

이더넷 네트워크의 시간 동기화 검증을 위한 IEEE 1588v2 PTP 구현

김 성 진* · 고 광 만**

요 약

분산 환경의 계측 및 제어 시스템에서 분산된 디바이스들의 복잡한 동기화 구조를 해결하기 위한 기술의 필요성이 요구되며 그러한 분산 시스템 환경에서 시간 동기화를 위해 IEEE 표준인 정밀 클럭 동기화 프로토콜(Precision Clock Synchronization Protocol)을 사용함으로써 문제를 해결 할 수 있다. 본 논문에서는 정확한 시간 동기화를 계측하기 위해 지연 요청-응답(Delay Request-Response) 메커니즘을 이용하여 IEEE 1588v2 PTP를 계측하고 제어 할 수 있는 기능을 BlueScope BL6000A에 구현하였다.

키워드 : IEEE 1588, 정밀 시간 프로토콜, 시간 동기화, 지연 요청-응답 메커니즘

Implementation of IEEE 1588v2 PTP for Time Synchronization Verification of Ethernet Network

Seongjin Kim* · Kwangman Ko**

ABSTRACT

The distributed measurement and control system require technology to solve complex synchronization problem among distributed devices. It can be solved by using IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems to synchronize real-time clocks incorporated within each component of the system. In this paper, we implemented the IEEE 1588v2 PTP emulator on BlueScope BL6000A using a delay request-response mechanism to measure clock synchronization.

Keywords : IEEE 1588, Precision Time Protocol, Time Synchronization, Delay Request-response Mechanism

1. 서 론

계측장비, 산업 자동화, 통신, 전력, 제어 시스템은 분산 시스템 분야에서 활용되고 있는 기술을 응용하고 있다. 특히, 계측 및 제어 시스템을 이용하는 기술 분야에서는 중앙 집중적 구조가 아닌 분산 환경이 많기 때문에 네트워크 기반의 제어 시스템이 필수적이며 분산된 디바이스들의 동기화 문제가 매우 중요한 이슈이다[1]. 분산 시스템 환경에서 네트워크 통신을 이용하여 시스템을 관리하고 제어하기 위한 동기화는 일반적으로 NTP(Network Time Protocol)[2]과 SNTP(Simple Network Time Protocol)[3]를 이용한 클럭 동기화 기술이 가장 많이 적용되고 있다. 이러한 방법들은

LAN(Local Area Network)과 이더넷 네트워크(Ethernet network)에서 가장 폭넓게 이용되지만 밀리세컨드(millisecond) 범위 오차로 인해 동기화의 정확성이 많이 떨어지는 단점이 있다. NTP와 SNTP 같은 네트워크 기반 동기화 방식과 다르게 GPS(Global Positioning System) 위성을 이용한 신호 및 위치 기반 클럭 동기화 방법은 네트워크 기반 동기화 방식 보다 정확한 클럭 동기화를 할 수 있지만 GPS 신호를 수신하기 위한 수신기와 안테나 같은 장비의 필요성 때문에 높은 비용이 요구된다는 단점이 있다[4]. 따라서 정확한 클럭 동기화를 위해서는 Sub-microsecond 범위 내 오차의 정확성과 새로운 장비의 추가나 망 구축이 아닌 기존 네트워크 대역폭을 그대로 이용하면서 기존 장비를 낮은 비용으로 동기화 기능을 구현할 수 있는 기술이 필요하다.

본 논문에서는 Precision Time Protocol(PTP)을 사용하는 패킷 기반 네트워크의 정확한 클럭 동기화를 측정하기 위해 지연 요청-응답(Delay Request-Response) 메커니즘을 이용

* 준 회원: 상지대학교 컴퓨터공학과 박사과정

** 종신회원: 상지대학교 컴퓨터정보공학부 교수

논문접수: 2012년 6월 1일

수정일: 1차 2012년 7월 4일

심사완료: 2012년 7월 13일

* Corresponding Author: Seongjin Kim(sjkim@compiler.sangji.ac.kr)

하여 IEEE 1588v2 PTP[5]를 계측하고 제어할 수 있는 기능을 구현하였다. 이를 위해, Master(Requester)와 Slave(Responder)로 나누고 시간 동기화를 위한 PTP 메시지들을 세부적으로 구성하고 전송할 수 있는 기능과 수신되는 PTP 메시지들에 대한 상태 정보 및 통계치를 제공하는 기능을 Bluelight Technology(BLT) 계측장비인 BlueScope BL6000A[6]에 구현하였다.

본 논문의 구성은 제 2장에서 IEEE 1588v2 PTP의 클럭 동기화를 위한 지연 요청-응답 메커니즘 구조를 소개하고, 제 3장에서는 BLT 계측장비에 구현된 화면 구성 및 동작 방법과 지연 요청-응답 환경을 구성하여 실험한 결과를 제시하고, 마지막으로 제 4장에서 결론 및 향후계획을 설명한다.

2. 관련 연구

IEEE 1588v2 표준안은 네트워크 통신, 로컬 컴퓨팅, 분산 시스템과 같은 환경에서 사용되는 계측 및 제어 시스템의 정확한 클럭 동기화를 가능하게 하는 PTP를 정의하고 있다. IEEE 1588v2 PTP는 메시지 기반 프로토콜이며 이더넷 환경과 더불어 패킷 기반 네트워크에서 동작한다는 특징이 있다. 이러한 특징은 오직 LAN 내에서만 동작했던 IEEE 1588v1[7]과는 다르게 Unicast를 지원하여 스위치와 라우터를 통해 시간 동기화 정보가 담긴 패킷을 전송할 수 있게 하고 UDP/IPv4(User Datagram Protocol over Internet Protocol version 4), IPv6(Internet Protocol version 6), Layer-2 Ethernet, DeviceNet[8], ControlNet[9] 등 다양한 프로토콜과 필드 버스를 통해서 정확한 클럭 동기화를 할 수 있는 기능을 제공하고 있다.

IEEE 1588v2 PTP는 Master와 Slave의 두 가지 노드로 나누고 노드 간 클럭 동기화를 위해 지연 요청-응답 메커니즘을 이용한다. 또한 시간 정보인 타임스탬프를 저장하고

있는 메시지를 교환하는 방식에 따라 Two-step 모드와 One-step 모드로 나뉘게 된다. 이러한 모드별 메시지 교환을 통해 두 노드 간의 클럭 동기화를 이루고 오프셋 보정 및 경로 지연(path delay) 측정을 하게 된다.

2.1 Two-step 모드

Two-step 모드에서는 총 4개의 메시지(Sync, Follow_up, Delay_Req, Delay_Resp) 교환을 통해 클럭 동기화를 이루게 되며 과정은 그림 1과 같다.

단계1 : Master는 Sync 메시지와 타임스탬프 t_1 이 저장된 Follow_up 메시지를 Slave로 보낸다.

단계2 : Sync와 Follow_up 메시지를 받은 Slave에서는 다음과 같은 과정을 거친다.

- a) Master로부터 Sync 메시지를 받는 즉시 타임스탬프 t_2 를 생성한다.
- b) Master로부터 Follow_up 메시지를 받으면 메시지 필드에 저장되어 있는 타임스탬프 t_1 를 저장한다.
- c) Delay_Req 메시지를 Master로 보낸 즉시 타임스탬프 t_3 를 생성하고 저장한다.

단계3 : Delay_Req 메시지를 받은 Master는 다음과 같은 과정을 거친다.

- a) Slave로부터 Delay_Req 메시지를 받는 즉시 타임스탬프 t_4 를 생성한다.
- b) 생성한 타임스탬프 t_4 를 Delay_Resp 메시지 필드에 저장하여 Slave로 보낸다.

단계4 : Delay_Resp 메시지를 받은 Slave는 메시지 필드에 저장되어 있는 타임스탬프 t_4 를 저장한다.

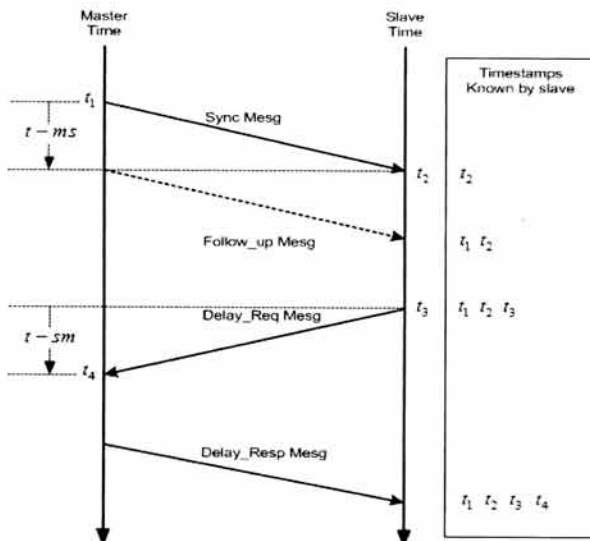


그림 1. Two-step 모드에서 지연 요청-응답 메커니즘
Fig. 1. Delay request-response mechanism of Two-step

메시지 교환 후에 Slave는 총 4개의 타임스탬프를 가지게 되며 저장된 타임스탬프들을 이용하여 오프셋과 평균 경로 지연(Mean Path Delay) 시간을 결정할 수 있게 된다. 이를 위해서는 먼저 Master-Slave간 지연시간($t - ms$)과 Slave-Master($t - sm$)간 지연시간을 알아야 하며 계산식은 다음과 같다.

$$t - ms = t_2 - t_1 \tag{1}$$

$$t - sm = t_4 - t_3 \tag{2}$$

구해진 $t - ms$ 과 $t - sm$ 에 대한 평균경로지연 시간을 구하는 계산식은 다음과 같다.

$$meanPathDelay = \frac{(1) + (2)}{2} = \frac{(t_2 - t_1) + (t_4 - t_3)}{2} \tag{3}$$

오프셋을 구하는 계산식은 다음과 같다.

$$offsetFromMaster = t_2 - t_1 - (3) = \frac{(t_2 - t_1) - (t_4 - t_3)}{2}$$

2.2 One-step 모드

4개의 메시지 교환을 통해 클럭 동기화를 이루는 Two-step 모드와는 다르게 One-step 모드에서는 그림 2와 같이 Follow_up 메시지를 전송하지 않는다. 따라서 Follow_up 메시지를 통해 전달되던 타임스탬프 t_1 은 Sync 메시지의 originTimestamp 필드에 저장하여 전송하게 되며, Sync 메시지를 수신한 Slave는 수신된 메시지의 헤더 정보 중 flagField를 체크하여 One-step 모드인 것이 확인되면 Sync 메시지에서 타임스탬프 t_1 을 저장한다. 또한 Follow_up 메시지를 수신한 후 계산되던 Master-Slave간 지연시간($t - ms$)은 Sync 메시지를 수신함으로써 계산 될 수 있다. 이렇게 3개의 메시지 교환 후에 저장되는 4개의 타임스탬프는 Two-step 모드와 같은 방법으로 오프셋과 평균경로지연 시간을 계산하게 된다.

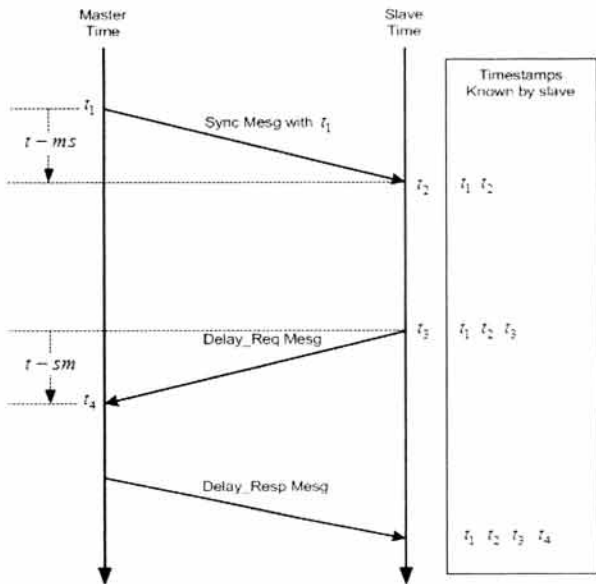


그림 2. One-step모드에서의 지연 요청-응답 메커니즘
Fig. 2. Delay request-response mechanism of One-step

3. BLT 계측장비를 이용한 IEEE 1588v2 PTP 구현 및 실험

본 논문에서는 PTP를 사용하는 패킷 기반 네트워크의 정확한 클럭 동기화를 측정하기 위해 지연 요청-응답 메커니즘을 이용하여 IEEE 1588v2 PTP를 계측하고 제어할 수 있는 기능을 BLT 계측장비에 구현하였다. 또한 Master와 Slave 및 PTP 패킷을 검증하기 위해서 BLT 계측장비 3대로 환경을 구성하고 지연 요청-응답 메커니즘의 클럭 동기화 실험을 하였다.

3.1 BlueScop BL6000A

BlueScop BL6000A는 1Gbit/10Gbit Ethernet, SDH/SONET, OTN, Fiber Channel를 테스트 할 수 있는 휴대 가능한 올인원 타입의 계측기이다. 구현된 IEEE 1588v2에서는 그림 3과 같이 Master 혹은 Slave 중 하나만을 테스트 할 수 있으며, 메커니즘 테스트가 시작되면 클럭 동기화 여부에 따라 PTP 포트 상태를 결정하게 된다. 클럭 동기화가 이루어진 후에는 TX와 RX로 전송 및 수신되는 모든 PTP 메시지들의 상세한 분석 정보와 함께 통계 자료를 위한 오프셋과 평균 경로 지연 시간을 계산하고 보정한다.



그림 3. BLT 계측장비를 이용한 테스트 환경
Fig. 3. Test Environment using Bluescope BL6000A

3.2 TX PTP 및 메시지 Configuration

Master와 Slave에서 PTP 메시지를 설정하고 전송하기 위한 TX 화면은 그림 4와 같다. TX PTP Step은 클럭 동기화 모드를 선택하기 위해서 사용되며 Two-step과 One-step 모두 선택 가능하다. 또한 TX PTP Message는 Master에서는 Announce, Sync, Follow_up, Delay_Resp 메시지에 대한 설정과 Slave에서는 Delay_Req 메시지를 설정할 수 있는 편집기능을 제공한다.



그림 4. TX PTP Configuration 화면
Fig. 4. TX PTP Configuration

TX PTP 메시지 화면에서는 그림 5와 같이 PTP 메시지의 헤더 및 몸체 정보를 보여주고 필요에 따라서 편집 가능한 데이터는 사용자가 직접 설정할 수 있는 기능을 제공한다. Master의 TX PTP Interval은 Slave로 전송할 PTP 메시지의 전송 주기를 선택할 수 있으며, 125ms ~ 16secs

범위 내에서 설정 가능하다. Slave의 RX Announce Interval 은 Master로부터 전송되는 Announce 메시지의 전송 주기를 선택할 수 있는데, 설정된 전송 주기 안에 Announce 메시지가 수신되지 않으면 PTP 포트 상태를 변경하게 된다. 그 외의 PTP 메시지의 헤더 정보인 Domain number를 설정할 수 있는 기능과 $-50ppm \sim +50ppm$ 범위 내에서 Timestamp Offset을 제어할 수 있는 기능을 제공한다.



Fig. 7. Back-to-Back Test Configuration

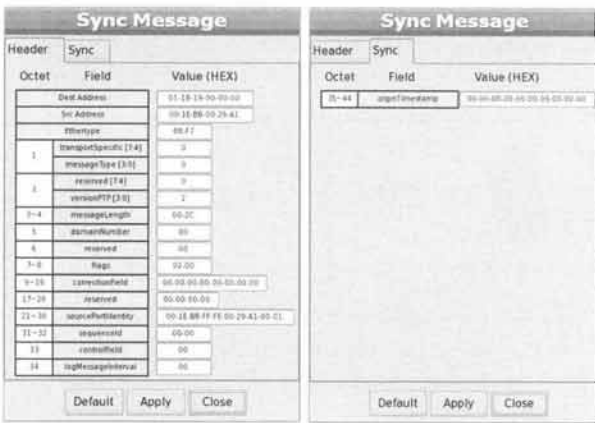


그림 5. TX PTP 메시지 편집 화면(Sync Message)
Fig. 5. Edit screen of TX PTP message

클럭 동기화 검증을 위해 전송하고 수신되는 모든 PTP 메시지에 대한 상태 정보는 그림 6과 같이 TX와 RX를 구분하여 제공한다. TX 및 RX PTP는 전송한 PTP 메시지들과 수신된 PTP 메시지들의 개수와 비율을 표시하며, Domain Mismatch는 수신된 PTP 메시지의 헤더 내 Domain number를 비교하여 만약 다른 경우 횟수를 증가시키고 수신된 PTP 메시지는 무시된다. 마지막으로 RX PTP 메시지 뷰어는 수신된 PTP 메시지들의 헤더 및 몸체의 모든 필드 정보를 16진수 값으로 표시한다.

3.3 지연 요청-응답 메커니즘 실험 및 결과

Master와 Slave간 클럭 동기화 실험을 위한 환경 구축을 위해 BLT 계측장비 3대를 그림 7과 같이 구성하였으며,

BLT 계측장비 간에는 SFP Module(Wave Length : 1310nm, Vendor : FINISAR CORP.)을 이용하여 Optic 1G로 연결하였다.

그림 7의 BlueScope BL1400A는 1Gbit/10Gbit Ethernet 테스트를 할 수 있는 휴대 가능한 올인원 타입의 계측기로써, Throughput/Throughput32, IP Tools, Monitoring, RFC2544, PBB등을 계측하고 제어 할 수 있는 기능을 제공한다. 실험에서는 모니터링 기능을 이용하여 수신되는 모든 패킷을 캡처하여 패킷 크기, 디코드 및 Hex 코드를 분석하는데 사용되었다. 또한 클럭 동기화를 위해서 사용되는 모든 타임스탬프는 정확성을 최대한 높이기 위해서 계측장비 내 하드웨어에서 제공된다.

테스트를 위하여 Master와 Slave는 Table 1과 같이 구성하고 PTP 메시지 전송을 위하여 Master를 활성화 시킨다.

표 1. Master와 Slave의 TX Configuration
Table 1. TX Configuration of Master and Slave

	Configuration	Value
Master TX	PTP Step	Two-step/One-step
	PTP Interval	1second
	Domain number	04(Hex)
Slave TX	Announce Interval	1second
	Domain number	04(Hex)

Master에서 전송한 PTP 메시지를 수신한 Slave에서는 타임스탬프를 저장 및 분석하고 클럭 동기화를 위해 메시지 교환을 시작하게 되며, 동기화가 시작되면 Slave는 수신된 타임스탬프들을 이용하여 그림 8과 같이 여러 형태의 통계치 정보와 함께 도식화한 그래프를 보여준다.

통계 화면에서는 수신된 타임스탬프 $t_1 \sim t_4$ 시간 정보와 함께 Master to Slave Delay($t - ms$), Slave to Master Delay($t - sm$), Mean Path Delay, Offset from Master, Sync PDV(Packet Delay Variation)/IPDV(Inter-Packet Delay Variation), Delay_Req PDV/IPDV 정보를 Nanosecond 단위로 보여준다. 또한 그래프 화면에서는 측정 시간과 함께 통계 정보를 중복 선택하여 여러 개의 그래프를 한 화면에서 볼 수 있으며 표시 범위를 지정할 수 있는 기능을 제공함으로써 특정 영역을 세밀하게 측정할 수 있다.



그림 6. Master와 Slave의 Status 화면
Fig. 6. Status screen of Master and Slave

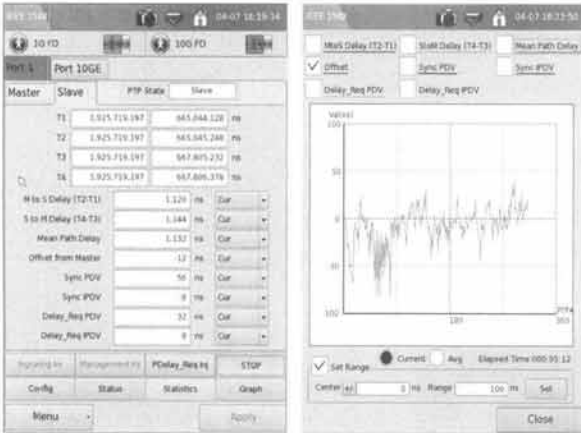


그림 8. Slave의 통계 및 그래프 화면
Fig. 8. Statistics and Graph screen of Slave

지연 요청-응답 메커니즘의 실험을 위해서 동기화 모드 별로 1100번의 PTP 메시지를 교환하여 클럭 동기화 테스트를 실행하였으며, 그 결과는 그림 9와 그림 10과 같다. 실험 결과에서 시작점부터 동기화를 위해 약 30번 정도의 메시지 교환을 통해 Master와 Slave간 클럭 동기화를 이루고 그 이후에는 $-50ns \sim +50ns$ 오차 범위에서 동기화가 유지되는 것을 볼 수 있다.

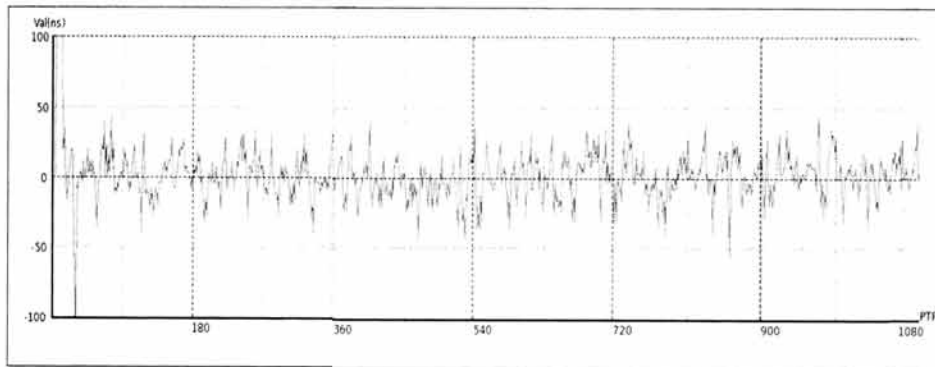


그림 9. Two-step일 때 Offset from Master 그래프
Fig. 9. Offset from Master of Two-step

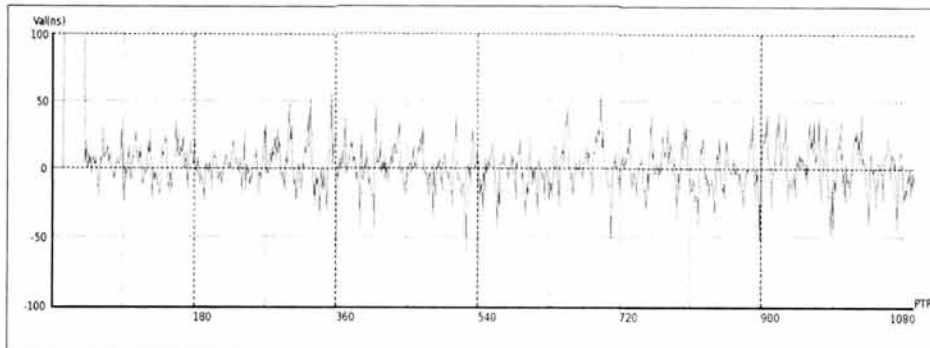


그림 10. One-step일 때 Offset from Master 그래프
Fig. 10. Offset from Master of One-step

4. 결론 및 향후연구

분산 시스템을 관리하고 제어하기 위한 클럭 동기화를 위해 IEEE 1588v2 표준의 중요성이 커지고 있다. IEEE 1588v2는 PTP 프로토콜을 정의하여 이더넷 환경과 더불어 패킷 기반 네트워크에서도 동작할 수 있게 하였으며, 이러한 환경은 타임스탬프가 저장된 메시지를 패킷 전송을 할 수 있게 함으로써 분산된 디바이스 사이의 클럭 동기화를 이루고 Microsecond에서 Nanosecond 이내의 시간 범위 오차를 제공함으로써 높은 정확성을 보장할 수 있게 된다.

본 논문에서는 PTP를 사용하는 패킷 기반 네트워크의 정확한 클럭 동기화를 측정하기 위해 지연 요청-응답 메커니즘을 이용하여 IEEE 1588v2 PTP를 계속하고 제어할 수 있는 기능을 구현하였다. 이를 위해, Master(Requester)와 Slave(Responder)로 나누고 시간 동기화를 위한 PTP 메시지들을 세부적으로 구성하고 전송할 수 있는 기능과 수신되는 PTP 메시지에 대한 상태 정보 및 통계치를 제공하는 기능을 Bluelight Technology 계측장비인 BlueScope BL6000A에 구현하였다. 또한 정확한 클럭 동기화와 정밀도를 높이기 위해서 모든 타임스탬프는 계측장비 내 하드웨어 단계에서 제공하였다.

향후 IEEE 1588v2의 기능을 세부적으로 지원하기 위해

Pdelay_Req, Pdelay_Resp, Pdelay_Resp_Follow_up 메시지 교환을 통해 peer-to-peer 전파시간(Propagation time)을 측정할 수 있는 Peer delay 메커니즘 기능과 멀티캐스트 및 유니캐스트 주소에 따른 PTP 패킷의 확장을 위해서 VLAN 과 UDP over IPv4, UDP over IPv6 네트워크 프로토콜을 설정할 수 있는 기능을 제공할 예정이다.

참 고 문 헌

[1] J. C. Eidson, "Measurement, Control, and Communication Using IEEE1588," New York: Springer-Verlag, 2006.

[2] D. Mills, J. Martin, J. Burbank, and W. Kasch, "Network Time Protocol Version 4: Protocol and Algorithms Specification," RFC 5905, June, 2010.

[3] Mills, D., "Simple Network Time Protocol(SNTP) Version 4 for IPv4, IPv6 and OSI," RFC 2030, October, 1996.

[4] Belden, White Papers : Precision Clock Synchronization The Standard IEEE 1588 [Internet], <http://www.belden.com/resourcecenter/documents/white-papers.cfm>

[5] "IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems," IEEE Std 1588-2008, pp.c1-269, 2008.

[6] Bluelight Technology, BL6000A [Internet], <http://www.bluelighttec.com/bluelight/product/product06.htm>

[7] John C. Eidson et. al. "IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems," IEEE Std 1588-2002, pp.1-144, 2002.

[8] ODVA, DeviceNet Technology Overview [Internet], <http://www.odva.org/Home/ODVATECHNOLOGIES/DeviceNet/DeviceNetTechnologyOverview/tabid/72/Inq/en-US/Default.aspx>

[9] ODVA, ControlNet Technology Overview [Internet], <http://www.odva.org/Home/ODVATECHNOLOGIES/ControlNet/ControlNetTechnologyOverview/tabid/245/Inq/en-US/Default.aspx>



김 성 진

e-mail : sjkim@compiler.sangji.ac.kr

2007년 한양대학교 컴퓨터공학과(석사)

2009년~현 재 상지대학교 컴퓨터공학과 박사과정

관심분야: Embedded systems, Retargetable compiler, System software



고 광 만

e-mail : kkman@sangji.ac.kr

1998년 동국대학교 컴퓨터공학과(공학박사)

1998년~2001년 광주여자대학교 컴퓨터

과학과 전임강사

2001년~현 재 상지대학교 컴퓨터정보

공학부 교수

방문연구: QUT(2003, 호주), UQAM(2008, 캐나다), UC Irvine (2010, 미국)

관심분야: Energy-aware Compiler Technology, Eco-Mobile computing