

웹-기반 실시간 광생물 반응기 모니터링 시스템

성원기¹, 김성수¹, 이제훈^{1*}
¹강원대학교 삼척캠퍼스 전자정보통신공학부

A Web-based Realtime Monitoring System for Photobioreactor

Won-Ki Sung¹, Sung-Soo Kim¹ and Je-Hoon Lee^{1*}

¹Division of Electronic and Information Communication Eng., Samcheock Campus,
Kangwon National University

요 약 본 논문은 와이파이 무선 인터페이스를 채택한 웹-기반 실시간 광생물 반응기 모니터링 시스템을 제안한다. 와이파이 무선 네트워크는 11Mbps의 고속 데이터 전송이 가능할 뿐만 아니라 기존 무선 랜 환경과 호환되기 때문에 쉽게 사용자의 요구에 따른 재구성형 광생물 반응기와 모니터링 시스템에 적용이 가능하다. 본 논문에서는 실제 상용 광생물 반응기에 와이파이 무선 데이터 전송 모듈을 탑재하여 무선 네트워크 환경을 구성하였고, 또한 여러 대의 광생물 반응기의 배양 환경을 실시간으로 모니터링 할 수 있는 응용 S/W를 개발하여 동작을 검증하였다. 본 논문의 연구 결과는 미세조류 장치뿐만 아니라 다양한 바이오 장치 산업의 핵심 기기들을 무선 네트워크로 연결하고 모니터링 환경을 구축하는데 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract This paper presents a web-based real-time monitoring system for a photobioreactor using an WiFi wireless network. An WiFi interface can support high speed data transfer, up to 11Mbps and it can be compatible with commercial wireless LAN environment. Thus, the proposed cell culture based on WiFi network can be easily applied to the reconfigurable system and real-time monitoring system. In this paper, we integrate the commercial WiFi module to the various bio-sensors and sensor control board to configure the wireless network. After we evaluate application S/W for monitoring the environment within incubator, we verify the proposed sensor networks for a cell culture system and its monitoring system. This result can be applicable for various bio-applications that require the network configuration and real-time monitoring system.

Key Words : Photobioreactor, Bio-application, WiFi, Wireless network, Real-time monitoring

1. 서론

전세계적으로 석유, 석탄, 천연가스등 주요 에너지원의 고갈 현상이 심화되고 있고, 신재생에너지원의 개발을 통해 이를 해결하려 노력하고 있다. 특히, 바이오매스(biomass)로부터 생물학적, 화학적 또는 물리학적 처리를 통해 바이오 에너지를 창출하려는 노력이 활발하다. 전 분질계인 옥수수과 당질계인 사탕수수를 이용한 바이오 에탄올 생산이 활발하나, 이러한 곡물 바이오매스를 이용

한 바이오에너지 생산은 대형 경작지를 필요로 하고 곡물 가격 상승의 부작용이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 해조류, 갈조류와 홍조류와 같은 거대조류, 그리고 식물성 플랑크톤인 미세조류와 같은 해양 바이오매스를 이용한 재생에너지 개발이 요구된다. 특히, 미세조류 바이오매스는 돌연변이 유발과 같은 유전자 조작에 의한 균주 개량이 용이하고, 대기의 이산화탄소를 광합성 암반응 과정을 통해 유기물로 전환하는 효율이 높다. 또한, 빠른 성장과 높은 광합성 효율로 단기간에 다량의 바이오

본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 IT/SW창의연구과정의 연구결과로 수행되었음 (NIPA-(2011)-(C1820-1101-0009)). 또한, 본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임 (2012H1B8A2026055).

*Correspondign Author : Je-Hoon Lee

Tel: +82-10-3258-2480 email: jehoon.lee@kangwon.ac.kr

접수일 12년 06월 25일 수정일 (1차 12년 07월 27일, 2차 12년 08월 09일) 게재확정일 12년 09월 06일

매스를 확보할 수 있다는 장점을 갖는다 [1]. 미세조류는 식용으로 사용되지 않기 때문에 식용 작물의 경작지 사용이라는 부작용이 없다 [2].

미세조류의 인공 배양을 위해서 개방형 수로형 연못 (opened raceway pond) 구조와 밀폐형 광생물 반응기 (closed photobioreactor)가 사용된다 [3]. 수로형 연못 구조는 가장 단순한 형태의 미세조류 배양기로, 실외에서 영양원 공급이 풍부한 연못에서 미세조류를 배양한다. 초기 설비 투자와 운전비용이 저렴하고 유지 보수가 간단하다. 그러나, 자연광을 이용하기 때문에 배양 장치 내부로 효과적인 빛 전달이 어려워 미세조류의 성장 속도가 느리고 외부 오염이 쉽게 발생한다. 밀폐형 광생물 반응기는 관형 혹은 판형의 밀폐형 구조로 미세조류를 배양하며, 밀폐형이기 때문에 외부 오염 문제가 없고 공간적으로 설치가 용이하다 [4-7]. 또한, 미세조류의 성장을 촉진하는 이산화탄소 주입, 광합성을 방해하는 고농도의 산소 제거, 온도 조절, 배양 상태에 따른 영양분 공급, 채광 시간과 같은 배양환경을 쉽게 제어할 수 있다. 그러나 초기 설치가 비싸고 운전비용이 높다는 단점을 갖는다 [3].

미세조류 배양은 현재 초기 연구 과정에 있고 배양 환경 변화와 생산성간의 상관관계를 규명하는 일이 중요하다. 채광 시간, 배양 온도, 기포량, 용존산소와 이산화탄소량, 산성도가 주요 배양 환경 파라미터로 사용되며, 이를 감지하는 다양한 바이오센서들이 광생물 반응기에 장착된다 [8]. 기존 광생물 반응기는 배양 과정동안 배양기에 장착된 여러 센서들이 측정된 데이터를 광생물 반응기의 컨트롤러로 전송하고, 컨트롤러는 이 정보를 LCD 화면에 표시한다. 연구자는 LCD 화면을 통해 배양환경을 실시간으로 관찰할 수 있으나, 미세조류 배양의 전주기 동안 세심한 노력이 필요하다. 이러한 노력을 줄이기 위해 배양 환경을 자동으로 관찰하고, 변화 발생시 자동으로 배양 환경을 조절할 수 있는 광생물 반응기 개발이 요구된다. 또한, 다양한 배양 환경 관찰을 위해서는 광생물 반응기에 장착된 바이오센서들의 종류를 바꿔가며 실험해야 한다. 따라서, 광생물 반응기에 장착되는 바이오센서들을 쉽게 탈부착할 수 있도록 설계해야 한다. 마지막으로, 여러 대의 광생물 반응기를 동시에 이용하여 대량 배양을 할 때 여러 대의 광생물 반응기를 단일 네트워크로 통합하여 동시에 모니터링할 수 있는 시스템 개발이 필요하다.

최근, 무선 통신 기술과 센서 기술이 결합된 유비쿼터스 센서 네트워크와 이를 이용한 모니터링 시스템이 개발 중이다 [9-12]. 주로 지그비 (ZigBee), 블루투스 (bluetooth), 와이파이 (WiFi)가 사용된다. 각 무선 통신 기술들은 표 1에서 보이듯이 장단점을 갖는다 [13]. 지그

비는 전력 소비가 적고 다양한 형태로 네트워크 구성이 가능하기 때문에 USN 환경에 가장 적합하다. 블루투스도 2.4GHz 대역에서 동작되나, 네트워크 구축이 어렵고 짧은 통신 거리 때문에 USN 환경에 적용하기 어렵다. 와이파이 통신 기술은 IEEE 802.11 무선랜 표준과 호환되며, 최대 11Mbps의 전송속도를 지원하기 때문에 고속 데이터 전송이 요구되는 센서 네트워크에 적합하다. 또한 태블릿을 비롯하여 다양한 휴대 정보 기기들이 와이파이 인터페이스를 기본 장착함에 따라, 무선접속장치(AP : access point)를 설치하면 쉽게 센서 네트워크와 연결된다 [14].

본 논문에서는 광생물 반응기의 재구성형 네트워크 구성과 웹 기반 실시간 모니터링 시스템을 제안하였다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 광생물 반응기 구조와 네트워크 구성 요건을 기술한다. 3장에서는 제안된 광생물 반응기의 네트워크 구성 방법과 모니터링 시스템을 기술한다. 4장에서는 실험을 통해 성능 평가를 수행하고, 이를 토대로 5장에서 결론을 맺는다.

[표 1] 무선 인터페이스 비교

[Table 1] Comparison between various wireless interfaces

구분	ZigBee	Bluetooth	WiFi
기반규격	IEEE802.15.4	IEEE802.15.1	IEEE802.11b
동작 주파수	2.4GHz 868, 915MHz	2.4GHz	2.4GHz
최대 속도 (bps)	음성:250K 데이터:20~40K	음성:64K 데이터:720K	11M
확장성	65536개	7개	1개
통신거리	10m	10-100m	최대 150m
전력소비	0.05W	0.1W	1W

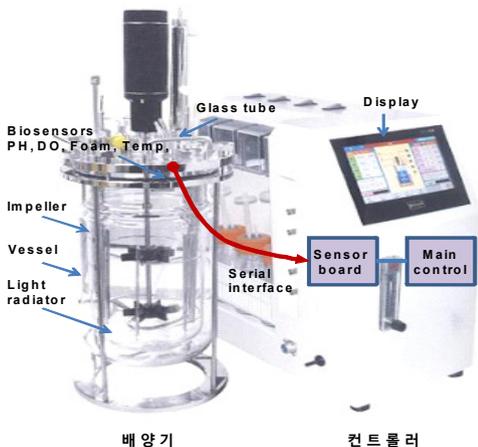
2. 광생물 반응기 구조와 네트워크 구성

기존 광생물 반응기는 그림 1에 나타난 것처럼 미세조류를 배양하는 배양기와 배양 환경을 제어하는 컨트롤러로 나뉜다. 배양기는 베셀내에 임펠러를 삽입하여 교반효과를 최대화하고, 내부 글래스 튜브와 외부 인공광원을 연결하여 부족한 광원을 공급한다. 공기와 CO₂의 주입은 스파저 (sparger)를 통해 이루어지며, 배양 환경을 관찰하기 위한 산성도, 용존량, 거품 및 온도를 측정 센서들을 배양기내에 장착한다. 센서들의 샘플링 시간은 배양한 미세조류의 종류, 환경 변화에 따른 민감도 그리고 베셀 용량에 의해 결정된다. 배양 시간이 길고 배양 환경 변화에 따른 미세조류의 민감도가 작을수록 샘플링 시간이 길어진다. 또한, 베셀 용량이 커질수록 배양 환경 변화가 느

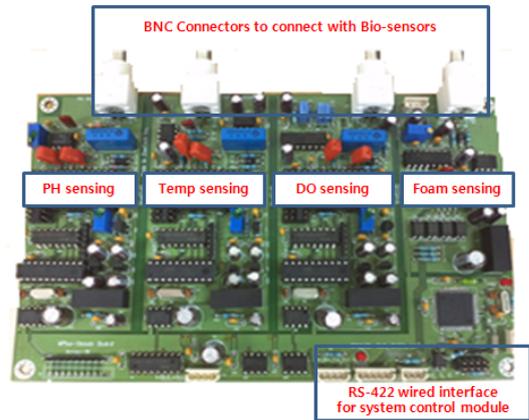
려져 샘플링 시간이 길어진다. 본 논문에서 제안된 광생물 반응기는 배양기내의 배양 환경 변화를 수 초단위로 센싱하고 광생물 반응기의 컨트롤러로 전송한다 [8].

광생물 반응기의 컨트롤러는 센서 보드, 메인 컨트롤부와 화면 표시부로 구성된다. 센서 보드는 그림 2와 같이 구성된다. 상단의 BNC 커넥터로 바이오센서들의 측정값을 수신한다. 측정값은 ADC (analog-to-digital)를 거쳐 디지털 신호로 변환된다. 센서보드의 MCU는 여러 센서들로부터 수신된 데이터들을 시간 구간별로 취합하여 데이터 패킷을 구성하고, 표 2에 나타낸 직렬 데이터 전송 프로토콜에 따라 메인 컨트롤부로 전송한다. 메인 컨트롤부는 배양 단계별로 PH, DO, Foam, 온도등 주요 배양 환경 파라미터들의 최적값을 저장한다. 각 배양 단계별로 배양기내에 장착된 바이오센서들의 측정값과 비교하여, 이산화탄소, 산소, 당분, 질소의 공급량을 결정하고 광생물 반응기에 연결된 솔레노이드 밸브들을 조정하여 최적의 배양 환경을 유지한다. 디스플레이부는 배양 환경을 그래픽으로 표시하고, 측정값을 저장한다.

기존 광생물 반응기는 배양기와 컨트롤러간 그리고 광생물 반응기간에 유선으로 네트워크를 구성한다. 따라서, 여러 대의 광생물 반응기를 위한 충분한 전송 대역폭이 보장되었고 전송 에러율이 적은 반면 배선이 복잡해지고 확장이 어렵다. 특히, 각 배양기에 장착된 센서들은 개별 케이블을 통해 컨트롤러내의 센서보드로 연결되기 때문에 센서보드가 구성된 후 센서의 추가 장착이 불가능하다. 또한, 여러 대의 광생물 반응기와 모니터링 서버를 RS-422 인터페이스를 네트워크로 구성하면, 새로운 반응기를 추가로 장착하거나 탈착할 때마다 네트워크를 재구성해야 할뿐더러 애드혹 (ad-hoc) 네트워크로 연결되어 외부에서 모니터링하기 어렵다.



[그림 1] 광생물 반응기의 기본 구조
[Fig. 1] Basic architecture of photobioreactor



[그림 2] 광생물 반응기의 센서 보드
[Fig. 2] Sensor board for photobioreactor

[표 2] 직렬 데이터 전송 프로토콜
[Table 2] Serial data transfer protocol

항목	Buad rate (Kbps)	Data bit	parity bit	Stop bit
항목값	115.2 Kbps	8bit	None	1 bit

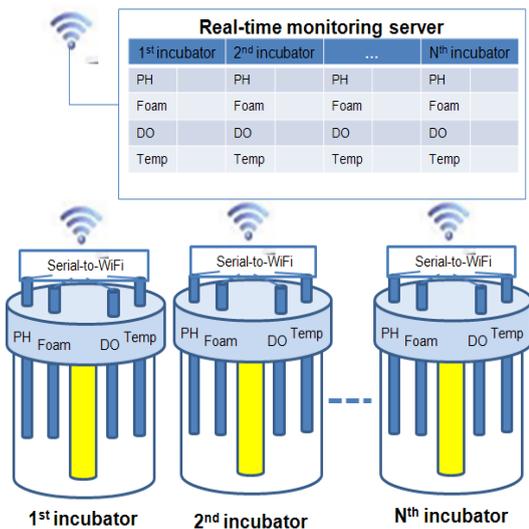
기존 광생물 반응기의 효과적인 모니터링을 위해 다음 요구사항들을 만족해야 한다. 첫째, 배양기에 장착되는 센서들의 종류는 쉽게 바꿀 수 있도록 독립적이고 재구성 가능한 네트워크를 채택해야 한다. 둘째, 여러 대의 광생물 반응기간 네트워크는 통신 거리, 센서노드의 수, 요구 전송 대역폭을 만족하는 네트워크를 구성해야 한다. 세 번째로, 모니터링 서버가 수신된 배양 환경 데이터를 사용자가 쉽게 실시간으로 모니터링할 수 있는 S/W 개발과 데이터 저장 장치가 필요하다. 특히, 모니터링 S/W는 인터넷을 이용하여 어느 곳에서나 배양 상태를 확인할 수 있도록 웹 기반으로 설계해야 한다.

본 논문에서는 다음과 같은 이유로 배양기내의 바이오센서들간의 네트워크와 여러 대의 광생물 반응기간의 네트워크로 와이파이를 채택하였다. 첫째, 센서 및 반응기 네트워크의 각 노드는 네트워크에 쉽게 추가 혹은 제거될 수 있어야 한다. 와이파이 무선 네트워크는 DHCP 서버를 이용하여 네트워크 자동 구성이 가능하다. 둘째, 네트워크의 통신 거리, 전송 대역폭 그리고 노드의 수를 고려하였다. 미세조류를 대량으로 배양할 수 있는 배양 공간은 100m 이내로 가정하였고, 무선 네트워크에 포함되는 바이오센서 및 배양기 수에 따른 데이터 전송 대역폭이 충분해야 한다. 또한 반응기의 컨트롤러는 측정 시간, 센서 종류 및 측정값을 데이터패킷으로 구성하여 전송하기 때문에 배양기에 장착된 센서의 수가 증가하고 측

정시간이 짧아질수록 고속 데이터 전송이 요구된다. 마지막으로 와이파이는 애드-혹 모드로 자체 네트워크 구성이 가능할뿐만 아니라 무선접속장치, AP (access point)를 이용한 인프라스트럭처 (infrastructure) 모드로 인터넷 연결이 가능하기 때문에 웹 기반의 실시간 모니터링 시스템 개발이 가능하다.

3. 광생물 반응기 무선 네트워크 구성

제안된 광생물 반응기의 네트워크 구조는 그림 3과 같이 여러 대의 배양기와 하나의 실시간 모니터링 서버로 구성된다. 제안된 다중 광생물 반응기 네트워크는 각 배양기별로 바이오센서들과 센서보드간에 하위 센서 네트워크와 각 반응기들과 실시간 모니터링 서버를 네트워크로 구성한 반응기 네트워크의 이중 구조로 구성된다.



[그림 3] 제안된 다중 광생물 반응기 네트워크 및 실시간 모니터링 서버

[Fig. 3] Proposed wireless network and realtime monitoring server for multiple photobioreactors

하위 센서 네트워크는 배양기별로 장착된 센서보드와 바이오센서들이 서로 데이터를 통신하는데 사용된다. 각 배양기의 바이오센서들은 와이파이 무선 통신 모듈을 장착하여 독립적으로 데이터를 전송하는 클라이언트로 그리고 센서보드는 서버로 동작한다. 또한 상위 반응기 네트워크는 여러 대의 배양기들과 하나의 호스트 PC로 구성된다. 각 배양기에 장착된 센서보드들은 각각 서로 다

른 IP 주소를 갖는 클라이언트가 되고, 모니터링 서버 역할을 수행하는 호스트 PC는 서버로 구동한다. 실시간 모니터링 서버는 배양기별로 바이오센서들이 전송한 배양 환경 정보를 그래픽으로 나타낸다. 와이파이 무선 네트워크를 통해 웹을 통해 배양 상태를 실시간으로 모니터링할 수 있다. 제안된 다중 광생물 반응기 네트워크를 다음과 같이 구성하였다.

3.1 무선 바이오센서 네트워크 구성

기존 광생물 반응기의 배양기에 장착된 바이오센서들은 센서보드로 신호를 출력하고 센서보드는 데이터 패킷을 구성한 후, 메인 컨트롤러로 전송한다. 센서보드에는 미리 사용이 결정된 센서들에 대한 아날로그 회로와 패킷 구성을 위한 MCU가 집적되기 때문에 센서보드에 미리 설계된 센서만 사용가능하다는 단점을 갖는다.

제안된 무선 센서 네트워크는 그림 4에 나타낸 것처럼 바이오센서들의 출력에 ADC를 포함한 아날로그 신호처리부와 와이파이 전송모듈을 장착하여, 각 바이오센서들이 독립적으로 무선 데이터 전송이 가능하다. 동일한 배양기에 장착된 모든 바이오센서들과 이를 위한 센서보드는 하나의 애드-혹 네트워크로 구성되며, 본 논문에서는 이를 하위 센서 네트워크라 부른다. 하위 센서 네트워크에서, 바이오센서들은 클라이언트로, 센서보드는 서버로 동작하는 서버-클라이언트 구조를 갖는다. 하나의 광생물 반응기에 장착된 바이오센서들과 센서보드는 독립적인 네트워크로 구성되며, 무선 랜 표준에 따라 배양기에서 센서가 탈부착될 때마다 네트워크가 자동으로 재구성된다. 따라서, 배양기별로 바이오센서들을 쉽게 추가 혹은 제거 가능하다.

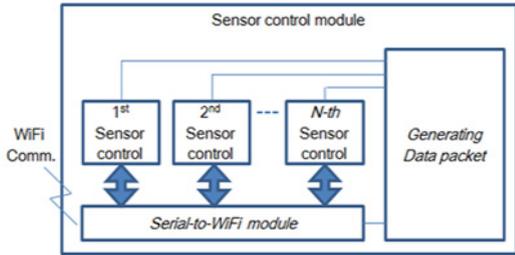
광생물 반응기의 바이오센서들과 센서보드의 와이파이 네트워크의 구성 순서는 다음과 같다. 바이오센서들은 클라이언트로 센서보드는 서버 모드로 동작한다. 서버인 센서보드에 내장된 DHCP 서버는 각 센서노드들에게 서로 다른 IP를 부여하고, 연결된 센서들의 IP 주소를 표 3과 같이 테이블로 관리한다. 이를 통해 센서보드는 활성화된 센서 노드와 비활성화된 센서 노드들을 구분하며, 배양기에 장착된 센서들의 종류와 수를 관리한다. 네트워크에 포함된 바이오센서들의 종류가 사용자의 요구에 따라 변화하면 센서보드는 관리 테이블을 자동으로 변경한다.

광생물 반응기별로 배양기에 장착된 센서들의 개별 Ad-hoc 와이파이 무선 네트워크가 구성된 후, 각 센서들은 데이터 전송을 시작한다. 반응기별로 바이오센서들은 센서종류, 센싱 데이터를 주어진 타이밍에 따라 실시간으로 센서제어부로 전송하고, 센서보드는 수신한 후 CRC 에러를 체크한다. 에러가 발생할 경우, 이를 내부적으로

만 저장하고 재전송 요구를 하지 않는다.



(a) 무선 바이오 센서 모듈



(b) AP내장 센서제어부

[그림 4] 제안된 무선 바이오센서 네트워크

[Fig. 4] Proposed wireless bio-sensor network.

[표 3] 배양기별 센서네트워크 관리테이블

[Table 3] Management table of cell cultivator

센서 종류	IP 주소	소켓번호	활성여부
PH 센서	192.168.10.19	2000	활성
온도 센서	192.168.10.20	2000	활성
DO센서	192.168.10.21	2000	비활성
Foam 센서	192.168.10.22	2000	활성

3.2 광생물 반응기 무선 네트워크 구성

여러 대의 광생물 반응기와 모니터링 서버도 와이파이를 이용한 상위 반응기 네트워크를 구성한다. 반응기 네트워크도 하위 센서 네트워크와 동일한 구성 과정을 거친다. AP를 내장한 모니터링 서버의 DHCP를 통해 자동으로 각각의 광생물 반응기들에게 IP 주소를 할당하고, 반응기 네트워크에 연결된 광생물 반응기와 실시간 모니터링 서버의 IP 주소를 식별자로 관리한다.

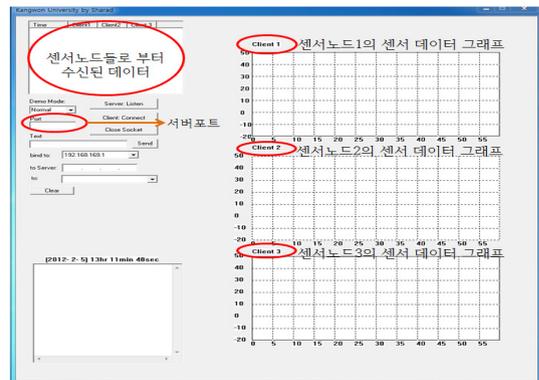
각 광생물 반응기의 센서보드는 센서 네트워크에서 수신한 데이터를 취합하여 모니터링 서버로 전송할 데이터 패킷을 그림 5와 같이 구성하고 모니터링 서버로 전송한다. 전송 데이터 패킷은 노드 ID, 데이터 길이, 전체 센서의 수, 활성 센서의 수, 전송 시간, 센서별 ID 및 센싱 데이터, 마지막으로 CRC를 포함한다. 데이터 전송은 하위 센서 네트워크와 마찬가지로 와이파이 무선 통신을 이용하나, 실시간 모니터링 서버가 수신한 데이터에 CRC 에러가 발생하면, 해당 반응기에 재전송 요구를 보내고, 해

당 반응기는 직전에 보낸 데이터 패킷을 재전송한다.

0	4	8	12	15
Node ID	Length of data	# of sensors	# of active sensors	Length of data
16	20	24	28	31
Sensor ID	Sensing data	Sensor ID	Sensing data	
32	36	40	44	47
Sensor ID	Sensing data	Sensor ID	Sensing data	
48	52	56	63	
Sensor ID	Sensing data	CRC		

[그림 5] 전송 데이터 패킷 포맷

[Fig. 5] Data transmission packet format



[그림 6] 미세조류배양기 모니터링 S/W

[Fig. 6] Monitoring S/W for Photobioreactor

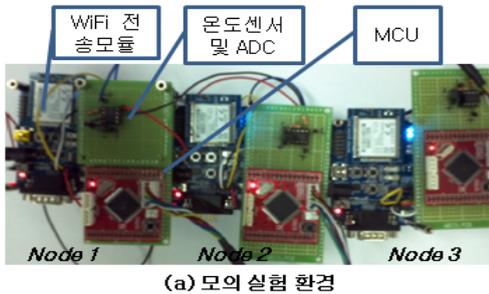
각 광생물 반응기의 배양 환경은 그림 6과 같이 그래프 형태로 실시간으로 화면에 출력하여 사용자가 쉽게 모니터링할 수 있다. 서버에서 포트를 열면 각 클라이언트에 미리 설정해놓은 모니터링 서버의 IP와 서버포트를 연결시켜 연결이 완료되면 수집된 배양 환경 파라미터값을 전송하게 되고 서버에서는 수신한 데이터를 각각의 그래프에 값을 처리하여 모니터링한다.

4. 실험 환경 및 결과

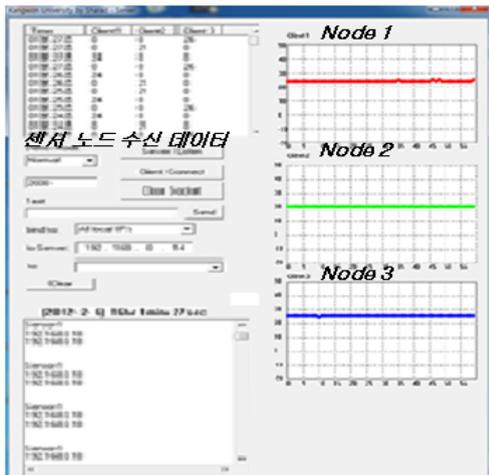
본 장은 제안한 다중 광생물 반응기 네트워크를 이용한 모니터링 시스템의 실험 환경 및 결과를 기술한다. 실험을 위해 우선 여러 개의 온도 센서를 이용한 와이파이 네트워크를 구성한 후, 하위 센서네트워크와 상위 반응기

네트워크의 구성에 따른 성능 평가를 수행하였고, 상용 광생물 반응기에 와이파이 무선 모듈을 탑재하고 유선 인터페이스와 동작을 비교하였다.

첫 번째 실험은 와이파이 전송 모듈을 탑재한 센서 노드들의 무선 데이터 전송 및 실시간 모니터링 S/W의 동작을 검증하였다. 그림 7(a)처럼 하나의 센서노드는 온도 센서 및 ADC, 패키지 구성용 MCU 그리고 와이파이 전송 모듈로 구성된다. 3개의 센서 노드가 0.3초 단위로 측정된 온도값을 와이파이 네트워크로 무선으로 데이터를 전송한 후, 호스트 PC에서 이를 수신하였다. 호스트 PC는 와이파이 네트워크에 연결된 센서 노드의 IP 주소를 통해 각 센서 노드를 식별한다. 그림 7(b)는 센서 노드들이 전송한 데이터를 모니터링 S/W를 통해 실시간으로 온도 변화를 나타내며, 동시에 DB로 저장됨을 보여준다.



(a) 모의 실험 환경



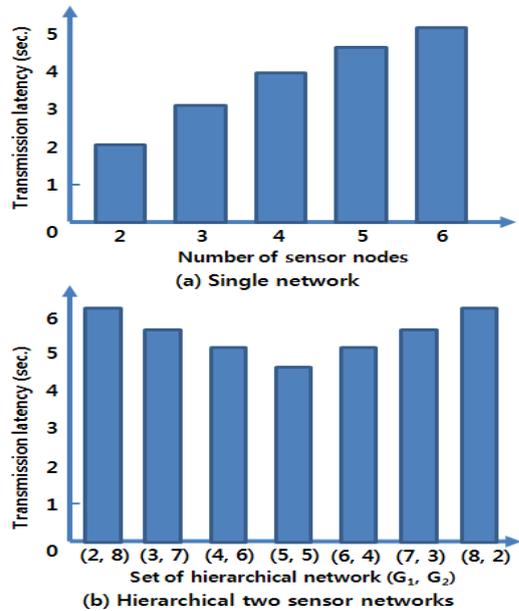
(b) 센서 모니터링 S/W 실험 결과

[그림 7] 다중 센서 노드의 와이파이 전송 및 실시간 모니터링 S/W 실험 환경과 결과

[Fig. 7] Experimental results for multiple WiFi sensor network and monitoring S/W

또한, 여러 대의 배양기를 네트워크로 구성할 때 노드 수에 따른 전송 지연을 측정하기 위해, 각 배양기에 장착된 센서노드 네트워크, G_1 과 배양기간의 네트워크, G_2 로

구성하고 센서노드 수를 변화시키면서 최적 성능을 갖는 네트워크 구성을 찾는 실험을 수행하였다. 우선 하나의 그룹에 포함되는 센서 노드의 수를 증가시키면서 전송 레이턴시를 측정하였고, 그림 8(a)에 나타난 것처럼 데이터 전송 레이턴시는 센서 노드의 수가 증가함에 따라 로그 함수 형태로 증가하였다. 전송 레이턴시 측정 결과를 이용하여 각 배양기에 장착되는 센서 노드의 수를 결정할 수 있다.



[그림 8] 센서 노드 수에 따른 전송 지연

[Fig. 8] Transmission latencies according to the number of sensor nodes

또한, 다중 배양기 구성시 전송 레이턴시를 예측하기 위해 배양기에 장착되는 센서 그룹, G_1 과 배양기 그룹 G_2 의 수를 변화시키면서 전송 레이턴시를 측정하였다. 그림 8(b)는 하나의 호스트 PC가 서로 다른 수의 센서 노드를 갖는 두 배양기를 동시에 모니터링할 경우를 가정하여 실험하였다. 두 그룹이 동일한 수의 센서 노드를 가질 때 가장 효율적인 전송 시간을 가짐을 확인하였고, 5개의 바이오센서를 장착할 경우 각 센서 노드들의 데이터 전송 주기는 5초가 된다.

(주)바이오트론에서 제작한 광생물 반응기, LiFlusGX에 그림 9와 같이 와이파이 무선 환경을 적용하여 미세조류를 배양하는 동안 실시간 모니터링 실험을 수행하였다. 배양기에는 4개의 바이오센서들이 탑재되고, 와이파이 네트워크를 통해 각 광생물 반응기의 센서보드로 데이터

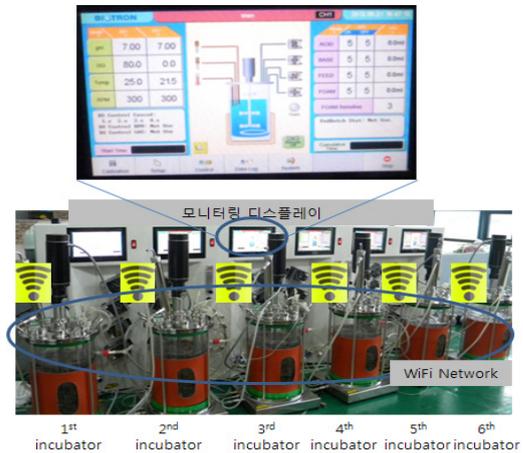
를 전송하고, 최종적으로 모니터링 서버로 데이터를 무선 전송한다. 모니터링 S/W는 GM6에서 사용되는 상용 제품을 이용하였고 C#으로 구현되었다. 그림 9는 미세조류를 배양 환경을 컨트롤러의 디스플레이부에 실시간으로 나타낸 결과를 보이며, 유선 인터페이스를 사용한 결과와 동일한 결과를 얻었다.

마지막으로 그림 10에 나타난 것처럼 ㈜바이오톨사의 멀티형 광생물 반응기, GM6를 이용하여 무선 네트워크 전송 실험을 수행하였다 [8]. 배양기별로 4개의 센서 노드를 장착하고 6대의 배양기가 동시에 미세조류를 배양한다. 각 배양기에 장착된 센서보드들은 와이파이 네트워크로 데이터를 전송하고 컨트롤러의 디스플레이부에 그 결과가 표시된다. 배양이 이루어지는 동안 실시간 모니터링 서버에서 수신한 결과를 그림 10과 같다. 각 센서 노드들은 5초 간격으로 배양 상태를 센싱하고 데이터를 전송하였고, 데이터 전송 실험 결과 유선 인터페이스인 RS-422을 이용하였을 때와 동일한 결과를 얻을 수 있었다. 또한, 제안된 광생물 반응기를 위한 모니터링 S/W는 웹 기반으로 동일한 기능을 수행한다.

본 논문에서 제안한 와이파이를 이용한 광생물 반응기 구조는 전송 속도, 전송 거리, 그리고 노드의 수에서 기존 유선 인터페이스를 대체할 수 있음을 실험을 통해 증명하였다. 무선 인터페이스를 갖는 센서를 사용하여 사용자의 요구에 맞게 배양기에 장착되는 바이오센서들의 종류와 수를 변형할 수 있고, 여러 대의 광생물 반응기를 하나의 네트워크로 구성한 후, 인터넷을 통해 실시간으로 모니터링이 가능함을 증명하였다.



[그림 9] 광생물 반응기 무선 전송 실험 결과
 [Fig. 9] Experimental result with LiPlus GX



[그림 10] 다중 광생물반응기 무선전송실험 결과
 [Fig. 10] Experimental result with multiple photobioreactor, GM6

5. 결론

본 논문에서는 최초로 광생물 반응기에 무선 기술인 와이파이 인터페이스를 적용하여 실시간 모니터링 시스템을 제안하였다. 이를 통해 광생물 반응기의 배양기에 장착되는 여러 바이오센서들이 사용자의 요구에 맞게 쉽게 커스터마이징 가능한 구조로 구현하였고, 대량 미세조류 배양을 위한 플랜트 타입의 다중 광생물 반응기 시스템에서도 쉽게 무선 네트워크를 도입할 수 있음을 증명하였다. 또한 무선 랜과 호환되는 와이파이 인터페이스를 채택함으로써, 웹 기반으로 실시간 모니터링 시스템을 재구성할 수 있기 때문에 사용자가 와이파이를 탑재한 다양한 휴대 정보 단말기를 이용하여 미세조류 배양 환경을 실시간으로 제어할 수 있도록 하였다. 본 논문의 연구 결과는 광생물 반응기뿐만 아니라 세포배양기 및 발효기와 같은 다양한 바이오 장치 산업에 사용되는 이화학기기들의 네트워크 구성 및 모니터링 환경에 적용할 수 있을 것으로 기대된다. 향후 무선 네트워크의 간섭 현상에 따른 에러 발생 확률 분석이 필요하며, 또한 무선 환경에서 데이터 전송의 신뢰성을 높이기 위한 네트워크 구성 방법에 관한 연구가 필요하다.

References

[1] H. J. Shin, J. H. Park, W. K. Jung, H. Cho and S. W. Kim, "Development of biorefinery process using

- microalgae," *J. of the Korean Society for Precision Engineering*, vol. 28, no. 2, pp. 154-167, Feb. 2011.
- [2] B. H. Jo and H. J. Cha, "Biodiesel production using microalgal marine biomass," *KSBB Journal*, vol. 25, no. 2 pp. 109-115, Apr. 2010.
- [3] L. P. Koh and J. Ghazoul, "Biofuels, biodiversity, and people: Understanding the conflicts and finding opportunities," *Biological Conversion*, vol. 141, no. 10, pp. 2450-2460, Oct. 2008.
- [4] J. T. Kim, D. G. Ahn, J. R. Park, J. W. Park and S. H. Jeong, "Recent trends of the development of photobioreactors to cultivate microalgae," *J. of the Korean Society for Precision Engineering*, vol. 28, no. 2, pp. 125-132, Feb. 2011.
- [5] Y. Chisti, Biodiesel from microalgae, *Biotechnol. Adv.* vol. 25, no. 3, pp. 294-306, Feb. 2007.
- [6] Y. Chisti, biodiesel from microalgae beats bioethanol, *Trends Biotechnol.*, vol. 26, no. 3, pp. 126-131, Jan. 2008.
- [7] L. Qiang, D. Wei and L. Dehua, "Perspectives of microbial oils for biodiesel production," *Appl. Microbiol. Biotechnol.* vol. 80, no. 5, pp. 749-756, Aug. 2008.
- [8] <http://ihani.com/>
- [9] Y. C. Lee, S. E. Jo and C. H. Oh, "Implementation of crops monitoring system using wireless sensor networks," *J. of The Korea Navigation Institute*, vol. 12, no. 4, pp. 324-331, Aug. 2008.
- [10] Y. H. Jeon, J. H. Woo, Y. R. Kim and H. D. Kim, "Monitoring system design and implementation using wireless solution," *Proc. of 2nd Summer Conf. of KIITF*, pp. 39-42, Aug. 2002.
- [11] J. H. Seo and H. B. Park, "Implementation of efficient mobile monitoring system of the greenhouse environment data," *J. of Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 13, no. 3, pp. 572-579, Mar. 2009.
- [12] H. K. Jo, K. K. Jung, J. W. Kim and K. H. Eom, "Wireless sensor network monitoring system," *Proc. of Fall Conf. of Korea Institute of Information and Communication Engineering*, pp. 946-949, 2007.
- [13] H. K. Song, W. D. Jo, *Ubiquitous short-range communication system*, JinHan M&B, 2010.
- [14] T. J. Park, M. G. Joo, T. H. Kwon, K. O. Yi and G. H. Kwark, "A wireless sensor node based on Wi-Fi communication," *Proc. of Summer Conference of Korea Institute of Information Technology*, pp. 135-137, 2010.

성 원 기(Won-Ki Sung)

[정회원]



- 1980년 2월 : 중앙대학교 전자공학과 (공학사)
- 1982년 2월 : 중앙대학교 전자공학과 (공학석사)
- 1986년 2월 : 중앙대학교 전자공학과 (공학박사)
- 1986년 3월 ~ 현재 : 강원대학교 전자정보통신공학부 교수

<관심분야>

제어 및 시스템, 임베디드시스템

김 성 수(Sung-Soo Kim)

[준회원]



- 2007년 3월 ~ 현재 : 강원대학교 전자정보통신공학부 전자공학전공 재학중

<관심분야>

임베디드시스템, 무선인터페이스, 바이오에너지

이 제 훈(Je-Hoon Lee)

[정회원]



- 1998년 8월 : 충북대학교 정보통신공학과 (공학사)
- 2001년 2월 : 충북대학교 정보통신공학과 통신회로 및 시스템공학 (공학석사)
- 2005년 2월 : 충북대학교 정보통신공학과 통신회로 및 시스템공학 (공학박사)
- 2005년 4월 ~ 2006년 4월 : Univ. of Southern California Viterbi School 박사후연구원
- 2006년 8월 ~ 2009년 8월 : 충북대학교 BK21 충북정보기술사업단 초빙조교수
- 2009년 8월 ~ 현재 : 강원대학교 전자정보통신공학부 조교수

<관심분야>

임베디드시스템, 고성능 저전력 디지털 회로 및 시스템 설계