

熱 · 流體 測定技術

李 東 鎬

<서울대학교 航空工學科>

1. 서 론

70 년대 들어서면서 적지 않은 규모의 외국차관이 국내의 교육기관 및 연구소등에서 실험시설 확충 및 측정기기 도입을 위하여 도입되었으며, 이에 따라 매우 낙후되었던 실험시설 및 기기등의 수준이 최근들어 급격히 향상된 것은 매우 다행스런 일이 아닐 수 없다. 그러나 지난 날의 부족했던 실험시설속에서 공과교육을 받았던 우리들에게는 최선의 실험시설 및 측정기기등을 선정하여 도입, 설치하는데 적지 않은 문제점을 제기하였으며 고가의 장비를 이용하는데도 많은 어려움이 뒤따랐다. 이러한 점을 고려하여 열·유체 분야에서 연구 및 교육에 종사하는 회원들이 기존 도입시설을 사용하거나 혹은 부족기기를 보충하고 새로운 장비를 선정, 도입코저 할 때 조금이나마 도움이 되었으면 하는 생각에서 어느 특정 기기보다는 온도, 압력 및 속도등 기본 측정에 대하여 총괄적으로 실제적인 면을 생각하며 설명하고자 노력하였다.

2. 본 론

본 해설에서는 열·유체실험의 기본을 이루는 온도, 압력 및 속도등을 측정하고자 할 때 필요한 측정기기, 측정방법의 여러 종류와 각 측정법간의 차이 및 장단점등을 설명하였다.

2.1. 온도측정

일반적으로 가장 널리 쓰이고, 신뢰성있는 온도측정법은 열전대(thermocouple)를 사용하는 것이다. 이 방법은 임의의 두 전기적으로 서로 다른(thermoelectrically dissimilar) 두 금속선의 양끝을 각각 연결하여, 두 연결부분을 온도가 다른 곳에 위치시킬 때 두 지점의 온도차에 거의 선형적으로 비례하는 기전력(EMF)이 열전대 내부에 발생하는 성질을 이용하는 것이다.

표 1에 일반적으로 많이 사용되는 열전대들의 재료들에 대하여 호칭형식(type), 색코오드, 사용온도범위 및 출력등을 나타내었다. 열전대의 두 가지 재료 이름중 앞의 재료가 \pm 쪽을 나타내며, 이들은 보통 0.1mm 이하에서 부터 1mm 정도까지의 직경을 가지고 있으며 나선(bare wire)형태, 혹은 유연한 절연물질로 피복된 복선(insulated pairs of wire)형태로 구할 수 있다. 한편 고온측정을 위하여 특별히 여러 크기의 스테인레스관속에 산화마그네슘(MgO)등과 같은 광물질로 절연되어 봉합된 상태로 공급되기도 한다.

열전대를 사용할 시 예전에는 기준온도(reference temperature)점으로 물에 얼음을 띄워 0°C를 유지시키는 방법이 많이 사용되어 왔으나, 근년에는 이럴 필요가 없이 수치온도계(digital thermometer)를 사용할 경우 내부 전자회로에서 기준온도를 일정하게 유지시켜 주므로 단지 사용하는 열전대의 형식(S, K-type 등등)에 해당

되는 선택스위치를 켜주기만 하면 되므로 매우 편리하다. 현재 약 1,500\$ 정도면 다중채널을 지니고, 여러 종류의 열전대 형식에 따라 원하는 온도스케일(화씨(°F) 혹은 섭씨(°C))로 수치적 온도값을 나타내며, 동시에 아나로그 혹은 디지털로 다른 자료수집 처리 장치와 연결 가능한 시스템을 구입할 수 있으므로 신속, 정확하게 수많은 측정점의 온도를 재기 위하여 기본적으로 필수적인 기기라 생각된다.

열전대 사용시 유의할 사항들은 온도측정부위와 측정기기간의 거리가 먼 경우 열전대로 전구간을 모두 연결치 말고 대부분의 거리를 구리선으로 매치할 경우 비싼 열전대를 절약할 수 있다는 점과, K-형식 열전대를 사용할 시 외력에 의한 변형으로 부터 발생하는 기전력(strain-induced EMF)에 의한 오차 및 J-형식을 이용하여 전도성유체 내부 실험시에 발생하는 기전력(galvanic EMF generation)등에 주의하여야 할 것이다. 한편 물체 표면의 온도 혹은 압축성 고속 유동장내의 온도분포등을 측정코자 할 때는 측정센서 제작 및 설치에 특별한 주위가 요구된다⁽¹⁾.

표 1 열전대 재료특성

ISA* 형식	ISA 색 코오트	구 성 성 분	최대온도	출 력 mV/ 100°K
		(60%로듐+40%이리듐) vs. 이리듐	2300°K	0.54
S		(90%백금+10%로듐) vs. 백금	1760°K	0.90
K	황색-적색	크로멜-알루멜	1530°K	4.1
E	자주색-적색	크로멜-콘스탄탄	1140°K	7.2
J	흰색-적색	철-콘스탄탄	1030°K	5.4
T	청색-적색	구리-콘스탄탄	640°K	5.4

*ISA : 미국기기학회(Instrument Society of America)

2.2. 압력측정

(1) 액주계(Manometer)

U형 유리관내의 액주의 높이차를 이용하는 액

주계는 고전적인 압력측정법으로, 저렴한 가격에 전원없이 어느 곳에서나 용이하게 직접 제작하여 사용할 수 있으며 압력의 크기를 눈으로 볼 수 있어 아직도 많은 실험실에서 사용되고 있다. 이러한 액주계를 사용할 시 기본적으로 유의할 점은 사용액체의 비중을 정확하게 알고 있어야 하며, 제한된 짧은 시간내에 측정을 끝내야 하는 경우 측정점과 액주계의 연결은 가능한 한 직경이 작고 짧은 튜브를 사용하고 액주계 자체의 내경도 작아야 한다. 그러나 액주계를 이용하여 낮은 압력을 측정하는데 어려움이 많은데 이는 예를들어 풍속 5m/sec 정도의 저속도를 측정할 때 나타나는 풍압은 수주높이로 겨우 1.5mm 밖에 되지 않는 것을 생각하면 될 것이다. 이러한 경우 액주를 경사시켜 측정배율을 늘린 경사액주계(inclined manometer)를 많이 사용하며, 보다 정밀한 측정을 요하는 경우 전기접촉식 정밀액주계를 사용하여야 한다. 한편 여러 지점의 압력을 동시에 측정하고자 다관액주계(multi-manometer)를 직접 제작 사용할 때 액체 저장탱크의 기준수면이 변하는 점을 고려할 수 있도록 하여야 하며 한 순간의 동시 측정을 위하여 사진촬영 후 눈금을 판독하면 보다 정확한 측정을 할 수 있을 것이다.

(2) 압력변환기(Pressure Transducer)

일반적으로 대부분의 측정기기 출력은 전기적 형태로 나오므로써 여러가지 데이터 수집 및 기록장치등을 사용하여 많은 양의 측정자료를 처리할 수 있는데, 이런 면에서 볼 때 위에서 설명한 액주계는 매우 불편한 방법이므로 압력의 크기를 전기적 신호로 바꾸어주는 압력변환기를 사용하게 된다.

압력변환기는 그 작동원리에 따라 10여가지의 종류들이 있지만 압력에 의한 기계적 변형을 스트레인 게이지(strain gage)를 이용하여 전기적 출력으로 바꾸는 스트레인 게이지 형식과 특정 재료의 결정체가 압력을 받을 경우 전기적 출력을 내는 성질을 이용하는 피에조엘렉트릭(piezoelectric)형식등이 가장 널리 쓰이는 종류들이다. 이들에 대한 선정은 측정정밀도, 측정압

◆ 講 座

력범위, 주파수 응답특성, 허용온도, 센서의 크기, 내충격성 그리고 가격등에 따라 결정된다. 이 두 형식간의 상대적인 성능 및 특성등을 표 2에 비교하여 나타내었으며, 이와 더불어 낮은 압력의 초정밀 측정에 사용되는 카파시티브(capacitive) 형식도 나타내었다. 카파시티브 형식은 정밀도가 매우 높으나 센서의 크기가 대형이며 가격이 비싸며, 피에조엘렉트릭 형식은 그 어느 종류보다 높은 주파수 특성을 갖고 소형이어서 섭동압력(fluctuating pressure)을 측정하는데 필수적이다. 한편 스트레인게이지 형식은 적당한 가격과 우수한 특성으로 인하여 가장 널리 사용되는데 이는 스트레인 게이지가 여러 공학분야에서 사용되므로 필요한 증폭기등을 주위에서 손쉽게 구할 수 있기 때문이기도 하다. 이상과 같은 압력변환기들이 측정하는 압력은 제조 방식에 따라 절대압력(absolute pressure), 혹은 대기압을 기준으로 상대적 압력인 계기압력(gage pressure), 그리고 압력변환기에 연결되는 두

압력의 차를 나타내는 차등압력(differential pressure)등이 있는 데 사용목적에 맞게 선정하여야 할 것이다.

한편 수십개의 압력측정을 짧은 시간내에 수행하여야 할 경우가 많은 데 이 때 각 채널마다 별개의 압력변환기로 증폭기등을 사용한다면 수십세트의 압력변환기가 필요하고 또한 각 채널간의 측정오차도 일정치 않을 것이다. 이러한 경우 수십채널의 압력측정용 튜우브와 하나의 압력변환기를 순서적으로 돌아가며 자동적으로 연결해 주는 스캐니밸브(scani valve)를 이용하면 단시간에 동일한 측정오차를 갖고 수십점의 압력을 잴 수 있어 유체실험실에 필요한 기본장비라 생각된다.

끝으로 사소하면서도 중요한 측정압력범위의 선정을 위하여 예를들어 설명하면 풍속 0~100 m/sec의 공기 실험시 압력변환기의 압력 범위는 1psi 혹은 0.05기압 (1기압 \approx 1kg/cm²)이면 충분하다는 점을 지적하고 싶다.

표 2 압력변환기의 종류 및 특성⁽²⁾

종 류	전원공급	출력레벨	측정오차	측정압력범위	주파수응답특성	허용온도범위	치 수(인 치)	내충격및내진동특성	가 격	
카 파 시 티 브	AC-DC 전 용	높음 5볼트	0.05%	0.01~200psi	0~100 Hz	0~165° F	2×3	나쁨	\$ 1500~3000	
피에조엘렉트릭 (Piezoelectric)	DC 앰프 자기 AC	중간 with Amp.	1%	0.1~10Kpsi	1~100 KHz	-450~+400° F	1/4×1	제일 좋음	\$ 300~500	
스트레인게이지	접착되지 않는 형태	AC-DC 전압조정된 10V AC-DC	낮음 4mV/V	0.25%	0.5~10Kpsi	0~2 KHz	-320~+600° F	3/4×1 1/2	좋음	\$ 180~500
	접착형포일(foil)	10V AC-DC	낮음 3mV/V	0.5%	5psi~10Kpsi	0~1 kHz	-65~+250° F	1 1/4×1 1/2	매우 좋음	\$ 180~400
	얇은필름	10V AC-DC	낮음 3mV/V	0.25%	15psi~5Kpsi	0~1 kHz	-320~+525° F	1×2	매우 좋음	\$ 250~700

2.3. 속도측정

유동장내의 속도분포를 측정하는 방법에는 여러가지가 있으나 피토히관, 열선풍속계(hot-wire anemometer) 및 레이저 속도계(Laser Doppler velocimeter)등을 이용하는 세가지 방법이 가장 널리 쓰이는 방법들이나, 피토히관으로는 평균속도만을 잴 수 있으며 난류속도 성분을 재

기 위하여는 열선풍속계나 레이저속도계등을 꼭 이용해야 한다.

(1) 피토히관

이 방법은 액주계와 함께 오래전부터 사용되어 온 고전적인 방법이지만, 압력변환기와 센서 자동이송장치(automatic traversing system)를 이용하는 경우 평균속도 분포를 측정 하는데 다루기 용이하고 매우 신뢰할 수 있는 측정법이다.

보통 전압(total pressure) 측정은 용이하나 동일지점에서의 정압(static pressure)측정에는 실험에 따라 어려움이 있는 경우도 적지 않다. 예를들어 경계층 혹은 곡면벽상의 벽제트(wall jet) 내부에서 속도분포를 얻고자 정압을 측정할 때는 세심한 주의가 필요하다.

(2) 열선풍속계(hot wire anemometer)

열선풍속계의 원리는 매우 간단하다 금속선을 전기적으로 가열한 뒤 유동장내에 위치시켰을 때 주위 유동과 열선간의 열전달 현상이 속도의 함수로 나타나는 원리를 이용한 것으로, 일정 전압(constant current anemometer)형식과 일정 온도(constant temperature anemometer : CTA)형식 두 가지가 있으며 온도의 난류성분을 재는 경우 이외에는 높은 주파수 특성을 쉽게 얻을 수 있고 사용법이 간단한 CTA형식이 많이 사용된다. 이에 관한 자세한 이론적 설명은 본 저자가 이미 본 학회지에 기고한 바 있어 이를 참조하기 바란다⁽³⁾.

그리고 난류성분 측정시 레이놀즈응력 $\overline{\rho u'v'}$ 등과 같은 상관계수(correlation coefficient)를 측정코저 할 경우 적어도 동일한 시스템이 두 세트 즉 2 채널 시스템이 필요하며, 빠른 유동장내에 장시간 노출될 열선은 피로현상을 가져와 종국적으로 절단되는 점을 고려할 때 짧은 시간내의 측정은 다른 어느 측정법보다 중요시된다. 따라서 마이크로컴퓨터를 이용한 자동자료수집장치(automatic data acquisition system)와 센서의 자동이송장치는 정확, 신속한 측정에 필수적이라 생각한다. 끝으로 유한한 수명을 가진 열선 센서(개당 100불내외)를 계속 수입, 구매하여야 하는데 이 경우 열선 센서 수선전용의 마이크로 아아크 용접기(micro arc-welding system)와 열선봉치를 구매하면 자체적으로 절단된 열선을 재용접 사용할 수 있어 매우 편리하다.

(3) 레이저 속도계(Laser Doppler velocimeter)

70년대 들어서며 실용화되기 시작한 LDV는 측정대상 유동장(flow field)을 교란시키지 않고 속도를 잴 수 있는 장점때문에 유체역학 실험분

야에서 많은 관심을 모으고 있다.

이 LDV의 사용 범위는 액체는 물론 기체유동에 대하여 매우 낮은 속도에서부터 초음속 영역까지 속도측정이 가능하고, 여타의 다른 측정기기로는 매우 측정키 어려운 이상유동(two-phase flows)내의 기포 및 부유입자들의 이동속도까지도 측정이 가능하다. 그러나 현재의 LDV 시스템이 모든 분야의 측정에서 완전무결하다는 것은 아니며 실제로 LDV 사용자는 그 어느 측정기기 이상으로 많은 실험경험과 관련분야(광학, 전자공학등등)의 기본지식등을 필요로 한다는 점을 명심해야 한다.

LDV의 원리를 간단히 살펴보면 그림 1과같이 주파수 f_0 , 파장 λ_0 인 빛이 V 의 속도로 움직이는 입자에 부딪쳐 산란될때 나타나는 도플러 주파수천위(Doppler-frequency shift) f_D 를 측정 함으로써 아래와 같은 관계로 부터 속도크기를 측정하는 방법이다.

$$f_D = \frac{V}{\lambda_0} (I_s - I_i)$$

위의 관계식에서 볼 때 V 와 f_D 는 선형관계이며, f_D 의 크기는 입사각과 산란각의 각도를

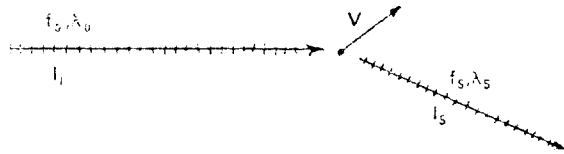


그림 1 레이저 속도계의 작동원리

통하여 조절할 수 있으며, 일반 측정기기에서 필요한 사전 검정(calibration)이 전혀 필요없는 등의 장점들을 지니고 있다. 그러나 실제 이러한 원리를 직접 이용하려면 다음과 같은 점들을 고려해 볼 필요가 있다. 빛의 주파수는 10^{14} Hz이며 도플러 주파수는 $10^5 \sim 10^8$ Hz 정도로 적어도 0.000001% 이상의 해상능력을 지닌 측정기기가 필요한데 이러한 측정기기 제작은 실질적으로 거의 불가능하다. 따라서 도플러 주파수를 검출하기 위하여 특별한 광학적 시스템을 필요로 하게 되는 데 이들 중 널리 쓰이는 3가지 기본형식들은 그림 2에 나타난 기준광선법(reference beam mode), 복합광선법(dual-beam or fringe

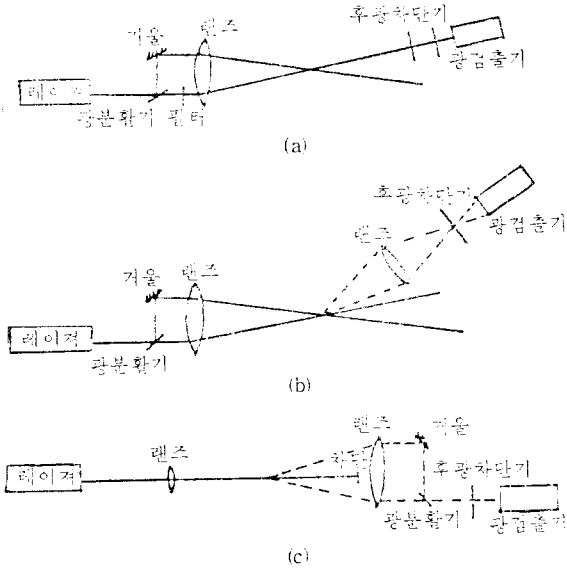


그림 2 형식별 광학배치도 (a) 기중광선법, (b) 이중광선법, (c) 단일광선법

mode) 및 단광선법(single-beam or virtual fringe mode)등이다.

이들중 가장 널리 쓰이는 이중광선법(dual-beam mode)은 그림 3과 같이 동일각도의 두 광선을 서로 다른 방향에서 측정점에 입사시킨 후 특정방향으로 산란되는 두 산란광들의 중첩(superposition)에 의하여 주파수 차가 도플러 주파수로 다음과 같이 나타 나며, 이 경우 수집렌즈를 사용하여 산란광의 수집방향에 관계없이 측정가능하다.

$$f_D = f_{s2} - f_{s1} = \frac{V}{\lambda_0} (I_{i1} - I_{i2})$$

일단 산란광들을 광전검출기를 거쳐 전기적 신호로 바꾸었을 때 보통 그림 4와 같은 형태를 보이는 데 이는 입자가 측정체적(probe volume)을 통과하는 데 걸리는 시간을 나타내는 저주파수와 도플러 주파수인 고주파수가 합쳐진 형태

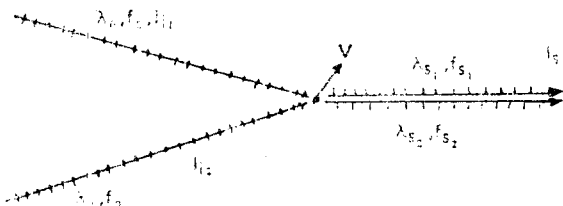


그림 3 이중광선법

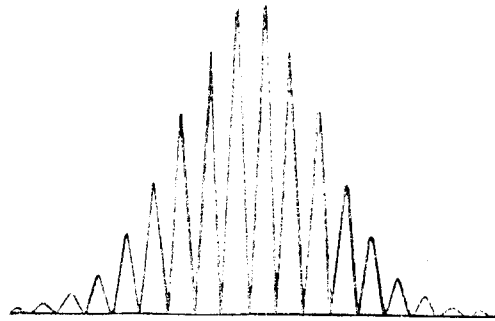


그림 4 도플러 신호의 스펙트럼

이므로 이들의 분리가 요구된다.

현재 광전검출기의 출력신호를 처리하기 위한 여러 방법중 주파수추적기(frequency tracker)와 주기카운터(period counter)등이 널리 쓰이는데 전자는 도플러 주파수를 추적하는 극소 진동자(local oscillator)의 전압출력을 이용하는 방법이며, 후자는 도플러 주파수의 주기를 고속시계로 측정하는 방법이다. 여러가지 성능면에서 주기 카운터법이 우수하나 상대적으로 가격이 훨씬 비싸며, 넓은 속도변화 범위를 갖는 유동장에 사용할 경우 고·저주파수 필터의 주파수범위가 충분치 못하면 많은 측정오차를 줄 수 있음에 특히 유의하여야 한다.

기본적인 광학시스템으로 구성된 LDV는 속도의 방향 즉+ 혹은 -를 구별하지 못하고 절대 크기만을 측정하게 되어 있는데, 이러한 결점을 해결하기 위하여 두 입사광선 중 한 광선의 경로에 주파수전위기(frequency shifter)를 설치할 경우 일정주파수 Δf 만큼 증가되어 도플러 주파수는 $f_D = \Delta f + \frac{V}{\lambda_0} (I_{i2} - I_{i1})$ 으로 되어 +속도의 경우는 Δf 증가된 도플러 주파수를, 속도가 0일 경우는 Δf 값을, 그리고 -속도인 경우 0과 Δf 사이의 출력 주파수를 갖게 되어 쉽게 속도의 방향까지 측정, 가능케 된다. 그림 5는 평면에 놓인 정사각형 단면의 장애물 전후방의 속도 측정에서 주파수 천위기를 사용했을 경우와 사용하지 않았을 경우의 측정 결과를 비교한 것으로 (a)의 평균속도측정에서 -속도의 역류현상을 잘 보여 주고 있으며 (b)의 난류강도측정은 실제값에 가까운 높은 난류강도를 나타내고 있다.

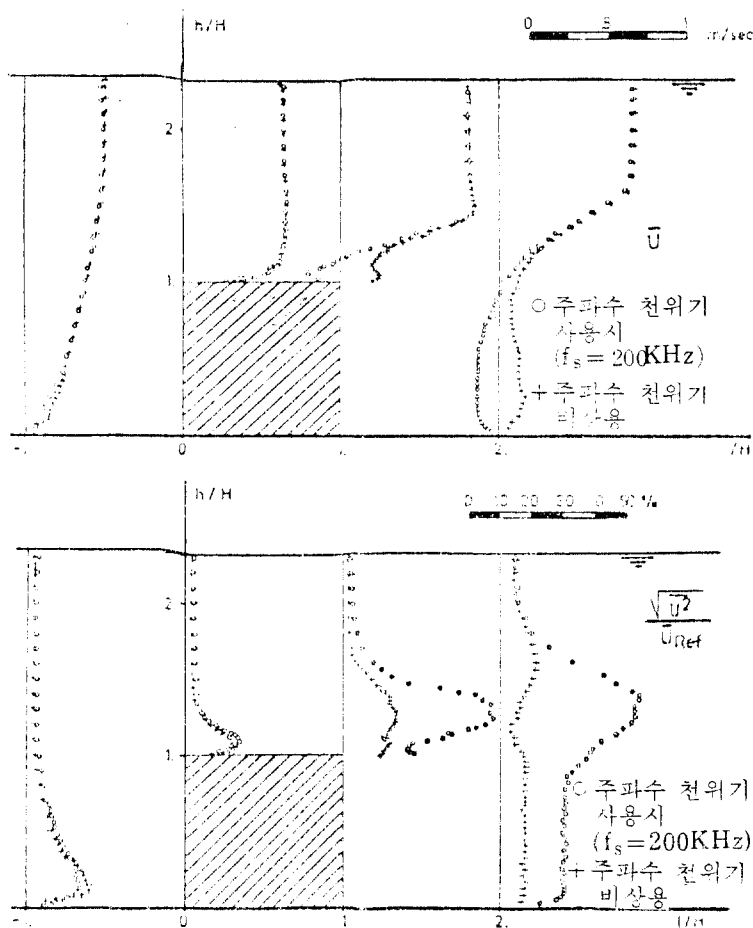


그림 5 주파수천위기의 사용효과⁽⁵⁾

끝으로 LDV 를 사용하여 속도분포(일차원 혹은 이차원)를 측정코자 할 때 광학적 혹은 기계적으로 유동장과 LDV 의 상대적인 이동이 필요한 점은 피토투관 혹은 열선풍속계의 경우와 마찬가지로이다. 그러나 이들에 비하여 LDV 의 이송장치는, 소형 15mW He-Ne 레이저일 경우 일지라도, 외국에서 구매코자할 때 수만불의 가격을 지불해야 한다. 최근에 국내에 수 많이 도입된 LDV 시스템 중 실제로 가동중인 것은 한 두개에 불과한 것은 바로 이 이송장치 때문이다. 저출력의 소형 LDV 는 보통 전방산란형(forward-scattering type)으로 발광부와 수광부(산란광을 받아들이는 부분)가 유동장 양편에 떨어져

정밀하게 동시에 똑같이 움직여야 하는 데 문제가 있는 것이다. 한편 후방산란형(backward-scattering type)은 발광부와 수광부가 일체로 되어 있어 이송장치 제작이 상대적으로 훨씬 용이하나 LDV 시스템 자체 가격이 상대적으로 고가인 것이 보통이다. 필자는 후방산란형은 물론 전방산란형에도 모두 이용할 수 있도록 발광부와 수광부가 분리, 조립되며 스텝-모터에 의하여 자동이송되는 이차원 이송장치를 설계, 제작하여 실험에 사용하여 본 결과, 원활하고 정밀한 이송을 위한 기본적 구조의 설계가 매우 중요하며, 저렴한 가격으로 높은 이송정밀도를 지닌 (447 페이지에 계속)