

## 국산 NZDSF를 이용한 10 Gb/s×16채널 WDM 신호의 640 km 전송실험

박근주 · 신승균 · 정윤철

한국과학기술원 전기 및 전자공학과

강희전 · 유기선

대한전선 주식회사

(2000년 1월 18일 받음, 2000년 4월 6일 수정본 받음)

최근 국내에서 개발된 NZDSF를 사용하여 160 Gb/s(10 Gb/s×16 채널)급 WDM 신호를 640 km 전송 실험하였다. 사용된 NZDSF의 평균 분산값은 1550 nm에서 약 4 ps/km/nm이었다. 따라서, 분산보상을 위하여 소요되는 DCF의 양은 분산값이 약 17 ps/km/nm인 기존의 단일모드 광섬유를 사용하는 경우에 비하여 약 1/4에 불과하였다. 뿐만 아니라, DCF의 손실을 보상하기 위하여 사용되는 EDFA의 수도 절감되었다. 따라서, 이번에 개발된 NZDSF는 향후 국내 광선로의 설치비용을 효과적으로 절감시키는 데에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

### I. 서 론

과장분할다중(WDM: wavelength-division-multiplexing) 방식 광통신 시스템의 전송용량을 더욱 증가시키기 위하여 채널의 수와 각 채널의 전송속도를 증가시키기 위한 여러 가지 노력이 계속되고 있다.<sup>[1]</sup> 예를 들면, 세계적으로는 이미 광섬유당 전송 용량이 3 Tb/s(160 Gb/s×19 channels)에 달하는 전송 시스템이 보고된 바 있으며,<sup>[2]</sup> 국내에서도 최근 0.32 Tb/s (20 Gb/s×16 channels)급 시스템이 보고되었다.<sup>[3]</sup> 이와 같이 초고속으로 변조된 광신호를 기존의 단일모드 광섬유(SMF: single mode fiber)를 이용하여 전송하는 경우에는 광섬유의 색분산으로 인하여 전송거리가 극히 제한되므로 분산보상이 필수적으로 요구된다.<sup>[4]</sup> 한편, 분산값이 매우 작은 분산전이 광섬유(DSF: dispersion shifted fiber)를 사용하여 여러 개의 과장분할다중화된 광신호를 전송하는 경우에는 4광파혼합 등의 비선형 효과로 인하여 시스템의 성능이 저하될 수 있다. 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 비영점 분산전이 광섬유(NZDSF: non-zero dispersion shifted fiber)가 제안되었다.<sup>[5]</sup> NZDSF는 분산값이 작으므로(1.5~4 ps/km/nm@1550 nm) 기존의 SMF와 비교하여 보상해야 할 분산의 양이 감소하는 동시에 4광파혼합 현상도 효과적으로 억제할 수 있다. 이로 인하여, NZDSF를 사용하는 경우 광선로의 설치 비용을 약 30~50% 정도 절감할 수 있을 것으로 예측되고 있다.<sup>[6]</sup> 본 논문에서는 최근 국내에서 자체적으로 개발된 NZDSF를 사용하여 성공적으로 160 Gb/s(10 Gb/s×16채널)급 WDM 신호를 640 km 전송 실험한 결과를 보고한다.

### II. NZDSF의 특성

과장분할다중방식 초고속 장거리 정보통신망의 구축을 위하여 최근 국내에서도 NZDSF가 개발되었다.<sup>[7]</sup> 표 1은 본 실험

에서 사용된 국산 NZDSF의 특성을 정리한 것이다. 전송 손실은 0.21 dB/km, 분산값은 2~5.2 ps/km/nm, 분산 기울기는 0.068 ps/km/nm<sup>2</sup>, 유효면적은 53 μm<sup>2</sup>으로써 Lucent사의 NZDSF(TrueWave<sup>®</sup>)와 거의 동일한 성능을 보였다. 스펴(spool) 상태에서 측정된 편광모드분산 특성은 0.06 ps/km<sup>1/2</sup>로써 작게 나타났다.

분산값이 상대적으로 큰 SMF를 사용하는 경우 각 채널의 전송 속도가 10 Gb/s이면 분산으로 인한 최대 전송거리(1 dB penalty 기준)는 약 60 km로 제한 된다. 국산 NZDSF는 분산값이 SMF의 약 1/4 정도에 불과하므로 그림 1과 같이 분산 보상 없이 전송 가능한 최대 거리를 200 km이상으로 증가시킬 수 있다.

일반적으로 분산으로 인하여 제한되는 최대 전송거리를 증가시키려면 분산값이 작은 광섬유를 사용하여야 한다. 그러나, WDM 방식 광전송 시스템의 경우 광섬유의 분산값이 작아지면 4광파혼합 현상에 의한 신호의 누화(crosstalk)가 발생하여 성능이 저하될 수 있다. 그림 2(a)는 채널 간격이 1 nm(125 GHz)이고 채널당 광파워가 0 dBm인 두 개의 광신호를 분산값이 0 ps/km/nm(@1550 nm)인 25 km의 DSF에 통과시킨 후 측정된 광신호의 스펴트럼을 나타내고 있다. 이 그림은 4광파혼합 현상으로 인하여 출력 광신호 보다 약 29 dB 작은 새로운 광신호가 생성되었음을 보여준다. 이와 같이 4광파혼

표 1. 개발된 국산 NZDSF의 특성

항목(@1550 nm)	국산 NZDSF	True Wave <sup>®</sup>
전송손실(dB/km)	0.21	≤0.22
분산*(ps/km/nm)	2~5.2	1.3~5.8
분산기울기(ps/km/nm <sup>2</sup> )	0.068	0.07
유효면적(μm <sup>2</sup> )	53	53
PMD(ps/√km)	0.06**	≤0.5

\*: 1530~1560 nm

\*\* : 본 실험에서 사용된 광섬유를 spool 상태에서 측정된 값

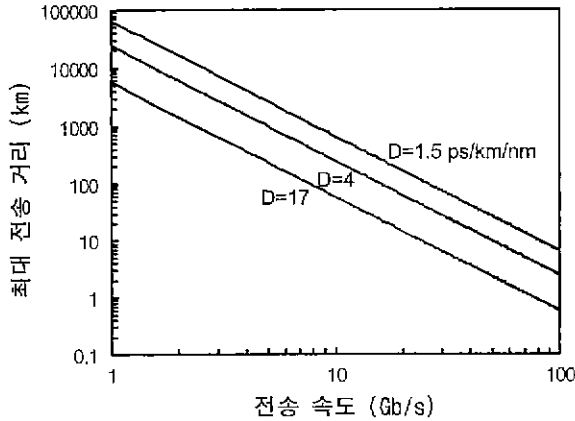


그림 1. 광섬유의 색분산으로 인하여 제한되는 최대 전송거리(10 Gb/s의 chirp-free 광원을 사용하는 경우).

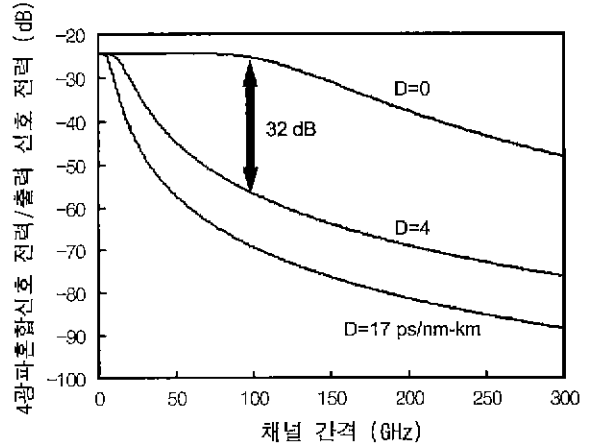
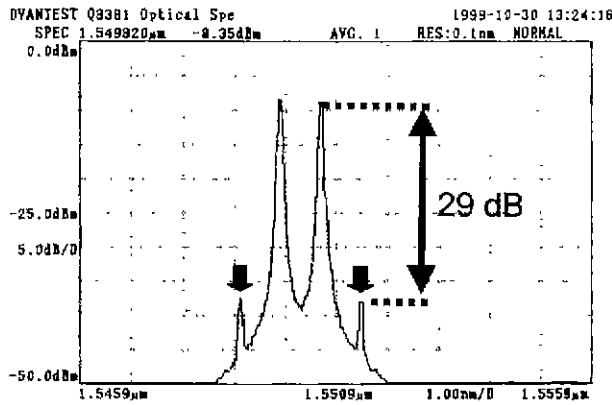
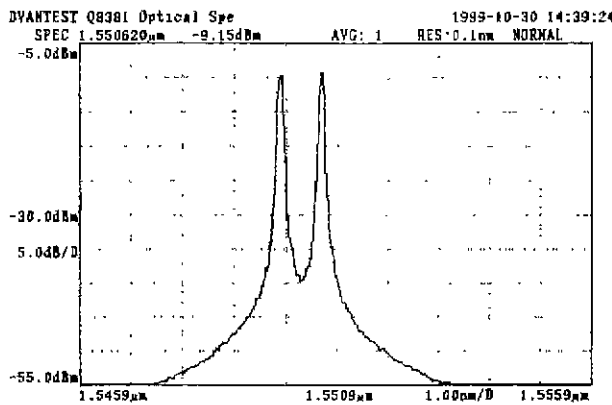


그림 3. 4광파혼합현상으로 생성된 신호의 채널간격에 따른 효율 ( $\alpha=0.21$  dB/km,  $\lambda=1.55$  m,  $L=100$  km,  $P_{in}/ch.=1$  mW,  $dD/d\lambda=0.07$  ps/km/nm<sup>2</sup>).



(a) DSF (25 km)



(b) NZDSF (40 km)

그림 2. 두개의 광신호를 이용하여 측정된 광 스펙트럼. (a) 광신호가 25 km의 DSF를 통과한 경우, (b) 광신호가 40 km의 NZDSF를 통과한 경우.

합 현상으로 인하여 생성된 신호는 입력 광신호의 개수나 전력이 증가할수록 더욱 증가하므로 각 채널의 전송품질에 많은 영향을 줄 수 있다. 그러나, 국산 NZDSF는 DSF와 비교하여 상대적으로 큰 분산값(4 ps/km/nm)을 갖고 있으므로 그림 2(b)와 같이 길이가 40 km인 NZDSF에 동일한 전력의 광신호를 입력시켜도 4광파혼합 현상으로 인한 신호가 관찰되지 않음을

알 수 있다.

그림 3은 두 광신호를 광섬유에 입력하는 경우 채널 간격에 따라 계산된 4광파혼합현상의 효율을 보여준다. 이 때, 광섬유의 전송 손실은 0.21 dB/km, 길이는 100 km, 분산 기울기는 0.07 ps/km/nm<sup>2</sup>, 유효 면적은 53  $\mu$ m<sup>2</sup>, 입력 광신호들의 전력은 0 dBm, 파장은 1550 nm로 가정하였다. 채널 간격이 100 GHz일 때, 분산값이 0 ps/km/nm인 DSF에서는 4광파혼합 현상에 의하여 출력 광신호의 크기보다 약 26 dB 작은 누화 신호가 생성된다. 그러나, 분산값이 4 ps/km/nm인 NZDSF에서는 출력 광신호 보다 약 58 dB 작은 누화 신호가 생성됨으로써 4광파혼합 현상에 의한 신호의 열화가 나타나지 않는다. 따라서, 개발된 국산 NZDSF는 기존의 단일모드 광섬유에 비해 분산에 의해 제한 받는 최대 전송 거리를 4배 이상 증가시킬 수 있는 동시에 4광파혼합 현상을 효과적으로 억제할 수 있다. 따라서, 이러한 NZDSF를 사용함으로써 장거리 전송 시 필수적으로 요구되는 분산 보상기의 개수와 그에 따른 손실을 보상하기 위한 광증폭기 소자 등을 절감할 수 있다.

### III. 전송실험 및 결과

그림 4는 160 Gb/s(10 Gb/sx16채널)급 WDM 신호를 640

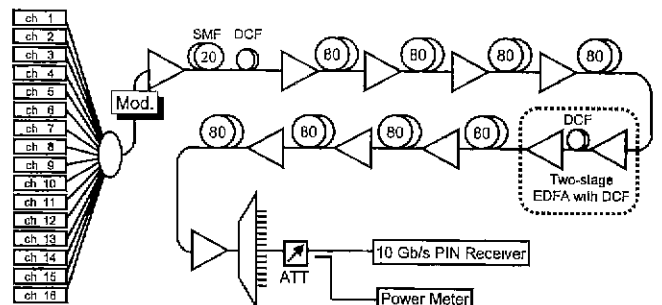


그림 4. 10 Gb/sx16 채널 WDM 신호의 NZDSF 640 km 전송 실험을 위한 구성도.

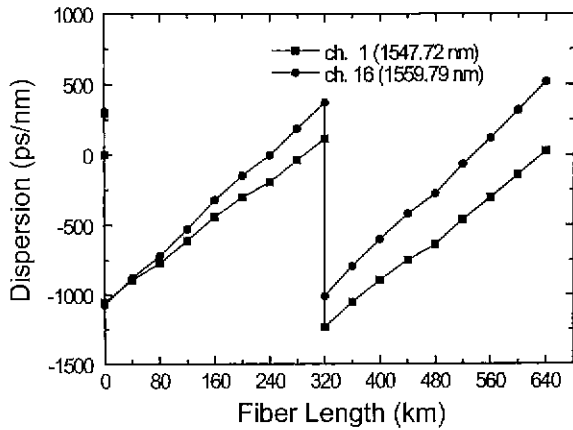
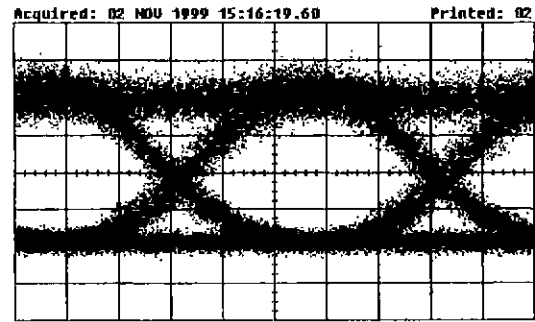


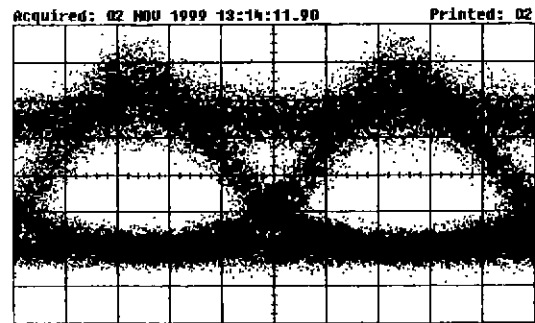
그림 5. NZDSF 광전송 선로의 누적 분산.

km의 NZDSF를 사용하여 전송하기 위한 실험 구성도이다. 16개의 DFB 레이저들은 1547.72~1559.79 nm 사이의 ITU 표준파장에서 동작하고 있으며 채널 간격은 100 GHz이다. 각 레이저의 출력은 4 dBm이며, 커플러를 통하여 다중화된 후 LiNbO<sub>3</sub> 광변조기를 이용하여 10 Gb/s의 전송속도(패턴길이: 231-1)로 변조되었다. 이때 소광비는 13.2 dB로 측정되었다. 변조된 WDM 신호들은 EDFA에서 증폭된 후 전체 광선로의 분산값을 조정하기 위하여 설치한 20 km의 단일모드광섬유와 1550 nm에서 분산값이 -135 ps/nm인 분산보상광섬유(DCF: dispersion compensating fiber) 모듈을 통과한 뒤 EDFA에서 다시 증폭되었다. 광선로는 8개의 1단 EDFA와 8개의 길이가 80 km인 NZDSF 그리고 광선로의 중간지점(320 km)에 위치한 분산보상모듈로 구성되었다. 사용된 1단 EDFA의 이득은 19 dB, 잡음 지수는 5 dB이었다. 분산보상모듈은 2단 EDFA와 DCF로 이루어져 있으며 사용된 DCF의 분산 보상량의 합은 1550 nm에서 약 -2711 ps/km/nm이었다. NZDSF의 손실은 평균 0.21 dB/km이었으며, 접속손실과 커넥터 손실을 포함한 한 구간(80 km)의 총 손실은 19 dB이었다. NZDSF에 입력되는 WDM 신호의 채널당 광파워는 0 dBm이었다. 또한, PIN 수신기의 수신감도는 -19.5 dBm(@BER = 10<sup>-9</sup>)이었다.

그림 5는 NZDSF 광전송 선로의 누적 분산을 나타낸다. 1550 nm의 파장에서 한 증폭기 구간(80 km)내에 있는 NZDSF의 누적 분산과 분산 기울기는 각각 320 ps/nm와 5.4 ps/nm<sup>2</sup>



(a) Ch. 1 (1547.72 nm)

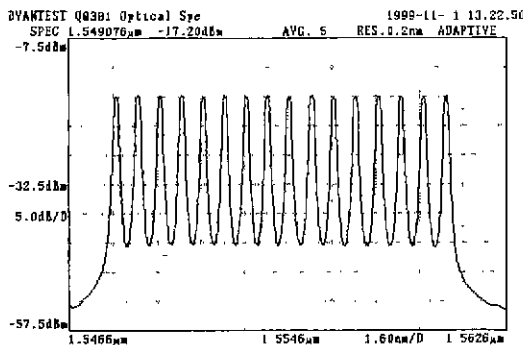


(b) Ch. 16 (1559.79 nm)

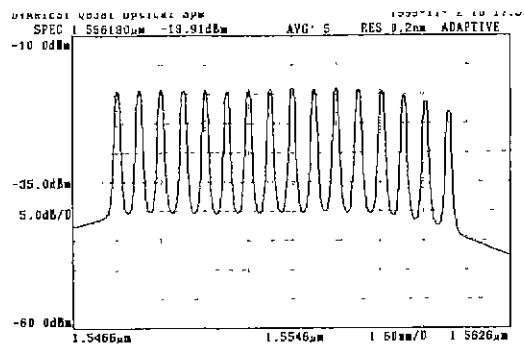
그림 7. 640 km 전송 후 측정된 eye diagram. (a) 채널 1, (b) 채널 16.

이었고 DCF는 각각 -1367 ps/nm와 -3.97 ps/nm<sup>2</sup>이었다. 채널 1에 해당하는 파장(1547.72 nm)에서의 평균 분산값은 3.7 ps/km/nm이었고 채널 16(1559.79 nm)에서는 4.5 ps/km/nm이었다. 640 km 전송 후 분산기울기로 인하여 발생하는 여분의 분산값은 채널 별로 30~500 ps/nm 사이에 분포되어 있다.

그림 6은 전송 전과 640 km 전송 후의 측정된 광스펙트럼이다. 각 채널의 광신호대잡음비와 전력 차이는 각각 23 dB(해상도: 0.1 nm) 이상, 5 dB 이하로 측정되었다. 그림 7은 전송 후의 채널 1과 채널 16의 eye diagram을 보여준다. 채널 16의 경우 500 ps/nm의 잔여 분산이 존재하였으나, 광섬유의 분산에 의한 chirp과 반대의 부호를 갖도록 광변조기를 동작시켰으므로 펄스가 약간 압축되어 전송품질에는 크게 영향을 미치지 않았다. 그림 8은 전송 후에 측정된 각 채널의 비트 오류를 나타낸다. 640 km 전송 후, 광신호대잡음비의 감소로



(a) 전송 전



(b) 640 km 전송 후

그림 6. 640 km 전송 후 측정된 광스펙트럼. (a) 전송 전, (b) 640 km 전송 후.

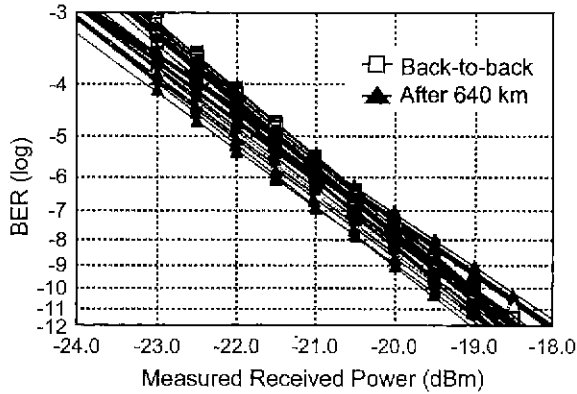


그림 8. 640 km 전송 후 측정된 각 채널의 비트 오류.

인한 수신기의 파워 페널티는 거의 나타나지 않았다(<0.5 dB). 따라서, NZDSF를 사용하여 160 Gb/s(10 Gb/s×16 채널)급 WDM 신호를 에러 없이 640 km 전송할 수 있었으며, 기존의 SMF를 사용하는 경우와 비교하여 분산 보상을 위한 DCF와 광증폭기 소자를 절감할 수 있었다.<sup>[4]</sup>

IV. 결 론

본 논문에서는 최근 국내에서 개발된 NZDSF를 이용하여 160 Gb/s(10 Gb/s×16 채널)급 WDM 신호를 에러 없이 640 km 전송 실험한 결과를 보고하였다. 이 실험에서 사용된 NZDSF의 전송 손실은 0.21 dB/km, 분산값은 2~5.2 ps/km/nm, 분산 기울기는 0.068 ps/km/nm<sup>2</sup>, 유효면적은 53 μm<sup>2</sup>, 편광모드분산은 0.06 ps/km<sup>1/2</sup>이었다. 이러한 NZDSF를 사용함으로써 분산보상을 위하여 소요되는 DCF의 양을 기존의 SMF

를 사용하는 경우와 비교하여 약 1/4로 감소시켰으며, 이에 따라 DCF의 손실을 보상하기 위한 EDFA의 수도 절감되었다. 광신호대잡음비의 감소로 인한 수신기의 파워 페널티는 640 km 전송 후에도 0.5 dB 이하로 측정되었다. 따라서, 이번에 개발된 NZDSF는 향후 국내 광선로의 설치비용을 효과적으로 절감시키는 데에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문은 대한전선 주식회사와 KAIST 광전자연구센터의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] D. Breuer, K. Obermann, and K. Petermann, Tech. Dig. OFC'98, (Optical Society of America, San Jose, USA, 1998), paper Tu18.
- [2] S. Kawanishi, H. Takara, K. Uchiyama, I. Shake, and K. Mori, Tech. Dig. OFC/IOOC'99, (Optical Society of America, San Diego, USA, 1999), paper PD1.
- [3] 신승균, 현덕화, 정윤철, 광자기술학술회의'99, (한국광학회, 속초, 1999), 373.
- [4] S. K. Shin, C. H. Kim, and Y. C. Chung, IEEE Photon. Tech. Lett., 11, 742 (1999).
- [5] A. R. Chuaplyvy, R. W. Tkach, and K. L. Walker, U.S. Patent 5327516 (1994).
- [6] P. Palumbo, Lightwave Magazine, Nashua, NH: Penn Well Publishing, 1 (1996).
- [7] 정창현, 유기선, 강희전, 광자기술학술회의'99, (한국광학회, 속초, 1999), 35.

10 Gb/s×16-channel WDM transmission over 640 km of domestic non-zero dispersion shifted fiber

Keun Joo Park, Seung Kyun Shin and Yun Chur Chung

Department of Electrical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Taejon 305-701, Korea

Hee Jeon Kang and Ki Sun Yu

Taihan Electric Wire Co. Ltd, Anyang 431-060, Korea

(Received January 18, 2000, Revised manuscript received April 6, 2000)

We demonstrate an error-free transmission of 160-Gb/s (10 Gb/s×16 channels) WDM signals over 640 km of non-zero dispersion shifted fiber (NZDSF) developed within Korea. The average dispersion of the NZDSF was 4 ps/km/nm at 1550 nm. Using this NZDSF, we could reduce the dispersion-compensating fiber (DCF) by a factor of four. Accordingly, we could also reduce the number of erbium-doped fiber amplifiers required for the compensation of fiber losses in DCF modules.