

고해상도 CCD 카메라를 이용한 Single-Frame PIV 속도장 측정기법 개발

이 상 준* · 신 대 식**
(1999년 4월 8일 접수)

Development of Single-Frame PIV Velocity Field Measurement Technique Using a High Resolution CCD Camera

Sang-Joon Lee and Dae Sig Shin

Key Words : Particle Image Velocimetry(입자영상유속계), Image Shift(영상편이), High Resolution Camera(고해상도 카메라), Single-Frame(싱글프레임), Cross-Correlation (상호상관)

Abstract

Although commercial PIV systems have been widely used for the non-intrusive velocity field measurement of fluid flows, they are still under development and have considerable room for improvement. In this study, a single-frame double-exposure PIV system using a high-resolution CCD camera was developed. A pulsed Nd:Yag laser and high-resolution CCD camera were synchronized by a home-made control circuit. In order to resolve the directional ambiguity problem encountered in the single-frame PIV technique, the second particle image was genuinely shifted in the CCD sensor array during the time interval Δt . The velocity vector field was determined by calculating the displacement vector at each interrogation window using cross-correlation with 50% overlapping. In order to check the effect of spatial resolution of CCD camera on the accuracy of PIV velocity field measurement, the developed PIV system with three different resolution modes of the CCD camera (512×512 , $1K \times 1K$, $2K \times 2K$) was applied to a turbulent flow which simulate the Zn plating process of a steel strip. The experimental model consists of a snout and a moving belt. Aluminum flakes about $1\mu\text{m}$ diameter were used as scattering particles for the liquid flow in the zinc pot and the gas flow above the zinc surface was seeded with atomized olive oil with an average diameter of $1-3\mu\text{m}$. Velocity field measurements were carried out at the strip speed $V_s = 1.0$ m/s. The $2K \times 2K$ high-resolution PIV technique was significantly superior compared to the smaller pixel resolution PIV system. For the cases of 512×512 and $1K \times 1K$ pixel resolution PIV system, it was difficult to get accurate flow structure of viscous flow near the wall and small vortex structure in the region of large velocity gradient.

1. 서 론

유체유동 연구에 있어서 유동가시화는 유동현상을 직접 관찰함으로써 유동구조를 정성적으로 파악 할 수 있는 매우 중요한 실험 기법이다. 염료나 연기 등을 이용한 고전적인 유동가시화 방법은 전체 유동장의 정성적인 정보를 제공하지만, 정량적인 결과를 얻을 수 없다는 단점이 있다. 이

와는 반대로 LDV(Laser Doppler Velocimetry), 열선 유속계 등과 같은 기존의 유속계는 한 순간에 한 점에서의 속도를 정량적으로 제시하지만, 전체 유동장의 공간적 구조, 즉, 시간에 따라 변화하는 유동의 순간 속도장을 구하기는 거의 불가능하다.

최근 들어, 컴퓨터, 전자계측장비, 화상처리기법 등의 발달로 인하여 기존의 단점들을 보완한 정량적인 유동가시화 기법들이 선진국을 중심으로 활발히 개발되고 있다. 유동 속에 놓인 입자(particle)들의 거동을 화상처리하여 유동의 속도장 정보를 구하는 PIV(Particle Image Velocimetry)기법은 비접촉식이며 공간적인 유속분포를 순간적으로 구할 수 있다. 이 PIV 기법을 이용하면 LDV가 갖

* 회원, 포항공과대학교 기계공학과

E-mail : sjlee@postech.ac.kr

TEL : (0562)279-2169 FAX : (0562)279-3199

** 회원, 포항공과대학교 기계공학과 연구원

는 장점뿐만 아니라 비정상 유동의 거시적인 해석 그리고 유동의 공간적인 변화를 정성적, 정량적으로 측정할 수 있다.

최근 선진국에서는 PIV 측정기법의 효율향상을 위한 새로운 알고리즘 개발과 복잡한 3차원 유동장을 정확하게 측정하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한 PIV 속도장 측정기법을 이용한 난류유동의 계측도 지속적으로 시도되고 있다.⁽¹⁻³⁾ 국내의 경우 일부 대학이나 연구소에서는 상용화된 제품을 구매하여 복잡한 유동의 속도장을 해석하여 좋은 결과를 내고 있다.⁽⁴⁾ 또한 독자적으로 개발한 PTV(Particle Tracking Velocimetry) 기법에 대한 연구도 상당한 수준까지 도달해 있다.^(5,6) 그러나 일반 범용 CCD 카메라를 이용한 상용화된 제품(TSI, Dantec 등)들은 연구목적에 맞게 시스템을 변화시키기 어렵고, 측정 정확도를 향상시키고 측정영역을 확장시키는 데 어려움이 따른다. PIV 속도장 측정방식에서 측정 정확도를 향상시키기 위해서는 카메라의 해상도를 증가시켜야 한다. 그러나 해상도가 2K × 2K 이상인 고해상도 카메라는 고가이기 때문에 이를 이용한 PIV 시스템을 구입하려면 경제적인 어려움이 따른다. 또한 현 단계에서 고해상도 카메라를 이용한 상용화된 제품도 구하기 쉽지 않다. 또한 이와 같은 고해상도 PIV 시스템을 구축하기 위해서는 방향모호성(directional ambiguity)문제, 장비들 사이의 동기 등 많은 어려움이 남아 있다. 이러한 어려움 때문에 국내에서는 대부분 해상도가 낮은 512 × 512 픽셀(pixel) CCD 또는 비디오 카메라를 사용하거나 해상도가 1K × 1K 인 CCD 카메라를 활용한 PIV 시스템을 구축하여 유동의 속도장을 측정하고 있다. 그러나 이러한 PIV 시스템으로는 복잡한 3차원 유동의 전체적인 난류구조를 정확하게 해석하는 데는 어려움이 따른다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 사용하기 편리하고 경제적인 고해상도 PIV 속도장 측정시스템을 자체적으로 개발하는 것이 필요하다.

고해상도 카메라를 이용한 PIV 기법은 화상 저장 방식에 따라 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫 번째는 주로 중형카메라와 35 밀리 카메라를 사용한 필름 저장 방식이다. 이 방식은 한 장의 필름에 이중 노출시키게 되므로 방향모호성이 존재하므로 카메라 앞에 FLC(Ferroelectric Liquid Crystals)나 회전 거울과 같은 추가적인 장치를 부착하여 입자영상을 취득한 후 필름으로 현상하여 다시 스캐너 등을 이용하여 영상의 디지털 정보를 얻어내게 된다. 장점으로 해상도가 높은 반면 속도 방향의 모호성을 해결하는데 정확한 영상이동 등 많은 노력이 필요하고, 스캐너 작업에 오차가 포함될 수 있으며, 속도분석 작업에 많은 시간이 소요된다. 따라서 레이놀즈층력, 난류운동에너지 등 난류구조를 해석하는 실험에서는 많은 수의 순

간속도장 정보가 요구되므로 적합하지 않다. 두 번째로는 CCD 카메라를 이용하여 입자영상을 취득하는 방식이다. 이 방식은 CCD 카메라로 디지털 영상 값을 바로 취득하기 때문에 취급이 용이하고 제어장치를 이용하여 일정거리 만큼 유동영상을 편이시킬 수 있다. 또한 유동영상을 디지털 값으로 기억장치에 바로 저장시키기 때문에 많은 양의 속도장 데이터를 처리할 수 있어 난류구조 해석도 가능하다.

PIV 기법에는 하나의 순간속도장을 한 장의 입자영상으로부터 구하는 싱글프레임(single frame) 방식과 2 장 이상의 입자영상을 필요로 하는 다중프레임(multi frame) 방식이 있다. 고속유동의 경우 매우 짧은 시간 간격으로 이중 노출시킨 싱글프레임 방식이 유리하나, 속도장 계산시 방향모호성 문제가 야기되어진다. 반면에 다중프레임 방식에서는 방향모호성 문제는 없으나, 시간 간격 Δt 를 줄이기 위한 부가적인 장치와 노력이 요구되어진다.

본 연구에서는 해상도가 2K × 2K 인 고해상도 CCD 카메라를 이용한 싱글프레임 PIV 시스템을 구축하고 이를 빠른 속도로 움직이는 스트립 상부의 공기유동과 액체유동에 적용하였다. 싱글프레임 PIV 방식에서의 방향모호성 문제는 디지털카메라에 내장된 디지털 영상편이 기능을 이용함으로써 이상적으로 해결하였다. 그리고 같은 난류 유동장에 대해서 CCD 카메라의 해상도를 512 × 512, 1K × 1K, 2K × 2K 로 변화시켜 가면서 입자영상을 취득하여 카메라 해상도에 따른 속도장 결과를 비교 분석하였다. 이와 같은 연구를 통해 카메라 해상도가 속도장 측정의 정확성과 신뢰성에 미치는 효과를 파악할 수 있으며, 선진국에서도 현재 활발히 연구중인 고해상도 PIV 기법과 같은 첨단 실험기법을 자체적으로 구축하는 것이 본 연구의 목적이다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 입자영상유속계(PIV)

본 연구에 사용된 PIV 속도장 측정시스템은 Nd:Yag 레이저, CCD 카메라, 영상처리보드, 제어 및 분석용 컴퓨터, 동기장치 등으로 이루어져 있으며 그 개략도를 Fig. 1 에 나타내었다. 레이저로는 두개의 광원을 가지고 있는 2-head Nd:Yag 레이저를 이용하였는데, 레이저 펄스 당 약 25 mJ 에너지를 방출한다. 이때 레이저 펄스는 카메라의 노출신호와 정확히 동기시켜야 하므로 동기장치를 직접 제작하여 사용하였다. Fig. 2 는 CCD 카메라와 Nd:Yag 레이저 펄스를 동기시키는 신호계통도(signal diagram)를 표시한 것으로 CCD 카메라의 1 차 노출시간(exposure time)과 2 차 노출시간 사이에 픽셀 당 8.2 μ s 의 빠르기로 두 번째 레이저 펄

스에 의해 CCD 센서에 맺힌 입자영상을 편이시켰다. 여기서 나타난 Δt 는 두 개의 레이저 펄스 사이의 간격이며, 첫번째 입자영상위에 Δt 만큼 시간이 지난 후 두 번째 레이저 펄스에 의한 입자영상이 일정거리 만큼 편이된 상태로 중첩하게 되어 이중 노출 싱글프레임(double-exposure single frame) 입자영상을 얻게 된다.

Fig. 3은 본 연구에 사용된 $2K \times 2K$ 고해상도 카메라(SMD4M4)를 나타낸 것으로 세 가지 해상도(512×512 , $1K \times 1K$, $2K \times 2K$) 중 하나를 선택하여 사용하도록 되어있다. 카메라에서 나오는 영상 신호(video signal)는 12비트(bit)이며, 카메라의 셀(cell) 충진율은 100%이고 초당 4장의 영상을 얻을 수 있다. 그리고 공냉식으로 별도의 냉각장치를 필요로 하지 않는다. 또한 PIV 속도장 측정시 방향모호성(directional ambiguity) 문제를 해결하기

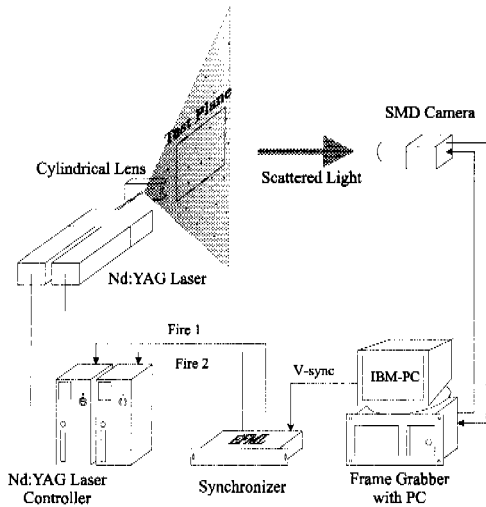


Fig. 1 Schematic diagram of PIV velocity field measurement system

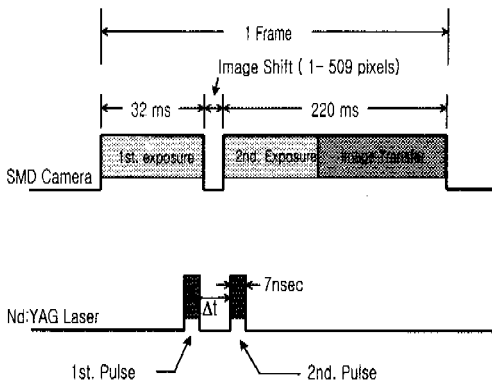


Fig. 2 Signal diagram of synchronization for velocity field measurement

위한 영상편이(image shift) 기능이 카메라 내부에 내장되어 있어 영상이동을 위한 회전거울과 같은 추가적인 장치를 필요로 하지 않는다. 영상의 이동거리는 최소 1 픽셀에서 최대 509 픽셀이며 4픽셀 간격으로 조절할 수 있다. 영상처리는 AM-DIG16R 카드를 장착하고 있는 Imaging Technology사의 IC-PCI 이미지 보드를 사용하였고, 시스템 제어 및 영상 데이터 분석은 Pentium II 컴퓨터를 이용하여 수행하였다.

2.2 동기회로

CCD 카메라의 영상 취득신호와 레이저 펄스 발생신호를 동기화 시켜 입자영상을 얻기 위하여 동기장치를 제작하였는데, Fig. 4는 그 회로도도를 보여주고 있다. 이것은 크게 입력신호를 기다리는 검출부와 시간 간격 Δt 를 미리 설정하는 시간 설정(time-setting) 부분, 입력신호가 떨어진 후 경과 시간을 계산하여 미리 설정된 값과 비교하는 제어 부분, 그리고 출력신호를 내보내서 레이저광을 발생시키는 출력신호 부분으로 나누어진다. 입력신

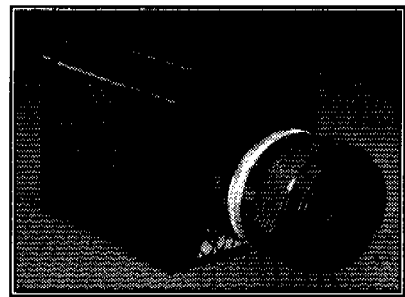


Fig. 3 Photograph of SMD 2kx2k digital CCD camera

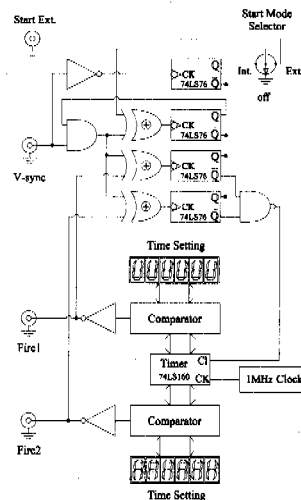


Fig. 4 Schematic diagram of the synchronizing device

호로는 CCD 카메라에서 출력되는 수직동기신호를 사용하였고, 시간간격 Δt 는 $1 \mu\text{s}$ 간격으로 조절이 가능하도록 하였다.

2.3 유동방향의 모호성

일반적으로 다중 노출방식의 PIV 측정에서는 입자영상이 하나의 영상프레임에 겹쳐 나타나기 때문에 유동방향의 모호성문제가 발생한다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 현재 여러 가지 방법들이 사용되고 있다.⁽⁸⁾ 여기에는 조사되는 광원의 강도(intensity)를 달리하여 입자영상을 구별하거나, 서로 다른 레이저 컬러를 사용하여 입자영상을 구별하는 방법이 있다. 광원의 강도를 다르게 하여 구별하는 방법은 평면광 내부에 있는 입자의 위치에 따라 입자영상의 강도가 달라질 수 있기 때문에 신뢰성이 떨어진다. 이밖에 코드 분할(code sequence) 방법과 형광입자가 산란할 때 점진적으로 감쇄되는 성질을 이용하여 1차와 2차 입자영상을 구별하는 방법들도 있다. 컬러 코딩 방법을 제외한 3가지 방법은 입자밀도가 낮은 PIV 측정에서 유용하게 사용되지만, 자기상관함수에 의한 PIV 분석에서 상관 값이 대칭적으로 나타나기 때문에 역류가 존재하는 유동이나 입자밀도가 높은 유동에 대해서는 어려움이 많이 따른다. 고해상도 디지털 CCD 카메라를 사용하는 본 PIV 시스템에서는 카메라내에 내장된 영상편이(image shift) 기법을 활용하였다. 이 방법은 LDV에서 사용하는 주파수 편이(frequency shift) 기법과 매우 유사하며, Fig. 5에 영상이동 기법의 개념도를 나타내었다. 시간 T_1 에서의 입자영상을 CCD 카메라 센서배열(sensor array)에 저장하고 설정된 픽셀(X_s)만큼 CCD 카메라 센서배열이 X 또는 Y 방향으로 이동한 후, 시간 T_2 때의 입자영상을 다시 저장하여 하나의 프레임에 이중 펄스에 의한 입자영상을 나타나게 함으로써 유동방향의 모호성을 제거하였다. 레이저 펄스 T_1 과 T_2 사이에 CCD 카메라는 열려 있고, 실험장치 주위는 암막 커튼으로 빛이 들어오지 못하게 차단하게 된다. 따라서 방향모호성을 해결하기 위한 추가적인 장치와 동기화 작업들이 필요 없으며, 설정한 픽셀만큼 영상이동이 정확이 이루어지므로 신뢰성 있는 속도장 결과를 구할 수 있다.

2.4 PIV 측정방법

화상처리를 이용한 PIV 속도장 측정기법은 입자영상(particle image)을 취득, 속도벡터를 추출하고 그리고 추출한 속도장 결과를 나타내는 3단계 과정으로 이루어진다.

입자영상을 취득하는 과정에서 우선해야 할 일은 작동유체에 맞는 입자(particle)를 선정하여야 한다. 입자는 유동을 제대로 추종할 수 있도록 충분히 작아야 하며, 영상에 입자들이 선명하게 나

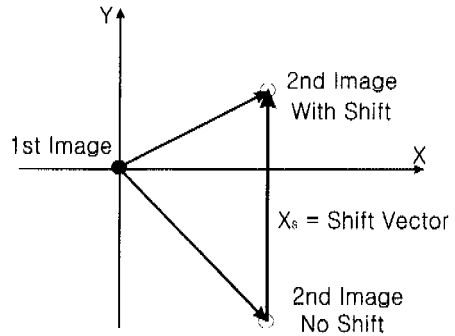


Fig. 5 Image shifting using translation of pixel lines

타날 수 있도록 레이저 평면광에 잘 산란 되어야 한다. 또한 신뢰성 있는 속도 측정이 가능하도록 입자 농도(concentration)가 충분히 높아야 한다. 이러한 세가지 입자선정 조건을 고려하여 본 연구에서는 공기유동을 모사하기 위해서 직경 $1\sim 3\mu\text{m}$ 의 올리브 오일 입자를 이용하였고, 액체유동인 경우는 직경 $1 \mu\text{m}$ 알루미늄 입자를 사용하여 액체유동을 모사하도록 하였다. 입자가 선정되면 다음으로 실린더형 렌즈와 구형렌즈(spherical lens)를 이용하여 레이저 평면광을 만들어 측정하고자 하는 유동장을 조사하게 된다. 그런 다음 CCD 카메라를 평면광에 수직되게 장착하여 입자영상을 취득하게 되는데, 좋은 입자영상을 얻기 위해서는 평면광을 측정하고자 하는 관측창(field of view)에 위치시키는 것이 필요하다.

레이저광에 의해 산란된 입자들의 입자영상을 찍는 일련의 과정은 다음과 같다. 먼저 CCD 카메라의 1차 노출시간(exposure time) 동안 레이저광을 조사하면 평면광 내의 입자들이 산란하게 되고 그들의 위치가 CCD 카메라 그리고 앞에서 설명한 것처럼 CCD 카메라에 내장되어 있는 영상편이 기능을 사용하여 하나의 영상 위에 Δt 시간 후의 두 번째 영상을 이중 노출시켜 중첩되게 입자영상을 얻는다. 이러한 싱글프레임 이중노출(single-frame double-exposure)영상은 짧은 시간간격(Δt)이 요구되는 고속유동의 속도장 측정에 유용하다. 본 연구에서는 두 개의 레이저 펄스 사이의 시간간격을 $\Delta t = 200 \mu\text{s}$ 로 고정한 상태에서 CCD 카메라의 해상도를 512×512 , $1K \times 1K$, $2K \times 2K$ 로 변화시켜 가며 같은 유동에 대해 속도장을 구하였다. 본 연구에 사용된 듀얼(dual) Nd:Yag 레이저의 펄스 폭은 약 7 nsec 로 빠른 속도의 난류유동에 적용한 결과 입자영상이 흐려지지 않았다.

Fig. 6은 본 연구에서 사용한 PIV 측정기법의 개념도를 나타낸 것으로, 하나의 프레임에 이중 노출된 싱글프레임 입자영상으로부터 속도장을 추출하기 위하여 상호상관함(cross-correlation)을 사용하였다. 상호상관함수를 구하기 위해 사용되는 두

번째 영상의 미소조사구간은 Fig. 6에 나타난 것처럼 일정거리 만큼 영상이동된 다른 위치에 위치하게 되는데, 이 경우 두개의 큰 상관 값과 하나의 상대적으로 작은 상관 값이 나타나게 되므로 PIV 방식에서 크게 분체가 되는 유동방향의 모호성을 해결할 수 있다. 이러한 PIV 방식은 고속유동의 속도장 측정이나 높은 해상도를 가진 입자영상을 취득하는 난류유동 해석에 유용하다고 할 수 있다.

입자영상에 나타난 입자변위는 유동의 속도와, 편이된 영상이동량 그리고 Δt 에 의해 생성된 것이다. 유동에 의한 실제 입자 변위는 주어진 영상이동(translation)량을 빼면 얻어지게 되는데, 영상이동량은 측정하고자 하는 유동에 존재하는 최대 역방향 속도성분에 해당하는 거리보다 크게 하여야 한다. 그러나 영상이동량이 너무 커지게 되면 이동된 픽셀에 해당하는 끝부분에서 속도정보를 얻을 수 없게 되므로 그 만큼 속도장 결과에서 측정 공간이 줄어들게 된다. 이러한 점들을 고려하여 PIV 속도장 측정에서 영상이동의 방향은 유동장을 고려하여 영상이동이 가장 작게 되는 쪽을 선택하였다. 일반적으로 역류가 최소가 되는 방향을 선택하면 가장 작은 영상이동을 설정할 수 있다. 본 연구에서는 512×512 해상도인 경우 영상이동은 5 픽셀로 하였고, $1K \times 1K$ 인 경우는 9 픽셀, $2K \times 2K$ 인 경우는 영상이동을 13 픽셀로 설정하였다.

PIV 속도장 측정에서 공간분해능은 속도를 분석하는 미소조사구간의 크기에 의해 결정되는데, 이 미소조사구간이 작으면 작을수록 공간해상도가 좋아지게 된다. 본 연구에서는 해상도에 따른 성능을 객관적으로 비교하기 위하여 각 해상도에 따른 공간분해능을 동일하게 하였는데, 512×512 해상도인 경우는 16×16 픽셀, $1K \times 1K$ 인 경우는 32×32 픽셀, $2K \times 2K$ 인 경우는 64×64 픽셀로 미소조사구간 크기를 설정하였다. 그리고 오버랩핑(overlapping)은 50%로 같게 하였다.

3. 용융아연 도금욕 장치

본 연구에서 개발한 고해상도 CCD 카메라를 이용한 PIV 속도장 측정기법의 유용성을 검증하고 CCD 카메라의 해상도에 따른 속도장 측정결과를 비교하기 위하여 PIV 측정기법을 용융아연 도금욕 snout 내부 난류유동⁽⁹⁾에 적용하였다.

본 연구에 사용되어진 아연 도금욕 모사장치의 개략도를 Fig. 7에 나타내었는데, 이것은 크게 스트립(strip) 모사부와 snout 시험부로 구성되어 있다. 스트립 모사부는 수조 내에 설치한 싱크롤(sink roll)과 수조 상부에 설치된 구동롤에 이음매 없는 벨트(endless belt)가 회전하는 방식으로 이루어져 있다. 상부의 구동롤은 DC 모터로 회전하게

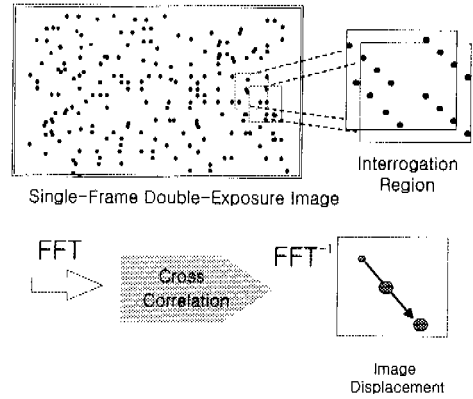


Fig. 6 Single-frame double-exposure cross-correlation PIV technique for velocity field measurement

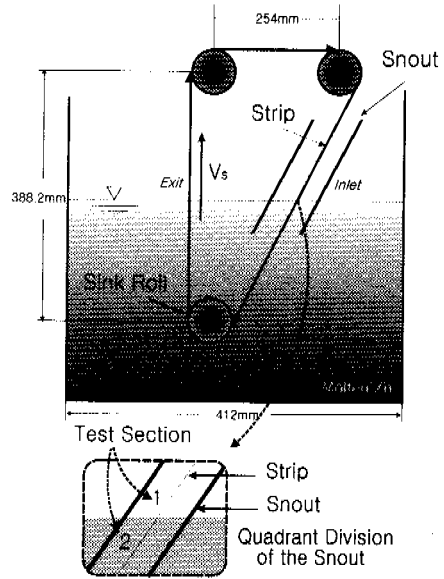


Fig. 7 Schematic diagram of the Zn-plating process model used in this study

되며, 회전수를 변화 시켜 스트립의 이동속도를 조절할 수 있다. 상부에는 수평레벨 조절장치가 있는데, 이것을 미세 조절함으로써 스트립 벨트가 회전하는 동안 측면방향으로 움직이는 것을 방지하기 위한 것이다. 그리고 강판스트립이 도금욕 속으로 들어가는 부분에 snout 장치가 설치되어 있는데, 이것은 아연도금 과정에 생기는 불순물(dross)이 강판에 붙는 것을 방지하기 위한 것이다. 본 연구에서는 snout 내부에서 고속으로 이동하는 벨트 주위의 유동을 측정하였는데 Fig. 7에서 점선으로 표시한 부분이 시험부 구간으로 도금욕 표면을 기준으로 자유표면 아래의 액체 유동부분과 상부의 공기 유동부분으로 구성되어 있다. 시험부는 깨끗한 입자영상(particle image)을 얻기 위하여 유입구 측면을 투명유리로 제작하였다. 본 실험에

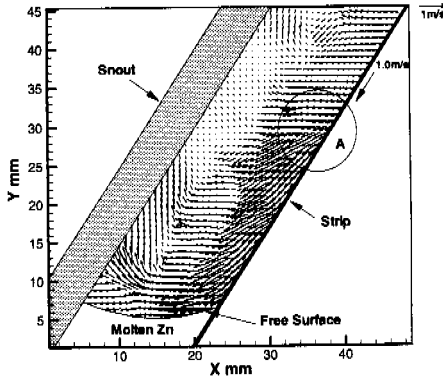


Fig. 8 Velocity field of gas flow in the 1st quadrant with 512 × 512 pixel resolution

서는 스트립 이동속도(V_s)를 $V_s = 1.0$ m/s 로 고정하여 snout 내부 1분면의 공기유동과 2분면의 액체유동의 속도장을 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

CCD 카메라의 해상도를 512 × 512, 1K × 1K 그리고 2K × 2K 의 3가지 경우로 snout 내부 공기유동의 입자영상을 취득하여 구한 속도장 결과를 Fig. 8, 9, 10 에 나타내었다. 측정된 공기유동장의 실제 측정구간 크기는 46mm × 46mm 이다.

Fig. 8 은 해상도 512 × 512 로 하여 얻어진 snout 내부 공기유동의 속도장 결과이다.

왼쪽이 snout 벽면이고 오른쪽이 대각선 아래로 1.0 m/s 속도로 이동되고 있는 스트립이다. 이 속도장 결과를 보면 스트립을 따라 아래로 움직인 공기유동이 하부의 액체표면을 지나 snout 위쪽으로 빠져나가는 시계방향의 커다란 와류를 형성하고 있는 유동형태를 보여주고 있다. 또한 좌측 상부의 속도장 결과를 살펴보면 스트립 표면을 따라 하강하는 유동을 볼 수 없으며, 스트립에 의한 운동량 전달이 어느 정도 이루어진 A 영역에 가서야 스트립 표면을 따라 아래로 움직이는 유동을 볼 수 있다. 이것은 입구영역에서 스트립 이송에 의해 영향을 받는 유동영역이 스트립 표면에 아주 가까운 점성 저층에서만 존재하지만 해상도가 낮아서 이를 나타내지 못하는 것으로 보인다. 따라서 512 × 512 해상도를 가진 PIV 측정기법을 사용하여 46mm × 46mm 크기의 관측장 내부유동의 미세 구조까지 파악하기 어렵다는 것을 알 수 있다.

Fig. 9 는 Fig. 8 에서와 같은 유동의 입자영상을 1K × 1K 해상도로 취득하여 구한 속도장이다. 속

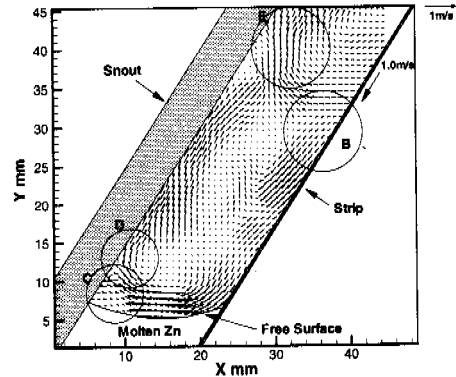


Fig. 9 Velocity field of gas flow in the 1st quadrant with 1K × 1K pixel resolution

도장 결과를 보면 스트립을 따라 아래로 움직인 유동은 하부 액체의 자유표면에 부딪혀 왼쪽으로 방향을 틀어 snout 벽면 D 영역에 충돌하면서 시계방향의 커다란 와류를 형성한다. 그리고 snout 벽에 충돌한 유동이 분기되어 C 영역에 명확하게 보이지는 않지만 반 시계방향의 작은 2차 와류 구조를 형성하고 있다. Snout 벽면을 따라 상승하던 유동은 E 영역에서 스트립을 따라 유입되는 유동을 만나 수직방향으로 빠져나가고 있다. 해상도 512 × 512 로 측정된 Fig. 8 의 A 영역에 나타난 오류속도 성분이 해상도 Fig. 9 의 B 영역에서도 나타나고 있다. 이처럼 해상도가 1K × 1K 로 측정된 속도장의 경우, 시계방향으로 회전하는 큰 와류 구조는 비교적 정확하게 나타나고 있지만, 속도구배가 심한 스트립이 이송되는 초기 점성저층 영역이나 snout 아래 왼쪽 가장자리 C 영역처럼 작은 와류구조가 존재하는 곳에서는 실제유동을 제대로 모사하지 못하고 있다.

Fig. 10 은 CCD 카메라의 해상도를 2K × 2K 로 설정하여 같은 유동에 대해 얻어진 PIV 속도장 결과이다. 공기유동은 아래로 이동하는 스트립 표면을 따라 빠른 속도로 움직이다가 용융아연 표면에 부딪혀 왼쪽으로 방향을 틀게 된다. 왼쪽으로 들어진 유동은 snout 벽면 H 영역에 충돌하여 snout 벽면을 따라 상승하는 시계방향의 커다란 와류를 형성한다. 그리고 snout 하부 왼쪽 가장자리 G 영역에는 세기는 크지 않지만 반시계방향으로 회전하는 2차 와류구조를 뚜렷이 보여주고 있다. 그리고 snout 벽면을 따라 상승하던 유동은 I 영역에서 스트립을 따라 유입되는 유동과 상호작용을 하면서 수직방향으로 빠져나가고 있다. F 영역을 보면 스트립이 이송되는 초기 영역에서부터 공기유동이 스트립을 따라 아래로 이동되는 것을 볼 수 있다. 이처럼 해상도 2K × 2K 인 고해상도

CCD 카메라를 이용한 PIV 속도장 결과는 snout 내부에 형성되는 큰 와류구조뿐만 아니라 작은 2차 와류구조, 그리고 큰 속도구배가 존재하는 점성저층영역의 속도장 정보를 정확하게 제공하고 있다.

같은 방법으로 CCD 카메라의 해상도를 바꾸어 가면서 snout 하부의 2분면의 액체유동에 적용하여 구한 속도장 결과를 Fig. 11, 12에 나타내었다. 이 경우 측정된 관측장의 크기는 56mm × 56mm 이었다.

Fig. 11은 CCD 카메라의 해상도를 1K × 1K, 미소조사 구간은 32 × 32 픽셀, 오버랩핑은 40%로 하여 구한 속도장 결과를 나타낸다. 이 속도장 결과를 보면 도금속 표면으로 상승하는 유동형태를 보여주고 있으며, snout 쪽 J 영역에서는 반시계방향의 작은 와류구조가 나타나고 있다. 스트립 쪽 K 영역에서는 명확하지는 않지만 시계방향의 와류구조가 형성되는 것을 볼 수 있다. 그리고 Fig. 9

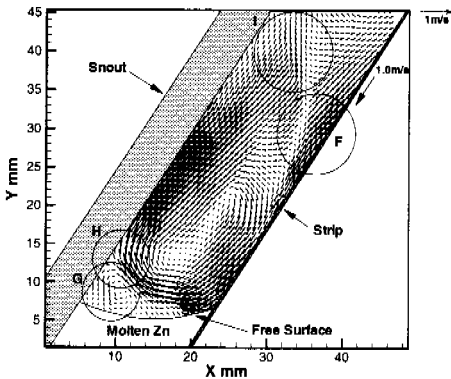


Fig. 10 Velocity field of gas flow in the 1st quadrant with 2K × 2K pixel resolution

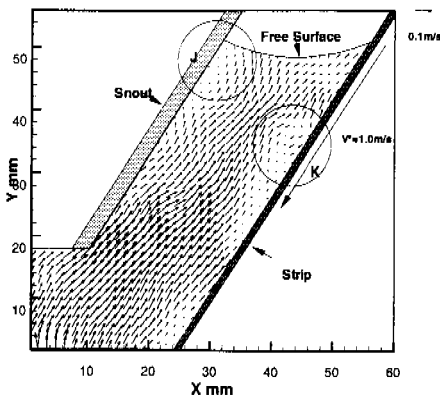


Fig. 11 Velocity field of liquid flow in the 2nd quadrant with 1K × 1K pixel resolution

에 나타난 공기유동의 경우와 마찬가지로 액체유동에서도 속도구배가 큰 스트립 표면 부근에서의 하강유동을 제대로 나타내지 못하고 있다.

Fig. 12은 해상도를 2K × 2K, 미소조사구간 64 × 64 픽셀, 오버랩핑은 50%로 설정하여 얻어진 속도장 결과이다. 속도장 결과를 보면 snout 쪽에 치우쳐 도금속 표면으로 상승하는 유동형태를 보여주고 있다. 이것은 snout 내부로 상승하는 유동이 스트립쪽에서 빠른 속도로 하강하는 스트립 유동에 의해 감쇄되기 때문이다. Fig. 11의 결과와 비교하여 보면 해상도 1K × 1K인 경우는 상승하는 거시적인 유동형태만 보여주고 있는데 반해, 2K × 2K인 경우에는 미시적인 유동형태까지 나타내고 있다. 또한 해상도 2K × 2K인 경우에는 snout 쪽 L 영역과 스트립 쪽 M 영역에 형성되는 작은 와류구조를 명확하게 보여주고 있다. 게다가 속도구배가 큰 스트립 표면근처에 형성되는 하강 유동형태도 잘 나타내고 있다.

따라서 본 연구에서 개발한 해상도 2K × 2K인 고해상도 CCD 카메라를 이용한 PIV 시스템의 경우는 고속으로 이동하는 스트립 주위 공기유동과 액체유동의 유동정보를 정확히 제공하고 있으며 snout 내부에 형성되는 큰 와류구조뿐만 아니라 작은 2차 와류구조 그리고 큰 속도구배가 형성되는 점성저층영역의 속도장 정보를 정확하게 보여주고 있다.

5. 결론

본 연구에서는 고해상도 CCD 카메라를 사용한 이중노출 싱글프레임 PIV 시스템을 개발하였으며, CCD 카메라의 해상도를 512 × 512, 1K × 1K 그리고 2K × 2K로 변화시켜 가면서 빠른 속도로 움직이는 스트립 주위 난류유동에 적용하여 해상도에 따른 속도장 결과를 비교 검토하여 다음과 같은 결

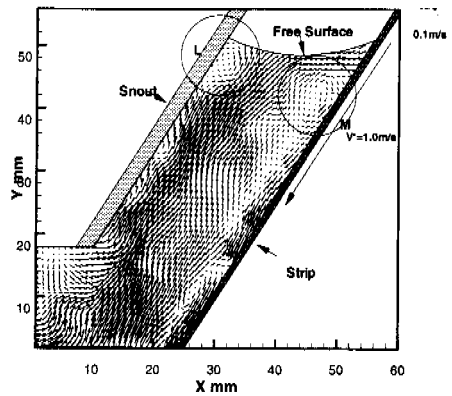


Fig. 12 Velocity field of liquid flow in the 2nd quadrant with 2K × 2K pixel resolution

론을 얻었다.

(1) 카메라에 내장된 영상이동기법을 사용함으로써 유동방향의 모호성을 효과적으로 해결한 고해상도 싱글프레임 PIV 시스템을 구축하였다.

(2) CCD카메라의 해상도가 높을수록 측정정확도가 향상되어 복잡한 난류유동의 유동구조를 보다 정확히 파악할 수 있었다.

(3) 해상도가 낮은 512×512 , $1K \times 1K$ 인 PIV 시스템은 미세한 와류구조, 물체 표면 가까이에서의 점성구간과 속도구배가 큰 경계층영역에서의 유동구조를 제대로 밝혀내지 못하였다.

(4) 본 연구에서 개발한 이중노출 싱글프레임 PIV 방식은 시간간격 Δt 를 크게 줄일 수 있으며 방향모호성 문제도 없으므로 향후 고속의 난류유동 해석에 매우 유용할 것이다.

후 기

본 연구는 포항공대 첨단유체공학 연구센터의 연구지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Huang H. 1998, "An Extension of Digital PIV-processing to Double-exposed Images," *Experiments in Fluids*, Vol. 24, pp. 364~372.
- (2) Quenot G. M., Pakleza J., and Kowalewski T. A. 1998, "Particle Image Velocimetry with Optical Flow," *Experiments in Fluids*, Vol. 25, pp. 177~189.
- (3) Gharib M., Weaterweel J., and Dabiro D., 1997, "The Effect of a Discrete Window Offset on the Accuracy of Cross-correlation Analysis of Digital PIV Recordings," *Experiments in Fluids*, Vol. 23, pp. 20~28.
- (4) Kim K. C. and Shin D. S., 1998, "A Study on the Topology of Shear Layer Vortex Structure in a Cross Flow Jet Using a Laser Tomographic Visualization Method," *Proceeding of VSJ-SPIE98*, pp. 1~8.
- (5) Baek S. J. and Lee S. J., 1996, "A New Two-Frame Particle Tracking Algorithm Using Match Probability," *Experiments in Fluids*, Vol. 22, pp. 23~32.
- (6) Lee S. J. and Baek S. J., 1998, "Velocity Field Measurements of Flow Around a Triangular Prism Behind a Porous Fence," *J. Wind Eng. & Industrial Aerodynamics*, Vol. 77, pp. 521~530.
- (7) Bertuccioli L., Gopalan S., Katz J., 1996, "Image Shifting for PIV Using Birefringent and Ferroelectric Liquid Crystals," *Experiments in Fluids* 21, pp. 341~346.
- (8) Dracos Th., 1996, "Three-dimensional Velocity and Vorticity Measuring and Image Analysis Technique," *Kluiver Academic Publishes*.
- (9) 신대식, 최제호, 이상준, 1999, "용융아연 도금 공정에서의 SNOUT 내부 유동장 해석 (I)," 대한기계학회논문집 B 권, 제 23 권 제 10 호, pp. 1265~1273.