

PIV측정에 의한 깃 없는 디퓨저에서의 유동특성

윤지인* · 신유환*† · 이윤표* · 김광호*

The Flow Characteristics in a Vaneless Diffuser by PIV Measurements

Ji-In Yoon*, Youhwan Shin*†, Yoon Pyo Lee*, Kwang Ho Kim*

Key Words : PIV(입자상관유속계), Vaneless diffuser(깃 없는 디퓨저), Centrifugal impeller(원심임펠러), Flow field(유동장)

ABSTRACT

The flow characteristics in a vaneless diffuser with a backswept radial impeller have been experimentally investigated according to the variation of discharge flow rate. Particle image velocimetry(PIV) system was applied to measure velocity fields with several operating conditions and on some diffuser horizontal planes. Pressure transducers were installed on hub wall of the diffuser in order to analyze the pressure fluctuations and their corresponding velocity fields. The results show that the location of the main flow center moves from the hub to the shroud side as the flow rate decreases, and the reverse flow is locally generated on the hub side.

1. 서론

일반적인 원심 압축기는 임펠러, 디퓨저, 볼류트로 구성되어 있으며 그 중 디퓨저는 압축기 운전 영역, 효율 및 정압력 회복 등에 많은 영향을 주고 있다. 디퓨저 내부 유동은 임펠러로부터 토출되는 유동의 영향을 크게 받는 것으로 알려져 있으며 임펠러 출구유동과 더불어 작동조건에 따른 많은 연구가 진척되고 있다.

디퓨저 내부유동의 측정방법으로는 Hot-wire와 LDV 방식 등이 있다. Pinarbasi and Johnson⁽¹⁾은 Hot-wire방법을 사용하여 깃 없는 디퓨저 내부에서의 후류유동을 확인하였고 LDV 방법으로는 Ubaldi 등⁽²⁾이 깃 없는 디퓨저에서 후류유동의 발달과 붕괴를 관찰하였으며 Akhras 등⁽³⁾은 깃 없는 디퓨저 내부의 제트-후류유동을 측정하였다. 그러나 Hot-wire와 LDV 측정은 점 측정 방법이라는 한계가 있다.

지난 20여 년 동안 동시다점 측정기술인 PIV가 발달되어 Paone 등⁽⁴⁾은 작동조건 변화에 따른 디퓨저 영역을 고찰하였고 Wernet 등^(5,6)과 Pedersen 등⁽⁷⁾은 LDV와 PIV의 광학 비교를 통해 PIV 계측의 신뢰성을 확보하고 서지와 실속 현상을 확인하였다. 또한, Wuibaut 등⁽⁸⁾은 블레이드-블레이드 영역에서 스펠(span)을 구별하여 측정하였으며 Choi 등⁽⁹⁾

은 PIV 방법을 사용하여 서로 다른 임펠러의 성능을 비교하기도 하였다. 그리고 Dazin 등⁽¹⁰⁾의 경우는 Stereoscopic PIV를 사용하여 깃 없는 디퓨저 내부의 실속 셀에 대한 유동을 관찰하였다.

측정에 의한 연구뿐만이 아니라 Ljevar 등⁽¹¹⁾은 해석을 통해 깃 없는 디퓨저에서 임펠러와 작동조건의 변화에 따른 유동을 분석하였다.

따라서, 본 연구에서는 동시다점으로 측정 가능한 PIV 시스템을 사용하여 출구유량의 변화에 따른 안전작동영역에서의 깃 없는 디퓨저 내부 유동을 측정하고자 한다. 또한, 측정 영역을 스펠방향 및 반경방향 등으로 나누어 각 방향의 유동장을 통해서 유량변화에 따른 디퓨저 내부의 유동 특성을 고찰하고자 하였다.

2. 실험방법

본 연구에서는 다양한 출구유량에 따른 깃 없는 디퓨저 영역에서의 유동을 분석하기 위해 PIV시스템과 압력측정시스템으로 각각 속도장과 압력을 측정하였다. 실험에 사용된 원심형 임펠러는 직경 165mm로 총 11개의 후향익으로 구성되어 있다. 그리고 깃 없는 디퓨저의 직경은 임펠러 직경의 약 2.24배로 설계되었고 허브와 슈라우드의 간격은 13.5 mm이다. 자세한 제원은 Table 1에 나타내었다. 실험에 사용되는

* 한국과학기술연구원 에너지메카닉스연구센터

† 교신저자, E-mail : yhshin@kist.re.kr

Table 1 Geometry of impeller and diffuser

Number of impeller blade	11 (no splitter)
Diffuser inlet diameter	165mm
Diffuser exit diameter	370mm
Diffuser width	13.5mm
Impeller rotational speed	300rpm
Reynolds number	370,000

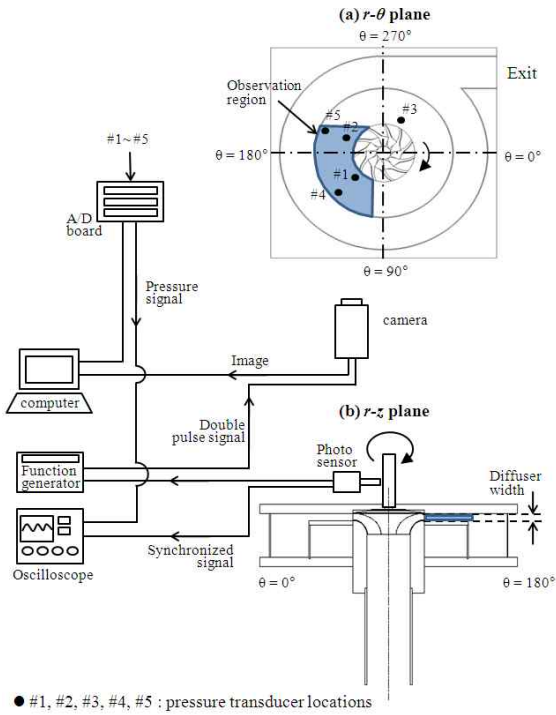


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus to measure the velocity fields in the (a) $r-\theta$ plane and (b) $r-z$ plane

유체를 물로 선정하여 실험 장치는 수조안에 구성하였고 ब्लू트케이싱 출구에 댐퍼를 장착하여 출구유량을 조절하였다.

압력측정은 허브면에 위치한 압력트랜스미터를 사용하여 게이지압을 측정하였고 측정된 5개의 지점(#1~#5)은 Fig. 1 (a)에 나타내었다. 블레이드에 동기된 포토센서 신호와 더불어 동시 측정하여 블레이드에 따른 압력분석이 가능하도록 하였다.

PIV시스템은 CCD카메라와 DPSS레이저로 구성하였다. 레이저 평면광은 구면렌즈(spherical lens)와 원통형렌즈(cylindrical lens)를 통해서 측정하고자 하는 영역에 조사되었다. 추적입자는 직경 10 μ m의 silver coated hollow glass spheres를 사용하였다. 그리고 갓 없는 디퓨저 영역에서의 유동분석을 위하여 $r-\theta$ 평면과 $r-z$ 평면에서 각각의 속도장을 얻었다. $r-\theta$ 평면은 5개의 스펠($d/b=0.86, 0.63, 0.48, 0.26, 0.11$)으로 나누어 측정하였고 $r-z$ 평면은 Fig. 1 (b)와 같이 압축기 180도에서의 단면을 측정하였다.

Fig. 1의 측정시스템에서 보여지듯이 블레이드에 동기된

포토센서 신호가 펄스제너레이터를 통해 2개의 신호로 카메라에 입력된다. 이 신호에 따라 2장의 영상을 획득하게 되고 각 신호는 A/D보드로 측정되며 오실로스코프를 통해서 실시간으로 확인할 수 있다.

시간평균 속도장은 총 300장의 순간 속도장으로 계산하였다. 순간 속도장의 계산은 상용 프로그램인 Dynamics studio 3.0의 Adaptive-correlation 알고리즘을 사용하였다. 상관영역(Interrogation window)은 16 \times 16 pixels의 크기로 50%를 겹쳐 벡터해상도를 높였다.

시간평균 속도장의 불확실성은 Wermet⁽⁵⁾의 논문을 참고하여 계산하였다. 논문에 따르면 불확실성의 값은 직각좌표계로 계산되어진 순간 속도장에서 u 와 v 성분의 표준편차로부터 계산되어진다.

$$s_{i,j} = \sqrt{s_{u,i,j}^2 + s_{v,i,j}^2} \quad (1)$$

식 (1)에서의 $s_{i,j}$ 는 각 좌표(i, j)별 시간평균 속도장의 표준편차이고, $s_{u,i,j}$ 와 $s_{v,i,j}$ 는 좌표위치에 따른 u 와 v 에서의 표준편차를 각각 나타낸다. 그리고 $s_{i,j}$ 를 시간평균 속도장의 벡터크기($\overline{V_{mag}}$)로 나누면 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\hat{s} = \sqrt{s_{u,i,j}^2 + s_{v,i,j}^2} / \sqrt{\overline{u^2} + \overline{v^2}} = s / \overline{V_{mag}} \quad (2)$$

여기서, \overline{u} 와 \overline{v} 는 시간평균 속도장의 u 와 v 의 성분을 각각 나타낸다.

측정시스템의 오류가 없다고 가정하면, 식 (2)로부터 시간평균 속도장의 불확실성을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\sigma_s = z_c \hat{s} / \sqrt{2N} \quad (3)$$

여기서, z_c 는 confidence factor로 95%의 신뢰도를 위해 1.96의 값을 적용하였고 N 은 순간 속도장의 수를 의미한다. 위 식 (3)을 통하여 시간평균 속도장의 불확실성을 계산한 결과, $r-\theta$ 평면의 평균은 약 1.3%의 값을 가지고 $r-z$ 평면의 평균은 약 9.0%의 값을 가진다.

불확실성의 분포는 $d/b=0.86$ 이고 $\phi=0.31$ 인 $r-\theta$ 평면을 0~0.03의 크기로 Fig. 2에서 나타내었다. 불확실성이 두드러지는 구간은 $r-\theta$ 평면의 경우에는 Fig. 2와 같이 임펠러 출구부근에서 나타나지만 $r-z$ 평면에서는 역류가 나타나는 지점에서 나타난다. 그리고 불확실성의 크기가 측정된 평면에 따라 큰 차이가 나는 것은 $r-\theta$ 평면의 경우에는 측정영역이 360 \times 300 mm²이나 $r-z$ 평면의 측정영역은 102.5 \times 13.5 mm²의 크기로 상대적인 추적 입자의 공간해상도차이가 가장 큰 이유라 할 수 있다.

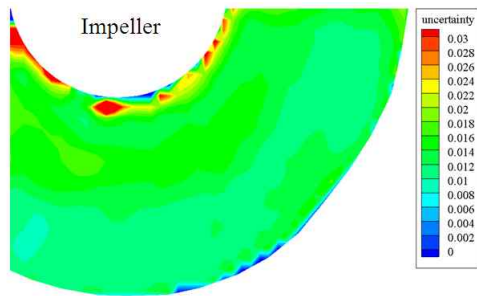


Fig. 2 The uncertainty in $r-\theta$ plane at $z/b=0.87$

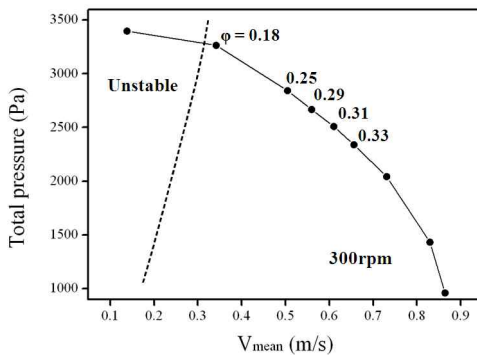


Fig. 3 Performance characteristics of test compressor

3. 결과 및 토론

Fig. 3은 볼류트케이싱의 출구 평균속도에 따른 전압력특성곡선을 나타낸다. 압력특성곡선은 임펠러 회전 300 rpm에서 시행되었으며 전압력과 평균속도는 볼류트케이싱 출구에서 Kiel probe를 사용하여 측정하였다. 이에 따라 레이놀즈수는 임펠러 출구지름을 기준으로 약 370,000이다.

본 실험의 변수인 출구유량은 볼류트케이싱 출구의 댐퍼 조절에 따른 질량 유량으로 유량계수가 변수를 대표한다. 유량계수의 값은 $\phi = 0.33, 0.31, 0.29, 0.25, 0.18$ 로 Fig. 3의 압력특성곡선에 나타나 있다. 실험에서 깃 없는 디퓨저 내부의 시간에 따른 압력변동은 크게 두드러지지 않는다. 그러므로 속도장은 시간평균 속도장으로 분석한다.

3.1 $r-\theta$ 평면

$r-\theta$ 평면의 속도장은 슈라우드면을 기준으로 5개의 스펀 ($z/b = 0.86, 0.63, 0.48, 0.26, 0.11$)으로 나누어 측정하였고 반경방향과 접선방향의 속도성분으로 구분하여 나타내었다.

Fig. 4는 유량계수 $\phi = 0.33, 0.29, 0.25$ 의 3가지 경우에 대한 $r-\theta$ 평면의 반경방향 속도성분을 m/s 단위로 표시하고

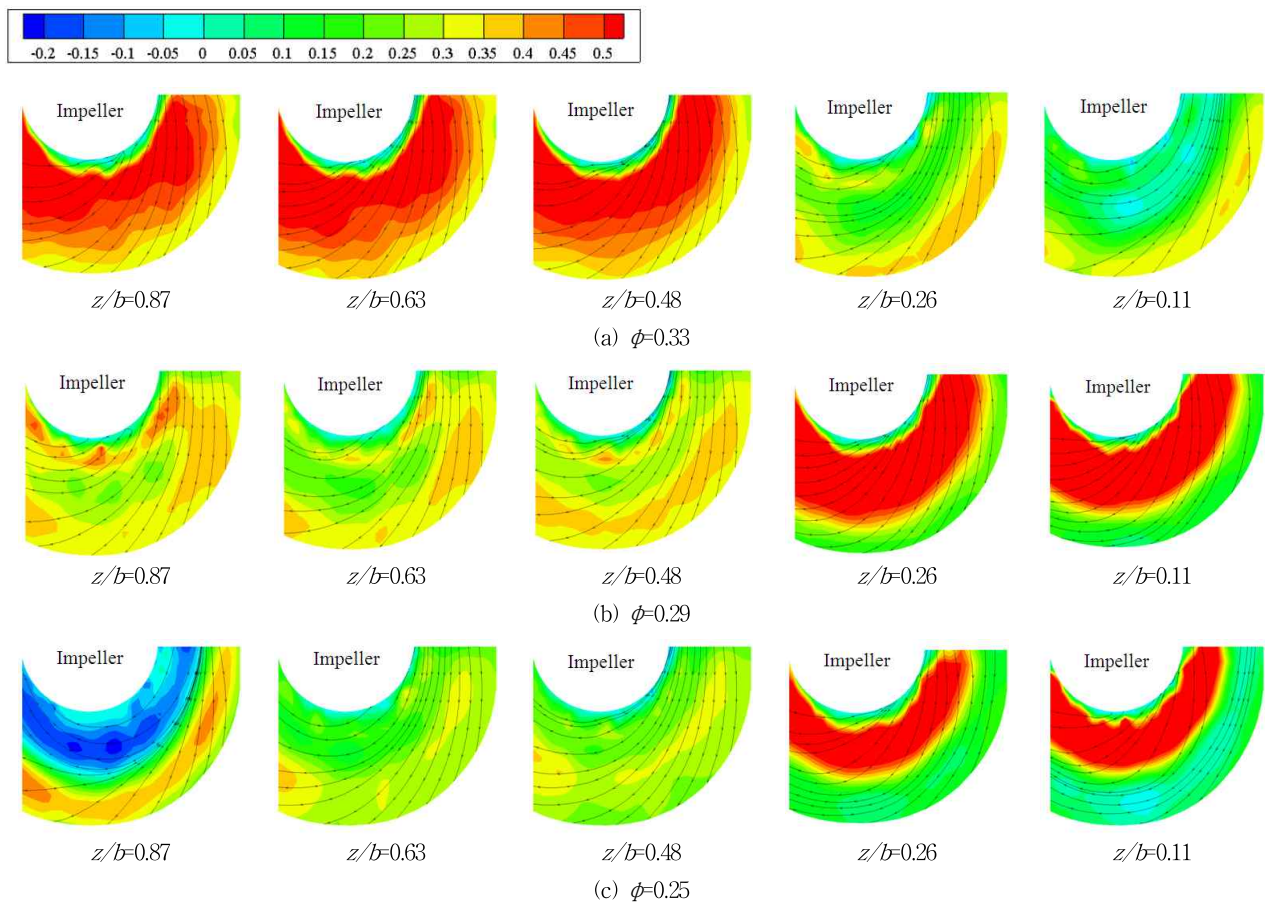


Fig. 4 Radial velocity fields on $r-\theta$ plane for various discharge flow rate

유선을 함께 나타내고 있다.

$\phi=0.33$ 의 경우, 허브면 부근($z/b=0.87, 0.63, 0.48$)의 임펠러 출구 근처에서 강한 속도가 두드러진다. 이러한 주유동은 디퓨저 반경방향에 대하여 완만한 속도구배를 가지면서 넓게 전파되고 있다. 이에 반해 약한 역류는 슈라우드면 근처($z/b=0.11$)에서 확인된다. 유량이 감소된 $\phi=0.29$ 에서의 주유동은 $\phi=0.33$ 과는 달리 슈라우드면 부근($z/b=0.26, 0.11$)에서 관찰되고 디퓨저 반경방향으로 가파른 속도구배를 동반하는 급격한 속도감소가 이루어진다. 유량이 더 감소하여 $\phi=0.25$ 가 되면 주유동의 위치는 $\phi=0.29$ 와 같이 슈라우드면 부근에서 관찰되지만 허브면 근처($z/b=0.87$)에서 강한 역류가 발생된다. 이 강한 역류는 임펠러 출구부근부터 디퓨저 반경비의 50%까지 영역이 넓게 발달된 것이 관찰된다. 이와 같은 역류 발달에 대한 고찰은 $r-\theta$ 평면에서의 속도장에서 구체적으로 언급을 할 것이다.

유량이 더욱 더 감소하여 불안정 작동영역에 가까운 $\phi=0.18$ 의 경우의 주유동은 속도성분의 크기가 확연히 줄어들고 다른 유량과는 다르게 특정 스팬에 고정되지 않는다. 이 현상은 주유동이 매끄럽게 흘러가지 못하고 끊어져 흐르는 것으로 볼 수 있다.

Fig. 5는 $r-\theta$ 평면에서 접선방향의 속도성분(m/s)과 유선을 나타낸다.

반경방향의 속도장과 마찬가지로 $\phi=0.33$ 의 주유동은 완만한 속도구배를 가지며 허브면 부근($z/b=0.63, 0.48$)에서 두드러지게 나타나고 있지만 디퓨저 반경방향에 따른 영향력은 상당히 줄어들었다. 유량이 감소된 $\phi=0.29$ 의 경우에는 반경방향 속도장과 같이 슈라우드면($z/b=0.26, 0.11$) 부근에서 나타나지만 디퓨저 반경방향에 따른 영향력은 접선방향의 속도장보다 줄어든다. 그러나 유량이 더 감소된 $\phi=0.25$ 에서는 주유동이 나타난 스팬뿐만이 아니라 반경방향 속도장의 허브면($z/b=0.87$) 근처의 스팬에서도 강한 접선방향의 속도성분이 나타난다.

유량이 더욱 더 감소하여 $\phi=0.18$ 의 디퓨저 내부 유동은 속도성분의 크기가 커지고 완만한 속도구배를 가지며 임펠러 출구부근에서 디퓨저 출구 근처까지 전파되는 것을 볼 수 있다.

출구유량이 작아질수록 반경방향의 속도장과는 다르게 속도성분의 크기는 커지며 임펠러 출구부근의 강한 속도성분이 디퓨저 반경비에 더 많은 영향을 끼치는 것으로 확인된다.

유량변화에 따른 유선은 Fig. 4와 5에서 동일하게 나타난

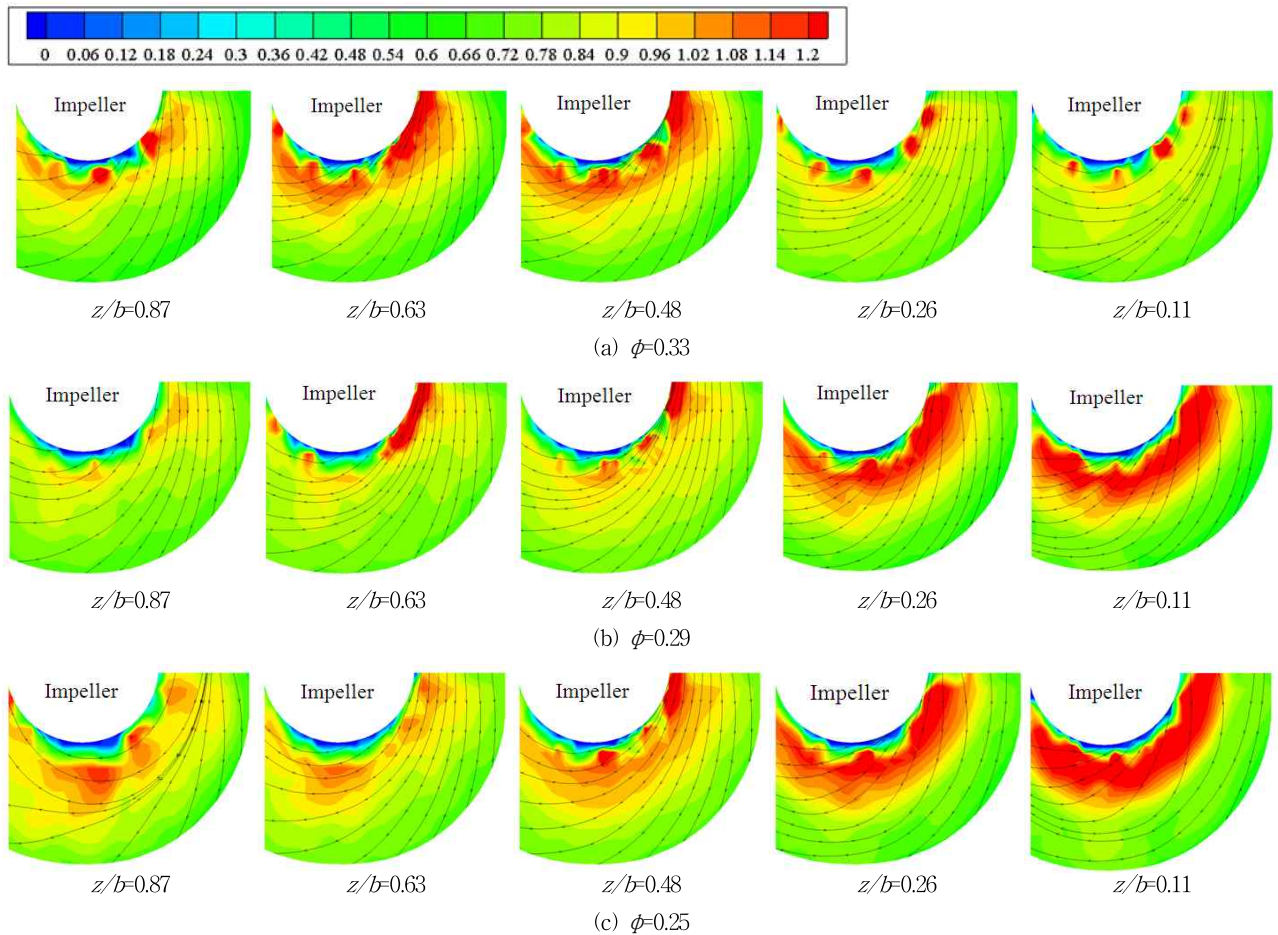


Fig. 5 Tangential velocity fields on $r-\theta$ plane for various discharge flow rate

다. 유량이 감소함에 따라 접선방향의 속도성분이 유동에 끼치는 영향이 커지게 된다. 그러므로 유량이 감소함에 따라 유선은 임펠러 출구에서 불류트 케이싱으로 벗어나는 형태에서 디퓨저 출구반경방향을 따라가는 회전하는 형태로 바뀌는 것이 확인된다. 이러한 현상은 속도삼각형에서 출구유량이 작아짐에 따라 접선방향 속도성분이 반경방향의 속도 성분보다 커지는 것을 확인시켜 준다.

3.2 r-z 평면

다양한 출구유량에 따른 r-z 평면의 반경방향 속도벡터는 Fig. 6에 나타내었다. 세로축의 경우 디퓨저 폭(b)으로 무차원하고 가로축의 경우는 식 (4)와 같이 디퓨저 반경길이를 무차원 하였다. 반경방향 속도벡터는 속도성분의 크기에 비례하도록 길이를 맞추고 가로축의 디퓨저 반경비($r_n = 0.05, 0.12, 0.23, 0.35, 0.50, 0.70, 0.90$)에 따라 표시하였다.

$$r_n = (r - r_2) / (r_3 - r_2) \quad (4)$$

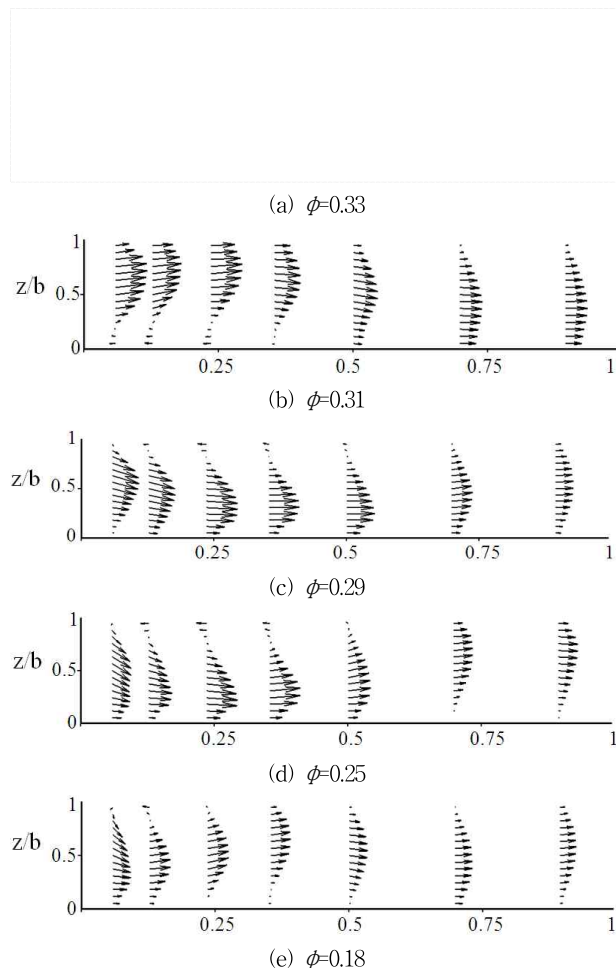


Fig. 6 The time-averaged velocity fields varied flow coefficient in r-z plane

여기서, r_2 는 임펠러 출구반경이고 r_3 는 디퓨저 출구반경을 의미한다.

Fig. 6에서는 유량변화에 따른 주유동과 역류의 거동이 확연히 나타난다. $\phi = 0.33$ 의 허브면 부근에서 주유동이 집중되고 있는 것이 관찰된다. 상대적으로 유량이 감소된 $\phi = 0.31$ 의 허브면 부근에서도 주유동이 관찰되지만 그 강도는 $\phi = 0.33$ 보다는 작게 나타난다. 이 보다도 유량이 감소한 $\phi = 0.29$ 에서는 주유동이 슈라우드 부근으로 이동되고 r- θ 평면의 접선방향 속도장에서는 관찰하기 힘들었던 허브근처의 약한 역류를 확인할 수 있다. 유량이 더욱 감소한 $\phi = 0.25$ 의 경우, r- θ 평면 허브근처의 디퓨저 반경비 50%까지 분포되었던 강한 역류를 확실하게 관찰할 수 있다. 불안정 작동영역에 가까이 유량이 감소하게 되는 $\phi = 0.18$ 에서는 $\phi = 0.25$ 의 허브 부근에 위치한 역류는 작아지면서 임펠러 출구부근(약 $r_n = 0.70$)으로 이동하게 되고 슈라우드 부근(약 $r_n = 0.35$)에서도 약하고 작은 역류가 생성되어있는 것이 확인된다. 이 두 개의 역류의 위치가 주유동의 흐름을 방해하기 때문에 주유동이 특정 스핀에서 흐르지 못하고 굴곡지면서 흐르게 된다.

4. 결 론

본 연구에서는 PIV시스템을 이용하여 깃 없는 디퓨저에서 유량변화에 따른 유동 특성을 고찰하였으며, 디퓨저 내부의 유동에 대한 상세한 분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

상대적으로 고유량 작동영역에서는 주유동이 허브 부근에 위치하지만 유량이 감소함에 따라 슈라우드 부근으로 이동하게 된다. 이와 동시에 고유량 영역에서 약하게 관찰되었던 역류현상은 유량이 감소함에 따라 허브에서 발생하게 되고, 이때 역류의 강도는 유량이 감소함에 따라 점차 증가하며, 그 영향은 디퓨저 입구에서부터 반경비 50%까지 확장된다. 또한 유량이 불안정 작동영역 근처까지 감소하면 허브면에서 발생했던 강한 역류의 크기는 작아지고 슈라우드 근처에서 또 다른 역류가 발생한다.

후 기

본 연구는 지식경제부 산업원천기술개발사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Pinarbasi, A., and Johnson, M. W., 1994, "Detailed Flow Measurements in a Centrifugal Compressor Vaneless Diffuser," *Journal of Turbomachinery*, Vol. 116, pp. 453~460.
- (2) Ubaldi, M., Zurino, P., and Ghiglione, A., 1998, "Detailed Flow Measurements within the Impeller and the Vaneless

- Diffuser of a Centrifugal Turbomachine," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 17, pp. 147~155.
- (3) Akhras, A.-R., El Hajem, M., Morel, R., and Champagne, J.-Y., 2001, "Internal Flow Investigation of a Centrifugal Pump at the Design Point," *Journal of Visualization*, Vol. 4, No. 1, pp. 91~98.
- (4) Paone, N., Riethmuller, M. L., and Van den Braembussche, R. A., 1989, "Experimental Investigation of the Flow in the Vaneless Diffuser of a Centrifugal Pump by Particle Image Displacement Velocimetry," *Experiments in Fluids*, Vol. 7, pp. 371~378.
- (5) Wernet, M. P., 2000, "Development of Digital Particle Imaging Velocimetry for use in Turbomachinery," *Experiments in Fluids*, Vol. 28, pp. 97~115.
- (6) Wernet, M. P., Bright, M. M., and Skoch, G. J., 2001, "An Investigation of Surge in a High-speed Centrifugal Compressor using Digital PIV," *Journal of Turbomachinery*, Vol. 123, pp. 418~428.
- (7) Pedersen, N., Larsen, P. S., and Jacobsen, C. B., 2003, "Flow in a Centrifugal Pump Impeller at Design and Off-design Conditions-part 1: Particle Image Velocimetry (PIV) and Laser Doppler Velocimetry (LDV) Measurements," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 125, pp. 61~72.
- (8) Wuibaut, G., Bois, G., Dupont, P., Caignaert, G., and Stanislas, M., 2002, "PIV Measurements in the Impeller and the Vaneless Diffuser of a Radial Flow Pump in Design and Off-design Operating Conditions," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 124, pp. 791~797.
- (9) Choi, Y. D., Nishino, K., Kurokawa, J., and Matsui, J., 2004, "PIV Measurements of Internal Flow Characteristics of Very Low Specific Speed Semi-open Impeller," *Experiments in Fluids*, Vol. 37, pp. 617~630.
- (10) Dazin, A., Cavazzini, G., Pavesi, G., Dupont, P., Coudert, S., Ardizzone, G., Caignaert, G., and Bois, G., 2011, "High-speed Stereoscopic PIV Study of Rotating Instabilities in a Radial Vaneless Diffuser," *Experiments in Fluids*, Vol. 51, No. 1, pp. 83~93.
- (11) Ljevar, S., de Lange, H. C., and van Steenhoven, A. A., 2006, "Two-dimensional Rotating Stall Analysis in a Wide Vaneless Diffuser," *International Journal of Rotating Machinery* Vol. 2006, pp. 1~11.