

디퓨저 베인각의 변화에 따른 압축기 성능 특성

배명형* · 신유환* · 김광호* · 김진형**

Compressor Performance with Variation of Diffuser Vane Inlet Angle

M. H. Bae*, Y. H. Shin*, K. H. Kim*, J. H. Kim**

Key Words: Vaned Diffuser(베인드 디퓨저), Centrifugal Compressor(원심압축기), Flow Coefficient(유량계수), Static Pressure Rise Coefficient(정압상승계수), Vaneless Space(베인리스 공간)

ABSTRACT

A centrifugal compressor was tested with three different diffusers with plate vanes. The vane inlet angle was varied from 15 to 30 deg. The higher static pressure rises are obtained with lower vane stagger angle. In the stable region the static pressure field in vaneless space is very sensitive to flow rate. The impeller has a stabilizing effect over the whole stable operating range. The diffuser has a stabilizing effect at high flow rate but is destabilizing at low flow rate.

1. 서 론

원심 압축기는 일반적으로 인듀서, 임펠러, 디퓨저 그리고 볼류트 케이싱 등으로 이루어져 있고, 그 기능상 임펠러와 디퓨저가 주요한 역할을 담당하고 있다.

임펠러에서 유출되는 유동은 임펠러 날개의 영향으로 원주 방향에 대해서 균일하지 않은 속도분포를 가지며 이것은 날개를 따라 발생하는 경계층의 영향으로 더욱 심화된다. 압축기 내에서 적절한 압축과정이 실현되기 위해서는 임펠러에서 토출된 유체의 운동에너지가 디퓨저를 지나면서, 압력이 효율적으로 회복되어야 한다. 그러나 디퓨저 내부에서의 압력변환 과정은 벽면 경계층의 영향과 박리, 실속 현상 등의 존재로 손실을 야기시키게 된다. 또한 디퓨저 입구에서의 비대칭 속도분포와 엇갈림(skew) 현상은 디퓨저 내부유동의 안정성에 영향을 준다. 특히, 저유량 조건에서 이

러한 유동특성은 디퓨저 벽에서 발생하는 국부적 역류와 직접적인 관련이 있다. 또한 이러한 국부적 역류현상은 디퓨저에서의 선회실속 현상과 관련이 있다고 할 수 있다.

디퓨저는 이러한 균일하지 못한 비대칭적 속도분포를 제거할 수 있어야 하며 안정된 작동 조건을 유지하여야 한다. 또한 압력 회복 능력과 저왜곡의 안정된 유동을 확립하는 것은 원심 압축기의 성능과 직결된다고 볼 수 있으므로 원심 압축기 디퓨저에서의 유동 안정성과 효율 향상을 위해서 디퓨저 내의 유동현상 및 성능을 정확히 이해하는 것은 매우 중요한 과제라 할 수 있다.

유량변화가 크지 않고 고효율의 압축기에는 주로 베인 디퓨저가 사용되고 있다. 베인 디퓨저의 원리는 깃을 설치함으로써 접선방향의 속도성분을 감소시키고 이것으로 인해 각운동량이 감소되어 유로의 길이를 줄임으로써 손실을 감소시키고자 하는 것이다. 베인 디퓨저는 일반적으로 베인리스 디퓨저에 비해 확산율이 높아 출구 직경을 작게 하는 것이 가능하여 마찰손실

* KIST 열유동제어센터

** Siemens Building Technologies Ltd.

을 줄일수 있으며 따라서, 베인리스 디퓨저에 비해 압력회복과 압축기 효율의 향상이 가능하지만 유량범위가 매우 좁다는 단점을 가지고 있다.

지금까지 원심압축기 베인 디퓨저 내부의 유동에 대한 연구는 많은 연구자에 의해 수행되어져 왔다. Baghdadi 등⁽¹⁾은 실험을 통하여 베인리스 공간(vaneless space)에서 디퓨저 통로 근방의 박리가 디퓨저에서 높은 손실을 가져오고 서지(surge)를 유발시킴을 밝혀내었고, Yoshinaga 등⁽²⁾은 디퓨저 베인의 선단부 형상이 디퓨저 성능에 미치는 영향을 연구하였으며, Krain⁽³⁾은 임펠러와 베인 디퓨저 내에서의 유동장에 대하여 연구하였다. 그리고 Inoue 등⁽⁴⁾은 원심압축기의 베인리스 디퓨저와 베인 디퓨저의 원주방향과 디퓨저 길이방향으로의 유동분포를 측정, 비교하였으며 Dutton 등⁽⁵⁾은 베인 유로에서 압력장과 속도장을 측정, 조사하였으며, Hunziker 등⁽⁶⁾은 디퓨저의 베인 각의 변화에 따른 압축기의 안정성에 대하여 연구하였다.

본 연구에서는 평판형 디퓨저의 각도 변화에 따라 압축기의 성능 및 디퓨저 내부에서의 벽압력을 측정함으로써 디퓨저 베인각의 변화가 압축기의 성능에 미치는 영향을 연구하였다.

2. 실험장치 및 측정 시스템

장치의 단면도와 주요 구성은 Fig. 1과 같다. 본 실험장치는 디퓨저의 기하학적 형상에 따른 압축기의 성능고찰이라는 실험목적에 부합하기 위하여 여러 형상의 디퓨저의 교체가 가능하도록 탈부착이 용이하게 이루어질 수 있게 되어 있다.

입구 플레넘(plenum)과 입구 덕트 사이에 bellmouth를 설치하였고 입구 플레넘에는 스크린 필터를 설치하

여 흡입 공기중의 이물질질을 제거하였다. 유량 조절 밸브는 출구 덕트 끝단에 설치하였고 밸브에 타이밍 벨트로 장착된 기어를 설치하여 스텝핑 모터로 구동 조절할 수 있도록 제작 하였다. 구동모터는 3상 2극(정격회전수 3560rpm) 15KW 용량을 사용하였다. 안전을 위하여 이상 상태 발생시 모터의 전원을 차단할 수 있도록 비상 스위치를 장착하였다.

임펠러는 splitter가 없는 반경류형 임펠러이고 실험대상인 디퓨저의 쉬라우드면에 직경이 1mm인 압력탭을 설치하여 베인 사이의 정압을 측정할수 있도록 구성되었다. 임펠러의 기본 제원은 Table 1에 제시하였고 디퓨저의 주요 제원은 Table 2에 나타내었다.

디퓨저를 통과한 공기를 모으기위하여 디퓨저 출구에 collecting chamber를 설치하였고 압축된 공기는 collecting chamber, 출구덕트를 경유하게 된다.

측정시스템은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 구성되었다. 압력 및 온도측정을 위하여 압력측정시스템과 온도스캐너로 이루어져 있는데, 압력측정용 시스템은

Table 1. Geometry of impeller (unit : mm)

Impeller exit diameter	418
Impeller hub diameter	110
Impeller tip diameter	240
Number of impeller blade	17 (no splitter)
Impeller exit blade angle	90° (from tangential direction)

Table 2. Geometry of diffuser (unit : mm)

Vane angle	15°	23°	30°
Inlet diameter	420		
Outlet diameter	720		
Inlet width	19.4		
Outlet width	19.4		
Number of vanes	16		
Vane type	plate		
Vane length	120		
Vane thickness	2		

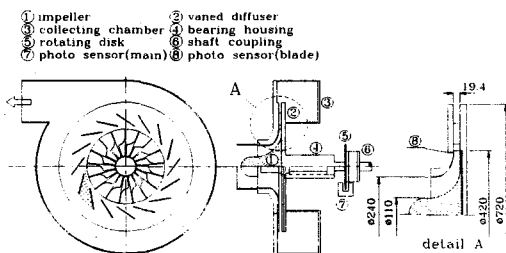


Fig. 1 Test rig of centrifugal compressor

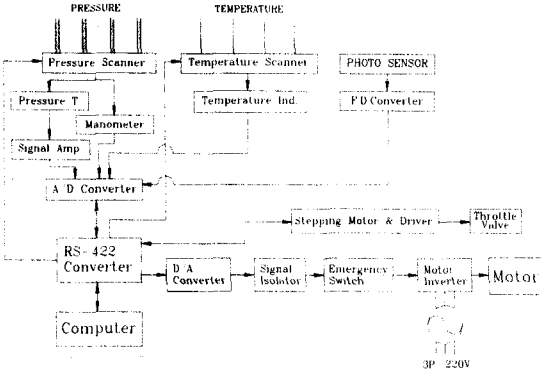


Fig. 2 Measurement system

PSI의 system 8400을 이용하였으며, 온도는 K형 열전대를 사용하였다. 측정된 각 신호값은 컴퓨터로 입력되어 후처리 과정을 거치게 된다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 압축기 전체, 임펠러 그리고 디퓨저의 성능을 측정하기 위해 여러 유량조건에 대하여 3000rpm의 회전수에서 실험을 수행하였다. 유량계수와 정압상승계수의 정의는 각각 다음과 같다. 유량은 출구덕트의 오리피스 전후 압력의 차이로부터 계산하였고, 정압상승은 압축기 입구 플레넘과 임펠러 출구 사이를 임펠러로, 디퓨저 입구와 압축기 출구 덕트사이를 디퓨저로, 각각의 정압상승의 합을 압축기 전체로 보고 계산하였다.

$$\phi = \frac{Q}{\pi D_2 b_2 U_2} \quad (1)$$

$$C_p = \frac{\Delta p}{1/2 \rho_\infty U_2^2} \quad (2)$$

베인각의 변화에 따른 성능곡선은 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3을 살펴보면 베인각이 작을수록 높은 정압상승 효과를 가져올 수 있다. 이는 디퓨저 통과에서의 압력회복이 베인각에 따라 상당한 영향을 받음을 의미한다. 또한 유량이 감소하면서 정압상승계수가 증가하다가 베인각이 15°인 경우 $\phi = 0.34$, 30°인 경우 $\phi = 0.37$ 부근에서 정압상승계수가 감소함을 볼 수 있는데 이 부근에서 선회실속이 발생하면서 불안정 운전 영역으로 접어들게 된다. 불안정 운전영역에서의 성능

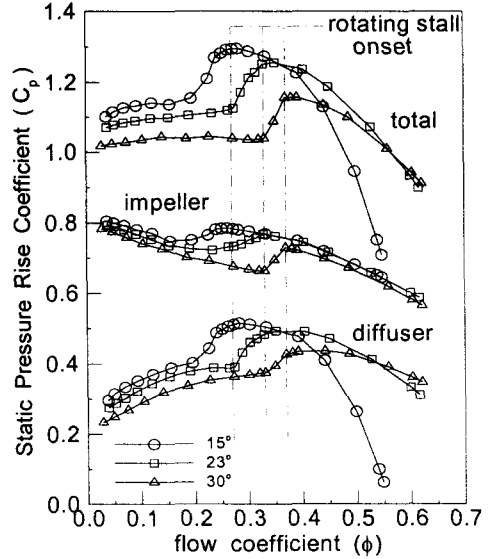


Fig. 3 Comparison of performances

특성 곡선을 살펴보면 임펠러는 저유량부근으로 갈수록 정압상승계수가 증가하는 반면 압축기 전체와 디퓨저에서는 정압상승계수가 감소하는 경향을 보인다.

압축기 전체의 성능특성곡선은 디퓨저의 성능특성곡선과 유사한 형태를 보이는데 이는 디퓨저가 압축기 전체의 성능 특성에 지배적인 영향을 미침을 의미한다.

Fig. 4는 각각 베인각이 15°, 23°, 30°인 경우 유량계수에 대한 정압상승계수의 변화량, 즉 $\Delta C_p / \Delta \phi$ 을 나타낸 것이다. $\Delta C_p / \Delta \phi$ 는 Greitzer⁽⁷⁾가 언급했듯이 유체기계 안정성에 대한 척도로 이용된다. 즉, $\Delta C_p / \Delta \phi$ 가 양의 값을 가지면 불안정 영역이고, 음의 값을 가지면 안정 영역이라 볼 수 있다. Fig. 4에서 확인할 수 있듯이 임펠러는 선회실속이 발생하는 지점 부근까지 안정적임을 보이는 반면, 디퓨저는 고유량계수에서는 상당한 안정성을 보이지만 유량이 감소하면서 선회실속 발생 지점 부근으로 갈수록 불안정성을 보인다. 압축기 전체의 $\Delta C_p / \Delta \phi$ 는 임펠러의 영향보다는 디퓨저에 의한 영향이 지배적임을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 베인각이 23°인 경우 안정영역에서의 정압상승계수의 분포를 나타낸 것이다. 유량계수가 큰 경우 ($\phi = 0.61$) 임펠러 출구에서 유출된 유동이 베인리스 공간(vaneless space)을 거쳐 디퓨저 통로로 유입되면서 강한 곡부 가속을 갖게 된다. 압력분포가 최소인 지점은 베인의 압력면(pressure side) 선단부근에서

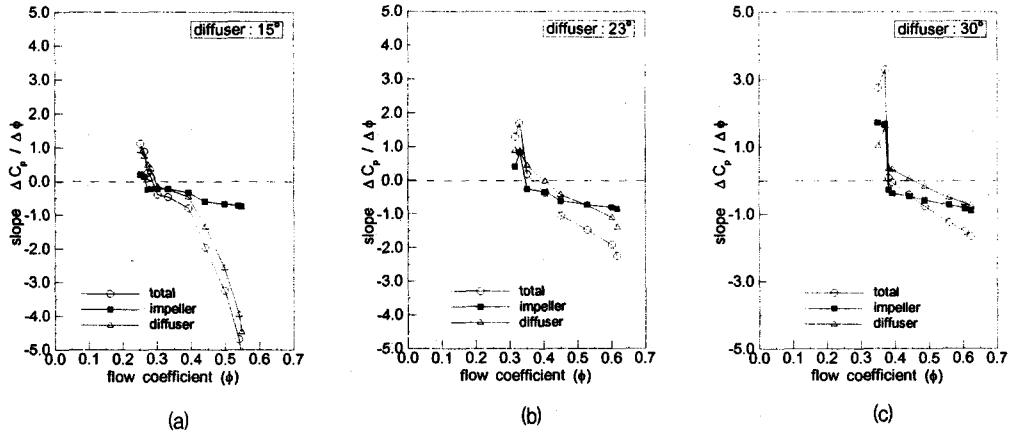


Fig. 4 Slopes of static pressure rise coefficients with flow coefficients

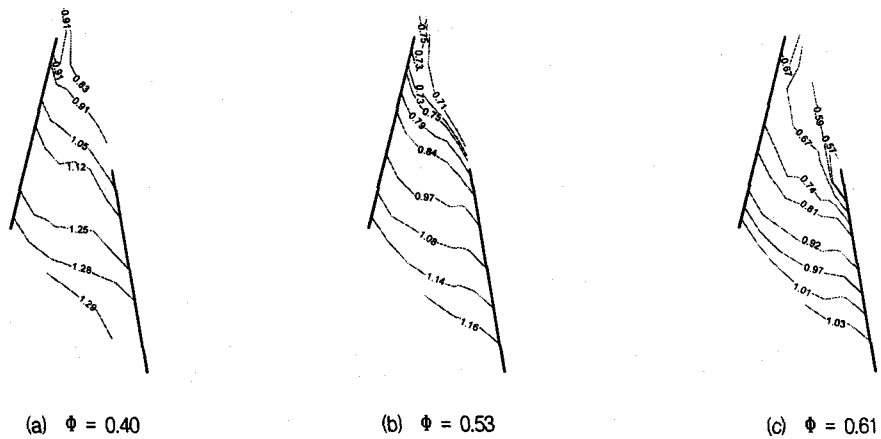


Fig. 5 Static pressure rise coefficient contours within the 23 deg diffuser at three different flow coefficients

존재하며, 베인 유로를 따라 후류로 갈수록 점차적으로 일정한 형태의 압력분포를 보임을 확인할 수 있다. 유량계수가 0.53 부근과 0.40 부근의 정압상승계수의 분포를 살펴보면 유량계수가 큰 경우보다 규칙적인 압력상승을 보인다. 또한 저압력의 국부적 포켓(local pocket)은 베인의 흡입면(suction side) 부근의 선단부에서 나타나는데 이것은 유량이 감소하면서 유체의 유동이 보다 접선방향으로 작용하는데 그 원인이 있다. 전반적으로 베인리스 공간(vaneless space)에서의 정압은 유량의 변화에 상당히 민감함을 볼 수 있다.^(5,6)

Fig. 6과 Fig. 7은 반경방향과 원주방향의 정압상승계수의 분포를 나타낸 것이다. 고유량 부근($\phi = 0.61$)에서 압력면의 선단부 근처에서 최소압력이 존재하고 (Fig. 7(c), Fig. 8(c)), 중간 유량 부근과 저유량 부근(ϕ

$= 0.53, 0.40$)에서 흡입면의 선단부 근처에서의 압력강하가 나타남을 확인할 수 있으며 (Fig. 7(a), Fig. 7(b)), 베인 유로의 후류로 갈수록 압력분포가 원주방향을 따라 거의 변화가 없음을 볼 수 있다(Fig. 8(a), Fig. 8(b), Fig. 8(c)). 또한 유량이 감소할수록 정압이 점차 높아짐을 확인할 수 있다.

Fig. 8에서는 베인 각이 15°인 경우 안정영역에서의 정압상승계수를 원주방향으로 나타내었다. 베인 각의 감소로 인하여 고유량 영역 ($\phi = 0.54$) 부근에서 베인 각이 23°인 경우보다 유동의 국부적 가속이 증가하게 되어 압력면의 선단부에서 보다 낮은 정압분포를 보이며 중간 유량 영역 ($\phi = 0.44$)까지 그 영향을 미칠 수 있다. 유량이 더 감소하게 되면 접선방향 유동성분의 영향이 증가하여 흡입면선단부의 정압을 감

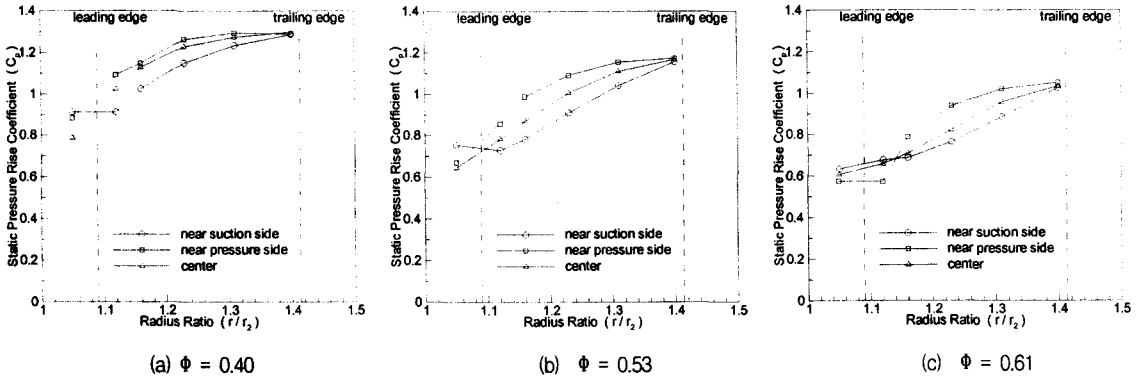


Fig. 6 Variations of static pressure rise coefficients with radius ratio (23 deg diffuser)

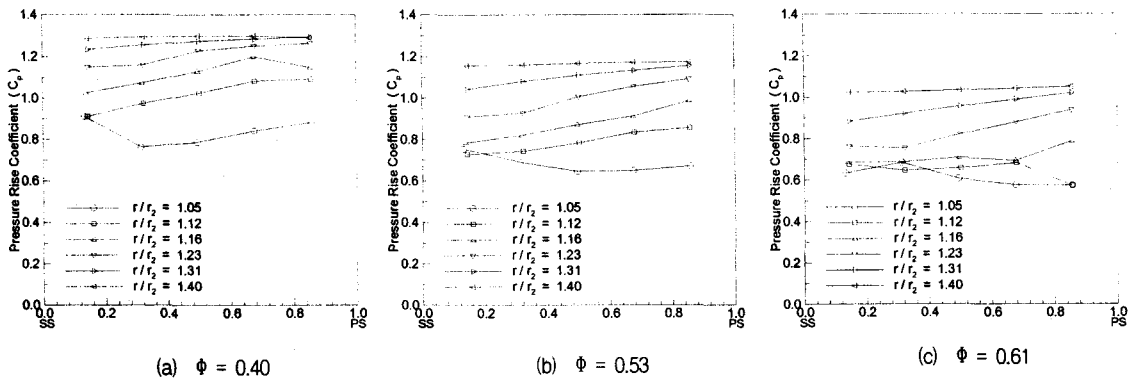


Fig. 7 Variations of static pressure rise coefficients within diffuser vane

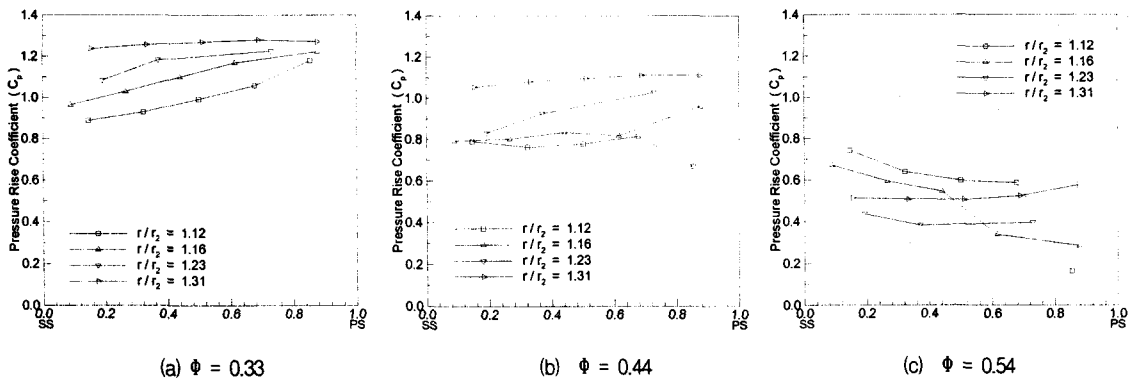


Fig. 8 Variations of static pressure rise coefficients within diffuser vane (15 deg diffuser)

소시키는 결과를 초래하게 된다($\phi = 0.33$).

Fig. 9는 베인 각이 30°인 경우 안정영역에서의 정압상승계수를 원주방향으로 나타낸 것이다. 베인 각이 커지면서 유동의 접선방향의 영향의 증가로 인해 베인

각이 15°인 경우와는 대조적으로 전 유량 영역 ($\phi = 0.38, 0.49, 0.62$)에 걸쳐 정압상승계수가 최소인 지점 흡입면 선단부 근처에서 나타남을 볼 수 있다.

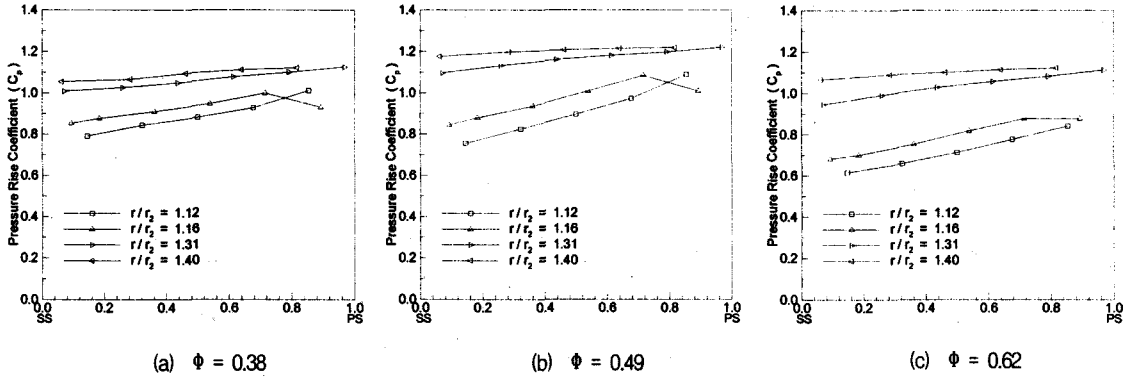


Fig. 9 Variations of static pressure rise coefficients within diffuser vane (30 deg diffuser)

5. 결 론

원심압축기의 베인 디퓨저의 성능에 대한 실험적 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 디퓨저 베인 각이 작을수록 높은 정압상승을 보임을 확인하였다.
- 2) 압축기 전체의 성능특성곡선은 디퓨저의 성능특성곡선과 유사한 형태를 보이는데 이는 디퓨저가 압축기 전체의 성능에 지배적인 영향을 미침을 의미 한다고 볼수 있다.
- 3) 전반적으로 베인리스 공간에서의 정압은 유량의 변화에 상당히 민감하다.
- 4) 베인각의 변화에 따라 베인 사이에서의 최소압력지점이 이동함을 확인하였다.
- 5) 안정영역에서 임펠러는 선회실속 부근까지 안정적임을 보이는 반면 디퓨저는 선회실속 발생지점 부근으로 갈수록 불안정성을 나타낸다.

참고 문헌

- (1) S. Baghadadi, A. T. McDonald, 1975, "Performance of Three Vaned Radial Diffusers With Swirling Transonic Flow", ASME J. of Fluids Engineering, pp. 155~173
- (2) Y. Yoshinaga, I. Gyobu, H. Mishina, F. Koseki, H. Nishida, 1980, "Aerodynamic Performance of a Centrifugal Compressor With Vaned Diffusers", ASME J. of Fluids Engineering, Vol.102, pp.486~ 493
- (3) H. Krain, 1981, "A Study on Centrifugal Impeller and Diffuser Flow", ASME J. of Engineering for Power, Vol.103, pp. 688~697
- (4) M. Inoue, N. A. Cumpsty, 1984, "Experimental Study of Centrifugal Impeller Discharge Flow in Vanelsee and Vaned Diffusers", ASME J. of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 106, pp. 455~467
- (5) J. C. Dutton, P. Piemsomboon, P. E. Jenkins, 1986, "Flowfield and Performance Measurements in a Vaned Radial Diffuser", ASME J. of Fluids Engineering, Vol. 108, pp. 141~147
- (6) R. Hunziker, G. Gyarmathy, 1994, "The Operational Stability of a Centrifugal Compressor and its Dependence on the Characteristics on the Subcomponents", ASME J. of Turbomachinery, Vol.116, pp. 250~259
- (7) E. M. Greitzer, 1981, "The Stability of Pumping Systems-The Freeman Scholar Lecture", ASME J. of Fluids Engineering, Vol. 103, pp.193~242