

미세 영상 장치를 이용한 벽면 유동 센서 개발

이승환* · 김병수** · 김형범**†

* 경상대학교 기계항공공학부 대학원, ** 항공기부품연구소

Development of Wall Flow Sensor Using Micro Imaging Device

Seung Hwan Lee*, Byung Soo Kim** and Hyoung-Bum Kim***†

* Graduate School of Mechanical Engineering, Gyeongsang Nat'l Univ.,

** Research Center for Aircraft Parts Technology, Gyeongsang Nat'l Univ.

(Received August 2, 2012 ; Revised September 4, 2012 ; Accepted September 4, 2012)

Key Words: Micro Imaging Sensor(미세 영상 장치), PIV(입자화상속도계), Defocusing Imaging (초점이탈)

초록: 능동 유동 제어의 되먹임 신호 및 벽면 전단 응력 측정 등을 위해 벽면 유동 센서가 사용되고 있다. 본 연구에서는 광학 마우스에 사용되는 미세 영상 장치를 이용하여 벽면 근처에서 2차원 및 3차원 유체 속도를 측정할 수 있는 센서를 개발하였다. 미세 영상 장치에서 나오는 영상 신호 획득 시스템을 구축하고 획득한 영상에 입자화상속도기법과 초점이탈 영상기법을 적용하여 측정 영역에서의 산란 입자의 위치를 측정하였다. 모사 유동 실험을 통해, 개발된 벽면 유동 센서의 공간 해상도 및 측정 정확도를 검증하였고 기존 미세 영상 장치의 quadrature 신호 결과와 비교하여 입자화상속도기법을 적용할 경우, 측정 정확도 및 측정 범위가 확대되는 것을 확인하였다.

Abstract: A wall flow sensor has been used for feedback flow control and wall shear stress measurement. In this study, we developed a new wall flow sensor by combining the PIV algorithm and the micro image sensor used in an optical mouse. The feasibility of the wall flow sensor was investigated by using simulated fluid flow experiments. Compared with the quadrature signal from imaging devices, the accuracy of the wall flow velocity measurement was improved and the dynamic range increased. In addition, the depth information of particles was also measured by using the defocusing imaging technique.

1. 서 론

공력 및 유체의 혼입 조절 등을 목적으로 박리 전단유동을 제어하기 위해 많은 연구가 이루어지고 있다. 유동제어 기법은 되먹임(feedback)신호의 사용유무에 따라 개루프(open-loop) 및 폐루프(closed-loop) 제어 기법으로 분류된다. 일반적으로 개루프 제어의 경우에는 외부 유동의 변화에 반응할 수 없어, 제한된 조건에서만 제어 효과를 얻을 수 있기 때문에 외부 교란 및 유동 조건의 변화에서도 제어 효과를 얻기 위해서는 폐루프 제어가 필요하다.^(1,2)

기존 박리 유동의 폐루프 제어에서는 압력 센서, 역류 센서(reverse flow sensor) 등이 주로 되

먹임 신호 생성에 사용되었다.⁽³⁾ 압력센서는 기체 유동에서 압축성 효과에 의해 상대적으로 느린 반응 속도를 가지는 단점이 있다. 반면, 역류 센서는 유동의 1차원 방향을 측정할 수 있고, 압력 센서에 비해 기체에서도 빠른 주파수 응답 특성을 가지나 재부착 지점과 같은 복잡한 유동장에서는 압력센서와 비교하여 정확도가 낮다고 알려졌다.⁽⁴⁾ 또한 전단 박리 유동의 재부착지점에서는 매우 복잡한 와류출 및 필러임 현상이 발생하여 단일 센서로 전단 박리 유동의 거시적 구조 변화를 관찰하기에는 한계가 있어 다중 센서의 사용도 많이 제시되고 있다.^(5,6)

본 연구에서는 폐루프 유동 제어기법에서 되먹임 신호로 사용할 수 있는 새로운 센서 개발을 목표로 광학 마우스에서 사용되는 미세 영상 장치와 입자화상속도기법(PIV)을 결합하여 벽면 근

† Corresponding Author, kimhb@gnu.ac.kr

처에서 정확한 유동 정보를 획득할 수 있는 벽면 유동 센서를 개발하였다. 또한 깊이 방향으로의 산란 입자 위치 측정이 가능한 초점이탈(defocusing imaging method)기법의⁽⁷⁾ 적용 가능성도 연구하여 기존 벽면 유동센서가 측정할 수 없었던 벽면 전단응력의 측정가능성도 확인하였다.

2. 실험 장치 및 방법

미세 영상 장치는 기계적인 마우스 센서(mechanical mouse)의 성능 개선을 목적으로 개발되었다. 전자공학의 발달로 낮은 해상도(<1k pixel)에서 매우 높은 영상획득률(frames per second)을 갖는 영상 센서들이 개발되어 처음 개발 목적인 마우스 외에 동작분석(motion analysis), 수위 센서(floating sensor) 등의 다양한 분야로 사용 범위가 점차 확대되고 있다.^(8,9)

Table.1은 몇 가지 미세 영상 장치의 광학 성능 예이다. 표의 결과와 같이 미세 영상 장치의 화소수는 PIV실험에 사용되는 디지털 카메라와 비교하여 매우 작기 때문에 일반적인 PIV 기법에서 사용하는 조사구간의 크기(8~32 pixel)를 적용할 경우 2x2에서 4x4개의 속도벡터를 측정할 수 있다. 대신 상대적으로 매우 빠른 화상획득률로 본 연구에서 개발될 센서는 기존 PIV기법이 가지는 속도장 측정(field measurement)보다는 LDV나 열선 유속계와 같은 점 측정(point measurement) 기법과 유사한 측정 결과를 가진다. 이러한 미세 영상 장치는 빛을 감지하는 센서부와 센서에서 나온 아날로그 신호를 디지털로 전환하는 회로부가 일체화 되어 하나의 반도체 칩에 집적되어 있다.

미세 영상 장치의 수요가 동작 해석(motion analysis) 분야에 특화되어 개발되고 있기 때문에 해상도의 향상보다는 평면에서의 변위(displacement)를 고속으로 측정하는 방향으로 발전하고 있다. 이를 위해 영상 신호 처리를 위한 전용 DSP도 포함된 일체형 미세 영상 장치가 개발되어 사용되고 있다.⁽¹⁰⁾

현재 상용화된 미세 영상 장치로부터 크게 3가지 종류의 출력 신호를 획득할 수 있다. 가장 먼저 개발된 것은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 A/D 회로를 거친 CMOS 센서의 디지털 영상 정보를 직접 획득하는 방식이다. 이와 같은 경우에는 컴퓨터와의 인터페이스 회로를 구성하여 획득

한 디지털 영상 정보를 컴퓨터에 저장할 수 있다.

Fig. 2는 현재 가장 많은 미세 영상 장치들이 사용하는 신호 전달 체계이다. 이 방식은 영상 정보가 아닌 미세 영상 장치와 연결된 DSP회로에서 독자적인 영상 분석 알고리즘을 사용하여 변위값을 계산한 후, 이 변위 정보를 quadrature 신호 형태로 바꾸어 외부에 디지털 값으로 전송한다. Quadrature 신호는 두 개의 독립된 digital line의 0/1 신호의 주기적 변화를 이용하여 변위 정보를 제공하고 Fig. 2에서 보는 바와 같이, 획득한 영상 분석을 통해 1 pixel 당 한 번씩 quadrature신호가 발생된다. 따라서 quadrature 신호의 개수와 영상의 1 pixel에 해당하는 길이를 곱하게 되면 실제 움직인 변위를 구할 수 있다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 quadrature 디지털 신호의 변화 순서가 역으로 바뀔 경우에 음의 변위로 계산한다. 따라서 2차원 변위(x, y)를 측정하기 위해 모두 4 개의 quadrature output 신호가 센서로부터 나오게 된다. Quadrature 신호 생성을 위한 변위 계산 등에 사용되는 알고리즘은 각 센서 고유의 내용으로 공개되어 있지 않다.

가장 최근에 개발된 미세 영상 장치의 경우, 직접적인 변위 신호를 출력하지 않고, 고유의 데이터 포맷에 맞추어 변위 값을 디지털 신호로 직접 출력하고 있다.

본 논문에서는 Fig. 1과 Fig. 2의 인터페이스 방식을 채용한 두 가지 미세 영상 장치(ADNS-2610[®], HDNS-2000[®])를 선택하여 센서 개발 연구를 진행하였다. 두 모델은 1 pixel의 크기가 63 μ m이고 해상도, 계조치 분해능과 같은 광학적 사양은 동일한 반면에, 데이터 출력이 각각 영상 신호(ADNS-2610[®]) 및 quadrature 신호출력

Table 1 Optical specification of conventional navigation sensors

마이크로 영상장치	해상도 (resolution: Pixel)	계조치 분해능 (gray level)	영상획득률 (frames per second)
ATA2188 [®]	18×18	64	3,400
ADNS-2610 [®]	18×18	64	1,500
HDNS-2000 [®]	18×18	64	2,000
VT5366 [®]	20×20	NA	9,600
UIC1001 [®]	16×16	1,024	20,000

(HDNS-2000[®])으로 서로 다르다. ADNS-2610[®] 와 HDNS-2000[®] 시스템은 모두 639nm의 적색 LED 조명과 동일한 대물 렌즈를 사용하고 있다.

두 영상 장치의 결과 비교로부터 센서의 DSP 회로에서 제공하는 변위와 영상 정보를 획득 후 입자화상속도기법(PIV)을 적용하여 획득된 변위 결과와의 차이를 알 수 있다.

ADNS-2610[®] 영상 센서로부터 나온 영상 신호를 컴퓨터에 저장하기 위해 Fig. 3과 같은 ATmega[®] 제어기를 이용하여 센서에서 나온 디지털 영상 정보를 컴퓨터의 USB포트로 입력받아 저장하는 시스템을 구축하였다.

HDNS-2000[®] 영상 센서의 경우, DSP회로에서 계산되어 나온 영상의 이동 변위를 나타내는 quadrature 신호를 획득하기 위해, 4개의 digital input이 가능한 D/A 보드(SCB-68)와 Labview 소프트웨어를 이용하여 신호 획득시스템을 만들었다. Fig. 4는 구축된 시스템과 데이터 획득에 사용된 Labview 프로그램을 보여준다.

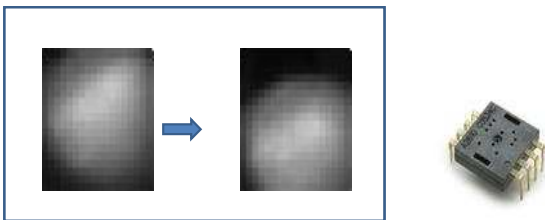


Fig. 1 Digital image output from micro imaging sensor (ADNS-2610[®] sensor)

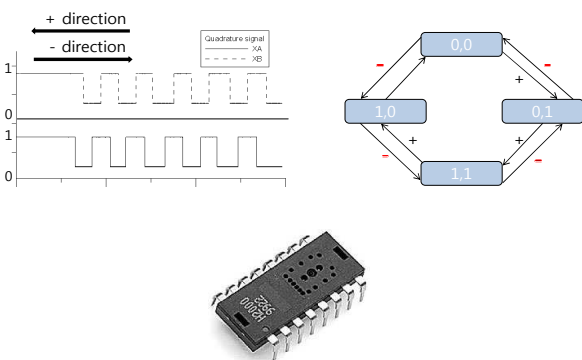


Fig. 2 Quadrature signal output from micro imaging sensor (HDNS-2000[®])

먼저 미세 영상 장치에 사용된 광학 시스템의 성능(심도(depth of focus), 측정 영상 영역(field of view))을 확인하기 위한 실험을 수행하였다. 미세 이송 장치(micro stage traverse)에 회색 계조 타깃을 설치한 후, 타깃을 깊이 방향(z)으로 움직이며 계조치 변화로부터 심도를 측정하였고, 측정 영상 영역은 미세 이송 장치를 x, y 평면상에서 움직이며 영상을 촬영하여 확인하였다. Fig. 5는 x, y 평면상으로 움직이면서 획득한 계조 타깃 영상의 예를 보여준다. 위의 실험으로부터 센서 시스템의 측정 영역 크기는 1.14×1.14 mm로 ADNS-2610[®]/HDNS-2000[®] 미세 영상 센서의 크기와 동일하여 사용된 광학 시스템은 1:1 비율의 macro 렌즈로 확인되었다.

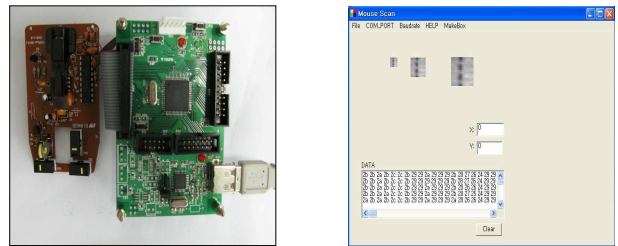


Fig. 3 Hardware and software for reading the image from micro imaging sensor (ADNS-2610[®])

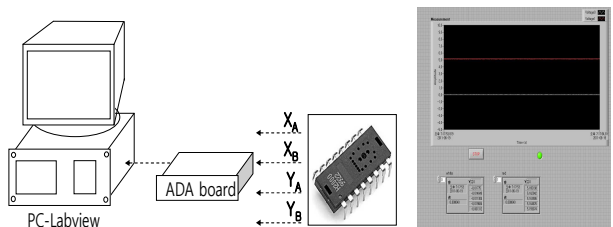


Fig. 4 Quadrature data interface system using Labview from HDNS-2000[®] micro imaging sensor

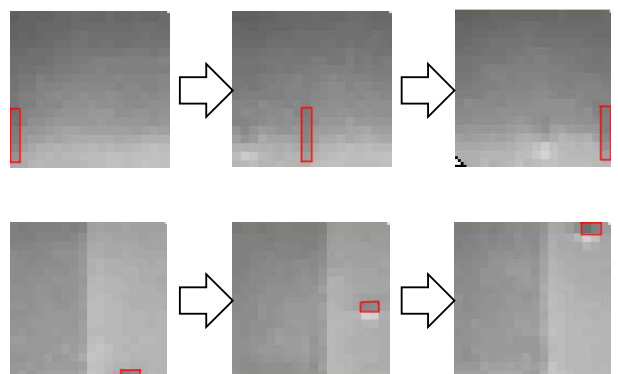


Fig. 5 Field of view of optical system

즉, CMOS 센서크기와 영상에 획득된 개체의 크기 비율이 1:1임을 의미한다. 심도는 계조치의 구배를 구해 최대값의 위치가 1 pixel 이상 변하는 높이를 기준으로 계산하였다. 미세 영상 장치의 공간 해상도는 심도내에서 최대값을 가지고 심도에서 멀어질수록 낮은 공간 해상도를 가지기 때문에 정확한 심도값을 측정하는 것은 매우 중요하다.⁽¹⁰⁾ 본 연구에서 사용한 미세 영상 장치의 렌즈는 초점 거리가 2.95mm이고 이때 심도는 200 μm를 가지는 것을 위 실험을 통해 알 수 있었다.

앞에서 구축한 두 가지 형태의 미세 영상 장치를 이용하여 벽면 유동 센서로서의 유용성을 검증하기 해 측정된 변위값의 공간 해상도(temporal resolution)와 정확도(accuracy)를 연구하였다. 이를 위해 Fig. 6에서 보는 바와 같이 유동 모사 장치를 구성하여 실험을 수행하였다. 유동을 모사하기 위해 투명 유리판사이에 물과 폴리스티렌입자를 넣은 후 미세 이송 장치에 위치시킨 후 정밀하게 이송시키며 센서로부터 구한 변위 정보와 이송 장치에서의 변위 값과 비교하였다.

Fig. 7은 ADNS-2610[®] 센서로부터 연속적으로 획득한 모사 유동 영상의 예로 구성된 미세 영상 장치 센서가 산란 입자 영상을 잘 획득하는 것을 보여준다.

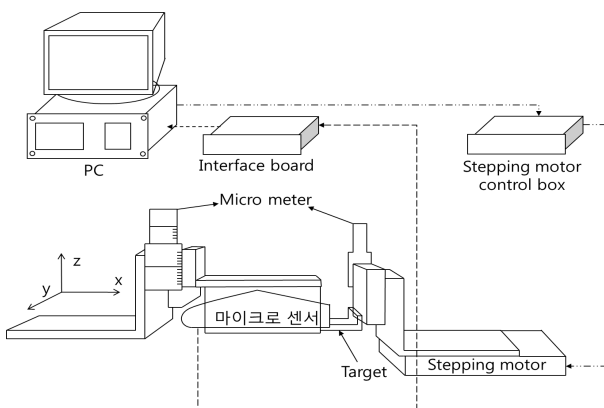


Fig. 6 Schematics of experimental system



Fig. 7 Captured successive particle images using ADNS-2610[®] micro imaging sensor

위와 같이 획득한 영상에 상호상관관계 PIV 알고리즘을 적용하여 x, y 방향으로의 변위를 계산하였다. 이 변위 결과와 미세 이송 장치에서의 변위 결과를 가지고 공간 해상도 및 측정 정확도 검증 연구를 수행하였다. 모든 실험 결과는 10회 반복한 평균값이다.

센서로부터 획득한 영상의 크기는 18×18 pixel로 PIV알고리즘을 적용하기 전에 4배 오버샘플링을 적용하여 64×64 pixel크기로 확대하여 PIV연산을 수행하였다. 이와 같은 오버샘플링은 평균값에는 영향을 주지 않지만, 변동 성분에는 다소 영향을 준다고 보고되었다.⁽¹¹⁾

Fig. 8은 획득 영상에 PIV 알고리즘을 적용하여 구한 x 축 방향으로의 이동 변위 결과의 벡터 그래프이다. 미세 이송 장치에서의 이동 변위는 0.150 mm이고, 입자 영상에서 PIV기법을 이용하여 계산된 평균 이동 거리는 0.156 mm로 나왔다. 이는 약 4 %의 오차로 정확하게 유체의 이동 변위를 측정할 수 있음을 의미한다. 이 결과는 구축한 미세 영상 센서 신호 획득 시스템의 벽면 유동 센서로서의 응용 가능성을 보여준다.

HDNS-2000[®] 센서의 quadrature 신호를 이용한 변위 측정의 공간 해상도와 정확도를 같은 방법으로 연구하였다. 미세 이송 장치상의 실험 모델을 움직이며 Labview 프로그램으로 quadrature 신호 숫자를 세어 HDNS-2000[®] 센서가 자체적으로 계산한 변위를 획득하였다. Table. 2는 측정 정확도 실험 결과로 10회 평균한 값이다. 미세 이송 장치와 미세 영상 장치의 quadrature신호로부터 획득한 변위와의 오차는 약 0.05mm로 PIV기법을 적용한 변위 측정 결과와 비교하여 10배 정도 큰

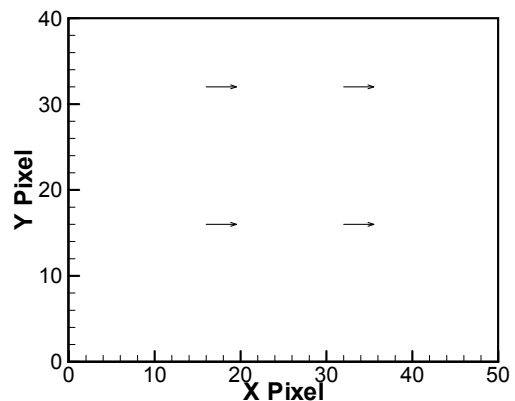


Fig. 8 Displacement vector from captured images using ADNS-2610 sensor

값이다. 이 값은 센서 매뉴얼에서 제공한 센서의 공간 해상도인 400 cpi (count per inch) 해상도와 비슷한 값이다.

HDNS-2000[®] 변위 측정 범위를 확인하기 위하여 1 pixel 크기(약 63 μ m)이내에서 미세하게 전송 장치를 움직이며 quadrature 신호의 변화를 측정하였다. Fig. 9의 결과로부터 25 μ m 이하의 움직임의 경우, 즉 센서 1 pixel 크기의 절반 이하의 움직임에서는 미세 영상 센서의 변위 계산 알고리즘이 유체의 이동 변위를 측정하지 못함을 알 수 있었다. 이 결과는 HDNS-2000[®]의 DSP에서 변위 측정에 사용된 알고리즘은 센서의 공간해상도에 해당하는 1 pixel 이내의 움직임은 정확하게 측정하지 못함을 의미하고 이는 고속의 변위 계산에 특화된 알고리즘이 갖는 특성으로 생각된다.

위 연구 결과는 미세 영상 장치에 PIV알고리즘을 결합해 개발된 유동 센서의 특징을 잘 보여준다. PIV 영상 알고리즘을 이용한 유동 센서의 경우, quadrature 신호 방식의 영상 센서와 비교하여 서브픽셀(sub pixel) 이내의 변위 측정 정확도를 확보할 수 있었고, 이는 측정 속도 범위도 더 넓음을 의미한다.

벽면에 평행한 평면에서의 2차원 속도 성분 측정 연구와 더불어 깊이 방향으로의 속도 측정 가능성에 대한 연구도 수행하였다. 일반적으로 3차원 속도 측정을 위해서는 2 대 이상의 영상 장치를 사용하나 초점이탈(defocusing imaging)기법의 사용으로 단일 카메라를 이용하여 깊이 방향으로의 위치를 측정할 수 있게 되었다.⁽⁷⁾

초점이탈 기법을 사용하기 위해 렌즈와 센서 사이에 3 개의 구멍(pin hole)이 있는 필터를 설치하고 앞서의 실험과 같은 유동 모사 모델을 이용하여 연구를 수행하였다.

xy 평면은 고정시킨 후, 깊이 방향(z)으로 미세 전송 장치를 움직이며 핀홀 필터를 통과한 입자

영상의 변화를 관찰하였다. 미세 영상 장치에 사용된 광학 시스템의 한계로 초점거리보다 먼 구간에서만 z값을 변화시켜 가며 초점이탈된 입자 영상을 획득하였다.

Fig. 10은 입자의 깊이 방향 위치와 세 개의 점으로 분리된 초점이탈된 입자 영상에서 세 점간의 평균거리와의 관계식을 보여준다. 결과로부터 깊이에 따라 선형적으로 초점이탈된 입자 영상의 간격이 증가함을 확인할 수 있다. 위 결과는 개발된 미세 영상 장치를 이용하여 깊이 방향의 입자 위치를 측정할 수 있고 이로부터 벽면 전단 응력 측정이 가능함을 의미한다.

개발된 유속 측정 센서의 속도 측정 범위는 영상 획득 속도 (frame rate)에 의해 결정되며 본 연구에 사용된 센서의 측정 가능한 속도 범위는 약 5 m/s 이내의 저속이다. 속도 측정 범위의 확대는 보다 높은 영상 획득률을 가지는 고성능 미세 영상 센서를 사용함으로써 이루어질 수 있다.

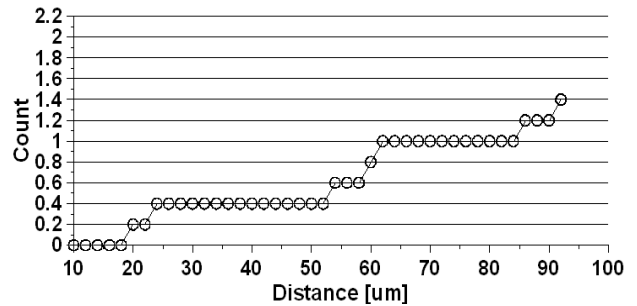


Fig. 9 Dynamic range test of HDNS-2000 micro imaging sensor

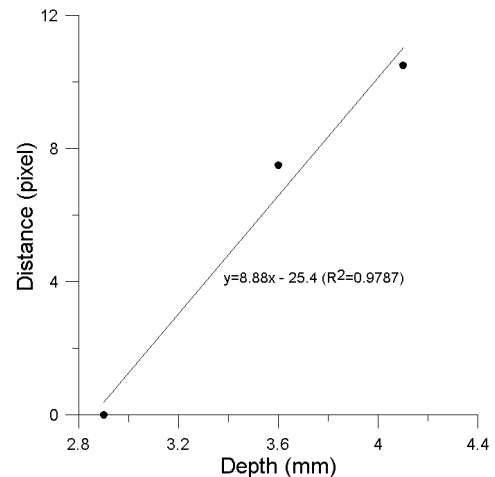


Fig. 10 Distance variation along the depth direction

Table 2 Accuracy test result of HDNS-2000[®] sensor system using quadrature signal

	평균 COUNT	평균 이동거리	실제 이동거리와의 오차
+Y 방향	19.1	1.21 mm	0.06 mm
-Y 방향	19.1	1.21 mm	0.06 mm
+X 방향	19.3	1.22 mm	0.05 mm
-X 방향	19.4	1.23 mm	0.04 mm

3. 결 론

본 연구에서는 마우스에서 사용되는 미세 영상 장치를 이용하여 벽면 근처 유속 측정 센서를 개발하였다. 결과로부터 quadrature방식의 변위 측정 결과와 비교하여 입자화상속도기법을 적용한 변위 측정 기법이 상대적으로 측정 정확도가 우수하고 속도 측정 범위가 넓음을 알 수 있었다. 또한 초점이탈 기법의 적용으로부터 개발된 벽면 유동 센서를 이용한 전단 응력의 측정 가능성도 확인하였다. 이는 기존의 압력 및 역류 센서와 비교하여 유동 제어 및 측정에 있어 새로 개발된 센서의 우수함을 의미한다.

후 기

본 연구는 한국연구재단의 중점연구소(2011-0031382), 융합파이오니어(2012-0001055)와 일반연구자지원사업(2010-0024798)의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 저자(이승환)는 BK21사업단의 지원을 받았습니다.

참고문헌

- (1) Gad-el-Hak, M., 2006, Flow Control: Passive, Active and Reactive Flow Management, Cambridge University press, New York.
- (2) Meier, G. E. A. and Viswanath, P. R., 1999, IUTAM Symp. Mechanics of Passive and Active Flow Control, Kluwer Academic Pub., Dordrecht.
- (3) King, R., 2006, Active Flow Control, Springer, Berlin.
- (4) Kamiumten, S., Nagayo, H., Motosuke, M. and Honami, S., 2010, "Coupled Electrothermal Analysis of a Micro Flow Sensor With Control Circuit using Spice," *Electronics and Communications in Japan*, Vol. 93, pp. 58~64.
- (5) Morioka, T., Manabu S. and Honami, S., 2001, "A Closed Loop Control of a Backward-Facing Step Flow by a Vortex Generator Jet," *Trans. of JSME*, Vol. 79.
- (6) Seifert, A. and Pack, L. G., 2002, "Active Control of Separated Flow on a Wall-mounted "Hump" at High Reynolds Numbers," *AIAA J.*, Vol. 40, pp.1363~1372.
- (7) Yoon, S. Y. and Kim, K. C., 2006, "3D Particle Position and 3D Velocity Field Measurement in a Microvolume via the Defocusing Concept," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 17, pp. 2897~2905.
- (8) Ng, T. W., Cheong, T. L. and Sheridan, J., 2007, "Digital Readout Manometer using an Optical Sensor," *Eur. J. Phys.*, Vol. 28, pp. 11~16.
- (9) Fujimori, Y., Ohmura, Y., Harada, T. and Kuniyosho, Y., 2009, "Wearable Motion Capture Suit with Full-body Tactile Sensors," *IEEE Int. conf. on Robotics and Automation*, Kobe, Japan.
- (10) LED-based Sensor (ADNS-3000) Document at "<http://www.avagotech.com/docs/AV02-2727EN>"
- (11) Eckstein, A. and Vlachos, P. P., 2009, "Assessment of Advanced Windowing Techniques for Digital Particle Image Velocimetry (DPIV)," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 20, No. 7, p. 075402.