

## 분산천이 광섬유의 영분산 파장영역에서 선형분산 곡선측정

김동환 · 김상혁 · 조재철 · 최상삼

한국과학기술연구원 정보전자부 광기술연구센터

(1997년 11월 29일 받음)

분산천이 광섬유에서 두 입력 레이저광을 입사하여 부분축퇴된 4광파 효율 특성을 측정하였다. 효율은 약 -26 dB로, 대역폭은 2 nm로 측정되었다. 또한 광섬유의 영분산 파장 근처에서 4광파혼합 효율을 OSA(optical spectrum analyzer)의 분해능 한계(0.05 nm)로 정밀히 측정하므로써 4광파 혼합에 대한 위상 정합조건으로부터 선형 분산 기울기값을 계산하였다.

### I. 서 론

광섬유 또는 반도체 광증폭기(semiconductor optical amplifier) 내에서 4광파 혼합(four wave mixing)은 최근 광 시분할다중 시스템(optical time division multiplexing)에서 고속 PLL (Phase Locked Loop) 회로에 응용을 위해 많은 관심을 모으고 있다.<sup>[1-3]</sup> 광섬유내에서의 FWM 현상은 파장분할다중(wavelength division multiplexing) 전송 시스템에서 불필요한 신호광의 발생으로 인한 시스템 성능저하를 가져오는 단점도 있으나, 역으로 새로운 파장 변환 특성을 활용하여 고속 광통신 시스템에서 저잡음 수신단에 이용된다. Inoue는 분산천이 광섬유에서 영분산 파장 근처의 4광파 혼합 효율 특성을 조사하였고, 광섬유 길이에 따른 4광파 혼합 효율의 저하 현상을 분석하였다.<sup>[4]</sup>

장거리 광통신에 있어서 신호 펄스광의 분산은 광통신 용량의 제한을 가져오므로 고속 광통신연구에 있어서 중요한 기본 변수이다. 분산천이 광섬유(dispersiaon-shifted fiber)는 색 분산(chromatic dispersion)이 1.3  $\mu\text{m}$  근처에서 영인 일반 광섬유와는 달리 광섬유 코어의 굴절률 분포를 달리 설계함으로써 도파로 분산(waveguide dispersion)값을 조절하여 전체 색 분산이 1.55  $\mu\text{m}$  근처에서 영이 되도록 설계된 광섬유이다. 이러한 분산천이 광섬유는 1.55  $\mu\text{m}$  에서 광손실이 최소이고, 색 분산이 영이되므로 장거리 고속 광통신 전송망에 가장 적합하다. 또한 이 파장 영역대의 입력 신호광에 대해 4광파 혼합이 잘 일어 나는 위상 정합 조건이 만족될 수 있으므로, NTT 등 통신관련 연구소에서 광섬유 FWM에 대해 많이 연구되어 왔다. 최근에는 레이저광과 같은 코히런트한 광뿐만 아니라 인코히런트한 광에 의한 광섬유 FWM 현상도 보고된 바있다.<sup>[5,6]</sup> 한편, 증폭 이득체인 반도체 광 증폭기는 레이저 다이오드 제조 기술의 발달로 매우 짧은 길이(~1 mm)에서도 4광파 혼합현상이 잘 관측되어 현재는 반도체 광 증폭기를 이용한 FWM 응용 연구가 활발히 진행되고 있다. 반도체 광 증폭기에 비해, 광섬유 FWM 현상은 파라메트릭 과정이므로 입력광의 세기가 높아야 하는 단점이 있으나 ASE(Amplified Spontaneous Emission)에 의한 광잡음이 없으므로, FWM 신호광 대 잡음비는 더 우수하다.

본 논문은 분산천이 광섬유를 비선형 매질로 이용하여 영분산 파장근처(1.55  $\mu\text{m}$ )와 근축퇴된(nearly degenerate) 파장 영역에서 4광파 혼합 효율의 특성을 조사하였다. 특히, 영분산 파장 영역에서는 4광파 효율의 변화를 OSA(optical spectrum analyzer) 분해능 한계 (0.05 nm) 까지 정밀히 측정, 분석하여 효율 특성 곡선으로부터 영분산 파장 및 선형 분산 기울기를 계산하였다. 따라서, 통상의 짧은 레이저 펄스를 이용하여 단위 길이(1 km)의 광섬유에 대해 시간 지연을 측정하는 방법과는 달리 광섬유 전체 길이효과를 포함한 새로운 분산 측정방법을 제안하였다.

### II. 광섬유 4광파 혼합 이론

단일 모드 광섬유는 비선형 계수가 작아도 코어 직경이 작고 상호작용 길이를 충분히 길게 할 수 있으므로 입력빔의 세기가 수 dBm 정도로 낮아도 FWM 현상이 쉽게 관측된다. 그러나, 효율적인 4광파 혼합을 이루기 위해서는 입력광들과 새로이 발생된 4광파혼합 신호광과의 일정한 위상정합 관계를 만족시켜 주어야 하는데, 이들중 한가지는 광섬유의 영분산 파장근처에서 적절히 입력광들의 파장 관계를 조절시켜주면 된다.

그림 1과 같이 분산천이 광섬유에 두 주파수 성분 ( $f_1$ ,  $f_2$ )의 레이저 다이오드 빔을 입사시키면, 각각의 주파수에 상호대칭인 주파수 성분의 두 부분 축퇴된 4광파 혼합(partially degenerate FWM) 신호광이 발생된다. 여기서 FWM은 전기적 쌍극자에 의한 3차 비선형효과이므로 각각의 입력 세기를  $P_1$ ,  $P_2$ 라 할 때, FWM  $f_{112}$ 의 주파수는 에너지 보존에 의해  $(2f_1 - f_2)$  이고 출력은  $P_1^2 P_2$ 에 비례한다. 한편,  $f_{221}$ 의 주파수는  $(2f_2 - f_1)$  이며 출력은  $P_2^2 P_1$ 에 비례하나 두 입력 세기가 같아도 각 주파수의 발생에 대한 위상정합 조건이 다르므로 상대적 세기가 다르게 발생된다. 그러나  $f_1$ 이  $f_2$ 로 근접하면 축퇴된 4광파 혼합이 되는데,  $f_{112}$ 와  $f_{221}$ 에 대한 위상 부정합의 크기가 거의 같게 되므로 영분산 파장에 대한 두 입력광 파장의 구분이 없게 되어, 같은 세기의 4광파 신호광이 발생된다. 위상정합 조건을 알아 보기위해, 각각의 전파상수를  $\beta_i$  ( $i=1,2, F$ )라 두고, 각각을 영분산 파장 근처에서 다차항 전개하면 다음과 같다.

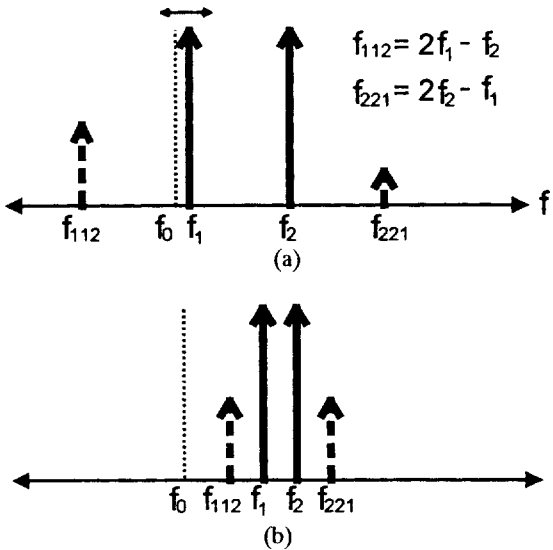


그림 1. 4광파혼합 주파수의 모식도. (a)  $f_1$ 이  $f_0$  (영분산 주파수) 근처에 있을 때 (b)  $f_1$ 이 영분산 주파수에서 멀어지고  $f_2$ 에 접근 할때.

$$\beta_1(f) = \beta_1(f_0) + (f - f_0) \frac{d\beta_1(f_0)}{df} + \frac{1}{2} (f - f_0)^2 \frac{d^2\beta_1(f_0)}{df^2} + \frac{1}{6} (f - f_0)^3 \frac{d^3\beta_1}{df^3(f_0)} + \dots \quad (1)$$

그런데, 영분산 주파수에서는 분산값이 영이므로,  $\frac{d^2\beta_1(f_0)}{df^2} \sim D_c(f_0) = 0$  이어서 부분 축퇴된 4광파 혼합에 대한 위상 부정합 ( $\Delta\beta$ )은 3차 미분항까지만 고려하여 발생하는 4광파혼합 신호의 주파수  $f_{112}$ 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$\Delta\beta(f_{112}) = 2\beta_1 - \beta_2 - \beta_F \approx -\frac{\lambda^4 \pi}{c^2} \frac{dD_c}{d\lambda} 2(f_1 - f_2)^2 (f_1 - f_0) \quad (2)$$

여기서,  $f_1$ 은 가변파장 레이저의 주파수이고,  $f_2$ 는 영분산 근처에서 고정된 주파수를,  $f_0$ 는 영분산 주파수,  $f_F$ 는 4광파 신호광을,  $D_c$ 는 광도파로 분산항과 물질 분산항을 모두 포함한 광섬유 분산을 나타낸다. 광섬유 4광파 혼합은 파라메트릭 과정이므로, FWM 출력에 비례하는 효율은 위상 부정합의 함수로 다음과 같이 표현된다.<sup>[4]</sup>

$$\eta = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + (\Delta\beta)^2} \left[ 1 + \frac{4e^{-\alpha} \sin^2(\Delta\beta L/2)}{(1 - e^{-\alpha})^2} \right] \quad (3)$$

여기서  $L$ 는 광섬유 길이이고  $\alpha$ 는 광섬유의 광손실이다. 식 (3)에서 효율 함수의 특성을 알아보기 위해 광섬유의 손실이 매우 작다고 가정하면, 효율식은 다음과 같이 요동하는 sinc 함수로 근사 표현되어 위상 부정합에 대해 변조특성을 나타낼 수 있다.

$$\eta \sim \frac{\sin^2(\Delta\beta L/2)}{(\Delta\beta L/2)^2} \quad (4)$$

따라서, FWM효율은 위상정합이 될 때, 즉  $\Delta\beta=0$  에서 최대 1의 값을 가지는데 이는 식 (2)에서 보면,  $f_1=f_0$ 와  $f_1=f_2$  에서 각각 만족된다. 따라서  $f_1$ 을 가변시키면 FWM 효율은  $f_1=f_0$ 와  $f_1=f_2$  에서 각각 최대값을 나타냄을 예측할 수 있다. 그러나,  $f_1=f_2$ 인 경우는 완전 축퇴된 4광파 혼합이 일어나는데, 광도파로와 같은 입력 광파 출력광이 같은 방향으로 진행하는 구조에서는 모두 파장이 같으므로, 실험상 FWM 성분만을 분리시킬 수가 없다.

### III. 실험 및 4광파 혼합 효율 측정

그림 2는 광섬유 4광파 혼합 실험의 개략도이다. 사용된 입력 광은 파장가변 반도체 레이저와 1554.21 nm에 고정된 DFB (Distributed Feed Back) 레이저이다. 각각 레이저의 파장 선포는 수백 kHz 정도로 OSA 분해능 이하의 매우 좁은 선포를 하고 있다. 각각의 입력광을 EDFA(Erbium Doped Fiber Amplifier)로 증폭한 후 편광상태를 같게 해 주기위해 각각 광섬유 편광기를 통과 시키고, 파장가변 레이저단에는 편광조절기를 사용하였다. 분산천이 광섬유의 입력직전에 측정된 입력광들의 세기,  $P_1, P_2$ 는 각각 6 dBm 이었다. 그림 3은 광섬유 4광파 혼합의 편광 의존성을 보여주는 결과로, 파장 가변 레이저의 편광상태를 주파수 고정된 DFB 레이저의 편광 상태에 변화시키면서 측정한 4광파 혼합 신호광의 출력 변화를 나타내었다. 여기서 편광 각도를 조절하기 위하여 HWP(Half Wave Plate, 조절각도= $\theta$ )를 사용하였다. 실험 결과에서 보듯이 두 입력광의 편광이 서로 평행할 때( $\theta=0^\circ, 90^\circ$ ) 최대 FWM 신호광이 검출되었고, 서로 수직할 때에( $\theta=45^\circ, 135^\circ$ ) 최소 FWM 세기를 얻었다. 이는 두 입력광이 서

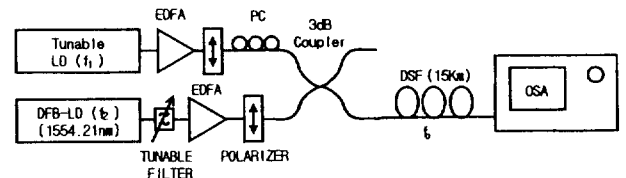


그림 2. 광섬유 4광파 혼합의 실험 장치도.

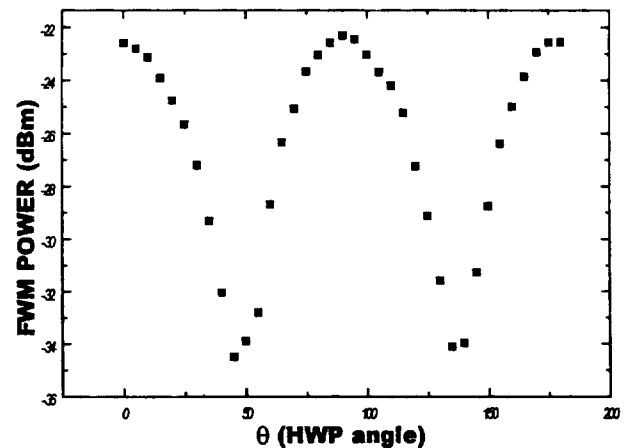


그림 3. 광섬유 4광파 혼합 현상에서 두 입력광의 편광 사이각 ( $2\theta$ )에 따른 4광파 혼합광의 출력 변화. 여기서  $\theta$ 는 HWP (Half Wave Plate) 각도로서 편광 회전각은  $2\theta$ 이다.

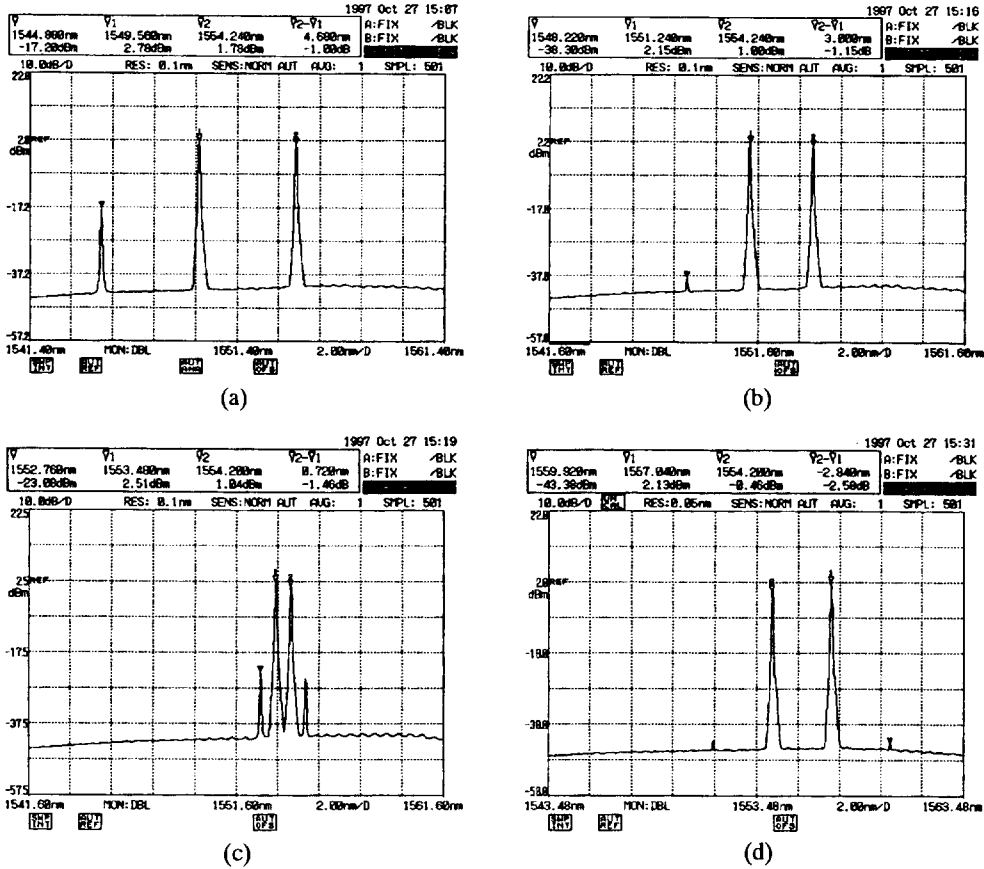


그림 4. 두 입력광의 파장 차이에 따른 4광파 혼합 신호광의 세기 변화. 영분산 파장은 1549.77 nm, 고정된 주파수의 DFB 레이저의 파장은 1554.21 nm 이다. (a)  $f_1(\lambda_1)$ 이  $f_0(\lambda_0)$  (영분산 주파수) 근처에 있을 때 (b)  $f_1(\lambda_1)$ 이 영분산 주파수에서 멀어질 때 (c)  $f_1(\lambda_1)$ 이  $f_2(\lambda_2)$ 에 근접 할 때 (d)  $f_1(\lambda_1)$ 이 영분산 주파수와  $f_2(\lambda_2)$ 에서 모두 멀어 질 때.

로 수직인 편광 상태이더라도 XPM(Cross Phase Modulation) 현상에 의해 서로 수직인 성분들의 비선형 광결합에 의해 위상정합 조건만 만족되면 영이 아닌 최소값의 FWM 신호가 발생된다고 보고된 바있다.<sup>[7]</sup>

그림 4는 1549 nm에서 1556 nm에 걸쳐  $f_1(\lambda_1)$ 을 가변시키면서 관측한 출력광들의 스펙트럼을 나타내었다. 그림 4(a)에서는  $f_1(\lambda_1)$ 이 영분산 파장인 1550 nm 근처에 있는 경우는  $f_{112}$ 는 위상정합이 근사적으로 만족되므로 신호가 관측이 되나,  $f_{221}$ 은  $f_2(\lambda_2)$ 가 영분산 파장에서 멀리 떨어져 있으므로 위상 부정합에 의해 관측되지 않고 있다. 그림 4(b)는  $f_1(\lambda_1)$ 이 영분산 파장에서 멀어짐에 따라 4광파신호( $f_{112}$ )세기가 줄어들어 나타내나 그림 4(c)에서와 같이,  $f_1(\lambda_1)$ 이  $f_2(\lambda_2)$ 에 근접하면 서부터 근축되던 4광파혼합이 이루어 지므로  $f_{112}$ 와  $f_{221}$  성분 모두가 관측되고 있다. 그림 4(d)는 두 입력광의 주파수가 모두 영분산 파장 주파수에서 멀어지는 경우는 위상 부정합으로 인해 4광파 혼합 신호가 거의 발생되지 않는 것을 보여주고 있다. 위 측정에서  $f_{112}$ 의 SNR(signal to noise background ratio)은 약 20 dB 정도로 측정되었다.  $f_1(\lambda_1)$ 에서  $f_{112}$ 로의 파장 변환 효율을 입력광 세기와 4광파혼합 출력광 세기와의 비율

$$\left( = \frac{P(L, f_{112})}{P(0, f_1)} \right)$$

로 정의하면 약 -26 dB로 측정되었다. FWM 대

역폭은 영분산 파장근처에서는 0.5 nm 정도이고 두 주파수가 근접할 때는 약 2 nm 정도로 측정되었다. 이러한 FWM 대역폭이 다른 이유는 식 (2)로부터 알 수있는데, 위상 부정합값이  $(f_1 - f_2)^2 (f_1 - f_0)$ 에 비례하기 때문에 입력광의 주파수 성분  $f_1$ 가 영분산 주파수  $f_0$ 와  $f_2$ 로부터 얼마나 멀리 위치하느냐에 따라 달라진다. 그림 5는 파장가변 주파수 성분  $f_1(\lambda_1)$ 의 변화에 따라 변

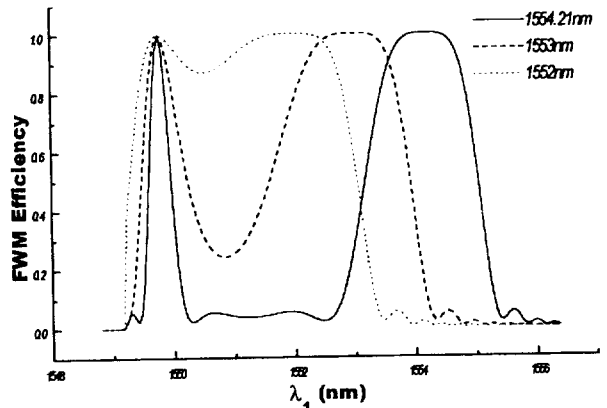


그림 5. 고정된 주파수의 DFB 레이저의 파장( $\lambda_2$ )에 대해 계산된 4광파 혼합 신호광( $\lambda_{112}$ )의 효율 변화.

화하는 4광파 혼합 신호광의 효율변화를 계산한 결과로서, 입력광의 주파수( $f_2(\lambda_2)$ )가 영분산 주파수( $f_0(\lambda_0)$ )에 가까워지면 두 FWM 효율 곡선이 겹쳐지면서 보다 넓은 대역폭을 나타내게 된다. 광섬유 FWM은 광섬유의 영분산 파장에 의해 위상정합 조건이 크게 의존하므로 입력광 주파수와 광섬유의 길이에 의해 FWM 효율 및 특성이 달라진다.

#### IV. 선형 분산 곡선 측정 및 결과 분석

이론적으로는  $f_1$ 이  $f_0$ 와  $f_2$ 에서 효율값은 위상정합조건을 만족시키므로 최대로 서로 같아야 하나, 실제 광섬유 제조상 전체 길이에 대해 영분산 파장이 일정하지 않으므로, 단일 영분산 파장으로는 위상정합 조건을 만족시킬 수가 없기 때문에 완전 측정된 경우보다 영분산 파장근처에서 더 낮은 효율이 측정되었다(그림 6(a)). 한편 영분산 근처에서 FWM 효율을 OSA 파장 분해능 수준 (0.05 nm)으로 자세히 측정하여 그림 6(b)와 같은 결과를 얻었다. 여기서 4광파 효율식 (2)와 (3)에서 살펴보면, 영분산 파장을 기준으로 첫 번째 최소치의 FWM 신호 세기를 나타내는 가변 파장 주파수  $f_\pi(\lambda_\pi)$  ( $f_\pi=f_1, f_{12}$ 가 첫번째 최소 FWM 효율 일 때)는 엄밀히 좌우 대칭이 아니며, 영분산 파장보다 긴 쪽에서의 최소 FWM 신호( $\lambda_\pi > \lambda_0$ )는

고정 파장( $\lambda_2$ )과 영분산 파장간격에 따라 4광파 혼합 신호광의 효율 양상이 달라지므로(그림 5), 영분산 파장과 고정 파장 사이의 정확한 첫 번째 FWM 최소 파장을 측정하기가 어렵다. 따라서, 변조 특성곡선에서 영분산 파장보다 짧은 파장영역에서, 첫번째 FWM 최소값은 식 (4)의 특성으로부터  $(\Delta\beta)_\pi L/2 \approx \pi$ 에서 일어나므로, 영분산 파장보다 짧은 영역에서, 첫번째 최소점 파장  $\lambda_\pi$ 를 측정하면 식 (2)에서 광섬유의 분산 기울기를 다음식에 의해 계산해 낼 수 있다.

$$\frac{dD_c}{d\lambda} = \frac{1}{cL \lambda_\pi^4 \left(\frac{1}{\lambda_\pi} - \frac{1}{\lambda_2}\right)^2 \left(\frac{1}{\lambda_\pi} - \frac{1}{\lambda_0}\right)}, \quad \frac{1}{\lambda_\pi} = \frac{2}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_0} \quad (5)$$

위와 같은 방법을 이용하여 광섬유 손실이 0.28 dB/km이고 길이가 15 km인 분산천이 광섬유의 영분산 근처에서의 선형 분산 곡선을 측정된 결과,  $\lambda_\pi$ 는 1549.42 nm로 측정되어 다음과 같은 결과를 얻었다.

$$D_c(\lambda) = \left(\frac{dD_c}{d\lambda}\right)(\lambda - \lambda_0), \quad \lambda_0 = 1549.77 \text{ nm},$$

$$\frac{dD_c}{d\lambda} = 0.069 \text{ ps/km} \cdot \text{nm} \cdot \text{nm} \quad (6)$$

이 측정값은 사용된 분산천이 광섬유의 사양에 명시되어 있는, 통상의 단위길이(1 km)의 광섬유에 적용하는 색분산 측정 계측기를 이용하여 측정된 0.075 ps/km · nm · nm 값과 매우 근사한 결과이다. 기존의 색분산 계측기를 이용한 방법은 파장 가변 극초단 펄스 레이저를 이용하는 직접적인 측정방법으로서 이와 위에서 제안한 측정 방법을 비교할 때, 이는 연속 발진 레이저를 사용하여 FWM 효율 특성에 의한 간접적 방법이라 볼 수 있다. 다음에는 30 km 분산천이 광섬유에서도 위에서 제안한 측정방법을 이용하여 선형분산곡선의 기울기를 측정된 결과, 영분산 파장은 1549.72 nm로, 첫 번째 최소 FWM세기를 갖는 가변주파수 파장( $\lambda_\pi$ )은 1549.47 nm로 측정되어,  $\frac{dD_c}{d\lambda}$ 는 0.048 ps/km · nm · nm로 측정되었다. 이렇게 계산 결과가 달라지는 이유는 위에서 제안한 측정방법이 광섬유 전체 길이에 대한 분산 기울기 측정방법이며, Inoue 등도 보고한 바 있듯이,<sup>[6]</sup> 광섬유의 길이가 길면 길수록 광섬유 제조상, 영분산 파장의 비균일성이 커지므로 단일 영분산 파장보다는 2개 이상의 영분산 파장을 제안하셔서 설명하였다. 또한 식 (2)와 (4)에서, 영분산 파장의 측정오차에서 비롯되는 위상 부정합의 첫 번째 최소값의 근사된 조건식에서 찾을 수 있다.

#### V. 결 론

분산천이 광섬유에서 부분 측정된 4광파 혼합 실험을 수행하여 두 입력광의 주파수차에 의한 4광파 혼합 신호광의 효율 특성을 조사하였다. 측정된 효율 특성 곡선으로부터 영분산 파장이 1549.77 nm로 측정되었고, 영분산 파장근처에서의 위상 정합 관계식으로부터 선형 분산 곡선의 기울기를 측정하는 새로운 분산 측정 방법을 제안 하였으며, 광섬유 길이가 증가하면 영분

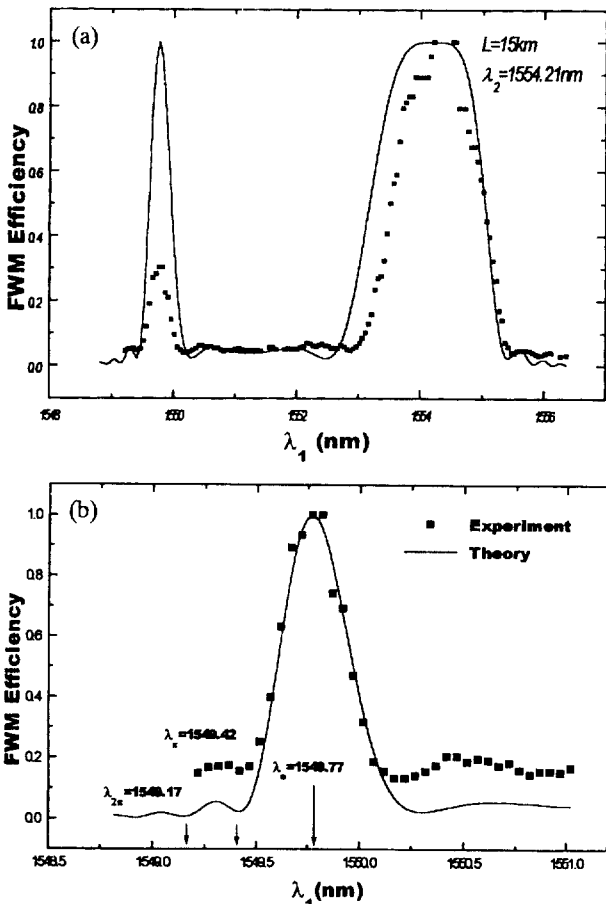


그림 6. (a) 가변파장  $\lambda_1$ 에 대한 FWM 효율 변화. 실선은 이론값. (b) 영분산 파장  $\lambda_0$  근처에서의 가변파장  $\lambda_1$ 에 대한 FWM 효율. 실선은 이론값.

산 파장의 비균일성으로부터 나타나는 문제점을 토의하였다.

### 참고문헌

- [1] T.Ducellier, M.B.Bibey, IEEE Photonics Technol. Lett., **8**, 530 (1996).
- [2] T.Morioka, H.Takara, S.Kawanishi, K.Uchiyama, and M. Saruwatari, Elec. Lett., **32**, 840 (1996).
- [3] M. Saruwatari, IEICE Trans. Commun., **E78-B**, 635 (1995).
- [4] K.Inoue, IEEE J. Lightwave Technol., **10**, 1553 (1992).
- [5] J.S.Lee, Y.C.Chung, D.J.DiGiovanni, IEEE Photon. Technol. Lett., **5**, 1458 (1993).
- [6] Y.S.Jang, Y.C.Chung, OECC'97, Seoul, 668 (1997).
- [7] G.P.Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics* (second edition), Chapter 7, (Academic Press, San Diego, 1995).

## Measurement of linear dispersion of optical fibers in zero-dispersion wavelength region

Dong Hwan Kim, Sang Hyuck Kim, Jae Cheol Jo and Sang Sam Choi  
*Korea Institute of Science and Technology, Photonics Research Center, P.O.BOX 131,  
Cheongryang, Seoul, 130-650, Korea*

(Received : November 29, 1997)

Fiber four-wave mixing(FWM) in zero-dispersion wavelength region is studied. FWM efficiency of -26 dBm and bandwidth of 2nm are measured. The linear dispersion slope in zero-dispersion wavelength region is calculated from the modulation behavior of FWM efficiency.