

## G.652, G.653, G.655 광섬유에 대해 측정된 FWM 및 XPM 효율의 채널간격에 대한 의존성

김근영\* · 이용기

KT 통신망연구소

Ⓣ 305-811 대전시 유성구 전민동 전민동 463-1

(2002년 8월 27일 받음, 2002년 12월 30일 수정본 받음)

본 논문은 다양한 분산값을 갖는 G.652, G.653, G.655(I),(II),(III) 광섬유에 대해 채널간격에 따른 FWM 효율을 측정하고 그 결과를 해석적으로 얻은 값과 비교 분석하였다. 또한 pump-probe 실험 구성을 사용하여 각 광섬유에 있어서 XPM 효율을 측정함으로써 색분산과 채널 간격이 XPM에 미치는 영향을 분석하였다.

주제어 : optical fiber, WDM, FWM, XPM.

### I. 서 론

광전송 매개체인 광섬유는 전송 시스템의 채널 속도 고속화와 채널 수 증대에 부합하여 발생하는 색분산, 편광모드분산, 비선형 효과 등으로 인한 전송한계를 특별한 보상법을 사용하지 않고 광섬유 자체의 특성을 개선하여 전송한계를 극복시킬 수 있는 방향으로 진화되고 있다.<sup>[1]</sup> 고속 광전송매체로서 주도적인 역할을 한 단일모드 광섬유는 1550 nm 파장에서 갖는 색분산값이 ~17 ps/nm/km인 G.652(SMF), 단일채널 고속 전송에 적합하도록 0~1 ps/nm/km의 낮은 색분산값을 갖는 G.653(DSF), C밴드(1530 nm~1565 nm) 영역에서 0.1~10 ps/nm/km의 색분산값을 갖고 WDM 전송에 제한적으로 사용된 G.655(NZ\_DSF) 광섬유로 분류될 수 있다. G.655 광섬유는 각각 1530 nm와 1565 nm에서 갖는 분산값에 따라 A형(0.1~6 ps/nm/km)과 B형(1~10ps/nm/km)으로 분류된다. G.655\_A 광섬유는 채널속도를 10 Gbit/s로 하고 스펙트럼 효율을 높이기 위해 채널 간격을 50 GHz이하로 가져갈 경우 4광파 혼합현상(Four Wave Mixing: FWM)에 의한 신호의 왜곡이 발생하여 장거리 전송이 어려워 100 GHz 이상의 채널간격이 요구된다.<sup>[2]</sup> 이러한 단점을 보완한 G.655\_B형은 1550 nm 파장에서 48 ps/nm/km의 색분산값을 갖고 있어 비선형에 의한 신호품질 저하와 색분산 보상비용을 최소화함으로써 초고속 대용량 광전송용 차세대 광섬유로 주목받고 있다.<sup>[3,4]</sup>

초고속 대용량 광전송 매개체 요구사항으로는 분산과 비선형에 의한 신호 왜곡을 최소화할 수 있는 분산값을 가지고 있어야 하며, 다채널 장거리 전송시 채널 간 분산차를 없애기 위해 분산기울기가 작아야 하며, 라만중폭 이득을 높여 광섬유로 입력되는 광세기를 높게 유지하면서 이중 레일리 산란효과를 줄이기 위해 적당한 넓이의 광섬유 코어를 가져야 된다.

편광모드분산과 달리 채널 당 속도가 증가할 경우 색분산에

의한 영향을 줄이기 위해 단순히 광섬유의 분산값을 매우 낮게 가져가는 것은 어렵다. 왜냐하면, 전송속도가 증가됨에 따라 광수신기는 더욱 높은 OSNR을 요구하고 그에 따라 광선로에 입력되는 광신호의 세기는 더욱 커져야 되므로 광선로가 갖는 분산값이 작으면 4광파 혼합현상 및 상호위상변조(Cross Phase Modulation: XPM)와 같은 비선형에 의한 전송성능 저하가 나타날 수 있기 때문이다. 따라서, 수 Tera 급의 기간 광전송망을 구축하기 위해서는 비선형에 의한 신호 왜곡, 특히 분산비용을 절감하기 위해 분산값이 작은 광섬유를 사용하여 수십수백 채널을 고속 전송할 경우 발생하는 FWM, XPM이 전송 성능에 주는 영향을 연구하는 것은 매우 중요하다.<sup>[5-7]</sup>

본 논문에서는 G.652, G.653, G.655 광섬유에 대해 입력 광세기와 채널 간격에 따른 FWM 효율을 실험적으로 측정하고 그 결과를 해석적으로 얻은 값과 비교분석 하였다. 또한 색분산과 채널 간격이 XPM에 미치는 영향도 pump-probe 실험 구성을 통해 광섬유 종류별 XPM 효율을 측정함으로써 알아 보았다.

### II. FWM과 XPM

#### 2.1. FWM(Four Wave Mixing)

FWM은 광섬유를 전파하는 광신호가 광섬유의 굴절률분포를 변화시켜 공간적으로 회절격자를 생성하고, 이 격자에 의해 입력 신호가 산란되어 원래 신호 이외에 새로운 파장을 갖는 신호가 생성되는 현상이다. 그림 1(a)는  $\lambda_1, \lambda_2$  파장을 갖는 두 광신호가 광섬유를 진행할 때 적절한 위상정합 조건이 만족하면  $2\lambda_1 - \lambda_2, 2\lambda_2 - \lambda_1$  파장을 갖는 FWM 성분이 생성됨을 보여 주고 있다. FWM이 일어나기 위한 위상정합 조건( $\Delta\beta$ ), FWM 효율( $\eta$ ) 및 생성된 FWM 신호의 크기( $P_{FWM}$ )는 식(1), (2), (3)으로 각각 나타낼 수 있다.<sup>[8]</sup>

$$\Delta\beta = \frac{2\pi\lambda^2}{c} \Delta f \left( D + \Delta f \frac{\lambda^2}{c} \frac{dD}{d\lambda} \right) \quad (1)$$

\*E-mail: gykim@kt.co.kr

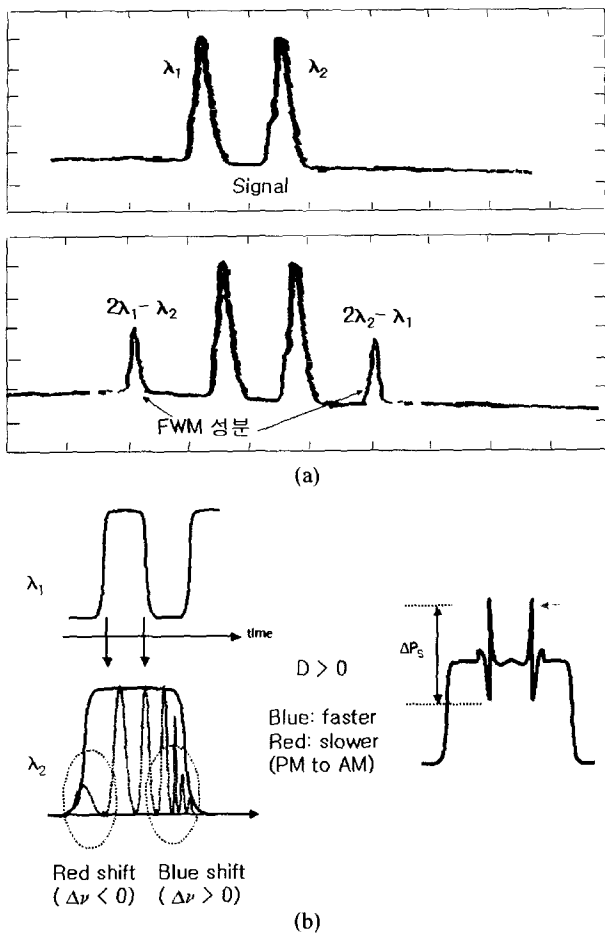


그림 1. FWM 및 XPM으로 인한 신호의 왜곡 원리. (a) FWM, (b) XPM.

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

$$P_{FWM} = \frac{1024\pi^6}{n^4 \lambda^2 c^2} \left( \frac{Y \chi_{1111} L_{eff}}{A_{eff}} \right)^2 P_i P_j P_k e^{-\alpha L} \eta \quad (3)$$

여기서,  $\Delta\beta$ 는 분산 때문에 발생하는 전파상수 차,  $\eta$ 는 FWM 효율,  $P_{FWM}$ 은 FWM 성분의 광세기,  $D$ 는 분산,  $dD/d\lambda$ 는 분산기울기,  $\Delta f$ 는 채널 간격,  $n$ 은 굴절률,  $\lambda$ 는 파장,  $c$ 는 광속도,  $P_i, P_j, P_k$ 는 입력 채널의 광세기,  $L_{eff} = (1 - e^{-\alpha L})/\alpha$ 는 광섬유의 effective length,  $\alpha$ 는 광섬유 손실,  $A_{eff}$ 는 광섬유 유효단면적,  $Y$ 는 축퇴정도로 두 채널이 같은 파장이면  $Y=3$ , 세 채널이 모두 같은 파장이면  $Y=6$ ,  $\chi_{1111}$ 는 3차 비선형계수.

식 (1)은 FWM이 일어날 수 있는 위상정합 조건으로 채널 간격이 정해진 경우 광섬유의 분산값이 적을수록 위상정합조건이 만족되어 FWM 효율이 커짐을 알 수 있다. 분산이 충분히 적을 경우  $\Delta\beta \approx 0$ ,  $h \approx 1$ 로 FWM이 가장 잘 일어난다. 위상정합조건은 광섬유의 영분산 파장이  $f_i, f_j$  두 신호의 중간에 위치하거나, 축퇴된 신호의 파장이 영분산 파장과 일치하면 항상 만족된다. 식 (3)에서 FWM 성분의 광세기는 입력 광신호의 세기, effective length에 비례하고 유효 단면적에 반비례함

으로 입력 광세기, 분산, 손실이 비슷할 경우 광섬유 코어 크기가 작을수록 FWM 성분의 광세기가 커짐을 알 수 있다.

또한,  $N$ 개의 입력 광신호에 대해서 생성될 수 있는 FWM 성분 개수<sup>[8]</sup>는  $N^2(N-1)/2$ 로 주어지므로 다채널이 사용되는 WDM 전송에 있어 광섬유의 분산값이 적을 경우 FWM으로 인한 성능저하가 주도적으로 나타날 수 있다.

### 2.2. XPM(Cross Phase Modulation)

굴절률의 입력 광세기 대한 의존성 때문에 나타나는 비선형 현상으로는 SPM(Self Phase Modulation)과 XPM이 있다. SPM이 광섬유 내를 전파하는 신호 자체의 광세기에 의해 위상이 변화되는 것과 달리 XPM은 인접채널의 광세기에 의해 비선형적인 위상의 변화를 겪는다.

그림 1(b)는 두 채널 시스템에 대해서 XPM이 유발하는 신호의 왜곡을 간략히 설명한 것이다. 서로 다른 파장  $\lambda_1, \lambda_2$ 를 갖는 광신호가 광섬유 내를 전파할 때  $\lambda_1$  파장을 갖는 광신호의 세기에 의해 광섬유의 굴절률이 변하고 이러한 굴절률 변화는  $\lambda_2$  파장을 갖는 광신호의 위상을 변화시켜, 펄스의 앞쪽에는 높은 주파수 성분(청색편이), 펄스 뒤쪽은 낮은 주파수(적색편이)를 갖는 처핑을 유발한다. 이러한 처핑은 이상분산영역 ( $D > 0$ )을 지나면 청색편이된 주파수 성분은 빠르게 전파하고 적색 편이된 성분은 느리게 전파되어 펄스 왜곡을 가져온다. 즉 XPM이 유발하는 위상의 변조가 광섬유의 분산에 의해 강도 변조되므로 펄스형태에 왜곡을 가져온다.  $\lambda_2$  채널이 겪는 총 비선형 위상변화는 다음과 같다.<sup>[9]</sup>

$$\Delta\phi_{\lambda_2} = \gamma \cdot L_{eff} \cdot (P_2 + 2 \cdot P_1)$$

여기서,  $\gamma$ 는 비선형 계수,  $L_{eff}$ 는 유효 상호작용 길이,  $P_1, P_2$ 는 각각  $\lambda_1, \lambda_2$  파장을 갖는 채널의 입력 광세기. 첫 번째 항은 SPM으로 인한 비선형 위상변화이고, 두 번째 항은  $\lambda_1$  채널의 광세기로 인해 유발되는 XPM 항이다. XPM이 유발하는 위상변화는 광섬유의 색분산에 의해 강도변조되어 신호의 성능을 저하시킨다. 특히, 광섬유의 손실이 지수 함수적으로 증가하므로 XPM이 유발하는 위상변화는 주로 광섬유로 입력되는 시작 부분에서 가장 강하게 나타난다. 또한, 분산이 클수록 두 채널간에 속도차가 발생하므로 펄스간 상호작용하는 시간이 줄어들어 XPM으로 인한 위상변화 누적이 줄어든다. XPM 현상은 일반적으로 항상 SPM을 동반하므로 XPM 효율을 측정하기 위해서는 XPM으로 인한 위상변화만을 고립시킬 필요가 있다. pump-probe 실험구성<sup>[10]</sup>에서는 CW의 probe 신호에 비해 변조된 펄프 신호가 갖는 피크 파워가 크므로 probe 신호가 겪는 총 위상변화 중에서 SPM으로 인한 위상변화를 무시할 수 있으므로 펄프 신호에 의해 probe 신호가 겪는 XPM만을 측정할 수 있다.

### III. 실험 구성도

실험에 사용된 5종류의 광섬유에 대해 분산, 영분산 파장, 분산기울기 및 유효단면적을 표 1에 나타내었다. 3종류의 G.655 광섬유 모두 ITU-T에 정의된 B형으로 기존의 A형에

표 1. 실험에 사용된 광섬유별 특성

	G.652	G.653	G.655(I)	G.655(II)	G.655(III)
분산@1550nm [ps/nm/km]	16.8	<0.1	4.5	8.5	4.2
영분산파장[nm]	1313	1549	1453	1420	1500
분산기울기[ps/nm <sup>2</sup> /km]	0.060	0.068	0.046	0.063	-
유효단면적[μm <sup>2</sup> ]	86	50	55	60	72

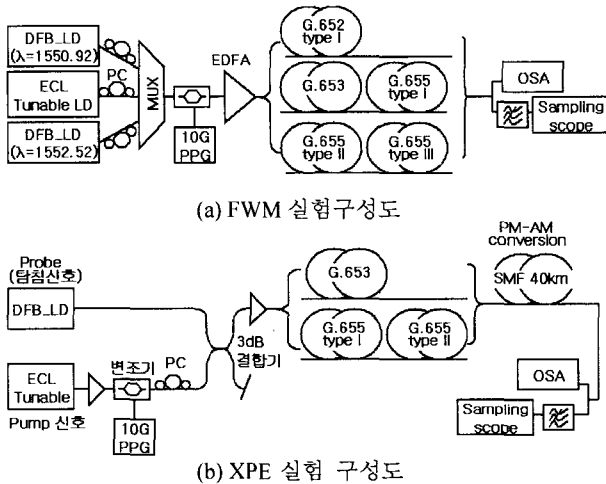


그림 2. 광섬유 종류별 FWM 및 XPM 효율 측정을 위한 실험 구성도.

비해 4~8 ps/nm/km의 상대적으로 큰 분산값을 갖고 있어 50 CHz 이하의 채널 간격을 갖는 고속 WDM 전송에 적합하도록 만들어진 광섬유이다. 광섬유에 입력되는 광세기를 결정할 수 있는 유효 단면적은 비선형 임계 파워를 높게 하기 위해 넓은 값을 갖고 있다. 실험에 사용된 G.652 광섬유는 water peak가 제거된 점을 제외하고는 기존 SMF와 동일한 광학적 특성을 가진다. 다채널 전송에서 분산값이 크면 SPM 또는 XPM에 의해 유발된 위상변화가 강도잡음으로 변하는 정도가 커지지만 인접채널간 상호작용 시간이 짧아져 XPM으로 인한 위상변화량이 줄어들고, FWM이 일어날 위상정합 조건이 약화되어 FWM 효율이 감소된다.

그림 2-(a)와 (b)는 각각 광섬유별 FWM과 XPM 효율을 측정하기 위한 실험 구성도이다. 각 광섬유는 20~25 km의 스폰 형태로 0.22 dB/km 이하의 평균 손실을 가지므로 비선형 현상이 주로 유발되는 유효거리(effective length)인 20 km 보다 길어 비선형에 의한 위상변화를 충분히 얻을 수 있다. 광섬유로 입력되는 광세기는 광증폭기의 출력세기를 가변시켜 채널당 6 dBm~13 dBm의 파워를 가지며, 채널간격에 대한 FWM/XPM 효율을 측정하기 위해 수 KHz의 좁은 선폭을 갖는 파장가변 광원과 1550.92 nm와 1552.52 nm의 고정된 파장을 갖는 DFB-LD가 사용되었다.

3.1. FWM 실험

FWM 효율을 최대로 하기 위해 편광조절기를 사용하여 탐침 광원(probe)과 펌프광원의 편광상태를 평행하게 만들었다. FWM 효율은 펌프 파장을 가변시켜 가면서 OSA를 통해 FWM 성분

과 원래 신호 사이의 크기 차를 측정함으로써 채널 간격에 따른 효율을 측정하였다. 펄스에 유발되는 FWM 효과는 펌프와 탐침 신호를 PPG를 사용하여 “101010111001111111” 변조패턴을 갖는 10 Gbit/s 변조속도로 변조시킨 후 1 nm의 3 dB 대역폭을 갖는 가변 대역투과 광필터를 사용하여 필터링한 탐침 신호를 고속 광검출기를 내장한 샘플링스코프에 입력시켜 FWM이 펄스에 유발하는 신호왜곡 정도를 측정하였다. 샘플링율은 1024비트로 하였다.

3.2. XPM 실험

다른 비선형 현상에 의한 신호 왜곡을 막기 위해 CW의 탐침 신호와 변조된 펌프 광신호를 이용하는 실험구성이 사용되었다. 변조속도와 패턴은 FWM 효율 측정시 사용한 조건과 동일하며 G.653, G.655(I), G.655(II) 광섬유에 대해서 XPM 효율을 측정하였다. XPM 효율( $m_x$ )은 CW 탐침신호가 변조되는 정도이며, 펌프 광펄스 세기 대비 XPM으로 인해 강도변조된 CW 탐침광신호의 peak to peak 비로 정의된다. 펌프광신호와 탐침 광신호의 편광상태는 XPM 효율을 최대가 되도록 편광조절기(PC)를 사용하여 평행하게 만든다. 10 Gbit/s로 변조된 펌프신호에 의해서 CW 탐침신호에 유발되는 위상변화를 강도변화로 변환시키기 위해 16.8 ps/nm/km의 큰 분산값을 갖는 40 km SMF 광섬유를 측정하고자 하는 광섬유 다음에 놓았다.

IV. 실험결과 및 분석

4.1. FWM 효율 측정

그림 3(a)는 영분산 파장이 각각 1550.52 nm, 1558.11 nm인 두 종류의 G.653 DSF 광섬유에 대해서 측정된 FWM 스펙트럼이다. 광신호의 파장은 1550.92 nm, 1551.72 nm, 1552.52 nm로 0.8 nm의 채널간격을 갖으며 채널당 광세기는 8 dBm이다. 1550.52 nm에서 영분산 파장을 갖는 광섬유의 경우 광신호 3 채널 모두 광섬유의 영분산 파장 근처에 위치하여 0.1 ps/nm/km 이하의 낮은 분산값을 갖게 되므로 FWM이 일어날 수 있는 위상정합 조건이 잘 만족되어 FWM 크게 발생하는 반면, 1558.11 nm에서 영분산파장을 갖는 광섬유를 사용하면 광신호가 갖는 분산값이 상대적으로 전자보다는 크므로 FWM 성분의 개수도 적고, 또한 FWM 성분의 크기가 최대 15.7 dB정도 적음을 알 수 있다. 전자의 경우 각각의 신호 채널에 포함된 3개의 FWM 성분을 포함하여 총 9개의 FWM 성분이 발생되었고 이는 이론적인 값과 정확히 일치한다. 그림 3(b)는 G.652, G.655(I), G.655(II) 타입에 대해 각각 측정된 FWM 성분이다. 각각의 광섬유에서 갖는 분산값은 G.652의 경우 16.8 ps/nm/km,

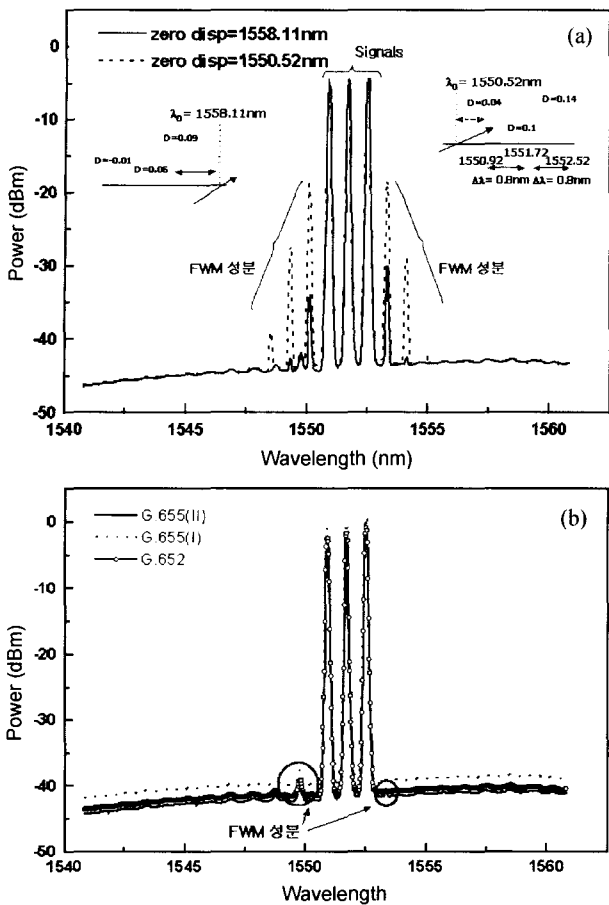


그림 3. 광섬유 종류별 FWM 효율 측정. (a) 두 종류의 G.653, (b) G.652, G.655(I), G.655(II).

G.655(I) 및 G.655(II)에 대해서는 4.5 ps/nm/km, 8.5 ps/nm/km의 큰 값을 가지므로 위상정합 잘 이루어지지 않아 G.653 광섬유에 비해 FWM 성분의 크기가 매우 작다. 신호 채널과 FWM 성분 사이에 40 dB 이상의 크기 차이가 나므로 전송시는 FWM으로 인한 신호의 왜곡이 나타나지 않음을 짐작할 수 있다. G.655(II) 광섬유는 나머지 광섬유에 비해 상대적으로 적은 분산값을 갖고 있어 다른 광섬유에 비해 신호 채널의 오른쪽에 추가적인 FWM 성분이 발생하였다. 그림 3(b)에 나타난 광섬유별 파워 차이는 사용한 광섬유의 길이 차로 인한 손실에서 기인된 것이다.

그림 4은 신호채널만 필터링 한 후 비트 패턴에 나타난 노이즈를 측정된 것이다. 이와 같은 노이즈는 신호 채널 대역 내에 생성된 FWM 성분이 유발하는 누화(crosstalk)로 위상정합조건을 가장 잘 만족하는 G.653 광섬유에서 가장 강하게 나타나고 나머지 광섬유에 대해서는 FWM 성분의 크기가 작아 계측기로 노이즈 성분을 구별하기는 어렵다. 물론 광섬유의 유효 단면적이 작을 경우는 FWM에 의한 노이즈 뿐만 아니라 SPM, XPM과 같은 비선형 효과에 의한 영향이 있을 수 있지만 실험과 같이 DSF를 사용하면 FWM에 의한 영향이 가장 주도적이다. 신호 채널들의 채널간격이 100GHz로 동일할 경우 FWM 성분이 중심채널(1551.72nm)에 가장 많이 생

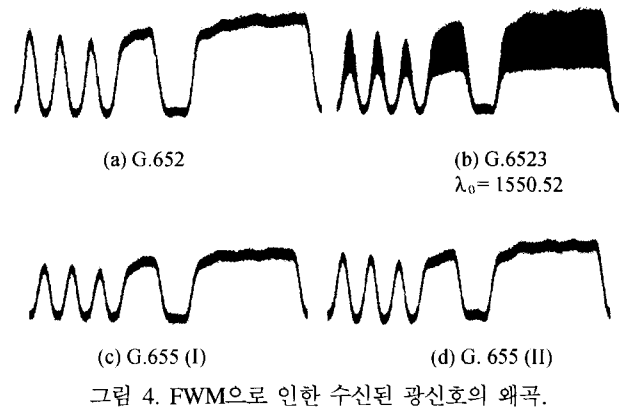


그림 4. FWM으로 인한 수신된 광신호의 왜곡.

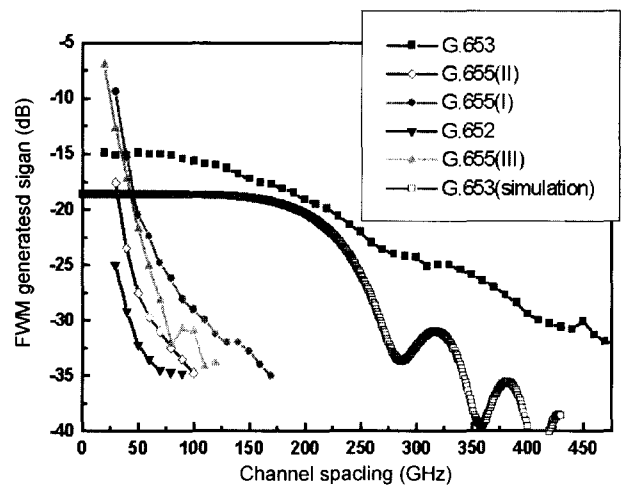


그림 5. 이론적으로 계산된 광섬유 종류별 FWM 효율.

기므로 이 채널에서 비트 패턴에 노이즈가 성분이 가장 강하게 생성되므로 이 채널만 필터링 하였다. FWM 성분은 수신기를 거치면서 신호채널에 있는 signal-noise간의 비팅 노이즈를 유발하여 재생된 비트에 강도잡음을 유발하므로 신호관별시 에러를 유발시킨다.

그림 5에 광섬유별 측정된 FWM 효율을 나타내었다. 특히, G.653 광섬유에 대해서는 해석적으로 계산된 효율값도 같이 나타내었다. FWM 효율은 1550.92 nm의 고정된 파장을 갖는 LD와 1551.72nm의 파장을 갖는 가변 LD를 사용하여 채널 간격에 따른 효율을 측정하였다. G.653은 1550.52 nm에서 영분산 파장을 갖는 광섬유에 대해 측정하였다. 해석적 계산에 사용된 조건은 실험과 동일한 조건의 채널 파워와 채널 간격, 영분산 파장, 색분산값이 사용되었다. 같은 채널 간격에 대해 17 ps/nm/km의 분산값을 갖는 G.652 광섬유가 가장 작은 FWM 효율을 갖고, 0.1 ps/nm/km의 가장 작은 분산값을 갖는 G.655 광섬유가 가장 큰 FWM 효율을 가짐을 알 수 있다. FWM 효율 값 25 dB를 최대허용 한계 값으로 가정하면, FWM이 유발하는 신호성능 저하로 인해 G.653 광섬유는 300 GHz, G.655(I), G.655(III) 광섬유는 50100 GHz 이하의 채널 간격으로 가져가기는 어려울 것으로 생각된다. G.655(II) 광섬유는 다른 NZ\_DSF에 비해 상대적으로 큰 분산값을 가지므로 더

좁은 채널 간격을 설정하는 것이 가능함을 알 수 있다. G.653 광섬유의 대해 측정된 FWM 효율과 해석적으로 계산된 값이 채널 간격이 좁을 경우 비슷한 경향을 나타내 보이지만, 채널 간격이 250 GHz 이상 넓어지면 큰 차이를 나타내는데 그 이유는 채널간격이 넓으면 생성된 FWM 성분의 크기가 작아 측정 오차가 발생하기 때문이다.

**4.2. XPM 효율 측정**

그림 6는 10Gbit/s 변조속도, 20비트의 펄스패턴, 1 nm 채널 간격, 10 dBm의 채널당 광세기 실험조건에서 4.5 ps/nm/km의 분산을 갖는 G.655(I)와 8.5ps/nm/km의 분산을 갖는 G.655(II)에 대해서 측정된 XPM이 CW 탐침신호에 유발하는 신호 왜곡이다. G.655(I), G.655(II) 광섬유의 길이는 25 km이며, 손실은 각각 0.24 dB/km, 0.23 dB/km이다. 초기에 겹쳐있던 서로 다른 파장을 갖는 두 펄스가 광섬유를 전파하면서 얼마나 빨리 서로간에 완전히 벗어날 수 있는지를 나타내는 척도인 walk-off는  $w = D \cdot \Delta\lambda \cdot L$ 로 주어지며, 각각의 광섬유에 대해서는 112.5 ps, 212.5 ps로 펄스폭인 100 ps 보다 크다. 따라서, XPM이 유발하는 시간에 따른 위상변화, 처평( $\Delta v(t) = d\phi_{XPM}/dt$ )은 펄스의 전 영역에 걸쳐 축적된다. 40 km SMF에서 PM-AM 변환을 통해 탐침신호의 CW가 펄프 펄스가 갖는 패턴을 나타내며 이는 walk-off가 짧을 수록(두 펄스가 서로간에 벗어나는데 걸리는 시간이 길어지므로 상호작용 시간이 길어짐)

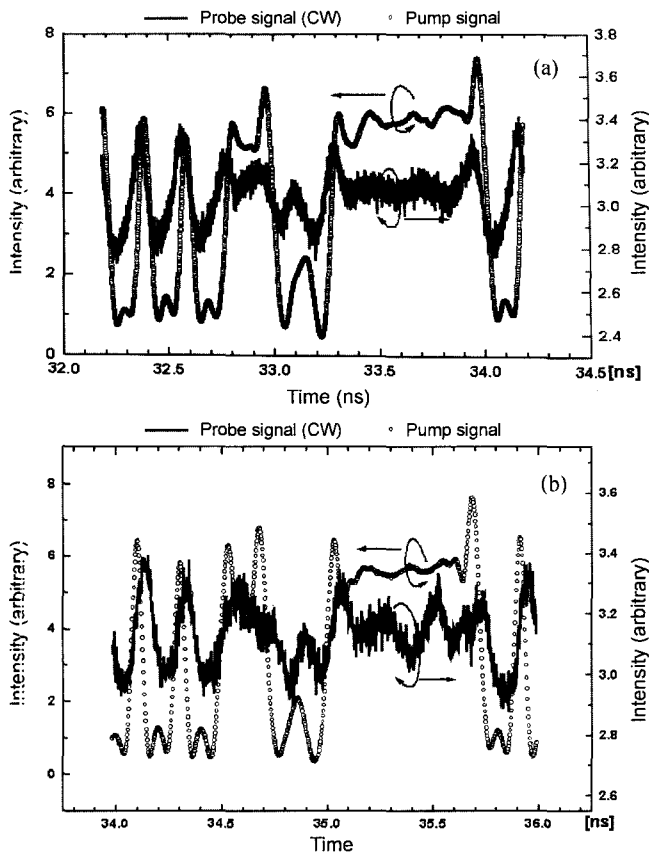


그림 6. XPM으로 인해 유발되는 CW 탐침신호의 왜곡. (a) G.655(I), (b) G.655(II).

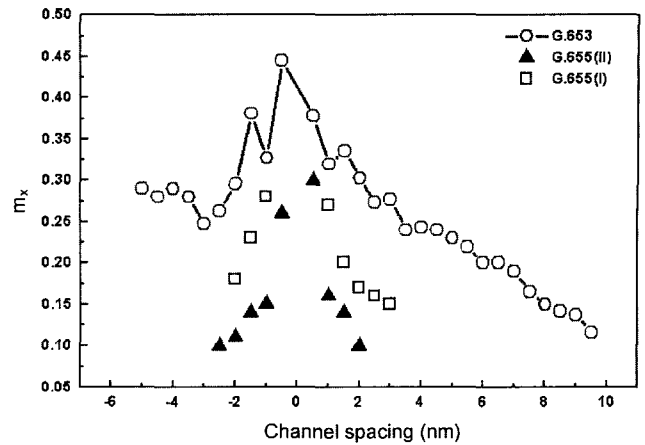


그림 7. 광섬유 종류별로 측정된 XPM 효율.

XPM이 주는 위상변화가 더 많이 누적되므로 G.655(I) 광섬유에서 CW 펄스가 더 많이 변조됨을 알 수 있다.

그림 7은 G.653, G.655(I), G.655(II) 광섬유에 대해 측정된 XPM 효율의 채널간격에 대한 의존성을 보여 주고 있다. 채널 간격( $\Delta\lambda = \lambda_{pump} - \lambda_{probe}$ )은 10G로 변조된 펄프광원의 파장을 가변시켜 조정한다. 분산값이 0.1 ps/nm/km 이하의 값을 갖는 DSF 광섬유의 경우는  $\Delta\lambda = \pm 10$  nm 정도의 넓은 채널 간격에 대해서도 XPM이 유발하는 CW 신호의 변조가 측정되었다. 또한, XPM 효율은 채널 간격이 좁을수록 강하게 나타났으며 첫 번째 최대값은 가장 좁은 채널간격에서 나타났다. 두 번째 최대값은 DSF의 영분산 파장(~1550.52nm)이  $\lambda_{pump}$ 과  $\lambda_{probe}$ 의 파장 사이에 위치하여 짧은 walk-off를 가질 때 나타난다. XPM이 유발하는 신호의 왜곡 정도를 보여주는 XPM 효율은 G.653 광섬유를 같은 길이를 갖는 G.655(I)과 G.655(II) 광섬유로 대체할 경우 크게 감소함을 볼 수 있다. 이러한 결과는 G.655 광섬유가 갖는 분산값이 G.653 광섬유의 분산 값보다 커 G.655 광섬유 내에서 펄프 광신호와 탐침 광신호가 상대적으로 큰 walk-off를(짧은 상호 작용시간) 갖는데서 기인된 것이다. 이러한 논리는 비슷한 유효단면적을 갖는 G.655(I)이 G.655(II) 보다 같은 채널 간격에 대해서 더 큰 XPM 효율 ( $m_x$ )을 갖는다는 것을 설명하는데 사용될 수 있다.

**V. 결 론**

파장분할 다중화 방식을 기반으로 초고속 대용량 광전송망을 구축할 경우 발생하는 색분산, PMD, 비선형, 라만 증폭시 발생하는 이중 레일리 산란 등의 여러 문제를 추가적인 보상장치를 사용하지 않고 광섬유 자체의 특성을 개선하여 해결하는 것은 안정되고 경제적인 기간망 구축을 위해 반드시 필요하다. 본 논문에서는 분산값이 다른 G.652, G.653, G.655(I), (II), (III) 광섬유에 대해 입력 광세기와 채널 간격에 따른 FWM 효율을 실험적으로 측정하고 그 결과를 해석적으로 얻은 값과 비교 분석하였다. 채널간격과 채널당 광세기가 각각, 0.8 nm, 8 dBm인 경우 FWM에 의한 신호의 왜곡은 분산값이 가장 적은 G.653 광섬유를 사용한 경우가 가장 크고, G.655와 G.652

는 수신된 광신호의 왜곡만으로는 큰 차이 볼 수 없었지만 스펙트럼 상에서 G.655(II) 광섬유의 경우 미약한 FWM 성분이 측정되었다.

또한, 색분산과 채널 간격이 XPM에 주는 영향을 G.653, G.655(I), G.655(II) 광섬유에 대해 XPM 효율을 측정함으로써 알아보았다. 다른 비선형 효과로부터 XPM을 고립시키기 위해 pump-probe 실험 구성이 사용되었다. XPM 효율은 색분산값과 유효 단면적에 반비례하는 경향을 보였고 G.653, G.655(I), G.655(II)의 순서로 낮게 측정되었다.

### 참고문헌

- [1] Zelda Gills, Arthur Judy, "New requirements for long haul optical transmission fiber" in *National Fiber Optic Engineers Conference'2000, Denver, USA, 2000*, pp. xxx.
- [2] Chaudhry, M. S, Cornwell, W. D, "WDM transmission limitations in non-dispersion shifted and non-zero dispersion shifted fibers," *IEEE Colloquium on High speed and long distance transmission*, 18/1-18/4, 1999.
- [3] M. Eiselt, *et al.*, "Experimental comparison of WDM system capacity in conventional and nonzero dispersion shifted fiber," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, no. 2, pp. 281-283, 1999.
- [4] Grosz, D.F, *et al.*, "Demonstration of all-raman ultra-wide band transmission of 1.28Tbit/s[128x10Gb/s] over 4000 km of NZ\_DSF with large BER margin," *ECOC'01*, vol. 6, pp. 72-73, 2001.
- [5] S. Ten, *et al.*, "Comparison of four-wave-mixing and cross phase modulation penalties in dense WDM systems," *OFC'99*, paper ThC4-1.
- [6] X. Y. Zou, *et al.*, "Limitations in 10Gb/s WDM optical-fiber transmission when using a variety of fiber types to manage dispersion and nonlinearities," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 14, no. 6, pp. 1144-1152, 1996
- [7] Saunders. R. A, Patel. B. L., "Impact of cross-phase modulation for WDM systems over positive and negative NZ\_DSF and method for its suppression," *IEEE Electron. Lett.*, vol. 32, no. 21, pp. 2206-2207, 1996.
- [8] R. W. Tkach, *et al.*, "Four-photon mixing and high-speed WDM systems," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 13, no. 5, pp. 841-849.
- [9] Govind P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics* (Academic Press, New York, 1995), pp. 243-249.
- [10] Govind P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics* (Academic Press, New York, 1995), pp. 277-285.

## Dependence of XPM and FWM efficiencies on channel spacing for G.652, G.653, G.655 optical fibers

Geun-Young Kim<sup>†</sup> and Yong-Gi Lee

*Telecommunications Network Laboratory, Korea Telecom, Daejeon 305-811, KOREA*

<sup>†</sup>*E-mail: gykim@kt.co.kr*

(Received August 27, 2002, Revised manuscript December 30, 2002)

We experimentally measured the dependence of FWM efficiency on channel spacing for G.652, G.653, G.655 optical fiber with various dispersion values and compared the results with analytical results. Also, we investigated the dependence of XPM efficiency on channel spacing and dispersion in pump-probe experimental configuration.

*Classification code* : FO.040.