첨단광학기술 활용을 위한 광학부품의 사용법과 유의점

지난호까지 지상공개강좌에서는 2003년 일본에서 출간된 「광디바이스 정밀 가공 핸드북」에서 국내 광학산업현장에 참고가 될 만한 내용을 발췌 · 정리하여 본 협회에서 발간한 기술참고자료를 총 30여회에 걸쳐 연재했다.

이번호부터는 일본 캐논의 연구개발부장을 지낸 末田哲夫씨가 집필한 <광학부품의 사용법과 유의점>이란 책 내용을 연재하고자 한다. 본 내용은 일본의 월간 OPTRONICS에서 1982년부터 30회에 걸쳐 연재된 바 있고, 연재한 내용만 묶어 한 권의 책으로 나온 이후 지금까지 많은 광학인들이 애독하고 있는 핸드북이다. 월간 OPTRONICS는 1990년에 책 내용을 세부에 걸쳐 수정함과 동시에 렌즈에 대한 기초를 보다 충실히 하고 비구면 렌즈, Rod 렌즈, 홀로그램, 고체 촬상 디바이스, 회절광간섭방식 엔코더 등을 새롭게 첨가하여 보다 알찬 내용으로 보강하여 증보개정판을 내놓았다.

국내에서는 (주)그린광학에서 본 자료를 입수하여 사내자료로 활용하고 있을만큼 시대와 장소를 초월하여 아직도 광학산업현장에서 유용한 자료로 읽혀지고 있다. 비록 일부 내용들은 우리나라 산업현실과 다소 차이가 있는 부분도 있을 것이나 광학기술의 역사와 기반이 앞서있다고 생각되는 일본의 실질적인 기술관련 자료이기 때문에 국내 업체 관련분야에 종사하시는 분들에게 일독을 권해드리고 싶은 마음에 광학세계에서도 2009년 7월호부터 연재를 하게 되었다.

전체 내용을 미리 살펴보면, 제1부에는 대표적인 광학부품에 대한 설명, 제2부에는 그것들을 사용한 광학시스템과 그것들에 관한 기본적인 사항의 해설, 제3부에는 광학부품을 수입하는 경우의 측정방법과 그것들을 시스템으로 조립하는 경우의 조정방법 예 등을 해설했다. 기술내용은 응용범위가 넓다고 생각되는 구체 예를 기본으로 가능한 해설했다.

끝으로 본 서를 광학세계에 전재할 수 있도록 적극 도움을 주신 (주)그린광학의 조현일 대표와 번역을 맡아주신 유정훈 과장에게 감사를 드린다. <편집자 주>

연재 순서

제1부 광학부품의 종류와 사용방법
제1장 평면을 베이스로 한 광학부품
제2장 구면을 베이스로 한 광학부품
제3장 다양한 광학부품
제2부 광학시스템과 광학부품
제1장 광학시스템의 빛의 포착방법과 기능
제2장 광학시스템과 광학부품
제3부 광학부품의 검사와 시스템으로의 조립 · 조정
제1장 광학부품의 검사 · 측정
제2장 광학부품의 조립조정

저자약력: 末田哲夫

1947년 5월 25일생
1971년 早稲田대학 이학부 물리학과 졸업
1973년 同수사과정 수료
1973년 캐논(주) 입사
각종 광학계에 관한 계측 · 물리광학을 주체로 한 계측방법과 화상처리에 관한 연구개발 등에 종사, 현재 연구개발본부 G-CDS추진부 부장

제I부 광학부품의 종류와 사용방법

광학시스템은 다양한 광학부품 및 그것들을 정확히 고정하는 금속기구에 의해 구성되어 있다. 광학부품은 각각 고유한 기능을 가지고, 시스템 내에서 많이 사용되는 쪽으로 적용되고 있다. 그림1-1은 광학부품을 크게 분류해서, 그 주요한 사용방법을 나타낸 것이다. 제1부에서는 광학부품을 평면을 베이스로 한 광학부품, 구면을 베이스로 한 광학부품, 그 외 광학부품을 3종류로 크게 나눠, 각각의 광학부품 특성과 사용방법에 대해서 해설하겠다.

제1장 평면을 베이스로 한 광학부품(上)

1. 머리말

본 장에서는 광학부품 내에서 가장 기본적인 구조 및 기능을 이루는 반사경과 프리즘에 대해서 설명하겠다. 일반적으로 판매되고 있는 반사경과 프리즘 등의 광학부품은 전기부품에 비교하면, 훨씬 소량생산이고, JIS와 ISO 등의 규격화는 되어 있지 않다. 또 대부분의 물건이 수작으로 가공되고 있기 때문에 기성 물건에 대해서 치수, 정도와 표면처리에 대해서 주문을 해서 원하는 물건을 오더메이드로 입수하는 것도 가능하다. 또 카탈로그 상에 한마디로 말하는 것이 어려운 파라미터도 있기 때문에, 시스템을 형상한 다음에 고정도를 필요로 하는 부품인 경우에는 메이커에 문의와 검사성적서의 첨부 요구 등이 필요하다.

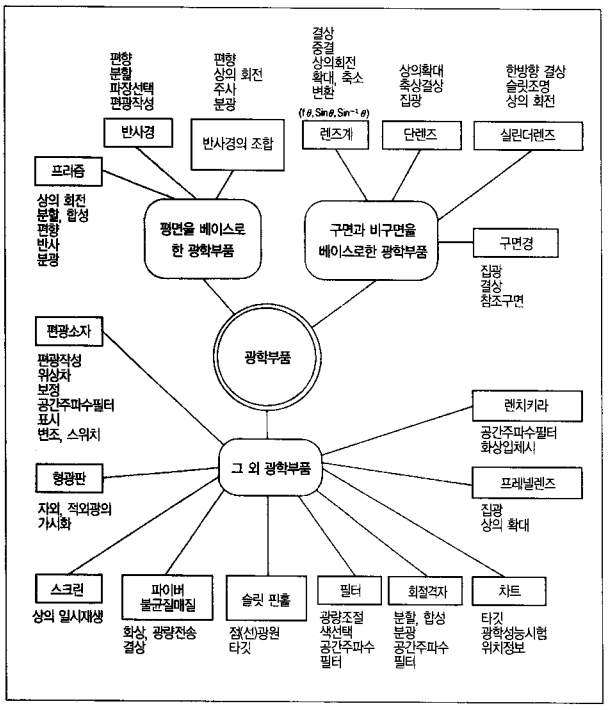

그림1.1 각종 광학부품과 그 사용방법

2. 반사경의 종류와 사용방법

빛에 있어 가장 기본적인 성질인 반사를 기능으로 하는 광학부품이다. 여기서는 반사경에 대한 일반논과 대표적인 반사경에 대해서 설명하겠다.

반사하는 빛의 파장과 반사율에 따라서 고반사경, 반투경, Chromatic미러 등으로 분류가능하고, 각각의 용도에 따라 재료, 표면처리, 정도 등을 생각할 수 있다.

반사경의 정도는 반사경을 반사한 파면과 투과한 파면에 대해서 고려해서 결정된다. 반사파면은 반사면의 면정도, 투과파면은 파사면(波射面)과 이면(裏面)의 면정도와 사용하고 있는 유리 굴절률의 균질도로 결정된다. 각 파면의 정도는 식(1.1)~(1.3)로 나타낼 수 있다.

$$RW = 2\times AR \quad \cdots\cdots (1.1)$$

$$TW = (n-1)\times (AR+BR)+(\Delta n\times d) \quad \cdots\cdots (1.2)$$

$$RB = 2\times \{(n-1)\times BR +\Delta n\times d\} + AR\times n \quad \cdots\cdots (1.3)$$

RW; 표면반사경의 반사파면
TW; 반투경 등의 투과파면
RB; 이면(裏面) 반사경의 반사파면
AR; 반사면의 면정도
BR; 이면의 면정도
n ; 유리재료의 굴절률
Δn; 유리재료 굴절률의 균질성
d ; 유리재료의 두께

즉, 반사경에 대해서 그 정도를 결정하는 것은 면정도이다. 면정도 표시는 카탈로그 상에는 면 높이의 최고최저 차를 파장(He-Ne 레이저발진파장;632.8㎚가 많다)으로 단순히 표시한 것이 많다. 이것은 반사경에 한정하지 않고 프리즘류에도 같다. 그러나 예를 들면 그림1.2에 나타난 면은 모두 1λ의 최고최저 차이다. 이 그림에서 알 수 있듯이, 면정도 표시는 최고최저 차만으로는 본래 충분하지 않다. 면정도를 표시하는 항목으로서, 높이차에 더해서, [아스] 및 [쿠세] 범위를 고려한 표시를 한다. 여기서 아스란 그림1.3에 나타냈듯이 면내의 방향에 의한 곡률 차를 말하고,

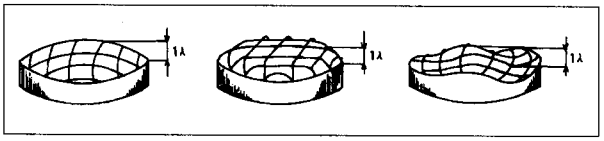

그림1.2 각종 1λ 면정도의 면형상

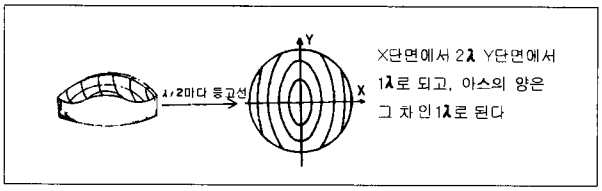

그림1.3 아스 1λ의 면형상과 등고선(간섭호)

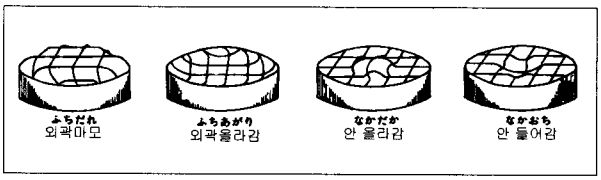

그림1.4 각종 쿠세의 면형상

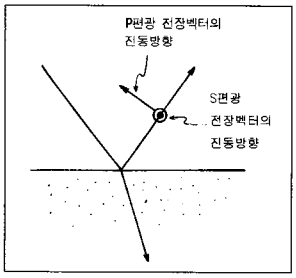

그림1.5 S편광과 P편광

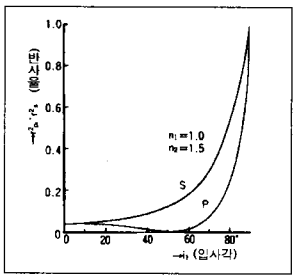

그림1.6 굴절률1.5인 글라스 표면반사율

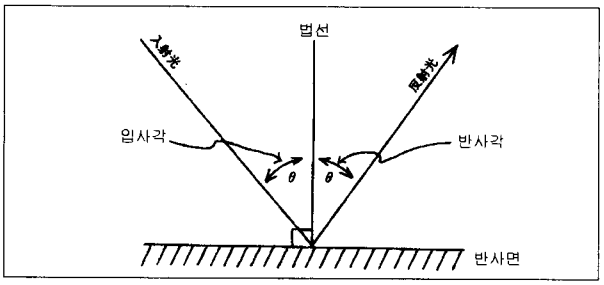

그림1.7 입사각과 반사각

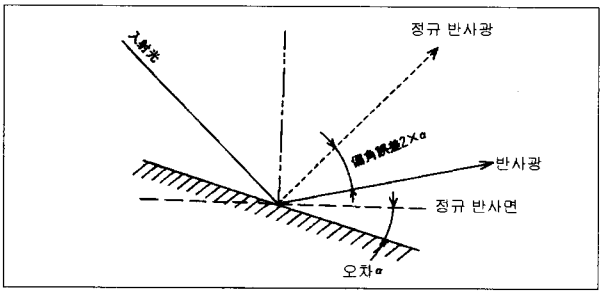

그림1.8 반사 오차의 반사각으로의 영향

쿠세란 그림1.4에 나타냈듯이 급격한 기울기를 가진 면 변화를 말한다. 카탈로그 상에는 아스 및 쿠세는 일반적으로 기재되어 있지 않기 때문에, 고정도부품이 필요한 경우에는 검사성적서 등을 요구해서 구입하는 편이 안전하다.

반사경에 공통인 성질로서 반사파의 편광특성이 있다. 빛은 전자파이고, 반사굴절시에 경계면의 유전율(굴절률)차의 영향을 받아 면내 진동방향의 빛(S편광)과 그것에 대한 수직방향의 빛(P편광)에 비교해서 일반적으로 강하게 된다. 그림1.6은 굴절률1.5인 글라스의 P편광 및 S편광에 대한 반사율의 이론값을 나타낸 것으로, 빛을 반사경에 사입사 시켰을 때에 S편광과 P편광 강도는 일반적으로 같지 않는 것을 나타낸다. 또 강도차는 표면재질의 굴절률(유전율)에 따라 다르기 때문에 표면처리 재질에 따라 수치는 다르다.

반사경에 빛을 θ입사각으로 입사시켰을 경우, 그림1.7에 나타냈듯이 반사각은 θ로 된다. 또 반사경이 정규의 각도에서 α만 기울인 경우, 반사각은 그림1.8과 같이 정견의 각도에서 $2\times\alpha$기운다. 또 반투경과 같이 유리자재 내에 빛이 입사하는 경우, 굴절각은 (4)의 스넬 공식에 따른다. 이때에 표면처리층(코팅)이 평행이라고 하면 유리자재의 굴절률을 계산에 사용해도 된다.

(1) 고반사경

뒷면에 빛을 투과하는 것이 없고, 가능한 넓은 파장역에 대해서 고반사율을 나타내는 반사경을 말한다. 체경(體鏡) 정도의 물체에서 λ/100단위의 공정도로 연마된 초평면경까지 다양한 고반사경이 있다.

반사경에 사용되고 있는 초자재료로서, 반사면의 면정도를 높게 요구하는 것(크기에 의하지만, Φ50mm로 λ/10 이상을 하나의 기준으로 하고 싶다)이 필요한 경우에는 용융석영과 미세결정화 글라스 등의 온도변화에 강한 저팽창 재료를 사용한 반사경을 선택한다. 또 수λ~λ/10정도의 면정도 반사경이라면, BK-7 광학글라스를 사용해도 된다. 고정도를 요구하는 반사경에서는 제작시, 측정시, 사용시의 열팽창을 무시할 수 없지만, 저팽창 재료라면 면정도를 보상하는 것이 어렵다.

표면반사용의 코팅재료로서, 가시광역광(400㎚~700㎚)에 대한 고반사경에서는 일반적으로 알루미(Alumi)를 코팅하는 경우가 많다. 또 특정파장역의 반사율을 특히 올리기 위해서 산화세륨 등의 유전체막을 알루미코팅 위에 적층시키는 경우도 있다. 넓은 파장역에서 고반사율을 나타내는 은코팅은 공기에 방치해두면 산화해서 반사율이 쉽게 떨어지기 때문에, 일반적으로는 이면(裏面)경으로써 사용한다. 또 특히 적외역에 대한 코팅재료로서, 금 혹은 은

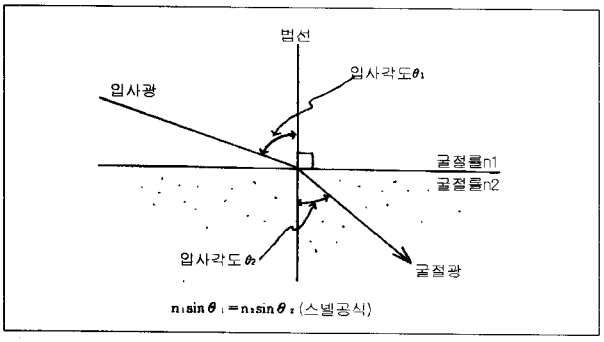

그림1.9 스넬법칙(1) 고반사경

을 사용하는 것도 있다. 그림1.10에 대표적인 고반사코팅의 반사율을 나타냈다.

(2) 반투경

반사면에 반투경막을 실시하는 것에 의해, 빛의 분해와 중첩을 행하는 반사경을 말한다. 반사광의 편광성분과 같이, 투과광의 편광성분도 강도가 같지 않기 때문에, 사용시에 주의가 필요하다.

투과한 파면의 파면수차가 고정도로 필요한 경우에는 재료로서 정밀어닐링을 실시해서 특별히 굴절률을 균질화한 BK-7과 용융석영을 사용한 물체를 선택한다. 이것은 후기의 프리즘류에 대해서도 같다. 정밀어닐링을 실시한 BK-7에서는 굴절률의 균질성이 10^{-16}의 항까지 보장한 것이 생산되고 있기 때문에, 만약 기제품이 없어도 입수하는 것이 가능하다.

반투막은 일반적으로 유전체막을 복수층으로 적층해서 형성하는 경우가 많고, 빛의 파장과 입사각에 의해 반사율과 투과율이 다른 경우가 많기 때문에, 사용시에 주의가 필요하다. 또 알루미를 코팅한 반투경에서는 막의 흡수가 크기 때문에, 효율이 나쁜 경우가 많다.

일반적으로 반투경은 뒷면에 반사방지막을 실시한다. 이것은 반사면이외의 반사광을 제거해서, 광학시스템중의 광신호 S/N을 높이기 위한 것이다. 그러나 반사방지코팅을 실시해도 반사율이 완전히 0이 되지는 않고, 실제로는

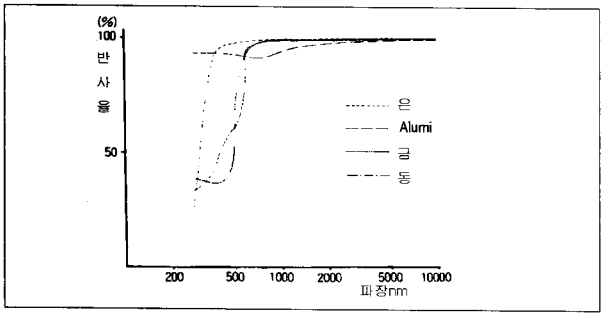

그림1.10 대표적인 고반사미러의 반사율

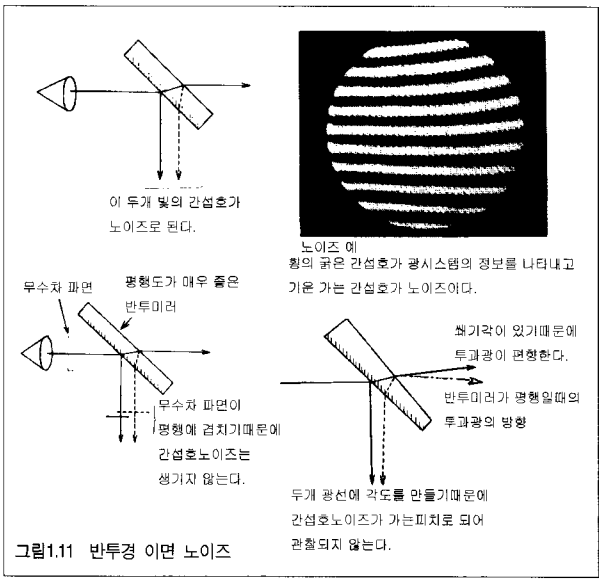

그림1.11 반투경 이면 노이즈

그림1.11 반투경 이면 노이즈

0.05%이상은 아무리 적어도 존재한다고 생각하는 쪽이 좋다. 레이저를 사용한 광학시스템에서는, 이 미소한 뒷면의 반사광이 본래의 반투막에서의 반사광과 서로 간섭해서, 그 간섭호가 노이즈가 되어 광정보전달의 방해가 되는 경우가 있다. 이 노이즈를 제거하기 위해서는 반투경을 평행도가 매우 좋은 것을 선택하는 한편 완전히 무수차의 광속을 사용함에 의해 제거가능하다. 혹은 반투경에 일부러 쐐기상의 각도를 가진 물체를 사용해서, 뒷면반사에 의한 간섭호를 노이즈로서 관측되지 않는 정도로 세밀하게 하는 방법도 있다. 이때에 반투경을 투과하는 빛은 반투경의 쐐기각에 응해서 편향하기 때문에 주의할 필요가 있다. 그림1.11은 이상의 사항을 설명한 것이다. 일반적으로 판매되고 있는 반투경은 이상의 사항을 고려한 것이 적기 때문에, 미소 쐐기각을 가진 반투경은 메이커에 특별주문 형태로 만들 필요가 있다. 또 일반적인 시판품 등을 사용해서 이상의 문제가 발생할 때에는 반투경을 경면 내에서 회전시키면 비교적 좋은 형상이 존재할지도 모르겠다.

판상 혹은 미소한 쐐기각을 가진 반투경은 기본적으로는

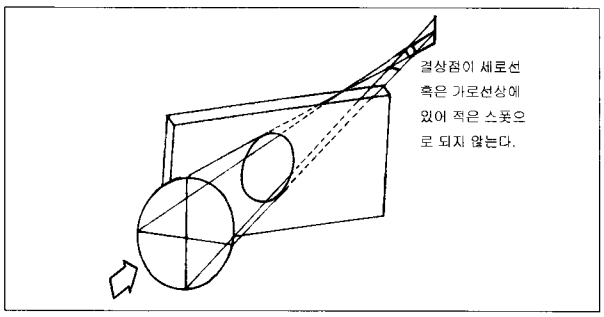

그림1.12 받아들어진 광속중의 반투경을 기울여 넣은 경우

평행광속 중에서 가지고 있다. 수렴광과 발산광중에서 사용하면 그림1.12에 나타나듯이 투과광은 결상시에 비점수차를 발생해서, 적은 스폿을 형성할 수가 없기 때문에 주의가 필요하다.

(3) 그 외 반사경

반사코팅을 선택하는 것에 의해, 일부 파장역의 투과 혹은 반사를 생성시켜 얻는 반사경을 생각할 수 있다. 가시광만을 반사해서 열선(적외광)을 투과시키는 Cold미러는 백열전구를 광원으로 하는 광원부에 설치되어 사용된다. 또 특정 파장역의 빛만을 반사시키는 Chromatic미러는 색분해를 행하는 광학시스템에 사용된다.

3. 반사경을 조합한 광학부품과 그 사용방법

한 장의 반사미러에서는 빛의 가장 기본적 성질인"반사"를 한번밖에 행하지 않고, 반사면을 복수로 해서, 복수회의 반사를 행하거나, 반사미러계를 움직임에 의해 한 장의 반사미러에서는 얻을 수 없는 다양한 기능을 실현할 수 있다.

(1) 2장 미러

2장의 고반사미러를 각도θ로 고정해서 둔다. 이 광학계에 빛을 입사시키면 입사광과 반사광이 이루는 각도는 반드시 2θ로 된다. 그림1.13은 이것을 설명한 그림이고, θ가 고정되어 있다면 2장 미러가 저면내에서 회전해도 상기의 2θ 조건은 유지된다. 예를 들면 2장 미러의 상대각도를 45°로 하면, 입사광과 반사광이 이루는 각도는 반드시 90°로 된다.

2장 미러 사용방법의 하나로서, 광학시스템 중에서 일정각도의 빛의 편향을 행하는 경우에 2장 미러를 유닛 형태로 조립해서 조정을 해서, 시스템 조립시의 수고를 경감하는 사용방법이 있다. 또 시스템 중의 빛의 편각을 알고 싶을 때에 시스템 중에서 2장 미러의 상대각도를 조정해서 시스템의 이상상태로 해 두고, 상대각도를 유지한 채 추출해서 그 편각을 측정하는 사용방법도 있다.

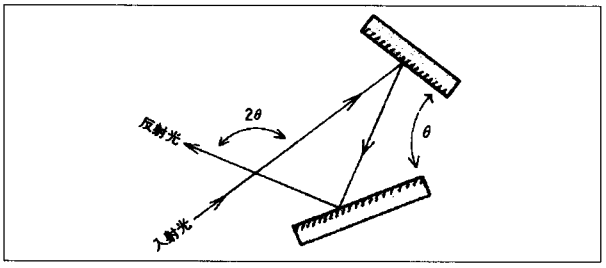

그림1.13 2장 미러

또 후술의 프리즘에 있어서 2회 반사를 행하는 프리즘의 편각은 2장 미러의 원리에 의한다.

(2) Fabry-Perot pair

2장의 고반사로, 투과 가능한 반투경을 반사면에 평행하게 대향시켜 배치한 것이다. 만약에 빛의 파장λ와 반사면간격d가 (1.5)를 만족하는 경우에, 빛은 두 개의 반사면에서 반복해서 반사간섭을 행하고, 대부분의 강도가 투과한다. 그림1.14에 나타나듯이

$$2nd = m\lambda \qquad (1.5)$$

(n은 반사면간 매질의 굴절률, m은 정수이다)

즉 d를 결정하는 것에 의해 Fabry-Perot pair는 투과해서 얻는 광의 파장을 선택하는 기능이 있다. 파장절대치에 대한 분해능의 비는 일반적으로 5×102 이상으로 높기 때문에 광의 스펙트럼 Analyzer(예를 들면 레이저 발진광의 해석)와 다파장발진 레이저의 파장선택 등에 사용한다.

Fabry-Perot pair의 분해능을 결정하는 항목은 반사면의 표면반사율, 면정도, 2면간의 평행도이다. 각 항목의 정도는 높으면 높을수록 파장선택의 분해능은 높게 된다.

d를 결정하는 수단으로써 수동 마이크로미터 외에 RZT 자기를 넣어 전왜(電歪)를 이용해서 d를 결정하는 것도 많다. 온도변화에 의한 변형을 고려해서 구조재료로서 Super Inber(저팽창 금속재료)를 사용한 것을 선택하는 쪽이 좋다.

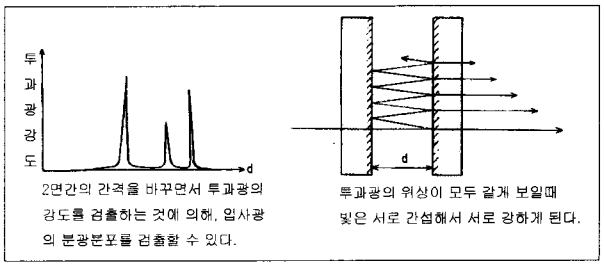

그림1.14 Fabry-Perot pair

(3) 다면경

측정과 정보전달을 목적으로 하는 광학시스템에서는 빛을 주사할 필요를 발생하는 경우가 있다. 현재 다면경의 대다수 것은 이와 같은 주사광학계를 목적으로 하고 있다. 즉 그림1.15와 같이 다면경을 회경(回鏡)시켜 반사광에 시계

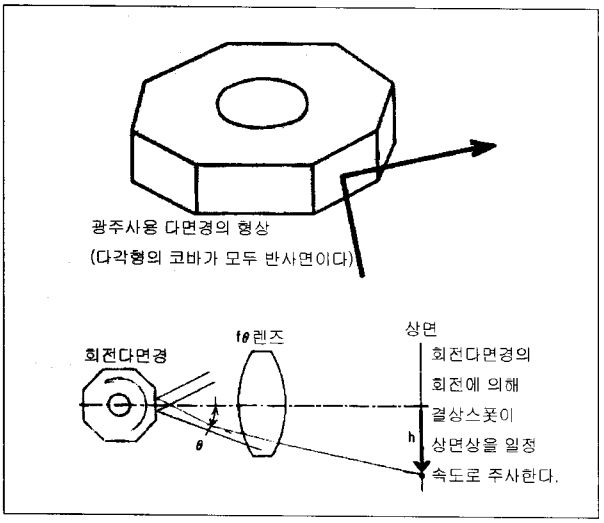

그림1.15 光주사용 다면경과 그 사용방법

열적으로 각도를 붙여, 이 빛을 f·θ렌즈 등을 사용해서 결상스폿을 주사시키는 방법이 많다. 즉 1장의 반사경을 검류계 등을 사용해서 주사하는 방법에 비교해서, 훨씬 고속으로 광spot을 주사하는 것이 가능하다. 다면경의 회전수는 모터에도 의하지만, 거의 30,000r.p.m정도까지 실용화되어 있기 때문에, 다면경이 16면체인 경우, 1분간 48만회(1초간에 8천회)의 광주사를 행하는 것이 가능하다.

광주사에 사용하는 다면경은 정확한 주사를 행하기 위해 이하의 사항에 대해서 주의할 필요가 있다. 즉 일정속도로 주사하기 위해서는 각반사면의 면정도가 좋은 것이 필요하다. 또 주사의 동기와 주사방향과 수직방향의 위치오차에 대한 사항은 각각 각면간의 상대각도와 회전기준면에 대한 각도정도이다. 또 회전의 정도는 모든 정도에 영향이 있기 때문에, 다면경은 회전축에 대해 정확히 고정할 필요가 있다. 이 때문에 회전기준면의 면정도는 회전축에 감합(嵌合)시키는 구멍 경의 정도와 편심에 대해서도 사용상 주의할 필요가 있다.

주사광학계용의 다면경으로서, 모터에 고정된 유닛도 판매되고 있다. 이와 같은 물체를 사용하는 것에 의해, 적어도 실험실단계에서는 부담 없이 사용할 수가 있게 되었다.

(4) Image rotator

반사경을 3장 사용해서, 그림1.16과 같이 배치한 반사경 광학계를 말한다. 화상정보를 포함한 빛을 입사시키면서, 광축을 중심으로 Image rotator를 회전시키면, 이것을 투과하는 화상은 회전속도의 2배 속도로 회전한다. 예를 들면, Image rotator의 회전각도가 45°라면, 화상의 회전각

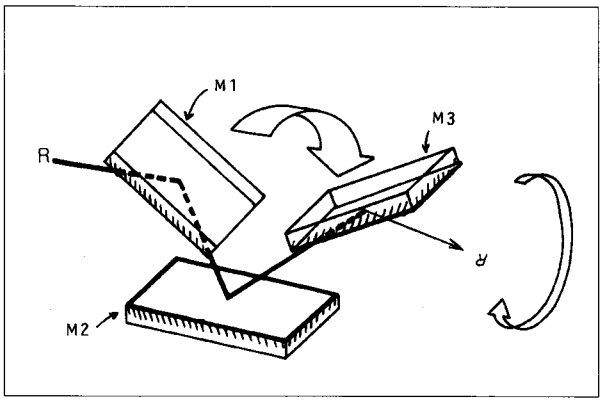

그림1.16 Image rotator의 배치와 그 작용

도는 90°가 된다. 단 화상의 1방향은 항상 선대칭방향에 반전하고 있기 때문에 사용시에 주의할 필요가 있다.

이 광학계를 광학시스템에 넣으면, 화상의 결상방향을 결상면상에서 Image rotator만의 회전으로 회전하는 것이 가능하게 된다. 특히 화상을 사용한 계측시스템에서는 여러 가지 사용방법을 생각할 수 있다. 예를 들면 2방향의 단면장의 계측을 그림1.17과 같이 1개의 Linear 센서 어레이(Linear Sensor Arrays)로 측정하는 것도 가능하다.

Image rotator를 형성할 때의 주의 점으로서, 반사경의 배치각도가 있다. 회전중심과 광축을 일치시키기 위해, 그림1.16 중의 M2는 광축과 평행으로, M1과 M3가 광축과 이루는 각도는 같이 둘 필요가 있다. 이것들의 각도에 오차가 있으면 회전시에 투과광축이 입사광축에 대해서 각도를 가지기 때문에 상이 흔들리는 결과가 된다. 또, 각 반사면의 면정도도 시스템의 요구에 맞는 물체를 선택할 필요가 있다.

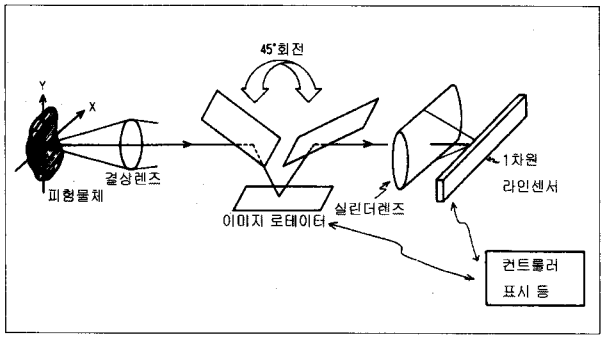

그림1.17 Image rotator를 사용한 계측시스템 예

〈 다음호에 계속 〉