

스테레오 PIV 기법에 의한 임펠러 와류유동의 3차원 구조측정

윤 상 열*·김 경 천†

(2002년 10월 31일 접수, 2003년 3월 21일 심사완료)

Identification on the Three-Dimensional Vortical Structures of Impeller Flow by a Multi-Plane Stereoscopic PIV Method

Sang Youl Yoon and Kyung Chun Kim

Key Words: Stereoscopic PIV(스테레오 입자영상유속계), Multi-Plane Measurements(다중평면 측정), Rushton Turbine(러쉬톤 터빈), 3-D Volumetric Velocity Field(3차원 체적 속도장), 3-D Topology of Tip Vortices(선단와류의 3차원 거동)

Abstract

The three-dimensional spatial structures of impeller flow created by a six bladed Rushton turbine have identified based on the volumetric velocity information from multi-plane stereoscopic PIV measurements. A total of 10 planes with 2 mm space and a 50 mm by 64 mm size of the field of view were targeted. To reduce the depth of focus, we adopted an angle offset configuration which satisfied the Scheimpflug condition. The distortion compensation procedure was utilized during the in situ calibration. Phase-locked instantaneous data were ensemble averaged and interpolated in order to obtain mean 3-D, volumetric velocity fields on a 60 degree sector of a cylindrical ring volume enclosing the turbine blade. Using the equi-vorticity surface rendering, the spatial structure of the trailing vortices was clearly demonstrated. Detail flow characteristics of the radial jet reported in previous studies of mixer flows were easily identified.

기호설명

X	: 이미지상의 위치
x	: 물리적인 공간위치
F	: 사상(mapping) 함수
$F_{i,j}$: $\partial F_i / \partial x_j$
r, θ, z	: 원통형 좌표계에서의 각 축
$D(R)$: 터빈블레이드의 지름(반지름)
H	: 혼합탱크의 높이
$Re (= ND^2/\nu)$: 레이놀즈 수
U_r, U_θ, U_z	: 각 축방향 평균 속도성분

1. 서 론

혼합탱크는 열 및 물질전달과 혼합을 위해 공업적으로 가장 많이 사용되어지는 장치 중 하나이다. Fig. 1은 러쉬톤 터빈을 나타내며 이러한 혼합교반기에 적용된 터빈 중 가장 단순한 형태를 가지고 있다. 그러나 이러한 단순한 형태에도 불구하고 교반기 내의 유동은 터빈 블레이드에 의해 발생하는 3차원적인 선단 와류와 서로의 상호작용에 의해 그리고 거대유동의 발생과 함께 복잡한 거동을 한다. 이러한 유동의 복잡성은 이론적인 접근을 어렵게 하며, 실험과 전산해석에 있어서도 많은 한계를 낳게 하였다.

Yianneskis 등⁽¹⁾은 사진유속측정방법과 레이저 도플러 유속계를 이용하여 용기내의 평균 유동장

* 부산대학교 대학원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부,
기계기술연구소, E-mail: kckim@pusan.ac.kr.

TEL : (051)510-2324, FAX : (051)512-9835

과 반지형 와의 형성메커니즘, 그리고 팁에서 발생하는 와의 궤적을 측정하였으며, 김상기 등⁽²⁾은 입자영상유속계를 이용하여 혼합 교반기 내의 2차원적인 전체 유동장을 측정하여 거대유동장의 평균 및 난류유동특성을 분석하였다. Van't Riet 등⁽³⁾은 사진유속측정방법을 이용하여 팁에서 발생하는 와류의 구조와 궤적을 분석한 바 있다. Hill 등⁽⁴⁾은 스테레오 입자영상유속 측정기법을 통해 블레이드 근처의 한 평면에 대해 이웃한 두 임펠러 사이의 3차원 속도장 등의 유동정보를 조사한 바 있다. 많은 선행 연구에도 불구하고 유동구조의 복잡성, 3차원성으로 인해 정확

한 생성메커니즘은 아직 정리되어 있지 못한 상태이고, 많은 실험과 전산해석이 최근에도 시도되어지고 있다. 특히 이러한 3차원성과 복잡성은 팁으로부터 생성되는 선단 와류가 주원인이다. 따라서 본 연구에서는 이웃한 두 임펠러 사이의 동일 위상에서 여러 평면을 측정하여 평균 3차원 부피정보를 얻고자 하였으며, 이를 토대로 선단 와류의 3차원적인 거동을 살펴보고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

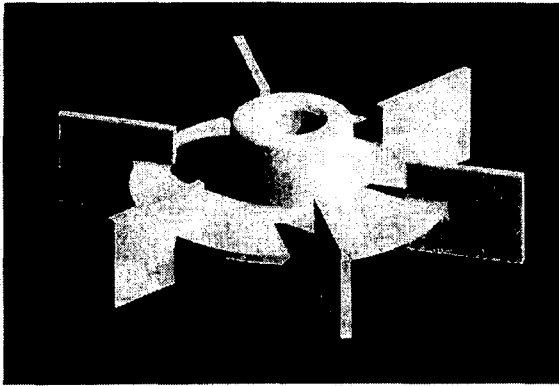


Fig. 1 Rushton turbine

Fig. 1은 본 연구에서 사용되어진 실험장치의 개략도 및 좌표계를 나타낸다. 터빈 용기의 지름과 높이는 152.4 mm 였다. 터빈의 지름은 50.8 mm 이었으며, 6개의 블레이드로 이루어졌다. 터빈 위치는 용기의 중심위치인 바닥으로부터 1/2H 지점에 위치시켰다. 터빈의 회전속도는 100 rpm 이었으며 이때의 $Re = ND^2/\nu = 4000$ 이었다. 이때의 N =회전수, D 는 터빈의 지름이며 ($R=D/2$), ν 는 동점성계수이다.

부피측정을 위해 전체 10개의 평면으로 공간을 분할하여 측정하였다. 각 평면은 서로 2mm의 간격을 가지며, 전체 측정부피는 가로 45mm×세로 45mm×깊이20mm이었다. 각각의 평면에 대해

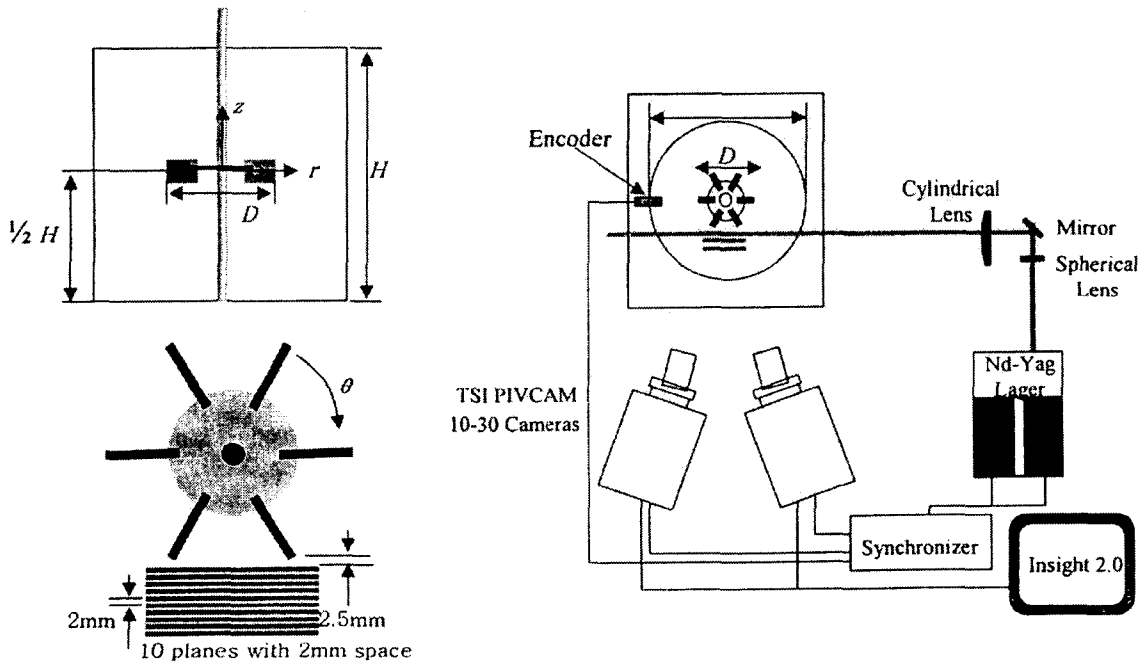


Fig. 2 Schematic of the experimental setup

교정이 이루어졌으며, 한 평면 내에서 교정을 위해 0.5mm씩 격자를 이동시켜 획득한 5개의 격자 이미지를 사용하였다. 3차원 속도값의 추출과 왜곡에 대한 속도의 보정을 위해 식 (1), (2)를 사용하였다. 이러한 스테레오 입자영상유속 측정기법을 위한 보정 기법에 대해 Soloff⁽⁵⁾ 등이 제안한 바 있다. 교정 시 각 축에 대한 보정에 대한 오차는 0.1~0.2 픽셀 정도였다. 식 (2)에 의한 실제 세 방향의 속도성분을 구하기 위해 최소자승법이 사용하였다.

$$\overline{\Delta X_i^{(c)}} \simeq F_{ij}^{(c)}(x_j) \overline{\Delta x_j} \quad (1)$$

(i=1,2 j=1,2,3, c=1,2)

$$\begin{pmatrix} \overline{\Delta X_1^{(1)}} \\ \overline{\Delta X_2^{(1)}} \\ \overline{\Delta X_1^{(2)}} \\ \overline{\Delta X_2^{(2)}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_{1,1}^{(1)} & F_{1,2}^{(1)} & F_{1,3}^{(1)} \\ F_{2,1}^{(1)} & F_{2,2}^{(1)} & F_{2,3}^{(1)} \\ F_{1,1}^{(2)} & F_{1,2}^{(2)} & F_{1,3}^{(2)} \\ F_{2,1}^{(2)} & F_{2,2}^{(2)} & F_{2,3}^{(2)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \overline{\Delta x_1} \\ \overline{\Delta x_2} \\ \overline{\Delta x_3} \end{pmatrix} \quad (2)$$

여기서 X 는 이미지상의 위치를, x 는 실제 물리적인 위치를 나타낸다. 그리고 첨자 i 와 j 는 각각 이미지, 실제 물리적인 공간상의 각 축을 의미한다. F_{ij} 는 $\partial F_i / \partial x_j$ 를 의미하며 c 첨자는 좌우 카메라를 나타낸다. 위 식들에서 함수 F 는 아래 식 (3)과 같으며 계산된 벡터를 보정하기 위해 사용된 이미지 사상함수를 나타내며, 세 개의 방향에 성분에 대해 각각 3차 다항함수를 사용하였다.

$$F = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 \sum_{k=0}^3 a_{ijk} x_1^i x_2^j x_3^k \quad (3)$$

각 10개의 측정 평면에 대해 각각 500번 썬의 샘플링이 이루어졌으며, 이의 평균데이터에서부터 선형 보간을 이용하여 원통형 좌표계로 변환하여 결과를 정리하였다. 원주좌표계로 전환된 부피영역은 $\theta=5\sim55^\circ$, $r=26.5\sim44\text{mm}$, $z=-17.0\sim17.0\text{mm}$ 이다.

본 연구를 위해 사용한 광원은 532nm 파장을 가지는 12mJ/pulse의 Nd-yag 레이저 광원이었으며 이때의 평면법의 두께는 2mm이었다. 이미지 획득을 위한 카메라는 TSI PIVCAM 10-30 CCD 카메라 두 대를 사용하였으며 해상도는 1K×1K이었다. 3차원 속도장의 측정을 위해 카메라를

평면법에 수직인 축에 대해 약 35° 정도 기울였으며, 초점의 정확도를 위해 렌즈를 카메라 중심 축에 대해 5° 정도 바깥 방향으로 틸팅(tilting)시켰다. 또한 동일한 고정된 위상의 측정을 위해 적외선센서에 의한 trigger 신호를 동기장치와 동기시켜 사용하였다. 사용된 입자의 직경은 10μm였으며 충분히 균일하게 분포되도록 하였다. 이미지의 획득을 위해 TSI Insight 2.0이 사용되었으며, 2화상 상호상관기법을 이용하여 속도추출을 하였고 아픽셀 보간을 위해 포물선(parabolic) 근사를 사용하였다.

3. 실험 결과 및 해석

3.1 선단 와류의 발달

Fig. 3는 각각의 θ 에 대해 5° 간격으로 추출한 z-r평면에서의 속도장이며, 선단 와류의 발달 과정을 명확히 보여준다. $\theta=10^\circ$ 까지는 아직 임펠러 후면에 와가 위치하고 있으며, $\theta=10^\circ$ 부터 임펠러 외부로 대류되어 나가기 시작해 서서히 상하좌우로 대류되어 나감을 확인할 수 있다. 약 30°까지는 선단와류가 원주방향으로 즉 터빈팁의 바깥으로 강하게 대류되어감을 알 수 있으며 이후 점차 원주방향의 대류는 크게 이루어지지 않고 반경방향의 대류만 있음을 확인할 수 있다. 이는 초기 팁 후면에 발생하는 강한 유입에 의해 선단 와류가 초기 원주방향의 강한 기동을 유발한다고 판단된다. 따라서 이러한 강한 유입에 의한 선단 와류의 생성과 지속은 팁으로부터 약 30°까지 이루어짐을 확인할 수 있다. 또한 30° 이후 평균된 결과에서는 선단 와류가 명확하지 않음을 확인할 수 있다. 이는 선단 와류의 상하로의 진동에 의한 것으로 순간속도장을 통해 확인된 바 있으며, 이로 인해 속도장을 평균하는 과정에서 그 구조가 상실된 것이다. Fig. 4는 $\theta=0^\circ$ 또는 60°에서 측정한 순간속도장을 나타내며 상하좌우로의 선단 와류의 진동을 확인할 수 있다. 여기서 확인되는 선단 와류는 이전 팁에서부터 비롯되었으며, 평균속도장에서와는 달리 60°가 지났음에도 불구하고 상당히 명확한 구조를 유지하고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 진동은 유동 내에 몽푁한 물체 상하에서의 전단층에서, 그리고 반경방향 제트의 불안정성에 의한 것으로 판단된다. 따라서 믹서의 유동구조를 위

한 평균적인 거동으로 좀더 세밀한 관찰을 위해서는 팁의 위치에 기반한 위상평균이 함께 이루어져야 함을 확인할 수 있다. 그리고 선단 와류의 구조가 30° 이후로 명확하지 않은 것으로 보아 상하 진동이 30° 이후로 큼을 예상할 수 있다. 와도장을 통한 상하와의 중심간격은 초기 약

1.6에서부터 이후 1.8R 정도로 상하로의 대류는 크지 않음을 확인하였다.

Fig. 5는 $\theta=20^\circ$ 에서의 streamline들을 보여주고 있으며, 크게 4영역으로 구분되어 있음을 알 수 있다. 우선 블레이드 축과 가까운 영역에서의 아래로 유입되는 상하부 영역과 바깥쪽에 유입되

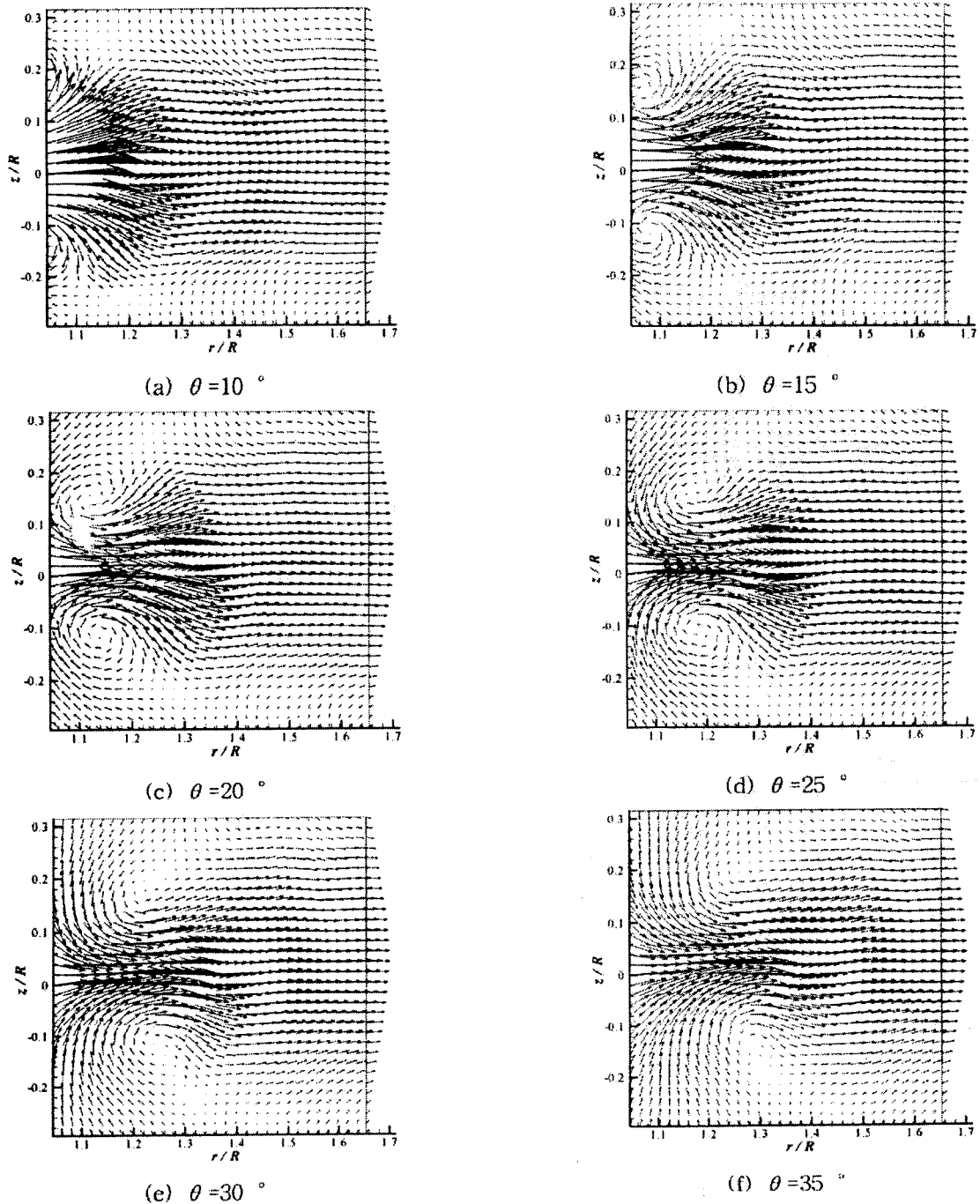


Fig. 3 Development of the Tip Vortices

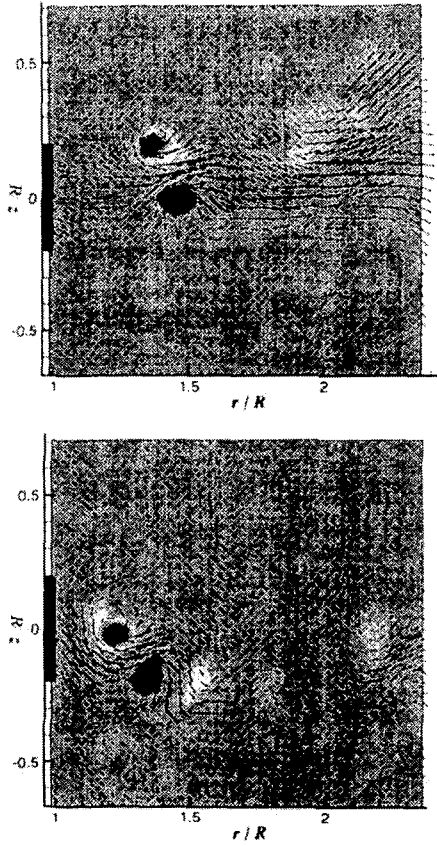


Fig. 4 Instantaneous velocity field ($\theta=0^\circ$ or 60°)

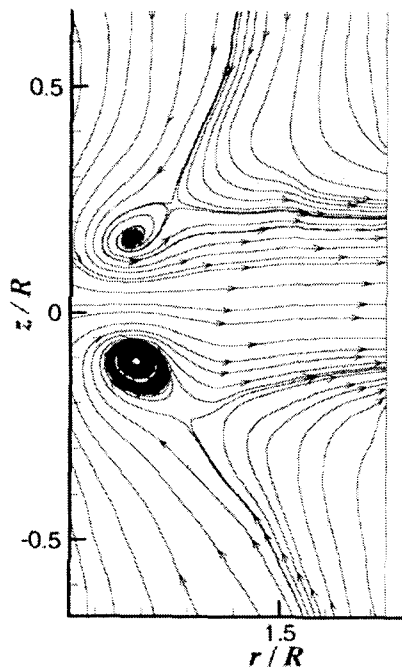


Fig. 5 Streamlines ($\theta=20^\circ$)

이 반경방향으로 나아가는 유동영역을 확인할 수 있으며, 선단 와류영역과 반경방향제트영역으로 구분되어짐을 알 수 있다. 따라서 각각의 영역은 각각 다른 특성의 물질전달 메커니즘이 존재할 것이라 판단되며, 혼합영역 또한 4영역으로 구분되어 이루어질 것이 예상된다. 특히 축에 가까운 영역은 물질이 내부에 머물러 전체 혼합시간에 영향을 미칠 것으로 예상된다.

3.2 $r-\theta, z-\theta$ 평면에서의 선단 와류의 궤적

Fig. 6은 각각의 z 에 대해 추출한 $r-\theta$ 평면을 $\theta=5^\circ \sim 55^\circ$ 까지 나타내었다. Fig. 6(a)는 $z/R = 0.2$, 즉 상부 와의 윗면 위치의 속도장을 나타낸 것으로 전체속도벡터의 절반만 표현되었다. 선단 와류에 의한 유입이 확인되고 있으며, $R=1$ 부근영역에서 약 30° 까지 안쪽으로 유입이 일어나고 있으며, 이후의 영역에서는 반대방향의 유입이 일어남을 확인할 수 있다. 이는 선단 와류의 영향이라 판단되며, 선단 와류의 위치가 반경방향으로 그 위치가 바뀌고 있음을 의미한다. Fig 6(b)는 $z/R=0$, 팁의 중심에 해당하는 평면의 원주방향 속도성분 contour를 나타낸다. 상하부의 와의 중심의 가운데 지점은 와의 영향으로 가속될 것이며 따라서 최대원주속도의 위치는 와의 전체적인 궤적의 경향과 유사한 거동을 할 것이라 판단된다. 접선은 동일 각도에서의 최대원주속도의 위치이며, 따라서 와의 궤적은 이와 유사할 것이라 판단된다. 또한 원주방향의 속도가 회전반대방향으로 갈수록 크게 느려지고 있어 원주방향의 스트레칭이 클 것으로 예측된다. Fig. 6(c)는 $z/R=0$ 에서의 반경방향 속도성분 contour이다. 원주방향의 속도와 동일하게 접선은 동일 각도에서 최대속도성분의 궤적을 나타내며, 선단 와류의 궤적을 예측할 수 있다고 판단된다. 또한 앞서 두 궤적은 서로 일치하고 있음을 확인할 수 있다. Fig 6(d)는 $z/R = 0.12$ 위치, 즉 Fig 2에서 확인할 수 있듯이 상부 선단 와류의 중심이라 판단되는 지점에서의 $r-\theta$ 평면에 수직방향속도성분의 contour를 나타낸다. 좌우로 서로 다른 방향을 가지고 있으며, 각각 최대값의 궤적이 검은 실선으로 표시되어 있다. 또한 수직속도성분이 0 인 궤적이 접선으로 표시되어 있다. 서로 다른 부호를 가지는 수직속도성분 사이의 0 값은 와의 중심이라 판단할 수 있다. 따라서 0의 궤적은 와의

궤적을 나타내며 앞서 두 경우의 궤적과 거의 일치함을 알 수 있다. 또한 실선으로 표시된 음과 양의 수직속도성분의 최대값의 궤적은 선단 와류의 좌우로의 크기 변화정도를 예측할 수 있다. 따라서 앞서 Fig 6(a)에서의 반경방향으로 스트레칭과 함께 고려한다면 운동량 보존에 의해 선단 와류의 단면형태는 아래위로 조금 납작한 타원의 형태를 가질 것이라 판단된다. 또한 서로 다른 부호를 가지면서 동일한 최대치를 가지는 지점의 연결선(이점쇄선)이 선단 와류의 중심궤적의 수직방향선(일점쇄선)과 상당한 각도를 이루는 것으로 보아 파배기형태로 진행함을 예상할 수 있다. 앞서의 Fig. 6(a)(b)(c)(d) 전체적으로

$r/R=1.4$ 정도를 기준으로 내부와 외부영역으로 나뉘어짐을 볼 수 있다. 즉 내부의 선단 와류에 의해 영향을 크게 받는 부분과 그렇지 않은 부분으로 나뉘어지고 있음을 확인할 수 있으며 열 및 물질전달에 있어 차이가 있을 것이라 예상된다.

Fig. 7은 팁의 선단부근인 $r/R=1.04$ 인 지점에서의 $z-\theta$ 평면을 추출한 결과이며, Fig 7(a)는 원주방향속도성분을 $U_\theta=0.45U_{tip}$ 로 변환하여 속도벡터를 나타낸 것이다. 선단 와류의 단면을 확인할 수 있고, $\theta=10^\circ$ 부근에서 팁 바깥으로 기동함을 알 수 있다. 또한 약 30° 까지 선단 와류의 영향을 받고 있음을 확인할 수 있다.

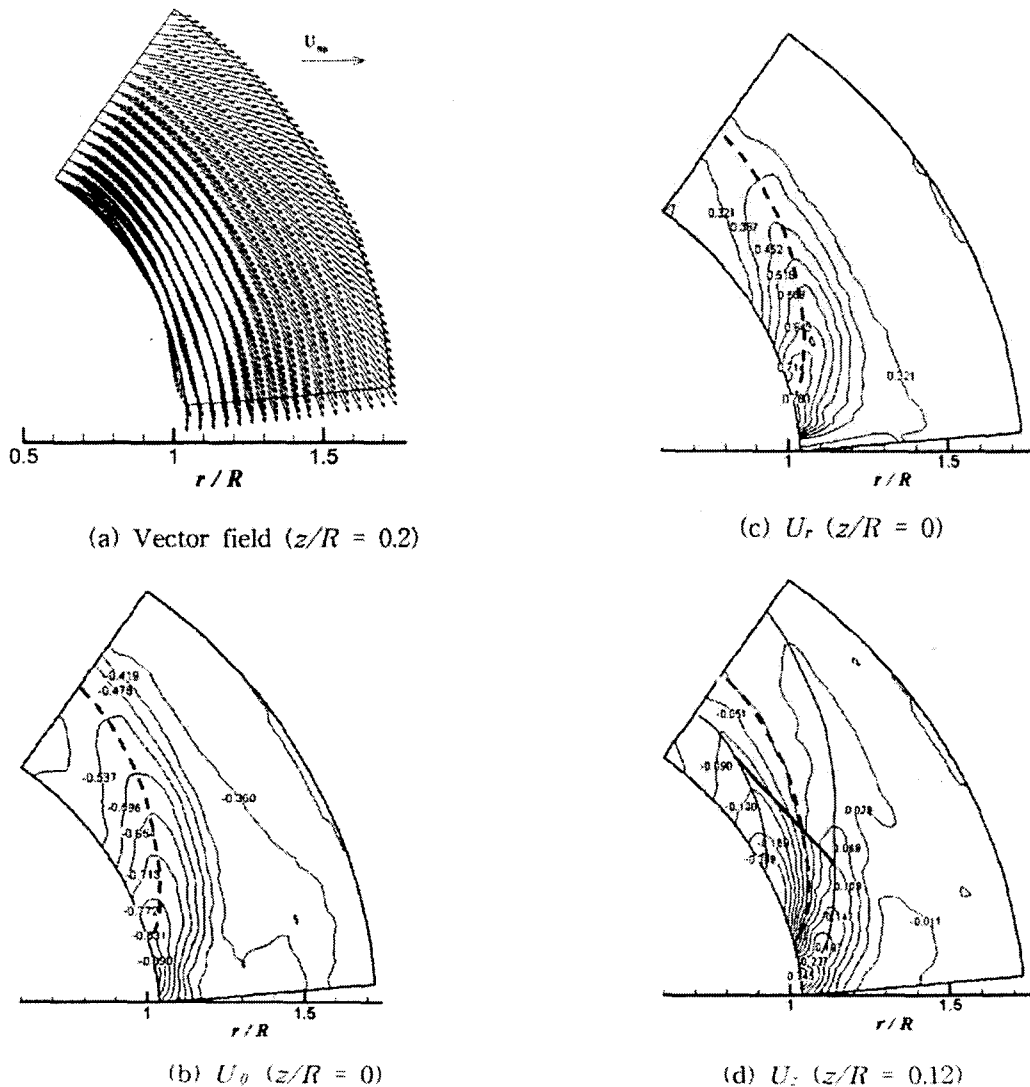


Fig. 6 Velocity components in $r-\theta$ planes

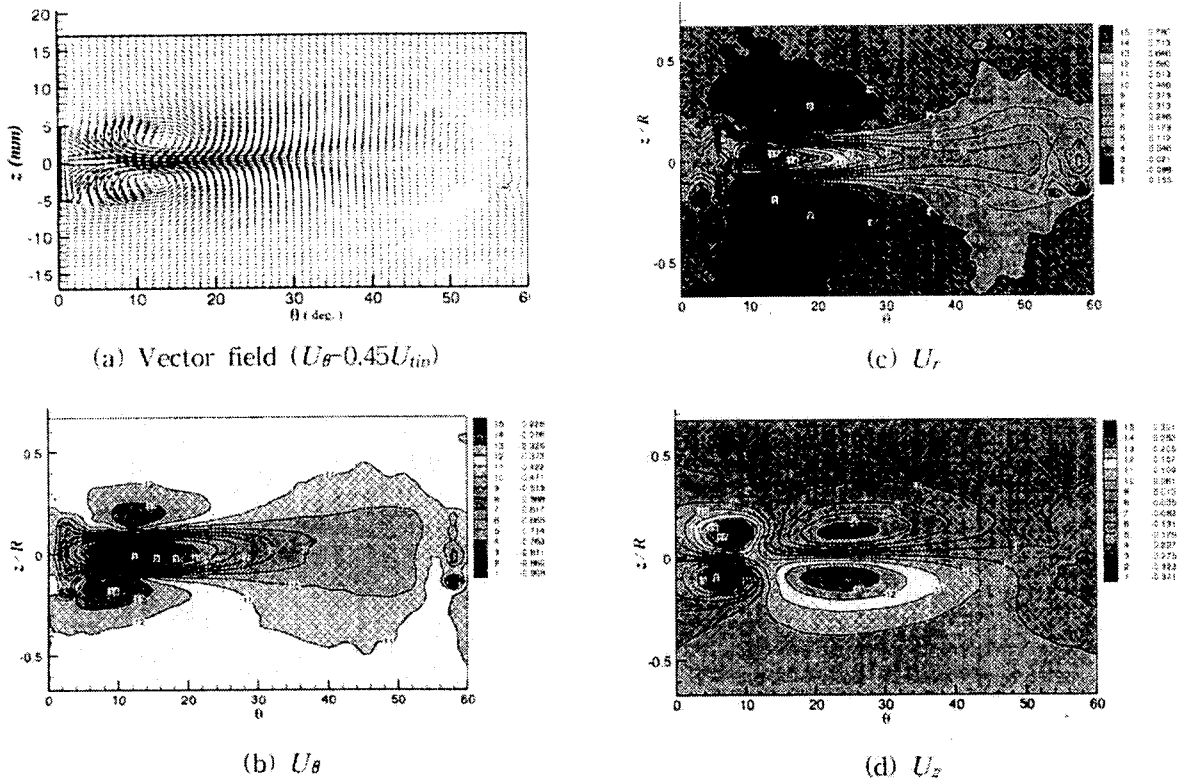


Fig. 7 Velocity components in z - θ planes (at $r=1.04R$)

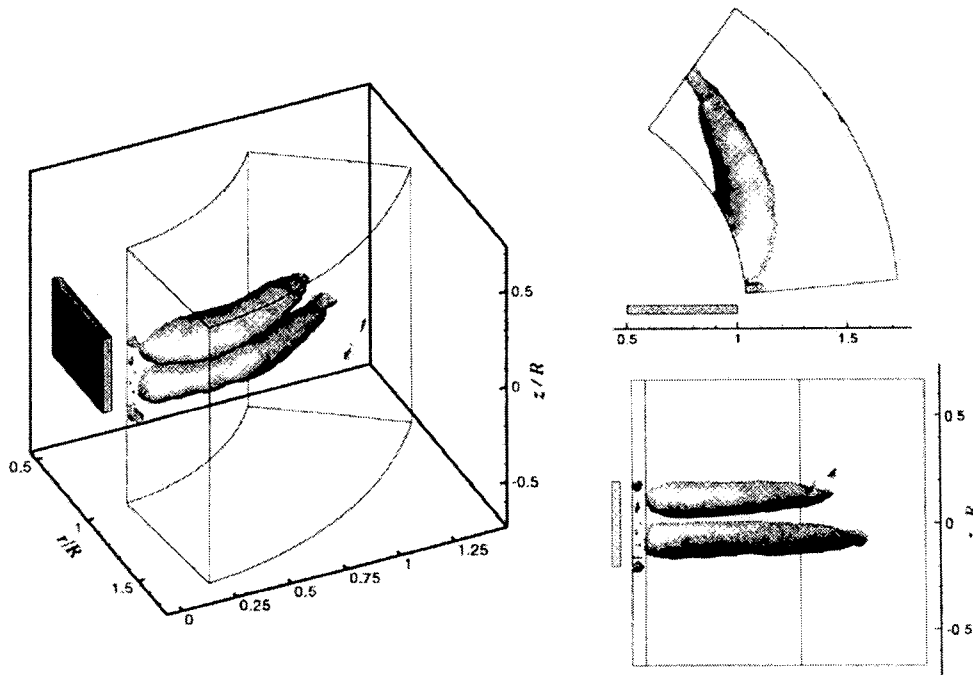


Fig. 8 Equi-vorticity surface (Vorticity : $|\xi|=5.73$)

Fig. 7(b)는 원주방향속도성분, (c)는 반경방향속도성분, (d)는 수직방향의 속도성분의 contour를 나타낸다. 여기서 $\theta=5^\circ$ 부근과 55° 부근에서 에러값을 가지는 이유는 팁 선단에서의 반사에 의한 결과이다. Fig. 7(b)에서 원주방향속도성분이 음의 값을 갖는 것은 팁의 진행방향과 원주방향의 진행방향이 반대인 것으로부터 기인하였다. 원주방향의 속도성분과 반경방향의 속도성분의 경우 상하 선단 와류 사이의 영역에서 값이 큼을 확인할 수 있으며 선단 와류에 의한 가속 때문이라 판단된다. 또한 두 성분의 경우 경향이 거의 비슷함을 알 수 있으며, 원주방향속도성분의 최대치가 $0.9U_{tip}$, 반경방향성분의 경우 $0.8U_{tip}$ 까지 이른다. Fig. 7(d)는 수직방향속도성분의 contour를 나타내며, 4개의 피크를 보여주고 있으며 선단 와류의 영향이 강하게 미치고 있으며, 그 영역이 넓게 분포함을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 $r-z$ 평면에 대한 와도값을 3차원적으로 구성해 동일한 와도값($|\xi|=5.73$)을 가지는 contour를 나타낸 것이다. 외곽의 가는 실선은 측정영역을 표시한 것이며 혼합탱크를 나타낸 것은 아니다. 3차원적인 와의 거동을 명확히 나타내고 있으며 전체적인 궤적이 앞서 Fig. 6에서 추적한 궤적들과 일치함을 확인할 수 있다. 또한 와의 형태가 좌우로 넓은 타원형태를 가지며, 상하로의 대류는 거의 이루어지지 않음을 알 수 있다.

4. 결론

혼합탱크의 팁 근처의 측정부피를 일정 두께로 분할한 여러 평면을 스테레오 입자영상유속 측정 기법을 이용하여 3차원 속도장의 계측하여 일정 부피 내의 평균유동장을 획득할 수 있었으며, 이후 원주좌표계로 재구성하여 선단 와류의 거동을 조사하여 거동 특성과 궤적 등을 파악할 수 있었다. 선단 와류는 상하좌우로의 심한 진동을 하고 있음을 확인할 수 있었으며, 이는 팁의 위치에 따른 위상평균과 함께 팁의 진동주기에 따른 위상평균이 동시에 진행될 경우 좀더 선단 와류의 거동을 명확히 파악될 수 있을 것이라 판단된다.

선단 와류의 상하와의 중심간격은 약 1.6-1.8R 정도였고, 상하로의 대류는 아주 미약한 것으로 조사되었다. 그리고 선단 와류는 약 10° 에서 팁의 외부로 진행됨을 알 수 있었으며, 그리고 선단 와류는 상하가 좁은 타원의 단면형상을 가지고 있으며, 파배기 형태로 꼬여 진행됨을 예측할 수 있었다. 그리고 각 방향의 속도성분들로부터 선단 와류의 궤적을 예측할 수 있었으며 결과들은 서로 거의 일치하였다. 또한 $r/R=1.4$ 부근을 경계로 선단 와류의 영향을 크게 받는 영역과 그렇지 않은 영역으로 나누어짐을 확인하였고 두 영역의 경계를 기준으로 열 및 물질전달에 있어서 다소 차이가 존재할 것이라 예상된다.

후 기

본 연구는 두뇌한국21 핵심과제의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Yianneskis, M. and Whitelaw, J. H., 1987, "An Experimental Study of the Steady and Unsteady Flow Characteristics of Stirred Reactors," *J. Fluid Mech.*, Vol. 175, pp. 537~555
- (2) Kim, S. K. and Kim, K. C., 2000, "PIV Measurements of Bulk Flow in a Stirred Mixer," *Proceeding of KSME Spring Annual Meeting*, B, pp. 77~88
- (3) Riet, K. V. and Smith, J. M., 1975, "The Trailing Vortex System Produced by Rushton Turbine Agitators," *Chemical Engineering Science*, Vol. 30, pp. 1093~1105
- (4) Hill, D. F, Sharp, K. V. and Adrian, R. J., 2000, "Stereoscopic Particle image velocimetry measurements of the Flow around a Rushton Turbine," *Exp. Fluids*, in press
- (5) Soloff, S. M., Adrian, R. J. and Liu, Z-C, 1997, "Distortion Compensation for generalized Stereoscopic Particle Image Velocimetry," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 8, pp. 1441~1454