

난류유동의 측정기술

성형진 · 고상근

Measurement Technique of Turbulent Flows

Hyung-Jin Sung · Sangken Kauh



- 성형진 (한국과학기술원 기계공학과)
- 1954년생
- 유체공학을 전공하였으며, 난류유동의 실험 및 해석에 관심을 가지고 있다.



- 고상근 (서울대학교 기계공학과)
- 1956년생
- 열유체계측어, 열전달을 전공하였으며, 에너지시스템 메카트로닉스에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

난류유동의 측정이 필요한 이유는 다음과 같이 크게 세 가지로 분류할 수 있다.

- (1) 직접응용을 위한 실측자료의 필요성
- (2) 난류구조를 이해하기 위한 물리적 현상의 발견
- (3) 이론적 예측을 설명하기 위한 기반자료의 필요성

각각의 필요에 따라 적절한 실험기법이 요구되는데 공통적으로 유속계의 응답속도가 빨라야 하고, 3차원 속도 측정이 가능해야 하며 이에 따라 대단히 많은 양의 자료를 취급할 수 있어야 한다. 측정시스템이 유동의 시간상수보다 빠른 응답특성을 가지고 있다면 난류의 측정도 층류의 측정과 유사하게 취급할 수 있게 된다. 이러한 요건을 충족시키면서 현재 널리 쓰이고 있는 측정기법으로는 열선유속계와 레이저 도플러 유속계(LDY), 가시화기법 등이 있다.

한편, 유량측정은 유속계의 교정방법에 따

라 상대측정방법과 절대측정방법(relative & absolute measurement)으로 나눌 수가 있다. 상대측정방법은 잘 알고 있는 유속과 비교하여 교정을 하는 반면, 절대측정방법은 기지의 유량에 의하지 않고 다른 물리량들을 측정 환산하여 유속을 알 수 있다. 따라서 절대측정방법이 상대측정방법보다 우수한 방법이라고 할 수 있으나 바이어스 오차(bias error, systematic error)의 가능성이 있으므로 그를 배제하고자 하는 많은 노력이 필요하다.

이 글에서는 상대측정방법의 예로서 열선 유속계, 절대측정방법의 예로서 레이저 도플러 유속계, 가시화기법에 대한 전반적인 설명을 통하여 난류측정에 대한 이해를 돕고자 한다. 열선유속계와 레이저도플러유속계는 응답특성이 난류측정에 적합한 측정기술로서 입증되어 있지만, 가시화기법에 의한 난류측정은 3차원 유동장을 동시에 처리할 수 있는 장점에도 불구하고 영상처리에 많은 시간이 필요하므로 아직까지 계속적인 연구가 이루어지고 있다.

2. 열선유속계에 의한 난류 측정

난류유동 측정에서 열선유속계를 이용한 난류측정방법이 가장 널리 사용되고 있는데 그것은 이 센서가 가진 다음의 장점에 기인한다.

- 센서의 크기가 비교적 작다.
- 난류측정에 적합한 정도로 응답속도가 빠르다.
- 수 % 정도의 난류강도를 측정하는데 충분히 감도가 좋다.
- 열선유속계에서 나오는 전기신호를 아날로그 장치나 디지털 장치로 쉽게 통제처리할 수 있다.
- 온도 및 밀도 등에 대한 평균치, 난류도, 상관계수 및 난류의 주파수특성 등을 상대적으로 용이하게 연속적으로 얻을 수 있다.

2.1 열선유속계의 원리

열선유속계는 두 가지의 물리적 현상을 이용하는 장치인데 식 (1)과 (2)는 이를 표현하고 있다.

$$Q = hA(T_w - T_a) \quad (1)$$

$$R_w = R_0(1 + \alpha T_w) \quad (2)$$

식 (1)은 열선으로부터 주위 유체에 전달되는 열전달량을 나타내는 식이고 식 (2)는 열선의 온도-저항관계식이다. 열선에 전류를 흘리게 되면 $I^2 R_w$ 만큼의 열이 발생하고 이는 식 (1)에 의해 유체에 전달된다. 이때 유체의 속도에 따라 열전달계수 h 가 변하여 열전달량에 차이가 생기게 되므로 열전달량을 측정하면 유속을 알 수 있게 된다.

열선유속계는 열선에 전류를 흘리는 방식에 따라 크게 두 가지로 구분되는데 이는 정온도형 열선유속계(CTA; constant temperature hotwire anemometer)와 정전류형 열

선유속계(CCA; constant current hotwire anemometer)이다. 정온도형 열선유속계는 열선에 일정한 양의 전류를 흘려 보내는 방식으로 유체의 속도에 따라 열선의 저항이 변하여 열전달량이 바뀐다. 반면 정온도형 열선유속계는 closed circuit feedback control system에 의해 열선의 온도가 일정하게 유지된다. 따라서 전류변화를 통하여 열전달량을 알 수 있다. 정전류형 열선유속계는 열선자체의 관성효과로 인하여 매우 낮은 cut-off frequency를 갖게 되므로 현재는 거의 사용되지 않고 단지 속도 및 온도의 동시 측정 등에 제한적으로 사용되고 있다. 그러나 정온도형 열선유속계는 부귀환증폭회로를 채택하여 동적응답특성을 향상시키고 잡음에도 강한 특성을 보이므로 많이 사용되고 있다.

2.2 주파수응답특성

난류의 측정에는 필수적으로 주파수응답특성(frequency reponse)이 빠른 유속계가 필요하다. 열선유속계는 다음의 원인에 의해 유한한 주파수응답특성을 가지게 된다.

- 열선이 가진 질량에 의해 열적관성을 가지고 있다.
- Lead wire에 의해 인덕턴스효과가 존재한다.

정전류형 열선유속계와 정온도형 열선유속계의 주파수 응답특성은 적절한 모델링에 의하여 다음의 식으로 표현될 수 있다.

$$\frac{e}{v}(D) = \frac{K}{\tau D + 1}$$

여기서,

$$K \cong \frac{-K_v A I (K_{tr} R_0 - T_f)}{K_{tr} A (C_0 + C_1 \sqrt{V_0}) - I^2}$$

$$\tau \cong \frac{MCK_{tr}}{K_{tr} A (C_0 + C_1 \sqrt{V_0}) - I^2} \quad (3)$$

$$\frac{e}{v}(D) = \frac{K_{ct}}{\tau_{ct} D + 1}$$

여기서,

$$K_{ct} \cong \frac{-KK_bK_aR_r/I_m}{1+K_eK_bK_a/I_m}$$

$$\tau_{ct} \cong \frac{\tau}{1+K_eK_bK_a/I_m} \quad (4)$$

식 (3)에서 정전류형 열선유속계의 시간상수는 1ms 이하로 줄어들 수 없으며 이로 인해 스텝함수의 주파수 응답은 160 Hz를 넘을 수 없다. 하지만 일반적인 난류의 측정을 위해서는 수 kHz에서 수십 kHz의 주파수 응답이 가능해야 한다. 반면 식 (4)에서 정온도형 열선유속계의 경우 τ_{ct} 가 τ 보다 항상 작은 것을 알 수 있다. 실제로 매우 높은 값의 증폭이득 K_a 때문에 τ 의 1/100까지 줄일 수 있다. 하지만 K_a 가 너무 커지게 되면 시스템이 불안정해져서 발전할 가능성이 높아지게 되므로 적절한 값을 찾아야 한다.

증폭이득을 높이는 방법 이외에도 다음과 같은 방법으로 주파수응답특성을 향상시킬 수 있다.

- 열선의 직경을 줄여 τ 자체를 감소시킨다.
- 과열비를 높여 K_b 를 증가시킨다.

2.3 Hot Film과 Hot Wire

일반적으로 열선유속계는 공기나 다른 가스 등의 난류측정에 이용되어져 왔으며 액체 상태의 유체를 측정할 경우에는 열선 자체가 적절하지 않다는 사실이 알려져 있다. 예를 들어 열선의 온도가 높은 경우에는 scale의

생성이라든지 혹은 열선표면에서의 증발 등이 문제가 되어서 과열비를 낮춰야 할 필요가 있다. 또한, 전기적 혹은 화학적으로 열선이 오염될 수가 있으며, 액체 유체 측정시 필요한 강도를 위해 좀더 두껍고 긴 열선을 쓸 경우 열선의 감도와 시간상수 등에 안 좋은 영향을 미치게 된다. 이런 문제들을 해결하기 위하여 고안된 것이 hot film type anemometer이다. 이것은 Ling and Hubbard에 의하여 도입되었고 그 이후로 계속해서 발달되어 왔으며 high-polymer solution의 측정에 성공적으로 이용되어 왔다.

2.4 난류 측정의 원리

열선유속계를 이용하여 난류를 측정하는 경우 먼저 다음과 같은 두 가지 사실에 주목할 필요가 있다. 첫째, 열선과 주위 유체와의 대류열전달해석에 사용된 속도 성분은 열선에 수직인 평면상에 있는 모든 속도 성분들의 vector sum(\vec{U}_{eff})을 의미한다는 것이다. 둘째, 열선의 출력중에서 instantaneous value $e'(t)$ 는 난류의 주파수 특성의 해석이 외에는 그 자체로 아무 의미가 없다는 것이다. 즉, 난류강도나 상관계수 등을 구하기 위해서는 $e'(t)$ 을 그대로 사용할 수 없고 그 성분의 r.m.s.(root mean square) 값을 사용해야 한다는 것이다. 이 두 가지를 기본으로 해서 방향성 감도를 이용한 방향별 난류속도의 분리 측정에 관해 설명을 해보기로 하겠다. 그림 1은 2차원 속도 측정에 많이 사용



그림 1 X-열선 프로브에 사용된 Coordinate system

되는 x-wire를 보여주고 있다. 여기서 $\tilde{U} = U + u$, $\tilde{V} = V + v$, $\tilde{E}_1 = E_1 + e_1$, $\tilde{E}_2 = E_2 + e_2$ 로 놓으면, 다음과 같은 식들을 유도해낼 수 있다. 단, $\langle u \rangle = \sqrt{u^2}$ 로서 u 의 r.m.s.값이고 K 는 linearizer setting 시의 상수이다.

$$\begin{aligned} (\tilde{U}_{eff})_1 &= \tilde{U} \sin \alpha - \tilde{V} \cos \alpha \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} (\tilde{U} - \tilde{V}) = K \tilde{E}_1 \\ (\tilde{U}_{eff})_2 &= \tilde{U} \cos \alpha + \tilde{V} \sin \alpha \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} (\tilde{U} + \tilde{V}) = K \tilde{E}_2 \\ \tilde{U} &= \frac{K}{\sqrt{2}} (\tilde{E}_1 + \tilde{E}_2), \\ \tilde{V} &= \frac{K}{\sqrt{2}} (\tilde{E}_1 - \tilde{E}_2) \end{aligned} \quad (5)$$

그러므로 우리가 원하는 난류성분은 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} \langle u \rangle &= \frac{K}{\sqrt{2}} (e_1 + e_2), \quad \langle v \rangle = \frac{K}{\sqrt{2}} (e_2 - e_1), \\ \overline{uv} &= \frac{K^2}{2} (e_1 + e_2) (e_2 - e_1) \end{aligned} \quad (6)$$

2.5 실제의 열선유속계

열선유속계 사용자로서의 관점을 설명한다. 열선유속계의 조정에 필요한 것은 과열비설정, 주파수특성 조정, 오프셋 설정 (off set), 교정 등이다. 열선유속계 사용설명서에 의하면 정밀한 과열비를 설정하기 위하여 프로브의 저항을 측정하며, 케이블의 길이에 따른 저항도 측정한다. 과열비의 영향은 감도이다. 적절한 과열비는 1.4~1.6 정도라 한다. 따라서 과열비를 설정하기 위하여 사용자들이 동축케이블 저항 등을 정밀하게 측정하려고 시도하는 예를 많이 보는데, 대부분의 경우에는 필요없다고 생각된다. 왜냐하면 정밀하게 저항값을 측정하여도 과열비값을 1.4~1.6 정도 곱하는 과정에서 의미가 없기 때문이다. 여러 채널을 동시에 사용할 때 같은 감도를 유지하기 위하여 저

항의 정밀측정이 필요하다.

주파수 특성 조정에 관련 되는 것은 인덕턴스와 오프셋 설정 (off set)이다. 과열비가 주파수특성에 중요한 영향을 미치지만 사용자 입장에서는 조정할 수 있는 인자가 아니다. 요즘은 컴퓨터로 제어되는 열선유속계라 할지라도 반드시 인덕턴스를 조정하게 되어 있다. 물론 장치 앞면에 위치하지만 표현은 인덕턴스라고 되어 있지 않으니 참고 바란다. 주파수특성 조정은 난류유동 계측에는 중요하기 때문에 세밀한 주의가 필요하며 자세한 것은 사용설명서를 참고하는 것이 좋다.

총류유동 측정시나 또는 난류유동 측정시라 할지라도 난류성분을 측정하지 않고 평균값만을 측정하는 경우에는 주파수특성 조정을 안하여도 결과에 무관하다는 것을 첨언한다. 그러하면 주파수특성 조정에 들이는 시간을 절약함과 동시에, 조정중 발진이 일어나 프로브가 끊어지는 것을 막을 수 있다.

또한 열선유속계의 단점으로서 주위 유체의 온도변화에 민감하다는 것이다. 즉 주위 유체의 온도가 올라가면 유속계의 출력은 저하한다. 밀폐형풍동을 사용할 때 공기의 온도가 10°C 이상 상승하므로 교정이 필요하며, 하루 중의 온도변화에도 교정하여야 한다.

3. 레이저 도플러 속도계

3.1 기본원리

LDV의 기본 원리는 유체에 수반되어 움직이는 입자로부터 산란된 레이저광의 도플러 편이를 근거로 한다. 움직이는 단일입자로부터 산란된 레이저광의 주파수 f_s 는 입사광 주파수 f_i 와 도플러 편이량 f_D 의 합으로 다음과 같이 표현된다.

$$f_s = f_i + f_D$$

$$= f_i + \frac{\vec{V} \cdot (\vec{k}_s - \vec{k}_i)}{2\pi} \quad (7)$$

여기서, \vec{k}_s 와 \vec{k}_i 는 각각 입사광과 산란광의 파동벡터이고 $|\vec{V}| \ll c$ (c 는 광속)이라는 조건을 사용했다. 입사광 주파수에 비해 편이 주파수의 크기가 상당히 작으므로 해상도의 한계를 갖는 Fabry-Perot 간섭계 등에 의한 직접적인 주파수 측정방법은 매우 높은 속도 (200 m/s 이상)를 제외하고는 사용될 수 없다.⁽¹⁾ 이러한 이유에서 두 개의 다른 입사광을 사용하여 이들로부터 산란된 광선들을 혼합하거나(2중광 방식) 한 개의 기준광과 산란광을 혼합하여(기준광 방식) 도플러 편이(shift)를 구하는 헤테로다인(heterodyne) 검출법이 사용된다. 두 개의 산란광(2중광 방식인 경우) 또는 한 개의 산란광과 기준광(기준광 방식)은 제곱 법칙 광탐지기(square law photodetector)의 표면에서 혼합되어 다음과 같은 광전류를 발생시키게 된다.⁽²⁾

$$i(t) = i_{DC}(t) + i_D(t)$$

$$\begin{cases} i_1(t) + i_2(t) + 2\sqrt{i_1(t)i_2(t)} \cos[2\pi f_D t + \phi] \text{ (단일입자 산란방식)} & (8a) \\ i_1(t) + i_2(t) + 2\sqrt{i_1(t)i_2(t)} \cos[2\pi f_D t + \phi(t)] \text{ (다중입자 산란방식)} & (8b) \end{cases}$$

여기서, $i_{DC}(t) = i_1(t) + i_2(t)$ 이고 정현파를 포함하는 우변항보다 느리게 변화하므로 dc 부 또는 기저부(pedestal part)라 불린다. 정현항에 나타난 도플러 주파수 f_D 는 다음의 식으로 주어진다.

$$f_D = \begin{cases} \frac{u_{sp} \sin(\theta/2)}{\lambda} \text{ (단일입자 산란방식)} & (9a) \\ \frac{u_0 \sin(\theta/2)}{\lambda} \text{ (다중입자 산란방식)} & (9b) \end{cases}$$

여기서, θ 는 레이저광의 교차각이고, λ 는 레이저의 파장이며, u_{sp} 는 단일입자의 측정

체적부 안에서의 측정방향 속도이고, u_0 는 다중입자를 사용할 때 측정체적부에서의 측정방향 순간 대표속도라고 할 수 있다. 식(8b)에 나타난 바와 같이 다중입자에 의해 유체속도를 구현하는 계에서는 위상성분 ϕ 가 시간에 따라 섭동하므로 난류에 의한 속도성분과 위상의 시간 섭동 성분의 주파수가 겹치는 주파수 변조현상(Doppler ambiguity)이 나타나고 이 주파수 변조는 난류강도를 실제유동장의 값보다 증가시키는 역할을 한다. 일반적으로 이해되고 있는 입자가 간섭 프린지를 지날 때 도플러 신호를 발생시킨다는 프린지 모형 해석방법은 위상섭동 등의 현상에는 적절하지 못하다.⁽²⁾

3.2 광학계와 입자 산란 방식

광탐지기에서 혼합된 신호의 강도는 레이저광의 파장이 주어졌을 때 광탐지기의 개구 조리개(aperture stop)의 크기에 반비례하고 산란광의 원점과 수광렌즈의 정점 사이의 각도 ψ 에 비례하는데 도플러 신호가 나올 수 있도록 필요로 하는 "집속조건(coherent condition)"을 만족시켜야 한다. 단일입자가 측정체적부를 지나도록 하여 도플러 신호를 탐지도록 하는 2중광 배열은 상기의 각도 ψ 가 영이므로 집속조건을 위배하지 않고서도 큰 조리개를 이용할 수 있다. 반면 기준광 방식에서 ψ 가 작아지기 위해서는 기준광의 초점 근처에서 산란되어야 하므로 조리개의 크기에 제약을 갖게 된다. 더욱이 2중광 방식은 배치의 간편성과 수광부의 배치와 도플러 주파수와는 무관하다는 점 때문에 현재 가장 널리 이용되고 있다.⁽¹⁾

2중광 배치에서도 다중산란에 의한 광전류 혼합방식을 사용하면 위상섭동에 의해 도플러 주파수변조가 나타나고 준연속신호(quasi-continuous signal)를 만들어내어 통계처리를 할 수 있게 하는 트래커 등에서는 과다 위상섭동에 의해 신호와 트래커 진동자

간의 불일치 또는 긴 도플러 신호 부재 간격 등으로 인한 신호탈락(drop-out)현상이 발생한다. 반면 2중광 배치를 사용하고 단일 입자 산란에 의해 유효 버스트당 한 개의 속도 추출을 하는 단일 실현 방식에서는 위상섭동에 의한 잡음의 문제는 해결되었으나 시간당 신호 추출확률이 평균속도보다 높은쪽으로

치우치므로 통계처리에 속도 편의(velocity bias)라는 장애를 야기시킨다.⁽²⁾

3.3 주파수 편이

현재 대부분 사용되고 있는 LDV는 혼합광들 중 하나의 주파수를 편이시키는 주파수 편이(frequency shift)장치를 갖추고 있다. 주파수 편이기법은 기저부 주파수 제거에 유용할 뿐만 아니라 역방향 유속측정을 가능하게 했으며 측정에 필요한 유효 도플러 주기를 증가시켜 입자의 측정체적부 입사각도에 따른 방향 편이(directional bias), 또는 프린지 편이(fringe bias)의 문제점도 해소시켰다. 주파수 편이 장치로는 이동 회절격자(grating), 초음파 브라그 셀(Bragg cell), 켈 셀(Kerr cell) 등이 있으며 이 중 기계적 운동기구를 갖지 않는 브라그 셀에 의한 40 MHz의 기본 주파수 편이 방법이 널리 이용되고 있다.⁽³⁾ 광탐지기에 의해 검출된 속도와 기본 주파수 편이에 의한 도플러 주파수를 신호처리가 직접적으로 기본 주파수 편이량과 속도신호를 분해하여 처리하기에는 기본 주파수 편이량이 상대적으로 너무 크므로 광탐지기의 검출신호는 감소 혼합회로(downmixer circuit)로 되먹임되어 전기적 주파수 편이 회로에 의해 감소되고 이 감소된 신호는 신호처리로 보내진다.⁽¹⁾

3.4 신호 처리기

트래커형(tracker type) 신호처리기는 광탐지기와의 출력을 추적할 수 있는 대역필터

와 주파수 판별기로 구성되어 있다. 이 형태의 신호처리기는 대부분 다중입자 산란 방식이나 시간당 데이터 추출 횟수가 비교적 큰 경우에 사용되고 신호처리 출력의 형태는 도플러 주파수에 비례하는 전압이다. 트래커의 다중산란입자 신호는 도플러 앰비규어터나 신호탈락 현상등으로 인해 고주파수 난류성분의 추종성 결여와 표준편차 예측의 부정확성 등의 문제를 내포하고 있다.⁽²⁾

카운터형(counter type) 신호처리기는 산란입자 방식의 형태나 데이터 추출율에 관계없이 사용할 수 있으나 트래커가 갖는 단점의 보완을 위해 일반적으로 단일 입자 산란 방식을 사용한다. 이 신호처리기는 미리 지정된 갯수의 도플러 신호의 주기를 재거나 기준 문턱신호 수준(trigger signal level) 이상일 때의 도플러 신호의 전체 주기와 영점교차 횟수를 구하여 도플러 주파수를 도출해내는 방법을 사용한다. 전체적으로 트래커보다 좋은 신호대 잡음비를 갖고 있다.⁽²⁾

4. 정량적인 가시화 기법

최근에 개발된 정량적인 가시화 기법에는 입자 궤적 속도계(PSV; particle srteak velocimetry), 입자 영상 속도계(PIV; particle image velocity), 디지털 영상 속도계(DIV; digital image velocimetry), 그리고 입자 추적 속도계(PTV; partcle tracking velocimetry)방식이 있다.⁽⁴⁾

이러한 속도측정방법의 장점은 전유동장에 대해서 비접촉식의 정량적인 속도 측정 방법이다. 아래에 이러한 방법을 간단히 설명하고 있다.

4.1 입자 궤적 속도계 방법(PSV)

PSV방법은 개념상의 간단함으로 인하여 널리 사용되는 한 방법이다. PSV는 움직이는 유체내의 산란하는 입자를 띄워 필름이나

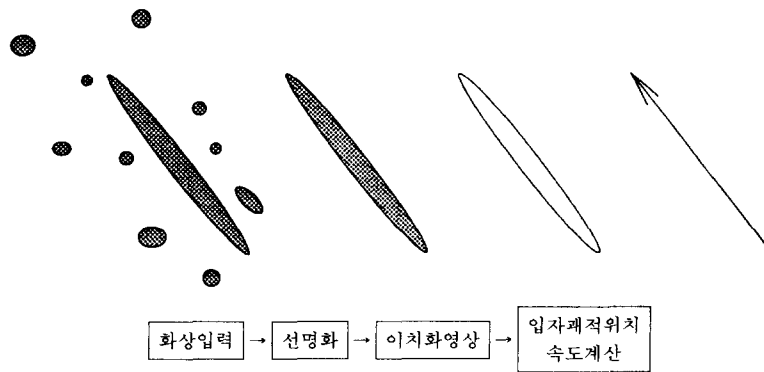


그림 2 입자궤적 속도계 방법의 예

표 1 입자 궤적 속도계 방법의 예

유동	유체	산란 입자	속도 범위	연구자
○ 2-D 혼합층 유동	물	튕밥	$1360 < Re < 2520$	Dimotakis, 1981
○ 사각관 유동	공기	기름방울	$\sim 3.62 \text{ m/s}$	Emrich, 1983
○ 난류수로 유동	물	폴리스틸렌 (0.1~0.5 mm)	$\sim 6 \text{ mm/s}$	Utami & Ueno, 1987
○ 엔진스로틀 유동	공기	나이론 입자 (30 μm)	$\sim 6.5 \text{ m/s}$	Adamczyk & Rimai, 1988
○ 원통내의 와류 유동	물	폴리오리테	65 rpm	Khalighi, 1989
○ 오프셋관 유동	물	폴리오리테 (50~100 μm)	$25 < Re < 4600$	Water & Chan, 1989
○ 난류 유동	물	알루미늄 분말 (5 μm)	$Re = 2872$	Liu, et al., 1991

CCD(charge coupled device)에 입자의 유동에 따른 거동을 기록하는 방법이다. 기록된 영상은 노출시간 동안 입자가 이동한 궤적을 나타낸다. 그림 2는 입자궤적 속도계의 단적인 예를 보이고 있다. PSV에 대한 예는 표 1과 같다.

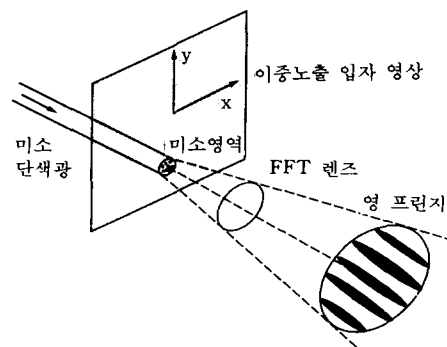


그림 3 영 프린지 기법

4.2 입자 영상 속도계 방법(PIV)

PIV방법은 레이저 스피클 속도계(LSV; laser spackle velocimetry)라 하기도 하며

표 2 입자 영상 속도계 방법의 예

유동	유체	산란 입자	속도 범위	연구자
○버나드 대	물/글리세린	라텍스 페인트 (0.01 ml per l)	Ra=O(105)	Simpkin & Duderar, 1978
○저유속 제트 유동	공기	기름방울 (10~30 mm)	Re=2300	Meynart, 1983
○영각을 갖는 에어포일 비정상 유동	공기	TSI model 10087 (4 μm)	Re=1400	Lourenco & Krothapalli, 1986
○제트 유동	물	프라스틱 구 (10 μm)	0.5~50 mm/s	Landreth & Adrian, 1988
○케비테이션 방울의 비정상 유동	물	베스타미드 (25 μm)	2~30 m/s	Vogel & Lauterborn, 1988
○테레스트리알 유동	물	그라시어 (10~25 m)	0.3~0.7 m/day	Conley & Cloud, 1989
○터빈 날개 유동	공기	알루미늄 분말 (5 μm)	60~340 m/s	Post, et al., 1991

속도장을 구하기 위하여 하나의 영상에 다중 노출을 시도하여 일정한 시간 간격에서의 입자 영상을 이용하여 영프린지 원리(Young's fringe principle)를 이용한 방법이다. PIV의 특징은 하나의 화면에 단일 노출의 영상을 이용하는 방법이다. PIV는 영상을 미소영역(interrogating windows, 30×30 pixels)으로 나누며 이러한 영역내의 입자의 변위와 시간간격으로부터 영프린지 원리를 적용한 광학적인 속도측정방법이다. 그림 3은 이중노출영상으로부터 영프린지를 형성하는 방법을 보이고 있다. 미소영역내의 입자쌍에 의한 광학적인 푸리에 변화를 이용하여 영프린지를 형성하며 프린지의 간격으로부터 미소영역내의 속도를 구한다. 표 2는 PIV방법에 대한 연구를 요약하고 있다.

4.3 디지털 영상 속도계 방법(DIV)

일정한 시간간격의 단일한 노출이 주어진 연속적인 영상을 CCD카메라로 획득한다.⁽⁵⁾ 획득된 영상은 A/D변환기를 통하여 디지털

영상으로 변환하여 저장되어 처리되다.⁽⁶⁾ DIV의 장점은 단일한 노출에 의한 영상만의 정보로 속도장의 벡터를 결정할 수 있다. DIV의 예는 표 3에 예시하고 있다.

4.4 입자 추적 속도계 방법(PTV)

PTV는 단일한 노출이 주어진 연속적인 영상에서의 일대일 대응하는 입자를 추적하는 방법이며 2차원뿐 아니라 3차원 속도장의 해석이 가능하다.⁽⁷⁾ 유동장내의 균일하게 분

표 3 디지털 영상 속도계 방법의 예

유동	유체	산란 입자	속도 범위	연구자
저유속 와류환	물	폴리스틸렌 (80 μm)	Re=1050	Willert & Gharib, 1991
난류개방 관유동	물	폴리스틸렌 (400 μm)	Re=3900	Utami & Blackwelder, 1991
육면체챔버 내의 유동	물	폴리오릿	Re=298	Chen, 1991

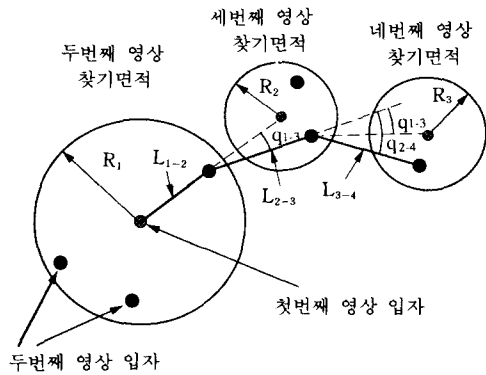


그림 4 다중 입자 추적방법

표 4 입자 추적 속도계 방법의 예

유동	유체	산란 입자	속도 범위	연구자
3-D 유동장	공기	나이론	6.4 m/s	Adamczyk & Rimai, 1988
층류쿠대 유동	물	나이론 12 (<280 mm)	Re = 690, 556	Nishino, et al., 1989
와류 붕괴유동	물	나이론	Re=1776	Uemura, et al., 1993

포된 추적 입자의 3차원 움직임을 측정하기 위하여 두 개 또는 세 개의 CCD카메라의 임의의 방향에서의 관찰을 통하여 이루어진다. 주어진 시간 간격내에 각각의 영상을 저장한다. 각 영상의 해석을 통하여 3차원에서의 입자의 위치를 찾고 입자 궤적의 변위를 계산하여 주어진 시간간격으로 나누어 속도를 계산한다.

LDV의 한계는 하나의 점에 대한 2-D 또는 3-D에 대한 속도의 시간에 따른 정보를 획득하기 위하여 상대적으로 복잡한 광학적인 방법을 이용한다. 또한 전유동장에 대한 속도를 구하기 위해서 유동장을 통한 각각의 점에 대한 반복적인 측정이 요구된다. 그러나 PTV방법은 전유동장에 대한 비접촉, 정량적인 가시화 기법에 의한 속도장 측정방법이다. 그림 4는 다중입자 추적에 대한 방법이며 연속적인 영상의 입자들 간의 거리와

각도에 대한 통계적인 방법에 의해 입자들을 추적하여 속도를 구하는 방법을 보이고 있다. PTV에 대한 예는 아래의 표 4에서 보이고 있다.

참고문헌

- (1) Goldstein, R. J., 1983, *Fluid Mechanics Measurements*, Hemisphere Publishing Corp., pp. 155~244.
- (2) Buchhave, P., George, W. K. Jr. and Lumley, J. L., 1979, "The Measurement of Turbulence with the Laser-Doppler Anemometer," *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 11, pp. 443~503.
- (3) Durst, F., Melling, A. and Whitelaw, J. H., 1981, *Principles and Practice of Laser-Doppler Anemometry*, Academic Press.
- (4) Adrian, R. J., 1986, "Image Shifting Technique to Resolve Directional Ambiguity in Double-Pulsed Velocimetry," *Applied Optics*, Vol. 25, pp. 3855~3858.
- (5) Hesselint, L., 1988, "Digital Image Processing Flow Visualization," *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 20, pp. 421~485.
- (6) Willert, C. E. and Gharib, M., 1991, "Digital Particle Image Velocimetry," *Exp. in Fluids*, Vol. 10, pp. 181~193.
- (7) Hassan, Y. A. and Blancat, T., 1991, "Full-Field Bubbly Flow Velocity Measurements Using a Multiframe by Digital Image Pulsed Laser Velocimetry," *Exp. in Fluids*, Vol. 11, pp. 293~301.
- (8) Smol'yakov, A. V. and Tkachenko, V. M., 1983, *The Measurement of Turbulent Fluctuations*, Springer-Verlag.
- (9) Doebelin, E. O., 1990, *Measurement Systems-Application and Design*, 4th Edition, McGraw-Hill.
- (10) Goldstein, R. J., 1983, *Fluid Mechanics*

- Measurements*, Springer-Verlag.
- (11) Hinze, J. O., 1975, *Turbulence*, 2nd Edition, McGraw-Hill.
- (12) Perry, A. E., 1982, *Hot-wire Anemometry*, Oxford University Press.
- (13) Taslim, M. E., Kline, S. J. and Moffat, R. J., 1978, *Calibration of Hot-wires and Hot-films for Velocity Fluctuations*, Stanford University.
- (14) Holman, J. P., 1984, *Experimental Methods for Engineers*, 4th Edition, McGraw-Hill. ㉔