

채널 가감 파장분할다중(WDM)망에서 EDFA 이득의 빠른 과도 응답 제어

준회원 박 정 문*, 이 상 현*, 종신회원 신 서 용*, 정회원 송 성 호**

A fast transient control of EDFA gain on channel add/drop WDM networks

Jungmoon Park*, Sangheon Lee* *Associate Member*, Seoyong Shin* *Life Member*
Seongho Song** *Regular Member*

요 약

본 논문에서는 파장분할다중(WDM)망에 적용된 어븀첨가 광섬유증폭기(EDFA)의 이득이 채널의 가감(add/drop)에 따라 변화하는 것을 EDFA의 3-레벨 모델을 기반으로 하는 비례-적분-미분 제어기(PID controller)가 적용된 새로운 외란관측기법을 통해 제어함으로써 이득회복시간을 3 μ sec 이하까지 단축시킬 수 있음을 보였다. 3 μ sec이하의 이득회복 및 안정화 시간은 지금까지 발표된 것들 가운데 가장 빠른 것으로 종전에 2-레벨 EDFA 모델을 기반으로 하는 PI 제어기가 사용된 외란관측기법을 통해 얻었던 250 μ sec의 약 1%, 그리고 현재 상용화되어 있는 WDM 망용 EDFA의 가장 빠른 이득회복시간인 200 μ sec의 2%도 채 안되는 시간이다. 이러한 결과는 외란관측기의 파라미터와 PID 제어기의 제어 파라미터의 변화에 따른 시스템의 특성 변화를 분석하여 제어기를 최적함으로써 얻어 낼 수 있었으며, 이를 상용화에 적용할 경우, 향후 유동적(dynamic) WDM 망에서 매우 중요한 역할을 할 것으로 전망된다.

Key Words : WDM, EDFA, Gain control, Disturbance observer, PID control

ABSTRACT

In this paper, we have shown the gain recovery time of erbium-doped fiber amplifier(EDFA) in WDM add/drop networks can be reduced to less than 3 μ sec by employing disturbance observer technique with PID controller which is based on 3-level EDFA model. The 3 μ sec transient time is the fastest one ever reported and it is about 1% of 250 μ sec previously obtained from disturbance observer technique with PI controller which was based on 2-level EDFA model and it is also less than 200 μ sec of commercially available EDFAs for WDM networks. We were able to obtain this result by analyzing various system characteristics as we change the parameters of disturbance observer and PID controller. If this result is applied to a commercial product, the product will do an important role in the future dynamic WDM networks.

* 명지대학교 통신공학과 광통신 연구실({jungmoon, unique, sshin}@mju.ac.kr)

** 한림대학교 정보통신공학부(ssh@halym.ac.kr)

논문번호 : KICS2004-12-314, 접수일자 : 2004년 12월 9일

※ 본 연구는 광주과학기술원 초고속 광네트워크 연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원과 정보통신연구진흥원에서 지원하고 있는 정보통신기초기술연구지원사업의 연구결과입니다

I. 서론

파장분할다중(WDM)망에서 채널이 가감됨에 따라 망 내에 있는 어븀첨가 광섬유증폭기(EDFA)의 이득은 교차 이득 포화(cross gain saturation) 현상에 의해 요동을 치게 되며, 이로 인해 WDM 채널들의 진폭에 변화가 일어나 시스템의 성능이 저하된다^[1]. 기존의 상용화된 WDM용 EDFA들은 대부분 룩업표(look-up table)를 참고하여, 입력되는 WDM 신호의 레벨 변화에 따라 EDFA 펌프 레이저의 전류를 제어해주는 방식을 채용하고 있으며, 이 경우, 이득을 회복하는데 걸리는 시간은 세계 최고의 제품인 경우, 200μsec 가량 걸리고 있다. 우리는 지난 논문에서 기존의 방법과는 달리 외란관측기법이라는 새로운 방식을 도입하여 EDFA의 이득 회복시간을 250μsec까지 줄일 수 있음을 보인 바 있다^[2]. 그러나, 외란관측기와 EDFA의 2-레벨 모델을 기반으로 한 비례/적분(PI) 제어를 사용하는 지난 방법에서는 이득 회복시간을 더욱 줄일 목적으로 제어기의 이득을 더욱 높일 경우, EDFA의 출력 파형이 왜곡되는 것을 확인할 수 있었다. 이에 본 논문에서는 이러한 결과에 대한 원인 분석을 통해, 보다 개선된 외란관측기법에 기반 한 EDFA 이득제어 방법을 도출하고, 도출한 결과의 성능을 시뮬레이션을 통해 입증하고자 한다. 본 논문의 II.1,2,3절에서는 3-레벨을 모델링한 EDFA를 소개 한 후, 외란관측기와 PID 제어기 설계에 대해 설명하며 II.4절에서는 위에서 설계한 EDFA 이득제어기의 각종 제어파라미터와 변수들에 대해서 EDFA의 이득이 마이크로초(μs)단위까지 조정될 수 있음을 보여주고, III절에서 결론을 맺는다.

II. 본론

2.1 EDFA 모델링

마이크로초단위의 응답시간 특성을 얻는 데 있어서, 지난 연구([2])에서의 문제에 대한 원인을 분석하여 보면, 어븀 이온이 E3레벨에서 E2레벨로 자연 발진 하는데 걸리는 시간, 즉, 시정수 τ_{32} 가 상대적으로 작지않아서, E3 레벨에 대한 고려를 무시할 수 없게 된다. 즉, E3레벨에도 일정수의 어븀 이온이 존재하므로 E3레벨을 생략시켰던 2-레벨 모델로는 마이크로초 단위의 제어가 어려웠다. 따라서, 마이크로초단위의 응답시간을 보장하기 위하여서는 보다 정확한 EDFA의 모델인 3-레벨 모델을 기반으로

한 이득제어기를 설계할 필요가 있다. EDFA 이득 제어기를 설계하기 위해, EDFA의 수학적 모델을 3-레벨상태로 모델링하면, 시간과 위치에 따라 여기되는 이온의 비율로 나타내어지는 다음과 같은 비율방정식(rate equation)을 얻을 수 있다^[3].

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_3}{\partial t} &= -\Gamma_{32}N_3 + (N_1 - N_3)\phi_p\sigma_p \\ \frac{\partial N_2}{\partial t} &= -\Gamma_{21}N_2 + \Gamma_{32}N_3 - (N_2 - N_1)\phi_s\sigma_s \\ \frac{\partial N_1}{\partial t} &= \Gamma_{21}N_2 - (N_1 - N_3)\phi_p\sigma_p + (N_2 - N_1)\phi_s\sigma_s \end{aligned} \quad (1)$$

N_1, N_2, N_3 는 각 에너지 레벨의 어븀이온의 개체수(populations of the level)로 거리 z 와 시간 t 의 함수이다. 즉 각 항은 다음과 같이 $N_{\#}(z, t)$ 인 z 와 t 로 표현해야 하지만 지면의 관계상 z 와 t 를 생략하도록 하겠다. ϕ_s, ϕ_p 는 신호와 펌프에 의해 생기는 단위시간과 단위면적당 광자수(flux)이다. Γ_{ij} 는 레벨 i 에서 레벨 j 로 이온이 전이되는 비율(spontaneous transition rate of the ion)로 $\Gamma_{32}=1/\tau_3, \Gamma_{21}=1/\tau_2$ 이다. σ_s, σ_p 는 신호와 펌프 파장의 에너지를 흡수/방출하는 능력(cross section)을 나타낸다.

펌프와 신호의 에너지 전달방정식(pump & signal field power propagation equations)은 다음과 같이 정의한다^[4].

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_0(z, t)}{\partial z} &\equiv \rho u_p \Gamma_p [\sigma_p^e N_2 - \sigma_p^a N_1] P_0(z, t) \\ \frac{\partial P_k(z, t)}{\partial z} &\equiv \rho \Gamma_s [\sigma_s^e N_2 - \sigma_s^a N_1] P_k(z, t) \end{aligned} \quad (2)$$

$P_0(z, t), P_k(z, t)$ 는 단위시간에 대한 신호 및 펌프의 에너지이다. $z=0$ 일 때 $P_k(z, t)$ 와 $P_0(z, t)$ 은 $P_k^i(z, t)$ 와 $P_0^i(z, t)$ 으로 정의된다. ρ 는 단위 부피에 대한 어븀의 수 즉 밀도를 말한다. Γ_s, Γ_p 는 각각 신호와 펌프에 대한 기하학적인 보정요소(geometric correction factor)로서 각 파장에 대한 어븀이온의 분포를 가진 중첩요소(overlap factor)이다. u_p 는 펌프의 진행방향이 $z=0$ 으로부터 $z=L$ 로 전파될 때 +1의 값을 가지며, 그 반대방향일 경우 -1의 값을 가진다. 이때, L 은 섬유(fiber)의 길이를 의미한다.

EDFA를 통과하는 신호의 이득이 변화하는 원인은 입력채널 개수의 변화에 따라 EDFA 내부의 여기된 전체 이온수가 제어되지 않아 발생한다. 따라서 EDFA 내부의 여기된 전체 이온수와 EDFA의

이득간의 관계식을 구해 이를 통해 채널이 add/drop 되어도 EDFA의 여기된 전체 이온수를 일정하게 하겠다. EDFA의 상위레벨에 여기되어 있는 전체 여기 이온 수는 2-레벨에 머무르는 저장소 $r_2(t)$ 와 3-레벨에 머무르는 저장소 $r_3(t)$ 를 사용하여 다음과 같이 정의한다.

$$r_2(t) \equiv \rho A \int_0^L N_2(z, t) dz \quad (3)$$

$$r_3(t) \equiv \rho A \int_0^L N_3(z, t) dz$$

식 (1), (2)와 (3)을 이용하면 EDFA의 3레벨 비율방정식은 다음과 같은 미분방정식으로 표시된다^[3].

$$\begin{aligned} \dot{r}_3(t) &= F_{32}r_3(t) + (1 - e^{-G_0(t)})P_0^{in} \\ \dot{r}_2(t) &= F_{21}r_2(t) + \Gamma_{32}r_3(t) + \sum_{k=1}^N (1 - e^{-G_k(t)})P_k^{in} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, P_0^{in}, P_k^{in} 은 각각 입력 pump 파워와 각 채널의 입력 신호 파워이다. 또한, 채널 k의 이득을

$$G_k(t) = \ln \frac{P_k^{out}(t)}{P_k^{in}(t)} \quad (5)$$

으로 정의하면, 채널 k의 이득방정식은 다음을 만족한다^[2,3].

$$G_k(t) = B_k r_2(t) - A_k \quad (6)$$

여기서,

$$B_k \equiv \frac{\Gamma_k \sigma_k^T}{A} = \frac{h\nu}{P_k^{IS} \tau} \quad (7)$$

$$A_k \equiv \rho \Gamma_k \sigma_k^a L = a_k L$$

이다. 식(7)에서 흡수계수(absorption coefficient) a_k 는 채널k 파장에 의존적 변수이고, P_k^{IS} 는 EDFA의 고유한 포화에너지(intrinsic saturation power)이다. h 는 플랑크상수(plank's constant)이고, ν 는 신호의 주파수(frequency)이다. 따라서 식(7)의 변수 A_k, B_k 는 EDF의 특성에 기인하여 일정한 값을 가진다. 식(7)에서 알 수 있듯이 채널 k의 이득을 변화시키는 요소는 시간에 따라 변하는 저장소 r_2 뿐이다.

식(6)으로부터 채널 k의 이득은 저장소 r_2 와 관계되므로, 식(4)로부터 3레벨 EDFA 모델은 다음

과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} r_3 &= -\Gamma_{32}r_3(t) + (1 - e^{-G_0(t)})P_0^{in} \\ \frac{d}{dt} G_k(t) &= -\Gamma_{21}G_k(t) - \Gamma_{21}A_k + B_k \Gamma_{32}r_3(t) \quad (8) \\ &\quad + B_k \sum_{k=1}^N (1 - e^{-G_k(t)})P_k^{in} \end{aligned}$$

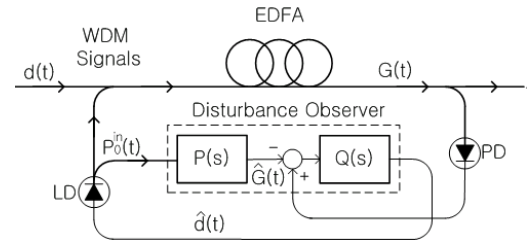


그림 1. WDM 입력신호의 채널개수 변화를 빠르게 추정할 수 있는 외란관측기의 구조도

2.2 외란관측기 설계

그림 1은 본 논문에서 제안하는 외란관측기이다. 채널의 add/drop이 발생시 외란관측기는 이런 채널 add/drop 신호를 외란 $d(t)$ 로 간주하고, 이의 추정치 $\hat{d}(t)$ 를 역으로 주입시켜서, 외란 $d(t)$ 를 제거함으로써 EDFA의 출력에 나타나는 이득변화를 줄일 수 있다^[5]. 외란관측기를 이용하려면, 입력과 외란이 같은 방정식에 존재하여야 하며, 이를 정합조건(matching condition)이라고 한다. 외란관측기 설계시 입력과 외란으로 정의된 두 변수가 같은 수식상에 존재하여 외란을 추정하여 이 값을 입력에서 빼주게 되면 외란과 추정값이 거의 동일한 경우에 그 영향을 줄일 수 있다. 그런데 식 (4) 또는 (8)식으로 주어지는 3레벨 모델을 보면 펌프 P_0^{in} 와 외란으로 여기는 각 채널 신호 $\sum_{k=1}^N (1 - e^{-G_k(t)})P_k^{in}$ 이 서로 다른 식에 있어서 정합조건을 만족시키지 못하여 3레벨을 이용하여서는 외란 관측기를 설계할 수 없다. 따라서, 실제 모델은 3레벨이지만 2레벨로 근사화된 모델을 대상으로 외란관측기를 구성하여 외란 추정값을 사용하고자 한다. $P(s)$ 는 2레벨 EDFA 모델의 전달함수이고, $Q(s)$ 는 전체 외란관측기의 전달함수 특성이 저대역 통과필터와 같도록 하기 위한 필터이다. 이와 같이 외란관측기를 설계함으로써, 실제 EDFA에 시간에 따라 변하는 외란이 입력되면 외란관측기는 EDFA의 출력으로부터 채널 k에 대한 실제 이득 $G_k(t)$ 와 외란이 없을 경우

의 이상적인 채널 k에 대한 이득 $G_k(t)$ 의 계산값의 차를 구하면, 이는 외란에 의하여 발생한 채널 k에 대한 이득 $G_k(t)$ 의 오차가 되고, 이를 $Q(s)$ 를 전달 함수로 갖는 필터로 필터링하여 외란의 추정치 \hat{d} 을 구하여 EDFA의 입력에 추가함으로써 외란의 영향을 제거 구한다. 즉, 외란관측기로부터 구한 채널 add/drop 신호의 추정치를 피드백 시켜서, EDFA의 펌프레이저를 제어하는데 제어신호로 사용한다.

채널의 add/drop에 의한 외란 $d(t)$ 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$d(t) \equiv -e^{G_0 t} P_0^{in}(t) + \sum_{k=1}^N P_k^{in} [1 - e^{G_k t}] \quad (9)$$

식(8)로 주어지는 3레벨 EDFA 모델에서 Γ_{32} 가 Γ_{21} 에 비하여 상대적으로 충분히(약 1000배이상) 크기 때문에 $r_3 \approx (1 - e^{G_0}) P_0^{in} / \Gamma_{32}$ 이라고 볼 수 있다. 그러면, 식(8)에 이 값을 대입하고, 시간에 따른 채널 k의 이득방정식을 앞에서 정의한 외란을 적용하여 라플라스 변환하면 다음과 같이 된다.

$$G_k(s) = \frac{B_k P_0^{in}(s) + d(s)}{(s + 1/\tau)} \quad (10)$$

여기서, $\tau = \Gamma_{21}$ 이다.

EDFA에 채널 add/drop, 즉, 외란이 발생하지 않았다면, 식(10)에서 $d=0$ 이며, 이때의 채널 k의 이득추정치 $\widehat{G}_k(s) = \frac{B_k P_0^{in}}{s + 1/\tau}$ 이 된다. 따라서, 그림 1에서 $P(s)$ 는 다음과 같다.

$$P(s) \equiv \frac{G_k(s) - \widehat{G}_k(s)}{d(s)} = \frac{B_k}{s + 1/\tau}$$

전체 외란관측기의 저대역 통과 필터의 특성을 갖게 하기 위하여 필터 $Q(s)$ 를

$$Q(s) = \frac{w_n^2 (s + 1/\tau)}{B_k (s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2)}$$

으로 선택하면, 외란관측기의 전달함수 G_D 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} G_D(s) &\equiv \frac{\widehat{d}(s)}{d(s)} \\ &= P(s)Q(s) \\ &= \frac{w_n^2}{s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2} \end{aligned} \quad (11)$$

식(11)에서 ζ 와 w_n 은 저대역 통과필터의 응답특성을 최적화하기 위한 설계 변수이다. ζ 는 진동폭을 조절하는 제동비율(damping ratio)이고 w_n 은 시스템의 대역폭에 관계되어, 시스템의 응답시간에 영향을 준다. 시스템의 대역폭 w_n 을 넓히면 상대적으로 ζ 값이 작아져서 시스템에 진동이 발생한다.

2.3 PID 제어기설계

참고문헌[2]에서는 2레벨 EDFA 모델에 대하여 제어기를 구성하였으므로, 비례적분제어기(PI control)만으로도 충분하였다. 그러나 EDFA의 3레벨 모델에 적용하였을 경우, 수마이크로초 단위의 응답 특성을 확보하기 위하여서는 제어기의 제어이득 변수를 크게 하여야 하는데, 이 때 시스템의 응답이 심한 오버슈트와 진동을 유발하는 경향이 있다. 이는 폐경로시스템의 특성방정식의 차수는 3차이나, 실제 제어변수는 비례제어이득과 적분제어이득변수 두개 뿐이기 때문에 시스템의 극점(pole)을 임의로 만들 수 없기 때문이다. 따라서, 이를 보상하기 위하여 시스템에 감쇄계수를 높일 수 있는 미분제어기가 첨가되어야 한다. 본 논문에서는 공칭제어기(nominal controller)로서 비례 미분 적분제어기를 사용한다.

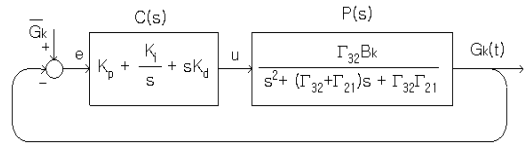


그림 2. EDFA 3-레벨을 기반으로 설계된 PID 제어기의 구조도

그림 2은 EDFA 3-레벨을 기반으로 설계한 PID 제어기의 구조도이며 식(12)는 폐경로 전달함수이다.

$$G_{cl}(s) = \frac{\Gamma_{32} B_k (K_d s^2 + K_p s + K_i)}{[s^3 + (\Gamma_{32} + \Gamma_{21} + \Gamma_{32} B_k K_d) s^2 + (\Gamma_{32} \Gamma_{21} + \Gamma_{32} B_k K_p) s + \Gamma_{32} B_k K_i]} \quad (12)$$

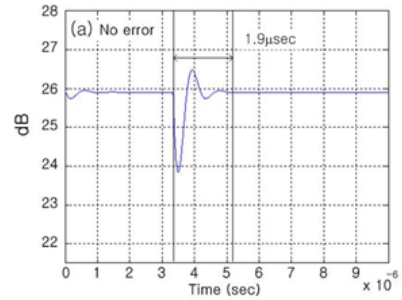
그림 2에서 \overline{G}_k 은 k 채널의 원하는 이득 값이고 G_k 는 실제 이득 값을 말한다. 그림 3에서의 \widehat{G}_k 는 3레벨 모델이 아닌 2레벨 모델에 대하여 외란관측기를 구성하여 얻은 G_k 의 추정 값이고 이것과 실제 이득 G_k 와의 차를 이용하여 본 논문에서 외란으로 생각 하는 채널 신호의 변동을 추정한다. 즉,

이상적이라면 이득이 \widehat{G}_k 여야 하지만 채널 신호 변동 등에 따라서 생기는 실제 이득과의 차이를 이 용함으로써 외란의 영향을 고려한다. 식(12)에서 알 수 있듯이 만약 미분제어변수 $K_d=0$ 이면, 임의의 극점 이동(arbitrary pole placement)이 불가능하다. 따라서, PID제어기는 임의의 극점 이동(arbitrary pole placement)이 가능하게 하여 출력파형의 적당한 응답시간과 진동의 여부를 조절할 수 있다.

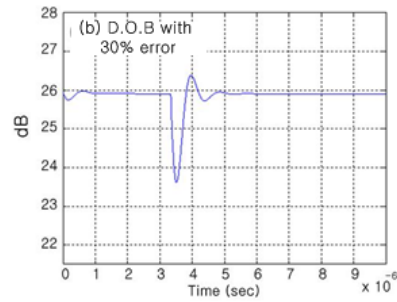
2.4 시뮬레이션

EDFA에 1551.8nm, 1557.9nm를 입력신호로 하여 3-dB 즉, 입력신호의 절반이 add/drop되는 상황으로 설정하였고, 980nm의 펌프를 사용하였다. 매 0.005초마다 채널이 add/drop되는 상황으로 설정하였다. 그림 3은 시뮬레이션에서 사용한 EDFA 이득 제어기로서 전체 이득제어기는 외란관측기와 PID 제어기로 이루어져 있다. 그림 2의 제어기 C(s)가 그림 3에서는 PID 제어기 블록에 해당하며, 이 입력에 외란관측기 출력 \widehat{G}_k 이 가해져서 전체 펌프 입력을 구성하게 된다. 기존의 EDFA이득제어기로 널리 쓰이는 순람표 참조제어기와 앞에서 설계한 PID 제어기와 외란관측기로 이루어진 이득제어기의 비교 시뮬레이션을 이득제어시간의 오차에 대한 항목과 제어파라미터에 따른 특성변화 항목에 대해 실행하였다. 표 1은 모의실험에서 사용된 변수를 기술하였다. 표 1에서 α_c 는 흡수교차단면이며, ϵ 는 방출

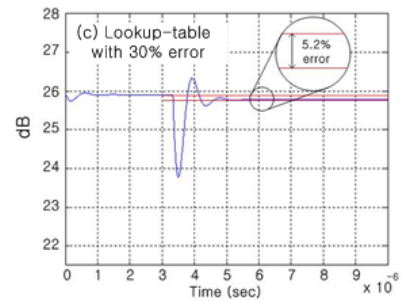
교차단면을 나타낸다. P_k^{fs} 와 α_a 는 각각 고유포화에너지와 흡수계수를 나타낸다.



(a) 외란관측기에 오차가 없을때



(b) 외란관측기의 모델에 30% 변수 오차가 발생했을때



(c) 순람표 참조 테이블에 30% 오차가 발생했을때

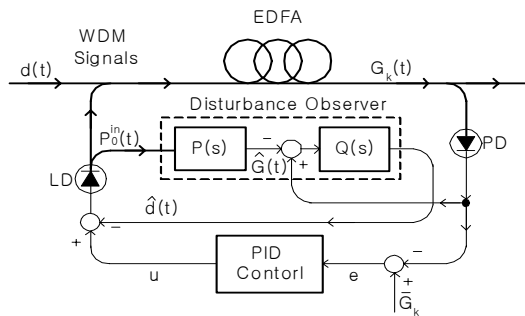


그림 3. 외란관측기와 EDFA 3-레벨을 기반으로 설계된 EDFA 이득제어기 구조도

표 1. 모의실험 변수들

주파수[nm]	α_c [e-25]	ϵ [e-25]	P_k^{fs} [[J/S]*e-4]	α_a [m ⁻¹]
1551.8	1.86	2.573	1.836	0.212
1557.9	1.549	2.27	2.140	0.177

그림 4. 순람표 참조와 PID제어기로 이루어진 이득제어기와 외란관측기와 PID제어기로 이루어진 이득제어기간 30% 오차가 발생했을 때 EDFA의 출력단에 나타나는 이득변화에 대한 시뮬레이션 결과.

2.4.1 오차에 대한 외란관측기와 순람표 참조제어기의 응답시간 비교 시뮬레이션

그림 4는 외란관측기를 설계 시 발생할 수 있는 오차로 대표적으로 광섬유의 채널에 따른 흡수계수 α_k 와 P_k^{fs} , 광자의 여기수명 τ 에 대해 존재할 수 있는 오차와 EDFA의 입력단을 감시하여 채널의 add/drop이 발생시 EDFA의 펌프레이저의 보상값을 순람표에서 참조하는 방식에 오차가 발생했을 때의

시물레이션이다⁶⁾. 외란관측기방식은 앞에 나열한 변수의 비정확성으로 인해 생길 수 있는 오차까지도 채널의 add/drop에서 발생할 수 있는 요인으로 간주하여 같이 정정한다는 것이다. 따라서 EDF와 채널의 의존적인 변수가 30% 정도의 오차를 가지고 있어도 외란관측기는 채널의 add/drop 유무를 판단하는데 큰 오차가 없으며, 이는 외란 관측기가 모델 등에 오차가 있더라도 이러한 오차의 영향까지도 추정하여 보상하기 때문이다. 아무런 하자가 없다. 반면에 순람표 참조제어방식은 30%오차가 발생할 때 EDFA의 출력단에서 대략 5.2%의 오차가 발생함을 확인하였다. 이는 주위 환경적 변화에 따라 EDFA의 순람표를 주기적으로 갱신해야 하는데 이러한 설정 시간과, 순람표의 부정확한 정보에 의해 오차가 발생한다.

2.4.2 외란관측기 제동비율 ζ 의 변화에 대한 응답시간과 채널추정에 대한 시물레이션

그림 5는 외란관측기의 특성을 조절할 수 있는 제동비율(damping ratio) ζ 에 따른 시스템 응답시간에 대한 시물레이션 결과이다. ζ 의 값이 작을수록 안정화 상태에 이르는 응답시간은 짧아지지만 반대급부로 이득과형에서 진동을 일으켜 초과량(over-

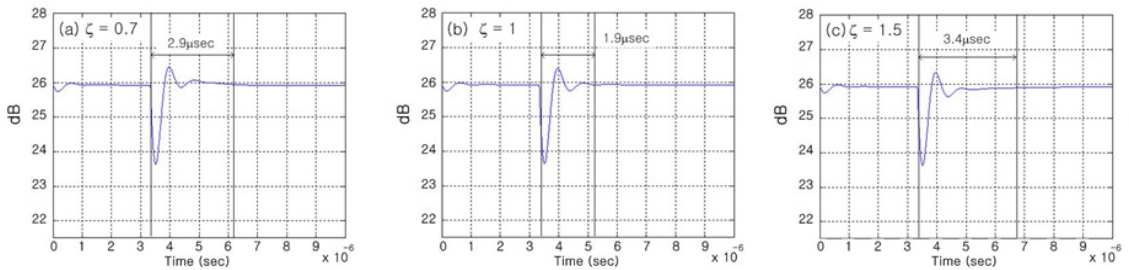
shoot)을 일으킨다. 이런 초과량은 시스템 전반에 큰 영향을 미칠 수 있으므로 빠른 응답시간과 함께 알맞은 초과량을 유지하는 것이 매우 중요하다. 시물레이션 상에서 최대 초과량은 일정한 이득 값의 약 1.3dB 정도 크게 나왔다.

2.4.3 외란관측기 대역폭 w_n 의 변화에 대한 응답시간과 채널추정에 대한 시물레이션

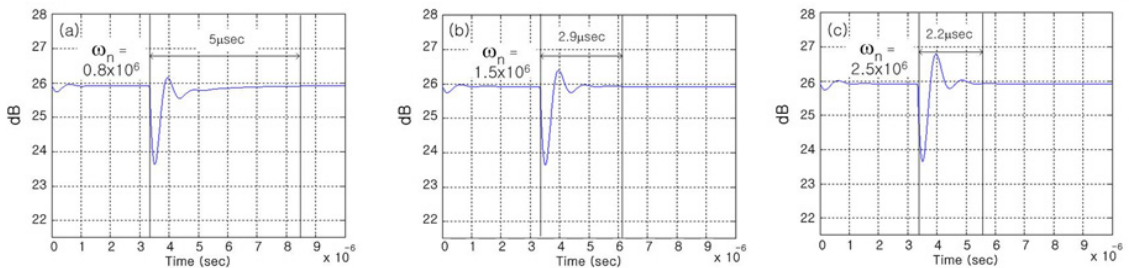
그림 6은 ζ 와 함께 외란관측기의 특성을 조절할 수 있는 w_n 에 따른 시스템의 응답시간에 대한 시물레이션 결과이다. w_n 은 외란관측기에 입력되는 외란에 대한 대역폭으로 얼마나 자주 외란이 발생 빈도수와 매우 밀접한 관계를 가지고 있다. w_n 을 크게 설정하면 빠르게 안정화 상태에 이를 수 있지만 일정 한계를 넘으면 ζ 와 마찬가지로 심한 진동을 일으키다가 출력 이득과형이 발산하게 된다.

2.4.4 PID제어기의 제어 파라미터 K_p , K_d 의 변화에 대한 응답시간에 대한 시물레이션

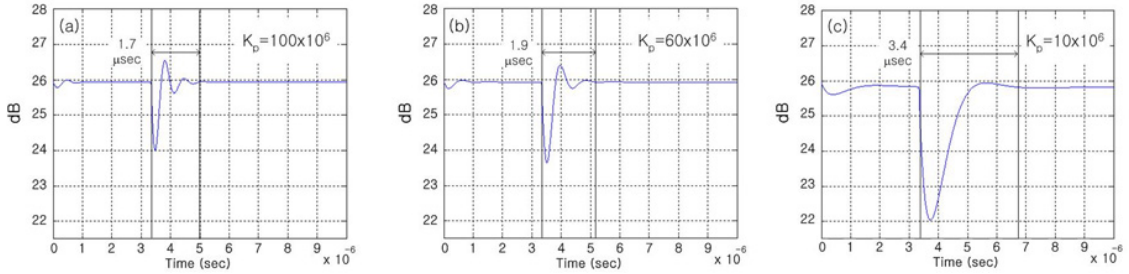
그림 7은 이득제어기의 공칭제어기로 사용하는 PID 제어기의 제어요소 중 K_p 에 따른 이득제어기의 응답시간을 시물레이션 한 것이다. K_p 는 시스템의 대역폭을 조절하는 요소로서 K_p 가 커질수록 안



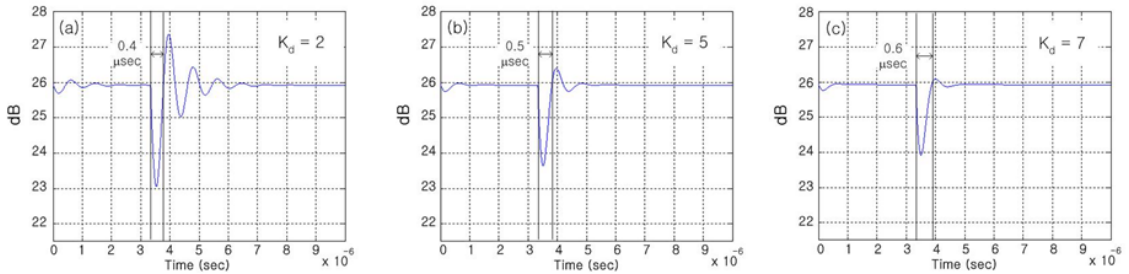
(a) 외란관측기의 제동비율 ζ 이 0.7일 때 (b) 외란관측기의 제동비율 ζ 이 1일 때 (c) 외란관측기의 제동비율 ζ 이 1.5일 때
그림 5. 외란관측기의 제동비율 ζ 에 따른 EDFA의 출력과형



(a) 외란관측기의 시스템 대역폭 w_n 이 0.8×10^6 일 때 (b) 외란관측기의 시스템 대역폭 w_n 이 1.5×10^6 일 때 (c) 외란관측기의 시스템 대역폭 w_n 이 2.5×10^6 일 때.
그림 6. 외란관측기의 시스템 대역폭 w_n 에 따른 EDFA의 출력과형



(a) PID 제어기의 K_p 가 100×10^6 일 때 (b) PID 제어기의 K_p 가 60×10^6 일 때 (c) PID 제어기의 K_p 가 10×10^6 일 때
 그림 7. PID 제어기에서 시스템의 대역폭을 조절하는 요소 K_p 따른 EDFA의 출력파형



(a) PID 제어기의 K_d 가 2일 때 (b) PID 제어기의 K_d 가 5일 때 (c) PID 제어기의 K_d 가 7일 때
 그림 8. PID 제어기에서 시스템의 제동비율을 조절하는 요소 K_d 에 따른 EDFA의 출력파형

정확 상태로 이르는 응답시간이 짧아진다. 또한 출력 이득파형에서 빠른 응답시간을 얻기 위해 진동이 나타남을 확인할 수 있다. 그림 8은 PID 제어기의 제어요소 중 K_d 에 따른 이득제어기의 응답시간을 시뮬레이션 한 것이다. K_d 는 시스템의 제동비율을 조절하는 요소로서 K_d 가 커질수록 출력 파형에 진동은 작아지지만 안정화 상태로 이르는 응답시간이 길어진다. PID 제어기의 K_i 는 안정화 상태에 이르렀을 때 출력 파형의 에러의 비율에 대해 조절하는 요소이다. 또한 최대 초과량은 일정한 이득을 기준으로 약 1.3dB 으로 측정되었다.

III. 결론

본 논문에서는 채널 add/drop에 따라 EDFA에서 발생할 수 있는 남아있는 채널의 이득변화에 대하여 이를 마이크로초(μs)단위까지 제어할 수 있는 이득제어기를 설계하고, 모의실험을 하였다. 새로이 EDFA 3-레벨 모델을 적용한 PID 제어기와 외란관측기로 설계된 이득제어기는 여타의 시스템에 존재하는 입력광신호의 참조나 광신호처리의 과정이 없으므로 시뮬레이션 결과 응답시간이 대략 $1.9 \mu s \sim 3 \mu s$ 정도로 매우 짧은 시간안에 안정화 되는 것을

확인하였다. 또한 외부적 요인에 의하여 EDFA에 발생할 수 있는 30%까지의 특성오차까지도 보상이 가능하다. 이는 여타의 시스템에서는 볼 수 없는 매우 높은 수치이며, 장점이라고 할 수 있다.

참고 문헌

- [1] J. L. Zyskind, et al., "Fast power transients in optically amplified multiwavelength optical networks," *Proc. OFC'96*, Paper PD31, 1996.
- [2] 박정문, 신서용, 송성호, "WDM add/drop 망에서 EDFA의 새로운 이득 제어방법," 한국통신학회논문지, 제29권, 제4호, 2004년 4월.
- [3] P. C. Becker, N. A. Olsson, and J. R. Simpson, *Erbium Doped Fiber Amplifiers : Fundamentals and Technology*(Academic Press, 1999).
- [4] E. Desurvire, *Erbium Doped Fiber Amplifier* (John Wiley & Sons, 1994).
- [5] Y. J. Choi, et al., "Disturbance observer in H_∞ framework," *IEEE IECON*, pp. 1394-1400, 1996.

