

# 사용자를 위한 광·전기의 선택방법 (2)

박한중/역

## 센싱에서 본 광과 전기

### 머리말

센서의 대상물이나 전압이나 전류 등 전기 그 자체인 경우나 백색광이나 레이저 등 광 그 자체인 경우는 물론이고 온도, 습도, 자기, 속도, 가속도, 변위, 음향, 진동, 가스분석 등 많은 것이 전기나 광을 사용해서 측정된다.

또 그것들의 응용범위도 자동차, 에너지산업, 사회시스템, 수산, 농업, 방위, 가정 등이나 생산공업 현장에서 폭 넓게 사용되고 있고 앞으로도 그 수요는 더욱 확대될 것으로 생각된다.

이들 광이나 전기를 사용한 센서는 너무나 많은 종류이고 광범위한데 이것들은 잘 알려져 있는 센서이기도 하다. 따라서 여기서는 최근 각광을 받기 시작한 광 파이버 센서를 어떠한 의미에서 사용하고 있는 것에 한해서 그것이 종래의 전기적 센서와 비교할때 어떠한 이점, 결점을 가지고 있는가에 대해서 기술하기로 한다.

그리고 세라믹이나 유기고분자를 사용한 온도, 습도, 가스센서와 같이 전기나 광을 직접 사용하지 않는 센서도 많이 있지만 여기서는 언급하지 않는다.

### 1. 광 파이버 센서

광 파이버 센서에는 광 파이버를 단순히 광의 전달매체로서 사용하고 있는 것과 광 파이버가 갖는 물리적, 화학적 성질을 이용하는 것 두 종류가 있다. 전자의 대표예로서는 물체의 유무를 검출하는 비접촉형 센서가 있으며, 센서부예의 광의 도파로서 저손실 광파이버를 사용하면 수 km 앞의 물체의 유무도 검출할 수 있다.

기타 이러한 종류의 것으로서 플라스틱 파이버, 다성분 유리 파이버, 밴들 파이버, 이미지 파이버 등을 사용한 것이 있으며, 그리고 또 광 파이버의 제조기술의 진보에 따라 새로운 응용에 고안되고 있는 것, 즉 원적외 파이버나 나쁜 환경 아래서도 사용이 가능한 금속 코트 파이버, 장치에서도 사용 가능한 석영 이미지 파이버 등을 사용한 것이 있다.

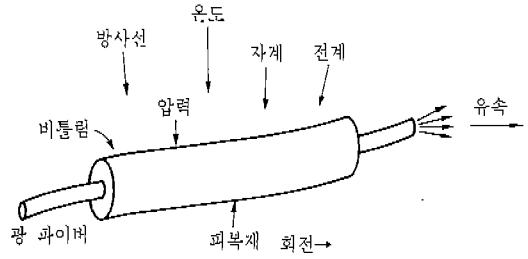
후자의 물리적, 화학적 성질을 이용한 것으로는 근래의 광파이버의 진보에 따라서 처음으로 가능해진 것이 많다.

즉, 파이버 자일로, 파이버 도플러 속도계, 파이버 압력센서, 음향센서, 자계센서, 온도센서, 왜곡센서 등은 단일 모드 광 파이버나 편파면 보존 단일 모드 파이버를 사용하여 처음으로 가능해진 것이다.

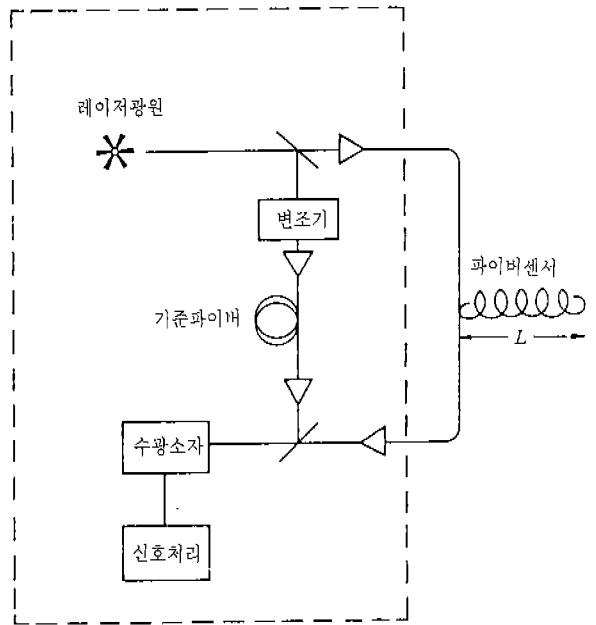
광과 전기의 비교를 기술하기 전에 이들 광 파이버 센서의 원리를 이하, 개략적으로 소개하기로 한다. <그림 1>은 파이버 센서의 개념도, <그림 2>는 측정원리도이다.

<그림 1>에 있어서 예컨대 온도가 바뀌면 광 파이버의 길이가 열팽창에 의해 변화하며 그곳을 통과하는 광의 위상이 변화한다. 따라서 이 위상의 변화를 <그림 2>와 같은 장치로 측정하면 온도의 변화를 구할 수가 있다. 실제로는 온도에 의해 파이버의 굵기나 굴절률도 바뀌므로 그것도 고려에 넣어 두어야 한다.

레이저광 등 강한 광의 펄스를 파이버에 보내고 그 약간의 산란반사광을 구하면 산란광이 온도에



<그림 1> 파이버센서의 개념도



<그림 2> 광파이버센서의 기본구성

따라 변화하는 사실에서 파이버 내의 온도를 장소의 함수로서 구할 수도 있다.

GaAs 등의 반도체는 급준한 광학적 흡수단 파장을 갖고 그것에서 단파장의 광은 거의 흡수한다. 이 흡수단 파장은 온도상승과 함께 장파장측으로 이동한다. 따라서 이 반도체와 광원 및 수광기를 광 파이버로 연결하면 반도체의 투과광 강도는 온도상승과 함께 감소하며 출사광 강도를 측정하면 온도의 값을 알 수 있다.

## 광 파이버는

방사선에 닿으면 화학적 변화에 의해 전송손실이 커진다.

따라서 원자로 등 주위에 파이버를 부설해 두면

방사선의 누설을 측정할 수 있다.

광 파이버는 굽혀지면 전송손실이 커진다. 따라서 전송손실을 측정하면 파이버의 굽곡량을 알 수 있다. 이것으로부터 왜곡의 양 또는 물체의 위치가 구해진다.

광 파이버 주위에 압력이 가해지면 파이버의 길이가 변화한다. 따라서 파이버 내의 광의 위상을 구하면 음압이 구해진다. 이것은 파이버 파이드로폰으로서 사용된다.

파이버의 피복재로서 자왜(磁歪)재료가 사용되고 있으면 자계에 의해 자왜재료가 신축, 파이버의 길이가 바뀐다. 따라서 광의 위상을 구하면 자계를 측정할 수 있다. 전왜(電歪)재료도 동일하다.

파이버 내의 광의 속도는 파이버의 위치, 이동에 관계가 없으므로 광의 위상을 구하면 파이버의 운동을 알 수 있으며 파이버 자일로로서 사용할 수 있다.

광 파이버는 방사선에 닿으면 화학적 변화에 의해 전송손실이 커진다. 따라서 원자로 등 주위에 파이버를 부설해 두면 방사선의 누설을 측정할 수 있다.

이상은 파이버 자체의 물리적, 화학적 변화 등에 의해 그것들의 변화량을 구하는 것이지만 기타 파이버에서 나온 광의 반사광 위상의 변화, 이른바 홉플러 효과에서 유속을 구하는 것 등 많이 있다.

광 파이버를 이용한 센서는 이상 기술한 바와 같이 대단히 광범위한 응용이 기대되고 또 수많은 제안이 되고 있지만 그 물리적, 화학적 성질을 이용한 것은 아직 생겨난지가 얼마 안되어인지 대량생산이나 표준화는 요원한 존재이다.

## 2. 센서에 있어서의 광과 전기의 비교

### (1) FA센서(Factory Automation Sensor)

제조공정에 있어서의 자동화에는 로봇 내를 위치해서 가공, 조립, 반송, 포장, 검사 등 많은 장소에 각종 센서가 사용되고 있다. 그것들은 비접촉형의 광전스위치, 근접스위치, 속도센서, 변위센서, 온도센서나 접촉형 압력센서 등이며, 위치의 검출을 중심으로 해서 비교적 물리량을 구하는 것이 많지만 이것들은 근년 더욱 더 다양화 되고 있다. 이것들에는 당연한 일이지만 신뢰성, 감도, 정밀도, 속도, 내환경성등 특성상의 기술적 과제 외에 소형화, 경량화 등의 문제가 있다.

이들 FA센서 중에서도 가장 많이 사용되고 있는 것이 물체의 유무를 검출하는 리밋 스위치, 광전 스위치, 근접스위치, 화상처리장치 등일 것이다.

리밋 스위치는 기계적으로 유무를 판단하는 마이크로 스위치 등이 대표적 예로서 다량으로 사용되고 있는 것이지만 고속물체의 검출에는 그리 적합하지 않다. 또 출력을 마이컴 등에 입력하는 경우는 차타링에 대해서 충분히 고려해 두어야 한다. 차후 느리기는 하지만 홀 소자나 발광 다이오드 등을 사용한 무접점형으로 바뀌어 나갈 경향이 있다.

광전 스위치는 발광 다이오드의 성능향상이나 저가격화에 따라 급속히 보급되어 종래의 기계적 스위치를 대신해 나가고 있다.

이것은 광의 반사나 투과를 이용한 것으로서 소형이다. 분해능력이 높다. 응답속도가 빠르다, 검출거리가 길다 등 많은 이점이 있는데, 도파로에 광 파이버를 사용한 것은 미소물체의 검출, 좁은 장소

에서의 이용 등에 우수하다. 이들의 광을 사용한 것은 오손에 대해서 약하므로 정기적인 청소가 필요하데, 더러움에 강한 센서도 개발되고 있다.

근접 스위치는 고주파전류의 와전류에 의한 코일 인덕턴스의 변화나 자성체 검출을 이용한 것으로서 옛날부터 무접촉 센서로서 이용되어 왔지만 이것도 근년에 광전 스위치로 바뀌어 가고 있다.

특히 온도변화가 심한 곳에서의 사용에는 발전주 파수의 변화 등을 충분히 주의해야 한다. 다만 오염이 심한 장소등 광을 사용할 수 없을 것 같은 환경에서도 충분히 동작가능하며 그와 같은 특수환경에서의 응용에는 우수하다.

화상처리장치는 로봇에 필요한 시각, 청각, 촉각 중에서 시각 부분을 담당하는 필요불가결의 기술로서, 당연히 광을 사용하는 것인데, 그 센서는 1차원 또는 2차원의 CCD 카메라나 비디콘 카메라 등으로서 이미 이것은 광이나 전기로 분리할 수 없는 것은 아니다. 금후, 이 화상처리장치는 마이컴 기술의 보급과 함께 그 용도가 폭발적으로 확산하는 동시에 그 성능도 비약적으로 향상해 나갈 것으로 생각된다.

## (2) 온도센서

온도의 측정대상은 복잡다기(多岐)하고 센서의 종류도 대단히 많지만 공업적으로 많이 이용되고 있는 것은 열전대, 저항체, 방사온도계 등이다.

열전대에는 백금계 열전대, 크로멜 아부멜 열전대, 크로멜 콘스탄틴 열전대, 철 콘스탄틴 열전대, 동 콘스탄틴 열전대 등 여러 종류가 있으며 사용환경, 온도범위 등에 따라 선택된다. 이들 열전대를 사용한 온도측정은 비교적 염가인 점과 좁은 장소의 측정이 가능한 점 등과 같은 이점이 있다.

저항체 온도 센서는 백금측온저항체와 같이 온도의 표준기로서 사용되는 안정되고 재현 정밀도가 우수한 것과 더미스터와 같은 염가이고 산업기거나 빈생기에 널리 사용되고 있는 반도체로된 부의 온도계수를 가지는 측온체가 있다. 이 더미스터 온

도계는 반도체이기 때문에 고온에서의 사용은 안되지만 염가이고 비교적 손쉽게 이용할 수 있어 그 용도가 계속 확대될 것으로 생각한다.

방사온도계는 광, 특히 적외선을 이용한 것으로서, 이동물체나 미소한 물체를 비접촉으로 측정할 수 있으며 응답성이 우수하여 근년 널리 이용되기 시작한 것이다. 인체의 표면등 비교적 저온으로부터 산수소염등 2,000°C 이상인 온도의 측정이 가능하다.

단, 이 온도계는 물체 표면의 상태에 좌우되고 표면밖에 측정할 수 없으며, 절대값의 측정이 곤란하고 고가라는 등의 결점이 있지만, 제조공정 현장에서는 절대값보다도 온도의 안정성, 재현성이 중요한 경우가 많으며, 그러한 용도에는 우수하다.

온도 센서로서는 이상의 것외에 잘 알려진 수은 온도계, 바이메탈 온도계 등이 있다.

전술한 광 파이버를 사용한 온도센서는 아직 개발단계라고 해도 과언이 아니다.

## (3) 역학센서

변위나 왜곡, 회전각, 속도, 가속도, 힘, 압력, 토크, 유량, 유속등 힘에 관련되는 센서를 역학 센서라고 하는데, 이것들의 측정은 광이나 전기를 나누어 하기 보다 각종 센서의 조합에 의해 행하여지는 것이 많다. 예를 들면 힘은 변위나 왜곡에 의해 측정되고 그 변위나 왜곡은 차동 트랜스나 정전 용량의 변화로 바뀌며 또 왜곡 게이지로도 측정된다. 한편, 광의 간섭현상과 그것을 측정하는 광소자를 이용하면 미소한 이동도 측정할 수가 있다.

속도센서는 잘 알려진 것으로 예를 들면 자동차의 스피드 미터가 있다. 한편, 그 자동차의 스피드를 외부에서 측정하는 것에 초음파를 사용한 것, 마이크로 파를 사용한 것, 적외선을 사용한 것 등 여러가지가 있다. 이와 같은 예들로서도 알 수 있듯이 어느 것이 좋은가를 일괄적으로 말할 수 있는 것은 아니지만 마이크로 파를 사용하는 경우 전파법으로 규제되는 것도 고려해 두어야 한다. 한편, 태양광이

나 안개에 약하다.

회전각이나 위치 측정에는 자일로가 적합하다. 항공기에 사용되는 고정밀도의 비싼 기계식 자일로도 있지만, 자립항법식의 무인차에 탑재되는 자일로로는 헬륨가스를 봉입하여 그 흐름을 열선의 온도 변화에서 판독하는 가스레이트 자일로가 흔히 사용되고 있다. 또, 최근 파이버 자일로가 연구단계를 지나 실용화되고 있다. 이것은 레이저, 결합기, 싱글모드 파이버, 수광기 등으로 구성되는 것으로서 아직 많이 생산되지 않아 고가이지만 기술의 진보와 더불어 값이 내려갈 가능성이 있으며 차후 급속히 그 가격이 내릴 것으로 생각된다.

유량, 유속을 측정하는 것에 관로내에 오리피스, 노즐, 벤츄리관 등을 설치하고 그 전후의 압력을 측정하여 구하는 것이 있는데, 광 파이버를 사용하여 그 단말에서 나온 광의 반사광의 약간의 파장 변화를 구하고 도플러 효과를 이용, 유속을 구하는 방법이다. 이것은 혈액의 유속 측정 등 종래의 측정기로는 측정 곤란한 장소에 이용되고 있다.

#### (4) 이미지 센서

촬상관이나 광전자 배증관, CCD 등이 많이 알려진 이미지 센서이지만 이것도 광이나 전기로 구별할 수 있는 센서는 아니다. 다만 최근은 이미지 파이버와 이것들을 결합한 것이 상당히 실용화되고 있다.

이 이미지 파이버는 원래 위 카메라등 의료용에 사용되고 있지만 석영계 파이버의 기술적 진보에 의해 가늘고 긴 이미지 파이버가 실용화되어 원자로의 기기, 구조물의 관찰 검사, 연료검사 배관 검사, 핵융합 플라즈마 관측이나 발전소 등의 보일러 내부 관측에 사용되고 있다. 현재 최대 화소수 10만, 길이 100m, 내열특성이 240°C, 내방사선이 10<sup>6</sup>R 정도가 개발되고 있다. 또, 1mm 이하의 가는 지름으로 할 수 있는 것의 특징을 살려 혈관 내부의 관측 등도 행하여 지고 있다. 차후 이러한 수요가 더욱 확대될 것으로 생각된다.

#### (5) 전자계 센서

전압이나 전류 및 전계나 자계의 측정은 전기측정의 기본을 이루는 것으로서, 예전부터 상당히 확립되고 있는 기술이지만 최근의 광기술의 진보에 의해 새로운 센서가 여러가지 제안되고 있다. 광을 이용하는 이점은 광의 절연성에 의한 고전압기기, 선로에의 응용이다.

이 원리는 패러데이 효과나 포켈스 효과가 큰 재료에 광을 통하여 그 편파면이나 광의 타원도를 측정함으로써 자계나 전계를 구하는 것이다. 또, 자재 재료나 전재재료로 광 파이버를 피복하고 피복재의 왜곡을 광의 위상 변화에서 구하는 방법도 있다. 다만, 이것들은 모두 발광소자, 수광소자를 필요로 하며 고가인데다가 온도특성이 나빠 고정밀도 측정에는 적합하지 않아 그리 사용되고 있지 않다.

#### 맺음말

광과 전기를 대충 비교하면 광은 전자유도 등에 의한 노이즈에 강하고 전기는 더러워지기 쉬운 나쁜 환경에 강하다고 할 수 있다. 광 파이버를 이용한 센서는 비교적 새로운 분야이며, 주로 파이버 내의 위상변화에 의해 물리량을 측정하기 때문에 대단히 고감도이다. 그러나 이것을 수반하는 용기의 진동, 온도, 습도 등의 영향을 제거하는 배려가 필요하다.

현재 파이버 자일로나 파이버 하이드로폰 등은 신용단계에 들어서 있다. 이것들이 어느 영역에서는 종래의 것을 능가하는 날도 멀지 않았다고 생각한다.

그러나 광응용 센서는 일반적으로 레이저 광원이거나 그 위상측정장치 등 비교적 고가의 부품이 필요하여 아직 실용레는 그리 많지 않다. 전계, 자계, 온도, 유량 측정등 종래부터 널리 사용되고 있는 분야에서는 종래 방식으로는 본질적으로 불가능하거나 특성이 나쁘거나 한 분야에 있어서 그 특징을 발휘할 수 있을 것으로 생각된다. ㊦

# 광과 전기의 사용성 비교

## 머리말

광 시스템은 종래의 전기 시스템에 비해서 여러 가지 장점을 가지고 있다. 그러나 저손실, 광대역, 무유도, 내잡음 특성등 우수한 점이 강조되는 반면, 광이 가지는 본질적인 문제점이 간과되기 쉽다. 이것은 시스템을 구성하는 디바이스 설계상 극히 중요한 포인트로서 광의 성질을 잘 이해하고 나서 이용하지 않으면 광의 특징을 충분히 살릴 수가 없다. 여기서 전기회로와 광회로로 대비하면서 광회로의 응용상 유의점을 중심으로 정리해 보기로 한다.

## 1. 광회로가 가지는 한계

우선 첫째로 전기회로소자와 광회로소자를 비교하면 전자가 트랜지스터를 시초로 하는 단자소자인데 대해서 광회로소자는 레이저 다이오드로 대표되듯이 2단자 소자가 기본이다. 따라서 증폭, 발진 등의 기능을 광소자만으로 실현하는 것은 어려운 점이 있다. 그래서 전송 기능만 광으로 하고 증폭 등의 기능은 전기로 변환해서 실현시키고 있는 것이 현상이다.

둘째 포인트는 전기에 있어서의 파위의 개념이 광과는 상이하다는 것이다. 즉, 전력(파위)은 전압과 전류의 적으로 표현할 수 있지만 광의 파위는 이 이상 분해되지 않는다. 따라서 하이임피던스 터핑으로 분기를 취하는 등의 재주는 광으로는 불가능하며 다 분기를 저손실로 취하는 것은 극히 어려워진다.

셋째 포인트는 광소자 집적화의 한계이다. 전기

소자는 IC로 대표되듯이 백만개 가까운 요소를 수 mm각의 칩상에 집적할 수가 있다. 그러나 광소자는 광이 갖는 파장으로 제한을 받으며 수  $\mu\text{m}$  서브미크론의 광도파로가 부가결하다. 또 광의 직진성을 생각하면 굴곡이 어려우며 아무래도 리니어한 소자가 안될 수 없다.

즉, 어스펙트 비가 1:100~1:1,000으로 소자의 종횡비(縱橫比)가 극히 크고 또 양방 고정밀도 가공이 필요하다는 것을 의미하고 있다. 따라서 집적화, 미세화가 전기소자에 비하면 2계단 이상 곤란하다고 할 수 있다.

최후의 포인트는 접속문제이다.

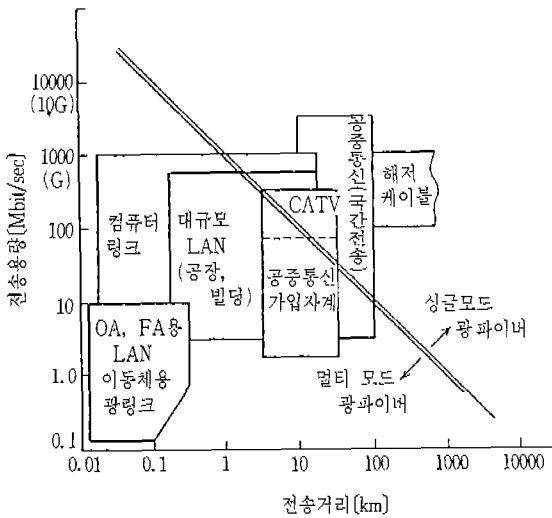
광회로에는 전기회로와 같은 임피던스 정합이나 접지에 어려움이 없는 반면 기하학적인 정합이 필요하다. 즉, 도파로나 광 파이버의 코어에 상당하는 부분을 특히 싱글 모드계에 있어서는 서브 미크론의 오더로 위치 맞춤을 하지 않으면 안된다. 광회로의 최대의 과제는 이 접속기술에 있다고 해도 과언이 아니다.

## 2. 광회로, 광소자의 응용상의 과제

광기술이 가지는 우수한 점을 충분히 살리기 위해서는 그 한계를 잘 이해하지 않으면 안된다. 몇가지 대표적인 소자를 들어 생각해 보기로 한다.

### (1) 광 파이버

전송로로서 생각했을 때 광 파이버는 현재 가장 좋은 매체라고 생각된다. 즉, 전송손실은 이론한계라고도 할 수 있는 0.2dB/km이 달성되고 있으며,



〈그림 1〉 광 파이버 통신의 적용영역

이 값은 광이 1km 전반한 후에도 불과 5%의 감쇠밖에 받지 않는 것을 의미하고 있다. 한편, 대역 쪽도 사용 파장 1.55 $\mu\text{m}$ 와 같은 광 파이버의 저손실 창을 사용해서 10수 GHz의 고속전송이 가능하다.

현재 실용화되고 있는 광 파이버의 종류는 극히 많다. 멀티 모드 광 파이버와 싱글 모드 광 파이버로 대별되는데, 전자의 경우 GI-50(50 $\mu\text{m}$ φ 코어)로 굴절률 분포를 갖는 광 파이버)이 주류이긴 하지만 코어 지름만도 65.5, 80, 100 $\mu\text{m}$ , 그리고 SI형(계단형상의 굴절률 분포를 갖는 광 파이버)을 포함하면 200, 250 $\mu\text{m}$ φ와 같은 대구경도 있어 사용목적에 따라 구분 사용되고 있다.

한편, 싱글 모드 광 파이버는 주로 장거리 전송용으로 사용되고 있다. 최근에는 편파보전 특성이 있는 것도 나와 있다. 〈그림 1〉에 광 파이버의 적용범위를 표시했는데, 용도에 따라 적당한 광 파이버를 선택해야 한다.

〈그림 1〉좌측 아래부분은 대구경의 플라스틱 파이버 등의 적용영역이지만 동축 케이블이나 페어 케이블과의 경쟁이 존재하는 분야로서 코스트 파포먼스를 고려하지 않으면 도리어 불경제적이 된다. 특히 이서네트와 같은 동축계로 시스템이 완성되어

〈표 1〉 접속손실의 원인

손실의 종류	손실원인
접속할 광파이버의 구조 파라미터의 상위	코어지름 NA 또는 비균전율차 코어 또는 클래드의 편심 코어의 비원성
접속할 광파이버의 기하학적부정정성	축차이 각도차이 간격차이 면의 거칠음
광파이버의 단면만사	프레넬만사

있는 경우나 CATV 시스템과 같이 다수의 가입자에 서비스하는 경우에는 아직 광 시스템의 완성도가 낮다고 보아야 한다.

## (2) 코넥터

광회로에 있어서의 접속에 대해서는 상호의 선로간 변위가 손실에 영향을 미친다는 것을 알고 있다. 이점은 전기회로와의 결정적인 차이이다. 선로간은 물론이고 광 파이버와 도파로 디바이스의 접속도 고도의 위치맞춤이 요구된다. 따라서 광회로의 접속문제가 광 시스템의 특성을 좌우한다고 해도 과언이 아니다.

전자계의 전지에서 보면 접속이란 도파로끼리(광 파이버도 그 일종으로 생각된다)의 전계분포를 정합시키는 조작이라고 할 수가 있다.

따라서 접속시에 생기는 손실의 원인에 대해서 고찰해 보기로 한다. 원인별로 대별하면 〈표 1〉과 같다.

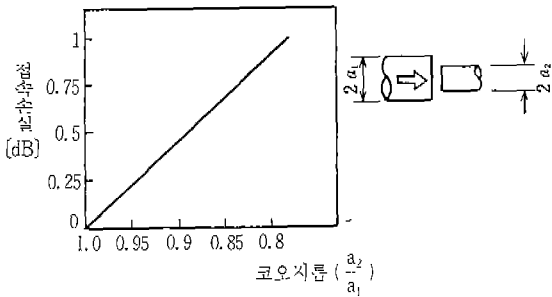
### ① 광 파이버의 구조 파라미터 부정합 손실

접속할 멀티 모드 파이버의 코어 지름의 상위에 의한 손실은 다음과 같이 표시할 수가 있다.

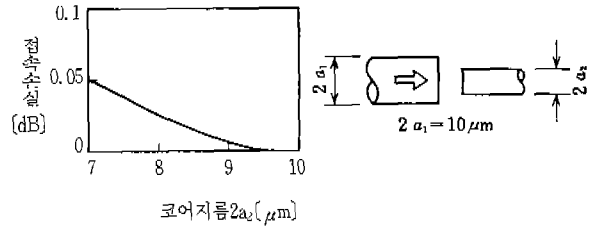
$$L_1 = -10 \log(a_2/a_1) \text{ (dB)}$$

단, 코어지름  $2a_1$ ,  $2a_2$ 라 하고,  $a_1 > a_2$ 라 한다.

멀티 모드의 경우는 코어 지름의 면적비로 손실이 대표되지만 싱글모드 파이버의 경우는 스포트



(a) 멀티모드 광파이버



(b) 싱글모드 광파이버

사이즈의 상위에 의존한다. 스포트 사이즈( $\omega$ )는 다음과 같이 표시된다.

$$\omega = (0.65 + 1.62V^{-3/2} + 2.88V^{-6})a$$

$$\text{단, } V = 2\pi a n_1 \sqrt{2\lambda}$$

여기서 2개의 싱글모드 광 파이버가 부여되었을 때 각각의 스포트 사이즈를  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ 라고 하면 접속 손실은 다음 식으로 표시된다.

$$L_2 = -10 \log \left\{ \left( \frac{2\omega_1\omega_2}{\omega_1^2 + \omega_2^2} \right) \right\} \text{ [dB]}$$

멀티 모드, 싱글 모드 광 파이버의 접속손실의 예를 (그림 2)에 들었다. 싱글 모드 광 파이버의 경우 쪽이 코어 지름의 상위에 의한 손실에 작아지는 것에 주목해야 한다.

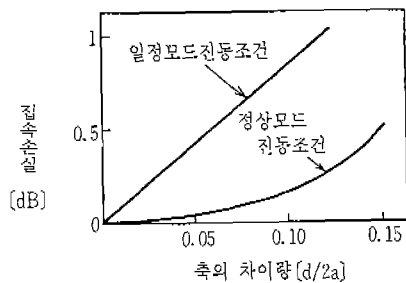
② 광 파이버의 기하학적 불완전 손실

광 파이버끼리의 형상, 위치 정밀도에 의존하는 손실로서 축 차이, 각도 차이, 간격 차이, 표면 거칠기의 4가지로 분류된다. 각각의 멀티 모드와 싱글 모드의 경우에 따라 상이하하며, 정리하면 (표 2)와 같다.

멀티 모드 광 파이버일 때 파이버의 접속점이 광원에서 어느 만큼 떨어져 있는가로 손실이 상이하다는 현상이 있다. 이것은 광 파이버를 장거리에 걸쳐 전반할때 고차 모드가 감쇠를 받아 저차 모드가 도미넌트가 되기 때문이다. 통상 이 거리는 수 100m~1km라고 하고 있다. 따라서 광원에 가까운 경우의 전반상태를 일정모드 여진(전체모드 여진), 광원에서 충분히 떨어진 경우의 전반상태를 정상모드 여진이라고 한다. 일반적으로는 정상 모드 여

〈표 2〉 차이량과 접속손실

차이량	멀티모드광파이버	싱글모드광파이버
축차이 (d)	$-10 \log \left\{ \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \frac{d}{2a} - \frac{d}{\pi a} \sqrt{1 - \left( \frac{d}{2a} \right)^2} \times \left[ 1 - \frac{1}{12} \left( 2 + \frac{d^2}{a^2} \right) \right] \right\}$ (SI형 정당모드)	$-10 \log \left\{ \exp \left\{ - \left( \frac{d}{\omega} \right)^2 \right\} \right\}$
각도차이 ( $\theta$ )	$-10 \log \left( 1 - \frac{\theta}{\pi \sqrt{2} a} \right)$ (SI형)	$-10 \log \left\{ \exp \left( \frac{\pi n_2 \omega \theta}{\lambda} \right) \right\}$
간격차이 (z)	$-10 \log \left( 1 - \frac{z}{4a} \tan \theta_c \right)$	$-10 \log \left\{ \frac{1}{1 + \left( \frac{\lambda z}{2\pi n_2 \omega} \right)^2} \right\}$

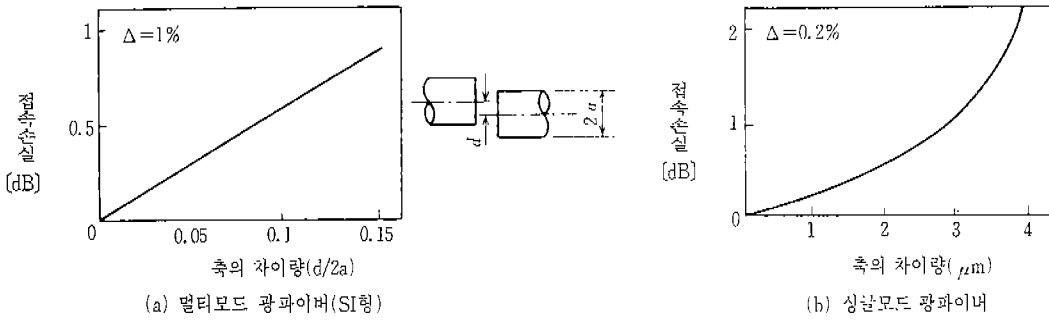


〈그림 3〉 축의 차이에 의한 접속손실

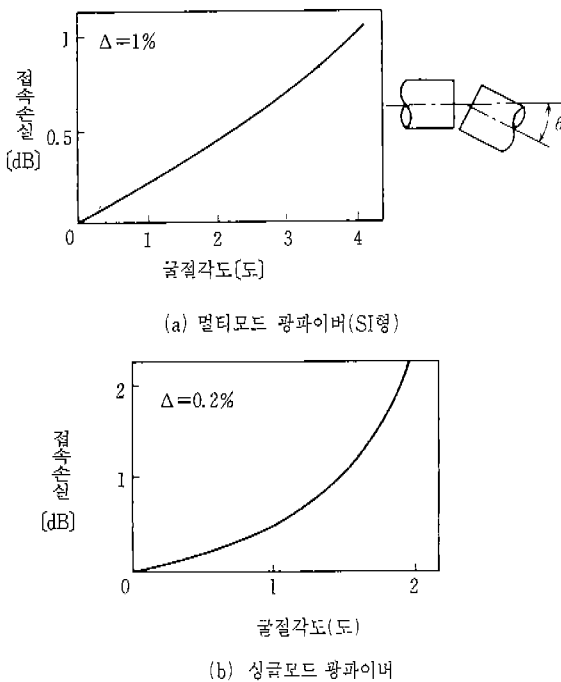
진상상태로 평가하는데, 고차 모드가 떨어져 있기 때문에 축 차이, 각도차이 등에 대한 접속손실에의 영향은 작아지고 있다.

〈그림 3〉에 축 차이량에 대한 접속손실을 일정 모





(그림 4) 파이버의 축 차이에 의한 접속손실



(그림 5) 광 파이버의 각도 차이에 의한 접속손실

드, 정상 모드의 각각의 여진상태에서의 변화량을 표시하였다. 또한 (그림 4)에서도 알 수 있듯이 1dB의 접속손실을 부여하는 축 차이량은 멀티 모드 광 파이버의 8~9 $\mu\text{m}$ 에 대해서 싱글 모드 광 파이버의 그것은 3 $\mu\text{m}$  이하로 극히 작다. 따라서 싱글 모드 광 파이버 코넥터의 기계정밀도를 울리지 않으면 안되는 것을 알 수 있다.

한편, 각도 차이(그림 5에 표시하듯이), 간격 차

이도 싱글 모드 광 파이버의 경우는 심하고 접속손실은 전자에서 각도  $\theta$ 의 2승, 후자에서 간격의 3/2승에 각각 비례하게 된다. 따라서 종합적으로 접속손실을 작게 하려면 싱글 모드 광 파이버용 코넥터의 경우 서브 마이크론의 가공정밀도를 필요로 한다. 이것은 전기계의 코넥터와 결정적으로 상위한 점이다.

마지막으로 프레넬 손실인데, 굴절률이 상이한 매질, 즉  $n_0, n_1$ 의 경계에서 다음과 같은 반사가 생긴다.

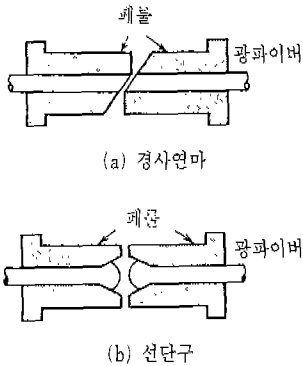
$$R = \left\{ \frac{(n_1 - n_0)}{(n_1 + n_0)} \right\}^2$$

따라서 코넥터를 결침으로 인한 접속손실은

$$L_3 = -10 \log(1 - R) \text{ [dB]}$$

가 되며, 지금  $n_0=1$ (공기),  $n_1=1.45$ (석영계 파이버)라고 하면 0.3dB의 손실이 반드시 생기게 된다. 이 반사에 의한 손실은 단적인 손실에 끝나지 않고 레이저에의 복귀광으로서 광원의 불안정성에도 영향을 미친다. 통상적인 광회로에서는 -40dB 이하로 반사량을 억제하지 않으면 안된다고 하고 있다. 따라서 여러가지의 대책이 시도되고 있다.

- (i) 굴절률 정합계의 봉입(예컨대 실리콘계 수지)
  - (ii) 경사 커트 코넥터(광축에 대해서 6~7의 경사를 갖게 한다).
  - (iii) 파이버 단면(端面)에의 무반사 코트
  - (iv) 광 파이버끼리를 불형상 단면화하여 접속
  - (v) 아크 방전 등에 의한 스프라이싱
- (i)~(iii)은 특수한 경우를 제외하고 일반적으로는 사용되고 있지 않다. (ii), (iv)는 (그림 6)에서 표시하



〈그림 6〉 파이버 단면에서의 무반사대책

는 바와 같은 구조를 하고 있으며 위치 정밀도의 정합성, 반사손 제거 어느 것도 가장 좋다. 특히(b) 타입은 PC 코넥터로서 실용화되고 있다.

광집적회로도 대표되는 것같은 평면형광 디바이스에의 싱글 모드 광 파이버의 접속도 중요한 과제이다. 접속원리는 광 파이버끼리의 경우와 동일하게 양자의 전계분포 정합(整合)을 최적화 하는 것이 좋다.

$$L_1 = -10 \log$$

$$\left\{ 0.93 \times \frac{1(\omega/a)^2}{\{(\omega/a)^2 + \epsilon\} \{(\omega/a)^2 + 1/\epsilon\}} \right\}$$

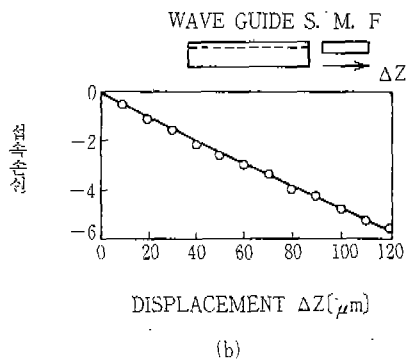
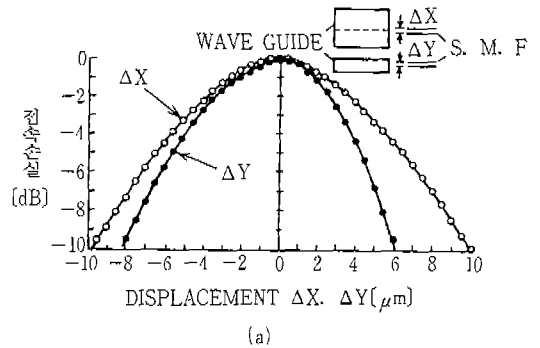
단,  $\omega = \sqrt{\omega_1 \cdot \omega_2}$ ,  $\epsilon = \omega_1/\omega_2$

$\omega_1 = \omega_2$ 로 하면 식( )과 정수 이외는 일치한다.

이 정수는 광 파이버와 도파로의 전계분포의 본질적인 차를 표시하고 있으며 이상적인 경우라도 93%의 결합효율밖에 얻어지지 않는 것을 의미하고 있다.

〈그림 7〉에 싱글 모드 광 파이버와 광도파로(LiNbO<sub>3</sub> 예)의 접속손실과 상대변위와의 관계를 표시하였다. 특히 각도 차이에 대해서 심한 것을 알 수 있다.

광 파이버의 접속에 대해서 기술해 왔는데, 또 하나의 과제는 여하히 효율적으로 고정 실장하는가 하는 점에 있다. 현재 광 파이버 코넥터는 현장조립형(FA형)과 고정밀도형(FC형)으로 대별된다. 외관, 형상은 동축 케이블의 BNC 코넥터와 닮았지만



〈그림 7〉 도파로와 광파이버의 접속

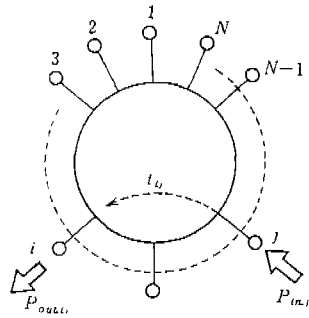
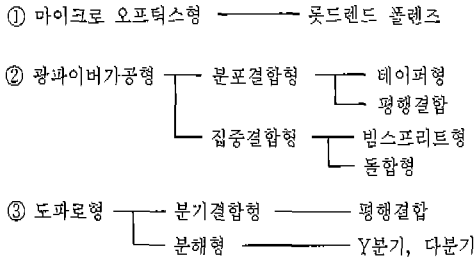
전술한 바와 같이 정밀도가 많이 다르다. 코넥터의 기본구성은 중심에 가는 구멍이 있는 페룰루에 광 파이버를 삽입, 슬리브 안에서 돌합시키는 것이다.

실제의 축맞춤은 현미경 아래서 하며, 페룰루 중심에 광 파이버를 고정 접하는 방식으로 시계 가공에 사용되는 정밀가공기술이 사용된다. 멀티 모드 광파이버에 대해서 평균 접속 손실이 0.3dB, 단일 모드 광 파이버에 대해서도 평균 0.55dB의 저손실 접속이 달성되고 있다.

### (3) 광 분기·합류회로

전기회로와 달리 광 회로의 분기·합류에 대해서는 파위의 분배(임피던스 정합은 안된다)만을 취급하게 된다. 따라서 기하학적인 형상이 중요한 포인트가 되며 삽입손실, 출력 파워의 일정성 등의 특성이 구해진다. 기능으로서는 1×2, 1×4……1×n 등

〈표 3〉 광분기·합유기의 구조상의 분류



〈그림 8〉 N포트 광분기·결합기의 모델

의 1대 다단형(對多端型)과 2×2, 4×4 등 nxm의 다단형으로 나뉘어지는데, 특히 후자를 커플러라고 하기도 한다.

코넥터의 항에서도 기술한 바와 같이 멀티모드 광과 싱글 모드 광에서 출력특성에 상위가 생기는 일이 있다. 이것은 모드 변환에 입각하는 것으로, 렌즈계를 걸쳐 상 변환을 하는 광회로 이외의 것에서는 영향을 무시할 수 없다. 광분기·합유기의 구조상 분류는 통상 〈표 3〉과 같이 표시한다.

분기·합유기에 관한 광학적 특성을 평가하기 위해서는 전달합수 전달 매트릭스의 개념을 도입하는 것이 유용하다. 〈그림 8〉과 같이 포트 수 N을 갖는 광 회로를 생각한다. 여기서 포트 j만에 광 파워 Pin, j를 입력했을 때 j 이외의 포트로부터의 출력 Pout, ij가 얻졌다고 하면 이 광회로의 전달계수를 다음과 같이 정의한다.

$$t_{ij} = \frac{P_{out, ij}}{P_{in, j}}$$

(i, j=1, 2, …, n)

dB표시로 하면

$$T_{ij} = 10 \log(P_{out, ij}/P_{in, j})$$

한편, 복수의 포트에 광 파워가 입력되었을 때 출력 포트에는 입력 파워에 대응한 기여분이 가산되어 출력되게 된다. 즉, 각 포트의 입력에 대한 출력이 상호 간섭하지 않는 조건하에서는 출력포트 i의 출력은

$$P_{out, i} = \sum P_{out, ij} = \sum t_{ij} \cdot P_{in, j}$$

와 같이 표시된다. 이때의 전달계수  $t_{ij}$ 는 매트릭스로서 표현되며, 이것을 전달메트릭스라고 한다. 광

회로에서 사용되는 특성값 정의의 몇가지를 표시한다. 여기서, j포트를 중심으로 생각해 보면 (dB표시)

- (a) 삽입손실(통과손실)  $10 \log t_{ij}$
- (b) 아이소레이션(크로스토크)  $10 \log t_{kj}$   
(R 포트 : 광신호를 전달하고 싶지 않은 포트)
- (c) 반사손실  $10 \log t_{ij}$
- (d) 과잉손실  $10 \log \sum t_{ij}$
- (e) 분배손실  $10 \log(t_{ij}/\sum t_{ij})$

이들 정의로부터 삽입손실=과잉삽입 손실-분배손실이 되며 이것이 광 회로의 특성을 정하는 중요한 파라미터가 된다. 이 정의는 마이크로파 회로와의 아나로지가 성립되어 있다. 광회로가 가지는 결점은 삽입손실 안에 광 파이버와의 접속손실에 불가피적으로 포함되어 있으며 아무래도 총합적 광회로의 로스가 커져버리는 것이다.

현재 모드 의존성이 적은 마이크로오프 텍스형 광회로에서는 0.5~1.0 dB의 삽입손실을 피하기 어

〈표 4〉 분기·합파기의 방식과 특징

구 조	분파수	특 성
유전체다층막(필터) 방식	少	파장, 대역폭의 설정자유
회절격자방식	多	협대역가, 손실이 비교적 크다
프리즘 방식	中	구성이 간단 분해능력이 낮다.

렵다. 모드 의존성이 큰 광 파이버형에서는 삽입손실을 극히 작게 할 수 있으며 0.1 dB 전후의 것도 실용화되고 있다. 도파로형은 그 중간적으로는 특성을 갖는다. 단, 싱글모드 광 파이버를 사용하면 모드 의존성은 관계없어지므로 뒤는 삽입손실 출력 파워의 불일치와 코스트의 비교가 된다.

포트 수가 많아지면 광 파이버형이 유리하다고 하고 있지만 가장 많이 사용되는 1X2, 2X2 등의 분기 합류기의 광 회로용 소자로서 무엇이 메저가 되는가 예상할 수 없다. 구체적인 광 회로의 예는 다른 문헌에 상세히 해설되어 있으므로 여기서는 언급하지 않기로 한다.

**(4) 분파·합파기(分波·合波器)**

기본적 구성은 전술한 분기 합류기와 동일하지만 광의 파장에 따라 분기 합류하는 것이다. 광 시스템 구성상 파장분할 다중 전송방식(Wavelength Division Multiplexing : WDM)이라 불리며 다량의 정보 동시 전송이나 쌍방향전송에는 유효한 방식이다. 이 방식으로 사용되는 분파·합파기란 전기회로에 있어서의 필터와 동일한 기능을 가지며, 전기회로가 주파수 공간을 이용하고 있는데 비해 광 회로에서는 파장 공간을 사용하고 있다. 분파·합파기의 구성 원리는 <표 4>의 세가지로 대별할 수 있다.

다 채널의 분파가 필요한 것은 회절 격자형이 유효하며 수 파 이하의 분파·합파기에 대해서는 필터형이 많이 사용된다. 전기회로에 있어서의 3파기와 동일하게 저삽입 손실, 채널 선폰레이션(저 크로

스토크), 넓은 사용파장 영역, 대역폭 등이 중요한 특성으로서 들 수 있다. 여기서 <그림 9>와 같은 3 파 다중 전송 시스템을 가정하고 그 특성을 평가할 때 가장 중요한 파라미터는 출력해야할 파장  $\lambda_1$ 의 신호와 출력해서는 안되는 파장  $\lambda_2$ 의 신호비  $\gamma$ (크로스토크)이다. 이때 분파기가 갖는 파워 페널티  $\Delta P$ 는 디지털 전송시 다음과 같이 표시할 수가 있다.

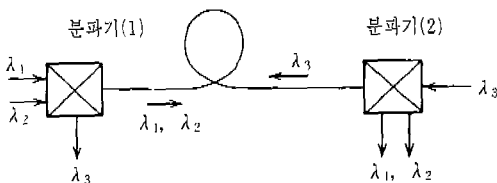
$$\Delta P = 20 \log \left( \frac{1-r}{1+r} \right) \left( \frac{2-x}{2+2x} \right)$$

단, x는 수광소자의 잡음지수를 표시한다.

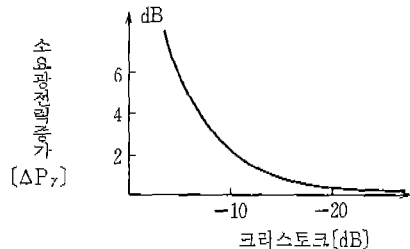
크로스토크와 파워페널티의 관계는 <그림 10>과 같다. 통상 디지털 전송의 경우는 -15dB 이하의 크로스토크가 요구되고 비디오 신호(베이스밴드)의 경우는 -23dB 이하가 요구된다.

한편, 근단누화(近端漏話) 감쇠량이라고 하는 파라미터가 있다. 이것은 어느 노드의 입력단으로부터의 신호  $\lambda_1$ 이 동일한 노드의 출력단으로 누설하는 신호량으로서 쌍방향 전송의 경우에는 잡음레벨이 올라가 버린다. 통상 -25dB 이하로 억제해야 한다고 하고 있다. 크로스 토크(원단누화 감쇠량이라고도 한다)와 이 근단(近端)누화 감쇠량을 포함해서 분파·합파기의 아이소레이션이라고 하며, 삽입손실과 함께 중요한 설계 파라미터가 된다.

합분파기에서 많이 사용되는 필터의 설계는 극히 중요하며, 소정의 파장폭에서 저손실인 한편 불필요한 파장 영역에서는 광을 완전히 저지하지 않으면 안된다. 즉, 사용하는 파원의 스펙터 폭, 온도변화 등에 의한 파장의 프리크 체이션을 흡수시키기



<그림 9> 3파장다중전송시스템의 예



<그림 10> 크로스토크와 소오 광전력의 증가

〈표 5〉 광스위치의 방식과 재료

스위치방식	스위치원리	재 료	
기계식	전자석, 스프링, 스텝 모터, 피에조 소자	프리즈, 미러 광파이버, 로트렌즈	
비기계식	별크형	전기광학효과, 자기광학효과, 음향광학효과	BSO, 액정, PLZT, LiTaO <sub>3</sub> , LiNbO <sub>3</sub> , YIG
	도파로형	위상정합 전반사(TIR)	GaAs, InP

위해 필터의 통과파장 폭은 0.8 $\mu$ m 대에서 300~350A, 1.3 $\mu$ m 대에서는 450~500A를 확보해야 한다. 따라서 필터의 제조에 있어서는 40층을 초과하는 고성능 다층막이 설계되고 있다.

기타, 필터와 광의 진행방향과의 각도 설정도 문제로써 수직 입사에 비해서 필터의 입사각도를 크게 하면 협대역화와 단파장 시프트가 생긴다. 따라서 시스템 요구에 맞는 분파·합파기를 설계하는 것은 전기회로의 설계에 비해서도 결코 용이한 일이 아니다.

한편, 회절격자를 사용한 분파기는 각도분산을 위치분산으로 변환함으로써 구성되고 있다. 즉

$$\Delta x = 2 \tan \theta_{\beta} \cdot f \cdot \frac{\Delta \lambda}{\lambda_0}$$

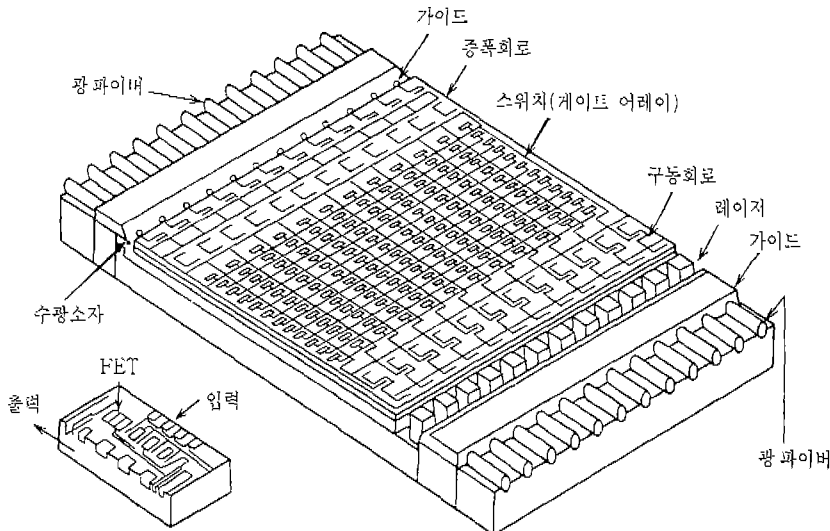
f: 렌즈의 초점거리

$\theta_{\beta}$ : 회절격자의 브래이즈 각

회절격자를 사용한 경우의 대역폭은 수광용 광파이버의 구경에 따라 근본적으로 결정되어 버린다. 따라서 입력 파이버를 동등하게 하면 대역이 좁아지기 때문에 통상은 출력 파이버의 구경을 굵게 하여 사용하는 일이 많다. 이것은 분파기로는 사용되지만 합파기로서는 손실이 심하게 커져버리는 것을 의미하고 있다. 구성이 간단하고 다(多)채널화가 용이(20채널도 가능한 이점은 있지만 사용 용도가 한정되어 있는 것이 현상이다.

### (5) 스위치

광 시스템을 구성하는데 있어서 광신호의 광로 변환, 변조 등에 광 스위치가 사용된다. 전기계 스위치에 비해 광 회로용 스위치는 그 파포멘스에서 가장 늦어져 있는 분야이다. 그러나 포텐셜은 높아 20GHz의 변조가 가능한 광 스위치(변조기)도 시험 제작되고 있으며 광 집적회로의 전개와 함께 차세



〈그림 11〉 광·전자집적회로(OEIC)의 개념도

대 광 스위치에의 기대가 크다. 현재 실용되고 있는 광 스위치는 기계식, 비기계식으로 대별되는데, 비기계식 중에서 주목받고 있는 것이 도파로형의 광 스위치이다.

기계식 광 스위치는 그 안정성, 크로스토크 특성이 좋은 등으로 가장 널리 사용되고 있다. 광 파이버, 렌즈, 프리즘, 미러 등을 전자식으로 구동시키는 방식으로, 변환시간은 10~15m sec와 같이 늦지만 삽입손실은 1.0~1.5dB, 크로스토크는 -45dB 이하 반복, 수명 $10^8$ 회 이상으로 스위치로서의 특성은 스피드 이외 실용성 문제가 없는 레벨에 달하고 있다. 변환시간은 구동해야 할 소자의 모멘탈에 의존하고 있으며, 광 파이버만을 움직이는 방식이면 수 m sec에서 서브 m sec의 것이 실용화되고 있다.

비기계식 광 스위치에 대해서는 벌크형과 도파로형으로 분류되는데, 전자는 전기광학결정을 광로 내에 삽입, 결정의 편광회전으로 이용하는 것으로서  $\mu$ sec의 오더 변환은 용이하다. 인가전압이 100V~수 kV와 같이 높고 또한 소광비(消光比)(크로스토크가 크다)가 작은 것이 결점으로, 애널로그 전송용에는 사용할 수 없다.

한편, 도파로형은 광을 좁은 영역에 잡아 넣기 때문에 전계와의 상호작용의 효율은 좋고 비교적 저전압 구동이 가능해진다. 또 집적복합화에 대해서도 유리하며 메트릭스 스위치 등이 제작되고 있다.

대표적인 2X2 단일 모드 광 스위치의 예를 들어 보면 파장  $1.3\mu$ m 삽입손실 2.0dB, 크로스토크(직통시)-27dB, (절환시)-21dB, 인가전압 6V로 1n sec의 변환시간이 얻어지고 있다.

이 예에서는 기관으로서 유전체 재료(LiNbO<sub>3</sub>)가 사용되고 있는데, 금후는 화합물 반도체(TaAs나 Inp)를 기관으로 하여 LD, APD 등의 광 디바이스와 전자 디바이스에 의한 메트릭스 스위치와의 집적화에 의한 OEIC(광전자 집적회로)가 주류가 될 것으로 보고 있다.

### 맺음말

전기회로와 광회로의 상위(相違)를 주로 하여 특성면에서 고찰해 왔는데, 양자가 상반적인 존재가 아니고 상완적(相完的)인 관계에 있는 것을 강조하고 싶다. 광방식은 전송면으로는 전기방식의 추종을 허용하지 않는 반면 증폭, 스위칭 등의 기능에서는 아무래도 뒤떨어진다.

현재는 상호의 특성을 상호보충적으로 복합화하여 실용 디바이스가 만들어지고 있지만 아직 하이브리한 집적화에 불과하다. 스위치의 향에서도 언급한 바와 같이 모노리식한 집적화가 실용레벨에 달하면 전기회로나 광회로와 같은 개별소자의 경계는 차차 없어질 것으로 생각한다. ☺

# 내가하는 재해예방 나라사랑 민족사랑