

이중광축을 이용한 레이저 도플러 속도측정계**

(Fiber optic sensors 시스템 기술개발연구)

이 형 중 김 진 승 *
전북대학교 물리학과
조 재 철 최 상 삼
한국 과학기술원 응용광학연구실

초 록

레이저 도플러 효과를 써서 유체 또는 작은 입자의 속도를 잴 수 있는 레이저 도플러 속도측정 장치를 만들었다. 광학계는 레이저 광축을 두 갈래로 나누어 다시 마주치게 하여 두 광축이 겹치는 곳에, 평행한 삼차원 간섭무늬가 생기도록 꾸몄다. 분무기로 작은 물방울을 만들어 두 광축이 겹치는 곳을 지나게 했더니 깨끗한 도플러 신호를 얻을 수 있었다.

1. 서 론

유체의 속도는 압력, 밀도와 더불어 흐르는 유체의 특성을 나타내는 아주 중요한 변수이다. 특히 유체동역학의 주된 문제는 주어진 경계조건과 초기조건 속에서 유체가 흐르는 속도의 분포를 이론적으로 셈하고 실험을 통해 제어 확인하는 일이다.

유속을 잴 방법은 1)뜨거운 철사(hot wire)를 쓰는 방법 2)얇은막(thin film)을 쓰는 방법 3)빛을 쓰는 방법등이 있다.¹⁾ 이 가운데 빛을 쓰는 방법은 움직이는 물체가 빛을 산란시킬 때 산란된 빛의 진동수가 물체의 운동속도에 따라 바뀌는 도플러 효과를 이용한 것이다. 이 방법은 다음과 같은 좋은 점이 있어 투명한 유체의 속도를 잴 때는 가장 많이 쓰이고 있다. 첫째로 이 방법은 유체의 자연스러운 흐름을 흐트리지 않는다. 1),2)의 방법은 속도를 잴 곳에 속도감지기를 밀어 넣어야 하며 이에 따라 감지기 주위의 흐름이 흐트러지기 쉽다. 그러나 빛의 진행은 유체의 흐름을 방해하지 않으므로 유체가 투명하여 빛이 이를 수 있는 곳은 어디든 빛을 보내 어 그 곳의 유속을 잴 수 있다. 둘째로 얻어진 신호로 부터 유속을 셈할 때 따로 보정할 필요가 없다는 점이다. 1),2)의 방법은 같은 유속에 대한 신호값이 유체의 온도, 압력에 따라 바뀌므로 잴 때는 조건이 달라질 때 마다 보정을 해야한다. 그러나 도플러 효과는 그러한 유체의 변수와는 관계 없으므로 보정할 필요가 없다. 셋째로는 유속의 각 벡터성분을 따로 따로 잴 수 있다는 점이다. 거의 모든 실험조건에서 성립하는 비상대론적 한계 안에서는 도플러 효과에 의한 산란된 빛의 진동수 변화는 들어오는 빛의 진행방향에 나란한 속도성분에만 비례한다. 따라서 광학계의 배치에 따라 재어지는 속도성분이 유일하게 결정된다. 넷째로는 시,공간 분해능이 좋다는 점이다. 시간분해능은 ** 이 발표논문은 과학기술처 특정연구 과제와 관련입니다.

광검출기에서 나오는 신호를 처리하는 데 걸리는 시간으로 제한되며 보통은 백분의 일초 이하이다. 공간분해능은 빛을 집속시킨 초점의 크기로 정해지는데 보통은 수십-1 μ m 이다. 이러한 분해능은 1),2)의 방법으로는 얻을 수 없는 특성이다. 다만 빛을 쓰는 방법은 유체가 너무 불투명하면 쓸 수 없고, 장치가 비교적 비싸다는 단점이 있다.

2. 이 론

빛의 도플러 효과를 써서 유속을 재는 레이저 도플러 속도계측장치는 크게 1)레이저광을 보내고 산란광을 모으는 광학계통부 2)광원과 광검출기 3)광검출기에서 나오는 광전류신호를 처리하여 속도를 세하는 신호처리부로 이루어진다.

광학계통부는 레이저 광을 보내고 산란광을 모아 받는 방법에 따라 그림 1과 같이 1)교차 이중 광속 (Crossed dual beam), 2)기준 광속 (Reference beam), 그리고 3)이중 산란광 (Dual scatter) 의 세가지 모양이 있는데, 이 가운데 가장 많이 쓰이는 것이 신호대 잡음비가 가장 높은 첫번째의 교차 이중 광속 모양이다.

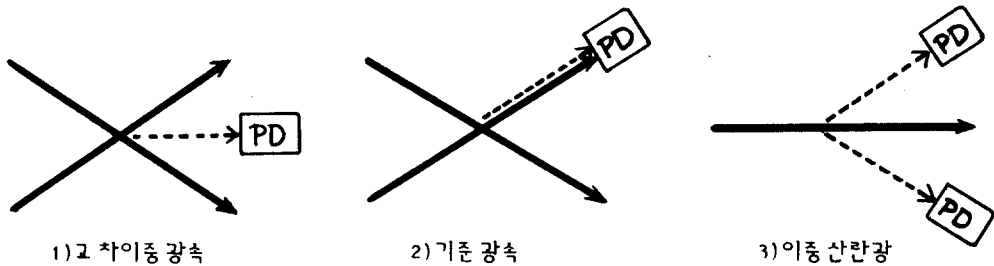


그림 1. 광학계통부의 모양에 따라 나눈 레이저 도플러 속도계측장치의 종류.
 ————— 레이저광속, - - - - 산란된 빛

교차 이중 광속 모양에서는 하나의 레이저에서 나온 광속을 두 갈래로 나눠 보내서 유체 속의 속도를 재야할 곳에서 다시 마주치게 한다. 두 레이저 광속이 만나면 두 광속이 겹치는 곳에는 영의 간섭무늬가 삼차원적으로 생긴다. 이때 빛의 밝기가 일정한 곳들은 두 광속의 교차각의 이등분선에 나란한 평면들을 이루고, 서로 이웃하는 밝기가 같은 평면 사이의 거리 d 는

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \frac{\theta}{2}} \quad (1)$$

가 된다. 여기서 λ 는 레이저에서 나오는 빛의 파장, θ 는 두 광속의 교차각이다(그림 2).

이러한 간섭무늬가 만들어진 곳을 지름이 간섭무늬 간격보다 작은 입자가 지나가게 되면, 그 입자가 밝은 곳에 있을 때는 산란된 빛이 밝고 어두운 곳에 있을 때는 산란된 빛도 어두워진다. 그러므로 산란된 빛의 밝고 어두움이 바뀌는 속도는 입자가 간섭무늬를 가로 지르는 속도에 비례한다.

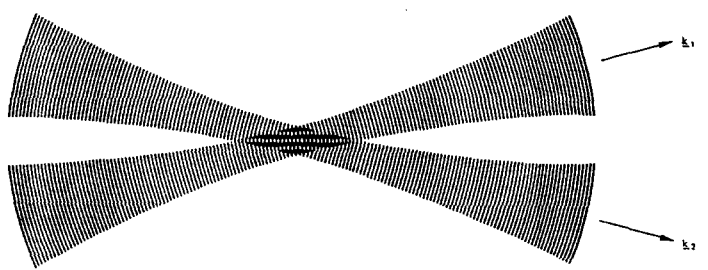


그림 2. 서로 엇갈리는 두 레이저 광속이 겹치는 곳에 만들어지는 간섭무늬의 모양.

유체를 따라 움직이는 입자의 속도벡터를 u , 서로 마주치는 두 광속의 전파벡터를 k_1, k_2 라 하면 입자가 산란시킨 빛의 밝기는 진동수

$$f_D = \frac{(k_1 - k_2) \cdot u}{\pi} = \frac{2 \sin \frac{\theta}{2}}{\lambda} u_x \quad (2)$$

의 사인함수꼴로 변한다. 그러므로 산란된 빛의 밝기가 변하는 모양을 제어 유속을 셈할 수 있다.

광검출기에서 나오는 전류신호의 신호대 잡음비를 높이려면, 산란된 빛을 될 수 있으면 많이 모아 광검출기에 보내고 다른 빛은 들어가지 못하게 해야한다. 그러기 위해서는 볼록 렌즈를 써서 두 광속이 마주친 곳의 상이 광검출기의 감지면(sensor area)에 생기도록 하고, 그 상을 맺는 빛만이 광검출기에 들어가도록 한다.

산란된 빛은 그 방향에 따라 전방산란광과 후방산란광으로 나눌 수 있는데, 레일리 산란에서는 앞,뒤로 산란되는 빛의 밝기가 같지만 미산란에서는 앞쪽으로 산란된 빛이 뒤쪽으로 산란된 빛 보다 훨씬 밝다. 따라서 앞쪽으로 산란된 빛을 모아 광검출기로 보내야 더 좋은 신호대 잡음비를 얻을 수 있다. 그렇지만 앞쪽으로 산란된 빛을 모으려면 유체를 사이에 두고 광속전달부와 산란광수집부가 완전히 떨어져 있게 되어 위치를 바꾸어가며 유체속의 여러 곳의 속도를 재는 데는 어려움이 많아진다. 뒤로 산란된 빛을 모아 광전류로 바꾸게 되면 산란된 빛을 이용하는 효율은 떨어지지만 레이저 광속을 고차시키는 데 쓴 렌즈를 그대로 산란된 빛을 모으는 데도 쓸 수 있어 광학계통부를 한 몸으로 만들 수 있으므로 장치구성이 훨씬 작고 단순해진다. 그러므로 유체 속의 여러 곳의 속도를 재는 데는 뒤쪽으로 산란된 빛을 쓰는 것이 편리하다.

거의 모든 레이저 도플러 속도계측기에서 광원으로는 나오는 빛의 파장선평이 좁아 색깔이 순수하면서도 출력이 높아 밝으며, 빛이 퍼지지 않고 모여 진행되는 레이저를 쓴다. 여러가지의 레이저 가운데 어느 하나를 고르는 기준은 유체 속의 작은 입자가 산란시키는 빛의 밝기(산란도율)과 산란된 빛의 색깔에 따라 광검출기에서 나오는 전기신호의 크기(파장감도 : spectral responsivity) 그리고 레이저에서 나오는 빛의 밝기등이다. 투명한 유체 속에서 산란되는 빛은 주로 그 안에 든 지름 $0.1 \mu\text{m}$ 에서 수 μm 에 이르는 작은 입자에 의한 것인데, 레일리 산란(Rayleigh scattering)

의 산란효율은 파장이 네제곱에 역비례하고, 미산란(Mie scattering)의 산란효율은 문제가 되는 크기 외 입자에서는 파장의 제곱 정도에 역비례한다²⁾. 따라서 산란광의 밝기를 생각하면 적외선 보다는 자외선이나 가시광선이 나오는 레이저가 좋다. 광검출기로는 광증폭기(Photomultiplier) 또는 반도체 광다이오드를 많이 쓰는데, 광증폭기가 잘 반응하는 빛의 파장범위는 300-650 nm 정도, 광다이오드가 잘 반응하는 파장범위는 430-1140 nm 정도이다(그림 3).

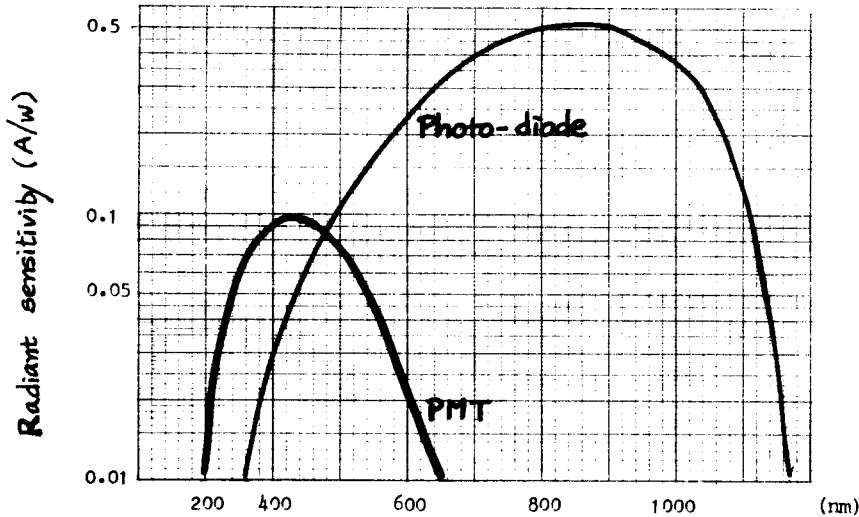


그림 3. 광증폭기와 광다이오드의 파장 감도

따라서 검출기로 광증폭기를 쓸 때는 자외선이나 가시광선 레이저를 쓰는 것이 좋고, 광다이오드를 쓸 때는 가시광선이나 적외선 레이저를 쓰는 것이 좋다. 출력이 높고 빛이 연속으로 나오는 레이저는 가시광선쪽에 아르곤이온(488 nm, 514 nm), 크립톤이온(647 nm) 그리고 헬륨 네온 레이저(633 nm)가 있고, 적외선쪽에 반도체다이오드 레이저(800 nm, 1300 nm), 네오 다임 야그 레이저(1.06 μm)가 있다. 그러므로 아르곤이온, 크립톤이온 또는 헬륨 네온 레이저를 광원으로 하고 광증폭기나 광다이오드를 광검출기로 쓰거나 반도체다이오드 또는 네오 다임 야그 레이저를 광원으로 하고 광다이오드를 광검출기로 써서 레이저 도플러 속도 측정장치를 만들 수 있다.

신호 처리장치는 진동수 추적형과 계수형의 두 가지가 있다. 진동수 추적형은 유체속에 산란입자들이 비교적 많이 들어서 두 광속이 고차하여 간섭무늬가 생긴 곳에 거의 언제나 한개 이상의 입자가 들어 있게될 때 쓰인다. 이때는 산란된 빛이 잇달아 나오므로 광검출기에서도 전류신호가 잇달아 나오고, 이 전류신호의 진동수는 식(2)에 따라 산란입자가 간섭무늬를 가로질러가는 속도에 비례하므로 전류신호의 진동수를 추적하면 유속의 변화를 알 수 있다. 이와는 반대로 산란입자가 비교적 적으면 때로는 두 광속이 마주친 곳에 입자가 없게되고, 이때는 광검출기에서 전류신호도 나오지 않으므로 진동수 추적법을 쓸 수 없다. 이러한 때는 이따금씩 하나의 입자가 간섭무늬를 가로지를 때 마다 나오는 한 무리의 광전류신호에서 밝기가 변하는 주기를 재어, 그로부터 입자의 속도를 셈하고 이것을 여러번 되풀이 하여 평균속도를 셈한다.

3. 실험

레이저 도플러 속도측정장치를 구성하여 성능을 시험하였다. 실험과정은 다음의 세단계를 이루어졌다.

- 가. 고차이중광속 모양의 광학계 구성
- 나. 광속 고차점에서의 간섭무늬 관찰
- 다. 도플러 광전류 신호의 관찰

가. 고차이중광속 모양의 광학계의 구성

프리즘 광속 분할기와 대구경렌즈($\phi 50$ mm, $f 300$ mm)를 써서 고차이중광속모양의 광학계를 구성하였다. 광학계의 배열은 그림 4와 같다. 헬륨 네온 레이저에서 나온 빛은 광속분할 프리즘을 지나면서 밝기가 같은 두 개의 광속으로 갈라져 나란히 진행한다. 나란한 이 두 광속은 볼록렌즈를 지나면 그 초점에서 마주친 다음 다시 갈라진다. 이 마주친 곳에서는 두 광속이 간섭하여 정지상태의 간섭무늬가 만들어진다.

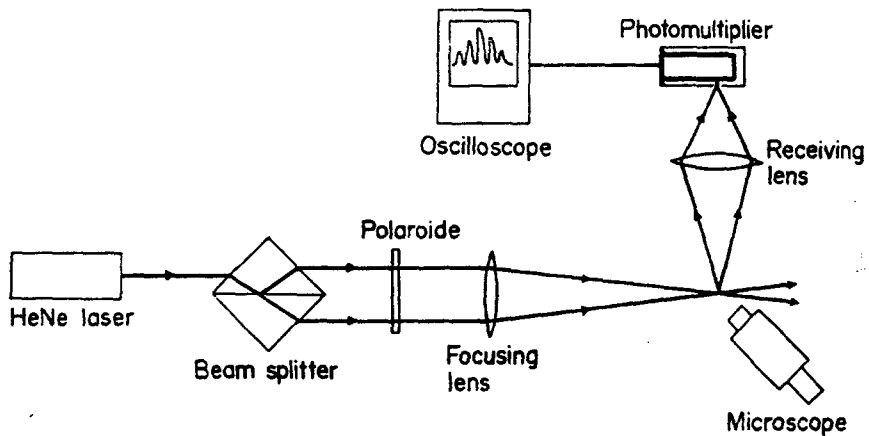


그림 4. 고차이중광속형 레이저 도플러 속도측정계의 장치배열 그림.

나. 광속 고차점에서의 간섭무늬의 관찰

신호대 잡음비가 좋은 도플러 광전류 신호를 얻으려면 두 광속이 겹쳐질 때 생기는 간섭무늬가 뚜렷해야 한다. 간섭무늬의 뚜렷함을 보기 위해 광속의 겹치는 곳에 흰종이를 두고 현미경으로 간섭무늬를 관찰했다. 간섭무늬가 뚜렷하지 않을 때는 편광판을 돌려가며 간섭무늬가 가장 뚜렷한 상태에 이르도록 하였다. 그림 5은 간섭무늬의 현미경 사진이다.

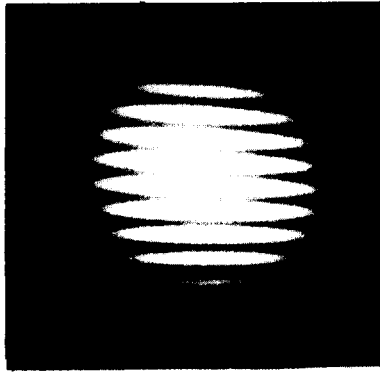


그림 5.

다. 도플러광전류 신호의 관찰

두 광속이 만나는 곳에 생기는 간섭무늬가 가장 뚜렷해지도록 두 광속의 편광상태를 맞춘 뒤, 분무기로 물을 뿌려 작은 물방울이 측정점을 지나게 하였다. 작은 물방울이 간섭무늬를 가로지를 때 산란된 빛을 $\phi 50 \text{ mm}$ $f100 \text{ mm}$ 의 렌즈로 모아 광증폭기에 넣고, 광증폭기에서 나오는 전류신호를 오실로스코프로 관찰하였다. 그 결과 신호대 잡음비가 좋은 도플러 신호가 얻어짐을 볼 수 있었다.

4. 토 의

고차이종광속모양의 레이저 도플러 속도 측정장치를 꾸미고, 두 광속이 겹쳐 간섭무늬를 만든 곳에 작은 물방울이 지나갈 때 깨끗한 도플러 광전류 신호를 얻었다. 이 장치에서는 렌즈, 광속분할 프리즘등을 썼는데, 앞으로는 광섬유를 쓰고, 광원으로는 레이저 다이오드, 광검출기로는 광다이오드, 그리고 광전류신호를 처리하는 데는 소형전자계산기를 쓸 수 있도록 연구를 계속해야 할 것이다⁴⁾.

참 고 문 헌

1. F.O.Schulz-DuPois ed., Photon Correlation Techniques in Fluid Mechanics (Springer-Verlag, Berlin, 1983).
2. M.Porn and F.Wolf, Principles of Optics (Pergamon, London, 1975).
3. Technical Data Sheet, Hamamatsu Photonics k.j.k., Japan.
4. P.W.Forder, C.N.Pannell, J.D.C.Jones, D.A.Jackson and R.G.W.Brown, "Design of fiber optic probes for laser anemometry", Second International Conference on Laser Anemometry (21st-23rd Sept. 1987, Strathclyde, U.K).