

초고속 광 클럭 재생기술 연구동향

Trend Review of Ultrafast Optical Clock Recovery Technique

김혜영(H.-Y. Kim) 광교환연구실 선임연구원
김광준(K. Kim) 광교환연구실 선임연구원
이혁재(H. J. Lee) 광교환연구실 선임연구원
최지연(J. Y. Choi) 광교환연구실 연구원

고속 광 시스템에서 필요로 하는 광 재생 중계기, 시간 분할 스위칭 시스템이나 다중 분리화 회로 등을 구현하기 위해서는 초고속 광 동기 회로 및 클럭 재생 기술이 필수적이다. 본 고에서는 고주파수 광 클럭 추출을 구현하기 위해서 활발히 진행되고 있는 광 클럭 재생 기술의 최근 개발 동향을 분석해 보고자 한다. 아직은 어느 하나도 완벽한 방법이라 할 수 없겠지만, 각 방법의 장단점을 헤아려 보고 구성하고자 하는 통신망에 적절한 광 클럭 재생기술을 채택하여 사용하는 것이 필요하리라 본다.

I. 머리말

미래의 대용량 데이터망에서 전자 기술의 한계에 의한 병목현상을 피하기 위해서는, 궁극적으로, 광 고유의 잠재된 초고속/광대역의 가능성을 그대로 활용할 수 있는 완전광 신호처리 방식이 채택될 것이다. 초고속 광대역 통신을 위하여는 완전 광 통신망 및 광교환 시스템이 기대되고 있다. 현재 사용자들에게 100 Gbit/s 이상의 광대역 패킷 서비스를 제공할 수 있는 초고속, 시간 분할 다중화(time division multiplexed: TDM)방식 동시 공용 이용망(multiaccess network)이 개발되고 있다[1].

사용자들은 고속의 전자 및 광 논리 게이트로

구성된 접속 점에서 이들 망에 접속하게 될 것이다. 이러한 시나리오에서는, 주소인식[2], 비트 클럭 재생[1, 3-5]과 패킷 완충화[6-8] 등과 같은 기능들이 필수적이다. 이들 기술의 실현을 위하여 최근에 세계 각국의 연구소들에서 상당한 노력을 기울이고 있다.

시간 영역에서 여러 채널의 고속 펄스부호변조(pulse code modulation: PCM)신호를 더 높은 비트 속도 신호로 다중화(multiplex)하거나 그 반대로 분리화(demultiplex)하는, 시간분할 다중화/분리화는 수십 Gbit/s의 초고속 광통신 시스템의 필수적인 기능 중의 하나이다. 이러한 기능들은 현실적으로 전자회로로 처리할 수 없는 빠른 신호처리 기능이 요구되며, 고속 변조기나 3차 광학비

선형성을 이용한 광 비선형 초고속 전광 스위칭 기술이 가망성 있어 보인다.

고속 광 시스템에서, 전송 용량은 타이밍 순간 흐트러짐(jitter)과 잡음에 의해 제한된다. 이 문제를 극복하기 위해서는, 광 영역에서 타이밍과 진폭 복원을 할 수 있는 재생 광 반복기가 필요하다. 이와 같은 광 재생 중계기, 시간분할 스위칭 시스템이나 다중 분리화 회로 등을 완전 광 신호 처리 시스템에서 구현하기 위해서는 완전 광 동기 회로 및 클럭 재생 기술이 필수적인 요소 기술이다.

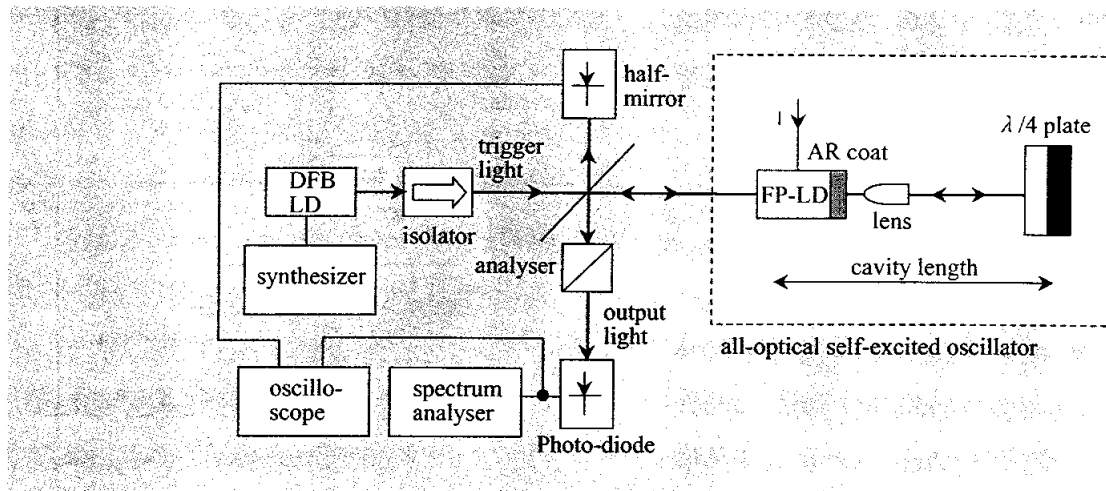
광 클럭 재생기술은 수신된 광 신호로부터 비트단위나 프레임단위의 클럭을 추출하는 기술이다. 광 클럭 재생은 수신기 쪽에서 유용할 뿐 아니라, 펄스의 타이밍과 신호 대 잡음 비(signal to noise ratio: SNR)를 향상시키기 위한 광 데이터 재생이 전송 시스템에서 행해질 수 있게 한다. 광 모드 잠김에 기반한 완전광 클럭 재생은 매우 빠른 속도로 이들 기능을 모두 행할 수 있는 능력을 갖고 있다. 광 클럭 재생방법으로는 입사 데이터 속도의 변화에 대해 내성이 있고 낮은 타이밍 순간 흐트러짐을 갖는 클럭 펄스열을 만들어 내는 것이 필수적이다. 고주파수 광 클럭 추출을 구현하기 위해, 고속 광학에 기반한 많은 접근 방법들이 연구되어 왔다.

현재 각 나라별로 특색 있는 연구가 진행되고 있다. 따라서 여기서는, 초고속 데이터로부터의 클럭 재생을 실현하고자 시도한 방법 중, 완전 광 클럭 재생방법을 중심으로 몇 가지를 각 나라에서 그 연구의 주축을 이루는 연구소나 학교 연구그룹 단위로 서술하고자 한다. 먼저 II장에서는

일본의 NTT, III장에서는 영국의 BT, IV장에서는 유럽의 여러 국가, 그리고 V장에서는 미국의 순으로 나열되어 있다. 단원 VI장에서는 간단한 맺음말로 정리하고 끝을 맺는다.

II. NTT (일본)

NTT(Nippon Telegraph and Telephone Corporation)에서는 1989년[9] 완전-광학 자체-여기 발진기(all-optically self-excited oscillator)를 이용한 광 동기 회선을 제안하고 약 2cm의 공동(cavity)길이의 경우 3.2 GHz에서 동작하는 것을 실험적으로 구현하였다. 이후 '94년[10]에는 이와 같은 이중모드-잠김 기술(dual mode-locking)로 5 GHz에서 동작하는 것을 실험적으로 보였다. 이 방법은, (그림 1)에서 나타난 바와 같이, 자유 공간에서 구성되며 하나의 거울과 또 하나의 반거울로 구성된 외부 공동(external cavity)에 진행파 증폭기(traveling wave amplifier: TWA)와 Faraday 회전기나 1/4 파장판 등과 같은 TM/TE 편광 변환기로 구성되어 있다. 구동 원리를 살펴보면, 먼저 세기 변조된 트리거 광이 완전-광학 자체-여기 발진기에 입사하게 된다. 이때, 트리거 광의 클럭 주파수가 자기-여기 발진 주파수에 가까우면 동기신호가 발생하게 된다. 이렇게 발생된 동기신호가 바로 광 재생클럭인 것이다. 이 발진기에서는 TWA를 위한 직류원 외에는 전기적 회선이 전혀 필요 없다. 따라서 이 방법은 완전광 방식으로 고속 동작 주파수가 기대된다. 자체-여기되는 발진 주파수는 외부 공진기의 길이를 조절함으로써 변화시킬 수 있다. 10 GHz 이상에서 구동하려면, 수 mm로 공동 길



(그림 1) 완전-광학 자체-여기 발진기를 사용한 광동기 회선[10]

이를 줄여야 한다. 이 방법의 단점으로는 주입된 신호에 대해서 시간 축에서 위상 오차가 생긴다는 것을 들 수 있다.

NTT에서는, 이와는 별도로, 위상차가 없는 완전한 시간 재생이 손쉽게 얻어질 수 있는 방법으로 위상 동기 회로(phase locked loop: PLL)를 제안하였다. 이 방법은 전기적으로 클럭을 재생하고자 하는 방법으로, 문제는 이러한 전기적 PLL이 얼마나 빨리 구동될 수 있을 것인가 하는 것이다. 기존의 전기적 PLL의 구동 속도는 위상 비교기의 반응 속도에 따라 제한되었으므로, 여기서 제안된 고속 PLL을 위해서는 광학에 기반을 둔 새로운 상호-상관 기술이 개발되었다. 진행파형 반도체 레이저 증폭기(traveling-wave semiconductor laser amplifier: TW-SLA)를 입사 광 펄스 열과 전압-구동 발진기(voltage-controlled oscillator: VCO)에 의해 구동되는 광 클럭 사이에 완전광 위상 비교기로 사용한 성공적인 PLL구동으로 10 Gbit/s의 임의 변조 신호로부터 10 GHz의 광 재생클럭 신호를 추출하는데 성공하였다[11]. 또한 광전(elec-

tro-optic) 1X2 스위치를 위상 검출기로 사용하여 5 GHz 클럭 추출도 발표하였다[12]. 잇달아 6.3 GHz 클럭 추출도 발표되고 이후 다중 분리화 회로에 많이 이용하였다[13-16]. 새로 제안된 방법이 속도면에서 많이 진보하였으나, 역시 전자적 방법이 지니는 구동속도의 한계를 벗어나지 못한다.

또 다른 하나의 방법으로 진폭이 다른 솔리톤을 클럭 재생에 이용한 기술이 제안되었다[17]. 이 방법에서는 채널별로 서로 다른 진폭의 솔리톤을 사용하여 데이터를 시간 다중화하여 전송하며, 수신단에서 원하는 채널을 선택할 때, 전송된 솔리톤의 진폭 차를 이용하여 채널을 분리한다. 이 방법 또한 전기적인 방식에 의해 클럭을 재생하는 방법으로 비슷한 문제를 지니고 있다.

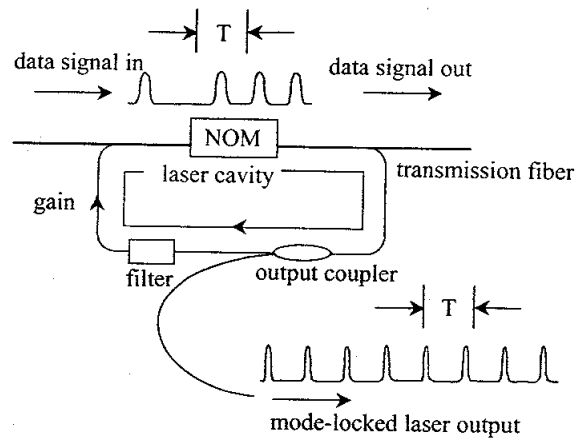
결론적으로 NTT에서의 클럭 재생 기술은 크게 이중 모드-잠김 기술과 전압-구동 발진기를 사용한 위상 동기 회로 기술, 그리고 진폭이 다른 솔리톤을 클럭 재생에 이용한 기술 등의 세 부류로 나눌 수 있다. 이중 첫 번째 방법인 이중

모드-잠김 기술만이 광 고유의 초고속/광대역의 잠재능력을 최대한 활용하는 완전광 클럭 재생 방법이다.

III. BT (영국)

BT(British Telecom)에서는 자체-맥동 레이저 다이오드(Self Pulsating Laser Diode: SP-LD)를 사용하여 2.5 Gbit/s의 NRZ(none-return-to-zero) 신호로부터 완전광 방식으로 클럭을 재생하는데 성공했다[18]. 여기서 자체-맥동 레이저 다이오드는 두 개의 접착된 InGaAsP 반도체로 구성되며 운반자(carrier)의 수명을 단축시키기 위해서 Zn 이온이 도핑되어 있어서 4 GHz 정도까지의 주파수에서 강한 자체-맥동이 일어난다. 발진 파장보다 약 15nm 정도 짧은 파장을 갖는 광신호가 $10\mu\text{W}$ 정도 세기로 입사하는 것만으로도, NRZ 신호로부터의 자체-맥동으로 인한 동기화가 가능하다. RZ 형식 광 신호에서도 비슷한 효과가 보여졌다. 이러한 완전광 클럭 추출 기술은, 단일 반도체 소자를 이용하는 방법으로, 미래 수 기가 비트 단위의 광 통신망과 광전자 집적회로(opto-electronic integrated circuit: OEIC) 적용에 매우 유리한 방식이다.

이어서 광섬유 고리 레이저(fiber ring laser)의 모드-잠김(mode-locking)현상을 이용한 새로운 방법이 제안되었다[19,20]. 또한 이 방법을 이용한 여러 변형이 발표되었다[21-23]. 이 방법의 기본 구조는 (그림 2)에 나타나 있다. 레이저 공동과 전송선은 하나의 비선형 광학 변조기(nonlinear optical modulator: NOM)를 공유하고 있다. 우선 기



(그림 2) 광섬유 고리 레이저[19]

본 구동 원리를 간단히 살펴보기로 한다. 입사 데이터가 없을 경우에 클럭 재생회로는 락 통과 필터(band pass filter: BPF)를 통과하도록 조절된 파장의 연속파동을 발진한다. 일단 변조 신호 열이 광섬유 고리 레이저에 입사하게 되면, 입사된 데이터는 공동 내의 빛과 NOM안에서 서로 겹치게 된다. 이 때, 모드-잠김을 야기하는 신호 데이터 열에 의해 레이저 광의 교차위상 변조(cross-phase modulation: XPM)가 이루어진다. 공동 내의 일 회전시간(round trip time)이 입사 데이터 열의 비트주기의 정수배에 맞추어져 있으면, 레이저의 일 회전 시간(또는 그의 약수)과 같은 기본 주기(T)로 변조가 일어나게 되면서 레이저의 모드-잠김이 일어나게 된다. 데이터 속도가 공동 모드 간격의 정수배가 되도록 미세 조절할 수 있게 하기 위해서는 광섬유 길이 변환기(fiber stretcher)가 필요하다. 이와 같이 비선형 광학 변조기의 보조에 의한 모드-잠김 현상에 의해 입사 신호 열의 기본 속도로 수 picosecond 폭의 단(short) 펄스가

생성된다. 이렇게 광섬유 고리 레이저에서 출력되는(1/T의 반복 속도로) 지속되는 단 펄스 열이 바로 재생 클럭이며, 이 클럭 펄스 열은 전송된 데이터의 추후 광 처리 과정에 직접 사용될 수 있다. 이렇게 해서, 레이저 공동 내에서의 광의 진폭과 위상을 변조하는 데 데이터가 한 몫을 하게 되는 것이다. 컴퓨터 시뮬레이션 결과에 의하면 하나의 모드-잠김 펄스가 형성되는 데에 필요한 변조기-통과 데이터 수는 10개 정도 이상이 필요하다고 한다[19].

비선형 광학변조기로는 비선형 광학 특성을 갖는 다양한 소자의 선택이 가능하다. 분산 편이 광섬유(dispersion shifted fiber: DSF)를 NOM으로 이용한 광섬유 고리 클럭 재생기의 구조는 1994년에 NTT와 BT의 공동연구[24]로 발표된 바 있다. 이는 1992년 BT[20]에서 발표한 DSF의 XPM을 이용한 광섬유 고리 레이저의 주파수 변조(frequency modulation: FM) 모드-잠김 현상을 바탕으로 한 변형이다. FM 모드-잠김은 주기적인 내부 위상 섭동(perturbation)이 레이저 공동 모드들이 결속하게끔 작용하여 레이저로 하여금 짧은 광 펄스의 열을 만들게 하는 것이다. 여기서의 경우는 XPM으로부터 주기적인 위상변조가 초래된 경우이다. 펌프 펄스의 열(λ_p)이 신호(레이저) 파장(λ_s)의 광굴절률을 주기적으로 변환시킨다고 하자. 신호에 가해지는 비선형 위상변화의 정확한 세부특성은 펌프 펄스의 폭과 세기, 그리고 두 파장 사이의 군지연차(walk-off)에 의존한다. 군지연차가 전혀 없고 펌프와 신호가 같은 편광특성을 갖는 경우, 위상차가 π 만큼 나는데 필요한 펌프 펄스의 최대 세기 P_π 는 다음 식으로 주어

진다.

$$P_\pi = \frac{\lambda A_{eff}}{4n_2L}$$

여기서, λ 는 파장, A_{eff} 는 유효 광섬유 모드 면적, n_2 는 비선형 굴절률, 그리고 L 은 광섬유 길이이며, 기본 공동 파장은 $\Delta v = c/nL$ 이다.

이와는 별도로 1994년 BT[25]에서는 반도체 광증폭기(traveling wave semiconductor laser amplifier: TWSLA)를 능동 모드-잠김 소자로 이용한 광섬유 고리 레이저도 발표하였다. TWSLA로 광 펄스 열이 입사하여, TWSLA의 이득변조동작(gain modulation dynamics)으로 인하여 공동(cavity) 내에서 돌고 있는 빛에 복잡적이고 주기적인 위상과 진폭 변조가 생기게 되어 모드-잠김이 이루어진다. 이와 같이 최근 BT에서는 주로 고리형 광섬유 레이저를 이용한 완전광 클럭 재생기술 연구에 주력해왔다.

IV. 유럽

BT 이외에도 유럽의 각국에서 완전광 통신망을 향한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 몇 가지 예를 들어보면, 다음과 같다.

이탈리아에서는[26], 1993년에, 신호와 클럭 용으로 처음부터 두 개의 파장을 이용한 시간분할 다중망을 제안하였다. 여기서 제안된 망구조에서는 두 개의 다른 파장으로 전송된 신호와 클럭을 수신단의 다중분리기로 사용하는 비선형 광 루프 거울(nonlinear optical loop mirror: NOLM)에서 신호와 제어 펄스로 각각 사용하였다. 그러나, 이 방법은 두 파장의 군속도 차이로 인한 동기화 등

의 문제로 장거리 전송에 적합하지 않다.

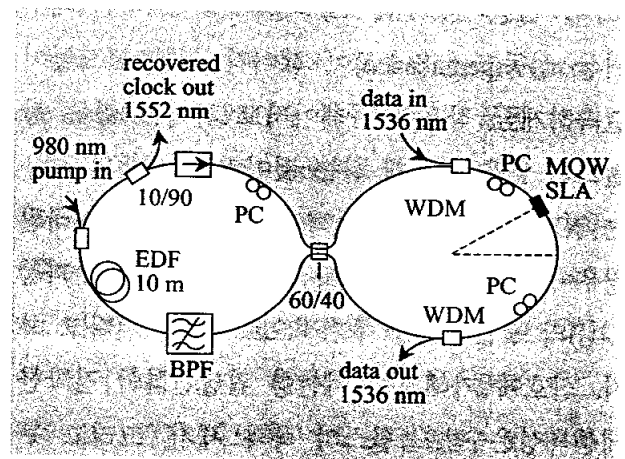
덴마크에서는[27], 1994년에, 모드-잠김 광섬유 고리 레이저를 이용한 전광 프레임 동기 재생 방법을 제안하였다. 여기서 프레임 동기 재생이란 입사 신호에서 정해진 신호를 갖는 헤더부분은 광섬유 레이저에서 똑같은 펄스들을 변조하게 되므로 결론적으로 레이저 출력에 그대로 복사되고, 임의로 변조된 데이터신호를 갖은 페이로드(payload)부분에서는 비트단위로 클럭이 재생되는 것을 의미한다. 이 프레임 동기 신호는 완전 광 다중분리기에서 각각의 채널을 인식하는데 유용하게 응용될 수 있다. 그러나, 이 방법은 각 노드마다 이 방법 특유의 독특한 헤더를 갖추어야 하므로 다중노드 통신망에서 실현하는 데는 일정 길이의 다양한 헤더를 확보해야 하는 어려움이 있을 것이다.

V. 미국

미국에서는 AT&T, MIT와 Digital Equipment Co. 가 함께 ARPA(Advanced Research Projects Agency)를 결성하여서 1993년부터 완전광 망 관련하여 망구조, 필요소자, 그리고 응용분야에 대한 광범위한 연구를 하고 있다[1]. 이 중 초고속 100 Gbit/s TDM 시간분할망(TDM network) 분야에서는 완전광 클럭 재생 방법으로 8자형 광섬유 레이저를 이용한 방법을 연구하고 있다.

8자형 광섬유 레이저의 모드-잠김 현상을 이용한 완전광 클럭 재생 방법은 1995년[28, 29] MIT 그룹에서 발표한 것으로 이를 이용하여 동기화된 40GHz의 클럭 추출을 실험적으로 구현하

였다. 여기서 모드-잠김 8자형 광섬유 레이저는 반도체 레이저 증폭기(semiconductor laser amplifier: SLA)를 비선형 소자로 사용하고 있는데, 광섬유보다 큰 반도체의 비선형성으로 인하여 공동의 길이가 짧아지는 이점이 있다. 8자형 클럭 재생 레이저의 구조는 (그림 3)에 나타나 있다. (그림 3)에서 왼쪽 루프에는 이득(gain)부분과 출력단 결합 부분이 있고, 오른쪽 루프는 그 자체가 모드-잠김 소자로 역할하는 NOLM이다. NOLM은 외부작용이 없는 경우 입력된 빛이 그대로 입력단으로 반사(reflection)하게 되어 있는 구조이다. 오른쪽 루프에 비대칭적으로 위치한 SLA는 데이터 펄스에 의해 작용될 때마다 입력된 빛이 NOLM을 통과(transmission)하도록 변조한다. 이런 방법으로, 레이저는 입사 데이터의 반복률(repetition rate)로 모드-잠김이 된다. 모드-잠김의 기본 구동 역학은 SLA의 비선형 위상변이에 의한 것으로 알려져 있다.



(그림 3) 8자형 클럭 재생 레이저[28]

미국 내 학교 중에서 다중분리화 분야에서 가장 활발히 연구하는 그룹 중의 하나로 아마도

Princeton대학의 Prucnal그룹을 꼽을 수 있을 것이다. 이 그룹에서는, 그러나, 클럭 재생이 따로 필요 없도록 시간분할다원접속(time division multiple access: TDMA) 통신망 내에 중심 광 클럭원을 따로 설치하여 중앙 집중식으로 공급되는 광 클럭 신호를 필요한 만큼의 시간지연을 준 후에 시스템 내 각 요소마다 배포하여 사용하였고[30], 펄스-간격 비트-스위칭 기술을 이용한 헤더 검출방식 [31-33]에서는 헤더에 클럭용 펄스를 함께 실어 보내는 방법을 사용하였다. 후자의 경우에는 데이터나 헤더와 클럭 펄스간의 편광상태를 서로 직각되게 하여 다중 분리화 등과 같이 필요한 경우에는 서로 분리하기 쉽게 하였다. 이와 같은 자체-클럭 통신망에서는 따로 클럭 재생이 필요 없게 된다. 이러한 방법은, 그러나, LAN이나 LAN과 같은 작은 망에서나 실현 가능한 방법으로, 장거리 광 통신망에서 사용하는 데는 데이터와 클럭 펄스간의 편광 상태 유지 및 군지연 문제 등 많은 어려움이 따른다.

VI. 맺음말

본 고에서는 미래 대용량 데이터망에서 채택될 가능성이 있는 초고속 광 클럭 재생 기술 연구를 현재 각 나라별로 진행되고 있는 연구 방법들을 중심으로 기술하였다. 광 고유의 초고속/광대역의 특성을 최대한 활용하기 위하여는 광 신호를 광/전, 전/광 변환없이 완전 광으로 처리하는 방법이 궁극적으로 채택될 것이다. 위에서 소개한 각 방법마다 나름대로의 특색이 있고 구현 시 난이도가 다르게 존재하지만, 현재 가장 안정

된 클럭 펄스를 산출하는 완전 광 클럭 재생방법은 8자형 광섬유 레이저를 이용한 방법으로 보인다. 하지만 실제로 완전 광 통신망에 사용할 수 있는 완전 광 클럭 재생을 구현하려면, 버스트(burst) 방식으로 전송되어 오는 입사 데이터에 대한 대처방안 등 아직도 해결 되어야 할 문제들이 많이 있다. 아직은 어느 하나도 완벽한 방법이라 할 수 없겠지만, 현재로서는, 각 방법의 장단점을 헤아려 보고 구성하고자 하는 통신망에 적절한 광 클럭 재생기술을 채택하여 사용하는 것이 필요하리라 본다. 앞으로 좀 더 나은 방법의 개발을 위한 노력이 계속될 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Barry, R. A., Chan V. W. S., K. L. Hall, E. S. Kintzer, J. D. Moores, K. A. Rauschenbach, E. A. Swanson, L. E. Adams, C. R. Doerr, S. G. Finn, H. A. Haus, E. P. Ippen, W. S. Wong, and M. Haner, "All-Optical Network Consortium-Ultrafast TDM Networks," *IEEE J. on Select. Areas in Comm.*, Vol. 14, 1996, pp. 999-1013.
- [2] D. Cotter, J. K. Lucek, M. Shabeer, K. Smith, D. C. Rogers, D. Nasset, and P. Gunning, "Self-Routing of 100 Gbps Packets Using 6 Bit 'keyword' Address Recognition," *Electron. Lett.*, Vol. 31, 1995, pp. 1475-1476.
- [3] A. D. Ellis, K. Smith, and D. M. Patrick, "All-Optical Clock Recovery at Bit Rates up to 40 Gbit/s," *Electron. Lett.*, Vol. 29, 1993, pp. 1323-1324.
- [4] S. Kawanishi, H. Takara, K. Uchiyama, T. Kitoh, and M. Saruwatari, "100 Gbit/s, 50 km, and Nonrepeated Optical Transmission Employing All-Optical Multi/Demultiplexing and PLL Timing Extraction," *Electron. Lett.*, Vol. 29, 1993, pp. 1075-1076.

- [5] K. L. Hall, K. A. Rauschenbach, E. A. Swanson, S. R. Chinn, and G. Raybon, "Picosecond-Accuracy All-Optical Bit Phase Sensing Using a Nonlinear Optical Loop Mirror," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, Vol. 7, 1995, pp. 935-937.
- [6] C. R. Doerr, W. S. Wong, H. A. Haus, and E. P. Ippen, "Additive Pulse Modelocking/Limiting Storage Ring," *Opt. Lett.* Vol. 19, 1994, pp. 1747-1749.
- [7] K. L. Hall, J. D. Moores, K. A. Rauschenbach, W. S. Wong, E. P. Ippen, and H. A. Haus, "All-Optical Storage of a 1.25kbit at 10 Gbit/s," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, Vol. 7, 1995, pp. 1096-1098.
- [8] J. D. Moores, W. S. Wong, and K. L. Hall, "50 Gbit/s Optical Pulse Storage Ring Using Novel Rational-Harmonic Modelocking," *Opt. Lett.* Vol. 20, 1995, pp. 2547-2549.
- [9] K. Takayama and K. Habara, "3.2GHz Operation of All-Optical Synchronization Circuit," *Electron. Lett.*, Vol. 25, 1989, pp.1739-1741.
- [10] T. Ono, Y. Yamabayashi, and Y. Sato, "5-Gbit/s All Optical Clock-Recovery Circuit Using a Dual Mode-Locking Technique," presented at *OFC'94*, paper ThM3, 1994.
- [11] S. Kawanishi and M. Saruwatari, "10 GHz Timing Extraction from Randomly Modulated Optical Pulses Using Phase-Locked Loop with Traveling-Wave Laser-diode Optical Amplifier Using Optical Gain Modulator," *Electron. Lett.*, Vol. 28, 1992, pp. 510-511.
- [12] K. Takayama, K. Habara, H. Miyazawa, and A. Himeno, "High-Frequency Operation of a Phase-Locked Loop-type Clock Regenerator Using a 1X2 Optical Switch as a Phase Comparator," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, Vol. 4, 1992, pp. 99-101.
- [13] S. Kawanishi, H. Takara, K. Uchiyama, and M. Saruwatani, "100 Gbit/s, 100 km Optical Transmission with In-line Amplification Utilizing All-Optical Multi/Demultiplexing and Improved PLL Timing Extraction," presented in Technical Digest, *European Conf. on Optical Communications*, Montreux, Switzerland, paper MoC1.5, 1993.
- [14] K. Uchiyama, H. Takara, S. Kawanishi, T. Morioka, M. Saruwatari, and T. Kitoh, "100 Gbit/s All-Optical Demultiplexing Using Nonlinear Optical Loop Mirror with Gating-Width Control," *Electron. Lett.*, Vol. 29, 1993, pp. 1870-1871.
- [15] O. Kamatani, S. Kawanishi and M. Saruwatari, "Prescaled 6.3 GHz Clock Recovery from 50 Gbps TDM Optical Signal with 50 GHz PLL Using Four-Wave Mixing in a Travelling-Wave Laser Diode Optical Amplifier," *Electron. Lett.*, Vol. 30, 1994, pp. 807-809.
- [16] S. Kawanishi, T. Morioka, O. Kamatani, H. Takara, and M. Saruwatari, "100 Gbps, 200 km Optical Transmission Experiment Using Extremely Low Jitter PLL Timing Extraction and All-Optical Demultiplexing Based on Polarisation Insensitive Four-Wave Mixing," *Electron. Lett.*, Vol. 30, 1994, pp.800-801.
- [17] M. Nakazawa, E. Yoshida, E. Yamada, K. Suzuki, T. Kitoh, and M. Kawachi, "80 Gbit/s Soliton Data Transmission Over 500 km with Unequal Amplitudes Solitons for Timing Clock Extraction," *Electron. Lett.*, Vol.30, 1994, pp.1777-1778.
- [18] P. E. Barnsley and H. J. Wickes, "All-Optical Clock Recovery from 2.5 Gbit/s NRZ Data Using Selfpulsating 1.58 μ m Laser Diode," *Electron. Lett.*, Vol. 28, 1992, pp. 4-6.
- [19] K. Smith and J. K. Lucek, "All-Optical Clock Recovery Using a Mode-Locked Laser," *Electron. Lett.*, Vol. 28, 1992, pp. 1814-1816.
- [20] E. J. Greer and K. Smith, "All-Optical FM Mode-Locking of Fiber Laser," *Electron. Lett.*, Vol. 28, 1992,

- pp. 1741-1742.
- [21] A. D. Ellis, K. Smith, and D. M. Patrick, "All Optical Clock Recovery at Bit Rates up to 40 Gbit/s," *Electron. Lett.*, Vol. 29, 1993, pp. 1323-1324.
- [22] W. A. Pender, P. J. Watkinson, E. J. Greer, and A. D. Ellis, "10 Gbit/s All-Optical Regenerator," *Electron. Lett.*, Vol. 31, 1995, pp.1587-1588.
- [23] L. M. Spirit and L. C. Blank, "Optical Time Division Multiplexing for Future High-Capacity Network Applications," *BT Technol. J.*, Vol. 11, 1993, pp. 35-45.
- [24] E. J. Greer, Y. Kimura, K. Suzuki, E. Yoshida, and M. Nakazawa, "Generation of 1.2 ps, 10 GHz Pulse Train from All-Optically Modelocked, Erbium Fiber Ring Laser with Active Nonlinear Polarisation Rotation," *Electron. Lett.*, Vol. 30, 1994, pp. 1764-1765.
- [25] D. M. Patrick, "Modelocked Ring Laser Using Nonlinearity in a Semiconductor Laser Amplifier," *Electron. Lett.*, Vol. 30, 1994, pp. 43-44.
- [26] L. E. Adams, E. S. Kintzer, and J. G. Fujimoto, "All-Optical Timing Extraction at 40 GHz Using a Mode-locked Figure-Eight Laser with an SLA," *Electron. Lett.*, Vol. 31, 1995, pp. 1759-1761.
- [27] L. E. Adams, E. S. Kintzer, and J. G. Fujimoto, "All-Optical Clock Recovery at 2.5 GHz Using a Semiconductor Nonlinearity in a Mode-locked Figure Eight Laser," *Conf. Lasers and Electro-Optics*, Baltimore, MD, USA, May 22-26 1995, Paper CME2.
- [28] J.-G. Zhang and G. Picchi, "Self-Synchronised All-Optical Time-Division Multiple-Access Broadcast Network," *Electron. Lett.*, Vol. 29, 1993, pp. 1871-1873.
- [29] M. (bro, P. Thorsen, and S. B. Andreasen, "All-Optical Frame Synchronisation Recovery," *Electron. Lett.*, Vol. 30, 1994, pp. 1243-1244.
- [30] P. R. Prucnal, M. A. Santoro, S. K. Sehgal, and I. P. Kaminow, "TDMA Fiber-Optical Network with Optical Processing," *Electron. Lett.* Vol. 22, 1986, pp. 1218-1219.
- [31] P. A. Perrier and P. R. Prucnal, "Self-Clocked Optical Control of a Self-Routed Photonic Switch," *J. Lightwave Tech.*, Vol. 7, 1989, pp. 983-989.
- [32] R. K. Boncek, P. R. Prucnal, M. F. Krol, S. T. Johns, and J. L. Stacy, "Five Gigabit/Second Operation of a 50-Channel Optical Time-Division Multiple-Access Interconnect," *Optical Engineering*, Vol. 31, 1992, pp. 2442-2449.
- [33] I. Glesk, J. P. Sokoloff, and P. R. Prucnal, "All-Optical Address Recognition and Self-Routing in a 250 Gbit/s Packet-Switched Network," *Electron. Lett.*, Vol. 30, 1994, pp. 1322-1323.