

요 약 문

I. 연구개요

- 실시간 악취 모니터링 시스템을 구축하기 위해서는 해당 지역의 악취 발생원에 대한 정확한 원인규명이 반드시 필요하며, 그 자료를 근거로 악취 모니터링 장비의 센서값과 대기 확산 모델링 등 결과 등을 취합/분석하여 최적의 악취 관리 방안을 수립할 수 있는데 이를 위해서는 보다 신뢰도 높은 모니터링 장비와 확산 모델링이 요구됨.
- 이에 본 과제에서는 부산 녹색환경지원센터의 지원을 받아 부산대학교를 주관기관, 태성환경연구소를 참여기업으로 하여 신평·장림 공단의 악취발생사업장과 주변 주거지역의 악취특성과 그 상관성을 조사하여 악취 발생원 추적이 가능한 무인 악취추적 모니터링 시스템을 개발하여 신뢰성을 평가하고자 함.

II. 연구의 필요성 및 목적

- 환경부에서 지정고시한 악취관리지역의 민원발생은 해마다 증가하는 추세이며, 악취 관리감독의 역할을 담당하고 있는 관에서의 민원발생시 대응은 민원 현장을 직접 방문하여 시료채취를 통해 관능법 및 기기분석법에 의한 결과를 근거로 예상 또는 역추적하는 방법으로 악취 발생원에 대한 즉각적 대응이 어려운 실정임.
- 일부 지역에서는 VOC, 황화수소, 암모니아 성분에 대한 검출이 가능한 3가지 센서가 장착된 악취모니터링시스템이 구축되어 있으나, 악취 민원이 주로 발생하는 복합악취에 대한 발생원 추적은 불가능한 시스템이 구축되어 있음.
- 따라서 악취민원 발생 시 민원발생여부 및 발생원을 현장에서 실시간 확인 및 정보가 공유되어 악취민원을 최소화할 수 있는 악취추적모니터링 시스템 구축이 매우 시급한 상황임.

III. 연구의 내용 및 범위

- 악취발생사업장 및 민원지역 특성조사
 - 냄새종류 및 악취세기 등 특성조사(분류)
- 냄새 종류별 특성 조사
 - 악취민원 냄새종류 선정 및 종류별 원인 조사
 - 해당 조사지역에 적합한 악취모니터링 적용 센서 검토

- 악취추적 모니터링 장비 제작 및 데이터 베이스 구축
 - 악취 발생원과 민원지의 악취특성을 모니터링 장비에 인식시켜 장비 운영 시 민원지로부터 발생원을 추적 가능하도록 DB화 작업 수행
- 냄새 예측 프로그램 개발
 - 다수의 센서별 송출된 값을 자체 개발한 예측 프로그램을 활용 패턴화
 - 측정된 센서를 이용한 냄새종류 구분(다차원 패턴 분석)
 - 측정된 냄새세기와 센서와의 상관성 도출
 - 예측 프로그램을 이용한 평가 및 보정
- 최적의 모델 적용을 위한 수치 실험
 - 신평·장림 공단지역의 주변 기상장 장기 분석
 - 미국 환경청에서 공인되고 세계적으로 널리 쓰이고 있는 CALPUFF 모델을 관심 지역에 대해 수치모의 실시 및 결과 분석
- 신뢰성 평가
 - 이동식 추적장비를 이용한 악취민원지역 현장 평가 후 냄새 종류 및 발생원 예측 여부 평가

IV. 연구결과

- 악취발생사업장 및 민원지역 특성조사
 - 조사대상 지역인 신평·장림공단의 냄새 종류와 세기 등 악취현황을 악취발생사업장과 민원지역으로 구분하여 조사하였음.
 - 악취발생사업장에 대해서는 신평염색공단 내 입주 기업 중 D사업장 및 M사업장 등 2개 사업장의 협조를 받아 진행하였으며, 특정 공정 방지시설 배출구(점오염원)와 부지경계(면오염원)에 대해 먼저 직접관능에 의해 평가를 실시하였고, 점오염원에 대해서는 시료를 포집한 후 기기분석을 통해 악취의 주요 성분을 분석하였음.
 - 직접관능의 경우, D사업장 점오염원에서는 비린냄새(I)가 악취세기 4로 강하게 감지되었고, 부지경계(면오염원)에서는 무슨 냄새인지 확인이 안 될 정도의 약한 냄새가 감지되었음. M사업장 점오염원에서는 탄냄새(E)가 악취세기 4로 강하게 감지되었고, 부지경계(면오염원)에서도 동일한 탄냄새(E)가 악취세기 2정도로 감지되었음. 상기 결과만으로 신평염색공단 전체의 악취발생원인을 분석하기는 어렵지만 전체적으로 볼 때 각 방지시설에 대한 보다 철저한 관리와 효율적인 운전이 요구됨.
 - 기기분석 결과, D사업장의 점오염원에서 발생하는 비린냄새의 원인은 포름알

데히드인 것으로 예상되며, M사업장에서 발생되는 탄냄새의 원인은 아세트알데히드인 것으로 예상됨.

- 사업장 외 악취에 대한 민원 발생이 예상 지점으로는 현재 고정식 악취모니터링 장비가 설치되어 있는 13개 지점 중 사하구보건소와 신평현대아파트 2개 지점을 선정하였으며, 해당 지점의 악취 평가 결과는 무취로 평가 시점에서는 악취에 의한 영향은 없었음. 다만 도로변에 인접해 있기 때문에 자동차 매연에 의한 냄새는 간헐적으로 감지가 되었으나 그 부분에 대한 악취는 평가에 고려하지 않았음.

○ 냄새 종류별 특성 조사

- 악취민원 냄새종류 선정 및 종류별 원인 조사
 - 본 연구에서는 냄새 종류를 12가지로 분류하였고, 각 냄새에 대한 원인물질은 다음과 같음.

순번	냄새종류	악취 원인물질	비고
1	페인트냄새(A)	벤젠, 톨루엔	
2	고소한냄새(B)	곡물, 사료	
3	구린냄새(C)	메틸메르캅탄, 황화디메틸, 이황화디메틸	
4	악품냄새(D)	페놀, 크레졸, 알코올, 염화수소	
5	탄냄새(E)	에틸아크릴레이트	
6	기름냄새(F)	등유, 경유	
7	분뇨냄새(G)	발레르알데히드, 이소발레르알데히드, 발레르산	
8	쇠냄새(H)	철판, SUS	
9	비린냄새(I)	메틸아민, 디메틸아민, 트리메틸아민, 에틸아민, 아닐린	
10	걸레냄새(J)	아세트알데히드, 부틸알데히드	
11	달콤한냄새(K)	자일렌, 에틸렌	
12	무취(Z)		냄새없음

- 해당 조사지역에 적합한 악취모니터링 적용 센서 검토
 - 적용이 검토된 센서는 총5가지였으며, 이중 전기화학식, 반도체식, 적외선식 및 광이온화식을 선정하였음.

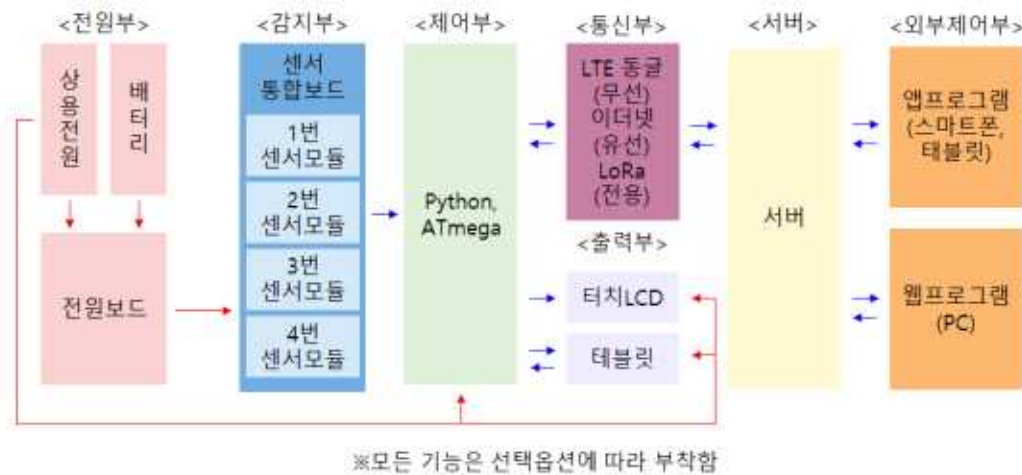
구분	전기화학식	접촉연소식	반도체식	소형 비분산적외선 (적외선식)	광이온화식 (자외선식)
제품사진					
동작원리	가스와의 반응에 의한 전극간의 기전력 변화	가연성 가스와의 발열반응에 의한 열선의 저항변화	가스와의 반응에 따른 금속산화물의 저항변화	가스에 의한 적외선 흡수도 변화	가스에 자외선을 쬘여서 이온화된 이온들을

					전극으로 집전시켜 농도에 따른 전류변화
대표 감지가 스	(CO, CO ₂ , O ₃ , SO ₂ , NO, NO ₂ , VOC)	가연성 가스 (H ₂ , CH ₄ , C ₃ H ₈ , C ₄ H ₁₀ 등)	CO, NO ₂ , SO ₂ , H ₂ S, VOC (알콜, HCHO 등)	CO, CO ₂ , NO, NO ₂ , SO ₂ , O ₂ , CxHy	VOCs, O ₂ , H ₂ , H ₂ S, CO
민감도	상	하	상	중	상
선택성	중	하	하	상	상
반응시 간	빠름	중간	빠름	느림	빠름
소모전 력	중	대	중	저	저
가격	저	저	저	고	고
크기	소형	소형	소형	소형	소형

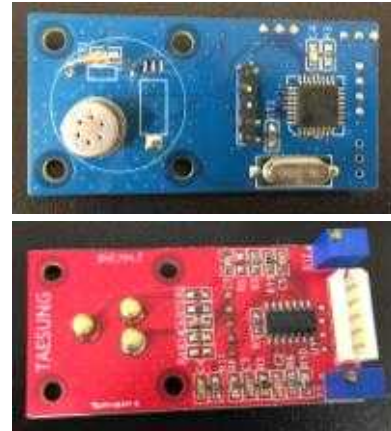
○ 악취추적 모니터링 장비 제작 및 데이터 베이스 구축

• 악취추적 모니터링 장비 제작

- 전원부는 고정식과 이동식 및 정전을 모두 고려하여 상용전원 외 배터리를 추가하였고, 감지부는 함체 내부 배선 간소화, 이에 따른 예러 검출 및 수정 용이, 불량률 감소 등을 위해 각각의 센서를 모듈화하고 센서통합보드와 제어부를 통해 제어할 수 있도록 설계하였음. 그 외 통신부, 출력부, 서버 및 외부제어부로 구성되어 있음.

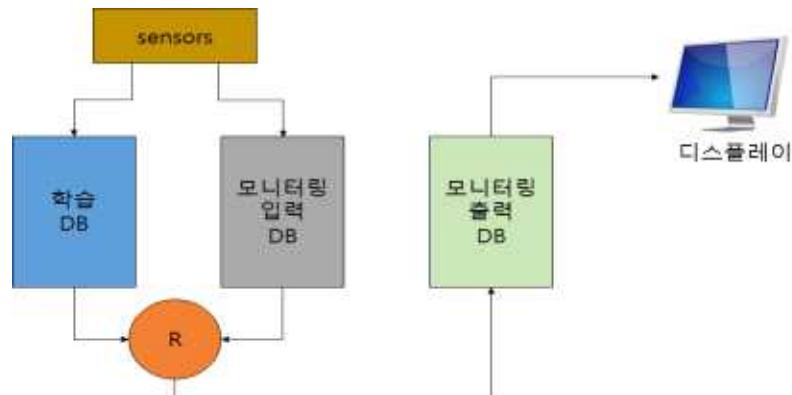


- 본 악취추적 모니터링 장비는 14개의 가스센서가 장착되었고, 각 센서별 타겟가스를 이용하여 센서 감지범위를 확인하였으며, 각 센서별 모듈에는 레벨 시프터 회로와 차동증폭기를 추가하고 트리머를 설치하여 gain을 조정함으로써 zero와 span 설정이 가능하도록 제작하였음.



- 데이터 베이스 구축

- 데이터 베이스 구축을 위한 서버는 학습DB, 모니터링입력DB, 모니터링출력DB로 디자인 하였으며, 센서감지부에 의해 측정된 센서값과 그 센서값에 해당되는 결과 즉 냄새종류와 냄새세기 및 희석배수는 학습DB에 저장되고, 실시간으로 모니터링입력DB에 입력되는 센서값은 냄새 예측 프로그램(R코드)에 의해 분석되어 결과가 모니터링출력DB에 저장되는 구조임.



- 상기와 같이 디자인된 DB에 약취추적 모니터링 장비를 이용하여 고소한 냄새, 구린 냄새, 약품 냄새, 탄 냄새, 분노 냄새 등 측정된 각 냄새 종류에 따른 센서값을 저장하여 장비를 학습 시켰으며, 현재까지 약 6000개의 냄새에 대한 정보(데이터)가 학습DB에 들어가 있고 향후 지속적으로 업데이트하여 신뢰도를 향상시켜 나갈 계획임.

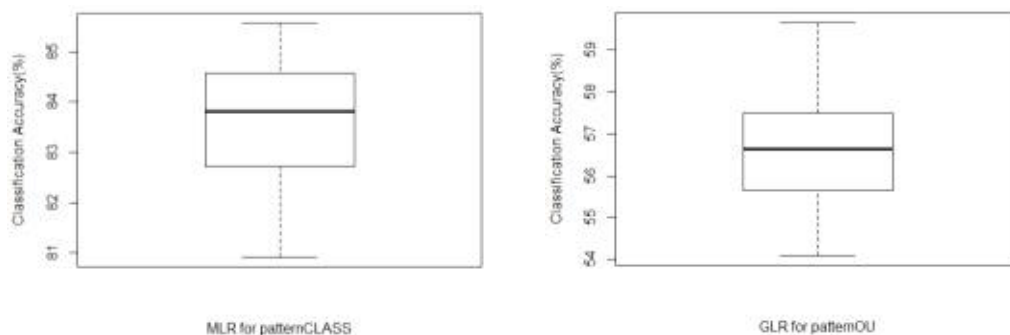
- 냄새 예측 프로그램 개발

- 프로그램 개발 목표는 분석 대상 데이터를 바탕으로 측정된 냄새/약취를 구분하고 각각의 특성을 분석할 수 있는 알고리즘을 개발을 통해 냄새/약취의 종류, 세기 및 희석배수를 예측하는 것임.

- 분석 알고리즘은 냄새/악취의 특성 중 종류와 세기를 구분하는 모델과 희석배수를 예측하는 모델 2가지로 구성되어 있으며, 각각은 MLR(Multinomial Logistic Regression)과 GLR (Gaussian Linear Regression) 기반의 데이터 분류 및 예측 모델 생성 코드를 작성하고 있음.
- 냄새 데이터의 종류 및 세기 구분-MLR / Classification
 - 학습DB에 입력된 온도, 습도, 센서 데이터를 독립변수로 모델 생성에 사용
 - 냄새/악취 종류(총 12가지): 페인트냄새(A), 고소한냄새(B), 구린냄새(C), 약품냄새(D), 탄냄새(E), 기름냄새(F), 분노냄새(G), 쇠냄새(H), 비린냄새(I), 걸레냄새(J), 달콤한냄새(K), 무취(Z)
 - 냄새 세기(총 6가지): 무취(0), 간신히 느낄 수 있는 수준(1), 무슨 냄새인지 알 수 있을 정도 수준(2), 쉽게 감지할 수 있는 강한 냄새 수준(3), 아주 강하게 느끼는 냄새 수준(4), 견디기 어려운 강렬한 냄새 수준(5)
 - 종류와 세기를 바탕으로 Pattern을 Class로 구분하고, 구분된 Class의 특징을 분석하여 예측할 수 있는 모델 생성.
 - 종속변수로 각 Class에 속할 확률을 추정하여 가장 높은 확률을 가진 Class 값을 예측값으로 저장.
- 냄새 데이터의 희석배수 예측-GLR / Regression
 - 학습DB에 입력된 온도, 습도, 센서 데이터, 구분된 냄새 종류 및 세기를 독립변수로 모델 생성에 사용
 - 특히, 냄새의 세기와 희석배수는 베버-페히너의 법칙(Weber-Fechner' law)이 성립하여 이를 모델 생성 및 예측과정에서 활용함.

$$\text{냄새세기} = a + k * \log(\text{희석배수})$$

- 약 6000여개의 냄새에 대한 정보를 바탕으로 모델을 생성하여 분류 정확도를 확인해 본 결과 냄새 종류와 세기는 평균 83.2%, 최대 85.5%로 나타났고, 희석배수는 평균 56.6%, 최대 59.7%로 확인되었음.



○ 최적의 모델 적용을 위한 수치 실험

- 악취물질은 화학적 변화가 없는 것으로 가정하고 확산 패턴을 알아보기 위해, 악취발생지점마다 가상의 배출량 1g/s를 적용하여 2018년 11월 30일 하루동안 모델링을 실시하였음.
- 앞서 살펴본 일기도와 관측 및 모의값을 바탕으로 이날은 하루종일 북풍계열이 지배적이었다는 것을 알 수 있음.
- 악취물질은 바람의 방향에 따라 확산하였으며, 11월 30일 하루 동안 악취발생지점과 민원발생지점에 검출될 것으로 예측된 농도는 악취발생지점1이 평균 65.59 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 발생지점2는 평균 21.65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 발생지점3은 0.08 ~ 73.82 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났음

○ 신뢰성 평가

- 현장 평가 및 악취 모니터링 장비 학습
 - 신뢰성 평가는 6개의 현장평가 지점에서 이동식 악취 모니터링 장비를 사용하여 진행하였고, 평가 당시 각 지점별 직접관능 평가 결과와 이동식 악취 모니터링 장비의 판별값을 비교 분석하였음.

순번	조사지점 정보				관능평가 결과			모니터링장비 판별값		
	좌표	풍향	풍속 (km/h)	온도 (℃)	종류	세기	희석 배수	종류	세기	희석 배수
1	35.053444/ 128.572455	N	4.0	13.1	기름 냄새	2	144	기름 냄새	3	448
2	35.052462/ 128.572895	NW	0.0	16.9	탄 냄새	3	448	탄 냄새	3	448
3	35.050166/ 128.573553	S	0.0	15.1	비린 냄새	2	144	비린 냄새	2	144
4	35.053840/ 128.573360	W	4.0	12.8	무취	0	-	무취	0	-
5	35.053813/ 128.574807	W	7.9	16.6	무취	1	-	무취	0	-
6	35.054674/ 128.571897	S	7.9	15.8	무취	0	-	무취	0	-

- 현장평가 결과와 모니터링 장비로부터 획득한 판별값을 비교해 보면 냄새종류는 모든 지점에서 판정원 제시값과 장비에 의한 값이 일치하는 결과를 얻었고, 냄새세기와 희석배수는 지점 1에서만 약간의 차이를 나타내었음. 지점 5의 경우 관능평가로는 냄새세기가 너무 약해서 무슨 냄새인지는 판별할 수 없을 정도의 아주 약한 냄새가 감지가 되었지만, 장비는 그러한 저 농도의 냄새는 세기를 판별하지는 못하는 것으로 보임. 전체적으로 볼 때 기계학습이 정확하게 이루어진다면 해당 장비 및 적용된 알고리즘의 신뢰도는 아주 높을 것으로 판단됨.

V. 연구결과의 활용계획

○ 연구결과의 활용계획

- 연구기간 종료 후 고정식 장비 설치 및 주기적인 머신러닝(학습) 등 지속적인 투자와 유지관리를 통해 장비 신뢰도를 제고시키고 연구성과를 확산시킴.
- 관공서의 경우 악취 민원 지역에 설치하여 실시간 악취발생여부 및 악취발생원 추적용으로 사용하여 발생원 관리에 유용하게 이용될 수 있을 것으로 기대됨.
- 사업장의 경우 부지경계선이나 배출원, 방지시설 전·후단 등에 설치하여 관리기준 초과 여부 및 공정상태를 실시간으로 관리함으로써 외부 영향을 최소화할 수 있음.
- 악취는 대기환경 뿐만 아니라 자동차 실내, 주택 주거공간, 건축자재, 가전제품 등 다양한 분야에서 문제가 발생되고 있으며, 국가적인 규제도 강화되고 있음.
- 따라서 이들 분야에 관리기준 초과여부 및 발생원 추적, 교체, 환기시스템 연계 등 다양한 종류의 측정시스템 장비로 적용 가능

○ 제언

- 현재 많은 지자체에서 악취 모니터링 장비를 설치하여 실시간 악취정보에 의한 신속한 대응체제를 구축하기 위한 노력을 기울이고 있지만, 센서값이 맞지 않아 장비에 대한 불신이 팽배해 있는 실정임.
- 본 과제를 통해 개발된 장비는 신뢰성 평가 결과에서 확인된 바와 같이 장비 및 냄새판별 알고리즘의 신뢰도는 입증되었다고 볼 수 있음. 그러므로 본 과제가 과제에만 그치지 말고 실제 현장에 적용되어 해당지역의 악취관리에 기여할 수 있는 기회가 마련되기를 바람.
- 또한 악취 모니터링 장비 설치에 앞서 발생원 및 민원지역에 대한 면밀한 전수조사를 진행하고, 그 결과를 바탕으로 최적의 모니터링 장비 설치 대수와 위치를 선정함으로써 비용은 최소화하고 효율은 극대화시킬 수 있는 방안에 대한 검토가 필요함.