

BSPN17110-002-12

극한지 오일샌드 플랜트 모듈
건전도 검증을 위한 손상 모니터링
시스템 개발(4차년도)

Development of damage monitoring system
and evaluation of health monitoring



국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

극한지 오일샌드 플랜트 모듈
건전도 검증을 위한 손상 모니
터링 시스템 개발(4차년도)
연차보고서

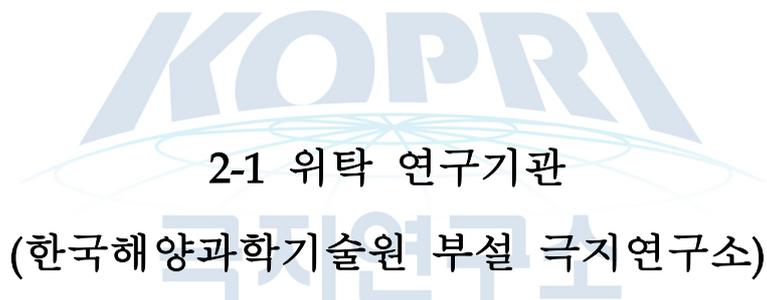
2017. 12.

Infrastructure
R&D Report

협동연구기관 / 비츠로테크
위탁연구기관 / 한국해양과학기술원 부설
극지연구소

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

극한지 오일샌드 플랜트 모듈 건전도 검증을 위한 손상 모니터링 시스템 개발



총 연구기간 2014. 12. 29. - 2019. 12. 28. (5년)

4차년도 연구기간 2017. 03. 01. - 2017. 12. 31. (10개월)

제 출 문

비츠로테크 대표이사 귀하

2017년 4월 19일 귀 기관과 우리 극지연구소간에 계약한 “극한지 오일샌드 플랜트 모듈 건전도 검증을 위한 손상 모니터링 시스템 개발”에 대한 위탁용역을 과업지시서에 의거하여 완수하였기에 보고서로 제출합니다.

2017 년 12월 일

위탁기관명 : 한국해양과학기술원 부설 극지연구소

연구책임자 : 이 방용

연구원 : 책임연구원 윤 영준

책임연구원 최 태진

선임연구원 박 기태

선임연구원 박 근보

보고서 요약서

과제고유번호	15IFIP-B089065-03	해 당 단 계 연 구 기 간	2017. 3. 01 - 2017. 12. 31	단 계 구 분	(4차년도)
연구사업명	플랜트 연구사업				
연구과제명	최 상 위 과 제 명	오일샌드 모듈화 플랜트 시공을 위한 설계, 제작 및 현장기술 개발			
	단 위 과 제 명	극한지 오일샌드 플랜트 모듈 건진도 검증을 위한 손상 모니터링 시스템 개발			
연구책임자	이방용	해당연구기간 참 여 연구원수	총 : 5명 내부 : 5명 외부 : 0명	3차년도연구비: 60,000 천원	정부: 60,000천원 기업: 천원 계: 60,000천원
연구기관명 및 소속부서명	한국해양과학기술원 부설 극지연구소		참여기업명	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)			보고서면수		
<ol style="list-style-type: none"> 1. 오일샌드 플랜트 및 모듈의 부분적인 변형 또는 플랜트 전체의 변형이 발생할 우려가 있는 부위에 손상을 상시 판독할 수 있는 WSN 모니터링 시스템 제작하여 오일샌드 플랜트의 안정성을 유지할 수 있는 시스템을 개발하고자 함. 2. 이를 위하여 3차년도에 설계한 변형/상태 감지 시스템, WSN 기반 통신 및 저전력 무선데이터로거를 제작하였음. 3. 개발된 변형/상태감지 WSN 모니터링 시스템의 보드에 방습제를 도포하여 보드의 수명 연장과 습기에 강한 보드를 구현하였음. 4. 알래스카 카운실에서 현장시험을 실시하고 개발된 시스템의 PER을 확인하여 목표하는 PER 수준을 검증하였음. 					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	무선센서네트워크, 손상, 유지관리, 건정성, 모니터링			
	영 어	WSN, damage, maintenance, health, monitoring			

목 차

제1장 모듈변형 상태감지 WSN 모니터링 시스템 제작	1
1. 상태감지 WSN 모니터링 시스템 제작	1
1.1 가스 분석법	1
2.1 상태감지 WNS 시스템의 성능 및 범위	7
3.1 상태감지 WSN 모니터링 시스템 제작 결과	12
제2장 오일샌드플랜트 모듈 변형/상태감지 WSN 모니터링 시스템 보완	20
1 PCB 방습 및 절연	20
1.1 개요	20
1.2 코팅 타입 및 공정	20
1.3 코팅 결과	22
2. 게이트웨이 보완	22
2.1 게이트웨이 장치(센서 코디네이터)	23
2.2 게이트웨이 보완 결과	25
제3장 모듈접합부 변형감지 WSN 모니터링 시스템 performance test	30
1. 계측 센서의 선정	30
1.1 개요	30
1.2 센서의 선정	30
1.3 센서의 설치	34
2. 센서의 설치 직후 획득된 데이터	38
제4장 결론	48
1. 결론	48

그림목차

그림 1	센서노드 구성도	10
그림 2	CO2 센서	12
그림 3	전원제어 회로	13
그림 4	Relay 모듈 회로	14
그림 5	유선통신부 회로	15
그림 6	12bits ADC 모듈 회로	16
그림 7	DC/DC Up convertor 모듈회로	16
그림 8	CO2 센서 인터페이스 모듈	17
그림 9	CO2 센서 통신 모듈	17
그림 10	CO2 센서 인터페이스 제작품	17
그림 11	CO2 센서 통신 모듈 제작품	18
그림 12	CO2 센서 모듈 전체 조립 제작품	18
그림 13	코팅된 PCB	22
그림 14	게이트웨이 구성도	24
그림 15	게이트웨이 회로도(MCU부)	26
그림 16	게이트웨이 회로도(메모리부)	26
그림 17	게이트웨이 회로도(전원부)	27
그림 18	게이트웨이 회로도(이더넷부)	27
그림 19	게이트웨이 회로도(연결부)	28
그림 20	저전력 WSN 게이트웨이	28
그림 21	리튬배터리 채워	33
그림 22	무보수 밀폐형 배터리	34
그림 23	알래스카 카운실 전경	34
그림 24	지중침하계 설치 결과	35
그림 25	온도계 설치 결과	36
그림 26	CO2 센서 설치 결과	37

표목차

표 1 온도데이터	34
표 2 CO2센서 데이터	43
표 3 지중침하센서 데이터	45



제1장

모듈변형 상태감지 WSN 모니터링 시스템 제작

1. 상태감지 WSN 모니터링 시스템 제작

1.1 가스 분석법

최근 들어 대규모 사회 인프라 구축 및 플랜트 설비가 증가함에 따라 현장 실증실험을 통한 매설 배관의 안전성평가 기술수요가 증가하고 있는 추세이며, 공사에서도 지상배관 및 매설배관의 안전성 검증에 대한 요구가 증가되고 있다. 특히 플랜트의 경우 정상 및 과도 상태시, 배관의 연결 부위 등에서 발생하는 미확인 가스 누출(leak)은 안전에 심각한 영향을 미친다. 예상하지 못한 이러한 가스의 누출을 조기에 효과적으로 탐지하여 대형의 누출사고를 미연에 방지하고, 유독가스 누출로 인한 인명피해 및 환경문제를 예방하는 것은 플랜트 시설물의 안전성 증대 및 가동률 향상 면에서 대단히 중요한 과제이다. 현재의 누출 탐지방식은 누출량에 대한 민감도가 낮고, 누출을 인지하는데 필요한 감응시간이 길며 누출부위의 위치를 찾아내는데 문제가 있어 왔다.

산업용 가스 모니터링은 높은 신뢰성을 가지고, 최소한의 유지보수로 운용이 가능해야 한다. 산업용 가스 모니터링은 적외선 분광법과 근적외선 영역서 조정 가능한 다이오드 레이저 흡수 분광법을 이용하는 TDLS(Tunable Diode Laser Spectroscopy) 측정법 등이 있다. 전형적인 측정가스에는 O₂, CO, NH₃, HCl 및 HF가 있으며, 대부분의 가스분자들도 모두 적용이 가능하다. 이들은 적외선과 TDLS에 의해 빠른 반응속도와 높은 감도로 측정된다. 이는 습식분석과 같은 종래 기술로는 힘들었던 부분이다. 일반적으로 가스센서는 매우 다양한 원리로 동작되나, 시장점유율이 높은 종류로는 반도체식, 전기화학식(Electrochemical), 접촉연소식(Catalytic Combustion), 광학식 등이 있다. 반도체식과 전기화학식은 MEMS(Micro Electro Mechanical Systems) 마이크로 히터 도입을 통한 소형화 및 저전력화와 나노 감지소재 도입을 통한 고감도화 등의 기술적 발전이 급속히 진행되고 있으나 본 장에서는 플랜트 상태감지를 위하여 가스 분석법에 대해 서술하고 이를 통해 가스를 측정하는 모니터링 시스템을 제작에 대한 내용을 기술하고 플랜트 현장에서 가장 요긴하게 사용할 수 있는 소모전력이 가장 적은 적외선 분광법 및 TDLS에 대해서만 다루도록 하겠다.

적외선 분광법

적외선 분광법 (赤外線分光法) 또는 IR 분광법, 진동 분광법 전자기파 중 적외선 영역을 다루는 분광법을 의미한다. 적외선은 가시광선보다 더 긴 파장 값과 더 작은 진동수 값을 가진다. 적외선 분광법에서는 주로 흡수 분광법에 기반한 기술을 다루게 된다. 이 기술은 다양한 화학 물질들을 분석하고 연구하는 데에 이용할 수 있다. 고체 또는 액체일 수도, 기체일 수도 있는 주어진 시료에 대해서, 적외선 분광법이 다루는 방법이나 기술은 물질이 흡수하는 적외선 영역의 전자기파 스펙트럼을 얻기 위해 적외선 분광계(또는 광도계)라 부르는 기계를 이용한다. 요즘 사용하는 기본적인 IR 스펙트럼은 대개 수평 축에는 진동수나 파장을 표시하고, 수직 축에는 수평 축의 값에 해당하는 전자기파에 대한 물질의 흡광도(또는 투과도)를 표시한다. 적외선 스펙트럼들에서 사용되는 전형적인 주파수 단위로는 ν 의 기호로 표시되는 센티미터의 역수 값(이를 파수라고 하기도 합니다)을 이용한다. 적외선의 파장 단위는 주로 마이크로미터 단위로 주어지며(전에는 이를 “마이크론”이라고 부르기도 했다), 기호는 μ 의 기호를 이용하는데, 이는 파수의 역수와 관련이 있다. 이 기술을 이용하는 일반적인 실험 기기는 푸리에 변환 적외선 분광기이다.

전자기파 스펙트럼의 적외선 영역은 주로 근적외선, 중간 적외선, 근적외선의 세 영역으로 나뉜다. 이 영역들의 이름은 가시광선 스펙트럼 영역과 떨어진 정도와 관련이 있다. 상대적으로 큰 에너지를 가지는, 14000 - 1400의 영역(0.8 - 2.5의 파장 영역과 같다)의 근적외선은 분자의 조화 진동을 들뜨게 할 수 있다. 중간 적외선, 거의 4000 - 400영역(2.5 - 25의 파장 영역과 같다)의 IR 스펙트럼은 분자의 기본 진동과, 이에 관련된 회전 진동 구조를 연구하는 데에 이용될 수 있다. 400 - 10영역(25 - 1000의 파장 영역과 동일하다)은 마이크로파 영역에 인접해 있으며, 상대적으로 낮은 에너지를 가지며 분자의 회전 스펙트럼의 연구에 이용할 수 있다. 이들 각각의 세분화된 영역들의 이름과 분류는 과학계의 관습이며, 분자의 성질이나 전자기적 특성과는 크게 관련이 없다.

TDLS의 원리 및 장점

TDLS는 적외선 영역의 레이저를 이용한 적외선 흡수법이다. 조절 가능한 다이오드 레이저 스펙트로스코피(Tunable Laser Diode Spectroscopy)라는 의미다. 많은 가스들은 적외선 파장 영역에서 흡수선을 가지는 특징이 있다. 일반적 적외선분석기 구조에선, 적외선은 샘플셀을 통과하여 광검출기에 도착한다. 샘플셀 속의 가스분자와 적외선의 반응으로, 가스의 농도에 따라 광검출기에 도착하는 적외선의 양이 줄어든다. 비교적 작은 분자량의 가스들로 이루어진 흡수밴드는 수많은 각각의 흡수선들로 구성된 미세한 구조를 가진다. TDLS는 측정가스 중 하나의 미세한 흡수선 중앙에 맞출수 있도록 파장을 선택할 수 있다. 일반적인 적외선 분석기는 선택 파장을 광학필터를 이용하여 분리하는데, 광학필터의 특성상 원하는 파장만 0.1nm 이하로 뽑아내는 것은 거의 불가능한 것을 볼 수 있다. 광학필터를 사용하는 분석기와 TDLS의 분석기의 분해능 차이는 거의 1,000배 정도로 TDLS가 우수하다. 이러한 이유로, 광학필터를 사용하는 분석기는 가스측정과 원칙적으로 교차간섭에서 자유롭지 못하다. TDLS의 레이저는 가스의 농도를 측정하기 위해 매우 좁은 파장범위(2nm 이하)에서 가스의 흡수선을 스캔한다. 샘플 속 다른 가스로부터의 교차간섭을 없게 하기 위해 0.1nm 이하의 아주 가는 선들을 이용하기 때문에 일반

적으로 하나의 레이저는 1~2개 가스를 측정한다. TDLS는 동작이 쉽고, 간편한 반도체 레이저를 사용하기 때문에 사용과장영역이 $2.7\mu\text{m}$ 이하이고, $0.76\sim 2.3\mu\text{m}$ 영역에 위치한 흡수밴드의 첫 번째 공명밴드를 이용한다. 이로써 근적외선 영역 레이저와 광검출기를 사용할 수 있다.

TDLS 레이저 분석기는 전형적인 조건인 높은 온도 또는 압력 및 전송을 다양화하는 조건에서 측정가스를 보다 빠르고 정확하게 측정할 수 있는 가장 강력한 온라인 분석기 중 하나다. TDLS 기술은 부식성 및 흡착성 가스에 적합하다. 또한, 일반적으로 다른 가스의 간섭현상이 없던지 매우 작고 응답시간 또한 매우 짧다. 현장에서 예상되는 HCl 배출농도는 5ppm 미만으로 매우 낮은 수준이다. 이와 같이 낮은 배출 수준에선 Limit of detector(최소측정농도단위)와 잠재적 측정방해물질을 이해하는 것이 매우 중요하다. 산업용 분석장비는 쉬운 작동, 적은 유지보수 요구 때문에, 극저온 쿨링으로 온도 유지가 필요한 중적외선 영역 TDLS는 산업에 널리 사용되지 못했다. 비록, 근적외선 흡광라인이 중적외선 보다 약할지라도, 실온에서 레이저와 검출기를 작동할 수 있는 근적외선 영역은 산업용 Application에 있어서 보다 매력적이다. 비단, TDLS를 떠나서 어떤 원리의 분석기든 동작이 간편해야 한다는 것은 분명한 사실이다. 이러한 작동이 간편한 반도체 레이저를 적용하면서, 예전보다 저렴한 비용으로 레이저분석기를 적용할 수 있게 되었다. 레이저는 그 특성상 일반적 적외선분석기 보다 유지보수가 거의 필요치 않으며, 교정주기가 매우 긴 장점을 가지고 있다.

Application

가장 중요하게 여겨지는 배출가스들은 연소공정들에서 환경에 영향을 준다. 산업적 측면에서 배출원은 일반적으로 보일러(발전소), 화학산업, 소각장, 알루미늄 용해오븐, 제철용 퍼니스, 유리용 퍼니스에서 나온다. 또 다른 중요한 배출원은 승용차, 버스, 그리고 모터사이클이다. 산업공정으로부터의 가스배출원의 연속모니터링은 CO, NO_x, SO₂으로 제한되어 왔으며, 그 연속측정법들은 잘 자리잡아 왔다. HF, HCl과 NH₃같은 가스의 연속측정은 가능한 장비의 측정 수준의 한계로 실제로는 배출에 대한 연속모니터링을 힘들게 했다. 이들 가스들에 대해 TDLS 측정방식은 새롭고 유일무이한 방법을 제시하고 있다.

a) HCl 측정

: HCl 배출량은 연료 속에 포함된 염소의 함량에 영향을 많이 받는다. 소각장을 예로 들어 보면, 연료 속에 있는 90% 염소가 연료가스 안의 HCl로 바뀐다. 산업과 소각장의 염화수소 최대허용 배출기준은 수 ppm으로 점점 낮아지고 있다. TDLS를 포함한 소수의 분석장비만이 이 수준의 측정을 만족할 수 있다. TDLS의 최소검출한계는 0.1ppm 정도다.

b) HF 측정

: HF는 주로 알루미늄 플랜트, 유리제조, 타일제조, 소각장과 알킬레이션 플랜트에서 배출된다. 소각

장을 예로 들면, 연료 속에 있는 10% 불소가 연료가스 속의 불산으로 바뀐다. 최대허용 기준치는 수 ppm이며, 공정과 application에 따라 다르다. 최근까지 HF는 이렇게 작은 수치에서는 연속적인 측정이 가능한 장비가 없었다. 하지만, 지금은 1미터 광학 셀 길이를 가진 TDLS를 이용하여 30ppb 최소 검출한계를 가지고 측정이 가능하다.

c) O₂ & CO 측정

: 연료가스 속의 O₂와 CO의 측정은 연소공정의 효율성을 모니터링 하는데 있어 가장 중요한 가스다. 완전연소는 과량의 공기가 있을 때 가능하다. 하지만 너무 많은 공기는 연소기를 냉각시키고, 연료가스 속의 CO 양을 증가시킨다.

d) NH₃ 측정(석탄화력 SCR)

: 2.5% 황이 포함된 가루탄을 때도록 설계된 460MW 발전소가 있다면, 이 플랜트는 SO₂에 대해 탈황설비와 NO_x 컨트롤을 위한 암모니아 기반의 SCR을 갖추어야 한다. 암모니아는 온도가 330~360°C인 SCR 반응기 후단에서 측정된다. 전형적인 연소가스는 13.5 vol% CO₂, 8.5 vol% H₂O, 3.9vol% O₂, 700ppm SO₂, 250ppm NO_x와 0~5ppm의 NH₃(암모니아)로 구성된다. 먼지농도는 보통 10g/m³이다. 1.5%의 역청탄을 사용한다면, 암모니아 농도가 10ppm까지 오르고, 이와 같은 농도는 탈황설비 부산물을 오염시키고, SCR 촉매의 수명을 단축시킬 것이다. 이렇듯, 연속적인 암모니아 모니터링을 통한 최적화된 암모니아 투입량은 중요하다.

e) H₂O 측정(도시소각로)

: 오븐 안 연료의 연소로부터 다양한 레벨의 수분은 연소공정을 컨트롤하기 위해 실시간으로 모니터링 되어야 한다. 실시간의 분석값을 제공하기 위해 수분 보정이 필요한 분석기에 공급될 수 있다. 분석기 샘플링 시스템

a) 샘플링 시스템의 중요성

: 일반적으로, 분석기 공급업체는 분석기 자체 성능 테스트에 역점을 둔다. 그렇다 보니, 공정과 분석기를 연결해줄 샘플링 부분이 취약해서 지속적인 문제가 야기되지만, 보통은 분석기에 문제가 있는 것으로 간주되는 경우가 대부분이다. 하지만 통계적으로 볼 때, 측정기 시스템에서 문제가 발생하는 것을 100으로 보면 분석기 잘못된 경우는 20의 경우이며, 나머지 80은 샘플링 문제를 야기하는 것으로 간주되어 왔다. 깨끗한 샘플과 대표 시료를 지속적으로 채취하고, 샘플이 분석기 동작에 적합한 조건으로 샘플링하는 것이 중요하다. 적절하게 설계된 샘플링 시스템과 분석기는 높은 신뢰성과 적은 유지보수 비용이 들 것이다. 광범위한 지식과 잠재적인 문제를 해결할 수 있는 상세하고 전문적인 지식을 기반으로 만

들어진 샘플링 시스템은 응용 분야에서 문제없이 이용할 수 있다.

b) 올바른 샘플링 시스템 구성법

: 분석기 전처리 시스템인 샘플링 시스템의 역할은 분석기가 올바르게 결과를 낼 수 있도록 샘플을 준비해주는 동시에, 분석기 오작동을 방지하는데 그 목적이 있다. 측정물질, 측정범위, 측정최소농도단위, 샘플 전분석자료, 공정조건 및 특이사항, 압력, 온도, 거리, 현장의 위치 및 기후조건을 전반적으로 고려하여, 경험이 풍부한 전문가에 의해 제작되어야 할 것이다. 이러한 과정 없이 제작되어 적용된 샘플링 시스템은 지금도 현장에서 많은 문제를 야기 시키고 있다.

밀폐상법 (Closed Chamber method)

밀폐상법은 CO₂ 측정에서 이용되는 방법으로 측정하고자 하는 지면에 상하부가 개방된 원형 또는 사각형 틀을 약 5cm 이내(리터 포함)로 토양 표면에 고정된 후 상부에 캡 형태의 뚜껑을 결착하여 지면과 캡 사이를 밀폐 상태로 만든다(CC; closed chamber method). 이후 밀폐된 내부 공기가 방출되는 이산화탄소에 의해 시간 경과에 따라 농도의 상승률, 즉 방출되는 이산화탄소량을 측정한다.

통기법(Open Flow method)

: 밀폐상법은 기본적으로 밀폐상을 밀폐시킨 상태에서 정해진 시간 동안 상승하는 내부의 CO₂ 농도로부터 계산하므로 밀폐상 내의 CO₂ 농도의 상승 조건을 피할 수 없다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 밀폐상의 양쪽에 구멍을 내고 한쪽 구멍으로 대기중 공기를 밀폐상내로 흡입하고 다른 한쪽에서 동일한 양의 공기를 배출하여 밀폐상으로 들어가는 공기와 배출되는 공기의 CO₂ 농도차이를 이용하여 계산하는 통기법(Open Flow method, OF)이 발달하게 되었다. 통기법은 자연적인 상태의 대기 CO₂ 농도가 측정 대상이 되는 부분과 접하게 됨으로써 자연상태에서 이루어지는 점으로 실제에 가까운 값을 얻을 수 있다는 평가를 받고 있다.

휴대용 측정 장치

밀폐상법이나 통기법과 같은 연속적인 CO₂ 측정시스템을 만들기 위해서는 여러 제어 부품들과 이를 조립하여 측정 시스템을 구축하고 운용하는 연구자의시간과 수고가 필요하다. 또한 관측지 중 전기를 이용할 수 없는 지점에서는 연속 측정을 위한 전원 확보라는 기본적인 문제에 의해 제약을 받는다. 이러한 제한점을 극복하고 CO₂를 보다 쉽게 측정할 수 있도록 고안되어 판매되는 CO₂ 챔버는 밀폐상법을 기초로 한 LI-6400-09(Li-Cor Inc., Lincoln, USA)와 SRC-1(PP Systems, Amesbury, U.K)이 대표적인 예이다. LI-6400-09는 LI-6400(Li-Cor Inc., USA)의 광합성 측정 장치를 응용하여 토양 호흡 관측을 하며, SRC-1는 EGM-3 혹은 EGM-4(PP systems, U.K)를 적외선기체분석기로 사용하여 CO₂를 관측한다. 이 장비들은 전원이 공급되지 않는 측정 대상지에서 휴대용 배터리를 사용하여 간편하게 CO₂를 측정할 수 있는 장점이 있다(Elberling and Braandt, 2003). 최근에는 소형 CO₂ 센서(GMT222, Vaisala, Vantaa, Finland)와 소형 배터리 전원을 이용하여 보다 저렴한 휴대장비

를 구성한 기기들이 이용되고 있다. 휴대용 측정기기의 경우, 시스템의 단순화로 연구자가 기계적 지식 부담이 많지 않은 상태에서 자료를 획득할 수 있고 실제 야외에서 전력공급 없는 여러 장소를 측정 할 수 있는 점이 있다. 그러나 측정기기의 운용이 인력으로 이루어지기 때문에 장기간 규칙적으로 일정한 시간 간격을 두고 연속 관측을 수행하는 것은 매우 어렵다. 또한 강우, 야간, 동계 결빙 등 다양한 환경 조건에서 일관성있는 CO₂ 측정이 어려워 측정가능기간의 특정한 조건만이 반영되어 CO₂ 값이 산정되는 경우가 많아 일정 기간 혹은 연간 CO₂를 산정할 경우 산정된 CO₂ 값의 정확도 및 신뢰도가 떨어질 수 있다.

2.1 상태감지 WNS 시스템의 성능 및 범위

개발된 극저온 상태감지 WNS 시스템의 성능

극저온 환경의 극지역 기후 변화를 원격으로 관측하기 위한 ICT 융복합형 기술개발에 있어 저전력으로 동작하는 무선센서네트워크 구성은 신뢰성 높은 관측 시스템을 구축하는데 매우 중요하다. 관측 목적에 맞는 적절한 계측 센서의 선정과 연동 기술, 상용 인공 위성을 이용한 실시간 데이터 수집 및 원격모니터링 시스템 등의 기술 개발이 계속 진행 될 것으로 판단된다.

3차년도에서 조사 되었듯이 저전력 무선센서네트워크 구성에는 ZigBee와 LoRa 표준 규격이 가장 적합하다. 네트워크 토폴로지를 다양하게 확장 구성 할 수 있는 ZigBee 통신과 통신 속도 등을 응용 센서에 맞게 조정하여 수 km 이상의 통신 도달 거리를 가질 수 있는 LoRa 통신 방식을 융합 사용하면 저전력 무선센서네트워크 구성이 용이해 진다. 또한, 센서 노드는 측정이 없이 대기하는 동안에는 최소의 전력을 소비하도록 동작 모드를 조정하여 전력을 최소화 할 수 있다. 무선 통신 노드의 소비 전력만 생각한다면 극저온 극지환경에서 알카라인 건전지로 수년 이상 동작 할 수 있다. 극지에서 관측하고자하는 목표에 따라 적절한 계측 센서를 선정하여 무선 센서 노드와 연동해야 할 것이다. 센서 타입과 측정 빈도에 따라 소비전력은 달라 질수 있다. 따라서 배터리는 센서 타입, 측정 빈도, 통신 빈도 등을 고려하여 선정되어야 한다. 더 나아가 태양광 발전, 풍력 발전 등의 에너지 수확 기술을 접목하면 반영구적인 관측 시스템 구축이 가능해 질 것이다. 특히 본 연구에서 수행되는 오일샌드 플랜트 모듈 상태감지 모니터링 시스템은 WSN 기반으로 구축할 예정이다. 본장에서는 상태감지 WSN 기반 통신 모듈 및 오일샌드 플랜트 모듈 모니터링 프로그램에 대하여 기술하였다. 현장에 설치될 센서에서 모니터링 스테이션까지 무선통신 방식으로 데이터를 획득하는 것을 기본으로 하고, 관계자가 원거리에서 접속하여 모니터링을 할 수 있도록 원거리 데이터 통신 방식(초고속 통신 등)을 이용한 원격 모니터링 서비스를 제공한다. 또한 통신 모듈은 Buffer Memory를 사용하여 통신 장애시 데이터를 보관할 수 있으며, 통신 장애가 해결되면 서버에 전송하여 모든 데이터를 획득할 수 있도록 구축할 예정이다. 모니터링 소프트웨어를 사용하여 계측기 별로 계측 주기 및 계측시간 조정 가능 1.0GHz 대역의 통신 주파수를 사용하는 IEEE

802.15.4 프로토콜 기반의 WSN 기반 통신, 무선데이터로거(게이트웨이) 및 무선데이터로거 내부에 ADC 24bit 센서구동회로, 신호증폭기, LowPass Filter를 내장하여 센서에서 측정된 데이터를 관리화면에서 점검자가 즉시 확인할 수 있다. 다음은 통신과 WSN 요소장치의 개발 내용을 나타내고 있다.

아래는 개발 하고자하는 무선 센서 노드의 개발 목표 사양이다.

○ ZigBee-WPAN, LoRa-WAN 핵심 기술 개발

- 동작온도 범위 : $-40\sim 85^{\circ}\text{C}$
- 공급전압 : $3.3\pm 0.25\text{V}$
- 대기전류 : $\lt 10\mu\text{A}$
- 링크버짓 : 150dB 이상
- 송신출력 : $+27\text{dBm}$
- 네트워크 규모 : 256nodes
- 통신거리 : 10km 이상(line of sight, low data rare)

○ 센서인터페이스 모드 개발

- 온도(16CH), 지표온습도, CO₂, CH₄ 센서 연동 가능 구조

○ 위성통신 접속기술 개발

- 위성 통신 규격 분석(경제성, 신뢰성, 양방향, 통신 속도 등 고려하여 극지에서 사용가능한 위성 통신 규격 선정)
- 동작온도 범위 : $-40\sim 85^{\circ}\text{C}$
- 공급전압 : $5.0\pm 0.25\text{V}$
- 대기전류 : $\lt 2\text{mA}$

무선센서 네트워크 WSN(wireless sensor networks)는 센서뿐만 아니라 구동기(actuator)도 포함하는 제어계측용 무선 네트워크를 의미한다. 무선센서 네트워크는 종래의 이더넷, 직렬통신, 필드버스 등의 유선 네트워크를 치환하는 것뿐만아니라 제어계측 분야에서 종래의 유선방식에서 다루기 어려운 응용분야와 새로운 통신 인프라를 제공하고자 한다. 무선센서 네트워크는 일반적으로 게이트웨이를 경유하여 이더넷 백본(backbone), 직렬통신, 필드버스 등의 유선 네트워크와 접속된다. 계측제어 데이터 액세스 단말 기능을 담당한다.

○ 센서노드

- WPAN기술중 최저 전력 : 100mW 미만
- 100m 이상 통신가능(자유공간)
- ZigBee 표준 준수
- IEEE 802.15.4-2011 기반

센서노드는 각종 아날로그센서와 디지털 센서를 연결하기 위한 인터페이스를 제공하여 적당한 센서로 시스템을 구성할 수 있도록 하였다. 또한, 유지보수 및 설치의 편의를 제공하기 위해 센서 노드는 저전력 모드로 동작 가능하도록 설계하였다. 개발하는 WSN 시스템의 각종 구성 장치들의 주요 기능과 설계 내용은 다음과 같다.

- 센서노드 장치

그림 1과 같이 센서로부터 측정된 데이터를 지그비(ZigBee) 통신을 통해 USN 게이트웨이로 전송하는 장치로 각종 디지털, 아날로그 센서 연결이 가능. 저전력 모드를 지원하도록 설계하였으며 저전력 동작 모드 시 수 uA 이하로 동작되도록 구성하였다. 동작 온도 범위는 극한환경을 고려하여 -40 ~ 80°C로 개발 하였다. 상기에서 설명한 바와 같이 캐나다의 경우 겨울에 공사가 진행되므로 최소 -20°C의 온도 설정이 필요하다. 하지만 이미 적용되어있는 모니터링 장비를 운용중에 사용하기 위해서는 -40°C의 온도 변화에도 사용가능한 센서로 구성되어야 한다.

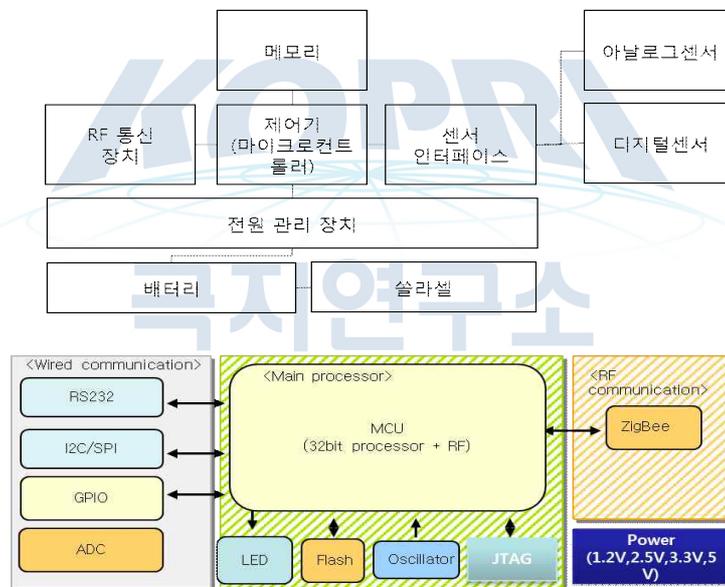


그림 1 센서노드 구성도

- RF 통신 장치

Ad-hoc WMN(Wireless Mesh Network)의 ZigBee 통신을 제공하도록 설계하였다. ZigBee 통신 방식은 저전력, 저비용으로 센서 네트워크를 구성하기 위한 국제 표준 기술로 배터리를 사용하여 수개월에서 수년간 지속 사용이 가능하다.

WSN 기반 오일샌드 플랜트 모듈 모니터링의 운영 및 제어 프로그램은 현장 게이트웨이에 설치할 계획이고, 현장 게이트웨이는 원격 모니터링을 할 수 있도록 원격 접속 서비스를 제공할 수 있도록 개발하였다. 모니터링 프로그램의 주요한 기능은 현장에 설치된 센서에서 획득한 데이터를 완벽하게 수신하고

이를 저장할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 WSN 기반 오일샌드 플랜트 모듈을 관리자가 원하는 시간에 모니터링 할 수 있도록 이러한 기능을 구축할 계획이다. 일반적으로 구조물을 모니터링 하는 이유는 구조물에 중대한 결함이나 이상 징후가 발생하였을 경우 관리주체가 이를 파악할 수 있도록 경보를 하고 원인을 찾을 수 있는 데이터를 제공하는데 있다. 본 운영 프로그램에서는 이러한 기능을 모두 탑재할 예정이다. 또한 본 연구에서 성과기준을 Packet Error Rate(PER) 1%로 구성할 계획이다. PER 1%의 의미는 본 연구 개발품이 세계표준에 대한 기준을 충족함을 의미한다. 그러나 연차별 성과 목표를 달성하기 위하여 4차년도는 2%, 5차년도는 1.5% 및 6차년도는 1%로 성과목표를 설정하였다.

소프트웨어 및 알고리즘

센서 네트워크에서 시각 동기를 하기 위한 시각 정보 데이터 전송 시에 지연 요소가 포함 될 수 있어 이 면에서 소프트웨어 알고리즘의 성능에 큰 영향을 미칠 수 있다. 이러한 시간 지연 요소를 데이터 전달 측면에서 분석하여 디자인에 반영되어야 한다. 다음은 이러한 분석을 계층별로 나타내었다.

- Send Time: 매체 접근 제어(MAC)의 상위계층에서 메시지를 생성하고 처리하는데 소요되는 시간으로 일반적으로 수백 ms 지연 시간이 포함된다.
- Access Time: 데이터를 전송하기 위한 매체 접근제어(MAC)에 소요되는 시간으로 수백 ms 에서 수초 사이의 지연 시간이 포함된다.
- Transmission Time: 물리(PHY)계층에서 데이터를 보내기 위해 소요되는 시간으로 수십 ms 이 내의 지연 시간이 소요된다.
- Propagation Time: 송신 노드의 RF 에서 신호가 출력되어 수신 노드의 RF 에서 데이터를 수신 하기까지의 소요시간으로 1 us 이내의 지연 시간이 소요된다.
- Receive Time: Send Time 과 대칭되며 MAC 상위계층에서 데이터를 처리하는데 소요되는 시간 이다.

RBS는 시각 정보 값을 포함하지 않고 주기적인 참조 노드의 시각 정보 데이터를 참고하여 시각 동기를 형성하는 방식이다. RBS는 R-R synchronization 방법으로 참조 노드의 수신 시간 값을 이용하여 주변노드들 간의 데이터 송수신을 통한 동기화를 이룬다. 이러한 방법은 무선 통신의 데이터 전송 시 누적되는 에러 요소 중 송신 노드에서 발생하는 에러를 제거할 수 있는 장점을 가진다.

FTSP 알고리즘은 보다 정밀한 시각 동기를 위하여 시각 동기 데이터를 연속적인 n개를 송신하여 수신된 n개의 샘플데이터 값으로 Linear Regression 을 통한 에러 보정을 포함하며, 또한 동기 필드(sync filed)의 바이트 정렬(byte alignment)를 통하여 에러를 보정하고 있다. 또한 네트워크 시각 동기 방식이 브로드캐스팅 방법이기 때문에 네트워크 토폴로지 및 에러 에 대한 복구 능력이 뛰어나다. 센서노드의 개발목표 사양은 변형감지 WSN 시스템과 동일하다.

CO2 센서의 인터페이스 제작

CO2 가스 측정 센서는 통기법을 이용하여 적외선 흡수법을 이용하여 물리량의 변화에 따라 적외선의 흡수 변화하는 현상을 이용한 센서이다. CO2 가스의 계산은 칼라와 cap의 밀폐 공간 내 공기의 이산화탄소 농도 변화를 1분 동안 30초 간격으로 측정하여 시간에 따른 이산화탄소 농도 변화를 계산 하고, 동시에 기온과 대기압을 측정하여 이산화탄소 밀도를 계산하여 최종적으로 단위시간당 단위면적에서의 이산화탄소 방출량($\text{mg CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{h}^{-1}$)을 계산하게 된다. 그림 2는 CO2센서를 나타내고 있다.

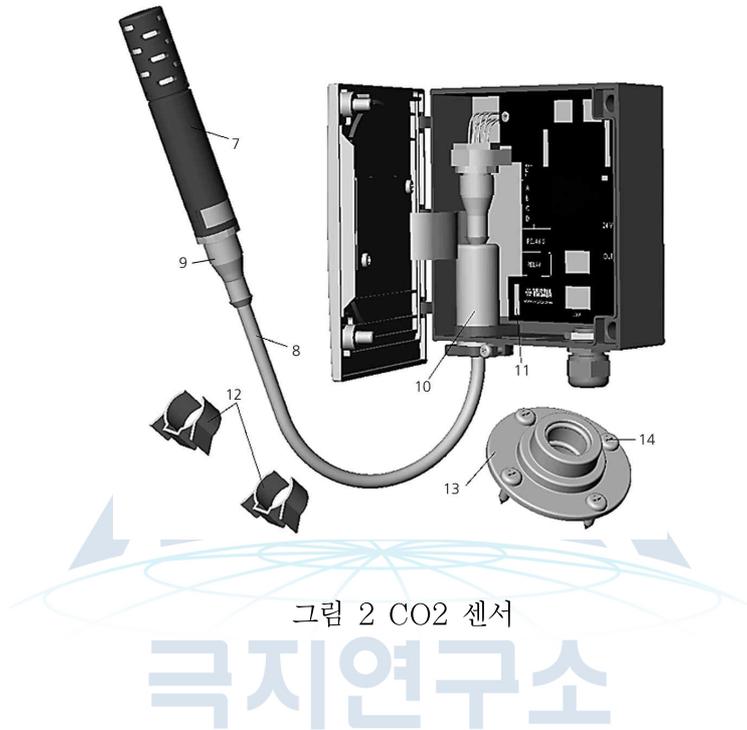


그림 2 CO2 센서

3.1 상태감지 WSN 모니터링 시스템 제작

센서노드 및 인터페이스 설계

CO2 가스 센서의 경우 가스가 발생하는 구간에 CO2 가스 센서를 부착하고 계측장치를 연결하여 측정한 결과를 기록 한다. 따라서, 직접 센서가 설치된 위치로 이동하지 않고 다양한 위치의 변형을 측정 및 실시간 모니터링할 수 있는 원격 모니터링 시스템의 구현하기 위한 단말기가 필요하다. 본 연구에서는 가스 센서도 다른 센서 인터페이스 보드와 같이 무선센서네트워크에 연결 할 수 있도록 하였다. 상태 감지 WSN 모니터링 시스템의 센서노드는 본 연구에서 개발되는 시스템을 구성하기 위한 핵심 무선 통신 모듈로 송신 출력과 안테나 타입에 따라 4종류로 구분되며 주요기능은 다음과 같고 그림 3은 센서의 전원을 제어하기 위한 회로이다. 센서와 무선 통신 모듈은 대기 상태에서 많은 전류를 소비하므로 휴먼 모드(Sleep mode)로 동작하도록 설계 되었다. 동작에 관련된 설계 회로도 는 그림 3에서 7과 같다.

- ZigBee 통신

- IEEE 802.15.4-2006 표준
- 채널, 출력 변경 가능
- ZC, ZR, ZED 동작 가능
- 최대 +20[dBm] 출력 가능
- SMD, SMA 안테나 가능
- LED 표시 기능
 - 동작모드, 통신상태, 에러 표시
- 펌웨어 업데이트
 - 펌웨어 업데이트 기능 제공

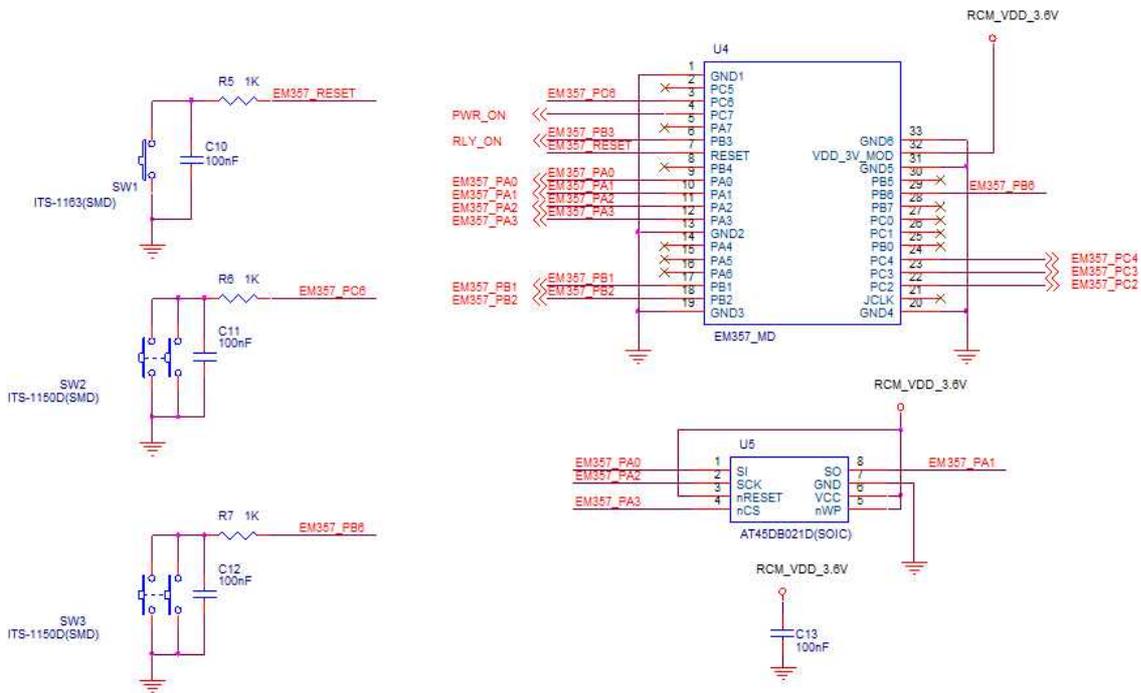


그림 3 전원제어 회로

운영 및 제어프로그램

운영프로그램은 3차년도 3.1장에 나타난 개발 내용에 맞추어 제작하였다. PC에서 미터링정보를 수집하고 제어프로그램을 이용해 미터링 정보를 수집하는 것으로 무선모듈을 이용해 정보를 수집하는 방식으로 개발하였다.

동토에서 발생하는 CO2 변화를 장시간 관측하기 위해서는 저전력으로 동작되는 로거가 필수적이다. 알래스카 카운실 사이트에 설치한 CO2 센서 모듈은 바이셀라 사의 GMT222 이다. GMT222의 동작 전압은 24V이며 평균 4W 전력을 소비한다. 따라서 센서 모듈의 전원을 제어하는 것은 장시간 관측 위해 필수적이다. GMT222 센서 모듈은 4-20mA 아날로그 방식으로 CO2값을 출력한다. 센서로부터 최초의 측정값을 얻기 위해서는 최소 30초 이상의 전원을 공급하여야만 한다.(Warm-up time) 아래의 그림은 센서 값을 무선 메시 네트워크(ZigBee-Pro) 연결하기 위한 무선 통신부 회로도이다.

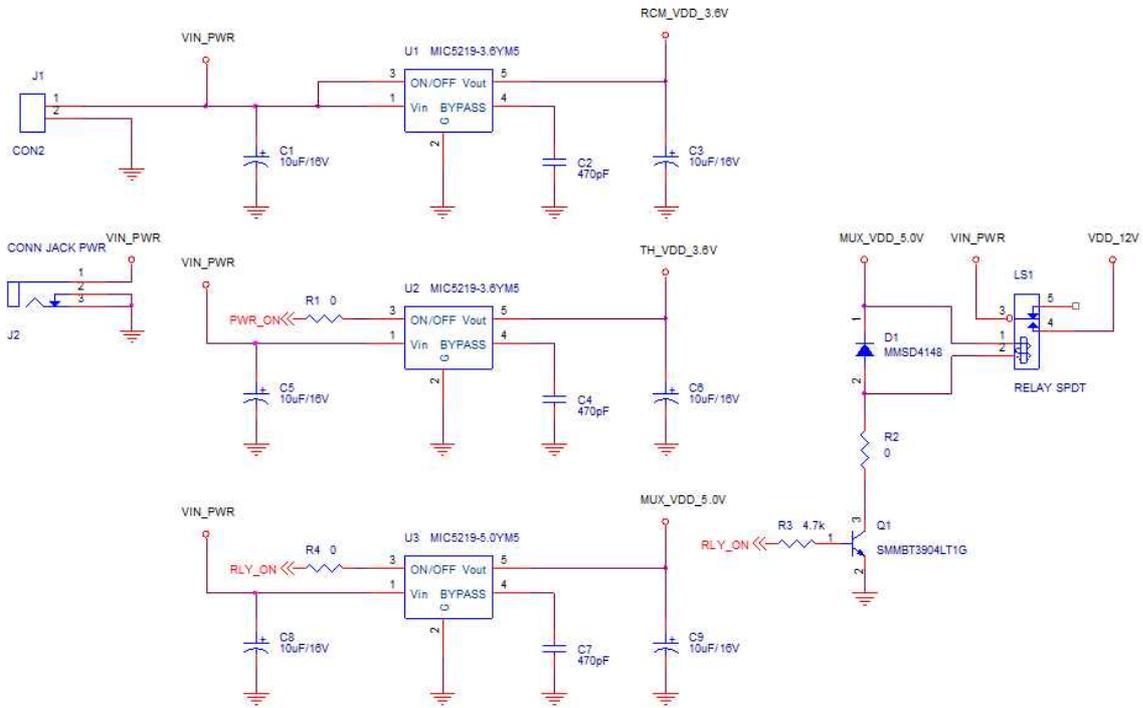


그림 4 Relay 모듈 회로

앞에서 설명하였듯이 GMT222 센서 모듈을 전원 인프라가 없는 극한지에서 장시간 사용하기 위해서는 전원제어가 필수적이다. 아래 그림 7은 24V GMT222 전원을 제어하기 위한 회로도이다. 측정 시에만 전원을 공급하며 측정이 완료되면 전원을 차단한다. 그러므로, 활성화 시간(Warm-up time) 30초를 포함하여 약 1분간만 동작하게 된다. 평균 소비전력량은 66[mWH]이다.

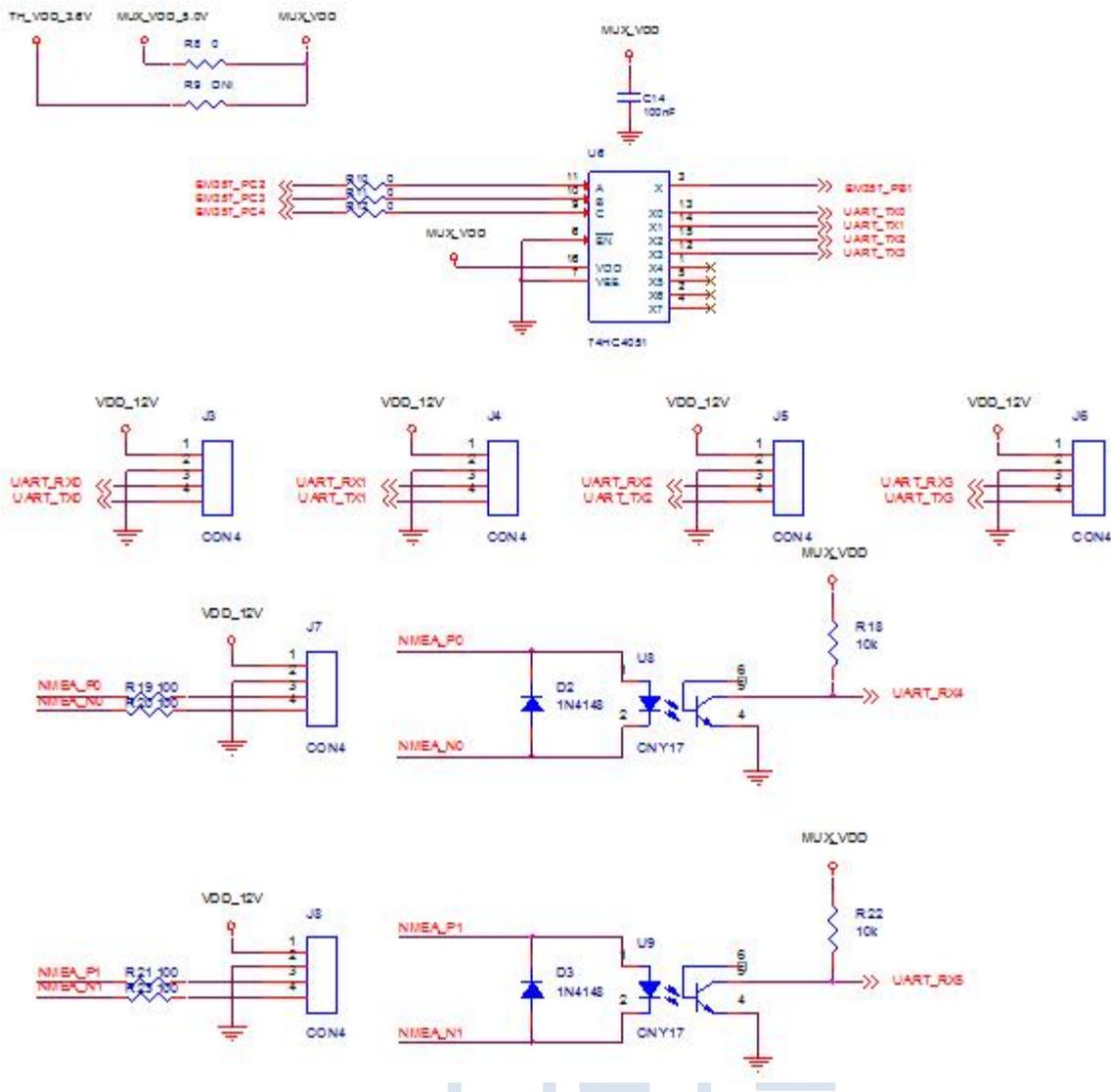


그림 5 유선통신부 회로

GMT222는 0-20mA, 4-20mA, 0-10V 등의 다양한 아날로그 방식으로 CO2값을 출력한다. 알래스카 시스템에서는 통신 모듈과 연결하기 위해 4-20mA 방식을 채택하였다. 아래 회로도에는 4-20mA를 SPI 방식으로 변환하여 통신 모듈에 연결하기 위한 회로이다. ADC 변환된 CO2 값은 12비트 정밀도를 갖는다.

GMT222의 전원은 DC 24V이므로 24V의 높은 전압을 얻기 위해서는 여러 개의 배터리 셀을 직렬로 연결해야 하는 문제가 있다. 예로 리튬 1차 전지를 사용 할 경우 리튬 배터리 3.6V 셀을 7개를 직렬로 연결해야 한다. 여러 개가 직렬로 연결된 배터리 그룹에서 먼저 방전하는 셀이 존재하게 되고 에너지가 먼저 고갈된 배터리 셀로 전류가 계속 흘러 셀이 고장나거나 심한 경우 폭발의 위험이 있다. 전문가에 의해 특별 제작된 직렬 배터리 셀이라면 안전이 보장 되겠지만, 제작이 까다롭고 번거로우므로 본 과제에서는 10.8V을 24V로 변환하는 회로를 구성하여 GMT222에 전원을 공급하였다. 아래 그림은 DC/DC 업컨버터 회로도이다.

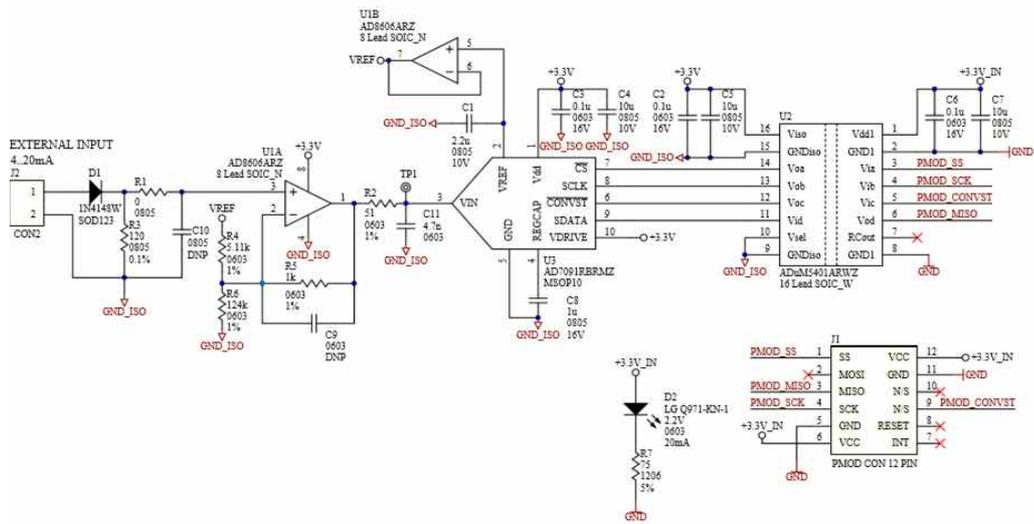


그림 6 12bits ADC 모듈 회로

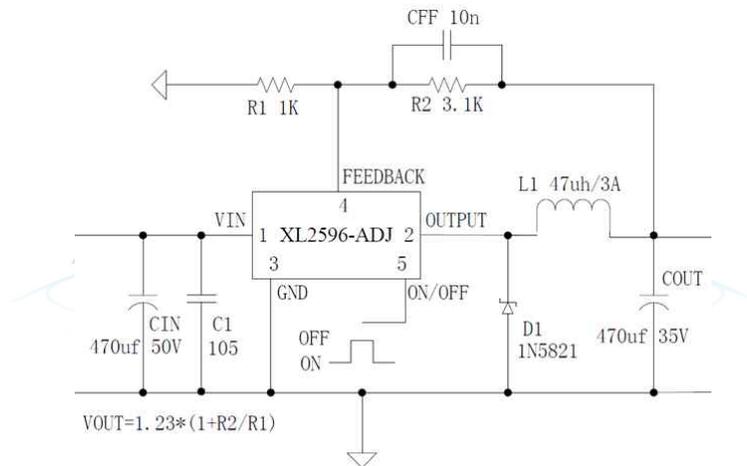


그림 7 DC/DC Up convertor 모듈회로

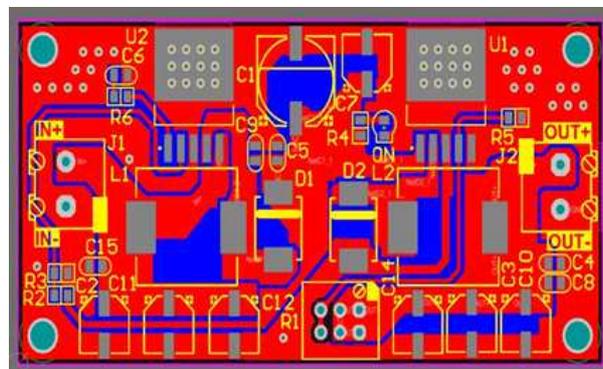


그림 8 CO2 센서 인터페이스 모듈

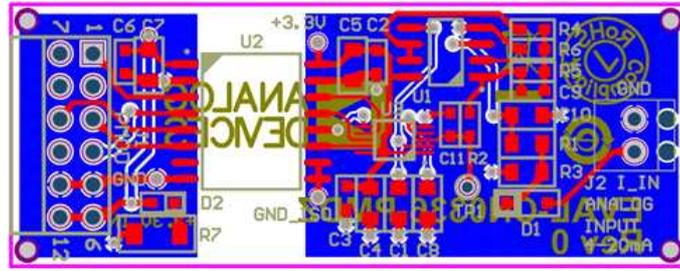


그림 9 CO2 센서 통신 모듈

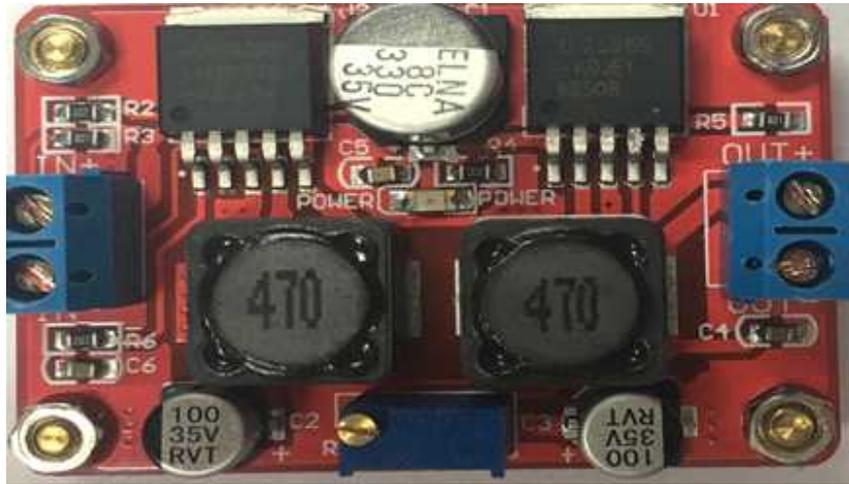


그림 10 CO2 센서 인터페이스 제작품

그림 8과 9는 PCB 설계 파일은 PADS 툴을 사용하여 설계한 도면이다. 1개의 제어 보드(인터페이스 보드)에 2개의 센서를 연결 할 수 있으므로 총 2개의 온도센서 인터페이스 보드가 사용될 수 있다. 전원은 3.6V 배터리를 동작 할 수 있게 하였으며, 극한 환경에서 장시간 운영되도록 $-40 \sim 85^{\circ}\text{C}$ 범위에서 동작 할 수 있게 하였다. 그림 3에서 7의 회로도와 같이 하나의 인터페이스 보드에 2개의 센서를 연결 할 수 있도록 개발 하였다.

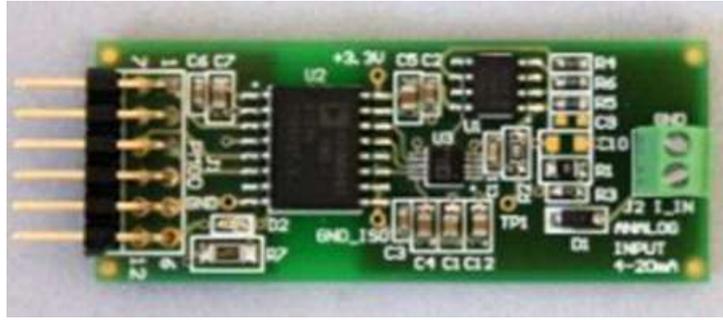


그림 11 CO2 센서 통신 모듈 제작품

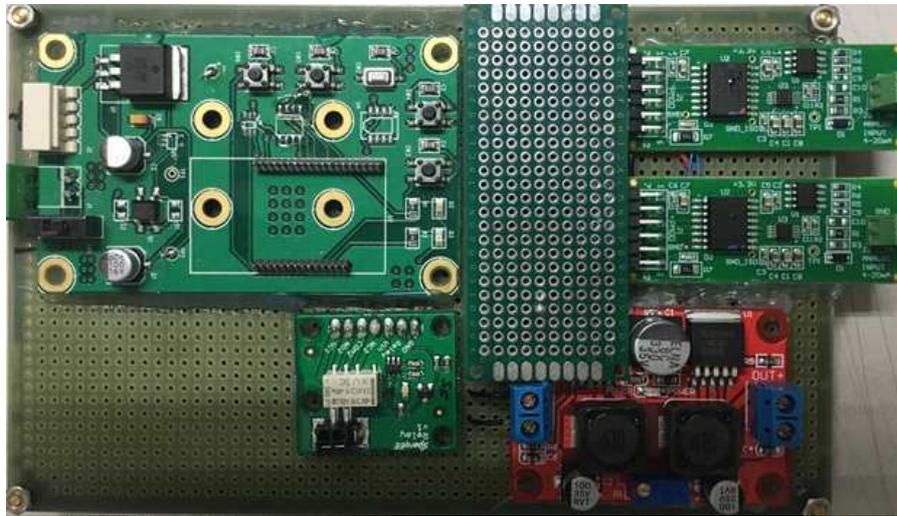


그림 12 CO2 센서 모듈 전체 조립 제작품

CO2 센서에서 얻은 데이터를 전송하기 위하여 센서 인터페이스를 개발하고 시작품을 완성하였다. 센서 인터페이스에서는 피드백 되는 고유 진동 주파수를 측정하고 센서와 무선 통신 모듈은 대기 상태에서 많은 전류를 소비하므로 휴먼 모드(Sleep mode)로 동작하도록 제작하였다.

제2장

오일샌드플랜트 모듈 변형/상태감지 WSN 모니터링 시스템 보완

1 PCB 방습 및 절연

1.1 개요

수년 전 까지만 해도 전자 SMD Assembly PCB에 코팅은 사용하기가 어려웠다. 대부분의 코팅 방식이 까다로운 공정 이어서 일부군용 . 철도 . 항공. 선박 및 산업기기 등 High-tech 분야에서만 적용이 가능했을 뿐이다. 하지만 최근 전자공학에 있어 견고성을 강조하는 요구가 늘어남에 따라 편리한 코팅 솔루션이 개발되고 있다. 특히 부품 간격이 조밀한 채로 작업할 경우 부식성 물질이 아무리 적더라도 실패하기가 쉽다. 이러한 부식을 막아주는 대안으로 전자기기를 Coating하는 방법이 나오게 되었다. 전자제품은 현대인의 생활의 일부가 되어 있으며 더욱더 견고한 제품을 요구하고 있다. 견고하고 튼튼한 제품 생산을 위해서는 전자부품 어셈블리의 코팅이 매우 중요하다. 부품 조립후 coating 으로 막을 입히게 되면 고밀도 SMD PCB 뿐만 아니라. 감전, 습기 및 부식 방지에 도움이 된다(www.namaSMT.com).

1.2 코팅 타입 및 공정

코팅 타입(www.namaSMT.com).

1) Silicone Based (실리콘)

- Coating력은 좀 약한 반면 탄력적인 코팅방식으로 60℃ 이하 열(2~5분) 에서 Curing.
- 20%~35% 습도 필요 유해성 연기나 물질이 전혀 없다.

2) Solvent Based (솔벤트)

- Coating력은 강하지만 탄력적 코팅이 약하다.
- 80℃ 이하 열 (8~10분)에서 Curing.
- 사용에 있어 위험하고 폭 발생 물질(curing동안 폭 발생 가스가 분출될 수 있다.)

3) Water Based (물)

- Coating력은 강하지만 탄력적 코팅이 약하다.
- 실내온도 22℃ 이하(20분)에서 빠른 Curing.
- 코팅 및 세부 공정 시 향기나 자극성이 전혀 없다.

4) UV Curing

- Coating력이 강하고 UV light에서 코팅된다.
- Belt 속도 1.5~7.5M/min.
- 유해성 연기나 물질이 전혀 없음.
- 조밀한 부품 사이에 코팅된 것은 curing되지 않는다.

코팅 공정

1) 정전기 대책을 갖춘 후 작업 실시한다.

2) PCB 세척 및 건조

- 부품의 날인이 세척에 지워지거나 파손될 우려가 있는 부품은 마스킹한다.
- 제품에 특성에 맞는 세척액을 선택하여 PCB를 세척한다.
- 세척이 완료된 PCB를 건조기에 넣고 건조한다 (40~60℃ 1시간 이상)
- 건조된 PCB를 제습하고(제습함) 상온으로 1시간 경과 후 작업한다.

3) 코팅

- 마스킹 완료된 제품을 에어컴프레셔를 이용하여 이물질(먼지, 붓털등)을 털어낸다.
- 제품을 코팅판에 정렬시키고 전면 코팅을 실시한다.(코팅 두께를 조절하기 위해 최대 4번까지 반복적으로 코팅 분사한다.(코팅-건조-코팅-건조))
- 전면 코팅이 완료되면 후면 코팅을 실시한다.
- 코팅 완료 후 UV검사기로 확인 하고 건조기에서 4시간이상 건조한다(40~60℃ 4시간 이상)

4) 마스킹 제거

1) 건조가 완료된 제품의 마스킹 테이프를 제거한다.

5) 코팅검사

- 지정된 UV코팅 검사기에 제품을 위치하고 검사를 실시한다.
- 반드시 지정된 검사실에서 검사하고 주변을 청결히 유지하여 이물질이 붙지 않도록 주의한다.

1.3 코팅 결과

- 본 연구에서 사용된 PCB를 이용하여 감전, 습기, 부식 방지에 도움이 되는 PCB 코팅을 그림 13과 같이 수행하였다.



그림 13 코팅된 PCB

2. 게이트웨이 보완

WSN 게이트웨이는 각 센서인터페이스 보드의 무선 통신 모듈에서 전송한 데이터를 수집하고 무선 네트워크를 관리하는 장치이다. 수집된 데이터는 이리듐(Iridium) 모뎀을 통해서 미리 정의된 메일 계정으로 데이터를 송신하게 된다. 이번 차년도 개발 SBC(Single Board Computer) 보드는 2 ~ 3차년도에 설계 제작된 CPU 모듈에 비교하여 저전력 MCU(Micro Control Unit)을 사용하여 설계 되었다. 2 ~ 3차년도에 제작 된 CPU 모듈은 활성화 상태에서 평균 ~146mA 전류를 소비하는 반면 이번차년도 제작 ~58mA 전류를 소비한다.

2.1 게이트웨이 장치(센서 코디네이터)

그림 14와 같이 지그비(ZigBee) 센서네트워크로부터 수집된 데이터를 이더넷·무선인터넷·인공위성 등 이종의 통신방식으로 변환하는 장치이며 보드(장치) 내에 비 휘발성 메모리를 갖추고 있어 수집된 데이터를 자체적으로 보존할 수 있도록 설계하였다. 동작 온도 범위는 -40 ~ 80℃ 이상이 되도록 하여 극한 환경 온도에서도 사용 가능하도록 설계하였다. 캐나다의 경우 겨울에 공사가 진행되므로 최소 -20℃의 온도 설정이 필요하다. 하지만 이미 적용되어있는 모니터링 장비를 운용중에 사용하기 위해서는 -40℃의 온도 변화에도 사용가능한 센서로 구성되어야 한다. WSN 모니터링 시스템중 개발된 게이트

웨이 주요기능은 다음과 같다.

- 이더넷 통신
 - 원격 서버와 TCP/IP 통신
 - 센서데이터 송신
 - 동작 모드 및 에러 상태 모니터링
 - 동작 모드 변경
 - ZigBee 출력 변경

- ZigBee 통신
 - IEEE 802.15.4-2006 표준
 - 채널, 출력 변경 가능
 - ZigBee 코디네이터(ZC) 또는 라우터(ZR) 로 동작 가능
 - 센서 노드로 부터 데이터 수신

- LED 표시 기능
 - 동작모드, 통신상태, 에러 표시

- 펌웨어 업데이트
 - 펌웨어 업데이트 기능 제공

- 자체 진단 기능
 - 센서동작 상태 진단
 - 각종 하드웨어 장치 진단



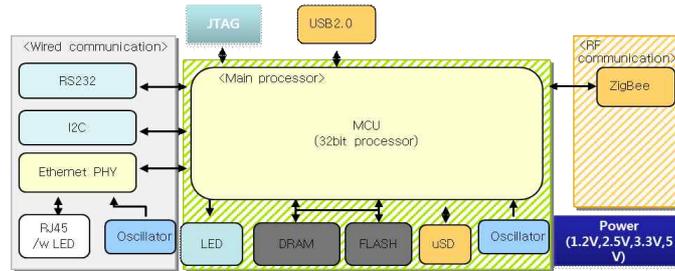
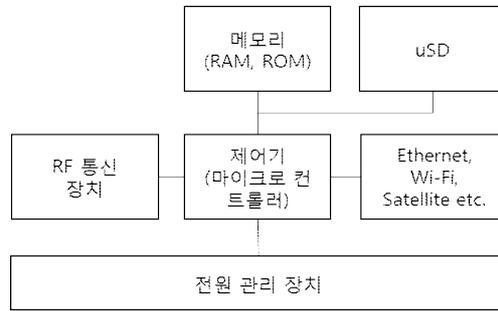


그림 14 게이트웨이 구성도

• 소프트웨어 및 알고리즘

센서 네트워크에서 시각 동기를 하기 위한 시각 정보 데이터 전송 시에 지연 요소가 포함 될 수 있어 이 면에서 소프트웨어 알고리즘의 성능에 큰 영향을 미칠 수 있다. 이러한 시간 지연 요소를 데이터 전달 측면에서 분석하여 디자인에 반영되어야 한다. 다음은 이러한 분석을 계층별로 나타내었다.

- Send Time: 매체 접근 제어(MAC)의 상위계층에서 메시지를 생성하고 처리하는데 소요되는 시간으로 일반적으로 수백 ms 지연 시간이 포함된다.
- Access Time: 데이터를 전송하기 위한 매체 접근제어(MAC)에 소요되는 시간으로 수백 ms 에서 수초 사이의 지연 시간이 포함된다.
- Transmission Time: 물리(PHY)계층에서 데이터를 보내기 위해 소요되는 시간으로 수십 ms 이 내의 지연 시간이 소요된다.
- Propagation Time: 송신 노드의 RF 에서 신호가 출력되어 수신 노드의 RF 에서 데이터를 수신 하기까지의 소요시간으로 1 us 이내의 지연 시간이 소요된다.
- Receive Time: Send Time 과 대칭되며 MAC 상위계층에서 데이터를 처리하는데 소요되는 시간 이다.

RBS는 시각 정보 값을 포함하지 않고 주기적인 참조 노드의 시각 정보 데이터를 참고하여 시각 동기를 형성하는 방식이다. RBS는 R-R synchronization 방법으로 참조 노드의 수신 시간 값을 이용하여 주변노드들간의 데이터 송수신을 통한 동기화를 이룬다. 이러한 방법은 무선 통신의 데이터 전송 시 누적되는 에러 요소 중 송신 노드에서 발생하는 에러를 제거할 수 있는 장점을 가진다.

FTSP 알고리즘은 보다 정밀한 시각 동기를 위하여 시각 동기 데이터를 연속적인 n개를 송신하여 수

신된 n개의 샘플데이터 값으로 Linear Regression 을 통한 에러 보정을 포함하며, 또한 동기 필드 (sync filed)의 바이트 정렬(byte alignment)를 통하여 에러를 보정하고 있다. 또한 네트워크 시각 동기 방식이 브로드캐스팅 방법이기 때문에 네트워크 토폴로지 및 에러 에 대한 복구 능력이 뛰어나다.

2.2 게이트웨이 보완 결과

RS485 유선 통신 포트와 ZigBee 모듈을 이용한 MODBUS/ZigBee 무선 모듈로 설치 환경을 감안해 최대한 작은크기로 설계하였다. 그림 15에서 19는 MODBUS/ZigBee 무선모듈의 설계도이다. 미터와 MODBUS 데이터 수집프로그램으로부터 받는 패킷을 위해 유선통신용 RS485포트가 있고 네트워크 구성용 버튼과 전원, 그리고 ZigBee모듈이 들어간다. 유선 통신부로부터 패킷을 받으면 제어알고리즘을 통해 ZigBee를 이용한 무선통신을 하게 된다. 이 때, 터널을 이용해 터널링으로 MODBUS패킷의 변화 없이 전달하게 되며 미터로부터 수집된 미터링 데이터는 ZigBee에 저장되어 ZigBee네트워크에서 에너지 관리를 위해 활용된다. 그림 20은 그림 15에서 19와 같이 설계한 회로도의 PCB제작 설계도와 시제품을 나타내고 있다.

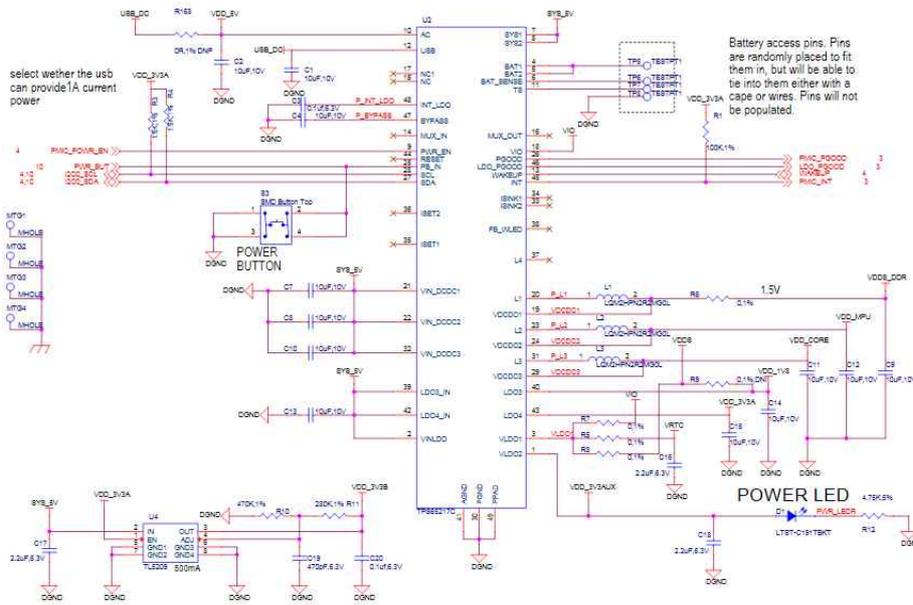


그림 15 게이트웨이 회로도(MCU부)

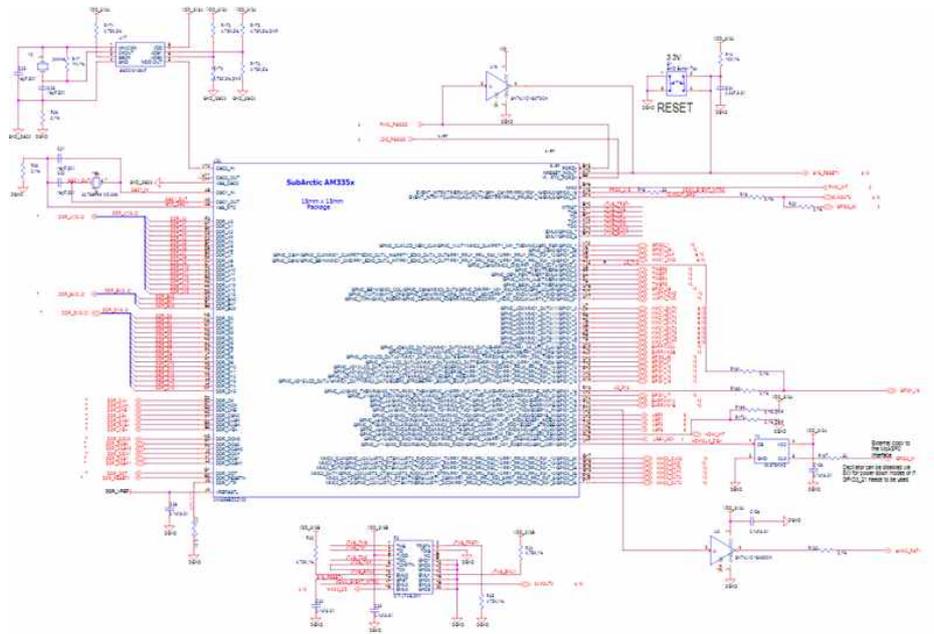


그림 16 게이트웨이 회로도(메모리부)

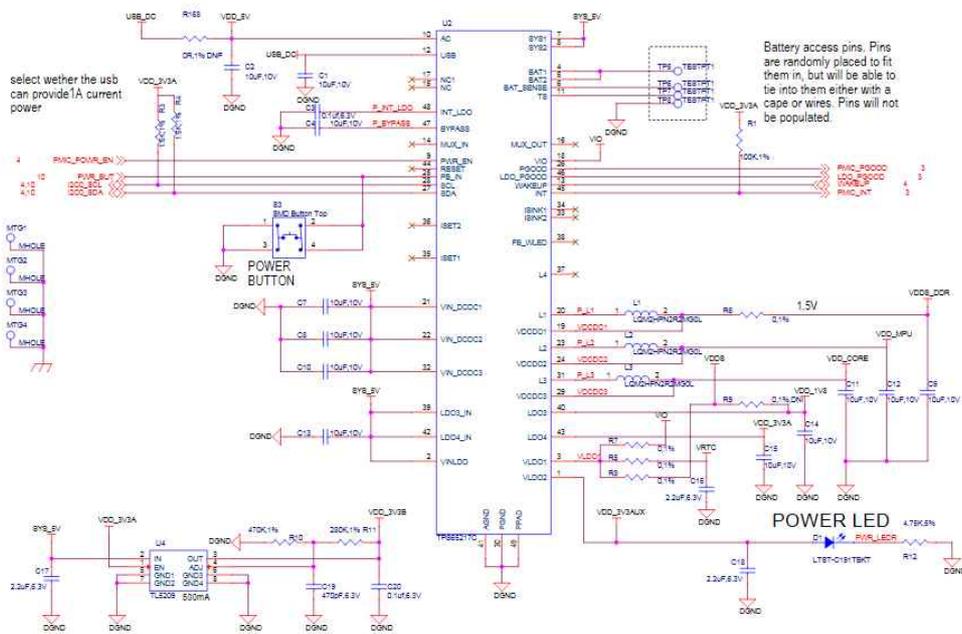


그림 17 게이트웨이 회로도(전원부)

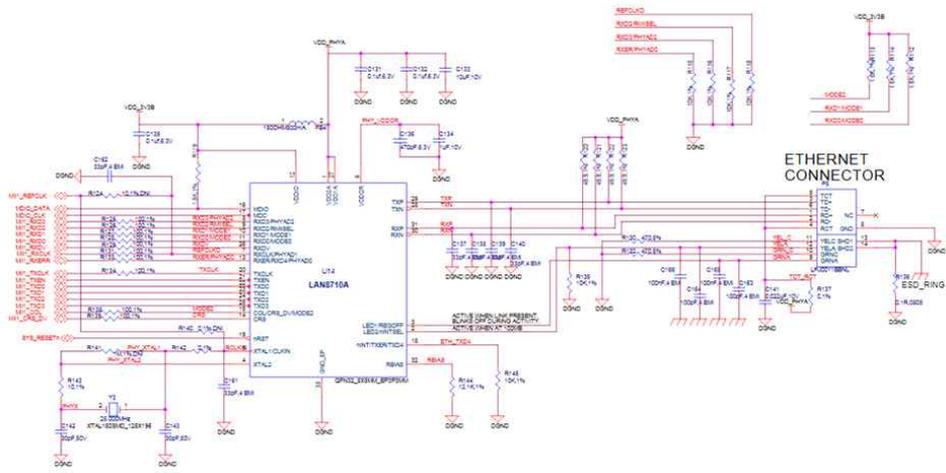


그림 18 게이트웨이 회로도(이더넷부)

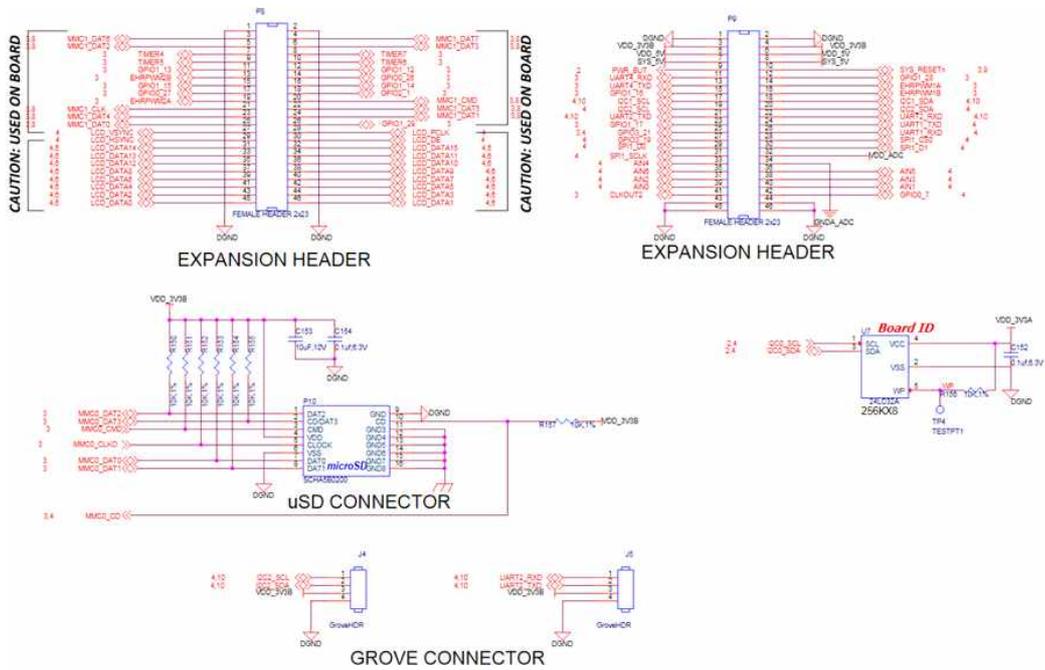


그림 19 게이트웨이 회로도(연결부)



그림 20 저전력 WSN 게이트웨이

그림 20에서 게이트웨이용 CPU 보드는 ARM Cortex-A8 프로세서, 512MB DDR3, 4GB eMMC, 이더넷 통신 포트, USB 2.0 호스트, UART 3포트, 16GB SD 카드, 확장 I/O 포트 구성된다. 이리듐(Iridium) 모뎀과 지그비(ZigBee) 통신 모듈은 UART 포트를 통해 연결하게 된다. 센서 노드로부터 수집된 센서 값은 실시간으로 SD 카드에 저장되고, 사용자가 설정한 주기로 평균된 값(또는 샘플 값)을 이리듐 모뎀을 통해 원격지 서버로 송신한다.

제3장

모듈접합부 변형감지 WSN 모니터링 시스템 performance test

1. 계측 센서의 선정

1.1 개요

오일샌드 플랜트 모듈에 설치될 WSN 시스템은 지금까지 국내에서 시행되었던 지반 및 구조물 계측과는 다르게 지반 및 구조물의 거동을 지속적으로 감시하는 구조물 장기 계측관리 시스템(long-term structural monitoring system)이다. 따라서 계측 계획에서부터 센서의 선정, 센서 및 통신장비의 설치 등 전체적인 계측관리 시스템 구축시 계측관리 시스템의 내구성과 안정성을 고려하여 설치하였다. 특히, 센서의 설치뿐만 아니라, 센서와 자동계측 장비를 연결하는 케이블의 설치 및 보호에도 중점을 두었으며, 설치 단계마다 상황을 점검하여 계측관리 시스템의 구축에 만전을 기하였다.

1.2 센서의 선정

계측을 통하여 오일샌드 플랜트의 안전성을 검토하기 위해서는 전체적인 플랜트의 거동을 파악할 수 있어야 한다. 그러기 위해서는 플랜트에 설치되는 센서가 많으면 많을수록 좋으나, 필요 이상으로 많을 경우 비용이 지나치게 증가되어 비경제적이 되며, 분석해야 할 자료가 많아져 시스템의 효율이 떨어질 뿐 아니라 하드웨어의 크기도 커진다. 그러므로, 플랜트의 거동을 대표하는 부재 및 위치에 최소한의 센서를 설치하여 플랜트 전체의 거동을 파악하여야 한다. 선정된 계측기의 경우, 설치위치는 구조해석 결과, 국내 운용중인 구조물 계측관리 시스템 등에 작성된 내용을 토대로 결정하였다. 각 계측항목별 세부 사항을 정리하면 아래와 같다.

(1) 지반의 침하, 히빙

① 설치목적 : 지반 천공후 내부에 침하계를 설치하여 동결융해로 인한 지반의 침하 및 히빙을 측정한다.

- ② 센서종류 : Vibrating 지중침하계
- ③ 설치수량 : 각 1개
- ④ 모델명 : GTC-sub
- ⑤ 설치위치 : 알래스카 카운실 인근 지반

(2) 온도 측정

① 설치목적 : 플랜트 내부의 파이프의 상태를 감지하기 위하여 온도를 측정하고 실시간 온도변화를 측정한다.

- ② 센서종류 : Thermal couple
- ③ 설치수량 : 16개
- ④ 모델명 : VWSG-S
- ⑤ 설치위치 : 알래스카 카운실 지중 및 지상온도 측정

(3) 가스측정

① 설치목적 : 플랜트 설비의 이음부 혹은 전체 플랜트에서 발생할 수 있는 가스를 알기 위하여 CO2 가스 측정센서를 설치하고 가스의 양을 측정한다.

- ② 센서종류 : CO2 가스 측정 센서
- ③ 설치수량 : 1개
- ④ 모델명 : GMT220
- ⑤ 설치위치 : 알래스카 카운실 지상에 설치하여 지중에서 발생하는 가스 측정

설치된 계측기 사양

본 연구에서 계측관리는 일시적이 아닌 수년간 계속되는 시스템이므로 센서 선정시 센서의 내구성과 안정성에 중점을 두었다. 또한, 전체 센서가 하나의 계측관리 시스템에 연결되어야 하므로 계측관리 시스템 구축시 문제가 없는 센서들을 선정하였다. 센서 선정은 국내·외에서 내구성과 안정성이 가장 좋으며 데이터 수집 시스템에 적합한 적합한 센서들을 선정하여 full monitoring system을 구축하였다. 여기에 사용된 센서의 특징과 사양을 정리하면 다음과 같다.

(1) VW type 지중침하계

- ① 형식 : Vibrating-wire
- ② 측정항목 : 플랜트 인근 지반 히빙 및 침하
- ③ 모델명 : KLA-100A
- ④ 정격출력 : 970 $\mu\text{V}/\text{V}$
- ⑤ 측정범위 : 100mm

⑥ 정확도 : 0.03%

⑦ 작동온도 : 23℃

(2) 온도계

① 형식 : Air and ground temperature sensor

② 측정항목 : 대기 온도 및 하우스 내부 온도

③ 모델명 : Pt 100 thermometer

④ 측정범위 : -50~50℃

⑤ 정밀도 : 0.2℃

⑥ 출력 : 4~20mA

⑦ 입력전원 : 12~40 Vdc

(3) 가스센서

① 형식 : Bridge resistance

② 측정항목 : CO2 측정

③ 모델명 : GMT220

④ 정밀도 : 0.01mm

⑤ 측정범위 : 5000ppm

⑥ 정확도 : 0.1%

⑦ 작동온도 : 21℃



(4) 전원공급장치

플랜트 건설전 극지에서는 전원공급이 안되기 때문에 전원공급장치는 충방전이 가능한 무보수 밀폐형 배터리 및 리튬배터리로 구성하여 안정된 전원을 공급하도록 하였다. 배터리는 외부온도가 저온과 고온 (-40℃ ~ +50℃)에서도 이상 없이 작동되게 하였으며 배터리 내부는 진동 및 내충격 보호 기능을 갖는 구조로 설계·제작 하였다. 또한 배터리는 유지보수 및 장착의 편리를 위하여 단자는 STUD TYPE, 운반용 핸들이 부착하였다. 그림 21에 나타난 리튬 배터리의 용량은 계측기 운용 전력을 계산하여 14.6V / 300Ah로 구성하였으며 그림 22와 같이 무보수 밀폐형 배터리는 1.5V / 540Ah로 구성하였다. 무보수 밀폐형 배터리의 규격은 다음과 같다.

- 무보수 밀폐형 배터리 (ES100-12V) 규격

20hour capacity to 1.75 VPC : 100 amp-houes

Float voltage : 1.75V per cell

Cyclic Recharge : 2.45 VPC - no current limit

Shelf life	: 2 years
Impedance Current	: 2.5 mohm
Short Circuit Current	: 3,500 Amps
Voltage	: 12.5Voltag

SPECIFICATIONS

(Typical values for batteries stored at 20°C for one year)

Nominal Capacity (At 5mA/20°C/68°F/2.0V Cut-Off)	19 Ah
Open Circuit Voltage (At 20°C/68°F)	3.67 V
Nominal Voltage (At 5mA/20°C/68°F)	3.6 V
Maximum Continuous Current	230 mA
Maximum Pulse Current Capability	500 mA
Operating Temperature Range	-55 ~ 85 °C
Weight	97 g (3.42 oz)
Anode Surface Area	40 cm ²
Volume	51 cm ³
Diameter (Max)	33.6 mm
Height (Max)	60 mm



그림 21 리튬배터리 제원



그림 22 무보수 밀폐형 배터리

1.3 센서의 설치

그림 23은 알래스카의 카운실 현장 사진이다. 알래스카 카운실 현장은 알래스카 원주민 협의회에서 승인 받은 지역으로 툰드라 지역이다. 중앙에 설치된 게이트웨이를 중심으로 온도, 가스, 침하센서를 설치하였다. 극지에서 센서를 설치하는데 있어 여러 가지 어려움이 많았고 국내에서 사용되는 설치절차와 상이한 부분이 많았기 때문에 설치 절차 및 설치된 계측기를 다음에 정리하였다.



그림 23 알래스카 카운실 전경

(1) 지반의 침하계 설치 절차

- ① 침하가 발생하지 않은 지지층까지 천공한다. (예상침하량보다 약 1.5 ~ 2배 추가 굴진)
- ② 천공 후 맑은 물로 깨끗하게 세척하여 Slime을 완전하게 제거한다.
- ③ 침하계 센서 설치 지점까지 케이싱을 제거하고 룯드 선단 보호파이프를 기반암 선단에 정착시킨다.
- ④ 측정룯드와 침하계 기준 센서를 천천히 삽입한 후 정착위치에서 유압펌프를 이용 유압앵커를 원지반에 고정시킨다.
- ⑤ 기준침하계 상부에 마찰 방지파이프와 신축파이프를 설치하고 침하계 센서를 와이어와 설치룯드를 이용하여 설치위치에 고정시킨다. 이때 케이싱은 설치위치 상부까지 제거한다.
- ⑥ ⑤와 같은 방법으로 반복하여 센서 및 마찰방지파이프, 신축파이프 등을 설치하고 공내 설치가 완료되면 미리 설치한 그라우팅 호스를 이용하여 시멘트+벤토나이트 그라우팅을 한다. 이때 벤토나이트와 시멘트의 혼합비율은 주변지반의 강도와 변형계수가 일치되도록 시험배합을 하여 결정한다.
- ⑦ 상부까지 그라우팅이 완료된 후 원지반 상부에 침하판과 측정룯드를 고정한다.
- ⑧ 케이블은 충분히 보호하며 자동화 시스템에 연결한다.



그림 24 지중침하계 설치 결과

(3) 온도계 설치 절차

- ① 계측기 보호를 위한 하우스 내부에 계측기에 영향을 주지 않는 범위 내에서 설치위치를 선정 후 설치할 곳을 정확히 표시한다.
- ② 설치면에 이물질이 없도록 깨끗이 청소한다.
- ③ 센서를 고정하기 위한 지그에 에폭시 본드를 도포하여 설치하고자 하는 위치에 정확히 부착한다.(단, 장기간 설치에 따른 온도계의 탈락을 대비하여 필요할 경우 앵커볼트 등으로 계측기를 고정하도록 한다.)
- ④ 케이블은 측정데이터에 영향을 주지 않도록 정리하도록 하며, 보호 커버를 설치하도록 한다.
- ⑤ 자동화시스템과 연결하여 계측기의 상태를 점검한다. 본 연구에서 설치되는 온도센서는 thermal couple로 외부온도, 지중의 내부온도, 지중침하계 지반온도를 측정하기 위하여 설치하였다.



그림 25 온도계 설치 결과

(1) 가스센서 설치 절차

- ① 설치 전 게이지의 작동상태의 이상유무를 점검한다.
- ② 설치위치의 이물질을 깨끗이 제거한다.
- ③ 설치위치에 Anchor로 지그를 부착한다.
- ④ 부착된 지그에 가스센서를 거치한다.
- ⑤ 자동화 시스템에 연결하여 CO2의 변화를 감시한다.



그림 26 CO2 센서 설치 결과

극지연구소

2. 센서의 설치 직후 획득된 데이터

본 연구에서는 극한지에서 얻어진 데이터의 PER은 모두 1% 이하로 관측되었다.

표 1. 온도데이터

tc1	L0	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L12	L13	L14지 표	L15air
WedAug 9 05:50:21 2017	2.25	3.25	5.75	9.5	12.75	15	13.75	19	0	0.25	0.5	1.25	0.75	0.5	1.5	1.25
WedAug 9 06:20:33 2017	2.75	3.75	6.25	9.5	13	14.5	13.75	17.5	0.25	0.25	0.5	1	1	0.75	1.5	1.25
WedAug 9 06:50:58 2017	2.75	3.25	6	9.5	12.5	13.25	13.75	15.25	-0.25	0	0.25	1	0.75	0.5	1.25	1.25
WedAug 9 07:21:05 2017	2.75	3.5	6	9.25	12.25	12.5	13.25	14	0	0	0.25	1	0.5	0.5	1.5	1.25
WedAug 9 07:51:16 2017	2.5	3.5	5.75	9	11.75	11.5	13	11.25	0	0	0.25	1	0.5	0.5	1.25	1
WedAug 9 08:21:24 2017	2.5	3.5	6	9	11.5	11.5	12.75	11.5	-0.25	0	0.25	0.75	0.5	0.25	1.25	1
WedAug 9 08:51:37 2017	2.5	3.5	6	9	11.25	11	12.5	11.5	0	0	0.25	0.75	0.5	0.25	1.25	1
WedAug 9 09:52:07 2017	2.25	3.25	6	9	10.75	10.75	12.25	11.25	-0.25	0	0.25	1	0.5	0.25	1.25	1
WedAug 9 10:22:27 2017	2.25	3.5	6	8.75	10.75	11	12	11.75	0	0	0.25	1	0.5	0.25	1.25	1.25
WedAug 9 10:52:34 2017	2.5	3.5	5.75	8.75	10.5	10.5	12	10.75	0	0	0.25	1	0.5	0.25	1.25	1.25
WedAug 9 11:22:31 2017	2.25	3.25	5.75	8.75	10.25	10	11.5	10.5	0	-0.25	0.25	0.75	0.25	0.25	1.25	1
WedAug 9 11:52:38 2017	2.5	3.5	5.5	8.5	10.25	9.5	11.5	9	-0.25	0	0.25	0.75	0.5	0.25	1.25	1
WedAug 9 12:22:42 2017	2.25	3.25	5.75	8.5	10	9.25	11.25	9.25	-0.25	-0.25	0.25	0.75	0.25	0.25	1.25	1
WedAug 9 12:52:49 2017	2.25	3.25	5.75	8.5	9.75	9	11	9	-0.25	0	0.25	0.75	0.25	0.25	1.25	1
WedAug 9 13:23:00 2017	2.25	3.5	5.5	8.25	9.5	8.5	10.75	7.75	-0.25	-0.25	0	0.75	0.5	0.25	1.25	1
WedAug 9 13:53:07 2017	2.25	3.25	5.5	8.25	9.5	8	10.75	7.25	-0.25	-0.25	0.25	0.75	0.25	0.25	1	1
WedAug 9 14:23:20 2017	2.25	3	5.5	7.75	9.25	7.75	10.25	5.5	-0.25	-0.25	0	0.5	0.25	0	1.25	0.75
WedAug 9 15:53:59 2017	2.25	3.25	5.5	8	9	9	10	10	1.75	3	2.25	2.5	3	2	2.75	2.5
WedAug 9 16:24:18 2017	2.5	3.5	5.5	8	9.25	10	9.75	9.75	1.5	1.75	1.25	1.5	3	1.75	2.25	1.5
WedAug 9 16:54:12 2017	2.5	3.5	5.75	8	9.25	11	9.75	10	1.25	2	1.5	2	4	2.5	2.75	2
WedAug 9 18:24:50 2017	2.25	3.5	5.75	8.5	10	15.5	9.75	15.25	0.5	2.5	2	1	4	2.5	1.5	-0.25
WedAug 9 18:55:16 2017	2.25	3.75	6	8.75	10	17.25	9.75	16.5	0.25	1.75	0.25	-1.75	3.5	2	1.25	0.25

WedAug	9 19:25:38 2017	2.25	3.75	6	8.75	10.5	19	10	17.5	-1.25	-0.25	-1.5	0	2.75	1.25	0.5	0.5
WedAug	9 19:55:52 2017	2.25	3.75	6	9	11	19.75	10.25	18.5	-1.25	-0.25	-1	0.75	2.25	1	1.25	0.75
WedAug	9 20:25:53 2017	2.5	4	6.25	9	11.5	21	10.5	19	-0.75	-0.5	-0.25	0.75	1.75	0.75	1	0.75
WedAug	9 21:26:01 2017	2.5	3.75	6.25	9.25	12	21.75	11	20.75	0.25	0.5	0.5	1.25	1.25	1	1.5	1.25
WedAug	9 21:56:02 2017	2.5	4	6.25	9.5	12.5	22	11.25	21.5	0.75	0.5	0.75	1.5	1	0.75	1.5	1.25
WedAug	9 22:26:04 2017	2.75	3.75	6	9.25	12.75	21.75	11.75	22.25	0.75	0.75	0.75	1.5	1	0.75	1.5	1.5
WedAug	9 22:56:15 2017	2.75	3.75	6.25	9.5	13	21.75	12	22.75	0.75	0.75	1.25	1.75	1	0.75	1.75	1.5
WedAug	9 23:26:44 2017	3	3.75	6.25	9.25	13.75	21	12.5	23.25	0.75	0.75	1	1.5	1.25	1	1.5	1.5
WedAug	9 23:56:42 2017	2.5	3.75	6.25	9.5	13.5	21.25	13	23.75	0.5	0.75	0.75	1.5	1.5	1.25	1.75	1.75
Thu Aug	10 02:07:28 2017	2.75	3.5	6	9.5	13.5	16.75	13.5	20.75	0.5	0.5	0.5	1	1.25	1	1.75	1.5
Thu Aug	10 03:07:33 2017	2.75	3.75	6.25	9.5	13	16.25	13.75	20	0.5	0.25	0.5	1	1	1	1.75	1.5
Thu Aug	10 04:08:11 2017	2.75	3.75	6.25	9.5	13	16.25	13.75	20	0.5	0.25	0.5	1	1	1	1.75	1.5
Thu Aug	10 05:08:31 2017	3	3.75	6.25	9.75	13	15.5	13.5	19.25	0.25	0.25	0.5	1.25	1	1	1.5	1.5
Thu Aug	10 06:08:31 2017	2.75	3.5	6	9.5	12.75	14.25	13.25	17	0.25	0.25	0.5	1	0.75	0.75	1.5	1.25
Thu Aug	10 07:09:13 2017	2.75	3.5	6.25	9.25	12.5	13.75	13.25	16	0.25	0.25	0.5	1	0.75	0.5	1.25	1.25
Thu Aug	10 08:09:18 2017	2.5	3.5	6	9.25	12	13	13	15.5	0	0.25	0.5	1	0.5	0.5	1.5	1.25
Thu Aug	10 09:09:45 2017	2.5	3.75	6	9.25	11.75	12.25	12.75	14.5	0.25	0.25	0.25	1	0.5	0.5	1.5	1.25
Thu Aug	10 10:10:35 2017	2.5	3.75	6	9.25	11.25	12	12.5	13.5	0	0	0.5	1	0.5	0.5	1.5	1.25
Thu Aug	10 12:11:30 2017	2.5	3.5	6	9	11	11.5	12	13.25	0	0	0.5	1	0.5	0.5	1.5	1.25
Thu Aug	10 13:11:59 2017	2.5	3.5	5.75	8.75	10.75	11.25	11.75	12.5	0	0	0.25	0.75	0.25	0.5	1.25	1.25
Thu Aug	10 14:12:09 2017	2.5	3.5	5.75	8.75	10.5	11	11.5	12.5	0	0	0.25	1	0.5	0.25	1.25	1.25
Thu Aug	10 16:13:16 2017	2.5	3.5	6	8.75	10.5	11.25	11	12.75	0	0.25	0.5	1	0.5	0.5	1.25	1.25
Thu Aug	10 17:13:44 2017	2.5	3.75	6	8.75	10.25	11.5	11	13	0.25	0.25	0.5	1	0.75	0.75	1.5	1.25
Thu Aug	10 19:14:36 2017	2.75	3.75	6	9	10.75	14.25	11.25	16.5	0.5	0.5	0.5	1.25	1.25	1	1.5	1.5
Thu Aug	10 20:14:57 2017	2.75	3.75	6.25	9	11.25	15.75	11.5	17.5	0.25	0.5	0.75	1.25	1.25	1	1.5	1.75
Thu Aug	10 21:15:16 2017	2.75	3.75	6	9	11.75	16	11.5	18.75	0.5	0.5	0.75	1.25	1.25	1	1.75	1.75
Thu Aug	10 22:15:49 2017	2.75	3.75	6	9	11.75	16	11.5	18.75	0.25	0.25	0.5	1.25	1	0.75	1.5	1.5
Thu Aug	10 23:16:00 2017	3.25	4	6.25	9.25	12.5	16.25	12	18.75	0.25	0.25	0.5	1.25	1	0.75	1.5	1.5
Fri Aug	11 00:16:08 2017	3	4	6	9	12.25	15.5	12	16.25	0.25	0.25	0.5	1	1	0.75	1.25	1.25

Fri Aug 11 01:16:26 2017	2.75	3.75	6	9.25	12	14.5	12.25	15.25	0.25	0.25	0.25	1	0.75	0.75	1.5	1.25
Fri Aug 11 03:16:39 2017	2.75	3.75	6	9	11.75	13.75	12.25	14.75	0.25	0.25	0.5	1	0.75	0.5	1.25	1.25
Fri Aug 11 04:16:53 2017	2.75	3.75	6	9	12	13.25	12.25	14.5	0	0	0.5	1	0.75	0.5	1.5	1.25
Fri Aug 11 05:16:54 2017	2.5	3.75	6	9	11.25	12.5	12	14	0	0.25	0.25	0.75	0.5	0.5	1.25	1.25
Fri Aug 11 06:17:05 2017	2.75	3.75	6	9	11.25	12.25	11.75	14	0	0.25	0.25	1	0.5	0.5	1.25	1.25
Fri Aug 11 07:17:16 2017	2.75	3.5	6	9	11	11.75	11.5	13.5	0	0	0.5	1	0.5	0.25	1.25	1.25
Fri Aug 11 08:17:28 2017	2.5	3.5	6	8.75	10.75	11.25	11.5	13	0	0	0.25	1	0.5	0.5	1.25	1.25
Fri Aug 11 09:18:05 2017	2.5	3.5	6	8.75	10.5	11.25	11.25	12.75	0	0	0.25	1	0.5	0.5	1.25	1.25
Fri Aug 11 10:18:05 2017	2.5	3.5	5.75	8.75	10.5	11.75	11.25	13.5	0	0	0.5	1	0.5	0.25	1.25	1.25
Fri Aug 11 11:18:07 2017	2.5	3.5	5.75	8.75	10.25	11.75	11	13.25	0	0	0.5	1	0.5	0.5	1.25	1.25
Fri Aug 11 12:18:12 2017	2.5	3.75	5.75	8.5	10.5	12	11	14	0	0	0.5	1	0.5	0.5	1.25	1.25
Fri Aug 11 13:18:16 2017	2.5	3.75	6	8.5	10.5	11.75	11	13.75	0	0	0.5	1	0.5	0.5	1.5	1.25
Fri Aug 11 23:19:27 2017	2.75	3.75	5.75	8.5	10.75	13.25	10.75	14.5	0.25	0.25	0.5	1	0.75	0.75	1.5	1.5
Sat Aug 12 01:19:47 2017	2.75	3.5	5.75	8.25	10.25	12.25	10.75	13.25	0	0	0.25	0.75	0.75	0.5	1.5	1.25
Sat Aug 12 02:20:05 2017	2.75	3.75	5.75	8.5	10.5	12.75	10.75	13.75	0	0	0.5	1	0.75	0.75	1.5	1.5
Sat Aug 12 03:19:53 2017	2.5	3.25	5.5	8.25	10.25	11	10.5	10.5	0	0	0.25	0.75	0.75	0.5	1.25	1
Sat Aug 12 04:20:16 2017	2.5	3.25	5.5	8.25	10.25	11	10.5	10.5	0	0	0.25	0.75	0.75	0.5	1.25	1
Sat Aug 12 05:20:08 2017	2.25	3.5	5.5	8	9.75	9.75	10.25	9	-0.25	-0.25	0.25	0.75	0.5	0.25	1.25	1
Sat Aug 12 07:20:17 2017	2.25	3.25	5.5	8	9.25	8.75	10.25	7.75	0	0	0.25	0.75	0.25	0.25	1.25	1
Sat Aug 12 08:20:20 2017	2.25	3.5	5.5	7.75	9	8.25	10	7	-0.25	-0.25	0	0.75	0.25	0.25	1.25	1
Sat Aug 12 09:20:27 2017	2.25	3.25	5.25	7.5	8.75	8	9.75	6.75	-0.25	0	0	0.5	0.25	0.25	1	1
Sat Aug 12 10:20:28 2017	2.25	3	5.25	7.5	8.5	7.5	9.25	6.5	-0.25	-0.25	0.25	0.75	0.25	0.25	1	1
Sat Aug 12 11:20:23 2017	2.25	3	5	7.25	8.25	7.25	9	6.25	-0.25	-0.25	0.25	0.5	0.25	0	1	1
Sat Aug 12 12:20:27 2017	2.25	3	5	7	8	7	8.5	5.75	-0.25	-0.25	0	0.5	0.25	0.25	1.25	1
Sat Aug 12 13:20:52 2017	2.25	3	4.75	7	7.75	6.75	8.25	5.75	-0.25	-0.25	0	0.5	0	0	1.25	1
Sat Aug 12 14:21:05 2017	2.25	3	4.75	7	7.5	6.5	7.75	5.75	-0.25	-0.25	0	0.5	0	0	1.25	1
Sat Aug 12 17:21:42 2017	2.25	3	4.75	6.75	7.25	7	7.25	7	-0.25	-0.25	0	0.75	0.25	0	1.25	1
Sat Aug 12 18:21:42 2017	2.25	3	4.75	6.5	7.25	7.75	7.5	7.75	-0.25	0	0.25	0.75	0.5	0.25	1.25	1.25
Sat Aug 12 19:21:55 2017	2.25	3	4.75	6.5	7.5	8.25	7.75	8.5	0	0	0.25	0.75	0.5	0.25	1.25	1.25

Sat Aug 12 20:21:49 2017	2.25	2.75	4.5	6.5	7.5	8.25	8	8.75	-0.25	0	0.25	0.75	0.5	0.25	1.25	1
Sat Aug 12 21:21:57 2017	2.25	3	4.5	6.5	7.75	9	8.25	10.25	0	0	0.25	0.75	0.5	0.5	1.25	1.25
Sat Aug 12 22:22:18 2017	2.25	3	4.5	6.75	8	10.5	8.75	12	0.25	0	0.5	1	0.75	0.5	1.5	1.25
Sat Aug 12 23:22:23 2017	2.5	3	4.75	6.75	8.25	11.75	9.25	13.25	0.25	0.5	0.5	1	1	1	1.75	1.5
Sun Aug 13 00:22:20 2017	2.75	3.5	5	7	9	13.5	10	15.75	0.25	0.25	0.5	1.25	1	0.75	1.5	1.5
Sun Aug 13 01:22:27 2017	3	3.75	5	7	10	14.25	10.75	16	0.5	0.5	0.75	1.5	1.25	1	1.75	1.5
Sun Aug 13 03:22:44 2017	4.75	4.5	5.25	8.5	14	15.5	12.75	17.5	0.5	0.5	0.75	1.25	1.25	1	1.75	1.5
Sun Aug 13 05:22:58 2017	2.75	3	4.75	7.25	10.25	12	12	13.25	0	0.25	0.5	1	0.75	0.75	1.5	1.25
Sun Aug 13 06:23:10 2017	2.75	3	4.75	7.25	10.25	12	12	13.25	0	0.25	0.5	1	0.75	0.75	1.5	1.25
Sun Aug 13 07:23:22 2017	2.25	3	4.75	7.5	9.5	10.5	11.25	12.75	0	0	0.25	1	0.5	0.5	1.25	1.25
Sun Aug 13 09:23:54 2017	2.25	3	4.75	7.5	9.25	10	10.75	12	0	0	0.5	0.75	0.5	0.25	1.25	1.25
Sun Aug 13 11:24:34 2017	2	3	4.75	7.25	8.75	9.25	10	10.75	0	0	0.25	0.75	0.5	0.25	1.25	1
Sun Aug 13 12:24:33 2017	2	3	4.75	7	8.5	9	9.75	11.25	0	0	0.5	1	0.25	0.25	1.25	1.25
Sun Aug 13 13:24:39 2017	2.25	2.75	4.75	7.25	8.5	9.25	9.75	11.75	0	0	0.25	1	0.5	0.25	1.25	1.25
Sun Aug 13 16:24:49 2017	2.25	3	4.75	7.25	8.5	10.25	9.5	12	1.25	1.75	1.75	2	2.25	2.5	2.5	1.75
Sun Aug 13 17:24:58 2017	2.25	3	4.75	7	8.5	9.5	9.25	10.75	0.5	0.5	0.5	1	1	0.75	1.5	1.5
Sun Aug 13 18:25:06 2017	2.25	3	4.75	7.25	8.75	10.25	9.25	10.5	2	2.5	2.5	2.5	4	2.5	2.75	2.75
Sun Aug 13 20:25:36 2017	2	3	4.75	7.25	8.25	13.5	9	12.25	0.25	0	-1.5	0.25	3.75	1.75	0	0.5
Sun Aug 13 22:25:49 2017	2.5	3	5	7.25	9.5	11.5	9.5	13	0.5	0.5	0.5	1	1.25	1	1.5	1.5
Sun Aug 13 23:26:08 2017	2.5	3.25	5	7.5	9.5	12	9.75	13.25	0.25	0.25	0.25	0.75	1.25	1	1.5	1.25
Mon Aug 14 00:26:20 2017	2.5	3.25	5	7.5	9.5	12.5	10	14.25	0.25	0.25	0.5	1	1.25	0.75	1.5	1.25
Mon Aug 14 01:27:04 2017	2.5	3.25	5	7.5	9.75	12.5	9.75	14.75	0.25	0.5	0.5	1	1	1	1.5	1.25
Mon Aug 14 03:27:45 2017	2.5	3.25	5	7.5	9.75	12.5	9.75	14.75	0.25	0.5	0.5	1	1	1	1.5	1.25
Mon Aug 14 04:27:42 2017	3	3.25	5	7.75	10.5	11.5	10.5	14.25	0.25	0.25	0.5	1	1	0.75	1.5	1.25
Mon Aug 14 05:28:12 2017	2.5	2.75	4.75	7.5	10	11	10.25	13.5	0	0.25	0.5	1	0.75	0.5	1.5	1.25
Mon Aug 14 07:28:17 2017	2.25	2.75	4.75	7.25	9	9	9.75	11.5	0	0	0.25	0.75	0.5	0.5	1.25	1
Mon Aug 14 09:28:39 2017	2.25	2.75	4.5	7	8.5	8	9.25	8.5	-0.25	0	0.25	0.75	0.5	0.25	1.5	1
Mon Aug 14 10:28:43 2017	2	2.75	4.5	7	8.25	8	9	8.5	-0.25	0	0.25	0.75	0.25	0.25	1.25	1
Mon Aug 14 11:28:59 2017	2	2.75	4.75	7	8	8	9	8.75	-0.25	0	0.25	0.75	0.25	0.25	1.25	1

Mon Aug 14 12:28:51 2017	2	2.75	4.5	6.75	8	7.75	8.75	8	-0.25	0	0.25	0.75	0.25	0.25	1.25	1
Mon Aug 14 13:29:36 2017	2	2.75	4.5	6.75	7.75	7.5	8.5	8.25	-0.25	0	0.25	0.75	0.25	0.25	1.25	1
Mon Aug 14 16:30:23 2017	2	2.75	4.5	6.5	7.5	8	8	9	-0.25	0	0.25	0.75	0.5	0.25	1.25	1
Mon Aug 14 17:30:36 2017	2	2.75	4.5	6.5	7.5	8	8	9	-0.25	0	0.25	0.75	0.5	0.25	1.25	1
Mon Aug 14 18:31:20 2017	2.25	2.75	4.75	6.75	7.75	9.5	8	10.25	0	0.25	0.5	1	0.75	0.75	1.5	1.25
Mon Aug 14 19:31:31 2017	2.25	3	4.5	6.75	8	9.75	8	11	0.25	0.25	0.5	1	0.75	0.5	1.5	1.25
Mon Aug 14 20:31:54 2017	2.25	3	4.5	6.75	8	10	8.25	11.25	0.25	0	0.5	1	0.75	0.5	1.5	1.25
Mon Aug 14 21:32:23 2017	2.25	3	4.5	6.75	8.25	11.25	8.5	12.75	0.25	0.25	0.5	1	1	0.75	1.75	1.5
Mon Aug 14 23:32:38 2017	2.5	3	4.75	7.25	9.25	13.5	9	14.25	0.25	0.5	0.75	1.25	1	1	1.75	1.5
Tue Aug 15 00:32:57 2017	2.5	3.25	4.75	7.25	9.5	12.5	9.25	13.75	0.25	0.25	0.5	1	1	0.75	1.25	1.25
Tue Aug 15 01:32:58 2017	2.5	3	4.75	7.25	9.5	12	9.5	13.75	0.25	0	0.5	1	0.75	0.75	1.5	1.25
Tue Aug 15 03:33:18 2017	2.5	3	4.75	7.25	9.5	11.75	9.75	13.25	0.25	0.25	0.5	1	0.75	0.75	1.25	1.25
Tue Aug 15 05:33:38 2017	2.25	3	4.75	7.25	9.25	11	9.75	12.5	0.25	0	0.5	1	0.75	0.5	1.5	1.25
Tue Aug 15 06:34:14 2017	2.25	2.75	4.75	7.25	9	10	9.5	11.75	0	0	0.25	0.75	0.5	0.5	1.25	1
Tue Aug 15 07:34:09 2017	2.25	2.75	4.75	7.25	8.75	9.5	9.5	11	0	0	0.25	1	0.5	0.25	1.25	1.25
Tue Aug 15 09:34:35 2017	2	2.75	4.75	7	8.5	8.75	9.25	11	0	0	0.25	0.75	0.5	0.25	1.25	1.25
Tue Aug 15 10:34:19 2017	2	2.75	4.75	7	8.25	8.5	9	10.25	-0.25	0	0.25	0.75	0.5	0.25	1.25	1
Tue Aug 15 11:34:38 2017	2.25	2.75	4.75	7	8	8.25	8.75	9.25	-0.25	0	0.25	0.75	0.25	0.25	1.25	1
Tue Aug 15 12:34:51 2017	2	2.75	4.5	6.75	8	8	8.75	9.5	0	0	0.25	0.75	0.25	0.25	1.25	1
Tue Aug 15 13:34:51 2017	2	2.5	4.5	6.75	8	7.75	8.5	9	0	0	0.25	0.75	0.25	0.25	1.25	1
Tue Aug 15 14:34:57 2017	2	2.75	4.5	6.75	7.75	7.75	8.25	9.75	-0.25	0	0.25	0.75	0.25	0.25	1.25	1
Tue Aug 15 16:35:20 2017	2	2.75	4.5	6.5	7.5	8	8.25	8.5	-0.25	0	0.25	0.75	0.5	0.25	1.25	1
Tue Aug 15 19:35:45 2017	2	2.75	4.5	6.5	7.5	8	7.75	8.25	-0.25	0	0.25	0.75	0.5	0.25	1.25	1
Tue Aug 15 20:35:46 2017	2.25	2.75	4.5	6.5	7.75	8.75	8	8.75	0	0	0.25	0.75	0.5	0.5	1.5	1.25
Tue Aug 15 21:35:58 2017	2.25	2.75	4.5	6.5	7.75	8.75	8	9	0	0	0.25	0.75	0.75	0.5	1.5	1.25
Tue Aug 15 22:36:02 2017	2.25	2.75	4.25	6.5	7.75	9.25	8	9.5	0	0	0.25	0.75	0.75	0.5	1.5	1.25
Tue Aug 15 23:35:56 2017	2.25	2.75	4.5	6.5	8	9.25	8	9.25	0	0	0.5	0.75	0.75	0.5	1.5	1.25

표 2. CO2센서 데이터

Thu Sep 14 03:13:17 2017	1191.697
Thu Sep 14 04:12:48 2017	1200.244
Thu Sep 14 05:12:27 2017	1224.664
Thu Sep 14 06:12:00 2017	1219.78
Thu Sep 14 07:13:22 2017	1221.001
Thu Sep 14 07:14:36 2017	1221.001
Thu Sep 14 08:11:21 2017	1214.896
Thu Sep 14 09:10:52 2017	1175.824
Thu Sep 14 10:10:39 2017	1200.244
Thu Sep 14 11:10:09 2017	1225.885
Thu Sep 14 12:09:54 2017	1225.885
Thu Sep 14 13:09:32 2017	1214.896
Thu Sep 14 14:09:12 2017	1263.736
Thu Sep 14 15:08:51 2017	1244.2
Thu Sep 14 16:08:30 2017	1244.2
Thu Sep 14 17:08:08 2017	1249.084
Thu Sep 14 18:07:46 2017	1201.465
Thu Sep 14 19:07:22 2017	1170.94
Thu Sep 14 20:07:04 2017	1253.968
Thu Sep 14 21:06:39 2017	1255.189
Thu Sep 14 22:06:20 2017	1240.537
Thu Sep 14 23:08:50 2017	1206.349
Fri Sep 15 00:05:34 2017	1170.94
Fri Sep 15 01:05:10 2017	1147.741
Fri Sep 15 02:06:00 2017	1190.476
Fri Sep 15 03:06:44 2017	1185.592
Fri Sep 15 04:03:21 2017	1170.94

Fri Sep 15 05:05:55 2017	1221.001
Fri Sep 15 06:02:39 2017	1245.421
Fri Sep 15 07:02:18 2017	1240.537
Fri Sep 15 08:01:55 2017	1205.128
Fri Sep 15 09:01:25 2017	1245.421
Fri Sep 15 10:01:10 2017	1249.084
Fri Sep 15 11:00:46 2017	1249.084
Fri Sep 15 12:01:57 2017	1229.548
Fri Sep 15 12:03:24 2017	1229.548
Fri Sep 15 13:00:03 2017	1284.493
Fri Sep 15 14:00:56 2017	1245.421
Fri Sep 15 14:59:09 2017	1274.725
Fri Sep 15 15:58:53 2017	1253.968
Fri Sep 15 16:59:52 2017	1205.128
Fri Sep 15 17:58:07 2017	1255.189
Fri Sep 15 18:57:36 2017	1255.189
Fri Sep 15 19:57:19 2017	1253.968
Fri Sep 15 20:56:58 2017	1234.432
Fri Sep 15 21:56:33 2017	1260.073
Fri Sep 15 22:57:39 2017	1221.001
Fri Sep 15 23:57:12 2017	1180.708
Sat Sep 16 00:55:29 2017	1216.117
Sat Sep 16 01:54:57 2017	1234.432
Sat Sep 16 02:54:20 2017	1250.305
Sat Sep 16 03:53:50 2017	1224.664
Sat Sep 16 04:53:32 2017	1229.548
Sat Sep 16 05:53:07 2017	1216.117
Sat Sep 16 06:52:57 2017	1245.421

Sat Sep 16 06:54:17 2017	1245.421
Sat Sep 16 07:52:25 2017	1240.537
Sat Sep 16 08:52:01 2017	1206.349
Sat Sep 16 09:51:30 2017	1258.852
Sat Sep 16 10:51:26 2017	1200.244
Sat Sep 16 10:52:41 2017	1200.244
Sat Sep 16 11:52:19 2017	1244.2
Sat Sep 16 12:51:57 2017	1245.421
Sat Sep 16 14:49:46 2017	1235.653

표 3. 지중침하센서 데이터

Time	L0
MonSep 4 21:30:10 2017	269.0598
MonSep 4 21:31:21 2017	254.6912
MonSep 4 22:29:38 2017	489.5911
MonSep 4 22:30:53 2017	144.0194
MonSep 4 23:29:07 2017	785.5833
MonSep 4 23:30:25 2017	603.3431
TueSep 5 00:28:27 2017	666.2954
TueSep 5 01:27:51 2017	302.4112
TueSep 5 02:27:12 2017	383.5477
TueSep 5 03:26:39 2017	8.418627
TueSep 5 04:26:02 2017	598.6284
TueSep 5 04:39:53 2017	188.6074
TueSep 5 05:39:21 2017	910.3666
TueSep 5 06:38:49 2017	598.8331
TueSep 5 07:38:27 2017	134.7611
TueSep 5 08:39:29 2017	577.7272
TueSep 5 09:37:39 2017	773.3478

TueSep	5	10:37:19	2017	711.2931
TueSep	5	11:36:58	2017	389.8472
TueSep	5	12:36:43	2017	14.60462
TueSep	5	13:36:16	2017	821.1042
TueSep	5	14:35:54	2017	975.8251
TueSep	5	15:35:24	2017	428.9625
TueSep	5	16:35:18	2017	372.2317
TueSep	5	16:36:30	2017	787.4143
TueSep	5	17:36:11	2017	247.4457
TueSep	5	18:34:24	2017	262.7611
TueSep	5	19:34:13	2017	323.9763
TueSep	5	19:35:28	2017	508.4292
TueSep	5	20:33:41	2017	120.8221
TueSep	5	21:33:14	2017	880.6793
TueSep	5	22:32:42	2017	480.9304
TueSep	5	23:33:41	2017	362.9405
WedSep	6	00:33:09	2017	253.1483
WedSep	6	01:31:13	2017	460.6778
WedSep	6	02:30:40	2017	327.2477
WedSep	6	03:30:04	2017	837.4212
WedSep	6	04:28:59	2017	593.8857
WedSep	6	05:28:36	2017	701.5188
WedSep	6	06:28:00	2017	824.2655
WedSep	6	07:27:42	2017	132.5911
WedSep	6	08:27:29	2017	896.3303
WedSep	6	08:28:43	2017	662.4198
WedSep	6	09:26:58	2017	278.8187
WedSep	6	10:26:25	2017	719.1822

WedSep	6	11:26:08	2017	896.67
WedSep	6	12:25:48	2017	284.5648
WedSep	6	13:25:25	2017	250.9814
WedSep	6	14:27:50	2017	141.457
WedSep	6	15:24:51	2017	733.5309
WedSep	6	15:26:05	2017	786.8194
WedSep	6	16:24:20	2017	939.4525
WedSep	6	17:23:57	2017	148.3863
WedSep	6	18:23:43	2017	540.9099
WedSep	6	18:24:58	2017	464.883
WedSep	6	19:23:11	2017	395.7682
WedSep	6	20:22:47	2017	68.54672
WedSep	6	21:22:24	2017	169.1171
WedSep	6	22:21:59	2017	796.2628
WedSep	6	23:21:33	2017	9.031986
ThuSep	7	00:21:10	2017	906.4701
ThuSep	7	01:20:35	2017	411.7517
ThuSep	7	02:21:41	2017	769.8907
ThuSep	7	03:19:48	2017	242.5396
ThuSep	7	04:20:46	2017	965.0977
ThuSep	7	05:23:08	2017	283.3975
ThuSep	7	06:18:26	2017	393.959
ThuSep	7	07:18:10	2017	87.12303
ThuSep	7	08:17:46	2017	850.6582
ThuSep	7	09:17:21	2017	666.6944
ThuSep	7	10:17:00	2017	607.335

제4장

상태감지 WSN 모니터링 시스템 제작 및 오일샌드 플랜트 WSN 모니터링 시스템 performance test

1. 결론

본 연구에서는 극한지에서 모듈의 상태변화에 관계되는 핵심 데이터인 가스에 대해 분석하고 상태감지 WSN의 시작품을 제작하였다. 또한 전년도에 개발된 변형감지 시작품과 상태감지 시작품에 대한 방습, 절연 코팅을 실시하고 게이트웨이를 보완하였다. 알래스카 현장시험을 통해 개발된 시작품의 저온에서의 적용성을 검증하였으며 전체 모니터링 시스템의 무선 통신 및 데이터 저장을 구현하기 위한 연구를 수행하였다. 4차년도 연구를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 플랜트의 현재 상태를 판정하기 위하여 필요한 핵심 데이터인 가스 측정에 대해 조사 분석하였고 PCB보완을 위해 보드 코팅에 대해 조사 분석 하였다.

2. 가스측정 센서에서 얻은 데이터를 전송하기 위하여 센서 인터페이스를 개발하고 시작품을 완성하였다. 센서 인터페이스에서 제어기에서 최소 30초 이상의 전원을 공급한 후, 피드백 되는 CO2 센서 값을 측정하도록 하였다. 센서와 무선 통신 모듈은 대기 상태에서 많은 전류를 소비하므로 휴먼 모드(Sleep mode)로 동작하도록 제작하였다.

3. 동토에서 발생하는 가스 변화를 장시간 관측하기 위해서는 저전력으로 동작되는 로거가 필수적이며 이에따라 기존의 게이트웨이의 평균소비전류를 평균 146mA에서 평균 58mA 전류를 소비하는 게이트웨이를 제작하고 성능평가 하였다. 또한

4. 상태/변형감지 센서 인터페이스 회로도에 수분 및 절연에 대한 저항과 부식 방지를 위해 PCB보드에 쉴딩 제품을 이용하여 도포하였으며 알래스카 카운실 현장에 설치하여 성능평가를 수행하고 있다.

5. 계측항목 설정, 계측관리 시스템의 선정, 계측관리 시스템 설치 세부사항 및 계측수행 방법에 대한 연구를 수행하였으며 캐나다 오일샌드 플랜트 현장과 위도와 년평균 온도가 비슷한 알래스카 카운실에서 온도, 지중침하, 가스센서를 설치하였다. 계측시스템의 거동 데이터를 실시간으로 확보하기 위하여 실시

간 위성 자료 전송 시스템을 구축하였다. 이는 지반 구조물 거동을 실시간 수집·평가·판단이 가능하며 엔지니어 현장 상주 없이 국내를 통해 실시간 위험 알람, 비상대피 및 보수보강 원격지원 가능할 것으로 판단된다.

6. 지반 및 구조물 모니터링 데이터는 운송중, 시공중, 시공후 및 공용중 안정성 및 경제성의 확보, 차후 유사한 공사에서 정보시공의 유용한 자료로 활용, 기존 이론이나 설계법에 Feed back 되어 보다 나은 설계법의 개발에까지도 활용 가능하다.



참고문헌

http://hartcommorg/hcf/news/pr2010/WirelessHART_approved_by_IEC.html.

<http://www.namaSMT.com>

IEEE Std 802.15.4-2006, IEEE Standard for Information technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local metropolitan area networks - Specific requirements, Part 15.4: Wireless Medium Access Control(MAC) and Physical Layer(PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks(WPANs), 2006.

ISA-100.11a-2009, Wireless systems for industrial automation: Process control and related applications, ISA, 2009.

Kastner, W. G. Neugschwandtner, S. Soucek, and H. Newman, "Communication systems for building automation and control," Proc. of the Institute of Electrical and Electronics Engineers, vol. 93, pp. 1178-1203, June 2005.

Reinisch, W. C. Kastner, G. Neugschwandtner, and W. Granzer, "Wireless technologies in home and building automation," Proc. 7th Institute of Electrical and Electronics Engineers International Conference on Industrial Informatics, vol. 1, pp. 93-98, 2007.

극지연구소