

# 동기식 선형망에서의 망동기 클럭특성 분석에 관한 연구

正會員 李 昌 基\*, 洪 再 根\*\*

## A Study on the Analysis of the Characteristics of Synchronization Clock in the SDH Based Linear Network

Chang Ki Lee\*, Jae Keun Hong\*\* *Regular Members*

### 요 약

동기식 전송망과 장치를 설계할 때 고려해야 할 중요사항은 최대 노드수와 노드의 클럭특성이다. 이를 위해서는 클럭상태가 정상상태일 때 뿐 아니라 단기위상순시변위, 그리고 장기위상변위 등에 관한 클럭특성 연구가 필요하다. 따라서 본 논문에서는 국내 동기클럭 분배망의 구성을 바탕으로 최근 확정된 ITU-T 및 ANSI의 클럭규격을 적용하여 동기식 선형망에서 정상상태와 위상변위상태일 때의 망구성에 따른 MTIE 및 TDEV특성을 살펴보고, ITU-T와 ANSI규격을 동시에 만족하는 최대 노드수를 제시하였다. 또한 본 논문에서 얻은 결과를 AT&T의 것과 비교 분석하였다.

### ABSTRACT

The important articles we must consider in SDH network and system design are the number of maximum nodes and clock characteristics of each node. In order to get these, the study of characteristics about some clock states, such as normal state and phase transient state, on the standard specifications is required. In this paper, we presented MTIE and TDEV characteristics with ITU-T & ANSI standard specifications in some clock states of the SDH linear network, and proposed the number of maximum nodes satisfying above two standards. Also our results are compared with AT&T's.

### I. 서 론

동기식 전송망(synchronous digital hierarchy net-

works)의 망동기는 최초의 동기원인 PRC(primary reference clock)를 근원으로 하고 동기클럭 공급장치 레벨인 ITU-T의 G.812와 미국 ANSI의 BITS(building integrated timing supply)에서 공급되는 동기클럭에 의해서 실현된다. 국내에서도 이와 동일한 구성으로 KRF (Korea reference frequency)를 소스로 하고, DOTS<sup>III</sup> (digital office timing supply)의 동기클럭을 동기식 전

\* 한국전자통신연구원 전송방식연구실

\*\* 경북대학교 전자전기공학부

論文番號: 97196-0610

接受日字: 1997年 6月 10日

송장치에 제공하여 모든 클럭을 동기시키게 된다. 또한 DOTS의 동기클럭을 제공받을 수 없는 동기식 전송장치는 상대국에서 오는 신호신호에서 추출된 클럭을 동기원으로 사용할 수 있다. 여기서 망동기 클럭의 특성변화는 동기원에 변위가 발생하거나 신호손실 또는 성능저하 등의 요인에 의해서 갑작스럽게 위상천이가 일어날 때 발생할 수 있다. 이와 같은 특성변화가 일어나면 장치 내에서 예기치 않은 포인터 조정이 발생하고, 이는 전송망의 성능을 악화시키는 요인으로 작용하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 포인터 조정이 발생할 때 나타나는 지터성분을 최소화시켜 주거나 전송망에서 수용할 수 있는 클럭특성 규격을 보완하여 망이나 장치설계에 이를 적극 반영하는 것이다. 클럭특성 규격에서 ITU-T는 동기식 전송장치의 클럭규격인 G.813<sup>[6]</sup>의 제정을 필두로 하여 동기식 전송기술이 도입되기 전의 PRC 클럭규격인 G.811<sup>[4]</sup>과 그리고 G.812<sup>[5]</sup>를 96년도 말에 수정하여 잠정안을 확정 한 바 있고, 미국에서도 관련규격<sup>[1][11]</sup>을 제정 및 개정하였다.

동기식 전송망과 장치를 설계할 때 고려해야 할 중요사항은 최대 노드수와 노드의 클럭특성이다. 이를 위해서는 클럭상태가 정상상태일 때와 동기원 장애에 의한 절체시 발생할 수 있는 단기위상순시변위(phase transient), 그리고 홀드오버(holdover) 등의 장기위상변위 등의 클럭특성 연구가 요구된다. 클럭특성에 관한 연구는 클럭노이즈<sup>[10][11]</sup>와 측정방법<sup>[9]</sup>에 관하여 활발히 진행되었다. 망측면을 고려한 연구는 AT&T<sup>[12]</sup>(현 Lucent Technology)에서 수행하였는데 이는 BITS를 소스로 하고, 16개의 노드를 사용하였을 때 MTIE(maximum time interval error)와 TDEV(time deviation)의 특성을 제시한 바 있다. 그러나 이는 16개 노드까지만 수행하였기 때문에 최대 노드수를 제시하지 못했고, 또한 전송망에서의 위상순시변위에 대한 연구가 이루어지지 않았다. 그 이외의 망측면을 고려한 연구는 수행되었거나 혹은 수행되고 있는 것으로 예상되지만 아직 연구결과를 공개하지 않고 있다. 한편 국내에서는 1995년에 장치지터를 고려하기 위한 클럭노이즈 생성에 관한 연구<sup>[13]</sup>가 수행되었지만 클럭규격과 망측면에서의 연구가 이루어지지 않았다. 또한 위상변위가 발생하지 않는 상태에서의 망 노드수에 따른 클럭특성<sup>[14][15]</sup>을 제시한 바 있지만 PRC의

TDEV와 DOTS에 대한 MTIE 및 TDEV 규격 등의 국제규격이 제대로 갖추어지지 않은 상태에서 수행되어 왔고, 또한 홀드오버등의 위상순시변위 상태에 대한 연구가 제대로 수행되지 않았다.

따라서 본 논문에서는 동기식 선형망에서 국내 동기클럭 분배망의 구성을 바탕으로 최근 확정된 ITU-T 및 ANSI의 클럭규격을 적용하여 정상상태와 위상변위상태일 때의 망구성에 따른 MTIE 및 TDEV특성을 살펴보고, ITU-T와 ANSI규격을 동시에 만족하는 최대 노드수를 제시하였다. 또한 본 논문에서 얻은 결과를 AT&T와 비교 분석하였다. 아울러 정상상태와 단기위상변위일 때의 PJC발생횟수와 형태를 알아보았다.

본 논문의 구성은 2장에서 클럭모델과 클럭노이즈 생성방법을 기술하고, 3장에서는 클럭특성에 관한 국제규격을 살펴봄, 4장에서는 실제 국내 동기망클럭의 분배를 바탕으로 한 망동기클럭의 적용모델 및 방법을 기술한다. 그리고 5장에서는 4장의 모델과 적용방법에 따라 시뮬레이션을 수행하며, 또한 그 결과를 분석하고 6장의 결론으로 맺는다.

## II. 클럭모델

### 1. 클럭신호의 수학적 모델

전송망을 포함한 통신망에서 사용되고 있는 클럭신호는 일반적으로 데이터신호를 생성하고, 또한 전송하는데 사용된다. 이러한 클럭신호를 수학적으로 분석하기 위하여 아래 식과 같이 주기적인 시간함수인  $s(t)$ 로 정의할 수 있다.<sup>[2][3]</sup>

$$s(t) = A \sin [\Phi(t)] \tag{1}$$

여기서  $A$ 는 진폭이고,  $\Phi(t)$ 는 전체위상의 순시치를 나타내고 있다. (1)식의  $\Phi(t)$ 는 이상적인 클럭신호일 경우로 가정한다면  $2\pi f_0 t$ 로 쓸 수 있지만 실제 클럭신호는 이상적이지 않는 여러 형태의 성분들이 함께 포함하고 있어 아래 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\Phi(t) = \Phi_0 + 2\pi f_0(1 + y_0)t + \pi D f_0 t^2 + \varphi(t) \tag{2}$$

여기서,  $f_0$ 는 nominal 주파수,  $\Phi_0$ 는 초기 위상 값,  $y_0$ 는 nominal 주파수의 fractional 주파수 옵셋,  $D$

는 주파수 드리프트율이며,  $\varphi(t)$ 는 랜덤 위상편차를 나타낸다. 클럭의 특성변화는 이상적인 클럭신호에서 실제의 클럭신호간의 시간적인 편차를 나타낼 수 있다. 클럭의 시간함수  $T(t)$ 는  $\Phi(t)$ 를 기준 주파수로 나눈 값으로 정의할 수 있고, 주어진 클럭의 시간함수  $T(t)$ 와 이상적인 시간함수  $T_{ref}(t)$ 사이의 시간편차  $x(t)$ 는 아래 식과 같이 쓸 수 있다.<sup>[13]</sup>

$$x(t) = T(t) - T_{ref}(t) = x_0 + y_0 t + \frac{D}{2} t^2 + \frac{\varphi(t)}{2\pi f_0} \quad (3)$$

여기서  $x_0$ 는 초기 시간편차 오프셋이며,  $T_{ref}(t)$ 에 관련된 퇴화성분들은 무시한다. 그리고 정규화된 주파수 편차  $y(t)$ 는 시간편차 함수를 미분함으로써 얻을 수 있다. 지금까지 살펴본 수식 중에서 (3)식은 동기망이나 전송망의 클럭 특성변화 측정에 직접 이용할 수 있다. 다만  $y_0$ 와  $D$ 는 규정될 수 있는 성분이지만  $\varphi(t)$ 는 랜덤한 위상 노이즈 성분이다. 따라서  $\varphi(t)$ 에 대한  $y(t)$ 의 전력밀도함수  $S_y(f)$ 는 power-law model 형태로 정의할 수 있다.<sup>[12]</sup>

$$S_y(f) = \sum_{\alpha=-2}^2 h_{\alpha} f^{\alpha} = h_{-2} f^{-2} + h_{-1} f^{-1} + h_0 f^0 + h_1 f^1 + h_2 f^2 \quad (4)$$

(4)식에서 노이즈 성분은 백색 위상 잡음(WPM;  $f^2$  항), 플리커 위상 잡음(FPM;  $f^1$  항), 백색 주파수잡음(WFM;  $f^0$  항), 플리커 주파수 잡음(FFM;  $f^{-1}$  항)과 랜덤워크 주파수 잡음(RWFM;  $f^{-2}$  항) 등이 포함되어 있고, 이 중 WPM, FPM과 WFM 성분이 주로 클럭특성에 영향을 미치게 된다.

### 2. 클럭노이즈 생성

클럭특성에 영향을 주는 3가지의 랜덤한 클럭노이즈의 생성은 기본적으로 정규확률분포를 가지는 백색잡음을 이용한다.<sup>[13][14]</sup> WPM은 백색잡음으로 직접 생성하고, WFM은 생성된 WPM의 적분으로 얻을 수 있다. 또한 클럭 노이즈의 생성에서 가장 복잡한 FPM은 백색잡음을 입력으로 하여 다단 연결된 R-C 위상 지연회로에 의해서 생성된다. 여기서 아날로그 필터를 디지털 필터로 전환할 때 양산형변환 알고리즘을 사용하면 개선된 주파수특성을 얻을 수 있다.<sup>[14]</sup> 이의 전달함수는 다음 식과 같고, 디지털 필

터의 차분방정식을 얻은 후 다단 접속을 통해 FPM을 얻는다.

$$H(z) = \frac{\left[1 + \frac{1}{\sqrt{a}} \cot\left(\frac{\omega_m}{2}\right)\right] + \left[1 - \frac{1}{\sqrt{a}} \cot\left(\frac{\omega_m}{2}\right)\right] z^{-1}}{\left[1 + \sqrt{a} \cot\left(\frac{\omega_m}{2}\right)\right] + \left[1 - \sqrt{a} \cot\left(\frac{\omega_m}{2}\right)\right] z^{-1}} \quad (5)$$

## III. 동기클럭 특성 및 규격

### 1. 동기클럭의 분배

동기식 전송망에 공급되는 동기클럭은 그림 1과 같이 KRF를 중심으로 총괄국(DOTS1), 중심국(DOTS2)과 하위의 단국 등 3계위로 구성된 동기클럭 분배망을 통해 공급받는다. KRF에서 제공되는 동기클럭은 전송망을 통해 총괄국에 입력되어 DOTS1을 동기시키고, DOTS1의 출력 동기클럭은 중심국의 DOTS2와 총괄국 계위의 동기식 전송망에 제공된다. DOTS2는 총괄국과 동일하게 하위계위의 단국(그림에서는 제외)과 중심국 계위의 전송망에 동기클럭을 제공함으로써 KRF를 기준으로 하여 모든 전송망의 망동기를 실현하게 된다. 그러나 고안정도를 가지고 있는 KRF의 클럭특성은 이와 같은 분배망을 거치는 동안에 NE(network element)와 DOTS의 자체 원더 및 지터 등 여러 요인의 영향을 받음에 따라 전송망의 동기원으로 제공되는 클럭특성은 나빠지게 된다. 이중 지터 성분은 NE나 DOTS의 협대역 PLL에 의해서 어느 정도 흡수할 수 있지만 원더성분은 다단 연결된 노드에 의해 누적되기 때문에 클럭의 안정도에 영향을 주며, 위상변위 상태와 함께 관심 대상이 되고 있다.

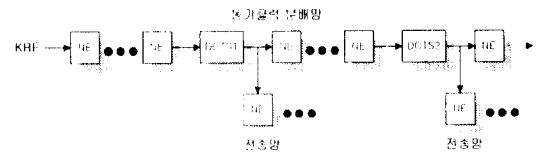


그림 1. 동기 클럭의 분배  
Fig. 1 Synchronization clock distribution

### 2. 클럭특성 파라미터 및 관련규격

ITU-T와 ANSI에서 적용하고 있는 클럭 특성 파라

메터는 MTIE와 TDEV가 있다.<sup>[3][7]</sup> MTIE는 (3)식의 시간편차를 이용하여 임의의 관측시간에서 가장 큰 시간편차와 가장 작은 시간편차간의 차를 나타내는 최대 시간간격 편차를 말하며, 이는 클럭의 장단기적인 특성을 제한할 수 있기 때문에 널리 이용되고 있다. TDEV는 클럭의 안정도를 측정할 때 사용되는 Allan 분산을 개선한 것이며, 클럭신호에 존재하는 잡음형태를 기술기로 구별할 수 있다.

MTIE와 TDEV를 이용한 클럭규격은 크게 적용계층, 적용위치와 클럭상태에 따라 분류된다. 적용계층은 PRC(G.811), DOTS(G.812)와 NE(G.813) 등이 있으며, 적용위치는 장치 입력 및 출력과 장치 내부로 분류된다. 그리고 클럭상태는 정상상태(normal), 단기적인 순시변위 상태와 장기적인 순시변위 상태로 나누어진다. 이와 같은 분류에 의해서 ITU-T와 ANSI는 그림 2와 같이 규정하고 있다.<sup>[4][8]</sup> 그림 2의 (a)와 (b)는 각 계층별 원더에 대한 내부 생성규격(wander generation)인 MTIE와 TDEV를 나타내고 있다. 여기

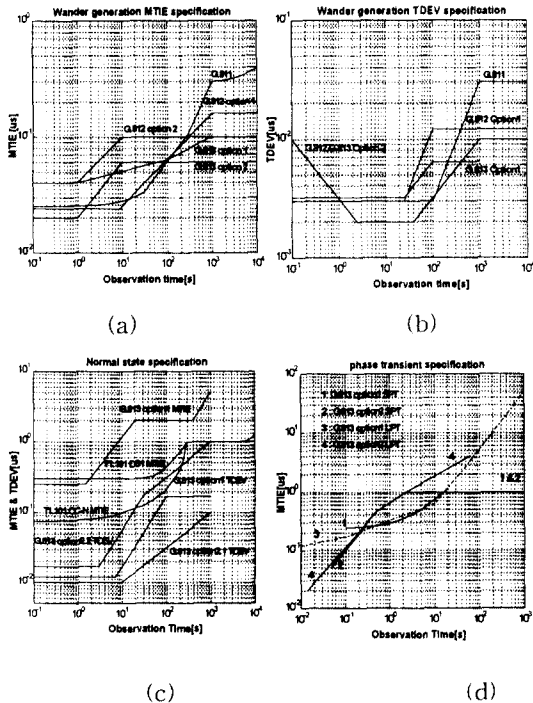


그림 2. 동기클럭 특성규격  
Fig. 2 Characteristic specification of synchronization clock

서 option 1은 2.048Mb/s 계위에 적용되고, 그리고 option 2는 1.544Mb/s 계위에 적용되며, 이는 ANSI 규격과 동일하다. 그림 2(c)는 정상상태일 때 NE 입출력에서의 MTIE 및 TDEV 규격이며, ITU-T에서 규정되지 않은 규격은 ANSI규격을 사용한다. 그림 2(d)는 위상순시변위상태일 때 NE 출력에서의 MTIE 규격이며, SPT는 단기위상순시변위, LPT는 장기위상순시변위를 나타내고 있다. TDEV는 규정된 표준 규격이 정해져 있지 않다.

#### IV. 동기식 선형망에서의 클럭모델 적용

##### 1. 전송망의 구성형태와 클럭 위상변위

동기식 전송망은 그림 3과 같이 일반적으로 PTP (point to point)형, 선형, 환형과 메쉬형으로 이루어진다.<sup>[17]</sup> 여기서 망노드인 동기식 전송장치는 동기클럭 분배망에서 제공되는 외부 동기클럭과 인접노드에서 오는 STM-N신호에서 추출된 수신클럭등을 동기원으로 사용하지만 외부 동기클럭의 제공 유부에 따라 이들을 모두 적용하거나 혹은 수신클럭으로만 적용될 수 있다.

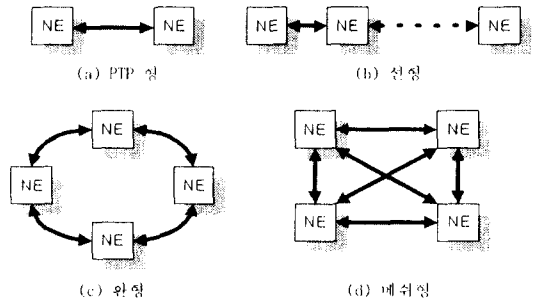


그림 3. 동기식 전송망의 구성 형태  
Fig. 3 SDH transport network topologies

전송장치 클럭은 정상상태, 단기위상변위상태와 장기위상변위상태로 분류된다. 정상상태는 정상적인 동기기능이 수행되는 상태를 말하고, 단기위상변위는 동기원 장애에 의한 절체과정에서 발생하는 15초 이내의 위상변위이며, 장기위상변위는 모든 동기원의 장애로 인해 홀드오버상태가 지속될 때 나타나는 위상변위를 말한다. 정상상태의 MTIE/TDEV 클럭특

성은 동기원의 특성, 윈더 생성과 노드수에 의해 영향을 주며, 이는 (3)식의 클럭노이즈 성분인  $\frac{\rho(t)}{2\pi f_0}$ 에 의해 주로 나타난다. 단기위상변위는 정상상태의 요소와 (3)식의  $x_0$ 와  $y_0$ 로 표현되는 동기원 실상에 따른 위상변위, 그리고 홀드오버 유지시간( $T_h$ ) 등이 영향을 미치게 된다. 여기서  $t$ 는  $t_{pl}$ 를 위상변위 발생시점이 라면  $t_{pl} \leq t \leq t_{pl} + T_h$  범위에서 적용된다. 장기 위상변위는 단기위상변위 요소와 (3)식의 드리프트 성분인  $\frac{D}{2} t^2$  등이 영향을 준다. 이와 같은 사실을 바탕으로 망 구성 형태와 클럭상태를 함께 고려하여 클럭특성을 살펴보면 먼저 PTP형의 클럭특성은 노드에 따른 수직성분이 존재하지 않고, 주로 동기원의 특성에 좌우된다. 메쉬망에서는 망구성 형태상 동기원이 다수의 노드를 통과하지 않기 때문에 클럭상태에 따른 영향은 크지 않고 동기원의 특성에 좌우된다. 선형망에서는 환형망과 함께 전송노드가 직렬형태를 가지면서 다단으로 연결되어 있어 동기원의 특성, 전송노드수와 클럭상태 등이 출력 클럭특성에 영향을 주게 되고, 망 구성 형태 중에서 가장 최악의 출력 클럭특성이 발생할 수 있다. 그러므로 본 논문에서는 가장 열악한 클럭특성이 나타날 수 있고, 동기원 관점에서 여러 가지의 망구성 형태를 포괄적으로 수용하고 있으며, 또한 실제 많이 적용되고 있는 선형망을 고려한다.

2. 선형망에서의 모델 적용

선형망에서의 클럭특성 분석을 위해 고려해야 할 파라미터는 윈더생성, 차단주파수, 망노드수, 클럭상태와 홀드오버 유지시간등이 있다. 본 논문에 적용되는 PRC, DOTS와 NE의 윈더생성은 그림 4와 같이 앞서 살펴본 클럭노이즈 생성방법을 이용하여 ITU-T와 ANSI규격에 가장 근접하게 만족하도록 발생시켰고, AT&T에서 사용한 윈더생성은 규격을 넘어서는 다소 높은 값을 사용하였다.<sup>[6][8]</sup>

망노드수는 동기클럭 분배망과 전송망에 사용되는 노드수를 말하며, 동기클럭 분배망의 노드수는 PRC와 DOTS1 혹은 DOTS1과 DOTS2 사이를 통과하는 NE수이고, 전송망의 노드수는 망을 구성하는 NE수이며, 그리고 차단주파수는 NE와 DOTS에 적용되는 간략화된 모델<sup>[6][8]</sup>에서 적외 통과 필터의 차단주파수를 말하며, ITU-T와 ANSI의 권고 범위 내에 있는 0.1Hz와 1Hz로 사용한다.<sup>[6][8]</sup>

선형망에서 동기원 장애가 발생하면 차순위 동기원으로의 전체가 수행되기 전까지는 홀드오버상태로 유지하고 있는데 이를 홀드오버 유지시간,  $T_h$ 라 한다.  $T_h$ 는 동기원 장애 발생위치에 따라 달라질 수 있고, 정상적인 동기원과 비교할 때 위상변위가 발생할 수 있다.  $T_h$ 의 세부적인 사항은 그림 5를 통해 살펴본다. 그림 5(a)는 K개 노드로 구성된 선형망에서 동기원을 노드 1에서 오는 소스로 하였을 때 각 노드의 동기실현을 보여주고 있다. 이때 반일 그림 5(b)에서와 같이 노드 H-1에서 오는 수직동기원이 상실되면 노드 H는 동기상태 메시지를 이용하여 이 사실을 노드 K까지 전달하고, H부터 K-1까지 노드들은 순차적으

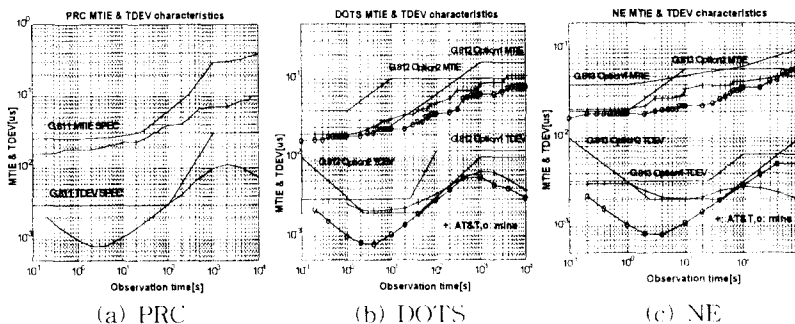


그림 4. 윈더 생성  
Fig. 4 Wander generation

로 홀드오버상태로 진입하여 머물게 되며, 노드  $K$ 의 새로운 동기원이 전파되면 노드  $K$ 에서 노드  $H$ 까지 역순으로 동기원 절체를 수행한다. 여기서 1에서  $H-1$ 까지의 노드들은 정상상태(NOR), 노드  $K$ 는 절체과정에 의한 순간적인 위상변위(PT)만 발생한다. 그리고  $H$ 부터  $K-1$ 까지의 노드들은 홀드오버 상태에서 정상상태(HD→NOR)로 바뀌게 되어 절체에 의한 순간적인 위상변위와 홀드오버를 유지하는 동안의 옴셋성분등 단기위상변위가 발생하게 된다. 여기서 전송 지연시간을 고려하지 않고 각 노드에서의 동기상태 메시지 처리시간을  $T_s$ 라 할 때 노드  $H$ 의  $T_h$ 는 아래 식과 같이 쓸 수 있다.

$$T_h = 2 \cdot T_s \cdot (K - H) \quad (6)$$

여기서  $T_h$ 는 소스 동기원 장애가 발생한 노드  $H$ 에서 가장 큰 값을 가지게 된다. 그리고 선형망에서 장기위상변위는 그림 5(d)와 같이 동기원 소스가 전파될 수 있는 모든 경로가 단절된 노드  $H$ 와 노드  $H+1$ 에서 발생하게 되고, 그림 5(e)와 같이 동기원 소스가 모두 단절되면 모든 노드에서의 장기위상변위가 나타나게 된다. 장기위상변위에서의  $T_h$ 는 적용되지 않는다.

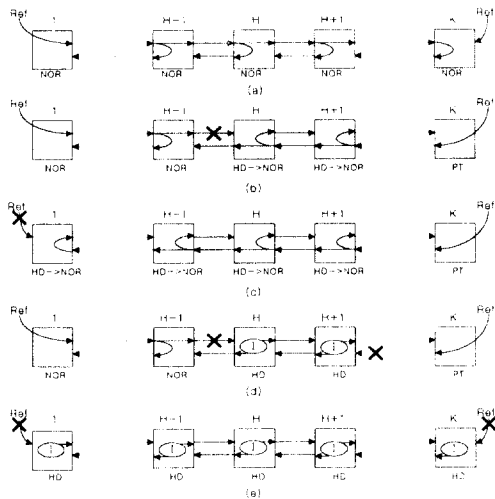


그림 5. 선형망에서의 동기  
Fig. 5 Synchronization in linear SDH network

앞서 살펴 본 내용을 종합하여 망 모델<sup>[8][12][15]</sup>을 적용해 보면 일반적으로  $k$ 번째 노드의 클럭 노이즈 모델은 아래 식과 같이 쓸 수 있다.

$$N_o^{(k)}(s) = H^{(k)}(s) N_o^{(k-1)}(s) + N_{wg}^{(k)}(s) + N_{pt}^{(k)}(s) \quad (7)$$

여기서,  $N_o^{(k)}(s)$ 는  $k$ 번째 노드에서의 출력 클럭 노이즈이고,  $N_o^{(k-1)}(s)$ 는  $k-1$ 번째 노드에서의 출력 클럭 노이즈이며, 이는  $k$ 번째 노드에서의 입력 클럭 노이즈인  $N_{in}^{(k)}(s)$ 와 동일하다.  $H^{(k)}(s)$ 는  $k$ 번째 노드의 저역 통과 필터 전달함수,  $N_{wg}^{(k)}(s)$ 는  $k$ 번째 노드의 윈더생성을 나타낸다. 그리고  $N_{pt}^{(k)}(s)$ 는 위상변위 성분이며, 이는 단기 및 장기위상변위상태가 있을 때만 적용된다. 여기서 모든 NE의 필터 전달함수가  $H_1(s)$ 로 같고, 모든 DOTS의 전달함수는  $H_2(s)$ 로 같다고 가정하고, 또한  $k$ 개 노드로 구성된 선형망이라면 노드 1의 성분에 의한 노드  $k$ 에서의 클럭 노이즈는 다음 식으로 쓸 수 있다.

$$N_o^{(k)}(s) = (H_1(s))^k N_{in}^{(1)}(s) + \sum_{n=1}^k (H_1(s))^{k-n} (N_{wg}^{(n)}(s) + N_{pt}^{(n)}(s)) \quad (8)$$

여기서  $N_o^{(1)}(s)$ 는 동기원의 소스가 되며, DOTS1과 DOTS2가 적용된다. DOTS에 관한 관계식을 구해 보면 DOTS1은  $i$  개의 NE, DOTS2는 DOTS1에서  $j$  개의 NE를 각각 통과한다고 가정할 때 DOTS1과 DOTS2의 클럭 노이즈는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$DT1_o(s) = H_2(s) N_o^{(1)}(s) + DT1_{wg}(s) \quad (9)$$

$$DT1_o^{(j)}(s) = (H_1(s))^j H_2(s) N_o^{(1)}(s) + \sum_{n=1}^j (H_1(s))^{j-n} DT1_{wg}^{(n)}(s)$$

$$DT2_o(s) = H_2(s) DT1_o^{(j)}(s) + DT1_{wg}(s) \quad (10)$$

여기서 (9)식에서  $N_o^{(1)}(s)$ 는 (8)식에서  $k$ 가  $i$ 일 경우이고,  $N_{in}^{(1)}(s)$ 는 PRC 클럭 노이즈가 되며, 동기클럭 분배 망상에서의 위상변위를 고려하지 않기 때문에  $N_{pt}^{(1)}(s)$ 는 제외한다.

지금까지 선형망에서의 클럭 특성 분석을 위해 고려할 수 있는 파라미터인 윈더 생성, 망노드수, 홀드오버 유지시간 등과 실제 선형망에서 나타나는 위상변위를 살펴보았다. 이와 같은 파라미터들을 시뮬레

이선에 적용시켜 클럭 특성을 분석하면 망 설계시 요구되는 최대 노드수를 도출할 수 있다.

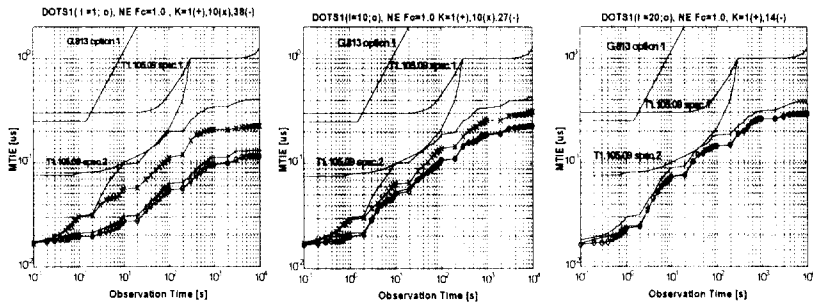
### V. 시뮬레이션 수행 및 결과분석

#### 1. 망 시뮬레이션

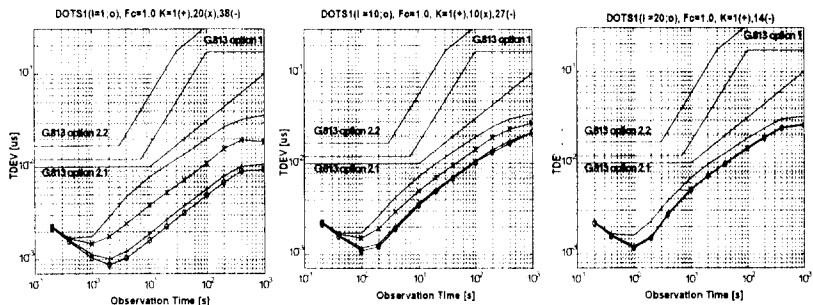
선형망에서의 클럭특성 시뮬레이션은 (8),(9),(10)식에 원더생성, 노드수, 클럭 상태와 홀드오버 유지시간 등을 적용시켜 수행하였다. (8), (9), (10)식에서  $i$ 와  $j$ 는 1, 5, 10, 15, 20을 사용하고, DOTS1( $i$ 적용)과 DOTS2( $i, j$ 적용)의 동기원인 때를 구분해서 수행하였다. 또한 전송망의 노드수인  $k$ 는 1부터 값을 증가시키면서 그림 2의 표준규격을 넘어서기 시작하는 노드수를 얻었다. 시뮬레이션에 적용된  $x_0, y_0$ 와  $D$ 의 값은 각각  $20ns, 50ns/s, 1.16 \times 10^{-6}ns/s^2$ 으로 하였다.<sup>[6]</sup>

DOTS1을 동기원으로 하는 정상상태의 클럭특성은 그림 6에 나타나 있다. 그림 6의 (a), (b)는  $i$ 가 각각 1, 10, 20일 경우의 MTIE와 TDEV특성이다.  $i$ 가 1, 10, 20일 경우에 노드수  $k$ 가 38, 27, 14에서 MTIE 규격을 만족하지 못하는 것을 볼 수 있다. 그렇지만 TDEV는 모두 만족하고 있다. 그리고 그림에는 나타나지 못했지만  $i$ 가 각각 5와 15일 때는  $k$ 가 35와 22일 때 규격을 넘어섰다.

그림 7은 DOTS2를 동기원으로 하는 정상상태의 클럭특성이다. 그림 7(a)에서  $i, j$ 가 각각 1, 10, 20일 때, 선형망 노드수  $k$ 가 34, 16, 1부터 MTIE 표준규격을 만족하지 않으며, 그림 7(b)에서는  $i, j$ 가 20일 때  $k$ 가 20일 때 TDEV규격도 만족하지 못하였다. 그리고  $i, j$ 가 각각 5, 15일 때는  $k$ 가 25, 7에서 MTIE 규격을 넘어섰다.



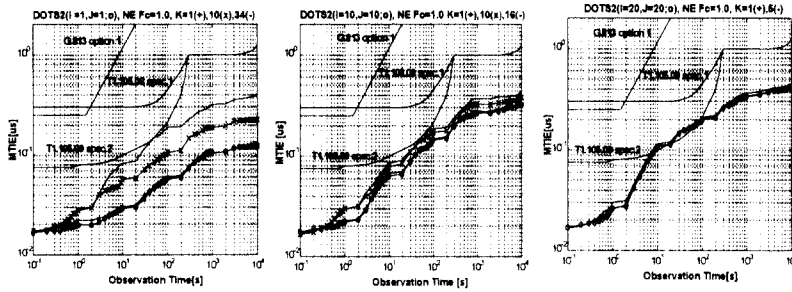
(a)  $i, j$ 가 1, 10, 20일 때의 MTIE 특성



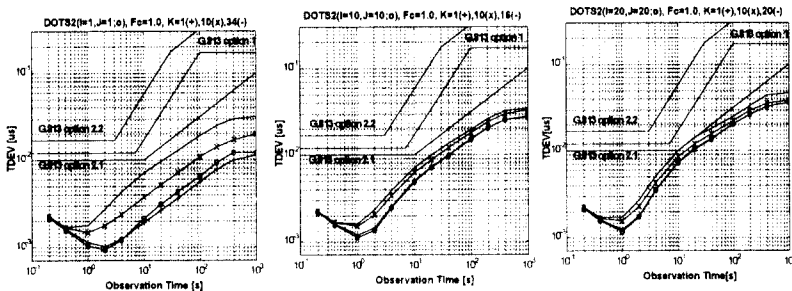
(b)  $i, j$ 가 1, 10, 20일 때의 TDEV 특성

그림 6. DOTS1을 소스로 할 때 정상상태의 클럭 특성

Fig. 6 Clock characteristics with DOTS1 source in normal state



(a)  $i, j$ 가 1, 10, 20일 때의 MTIE 특성



(b)  $i, j$ 가 1, 10, 20일 때의 TDEV 특성

그림 7. DOTS2을 소스로 할 때 정상상태의 클럭 특성

Fig. 7 Clock characteristics with DOTS2 source in normal state

그림 5(b)와 같이  $i, j$ 가 1인 DOTS2의 소스를 사용하고 노드 5의 동기원 단절이 발생하였을 때 노드 1, 5, 10, 20에 대한 클럭특성은 그림 8에 나타나 있다. 노드 1은 정상상태의 특성으로 나타났고, 노드 5, 10과 20은 동기원 절체에 의한 단기위상변위가 발생하였으며, 이 중 노드 5에서 MTIE 특성 값이 가장 크게 나타났지만 표준규격은 만족하고 있다. 또한 TDEV도 역시 노드 5에서 가장 크게 나타났지만 관련규격이 없어 정상상태의 규격과 비교하였다. 그리고 가장 최악의 경우인 그림 5(c)와 같이 모든 노드에 단기위상순시변위가 발생하였을 때 노드 1에서의 클럭특성은 그림 9에 나타나 있다. 그림 9(a)는  $i$ 가 1, 10, 20인 DOTS1 소스일 때의 MTIE특성이며,  $k$ 가 각각 41, 35, 31일 때 노드 1에서 MTIE 단기 위상변위 표준규격을 만족하지 않는 것을 볼 수 있다. 또한  $i, j$ 가 각각 1, 10, 20인 DOTS2는 그림 9(b)에 나타나 있으며,  $k$ 가 39, 33, 30일 때 MTIE 단기 위상변위 규격을 넘

어서고 있다. 또한 그림에는 포함시키지 못했지만  $k$ 가 5, 15일 때는  $k$ 가 37, 33에서, 그리고  $i, j$ 가 5, 15일 때는  $k$ 가 각각 36, 31에서 규격을 넘어섰다.

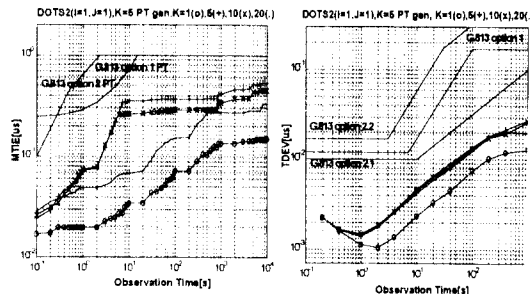
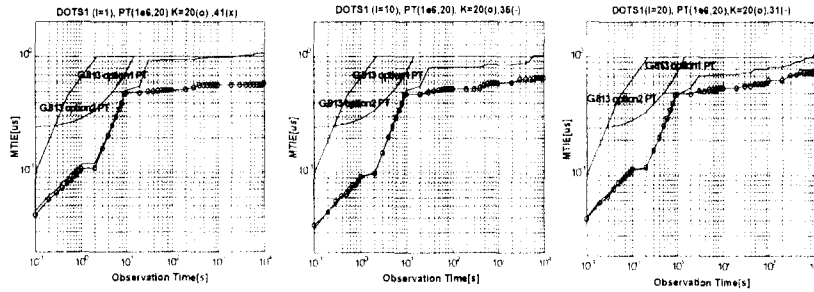
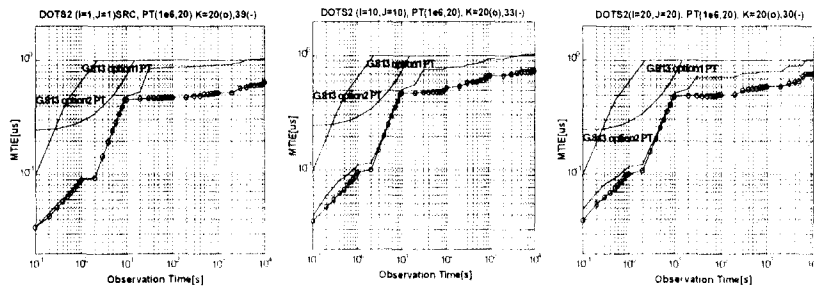


그림 8. 노드 5의 단기 위상 변위 상태에 따른 클럭 특성  
Fig. 8 Clock characteristics in short-term phase transition state of 5th node.





(a)  $i, j$ 가 1, 10, 20인 때의 MTIE 특성



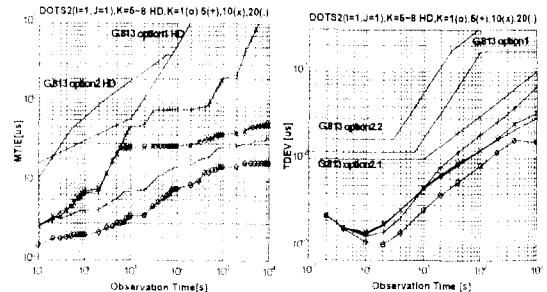
(b)  $i, j$ 가 1, 10, 20인 때의 TDEV 특성

그림 9. 단기 위상변위 상태의 클럭 특성  
Fig. 9 Clock characteristics in short-term phase transient state

장기위상변위에 관한 클럭특성 시뮬레이션 결과는 그림 10에 나타나 있다. 그림 10의 (a)와 (b)는 각각 그림 5(d)경우와 같이 20개의 노드로 구성된 선형망에서 노드 5부터 노드 8까지 홀드오버상태가 발생하였을 때의 MTIE와 TDEV의 클럭특성이다. 노드 5의 MTIE 특성은 급격히 증가하였지만 유각 내의 값이었고, TDEV특성은 다른 노드에 비해 증가하는 것을 볼 수 있다. 그림 10(c)는  $i, j$ 가 1인 DOTS2 소스를 사용하고, 모든 노드가 홀드오버상태일 때의 MTIE 특성이며, 노드에 따른 차이가 거의 없는 것을 보여주고 있다. 그리고 그림 10(d)는 모든 노드가 홀드오버상태이고,  $k$ 가 20인 상태에서  $i, j$ 가 각각 1, 5, 10, 20인 소스에 따른 MTIE 특성이다. 여기서 MTIE 특성도 노드수에 따른 차이는 거의 없다는 것을 알 수 있어 최대 노드수의 도출에는 반영하지 않는다.

$i, j$ 가 5, 10, 20인 DOTS2를 소스로 할 때 클럭상태에 따라 각 노드에서 발생한 PRC 기준의 AU(ad-

ministrative unit) 포인트 조정 발생횟수에 대한 시뮬레이션 결과는 그림 11에 나타나 있다. 그림 11(a)는 정상상태이고, (b)는 노드 5에서의 동기원 상실때 노드별 PJC를 보여주고 있다. 여기서 PJC 수는 정(+), 부(-)의 발생횟수를 합한 값이고, 피라크기는 2바이트로 하였다.



(a) (b)

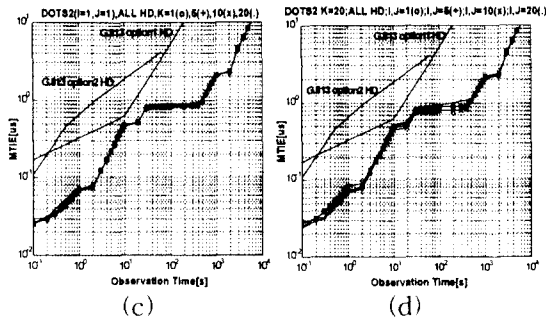


그림 10. 장기 위상변위 상태의 클럭 특성  
Fig. 10 Clock characteristics in long-term phase transient state

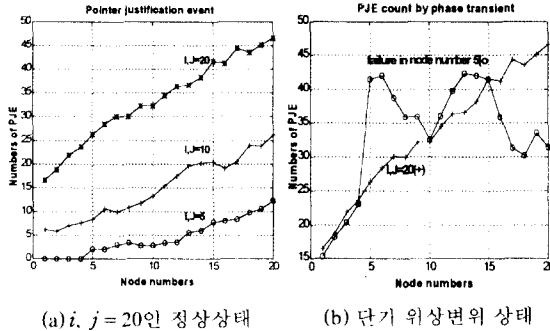


그림 11. 포인터 조정 발생수  
Fig. 11 Pointer justification event count

## 2. 결과 분석

그림 6과 7의 정상상태 클럭특성에서 DOTS1에 비해 DOTS2의 동기원을 사용하거나 동일 동기원에서 노드수의 증가는 누적되는 원더성분에 의하여 규격을 만족하는 노드수를 급격히 감소시키는 것을 볼 수 있다. 그림 8과 9의 단기 위상변위에서는 동기원이 단절된 노드에서 클럭특성이 가장 나쁘게 나타났고, 또한 노드수가 증가할 때 클럭특성에 영향을 받지만 최대 노드수는 완만하게 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 노드수에 따라 누적되는 클럭노이즈 성분이 옅섯성분보다 영향을 작게 미치고, 또한 표준규격의 값에 비해 누적되는 값이 작기 때문에 나타나는 것으로 해석할 수 있다. 그림 10의 장기위상변위상태에서도 노드수에 따른 영향이 거의 나타나지 않았다. 이 역시 홀드오버상태의 드리프트 성분이 클럭노이즈 성분에

비해 우세하게 나타나기 때문이다. 정상상태와 단기 위상변위상태에 따른 모든 규격을 만족하는 최대 노드수는 그림 12에서와 같이 정상상태의 노드수가 되며, 이는  $i$ 가 1, 5, 10, 15, 20일 DOTS1일 때 37, 34, 26, 21, 13이 되고,  $i, j$ 가 1, 5, 10, 15인 DOTS2일 때 33, 24, 15, 6으로 나타나고,  $i, j$ 가 20일 때는 DOTS2 자체가 규격을 만족하지 못한다.

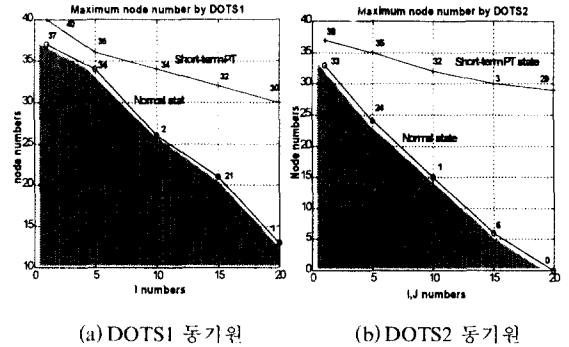


그림 12. 동기원에 따른 적용 가능한 노드수  
Fig. 12 Allowable node number about synchronization sources

PJC는 그림 11에서와 같이 동기클럭 분배망과 선형망의 노드수가 증가하면 발생횟수도 증가하고, 단기 위상변위상태에서는 정상상태와 비교할 때 동기원이 단절된 노드에서 발생횟수가 크게 증가하고, 노드 20에서는 오히려 감소함을 알 수 있다. PJC는 ITU-T에서도 아직 세부적인 이용방안을 제시한 바 없지만 노드별 발생형태를 고려하면 전송망의 클럭상태를 간접적으로 알 수 있을 것으로 예상되어 이와 관련된 연구가 필요할 것으로 생각된다.

$i$ 가 1인 DOTS1을 동기원으로 하고  $k$ 가 10일 때 AT&T의 연구결과<sup>[8][12]</sup>와 비교한 것이 그림 13에 나타나 있다. 그림 13에서 DOTS/BITS 소스특성과  $k$ 가 10인 노드특성을 비교하였다. MTIE는 본 논문에서 적용된 DOTS/NE의 원더성분보다 약간 높은 모델을 적용하였지만 비교적 비슷하게 나타나고 있다. 이는 AT&T에서 고려하지 않은 PRC를 본 논문에서 적용함에 따라 나타난 결과이며, 실제 구성과 동일하게 구성하기 위해서는 동기원의 근원인 PRC의 적용이

필요하다. TDEV결과는 관측시간이 작을 경우에는 큰 차이를, 관측시간이 클 경우는 작은 차이를 보이고 있으며, 이는 NE 원더생성 적용에 따라 나타난 결과이며, NE와 동일한 형태로 나타나고 있다. 여기서 AT&T는 규격치보다 높은 원더생성을 사용하였고, 또한 최대노드수에 대한 결과는 없다. AT&T와의 결과비교를 통해 볼 때 본 논문의 관점인 최대 노드수에 관한 직접적인 비교는 할 수 없지만 시뮬레이션 결과에서 클럭특성의 발생형태에 대한 간접적인 검증은 할 수 있었다.

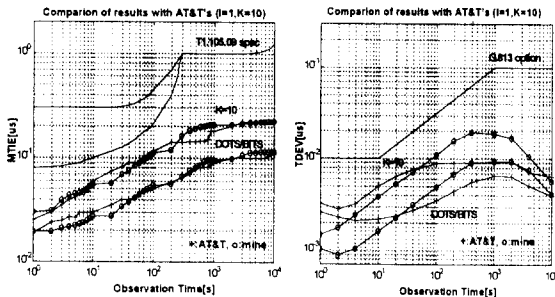


그림 13. AT&T와의 결과 비교  
Fig. 13 Comparison of results with AT&T's

## VI. 결 론

선형망에서 망동기 클럭특성 변화가 갑작스럽게 일어나면 버스트성 PJE가 발생하고, 이는 전송망의 성능을 저하시키는 요인으로 작용할 수 있다. 이에 따른 선진 각국의 연구가 활발히 진행되고 있지만 장치나 망 설계할 때 고려되어야 될 사항인 최대 노드수에 관한 연구결과는 아직 공개하지 않고 있으며, 국내에서의 관련 연구는 거의 진행되지 않고 있다. 본 논문에서는 이러한 관점에서 국내 동기클럭 분배구조를 바탕으로 하고, 여러 가지의 망형태를 복합적으로 반영되어 있는 동기식 선형망에서 3가지의 클럭상태에 따른 클럭특성 연구를 수행하였다. 원더생성과 노드수 및 홀드오버 유지시간 등을 반영하고, 망동기 클럭상태가 정상상태와 단기위상변위가 발생하더라도 ITU-T 국제규격과 ANSI의 미국규격을 모두 만족하는 최대 노드수는 1, 5, 10, 15, 20등의 분배노드가 적용된 DOTS1 소스에 대해서 37, 34, 26, 21, 13개의

노드, 그리고 DOTS2 소스에 대해서는 33, 24, 15, 6, 0개의 노드임을 알았다. 그리고 장기 위상순시변위 상태는 노드수에 따른 영향이 거의 없음을 알 수 있었고, 동기원의 단절이 발생하는 노드에서 위상순시변위와 PJC가 크게 나타난다는 사실을 알았다. 그리고 본 논문의 시뮬레이션 결과는 최대 노드수를 제시하지 않은 AT&T 결과와 직접적인 비교를 할 수 없었지만 간접적인 분석을 통해 검증은 해 보았다.

본 논문에서 얻은 결과는 실제 전송망 설계에 직접 활용될 수 있으며, 또한 전송장치 설계에 사용되는 VCXO의 단기 및 장기 안정도 특성 규격에도 충분히 반영할 수 있어 초고속 전송장치 개발에 도움이 될 것으로 확신한다. 다만 본 논문에서 고려하지 않았던 동기클럭 분배망의 위상 순시변위에 따른 연구와 PJC 발생횟수의 이용방안 연구가 계속되어야 할 것으로 생각된다.

## 〈감사의 글〉

본 논문은 HAN/B과제인 "100Gbps급 WDM 광전송 시스템 개발"을 수행하는 과정에서 작성된 결과의 일부이며, 논문작성에 도움을 주신 이만섭 박사님과 박창수 박사님에게 감사드리며, 그리고 이재환군과 이철군에게 도움에 대한 감사의 마음을 전한다.

## 참 고 문 헌

1. 한국전기통신공사, "디지털 클럭 공급장치(DOTS) 설명서," 1988년.
2. P. Kartachoff, "Computer simulation of the conventional clock model," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 28, no. 3, pp. 193-197, 1979.
3. ITU-T Draft Recommendation G.810, "Definition and terminology for synchronization network," July 1995.
4. ITU-T Draft Recommendation G.811, "Timing characteristics of primary reference clocks," May 1996.
5. ITU-T Draft Recommendation G.812, "Timing requirements of slave clocks suitable for use as node clocks in synchronization networks," Nov. 1996.
6. ITU-T Draft Recommendation G.813, "Timing

