

# 광학기법을 이용한 백색 굴뚝연기 혼탁도 측정의 설계

손현근\* · 반재훈\*\*

## Design of Turbidity Measurement of White Plume using Optical Method

Hyun-Keun Son\* · Chae-Hoon Ban\*\*

### 요 약

굴뚝연기의 혼탁도 측정하는 DOM( Digital Optical Method)은 쉽게 구할 수 있는 저렴한 비용의 디지털 카메라를 이용해 측정하고자하는 구역과 그 대조 구역을 설정하여 혼탁도를 계산하는 방법이다. 그러나 흐린 하늘에서는 구름과 백색 굴뚝연기가 구분되지 않아 측정이 어려운 문제점 있다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 배경하늘을 주기적으로 디지털 카메라로 촬영하고 유형을 분류하여 대표할 수 있는 배경하늘 유형 모델을 개발한다. 또한 개발된 배경하늘 유형 모델을 기반으로 백연 이미지 보정을 최적화하기 위한 필터를 개발하고 실험을 통하여 우수성을 입증한다.

### ABSTRACT

The DOM ( Digital Optical Method), which measures the turbidity of chimney smoke, is a method of calculating the turbidity by setting the area to be measured and the contrast area using a low-cost digital camera that can be easily obtained. However, it is difficult to measure clouds and white smoke in a cloudy sky. In this paper, we develop a background sky type model that can represent the background sky and classify the type by periodically photographing it with a digital camera to solve this problem. In addition, based on the model, we develop a filter to optimize white smoke image and prove its excellence through experiments.

### 키워드

White Plume, EPA Method 9, Turbidity, DOM  
백색 굴뚝연기, 미국환경보호청 메소드9, 혼탁도, 디지털광학방법(DOM)

## 1. 서 론

대규모의 사업장에서 발생하는 매연은 대기오염의 원인이 될 뿐만 아니라 인체에도 나쁜 영향을 미친다. 대기오염의 관리를 위하여 대기오염물질을 배출하는 대규모의 사업장은 굴뚝 자동측정기기를 부착해야 하

며 대기오염물질 배출 정보를 환경부에서 운영하고 있는 굴뚝 원격감시체계 관제센터에 전송한다[1]. 그러나 중소규모의 사업장의 경우 대기오염물질의 무단 배출 또는 자가 측정을 거짓으로 기록할 수 있기 때문에 이에 대한 대책이 마련되어야 한다. 특히 대기오염물질 배출의 경우 다른 오염물질과는 다르게 일단

\* 고신대학교 보건환경학부(hkson@kosin.ac.kr)

\*\* 교신저자 : 고신대학교 IT경영학과

• 접수 일 : 2020. 10. 29

• 수정완료일 : 2020. 11. 22

• 게재확정일 : 2020. 12. 15

• Received : Oct. 29, 2020, Revised : Nov. 22, 2020, Accepted : Dec. 15, 2020

• Corresponding Author : Chae-Hoon Ban

Dept. IT Management, Kosin University,

Email : chban@kosin.ac.kr

배출하고 나면 대기 중으로 빠르게 확산돼 단속이 어려워지며 현장 적발하였다하더라도 시료채취가 어려워 적극적인 대기 오염행위 적발, 단속을 위한 지도·점검 관련법 개선이 필요하다.

굴뚝에서 발생하는 굴뚝연기의 혼탁도를 측정하는 방법은 자동시정측정기를 굴뚝 안에 장착하여 측정하는 방법이나 측정 전문가가 현장에서 눈으로 직접 측정하는 Method 9 방법이 있다[2]. 그러나 전자의 경우는 구축에 많은 비용이 들며 정확한 측정값을 얻기 위하여 지속적인 유지관리가 필요한 단점이 있으며 후자의 경우에는 지속적인 교육 등 많은 비용과 측정값의 부정확하다는 단점이 있다.

이러한 문제점을 해결하는 방법으로 디지털 카메라와 같은 광학센싱 방법을 이용한 굴뚝연기 혼탁도 측정하는 DOM 방법이 있다[3-5]. DOM은 쉽게 구할 수 있는 저렴한 비용의 디지털 카메라를 이용해 측정하고자 하는 구역과 그 대조 구역을 설정하고 특정 수식을 이용하여 두 구역의 방사휘도(radiance)를 계산하여 혼탁도를 계산하는 방법이다. DOM을 이용하여 굴뚝연기를 측정하는 경우에 흑색 굴뚝연기(이하 흑연)이면 맑거나 흐린 하늘을 배경으로 측정이 용이하나 백색 굴뚝연기(이하 백연)인 경우에 흐린 날에는 배경과 연기의 색이 구분되지 않아 측정이 어렵다[6,7].

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 배경하늘을 색정보에 따라 분류하여 이를 대표할 수 있는 배경하늘 모델을 제시하고 백연의 효율적 측정을 위한 필터를 개발하며 이를 적용하는 백연 이미지 필터 적용 모델을 개발한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 굴뚝연기의 혼탁도 측정을 위한 Method 9와 DOM 기법에 대하여 설명하며 3장에서는 DOM을 이용하여 백연을 측정하는 경우에 발생하는 문제점을 기술한다. 그리고 4장에서는 이 문제를 해결하기 위하여 배경하늘 모델을 제시하고 백연의 효율적 측정을 위한 필터와 보정 방법을 기술한다. 마지막 5장에서는 결론 및 향후 연구에 대해 기술한다.

## II. 관련 연구

대기오염물질 배출 사업장은 대기오염물질 배출시설에서 나오는 오염물질 발생량에 따라 1종부터 5종까지로 분류된다[1]. 1~3종 사업장의 경우 굴뚝 자동 측정기기를 부착하고 굴뚝 원격감시체계 관제센터의 통제를 받기 때문에 대기오염물질의 무단 배출의 문제가 발생하지 않으나 대다수를 차지하고 있는 4, 5종 그리고 등록되지 않은 수많은 사업장에서는 대기오염물질의 무단 배출 또는 자가 측정을 거짓으로 기록하여 대기오염을 발생시키고 있다. 특히 대기오염물질 배출의 경우 다른 오염물질과는 다르게 일단 배출하고 나면 대기 중으로 빠르게 확산돼 단속이 어려워 현장 적발하였다하더라도 시료채취가 어려워 적극적인 대기 오염행위 적발, 단속을 위한 지도·점검 관련법 개선이 필요하다.

굴뚝에서 발생하는 굴뚝연기의 혼탁도를 측정하는 가장 일반적인 방법은 자동시정측정기를 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[2]. 그러나 이 방법도 교육을 이수한 측정 전문가에 의존하므로 지속적인 교육 등 많은 비용과 측정값의 부정확함이 단점이다. 또한 한국에서는 미국처럼 굴뚝연기의 측정을 위한 전문기관과 측정 전문가가 따로 있지 않는 문제가 있다.

Method 9의 약점을 극복하기 위하여 혼탁도를 측정하는 다양한 방법이 연구되어졌다. DOM은 쉽게 구할 수 있는 저렴한 비용의 디지털 카메라를 이용해 낮과 같이 빛이 있는 광범위한 환경에서 굴뚝연기의 혼탁도를 정량화하기 위해 개발된 방법이다[3-5]. 이 방법은 비용이 저렴하며 결과의 정확도와 정밀도가 다른 방법에 비해 상대적으로 높으며 관찰자의 주관 을 배제할 수 있는 장점이 있다.

디지털카메라로 촬영된, 안정된 균일한 빛(푸른 하늘의 일부 또는 흰벽)의 장면을 가진 사진에서 측정하고자 하는 구역과 그 대조 구역을 설정하고 두 구역의 방사휘도(radiance)를 아래와 같이 계산하여 혼탁도를 계산한다. 검은색의 연기일 때는 식 (1)과 같이

$N_{pb}$ 는 굴뚝연기의 휘도,  $N$ 은 배경의 휘도이며  $kb$ 는 상수 0.21이다. 흰색의 연기일 때는 식 (2)과 같이  $N_{pw}$ 는 굴뚝연기의 휘도,  $N$ 은 배경의 휘도이며  $kw$ 는 상수 5.0이다.

$$Opacity = \left( \frac{1 - \frac{N_{pb}}{N}}{1 - kb} \right) \times 100 \quad (1)$$

$$Opacity = \left( \frac{\frac{N_{pw}}{N} - 1}{kw - 1} \right) \times 100 \quad (2)$$

[6,7]에서는 광학센싱을 이용한 굴뚝연기 혼탁도 측정 프로그램을 구축하였다. 디지털 카메라를 이용하여 굴뚝연기의 사진을 획득하고 이를 분석하는 DOM을 사용하여 굴뚝연기의 혼탁도를 측정하는 모듈을 설계하고 컴퓨터에서 동작하는 자바프로그램으로 구현하였다.

### III. 문제정의

[6,7]에서 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. 구현이 정확한지를 평가하기 위하여 자동시정측정기로 측정된 값과 비교하였다.

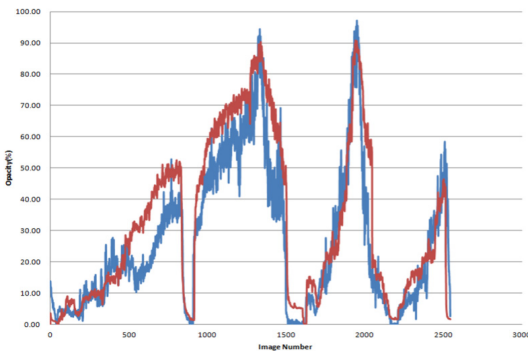


그림 1. 흑연의 측정 분석 결과  
Fig. 1 Measurement result of black plume

그림 1은 DSLR로 촬영된 이미지를 DOM 혼탁도 측정 프로그램과 자동시정측정기로 측정된 결과를 비교 분석한 그래프이다. 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 나타났으며 두 결과 값의 정확도는 92.32%, 오차율은 7.68%로 평가되었다.

그림 2는 백연을 DSLR로 촬영하고 DOM 혼탁도 측정 프로그램과 자동시정측정기로 측정된 결과를 비교 분석한 그래프이다. 혼탁도 측정 모듈을 사용하여 측정하였을 때는 최고 혼탁도 94.23%, 최저 혼탁도 0%, 평균 혼탁도는 30.37%로 나타났다. 또한 자동시정측정기를 사용하여 측정하였을 때는 최고 혼탁도 95.72%, 최저 혼탁도 0%, 평균 혼탁도는 46.96%로 나타났으며 두 결과 값의 정확도는 81.79%, 오차율은 18.21%로 평가되었다.

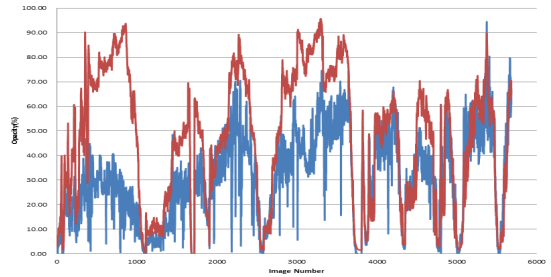


그림 2. 백연의 측정 분석 결과  
Fig. 2 Measurement result of white plume

이처럼 DOM을 이용하여 굴뚝연기를 측정하는 경우 굴뚝연기가 흑연이면 맑거나 흐린 하늘을 배경으로 측정이 용이하며 측정결과의 오차도 양호하다. 그러나 백연을 측정하는 경우에는 다음과 같은 문제가 발생한다.

첫째로 지붕, 나무와 같은 대조 배경이 있어야 측정이 가능하다. 대조 배경이 없는 경우 측정이 불가능하다. 둘째로 대조 배경을 이용하더라도 흐린 날에는 배경과 연기의 색의 구분이 뚜렷하지 않아 측정의 오류가 발생한다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 배경하늘을 색정보에 따라 분류하여 이를 대표할 수 있는 배경하늘 모델을 제시하고 백연의 효율적 측정을 위한 필터와 보정 방법을 개발한다.

## IV. 백연 측정 방법의 설계

### 4.1 기본 아이디어

DOM을 이용하여 백연을 측정하는 경우에 대조 배경이 필요하며 대조 배경이 있더라도 파란색의 맑은 날에는 측정이 용이하나 하얀색의 흐린 날에는 배경과 굴뚝연기의 색이 뚜렷하게 구분되지 않아 혼탁도 측정이 어려운 문제가 발생하였다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 먼저 백연 대비 배경하늘의 유형을 분류한다. 특정지역 배경하늘을 주기적으로 디지털 카메라로 촬영하고 배경하늘의 색, 명도, 채도 등의 정보 분석한다. 추출한 정보 패턴을 분류하여 배경하늘 유형을 분류하고 이를 대표할 수 있는 배경하늘 유형 모델을 개발한다.

이후 개발된 배경하늘 유형 모델에 적합한 필터를 개발하고 적용 및 검토한다. 먼저 배경하늘 대비 백연의 이미지 보정을 위한 필터 조사하고 이를 백연 이미지에 적용하고 그 결과를 분류한다. 그리고 배경하늘 유형 모델을 기반으로 백연 이미지 보정을 최적화하기 위한 필터와 보정 방법을 개발한다.

### 4.2 배경하늘 유형 분류

배경하늘 색정보를 분석하기 위하여 특정지역 배경하늘을 주기적으로 디지털 카메라로 촬영하고 배경하늘의 색, 명도, 채도 등의 정보 분석하였다. 매일 오전, 오후 2회에 걸쳐 동일장소에서 raw와 jpg로 사진을 촬영하였다. 2020년 6월부터 10월까지 5개월간 진행하였으며 약 600여장의 하늘사진의 데이터베이스를 구축하였다. 이 자료를 바탕으로 하늘유형을 10개의 클래스로 분류하였다.

추출된 값을 대상으로 배경하늘의 명도 분포도를 그려보면 그림 3과 같이 120대와 220대에 데이터가 몰려 있는 것을 알 수 있다. 120에 몰려 있는 데이터는 파란 맑은 하늘이며 220에 몰려 있는 데이터는 구름이 많이 낀 하얀 흐린 하늘이다. 여기에서 문제가 되는 것은 220에 몰려 있는 하얀 하늘로서 백연을 측정하게 되는 경우 맑기의 차가 뚜렷하지 않아 측정이 불가능하다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 논문에서는 필터를 이용하여 그 차이를 부각시킨다.

위의 분포도를 바탕으로 배경하늘 데이터를 10개의 구간으로 나눈다. 그리고 구간별로 필터를 개발하여 나중에 촬영된 하늘에 해당하는 구간을 찾고 이에 해당하는 적당한 필터를 적용하여 문제를 해결한다.

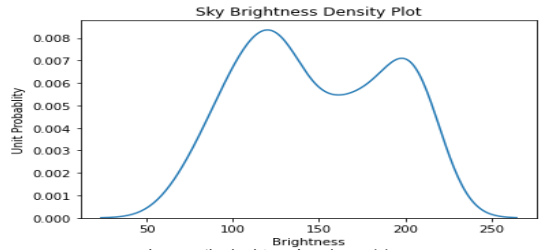


그림 3. 배경하늘의 명도 분포도  
Fig. 3 Background sky brightness distribution graph

하늘 사진을 가지고 구간을 나누는 방법은 데이터의 분포를 고려하여 다음과 같은 순서로 진행한다.

- ① 하늘 사진을 gray로 변환하고 이에 대한 평균값을 계산한다.
- ② 전체 사진을 평균값으로 정렬한다.
- ③ 전체 데이터의 개수를 고려하여 정렬된 데이터를 10개의 구간으로 나눈다.
- ④ 나누어진 구간에 대한 정보를 출력한다.

위의 방법을 이용하여 약 600개의 데이터를 10개의 구간으로 나눈 것이 표 1이다. 각 클래스별로 최소값과 최대값이 정해지며 각 클래스별 구간의 값을 표시하였다. 전체 범위가 0부터 255까지이며 전 범위를 고려해야 하므로 class 1의 범위는 0~95.42가 되며 class 10은 207.02~255까지가 된다. 표를 자세히 살펴보면 class 4와 class 9의 범위가 상대적으로 작는데 이는 이 구간에 많은 데이터가 몰려 있다는 의미이다. 즉, 파란하늘 날씨는 class 4에 몰려 있으며 흐린 하늘 날씨는 class 9에 몰려 있다.

표 1. 배경하늘 유형 모델  
Table 1. Background sky type model

class	min	max	range
1	70.32	95.42	25.1
2	96.97	112.8	15.83
3	113.45	124.23	10.78
4	125.28	132.03	6.75
5	133.24	151.09	17.85
6	152.56	168.66	16.1
7	169.39	183.55	14.16
8	186.83	201.16	14.33
9	202.48	206.52	4.04
10	207.02	217.89	10.87

표 1에 따라 촬영된 하늘이 어떠한 class에 속하는지를 찾고 거기에 적합한 필터를 적용하여 사진을 보정한다. 예를 들어 촬영된 사진의 하늘 부분의 gray 값이 189라면 class 8에 속하며 이에 대한 필터를 적용하여 보정한다. 하늘사진은 계속 업데이트될 예정이며 이렇게 업데이트된 하늘사진에 따라 분류된 클래스는 점진적으로 업데이트 될 예정이다.

### 4.3 배경하늘 대상 필터 개발 및 적용

본 논문에서는 배경하늘 이미지에서 백연을 부각시키기 위하여 히스토그램을 이용하여 백연을 검출하는 필터를 개발하였다. 이 기법은 원본 이미지의 히스토그램을 조사하고 히스토그램을 고르게 분포하도록 함으로써 각 물체간의 구별을 가중하여 검출하는 기법이다. 이러한 기법을 본 논문에서는 DF 필터라고 명한다. 이후 정확도를 높이기 위하여 보정연산을 적용한다.

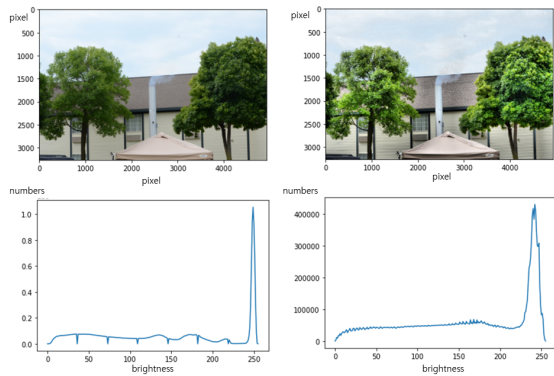


그림 4. DF 필터를 이용한 백연의 필터링  
Fig. 4 Filtering of white smoke using DF filter

그림 4는 원본 이미지에 대한 히스토그램과 이를 DF 필터를 적용한 방법을 수행한 후의 히스토그램이다. DF 필터를 적용하며 배경하늘에서 백연을 쉽게 검출할 수 있다.

원본 이미지에 DF 필터를 적용한 후 정확도를 높이기 위하여 보정연산을 수행한다. 보정연산은 아래의 수식 (3)과 같이 정의한다. 수식에서  $DOM$ 은 혼탁도 연산,  $I_n$ 는 원본이미지이며  $n$ 은 배경하늘 유형 모델에서 해당하는 class이다.  $DF$ 는 DF필터이며  $a_n$ 은 보정상수이고  $\otimes$ 는 보정연산이다. 따라서 원본이미지에

DF필터를 적용하여 변환한 뒤, 배경하늘 유형모델에서 원본이미지의 class를 찾아 해당하는 보정상수를 가지고 보정연산을 수행한다. 이후 최종적으로 혼탁도 연산을 수행한다.

$$DOM((DF(I_n)) \otimes a_n) \tag{3}$$

개발된 DF필터와 보정연산의 우수성을 입증하기 위하여 실험을 진행하였다. 미국에서 촬영된 약 5000여개의 사진 중 혼탁도를 기준으로 80장의 사진을 추출하여 DF 필터와 보정연산을 실시하였다. 이때 사진을 고르는 기준은 첫째, class 9에 해당하며 둘째, 혼탁도가 0~10 10개, 10~20 10개 등 0~80까지의 각각 10개씩 80개를 추출하였다.

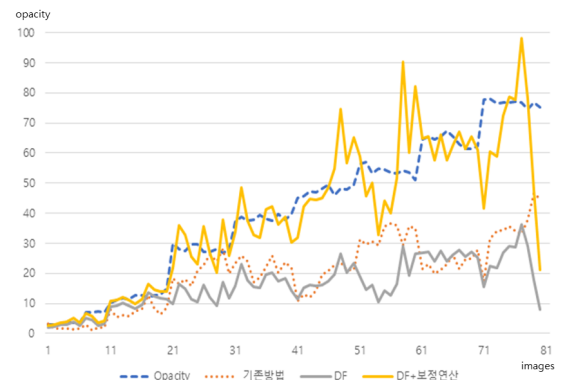


그림 5. DF 필터와 보정연산 실험 결과  
Fig. 5 Experiment results of DF filter and correction calculation

그림 5는 실험 결과 그래프이다. 그래프에서 두꺼운 점선은 실제 혼탁도(opacity) 값이다. 그리고 얇은 점선은 기존의 방법으로서 백연을 측정하기 위하여 대조배경으로 지붕을 선택하여 측정한 값이다. 그리고 아래쪽 실선 그래프는 DF 필터를 적용하여 측정된 값으로 기존 지붕을 대조배경으로 측정한 값과 비슷한 값을 나타내었다. 그리고 맨 위에 실선은 DF 필터로 필터링하고 보정연산을 수행한 값으로 실제 혼탁도 값에 근접한다. 오차율은 기존의 방법이 20.52%를 나타내었으며 DF필터만 적용한 오차율은 24.5%, DF필터와 보정연산을 적용한 오차율은 7.17%로서 개발된 방법이 백연의 혼탁도를 계산하는데 우수한 결과를 나타내었다.

## V. 결론 및 향후 연구

광학센싱 방법을 이용하여 굴뚝연기의 혼탁도를 측정하는 DOM은 백색 굴뚝연기를 측정하는 경우에 흐린 날에는 배경과 연기의 색이 구분되지 않아 측정이 어렵다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 배경하늘을 색정보에 따라 분류하여 이를 대표할 수 있는 배경하늘 모델을 제시하였으며 효율적 측정을 위한 필터를 개발하며 이를 적용하는 백연 이미지 필터 적용 모델을 개발하였다. 또한 실험을 통하여 개발한 이미지 필터 모델의 우수성을 입증하였다. 향후 연구에서는 배경하늘 모델별로 효율적인 필터를 개발하고 이를 검증하는 것이다.

## References

[1] Clean Air Conservation Act [Internet]. Available: <http://www.law.go.kr/lsInfoP.do?lsiSeq=173169&efYd=20150721#0000>

[2] U.S. Environmental Protection Agency (USEPA), *NSPS Test Method 9-Visual Determination of the Opacity of Emissions for Stationary Sources*, EMTIC TM-009: 1990

[3] M. McFarland, S. Rasmussen, D. Stone, G. Palmer, A. Olivas, J. Wander, and M. Spencer, "Field Demonstration of Visible Opacity Photographic System," *J. of the Air & Waste Management Association*, vol. 57, no. 1, 2007.

[4] K. Du, M. Rood, B. Kim, M. Kemme, B. Franek, and K. Mattison, *Evaluation of Digital Optical Method To Determine Plume Opacity during Nighttime*, *Environ. Sci. Technol.*: 2009.

[5] K. Du, M. Rood, B. Kim, M. Kemme, B. Franek, and K. Mattison, *Digital Photographic Technique to Quantify Plume Opacity During Daytime and Nighttime, Atmospheric and Biological Environmental Monitoring*: 2009.

[6] C. Ban, "Design and Implementation of Turbidity Measurement Module of Plume using a Digital Camera," *J. of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 19, no. 2, 2015.

[7] C. Ban, "Design and Implementation of Turbidity Measurement Module of Plume using a Mobile Device," *J. of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 19, no. 11, 2015.

[8] I. Lim and S. Bae "A Study on Development of the Meteorological Data Preprocessing Program for Air Pollution Modeling," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 10, no. 1, 2015.

[9] D. Kim, H. Lee, and C. Ban, "The Design and Implementation of a Chatting System Sharing Paths ," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 12, no. 2, 2017.

[10] D. Kim, B. Choi, and C. Ban, "Design and Implementation of Order Settlement System Using Artificial Intelligence Speaker," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 14, no. 6, 2019.

## 저자 소개

### 손현근(Hyun-Keun Son)



1994년 연세대학교 토목공학과 졸업(공학사)

1996년 미국펜실베이니아주립대학교 환경공학과 졸업(공학석사)

2000년 미국펜실베이니아주립대학교 환경공학과 졸업(공학박사)

2001년 ~ 현재 고신대학교 보건환경학부 교수

※ 관심분야: 대기오염방지기술, VOC처리, 악취처리

### 반재훈(Chae-Hoon Ban)



1997년 부산대학교 컴퓨터공학과 졸업(공학사)

1999년 부산대학교 대학원 컴퓨터공학과 졸업(공학석사)

2006년 부산대학교 대학원 컴퓨터공학과 졸업(공학박사)

2008년 ~ 현재 고신대학교 IT경영학과 교수

※ 관심분야: 인터넷응용, 모바일, 빅데이터