

철도차량용 지능형 화재감지기 개발에 관한 연구(I)

이종민, 유원열, 박동선, 이덕희*, 정우성*

(주)이플러스티, (주)이플러스티, (주)이플러스티, *철도연, *철도연

Development of Intelligent Fire Detectors for Railroad Carriage(I)

Lee Jong Min, Yoo Won Yuel, Park Dong Sun, Lee Duk Hee*, Jung Woo Sung*

EplusT, EplusT, EplusT, *KRRI, *KRRI

1. 서 론

대구 지하철 참사 이후 국내 지하철 객차 내부에는 화재 감지를 위해 건물용 화재 감지기를 설치하고 있다. 이러한 현실은, 철도 운송 수단에 적합한 화재 감지기의 성능 요구조건, 성능시험 관련 법규 등의 제반 여건이 심층 연구를 통하여 개선되지 않았기 때문이다. 현재 지하철 객차 내부에서 사용되고 있는 건물용 연기 및 열 감지기는 여러 가지 내부 및 외부 환경적 요인에 의해, 화재 발생 시 화재 경보를 제대로 알려주지 못하는 단점이 있다.

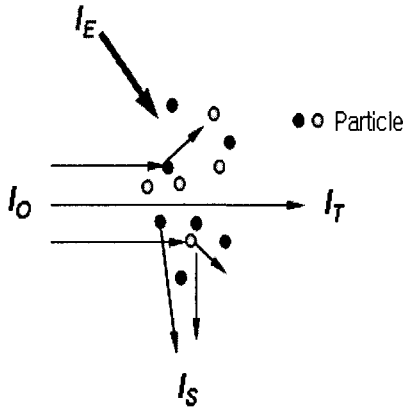
본 연구에서는, 지하철 및 철도 차량에 적합한 화재감지기로써, 지능형 고감도 연감지기, 및 다중 불꽃감지기 등의 원천 기술 개발에 관한 연구를 수행하였다. 또한, 화재의 조기 인지 및 진압이 가능한 조기 경보레벨에 대한 기초 연구를 수행하였다.

연구 결과물 중의 하나인, 지능형 고감도 연감지기 시작품을 모의 객차에 설치하고 자동소화 실험을 수행하였으며 좋은 결과를 얻었다. 불꽃감지기 개발을 위해, 본 연구에서 제작한 증적외선 검출소자와 광학계를 이용하여 다양한 연소재의 불꽃 감지 실험을 수행하였으며 좋은 결과를 얻었다.

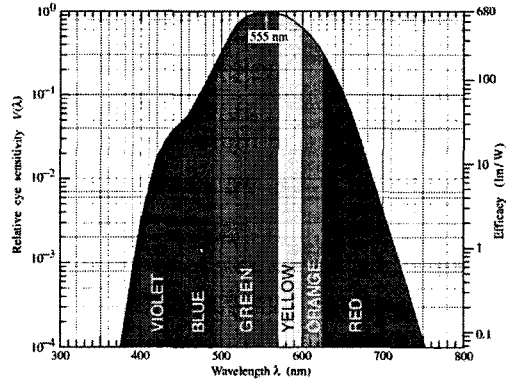
2. 이 론

<그림 1>에는 연기 입자에 의하여 발생할 수 있는 여러 가지 광학적 현상이 도식되어 있다. 연감지기 내부에서, 광원으로부터 방사된 빛의 광량(I_0)은, 입자에 의해 산란되거나(I_s), 흡수되며, 투과된 광량(I_T)만이 광센서에 도달하게 된다.

이 때 감지기 내부에는 감지기의 광원으로부터 방출된 빛(I_0)만 존재하는 것이 아니라, 외부로부터 입사된 외부광(I_E)도 존재한다. 이 외부광은 연감지기의 설계 의도와는 관계없이 존재하는 것이며, 외부 환경에 따라 불규칙하게 광량이 변화하기 때문에 측정의 정밀도를 나쁘게 하는 요인이 된다. 이 외부광을 제거하거나 효과를 최소화하기 위하여 통상적인 연감지기는 측정실이 암실 구조로 되어 있다. 그러나 외부광의 효과를 제거하기 위하여 완벽한 암실에 가깝게 설계할수록 외부로부터의 유동과 연기 입자의 입출입이 제한되는 결과를 낳고, 화재 시 발생한 연기 입자에 대한 응답시간이나 감도가 나빠진다.



<그림 1> 입자에 의한 광학적 현상



<그림 2> 가시광선 영역의 파장별 색상

상업화된 연기농도 측정기(Smoke meter)의 측정원리는 광투과법(Light extinction method)이며, 이와 관련된 이론적인 식은 아래와 같다[1]. <그림 2>의 가시광선 영역 중에서, 550~570nm 사이의 연초록광선을 광원(Light source)으로 사용하거나, 근적외선(860nm)를 사용한다. 광센서로는 포토다이오드(Photodiode)를 사용한다.

$$T = (I_T / I_0) = e^{-kL} \tag{1}$$

$$N = 100 \cdot (1 - T) \tag{2}$$

$$= 100 \cdot (1 - e^{-kL}) \tag{3}$$

$$N_s = 100 \cdot (1 - ((1 - (N_m/100))(L_s/L_m))) \tag{4}$$

$$k = -(1/L) \cdot \ln(1 - N/100) \tag{5}$$

T : Transmittance of light in the particle plume

e : Base of natural logarithms

k : Smoke density(m⁻¹)

L : Effective optical path length(m)

L_s : Standard effective optical path length(m)

L_m : Real effective optical path length(m)

N : Light obscuration(%)

N_s : Standard obscuration of standard EOPL

N_m : Real obscuration of real EOPL

ln : Natural log

위의 식에서, 유효광로길이(EOPL: Effective Optical Path Length)란 광원으로부터 방사된 빛이 광센서에 도달하기 전의 이동경로 중에서, 실제로 입자가 포함된 유동과 만난 경로의 길이를 의미한다. 연기농도 측정기의 표준 유효광로길이(Standard EOPL)는 1미터이다. 즉 빛이 1미터 진행하였을 때 감쇄되는 광량의 백분율(obs%/m)이 기본 단위이다. 연기농도 측정기에서 실광로길이(Real Optical Path Length)는 제조사의 설

계 의도에 따라 표준 유효광로길기와 동일하지 않을 수 있다. 제조사는 적용 용도와 사용 환경을 반영하여 실광로길기를 짧게 설계하고, 표준 유효광로길기에 대한 값으로 환산하는 경우도 있다. 이런 경우 연기농도 측정기의 광학부 크기를 줄일 수 있는 장점이 있다.

상기의 식으로 측정된 연기 농도는, 측정 당시의 주위 환경이 표준상태가 아닐 경우, 아래의 식으로 표준 상태로 보정할 수 있다.

$$k_{cor} = k_{meas} (P_{atm}/P_{meas}) \quad (6)$$

$$k_{cor} = k_{meas} (T_{meas}/T_s) \quad (7)$$

k_{cor} : Measured smoke density corrected for pressure and temperature(m^{-1})

k_{meas} : Measured smoke density(m^{-1})

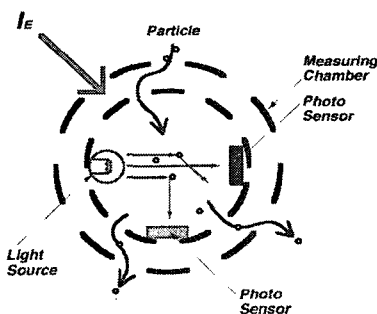
P_{atm} : Atmosphere pressure(kPa)

P_{meas} : Measured static pressure in the measuring zone(kPa)

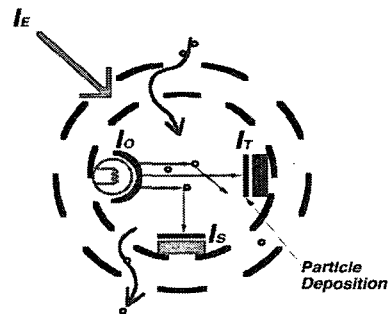
T_{meas} : Ambient temperature in the measuring zone(K)

T_s : Standard temperature in the measuring zone(K)

이전에는 광원으로서 백열등을 사용하였으나 현재는 모든 연기농도 측정기에서 550~570nm 사이의 연초록 광선(Lime green)을 사용하거나, 860nm 부근의 근적외선 광선을 사용한다. 백열등보다는 좁은 파장 범위를 갖는 발광다이오드(LED : Light Emitting Diode)를 사용하는 것이 훨씬 안정적인 일관성 있는 신호를 얻을 수 있기 때문이다.



<그림 3> 연감지기의 일반적인 구조



<그림 4> 연감지기의 오염에 의한 드리프트

건물용 연감지기는 대략적으로 <그림 3>과 같은 구조를 갖는다. 측정실(Measuring chamber) 내부에는 광원과 광센서가 위치하고 있다. 측정실의 크기가 작으므로 광산란법(Light scattering method)를 이용하며, 광센서는 그림에서와 같이 입사광과 90도를 이루는 것이 일반적이다. 그러나 90도 이 외에도 전방산란(Forward scattering) 또는 후방산란(Backward scattering) 광을 이용하는 경우도 있다. 그림에서는 이해를 돕기 위해서 입사광과 90도 위치를 갖는 광센서 이 외에도, 광원의 맞은편에 위치하여 투과광(Transmitting light)을 받아들이는 광센서도 표시되어 있다.

측정실은 외부광을 제거하기 위하여 암실 구조로 되어 있으나, 외부광의 차단과 함께

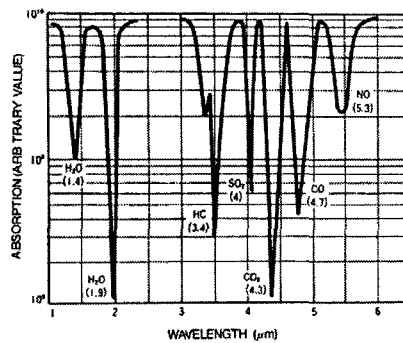
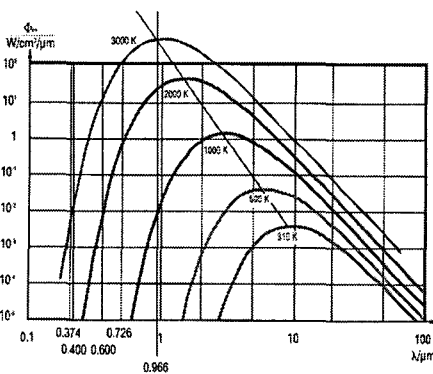
외부로부터의 입자 유동도 제한되기 때문에 완전한 암실구조란 존재하지 않는다.

측정실 내부에 존재하는 입자들, 즉 화재 발생 시 발생한 입자가 측정실로 유입되면 광원에서 방사된 빛이 입자와 충돌하여 산란광을 발생시킨다. 이 산란광의 광량(Intensity)은 입자의 크기와 수농도(Number density)에 비례하여 발생한다. 즉, 연기가 많이 유입될수록 90도 위치를 갖는 연감지기 광센서의 출력신호는 증가하게 된다.

반면에, 광원의 맞은편에 위치한 광센서는 입자의 농도가 높아질수록, 광원으로부터 방사되어 광센서에 도달하는 광량이 감소하게 된다. 즉, 연기가 많이 발생할수록 연기농도 측정기의 광센서 출력은 감소하게 된다. 즉, 광산란법에 의한 연감지기와, 광투과법에 의한 연기농도 측정기는, 연기의 농도와 출력신호 사이의 관계가 상반된다.

광산란법을 이용한 감지기는 현장에서 장기간 사용할 경우, <그림 4>에서와 같이 광원, 광센서 표면에 먼지 또는 입자들이 점진적으로 흡착(Deposition)된다. 광원에 흡착된 입자들은 광원으로부터 방사되는 빛을 차단하여 입사광(I_0)의 광량을 감소시키게 된다. 또한 광센서 표면에 흡착된 입자들은 광센서로 들어가는 산란광량(I_s)을 감소시키게 된다. 기본적으로 두 번에 걸친 광량의 감소는, 동일한 농도의 연기 입자가 존재할 경우에도 훨씬 낮은 농도로 판정하는 신호를 출력시키게 된다. 이러한 이유 때문에 빌딩용 연감지기는 사용 시간이 길어짐에 따라, 화재 발생 시 화재 경보를 울리지 못할 가능성이 높은 것이다. 특히 먼지가 많은 환경에서 사용할 경우에는 거의 무용지물이다 다름없다. 광투과법은 이와 반대로 먼지가 많은 환경에서 사용할 경우, 먼지가 광원과 광센서 표면에 흡착되고, 이를 연기농도로 인식하여 일정 순간이 되면 정상적인 환경에서 비화재보를 발생시키게 되는 단점을 안고 있다.

본 연구에서는 광투과법을 이용한 지능형 연감지기 개발을 수행하였다. 지능형이란, 광투과법이 갖고 있는 단점을 개선하여 장기간의 사용에도 크게 변하지 않는 높은 정밀도의 연기 감지 성능을 제공하는 것을 의미한다. 여기에 추가로 외부광의 영향을 받지 않도록 광학적 및 전자적으로 외부광을 제거하고 암실 구조에 의존하지 않는 성능도 포함된다.



<그림 5> 흑체복사의 온도에 따른 방사 파장 <그림 6> 기체 분자별 중적외선 흡수파장

<그림 6>에는 흑체복사(Blackbody radiation)에 의한 방사 파장이 제시되어 있다. 일반적으로 모든 물질의 연소 시 발생하는 화염으로부터의 방사파장은 흑체복사와는 차이가 있으나, 화염 감지의 원리에 대하여 설명하기 위해서 제시하였다. 그림에서, 물질의 온도가 높아지면 발생하는 피크파장(Peak wave)은 적외선에서 가시광선으로 이동

함을 알 수가 있다. 이 그림에서와 같이, 어떤 물질이 연소할 때 화염에서는 단일파장의 빛만 방사하는 것이 아니라 연속적인 스펙트럼을 갖는 파장을 발생시킨다. 불꽃감지기 내부에 별도의 광원이 존재하는 것이 아니라 외부의 화염이 광원이 된다.

상업화된 불꽃 감지기의 광센서는 적외선과 자외선을 받아들이는 것이 주종을 이룬다. 가장 최근에 해외에서 상업화된 3중 불꽃 감지기는 3가지 파장의 증적외선만을 선택적으로 받아들이는 광센서를 사용하고 있다. 최근에는 국내에서도 단일파장의 증적외선만을 이용하는 불꽃감지기가 국산화되었다. 외부의 광원인 불꽃(화염)에서는 연소 물질에 따라 특정한 파장의 강도가 강하게 발생할 수도 있다. 이러한 높은 강도의 특정 파장이 발생함을 이용하여 화염의 존재 유무를 측정할 수도 있다.

<그림 6>에는 여러 가지 기체 분자가 흡수하는 적외선 영역의 흡수파장이 표시되어 있다. 최근에 상업화된 3중 불꽃감지기는 $3.9\mu\text{m}(\text{SO}_2)$, $4.3\mu\text{m}(\text{CO}_2)$, 및 $4.7\mu\text{m}(\text{CO})$ 의 파장을 이용하여 불꽃을 감지하고 있다. 연소체가 연소하며 불꽃을 발생시킬 경우, 화염으로부터 방사되는 광선이 불꽃감지기에 입사하게 된다. 그러나 화염 주변에는 연소 생성물인 다양한 기체가 발생하게 된다. 예로써, 이 때 발생한 CO_2 가스는 화염에서 방사되는 $4.3\mu\text{m}$ 의 파장을 흡수하여 외부로 방사되는 광량을 감소시킨다. 물론 이러한 효과는 순간적이며 지속적으로 심한 변동이 발생한다. 이러한 변동을 적외선 센서에서 감지하여 화염의 존재 유무를 판정하게 된다. 센서의 감도가 높은 센서일 경우에는 작은 변화도 감지할 수 있다.

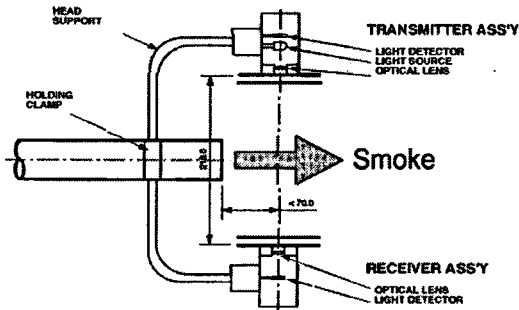
본 연구에서는 PbSe(Lead Selenide) 재질의 Photoresistor 를 증적외선 광센서로 사용하였다. 증적외선 감지센서로는 Thermopile 센서, Pyroelectric 센서, Photoresistor 센서 등이 있으며 후자의 센서들은 전자의 센서보다 10배 이상 감도가 증가한다. 또한, 더욱 감도를 증가시키기 위하여, Photoresistor 하단에 열전냉각소자(Thermo-electric cooler)와 온도센서(Thermistor)를 설치하여 -20°C 까지 냉각할 수 있도록 하였다.

3. 실험

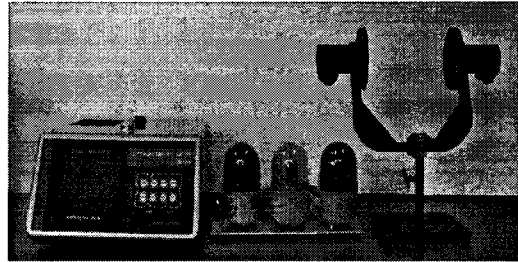
본 연구의 선행연구에서 개발한 광투과식 연기농도 측정기를 본 연구에서 사용하였다. 측정범위는 $0\sim 100\%\text{obs/m}$, 정밀도 및 해상도는 $\pm 0.1\%\text{obs/m}$, 영점 및 스펜 편차는 1주일 연속측정 시, $\pm 2\%\text{FS}$, 광원은 563nm LED, 광센서는 실리콘 포토다이오드 등을 적용하였다. 이론적인 고찰을 통하여, 연감지기의 장기간 사용에 따른 감도저하(편차발생)를 최소화하거나 방지하기 위한 로직을 개발하여 적용하였다. 이를 위해서 기존 감지기에서 사용되지 않았던 CPU를 사용하여 마이크로컨트롤러를 설계하였으며, 입력된 논리적인 프로그램에 의해 보정하도록 설계 및 제작하였다.

<그림 7>에는 연기농도 측정기의 광학구조가 도식되어 있다. <그림 8>은 본 연구에서 사용한 연기농도 측정기의 외관이 제시되어 있다. 가시적으로 쉽게 인지하도록, 연기농도에 따라 1단계($5\%\text{obs/m}$), 2단계($10\%\text{obs/m}$), 3단계($15\%\text{obs/m}$) 경보에 따라 경광등을 작동시킬 수 있도록 제작하였다.

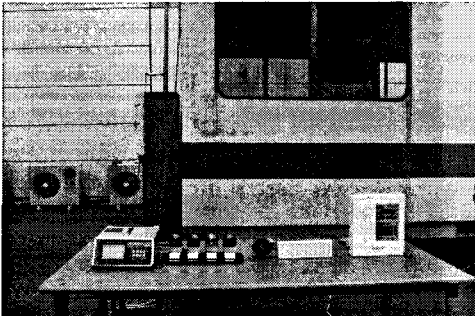
<그림 9> 및 <그림 10>에는 모의 객차 외부 및 내부에 설치된 마이크로컨트롤러와 광학부가 제시되어 있다. 모의 객차 내부에는 노즐을 설치하고 외부의 소화 약제가 공급되도록 하였다. 모의 객차 외부에서 목재에 점화하고, 점화된 연소재를 객차 내부로 옮겼다. <그림 11>은 측정된 연기농도가 지시되는 마이크로컨트롤러의 LCD 화면이다. <그림 12>는 소화약제의 방출 후 화재가 진압된 후 연기농도가 감소하고 있을 때의 지시화면이다.



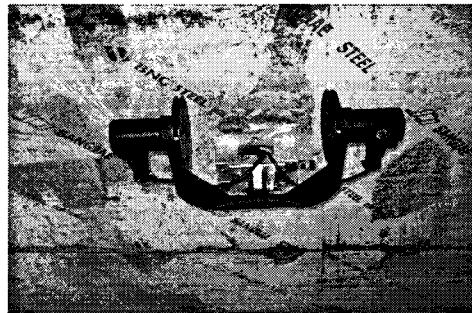
<그림 7> 연기 농도 측정기의 광학 구조



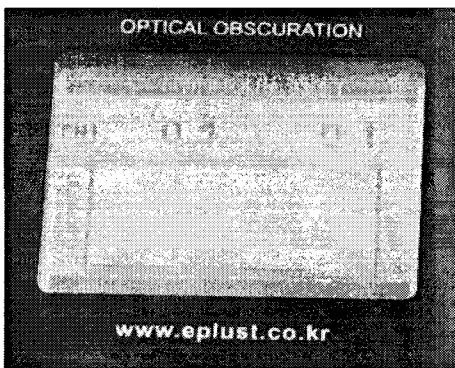
<그림 8> 연기 농도 측정기 시제품



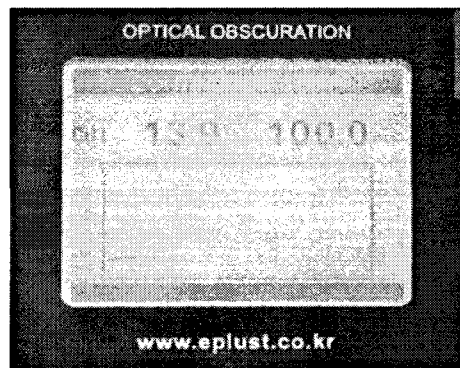
<그림 9> 연기감지기 및 화재 경보시스템 설치



<그림 10> 모의객차 내부 설치된 연기감지기 광학부



<그림 11> 모의객차 내부 화원 설치 직전 연기농도

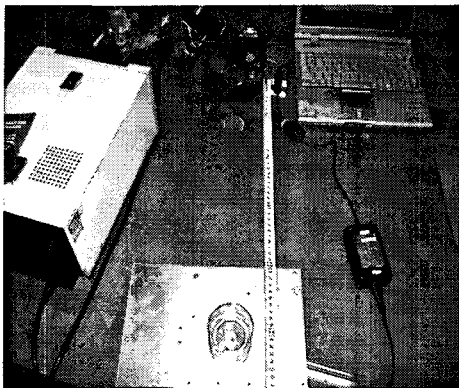


<그림 12> 모의객차 내부 완전 소화 이후의 연기농도 측정 화면

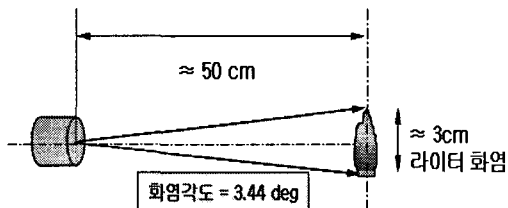
상기의 시험은 한국기계연구원에 모의 객차를 설치하고 수행하였으며, 노즐은 한국기계연구원에서 개발한 시제품을 적용하였다. 자동소화설비는 다담마이크로(주), 및 (주) 포트텍이 설치하였다.

모의 객차 내부의 연기농도가 10%obs/m 에 도달하였을 때 화재발생 경보를 울리고

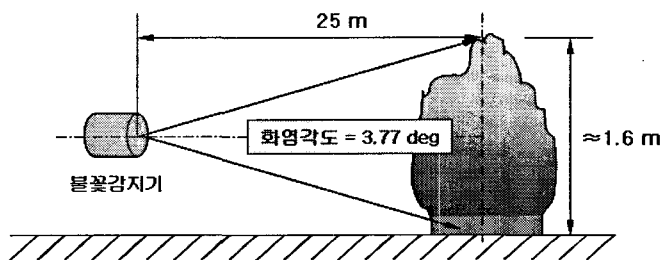
소화 약제를 자동으로 분사하여 소화하였다. 연기 농도의 검출과 소화 과정 등 전 과정이 자동화되어 진행되었다.



<그림 13> 모의 화염 감지 시험 준비



<그림 14> 화염 검출 각도



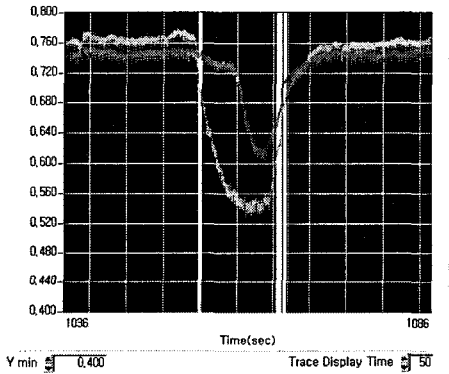
- | | |
|-----------------------------------------------|------------------------|
| 1. N-헵탄 연소 후 30초 이내에 화재신호를 발신해야 함. | ■ 화조 = 33 X 33 X 50(H) |
| 2. 작동시험에 의한 수광량의 1/4 값에서 1분 이내에 작동하지 아니하여야 함. | ■ n-Heptane = 9mm |
| | ■ 물 = 21mm |
| | ■ 점화 1분 후 시험 시작 |

<그림 15> 불꽃감지기의 형식승인 실험

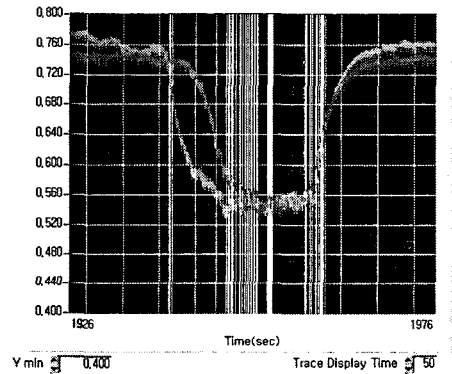
<그림 13>에는 모의 화염 검출 시험을 위한 장치 구성이 제시되어 있다. 광센서의 신호는 마이크로컨트롤러에서 검출하고 RS232 디지털 통신을 통하여 PC로 송신하였다. PC에서는 신호의 변화를 쉽게 인지하고 데이터를 저장할 수 있도록 프로그램을 작성하였다. <그림 14>는 광센서로부터 이격된 불꽃의 위치와 크기, 화염각도 등이 제시되어 있다. <그림 15>는 화재감지기의 불꽃 감지 시험을 모사한 그림이다[2]. <그림 14>와 <그림 15>에서, 가시광영역의 불꽃 크기만을 비교한다면 화염각도가 유사함을 알 수가 있다. 그러나 불꽃 감지 센서는 중적외선을 이용하므로 가시광선 영역의 화염 크기 및 화염 각도 비교는 정확한 비교는 아니다.

본 연구에서는 광센서로부터 50cm 이격된 작은 촛불과 라이터 불이 수평 각도에서 감지되었다. 이 때 감지 파장으로는 3.9 μ m과 4.3 μ m을 이용하였다. 다른 연소재로 신문광고지를 이용하였을 경우에는 3.9 μ m에서 가장 큰 신호변화를 감지할 수 있었다. A4 크기의 신문광고지를 연소시켰을 때 수평으로 5m 이격된 위치에서, 연소 초기부터 화염의 유무가 강하게 검지되었다.

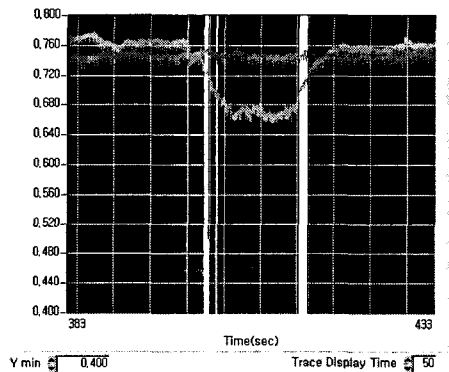
본 실험에서는, 신문용지, 광고용지, 부직포, 라이터불, 담배, 에탄올, 신나, 폴리에틸렌, 폴리스틸렌 등을 연소재로 사용하였으며 지름 5cm, 높이 3cm의 화조를 사용하였다. <그림 16>과 <그림 17>은 방화에 손쉽게 이용될 수 있는 에탄올과 신나를 연소시켰을 때 신호 변화를 검출한 것이다. 적색 신호선은 3.9 μ m 파장에서의 광량변화를, 초록색 신호선은 4.3 μ m 파장에서의 광량변화를 표시한 것이다. 모든 연소재의 화염에서 4.3 μ m의 파장에서 신호의 변화가 매우 크게 검출되었다. 광량 변동폭은 노이즈(Noise) 대비 5~20배 정도로 크게 잡혔다. 본 연구에서 개발한 마이크로컨트롤러는 노이즈의 2% 이상의 변화량을 검출할 수 있는 성능이므로, 본 실험에서의 불꽃 검출은 매우 용이하였다. <그림18>에는 라이터 불꽃에 대한 적외선 센서의 신호변화량을 표시하였다. 라이터 불꽃에 대해서는 3.9 μ m 파장에서의 광량 변화는 검출되지 않았다. 이런 특이한 현상에 대해서는 후속 연구의 수행을 통하여 분석할 예정이다.



<그림 16> 에탄올 연소에 따른 출력 신호



<그림 17> 신나 연소에 따른 출력 신호



<그림 18> 라이터 불 연소에 따른 출력 신호

4. 결과 및 토론

본 연구에서는 철도 운송 수단에 적합한, 지능형 화재감지기의 개발을 수행하였다.

연감지기 측정 원리인 광산란법을 이용하지 않고, 연기농도 측정기의 원리인 광투과법을 적용하였으며, 장기간 사용에 따른 광학계의 오염과 이에 따른 편차 보정 로직을 개발하여 적용하였다.

제작된 광투과법 연기농도 측정기를 이용하여, 모의 객차에서의 화재 소화시험을 수행하였으며, 10%obs/m의 농도에서 소화 약제를 분무하고 소화하였다.

다중 적외선 불꽃감지기의 개발을 위한 기초 실험을 위하여, 3.9 μ m 및 4.3 μ m의 두 가지 파장을 이용한 불꽃감지기의 시작품과, 마이크로컨트롤러의 시제품을 설계 및 제작하였다.

제작된 불꽃감지기 시작품을 이용하여 실험실에서 소규모의 불꽃 감지 실험을 수행하였다. 상기의 두 가지 중적외선 파장의 광량 변화를 검출하였다. 검출된 광량의 변화는 노이즈 대비 500~2000% 정도였으며 검출이 용이하였다.

향후 후속 연구를 통하여, 상업적으로 적용이 가능한 도시철도 및 고속철 등에 적합한 지능형 화재감지기의 개발을 수행할 예정이다. 이를 통하여 철도 운송 수단에 적합한 다양한 신개념의 기술을 개발할 예정이다.

5. 참고 문헌

- [1] "Smoke detectors for fire protective signaling systems", UL268, 2001.
- [2] "감지기의 형식승인 및 검정기술기준(KOFEIS 0301)", 한국소방검정공사, 2005.

감사의 글

본 연구는 2005년부터 시작된 건교부의 "철도종합안전기술개발사업" 제1차년도 연구결과임을 밝히며, 관련기관 및 관련자 여러분의 지원에 깊은 감사를 드린다.