구 쉬라우드 부분에 6개의 정압홀을 내어 유량 및 회전수 별로 압력을 측정하였다. 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 회전차 출구에서의 압력분포와 압력면과 흡입면에서의 압력 값이 베인의 turning 각에 의해서도 많은 영향을 보임을 알 수 있었다. 베인의 turning 각이 양에서 음으로 바뀌므로써 최저 압력점이 흡입면에서 압력면으로 이동하는 것을 알 수 있었으며, 유량이 감소할수록 압력면과 흡입면에서의 압력이 유로 중앙의 압력보다 높게 예측되었다.



(a) zero turning angle



(b) positive turning angle

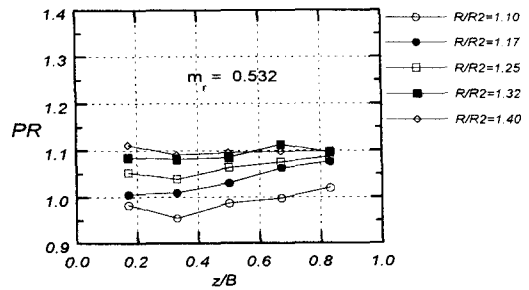


(c) negative turning angle

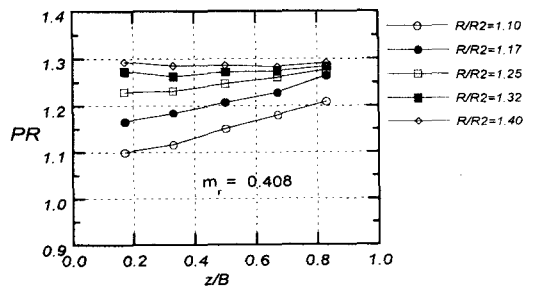
Fig. 7 Comparison of pressure distribution at impeller exit ($r/r_2 = 1$, 50,000 rpm)

2.3 디퓨저 내에서의 압력분포

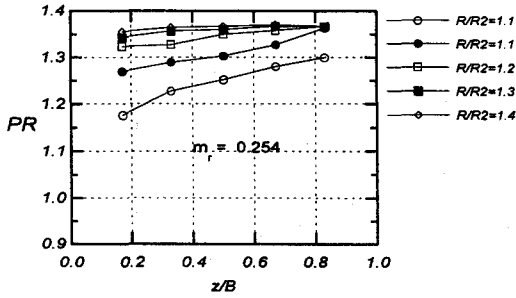
유량과 회전수의 변화에 따른 디퓨저 내부에서의 압력값을 측정하기 위해 압력면과 흡입면 사이에 5 지점, 반경방향으로 베인이 시작하는 지점 ($r_3/r_2=1.1$)부터 끝나는 지점 ($r_4/r_2=1.4$)까지 5 지점으로 총 25 지점에서 정압값을 측정하였다. Fig. 8에는 zero 회전각의 디퓨저에 대해 36,000 rpm에서 유량의 변화에 따른 디퓨저 내의 압력분포를 도시하였다.



(a) $m_r = 0.532$



(b) $m_r = 0.408$



(c) $m_r = 0.254$

Fig. 8 Pressure distribution in diffuser passage. (zero, 36,000 rpm)

고유량 영역에서는 원주방향에 대해 유동각이 상대적으로 크기 때문에 압력면과 흡입면의 압력차가 상대적으로 작으며, 저유량으로 갈수록 유동각에 의한 영향으로 흡입면에서 압력면으로 압력이 증가함을 알 수 있다. 그리고 베인이 끝나는 지점에서는 흡입면에서 압력면까지 원주방향으로 균일한 압력값을 나타내었다. 그림으로 제시하지는 않았지만 neg. 회전각의 디퓨저는 저유량 영역에서 베인 출구에서의 압력분포가 상대적으로 압력면의 압력이 흡입면보다 높게 예측되었다. 이것이 zero의 경우보다 먼저 스톨을 유발시키는 원인이라고 생각된다. 그리고 pos.의 경우 고유량에서의 디퓨저 출구 압력 상승량이 상당히 낮게 예측되었는데 이는 디퓨저 내부에서의 압력치가 불균일하게 주어짐으로써 디퓨저로서의 역할을 하지 못하기 때문이라고 생각된다. 또한 압력면과 흡입면의 압력분포도 흡입면이 상대적으로 높은 압력분포를 가졌다. 그러나 이러한 현상은 유량이 줄어들어감으로써 감소하였다.

2.4 탈 설계점에서의 성능특성

원심압축기의 특성 중의 하나는 저유량 영역에서 상대적으로 효율이 높다는 것이다. 이런 이유로 스톨 및 서지영역에서의 작동 안정성에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 본 연구에서는 스톨의 시작점을 전후해서 베인의 turning 각도가 압축기의 불안정성에 어떠한 영향을 미치는 지를 알아보기 위해서 회전차의 입구에 hotwire를 설치

하고 디퓨저 출구($r/r_2=1.8$)에 압력센서를 설치하였다. 안정성 등의 이유로 측정은 36,000 rpm에서 행하였다. 실험 결과의 분석을 위해 hotwire와 압력센서로부터 측정된 결과를 auto-correlation과 cross-correlation, FFT 방법을 적용시켰다. 그 방법을 간단히 기술하면 다음과 같다.

신호 $x(t) = x(n\Delta t)$ $n=1, 2, \dots, N$ 고려할 때, $r\Delta t$ 만큼 지연된 시간에서의 cross-correlation 함수는 다음과 같이 정의된다.

$$R(r\Delta t) = \frac{1}{N-r} \sum_{n=1}^{N-r} x_n y_{n+r} \quad r=0, 1, 2, (1) \dots, m$$

위 식은 ± 1 사이의 값을 가지도록 normalized 될 수 있다. 그 식은 아래와 같다.

$$\rho(r\Delta t) = \frac{R(r\Delta t)}{\sqrt{R(0)}\sqrt{R(0)}} \quad r=0, 1, 2, \dots (2)m$$

auto-correlation은 cross-correlation의 특수한 경우로서 y_{n+r} 를 x_{n+r} 로 바꾸면 된다. Fig. 9은 베인리스 디퓨저에 대해 전 유량범위에서 I-형 열선으로 측정된 데이터를 나타낸다.

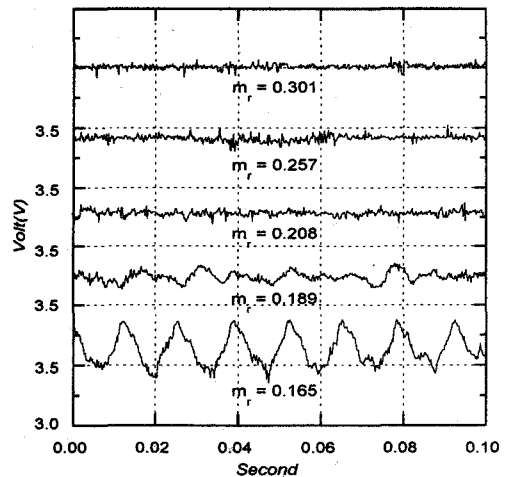


Fig. 9 Hotwire signal at impeller inlet (vaneless)

스톨이 시작되는 지점에서 전압신호는 안정된 영역에 비해 심한 요동을 하게 된다. 그림으로 나타내지 않았지만 베인리스 디퓨저의 경우가 가장

작은 유량에서 스톨이 감지되었으며, 유량을 줄여 갈 때, pos., zero, neg.의 순서로 스톨이 감지되었다. 스톨 주파수의 정량적인 값을 얻기 위하여 이들 신호를 FFT 처리를 하였으며, 주기 및 지연시간 등을 구하기 위해서 auto-correlation과 cross-correlation을 수행하였다. Fig. 10은 각각의 디퓨저에서 스톨이 시작하는 유량에서 열선과 전압신호를 이용하여 계산한 cross-correlation의 결과이다. 첫 번째 피크치까지를 두 지점간의 시간 지연량이라고 할 수 있는데, 주기가 크면 시간지연도 커지는 결과를 얻을 수 있었다.

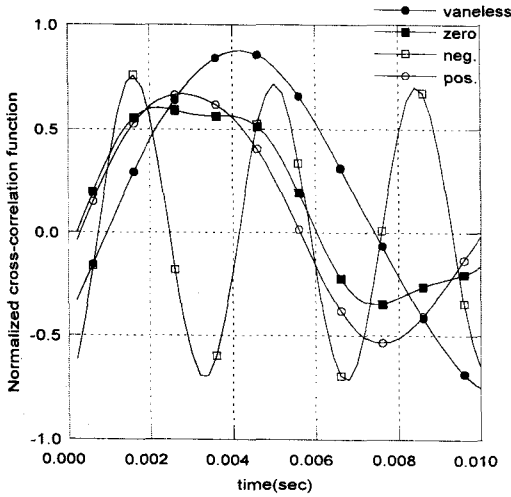


Fig. 10 Cross-correlation function with flow coefficient (impeller inlet & diffuser outlet, 36000 rpm)

Fig. 11은 hotwire신호의 FFT결과를 나타낸다. 베인리스 디퓨저가 가장 낮은 주파수를 가지는 것을 알 수 있었으며, 베인에 따라서도 주파수 특성이 다르게 나타났는데 역압력구배가 가장 강하게 일어날 수 있는 neg.의 경우가 가장 높은 주파수 특성을 가졌다. 결과에서 알 수 있듯이 베인의 설치에 의해서 로터-스테이터 간의 간섭에 의하여 주파수 특성이 높게 나타나는 것을 알 수 있었으며, 베인의 turning 각 즉, 압력구배에 의해서도 주파수 특성이 다르게 발생함을 알 수 있었다. 앞으로 임펠러의 입구, 출구 및 베인의 여러 지점에서 비정상 압력신호를 얻어 이들 결과에 대한 연구를 통하여 스톨 및 서지현상에 대한 보다 많은 연구가 진행되어질 예정이다.

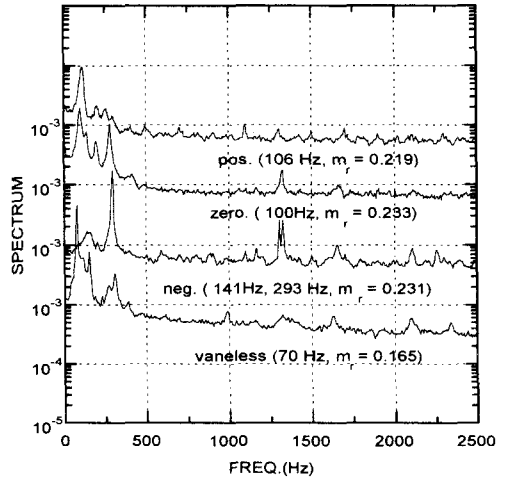


Fig. 11 Comparison of frequency spectrum with hotwire signal at impeller(36,000 rpm)

4. 결론

최근에 세계적으로 연구되어지고 있는 낮은 솔리디티의 디퓨저 (LSVD)를 세가지 형태로 설계·제작하고 성능시험을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 베인리스 디퓨저 보다 성능 및 효율면에서 낮은 솔리디티의 베인 디퓨저가 우수하며, 작동영역 면에서도 좋은 특성을 가졌다. 그러나 과도하게 회전각을 주게 되면, 실제 노즐 목은 존재하지 않지만 고유량 영역에서 디퓨저로서의 역할을 제대로 하지 못하는 것으로 나타났다.
- (2) 디퓨저 베인에 의해 임펠러 출구의 정압은 균일한 분포를 가지지 않았으며, 베인의 회전각에 따라 최소압력지점이 이동함을 실험을 통하여 관찰할 수 있었다.
- (3) 디퓨저 내부에서의 압력분포는 유량의 변화에 의해 압력면과 흡입면을 따라 변화를 가졌으며, 베인의 회전각에 따라 디퓨저의 압력분포의 변화를 관찰할 수 있었고, 스톨의 시작을 유발하는 하나의 원인으로 간주될 수 있음을 알 수 있었다.
- (4) 베인의 회전각에 따라 스톨점의 위치가 달라짐을 확인할 수 있었고, 주파수 특성도 다르게 관찰되었다.

앞으로 실험을 통하여 각 부의 비정상 압력신

호를 얻음으로써 스톨과 서지를 유발시키는 현상과 원인에 대해 연구가 진행될 예정이다.

후기

본 연구는 서울대 터보동력기계 연구센터와 한국과학기술 정책 관리연구소의 지원으로 이루어 졌습니다. 이에 관계자 여러분에게 심심한 감사를 표합니다.

참고 문헌

- (1) Senoo, Y., 1981, "Low Solidity Circular Cascade for Wide Flow Range Blower", Proceedings of Advanced Concepts in Turbomachinery, Fluid Dynamics Institute, Hanover, New Hampshire.
- (2) Senoo, Y. and Hayama, H., H., 1983, "Low Solidity Tandem Cascade Diffusers For Wide Flow Range Centrifugal Blowers", ASME-Paper 83-GT-3, 1983.
- (3) Osborne, C. and Sorokes, J., 1988 " The Application of Low Solidity Diffusers in Centrifugal Compressors", ASME Winter Annual Meeting 1988, FED Symposium, Chicago.
- (4) Sorokes., J. M. and Welch, J. P., 1992, "Experimental Results on a Rotatable Low Solidity Vaned Diffuser", ASME Paper, 92-GT-19.
- (5) 조성국, 강신형, 1998, "소형 원심압축기의 성능평가에 대한 실험적 연구", 대한기계학회논문집, 제22권 제8호, pp.1052~1063.