

# 광 FDM 전송시스템에서 4파장믹싱 효과를 최소화하는 최적 채널할당 방식

正會員 이 강 호\*, 유 진 태\*\*, 박 진 우\*\*

## Optimum Channel Allocation Scheme to Suppress FWM Effects in Optical FDM Transmission Systems

Ghangho Lee\*, Jintae Yu\*\*, Jinwoo Park\*\* *Regular Members*

※본 연구는 한국과학재단 특정기초연구비 (961-0100-001-2) 지원으로 수행되었으며 지원에 감사를 드립니다.

### 요 약

분산전이 광섬유를 사용하는 다채널 광 주파수 분할 다중화 전송시스템에서 4파장 믹싱 현상은 지배적인 비선형 현상으로 작용한다. 이 현상은 광 주파수상에서 주파수 캐리어 사이의 조합에 의해 합과 차의 주파수 성분을 발생시켜 원하는 채널에 간섭형태의 주파수 성분을 생성하여 광 FDM의 채널용량을 제한하는 요인으로 작용한다. 본 논문에서는 이러한 4파장 믹싱 현상을 최소화하는 최적 채널배치 알고리즘을 제시한다. 제안된 구조에서는 대역폭 확장 팩터(bandwidth expansion factor)를 다른 비 등간격 채널 배치 구조들과 비슷한 수준으로 유지하면서 4파장 믹싱 현상이 신호채널 대역에 중첩되는 것을 피하고 누화성분이 전송대역폭 밖으로 균일하게 분산되도록 한다. 제안한 최적 비 등간격 채널배치 알고리즘에서는 다른 비 등간격 채널배치 알고리즘과 비교했을 때 향상된 eye pattern과 비트에러율의 결과를 얻을 수 있었다.

### ABSTRACT

Four wave mixing(FWM) process is a dominant nonlinear effect in long-haul multichannel optical FDM transmission systems employing dispersion shifted fiber. FWM process results in generation of new frequency components acting as crosstalks to the transmission channels limiting the channel capacity of the optical FDM systems. An optimum unequal channel allocation scheme to suppress FWM effects is presented in this paper. The

\* (주)삼성전자

\*\* 고려대학교 전자공학과

論文番號: 97324-0911

接受日字: 1997年 9月 11日

proposed scheme locates FWM crosstalk components distributed uniformly over the allowed transmission bandwidth while avoiding the superposition with the signal channel bandwidths. It is also noticed that the transmission bandwidth expansion factor is kept low compared to other unequal channel allocation schemes. Enhanced transmission performance is demonstrated through the simulation experiments in terms of eye pattern and BER, compared with the equal and the other unequal channel allocation schemes.

## I. 서 론

현재 대용량 광전송 시스템은 광섬유의 저손실 파장대역인 1300nm 파장대와 1550nm 파장대에서 각각 약 30~40nm의 파장폭을 활용하고 있다. 따라서 사용 가능한 파장대역이 실제적으로 제한된다는 점은, 앞으로 본격화되는 정보통신 사회에서 기하급수적으로 증가되는 전송정보량을 고려할 때에 주어진 광섬유 또는 광전송 시스템의 전송 대역폭을 보다 효율적으로 활용할 필요성이 커지고 있다.

현재 연구되고 있는 광 FDM(Frequency Division Multiplexing) 시스템은 고밀도 WDM (Wavelength Division Multiplexing) 시스템의 확장으로서, 광통신 파장채널 사이의 간격을 0.04nm까지 줄여 가능한 많은 주파수 채널을 확보하려는 시도가 진행되고 있다 [1, 2]. 보다 많은 채널은 보다 많은 정보를 전송할 수 있다는 이점이 있지만, 이에 반하여 발생하는 많은 문제점들이 도출되고 있으며, 이중에 중요한 제한요소는 광섬유의 비선형성에 의한 전송신호의 왜곡현상이다. 즉, 전송채널의 밀집 다중화에 따라 광섬유 단위면적당의 전송 광신호 출력이 크게 증가되면서 소규모 전송시스템에서 무시될 수 있었던 광섬유의 비선형 효과가 증대되어 실제적인 전송 효율을 제한하는 요소로 부각되었다.

대표적인 광섬유의 비선형 현상은 4파장믹싱 (four-wave mixing; FWM), 유도라만 산란 (stimulated Raman scattering), 유도브릴로인 산란 (stimulated Brillouin scattering), 자기위상 변조 (self-phase modulation), 그리고 교차위상 변조 (cross phase modulation)이 있다. 이중에 광섬유의 색분산을 감소시키기 위해 채용하였던 분산천이 광섬유 (dispersion shifted fiber: DSF)의 경우에, 전송되는 채널신호간에 위상 차이가 적으므로 광섬유의 비선형 동작에 의하여 채널 광파간의

혼합현상이 두드러져 FWM 효과가 지배적이 된다. 즉, 광주파수 혼합에 의한 누화 주파수 성분이 다른 신호 채널에 중첩되어 전송되는 신호를 왜곡시키게 된다 [3, 4].

다채널 광 FDM 전송시스템에서 FWM 현상을 줄이기 위한 노력은 다방면으로 진행되어 왔다. 초기의 연구는 등간격 채널배치에 기반을 두고 전송 채널간격을 수백 GHz로 넓힘으로써 FWM 누화(crosstalk) 성분의 혼합 효율을 줄이도록 하였다. 그러나 이러한 방식은 채널수가 증가함에 따라 전송대역폭이 급격히 증가하게 되어 가용 대역폭을 효율적으로 사용하지 못한다는 단점이 있다. 그 이후 가용 대역폭을 보다 더 효율적으로 사용하기 위해 편광 제어(polarization control)에 의하여 FWM 효과를 감소시키는 방식이 제안되었으나, 전송특성에 아직도 많은 문제점을 갖는 편광유지 광섬유를 사용하여야 하거나 편광을 정확히 제어하는 부가적인 과정과 편광 제어의 정확성에 따른 개선정도의 변동이 예상된다 [5, 6]. 현재 현실적인 방법으로 제시되는 FWM 감소방식은 비등간격 채널 할당방식으로서 많은 연구가 진행되고 있다. 파장 채널간의 간격을 일정하도록 제한하지 않음으로써 FWM 현상에 의한 누화성분이 신호 채널대역에 중첩되지 않도록 하는 방식이다. 이 방식은 필연적으로 채널 사이를 넓히는 효과를 갖기 때문에 전체 소요되는 파장 대역이 증가하는 문제점을 갖는다. 따라서 적절한 채널배치 방법을 찾으려는 연구가 최근 발표되었는데, 대표적으로 Forghieri 등 [7, 8]이 정수 선형 프로그래밍 (integer linear programming) 방법을 이용하여 시뮬레이션과 실험·결과에서 비등간격 채널배치에 따른 유효성을 확인하였다. 또한 Kwong 등 [9]이 광채널을 광 CDMA의 직교코드로 설정하여 비등간격의 채널위치를 산정하는 방법을 제시하였다. 이러한 방법들은 일관적으로 비선형에 의하여 발

생되는 누화 주파수 성분이 전송신호의 채널 대역과 중첩되지 않도록 전송 채널의 주파수를 적절히 배치하는 것을 원칙으로 하고 있으나, 이러한 원칙을 만족시키는 해는 하나의 채널 대역폭을 어떻게 설정하느냐에 따라 많은 해를 가질 수 있다.

본 연구에서는 FWM 현상으로부터 발생하는 혼잡 누화 성분의 주파수 분포 특성은 전송채널들이 위치한 대역의 중심부근에 큰 값으로 분포한다는 사실을 관측하였으며, 따라서 비등간격 채널의 위치는 가능한 허용한 전송 대역의 가장자리 부분에 위치하는 것이 유리하다는 점을 제안하였다. 또한 이러한 사실을 바탕으로 누화성분이 신호전송 채널과 중첩되지 않으면서 누화성분의 집중되는 정도에 따라 주파수상에서 채널간의 간격을 최적으로 결정할 수 있는 비등간격 채널 할당방식 선정 알고리즘을 제안하였다. 2장은 FWM 현상의 원인인 광섬유의 비선형 현상을 간단히 설명하고, 3장은 제안한 최적의 비등간격 채널 할당 알고리즘을 설명하고, 4장에서 6개의 채널 FDM 전송시스템을 시뮬레이션 실험을 이용하여 성능평가를 함으로써 기존의 채널할당 방식과의 비교적 성능을 분석하였다.

## II. 광섬유의 비선형 현상

광섬유에 높은 광파워를 지닌 빛이 도파할 경우 비선형 자화율에 의해 비선형 편광(nonlinear polarization)이 유도된다. 광소자에 있어서 비선형 현상은 비선형 자화율(nonlinear susceptibility), 입력 광파워(incident light), 상호 작용 길이(interaction length)에 의해 좌우된다. 현재 광전송 시스템에 채택되고 있는 1550nm 대역의 단일 모드 광섬유(single mode fiber)는 상대적으로 작은 값의 비선형 자화율을 지니고 있으나, 0.2dB/km의 작은 전송 손실(transmission loss)과 수십  $\mu\text{m}^2$  정도의 작은 코어(core) 단면적을 지니고 있다. 이처럼 작은 손실과 단면적은 전송채널 증가시 광섬유가 감당해야할 광파워를 증가시키게 하여, 광섬유의 비선형 현상을 증가시키고 동시에 송신단의 레이저 다이오드 출력 광파워를 제한시키는 결과를 초래한다.

광섬유를 도파하는 빛은 맥스웰 방정식을 이용한 도파 방정식(wave equation)으로 표현할 수 있다. 식

(1)에서  $E, P, \mu_0$ 는 각각 전계, 편광, 자유공간에서의 투자율(permeability)을 나타낸다 [1].

$$\nabla \times \nabla \times E = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} - \mu_0 \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \quad (1)$$

빛이 도파해 나감에 따라 유도되는 편광은 식(2a)와 같이 선형편광과 비선형편광으로 구성되고, 이들은 각각 식(2b)와 (2c)로 나타낼 수 있다.

$$P(r, t) = P_L(r, t) + P_{NL}(r, t) \quad (2a)$$

$$= \epsilon_0 \{ \chi^{(1)} E + \chi^{(2)} E^2 + \chi^{(3)} E^3 + \dots + \chi^{(n)} E^n \}$$

$$P_L(r, t) = \epsilon_0 \chi^{(1)} E(r, t) \quad (2b)$$

$$P_{NL}(r, t) = \epsilon_0 \sum_n \chi^{(n)} E^n \quad (2c)$$

$\epsilon_0$ 는 자유공간에서의 유전율(permittivity)을 나타내고,  $\chi^{(n)}$ 은 편광의 방향성분과 비례상수를 나타내는 n차 자화율(nth-order susceptibility(tensor))이다. 식(2c)의 비선형편광은 2차 이상의 자화율을 지닌 항으로 이뤄져 있다. 그러나 역대칭(inversion symmetry) 분자 구조(molecular level)를 지닌 실리카 광섬유의 경우 2차 비선형 자화율은 영이 되고, 가장 지배적인 비선형 편광은 3차 비선형 자화율이 된다.

식(2)의 시간영역의 전계와 편광을 식(1)에 대입하고 2차 미분형 맥스웰 방정식을 이용하면 비선형 분산 매체의 파동방정식은 식(3)과 같이 나타낼 수 있다. 식(3)의 좌변에 첫째 항은 선형편광에 기인된 항이며, 둘째 항은 비선형편광에 기인된 항으로 비선형 현상의 원인이 된다.

$$\nabla^2 E - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = -\mu_0 \frac{\partial^2 P_L}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 P_{NL}}{\partial t^2} \quad (1)$$

비선형편광  $P_{NL}$ 은 선형편광  $P_L$ 과 비교했을 때 작은 변동값을 가지고 광계는 편광을 유지하며 광계는 의사 단일광(quasi-monochromatic)으로 이뤄져 있고 진폭변화가 작아 지역값의 근사화가 가능하다고 하면 식(3)은 아래와 같이 간소화된다.

$$\nabla^2 \tilde{E} + \epsilon(\omega) \left( \frac{\omega}{c} \right) \tilde{E} = 0 \quad (4)$$

식(4)는 식(3)을 주파수 영역에서 표현한 형태로서, 유전율은 선형 및 비선형 자화율에 의한 유전율을 포

함하고 있다. 식(5)는 식(4)의 나타나 있는 주파수 영역에서의 전계를 나타내고 있으며, 진폭 근사화를 위해  $x, y$ 축의 함수로 구성된 모드와 진행방향인  $z$ 축으로 구성된 진폭의 함수로 이뤄져 있다.  $\beta_0$ 는 파수(wavenumber)로서 전파의 진행거동을 대표한다.

$$\tilde{E}(r, \omega) = F(x, y) \tilde{A}(z, \omega) \exp(i\beta_0 z) \quad (5)$$

식(5)를 식(4)에 대입하고, 1차 요동 이론(first-order perturbation theory)과 가우시안 근사화를 통해 광섬유의 파동방정식을 구해보면 다음의 식과 같다.

$$\frac{\partial \tilde{A}}{\partial z} + \beta_1 \frac{\partial \tilde{A}}{\partial z} + \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 \tilde{A}}{\partial t^2} - \frac{1}{6} \beta_3 \frac{\partial^3 \tilde{A}}{\partial t^3} + \frac{\alpha}{2} \tilde{A} = i\gamma |\tilde{A}|^2 \tilde{A} \quad (6)$$

식(6)을 광섬유의 도파 방정식 또는 비선형 슈뢰딩거 방정식이라 한다. 좌변의 첫째 항이 광섬유의 비선형 현상과 관계된 항이고, 둘째에서 넷째 항은 분산에 관계된 항이다. 좌변의 마지막 항은 빛의 진행에 따른 전송 손실을 나타내고 있는 항으로  $\alpha$ 는 손실 계수, 우변의  $\gamma$ 는 비선형 계수,  $\beta_n$ 은  $\beta(\omega)$ 를  $\omega$ 에 대해  $n$ 번 미분한 형태이다.

### III. 최적 채널 할당방식

#### 3.1 FWM 현상

FWM 과정은 3차 비선형 편광 또는 비선형 굴절률에 의해 3 채널의 상호 간섭 믹싱으로 새로운 주파수 성분이 생성되는 현상을 말한다. FWM에 의한 누화(crosstalk) 성분은 다음과 같이 전송채널 주파수의 합과 차의 조합으로 나타난다.

$$f_{ijk} = f_i + f_j - f_k \quad (7)$$

식(7)의 결과는 전송채널 주파수 성분  $f_i, f_j, f_k$ 에 의하여 발생된 새로운 주파수 성분이다.

FWM 성분의 세기는 혼합효율(mixing efficiency)과 전파상수차( $\Delta\beta$ )로 나타낼 수 있다.

$$P_{ijk}(L) = \eta_{ijk} \frac{1024\pi^6}{n^4 \lambda^2 c^2} (DX_{1111})^2 \left( \frac{L_{eff}}{A_{eff}} \right) P_i P_j P_k \exp(-\alpha L) \quad (8)$$

위 식에서  $P_n$ 은 단일모드 광섬유로 입사된 입력 광출력,  $L$ 은 광섬유의 길이,  $n$ 은 코어의 굴절률,  $\lambda$ 는 전송창의 파장대역,  $X_{1111}$ 은 3차 비선형 자화율,  $L_{eff}, A_{eff}$ 는 HE<sub>11</sub> 진행모드의 실효길이와 단면적,  $\alpha$ 는 전송손실을 나타내고,  $\eta_{ijk}$ 는 혼합효율을 나타내고 있다. 혼합효율은 채널 간격과 위상 매칭, 그리고 전송길이에 의해 좌우되고 0~1 사이의 값을 지니며, FWM 누화 성분의 혼합효율을 의미한다.

FWM의 혼합효율은 아래의 식 (9a)로 나타낸다. 혼합효율은 또한 아래의 식 (9b)의 전파 상수차에 의해 좌우되며 채널 간격  $\Delta f$ 가 크고, 위상정합이 이뤄지지 않았을 경우 0으로 감소하게 된다. 식(9b)의  $D_c$ 는 광섬유의 색분산을 나타낸다. 색분산이 상대적으로 낮은 DSF와 1300nm대역의 전송창을 사용하는 광전송 시스템에 있어서, 전송되는 광파들은 서로 위상정합을 이뤄 전파상수차는 최소가 되고, 혼합효율은 최대가 된다.

$$\eta_{ijk} = \left( \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \Delta\beta^2} \right) \left\{ 1 + \frac{4e^{-\alpha L} \sin^2(\Delta\beta L/2)}{(1 - e^{-\alpha L})^2} \right\} \quad (9a)$$

$$\Delta\beta = \frac{2\pi\lambda^2}{c} (\Delta f)^2 \left( D_c + \Delta f \frac{\lambda^2}{c} \frac{dD_c}{dD} \right) \quad (9b)$$

#### 3.2 최적의 채널배치

제안한 채널할당 방식은 새로운 광주파수 누화성분을 생성시키는 FWM 현상이 다채널 전송시에 중앙에 위치한 파장채널에 가장 큰 영향을 주고, 신호를 왜곡시킨다는 점과 식(7)에서 볼 수 있듯이 누화성분의 생성 광주파수를 유추해낼 수 있다는 점에 착안하여, 중앙 채널대역에 넓은 채널간격을 부여하고 모든 채널간격이 서로 다른 비등간격 채널할당에 기반을 두었다.

그림 1은 비등간격 채널배치에 따라 나타나는 전환 효과를 보여주고 있다. 그림에서 각각의 검정 블록은 FWM 누화 성분을 나타내고, 이들이 전송채널을 중심으로 좌우로 배분됨을 알 수 있다.

50GHz의 등간격 채널배치의 경우 55GHz 대역에 위치한 채널4에는 식(7)에 의해  $f_{163}, f_{231}, f_{253}, f_{274}, f_{321}, \dots, f_{635}$  성분들이 위치하게 된다. 그러나, 비등간격 채널배치를 사용할 경우 이들 성분들은 61GHz의 전송대역폭을 제외한 57GHz에서 64GHz 대역에 고루 분포하게 되고, 성분의 개수도 대략 1/2씩 좌측대역과 우측대역에 분

포하게 된다.

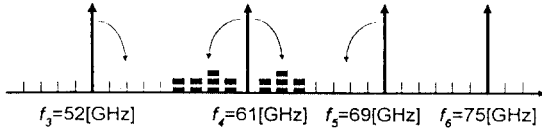


그림 1. 6채널 광 FDM 전송시스템에서 비등간격 배치로의 전환효과

Fig 1. Conversion effects of unequal channel spacing allocation in 6 channel Optical FDM transmission systems

### 3.3 최적 비등간격 채널할당 알고리즘

제안한 최적 비등간격 채널할당 방식은 채널 간격 분할률 결정, 전송대역폭 결정, 채널 간격의 순차배정, 채널배치의 네단계로 이뤄져 있다.

채널 간격 분할률은 비등간격 배치를 위한 슬롯수,  $m$ 으로 정의되며 각 채널의 전송률과 전송대역폭에 의해 결정된다. 그림 2는 동일 채널 간격의 슬롯수에 따른 분할률을 보여주고 있다. 그림 2에서 알 수 있듯이 큰 값의 슬롯수를 배정할 경우, 채널 간격은 더 작은 슬롯단위로 세분화되어 있음을 의미하게 되고 비등간격 채널배치에 의해 나타나게 되는 대역폭 확장을 최소화할 수 있다.

그림 3은 등간격 배치시와 슬롯수의 증가에 따른 대역 확장 정도를 비교하고 있다. 그림에서 볼 수 있

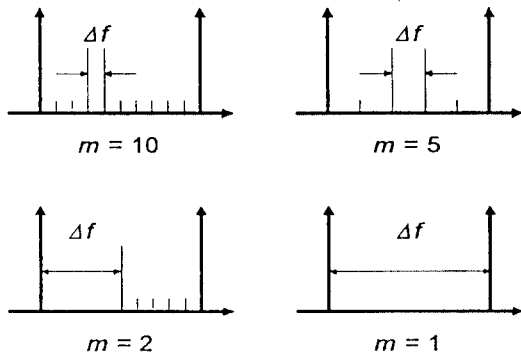


그림 2. 슬롯수에 따른 채널 간격 분할률  
Fig 2. Channel spacing division rate varying the number of slots

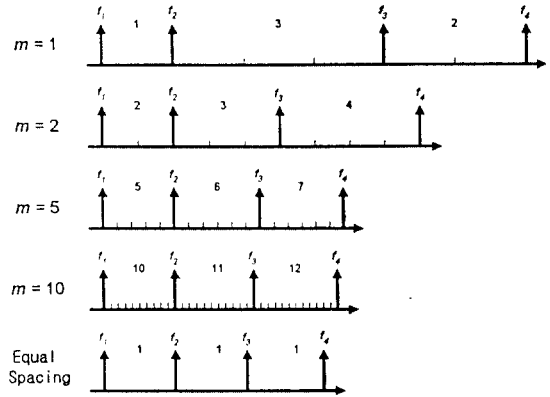


그림 3. 슬롯수에 따른 대역 확장의 변화  
Fig 3. Variation of bandwidth expansion varying the number of slots

듯이 슬롯수를 증가시킬수록, 대역의 확장이 작음을 알 수 있다. 그러나 슬롯수를 증가시키면 전송채널에 가장 가깝게 위치한 FWM 누화성분이 서로 인접하게 됨을 의미하고, 광 FDM 전송시스템의 수신단을 구성함에 있어서 더 미세한 광필터링을 필요로 하게 된다. 결국 슬롯수는 무한대로 확장하거나 줄일 수 있는 요소가 아니며, 대역 확장성과 적용하려는 광필터링 능력에 의해 제한을 받게 된다.

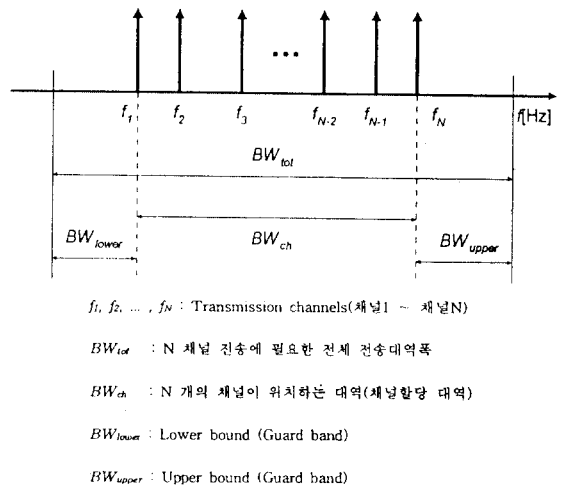


그림 4. 최적 비등간격 채널할당의 전송대역  
Fig 4. Transmission bandwidth of the optimum unequal channel spacing allocation scheme

최적 비등간격 채널배치에 있어서 전송대역은 그림 4와 같이 모든 채널 간격의 합이 된다.

전체 전송대역폭은 전송채널 대역폭과 보호 대역폭의 합이 되고 다음의 식과 같이 표현된다.

$$BW_{tot} = BW_{ch} + (BW_{lower} + BW_{upper}) \quad (10)$$

전송채널의 개수를  $N$ 이라 하면 전송대역폭은  $m$ 에서  $m+(N-2)$ 의 합이 되고 식(11a)와 같다. 식(11b)와 (11c)는 상위 및 하위 보호 대역폭으로 각각 채널1과 채널 $N$ 이 위치하는 대역과 FWM 누화 성분이 미치는 범위의 차를 나타낸다.

$$\begin{aligned} BW_{ch} &= m_{tot} = m + (m+1) + \dots + (m+(N-2)) \\ &= m \times (N-1) + \frac{(N-2)(N-1)}{2} \quad (11a) \\ &= (N-1) \left\{ m + \frac{N-2}{2} \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} BW_{lower} &= |f_1 - \min\{f_{ijk}, (\forall i, j, k)\}| \quad (11b) \\ &= |f_1 - f_{1N}| \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} BW_{upper} &= |\max\{f_{ijk}, (\forall i, j, k)\} - f_N| \quad (11c) \\ &= |f_{NN1} - f_N| \end{aligned}$$

채널 간격의 순차는  $S_n$  ( $n=1, 2, \dots, N-2$ )으로 정의되고, 중앙 배분의 원리에 의해 순차적으로 큰 값이 중앙에 작은 값이 시작과 마지막 채널 간격에 배정되고 식 (12)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} S_n &= m + 2(n-1) \quad \text{for } n \leq N/2 \\ &= (m-1) + 2(N-n) \quad \text{for } n > N/2 \end{aligned} \quad (12)$$

여기서  $n=1, 2, \dots, N-2$ . 이로부터  $N$ 채널 시스템의 채널위치에 대하여 일반화된 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} f_1 &= BW_{lower} \\ f_n &= f_{n-1} + S_{n-1} \\ &= f_1 + S_1 + S_2 + \dots + S_{n-1} \quad (n=2, \dots, N) \quad (13) \\ &= f_1 + \sum_{i=1}^{n-1} S_i \end{aligned}$$

위의 식에서 채널1은 하위 보호 대역폭 직후에 배

치시키고, 채널2에서 채널 $N$ 은 채널1에 슬롯간격 순차를 더한 위치에 각각 배정된다. 그림 5는 식(10)에서 (13)에 설명한 중앙 배분의 원리에 의해 배치된  $N$ 채널 광 FDM의 채널할당을 보여주고 있다.

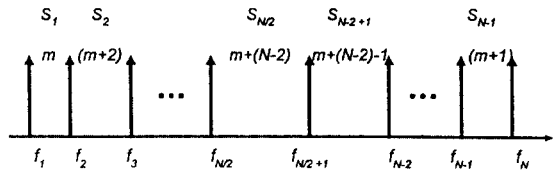


그림 5. N채널 최적 비등간격 채널할당  
Fig 5. Optimum unequal channel spacing allocation for the N channel transmission systems

#### IV. 전송성능의 비교 분석

본 절에서는 다채널 광 전송시스템을 가정하여 제안한 최적 비등간격 채널 할당 방식의 효율성을 시뮬레이션을 통하여 확인한다.

각 채널은  $f_1$ 에서  $f_6$ 의 광주파수를 지니며, 이전 무작위 신호발생기와 광파워를 조정하기 위해 광변조지수의 조정 블럭을 삽입하였다. 다중화기를 통해 6채널의 다중화가 이뤄지며, 다중화된 신호는 전송손실을 고려한 선형 전송채널을 통해 전송된다. FWM 누화 잡음을 나타내는 블럭은 각 채널의 특성을 추출하여 구성된 비선형 전송채널에 의해 선형 전송채널에 더해지게 된다. 수신단에서는 중간채널인  $f_3$ 와 동일한 주파수를 출력하는 국부 발진 레이저를 구성하여 코히어런트 검출을 행한다. 시뮬레이터를 이용한 600km의 전송실험에 있어서, 중계기 간격은 120km로 잡아, span당 120km와 0.2dB/km의 곱인 24dB의 손실을 갖는다고 가정하였다.

광증폭기는 20dB의 이득을 갖고 모든 채널에 대해 동일한 이득을 주어 이상적인 이득평탄(gain flattening)을 지닌다고 가정하고, FWM 현상의 관측에 초점을 맞추기 위해 광증폭기의 잡음은 무시하였다. 이는 각 채널의 광섬유 입력파워를 0dBm(1mW)로 가정했을 경우, 600km 전송후 수신단에서 검출되는 광파워는 -20dBm으로 현재 상용화된 2.5Gbps용 PIN 광검출기의 수신감도(-20dBm에서 -24dBm)를 만족한다

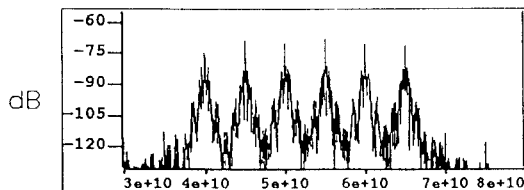
고 가정하기 위함이다.

광섬유의 1550nm 전송대역창을 사용하는 시스템을 가정하였으며, 이곳에서의 분산값은 FWM 현상이 현저하게 일어남을 강조하기 위해 전송대역창 내에서 동일하게 0.3ps/nm·km를 지녀, 모든 채널이 위상정합을 이루게 하였다.

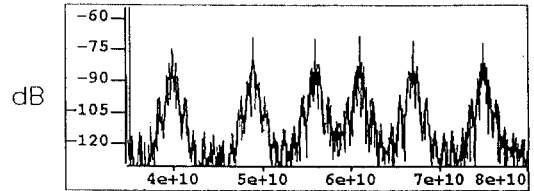
성능의 평가과정에서 1550nm 대역의 DSF를 사용한다고 가정하였으며, 색분산과 2차 색분산은 각각 0.3ps/nm·km, 0.055ps/nm<sup>2</sup>·km로 설정하고, 광섬유 코어 굴절률은 1.45, 코어의 단면적에 해당하는 유효면적은 20μm<sup>2</sup>을 사용하였다. 수신기의 PIN 다이오드의 양자효율은 0.67로 가정하였으며, 모든 광주파수 전송채널  $f_1$ 에서  $f_6$ 는 2.5Gbps의 전송률을 지니고 입력 광파워가 동일하다고 가정하였다. 그리고 코히어런트 검출과정에서의 결과를 단순비교하기 위하여 광주파수 전송채널과 FWM 과정에 의해 생성된 누화 성분은 동일한 편광을 지닌다고 가정했다.

#### 4.1 수신 광 스펙트럼

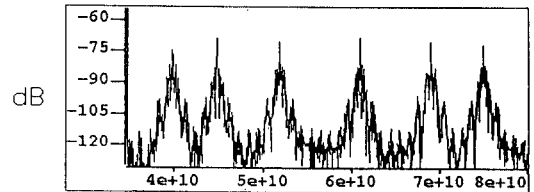
그림 6은 FWM 현상에 의해 영향을 받는 채널을 거친 후 수신된 광스펙트럼이다. 그림 6(a)는 슬롯수는 5로 설정하여 각각 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70GHz 대역에 채널을 배치시킨 등간격 채널할당시의 수신 스펙트럼으로 중앙에 위치한 광주파수 채널인  $f_3$ 과  $f_4$ 가 가장 큰 영향을 받을 것임을 예측할 수 있다. 그림 6(b)는 기존에 발표된 비등간격 채널배치한 예를 보이고 있으며 [7, 8], 전송채널의 위치는 40, 48, 54, 59, 66, 75 GHz이다. 전송채널 사이에 4광장 믹싱으로 인한 누화성분이 존재함을 관찰할 수 있으나, 특히 전송채널의 중앙부분인 채널 3과 채널 4의 사이에 상대적으로 큰 누화성분이 위치하게 되어 중앙채널의 전송 성능에 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다. 그림 6(c)는 본



(a) 등간격 광 FDM 시스템의 수신 광스펙트럼



(b) 일반적인 비등간격 광 FDM 시스템의 수신 광스펙트럼



(c) 최적 비등간격 광 FDM 시스템의 수신 광스펙트럼

그림 6. 6채널 광 FDM 시스템의 수신 광스펙트럼

Fig 6. Received optical power spectrum of the optimum unequal channel spacing allocation

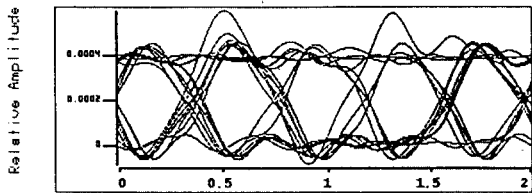
연구에서 제안한 최적 비등간격 채널배치에 의해 40, 45, 52, 61, 69, 75GHz 대역에 채널을 배치시킨 경우로서 FWM 누화 성분들이 송신 광주파수 채널대역 밖에 성공적으로 위치함을 확인할 수 있다.

#### 4.2 Eye 패턴

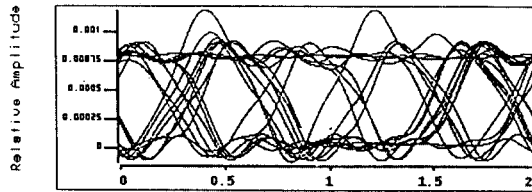
그림 7은 600km 전송을 가정하고, 등간격 채널배치 시 광파워 증가에 따른 이진 디지털 신호의 eye 패턴이다. 각 광주파수 채널  $f_1$ 에서  $f_6$ 의 입력 광파워를 2.0mW 미만으로 유지한 그림 7(a)의 경우 거의 명확한 eye opening을 확인할 수 있어 FWM 현상에 의한 영향이 크지 않음을 알 수 있다. 그러나 그림 7(b)와 7(c)의 결과에서 나타난 바와 같이 2.6mW 이상의 입력 광파워에 대해서는 신호의 요동 및 eye closure가 심해져 신호의 검출이 불가능함을 알 수 있다.

그림 8은 일반적인 비등간격 채널할당에 의한 600km 전송 성능의 측정결과이다. 등간격 채널 배치의 경우에 비하여 훨씬 우수한 eye 패턴을 관찰할 수 있으나, 입사 광출력이 증가할수록 eye closure가 커지는 현상을 보이고 있다. 이에 비교하여 그림 9에서 본 연구에

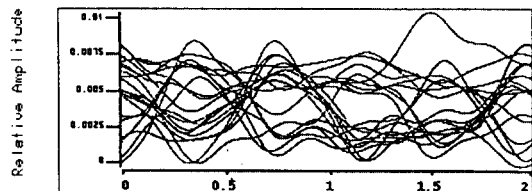
서 제안한 최적 비등간격 채널할당 시스템을 이용하여 600km를 전송하였을 때의 eye 패턴을 보여주고 있다. 제안한 방식은 중앙부근에 위치한 광주파수 채널 대역에 여분의 대역폭을 적절히 허용하여 FWM 누화성분이 전송 채널대역밖에 위치하도록 유도한 결과로서, 높은 광파워를 지닌 광주파수 채널들이 전송될 경우에도 FWM 현상의 효과가 감소됨을 알 수 있다. 각 채널의 입력 광파워가 2.6mW인 그림 9(b)의 경우에도 eye opening이 크게 유지되어 다른 채널 배치 방식에 비교하여 우수한 수신 성능이 유지될 수 있음을 예측할 수 있다.



(a) 광파워=2.0mW

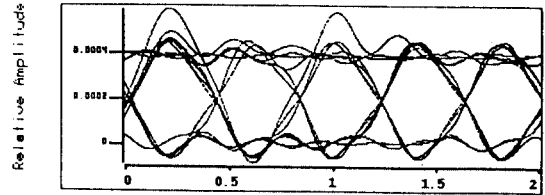


(b) 광파워=2.6mW

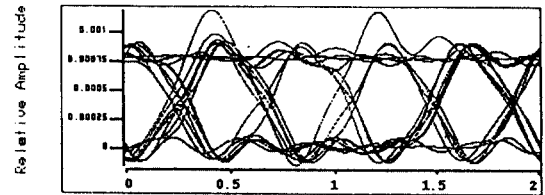


(c) 광파워=3.4mW

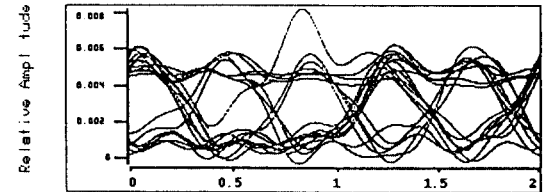
그림 7. 등간격 채널할당시 광파워 증가에 따른 eye 패턴  
Fig 7. Eye pattern of the equal channel spacing allocation



(a) 광파워=2.0mW



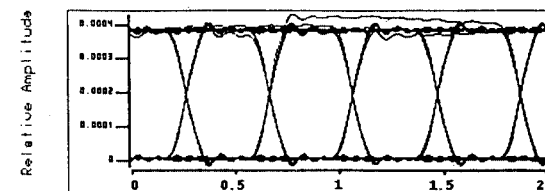
(b) 광파워=2.6mW



(c) 광파워=3.4mW

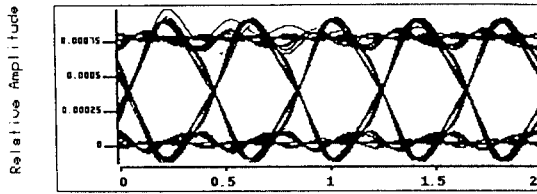
그림 8. 일반적인 비등간격 채널할당시 광파워 증가에 따른 eye 패턴

Fig 8. Eye pattern of the general unequal channel allocation

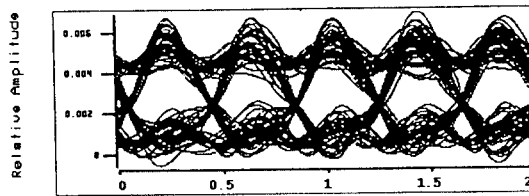


(a) 광파워=2.0mW





(b) 광파워=2.6mW



(c) 광파워=3.4mW

그림 9. 최적 비등간격 채널할당시 광파워 증가에 따른 eye 패턴

Fig 9. Eye pattern of the optimum unequal channel spacing allocation

#### 4.3 비트에러율

그림 10은 광출력을 증가하는 경우에 채널할당 방식에 따른 비트에러율을 나타내고 있다. 4파장 믹싱 현상의 효과가 가장 크게 나타나는 전송채널 대역의 중앙부분에 위치한 전송채널의 전송성능을 비교하기 위하여 채널 3을 분석대상으로 하였다. 분석에서의 전송거리는 600km 전송을 가정하였다. 주어진 전송채널의 매개변수 값을 가정하여 등간격 채널배치의 경우에는  $10^{-9}$ 의 BER을 얻기 위해 1.6mW 이하의 입력 광출력으로 제한됨을 알 수 있으며, 일반적인 비등간격 채널배치의 경우에 2.1mW로 채널당 전송할 수 있는 광출력이 증가함을 알 수 있다. 그러나 제안한 최적 비등간격 채널할당의 경우에는 4파장믹싱에 의한 누화 효과를 최소로 감소시킴으로써 전송할 수 있는 채널당 광출력이 약 2.6mW로 개선됨을 알 수 있다.

그림 11은 4파장 믹싱현상에 대하여 광전송 채널의 배치방법에 따른 가능한 광주파수 전송채널수를 산정한 결과를 보여주고 있다. 채널증가에 따른 영향을 살펴보기 위해 전송거리를 3.5km로 제한하였다. 그림에서 알 수 있듯이 최적 비등간격 채널할당의 경우

3.0mW의 입력 광파워를 유지하며, 30채널 이상을 전송할 수 있음을 알 수 있다.

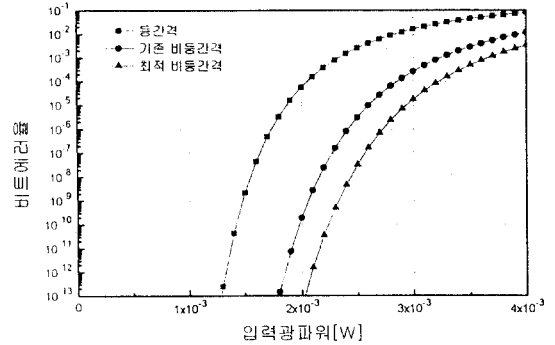


그림 10. 6채널 광 FDM 시스템의 BER

Fig 10. Bit Error Rate of the 6 channel optical FDM systems

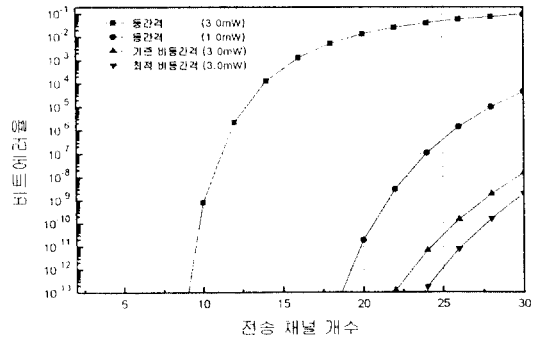


그림 11. 채널수의 증가에 따른 광 FDM 시스템의 BER

Fig 11. Bit Error Rate of the optical FDM systems with increasing the number of channels

#### V. 결론

본 연구 논문은 장거리 대용량 광 FDM 전송시스템을 구현함에 있어서 나타나게 되는 광섬유 비선형 현상의 특성을 파악하고, 이를 극복할 수 있는 최적의 채널할당 알고리즘을 제시하고 전송 성능을 측정함으로써 전송성능이 개선된 결과를 제시하였다.

본 연구에서 산출해낸 결과에 의하면, FWM 현상에 의한 영향이 각 채널의 입력 광파워 증가에 따라

전송성능을 급격히 열화시킴을 관찰할 수 있었으며, 특히 FWM 현상에 의한 누화성분이 전송채널 대역의 중앙부분에 집중됨으로써 해당 대역에 위치한 채널의 전송성능 열화가 특히 커짐을 알 수 있었다. 따라서 FWM 현상에 의한 누화성분이 전송채널 대역과 중복되지 않으면서 전체 전송채널 대역에 균일하게 분포하도록 하는 방식을 제안하여 FWM 현상에 의한 누화잡음 효과를 최소화하도록 하였다.

DSF를 사용하는 6채널 광 FDM 전송시스템을 이용하여 600km를 전송할 때  $10^{-9}$ 의 BER을 얻기 위해 등간격 채널할당의 경우 각 채널의 최대 입력 광파워를 1.5mW로 제한해야 하나, 본 논문에서 제안한 최적 비등간격 채널할당의 경우 이를 2.6mW 정도까지 완화시키고, FWM 효과에 의한 신호의 왜곡을 최소화시킬 수 있음을 알았다.

이러한 입계 광파워의 완화는 전송거리를 증가시키고, 수용 가능한 채널수를 늘리는 효과를 가져와 중계기간 간격을 늘릴 수 있고, 시스템을 설계함에 있어 파워 페널티(power penalty) 문제를 완화시켜 대용량 장거리 광 FDM 전송시스템을 구현함에 있어 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

### 참 고 문 헌

1. G. P. Agrawal, Nonlinear Fiber Optics, 2nd Ed, Academic Press, 1995.
2. D. M. Sprit, M. J. O'Mahony, High Capacity Optical Transmission Explained, John Wiley & Sons, 1995.
3. N. Shibata, et al., "Transmission Limitations Due to Fiber Nonlinearities in Optical FDM Systems," *IEEE J. Select. area on Comm.*, vol. 8, no. 6, pp. 1068-1077, Aug, 1990.
4. D. Marcuse, et al., "Effect of Nonlinearity on Long-Distance Transmission," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. LT-9, no. 1, pp. 121-128, 1991.
5. M. W. Maeda, et al., "The Effect of Four-Wave Mixing in Fibers on Optical Frequency Division Multiplexed Systems," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 8, no. 9, pp. 1402-1408, 1990.
6. 이상수 외, "분산천이 광섬유를 이용하는 등간격

다채널 광전송 시스템에서 발생하는 4 파 혼합 효과의 편광 의존성," *한국광학회지*, vol. 8, no. 1, 1997.

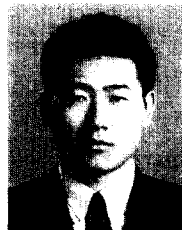
7. F. Forghieri, et al., "Reduction of Four-Wave Mixing Crosstalk in WDM Systems Using Unequally Spaced Channels," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 6, no. 6 pp. 754-756, 1994.
8. F. Forghieri, et al., "WDM Systems with Unequally Spaced Channels," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 13, no. 5, pp. 889-897, 1995.
9. W. C. Kwong, et al., "Eliminating Four-Wave-Mixing Crosstalk in Wavelength-Division Multiplexing Systems," *Proc. of SPIE on All-Optical Communication Systems: Architecture, Control, and Network Issues II*, vol. 2919, pp. 230-239, 1996.



이 강 호(Ghangho Lee) 정회원  
1995년 2월: 명지대학교 전자공학과 졸업(공학사)  
1997년 2월: 고려대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)  
1997년 3월~현재: 삼성전자(주) 정보통신본부 전송

연구그룹 주임연구원

※주관심분야: 광통신, 광전송



유 진 태(Jintae Yu) 정회원  
1996년 2월: 고려대학교 전자공학과 졸업(공학사)  
1996년 3월~현재: 고려대학교 대학원 전자공학과 석사과정  
※주관심분야: 광전송망, 무선통신망



박진우(Jinwoo Park) 정회원

1979년 2월: 고려대학교 전자공학과 졸업(공학사)

1983년 8월: 클렘슨대학교 전기공학과 졸업(공학석사)

1987년 11월: 버지니아 주립대학교 전기공학과 졸업(공학박사)

1988년 3월~1989년 2월: 명지대학교 전자공학과

1989년 3월~현재: 고려대학교 전자공학과 부교수

※주관심분야: 광전송시스템, 광교환시스템, 광통신망