ToP (Timing over Packet)의 효과적인 운용 방안

The study on effective operation of ToP (Timing over Packet)

김 정 훈*, 신 준 효, 홍 진 표
(Jung-Hun Kim, Jun-Hyo Shin and Jin-Pyo Hong)

Abstract : The frequency accuracy and phase alignment is necessary for ensuring the quality of service (QoS) for applications such as voice, real-time video, wireless hand-off, and data over a converged access medium at the telecom network. As telecom networks evolve from circuit to packet switching, proper synchronization algorithm should be meditated for IP networks to achieve performance quality comparable to that of legacy circuit-switched networks. The Time of Packet (ToP) specified in IEEE 1588 is able to synchronize distributed clocks with an accuracy of less than one microsecond in packet networks. But, The ToP can be affected by impairments of a network such as packet delay variation. This paper proposes the efficient method to minimize the expectable delay variation when ToP synchronizes the distributed clocks. The simulation results are presented to demonstrate the improved performance case when the efficient ToP transmit algorithm is applied.

Keywords: Timing, Synchronization, IEEE 1588, ToP, Delay variation

I. 서론

이동 통신 시스템에서 동기화된 네트워크 구성을 위해 높은 주파수 정확도와 낮은 위상 오차가 요구된다. 기 존의 GPS위성을 이용한 방안은 설치에 제약이 있을 뿐 아니라 위성 수신상태에 의존적이다. 이더넷 등 동기화 되지 않은 패킷 네트워크에서 동기용 클럭을 추출 할 수 없는 문제점을 안고 있다. 본 논문은 타이밍 패킷을 활용하여 동기되지 않은 패킷 네트워크에 연결된 각 노드의 주파수 및 위상을 동기 시키는 방법에 관한 것으로서, 클럭 품질의 주요인자인 시간지연 변동(delay variation)을 최소화하는 방안을 제시하며, 특히 네트워크에서 기인하는 예측 가능한 delay variation을 최소화 하는데 그 목적이 있다. 네트워크에서 발생되는 systematic delay variation을 모델링 하여 시뮬레이션을 통해 그 영향도를 평 가하고 제안된 알고리즘의 개선 정도를 예측하였다. 결론적으로, 네트워크에서 기인하는 특정 delay variation 요인은 타이밍 패킷을 송신하는 방식에 따라 효과적인 결과를 얻을 수 있음을 증명하였다. 따라서, 기존의 알고리즘이 ToP Slave에 집중되어 있는데 반하여 보다 정확한 망동기를 위해서 ToP Master의 패킷 전송방법에 있어서 효과적이고 효율적인 고려가 요구된다.

II. Overview of IEEE1588

네트워크의 시각과 주파수를 일치시킴으로써 원격지에서의 정확한 측정 및 제어를 가능하게 할 수 있을 뿐 아니라, 통신 장비에 있어서는 이동성을 확보하는 수단으로서 활용될 수 있다. 유사한 기 술로서 GPS위성을 사 용한 동 기 기술과 PDH, SDH와 같은 동기 된 망에서 클럭을 추출하는 방법이 있으나, 전자에서는 위성과 위성 수신 장치에 의존할 수 밖에 없어 안테나의 설치 환경에 따라 품질이 영향을 받는 단점이 있을 수 있다, 후자의 경우에 있어서는, 낮은 대역폭과 높은 비용문제에 직면하여 높은 대역폭을 제공하는 패킷 망으로 대체되는 상황에 놓여 있다. 한편, Ethernet등 패킷 망은 타이밍 측면에서 동기된 망이 아니라는 점을 문제점으로 들 수 있다.

따라서, 이에 대한 활발한 연구가 진행되고 있으며, 패킷 망에서의 주파수 및 위상을 동기 시키는 가장 효과적인 방안으로 타이밍 패킷을 이용하는 IEEE 1588이 제안되고 있다.

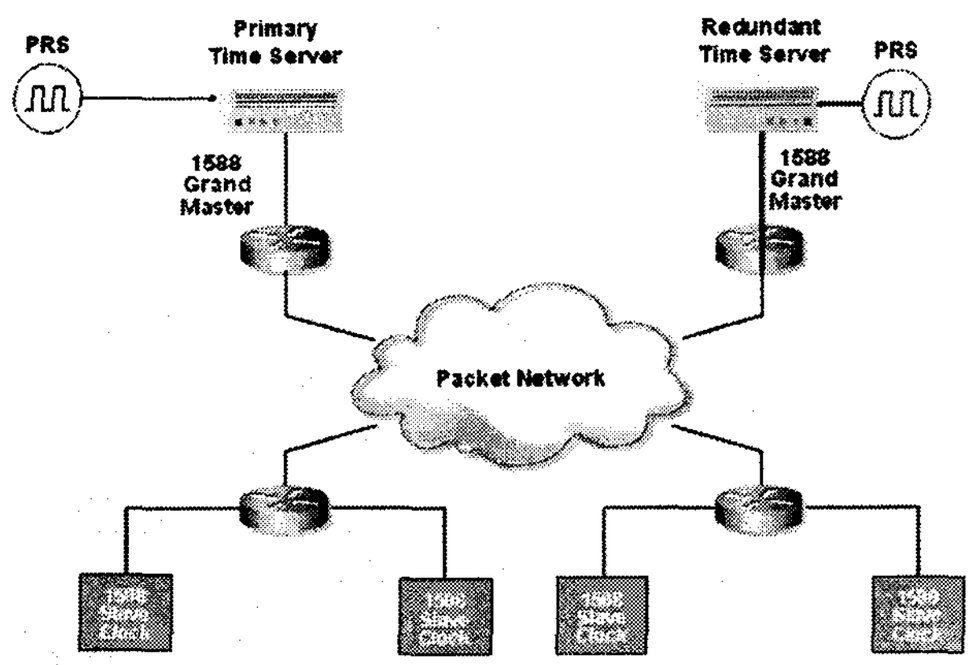

그림 1. IEEE1588 구성

그림 1과 같이 IEEE1588은 크게 ToP master와 ToP slave로 구성된다. ToP master는 각 노드에 Timing 정보를 제공하며, ToP slave는 ToP master와 자신과의 전송지연시간 (Transmission delay)을 고려하여 ToP master에서 제공하는 Timing 정보를 조정한다. IEEE1588은 ToP master와 ToP slave 간에 PTP (Precision Time Protocol) message를 규칙적으로 전송하여 (sync message, Follow up message, Delay request message, Delay response message) ToP master와 ToP slave 사이의 시간 오프셋과 네트워크의 전송지연시간을 측정하게 된다. 그림 3과 같이 ToP slave는 시간 오프셋과 전송지연시간을 계산하기 위해서 sync message와 delay request message의 전송 및 도착 시간을 나타내는 T1, T2, T3, T4

의 값을 사용하며, 최종적으로 ToP slave는 ToP master의 클럭

* 책임저자(Corresponding Author)
논문접수 : 2007. 7. 20., 채택확정 : 2007. 7. 30.
김정훈, 신준효, 홍진표 : LG-NORTEL Mobile Network H/W Team
(jhunkim@lg-nortel.com, fr2estyle@lg-nortel.com, hjp@lg-nortel.com)

에 동기된 주파수와 Time of Day 정보를 추출하게 된다.

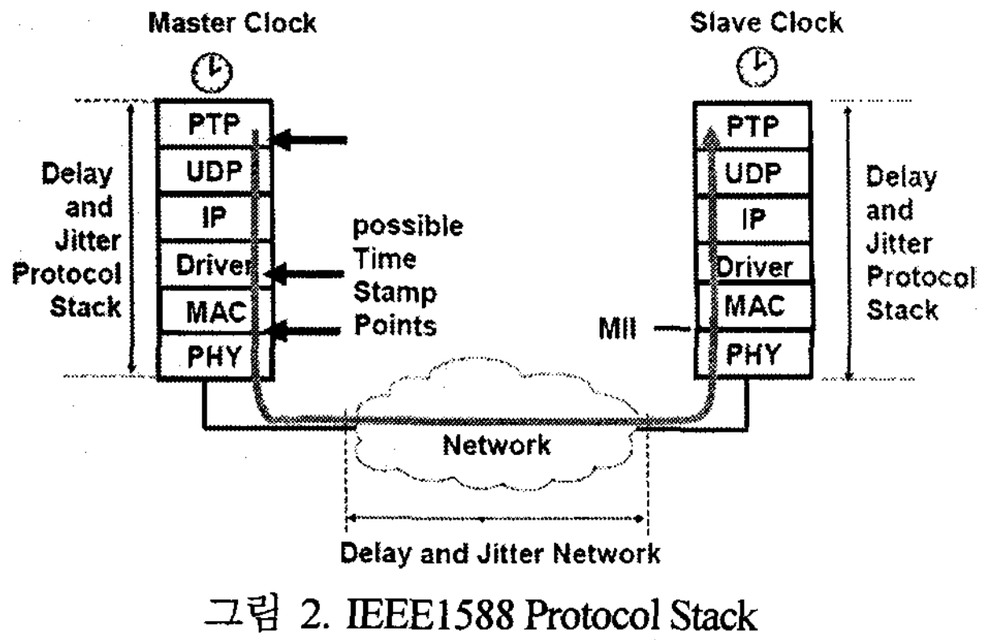

그림 2. IEEE1588 Protocol Stack

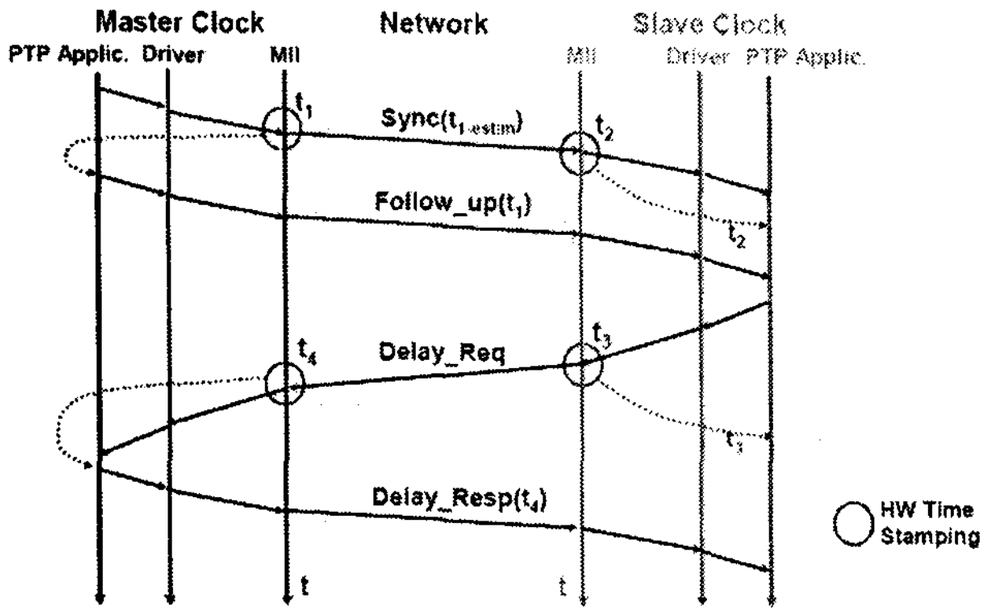

그림 3. IEEE1588 Timing message sequence

III. Systematic Delay Variation

ToP Master는 ToP Slave로 타이밍 패킷을 전송할 때, 여러 가지 오차 요인에 의해 정확도가 떨어지게 된다.

첫째, 패킷 (Delay), 둘째, 지연시간 변화량 (Delay Variation), 셋째, 패킷 에러율 (Packet Error Ratio), 넷째 패킷 손실률 (Packet Loss Ratio)등을 들 수 있다. 이 중 큰 영향을 미치는 요소로 지연시간과 지연시간 변화량을 고려 할 수 있는데, 그 특징으로 보면, 지연시간은 주파수 오차에 영향이 없으나 위상 오차에 영향을 주게 되는 반면, 지연 시간 변화량은 주파수와 위상 오차에 모두 영향을 준다는 점에서 더욱 각별히 중요하게 고려되어야 하는 요소이다.

Delay variation의 주요 원인으로는 5가지를 들 수 있다.
첫째, 랜덤 지연시간 변화량이다. 이는 Gaussian 분포를 따르게 되므로, 샘플을 증가시켜 통계적으로 접근하면 필터링이 가능하다.
둘째, 라우팅 프로토콜의 동작에 따른 라우팅 변경이다. 망에 존재하는 라우팅 경로가 변경되므로 이에 상응하는 지연시간 변화가 발생한다. 지연시간이 계단형 증가 경향을 보이므로 검출이 가능하고, 시간 지연 오프셋 변경 등 보정 알고리즘으로 제어할 수 있다.
셋째, 트래픽 부하에 따른 네트워크 엘리먼드(Network Element)의 자원 컨텐션(Resource Contention)을 들 수 있다. 급격한 데이터 흐름 증가에 따라 데이터 흐름이 느려지고, 타이밍 패킷의 전달 시간이 과다해지는 현상이다. 이러한 문제는 네트워크의 트래픽 부하에 따라 그 정도가 결정되며, 해결책으로는 타이밍 패킷의 우선순위를 제어하여 그 변동을 줄이도록 제어가 가능할 것이다.
넷째, 네트워크 폭주(Congestion)가 있다. 이는 네트워크에 과다한 부하가 발생하는 것으로, 심각한 정도로 지연시간이 증가하거나 경우에 따라 패킷이 드롭 되는 현상을 보인다. 그러나, 일반적으로 짧은 시간 동안 발생하고 TCP 프로토콜 등에 의해 트래픽 부하가 낮아지도록 흐름제어를 하게 되므로 어느 정도 시간 경과 후 복구되는 특징을 가지고 있다.
다섯째, 큐잉딜레이 (Queuing Delay)등에 기인하는 네트워크 구성요소의 동작 특성에 따른 시간지연 변화(Systematic Delay Variation)가 있다. 이는 xDSL등의 망에서 많이 발생하며, 이를 그래프적으로 해석해보면 그림 4 (패킷 스트림에 따른 큐잉 딜레이 변화)과 같이 톱니형 시간지연 프로파일로 나타나게 된다. 이때, 톱니형 시간지연 프로파일의 주기는 네트워크 상 요인에 따라 그 주기가 일정하지 않으며, 경우에 따라 수십 시간의 주기를 갖게 되기도 하는데 그 주기가 길 수도 있다는 점에서 이를 예측하여 필터링 하는 것을 아주 어렵게 한다.

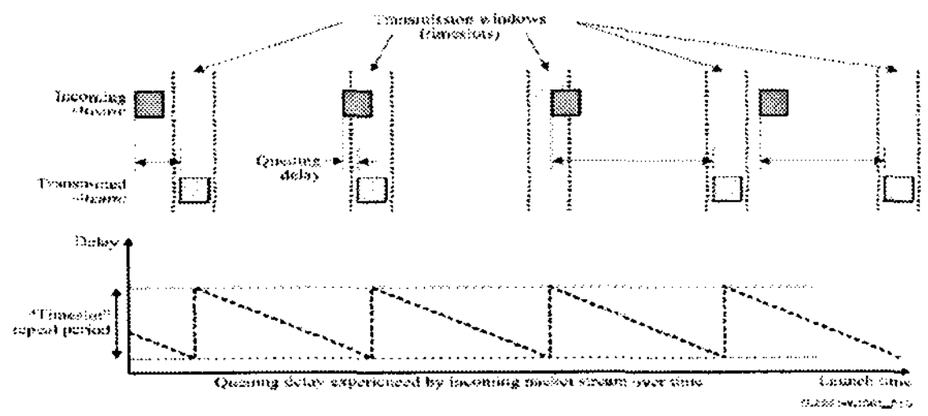

그림 4. Time Slot을 갖는 네트워크에 의해 발생하는 Delay Variation [1]

IV. Sawtooth 현상과 필터

ToP master와 ToP slave간의 delay함수, 임의의 시점 t에서 master와 slave의 time stamp propagation delay는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$d(t) = d + PDV(t)$$

d : Propagation delay
PDV(t) : Propagation delay variation

$$x_M(t) = x_{oM} + (1 + y_M)\cdot t + N(t)$$

$$x_s(t) = x_{oS} + (1 + y_S)\cdot [t + d + PDV(t)] + n(t)$$

x_M : ToP master의 timestamp

x_s : Timestamp 도착시점의 slave time stamp

y_M : Master frequency fractional offset

y_S : Slave frequency fractional offset

$N(t)$: Master clock noise

$n(t)$: Slave clock noise

n(t) : Slave clock noise

전달지연시간 d는 상수인데 반하여 PDV는 시간에 따라

변동하는 함수이며 네트워크 등에서 기인하는 요인이므로 필터링이 어려워, recovery clock의 주파수, 위상오차의 직접적인 원인이 된다.

일정한 bit rate을 포함하는 일정한 간격으로 규칙적으로 전송하는 패킷 스트림은 시간에 대하여 완만한 delay variation을 야기하게 된다. 이러한 현상은 TDM의 waiting time jitter와 유사하나 TDM과 같은 형태의 네트워크에서는 waiting time jitter를 제어하는 것이 가능한데 반하여 패킷 네트워크에서는 그렇지 않다[1]. 이때, delay variation은 timeslot repeat period에 따라 결정되며 sawtooth 주기는 연결된 두 시스템의 reference clock의 주파수 오차 및 규칙적으로 송신되는 스트림의 주기에 따라 다른 값을 가지게 될 것이므로 실질적으로 대표치로 명시할 수는 없다.

일반적으로 Gaussian 분포를 따르는 데이터 집합의 경우에 산포를 줄이기 위하여 평균필터를 사용할 수 있다. 그러나 delay variation에 있어서 주기가 불명확한 sawtooth 특성을 가질 경우, 그 주기가 길면 길어질수록 필터링 효과가 작아져, 더 많은 데이터 샘플이 필요하게 되거나 필터링 되지 않는 특징이 있다.

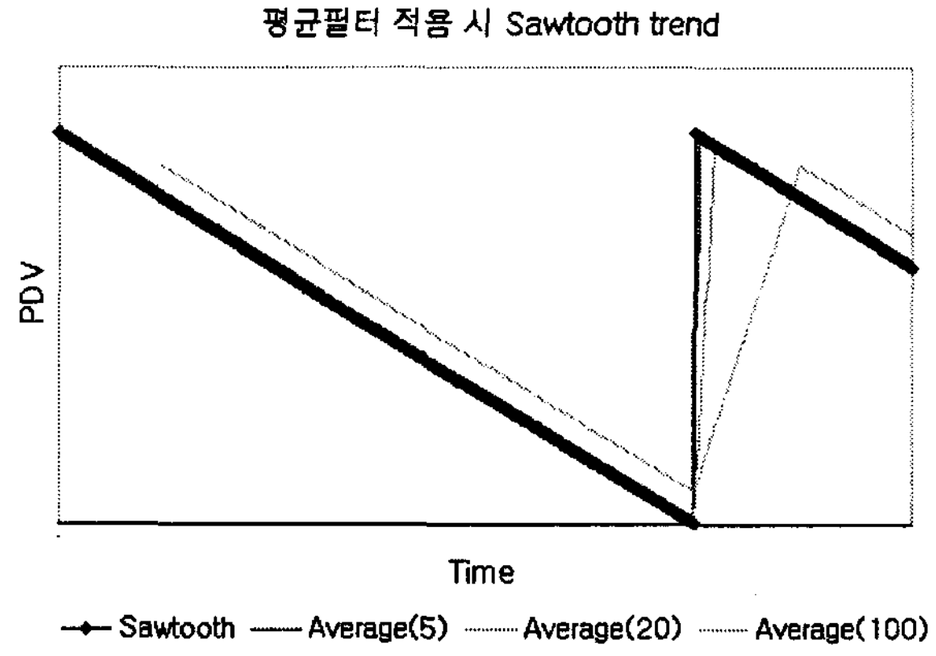

그림 5. 평균필터를 적용한 경우 (sawtooth trend)

그림 5는 sawtooth현상이 있는 네트워크에서 시간경과에 따른 PDV(Propagation Delay Variation)가 평균필터에 대하여 어떠한 영향을 미치는 지를 보여준다. Average(5) : 5개 timing data를 평균한 그래프에 비하여 Average(10) : 10개의 timing data를 평균, Average(100) : 100개의 timing data를 평균으로 갈수록 상승기울기는 완만해 지는 경향을 보이나 하강기울기는 변화 없이 우측으로 이동함을 보여준다. delay variation,의 peak-to-peak값은 개선을 보이나 sawtooth 그래프의 하강 기울기가 완만하면 완만할수록 그 시간 동안 위상 천이 (phase drift)가 발생할 것임을 알 수 있다. 요약하면, sawtooth의 크기를 명시할 수 없는 한, averaging을 위한 timing data sample 수를 결정할 수 없으므로, 이는 필터링하기 어렵거나 필터링되지 않는 경우가 존재함을 의미한다.

V. ToP Master 의 timing packet 생성 알고리즘

Sawtooth 현상이 패킷 스트림의 규칙성에 기인하는데 반하여 ToP master는 slave로 규칙적으로 timing packet (sync message)를 전송해야 하며 (그림 6) 이것이 slave에서 clock을 recovery할 때 품질을 결정하는 중요한 변수 중의 하나이기도 하다는 점을 이미 언급하였다. 요구 되어지는 단위 시간당 timing packet수를 유지하면서 sawtooth현상을 피하기 위해서는 ToP master의 timing packet 전송 시점을 랜덤화를 통해 가능하다. (그림 7)

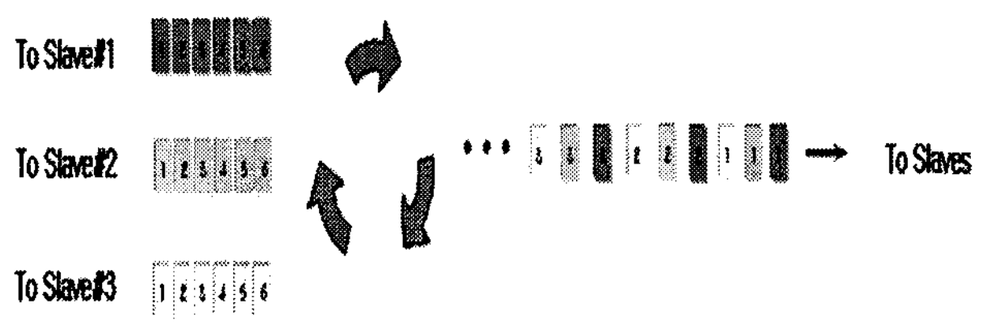

그림 6. 기존의 ToP 전송과정

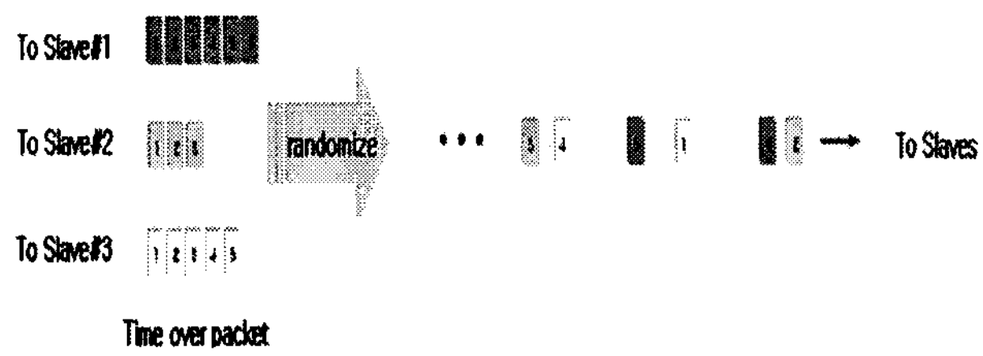

그림 7. 랜덤화된 ToP 전송과정

VI. Simulation

그림 8 은 sawtooth 특성을 갖는 네트워크를 모델링하여 일정한 주기의 패킷 (30 timing packets / sec)을 master 에서 발생시켜 slave 에서 PDV 를 예측한 것이다

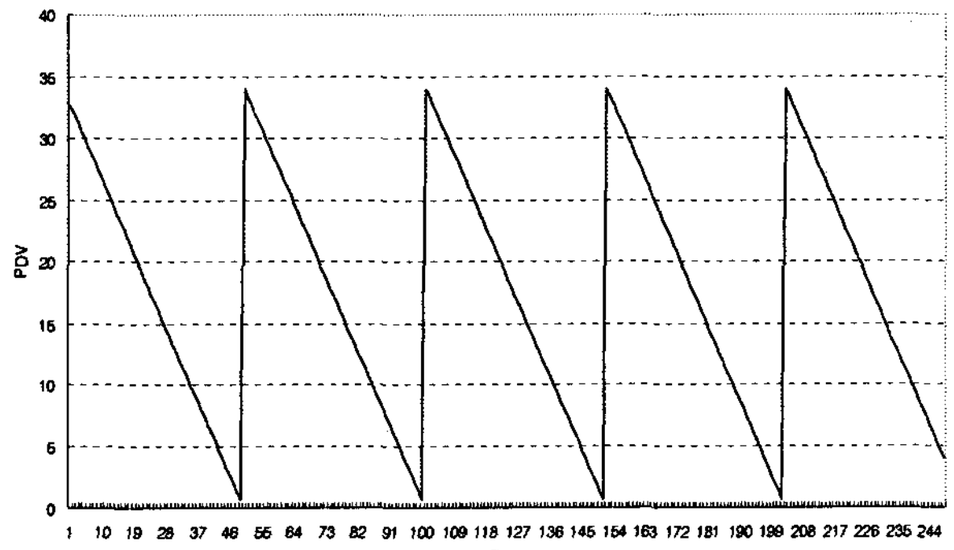

그림 8. 시뮬레이션에 사용된 Systematic delay variation 을 갖는 네트워크 모델
(30pps generation, 34us time slot repeat period)

그림 9는 평균필터를 취하여 sawtooth현상의 변화추이를 시뮬레이션한 것이다. 평균할 샘플의 수를 증가시키면 ampli-

tude는 감소하나 하강 기울기는 shift되는 것을 알 수 있다. 시뮬레이션에서 사용된 네트워크 모델를 통과한 20개 timing packet을 평균 필터를 통과시키더라도 sawtooth현상이 사라지지 않음을 알 수 있다.

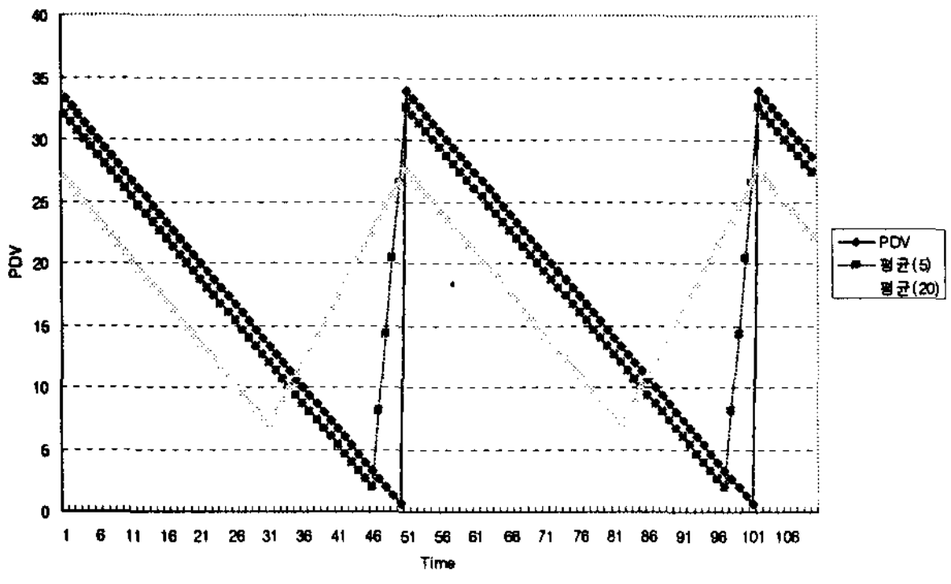

그림 9. 일정한 주기의 packet (30PPS) 을 모델링 한 네트워크에 통과시킨 후 평균필터에 따른 PDV sawtooth 변화 추이

그림 10은 randomized packet을 sawtooth특성을 갖는 네트워크를 통과한 후 slave에서 관찰된 packet의 PDV 시뮬레이션 결과이다. 진폭은 변화하지 않았으나 그 sawtooth 규칙성은 보이지 않는다.

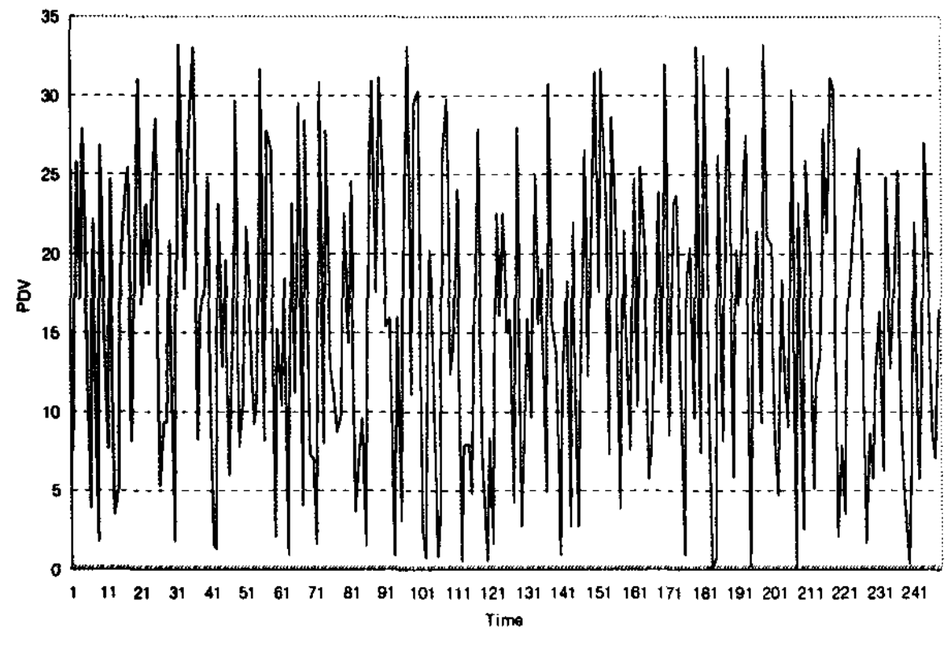

그림 10. Random한 주기의 packet (30PPS, average)을 모델링한 네트워크에 통과시킨 후

그림11, 12에서는 ToP master에서 randomized packet을 생성하여 slave에서 이를 복원한 경우를 보여준다. 실제로 sawtooth에 의한 현상은 마찬가지로 보이지 않는다.

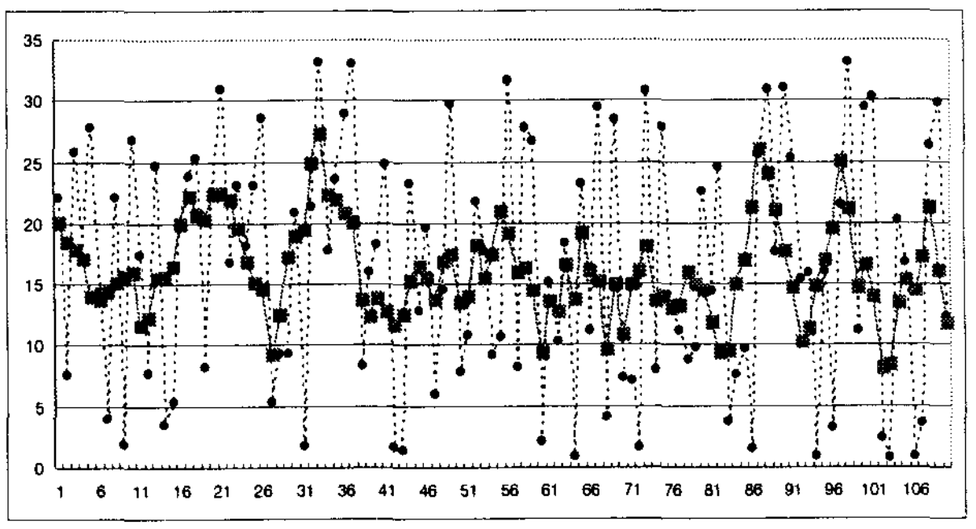

그림 11. Randomized packet에 의한 PD에 및 5개 timing packet을 평균 필터 결과

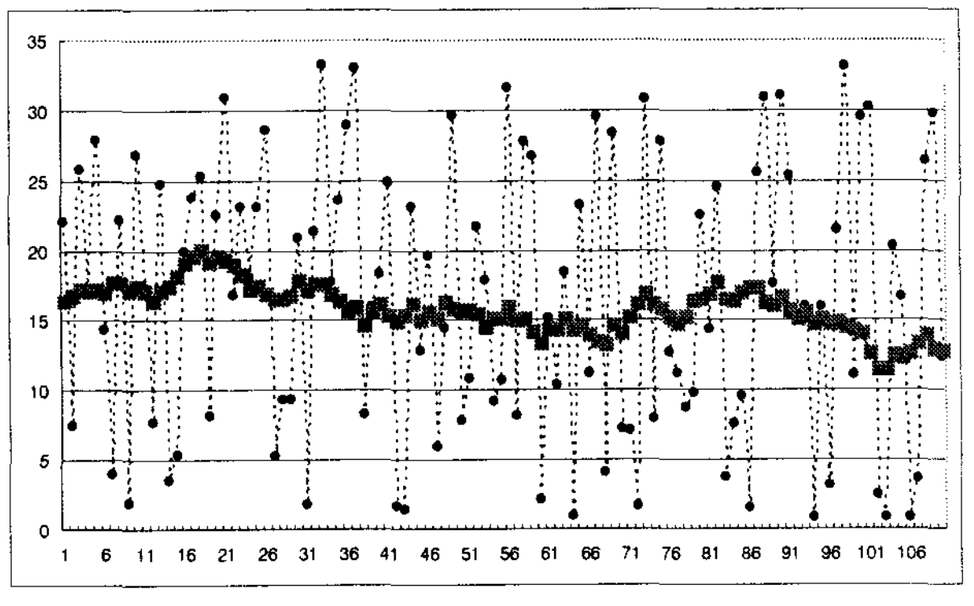

그림 12. Randomized packet에 의한 PD에 및 20개 timing packet을 평균 필터 결과

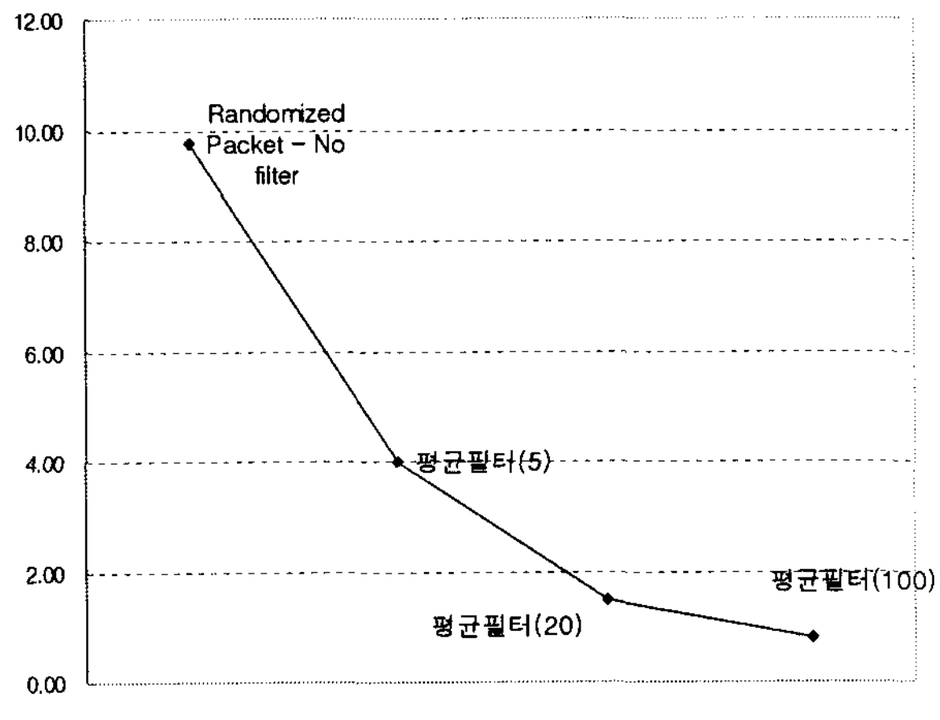

그림 13. 필터를 적용하지 않은 경우와 5개, 20개, 100개 timing packet수에 따른 평균 필터 시 위상오차의 Std. deviation 추이

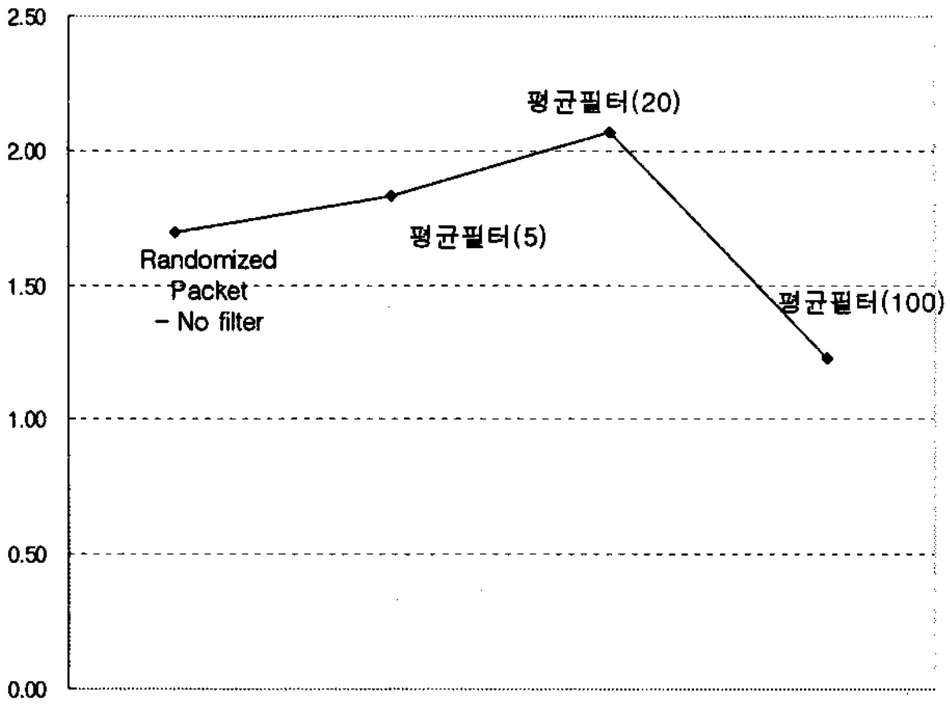

그림 14. 필터를 적용하지 않은 경우와 5개, 20개, 100개 timing packet수에 따른 평균 필터 시 위상오차 평균값 추이

표 1. Randomized packet생성 시 필터에 따른 Phase error

Averaging	Mean [us]	Std.Dev [us]
Randomized Packets – No filter	1.70	9.77
평균필터 (5)	1.83	4.01
평균필터 (20)	2.07	1.49
평균필터 (100)	1.23	0.81

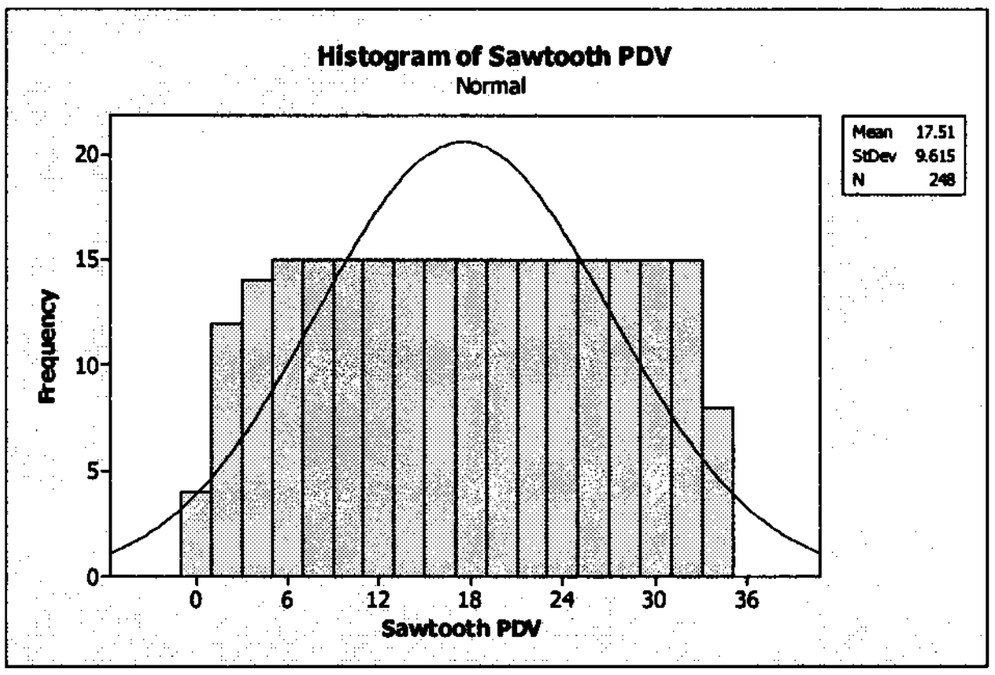

그림 15. Sawtooth 네트워크를 통과 정 주기 패킷 (30PPS)의 PDV 히스토그램

그림 15는 sawtooth현상에 의한 PDV의 histogram으로 정규분포를 따르지 않음을 보여준다. 이들 패킷을 평균필터를 취하더라도 정규분포가 되기 어려울 것임을 그림 9를 통해 추정할 수 있다.

그림 16과 같이 랜덤화 과정을 거친 패킷은 최초 평균필터를 취하기 전 PDV값이 정규분포를 따르지 않음을 알 수 있다. 그러나 Sawtooth에 의한 규칙성을 보이지 않는다.

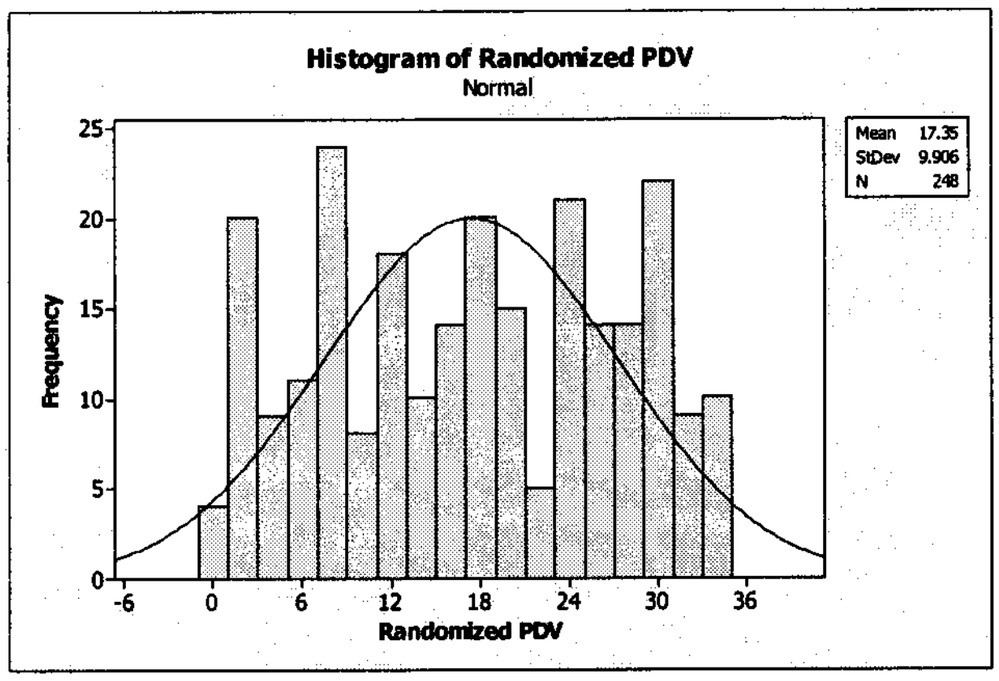

그림 16. Sawtooth 네트워크를 통과한 random 주기 패킷 (30PPS, average)의 PDV 히스토그램

그러나 그림 17과 같이 평균필터를 취한 PDV데이터는 정규분포의 형태를 갖게 된다.

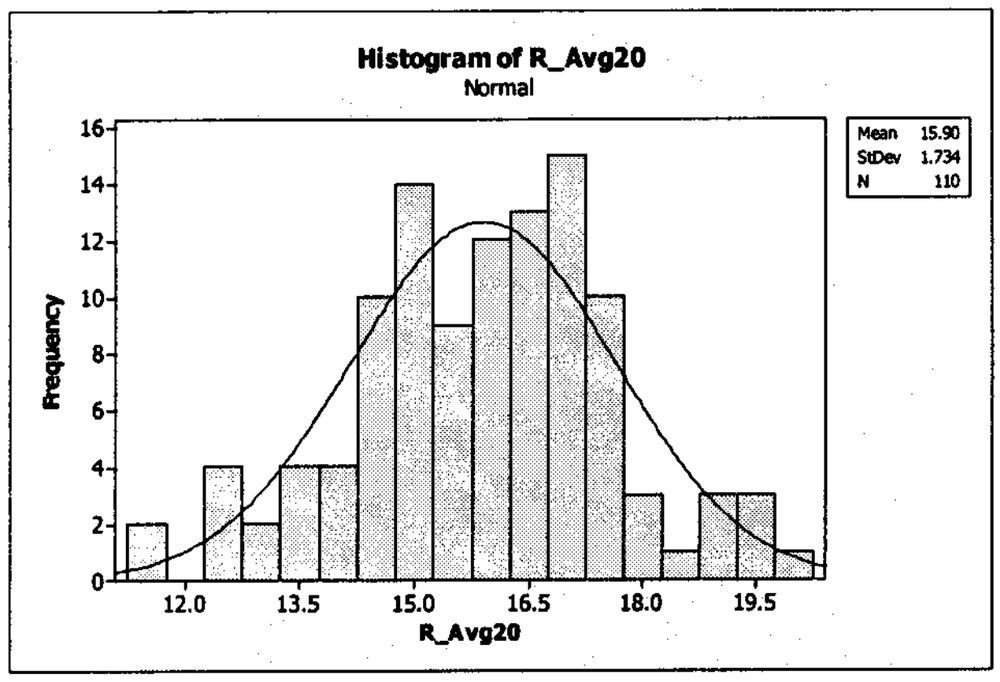

그림 17. Sawtooth 네트워크를 통과한 random 주기 패킷 (30PPS, average)을 20개 패킷 평균필터를 취한 경우 PDV 히스토그램

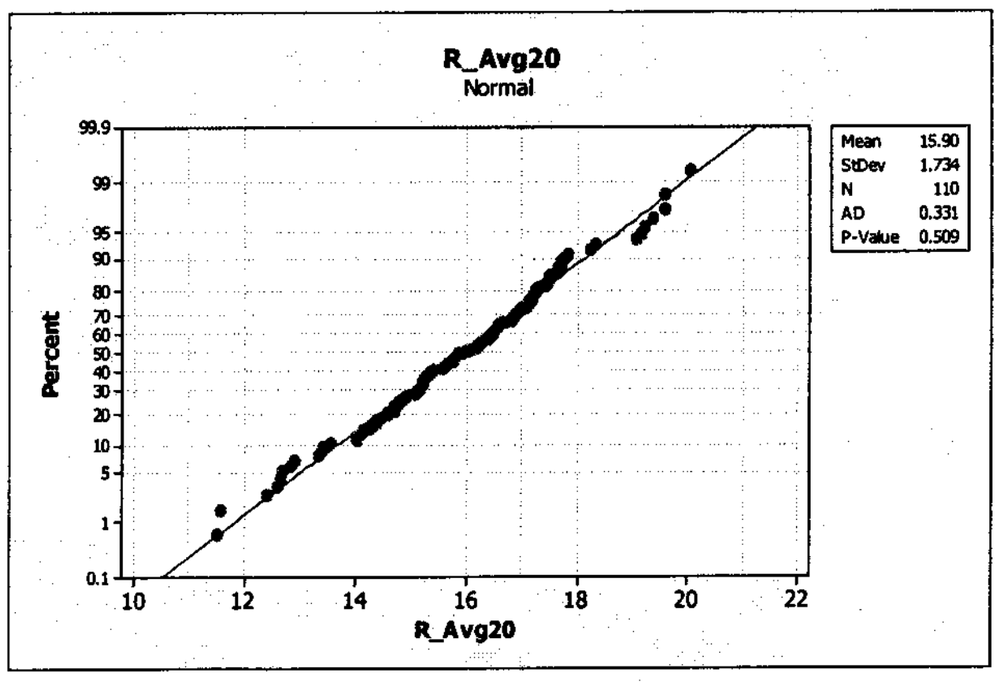

그림 18. 정규성 검정 결과

실제로, normality test를 수행해본 결과 P-Value가 0.509로 정규분포를 따름을 확인할 수 있다. 이는 Master에서 packet을

randomization 할 경우, randomized packet이 slave의 평균필터를 통과할 경우, 정규 분포화하여 sawtooth규칙성이 사라짐을 설명해준다. 또한 Slave에서 이미 내재하는 평균필터 알고리즘 외에 별도의 알고리즘을 추가하지 않고도 PDV의 산포를 줄여 보다 양질의 clock recovery가 가능하다는 것을 의미한다.

VII. 결론

이동통신 망에 이동성을 제공하기 위한 시각 동기, 주파수 동기 시 더욱 더 안정되고 향상된 품질을 확보하는 것이 전체 시스템의 품질에 직접적인 영향을 미친다. Clock recovery에 영향을 미치는 여러 요인 중 네트워크에서 기인하는 delay variation 요인은 ToP Slave에서 이를 필터링하기 어렵다. 그러나, ToP Master에서 전송방법을 적절히 고려하면 효과적인 결과를 얻을 수 있다. 따라서, 기존의 알고리즘이 ToP Slave에 집중되어 있는 반면, 정확한 망동기를 위해서는 ToP Master의 패킷 전송방법에 있어서 효과적이고 효율적인 고려가 요구된다.

참고문헌

[1] Timing and synchronization aspects in packet networks, G.8261/Y.1361, May, 2006

[2] IEEE-1588 Standard for a precison clock synchronization protocol for networked measurement and control system, 34th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) meeting, John C. Eidson, Mike Fischer, Joe White,

[3] IEEE1588 Implementation and Performance of Time Stamping Techniques, Conference on IEEE 1588, Sep 28, 2004

[4] IEEE 1588 A solution for synchronization of networked data acquisition systems, Diarmuid Corry, M.Eng

[5] IEEE 1588 Standards Committe, Precision clock synchronization protocol for networked measurement and control systems, IEEE Std. 1588, 2004