

컨테이너 크레인 실시간 설비진단 시스템 개발 Development of Real-time Condition Monitoring System for Container Cranes

정다운 · 추영열

D. U. Jung and Y. Y. Choo

(접수일 : 2008년 10월 23일, 수정일 : 2008년 11월 28일, 채택확정 : 2008년 12월 1일)

Key Words : Ubiquitous Sensor Network(USN), Bluetooth(블루투스), Condition Monitoring System(상태감시시스템), Ad-Hoc Routing(에드혹 라우팅)

Abstract : This paper describes development of real-time condition monitoring system to observe state of a container crane in a port. To analyze the state of a crane, the strength and the direction of wind are measured with sensors along with the load resulted a crane at the moment. The measured signals are processed by especially developed conditioning board and converted into digital data. Measured data are analyzed to define the state of the crane at an indicator. For transmission of these data to the indicator, we implemented wireless sensor network based on IEEE 802.15.4 MAC (Media Access Control) protocol and Bluetooth network protocol. To extend the networking distance between the indicator and sensor nodes, the shortest path routing algorithm was applied for WSN (Wireless Sensor Network) networks. The indicator sends the state information of the crane to monitoring server through IEEE 802.11b wireless LAN (Local Area Network). Monitoring server decides whether alarm should be issued or not. The performance of developed WSN and Bluetooth network were evaluated and analyzed in terms of communication delay and throughput.

1. 서 론

2003년 9월에 발생한 태풍 매미로 인해 부산항에 서는 컨테이너 크레인 등 항만 구조물들의 파손으로 많은 비용의 손실이 발생하였다. 컨테이너 크레인 한대당 설치비용이 50억 정도가 소요되는데 크레인 파손으로 인한 재설치 비용 뿐 아니라 항만 조업의 중단으로 인한 손실 등 그 피해는 막대하였다. 현재 항만에 설치된 컨테이너 크레인에 대해 제조업체에서 보장하는 사용 기간은 통상 20년이나 정비 과정을 거쳐 그 이상 사용되고 있다. 현재 부산항의 컨테이너 크레인 대부분이 20년 전후로 노후화가 되어 있어, 설비에 대한 엄격한 정비 및 관리가 요구되고 있다. 항만내 구조물의 피로도를 점검하는 등 설비 상태에 대한 감시는 분기별로 비파괴 검사를 통해 이루어지고 있다. 그러나 이 검사는

실시간으로 상태를 감시할 수 없으므로 태풍과 같은 천재지변 및 돌발 사고에 대하여는 취약한 상태이다.¹⁾

현재 항만 내 구조물 상태 감시는 풍향, 풍속 센서를 이용하여 바람의 방향과 세기를 측정하고 이 신호 처리를 위하여 인디케이터가 크레인에 설치되어 있다. 그러나 풍향과 풍속이 크레인에 미치는 영향에 대한 분석을 포함하여 설비 상태를 실시간으로 항만의 중앙 관제실에 송신되는 설비감시 장치는 아직 적용되지 못하고 있다. 기존의 풍향, 풍속 센서와 인디케이터는 유선으로 연결되어 설치 및 유지, 보수가 어려운 점도 문제점으로 제시되고 있다.

기존의 무선 통신을 이용한 상태 감시 시스템 사례로는 Gold Gate Bridge 프로젝트²⁾와 Redwood 프로젝트가³⁾ 있다. Golden Gate Bridge 프로젝트는 미국 캘리포니아 주 서안의 Golden Gate Bridge의 구조물 상태를 감시하기 위해 56개의 USN 노드를 설치하여 교량의 부분별 진동을 측정하고 이를

추영열(책임저자): 동명대학교 컴퓨터공학과
E-mail: yychoo@tu.ac.kr, Tel: 051-629-3751
정다운: 동명대학교 대학원 컴퓨터공학과

multi-hop 네트워크를 통해 전송함으로써 차량의 통제 없이 교량의 상태를 감시한다.²⁾ 그러나 이 연구결과는 측정 신호 및 대상이 달라 따라 크레인에 적용할 수 없다.

Redwood 프로젝트는 캘리포니아의 주목인 Redwood의 상태를 USN을 이용하여 Redwood의 상태를 감시한다. 기존의 위성사진으로 Redwood의 상태를 판독하던 것을 USN Node를 이용, 4~5분 단위로 광합성 상태, 온도, 습도를 측정하여 비용 절감을 꾀하였다.³⁾

이외에도 많은 상태 모니터링에 대한 연구가 수행 되었지만 항만에 사용 중인 구조물에 대한 모니터링 시스템의 연구 결과는 아직 제시되지 않고 있다.

본 논문에서는 풍향, 풍속 센서를 통해 바람의 방향과 세기를 측정하고 Load cell을 이용하여 풍향과 풍속에 따른 컨테이너 크레인의 하중을 동시에 측정하여 그 결과를 무선 센서 네트워크를 이용하여 항만의 중앙 관제실로 전송함으로써 위험 상황에 대하여 정보를 전달하는 실시간 컨테이너 크레인 상태 감시 시스템에 대하여 기술한다. load-cell, 풍향, 풍속센서와 인디케이터간의 인터페이스는 설치 및 유지 보수의 편리성을 위해 USN (Ubiquitous Sensor Network)과 Bluetooth를 이용한 2가지 형태를 개발하고 성능을 평가하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 개발된 실시간 설비감시 시스템의 하드웨어 및 소프트웨어 구성에 대해 기술한다. 3장에서는 USN을 이용한 모니터링 시스템과 Bluetooth를 이용한 모니터링 시스템의 성능실험 및 결과를 기술하고 4장에서 결론을 맺는다.

2. 컨테이너 크레인 모니터링 시스템

이장에서는 USN과 Bluetooth를 이용한 컨테이너 크레인 설비감시시스템의 구조에 대해 기술한다.

2.1 크레인 설비감시시스템의 통신 방식

컨테이너 크레인의 실시간 상태 감시를 위해 크레인 하부에 하중을 측정 할 수 있는 Load-cell을 부착하고 상단에는 풍향풍속의 변화를 측정 할 수 있는 초음파 풍향풍속 센서를 설치하여 측정된 데이터를 센서 네트워크를 통해 인디케이터에 전송되도록 설계하였다. 각 센서에서 측정된 데이터를 인

디케이터에 전송하기 위해 USN 과 Bluetooth 두 가지의 통신 방식을 구현하였다. USN 방식에서는 각 센서들이 USN Node의 ADC (Analog-Digital Converter)를 통해 디지털 신호로 변환되고 센서 네트워크를 통해 인디케이터에 송신된다. 인디케이터는 수집된 데이터를 항만 내에 구축된 WiFi 통신을 통해 운영실에 전달하며, 운영실에선 실시간으로 크레인의 상태를 감시하게 된다.

또한 Bluetooth 통신에 의해서도 센서 데이터가 수집될 수 있도록 구현하였으며 사용자의 선택에 따라 둘 중 하나의 방식을 적용할 수 있다. 두 형태의 시스템의 구성은 Fig. 1과 같다.

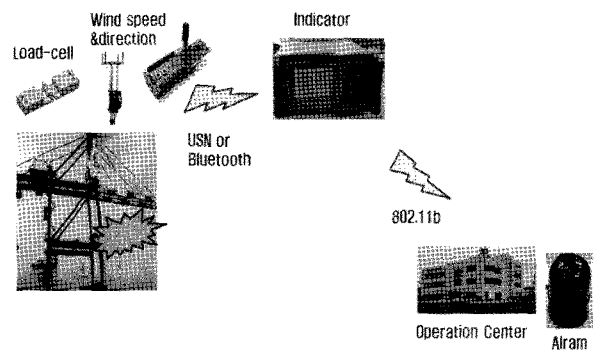


Fig. 1 Monitoring system configuration with Bluetooth and USN communication links

2.2 크레인 설비감시시스템의 신호처리부

USN 노드를 이용한 것과 컨테이너 크레인 설비감시시스템을 위해서 각 센서들의 출력값을 USN 노드의 ADC인터페이스를 이용하여 센싱 정보를 수집한다.

- 풍향 풍속센서 출력 : 4~20mA
- Load-cell 출력 : 0~1.04mV
- USN 노드 ADC 입력값 : 4~20mA
- 신호증폭기 : Load-cell 출력을 10배 증폭

Load-cell의 출력값이 USN 노드의 ADC에 바로 입력값으로 하기에는 출력이 낮기 때문에 load-cell의 신호를 증폭시켜야 된다. 증폭 시에 발생할 수 있는 아나로그 신호의 왜곡 현상을 방지하기 위해 디지털로 변환 후 기준신호의 10배로 증폭시켰다.

증폭시킨 디지털 신호를 USN 노드의 ADC에 연결하기 위해서 다시 디지털 신호를 아날로그 신호로 변환하는 DAC-ADC 보드를 통해 신호를 변환하여 USN 노드에 입력을 하게 된다. 사용된 USN 노드의 ADC는 3개의 채널을 이용하여 load-cell과

풍향, 풍속을 구분 하였다. 전체 구성은 Fig 2와 같다.

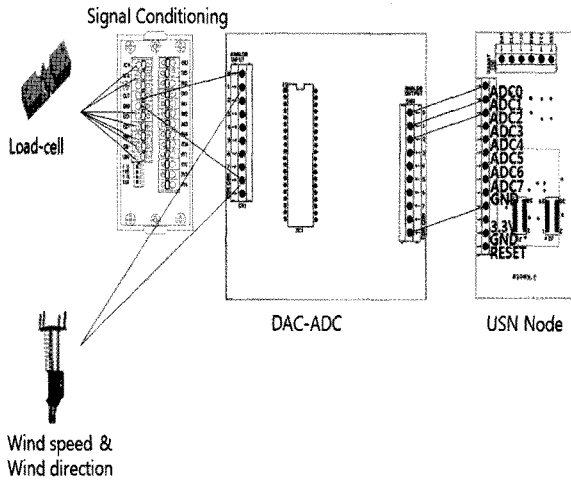


Fig. 2 Block diagram of developed signal processing module

2.3 USN Node Software

USN 노드의 프로그램은 TinyOS 기반의 NesC 언어를 이용하여 작성되었다. 개발에 사용된 USN 노드는 MSP430 MCU를 장착하고 있다. TinyOS에서 제공하는 MSP430 컴포넌트를 사용하였으며, USN 노드에 연결된 센서 타입별로 load-cell과 풍향풍속센서 연결되는 2개의 ADC 채널을 사용하여 작성하였다. 하나의 ADC 채널에는 load-cell이 연결되어 데이터를 수집하고 다른 하나의 ADC 채널은 풍향풍속 센서가 연결되어 데이터를 수집한다. 전반적인 USN node 소프트웨어는 Open Source인 SurgeTelos를 참조하여 작성하였다.^{4)~6)} Fig. 3은 각 USN 노드에 구현된 소프트웨어 구조를 나타낸다.

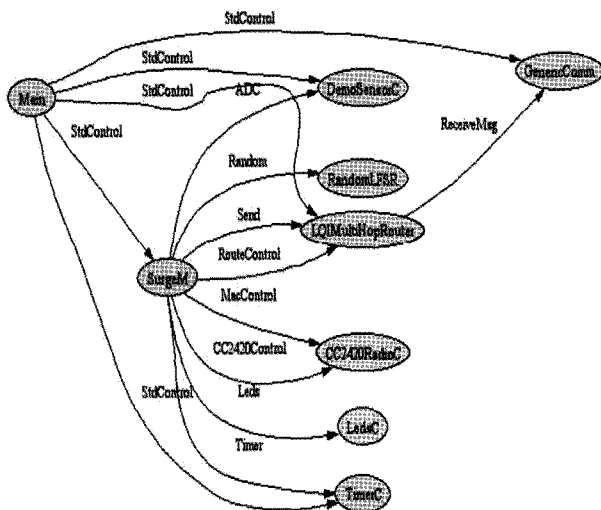


Fig. 3 USN node software architecture

이때 사용된 Ad-hoc routing 기법은 최단 경로 알고리즘을 이용하였다. 최단 알고리즘을 이용하여 데이터를 전달하는 과정은 Fig. 4와 같다.

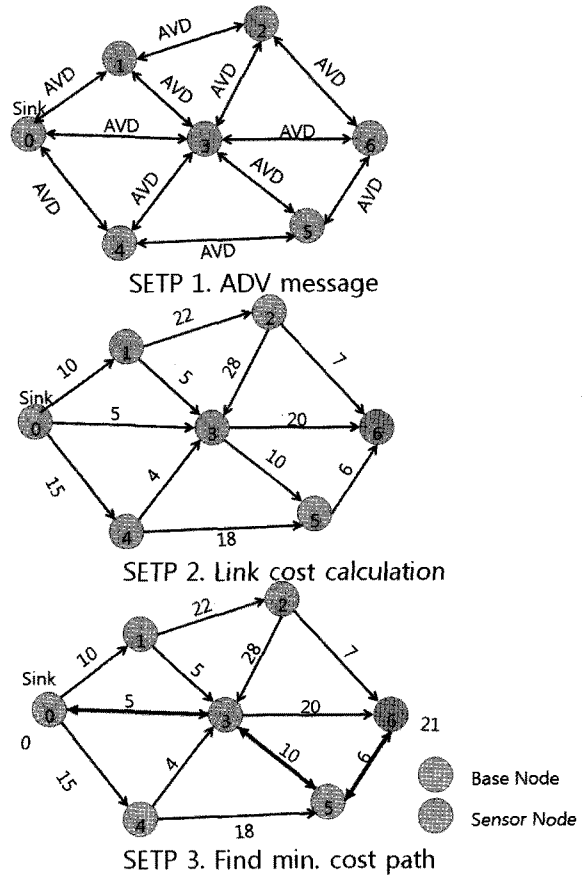


Fig. 4 Operation of the shortest path routing algorithm

- 각 노드들은 유일한 고유의 node ID를 가진다.
 - Base Node는 가장 작은 node ID가 된다.
 - 각 node들은 이웃한 node에게 AVD 신호를 전달한다.
 - 수신 AVD 신호를 이용하여 RSSI와 LQI 값을 계산한다.
 - 이 값을 이용하여 각 링크의 cost를 계산한다.
 - 각 링크 Cost 값을 보고 최단 경로를 선택한다.
- 이때 최단 경로를 선택하기 위해 다음과 같은 식을 이용하여 자신 node ID cost를 계산한다.
- $$\text{노드 ID cost} = \text{부모 노드 cost} + \text{link cost}$$

2.4 상태감시 서버

항만 크레인의 상태정보는 항만 운영실에 위치한 상태감시 서버로 송신되며 항만 운영 시스템 (TOS, Terminal Operation System)과 연동되어 경

보를 발생하게 된다. TOS와의 연동을 고려하여 Server 프로그램은 SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) 툴인 InTouch를 사용하여 개발 하였다⁷⁾. 상태감시 서버에서는 풍향, 풍속 과 그에 따른 크레인의 하중 변화가 임계치에 도달하면 경보를 발생하게 된다. server 프로그램의 구조는 Fig. 5와 같으며, 실행화면은 Fig. 6과 같다.

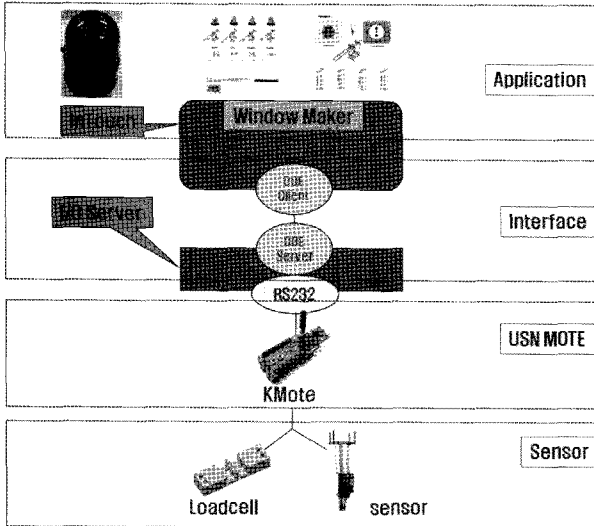


Fig. 5 Server program hierarchy

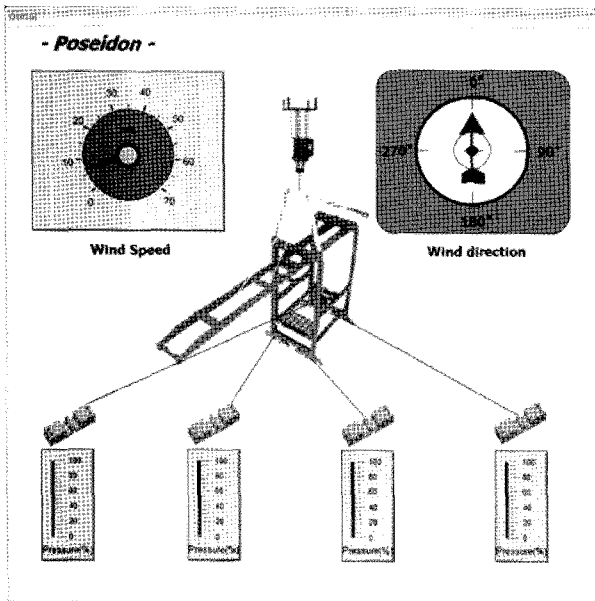


Fig. 6 GUI of server

USN으로부터 송신된 측정 데이터는 상태감시 서버에 수신되어 서버 내부에서 프로세스간 통신 방식의 하나인 DDE (Dynamic Data Exchange) 방식

에 의해 데이터 처리 및 경보 발생 여부를 판정하는 상태감시 응용에 전달된다. 이를 위해서 별도의 I/O server를 개발 하였다. USN 노드로부터 데이터를 수신하는 부분이 서버가 되고 데이터를 처리하는 상태감시 응용이 클라이언트가 된다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 USN을 이용한 시스템

USN을 이용한 항만 구조물 모니터링 시스템의 성능 실험을 위해서 USN 노드를 10m, 20m, 30m, 40m, 50m 로 거리를 변화하면서 측정 데이터를 Base 노드로 전달하도록 하였다. 전달되는 데이터의 크기는 10Kbyte였다. USN 노드의 RF 출력을 최대로 올려서 실험을 하였다. 실험 결과는 Table 1과 같다. 10m, 20m, 30m, 40m, 50m 로 거리를 변화에 따라 USN을 이용한 수신 시간은 평균하면서 약 22초의 수신 시간이 걸렸으며, 전송률 평균은 3531.445 bps가 측정되었다.

3.2 Bluetooth를 이용한 시스템

실험 조건은 USN과 동일한 환경에서 하였으며, Bluetooth는 Bluetooth version 2.0 ED1 class 1 사양을 이용하여 실험하였다. Bluetooth version 1.0의 경우 10m의 전송 범위를 가져 센서가 부착된 크레인의 각 영역을 하나의 네트워크로 연결할 수 없다. Bluetooth version 2.0의 경우 최대 100m의 전송 범위를 가지므로 본 응용에서 단일 크레인의 설비감시를 위한 시스템에는 적용이 가능하다. Bluetooth를 이용한 실험 결과는 Table 2와 같다. 평균 전송 시간은 13.45초였으며 평균전송률은 6944.763 bps 였다.

3.3 실험 결과 비교 분석

앞에서 실험한 실험 결과를 비교 분석 하였다. USN과 Bluetooth 통신망에 대하여 10kbyte의 데이터의 수신시간을 비교하였고 그 결과를 Table 3과 Fig. 7에 나타내었다. Table 3을 보았을 때 Bluetooth가 USN에 비해 더 짧은 전송지연을 보였다. 두 통신방식의 전송률은 거리 변화에 따라 Table 4 와 같이 나타났다. 이를 Fig. 8에 그래프로 나타내었다.

Table 1 Transmission delay and throughput for USN

distance (m)	delay(sec.)	throughput (bps)
1	20	4480.00
10	24	3373.33
20	27	3318.52
30	26	3446.15
40	25	3584.00
50	30	2986.67

Table 2 Transmission delay and throughput for Bluetooth

distance (m)	delay (sec.)	throughput (bps)
1	8.6	10418.60
10	14.3	6265.73
20	14.6	6136.99
30	14.3	6265.73
40	14.4	6222.22
50	14.5	6179.31

Table 3 Comparison of transmission delay in USN and Bluetooth depending on distances

distance(m)	delay of USN (sec.)	delay of Bluetooth (sec.)
1	20.7	8.6
10	24.3	14.3
20	24.7	14.6
30	26.3	14.3
40	25.5	14.4
50	30.2	14.5

Table 4 Throughput of USN and Bluetooth depending on distances

distance (m)	throughput of USN (bps)	throughput of Bluetooth (bps)
1	4480.00	10418.60
10	3373.33	6265.73
20	3318.52	6136.99
30	3446.15	6265.73
40	3584.00	6222.22
50	2986.67	6179.31

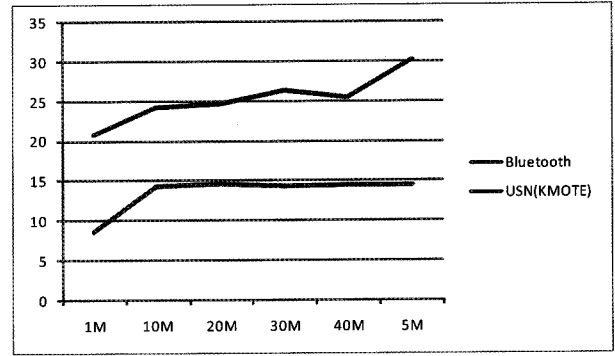


Fig. 7 Transmission delay in USN and Bluetooth depending on distances

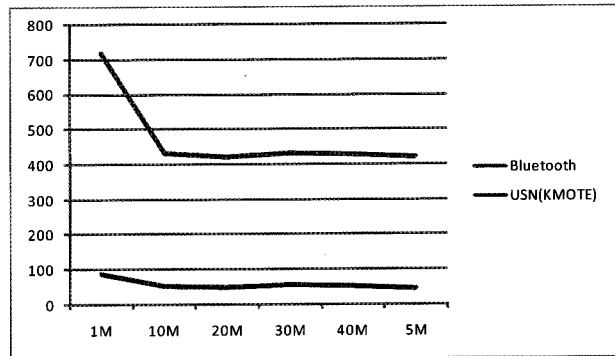


Fig. 8 Throughput of USN and Bluetooth depending on distances

이와 같은 결과의 차이는 USN과 Bluetooth의 Spec의 차이에서 비롯된 것으로 분석된다. USN 노드에 사용하는 RF 칩인 CC2420은 IEEE 802.15.4 MAC (Media Access Control) 사양을 구현하고 있으며 최대 250Kbps 전송속도를 가지고 있다. 하지만 Bluetooth version 2.0 경우 최대 3Mbps의 전송속도를 가지고 있어 이러한 전송속도 사양의 차이로 인해 Bluetooth가 USN에 비해 전송 지연이 더 작은 것으로 분석된다.

USN과 Bluetooth를 이용한 컨테이너 크레인 모니터링시스템에 전달하는 풍향풍속 센서의 값과 load-cell의 값을 실시간 처리에는 아무런 문제가 없음을 확인하기 위해서 기존의 유선으로 풍향, 풍속센서와 load-cell의 데이터를 측정하는 유선시스템과 성능을 비교 해보았다. 유선 통신을 이용한 모니터링 시스템의 경우 10kbps 데이터를 전송시 약 1분의 전송시간이 걸렸으며, 전송률은 평균 1493.33bps로 측정이 되었다. 이 결과와 비교하여 유선 시스템에 비해 본 논문에서 제안하는 무선통신을 이용한 시스템이 데이터의 실시간 전송에 더 유리함을 확인하였다.

하지만, Bluetooth의 경우 Pico net 구성은 하나의 master 노드와 최대 7개의 slave 노드 연결이 가능하여 최대 7개의 센서들만이 연결할 수 있고 망의 거리 역시 100m 정도로 제한되는 한계가 있다. 반면에 USN의 경우는 더 많은 센서들이 설치될 수 있고 보다 라우팅에 의해 망의 확장성 측면에서 장점을 가지고 있다.^{8)~10)}

4. 결 론

본 논문은 무선통신을 이용한 컨테이너 크레인 모니터링 시스템을 다음과 같이 설계하였다. 컨테이너 크레인에 풍향·풍속 센서와 Load-cell를 설치하고 각 센서들과 인디케이터 간의 데이터 링크로써 USN과 Bluetooth를 이용하는 모니터링 시스템을 구현하였다. 이 시스템에서 센서들에서 측정되는 데이터의 실시간 전송을 위해 IEEE 802.15.4에 기반한 MAC 프로토콜과 Bluetooth 프로토콜을 구현하였다. 구현된 두 통신 방식에 대하여 데이터의 송신시 전송지연 시간과 Throughput을 측정, 두 시스템의 성능을 비교 분석 하였다.

전송률이나 전송시간은 Bluetooth가 더 나은 성능을 보였으나, Bluetooth는 기본적으로 PAN(Personal Area Network)을 목적으로 제안된 사양으로써 반경이 100m로 제한되어 있다. USN의 경우는 multi-hop 네트워크를 구성함으로써 보다 광범위한 거리에서도 사용이 가능한 장점이 있다. 항만 설비 상태감시의 경우 측정 센서간의 거리를 고려하여 적용 환경에 따라 두 사양 모두 적용이 가능하다. 향후 항만 환경에서의 실제 실험을 통해 정보를 발해야 할 풍속과 풍향, 그 때의 크레인에 부가되는 하중 변화에 대한 임계치를 설정하는 연구가 수행될 예정이다.

후 기

본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 대학IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음. (IITA-2008-C1090-0801-0004)

참 고 문 헌

1. 최상희 외 4인, 2007, "국내 컨테이너 항만 기술 개발 로드맵 수립 연구", 해양수산개발원 기

본연구 2007-14.
 2. Sukun Kim et al., 2007, "Health Monitoring of Civil Infrastructures Using Wirelss Sensor Networks", IPSN'07.
 3. Gilman Tolle et al., 2005, "A Macroscopic in the Redwoods" Proc. of the 3rd Int'l Conf. on Embedded Networked Sensor Systems, pp. 51~63.
 4. Bluetooth.com, <http://www.bluetooth.com>
 5. TinyOS Forum <http://www.tinyos.or.kr>
 6. Texas Instruments <http://www.ti.com>
 7. Wonderware Invensys <http://global.wonderware.com/>
 8. 이원준, 이춘화, 2005, "저속WAPN IEEE 802.15.4 센서 네트워크", 홍릉과학출판사.
 9. Stefano Basagni et al., 2004, "Mobile ad hoc network", Wiley Interscience.
 10. Holger Karl and Andreas Willig, 2005, "Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks," Wiley Interscience.