

Micro PIV의 원리와 응용

정은호* · 김경천†

Principle and Application of Micro PIV

Eun Ho Jeong* and Kyung Chun Kim†

1. 서 론

지난 5년간 마이크로 및 나노 스케일의 유동현상에 관심이 증가되고 있다. MEMS와 Bio-MEMS 분야에 적용되는 microfluidics의 연구를 위해서는 수 μm 해상도의 속도장 측정은 필수적인데, Micro PIV 기법을 통해 높은 공간해상도의 속도장을 측정할 수 있다. Micro PIV는 100 μm 정도의 스케일의 유동장에서 1~10 μm 의 공간해상도로 속도장을 측정하는 PIV 측정 기법의 한 분야이다. 기존의 매크로 스케일의 PIV 이론은 잘 정리되었지만, 물리적인 한계와 실제 실험상의 어려움 등으로 인해 0.2~1.0mm 이하의 공간해상도로 측정하기가 어려움이 많다.

본 연구에서는 마이크로 PIV 실험에 있어서 실험 오차를 줄이기 위해 반드시 고려해야 할 사항들과 속도추출 알고리즘에 대해 살펴보고자 한다.

2. Micro PIV의 기초 이론

2.1 In-plane 공간분해능

PIV 영상의 가장 기본적인 요건은 작동유체 안에 포함되어 유동의 공간적 움직임을 잘 따르는 유체 추적입자의 연속적인 영상 두 장을 기록하는데 있다. 또한, 높은 공간 분해능은 미세유체소자내의 유동을 정확히 따르기 위해 충분히 작은 직경 d_p 을 지닌 유동 추적입자를 기록함으로써 이루어진다. 입자는 반드시 좋은 회절해상도를 가지는 광학장치와 충분히 높은 배율로 가시화되어야 하고, 최소한 입자의 지름이 3-

4 픽셀에 해당될 수 있는 해상도를 지녀야 한다. Olsen & Adrian(2000) 에 따르면, 1보다 큰 배율로 원형구경을 통해 이미지를 볼 때 회절한계를 지닌 점원의 크기 d_s 는 다음과 같이 주어진다.

$$d_s = 2.44(M+1)\frac{\lambda}{2NA} \quad (1)$$

여기에서 M 은 배율, NA 는 렌즈의 개구율, 그리고 λ 는 빛의 파장이다. 개구율 NA 는 $NA \equiv n \sin\theta$ 로 정의되고, 여기에서 n 은 기록하는 매체의 굴절률이며, θ 는 기록하는 렌즈의 구경에 내재하는 반각이다.

실제로 기록되는 이미지의 유효한 직경 d_e 는 다음과 같이 쓰여질 수 있다.

$$d_e = [d_s^2 + M^2 d_p^2]^{1/2} \quad (2)$$

2.2 Out-of-Plane 공간분해능

PIV 측정에서는 입자를 조명하기 위해 평면광을 사용하기 때문에 out-of-focus의 입자들로 인한 배경잡음은 매우 낮다. 따라서, 속도 측정에 있어서 out-of-plane 공간해상도는 조명되는 평면광의 두께에 의해 정의된다.

MicroPIV는 작은 길이 스케일로 인해 수 μm 두께의 평면광 형성이 어려울 뿐 아니라 대물렌즈의 측정 평면과 정렬하는 것도 어렵다. 결국 마이크로 PIV에서는 volume illumination으로 관찰영역을 조명하고, 측정 영역의 out-of-plane의 두께는 렌즈의 depth of field 에 의해 결정되는 것이 일반적이다(Fig. 1).

Out-of-plane 해상도는 depth of correlation에 의해 결정되는데, 측정면으로부터의 축방향 거리 z_{corr} 로써 정의된다.

†부산대학교 기계공학부
E-mail : kckim@pusan.ac.kr
*부산대학교 기계공학과

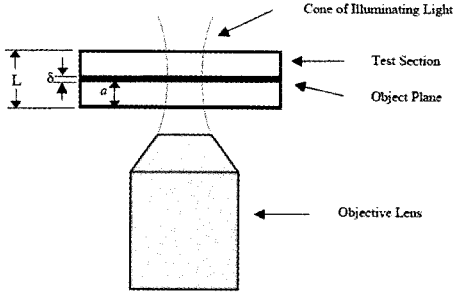


Fig. 1. Volume illumination particle image velocimetry.

$$Z_{corr} = \frac{1}{2} \left[\frac{(1-\sqrt{\epsilon})(n^2-1)}{\sqrt{\epsilon}} \left(\frac{n^2}{NA^2} - 1 \right) \left(d_p^2 + \frac{1.49(M+1)^2 \lambda^2}{M^2 NA^2} \right) \right]^{1/2} \quad (3)$$

Depth of correlation (Z_{corr})은 확대를 M 에 비해 개구율 NA 와 입자 크기 d_p 에 크게 의존한다. Table 1은 다양한 현미경렌즈에 대한 $2 Z_{corr}$ 측정평면에 대한 두께를 보여준다. 이 변수들에 대한 평면해상도 중에서 가장 높은 것은 $NA = 1.4$, $M = 60$ 인 렌즈 그리고 입자크기는 $d_p < 0.1 \mu\text{m}$ 에 대해서 $2 Z_{corr} = 0.62 \mu\text{m}$ 이다.

2.3 입자 가시성

Micro PIV측정에서, 측정표면의 반사와 초점이 안 맞는 입자들에 의한 배경 잡음으로부터 초점이 맞는 입자의 영상을 구분할 수 있도록 이미지를 획득하여야 한다.

측정표면의 반사는 형광기법을 이용하여 제거할 수 있지만, 초점이 안 맞는 입자의는 쉽게 제거되지 않는다. 이는 적절한 실험적 변수들을 선택함으로써 개선할 수 있다. Olsen & Adrian (2000a)은 최고 입자 가시성에 관한 식을 제안하였는데, 그것은 초점이 잡힌 입자영상의 빛 강도값과 초점이 잡히지 않은 입자에 의해 발생하는 배경빛의 평균강도값의 비로 정의된다.

형광빛이 입자로부터 균일하게 나온다고 가정하면, Olsen & Adrian(2000a)에 의하면, 초점 내 입자 가시성(visibility) V 은 다음과 같다.

$$V = \frac{I(0,0)}{I_B} = \frac{4M^2 \beta^2 (s_0 - a)(s_0 - a + L)}{\pi C L s_0^2 (M^2 d_p^2 + 1.49(M+1)^2 \lambda^2 / NA^2)} \quad (4)$$

주어진 광학기록장치에서 입자 농도 C 와 실험영역

Table 1. Thickness of the measurement plane for typical experimental parameters

d_p μm	Microscope Objective Lens Characteristics			
	M=60 NA=1.4	M=40 NA=0.75	M=20 NA=0.5	M=10 NA=0.25
0.01	0.62	2.47	7.46	34.95
0.10	0.63	2.49	7.48	34.97
0.20	0.66	2.53	7.53	35.02
0.30	0.72	2.60	7.62	35.12
0.50	0.87	2.80	7.90	35.43
0.70	1.06	3.09	8.30	35.88
1.00	1.39	3.62	9.09	36.83
3.00	3.77	8.31	17.28	49.36

의 두께 L 을 줄임으로써 입자 가시성(visibility)을 높일 수 있고, 또한 입자의 농도가 고정된 상태에서는 입자의 직경을 줄이거나 렌즈의 개구율 NA 을 늘려서 가시성(visibility)을 높일 수 있다. 가시성은 렌즈의 배율이나 초점 거리에는 크게 좌우되지 않는다.

용액속의 입자들의 volume fraction을 표현한 V_{fr} 은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{fr} = \frac{2d_p^3 M^2 \beta^2 (s_0 - a)(s_0 - a + L)}{3V L s_0^2 (M^2 d_p^2 + 1.49(M+1)^2 \lambda^2 / NA^2)} \times 100\% \quad (5)$$

대체로 고분해 PIV에 사용되는 영상의 가시성(visibility)은 $V \sim 1.5$ 가 요구된다.

3. Particle and Fluid Dynamics

정확한 PIV측정을 위해서는 seed particles이 유동을 충실히 따라야 정확한 속도를 측정할 수 있기 때문에, PIV실험 시 입자들이 이론적인 유동을 충실히 따른다는 것을 증명해야 한다.

일반적으로 micro PIV에 사용되는 작은 크기의 입자들은 식(15)는 스톱스 항력(Stokes Drag)과 임의의 외력(f_f)으로 단순화 되어질 수 있다. 예를 들어, f_f 는 정전기력 또는 자기력으로 표현될 수 있다. 임의로 미치는 힘 f_f 는 측정될 수 있는 양이 될 수 있고 또 이 힘이 유동 속도 측정의 정확도를 감소시킬 수 있다. micro PIV에서 입자가 유동을 따라가지 못하게 하는 세 가지 주요한 현상은 다음과 같다.

- Saffman effect - 입자가 벽면근처 있을 경우

- Brownian motion - 입자들의 불규칙한 진동
- Arbitrary external forces - 임의의 외부 힘

Saffman effect와 Brownian motion는 속도 측정시 중요한 현상들이며 자세하게 다루고, 외부 힘의 영향은 실험의 고유한 조건에 따라 생략한다.

3.1 Brownian Motion

브라운 운동을 서술하기 전에 입자의 특징이 되는 응답시간에 대해 먼저 정의하는 것이 필요하다. Stokes 유동으로 가정하고 일정한 유동 가속조건에 대한 입자의 응답시간 τ_p 를 나타내면 다음과 같다.

$$\tau_p = d_p^2 \rho_p / (18\mu_f) \tag{6}$$

여기서, d_p 는 입자 지름, ρ_p 는 입자 밀도, μ_f 는 유체 점성계수를 나타낸다.

추적입자로 300 nm 입자를 사용하였다면 입자의 응답시간은 대략 $10^{-9}sec$ 이다. 이는 실제 유체나 저속의 기체 유동의 time scale에 비해 매우 작다. 입자의 응답 시간외에 브라운 운동으로 인한 영향이 고려되어야 한다. 평균 확산 거리는 $D\Delta t$ (D 는 입자 확산계수)에 비례한다. 스톡스 법칙을 따르는 구형 입자에 대한 확산계수는 아인슈타인에 의해 처음 다음과 같은 식으로 소개되었다.

$$D = \frac{kT}{3\pi\mu d_p} \tag{7}$$

이상적으로, 입자가 브라운 운동을 하지 않는다고 가정하고 시간 간격 Δt 동안 x, y방향으로 변위를 가지면 입자의 Δt 유선은 다음과 같은 식으로 나타내어진다.

$$\Delta x = u\Delta t ; \Delta y = v\Delta t \tag{8}$$

x, y 방향의 입자 속도의 2차원 측정에서 입자의 브라운 운동에 의한 변위는 이미지 획득시 상대오차, ϵ_x 를 가지는데 그 식은 다음과 같다.

$$\epsilon_x = \frac{\sigma_x}{\Delta x} = \frac{1}{u\sqrt{\Delta t}} \sqrt{2D} \tag{9}$$

위 식에 통해 측정의 시간이 증가함에 따라 브라운 운동에 의한 오차가 감소한다는 것을 알 수 있다. 실제

로, 유속이 1 mm/s 보다 작은 유동에서 50-500 nm의 입자를 사용할 때 브라운 운동을 고려해야 한다. 0.5 mm/s 속도를 갖는 유속에서 500nm 입자를 사용할 경우 브라운 운동 때문에 $dt > 100\mu s$ 이어야 한다. 이 오차값들은 추적영역에서의 여러 입자들에 대해서 평균을 하거나 ensemble 평균을 취함으로써 감소된다.

3.2 Saffman effect

채널 유동에서, 전단력에 의해 야기된 입자 이동의 영향은 브라운운동만큼 큰 영향을 미친다.

많은 연구가들은 전단흐름에서 입자이동의 영향을 연구하였다. Poiseuille 은 실험에서 미세관을 통과하는 혈액유동에서 혈구들은 벽면으로부터 멀어지는 경향이 있다는 것을 발견하였다. 또한, Talyor는 튜브의 단면에서 입자유동을 관찰하여 벽 근처뿐만 아니라 채널의 가운데 부분도 cell 집중도가 낮다는 것을 발견하였다. Segre 와 Silberberg의 실험을 통해 위의 두가지 관찰이 맞다는 것이 확인되었고 “벽으로부터 이동과 채널의 중심으로부터의 이동량은 입자반경의 네제곱 및 평균속도에도 제곱에도 비례한다는 것” 주장하였다. Saffman은 linear unbounded shear field에서 입자의 이동의 경우를 고려했다. 밀도가 ρ 인 유체의 전단 유동에서 반경이 a , 동점성 계수 ν 일 때, 공간좌표에서 속도장이 선형적이면 속도구배가 G 가 선형적으로 증가한다. 초기에 입자는 원점에 위치하게 되고(처음위치는 유속이 0인 위치), 입자는 V_s 의 유체 속도에 따라 움직이고 Ω 로 회전한다고 가정한다. 이 때, 레이놀즈 수는 다음과 같다.

$$Re_G = \frac{4a^2G}{\nu}, Re_s = \frac{2aV_s}{\nu}, Re_\Omega = \frac{4a^2\Omega}{\nu} \tag{10}$$

Re_s 는 미끄럼 레이놀즈수(slip Reynolds number)이다. 이들 Reynolds 수는 1보다 상대적으로 작으면 Saffman's analysis는 적용된다. 그의 분석은 이동속도 V_m 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{V_m}{V_s} = 0.343a \sqrt{\frac{G}{\nu}} \tag{11}$$

V_m/V_s 의 비는 1보다 작으면 속도구배에 의해 발생한 유선 안에서의 입자이동은 속도 무시할만한 영향을 가진다.

4. Micro PIV 영상의 개선

Micro PIV와 macro PIV는 하드웨어적으로 뿐만 아니라 이미지의 추적방법 즉 algorithm과 processing 방법에서도 근본적인 차이가 있다.

기존의 PIV를 처리할 때 측정결과와 신뢰성과 정확성을 위해 추적 영역내에 충분한 개수의 입자수가 필요하다. 그러나 측정에서 얻어진 입자영상의 밀도가 낮은 경우(low image density : LID) PTV기법으로 처리되는데, 이는 측정결과와 신뢰성과 정확성에 한계를 가질 수 밖에 없다. LID영상으로 신뢰성 있는 결과를 얻기 위해 Overlapping of LID-PIV recordings의 방법과 Correlation averaging method의 방법을 이용한다.

4.1 Overlapping of LID-PIV recordings

PIV기법이 적용되던 초기에는 영상의 입자밀도를 높이기 위한 다중노출 영상기법이 이용되었다. 이러한 다중노출 영상기법과 유사한 이 기법은 single frame, high-image-density(HID) PIV 영상을 다음과

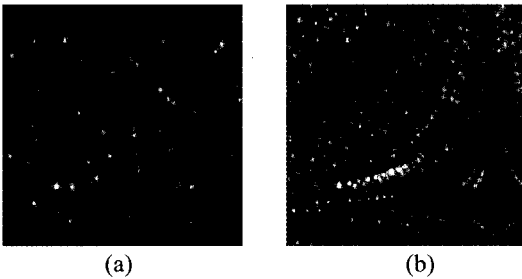


Fig. 2. Example of image overlapping: (a) one of the LID-PIV recordings; (b) result of overlapping 9 LID-PIV recordings.

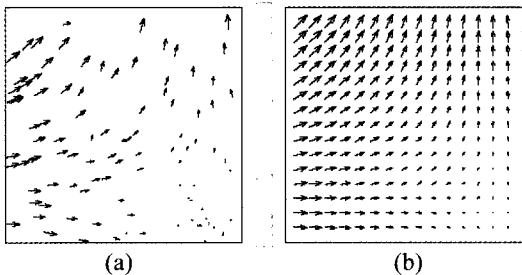


Fig. 3. Effect of image overlapping: (a) results for a single LID-PIV recordings; (b) results for the overlapped PIV recording pair.

같은 함수에 의해 여러장의 LID-PIV recordings를 합성하여 속도벡터를 산출한다.

$$g_0(x,y) = \max\{g_k(x,y), k=1,2,3,\Lambda,N\}, \quad (12)$$

여기서 $g_k(x,y)$ 는 총 데이터의 개수 N 개의 LID-PIV 영상들의 강도 분포이며, $g_0(x,y)$ 는 영상을 겹친 영상(overlapped recording)이다. Figure 3b에 나타난 속도벡터는 Figure 3a에 나타난 결과보다 더 조밀하고 균일한 분포를 보이고 있다.

마이크로 스케일의 영역에서 유동은 저 레이놀즈수를 가지므로 데이터를 얻는 동안 유동을 층류, 정상상태로 가정할 수 있다. 따라서 난류 또는 비정상 유동에는 적용될 수 없으며, HID-PIV recording를 overlapping하거나 너무 많은 LID-PIV 이미지를 overlapping할 때 입자영상간에 간섭으로 물리적으로 맞지 않은 결과를 낼 수도 있다.

4.2 Correlation averaging method

입자의 추적영역에서 상관기법을 이용한 PIV 계산을 위한 상관함수는 다음과 같다.

$$\Phi_k(m,n) = \sum_{j=1}^q \sum_{i=1}^p f_k(i,j) \cdot g_k(i+m,j+n) \quad (13)$$

여기서 $f_k(i,j)$ 와 $g_k(i,j)$ 는 k 번째의 PIV 이미지 쌍에서 전체이미지 영역중 특정한 위치에서 $p \times q$ 의 크기를 가지는 각각 1번째 노출과 2번째 노출의 영상강도 분포이다. 입자영상의 이동거리와 일치하는 지점에서 peak을 가지며, 이 peak은 검사영역내의 상관함수의 peak중에서 가장 큰 peak이다. 경사영역내에서 입자수가 적거나 잡음수준이 클 경우에 main peak의 크기는 작아지거나, 일부의 sub peak보다 오히려 작아질 수 있어 에러 벡터가 발생하게 된다. 층류 정상유동에서는 다른 시간에 측정된 PIV 이미지 쌍에서 main peak은 항상 동일한 위치에 존재하고, sub peak은 불규칙적으로(random) 나타난다. 결국 많은 수의 PIV 이미지쌍들(N)에 대해 Φ_k 를 평균하면, main peak은 각각의 상관함수에서 동일한 위치에 위치하고 불규칙적으로 발생하는 noise peak는 평균하면 제거될 수 있다(Fig. 4).

평균 상관함수(averaged (or ensemble) correlation function)는 다음과 같이 주어진다.

$$\Phi_{ens}(m, n) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \Phi_k(m, n) \quad (14)$$

4.3 Background removal

영상 획득 시, 유리 커버의 오염물질이나 벽에 고착된 입자 등에 의한 노이즈 영상은 사라지거나 움직이지 않기 때문에 평균한 이미지에서 동일한 밝기 분포(brightness distribution)를 가지고 여전히 존재한다. PIV 이미지에서 배경잡음을 차감함으로써 오차를 줄일 수 있다.

Figure 5a는 background removal을 적용하지 않을 때 100개의 이미지 쌍의 ensemble correlation function을 보여주고 있으며, dominant peak은 zero displacement에서 나타나는데 이는 이미지에서의 배경잡음에 해당하는 반점이 움직이지 않기 때문이다. Minimum gray value method로 배경 영상을 생성하고 이를 이미지 쌍들에서 차감하였을 때 거친 유리커버의 영향이 감소하여, 입자이동 거리의 peak이 확연히 드러남을 Figure 5b에서 알 수 있다.

5. Micro PIV 알고리즘 개선

Micro PIV 측정의 정밀도와 신뢰성을 더욱 향상시

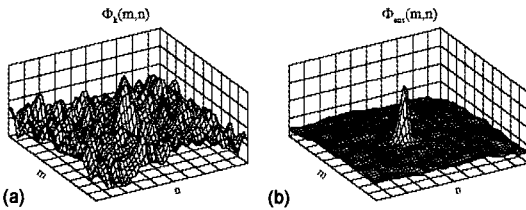


Fig. 4. Effect of ensemble ecorrelation : (a) results with conventional correlation for one of the PIV recording pairs; (b) results with ensemble correlation for 101 PIV recording pairs (Wereley, et al., 2001).

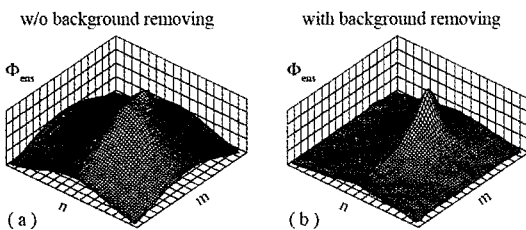


Fig. 5. Ensemble correlation function for 100 image sample pairs without (a) and with (b) background removal.

키기 위해 표준 PIV 시스템에도 잘 적용되는 두가지 알고리즘이 적용될 수 있다. PIV 이미지의 측정 불확도(Uncertainty)는 편향오차(Bias error)와 정밀도오차(Precision error)들을 포함한다. 복잡한 유동에서 PIV 측정의 편향오차를 감소시키는데 가장 효과적인 기법 중의 하나는 CDI (Central Difference Interrogation) 기법이다. 정밀도오차 또는 우연오차(Random error)를 감소시키기 위해, 영상보정기법이 적용된다.

5.1 Central Difference Interrogation

현재 일반적으로 평가오차(Evaluation error)를 감소시키기 위한 FFT에 기반을 둔 상관관계 알고리즘과 공간 분해능을 증가시키기 위한 영상 패턴 추적 알고리즘으로 구성된 adaptive window offset 기법이 폭넓게 사용된다. Adaptive window offset 기법은 첫 번째 윈도우에서 입자영상의 평균 변위값에 해당하는 양만큼 유동의 진행방향으로 두번째 윈도우가 옮겨지기 때문에 FDI(Forward Difference Interrogation) 기법으로 불려질 수 있다. 비록 FDI 기법이 많은 경우에 있어 PIV 영상의 공간해상도를 현저한 개선할 수 있지만, FDI 기법의 적용시 피할 수 없는 잠재적으로 오차요인은 여전히 존재한다. PIV 측정의 정확도를 증가시키고 FDI 기법의 단점을 피하기 위해, CDI 기법이 도입되었다. CDI 기법과 FDI 기법간의 비교는 전방차분기법이 Δt 의 오더로 정확한 반면 중앙차분기법은 Δt^2 의 오더로 정확하다는 점에서 도함수에 대한 중앙차분과 전방차분간의 비교와 유사하다.

CDI 기법을 사용시, 첫번째와 두번째 윈도우는 예측되는 입자영상 변위의 1/2만큼씩 각각 후방과 전방으로 옮겨진다. 많은 Adaptive window shifting 기법들과 마찬가지로 이 기법은 최적의 결과를 획득하기 위해 반복계산이 이루어진다.

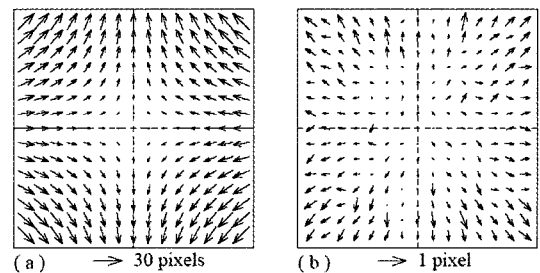


Fig. 6. Simulation of the four-roll-mill test : (a) desired flow pattern, (b) evaluation errors with FDI.

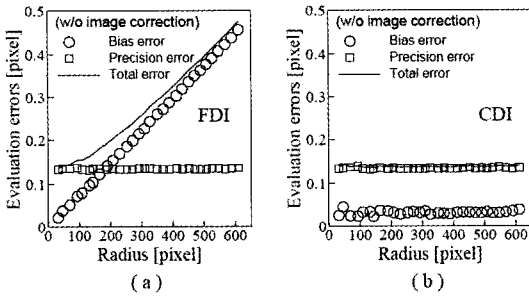


Fig. 7. Dependences of evaluation errors on the location (radii) of the evaluation with FDI (a) and CDI (b) for the four-roll-mill test.

FDI기법과 CDI 기법을 비교하기 위해 전형적인 회전유동(4 roll mill 유동)이 사용되었다. 입자 영상 크기(size), 입자 농도(concentration), 명암 강도(intensity)와 같은 실제 실험적인 변수에 기초하여, PIV 영상들은 Fig. 6a에 보여지는 유동장이 계산된다. 1024×1024 픽셀크기의 PIV 영상의 가장 효과적인 입자 영상 변위는 약 30 픽셀이다. 이에 상응하는 측정영역과 최적의 속도는 각각 10×10 mm² 과 0.04 m/s 이다.

FFT 에 기초한 상관관계 알고리즘과 FDI 기법을 결합시킬 때, 계산되는 영상들의 평가오차는 평가 결과의 유동장으로부터 Fig. 6a의 유동장을 뺄 수 있다. Fig. 6b의 평가오차는 반경방향의 위치(즉, 벡터위치와 유동장중심의 거리)에 따른 편향오차에 의해 명백하게 좌우된다.

이 결과에서 편향오차는 Fig. 6b에 보이는 것과 같이 500 개의 개개의 오차 맵을 평균함으로 결정되고 우연오차의 RMS 값의 분포가 계산된다. 반경방향 위치에서 편향오차와 우연오차의 종속상태가 결정되고 FDI 기법과 CDI 기법에 대해서 각각 Fig. 7a와 Fig.

7b에 보여진다. 전체오차는 편향오차와 우연오차의 RSS(Root Sum Square)로 정의된다. 200 픽셀이상의 반경방향 위치에서 FDI 기법의 평가오차는 편향오차에 의해 지배됨이 Fig. 7에 보인다.

CDI 기법이 사용되는 경우, 편향오차는 매우 작아서 위치에 의존하지 않는 우연오차와의 비교에서 무시될 수 있다.

5.2 Image correction technique

4 roll mill 테스트의 편향오차는 CDI 기법의 사용에 의해 최소화된다. 측정의 불확실성(즉, 전체 오차)을 더욱 감소시키기 위하여, 우연오차 역시 감소되어야만 한다. 4 roll mill 테스트의 경우 유동에 입자가 이상적으로 뿌려지고 PIV 영상이 어떠한 노이즈도 없이 기록되었다 할지라도, 평가오차는 측정된 유동의 변형으로부터 초래될 수 있다. PIV 영상 패턴의 변형을 고려하기 위해, 영상 보정 기법이 개발되었다. 영상 보정의 아이디어는 Huang, et al.(1993)로부터 소개되었고 유사한 아이디어들 역시 다른 이들에 의해 적용되었다. 그러나, 영상 보정이 복잡하고 많은 시간이 걸려 널리 이용되지 않지만, 처리 속도를 높이기 위해 아래와 같이 영상 보정 기법을 수정하였다.

이전의 반복계산에 기초하여, 각 조사영역의 4 코너에서 입자 영상 변위가 계산되고 간단한 쌍일차(bilinear) 보간을 사용하여 PIV 영상들의 조사영역에서 영상패턴을 변형하기 위해 사용된다. 그럼으로 인해 영상 패턴은 입자 영상의 변위에 있어 공간적인 속도 구배에도 불구하고 잘 일치한다. 수정된 영상 보정기법에 FFT에 기초한 상관관계 알고리즘을 결합하면 매우 고속으로 수행될 수 있다. 영상 보정의 효과가 Fig. 8과 같이 나타난다. 영상 보정의 효과는 측정기법의 전체 오차의 약 절반을 감소시킬 수 있다.

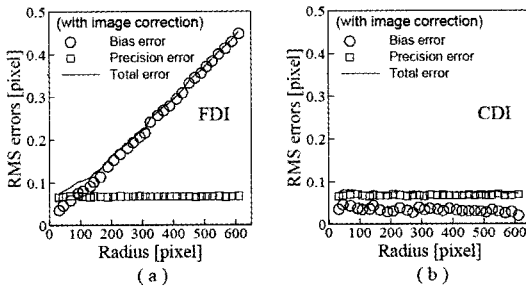


Fig. 8. Dependences of evaluation errors on the location of the evaluation with FDI (a) and CDI (b) by using image correction.

6. 결 론

Microfluidics연구를 위해서는 수 μm 해상도의 속도장을 측정할 수 있는 micro PIV기법이 널리 적용된다.

기존의 PIV장치를 이용하여 현미경을 통해 이미지 획득하게 되는데, 형광기법을 사용하여 반사에 의한 배경잡음을 없애고 대물렌즈의 depth of focus에 의해 정의되는 면의 추적입자 영상을 획득한다. 나노크기의 추적입자를 사용할 경우 Brownian motion 과

Shaffman effect를 고려해야 하여 나노입자의 운동에 의한 오차를 최소화 해야한다. 공간 및 실험대상의 제약으로 인해 발생하는 저밀도 입자영상은 Overlapping of LID-PIV recordings, Correlation averaging method, Background removal 등의 기법을 적용하여 개선할 수 있다.

또한, 이미지의 편향오차(Bias error) 와 정밀도오차(Precision error)를 개선하기 위해 Central Difference Interrogation 기법과 Image correction technique을 적용하여 보다 정확한 속도장을 추출할 수 있다.

후 기

본 연구는 국가지정연구실 사업으로 수행되었음.

참고문헌

- 1) Adrian RJ, 1991, "Particle-imaging for experimental fluid mechanics," Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 23, pp. 261-304.
- 2) Olsen MG and Adrian RJ, 2000, "Out-of-focus effects on particle image visibility and correlation in microscopic particle image velocimetry," Exp. Fluids, Vol. 29, pp. 166-174.
- 3) Meinhart CD, Wereley ST and Santiago JG, 1999, "PIV Measurements of a Microchannel Flow," Exp. in Fluids, Vol 27, pp. 414-419.
- 4) Wereley ST and Meinhart CD, 2001, "Adaptive second-order accurate particle image velocimetry," Exp. in Fluids, Vol. 31, pp. 258-268.
- 5) Meinhart CD, Wereley ST and Santiago JG, 2000, "A PIV algorithm for estimating time-averaged velocity fields," Journal of Fluids Engineering, Vol. 122, pp. 285-289.
- 6) Keane RD and Adrian RJ, 1995, "Super-Resolution Particle Imaging Velocimetry," Measurement Science Technology, Vol. 6, pp. 1-27.
- 7) Olsen MG and Adrian RJ, 2000, "Brownian motion and correlation in particle image velocimetry," Opt. Laser Technol., Vol. 32, pp. 621-627.