

PIV속도계측에 수반하는 UNCERTAINTY해석

이 영 호* · 최 민 선**

(Analysis on the Uncertainty Accompanied
by PIV Velocity Measurements)

Lee Young-Ho, Choi Min-Seon

Abstract

Uncertainty analyses accompanied by the measurement of the velocity vectors in 3-D cavity flows are carried out. Twenty-one elemental errors are estimated or calculated according to the ANIS/ASME uncertainty analysis manual. Error components associated with the PIV (Particle Imaging Velocimetry) are reasonably small and the errors caused by the flow characteristics are fairly large, which confirm the reliability of the PIV measurement and also give good information to the planning phase of the experiment by discriminating the most critical parameter. The present study reveals that vector length expressed by pixels is the most influential. Calculated relative uncertainty for the all experimental conditions is ranging about 5-10% in terms of the representative velocity $0.5U_c$. U_c is here the belt velocity on the cavity apparatus.

Approximating equations to show the relative rss uncertainties are given and graphic representations are followed for the easier understanding of the uncertainty, existing in the velocity profiles of the cavity flow.

1. 서 론

최근에는 저가격의 컴퓨터 및 관련된 주변장치가 비교적 용이하게 구입될 수 있으며 또한 그 성능이 비약적으로 발달되어 유체공학을 포함한 제반 계측분야에 있어서의 화상처리 계측시스템에도

적극적으로 활용되고 있다. 나아가 정량적인 데이터의 신뢰성을 유지하기 위해서는 수반하는 오차에 대한 엄밀한 평가가 요구되며 이전부터 합리적인 오차해석방법 및 그 적용예가 다수 발표되어 왔다^{1)~3)}. 특히 Moffat은 uncertainty해석에 관한 중요한 기본개념을 소개하여, 유용한 적용사례를

* 한국해양대학 기관학과 조교수

** 한국해양대학 대학원 박사과정

발표하고 있으나 이미 공표된 ANSI/ASME로부터의 해설서⁴⁾와는 구체적인 계산방법이 틀린 점이 있음으로서, 오차해석의 표준적인 방법이 되지 못하고 있다. 따라서 ANSI/ASME로부터 공표된 수법이 오차해석의 효과적인 방법으로서 통용되고 있다. 한편, 1987년에 일본기계학회에서는 “計測の不確かさ”라고 하는 제목으로 이 해설서의 번역판을 출판하여 자국의 전문용어로서 정착을 시키고 있다.

화상처리수법을 이용한 속도계측(Particle Imaging Velocimetry)에 있어서의 오차해석은 Schraub⁵⁾ 및 Imaichi⁶⁾등의 선구적인 연구결과가 있다. Schraub 등은 수소기포를 이용한 가시화사진으로부터 정량적인 속도값을 구할 때의 제반오차요인을 산출하였다. 특히, Eulerian속도장을 미소시간 평균속도인 Lagrangian수법을 이용하여 구함으로써 발생하는 오차를 averaging uncertainty라고 정의하고 시간, 공간적인 Taylor급수전개를 행하여 이 값을 정량적으로 구하고 있다. Imaichi 등은 2차원 Karman와류 실험에서의 속도값을 정지사진 및 digitizer를 이용한, 당시로서는 혁신적인 화상처리수법을 활용하여 제반 유체정보량을 구하고 이에 수반하는 오차를 계통적으로 보고하였다. 西野⁷⁾ 등은 동심회전하는 이중원통간의 비정상층류인 Couette흐름의 속도분포측정을 위해, 미소입자를 유동장에 주입하고, TV카메라를 이용하여 tracer의 거동을 PIV수법에 의해 추적하였다. 이때 유체의 주기적인 속도변동에 대한 추종성 및 step적인 속도변동에 대한 입자의 추종성도 함께 검토하고 있다.

본 연구에서는 구체적인 유동장으로서 3차원의 cavity흐름을 대상으로 하였다. Tracer는 150 마이크로미터의 나일론입자를 사용하였으며 유동장에 분포된 다수의 입자의 거동은 비디오 테이프에 기록보존하여 유동장의 재현성을 확보하였다. 보존된 화상은 전용의 image processor 및 처리 algorithm을 활용하여 속도분포를 구하기 위한 기초 데이터의 수집에 이용되었다. 속도계산에 필요한 변수의 수는 여섯가지이며 이들 각각에 대한 오차요인을 우선 정량적으로 구하고, 이들 값의 결과에의 전파(propagation)를 계산하여 속도값에

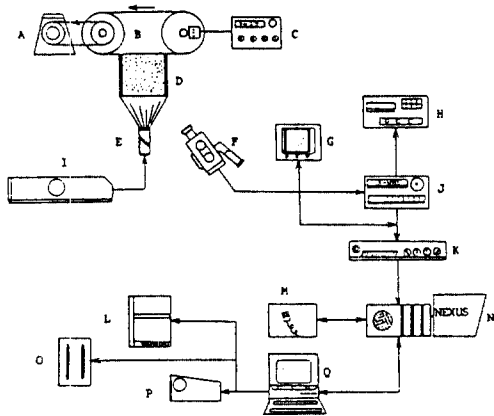
수반하는 최종적인 uncertainty값을 평가하였다.

계산된 uncertainty는 세 종류의 Re수에 대하여 거의 같은 값을 가지며 대표속도 0.5U(U는 벨트속도)에 대한 상대uncertainty는 5%전후의 값을 나타내었다. 이 값에는 image processor 및 처리 algorithm 자체에 기인하는 오차성분과 함께 유동장의 특성에 기인하는 성분도 크게 작용함을 알 수 있었으며 이에 관한 값들을 정량적으로 제시하였다.

2. 실험방법 및 PIV의 개요

그림1은 본 연구에서 채택한 실험장치의 배치도이다. 유동장으로서의 전산유체역학분야에서 bench mark로 자주 인용되는 cavity흐름을 택하였다. 실험을 위해 폭, 두께 및 높이가 각각 100 mm, 100mm 및 100mm인 정방형cavity를 아크릴판으로 제작하였다. 상부의 가공면은 연속적으로 회전하는 두께 0.25mm의 스테인레스 판과 수밀을 유지하면서 접촉되어 cavity내부에 큰 값의 와도(vorticity)를 공급한다. 그림2는 본 실험에서 채택된 좌표정의이다. X방향은 cavity흐름에서 TGL와(Taylor-Goertler-Like Vortex)가 관찰되는 단면으로서 벨트의 이동방향과 직각을 이루고 있다. Y축은 벨트의 이동면과 평행인 단면을 가르킨다. Z축은 주류방향이라 하며 좌우에 미약한 2차와(secondary eddy)가 형성되는 방향이다. 전산유체역학의 연구에서 주로 인용하는 대표 단면이다.

생성된 유동장은 비디오 카메라 및 고화질의 SVHS테이프를 사용하여 기록보존하였다. 일반적으로 화상처리수법에 있어서 유동장의 입력은 real time입력을 위한 on-line직접입력방법과 생성된 유동장을 일단 테이프 등에 기록보존한 다음 차후에 재생하여 처리하는 방법이 있다. 본 실험에서는 후자의 방법을 택하였으며, 특히, 유동장의 재현성 확보면에서 우수한 점이 평가된다. 실험조건으로서 아스펙트비 1:1의 경우에 cavity의 높이, 스테인레스 벨트의 속도 및 상온의 수도수를 작동액으로 사용하여 계산되는 Re수는 10^3 , 3.2×10^3 및 5×10^3 의 세 종류이다. 실제의 벨트속도는



- | | |
|----------------------------------|------------------------------|
| A: SCR DC Motor & Reduction Gear | B: Roller & Stainless Belt |
| C: Encoder & Digital Tachometer | D: Cavity (100 mm L, B, H) |
| E: Cylindrical Lens & Fiber Line | F: TV Camera or CCD Camera |
| G: Monitor TV | H: Color Image Printer |
| I: Argon Laser | J: Video Tape Recorder |
| K: Time Base Corrector | L: X-Y Plotter |
| M: Digitizer | N: Image Processor & Monitor |
| O: External Memory | P: Laser Printer |
| Q: Host Computer | |

Fig. 1 Schematic Experimental Apparatus

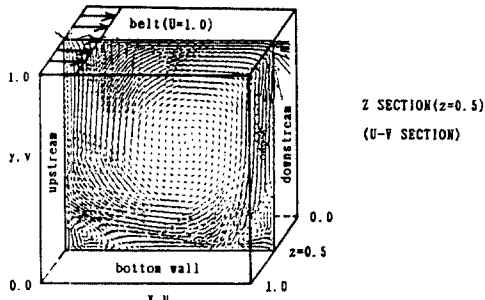


Fig. 2. Schematic Definition of Coordinates

$Re=10^3$ 의 경우에 10mm/sec 전후의 속도값을 갖는다. Sheet light 광원용인 argon 레이저 발생장치 및 광섬유에 연결된 실린드라컬렌즈를 사용하여 2.5mm의 slit 광선을 공급하였다. 벨트의 회전 속도 유지를 위해서 SCR 직류모터를 설치하였으며, 일정회전수를 얻기 위해 encoder 및 디지털 타코메타를 사용하였다. Tracer 입자는 수도수와 거의 같은 밀도를 갖는 나이론 12 입자이며 평균 직경 150 마이크로 전후의 것을 선별하여 사용하였다. 완전히 발달한 유동장을 얻는데 있어서의 잠음 성분으로서는 cavity 안밖의 미소한 누설, 광원으로 부터의 열전달에 의한 완만한 대류현상, 벨트속도의

미소변동, 입자의 편중된 분포에 의한 이상류적 영향 및 초기의 비대칭속도분포 등이 지적된다. 그러나 본 실험에서 대상으로 하는 모든 실험조건에 있어서 완전히 발달된 유동장의 특성중의 하나는 span 방향의 중앙단면인 $z=0.5$ 를 중심으로 시간평균적인 대칭흐름이 유지된다는 점이며 상기의 어느성분도 완전한 random flow 또는 bi-stable flow를 초래하지 않았음을 주요 유동특성중의 하나로서 밝혀 둔다. 처리 algorithm 및 구체적인 적용 예는 별도의 문헌⁸⁻⁹⁾에 소개되어 있다.

3. 요소오차의 산출

ANSI/ASME의 해설서를 참고로 하여 요소오차의 산출을 행하나 적당한 적용예가 없는 경우에는 별도의 방법을 제안하여 uncertainty 값을 산출하였다.

3-1. 교정에 수반하는 오차

이 오차는 bias error의 제거 및 상위기준기기에 대한 traceability를 확보하기 위해 행한다. 이 경우에 있어서 교정은 실제의 실험조건과 동일한 환경하에서 행할 필요가 있으며 특히, 장시간에 걸친 계측기기의 drift 및 조절불가능의 오차에 대한 교정이력(calibration history)을 파악하여 두어야 한다.

a. 수온온도계의 교정 : 온도계측을 위한 온도계는 0.1 °C/scale의 정도를 가지나 상위의 수온표준온도계를 이용하여 상온근처에서 교정을 행한 결과를 bias error로서 간주하였다.

$$B_{3-1-1} = \pm 0.1 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ (계측)}$$

b. 타코메터 및 엔코우더의 교정 : 엔코우더는 1000 pulse/rev의 정도를 갖는다. 이들 신호처리계에 있어서의 오차를 개략적으로 확인하는 방법으로 로서 롤러의 1회전에 걸리는 시간을 초시계로 계측하였고 pulse 수로부터 계산한 시간과 반복비교하였다.

$$B_{3-1-2} = 0.2 \text{ sec/rev (계측)}$$

c. 비디오카메라의 교정 : 테이프의 주행속도변동,

공칭서터속도 등에 관한 오차는 미지량이나 상업용으로서의 정도는 충분히 확보되어 있다고 추정하였다.

$$B_{3-1-3} = 0 \text{ pixel (추정)}$$

d. 화상처리장치의 교정 : 특히 skip수에 따른 화상의 입력시간간격의 정확도가 문제가 되나 skip은 디지털제어에 의하므로 이에 수반하는 오차는 무시할 수 있다고 추정한다. 확인방법으로써 monitor상에서 반복되는 화면수에 skip시간간격을 곱한 값과 초시계에 의한 실제의 계측값과 비교하여 오차값을 제시하였다.

$$B_{3-1-4} = 0.0 \text{ sec (계측)}$$

e. 화상처리algorithm의 교정 : 채택된 처리soft에 의해 정확한 속도값이 얻어 질 수 있는가를 확인하기 위해서는 이미 상위의 정도가 확보된 다른 계측수법과의 비교가 필요하나 algorithm의 기본원리로부터 이에 관한 오차는 무시하였다.

$$B_{3-1-5} = 0 \text{ pixel (추정)}$$

f. 그밖에 cavity 및 롤러의 크기를 계측하기 위한 버니어 캘리퍼스, 3축 traverse장치 및 비중계 등의 교정은 생략하였다.

3-2. 데이터의 수집에 수반하는 오차

오차의 기본적인 분별법으로써, 통계량으로 계산될 수 있는 오차는 random오차로, 그렇지 못한 오차는 bias오차로 간주하였다. 또한, 통계량으로 계산되어지나 실험중 변하지 않는 성분은 bias오차로 구별하였다.

3-2-1. 측정기기의 오차

주로 기기의 공칭오차 및 판독오차가 여기에 속한다.

a. 수온온도계의 판독오차 : 눈금은 0.1 °C의 정도를 가지나 확대렌즈로 판독이 가능한 한계를 오차값으로 간주하였다.

$$B_{3-2-1-1} = \pm 0.02 \text{ }^{\circ}\text{C (추정)}$$

b. 버니어 캘리퍼스의 판독오차 : 공칭오차 1/20 mm를 bias오차로 구분하였다.

$$B_{3-2-1-2} = \pm 0.05 \text{ mm (추정)}$$

c. 타코미터의 round-off 오차 : D.C. 모터의 회전속도 변동오차에 포함하는 성분으로 간주하여 무시하였다.

$$B_{3-2-1-3} = 0 \text{ pixel (추정)}$$

d. 이밖에 비디오 카메라 및 화상처리장치 등에 관련한 오차도 발생하나 미지량으로서 무시하였다.

3-2-2. 실험환경오차

a. cavity가공 및 조립오차 : 계측한 결과 최대 0.1mm의 값을 얻었다.

$$B_{3-2-2-1} = \pm 0.1 \text{ mm (계측)}$$

b. 세제유입에 따른 밀도변화 : 나이론입자간의 결합을 방지하기 위해 1회의 실험조건마다 약 0.5ml의 계면활성체를 투입하였다. 이때의 밀도변화를 알아 보기 위해 비중계로 밀도를 계측한 결과 약 1 kg/m³의 증가를 보였다. cavity체적 1000ml에 대해서는 무시할 수 있는 양으로 간주하였다.

$$B_{3-2-2-2} = 0.1 \text{ kg/m}^3 \text{ (계측)}$$

c. 세제유입에 따른 점도의 변화 : 세제는 3종류의 화학성분의 합성물이나, 이에 관한 상세한 배합률은 알려져 있지 않다. 그러나 밀도변화가 무시될 수 있으므로 점도의 변화도 무시하였다.

$$B_{3-2-2-3} = 0.0 \text{ m}^2/\text{sec (추정)}$$

d. 동점성계수 보간에 따른 오차 : 5 °C마다 보고되어 있는 동점성계수의 값을 spline함수로 보간하여 속도의 조정에 이용하였다. 20 °C에서의 보간치와 보고치와의 차를 보간오차로 간주하였다.

$$B_{3-2-2-4} = 0.00032 \text{ mm}^2/\text{sec (계산)}$$

e. D.C. 모터의 회전수 변동 : SCR전압제어에 의해 D.C.모터의 속도를 일정하게 유지한다. 사양서상의 정도는 최대회전수에서 2.0 %이나, 실제의 계측으로부터 경험적으로 1pulse의 속도변동값을 오차로서 추정하였다.

$$B_{3-2-2-5} = \pm 1 \text{ pulse (계측)}$$

f. 입자의 혼합에 따른 유동장의 이상류적 특성 : 1

회에 주입하는 입자의 양은 0.15-0.20ml 전후이므로 cavity의 체적1000ml에 대한 보이드율은 약 0.02%가 되어 입자의 존재에 따른 상호작용의 영향은 충분히 무시될 수 있다고 판단하였다.

$$B_{3-2-2-6}=0.02\% \text{ (계측)}$$

g. 입자의 성질로부터의 오차: 나이론12입자의 진원도 및 표면거칠기 등이 유동장에 대한 추종성에 영향을 미칠것으로 추정하나 명확하지 않다. 현미경으로 관찰한 결과 진원도는 양호하며 표면은 매끄러워 이에 관한 오차는 무시될 수 있다고 추정하였다.

$$B_{3-2-2-7}=0 \text{ pixel (추정)}$$

h. 입자의 밀도차에 의한 강하속도: 사용된 나이론12입자는 직경이 0.15mm전후의 구형입자이나 밀도가 수도수보다 큰 값을 갖는다. 이때 발생하는 중력방향의 강하속도는 속도벡터의 계산에 있어서 오차를 수반하며 특히 밀도차가 큰 경우에는 무시할 수 없는 요소가 된다. 본 실험에서는 일정한 길이의 비이커내의 정지유체내에서 다수입자의 평균강하속도를 구하고 실제의 화상처리장치의 해상도로 환산한 값을 오차로 계산하였다.

$$B_{3-2-2-8}=0.4 \text{ pixel (계측)}$$

i. laser sheet light에 의한 온도상승: 폭2.5mm의 sheet light에 의한 cavity내의 온도상승을 0.02℃까지의 관독가능한 온도계로 계측한 결과, 온도의 증가는 발견되지 않았다. 그러나, 최소눈금값을 관독오차로서 추정하였다.

$$B_{3-2-2-9}=\pm 0.02 \text{ }^\circ\text{C (계측)}$$

j. 물라의 원주길이의 관독오차: 물라의 원주길이를 최소눈금이 1.0mm인 스케일로 계측하였으나 이때의 오차를 최소눈금의 1/2로서 추정하였다.

$$B_{3-2-2-10}=\pm 0.5 \text{ mm (추정)}$$

3-2-3. 속도벡터의 계산에 수반하는 오차

a. cavity좌표길이의 관독오차: cavity단면의 네 정점의 좌표를 이용하여 대표길이를 결정하고 이 값을 무차원화에 이용하였다. 좌표는 digitizer에 의해 관독하나 경험적으로 대표길이에 대한 오차 값을 추정하였다.

$$B_{3-2-3-1}=\pm 2 \text{ pixel (추정)}$$

b. 비디오카메라와 cavity의 위치설정오차: 카메라는 cavity의 정중앙에 직각으로 위치하여 설정되는 것이 바람직하다. 그러나 실제의 경우에 있어서는 약간의 위치변화가 늘 존재한다. 이와같은 자세변화에 의한 광학수차 등으로 인하여 속도벡터값이 변화하며 요소오차성분이 된다. 본 실험에서는 6가지의 자세변화를 주어 길이가 알려진 기준판의 길이변화에 대한 정밀도를 계산하였다.

$$S_{3-2-3-2}=0.245 \text{ pixel, 자유도}=36 \text{ (계측)}$$

c. sheet light폭의 원근차에 의한 오차: 2.5mm의 폭을 갖는 촬영체적내의 입자가 slit폭의 중심으로부터 전후에 존재하는 경우에는 광학적인 효과로 인해 입자의 궤적이 틀리게 나타난다. 이때의 입자의 이동거리차를 굴절율을 무시한 단순한 비례관계로 부터 구하였다.

$$B_{3-2-3-3}=\pm 0.25 \text{ pixel (계산)}$$

d. 입자의 중심위치 계산에서의 truncation오차: 사용된 image processor는 1차모멘트의 원리에 의해 구형입자의 중심(gravity center)를 구하나, 그값은 정수로서 나타낸다. 속도벡터의 시점과 종점의 2개소에서 발생하므로 2pixel을 최대오차성분으로 추정하였다.

$$B_{3-2-3-4}=\pm 2 \text{ pixel (추정)}$$

e. 기준치(threshold level)변화에 의한 오차: 256계조의 다지탈신호로 변환된 화상정보로부터 입자의 중심위치를 계산하나, 이때의 기준치를 적정하게 조정하여 잡음정분을 제거함으로써 최상의 화상정보를 얻는다. 30개의 입자의 입자에 대하여 기준치를 100에서 70으로 바꾸었을 때의 중심위치 변화값에 대한 정밀도를 오차로서 간주하였다.

$$S_{3-2-3-5}=0.894 \text{ pixel, 자유도}=30 \text{ (계산)}$$

f. 카메라의 셔터속도차에 의한 오차: 셔터속도값이 다를 경우 입자의 중심위치값이 변화한다. 본 실험에서는 1/250sec의 일정한 값을 유지하며 이 값의 대한 중심위치의 변화량을 구하여 오차로서 추정하였다.

$$B_{3-2-3-6}=0.24 \text{ pixel (계산)}$$

g. 속도벡터의 averaging오차: 속도벡터의 산출 algorithm은 4시각의 입자의 중심위치를 이용하고 있다. 따라서, 각화상은 유동장의 변동성분에 대하여 시간공간적인 평균조작(averaging)이 행해진 결과이며 이에 따른 오차가 무시될 수 없음이 Schraub 등의 선구적인 결과⁵⁾에 의해 보고되어 있다. 본 연구에서는 다음과 같은 새로운 수법을 제시하였다. 즉, N개의 입자에 대하여 시점으로부터 중점까지의 세 속도성분에 대한 평균값을 취하여 이 값에 대한 정밀도를 구하고 같은 원리로 M조의 입자에 대한 가산적 추정치(pooled estimate)를 구하여 오차로서 추정하였다.

$$S_{3-2-3-7} = 0.66 \text{ pixel, 자유도} > 30 \text{ (계산)}$$

h. 입자의 추종성에 수반하는 오차: 고속의 난류나 진동유동장에서는 입자의 추종성이 중요한 문제가 되고 있다. 그러나 본 실험에서와 같이 층류에서의 완전한 유동장에서는 입자의 밀도차에 의한 상승 또는 강하속도가 주요 오차요인이 되며 0.6% 정도의 미약한 평균밀도차에 의한 추종성문제는 무시될 수 있음이 수치해석결과¹⁰⁾⁻¹¹⁾에 의해 밝혀져 있다.

$$B_{3-2-3-8} = 0 \text{ pixel (추정)}$$

i. 계산기의 truncation오차: 충분히 무시될 수 있다고 추정하였다.

$$B_{3-2-3-9} = 0 \text{ pixel (추정)}$$

3-3. 데이터의 처리에 수반하는 오차

일반적인 수법으로서는 교정곡선의 커브결정에 따른 오차 및 계산기의 정도 등이 포함되나 본 해석에서는 임의로 구분된 공간격자상에 분포된 입자의 평균조작에 수반하는 오차를 고려하였다. 즉, 개개의 속도벡터에 대해서는 앞질의 방법으로 제반오차를 계산할 수 있으나 시간 및 공간 평균조작에 의한 임의의 대표속도값에는 이들의 속도성분차에 의한 오차가 반드시 존재하며 이 분포를 random오차로 구분하여 최종적인 오차값의 산출에 이용하였다. 이에 관한 제반오차요인을 다음과 같이 제시하나 정량적인 값을 개별적으로 계산하는 것은 어렵다고 판단되었다.

a. sheet light폭 증가에 의한 오차: laser광선은 그 직진성이 장점으로 알려져 있으나 실린드릭 렌즈, cavity 및 수도수에 의한 굴절률로 인해 slit폭이 미소증가한다. 실측에 의하면 0.19mm의 증가를 보였다.

b. 데이터의 시간평균에 의한 오차: 최종적인 속도 분포도를 얻기 위해서 평균 15회분의 화상데이터를 이용하였다. 시간평균값에 대한 정확도를 높이기 위해 평균 40초의 간격으로 화면을 skip하였으나 conditional sampling과 같은 완벽한 데이터의 수집이 불가능함으로서 속도벡터분포에 변동이 발생하였다.

c. 광학적수차에 의한 오차: 카메라의 렌즈특성에 따른 다양한 광학적수차에 의한 오차가 발생한다. 그러나, 상용의 기기에 대한 정확한 오차성분을 제시하는 것은 어렵다고 판단되었다.

d. 속도벡터의 작용점위치에 따른 오차: 채택된 algorithm의 특성상 4시각의 화상정보로 속도벡터를 산출하였다. 따라서, 화면간의 skip수가 큰 경우에는 제1화면상의 입자위치를 벡터의 작용점으로 결정하는 것은 무리가 있다고 판단되었다. 본 실험에서는 제2화면과 제3화면의 위치좌표의 평균치를 대신 사용하는 수법을 택하였으나 이에 따른 공간적인 변동이 오차의 원인이 되었다.

e. 3축traverse장치의 이동오차: 장치자체는 1/20 mm의 정도를 가지나 sheet light의 단면결정에 있어 이동오차가 존재한다. 따라서, 결과적으로 해석대상의 유동장결정에 오차를 수반하였다.

이상의 오차를 대표적으로 계산하는 방법으로써 임의의 공간격자내에 분포된 속도벡터값의 평균값에 대한 정밀도를 계산하는 수법을 택하였다. 예를 들어, $Re = 3.2 \times 10^3$, 아스펙트비 1:1 및 시간간격 1.0sec에 대한 오차로서 다음과 같이 pixel로 환산한 값을 제시하였다.

$$\begin{aligned} S_{3-3} &= 0.169 \text{ pixel, 자유도} = 147 \text{ (x단면)} \\ &= 0.211 \text{ pixel, 자유도} = 141 \text{ (y단면)} \\ &= 0.170 \text{ pixel, 자유도} = 46 \text{ (z단면)} \end{aligned}$$

3-4. 요소오차의 결합

무차원속도벡터의 산출에는 여섯종류의 변수가

필요하다. 따라서, 앞절에서 제시된 개개의 요소 오차가 이들 변수에 작용하기 위해서는 각기 bias 오차 및 random 오차로 통합되어야 한다. 결합된 uncertainty 성분은 최종적으로 속도벡터 산출 결과로의 전파식에 이용된다.

3-4-1. 무차원속도의 계산

입자의 이동거리로부터 얻어진 개개입자의 무차원속도는 U^* 는 $U^*=l^*/t^*$ 로 표시한다. 여기에서 l^* 은 무차원길이를, t^* 는 무차원시간을 의미한다. l^* 은 P_{41}/L 로 나타내지며 P_{41} 은 시점으로 부터 종점까지의 입자의 변위를 pixel단위로 표시한 값이며, L 은 cavity의 한번의 길이를 pixel단위로 나타낸 값이다. t^* 는 $dt/(H/U_B)$ 로 무차원화 한다. 여기에서, dt 는 시점과 종점간의 시간간격을, H 는 cavity의 한번의 길이를, U_B 는 정해진 Re수에 해당하는 벨트의 속도를 의미한다. U_B 는 정도 1000pulse/rev의 encoder로 부터의 10초간의 pulse수 및 롤라의 원주길이를 이용하여 계산된다. 즉, $U_B = \text{반경} \times \text{각속도} = (s/2\pi) \times 2\pi(6n/1000) \times (1/60) = s \times n \times 10^{-4}$ 의 식으로 표시된다. 여기에서, s 는 롤라의 원주길이를, n 은 10초간의 pulse수를 의미한다. 따라서, 무차원속도 U^* 를 계산하기 위해서는 다음의 관계가 성립된다.

$$U^* = \frac{(H \times P_{41})}{(L \times s \times n \times 10^{-4} \times dt)} \quad (1)$$

상기식에서 알 수 있는 바와 같이 U^* 의 계산에 필요한 요소오차항목은 H, P_{41}, L, s, n, dt 의 여섯 종류이며 이들의 변수에 대한 요소오차의 결합을 행할 필요가 있다.

3-4-2. 요소오차의 환산

개개의 요소오차는 앞절에서 산정하였으나 일부의 오차성분은 식(1)의 변수의 차원과 일치하지 않는다. 따라서, 이들의 오차성분에 대하여는 변수의 오차성분으로 환산할 필요가 있다. 실험환경으로 부터의 오차중, 용액의 온도변화, 또는 세제의 투입에 따른 밀도변화 등은 cavity의 물성치를 바꾼다. 그 결과, 일정한 Re수를 유지하기 위한 롤라의 회전수를 조정할 필요가 있다.

Re수는 $Re = U_B H / \nu$ 로 표시하나, 온도의 오차성분에 의한 동점성계수의 변화를 고려하여 회전

수를 pulse값으로 표시하면 다음의 식으로 정리된다.

$$n = Re \times (\nu/s) \times 10^{-5} \text{ pulse} \quad (2)$$

$Re = 3.2 \times 10^3$, 19-20°C에서의 동점성계수의 차 $0.024 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$ 및 $s = 0.617 \text{ m}$ 를 이용하여 수은온도계의 교정에 따르는 오차를 환산한다.

$$B_{3-1-1} = 3200 \times (0.024 \times 10^{-6} \times 0.1) \times 10^5 / 0.617 = 1.17 \text{ pulse}$$

또한, 타코미터 및 encoder의 교정오차인 0.2 sec는 1회전 1000pulse에 걸리는 시간이 60sec인 관계로 $0.2 \times 1000 / 60 \text{ pulse}$ 의 값으로 환산된다.

$$B_{3-1-2} = 3.3 \text{ pulse}$$

같은 요령으로 수은온도계의 판독오차는,

$$B_{3-2-1-1} = 0.234 \text{ pulse}$$

동점성계수 보간에 따른 오차는,

$$B_{3-2-2-4} = 0.0156 \text{ pulse}$$

laser sheet light에 의한 온도상승오차는,

$$b_{3-2-2-9} = 0.234 \text{ pulse}$$

의 오차값으로 환원된다.

세제주입에 따른 밀도변화오차인 $B_{3-2-2-2} = 0.1 \text{ kg/m}^3$ 의 밀도증가에 대한 입자의 상승속도를 Stokes근사에 의해 구하였다. 구해진 $1.2 \times 10^{-3} \text{ mm/sec}$ 의 상승속도를 pixel해상도로 환산하면 0.005pixel의 값이 얻어진다.

$$B_{3-2-2-2} = 0.005 \text{ pixel}$$

3-4-3. 요소오차의 결합

ANSI/ASME로 부터의 uncertainty 해석수법에 의하면 오차의 합계는 RSS(root sum square)의 형식으로 구해진다. 이 방법으로 요소오차의 결합을 행하였다.

a. H에 관한 오차 :

$$B_{H} = (B_{3-2-1-2}^2 + B_{3-2-2-1}^2)^{1/2} = (0.05^2 + 0.1^2)^{1/2} = 0.112 \text{ mm}$$

b. s에 관한 오차 :

$$B_s = B_{3-2-2-10} = 0.5 \text{ mm}$$

c. L에 관한 오차 :

$$B_L = B_{3-2-3-1} = 2 \text{ pixels}$$

d. n에 관한 오차 :

$$B_n = (B_{3-1-1}^2 + B_{3-1-2}^2 + B_{3-2-2-4}^2 + B_{3-2-2-5}^2 + B_{3-2-2-9}^2)^{1/2} = (1.17^2 + 3.3^2 + 0.0156^2 + 1^2 + 0.234^2)^{1/2} = 3.65 \text{ pulse}$$

e. P₄₁에 관한 오차 :

$$B_{P_{41}} = (B_{3-2-2-8}^2 + B_{3-2-3-3}^2 + B_{3-2-3-4}^2 + B_{3-2-3-6}^2)^{1/2} = (0.4^2 + 0.25^2 + 2^2 + 0.24^2)^{1/2}$$

$$S_{P_{41}} = (S_{3-2-3-2}^2 + S_{3-2-3-5}^2 + S_{3-2-3-7}^2 + S_{3-3}^2)^{1/2} = (0.245^2 + 0.894^2 + 0.66^2 + 0.211^2)^{1/2} = 1.16 \text{ pixel, 자유도 } \nu > 30$$

f. dt에 관한 오차 :

$$B_{dt} = B_{3-1-4} = 0.0 \text{ sec}$$

3-4-4. 요소오차의 결과로의 전파

ANSI/ASME의 수법에 의거하여 개개의 변수에 해당하는 오차성분을 속도벡터의 계산식에 적용하여 절대 및 상대uncertainty의 값을 구하였다.

3-4-4-1. 절대정확도 및 정밀도

무차원속도 계산식 (1)을 다시한번 인용한다.

$$U^* = \frac{(H \times P_{41})}{(L \times s \times n \times 10^{-4} \times dt)} \quad (1)$$

구체적인 uncertainty의 산출방법을 제시하기 위해 Re=3,2×10³에서의 무차원 대표속도 0.5의 경우를 예를 들어 설명을 행한다.

여기에서,

H : cavity의 한변길이 100mm

P₄₁ : Re=3,2×10³에서 대표속도 0.5U_B에 해당하는 pixel수 60 pixel

L : cavity의 한변의 길이에 해당하는 pixel 수 400 pixels

s : 롤라의 원주길이 617mm

n : 20 °C에서 Re=3,2×10³에 해당하는 pulse 수 488,3 pulse

dt : 4화면의 화상입력 시간간격 1.0sec

상기의 변수에 대한 절대정확도 및 정밀도를 다음과 같이 정리한다.

변 수	절대정확도	절대정밀도
H	0.112mm	0
P ₄₁	2.07 pixel	1.16 pixel
L	2.0 pixel	0
s	0.5mm	0
n	3.65 pulse	0
dt	0.0 sec	0

3-4-4-2. 상대정확도 및 정밀도

무차원속도 0.5의 계산에 필요한 변수에 대한 상대오차성분을 다음과 같이 정리한다.

변 수	상대정확도	상대정밀도
H	0.112/100=0.00112	0
P ₄₁	2.07/60=0.0345	1.16/60=0.019
L	2.0/400=0.005	0
s	0.5/617=0.00081	0
n	3.65/488,3=0.0075	0
dt	0.0/1.0=0.0	0

3-4-4-3. 절대감도의 계산

절대감도는 식 (1)의 각 변수에 대한 편미분을 행하여 구하였다.

$$\theta_{BH} = \frac{\partial U^*}{\partial H} = \frac{P_{41} \times 10^4}{L \times s \times n \times dt} = \frac{60 \times 10^4}{400 \times 617 \times 488,3 \times 1,0} = 0.00498$$

$$\theta_{BP_{41}} = \frac{\partial U^*}{\partial P_{41}} = \frac{H \times 10^4}{L \times s \times n \times dt} = \frac{100 \times 10^4}{400 \times 617 \times 488,3 \times 1,0} = 0.00830$$

$$\theta_{sP_{41}} = \frac{\partial U^*}{\partial P_{41}} = 0.00830$$

$$\theta_{BL} = \frac{\partial U^*}{\partial L} = -\frac{H \times P_{41} \times 10^4}{L^2 \times s \times n \times dt} = -\frac{100 \times 60 \times 10^4}{400^2 \times 617 \times 488,3 \times 1,0} = -0.00124$$

$$\theta_{Bs} = \frac{\partial U^*}{\partial s} = -\frac{H \times P_{41} \times 10^4}{L \times s^2 \times n \times dt} = -\frac{100 \times 60 \times 10^4}{400 \times 617^2 \times 488,3 \times 1,0} = -0.00081$$

$$\begin{aligned}\theta_{Bn} &= \frac{\partial U^*}{\partial n} = -\frac{H \times P_{41} \times 10^4}{L \times s \times n^2 \times dt} \\ &= -\frac{100 \times 60 \times 10^4}{400 \times 617 \times 488.3^2 \times 1.0} = -0.00102\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\theta_{Bdt} &= \frac{\partial U^*}{\partial dt} = -\frac{H \times P_{41} \times 10^4}{L \times s \times n \times dt^2} \\ &= -\frac{100 \times 60 \times 10^4}{400 \times 617 \times 488.3 \times 1.0^2} = -0.498\end{aligned}$$

3-4-4-4. 상대감도의 계산

상대감도는 계산공식에 의해 개변수의 차수에 해당된다. H에 관한 상대감도를 예로서 구해보면 다음과 같이 된다.

$$\theta'_{BH} = \frac{H}{U^*} \cdot \frac{\partial U^*}{\partial H} = \frac{H}{U^*} \cdot \frac{U^*}{H} = 1$$

같은 요령으로 다른 변수에 관한 상대감도를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\theta'_{BP41} = \theta'_{SP41} = 1$$

$$\theta'_{BL} = \theta'_{BS} = \theta'_{Bn} = \theta'_{Bdt} = -1$$

3-4-4-5. 절대uncertainty의 계산

우선, 절대정확도를 계산해 보면

$$\begin{aligned}B_{ABS} &= \{(\theta_{BH} \times B_H)^2 + (\theta_{BP41} \times B_{P41})^2 + (\theta_{BS} \times B_S)^2 + (\theta_{BL} \times B_L)^2 + (\theta_{Bn} \times B_n)^2 + (\theta_{Bdt} \times B_{dt})^2\}^{1/2} \\ &= \{(0.00498 \times 0.112)^2 + (0.00830 \times 2.07)^2 + (-0.00124 \times 2)^2 + (-0.00081 \times 0.5)^2 + (-0.00102 \times 3.65)^2 + (-0.498 \times 0.00)^2\}^{1/2} \\ &= \{3.11 \times 10^{-7} + 2.952 \times 10^{-4} + 6.15 \times 10^{-6} + 1.640 \times 10^{-7} + 1.386 \times 10^{-5} + 0.00\}^{1/2} \\ &= \{3.157 \times 10^{-4}\}^{1/2} \\ &= 0.0178\end{aligned}$$

와 같이 된다. 절대정밀도는 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned}S_{ABS} &= \theta_{SP41} \times S_{P41} \\ &= 0.00830 \times 1.16 \\ &= 0.00963\end{aligned}$$

따라서, 절대 uncertainty를 구하면

$$U_{ABS,ADD} = B_{ABS} + 2 \times S_{ABS}$$

$$\begin{aligned}&= 0.0178 + 2 \times 0.00963 \\ &= 0.037 \text{ (about 99\% coverage)}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}U_{ABS,RSS} &= \{B_{ABS}^2 + (2 \times S_{ABS})^2\}^{1/2} \\ &= \{0.0178^2 + (2 \times 0.00963)^2\}^{1/2} \\ &= \{6.878 \times 10^{-4}\}^{1/2} \\ &= 0.026 \text{ (about 95\% coverage)}\end{aligned}$$

3-4-4-6. 상대 uncertainty의 계산

무차원대표속도 0.5에 대한 상대정확도는,

$$\begin{aligned}B_{REL} &= \{(\theta'_{BH} \frac{B_H}{H})^2 + (\theta'_{BP41} \frac{B_{P41}}{P_{41}})^2 + (\theta'_{BL} \frac{B_L}{L})^2 + (\theta'_{BS} \frac{B_S}{S})^2 + (\theta'_{Bn} \frac{B_n}{n})^2 + (\theta'_{Bdt} \frac{B_{dt}}{dt})^2\}^{1/2} \\ &= \{(1 \times 0.00112)^2 + (1 \times 0.0345)^2 + (-1 \times 0.005)^2 + (-1 \times 0.00081)^2 + (-1 \times 0.0075)^2 + (-1 \times 0.00)^2\}^{1/2} \\ &= \{(1.254 \times 10^{-6} + 1.190 \times 10^{-3} + 2.5 \times 10^{-5} + 6.56 \times 10^{-7} + 5.625 \times 10^{-5} + 0.0)\}^{1/2} \\ &= \{1.273 \times 10^{-3}\}^{1/2} \\ &= 0.036\end{aligned}$$

과 같이 나타내 진다.

상대정밀도는,

$$\begin{aligned}S_{REL} &= \{(\theta'_{SP41} \frac{S_{P41}}{P_{41}})^2\}^{1/2} \\ &= \{(-1 \times 0.019)^2\}^{1/2} \\ &= 0.019\end{aligned}$$

와 같이 정리된다. 따라서 상대 uncertainty를 구하면 다음과 같이 요약할 수 있다.

$$\begin{aligned}U_{REL,ADD} &= B_{REL} + 2 \times S_{REL} \\ &= 0.036 + 2 \times 0.019 \\ &= 0.074 \text{ (about 99\% coverage)}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}U_{REL,RSS} &= \{B_{REL}^2 + (2 \times S_{REL})^2\}^{1/2} \\ &= \{0.036^2 + (2 \times 0.019)^2\}^{1/2} \\ &= \{0.00274\}^{1/2} \\ &= 0.052 \text{ (about 95\% coverage)}\end{aligned}$$

3-4-4-7. uncertainty의 최종보고

이상에서 계산한 uncertainty 성분을 최종적으로 정리하면 다음과 같이 정리할 수 있다.

a. 절대 uncertainty

- 대표속도=0.5(무차원)
- $B_{ABS} = 0.0178$
- $S_{ABS} = 0.0096, \nu > 30$
- $U_{ABS,ADD} = 0.037$ (about 99% coverage)
- $U_{ABS,RSS} = 0.026$ (about 95% coverage)

b. 상대 uncertainty

- 대표속도=0.5(무차원)
- $B_{REL} = 0.036$
- $S_{REL} = 0.019, \nu > 30$
- $U_{REL,ADD} = 0.074 = 7.4\%$
(about 99% coverage)
- $U_{REL,RSS} = 0.052 = 5.2\%$
(about 95% coverage)

4. 적용예 및 고찰

이상과 같이 PIV를 이용한 속도계측에 있어서 수반하는 uncertainty를 ANSI/ASME제안의 수법에 충실하여 정리보고하였다. 전체적으로 가장 어려운 점은 다양한 요소오차를 찾아서 이들의 오차성분을 bias오차 및 random오차로 분류하여 정량적인 값을 제시하는데 있었다.

그림3부터 그림6까지는 PIV를 이용하여 3차원의 cavity유동장의 $z=0.5$ 단면 및 $x=0.2$ 단면에서의 속도벡터 분포도이며 평균 약 2000개의 입자를 처리한 결과이다. Cavity유동장의 특성을 알아보기 위해서는 특정단면에 존재하는 임의의 격자내의 속도평균값을 구한 뒤 이들 값을 곡선 근사하여 비교검토하는 수법을 택하였다. 본 연구에서는 구체적인 유동특성에 관해서는 설명을 생략하기로 한다.

표1은 $Re=3.2 \times 10^3$ 의 경우에 있어서 각각의 무차원속도에 대한 uncertainty 해석을 앞절의 무차원속도 0.5에 대한 요령과 동일한 수법으로 구하여 정리한 결과이다. 다른 Re수에 대한 표는 지면관계상 생략하였다. 그러나 이와같이 표로 정리한 경우에는 정량적인 값의 제시에는 유용하나 유

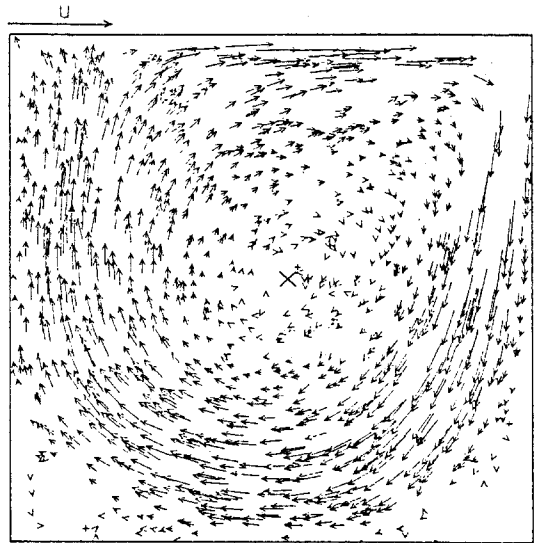


Fig. 3 Distribution of Velocity Vectors($Re=10^3$, SAR=1 : 1, $z=0.5$)

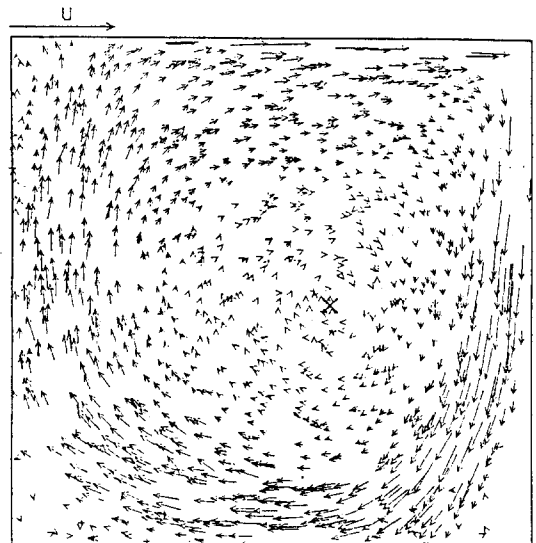
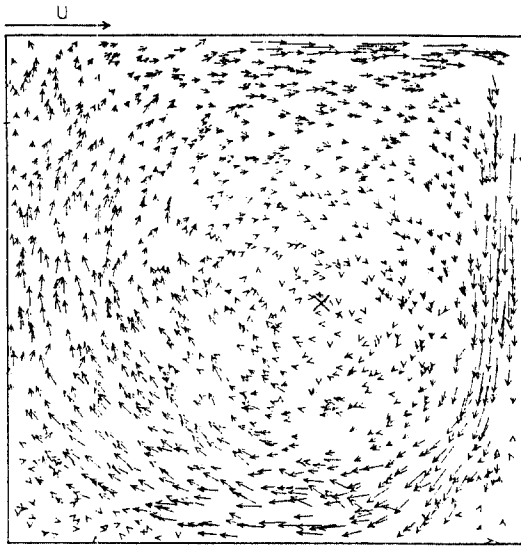


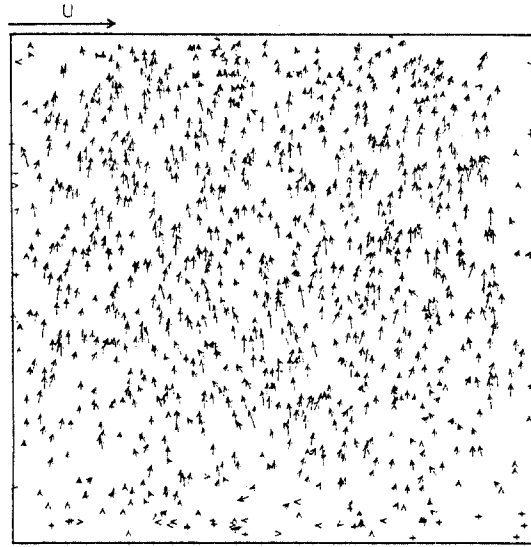
Fig. 4 Distribution of Velocity Vectors($Re=3.2 \times 10^3$, SAR=1 : 1, $z=0.5$)

동장전체에 걸친 오차의 특성파악에는 부족한 점이 지적된다. 따라서, 검토대상이 되는 특정단면의 속도분포도에 uncertainty값을 동시에 도시하여 직관적으로 이해를 쉽게 하도록 하는 편이 유익



Re=5000, SAR=1:1, Nylon12, section:z=0.5

Fig. 5 Distribution of Velocity Vectors(Re=5×10³, SAR=1 : 1, z=0, 5)



Re=5000, SAR=1:1, Nylon12, section:x=0.2

Fig. 6 Distribution of Velocity Vectors(Re=5×10³, SAR=1 : 1, x=0, 2)

Table 1. Relative Uncertainty of Re=3, 2×10³

Dimensionless Velocity (U)	B _{REL}	S _{REL}	U _{REL,RDD} (%)	U _{REL,RSS} (%)
0.1	0.16195	0.09062	34.3	24.3
0.2	0.08132	0.04531	17.1	12.1
0.3	0.05460	0.03020	11.5	8.1
0.4	0.04135	0.02265	8.6	6.1
0.5	0.03349	0.01812	6.9	4.9
0.6	0.02832	0.01510	5.8	4.1
0.7	0.02469	0.01294	5.0	3.5
0.8	0.02201	0.01132	4.4	3.1
0.9	0.01789	0.09021	4.0	2.8

Relative RSS Uncertainty : $U_{REL,RSS} (\%) = e^{(-0.9809 \cdot 10 \cdot U - 3.6853)} \times 100$

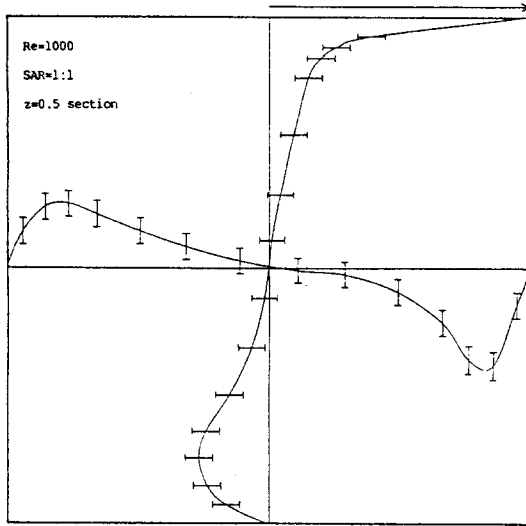
하다고 판단된다.

그림7부터 그림10까지는 대표단면의 중심선상의 시간평균 속도분포에 수반하는 상대 uncertainty 값을 도시한 예이다. 속도 profile은 중심선상의 14개의 격자점내에 분포된 속도벡터의 평균값이며 이들 값을 spline함수로 곡선 근사시킨 결과이다. 그림10은 Re=5×10³의 x=0.2단면에서의 결과이나 z=0.5의 중심선상의 시간평균속도값 0에 대한 uncertainty는 무한대의 값을 갖는다. 그러나, 이와 같은 도시방법은 uncertainty의 크기를 이해하

는데 직관적으로 용이함을 알 수 있다.

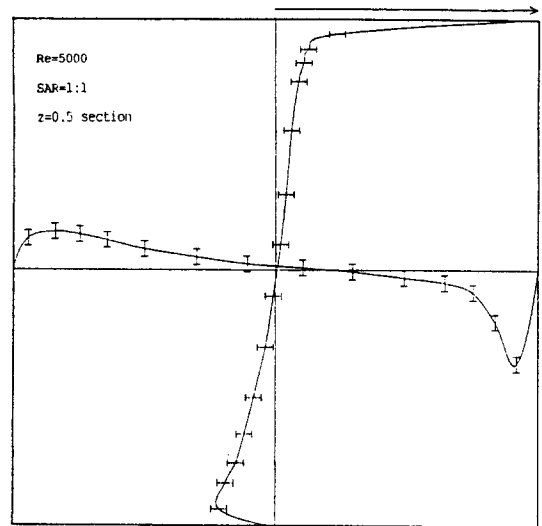
본 연구에서 대상으로 하는 cavity유동장은 장소에 따라 속도분포가 틀림으로서 개개의 요소오차값도 다르게 나타날 수 있다. 이 경우에는 편의상, 유동장 전체에 걸친 오차의 공간평균조작을 행하여 이 값을 대표 오차로 간주하는 수법을 채택하였다. 예를 들면, 요소오차중의 averaging오차 및 기준치변화에 대한 오차산정이 이에 속한다.

또한, 오차의 산출상 대표속도가 필요한 경우가 있다. 예를 들면, cavity에 대한 비디오카메라의



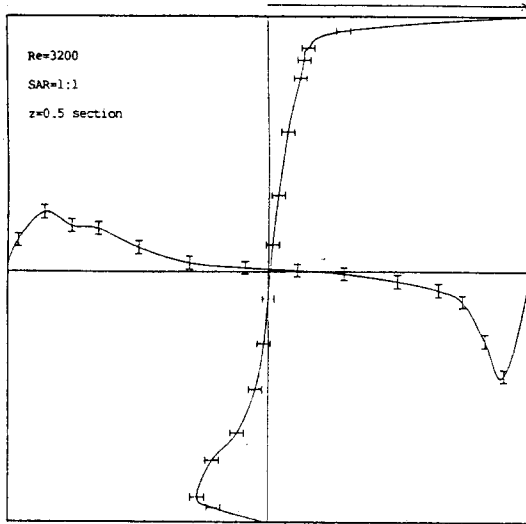
Relative RSS Uncertainty = $2.718^{(-0.9686 \times \log(u) - 2.9028)}$
 u: Dimensionless velocity

Fig. 7 Relative RSS Uncertainty ($Re = 10^3$, SAR = 1 : 1, $z = 0.5$)



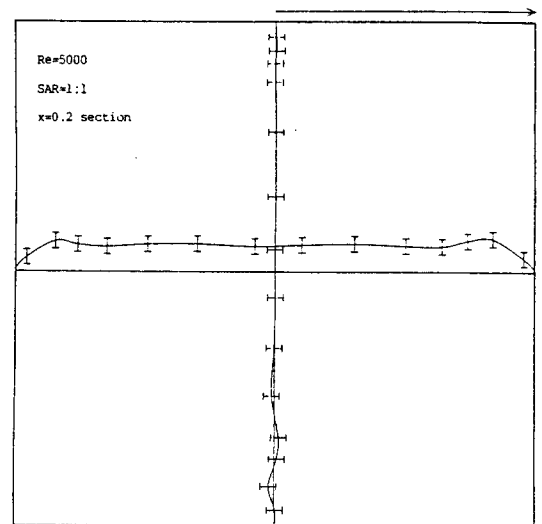
Relative RSS Uncertainty = $2.718^{(-0.9936 \times \log(u) - 3.4580)}$
 u: Dimensionless velocity

Fig. 9 Relative RSS Uncertainty ($Re = 5 \times 10^3$, SAR = 1 : 1, $z = 0.5$)



Relative RSS Uncertainty = $2.718^{(-0.9809 \times \log(u) - 3.6853)}$
 u: Dimensionless velocity

Fig. 8 Relative RSS Uncertainty ($Re = 3.2 \times 10^3$, SAR = 1 : 1, $z = 0.5$)



Relative RSS Uncertainty = $2.718^{(-0.9936 \times \log(u) - 3.4580)}$
 u: Dimensionless velocity

Fig. 10 Relative RSS Uncertainty ($Re = 5 \times 10^3$, SAR = 1 : 1, $x = 0.5$)

자세변화에 따른 오차, sheet light쪽에 의한 오차 계산에는 무차원속도 0.5에 대한 값을 구하였다. 따라서, 대표속도값을 달리 취하였을 때는 상기의 요소오차값이 바뀐다. 이 경우에 모든 속도성분에

대하여 uncertainty를 구하는 것은 가능하나 실용상의 관점으로부터는 기준이 되는 일정한 속도값에 대하여 오차를 산정하는 것이 타당하다고 보아진다. 같은 cavity유동장에 대한 일련의 실험을

행한 Koseff 등의 연구¹²⁾에서도 두 종류의 대표속도에 대하여 uncertainty 값을 구하고 있다.

또한 uncertainty 값을 표시하는데 있어 그림으로서는 절대 uncertainty 값보다 상대 uncertainty 값을 구하여 도시하는 편이 이해하기 쉽다. 그러나 하나의 수치로서 uncertainty 값을 평가하는 경우에는 절대 uncertainty 쪽이 효과적임에 주의할 필요가 있다고 생각된다.

한편, 본 연구에서 일부의 요소오차에 대하여 정량적인 값을 산출하지 못하였다. 따라서, 무시되었던 오차성분은 차후에 새로운 방법으로 산출하여야 하며, 잠재되어 있는 오차성분에 대하여도 주의깊은 검토를 행하여야 할 필요가 있다.

5. 결 론

3차원 cavity 유동장의 속도벡터값을 구하기 위하여 화상처리수법을 이용한 PIV 속도계측수법을 채택하였고 수반하는 uncertainty를 ANSI/ASME 제안의 해석수법에 따라 정량적으로 제시하였다. 다양한 요소오차에 대하여 그 발생원인을 명시하였으며 오차의 성질에 따라 bias 오차 및 random 오차로 구분하여 구체적인 오차값을 산출하였다. 속도벡터의 산출에는 여섯 종류의 변수가 필요하였으며 요소오차중 변수와 차원이 틀린 경우에는 오차값을 해당되는 변수값으로 환원하여 요소오차의 결합을 피하였다.

이들 변수에 대한 오차성분이 최종적인 결과인 속도벡터에 전파되는 것을 나타내기 위해 두가지의 수법 즉 절대 및 상대 uncertainty 해석방법을 따랐으며 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

우선 요소오차를 구분해 보면 PIV 자체에 기인하는 성분과 함께 유동장자체의 특성에 의한 성분도 무시할 수 없음을 알 수 있었다. 따라서, 본 연구에서 채택한 PIV는 속도계측에 유용하며 신뢰할 수 있는 계측데이터의 수집에 적합함을 보여준다. 나아가서, 완전히 발달한 3차원의 cavity 내 흐름은 그 Re 수가 커짐에 따라 비정상성이 크게 나타나며 동시에 uncertainty 해석에 있어 관계되는 요소오차값이 증대하는 결과를 나타내었다.

다음으로 uncertainty에 가장 큰 영향을 미치는 변수는 입자의 시점과 종점간의 거리계산에 수반하는 오차이나 다른 변수에 비해 상대적으로 큰 값의 bias 오차를 가지며 random 오차는 유일하게 이 변수에서 발생하고 있다. 따라서 예비실험단계에서 실험분위기를 제어하는데 있어 이 변수에 특히 주의를 기울일 필요가 있음을 알 수 있었다.

한편 속도벡터의 산출에 직접적으로 관여하는 변수와 차원이 다른 오차성분까지도 검출하고 이들 변수와 같은 값으로 환원하여 오차의 결합을 행하였다. 오차의 환원에 관한 구체적인 내용은 ANSI/ASME의 해석수법에는 제시되어 있지 않으나 모든 오차성분은 반드시 최종결과에 전파됨으로 본 연구에서와 같이 환원수법을 택하는 것은 합리적인 것으로 판단된다.

Uncertainty 값을 효과적으로 나타내기 위한 방법으로 네 종류의 Re 수에 대한 상대 uncertainty를 시간공간평균의 속도 profile에 함께 도시하였다. 무차원속도에 대한 상대 uncertainty 값을 최소사승법에 적용하여 다음과 같은 근사식을 산출하여 실험결과와 고찰에 있어서 데이터의 신뢰성을 확보하였다.

$$\begin{aligned} \text{a) } Re=10^3 : U_{REL,RSS}(\%) &= e^{(-0.9686 \times \log U - 2.9028)} \times 100\% \\ \text{b) } Re=3.2 \times 10^3 : U_{REL,RSS}(\%) &= e^{(-0.9809 \times \log U - 3.6853)} \times 100\% \\ \text{c) } Re=5 \times 10^3 : U_{REL,RSS}(\%) &= e^{(-0.9936 \times \log U - 3.4580)} \times 100\% \end{aligned}$$

단, U는 무차원 속도

참고문헌

- 1) S.J. Kline, F.A. McClintock, Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments, Mechanical Eng., Jan. 1953. p. 3.
- 2) R.J. Moffat, Contributions to the Theory of Single-Sample Uncertainty Analysis, Trans. ASME, J. of Fluid Eng., Vol. 104, June 1982. p. 250.
- 3) R.J. Moffat, Using Uncertainty Analysis in the Planning of an Experiment, Trans. ASME, J.

- of Fluids. Eng., Vol. 107, June 1985, p. 173.
- 4) Measurement Uncertainty - ANSI/ASME PTC19.1-ASME, 1985.
 - 5) F.A. Schraub, S.J. Kline, J. Henry, P.W. Runstadler, Jr., A. Littell, Use of Hydrogen Bubbles for Quantitative Determination of Time-Dependent Velocity Fields in Low-Speed Water Flows, Trans. ASME, J. of Basic Eng., June 1965, p. 429.
 - 6) K. Imaichi, K. Ohmi, Numerical Processing of Flow-Visualization Pictures-Measurement of Two-Dimensional Vortex Flow, J. Fluid Mech., Vol. 129, 1983, p. 283.
 - 7) 西野耕一ら、 画像処理に基づく乱流3次元計測システムの開発、 流れの可視化 Vol. 8 No. 30, 1988, p. 277.
 - 8) T. Kobayashi, T. Saga, K. Sekimoto, Velocity Measurement of Three-Dimensional Flow around Rotating Parallel Disks by Digital Image Processing, Flow Visualization-1989, ASME FED Vol. 85, 1989, p. 29.
 - 9) Young-Ho LEE et. al, Velocity Measurements in 3-D Cavity Flows by PIV (Particle Imaging Velocimetry), Proc. of the 2nd KSME - JSME Fluids Engineering Conference Vol. 1, 1990, p. 293.
 - 10) 李英浩ら、 粒子の流れ場に対する追従性に関する数値解析、 混相流シンポジウム第7回、 日本混相学会、 1988, p. 21.
 - 11) Young-Ho LEE, et al., Numerical Analysis on Traceability of Particles to Flow Fields, Proc. of the 1st KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference Vol. 2, 1988, p. 54.
 - 12) J. R. Koseff, R.L. Street, The Lid-Driven Cavity Flow : A Synthesis of Qualitative and Quantitative Observations, Trans. ASME, J. of Fluids Eng., Vol. 101, Dec. 1984, p. 390.