

설계 및 탈설계점에서의 원심압축기 채널디퓨저 내부의 압력분포에 관한 연구

강 정 식* · 강 신 형**

A Study on the Pressure Distribution in the Centrifugal Compressor Channel Diffuser at Design and Off-Design Conditions

Jeong-Seek Kang and Shin-Hyoung Kang

Key Words: Channel Diffuser (채널디퓨저), Centrifugal Compressor (원심압축기), Pressure Distribution (압력분포), Off-Design Condition (탈설계점)

Abstract

The aim of this paper is to understand the time averaged pressure distributions in a high-speed centrifugal compressor channel diffuser at design and off-design flow rates. Pressure distributions from the impeller exit to the channel diffuser exit are measured and discussed for various flow rates from choke to near surge condition, and the effect of operating condition is discussed. The strong non-uniformity in the pressure distribution is obtained over the vaneless space and semi-vaneless space caused by the impeller-diffuser interaction. As the flow rate increases, flow separation near the throat, due to large incidence angle at the vane leading edge, increases aerodynamic blockage and reduces the aerodynamic flow area downstream. Thus the minimum pressure location occurs downstream of the geometric throat, and it is named as the aerodynamic throat. And at choke condition, normal shock occurs downstream of this aerodynamic throat. The variation in the location of the aerodynamic throat is discussed.

기호설명

- AS₄ : 디퓨저 목 중형비
- L : 채널 디퓨저의 길이
- Pr : 시간 평균된 정압비
- R₂ : 임펠러 출구 반경
- R₃ : 채널디퓨저 입구 반경
- W₄ : 채널디퓨저 목의 폭

그리스문자

- α_3 : 디퓨저 베인의 각
- 2θ : 채널디퓨저 확산각
- 2ϕ : 디퓨저 베인의 확산각

* 서울대학교 대학원 기계공학과

** 서울대학교 기계항공공학부

1. 서론

원심압축기의 임펠러에서 나오는 유체는 높은 속도를 가지고 있으므로, 이를 효과적으로 정압으로 회복시키는 것이 필요하다. 채널디퓨저는 일반적으로 베인 디퓨저 중에서도 가장 높은 압력회복 성능을 가지고 있어서 고효율의 원심압축기에서 자주 사용된다. 그리고, 디퓨저는 작동범위가 중요한 문제인데, 채널디퓨저는 높은 압력회복 특성을 가진 반면에, 작동범위가 좁은 단점을 가지고 있다. 원심압축기의 최대 유량은 바로 채널디퓨저의 목의 면적에 의하여 결정된다. 그리고 고유량과 저유량의 작동에서는 베인에서의 큰 입사각으로 인하여, 채널디퓨저의 성능이 저하되어 오히려 베인없는 디퓨저보다 성능이 낮아

지게 된다. 그러므로 채널디퓨저의 연구에서는 설계유량 뿐 아니라 탈 설계유량에서의 자세한 연구가 필요하다.

Krain^(1,2)은 임펠러와 채널디퓨저 내부에서 L2F 속도계를 사용하여 속도를 측정하였고, 또한 설계유량에서 디퓨저 내에서 압력분포를 측정하였다. Kano⁽³⁾ 등은 채널디퓨저 내부에서 압력분포를 측정하였는데, 설계유량뿐 아니라 고유량과 저유량에서도 각각 압력분포를 측정하여 보고하였다. Dawes⁽⁴⁾는 Krain의 임펠러와 디퓨저에 대하여 비정상 유동해석을 수행하여 실험결과와 비교하였다.

Justen⁽⁵⁾ 등은 빠른 속도응답의 압력변환기를 사용하여, 채널디퓨저 내부에서의 순간압력 분포를 측정하였다. 설계유량과 서지 근처의 유량에서 임펠러의 위치에 따른 순간압력 분포를 나타

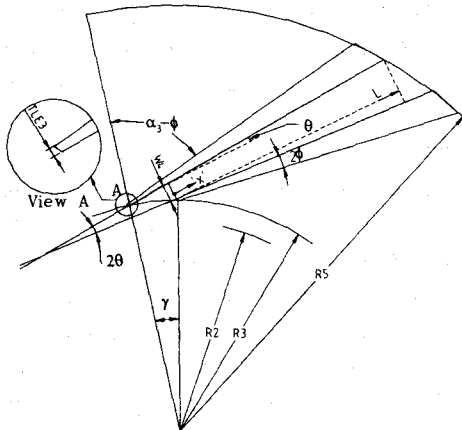


Fig. 2 Configuration of channel diffuser

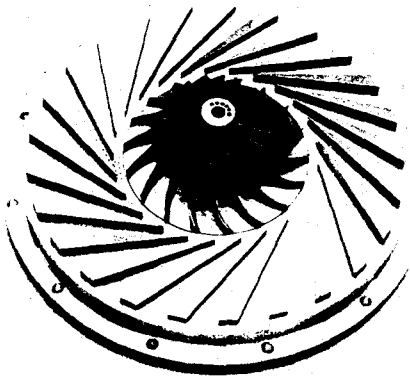


Fig. 1 Test impeller and channel diffuser

내었다. 그리고 초크 유량에서는 스트로보 솔리덴 사진을 이용하여 채널 내부에서 충격파의 모습을 보였다.

압력상승이 주목적인 채널디퓨저에서 유량 변화에 따른 내부유동 특히 압력분포에 대한 이해는 아직까지 충분하지 않다. 이 논문에서는 설계유량뿐 아니라 서지 근처유량에서부터 초크 유량에 이르기까지 넓은 범위에서 임펠러 출구에서부터 디퓨저 출구까지 자세한 압력분포를 측정하고 그 결과를 토의하였다.

2. 실험방법

2.1 시험장치

채널디퓨저의 형상은 Fig. 1과 같다. 본 연구에서는 1단으로 구성된 채널디퓨저를 가진 원심 압축기를 사용하였으며 자세한 사양은 Table 1에 나타내었다. 회전차의 구동을 위하여 터보차저 방식을 응용하였다. 구동동력을 얻기 위해서 세대의 이동식 공기압축기와 가열기를 사용하였으며, 터빈으로 유입되는 유량을 조절하기 위하여 터빈 입구측에 유량조절용 밸브를 설치하였으며, 이에 의해 회전수를 조절하게 된다. 터빈의 회전력에 의해 압축기가 회전하게 되고, 대기 공기가

Table 1 Specification of test impeller and channel diffuser

Impeller Diameter	110 mm
Inducer Tip Diameter	63.4 mm
Inducer Hub Diameter	20.4 mm
Inducer Tip Blade Angle	-60 deg.
Inducer Hub Blade Angle	-29.2 deg.
Backsweep Angle	-35 deg.
Number of Impeller Blades	18
Design Speed	60000 rpm
Impeller Tip Width	5.5 mm
L/W_4	11.4
AS_4	1
2θ	7.6 deg.
Number of Diffuser Vanes	25
2ϕ	6.8 deg.
α_3	70 deg.
R_3/R_2	1.1

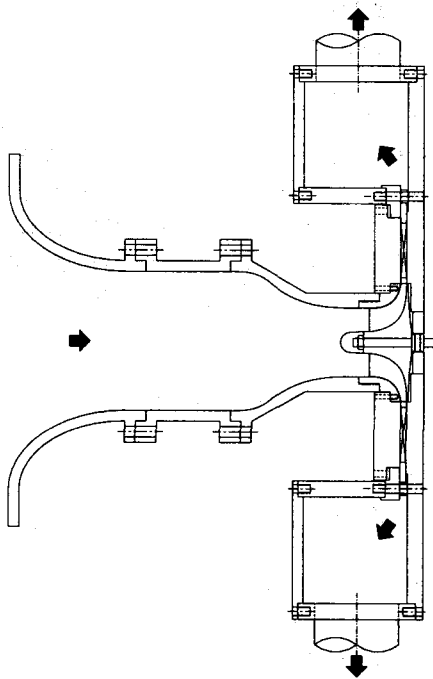


Fig. 3 Compressor test section

입구 챔버를 통하여 유입되게 된다. 압축기 출구 측에 유량조절용 밸브를 설치하여 배압을 조절함으로써 성능시험을 수행하게 된다. 터빈과 압축기의 배관 출구에 소음기를 설치하여 운전 소음을 줄이도록 하였다. 압축기의 출구에는 체적이 큰 콜렉터를 연결하였다. 시험장치에 대한 자세한 사항은 조성국과 강신형⁽⁶⁾, Kang⁽⁷⁾ 등에 잘 나타나 있으며, 채널디퓨저의 설계 과정은 강정식⁽⁸⁾, 강신형과 강정식⁽⁹⁾에, 채널디퓨저의 성능실험 결과는 Kang⁽⁷⁾ 등에 수록되어 있다. Fig. 2는 실험에 사용된 임펠러와 채널디퓨저의 그림이며 Fig. 3에는 채널디퓨저의 개략도를 나타내었다.

2.2 측정방법

디퓨저 내의 압력분포를 측정하기 위하여, 임펠러 출구부터 디퓨저 출구까지 121곳에 직경 0.5mm의 압력측정 탭을 사용하였다. 측정된 압력탭의 위치는 Fig. 4에 나타내었다. 압력탭은 튜브를 통하여 스캐니밸브, 압력센서와 연결되었다. 압력신호는 15초간 75000 개의 데이터를 측정하였고, 이를 평균하여 시간평균된 압력을 얻었다. 측정오차는 유량은 0.51%, 압력은 0.35% 였다.

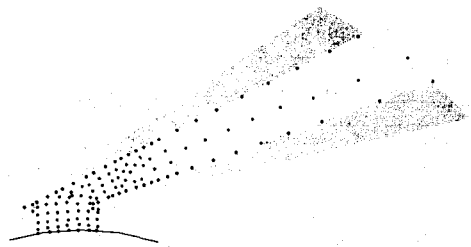


Fig. 4 Location of static pressure taps

3. 결과

3.1 압축기 성능곡선

서지유량에서 초크유량까지의 압축기의 특성곡선을 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 I는 설계유량이고, AA와 A는 초크유량이며, P와 Q는 서지유량이다. 설계유량에서 유량이 감소하면 특성곡선의 기울기는 거의 0에 가까우며, 서지유량(P, Q)에 이르면 약 12 Hz의 서지파가 발생하였다.^(10,11) 설계유량에서 유량이 증가하면 특성곡선의 기울기가 급격해지며 A와 AA에서 초킹(choking)현상이 발생하였다. 임펠러 출구의 압력은 전반적으로 음의 기울기를 가지며 안정적인 특성을 보이지만, 초크 유량에서는 갑자기 임펠러 출구의 압력이 증가한다. 이렇게 임펠러 출구에서의 압력이 디퓨저 출구에서의 압력보다 커지는 현상은, 초크와 그에 따른 디퓨저 내에서 발생한 수직충격파와 관련이 있으며, 자세한 유동 결과는 뒤에서 설명하였다.

3.2 디퓨저 내의 압력분포

측정된 압력분포를 Fig. 6에 나타내었다. 압력분포는 모두 압력비 0.03의 간격으로 표현하였다. Fig. 6(e)는 설계유량(I)에서의 디퓨저 내의 압력분포를 보여준다. 배인없는 공간(vaneless space)과 semi-vaneless space에서의 압력회복 크기가 채널 내부의 압력회복 크기보다 크다. 배인의 선단(leading edge)에서는 정체현상이 일어나 높은 압력이 발생하며, 이로 인하여 배인의 선단 근처에 높은 압력 구배가 발생한다. 또한 이 현상이 배인없는 공간에서의 물결모양의 압력분포를 일으키는 주원인이 된다. 배인과 배인 사이에서는 상대적으로 낮은 압력이 발생하고, 배인이 있는 곳

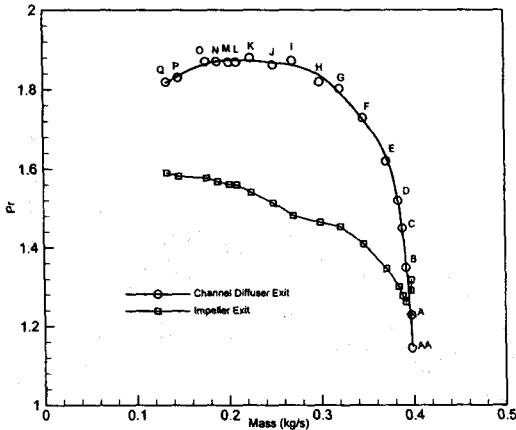


Fig. 5 Performance map of compressor

에서는 상대적으로 높은 압력이 발생하여 물결모양의 압력파를 형성한다. 이 배인없는 공간에서의 물결모양의 압력파는 Fig. 6에서 보듯이 초크 유량과 서지 유량에 이르기까지 모두 존재한다.

위의 결과로 볼 때 배인 선단의 모양은 채널 디퓨저의 성능에 영향을 미칠 것으로 예상된다. 이와 비슷하게 Yoshinaga⁽¹²⁾ 등은 배인 선단의 형상에 삼각형과 사각형의 홈을 파서 이것이 성능에 큰 영향을 미침을 관찰하였다. 본 실험에서도 선단의 두께, 각진 형상 등이 성능에 많은 영향을 미치리라 생각되며, 이에 대한 지속적인 연구가 필요하다고 생각된다.

유량이 조금 적은 M의 경우의 압력분포를 Fig. 6(f)에 나타내었다. 배인없는 공간과 semi-vaneless space 에서의 압력회복은 설계유량인 Fig. 6(e) 보다 조금 낮다. 목에서는 흡입면 방향으로 낮은 압력 영역이 발생하는 데, 이것은 유량이 줄어들어서 인하여 큰 유동각을 유체가 배인에서 음의 입사각(배인각-유동각)을 가져서 배인의 흡입면 부분에 부분적인 박리를 일으키기 때문이라고 생각된다. 이 현상은 좀 더 적은 유량 O에서의 그림인 Fig. 6(g)에서도 비슷하게 나타난다. 유량 O에서는 배인없는 공간에서의 압력회복이 매우 줄어들었다.

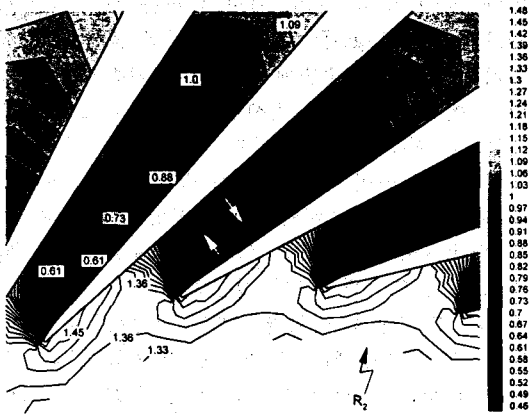
설계유량보다 유량이 조금씩 많아지면서, 유체의 유동각이 커져서 배인에서는 양의 입사각을 가지게 된다. 양의 입사각이 점점 커지면 선단 후류의 압력면에서 박리가 일어나서 낮은 압력 영역이 발생한다. 이것이 Fig. 6(d)에 나타나 있으며, 가장 낮은 압력 부분에 흰 화살표를 표시하

였다. 양의 입사각으로 인한 박리는 목 이후에서 유로폐쇄(blockage)를 일으켜 유체의 흐름을 방해하기 때문에 그 주변에서 유체가 가속되어 압력이 낮아지는 현상이 발생한다. 그래서 고유량에서는 목 이후에서는 박리와 가속이라는 두 가지 요인으로 인하여 형상에 의한 목(geometric throat) 이후에서 순압력구배의 압력영역이 존재하며, 어느 위치에서 가장 낮은 압력을 일으키고, 그 이후로 다시 역압력구배가 발생하여 압력이 증가하게 된다. 이렇게 순압력구배와 역압력구배가 만나서 가장 낮은 압력을 이루는 위치를 공력학적 목(aerodynamic throat)이라고 이름지었다. 공력학적 목이라고 한 이유는 박리로 인하여 채널의 유효면적(effective area)이 형상에 의한 목의 유효면적보다 작아지기 때문이다. 그리고 최대유량을 결정하는 목은 형상에 의한 목이 아니라 유효면적에 의한 목이기 때문이다. 그러므로 채널디퓨저의 초크유량은 공력학적 목에 의하여 결정되며, 설계자는 공력학적 목에서의 유효면적을 적절하게 계산하는 것이 필요하다.

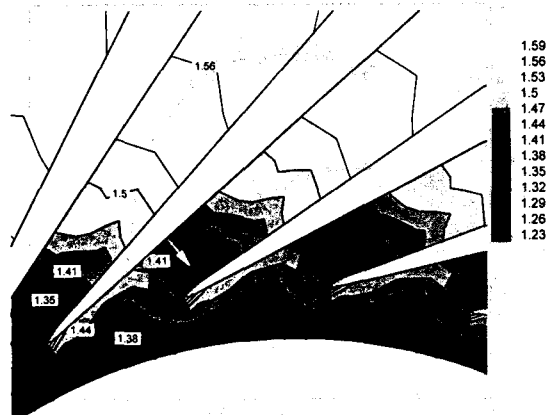
유량이 많아지면서 목 이후의 압력면에서 낮은 압력이 발생하는 현상은 Kano⁽³⁾ 등의 실험결과에도 나타나 있다. 비록 그들은 이 현상에 대하여 특별히 언급하지 않았지만, 설계유량보다 15% 많은 유량에서 L/W_4 가 약 0.66정도 되는 위치의 압력면에서 낮은 압력이 발생하였다. 본 실험에서는 Fig. 7에 나타내었듯이 L/W_4 가 약 0.44~0.56의 위치에서 이 현상이 나타났다.

유량이 많아질수록 공력학적 목은 더욱 뚜렷하게 형성된다. 유량 B의 경우를 Fig. 6(c)에 나타내었으며 가장 낮은 압력위치에 화살표를 나타내었다. 형상에 의한 목 위치에서부터 공력학적 목 위치까지 급격한 순압력구배가 발생하는데, 이는 유체가 급격히 가속되고 있음을 보여준다. 공력학적 목 이후부터는 다시 압력이 증가한다. 공력학적 목의 위치에서도 가장 낮은 압력은 유량 E의 경우와 마찬가지로 압력면 근처에 있다.

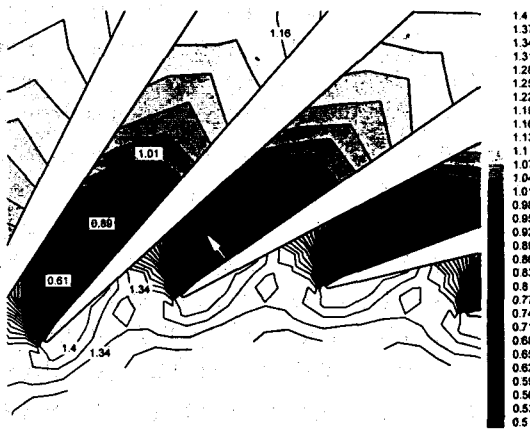
디퓨저에서 통과할 수 있는 최대 유량인 초크 유량(A)에서의 압력분포를 각각 Fig. 6(b)에 나타내었다. 형상에 의한 목 위치에서부터 순압력구배가 발생하여 압력이 급격히 강하되며, L/W_4 가 약 1.1의 위치에서 가장 낮은 압력이 발생하며, 그 이후에 압력은 다시 상승한다. 압력이 가장 낮은 위치에 흰색의 화살표를 표시하였다. 유량



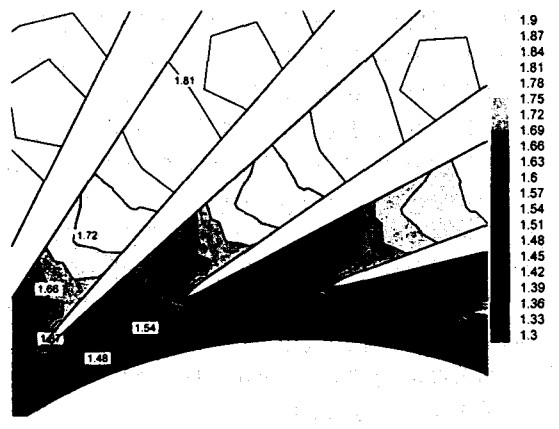
(a) Static pressure contour in flow condition AA.



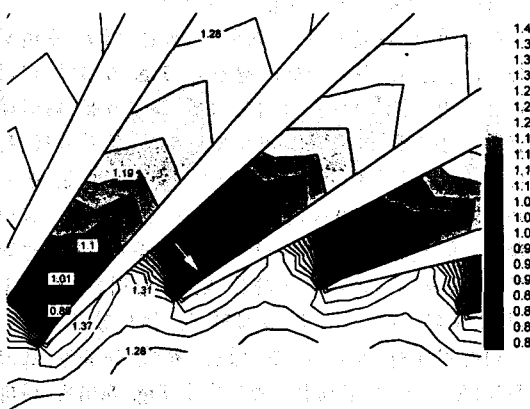
(d) Static pressure contour in flow condition E.



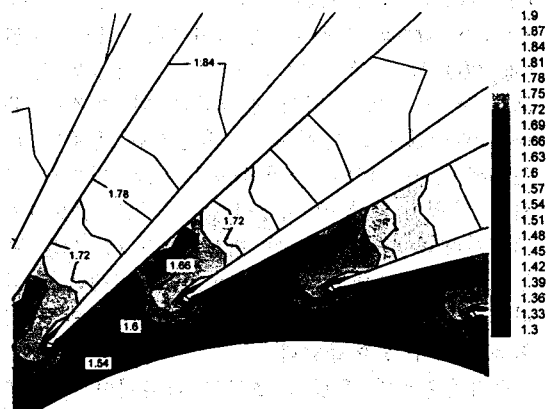
(b) Static pressure contour in flow condition A.



(e) Static pressure contour in flow condition I.

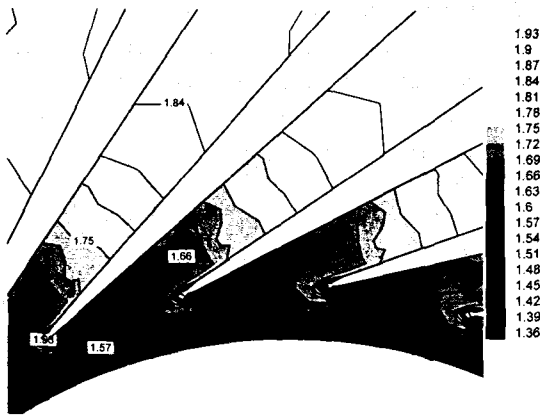


(c) Static pressure contour in flow condition B.



(f) Static pressure contour in flow condition M.

Fig. 6 Time-averaged static pressure contour in channel diffuser (continue).



(g) Static pressure contour in flow condition O.
Fig. 6 Time-averaged static pressure contour in channel diffuser

AA는 압축기 출구에서의 배압을 좀 더 낮추어서 작동시킨 경우이며, 압력분포결과를 Fig. 6(a)에 나타내었다.

각각의 작동조건에서 압력이 가장 낮은 곳에서의 마하수를 추정하였다. 임펠러 출구의 압력은 측정된 값을 사용하고, 임펠러 출구의 전압은 조성국⁽⁶⁾ 등의 성능평가방법을 통하여 적절한 값을 계산하였다. 이로부터 임펠러 출구에서의 마하수를 계산하였고, 임펠러 출구에서 가장 낮은 압력까지의 손실계수를 적절히 넓은 오차범위에서 가정하여, 가장 낮은 압력위치에서의 마하수를 추정하였으며, 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 유량 B, C, D 그리고 E에서는 마하수가 1이 되지 않지만, 초크유량인 A와 AA에서는 마하수가 약 1.3이 된다. 다시 말해서 유량 A와 AA에서의 가장 낮은 압력 위치는 충격파가 발생한 위치임을 알 수 있다. 그래서 그 위치도 B, C, D, E에서는 유량이 증가할수록 조금씩 후퇴하나 큰 차이가 없지만($0.44 \leq L/W_1 \leq 0.56$), A와 AA에서는 급격히 뒤로 후퇴한다($1.1 \leq L/W_1 \leq 1.5$). 그리고 가장 낮은 압력의 위치도 더 이상 압력면에 치우치지 않고 채널의 가운데 부분을 중심으로 압력면과 흡입면에 걸쳐있다. Justen⁽⁵⁾ 등은 채널 내부에서 초크가 일어날 때 발생하는 충격파의 모습을 스트로보 슐리렌 사진을 통하여 촬영하였으며, 충격파가 발생하는 위치는 스포트 되는 정도와 임펠러 날개의 위치에 따라 변하며 약 $0.92 \leq L/W_1$

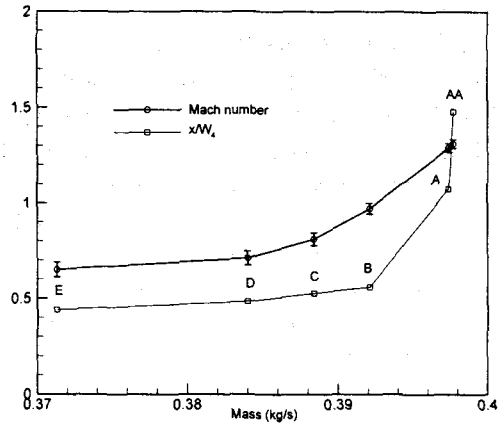


Fig. 7 Location and estimated Mach number at the minimum pressure location in channel.

≤ 1.7 임을 보였다.

유량이 설계유량보다 많아져서 양의 입사각이 생기면, semi-vaneless 공간의 흡입면에서 높은 압력 영역이 생성된다. 그리고 유량이 많아질 수록 이 흡입면에서의 높은 압력 영역이 좀 더 강해진다. Fig. 6(d)에서 보듯이 양의 입사각으로 인하여 채널 내부에서는 공력학적 목이 발생하지만 semi-vaneless space에서는 흡입면에서 높은 압력 영역이 넓게 나타나게 된다. 그리고 유량이 더욱 많은 B 유량에서는 압력이 더욱 높아지며, 초크 유량인 A와 AA에서도 이 현상이 강하게 나타난다. 그리고 이 semi-vaneless space 흡입면에서의 높은 압력 영역은 베인없는 공간에서의 물결과의 이동에 영향을 미친다. 유량이 많아져서 흡입면의 압력이 높아질수록 베인없는 공간에서의 물결과의 중심은 흡입면으로 이동하게 된다.

4. 결론

원심압축기 채널 디퓨저 내부에서의 압력분포를 설계유량 뿐 아니라 초크 유량에서부터 서지 근처 유량에 이르기까지 넓은 유량에서 측정하고 그 결과를 토의하였다.

베인의 선단에서는 정체현상이 일어나 높은 압력이 발생하는데, 이로 인하여 베인의 선단 근처에 높은 압력 구배를 일으켜서, 베인없는 공간에서 베인과 베인 사이에서는 상대적으로 낮은 압력이 발생하고, 베인이 있는 곳에서는 상대적으로 높은 압력이 발생하여 물결모양의 압력분포를

나타낸다.

설계유량에서는 베인없는 공간과 semi-vaneless space 에서의 압력회복 크기가 채널 내부의 압력회복 크기보다 크다. 서지 근처의 유량에서는 베인없는 공간과 semi-vaneless 공간에서의 압력회복이 설계유량에서보다는 작다. 고유량에서는 베인선단에서의 과도한 입사각으로 인하여 박리가 일어나며, 이로 인하여 목 이후의 압력면에서 낮은 압력영역이 존재하는데, 이 위치를 공력학적 목이라 이름지었다. 초킹 유량에서는 이 공력학적 목 이후에 충격파가 발생한다.

후기

본 연구는 교육부(97ME-B-04)와 한국기계연구원의 터보제너레이터 개발과제의 지원으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Krain, H., 1981, "A Study on Centrifugal Impeller and Diffuser Flow," *ASME Journal of Engineering for Power*, Vol. 103, Oct., pp.688-696.
- (2) Krain, H., 1984, "Experimental Observations of the Flow in Impellers and Diffusers," VKI Lecture Series, 1984-07.
- (3) Kano, F., Tazawa, N. and Fukao, Y., 1982, "Aerodynamic Performance of Large Centrifugal Compressors," *ASME Journal of Engineering for Power*, Vol. 104, pp.796-804.
- (4) Dawes, W.N., 1995, "A Simulation of the Unsteady Interaction of a Centrifugal Impeller With Its Vaned Diffuser : Flow Analysis," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol.121, pp.304~311.
- (5) Justen, F., Ziegler, K.U., and Gallus, H.E., 1998, "Experimental Investigation of Unsteady Flow Phenomena in a Centrifugal Compressor Vaned Diffuser of Variable Geometry," *ASME* 98-GT-368.
- (6) 조성국, 강신형, 1998, "소형 원심압축기의 성능평가에 대한 실험적 연구," *대한기계학회논문집 B권*, 제22권 제8호, pp.1052~1063.
- (7) Kang, S.H., Kang, J.S., and Cho, S.K., 1998, "A Hybrid Method of Performance Prediction for Channel Diffusers," *Proceedings of the Fourth KSME-JSME Fluids Engineering Conference*, pp.105-108.
- (8) 강정식, 1998, "원심압축기 베인 디퓨저의 설계 및 성능평가에 관한 연구," *서울대학교 대학원 공학석사학위논문*.
- (9) 강신형, 강정식, 1998, "원심압축기 채널디퓨저의 설계 및 성능평가에 관한 연구," *유체기계공업학회 '98 강연회 및 연구개발발표회 논문집*, pp.164-178.
- (10) 강정식, 조성국, 강신형, 1999, "원심압축기 채널디퓨저 내부의 비정상 압력분포," 1999 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp.69-77.
- (11) Kang, J.S., Cho, S.K., and Kang, S.H., 2000, "Unsteady Flow Phenomena in a Centrifugal Compressor Channel Diffuser," *ASME* 2000-GT-0451.
- (12) Yoshinaga, Y., Gyobu, I., Mishina, H., Koseki, F., Nishida, H., 1980, "Aerodynamic Performance of a Centrifugal Compressor With Vaned Diffusers," *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol.102, pp.486-493