

# 광섬유 증폭기에서의 이득제어 방법과 제어기 설계

염진수, 이정찬, 류광열, 허창우

## Gain Control Method and Controller Design in Erbium-Doped Fiber Amplifier

Jin-Su Yeom, Jung-Chan Lee, Kwang-Ryol Ryu, Chang-Wu Hur

### 요 약

본 연구는 파장 분할 다중화(WDM : Wavelength Division Multiplexing) 방식 전송 시스템(Transmission System)에 사용되는 어븀 첨가 광섬유 증폭기(EDFA : Erbium-Doped Fiber Amplifier)의 이득 제어(Gain Control) 방법에 관한 것으로 어븀 첨가 광섬유에서 상호 이득 포화(Cross Gain Saturation) 현상, 이득 비동질(Gain Inhomogeneity) 특성, 그리고 어븀 이온의 밀도 반전(Population Inversion)의 변화에 의해 출력되는 다 파장 광 신호들의 광세기가 각기 다르게 출력되는 현상을 고출력을 내도록 구성된 어븀 첨가 광섬유 증폭기와 고속 제어기를 구성하여 위 현상들을 억제하며 이득을 제어하기 위한 레이저 다이오드(Laser Diode : LD)의 제어전압 조사하고, 얻어진 결과들을 토대로 이득 제어에 적합한 방법을 제시하고 제어기를 설계한다.

### 1. 서 론

파장 분할 다중화(WDM : Wavelength Division Multiplexing) 방식은 파장이 서로 다른 다수의 광 신호를 하나의 광섬유를 통해 전송하는 방식이다. 파장분할 다중화 방식은 광전송시에 여러 파장(Multi-Wavelength Optical Channels)의 광 신호를 사용하므로, 광섬유가 제공하는 넓은 대역폭을 효과적으로 이용할 수 있다. 이에 따라, 차세대 광 전송 기술로서 널리 보급되고 있다. 이러한 파장분할 다중화 방식 전송 시스템에서 광신호의 증폭을 위해서 어븀 첨가 광섬유 증폭기가 사용된다. 어븀 첨가 광섬유 증폭기는 어븀(Erbium : Er<sup>3+</sup>)이라는 특수한 물질을 광섬유에 도핑(Doping)하여 만들어지며, 어븀을 레이저(Laser)로 펌핑(pumping)하면, 어븀 이온이 여기(Excitation) 되었다가 원래의 에너지 준위로 복귀하는 과정에서 발생하는 에너지에 의해 약한 광신호가 증폭될 수 있다. [그림 1]은 일반적인 어븀 첨가 광섬유 증폭기의 구성도이다. 이러한 파장분할 다중화 방식 전송 시스템에서는 전송망의 재구성으로 인한 시스템의 용량 변화, 전송 채널의 오류 및 임의의 실, 탈상(Add/Drop)에 의해 광 신호들의 채널 수가 변화하게 된다. 이와 같이 사용 중인 광 신호들의 채널 수가 변화하면, 광섬유 증폭기에서 이득 매질(Gain Medium)으로써 사용되는 어븀 첨가 광섬유의 특성으로 인해 운용 중인 생존채널(Surviving Channel), 즉 여러 광 채널 중 남아 있는 광 채널은 광섬유 증폭기에 의하여 일시적 변화 상태(Transient State)를 거쳐 안정 상태(Steady State)로 천이하고, 이득 및 출력에 순간

적인 변화(Perturbation)가 발생하게 됨으로써 광 전송 서비스에 오류를 일으킨다. 일반적으로 장거리의 광 신호를 전송하는 광 전송 시스템에서는 다수의 광섬유 증폭기를 구성하여 사용하므로, 비록 각각의 광섬유 증폭기에서의 출력 변동 특성이 작다 하더라도, 여러 개의 광섬유 증폭기를 거쳐 광 신호들이 전송된다면 더욱 심각하게 광신호의 오류가 유발된다. 그러므로 충분히 짧은 시간 내에 이러한 변동을 억제하도록 여러 파장의 광 신호들 간의 이득을 제어할 방법이 필요하다. 이러한 이유로 본 연구에서는 실험적 결과를 토대로 설계된 제어 방식에 의해서 레이저 다이오드를 선별 제어하고 광섬유 증폭기에서 출력되는 생존 채널들의 출력 광세기를 빠른 시간 안에 일정하게 유지하도록 이득을 제어할 수 있는 방법을 연구하였다.

### II. 광섬유 증폭기의 이득 제어 방법

이득 비동질(Gain Inhomogeneity) 특성은 일정 이득을 갖는 생존 채널의 파장을 변화시켰을 때, 생존 채널의 이득이 변화하는 것을 말하며, 상호이득포화(Cross Gain Saturation) 특성은 어븀 첨가 광섬유에서의 이득을 여러 광 채널이 일정한 이득 값으로 서로 공유하고 있는데, 여러 광 채널 중 일부 광 채널이 없어지면, 남아 있는 광 채널이 없어진 광 채널이 갖고있던 이득을 재차 공동 분배하여 얻는 것을 말한다.

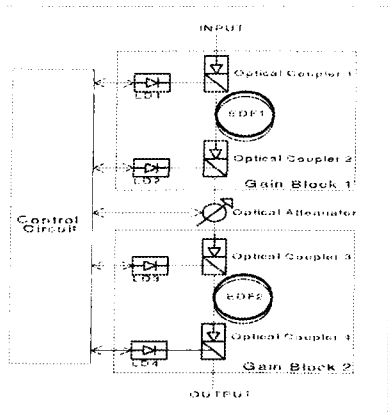


그림 1. 어븀 첨가 광섬유 증폭기 구성도

따라서 어븀 첨가 광섬유가 가지는 이득 비동질 특성과 상호 이득포화 특성으로 인해 생존 채널들의 파장 및 이득의 분포상태에 따라 이득이 달라지므로, 채널별 출력 불평형을 보상하는 이득 제어 방법이 필요하다. 광섬유 증폭기의 이득 제어 방법에는 첫째, 운영되는 다채널의 파장 대역과 다른 파장 대역에서의 여분 채널을 추가 운영하여 광섬유 증폭기의 밀도 반전(Population Inversion)을 조절함으로써 이득 제어하는 방법이 있다. 이 경우, 운영되는 채널 수가 많아질수록 여분의 채널은 높은 최대 출력을 필요로 하고, 운영되는 다채널 광 신호에 비선형 현상(Non-Linear Effect)에 의한 잡음이 발생하는 문제점이 있다. 둘째, 운영되는 다채널 광 신호 파장 대역 외의 일부 광을 광학적으로 피드백(Feedback) 하여 레이저 발진(Lasing)을 유도함으로써 밀도 반전을 유지하여 광학적으로 이득 제어를 하는 방법이 있다. 이 방법에서는 피드백되어 레이저 발진 된 광의 세기가 입력 광신호의 세기 변동에 따른 일시적 변동 상태에서 진동 현상(Damping Oscillation)이 나타난다. 이것은 레이저 발진에 이득 매질로서 기여하는 어븀 이온의 상 준위 수명시간(Upper-Level Life-Time)이 공진기 내 광자(Photon)의 수명시간 보다 긴 경우, 평형을 이루고 있는 밀도 반전이 순간적인 동요(Perturbation)를 받음으로써 발생하는 현상으로서, 제거되지 않거나 적절한 수준 이하로 제어되지 않을 경우에는 생존 채널에 영향을 주는 문제점을 지니고 있다. 또한, 이 방법은 밀도반전을 유지하기 위하여 복잡한 회로 설계가 요구되므로, 고속의 응답 특성(High Speed Response Time)을 얻을 수 없다는 문제점을 지니고 있다. 셋째, 입력 광 신호를 검출하여 여기광의 세기를 적정 수준으로 조절함으로써 광섬유 증폭기의 이득을 제어하는 방법이 있다. 이 방법은 가격과 운영 방법에 있어 가장 용

이하지만, 광 전송에 사용되는 채널의 수에 비례하여 제어 범위가 넓어지고, 장거리 전송을 위한 시스템에서 증폭기의 개수가 증가할수록 더욱 빠른 응답 속도를 갖는 고속 여기 광 제어 회로(High Speed Control Circuit)가 요구되는 문제점이 있다. 한편, 어븀 첨가 광섬유 증폭기에서 자동 이득 제어(Automatic Gain Control)와 자동 광세기 제어하기 위한 방법으로[1] 2단 증폭 구조로 구성하여, 첫 번째 증폭 단계에서는 입력력 광 신호들을 일부 분기하여 자동 이득 제어 기능이 수행되고, 두 번째 증폭 단2의 출력을 일부 분기, 검출한 후 각 증폭 단 사이에 있는 광 감쇄기(Optical Attenuator)를 통해 자동 광세기 제어 기능을 수행하도록 구성한 방법이 있으며, 또한, 출력의 일부를 재순환하여 어븀 첨가 광섬유에서의 일정 밀도 반전을 유지하도록 조절하는 방법이 있다.[2]

### III. 실험 및 결과 분석

[그림 1]에 나타낸 고출력 장파장 이득대역(1570~1605 nm) 어븀 첨가 광섬유 증폭기 대하여 각 증폭 단 즉, 이득 블록들의 이득 제어에 필요한 레이저 다이오드의 적정 제어 전압을 채널 수별로 그리고, 동시에 동일 채널 수의 경우, 채널들의 파장을 변화시킨 경우들에 대해 조사하였다. [그림 2]는 임의의 광세기를 갖는 입력 광신호가 파장 변화 하였을 경우, 레이저 다이오드의 제어 전압을 동일 조건으로 한 경우로 [그림 1]의 출력 광신호가 변화됨을 알 수 있다. 하지만, 임의의 광세기를 갖는 입력 광신호의 파장을 변화 시켰을 경우, 레이저 다이오드들의 최적 제어 전압을 사용하면 [그림 3]과 같이 광신호의 파장이 변화하더라도 동일 한 출력 광세기를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 따라서 입력되는 광신호의 수와 파장을 동시에 변화시켰을 경우, [그림 1]의 광섬유 증폭기에서 입력(Input)부터 광 감쇄기(Optical Attenuator) 이전까지의 출력을 [그림 3]과 같은 특성 갖도록 하기 위하여 제어기(Control Circuit)로부터 양방향 레이저 다이오드(LD1, LD2)의 적정 제어 전압을 [그림 4]와 같이 얻고, 또한 광 감쇄기 이후부터 최종 출력(Output)까지의 출력특성을 [그림 3]과 같은 특성 갖도록 하기 위하여 제어기로부터 양방향 레이저 다이오드(LD3, LD4)의 적정 제어 전압을 [그림 5]와 같이 얻을 수 있다. 여기서, 레이저 다이오드 1(LD1)과 레이저 다이오드 3(LD3)은 채널의 분기/결합시 그리고 채널의 파장 변화시 임의의 제어 전압 분포를 갖고, 레이저 다이오드 2와 레이저 다이오드 4는 두 영역으로 나누어진 직선의 특성을 갖는다. 그리고 이때에 각 이득 블록(GB1, GB2)에서의 출력 광세기와 이득 특성을 살펴보면 [그림 6]의 특성을 얻을 수 있다. [그림 6]으로부터 임의의 채널이 입력 된 경

우, 출력 광세기는 임의의 광세기가 출력 되지만, 이들 상호간의 관계는 이득 블록 1 그리고 이득 블록 1과 이득 블록 2을 결합한 전체의 이득 측면에서 볼 때에 채널 수에 무관하게 동일한 이득이 유지됨을 알 수 있다. 따라서 [그림 4]와 [그림 5]에서 레이저 다이오드 2와 레이저 다이오드 4는 두 영역으로 나누어진 직선의 특성을 갖도록 제어하고 레이저 다이오드 1과 레이저 다이오드 3은 채널의 분기/결합시 이득 블록 1 그리고 이득 블록 1과 이득 블록 2로 구성된 전체 이득 블록의 이득 값을 유지 하도록 유도하면 임의의 채널이 입력되어 채널의 파장 변화시 레이저 다이오드 1과 3의 임의의 분포특성은 해결될 수 있다.

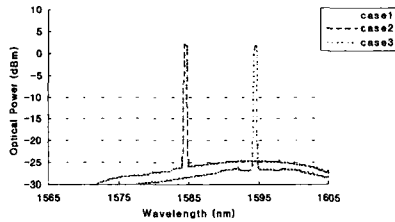


그림 2. 동일 제어전압에서의 파장변화에 따른 출력 광 신호

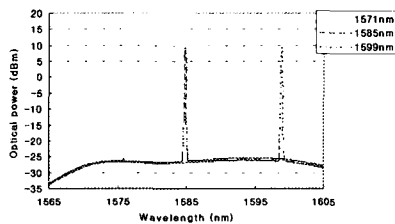


그림 3. 제어전압 적용시의 파장변화에 따른 출력 광 신호

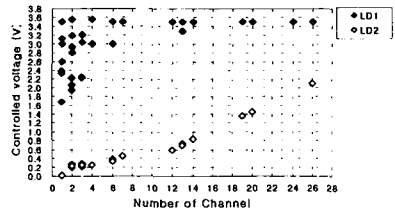


그림 4. 채널 수에 따른 LD1, LD2 제어전압

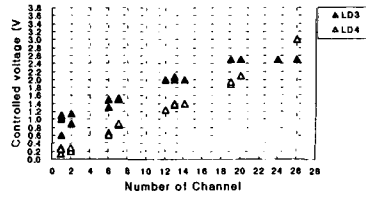


그림 5. 채널 수에 따른 LD3, LD4 제어전압

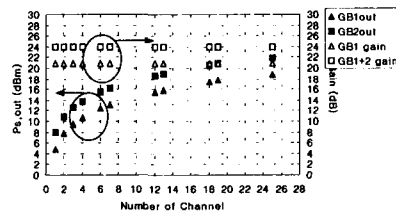


그림 6. 이득 블록(GB1, GB2)에서의 출력 광세기와 이득 특성

#### IV. 광섬유 증폭기 구성

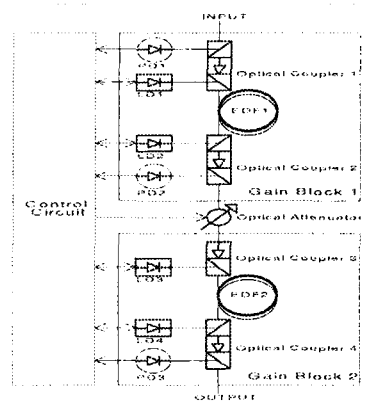


그림 7. 대역별 분기/결합 후 제어결과

[그림 7]은 위와 같은 결과 분석을 토대로 [그림 1]의 광섬유 증폭기를 변형한 구성도 이다. [그림 1]과 달리 각 이득 블록의 이득을 측정하기 위해서 광 검출기(PD : Photo Detector)가 추가되었다. 이득블록(Gain Block)1은 입력 광 신호와 순방향 및 역방향 여기 광을 받아들여, 입

력 광 신호를 증폭시키며, 이득블록2는 이득블록1에서 처리된 광 신호와 순방향 및 역방향 여기 광을 받아들여, 재차 증폭시킨다. 각 이득블록에 레이저 다이오드는 이득 블록 1과 이득 블록 2에 필요한 순방향 여기 광 또는 역방향 여기 광을 각각 생성하여, 이득 블록 1과 이득 블록 2에 제공한다. 광 검출기(PD1, PD2, PD3)는 이득 블록 1과 이득 블록 2의 각 양단에서 광신호의 일부를 분기시켜 받아들인 후 제어기의 광/전 변환(Optical / Electrical Conversion) 회로에 입력된다. 제어기(Control Circuit)는 검출된 전기 신호들을 이용하여 각 이득블록의 레이저 다이오드를 제어한다. 특히, 실험을 통해서 레이저 다이오드의 최적 제어 전압을 생성하도록 구성한다. [그림 8]과 [그림 9]는 임의의 채널 수를 일부 대역 별로 분기/결합시킨 후 실험결과와 이를 토대로 제어 한 결과로 이득 비동질 및 상호 이득 특성 없이 출력 광 신호 즉, 채널들 간의 이득 차이 없이 제어되어 있음을 알 수 있다.

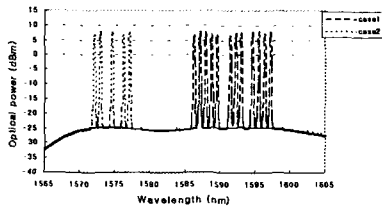


그림 8. 변형한 광섬유 증폭기 구성도

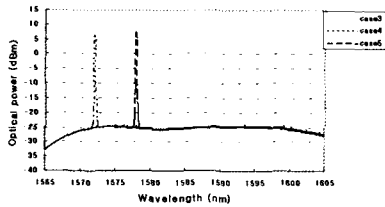


그림 9. 파장 변환 후 제어 결과

### V. 제어기 구성

[그림 10]은 [그림 9]의 광섬유 증폭기의 제어기를 구성한 것이다. 위 실험 결과로 얻어진 광섬유 증폭기의 이득 제어 방법을 자동으로 수행 하면서 고속으로 동작 할 수 있어야 하므로 주요 동작은 아날로그 회로로 구성하고 아날로그 회로의 동작 오차는 마이크로프로세서를 사용한 디지털 회로로 보상 할 수 있도록 구성하였다.

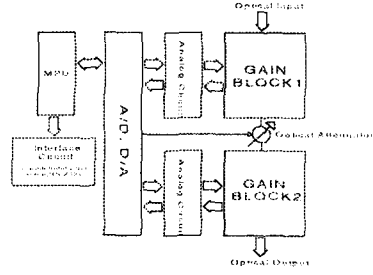


그림 10. 제어기 구성도

[그림 11]은 기본 동작 회로이다. PD1로 들어오는 입력 광 신호는 광/전 변환되어 증폭기에 입력되며, 증폭기는 [그림 4]의 LD2의 제어전압 특성에 근접한 형태로 출력되어 [그림 11]에 LD2를 제어한다. 오차에 대해서는 D/A 컨버터를 통해서 마이크로프로세서로 출력되어 보상한다. 또한, PD2로 들어오는 출력 광신호의 파워전압에서 PD1의 파워전압을 빼서 그 차 값을 LD1을 제어하기 위한 적분회로에 입력된다. 이 때에 PD 증폭기의 GAIN은 광섬유 증폭기에서 얻고자 하는 이득과 같도록 조절되어야 한다. 이득에 대한 오차는 마이크로프로세서에서 D/A 컨버터를 통하여 제어 할 수 있도록 하였다.[그림 11]과 같은 회로로 구성하면 아날로그 회로를 통해서 원하는 제어값까지 고속으로 제어하여 광 전송 서비스 오류를 방지 할 수 있으며, 나머지 오차는 디지털 회로로 보상하여 정확하게 제어 할 수 있다. 또한 본 제어기는 광섬유 증폭기의 상태를 병렬(8bit) 및 직렬(RS-232) 통신으로 모니터링 및 제어 할 수 있도록 하였다.

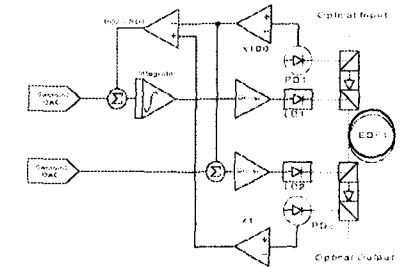


그림 11. 제어기 기본 동작 회로

## VI. 결 론

본 연구에서는 어븀 첨가 광섬유 증폭기에서 이득포화 현상 및 이득 비동질 특성에 의한 출력 광신호의 이득 불균형을 해소할 수 있는 레이저 다이오드의 적정 제어 전압을 조사하고, 그 제어 방법에 대하여 연구하였다. 또한 연구된 이득제어 방법을 통해서 파장 분포에 따라 이득의 불균형이 유발되어 광섬유 증폭기의 출력 광신호의 광세기가 달라지는 현상을 감소시킬 수 있었으며, 이 제어방법에 적합한 제어기를 설계하였다. 하지만 아날로그 회로의 고속 동작은 안정성에 문제를 유발시킬 수 있으므로 구현을 통하여 안정성을 검증해야 한다. 그리고 정확한 제어를 위해서는 디지털 회로에서 데이터를 고속으로 처리하여 피드백 할 수 있어야 할 것이며, 이를 위한 알고리즘도 연구되어야 한다.

## 참고문헌

- [1] 미국특허 제6,055,092호, "Multi-wavelength light amplifier", June 2000
- [2] M.Artiglia, "Gain-shifted EDFA with all-optical automatic gain control", ECOC '98, pp. 293-294, 1998