

P²HYMN: 발전소 정비지원 하이브리드 네트워크 시스템

P²HYMN: Hybrid Network Systems for Maintenance Support in Power Plants

진영훈, 추영열*
(Young-Hoon Jin¹ and Young-Yeol Choo^{1,*})
¹Dept. of Computer Engineering, Tongmyong University

Abstract: Due to the complicated steel structure and safety concern, it is very difficult to deploy wireless networks in power plants. This paper presents a hybrid network, named as P²HYMN (Power Plant HYbrid Maintenance Network), encompassing PLC (Power Line Communication), TLC (Telephone Line Communication), and Wireless LAN. The design goal of P²HYMN is to integrate multimedia data such as design drawings of control equipment, process data, and video image data for maintenance operation in electric power plants. A Multiplex Line Communication (MLC) device was designed and implemented to integrate PLC, TLC, and Wireless LAN into P²HYMN. Performance test of P²HYMN has been conducted on a testbed under various conditions. The throughput of TLC was shown as 39 Mbps. Because the bandwidth requirement per camera is 8.5 Mbps on average, TLC is expected to support more than four video camera at the same time.

Keywords: factory automation, PLC, WLAN, multimedia

I. 서론

국내 1인당 전력 소비량이 1990년 2,206kWh/년에서 2012년 9,331kWh/년으로 약 20년간 약 4배, 연평균 7.2%의 증가율을 보이며 꾸준히 증가하고 있다. 이에 따라 안정적인 전력생산을 위한 정비시간 단축 및 신뢰 확보를 위해 많은 노력을 기울이고 있다[1].

그러나 국내 총 발전량의 60% 이상을 차지하는 화력발전소 내부에는 설비 이상 감지 시스템만 구축되어 있어 발전 설비의 이상을 감지한 경우 운전원 및 운전실에 알람기능까지만 제공하여 설계도나 기술 문서를 온라인으로 열람하여 즉시 처리가 어려운 상황이다. 이에 영상정보를 송수신하기 위한 단말기와 정비지원 데이터를 송수신할 수 있는 새로운 네트워크 구축에 대한 필요성이 제기되었다. 특히, 발전소는 많은 철구조물 및 보안상의 이유로 무선네트워크의 적용이 어려운 문제였다. 본 논문에서는 비용절감과 구현의 편의를 위해 발전소 내 기 구축되어 있는 전화케이블과 전력케이블과 신규로 무선 랜을 포함하는 발전소 정비용 네트워크 구조 P²HYMN (Power Plant HYbrid Maintenance Network)를 제안한다. P²HYMN은 발전소 현장에 이미 구축되어있는 전화선, 전력선 등을 통신 미디어로 재활용하고 여기에 무선통신을 결합하여 정비이력과 설계도 검색이 가능하고 실시간으로 영상정보를 송수신 가능토록 함으로써 정비 작업의 효율성 제고와 비용절감을 꾀하였다. 본 연구

에서는 설비의 보안성과 함께 성능평가를 통해 실시간 정비의 가능여부를 분석하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서 대상이 되는 발전소 시스템 구성 및 사례에 대해, 그리고 III 장에서 제안하는 P²HYMN의 설계에 대해 기술한다. 제안한 설계를 기반으로 한 시연장치 구현과 성능평가에 대해 IV 장에 기술하고 V 장에서 결론을 맺는다.

II. 발전소 설비 구성 및 사례

본 장에서는 현재 발전소 내 네트워크 구성과 정비지원 네트워크 구축 사례 그리고 데이터 통신에 사용 가능한 통신 시스템에 대해 기술한다.

1. 발전소 내 네트워크 구성

발전소 내 네트워크는 사용 목적에 따라 발전 장비 운영을 위한 FA (Factory Automation) 네트워크와 업무를 위한

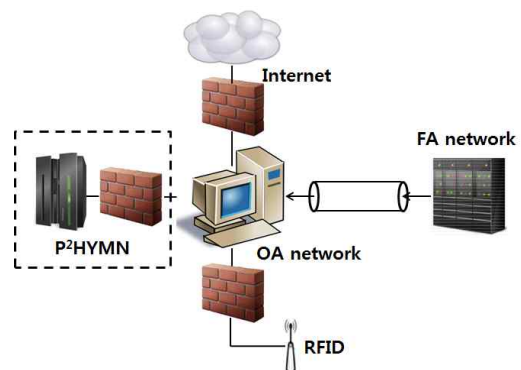


그림 1. 발전소 내 네트워크 구성도.

Fig. 1. Network diagram in power plant.

* Corresponding Author

Manuscript received May 7, 2014 / revised May 11, 2014 / accepted May 12, 2014

진영훈, 추영열: 동명대학교 컴퓨터공학과

(zanzanzan@dreamwiz.com / yychoo@tu.ac.kr)

※ 본 논문은 2013년도 기계연구원 용역사업의 연구비 지원으로 수행되었음.

OA (Office Automation) 네트워크로 구성되어 있으며 구성도는 그림 1과 같다.

각각의 네트워크는 물리적으로 개별 구성이 되어 있으며 FA 네트워크는 발전 설비의 제어 및 감시용으로 외부 인터넷 접속을 차단하고 데이터는 DB를 통해 저장되도록 구성되어 있다. 발전소 내 P²HYMN을 구축하기 위해서는 기존의 네트워크 구성에 영향을 주지 않아야 하며 FA망과 독립적으로 구축되어야 한다.

2. 구축 사례

현재 국내 발전소에는 정비지원을 위한 네트워크가 구축된 사례가 없는 반면, 해외 발전소에서는 정비 업무의 효율성과 신뢰성을 향상시키기 위한 방법으로 스마트 무선 네트워크 기술을 도입하여 사용하고 있다. Milford 발전소에서는 추운 날씨로 인해 water pump와 circulation 장비가 동파되는 사고가 잦았는데 무선 온도 전송기를 설치한 후 동파사고를 사전에 예방하여 장비 수리비용과 네트워크 구축비용의 절감을 통해 발전소 운영에 도움을 주고 있다. 또한 Nebraska 발전소에서는 oil tank monitoring에 무선 시스템을 도입하여 안정성과 효율성을 높이고 있다.

3. 발전소 내 구축된 장비

제안하는 P²HYMN 은 네트워크 구축에 소요되는 시간과 비용을 절감하기 위해 발전소 내 데이터 통신 자원을 최대한 사용하는 것을 전제로 하였다. 발전소 내 통신에 사용 가능한 장비로는 pager phone system과 TRS(Trunked Radio System)가 있다.

3.1 Pager phone system

Pager phone system은 발전소 현장에 설치된 단말기로 어디에서나 다수의 인원이 공동통화가 가능하도록 하는 음성 통신 시스템이다. Pager phone system의 구성도는 그림 2와 같다.

Pager phone system에 사용되는 케이블은 일반 전화선(CPEV 0.9mm)으로 TLC (Telephone Line Communication) 모뎀에 연결시키면 연결된 케이블을 통해 데이터 전송이 가능하다.

3.2 Trunked radio system

TRS는 기존 pager phone system이 고정된 위치에 부착하여 사용되어 지시사항이 있을 경우에는 부착된 위치로 이동하여 지시 전달을 받고 다시 이동함에 있어 효율성이 떨어지는 문제를 해결하기 위하여 도입되었다. TRS는 기존 사용 중인 pager phone system과 연동 가능하며 최대 540Kbps의 데이터 전송속도를 지원하지만 데이터 전송을

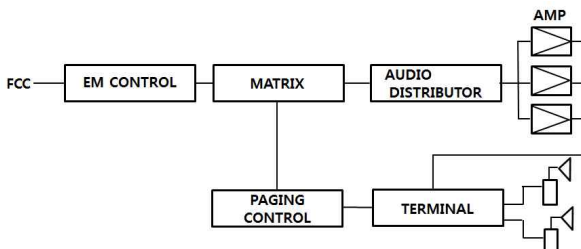


그림 2. Pager phone system 구성도.
Fig. 2. Pager phone system diagram.

위해서는 IP 연동 장치와 별도의 인증서버 구축이 필요하여 비용이 높다는 단점이 있다.

III. P²HYMN 설계

제안하는 P²HYMN은 pager phone 케이블과 전력케이블을 이용하는 유선 네트워크 그리고 케이블이 도달하지 않는 지역에 데이터 전달을 위한 무선 네트워크를 통합한 것으로 그림 3과 같이 구성된다. 기존에 구축되어있는 pager phone system의 활용을 위해 TLC 모뎀 외에 전력선 통신(PLC: Power Line Communication)을 활용키로 하였다. 그림 3의 MLC (Multiplex Line Communication) 모뎀은 TLC 및 PLC 모뎀을 포함하도록 개발된 장비이다. MLC 모뎀의 구조는 그림 4와 같다.

1. MLC

MLC는 P²HYMN 구조의 중심이되는 장치로, UTP, 전화 케이블 그리고 전력케이블을 연결하여 통신이 가능하도록 기업체와 공동으로 설계 및 개발하였다. SMPS(Switched Mode Power Supply), TLC 모뎀 그리고 PLC 모뎀으로 구성된다.

1.1 Telephone line communication

TLC는 전화케이블을 사용하여 데이터를 전달하는 기술로 기존에 사용되었던 xDSL(x Digital Subscriber Line)의 단점을 보완하기 위해 개발된 국내 기술이다[3]. P²HYMN에서는

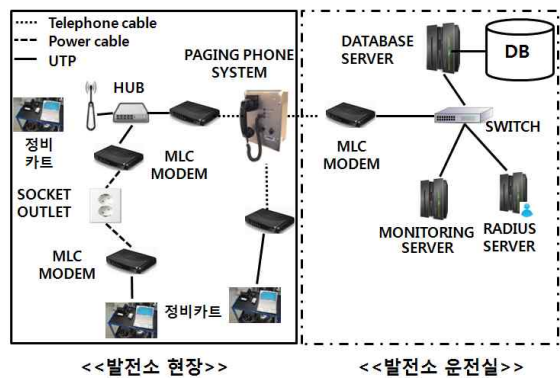


그림 3. P²HYMN 구조.
Fig. 3. P²HYMN structure.

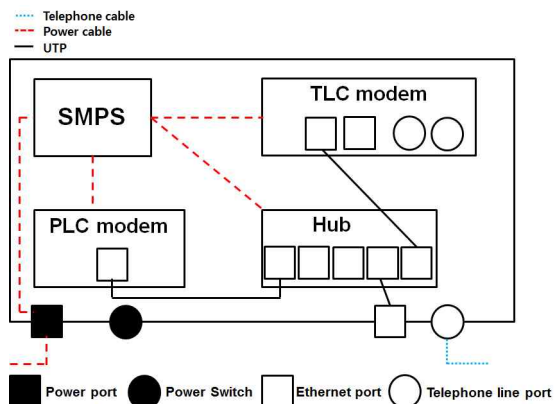


그림 4. MLC 모뎀 구성도.
Fig. 4. Configuration of MLC modem.

제철소 현장에 설치되어있는 TLC 케이블을 MLC에 접속하여 전송매체로 활용하도록 설계되었다.

1.2 Power Line communication

PLC는 전화케이블을 사용하여 데이터를 전달하는 기술로 최대 200Mbps 다운로드 속도를 지원하지만 심한 부하간섭현상과 심한 잡음 및 높은 감쇄 등의 영향으로 안정적인 속도와 연결 상태를 보장하지 못한다[4]. PLC 케이블 역시 P²HYMN의 전송 매체로 활용된다.

2. RADIUS 서버

발전소는 국가 기반시설로 무선 네트워크 구축시 국정원에서 제시하는 보안규정을 따라야 한다. 이에 무선 통신시 데이터 암호화 기법을 적용하여 정보의 유출을 차단하며 RADIUS (Remote Authentication Dial-In User Service) 서버를 사용하여 허가되지 않은 사용자의 접근을 차단하도록 설계하였다.

3. NTP 서버

각 발전소에서는 발전설비에 대한 정비를 위해 DB화하여 관리하고 있다. 고장 상태 및 조치사항을 저장할 경우, 발생 event 별로 순서화가 필요하다. 이를 위해서는 각 설비 및 조치사항에 대한 시간정보를 기준으로 순서화하게 된다. 이를 위해 네트워크 내부 장비들 간에 NTP (Network Time Protocol)을 적용한 동기화 서버를 구축하여 설비에서 발생하는 event 데이터의 동기화 기능을 구현하였다.

IV. 시연장치 설계 및 성능평가

앞서 제안한 P²HYMN 화력발전소에서의 적용 및 성능평가를 위해 시연장치를 설계 및 구현하여 현장에서의 실제 테스트 이전에 실험실 내에서의 성능평가를 수행하였다.

1. 시연장치 설계

발전소는 조업자가 발전소 가동상태를 감시 및 제어하는 운전실 영역과 터빈 등 전력생산설비가 가동되는 발전공정 영역으로 구성된다. 시연장치는 이를 모사하여 그림 5와 같이 구성하였다.

1.1 운전실 영역

운전실 영역에서는 조업자가 상주하여 다수의 컴퓨터와 설비의 제어화면, 현장영상 등을 통해 정비작업 진행 상태를

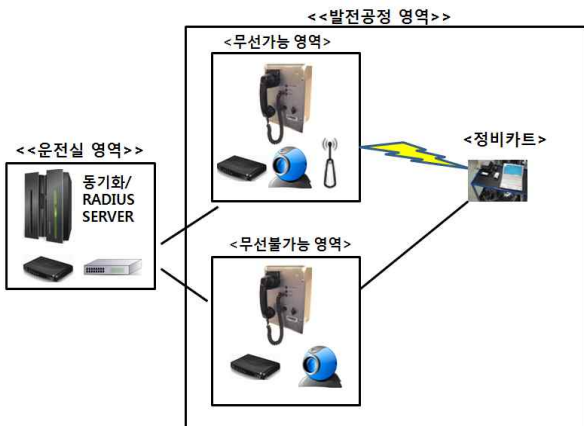


그림 5. 발전소 정비 네트워크 시연장치.

Fig. 5. Testbed of power plant management network.

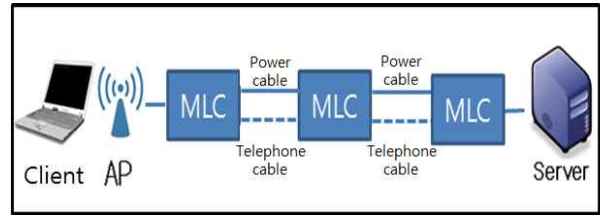


그림 6. 시연장치 실험환경.

Fig. 6. Testbed environment.

표 1. Server/Client 사양.

Table 1. Specifications of Server and Client.

구분	Server	Client
CPU	AMD Turion II 1.5G	Intel i5 2.67G
RAM	2G	6G
OS	Window Server 2008	Window 7

감시하고 관리한다. switch, MLC 모델과 동기화/RADIUS 서버 등으로 구성하였다. RADIUS 서버는 실험을 위해 linux에서 동작하는 open source 기반의 freeradius를 사용하여 구성하였다.

1.2 발전공정 영역

발전공정 영역은 터빈, 발전기 등 다수의 장치에 의해 전력생산이 이루어지는 영역으로 무선랜 설치가 가능한 영역과 불가능한 영역으로 나누어 구성하였다. 무선랜 설치가 가능한 영역은 MLC 모델, 네트워크 카메라 및 AP로 구성하였고 불가능한 영역은 MLC 모델과 네트워크 카메라로 구성하였다. 이 영역에서 정비 기술자가 정비 업무시 정비장비를 탑재한 정비카트를 이동시키면서 운전실로부터 정비지원 데이터를 수신하고 운전실로 정비 대상설비의 영상 데이터를 송신하는 등 정비업무를 수행한다.

2. 성능테스트 방법

MLC 모델과 유무선 망 환경에서의 bandwidth 측정을 위해 그림 6과 같이 실험환경을 구성하였다.

실험은 MLC 모델에 전화케이블과 전력케이블을 연결한 후 진행한 유선 성능평가 실험과 MLC 모델에 AP를 연결하고 전화케이블과 전력케이블을 연결한 후 진행한 무선 성능평가 실험, 그리고 동일한 환경에서 TCP (Transmission Control Protocol)의 송수신 window size를 변화 시키면서 진행한 window size 별 성능평가 실험까지 총 3가지로 구분하여 진행되었다. 실험에서 사용한 서버와 클라이언트의 사양은 표 1과 같다.

무선네트워크 실험에 사용한 대역폭 측정도구는 Jperf2.0이다. 각각의 실험시 window size는 8Kbyte로 고정하였으며 offered load를 변경하며 대역폭을 측정하였다. 실제 실험에 사용한 시연장치는 그림 7과 같다.

3. 유선 성능평가 실험

3.1 MLC 성능측정

MLC 모델의 성능평가를 위해 서버와 클라이언트사이에 MLC 모델만을 설치하고 연결된 케이블 별로 10초 동안 성능을 측정하였다. 이 실험은 MLC 자체의 최대 대역폭을 확인하기 위하여 실시되었다. 성능측정 결과는 표 2와 같다.



그림 7. 구현된 시연장치.
Fig. 7. Implemented testbed.

표 2. MLC 모뎀 성능측정 결과.

Table 2. Results of MLC modem performance test.

구분	Transmitted Bytes	Bandwidth
TLC	82,632 Kbytes	67,275 kbits/s
PLC	40,520 Kbytes	32,686 kbits/s
MLC	82,632 Kbytes	67,275 kbits/s

성능평가 결과 TLC의 대역폭이 PLC의 대역폭보다 약 2 배 정도 높은 것을 확인 하였으며 TLC와 MLC의 대역폭이 동일한 것으로 보아 전화케이블과 전력케이블을 모두 연결 하였을 때에는 전화케이블을 통해 데이터가 전송된다는 것을 알 수 있다.

3.2 TLC 성능평가

유선 TLC 성능평가를 위해 서버와 클라이언트 사이에 3 개의 MLC 모뎀과 switch를 설치하고, MLC 모뎀 간에는 전화케이블만 연결하여 100초 동안 TLC의 대역폭을 측정하였다. 측정결과 평균 대역폭은 18,579Kbps 였다.

3.3 PLC 성능평가

유선 PLC 성능평가는 앞선 실험과 동일한 환경에서 MLC 모뎀 간에는 전력케이블만 연결하여 100초 동안 PLC의 대역폭을 측정하였다. 측정결과 평균 5,045Kbps였으며 측정결과는 그림 8과 같다.

4. 무선 성능평가 실험

4.1 TLC 성능측정

무선 TLC 성능평가를 위해 유선 성능평가 실험과 동일한 환경에서 첫 번째 MLC 모뎀에 AP를 연결하고, Client는 무선으로 MLC 모뎀에 연결한 후 실험을 진행하였다. MLC 모뎀 간에는 전화케이블만 연결하여 100초 동안 측정된 결과 평균대역폭은 14,142Kbps였다.

4.2 PLC 성능측정

무선 PLC 성능평가는 앞선 실험과 동일한 환경에서 MLC 모뎀 간에는 전력케이블만 연결하여 100초 동안 측정한

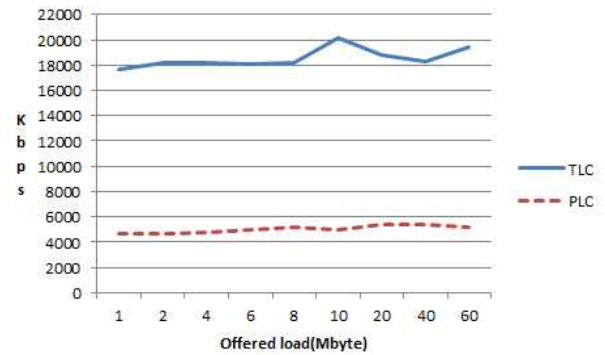


그림 8. TLC와 PLC 유선 성능측정 결과.
Fig. 8. TLC and PLC performance test results in wired network.

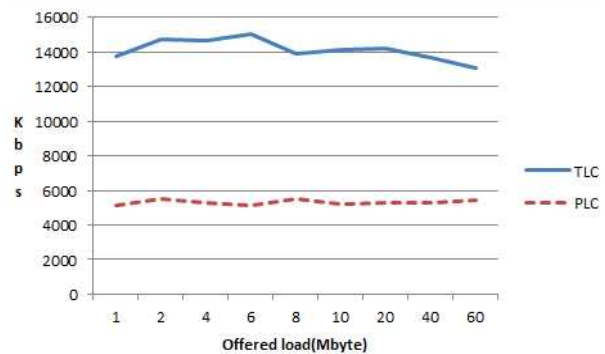


그림 9. TLC, PLC 무선 성능평가 결과.
Fig. 9. Wireless network test results of TLC and PLC.

결과 평균대역폭은 5,290Kbps로 측정되었다. 그림 9는 TLC와 PLC의 무선성능 측정결과를 나타낸 그래프이다.

5. Window size 별 성능평가 실험

시연장치에 사용된 MLC 모뎀의 최대대역폭은 200Mbps 이지만, 실험 결과 유선에서 최대대역폭의 33.5% 만 실제 활용됨을 확인 할 수 있었다.

이에 앞선 실험들과 동일한 환경에서 TCP window size를 8Kbyte에서 1Mbyte 까지 증가시키며 bandwidth를 측정하는 실험을 추가로 진행하였다. 그림 10은 유선 성능평가 결과를 나타낸 그래프이며, 그림 11은 무선 성능평가 결과를 나타낸 그래프이다.

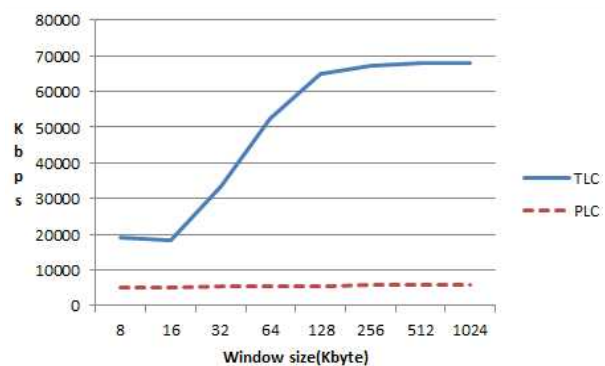


그림 10. Window size 별 유선 네트워크 성능.
Fig. 10. Wired network throughput according to window sizes.

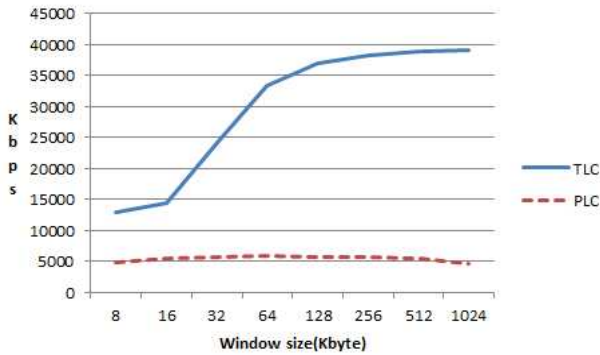


그림 11. Window size 별 무선 네트워크 성능.
Fig. 11. Wireless network performance according to window sizes.

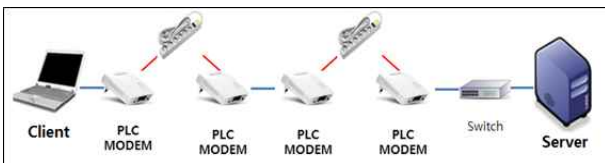


그림 12. PLC 추가 실험 환경.
Fig. 12. Additional test environment using PLC modem.

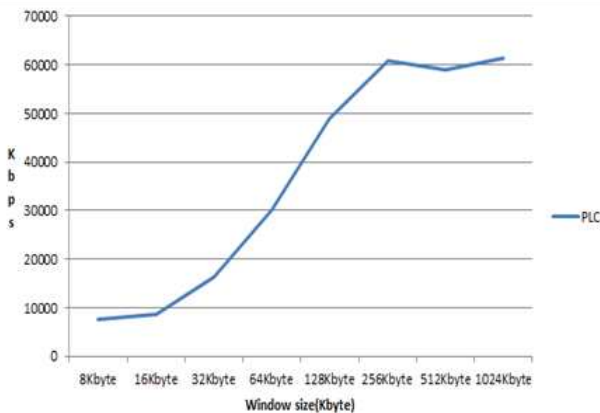


그림 13. PLC 추가 성능평가 결과.
Fig. 13. Additional test results using PLC modem.

6. PLC 추가 실험

앞에서의 성능평가 결과 PLC의 경우 window size를 증가시켜도 대역폭의 변화가 없는 것을 확인하였다. 이와 같은 원인을 파악하기 위해 동일한 성능을 지원하는 PLC 모뎀을 사용하여 그림 12와 같은 환경에서 추가 성능평가를 진행하였다.

그림 13은 PLC 추가 성능평가 결과를 나타낸 그래프이다. 그림에서 보이듯이 개발된 MLC 내의 PLC 성능에 비해 최대 10배 이상의 대역폭을 보였다.

7. 성능평가 결과분석

정비기술자가 현장에서 정비에 사용되는 카메라의 경우 화면당 1920 × 1080 픽셀에 초당 25 프레임을 전송한다. H.264 코덱을 사용하며 이때 요구되는 대역폭은 무선의 경우 8.5Mbps이다. 앞에서 TLC 무선성능평가의 경우 약 14Mbps의 대역폭을 제공하므로 event 정보를 포함하여

제안된 P²HYMN에서 지원 가능함을 알 수 있다. 특히 TLC의 경우 window size 확대시 약 39Mbps의 대역폭을 제공하므로 4대 이상의 정비카트에서 설비에 대한 정비화상을 동시에 전송하여도 수용 가능하다. Window size가 커질 경우 한 번에 전송되는 데이터 량이 증대되므로 대역폭은 그에 따라 증대된다. 유무선 네트워크가 각각 약 40Mbps, 70Mbps에서 한계점에 이른 것은 MLC, 무선 AP 등의 장비에서 처리할 수 있는 한계점에 이른 것으로 분석된다. 제안된 P²HYMN 구조는 현장테스트를 통해 동작을 확인하였다.

PLC의 경우 window size를 증가시켜도 대역폭의 변화가 없는 것을 확인하였는데 이는 추가 성능평가의 결과와 비교해 볼 때, MLC 내부 PLC 모뎀의 H/W적인 문제로 판단된다. 전력선 통신에서는 채널의 모델링 기법[5] 및 광대역 전력선 통신[6] 방식과 개선된 전력선 통신 칩셋[7]들이 제안되고 있다. 이를 검토하여 추후 과제로 P²HYMN에서 새로운 PLC 모뎀을 통한 MLC의 재설계가 필요하다.

V. 결론

발전소 내 비효율적인 정비 작업의 개선을 위해 기 구축된 pager phone 케이블, 전력케이블 그리고 무선 LAN을 통합하는 P²HYMN을 제안하였다. P²HYMN은 정비이력, 기술 문서, 설계도 등을 정비 작업자들에게 전송하며 정비 작업 상황을 카메라를 통해 영상데이터로 운전실에 전송함으로써 정비 작업의 효율성을 높인다. 본 논문에서는 제안한 P²HYMN을 기반으로 시연장치를 구축하였고 중단간 대역폭 및 전송지연 측정을 통해 성능평가를 실시하였고 이를 바탕으로 현장실험을 통해 적용 타당성을 확인하였다.

향후, 실제 발전소 현장에 구축을 위해 국정원에서 제시하는 보안 규정을 만족하는 보안 기능의 구축과 PLC 성능 개선을 위한 회로 재설계 연구가 필요하다.

REFERENCES

- [1] K. Yoo, "Impact of structural uncertainty in electric power supply and demand to private electric power company," *KIS Credit Monitor special Report*, pp. 4-25, Mar. 2012.
- [2] V. C. Gungor, D. Sahin, T. Kocak, S. Ergut, C. Buccella, C. Cecati, and G. P.Hancke, "Smart grid technologies: communication technologies and standards," *Industrial Informatics IEEE Transactions*, vol. 7, pp. 529-539, Nov. 2011.
- [3] W. Vereecken, W. V. Heddeghem, M. Deruyck, B. Puype, B. Lannoo, W. Joseph, D. Colle, L. Martens, and M. Pickavet, "Power consumption in telecommunication networks: overview and reduction strategies" *Communications Magazine, IEEE*, vol. 49, pp. 62-69, Jun. 2011.
- [4] S. K. Gupta, S. K. Gaur, and Y. Mohan, "Characterization and evaluation of power lines communication for multipath channel by using OFDM transmission," *VSIRD International Journal of Electrical, Electronics &*

Communication Engineering, vol. 1, pp. 496-503, Sep. 2011.

- [5] W. Zhu, Z. Zhu, E. Lim, and Y. Huang, "State-of-art power line communications channel modelling," *Procedia Computer Science*, vol. 17, pp. 563-570, 2013.
- [6] N. Berezak-Lazarus, "Smart grid enabled and enhanced by broadband powerline," *Proc. of the 3rd Int'l Conf. on Smart Grids, Green Communications and IT Energy-aware Technologies*, pp. 77-82, Mar. 2013.
- [7] Qualcomm AR7420 IEEE 1901 compliant HomePlug AV MAC/PHY Transceiver, <http://www.qca.qualcomm.com/wp-content/uploads/2013/11/QCA7420.pdf>



진 영 훈

2012년 2월 동명대 컴퓨터공학과 졸업.
2014년 2월 동 대학원 석사. 관심분야
는 네트워크, 정보보안.



추 영 열

1986년 2월 서울대학교 제어계측공학과 졸업(학사). 1988년 2월 서울대학교 제어계측공학과 졸업(석사). 2002년 2월 포항공과대학교 컴퓨터공학과 졸업(박사). 1988년 6월~1994년 6월 포항산업과학기술연구원 선임연구원. 1994년 7월~2002년 8월 포스코 기술연구소 책임연구원. 2002년 9월~현재 동명대학교 컴퓨터공학과 교수. 2005년 1월~7월 독일 Fraunhofer IESE Visiting Scientist. 2006년 11월~2012년 12월 유비쿼터스 항만 ITRC 센터장. 관심분야는 WSN, Ambient Intelligence, 컴퓨터통신, 공장자동화, 네트워크 보안.