



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

퍼지규칙과 신경망을 이용한 센서 네트워크  
기반 이동 로봇의 냄새 검출 및 추적



2010년 2월

부경대학교 대학원

전자공학과

이재연

공학석사 학위논문

# 퍼지규칙과 신경망을 이용한 센서 네트워크 기반 이동 로봇의 냄새 검출 및 추적

지도교수 이 원 창

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2010년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

전 자 공 학 과

이 재 연

이재연의 공학석사 학위논문을 인준함.

2010년 2월 25일



주 심 공학박사 강 근 태 (인)

위 원 공학박사 주 문 갑 (인)

위 원 공학박사 이 원 창 (인)

# 목 차

I. 서론	1
II. 시스템 구성	4
1. 냄새 감지	5
2. 연산 및 구동	6
3. 네트워크 (WSN)	8
4. 이동로봇	9
III. 동작 알고리즘	12
1. 냄새분류	12
1) 신경망 이론	12
2) 오류 역전파 알고리즘	14
3) 냄새 분류 알고리즘	17
2. 농도추론	19
1) 퍼지이론	19
2) 농도추론	20
3. 영상처리	23
1) 가우시안 필터	24
2) 윤곽선 검출	25
3) 크기 필터	27
4. 멀티홉 통신	28
5. 주행	31
1) 냄새 발생지 추적	31
2) 장애물 회피	33
IV. 실험결과 및 결론	34
1. 실험결과	34
2. 결론	39
V. 참고문헌	41
VI. 감사의 글	44

**Odor Recognition and Source Tracking of Mobile Robot Based on Sensor  
Network with Fuzzy Rules and Neural Network**

Jae Yeon Lee

Department of Electronic Engineering, The Graduate School,  
Pukyong National University

**Abstract**

This thesis represents a mobile robot, which can recognize chemical odor, measure concentration, and track its source indoors. The mobile robot has the function of smell that can sort several gases in experiment such as ammonia, ethanol, and their mixture with neural network algorithm and measure each gas concentration with fuzzy rules. In addition, it can not only navigate to the desired position with vision system by avoiding obstacles but also transmit odor information and warning messages earned from its own operations to other nodes by multi-hop communication in wireless sensor network. We suggest the way of odor sorting, concentration measurement, and source tracking for a mobile robot in wireless sensor network using a new algorithm with vision system and gas sensors. The experimental studies prove that the efficiency of the proposed algorithm for odor recognition, concentration measurement, and source tracking is superior to the existing one.

# I. 서론

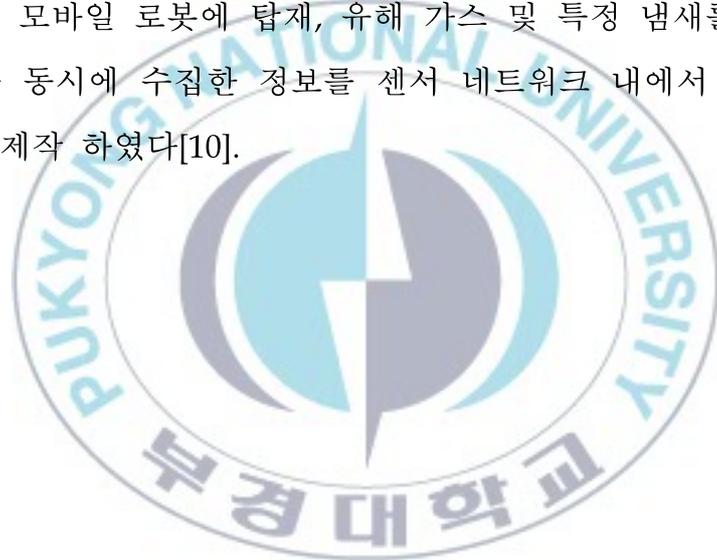
자연에 존재하는 생명체들은 오감이라 불리는 다섯 가지 감각기관을 이용하여 필요한 정보를 얻는다. 이중 인간을 제외한 포유류는 후각 기관의 의존성이 가장 높은 것으로 알려져 있다. 후각은 냄새를 맡고 이를 구분하는 능력을 일컫는데 즉, 냄새가 있는 화학물질의 분자에 의하여 비강 내의 후세포가 자극되어 일어나는 냄새의 감각이다. 이 감각에 의한 정보는 뇌로 전달되고 뇌에서는 각각의 냄새에 따른 차별화된 정보를 기억하여 이후 냄새를 구분하는데 사용한다. 이러한 후각의 기능은 먹이를 찾거나, 천적을 인지하는 역할 뿐만 아니라 생식을 위하여 짝짓기 상대를 감지하기도 하고, 의사소통의 기능을 가지는 경우도 있다[1]. 앞서 언급한 것처럼 후각 기능은 특히 포유류에게서 많이 발달해 있는데 우리에게 친숙한 개를 예로 들자면 마약 감지 견으로 훈련되어지는 셰퍼드 종의 경우 후각세포의 면적이 사람의 1만 배 이상 되며 이는 사람보다 100만 배 이상 좋은 후각을 가진 것을 의미한다.

인간은 오래 전부터 자연의 뛰어난 능력을 흉내내기위해 노력 해 왔다. 후각 또한 그 노력 중 하나였으며, 전자 기기를 이용하여 냄새를 측정하는 방안은 이미 1950대부터 시작되었다. 인공후각기술이라 불리는 이 분야는 1982년 기체에 민감한 응답을 보여 냄새를 구분할 수 있는 금속산화물 소자가 개발되면서 시작되었다[2]. 최근에는 반도체 기술의 눈부신 발달로 예전에 비해 높은 성능의 냄새 감지 센서를 제작하기에 이르렀으며, 이와 더불어 고속 연산이 가능한 프로세서의 발달, 인간의 뇌와 유사한 판단이 가능한 인공지능 알고리즘들의 발달로 인공 후각 관련 연구는 높은 수준에 이르렀고, 실제 후각 기능을 인공적으로 구현한

전자코 (Electronic Nose) 장비에 대한 관심도 높아지게 되었다. 전자코 (Electronic Nose)는 인간 코의 후각 기능을 디지털화 한 것으로 Multi-sensor Array 기술을 이용해 특정 향기 또는 냄새성분과 각각의 센서에서의 전기화학적 반응을 전기신호로 나타낸 것이다. 이는 사람 코의 후각세포에 해당하는 초정밀 센서와 사람 뇌의 후각피질에 해당하는 컴퓨터로 구성되어 있다. 사람의 후각세포가 감지한 냄새 정보를 뇌가 처리해 냄새를 지각하는 것처럼 전자코 (Electronic Nose)의 초정밀 센서가 공중에 떠다니는 냄새 분자에 반응하면 뇌의 후각 정보처리 방식을 모방한 인공지능 알고리즘에 의해 냄새를 구분하게 된다. 이는 사람의 코가 오랫동안 학습을 통해 냄새를 지각하는 것처럼 냄새에 대한 일정한 정보를 반복적으로 받아 이를 기억해뒀다가 냄새를 인식하는 것이다[3]. 이처럼 향상된 성능의 후각 센서를 이용하여 정보를 정확히 판단하고 그에 따른 행동 방식을 선택하는 것이 가능해 집에 따라 후각 센서를 이용하여 자연계에 존재하는 현상을 실생활에 응용하기 위한 노력도 상당수 이루어지고 있다. 이 응용분야의 대표적인 사례로 후각 기능을 탑재한 자율 이동 로봇에 관한 연구가 있다[4][5]. 후각 기능을 탑재한 모바일 로봇의 후각적 성능발달에 따라 가정이나 산업 현장의 가스 누출 방지, 재난현장 및 공항 수화물 검사에서 부터 오염물질 추출과 식·의약품 제조공정 등 많은 분야로의 적용이 가능할 것으로 예상 된다. 하지만 현재 가스 센서 중 가장 많은 비중을 차지하고 있는 반도체식 가스 센서는 센서 자체의 비선형과 습도 변이에 매우 민감하고 온도 변환 구동방식을 채택하기 때문에 온도의 변화에도 민감한 문제로 인하여 선택 가스의 선택성이 떨어지는 문제가 있다[6]. 이러한 문제를 해결하기 위한 인간의 노력으로 신경망이나 퍼지 이론 등의 지능 알고리즘이 사용되고 있다. 이처럼 센서 기술의 한계로 인한 불확정적인 센싱 데이터를 이용하여 실제 후각과 유사한 성능을 보이기 위해 신경망이나 퍼지규칙

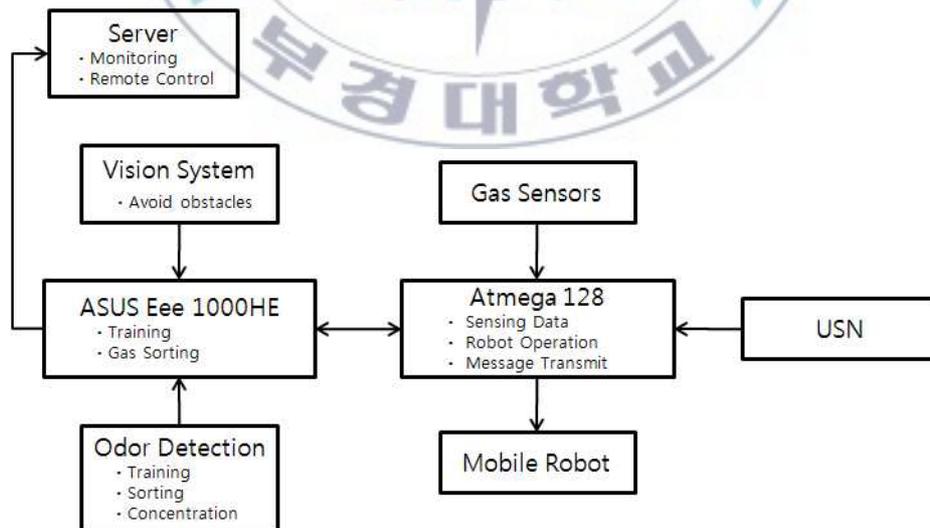
등의 인공지능 알고리즘의 성능향상을 위한 연구도 다수 진행되어진 사례가 있다[7][8]. 이러한 연구들은 최근 소형 PC등의 하드웨어 기술 발달로 보다 정확한 처리가 가능해 졌으며 그 처리 시간 또한 매우 짧아져 앞으로 더욱 신속하고 정밀하게 냄새를 인지하는 인공 후각 기능의 구현이 가능 할 것으로 보인다[9].

본 논문에서는 이러한 인공 후각 시스템을 이용하여 인간 생활에 도움이 되는 기술을 구현 하고자 현재 상용화 되어 있는 반도체식 가스센서에 지능 알고리즘을 적용하여 가스의 종류를 구분 하고, 농도를 추정할 수 있는 인공 후각 기능을 비전 시스템을 통하여 실내 환경에서 자율 이동이 가능한 모바일 로봇에 탑재, 유해 가스 및 특정 냄새를 구분, 추적 및 처리하는 동시에 수집한 정보를 센서 네트워크 내에서 전송 가능한 이동로봇을 제작 하였다[10].



## II. 시스템 구성

구현된 로봇은 아래의 <그림 2-1>과 같이 구성된다. 크게 두 부분으로 나눌 수 있는데 로봇의 뇌에 해당하는 부분으로 로봇의 행동에 필요한 알고리즘 연산이 수행되는 연산 처리부로 넷북이 사용 되었다. 연산 처리부의 역할은 냄새 검출 과정에서 냄새의 종류를 구분하기 위한 신경망 알고리즘 연산과, 농도를 추정하기 위한 퍼지 추론 연산, 그리고 장애물 회피를 위한 비전 시스템의 구동 연산이 수행 된다. 그리고 로봇의 각종 동작을 수행하는 마이크로프로세서가 사용 되었다. 마이크로프로세서는 가스 센서로부터 냄새 데이터 수집과, 연산 처리부의 연산 결과에 의한 로봇의 실제 이동 역할을 수행 한다. 이 외에 냄새를 인식하기 위하여 두가 종류의 가스 센서가 사용 되었고, 장애물 인식을 위한 웹캠, WSN 내에서 멀티홉 통신을 위한 ZigBee 모듈이 사용 되었다.



<그림 2-1> 시스템 구성

## 1. 냄새 감지

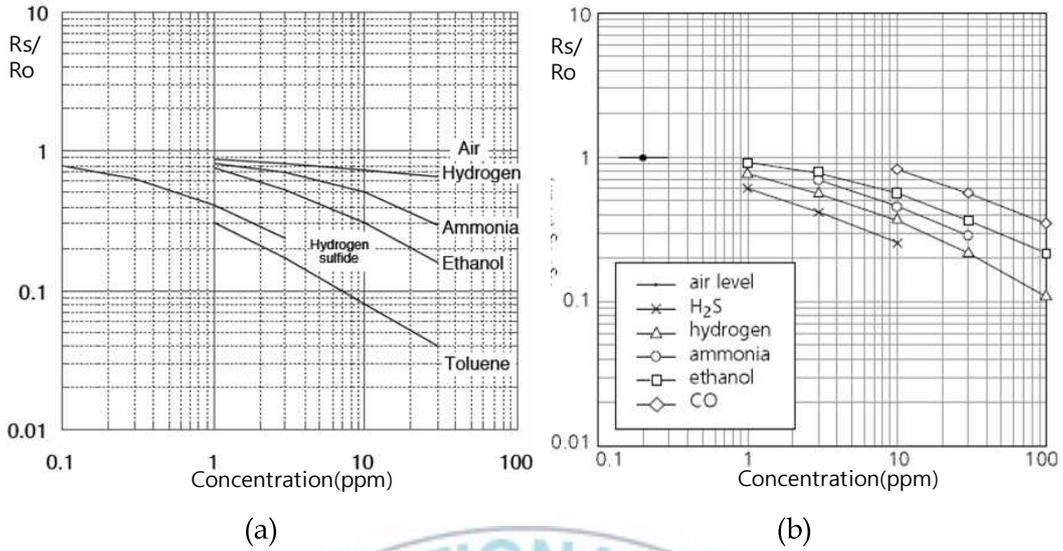
냄새 감지는 실내 환경에서 쉽게 발생 할 수 있는 특정 가스에 반응하는 두 종류의 가스 센서 4개를 좌·우측에 각각 2개씩 부착 하여 실시하였다. 로봇의 성능 확인을 위해 실험에 사용된 가스는 암모니아( $\text{NH}_3$ )와 에탄올( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ )이었으며 차후 로봇의 검출 가능한 가스의 종류를 확장 할 수 있도록 두 가지 종류의 센서를 함께 사용하였다.

냄새 감지를 위한 가스 센서는 Figaro사의 TGS2602와 FiS사의 SP3-AQ2가 사용 되었다[11][12]. 아래 <그림 2-2>는 사용된 가스 센서를 나타낸 그림 이며, 두 종류 센서 모두 주된 사용 목적이 실내 환경의 공기 오염물질 검출용으로 실내에서 발생하기 쉬운 각기 다른 종류의 오염 물질에 반응하는 특성을 가진다.



<그림 2-2> 가스센서  
(a) Figaro TGS 2602    (b) FiS SP3-AQ2

<그림 2-3>은 각 센서의 민감도 특성을 나타낸 그래프로 사용된 두 종류의 가스 센서 모두 온도 변환 구동방식을 사용한 반도체식 가스 센서로 반응하는 특정 가스의 농도에 따라 저항 값이 변하는 방식으로 가스를 인식 한다.



<그림 2-3> 가스 센서 특성 그래프  
 (a) Figaro TGS 2602 (b) FiS SP3-AQ2

## 2. 연산 및 구동

최근 PC성능의 발달과 소형화 제품의 상용화로 로봇의 연산처리는 ASUS Eee 1000HE 넷북이 사용 되었다. ASUS Eee PC는 크기가 266mm× 191.2mm×28.5mm이고 무게가 1.45kg의 소형 PC로 CPU는 Atom N280 (1.66G Hz)과 1GB 메모리를 장착하고 있다. 가스 센서로부터 얻어진 데이터를 이용하여 신경망 역전파 알고리즘 연산 수행으로 가스의 종류를 구분 하고, 로봇이 냄새 발생지 근처로 이동하면 퍼지 추론 연산이 이루어진다. 아래 <표 2-1>은 연산처리부로 사용된 PC의 성능을 나타낸 표이다.

<표 2-1> 연산용 PC 성능

프로세서	Intel Atom N280	메모리	DDR2 1GB
운영체제	MS-Window XP	크기 (mm)	266×191.2×28.5
메인 칩셋	모바일 인텔 945GSE	무게 (kg)	1.45
무선 커넥션	802.11b/g/n	배터리	리튬이온 8700mAh
유선 커넥션	10/100Mbps 이더넷	블루투스	블루투스 v2.0+EDR

또한 이동로봇에는 장애물 회피를 위하여 비전 시스템을 탑재 하였으며 Samsung사의 Pleomax 3800 웹캠을 사용하여 영상을 얻고 장애물 회피를 위한 영상처리도 연산처리부로 사용된 PC에서 이루어진다.

로봇 구동을 위해서는 ATmel사의 ATmega 128 프로세서가 사용 되었다. ATmega 128은 8-비트 RISC(Reduced Instruction Set Computer) 구조로 명령어가 간단하며 동작 속도가 빠르고, 1MHz당 약 1MIPS(Million Instruction Per Second)의 성능을 가진다. <그림 2-4>에 연산 및 구동에 사용된 장비를 나타 내었다.



(a)



(b)



(c)

<그림 2-4> 연산용 PC 및 웹캠

(a) Eee 1000HE      (b) Pleomax 3800      (c) ATmega 128

### 3. 네트워크 (WSN)

냄새관련 처리가 끝나고 나면 로봇은 관련 정보나 임의의 상황에 따른 위험 경보를 로봇이 포함된 센서 네트워크 내 센서 노드간의 멀티홉 통신으로 다른 노드로 전송 한다. 로봇의 센서 네트워크 구현을 위하여 2.4GHz대의 Zigbee 통신 방식을 지원하는 한백전자 사의 ZigbeX모듈을 사용 하였다. <그림 2-5>에 ZigbeX모듈을 나타내었다.



<그림 2-5> 한백전자 ZigbeX

ZigbeX는 ATmel사의 ATmega128과 Chipcon사의 2.4G RF통신용 CC2420을 사용한 센서 네트워크용 모듈로서 온습도센서와 조도센서를 기본센서로 채택하여 주변 환경 정보를 확인하고 또한 외부모듈 확장이 가능하도록 되어 있다. 그리고 센서 노드의 근본적 문제인 전원 관리를 위하여 Maxim사의 3.3V Step-up MAX1678 DC-DC 컨버터를 이용 하였다[13]. 아래 <표 2-2>에 ZigbeX모듈 플랫폼 사항을 나타내었다.

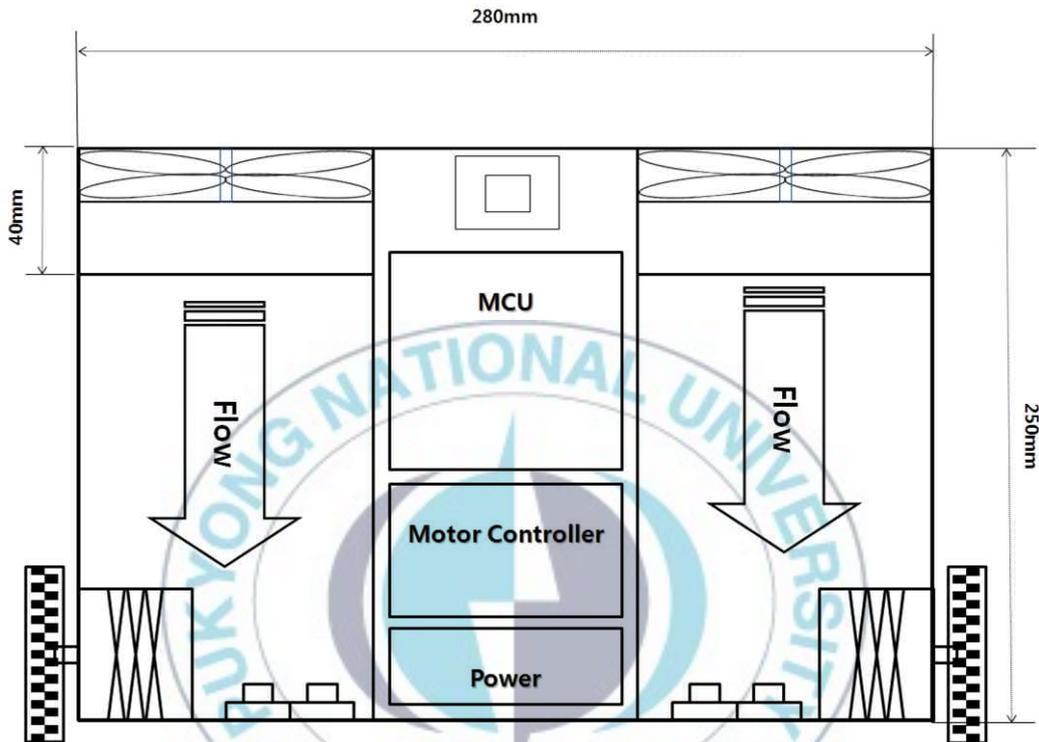
<표 2-2> ZigbeX 모듈 플랫폼

MCU	Device	Type	Memory (Kb)	SRAM (Kb)
	ATmega128	7.3728MHz	128	4
RF Transceiver	Device	Radio Freq. (MHz)	Max. Data Rate (Kbits/sec)	Antenna
	CC2420	2400	250	PCB Antenna (Default) SMA (user)
Power	Type	Capacity (mA-hr)	3.3V booster	External power
	AA×2	1000~2300	Default	Ext. Connector
Flash Memory	Device	Connection		Size (KB)
	AT45DB041B	SPI		512
Sensor	Temp		Light	
	SHT11		CdS	

#### 4. 이동로봇

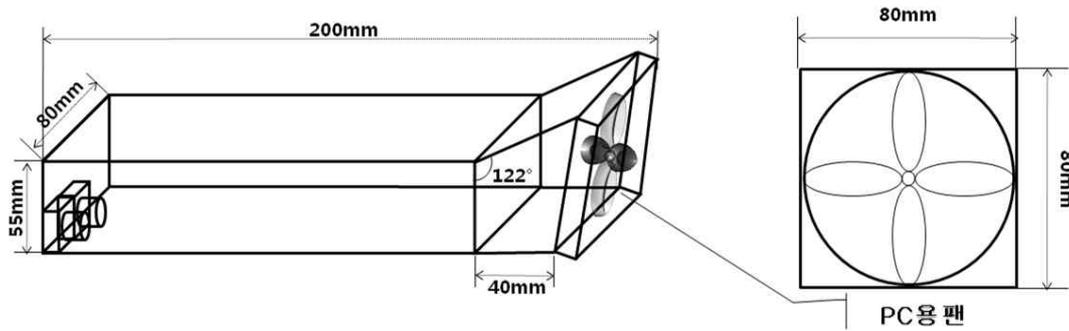
<그림 2-6>은 이동로봇의 상면도를 나타낸다. 로봇의 구동을 위하여 2개의 스텝모터를 좌·우측에 1개씩 사용하였으며, 전방에 1개의 핀치롤러를 설치하여 2개의 스텝모터 제어를 통하여 로봇이 원하는 방향으로 자유로이 주행 가능 하도록 하였다. 그리고 중앙에는 로봇 구동을 위한 마이크로프로세서와 전원부, 그리고 모터 제어부가 위치한다. 상면도 좌·우측을 보면 챔버와 가스 센서가 위치한다. 챔버는 가스 센서의 가스 인식을 돕기 위한 것으로 센서가 가스를 감지하려면 공기 중의 화학 성분이 센서에 닿아야 하는데 그러기 위해서는 공기의 흐름이

생겨야 한다. 따라서 공기의 흐름을 만들어 주기 위해 팬을 설치하였고 화학 성분이 분산되지 않고 센서에 잘 닿을 수 있도록 챔버를 설치하였다[14].



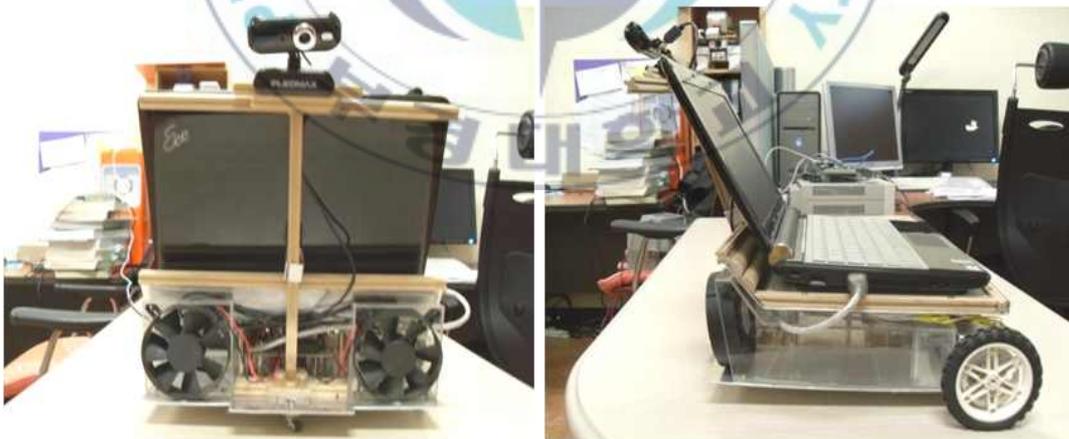
<그림 2-6> 이동로봇 상면도

<그림 2-7>은 챔버와 팬의 측면도 및 정면도 이다. 팬은 80mm×80mm 크기의 PC 발열 방지용 팬을 사용 하였으며, 200mm×80mm×80mm 크기의 투명 아크릴로 만들어진 챔버 전방에 부착되고 반대쪽 끝에는 두 종류의 가스 센서가 위치한다. 로봇의 좌·우측에 챔버 설치로 인하여 3~5m까지 비교적 먼 거리의 냄새 발생지로부터의 가스 성분을 로봇의 센서가 감지 할 수 있도록 하였다.



<그림 2-7> 챔버와 팬

<그림 2-8>은 실제 이동 로봇의 모습이며 로봇의 상단부에는 넷북이 위치하여 현재 로봇의 상황을 모니터링 할 수 있으며 넷북 상단에 전방을 향한 웹캠을 설치하여 장애물을 인식 할 수 있도록 하였다.



<그림 2-8> 모바일 로봇

### Ⅲ. 동작 알고리즘

이동 로봇이 완벽한 임무를 수행하기 위한 동작 알고리즘은 크게 다섯 가지로 구분된다. 센서로부터 얻은 데이터를 이용하여 냄새의 종류를 분류하는 냄새분류 알고리즘, 냄새 발생지로 이동하여 발생 가스의 농도를 추론 하는 농도추론 알고리즘, 장애물을 인식 및 회피 하기위해 필요한 영상처리 알고리즘, 센서 네트워크를 기반으로 냄새 정보를 전송하는 멀티홉 통신, 그리고 원하는 목적지로 이동하는 주행 알고리즘으로 이루어진다.

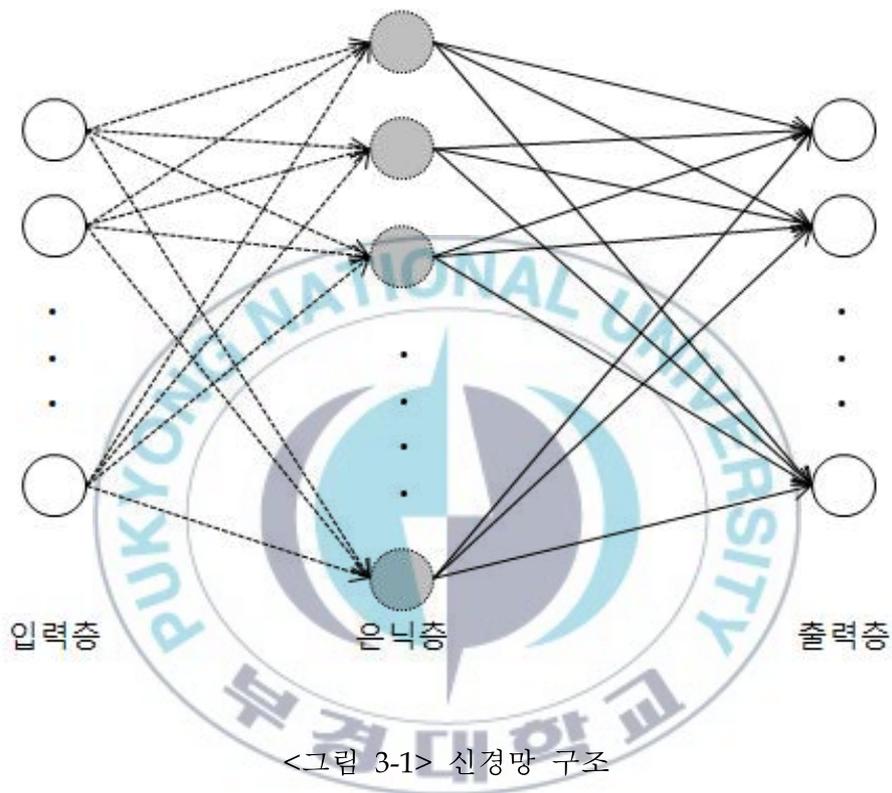
#### 1. 냄새분류

냄새 분류 과정은 가스 센서가 인식한 데이터를 이용하여 냄새의 종류를 분류하는 것으로 신경망 역전파(Neural Network Back Propagation) 알고리즘에 의해 이루어진다.

##### 1) 신경망 이론

신경망 혹은 인공 신경망 이론은 실제 사람의 뇌 구조를 모델로 한 이론이다. 이는 컴퓨터가 사람의 학습 기능을 갖도록 한 것이라 할 수 있다. 실제 학습기능을 가진 사람의 두뇌는 다수의 뉴런이 서로 연결된 신경망으로 구성되어 있다. 신경망은 이러한 생물학적 신경망에서 아이디어를 얻어 그래프 형태와 수학적 알고리즘으로 모델링한 것이다. 신경망은 생물학적 뉴런을 모델링한 유닛과 그 유닛 사이의 가중치를 가진 연결로 이루어지며 각각의 신경망 모델에 따라 다양한 구조와 독특한 학습 규칙을 갖는다.

각 신경망은 계층별로 그룹화 된 뉴런들의 집합으로 구성된 구조를 가지고 있다. 입력층, 은닉층, 출력층의 세 계층으로 이루어져 있으며, 입력층과 출력층 사이에 여러 개의 층이 존재할 수도 있다. <그림 3-1>은 신경망의 구조를 나타낸다[15].



생물학적 뉴런들 간의 정보전달에 있어 시냅스가 중요한 역할을 담당하고 있는 것처럼, 신경망의 처리 요소들 간의 연결강도 차이를 표현하기 위해 신경회로망에서는 연결가중치를 사용하는데, 각 처리요소들은 전달받은 입력 값과 연결가중치를 사용하여 입력 값을 계산한 후 이를 이용하여 출력 값을 낸다.

<표 3-1> 신경망의 장점

결함 내구성 (fault tolerance)	처리 노드가 많기 때문에 몇 개의 노드나 연결이 가진 결함이 비교적 시스템 전체의 결함을 초래하지는 않는다.
일반화 (generalization)	불완전하거나 사전에 알 수 없던 입력을 표현하는 경우에, 신경망은 합리적인 반응을 생성할 수 있다.
적용성 (adaptability)	신경망은 새로운 환경에서 학습한다. 새로운 경우는 즉각적으로 프로그램을 갱신하고 유지하는데 사용될 수 있다.

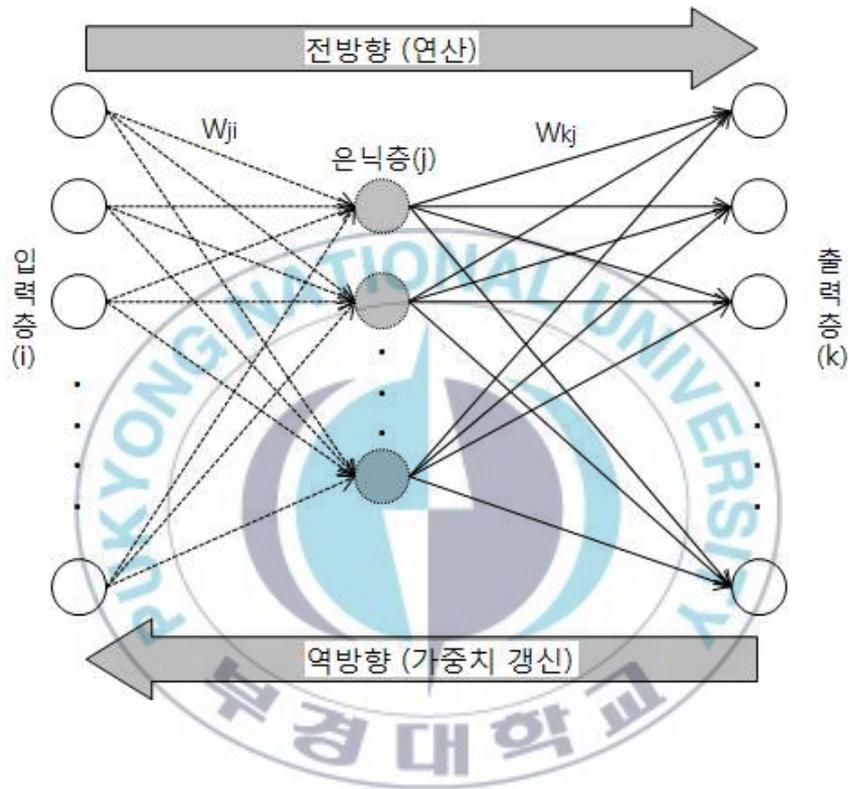
이러한 신경망 알고리즘은 주어진 예제 패턴의 반복 학습을 통하여 스스로 지식을 획득하는 특성을 갖는다. 따라서 불완전하고 잡음이 많은 입력의 해석뿐만 아니라 패턴인식, 학습, 분류, 일반화, 추상화 등을 위해 활용 될 수 있다. 또한 각종 논리적이고 분석적인 기법을 활용해서 시뮬레이션하기 어려운 인간의 문제해결능력을 수행 할 수 있다.

## 2) 오류 역전파 알고리즘

오류 역전파 알고리즘은 다층 퍼셉트론을 학습시키는 알고리즘으로 지도학습(Supervised learning)법을 사용하여 전 방향(feed-forward)의 다층 신경 회로망을 학습시킨다. 이 알고리즘은 원하는 목표값(d)과 실제 출력값(O) 사이의 오차제곱 합으로 정의된 비용함수 E의 값을 경사 하강 추적법(Gradient Descent Method)에 의해 최소화하는 방향으로 학습 한다.

$$E = \sum_p E_p, (E_p = \frac{1}{2} \sum_j (d_{pj} - O_{pj})^2) \quad (1)$$

여기서  $p$ 는  $p$ 번째 학습패턴을,  $E_p$ 는  $p$ 번째 패턴에 대한 오차이고,  $d_{pj}$ 는  $p$  패턴에 대한 목표 출력의  $j$  번째 요소를,  $O_{pj}$ 는 실제 출력의  $j$  번째 요소를 의미한다.



<그림 3-2> 역전파 알고리즘의 학습 방향

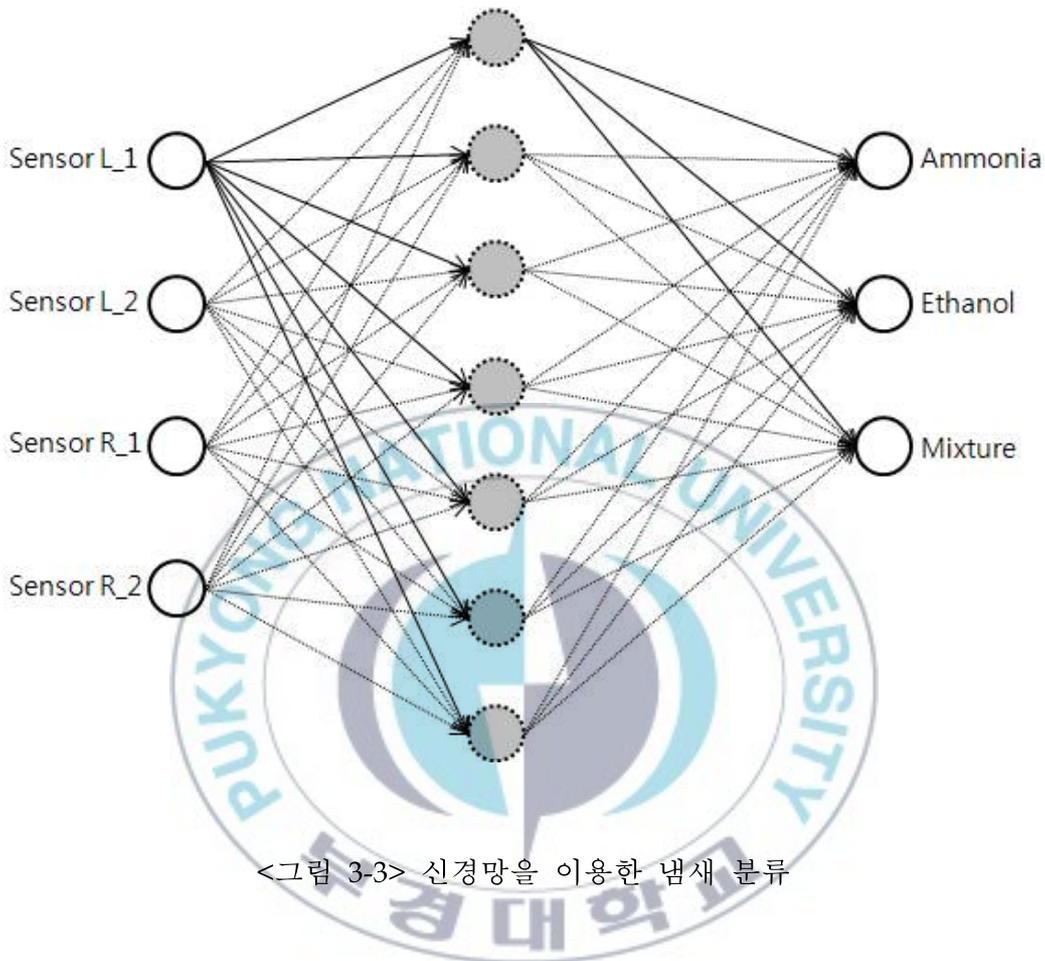
오류 역전파 알고리즘의 학습규칙은 전 방향 퍼셉트론의 실제 출력과 목표 출력간의 평균 제곱 오차(Mean Squared Error : MSE)를 최소화시키기 위해서, 연결가중치에 대한 오차의 미분계수가 감소하는 방향으로 연결 가중치를 계속 변경 시키는 반복적인 경사 하강 (Iterative Descent) 알고리즘이다. 따라서 각 출력뉴런 및 은닉뉴런들은 시그모이드 함수를 활성화 함수로 사용한다[16].

오류 역전파 알고리즘의 상세한 순서는 아래 <표 3-2>와 같다.

<표 3-2>. 오류 역전파 알고리즘

Step.1	가중치와 임계치를 임의의 작은 값으로 초기화한다.
Step.2	입력과 목표 출력을 제시한다.
Step.3	입력 벡터를 이용하여 은닉층 유닛 j의 입력 $net_{pj}$ 를 구한다. $net_{pj} = \sum_{i=0}^{N-1} W_{ji} X_{pi} - \theta_j, N \text{은 입력 뉴런의 개수} \quad (2)$
Step.4	시그모이드 함수 f를 사용하여 은닉층의 출력 $O_{pj}$ 를 구한다. $O_{pj} = f_j(net_{pj})$
Step.5	은닉층의 출력 $O_{pj}$ 를 이용하여 출력층 뉴런 k로의 입력 $net_{pk}$ 를 구한다. $net_{pk} = \sum_{j=0}^{L-1} W_{kj} O_{pj} - \theta_k, L \text{은 은닉뉴런의 개수} \quad (3)$
Step.6	$net_{pk}$ 와 시그모이드 함수를 사용하여 출력층의 출력 $O_{pk}$ 를 구한다. $O_{pk} = f_k(net_{pk}) \quad (4)$
Step.7	입력패턴의 목표출력 $d_{pk}$ 와 실제출력 $O_{pk}$ 의 오차 $\delta_{pk}$ 를 구하고, 출력층의 오차합 E는 학습패턴의 오차 $E_p$ 를 누적한다. $\delta_{pk} = (d_{pk} - O_{pk}) f'_k(net_{pk}) = (d_{pk} - O_{pk}) O_{pk} (1 - O_{pk}) \quad (5)$ $E = E + E_p \quad (E_p = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{M-1} \delta_{pk} W_{kj} O_{pj} (1 - O_{pj})), M \text{은 출력 뉴런의 개수} \quad (6)$
Step.8	출력층의 오차 $\delta_{pk}$ 와 은닉층과 출력층의 가중치 $W_{kj}$ 를 이용하여 은닉층의 오차 $\delta_{pj}$ 를 구한다. $\delta_{pj} = f'_j(net_{pj}) \sum_{k=0}^{M-1} \delta_{pk} W_{kj} = \sum_{k=0}^{M-1} \delta_{pk} W_{kj} O_{pj} (1 - O_{pj}) \quad (7)$
Step.9	출력층의 가중치 $W_{kj}$ 와 임계치 $\theta_k$ 를 갱신한다. $W_{kj}(t+1) = W_{kj}(t) + \eta \delta_{pk} O_{pj} \quad (8)$ $\theta_k(t+1) = \theta_k(t) + \beta \delta_{pk} \quad (9)$
Step.10	입력층과 은닉층의 가중치 $W_{ji}$ 와 임계치 $\theta_j$ 를 갱신한다. $W_{ji}(t+1) = W_{ji}(t) + \eta \delta_{pj} X_{pi} \quad (10)$ $\theta_j(t+1) = \theta_j(t) + \beta \delta_{pj} \quad (11)$
Step.11	모든 학습패턴에 대하여 전부 학습할 때까지 Step.2로 돌아간다.
Step.12	출력층의 오차합 E가 허용값 이하이거나 최대 반복횟수보다 적으면 Step.2로 돌아가고 그렇지 않으면 종료한다.

### 3) 냄새 분류 알고리즘



본 논문에서 제안한 로봇은 암모니아( $\text{NH}_3$ ), 에탄올( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ) 그리고 이들의 혼합가스에 대하여 냄새 구분을 위한 학습을 수행 하였다. <그림 3-3>은 사용된 역전파 알고리즘의 다이어그램으로 좌·우측 2개씩의 가스 센서에 따른 총 4개의 입력층 노드(Sensor L\_1, Sensor L\_2, Sensor R\_1, Sensor R\_2), 7개의 은닉층 노드 그리고 실험에 사용된 가스 종류에 따른 3개의 출력층 노드로 구성 되었으며 학습률은 0.1, 각 노드의 활성화 함수로 식(12)형태의 시그모이드 함수인 지수함

수(Exponential function)가 사용 되었다.

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (12)$$

또한 입력 센서 값인 0~255의 데이터는 입력 데이터 전체 값들의 중요도를 동일하게 하고, 시그모이드형 전달함수가 너무 빨리 포화 상태에 빠지는 것을 방지하기 위해 평균을 중심으로 표준 편차가 항상 1이 되는 수로 변환하는 전처리 과정이 수행 되었다.

이러한 냄새 구분의 모든 과정은 Matlab를 사용하여 구현 하였으며 <그림 3-4>는 위의 입력조건을 100회 수행 하였을 경우 전체 실험 가스의 평균 학습 에러 율을 나타낸 그래프이다[17][18].



<그림 3-4> 학습 에러 그래프

## 2. 농도 추론

### 1) 퍼지 이론

Fuzzy 라는 형용사는 fuzz 라는 "솜털, 잔털, 보풀"을 뜻하는 명사에서 나왔고 "흐릿한, 명확하지 않은, 애매한" 등의 의미를 가진다. 1965 년에 Lofti A. Zadeh 가 퍼지집합(fuzzy set) 이론을 제창한 이후 퍼지 이론이 나타났으며 그것은 종래의 집합이론의 틀에서 벗어난 확장 개념이었다.

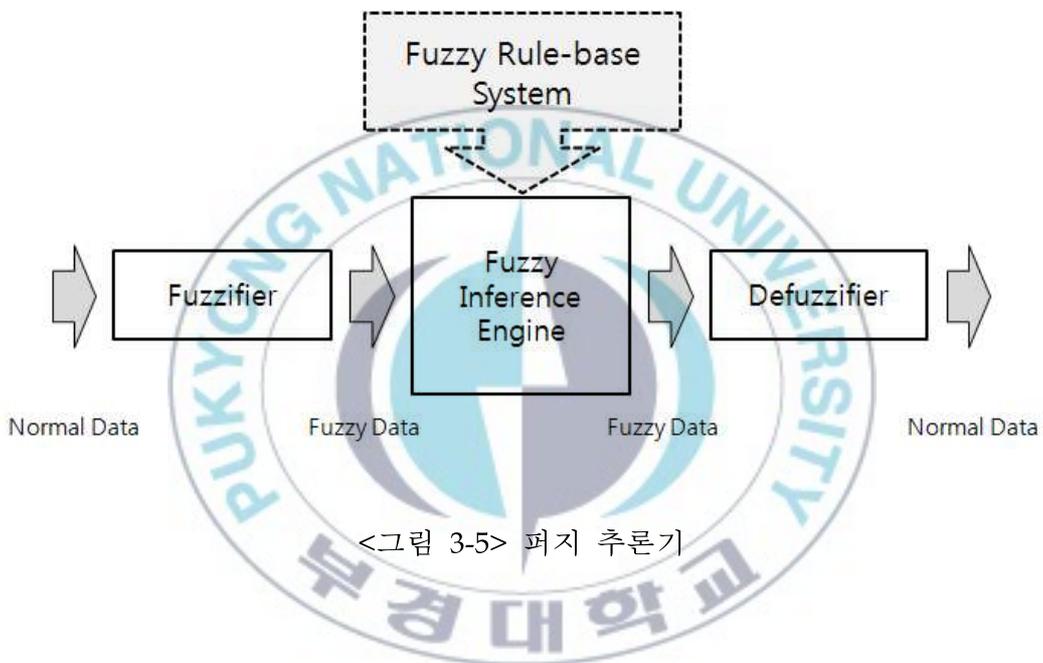
인간의 사고과정은 흑백논리로만 설명되지는 않고 흑과 백 사이에도 무수히 많은 정보가 있다. 그러한 것을 애매성 또는 다치논리라고 하는데 인간의 지능을 컴퓨터가 묘사하기 위해서는 애매성을 수학적으로 표현하여야 한다. "체온 36.5 °C를 정상체온으로 보았을 때 37 °C 는 과연 어느 정도 고열이라 할 수 있는가?", "나의 wife 는 어느 정도 예쁜 것일까?", "중년이라고 하면 어느 정도 나이를 표현하는 것인가?" 등과 같이 "고열, 예쁜, 중년" 과 같은 언어를 수학적으로 표현하여 컴퓨터가 그를 인식하도록 하기 위한 이론이라 할 수 있다.

즉, 애매한 값들에 퍼지집합을 적용시켜 그 의미에 상당한 것을 멤버십함수를 사용하여 표현함으로써 컴퓨터로도 애매한 추론이 가능하다는 방법을 제안하였으며 이것을 퍼지추론이라 한다[19].

퍼지 추론을 위해서는 일반적으로 사용하는 집합과는 다른 형태의 퍼지 집합을 사용한다. 퍼지 집합의 정의는 전체 집합에 포함된 하나의 원소  $x$ 가 퍼지 집합  $A$ 의 멤버인 경우에 구간  $[0, 1]$ 에 포함되는 실수 값으로의 사상인 소속 함수가 정의 될 수 있으며, 이때 퍼지 집합은 아래 식 (13)과 같이 표현 가능하다.

$$A = (x, \mu_A(x)) | x \in X, \mu_A(x) \in [0, 1] \quad (13)$$

아래 <그림 3-5>는 퍼지추론에 사용되는 퍼지 추론기를 나타낸 블록 다이어그램으로 퍼지 추론기는 크게 퍼지화기, 퍼지 추론부, 비퍼지화기로 구성된다.

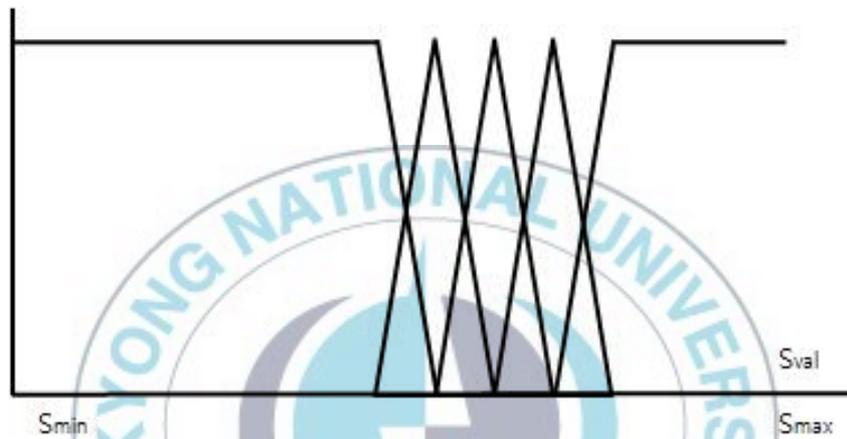


## 2) 농도 추론

이러한 퍼지 추론 방식을 이용하여 냄새원에서 발생하는 가스의 농도를 추론 한다. 이동 로봇이 냄새 발생원에 근접하여 이동을 멈추고 나면 로봇은 위험 정도 판단 및 냄새 정보 전송을 위해 냄새 발생원에서 발생하는 해당 가스의 농도를 추정 한다.

냄새 정보의 수집은 좌·우측에 사용된 각기 다른 두 종류의 센서로부터 얻어진 데이터를 이용하여 이루어지는데, 이때 두 가지 종류

센서의 저항값이 각각의 가스 종류에 따라 차이를 가지기 때문에 각 센서 값의 변위를 이용해 각각의 멤버십 함수를 결정하였다[20]. 즉, 각각의 센서에 대하여 공기 중에서 얻어지는 센서 값에서 센서를 가스에 최대한 노출 시켰을 경우의 센서 값까지의 센서 데이터 변위를 5단계로 나누어 결정하였으며, 이때 입력에 의한 멤버십 함수는 계산이 간단한 삼각파를 사용하였다.



<그림 3-6> 센서값 변위에 의한 입력 멤버십 함수

입력 멤버십 함수들들 사이에는 아래 식 (14)의 Mamdani가 제안한 방법으로 퍼지 관계를 결정 하였다. 이 방식은 멤버십 함수들 사이의 연산을 멤버십 함수 값의 최솟값으로 결정하며, 이후 조건 명제들 사이의 논리적 관계를 논리합(or)으로 결합 시킨다.

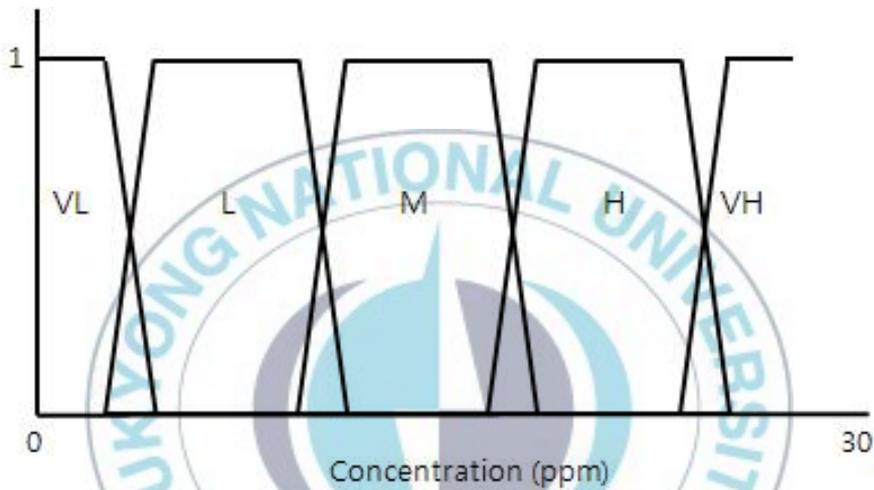
$$\mu_{R_e}(x, y) = (\mu_A(x) \wedge \mu_B(y)) \quad (14)$$

그리고 입력으로 주어진 센서 값들 사이의 조합에 관한 퍼지 규칙은 <표 3-3>과 같다.

<표 3-3> 센서 값들의 각 조합에 관한 퍼지 규칙

<p>If (S<sub>1</sub> is VL) AND (S<sub>2</sub> is VL) then (Concentration is VW) ELSE If (S<sub>1</sub> is VL) AND (S<sub>2</sub> is L) then (Concentration is VW) ELSE If (S<sub>1</sub> is VL) AND (S<sub>2</sub> is M) then (Concentration is VW) ELSE If (S<sub>1</sub> is VL) AND (S<sub>2</sub> is H) then (Concentration is W) ELSE If (S<sub>1</sub> is VL) AND (S<sub>2</sub> is VH) then (Concentration is M) ELSE</p> <p>If (S<sub>1</sub> is L) AND (S<sub>2</sub> is VL) then (Concentration is VW) ELSE If (S<sub>1</sub> is L) AND (S<sub>2</sub> is L) then (Concentration is VW) ELSE If (S<sub>1</sub> is L) AND (S<sub>2</sub> is M) then (Concentration is W) ELSE If (S<sub>1</sub> is L) AND (S<sub>2</sub> is H) then (Concentration is W) ELSE If (S<sub>1</sub> is L) AND (S<sub>2</sub> is VH) then (Concentration is M) ELSE</p> <p>If (S<sub>1</sub> is M) AND (S<sub>2</sub> is VL) then (Concentration is W) ELSE If (S<sub>1</sub> is M) AND (S<sub>2</sub> is L) then (Concentration is W) ELSE If (S<sub>1</sub> is M) AND (S<sub>2</sub> is M) then (Concentration is M) ELSE If (S<sub>1</sub> is M) AND (S<sub>2</sub> is H) then (Concentration is S) ELSE If (S<sub>1</sub> is M) AND (S<sub>2</sub> is VH) then (Concentration is S) ELSE</p> <p>If (S<sub>1</sub> is H) AND (S<sub>2</sub> is VL) then (Concentration is M) ELSE If (S<sub>1</sub> is H) AND (S<sub>2</sub> is L) then (Concentration is S) ELSE If (S<sub>1</sub> is H) AND (S<sub>2</sub> is M) then (Concentration is S) ELSE If (S<sub>1</sub> is H) AND (S<sub>2</sub> is H) then (Concentration is VS) ELSE If (S<sub>1</sub> is H) AND (S<sub>2</sub> is VH) then (Concentration is VS) ELSE</p> <p>If (S<sub>1</sub> is VH) AND (S<sub>2</sub> is VL) then (Concentration is M) ELSE If (S<sub>1</sub> is VH) AND (S<sub>2</sub> is L) then (Concentration is S) ELSE If (S<sub>1</sub> is VH) AND (S<sub>2</sub> is M) then (Concentration is VS) ELSE If (S<sub>1</sub> is VH) AND (S<sub>2</sub> is H) then (Concentration is VS) ELSE If (S<sub>1</sub> is VH) AND (S<sub>2</sub> is VH) then (Concentration is VS) ELSE</p>
--

농도 추론의 결과를 나타내는 출력 멤버십 함수는 가스 센서의 인식 가능 범위인 0~30ppm사이의 농도를 가스 입자의 양에 따라 매우 풍부, 풍부, 보통, 희박, 매우희박의 5단계로 나누어 나타 내었으며, 농도의 수치화를 위한 비퍼지화 과정으로 무게 중심 법을 사용 하였다. 아래 <그림 3-7>은 가스 농도추정 결과를 얻는 멤버십 함수를 나타낸다.

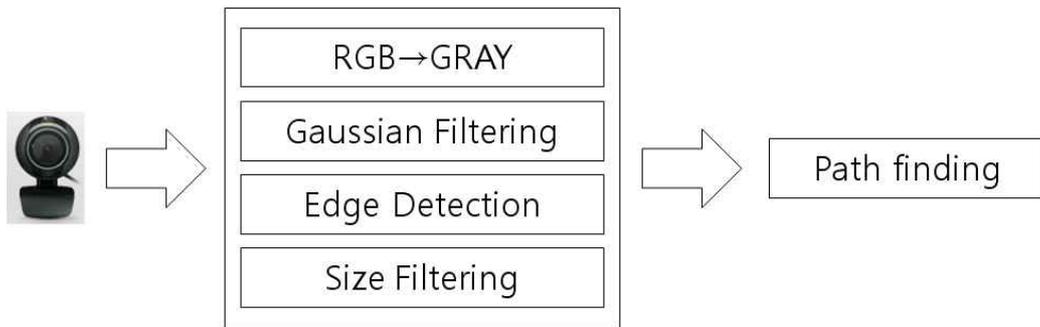


<그림 3-7> 농도에 관한 멤버십 함수

### 3. 영상처리

이동 로봇은 냄새 발생지 추적 외에 일반적인 환경에서 장애물을 회피하면서 자율이동을 한다. 이때 웹캠을 이용한 영상처리 과정을 통해 로봇은 장애물을 인식하고 회피하며 자율 주행하게 된다.

장애물 회피를 위한 영상 처리 과정은 <그림 3-8>과 같은 단계를 거치며 이루어진다.

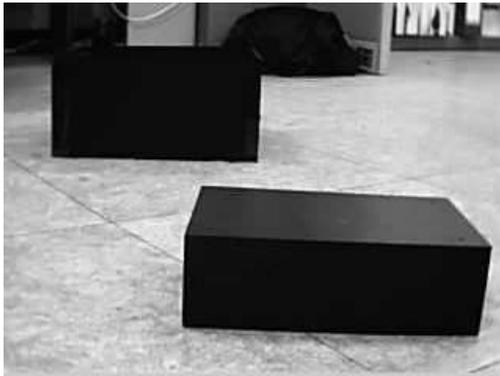


<그림 3-8> 영상처리

로봇은 캠으로부터 받은 영상에서 장애물을 인식 하기 위해 먼저 웹캠으로부터 받은 영상을 GRAY영상으로 변환 후 가우시안 필터링을 거치고 윤곽선 검출과정과 크기 필터링 과정을 거쳐 최종 장애물을 인식하게 된다[21].

### 1) 가우시안 필터

우선 RGB 영상으로 얻어진 카메라의 영상을 처리의 용이성을 위해 GRAY영상으로 변환하고 이렇게 얻어진 GRAY영상을 가우시안 필터를 통하여 전체적으로 부드러운 영상으로 변환한다. 가우시안 필터는 영상 데이터의 잡음을 제거하기 위해 사용되는 필터로 가우시안 분포를 가진 필터를 카메라를 통해 얻어진 영상에 컨볼루션 연산으로 가우시안 필터링된 영상을 얻을 수 있다. 가우시안 필터링 과정을 거치면 노이즈 등에 의한 픽셀값이 갑자기 변화하는 부분을 제거하여 영상의 노이즈 제거에 용이하며 이후 윤곽선 검출에도 용이한 특징이 있다. 아래 <그림 3-9>은 5×5크기의 표준 편차가 1인 가우시안 필터를 영상에 적용시킨 결과이다.



(a)



(b)

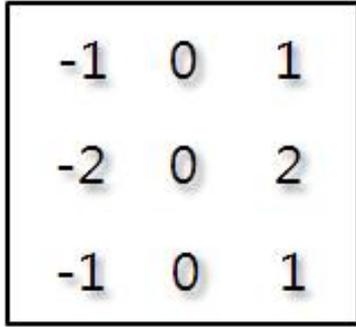
<그림 3-9> 가우시안 필터링

(a) 원 영상

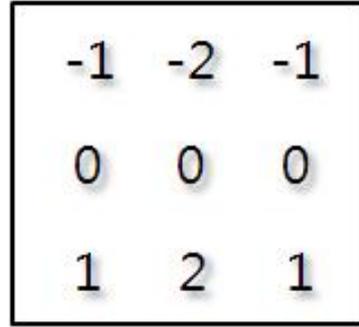
(b) 결과 영상

## 2) 윤곽선 검출

가우시안 필터링 과정을 통해 처리된 영상은 이후 장애물 인식에 좋은 성능을 보이는 윤곽선 검출 과정을 거친다. 윤곽선 검출은 영상 내 화소 값의 변화가 생기는 부분에서의 미분 값이 0이 아닌 특성을 이용하여 얻어진다. 하지만 실제 미분 연산 보다는 필터를 이용하여 빠른 속도로 윤곽선을 검출하는 것이 효과적이다. 윤곽선 검출에 사용되는 대표적인 필터로는 Sobel, Prewitt, Robert, Laplacian, Canny 등의 필터가 있는데 본 논문에서는 Sobel 필터를 사용하였다.



(a)

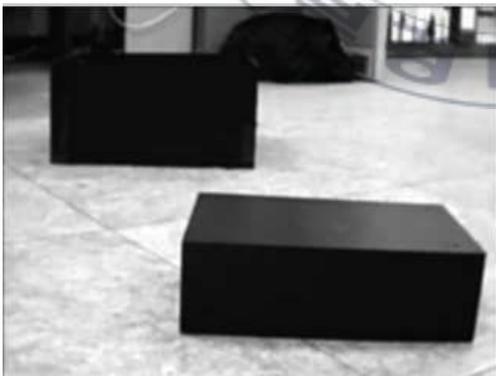


(b)

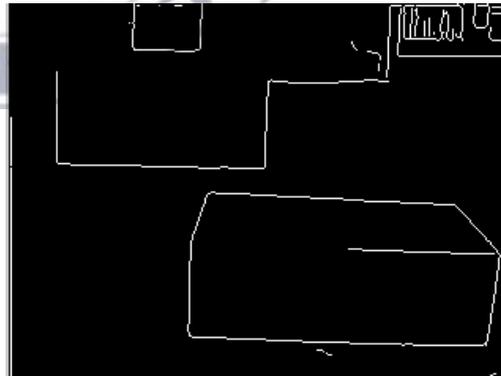
&lt;그림 3-10&gt; Sobel Filter

(a) 수직방향 (b) 수평방향

Sobel 필터는 장애물 인식에 좋은 성능을 가진 필터로 앞서 얻은 전체 영상에 대해 수직, 수평 방향의 윤곽선을 검출하기 위해 <그림 3-10>과 같은 3×3크기의 Sobel 필터를 적용 하였다. 아래 <그림 3-11>은 3×3크기의 Sobel 필터를 적용하여 카메라 영상내 물체에 대한 윤곽선 검출 결과 영상이다.



(a)



(b)

&lt;그림 3-11&gt; 윤곽선 검출

(a) 원 영상 (b) 결과 영상

### 3) 크기 필터

지금까지의 과정이 이루어지면 로봇은 어느 정도 장애물 인식이 가능하다. 하지만 실제 웹캠을 통해 얻어지는 윤곽선 영상은 수많은 노이즈 픽셀을 가지고 있기 때문에 크기 필터링을 통해 노이즈를 줄여 잘못된 연산을 방지해야 한다. 크기 필터링은 카메라로부터 얻은 영상의 윤곽선들을 라벨링 (Labeling) 처리 하여 연결된 윤곽선들끼리 하나로 묶어 준다. 이렇게 묶어진 영상의 크기가 임의의 값보다 작은 즉, 노이즈로 판단할 수 있는 작은 묶음을 제거하는 과정을 거친다. 본 논문에서는 8-연결도 순차 연결성분 알고리즘을 통해 윤곽선을 라벨링 하고, 라벨링된 영상에서 픽셀의 크기가 30 이하인 픽셀을 제거하는 과정을 거쳤다. <그림 3-12>는 크기 필터링 과정을 거쳐 30픽셀 이하의 노이즈가 제거된 영상이다.

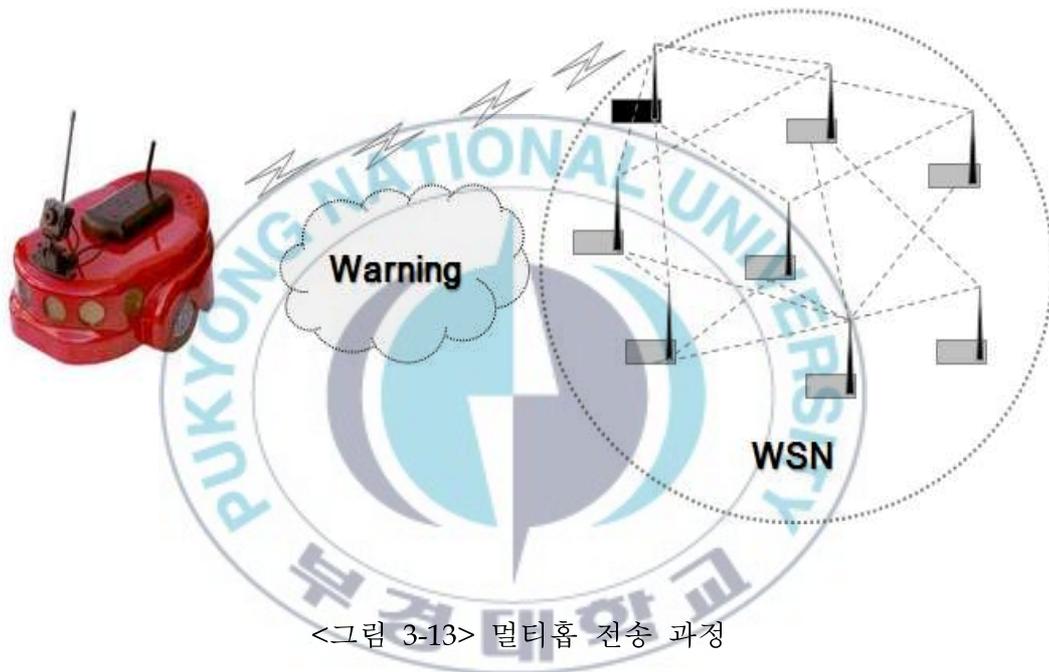


<그림 3-12> 크기 필터링  
(a) 원 영상      (b) 결과 영상

이러한 영상처리 과정을 거친 영상은 이동로봇이 자신의 진행 경로에서 얻은 영상 중 장애물을 인식하고 회피하기 위해 충분히 처리된 영상이라 할 수 있다.

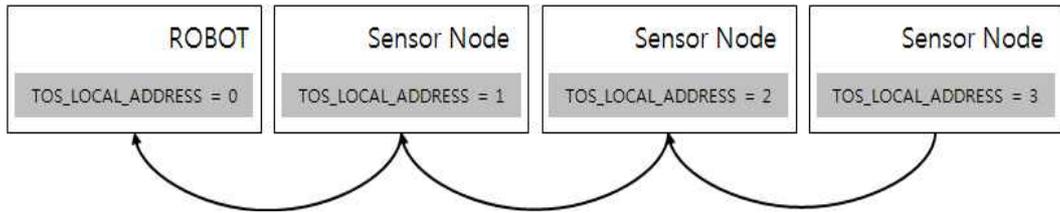
#### 4. 멀티홉 통신

로봇은 <그림 3-13>처럼 센서 네트워크 환경에서 동작하며 냄새 관련 정보를 수집하고 이를 자신이 포함된 센서 네트워크 내 다른 노드들과 멀티홉 방식으로 냄새 관련 정보 및 경고 메시지 혹은 이동 정보 등을 송·수신 한다.



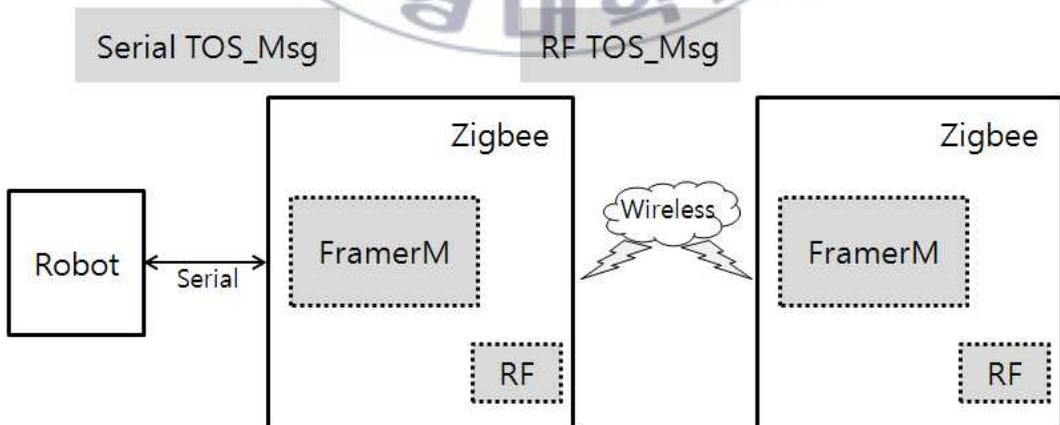
<그림 3-13> 멀티홉 전송 과정

멀티홉 통신 과정에서 개별 센서 노드는 고유한 TOS\_LOCAL\_ADDRESS를 가지며 각각의 위치는 고정되어 있다고 가정한다. 그리고 이들 사이에는 유니캐스트 방식에 의해 통신이 이루어진다. 아래 <그림 3-14>은 로봇이 센서 노드와 멀티홉 릴레이 통신을 수행하는 과정을 나타낸다.



<그림 3-14> 멀티홉 전송 과정

이때 로봇에 장착된 ZigBee 모듈과 마이크로프로세서 ATmega128 사이는 RS-232 시리얼 통신을 통해 데이터를 송·수신 하게 되는데 무선 멀티홉 방식으로 전송된 TOS\_Msg 포맷 (IEEE 802.15.4)과 시리얼 통신 상에 사용하는 TOS\_Msg포맷 (RFC 1662)은 서로 상이하므로 메시지 포맷 변환과정이 필요 하다[22]. 그러나 본 논문의 이동 로봇은 이러한 포맷 변환을 자동으로 해주는 Framerm 컴포넌트를 사용하기 위해 GenercComm컴포넌트를 사용하여 무선 및 시리얼 통신을 수행 하였다. 무선 통신과 시리얼 통신의 TOS\_Msg에 대한 블록 다이어그램을 <그림 3-15>에 나타내었다.



<그림 3-15> TOS\_Msg 포맷

먼저 TOS\_LOCAL\_ADDRESS가 1인 센서 노드에서 로봇에 설치된 TOS\_LOCAL\_ADDRESS가 0인 노드로 데이터를 무선 전송하면 TOS\_LOCAL\_ADDRESS가 0인 노드는 수신 받은 데이터를 시리얼로 로봇의 ATmega128로 넘겨주게 된다. 이때 전송된 패킷을 PC에서 수신하여 표시한 것이 아래의 <그림 3-16>이다. <그림 3-16>의 패킷은 Framerm 컴포넌트에 의해 자동으로 RF TOS\_Msg 포맷이 Serial TOS\_Msg 포맷으로 변환된 형태이다.

```

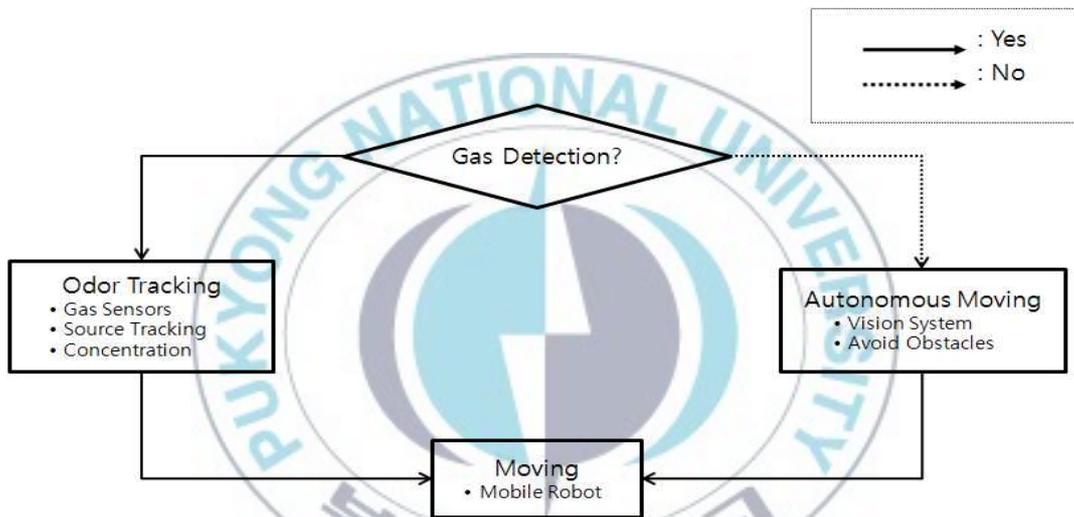
COM3(57600) CLOSED
[RECV (20)] <- 7E 42 7D 5E 00 0A 7D 5D 08 00 00 06 00 17 00 32 00 A4 E0 7E
[RECV (20)] <- 7E 42 7D 5E 00 0A 7D 5D 08 01 00 03 00 17 00 2E 00 68 A2 7E
[RECV (20)] <- 7E 42 7D 5E 00 0A 7D 5D 08 00 09 05 00 17 00 32 00 44 2E 7E
[RECV (20)] <- 7E 42 7D 5E 00 0A 7D 5D 08 01 00 02 00 17 00 2F 00 F9 D4 7E
[RECV (20)] <- 7E 42 7D 5E 00 0A 7D 5D 08 00 00 04 00 17 00 32 00 E4 6B 7E
[RECV (20)] <- 7E 42 7D 5E 00 0A 7D 5D 08 01 00 01 00 17 00 30 00 54 09 7E
[RECV (20)] <- 7E 42 7D 5E 00 0A 7D 5D 08 00 00 03 00 17 00 32 00 A5 A3 7E
[RECV (20)] <- 7E 42 7D 5E 00 0A 7D 5D 08 01 00 00 00 17 00 32 00 96 2A 7E
COM3(57600) OPEN SUCCESSFULL
  
```

<그림 3-16> 수신된 프레임 구조

수신 패킷중 프레임의 시작과 끝을 나타내는 StartByte와 EndByte의 7E는 시리얼 데이터임을 뜻하는 것이고 42는 NonACK, 7D 5E 00은 시리얼 어드레스인 7E를 StartByte와 EndByte의 7E와의 혼동을 막기 위해 XOR 연산을 거친 결과를 나타는 값이다. 그리고 0A는 MsgType, 7D 5D는 동일하게 GroupID인 7D를 뜻하는 것으로 혼동을 막기 위한 연산 과정을 거친 것이다. 그리고 08은 실제 데이터의 길이를 뜻하고 그 뒤의 8바이트는 전송 데이터를 뜻한다. 그리고 끝으로 CRC(A4 E0), EndByte (7E)가 따라 붙는다.

## 5. 주행

로봇은 크게 두 가지 목적의 주행 알고리즘으로 이동한다. 아래 <그림 3-17>은 로봇의 주행 알고리즘을 나타낸 다이어그램으로 이동 로봇의 주행은 가스 센서에 의해 가스 정보를 인식한 후 센서 값에 의해 냄새 발생지를 추적 하는 냄새 발생지 추적 주행과, 가스 정보를 인식하지 못한 경우 비전 시스템에 의한 장애물 회피 주행으로 나눌 수 있다.

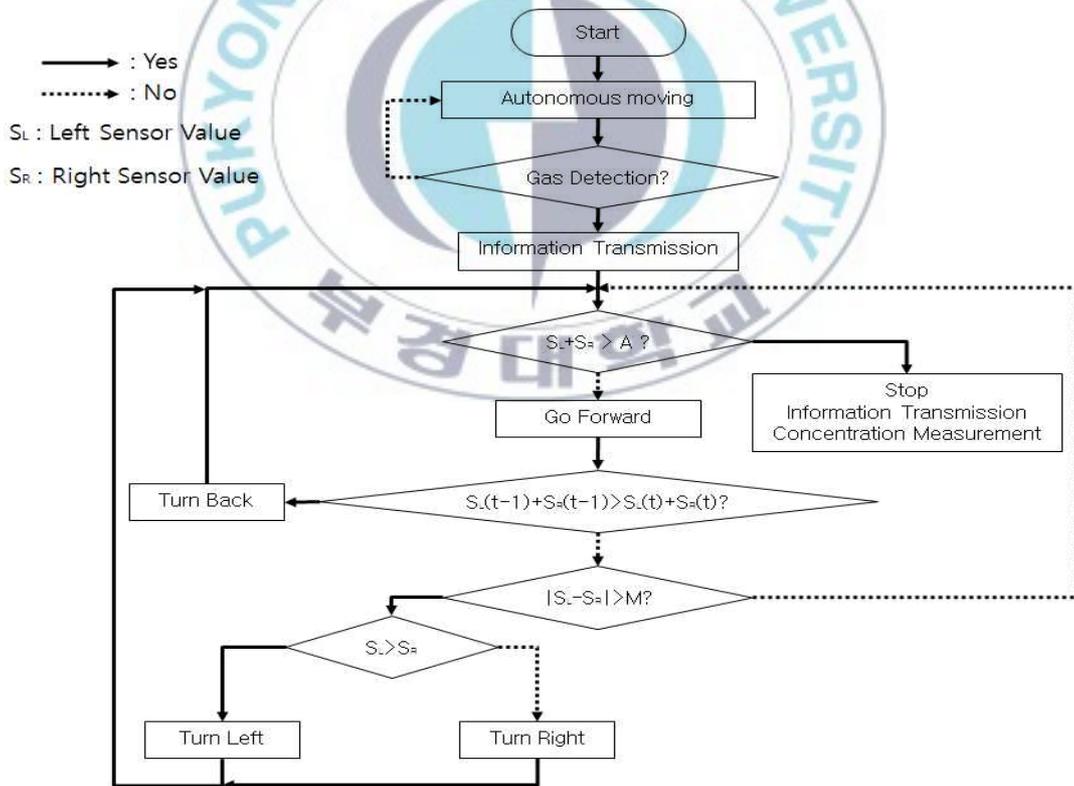


<그림 3-17> 주행 알고리즘

### 1) 냄새 발생지 추적

본 논문에서 제안한 냄새 발생지 추적 주행 알고리즘은 좌·우측에 부착된 가스센서 값을 이용하여 이루어진다. 아래 <그림 3-18>은 냄새 발생지 추적 주행 알고리즘을 나타낸 흐름도로서 로봇은 장애물 회피 주행 중 로봇의 가스 센서가 가스의 유·무를 인지하면 냄새를 구분하여 이를 센서 네트워크 내 다른 노드로 알려주고 냄새 발생지

추적 주행이 시작 된다. 좌·우측 센서 값의 합을 이용하여 냄새 발생 원과 로봇 사이의 근접 정도를 판단하며 만일 이 값이 특정 값에 못 미치면 즉, 로봇이 냄새 발생원에서 일정 거리 이상 떨어져 있다고 판단하면 이동이 시작된다. 이후 좌·우측 센서 값을 비교하여 회전 및 전진 이동을 결정하고 발생지를 지나쳤을 경우 즉, 센서 값이 순차적으로 감소하면 로봇은 180° 방향 전환에 의해 다시 냄새 발생원을 향하여 이동한다. 그리고 냄새 발생지 근처에 도달하여 센서 값의 합이 특정 값 이상이 되면 추적을 완료하고 다시 한 번 냄새 분류 정보를 다른 센서 노드로 전송하고 농도 검출을 실시한다. 농도 검출 과정이 끝나면 농도에 대한 정보와 해당 가스의 위험여부를 판단하여 경고 메시지를 다른 노드로 전송하여 동작을 마친다.



<그림 3-18> 냄새 발생지 추적 주행 알고리즘

## 2) 장애물 회피

장애물 회피 주행은 웹캠에 의한 정보를 통해 이루어진다. 앞서 서술한 영상처리 과정을 통하여 이동 로봇은 카메라로부터 비교적 정확한 윤곽선 영상을 얻으며 이를 이용해 장애물 회피 주행을 한다.



<그림 3-19> 장애물 회피 주행 과정

영상처리를 통해 얻어진 윤곽선 영상을 이용하여 로봇은 최 하단 윤곽선을 가장 근접한 장애물로 선정하여 장애물 근처로 이동한다. 이 장애물과의 거리가 가까워지면 즉, 최 하단 윤곽선의 픽셀이 영상 내 특정  $y$ 좌표 값 이하가 되면 카메라는 로봇에 고정되어 있기 때문에 로봇은 장애물과의 거리를 인식하여 근접하다는 것을 알 수 있다. 근접 장애물을 인식하면 해당 윤곽선의 좌·우측  $x$ 좌표를 얻어 로봇이 필요한 방향으로 장애물을 회피 할 수 있도록 한다. 회피 과정이 끝나면 새로운 장애물에 대하여 위의 과정을 반복한다. 본 논문의 이동 로봇은 가스 정보 인식에 중점을 두었기 때문에 가스 데이터를 얻기 전까지는 단순 장애물 회피 능력과 카메라로부터 얻은 영상을 전송하는 기능만이 요구되므로 영상처리 과정은 간략화 하였다.

## IV. 실험결과 및 결론

### 1. 실험결과

실험에 사용한 이동로봇은 넷북이 탑재 가능한 280mm×200mm×300mm 크기의 프레임을 제작 및 사용 하였다. 시스템은 넷북 ASUS Eee 1000HE에서 Matlab 프로그램을 통해 제안된 알고리즘이 구현 되었으며 로봇의 이동을 위하여 2개의 SST42D2120 스텝모터를 사용 하였고 모터 제어 및 가스 센서값 획득을 위하여 ATmega128 프로세서가 사용되었다. 또한 장애물 회피를 위한 영상 획득에 Samsung Pleomax 3800 웹캠이 사용 되었으며 무선 센서 네트워크 구성에 ZigBee 모듈인 한백전자 ZigbeX가 사용 되었다. 그리고 가스 수집 및 센서 값 추출이 용이 하도록 80mm×80mm 팬과 투명 챔버 2개를 좌·우에 설치하였다.

로봇은 크게 학습 모드와 주행 모드로 나뉘어져 동작하게 되는데 아래 <그림 4-1>은 로봇의 동작 모드별 프로그램 인터페이스를 나타낸다.

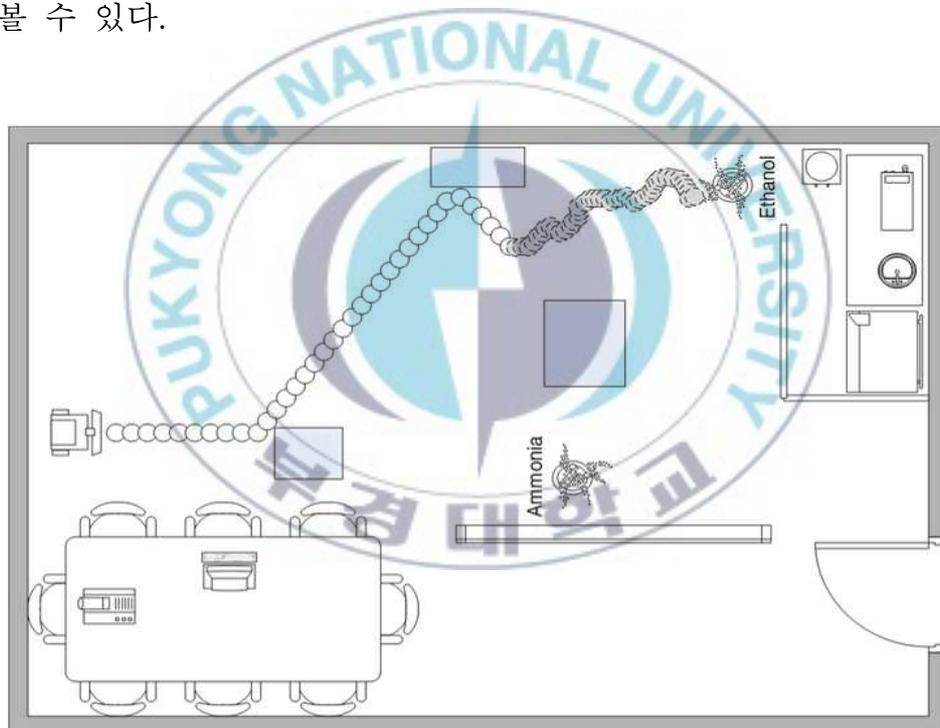


<그림 4-1> 프로그램 인터페이스  
(a) 학습 프로그램      (b) 주행 프로그램

로봇은 이동이 시작되기 전 오프라인 상태에서 <그림 4-1> (a)의 학습 프로그램에 의해 실험에 사용된 두 종류의 가스 암모니아( $\text{NH}_3$ ), 에탄올( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ) 및 이들의 혼합기에 대하여 신경망 역전파 알고리즘에 의해 이들을 구분하기 위한 학습을 실시한다. 가스 센서로부터 얻은 데이터는 ATmega128프로세서와 RS-232통신을 통해 각 센서별 900개의 센서 값을 넷북으로 전달하였다. 그리고 학습 가스 설정 및 신경망 알고리즘을 위한 초기 값을 설정하고 학습을 실시한다. 실험에서는 최종적으로 7개의 은닉층으로 구성된 신경망 알고리즘을 학습률 0.1로 100회 학습을 실시하여 냄새 패턴인식에 대한 에러율을 원하는 값 이하로 얻고 학습을 완료 하였다. 그리고 이때 얻은 가중치를 저장하여 이후 주행 프로그램의 초기화 과정에 사용한다. 학습이 완료된 로봇은 임의의 환경에서 <그림 4-1> (b)의 주행 프로그램에 의해 동작한다. 주행 프로그램은 RS-232통신을 통해 가스 센서로부터 데이터를 수신으로 받으며 가스의 종류를 구분 하거나 비전 시스템에 의해 장애물 회피 주행을 한다. 로봇은 주행 시작 전 학습을 통해 얻은 가중치를 불러오고 비전 시스템을 구동 시킨다. 그리고 비전시스템에 의해 장애물을 회피하며 임의의 환경에서 자율이동하고 가스 센서의 값이 급격히 변하기 시작하면 가스 센서로부터 얻은 데이터를 이용하여 가스의 종류를 구분한다. 이후 가스 발생지로의 이동과 농도 추정이 이루어진다.

실험 공간은 4m×6m 크기의 실험실 공간을 사용하였으며 실험을 위하여 실험실 곳곳에 장애물을 배치하였다. 실험을 위한 냄새 발생원으로 사용된 가스는 암모니아( $\text{NH}_3$ )와 에탄올( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ )로 이들을 실험실 내 임의의 장소에 위치시켜 실험 하였다. 실험 순서는 선 학습과정을 거친 로봇을 주행 프로그램을 통하여 실험실 내 임의의 장소에 위치시켰으며 최초 비전 시스템을 이용한 장애물 회피 주행을 실시하다가 가스센서로부터 가스 데이터를 얻으면 이 정보를 다른 노드로 전송하고

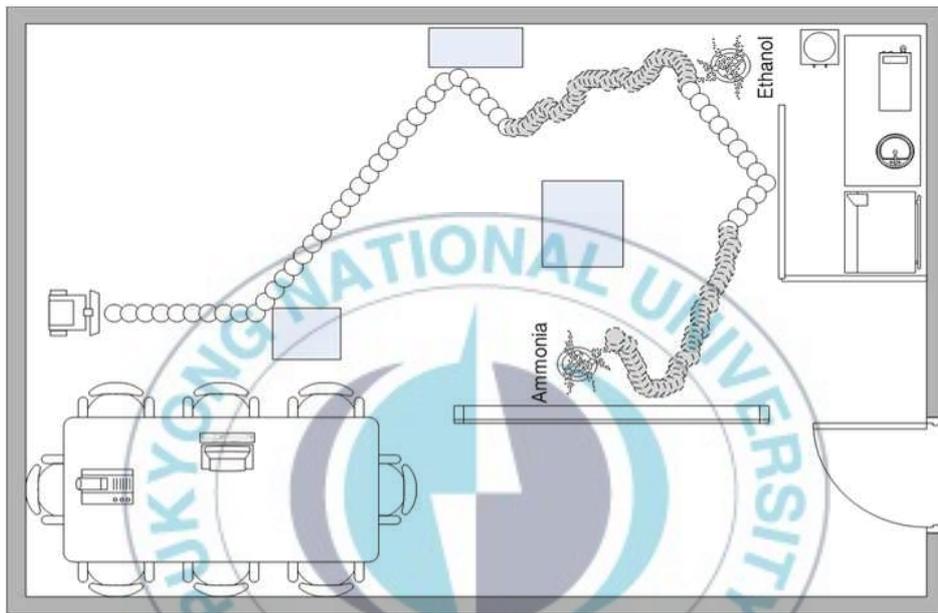
센서 값을 이용한 발생지 추적 동작을 수행하게 된다. <그림 4-2>와 <그림 4-3>은 이러한 방법으로 실시한 로봇의 이동 실험 결과이다. <그림 4-2>는 로봇이 실험 장소에서 에탄올( $C_2H_5OH$ )의 발생지를 추적하는 과정을 나타낸 그림이며 그림에서 흰색 실선 원으로 표시된 이동 경로는 비전 시스템에 의한 장애물 회피 주행 알고리즘에 의해 로봇이 동작한 구간이고, 회색 점선 원으로 표시된 이동 경로는 가스 센서값에 의한 냄새 발생지 추적 주행 알고리즘에 의해 동작한 구간을 나타낸다. 그림에서 보는 것처럼 냄새 발생지 추적 주행은 센서값의 변화가 정밀하지 못한 관계로 속도가 훨씬 느리고 불필요한 움직임이 다소 발생함을 볼 수 있다.



<그림 4-2> 에탄올 발생지 추적 결과

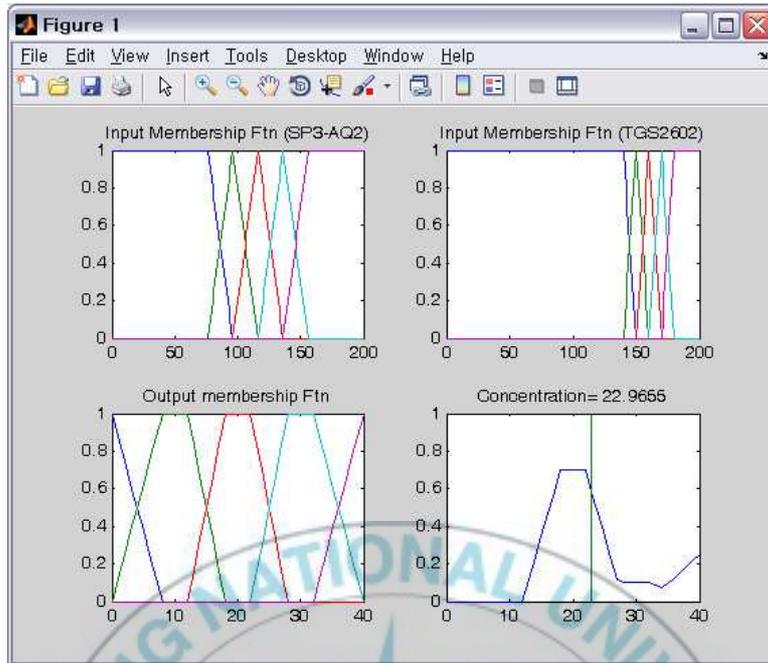
그리고 <그림 4-3>은 로봇이 암모니아 발생지를 추적하는 과정을 나타낸 그림으로 에탄올( $C_2H_5OH$ ) 추적의 경우와 동일하게 흰색 실선 원으로 표시된 이동 경로는 비전 시스템에 의한 장애물 회피 주행 알고리

즘에 의해 로봇이 동작한 구간이고, 회색 점선 원으로 표시된 이동 경로는 가스 센서값에 의해 냄새 발생지 추적 주행 알고리즘에 의해 동작한 구간을 나타낸다. 이 경우도 앞선 경우와 마찬가지로 냄새 발생지 추적 주행 과정에서 동일한 이유에 의해 로봇의 이동이 매우 느리고 이동 경로가 매끄럽지 못한 것을 볼 수 있다.



<그림 4-3> 암모니아 발생지 추적 결과

로봇은 장애물 회피 주행 및 냄새 발생지 추적 주행 과정을 통하여 가스 발생지 근처로 이동을 완료하고 나면 가스 센서의 내부적인 한계로 인하여 명확한 농도 추정을 위하여 센서값 안정화를 위해 냄새 발생지 부근에서 5초간 대기한다. 그리고 안정화된 센서로부터 얻은 데이터를 이용하여 발생지의 가스 농도 추정을 실시한다. <그림 4-4>는 퍼지 추론에 의한 농도추정 결과를 표시한 것으로 두 가지 실험 중 에탄올 추적시의 농도추정 결과를 나타낸다.



<그림 4-4> 에탄올 농도추정 결과

그림의 상단 두 개의 그래프는 각각의 가스 센서에 의한 입력 멤버십 함수를 나타낸 그래프 이고 하단 좌측 그래프는 출력에 대한 멤버십 함수를 나타낸다. 그리고 하단 우측의 그래프는 퍼지 추론에 의한 에탄올의 농도추론 결과를 나타낸다.

또한 챔버와 팬의 사용에 따른 성능 향상을 확인하기 위해 로봇과 가스 발생지 사이의 거리에 따른 인식 시간을 비교하는 실험도 실시하였다. 아래에 나타낸 <표 4-1>은 챔버와 팬의 사용에 따른 센서의 가스 인식성능을 비교한 것으로 챔버의 사용으로 기존의 센서에 의한 가스 인식의 경우보다 먼 거리까지 빠른 시간 내에 가스 인식이 가능함을 알 수 있다.

<표 4-1> 챔버 사용에 따른 가스센서 반응시간

× : 300sec. 이내 반응 하지 않음

챔버 / 팬 사용 여부	거리에 따른 가스센서 반응시간 (sec.)					
	100mm	300mm	500mm	1000mm	3000mm	5000mm
미사용	1sec. 미만	3	10	18	×	×
사용	1sec. 미만	2	3	4	9	13

## 2. 결론

지금까지 임의의 실내 환경에서 장애물을 회피 하며 자율이동 하는 로봇이 반도체식 가스 센서를 이용하여 실내 환경에서 발생 가능한 가스를 인식하여 그 종류를 분류 하고, 가스 발생지로의 추적, 그리고 발생 가스의 농도를 추론하여 이 정보를 전송하는 이동로봇을 구현하였다. 또한 이 로봇은 가스 추적 및 농도 추론 과정에서 얻어진 정보를 센서 네트워크 내 다른 노드로 전송하여 위험여부를 알릴 수 있는 기능 또한 가진다. 실제 실험을 통해 공기 중의 화학 물질로 알려진 가스에 의해 인지된 센싱 데이터와 같은 불확실한 값을 신경망 알고리즘을 통하여 유연한 가스 인식이 가능하였으며, 또한 퍼지 알고리즘을 통하여 정확하지 않은 발생 가스의 농도를 근접하게 추정 할 수 있었다. 그리고 이러한 인공 후각 기능은 비전 시스템을 이용한 이동 로봇에 탑재 되어 실내 공간의 장애물을 회피하며 안전하게 원하는 목적지로 이동하며 임무 수행에 문제가 없음을 확인 하였다. 실제로 이러한 로봇은 사람의 접근이 제한된 환경에서 각종 유해 가스의 인식과 위험 경보 전송 등으로 인간의 생활에 많은 도움을 줄 수 있을 것으로 기대 된다. 더 나아가 본 논문에서 보인 이동로봇이 넓은 환경에서 여러 개의 로봇으

로 멀티 구동 될 경우 활용 범위는 훨씬 넓어 질 것으로 예상된다.

하지만 제안한 로봇 시스템의 완성 단계에서 비전 시스템은 단순 장애물의 회피 기능밖에 가지지 못하여 복잡한 환경에 적용되기 위해서는 보다 진보된 영상처리 알고리즘이 필요할 것으로 예상된다. 그리고 냄새의 인식기능은 가까운 거리에서는 비교적 완벽하게 구현되었지만 반도체식 가스 센서의 내부적 한계로 인하여 먼 거리의 냄새를 인식하는데는 다소 어려움이 따랐다. 그리고 사용한 가스 2종류의 가스센서로는 인식 가능한 가스의 종류에도 한계가 있음을 알 수 있었다. 앞으로 이를 극복하기 위하여 보다 발전된 알고리즘으로 냄새 구분이 좀 더 확실하며 챔버와 팬 등의 하드웨어적 보완 또한 병행하여 인식률의 증대에 대한 노력이 필요할 것으로 보인다. 이처럼 비전 시스템과 냄새 발생지 탐색 알고리즘의 개선된 통합 운용으로 로봇의 탐색 성능을 보다 증가 시켜 보다 효율적인 냄새 발생지 추적 및 장애물 회피가 가능하도록 하는 것이 향후 남겨진 과제로 볼 수 있다.

## V. 참고문헌

- [1] R. Andrew Russell, "Locating Underground Chemical Sources by Tracking Chemical Gradients in 3 Dimensions", Proceedings of 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Sendai, Japan, 28 Oct, 2004.
- [2] Persaud, K. Dodd, G. Nature, 299, 352 - 355, 1982.
- [3] 길주형, 『전자코와 후각센서』, 월간 자동제어계측 기획특집 기사, 2004.
- [4] Emmanuel A. Gonzalez, Floyd Matthew G. Mascenon, Alexis J. Magpantay, and Kervin Clyde C. Go, "Design of an Autonomous Mobile Olfactory Robot for Chemical Source Localization", IEEE, 2004.
- [5] Lino Marques, Urbano Nunes, and A.T. de Almeida., "Odour searching with autonomous mobile robots: Anevolutionary-based approach", In IEEE Inf. Conj on Advanced Robotics, 2003.
- [6] 이정현, 조정환, 전기준, "반도체식 가스 센서와 퍼지 ART를 이용한 혼합가스의 농도 추정", 전자공학회 논문지, Vol. 43, pp.196-204, 2006.
- [7] A. Loutfi, S. Coradeschi, L. Karlsson, M. Broxvall, "Putting Olfaction

into Action : Using an Electronic Nose on a Multi-Sensing Mobile Robot", Proceedings of 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Sendai, Japan, 28 Oct, 2004.

[8] W. Jatmiko, T. Fukuda, F. Arai, and B. Kusumoputro, "Artificial Odor Discrimination System Using Multiple Quartz-Resonator Sensor and Neural Network for Recognizing Fragrance Mixtures", 2004 and The Fourth Symposium Micro-Nanomechtronics for Information-Based Society, 31 Oct, No. 3, pp. 169-174, 2004.

[9] Wisnu Jatmiko and K. Sekiyama and T. Fukuda, A PSO-Based Mobile Robot for Odor Source Localization in Dynamic Advection Diffusion with Obstacles Environment : Theory Simulation and Measurement, IEEE Computational Intelligence Magazine, May, 2007.

[10] H. Ishida, H. Tanaka, H. Taniguchi, and T. Moriizumi, "Mobile Robot Navigation Using Vision and Olfaction to Search for a Gas/Odor Source", Proceedings of 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Sendai, Japan, 28 Oct, 2004.

[11] [www.figarosystems.com](http://www.figarosystems.com)

[12] [www.fisinc.com](http://www.fisinc.com)

[13] [www.hanback.com](http://www.hanback.com)

- [14] R. Andrew Russell, "Laying and Sensing Odor Markings as a Strategy for Assisting Mobile Robot Navigation Task", IEEE Robotics & Automation Magazine 3, Sep, 1995.
- [15] 강훈, 심귀보, 『지능정보시스템』, 브레인코리아, 2003.
- [16] 도용태, 김일곤, 김종완, 박창현, 『인공지능 개념 및 응용』, 사이텍 미디어, 2001.
- [17] 임종수, 『Matlab GUI Programming』, 아진, 2005.
- [18] Palm, William J, 『introduction to Matlab 7 for Engineers』, McGraw-Hill, 2008.
- [19] 이상배, 『퍼지-뉴로제어 시스템』, 교학사, 1999.
- [20] 이현엽, 문경일, 『Matlab를 이용한 퍼지-뉴로』, 아진, 1999.
- [21] Alasdair McAndrew, 『Interoduction to Digital Image Processing with Matlab』, Course Technology, 2004.
- [22] T. von Eichen, D. Culler, S. C. Goldstein, K. E. Schauer, Active Messages: a Mechanism for Integrated Communication and Computation, The 19th Annual International Symposium on Computer Architecture, pp. 256-266, 1992.

## VI. 감사의 글

마지막 논문이 나오기 까지 도움을 주신 많은 분들께 드리는 감사함은 말로 표현할 수 없을 만큼 크지만 막상 그것을 정리하여 글로 옮기려다 보니 표현됨이 충분하지 못해 답답한 마음이 많이 듭니다. 말로써 또는 글로써 충분히 표현하지 못하고 남자라는 이름으로 혹은 부끄러움에 마음속 깊숙이 담아 두었던 '감사'이지만 곁에서 오래도록 지켜봐 주신 모든 지인들의 마음에는 충분히 스며들었으리라 감히 생각해 봅니다.

논문을 완성 시키는데 많은 도움을 주신 교수님들 : 학생들이 편하게 다가갈 수 있도록 항상 학생들 입장을 생각해 주시며 때로는 스승으로써 가르침에 아낌이 없으시고 때로는 아버지처럼 많은 인생의 조언 또한 아끼지 않으셨던 이원창 교수님과 지금은 한결음 물러나 계시지만 항상 연구실의 버팀목으로 많은 의지가 되었던 강근택 교수님, 그리고 논문의 심사를 도와주신 가족 같은 CAL의 주문갑 교수님께 진심으로 감사의 말씀 드립니다.

지금까지 항상 멋진 모습으로 늘 주변에서 도움을 아끼지 않았던 가족들 : 배움에 끝이 없음을 숭선수범하여 보여 주시며 지금까지 그리고 앞으로로도 계속해서 공부할 수 있는 밑거름을 주신 아버지와 항상 최선을 다하고 욕심을 부리기보다 조금 나아졌음에 감사할 줄 앎을 가르쳐 주신 어머니, 때로는 무서운 인생의 선배로 꾸짖으며 때로는 친구처럼 옆에서 큰 힘이 되어 주었던 형에게도 감사드립니다.

대학생활 중 가장 많은 시간을 함께한 로봇틱스 연구실 선·후배님들 : 아무것도 모르고 시작했던 첫 연구실 생활에서 가장 높은 선배로 로봇틱스인 으로서의 자부심과 가족 같은 편안함을 알려준 동민, 정준 선배, 저의 기억 속에 영원히 '왕고'로 남을 카리스마 준영선배, 특유의 친근함으

로 먼저 다가와준 현종선배, 가장 많이 싸우면서도 가장 많은 대화를, 가장 깊은 고민을 털어 놓을 수 있었던 기주선배, 항상 그 자신감을 배우고 싶었으며 제일 많이 혼나면서도 가장 오랜 시간 함께 하며 힘든 시기에 가장 의지가 되었던 착실한 상혁선배도 감사하다는 말씀 드리고 싶습니다. 또한 곁에서 항상 많은 힘이 되어 주는 강래와 태형이 : 항상 유쾌한 웃음을 주지만 덩치에 어울리지 않게 세심하고 꼼꼼한 그래서 더욱 정이 느껴졌던 강래, 야밤 술자리서 많은 고민 나누며 싸우기도 많이 했지만 항상 자기 발전을 위해 최선을 다하고 현실적이고 바른말 해 주던 태형이, 뒤늦게 랩에 들어와 선배들 뒤치다꺼리에 후배들 챙기면서도 초반 걱정과 다르게 잘 적응해준 성준이, 이제 교수님과도 친해지길 바란다. 그리고 지금은 없지만 빼 놓을 수 없는 후배 국진이, 다른 어딜 가셔도 인정받는 멋진 후배이길 바라며, 그리 길지 않은 시간 함께 했지만 민성이, 동준이, 인욱이도 앞으로 지금처럼 열심히 생활하며 항상 로보틱스 인으로서 자부심을 가지고 인정받는 멋진 후배들이 되길 바란다.

지금은 함께하고 있지 않지만 대학생활 내내 항상 함께 하며 서로 힘이 되어주었고 많은 것을 나누었던 내 동기 대훈이, 광현이 : 지금은 서로 각자의 길을 걷고 있지만 함께 생활했던 시간들이 지금의 내가 있기에 큰 힘이 되었던 것 같다. 그리고 대학원 생활의 동반자, 연구실 생활과 대학원생활 이라는 비슷한 길을 함께 걸으면서 많은 생각들을 공유했던 찬효와 대학원동기 상우, 상욱이, 왕근이형, 영권이형, 그리고 2층방 태진이형과 순태도 고맙다는 말을 전하고 싶습니다.

10년째 공부한답시고 학생 신분 유지하는 친구 항상 자랑스럽게 생각해 주며 용기주고 믿어준 고향 친구들 현동이, 종석이, 재성이, 경호, 영민이, 상희, 효형이 에게도 항상 힘이 되어준 것 고맙게 생각한다고 말하고 싶습니다. 또한 첫 대학생활을 함께 하며 서로 많은 의지가 되었던 우리 잊지 못할 인생의 3/4친구 성아35기 : 재우, 윤순이, 인경이, 회정이,

미애, 현주에게도 고맙다는 말 전하며 길지 않은 시간이었지만 많은 고민 들어주고 격려 해 준 맞춤형 카운슬러 윤경이, 가영이도 항상 고맙게 생각합니다.

끝으로 작은 일 하나도 결단 내리지 못하고 세상 모든 고민 다 짊어진 사람인양 살면서 지금 쓰고 있는 감사의 글이 너무 길진 않은지, 빠진 사람은 없는지, 혹은 누군가 서운해 하진 않을지 과도한 고민 스스로 짊어지고 알 수 없는 미래 먼발치에 깃발하나 꽂아놓고 저기가 내 목적지니 흔들리지 말라 하고, 아직은 만족하기에 이르다며 더한 힘듦을 향해 나아갈 준비 해주는 나에게도 마지막으로 고맙다는 말 전합니다.

