특집 | 비선형광학

광섬유 Raman 현상을 이용한 광섬유 증폭기 및 레이저 기술

한영근*, 이상배*

1. 서론

최근 인터넷의 보급과 함께 고화질 및 양방향 TV, VOD 방송, 화상 전화 등의 멀티미디어 시대가 열리면서 초고속 통신 시스템에 대한 관심이 증가되고 있다. 특히 화상이나 동영상 같은 대량의 정보가 좋은 품질 및 빠른 속도로 전달될 수 있는 통신 시스템의 필요성이 대두됨에 따라 가장 경제적이고 효율적인 고속 전송 수단으로 광통신에 대한 연구가 활발히 이뤄지고 있으며 현재 기간 통신망으로 이용되고 있다. 이러한 초고속 광통신 시스템을 구현하기 위해서 여러가지 핵심 기술에 관한 연구가 활발히 이뤄지고 있다[1,2]. 예를 들면 광신호가 장거리를 지나면서 입은 광손실을 보상하기 위해 광신호를 증폭시켜 줄 수 있는 광증폭기, 주어진 대역폭 내에서 채널의 수를 증가시키기 위한 다파장 광원, 광신호를 파장 및 주파수 대역에서 분할하기 위한 다채널 필터, 넓은 대역폭 내에서 손실이 적은 다중화기 및 역다중화, 그리고 각 채널을 신호간섭 없이 분리해낼 수 있는 광필터 등에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 광통신 발전에 중심축을 이루고 있는 것이 광섬유 증폭기이다. 광섬유 증폭기란 광신호의 출력을 증가시켜 주는 소자로써 장거리 광전송에서 필수적인 소자이며 광섬유 레이저를 구현하기 위한 핵심소자이다. 광섬유 레이저는 광증폭기와 공진기를 이용한 광섬유 광원으로써 최근에는 한 개의 광증폭기를 이용하여 다파장 광원을 생성할 수 있는 다파장 광섬유 레이저에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

광섬유 증폭기에는 어븀(Er) 첨가 광섬유 증폭기와 라만 광섬유 증폭기가 있다. 어븀 첨가 광섬유 증폭기는 광섬유 제조시 희토류 금속의 일종인 어븀이라는 물질을 첨가하여 만든 광섬유를 980nm/1480nm 대역의 여기 광원을 이용하여 어븀 이온을 활성화하여 C-band(1530nm ~ 1560nm) 대역에서 이득현상을 얻을 수 있는 증폭기이다. 최근에는 어븀 첨가 광섬유 길이와 여기 광원의 출력을 높여서 L-band(1570~1600nm)에서 이득을 얻을 수 있는 증폭기가 개발되었다. 하지만 어븀 첨가 광섬유 증폭기는 이득 효율은 높지만 homogenous broadening 현상 때문에 다파장 광원을 제조하기 어렵다. 이러한 현상을 제거하기 위한 방법으로 어븀 첨가 광섬유를 액체 질소에 담그면 어븀 이온들의 mode competition 현상이 억제되어 다파장 레이저 광원을 제조할 수 있다. 라만 광섬유 증폭기는 광섬유 비선형 현상의 일종으로 게르마늄이 첨가된 광섬유에 출력이 높은 여기 광원을 인가하여 이득 현상을 얻는 광섬유 증폭기이다. 라만 광섬유 증폭기에서 핵심 소자는 반도체 여기 광원으로써 1400nm 대역에서 높은 출력을 갖는 반도체 여기 광원 제조가 힘들었으므로 라만 광섬유 증폭기에 대한 연구가 진행되지 못하다가 최근에 반도체 광원 제조 기술의 발전으로 라만 광섬유 증폭기에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 어븀 첨가 광섬유 증폭기와는 달리 광신호 전송용 광섬유 자체를 이용하여 이득 현상을 얻을 수 있으므로 추가적인 증폭기가 필요하지 않다는 장점이 있으며 광신호가 전송되면서 이득을 동시에 얻기 때문에 시스템의 단순화를 기대할 수 있다. 현재 미국과 일본 등을 중심으로 라만 광섬유 증폭기를 이용한 장거리 광통신 시스템에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며 효과적인 광신호 전달을 위한 라만 광섬유 증폭기 구조에 대한 연

* 한국과학기술연구원 광기술연구센터

광섬유 Raman 현상을 이용한 광섬유 증폭기 및 레이저 기술

구가 진행되고 있다. 미국 Lucent technology와 일본의 Mitsubishi Cable Inc.에서는 장거리 광전송에서 광신호의 왜곡을 줄이기 위한 양방향 펌프 방식의 라만 광섬유 증폭기에 대해서 연구 결과를 보고하였고[3, 4], 미국의 OFS Laboratory에서는 분산 보상 광섬유를 이용하여 라만 광섬유 증폭기를 제조하여 증폭 현상과 분산 보상 효과를 동시에 구현할 수 있는 복합 기능성 라만 광섬유 증폭기에 대해서 보고하였다[5]. 일본의 KDDI와 NTT에서는 라만 광섬유 증폭기와 어븀 첨가 광섬유 증폭기를 혼합한 hybrid 형태의 라만 광섬유 증폭기를 연구하여 실제 해저 시스템에 적용하였고[6, 7], 영국의 Southampton 대학에서는 포토닉 크리스탈 광섬유를 이용하여 라만 광섬유 증폭기를 구현하는 등 라만 광섬유 증폭기에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[8]. 라만 광섬유 증폭기를 구현하기 위해서는 광섬유 비선형성을 이용하므로 광섬유 종류에따라 라만 이득 특성이 변하며 라만 현상 이외의 다른 비선형 현상이 라만 이득의 증가를 방해하는 요소로 작용하므로 광섬유를 적절하게 선택해야 한다. 최근에는 분산 보상 광섬유, 분산 천이 광섬유, 일반 단일 모드 광섬유 등을 이용하여 라만 이득을 분석하여 최적의 성능을 보이는 라만 이득 매질로 단일 모드 광섬유가 가장 우수하다는 결과가 발표되기도 하였다[9, 10]. 또한 라만 광섬유 증폭기는 inhomogeneous 이득 매질이므로 상온에서 안정된 출력을 갖는 다파장 레이저 광원 제조가 가능하다. 본 글에서는 현재까지 개발된 라만 광섬유 증폭기에 대해서 소개하고 라만 현상을 이용한 레이저에 대해서 소개하도록 하겠다.

2. 라만 광섬유 증폭기

일반적으로 라만 광섬유 증폭기를 구성하는 방법에는 여기 광원의 인가 방향에 따라 forward 라만 광섬유 증폭기, backward 라만 광섬유 증폭기, bidirectional 라만 광섬유 증폭기로 나눌 수 있다. Forward 라만 광섬유 증폭기는 그림 1과 같이 입력 광신호와 여기 광원 신호가 함께 진행하면서 라만 이득 현상을 얻는 것으로, OSNR(Optical signal to noise ratio: 광잡음지수)를 가지고 있는 입력 광신호가 여기 광원과 상호 작용하기 때문에 four wave mixing이라는 비선형성이 증가하므로 입력 광신호의 broadening 현상과 신호 잡음이 증가할 수 있다. 그리고 double Rayleigh backscattering 효과에 의해서 신호 잡음이 증가될 수 있다. 따라서 power penalty가 증가할 수 있고 gain depletion 현상에 의해서 라만 이득이 감소할 수 있으므로 효율적이지 못하다.

그림 2에서는 1554nm, 1558nm, 1562nm의 세 개의 입력 신호에 대해서 1440nm파장의 여기 광원(출력 : 100)을 forward 방향으로 none zero 분산천이 광섬유(Non zero dispersion shifted fiber: NZ-DSF)에 입사한 경우 four wave mixing 효과에 의해서 입력 신호가 왜곡된 모습을 나타내고 있다.

그림 3에서는 backward 라만 광섬유 증폭기에 대한 실험 구성도를 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 입력 광신호와 여기 광원이 서로 반대방향으로 광섬유에 입사되는 구조이다. 따라서 입력 광신호와 펌프광이 반대방향으로 진행하기 때문에 비선형 효과를 현저히 줄일 수 있고 signal-to-signal crosstalk, pump-to-signal crosstalk 등을 억제할 수 있으므로 광섬유 라만 증폭기의 성능을 향상시킬 수

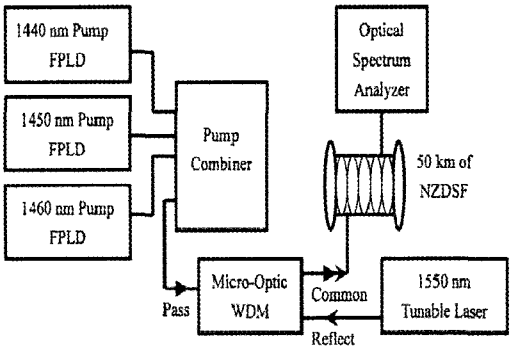

그림 1. Forward 라만 광섬유 증폭기에 대한 실험 구성도[1]

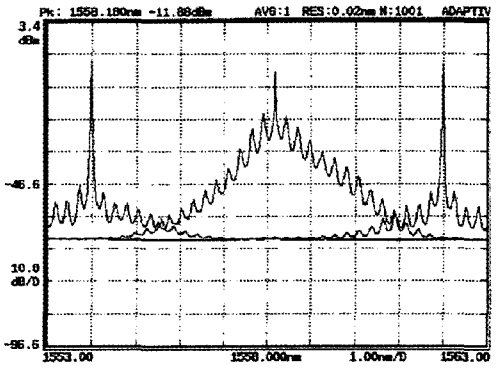

그림 2. Forward 라만 광섬유 증폭기에서 four wave mixing 효과[1]

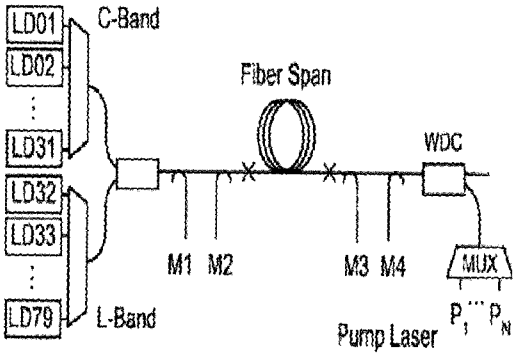

그림 3. Backward 라만 광섬유 증폭기에 대한 실험 구성도[2]

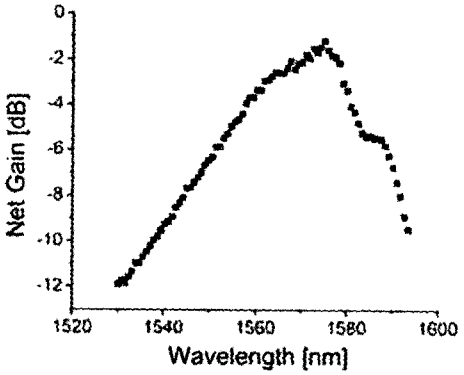

그림 4. Backward 라만 광섬유 증폭기에서 한 개의 입력신호에 대한 라만 이득[2]

있으나 OSNR이 저하될 수 있다는 단점을 가지고 있다.

그림 4에서는 backward 라만 광섬유 증폭기에 대한 실험 결과로써 한 개의 입력신호를 인가한 경우 라만 이득을 나타내고 있다. 그림 5에서는 backward 라만 광섬유 증폭기에서 OSNR 특성을 나타내는 것으로 비선형 계수가 증가하면 라만 이득이 증가하나 OSNR은 감소한다. 하지만 이러한 문제는 중앙부분에 isolator를 삽입함으로써 ONSR 저하 문제를 해결할 수 있다 [2].

그림 5는 bidirectional 라만 광섬유 증폭기에 대한 실험 구성도를 나타낸다 [4]. 그림에서 보듯이 여기 광원이 양방향으로 광섬유에 인가되는 구조이다. 이러한 구조는 특히 double Rayleigh backscattering 효과 억제시킬 수 있고 펌프광의 출력 조절을 통한 전체적인 광섬유 증폭기 효율 증가 및 극대화할 수 있으며 광신호의 power penalty의 현저히 감소시킬 수 있다. 그리고 광신호의 OSNR의 저하를 막을 수 있다. 그림 6에서는 bidirectional 라만 광섬유 증폭기를 이용하여 다채널 광신호 전송에 대한 실험 결과를

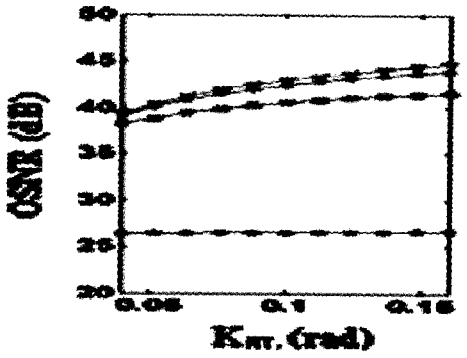

그림 5. Backward 라만 광섬유 증폭기에서OSNR[2]

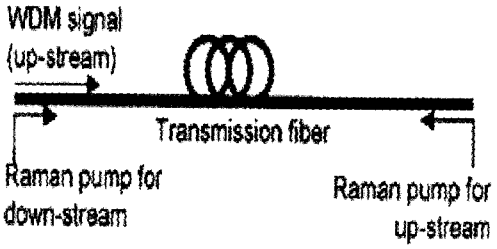

그림 6. bidirectional 라만 광섬유 증폭기에 대한 실험 구성도[4]

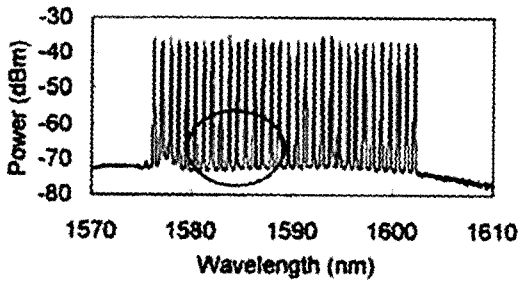

그림 7. bidirectional 라만 광섬유 증폭기에서 광전송 실험 결과[4]

나타내고 있다. 다채널 광신호들이 200km의 단일 모드 광섬유를 지나더라도 신호의 왜곡이 없이 잘 전송되고 있으며 특히 비선형 현상이 감소하여 OSNR이 유지되고 있음을 알 수 있다.

한편 여기 광원의 파장과 출력을 조절하여 라만 증폭기의 이득 평탄화를 구현하기 위한 연구도 진행되고 있다. 라만 이득의 파장 대역은 여기 광원의 파장에 따라 변하고 라만 이득 형태는 여기 광원의 출력에 따라 조절이 가능하므로 이들을 잘 조합함으로써 평탄화된 라만 이득을 얻을 수 있다. 그림 7은 평탄화된 라만 이득을 얻기 위한 실험 구성도이다. 여기서 backward 여기 방법을 사용하였고 광섬유 격자를 이용하여 여기 효율을 증가시켰다.

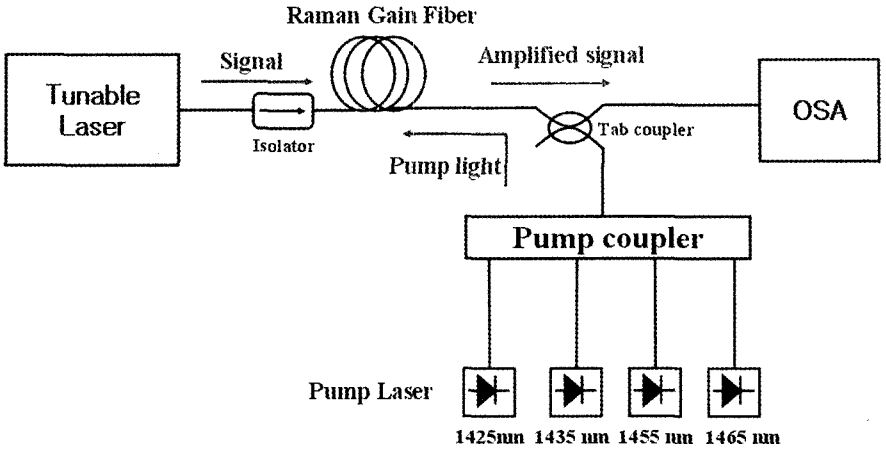

그림 8. 평탄화된 라만 이득을 위한 실험 구성도[11]

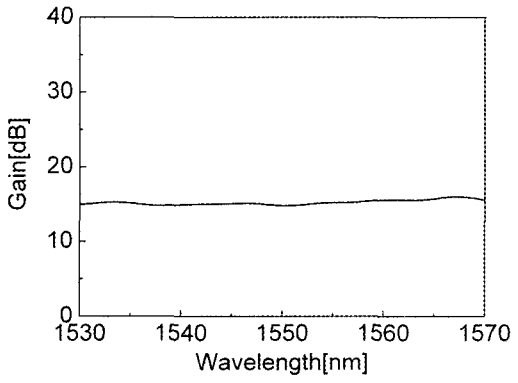

그림 9. 평탄화된 라만 이득[11]

라만 이득용 광섬유로는 25km의 단일 모드 광섬유 (cutoff 파장 = 1300nm, 손실 = 0.18dB/km)를 사용하였다. 사용된 라만 여기 광원은 총 4개로써 1425nm, 1435nm, 1455nm, 1465nm의 파장대역을 가지고 있으며, 각각 최고 파워는 300mW이다. 4개의 여기 광원들은 파장 결합기로 연결하여 25km의 라만 이득 광섬유에 역방향으로 입사되었으며, 4개의 여기 광원들이 결합되어 나오는 총출력은 1이다. 신호 입력단에 사용된 isolator는 역방향 펌핑시 1W의 높은 파워가 신호 소스인 가변 레이저로 입사됨으로써 가해지는 레이저 손상을 막기 위해 사용되었다. 일반적으로 라만 펌프는 파장 및 출력을 적절히 조절함으로써 라만 이득 대역 및 리플을 조절할 수 있으며, 본 실험에서는 C-band에서 0.8dB의 리플을 가진 15.3dB의 라만 이득을 얻을 수 있었다. 그림 8은 라만 증폭기 구현을 통해 얻은 C-band 영역에서의 라만 이득 결과이다.

3. 다파장 라만 광섬유 레이저

지금까지 라만 현상을 이용한 라만 광섬유 증폭기에 대해서 설명하였다. 라만 증폭기는 넓은 이득 영역과 inhomogeneous 이득 매질이라는 장점으로 인하여 증폭기 뿐만 아니라 레이저로써도 높은 기능성을 가지고 있다[12-14]. 라만 증폭기는 inhomogeneous 이득 매질이므로 mode competition이 없어서 상온에서 안정된 출력을 갖는 다파장 레이저 광원 제작이 가능하다. 그림 9에서는 라만 광섬유 레이저에 대한 실험 개요도를 나타낸다[12]. 제안된 라만 레이저는 50km 단일 광섬유, 공진기를 구성하기 위한 미러로 사용된 가변 첩 광섬유 격자, 센서 헤더로 사용된 두 개의 단주기 광섬유 격자로 구성되었다. 0.2nm의 대역폭을 가진 단주기 광섬유 격자 1, 2의 중심 파장은 각각 1554.2와 1556.7nm이고, 반사율은 약 99.9%이다. 광섬유 격자 1, 2는 단일 광섬유에 직렬로 부착 시켰고, 온도 민감도 측정을 위하여 오븐을 이용하여 가열시켰다. 가변 첩 FBG는 금속판의 구부림 각도를 조절 함으로서 대역폭을 변화 시킬 수 있다[5]. 선택된 대역폭은 4nm이며, 중심파장은 1556nm 이다. 사용된 라만 펌프는 4개로써, 각 중심 파장은 1425, 1435, 1455, 1465nm이고, 총 파워는 1W 이다. 이득 매질로써 사용된 광섬유는 일반단일모드 광섬유

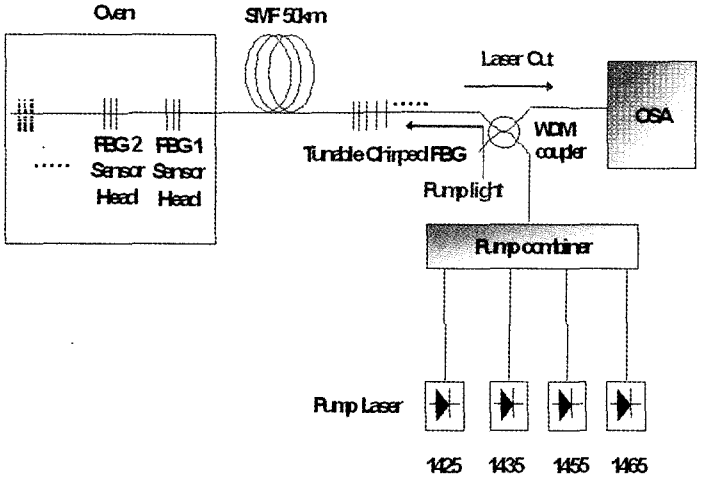

그림 10. 광섬유 격자를 이용한 라만 레이저의 실험 구성도[12]

이며 총 사용한 길이는 50km이다.

그림 10은 라만 레이저의 출력 스펙트럼을 나타내고 있다. 상온에서 안정된 출력을 나타내며 두 개의 단주기 광섬유 격자를 이용하여 두 개의 라만 공진기를 구성하였으므로 두 개의 다른 중심파장을 가진 레이저 출력을 얻을 수 있었으며, OSNR은 50dB 이상이다. 라만 광섬유 레이저는 긴 길이의 광섬유를 사용하기 때문에 장거리 센서로써 높은 활용성을 가지고 있다. 일반적으로 광섬유 센서는 장비의 간소화뿐만 아니라 전자계의 면역성, 제작의 간편화와 같은 이득을 얻을 수 있으며, 온도 및 인장력, 압력과 같은 외부의 다양한 변화에 대해서도 효율적인 검출을 가능하게 한다. 하지만, 격자를 사용함으로써 센서 시스템에서 발생하는 실질적인 제약 중 하나는 센싱 신호에 대해서 전송 거리의 한계를 지니고 있다는 것이다. 왜냐하면 광 대역 소스를 이용한 센싱 신호의 최대 전송 거리는 광섬유가 지닌 전송 손실 및 Rayleigh 산란으로 인해 25km로 제한 되기 때문이다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위한 방법으로, 라만 광섬유 레이저 센서는 추가적인 광원이 필요 없고 긴 길이의 광섬유를 사용하기 때문에 장거기 센서에 높은 활용성을 가질 수 있다고 할 소 있다. 그림 11은 앞서 제안된 라만 광섬유 레이저를 이용하여 온도 의존도를 측정한 실험 결과를 나타낸다. 온도 변화에 따라서 라만 광섬유 레이저의 파장이 장파장으로 움직이는 것을 알 수 있으며 이를 통해서 외부 온도 변화를 쉽게 측정할 수 있다.

그림 12에서는 다채널 필터인 Lyot-Sagnac 필터를 이용한 다파장 라만 광섬유 레이저에 대한 실험 개요도를 나타내고 있다[13]. 제안된 다파장 라만 광섬유 레이저는 WDM

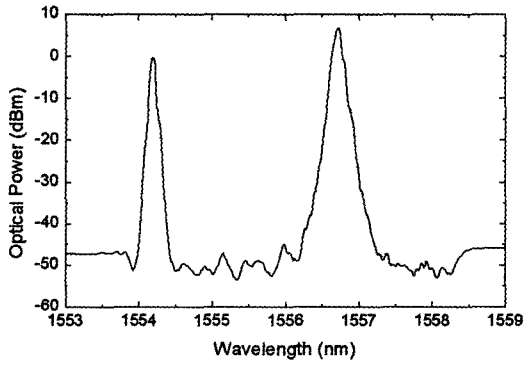

그림 11. 상온에서의 라만 레이저 출력 스펙트럼[12]

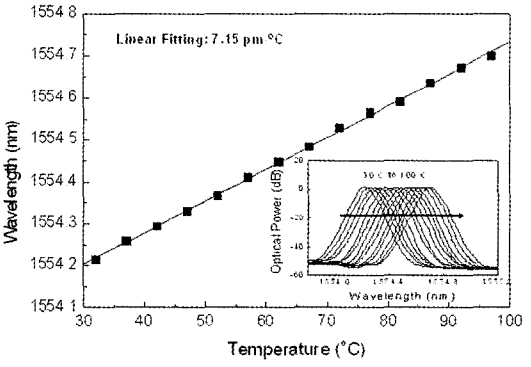

그림 12. 온도 변화에 따른 레이저 중심 파장 변화[12]

커플러, 25km 단일 모드 광섬유(cutoff 파장 = 1300nm , 손실= 0.18 dB/km), 광섬유 격자 공진기, 그리고 Lyot-Sagnac 필터로 구성되고 있다. 그리고, 최대 출력 파워가 각

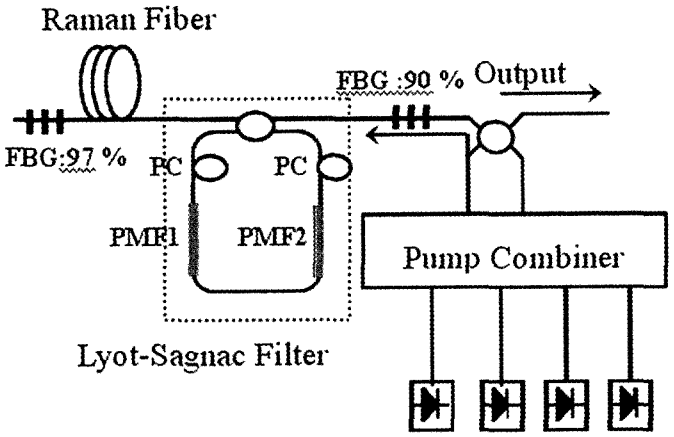

그림 13. 다채널 필터(Lyot-Sagnac filter)를 이용한 다채널 라만 광섬유 레이저[13]

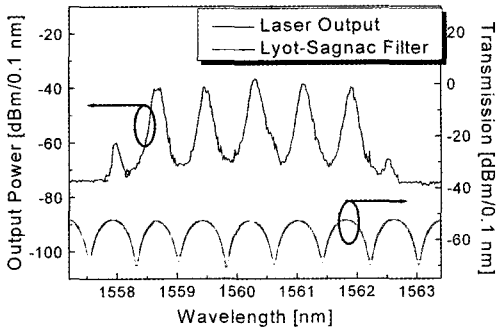

그림 14. 다채널 필터(Lyot-Sagnac filter)를 이용한 다채널 라만 광섬유 레이저 출력[13]

각 300mW이고 출력 파장이 1425, 1435, 1455, 1465nm인 4개의 라만 펌프 LD를 사용하였다. 파장 결합기에 의해 들어온 4개의 펌프광이 단일 모드 광섬유에서 흡수되고 라만 효과를 유도한다. 이때, 양쪽 끝에 연결된 두 개의 광섬유 격자에 의해 형성된 공진기를 통해 라만 레이저를 제조할 수 있다. 광섬유 격자는 반사율이 각각 97%, 90%이고, Ar-ion 레이저를 사용하여 제조하였다. 그림 13은 다파장 라만 광섬유 레이저에 대한 출력을 나타내고 있다. 5개의 파장이 나타나고 있으며 파장 간격은 0.8nm으로 측정되었다.

그림 14는 장주기 격자 기반의 다채널 필터를 이용하여 다파장 라만 레이저에 대한 구성도를 나타내고 있다[14]. 고리형 공진기는 WDM 커플러, 4km 라만 이득 광섬유(높은 비선형 광섬유(HNLF)나 분산 천이 광섬유(DSF)), 그리고 다채널 장주기 필터로 구성된다. 그리고, 최대 출력 파워가 20W인 1064nm 이터븀(Yb) 첨가 광섬유 레이저를 펌프 광원으로 사용하였다.

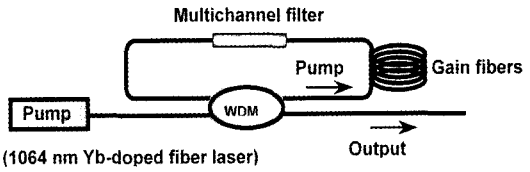

그림 15. 장주기 격자 기반 다채널 필터를 이용한 다파장 라만 레이저의 구성도[14]

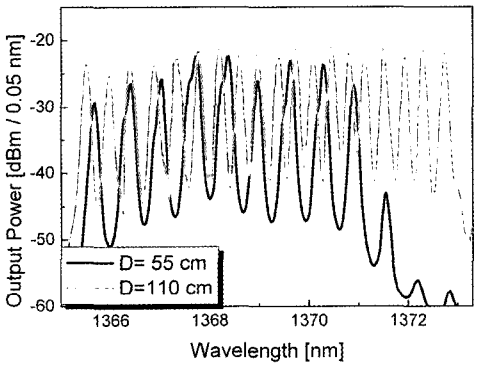

그림 16. 다파장 라만 레이저의 출력 특성[14]

그림 15는 펌프 파워가 5W이고 4km DSF를 사용하여 E-band용 다파장 라만 레이저 광원을 구현한 실험 결과를 나타내고 있다. 특히 장주기 격자 사이의 길이에 따라서 다파장 라만 레이저의 출력 특성이 효과적으로 조절됨을 알 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 장주기 격자 사이의 길이가 55cm인 경우에는 채널 수는 9개였고, 파장 간격은 100GHz(~ 0.66nm)이었으며, 격자 간격이 110cm인 경우에는 채널 수가 19개였고, 파장 간격은 50GHz(~ 0.33 nm)이었다.

4. 결론

인터넷의 보급과 더불어 핸드폰 및 PDA, 고화질 방송 등 소비자에게 필요한 데이터 양이 급증함에 따라 초고속 광대역 통신 구현의 필요성이 대두되고 있다. 현재 이러한 사회의 요구에 부응하기 위해 기간 통신망으로 광통신이 이용되고 있으며, 광통신의 고속화와 대용량화를 위해 많은 연구가 진행되고 있다. 전세계적으로 40Gb/s 이상 초고속 광통신 시장에서 기술적 우위를 확보하고 시장 경쟁력을 강화하기 위해 많은 투자와 연구를 하고 있다. 최근 광통신 시장이 어려움을 많이 겪고 있으나 선진국에서는 여전히 초고속 광통신 시스템 및 광소자 연구에 많은 연구를 진행하고 있다. 초고속 광대역 통신을 구현하기 위해 여러 가지 광소자에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 특히 비선형 현상을 이용한 라만 광섬유 증폭기 및 레이저에 대한 관심이 증가하고 있다. 따라서 전세계적으로 라만 광섬유 증폭기 및 레이저 개발 및 활용에 대한 많은 연구가 진행되었고 많은 결과가 보고되고 있으며 앞으로도 다양한 연구가 진행될 것으로 사료된다.

참고문헌

[1] T. T. Kung; Ching-Ten Chang; Jeng-Cherng Dung; Sien Chi, "Four-wave mixing between pump and signal in a distributed Raman amplifier," *J. Lightwave Technol.*, vol. 21, pp. 1164 - 1170, 2003.

[2] P. Vorreau, D. C. Kilper, and C. A. White, "Gain saturation spectrum of backward-pumped broad-band Raman amplifiers," *Photon. Technol. Lett.*, vol. 17, pp. 1405 - 1407, 2005.

[3] R. J. Essiambre, P. Winzer, J. Bromage, C. H. Kim, "Design of bidirectionally pumped fiber amplifiers generating double Rayleigh backscattering," *Photon. Technol. Lett.*, vol. 14, pp. 914 - 916, 2002.

[4] T. Mizuochi, K. Kinjo, S. Kajiya, T. Tokura, and K. Motoshima, "Bidirectional unrepeatered 43 Gb/s WDM transmission with C/L band-separated Raman amplification," *J. Lightwave Technol.*, vol. 20, pp. 2079 - 2085, 2002.

[5] B. Zhu, C. R. Doerr, P. Gaarde, L. E. Nelson, S. Stulz, L. Stulz and L. Gruner-Nielsen, "Broad bandwidth seamless transmission of 3.56 Tbit/s over 40x100km of NZDF fibre using CSRZ-DPSK format," *Electron. Lett.*, vol. 39, pp. 1528 - 1530, 2003.

[6] Y. Kurosawa, T. Kawazawa, K. Goto, N. Edagawa, "A study of upgrade methodology for ultra-wideband all-Raman amplified system," *Proc. OFC 2003 Technical digest*, pp. 427 - 429, 2003.

[7] C. Fukai, K. Nakajima, J. Zhou, K. Tajima, K. Kurokawa, and I. Sankawa, "A study of the optimum fiber design for a distributed Raman amplification transmission system," *Photon. Technol. Lett.*, vol. 15, pp. 1642 - 1644, 2003.

[8] J. H. Lee, Z. Yusoff, W. Belardi, T. M. Moore, P. C. Teh, D. J. Richardson, "A holey fibre raman amplifier and all-optical modulator," *Proc. ECOC 2001 Technical digest*, pp. 46 - 47, 2001.

[9] S. Faralli, S. Sugliani, G. Sacchi, F. D. Pasquale, and S. Papernyi, "Third order cascaded Raman amplification benefits for 10Gbits/s WDM unrepeated transmission systems," *Proc. OFC 2005 Technical digest*, OThF3, 2005.

[10] Z. Tong, H. Wei, and S. Jian, "Optimal design of multistage discrete Raman amplifiers incorporating midway isolators," *Photon. Technol. Lett.*, vol. 16, pp. 2230 - 2232, 2004.

[11] 김준희, 한영근, 이상배, 김상혁, 정제명, "Ultra L+-band Raman amplifiter 설계 (Development of Ultra L+-band Raman amplifier)," COOC 2003, pp. 203 - 204, 2003.

[12] J. H. Lee, J. Kim, Y. G. Han, S. H. Kim, S. B. Lee, "Investigation of Raman fiber laser temperature probe based on fiber Bragg gratings for long-distance remote sensing applications," *Opt. Express*, vol. 12, pp. 1747 - 1752, 2004.

[13] Y. G. Han, J. H. Lee, S. H. Kim, and S. B. Lee, "Tunable multi-wavelength Raman fiber laser based on fiber Bragg grating cavity with PMF Lyot-Sagnac filter," *Electron. Lett.*, vol. 40, pp. 1475 - 1476, 2004.

[14] Y. G. Han, C. S. Kim, Jin U. Kang, U. C. Paek, and Y. Chung, "Multiwavelength Raman Fiber Ring Laser Based on Tunable Cascaded Long-Period Fiber Gratings," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 15, pp. 383 - 385, 2003.

약 력

한영근

1997년 부산대 전자공학과 공학사
1999년 광주과학기술원 정보통신공학과 공학석사
2003년 광주과학기술원 정보통신공학과 공학박사
2002년- 미국 Johns Hopkins 대학 방문 연구원
2003년-2004년 한국과학기술연구원 연구원
2005년-현재 한국과학기술연구원 선임연구원

이상배

1983.2 서강대학교 물리학과 학사졸업
1985.2 서강대학교 물리학과 석사졸업
1992.2 서강대학교 물리학과 박사졸업
1985. 7 - 1992.8 한국과학기술연구원 연구원
1992. 9 - 1999.2 한국과학기술연구원 선임연구원
1999. 3 - 현 재 한국과학기술연구원 책임연구원
2000. 3 - 현 재 광기술 연구센터 센터장
1999. 9 - 2004.8 국가지정광섬유 연구실 실장