

광통신용 광섬유의 제조와 도파로 구조 설계

Fabrication and waveguide design of optical fibers for optical communications

오 경환

광주과학기술원 정보통신공학과

koh@eunhasu.kjist.ac.kr

정보화 사회의 기간망으로 구축되고 있는 광통신망에서 핵심적 요소의 하나인 광섬유에 대해 그 제조 방법 및 도파로 구조 설계에 대해 논의하고자 한다. 광섬유는 광신호가 전달되는 신호전달 매체로서 전송용량을 결정하는 특성, 즉 분산과 손실 두 측면 모두에서 twist pair 동선이나 coaxial cable에 비해 월등하다. 전송용량은 신호가 얼마나 빠른 속도로 전달되는가를 가늠하는 전송속도 (bps; bit per second)와 얼마나 먼거리를 신호를 전송하는가를 나타내는 전송거리 (km)의 곱인 bps · km로 나타내며 이 양을 증가시키기 위해 전송매질, 광원, detector, 및 증폭기에 대한 연구개발이 활발하게 진행되고 있다.

광섬유를 전송매질로 할 경우 광신호의 전송속도는 광섬유가 갖는 색분산 (chromatic dispersion)에 의해 결정되며 전송거리는 광섬유 길이방향으로의 광신호 손실 (attenuation)에 의해 결정이 된다. 1970년대 말 이후 광통신 시스템에 적용된 광섬유는 이 두 가지 특성, 색분산과 손실을 시스템의 용량 증가에 맞추어 최적화하되면서 여러 가지 형태의 광섬유로 발전되어 왔다. 즉 시기적으로 보면, 초기에 전송거리와 전송속도가 비교적 낮은 수준의 light emitting diode (LED)를 사용한 시스템에 적용된 step index multimode 광섬유, graded index multimode 광섬유로부터 전송속도가 증가된 laser diode를 사용한 시스템에 적용된 single mode 광섬유로 발전되었다. 1980년대 후반 이후부터는 광증폭기의 발전과 어울려 dispersion shifted 광섬유, dispersion compensating 광섬유, non-zero dispersion shifted 광섬유가 차례로 개발되었다. 현재에도 파장분할 다중화 (WDM; wavelength division multiplexing) 방식에서 전송 채널의 수를 증가시키기 위해 광증폭기의 이득구간의 확장에 대한 연구가 진행 중이며 이와 병행하여 차세대의 전송용 광섬유에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

이와 같은 여러 종류의 광통신 전송용 광섬유에 대해 그 제조원리, 제조방식 그리고 제조설비에 대해 논의하고자 하며 특히 MCVD (modified chemical vapor deposition) 제조 공정에 대해 설명하고자 한다. 광섬유의 제조 단계는 크게 광섬유 모재 (preform) 제조, 그리고 광섬유 인선 두 단계로 나뉜다. 광섬유의 광신호 손실을 최소화하기 위해서는 고순도의 실리카 (SiO₂) 유리의 제조가 필요하며 고순도의 silica 유리는 CVD (chemical vapor deposition) 방식을 이용하여 제조가능하다. CVD는 포화증기압이 큰 액상의 화학물질을 온도나 압력을 조절하여 선택적으로 증발시켜 고순도 증기로 변환한 후 증기 상태로 화학반응을 일으키는 방식으로 광섬유 외에도 반도체 결정 성장에도 활용되고 있다. 광섬유 제조시 쓰이는 물질은 SiCl₄, GeCl₄, POCl₃ 등으로 이들이 산화반응을 통해 비정질 상태의 SiO₂, GeO₂,

P_2O_5 를 형성한다. 이와 같은 방식으로 광섬유의 원재료인 모재를 제조한 후 이 모재를 일정한 외경을 가지고 또한 보호용 코팅이 된 광섬유형태로 최종화하는 공정이 광섬유 인출 공정이다. 광섬유 인출시 중요한 요소는 모재가열용 열원, 광섬유 코팅 장치, 외경조절 장치이다. 광섬유의 광손실의 대부분은 이와 같은 모재 제조 공정 그리고 광섬유 인출 공정에서 결정되며 현재 단일모드 광섬유의 광손실의 수준은 1.3과 1.5 micron에서 각각 0.34 와 0.21 dB/km 수준이다.

광손실외에 광전송용량을 결정하는 또 다른 요소가 광섬유의 색분산이며 이는 도파로의 구조 설계에 의해 최적화될수 있다. 광섬유는 일종의 cylindrical 도파로이며 이 도파로의 구조 즉 코어 및 클래딩의 굴절율 분포와 기하구조에 의해 각 모드들이 정의되며 이 모드들의 개별적 특성과 상호작용에 의해 색분산이 결정된다. 기본적으로 광섬유는 그 도파로에 의해 전파되는 모드의 수에 따라 multimode 와 single mode로 구분된다. 도파로에 의해 정의되는 각 모드는 파장별 그리고 주파수별로 그 전파속도 (propagation speed)가 달라진다. 이와 같은 특성에 의해 입사된 광 펄스가 광섬유를 진행하면서 주파수 성분별로 그 속도가 달라져서 펄스가 퍼지는 현상을 초래하는데 특히 펄스간의 간격이 짧은 고속 전송 속도의 경우 더욱 그 영향이 크다.

Multimode 광섬유의 기하 구조는 크게 step index와 graded index 두 가지로 나누며 색분산은 세가지 성분을 갖는다. 즉 모드간의 전파속도의 차이에서 발생하는 modal dispersion, 코어 재료에 의한 material dispersion, 도파로에 의한 waveguide dispersion이 합해져서 전체적인 색분산을 이루고 이에 의해 대역폭이 결정된다. 일반적 multimode 광섬유의 대역폭은 400~1000 GHz · km 수준으로 특히 코어의 index profile에 크게 영향을 받는다.

Single mode 광섬유는 도파로에 의해 정의된 단일 모드만이 전파되므로 modal dispersion이 존재하지 않고 material dispersion, waveguide dispersion에 의해 색분산이 결정된다. 일반 통신용 single mode 광섬유의 경우 색분산이 영이 되는 영분산 파장은 1310 nm 부근이며 1550 nm 부근의 색분산은 17~20 psec/nmkm 수준이다. 일반 통신용 광섬유에서 광손실은 1.5 micron 대역에서 0.21 dB/km 수준의 최소치를 가지므로 장거리 통신의 경우 1.5 micron 광원을 사용한다. 그러나 이 경우 색분산값이 비교적 높은 수준이므로 초고속 장거리 전송의 제약이 된다. 이 색분산 제약을 제거하기위해 개발된 것이 영분산 파장을 1.3 micron에서 1.5 micron으로 옮긴 dispersion shifted single mode 광섬유이며 이는 광섬유 코어와 내부 클래딩의 기하구조 및 재료 조성 변화를 통해 이루어 진다.

광증폭기의 개발이후 이득대역 내에 여러 개의 채널을 전송하는 WDM 시스템이 개발되고 있으며 이득 대역의 확장파 아울러 그 대역 내에서 비선형 효과를 억제하기 위한 색분산이 조절된 전송용 광섬유에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. dispersion compensating 광섬유의 경우는 도파로 색분산을 이용하여 1.5 micron 대역에서 큰 음수의 색분산과 색분산 기울기를 갖도록 설계되었다. Nonzero dispersion shifted 광섬유의 경우 또한 도파로 색분산을 이용하여 1.5 micron 이득 대역 내에서 ± 2 psec/nmkm 이내의 분산을 갖도록 설계되었다.

본 강의에서는 위의 광섬유에 대해 도파로 구조설계 방법에 대한 설명과 각 구조별 색분산에 미치는 영향에 대해 논의한다. 또한 각 광섬유의 제조시 중요한 제조공정 요소에 대해서도 논의한다.