

# 광전송망에서 정상상태 동기클럭 성능

정희원 양충열\*, 고제수\*, 이창기\*\* 김환우\*\*\*

## A Performance Analysis on Steady-state Synchronous Clock in NG-SDH Network

Choong Reol Yang\*, Jesoo Ko\*, Chang Ki Lee\*\*, Whan Woo Kim\*\*\* *Regular Members*

### 요약

본 논문에서는 차세대 광전송망의 전송노드와 DOTS에 대해 실제 측정된 클럭잡음 데이터를 기반으로 광전송망 내에서 동기클럭이 정상상태에 있을 때 성능을 분석하고, 이 때 구성가능한 최대 망노드 수준을 제시하였다.

**Keyword** : 광전송망, NG-SDH, 정상상태, 동기클럭, 원더

### Abstract

In this paper, We generated a wander generation model from really measured clock noise data on the transmission node and DOTS in NG-SDH network. and then, We presented the performance of Synch. clock and maximum node level capable network configuration through the clock characteristics simulation on network having the steady-state clock.

### I. 서론

동기식 전송기술인 SONET/SDH (Synchronous Optical Network/Synchronous Digital Hierarchy) 기술은 기존의 비동기식 전송기술의 문제점을 해결하기 위해 80년대 중반 이후부터 최근 NG-SDH(차세대 동기식 광전송 기술)까지 고속으로 발전하고 있다. SDH는 기본적으로 VC (Virtual Concatenation)를 사용하기 때문에 고정 비트 속도의 DS-n 중속신호의 전송에 적합하다. 그러나 EOS (Ethernet over SDH)를 위한 이더넷 신호와 SAN (Storage Area Network)의 광섬유 채널(FC) 등 다양한 종속(Client) 신호의 직접적인 전송, 즉 DOS (Data over SDH)에서는 대역이용 효율이 좋지 않은 문제점이 있기 때문에 이와 같은 문제점을 개선하기 위해 GFP(Generic Framing Procedure)와 VC 및 LCAS(Link Capacity

Adjustment Scheme) 등의 새로운 기술을 갖는 SDH 시스템이 차세대 동기식 광전송(NG-SDH) 시스템이다.

광 전송 시스템에서의 동기클럭 상태는 동기원에 의하여 정상적으로 동기기능이 수행되는 정상상태 (steady-state)와 동기원 장애가 발생하여 클럭 절체 등으로 인한 15초 이내의 클럭 위상변위가 일어나는 단기 위상변위상태(short-term phase transient state), 그리고 홀드오버(holdover) 상태가 지속되는 등 15초 이상의 클럭 위상변위가 발생하는 장기 위상변위 상태 (long-term phase transient state)로 나타날 수 있다. 정상상태 이외의 클럭상태에서는 클럭잡음<sup>1,2)</sup>과 위상변위에 의하여 시스템내의 클럭성능을 변화시키고, 또한 망노드별 클럭성능이 달리 나타나게 되어서 누적 전달되는 클럭성능 변화에 의한 시스템 및 전송망 성능에 심각한 영향을 줄 수 있기 때문에 동기클럭 규격<sup>12-3)</sup>에서는 이 세 가지 상태에 따라 관련 규격치를 권고하고 있다.

※ 본 논문은 정통부 및 정보통신연구진흥원의 IT 원천기술 개발사업중 OTH 기반 40G 다중서비스 전송기술개발 과제의 연구결과로 수행되었습니다.

\* 한국전자통신연구원 책임연구원 (cryang@etri.re.kr, jsko@etri.re.kr), \*\* 위덕대학교 전자공학과 교수 (cklee@uu.ac.kr),

\*\*\* 충남대학교 전자공학과교수 (wwkim@cnu.ac.kr)

논문번호 : KICS2006-11-504, 접수일자 : 2006년 11월 22일, 최종논문접수일자 : 2007년 6월 14일

광전송망에서 망동기는 망노드 장치에서 사용되는 클럭을 망측에 제공되는 동기클럭에 동기 시켜 단대단(end-to-end) 에러성능을 만족하게 하기 위한 것으로, 신뢰성 있고 안정된 광전송 시스템 전송망을 구축하기 위해서는 우선적으로 동기클럭의 단기안정도 성능이 좋아야 한다.

NG-SDH 광전송망에서 정상상태 동기클럭 성능 분석을 위해 동기클럭 잡음모델, 동기클럭의 단기안정도 특성 파라미터<sup>[2]</sup>인 MTIE(Maximum Time Interval Error)와 TDEV(Time DEVIation) 노드성능, PJC(Pointer justification event count)<sup>[6]</sup>와 평균 PJC 발생 시간간격인 MTBP(Mean Time Between Pointer justification event) 특성이 좋아야 한다.

국내에서는 아직 NG-SDH 시스템 망동기 기술, 동기클럭의 특성 및 성능연구가 미흡한 실정이어서 이에 대한 연구가 요구되고 있다. 최근의 통신시스템은 STM-16(2.5Gbps), STM-64(10Gbps) 등의 기존 SDH, GbE, 10GbE, EoS, FC 신호 등을 중속신호로 수용하고 있어서 이에 대한 효율적인 망동기 설계기술의 확보가 필요하다. NG-SDH 시스템 망동기는 시스템 내의 다양한 동기원에서 기준클럭을 선택하여 이루어지기 때문에 고속 신호를 스위칭하고 전송하는 통신시스템에 부합하는 동기원 및 동기클럭 선택방법에 관한 연구가 필요하다. 또한, NG-SDH 시스템으로 망을 구성할 경우 시스템 클럭잡음이 누적되어 망을 구성하는 노드 수준에 영향을 미치기 때문에 동기클럭 잡음에 대한 연구도 필요하다<sup>7,8,9)</sup>.

본 논문에서는 차세대 광전송시스템을 위한 정상상태 광전송망의 동기클럭 성능을 분석을 통하여 국내 광전송망에서 동기클럭에 미치는 잡음성분의 영향을 분석하고, 이 때 최대로 구성가능한 망노드 수준을 제시하고자 한다. 이 때 규격에 근접하는 클럭잡음 모델을 이용하여 시뮬레이션하는 기존의 방법대신 실제 광전송망에서 SDH 장비를 이용하여 실제 측정된(PCR, DOTS,NE) 클럭잡음을 이용한 시뮬레이션을 통해 MTIE, TDEV 등 단기성능규격을 만족하는 지 알아본다.

이를 위해 II장에서 차세대 고속 광전송 망을 위한 망동기 구현에 대하여 기술하고, III장에서 실제 DOTS 및 SDH 장비를 이용하여 측정된 데이터를 기반으로 한 NE(Network Element) 망모델링을 통해 차세대 광전송망에서 동기클럭이 정상상태에 있을 때의 동기클럭 성능특성을 시뮬레이션하고 그 결과를 제시하며 이 때 구성가능한 최대 망 노드수준을 제시한 다음, 끝으로 IV장에서 결론을 맺는다.

## II. 광전송 시스템에서의 망동기

### 2.1. 망동기 구현

NG-SDH 광전송 시스템은 일반적으로 동기식 전송 계위신호인 STM-N(Synchronous Transport Mode), GFP를 통한 이더넷 신호와 SAN 접속신호 등을 중속신호로 한다. 광전송 시스템의 망동기 기능은 기본적으로 동기 망에서 공급되는 동기클럭과 여기서 파생된 클럭(derived clock)에서 추출된 동기원에 의해서 실현된다. 동기식 전송망에 공급되는 동기원은 동기클럭 분배망, 즉 동기 망을 통해 공급받는다. 동기망은 동기클럭을 필요로 하는 교환망이나 전송망 등의 노드에 동기클럭을 제공하기 위한 네트워크를 말하며 통신망에서 전달하고자 하는 데이터를 원활하게 전송하기 위해서는 망에서 사용하는 클럭을 동기 시켜야 한다. 동기 망을 구성하는 핵심 요소로는 최초 동기원, 동기클럭 공급장치, 동기클럭 분배 전송노드 등이 있다.

### 2.2. 동기클럭 성능측정 파라미터

위 망동기 구현 과정에서 한국표준과학연구원에서 제공되는 KRF 클럭은 동기클럭 분배 망을 거치는 동안 전송노드인 망 요소와 DOTS의 자체 원더(wander)와 지터(jitter) 등 여러 가지 요인들의 영향을 받게 되고 실제 전송망의 동기원으로 제공되는 동기클럭의 성능은 KRF 고유의 성능보다 저하되어 나타난다. 이 가운데서 지터 성분은 전송노드(NE)나 DOTS의 협대역 PLL에 의해서 어느 정도 흡수되지만, 원더 성분은 다단 연결된 노드에 의해 누적되어 클럭 안정도에 영향을 주게 된다.

동기식 전송기술이 도입되기 전에 교환망에 사용되는 동기클럭은 안정도, 정확도, 슬립, TIE(Time Interval Error) 등에 의하여 클럭 성능을 규정하였다. 일반적으로 클럭규격에 적용되는 안정도의 측정 요소는 MTIE (Maximum Time Interval Error), TDEV(Time deviation), ADEV(Allan deviation), MADEV(Modified ADEV), TIE<sub>rms</sub>(Root mean square of Time Interval Error)가 있지만 ITU-T나 ANSI의 동기클럭 규격에서는 MTIE 와 TDEV를 중심으로 권고하여 사용하고 있다.

MTIE는 클럭의 시간오차를 이용하여 임의의 관측시간에서 가장 큰 시간오차와 가장 작은 시간오차간의 차이인 최대 시간간격 편차, 즉 측정주기 내에서 모든 관측시간( $\tau$ )에서의 최대 TIE를 말한다. ITU-T에서 MTIE는 (1)식과 같이 정의하고 있다.

$$MIE(n\tau_0) \equiv \max_{1 \leq k \leq N-n} \left[ \max_{k \leq i \leq k+n} x_i - \min_{k \leq i \leq k+n} x_i \right], \quad n=1,2,\dots,N-1 \quad (1)$$

여기서,  $\tau$ 는 관측시간으로  $n\tau_0$ 와 동일하고,  $n$ 은 관측시간에 대한 표본화 간격(sampling interval)의 수이다. 그리고  $\tau_0$ 는 시간오차의 표본화 간격,  $N$ 은 표본의 총수,  $x_i$ 는 표본의 시간오차를 말한다. 먼저 총 측정시간이 정해지면 측정시간 내에서 시간오차의 표본화 간격을 이용하여  $n=1$ 일 때의 관측시간인  $\tau (= \tau_0)$ 시간마다 시간오차의 최대, 최소값을 측정한다 다음 이중 최대값을  $\tau$ 에 대한 MTIE 값으로 채택하여 값을 취한다. 다시  $n=2$ 일 때의 관측시간인  $\tau (= 2\tau_0)$ 시간마다 동일한 방법으로 MTIE 값을 취하고, 이와 같은 과정을 측정시간인  $T$ 까지 수행한 다음 각 관측시간마다 얻어진 MTIE를 그래프로 표현하면 MTIE 특성 곡선을 얻을 수 있다. 이와 같은 MTIE는 초(sec) 단위의 관측시간으로 규격화가 가능하기 때문에 클럭의 단기적인 특성을 제한할 수 있는 특징을 가지고 있다. 따라서 MTIE는 기본적으로 단기적인 정확도를 측정하기 위한 수단으로 활용된다. 또한 시간오차를 계산할 때 기준치를 PRC(Primary Reference Clock) 수준의 이상적인 타이밍으로 여겨지는 클럭을 활용하여 측정하면 순수한 MTIE가 되며, 주어진 클럭과의 상대적인 최대의 TIE를 구하게 되면 이는 MRTIE(Maximum Relative TIE)가 된다.

클럭신호는 시간의 흐름에 따라 클럭의 성능이 저하되면서 파동하기 때문에 안정도 특성을 조사할 때 표준분산이 아닌 Allan 분산을 이용하는데 이 Allan 분산은 동기식 전송에 적용하기 위해서 TDEV로 보완되었다. TDEV는 표본 시간편차를 이용하여 지정된 횟수로 여러 번 측정된 분산을 평균한 것을 말한다. TDEV의 정의 식은 (2)식과 같다.

$$TDEV(n\tau_0) \equiv \sqrt{\frac{1}{6n^2(N-3n+1)} \sum_{j=1}^{N-3n+1} \left[ \sum_{i=j}^{n+j-1} (x_{i+2n} - 2x_{i+n} + x_i) \right]^2} \quad (2)$$

TDEV는 관측시간의 값에 따라서 세 개의 시간오차 표본을 활용하여 이들 간의 차이 값을 여러 차례 구한 다음 이를 다시 제곱평균을 하여 해당 관측시간에 따른 TDEV값을 구하게 된다. 이와 같은 과정을 모든 관측시간에 따른 TDEV값을 구하면 동기

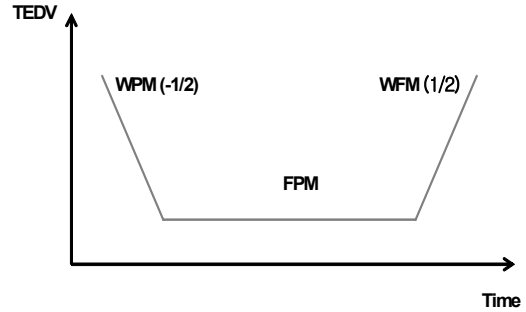


그림 1. TDEV의 기울기에 따른 클럭잡음.  
Fig. 1. Clock noise in accordance with TEDV slope.

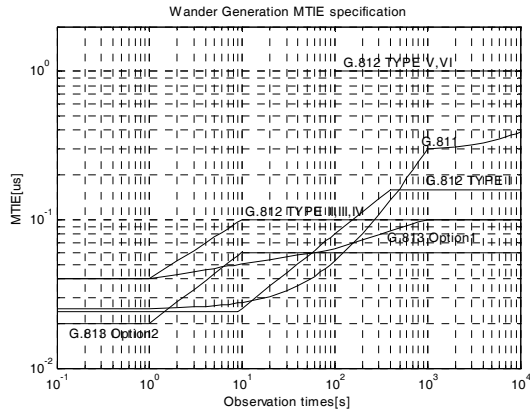
클럭에 대한 TDEV 특성을 얻을 수 있다. TDEV는 세 가지의 시간오차 간의 차이를 활용하기 때문에 기본적으로 단기적인 안정도를 측정하기 위한 수단으로 활용될 수 있다.

또한 TDEV는 그림 1과 같이 클럭신호에 존재하는 잡음형태를 기울기로 구별할 수 있는 특징을 가지고 있어서 이를 통하여 현재 측정하고자 하는 동기클럭의 잡음 성분과 영향력 정도를 분석할 수 있다.

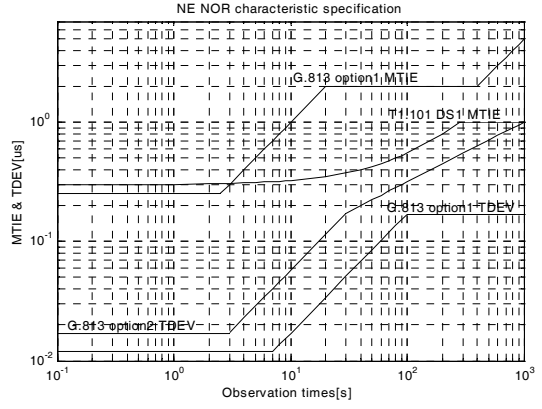
위 정의식 (1)과 식 (2)는 실제 클럭특성을 측정할 때 사용되며, 본 논문의 시뮬레이션 결과에도 적용된다. MTIE와 TDEV는 클럭특성을 직접적으로 측정할 수 있는 파라미터지만 이들의 상태를 간접적으로 확인할 수 있는 파라미터는 포인터조정 횟수인 PJC(Pointer Justification event Count)와 평균 PJC 발생 시간간격인 MTBP(Mean Time Between Pointer justification event) 등이 있다. 이와 같은 PJC와 MTBP는 클럭특성이 변화함에 따라 발생하는 횟수와 시간이 달라지므로 이를 이용하면 클럭 성능변화를 간접적으로 확인할 수 있게 된다.

### 2.3. 동기클럭 특성규격

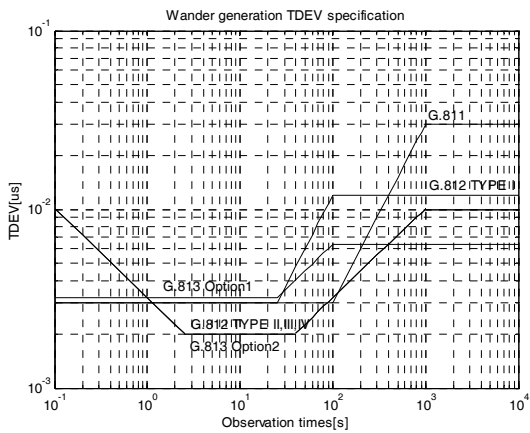
동기 망과 전송망에 적용되는 클럭규격은 크게 적용계층에 따른 분류, 적용위치에 따른 분류 및 클럭상태에 따른 분류 등 세 가지로 나눈다. 적용계층에 의한 분류는 모든 클럭의 소스인 PRC(G.811)와 동기클럭 공급장치인 DOTS(G.812), 그리고 망 노드장치인 NE(G.813)에 관한 규격 등으로 나눈다. 적용위치에 따른 분류는 장치 입력규격, 장치 출력규격 및 장치 자체규격 등으로 나눈다. 여기서 장치 자체규격은 원더생성(wander generation 또는 noise generation)이 적용되며, 원더생성은 입력 클럭잡음이 없다고 가정할 때 장치 내부에서만 발생하는 클럭잡음 성분을 말한다. 동기 망과 전송망에서 사용



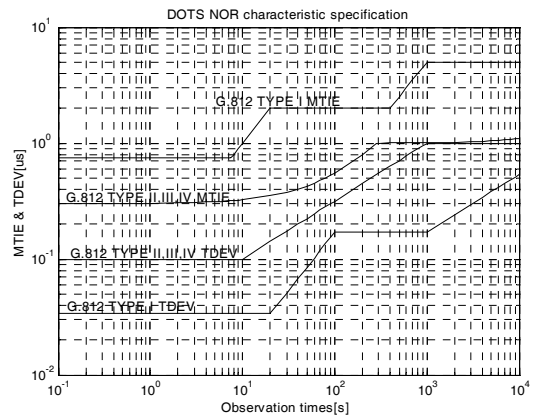
(a) 원더생성 MTIE  
(a) Wander generation MTIE



(a) 전송노드  
(a) NE



(b) 원더생성 TDEV  
(b) Wander generation TDEV



(b) 동기클럭공급장치  
(b) DOTS

그림 2. 원더생성 동기클럭 특성규격  
Fig. 2. Characteristics specification for Synchronization Clock.

되는 클럭은 장치 외부와 내부 등의 여러 가지 요인으로 인하여 상태가 변하게 된다. 이와 같은 클럭상태의 변화는 클럭성능에 직접적으로 영향을 끼치게 되고, 이로 인해 시스템 성능과 망 성능에 바로 반영이 되기 때문에 반드시 모니터링되어야 한다. 클럭상태에 따른 분류는 노드장치에서 출력되는 클럭상태를 고려하여 정상상태(normal state)와 위상변위 과도상태(phase transient state)에서의 규격<sup>[4,5]</sup>으로 나눈다.

원더생성 성분에 관한 ITU-T 규격은 그림 2에 나타내었다. 그림 2 (a), (b)는 각 계층별 자체 생성되는 잡음성분인 원더생성에 대한 규격을 MTIE와 TDEV로 나타낸 것이다. 그림 2의 G.811규격은

그림 3. 정상상태 동기클럭 특성규격  
Fig. 3. Characteristics specification for Synchronization Clock in Steady-state.

PRC 혹은 KRF에 적용되고, G.812는 DOTS와 BITS, 그리고 G.813은 전송망 노드인 NE에 적용된다. 그림 2의 규격에서 원더생성 규격 치를 만족하려면 실선 아래의 MTIE와 TDEV 값을 가져야 한다. 본 논문에서는 2.048Mbps급 계위를 기준으로 하여 G.812의 TYPE I과 G.813의 option 1 규격을 중심으로 시뮬레이션 등에 적용한다.

원더 성분에 관한 클럭상태별 동기클럭 규격은 동기클럭 시뮬레이션에 직접적으로 적용시켜 망노드별 동기클럭의 특성 분석 등에 사용하게 된다. 클럭상태별 동기클럭의 원더 특성규격은 그림 3에 나타내었다. 그림 3은 정상상태일 때 NE(SDH 장비클럭)와 DOTS(동기클럭공급장치)의 동기클럭 MTIE

및 TDEV 특성규격이다. 그림 3(a)는 NE계층에서의 option 1과 option 2에 대한 규격이고, option 2의 MTIE 규격은 아직 권고하지 않고 있기 때문에 ANSI T1 규격을 표시하였다. 그림 3(b)는 DOTS의 TYPE별 MTIE와 TDEV 원더 특성규격이다.

### III. 동기클럭 성능 시뮬레이션

#### 3.1. 최대노드산출을 위한 시뮬레이션 모델링

NG-SDH 광전송 시스템의 동기클럭 성능을 분석하기 위해서 실제 전송망노드의 클럭상태에 따른 잡음성분을 추출하여 동기클럭 특성에 영향을 미치는 파라미터들의 안정도를 측정한다.

기존에는 이의 실제 측정이 어려우므로 광전송망 노드에서 관측되는 여러 형태의 잡음을 시뮬레이션을 통해 인위적으로 발생시켜 동기클럭 특성을 분석하여 왔다. 동기클럭 특성을 분석하기 위해서 우선 백색위상잡음(WPM), 플리커 위상잡음(FPM), 백색 주파수잡음(WFM)을 상호 조합하여 클럭잡음 모델을 생성하고, 발생된 클럭잡음 모델을 이용하여 DOTS와 NE로 적용해야하는 노드 모델, 그리고 이를 바탕으로 하여 망모델을 구성한다. 이들 구성된 모델을 활용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 망을 구성하고 있는 광전송 노드클럭의 MTIE와 TDEV 클럭특성을 파악한다. 이 때 동기클럭 잡음모델에 적용하여야 할 파라미터는 원더생성, 차단주파수, 클럭상태, 노드수 등이 있다. 원더생성(wander generation)은 입력 클럭잡음이 없다고 가정할 때 장치 내부에서만 발생하는 클럭잡음 성분을 말하며 앞서 살펴본 세가지 클럭잡음을 이용하여 생성한다. 노드모델은 자체가 PLL 기능도 수행해야 하기 때문에 입력되는 잡음성분을 차단할 수 있는 차단주파수를 가지고 있는데 이 차단주파수는 일반적으로 동기클럭공급장치일 경우 0.01에서 0.1Hz, SDH 장비 클럭일 경우 0.1에서 1Hz를 ITU-T에서 권고하고 있고, 감쇠인자(damping factor)인  $\zeta$ 는 5로 설정한다.

동기클럭에서 나타날 수 있는 상태는 정상상태와 단기 위상변위 과도상태 및 장기 위상변위 과도상태이며, 각 상태에 따라 클럭성능이 크게 달라져서 MTIE와 TDEV 특성에 영향을 주게 된다. 정상상태에서는 동기원의 특성, 원더생성과 노드수에 따라 영향을 주게 되고, 단기 위상변위 과도상태에서는 정상상태의 요소와 동기원 상실에 따른 위상변위 성분과 홀드 오버상태가 지속되는 시간 등이 영향을 주게 되며, 장기 위상변위 과도상태에서는 단기 위

상변위과도상태의 요소와 홀드오버 상태가 계속 유지됨에 따라 나타나는 드리프트 성분이 영향을 주게 된다. 본 논문에서는 정상상태만을 고려한다.

그리고 노드수는 PRC와 DOTS 혹은 DOTS와 DOTS 사이의 NE 노드 수인 동기망의 노드수, 그리고 전송망을 구성하고 있는 NE 노드수를 말하며, 이와 같은 노드 수에 따라 클럭잡음 특성이 누적되어 나타남에 따라 클럭성능에 매우 크게 영향을 주게 된다.

그 밖에 홀드오버 유지시간<sup>[7]</sup>과 동기 상태 메시지 처리시간이 있는데, 홀드오버 유지시간은 동기소스(synchronous source) 장애가 발생한 시점부터 다음 동기소스로의 절체가 수행되기 전까지 홀드오버 상태로 머물러 있는 시간을 말한다. 이 시간은 위상변위 과도상태에서만 적용되며, 동기소스 장애 발생위치에 따라 유지시간이 달라질 수 있다. 그리고 동기 상태 메시지 처리시간은 동기소스의 상태변화를 인식한 다음 이를 송신 동기 상태 메시지에 적용하기까지의 걸리는 시간을 말하며, ITU-T에서는 200ms를 권고하고 있다. 이와 같은 홀드오버 유지시간과 동기 상태 메시지 처리시간은 동기클럭 시뮬레이션을 수행할 때 적용해야 한다.

NE와 DOTS에 적용되는 간략화된 클럭잡음 노드 모델<sup>[7]</sup>을 그림 4에 나타내었다. 모델은 LPF(Low Pass Filter)와 덧셈기, 그리고 원더생성 성분과 위상변위 성분으로 구성된다. 입력되는 위상잡음은 LPF를 통과한 후 장치 자체에서 생성되는 원더생성 성분과 위상변위 성분을 더한 후 출력된다. 여기서, 입력 위상잡음은 해당노드의 동기소스 잡음이 되고, 출력 위상잡음은 다음 단의 입력 위상잡음으로 전달된다. 그리고 위상변위 성분은 단기 및 장기에 따라 적용되는 값이 달라진다. 또한 앞서 살펴본 차단주파수는 노드모델의 LPF의 차단주파수로 적용된다.

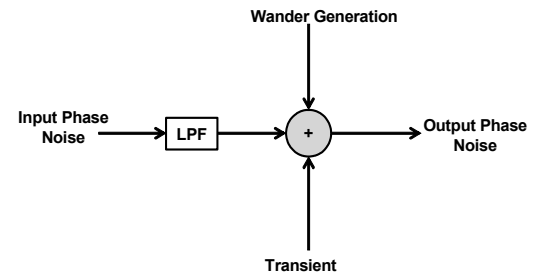


그림 4. 클럭잡음노드 모델  
Fig. 4. Node Model for Clock noise.

광전송 시스템으로 구성되는 망은 주로 메쉬형망이나 링망이 주로 적용되지만 본 논문에서는 클럭잡음이 최악으로 누적되는 선형망<sup>7)</sup>을 적용하기로 한다.

선형망으로 구성된 광전송 전송망의 모델을 수식으로 표현하면 (3)식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 N_{O}^{(1)}(s) &= H_1(s)N_{IN}(s) + N_{WC}^{(1)}(s) + N_{PT}^{(1)}(s) \\
 N_{O}^{(2)}(s) &= H_1(s)N_{O}^{(1)}(s) + N_{WC}^{(2)}(s) + N_{PT}^{(2)}(s) \\
 &= (H_1(s))^2 N_{IN}(s) + H_1(s)(N_{WC}^{(1)}(s) + N_{PT}^{(1)}(s)) \\
 &\quad + N_{WC}^{(2)}(s) + N_{PT}^{(2)}(s) \\
 &\dots\dots\dots \\
 N_{O}^{(k)}(s) &= (H_1(s))^k N_{IN}(s) + \sum_{n=1}^k (H_1(s))^{k-n} [N_{WC}^{(n)}(s) + N_{PT}^{(n)}(s)]
 \end{aligned} \tag{3}$$

여기서,  $N_{O}^{(1)}(s)$ 는 첫 번째 노드에서의 출력클럭잡음이고,  $N_{IN}(s)$ 는 첫 번째 노드로 입력되는 입력클럭잡음이다. 또한  $H_1(s)$ 는 노드의 LPF 전달함수이고,  $N_{WC}^{(1)}(s)$ 는 첫 번째 노드의 원더생성이며 이 항은 무시될 정도로 작은 값을 갖는다<sup>11)</sup>. 그리고  $N_{PT}^{(1)}(s)$ 는 위상변위 성분으로, 단기 및 장기 위상변위 과도상태가 있을 때만 적용된다. 이렇게 하여  $k$  개 노드로 연결한다면  $k$  번째 노드에서의 출력클럭잡음은  $N_{O}^{(k)}(s)$ 이 되어 마지막 식과 같이 된다. 여기서 모든 노드의 필터 전달함수를  $H_1(s)$ 로 가정하였고, 가장 열악한 환경을 만들기 위하여 첫 번째 노드는 외부타이밍, 나머지 노드는 선로타이밍으로 가정하였다. 따라서 망의 입력 동기소스로 작용할 수 있는  $N_{IN}(s)$ 만 결정이 되고 그림 2의 원더생성과 클럭상태만 결정되면 광전송 망노드의 클럭 특성을 알 수 있다.

동기망의 전달특성 모델은 식 (3)의  $N_{IN}(s)$ 에 적용되는 PRC나 DOTS1과 DOTS2의 동기소스를 발생시키기 위한 것이다. 기본적으로 PRC는 망을 거치지 않기 때문에 DOTS가 적용된다. DOTS에 입력되는 동기소스를  $N_s(s)$ 라 하고, DOTS의 전달함수를  $H_2(s)$ 라 하면 DOTS의 클럭 전달특성은 아래 (4)식과 같다. (4)식에서 볼 때 DOTS에서도 위상변위 상태를 적용하기 위하여  $DT_{PT}(s)$ 를 두었다. (4)식에서 입력 동기소스인  $N_s(s)$ 가  $N_{IN}(s)$ 을 동기소스로 하고  $i$  개의 전송노드를 통과한 출력을 사용한다면 (5)식과 같이 쓸 수 있다.

(5)식에서 만일  $N_{IN}(s)$ 가 PRC라고 하면

$$\begin{aligned}
 DT_{O}(s) &= H_2(s)N_s(s) + DT_{WC}(s) + DT_{PT}(s) \\
 DT_{O}(s) &= H_2(s)(H_1(s))^i N_{IN}(s)
 \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned}
 &+ H_2(s) \sum_{n=1}^i (H_1(s))^{i-n} [N_{WC}^{(n)}(s) + N_{PT}^{(n)}(s)] \\
 &+ DT_{WC}(s) + DT_{PT}(s)
 \end{aligned} \tag{5}$$

$DT_{O}(s)$ 는  $i$  개 노드를 거친 동기망의 DOTS1 출력클럭 특성이 되고,  $N_{IN}(s)$ 가 DOTS1이라면  $DT_{O}(s)$ 는  $i$  개 노드를 거친 DOTS2의 출력 클럭잡음이 된다. 여기서 얻어진 DOTS1과 DOTS2의 출력특성을 (3)식의  $N_{IN}(s)$ 에 적용한다면 동기망을 통해 전달되어 온 DOTS1이나 DOTS2의 동기클럭에 의하여 구동되어지는 광전송 망의 각 노드클럭 특성을 알 수 있게 된다.

식 (3), (4)와 식 (5)의 전달특성 모델에 PRC, DOTS와 NE의 클럭잡음이 주어지고 위상변위성분이 반영된다면 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 정상상태를 포함하여 다양한 클럭상태에 따른 광전송 노드별 MTIE와 TDEV 특성을 얻을 수 있고, 또한 이를 통해서 ITU-T 규격을 만족하는 최대 노드수를 구할 수 있다.

### 3.2. 시뮬레이션 조건 및 적용사항

NG-SDH 전송장비가 적용되거나 적용될 수 있는 전송망에서 실제 측정된 클럭잡음은 망설계 시뮬레이션에 아주 유용하게 이용될 수 있다. 이는 클럭특성 시뮬레이션<sup>18)</sup>을 수행할 때 실제 측정 클럭잡음을 적용하면 클럭잡음 관점에서의 전송망의 최대노드수를 정확히 산출할 수 있기 때문이다. 실제 측정 클럭잡음을 이용해서 클럭특성 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 측정 클럭잡음으로 만든 PRC, DOTS, NE의 원더생성 모델이 필요하다. 따라서 측정 클럭잡음을 이용하며 만든 원더생성을 그림 7에 나타내었다. 그림 7(a)는 최초 동기소스인 PRC의 클럭잡음 특성이며, G.811 MTIE와 TDEV규격(실선), 측정 클럭잡음(o)과 측정 잡음을 이용하여 만든 원더생성(x)이 나타나 있다. 그림 7(a)에서 만들어진 원더생성 모델은 측정 잡음과 다소 차이가 있다. 이는 워낙 측정 잡음수치가 작기 때문에 일치하는 모델 생성에 힘들고, 또한 작은 수치로 인하여 MTIE와 TDEV 특성을 동시에 만족하는 모델을 만들기가 어렵기 때문이다. 이에 따라 기준을 MTIE로 하고 이 기준으로 원더생성 시뮬레이션을 다수 수행하여 가장 근접한 특성을 원더생성 모델로 설정하였다.

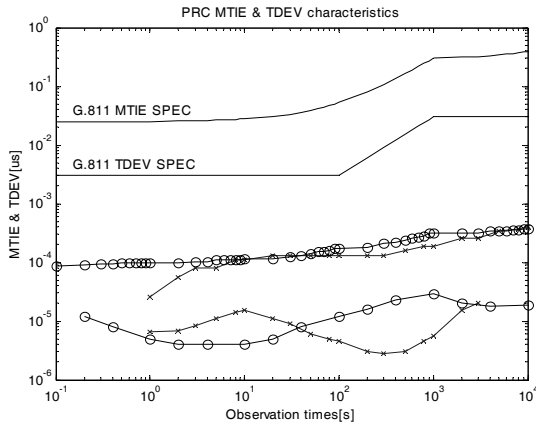


그림 5. PRC의 클럭잡음특성  
Fig. 5. Characteristics of Clock noise for PRC.

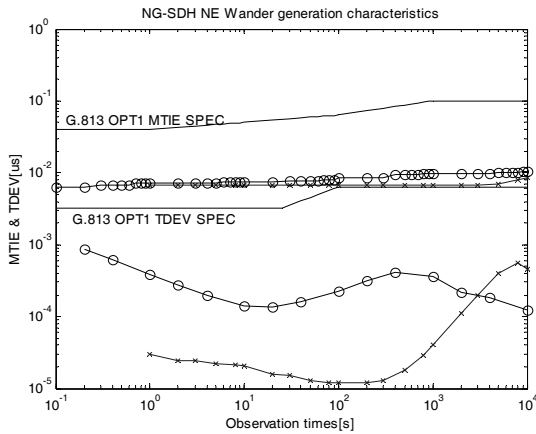


그림 6. NE의 원더특성  
Fig. 6. Characteristics of wander for NE.

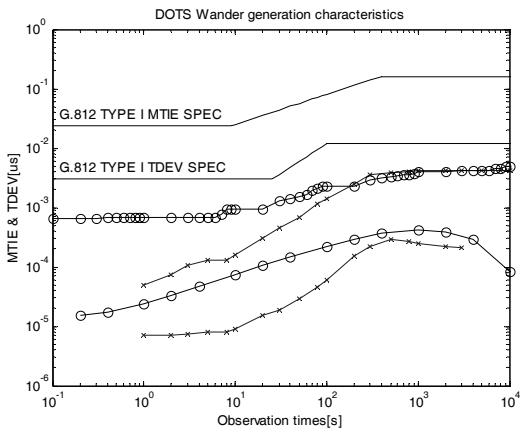


그림 7. DOTS의 원더특성  
Fig. 7. Wander generation of DOTS.

DOTS의 원더생성 모델은 그림 7(b)에 나타나 있고 G.812 규격(실선)과 측정 클럭잡음(o) 및 측정 잡음을 이용하여 만든 원더생성(x)을 볼 수 있다. NE의 원더생성 모델은 그림 7(c)에 나타나 있다. 이 결과를 통해 볼 때 실제 측정된 PRC, DOTS와 NE의 자체 클럭잡음은 ITU-T 클럭규격<sup>[3-5]</sup>에 훨씬 못 미치는 매우 좋은 클럭특성을 가지고 있음을 볼 수 있다.

클럭특성 시뮬레이션에 적용되는 노드수는 NE 망에 따라 각각 다른 노드수  $i, j$  및  $k$ 로 적용된다. 만일 PRC(혹은 KRF)를 동기소스로 하는 선형 광전송망(NE1)이 있다면 선형전송망의 노드수가  $i$ 가 된다. 선형 광전송망이 DOTS1에서 오는 동기소스를 사용할 경우(NE2)에는 PRC에서 DOTS1까지의 노드수가  $i$ 가 되고, 선형전송망의 노드수는  $j$ 가 된다. DOTS2를 동기소스로 하는 선형 광전송망(NE3)은 PRC에서 DOTS1까지의 노드수가  $i$ , DOTS1에서 DOTS2까지의 노드수가  $j$ , DOTS2 클럭을 동기소스로 하여 구성된 선형 광전송망의 노드수가  $k$ 로 적용된다. 클럭 상태는 우선 정상상태만을 고려하였고, 차단주파수는 DOTS를 0.1Hz, NE를 1Hz로 사용하였다.

지금까지 살펴본 원더생성과 노드수, 그리고 클럭 상태 및 차단주파수를 이용하여 최악의 클럭성능이 나타날 수 있는 선형 광전송망에 적용하여 시뮬레이션을 수행하고, 시뮬레이션 결과로 얻어진 망노드의 MTIE와 TDEV 특성을 NE특성규격 (여기서는 실제 망의 NE 특성을 사용한다)과 비교하면 규격 만족하는 망 최대 노드수 결과를 얻을 수 있다.

본 논문에서 NE 모델 생성을 위한 동기클럭 데이터 (MTIE, TDEV)는 다음과 같이 확보하였다. KRF(표준과학연구원) G.811 자체의 MTIE와 TDEV 측정 자료는 수신중속 동기항목과 유사하게 측정된 것으로 보고 KT 등 국사에서 사용하는 방식과 같은 운용방법으로 측정한 결과 수신중속동기항목과 유사하게 측정되었다. 독립동기 항목은 GPS를 기준클럭 소스로 DOTS를 운영했을 때 측정한 결과를 이용하였다. 수신중속 동기항목은 세습 10MHz → E1 발생계측기 → DOTS E1 출력 등의 신호 순으로 측정하고 세습 10MHz 기준으로 DOTS E1 출력을 비교 측정하였다. KRF에서는 세습에서 출력되는 10MHz를 기준으로 기준클럭을 생성하기에 유사할 것으로 보인다. 원더는 ITU-T G.813 규격 내에서 NE 모델에서 생성된다. STM-1급 장비와 SDH 기가급의 클럭 및 규격 성능은 동일하므로 NG-SDH 장비대신 STM-1급 장비의 클럭성능을 이용하였다.

노드가 증가하면 각 NE 노드에서 발생한 노이즈

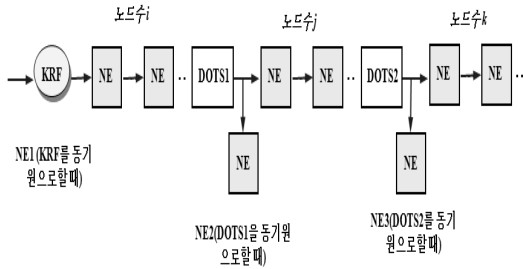


그림 9. 국내의 동기클럭 분배망 구조  
 그림 9. Configuration of Distribution Network for Local Synch. clock

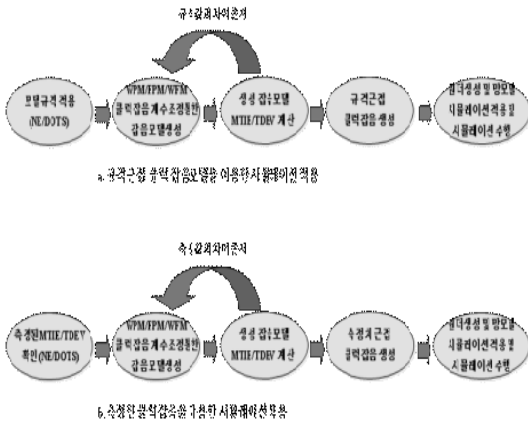


그림 10. NE의 원더특성  
 그림 10. Wander Characteristics for NE

가 누적되므로 증가하는 노이즈 한계를 제한하기 위해 ITU-T(G.803 8.2.4, G.813 Appendix II) 규격에서는 NE 노드수를 20개 이하로 제한하고 중간에 연결되는 DOTS 수도 10개 이하로 제한하고 있다.

그림 9에 국내의 동기클럭 분배망 구조를 나타내었다. 국내의 동기클럭 분배망은 한국표준과학연구원의 KRF(Korea Reference Frequency)를 중심으로 총괄국의 동기클럭 공급장치 (DOTS 1), 중심국의 동기클럭 공급장치(DOTS 2)와 하위인 단국의 동기클럭 공급장치 등 세개의 계위로 구성되며 모든 전송망은 KRF를 기준으로 하는 클럭으로 망동기가 이루어 진다. qhs 시뮬레이션에서는 KRF를 동기소스로 할 때를 NE1, DOTS1을 동기소스로 할 때를 NE2, DOTS2를 동기소스로 할 때를 NE3라 한다.

그림 3-10에 규격에 근접하는 클럭잡음 모델을 이용한 시뮬레이션 적용과정과 측정된 클럭잡음을 이용한 시뮬레이션 적용과정을 상호 비교한 성능분석 시뮬레이션 모델링 과정을 제시하였다.

### 3.3. 광전송 망 동기 클럭특성 시뮬레이션 결과분석

본 논문에서는 실제 측정된 클럭잡음(STM-1 155M급 장비)을 이용하여 만든 원더생성 모델을 NG-SDH 광전송망에 적용시켜 망노드 클럭상태가 정상상태일 때의 클럭특성 시뮬레이션을 수행하였다. 본 시뮬레이션은 네트워크에서 측정된 클럭 잡음을 사용한 관계로 ITU-T규격치보다 클럭성능이 훨씬 좋게 나타났다. 따라서 이런 클럭잡음을 모델로 만들어 최대 노드수를 구한 것이 여기 제시한 결과이다. 이번 결과로 보면 현재 운용망의 클럭 잡음 성능이 우수하다는 것을 볼 수 있다. 기존의 관련 연구보고서 들은 클럭모델을 규격치에 가깝게 만들어서 시뮬레이션한 것이지만 이것은 ITU-T 규격치에 가까운 것이기 때문에 망에서는 최소의 망노드 수를 의미한다고 볼 수 있다. 정상상태 하에서의 시뮬레이션 결과이나 아마도 위상변위상태에서도 시뮬레이션을 해보면 기존의 결과보다 규격 만족하는 노드수가 증가할 것으로 예측 된다. 시뮬레이션은 NE1, NE2 및 NE3 별로 수행하였다. 먼저 NE1에서의 시뮬레이션 결과는 그림 11에 나타내었다. 그림 11은 PRC를 동기소스로 사용하는 NE1에서  $i$ 가 40, 80, 99일 때의 노드클럭 MTIE와 TDEV 특성이다. 그림 11의 결과에서 볼 때  $i$ 가 99가 되더라도 모든 관측 시간에서 얻어진 MTIE와 TDEV 값은 G.813의 MTIE 출력 규격에는 크게 못 미치는 것을 볼 수 있다. 그러나 NE1 노드수가 증가함에 따라 클럭잡음이 누적되고 있지만 NE에 적용된 원더생성 값 자체가 작기 때문에 누적되는 성분 또한 작음을 볼 수 있다.

NE2에 대한 시뮬레이션 결과는 그림 12에 나타내었다. NE2는 DOTS1을 동기소스로 하는 전송망이기 때문에 동기소스 공급을 위한 PRC에서 DOTS1까지의 노드수인  $i$ 와 전송망의 노드수인  $j$ 가 적용된다. 두 가지의 노드수로 나타날 수 있는 경우가 다양하게 적용시킬 수 있지만 본 논문에서는  $i$ 와  $j$ 를 각각 20, 40, 80일 때로 제한하여 시뮬레이션 결과를 얻었다. 우선  $i$ 가 20일 때의 시뮬레이션 결과는 그림 12(a)에 나타내었다. 그림 12(a)는  $j$ 가 20, 40과 80일 때 노드클럭의 MTIE와 TDEV 특성을 나타낸 것으로 MTIE와 TDEV 특성 모두 G.813의 규격을 만족하고 있음을 알 수 있다. 그림 12(b)는  $i$ 가 40이고  $j$ 가 20, 40과 80일 때의 클럭특성이고, 그림 12(c)는  $i$ 가 80이고  $j$ 가 20, 40과 80일 때의 클럭특성이다. 이들의 결과는 그림 12(a)에서 살펴 본바와 같이 G.813의 MTIE와 TDEV 규격을 모두 만족하고 있음을 알 수 있고, 또한  $i$ 가 증가하면 누



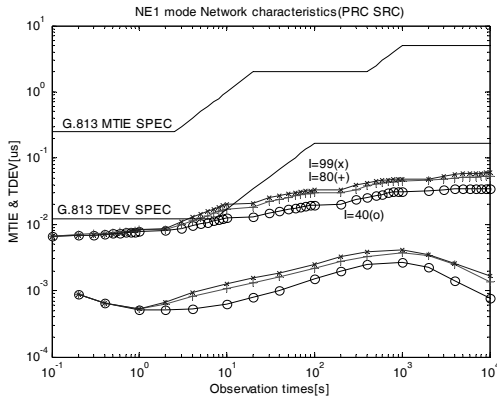
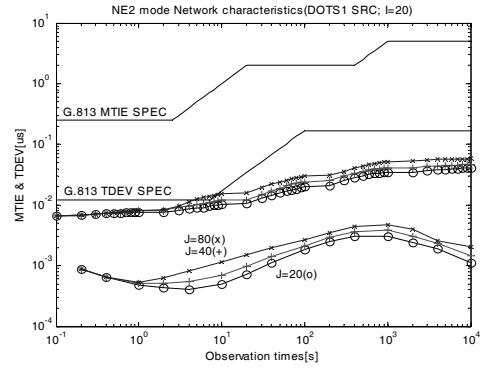


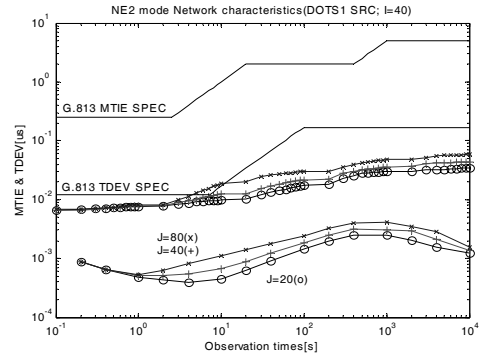
그림 11. NE1 노드클럭 MTIE와 TDEV 특성  
Fig. 11. NE1 Node clock, MTIE and TDEV.

적성분도 증가함을 그림 12(a)에서부터 그림 9(c)까지에서 볼 수 있다. 그림 12(d)는  $i$ 가 80인 NE1 노드 클럭특성(o)과 이를 소스로 받아들여 재동기시킨 DOTS1의 클럭특성(x)과  $i$ 가 80인 DOTS1을 동기소스로 하여  $j$ 가 20일 때의 NE2 노드 클럭특성(+)을 비교한 결과이다. 여기서  $i$ 가 80인 NE1 특성(o)이  $i$ 가 80이고  $j$ 가 20일 때의 NE2 노드 클럭특성(+) 보다 오히려 좋지 않게 나타나고 있는 것을 볼 수 있는데 이는 DOTS를 거치면서 누적잡음이 제거됨에 따라 나타나는 현상임을 알 수 있다.

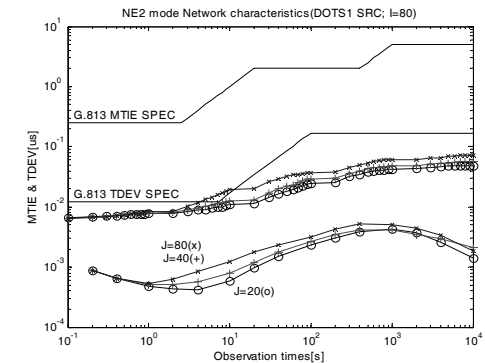
NE3의 클럭 시뮬레이션 결과는 그림 13에 나타내었다. NE3에서는 PRC에서 DOTS1까지의 노드수인  $i$ 와 DOTS1에서 DOTS2까지의 노드수인  $j$ , 그리고 DOTS2를 동기소스로 하는 전송망의 노드수인  $k$ 가 적용된다. 세 가지의 노드수가 적용됨에 따라 나타날 수 있는 경우의 수가 많지만  $i, j$ 를 20, 40, 80일 때  $k$ 가 20, 40, 80일 때로 제한하여 시뮬레이션 결과를 얻었다. 먼저  $i, j$ 가 20일 때의 시뮬레이션 결과는 그림 13(a)에 나타나 있다. 그림 13(a)는 DOTS2 동기소스를 사용하였을 경우  $k$ 가 20, 40과 80일 때의 MTIE와 TDEV 클럭특성을 나타낸 것이다. 여기서도 MTIE와 TDEV 특성은 모든 관측시간에서 G.813의 출력규격을 크게 만족하는 범위에 있음을 볼 수 있다.  $i, j$ 가 40일 때와  $i, j$ 가 80일 때의 시뮬레이션 결과는 그림 13(b)와 그림 13(c)에 나타내었다. 여기에서도 NE2에서 살펴 본 바와 같이  $i, j$ 가 증가하면 누적성분도 조금씩 증가함을 볼 수 있다. 다만 누적되는 성분이 크지 않은 것은 실제 측정 클럭성능이 좋아 NE 원더생성 모델의 값이 작기 때문인 것으로 판단된다.



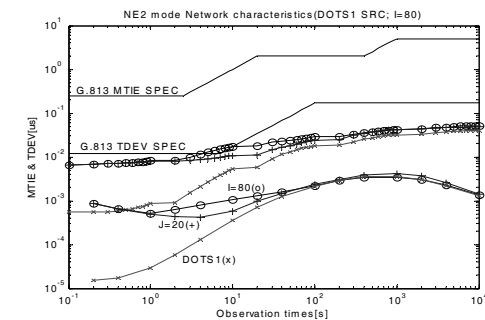
(a)  $i = 20$



(b)  $i = 40$



(c)  $i = 80$



(d) DOTS1 source

그림 12. NE2 노드클럭 MTIE와 TDEV 특성  
Fig. 12. NE2 Node clock, MTIE and TDEV.

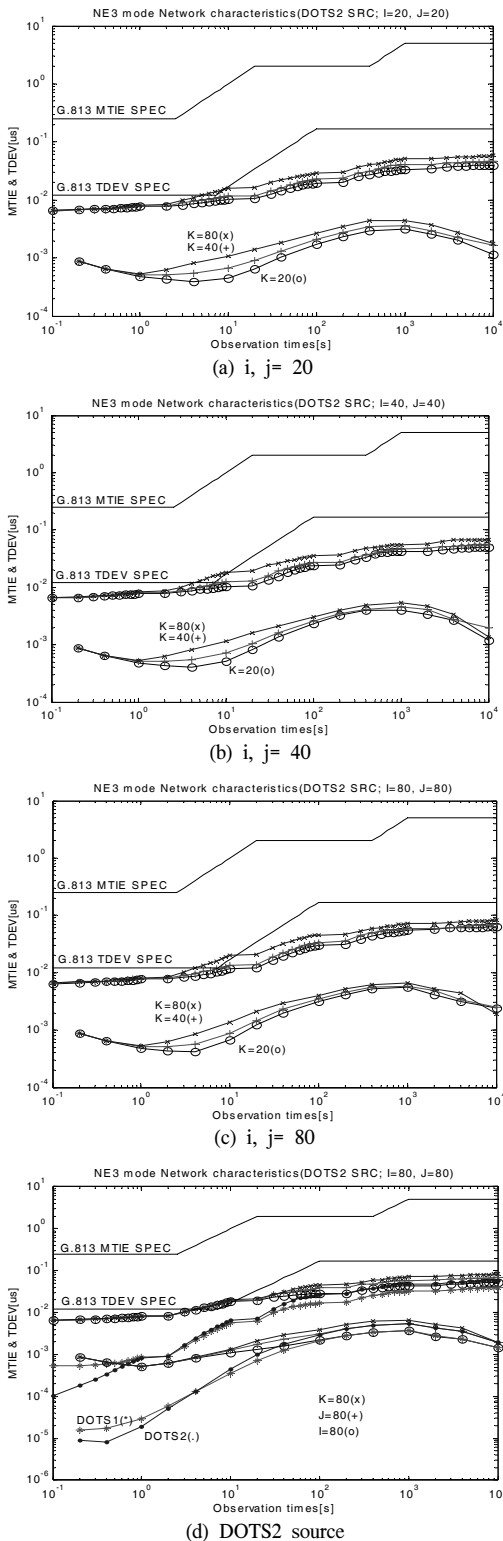


그림 13. NE3 노드클럭 MTIE와 TDEV 특성  
Fig. 13. NE3 Node clock, MTIE and TDEV.

그림 13(d)는  $i$ 가 80인 NE1 노드 클럭특성(o),  $i, j$ 가 80인 NE2 노드 클럭특성(x),  $i, j, k$ 가 80인 NE3 노드 클럭특성(x)과 그리고  $i$ 가 80인 소스로 받아들여 재동기시킨 DOTS1의 클럭특성(\*), DOTS1에서 나온 동기클럭을  $j$ 가 80인 노드를 통과하여 재동기시킨 DOTS2의 클럭특성(.) 등을 비교한 결과이다. 여기서  $i, j, k$  전체 노드수가 많이 증가하더라도 DOTS를 거치게 되면 클럭잡음이 감소되기 때문에 NE1, NE2 및 NE3의 경우에 대한 클럭잡음 특성이 크게 증가하지 않음을 볼 수 있다. 그리고 DOTS2 클럭특성은 DOTS1 클럭 특성보다 관측시간 4초 이상에서 MTIE와 TDEV가 증가함을 볼 수 있어서 잡음이 누적됨을 알 수 있다.

본 논문에서 수행한 정상상태일 때의 클럭특성 시뮬레이션 결과를 종합해보면  $i, j, k$ 가 80인 NE1, NE2 및 NE3에서 G.813 클럭특성 규격을 모두 만족하고 있음을 알 수 있고, 특성 값이 규격치보다 훨씬 좋아서 노드수를 더 증가하더라도 G.813 규격을 만족할 것으로 예측된다. 다만 80 개의 노드수도 현실적으로 실현하지 않은 노드수이기 때문에 더 이상의 노드수 증가는 의미를 부여할 수 없는 경우이다.

#### IV. 결론

광전송망을 설계할 때 고려해야 할 주요 파라미터 중의 하나는 클럭잡음이다. 전송노드와 DOTS의 실제 측정된 클럭잡음 데이터를 이용하면 망구성에 따른 누적 클럭잡음과 이에 따르는 망구성 가능한 최대노드 수준을 도출할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 광전송 시스템이 적용되거나 적용될 수 있는 전송망에서 실제 측정된 클럭잡음 데이터를 이용하여 원더생성 모델<sup>[8]</sup>을 만들었고, 이를 활용하여 정상상태 클럭을 가진 망에서의 클럭특성 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과, NE1, NE2 및 NE3에서 노드수  $i, j, k$ 를 80 개로 사용하더라도 ITU-T G.813 클럭특성 규격을 크게 만족하는 범위에 있음을 알 수 있고, 원더생성 특성이 좋은 DOTS가 누적된 잡음을 제거함으로써 NE2 또는 NE3으로 망노드 수가 증가하더라도 누적되는 클럭잡음의 증가가 크게 나타나지 않았다. 따라서 광전송망에서 정상상태 동기클럭에 미치는 원더잡음 성분의 영향을 알 수 있다.

본 논문의 선행연구를 통하여 DOTS에서 생성되는 원더잡음은 무시해도 좋을 정도로 적은 영향을 미치는 것을 미리 제시하였다<sup>[9]</sup>. 따라서 광전송망 설계할 때 정상상태만을 고려한다면 망구성에 따른

