

공학석사 학위논문

PIV에 의한 응집지수평판들  
성능해석에 관한 연구

A Study on the Performance Analysis of  
Flocculator by PIV

지도교수 이영호

2006년 2월

한국해양대학교 대학원

기계공학과

박영근

본 논문을 박영근의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장 : 공학박사 남 청 도 (인)

위 원 : 공학박사 김 유 택 (인)

위 원 : 공학박사 이 영 호 (인)

2006년 2월

한국해양대학교 대학원

기계공학과

박 영 근

# 목 차

Abstract .....	iii
Nomenclature .....	iv
제1장 서론 .....	1
1.1 연구의 목적 .....	2
1.2 연구내용 .....	4
1.3 연구방법 .....	5
1.4 기대효과 .....	5
제2장 응집지 G값 산정 및 검토 .....	6
2.1 수동력 (Pw) 및 G값 산출 .....	6
2.2 G값 및 소요동력 산정 오류수정 .....	16
2.3 G값 산정 자동계산 프로그램개발 .....	19
2.4 응집지 단별 G값 조건표 .....	21

제3장 PIV에 의한 유동해석 .....	31
3.1 PIV의 개요 .....	31
3.2 실험장치 구성 .....	38
3.3 유동장 계측 결과 및 검토 .....	41
제4장 결론 및 제언 .....	108
감사의 글 .....	110

**A Study on the Performance Analysis of  
Flocculator by PIV**  
*Young-Geon Park*

*Department of Mechanical Engineering  
Graduate School, Korea Maritime University*

***Abstract***

KOWACO ChangWon Branch has conducted a new study which aimed to improve flocculation process performance in horizontal paddle mixers. The purposes in this study is to increase the flocculation efficiency by finding significant operating factor affecting flow characteristics.

In the result of this research, the error in equation of  $G$ -value estimation and mixer RPM calculation which have been used until quite recently was corrected in mathematical form. Also, computer program to calculate  $G$ -value and RPM was developed and their statistical list was represented.

PIV experimentation was conducted with flocculation model mixers by 1/10 size ratio. Characteristics of all flow fields were examined by several operating conditions with clear description of complex three-dimensional flow fields.

## Nomenclature

$A_i$	:	Area of flocculator's blade
$B_i$	:	Height of flocculator's blade
$C_{ig}$	:	Cross-correlation coefficient
$C_d$	:	Coefficient of drag force
$Fr$	:	Froude number
$f_i$	:	Grey level of 1st frame
$G$	:	Flocculator's factor
$g$	:	Gravitation acceleration
$g_i$	:	Grey level of 2nd frame
$L_i$	:	Width of flocculator's blade
$N$	:	RPM(blade revolution per minute)
pps	:	Number of pictures per frame
$P_{wi}$	:	Horse power per blade
$Q$	:	Flow rate( $m^3/s$ )
$r_i$	:	Diameter of flocculator's blade
$Re$	:	Reynolds number
$T_w$	:	Torque
$U$	:	Representative velocity
$u, v$	:	Velocity in the x, y-direction

$V$	:	<i>Volume per blade</i> (조체적)
$V_T$	:	<i>Coefficient of viscosity</i> (동점성계수)
$\omega$	:	<i>Angular velocity</i>
$x$	:	<i>Distance in horizontal direction</i>
$y$	:	<i>Distance in vertical direction</i>

### ***Greek Letters***

$\Theta$	:	<i>Rotation angle of image</i>
$\gamma$	:	<i>Specific weight</i>
$\eta$	:	<i>Total efficiency</i>
$\rho$	:	<i>Density</i>

### ***Superscripts***

-	:	<i>Time averaging</i>
---	---	-----------------------

## 제1장 서론

정수장은 원수수질과 환경조건의 변화에 관계없이 항상 안전한 물을 계속하여 공급할 수 있도록 설계되어야 한다. 따라서 정수공정은 안전하고 충분한 양의 물을 효율적으로 공급할 수 있도록 단위공정들을 조합해야 하며 일반적으로 4개 또는 그 이상의 공정으로 구성되어 있다(혼화, 플록형성, 침전, 여과 그리고 소독공정 등). 각 단위 공정들은 밀접하게 상호관련 되어 있으므로 개별공정의 운전은 다른 공정의 운전 즉 전체시설에 영향을 미친다.

특히 기존 정수장의 용량을 확장하거나 노후시설을 개량할 때의 고려해야 할 사항은 1) 서류와 현지조사를 통한 기존 정수시설의 평가, 2) 원수수질에 대한 현지조사, 단위공정의 실제 효율조사와 현지조건에 대한 조사수행 3) 지방자치단체와 정부의 법적 규제기준에 근거한 시설개량계획을 평가하고 최종적으로 결정한다.

응집지에서의 플록형성이란 바로 앞의 급속혼화공정에서 응집제를 급속히 분산시킨 물을 천천히 교반시키는 공정이다. 이 공정의 목적은 입자의 충돌속도를 가속시킴으로써 전기적으로 불안정화된 콜로이드 입자를 침강성 또는 여과성이 좋은 크기의 입자로 뭉치게 하는 것이다. 플록형성공정을 설계할 때 결정해야 할 두 가지 사항은 체류시간과 교반강도( $G$ 값)이다. 플록형성공정은 입자상호간에 접촉이 최대로 이루어지도록 설계해야 하며 이러한 접촉은 유체내의 속도경사( $G$ 값)에 비례한다. 이 속도경사는 수리학적 또는 기계적 교반에 의해 발생한다. 가장 최근에 설계된 자료를 바탕으로 플록형성 방법으로 많이 사용된 순서대로 나열하면 첫 번째 각 단이 적절히 나누어진

수평류 흐름의 긴 날개를 가진 프로펠러형의 수직축 교반기, 두 번째 각 단이 적절히 나누어진 수평류 흐름의 패들형 교반기, 세 번째 수평 우류식의 최종단에 교반기(플록큐레이터)를 설치하는 혼합형, 마지막 네 번째는 최소유량일 때에도  $G \times t$ 값이  $3 \times 10^4$  를 초과하는 경우의 배플달린 우류식으로 나뉜다.

창원권 관리단의 응집지 형식은 상기의 두 번째의 것이나 총 4단중 1및2단의 정류벽 대신에 우류식 도류벽을 개량한 것으로 특이한 혼합형(우류식 및 교반기) 응집지이다.

본 연구는 수자원공사 창원권관리단의 정수장 시설개량공사중 응집지의 토목구조 변경에 따른 혼합형 응집지 내의 물의 유동형태 및 응집효율의 변화를 분석하고, 동시에 응집기의  $G$ 값에 대한 이론적 근거를 확인해보는데 그 목적이 있다. 그리고 상기의  $G$ 값을 활용, 패들형 응집기 설계기준을 만들어 수자원공사에서 계획하는 수평 패들형 응집기의 신규시설 및 운영중인 설비의 개·대체시 적용하고자 한다.

## 1.1 연구의 목적

창원 반송정수장 시설개량공사(Fig. 1.1, Fig. 1.2)를 수행함에 있어 응집지를 기존의 유공정류벽(1~4단)에서 우류식 도류벽(1~2단)으로 부분 교체함에 따라, 응집지에서의 유체유동분석 및 최적의 *Flocculator* 설계인자 도출을 위해 PIV를 이용한 유동해석을 실시하여 응집의 효율성을 높이고자함에 그 목적이 있다.



**Fig. 1.1** 운전중인 응집지 및 패들



**Fig. 1.2** 응집지 개량 예정공간

## 1.2 연구의 내용

- 1) PIV에 의한 응집지의 유동형태 분석 ( $G$ 값 :  $60 \sim 10 \text{ sec}^{-1}$  - 응집단수에 따라 점감되며 응집기의 유동 형태분석)
- 2) Flocculator 요소 설계용량 분석 (패들의 직경, 개수, 면적, 경제적 변속이 가능한 rpm 범위 산출)
- 3) 우류식 도류벽의 Slit에 약품 주입 시 최적의 주입지점 선정 및 "G" Value 측정
- 4) 플러 퍼손을 방지하기 위한 우류식 도류벽의 Slit size 산출 및 Slit 배치방향 결정
- 5)  $G$ 값과 온도에 따른 RPM 조건표 작성

### 1.3 연구방법

- 1) 문헌조사 상  $G$ 값의 산정방법 검토 및 수정
- 2)  $G$ 값 자동계산 프로그램의 개발 및 적용
- 3) 응집지 및 임펠러를 투명 아크릴 1/10 축소 모델로 제작.
- 4) 응집지는 전체 축소 모델을 제작하며, 임펠러는 1조를 제작하여 응집지 단수 별로 이동하여 사용
- 5)  $Re$ 수,  $Froude$ 수를 고려하여 유동장의 상사조건을 도출
- 6) 토오크센서를 이용한 축소모델의 토오크계측 및  $G$ 값 산정 비교
- 7) 고속도 1K 카메라를 사용한 2차원  $Dynamic$  PIV의 적용
- 8) 응집기의  $rpm$ , 패들형상, Slit의 폭 등을 변화시켜 실험
- 9) 유동분석을 통하여 응집지 내의  $dead\ zone$ 을 판별
- 10) 운전조건 ( $rpm$  등)에 따른 " $G$ " 값 산정
- 11) PIV 애니메이션 제작에 의한 유동장 해석 등

### 1.4 기대효과

- 1) 유동분석을 통한 효율적인 응집으로 정수 수질향상에 기여
- 2) 향후 응집지 설계에 대한 기초 자료 활용
- 3) PIV 유동해석에 대한 기술습득과 기술자에 대한 *Workshop* 개최 등

## 2. 응집지 G값 산정 및 검토

### 2.1 수동력(Pw) 및 G 값 산출

개량 응집지는 2계열, 2지/계열, 4단/지로 구성되어 있으며, 수평축 교반기는 3열패들/단, 4조패들/열, 4개블레이드/조로 구성되어 있다. 여기서  $r_i$ 는 교반기 회전축으로부터 각 블레이드까지의 반경,  $L_i$ 는 각 블레이드의 길이,  $B_i$ 는 각 블레이드의 폭(현 실험에서는 등폭과 부등폭 2가지 채택)을 나타낸다. 또한 본 연구에서는 블레이드의 두께는 얇은 것으로 하여 G값 산정 등에서 고려하지 않았다.

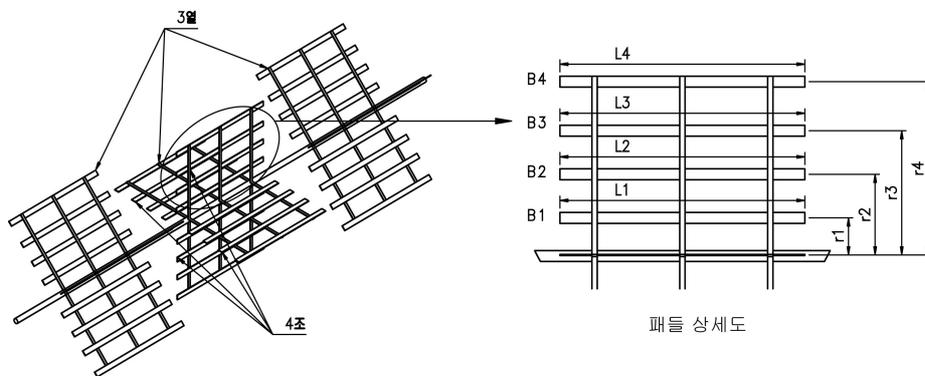


Fig. 2.1 패들형 교반기 구조 및 규격정의

### 2.1.1 수동력(P<sub>w</sub>) 및 G 값 산출

교반기의 수동력(P<sub>w</sub>)는 토오크에 각속도를 곱하거나, 블레이드의 회전방향에 작용하는 힘성분(항력)에 이동속도를 곱하여 식(2.1)과 같이 구할 수 있다. 일반적으로 뭉툭물체의 항력계수는 일정 레이놀즈수 이상에서 거의 변화가 없는 *Reynolds number independent*의 유동 특성을 나타내고 있다. 본 과제에서도 모든 실제 응집지에 사용되는 블레이드에 대하여  $Re > 10^4$ 의 조건을 만족함으로써 항력계수식 (2.2)가 그대로 사용될 수가 있다.

$$P_w = T \times \omega = F_D \times v = \left( \frac{1}{2} C_D \rho v^2 A \right) \cdot v = \frac{1}{2} \rho A C_D v^3 \quad (2.1)$$

$$\left( \because \text{항력계수 } C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho v^2 A} \right) \quad (2.2)$$

식(2.3)은 응집지 교반기의 교반강도를 나타내는 대표적인 척도로서 속도경사(velocity gradient)를 구하는 식으로서 일찍이 Camp(1943)에 의하여 제안되었다. 즉, 교반성능은 인접하는 두 유체입자의 상대속도가 클수록 점성전단응력에 의하여 유체입자의 혼합작용이 증가되며, 이러한 유체전단응력을 공급하기 위하여는 기계적인 방법(mixer, agitator)이나 유로면적의 급격한 변화에 의한 감·증속등 박리흐름을

성장시키는 우류식(baffled channel)이 종래부터 이용되어 왔다. 본 과제에서는 수평축 패들형 교반기를 채택하고 있다. 각각의 장단점에 관하여는 전문서에 상세히 소개가 되어있다(예를 들어, 정수시설의 종합설계와 유지관리, 대한상하수도학회, 2003, 2판).

$$G = \sqrt{\frac{P_w}{\mu V}} = \sqrt{\frac{\frac{1}{2} \rho A C_D v^3}{\mu V}} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \frac{C_D \cdot A \cdot v^3}{v_T \cdot V}} \quad \left( \begin{array}{l} v_T(T): \text{동점성계수} = \frac{\mu}{\rho} \\ V: \text{조체적} \end{array} \right) \quad (2.3)$$

개량응집지에서 각단별 패들열은 3열이고 열별 패들은 4조로 구성된다. 각조는 다시 4개의 평판블레이드 패들로 구성되어 있음으로서, 각 패들 블레이드의 반경  $r_i$ 별 3열4조 전체에서의 블레이드의 전면적  $A_i$ 는 식(2.4)로 구해진다. 또한,  $r_i$ 에서의 패들블레이드 원주속도는 식(2.5)로 구할 수 있다. 여기에서  $cof$ 는 속도보정계수로서 보통 0.5~0.75의 값을 추천하고 있다. 이와 같은 보정이 필요한 이유는 다음과 같다. 교반기의 패들이 원주방향으로 회전하면서 각 블레이드에서 방출되는 후류(wake)가 바로 소멸되지 않음으로서 그 다음으로 접근하는 블레이드에서는 같은 진행방향으로 이미 부분적인 유동속도가 존재하기 때문에 실제로 패들 블레이드의 주변 유동장에 대한 상대속도는 어느 정도 감소하게 된다. 이 값은 패들 열의 組數나 응집지의 벽면과 블레이드 사이의 간격, 응집지에서의 유동방향 등에 따라서 다르나 이 과제에서는 편의상 0.75의 값을 택하였다. 엄밀한  $G$ 값 산정을 위해서는 이 속도보정계수의 정확한 도출이 필수적이다.

$$A_i = L_i \times B_i \times 3\text{열} \times 4\text{조} \quad [\text{m}^2] \quad (2.4)$$

$$v_i = r_i \omega \times cof = \frac{2\pi \cdot N \cdot cof}{60} r_i = \frac{\pi \cdot N \cdot cof}{30} r_i \quad \left( \begin{array}{l} N : rpm \\ cof : \text{속도보정계수} \end{array} \right) \quad (2.5)$$

각 블레이드  $r_i$  별  $G_i$  는 식(2.6)으로 구해진다.

$$G_i = \left\{ \frac{1}{2} \cdot \frac{C_D}{v_T} \cdot \frac{A_i}{V} \left( \frac{\pi \cdot N \cdot cof}{30} \right)^3 \cdot r_i^3 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2.6)$$

전체  $G$  값을 구하기 위하여 각  $G_i$  를 합산하면 식(7)과 같이 된다.

$$G = \sum_{i=1}^{i=4} G_i = \sum_{i=1}^{i=4} \left\{ \frac{1}{2} \cdot \frac{C_D}{v_T} \cdot \frac{1}{V} \left( \frac{\pi \cdot N \cdot cof}{30} \right)^3 \cdot (A_i \times r_i^3) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2.7)$$

$$= \left\{ \frac{1}{2} \cdot \frac{C_D}{v_T} \cdot \frac{1}{V} \left( \frac{\pi \cdot N \cdot cof}{30} \right)^3 \right\}^{\frac{1}{2}} \times \left( \sqrt{A_1 \times r_1^3} + \sqrt{A_2 \times r_2^3} + \sqrt{A_3 \times r_3^3} + \sqrt{A_4 \times r_4^3} \right)$$

회전수  $N$ 에 관하여 식(2.7)을 정리하면 식(2.8)을 얻을 수 있다. 이 식은 실제 응집지에서 각 단별로 다른  $G$  값을 얻기 위하여 회전수를 변경하는데 유효하게 사용된다.

$$\left(\frac{\pi \cdot N \cdot cof}{30}\right)^3 = G^2 \left(\frac{2 \cdot V_T \cdot V}{C_D}\right) \cdot \frac{1}{\left\{\sum_{i=1}^{i=4} (A_i \times r_i^3)^{\frac{1}{2}}\right\}^2} \quad (2.8)$$

$$N = \left(\frac{30}{\pi \cdot cof}\right) \cdot \left\{G^2 \times \frac{2 \cdot V_T \cdot V}{C_D} \times \frac{1}{\left(\sqrt{A_1 \times r_1^3} + \sqrt{A_2 \times r_2^3} + \sqrt{A_3 \times r_3^3} + \sqrt{A_4 \times r_4^3}\right)^2}\right\}^{\frac{1}{3}}$$

### 2.1.2 G값의 계산 예

패들 블레이드가 모두 등간격인 경우의 예를 든다.  $r_i$  위치에서의 패들길이는  $L_i$ , 패들폭을  $B_i$ 로 정의하면 다음과 같은 값들을 갖는다.

$$\begin{pmatrix} r_1 = 0.438m, B_1 = 0.1m, L_1 = 2.3m \\ r_2 = 0.825m, B_2 = 0.1m, L_2 = 2.3m \\ r_3 = 1.213m, B_3 = 0.1m, L_3 = 2.3m \\ r_4 = 1.60m, B_4 = 0.1m, L_4 = 2.3m \end{pmatrix}$$

물의 온도는  $0^\circ\text{C}$ 로 가정하고 이때의 동점성계수  $V_T$ 는  $1.792 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 로 한다.  $r_i$  위치에서의 단별 모든 패들 블레이드의 면적합은 다음과 같이 계산된다.

$$A_1 = A_2 = A_3 = A_4 = 2.76\text{m}^2$$

패들형상에 대한 항력계수  $C_d=1.8$ , 속도보정계수  $cof=0.75$ , 그리고 1단에서의 교반기 회전수는  $N=3.5rpm$ 이며 1단 체적은  $V=168m^3$ 이라고 한다.

식(2.6)에 따라서 블레이드 반경별  $G$ 값을 계산하면,

$$G_1 = 13.08 \times (0.438^3)^{\frac{1}{2}} = 3.79 (1/s)$$

$$G_2 = 13.08 \times (0.825^3)^{\frac{1}{2}} = 9.80 (1/s)$$

$$G_3 = 13.08 \times (1.213^3)^{\frac{1}{2}} = 17.47 (1/s)$$

$$G_4 = 13.08 \times (1.60^3)^{\frac{1}{2}} = 26.47 (1/s)$$

$G$ 값의 합은 식(2.9)가 된다.

$$G = \sum G_i = 3.79 + 9.80 + 17.47 + 26.47 = 57.53 [1/s] \quad (2.9)$$

### 2.1.3 토오크의 계산

패들형 교반기에서 토오크를 계산하는 방법은 두가지가 있다. 즉, 패들 블레이드 에 작용하는 항력값을 이용하여 구하는 직접 계산방법 식(2.11)과,  $G$ 값의 산정에서 사용되는 소요동력  $P$ 값으로부터 간접적으로 구하는 방법 식(2.15)이다. 어느 것이나 같은 값을 보여주어야 하며, 이와 같은 패들형 교반기에서는 반경별로  $T_{wi}$ 를 구한 다음 식

(2.10)과 식(2.14)를 합산하면 된다.

① 직접계산

$$\begin{aligned}
 T_{wi} &= F_{Di} \times r_i = \left( C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_i^2 \cdot A_i \right) \times r_i = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot A_i (\text{cof} \cdot r_i \cdot \omega)^2 \times r_i \\
 &= \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot \omega^2 \cdot \text{cof}^2 \cdot r_i^3 \cdot A_i
 \end{aligned} \tag{2.10}$$

$$\begin{aligned}
 T_w &= \sum_{i=1}^{i=4} T_{wi} = \frac{1}{2} \rho \cdot C_D \cdot \text{cof}^2 \cdot \omega^2 \cdot \sum_{i=1}^{i=4} r_i^3 \cdot A_i \\
 &= \frac{1}{2} \rho \cdot C_D \cdot \text{cof}^2 \cdot \left( \frac{2\pi \cdot N}{60} \right)^2 \cdot \sum_{i=1}^{i=4} r_i^3 \cdot A_i \\
 &= \frac{1}{2} \left( \frac{\pi \cdot \text{cof}}{30} \right)^2 \cdot \rho \cdot C_D \cdot N^2 \cdot \sum_{i=1}^{i=4} r_i^3 \cdot A_i
 \end{aligned} \tag{2.11}$$

②  $G$ 값으로부터 각  $r_i$ 에 대하여

$$\begin{aligned}
 G_i &= \sqrt{\frac{P_{wi}}{\mu v_T}}, \quad P_{wi} = G_i^2 \times 1000 \times v_T \times V \quad [\text{W}] \\
 (\because \rho &\doteq 1000 \text{ kg} / \text{m}^3)
 \end{aligned} \tag{2.12}$$

$$P_{wi} = T_{wi} \times \omega \times \text{cof} \tag{2.13}$$

$$T_{wi} = \frac{P_{wi}}{\omega \times cof} = \left( \frac{3 \times 10^4 \times v_T \times V}{\pi N \cdot cof} \right) \cdot G_i^2 \quad [N \cdot m] \quad (2.14)$$

$$T_w = \sum_{i=1}^{i=4} T_{wi} = \left( \frac{3 \times 10^4 \times v_T \times V}{\pi N \cdot cof} \right) \sum_{i=1}^{i=4} G_i^2 \quad [N \cdot m] \quad (2.15)$$

#### 2.1.4 수동력의 계산

수동력은 각 블레이드 위치에서의  $G_i$  값을 구한 다음 이에 해당하는 수동력  $P_{wi}$ 는 식(2.16)를 합산하여 식(2.17)과 같이 구한다. 상수 1,000은 점성계수와 동점성계수의 환산에 필요한 밀도값이나 상온범위에서는 온도에 따라서 크게 변하지 않음으로서 편의상 1,000의 값을 선택하였다.

$$P_{wi} = 1000 \times v_T \times V \times G_i^2 \quad (2.16)$$

$$P_w = \sum_{i=1}^{i=4} P_{wi} = 1000 \times v_T \times V \times \sum_{i=1}^{i=4} G_i^2 \quad [W] \quad (2.17)$$

## 2.1.5 모터동력의 계산

수동력  $P_w$ 는 교반기의 블레이드를 통하여 발생하는 에너지수수에 의한 유체동력값이며, 이와 같은 유체에너지를 유동장에 공급하기 위하여는 여러 손실이 필연적으로 발생하게 된다. 즉, 회전축의 지지베어링에서 발생하는 기계적인 마찰손실, 벨트 또는 감속기어 등에서의 동력전달손실 등이 고려되어야 한다. 따라서 모터 등과 같은 원동기 (prime mover)로부터 축을 통하여 제공하는 축동력  $P_s$ 에 더하여 동력전달효율 등을 감안한 모터동력  $P_m$ 이 구해져야 한다. 실제 공급되어야 하는 전력량은 여기에다 모터효율까지를 고려한 값이 되어야 한다.

$$P_m = \frac{P_w}{\eta} \text{ [W]} \quad (2.18)$$

효율 :  $\eta$  (기계 손실, 동력 전달 손실 등 포함)

## 2.1.6 토오크 계산 예

① 직접계산(식2.11)

$$\begin{aligned} T_w &= \frac{1}{2} \left( \frac{\pi \cdot 0.75}{30} \right)^2 \times \rho \times C_D \\ &\times N^2 (0.438^3 \times 2.76 + 0.825^3 \times 2.76 + 1.213^3 \times 2.76 + 1.60^3 \times 2.76) \\ &= \frac{1}{2} \left( \frac{\pi \cdot 0.75}{30} \right)^2 \times 10^3 \times 1.8 \times (3.5)^2 \times 18.01 \\ &= 67.939 \times 18.01 = 1,223 \text{ [N}\cdot\text{m]} \end{aligned} \quad (2.19)$$

②  $G$ 값으로부터 계산, 식(2.15)

$$\begin{aligned}
 T_{wi} &= \left( \frac{3 \times 10^4}{\pi \cdot N \cdot cof} \right) G_i^2 \times v_T \times V \\
 T_w &= \left( \frac{3 \times 10^4}{\pi \cdot N \cdot cof} \times v_T \times V \right) \sum_{i=1}^{i=4} G_i^2 \\
 &= \left( \frac{3 \times 10^4 \times 1.792 \times 10^{-6} \times 168}{\pi \times 3.5 \times 0.75} \right) (3.79^2 + 9.80^2 + 17.47^2 + 26.47^2) \\
 &= 1.0957 \times 1116.26 \doteq 1,223.1 \text{ [N} \cdot \text{m]} \quad (2.20)
 \end{aligned}$$

식(2.19)와 식(2.20)의 값이 일치하고 있다. 즉, 토오크식으로부터 직접 구한 토오크 값과  $G$ 값으로부터 구한 토오크가 일치함으로서 상기의  $G$ 값 산출식 식(2.7) 및 이에 의한 동력산출식 식(2.17)이 정확하다는 것을 입증하고 있다.

### 2.1.7 수동력 계산예

$$\begin{aligned}
 P_w &= 1000 \times v_T \times V \times \sum_{i=1}^{i=4} G_i^2 \\
 &= 1000 \times 1.791 \times 10^{-6} \times 168 (3.79^2 + 9.80^2 + 17.47^2 + 26.47^2) \\
 &= 0.301 \times 1116.26 = 335 \text{ W} \quad (2.21)
 \end{aligned}$$

## 2.1.8 모터동력 계산예

$$\eta = 0.85, P_m = \frac{335}{0.85} = 394W \quad (2.22)$$

## 2.2 G값 및 소요동력 산정에서의 오류수정

### 2.2.1 수정전후의 식 비교

본 과제를 수행하는 과정에서 기존의 문헌을 조사하여 본 결과 G값 및 소요동력 산정에서 다수의 오류가 발견되었으며 이를 다음과 같이 표2.1로 정리하였다. 표2.2는 표2.1에 따라서 실제로 계산 결과 값을 도출하여 오류 값을 비교하여 본 것이다.

참고로 S. Kawamura의 원서(132쪽)에서 계산된 예제를 보면 G값의 산정에는 식(2.7)을 사용하여 정확하게 제공하고 있으나, 소요 동력의 계산에서는  $G_i$ 를 사용하지 않고 바로 전체 G값을 식(2.3)의 관계식에 대입하여 얻음으로서 매우 과대한 동력 값(14.4kW)을 산출하고 있다. 이것을 수정하기 위하여 식(2.17)을 적용하여 보면 불과 1.723 kW의 동력 값을 얻게 된다. 즉, 8배 이상의 과대한 소요 동력을 예측함으로써 불필요하게 대형의 구동모터를 설치하도록 하고 있다. 기동시의 시동 토크 문제가 있음으로서 어느 정도 여유 있는 동력산정이 필요하기는 하나, 이와 같이 비정상적으로 큰 구동모터를 설치할 필요는 없음을 알 수가 있다.

표2.1 G값 및 소요동력 산출식의 수정 전후 식의 비교

번호	수정전	수정후	비고
1	$G = \sqrt{\frac{C_D \cdot \rho \cdot A \cdot v^3}{2 \times \mu \times V}}$ <p>A : 단면패들 블레이드의 총면적 v : 패들 바깥쪽 원주 속도 × 보정계수 V : 조체적</p>	<p>식(2.7)</p> $G = \sum_{i=1}^{i=4} G_i$ $= \sum_{i=1}^{i=4} \left\{ \frac{1}{2} \cdot \frac{C_D}{v} \cdot \frac{1}{V} \left( \frac{\pi \cdot N \cdot cof}{30} \right)^3 \cdot (A_i \times r_i^3) \right\}^{\frac{1}{2}}$ $= \left\{ \frac{1}{2} \cdot \frac{C_D}{v_T} \cdot \frac{1}{V} \left( \frac{\pi \cdot N \cdot cof}{30} \right)^3 \right\}^{\frac{1}{2}}$ $\times (\sqrt{A_1 \times r_1^3} + \sqrt{A_2 \times r_2^3} + \sqrt{A_3 \times r_3^3} + \sqrt{A_4 \times r_4^3})$ <p>· 블레이드가 반경방향 바깥쪽으로 배치될수록, 부등간격, 부등폭일수록 수정전과 차이가 크게 발생함</p>	· 제작사 A (국내)
	$G = \sqrt{\frac{C_D \cdot \rho \sum (A_i \times v_i^3)}{2 \times \mu \times V}}$ <p>A<sub>i</sub> : 패들 블레이드의 반경 r<sub>i</sub> 별 총면적 v<sub>i</sub> : r<sub>i</sub> 별 보정된 원주 속도 V : 조체적</p>		· 일본수도 협회수도 시설설계지침 p.190
3	<p>소요동력</p> $P_w = G^2 \mu V$ $\left( \because G = \left( \frac{P_w}{\mu V} \right)^{0.5} \right)$	<p>식(2.17)</p> $P_{wi} = 1000 \times v_T \times V \times G_i^2$ $P_w = \sum_{i=1}^{i=4} P_{wi} = 1000 \times v_T \times V \times \sum_{i=1}^{i=4} G_i^2 \text{ [W]}$ <p>· 블레이드가 반경방향 바깥쪽으로 배치될수록, 부등간격, 부등폭일수록 수정전과 차이가 크게 발생함</p>	<p>Integrated Design and Operation of Water Facilities</p> <p>(S.Kawamura, 2000) p.132</p> <p>· 대한상하수도협회, 한글번역판 p.143</p>

## 2.2.2 계산 예

표2.2 계산 예

	수정 전	수정 후
1	$G = \sqrt{\frac{1.8 \times 10^3 \times 11.0 \times 0.45^3}{2 \times 1.792 \times 10^{-3} \times 168}}$ $= 54.7 \text{ sec}^{-1}$	$G_1 = \left\{ \frac{1}{2} \cdot \frac{1.8}{1.792 \times 10^{-6}} \cdot \frac{1}{168} \left( \frac{\pi \times 3.5 \times 0.75}{30} \right)^3 \right\}^{\frac{1}{2}}$ $\times \sqrt{2.76 \times 0.438^3} = 7.874 \times 0.482 = 3.79$
2	$G = \sqrt{\frac{1.8 \times 10^3 \times 2.76}{2 \times 1.792 \times 10^{-3} \times 168} \left( \frac{2\pi \times 3.5 \times 0.75}{60} \right)^3}$ $\times \sqrt{0.4375^3 + 0.825^3 + 1.213^3 + 1.60^3}$ $= 33.41 \text{ sec}^{-1}$ <p>(<math>\because A_1 = A_2 = A_3 = A_4 = 2.76 \text{ m}^2</math>)</p> <p>(<math>\because v_i = r_i \times \omega = r_i \times \frac{2\pi \cdot N \times \text{cof}}{60}</math>)</p>	$G_1 = 3.79$ $G_2 = 9.80$ $G_3 = 17.47$ $G_4 = 26.47$ $G = \sum G_i = 57.53 \text{ sec}^{-1}$
3	$P_w = 57.53^2 \times 1.792 \times 10^{-3} \times 168$ $= 996.4 \text{ [W]}$	$P_w = 1000 \times 1.791 \times 10^{-6} \times 168$ $\times (3.79^2 + 9.80^2 + 17.47^2 + 26.47^2)$ $= 335 \text{ [W]}$

## 2.3 G값 산정 자동계산프로그램 개발

응집지를 운영하는 정수장에서는 응집지에서의 각 단별 기준 G값을 유지하기 위하여 교반기의 회전수를 변경하는 방법을 채택하고 있다. 즉, 식(2.8)에서와 같이 주어진 G값에 대하여 온도보정을 행한 교반기의 회전수를 효과적으로 산출하여 조건표를 만들기 위하여 제반공식을 소프트웨어로 처리도록 하였다. 산정방식은 회전수를 선지정하여 온도를 감안한 G값을 도출하는 방법(Fig. 2.3), G값을 미리 주고 온도변화를 고려한 교반기의 회전수를 구하는 방법(Fig. 2.4)을 동시에 포함하였다.

수자원공사에서 제공된 시방서상의 응집지 각 단별 요구되는 G값은 표2.3과 같다

표2.3 개량 응집지에서의 단별 요구 G값

단별	1	2	3	4
G(1/sec)	59	42	22	13

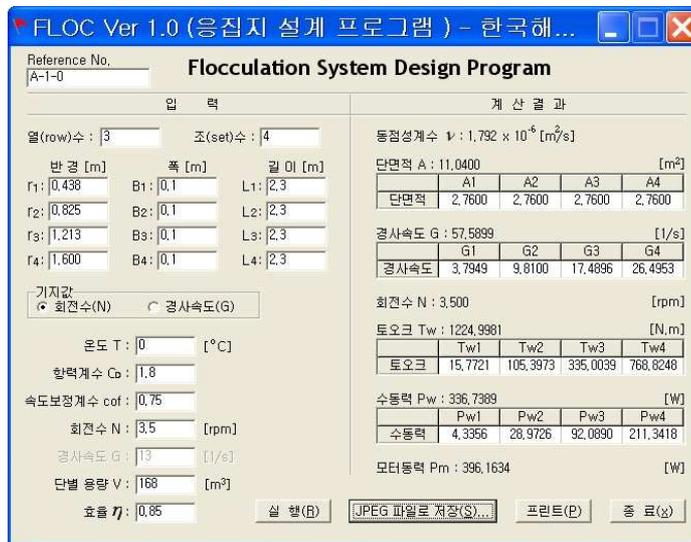


Fig. 2.2 회전수 지정방식

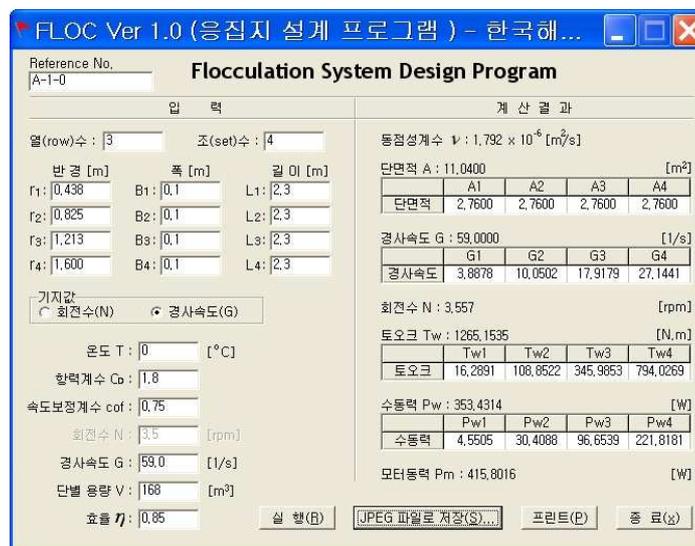


Fig. 2.3 G값 지정방식

## 2.4 응집지 단별 G값 조건표

### 2.4.1 개요

본 과제에서는 패들 블레이드의 형상 및 반경별 부착위치에 대하여 두 가지 방안을 검토하였다. 즉, 블레이드의 반경방향 위치는 변화시키지 않고, 블레이드 폭을 등폭으로 하는 방법과 회전축에 가까울수록 폭을 크게 하는 방법이다. 후자의 방법은 교반기의 회전반경이 큰 외측에서의 G값을 작게 하여 플록(floc)의 깨짐을 방지하고 대신 회전축 근방에서 발생하기 쉬운 *dead zone*의 크기를 억제하기 위한 것이다.

표2.4는 반경별 블레이드 폭 변화와 이에 따른 G값의 차이를 나타내고 있다. 부등폭의 경우에는 축에 가까운 블레이드 쪽에서 보다 큰 G값을 갖도록 하였다.

표 2.4 반경별  $G$ 값의 변화(1단,  $G=59 \text{ sec}^{-1}$ , 온도는  $0^\circ\text{C}$  기준임)

반경( $r_i$ ) m		0.438	0.825	1.213	1.600	A & G
등폭 (Fig. 2.3)	$B_i$	0.1	0.1	0.1	0.1	$A=17.11\text{m}^2$
	$G_i$	3.888	10.050	17.920	27.144	$G=59$
부등폭 (Fig. 2.4)	$B_i$	0.25	0.20	0.12	0.05	$A=11.04\text{m}^2$
	$G_i$	6.128	14.169	19.568	19.135	$G=59$



Fig. 2.4 블레이드 폭 변화시 제반변수 변화

## 2.4.2 패들블레이드가 등폭의 경우

(1) 1단( $G=59$ , 표2.5)

온도 (°C)	동점성계수 $\times 10^6$ [m <sup>2</sup> /s]	회전수 (rpm)	토크 (N·m)	수동력 (W)
0	1.792	3.56	1265.2	353.4
1	1.732	3.52	1236.8	341.6
2	1.675	3.48	1209.3	330.3
4	1.568	3.40	1157.5	309.3
6	1.472	3.33	1109.9	290.4
8	1.386	3.27	1066.1	273.4
10	1.308	3.20	1025.6	258.0
12	1.237	3.14	988.0	243.9
14	1.172	3.09	953.0	231.1
16	1.112	3.03	920.4	219.3
18	1.057	2.98	889.9	208.5
20	1.007	2.94	861.5	198.6
22	0.960	2.89	834.8	189.4
24	0.917	2.85	809.6	180.9
26	0.877	2.80	785.8	173.0
28	0.840	2.76	763.2	165.6
30	0.804	2.72	741.7	158.6
32	0.771	2.69	721.3	152.2
34	0.741	2.65	702.2	146.1
36	0.713	2.62	684.1	140.5
38	0.686	2.58	667.2	135.3
40	0.661	2.55	651.0	130.5

(2) 2단( $G=42$ , 표 2.6)

온도 (°C)	동점성계수 $\times 10^6$ [m <sup>2</sup> /s]	회전수 (rpm)	토크 (N·m)	수동력 (W)
0	1.792	2.83	804.2	179.1
2	1.675	2.77	768.7	167.4
4	1.568	2.71	735.7	156.7
6	1.472	2.66	705.4	147.2
8	1.386	2.60	677.6	138.5
10	1.308	2.55	651.9	130.7
12	1.237	2.51	628.0	123.6
14	1.172	2.46	605.8	117.1
16	1.112	2.42	585.0	111.1
18	1.057	2.38	565.7	105.7
20	1.007	2.34	547.6	100.6
22	0.960	2.30	530.6	96.0
24	0.917	2.27	514.6	91.7
26	0.877	2.24	499.5	87.7
28	0.840	2.20	485.1	84.0
30	0.804	2.17	471.4	80.4
32	0.771	2.14	458.5	77.1
34	0.741	2.11	446.3	74.1
36	0.713	2.09	434.9	71.2
38	0.686	2.06	424.1	68.6
40	0.661	2.03	413.8	66.1

(3) 3단( $G=22$ , 표 2.7)

온도 (°C)	동점성계수 $\times 10^6$ [m <sup>2</sup> /s]	회전수 (rpm)	토크 (N·m)	수동력 (W)
0	1.792	1.84	339.6	49.1
2	1.675	1.80	324.6	46.0
4	1.568	1.76	310.7	43.0
6	1.472	1.73	297.9	40.4
8	1.386	1.69	286.1	38.0
10	1.308	1.66	275.26	35.9
12	1.237	1.63	265.2	33.9
14	1.172	1.60	255.8	32.1
16	1.112	1.57	247.0	30.5
18	1.057	1.55	238.8	29.0
20	1.007	1.52	231.2	27.6
22	0.960	1.50	224.0	26.3
24	0.917	1.47	217.3	25.2
26	0.877	1.45	210.9	24.1
28	0.840	1.43	204.8	23.0
30	0.804	1.41	199.1	22.1
32	0.771	1.39	193.6	21.2
34	0.741	1.37	188.4	20.3
36	0.713	1.36	183.6	19.5
38	0.686	1.33	179.1	18.8
40	0.661	1.32	174.7	18.1

(4) 4단( $G=13$ , 표2.8)

온도 (°C)	동점성계수 $\times 10^6$ [m <sup>2</sup> /s]	회전수 (rpm)	토크 (N·m)	수동력 (W)
0	1.792	1.30	168.4	17.2
2	1.675	1.27	160.9	16.0
4	1.568	1.24	154.0	15.0
6	1.472	1.22	147.7	14.1
8	1.386	1.19	141.9	13.3
10	1.308	1.17	136.5	12.5
12	1.237	1.15	131.5	11.8
14	1.172	1.13	126.8	11.2
16	1.112	1.11	122.5	10.6
18	1.057	1.09	118.4	10.1
20	1.007	1.07	114.6	9.6
22	0.960	1.05	111.1	9.2
24	0.917	1.04	107.7	8.8
26	0.877	1.02	104.6	8.4
28	0.840	1.01	101.6	8.0
30	0.804	0.99	98.7	7.7
32	0.771	0.98	96.0	7.4
34	0.741	0.97	93.4	7.1
36	0.713	0.95	91.0	6.8
38	0.686	0.94	88.8	6.6
40	0.661	0.93	86.6	6.3

### 2.4.3 패들블레이드가 부등폭의 경우

#### 1) 1단( $G=59$ , 표2.9)

온도 (°C)	동점성계수 $\times 10^6$ [m <sup>2</sup> /s]	회전수 (rpm)	토크 (N·m)	수동력 (W)
0	1.792	3.55	1066.2	297.2
2	1.675	3.47	1019.2	277.8
4	1.568	3.40	975.5	260.1
6	1.472	3.33	935.4	244.2
8	1.386	3.26	898.4	230.0
10	1.308	3.20	864.3	217.0
12	1.237	3.14	832.7	205.1
14	1.172	3.08	803.2	194.3
16	1.112	3.03	775.7	184.4
18	1.057	2.98	750.0	175.4
20	1.007	2.93	726.0	167.0
22	0.960	2.88	703.5	159.3
24	0.917	2.84	682.3	152.2
26	0.877	2.80	662.2	145.5
28	0.840	2.76	643.2	139.3
30	0.804	2.72	625.0	133.4
32	0.771	2.68	608.0	128.0
34	0.741	2.64	591.8	122.9
36	0.713	2.6	576.6	118.2
38	0.686	2.6	562.3	113.8
40	0.661	2.6	548.7	109.7

2) 2단( $G=42$ , 표2.10)

온도 (°C)	동점성계수 $\times 10^6$ [m <sup>2</sup> /s]	회전수 (rpm)	토크 (N·m)	수동력 (W)
0	1.792	2.83	677.7	150.6
2	1.675	2.77	647.8	140.8
4	1.568	1.71	620.0	131.8
6	1.472	2.65	594.5	123.8
8	1.386	2.60	571.1	116.5
10	1.308	2.55	549.4	109.9
12	1.237	2.50	529.3	104.0
14	1.172	2.46	510.5	98.5
16	1.112	2.41	493.0	93.5
18	1.057	2.37	476.7	88.9
20	1.007	2.34	461.5	84.6
22	0.960	2.30	447.2	80.7
24	0.917	2.26	433.7	77.1
26	0.877	2.23	420.9	73.7
28	0.840	2.20	408.8	70.6
30	0.804	2.17	397.3	67.6
32	0.771	2.14	386.4	64.8
34	0.741	2.11	376.1	62.3
36	0.713	2.08	366.5	59.9
38	0.686	2.06	357.4	57.7
40	0.661	2.03	348.7	55.6

3) 3단( $G=22$ , 표2.11)

온도 (°C)	동점성계수 $\times 10^6$ [m <sup>2</sup> /s]	회전수 (rpm)	토크 (N·m)	수동력 (W)
0	1.792	1.84	286.2	41.3
2	1.675	1.80	273.5	38.6
4	1.568	1.76	261.8	36.2
6	1.472	1.72	251.3	34.0
8	1.386	1.69	241.1	32.0
10	1.308	1.66	232.0	30.2
12	1.237	1.63	223.5	28.5
14	1.172	1.60	215.6	27.0
16	1.112	1.57	208.2	25.6
18	1.057	1.54	201.3	24.4
20	1.007	1.52	194.9	23.2
22	0.960	1.50	188.8	22.2
24	0.917	1.47	183.1	21.2
26	0.877	1.45	177.7	20.2
28	0.840	1.43	172.6	19.4
30	0.804	1.41	167.8	18.6
32	0.771	1.39	163.1	17.8
34	0.741	1.37	158.8	17.1
36	0.713	1.35	154.7	16.4
38	0.686	1.34	150.9	15.8
40	0.661	1.32	147.3	15.3

4) 4단( $G=13$ , 표2.12)

온도 (°C)	동점성계수 $\times 10^6$ [m <sup>2</sup> /s]	회전수 (rpm)	토크 (N·m)	수동력 (W)
0	1.792	1.30	141.9	14.4
2	1.675	1.27	135.6	13.5
4	1.568	1.24	129.8	12.6
6	1.472	1.21	124.5	11.9
8	1.386	1.19	119.6	11.2
10	1.308	1.17	115.0	10.5
12	1.237	1.14	110.8	10.0
14	1.172	1.12	106.9	9.4
16	1.112	1.10	103.2	9.0
18	1.057	1.09	99.8	8.5
20	1.007	1.07	96.6	8.1
22	0.960	1.05	93.6	7.7
24	0.917	1.04	90.8	7.4
26	0.877	1.02	88.1	7.1
28	0.840	1.01	85.6	6.8
30	0.804	0.99	83.2	6.5
32	0.771	0.98	80.9	6.2
34	0.741	0.97	78.8	6.0
36	0.713	0.95	76.7	5.7
38	0.686	0.94	74.8	5.5
40	0.661	0.93	73.0	5.3

### 3. PIV에 의한 유동해석

#### 3.1 PIV의 개요

##### 3.1.1 배경

유체의 유동특성을 파악하는 것은 유체공학 관련의 제반문제를 해결하기 위하여 필요 불가결한 요소이다. 지금까지의 유동가시화 기법은 직관적으로 이해하기 쉬운 영상을 제공할 수 있음으로서 어떤 복잡한 유동장도 쉽게 이해 될 수 있다는 장점을 가지고 있지만 정량적인 데이터의 부족으로 역학적인 해석이 어렵게 되어 공학적인 측면에서 유체계측이 보다 중요한 위치를 차지하고 있다. 지금까지 유체계측에 있어서 속도를 얻기 위하여 열선유속계 또는 LDV를 사용하여 왔다. 이러한 점계측 속도측정기법은 신뢰성과 정도면에서 우수한 성능이 입증되었으나 계측기법 고유의 문제점 때문에 유동현상의 기본특성인 비정상의 동시다점계측이 원리적으로 불가능하다.

이러한 배경에서 종래의 정성적인 가시화기법과 디지털 영상처리 기술을 새로이 접목한 PIV가 속도계측의 새로운 실험기법으로서 1980년 대 중반부터 본격적으로 소개가 되었으며 최근에는 전산유체역학에 필적할 수 있는 유동장의 대표적인 계측기법으로서 크게 각광을 받고 있다.

PIV의 기본원리로서 유동장의 국소속도는 어느 한 점을 통과하는 추적입자가 미소시간 간격동안 이동한 미소 직선거리 및 방향을 알면 쉽게 구해진다. 즉 입자의 입자운동에 요하는 시간간격 및 벡터변위의 관계로부터 구할 수 있다. 유동장에 유체와 동일한 비중을 갖는 추적입자(*tracer particle*)을 분포시키고 이들 입자의 순간적인 위치를 시간차를 가진 두 영상 상에서 공간대응 시키는 방법에 의하여 속도 벡터를 동시다점으로 구한다. 특히 추적 입자로서 감온 액정 입자(*thermo-sensitive crystal particle*)와 같이 온도에 감응하는 추적입자

를 사용할 경우에는 공간의 온도분포까지 동시에 구할 수 있다. 최근에는 3차원 Stereoscopic PIV, 3차원 Volume PIV 등의 속도장 측정 방법이 개발되어 유동해석 연구에 넓게 활용되고 있다. 따라서 PIV 기법은 LDV 등이 갖는 점계측의 한계를 근본적으로 해결할 수 있음으로써 컴퓨터 관련기술 및 고성능의 영상처리장치의 개발에 힘입어 빠른 기술적 진보를 보이고 있으며 현재에는 다양한 조명장치와 정교한 전자장비에 의한 애니메이션 기법의 도입과 적용으로 유동관련 연구자들을 흥미로운 가시화의 세계로 초대하고 있다.

세계적인 PIV전문가들의 견해에 의하면 PIV의 계측원리에 대한 연구는 거의 완성단계에 진입하였으며, PIV기법을 대중화시키려는 일련의 움직임으로서 PIV 계측시스템에 대한 산업계적용 및 계측결과 의 정도를 평가 할 수 있는 표준기법의 확립에 중점을 두고 있음을 알 수가 있다. 하지만 PIV 고유의 정도문제로 인한 비정상적 순간의 변동량, 고속의 난류 유동장을 해석하기 위해서는 전문가적인 경험 이, 고속 유동장에 대응할 수 있는 PIV시스템의 구축에는 고가의 기본장비가 요구되고 있다. 따라서, 공학적인 측면에서 보다 유용하게 사용하기 위해서는 PIV알고리즘의 고정도화 기술이 필요하며, 효율적인 고속유동장을 위한 경제적인 PIV시스템에 대한 새로운 접근과 편의성을 갖춘 경제적인 하드웨어의 최적화기술 그리고 이들 기법을 이용한 응용개발 연구 및 PIV 데이터를 이용한 유동장기법의 새로운 접근이 중요한 과제로 대두되고 있다.

### 3.1.2 조명 및 추적입자

영상 처리를 하기 위해서는 측정하고자 하는 계측단면의 적당한 조명의 공급이 절대적으로 필요하다. 이러한 조명은 유동장에 투입된 입자를 주위의 배경보다 높은 계조치(*gray level*)를 갖게 하여 초기 영상을 획득하는데 중요한 자료를 제공한다. 특히 유동장에서 깨끗한 영상을 획득하기 위해서는 출력이 높은 광원이 필요하며, 실험에서는 이를 위하여 정밀한 PIV 시스템이 채택되어야 한다. 광원으로는 보

통, 5Watt급의 출력을 가지는 수냉식 아르곤 이온(Argon-Ion) 레이저가 사용되며, 여기에서 나오는 직진광을 실린드릭 렌즈를 통해 두께 2mm-5mm 정도의 2차원 시트 라인을 생성하여 측정하고자 하는 유동장에 직접 조사한다. 아르곤 이온 레이저는 가스레이저로서 0.5mbar 정도의 기체가 플라즈마 튜브에 채워져 있으며 전기방전에 의해 여기가 이루어진다. 이온화된 아르곤 원자들이 전자충돌에 의해 여기 되는데 이로 인해 여러 가지 상태들 사이에서 레이저 발진이 일어나게 된다.

PIV는 유동장에 분포된 입자의 미소시간 간격의 영상을 컴퓨터로 분석하여 속도벡터에 대한 데이터를 얻는 방법이므로 사용되는 입자의 선별기준은 유체와 입자운동사이의 사이를 최소화 혹은 없애기 위해서 유동 입자의 유체역학적 특성을 고려하는 것이 필요하다. 일반적으로 추적입자는 가시성이 좋아야 하고 입자와 유체와의 밀도차가 적어 유동장에 손상을 주지 않아야 한다. 입자의 직경은 유체유동을 잘 추종하기 위해서 작을수록 좋으나, 입자 직경은 빛의 산란에 의한 입자 영상을 영상 입력장치로 취득할 수 있을 정도로 어느 정도 이상의 크기를 가져야 한다. 그러므로 입자 직경의 결정에 대한 어느 정도의 시행착오가 필요하며, 이 실험에서는 물과 비슷한 1.02 전후의 비중과 110 $\mu$ m 직경을 가지는 PVC 입자를 추적입자로 사용하였다.

### 3.1.3 영상입력 및 저장장치

이 실험에서는 영상입력장치로 1,280×1,024의 해상도를 가지는 고속도 CCD카메라를 사용한다. 일반적인 CCD카메라나 가정용 캠코더 등은 *frame rate*가 30으로 고정되어 있어 이와 같은 촬영장비로는 약 0.5m/sec 이상의 속도계측은 불가능하다. *Pulse Generator*와 동기된 AOM 등의 고속계측장비를 사용할 수도 있으나 이 경우에는 연속촬영이 곤란하여 시계열적인 유동현상은 관찰할 수 없게 된다. 이에 대한 대안으로서 중저속 계측용으로 고속도카메라를 사용할 수 있다.

1,000pps 이상의 카메라를 사용하면 수십m/s 정도의 유동장을 연속적으로 저장할 수 있다. 다수의 영상을 고속연속촬영할 수 있으므로 *Animation* 제작에 적합하다. 근래에 초당 10,000frame 이상을 기록할 수 있는 고속도카메라가 있으나 해상도가 128x34 pixel 정도이며 이 같은 영상은 유동장의 극히 일부분만을 계측할 수밖에 없으므로 PIV 용으로는 부적합하다. 고속도카메라를 PIV용으로 사용하고자 한다면 full frame(1K x 1K)으로 1,000pps 정도가 되어야 하나 이 정도의 성능이라면 매우 고가이어서 부담스러운 가격이 된다. R, G, B의 컬러 정보가 요구되지 않는 PIV용이라면 컬러보다는 흑백 고속도카메라가 권장된다. PIV에서 필요로 하는 최종적인 영상은 8-bit *Gray* 영상이면 되고 컬러영상은 오히려 Y/C변환시 계산시간의 증가와 화질의 열화를 야기시킨다. 본 실험에서는 500pps(at full frame, 1K x 1K, KODAK)의 고속도카메라를 사용하였고 셔터속도는 1/60초 또는 1/125초로 설정하였다. 이때의 frame수는 1,024이었다.

### 3.1.4 단면광 형성

레이저로부터 나오는 직진광을 2차원의 시트라이트를 형성하기 위해 일반적으로 원통형 렌즈(Cylindrical lens)와 LLS(Laser Light Sheet) probe가 사용된다. 원통형렌즈는 유리나 아크릴로 가공된 원통형물체로서 레이저로부터의 직진광을 단면광으로 만드는 역할을 한다. 단면광을 만들기 위하여 설치의 편의성 때문에 일반적으로 LLS probe가 사용되나 이 경우는 레이저출구 출력이 1/2 정도로 감소하게 된다.

따라서 레이저를 실험장치에 맞게 배열할 수 있고, 보다 강한 광원이 요구된다면 원통형렌즈를 사용하는 것이 좋다. 렌즈의 직경이 작을수록 퍼지는 각도가 크나 빛이 약해지고, 반대로 렌즈의 직경이 클수록 퍼지는 각도가 작으나 빛이 강하게 된다. 따라서 해석하고자 하는 단면이 작으면 직경이 큰 렌즈를 사용하면 된다.

LLS probe는 레이저본체로부터 나오는 광을 입사조절기에서 받아 들여 광케이블(optical fiber line)을 통하여 LLS probe의 렌즈조합에 의하여 단면광을 생성하는 장치로서 두께와 폭을 쉽게 조절할 수 있는 레이저의 부속장비이다.

LLS probe는 레이저본체는 고정되어 있고 optical fiber line으로 연결하여 사용하므로 레이저본체와 멀리 떨어져 있는 곳에서도 단면광의 형성이 가능하고, 또한 임의의 위치와 각도로 설치할 수 있으므로 사용상의 편리성을 제공한다. 본 실험에서는 유동장이 저속이므로 200mW급의 Ar-Ion 레이저 2대를 동시에 사용하였고 LLS프로브 대신 실린드릭 렌즈를 이용하여 유동장에 조명을 직접 조사하는 기법을 채택하였다.

### 3.1.5 동일입자 추적

Fig 3.1은 PIV에 의한 속도계측의 개략적인 순서를 보여주고 있다. PIV해석을 위해서는 먼저 입자의 주입된 유동장을 가시화하고, 이들 입자의 운동 또는 입자군의 계조치 변화를 카메라를 이용하여 기록한 다음, 재생된 영상을 미소시간 간격으로 입자의 이동변위를 자동적으로 추적함으로써 속도벡터를 구한다.

PIV를 이용한 측정기법을 본 연구에 적용시키기 위해서는 유체의 거동을 충분히 파악할 수 있을 만큼 시간분해능과 공간분해능을 가지도록 하여야 한다. 초기 PIV 기법에서는 펄스 라이트 시이트에 의해 산란된 입자영상을 필름에 겹쳐 저장하고 유동영상의 미소 조사구간 내 영상을 Young's 프린지 분석이나 광학적 방법으로 조사구간을 대표하는 평균속도를 구하였다. 최근에는 이와 같은 광학적 PIV 기법은 거의 이용되지 않고 있으며, 획득된 영상을 디지털화한 후 조사구간에 대한 상관계수를 직접 계산함으로써 속도장을 구하는 상관방식이 PIV 기법의 주류를 이루고 있다.

PIV의 경우 입자의 개수가 많기 때문에, 입자의 움직임을 직접적으로 파악하기가 힘들게 된다. 따라서 통계학적으로 입자의 움직임을

구하게 되는데, 입자간의 상관관계를 구함으로써 입자의 움직임을 파악한다. 그 방법에는 한 프레임에 모든 영상을 획득하는 자기상관(*auto-correlation*)방법과 두 프레임에 각각 첫 번째와 두 번째 조사에 의한 영상을 획득하는 상호상관(*cross-correlation*)방법이 있다.

자기상관법은 같은 프레임에 첫 번째와 두 번째 조사에 의한 입자의 영상이 모두 담겨 있기 때문에 방향성의 문제가 생기게 된다. 반면에 상호상관법은 두 프레임에 각각 영상을 획득하기 때문에 방향성은 결정되지만 비디오 레이트에서는 프레임 공급속도에 의해 측정속도의 한계가 정해지는 단점이 있다. 하지만 최근 고해상도 카메라 및 Nd-Yag dual 펄스레이저 등의 급격한 발달에 힘입어 상호상관법으로도 초음속이상을 측정할 수 있게 되면서 방향모호성이 없는 상호상관법이 주류를 이루고 있다.

Fig. 3.2는 계조치 상호상관법의 원리를 설명하기 위한 것이다. 미소시간 동안에 유동장의 계조치 패턴은 크게 변화하지 않는다고 가정하면 제 1프레임상에서의 상관영역내의 계조치 분포와 미소시간후의 제 2프레임상에서의 계조치분포는 유사한 특성을 나타낸다. 즉 제 1프레임상의 임의의 위치를 중심으로 하여 제 2프레임상의 같은 크기를 갖는 영역과의 계조치에 대하여 상호상관계수를 구하여 비교하면 그 중 가장 큰 값을 동일입자의 위치로 간주할 수 있다.

그러나 유동장에 강한 전단층이 존재하는 부분이나, 고속류의 급격한 회전 등이 있는 경우에는 단시간 내에 유동패턴이 급변하여 계조패턴의 유사성을 상실하게 된다. 또한 입자가 2차원 시트라이트면을 이탈하여 후보 입자 중에 대응하는 입자가 포함되어 있지 않을 경우에도 부적합한 상관값에 의한 이상치(*outlier*)가 발생한다.

계조치 상호상관법을 적용할 때 탐색반경(SAR)과 상관영역(CAS)의 설정은 속도벡터의 오류발생 및 계산시간의 단축에도 매우 중요하다. 최대이동거리의 추정은 유동장 중에서 최대유속이 발생하는 부근에서 입자의 구별이 명확한 지점에 대하여 행하는 것이 효과적이나 터보기계 내부 유동과 같은 비정상류에 있어서는 최대유속 부분을 직관적으로 단정할 수는 없으므로 +1~2pixel하는 방법을 적용하였다. 탐색반경은 곧 입자가 이동할 수 있는 최대거리를 의미하

므로 작은 반경은 많은 에러벡터를 발생시키고 계측의 다이내믹 레인지를 제한하여 계산된 최대속도는 실제 유동장보다 낮게 나타난다. 또한, 큰 반경도 많은 계산시간과 불필요한 오류벡터를 수반한다.

상관영역은 탐색반경 내에 존재하는 입자의 격자점에서 상관계수를 구하는 계산영역을 의미한다. 상관영역의 크기가 너무 작을 때는 상관영역 내에 포함된 입자의 평균 개수가 너무 작고, 이 입자들의 위치관계가 너무 단순하여 동일입자확인에 있어서 만족시키기 쉽지만 결정된 속도벡터에 많은 에러를 유발하여 계조치 공간분포의 상관관계의 신뢰도가 떨어지며, 너무 클 때는 상관영역내의 입자의 평균개수도 역시 많아지므로 이 입자들의 위치관계가 너무 복잡하고 상관대응이 어렵기 때문에 많은 입자들의 두 번째 영상에 있어서 상관계수를 구하는데 과도한 계산시간을 요한다.

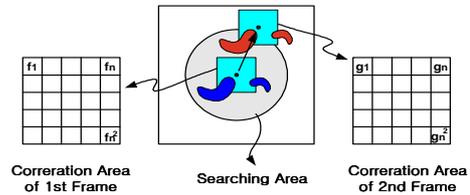
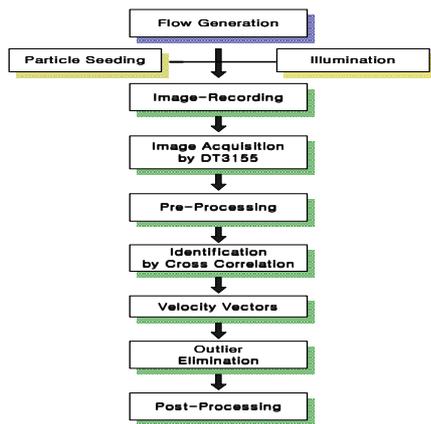


Fig. 3.1 PIV 해석의 흐름도

Fig. 3.2 계조치 상호상관법의 개념도

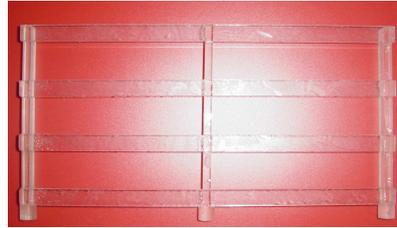
## 3.2 실험장치 구성

Fig. 3.3은 축소모델의 교반기 블레이드 사진을 보이고 있다. 폭이 동일한 모델과 축으로 갈수록 넓은 폭을 갖는 블레이드 모델의 2종류를 택하여 실험을 행하였다. Fig. 3.4는 혼화지쪽에서 본 응집지 모델의 사진으로서 1단에 3조의 패들이 설치되어 있으며 교반기의 구동부는 왼쪽에, 혼화기로부터의 유입구는 오른쪽에 위치하고 있다. 이 유입구의 직경은 실제 응집지의 구경을 1/10로 축소하여 100mm로 하였다. Fig. 3.5부터 Fig. 3.8은 계측 모델을 여러 각도에서 촬영한 사진으로서 어느 방향에서도 영상을 확보할 수 있도록 모두 벽면을 투명 아크릴로 제작하였다. Fig. 3.9와 Fig. 3.10은 교반기모델의 회전수 및 토크를 계측하기 위한 장치로서 회전수는 서보모터를 감속기어로 변속시키어 자동 정밀 조정하였다. 토크의 계측에서는 통상, 운전중 수  $kg_f \cdot cm$ 의 토크가 검출되나 이 값은 무부하상태에서의 토크 값과 비교하여 매우 작은 값을 나타내고 있고, 회전중의 약간의 축흔들림으로 발생하는 토크값의 변동폭이 소숫점에서의 유효숫자 오차에 포함됨으로서 정확한 계측이 불가능하였다. 이 문제를 해결하기 위하여는 지금의 모델보다 2-3배 큰 모델을 사용하여 토크의 계측 다이내믹 레인지에 포함될 수 있도록 하여야 한다.

Fig. 3.11은 본 실험에서 설정한 계측단면의 정의를 나타내고 있다. 붉은 색은 레이저조명이 조사되는 계측단면이며, 카메라는 좌우 또는 정면(케이스7)에 위치한다.



(a) 부등폭

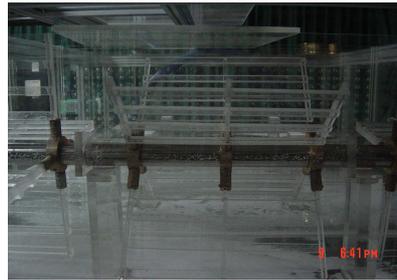


(b) 등폭

**Fig.3.3 축소모델 패들 블레이드의 형상**



**Fig. 3.4**  
혼화지에서 본 응집지모델



**Fig. 3.5**  
패들 블레이드 모델형상



Fig. 3.6 응집지 1단 축방향에서의 패들 블레이드 형상



Fig. 3.7 응집지 모델(왼쪽1단)

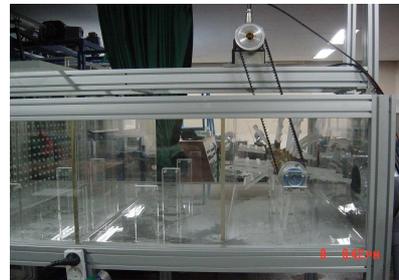


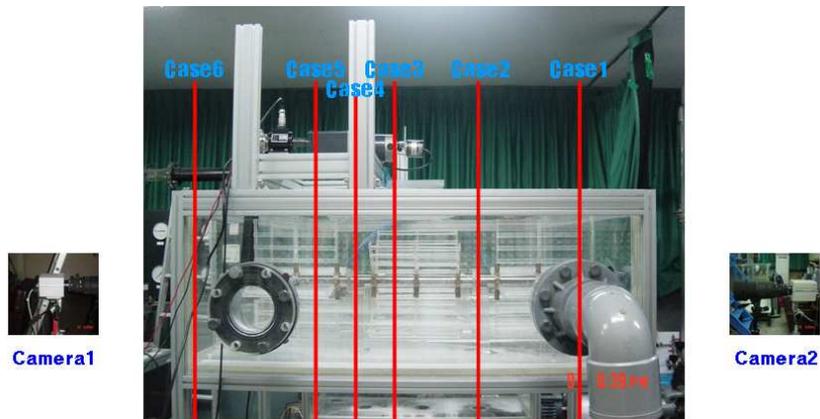
Fig. 3.8 모터구동축 모델 형상



Fig. 3.9 토오크센서



Fig. 3.10 토오크 및 회전수 표시기



**Fig. 3.11 PIV계측단면 정의((붉은색:레이저조명위치)**

- case1* : 1단 혼화지로부터 응집지로 유입하는 배관중앙단면
- case2* : 패들 1열과 2열 사이
- case3* : 패들 2열 중간
- case4* : 패들 2열과 3열 사이
- case5* : 패들 3열 중간
- case6* : 1단과 2단사이의 slit
- case7* : 1열과 2열사이의 공간(조명은 상방, 카메라는 혼화지)
- camera2* : 교반기 회전방향 기준 방향

### 3.3 유동장 계측결과 및 검토

#### 3.3.1 모델교반기 운전조건

개량 응집지 지당 최대유량은 일당  $30,000\text{m}^3$ 이므로, 유입배관(직경 1,000mm)에서의 유입 속도는  $0.44\text{m}/\text{sec}$ 이며, 분당 유입유량은  $30,000/(24 \times 60) = 20.83\text{m}^3/\text{min}$ 이다. 따라서 지당 체류시간은  $670.3\text{m}^3$  (전체지용적)/ $20.83\text{m}^3/\text{min} = 32.17$ 분이 된다. 각 단별 2차원 통과단면

(3.95mH x 3.75m)에서의 평균유속과 교반기 원주회전속도(3.5 rpm 기준)의 비를 축소모델에 그대로 적용시켜 유입유량을 결정하였다. 이때에 온도에 따른 rpm변화를 고려하면 표 3.1과 같이 정리된다.

표 3.1 모델운전조건(1단 모델)

번호	온도(°C)	N(rpm)	유량(liter/sec)
1	15	3.01	0.464
2	16	2.99	0.464
3	17	2.96	0.464
4	18	2.94	0.464
5	19	2.91	0.464
6	20	2.89	0.464
7	21	2.87	0.464
8	22	2.84	0.464
9	23	2.82	0.464
10	24	2.80	0.464
실용집지 1단 $G=57.53$ 기준 ( $0^{\circ}\text{C}$ , 3.5rpm, 30,000m**3/day)			

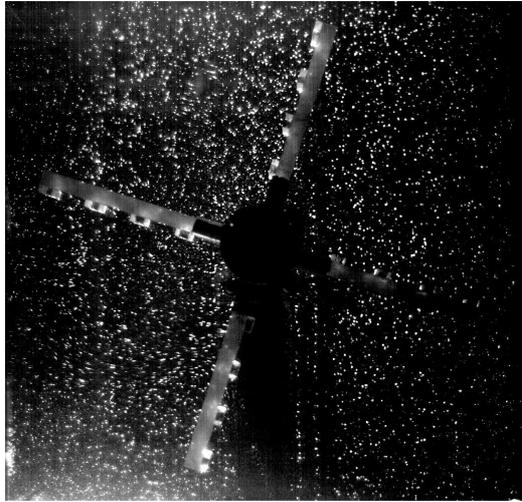
### 3.3.2 계측단면설정 (Fig. 3.11 참조)

표 3.2 계측단면설정 (괄호는 그림번호임)

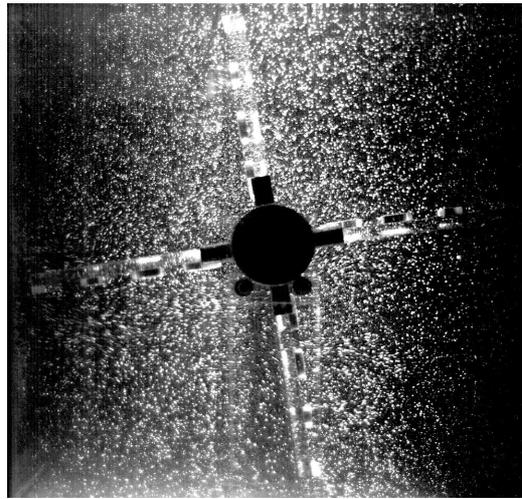
구분	1단						3단	
	유입유량 무 (등폭)		유입유량 유 (반시계방향)		유입유량 유 (시계방향)		유입유량 유 (반시계방향)	
	반시계	시계	등폭	부등폭	등폭	부등폭	등폭	부등폭
case1	o(3.13)	o(3.24)	o(3.18)	o(3.28)	o(3.26)	x	x	o(3.32)
case2	o(3.14)	x	o(3.19)	x	x(3.27)	x	x	x
case3	o(3.15)	o(3.25)	o(3.20)	o(3.29)	o	x	x	o(3.33)
case4	o(3.16)	x	o(3.21)	o(3.30)	x	x	x	o(3.34)
case5	o(3.17)	x	o(3.22)	x	x	x	x	x
case6	x	x	o(3.23)	x	x	x	x	x
case7	x	x	x	o(3.31)	x	x	x	o(3.35)

### 3.3.3 순간 유동장 오리지널 영상

Fig. 3.12는 PIV에서 사용된 고해상도 CCD 고속도카메라(KODAK, 1K x 1K, 500pps *at full frame*)에서 얻은 최초의 해석영상이다. 사용된 레이저의 출력이 가반형 소형(200mW급)으로서 벽면근처에서는 입자가 적게 분포된 것처럼 보이나 실제 PIV처리상에서는 별 문제가 없었다.



(a) 등폭 블레이드

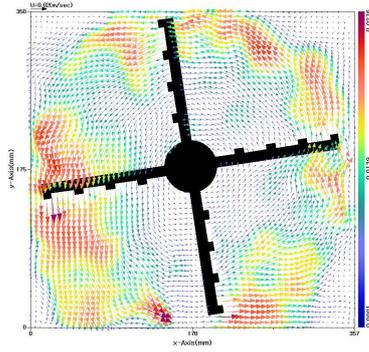


(b) 부등폭 블레이드

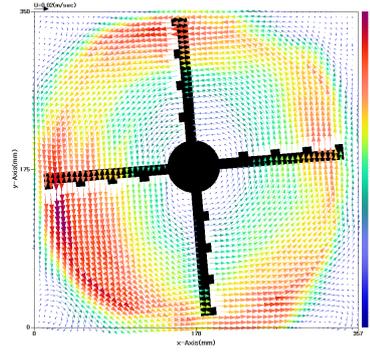
Fig. 3.12 원시영상(1K x 1K 고해상도 고속도카메라)

### 3.3.4 등폭 블레이드

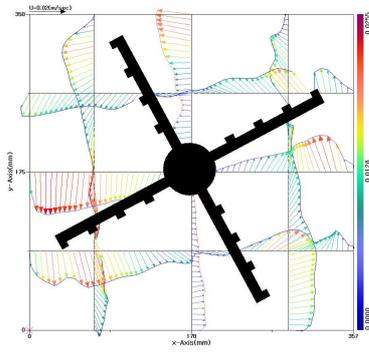
- 1) 교반기 반시계 방향 회전
- 1-1) 유입유량=0 (1단)



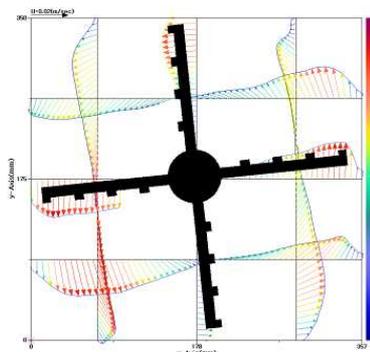
(a) 순간 속도벡터 분포



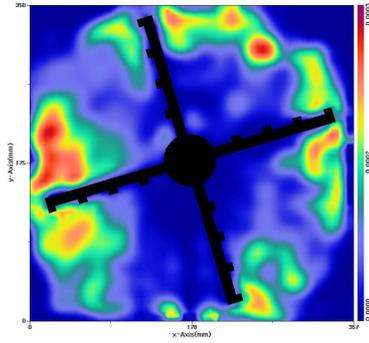
(b) 시간평균 속도벡터 분포



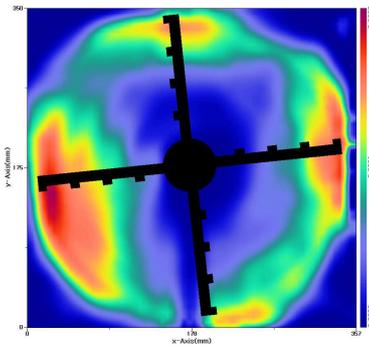
(c) 순간 속도프로파일



(d) 시간평균 속도프로파일

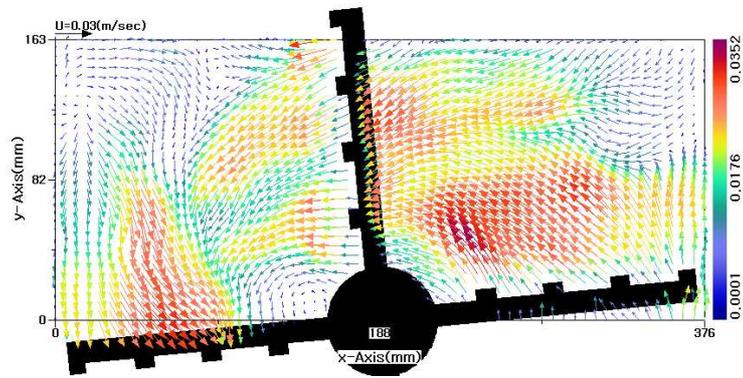


(e) 순간 운동에너지 분포

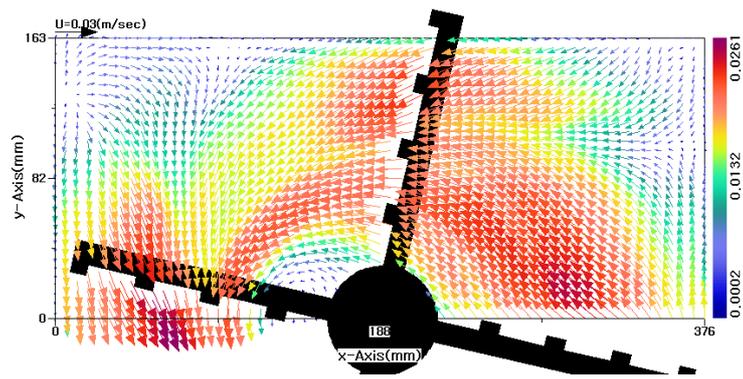


(f) 시간평균  
운동에너지 분포

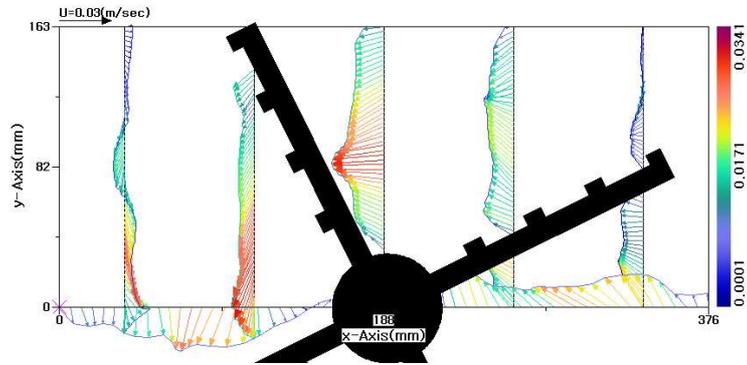
Fig. 3.13 case1에서의 계측결과



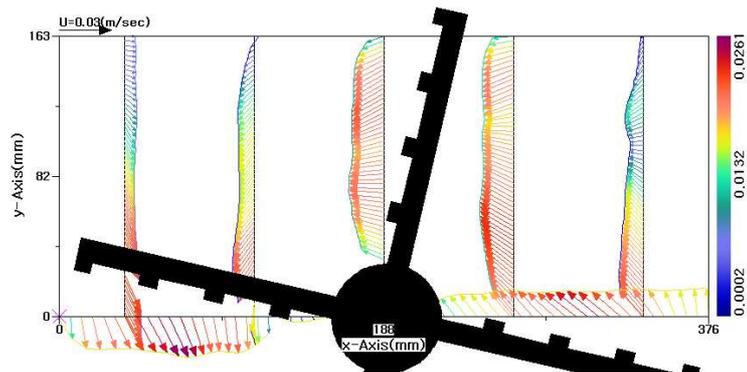
(a) 순간 속도벡터 분포



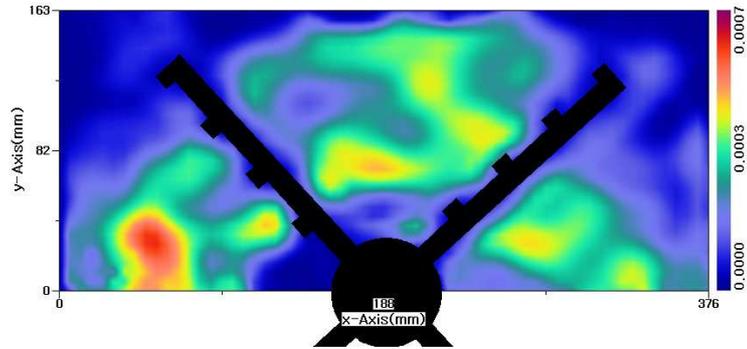
(b) 시간평균 속도벡터 분포



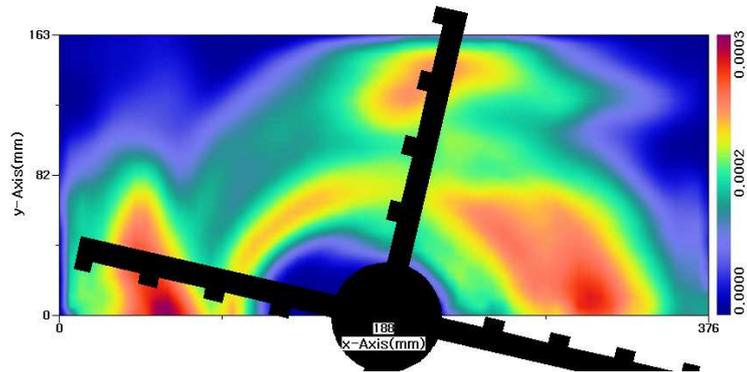
(c) 순간 속도프로파일



(d) 시간평균 속도프로파일

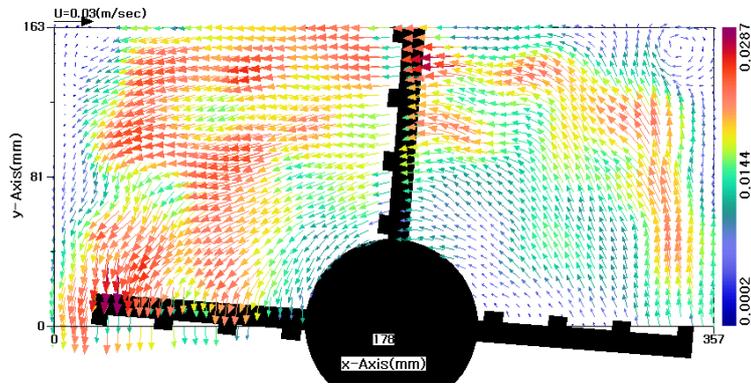


(e) 순간 운동에너지 분포



(f) 시간평균 운동에너지 분포

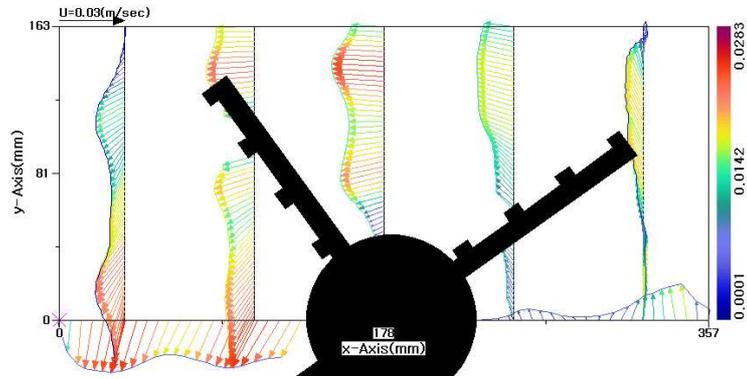
Fig. 3.14 Case2에서의 계측결과



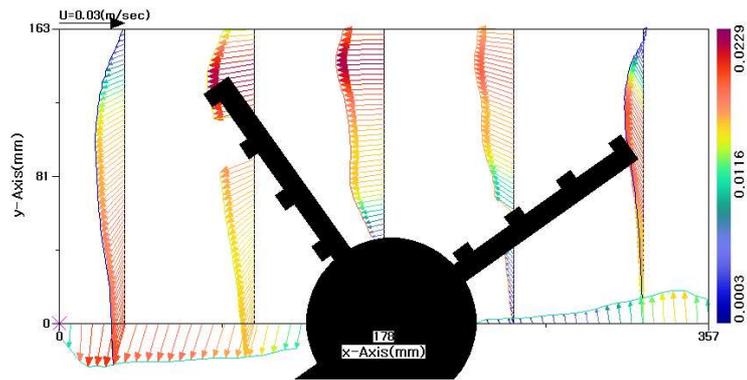
(a) 순간 속도벡터 분포



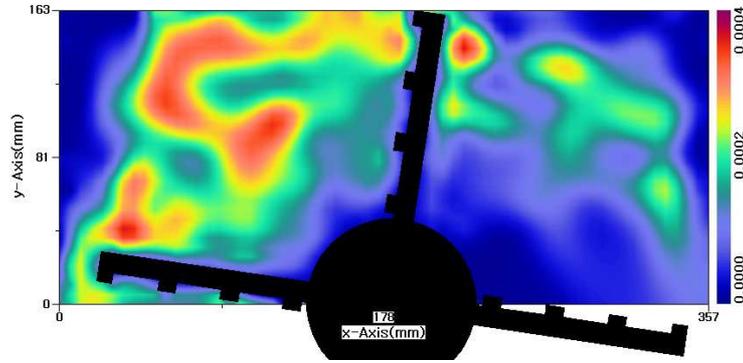
(b) 시간평균 속도벡터 분포



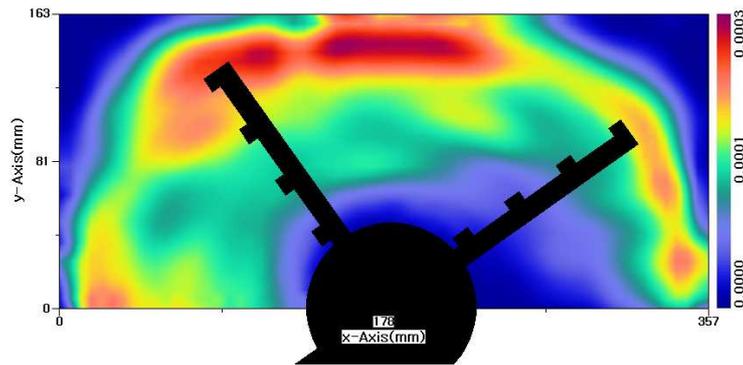
(c) 순간 속도프로파일



(d) 시간평균 속도프로파일

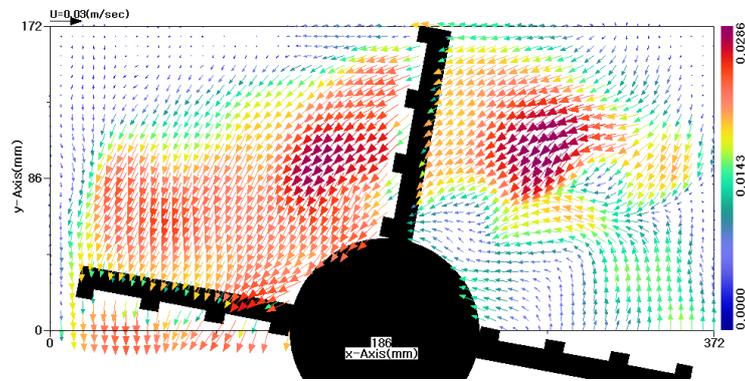


(e) 순간 운동에너지 분포

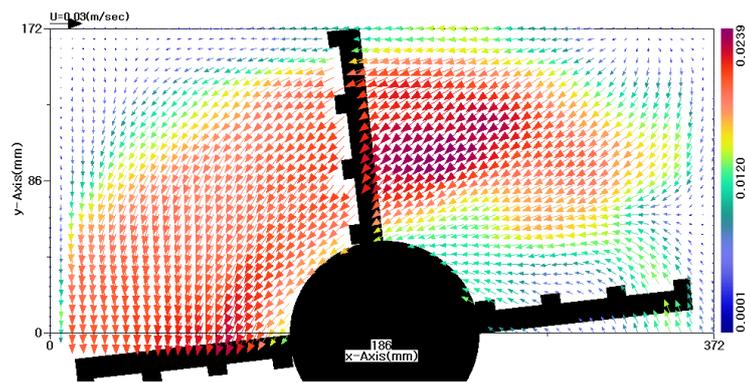


(f) 시간평균 운동에너지 분포

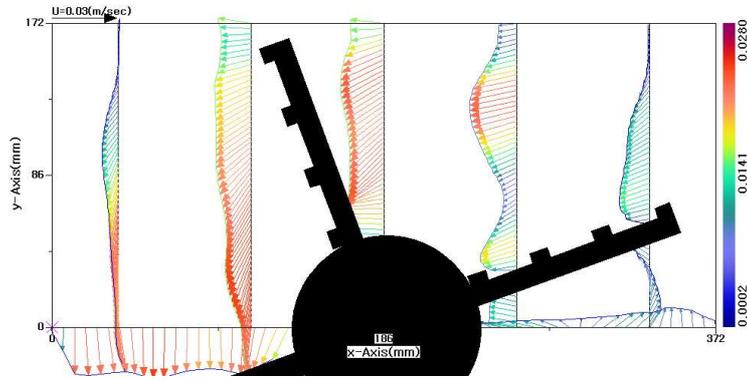
Fig. 3. 15 case3에서의 계측결과



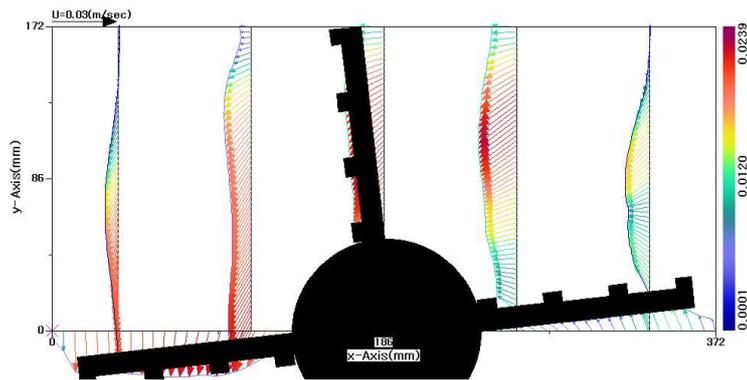
(a) 순간 속도벡터 분포



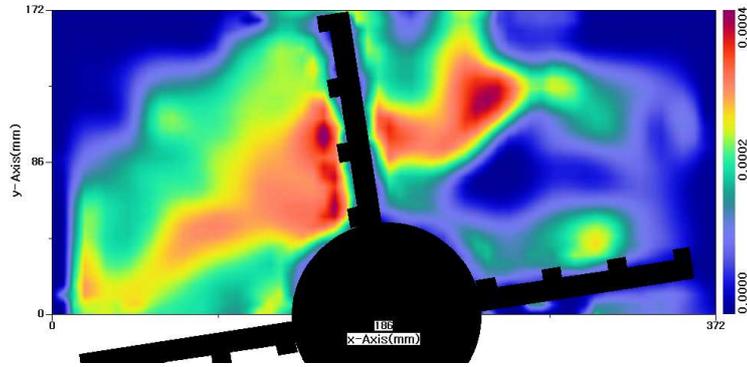
(b) 시간평균 속도벡터 분포



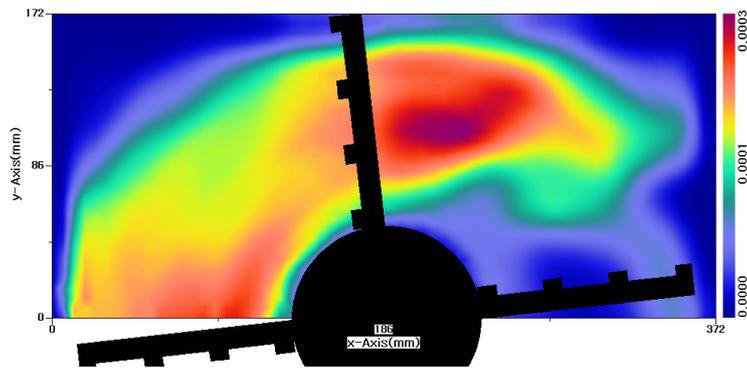
(c) 순간 속도프로파일



(d) 시간평균 속도프로파일

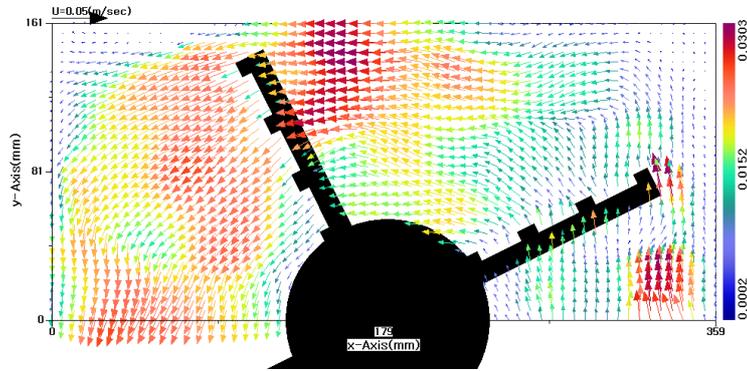


(e) 순간 운동에너지 분포

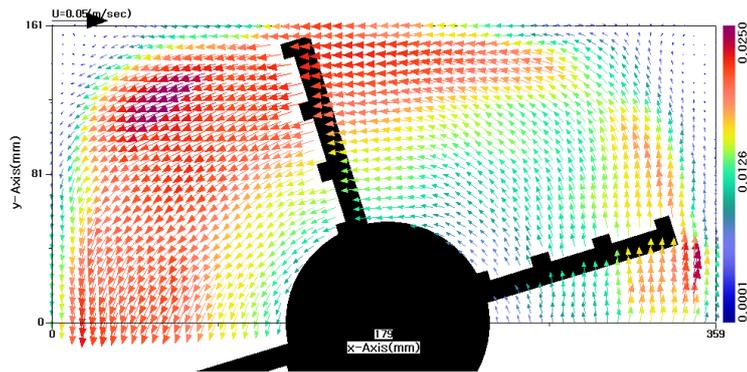


(f) 시간평균 운동에너지 분포

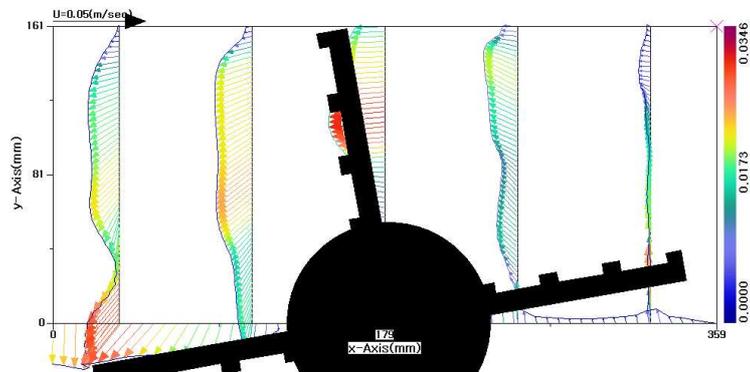
Fig. 3. 16 case4에서의 계측결과



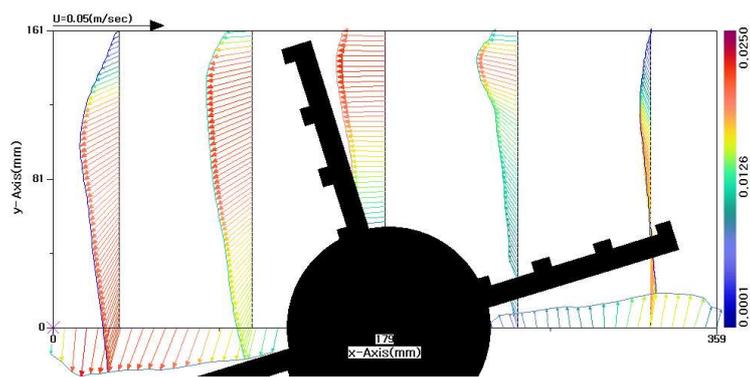
(a) 순간 속도벡터 분포



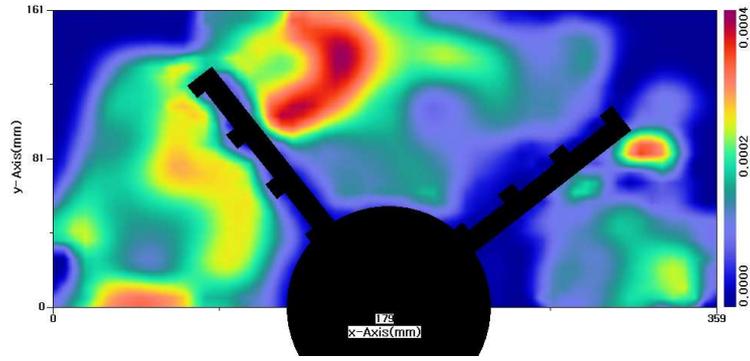
(b) 시간평균 속도벡터 분포



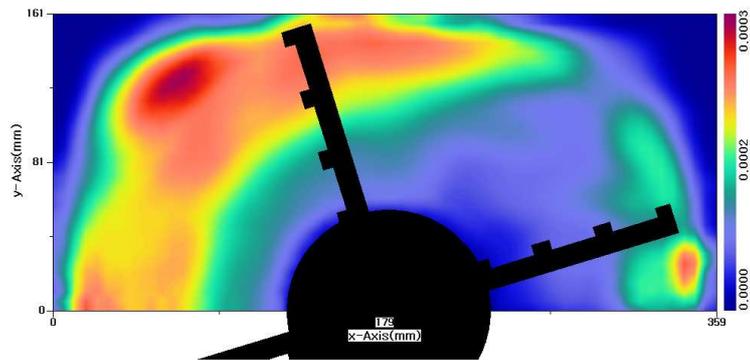
(c) 순간 속도프로파일



(d) 시간평균 속도프로파일



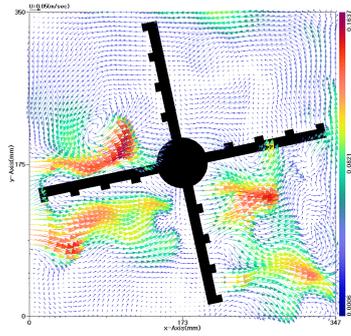
(e) 순간 운동에너지 분포



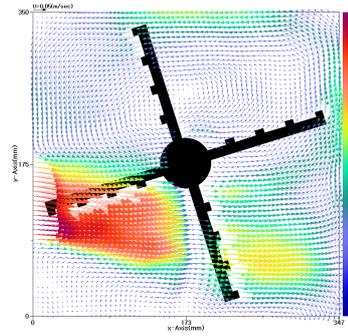
(f) 시간평균 운동에너지 분포

Fig. 3. 17 case5에서의 계측결과

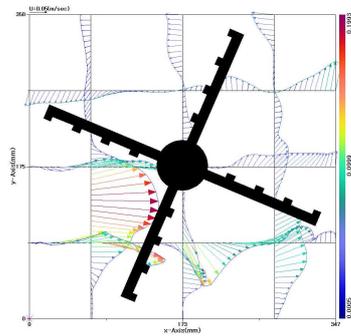
1-2) 유입유량=0.464(liter/sec) (1단)



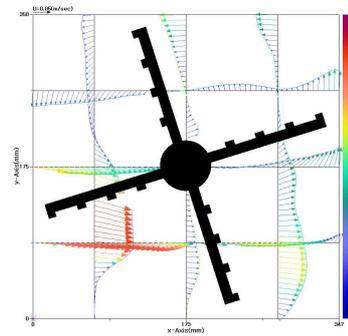
(a) 순간 속도벡터 분포



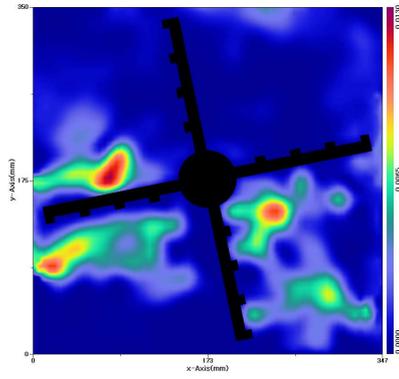
(b) 시간평균  
속도벡터 분포



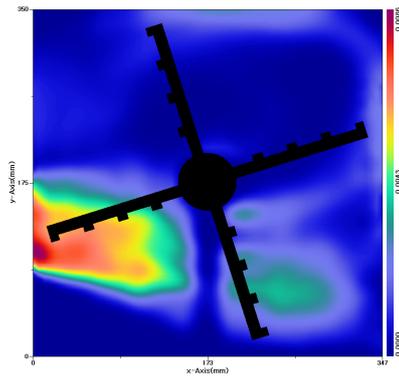
(c) 순간 속도프로파일



(d) 시간평균  
속도프로파일

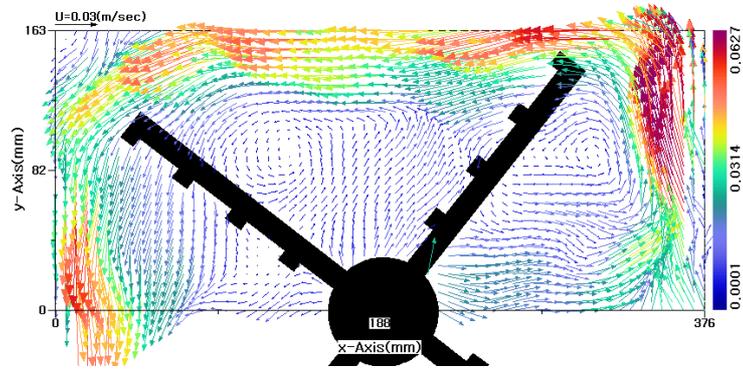


(e) 순간 운동에너지 분포

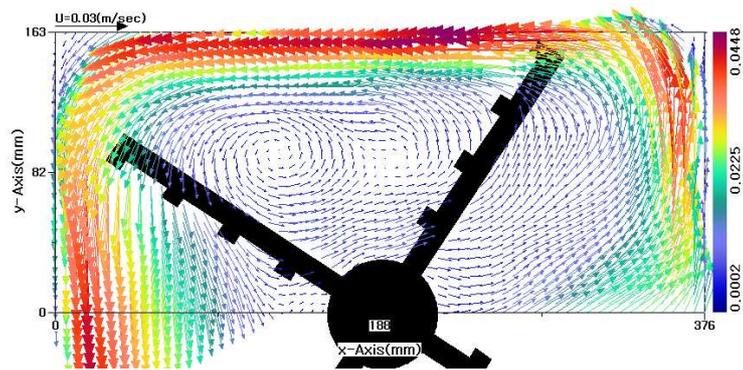


(f) 시간평균  
운동에너지 분포

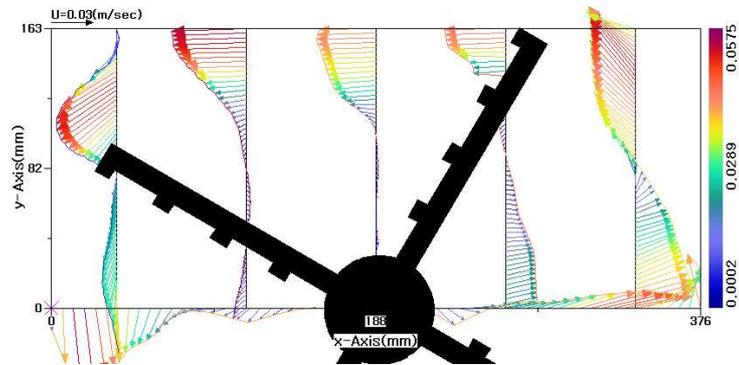
Fig. 3. 18 case1에서의 계측결과



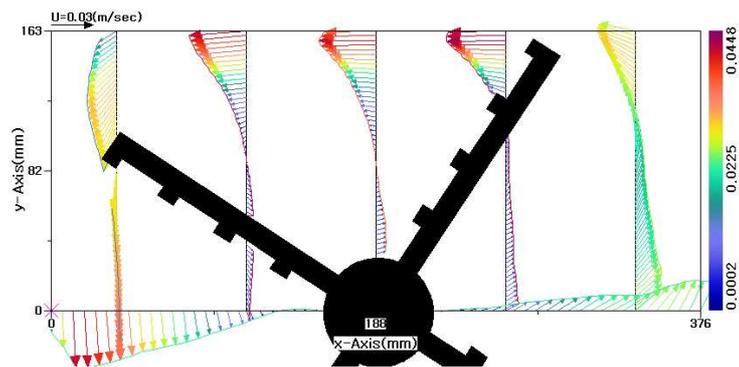
(a) 순간 속도벡터 분포



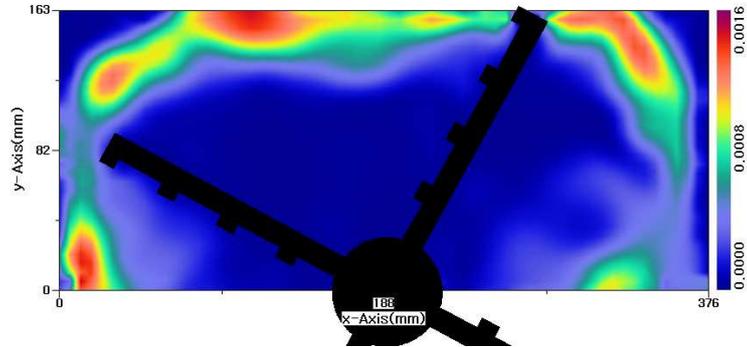
(b) 시간평균 속도벡터 분포



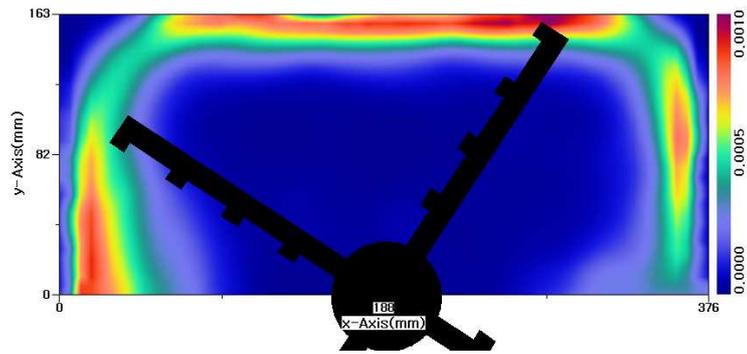
(c) 순간 속도프로파일



(d) 시간평균 속도프로파일

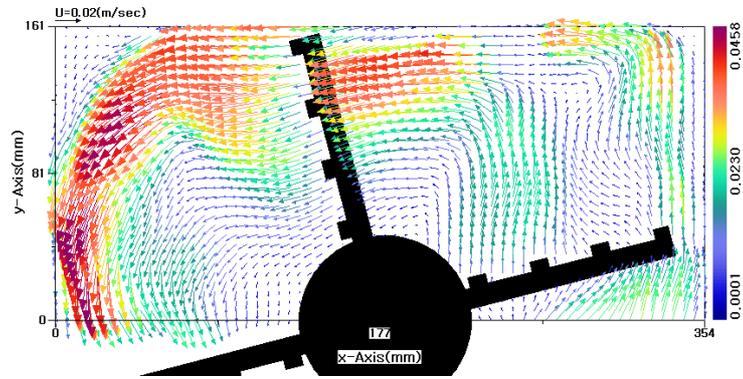


(e) 순간 운동에너지 분포

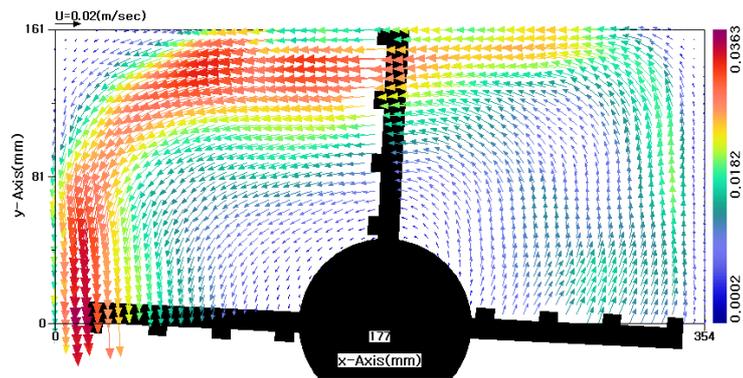


(f) 시간평균 운동에너지 분포

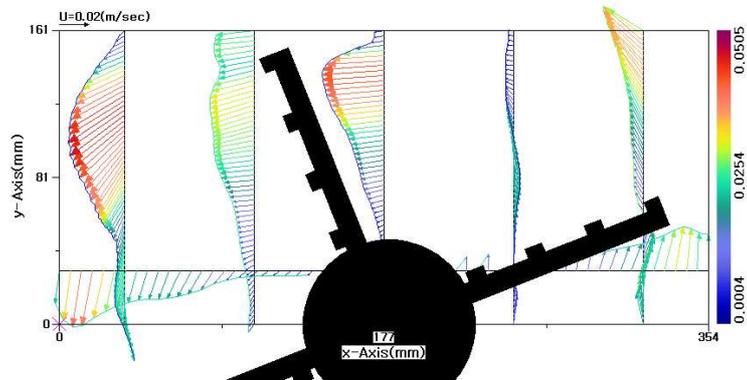
Fig. 3. 19 case2에서의 계측결과



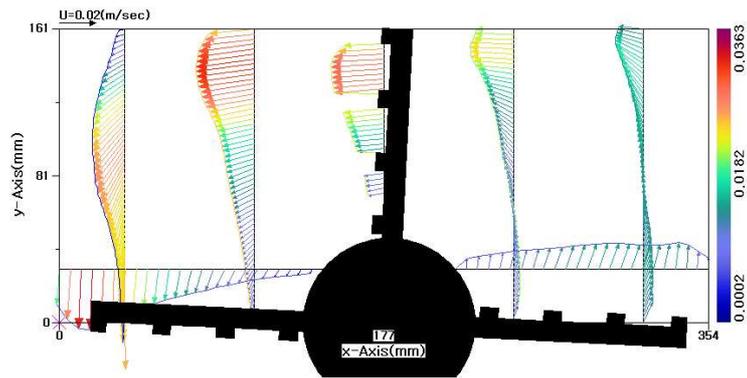
(a) 순간 속도벡터 분포



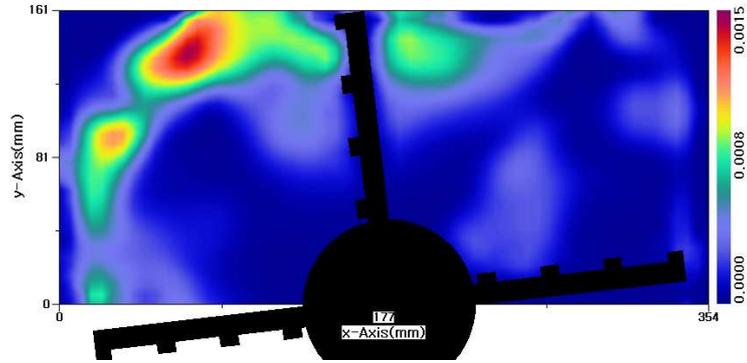
(b) 시간평균 속도벡터 분포



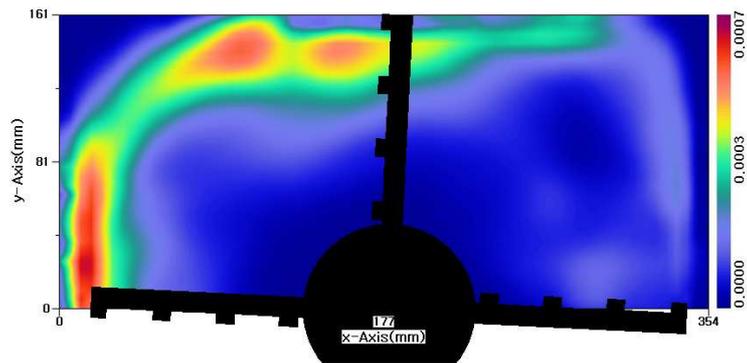
(c) 순간 속도프로파일



(d) 시간평균 속도프로파일

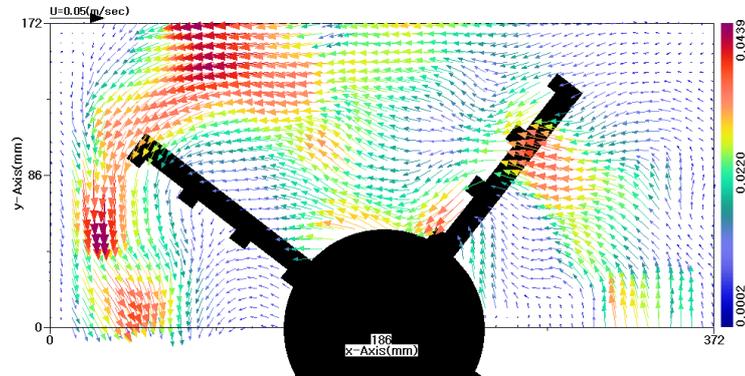


(e) 순간 운동에너지 분포

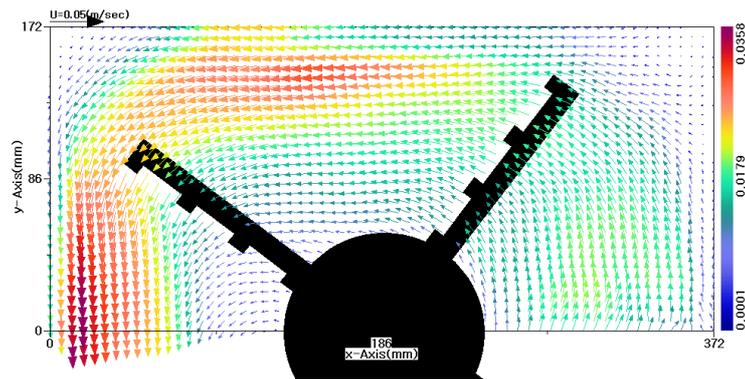


(f) 시간평균 운동에너지 분포

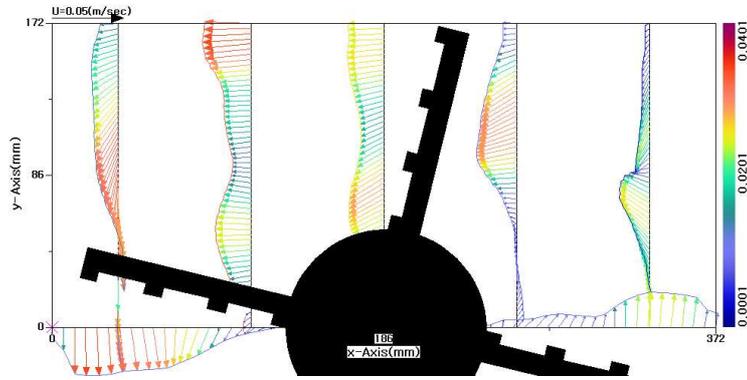
Fig. 3.20 case3에서의 계측결과



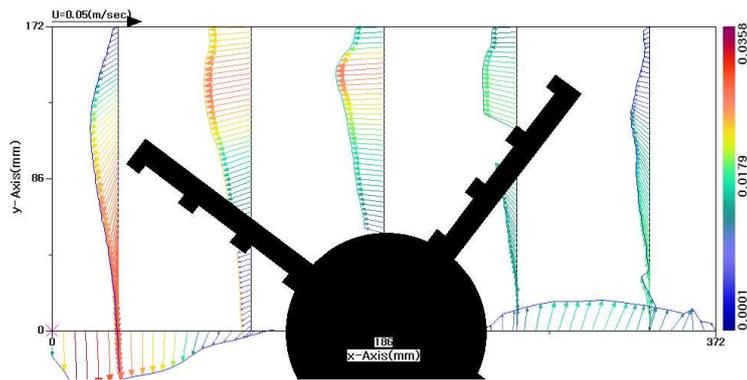
(a) 순간 속도벡터 분포



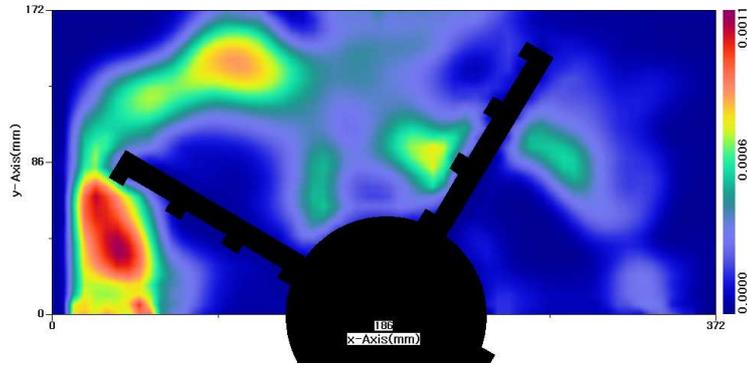
(b) 시간평균 속도벡터 분포



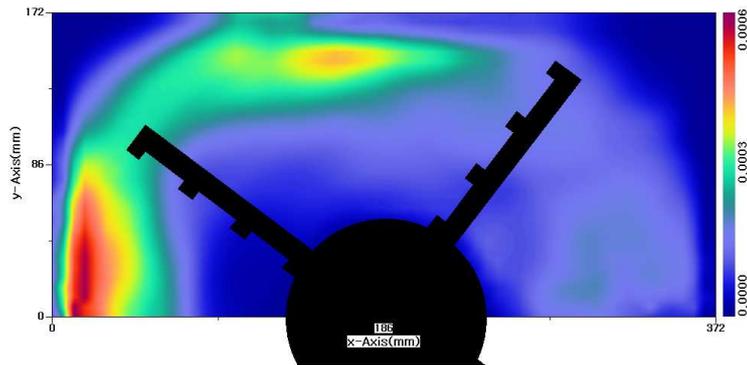
(c) 순간 속도프로파일



(d) 시간평균 속도프로파일

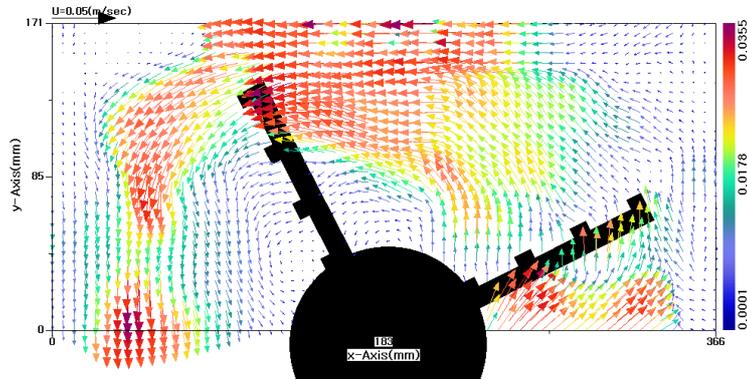


(e) 순간 운동에너지 분포

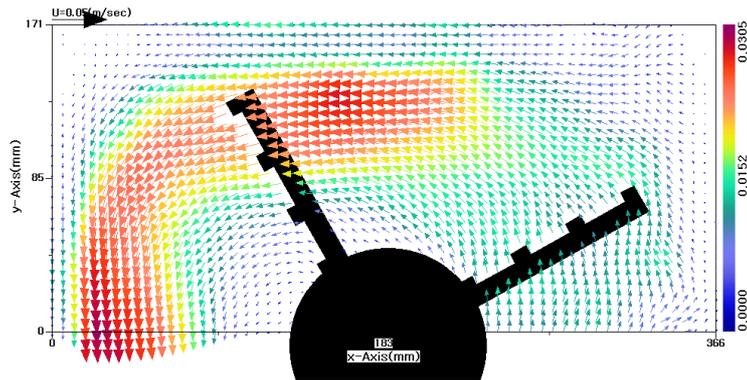


(f) 시간평균 운동에너지 분포

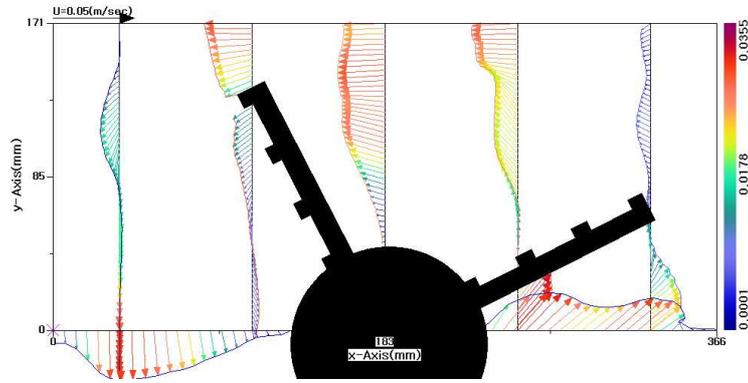
Fig. 3.21 case4에서의 계측결과



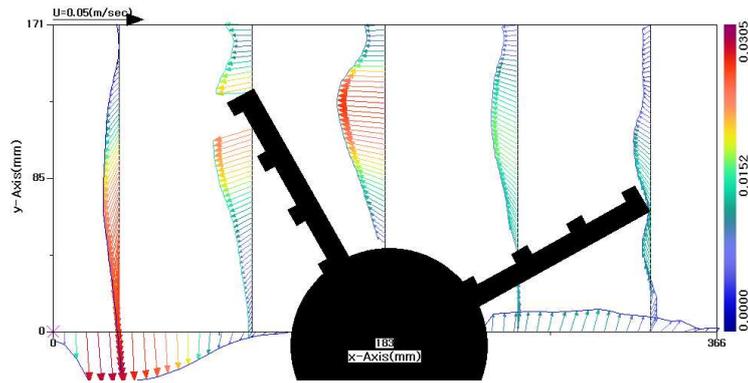
(a) 순간 속도벡터 분포



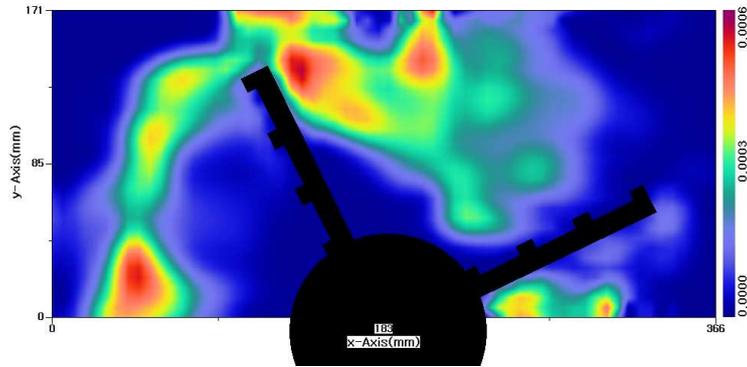
(b) 시간평균 속도벡터 분포



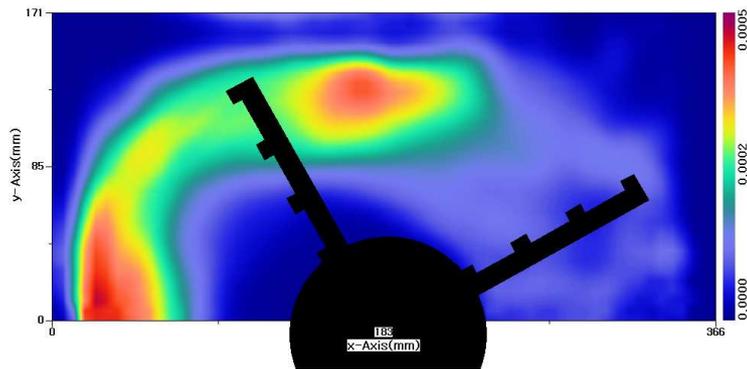
(c) 순간 속도프로파일



(d) 시간평균 속도프로파일

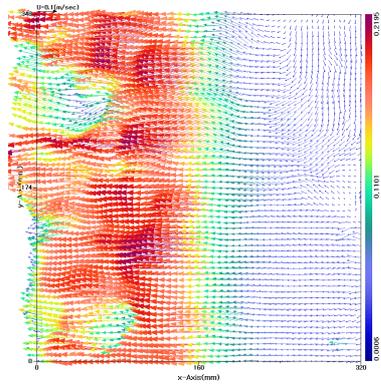


(e) 순간 운동에너지 분포

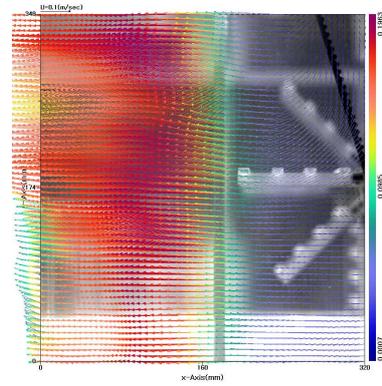


(f) 시간평균 운동에너지 분포

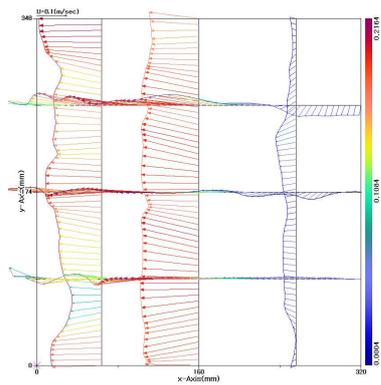
Fig. 3. 22 case5에서의 계측결과



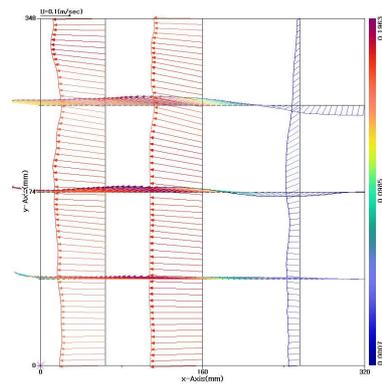
(a) 순간  
속도 벡터 분포



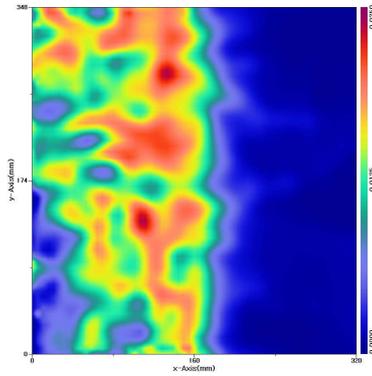
(b) 시간평균  
속도 벡터 분포



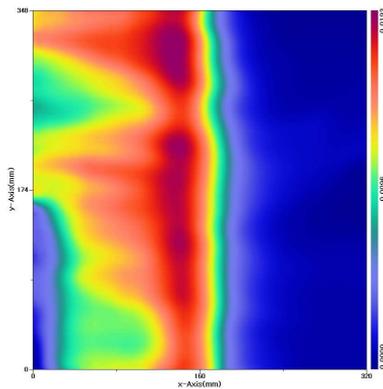
(c) 순간 속도프로파일



(d) 시간평균  
속도프로파일



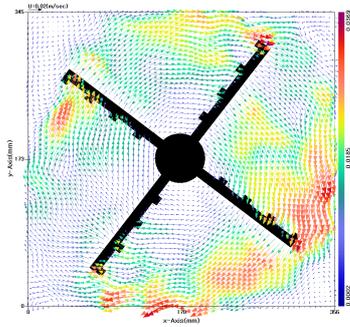
(e) 순간  
운동에너지 분포



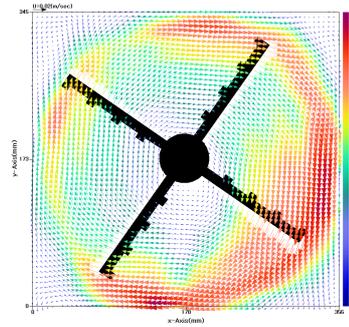
(f) 시간평균  
운동에너지 분포

Fig. 3.23 case6에서의 측정결과

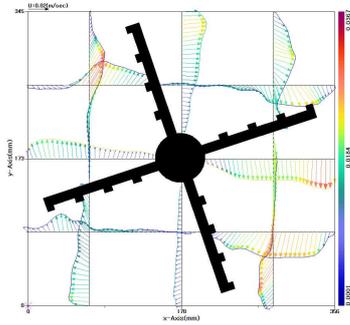
2) 교반기 시계방향 회전  
 2-1) 유입유량=0 (1단)



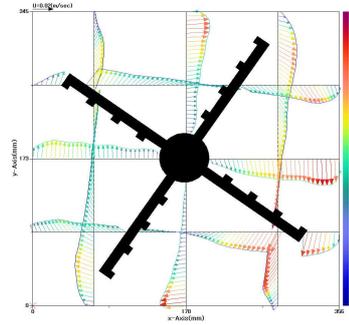
(a) 순간  
 속도벡터 분포



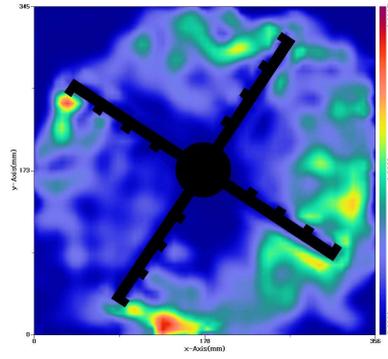
(b) 시간평균  
 속도벡터 분포



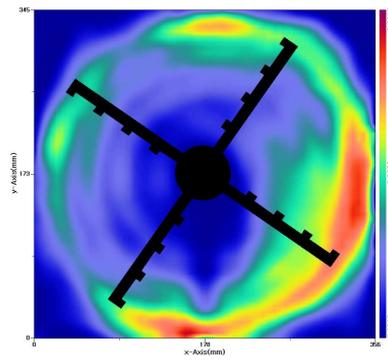
(c) 순간 속도프로파일



(d) 시간평균  
 속도프로파일

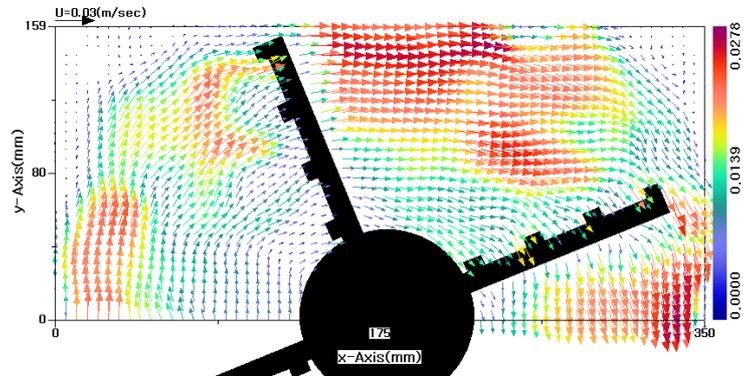


(e) 순간 운동에너지 분포

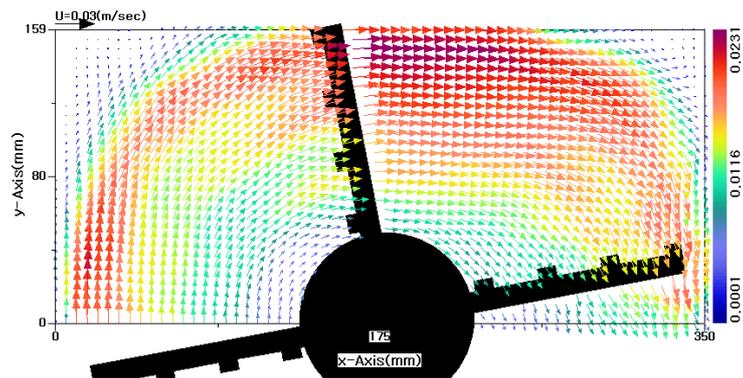


(f) 시간평균  
운동에너지 분포

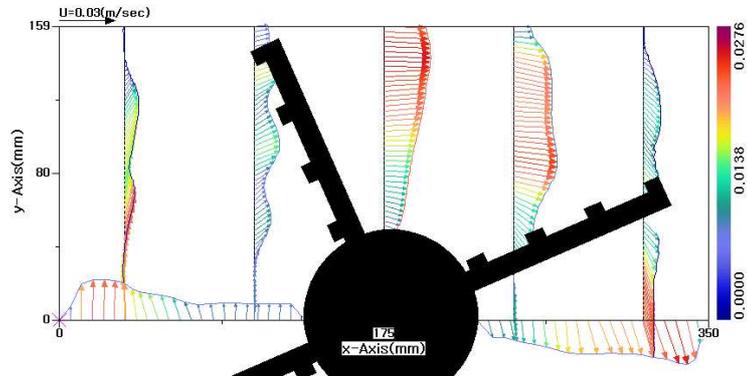
Fig. 3. 24 case1에서의 계측결과



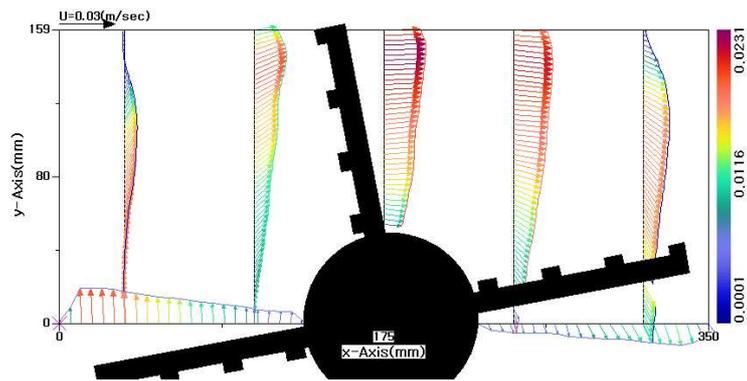
(a) 순간 속도벡터 분포



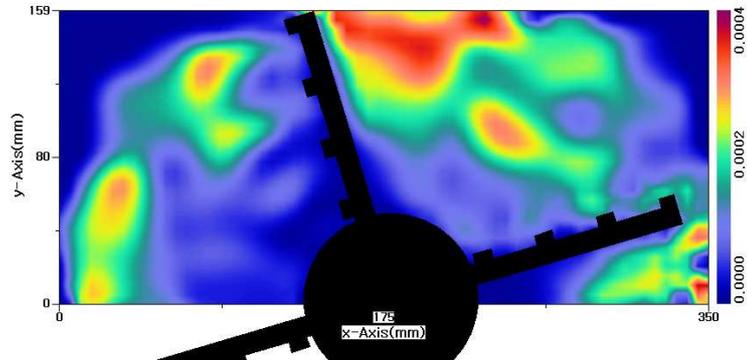
(b) 시간평균 속도벡터 분포



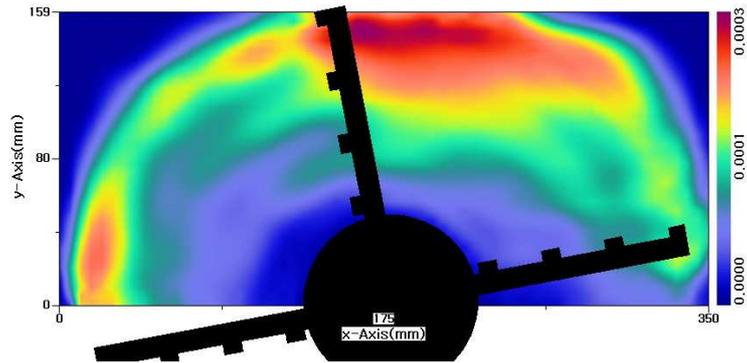
(c) 순간 속도프로파일



(d) 시간평균 속도프로파일



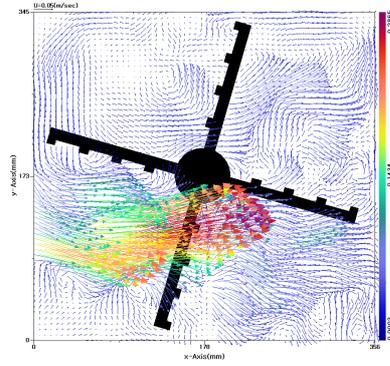
(e) 순간 운동에너지 분포



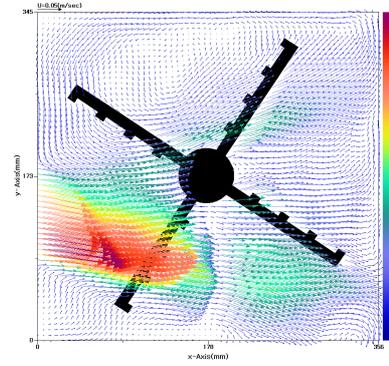
(f) 시간평균 운동에너지 분포

Fig. 3. 25 case3에서의 계측결과

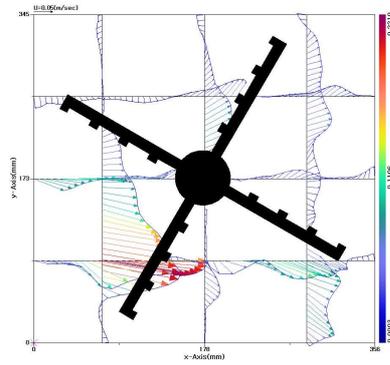
2-2) 유입유량=0.464(liter/sec) (1단)



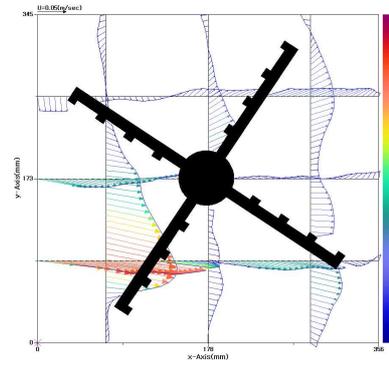
(a) 순간 속도벡터 분포



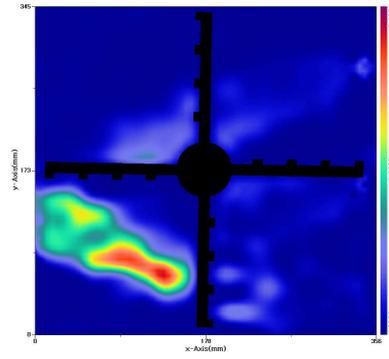
(b) 시간평균  
속도벡터 분포



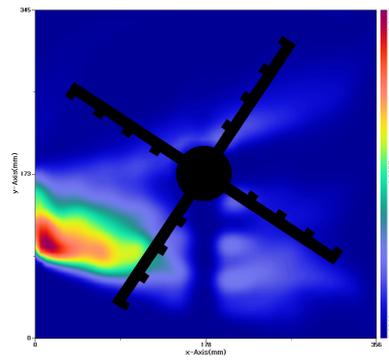
(c) 순간 속도프로파일



(d) 시간평균 속도프로파일

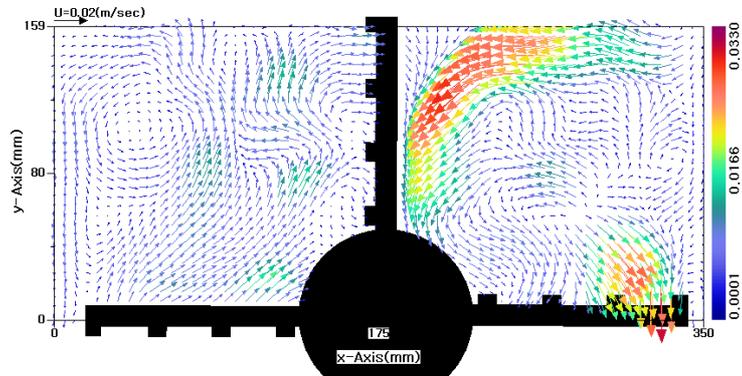


(e) 순간 운동에너지 분포

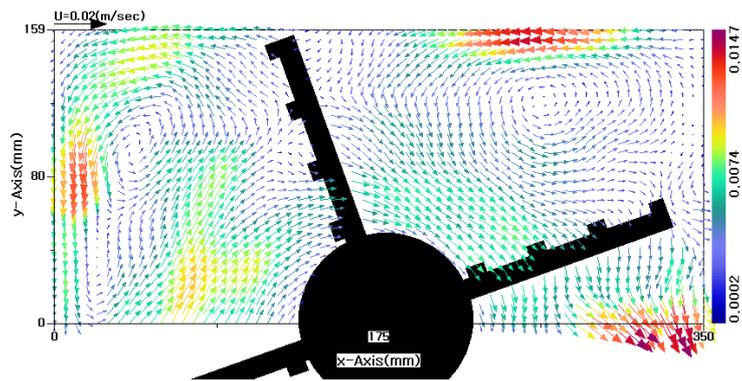


(f) 시간평균  
운동에너지 분포

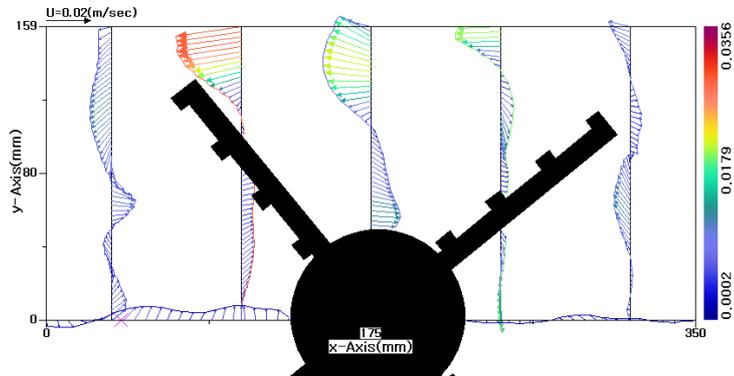
Fig. 3. 26 case1에서의 계측결과



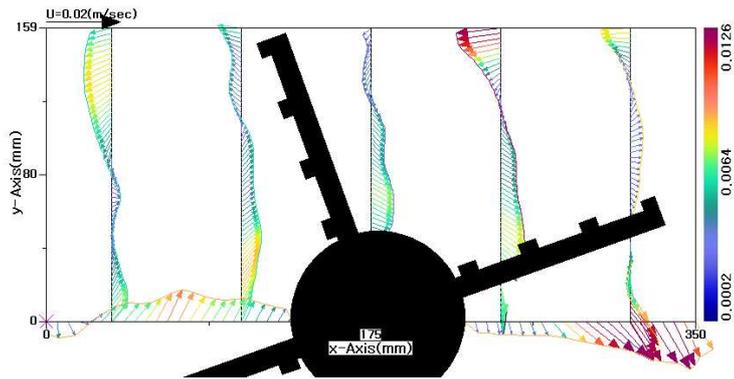
(a) 순간 속도벡터 분포



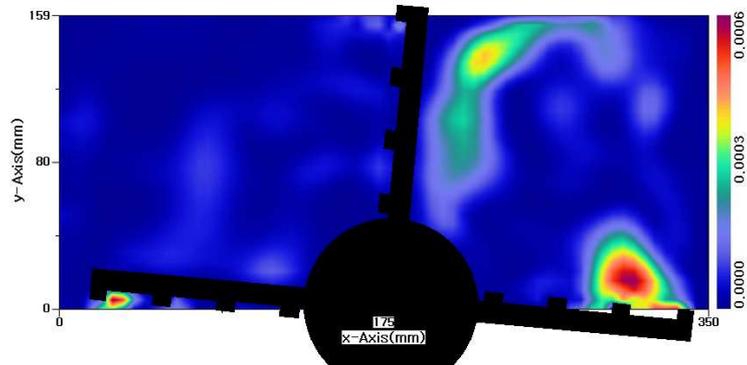
(b) 시간평균 속도벡터 분포



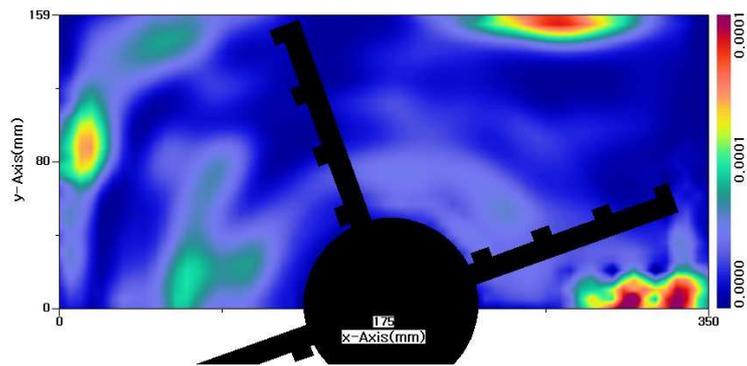
(c) 순간 속도프로파일



(d) 시간평균 속도프로파일



(e) 순간 운동에너지 분포

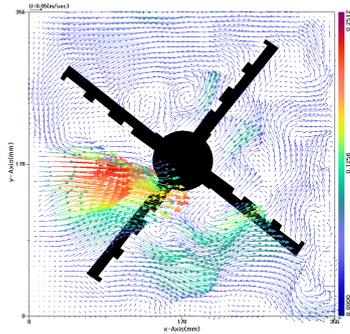


(f) 시간평균 운동에너지 분포

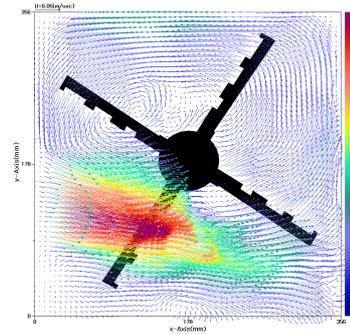
Fig. 3.27 case3에서의 계측결과

### 3.3.5 부등폭 블레이드

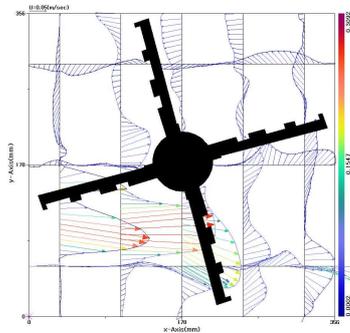
#### 1) 1단 (반시계방향)



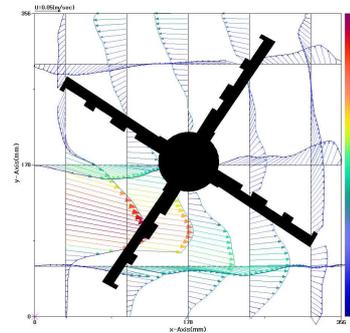
(a) 순간 속도벡터 분포



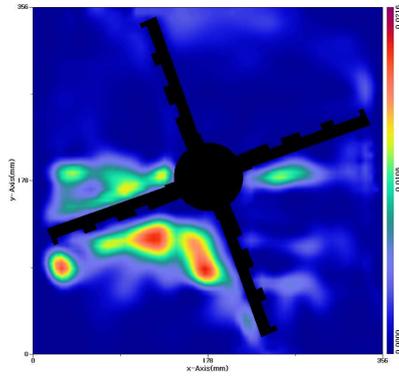
(b) 시간평균  
속도벡터 분포



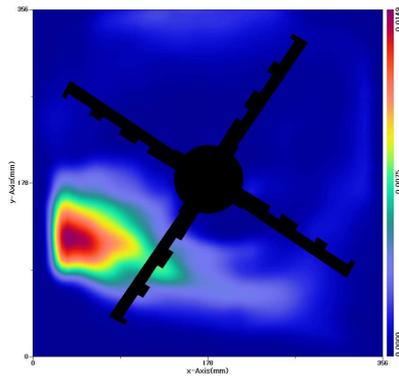
(c) 순간 속도프로파일



(d) 시간평균  
속도프로파일

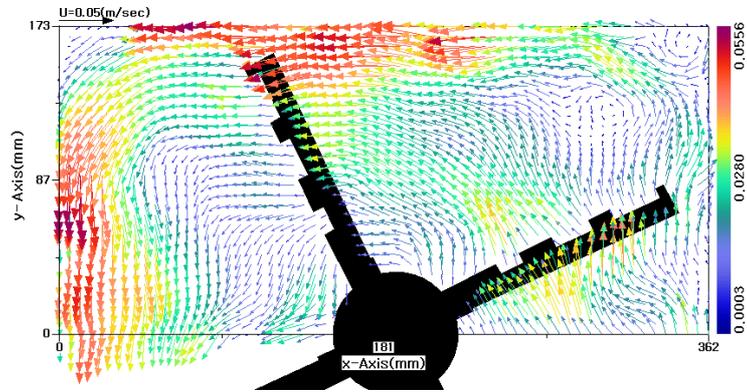


(e) 순간 운동에너지 분포

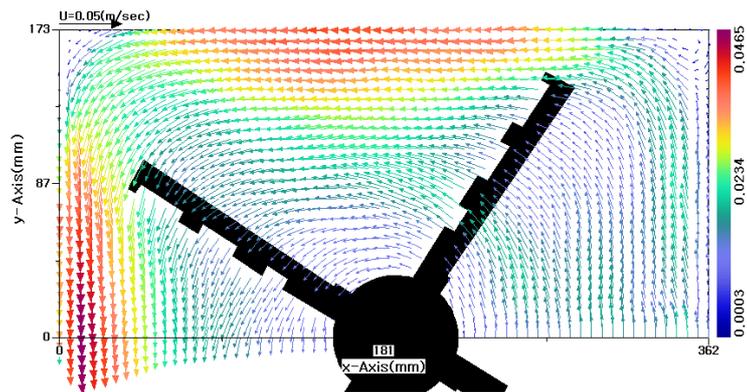


(f) 시간평균  
운동에너지 분포

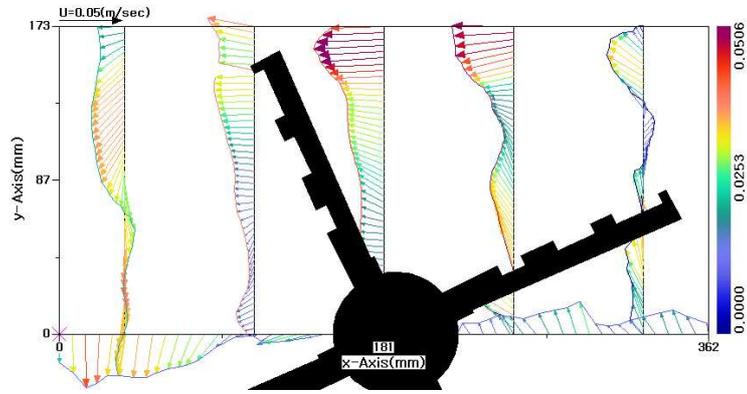
Fig. 3.28 case1에서의 계측결과



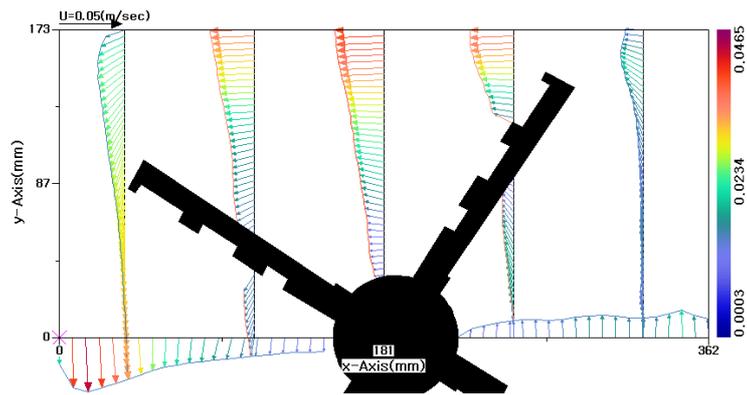
(a) 순간 속도벡터 분포



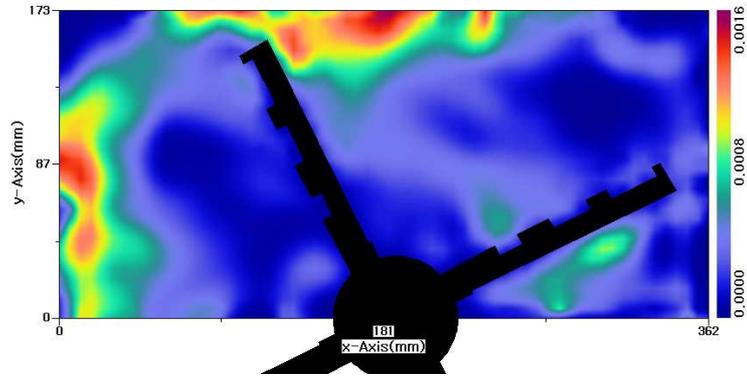
(b) 시간평균 속도벡터 분포



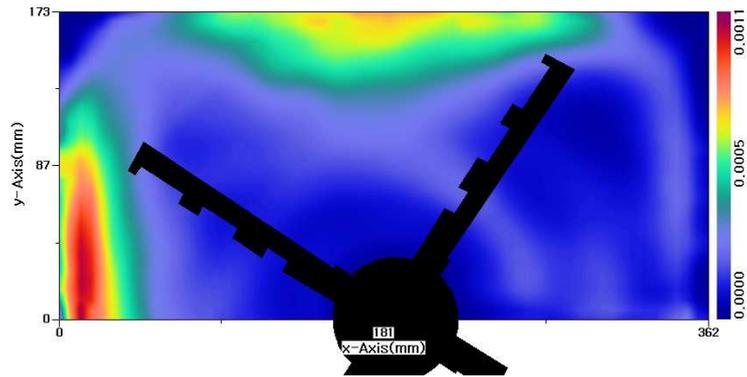
(c) 순간 속도프로파일



(d) 시간평균 속도프로파일

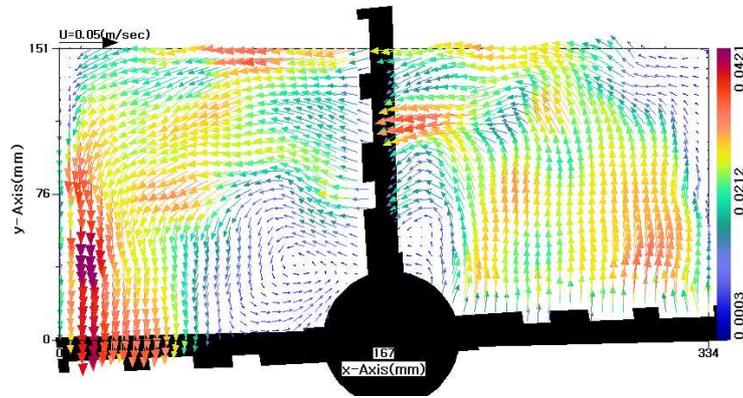


(e) 순간 운동에너지 분포

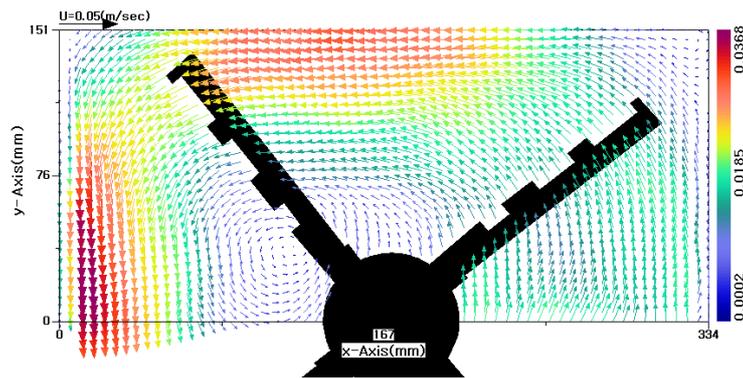


(f) 시간평균 운동에너지 분포

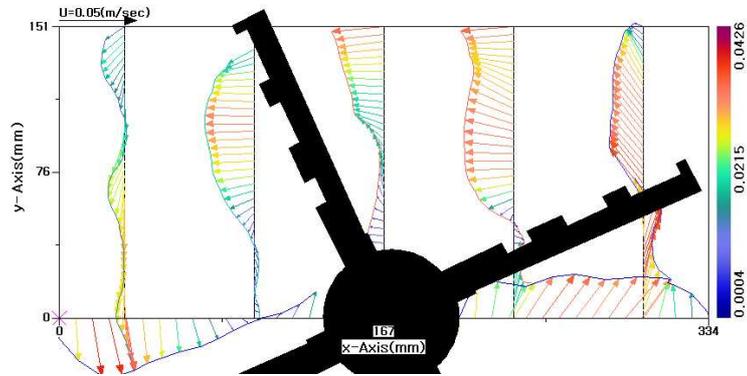
Fig. 3.29 case3에서의 계측결과



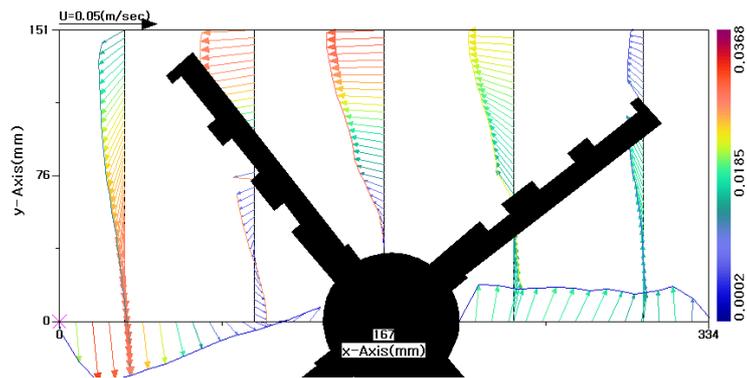
(a) 순간 속도벡터 분포



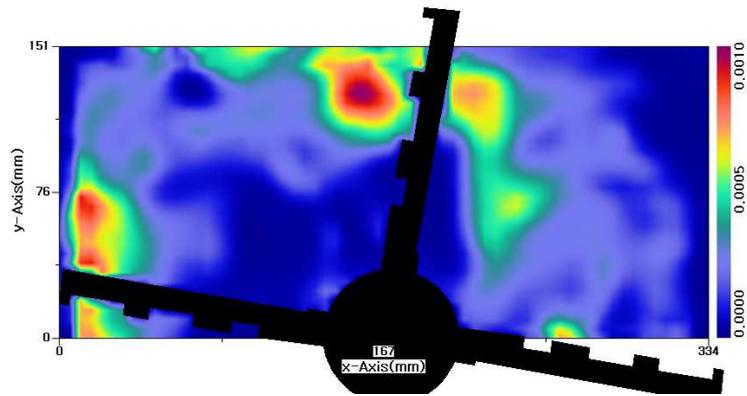
(b) 시간평균 속도벡터 분포



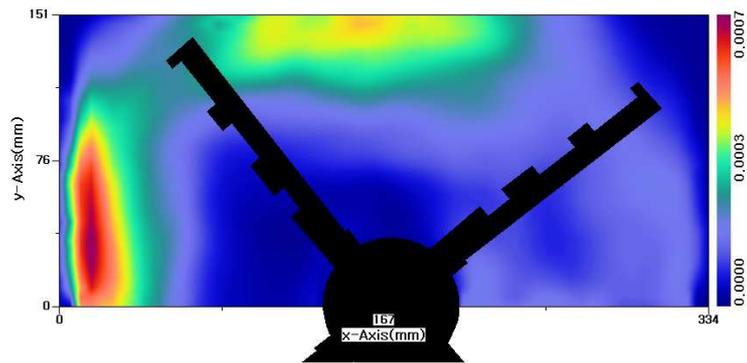
(c) 순간 속도프로파일



(d) 시간평균 속도프로파일

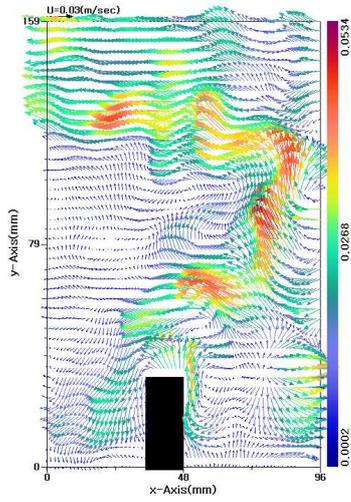


(e) 순간 운동에너지 분포

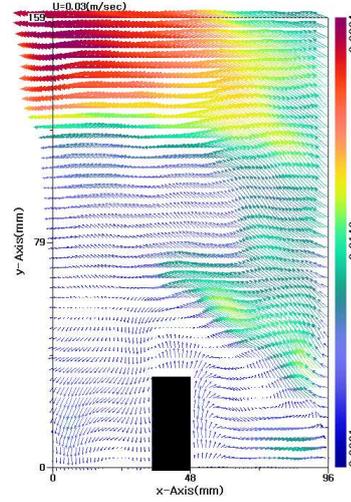


(f) 시간평균 운동에너지 분포

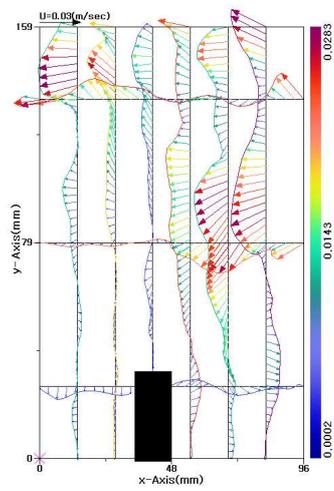
Fig. 3.30 case4에서의 계측결과



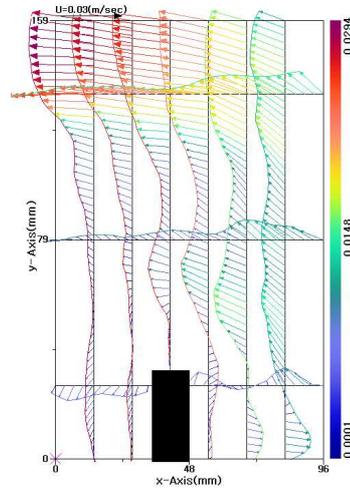
(a) 순간 속도벡터 분포



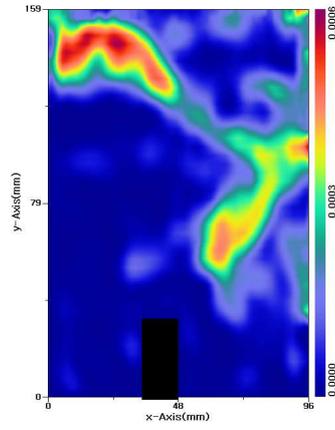
(b) 시간평균  
속도벡터 분포



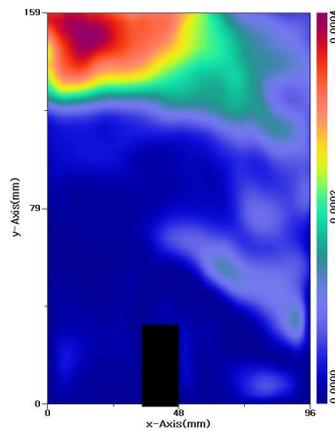
(c) 순간 속도프로파일



(d) 시간평균  
속도프로파일



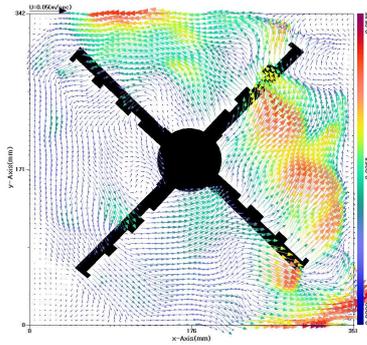
(e) 순간  
운동에너지 분포



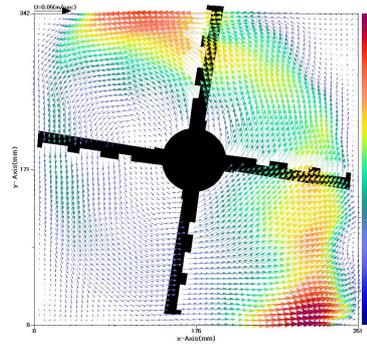
(f) 시간평균  
운동에너지 분포

Fig. 3.31 case7에서의 계측결과

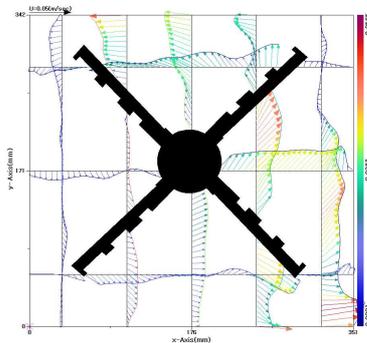
## 2) 3단(반시계방향)



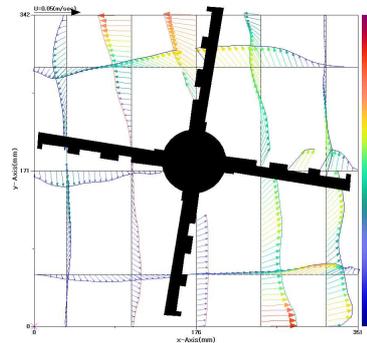
(a) 순간 속도벡터 분포



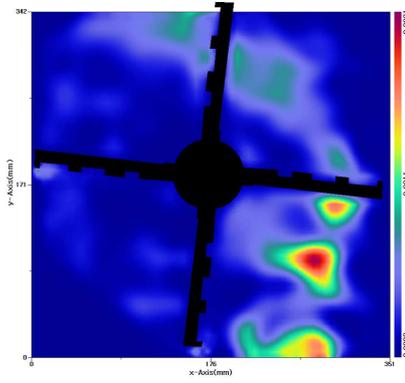
(b) 시간평균 속도벡터 분포



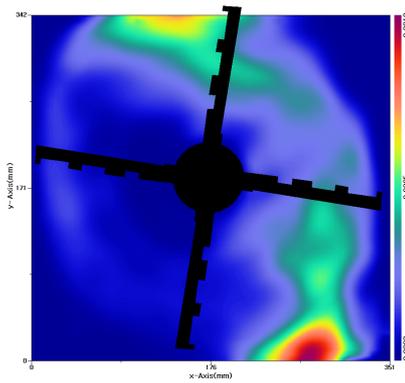
(c) 순간 속도프로파일



(d) 시간평균 속도프로파일

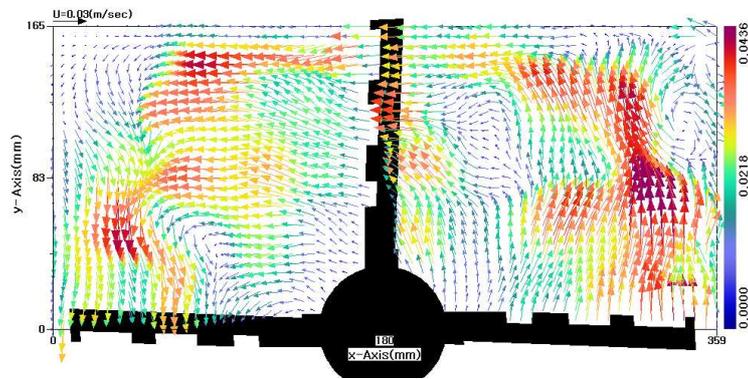


(e) 순간 운동에너지 분포

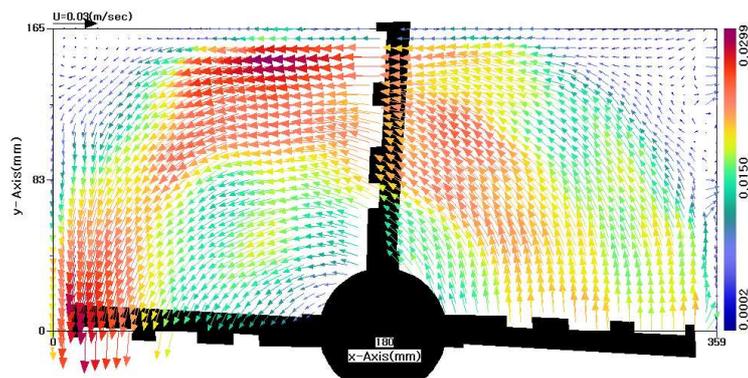


(f) 시간평균  
운동에너지 분포

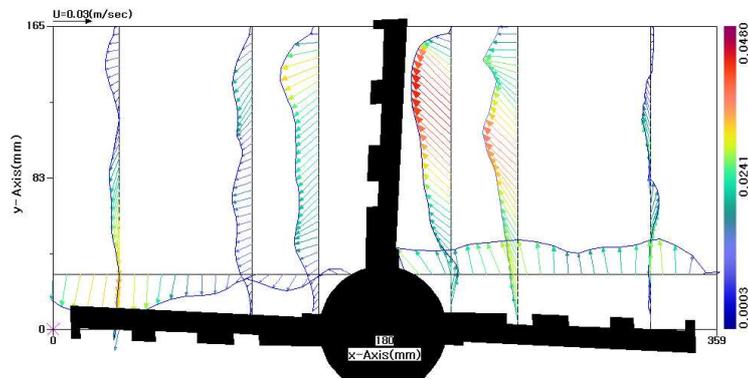
Fig. 3.32 case1에서의 계측결과



(a) 순간 속도벡터 분포



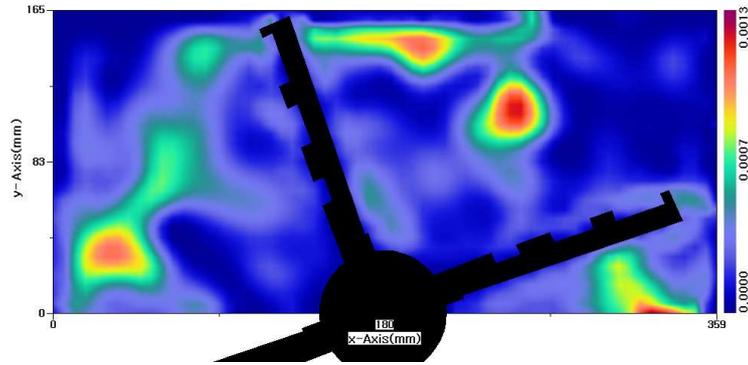
(b) 시간평균 속도벡터 분포



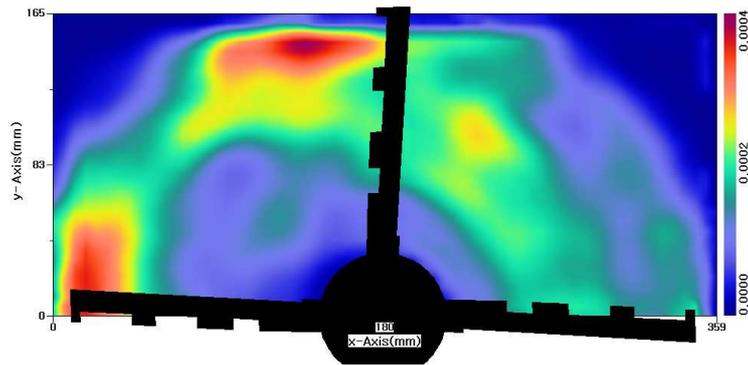
(c) 순간 속도프로파일



(d) 시간평균 속도프로파일

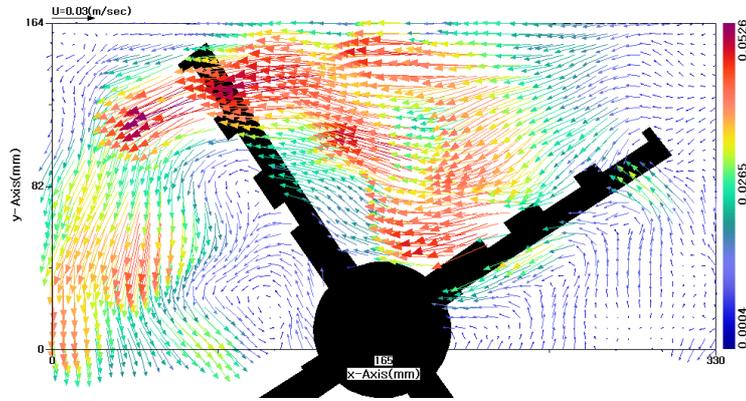


(e) 순간 운동에너지 분포

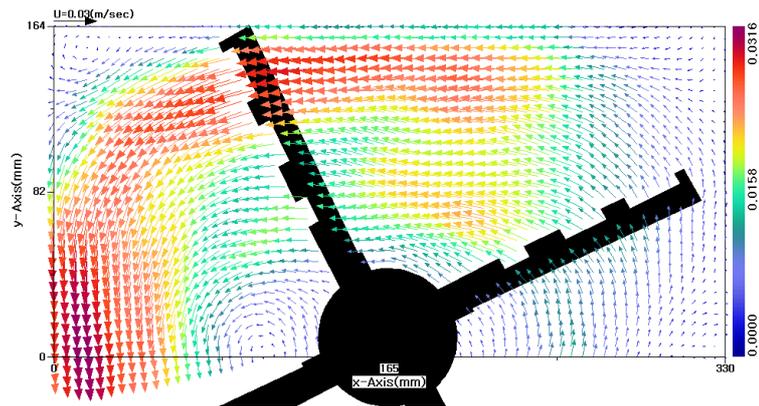


(f) 시간평균 운동에너지 분포

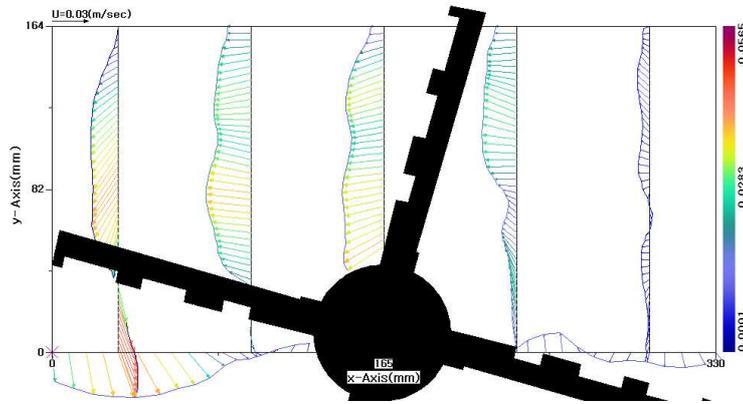
Fig. 3.33 case3에서의 계측결과



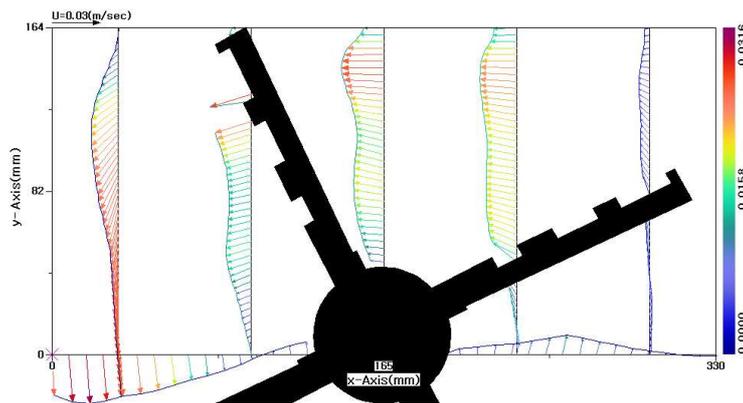
(a) 순간 속도벡터 분포



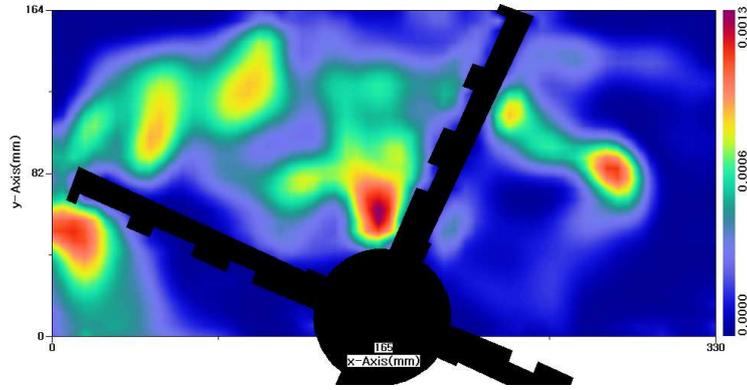
(b) 시간평균 속도벡터 분포



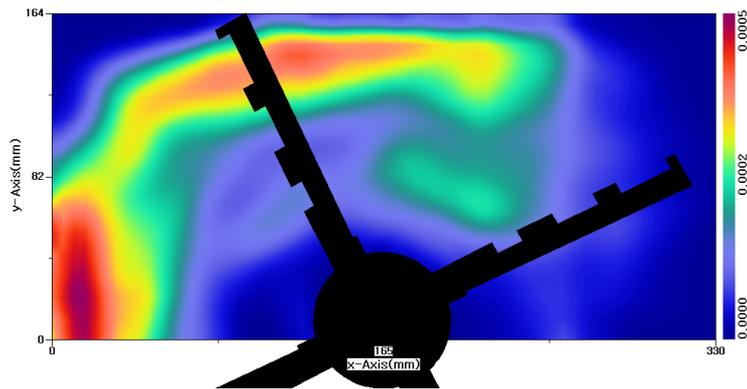
(c) 순간 속도프로파일



(d) 시간평균 속도프로파일

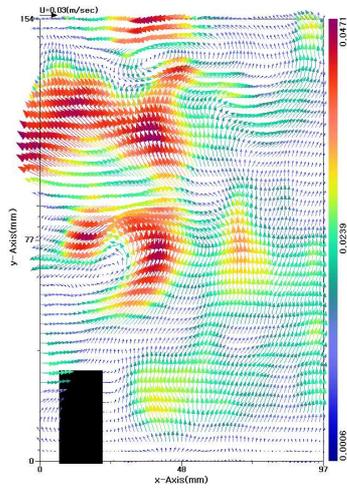


(e) 순간 운동에너지 분포

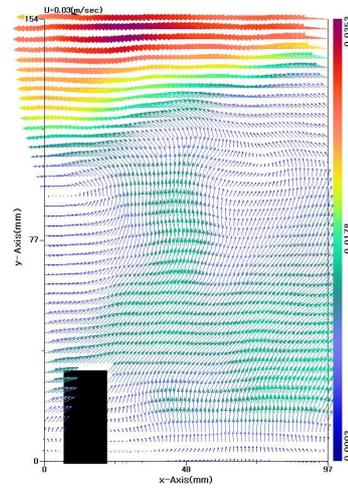


(f) 시간평균 운동에너지 분포

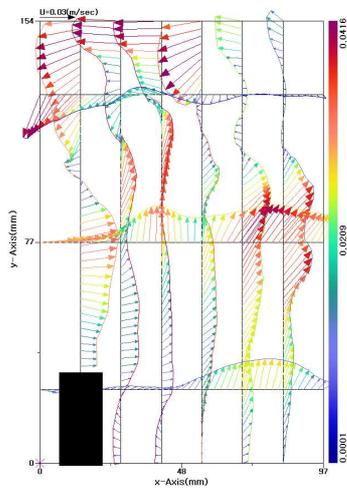
Fig. 3.34 case4에서의 계측결과



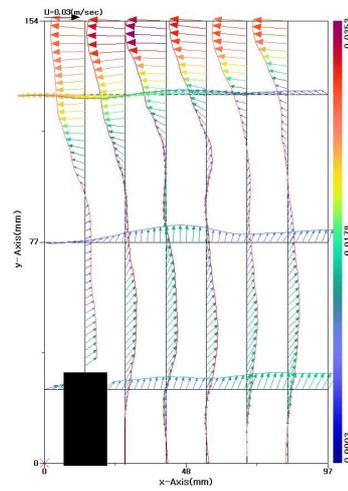
(a) 순간 속도벡터 분포



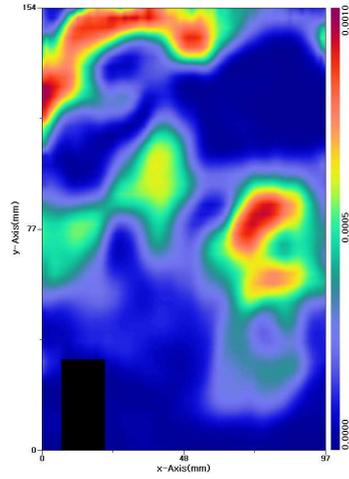
(b) 시간평균  
속도벡터 분포



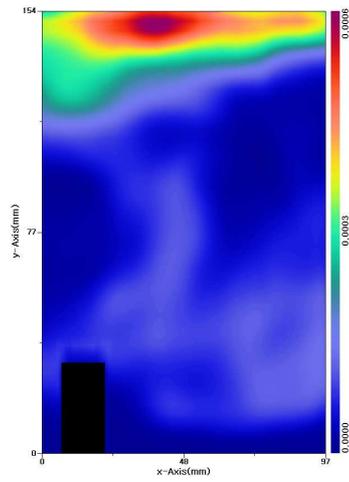
(c) 순간 속도프로파일



(d) 시간평균  
속도프로파일



(e) 순간 운동에너지 분포



(f) 시간평균 운동에너지 분포

Fig. 3.35 case7에서의 측정결과

### 3.3.6 검토

Fig. 3.13부터 Fig. 3.17까지는 등폭 블레이드의 교반기모델을 1단에 넣고 유입유량=0 에서 실험을 한 결과이다. 회전방향은 반시계 방향이다(Fig. 3.6 camera2에서 바라본 방향). 그림(d)의 시간평균 속도 프로파일에서 보면 교반기가 존재하는 case에서는 강제와류와 유사한 형태의 속도분포가 나타나고 있다. 이것은 유입흐름이 없는 상태에서의 결과이므로 대체로 무한공간에서의 강제와류와 유사한 유동특성을 보여주고 있다.

Fig. 3.18부터 Fig. 3.23까지는 상기조건과 동일하나 유입유량(모델, 0.464 liter/sec)이 존재하는 경우이다. 실제로 교반기의 회전방향과 직각방향으로 우류식의 흐름이 존재함으로써 내부 유동은 보다 복잡하게 발달하고 있다. Fig. 3.18은 case1 단면으로서 유입구 중앙에서 유입되는 흐름의 영향이 강하고 나타나고 있다. 또한, case2 (Fig. 3.19)에서는 그림(b)에서와 같이 시간평균 속도벡터에서 강제와의 중심이 좌상방으로 편재하고 있으며, 속도프로파일에서 자유표면에서의 흐름이 강하게 나타나고 있다. case3(Fig. 3.20)에서는 다시와의 중심이 회전축 근처에 존재하며, case4(Fig. 3.21), case5(Fig. 3.22)에서도 유사한 패턴을 유지하고 있다. Fig. 3.23은 1단과 2단사이의 우류식 slit 흐름이며 시간평균 속도프로파일에서 보면 거의 균일하게 유출되는 특성을 잘 나타내고 있다.

Fig. 3.24부터 Fig. 3.27까지는 1단에서 교반기의 회전방향을 시계 방향으로 운전한 결과이다. 유입유량이 0일 때는 회전방향에 따른 유동장의 차이는 거의 없음을 알 수가 있으나, 유입유량이 존재하는 경우에는 속도변동이 보다 크게 나타남을 알 수가 있다. 그러나 이것은 유입구가 존재하는 1단에서의 결과이며, 다른 단에서는 회전방향에 따라서 유동장의 변화가 크지는 않을 것으로 예상된다.

Fig. 3.28부터 Fig. 3.31까지는 1단에서 반시계방향으로 유입유량 존재 하에서 부등폭의 블레이드를 사용한 결과이나, 앞서의 등폭 블레이드의 결과와 비교하여 보면 유동장의 형태에서 뚜렷한 차이점은 발견되지 않는다. 이것은 동일한  $G$ 값을 얻을 수 있는 두 가지 형태의 블레이드 배치에 있어서 축 가까이에 보다 넓은 블레이드를 설치함으로써 국부적인  $G$ 값을 크게 하여 *dead zone*의 감소를 목적으로 하고 있으며 실제 응집지에서는 효과가 있을 것으로 판단된다.

Fig. 3.32부터 Fig. 3.35까지는 교반기 모델을 1단에서 3단으로 옮기고 유량유입 및 반시계 방향 회전 조건에서의 결과이다. 3단에서는 4단 방향으로 우류식의 slit대신 정류공이 설치되어 있는 점이 다르다. 그러나 유동장은 1단에서와 크게 다르지 않다.

전반적으로 모든 경우에서 교반기의 회전에 의한 강제와류의 유동이 지배적이며, 1단에서는 유입구 단면근처(*case1*)에서 교반기 회전 방향에 따른 유동장 변화가 크게 나타나고 있었으며, slit(*case6*)에서의 유출은 균일한 분포를 나타내었다. 순간유동장 속도벡터분포에서의 블레이드전방 국소속도와 블레이드의 회전원주속도를 비교함으로써 속도수정계수를 추정할 수 있으나, 계측단면의 부족으로 엄밀한 산정이 어려웠다. 속도프로파일상에서 추정하여 보면 대략 0.6~0.7전후로 보여지나, 정확한 값의 도출을 위하여는 체계적인 보완실험이 요구된다.

## 4. 결론 및 제언

1. 기존 문헌 및 기술자료에서 제시하고 있는 교반강도(속도경사) 값  $G$ 의 산출 및 소요동력 산정식의 오류를 수정하고 근거를 제시하였다.
2. 응집지의 온도변화 및 요구  $G$ 값에 해당하는 교반기의 회전수를 자동으로 계산할 수 있는 프로그램을 제작하여 조건표를 작성하였다(동일  $G$ 값을 갖는 등폭/부등폭 패들 블레이드 형상 조건).
3. 1/10 축소 응집지 모델을 제작하고 PIV 계측을 통하여 유동장의 해석을 수행하여, 유입유량 존재유무, 교반기 회전방향 전환, 1단~3단에서의 비교, 블레이드의 등폭-부등폭에 따른 유동특성을 고찰하였다.
4. 전반적으로 교반기의 회전에 따른 강제와류의 특성이 크게 나타났으며, 우류식slit에서의 유출은 비교적 균일한 분포를 나타내었다.
5. 속도수정계수는 PIV 시간평균 속도프로파일로부터 개략적으로 0.6~0.7 전후로 추산된다(기존문헌에서는 0.5~0.75 범위임).
6. 모델실험에서는 발생하는 토오크의 값이 매우 미약하여 계측이 매우 어려웠으므로, 지금보다 2~3배 큰 규모에서 실험을 수행하여야 정확한 소요동력이 예측될 수 있으며, *scale-up* 실험에서의 신뢰성이 확보될 수 있을 것으로 예상된다.
7. 본 연구를 토대로 하여 플록형성이 실제로 가능한 중규모의 응집지 실증실험을 수행한다면, 보다 효율적인 응집을 위한 최적의 교반기 설계, 응집지 설계변수 및 최적 운전조건의 도출이 가능할 것으로

예상한다.

8. 향후, 저항식 패들형과 원심임펠러식 교반기와의 비교 검토, 혼화기의 유동조건을 고려한 전체 응집효율 검토 등이 필요하다.

## 참고문헌

- [1] 김홍석, 한무영, “정수시설의 종합설계와 유지관리”, 대한상하수도학회, 2003년, pp81~195, 690~706
- [2] 한국수자원공사, “정수처리시설 설계지침”, 2004년, 제4장 정수처리시설 설계
- [3] *young-ho LEE, jang-won CHOI, "An Introduction to PIV(Particle Image Velocimetry)", 1991, Flow Informatics Lab, Korea maritime univ. & Image Lnformation Technology Co.. LTD*
- [4] *sang-joon LEE, "PIV/PTV Velocity Field Mesurement Technique-Theory and Practicle" 2001년, National Research Laboratory(Flow Visulation) BK21 School of Mechanical & Industrial Engineering Pohang University of Science and Techonolgy.*
- [5] 김찬중, “길잡이 전산유체역학 ”, 문운당, 2002년, pp 221~252.

## 감사의 글

올 겨울은 유난히 춥다.

하지만 따뜻한 마음을 가진 분들이 저 주위에 많이 있기에 이 겨울도 견딜 만 합니다.. 이영호 지도 교수님, 남청도 위원장님, 김유택 위원님, 김범석 박사, 그리고 연구실 후배들에게 이 지면을 빌어 고마움을 전합니다.

어디서 어떤 위치에 있더라도 가끔식은 학위를 위해 도움을 주신 사람들을 생각하며 살아 가고자 합니다.

2005. 12. 27.

박 영 근