

2007年 2月  
碩士學位論文

Desktop Personal Computer  
內附의 流動特性에 관한 研究

朝鮮大學校 大學院

機械工學科

丁 韓 別

# Desktop Personal Computer 內附의 流動特性에 관한 研究

A Study on the Flow Characteristics of Desktop  
Personal Computer

2006 年 10月 日

朝鮮大學校 大學院

機 械 工 學 科

丁 韓 別

Desktop Personal Computer  
內附의 流動特性에 관한 研究

指導教授：李 行 男

이 論文을 工學碩士 學位 論文으로 提出함

2006 年 10月 日

朝鮮大學校 大學院

機 械 工 學 科

丁 韓 別

# 丁 漢 別의 碩士學位 論文을 認准함

委員長 朝鮮大學校 教授 朴 吉 文 ⑩

委 員 朝鮮大學校 教授 牟 洋 佑 ⑩

委 員 朝鮮大學校 教授 李 行 男 ⑩

2006年 11月 日

朝鮮大學校 大學院

# 目 次

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| LIST OF FIGURES ..... | iii |
| LIST OF PHOTOS .....  | iv  |
| LIST OF TABLES .....  | iv  |
| NOMENCLATURE .....    | v   |
| ABSTRACT .....        | vi  |

|                        |   |
|------------------------|---|
| 第 1 章 序 論 .....        | 1 |
| 第 1 節 研究의 背景과 動向 ..... | 1 |
| 第 2 節 研究의 目的 .....     | 5 |

|  |    |
|--|----|
| 第 2 章 理論的 背景 .....                           | 7  |
| 第 1 節 PIV의 理論的 背景 및 速度計算 algorithm .....     | 7  |
| 1. PIV의 理論的 背景 .....                         | 7  |
| 2. 速度計算 algorithm .....                      | 14 |
| 가. Particle Tracking Method .....            | 15 |
| 나. Grey Level Cross Correlation Method ..... | 15 |
| 다. 1-Frame Method .....                      | 16 |
| 라. 2-Frame Method .....                      | 18 |

|            |                               |    |
|------------|-------------------------------|----|
| 第 3 章      | 實 驗                           | 21 |
| 第 1 節      | 實驗 裝置                         | 21 |
|            | 1. Experiment Duct            | 21 |
|            | 2. 各 裝置들의 諸元                  | 22 |
|            | 3. Particle Image Velocimetry | 23 |
| 第 2 節      | 實驗方法 및 計測                     | 25 |
|            | 1. PIV 計測                     | 25 |
| 第 4 章      | 結 果 및 考 察                     | 29 |
| 第 1 節      | 速度分布                          | 29 |
| 第 2 節      | Re-Stress 分布                  | 37 |
| 第 3 節      | 運動 Energy 分布                  | 44 |
| 第 5 章      | 結 論                           | 51 |
| References |                               | 52 |

## LIST OF FIGURES

|         |   |    |
|---------|---|----|
| Fig. 1  | Pulse control of the AOM .....  | 13 |
| Fig. 2  | Flow chart of the PIV classification .....  | 14 |
| Fig. 3  | Flow chart of the 1-frame method .....  | 17 |
| Fig. 4  | Velocity vector calculated from a displacement of a small<br>sub-region and known time $\Delta t$ ..... | 18 |
| Fig. 5  | Principle of the grey level cross correlation .....   | 20 |
| Fig. 6  | Maximum cross correlation coefficient. ....   | 20 |
| Fig. 7  | Experiment Duct .....   | 21 |
| Fig. 8  | Schematic diagram of the PIV system .....   | 24 |
| Fig. 9  | Velocity Distributions by In, Out Fan On .....  | 33 |
| Fig. 10 | Velocity Distributions by In, Out, CPU Fan On .....   | 36 |
| Fig. 11 | Re-Stress by In, Out Fan On .....   | 40 |
| Fig. 12 | Re-Stress by In, Out, CPU Fan On .....  | 43 |
| Fig. 13 | Averaged T.K.E by In, Out Fan On .....  | 47 |
| Fig. 14 | Averaged T.K.E by In, Out, CPU Fan On .....   | 50 |

## LIST OF PHOTOS

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Photo. 1  | Experimental equipments of PIV and test duct .....  | 27 |
| Photo. 2  | Date acquisition and processing system of PIV ..... | 27 |
| Photo. 3  | Fan 1,2 ON PIV Experiment .....                     | 28 |
| Photo. 4  | Fan 1,2 and CPU ON PIV Experiment .....             | 28 |
| Photo. 5  | Velocity Distributions by In, Out Fan On .....      | 31 |
| Photo. 6  | Velocity Distributions by In, Out, CPU Fan On ..... | 34 |
| Photo. 7  | Re-Stress by In, Out Fan On .....                   | 38 |
| Photo. 8  | Re-Stress by In, Out, CPU Fan On .....              | 41 |
| Photo. 9  | Averged T.K.E by In, Out Fan On .....               | 45 |
| Photo. 10 | Averaged T.K.E by In, Out, CPU Fan On .....         | 48 |

## LIST OF TABLES

|          |                                      |    |
|----------|--------------------------------------|----|
| Table. 1 | In, Out, CPU Fan Specification ..... | 22 |
| Table. 2 | Specification of PIV system .....    | 26 |



# NOMENCLATURE

| <b>Symbols</b> | <b>Brief definition</b>  |
|----------------|--|
| $i, j, k$      | : Unit vector along $x$ , $y$ and $z$ -axis, respectively            |
| $l$            | : Length of the test section [mm]                                    |
| $L_e$          | : Exit length [mm]   |
| $\Delta P$     | : Pressure difference [ $\text{N/m}^2$ ]                             |
| $Re$           | : Reynolds number of steady flow [ $= D_h u_m / \nu$ ]               |
| $t$            | : Time [s]   |
| $u, v, w$      | : Velocity components in $x$ , $y$ and $z$ -axis, respectively [m/s] |

| <b>Greek Symbols</b> | <b>Brief definition</b> |
|----------------------|-------------------------|
|----------------------|-------------------------|

|        |   |
|--------|---|
| $\mu$  | : Coefficient of viscosity [ $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ ] |
| $\nu$  | : Coefficient of kinematic viscosity [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]    |
| $\rho$ | : Density [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]                              |
| $\tau$ | : Shear stress [ $\text{N}/\text{m}^2$ ]                          |

## ABSTRACT

### A Study on the Flow Characteristics of Desktop Personal Computer

Jung, Han-Byul

Advisor : Prof. Lee, Haeng-Nam

Dept. of Mechanical Engineering

Graduate School of Chosun University

Rapid development of CPU integrated circuit has brought rapid increase of electronic equipment quality including computers. Developed technology that to integrate CPU chips on printed circuit board has brought acceleration of micro and higher-density electronic systems. In particular, Desktop Personal Computer needs increased power consumption of CPU and PC is getting thinner. Therefore, heat design of PC has been considered as a worse condition. PC inside is air-conditioned with a use of radiator grille, heat pipe and Fan. However, as Desktop Personal Computer is getting smaller and more heat is found in CPU and PC because of integrated CPU, an effective technology to discharge heat out of PC case is needed. As flowing in PC case makes whirling spirals in the center of the case by Fan installed in different axis directions, efficiency of air inhalation and discharge is lower and noise is found. When peripheral equipment is installed, air with whirling spirals between bottom Slot and bottom case is stagnant. Therefore, this study is to identify flowing inhaled and discharged inside and outside of the PC case and cooling

efficiency of CPU in a design of PC case.

It is to study flowing characteristics inside the desktop personal computers with a use of PIV test. Under the condition that inhalation and discharge Fans are operated, particles of ZnO(tracing particles) are diffused into the mouth of the duct to measure the characteristics. The results of the test are summarized as follows:

1) When Slots are installed in PC, large and small parasites between Slots and bottom occur, which influences the entire flowing inside PC and makes noise in inhalation and discharge.

2) In left top which is not directly influenced by inhalation and discharge Fans loaded in PC, flowing occurs because of pressure differences in parasites occurring in the middle of PC.

3) For operation of CPU Fan, flowing distribution is more definitely found in the upper of the case compared to when the Fan is not operated. However, as CPU Fan moves clockwise, more definite parasites occurs between CPU Fan and Slots. It is found when fluid inhaled from the inhalation Fan has reverse strength while flowing toward the discharge Fan.

4) The parasites occurring in the middle of CPU Fan is smaller as the gap between CPU Fan and Slot is larger. It influences flowing in left top of the case which is hardly found when the CPU Fan is not operated. However, it is believed that operation of CPU Fan does not influence flowing between Slots and the bottom of the case.

# 第 1 章 序 論

## 第 1 節 研究의 背景과 動向

최근 CPU칩에 회로를 집적하는 기술의 비약적인 발달은 컴퓨터를 비롯한 전자기기의 성능을 급격하게 증가시키고 있다. CPU칩을 인쇄회로기판(PCB: printed circuit board)에 신장하는 기술의 발달은 전자시스템의 소형화 및 고밀도를 더욱더 가속화시키고 있다. 특히 Desktop PC의 경우에 있어서 CPU의 소비 전력이 증가하고 있고, PC의 두께는 점점 얇아지고 있는 추세이다. 이로 인해 PC내부의 열설계 측면에서는 더욱더 열악한 조건으로 되고 있다. 현재 PC내부의 냉각방법은 방열판, Heat pipe, 팬을 사용한 공냉방식이 주를 이루고 있다. 그러나 Desktop Personal Computer의 크기가 점점 작아지고 있고 CPU의 집약기술의 발달로 인해 CPU 및 PC 케이스 내부에 발생하는 열은 더욱 많아지고 있고 PC 케이스 외부로 효율적으로 방출시키는 기술이 필요하게 되었다.

PC 케이스의 설계 또는 성능향상을 위한 제반 과정 중 가장 기본적인 것은 수반하는 유동장의 거동을 파악하는 일이다. 이 경우에 눈에 잘 보이지 않는 흐름 중에 추적 입자를 넣고 적당한 조명을 가한 뒤에 카메라 등으로 순서 또는 시간평균의 유동장을 기록하여 유체역학적인 특성을 고찰하는 작업을 가시화(Visualization)라고 부른다. 가시화 영상에는 정성적인 정보 이상의 유용한 정보가 포함되어 있다. 가시화 영상으로부터 정량적인 정보를 추출할 수 있다면 유체의 유동현상을 동반하는 제반 공학적 문제의 해결을 위하여 많은 기여를 할 수 있을 것이다. 이들에 관하여 많은 연구자들이 다양한 기법을 제시하여 왔으며 최근에는 발달된 영상매체의 기술에 힘입어 지금까지 원리적으로만 가능했던 기법들이 실

용 가능한 단계에 이르렀다. 특히 디지털 영상처리기법(Digital image processing)은 컴퓨터를 비롯한 관련 하드웨어의 비약적인 발전과 더불어 수많은 적용 사례를 보여 주고 있다. 이와 같은 추이 속에서 유체의 기본 물리량을 동시다점으로 측정할 수 있는 입자영상유속계(Particle Image Velocimetry, PIV)<sup>1~3)</sup>가 최근 각광을 받고 있다. 최근 들어 측정기기의 고성능화에 따라 유동특성에 대한 PIV 기법이 개발되어 이루어지고 있는 많은 연구 가운데 몇 가지를 살펴보면 Lee<sup>4)</sup>는 PIV를 이용한 순간속도장 측정에 관한 기초연구를 행하였고, Lee<sup>5)</sup>는 사각공동 내 자연대류유동에 대한 수치해석 및 삼단계추적법을 이용한 PIV 알고리즘에 의한 실험적 연구를 행하였다. Min<sup>6)</sup>은 PIV 기법을 이용하여 파형 벽면을 가지는 내부 유동의 특성에 대해서 실험적으로 규명하였으며 Lee<sup>7)</sup>는 단순물체의 후류에 대해서 이미지 영상기법을 사용하여 연구하였다. Yun<sup>8)</sup>은 곡관 후류에 연결된 직관에서 PIV를 이용하여 속도분포, 운동에너지 및 전단응력에 대해서 연구하였고 Kim<sup>9)</sup>은 혈액 유동장에 대한우레탄 인공 판막에 적용하여 인공판막 하류에서와 같이 난류 경향이 강한 유동장의 구조를 파악하였고 전체적인 속도장과 함께 유동장의 전단응력 분포를 해석하여 혈전 및 용혈 현상의 발생을 예측할 수 있도록 하였다.

1960년대에 들어서면서 컴퓨터의 급속한 발달에 힘입어서 과거에는 이론적으로 해석할 수 없었던 복잡한 유체유동해석이 수치 해석적으로 가능하게 되었다. 특히 지난 십 수 년 내의 컴퓨터의 발달은 매우 눈부시게 성장하여, 수년전 까지만 해도 계산기의 용량제한 및 계산속도의 제한이 커다란 문제가 되었다. 현재는 소형 컴퓨터로도 복잡한 유체유동 해석의 처리가 가능하게 되었다. 최근 진보가 매우 빠른 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)분야 에서 슈퍼컴퓨터를 이용한 유동 해석은 그 산물이라고 할 수 있다. 이와 같은 하드웨어의 진보와 함께 수치해석방법도 진보를 거듭하여, 복잡한 유체유동 현상을 해석할 수 있는 범용프로그램들이 외국에서 이미 개발되어 시판되고 있다, 현재 국내의

연구소, 대학 및 기업체 등에서도 이들 프로그램들을 도입하여 공학 분야에서 많은 시간과 비용이 소요되는 실험에 의지하지 않고는 측정할 수 없었던 물리적 현상을 예측하고, 실험에 의해서 측정하기 어려운 복잡한 형상 내에서의 유체유동을 해석하는 데 널리 사용되고 있다.

한편 최근 들어 활발한 연구가 이루어지고 있는 CFD를 이용한 연구를 살펴보면 Kim<sup>10)</sup>은 Navier-Stokes 방정식을 이용하여 고속 비행체의 최적 설계에 대해서 연구하였다, Jang<sup>11)</sup>은 선박용 프로펠러와 선체의 상호 간섭에 대해 연구하였으며 설비분야에 적용된 연구들로 Min<sup>12)</sup>은 사각 실린더 주위의 유동을 제어함에 따라 표면에 미치는 압력 분포의 형태를 연구하였다. Lee<sup>13)</sup>는 이차원 입·출구를 갖는 직육면체 공간내로 평행 유동 유입 시 형성되는 유동장에 대한 특성에 대해서 연구하였다, Yang<sup>14)</sup>은 유한체적법과 SIMPLER 알고리즘을 이용하여 덕트 내부 유동장에서 속도와 압력을 해석하였다. PIV계측과 CFD해석을 통해 비교한 연구로 Lee<sup>15-17)</sup>는 분기 사각덕트 내부에서 PIV와 CFD를 이용하여 분지부에서의 축방향속도와 2차유동분포를 측정하여 층류 정상유동의 이론해와 PIV 계측 실험 결과로부터 얻어진 속도 분포, 운동에너지 및 와류분포 등의 유동 특성에 대해서 연구하였다.

이러한 각종 연구를 크게 구분하여 보면 이론적 해석(Theoretical analysis), 수치해석(Numerical analysis) 및 실험적 연구(Experimental study)로 나눌 수 있다. 이론적인 연구방법으로서 관성항을 선형화시켜 해석하는 방법, 급수전개에 의한 해석방법과 CFD를 이용하여 운동량 방정식을 유한체적법에 의하여 수치해석 하는 방법으로 구분할 수 있다. 실험적인 방법으로는 정압피토포를 이용하여 속도와 압력분포를 측정하는 방법, 열선유속계를 이용하여 속도분포를 측정하는 방법, LDV를 이용하여 속도분포를 측정하는 방법과 염료 및 PIV를 이용한 유동가시화에 의한 속도벡터 해석방법 등이 있다.

유체유동을 가시화하기 위한 실험 및 컴퓨터 시뮬레이션 연구가 최근

각광받고 있는 가운데, 유체유동속도를 실험적으로 계측하기 위한 장치로서 기존의 열선유속계(HWA)와 레이저도플러유속계(LDV) 이후 등장한 것이 입자영상유속계(PIV)이다. 입자영상유속계를 이용한 유동가시화 기법은 3차원 측정 및 컬러 영상처리가 가능한 기술들이 개발되고 있으며, 최근에는 정도 및 해상도를 향상시켜 입자영상유속계를 이용할 수 있는 응용범위를 확대하고 있다. 닥트 내 유동현상에 대한 가장 믿을 수 있는 정보는 시험적인 물리량의 측정을 통하여 얻을 수 있지만 실험장치의 제약과 측정상의 어려움, 실험에 따른 많은 비용부담 등으로 인하여 실험은 제한된 경우에 한하여 수행하고 있다. 수치해석으로 유동문제를 해석하는 방법은 실제현상을 수학적으로 모델화 한지방정식을 풀이하는 것이므로, 유동현상을 관찰하는 실험적 연구와 비교하여 타당성과 정확성이 검증될 때 해석결과의 유용성을 인정받게 된다.

최근의 연구 동향을 조사해보면 1개의 모듈에 대한 유체유동 및 강제대류 열전달에 관한 연구는 문헌에 많이 보고되었다. 평행평판 채널벽면에 부착된 단일 모듈에 대한 열전달 특성을 실험적으로 수행하였다. Roller 등은 단일 발열체에 대한 유체유동 및 열전달 특성을 연구하였다. Rosten 등, Behnia 은 CFD 시뮬레이션을 이용하여 모듈 주위의 3차원 난류유동 및 열전달 특성을 연구하였다. 최근에 Nakamura은 난류경계층 내에 놓인 정방형 발열체 주위의 유체유동과 국소열전달 특성을 실험적으로 연구하였다. 이 연구들을 검토해보면 유체유동을 완전 발달된 유동으로 가정하여 모듈로부터 공기로의 대류열전달을 연구하였다. PC 케이스 내부로 공기를 유입 및 방출시키는 Fan, CPU의 냉각시키는 Fan 각 회로 기판이 설치되는 Slot의 가변적인 요소를 변화시켜가면서 PC케이스 내부의 Re-stress분포, 속도벡터분포, 운동에너지분포 등의 실험결과를 수행하였다.

## 第 2 節 研究의 目的

본 연구의 목적은 PC 케이스의 설계 시 PC케이스 내부에 발생하는 유동현상을 파악하여 CPU의 냉각효율과 케이스 내외부로 흡입·방출되는 유동현상을 규명하는데 목적이 있다.

이를 위해서 밀폐된 사각다트 내에서 유동에 대한 PIV계측에 사용된 지배방정식은 밀폐된 닥트 내의 유동에 대한 지배방정식을 유도한 후 비선형인 대류항을 Von-Kármán 적분법으로 선형화시켜서 속도분포식의 해를 구하였으며, 전산유체역학의 지배방정식인 연속방정식과 운동량방정식을 이산화 시켜 유체 유동해석에 많이 쓰이고 있는 유한체적법(Finite Volume Method)을 사용하였다. 실험적인 방법으로는 흡입구에 부착된 서지탱크로부터 발생된 추적 입자를 PC케이스 내부로 흡입시키고 출구 후면에 닥트로 이동하는 유동특성을 PIV를 이용하여 실험적으로 규명하였다. PC 케이스 내외부로 흡입 방출시키는 Fan 및 CPU를 냉각시키는 Fan 의 설계는 장치 전체의 냉각성능에 커다란 영향을 미치므로 정밀화, 고성능화, 규격화를 요구함에 따라 PC케이스 내부의 유동특성에 대한 연구의 필요성을 가진다.

본 연구는 PC케이스 내부의 유동현상이 각기 다른 축 방향으로 설치된 Fan에 의해 케이스 중앙부분에 소용돌이 형의 나선형운동을 하므로 공기의 흡입 방출이 효율이 떨어지며 소음이 발생한다, 주변기기를 장착하고 Slot의 부분에서는 공기가 Slot 하단과 케이스하단 사이에 나선형 운동을 하면서 정체되는 현상이 발생한다. 이러한 현상의 PC케이스의 실용적인 측면이나 학문적인 면에서 어떠한 유동특성을 나타낼 것인가는 유체공학을 연구하는 사람에게는 많은 관심이 집중되고 있다.

PC 케이스 내부로 공기를 유입 및 방출시키는 Fan, CPU를 냉각시키는 Fan, 주변기기(회로기관) 이 설치되는 Slot에게 요소를 변화시켜가면서



PC 케이스 내부에 발생하는 Re-stress분포, 속도벡터분포, 운동에너지분포 등에 관한 연구는 일반 Desktop Personal Computer 뿐만 아니라 노트북, 워크스테이션, 서버 및 기타 고밀도집적회로(Large Scale Integrated-LSI)가 사용되는 모든 케이스 설계의 효율 및 성능의 향상에 많은 도움이 될 것이다.

## 第 2 章 理論的 背景

### 第 1 節 PIV의 理論的 背景 및 速度計算 algorithm

#### 1. PIV의 理論的 背景

PIV는 실험유체역학의 새로운 기법이며, 이는 유체의 유동속도를 측정하기 위해 유동가시화기법과 디지털 화상처리기법의 결합된 기법이다. 입자영상유속계를 이용한 유동가시화는 LDV나 열선유속계와 같은 유속계측 방법과 비교하여 전체 유동장내의 유동특성을 정성적으로 쉽게 재현할 수 있고 동시다점계측이 가능한 장점을 가지고 있다. 최근 들어 컴퓨터와 화상처리기술의 발달로 인하여 입자영상유속계를 이용한 측정기법이 하루가 다르게 발전하고 있으며 그 응용범위도 점점 확대되고 있는 중이다.

PIV의 기본원리는 유동장내에 주입된 입자들의 운동을 추적하여 이들 입자들의 순간적인 위치를 미소시간 간격을 두고 영상을 입력하여 유체의 유동속도를 계산하는 기법이다. 이 기법의 장점은 추적 입자가 유동장내로 삽입됨으로 인한 유동교란이 없으며 순간적인 속도장을 획득할 수 있다는 것이다. 복잡한 유동이나 비정상유체유동을 효과적으로 연구할 수 있다. PIV는 정량적이고 정성적인 전체유동장내 공간적인 속도정보를 획득할 수 있으며, 이러한 정량적인 공간상의 속도정보로부터 유체역학적 특성들을 구할 수 있다.

속도벡터의 추출에 이용되는 입자의 종류가 개별입자인가 아니면 임의의 검사영역(Interrogation region)내의 입자군(중복되거나 독립적으로 존재함) 인가의 여부에 따라 PIV를 구분할 수 있다. 개별 입자를 독립적으로 인식하고 이들에 대하여 순서 또는 번지수를 부여하는 라벨링(labeling)작업과 함께 개별입자의 미소궤적을 추적하는 개별입자 추적(Discrete Partic

le Tracking, DPT) PIV [과거의 PTV(Particle Tracking Velocimetry)]와 검사 영역내의 입자군의 분포에 대한 상관관계로부터 속도벡터를 추출하는 입자분포상관(Particle Distribution Correlation, PDC) PIV로 대별할 수 있다. 이 경우에 DPT-PIV는 PTV와 같은 특성을 나타낸다. 임의로 분포된 위치에서의 랜덤벡터가 얻어지며 후처리과정에서 격자 보간이 필요하다. 그러나 PDC-PIV에서는 처음부터 정의된 격자점의 위치에서 속도벡터가 구해지기 때문에 격자간 보간이 필요 없게 된다. 또한 PDC-PIV에서는 원리적으로 검사영역내의 개별입자의 도심 좌표에 대해서도 상관계수를 구할 수가 있기 때문에 DPT-PIV용의 개별입자 영상이 사용될 수가 있다. 일반적으로 두 기법의 장단점을 비교해 보면 다음과 같다. 먼저 DPT-PIV는 개별입자의 자동 인식작업에 약간의 계산시간이 필요하나 동일입자의 추적 알고리즘은 비교적 간단한 연산과정을 요한다. 전체적인 작업시간이 매우 단축될 수가 있다. 미소시간 동안의 유동장의 변형에 대하여 비교적 둔감한 성질을 나타내기 때문에 이상치의 발생이 억제된다. 유동장 전체에 걸쳐 추적 입자가 독립적으로 균일하게 분포하여야 하며 양호한 산란광의 영상을 제공하여야 한다. 이것은 조명을 비롯한 실험환경 및 실험기법에 크게 의존하게 되며 일반적으로 한 장의 화면에서 얻을 수 있는 유효벡터의 수가 많지 않게 된다.

한편 PDC-PIV에서는 Adrian<sup>18)</sup>의 고영상밀도 PIV방식을 제외하고는 스펙클(LSV) 또는 픽셀 계조치의 밝기정보(Intensity, Grey-level)를 이용 [계조치 상호상관법 등]하기 때문에 유동장에 분포된 입자가 개별적으로 인식이 되지 않아도 문제가 되지 않는다. 입자에 대한 제한조건이 크게 완화되어 유동장의 생성이 비교적 용이하게 이루어진다. 얻어지는 벡터 수는 검사영역의 격자수로 정해지므로 많은 수의 벡터가 얻어질 수 있다. 그러나 이 방식에서는 상관함수(계수)의 산출에 번거로운 광학적인 배치가 필요하거나 FFT(Fast Fourier Transform)연산, 상관계수의 계산에 매우 큰 컴퓨터 부하를 요구한다. 한편 유동장의 변형에 대하여 상관함수의 최고치가

민감하게 변함으로서 이상치의 발생에 주의를 하여야 한다. 요약하면 DPT-PIV에서는 PIV에 적합한 입자의 공급 및 조명 등의 문제에 유의하여야 하나 대신 속도벡터 추출에 필요한 컴퓨터 연산속도가 빠르다. 그러나 PDC-PIV에서는 이와 반대로 유동장의 입자조건이 까다롭지 않은 반면 상관계수의 계산에 번거로운 작업이 요구된다.

조명부호 PIV 방법은 Adrian의 정의에 의한 저영상밀도 PIV(PTV)중 단일프레임(Single-frame)법을 의미한다. 한 장의 사진 또는 프레임에 조명을 부호화하여 벡터의 크기 및 벡터의 시점과 종점을 구하는 기법으로서 PTV의 초기에 많이 적용되었다. 펄스 조명의 폭 및 간격을 조정하여 연속펄스 또는 긴 유맥선(Streak) 입자영상을 기록한 뒤에 개별 입자의 궤적을 추적한다. 가장 기본적인 방법은 사진을 확대하여 디지털라이저(Digitizer) 상에서 사람의 눈으로 구별하는 것이나 번거로운 작업이 필요하며 무엇보다 역류영역에서 벡터의 방향을 제대로 파악하는 것이 매우 어렵다. 벡터의 시점과 종점의 정확한 위치산정이 어려워 계측정도가 떨어진다. 한편 컴퓨터는 전용의 영상처리장치(Image processor) 또는 영상보드(Image grabber)로부터 이들 입자 궤적의 밝기 정보를 2차원의 위치(예를 들어 640×480 픽셀) 및 각 픽셀에서의 계조치(보통 256단계)의 값으로 데이터파일을 받아서 영상처리를 하게 된다. 보통 필터처리를 통한 노이즈제거 및 입자영상의 강조, 윤곽선의 검출, 세션화, 라벨링(Labeling), 도심좌표(Centroid)의 계산 등을 거쳐 적절한 추적알고리즘에 의해 벡터의 방향과 크기가 자동으로 계산된다. 이 방법에서 가장 어려운 점은 벡터의 시점 또는 종점을 알아내기 위하여 조명을 부호화하여 이를 해독하는 작업이다. 지금까지 여러 가지의 기법이 제안되고 있으며 Kobayashi<sup>19)</sup> 등은 카메라의 셔터가 개방되는 초기 시점에 스트로스코프(Stloscof)에 의한 짧은 조명 펄스를 첨가하여 벡터의 시점을 구별하는 기법을 제시하였다.

Grant<sup>20)</sup> 등은 펄스태깅(pluse tagging)법을 적용하여 방향관별을 하고 있다. 조명부호법은 원리 및 관련 장치가 비교적 단순하여 쉽게 적용할 수가

있으나 일반적으로 조명이 시작하여 끝나는 시점까지의 시간 간격이 크다는 점이 제약이 될 수가 있다. 레이저의 2차원 시트광(sheet light)내에 입자가 계속 머물러야만 유효백터가 산출될 수가 있으나 추적 입자가 주어진 미소 시간동안 2차원의 조명영역(In-plane)내에 머물지 않고 이 단면을 이탈하는 문제를 발생시키며 특히 고속의 3차원 유동장 해석에는 계층의 다이내믹 레인지가 크게 떨어질 수가 있다.

상호상관 PIV를 적용한 연구결과는 지금까지 다수 있으나 Willert와 Gharib<sup>21)</sup>가 이에 관하여 체계적으로 설명을 하고 있으며 특히 영상의 기록에 30Hz의 샘플링간격을 갖는 비디오 시스템을 채택하고 이를 DPIV로 명명하였다. 영상의 기록에 1초당 30프레임의 연속 저장이 가능한 비디오 방식을 택하였기 때문에 이들 중 두 프레임을 선정하여 FFT연산에 의하여 상호상관함수(Cross Correlation Function, CCF)를 구하였다. 다음으로 Adrian<sup>22)</sup>등은 과거의 자기상관 방식에서 벗어나 연속된 사진영상을 CCD로 받아들여 CCF를 직접 계산하고자 하는 이론적 연구를 시도하였다. 현재시간 해상도면에서 상호상관 PIV에 가장 적합한 선택은 우선 고속도 비디오카메라가 자동으로 설정되며 단지 충분한 조명이 필요하다. 그러나 현재의 고속도비디오 카메라는 일반적으로 공간해상도가 낮으며(최대 500×500 픽셀 수준) 풀사이즈에서 프레임수도 10오더에 머물고 있다. 이 때 얻을 수 있는 최대 계층속도는 10m/s전후라고 보인다. 다음으로 선택할 수 있는 것이 레이저의 연속광을 단속적으로 절단(Chopping)하여 짧은 펄스조명의 발생을 비디오의 동기신호와 연계시키는 방법이다.

Fig. 1은 AOM(Acoustic Optical Modulator, AOM)의 펄스제어를 나타낸 것으로서 비월주사방식(Interlace scanning)의 비디오프레임(Frame, 1/30sec)의 두 field(Odd와 Even field, 1/60sec)에 임의의 미소 펄스폭과 간격을 갖는 펄스광을 연속적으로 발광시켜서 유동장의 영상을 비디오 방식으로 저장하는 기법이다. 크게 기계적인 초퍼 (Mechanical chopper) 방식과 음향광의 회절원리를 이용한 음향광 조절기방식으로 대별할 수 있

다. 이 방식으로 고출력의 연속광 레이저와 고감도의 CCD카메라를 조합하면 약 100 m/s까지의 속도측정이 가능하다.

PIV를 이용한 유동속도측정은 입자주입, 조명, 영상획득, 영상처리의 네 단계로 구성된다. 입자주입에서 유동을 추적하기 위한 추적 입자는 가능한 한 균질하게 유동장내에 분포되어야 하고, 반사율이 좋아야 하며 유동을 잘 추종해야 하며, 유체와 유동의 성질들을 변하지 않게 해야 하는 성질을 가져야 한다.

작동유체 및 계측속도의 범위에 따라서 입자를 선정하여야 하며, 입자와 작동유체의 밀도를 가능한 한 일치시켜 추종성(Traceability)을 확보하여야 한다. 저속액체의 경우에는 주변의 온도변화에 따른 입자의 미소한 밀도차이가 추종성에 큰 영향을 미칠 수 있으며 입자의 주입에 따른 이상유동특성 또는 초기교란상태를 억제하여야 한다. 입자 선택 시에는 유체흐름에 미치는 영향, 관측장에서의 부착성질, 산란광 강도, 인체에 미치는 유해성 등을 고려하여야 한다.

입자 선택 시 기체는 10 $\mu$ m 전후의 광란성이 우수한 미소입자를 사용하는 것이 좋으며, 작동유체의 상태에 따라 기체인 경우에는 액적, 기체, 분말 등을 액체(물의 경우)인 경우에는 나일론12, 폴리스티렌 구형입자(직경 10-100 $\mu$ m 전후), 알루미늄 분말 등의 입자를 사용할 수 있다. 실험체의 재질은 보통 투명한 아크릴 또는 유리관 등으로 구성되며 실험체가 곡면을 가지고 있다면 빛의 굴절률을 고려하여야 한다. 밀폐흐름에 있어서는 재현성을 갖춘 유동장의 확보가 필요하다.

조명은 2차원의 경우에는 평면광의 두께는 1~3mm 전후의 시트 라이트(Sheet Light)가 필요하고, 광원으로서 2차원의 시트 라이트를 제공하기 위한 가시광 레이저(예를 들면, Ar-Ion 레이저)가 효과적이다. 레이저 대신 백색광원을 사용할 수도 있으나 발생 열에 의한 유동장의 변동을 억제시켜야 한다. 광원의 세기는 영상으로 추적 입자들을 선명하게 획득할 수 있는 강도를 가져야 한다. 저속액체[1.0m/s이하, 유동장의 크기 150×

150(mm)]의 경우에는 500mW 전후의, 고속기체[10~40m/s, 유동장의 크기 150×150(mm)]의 경우에는 5W 전후의 레이저를 사용할 수 있으나 저속 액체의 경우에는 광원용의 조명 열에 의해 자연대류의 영향이 매우 크므로 유의하여야 한다. 고속유동계측의 경우에는 미소시간간격을 확보하기 위하여 조명의 펄스제어가 필요하며 속도벡터의 추출알고리즘과 직접적인 관련이 있다. 조명방식은 PIV의 계측 범위를 결정하는 중요한 요소이며 현재 실용화 되어 있는 1-프레임 자기상관(1-frame Auto-correlation) 방식의 펄스 레이저조명에 의하여 400m/s의 고속기류까지 계측이 가능하다.

유동장내 입자들의 궤적은 고해상도 카메라에 의하여 영상으로 획득한다. 속도측정은 주어진 시간간격 ( $\Delta t$ ) 동안 움직인 유동입자들의 변위정보를 고속도카메라와 같은 영상입력장치를 이용하여 연속된 영상을 획득한다. 이때 카메라의 광축은 평면광에 수직하게 설치되어야 한다. 영상처리는 PIV측정에서 가장 중요한 과정이다. 먼저 입자운동을 기록한 영상은 디지털영상을 얻기 위해서 Image grabber로 보내진다. Image grabber를 이용하여 2차원 화상데이터를 저장한 후 디지털 영상처리기법을 이용하여 입자 변위를 계측한다. 영상입력장치로 입력된 영상은 전용의 영상처리장치 또는 컴퓨터에 내장된 이미지 보드에 기록·저장되며, 전처리 과정에서 영상 내 대상체와 배경의 경계 또는 윤곽선을 결정하는 경계탐색, 영상 이분화 작업, noise제거를 수행한다. 영상처리작업이 끝난 뒤 입자추적법을 적용하는 경우에는 각 입자들을 확인하여 입자의 도심을 구한 뒤 미소 시간동안의 입자의 변위를 계산하여 속도벡터를 구한다. 입자 또는 입자군(Particle cluster)이 갖고 있는 계조치에 대한 정보와 상관계수를 이용하여 속도벡터를 구하는 방법이 계조치상관법(Gray level correlation method)이다. 계조치상관법은 프레임의 수에 따라 단일 Frame Method과 다중 Frame Method으로 분류한다. 입자추적법과 계조치상관법에 관해서는 보다 개선된 프로그램의 개발을 위하여 많은 연구가 진행

되고 있다.

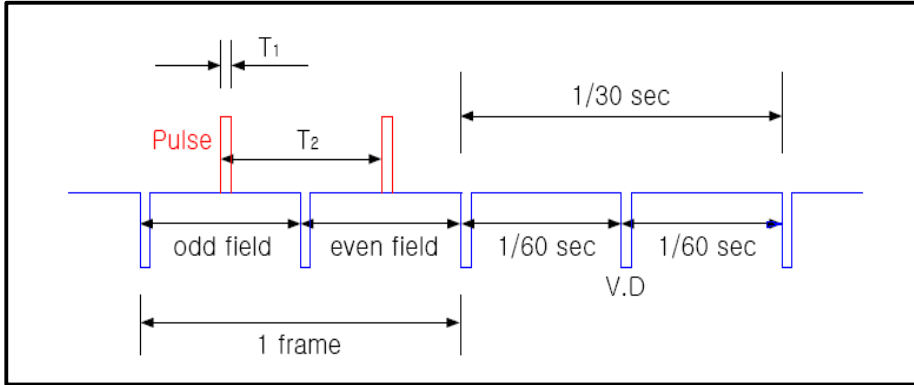


Fig. 1 Pulse control of the AOM



## 2. 速度計算 algorithm

입자영상유속계의 영상입력장치로 획득한 영상으로부터 processing과정을 거친 다음 영상처리과정에서 속도를 계산하기 위한 유속측정 알고리즘은 Fig. 2와 같이 입자추적법(Paticle tracking method)과 계조치상관(Grey level correlation)법으로 나눌 수 있다.

PIV시스템을 분류하는 방법은 여러 가지 방법으로 분류될 수 있으며, 그 분류기준으로 유속측정 알고리즘, 영상밀도(Image density) 혹은 입자분포의 밀도 등이 있다.

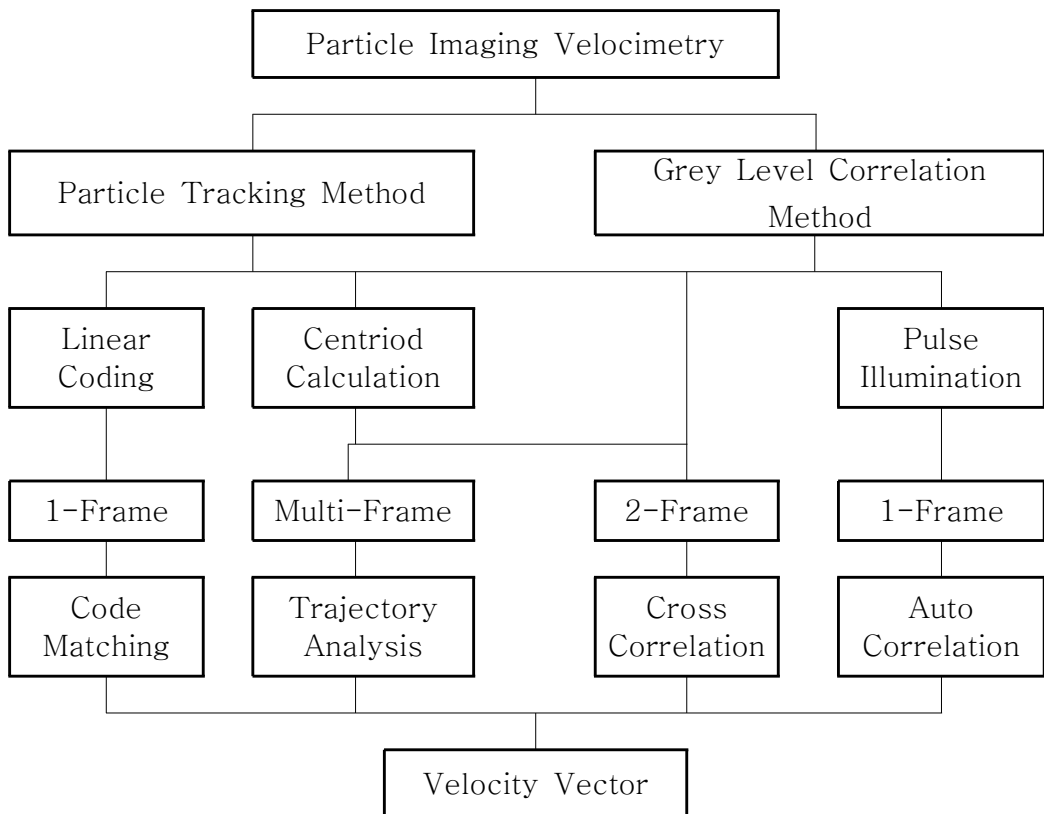


Fig. 2 Flow chart of the PIV classification

## 가. Particle Tracking Method

Particle Tracking Method(입자추적법) 중에서 가장 보편적으로 이용되는 기법은 개별도심좌표(discrete centroid)기법이다. 개별도심좌표 기법은 연속된 두 프레임 또는 그 이상의 프레임에서 개별추적입자의 도심좌표를 구하고, 구해진 2차원 위치정보( $x, y$ ) 좌표를 이용하여 벡터의 시점과 종점을 찾아내며 이로서 속도벡터를 획득하는 방법이다. 이 방법은 3프레임 이상의 연속된 입자분포 화면에 대하여 영상처리를 행하여 모든 입자의 도심좌표를 자동으로 구한 다음 이들 좌표에 대하여 미소시간 동안 이동할 수 있는 최대거리 및 등간격 이동조건과 이동각의 최소조건 등과 같은 평가함수를 산정하고 이로부터 최적의 유효벡터를 찾아내는 방법이다. 그러나 프레임 수가 많아지면 오류벡터의 발생확률을 줄일 수 있지만 단면이탈입자(Out of plane)의 문제로 인해 최종적으로 얻어지는 유효벡터의 수는 감소하게 되며 평가함수를 통한 계산시간이 많이 소요된다는 단점을 가지고 있다. 최근에는 두 프레임의 도심좌표만을 가지고 입자를 추적하는 기법들이 발달되고 있으며 일치확률기법 등과 같이 보다 정확한 속도를 얻기 위한 새로운 알고리즘이 개발되고 있다.

## 나. Grey Level Cross Correlation Method

Grey Level Cross Correlation Method(계조치상관법)은 순간입자영상을 개별 화상저장매체에 저장하고 각 조사구간 내 계조치분포사이의 상호상관함수를 직접 계산하거나 FFT(Fast Fourier Transform)연산을 이용하여 계산한 후 가장 큰 상호상관계수를 갖는 위치를 프레임 사이의 미소시간간격( $\Delta t$ )로 나누어줌으로써 조사구간 내 평균속도분포를 얻어내는 기법이다. 초기에는 2개 이상의 펄스광에 의해 산란된 입자영상을 고속카

메라와 같은 화상 저장매체에 동시 저장하고 미소 조사구간 내 영상을 Young's fringe 분석이나 자기상관함수를 이용하여 전체 속도장을 계측하는 상관법이 주류를 이루었다. 하지만 이 방법은 속도벡터 방향결정에 모호성 문제가 따르며 신호대 잡음을 나타내는 S/N비가 낮다는 문제점이 있었다. 최근 들어 방향의 모호성을 해결하기 위한 여러 가지 방법들이 개발되어 활용되고 있다.

입자추적이나 입자분포 상관정도에 다른 계조치상관법은 한 장의 영상을 이용하는 1-Frame Method과 두 장의 영상을 이용하는 2-Frame Method, 그리고 여러 장의 영상을 사용하는 Multi-Frame Method으로 나누어진다.

#### 다. 1-Frame Method

입자추적법이나 계조치상관법 중에서 하나의 프레임만을 이용하여 속도벡터를 구하는 방법을 1-Frame Method이라고 한다. 1-Frame Method은 광의 노출시간을 길게 하여 입자들의 streak를 형성시키는 Streak법과 여러 개의 Pulse로 Coding하는 Multi pulse coding법. Streak법과 Pulse coding을 혼합하는 방법 등이 있다. 속도를 계산하기 전에 획득된 영상에 대하여 영상을 이분화(Thresholding)하여 입자추적의 효과를 높이고, 오류벡터를 줄이기 위하여 배경잡음(background noise)을 제거한다. 다음으로 입자들의 경계를 탐색하고, 도심계산 등의 영상처리를 연속적으로 수행한다. 가시화실험을 통해서 얻은 영상을 1-Frame Method에 적용하여 속도벡터를 구하는 방법은 Fig. 3과 같다. Streak와 Dot를 혼합한 방법을 이용할 때 Chopper를 통과하는 광의 주기가 특정한 비를 가지고 있으므로 획득된 영상 내에서 입자들의 형상이 Fig. 4와 같이 분포하게 된다. 이때 점과 유맥선을 픽셀 점의 수로부터 판단하여 각각 분

리 저장한다. 저장된 유맥선에 대하여 곡선적합을 실행한 후 얻어진 함수의 방향으로 일정한 거리에 있는 지점에 적당한 크기의 탐색영역을 설정한다. 탐색영역 내에 화면주사 방향으로 탐색을 실행하여 영역 내에서 발견된 모든 pulse점에 대한 입자중심의 좌표 값에 기억시킨다. 여기에 있는 모든 입자중심의 좌표 값에 대하여 평가함수(evaluation function)를 도입하거나 적절한 알고리즘을 사용하여 중점을 구하게 되고 식 (2-1)로 속도벡터를 구하게 된다. 여기서 M은 magnification factor를 의미한다.

$$\text{Velocity} = M \frac{\Delta x}{\Delta t}, \quad M \frac{\Delta y}{\Delta t} \dots\dots\dots(2-1)$$

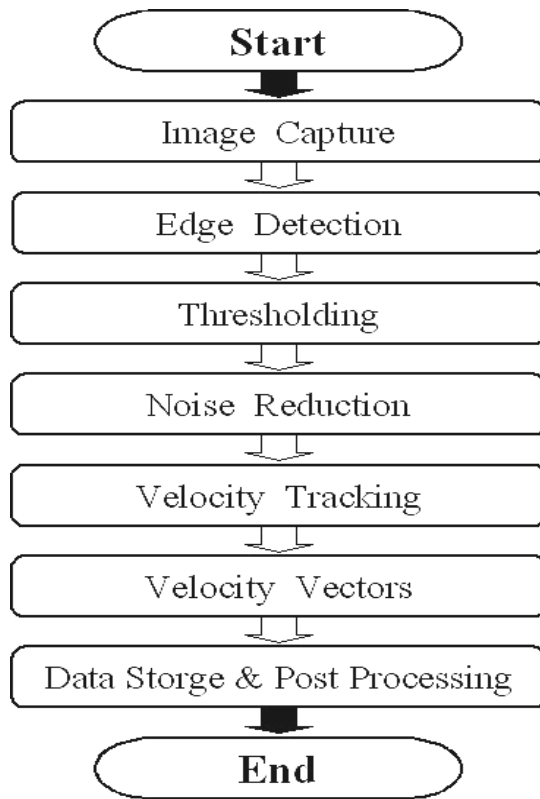
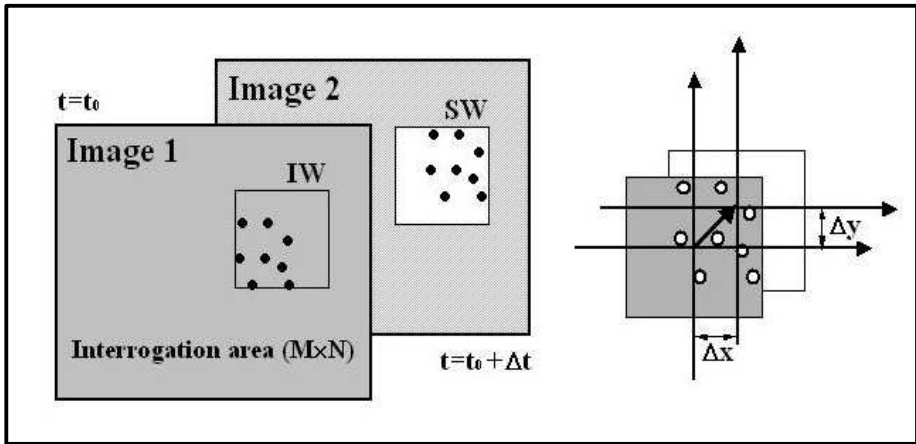


Fig. 3 Flow chart of the 1-frame method



$$\text{Velocity} = M \frac{\Delta x}{\Delta t}, \quad M \frac{\Delta y}{\Delta t}$$

Fig. 4 Velocity vector calculated from a displacement of a small sub-region and known time  $\Delta t$

#### 라. 2-Frame Method

2-Frame Method은 입자의 도심을 계산하여 속도벡터를 구하는 입자추적법과 계조치의 강도로써 속도벡터를 구하는 상호상관법에서 가장 많이 사용되고 있다. 상호상관법은 속도계산에 소요되는 시간이 매우 짧으나 2차원 영상에 근거하기 때문에 3차원 유동장 해석에 확장하기 위해서는 세심한 주의가 요구된다. 첫 번째 프레임에서 미소한 크기를 갖는 상관영역내의 입자는 두 번째 프레임의 탐색영역 내에 있다고 간주한다. 제 1-프레임과 제 2-프레임의 상관영역 내 각 화소(픽셀)의 계조치는 각각  $f(x, y)$ 와  $g(x, y)$ 로 나타낼 수 있으며, 이때  $f$ 와  $g$ 는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$f(x, y) = g(x - u\Delta t, y - v\Delta t) \quad \dots \dots \dots (2-2)$$

식 (2-2)의  $u\Delta t$ 와  $v\Delta t$ 는  $x$ 축과  $y$ 의 미소변위이고,  $f$ 와  $g$ 의 상호상관계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{fg} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [f(i, j) - \bar{f}][g(i-s, j-t) - \bar{g}]}{\left\{ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [f(i, j) - \bar{f}]^2 [g(i-s, j-t) - \bar{g}]^2 \right\}^{1/2}} \quad \cdot \cdot (2-3)$$

Fig. 5에서  $f(x, y)$ 의 원점이 제 1-프레임 상에서 속도벡터를 구하기 위한 벡터의 시점을 나타낸다. 이 점과 제 2-프레임 상에서 탐색영역(M)내의 모든 픽셀에서의 상관영역(J×K)의  $g(x-s, y-t)$ 에 대해 식 (2-3)을 이용하여 최대상호상관계수를 계산한다. 여기서,  $\bar{f}$ 와  $\bar{g}$ 는 각각 제 1-프레임과 제 2-프레임의 평균 계조치를 의미하며,  $f$ 와  $g$ 는 각각 제 1-프레임과 제 2-프레임의 임의 점의 계조값을 의미한다. 다음으로 이 값들 중에서 Fig. 6과 같이 최대상호상관값의 위치를 찾으면 이 점이 바로 속도벡터의 종점이 되는 것이다. 이 때 상관영역(Correlation area)은 제 1-프레임과 제 2-프레임에서 각 픽셀의 계조치를 비교하기 위한 탐색영역내 동일한 크기의 면적을 의미한다. 탐색영역(Searching area)은 제 1-프레임상의 시점에서 제 2-프레임상의 종점이 허용할 수 있는 최대거리를 의미한다. 만약, 탐색영역을 너무 크게 설정하면 계산시간이 오래 걸리며 오류벡터가 발생될 수 있다. 상관영역의 크기는 유동장에 따라서 다르게 결정되어야 한다. 이와 같이 두 개의 프레임을 이용한 후보입자의 추적방법은 기존의 4-Frame Method에 비해 프레임 수가 줄어들게 되어 이미지 보드(DT-3152)를 이용한 영상처리 시 컴퓨터 기억용량이 훨씬 줄어드는 장점을 가지고 있다. 그러나 입자가 중복되지 않는 범위 내에서 시간간격을 설정할 필요가 있다. 왜냐하면 단일입자의 중심점을 구하여 입자의 이동거리를 구할 때, 셀의 크기가 상대적으로 크면 분해능이 떨어

지므로 획득한 속도벡터의 정도가 떨어질 우려가 있기 때문이다.

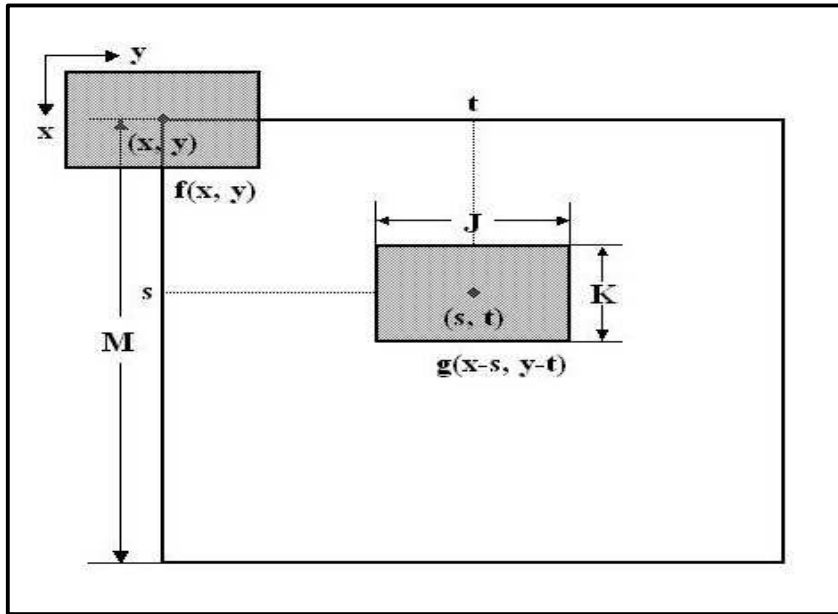


Fig. 5 Principle of the grey level cross correlation

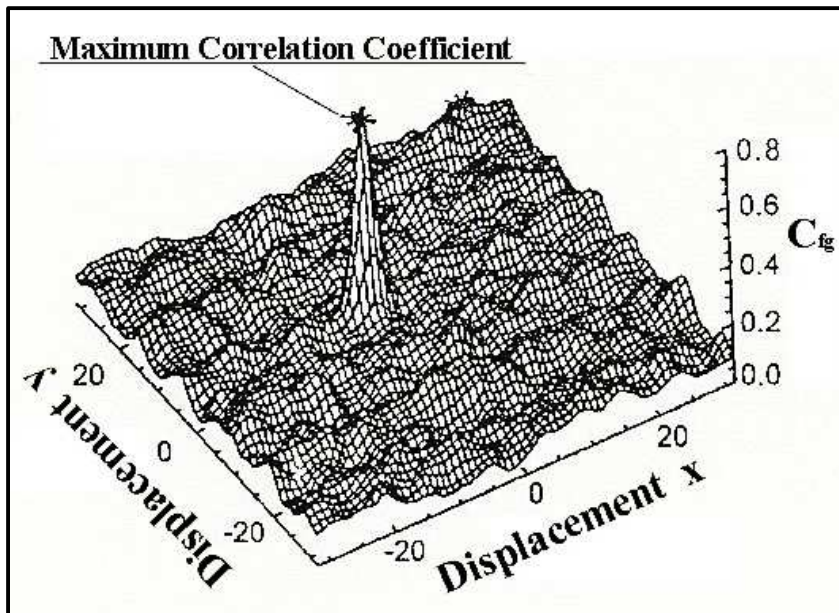


Fig. 6 Maximum cross correlation coefficient.

# 第 3 章 實 驗

## 第 1 節 實驗裝置

### 1. EXPERIMENT DUCT

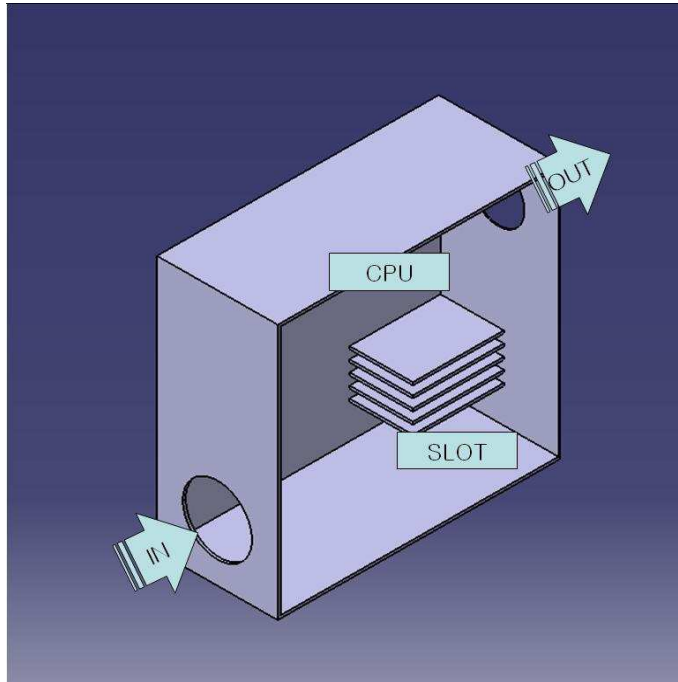


Fig. 7 Experiment Duct



Fig. 7은 210\*450\*490mm(가로\*세로\*깊이) 크기의 Desktop PC의 크기의 실험덕트이며 5mm의 두께의 투명 아크릴로 제작하였다. 이 덕트의 전면에 120mm의 흡입Fan, 후면에 92mm 방출Fan, CPU에 흡입, 방출Fan과 Z축으로 90°틀어진 92mm 냉각Fan이 설치되고 5개의 Slot이 흡입Fan과 수평인 방향에 설치된다. 흡입Fan 전면에는 입자를 균일하게 뿌려줄 수 있는 210\*450\*250mm의 서지탱크를 설치하고 방출 Fan 후면에는 210\*450\*300mm의 덕트를 설치하였다.



## 2. 各 裝置들의 諸元

CPU 및 흡입, 방출에 사용된 Fan은 ADDA사의 120mm, 92mm크기의 유체베어링Fan으로 7개의 날개를 가지고 있다. DC 12V를 사용하며 풍량과 소음은 각각 72.0CFM, 26.3CFM과 34.4DBM, 16.0DBM을 가지고 있다. 다른 팬들에 비해 풍량이 많고 소음이 적으며 3Pin Type의 가변저항을 사용하여 Fan의 RPM을 조절할 수 있어 본 실험의 실험 장치로 사용하게 되었다.

Table. 1 In, Out, CPU Fan Specification

| 120mm 25T (유체/3P)  |                   | 92mm 25T (유체/3P)  |                   |
|--|-------------------|---|-------------------|
|  |                   |  |                   |
| Dimension  | 120 x 120 x 25mm  | Dimension   | 92 x 92 x 25mm    |
| Bearing Type   | 유체(Hydro Bearing) | Bearing Type  | 유체(Hydro Bearing) |
| Reted Speed  | 1000rpm ± 10%     | Reted Speed   | 1500rpm ± 10%     |
| Reted Volltage   | 12V DC            | Reted Volltage  | 12V DC            |
| Reted Current  | 0.24A             | Reted Current   | 0.09A             |
| Air Flow   | 72.0 CFM          | Air Flow  | 26.3 CFM          |
| Noise Level  | 34.4 DBA          | Noise Level   | 16.0 DBA          |
| Pin Type   | 3 Pin Type        | Pin Type  | 3 Pin Type        |

### 3. Particle Image Velocimetry

본 실험에 사용한 Laser system은 514.5nm와 488.0nm의 기본 파장을 발산하는 Ar-Ion레이저로서 He-Ne레이저와 유사하나 電離(ionization)와 勵起(excitation)를 위해서 대단히 높은 전류를 부여할 수 있다. 다소 기술적으로 복잡한 면이 있으나 레이저의 효율은  $10^{-1}$ 의 오더를 갖는다. 광대역 레이저 miller를 사용하여 몇 가지의 파장에서 에너지 방출이 생성된다. 각각의 파장은 레이저 공진기에 있는 Brewster의 프리즘으로 선택할 수 있도록 하였으며 프리즘을 돌려서 조절할 수 있다, 프리즘을 사용하지 않고 하나의 최대파장으로 사용할 수 있는 싱글 렌즈를 통해서 514.5nm를 발생시켜 레이저의 최대 출력을 조절 할 수 있다. LLS(Laser Light Sheet)는 레이저 본체로부터 나오는 광을 입사조절기에서 받아들여 광케이블을 통하여 LLS probe의 렌즈조합에 의해서 단면 광을 생성하는 장치로 sheet의 폭을 쉽게 조절할 수 있으며 광의 손실이 적다는 장점을 가지고 있다. 레이저 본체와 평행을 이루는데 어려움이 있어 본 실험에서는 LLS probe를 레이저 본체에 고정하고 optical fiber line로 연결하여 사용하였다. 멀리 떨어져 있는 곳에서도 단면광의 형성이 가능하고 또한 임의의 위치와 각도로 설치할 수 있도록 하였다.

PIV에서 해석할 영상을 Hi-speed Camera 등과 같은 영상매체를 통해 나타나는 영상신호를 샘플 당 정의된 비트로 디지털화 하여 PC가 처리할 수 있는 신호로 바꾸어 주었다. 산술, 논리연산 및 영상처리조작을 행하여 정보를 분석하기 위하여 이미지 보드를 구성하였는데 이미지 보드의 구성은 MOTORAX사의 DATA-Translation보드이고 구성은 입출력 LUT(Look-Up- Table)와 이미지 메모리 그리고 입출력을 위한 A/D 및 D/A컨버터, 외부트리거 및 외부동기신호를 위한 포트로 구성되어있다. 이미지 보드의 작동원리는 비디오로부터 입력된 칼라신호를 보다 선명하게 획득하기 위하여 크로미넨스 노치 필터에서 칼라정보를 제거한

후 아날로그 신호를 샘플링 하여 A/D 변환기에서 디지털화하며 디지털로의 변환은 플래쉬 변환기에 의해서 행해진다. 변환 시 입력범위의 Black Level과 White Level로 조절 할 수 있으며 입력영상신호는 A/D 변환기를 거쳐 디지털 정보로 바뀌어 프레임 메모리에 저장되며 출력 LUT를 통과하여 PC의 램에 저장된다. RAM에 저장된 영상 Data는 모니터에 디스플레이 하거나 하드디스크로 저장 할 수 있도록 하였다.

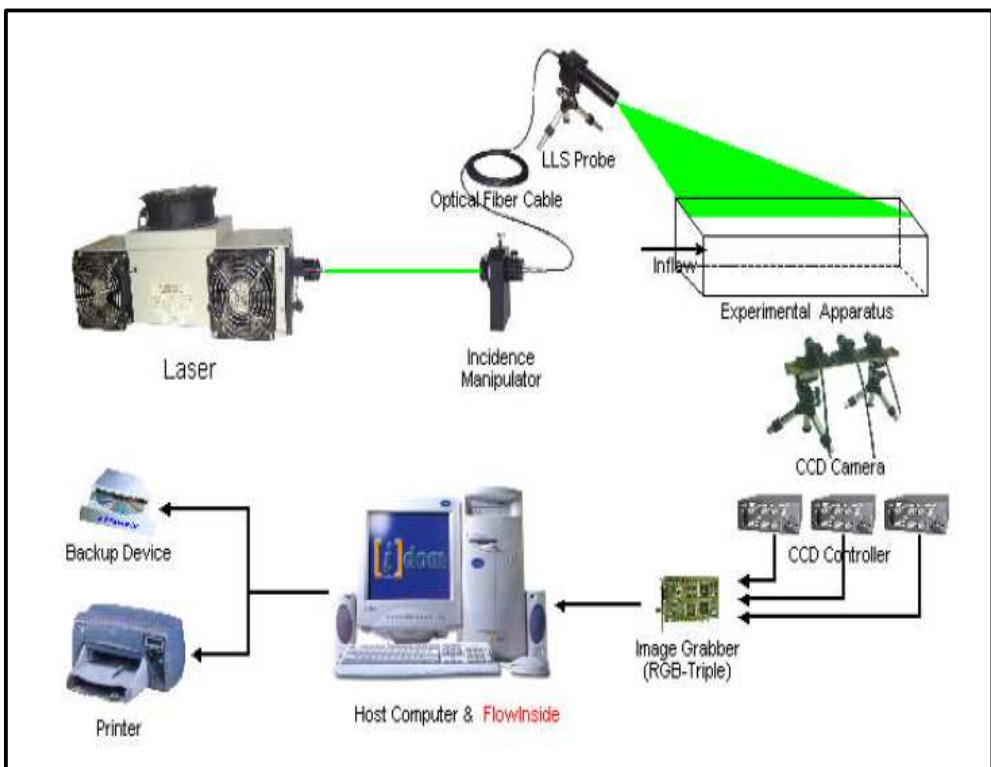


Fig. 8 Schematic diagram of the PIV system

## 第 2 節 實驗方法 및 計測

### 1. PIV 計測

PIV실험 시 실험 온도는 상온 $20^{\circ}\text{C}$ 에서  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ , 습도는 40%에서  $\pm 1\%$ 의 차를 유지 시켰으며 작동유체는 공기이며 추적 입자는 가벼우며 레이저광에 잘 산란된 ZnO(아연화가루)를 사용하였다. 입자의 산란은 흡입구에 부착된 Surge tank의 Fan에 의해 이루어지고 균일 분포를 위해 Henny Comb을 설치하였다. 입자가 Test section내에 분포 후 흡배기 Fan을 작동시켜 Surge tank로부터 발생하는 외부요인을 최소화 시켰다.

내부 변경조건으로는 Photo 4, Photo 5와 같이 PC상단으로부터 330mm 떨어진 지점에 Slot 1을 설치하고 각각 20mm간격으로 설치된 6개의 Slot의 Test section 영상을 취득 하였다. CCD 카메라에 실제로 측정된 시험부의 Test section은  $450\text{mm}\times 495\text{mm}$ 로 잡았으며, 고속 유동의 유동영상을 획득하기 위하여 AOM(Acoustic Optical Modulator)에 의하여 단속된 조명으로 촬영한 영상은 CCD카메라의 홀수필드와 짝수필드에 각각 입력된다.

본 실험의 가시화를 위해 사용된 장비는 Table. 2와 같으며 고속도계측을 위해 조명과 카메라의 동기화를 시켰으며 AOM을 이용하여 적절한 시간간격을 설정하였다. Laser system은  $514.5\text{nm}$ 와  $488.0\text{nm}$ 의 기본 파장을 발산하는 Ar-Ion 레이저로서 He-Ne 레이저와 유사하나 ionization과 excitation를 위해서 대단히 높은 전류를 부여할 수 있다. 저장된 영상은 영상처리장치 (Matrox DATA Translation-256 Grey Level)로부터 아날로그신호를 2차원의 디지털영상정보로 바꾼 후, 각종 전처리 과정은 전용 소프트웨어 CACTU S3.2를 이용하였다.

Table. 2 Specification of PIV system

|                         | Item                         | Specification   |
|-------------------------|------------------------------|---|
| Visualization Equipment | Image Grabber                | matrox<br>(DATA Translation)<br>- 256 Grey Level        |
|                         | Light Source                 | 7W Argon-Ion<br>Laser                                   |
|                         | Sheet Light                  | LLS probe   |
|                         | Camera                       | Kodak(ES 1.0)<br>1008 H x 1018 V (1,026,144)            |
| Measuring Condition     | Working Fluid                | Air   |
|                         | Temperature                  | 20 °C ±1  |
|                         | Particle                     | Zn  |
|                         | Time Resolution              | 1 / 60 sec  |
| Image Processing        | Host Computer                | Pentium IV PC<br>(CPU 2.54 GHz RAM 1G)                  |
|                         | Calculation Time             | 30 frame/sec  |
|                         | Identification               | Cactus'2000<br>(grey-level cross correlation algorithm) |
|                         | Number of Data for Time-Mean | 65 frames   |
| PIV System Equipments   | Probe                        | KANOMAX LLS Probe                                       |
|                         | Laser                        | LEXEL Argon-Ion Laser (최대 7W)                           |
|                         | CAMERA                       | Kodak(ES 1.0)<br>1008 H x 1018 V (1,026,144)            |
|                         | Image Grabber                | matrox (DATA Translation)<br>- 256 Grey Level           |
|                         | Computer                     | Pentium IV PC<br>(CPU 2.54 GHz RAM 1G)                  |
|                         | Software                     | CACTUS'3.2<br>(Cross-Correlation Algorithm)             |



Photo. 1 Experimental equipments of PIV and test duct



Photo. 2 Date acquisition and processing system of PIV

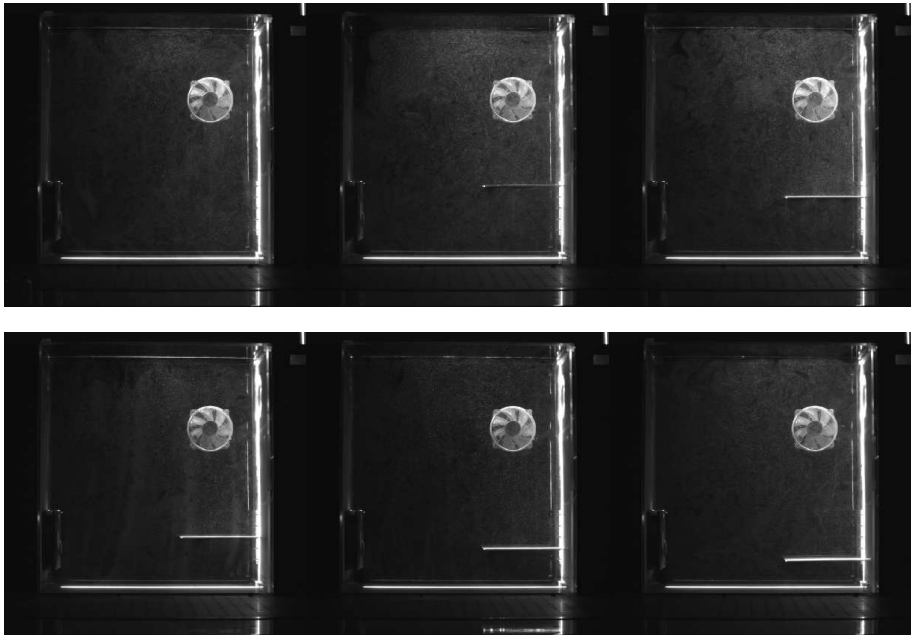


Photo. 3 Fan 1,2 ON PIV Experiment

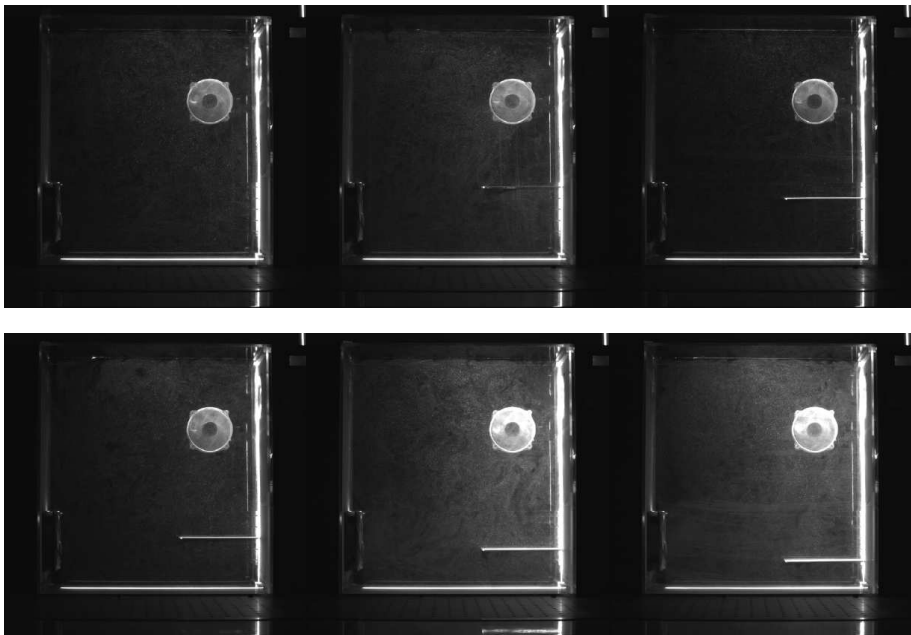


Photo. 4 Fan 1,2 and CPU ON PIV Experiment

## 第 4 章 結果 및 考察

### 第 1 節 速度分布

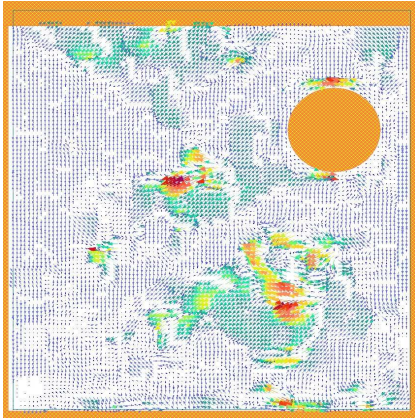
Photo. 5는 Desktop Personal Computer 내부의 Slot을 변화 시켰을 때 Test-section의 총괄적인 평균속도벡터 분포를 보여주고 있다. Photo. 5-(a)에서는 흡입구를 통해 들어온 추적 입자들이 Test-Section 전체에 고루 분포하며 출구 쪽으로 배기될 때 CPU Fan이 설치된 장애물의 영향을 받는 것을 보여주고 있다. 내부의 중심부분에서 발생하는 와류현상은 흡배기의 팬의 동작 시 좌측상단에는 팬의 영향을 받지 않아 내부 중앙과 압력차가 발생하여 우측 중앙부분에서 와류현상이 발생되는 것으로 사료된다. 흡배기인 좌측 하단과 상단의 속도벡터의 분포가 작고 방향성이 나타나지 않는 것은 XY축 방향의 이동보다 XZ 또는 YZ방향의 이동이 더 많아 데이터 해석에서 에러벡터로 처리한 것으로 사료된다. Slot 1에서 Slot 5로 점차 변화시켜 실험한 결과 Slot의 장착에 의해 흡입되는 추적 입자가 Slot의 하부로 들어가려는 현상과 하부에 밀집된 추적 입자들이 출구로 나오려는 현상이 동시에 발생되어 정체현상과 더불어 심한 와류현상을 보여주고 있다. Slot이 없을 때에 내부의 와류현상이 우측 중앙부분에서 발생하는 것과는 달리 Slot의 영향을 받아 그 중심이 좌측으로 100mm정도 이동한 것으로 사료된다. 또한 Slot에 의해 유동에 영향을 받은 추적 입자들이 (a)에서는 발생하지 않던 좌측상단까지 영향을 미쳐 상단에 또 다른 와류를 형성하는 것을 볼 수 있다. Photo. 5의 각 각을 비교해보면 Slot와 밀면의 간격이 작을수록 작지만 여러 개의 와류현상을 일으킨다. 이는 내부 전체 유동현상에 큰 영향을 미치며 소음 발생에도 영향을 미친다. Photo. 6은 CPU Fan을 작동시켰을 때 평균속도벡터 분포를 나타낸다. 이는 CPU Fan을 작동시키지 않았을 때에 비해 케이스 상단의 유동분포가 더욱 확실하게 나타내진다. 단 CPU Fan이 시계방향으로 작동



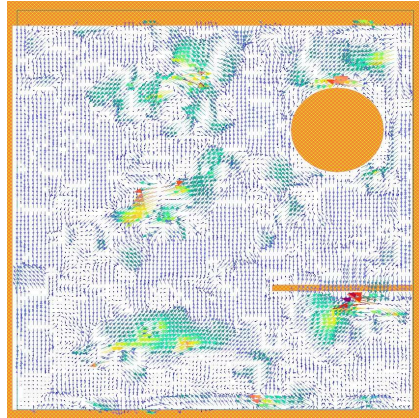
하여 CPU Fan과 Slot 사이에서 와류가 더 강하게 나타는 것을 볼 수 있다. 이는 흡기 팬으로 부터 들어온 유체가 배기 팬 쪽으로 흘러가는 도중 역방향의 힘을 받아 생기는 현상으로 사료된다. 이렇게 생기는 와류는 CPU Fan과 Slot의 사이의 간격이 클수록 작게 나타나는 것을 볼 수 있다. 또한 CPU Fan을 작동시키지 않았을 때는 잘 생기지 않던 케이스 좌측 상단의 속도분포가 나타나는 것을 볼 수 있다. 하지만 CPU Fan의 작동이 Slot과 케이스 하단사이의 유동현상에는 영향을 주지 않는 것으로 사료된다. Photo. 6의 (b), (c), (e)에서 Slot의 상단에서 하단으로 속도 벡터가 이동하는 것을 볼 수 있는데 이는 CPU Fan의 작동으로 인해 발생된 속도벡터가 Slot의 Y축의 상단을 넘어 Slot의 하단으로 이동하는 것을 나타내는데 Slot의 크기(160mm\*110mm\*5mm)가 케이스높이의 2/3지점의 높이 이므로 110~210mm사이의 공간을 통해 흐르는 극소적은 유체로 판단된다.

Fig. 9와 Fig. 10는 Photo. 5와 Photo. 6의 자료를 무차원화 그래프로 변환시킨 것이다. Fig. 9와 Fig. 10에서 x축은 변수로 나오는 40, 60, 80지점의 속도는 좌측 흡기 팬으로부터 90mm 떨어진 점의 각 속도벡터를 기준으로 하여 우측방향으로 180, 270, 360mm 지점의 속도벡터를 나누어 각 지점의 속도 벡터를 무차원화 시킨 것이다. 각 지점(40, 60, 80)에서의 99개의 눈금은 Photo. 5와 Photo. 6의 세로방향의 위치를 나타낸 것이며 y축은 속도벡터의 크기와 방향성을 나타낸다. 이 Fig. 9과 Fig. 10는 Photo. 5와 Photo. 6에서 발생하는 전체적인 유동현상에 대한 정량적 데이터이다. 이 테이블을 보면 Slot 0, Slot 1일 때의 평균속도벡터가 작지만 균일하게 발생되고 CPU Fan을 작동 시 Slot 5로 갈수록 평균속도벡터가 균일하게 발생하는 것을 알 수 있다.

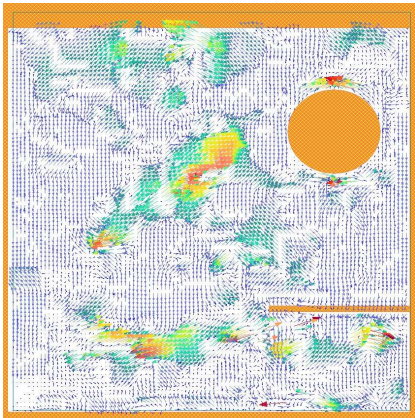
추후 Slot의 위치 변화가 아닌 Slot길이 변화에 따른 유동분포에 관한 연구가 필요할 것이다.



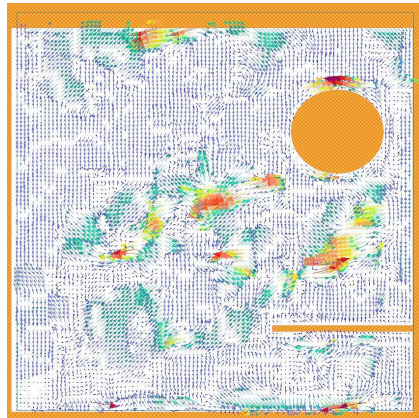
(a) Slot 0



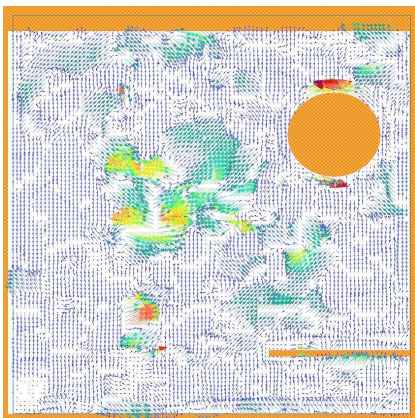
(b) Slot 1



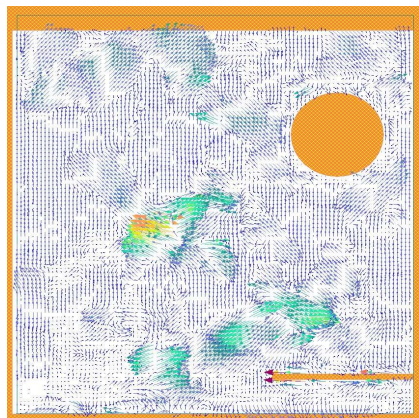
(c) Slot 2



(d) Slot 3

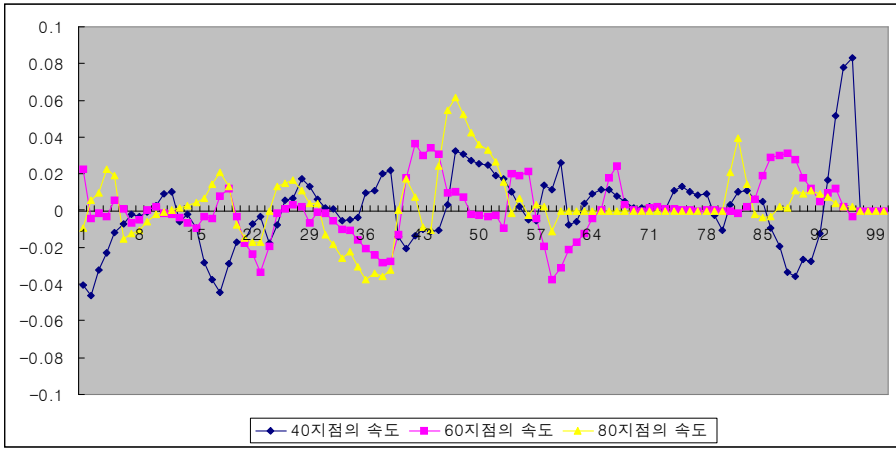


(e) Slot 4

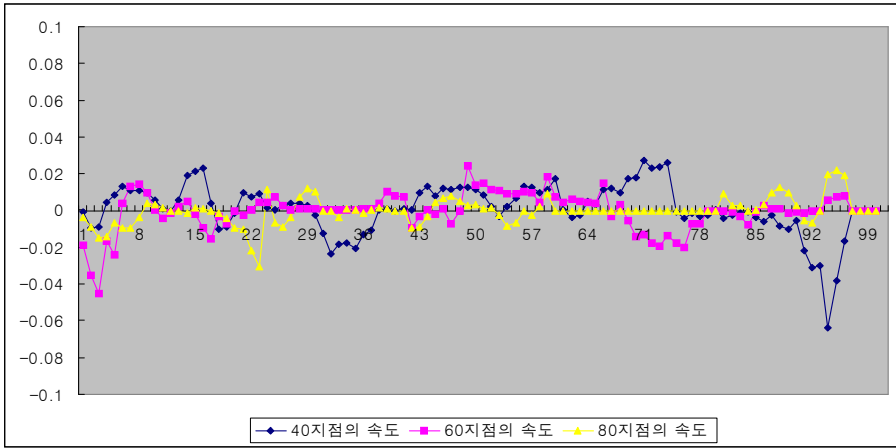


(f) Slot 5

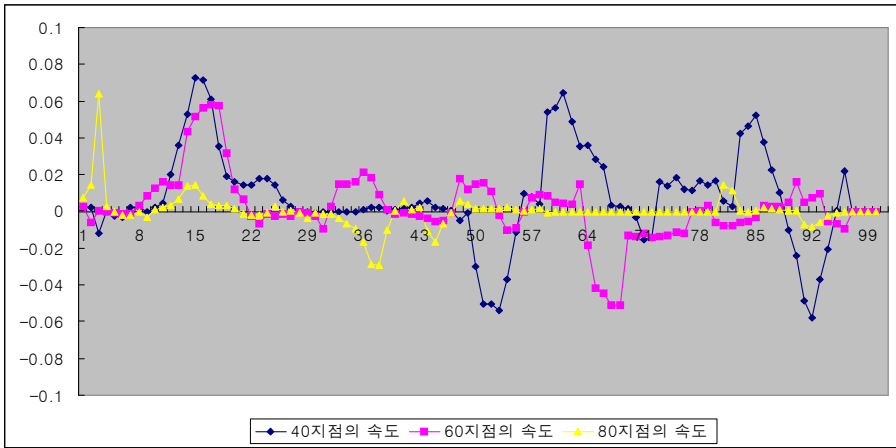
Photo. 5 Velocity Distributions by In, Out Fan On



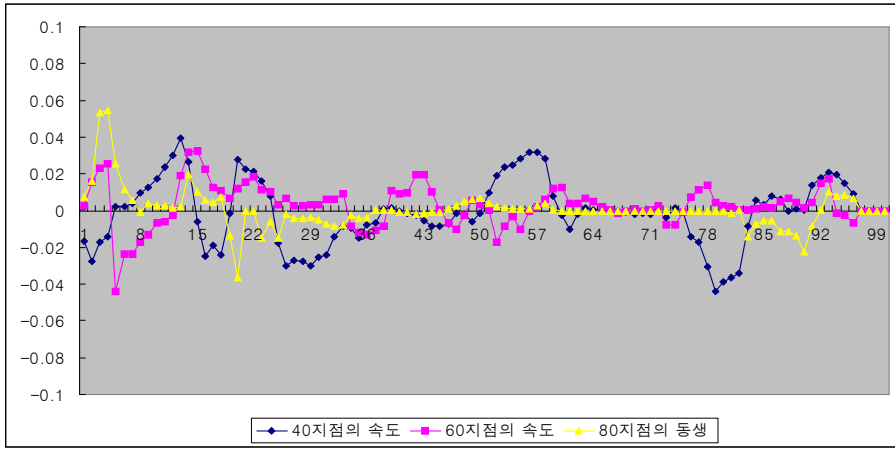
(a) Slot 0



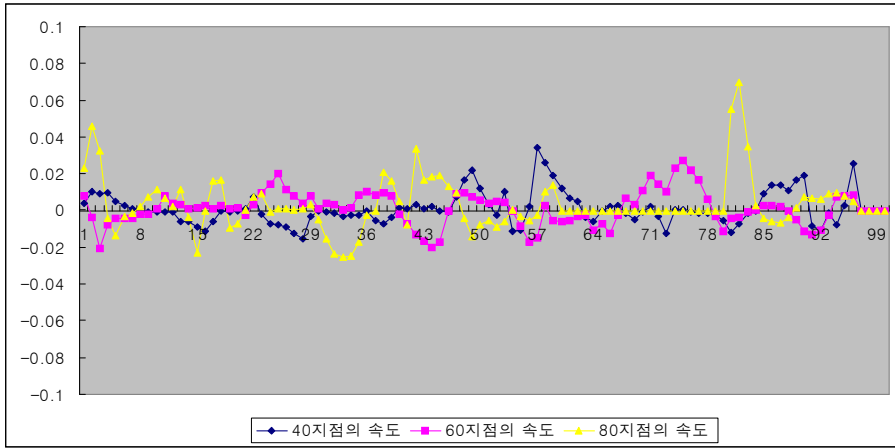
(b) Slot 1



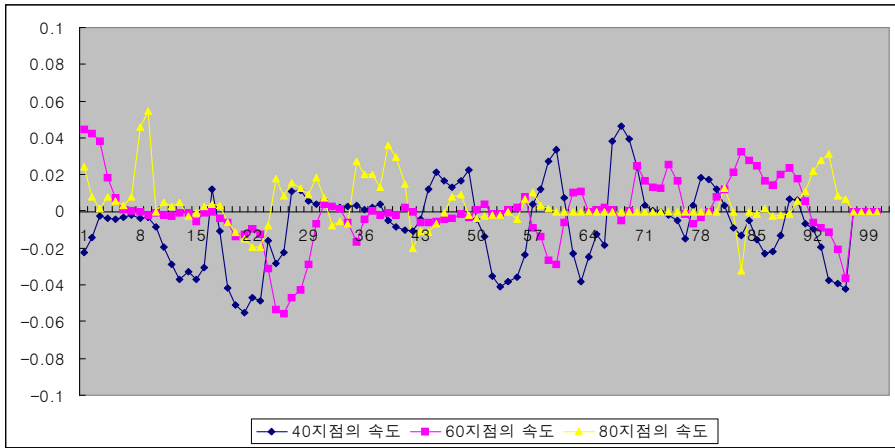
(c) Slot 2



(d) Slot 3

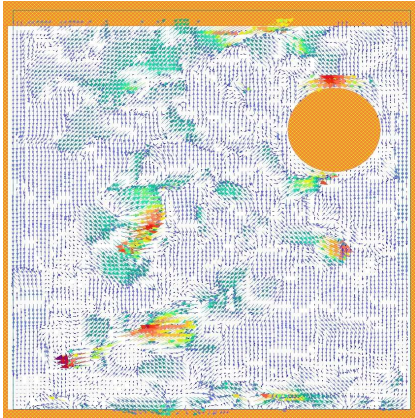


(e) Slot 4

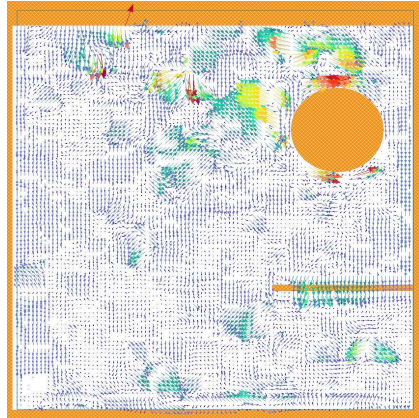


(f) Slot 5

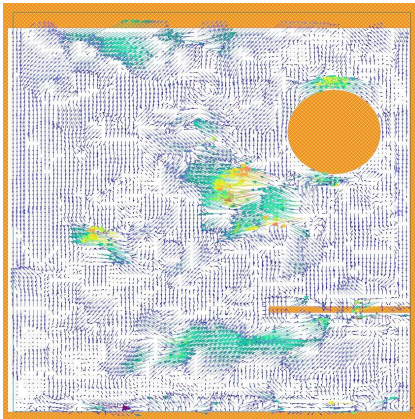
Fig. 9 Velocity Distributions by In, Out Fan On



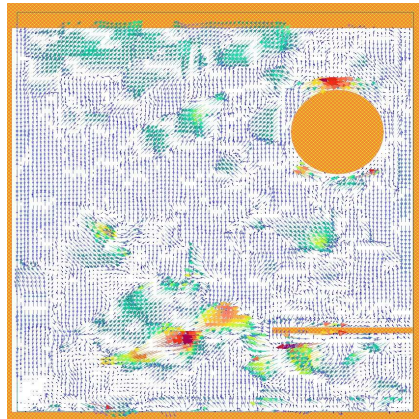
(a) Slot 0



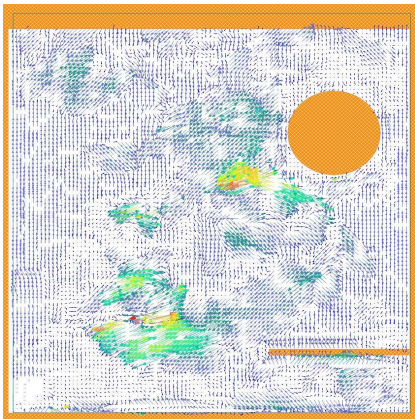
(b) Slot 1



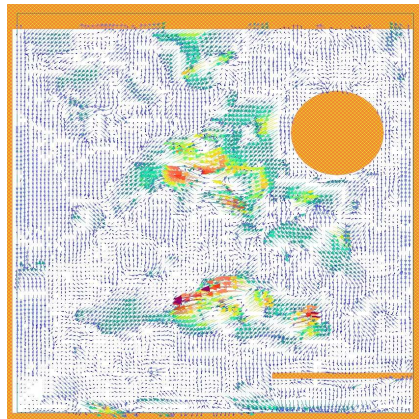
(c) Slot 2



(d) Slot 3

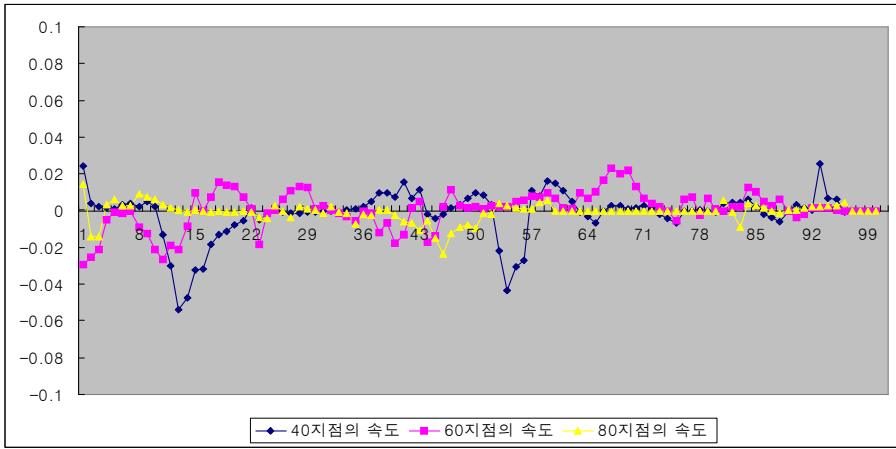


(e) Slot 4

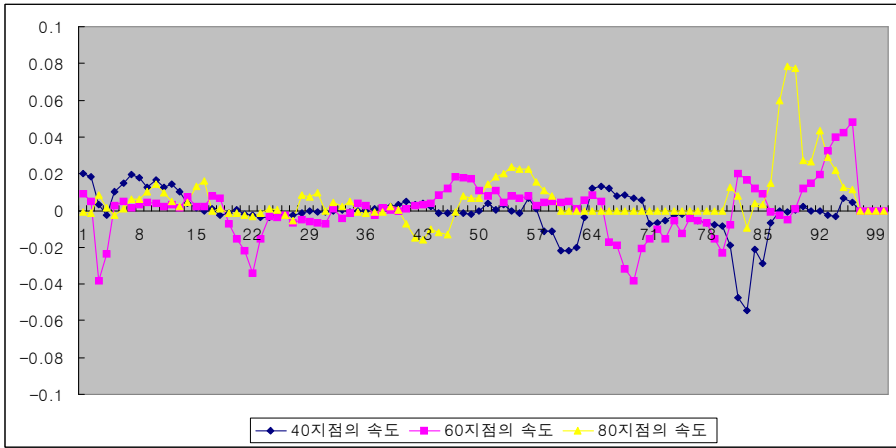


(f) Slot 5

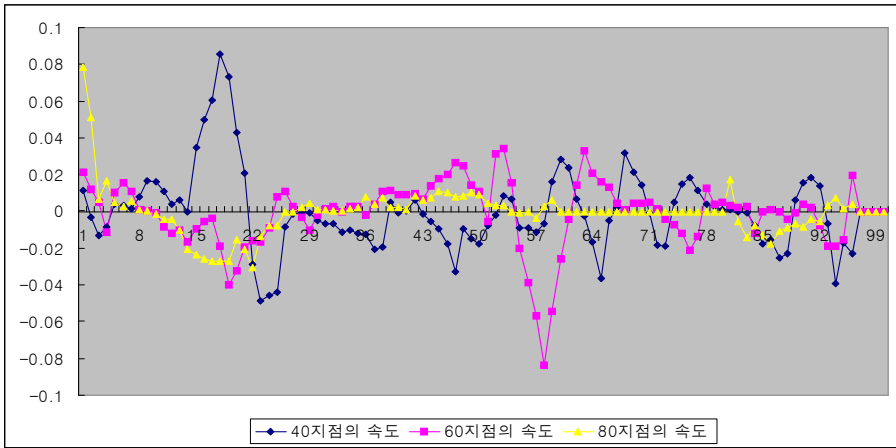
Photo. 6 Velocity Distributions by In, Out, CPU Fan On



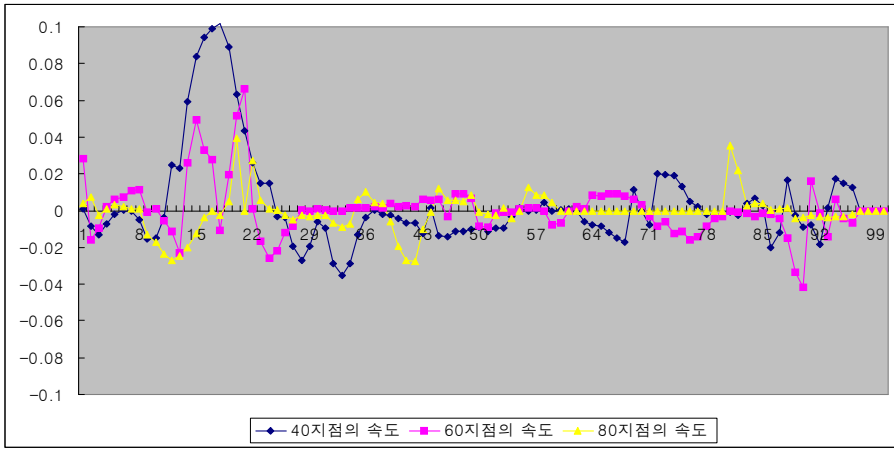
(a) Slot 0



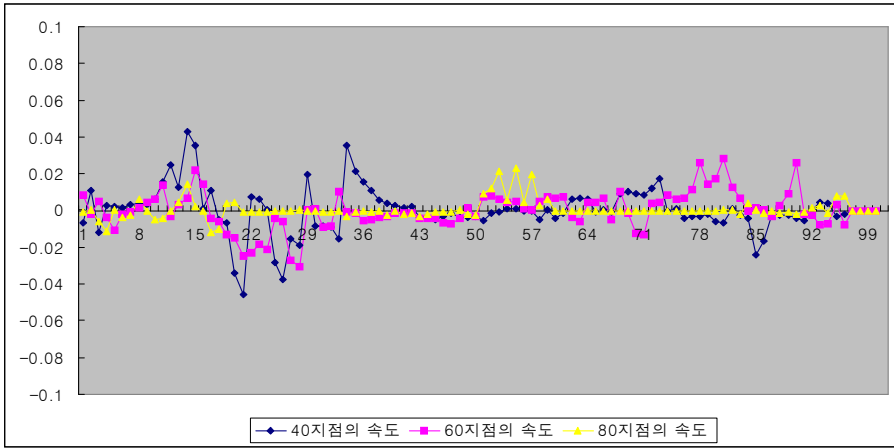
(b) Slot 1



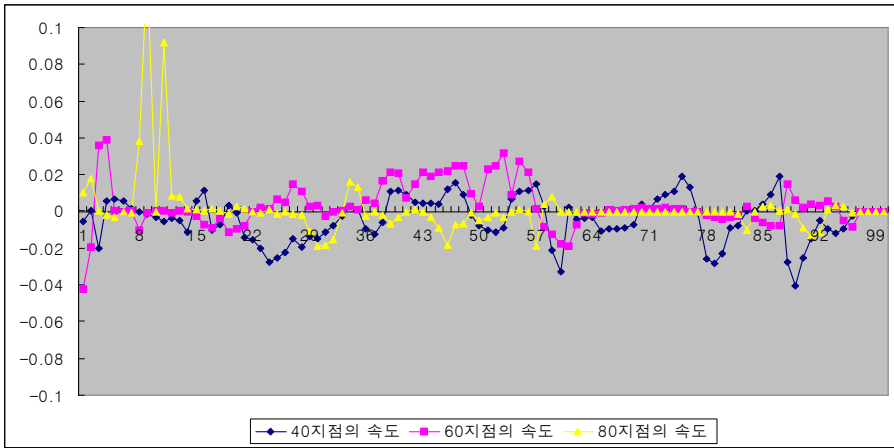
(c) Slot 2



(d) Slot 3



(e) Slot 4



(f) Slot 5

Fig. 10 Velocity Distributions by In, Out, CPU Fan On

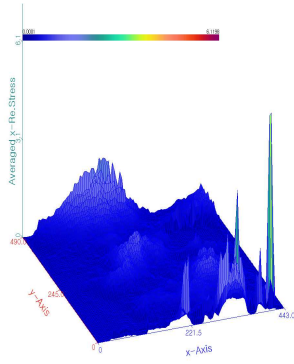
## 第 2 節 Re-Stress 分布

Photo. 7과 Photo. 8은 Desktop personal Computer 내부의 Slot과 팬의 작동유무를 변화 시켰을 때 Test-section의 총괄적인 Re-Stress 분포를 보여주고 있다. Fig. 11과 Fig. 12는 Photo. 7과 Photo. 8의 자료를 무차원화 그래프로 변환 시킨 것이다. Fig. 11과 Fig. 12에서 x축은 변수로 나오는 40, 60, 80지점의 속도는 좌측 흡기 팬으로부터 90mm 떨어진 점의 각 Re-Stress를 기준으로 하여 우측방향으로 180, 270, 360mm 지점의 Re-Stress를 나누어 각 지점의 Re-Stress를 무차원화 시킨 것이다. 각 지점(40, 60, 80)에서의 99개의 눈금은 Photo. 7과 Photo. 8의 세로방향의 위치를 나타낸 것이며 y축은 Re-Stress의 크기를 나타낸다.

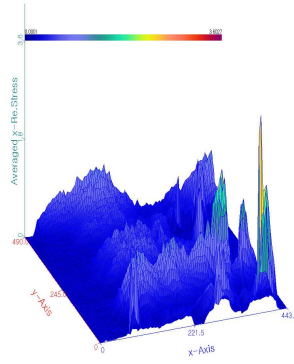
Fig. 11과 Fig. 12에서 1과 99지점 부근에서 Re-Stress가 높게 발생하는 것은 흡배기 팬의 작동으로 인한 외력이 발생하여 높게 나타난 것으로 사료된다. 특히 CPU Fan의 작동 시 50~57지점에서 Re-Stress가 CPU Fan의 미동작시에 비해 많이 나타나는 특징을 볼 수 있다. 중앙과 케이스 좌측상단에 많이 분포되는 Re-Stress는 CPU Fan의 미작동시 많이 나타나고 CPU Fan의 작동 시에는 그 부분의 Re-Stress의 분포가 줄어드는 현상을 볼 수 있다. 이렇듯 CPU Fan의 작동은 Test section의 내부의 Re-Stress의 분포에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다.

Slot의 장착 시에는 흡배기 팬의 작동에 의해 발생된 Re-Stress가 케이스의 좌측 상단과 우측하단에 편중되는 것을 케이스 중앙부분에도 발생시켜 전체 Re-Stress의 분포를 고르게 해주는 것을 알 수 있다. 하지만 이는 Slot 하단에서 Re-Stress의 최고점을 나타내게 하는 단점을 부각시키고 있다. 특히 이러한 현상은 CPU Fan의 작동 시 더욱 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

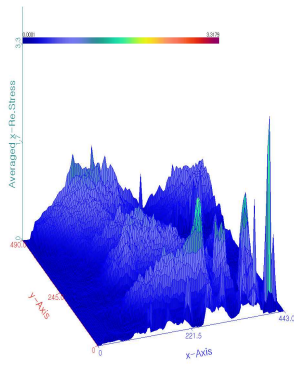




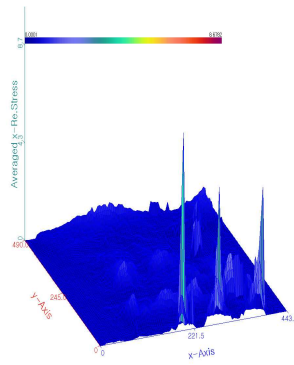
(a) Slot 0



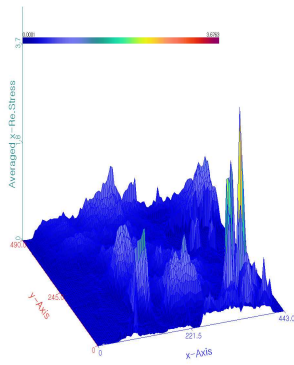
(b) Slot 1



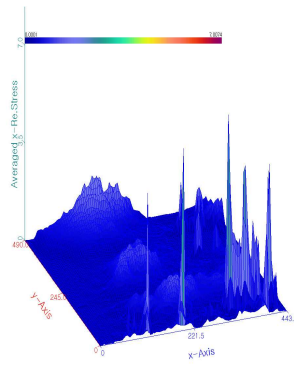
(c) Slot 2



(d) Slot 3

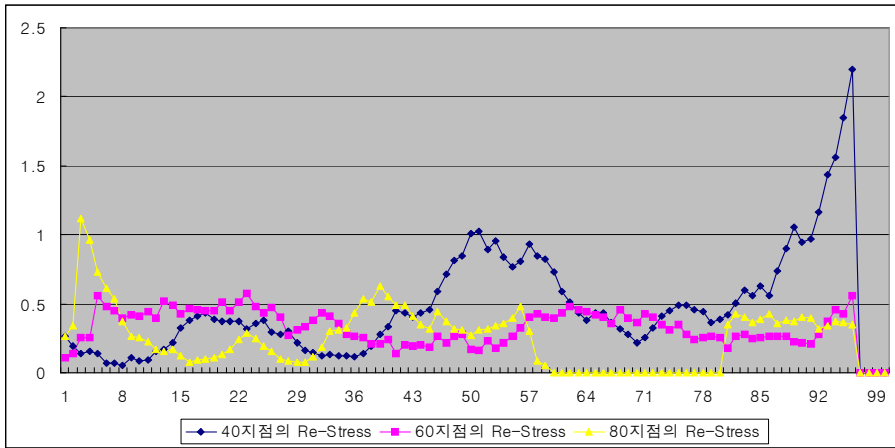


(e) Slot 4

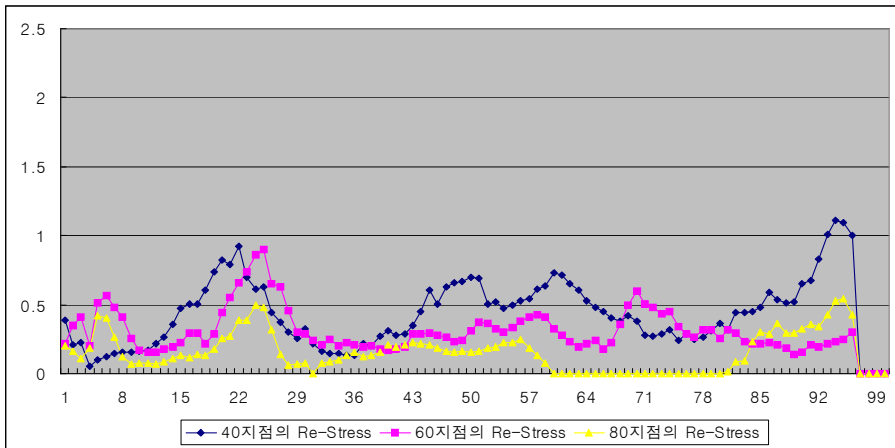


(f) Slot 5

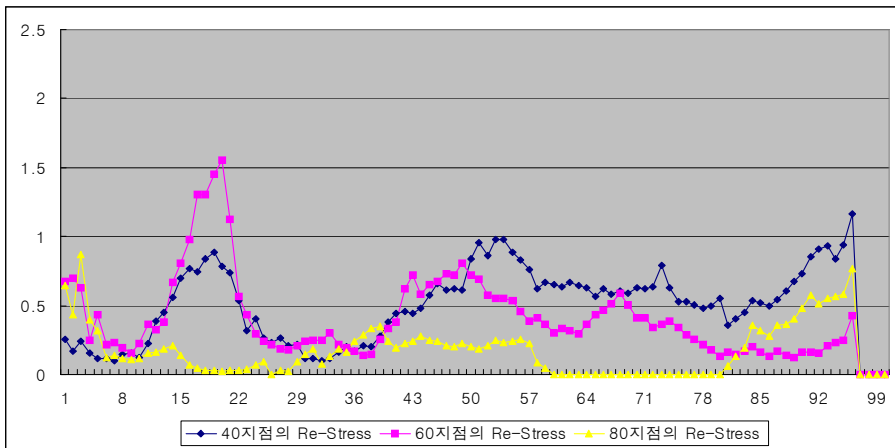
Photo. 7 Re-Stress by In, Out Fan On



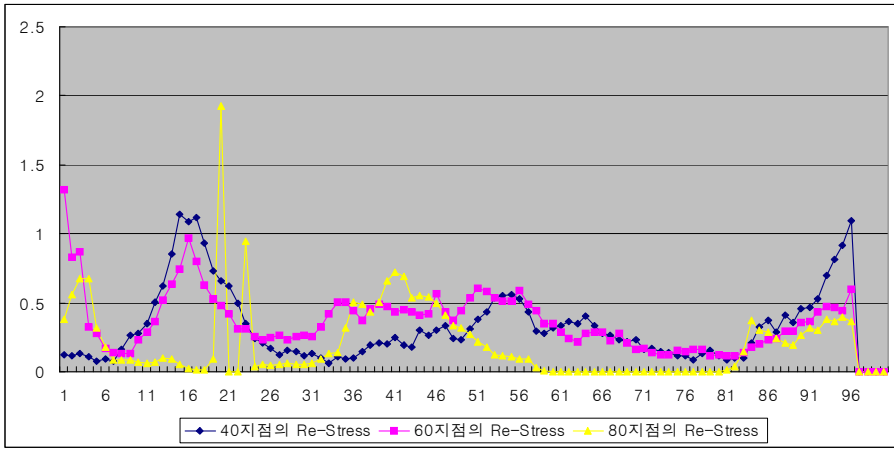
(a) Slot 0



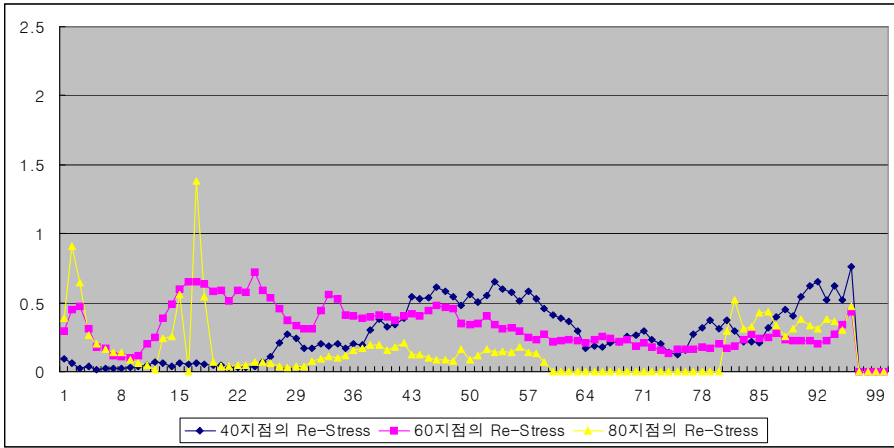
(b) Slot 1



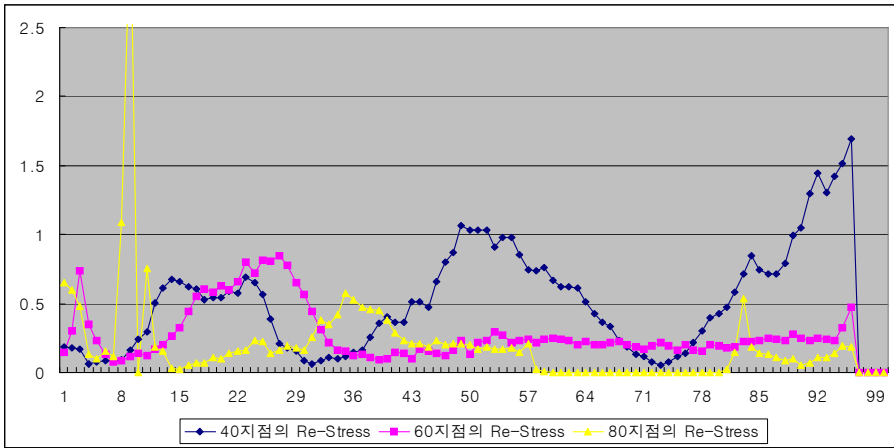
(c) Slot 2



(d) Slot 3

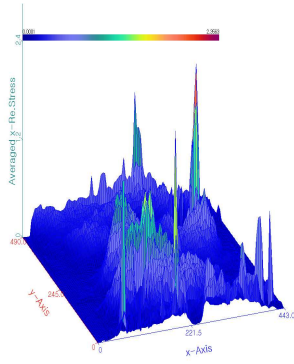


(e) Slot 4

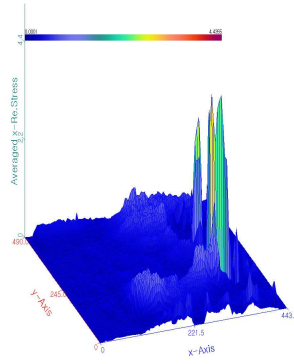


(f) Slot 5

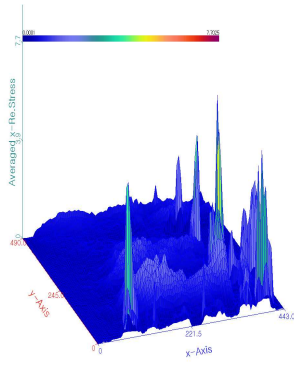
Fig. 11 Re-Stress by In, Out Fan On



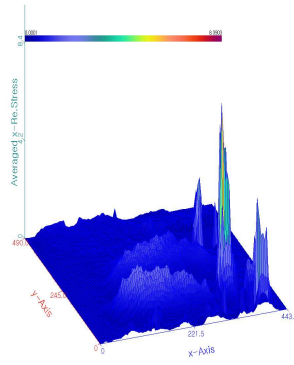
(a) Slot 0



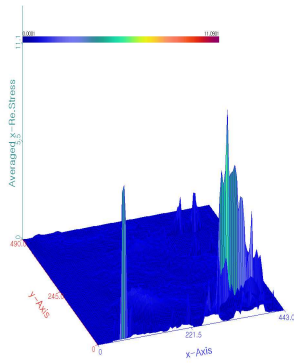
(b) Slot 1



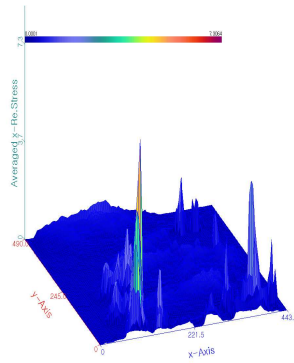
(c) Slot 2



(d) Slot 3

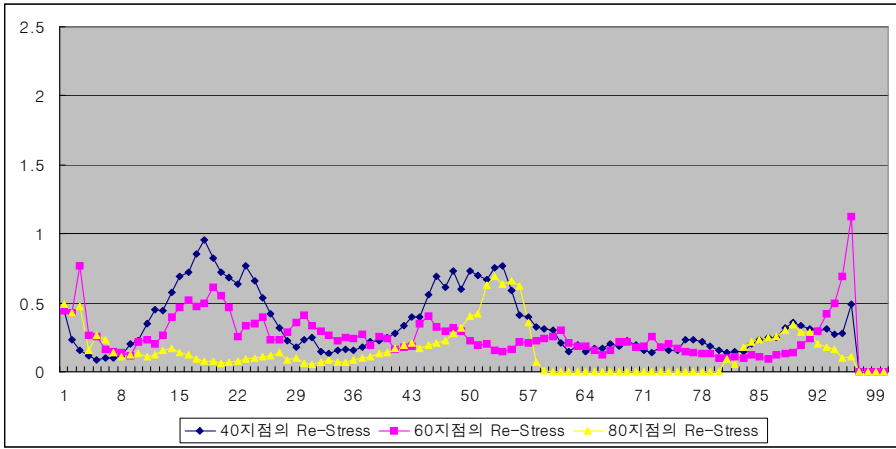


(e) Slot 4

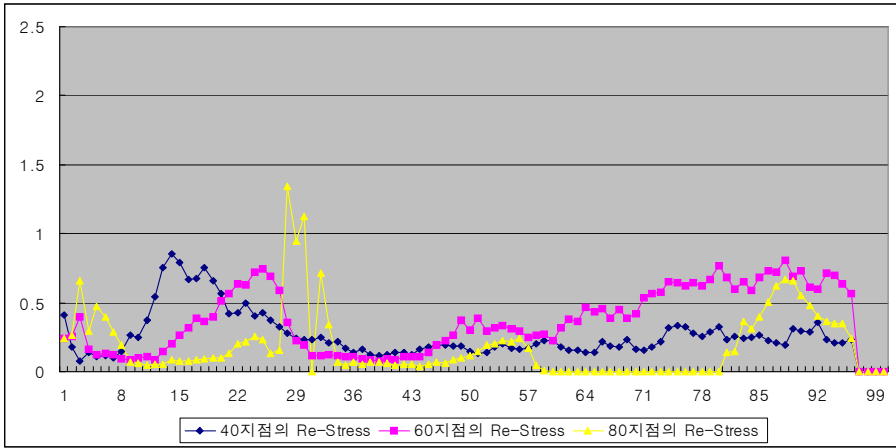


(f) Slot 5

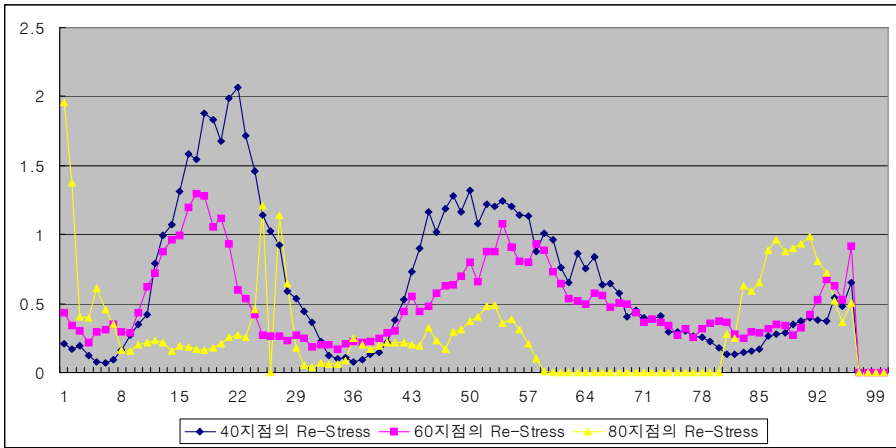
Photo. 8 Re-Stress by In, Out, CPU Fan On



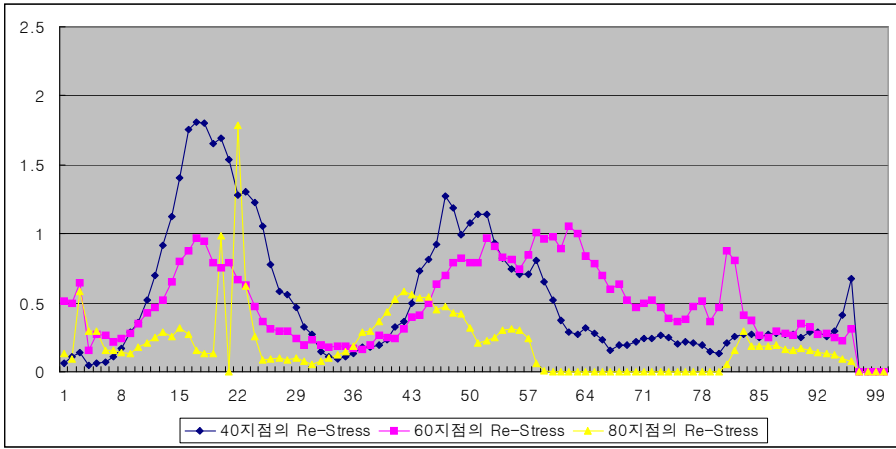
(a) Slot 0



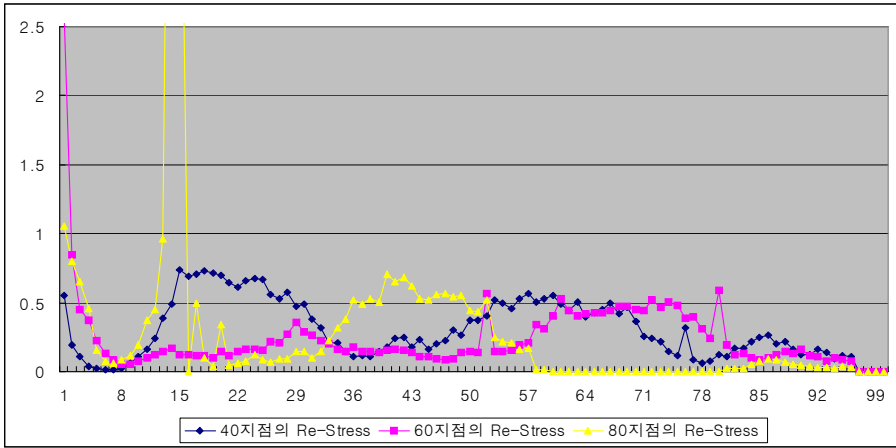
(b) Slot 1



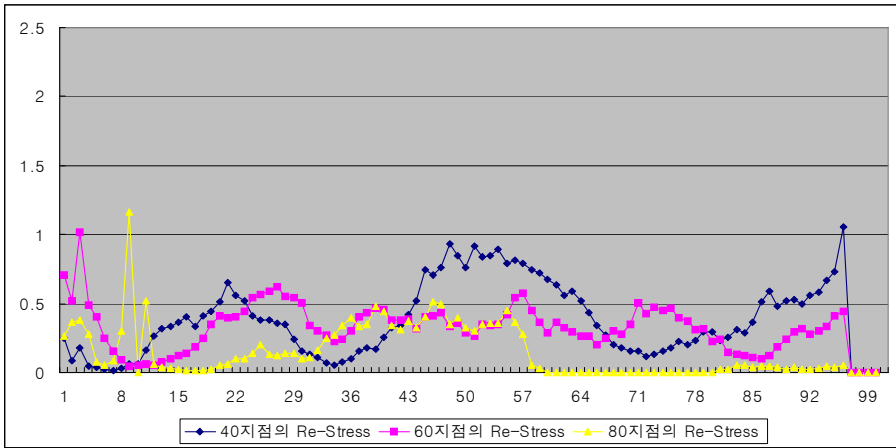
(c) Slot 2



(d) Slot 3



(e) Slot 4



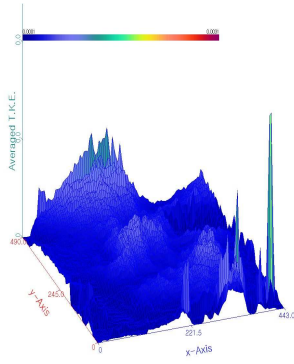
(f) Slot 5

Fig. 12 Re-Stress by In, Out, CPU Fan On

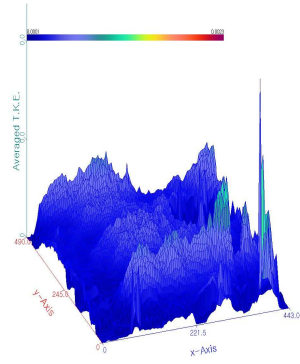
### 第 3 節 運動 Energy 分布

Photo. 9와 Photo. 10은 Desktop personal Computer 내부의 Slot과 팬의 작동유무를 변화 시켰을 때 Test-section의 총괄적인 운동에너지 분포를 보여주고 있다. Fig. 13과 Fig. 14은 Photo. 9와 Photo. 10의 자료를 무차원화 그래프로 변환 시킨 것이다. Fig. 13과 Fig. 14에서 x축은 변수로 나오는 40, 60, 80지점의 속도는 좌측 흡기 팬으로부터 90mm 떨어진 점의 각 운동에너지를 기준으로 하여 우측방향으로 180, 270, 360mm 지점의 운동에너지를 나누어 각 지점의 운동에너지를 무차원화 시킨 것이다. 각 지점(40, 60, 80)에서의 99개의 눈금은 Photo. 9와 Photo. 10의 세로방향의 위치를 나타낸 것이며 y축은 운동에너지의 크기를 나타낸다.

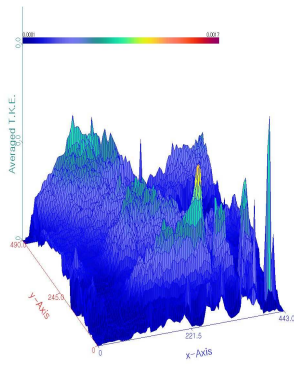
Fig. 13과 Fig. 14에서 99지점 부근에서 토털 운동에너지가 높게 발생하는 것은 배기 팬의 작동으로 인해 높게 나타난 것으로 사료된다. 특히 CPU Fan의 작동 시 50~57지점에서 토털 운동에너지가 CPU Fan의 미동작시에 비해 많이 나타나는 특징을 볼 수 있다. 하지만 CPU Fan의 작동유무와는 달리 Slot1의 설치 시 50~57지점의 토털 운동에너지는 거의 일정하게 유지되는 것을 알 수 있다. 중앙과 케이스 좌측상단에 많이 분포되는 토털 운동에너지는 CPU Fan의 미작동시 많이 나타나고 CPU Fan의 작동 시에는 그 부분의 토털 운동에너지의 분포가 줄어드는 현상을 볼 수 있다. 이렇듯 CPU Fan의 작동은 Test section의 내부의 토털 운동에너지의 분포에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다. Slot의 장착 시에는 흡배기 팬의 작동에 의해 발생된 토털 운동에너지가 케이스의 좌측 상단과 우측하단에 편중되는 것을 케이스 중앙 부분에도 발생시켜 전체 토털 운동에너지의 분포를 고르게 해주는 것을 알 수 있다. 하지만 이는 Slot 하단에서 토털 운동에너지의 최고점을 나타내게 하는 단점을 부각시키고 있다. 특히 이러한 현상은 CPU Fan의 작동이 더욱 크게 나타나는 것을 알 수 있다.



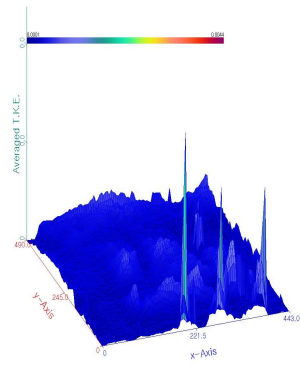
(a) Slot 0



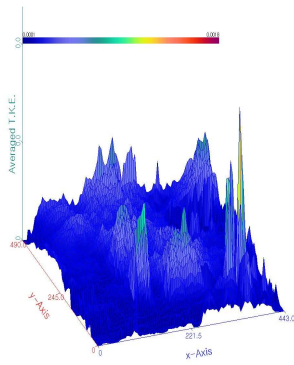
(b) Slot



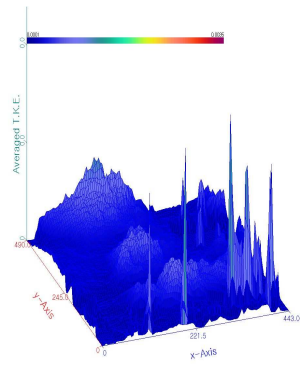
(c) Slot 2



(d) Slot 3



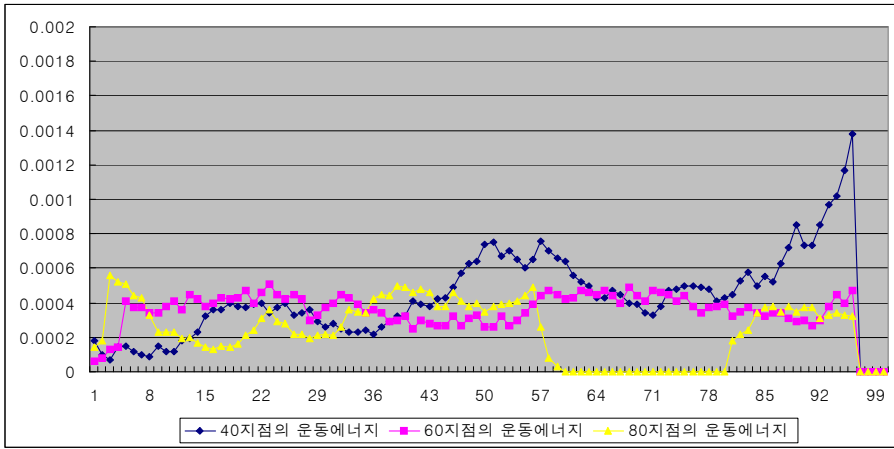
(e) Slot 4



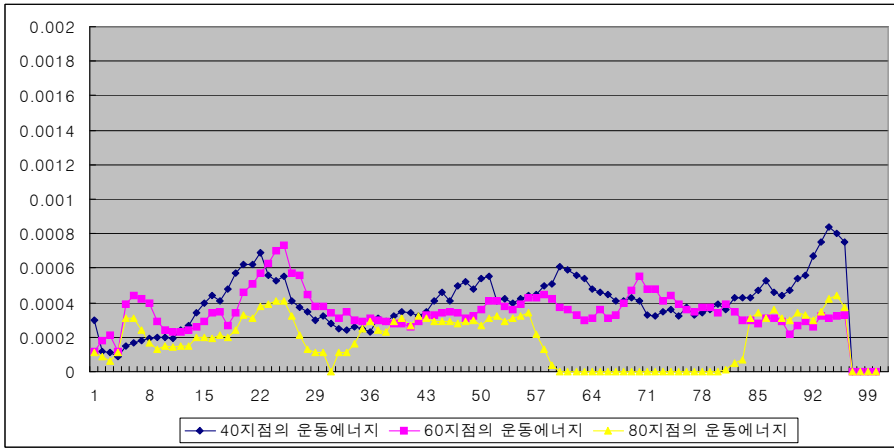
(f) Slot 5

Photo. 9 Averged T.K.E by In, Out Fan On

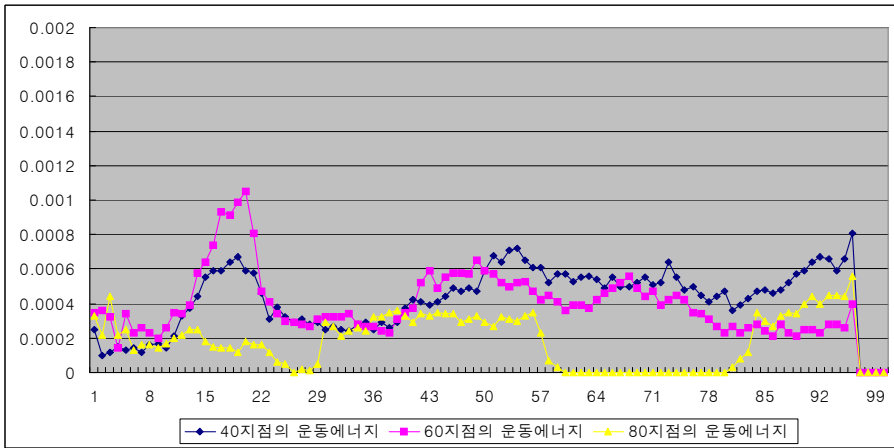




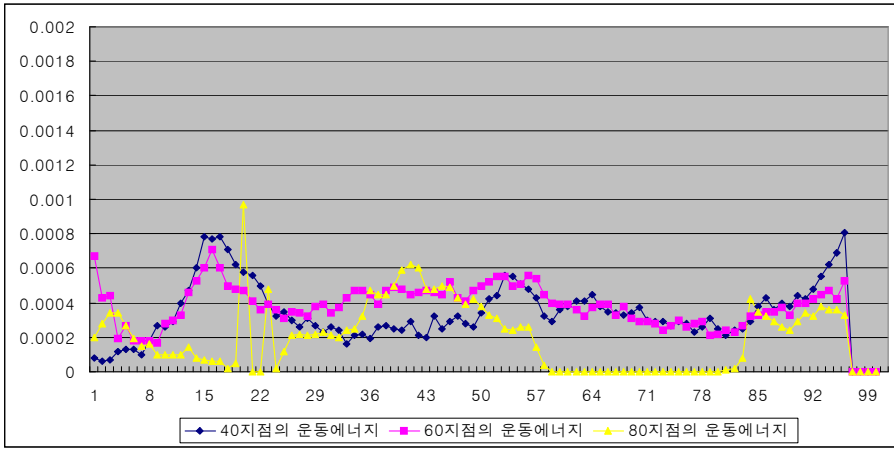
(a) Slot 0



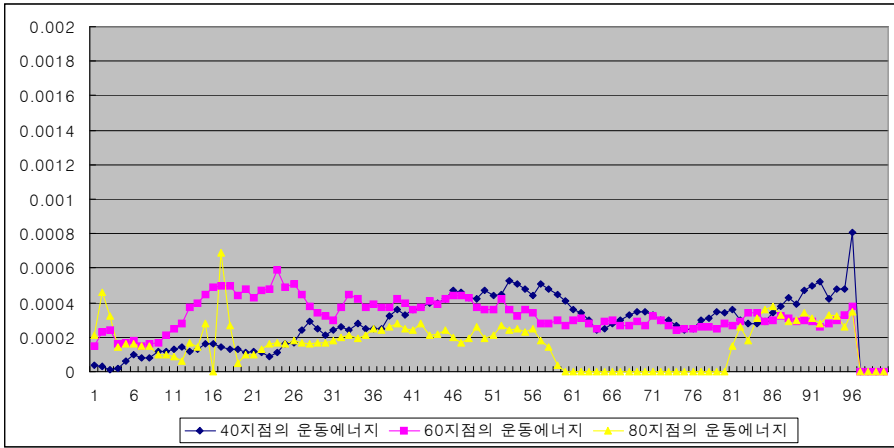
(b) Slot 1



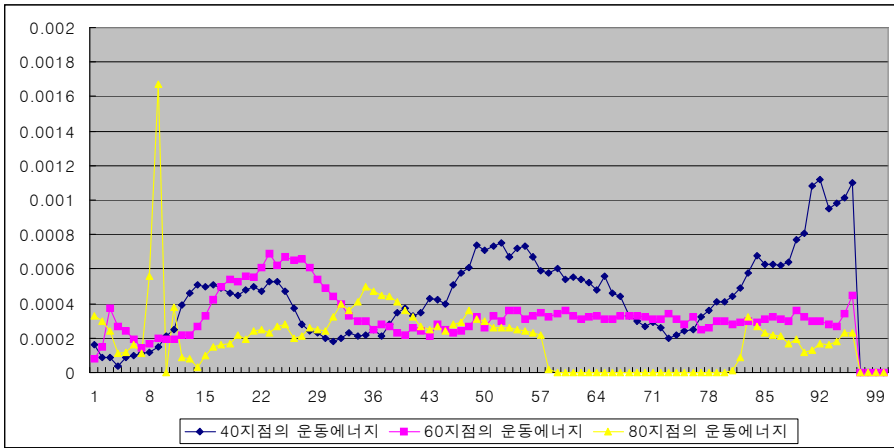
(c) Slot 2



(d) Slot 3

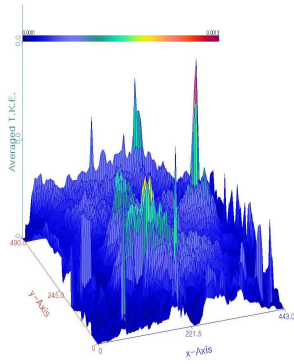


(e) Slot 4

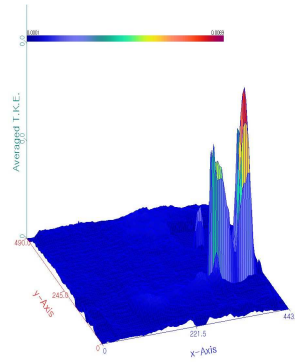


(f) Slot 5

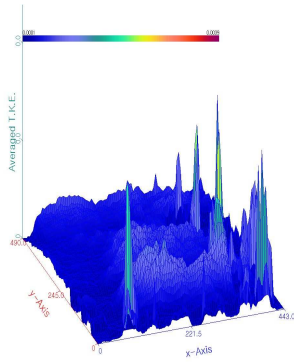
Fig. 13 Averaged T.K.E by In, Out Fan On



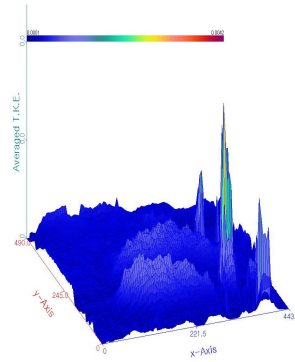
(a) Slot 0



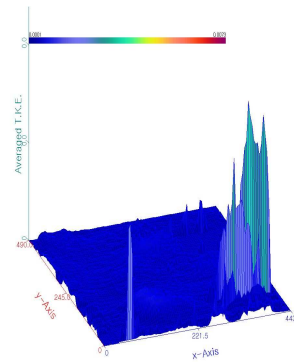
(b) Slot 1



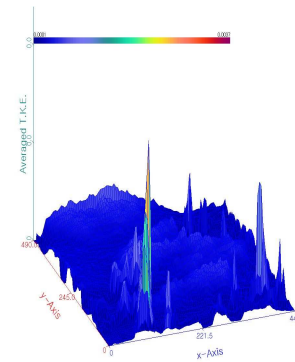
(c) Slot 2



(d) Slot 3

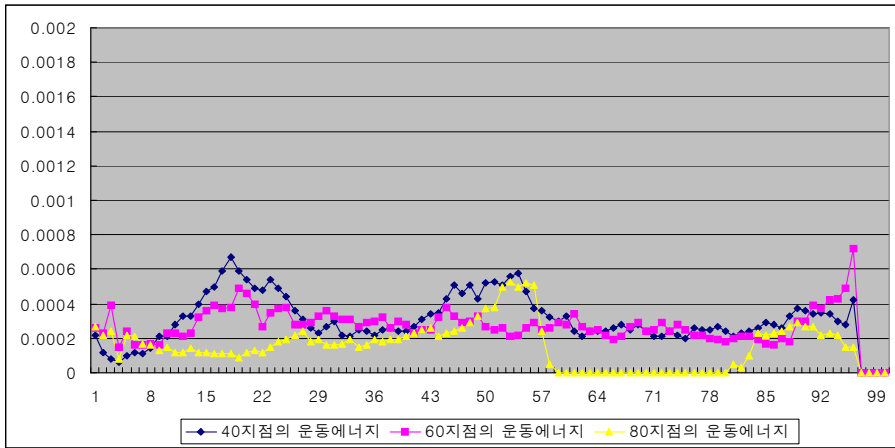


(e) Slot 4

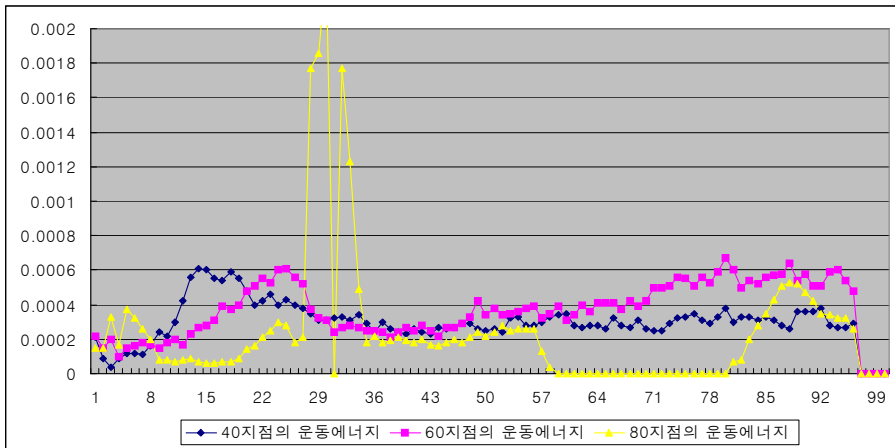


(f) Slot 5

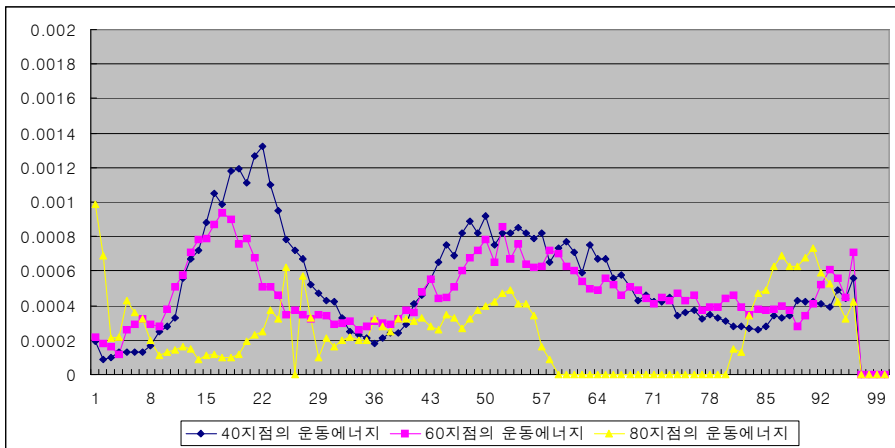
Photo. 10 Averaged T.K.E by In, Out, CPU Fan On



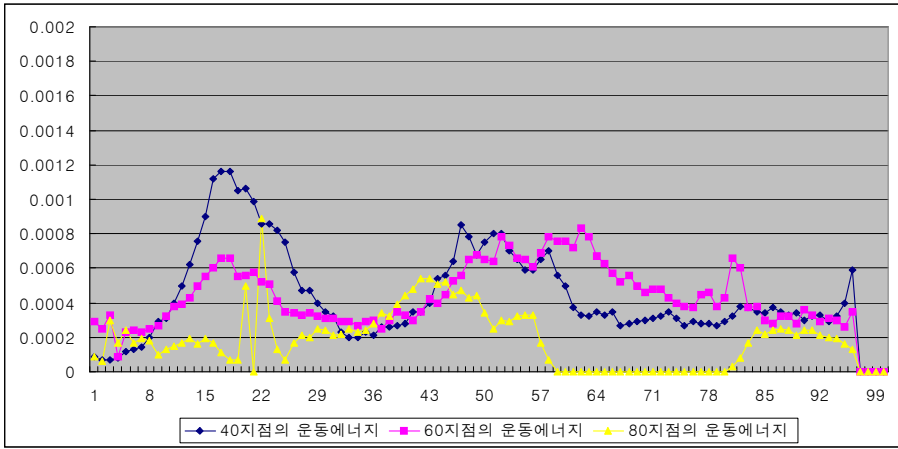
(a) Slot 0



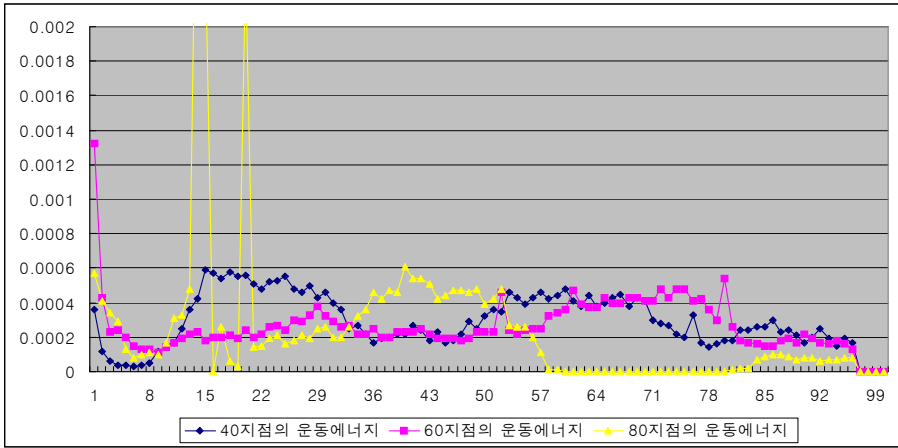
(b) Slot 1



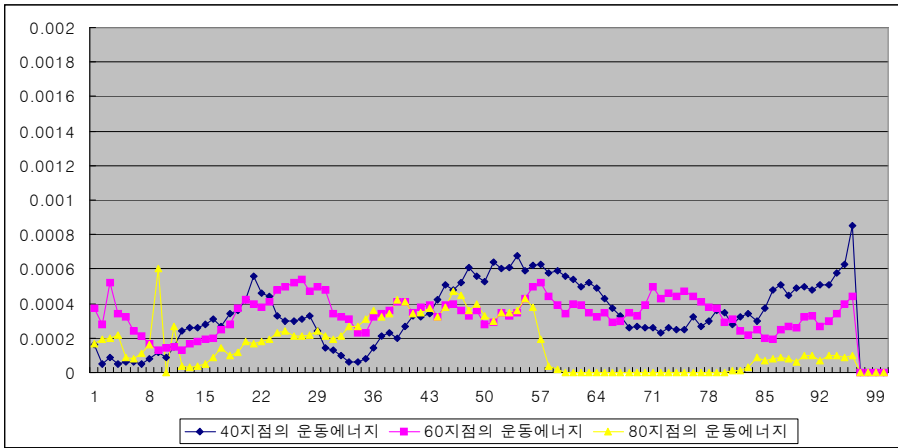
(c) Slot 2



(d) Slot 3



(e) Slot 4



(f) Slot 5

Fig. 14 Averaged T.K.E by In, Out, CPU Fan On

## 第 5 章 結 論

PIV 실험을 이용한 Desktop Personal Computer 내부의 유동특성에 관한 기초적인 연구로써 흡·배기 Fan을 작동 시킨 상태에서 닥트 입구로 ZnO(추적입자)를 산란시킨 후 CPU Fan의 작동 유무와 Slot의 설치 위치를 변화시키면서 측정된 Desktop Personal Computer 내부의 유동특성에 대한 실험 및 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) PC내부에 Slot의 설치 시 Slot와 밀면사이에 크고 작은 와류현상이 발생하며 이로 인해 PC내부의 전체유동에도 변화를 미치며 흡·배기 시 소음을 유발시킨다.
- (2) PC내부에 장착된 흡·배기 Fan의 영향이 직접적으로 미치지 않는 좌측상단도 중앙에서 발생하는 와류로 인한 압력차로 인한 유동현상이 발생한다.
- (3) CPU Fan의 작동 시 작동시키지 않았을 때에 비해 케이스 상단의 유동분포가 더욱 확실하게 나타내진다. 단 CPU Fan이 시계방향으로 작동하여 CPU Fan과 Slot 사이에서 와류가 더 강하게 나타는 것을 볼 수 있다. 이는 흡기 팬으로 부터 들어온 유체가 배기 팬 쪽으로 흘러가는 도중 역방향의 힘을 받아 생기는 현상으로 사료된다.
- (4) CPU Fan의 작동 시 중앙에 생기는 와류는 CPU Fan과 Slot의 사이의 간격이 클수록 작게 나타나는 것을 볼 수 있다. 또한 CPU Fan을 작동시키지 않았을 때는 잘 생기지 않던 케이스 좌측 상단의 유동현상에도 영향을 미친다. 하지만 CPU Fan의 작동이 Slot과 케이스 하단사이의 유동현상에는 영향을 주지 않는 것으로 사료된다.

## REFERENCES

1. Visualization society of Japan. *Handbook of Flow Visualization*: Asakura Book Company(Japanese), 1986.
2. Merzkirch, W., *Flow Visualization(2nd ed)*: Academic Press Inc.,1987.
3. Yang, W. J., *Handbook of Flow Visualization*: Hemisphere Pub.co., 1989.
4. G. K. Lee, “A Basic Study on the Instantaneous Velocity Field Measurement Using PIV”, *M.S. Thesis. Pohang Uni.*, 1995.
5. Y. D. Lee, “A numerical and Experimental Research by PIV algorithm using the New Three Step Search of Natural Convection in a Square Cavity”, *M.S. Thesis. Konkuk Univ.*, 1999.
6. H. J. Min, “An Experimental Study on the Measurement of Flow Field in Wavy Wall using PIV Algorithm”, *M.S Thesis. Konkuk Univ.*, 2001.
7. H. Lee, “A Study on Fluid Characteristics in the Wake of Bluff Bodies by Multivision PIV”, *M.S. Thesis. Korea Maritime Univ.*, 2001.
8. W. J. Yun, “A Study on the Flow Characteristics of Laminar Steady Flows in the Exit Region Connected to the Square-Sectional 180°Curved Duct”, *M.S. Thesis, Chosun Univ.*, 2002.
9. J. K. Kim, “PIV Measurements of Flow Downstream of Polyurethane Heart Valve Prosthesis for Artificial Heart: Pulsatile Flow Experiment”, *KSME(B), Vol.26.No.5:629-639*, 2002
10. J. S. Kim, “A Study on the Shape Design Optimization of

- High-Speed Air Vehicles Using Navier-Stokes Equations”, *M.S. Thesis. Korea Maritime Univ.*, 2001.
11. C. J. Jang, “Application of CFD to Marine Propellers and Propeller-Hull Interactions”, *Ph.D Thesis. London Univ.*, 1997.
  12. K. H. Min, “Surface Pressure Measurement on the Square Cylinder in the Wind-Tunnel” *M.S. Thesis. Incheon Univ.*, 2001.
  13. C. H. Lee, and W. J. Park, “A Study on the Flow fields Generated by a Parallel Flow into Rectangular Hexahedral Enclosures with a Two-Dimensional Inlet and Outlet”, *Korea University of Technology and Education, Vol. 8, No. 1*: 21-40, 2001.
  14. Y. G. Yang, “Finite volume method Applied to analyzing the flow in the duct of waterjet propulsor”, *M.S. Thesis. Seoul univ.*, 1996.
  15. H. N. Lee. G., M. Park., and G. D. Lee, “An Experimental Study on the Flow Characteristics in Dividing Rectangular Duct by using PIV Technique”, *KOSME, Vol. 25, No. 6*: 17-24, 2001.
  16. H. N. Lee., G., M. Park., and G. D. Lee, “A Study on the Flow Characteristics in Dividing Rectangular Duct by using PIV and CFD”, *KSAE, Vol. 1*: 421-427, 2001.
  17. H. N. Lee. G., M. Park., and G. D. Lee. “A Study on the Flow Characteristics in Dividing Rectangular Duct”, *KCORE, Vol. 1, No. 1*: 270-275, 2001.
  18. Adrian. R. J., “Scattering Particle Characteristics and Their Effect on Pulsed Laser Measurements of Fluid Flow : Speckle Velocimetry vs Particle Image Velocimetry”, *Applied Optics Vol. 23*, 1690 ~ 169, 1984.



19. Kobayashi and Yoshitake. Y., "An Automated Analysis Method for Determining Velocity Vectors from a Pathline Photograph", *Proc. Int. Symp. on Fluid Control and Measurement, Tokyo, Pergam Press, 729 ~ 734, 1985.*
20. Grant. and Liu. A., "Directional Ambiguity Resolution in Particle Image Velocimetry by Pulse Tagging", *Exp. in Fluids, Vol. 10, 71 ~ 76, 1990.*
21. Willert, C. E., and M.Gharib.. "Digital Particle Image Velocimetry", *Exp. in Fluids, Vol. 10, 181 ~ 193, 1991.*
22. Adrian, R. J.. and Keane, "Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics", *Annu. Rev. Fluid Mech., Vol. 23, 261 ~ 304, 1991.*

## 감사의 글

본 논문이 완성되기까지 학문적 지도와 격려는 물론 인격적인 면까지 하나하나 가르침을 주신 지도교수 이행남 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 아울러 본 논문의 심사를 통하여 많은 충고와 검토를 하여주신 모양우 교수님, 박길문 교수님께 진심으로 감사드립니다. 또한 연구기간동안 격려와 도움을 주신 기계공학과 교수님들과 유동가시화 실험실 대학원, 학원생 여러분께도 감사드립니다.

**‘하고 싶은 일을 하며 살수 있다는 것과 그만큼 인정받는다’**이라는 글귀를 품고 항상 나를 바른 길로 인도해주고 이끌어 주신 할머니와 부모님, 항상 멋진 일을 하며 세상을 살아가는 형, 나이는 어리지만 항상 어른 같은 동생에게 감사드리며, 하늘에 계신 할아버지께 이 영광을 바칩니다.

이 본문에 다 표현하지 못했지만 제가 이렇게 성장하기까지 만나온 사람들과 저를 이렇게 이끌어주신 모든 분들께 다시 한 번 고개 숙여 감사드립니다.

모두들 항상 행복하세요.

2006. 12.

정 한 별