

기술자료

통합환경관리제도의 대기평가방법론 현황 및 개선방안

The Present Status and Improvement of Air Quality Assessment Methodology for Integrated Environmental Permission System

서지혜, 황현정, 간종범, 이선경, 김영란*

국립환경과학원 환경자원연구부 자연환경연구과

Ji Hae Seo, Hyeon-Jeong Hwang, JongBeom Khan,
Sunkyung Lee, YoungLan Kim*

Natural Environment Research Division, Environmental Resource Research Department,
National Institute of Environmental Research, Incheon, Republic of Korea

접수일 2021년 3월 5일
수정일 2021년 3월 24일
채택일 2021년 4월 26일

Received 5 March 2021
Revised 24 March 2021
Accepted 26 April 2021

*Corresponding author
Tel : +82-(0)32-560-7690
E-mail : ylkim0@korea.kr

Abstract Integrated environmental permission system, which was introduced to effectively manage pollutants generated by industry, assess air pollutants using discharge impact analysis and set the permissible discharge standards according to environmental characteristics. The method of setting permissible discharge standards through discharge impact analysis is a method already applied in Europe and United States. For this reason, comparing and researching the air quality assessment methods of the countries in which it is applied is considered to be helpful in deciding the direction of Korea's integrated environmental permission system. In this study, the air quality assessment methodologies of United States, United Kingdom, Germany and Korea integrated environmental permission systems were compared. In case of United States, United Kingdom and Germany, developing and applying model and factors which were reflected the characteristics of their own countries for accurate air quality assessment. On the other hand, Korea's integrated environmental permission system was assessed by applying the H1 guideline in the United Kingdom, TA-Luft in Germany, and AERMOD modeling in the United States. In addition, in Korea's integrated environmental permission system, all industries and pollutants are assessed by applying the same modeling method. For this reason, it is difficult to reflect interaction factors according to industry, materials, surrounding environment. In additions, there is a limitation in that the assessment method for secondary pollutants such as ultra-fine dust (PM-2.5) or ozone generated by photochemical reactions, and the permissible discharge standards for this have not been specifically established. In order to overcome the limitations of the current integrated environmental permission system, it is judged that it is necessary to advance the pollutant assessment methods and discharge impact analysis modeling by referring to the assessment methods of abroad.

Key words: Integrated environmental permission system, Integrated permit, Discharge impact analysis, Permissible discharge standards, Air quality assessment method

1. 서 론

산업의 다양화 및 고도화로 인해 발생한 오염물질이 환경오염의 원인이 되면서 지구상 생물의 생존을 위협하고 있다. 이러한 문제 해결을 위하여 전 세계적으로 오염물질 저감과 관련한 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 미국과 유럽 같은 선진국에서는 2000년

대 초반부터 산업 활동으로 인한 환경 영향을 모니터링 및 관리하는 연구를 진행하여 관련된 평가방법 및 배출영향분석방법, 영향평가프로그램의 개발 및 적용이 현장에서 활발하게 이뤄지고 있다(US EPA, 2019; EA, 2016).

우리나라 역시 1960년대 공해방지법을 시작으로 환경오염에 대한 지속적인 연구가 이루어지고 있

며, 환경에 대한 법은 법률 체계에 따라 환경보전법에서 환경정책기본법, 환경영향평가법, 환경오염시설의 통합관리에 관한 법률 등으로 세분화되어 발전하였다. 2000년도에 들어서는 발생오염물질의 허가배출기준을 설정하거나 이를 처리하는 연구뿐만 아니라 KEI (2019)의 연구와 같이 배출시설 설치 계획단계에서 환경에 미치는 영향을 사전 평가하여 피해를 최소화하는 환경영향평가제도가 도입되어 시행되고 있다. 그러나 기존 제도로는 오염물질에 관한 배출기준의 확실성, 동일한 시설에 대해 중복되는 여러 매체법의 인·허가 및 제한적으로 고려되는 주변 환경 범위와 같은 문제점을 해결하기에는 어려움이 있었다.

이를 해결하기 위해 2017년부터 통합환경관리제도(이하 통합허가제도)와 「환경오염시설 통합관리에 관한 법률」(이하 통합법)이 입법 및 시행되고 있으며, 이 제도의 가장 큰 특징은 사업장 허가에 대한 접근 방식을 허가기관과의 협의를 통한 상호보완적 방식으로 진행하여 장기적인 환경관리를 추구한다는 점이다 (Kim *et al.*, 2017; KEI, 2006). 통합허가제도의 적용을 통해 사업장은 수용 가능한 수준에서의 허가배출기준을 설정하여 효과적으로 오염물질 관리가 가능하며, 관계 당국은 기존 제도에서 발생하는 문제를 보완하는 동시에 허가 대상인 사업장의 배출규제 집행 및 관리가 제도적으로 가능하다. 하지만 통합허가제도의 시행기간이 오래되지 않는 탓에 제도 정착을 위한 지속적인 연구와 보완이 필요한 상태이다.

본 연구는 국내·외 대기평가방법에 대한 자료 조사와 비교를 통해 세부 방법론에 대한 고찰을 진행하고, 이를 통해 우리나라의 대기평가방법과 통합허가제도가 향후 나아갈 방향을 제안하고자 한다.

2. 연구 방법

통합허가제도의 효과적인 적용을 위해 이를 선도적으로 시행하고 있는 미국, 독일, 영국의 허가제도와 국내 통합허가제도에서의 대기평가방법을 비교하였다.

구체적으로는 미국 환경청 (US EPA)의 청정대기법 (Clean Air Act), 독일의 이미시온(인간, 동물, 식물, 환경 등에 영향을 미치는 대기오염) 방지법 및 TA-Luft (Annex 3, 대기확산모델-입자모델), 영국 H1 가이드라인과 국내 통합환경관리제도의 대기평가방법과 대기질 모델링, 오염물질 허가배출기준 설정방법을 비교 검토하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 국외 대기평가방법 비교

국내 통합허가제도의 대기평가방법 개선을 위해 비교를 진행한 미국, 독일, 영국의 개략적인 대기평가방법 내용을 정리하면 표 1과 같다.

미국은 통합환경관리와 환경오염 원인물질의 관리를 위해 다매체적 접근방법을 채택하고 있으며 1984년 미국 환경보호청 (US EPA)과 환경보존재단이 공동주최한 ‘새로운 차원의 오염관리’에서부터 본격적인 논의가 시작되었다 (Park, 2008).

미국의 대기환경정책은 지역 구분, 배출규모, 배출오염물질 종류, 광화학 반응, 배출원 특성, 기후·대류 특성, 신규사업 등의 다양한 요소를 고려해 수립되며, 오염물질의 허가배출기준 산정은 기본적으로 대기오염 통제를 위해 설정된 미국의 연방법인 CAA (Clean Air Act), 미국 대기질 기준인 NAAQS (National Ambient Air Quality Standards) 및 NAAQS로 분류가 어려운 오염원에 대한 내용인 PSD (Prevention of Significant Deterioration)를 바탕으로 진행된다.

오염원의 평가는 미국 환경보호청이 규정한 신설 공장에서의 용제 사용량의 규제를 의미하는 NSPS (New Source Performance Standards)와 오염물질 배출량과 에너지 소비를 효과적으로 저감 가능한 환경관리기술인 BACT (Best Available Control Technology), 기술로 달성 가능한 최저 배출 값에 근거한 배출기준을 의미하는 LAER (Lowest Achievable Emission Rate), 유해오염물질 (Hazardous Air Pollutants, HAPs)

Table 1. Comparison of air pollutant discharge impact analysis methods in the United States, United Kingdom and Germany (US EPA, 2019; EA, 2016; BMU, 2002).

Classification		United States	Germany	United Kingdom
Assessment method and application model		<ul style="list-style-type: none"> • NAAQS (Ambient Air Quality Standards) • PSD (Prevention of Significant Deterioration) • AERMOD • Assess by step (NSPS, BACT, LAER, MACT, RACT) 	<ul style="list-style-type: none"> • Federal Immission Control Act (Immission prevention method) • Technical Instructions on Air Quality Control (TA Luft) • AUSTAL 2000 (Air pollution diffusion model) • VDI 3945 part 3 (Atmospheric diffusion model-particle model) 	<ul style="list-style-type: none"> • H1 Guideline • Annex F1 in H1 Guideline • Assess the suitability of BAT with H1 Software tool
Environmental impact assessment		<ul style="list-style-type: none"> • Changes in emissions over time and weather conditions are taken into account when calculating pollution levels. • The total pollution level is calculated by adding the additional pollution predicted as a result of AERMOD to existing pollution levels. 	<ul style="list-style-type: none"> • Define the characteristic value of emission through material-specific instructions according to the facility characteristics. • Calculate the additional pollution degree, existing pollution degree and reflecting characteristics of immission. • Displays the total pollution degree from existing and additional pollution. 	<ul style="list-style-type: none"> • BC + PC = PEC • (Background concentration + Process contribution = Predicted Environmental Concentration)
Discharge impact analysis	Simplified analysis	<ul style="list-style-type: none"> • Permissible discharge standards are set using different atmospheric diffusion modeling in each United States. 	<ul style="list-style-type: none"> • $PC_{Long\ term} < 3\% EQS$ • $PC_{Short\ term} < 5\% EQS$ 	<ul style="list-style-type: none"> • $PC_{Long\ term} < 1\% EQS$ • $PC_{Short\ term} < 10\% EQS$
	Detailed analysis		<ul style="list-style-type: none"> • If the total pollution level exceeds the permissible discharge standard, conduct a detailed analysis (AUSTAL 2000). 	<ul style="list-style-type: none"> • $PC_{Long\ term} + BC > 70\% EQS$ • $PC_{Short\ term} > 20\%$ ($EQS_{Short\ term} - 2 \times BC_{Long\ term}$)
Required information		<ul style="list-style-type: none"> • AERMOD <ul style="list-style-type: none"> – Company information – Terrain data – Stack data – Weather data – Background concentration statistical data – Emission pollutant data (Process concentration of pollutant, emission flow, flow rate, emission temperature) 	<ul style="list-style-type: none"> • Emission sources and emission strengths • Meteorological time series or a dispersion class statics • Time series of parameter value • Case-dependent parameters • Register of roughness lengths • Terrain profile 	<ul style="list-style-type: none"> • Substances released • Height, location and gas efflux velocity of releases • Predicted normal and maximum emissions expressed where appropriate as mass/unit time, concentration and total flow, or annual mass emissions • Plant loads at which the data are applicable • Statistical basis of releases (Average, percentile) • Whether the effects associated with the releases are long term or short term • The predicted frequencies of emissions if they are intermittent • Other relevant information such as building effects

Table 1. Continued.

Classification	United States	Germany	United Kingdom
Characteristic of method	<ul style="list-style-type: none"> • Unconditional assessment of new sources 	<ul style="list-style-type: none"> • Standard for exemption from existing pollution calculation <ul style="list-style-type: none"> - Average annual value < 85% of emission concentration - Measured value over 24 hours < 95% of emission concentration over 24 hours (except for PM-10) - Measured value over an hour < 95% of emission concentration over an hour - The number of atmospheric concentration (based on 24 hours) exceeds 50 µg/m³ in three years < 15 times (based on one year, PM-10) 	<ul style="list-style-type: none"> • Substances with little environmental impact through pre-screening are excluded from assessment. <ul style="list-style-type: none"> • PC < EQS_{Long term} 1% • PC < EQS_{Short term} 10%
Reference of permissible discharge standards	<ul style="list-style-type: none"> • NAAQS (National Ambient Air Quality Standards) 	<ul style="list-style-type: none"> • BImSchV, TA-Luft 	<ul style="list-style-type: none"> • EQS or EALs Annual Average Concentration and Maximum Admissible (or 95percentile concentration)
Legal basis	<ul style="list-style-type: none"> • Clean Air Act Amendment 	<ul style="list-style-type: none"> • Federal Immission Control Act (BImSchG), Council Directive 96/61/EC 	<ul style="list-style-type: none"> • Environmental Permit Regulation

제어 수준을 의미하는 MACT (Maximum Achievable Control Technology), 합리적으로 이용 가능하며 기술이나 경제적으로 실행 가능한 수준의 오염제어기술인 RACT (Reasonably Available Control Technology)로 구분하여 평가를 진행한다.

대기질 평가방법과 모델링은 오염물질의 종류나 사업장이 설치되어 있는 주(州)에 따라 각각 다르게 적용되나, 대부분 가우시안 모델 (Gaussian Model)을 기반으로 발전된 형태의 모델링을 적용한다. 대표적인 모델로는 미국 환경청에서 개발 및 보급하는 ISC3 (Industrial Source Complex Model), AERMOD (American Meteorological Society and United States Environmental Protection Agency Regulatory Model), CALPUFF (California Puff Model) 등이 있으며, 각 모델의 특징은 다음과 같다.

ISC3 모델은 시간단위 기상정보를 기반으로 정상 상태 (Steady-state)의 가우시안 확산 모델을 적용하는 단기 모델 (ISC Short-Term 3)과 기상 결합 빈도 함수를 가우시안 부분평균 (Gaussian sector-average) 확산 모델에 적용하는 장기 모델 (ISC Long-Term 3)로 구분되며, 일반적으로 사업장 오염물질의 확산을 평가할 때는 장기, 단기를 모두 모사 가능한 ISCST 모델이 주로 사용된다 (US EPA, 1987).

AERMOD 모델은 가우시안 플룸 함수 (Gaussian Plume Function)를 기반으로 하는 대표적인 배출영향 분석 미시 분석모델로 시공간적 범위가 50 km 이하로 좁은 경우에 적용이 적합하며, 실제 지형과 대기 효과, 고도에 따른 연기확산계수, 풍속 변화를 대기경계층 상사이론 (Similarity Theory)에 적용하여 계산을 진행한다 (US EPA, 2019; KEI, 2005).

CALPUFF 모델은 라그랑지안 가우시안 퍼프 (Lagrangian Gaussian Puff) 모델로 굴뚝에서 연속 배출되는 오염물질이 여러 덩어리 (Puff)의 형태로 배출된다고 가정하였을 때, 물질들이 3차원 공간에서 바람장을 따라 이동 및 확산하면서 미치는 영향을 농도 형태로 나타내는 모델이다 (Koo *et al.*, 2007). 이 모델은 점, 면 오염원에 대한 시간적 농도 변화의 계산이 가능하

고, 오염원으로부터의 거리와 복잡한 지형을 반영 가능하다는 장점을 가진다(Ha *et al.*, 2017; Scire *et al.*, 2000).

또한 미국의 경우, 오염물질의 영향을 평가하기 위한 모델링을 수행할 시에는 GEP (Good Engineering Practice) Stack Policy를 적용하여야 한다. GEP Stack Policy란 굴뚝의 물리적 높이에 따라 모델링에 적용하는 굴뚝 높이에 차이를 두는 방법으로 실제 굴뚝 높이가 GEP 굴뚝 높이보다 높은 경우, GEP 굴뚝 높이로 모델링을 수행하고 낮은 경우에는 기존의 실제 굴뚝

높이를 이용하여 모델링을 수행한다. 이러한 방법을 적용하는 이유는 downwash 현상(굴뚝 또는 건물 후면의 부압으로 인해 일부 바람이 소용돌이 상태로 하강하는 현상) 때문이다. 만약 실제 굴뚝의 높이가 GEP 굴뚝 높이 이상인 경우, downwash 현상을 고려하게 되면 유효 굴뚝 높이의 감소로 인해 오염물질 농도가 기준치 농도를 초과하는 현상이 쉽게 발생할 수 있다.

모델링을 통해 산정된 오염물질의 활동도와 배출계수는 오염물질 배출량을 산정하는 데 반영되며, 산정

Table 2. Air quality assessment methods in Germany (BMU, 2002).

Air quality assessment method
<p>• Immission calculation method</p> <ul style="list-style-type: none"> - Emission source area: An area within a radius of 50 times the height of stack around the emission source, If there are multiple sources of emission, the calculation area should be selected more widely. - If the emission intensity is affected by the wind speed, relevant matter should be reflected. - The short-term assessment criterion for the assessment of immission can be calculated through the diffusion calculation method of VID 3945 (AUSTAL 2000). Effective stack height, deposition rate, sedimentation rate, wind direction, and heat flow act as effective factors. - Calculation of effective stack height is generally in accordance with guidelines VDI 3782, and in the case of exhaust gas emissions through cooling towers, follow guidelines of VDI 3784. - Heat flow: The flow of energy when heat energy moves through the generation and absorption of heat. $M = 1.36 \times 10^{-3} \times R'(T-283.15K) \quad (1)$ <p>R' = Exhaust gas flow rate in standard condition (m^3/s) T = Temperature of exhaust gas (K)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Wind direction $r(z) = r_a + D(z) - D(h_a) \quad (2)$ $D(z) = 1.23D_h[1 - \exp(-1.75z/h_m)] \quad (3)$ $h_m = \begin{cases} \alpha \frac{u^*}{f_c} & \text{for } L_M \geq \frac{u^*}{f_c} \\ \alpha \frac{u^*}{f_c} \left(\frac{f_c L_M}{u^*}\right)^{1/2} & \text{for } 0 < L_M < \frac{u^*}{f_c} \end{cases} \quad (4)$ <p>r = Wind direction z = Ground height D = Rotation h_m = Mixed layer height u^* = Friction speed α = Coefficient (0.3) f_c = Coriolis parameters ($10^{-4} S^{-1}$) L_M = Monin-Obukov length</p> <ul style="list-style-type: none"> - In the diffusion calculation, an evenly distributed wind direction is randomly selected and used. In the case of non-uniformity, a value distributed evenly among the wind directions between 1° and 360° is randomly selected and used. If the wind stops and it is difficult to calculate the wind direction, the method is applied differently depending on whether the stopping time is more than two hours or less. - Equation (4) is the formula used to calculate the mixed layer height (h_m) applied to Equation (2) and (3) when it is incorrect. The frictional velocity (u^*) can be obtained from the wind profile of the atmospheric boundary layer model. Monin-Obukov Length (L_M) is a factor that refers to atmospheric stability, and can be obtained by calculating the diffusion class using the Klug/Manier formula and substituting it in meters according to the VDI 3782 guidelines.

된 배출량이 환경기준을 만족하는지 평가하고 평가 결과를 바탕으로 관련 정책의 수립 및 집행(배출시설의 설치변경허가, 사업장 단위의 오염물질 배출 감시, 정책 집행에 따른 규제수준 및 편익 분석 등)이 이루어진다.

독일의 경우, 독일 연방 배출규제법(Federal Immission Control Act, BImSchG, Bundes-Immissionsschutzgesetz)의 하위법령인 대기오염방지 기술지침(Technical Instructions on Air Quality Control, TA-Luft)에 따라 오염물질 평가와 허가배출기준 설정을 진행한다. 기술지침에는 정부가 배출시설 허가 시 매체통합적 측면에서 고려하여야 할 세부사항, 오염도를 고려한 허가배출기준의 설정 규정, 모든 대기오염물질에 대한 추가적인 배출제한 사항 등의 내용이 구체적으로 포함되어 있다.

오염물질 배출량이나 배경농도인 기존오염도(BC), 사업장 설치·운영으로 인한 추가오염도(PC)가 낮은 경우에는 허가배출기준을 설정하지 않는 경우도 존재하며, 표 1의 내용과 같이 기존오염도의 산출 면제가 가능한 경우도 있다(BMU, 2002). 면제 대상을 제외하고는 발생한 오염물질에 대한 이미시온(인간, 동·식물, 환경 등에 영향을 미치는 대기오염, Immission) 특성치 산정과 평가가 진행되어야 하며, 대기질 오염도는 라그랑지안(Lagrangian) 입자 확산 모델을 적용한 AUSTAL 2000을 이용하여 평가를 진행한다. 이미시온 특성치 산정과 허가배출기준 설정에 관련한 내용은 표 2와 같다.

모델링에서 가스상 물질의 확산 계산을 진행할 때는 배출 당시의 조건이 반영되어야 하며, 암모니아와 가스상 수은에는 각각 0.010, 0.005의 침적속도(V_d , m/s)를 적용하여 계산을 진행한다. 먼지의 경우는 입자크기에 따른 분포를 공기중역학적 직경으로 분류한 값을 침적속도 V_d , 침전속도 V_s 로 산정하며, 입자 직경에 따른 V_d , V_s 는 표 3과 같이 정리할 수 있다.

먼지 중에서 총 먼지의 침적 값은 각 등급 침적 값의 합으로 산정하며, PM-10(공기중역학적 직경 10 μm 미만의 먼지 입자)은 입자크기 등급 1, 2의 합을

Table 3. Dust deposition and sedimentation velocity (BMU, 2002).

Grade	Particle size (μm)	Deposition velocity (m/s)	Sedimentation velocity (m/s)
1	Less than 2.5	0.001	0.00
2	2.5 to 10	0.01	0.00
3	10 to 50	0.05	0.04
4	More than 50	0.20	0.15

침적 값으로 산정한다. 입자크기 분포가 부정확한 경우, PM-10은 등급 2로 처리하고 직경 10 μm 이상의 먼지는 V_d 0.07 m/s, V_s 0.06 m/s를 적용하며, 침적에 대한 이미시온 기준이 정해져 있지 않은 물질은 이를 제외하고 계산을 진행한다. 만약 오염물질의 이미시온 기준치가 정해지지 않았거나 이미시온 기준치가 연간, 일일, 시간 기준치를 만족시키지 못하는 물질에 대해서는 특례심사를 통하여 허가배출기준 설정이 가능하다. 이때, 이미시온 물질에 대한 5년 이내의 측정 자료를 증빙으로 제출하여야 한다(BMU, 2002).

영국은 1990년 매체별 환경법규를 통합한 환경보호법을 제정하여 통합적 환경관리체계(Integrated Pollution Control, IPC)라는 새로운 산업체 환경규제 구조를 확립하였다. 이 규제방식은 환경오염에 대한 수치를 합하여 제시하던 예전의 방식과 달리 근본적인 오염 예방을 강조하는 방식이며, 허가절차 간소화를 통해 사업장 부담을 경감한다는 목적을 가지고 있다(EA, 2016).

영국의 경우, 대기평가방법과 오염물질 관리 및 허가는 기본적으로는 영국환경청의 수평적 지침서(Horizontal Guidance Note) H1을 따라 이루어진다. 오염물질을 배출하는 사업장이 설치되는 경우, H1 가이드라인에 따라 오염물질의 희석 및 확산이 환경에 미치는 영향을 정량화하고, 발생된 오염물질의 수용가능한 수준여부에 대한 평가를 진행한다. 오염물질이 다양하게 배출되는 소각시설 등의 연소사업장이나 오염물질 배출량이 미미한 사업장에 대해서는 ADMS(Atmospheric Dispersion Model System) 모델 등을 별도로 적용하여 평가를 진행하고 있다. 또한, 사전스크

Table 4. Air quality assessment methods in United Kingdom (EA, 2016).

Air quality assessment method
<ul style="list-style-type: none"> • H1 software provided by the Environment Agency(EA) is used to evaluate hazards, if emission pollutant PC is low, exclude from the assessment target. • Company that conduct detailed assessment must perform discharge impact analysis, and the analysis is conducted in consideration of statistical techniques and regional environmental characteristics. • In discharge impact analysis, emission sources are divided into large point emission sources and small point emission sources. • Large point emission sources are modeled using a diffusion model, and small point emission sources are modeled using the Dispersal Kernel.
<ul style="list-style-type: none"> - Conditions for proceeding with detailed model $PC_{Long\ term} + BC > 70\% EQS, \quad PC_{Short\ term} > 20\% (EQS_{Short\ term} - 2 \times BC_{Long\ term})$
<ul style="list-style-type: none"> - Background concentration (BC) is calculate using the time average at all assessment points. - Process concentration (PC) is calculate average annual frequency distribution of wind direction, wind speed, and diffusion class. It is possible to calculate the annual average of PC, by using frequency distribution which applied diffusion model, that using pollutant concentration at receptor and deposition value.
<ul style="list-style-type: none"> • Establishment of the permissible discharge standard of company is set up by comparing and analyzing the PEC (Predicted Environmental Concentration) calculated through the discharge impact analysis. PEC and PC can be calculated using the equation (5), (6), (7). • Applying equation (8), (9), it is possible to calculate effective stack height and emission rate.
$PEC = PC + BC \quad (5)$
$PEC_{short\ term} = PC_{short\ term} + (2 \times BC) \quad (6)$
$PC_{air} = DF \times RR \quad (7)$
$U_{eff} = 1.66H \left(\frac{U_{act}}{H} - 1 \right) \quad (8)$
$Flow = U_{eff} \times r^2 \times 3.14 \times V_{efflux} \quad (9)$
<p> PC_{air} = Process concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) RR = Release rate (g/s) DF = Maximum average surface concentration per discharge rate (Diffusion coefficient, $\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{g/s}$) U_{eff} = Effective height of stack U_{act} = The height of stack from the bottom of building H = Building height r = Radius of stack V_{efflux} = Measured discharge rate </p>
<ul style="list-style-type: none"> • Formula for calculating the effect of air pollutants when it diffused into deposited in soil.
$PC_{ground} = \frac{(PC_{air} \times RR \times DV \times 3 \times 86400)}{1000} \quad (10)$
<p> PC_{ground} = Process concentration according to daily deposition rate ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{day}$) RR = Release rate (g/s) DV = Sedimentation rate (0.01 m/s) 3 = Sedimentation coefficient $86,400$ = A value expressed in seconds per day </p>

리닝을 통해 사업장에서 발생하는 오염물질이 환경에 미치는 영향이 미미한 것으로 확인된 경우, 해당 물질에 대한 평가를 제외하는 것이 가능하다. 허가 종류는 일반 표준허가(Standard Rules Permits)와 추가 검토가 필요한 경우 혹은 환경청에서 배출영향분석 수업을 요청하는 경우에 시행하게 되는 맞춤형 허가(Bespoke Permitting)로 나누어진다.

대기질 평가를 위한 사업장의 오염도 산정 및 허가 배출기준 설정에 대한 자세한 내용은 표 4와 같으며, 오염물질의 확산 평가를 위해 배출영향분석 및 모델링에서 사용되는 확산계수는 표 5와 같다. 확산계수는 유효 굴뚝 높이를 바탕으로 적용하며, 굴뚝 높이가 200 m 이상인 경우는 장기 확산계수 0.023, 단기 확산계수 2.3을 적용하여 평가를 진행한다.

Table 5. Dispersion coefficient of air pollutants (EA, 2016).

Effective height of stack (m)	Dispersion coefficient ($\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{g}/\text{s}$)		
	Long term: Maximum annual average	Monthly average	Short term: Maximum time average
0	148	529	3,900
10	32	34	580
20	4.6	6.2	161
30	1.7	2.3	77
50	0.52	0.68	31
70	0.24	0.31	16
100	0.11	0.13	8.6
150	0.048	0.052	4
200	0.023	0.026	2.3

배출영향분석을 통해 사업장에서 제시한 허가조건이 Environmental Permitting Regulation (EPR) 지침과 H1 Annex F-Air Emission을 만족하면 허가가 진행되며, 배출영향분석의 결과 값이 높은 경우는 허가가 거부될 가능성이 있다. 허가가 거부될 경우, 공정이나 연료 변경 및 개선 등의 오염저감 방안을 수립하여 다시 환경청에 제출하여야 하며, 환경의 질 목표수준이 최적가용기법(Best Available Technique, BAT)을 통해 달성 가능한 수준보다 엄격한 배출기준을 요구할 때는 Article 18 (Directives 2010/75/EU)에 의거하여 규제기관이 더 엄격한 기준을 부과하는 것이 가능하다(EA, 2016).

만약 계산된 최대 침적 비율에 따른 추가오염도가 기준치의 1%를 초과하는 경우나 사업장 중심으로 10 km 이내에 민감한 영향을 줄 수 있는 배출물질이 발생하는 경우에는 추가조사 여부를 고려하여야 한다.

3. 2 국내 통합환경관리제도

통합환경관리제도(통합허가제도)는 통합법을 기반으로 오염물질 배출시설에 대한 허가를 진행하고 이를 통한 효과적인 사업장 환경관리와 맞춤형 허가배출기준 설정을 목적으로 한다. 사업 계획과 사업 운영이 환경에 미치는 영향을 사전에 예측, 평가하고 그로 인해 발생 가능한 문제를 최소화하여 국민의 건강과 환경을 보호한다는 목적은 기존의 환경영향평가제도

(Environmental impact assessment, EIA)와 비슷하지만 사업장의 허가배출기준 설정을 위해 최적가용기법 및 배출영향분석을 개발하고 이를 적용한다는 점에서 목적 달성의 구체성 부분을 차이점으로 볼 수 있다(KEI, 2016).

통합법상에서 대기오염물질에 대한 평가는 표준모델링(배출영향분석)을 통해 이루어지며, 표준모델링 프로그램과 평가방법은 영국의 H1, 독일의 TA-Luft, 미국의 AERMOD 모델링을 기반으로 연구 개발이 진행되었다.

배출영향분석은 간이분석과 상세분석으로 구분되며, 이 중 간이분석은 식 (7)과 같이 영국의 H1 방법을 적용하여 오염물질의 추가오염도를 계산하고 계산한 추가오염도는 식 (11), (12)를 통해 평가하게 된다. 유효 분산 모델링 데이터가 있는 경우에는 이를 H1 방법 대신 적용 가능하다.

$$\sum_{All\ stack}(Volume\ of\ discharged\ pollutants) \times (DF_{Long\ term\ (LT)}) \leq 3\% EQS_{LT} \quad (11)$$

$$BC + \sum_{All\ stack}(Volume\ of\ discharged\ pollutants) \times (DF_{Long\ term\ (LT),\ Short\ term\ (ST)}) \leq 100\% EQS_{LT,\ ST} \quad (12)$$

간이분석을 이용하여 평가를 진행할 경우는 허가기관과 협의가 필요하며, 현재 국내 간이분석은 모멘텀(토출 속도에 의한 부력, 외부 공기 온도 등)이 고려되지 않는다는 한계점이 있어 대부분의 통합 허가 대상 사업장은 상세분석을 이용하여 대기오염물질에 대한 평가를 진행한다.

배출영향분석 중 상세분석은 표 6의 내용을 기준으로 오염물질이 환경에 미치는 영향을 평가하며, 2단계로 이루어진 배출영향분석을 통과하지 못하는 경우에는 사업장에서 발생하는 오염물질의 배출량을 저감하여야 한다. 이때, 저감된 배출량을 이용하여 진행한 재분석 결과 값은 평가기준을 만족해야 한다.

최종적으로 산정된 값이 평가기준을 통과한다면 사업장의 대기오염물질 허가배출기준은 최대배출기준 혹은 사업장이 제시한 배출기준으로 설정하게 되며,

그렇지 않은 경우에는 주변 환경기준 또는 환경의 질 목표수준(EQS)과 비교하여 환경영향이 없는 범위 내에서 허가배출기준을 도출하게 된다.

상세분석을 위한 입력자료와 허가배출기준의 설정 과정을 그림으로 표현하면 그림 1과 같다.

위의 내용과 같이 통합환경관리제도에서는 배출영향분석을 통한 결과에 따라 사업장의 허가배출기준이 산정되기 때문에 불확실성을 줄이는 것이 중요하다. 따라서 허가기관에서는 평가방법 및 모델링 프로그램과 프로그램에 반영되어야 하는 기상, 지형, 기존오염도 자료 등을 제공할 필요성이 있다. 이를 위해 허가기관에서는 사업장 주변지역의 기상 자료와 기존오염도

자료를 제공하고 있으며(Seok *et al.*, 2020), 기상 자료는 종관기상관측(Automated Synoptic Observing System, ASOS) 78개소와 상층기상관측 7개소의 자료를 기반으로 기상관측망에서 측정된 최근 1년간의 자료를 활용한다. 기존오염도는 국가 대기질 측정망에서 측정된 최근 3년간의 자료를 제공하며, 국가측정망에서 측정하지 않는 물질에 대해서는 0.0의 값을 기존오염도로 설정하도록 하고 있다. 만약 기상 자료 혹은 기존오염도 자료를 직접 산정하여 사용하고자 할 경우는 공인된 측정법으로 측정된 자료를 사용하여야 하며, 관련 서류를 증빙자료로 제출하여야 한다(MOE, 2017).

Table 6. Analysis stage and criteria of assessment for Korean type discharge impact analysis program (MOE, 2021).

Classification	Analytical method	Criteria of assessment
Step 1	Assessment of environmental contribution rate, which of additional pollution contribution by standard modeling	$PC_{LT} < 3\% EQS$
Step 2	Assessment of environmental contribution rate, which of additional pollution contribution and total contaminate contribution by standard modeling	$PEC_{LT} < 100\% EQS$ $PC_{ST} < EQS_{ST-LT}$ $PEC_{LT} < 100\% EQS$

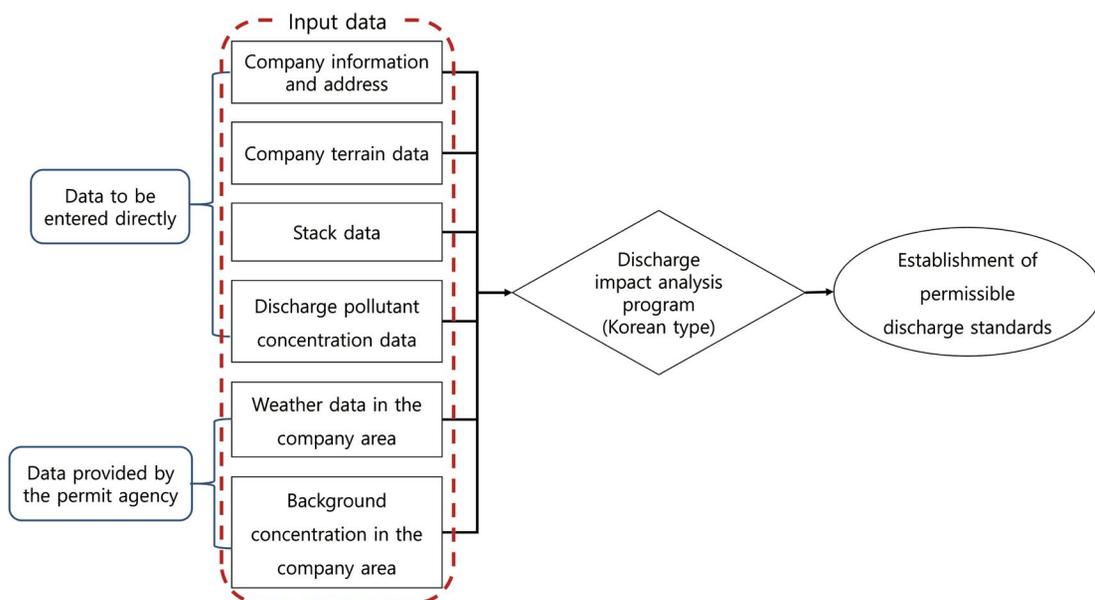


Fig. 1. Establishment of permissible discharge standards through discharge impact analysis.

Table 7. Air quality assessment method in Korea (MOE, 2021).

Applied statutes & model	Air quality assessment method
<ul style="list-style-type: none"> Integrated management of environmental pollution facilities law Korean type discharge impact analysis program AERMOD²⁾ 	<ul style="list-style-type: none"> Simplified analysis uses a simplified analysis tool provided by the Ministry of Environment. Pollution contribution is calculated by entering the information on the stack and the emission of pollutants. PC of company is calculated as the product of emission and the diffusion coefficient as shown in the following equation, and is calculated for all stacks in the company, respectively. BC can be calculated according to equation (13). $BC = \left(\sum_{i=1}^n Z_i \times \frac{1}{d_i^2} \right) \div \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^2} \right) \quad (13)$ <p> Z_i = Observed value at the observation point i d_i = Distance from observation point i to target point n = Number observation points </p> <ul style="list-style-type: none"> Diffusion coefficient of pollutants is based on the contents of the United Kingdom H1 methodology, and the PEC of company can be calculated by summing the calculated PC and BC. If calculated PC exceeds 3/100 of long term environmental standard, detailed analysis should be conducted. $PC (\mu\text{g}/\text{m}^3) = \text{Volume of discharged pollutants (g/s)} \times DF (\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{g/s}) \quad (14)$ $PEC (\mu\text{g}/\text{m}^3) = PC (\mu\text{g}/\text{m}^3) + BC (\mu\text{g}/\text{m}^3) \quad (15)$ <ul style="list-style-type: none"> Assuming that pollutants are discharged to concentration of maximum discharge standards from each stacks, if calculated volume of emission pollutants satisfies one of the equation (16), (17) and (18), can be excused analysis conducted to assess the impact of pollutants. $PC_{Long\ term\ (LT)} = \sum_{All\ stack} (\text{Volume of discharged pollutants}) \times (DF_{LT}) \quad (16)$ $PEC_{Long\ term\ (LT)} = BC + \sum_{All\ stack} (\text{Volume of discharged pollutants}) \times (DF_{LT}) \quad (17)$ $PEC_{Short\ term\ (ST)} = BC + \sum_{All\ stack} (\text{Volume of discharged pollutants}) \times (DF_{ST}) \quad (18)$ <ul style="list-style-type: none"> Analysis area is set as an area including a 20 km radius area excluding company boundary in consideration of the spatial distribution. The receptors are placed within the target area except for company boundary, and the distance between the receptor point is 50 m above the company boundary line, rectangular area less than 2 km from the boundary of company is 100 m, rectangular area of 2 km or more and less than 10 km from the boundary of company is 500 m, and other areas are set to 1 km (MOE, 2017). If there is a meteorological station in the vicinity of company, it is possible to use the observation data as weather data. Self-measurement data can be applied when the emission concentration value of pollutants are measured according to the guidelines of the Ministry of Environment, and the data are reliable.

오염물질의 배출영향분석을 위해서는 허가기관에서 제공하는 기상 자료와 기존오염도 자료 외에도 사업장 주소 및 위경도, 지형자료, 지표면상에서 굴뚝의 위치를 X, Y좌표로 표시한 굴뚝 위치와 굴뚝 내경과 높이 등의 굴뚝 정보, 오염물질의 배출농도·배출량, 시설·공정·사용 원료의 특성을 고려하여 산정한 배가스 유속, 유량, 온도 등의 자료가 필요하며, 허가기관에서 제공되지 않는 자료는 사업장에서 직접 입력하여 대기오염물질에 대한 평가를 진행한다.

입력한 사업장의 자료를 기반으로 사업장 내부를

제외한 경계부터 수용점을 설정하며, 오염물질 농도가 고농도로 측정되는 위치는 대부분 사업장 주변이므로 사업장과 가까운 영역일수록 수용점을 조밀하게 설정하고 멀수록 넓은 간격으로 설정하여 오염물질의 확산 평가를 진행하게 된다.

사업장의 설치 및 운영으로 인해 발생하는 추가오염도는 분석 대상 연도의 1월 1일 0시부터 12월 31일 23시까지 시간대별로 산출된 추가오염도를 산술 평균한 연간 평균치, 매 0시부터 23시까지 산출된 추가오염도를 산술 평균한 24시간 평균치, 매 0시부터 7시, 8

시부터 15시, 16시부터 23시까지의 추가오염도를 산술 평균한 8시간 평균치, 시간대별 추가 오염도의 999 천분위수의 값을 통해 산출하는 1시간 평균치, 30분 평균치를 이용하여 산정이 가능하다(MOE, 2017).

앞에서 언급한 수용점의 설정 간격과 추가오염도 계산식은 표 7의 내용과 같으며, 표 7은 통합법상의 대기평가방법과 관련 계산식을 정리한 내용이다.

결과적으로 통합허가제도의 대기오염물질 평가는 사업장의 지역적, 환경적 특성을 반영하여 배출영향 분석을 수행하므로 이를 통해 설정된 허가배출기준은 환경에 대한 영향을 최소화하면서도 사업장도 수용 가능한 수준이라는 장점이 있다.

그러나 현재 설정된 배출영향분석은 우리나라 지형 및 날씨, 환경 등의 특성을 반영하고는 있지만 기존오염도가 시간 단위가 아닌 연평균 단위로 제공되기 때문에 결과의 오차가 발생할 수 있으며, 모든 업종이나 오염물질에 대해 일괄적으로 같은 모델링 방법을 적용하여 평가를 진행하고 있어 업종이나 물질, 주변환경 등에 따른 상호작용을 모사하기에는 한계점이 있다. 또한, 초미세먼지(PM-2.5)나 광화학반응 등으로 발생하는 오존과 같은 2차오염물질에 관한 평가방법과 허가배출기준이 구체적으로 명시되어 있지 않기 때문에 이러한 한계점에 대해서는 국외의 평가방법이나 환경영향평가제도의 평가법을 참고하여 평가방법 및 모델링의 고도화를 진행하는 방법 등을 고려할 필요성이 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 사업장 맞춤형 허가배출기준 설정을 위해 시행되고 있는 통합환경관리제도의 효과적인 활용을 위하여 우리나라의 대기평가방법론과 국외의 대기평가방법론을 비교하고 이를 통해 우리나라 통합환경관리제도의 개선방안을 모색하고자 하였다.

1. 국외의 경우, 효과적인 평가를 위해 환경에 미치는 영향이 미미한 물질은 스크리닝 개념을 도입

하여 걸러내고, 환경에 미치는 영향이 큰 물질이나 사업을 우선적으로 상황 가정 및 예측하여 허가를 진행하고 있었다. 그러나 우리나라의 경우는 사업장에서 발생 가능한 최악의 조건 상황을 가정하고 평가를 진행하고 있어 효율성 측면에서는 다소 거리감이 있다. 이에 확산계수를 적용한 평가방법을 스크리닝 개념으로 도입하여 각 오염원의 심각성을 고려한 영향 예측이 진행되어야 할 것으로 판단된다. 다만 간이분석을 적용할 경우는 영국이나 독일처럼 별도의 유효 굴뚝 높이를 고려하여 평가하는 등의 세부적인 방법론이 제시되어야 할 것으로 판단되며, 모네펜(토출 속도에 의한 부력, 외부 공기 온도 등)이 고려되지 않는다는 한계점을 극복할 수 있도록 설계가 필요할 것으로 예상된다.

2. 국외는 정확한 대기오염평가를 위하여 사업장이 주변의 오염도를 직접 측정된 자료를 반영하여 평가하나, 우리나라는 국가에서 일괄적으로 제공하는 기존오염도를 반영하여 평가를 진행하기 때문에 모델링 결과의 정확성에 대한 한계점이 존재한다. 모델링 절차나 틀은 설정된 방법을 적용하였다면 큰 문제가 없으나, 모델에 적용되는 가정들은 설정 내용에 따라 결과가 다르게 나타날 수 있으므로 보수적인 측면에서는 허가기관의 자료 제공이 결과 신뢰도에 영향을 미치는 데 크게 기여할 것으로 판단된다. 다만, 우리나라 좁은 국토 내에서 사업장 평가라는 한계를 극복하기 위해서는 사업장의 기존오염도 자가측정 자료 등을 반영하는 것과 같이 국부적 영향을 배제할 수 있는 평가방법에 대한 내용도 추가적으로 고려하는 것이 필요하다고 판단된다.
3. 통합환경관리제도에서 대기오염물질의 추가오염도를 산정하기 위해 사용되는 AERMOD 모델링의 경우, 우리나라는 통합 대상 사업장에 일괄적으로 적용하고 있으나 국외는 업종이나 물질에 따라 적용을 다르게 진행하고 있었다. AERMOD는 화학반응이나 대기와의 상호작용 등을 고려할

수 없기 때문에 업종이나 물질, 주변환경 등에 따른 상호작용을 모사하기에는 한계가 있어 실제 통합허가 제도에서 적용하는 모델의 다양성이나 고도화에 대한 검토가 필요하다. 또한, 현재 통합 환경관리제도에서 고려하지 못하고 있는 초미세 먼지(PM-2.5)나 2차 생성물질인 오존(O₃) 등에 관한 환경영향예측은 환경영향평가제도를 참고하여 설정하는 것에 대한 고민도 필요할 것으로 판단된다.

4. 현재, 통합허가에서는 오염물질 종류나 대상 시설에 따라 별도의 평가방법이 고려되지 않고 19개 업종에 동일한 표준화된 프로그램을 배포하여 환경에 미치는 영향을 평가하고 있다. 영국, 독일의 경우는 오염물질이 다양하게 배출되는 소각시설 등의 연소 사업장이나 대기오염물질 종류에 따라 별도의 ADMS, AUSTAL 2000, LASAT (Lagrangian Simulation of Aerosol Transport) 모델 등을 적용하고 있어 관련 내용에 대한 평가방법 보완이 이루어져야 할 것으로 판단된다. 또한, 오염물질 배출이 환경에 미치는 영향을 평가하는 과정과 결과의 정확도, 이를 기술적으로 어느 수준까지 제어가 가능한지 평가하는 것이 앞으로의 통합환경 관리제도에서 중요한 인자로 작용할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 사업장 통합환경관리 표준화 방안 마련(III)-배출영향분석 방법 고도화 방안 마련 연구(과제 번호: NIER-2019-01-02-060)를 기반으로 수행되었습니다.

References

- Bundesministerium für Umwelt (BMU) (2002) First General Administrative Regulation Pertaining the Federal Immission Control Act, GMBL, Germany, 511-605pp.
- Environment Agency (EA) (2016) Environmental Permitting Regulations (England&Wales, EPR)_No RGN 4 Setting standards for environmental protection, Environment Agency (EA), United Kingdom, 8-12pp.
- Environment Agency (EA) (2016) H1 Annex F - Air Emissions, Environment Agency (EA), United Kingdom, 7-27pp.
- Ha, M.J., Lee, T.K., LEE, I.H., Jeon, E.C. (2017) Analysis about CO Diffusion Change Caused by Climate Change Using CALPUFF, Journal of Climate Change Research, 8(2), 81-89, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.15531/KSCCR.2017.8.2.81>
- Kim, J.H., Jeong, S.Y., Na, M.H., Chio, J.H., Im, C.I. (2017) A case study and review of emission impact analysis for establishing integrated environmental management permit emission for air pollutants-emitting facilities, Korea Environmental Policy and Administration Society, 33, 19-23.
- Koo, Y.S., Choi, J.H., Kim, S.T., Park, S.J. (2007) A Real Time Odor Monitoring and Modeling System, Journal of Odor and Indoor Environment, 6(4), 254-258.
- Korea Environment Institute (KEI) (2005) A Study on the Application of Air Distribution Model to Environmental Impact Assessment. <https://scienceon.kisti.re.kr/commons/util/originalView.do?cn=TRKO201800044128&dbt=TRKO&rn=> (accessed on Jun. 01, 2019).
- Korea Environment Institute (KEI) (2006) A study of the policy plan for the Integrated Environmental Management System. <https://scienceon.kisti.re.kr/commons/util/originalView.do?cn=TRKO201800044147&dbt=TRKO&rn=> (accessed on Jun. 01, 2019).
- Korea Environment Institute (KEI) (2016) A Study on the Linkage between Integrated Environmental Management and Environmental Impact Assessment. <https://scienceon.kisti.re.kr/commons/util/originalView.do?cn=TRKO20170008003&dbt=TRKO&rn=> (accessed on Oct. 12, 2017).
- Ministry of Environment (MOE) (2017) Ministry of Environment Examination 2017-15 Regulations on the method of discharge impact analysis and the preparation of results. https://ieps.nier.go.kr/web/board/5/390/?pMENUMST_ID=95 (accessed on Dec. 12, 2017).
- Ministry of Environment (MOE) (2021) Integrated Management of Environmental Pollution Facilities Act. <https://www.law.go.kr/%EB%B2%95%EB%A0%B9/%ED%99%98%EA%B2%BD%EC%98%A4%EC%97%BC%EC%8B%9C%EC%84%A4%EC%9D%98%ED%86%B5%ED%95%A9%EA%B4%80%EB%A6%AC%EC%97%90%EA%B4%80%ED%95%9C%EB%B2%95%EB%A5%A0%>

- EC%8B%9C%ED%96%89%EA%B7%9C%EC%B9%99 (accessed on Jan. 01, 2021).
- Park, T.J. (2008) Necessity and Status of Integrated Media Risk Assessment for applicate Environmental Management, Korea Environment Institute, 12(6), 1-8.
- Scire, J.S., Strimaitis, D.G., Yamartino, R.J. (2000) A User's Guide for the CALPUFF Dispersion Model, United States (US), 27-174pp.
- Seok, H.J., Khan, J.B., Kim, Y.L., Seo, J.W., Hong, S.Y., Kim, H.J. (2020) Discharge Impact Analysis of Air Pollutants for Integrated Environmental Management, Journal of Environmental Analysis, 23(4), 240-247, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.36278/jeaht.23.4.240>
- United States Environmental Protection Agency (US EPA) (1987) Industrial Source Complex (ISC) Dispersion Model User's Guide - Second Edition, United States (US), 98-117pp.
- United States Environmental Protection Agency (US EPA) (2019) AERMOD: DESCRIPTION OF MODEL FORMULATION, United States (US), 8-69pp.

Authors Information

- 서지혜 (국립환경과학원 환경자원연구부 자연환경연구과 전문연구원)
- 황현정 (국립환경과학원 환경자원연구부 자연환경연구과 전문연구원)
- 간종범 (국립환경과학원 환경자원연구부 자연환경연구과 전문연구원)
- 이선경 (국립환경과학원 환경자원연구부 자연환경연구과 전문연구원)
- 김영란 (국립환경과학원 환경자원연구부 자연환경연구과 환경연구관)