

# 스테레오 PIV 기법에 의한 임펠러 와류유동의 3차원 구조측정

윤 상 열\* · 김 경 천\*\*

## 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 부피 속도장), 3-D Topology of Tip Vortices(끝단 와류의 3차원형상)

### 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 with 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.

### 1. 서론

혼합탱크는 열 및 물질전달과 혼합을 위해 공업적으로 가장 많이 사용되어지는 장치 중 하나이다. 이러한 교반내의 유동은 터빈 블레이드에 의해 발생하는 3차원적인 tip vortex와 서로의 상호작용에 의해 그리고 거대유동의 발생과 함께 복잡한 거동을 한다. 따라서 이러한 유동의 복잡성은 이론적인 접근을 어렵게 하며, 실험과 전산 해석에 있어서도 많은 한계를 낳게 하였다.

Yianneskis 등<sup>(1)</sup>은 photographic 유속측정방법과 레이저 도플러 유속계를 이용하여 용기내의 평균

유동장과 반지형 와의 형성메커니즘, 그리고 팁에서 발생하는 와의 궤적을 측정하였으며, 김상기 등<sup>(2)</sup>은 입자영상유속계를 이용하여 혼합 교반기 내의 2차원적인 전체유동장을 측정하여 거대유동장의 평균 및 난류유동특성을 분석하였다. Van't Riet 등<sup>(3)</sup>은 photographic 유속측정방법을 이용하여 tip에서 발생하는 와류의 구조와 궤적을 분석한 바 있다. Hill 등<sup>(4)</sup>은 Stereoscopic PIV 실험을 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 정확한 생성메커니즘은 아직 정리되어 있지 못한 상태이고, 많은 실험과 전산해석이 최근에도 시도되어지고 있다. 특히 이러한 3차원성과 복잡성은 tip으로부터 생성되는 tip vortex가 주원인이다. 따

\* 부산대학교 공과대학 기계공학과

\*\* 부산대학교 공과대학 기계공학부

phase locking 된 여러평면을 측정하여 평균 3차원 부피정보를 얻고자 하였으며, 이를 토대로 tip vortex의 3차원적인 거동을 살펴보고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

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 tip로 이루어졌다. tip중심 위치는 용기의 중심위치와 바닥으로부터 1/2 지점에 위치시켰다. 터빈의 회전속도는 100 rpm이었으며 이때의  $Re = ND^2/\nu = 4000$  이었다. 이때의  $N$ =회전수,  $D$ 는 tip의 지름이며( $R=D/2$ ),  $\nu$ 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 Calibration이 이루어졌으며, 한 평면 내에서 Calibration을 위해 0.5 mm 씩 target을 이동시켜 획득한 5개의 target 이미지를 사용하였다. 3차원 속도값의 추출과 왜곡에 대한 속도의 보정을 위해 식(1)을 이용하였으며, 이러한 Stereoscopic PIV를 위한 Calibration 기법에 대해 Soloff<sup>(5)</sup> 등이

제안한 바 있다. Calibration을 위한 보정식은  $x, y, z$ 에 대해 3차 다항식을 사용했으며, 보정에 대한 오차는 0.1~0.2 픽셀 정도였다.

$$\overline{\Delta X_i^{(c)}} \approx F_{i,j}^{(c)}(x_i) \overline{\Delta x_j} \quad (1)$$

( $i=1,2 \quad j=1,2,3, \quad c=1,2$ )

여기서  $X$ 는 이미지상의 위치를  $x$ 는 실제 물리적인 위치를,  $F$ 는 보정식을 나타낸다. 그리고 인덱스  $i$ 는 이미지에서의,  $j$ 는 실제 물리적인 공간상의 각 축을 의미한다.  $F_{i,j}$ 는  $\partial F_i/\partial x_j$ 를 의미하며  $c$  인덱스는 좌우 카메라를 나타낸다.

본 연구를 위해 사용한 광원은 532nm 파장을 가지는 12mJ/pulse의 Nd-yag 레이저 광원이었으며 이때의 평면빔의 두께는 2mm 이었다. 이미지 획득을 위한 카메라는 TSI PIVCAM 10-30 CCD 카메라 두 대를 사용하였으며 해상도는 1K×1K이다. 3차원 속도장의 측정을 위해 카메라를 평면빔에 수직인 축에 대해 약 35° 정도 기울였으며, 초점의 정확도를 위해 렌즈를 카메라 중심축에 대해 5° 정도 바깥 방향으로 tilting 시켰다. 또한 동일한 고정된 위상의 측정을 위해 적외선 센서에 의한 trigger 신호를 synchronizer와 동기시켜 사용하였다. 이미지의 획득을 위해 TSI

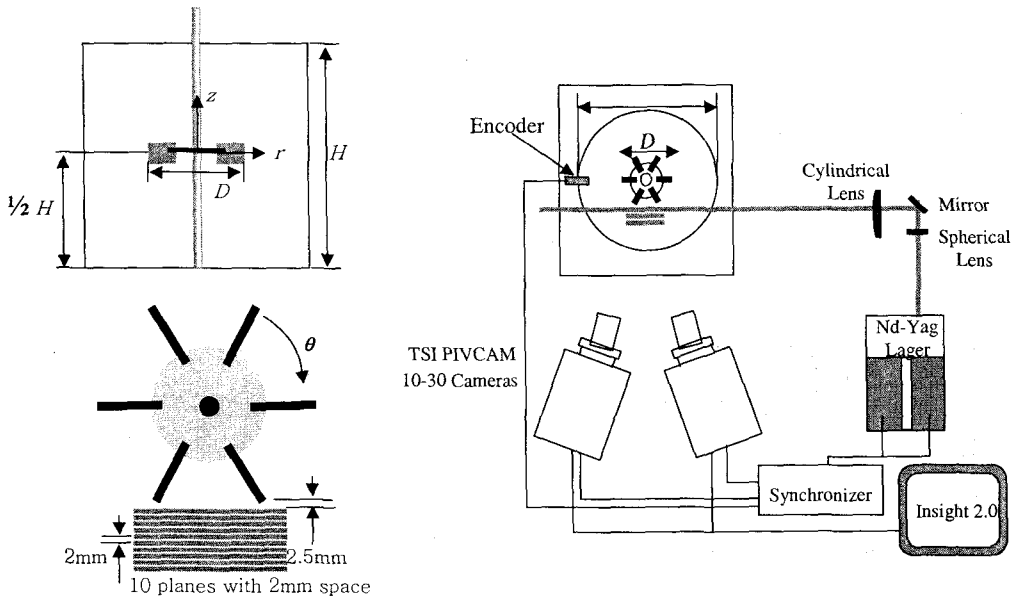


Fig. 1 Schematic of the experimental setup

Insight 2.0이 사용되었으며, 속도장의 계산은 two-frame crosscorrelation 기법을 사용하여 속도추출을 하였다.

### 3. 3 실험 결과 및 해석

각각의 평면에서 500번의 앙상블평균이 이루어졌으며 내삽과 외삽에 의해 원주좌표계로의 전환해

서 결과를 정리하였다. 원주좌표계로 전환된 부피영역은  $\theta = 5 \sim 55^\circ$ ,  $r = 26.5 \sim 44\text{mm}$ ,  $z = -17.0 \sim 17.0\text{mm}$  이다.

#### 3.1 Tip vortex의 발달

Fig. 2는 각각의  $\theta$ 에 대해 추출한  $z$ - $r$ 평면에서의 속도장이며, tip vortex의 발달과정을 명확히 볼 수 있다.  $\theta = 10^\circ$ 까지는 아직 임펠러 뒤에

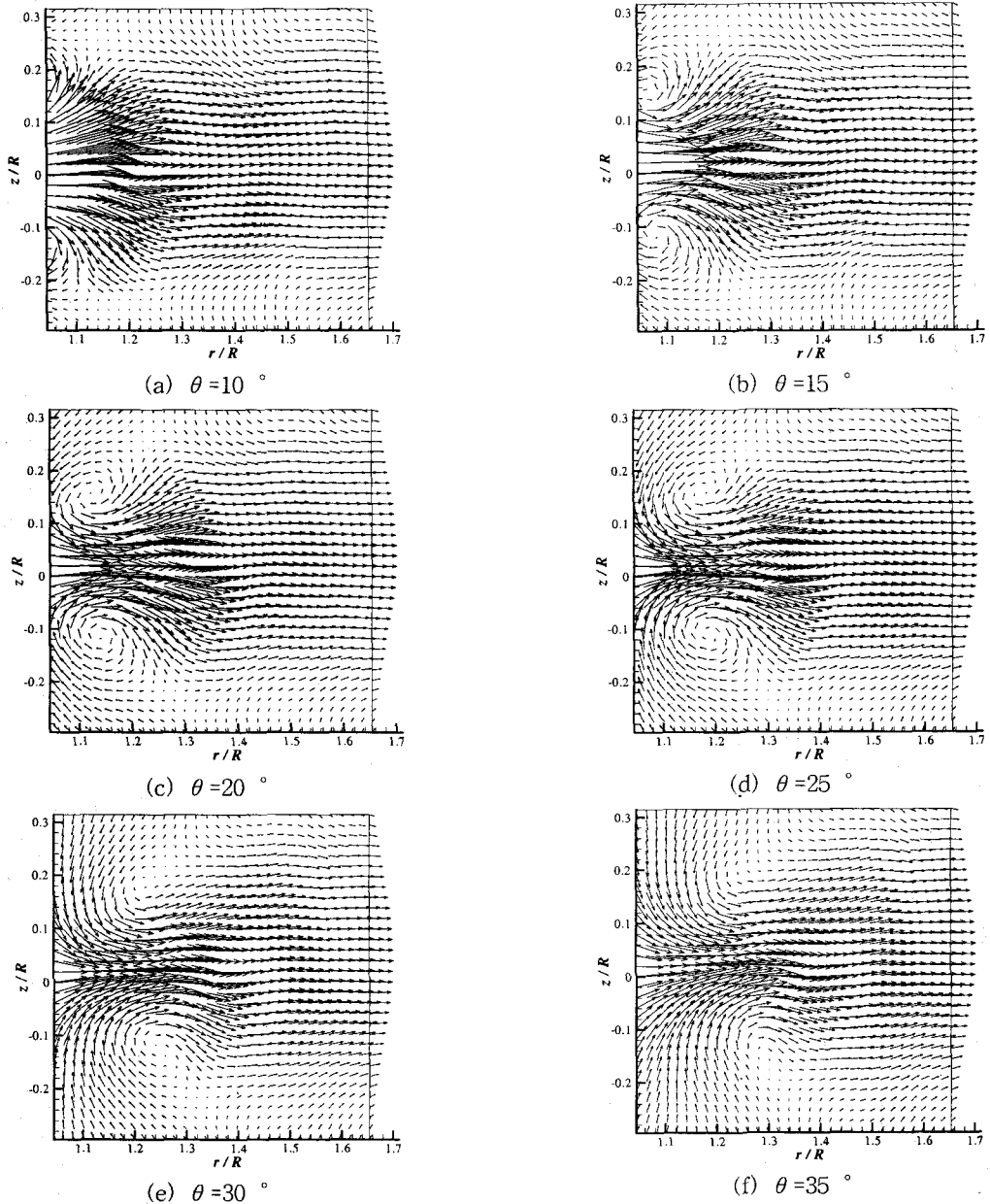


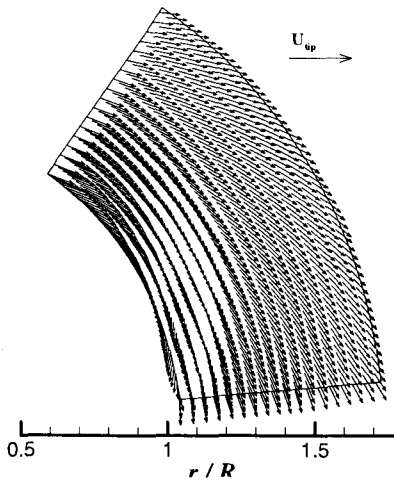
Fig. 2 Development of the tip vortex

와가 위치해 있으며,  $\theta=10^\circ$  부터 임펠러 외부로 대류되어 나타나기 시작해 서서히 상하좌우로 대류되어 나감을 확인할 수 있다. 원주방향으로 약  $30^\circ$  까지는 tip vortex의 거동이 강하게 남아 있으며 이후 점차 주류의 영향을 받아 대류되어 감을 알 수 있다. 와도장을 통한 상하와의 중심간격은 약  $1.6\sim 1.8R$  정도로 상하로의 대류는 크지 않음을 확인하였다.

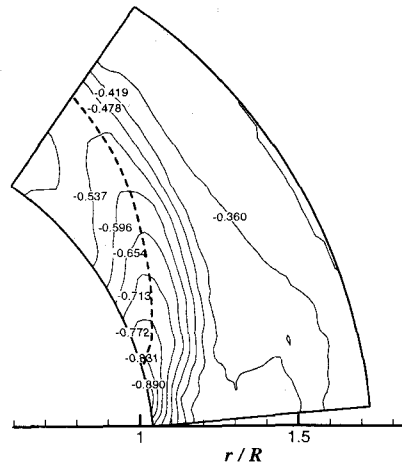
### 3.2 $r$ - $\theta$ , $z$ - $\theta$ 평면에서의 유동장 및 3차원 구조

Fig. 3은 각각의  $z$ 에 대해 추출한  $r$ - $\theta$  평면을  $5^\circ \sim 55^\circ$  까지를 나타내었다.

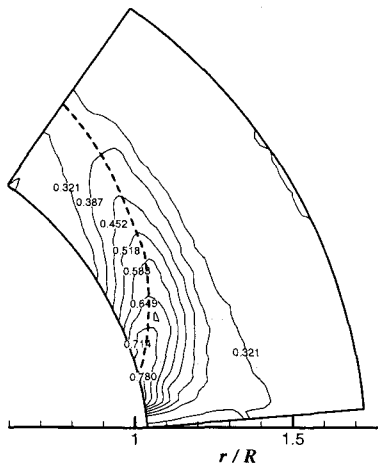
Fig. 3(a)는  $z/R = 0.2$ , 즉 상부 와의 윗면 위치의 속도장을 나타낸 것으로 전체속도벡터의 반만 표현되었다. 내부의 유입은 tip vortex에 의한 것이며 약  $30^\circ$  까지 tip vortex의 영향이 크게 미치고 있음을 알 수 있다. Fig 3(b)는  $z/R=0$ , tip의 중심에 해당하는 평면의 원주방향 속도성분 contour를 나타낸다. 상하부 와의 중심의 가운데 지점은 와의 영향으로 가속될 것이며 따라서 최대원주속도의 위치는 와의 전체적인 궤적의 경향과 유사한 거동을 할 것이라 판단된다. 점선은 동일 각도에서의 최대원주속도의 위치이며, 따라서 와의 궤적은 이와 유사할 것이라 판단된다.



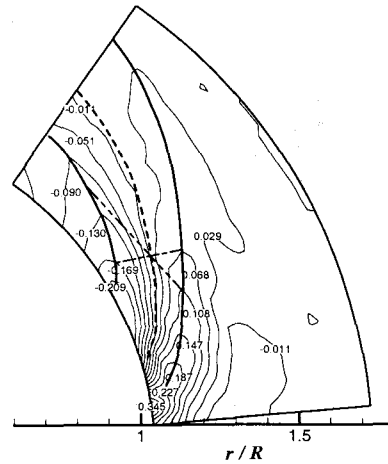
(a) Vector field ( $z/R = 0.2$ )



(b)  $U_\theta$  ( $z/R = 0$ )



(c)  $U_r$  ( $z/R = 0$ )



또한 원주방향의 속도가 회전반대방향으로 갈수록 크게 느려지고 있어 원주방향의 스트레칭이 클 것으로 예측된다. Fig. 3(c)는  $z/R=0$  에서의 반경방향 속도성분 contour이다. 원주방향의 속도와 동일하게 점선은 동일각도에서 최대속도성분의 궤적을 나타내며, tip vortex의 궤적을 예측할 수 있다고 판단된다. 또한 앞서 두 궤적은 서로

일치하고 있음을 확인할 수 있다. Fig 3(d)는  $z/R = 0.12$  위치, 즉 Fig 2에서 확인할 수 있듯이 상부 tip vortex의 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 점선

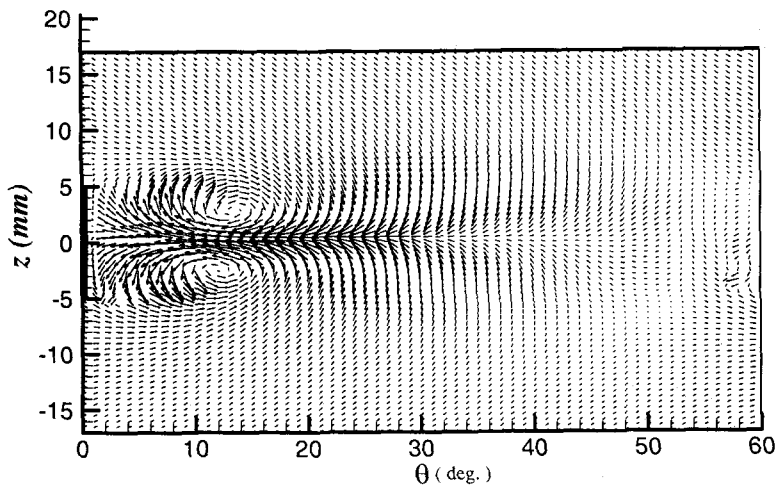


Fig. 4  $z-\theta$  plane

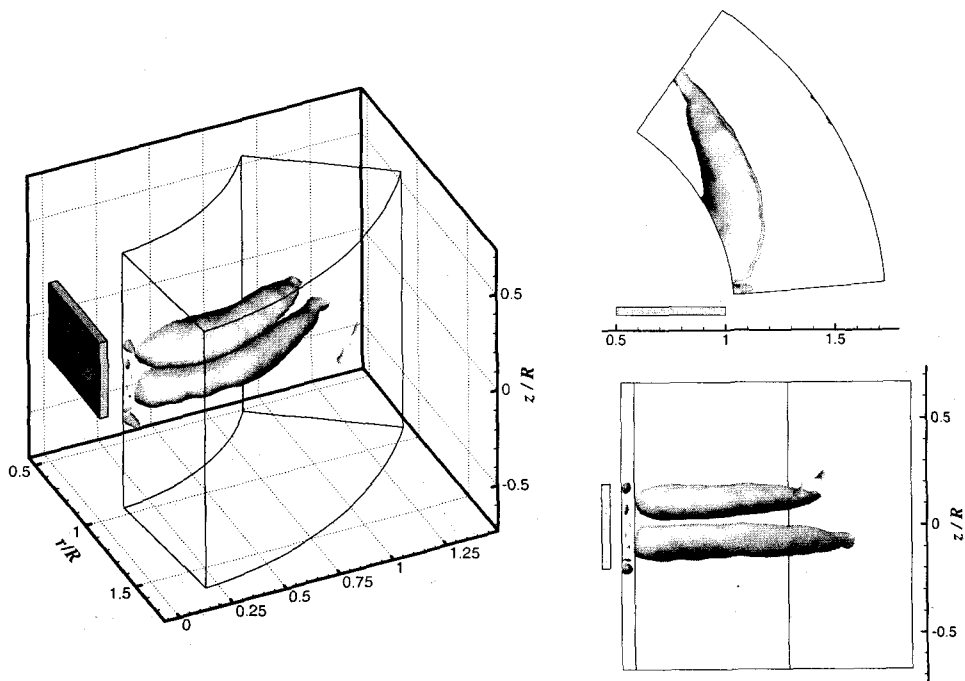


Fig. 5 Equi-vorticity surface (Vorticity :  $|\xi|=5.73$ )

으로 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 tip vortex의 좌우로의 크기 변화정도를 예측할 수 있다. 따라서 앞서 Fig3(a)에서의 반경방향으로 스트레칭과 함께 고려한다면 운동량 보존에 의해 tip vortex의 단면형태는 아래위로 조금 납작한 타원의 형태를 가질 것이라 판단된다. 또한 서로 다른 부호를 가지면서 동일한 최대치를 가지는 지점의 연결선(이점쇄선)이 tip vortex의 중심궤적의 수직방향선(일점쇄선)과 상당한 각도를 이루는 것으로 보아 파배기형태로 꼬여서 하류로 진행됨을 예상할 수 있다. 앞서의 Fig. 3(a)(b)(c)(d) 전체적으로  $r/R=1.4$ 정도를 기준으로 내부와 외부영역으로 나뉘어짐을 볼 수 있다. 즉 내부의 tip vortex에 의해 영향을 크게 받는 부분과 그렇지 않은 부분으로 나뉘어지고 있음을 확인할 수 있으며 열 및 물질전달에 있어 차이가 있을 것이라 예상된다.

Fig. 4는 tip의 바로 앞쪽  $r/R=1.04$ 인 지점에서의  $z-\theta$  평면을 추출해  $U_\theta=0.45U_{tip}$ 의 속도벡터를 나타낸 것이다. Tip vortex의 단면을 확인할 수 있고,  $\theta=10^\circ$  부근에서 tip 바깥으로 거동함을 알 수 있다. 또한 약  $30^\circ$  까지 tip vortex의 영향을 받고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 5는  $r-z$ 평면에 대한 와도값을 3차원적으로 구성해 동일한 와도값( $|\zeta|=5.73$ )을 가지는 contour를 나타낸 것이다. 외곽의 가는 실선은 측정영역을 표시한 것이며 혼합탱크를 나타낸 것은 아니다. 3차원적인 와의 거동을 명확히 나타내주고 있으며 전체적인 궤적이 앞서 Fig 3에서 추적한 궤적들과 상당 부분 일치함을 확인할 수 있다. 또한 와의 형태가 좌우로 넓은 타원형태를 가지며, 상하로의 대류는 거의 이루어지지 않음을 알 수 있다.

#### 4. 결론

혼합탱크의 tip 근처의 측정부피를 일정 두께로 분할한 여러 평면을 스테레오 PIV를 이용하여 3차원 속도장의 계측하여 일정 부피 내의 평균유동장을 획득할 수 있었으며 이후 원주좌표계로

재구성하여 tip vortex의 거동을 조사하여 거동특성과 궤적 등을 파악할 수 있었다. Tip vortex의 상하와 와의 중심간격은 약 1.6-1.8R 정도였고, 상하로의 대류는 아주 미약한 것으로 조사되었다. 그리고 Tip vortex는 약  $10^\circ$  에서 tip의 외부로 진행됨을 알 수 있었다. 그리고 tip vortex는 상하가 좁은 타원의 단면형태를 가지고 있으며, 파배기 형태로 꼬여 진행됨을 예측할 수 있었다. 그리고 각 방향의 속도성분들로부터 tip vortex의 궤적을 예측할 수 있었으며 결과들은 서로 거의 일치하였다. 또한  $r/R=1.4$  부근을 경계로 tip vortex의 영향을 크게 받는 영역과 그렇지 않은 영역으로 나누어짐을 확인하였고 두 영역의 경계를 기준으로 열 및 물질전달에 있어서 다소 차이가 존재할 것이라 예상된다.

#### 후기

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) 김상기, 김경천, 2000, "교반혼합기 내의 거대유동에 대한 PIV 측정," *대한기계학회 춘계학술대회 초록집*, 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