

# 광학센싱을 이용한 굴뚝연기의 혼탁도 측정모듈의 설계 및 구현

반재훈\* · 손현근\*\*

\*고신대학교 인터넷비즈니스학과, \*\*고신대학교 보건환경학부

## Design and Implementation of Turbidity Measurement Module of Plume using Optical Sensing

ChaeHoon Ban\* · HyunGeun Son\*\*

\*Dept. of Internet Business, Kosin University

\*\*Dept. of Public Health and Environment, Kosin University

E-mail : chban@kosin.ac.kr · hkson@kosin.ac.kr

### 요 약

공장·사업장 등에서 발생하는 매연은 대기오염의 원인이 될 뿐만 아니라 인체에도 나쁜 영향을 미친다. 굴뚝에서 발생하는 굴뚝연기의 혼탁도를 측정하는 가장 일반적인 방법은 자동시정측정기를 굴뚝 안에 장착하여 관찰하는 방법이나 미국환경보호청에서 제정한 고정오염원으로부터 방출되는 혼탁한 굴뚝연기의 시각적 결정 방법인 Method 9이 있다. 그러나 이러한 방법은 구축과 유지에 많은 비용이 요구된다.

본 논문에서는 광학센싱을 이용한 굴뚝연기 혼탁도 측정 모듈 프로그램을 구축한다. 디지털 카메라를 이용하여 굴뚝연기의 사진을 획득하고 DOM(Digital Optical Method)을 사용하여 굴뚝연기의 혼탁도를 측정하는 모듈을 설계하고 구현한다. 또한 구현된 모듈을 다른 방법과 비교 분석하여 우수성을 입증한다.

Smoke generated from business establishments and factories will not only cause air pollution but also have a significant impact on the human body. Generally, the most common method for measuring the turbidity of the plume generated from the stack is a method of observing by the transmissometer mounted in the chimney or Method 9 from the US EPA(Environmental Protection Agency) which is a visual method of determining plume turbid emitted from stationary sources. However, these methods need a lot of cost to build and maintain.

In this paper, we build a plume turbidity measurement module programs using light sensing. We design and implement a module which acquires the pictures of the plume using a digital camera and measures the turbidity of it using the DOM(Digital Optical Method). In addition, we demonstrate the excellence by comparing and analyzing implemented module and other methods.

### 키워드

Plume, EPA Method 9, Transmissometer, Turbidity, Digital Optical Method

## 1. 서론

공장·사업장 등에서 발생하는 매연은 대기오염의 원인이 될 뿐만 아니라 인체에도 나쁜 영향을 미친다. 우리나라에서는 별도의 규정을 두지 않고 환경보전법의 '시행규칙 별표8 대기오염물질 배출 허용기준'에서 일괄적으로 규정하여 규제한다. 대기오염물질 배출허용기준에서 살펴보면 매연은 모든 배출시설에서 링겔만 비탁도 2도 이하로 규정하고 있다.

굴뚝에서 발생하는 굴뚝연기(plume)의 혼탁도를 측정하는 가장 일반적인 방법은 자동시정측정기(transmissometer)를 굴뚝 안에 장착하여 관찰하는 방법이다 그러나 이러한 방법은 구축에 많은 비용이 들며 정확한 측정값을 얻기 위하여 지속적인 유지관리가 필요한 것이 단점이다. 미국의 경우 미국환경보호청(EPA)에서 Method 9이라는 정책을 통하여 혼탁한 굴뚝연기를 관리하고 있다. 그러나 이 방법도 교육을 이수한 측정 전문가에 의존하므로 지속적인 교육 등 많은 비용과 측정값의 부정확함이 단점이다. 또한 한국에서는 미국

\* 본 논문은 2014학년도 고신대학교 교내 학술연구 과제의 연구결과입니다.

처럼 굴뚝연기의 측정을 위한 전문기관과 측정 전문가가 따로 있지 않는 문제가 있다.

본 논문에서는 광학센싱을 이용한 굴뚝연기 혼탁도 측정 프로그램을 구축한다. 디지털 카메라를 이용하여 굴뚝연기의 사진을 획득하고 이를 분석하는 DOM(Digital Optical Method)을 사용하여 굴뚝연기의 혼탁도를 측정하는 모듈을 설계하고 컴퓨터에서 동작하는 자바프로그램으로 구현한다. 또한 구현된 모듈을 자동시정측정기와 비교 분석하여 우수성을 입증한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 굴뚝연기의 관찰방법인 Method9과 자동시정측정기를 사용한 방법에 대하여 기술하며 3장에서는 구현된 굴뚝연기 혼탁도 측정 모듈 프로그램에 대하여 설명한다. 4장에서는 구현된 굴뚝연기 혼탁도 모듈 프로그램의 정확도를 측정하기 위하여 실제 현장에서 실험 평가하며 이의 정확성을 비교하기 위하여 자동시정측정기로 측정한 값과 비교하여 설명한다. 마지막으로 5장에서는 결론 및 향후 연구를 기술한다.

## II. 굴뚝연기의 관찰 방법

연소 시에 발생하는 입자상물질, 황산화물 등 배출량이 일정한 허용기준 이상이 되는 경우 이를 법으로써 규제한다. 영국은 석탄사용 규제에서 비롯된 오랜 역사를 가진다. 인구와 산업의 집중으로 공장과 사업장 등에서 발생하는 매연은 대기오염의 원인이 될 뿐만 아니라 인체에도 큰 영향을 미친다. 매연규제의 입법화는 1956년 영국 '대기정화법'에서 화로로부터의 매연, 굴뚝높이, 매연제한지구 등에 대해 강력한 규정을 두고 있으며, 다른 대기오염방지법에서도 매연 발생시설 설치신고, 변경신고, 매연 배출제한, 매연량 추적 등의 규정을 두고 있다.

우리나라에서는 별도의 규정을 두지 않고 환경보전법의 '시행규칙 별표8 대기오염물질 배출허용기준'에서 일괄적으로 규정하여 규제한다. 대기오염물질 배출허용기준에서 살펴보면 매연은 모든 배출시설에서 링겔만 비탁도 2도 이하로 규정하고 있다. 대기오염공정시험법은 대기환경보전법 제 7조에 명시되어 있었지만 2008년 12월 31일부터 삭제되어 현재 대기환경보전법에는 명시되어 있지 않다. 이렇듯 한국에서도 환경보전법에 매연 배출허용기준을 명시하고 있지만 실질적으로 현장에 적용하는데 기술적, 물리적으로 어려움이 있다.

### 2.1 Method 9

Method 9은 미국환경보호청(EPA)에서 제정한 고정오염원으로부터 방출되는 혼탁한 굴뚝연기의 시각적 결정 방법을 말한다[1]. 많은 고정오염원

으로부터 대기권으로 눈에 보이는 혼탁한 굴뚝연기가 배출되는데 Method 9은 자격을 갖춘 관찰자에 의해 배출되는 굴뚝연기의 혼탁도를 결정하는 것을 말한다. 이 방법은 현장에서 굴뚝연기의 혼탁도를 결정하기 위한 절차와 관찰자에 대한 훈련 및 자격증을 부여받기 위한 절차를 포함하고 있다. 그러나 이 방법은 다음과 같은 문제점을 가진다. 첫째 사람의 눈으로 굴뚝연기의 혼탁도를 측정하는 방법이기 때문에 같은 굴뚝연기에 대하여 개개인마다 다른 값을 결과로 측정하는 현상이 발생한다. 둘째, 혼탁도는 5% 단위로 측정되기 때문에 3%와 같이 적은 혼탁도 값의 미세한 차이를 정확히 구별하기 힘들다. 셋째, 관찰자로서의 자격을 얻기 위해서는 6개월마다 트레이닝이 필요하며 또한 가격이 비싸다. 마지막으로 같은 굴뚝연기라도 날씨나 굴뚝의 배경에 따라 다른 측정값이 나오는 등 외부조건에 영향을 받는다.



그림 1. Method 9

### 2.2 자동시정측정기(Transmissometer)

자동시정측정기를 이용하여 굴뚝 연기를 측정하는 방법은 투광기(transmitter)와 수광기(receiver)를 그림과 같이 일정한 거리를 두고 굴뚝에 배치하고 투광기에서 비춰진 빛이 수광기에서 감수되어 광량에 비례한 전기신호로 변환하여 측정하는 방법이다.

그러나 이러한 방법은 구축시 많은 비용이 들며 고온 다습한 연기가 계속 배출되는 굴뚝 안에 장착이 되기 때문에 정확한 측정값을 얻기 위하여 투광기와 수광기의 렌즈를 계속해서 청결하게 하는 등의 지속적인 유지관리가 필요하다. 또한 진동에 매우 취약하다는 문제점을 가지고 있다.

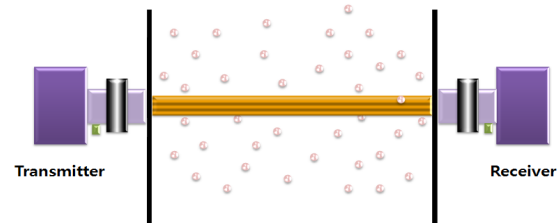


그림 2. 자동시정측정기

### III. 굴뚝연기의 혼탁도 측정모듈의 구현

DOM은 쉽게 구할 수 있는 저렴한 비용의 디지털 카메라를 이용해 낮과 같이 빛이 있는 광범위한 환경에서 굴뚝연기의 혼탁도를 정량화하기 위해 개발된 방법이다[2][3][4]. 안정된 균일한 빛(푸른 하늘의 일부 또는 흰벽)을 가진 장면을 가진 디지털카메라로 촬영된 사진에서 측정하고자 하는 구역과 그 대조 구역을 설정하고 특정 수식을 이용하여 두 구역의 방사휘도(radiance)를 계산하여 혼탁도를 계산한다.

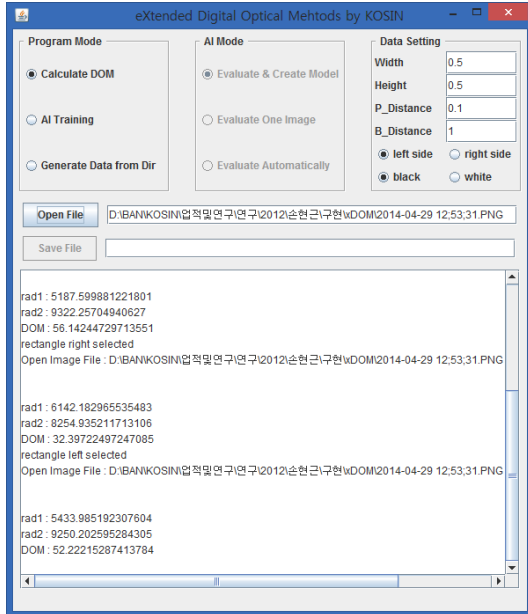


그림 3. 혼탁도 측정 모듈 프로그램

본 논문의 혼탁도 측정 모듈 프로그램은 DOM을 기반으로 자바로 구현되었다. 2개의 클래스를 생성하였으며 총 18개의 메소드를 작성하였다. 그림 3은 굴뚝연기의 혼탁도를 측정하기 위한 모듈의 프로그램 실행 화면이다. 프로그램이 실행되면 화면 상단의 오른쪽 부분의 Data Setting 박스의 여러 값을 설정하고 측정하고자 하는 이미지를 선택하여 굴뚝연기의 혼탁도를 측정한다. 측정 후에는 DOM 값이 화면에 출력되며 연속측정이 가능하다.

그림 4는 이미지에서 측정하고자 하는 지역을 선택한 화면이다. 사용자는 먼저 측정하고자 하는 굴뚝의 두 끝점을 마우스로 지정한다. 그러면 연기부분의 박스와 대조지역의 박스가 생성되며 이 박스 부분의 이미지 값을 계산하여 혼탁도를 측정한다. 이때 측정하고자 하는 박스의 크기를 그림 3에서의 Data Setting에서의 Width와 Height로 설정하며 굴뚝에서부터의 높이와 떨어진 거리를 각각 P\_Distance, B\_Distance로 설정하고 굴뚝연기의 모양에 따라 left side, right side, black,

white를 선택하여 설정한다. 또한 연속측정을 지원하기 위하여 위와 같이 지정하면 다른 이미지들은 동일한 좌표에서 값을 추출하여 측정한다.

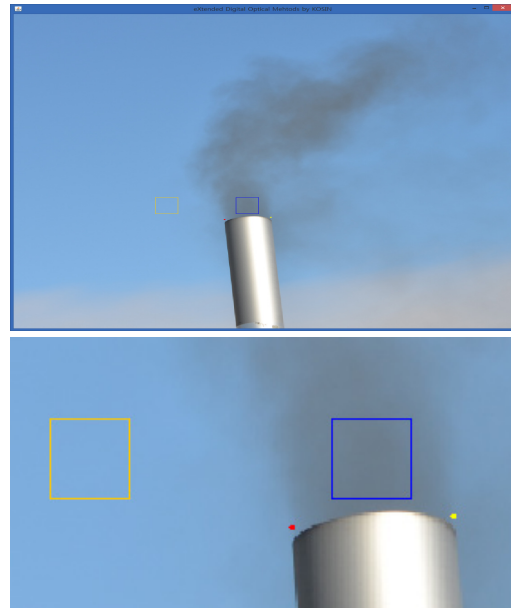


그림 4. 이미지에서 측정 지역 선택

### IV. 실험평가

본 논문에서 구현한 혼탁도 측정 모듈 프로그램의 우수성을 입증하기 위하여 실제 현장에서 실험평가를 수행하였다. 실험평가의 정확도를 높이기 위하여 미국 일리노이 현지에서 실행되고 있는 Method9 교육 및 테스트 때 참가하여 측정하였다. 2013년 7월 9일~10일 이틀간 굴뚝에서 나오는 연기를 초당 1장씩 사진을 찍어 구현한 혼탁도 측정 모듈 프로그램으로 분석하였다. 또한 구현 모듈이 정확한지를 평가하기 위하여 자동시정측정기로 측정한 값과 비교하였다.

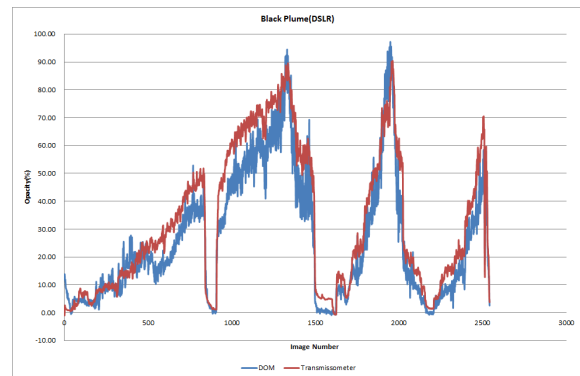


그림 5. 측정 분석 결과 1

그림 5는 혼탁도 측정 모듈(DOM)과 자동시정측정기(transmissometer)의 분석 결과를 비교한

그래프이다. 오후 4시경 약 1시간동안 촬영된 사진을 분석하였는데, 혼탁도 측정 모듈을 사용하여 측정하였을 때는 최고 혼탁도 97.22%, 최저 혼탁도 0%, 평균 혼탁도는 26.53%로 나타났다. 또한 자동시정측정기를 사용하여 측정하였을 때는 최고 혼탁도 90.03%, 최저 혼탁도 0%, 평균 혼탁도는 33.0%로 나타나 두 결과 값의 정확도는 92.32%, 오차율은 7.68%로 평가되었다.

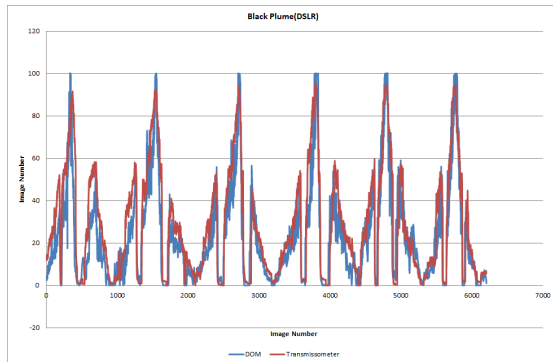


그림 6. 측정 분석 결과 2

그림 6은 오후 12시경 약 2시간동안 촬영된 사진을 분석한 그래프이다. 혼탁도 측정 모듈을 사용하여 측정하였을 때는 최고 혼탁도 100.0%, 최저 혼탁도 0%, 평균 혼탁도는 23.45%로 나타났다. 또한 자동시정측정기를 사용하여 측정하였을 때는 최고 혼탁도 95.63%, 최저 혼탁도 0%, 평균 혼탁도는 29.10%로 나타나 두 결과 값의 정확도는 91.10%, 오차율은 8.90%로 평가되었다.

미국 EPA Method9의 자격을 인증을 받기 위해서는 자동시정측정기의 측정값과 관측자의 관측 값의 오차 평균이 15%를 초과하지 않아야 된다. 따라서 본 논문에서 구현한 혼탁도 측정 모듈의 경우 위의 결과에서와 같이 오차의 평균이 10%미만이므로 미국 EPA Method9 자격조건에도 만족하는 결과를 나타냈다.

## V. 결론 및 향후 연구

국내의 다양한 산업현장 및 환경기초시설에서 발생하는 굴뚝연기의 배출여건은 대단히 다양하나 이에 대한 관리 방안 및 감시 방안은 굉장히 제한적인 상황이다. 본 논문에서는 광학센싱을 이용한 굴뚝연기 혼탁도 측정 모듈 프로그램을 구축하였다. 디지털 카메라를 이용하여 굴뚝연기의 사진을 획득하고 이를 분석하는 DOM을 사용하여 굴뚝연기의 혼탁도를 측정하는 모듈을 설계하고 구현하였다. 또한 구현된 모듈을 자동시정측정기와 비교 분석하여 우수성을 입증하였다.

본 논문에서 개발된 광학센싱을 이용한 굴뚝연기의 혼탁도 측정모듈은 미국 EPA Method 9의 한국적 적용 방안이 될 것이며, 각종 산업현장에

서 발생하는 혼탁한 연기에 대한 효율적 관리방안 및 지자체 등의 효율적인 배출시설 관리에 활용될 수 있을 것이다. 향후 연구로서, 다양한 국내환경에서의 실험 평가와 오차율을 줄이기 위한 방안 및 인공지능방법을 사용한 측정방법에 대하여 연구할 것이다.

## 참고문헌

- [1] U.S. Environmental Protection Agency (USEPA), "NSPS Test Method 9-Visual Determination of the Opacity of Emissions for Stationary Sources", EMTIC TM-009, 1990
- [2] Ke Du, MJ. Rood, BJ. Kim, MR. Kemme, B. Franek, K. Mattison, "Evaluation of Digital Optical Method To Determine Plume Opacity during Nighttime", Environ. Sci. Technol., 783 - 789, 2009
- [3] Ke Du, Mark J. Rood, Byung J. Kim, Michael R. Kemme, Bill Franek and Kevin Mattison, "Digital Photographic Technique to Quantify Plume Opacity During Daytime and Nighttime", Atmospheric and Biological Environmental Monitoring, 39-50, 2009
- [4] Ke Du, MJ. Rood, BJ Kim, MR Kemme, B. Franek, K. Mattison, "Quantification of Plume Opacity by Digital Photography", Environ. Sci. Technol., 928-935, 2007
- [5] Taylor, J. K, "Statistical Techniques for Data Analysis", Lewis Publishers: Inc: Chelsea, MI, 1990