pISSN: 1226-7147, eISSN: 2383-9171
https://doi.org/10.17208/jkpa.2022.06.57.3.150

Journal of Korea Planning Association Vol.57, No.3 (2022)
대한국토·도시계획학회지 「국토계획」 제57권 제3호 pp.150-160

Check for updates

국부적 미세먼지 관측을 위한 Fuzzy AHP 기반의 영상분석용 CCTV 입지 선정에 관한 연구*

A Study on Selection of Image Analyzing CCTV Location for Local Fine Dust Observation based on Fuzzy AHP

최우철** · 정규수***
Choi, Woo-Chul · Cheong, Kyu-Soo

Abstract

This study presented a methodology and demonstration for the selection and evaluation process of local fine dust observation sites based on CCTV images. In the evaluation process, a more rational decision-making process was supported using fuzzy AHP. As a result of the analysis, the importance of the training dataset for image analysis (data reliability: first priority) and the location of the fine dust generating factors (fine dust producing location: second priority) were highly evaluated. This is because when the concentration of fine dust differs for each image (or ROI), the data set can be built in various situations. In addition, the data collection ease (third priority) and observation obstacle environment (fourth priority), which are the factors related to securing images, were also analyzed as high. To interpret this, the difficulty of securing CCTV images because of personal information problems and the removal of obstacles in the screen for a smooth image analysis were also considered. Recently, R&D is a trend that requires technology development and practical use and commercialization through demonstration. This study is expected to serve as a reference example for local governments to demonstrate image recognition-based fine dust observation tasks and other tasks.

주제어 미세먼지, 대상지 선정, CCTV, 다기준 의사결정기법, 퍼지 AHP
Keywords Fine Dust, Test-Bed Selection, CCTV, MCDM, Fuzzy-AHP

Ⅰ. 서 론

1. 연구의 배경 및 목적

최근 GDP 상승, 주 52시간 근무제 시행, 삶의 질을 추구하는 소비패턴 등에 따라 시민들의 여가활동이 크게 증가하고 있다. 이렇게 증가한 여가활동에 있어 미세먼지 정보는 실외 또는 실내활동을 선택하는 핵심요인으로 자리잡은 지 오래이다. 하지만 에어코리아(환경부), 에어맵코리아(KT) 등 현재 제공 중인 미세먼지 정보는 현재 위치로부터 가장 가까운 미세먼지 관측소의 지역단위 정보일 뿐으로, 시민들의 세부 생활권 정보로 간주하기에는 그 대푯값의 지역 범위가 너무 넓은 단점이 있다. 지자체별 국가측정소 개수를 살펴보면, 안양시 4곳, 고양시 4곳, 파주시 3곳 등 시민들의 세부 생활권 미세먼지 정보 요구를 충족시키기에 턱

* 본 연구는 과학기술정보통신부 한국건설기술연구원 연구운영비지원(주요사업)사업으로 수행되었습니다(20220136-001, AI 영상인식 기반 내주변 3차원 미세먼지정보 구축 기술 개발).
** Research Specialist, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (First Author: wcchoi@kict.re.kr)
*** Research Fellow, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (Corresponding Author: ksc@kict.re.kr)

없이 부족한 상황이다. 지자체에서는 자체적으로 미세먼지 간이 측정기(주로 광산란식)를 주요지역에 추가 설치하고 있으나, 시민 생활권을 모두 메우기에는 역부족이다. 이에 생활권 전역에 위치한 CCTV 기반으로 AI 영상분석을 통해 미세먼지농도를 예측하는 연구가 진행 중에 있다. 한국건설기술연구원의 'AI 영상인식 기반의 3차원 내주변 미세먼지 정보 구축 기술 개발' 연구로서, 최종목표는 지자체에 기설치된 CCTV 기반으로 미세먼지 관측장비의 추가 설치 없이 보다 조밀한 미세먼지 지역정보를 시민들에게 제공하는 것이다. 구체적으로 살펴보면, CCTV의 영상이미지를 기반으로 온도, 습도, 풍향, 풍속 등 기상 데이터의 통합 데이터셋을 구축하고, 관련 기상요인 등 변수 투입을 통해 미세먼지농도를 예측하는 딥러닝 영상분석 모형을 개발하고 있다. 위 연구가 원활히 수행되기 위해서는 영상분석용 CCTV 이미지의 데이터셋이 견고해야 한다. CCTV 이미지에서의 관심영역(Region of Interest, 이하 ROI) 설정 시 이미지 속성정보(Hue, Saturation, Value)의 이상치가 발생되지 않고, 미세먼지농도와 CCTV 영상 간 상관관계의 신뢰성을 확보해야 한다. 해당 데이터셋이 참조데이터(Reference Data)가 되어 타 CCTV에 적용 후 미세먼지 예측지점을 확산시킬 수 있기 때문이다. 완결성 높은 데이터셋 구축과 미세먼지농도 예측력 향상을 위해서는 데이터 및 데이터 전처리 프로세스의 신뢰도, 변수 구성, 딥러닝 모델 선정 및 하이퍼파라미터값 설정 등 다양한 요인들의 최적화 작업이 필요하나, 무엇보다 영상분석의 토대인 안정적인 데이터 취득을 위한 영상분석용 CCTV의 입지 선정이 매우 중요한 요소라 할 수 있다. 이에 본 연구는 일반적으로 수행되는 의사결정방법인 AHP에서 보다 과학적 신뢰도가 높다고 평가되는 Fuzzy AHP를 활용하여 영상분석용 CCTV 입지 선정에 관한 연구를 수행하고자 하였다. 이를 위해 본 논문은 영상분석용 CCTV 입지 선정을 위한 주요 선정 요소를 설정하고, 실제 지자체의 CCTV 영상을 토대로 관측 대상지 평가를 진행하였다. 최종적으로는 해당 과제 내 지자체 테스트베드를 선정하고, 체계화된 CCTV 영상분석 기반 미세먼지 관측 대상지 선정 프로세스를 제시하고자 한다.

2. 연구의 범위 및 방법

본 연구의 내용적 범위는 AI 기반 미세먼지정보 예측을 위한 지자체 CCTV 인프라가 그 대상이다. 영상분석용 CCTV의 지역적 위치를 선별하는 프로세스 제시가 본 연구의 핵심이라 할 수 있다. 공간적 범위는 해당 과제의 실증 지자체인 안양시의 주요 스마트교차로이다. 스마트교차로는 '2020 지능형 교통체계(ITS) 구축사업'으로 차량 빅데이터를 위해 안양시 주요 교차로 21곳에 설치되었으며, 고해상도 영상 수집(200만 화소)과 분석용 원거리 ROI 지정이 용이하다.

연구 방법론적으로는 연구 및 사업 대상지, 기술 및 서비스 등을 선정할 때 체계적이고 합리적인 대안 도출이 가능하여 학계에서 주로 활용되는 다기준 의사결정기법(Multi Criteria Decision Making, 이하 MCDM)을 사용하였다. MCDM은 평가자의 평가기준, 대안, 계층구조에 대한 이해를 바탕으로 우선순위 대안 제시가 가능한 검증된 기법이다. 특히, 본 연구는 MCDM의 고전적 방법인 AHP에서 퍼지 이론이 접목되어 보다 진보된 방법론인 Fuzzy AHP를 활용하여, 평가기준에 대한 상대적 중요도 평가와 대안 선정을 위한 절대적 중요도 평가를 수행하고자 한다.

II. 선행연구 고찰

1. 미세먼지 관측지 선정 관련 연구

환경부에서는 미세먼지 국가 측정소 위치를 선정하기 위해 인구 비례에 의한 방법, 측정 지역을 대표할 수 있는 공간으로부터의 거리, 시료 채취가 가능한 지점(건물 등 장애사항 고려) 등을 주요 선정 기준으로 두고 있다(대기오염 공정 시험 기준 환경대기 시료 채취방법, ES0115). 평가기준을 참조하기 위한 관련 선행연구는 다음과 같다. 김효정·조완근(2012)은 IDW, Kriging과 같은 공간 보간법을 이용하여 도시지역 미세먼지 측정소의 배치 적절성 평가 연구를 수행하였다. 측정소 위치 평가를 위해 연도별, 계절별, 요일별 등 시계열적 요소를 분류 기준으로 활용하였다. 정종철(2018) 역시 IDW 보간기법을 활용하여 영등포구 신규 미세먼지 측정소 선정을 위한 공간분석 연구를 수행하였다. 공간분석에 활용된 변수로는 주거와 공장지역, 위험물 처리시설 지역, 교통량 및 유동인구가 사용되었다. 이금숙(2008)은 교통흐름에 기인하는 미세먼지 노출 도시인구에 대한 시공간적 분석 연구를 수행하였다. 도시 공간 내에서의 교통흐름, 도시 통행인구를 미세먼지 영향요인으로 선정하여 공간분석을 수행하였다. 김아영·권창희(2016) 역시 GIS를 이용하여 도심지 대기오염 측정망의 최적위치 선정에 관한 연구를 수행하였다. 주요 변수로는 도시밀도, 토지피복, 표고 등이 활용되었다. 송인상·김선영(2016)은 미세먼지의 지역적 대푯값 산정 방법에 관한 연구를 수행하였다. 서울시와 같은 도시화 지역은 인구 거주 위치, 즉 인구 대표점이 오염도의 지역적 대표성을 가질 수 있음을 확인할 수 있었다. 유재환·김학열(2011)은 서울시 대기오염측정소의 중복가능성을 평가하였다. 대기오염측정소의 오염도를 주요인으로 연구를 수행하였다. 김성준 외(2018)는 지리정보시스템을 활용한 서울시 유해대기오염물질 우선순위 측정지역 선정 연구를 수행하였다. 주요 변수로는 교통량, 배출원(발전소, 소각장 등), 자동차 등록대수, 인구수 등이 활용되었다. 선행연구를 살펴봤을 때, 미세먼지 관측지 선정에 고려되는 주요 요인은 미세먼지 배출원, 교통량, 인구분포(밀도, 유동인구 등), 시간대별 미세먼지 변화 등으로 판단된다. 해당 연구들은 영상분석에 대한 요소는 포함되어 있지

않지만, 미세먼지 발생 및 확산, 관측지 선정요인 등 미세먼지 자체에 대한 평가요인 선정 시 참조 가능할 것으로 판단된다.

2. 영상인식 기반 미세먼지 관측 관련 연구

앞서 언급했듯이 본 연구는 영상 기반의 미세먼지정보 예측 딥러닝 분석을 위한 데이터셋을 지자체에 적용하기 위한 목적으로, 해당 딥러닝 분석 역시 함께 수행 중에 있다. 관련 연구로서 원태연 외(2020)는 CCTV 영상으로부터 미세먼지 추정에서 학습영상 조합, 기상변수 적용이 결과에 미치는 영향 분석 연구를 수행하였다. 예측력이 높은 모형의 RMSE 값은 4.79, R2값은 0.93으로, 해당 연구의 지자체 적용 및 실용화의 기대를 높이는 연구 결과가 도출되었다. Won et al.(2021)은 원태연 외(2020) 논문을 고도화한 연구로서 기존 영상 외 온도, 습도, 바람의 영향 등의 현장데이터와 공공데이터의 기상변수를 추가 투입하여 모형을 새로이 구축하였다. 그 결과 PM2.5의 1시간 축적된 평균값을 학습한 시계열 적용 모델의 경우 RMSE값 1.325(R^2=97.9%)의 우수한 예측력을 나타냈다. 이는 CCTV 영상 기반의 AI 미세먼지농도 예측분석에 대한 신뢰성을 확인할 수 있는 결과이다. 다만, 실증 대상이 지자체 CCTV 인프라가 아닌 테스트 목적의 영상을 활용했다는 아쉬움이 남으며, 이에 본 연구를 통해 지자체 실증을 위한 대상지를 선정하여 기술 실용화의 발판을 마련할 필요가 있다. 홍순원·이재성(2019)은 CCTV를 이용하여 ROI 영역의 엣지 기반으로 미세먼지 농도를 유추하는 방법에 관한 연구를 수행하였다. 상관관계 분석 결과, 엣지 강도와 미세먼지 농도 추세선의 관계가 87.5%의 정확도를 보여, 영상분석을 통한 미세먼지 농도 예측 연구에 대한 가능성을 확인할 수 있었다. 영상을 통해 미세먼지 농도를 예측하는 연구는 국외에서 보다 활발히 진행되어 왔다. Liu et al.(2016)은 베이징, 상하이, 피닉스 지역의 실외 이미지를 토대로 미세먼지 예측 영상분석 연구를 수행하였다. ROI 선정 시 물체와 카메라 사이의 거리에 따른 투과율을 고려하였는데, 이는 어느정도 원거리의 ROI가 모형 예측력에 도움이 되는 것을 시사한다. 본 연구에서 CCTV 화면 구도 내 원거리 ROI 선택 가능 여부가 평가기준이 되어야 할 것으로 사료된다. 이 밖에 딥러닝 및 머신러닝 기반의 VGG, ResNet50, AlexNet, RandomForest 등 다양한 모형을 적용하여 PM2.5(Chakma et al., 2017; Rijal et al., 2018; He et al., 2018; Bo et al., 2018) 또는 PM10(Kim and Kim, 2018; Kim et al., 2019)을 예측한 연구가 진행된 바 있다. 논문마다 차이는 있지만, 딥러닝 분석을 활용하여 미세먼지 농도를 예측하는 연구의 유효성을 입증한 의의를 갖는다. 전체적으로 이미지와 미세먼지 농도만을 변수로 설정한 것보다 환경정보를 추가했을 때 예측력이 좋아진 것을 알 수 있었다. 본 연구 역시 평가기준 설정 시 기상, 오염원 등의 환경정보를 대상지 선정기준에 고려해야 될 것으로 판단된다. 또한 해당 연구들은 정부 및 지자체에서 관리하는 고정형 CCTV가 아닌 연구자의 촬영 영상, 공공 오픈 데이터 등을 활용하여 데이터셋 구성에서 본 연구와는 차이가 있다. 경제성을 고려하여 기존 지자체 CCTV를 기반으로 미세먼지농도를 예측하는 본 연구의 수행과제와 해당 CCTV 지점을 선정하는 본 논문의 차별성을 알 수 있는 부분이다.

3. Fuzzy AHP 이론 및 관련 연구

1) Fuzzy AHP 이론

AHP는 복잡한 의사결정 상황에서 대안 선택의 구조화가 가능하고, 전문가의 경험, 지식을 기반으로 정량/정성적 요소, 주관/객관적 요소의 통합이 용이한 장점을 갖는다. 이에 정부 예비타당성조사의 종합평가에 사용되는 검증된 의사결정기법이다. AHP는 Saaty(1986)에 의해 개발되었으며, 계층의 요소 간 쌍대비교(Pairwise Comparison)를 통해 의사결정을 지원한다. Saaty(1986) 이후 수많은 연구자들에 의해 다양한 파생기법이 제시되었다. 대표적으로 Zadeh(1965)가 제안한 퍼지이론(Fuzzy Theory)을 AHP에 접목한 Fuzzy AHP가 있다. 퍼지이론은 평가 시 주관적 판단이 갖는 부정확함 및 애매성(Imprecision)을 극복하기 위해 퍼지논리(Fuzzy Logic), 퍼지집합(Fuzzy Set) 등을 도입한 개념이다. Fuzzy AHP는 불분명한 수량정보, 주관적이며 불확실한 판단 등의 애매한 현상을 수학적으로 표현 가능하여 합리적인 의사결정 대안 도출이 가능하다. 이에 본 연구는 고전 AHP 방식에서 보다 진보된 방법론인 Fuzzy-AHP를 적용하여 CCTV 기반 국부적 미세먼지 관측 대상지 선정 기준 및 대안 평가 분석을 수행하고자 한다.

2) Fuzzy AHP 관련 연구

Thengane et al.(2014)은 AHP와 Fuzzy AHP를 함께 적용하여 수소 생산기술의 비용 대비 효율 중요도 분석을 비교하였다. 그 결과, 평가자의 주관적 판단의 애매성이 보완된 Fuzzy AHP가 수학적 신뢰도가 높다고 제시하였다. 유주한 외(2006)는 삼각퍼지수를 활용하여 지역환경 평가지표 순위 결정 분석 연구를 수행하였다. 연구자는 단순히 중요도를 토대로 순위를 선정했을 때보다 삼각퍼지수로 변환하였을 때 삼각형 함수에 따른 수학적 분석이 보완되어 과학적 신뢰도가 보다 높아진 것으로 판단하였다. 윤정미·이성호(2002)는 도시의 물리적 성장 형태를 예측하기 위해 Fuzzy AHP를 적용하였다. 해당연구는 도시 단위에서의 복합적 인자를 대상으로 퍼지 집합개념을 접목하여 보다 유연한 공간분석을 시도한 의의를 갖는다. 김선구 외(2013)는 Fuzzy AHP 기법을 활용하여 중소도시 소매유통센터의 입지선정 연구를 수행하였다. 해당연구는 지자체 내 주요시설 입지 선정을 위해 Fuzzy AHP 기법 기반의 합리적인 의사결정과정을 제시한 의의

를 가진다. 김정섭(2020)은 AHP 및 퍼지 모형을 활용하여 장치라인의 CTP(Critical To Process) 선정모델을 개발하였다. 상대평가를 통해 평가기준 가중치를 선정한 뒤, 평가기준별 5점척도 대안 평가를 수행하는 방식이다. 최윤의 외(2014)는 도시광장 설계요소와 공간이용에 대한 만족도 분석을 5점 리커트척도를 삼각퍼지수로 변형하여 선형 소속함수를 계산하였다. 이들 연구들은 Fuzzy AHP를 활용하여 보다 과학적인 의사결정체계를 지원하고자 하였다. 본 연구 역시 Fuzzy AHP를 활용하되, 평가기준에 대한 상대적 중요도 분석, 대안평가를 위한 절대적 중요도 분석을 동시에 수행하여 의사결정과정의 체계성과 용이성을 동시에 취하는 차별성을 확보하고자 한다. 또한 본 연구의 목적인 CCTV 기반 국부적 미세먼지 관측 대상지 선정을 위한 Fuzzy AHP 적용은 최초 연구라는 차별성을 갖고 있다.

Ⅲ. 미세먼지 관측대상지 선정요인 및 후보지 현황조사

1. 대상지 선정요인

앞서 살펴본 선행연구는 미세먼지 관측소 위치 선정을 위한 연구가 주였지만, 본 논문은 지자체 CCTV를 활용하며 AI 영상분석을 위한 미세먼지 농도 예측 데이터셋 구축 목적이라는 연구 특수성이 고려되어야 한다. 즉, 거시적 요소보다는 딥러닝 분석 관련 데이터 수집 가능성, 블록단위 내 국지적 영향요인 등이 주로 고려되어야 한다. 신뢰성 높은 대상지 선정요인 설정을 위해 전문가 집단 심층토의(Focus Group Interview, 이하 FGI)를 수행하였다. FGI는 다양하고 심층적인 논의과정을 통해 연구에 필요한 정보 수집이 가능한 질적 조사방법이다. 본 연구와 같이 미세먼지 환경, 딥러닝 영상분석, 지자체 인프라 등이 복합적으로 작용하는 연구에 적합하다고 판단되었다. 본 연구는 FGI 참여자를 과제 참여연구원 외 환경 전문가, 딥러닝 전문가, 지자체 관제센터 공무원 등 10명으로 구성하였다. 전문가 집단에게 연구 개요 및 선행연구 검토 내용을 소개한 뒤, 개방형으로 대상지 선정요인을 질문하였다. 집단 심층토의 결과, 대상지 선정요소는 크게 실측 데이터 활용성, 미세먼지 관측환경, 미세먼지 발생요인으로 대별되었다. 신뢰성 있는 미세먼지 실측 데이터와 CCTV 영상 데이터 취득이 전제되어야 딥러닝 영상분석이 가능하므로, 실측 데이터 활용성 항목은 데이터 수집 용이성, 데이터 신뢰성의 세부 요소항목으로 설정하였다. 미세먼지 관측환경의 경우 계절, 요일과 같은 시간대별 변화 추이가 나타나는 데이터 변화 환경, 영상분석 화면 구도상의 관측 장애물 환경, 3차원 관제를 위한 드론 비행 환경의 요소가 도출되었다. 마지막 미세먼지 발생요인의 경우 주유소, 공사장 등 미세먼지 발생요인의 입지 여부, 차로수, 신호교차로, 교통유발시설 등이 고려된 차량 통행량 및 도로 환경, 용도지역 및 인구분포(밀도, 유동인구 등)가 최종 도출되었다. 이에 따른 상위항목, 하위항목에 대한 계층구조는 〈Figure 2〉에서 살펴볼 수 있다.

2. 후보지 현황조사

평가 후보지는 〈Figure 1〉과 같이, 안양시 내 스마트교차로 중 영상 제공이 가능하고, 미세먼지 예측 영상분석이 용이한 3개소를 선정하여, CCTV 영상과 위치, 미세먼지 측정기가 설치된 주요 정류장 40개소 위치 정보 등의 후보지 현황을 조사하였다. 평가기준별로 조사된 내용을 살펴보면, 데이터 수집 용이성 및 신뢰성은 지자체 영상제공 협조 여부, 후보지 주변 미세먼지 관측지점(국가측정소, KT 측정소, 미세먼지 모니터링 정류장 등), 딥러닝 분석용 ROI 선정의 용이성, CCTV 영상 화소 수 등을 추가 조사하였다. 데이터 변화 환경의 경우 후보지 주변 국가측정소의 미세먼지 농도 변화 추이를 비교하였으며, 관측 장애물 환경은 CCTV 영상화면 구도상 장애요인을 검토하였다. 3차원 관제를 위한 드론 비행 환경은 후보지별 드론 비행금지구역, 제한구역 등을 검토하였다. 미세먼지 발생요인 입지 여부는 현장 방문 조

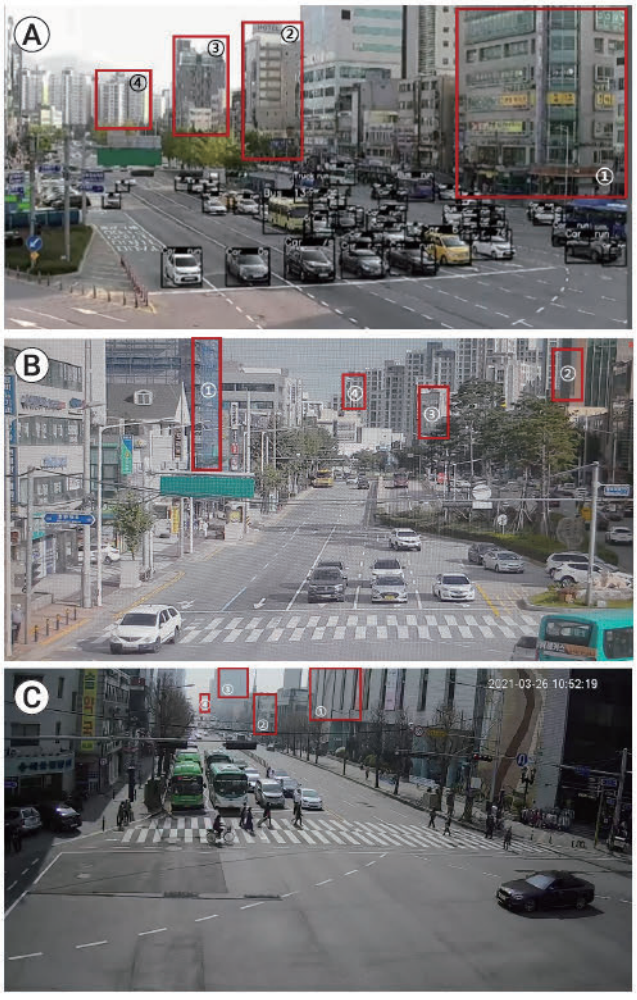

Figure 1. CCTV screen by site (A, B, C from above)

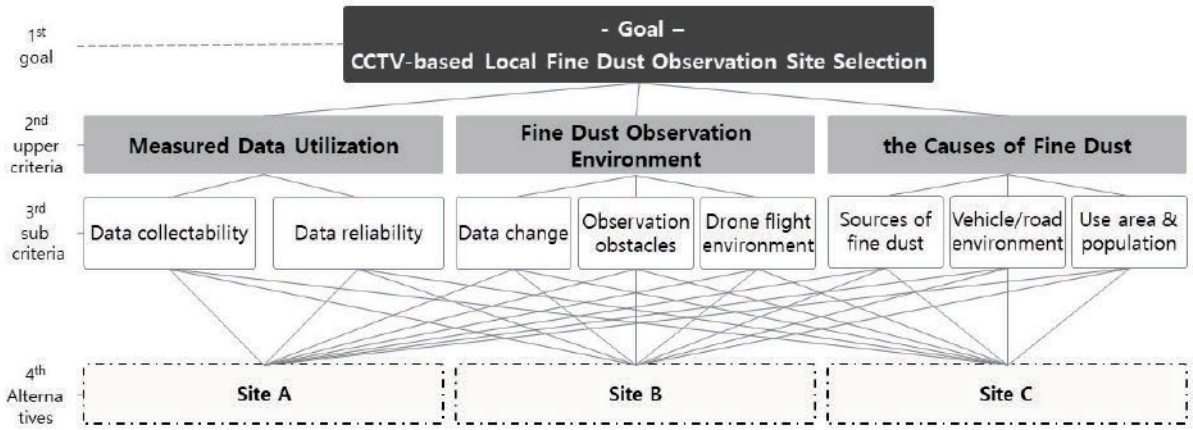

Figure 2. Hierarchy structure

사 및 지도 로드뷰를 통해 공사장, 주유소 등의 미세먼지 발생원을 조사하였다. 차량 통행량 및 도로 환경은 지자체 담당 공무원 논의 및 로드뷰를 통해 통행량, 차로수, 신호교차로, 도로 구조 등을 검토하였고, 용도지역 및 인구분포는 지적편집도, 인구 밀도 및 유동인구 등을 추가 검토하였다. 이를 기반으로 평가자에게 후보지별 현황자료 제시와 세세한 설명을 통해 후보지에 대한 인지력을 높여 신뢰성 있는 평가를 도모하고자 하였다.

Ⅳ. Fuzzy AHP 분석

1. 분석 개요

본 연구의 CCTV 기반 국부적 미세먼지 관측 대상지 선정요인 평가는 상대적 중요도 평가를, 대상지 대안 평가는 절대적 중요도 평가를 수행하였다. 본 연구의 평가는 FGI에 참여했던 과제 참여자, 환경 및 딥러닝 전문가, 도시 및 공공인프라 전문가 등 총 15명이 평가자로 참여하였다. 설문의 응답 수가 적지만, AHP 연구에서는 전문성과 논리 일관성이 전제되는 경우 표본의 크기는 문제되지 않는다(김채복 외, 2013). 본 설문의 참여자는 관련 분야 전문가일 뿐만 아니라 FGI를 통해 본 연구에 대하여 충분히 숙지되었으며, 대안 평가 시에는 관련 자료 및 지도 로드뷰를 제공하여 현장 감각을 최대한 향상시키고자 하였다.

MCDM 연구의 논리 일관성을 확인하고자 검증작업을 함께 수행하였다. 쌍대비교에서의 비교행렬(Consistency Index)로부터 평가기준의 상대적 가중치 도출 후 평균 무작위지수(Random Index)를 기반으로 설문 일관성 비율(Consistency Ratio, 이하 CR)을 도출하였다. CR은 0.1보다 작으면 일관성에 문제가 없는 것으로 통용된다. 일관성 검증 결과, 평가자 평균 CR은 0.055로 매우 양호한 일관성을 갖는 것으로 분석되었다. MCDM의 중요 작업 중 하나인 계층화 작업은 평가기준과 대안 간 계층구조, 즉 의사결정 사항을 유기적으로 설계해야 한다. 본 연구의 목표, 앞서 선정한 대상지 선정요인 및 후보지 대안에 관한 계층구조는 〈Figure 2〉와 같다.

2. 모형의 적용

Laarhoven and Pedrycz(1983)은 삼각퍼지수(Triangular Fuzzy Number, 이하 TFN)를 사용하여 Saaty(1986)의 AHP를 확장하는 방법론을 제안하였다. TFN은 (l, m, u)의 세 개의 점의 삼각형 형태로 표현되며(l=하한, m=중간, u=상한), 이들의 면적은 TFN의 크기이다(김정섭, 2020; 박유진, 2013; Lee et al., 2009; 퍼지기술연구회, 1992)(Figure 3). 본 연구는 Chang (1996), Kahraman et al.(2003), Lee et al.(2019), 박유진(2013) 등 Fuzzy-AHP를 제시 또는 확장한 다수 연구를 참조하여 〈Table 1〉의 퍼지스케일을 설정하였다.

해당 퍼지스케일을 활용하여 계층별 평가기준(Criteria) 간 쌍대비교에 따른 가중치의 평균값을 산정하였다. 아래 식을 활용하여 I번째 속성의 TFN $S_i=(l_i, m_i, u_i)$ 값을 도출한 뒤, 평가기준별 TFN S_i의 비퍼지화(Defuzzification)를 위해 최소값의 고유벡터 정규화 값을 최종 산정하였다(박유진, 2013; Lee et al., 2009).

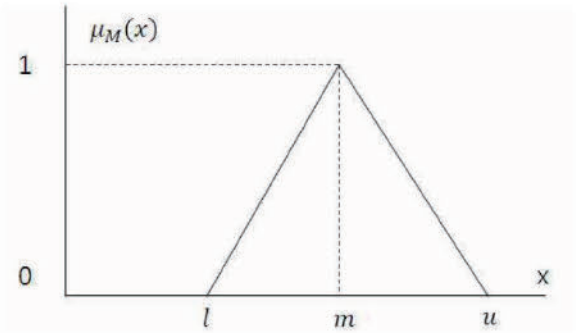

Figure 3. Triangular Fuzzy Number (TFN)

Table 1. Fuzzy scale

Linguistic scale	F-No.	Fuzzy Triangular Scale	Reciprocal F-T-Scale
Equal importance	1	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)
Moderate importance	3	(2/3, 1, 3/2)	(2/3, 1, 3/2)
Strong importance	5	(3/2, 2, 5/2)	(2/5, 1/2, 2/3)
Very strong importance	7	(5/2, 3, 7/2)	(2/7, 1/3, 2/5)
Extreme importance	9	(7/2, 4, 9/2)	(2/9, 1/4, 2/7)

$$S_i = \sum_{j=1}^{m} M_{ij} \times [\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} M_{ij}]^{-1} \quad (1)$$

$$s \cdot t \sum_{j=1}^{m} M_{ij} = (\sum_{j=1}^{m} l_{ij}, \sum_{j=1}^{m} m_{ij}, \sum_{j=1}^{m} u_{ij})$$

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} M_{ij} = (\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} l_{ij}, \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} m_{ij}, \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} u_{ij})$$

$$[\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}]^{-1} = \left[\frac{1}{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} u_{ij}}, \frac{1}{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} m_{ij}}, \frac{1}{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} l_{ij}}\right]$$

대안평가의 경우 설문의 피로도를 고려하여 절대평가를 수행하였으며, 퍼지스케일은 평가기준 분석의 스케일을 동일하게 활용하였다. 절대적 중요도 산정을 위한 비퍼지화 방법은 무게중심법을 활용하였다. n개의 삼각퍼지수의 퍼지값은 아래 수식과 같으며,

$$A = \frac{(\sum_{i=1}^{n} a, \sum_{i=1}^{n} b, \sum_{i=1}^{n} c)}{n} = (a, b, c) \quad (2)$$

무게중심법에 따른 비퍼지화 산정식은 다음과 같다. 여기서 g는 무게중심값이며, a, b, c는 삼각퍼지수 값이다. 해당 무게중심값 산정을 통해 대안의 삼각퍼지수 특성값 도출이 가능하다(김정섭, 2020; 유주한 외, 2006).

$$g = c - \sqrt{\frac{(c-a)(c-b)}{2}}, \; g = a + \sqrt{\frac{(c-a)(b-a)}{2}} \quad (3)$$

앞서 산정된 대안별 무게중심값을 기반으로 Fuzzy AHP 평가기준 가중치를 적용한 Decision Value(DV)는 아래 식을 통해 최종 산출된다.

$$DV_{(i)} = \sum_{x=\alpha}^{\gamma} W_x \left(c_{i(x)} - \sqrt{\frac{(c_{i(x)} - a_{i(x)})(c_{i(x)} - b_{i(x)})}{2}} \right)$$
$$x = \alpha, \beta, \gamma \quad \sum_{x=a}^{\gamma} W_x = 1 \quad (4)$$

3. 선정요인 상대적 중요도 분석결과

본 연구의 평가기준 계층인 2계층 및 3계층에 대한 쌍대비교를 앞서 제시한 퍼지스케일을 기반으로 행렬을 구성한 뒤, 퍼지 선호도의 기하평균값을 산출하였다. 이를 기반으로 평가기준별 TFN 값과 비퍼지화를 위한 최소값의 고유벡터값, 즉 최종 가중치를 산정하였다(Table 2, 3). 2계층의 경우 TFN 값은 실측 데이터 활용성 (0.26, 0.37, 0.53), 미세먼지 관측 환경 (0.21, 0.29, 0.41), 미세먼지 발생요인 (0.24, 0.34, 0.47)로 각각 산출되었다(Table 2). 이를 토대로 최종 산정된 정규화된 가중치는 실측데이터 활용성이 0.36으로 가장 높았으며, 이어서 미세먼지 발생요인 0.34. 미세먼지 관측 환경 0.30 순으로 산정되었다. 영상분석을 위한 기초 데이터로써 CCTV 이미지, 미세먼지 관측 데이터 등의 실측데이터의 활용성과 영상분석 시 유의미한 결과를 찾기 위한 미세먼지 발생요인의 중요도가 다소 높게 평가된 결과로 해석된다.

같은 방법으로 3계층 평가기준별 TFN과 가중치를 산정하였다. 미세먼지 관측 환경의 경우 데이터 수집 용이성의 TFN은

Table 2. 2st class TFN & weight calculation result

2st class	Measured data utilization	Fine dust observation environment	The causes of fine dust
Measured data utilization	(1, 1, 1)	(0.98, 1.33, 1.77)	(0.82, 1.04, 1.32)
Fine dust observation environment	(0.56, 0.75, 1.02)	(1, 1, 1)	(0.72, 0.90, 1.14)
The causes of fine dust	(0.76, 0.97, 1.21)	(0.88, 1.11, 1.39)	(1, 1, 1)
TFN (S_1, S_2, S_3)	(0.26, 0.37, 0.53)	(0.21, 0.29, 0.41)	(0.24, 0.34, 0.47)
Weight (normalization)	0.36	0.30	0.34

Table 3. 3rd class TFN & weight calculation result

3rd class		Ease of data collection	Data reliability
Measured data utilization	Ease of data collection	(1, 1, 1)	(0.65, 0.81, 1.02)
	Data reliability	(0.98, 1.24, 1.54)	(1, 1, 1)
	TFN (S_1, S_2, S_3)	(0.36, 0.45, 0.56)	(0.43, 0.55, 0.70)
	Weight (normalization)	0.45	0.55

3rd class		Data change	Observation obstacles	Drone flight environment
Fine dust observation environment	Data change	(1, 1, 1)	(0.67, 0.85, 1.09)	(1.07, 1.41, 1.80)
	Observation obstacles	(0.92, 1.18, 1.50)	(1, 1, 1)	(1.29, 1.71, 2.18)
	Drone flight environment	(0.55, 0.71, 0.94)	(0.46, 0.59, 0.78)	(1, 1, 1)
	TFN (S_1, S_2, S_3)	(0.25, 0.36, 0.50)	(0.30, 0.43, 0.61)	(0.19, 0.25, 0.35)
	Weight (normalization)	0.35	0.41	0.26

3rd class		Location of producing fine dust	Vehicle/road environment	Use area & population
The causes of fine dust	Location of producing fine dust	(1, 1, 1)	(1.23, 1.58, 1.99)	(1.68, 2.09, 2.52)
	Vehicle/road environment	(0.50, 0.63, 0.81)	(1, 1, 1)	(0.98, 1.32, 1.75)
	Use area & population	(0.40, 0.48, 0.59)	(0.57, 0.76, 1.02)	(1, 1, 1)
	TFN (S_1, S_2, S_3)	(0.36, 0.51, 0.71)	(0.23, 0.32, 0.46)	(0.18, 0.25, 0.34)
	Weight (normalization)	0.51	0.32	0.25

Table 4. Evaluation criteria final result

2nd class		3rd class		Final result	
Criteria	Weight	Criteria	Weight	Weight	Rank
Measured data utilization	0.36	Ease of data collection	0.45	0.17	3
		Data reliability	0.55	0.20	1
Fine dust observation environment	0.30	Data change	0.35	0.10	6
		Observation obstacles	0.41	0.12	4
		Drone flight environment	0.26	0.08	8
The causes of fine dust	0.34	Location of producing fine dust	0.51	0.17	2
		Vehicle/road environment	0.32	0.11	5
		Use area & population	0.25	0.09	7

(0.36, 0.45, 0.56), 가중치는 0.45이며, 데이터 신뢰성의 TFN은 (0.43, 0.55, 0.70), 가중치는 0.55로 산정되었다. 데이터의 신뢰성이 상대적으로 높게 평가된 결과이다. 관측 장애물 환경의 경우 공공데이터 변화 환경의 TFN은 (0.25, 0.36, 0.50), 가중치는 0.35, 관측 장애물 환경의 TFN은 (0.30, 0.43, 0.61), 가중치는 0.41, 드론 비행 환경의 TFN은 (0.19, 0.25, 0.35), 가중치는 0.26으로 도출되었다. 원활한 영상분석을 위한 관측 장애물 환경의 중요도가 높았으며, 3차원 미세먼지정보 구축을 위한 드론 비행 환경 요소의 중요도는 낮게 평가되었음을 알 수 있다. 미세먼지 발생요인의 경우 미세먼지 발생요인 입지 여부의 TFN은 (0.36, 0.51, 0.71), 가중치는 0.51, 차량 통행량 및 도로 환경의 TFN은 (0.23, 0.32, 0.46), 가중치는 0.32, 용도지역 및 인구 분포의

TFN은 (0.18, 0.25, 0.34), 가중치는 0.25로 산정되었다. 영상분석의 예측력 및 신뢰성 향상을 위해서는 미세먼지 발생요인이 입지한 ROI별 이미지 데이터셋의 차별성 확보가 필요한 결과로 해석 가능하다. 2계층과 3계층의 가중치를 곱한 종합 가중치 산정 결과, 데이터 신뢰성이 0.20으로 가장 높게 나타났으며, 이어서 미세먼지 발생요인 입지 여부(0.17), 데이터 수집 용이성(0.17)이 종합 순위상 상위권으로 선정되었다(Table 4). 신뢰성 있는 실측 데이터 확보와 가시적인 미세먼지 발생원인이 영상분석의 미세먼지정보 예측력을 높이는 핵심 요인으로 평가된 결과로 해석된다.

4. 후보지 대안 절대적 중요도 분석결과

본 연구는 평가 대안의 절대적 중요도 산출을 위해 무게중심값을 활용하였다. 무게중심값 산출과정을 살펴보면, 평가기준별 퍼지스케일을 기반으로 변환된 삼각퍼지수의 평균값을 산출하였다. 그 예로 후보지 A의 평가기준 데이터 수집 용이성의 하한값 a, 중앙값 b, 상한값 c의 삼각퍼지수 평균값 도출과정은 아래와 같다.

$$\frac{\sum_{i=1}^{n} a_i}{n}=\frac{(2.5+3.5\cdots+3.5+3.5)}{15}=\frac{43.2}{15}=2.9$$
$$\frac{\sum_{i=1}^{n} b_i}{n}=\frac{(3.0+4.0\cdots+4.0+4.0)}{15}=\frac{50.0}{15}=3.3 \quad (5)$$
$$\frac{\sum_{i=1}^{n} c_i}{n}=\frac{(3.5+4.5\cdots+4.5+4.5)}{15}=\frac{57.0}{15}=3.8$$

이를 통해 도출된 후보지 A의 데이터 수집 용이성 TFN 값 (2.9, 3.3, 3.8)을 기반으로 아래와 같이 무게중심값(g) 3.34를 산출하였다.

$$g=3.8-\sqrt{\frac{(3.8-2.9)(3.8-3.3)}{2}}=3.34 \quad (6)$$

위와 같은 방법으로 후보지 세 곳의 평가기준별 무게중심값을 모두 산출한 뒤, 앞서 산정한 평가기준별 가중치를 적용한 최종 수학적 의사결정모델 DV값을 산정하였다. 그 예로 후보지 A의 DV값 산정과정은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} DV_{(1)} &= \sum_{x=a}^{\gamma} W_x \cdot g_x \\ &= (0.17\times3.34)+(0.20\times3.34)+(0.10\times3.27) \\ &\quad +(0.12\times3.20)+(0.08\times2.81)+(0.17\times3.34) \\ &\quad +(0.11\times3.34)+(0.09\times3.67) \\ &= 3.42 \end{aligned} \quad (7)$$

최종 산정된 후보지 세 곳의 DV 값 및 순위는 〈Table 5〉와 같다. 후보지 세 곳 모두 안양시 관제센터 담당 공무원의 협조로 200만 화소의 고화질 CCTV 영상 수집이 가능하며 위치적으로 큰 차이가 없으므로, 데이터 취득 용이성, 데이터 신뢰성, 공공데이터 변화 환경의 가중치는 대동소이한 편이었다. 하지만 해당 평가기준은 영상 관리 주체가 다르거나, 위치적으로 차이가 날 때(예: 위치상 먼 거리, 도로변과 공원 주변 등)는 중요한 선정요인이 될 수 있으므로 간과해서는 안 될 것으로 판단된다. 분석 결과, 후보지 A의 DV값이 3.42로 1순위로 선정되었다. 유동인구 및 통행량이 많고 상업시설이 밀집된 지역 특성에 높은 평가를 받은 것으로 판단된다. 또한 타 후보지에 비해 도로와 인도의 폭이 넓고 곳곳에 오픈 스페이스가 있어 드론 비행 환경에서도 높은 점수를 받았다. 이 밖에 미세먼지 모니터링 정류장과 KT 측정소, 공사현장 및 주유소 등의 미세먼지 발생원의 입지 등에 따라 전체적으로 고른 평가를 받은 것으로 사료된다.

후보지 B는 DV값 3.32로 산출되어 근소한 차이의 2순위로 선정되었다. 이곳은 지하차도 진출입구가 있어 차량 통행 및 도로환경에 따른 미세먼지 발생요인이 존재하는 점에 높은 평가를 받은 것으로 판단된다. 아파트 공사현장, 주유소 등의 입지도 큰 영향을 받은 것으로 사료된다. 또한 미세먼지 국가측정소와 미세먼지 모니터링 정류장도 함께 위치하여 데이터 취득 용이성에서도 가장 높은 가중치를 받을 수 있었다. 후보지 C는 DV값 2.81로

Table 5. Evaluation alternative final result

Site	Center of gravity (weight)								DV (decision value)	Rank
	Measured data utilization		Fine dust observation environment			The causes of fine dust				
	Ease of data collection	Data reliability	Data change	Observation obstacles	Drone flight environment	Location of producing fine dust	Vehicle/road environment	Use area & population		
A	3.34	3.34	3.27	3.20	2.81	3.34	3.34	3.67	3.42	1
B	3.47	3.20	3.13	2.74	2.21	3.53	3.60	3.13	3.32	2
C	3.20	3.20	3.07	2.14	1.81	2.47	2.60	2.47	2.81	3

가장 낮은 순위로 선정되었다. 〈Figure 1〉의 CCTV 이미지에서 볼 수 있다시피, 화각이 아래를 향해있어 ROI 선정 및 라인 추출의 어려움이 예상되는 것이 큰 이유 중 하나이다[1]. 타 후보지에 비해 미세먼지 발생요인이 적으며, 조밀하고 협소한 공간 구성 탓에 드론비행 환경도 좋지 않은 것 역시 평가에 영향을 끼쳤을 것으로 판단된다.

V. 결 론

본 논문은 Fuzzy AHP를 이용하여 영상분석용 CCTV 입지 선정에 관한 방법론 및 실증 과정을 제시하였다. 먼저 대상지 선정요인 평가의 분석결과를 요약하면, 데이터의 신뢰성(1순위)이 가장 높은 평가를 받았는데, 이는 영상분석을 위한 학습용 데이터셋의 중요성이 강조된 결과로 해석 가능하다. 미세먼지 발생요인 입지 여부(2순위) 역시 높은 평가를 받았는데, 이는 영상별 또는 ROI별 미세먼지 농도가 상이해야 다양한 상황에서의 데이터셋을 구축 가능하기 때문으로 판단된다. 영상 확보 관련하여 데이터 수집 용이성(3순위)과 관측 장애물 환경(4순위)이 상위권에 포진되어 있다. 개인정보 문제에 따른 CCTV 영상 확보의 어려움과 원활한 영상분석을 위한 화면 내 장애요소의 제거 문제가 내재된 결과로 해석된다. 후보지 대안 평가의 분석결과를 요약하면 다음과 같다. 후보지 C는 타 대안에 비해 매우 낮은 평가를 받았는데, 이는 CCTV 화면의 화각이 내려와 있어 ROI 추출이 어려운 점에서의 감점요인이 매우 컸기 때문이다.

후보지 A와 B가 상대적으로 높은 평가를 받은 이유는 미세먼지 국가 측정소, KT 측정소, 미세먼지 모니터링 버스 정류장 등 주변 미세먼지 측정소가 입지되어 있어 참조 데이터를 활용할 수 있는 장점과 공사현장, 주유소 등의 미세먼지 발생요인이 있었기 때문이다. 특히 후보지 A는 유동인구 및 통행량이 많고 상업시설이 밀집되어 있어 미세먼지 발생요인이 보다 높았으며, 드론 비행 환경이 우수한 장점이 추가적으로 작용되어 대안 1순위로 선정되었다.

본 논문을 통한 시사점을 정리하면, 본 연구는 기설치된 지자체 CCTV 이미지의 AI 영상분석을 통해 국부적 미세먼지정보를 예측 및 구축하는 기술 개발 과제의 지원 목적도 있으나, 지자체 관제센터를 기반으로 관련 도시문제를 해결하기 위한 신기술을 실증하는 테스트베드 선정 의사결정 프로세스를 제시했다는 의의를 함께 갖는다. 특히, 기존 고전방식의 AHP에 비해 보다 진보되고 과학적으로 검증된 Fuzzy AHP를 활용한 점과 의사결정과정에서의 논리성과 용이성을 함께 고려하여 상대적 중요도 기반의 대상지 선정요인 평가, 절대적 중요도 기반의 후보지 대안 평가를 동반한 점이 타 연구와의 차별성을 갖는 요소이다. 하지만 본 연구의 한계도 분명 존재한다. AI 분석 기반의 미세먼지 관측 대상지 선정에 관한 평가 방법론을 제시하였으나, 타 연구에서 이를 적용할 때 큰 틀에서의 분석 프로세스를 참조하는 정도만 가능할 것으로 보인다. 각각의 연구에 맞는 맞춤형 분석 방법론이 필요하다고 판단되나, 이를 아우를 수 있는 방법론적 고찰이 추가적으로 필요할 것으로 사료된다. 최근 R&D는 기술 개발뿐 아니라 실증을 통한 실용화 및 상용화까지 필요로 하는 추이이다. 본 연구가 영상인식 기반 미세먼지 관측 과제뿐 아니라 타 과제에서의 지자체 실증 시 참조되는 모범사례가 되길 기대한다.

주 1. 관제센터 담당 공무원에 따르면, 연구 목적을 고려하여 CCTV의 화각 조정은 일부 가능하다고 하다.

인용문헌
References

1. 김선구·최용석·신정신, 2013. "Fuzzy-AHP 의사결정모형에 의한 중소도시 소매유통센터의 입지선정 연구", 「산업경제연구」, 26(5): 2361-2377.
Kim, S.G., Choi, Y.S., and Shin, J.S., 2013. "A Study on the Location Selection of Retail Stores in Local Small City", *Journal of Industrial Economics and Business*, 26(5): 2361-2377.
2. 김성준·박현진·이상진·김창혁·이승복·최성득, 2018. "지리정보시스템을 활용한 서울시 유해대기오염물질 우선순위 측정지역 선정", 「한국대기환경학회지」, 34(2): 223-232.
Kim, S.J., Park, H.J., Lee, S.J., Kim, C.H., Lee, S.B., and Choi, S.D., 2018. "Selection of Priority Monitoring Areas for Hazardous Air Pollutants (HAPs) in Seoul using Geographic Information System", *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(2): 223-232.
3. 김아영·권창희, 2016. "GIS를 이용한 도심지 대기오염 측정망 최적위치 선정에 대한 연구: 서울특별시를 대상으로", 「한국재난정보학회논문집」, 12(4): 358-365.
Kim, A.Y. and Kwon, C.H., 2016. "Study on Optimal Location of Air Pollution Monitoring Networks in Urban Area Using GIS: Focused on the Case of Seoul City", *Journal of the Korean Society of Disaster Information*, 12(4): 358-365.
4. 김정섭, 2019. "AHP 및 Fuzzy 의사결정 모형을 활용한 장치라인의 CTP 선정 방법론 개발", 금오공과대학교 박사학위 논문.
Kim, J.S., 2019. "Development of CTP Selection Methodology of Equipment Line Using AHP and Fuzzy Decision Model", Ph.D. Dissertation, Kumoh National Institute of Technology.
5. 김채복·홍원화·조영빈·김종달, 2013. "스마트그리드 관련 기술 및 서비스 평가기준 도출 및 AHP 방법을 이용한 상대적 중요도 분석", 「환경정책」, 21(3): 127-144.
Kim, C.B., Hong, W.H., Jo, Y.B., and Kim, J.D., 2013. "Extraction of Evaluation Criteria on Technology and Service Related to Smart Grid and Analysis of Relative Importance among Evaluation Criteria by AHP Method", *Journal of Environmental Policy and Administration*, 21(3): 127-144.

6. 김효정·조완근, 2012. "공간 보간법을 이용한 도시지역 미세먼지 측정소의 배치 적절성 평가", 「한국지형공간정보학회지」, 20(2): 3-13.
Kim, H.J. and Jo, W.K., 2012. "Assessment of PM-10 Monitoring Stations in Daegu using GIS Interpolation", *Journal of the Korean Society for Geospatial Information Science*, 20(2): 3-13.

7. 박유진, 2013. "Fuzzy-AHP/DEA 기법을 이용한 SCM 효율성 분석", 연세대학교 박사학위 논문.
Park, Y.J., 2013. "Analyzing the Efficiency of SCM using Fuzzy-AHP/DEA", Ph.D. Dissertation, Yonsei University.

8. 송인상·김선영, 2016. "미세먼지(PM10)의 지역적 대푯값 산정 방법에 관한 연구: 서울특별시를 대상으로", 「한국지리정보학회지」, 19(4): 118-129.
Song, I.S. and Kim, S.Y., 2016. "Estimation of Representative Area – Level Concentrations of Particulate Matter(PM10) in Seoul, Korea", *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, 19(4): 118-129.

9. 원태연·어양담·성홍기·정규수·윤준희, 2020. "CCTV 영상으로부터 미세먼지 추정에서 학습영상조합, 기상변수 적용이 결과에 미치는 영향", 「한국측량학회지」, 38(6): 573-581.
Woon, T.Y., Eo, Y.D., Sung, H.K., Chong, K.S., and Youn, J.H., 2020. "Effect of the Learning Image Combinations and Weather Parameters in the PM Estimation from CCTV Images", *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, 38(6): 573-581.

10. 유재환·김학열, 2011. "서울시 대기오염측정소의 중복가능성 평가", 「도시행정학보」, 24(4): 299-313.
Yoo, J.H. and Kim, H.Y., 2011. "An Evaluation on Redundancy of Air Pollution Monitoring Stations in Seoul", *Journal of the Korean Urban Management Association*, 24(4): 299-313.

11. 유주한·정성관·박경훈·김경태, 2006. "삼각퍼지수를 활용한 지역환경 평가지표 순위 결정: 생태계를 중심으로", 「환경영향평가」, 15(6): 395-406.
Yoo, J.H., Jung, S.G., Park, K.H., and Kim, K.T., 2006. "Rank Decision on Regional Environment Assessment Indicators Using Triangular Fuzzy Number: Focused on Ecosystem", *Journal of Environmental Impact Assessment*, 15(6): 395-406.

12. 윤정미·이성호, 2002. "Fuzzy-AHP를 적용한 셀루라오토마타의 네이버후드 및 전이규칙에 관한 연구: 부산광역시를 중심으로", 「국토계획」, 37(4): 83-94.
Yun, J.M. and Lee, S.H., 2002. "A Study on Neighborhood and Transition Rule of Cellular Automata with Application Fuzzy-AHP", *Journal of Korea Planning Association*, 37(4): 83-94.

13. 이금숙, 2008. "교통흐름에 기인하는 미세먼지 노출 도시인구에 대한 시·공간적 분석", 「한국경제지리학회지」, 11(1): 59-77.
Lee, K.S., 2008. "Spacio-Temporal Analysis of Urban Population Exposure to Traffic-Related Air Pollution", *Journal of the Economic Geographical Society of Korea*, 11(1): 59-77.

14. 정종철, 2018. "영등포구 신규 측정소 선정을 위한 공간분석", 「서울도시연구」, 19(4): 61-73.
Jeong, J.C., 2018. "Study on the Spatial Analysis for the Selection of a New Monitoring Station in Yeongdeungpo-gu", *Seoul Studies*, 19(4): 61-73.

15. 최윤의·전진형·이정아, 2014. "도시광장 설계요소 및 공간이용 만족도 분석: 광화문광장과 금빛공원광장을 중심으로", 「한국조경학회지」, 42(6): 111-123.
Choi, Y.E., Chon, J.H., and Lee, J.A., 2014. "An Analysis of Design Elements and Satisfaction on the Usability of City Squares: Focused on Gwanghwamun Square and Geumbit Square", *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture*, 42(6): 111-123.

16. 퍼지기술연구회, 1992. 「퍼지이론해설」, 기전연구사.
Fuzzy Technology Research Group, 1992. *Fuzzy Theory Explanation*, MJmedia.

17. 홍순원·이재성, 2019. "CCTV를 이용한 미세먼지 농도 유추 방법", 「한국정보통신학회논문지」, 23(10): 1234-1239.
Hong, S.W. and Lee, J.S., 2019. "An Method for Inferring Fine Dust Concentration Using CCTV", *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, 23(10): 1234-1239.

18. Bo, Q., Yang, W., Rijal, N., Xie, Y., Feng, J., and Zhang, J., 2018. "Particle Pollution Estimation from Images Using Convolutional Neural Network and Weather Features", Paper presented at 2018 25th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), Athens, Greece.

19. Chakma, A., Vizena, B., Cao, T., Lin, J., and Zhang, J., 2017. "Image-based Air Quality Analysis Using Deep Convolutional Neural Network", Paper presented at 2017 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), Beijing, China.

20. Chang, D.Y., 1996. "Applications of Extent Analysis Method on Fuzzy AHP", *European Journal of Operational Research*, 95(3): 649-655.

21. He, Z., Ye, X., Gu, K., and Qiao, J., 2018. "Learn to Predict PM2.5 Concentration with Image Contrast-Sensitive Features", Paper presented at 2018 37th Chinese Control Conferenc (CCC), Wuhan, China.

22. Kahraman, C., Cebeci, U., and Ruan, D., 2003. "Multi-attribute Comparison of Catering Service Companies using Fuzzy AHP: The Case of Turkey", *International Journal of Production Economics*, 87(2): 171-184.

23. Kim, S.H. and Kim, S.I., 2018. "Vision-based Predictive Model on Particulates via Deep Learning", *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 13(5): 2107-2115.

24. Kim, S.H., Jung, S.H., Yang, S.M., Han, J.S., Lee, B.Y., Lee, J.H., and Han, S.W., 2019. "Vision-Based Deep Q-Learning Network Models to Predict Particulate Matter Concentration Levels Using Temporal Digital Image Data", *Journal of Sensors*, 2019: 9673047.

25. Lee, S.K., Mogi, G., and Kim, J.W., 2009. "Decision Support for Prioritizing Energy Technologies against High Oil Prices: A Fuzzy Analytic Hierarchy Process Approach", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 22(6): 915-920.

26. Liu, C., Tsow, F., Zou, Y., and Tao, N., 2016. "Particle Pollution Estimation Based on Image Analysis", *Plos One*, 11(2): 0145955.

27. Rijal, N., Gutta, R.T., Cao, T., Lin, J., Bo, Q., and Zhang, J., 2018. "Ensemble of Deep Neural Networks for Estimating

Particulate Matter from Images", Paper presented at 2018 IEEE 3rd International Conference on Image, Vision and Computing (ICIVC), Chongqing, China.

28. Saaty, T.L., 1986. "Absolute and Relative Measurement with the AHP. The Most Livable Cities in the United States", *Socio-Economic Planning Sciences*, 20(6): 327-331.

29. Thengane, S.K., Hoadley, A., Bhattacharya, S., Mitra, S., and Bandyopadhyay, S., 2014. "Cost-benefit Analysis of Different Hydrogen Production Technologies using AHP and Fuzzy AHP", *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(28): 15293-15306.

30. van Laarhoven, P.J.M. and Pedrycz, W., 1983. "A Fuzzy Extension of Saaty's Priority Theory", *Fuzzy Sets and Systems*, 11(3): 229-241.

31. Won, T.Y., Eo, Y.D., Sung, H.K., Chong, K.S., Youn, J.H., and Lee, G.W., 2021. "Particulate Matter Estimation from Public Weather Data and Closed-Circuit Television Images", *KSCE Journal of Civil Engineering*, 26(2): 336-352.

32. Zadeh, L.A., 1965. "Fuzzy Sets", *Information and Control*, 8(3): 338-353.

Date Received 2021-09-30
Reviewed(1st) 2021-11-21
Date Revised 2022-02-20
Reviewed(2nd) 2022-03-13
Date Accepted 2022-03-13
Final Received 2022-05-06