특 집

초고속 정보통신용 고분자광섬유의 대역특성향상과 향후전망

박 찬 용·이 봉 훈

1. 서 론

최근 지역네트워크 (LAN : Local Area Network) 및 광역네트워크 (MAN : Metropolitan Area Network) 상으로 전송하는 정보전송량은 인터넷 (Internet) 및 인트라넷 (Intranet) 등의 급격한 보급과 함께 연간 1000% 수준으로 크게 증가하고 있으며 이를 수용할 수 있는 정보전송 시스템의 필요성이 절실해지고 있다. 이에 따라 초고속 통신망에 사용되는 광섬유에 대한 중요성이 더욱 증가되고 있는데 현재 정보전송용 광섬유는 실리카 (Silica) 재질의 GOF (Glass Optical Fiber)로서 전송손실이 매우 낮을 뿐 아니라 광학특성이 우수하고, 환경안정성, 내열특성, 고속전송특성 등의 장점을 두루 갖추면서 기존의 전선매체가 가지는 한계 전송속도를 쉽게 극복할 수 있는 장거리 전송매체로서 초고속 정보통신을 가능하게 하였다.

지난 20년 동안 기존 SMF (Single Mode Glass Optical Fiber)에서 손실의 감소, EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier)의 개발, 그리고 개선된 Optical receiver, 고속의 LD (Laser diode) 등의 개발로 인해서 광통신기술은 급속히 발전해 왔으며, 이러한 발전은 주로 1990년대 후반까지 Long-haul network (100 km 이상)를 구축하는데 중점이 되어 왔다.

그러나 인터넷을 이용한 기술의 비약적인 발전으로 인하여 음성매체 뿐만이 아니라, 동화상 전송 등 방대한 정보를 고속으로 전달함에 있어서 사용자들의 욕구가 더욱 높아지게 되어 long-haul영역 뿐만이 아니라 metro영역 (10~100 km)의 중,근거리 통신 네트워크에 있어서도 광 전송화가 불가피하게 되었다. 최근에는 access network (2~10 km) 등의 단거리 정보 전송량도 폭발적으로 증가함에 따라 FTTH (Fiber To The Home) 등 초고속 Home network도 점차 가시화 되고 있다. 또한, 향후 수년 내에 일반화 될 것으로 보이는 HDTV 등을 포함한 멀티미디어 시스템이 완벽히 구현되기 위해서는 10 Gbps 이상의 전송속도가 필요하기 때문에 단거리 전송부문에 있어서도 설치비용이 높고 전문

박찬용

1997 인하대학교 고분자공학과 (학사)
1999 인하대학교 고분자공학과 (석사)
1997~1999 KIST Polymer Hybrid Lab. 연구원
1999~2000 SAIT Polymer Lab. 연구원
2000~현재 LGC 광통신연구소 광섬유연구그룹 주임연구원

이봉훈

1994 한국과학기술원 기계공학 (학사)
1996 한국과학기술원 기계공학 (석사)
2001 한국과학기술원 기계공학 (박사)
1996~2001 한국과학기술원 기계공학기술 연구소 연구원
2002~현재 LGC 광통신연구소 광섬유연구그룹 선임연구원

Bandwidth Enhancement & Future Prospect of the Plastic Optical Fiber for the Gigabit Data Transmission

LG 전선 광통신연구소 광섬유연구그룹 (Chan Yong Park and Bong Hoon Lee, Fiber Optics & Telecom Research Lab., LG Cable Ltd., 555, Hogye-dong, Dongan-gu, Angang-shi, Kyungki-do 431-080, Korea)

적인 지식을 필요로 하는 SMF나 최대용량이 수백 Mbps에 불과한 현재의 동케이블을 보완할 단거리 정보전송용 광섬유가 반드시 필요하다.

POF (Polymer Optical Fiber)는 GOF와 구리전선의 중간적 특성을 확보할 수 있기 때문에 꾸준히 연구 개발되어 왔는데, 최근 초고속 정보통신망 구축이 가시화 됨에 따라 GI POF (Graded Index POF)에 대한 관심이 최근 크게 높아지고 있다. 기가비트급 대역특성을 가지는 정보통신용도의 POF를 제조하기 위해서는 여러 핵심기술이 필요하지만 그 중에서도 최적의 GI (Gradient Index)형 굴절률 분포를 갖는 프리폼 제조기술과 고분자 재료자체를 전송손실이 적도록 설계하는 기술이 가장 중요하다.

본 기고문에서는 광섬유에 관한 일반적 내용뿐 아니라 향후 Home network 및 LAN에서 사용될 기가비트급 정보전송용 GI POF의 대역 및 전송특성과 향후전망에 대해 살펴보고자 한다.

2. 본 론

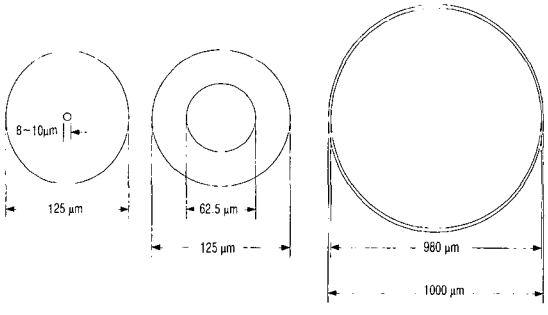
2.1 광섬유의 종류

광섬유는 일반적으로 빛이 유도되는 코어부와 진행하는 빛을 지속적으로 코어부로 유도하는 클래드부로 구성되어 있으며, 광섬유의 종류로는 실리카가 주성분인 GOF와 고분자 재질의 POF로 크게 분류할 수 있다. GOF는 1966년 Charles K. Kao 등이 저손실 광섬유의 개념을 도입함으로써 개발되기 시작하였고 POF역시 비슷한 시기에 개념이 도입되었으나 상대적으로 전송특성이 우수한 GOF에 비하여 큰 주목을 받지 못하였다.

GOF는 실리카를 주성분으로 하여 MCVD(Modified Chemical Vapor Deposition), VAD (Vapor Axial Deposition), OVD (Outside Vapor Deposition) 등의 공법으로 모재를 제조한 뒤 이를 광섬유상으로 인선하여 만들어 진다. GOF는 광학적으로 특성이 뛰어나고 전송손실이 0.2~0.3 dB/km수준에 불과한 우수한 전송 매체로서, 현재 장거리 전송에 사용되고 있는 싱글모드 광섬유 (SMF 또는 SM GOF : Single Mode GOF)와 광역 전송망에 적용되고 있는 중거리 용도의 멀티모드 광섬유(MMF 또는 MM GOF : Multi Mode GOF)로 나뉘어질 수 있다. 여기서 모드(mode)라는 것은 광섬유 내에서 진행하는 빛의 특정한 분포(통상적으로 경로라고 부름)를 말하는 것으로 광섬유의 기하구조와 사용하는 파장영역에 따라 하나 또는 여러 개 일 수 있으며, 하나의 경로만 존재할 때 SM형, 여러 개의 경로가 존재할 때 MM형이라 한다. SMF의 경우 주된 사용파장 영역인 1550 nm 부근에서 1개의 모드만이 존재하도록 도파로 구조가 설계되어 있고 MMF는 사용파장 영역인 850 nm부근에서 500~1000여 개의 모드가 존재하며 코어내부의 굴절률이 중심은 높고 주변부는 낮은 포물선형 (Parabolic) 분포를 가지도록 제조한다.

POF는 광학적 특성이 우수한 고분자를 이용하여 모재를 제조한 뒤 열연신 공정을 통하여 제조하거나, 연속인발공법 등을 이용하여 광섬유화 한 것으로 GOF와 마찬가지로 코어부와 클래드부로 구성되어 있다. POF는 싱글모드형도 있을 수 있으나 장거리 전송용도가 아니기 때문에 통상적으로 POF는 멀티모드 형이며, 광섬유 코어의 굴절률이 균일한 SI POF (Step Index POF)와 코어내부의 굴절률이 포물선형 분포를 가지는 GI POF (Graded Index POF)로 구분할 수 있다. POF는 코어직경이 50 ~ 200 μm 정도이며 최대 1000 μm까지 가능하다는 점에서 SMF 및 MMF와 크게 다르다. 멀티모드 광섬유의 가장 큰 특징은 코어경과 NA (Numerical Aperature)가 싱글모드 광섬유에 비하여 크므로 고가의 LD대신 저렴한 LED 또는 VCSEL 광원과 쉽게 연결할 수 있고 정렬 허용값 (Alignment tolerance)도 상대적으로 크므로 접속손실이 작아 접속작업이 많은 LAN 등 단거리망에 적합하다. **그림 1**은 광섬유의 종류별로 대표적인 단면크기를 묘사한 그림이다.

2.2 POF의 일반적 특성



(a) SMF (b) MMF (c) POF

그림 1. 광섬유의 단면 비교도.

POF는 재료자체의 특성상 전송손실이 GOF에 비하여 높으므로 (>20 dB/km) 장거리 전송용으로 적합치 않으나 단거리 전송용도에서는 대역특성을 확보한다면 재료자체의 유연성과 설치비용의 저가화 측면을 충분히 살릴 수 있는 이상적인 재료가 될 수 있다. 그 이유는 광섬유용 고분자 재료는 GOF의 고순도 실리카 보다는 매우 저렴하므로 코어직경을 크게 하더라도 원가가 크게 올라가지 않을 뿐 아니라 고분자 재료자체가 친화력을 갖고 있기 때문이다.[5]

코어직경의 크기는 접속시 미세정밀도와 직접적으로 관련이 있기 때문에 사용자가 직접 접속해야 하는 단거리 전송과 같은 분야에서는 코어 직경이 크면 클수록 접속이 용이하고, 접속시 사용되는 커넥터는 POF의 구경에 따라 정밀도를 ~1/20 수준까지 완화할 수 있으므로 초보자도 쉽게 사용할 수 있는 저가의 플라스틱 커넥터를 이용할 수 있다. POF의 경우는 코어직경이 크기 때문에 고가의 LD 대신 저렴한 LED 및 VCSEL 광원 등을 사용하여 저가의 패키지화 모듈을 제작할 수 있을 뿐 아니라, 재료자체의 무게도 가벼워 광섬유 포설 및 케이블 작업도 용이하여 설치비도 줄일 수 있으므로 사용편리성과 저가격화를 동시에 만족시킬 수 있다.[3,4]

통신용 고분자재료로서 가장 크게 요구되는 특성은 투명성으로서 이러한 측면에서 주로 사용되는 고분자 재료로는 PMMA (Poly(methyl methacrylate))를 들 수 있는데 PMMA는 광 투과율이 92~93%로서 88~90% 수준의 PS (polystyrene) 또는 87~89% 수준의 PC (polycarbonate) 보다 우수할 뿐 아니라, 복굴절이 일어나기 어려운 전형적인 등방성 물질로 성형성도 양호하고 기계적 강도도 밸런스가 잡힌 대표적 광학재료로 POF의 재료로서 많이 사용된다. 그러나 일반적으로 고분자 광섬유는 전송 시 전송손실이 크게 발생하는데 전송손실은 광섬유 제조 시에 발생하는 결함에 의한 비고유성 손실과 재료자체의 특성에 의한 고유성 손실로 구분할 수 있다. 비고유성 손실로는 천이금속이나 유기계 불순물로 인한 흡수손실과 먼지, 기포와 코어클래드 결함 그리고 광섬유로 인선 시 발생하는 배향 복굴절에 의한 산란손실이 있고, 고유성 손실은 재료자체의 특성에 기인하는 것으로 중합시 발생하는 고분자 밀도 불균일에 의한 레일레이 (Rayleigh) 산란손실과 자외영역의 전자천이에 의한 흡수손실 및 적외영역에서 진동흡수손실이 있다. 레일리이 산란은 고분자의 밀도변동에 의한 것으로 산란손실은 굴절률의 8승에 비례하므로 굴절률이 낮은 고분자를 사용하는 것이 유리하다.[11]

외부로부터 유입되는 원인에 의한 손실을 제외한다면 POF의 손실한계는 고분자의 적외흡수와 레일리이 산란을 줄이는 것이 중요하며 그 중 적외흡수를 경감시키는 것이 효과가 큰데, 자외영역의 전자천이에 의한 흡수손실은 C-O 이중결합의 $n \rightarrow \pi^*$ 천이와 C-C 이중결합의 $\pi \rightarrow \pi^*$ 천이 등에 의한 흡수로서 주로 자외선영역에 강하게 나타나며 근적외영역에 일부 영향을 주는데 PMMA의 경우 500 nm 이상의 영역에서 1 dB/km정도로 그 영향은 크지 않기 때문이다. 따라서 흡수손실을 크게 줄이려면 적외영역의 진동흡수를 줄여야 하는데 적외흡수는 주로 C-H 결합에 의해 발생하므로 수소보다 무거운 중수소나 불소 등으로 치환하는 노력이 이루어졌다. 그 중 불소치환 고분자의 경우는 발수성 내열성 등의 특징과 함께 적외영역에서의 손실문제도 해결할 수 있으며 굴절률이 낮으므로 레일리이 산란도 줄일 수 있을 뿐 아니라 재료분산특성도 GOF의 실리카 재료보다 우수하다.

그림 2는 광섬유의 전송손실을 보여주는 그림으로 치환기에 의한 파장별 손실로서 C-H 결합에 의한 손실은 사용 파장영역에서 크게 증가하나 C-F 결합은 사용 파장대에서 손실을 가지지 않음을 보여 주고 있다. 현재까지 연구된 불소치환 고분자는 여러가지 종류가 있으며 그 중 아사히 케미칼의 CYTOP은 완전불소치환 고분자로서 넓은 파장영역에서 투명하고, 내화학성 난연 특성 등을 갖추었을 뿐 아니라 헬릭스 (helix) 구조로서 결정화되기 어려운 장점을 갖추고 있다.

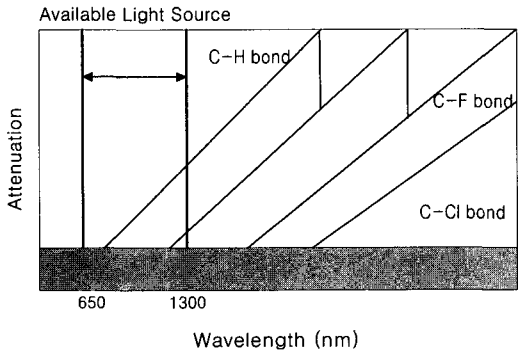


그림 2. 치환기에 따른 손실.

최근의 연구결과 완전불소치환 GI-POF의 경우 완전불소치환 고분자의 재료특성으로 인해서 굴절률 분포의 민감도를 실리카 광섬유보다 완화할 수 있고 결과적으로 넓은 파장범위에 걸쳐 대역특성을 향상시킬 수 있음을 보고하였다. 특히, 재료분산특성은 실리카 광섬유보다 우수하다고 보고되고 있다.[9,10,16]

2.3 POF의 대역 특성

대역특성 (통상 Bandwidth)이란 매질의 정보전송능력을 나타내는 것이다. 현재 상용화되어 있는 POF는 모두 코어중심의 굴절률이 균일한 SI POF로서 값이 싸고 사용하기는 편리하지만 PMMA를 기본으로 하기 때문에 재료자체의 전송손실도 크고 Bandwidth가 수십 Mbps에 불과해서 정보 전송용으로는 한계가 있다. SI POF는 Snell's Law에 의해 코어와 클래드 간의 계면 전반사(total internal reflection)에 의하여 광신호가 전송되는 것으로 광섬유의 중앙부로 직진하는 모드와 지그재그형으로 전파하는 모드간의 전파속도 차이인 분산이 생기므로 대역특성이 우수하지 못하여 조명용도로 사용하거나 단거리 정보전송용으로 사용한다.

Bandwidth는 전송채널에서 정의된 손실 또는 정의된 신호 왜곡값을 가지는 최대 주파수 채널을 의미하는 것으로 실제적으로 펄스의 퍼짐을 측정하여 주파수 영역에서 광학적 손실 (일반적으로 -3 dB 정의)에 대한 선폭을 구한 뒤 이를 광섬유의 길이로 정규화하여 Hz·km로 표현하며 이를 주파수-거리 결과 (Frequency-distance product)라고 한다.

Bandwidth가 크다고 하는 것은 주어진 변조(modulation)주파수로 더 멀리 갈 수 있음을 의미하거나, 같은 거리를 보다 빠른 주파수를 이용하여 보낼 수 있음을 의미하는 것이다. 예를 들어 Bandwidth가 200 MHz·km라는 것은 200 MHz 주파수를 이용하여 1 km를 전송하거나 100 MHz 신호를 이용하여 2 km전송할 수 있다는 것으로 빠른 변조 주파수를 이용하면 보다 많은 정보를 단위시간에 전송할 수 있음은 물론이다.[15,17]

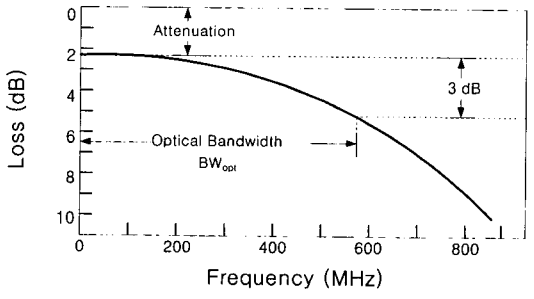


그림 3. Frequency domain에서 Bandwidth.

또 다른 표현으로서 Bandwidth는 Gbps(Giga bit per second) 또는 Mbps로 표현하기도 하는데, 단위 거리당 신호간섭(intersymbol interference) 없는 최대 비트율 (bit rate)로 정의하고, 한가닥의 광섬유가 전송할 수 있는 정보량을 의미할 경우 사용한다. 광섬유에서 데이터의 비트는 광신호의 펄스로 표현되며 각각의 펄스는 광섬유 내부를 진행하는 동안 퍼짐현상 (분산)이 발생한다. 이러한 펄스의 퍼짐이 중첩되면 신호간섭이 일어나게 되며 수신단에서 신호의 분리가 불가능해진다. 신호간섭이 적으면 적을수록 광섬유의 전송능력은 우수하다고 볼 수 있으며 결국 광섬유의 대역특성은 펄스의 퍼짐, 분산에 의하여 결정된다고 볼 수 있다.

광섬유의 분산은 크게 두 가지로 나누어 볼 수 있다. 첫번째는 Intramodal dispersion으로서 색분산 (chromatic dispersion)이라는 표현으로 더 많이 사용되는 것으로서 실제 광원은 미세한 파장의 분포 (Spectral width)를 가지고 있고 각각의 파장에 대해 매질의 전파속도가 다르기 때문에 발생하는 것이다. 주로 LD보다 LED에서 많이 발생하는데 LED의 파장분포가 보다 넓기 때문이다. 색분산은 구조 (waveguide)분산과 재료 (material)분산으로 다시 나뉘어진다. 구조분산은 광섬유 도파로 내부의 굴절률 분포차이에 의하여 유효 굴절률이 생기고 이에 따라 전파속도가 결정되어 따라 생기는 것이고, 재료분산은 광섬유의 매질이 유전특성을 가지고 있고 파장에 따른 유전특성이 달라지기 때문에 생기는 것이다. 두 번째는 Intermodal dispersion으로 멀티모드 광섬유에만 있는 현상이다. 이는 전술한 바와 같이 멀티모드 광섬유의 경우는 NA가 커서 다양한 모드의 빛이 입사하기 때문에 발생하는데 서로 다른 모드로 진행한 신호는 모드간 속도차에 의하여 빠른 모드와 느린 모드로 시간차가 생기고 느린 모드는 뒤따라오는 신호와 중첩하여 종단에서 신호분리가 불가능하게 되는 현상을 말하는 것이다. 따라서 멀티모드 광섬유의 전송능력 (Bandwidth)을 향상시키려면 Intermodal dispersion을 최소화 하도록 광섬유 내부에 굴절률 분포를 부여해야 한다.

2.4 GI POF

진행 경로가 짧은 코어 중심부분의 굴절률을 높게 하고 진행경로가 긴 클래딩 부분의 굴절률을 낮게 하면 진행경로 차이에 의한 전송 시간차가 상쇄되어 모드분산을 최소화할 수 있다. GI POF의 경우는 코어내 굴절률 분포를 부여한 POF를 말하는데, 정확한 표현은 아니지만, 다음과 같은 설명으로 쉽게 이해될 수 있다. 즉, 광섬유 내부에 굴절률 분포가 있는 GI POF의 경우 입사한 모든 모드는 스넬의 법칙(Snell's law)에 의하여 사인파형을 그리며 전파하여 굴절률이 높은 쪽으로 진행하려는 특성이 있으므로 광축에 모든 입사광이 교차하면서 진행하게 되고 굴절률과 역비례 관계가 있는 빛의 진행속도로 인하여 굴절률이 높고 경로가 짧은 코어 중심쪽의 모드와 굴절률이 낮고 경로가 긴 가장자리로 지나가는 모드는 경로에 따른 모드간 군속도의 차이가 없이 진행하게 되며 결과적으로 모드간 신호간섭이 없어 초고속 통신이 가능하게 된다.

그림 4는 GI POF를 이용하여 전송할 때 모드의 진행경로를 보여주는 그림이다. SI POF의 경우 첫번째 입사신호와 두번째 입사신호가 서로 뒤섞여 출력단에서 분리하기가 곤란해지지만 GI POF의 경우 첫번째 신호와 두번째 신호는 서로 분리되어있음을 볼 수 있다.

GI 분포 (Gradient Index Profile) 근사화 시킨 식을 Power Law Index Profile이라 한다. 즉 코어 중심부 굴절률과 클래드 굴절률이 결정되면 이상적 굴절률 분포형상을 결정할 수 있고, 굴절률 분포형상을 결정하는 지수 α를 굴절률 분포 파라미터 (profile shape parameter)라고 하는데 α=1일 경우 삼각형 구조의 굴절률 분포가 되며 α=∞일 경우 스텝형 굴절률, α=1.5~3일 경우 포물선형 굴절률 분포가 된다. α 값에 따라 굴절률 분포가 변화하는 모양이 **그림 5**에 나타나 있다.

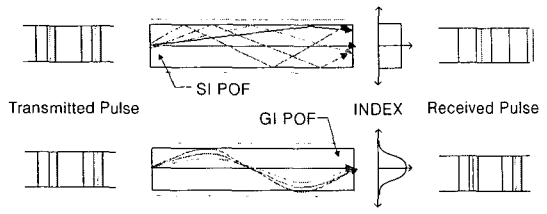


그림 4. SI POF와 GI POF의 비교.

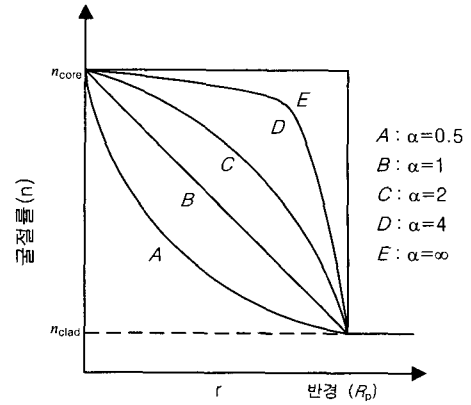


그림 5. 굴절률 분포 설계.

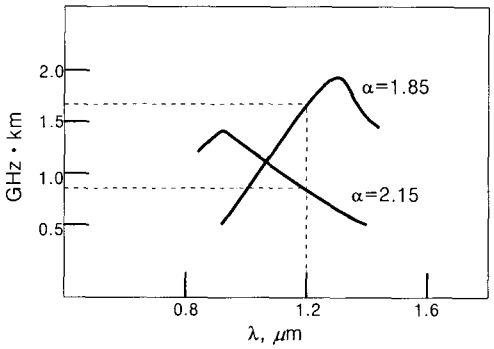


그림 6. α 값에 따른 파장별 대역특성.

Power Law Index Profile

$$n(r) = n_{core}[1 - \Delta\left(\frac{r}{a}\right)^{\alpha}]^{1/2}$$

$$\Delta : (n_{core}^2 - n_{clad}^2)/2n_{core}^2$$

r : 임의의 위치에서 코어반경

a : 코어반경

α : 굴절률 분포 파라미터

제조하고자 하는 POF의 구경에 따라 최적의 Δ 및 α 값이 선정되고 α 값에 따라 대역특성이 크게 좌우되기 때문에 Power Law Index Profile에서 최적의 α 값을 설계함으로써 모드분산이 최소화되고 대역특성이 최대가 되는 굴절률 프로파일을 도출할 수 있다. 사용파장에 따라 최적의 α 값이 다르며 최적의 α 값을 전후해서 대역특성이 급격하게 변화하므로 설계된 α 값을 그대로 실현시키고 프로파

일을 유지할 수 있는 공법을 개발하는 것이 무엇보다 중요하다. 실제로 프로파일 파라미터 α 값의 차이는 약 10% 정도이지만 그에 따른 Bandwidth의 차이는 약 200%에 달하므로 설계시 정확한 α 값의 결정과 공정에서의 구현이 필수적으로 요구된다. **그림 6**은 α 값의 차이에 따라 사용파장과 Bandwidth가 어떻게 결정되어야 하는지 보여주고 있다.

2.5 POF의 DMD (Differential Modal Delay)

POF의 광원으로는 통상적으로 사용되는 저가의 LED (Light Emitting Diode)뿐만 아니라 VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) 광원이 크게 고려되고 있는데, 이는 LED 광원의 bit rate가 낮기 때문에 최대 전송속도가 622 Mbps급으로 한계가 있을 뿐 아니라 주된 사용파장 대역인 850 nm 근처에서 색분산 현상이 발생하기 때문이다. 기가비트급 정보전송용 광원은 VCSEL, Fabry-Perot Laser, CD Laser 등이 있으며 특히 VCSEL은 LD와 함께 기가비트급 변조율 (Modulation rate)을 가지면서도 생산가격이 저렴하여 대역특성향상 효율이 높다.

VCSEL은 LED보다 광 초점 크기가 매우 작으므로 멀티모드 광섬유인 POF에 입사되는 빛의 분포가 LED와 다르며 광섬유 단면의 일부분에만 광신호가 분포하게 된다. 멀티모드 광섬유의 대역특성은 빛의 분포에 따라 결정되는 모드특성과 관련이 깊으므로 두 광원을 사용한 경우 각각의 대역특성은 차이가 있다. VCSEL의 경우는 상대적으로 작은 광 초점 크기로 인하여 고차, 저차모드중 일부만을 여기시킬 가능성이 LED에 비하여 훨씬 크므로 입사조건 (Launch condition)을 신중히 고려해 주어야 하며 대역특성감소의 주원인으로서 DMD를 최소화 시키는 방안이 연구되고 있다. DMD에 의한 대역특성은 멀티모드 광섬유에서 여러 모드로 나뉘어 진행하는 빛이 전파상수의 차이로 인하여 수신부에 도달하는 시간차가 발생하여 위상변화 (Jitter)를 일으키기 때문이다. 이는 여러 모드에 의한 전파상수차에 의한 것으로 단일한 모드만 전파하는 SMF에서는 발생하지 않는 현상이다. **그림 7**은 광원의 spectral width에 따라 대역폭이 어느 정도까지 차이가 나는지 보여주고 있다.

분산으로 인해서 신호간 지연차 (Jitter)가 생긴다는 점에서 DMD와 분산을 동일시 하기 쉬우나 분산은 스펙트럴 폭 (spectral width)을 갖는 광원을 사용할 경우 파장의 매질진행속도 차에 의하여

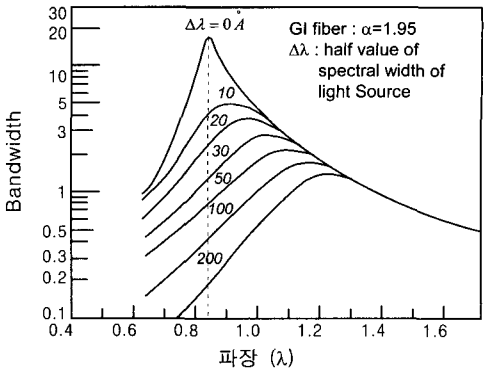


그림 7. 광원의 파장범위에 의한 대역특성 변화.

발생하는 현상인데 반하여 DMD는 코어조성에 따라 빛이 분리되는 beam-splitting때문에 발생하는 것으로 서로 다른 것이다. 기존의 LED보다 VCSEL로 사용경향이 바뀜에 따라 기존의 Bandwidth로 전송거리를 보증할 수 없음이 밝혀지게 되었고, 이에 따라 최근에는 DMD를 측정하여 전송거리를 예측하는 추세이다.[12-14]

2.6 POF의 제조공법

POF의 제조방법은 크게 연속식과 배치식이 있다. 연속식은 다시 연속 압출법, 단위 압출법으로 나눌 수 있고 배치식은 모재를 만들어서 인선하는 모재인출법이 있다. POF 제조 공정조건은 전송손실과 바로 직결되기 때문에 매우 세심한 주의가 필요하고, 단량체의 정제과정 중에 혼입되는 불순물, 금속이온과 중합과정에 생기는 미세버블, 그리고 공정의 결함에서 오는 코어 클래드 간의 불완전한 계면형성 등을 효과적으로 억제할 수 있어야 한다. 따라서 통신용도의 광섬유를 제조하기 위해서는 이물질의 혼입을 억제하기 어려운 연속식보다는 모재를 만들어 인출하는 방법이 주로 연구되고 있다.

연속압출법은 코어용 단량체를 연속적으로 중합하면서 정교하게 설계된 구조의 노즐을 통하여 코어 및 클래드 재료를 동시에 압출하는 방법이다. 이 방법은 주로 SI POF를 제조하는데 사용되며 미쯔비시 레이온 (日)에서 멀티노즐 설계를 통하여 GI POF 제조연구를 하기도 하였는데 생산속도가 빠르지만 장비가 복잡하고 불순물의 혼입가능성이 있으며 공정이 완전하지 않으면 광섬유에서 손실이 생길 가능성이 매우 크다. 단위 압출법은 밀폐된 반응기에서 단량체를 정제하고 정제된 액체상태의 단량체를 중합하여 압출하는 방법으로 생산속도가 느리지만 고순도를 얻을 수 있다. 모재인출법은 POF

에서 가장 많이 연구되고 있는 방법으로 일정크기의 모재를 여러가지 방법을 통하여 제조한 뒤 인출하는 방법으로 불순물의 혼입가능성이 제일 적으며 시스템 제어가 용이하기 때문에 특히 굴절률 분포를 부여하는 GI POF 제조에서 많이 사용된다.

멀티모드의 한 종류인 POF의 대역특성을 향상시키려면 모드 분산을 최소화하도록 최적의 가우시안 분포를 가지도록 설계해야 하는데 이를 근사화한 식인 Power Law Index profile을 통하여 최적의 분포를 설계함으로써 모드 분산이 최소화되고 대역특성이 최대가 되는 굴절률 분포를 도출할 수 있다. 설계된 최적의 프로파일을 이용하여 프리폼 내부에 굴절률 분포를 조성하는 방법은 여러가지 방법이 연구되었고 특허화되어 있다.

그림 8은 가장 대표적인 공법으로서 일본 Keio 대의 Koike교수 등이 제안한 계면-겔 중합방법을 나타내는 그림이다.[7] 계면-겔 중합방법은 고분자 튜브를 먼저 제조한 뒤 내부에 굴절률이 높고 분자부피가 큰 비반응성 성분인 도펀트, 단량체, 개시제, 분자량 조절제 등을 특정 비율로 혼합한 혼합물을 투입하여(**그림 8** (a)) 특정온도조건에서 중합하는 방식으로서 고분자 튜브면에 가까운 반응혼합물은 gel- effect에 의해서 먼저 반응이 진행되고 상대적으로 분자부피가 큰 도펀트는 계면에서 겔 상태로 중합될 때 중심부로 밀려나게 되는데(**그림 8** (b)) 그 결과 중심부에서는 굴절률이 높은 도펀트가 상대적으로 더 많아지며 굴절률 분포를 조성하게 된다(**그림 8** (c)).

이와 같이 계면-겔 중합법을 이용하는 방법에는 도펀트를 이용하는 방법이외에 반응성 반응비율(Reactivity ratio)법 (JP61-130904)이라는 굴절률과 반응성이 다른 두 단량체를 이용하는 공중합기법도 있다. 또 다른 방법으로는 조성비가 다른 공중합체로 이루어진 고분자 필름을 코어재료에 권취, 적층시킨 후 이를 연신하는 방법 (JP1-265208),

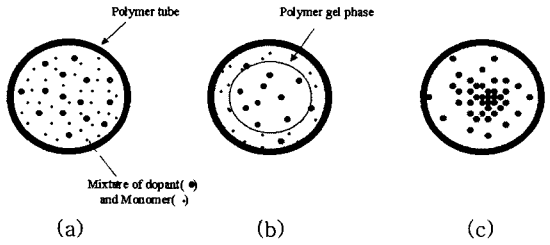


그림 8. 대표적인 GI POF 프리폼 제조방법.

공중합체를 블렌딩하는 방법, 원심력과 도펀트의 비중을 이용하는 방법, 다단계중합법 등이 제시되어 있으나 도펀트를 이용하는 방법은 기계적 강도의 문제가 발생하며, 고분자 필름 적층방법은 이물의 혼입가능성이 매우 커서 현실성이 없으며 블렌딩 기법은 광산란의 문제가 고려되어야 하고, 원심력에 의한 방법은 프리폼 대형화가 불가능하다. 관련 업계에서는 관련된 특허 등을 고가의 License 등의 방법을 통하여 공유하거나 독점사용하고 있는데 있으며 일본 MRC 및 Asahi glass Co. 등이 대표적인 경우이다.

현재까지 알려진 공법은 대체로 scale-up이 용이하지 않으며 chemical의 화학반응에 따른 굴절률 분포형성으로서 임의로 α값을 제어하는 것이 사실상 불가능하고 최적의 α값을 설계하더라도 제조공정 상에서 이를 구현하기 어렵다. 따라서 MMF 프리폼의 제조공법 같이 최적의 α값을 임의로 제어할 수 있는 공법의 개발이 기가비트급 고분자 광섬유의 대역특성향상을 위하여 필요하며 이를 위한 연구가 현재도 각국에서 활발히 진행되고 있다. 현재로서는 POF제조의 완전한 공법으로 여겨지는 것은 없으며 좀더 연구가 진행되면 유리광섬유의 경우처럼 대표적인 몇 가지의 공법과 이를 응용하는 기타의 공법이 정립될 것으로 보인다.

2.7 POF의 향후전망

초고속 멀티미디어가 수 년내에 보편화 될 것으로 전망됨에 따라 홈 네트워크 등에서 초고속 LAN의 필요성이 요구되고 있고 일본의 SHARP, NEC, SONY, National 등 관련 전자회사들은 POF 링크를 이용하는 시스템 연구개발하고 있으며 일부는 시제품을 홈 네트워크에 적용시험 중인 것으로 알려지고 있다.[8] 현재 연구 및 개발이 진행중인 홈 네트워크 프로토콜은 대략 8가지가 있는데, 크게 무선 및 유선으로 분류가 가능하고 무선네트워크 기술로는 Bluetooth, Home RF, Wireless LAN, 유선 네트워크기술로는 Ethernet, Home PNA(Phone Line Alliance), IEEE 1394, PLC(Power Line Communication), USB(Universal Serial BUS)가 연구개발 또는 일부적용 중이다. 각각의 홈 네트워킹 기술이 장단점을 보이고 있으나 무선의 경우는 사용이 편리한 장점을 제외하면 기본적으로 대역폭에 한계를 가지며 유선네트워크 기술에서 사용의 편리성과 함께 Gbps급 전송용량을 확보할 수 있는 프로토콜은 IEEE 1394가 유일하다. 향후 실시간

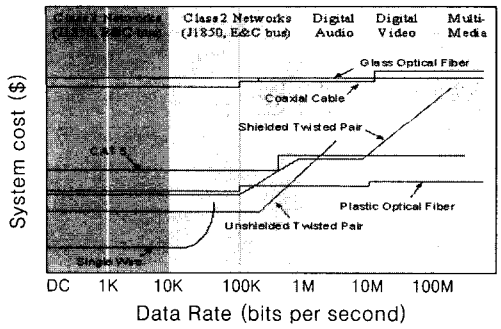


그림 9. 전송매체에 따른 시스템 가격.

(real time) 동영상 전송이 일반화되면 현재의 기타 프로토콜은 홈 네트워크로 향하는 중간다리 역할을 하게 될 것으로 보이며 만일 IEEE 1394에 플라스틱 광섬유가 적용된다면 그 수요는 현재의 기준으로는 예상이 불가능하다. 홈 네트워크 등 단거리 전송에서 총 설치비용이 멀티모드의 65% 수준에 불과한 POF는 연결처리방법도 간단해서 가입자들의 선택을 받을 확률이 매우 크다고 볼 수 있다.[6] 다만, 가입자의 선택측면에서 볼 때, 상대적으로 고가이더라도 전송특성이 뛰어난 불소치환 GI POF를 사용하게 될 것인지 전송특성은 다소 떨어지더라도 저가화의 이점을 충분히 살릴 수 있는 PMMA계 SI POF를 선택하게 될 것인지 아니면 거리별 영역을 분화해서 적용될 것인지는 판단하기 어렵다.

현재 미국의 Information super highway계획 및 일본의 신사회 간접자본 계획 등 초고속 정보통신망 계획(FTTH)을 수립하고 있고 초고속통신망을 구축함에 있어서 필수적인 광통신의 관련부품과 설치비용의 저가격화가 필수적임을 감안할 때 우수한 대역특성, 사용편리성의 측면과 함께 저가격화를 달성할 수 있는 POF의 수요확대는 불가피한 것으로 보여진다.

3. 결 론

정보통신분야의 발달에 따라 인터넷 및 인트라넷이 급격하게 발달하고 있으며 LAN, MAN상으로 전송되는 정보의 양도 크게 증가하고 있다. 향후에도 크게 증가할 정보전송용량을 고려할 때 초고속 전송이 가능한 단거리 전송매체를 연구할 필요가 있으며 적합한 재료로서 POF가 사용될 가능성이 매우 높다. 단거리 전송용 광섬유로는 멀티모드 광섬유와 GI-POF가 있으며 총 설치비용이 저렴하고 코어구경이 커서 접속이 용이한 GI-POF는 가입자 망에서 사용확대가 예상되므로 관련연구가 시급하다. POF의 손실을 줄이기 위한 연구가 진행되어 왔으며 이를 위해 가장 바람직한 방향은 불소치환 고분자를 설계하는 것이고 대역특성을 향상시키기 위하여 프리폼내 굴절률을 임의로 조절할 수 있는 공법의 개발도 절실하다. 우리나라를 비롯한 미국, 일본에서 FTTH 계획을 세우고 가까운 시일내에 HDTV, 케이블 TV 등 멀티미디어가 급속히 보급되면서 정보전송용량이 크게 증가할 경우 POF가 크게 주목받을 전망이며 향후 수 년 내에 현실화될 것으로 보이는 고도정보화 사회에서 가격이 저렴하고 사용이 편리한 POF는 또 한번의 혁신적인 발전을 가능하게 해 줄 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. Y. Koike, T. Ishigura, and E. Nihei, *Journal of Lightwave Technology*, **13**, 1475 (1995).
2. 田中章, *Optronics*, 116 (1994).
3. *ATM forum document* 95, 1469, Dec. 11 (1995).
4. O.Krumpholz *et al.*, *Proc. 2nd Int. Conf. Plastic Optical Fiber and Its Applications*, 125 (1993).
5. T. H. Lee *et al.*, *Polym. Sci. Tech.*, **2**, 116 (1996).
6. C. Emsile, *Journal of Material Science*, **23**, 2281 (1988).
7. Y. Koike, *Proc., 3rd Int. Conf. Plastic Optical Fiber and Its Applications*, 16 (1994).
8. *POF 2000 Conf., Proc.*,131 (2000).
9. Takaaki Ishigure, *POF 2000 Conf.*, Proc., 14 (2000).
10. T. Ishigure, *IEEE, Journal of Lightwave Technol.*, **18**, 178, (2000).
11. "광파이버 광학재료", 겸지사, 1994.
12. InfiniCor series catalogue Corning, GigaGuide Series Lucent, catalogue.
13. J. George *et al.*, "New Developments in 10 Gigabit Multimode Fiber Systems and Standards", Bell Lab., BICSI Las Vegas, May (2001).
14. Giorgio Giaretta *et al.*, *IEEE Photonics Technology Letters*, **12**, 347 (2000).
15. John M Senior, "Optical Fiber Communication", 2nd Ed., p. 404, Prentice Hall, Hertfordshire, England, 1992.
16. Y. Koike, "Status of High Speed Plastic Optical Fiber and its Future Prospect", POF 2000 conference proceedings, p. 1.
17. Gunther Mahlke *et al.*, "Fiber Optic Cables", 4th Ed., p. 64, Publicis MCD Corporate Publishing, Munich, 2001.