

공학석사 학위논문

Fuzzy 알고리즘을 이용한 PTV측정법의 개발에 관한 연구

A Study on the Development of PTV using Fuzzy Algorithm

지도교수   도   덕   희

2004년   2월

한국해양대학교 대학원

냉 동 공 조 공 학 과

우 장 덕

본 논문을 우장덕의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장    공학박사    최 형 식    인

위    원    공학박사    김 동 혁    인

위    원    공학박사    도 덕 희    인

2003년 12월 19일

한국해양대학교    대학원

냉동공조 공 학 과

# Contents

Abstract

Contents

List of Tables

List of Figures

Nomenclature

<b>제 1 장 서론</b> .....	<b>1</b>
1.1 연구 배경 .....	<b>1</b>
1.2 연구 목적 .....	<b>3</b>
<b>제 2 장 PTV계측시스템</b> .....	<b>4</b>
2.1 PTV계측법의 개요 .....	<b>4</b>
2.2 PTV시스템 구성 .....	<b>5</b>
2.3 PTV계측알고리즘 .....	<b>7</b>
<b>제 3 장 Fuzzy 알고리즘을 이용한 PTV</b> .....	<b>13</b>
3.1 일반적인 Fuzzy 알고리즘 .....	<b>13</b>
3.2 PTV를 위한 Fuzzy 알고리즘 .....	<b>16</b>

<b>제 4 장 DNS 난류 채널 유동</b> .....	<b>39</b>
4.1 DNS 가상 영상의 생성 .....	39
4.2 DNS 난류 채널 계산결과 .....	42
<b>제 5 장 결론</b> .....	<b>53</b>
<b>참고 문헌</b> .....	<b>55</b>

# **A Study on the Development of PTV using Fuzzy Algorithm**

**by**

**Jang Duk, Woo**

**Department of Refrigeration and Air Conditioning Engineering  
Graduate School Korea Maritime University**

## **Abstract**

PTV can not only probe small scaled eddy structures but also provide spatial information of velocity vectors over the whole flow field. For these reasons, PTV(Particle Tracking Velocimetry) is now widely used in the field of fluid engineering. However, some erroneous vectors are obtained during PTV calculation for the algorithms adopted in the PTV techniques. The main source of the erroneous vectors is the paring method. To obtain the velocity vector distribution, correct particle paring should be made in PTV. Since there are numerous particle images on the two images used for PTV calculation, it is not so easy to identify the same particle between the two images.

In this paper, a new idea based on Fuzzy Theory is adopted to PTV so that the number of correct pairs of particles becomes as much as higher than those of GA-PTV. Mamdani method which is most widely used is used for the calculation of Fuzzy-PTV.

It was verified that the velocity vectors obtained by the constructed Fuzzy-PTV belonged to the original vector data used for the test, which implies that the constructed algorithm is available for the measurement of fluid flows.

## List of tables

Table 2.1 PTV measurement algorithms

Table 3.1 The rule bases for fuzzy PTV calculation

Table 3.2 Input data

Table 3.3 Matching vector number(N)

Table 3.4 Relative error(%) in particle number(N)

Table 4.1 Vector recovery ratio(%) according to distance

## List of figures

- Fig. 2.1 Two consecutive particle images according to the time
- Fig. 2.2 Image viewed by camera
- Fig. 2.3 Obtained 2-D velocity vectors using GA-algorithm
- Fig. 3.1 Crisp set and fuzzy set
- Fig. 3.2 Schematic diagram of inputs
- Fig. 3.3 Schematic diagram of diameter
- Fig. 3.4 The input membership functions
- Fig. 3.5 Particle pairing with fuzzy PTV
- Fig. 3.6 Fuzzy-controller basic rule
- Fig. 3.7 Flowchart of fuzzy in PTV
- Fig. 3.8 The instantaneous vector (2000, 3000, 4000, 5000) using GA
- Fig. 3.9 The instantaneous vector (2000, 3000, 4000, 5000) using Fuzzy
- Fig. 3.10 The error-removing vector (2000, 3000, 4000, 5000) using GA
- Fig. 3.11 The error-removing vector (2000, 3000, 4000, 5000) using Fuzzy
- Fig. 3.12 Interpolated vector (2000, 3000, 4000, 5000) using GA
- Fig. 3.13 Interpolated vector (2000, 3000, 4000, 5000) using Fuzzy
- Fig. 3.14 Matching vector (2000, 3000, 4000, 5000) using Fuzzy & GA
- Fig. 3.15 Relative error(%) (2000, 3000, 4000, 5000) using Fuzzy & GA
- Fig. 4.1 Raw image
- Fig. 4.2 Mean velocity profile of the interpolation files
- Fig. 4.3 Mean velocity profile

Fig. 4.4 Turbulent intensity profile

Fig. 4.5 Turbulence intensity distribution

$$\left( T_u = \frac{\sqrt{\overline{u'^2}}}{U_0}, T_v = \frac{\sqrt{\overline{v'^2}}}{U_0} \right)$$

Fig. 4.6 Reynolds shear stress distribution (RES=  $-\overline{u'w'}/U_0^2$ )

Fig. 4.7 Turbulence kinetic energy distribution(  $TKE = \frac{1}{2} \overline{q^2}/U_0^2$  )

Fig. 4.8 The instantaneous vector using fuzzy according to searching area

Fig. 4.9 Calculation domain according to searching area

Fig. 4.10 Vector recovery ratio(%) according to distance



## Nomenclature

Conf	: Confidence of the Vector
AngDif	: Angle Difference
SLR	: Search Length Region
Conf-Out	: Confidence Singletons

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구배경

유체역학은 가장 오래되고 모든 공학의 기초가 되는 중요한 물리학의 한 분야이다. 자연 현상이나 산업 현장에서 관찰되는 유동의 대부분은 비정상(unsteady) 난류 유동(turbulent flow)이다. 유동을 기술하는 유체역학의 기본방정식의 해는 Navier-Stokes 방정식의 발견 이래로 계속해서 탐구되고 있으며, 컴퓨터의 등장과 더불어 어떤 종류의 난해한 문제에 대해서도 기본 방정식을 모델화한, 수치적 계산한 전산 유체 역학(CFD), 실험적인 기법인 열선유속계, LDV(Laser Doppler Velocimetry)가 측정분야에서는 널리 적용되어져 왔다. 그러나 이러한 CFD는 모델화의 어려움, 식의 복잡함에 의한 계산 시간의 증가란 문제가 있고, 열선 유속계와 LDV는 측정대상공간에 대하여 한 점에 대한 정보만 얻을 수 있고, 측정기의 유동장에 직접 접촉에 의한 유동방해란 맹점이 있다. 그러한 이유로 최근 들어 컴퓨터와 전자산업의 발달과 화상처리기술이 발전함에 따라 동시 다점측정이 가능한 PIV(Particle Imaging Velocimetry), PTV(Paticle Tracking Velocimetry)속도장 측정기술이 매우 빠른 속도로 발전하여 이제는 복잡한 비정상(unsteady), 난류 유동(turbulent flow)의 유동 구조를 높은 공간분해능력으로 정확히 해석하는 기술이 10년간 발전되어져 왔다. 이러한 화상처리를 이용한 PIV/PTV 속도장 측정기법은 점점 발달되어 가는 컴퓨터 및 화상처리 장비 및 기술에 힘입어 점차 복잡한 열 유동 문제의 규명 및 유동구조의 물리적 진단에 있어서 효과적인 측정 방법이 될 것이다. PTV기법은 각각의 입자 궤적을 추적하는 방식으로 각 입자의 화상이 분별가능할 정도의 낮은 입자밀도를 가진 저밀도 PIV이다.

PIV/PTV 속도장 측정기법은 정확한 유동장계산과 계산 시간 단축을 위해 효과적인 알고리즘 개발이 필요하다. Chang과 Tatterson(1983)과 Chang et al.(1984)들은 다중사진기법으로 실용적인 속도계를 처음으로 고안하여 3차원성이 강한 유동의 난류 유동계측에 성공하였으나, 카메라의 작은 시선 각으로부터 얻어진 3차원 좌표에서 깊이 방향의 정확도가 떨어진다는 단점을 보였다.

Yamakawa 와 Iwashige(1986), Racca와 Dewey(1988), Adamczyk 와 Rimai(1988), Kobayashi 등(1989)은 두 대의 카메라를 계측영역에 대하여 직각 방향으로 설치함으로써 카메라의 좁은 시선 각으로 인한 깊이방향의 계측 오차를 줄였으나, 여전히 복잡한 유동장에서는 카메라의 위치선정이 까다로웠다. Kobayashi(1991)등은 이러한 단점을 극복하기 위해 AOM(Acousto Optical Modulator)이라 불리는 광학장치를 이용하여 4-Frame PTV 계측법을 구축하였으나, 결과가 2차원에 한정되었고, 계측 결과도 Baek and Lee(1996)의 2-Frame PTV알고리즘 보다 상대적으로 낮았다. 또한, Multi-Frame PTV방법은 여러 장의 연속적인 이미지를 사용하여 동일입자를 추적하는 알고리즘을 채택하고 있기 때문에 상대적으로 속도가 빠르거나 3차원성이 강한 복잡한 유동장에 적용하는 것은 거의 불가능하다. 이러한 단점을 극복하기 위해서 Doh(1996)등의 연구에서는 1-Frame 3-D PTV 알고리즘을 개발하였다. 최근에는 Adrian 등(1991)이 인간의 눈이 하나의 사물을 입체적으로 보는 원리를 이용한 스테레오스코픽(stereoscopic) 기법의 사용이 널리 보급되어 상용화되었다. 이는 2대의 카메라를 사용하여 PIV에 의한 두 개의 각각의 시각에서 바라본 2차원 벡터장의 계산결과를 매칭하여 3차원의 공간벡터를 얻는다. 그러나 스테레오스코픽의 경우 평면적인 벡터의 신뢰도는 우수하지만 유동장의 전역에 대한 순시벡터의 획득은 불가능하다. 위의 해석법 이외에 최근에 각광 받고 있는 자연세계의 진화현상인 적자생존에 기초한 최적화 알고리즘인 John Holland에 의해 개발된 유전적 알고리즘(Genetic Algorithm, GA)은 주어진 문제의 탐색공간 내에서 최적화 할 목적 함수에 대해 초기 해로부터 재생산(reproduction), 교배(crossover), 돌연변이(mutation)를 거쳐 새로운 자손을 인공적

으로 만들어 내고, 자연의 생물유전을 모방한 연산자들을 반복적으로 적용하여 적합한 해를 탐색한다. 이를 3차원 PTV에 적용하여 Doh, Cho(2000)은 이러한 유전적 알고리즘을 PTV에 적용하여 불림전체에 효과적으로 적용할 수 있는 GA-PTV 알고리즘을 개발하였으나, 세대수가 많아지면 그 만큼 계산 시간이 길어진다는 단점이 있다.

한편, Fuzzy 이론은 1965년 미국 버클리 대학의 L.A. Zadeh 교수에 의해 ‘퍼지 집합 이론(Fuzzy set theory)’이 처음으로 소개되어진 뒤 많은 분야에서 다용도로 그리고 빠르게 응용되어져 오고 있다. 퍼지 이론은 컴퓨터가 인공적인 지능을 가지고 인간의 의사대로 수행하기 위해서 인간이 사용하는 수치는 물론 언어적으로 애매한 표현들을 처리할 수 있도록 한다. 퍼지 논리에서는 어떤 집합이 완전히 속하면 1, 그 반대는 0, 그 이외에도 0과 1사이의 실수 값을 가지게 되며, 인간의 애매 모호한 상황도 표현할 수 있는 것이 퍼지 이론이다. 1974년 E.H. Mamdani에 의해 퍼지 제어기(FLC:Fuzzy Logic Controller)가 최초로 스팀 엔진에 도입된 이후, 자동제어, 전문가 시스템, 패턴 인식, 로봇등 전자, 기계분야 에서 널리 발전, 이용되어져 왔고, 입력성분의 잡음(noise)성분 제어에서 효과적인 알고리즘으로 알려져 있다.

## 1.2 연구 목적

본 연구에서는 PTV측정법에 있어서 가장 문제시되고 있는 2장 연속의 영상간의 입자들의 대응문제를 효과적으로 개선하기 위하여 퍼지이론을 도입한 PTV측정 알고리즘을 구축하는 것을 연구의 목적으로 삼고자 한다.

구체적으로는 이미지 사이의 입자 쌍의 불확실성, 입자들 간의 겹침 등과 같이 이미지 프로세싱의 입력성분의 불확실성을 해결, 계산시간단축하기 위하여 퍼지이론기반의 PTV알고리즘을 개발하고자 하고자 한다.

## 제 2 장 PTV계측시스템

### 2.1 PTV계측법의 개요

유동장에 떠돌아다니는 부유물 혹은 먼지의 움직임을 보면 개략적으로 유동의 유속을 알 수 있다. 이것은 태양의 빛이나 실내조명 등에 의하여 가시화된 부유물 혹은 먼지(추적입자)의 움직임을 인간의 눈으로 포착한 뒤 그 시각정보를 인간의 뇌가 적절히 처리하고 있기 때문이다. 이와 같은 일련의 작업과정이 카메라, 화상처리장치 및 컴퓨터의 구성에 의하여 이루어지는 것이 입자영상추적유속계(이하 PTV라 함, PTV:Particle Tracking Velocimetry)라고 한다.

가시화에 의한 유체계측법은 추적입자의 화면밀도(image-density)에 따라 분류되는데 추적입자의 화면밀도가 낮아 각각의 입자추적이 용이한 경우 Fig 2.2에 적용하는 방법이 PTV방법이다. 한편, 추적입자의 화면밀도가 높아서 각각의 입자추적이 용이하지 않는 경우에 적용하는 방법이 PIV(Particle Image Velocimetry)라고 한다.

PTV에서는 입자들 하나 하나의 움직임을 추적하므로 입자이미지의 중심위치데이터만 있으면 되며 이들 위치데이터를 2시각 이상에 걸쳐서 획득하여 입자추적을 실시하면 유속분포를 얻어낸다. 최근, 화상처리장치 및 주변기기의 발달에 힘입어 입자이미지의 위치정보를 거의 실시간으로 얻을 수 있게 되었다. PIV에서는 값비싼 레이저를 써야 만이 그 효용이 발휘하는데 반하여 PTV는 스트로보가 이용될 수 있다는 점으로부터 PIV에 관련된 연구를 개시하는 연구자에게는 초기도입이 용이한 측정법이다. PTV에는 속도2성분( $u, v$ ) 혹은 속도3성분( $u, v, w$ )이 얻어지느냐에 의하여 2차원 PTV와 3차원 PTV로 구분될 수 있다. 2차원 PTV는 단면형상의 광원 안에 나타난 입자의 움직임을 카메라로 촬영하여 이하에 기술된 여러 가지의 측

정알고리즘에 의하여 그 단면 내에서의 2차원 속도벡터분포를 측정하는 방법이다.

2차원 PTV를 보다 발전시킨 것이 복수대의 CCD카메라를 이용한 3차원 PTV로 보면 된다. 이것은 유동장의 입체적인 영역의 속도3성분을 동시에 측정하는 방법이다. 본 논문에서는 2차원에 관한 것에 국한하고자 한다.

## 2.2 PTV시스템 구성

PTV시스템은 PIV시스템과 그 구성이 거의 동일한데 촬영부, 기록부, 처리부, 조명부로 구성되어 있으며 목적과 예산에 맞추어 적절한 기기가 선택되고 있다.

촬영부로서는 고체촬상소자 (CCD: Charge Coupled Device)를 이용한 TV카메라가 주류를 이루고 있다. 시판되는 TV카메라를 이용하면, A/D변환해서 얻어진 화상 데이터는 512~640 x 480화소 정도의 분해능인데 최근에는 고해상도 TV카메라 혹은 디지털카메라가 등장하여 4,096 x 4,096 화소정도가 사용되고 있다. 전자기술의 발달로 촬영부의 용량 혹은 성능향상은 더욱더 가속화될 것으로 사료된다. 전술과 같이 2차원 PTV시스템은 카메라 1대를 사용하는 반면에 3차원 PTV시스템에서는 2대 이상의 카메라를 사용하고 있다. 2차원 시스템이라 할지라도 측정영역이 매우 넓은 경우에는 2대 이상의 카메라를 평행으로 배치하여 사용하는 경우(파노라믹, Panoramic PTV법이라고도 함)도 있다.

기록부로서는 여러 가지가 사용되고 있는데 일반적으로 촬영부의 성능에 맞추어 구성되고 있다. 촬영부가 NTSC방식의 TV카메라인 경우에는 가정용 VTR을 기록부로 쓰는 경우가 있는데 이것은 가끔씩 정확한 프레임제어가 되지 않아 PTV의 자동처리에 문제가 되는 경우가 있다. 이를 해결키 위하여 컴퓨터제어 가능한 전용 VTR이 사용되기도 한다. 한편, VTR의 테잎의 열화문제로 광디스크에 아날로그방식으로 실시간 저장이 가능한 광디스크가 사용되는 경우도 있는데 고가인 것이 단점으로 남아있다. 최근에는 컴퓨터자체의 메모리용량 향상 및 처리속도의 향상으

로 화상정보를 컴퓨터메모리에 직접 기록이 가능한 이미지그래버를 많이 쓰고 있는 추세에 있으며 앞으로도 고속대용량화가 가속되어 PTV알고리즘만 개선된다면 방대한 량의 실험데이터의 실시간 처리가 가능하게 될 것으로 사료된다.

처리부는 속도분포를 얻어내기 위하여 사용되는 화상처리장치(하드웨어부)와 알고리즘(소프트웨어부)으로 구성되는데, 하드웨어로서 매우 고가인 전용화상처리장치에서부터 컴퓨터용의 저렴한 이미지그래버까지 다양한 것이 시판되고 있다. 선정시 주의사항으로서 하드웨어구입시 딸려있는 소프트웨어의 충실도인데 일반적으로 이는 가격에 비례하므로 기본 소프트웨어개발에 어디까지 시간을 투입할 것인가를 고려하여 선택하여야 한다. 최근에는 개인용컴퓨터상에서 PTV를 위하여 필요하게 되는 기본화상처리(배경처리, 입자중심계산)가 가능하도록 되어 있는 화상처리장치도 시판되고 있다. 또한, 연구환경에 따라 고해상도카메라 혹은 여타 다른 고기능의 카메라를 사용할 경우 그들에 대응한 처리부를 선택할 필요가 있다. 예를 들면, 디지털카메라에서는 화상데이터가 직접 컴퓨터에 전송되므로 인터페이스와 화상데이터 보존을 위하여 대용량메모리가 필요하게 될 뿐만 아니라 화상의 저장, 표시, 전송과정을 고속화가 가능한 처리부가 필요하게 되었다.

조명부로서는 연속발광레이저를 많이 사용하여 왔지만 최근에는 펄스발광장치의 성능향상으로 인하여 점차 Nd/Yag레이저 혹은 루비레이저와 같은 펄스레이저를 쓰고 있는 추세에 있다. PTV가 개발된 초기에는 슬라이드프로젝터나 일반 광원들을 사용하여 예산절감을 효과를 누릴 수 있었는데 지금도 예산상의 제약이 따를 경우에는 가끔씩 이 방법을 도입하는 경우도 있다. 이 경우는 계측데이터에 대한 고정도는 기대하기는 힘들다고 봐야한다. PIV용으로는 부적절하지만 PTV용 적절한 스트로보장치는 펄스발광이 가능 할 뿐만 아니라 안전하면서 저렴하므로 PTV조명부로서 종종 쓰이기도 한다. 특히, 3차원 PTV인 경우에는 유동장의 유속이 특별히 빠르지 않는 한 스트로보장치를 쓰더라도 얻어진 데이터에 대하여 고정도를 보이는 연구성과들이 보고되고 있다. 한편, 통상의 연속광레이저에 음향광학변조기(AOM: Acoustic Optical Modulator)를 사용하면 임의 패턴의 펄스광원을 발생시킬 수 있으

므로 이를 이용한 고속유동장 PTV계측 사례가 있다.

PIV나 PTV시스템은 구성품 하나 하나가 독립적으로 발달 및 변모하고 있는 상황이므로 시스템의 기능향상을 기하고자 할 경우에는 구성품을 새롭게 교체해야 하는 경우가 종종 발생한다. 이 경우 펄스광원의 발광시간과 카메라와의 동기문제가 자주 대두되고 있으나 최근에는 동기문제를 어느 정도 쉽게 해결할 수 있는 신호발생장치가 시판되고 있는 상황이다.

### 2.3 PTV계측알고리즘

실제 실험이나, 가상 이미지 데이터로부터 저장된 이미지에서 배경을 제거하는 과정을 거치면, 이미지는 순수 입자들만이 존재하게 된다. 이렇게 처리된 이미지는 임계 값에 의한 이치화한 다음 윤곽선추적(boundary trace)을 행하여 하나의 입자로 인식되는 화소에 대해 면전모멘트 공식에 의해 입자의 중심을 결정한 후, 입자의 2차원 위치계산, 동일입자의 쌍을 구하는 과정을 수반한다. 이때 올바른 입자 쌍을 결정하기 위해서 알고리즘의 적용이 필요하게 된다. 다음 식 2.1은 2차원 입자좌표 값을 구하기 위한 면적모멘트를 나타낸 식이다.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i x_i}{\sum_{i=1}^n A_i}, \quad \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i y_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (2.1)$$

결정된 입자의 중심으로부터 여러 가지 알고리즘을 적용하여 최종적인 2차원 벡터를 결정한다. Table 2.1은 PTV를 속도계측을 위해서 사용된 입자화상의 개수와 적용된 계측알고리즘에 따라 정리한 분류표를 보이고 있다. 2차원 PTV에 적용되고 있는 알고리즘으로는 사용되는 화상의 수에 따라 4시각(4-Image) 입자추적법, 3시



각 입자추적법, 2시각 입자추적법이 등이 있다. 또한, 이들 입자화상간의 입자대응을 위하여 퍼지이론, 신경망이론, 유전알고리즘, 확률에 의거한 확률일치법 등이 적용되기도 한다.

인공 유전 시스템인 유전 알고리즘은 자연세계의 진화 현상에 기초한 계산 모델로서 John Holland에 의해서 1975년에 개발된 전역적인 최적화 알고리즘이다. 유전 알고리즘은 자연 선택의 원리와 자연계의 생물 유전학에 기본 이론을 두며 병렬적이고 전역적인 탐색 알고리즘으로서, 모든 생물은 주어진 다양한 환경속에 적응함으로써 살아남는다는 Darwin의 적자생존(survival of the fittest)의 이론을 기본 개념으로 한다. 유전 알고리즘은 풀고자 하는 문제에 대한 가능한 해들을 정해진 형태의 자료 구조로 표현한 다음 이들을 점차적으로 변형함으로써 점점 더 좋은 해들을 만들어 낸다. 다시 말하면 미지의 함수  $Y=f(x)$ 를 최적화하는 해  $x$ 를 찾는 모의 진화(simulated evolution)형의 탐색 알고리즘이다. 자연계의 모든 생물들은 유전인자인 염색체(chromosome)에 의해서 생식과 유전 등 진화과정을 반복하여 발전해 간다. 유전 알고리즘에서는 생물학적 유전인자인 염색체에 해당하는 문자열을 가지고 생물과 같은 재생산(reproduction), 교배(crossover), 돌연변이(mutation)를 거쳐서 다음 세대의 새로운 자손(offspring)을 인공적으로 만들어 낸다. 자연의 생물유전을 모방한 연산자들을 반복적으로 적용하여 적합한 해를 탐색한다. 아래의 Fig 2.4는 PTV에 있어서 GA 알고리즘의 적용과정을 나타낸 것이다. 첫 번째 이미지의  $x_1, y_1$ 좌표, 두 번째 이미지의  $x_2, y_2$ 를 유전자(Gene)로 할 수 있고, 염색체(chromosome)는 유전자(Gene)의 집합으로 볼 수 있다. 즉 입자들의 군이다. 이것을 가지고 적합도(fitness)를 평가하여 올바른 해 벡터를 구하는 것이다.

Fig 2.1은 2시각 입자추적법의 경우에 입자 상을 나타내는데 2시각의 화상간에 동일한 입자를 찾아냄으로써 속도분포를 얻게된다. 이 동일한 입자 상을 찾아내는 과정을 대응(pair matching)과정이라 한다. 현재 2시각 입자추적법이 가장 많이 이용되고 있으며 시각간의 동일한 입자대응을 위해서는 유동장의 특성에 따라 상기의 다양한 방법들을 적용하고 있다. Fig 2.3은 2차원 유전알고리즘을 이용한 2차원 PTV법의 계측결과에의 예를 나타내고 있는데 Fig 2.2의 원화상에 대한 결과이다.

이 방법은 여타 다른 알고리즘보다 작은 스케일의 유동에도 속도벡터의 복구능력이 우수함이 알려져 있다. Fig 2.3에서 보이는 바와 같이 여전히 오류벡터들이 몇 군데(그림의 좌측 아래 부분) 보이고 있음을 알 수 있다.

Table 2.1 PTV measurement algorithms

	동일입자대응을 위하여 사용된 영상수에 따른 분류	동일입자대응을 위하여 사용된 알고리즘에 따른 분류
2차원 PTV	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 4-프레임 추적법</li> <li>· 3-프레임 추적법</li> <li>· 2-프레임 추적법</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 벡터 히스토그램법</li> <li>· 확률일치법</li> <li>· 통계 및 분산처리법</li> <li>· 유전알고리즘법</li> <li>· 퍼지법</li> <li>· 신경망이론법</li> <li>· 기타</li> </ul>
3차원 PTV	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 8-프레임 추적법(TSM)</li> <li>· 3-프레임 추적법(STM)</li> <li>· 2-프레임 추적법(STSM)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 벡터 히스토그램법</li> <li>· 확률일치법</li> <li>· 통계 및 분산처리법</li> <li>· 유전알고리즘법</li> <li>· 기타.</li> </ul>

※TSM : Temporal-Spatial Pair Matching Method

※STM : Spatial-Temporal Pair Matching Method

※STSM: Simultaneous Temporal-Spatial Pair Matching Method

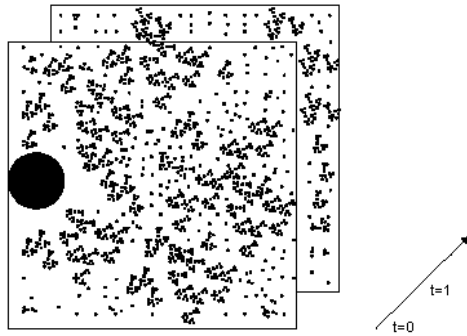


Fig. 2.1 Two consecutive particle images according to the time

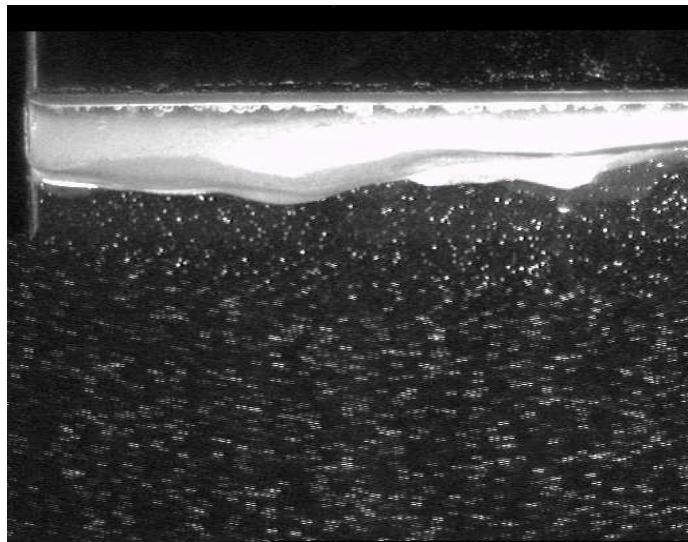


Fig. 2.2 . Image viewed by camera

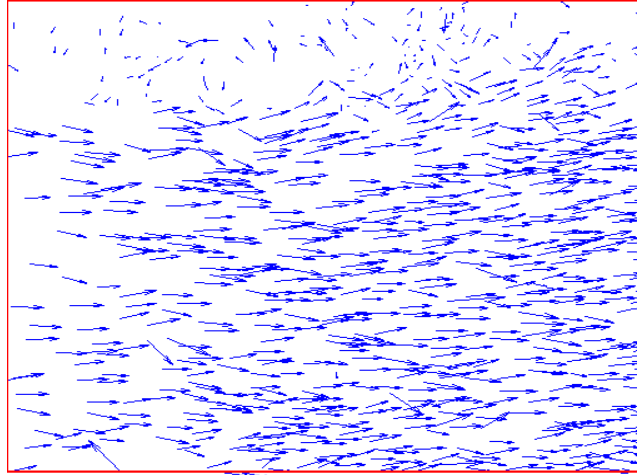


Fig. 2.3 Obtained 2-D velocity vectors using GA-algorithm

## 제 3 장 Fuzzy 알고리즘을 이용한 PTV

### 3.1 일반적인 Fuzzy 알고리즘

퍼지니스(Fuzziness)의 개념이 이것을 표현하는 퍼지 집합(Fuzzy Set)과 함께 캘리포니아 대학의 Zadeh에 의해 제창되었던 것은 1965년의 일이었다. 오늘날 일반적으로 퍼지 이론이라는 것은 퍼지 집합, 퍼지 논리, 퍼지 측도를 핵심으로 하는 이론 체계를 말한다. 인간의 사고 과정의 중요한 요소는 언어라고 해도 좋다. 언어 없이는 인간은 생각할 수 없으며, 만약 사고의 계열이라는 것이 있다고 하면 그것은 언어의 계열이다. 이 언어는 수학 기호등과 달라서 애매함을 가진 것이고, 이 애매함이 퍼지 이론에서 퍼지니스(Fuzziness)라고 불리워지고 있는 것이다.

Fig 3.1는 퍼지 집합과 크리프트 집합을 개념적으로 도식화한 그림이고, Fig 3.1에 서의 겹침 부분이 우리가 관심을 가지는 애매함을 나타낸 부분이다. 여기서 소속정도(귀속도, 적합도: Membership Grade, Membership Degree)는 전체집합 X의 퍼지 부분집합 A의 원소가 그 집합에 속하는 정도로서 단위구간[0, 1] 사이의 실수 값으로 나타내고 식(3-1)과 같이 표현한다.

$$\mu_A(x), \forall x \in X \quad (3-1)$$

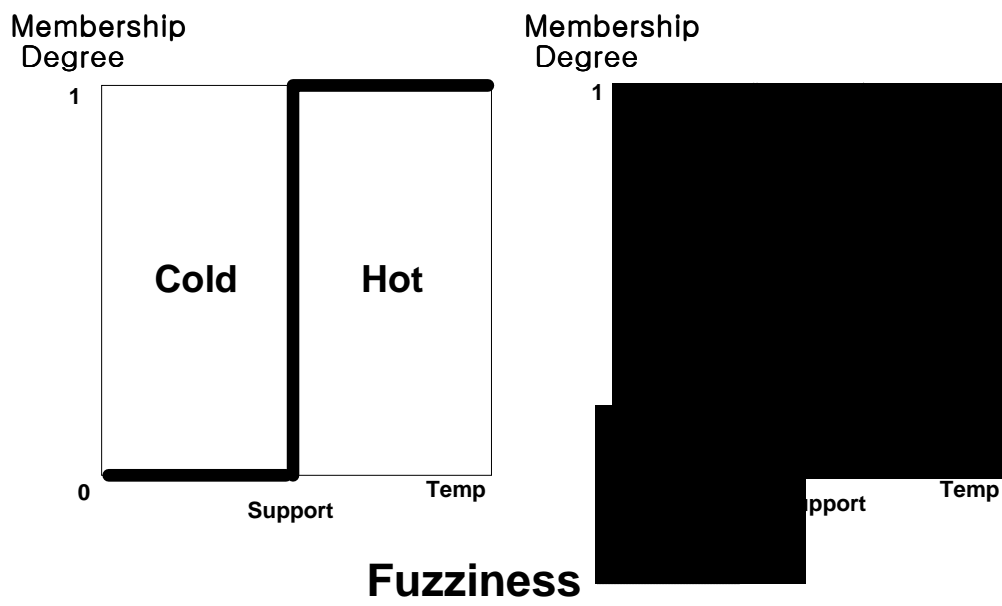


Fig. 3.1 Crisp set and fuzzy set

퍼지집합(Fuzzy Set)은 언어의 의미와 개념의 정의에서 보여지는 애매성을 정량적으로 나타내기 위한 집합 개념으로 퍼지 이론의 근간을 이루는 것이다. 퍼지 이론의 생각하는 사고 방식의 이해가 필요로 되지만 퍼지 이론은 퍼지 집합론을 기본으로 하여 구축된 것이다.

퍼지관계라고 하는 것은 대상과 대상의 사이의 애매한 관계를 퍼지 집합 개념을 사용하여 나타낸 것이다. 애매한 관계를 퍼지집합에 의해 나타낸다는 것은 보통 관계가 크립트 집합(crisp set)에 의해 나타낼 수 있다는 사실에 의거하고 있다. 퍼지 관계는 퍼지 이론의 응용에 있어서 매우 도움이 되는 개념이다. 이것은 퍼지 관계가 ‘함수  $\rightarrow$  관계  $\rightarrow$  퍼지 관계’ 라는 확장으로 되기 때문이다.

퍼지 논리(Fuzzy Logic)는 한 마디로 말하면 다치 논리에 퍼지니스 개념을 도입한 것이다. 단, 퍼지 논리에 대하여 생각하는 방식에는 여러 가지가 있고 분명한 정의는 없다. 하나의 논리는 논리 연산에 의해 결합된 명제의 진리치를 주는 방법과 추론의 규칙에 의해 특정 지어 진다.

퍼지 함의(Fuzzy Implication)라는 것은 일반 논리 체계에서와 같이 하나의 술어로서 퍼지 관계에 의해 표현된 퍼지 명제를 일컫는 말이다. 예를 들면 “기온이 내려가면 날씨가 춥다.” 라는 명제가 있을 때, “기온이 내려감  $\rightarrow$  춥다”의 표식으로서 특히, “ $\rightarrow$ ”로 결합된 명제를 만들 수가 있으며, 이렇게 만들어진 표현의 명제를 함의(Implication)라고 한다. 그리고 앞으로 논의될 퍼지 추론에서는 이렇게 표현된 명제인 함의 “IF-THEN”형식의 제어 규칙으로 정의한다.



## 3.2 PTV를 위한 Fuzzy 알고리즘

퍼지이론이 Zadeh에 의해 제한된 이래 여러 분야에서 성공적으로 응용되어 왔으며 특히 제어공학에서는 정량적 분석이 어려운 시스템이 제어문제에서 기존 제어기의 부적합한 점을 보완, 대체 가능하여 그 연구와 응용이 가장 활발하다. 퍼지에 관한 응용은 1974년, Mamdani교수에 의한 스팀엔진 제어 연구가 성공한 이래, 1980년에는 지하철 운전 제어등 실제 산업 현장에 이용 되기 시작하였다. 특히 최근 일본을 중심으로 가전제품을 비롯한 많은 곳에서 퍼지 응용 예가 나타나기 시작하였으며 이와 같은 추세로 당분간 더욱 활발히 연구가 진행되리라 본다. 퍼지 규칙은 이미지 프로세싱에 있어서 잡음성분이 많은 것을 해결하는, 강력한 이론으로 알려져 있다. 시스템에 있어서 복잡한 모델을 요구하는 대신에, 사용자 정의에 기초한 규칙으로 프로세스를 제어한다. 본 연구에서는 이러한 퍼지 논리를 가지고 PTV에 적용해보자 한다. 어떠한 시간간격을 가진 이미지 두장에 있어서 올바른 입자 쌍을 찾기 위한 퍼지 입력 값을 결정과 결정된 입력 값으로부터 올바른 추론 테이블의 작성이 중요하다.

Fuzzy-PTV는 두 이미지간의 입자 쌍을 결정하는데 있어서 두 가지의 구속조건을 이용하여 동일한 입자 쌍을 구함으로써 속도벡터를 구하게 된다. 첫 번째 구속조건으로서 제 1시각의 이미지상의 입자가 제 2시각의 이미지상에서 일정의 거리를 초과하지 않는다는 조건을 사용하였다. 두 번째 구속조건으로서 첫 번째 구속조건에 만족되는 제 2시각의 입자들과 제 1시각의 입자가 형성하는 각이 임의의 각 이내에 있게 된다는 조건을 사용하였다. 즉, 두 시각에서 이루는 입자들간의 거리와 입자들이 이루는 각이 전문가의 지식(퍼지집합)을 벗어나지 않는다는 점을 바탕으로 추론함으로써 동일한 입자 쌍을 구한다는 것이다. 퍼지 추론에 사용될 가상 데이터는 첫 번째 이미지 데이터 좌표를  $P1(x_1, y_1)$ 이라고 하고, 그 이미지 데이터가  $P2(x_2, y_2)$ 로 움직인다고 가정했을 때,  $x_2 > x_1$ 로 한다.  $x_2 > x_1$ 이라는 사실 하에

PTV에 적용하면, PTV는 퍼지 시스템으로 풀기 적당한 예이다. 이러한 이유는 정확한 입자 쌍을 찾기 위한 정확한 수치적 모델은 제한된 규칙이나, 근사한 형태로 묘사될 수 있다. 인간의 사고에 의거한 퍼지 추론은 다음과 같다.

1. 입자 쌍에 대한 정확한 속도벡터는 x-stream방향이다. ( $x_1 < x_2$ )
2. 정확한 입자 쌍은 프로그램상에 이동거리(SLR)에서 멀리 떨어지지 않는다.

효과적인 알고리즘 평가를 위해 본 논문에서는 가상으로 발생한 가상 데이터를 쓴다. 이러한 가상데이터는 x-stream방향으로의 채널 유동으로 하면 이미지 데이터 상 첫 번째 입자의 x축 좌표는 두 번째 이미지 x축 좌표보다 작음은 명확하다. ( $x_1 < x_2$ ) 가상으로 발생시킨 입자 데이터는 2000개, 4000개, 5000개이고 화면 해상도는 512×512 pixel이고 시간은 고려하지 않는다.

위와 같은 가정에 의해, 퍼지 시스템은 정확한 입자 추적 알고리즘을 제공한다. 위 첫 번째는 다른 의미는 입자는 다음 이미지에서 같은 방향으로 움직이므로 두 입자간의 각도는 거의 변화가 없는 것이 정확한 입자 쌍 일 거라는 것을 알 수 있고, 프로그램 상에 사용자가 준 값인 SLR값 주위에 다음 입자가 존재 할 거라는 사실은 분명하다. 즉, 두 입자간의 거리가 SLR에 근접한 값이 가장 귀속도( $\mu$ )가 1에 근접한 값이다. 여기서 입자의 크기, 밝기정보는 정확한 입자 중심 추적에 의해서 추론요소가 되지 않는 것으로 한다. 아래 Fig 3.2는 두 개의 입력 정보 값을 나타낸 것으로써, 각도(Angle: AngDif), 거리(Distance: SLR)를 나타낸 것이다.

위와 같은 가정 하에 두 개의 입력 값과 하나의 출력 값을 가지는 퍼지 시스템이다. Fig 3.2에서와 같이 입력 값의 하나인 AngDif(Angle)은 수평적인 방향 이탈의 정도를 나타낸 값이고, SLR(Distance)는 사용자가 임의로 준 거리 값으로 탐색반경 결정에 필요한 요소이다. 여기서 거리에 따른 반경  $R_1, R_2, R_3$ 을 각각 5, 10, 15로 주었으며 이는 사용자가 줄 수 있는 거리 최소 3에서 최대 16까지로 프로그램상

제한한 것이다. 여기서의 단위는 이미지 픽셀(Pixel)단위 이다.

식 3.2.1은 두 입자간  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$  사이의 각도를 나타낸 것이고, 식 3.2.2는 탐색반경(D)을 나타낸 것이다.

$$AngDif = \tan^{-1} \frac{y_2 - y_1}{|x_1 - x_2|} \quad (3.2.1)$$

$$\begin{aligned} R_1 &= 5\text{pixels}/2, \\ R_2 &= 10\text{pixels}/2, \\ R_3 &= 15\text{Pixels}/2 \end{aligned} \quad (3.2.2)$$

여기서 각 입력 값은 퍼지 집합에 할당되고, 거시서 집합의 각 요소들의 멤버십 값은 0과 1사이의 실수 값들이다. 본 논문에서는 표준의 50%의 중첩된 삼각형 입력 멤버십 함수를 사용한다. Fig 3.4 (a), (b)는 입력 값인 AngDif와 Distance(SLR)를 위한 입력 멤버십 함수를 보여준다. 여기서 AngDif는 고정된 값이지만, Distance는 사용자 옵션에 따른 탐색영역 5, 10, 15Pixel일 때마다 다른 대(Support)를 가진다. 즉, 사용자가 3에서 7사이의 값을 주었을 경우 Fig 3.4 (b)에서 (2, 4), 7에서 11사이의 값을 주었을 경우 (4, 8), 더 큰 값인 12에서 16을 주었을 경우 (8, 16)의 다른 대(Support)를 가지고 계산을 수행한다.

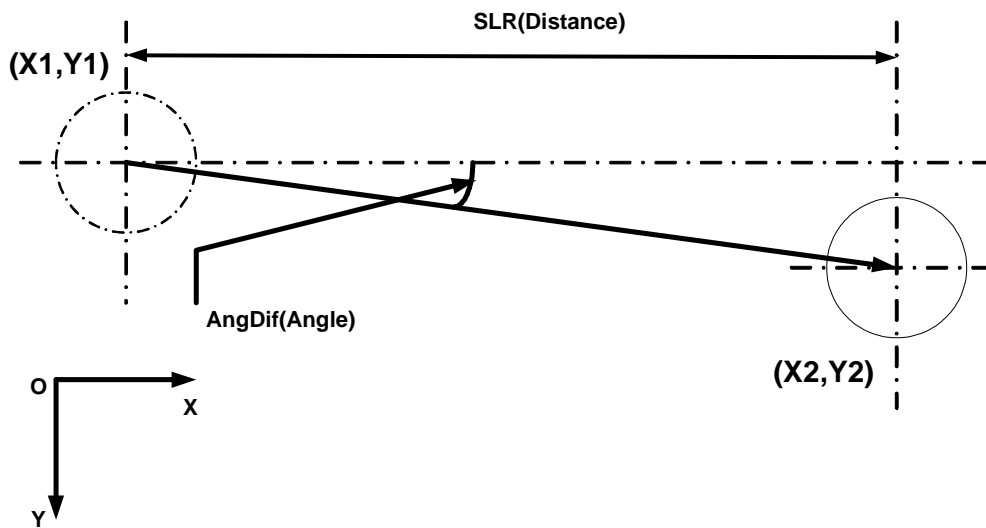


Fig. 3.2 Schematic diagram of inputs

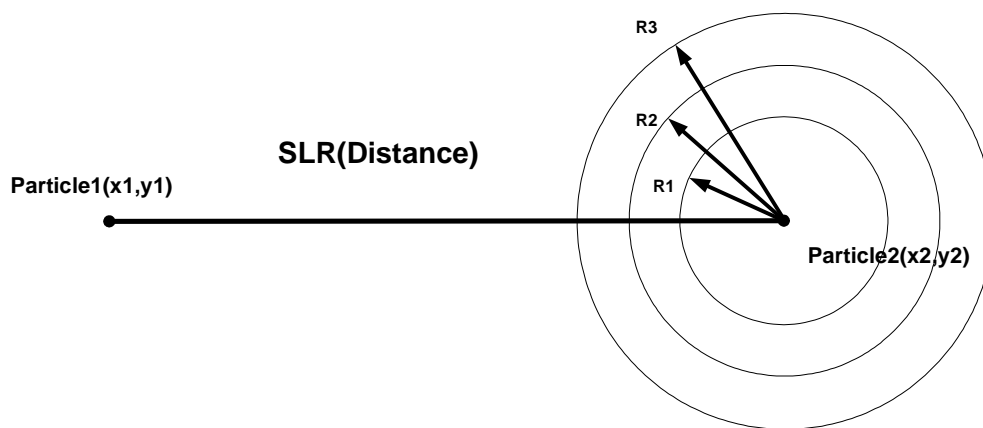
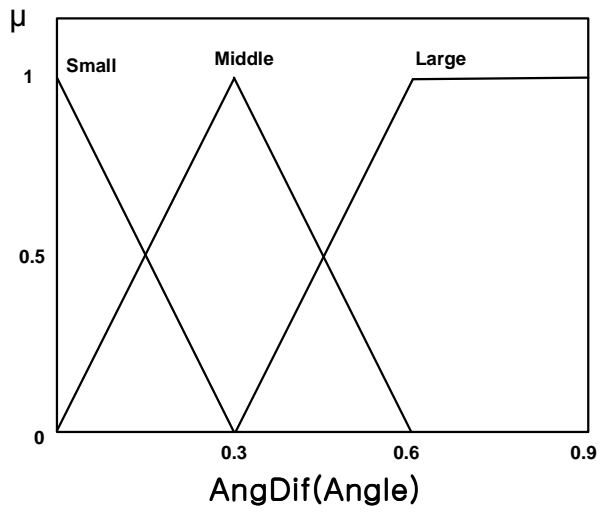
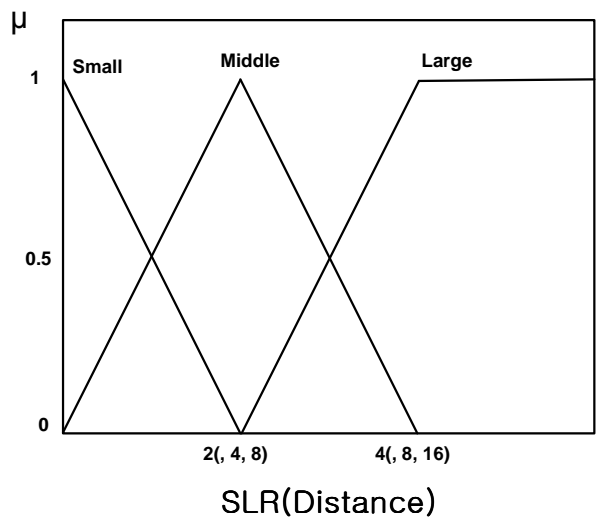


Fig. 3.3 Schematic diagram of diameter



(a)



(b)

Fig. 3.4 The input membership functions

멤버십 함수에 따르면, 어떤 크리프트(Crisp) 집합도 다음과 같이 Form={Small, Middle, Large}와 같이 퍼지 입력의 값의 집합으로 변경 할 수 있다. 예를 들면, AngDif 가 0.15( 약 8.59° ) 에 대한 응답된 퍼지 입력은 {0.5, 0.5, 0}이다. 이것은 Fig 3.4 (a)에서 Small=0.5(50%) Middle=0.5(50%) 인 것을 뜻한다. 이것을 수학적인 배열 형태의 기호로 쓰면

$\mu_{AngDif} = \{ \mu_{AngDif}(Small) = 0.5, \mu_{AngDif}(Middle) = 0.5, \mu_{AngDif}(Large) = 0 \}$  이 된다. 다른 입력 값인 SLR(Distance)는 위의 AngDif와 역시 마찬가지로 비슷한 퍼지 입력 집합인 Fig 3.4 (b)에 나타나 있고 SLR(Distance)의 표현은  $\mu_{SLR}$  이다.

퍼지 추론은 퍼지 메카니즘과 퍼지 규칙에 기본을 두고 있다. 퍼지 추론 메카니즘은 퍼지 이론 방법이다. 많은 퍼지 추론법이 있는데, 여기서는 폭 넓게 사용되어 지는 퍼지 컨트롤 시스템인 Max-Min Method를 사용하기로 한다. 퍼지 규칙에 의거한 전문가 지식 시스템에 언어적인 표현 규칙은 ‘IF-THEN’ 블록으로 나타 내어 진다.

**IF** (x is A) **THEN** (y is B)

R : (x is A) → (y is B)

퍼지 추론(Fuzzy Inference)이라는 것은 어떤 주어진 사실이나 관계로부터 새로운 관계나 사실을 유추해 나가는 일련의 과정이라고 정의를 하며 즉, “IF x is A THEN y is B”(A,B는 퍼지 집합이다.)가 되는 함의(→ : Implication)와 퍼지 제어 규칙에 있어서 “x is A”라는 입력과 그 입력에 대해서 “y를 어떻게 구할 수 있을까?” 하는 것을 다루는 과정을 의미한다. 여기서 규칙이라는 말은 어떤 사실들의 관계를 나타내며, 사실이라는 말은 현재의 어떠한 상태를 나타내는 말이다. 그리고 추론은 여러 가지의 “규칙”들과 “사실”들로 구성되어져 있으며 또한, 규칙들과 사실

들은 지식 기반(Knowledge Base)에서 “IF-THEN”형식의 언어적인 규칙으로 구성되어 있다. 그 일반 형태는 다음과 같다.

**규칙** : IF (x is A) THEN (y is B)

**사실** : x is A

여기서 x, y는 언어적인 변수(Linguistic Variable)이고 A, B는 언어적인 값(Linguistic Value)이다. “x is A”는 전건부(Antecedent)이고 “y is B”는 후건부(Consequent)이다.

**규칙** : IF (x is A) THEN (y is B)

**사실** : x is  $A^*$

---

**추론 결과** : y is  $B^*$

**추론 과정** :  $B^* = A^* \Theta R$  (3.2.3)

여기서  $\Theta$ 는 앞의 퍼지 관계의 합성에서 논의된 바 있는 퍼지 추론의 합성 규칙 (Composition rule of Inference)이며,  $B^*$ 는 추론된 결과이다. 위의 추론에서는 여러 가지 방법이 있으니 크게 전향 추론(Modus ponens)과 후향 추론(Modus tollens)으로 나누어지며, 또한 직접법과 간접으로 구분하기도 한다. 퍼지 제어에서는 주로 직접법 즉, 전향 추론 방법을 사용한다. 그리고 이 추론 방법에서는 추론의 합성 규칙이 사용되는데 주로 두 가지를 사용한다. 그것은 Mamdani에 의한 Max-Min 규칙과 Yamazaki에 의한 Max-Product 규칙이 있는데 여기서는 Max-Min법을 사용하기로 한다.

Mamdani의 Max-Min법을 간단히 설명하면 다음과 같다.  
 어떤 임의의 갯 수 만큼 규칙이 존재 할 때

**규칙1** : **IF** (  $x_1$  is  $A_1$ ) and (  $y_1$  is  $B_1$ ) **THEN** (  $z_1$  is  $C_1$ )

**규칙m** : **IF** (  $x_m$  is  $A_m$ ) and (  $y_m$  is  $B_m$ ) **THEN** (  $z_m$  is  $C_m$ )

$x_1$  is  $A_1$  and .....  $x_m$  is  $A_m$

위 표현식의 전건부 적합도( $\mu$ )는 다음과 같다.

$$\mu_{A_1}(x_1) \wedge \dots \wedge \mu_{A_m}(x_m)$$

(3.2.4)

최종적인 추론결과는 다음과 같다.

$$\mu_C(z) = \mu_{C_1}(z) \vee \dots \vee \mu_{C_m}(z), \forall z \in Z \quad (3.2.5)$$

추론으로부터 얻어진 최종값( $\mu_C(z)$ )은 입력에 대한 알맞은 결과 값이 아니다.  
 따라서 퍼지 제어에 쓰이는 PTV에 적용되어질 때에는 그 때에 알맞은 수치(Conf:  $y^0$ )로 바꾸어 주어야만 한다. 이 과정을 비퍼지화(Defuzzifier)라고 하며 즉, 추론의 과정을 통한 애매한(Fuzziness) 값이 아닌 정량적인 수치로 바꾸는 과정을 일컫는 것이다. 이 비퍼지화 예는 크게 세 가지 방법이 있는데, 대표적인 것이 무게 중심법(Center of Gravity)이다. 비퍼지화 방법들 가운데서 무게 중심법이 가장 유연한 결과 값을 가지는 것으로 알려져 있고 식은 다음과 같다.



$$y^0 = \frac{\sum y_i \cdot \mu_A(y_i)}{\sum \mu_A(y_i)}$$

(3.2.6)

이런 이론에 근거로 하여 편리하게 규칙을 표현하기 위해서는, “IF-THEN” 블록 대신에 행렬 형태로 표현한다. 퍼지 규칙에 의거한 것을 Table 3.1에서 보여준다.

Table 3.1 The rule bases for fuzzy PTV calculation

Confidence		AngDif		
		Small	Middle	Large
SLR(Distance)	Small	Medium	Low	None
	Middle	High	Medium	Low
	Large	Medium	Low	None

위 식 (3.2.6)에서 ( $y^i : \text{Conf-out}$ )는  $i$ th 번째 단독 신뢰도 값이다. 여기서 Conf-out는 다음 네가지 값중 하나를 가진다고 정의해 준다 {High=0.9, Medium=0.5, Low=0.1, None=0} Max-Min법에 따라 전체 시스템의 출력( $y^0 : \text{Conf}$ )은 즉 식 (3.2.6)은 다음과 같이 표현된다.

$$\text{Conf}(y^0) = \frac{\sum y_i \cdot \mu_A(y_i)}{\sum \mu_A(y_i)}$$

(3.2.7)

식 (3.2.7)에서  $\mu_A(y_i)$ 는 모든 입력에 대한 멤버십 함수 값의 최소 값을 취한

값이다.

Table 3.1에 따른 "IF-THEN" 블록문은 다음과 같다.

```
IF (AngDif is Small SLR is Small) THEN
     $Conf - Out_1 = \text{Medium}$ 
IF (AngDif is Small SLR is Middle) THEN
     $Conf - Out_2 = \text{High}$ 
IF (AngDif is Small SLR is Large) THEN
     $Conf - Out_3 = \text{Medium}$ 
IF (AngDif is Middle SLR is Small) THEN
     $Conf - Out_4 = \text{Medium}$ 
IF (AngDif is Middle SLR is Middle) THEN
     $Conf - Out_5 = \text{Medium}$ 
IF (AngDif is Middle SLR is Large) THEN
     $Conf - Out_6 = \text{Low}$ 
IF (AngDif is Large SLR is Middle) THEN
     $Conf - Out_7 = \text{Low}$ 
ENDIF
```

Fig 3.5에서 임의의 첫 번째 이미지의 입자 좌표A에 대한 다음 이미지 영역 안에 입자 후보들을 B, C, D라고 하면 식 (3.2.1)과 식 (3.2.1)에 의해서 구한 값으로 입력 멤버십 함수를 읽은 값은 Table 3.2와 같다.

예로, Fig 3.5에서 시작 입자를 A 그리고 그것의 입자군(B, C, D)가 있다고 하자. 우리는 컴퓨터 연산에 의해서 세 개의 벡터 즉, AB, AC, AD이다. 멤버십 함수를 이용하여, 입력은 퍼지 입력 값으로 변경 할 수 있다. 벡터 AB의 AngDif는 1.31이고 SLR은 8(10)이다. 이 응답에 대한 퍼지 입력값은 {0, 0, 1}과 {0.098, 0.08}이다. 이것을 가지고 Conf(AB)를 구하면 다음과 같다.

$$\text{AB벡터에서 } \mu_{AngDif} = \{0, 0, 1\}, \quad \mu_{SLR} = \{0, 0, 1\}$$

$$\text{AC벡터에서 } \mu_{AngDif} = \{0.70, 0.30, 0\}, \quad \mu_{SLR} = \{0, 0, 1\}$$

$$\text{AD벡터에서 } \mu_{AngDif} = \{0, 0.27, 0.73\}, \quad \mu_{SLR} = \{0, 0.25, 0.75\}$$

$$\text{Conf(AB)} = \frac{0.5 \times 0 + 0.9 \times 0 + 0.5 \times 0 + 0.1 \times 0 + 0.5 \times 0 + 0.1 \times 0 + 0.1 \times 0}{0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0} = 0$$

$$\text{Conf(AC)} = \frac{0.5 \times 0 + 0.9 \times 0 + 0.5 \times 0.7 + 0.1 \times 0 + 0.5 \times 0 + 0.1 \times 0.3 + 0.1 \times 0}{0 + 0 + 0.7 + 0 + 0 + 0.3 + 0} = 0.38$$

$$\text{Conf(AD)} = \frac{0.5 \times 0 + 0.9 \times 0 + 0.5 \times 0 + 0.1 \times 0 + 0.5 \times 0.25 + 0.1 \times 0.27 + 0.1 \times 0.25}{0 + 0 + 0 + 0 + 0.25 + 0.27 + 0.25} = 0.23$$

여기서 분모 값이 0인 벡터AB는 수학적으로는 맞지 않지만, 분모가 0인 것은 0으로 간주한다. 그런 의미는 벡터AB는 퍼지 추론에 전혀 맞지 않는다는 뜻이다. 따라서 세 개의 후보 벡터 중에 귀속도 1에 가장 가까운 벡터AC가 가장 신뢰도가 높은 해 벡터이다. 이 경우에는 나타나지 않지만 같은 값을 가지는 벡터가 있을 수도 있다. 그런 경우 추론 테이블 상에서 보다 높은 우선순위(High>Medium>Low)에 값이 있는 경우를 참인 값으로 한다.

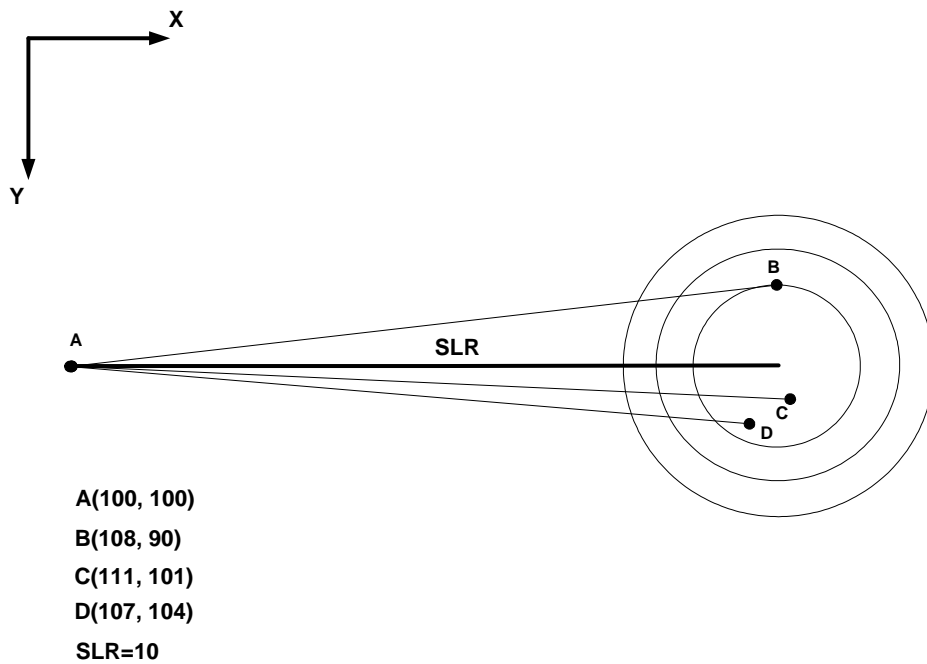


Fig. 3.5 Particle pairing with fuzzy PTV

Table 3.2 Input data

	Direction	AngDif	SLR(Distance)
AB	-51.34°	0.896	8(10)
AC	5.19°	0.09	11(10)
AD	29.74°	0.52	7(10)

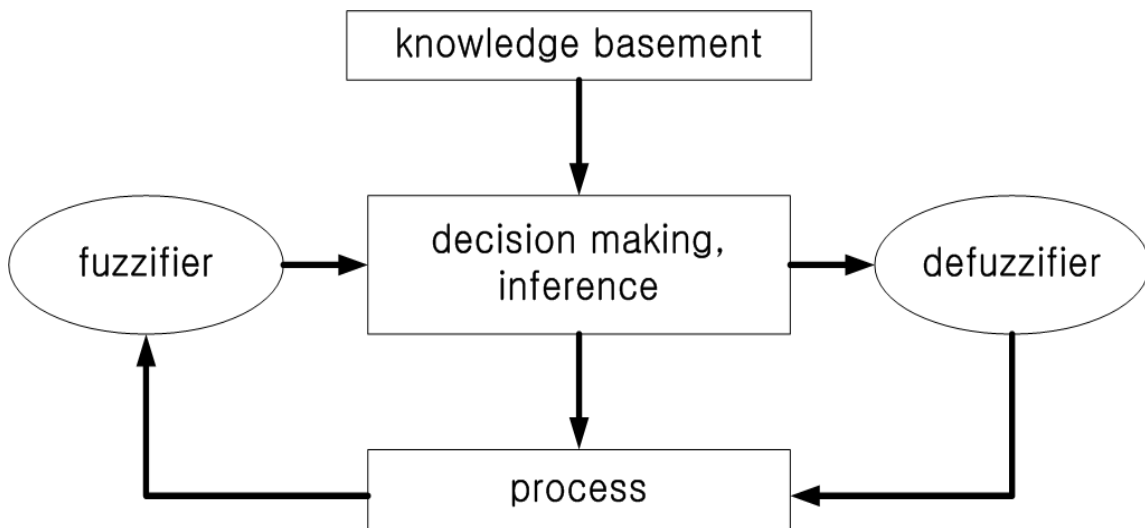


Fig. 3.6 Fuzzy-controller basic rule



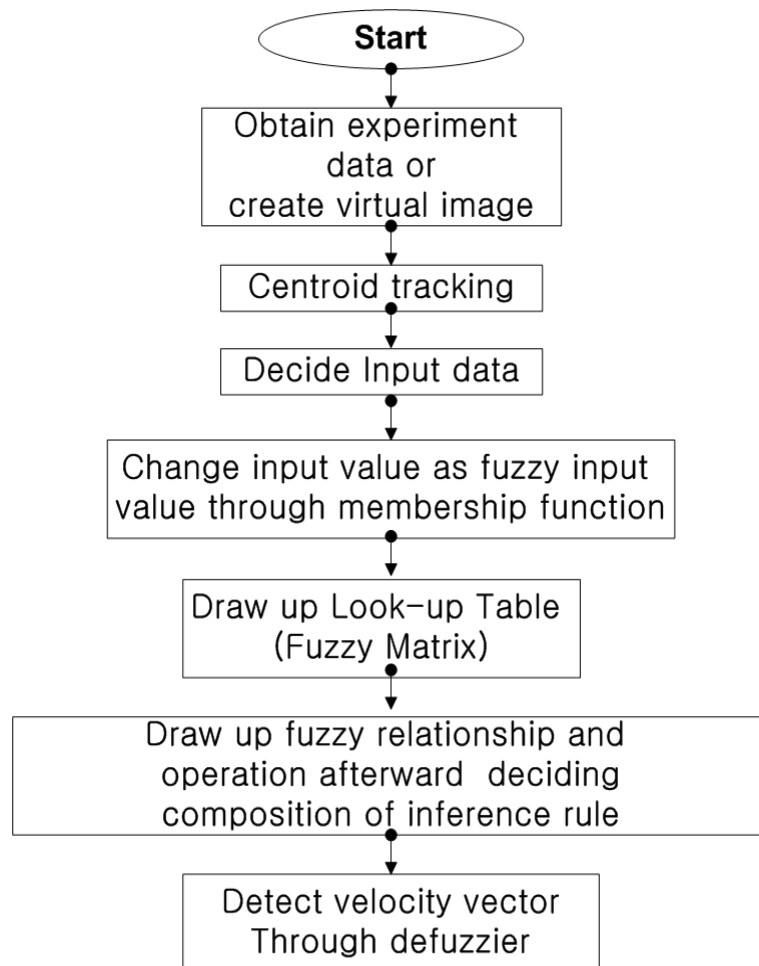


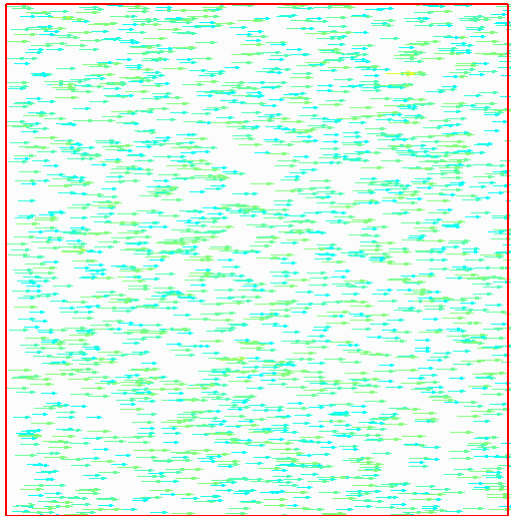
Fig. 3.7 Flowchart of fuzzy in PTV

아래 Fig 3.8, Fig 3.9는 x-streamwise 방향으로 이동거리 10pixel 정도로 가상 데이터를 발생 시켰을 때 획득한 순시 벡터이다. GA, Fuzzy, 모두 우수한 순시벡터를 얻을 수 있지만, 입자수가 많아짐에 따라 GA는 Fuzzy에 비해 계산시간의 비약적인 증가를 보였다. Fig 3.14는 2000개에서 5000개까지 입자 데이터를 발생 시켰을 때 벡터 손실률을 나타낸 그림이고 표는 3.3과 같다. Fig 3.15는 상대적인 에러 벡터를 표시한 그래프이고 식은 아래와 같다.

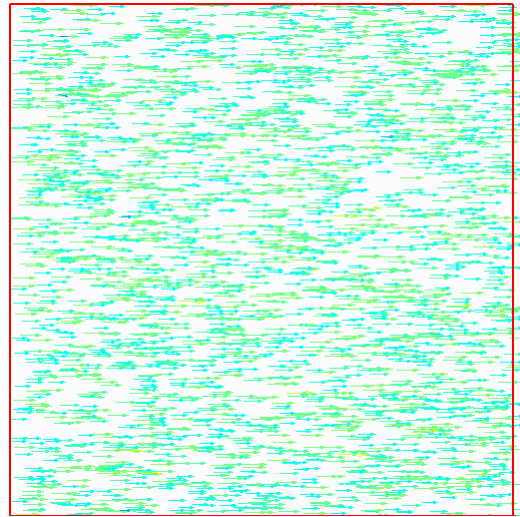
$$E(\%) = \frac{1}{N} \times (N - A) \times 100(\%) \quad (3.2.8)$$

여기서 N는 각각의 파티클(Particle) 수(2000, 3000, 4000, 5000)이고, A는 이미지 밖으로 빠져나간 파티클과 에러벡터 제거 프로그램으로 구한 파티클을 더한 값에 전체 수를 뺀 나머지 실제 얻어진 벡터이다. 그래프에서 알 수 있듯이 파티클 수의 증가에 따라 에러율도 약간 증가하지만 거의 Fuzzy나 GA모두 낮은 에러 벡터를 가짐을 알 수 있다.

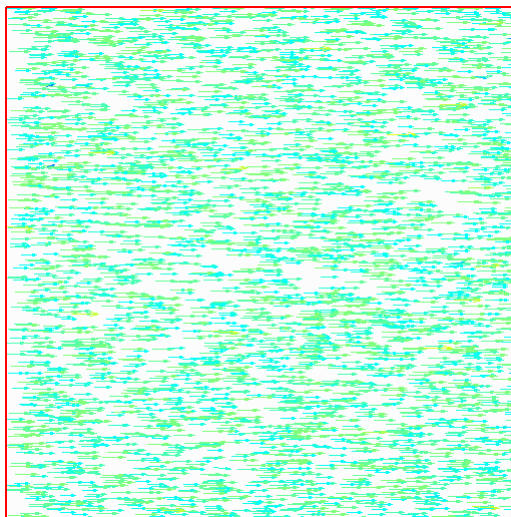




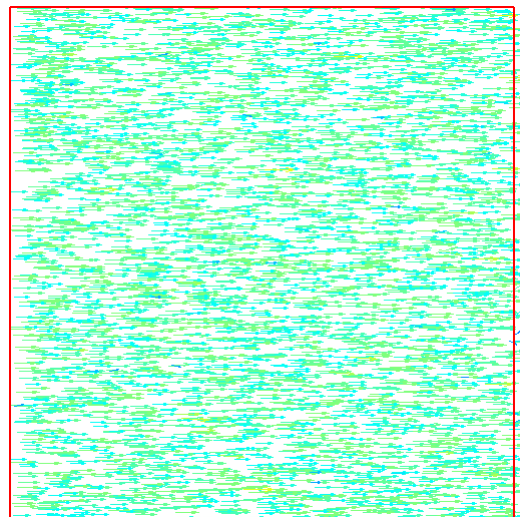
(a) 2000



(b) 3000

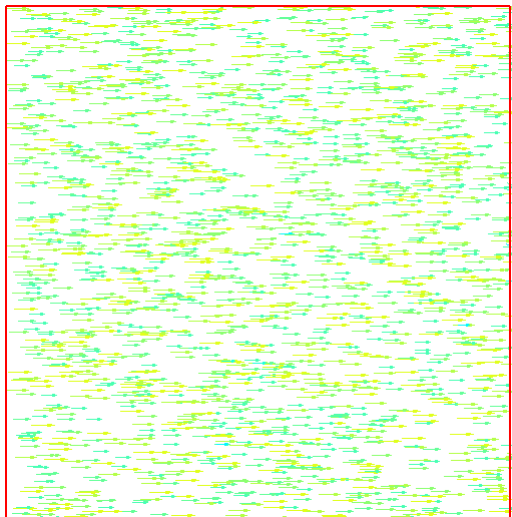


(a) 4000

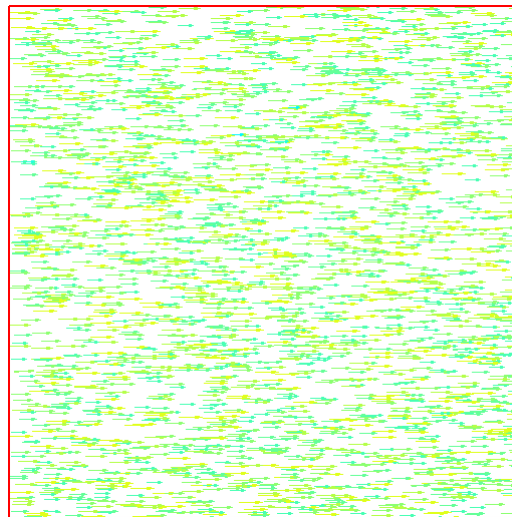


(b) 5000

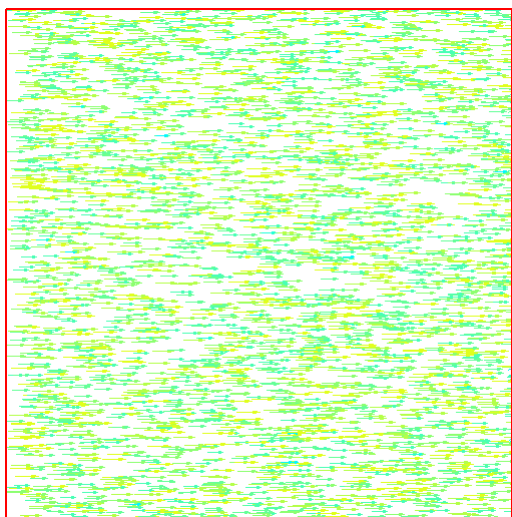
Fig. 3.8 The instantaneous vector (2000, 3000, 4000, 5000) using GA



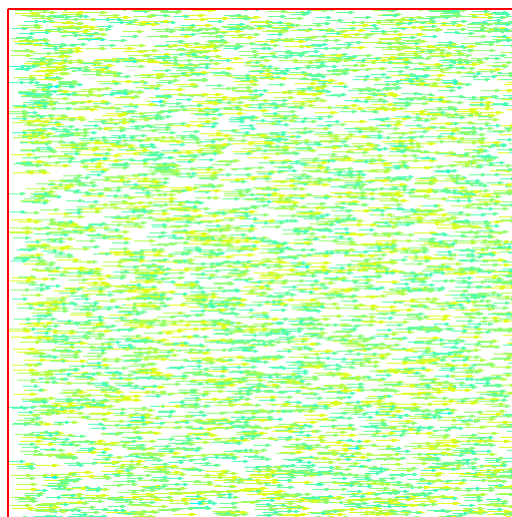
(a) 2000



(b) 3000

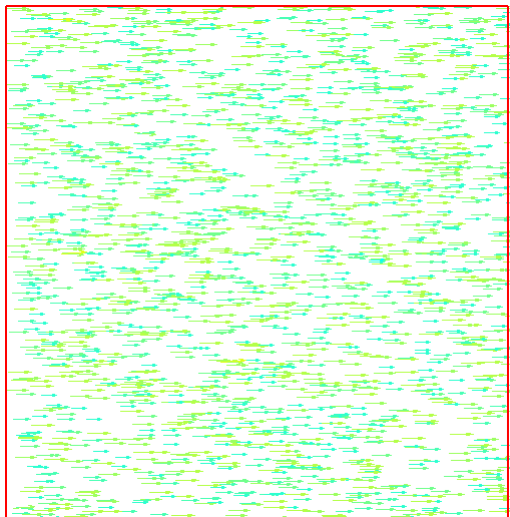


(a) 4000

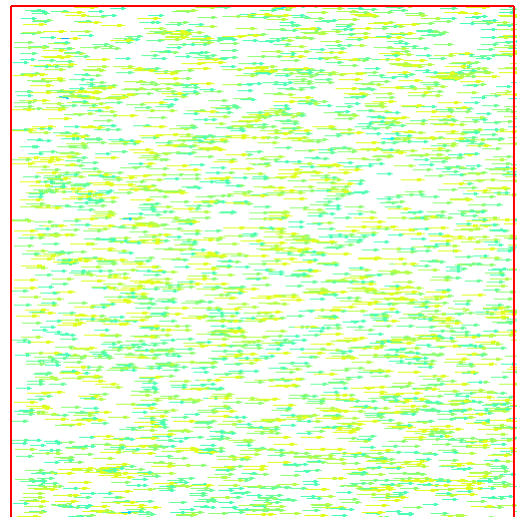


(b) 5000

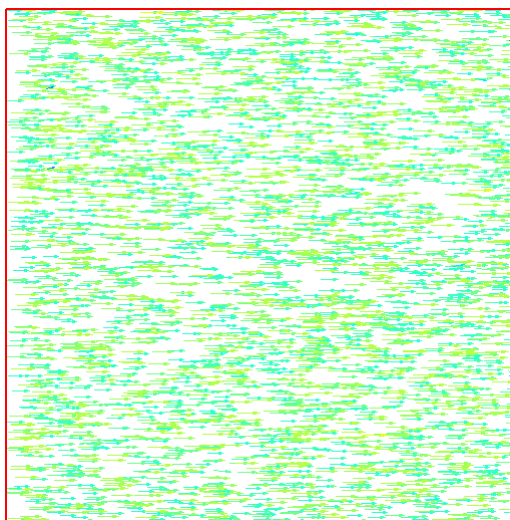
Fig. 3.9 The instantaneous vector (2000, 3000, 4000, 5000) using Fuzzy



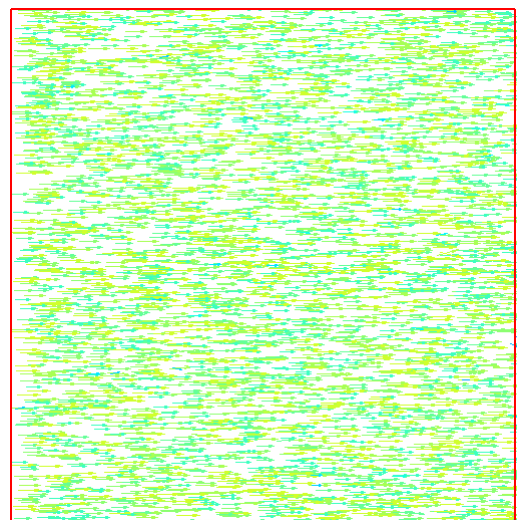
(a) 2000



(b) 3000

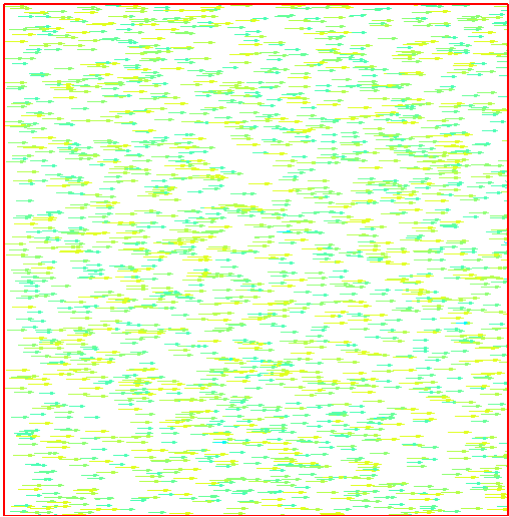


(a) 4000

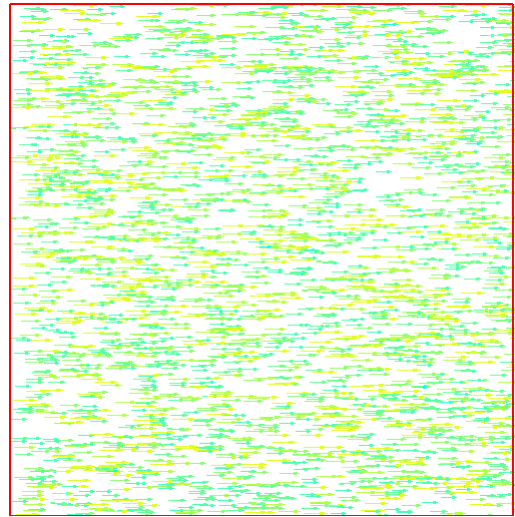


(b) 5000

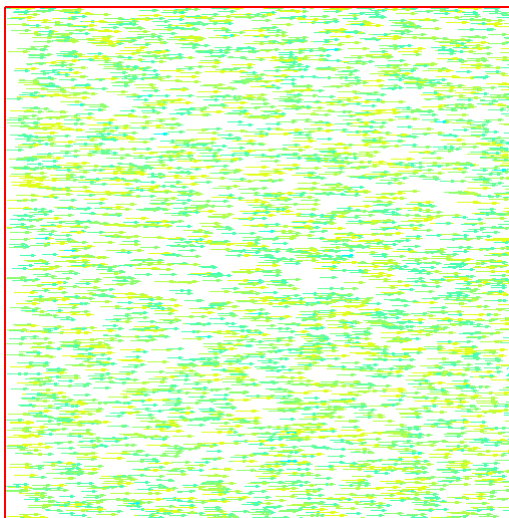
Fig. 3.10 The error-removing vector (2000, 3000, 4000, 5000) using GA



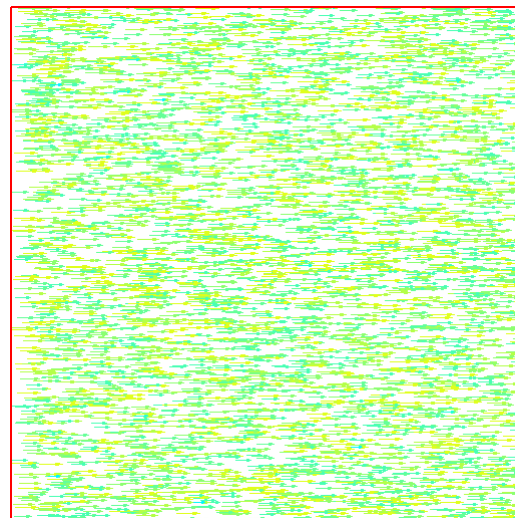
(a) 2000



(b) 3000

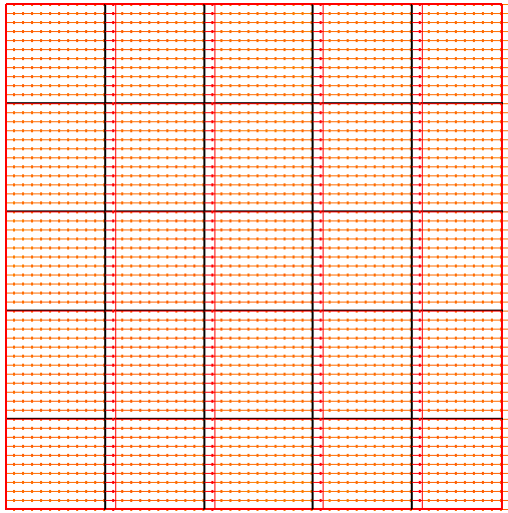


(a) 4000

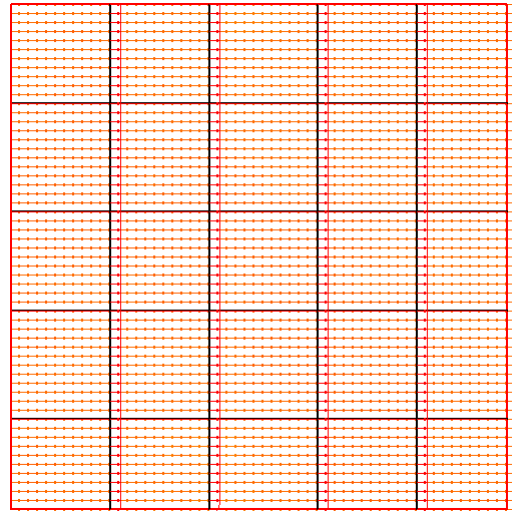


(b) 5000

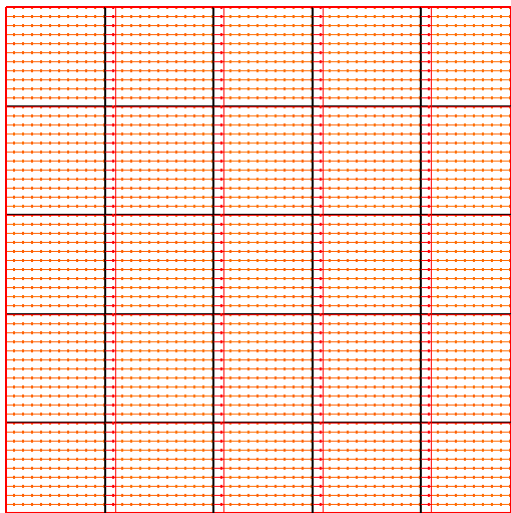
Fig. 3.11 The error-removing vector (2000, 3000, 4000, 5000) using Fuzzy



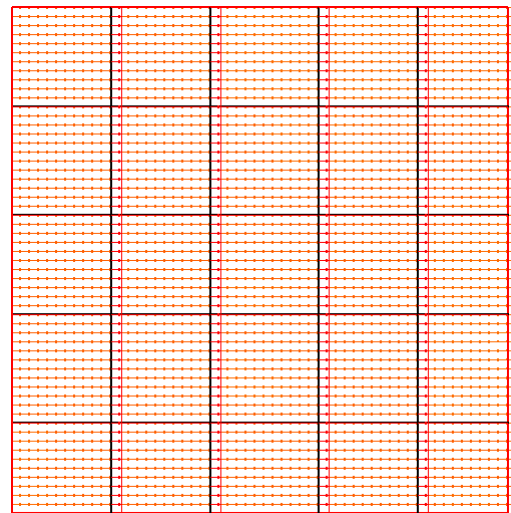
(a) 2000



(b) 3000

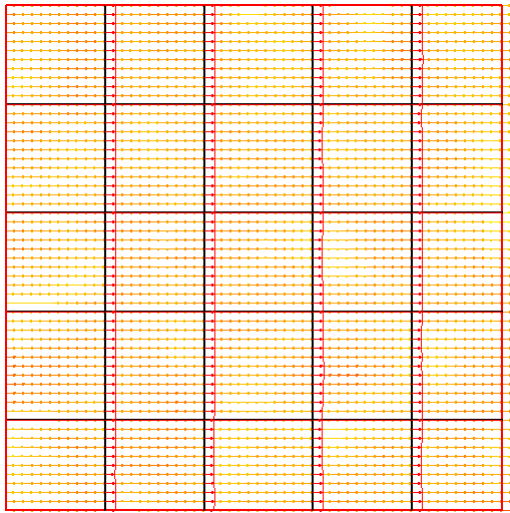


(a) 4000

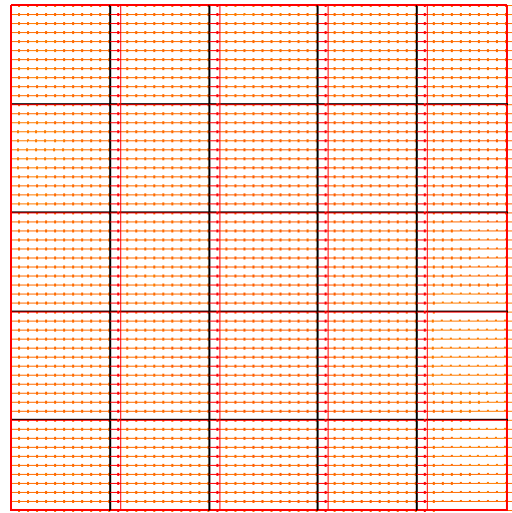


(b) 5000

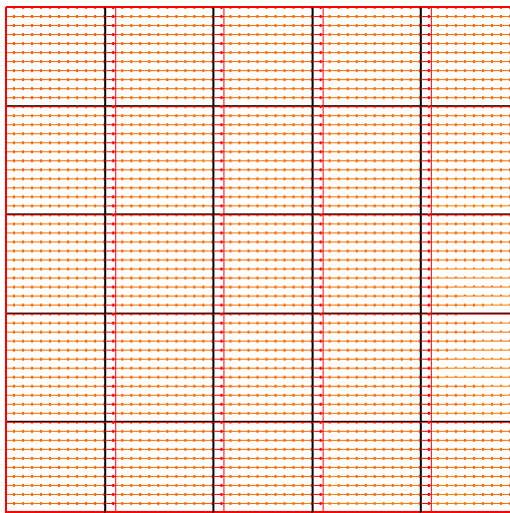
Fig. 3.12 Interpolated vector (2000, 3000, 4000, 5000) using GA



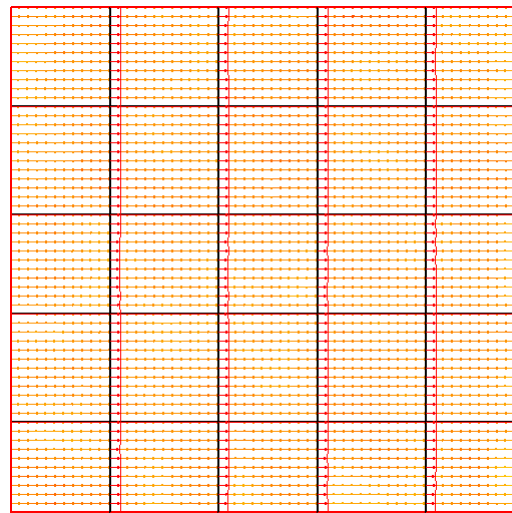
(a) 2000



(b) 3000



(a) 4000



(b) 5000

Fig. 3.13 Interpolated vector (2000, 3000, 4000, 5000) using Fuzzy

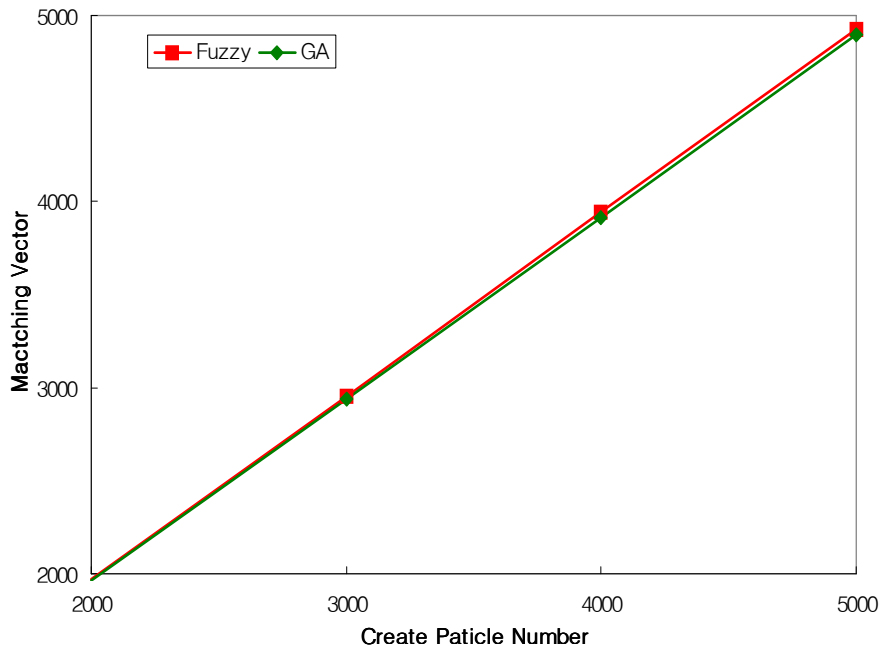


Fig. 3.14 Matching vector (2000, 3000, 4000, 5000) using Fuzzy & GA

Table 3.3 Matching vector number(N)

Particle Number(N)	GA	Fuzzy
2000	1960	1967
3000	2940	2950
4000	3916	3942
5000	4895	4928

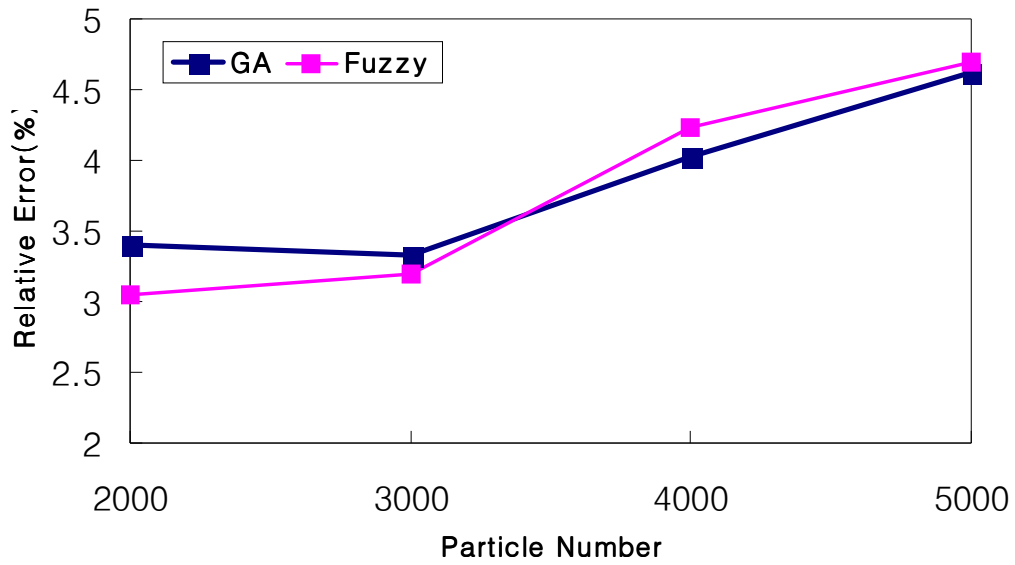


Fig. 3.15 Relative error(%) (2000, 3000, 4000, 5000) using Fuzzy & GA

Table 3.4 Relative error(%) in particle number(N)

Particle Number(N)	GA(%)	Fuzzy(%)
2000	3.40	3.05
3000	3.33	3.20
4000	4.03	4.23
5000	4.62	4.70



## 제 4 장 DNS 난류 채널 유동에 의한 성능평가

### 4.1 DNS 가상 영상의 생성

3장에서는 퍼지 알고리즘을 이용한 2차원 PTV방법의 가상 데이터에 의한 검증에서 우수한 결과를 보임을 알 수 있었다. 이번 장에서는 DNS(Direct Numerical Simulation) 데이터에 퍼지 알고리즘을 적용 해봄으로써 퍼지 알고리즘의 활용방안에 대해 평가하고자 한다.

Willert and Gharib(1991)은 DPIV(Digital PIV)기법의 평가를 위한 PIV 가상영상(32×32 pixel의 상관영역에서 11개 정도의 입자가 포함되어 있는 경우에 8pixel의 변위에 대한 측정오차가 0.8pixel)을 제시했으며, Okamoto et al.(1999)은 젯트 유동의 3차원적 운동을 고려한 PIV 표준영상의 구성과 PIV 표준 계획(PIV-STD3D)을 제시했다. 본 연구에서는 퍼지 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 PIV Challenge 03(<http://www.pivchallenge.org>)에서 제공한 DNS 난류 채널 유동 이미지를 이용하였다. 본 이미지는 한국, 일본 및 유럽의 PIV 및 PTV 관련 연구자들에 의해서 PIV 및 PTV 알고리즘의 검증을 위해서 사용되었다.

사용된 이미지는 DNS 데이터를 가상이미지로 생성시킨 것으로 해상도는 (1536×512)pixel이며, 각 pixel은 256(gray level, 8bit)이다. 생성된 이미지 수는 100장이다.

저장된 이미지로부터 배경을 제거하는 과정을 거치면, 이미지는 순수 입자들만이 존재하게 된다. 이렇게 처리된 이미지는 임계값에 의한 이치화한 다음 윤곽선추적 (boundary trace)을 행하여 하나의 입자로 인식되는 화소에 대해 면진모멘트 공식에 의해 입자의 중심을 결정한 후, 입자의 2차원 위치계산, 동일입자의 쌍을 구하는 과정을 수반한다. 최종 2차원 벡터를 구할 때까지의 모든 처리과정은 본 연구에서 개발한 프로그램에 의해 자동으로 처리된다. 결정된 입자의 중심으로부터 유전 알고리즘, 퍼지 알고리즘을 적용하여 최종적인 2차원 벡터를 결정한다. Fig 4.1은 DNS 난류 채널 원시 이미지이다.

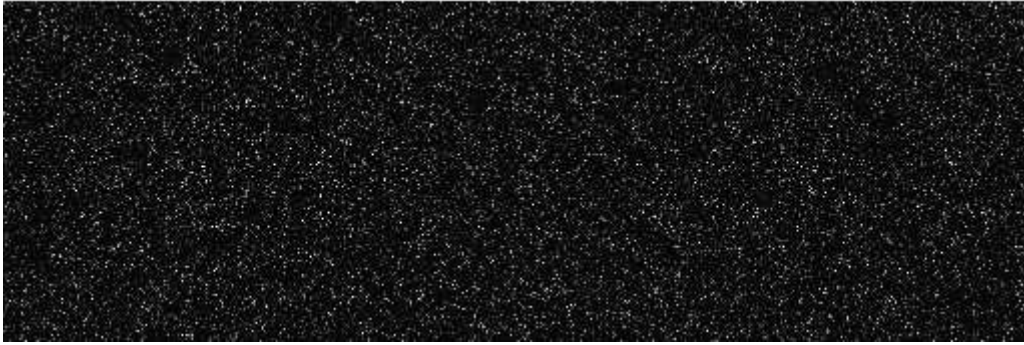


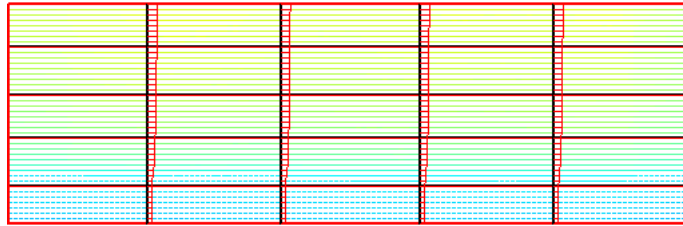
Fig. 4.1 Raw image

## 4.2 DNS 난류 채널 계산결과

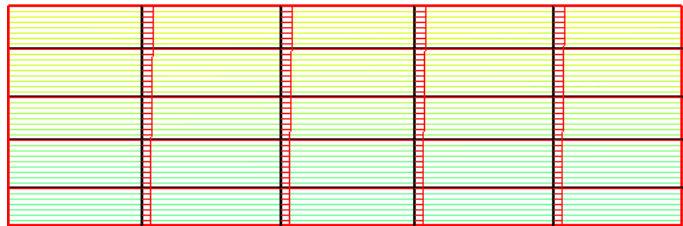
초기 알고리즘의 동작유무를 테스트하기 위하여 DNS를 이용한 난류채널유동 이미지를 본 논문에서 구현한 알고리즘을 적용하였다. Fig 4.2는 획득된 센트로이드(Centroid) 파일 데이터로부터 퍼지(Fuzzy), 유전(Genetic)자 알고리즘을 사용하여 계산한 후, 에러제거 보간을 거친 평균 속도장을 나타낸 것이며, 이에서 볼 수 있는 것처럼 퍼지 알고리즘을 사용한 것보다 유전자 알고리즘을 사용한 것이 바닥 면에 속도 경계층이 좀 더 뚜렷하게 나타나는 것을 알 수 있다. Fig 4.3은 퍼지 알고리즘과, 유전자 알고리즘으로 구한 약  $x/D=1.5$ 지점에서의 무차원 속도(U,V)를 나타낸 그림이다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼  $y/D=0.2$ 지점부터 0까지 경계층 변화를 GA 계산결과는 비교적 우수함을 보이고 상대적으로 Fuzzy 계산결과가 경계층 부분에서 맞지 않음을 알 수 있다. 향후 실제 유동계측에 적용을 위해서는 경계층부분에서의 와류를 검출하기 위한 새로운 퍼지 추론 알고리즘 개발이 필요하다.

Fig 4.4, 4.5, 4.6은 각각 난류강도(Turbulent intensity), 레이놀드 전단응력(Reynolds shear stress), 난류 운동 에너지(Turbulent kinetic energy)를 퍼지와 유전자 알고리즘으로 계산한 결과이다. 평균 속도장과 물리량에서 볼 수 있는 것처럼 전체적으로 퍼지(Fuzzy) 알고리즘을 사용한 결과가 유전 알고리즘보다 상대적으로 약한 경계층 프로파일(profile)을 가지며 이는 아래 부분에서 상대적으로 난류 경계층 발생으로 인한 속도의 감소로 인하여 어떤 사용자가 준 거리(Distance:SLR)가 윗 부분은 비교적 올바른 입자쌍을 찾는데 비해, 아래 난류 속도 경계층 부분에서 올바른 입자 쌍을 찾지 못하는 결과를 유발한다. 이는 퍼지 추론 테이블(Fuzzy confidence table)에서 입력 값인 각도(Angle), 거리(Distance)가 실제 유동장에 적용 시킬 요소로서 적당하지 않음을 알 수 있고, 향후 PTV에 적용시킬 새로운 퍼지 추론 테이블작성을 필요로 한다.

Fig 4.8은 특정시점에서 각각 다른 거리(Distance) 값으로 계산한 결과이다. 속도가 느린 아래 부분에서는 거리를 작게 준 것이 높은 백터 회복률을 가짐을 알 수 있다. Fig 4.10은 유동장을 Fig 4.9의 그림 영역으로 나누어 각 영역별로 백터 회복률을 구해본 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 Section-A는 작은 탐색거리 값 (slr=5) 일 때 높은 백터 회복률을 가지며 Section-B, Section-C는 상대적으로 큰 거리 값에서 높은 백터 회복률을 보인다. 이는 향후 실제 퍼지 알고리즘을 사용한 PTV에 있어서 새로운 퍼지 추론 규칙을 개발할 필요성이 있음을 추론할 수 있다.



(b) GA



(c) Fuzzy

Fig. 4.2 Mean velocity profile of the interpolation files

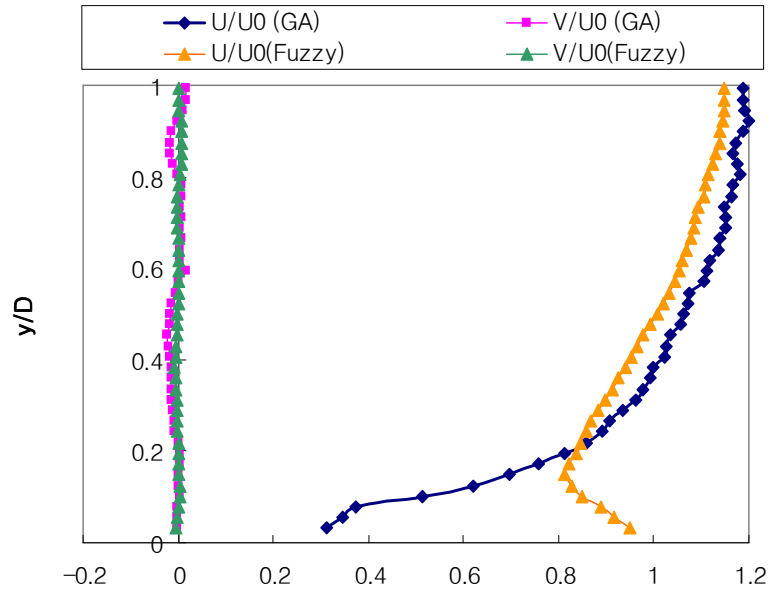


Fig. 4.3 Mean velocity profile

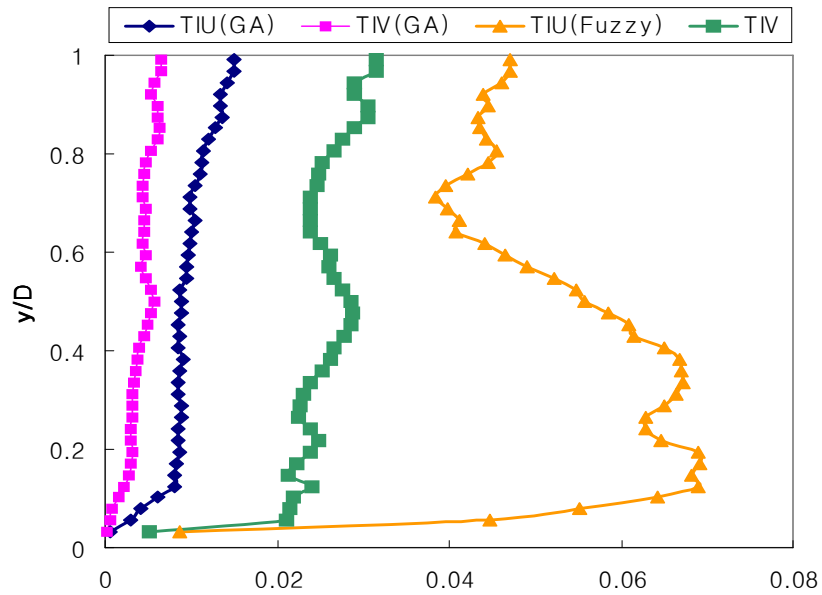
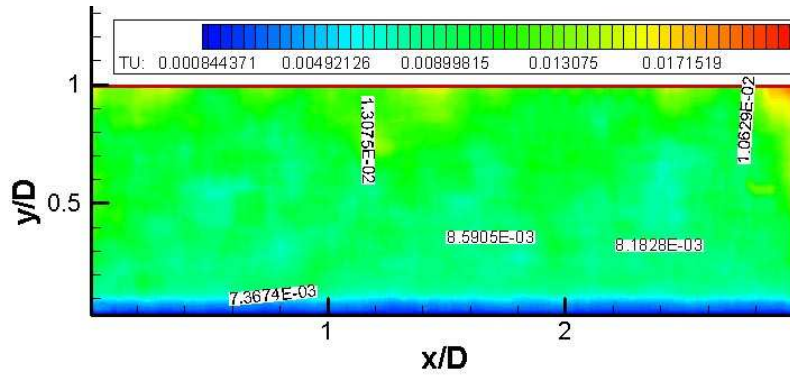
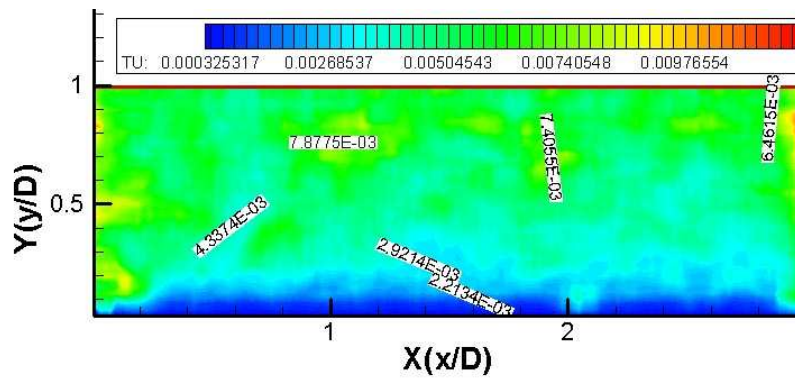


Fig. 4.4 Turbulent intensity profile



(a) GA(TIU)

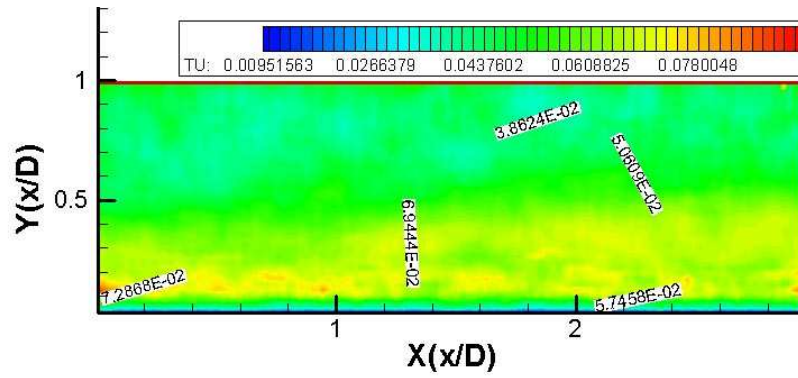


(b) GA(TIV)

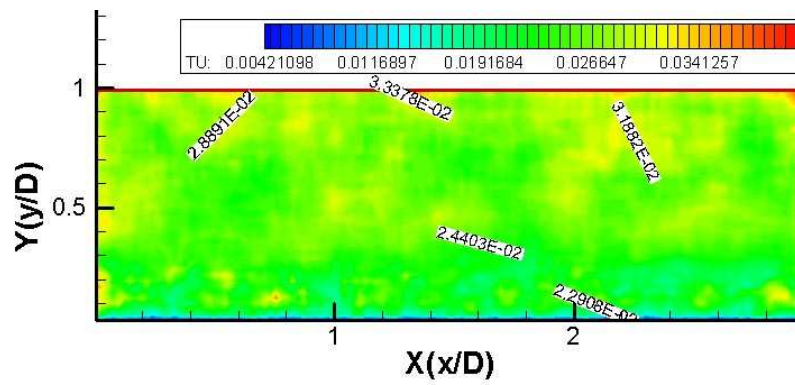
Fig. 4.5 Turbulence intensity distribution

$$\left( T_u = \frac{\sqrt{u'^2}}{U_0}, T_v = \frac{\sqrt{v'^2}}{U_0} \right)$$



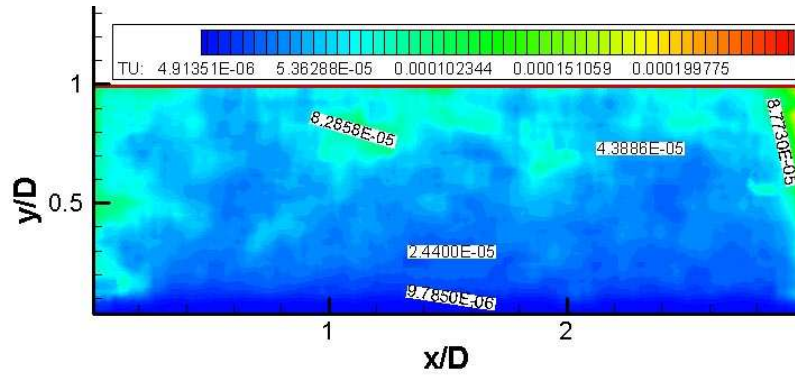


(c) Fuzzy(TIU)

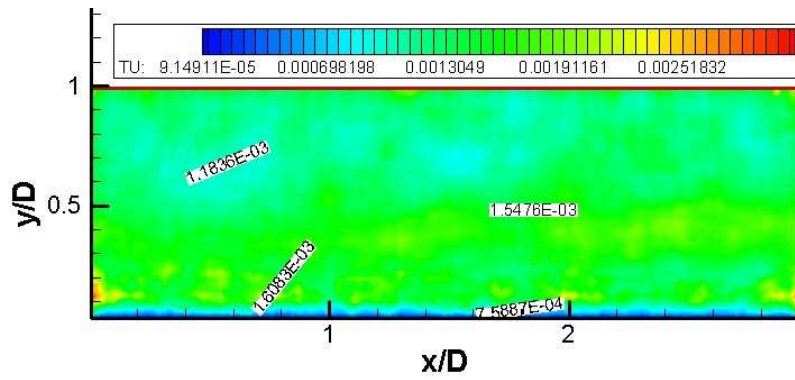


(d) Fuzzy(TIV)

Fig. 4.5 Continued

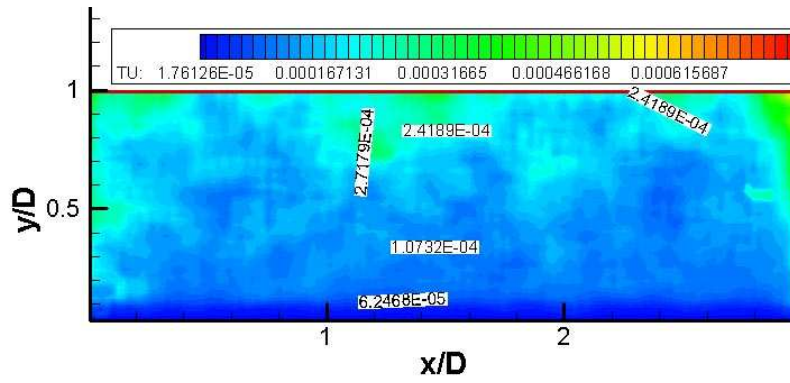


(a) GA

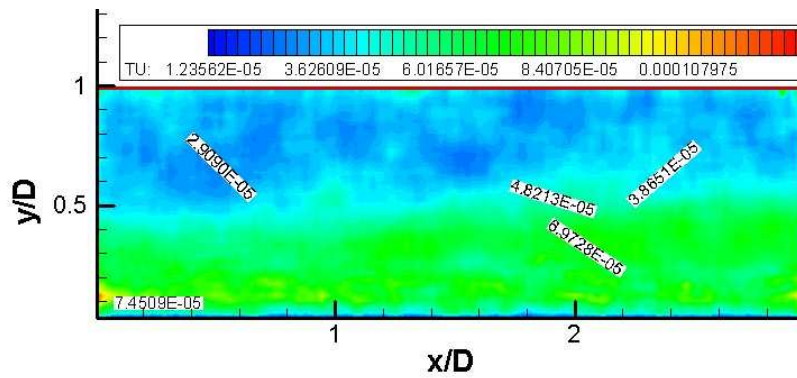


(b) Fuzzy

Fig. 4.6 Reynolds shear stress distribution ( $RES = -\overline{u'w'} / U_0^2$ )

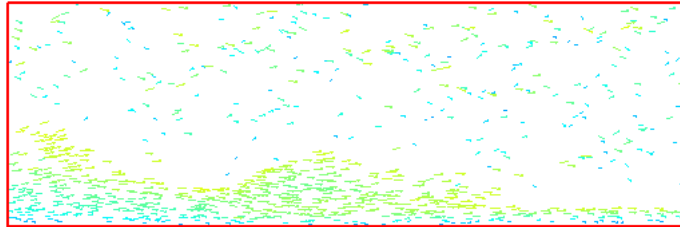


(a) GA

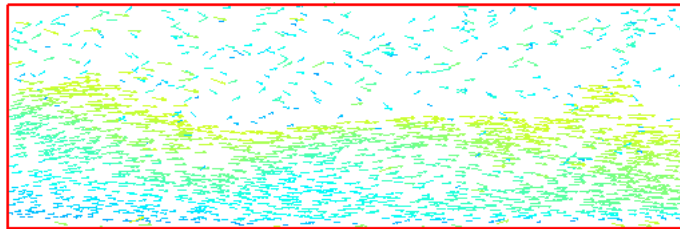


(b) Fuzzy

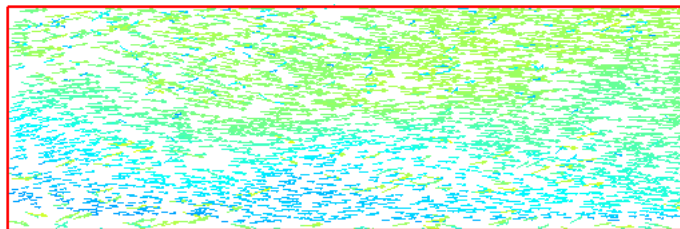
Fig. 4.7 Turbulence kinetic energy distribution(  $TKE = \frac{1}{2} \overline{q^2} / U_0^2$  )



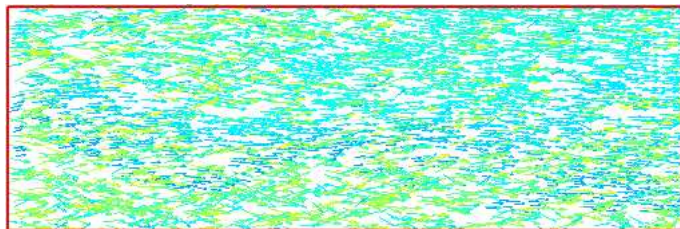
(a) slr=5



(b) slr=7.5



(c) slr=10



(c) slr=15

Fig. 4.8 The instantaneous vector using Fuzzy according to searching area

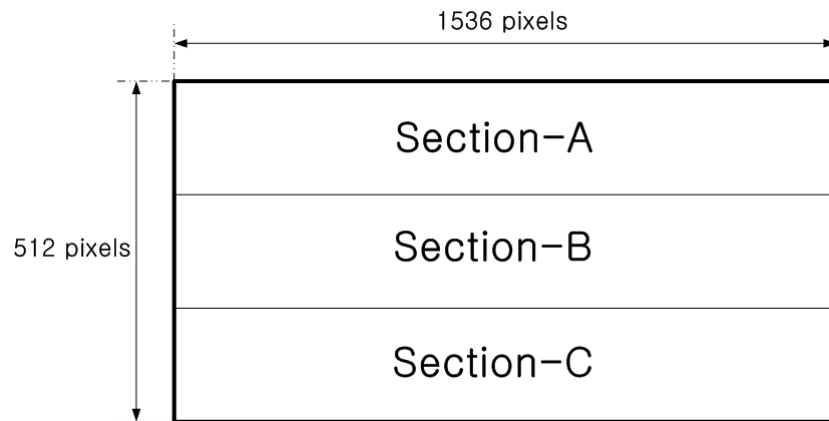


Fig. 4.9 Calculation domain according to searching area

Table 4.1 Vector recovery ratio(%) according to distance

<b>Distance(slr)</b>	<b>Section-A</b>	<b>Section-B</b>	<b>Section-C</b>
5	16.0	19.61	64.36
7.5	25.43	37.82	36.75
10	34.85	35.70	29.45
15	34.62	35.12	30.26

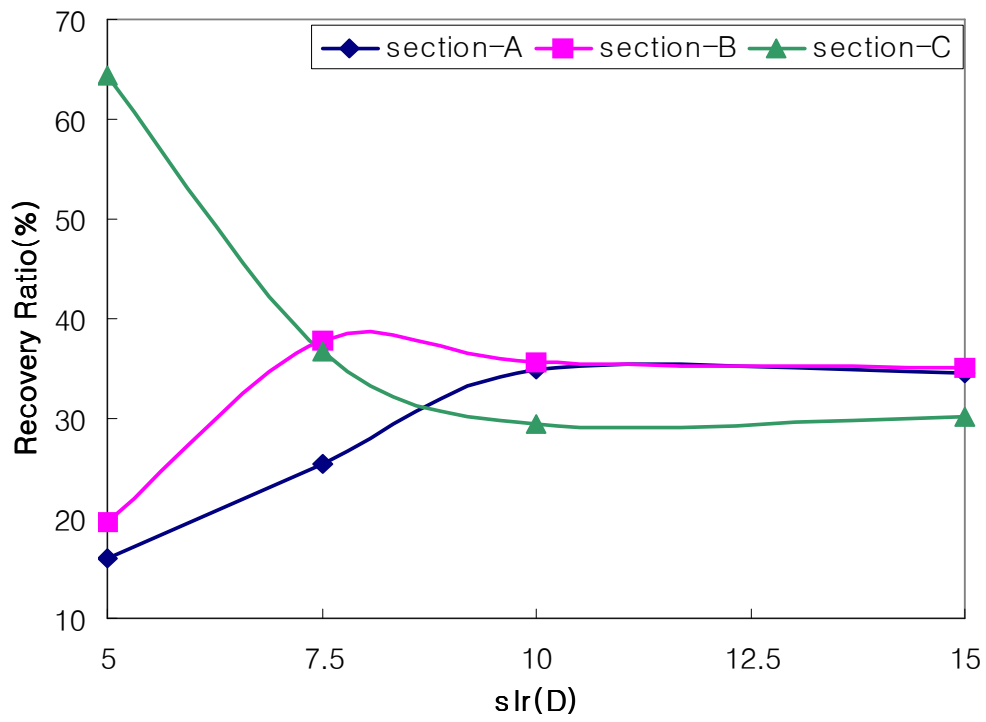


Fig. 4.10 Vector recovery ratio(%) according to distance

## 제 4 장 결론

퍼지 추론을 이용하여 2D-PTV(Particle Imageing Velocimetry) 방법을 제시하였고, 채널유동(x-streamwise방향)의 DNS 데이터를 적용하여 개발된 알고리즘의 성능평가를 수행하였다. 이러한 과정에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

퍼지 알고리즘을 적용과정에 있어서 추론이 어떤 역할을 하는가 잘 알 수 있고, 추론이 정확 할 수록 더욱 우수한 속도 벡터를 검출 할 수 있다. 계측영역내의 입자 수가 4000개까지는 비교적 우수한 벡터를 GA-PTV나 다른 PTV기법 보다 더욱 빠르고 많은 속도 벡터를 검출 할 수 있다.

본 연구에서 개발한 Fuzzy-PTV법은 PTV계측법에 대한 성능을 평가하기 위해 실제 유동의 실험을 통한 검증을 필요로 한다. 그리고 정확한 벡터 검출을 위해 차후 국소 영역 안에서 유체는 연속의 식을 만족해야 한다는 조건의 도입을 필요로 한다.

PTV 계산을 위해서는 퍼지 추론에서 입력 값에 대한 퍼지 입력 값으로 변환하는 멤버쉽 함수의 정확한 결정이 매우 중요하게 됨을 수치적 실험으로부터 알 수 있었다.

본 연구에서 DNS 데이터에 의한 계산 결과에서는 입자 후보군 중에서 정확한 입자 후보를 찾는 방법과 에러벡터를 제거하기 위한 새로운 퍼지추론 방법 개발을 필요로 하고, 향후 공간인식을 통한 3D-PTV로의 확장이 필요하다.

현재 GA-PTV 알고리즘이 가장 올바른 입자 쌍을 찾는 알고리즘으로 여기어 지고 있으나, 계산시간이 많이 걸린다는 점, 측정 알고리즘의 복잡성으로 인하여 오류 백터가 많이 포함될 가능성이 높다는 점의 단점이 있다. 본 연구에서는 국소적인 정보에 대하여 최적화가 가능하고, 계산시간이 적게 걸리는 Fuzzy-PTV기법의 개발 가능성을 제시 하였고, 향후 실제 유동 계측에 있어서 보다 합당한 추론 규칙을 제시한다면 우수한 PTV측정법이 될 것으로 사료된다.



## 참고 문헌

Liping Shen, Xiangqun Song, Yuichi Murai, Manabu Iguchi, Fujio Yamamoto. Velocity and size measurement of falling particles with fuzzy PTV , Flow Measurement and Instrumentation 12 (2001) 191-199.

M. P. Wernet. New insights into particle image velocimetry data using fuzzy-logic-based correlation/particle tracking processing. Experiments in Fluids 30 (2001) 434-447.

임영도, 이상부 공저. Fuzzy Neural network Genetic evolution. 도서출판 영과일.

박민용, 최향식. 퍼지제어 시스템(Fuzzy Control System). 도서출판 대영사.

도덕희, 조용범, 홍성대, 2000, “ 유전적 알고리즘에 의한 PIV계측법”, 대한기계학회춘계학술대회 논문집(B), 울산대학교, pp.650-654.

기타노 히로아키, 1996, “ 유전자 알고리즘 ” · Hanazaki H. A numerical study of three-dimensional stratified flow past a sphere. J. Fluid Mech 1988;192:393-419

조경래, 2001, 유전알고리즘을 이용한 3차원 PTV기법의 개발에 관한 연구, 한국해양대학교 석사논문, 부산

조용범, 2002, 3차원 PTV에 의한 원주 근접후류의 특성조사, 한국해양대학교 석사논문, 부산

Mark P. Wernet. Fuzzy Logic Particle Tracking Velocimetry. SPIE Conference on Optical Diagnostics in Fluid and Thermal Flow, San Diego, 1993, (NASA TM 106194)

Yamakawa M; Iwashige K (1986) On-line velocity distribution measuring system applying image processing. J Flow Visualization Soc. Jpn., 6(20): 50-58.

Racca RG; Dewey JM (1988) "A method for automatic particle tracking in a three-dimensional flow field". Exp. in Fluids, 6: 25-32.

Adamczyk AA; Rimai L. (1988) "Reconstruction of a 3-Dimensional flow field from orthogonal views of seed track video images." Exp. in Fluids, 6: 380-386.

Kobayashi T.; Saga T.; Sekimoto K. (1989) "Velocity measurement of three-dimensional flow around rotating parallel disks by digital image processing." ASME FED 85: 29-36.

Nishino K.; Kasagi N.; Hirata M. (1989) "Three-dimensional particle tracking velocimetry based on automated digital image processing." ASME J. Fluids Eng. 111(4): 384-391.

Kobayashi T.; Saga T.; Haeno T.; Tsuda N. (1991) "Development of a real-time velocity measurement system for high Reynolds fluid flow using a digital image processing design." In: Experimental and Numerical Flow Visualization (Ed Khalighia B et al.). ASME FED 128: 9-14.

D.H. Doh; D.H. Kim; S.W. Choi; S.D. Hong; Kobayashi; T. Saga (2000)  
"Single-frame 3D-PTV for high speed flows", Exp. in Fluid

Adrian RJ (1991) "Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics."  
Ann. Rev. Fluid Mech. 23: 261-304.

· Dandy DS, Dwyer HA. A sphere in shear flow at finite Reynolds number:  
effect of shear on particle lift, drag, and heat transfer. J Fluid Mech  
1990;216:381-410

Magnaudet J, Rivero M, Fabe J. Accelerated flows past a rigid sphere or a  
spherical bubble. Part I: Steady straining flow. J Fluid Mech 1995;287:151-17

P. Ploumhans, G.S. Winckelmans,<sup>\*</sup> J. K. Salmon, A. Leonard, and M. S. Warren,  
2002, Vortex Methods for Direct Numerical Simulation of Three-Dimensional  
Bluff Body Flows: Application to the Sphere at  $Re=300, 500, \text{ and } 1000$ , Journal  
of Computational Physics, Elsevier science(USA), VOL(178), PP 427~463.

R. Mittal, 2000, Response of the Sphere Wake to Freestream Fluctuations  
Theoret. Comput. Fluid Dynamics, USA, VOL(13), PP 397~419.

V.A. Gushchin <sup>\*</sup>, A.V. Kostomarov, P.V. Matyushin, E.R. Ravlyukova, 2002,  
Direct numerical simulation of the transitional separated fluid flows around a  
sphere and a circular cylinder, Journal of Wind Engineering and Industrial  
Aerodynamics, Elsevier Science Ltd(USA), VOL(90), PP 341~358.

Mansy, H., Yang, P. M. and Williams, D. R., "Quantitative Measurement of Three-Dimensional Structure in the Wake of a Circular Cylinder", *J. Fluid Mech.*, Vol. 270, 1994, pp. 277-296.

Williamson, C. H. K., "Three-Dimensional Wake Transition," *J. Fluid Mech.*, Vol. 328, 1996, pp. 345-407.

Chyu, C. and Rockwell, D., "Evolution of Patterns of Streamwise Vorticity in the Turbulent Near Wake of a Circular Cylinder," *J. Fluid Mech.*, Vol. 320, 1996, pp. 117-137.

Wu, J., Sheridan, J., Welsh, M. C., Hourigan, K. and Thompson, M., 1994, "Longitudinal Vortex Structures in a Cylinder Wake," *Phys. Fluids*. Vol.6, pp. 2883-2885.

Chang, T. P., Wilcox, N. A., Tatterson, G. B., "Application of image processing to the analysis of three-dimensional flow fields", *Opt. Eng.* Vol. 23(3), 1984, pp. 283-287

Chang, T. P., Tatterson, G. B., "An automated analysis method for complex three dimensional mean flow fields", *Proc. Third Int. Symp. Flow Visualization*, 1983, pp. 266-273

Yamakawa, M., Iwashige, K., "On-line velocity distribution measuring system applying image processing", J Flow Visualization Soc. Jpn., Vol. 6(20) 1986, pp. 50-58.

Racca, RG., Dewey, JM., "A method for automatic particle tracking in a three-dimensional flow field", Exp. in Fluids, Vol. 6 .1988, pp. 25-32.

Adamczyk, A. A., Rimai, L., Reconstruction of a 3-Dimensional flow field from orthogonal views of seed track video images. Exp. in Fluids, Vol. 6, 1988, pp. 380-386

Nishino, K. Kasagi, N., Hirata, M., "Three-dimensional particle tracking velocimetry based on automated digital image processing", ASME J. Fluids Eng. Vol.111 No. 4, 1989, pp. 384-391.

Panantoniou, D., Dracos, T., "Analyzing 3-D turbulent motions in open channel flow by use of stereoscopy and particle tracking", Advances in Turbulence 2 (Ed. Fernholz HH; Fiedler HE). 1989, pp. 278-285. Berlin: Springer-Verlag.

Kasagi, N., Nishino, K., Probing turbulence with three dimensional particle tracking velocimetry. Exp. Thermal and Fluid Sci. Vol. 4, 1991, pp. 601-612

Kent, J.C., Trigui, N., Choi, W.C., Guezennec, Y.G., Brodkey, R.S.,  
"Photogrammetric calibration for improved three-dimensional particle tracking  
velocimetry", Proc. SPIE Int. Symp. on Optical Diagnostic in Fluid and Thermal  
Flows, San Diego, July. 1993,

Mass, H. G., Gruen, A., Papantoniou, D. A., "Particle tracking velocimetry in  
three-dimensional flows. Part 1 Photogrammetric determination of particle  
coordinates", Exp. In Fluids. Vol. 15 1993, pp. 133-146

Malik, N. A., Dracos, Th., Papantoniou, D. A., "Particle tracking velocimetry  
in three-dimensional flows", Part 2. Particle tracking. Exp. In Fluids.  
Vol. 15, 1993, pp. 279-294

Ballard, D, H., Brown, C, M., Computer vision. New Jersey: Prentice-Hall,  
1982, pp. 195-225.

Okamoto, K., Three-dimensional particle tracking algorithm: Velocity Vector  
Histogram and Spring Model, Proc. of 3rd PIV Workshop, Fukui, Japan. 1995.

Ohyama, R., Takagi, T., Tsukiji, T., Nakanishi, S., Kaneko, K., Particle  
Tracking Technique and Velocity Measurement of Visualized Flow Fields  
by means of Genetic Algorithms, 可視化情報, Vol. 13 Suppl. No. 1, 1993,  
pp. 22-25.

Kimura, I., Hattori, A., and Ueda, M., "Particle Pairing Using Genetic Algorithms for PIV", Proceedings of VSJ-SPIE98 December 6-9, 1998, Yokohama, JAPAN AB093

Masagi, N., "An introduction to measurement uncertainty analysis", J. Visualization. Visualization Society of Japan. Vol. 9(31), 1998, pp. 29-35

Agui, J. C., Jimenez, J., "On the performance of particle tracking", J. Fluid Mech. No1. 185, 1987, pp. 447-468.

Willert, C. E., and Gharib, M., "Digital particle image velocimetry", Exp. in Fluids, Vol.10, No. 4, 1991, pp.181-193.

## 감사의 글

짧다면 짧고 길다면 긴 실험실 생활 5년 동안 방황 할 때 학문의 길로 인도해주신 도덕희 지도교수님에게 진심으로 감사 드립니다. 저희들 걱정에 편하게 잠들지 못하시는 교수님을 볼 때 마다 안쓰럽습니다. 앞으로 건강도 챙겼으면 하는 바람입니다. 저의 논문을 심사해주신 최형식 교수님과, 김동혁 교수님에게도 감사의 뜻을 전합니다. 아울러, 저의 학문적 소양을 넓혀주신 기계과, 냉동공조공학과 교수님들께도 감사의 마음을 전합니다.

지금까지 키워주시고 많은 나이에 공부 하겠다는 저를 위해서 고생하시는 부모님, 물론 양면으로 지원해주시는 작은아버님, 고모부님, 고모들, 이모부님, 이모들, 사촌형, 누나, 동생들에게도 감사의 뜻을 전합니다.

제가 처음 실험실에 들어왔을 때 실험실장으로써 아무것도 모르는 저에게 많은 도움을 주신 성환이형 주말이면 항상 저희와 함께 시간을 보내신 백태실 교수님께 감사의 마음을 전합니다. 그리고 지금은 일본에서 열심히 공부하고 있는 성대형, 우리의 영원한 파스칼 경래형, 이제 막 일본에 공부하러간 원제, 오랜 실험실 생활동안 격의 없이 지내고 있는 좋은 벗인 조용범, 편용범, 장규섭, 박천수, 차규한 대우 전자에서 열심히 일하고 있고 곧 장가 간다는 문지섭에게도 감사의 마음을 전합니다. 무엇보다 논문 쓰는데 많은 도움과 격려를 해준 황태규군, 신입 대학원생으로 힘든 일 어려운 일을 마다하지 않았던 후배들 신동진, 방윤석, 김종찬, 상지웅에게도 감사의 마음을 전합니다.

이 지면을 빌려 일일이 열거를 할 수 없지만 저에게 많은 힘이 되어 주신 가족, 친지, 친구. 동기에게도 감사의 마음을 전합니다.

2003년 1월  
아치섬에서 우장덕 배상