

## 러쉬톤 교반기의 초기 비정상 유동 특성

박경현\* · 김경천†

(2000년 2월 27일 접수, 2001년 9월 20일 심사완료)

### Characteristics of the Starting Flow of a Rushton Turbine Mixer

Kyung Hyun Park and Kyung Chun Kim

**Key Words:** Rushton Turbine(러쉬톤 터빈), Starting Flow(초기 비정상 유동), Trailing Vortex(끝단 와류), Cinematic PIV(시네마틱 PIV), Bulk Flow(거대 유동)

#### Abstract

The characteristics of starting flow of a six-blade Rushton turbine mixer were investigated by using a cinematic Particle Image Velocimetry technique. The flows were quantified by measurements of velocity fields with a 4 ms time interval for a blade rotational speed of 100 r.p.m, so that the turbine Reynolds number( $ND^2/\nu$ ) was fixed to 6,960. The radial shedding of the trailing vortices starts from passing four blades after the beginning of rotation. It clearly shows that the vortex pairing phenomena caused by the interactions between trailing vortices from consecutive blades. The average convection velocity of the radial flow is found to be 28 % of the tip velocity. The starting flow seems to arrive at a steady state after 8 revolutions in this study, which corresponds nearly one circulation through the bulk flow trajectory with the average radial convection velocity.

#### 기호설명

$D$	: 터빈 블레이드 직경
$H$	: 터빈 블레이드 높이
$Re_D$	: 터빈 레이놀즈 수
$r$	: 축으로부터 반경방향 거리
$r^*$	: 무차원 반경 ( = $r/R$ )
$R$	: 블레이드 반경
$u_r$	: $r$ 방향의 속도성분
$u_z$	: $z$ 방향의 속도성분
$z^*$	: 무차원 높이 ( = $z/R$ )

#### 1. 서론

원통형 용기 속에 놓인 Rushton 터빈 블레이드

의 회전으로 형성되는 혼합교반기 유동은 침전 및 이종 물질의 혼합촉매작용 등 다양한 화학공정 및 관련 산업의 응용에 공학적으로 매우 중요하다. 실제 산업현장에서는 대규모의 교반기가 사용되고 있으며, 교반기 내의 유동구조의 파악과 난류에너지의 생성 및 난류확산에 따른 소산 효과 등에 대한 해석이 절실히 필요하다. 이러한 교반기내의 유동은 아직까지 규명되지 않은 터빈 블레이드에 의해 발생하는 3차원적인 와 구조와 블레이드 부근에서는 난류특성이 국소적으로 매우 크게 나타나는 유동이다.

이러한 유동의 복잡성으로 인하여 선행연구들은 이론적 접근보다는 실험적 연구가 그 주류를 이루어 왔으며 열필름, 레이저 도플러 유속계(LDV) 및 입자영상유속계(PIV) 등 다양한 실험기법을 이용하여 교반기 전체 유동장 및 블레이드 팁(Tip) 근처의 유동구조에 대해 연구해 왔다.

거대유동은 블레이드 팁으로부터 배출되는 반경방향의 제트(Jet)유동이 교반기 상하로 나뉘면서 거대한 반지형 와(Ring vortex)를 이루어 형성

\* 회원, 부산대학교 대학원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소  
E-mail: kckim@pusan.ac.kr  
TEL : (051)510-2324 FAX : (051)512-9835

되며 전체 유동장의 혼합형태를 지배한다. Yianneskis<sup>(1)</sup> 등은 사진촬영 유속측정방법과 레이저 도플러 유속계를 이용하여 용기내의 평균유동장과 거대유동장내에서의 반지형 와의 형성 매커니즘, 팁에서 발생하는 와의 궤적을 측정하였다. Distelhoff와 Marquis<sup>(2)</sup> 는 레이저유도형광(LIF) 기법을 이용, 교반기 내의 농도장을 측정하여 선단와류 구조가 농도장의 구배와 블레이드 사이에서 측정된 농도장의 섭동성분의 증가를 초래함을 밝혔다. 김상기<sup>(3)</sup> 등은 PIV를 이용하여 혼합교반기 내의 전체유동장을 측정하고 터빈 블레이드의 깊이 따른 거대유동장의 평균 및 난류유동 특성을 분석하였다. 특히 블레이드 근처 유동구조는 블레이드 팁으로부터 배출되는 반경방향의 제트유동과 블레이드의 회전에 의한 와의 형성 및 와류의 3차원 운동 등 그 구조가 매우 복잡하다. Vant Riet와 Smith<sup>(4)</sup> 은 사진촬영 유속측정방법을 이용하여 팁에서 발생하는 와류의 구조와 궤적을 분석하여 각각의 블레이드 뒤쪽에 선단와류 쌍의 개념과 존재를 분석하였고, 해석적인 접근을 통하여 단순화된 Navier-Stokes 방정식을 이용하여 와 거동을 설명하였다. Fig. 1은 블레이드 근처의 복잡한 3차원 구조를 가진 끝 선단와류의 개략도를 나타내고 있다. 여기서 끝 선단와류가 블레이드 디스크의 아래와 윗면에 같이 존재함을 알 수 있다. 이 선단와류는 블레이드 안쪽의 수직 모서리의 뒷부분에 존재하는 정지유체 영역(dead water zone)의 와의 운동과 블레이드의 상하 모서리 뒷부분을 따라 거동하는 와열의 조합된 효과에 의해 발생된다. Stoots와 Calabrese<sup>(5)</sup> 는 레이저 도플러 유속계(LDV)를 이용하여 블레이드 근처에서의 주기성과 팁에서 발생된 와가 높은 난류유동장을 형성함을 밝혔다.

지금까지의 선행연구에서는 교반기의 운전이 정상상태에 도달했을 경우에 대해서만 유동특성

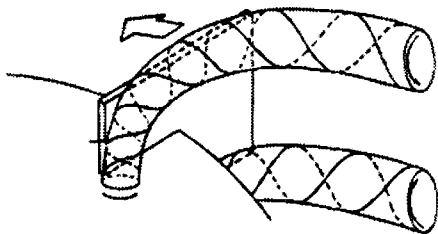


Fig. 1 Schematic three dimensional view of the trailing vortex pair

파악이 시도되었고 정지상태로부터 출발하는 시작유동의 초기 비정상 유동 특성에 대한 연구는 저자들이 파악한 바로는 전무하다. 본 논문에서는 Cinematic PIV기법을 이용하여 정지상태로부터 회전하기 시작하는 교반혼합기 내의 시작유동(starting flow)에 대한 유동구조와 선단와류의 형성 매커니즘을 시간에 따라 연속적으로 얻어진 속도장으로부터 규명하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 교반혼합기의 제원 및 좌표계를 나타낸다. 터빈 블레이드의 직경( $D$ )은 64mm이며 블레이드는  $60^\circ$  간격으로 6개이다. 블레이드 두께는 2mm이고, 혼합용기의 직경( $T$ )은 190mm( $\approx 3D$ )이며 아크릴로 제작되었다. 수면의 높이는 용기의 직경과 같도록 하였다. 터빈 블레이드는 용기의 중심에 수직으로 위치하게 하였으며 깊이 방향으로는 바닥으로부터  $T/2$ 인 지점에 위치시켜 실험을 수행하였다. 임펠러의 회전속도는 100 r.p.m.,  $V_{tip} = 335\text{mm/s}$ 이다. 터빈 레이놀즈 수는 다음과 같이 정의된다.

$$Re_D = \frac{ND^2}{\nu} \quad (1)$$

여기서  $N$ 은 임펠러의 회전수,  $D$ 는 터빈 블레이드의 직경,  $\nu$ 는 물의 동점성계수이다. 따라서, 계산된 레이놀즈 수는 6,960이었다. 측정영역은 블레이드 팁이 포함된 영역으로 측정하였으며, 관측창의 크기는 약 69mm × 65mm 이다.

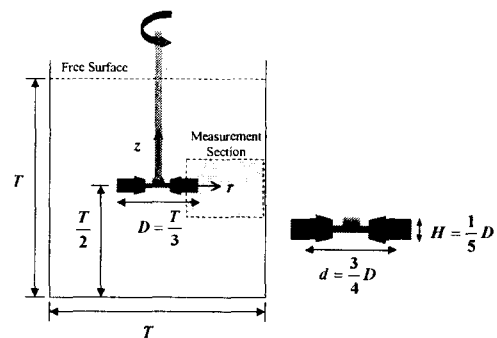


Fig. 2 View of the Rushton turbine mixer, geometric conditions and the coordinate system

Fig. 3은 실험장치의 전체 개략도를 나타내고 있다. 교반혼합기 내의 유동장 계측을 위하여 비중이 1.05이하이고, 평균 직경이 8 ~ 12  $\mu\text{m}$ 인 속이 빈 유리구슬(hollow glass) 입자를 유동 내에 주입하였다. 유동 내의 입자들의 조명을 위하여 Ar-Ion 레이저(4W)가 사용되었으며 원통형 렌즈를 사용하여 교반혼합기 내의  $r$ - $z$  평면에 평면광으로 조사된다. 레이저에 의해 산란된 입자들의 영상을 획득하기 위하여 고속카메라(Kodak Motion Corder Analyzer SR-Ultra-c)를 사용하였다. 이 고속카메라는 최소 해상도 128  $\times$  34 픽셀의 해상도에서 10,000 frame/s, 최대 해상도 512  $\times$  480 픽셀에서 250 frame/s의 속도로 촬영이 가능하다.

본 실험에서는 최대 해상도 조건에서 영상을 획득하여 고속카메라의 메모리에 1,364장의 화상정보를 연속적으로 저장하였다. 속도벡터는 FFT 방식의 상호상관법에 의해 계산되었으며 연속된 두 장의 영상을 사용할 수 있으므로 추출된 속도벡터장은 1,332장이다. 본 실험에서 구해진 속도장의 시간해상도는 고속카메라의 촬영속도와 같으므로 4ms이다. 공간해상도를 향상시키기 위하여 순차적 기법(Recursive method)을 적용하여 64  $\times$  64 픽셀에서 32  $\times$  32 픽셀로, 여기서 16  $\times$  16 픽셀로 추정구간을 세분화하였고, 50%의 겹침을 사용하여 3,245개의 벡터를 얻었다. 여기서 16 픽셀은 2.154 mm의 물리적 크기에 대응하며, 픽셀 단위 이하의 정밀도를 얻기 위하여 Gaussian 보간법으로 보간하였다. 이와 같은 속도벡터의 해상도는 일반적인 고분해능 DPIV에서 사용되는

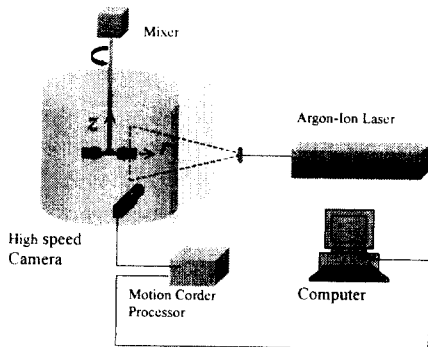


Fig. 3 Experimental setup of the cinematic PIV measurement

1K  $\times$  1K CCD 카메라로 얻은 영상에서 32  $\times$  32 픽셀의 탐색영역에 50%의 겹침을 사용하는 경우와 같은 해상도이다. 그리고, 속도벡터가 결정되기 전에 상관관계 테이블에서 오류벡터 검출을 위하여 MCV(Multiple Correlation Validation) 기법<sup>(6)(7)</sup>을 적용하였다. 상세한 측정기법은 참고문헌 (8)에 나와있다.

### 3. 순간 속도장

Cinematic PIV 기법에 의해 연속적으로 얻어진 화상정보들은 그 자체가 유동에 대한 정성적인 정보일 뿐만 아니라, 후처리를 통하여 물리적으로 의미 있는 정량적인 해석을 가능하게 한다. 고속카메라로부터 얻어진 유동에 대한 화상정보로부터 추출된 벡터장은 약 0.004초 간격으로 5.324초까지 1,331장의 순간 유동장들이다. 최초 정지상태에서 블레이드의 위치는 0°이며 첫 번째 블레이드라고 정의하였다. Fig. 4는 0.124초(두 번째 블레이드가 0° 인 위치)부터 0.404초까지의 순간속도장을 나타내며, Fig. 4(a)에서 Fig. 4(o)까지는 0.02초 간격으로, Fig. 4(o)부터 Fig. 4(v)까지는 0.04초 간격으로 나타낸 것이며 각 순간 속도장은 평탄화 처리를 하였다.

블레이드가 정지상태에서 회전함에 따라 임펠러는 100r.p.m.까지 가속된다. 블레이드 회전 초기에는 주변 유체의 유동은 관찰되지 않으며 회전이 가속됨에 따라 블레이드 후방에 발생된 음압의 영향으로 유체는 유입된다. Fig. 4(a)에서 두 번째 블레이드가 0° 에 위치함에 따라 블레이드에 의해 외부로 밀려나는 유동이 나타나며, 첫 번째 블레이드와 두 번째 블레이드 사이의 유체가 정지상태에서 블레이드의 회전에 따라 서서히 유동을 시작하여 상, 하 반경방향으로 거의 같은 속도로 진과되어 나간다. 첫 번째 블레이드에서 형성된 주변 유체유동의 영향으로 인하여 Fig. 4(b)로부터 블레이드 팁에서 형성된 텀보텍스의 형태를 분명히 볼 수 있다. 또한, 서로 반대방향으로 회전하는 와 유동이 블레이드 사이에서 형성되며, 이 반전와류쌍에 의해 중심의 유체는 반경방향으로 분출된다. 블레이드가 회전함에 따라 반전와류쌍이 서로 접근하여 그 강도가 세어지는 현상을 Fig. 4(c)로부터 알 수 있으며 블레이드 후방에서의 음압의 영향으로 판단된다. 블레이드

팁의 위와 아래에서는 유체가 계속 유입되므로 반경방향으로 분출되는 제트는 중심축에만 존재함을 알 수 있다.

비정상유동의 특징은 Fig. 4(d)에서 볼 수 있는데, 접근해오는 블레이드 전방에는 음압에 의해 상·하 경계면에서 강한 유입이 발생하며, 아직까지 중심축을 따라 분출하는 제트가 보인다. 또한, 두 번째 블레이드에 의해 발생된 팁보텍스는 주변 유체의 영향으로 완전히 발달된 3차원적인 구조를 가지지 못하므로 반경방향으로 분출되지 못하고 블레이드 팁과 함께  $\theta$  방향으로 유동한다. Fig. 4(d)에서 보이는 반경방향 속도성분은 상·하 면의 유입에 따른 유출 현상으로 판단되며, 그 강도도 시간에 따라 약해진다. 따라서, 아직까지 팁보텍스가 완전히 발달되지 못한 것으로 사료된다. 블레이드가 회전함에 따라 Fig. 4(e)와 같이 상·하 면에서 유체의 유입보다 반경방향의 유입이 더욱 증가하게 되므로 중심축에서는 앞서 형성되었던 반경방향의 제트와 블레이드 쪽으로의 유입이 충돌하여 정체점 유동(stagnation flow)이 형성된다.

세 번째 블레이드가  $0^\circ$ 에 위치할 때(Fig. 4(f))에는 반경방향의 제트보다는 회전축 방향의 역류가 강하게 발생한다. 이 역류의 영향으로 정체점의 위치는 Fig. 4(e)보다 축으로 더 접근하게 된다. 세 번째 블레이드가 지나간 뒤(Fig. 4(g))에는 역류의 영향으로 반경방향 제트의 분출이 나타나지 않으며, 블레이드 사이의 음압에 의해 반경방향에서 유입이 발생한다. 또한, 상·하 면에서 강한 유체의 유입이 발생하여 와가 형성되며, 시간이 지남에 따라 유입에 의해 와가 성장한다(Fig. 4(h)). 그러나, Fig. 4(i)와 Fig. 4(j)로부터 이 팁보텍스 역시 완전히 발달된 형태를 형성하지 못함을 알 수 있다. 이것은 팁보텍스의  $\theta$  방향 유동이 지배적임을 나타낸다고 사료되며 블레이드 주변 유체의 유동장이 다소 형성되어 두 번째 블레이드가 지나간 경우와는 다르게 다소 반경방향으로 밀려나게 되고 그 강도가 비교적 증가함을 알 수 있다. 여전히 반경방향으로 분출되는 제트의 형태는 볼 수 없다.

네 번째 블레이드의 접근으로 반경방향에서 유입이 발생하지만 두 번째 블레이드와는 달리 그 강도가 약함을 관찰할 수 있는데 이는 세 번째 블레이드에 의한 팁보텍스의 잔상의 강도가 이전

에 비해 증가하였음을 의미한다고 판단된다. 이때 발생된 와의 잔상은 반경방향으로 전파되지 못하고(Fig. 4(k)) 네 번째 블레이드 이후에 발생된 팁보텍스에 흡수되면서 강한 팁보텍스를 형성하게 된다(Fig. 4(l)). 따라서, 강한 반전와류쌍이 발생하면서 반경방향의 제트가 분출된다. Fig. 4(m)에서와 같이 네 번째 이후에는 부호가 서로 반대인 와류쌍이 상호작용하므로 외부의 유체가 블레이드의 상·하 면으로부터 강하게 유입되어 팁보텍스는 밀려나게 되고, 다섯 번째 블레이드가 접근해 오면서 반경방향으로 반전와류쌍을 밀어내어 결과적으로 반경방향으로 대류가 발생하기 시작한다(Fig. 4(n)).

Fig. 4(o)에서 보는 바와 같이 완전히 발달된 팁보텍스 pair는 반경방향 제트와 함께 반경방향으로 대류가 일어나며, 블레이드 상·하 면에서는 음압의 영향으로 유체의 유입이 서서히 진행된다. 이로 인해 다섯 번째 블레이드 후면에서 유입된 유동이 부딪히면서 반경방향으로 제트는 분출되고, 팁보텍스가 다시 형성됨을 볼 수 있다(Fig. 4(p)). 다섯 번째 블레이드에 의해 형성된 팁보텍스는 여섯 번째 블레이드의 접근으로 인하여 반경방향으로 전파되며(Fig. 4(q)), Fig. 4(r)에서는 강한 반경방향 제트가 분출된다. 그러나, 다섯 번째 블레이드에서 발생된 와의 강도는 다소 작게 나타나는데, 이는 네 번째 블레이드에서 발생된 와의 영향으로 판단된다.

Fig. 4(s)로부터 다섯 번째 블레이드 이후에 발생된 팁보텍스는 네 번째 블레이드 이후에 발생된 강한 팁보텍스에 흡수됨을 볼 수 있다. 즉, 인접한 두 개의 블레이드에서 발생한 와들이 와류쌍을 이루는 증거이다. 일곱 번째 블레이드 후면에서 팁보텍스가 형성되고, 그 형태를 유지하면서 반경방향으로 전파됨을 확인할 수 있다(Fig. 4(t)). Fig. 4(u)에서는 블레이드가 1회전 뒤에는 각 블레이드에서 형성된 팁보텍스들의 상호작용에 의해 복잡한 유동장을 형성하게 되고, 반경방향 제트는 Fig. 4(v)에서 원통 벽면에 도달하여 정체점 유동이 나타남을 볼 수 있다.

시작유동이 시작되어 반경방향의 분출유동이 벽면까지 도달하는 데에는 약 0.7초가 소요되었다. 블레이드 끝단에서 벽면까지의 거리( $T/3$ )를 시간으로 나누면 평균 대류속도는 약  $90\text{mm/s}$ 로 tip 속도의 27%에 해당한다.

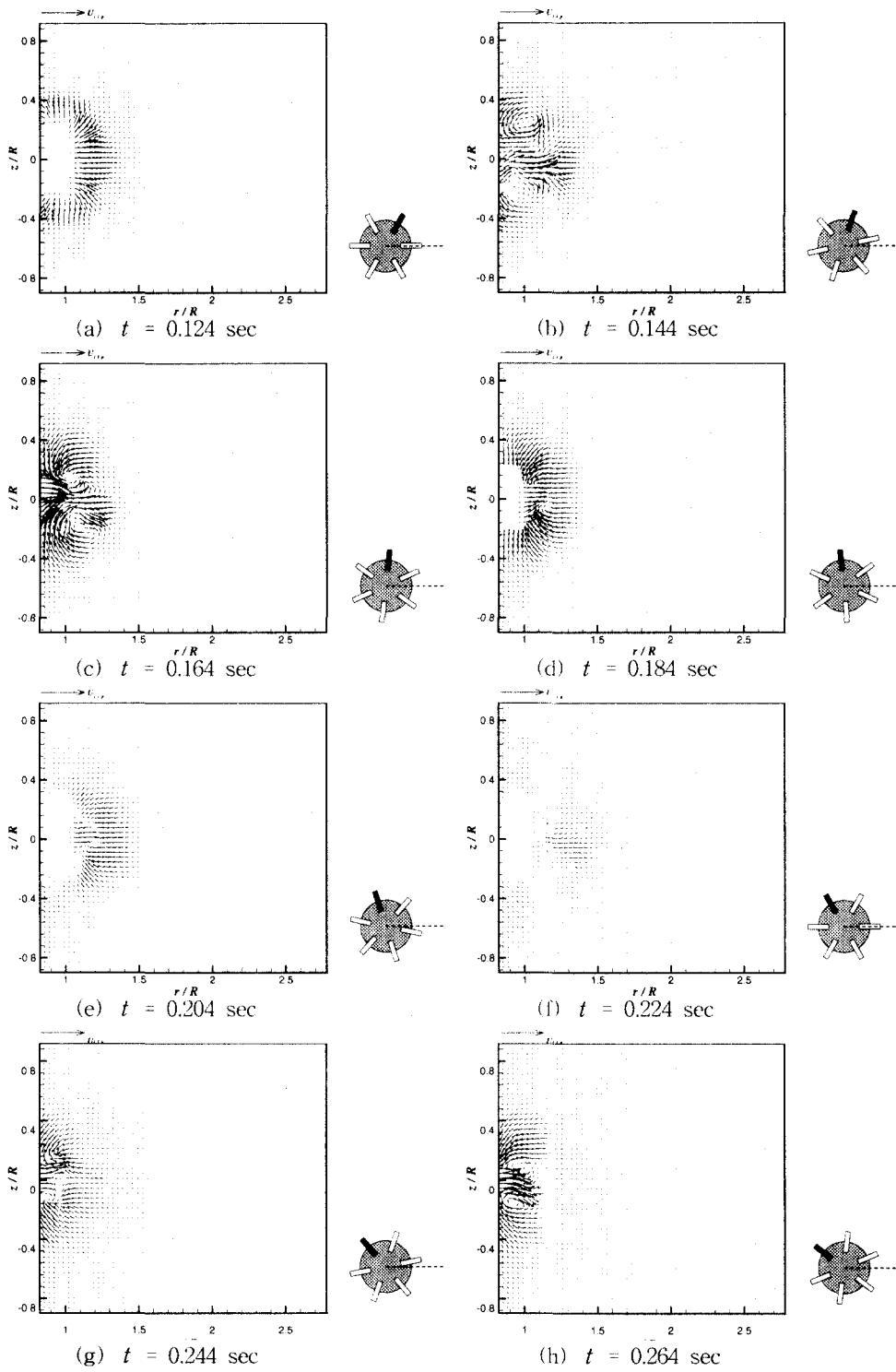
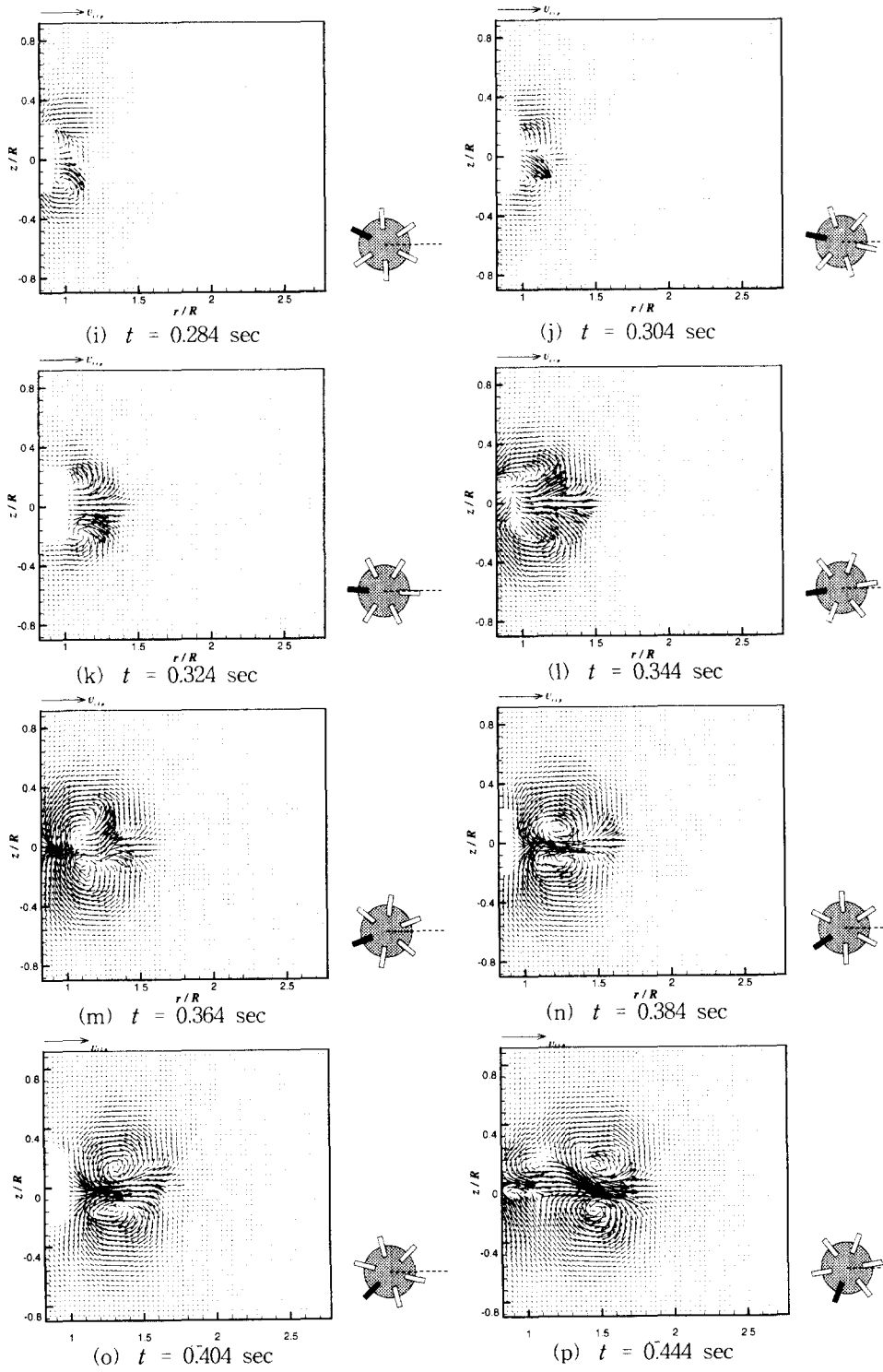
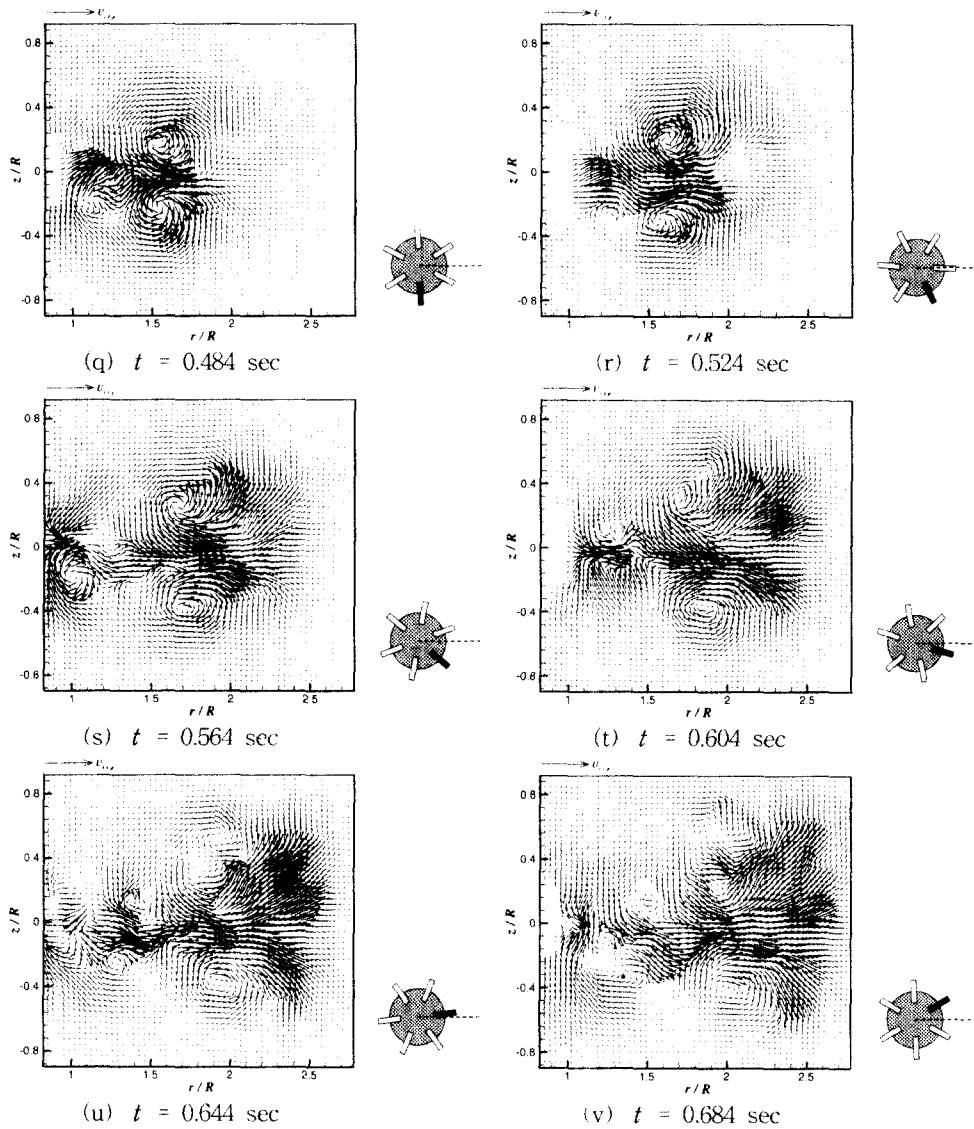


Fig. 4 Instantaneous velocity fields (0.124-0.684sec)



( Fig. 4 Continued )



( Fig. 4 Continued )

4. 거대 유동장의 형성시기

비정상 상태에서부터 유동장이 정상상태로 변화하는데 걸린 시간을 추정하는 것은 교반혼합기 내의 거대 유동의 형성시기와 밀접한 관련이 있다. 뿐만 아니라 블레이드의 회전에 의한 텀보텍스의 형성과 전개 과정, 그리고 거대 유동장의 특징인 두 개의 큰 반지형 와의 형성시기를 규명

하는데 필수적이다.

정상상태는 유동장 내의 모든 점(point)에서 속도나 임의의 유동에 관계된 물리량이 시간에 대해 일정한 상태를 말하며 교반혼합기에서는 블레이드의 회전에 의해 주기적인 유동이 발생하므로 시간에 따른 임의의 점 데이터를 이용하여 평균값이 일정 값에 도달하는 시기를 정상상태라 간주할 수 있다. Fig. 5는 축 방향 속도성분을 추출

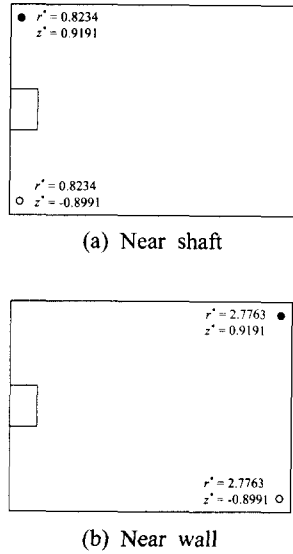
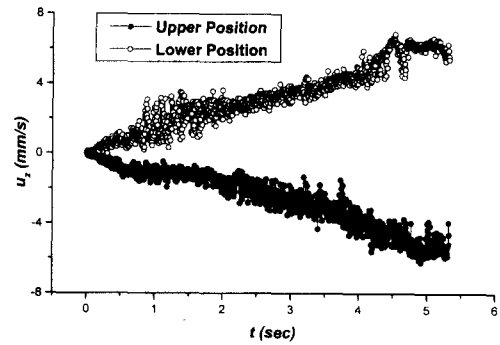


Fig. 5 Measurement points

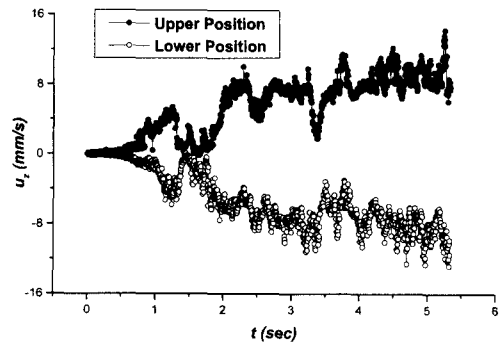
하기 위한 위치를 나타내고 있다. Fig. 6은 Fig. 5(a) 위치에서의 시간에 따른 축 방향 속도변화를 나타낸다. 블레이드의 정지상태로부터 회전에 의해 전체 유동장의 속도변화가 시간에 따라 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 임펠러가 8회전을 한 약 5초 이후에 속도분포가 거의 정상상태에 도달했음을 보여준다. 이 시간은 거대유동의 최대 제적인 2T(380mm)를 반경방향 대류속도(90 mm/s)로 나누었을때의 시간 스케일인 4.2초와 거의 유사하다.

Fig. 7은 원통형 용기 벽면측의 아래와 위(Fig. 5(b))에서 얻어진 데이터이다. 텃보텍스가 발생되는 초기에는 와가 전체 유동장에 영향을 미치지 못하므로 아래와 위 모두 속도의 변화가 거의 없지만, 전파가 진행됨에 따라 전반적으로 서서히 증가함을 알 수 있다. 약 1.3초와 2.3초, 3.3초 부근에서 급격히 감소하는 구간이 존재하는데 이는 벽면에 충돌한 와동이 붕괴되거나, 아니면 벽면으로 그냥 대류되는 현상에 의한 것으로 사료된다. 정상상태의 도달은 보다 많은 데이터가 확보되어야 정확히 판단할 수 있으나, 7회전에 해당하는 약 4.5초 정도에서 정상상태에 접근하고 있다고 사료되며, 이 역시 거대 유동의 시간척도에 근접한다.



(● :  $r^* = 0.8234, z^* = 0.9191,$   
○ :  $r^* = 0.8234, z^* = -0.8991$ )

Fig. 6 Development of axial velocity with time



(● :  $r^* = 2.7763, z^* = 0.9191,$   
○ :  $r^* = 2.7763, z^* = -0.8991$ )

Fig. 7 Development of axial velocity with time

### 5. 결 론

고해상도 Cinematic PIV 기법을 이용하여 최초 텃보텍스가 형성되는 과정에 대한 연구를 수행하였다. 각각의 순간 속도장으로부터 블레이드의 회전이 계속됨에 따라 복잡한 3차원 유동장이 형성됨을 알 수 있었다. 관찰된 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 임펠러가 회전을 시작한후 네 번째 블레이드가 시작점을 지날 때부터 텃보텍스가 완전히 형성되면서 반경방향으로 와유출이 발생한다.
- (2) 각 블레이드에서 형성된 텃보텍스는 서로



결합하여 하나의 큰 와를 형성하는 와류쌍이 관찰되었다.

(3) 반경방향 유동의 평균대류속도는 팁 속도의 27% 정도임을 알았다.

(4) 거대유동의 형성은 본 연구의 경우 임펠러가 8회전한 이후에 정상상태에 근접하는 것으로 보이며, 이는 거대 유동의 와 회전(eddy turn over)시간 척도와 거의 일치한다.

### 후 기

본 연구는 두뇌한국 21 핵심사업의 연구비 지원에 의하여 수행되었다.

### 참고문헌

- (1) Yianneskis, M., Popiolek, Z. 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) Distelhoff, M. F. W. and Marquis, A. J., 1998, "An LIF Line Scan System for the Measurement of Scalar Concentration in a Continuously Operated Stirred Tank," *Experiments in Fluids*, Vol. 25, pp. 77~88.
- (3) 김상기, 김경천, 2000, "교반혼합기 내의 거대 유동에 대한 PIV 측정," 대한기계학회 춘계학술대회 초록집 B, pp. 680~685.
- (4) Riet, K. Vant and Smith, J. M., 1975, "The Trailing Vortex System Produced by Rushton Turbine Agitators," *Chemical Engineering Science*, Vol. 30, pp. 1093~1105.
- (5) Stoots, C. M., and Calabrese, R. V., 1995, "Mean Velocity Field relative to a Rushton Turbine Blade," *AIChE Journal*, Vol. 41, No. 1, pp. 1~11.
- (6) Hart, D. P., 1998, "The Elimination of Correlation Error in PIV processing," Proceed of 9th International Symposium on Application of Laser to Fluid Mechanics(Lisbon).
- (7) Hu, H., Saga, T. and Kobayashi, T., 2000, "Improve the Spatial Resolution of PIV Results by Using Hierarchical Recursive Operation," *9th International Symposium on Flow Visualization*, Paper number, 137, pp. 1~12.
- (8) 박경현, 김경천, 2001, "고해상도 Cinematic PIV의 개발," 대한기계학회논문집 B권, 제25권 제11호, pp. 1535~1542.