제2차년도
최종보고서

용인시 생활폐기물 소각시스템의 최적화 및 주변지역의 환경영향 조사

Optimization of Yongin municipal incineration system and estimation of its environmental impact on neighborhood

한국외국어대학교

경기지역환경기술개발센터

제 출 문

경기지역환경기술개발센터장 귀하

본 보고서를 “ 용인시 생활폐기물 소각시스템의 최적화 및 주변지역의 환경영향 조사 ” 과제의 보고서로 제출합니다.

연구기관명 : 한국외국어대학교 환경생명공학부

연구책임자 : 이 상 권 (한국외국어대학교)

연 구 원 : 류 동 길 (한국외국어대학교)
이 민 영 (한국외국어대학교)
황 정 (한국외국어대학교)
손 지 환 (한국외국어대학교)
윤 성 환 (한국외국어대학교)
노 경 민 (한국외국어대학교)
손 예 숙 (한국외국어대학교)

위탁연구기관명 : 안양대학교 환경공학과

위탁연구책임자 : 구 윤 서 (안양대학교)

요 약 문

Ⅰ. 제목

“ 용인시 생활폐기물 소각시스템의 최적화 및 주변지역의 환경영향 조사 ”

Ⅱ. 연구의 목적 및 필요성

용인시에서는 생활폐기물의 발생량 증가로 인하여 소각장의 증설이 불가피한 실정이다. 반면에 용인시의 생활폐기물 소각장 증설 계획에 강력하게 반발하는 소각장 주변 지역주민들의 쓰레기 반입저지로 인하여 쓰레기의 적절한 처리가 이루어지지 못하는 등 사회적인 문제가 되고 있다. 그러므로 용인시에 발생되고 있는 생활 폐기물의 다양한 성상을 고려하여 소각조건을 개선 및 효율을 향상하여 소각장의 용량을 최소화하고, 소각장의 증설 가동에 따른 주변 지역주민의 환경오염에 대한 피해를 최소화하기 위하여 주변지역에 미치는 환경영향에 대한 조사가 동시에 수행되어야 할 필요가 있다.

또한 투명하고, 과학적으로 소각장을 관리하기 위해서는 소각장에서 배출되는 오염물질이 주변에 미치는 기여 영향도를 정확히 계산할 필요가 있다. 이와 같은 목적으로 현재 국내에서 사용되고 있는 대기환경영향평가용 software는 미국환경청에서 제작된 software로써 DOS상에서 구동되기 때문에 사용이 불편하고 국내 지형 및 기상조건에 부적합한 문제점을 갖고 있다. 따라서 국내 여건에 적합하고, 사용하기 용이한 Windows GUI(Graphic User Interface)에서 구동되는 평가용 software 개발이 필요하다. 그리하여 위탁기관에 의뢰하여 소각장을 대상으로 평가용 software를 개발하고, 실제 용인 소각장에 적용하여 환경영향평가를 수행하고자 하였다.

Ⅲ. 연구의 내용 및 범위

첫째는, 용인소각장을 주요 대상으로 용인시에서 발생되는 생활폐기물의 물리·화학적 성상을 살펴보고, 용인시 및 전국의 생활폐기물 성상별 소각처리 특성, 생활폐기물의 성상별 대기오염물질의 배출특성, 생활폐기물의 성상별 대기오염 방지기술의 개선 및 개발, 생활폐기물 소각장 주변지역의 피해저감을 위한 사전예방 및 관리기술을 조사한다.

둘째는 위탁기관을 통하여 ISCST3에서 채택하고 있는 Gaussian 확산이론을 근거로 평

가용 software를 한국 실정에 맞게 재구성하여 GUI로 개발하고, 이 개발된 Software를 ISCST3모델과 비교하여 검증한다. 또한 개발된 Software를 실제 용인 소각장에 적용하여 용인 소각장에서 배출된 오염물질이 주변에 미치는 영향을 평가한다. 한편 Gaussian 모델은 정상상태의 모델로 바람장이 시간 및 공간에 따라서 변화가 심한 경우에는 사용에 제한이 있으므로 비정상상태의 바람장을 고려할 수 있는 Puff 모델을 소각장 환경영향평가에 사용하는 것에 대해서 검토하였다

Ⅳ. 연구결과

용인시에서 발생하는 생활폐기물 중 소각이 가능한 가연성 쓰레기의 발생량은 61.6%이고 소각에 의한 처리방법은 26.4%로 비교적 다른 자치지역보다 높게 나타났다. 또한 용인소각장의 경우 종이류, 나무류, 플라스틱류의 소각 비중이 높고, 음식물 채소류의 소각 비중이 0.5% 정도로 매우 적다. 그리하여 수분 분포가 월별에 따라 30%에서 40%로 다소 적고 월별 발열량이 전국 평균보다 전체적으로 높게 나타나고 있다.

용인시 소각장에서 배출되는 SOx 농도는 겨울철을 제외한 봄, 여름, 가을철에는 전국 평균 배출 SOx 배출농도보다 적게 배출되고 HCl의 배출량은 전국 평균보다 훨씬 적은 양이 배출된다. 또한 기타 대기오염물 는 반면, NOx 배출량은 전국소각장 평균농도보다 다소 많이 배출되고 있다. 그러나 용인소각장에서의 dust 배출농도 10~12ppm으로 전국 소각장 평균 배출농도보다 다소 높고 특히 NOx의 배출량은 전국 평균보다 많이 배출된다. 이러한 용인시 소각장의 문제는, 대단히 가연성인 플라스틱류, 고무류, 그리이스류, 기타등등의 쓰레기를 소각하는 비율이 높아, 소각로의 화격자에 심각한 열적손상(heat damage)을 초래한고. 그 결과 소각로의 용량을 증가시키는 원인이 되면서. 연돌에서 배출되는 가스의 농도(특히 NOx)가 전국 평균보다 다소 높게 나타나고 있다.

또한 위탁연구기관에서는, 개발한 Software(미국 환경청에서 추천하는 ISCST3모델과 동등한 수준으로, 한국 지형 및 기상 자료를 손쉽게 입력하여 모델링을 수행할 수 있는 평가용 Software)를 사용하여 용인 소각장에 대해서 대기환경영향 평가를 수행한 결과 소각장에서 배출되는 SO_2, NOx, PM10이 주변에 미치는 기간별 기여 농도만을 볼 때 대기환경기준에 충분히 만족하였다. Gaussian model과 Puff model로 동일한 소각장 배출조건에 대해서 비교한 결과 Puff model로 계산한 기여농도가 높게 나타나는 것을 알 수 있었다. 이는 Puff 모델이 풍속이 시간에 따라서 변하는 영향을 보다 상세히 고려할 수 있고, 또한 약한 풍속에서도 정확히 계산할 수 있기 때문이다. 따라서 향후 환경영향평가에 있어서 정상상태만을 고려한 Gaussian 모델보다 진보된 개념인 Puff 모델을 이용하여 평가하는 것이 타당한 것으로 판단된다.

Ⅴ. 연구결과의 활용계획

본 연구 결과는, 생활계 폐기물의 효율적인 관리를 위하여 활용될 수가 있으며, 소각장의 소각효율 향상, 소각장의 용량을 최소화하여 용량증설을 최소화하는데 활용될 수가 있다. 그리하여 생활폐기물 소각장의 대기오염물질 배출량 저감으로 쾌적한 대기환경 조성, 환경오염피해의 사전방지로 환경피해분쟁의 감소, 지역주민의 환경오염 피해를 최소화, 대기확산모델의 상용화 등이 기대된다.

또한 위탁연구에서 검토한 결과에 의하면 Gaussian 모델보다는 Puff 모델이 보다 시간에 따라서 변하는 바람장의 영향을 계산에 반영할 수 있으므로 향후 Puff 모델 이론을 근거로 평가용 Software도 개발할 예정이다. 그리고 본 연구 결과를 한국대기환경학회에 발표 및 논문에 게재할 예정이다.

SUMMARY

The amount of MSW incineration in Yongin City is growing for the solution of solid waste disposal, and air pollutant emission from the incineration cause serious social problems. Therefore, an optimized incineration management for the minimization of air pollutant emission is essentially required. In addition to reduction of air pollution, quantitative recognization of the environmental impact of incineration facility is needed for enhancing air quality around it.

This report describes the municipal solid waste (MSW) stream in Yongin City, and characterizes the solid wastes incinerated for the volume reduction and detoxification of solid wastes. It also discusses trends and highlights changes that have occurred over several years, both in the types of wastes generated and in the ways they are managed. Although the report may not accurately represent local or national waste stream, the data in the report can be used to develop approximate estimates of MSW generation and composition in Yongin areas.

The purpose of research is to minimize the environmental impacts of MSW incineration and identify quantitative effect of air pollutant emission on neighbors around incineration facility. Therefore, trends of waste generation, composition of wastes, heating values of wastes and others effecting the air pollutant emission from incinerator are investigated. In addition, the operating conditions of incinerator are considered for the reduction of air pollutants.

This report includes information on total MSW generation, recovery, and landfill disposals in Yongin City, materials (e.g., paper, glass, metals, plastic) that comprise MSW in Yongin City waste stream, and trends in MSW management of Yongin City, including recovery for recycling, combustion and landfilling. Identifying the components of the waste stream is an important step toward addressing the issues

associated with the emissions and minimization of air pollutants. Municipal solid wastes characterizations, which analyze the quantity and composition of the municipal solid waste stream, involve estimating how much MSW is generated, recycled (including composting), combusted, and disposed of in landfills.

In addition, a program for EIA (Environmental Impact Assessment) of air pollutants emitted from municipal waste incinerator have been developed at other institute coorperared for this study. The dispersion theory used in the air dispersion modeling software is based on U.S. EPA's ISCST3 (Industrial Source Complex model for Short Term- version3). The input data to run the model such as meteorological and terrain data are supplied automatically from databases in the software and the modeling procedure is very easy and simple under GUI window environment. Key outputs of AirMaster are a concentration diagram on a digital map, a windrose, a report for the enironmental impact assessment. The developed dispersion modeling software is applied to the EIA of Yongin incinerator. The results show that the environmental impact to the air quality near the incinerator is not over the ambient air quality standard.

CONTENTS

Summary(Korean) ····· i
Summary(English) ····· iv
Contents ····· vi

Chapter 1. Introduction ····· 1
1. Background and research objectives ····· 1
2. Overview of project ····· 2

Chapter 2. Status of Domestic Technology Development ····· 4
1. Current status of domestic incineration facility ····· 4
2. Operation of incinerator and its problems ····· 5

Chapter 3. Performance of Project ····· 6
1. Generation and disposal of municipal solid waste ····· 6
2. Yongin Incineration Facility ····· 8
3. Operations of Yongin Incineration Facility ····· 8
4. Characteristics of emissions from Yongin Incineration Facility ····· 14
5. Emission characteristics of municipal solid wastes ····· 17
6. Characteristics and control of heating values for municipal solid wastes ····· 20
7. Problems and optimum management of Yongin Incineration Facility ····· 24

Chapter 4. Conclusions ····· 29

Chapter 5. Achievement of Project Performance ····· 30

Chapter 6. Planning for Use of Project Outputs ····· 31

Chapter 7. Reference ····· 32

[Sub-Project : A Program Development for Environmental Impact Assessment of Air Pollutants Emitted from Municipal Waste Incinerator]

목 차

요약문 ····· i
Summary ····· iv
Contents ····· vi

제 1 장 서론 ····· 1
1. 연구배경 및 연구목적 ····· 1
2. 연구범위 ····· 2

제 2 장 국내의 기술개발현황 ····· 4
1. 국내소각시설 현황 ····· 4
2. 운영실태 및 문제점 ····· 5

제 3 장 연구수행 내용 및 결과 ····· 6
1. 생활계 폐기물의 발생 및 처리 ····· 6
2. 용인소각장의 시설 현황 ····· 8
3. 용인소각장의 운영 현황 ····· 8
4. 용인소각장의 대기오염물질 배출 특성 ····· 14
5. 생활폐기물의 특성모델 ····· 17
6. 생활폐기물의 열량 특성 및 제어 ····· 20
7. 소각장의 문제점 및 적정 관리 방안 ····· 24

제 4 장 결론 ····· 29

제 5 장 연구목표 달성도 및 대외기여도 ····· 30

제 6 장 연구결과의 활용계획 ····· 31

제 7 장 참고문헌 ····· 32

[위탁과제 : 소각장 주변 환경영향 및 위해성 평가 Program 개발에 관한 연구]

제 1 장 서 론

1. 연구배경 및 연구목적

급격한 경제성장에 따른 생활양식의 변화와 도시개발 및 인구집중으로 도시의 생활쓰레기는 계속 증가하고 있으며 그로 인한 환경오염 문제가 사회적인 문제로 대두되고 있다. 그리하여 전국적으로 폐기물의 적절한 처리는 가장 우선적으로 해결해야할 당면과제가 되고 있다. 쓰레기의 적절한 처리를 위하여 많은 노력을 기울이고 있는 정부는 기존의 매립위주 쓰레기 처리방식에서 소각 및 재활용 위주의 쓰레기 처리 정책으로 전환함에 따라 쓰레기의 소각처리 비율이 날로 증가하고 있는 실정이다.

쓰레기 발생량의 증가와 쓰레기의 소각처리 비율이 날로 증가함에 따라 소각처리 시에 발생되는 다량의 유해성 대기오염물질은 2차적인 환경오염을 유발시켜 소각시설 주변지역의 생활환경을 위협하고 있다. 이에 따라 정부는 소각처리시의 배출가스에 대한 규제를 강화하고 있으며, 소각로 시스템의 기술개발에 많은 노력을 기울이고 있다. 그러나 선진국에 비교하여 국내의 소각처리 관련 기술의 개발은 매우 최근에 시작되었으며, 여전히 소각처리 시설의 주요 핵심기술은 유럽, 일본 등의 선진국으로부터 기술제휴나 기술도입에 의존하고 있는 실정이다. 최근에는 극히 소수의 국내 관련 기업이 소각시스템의 모방제작이나 설치, 그리고 부분적인 개선을 추진하고 있으며, 중장기적 계획에 의한 저변 요소기술의 개발에 많은 노력을 기울이고 있다.

국내에서의 쓰레기 소각처리 비율이 증가하는 반면에, 소각처리시 발생되는 대기오염물질에 의한 2차적인 환경오염 문제는 지역주민의 집단이기주의(NIMBY 현상)를 초래하여 소각시설과 관련된 민원이 끊임없이 발생하고, 또한 정부의 엄격한 규제방침에 대응하기 위하여 소각시설의 적절하고 효율적인 운전관리는 매우 중요한 당면과제로 대두되고 있다. 또한 지역주민의 집단이기주의와 환경오염 피해분쟁의 원인이 되고 있는 소각장 주변지역의 환경오염 문제를 정확히 조사하여 소각처리시 발생되는 환경오염의 피해를 최소화하고 민원문제를 원만하게 해결하는 방안을 수립하는 것이 매우 절실히 필요한 실정이다.

특히 용인시에서는 생활폐기물의 발생량 증가로 인하여 소각장의 증설이 불가피한 실정이다. 반면에 용인시의 생활폐기물 소각장 증설 계획에 강력하게 반발하는 소각장 주변지역주민들의 쓰레기 반입저지로 인하여 쓰레기의 적절한 처리가 이루어지지 못하는 등 사회적인 문제가 되고 있어 용인시를 포함한 경기도내의 대부분의 시·군에서 해결하여

야 할 당면과제이다. 그러므로 용인시에 발생되고 있는 생활 폐기물의 다양한 성상을 고려하여 소각조건을 개선하고 소각효율을 향상시켜 소각장의 용량을 최소화하는 것이 절실히 요구되고 있다. 또한 소각장의 증설 가동에 따른 주변 지역주민의 환경오염에 대한 피해를 최소화하기 위하여 주변지역에 미치는 환경영향에 대한 조사와 방지시설의 개선이 동시에 수행되어야 할 필요가 있다.

또한 국내 대기기준은 일반적으로 배출허용기준과 일반대기환경기준으로 나눌 수 있다. 배출허용기준은 굴뚝과 같은 배출원으로부터 배출되는 오염물질의 농도를 규제하여 대기환경을 보전하려는 노력의 수단으로서 강제력이 있으나, 일반대기환경기준은 국가가 국민의 생명과 재산을 보호하기 위하여 정한 목표치로 강제력은 없다. 그런데, 배출허용기준을 만족시키면서 굴뚝으로부터 배출된 오염물질이 기상조건의 악화나 특이한 지형조건에 의하여 임의의 시점, 임의의 지점에서 대기환경기준을 만족시키지 못할 수 있으므로, 소각장의 굴뚝에서 배출된 오염물질이 주변지역에 미치는 대기확산 기여도를 정량적으로 평가함으로써 소각장 주변지역 대기를 과학적으로 관리 할 수 있는 프로그램이 필요하다.

그리고 소각장의 대기확산 모델링을 수행하여 계산한 결과는 단기 및 장기 기여농도에 해당되는 수치자료이므로 이 농도 값을 소각장 주변 대기관리에 효과적으로 이용하기 위해서는 모델링 계산결과인 기여농도를 일반적인 용어로 해석하여, 주변에 미치는 영향도를 일반인도 손쉽게 이해할 수 있도록 구성할 필요가 있다. 따라서 오염물질별로 계산된 기여농도를 근거로 주변에 미치는 영향도를 간편하고, 용이한 용어로 정의하여 평가하는 프로그램 개발이 필요하다. 그러므로 본 연구의 또 다른 목적은 소각장 환경영향평가를 위한 Software를 개발하고, 개발한 Software를 이용하여 용인 소각장 환경영향평가에 적용하는 것이며, 이러한 연구는 위탁연구기관을 통하여 수행되었다.

2. 연구범위

본 연구는 용인시에 발생되고 있는 생활 폐기물의 다양한 성상을 조사하여 성상별 소각조건의 개선 및 소각조건의 최적화로 소각효율을 향상시켜 소각장의 용량을 최소화하는 것이다. 또한 소각장의 증설 가동에 따른 지역주민의 환경오염에 대한 피해를 최소화하기 위하여 주변지역에 미치는 환경영향에 대한 조사와 위해성 평가를 수행(위탁연구)하고 소각조건 및 방지시설의 운전조건을 최적화하여 생활쓰레기의 효율적인 소각처리와 동시에 소각장 주변지역의 대기환경을 쾌적하게 조성하고자 하는 것이다.

그리하여 본 연구에서는 소각장 및 위해성에 관련된 문헌조사를 하였고, 용인소각장의 경우 생활폐기물의 계절별 물리·화학적 성상을 아래의 항목별로 전국소각장과 비교하여 평가하였다. 또한 소각으로 인한 배출가스와 분진의 종류 및 농도를 조사하여 소각장 주변 환경에 미치게 될 영향을 평가하고자 하였다. 본 연구의 주요 연구범위는 다음과 같다.

1. 소각장 및 위해성 관련 문헌조사.
2. 생활폐기물의 계절별 물리·화학적 성상의 문헌 조사.
3. 소각배가스의 배출 특성 조사.
4. 용인시 소각배가스의 입자성 오염물질 특성 조사.
5. 생활폐기물의 특성 모델 개발.
6. 소각장으로부터 배출되는 대기오염물질의 확산에 의한 주변에 미치는 영향도를 평가하는 대기환경영향 평가용 software 개발.(위탁연구)
7. 본 연구에서 개발하고자 하는 software는 Windows에서 GUI(Graphic User Interface)로 제작하여 사용이 편리하도록 제작하고 Software제작에는 Borland C++ 언어를 사용.(위탁연구)
8. 개발된 software로 용인소각장을 대상으로 적용하여 용인소각장에서 배출된 오염물질이 주변지역에 미치는 영향도를 분석하여 환경영향성을 평가.
9. 현재 국내 대기환경영향평가에서 Gaussian 모델과 비정상상태를 고려할 수 있는 puff 모델을 동일한 입력조건을 사용하여 계산을 수행한 후 결과를 비교하고, 환경영향평가에 puff모델의 적용 가능성에 대해서 검토. (위탁연구)

제 2 장 국내의 기술개발 현황

1. 국내소각시설 현황

전국 규모의 생활 폐기물의 발생량을 보면, 가연성, 재활용품, 불연성의 순으로 많이 발생한다. 이와 같은 경향은 경기 지역과 용인시에서도 보여지고 있다. 반면에 폐기물 처리는 대부분 단순매립 처리 중심이었으나 도시쓰레기 발생량 증가로 최근에 소각처리의 비율이 급증하였다. 1990년대 이전에는 소각설비에 대한 초기투자비가 고액이고 지역주민의 반발로 도시지역의 소각설비 설치에 소극적인 반면에, 1990년도 이후에는 도시쓰레기의 발생량이 급증하여 쓰레기 대란과 같은 사회적인 문제가 빈번하게 대두되면서 쓰레기 소각설비의 건설이 현저하게 증가하였다. 1987년에 서울시 목동(150톤/일), 1993년 대구시(200톤/일), 1994년 성남시(100톤/일) 등 지자체에서 6 ~ 7년에 걸친 산고 끝에 소각설비를 정상 가동하였고, Table 1에서 보는 바와 같이, 부산, 수도권 신도시 지역, 대전, 광주, 서울시 중계동 등에서 소각설비를 설치하기 시작하였으나 지역주민들의 소각설비 설치 반대로 건설 또는 정상가동이 지연되어지고 있다. Table 1은 국내 소각설비의 현황을 보여주고 있다.

Table 1. Construction of domestic incinerators

소 각 시설명	시설용량		공사기간	가 동 개시일
	톤/일	기		
양 천	200	2	'92.12~'96. 2	'96. 3. 1
노 원	400	2	'92.12~'97. 1	'97. 1.15
해운대	200	2	'94. 6~'97. 7	'96. 7.19
다 대	200	1	'93. 8~'95. 8	'95. 8.30
성 서	200	3	'90. 8~'98. 9	'92.10. 1
대 전	200	1	'95. 7~'98.10	'98.11. 1
평 촌	200	1	'91.11~'93.12	'93.12.15
중 동	200	1	'92.12~'95. 5	'95 . 6. 8
성 남	300	2	'94.12~'98.10	'98.10. 8
일 산	300	1	'92.11~'95.11	'95.12. 1
광 명	150	2	'96. 3~'99.12	'99. 2. 1
용 인	100	1	'95.12~'99. 2	'99. 3. 1
과 천	80	1	'96. 8~'99.10	'99.12. 7
창 원	200	2	'93. 7~'95. 2	'95. 3. 1
수 원	300	2	'96. 7~'99.10	'99.10.28
울 산	200	2	'97. 6~'00. 5.15	'00. 5.15
대 장	300	1	'97. 9~'00. 9. 4	'00. 9. 5
상 무	200	2	'96. 6~'00. 9.15	임시가동중

2. 운영 실태 및 문제점

국내에서 가동중인 소각시설은 대부분 일본, 독일 등의 기술로 설치되었고 충분한 기술적 뒷받침 없이 설치·운영되다보니 운영관리상의 많은 어려움이 노출되고 있다.

특히, 초기 년도 또는 처음으로 시도되는 시스템의 경우 주로 대기오염방지시설운영에 시설의 노후화와 함께 적정처리에 어려움이 많다. 선진외국 기술제휴업체에 의한 기술도입에 전적을 의존하고 있는 국내의 시공업체들은 기술도입의 국내 대체 및 국내 현실에 맞는 시설로서 개선을 통한 엔지니어링 기능을 대폭 보강하여 불필요한 기술료 지불 등을 최소화할 수 있는 방안을 모색하여야 하며, 자체 고유기술을 개발하여 선진국에 의한 시장잠식을 방지하고 해외 진출의 교두보로 삼아야 한다는 당위성을 가지고 공조체제의 필요성을 느껴야 한다.

쓰레기 소각장의 운영으로 인하여 소각장주변의 환경에 영향을 미칠 수 있는 영향요인들은 여러 가지로 다양하며 이러한 요인들은 소각시설의 운영관리를 철저히 이행함으로서 주변지역 주민들에 대한 환경피해를 최소화하여야 할 것이다.

소각장 주변환경에 영향을 미칠 수 있는 주요인자들은 다음과 같다.

- 연소가스배출로 인한 유해가스 및 분진발생
- 쓰레기 수거차량 운행 및 쓰레기 저장 등으로 인한 악취발생
- 쓰레기 저장 및 장내 청소 등으로 인한 폐수발생
- 기계장치류 및 수거차량 운행 등으로 인한 소음진동발생
- 쓰레기 수거차량 및 소각재 운반차량 운행으로 인한 교통체증 유발

이상과 같은 제반 영향요인을 저감시키기 위해서는 기본계획 단계에서부터 적절한 저감대책이 고려되어야 하나 현 실태는 결코 완벽하지 못한 것으로 평가되고 있다.

이 연구는 소각장 주변환경에 영향을 미칠 수 있는 영향요인을 조사하고, 이러한 조사를 바탕으로 소각장 주변의 환경을 쾌적하게 만들 수 있는 초석이라 할 수 있다.

제 3 장 연구수행 내용 및 결과

1. 생활계 폐기물의 발생 및 처리

폐기물은 생활·사업장 폐기물로 구분하며, Table 2에서 보는 바와 같이 전체 생활 폐기물관리 지정 구역은 전체 행정구역 99,835㎢ 중 82,326㎢이며, 지정율이 82.5%이다. 그리고 용인시의 생활 폐기물 관리구역은 592㎢로 나타나 있고, 이는 용인시의 전체 행정구역의 면적과 같다.

Table 2. Management district of municipal solid wastes (2000)

구분	전체행정구역			생활폐기물관리구역		
	면적 (㎢)	인구 (명)	동(읍,면)수	면적 (㎢)	인구 (명)	동(읍,면)수
전국	99,835	47,954,446	3,549	82,326	47,307,631	3,538
경기도	10,189	9,280,013	484	9,311	9,230,072	480
용인시	592	395,023	14	592	395,028	14

Table 3에서는 2000년도의 생활계 폐기물의 발생현황을 나타내고 있다. 지역 규모별로 공통으로 가장 많은 양을 차지하고 있는 것은 음식물 쓰레기이다. 전국 규모의 생활 폐기물의 발생량을 보면, 가연성, 재활용품, 불연성의 순으로 많이 발생한다. 이와 같은 경향은 경기 지역과 용인시에서도 보여지고 있다. 용인시에서 발생하는 생활폐기물 중 소각이 가능한 가연성의 비율은 61.6%이다. 그리고 재활용품의 발생비율은 29.4%이다. 소각과 재활용을 할 수 없는 불연성 생활 폐기물의 발생비율은 9%정도이다. 그러므로 용인시에서 발생하는 생활 폐기물의 90%이상을 소각과 재활용에 의해서 처리가 가능하다는 것을 Table 3을 보고 알 수 있다.

폐기물 처리는 대부분 단순매립 처리 중심이었으나 도시쓰레기 발생량 증가로 1985년 의정부시 장암동 소각설비(50톤/일, 비연속식 스토카방식, 현재 폐쇄됨)가 가동되었으나 소각설비에 대한 초기투자비가 고액이어서 도시지역의 소각설비 설치는 큰 진전이 없는 실정이다. 도시쓰레기 발생량이 급증하는 반면 신규 매립장의 확보가 어려워지면서 1987 서울시 목동(150톤/일), 1993년 대구시(200톤/일), 1994년 성남시(100톤/일) 등 지자체에서 6 ~ 7년에 걸친 산고 끝에 소각설비를 정상 가동하였고 이어서 부산, 수도권 신도시 지역, 대전, 광주, 서울시 중계동 등에서 소각설비를 설치하기 시작하였으나 지역주민들의 소각설비 설치 반대로 건설 또는 정상가동이 지연되어지고 있다. 정부는 그 대안으로 1회용품 사용규제 등 쓰레기 발생의 원천적 감량을 도모하고 있으며, 소비자단체와 환경단체

들의 협조적 자세로 시책 초기에는 상당한 실적을 거두었으나 일반 소비자들과 관련업계의 자율적인 참여가 부진하다. 이에 정부는 폐기물 재활용 촉진에 역점을 두는 시책 추진하고 있다.

Table 3. Generation of municipal solid wastes (tons/day, 2000)

구분		전국	경기	용인시
가연성	음식물, 채소류	11,434	2,151	79.6
	종이류	5,577	1,169	44.0
	나무류	1,965	288	26.7
	고무 피혁류	1,160	194	11.1
	플라스틱류	2,359	415	19.7
	기타	5,181	739	19.4
	소계	27,676	4,956	200.5
불연성	연탄재	649	86	3.6
	금속 초자류	982	120	3.4
	토사류	1,096	89	3.4
	기타	2,332	368	18.8
	소계	5,058	662	29.2
재활용품	종이류	6,422	906	37.8
	병류	2,017	518	10.5
	고철류	2,629	395	13.5
	캔류	624	161	4.8
	플라스틱류	1,098	253	18.5
	기타	914	200	10.6
	소계	13,704	2,433	95.7
총계		46,438	8,050	325.4

Table 4에서 생활 폐기물의 처리방법을 살펴보면, 전국 규모에서는 매립의 의존도가 가장 높고 그 다음으로 재활용과 소각에 의한 방법이다. 반면에 경기도 지역에서는 재활용에 의한 처리방법이 45.3%로 가장 높고, 소각에 의한 방법도 25.4%에 달한다. 이에 비해서 용인시에서는 매립과 재활용에 의한 처리방법이 각각 36.5%, 37.1%로 비슷하며, 소각에 의한 처리방법은 26.4%로 비교적 다른 자치지역보다 높은 것을 알 수 있다.

Table 4. Treatment methods of municipal solid wastes (%, 2000)

구분	전국	경기	용인시
매립	47.0	29.4	36.5
소각	11.7	25.4	26.4
재활용	41.3	45.3	37.1

2. 용인소각장의 시설 현황

▷ 위치 : 경기도 용인시 포곡면 금어리 산 245번지

▷ 부지면적 : 18,844㎡

▷ 소각시설

- 소각형식 : 스토카식(24시간 연속 연소식)
- 소각능력 : 100톤/일
- 배가스냉각방식 : 수분사식
- 배가스처리방식 : 반건식반응탑(SDR)
  활성탄분무설비(A/S)
  백필터설비(B/F)
  선택적 촉매반응탑(SCR)

3. 용인소각장의 운영 현황

전국의 전체 소각장과 용인소각장의 운영현황을 Table 5에 정리하였다. 전국의 전체 소각장과 비교하여 용인소각장으로 반입되는 양의 비중은 1.9%로 나타난다. 그리고 일평균 소각량의 비중과 열 생산량의 비중은 각각 2.6%와 0.06%이다.

Table 5. Operation of incineration facilities

구분	전국	용인소각장
반입량 (톤)	1,350,533	25,010
일평균 소각량 (톤)	2,908	75
열 생산량 (Gcal)	1,901,028	1,182

생활계 폐기물의 소각물질을 Table 6 에서와 같이 살펴보면, 전국 전체의 소각장과 경기도 지역의 소각장에서는 종이류, 음식물 채소류, 나무류, 플라스틱류의 소각 비중이 높은데 비하여 용인소각장에서는 종이류, 나무류, 플라스틱류의 소각 비중이 높고, 음식물 채소류의 소각 비중이 0.5% 정도로 낮게 나타나고 있다.

Table 6. Incineration of municipal solid wastes (tons/day, 2000)

구분	전국	경기	용인
음식물, 채소류	1,088	466	0.4
종이류	1,749	720	27.0
나무류	703	186	24.0
고무 피혁류	298	115	7.1
플라스틱류	652	254	10.6
연탄재	0.6	0.6	0.0
금속 초자류	0.5	0.5	0.0
토사류	0.3	0.3	0.0
재활용품 종이류	9.7	8.2	1.2
재활용품 플라스틱류	15.1	12.9	0.3
기타	924	279	15.4
계	5,440	2,042	86.0

3.1. 월별 평균소각온도와 월별 연돌 배출가스 온도

Fig. 1 은 전국 전체 소각장의 월별 평균소각온도와 월별 연돌 배출가스 온도를 용인소각장의 경우와 비교하고 있다. 소각온도는 용인소각장이 1000℃ 정도로 전국평균 900℃ 정도보다 100℃ 정도 높게 나타나고 있고, 연돌 배출가스 온도는 200℃ 정도로 비슷한 경향을 나타내고 있다. Fig. 1에서 보여지는 바와 같이 전국 전체 소각장과 용인소각장의 소각온도와 연돌 배출가스 온도는 월별에 따라 온도분포가 거의 일정한 것을 알 수 있다.

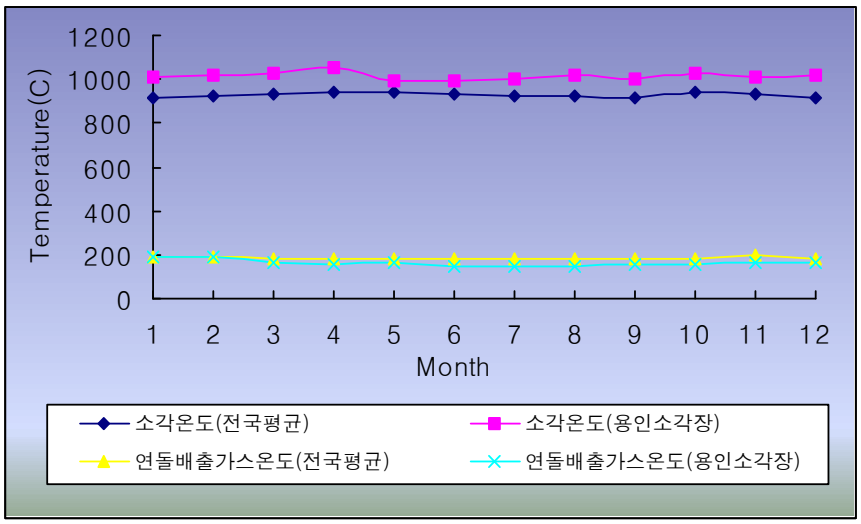


Fig.1. Temperature distributions at Yoingin incinerator.

3.2. 가연성 폐기물 분포

가연성 폐기물의 소각 비중을 살펴보면, 전국 전체 소각장에서의 평균치는 40%정도로 월별로 거의 일정한 것으로 나타나고 있으며, 용인소각장에서는 1월에는 50%정도이고 2월부터 12월까지는 55%에서 60%정도로 나타나는 것을 Fig. 2에서 확인할 수 있다.

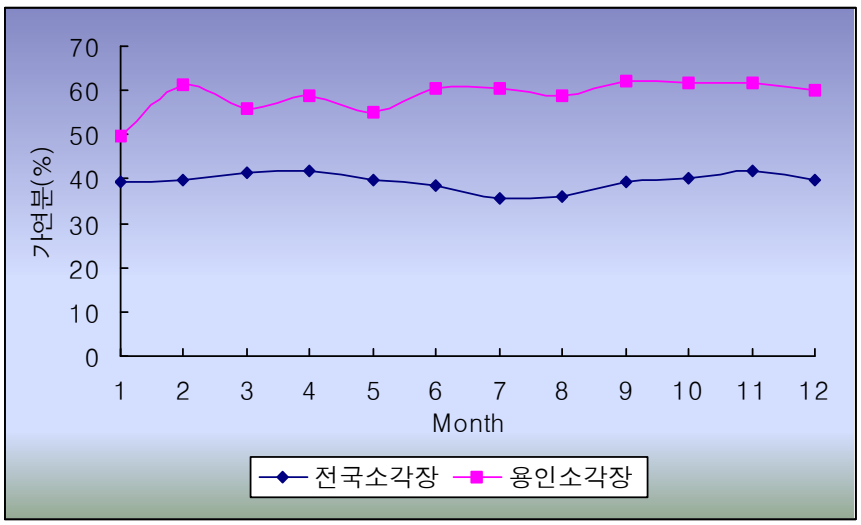


Fig. 2. Distributions of combustible wastes at Yoingin incinerator.

3.3. 폐기물의 수분 분포

생활 폐기물의 수분 분포는 결국 소각 온도에 영향을 주는 요인이고, 수분이 많을수록 소각을 하는데 더 많은 에너지가 소모되게 된다. Fig. 3에서는 전국 전체 소각장의 월별 평균 수분 분포와 용인소각장의 월별 수분 분포를 비교하였다. 용인소각장의 수분 분포는 월별에 따라 30%에서 40%의 수분 분포를 나타내고 있으며, 전국 소각장에서는 50%에서 60%의 수분 분포를 나타내고 있다.

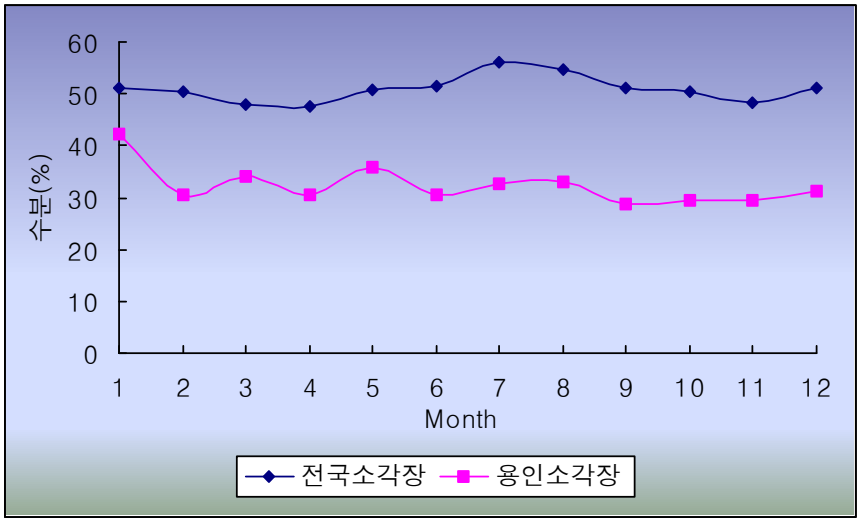


Fig. 3. Moisture content of wastes at Yoingin incinerator.

3.4. 폐기물의 회분 분포

소각하는 폐기물중의 회분의 분포는 소각후의 분진으로 가스와 함께 배출되게 된다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 용인소각장의 월별 회분 분포를 전국 전체 소각장의 월별 평균 회분 분포와 비교하면, 봄과 가을에는 비슷한 회분 분포를 나타내고 있으며 여름과 겨울에는 다소 낮은 회분 분포를 나타내고 있다.

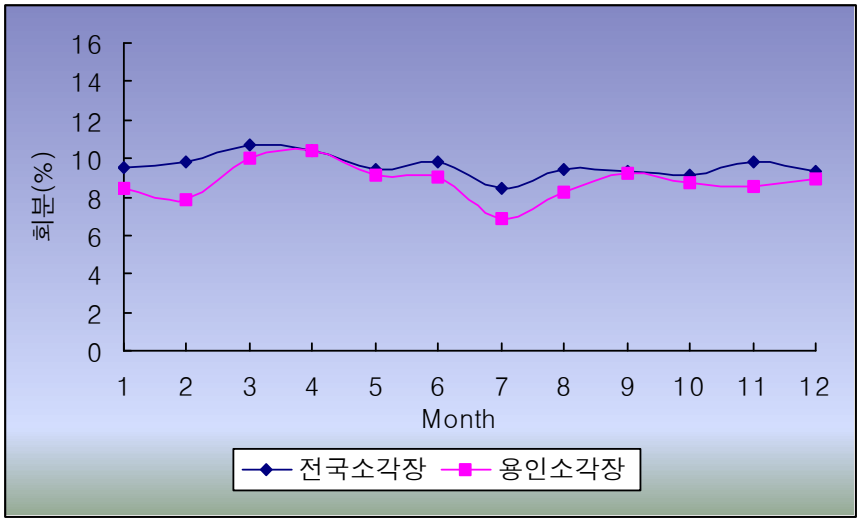


Fig. 4. Ash content of wastes at Yoingin incinerator.

3.5. 폐기물의 발열량

용인소각장의 발열량과 전국 전체 소각장의 평균 발열량의 비교는 Fig. 5와 같다. 전국 소각장 평균 발열량은 1600Kcal/Kg 정도의 월별 분포를 나타내고 있으며, 용인소각장의 발열량은 3월에 5000Kcal/Kg로 가장 높은 수치를 보여준다. 7월부터 12월까지는 3000Kcal/Kg 정도로 고른 분포를 띠고 있고, 전국 평균보다 월별 발열량이 전체적으로 높게 나타나고 있다.

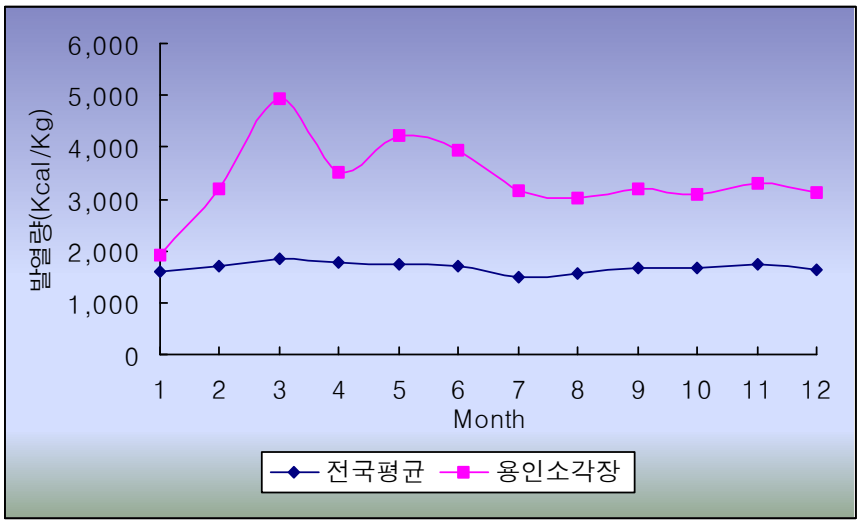


Fig. 5. Heating values of wastes at Yoingin incinerator.

3.6. 용인시 소각장 폐기물의 조성

Fig. 6에서는 월별 용인소각장으로 반입되는 폐기물의 조성을 나타내고 있다. 반입되는 폐기물 중 종이류, 비닐, 플라스틱류, 음식물이 대부분을 차지하고 있는 것을 알 수 있다. 3월, 5월에 종이류의 구성비가 50%이상이고, 이때의 발열량이 Fig. 6에서 보는 바와 같이 높게 나타나고 있다.

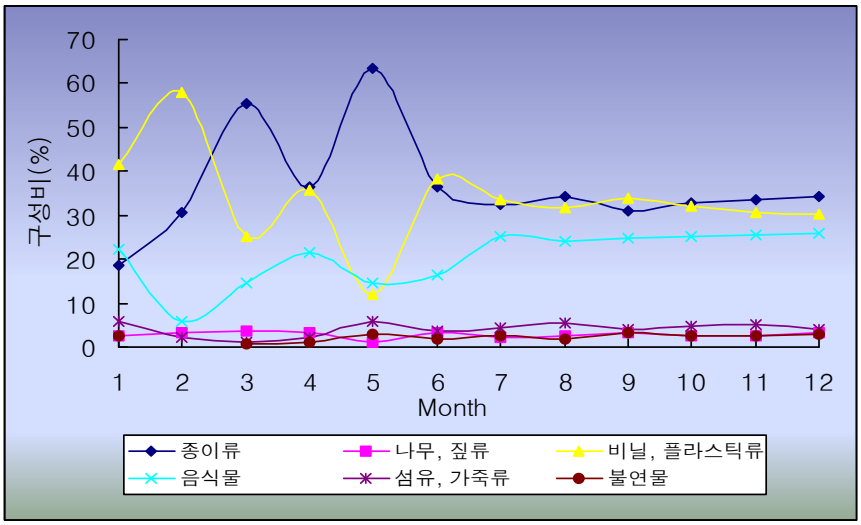


Fig. 6. Compositions of wastes at Yoingin incinerator.

3.7. 전국 소각장의 폐기물 평균 조성

용인소각장과 비교하여 전국 소각장의 폐기물 평균 조성을 Fig. 7과 같이 살펴보면 용인소각장에서는 종이류와 비닐, 플라스틱류의 비중이 높으나, 전국 소각장의 폐기물 조성은 음식물이 월별에 따라 45% 정도로 가장 높은 비중을 나타내고 있다.

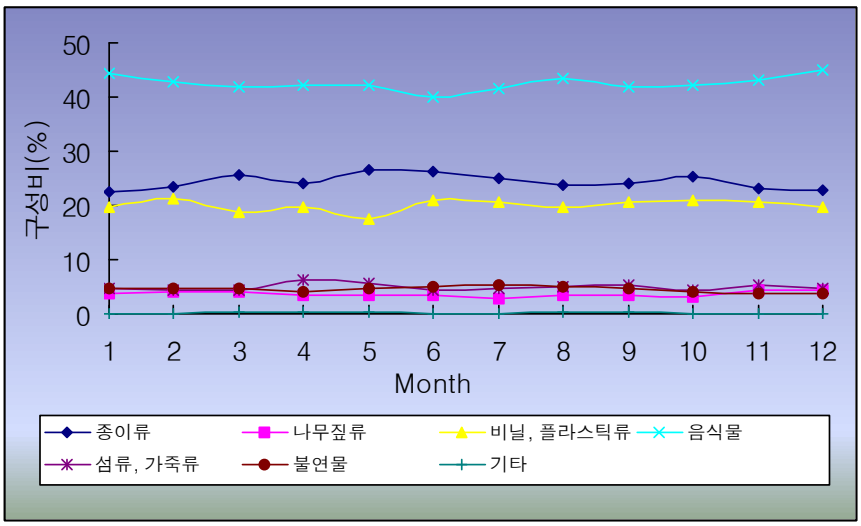


Fig. 7. Average compositions of wastes at national incinerators.

4. 용인소각자의 대기오염물질 배출 특성

4.1. SOx 배출농도

용인소각장과 전국 소각장의 평균 SOx의 배출농도는 Fig. 8에서 보는 바와 같다. 전국 소각장의 평균 SOx 배출농도는 8~10ppm 정도로 나타나고 있고, 용인 소각장에서 배출되는 SOx 농도는 겨울철에 10~11ppm 정도로 전국 평균 배출량보다 높게 나오고, 봄에서 가을철에는 전국 평균 배출 SOx 농도보다 낮게 배출된다.

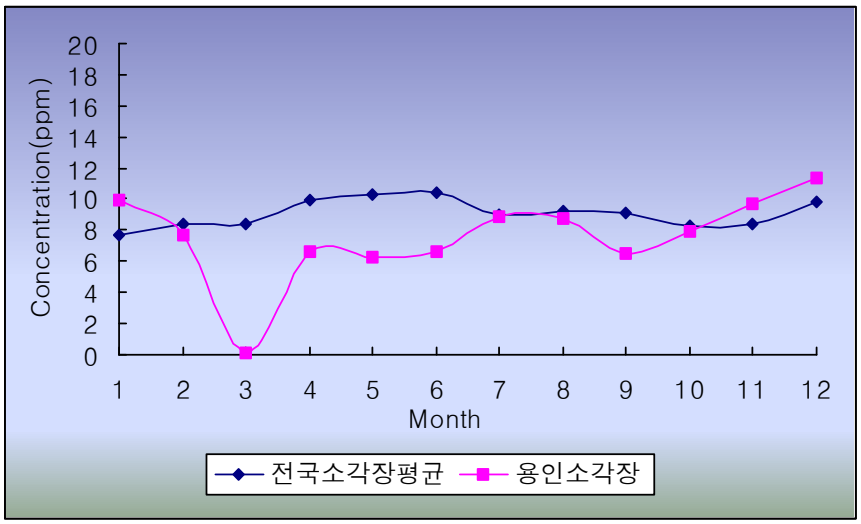


Fig. 8. SOx emissions from Yoingin incinerator.

4.2. NOx 배출농도

Fig. 9과 같이 용인소각장의 NOx 배출농도는 월별에 따라 전체적으로 전국 소각장 평균 NOx 농도보다 최고 35ppm 정도 높게 배출되는 경향을 나타내고 있다. 8월에는 용인소각장에서의 NOx 배출농도가 75ppm 정도로 최고치를 나타내고 있는 것을 볼 수 있다.

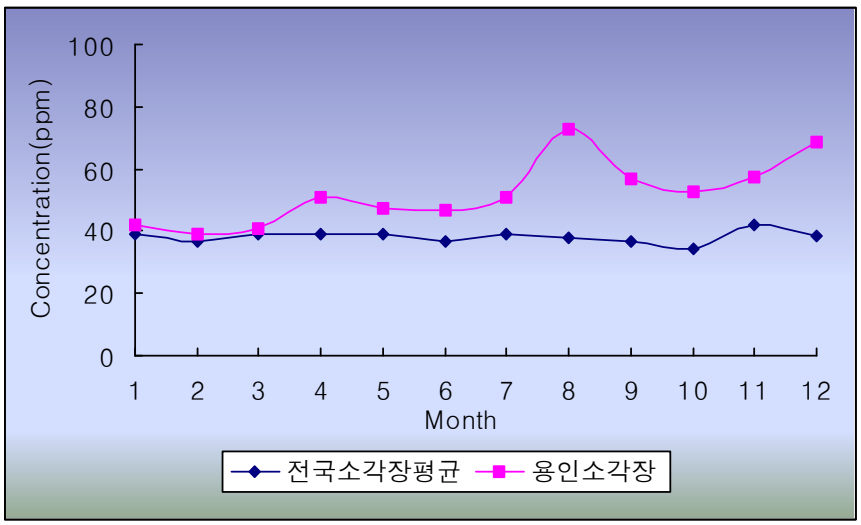


Fig. 9. NOx emissions from Yoingin incinerator.

4.3. HCl 배출농도

용인시 소각장의 HCl 배출농도는 1~2ppm 정도로 Fig. 10과 같이 나타난다. 이러한 수치는 전국 소각장 평균 HCl 배출농도보다 2~5ppm 정도 낮은 값이다. 월별 HCl 배출농도가 거의 일정하게 나타난다는 것을 볼 수 있다.

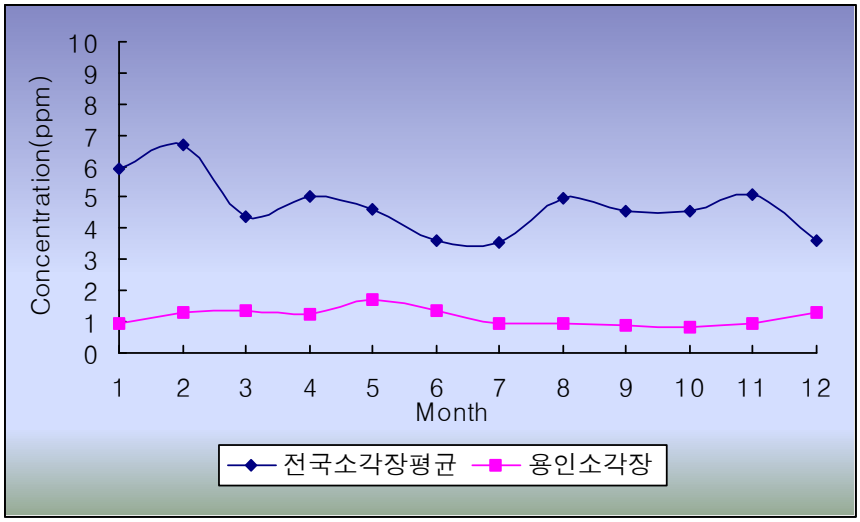


Fig. 10. HCl emissions from Yoingin incinerator.

4.4. Dust 배출농도

용인소각장에 배출되는 Dust의 농도와 전국 소각장에서 배출되는 평균 Dust와 비교하면 Fig. 11과 같이 월별에 따라 전체적으로 용인소각장에서 배출되는 Dust 농도가 2~4ppm 정도 높게 나타난다. 용인소각장에서 배출되는 Dust의 최고치는 1월에 12ppm 정도로 나타난다.

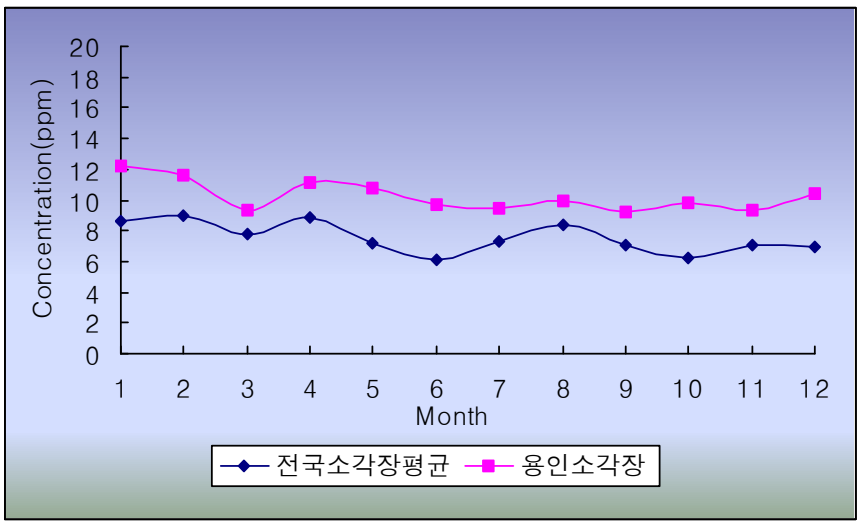


Fig. 11. Dust emissions from Yoingin incinerator.

4.5. 기타 대기오염물질 배출농도

기타 대기오염물질 배출농도는 Table 7 에 나타나 있다. 매연의 농도는 1도로 나타나 있다. 이는 대기환경보전법상의 매연의 배출허용기준 2도를 초과하지 않는 농도이다. 중금속인 Pb와 Cu도 마찬가지로 배출허용기준인 각각 5ppm, 10ppm을 넘지 않는 농도를 나타내고 있다. 황화수소의 배출허용기준은 15ppm이다. 이 밖의 암모니아와 불화수소 또한 배출허용기준을 밑돌고 있다.

Table 7. Emissions of other air pollutants from Yongin incineration facilities

구분	최소농도	최대농도	연평균농도
매연 (도)	1도	1도	1도
NH_3 (ppm)	0.02	0.41	0.15
H_2S (ppm)	0.03	0.12	0.08
HF (ppm)	0.342	0.754	0.297
Pb (㎎/Sm³)	0.03	0.064	0.049
Cu (㎎/Sm³)	0.03	0.054	0.041
배출가스량 (Sm³/hr)	15593	31291.7	19878.11

5. 생활폐기물의 특성모델

생활계 폐기물의 성상에 따라 소각처리시에 발생되는 대기오염물질의 배출량은 많은 차이가 있다. 그러므로 폐기물의 성상별 특성에 따른 대기오염물질의 배출농도를 이해하는 것은 폐기물의 소각처리시 주변지역의 환경영향을 고려하는 경우에 매우 중요하다.

본 연구에서는 폐기물의 성상별 특성에 따른 대기오염물질의 배출량을 이해하기 위하여, 대기오염물질을 2개의 그룹으로 구분하였는데, 첫째는 CO_2/SO_2/HCl의 그룹과, 둘째는 CO/Organics/Particulate matter/NOx의 그룹이다.

5.1 폐기물 특성별 CO_2/SO_2/HCl 배출

다양한 성상을 가지는 폐기물을 소각시에 배출되는 CO_2/SO_2/HCl의 배출량은 equation 1로 나타낼 수가 있다. equation 1을 이용하여 대기오염물질의 이론적인 배출량을 산정하기 위해서는 폐기물의 최종분석(ultimate analysis) 자료가 활용되어야 한다. 폐기물의 최종분석(ultimate analysis)은 C, H, N, S, O, Cl, H_2O, 회분(ash)의 중량비(weight fraction)를 측정하는 것이다.

$$C_cH_hN_nS_sO_oCl_l + \alpha(O_2 + 3.78N_2) + wH_2O \rightarrow cCO_2 + \left(\frac{h}{2} + w - \frac{1}{2}\right)H_2O + sSO_2 + \left(3.78\alpha + \frac{n}{2}\right)N_2 + \left(\frac{o}{2} + \alpha + \frac{w}{2} - c - \frac{h}{4} - \frac{w}{2} + \frac{l}{4} - s\right)O_2 + lHCl \quad \text{(Eqn. 1)}$$

여기서 c, h, n, s, o, l 은 1 mole의 가연성 폐기물 속에 들어있는 C, H, N, S, O, Cl 원소의 몰수 이고, α는 소각시 주입되는 공기의 몰수이며, w는 물의 몰수 이다. 그리고 연소실에 공급되는 과잉공기량(%)은 폐기물의 소각에 필요한 최소한의 이론적 공기량을 초과하여 주입되는 공기량이다.

이 식을 이용하여 폐기물의 성상별 특성에 따른 대기오염물질의 배출량을 산정하기 위해서, 폐기물 속에 함유되어 있는 모든 N, S는 N_2와 SO_2로 전환되며, 회분은 연소반응에 참여하지 않으며, 공기의 몰수는 건조공기로 가정하였다. 또한 불완전 연소의 생성물인 CO, 그리고 NOx의 생성량은 폐기물 소각배가스의 총량에 비교하여 매우 적은 양이므로 무시하였다.

CO_2의 경우, equation 1로 계산될 경우 대기방지시설이 가동되지 않는 경우의 배출량인데, CO_2의 경우 대기오염 방지시설에 의해 처리되고 있지 않으므로, 이 식을 이용하여 CO_2의 배출량을 직접 산출할 수가 있다. 반면에 SO_2와 HCl은 대기오염 방지 시설에 의해 처리되고 있으므로 이 식을 이용하여 산출할 수가 없다. 그러므로 대기오염방지 시설의 SO_2와 HCl 제거효율을 고려하여 수정하여야 할 것이다. 본 연구에서는 SO_2의 제거효율을 80%로 가정하고, HCl의 제거효율을 95%로 가정하였다. 그러므로 대기오염방지 시설이 가동되고 있는 소각시설에서 SO_2와 HCl의 배출량은 equation 1에서 산출된 SO_2와 HCl의 20%와 5%가 배출되는 것이다.

5.2 폐기물 특성별 CO/Organics/Particulate matter/NOx 배출

폐기물 소각시 배출되는 CO, Organics, Particulate matter, NOx의 배출량을 산정하기 위해서는 equation 1의 이론적인 배출량 산출에 기초하지만 간접적인 방법으로 산출된다. 즉 CO, Organics, Particulate matter, NOx의 배출량 최대치가 국내의 배출허용기준를 만족하는 것을 가정하고 equation 1에서 결정되는 소각배가스의 유량을 이용하면 폐기물의 소각시 배출되는 이러한 오염물질들의 농도를 산출할 수가 있다.

폐기물의 성상별 CO, Organics, Particulate matter, NOx의 배출량을 계산하는 방법은, 첫째 폐기물의 최종분석(ultimate analysis) 자료를 이용하여 폐기물의 화학식을 이용한다. 둘째는 소각배가스의 산소농도를 7%로 가정하여 소각시에 공급되는 공기의 몰수인 α를 equation 2와 같이 계산할 수가 있다. 여기서 Qo는 소각배가스내의 산소 몰수이며 equation 1로부터 다음과 같이 나타낼 수가 있다.

$$Q_o = \frac{o}{2} + \alpha - c - \frac{h}{4} + \frac{l}{4} \qquad \text{(Eqn. 2)}$$

또한 소각배가스의 산소농도를(7%로 가정한 경우) 다음과 같이 나타낼 수가 있다.

$$\frac{Q_o}{Q} = 7\% \qquad \text{(Eqn. 3)}$$

여기서 Q는 소각시의 건조배출가스 총유량이고, equation 1로부터 다음과 같이 산출될 수가 있다.

$$Q = \frac{o}{2} + 4.78\alpha - \frac{h}{4} + \frac{5l}{4} + \frac{n}{2} \qquad \text{(Eqn. 4)}$$

그리하여 equation 2~4를 이용하면 소각시 발생되는 소각배가스의 총유량, Q를 산출할 수가 있는데, 이 유량을 L/gram-mole 단위로 환산하고, 국내의 배출허용기준을 이용하면 폐기물의 성상별 CO/Organics/Particulate matter/NOx 배출량을 산출할 수가 있다.

5.1과 5.2에서 기술한 간단한 모델을 이용하면, Table 8에서 보는바와 같이, 폐기물의 성상별로 소각시에 배출되는 CO_2/SO_2/HCl와 CO/Organics/Particulate matter/NOx의 배출량을 예측할 수가 있어 소각처리시 적극 활용될 수가 있으며, 특히 이러한 결과는 소각장에서 배출되는 대기오염물질의 영향을 살펴보기 위한 대기확산모델의 입력자료로 적극 활용될 수가 있다.

Table 8. Pollutant emissions per mass unit of wastes combusted in an incinerator.

폐기물 성상	대기오염물질 배출량 (kg of pollutants/ton of wastes)						
	CO_2	SO_2	HCl	NOx	PCDD	CO	PM
플라스틱류	2.07E+3	1.16E+0	1.54E+0	1.96E+0	1.27E-7	1.22E+0	2.34E-1
신문종이류	1.34E+3	2.60E-1	5.60E-2	1.03E+0	1.70E-8	6.40E-1	1.23E-1
나무류	1.01E+3	2.80E-1	4.62E-2	1.15E+0	7.50E-8	7.20E-1	1.38E-1

Table 9. Ultimate analysis of municipal solid wastes(weight %)

폐기물 성상	C	H	O	N	Cl	S	H_2O	Ash
플라스틱류	56.43	7.79	8.05	0.85	3.00	0.29	15.0	8.59
신문종이류	36.62	4.66	31.76	0.11	0.11	0.19	25.0	1.55
나무류	41.20	5.03	34.55	0.24	0.29	0.07	16.0	2.62

6. 생활폐기물의 열량 특성 및 제어

6.1 생활폐기물의 열량 특성

생활계 폐기물의 경우 화석연료나 사업장 폐기물과는 달리 폐기물의 성상 및 조성이 매우 다양하므로, 소각시 발생되는 총열량은 폐기물의 성상에 따라 매우 큰 변화를 나타낸다. 소각시 발생되는 열을 에너지원으로 재이용하기 위해 열 회수 공정이 설치된 대부분의 소각설비는 열효율을 높이기 위하여 열량이 높은 폐기물을 소각한다. 그러나 대부분의 소각로에서 공통적으로 발생되는 문제는, 열이용율 높이기 위하여 대단히 가연성인 플라스틱류, 고무류, 그리이스류, 기타 등등의 쓰레기를 소각함에 따라 소각로의 화격자에 심각한 열적손상(heat damage)이 발생되는 문제에 당면하고 있다.

특히 용인 소각장의 경우, 열을 에너지원으로 재이용하지 않기 때문에 열량이 높은 폐기물을 소각하는 경우에 소각설비의 열적손상이 더욱 커진다. 그리하여 쓰레기 주입량을 제한할 수밖에 없어 용인시에서 발생되는 쓰레기의 소각처리를 위해 소각설비의 증설이 불가피하다. 따라서 폐기물의 성상별 열량 특성을 살펴보고, 열량 제어를 통하여 소각설비의 열적손상을 최소화하면서 대기오염물질의 배출을 최소화할 수 있는 기술 개발이 필요하다.

폐기물의 성상별 최종분석(ultimate analysis) 자료를 이용하면 다음의 식으로 폐기물의 열량을 산출할 수가 있다. 아래의 식들은 실험식으로 산출된 열량이 다르므로 본 연구에서는 이러한 식에서 산출된 열량을 평균하여 사용할 것을 권장한다.

◇ Dulong Equation

$$Kcal/Kg = 78.31C + 359.32(H-O/8) + 22.12S + 11.87O + 5.78N \quad \text{(Eqn. 5)}$$

◇ Chang Equation

Kcal/kg = 8561.11 + 179.72H - 63.89S - 111.17O - 91.11Cl - 66.94N **(Eqn. 6)**

◇ Boie Equation

Kcal/kg = 83.22C + 274.3H - 25.8O + 15N + 9.4Cl + 65P **(Eqn. 7)**

전절에서 살펴본 폐기물의 원소분석 자료와 Eqn. 5~7을 이용하여 폐기물의 성상별 열량을 산출한 결과가 Table 10에 나와 있다. 이러한 계산은 spreadsheet를 이용하여 쉽게 계산할 수가 있다.

Table 10. Heating values of municipal solid wastes(kcal/kg, as fired)

폐기물 성상	Dulong (Eqn. 5)	Chang Eqn. 6)	Boie (Eqn. 7)	Average
플라스틱류	5918.9	6787.6	5671.4	6126.0
신문종이류	2523.1	4279.4	2634.8	3179.1
나무류	3271.5	4496.6	3294.6	3687.6

폐기물의 최종분석(ultimate analysis) 자료에 기초하여 폐기물 성상별 열량이 결정되면 소각로의 온도(T)를 아래의 mass/energy 식으로 나타낼 수가 있다.

Mass Balance :

$$In = Out$$

$$\dot{m}_{waste} + \dot{m}_{fuel} + \dot{m}_{air} = \dot{m}_{exhaust} \qquad (\text{Eqn. 8})$$

Energy Balance :

$$\dot{q}_h = Q\rho_g \Delta H = \dot{m}\Delta H$$

$$= Q\rho_g C_P(T - T_o) = \dot{m} C_P(T - T_o) \qquad (\text{Eqn. 9})$$

여기서,

m : mass flow rate

q_h : heat rate required

Q : gas volume flow rate

ρ_g : gas density

H : enthalpy

C_p : specific heat

T_o : reference temperature (25℃)

여기서 사용되는 Q_h는 잠열(latent heat)과 소각로의 열손실을 고려한 열량이 사용된다. 이러한 방법으로 산출된 소각로의 온도(T)가 폐기물의 연소속도에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 다음과 같은 연소 kinetics를 이용한다.

$$\frac{dC_A}{dt} = -kC_A^n \qquad (\text{Eqn. 10})$$

여기서,

C_A : concentration of pollutant A

k : kinetic rate constant

n : reaction order

여기서 소각시 발생되는 대기오염물질의 농도가 산소농도보다 훨씬 적으므로 1차반응으로 가정할 수가 있다. 즉, n = 1로 두면,

$$\frac{C_A}{C_{Ao}} = \exp(-kt) \qquad (\text{Eqn. 11})$$

여기서 t는 소각로의 체류시간이고, k는 다음과 같이 Arrhenius form으로 나타낼 수 있다.

$$k = A \exp(- E_{act} / RT) \qquad \text{(Eqn. 12)}$$

E_{act} : activation energy

R : gas constant (1.987 cal/gmole K)

소각로에서의 체류시간, t는 다음과 같이 얻어진다.

$$t = \frac{L \cdot \pi \cdot D_l^2}{4 (Q_p + Q_o)} \qquad \text{(Eqn. 13)}$$

여기서,

Q_p : process / waste gas stream

Q_c : combustion product gas stream

D_l : incinerator diameter

L : length of incinerator

6.2 열량 제어 방안

폐기물의 성상에 따른 열량변화와 그에 따른 소각로의 온도에 변화에 대하여 이전의 절에서 살펴보았다. Eqn. 8~13에서 보는바와 같이 소각로의 온도는 소각배가스의 유량에 반비례한다. 즉, 소각로의 체류시간이 적어지면, 소각로의 온도가 낮아지는 것이다. 그러나 소각로의 체류시간이 적어지면, 폐기물의 소각이 이루어지지 못하고 배출되므로 폐기물의 소각이 90% 이상 혹은 대기오염물질의 배출이 국내의 배출허용기준의 범위내에서 배출될 수 있는 체류시간(t)이 유지되는 범위까지 소각배가스의 유량을 증가시키면 소각로의 온도를 효율적으로 저감시킬 수가 있을 것으로 예상된다.

소각장을 증설하여 충분한 체류시간을 유지하면서 소각하는 방안이 환경문제를 고려할 때 가장 적절한 방안일 것이다. 그러나 소각설비의 용량 증설은 경제적인 부담을 초래하고, 특히 소각장 주변 주민의 반발로 결코 매우 어려운 문제이다. 그러므로 이러한 문제를 해결할 수 있는 대안으로 소각장의 용량 증설보다는 소각조건을 개선하여 소각 효율을 최대화하는 것이다. 그리하여 소각배가스의 유량을 증가시켜, 소각로의 온도를 낮게 유지하면서 쓰레기의 소각량을 증가시킬 수가 있다. 이러한 경우에 소각로내의 체류시간이 감소하여 미연소된 매연이나, 각종 유기물질의 배출량이 증가하므로 소각로 후단에 있

는 대기오염방지시설 특히 스크러버나 백필터의 집진효율을 최대화할 수 있도록 유지관리가 절실히 필요하다.

또 다른 대안은, 일반적으로 많이 적용되고 있는 방법으로, 체류시간의 저감으로 미연소 성분을 다량 함유하고 있는 소각배가스의 유량을 소각로에 다시 주입하여 소각로의 유량을 증가시키면서, 미연소 성분을 재연소시키는 공정으로 개선하는 것이다. 이 방법은 공정개선에 따른 비용이 부담되지만, 재연소를 하는 경우에 소각배가스의 미연소성분이 현저히 감소되어 대기오염 물질의 배출량이 저감되고, 따라서 대기오염 방지시설의 부하량이 감소되는 장점이 있다.

소각로의 연소실에 물을 직접 주입하는 경우 온도를 적절히 유지하는데 매우 용이하나, 수분의 증가로 인하여 각종 산성가스가 용해되어 배관의 부식이 가속화되므로 경제적인 타당성을 검토한 후에 적용시킬 수가 있을 것이다. 그 밖에 용인소각장의 경우, 소각시 발생되는 폐열을 재이용하는 방안을 적극 검토할 필요가 있다. 소각열을 재이용함으로써 소각로의 온도를 유지하는 것이 가장 적극적인 방법이 될 것이다.

7. 소각장의 문제 및 적정 관리 방안

7.1 도시쓰레기 소각시설의 문제점

- 쓰레기의 물리적, 화학적 성상 분석을 규칙적이고 빈번하게 수행하는 것이 필요하며, 특히 쓰레기의 방사성물질의 농도를 측정할 필요가 있다.
- 연돌의 배출가스를 연속적으로 측정하고 있으며, 소각로에서 배출되는 폐수의 성분을 분석하고 있다.
- 쓰레기의 소각량을 무게로 측정하지 않는 경우가 많다.
- 소각장의 저장(pit)길에서 발생되는 문제는, 부피가 매우 큰 쓰레기와 액상 폐기물이다.
- 소각장의 투입시 발생되는 문제는, 부피가 큰 쓰레기를 주입하는 경우, 쓰레기의 주입이 지연되고, 주입기 hopper에서 막히는 문제가 발생한다.
- 화격자(grate)에서 발생되는 문제는 화격자의 손상인데, 이것은 대단히 가연성인 물질로 인하여 화격자가 손상을 입게되는 것이다. 또한 화격자에 끼이거나, 손상을 입히는 매우 단단한 물질이 문제를 초래한다. 그리고 slag에 의한 화격자의 막힘현상이 소각시 발생되는 문제이다.
- **대부분의 일반적인 소각로의 문제는, 대단히 가연성인 플라스틱류, 고무류, 그리이스류, 기타 등등의 쓰레기를 소각하는 경우, 소각로의 화격자에 심각한 열적손상(heat damage)을 초래하고, 그 결과 연돌에서 배출되는 가스의 농도를 증가시킨다. 또한 소각로의 용량을 증가시키는 원인이 되고 있다.**

이러한 대안으로는 스팀을 생산하여 열의 발생을 자원으로 활용하면서 소각로의 온도를 저감시키도록 하는 것이 필요하다.

7.2 쓰레기 주입량의 조절

다음과 같은 경우에는 소각로에 주입하는 쓰레기의 양을 조절하고, 가능하면 자동적으로 조절될 수 있도록 한다.

- 연소실에서의 온도가 최소허용온도에 도달하는 경우,
- 연소실 후단에 설치된 여과집진 설비의 유입온도가 최대허용온도 이상인 경우,
- 연소실내의 압력이 최대허용압력 이상으로 증가할 때,
- 연소가스 배출량이 최대허용치 이상에 도달하는 경우,
- 대기오염방지 설비의 운전조건이 최대허용치를 초과하는 경우(특히 처리 유량이 석회의 주입량을 초과할 정도로 증가하는 경우)
- 연속측정 결과가 배출허용기준을 초과하는 경우에는 쓰레기의 주입을 즉시 조절하여야 한다
- 기타 쓰레기 주입량을 정확하게 정량화 할 수 있도록 하여야 한다.

7.3 연소실의 개선

연소실에서 발생되는 가장 빈번한 문제는 연소실의 leaks 이다. 또한 대기오염 대기방지 설비의 문제, 연결관, 비점원 형태로 배출되는 문제등이 있다. 그리하여 연소가 일어나는 곳은 완전히 밀폐되어야 하고, 연소실의 압력을 음압(negative pressure)으로 유지하여 대기오염물질이 비점원 형태로 배출되는 것을 최소화하여야 한다.

7.4 분진제어를 위한 운전조건의 개선

분진의 발생에 가장 많은 영향을 끼치는 요인은 (1) 주입되는 쓰레기의 성분, (2) 연소실에서 생성되는 bottom ash와 fly ash의 생성량, (3) 집진장치의 집진효율이다.

연소실에 주입되는 쓰레기의 성분 중에서 쓰레기의 회분(ash) 성분과 쓰레기 입자의 분포(size distribution)가 분진 발생에 매우 중요한 영향을 미친다. 그러므로 회분(ash)의 최대 반출량과 최소 반출량을 제한하여야한다. 회분의 최대 반출량 제한은 overloading에 따른 분진발생을 감소하고, 최소 반출량 제한은 배출가스로의 인입을 억제하여 연돌에서의 배출량을 최소화할 수가 있다. 이러한 회분의 최대 반출량과 최소 반출량은 설계치의 80% 내에서 이루어지도록 유지하여야 할 것이다. 또한 소각배가스의 유량을 제한하면, 이들 분진이 배출가스로 유입되는 것을 저감할 수가 있다.

분진의 배출을 억제하기 위해서는 집진설비의 적절한 운전 및 유지관리가 필수적이다. 용인소각장의 경우 여과집진설비(백필터)를 가동하고 있는데, 이러한 집진설비의 집진효

율은 필터의 종류나 특성(weave, pore size, thickness), face velocity, 필터 cake의 특성, 분진의 입도분포등에 따라 변한다. 그러나 백필터에서 발생되는 저효율 집진문제는 필터가 손상되어 필터백(bag)에 구멍이 생기는 경우이다. 이러한 경우에는 유량이 최대가 되고 압력손실이 최소 또는 최대가 되는 경우가 발생된다. 그러므로 백필터의 운전조건(특히 압력과 유량)에 이상이 발견되면 필터백의 손상을 눈으로 점검하거나, bag leak detector systems을 설치하여 필터백의 손상여부를 신속하게 확인하여야 한다.

백필터의 운전시에도 필터링하는 소각가스의 최대유량을 제한하여야 한다. 가스유량의 증가는 필터의 air-to-cloth ratio(effective filter face velocity)를 증가시켜 백필터로부터 분진이 유출되는 경우가 발생한다. 또한, 필터링하는 동안 최대/최소의 압력손실을 신중하게 제한하여야 한다. 적당히 높은 압력손실은 필터케이크의 생성과 그로 인한 적절한 집진효율을 보여주고, 압력손실의 급격한 감소는 필터백의 손상, 혹은 필터하우징과 필터백의 연결부분에 심한 leakage가 발생하고 있음을 암시하므로 압력손실의 최대/최소를 엄격히 제한하여야 할 것이다.

그러나 백필터의 운전시 가장 빈번하게 발생되는 문제는 필터에 매우 조그만 손상이 생겼을 경우인데, 이러한 경우에는 압력손실의 변화가 매우 적다. 그러므로 조그만 압력손실이 발생하는 경우에도 필터백의 leakage를 점검할 수 있는 시스템을 구축하고, 가능하면 최대압력을 제한하여 조그만 구멍을 통하여 분진이 유출되는 경우를 억제하여야 할 것이다.

또한 필터백 표면에 적절한 필터케이크를 유지하기 위해서는 필터의 cleaning cycle, 필터 클리닝의 강도, 클리닝 지속시간을 조정하면서 필터의 압력손실을 적절하게 유지할 수 있도록 하여야 할 것이다. 필터백의 손상으로 발생되는 leakage를 점검하는 방법은 powder leak detection 방법인 널리 이용되는데 시각적으로 확인할 수 있는 발광분체를 사용하여 필터링하면서 필터백의 표면에 UV를 사용하면 필터백의 손상을 조사할 수가 있다. 이러한 leakage를 점검은 이상이 발생했을 경우는 물론 주기적으로 점검하는 것이 필요하다.

7.5 염소가스와 염화수소의 배출저감

소각시 발생되는 염소가스 및 염화수소의 배출량은 염소성분이 함유되어 있는 쓰레기의 주입량, 스크러버와 같은 대기오염방지 설비의 제거효율에 큰 영향을 받는다. 염소나 염화수소의 발생은 염소화합물의 소각량에 따라 증가하므로 유기염소 혹은 무기염소 성분이 함유된 쓰레기의 최대주입량을 제한하여야 한다.

또한 calcium, sodium, potassium과 같은 물질은 염소와 반응하므로 염소의 발생을 저감시키기 위하여 이러한 물질들(특히 석회)을 주입하는 것이 필요하다. 그러나 이러한 첨가제의 주입은 집진기의 부하량을 증가시키는 단점이 있다. 그리하여 염소가스 및 염화수

소를 저감시키기 위해서는 스크러버와 같은 대기오염 방지설비를 이용하여 저감시키는 것이 가장 적절하다.

7.6 연소실의 개선

연소실에서 발생되는 가장 빈번한 문제는 연소실의 leaks 이다. 또한 대기오염 대기방지 설비의 문제, 연결관, 비점원 형태로 배출되는 문제등이 있다. 그리하여 연소가 일어나는 곳은 완전히 밀폐되어야 하고, 연소실의 압력을 음압(negative pressure)으로 유지하여 대기오염물질이 비점원 형태로 배출되는 것을 최소화하여야 한다. 적절한 연소조건을 유지하기 위해서는, 연소실의 다음 조건을 제한하여야 할 것이다.

- Minimum combustion chamber temperature.
- Maximum flue gas flowrate or production rate.
- Maximum hazardous waste feedrate.
- Operation of waste firing system.

7.7 유기화합물질/이산화탄소/탄화수소의 배출량 저감

유기화합물질은 인체에 유해한 발암성물질로, 소각시 불완전연소의 생성물(PICs, products of incomplete combustion)이 일부 분해되어 발생하거나, 유해성 유기화합물질이 소각로에서 미연소(unburned)되어 발생한다. 그러므로 이러한 유해성 유기물질의 배출을 억제하기 위해서, CO와 hydrocarbons의 최대배출량을 엄격하게 억제하는 것이 필요하다.

CO와 HC은 직접적으로 연소 성능을 보여주는 지표로 널리 사용되고 있다. 이것은 소각로에서 공기의 혼합이 잘 이루어지고 적절한 연소온도가 유지되는 조건에서는 CO, HC, 기타 유기물질의 배출이 최소가 되고, 반면에 공기와의 혼합이 적절치 못하고 소각로내의 온도가 낮아지면 CO가 다량 배출된다. 또한 CO의 배출량이 먼저 증가한 후, 곧 이어서 HC와 다른 유기물의 배출량이 증가하기 시작한다. 그러므로 소각시 CO의 증가는 organics과 HC의 배출량 증가를 암시하므로 CO의 배출량을 엄격하게 제한하여야 할 것이다.

소각로의 온도가 낮아지면 각종 유기물질의 분해가 적어지므로 소각로의 최소온도를 제한하여 운영하여야 한다. 소각로의 온도 조절은 쓰레기의 주입량을 조절하거나, 보조연료를 사용하고, 공기의 주입량을 조절함으로써 변화시킬 수가 있다.

또한 소각가스의 최대유량을 제한하여 소각로내의 체류시간이 충분하도록 유지하여야 한다. 이러한 최대유량의 제한은 대기오염 방지시설의 부하량에도 영향을 미친다.

7.8 기타 방지시설의 점검 및 유지관리

기타 다음과 같은 소각설비 시스템의 점검과 유지관리를 주기적으로 엄격히 수행 할 필요가 있다.

- 연돌 : 시각적으로 관찰
- 압력계 : Fabric pressure loss, fan static pressure, 기타 압력변화의 경향
- air system : Air leakage, 댐퍼valves, 적절한 운전소음의 유지상태
- 집진설비 : Control panel indicators의 관찰
- Dust removal system : Proper operation, pluggage
- Filter bags : Tears, holes, abrasions, proper fastening, bag tension, dust accumulation, creases and folds
- Hoppers : 연소실 및 집진설비의 screw conveyor등
- Motor, fans, etc. : 부식 및 material buildup, Lubrication of all electric motors, speed reducers belt drives and chains 등
- Monitors : Accuracy of equipment
- Access doors : Gaskets
- all bolts and welds 등

제 4 장 결 론

(1) 용인시에서 발생하는 생활폐기물 중 소각이 가능한 가연성 쓰레기의 발생량은 61.6%이고 소각에 의한 처리방법은 26.4%로 비교적 다른 자치지역보다 높다.

(2) 용인소각장의 경우 종이류, 나무류, 플라스틱류의 소각 비중이 높고, 음식물 채소류의 소각 비중이 0.5% 정도로 매우 적다. 그리하여 수분 분포가 월별에 따라 30%에서 40%로 다소 적고 월별 발열량이 전국 평균보다 전체적으로 높게 나타나고 있다.

(3) 용인 소각장에서 배출되는 SOx 농도는 겨울철을 제외한 봄, 여름, 가을철에는 전국 평균 배출 SOx 배출농도보다 적게 배출되는 반면, NOx 배출량은 전국소각장 평균 농도보다 다소 많이 배출되고 있다.

(4) 용인소각장에서의 dust 배출농도 10~12ppm으로 전국 소각장 평균 배출농도보다 높고 HCl의 배출량은 전국 평균보다 훨씬 적은 양이 배출된다. 또한 기타 대기오염물질 배출농도는 배출허용기준을 만족하고 있다.

(5) 용인시 소각장의 문제는, 대단히 가연성인 플라스틱류, 고무류, 그리이스류, 기타등등의 쓰레기를 소각하는 비율이 높아, 소각로의 화격자에 심각한 열적손상(heat damage)을 초래한다. 그 결과 소각로의 용량을 증가시키는 원인이 되고. 연돌에서 배출되는 가스의 농도(특히 NOx)를 증가시킨다.

(6) 본 연구에서 개발 한 Software를 이용하여 용인 소각장 주변에 대한 환경영향 평가를 수행한 결과 소각장에서 배출되는 SO_2, NOx, PM_{10}이 주변에 미치는 영향은 크지 않았고, 대기환경기준에 충분히 만족하고 있다.

(7) 환경영향평가에 있어서 정상상태만을 고려한 Gaussian 모델만을 수행할 경우 결과값들이 과소 평가될 수 있다. 특히 우리나라와 같이 산악지형이 많고 풍향과 풍속이 시간과 공간상에서 자주 변하는 우리나라와 같은 지형에서는 비정상상태를 고려할 수 있는 Puff 모델을 이용하는 것이 소각장 주변 영향을 평가하는 데 타당하다.

제 5 장 연구목표 달성도 및 대외기여도

1. 연도별 사업목표 및 내용

	연도별 사업 목표 및 사업내용
당해년도	용인시에 발생되고 있는 생활 폐기물의 다양한 성상을 조사하여 성상별 소각조건의 개선 및 소각조건의 최적화로 소각효율을 향상시켜 소각장의 용량을 최소화하는 것이다. 또한 소각장의 증설 가동에 따른 지역주민의 환경오염에 대한 피해를 최소화하기 위하여 주변지역에 미치는 환경영향에 대한 조사와 위해성 평가를 수행(위탁연구)하고 소각조건 및 방지시설의 운전조건을 최적화하여 생활쓰레기의 효율적인 소각처리와 동시에 소각장 주변지역의 대기환경을 쾌적하게 조성하고자 하는 것이다.
당해연도 위탁연구	-국내 실정에 맞는 대기확산모델링기법 정립 -모델링 software제작 -Software의 신뢰도 검증 -용인소각장에 현장 적용

2. 평가항목 및 평가결과

평가항목	평가결과
1. 생활폐기물의 특성 모델	소각설비에 활용할 수 있는 실용적인 모델 제시
2. 생활폐기물의 열량 특성	폐기물 성상별 열량 산출이 가능한 Worksheet 제시
3. 생활폐기물의 열량 제어	소각로의 온도 유지를 위한 방안을 제시
4. 대기오염방지 시설의 최적화	대기오염 방지시설을 포함한 소각시스템의 효율적인 관리방안 제시
5. 환경영향 조사(위탁연구)	위탁연구보고서 참조

제 6 장 연구결과의 활용계획

1. 기대효과

- 소각효율의 향상으로 소각장의 용량 증설을 최소화.
- 생활폐기물 소각장의 대기오염물질 배출량 저감으로 쾌적한 대기환경 조성.
- 소각장 용량 증설을 최소화하여 민원문제의 해소.
- 소각장 주변지역의 환경영향 평가로 지역주민의 환경피해 의식의 감소.(위탁연구)
- 소각장 주변지역의 환경오염 피해를 객관적이고 정량적으로 제시할 수 있으므로 민원문제에 적극적으로 대응이 가능함.(위탁연구)
- 영향평가 program 개발로 한국지형 및 기상 자료를 손쉽게 입력.(위탁연구)

2. 기타

구분		실적건수	내용	비고
2차년도 연구 사업	신기술이증 및 발표			
	기술이전			
	환경정책활용			
	국내외 특허	1	소프트웨어 등록 준비 중	
	국내외 논문	1	한국대기환경학회에 논문게재할 예정	
	국내외 발표	1	한국대기환경학회에 발표 예정	
	환경홈닥터			

3. 향후 계획

최근에는 국내의 소각관련 기업체에서도 소각시설의 제작 및 설치, 그리고 부분적인 개선이 가능할 정도로 소각기술이 많은 발전을 거듭하였다. 반면에 소각설비의 설계 및 최적운전에 절대적으로 필요한 생활폐기물의 배출 특성에 대한 조사와 쓰레기의 열량변화의 특성에 관한 연구 결과는 미비한 실정이다. 따라서 생활폐기물의 발생 특성에서 소각시의 배출특성, 그리고 소각배가스의 배출농도와 환경영향 조사 및 위해성 평가 분야를 통합하는 Program을 개발할 계획이다. 이러한 program이 개발되면 기존의 소각시설과 새로 건설되는 소각시설, 또한 앞으로 건설 예정인 소각시설에 판매 또는 적극 활용될 것으로 예상된다.

제 7 장 참고문헌

1. Stahlberg, R.: High-Temperature Recycling and Minimization of Environmental Pollution through Complete Thermal-Chemical Material Conversion; MUT International Congress for Environmental Engineering and Research. Basel, October, 1992, pp. 7-22.
2. Kiss, G., Marfiewicz, W., Riegel J., Stahlberg, R. : THERMOSELECT-Recovery of Energy and Raw Materials from Waste. In: The Thermoselect Process for the Degasification and Gasification of Wastes, Schweitzer, F. J. (Ed.). Berlin, EF-Verlag, pp. 21-55(1994).
3. Stahlberg, R., Feuerriegel, U.: THERMOSELECT - Energy and RawMaterials Recovery, Part 1: Process Foundation for the Continuous Utilization of Waste. Chem. Technik, 46, No. 5 (1994), pp. 257-266.
4. Stahlberg, R., Feuerriegel, U.: THERMOSELECT - Energy and RawMaterials Recovery, Part 2: Studies of the THERMOSELECT Plant in Fondotoce (Italy), Product Quality and Proof of the Distribution of the Chemical Elements in the Material Flows. Chem. Technik, 47, (1995) 3, 113-121.
5. "Dewatering of Municipal Wastewater Sludge." EPA/625/1-87-014, U.S. EPA Cent. Environ. Res. Info., Cincinnati, Ohio(1987).
6. Owen, M.B., "Sewage Solids Combustion." Water and Sew. Works, 107(1960).
7. "Municipal Wastewater Sludge Combustion Technology." EPA/625/4-85-015, U.S. EPA Cent. Environ. Res. Info., Cincinnati, Ohio(1985).
8. Kibbey, A., A State of Art Report on Low Lwv지 Radioactive Waste Treatment, Oak Ridge National Laboratory, September 1980.
9. Jacknow, J., "Environmental Aspects of Acceptable Sludge Disposal Techniques," Fifth Conference on Acceptable Slidge Disposal Techniques, January 1978.
10. Oyen, L., Kibbey, A., "Volume Reduction, Solidification and Packaging of Waste From Nuclear Power Plants, Nuclear Power Waste Technology, Chapter 7, American Society of Mechanical Engineers Monograph G00132, New York, 1978."
11. Filter, H., Roberson, K., "Solidification of Low Level Radioactive Wastes From Nuclaer Power Plants," Management of Low Level Radioactive Waste, Volume Pergamon Press, Elmsford, New York, 1979.
12. Hedahl, T., McCormack, M., Research and Development Plan for the Slagging Pyrolysis Incinerator, United States Department of Energy, January 1979.

13. Stretz, L., Allem, C., Crippen, M., "Combustible Radioactive Waste Treatment by Incineration and Chemical Digestion," Journal of the American Institute of Chemical Engineers, May 28, 1980.
14. Borduin, L., Taboas, A., US Department of Energy Radioactive Waste Incieration Technology, LosAlamos Laboratories, March 1980.
15. Parker, G., "Incineration of Hazardous and Low Level Radioactive Waste," Pollution Engineering, August 1981.
16. Stretz, L., Koenig, R., "Offgas Treatment for Radioactive Waste Incinerators, Department of Energy Nuclear Air Cleaning Conference, October 1980."
17. Aronson, R., "The Search for Safe Nuclear Waste Disposal," Machin Design, March 1980.
18. Hinga, K., "Disposal of High Level Radioactive Wastes," Environmental Science an Technology, January 1982.
19. Stenburg, R. L., Horsley, R. R., Herrick, R, A., Rose, A. H. Jr., Effects of Design and Fuel Moisture on Incinerator Effluents. JAPCA. 10:114-120(1966).

제 출 문

한국외국어대학교 총장 귀하

본 보고서를 “ 소각장 주변 환경영향 및 위해성 평가 PROGRAM 개발에 관한 연구” 과제의 보고서로 제출합니다.

위탁연구기관명 : 안양대학교 환경공학과

위탁연구책임자 : 구 윤 서 (안양대학교)

연 구 원 : 박 성 순 ((주)에니텍)
이 임 학 ((주)에니텍)
유 혜 은 ((주)에니텍)
윤 희 영 (안양대학교)
박 광 일 ((주)워터텍)
최 상 민 (안양대학교)
김 성 태 (안양대학교)

요 약 문

Ⅰ. 제목

“ 소각장 주변 환경영향 및 위해성 평가 program 개발 ”

Ⅱ. 연구의 목적 및 필요성

투명하고, 과학적으로 소각장을 관리하기 위해서는 소각장에서 배출되는 오염물질이 주변에 미치는 기여 영향도를 정확히 계산할 필요가 있다. 이와 같은 목적으로 현재 국내에서 사용되고 있는 대기환경영향평가용 software는 미국환경청에서 제작된 software로써 DOS상에서 구동되기 때문에 사용이 불편하고 국내 지형 및 기상조건에 부적합한 문제점을 갖고 있다. 따라서 국내 여건에 적합하고, 사용하기 용이한 Windows GUI(Graphic User Interface)에서 구동되는 평가용 software 개발이 필요하다.

이와 같이 소각장을 대상으로 평가용 software를 개발하고, 실제 용인 소각장에 적용하여 환경영향평가를 수행하고자 한다.

Ⅲ. 연구의 내용 및 범위

본 연구에서 고려한 ISCST3에서 채택하고 있는 Gaussian 확산이론을 근거로 평가용 software를 한국 실정에 맞게 재구성하여 GUI로 개발하고, 이 개발된 Software를 ISCST3모델과 비교하여 검증한다.

또한 개발된 Software를 실제 용인 소각장에 적용하여 용인 소각장에서 배출된 오염물질이 주변에 미치는 영향을 평가한다.

한편 Gaussian 모델은 정상상태의 모델로 바람장이 시간 및 공간에 따라서 변화가 심한 경우에는 사용에 제한이 있으므로 비정상상태의 바람장을 고려할 수 있는 Puff 모델을 소각장 환경영향평가에 사용하는 것에 대해서 검토하였다.

Ⅳ. 연구결과

미국 환경청에서 추천하는 ISCST3모델과 동등한 수준이며, 한국 지형 및 기상 자료를 손쉽게 입력하여 모델링을 수행하고, 그 결과를 GIS 기법을 이용하여 손쉽게 분석할 수 있는 Windows 환경에서 구동되는 평가용 Software를 개발하였다.

본 연구에서 개발 한 Software를 사용하여 용인 소각장에 대해서 대기환경영향 평가를 수행한 결과 소각장에서 배출되는 SO_2, NOx, PM10이 주변에 미치는 기간별 기여 농도만을 볼 때 대기환경기준에 충분히 만족하였다.

Gaussian model과 Puff model로 동일한 소각장 배출조건에 대해서 비교한 결과 Puff model로 계산한 기여농도가 높게 나타나는 것을 알 수 있었다. 이는 Puff 모델이 풍속이 시간에 따라서 변하는 영향을 보다 상세히 고려할 수 있고, 또한 약한 풍속에서도 정확히 계산할 수 있기 때문이다. 따라서 향후 환경영향평가에 있어서 정상상태만을 고려한 Gaussian 모델보다 진보된 개념인 Puff 모델을 이용하여 평가하는 것이 타당한 것으로 판단된다.

Ⅴ. 연구결과의 활용계획

- 본 연구에서 검토한 결과에 의하면 Gaussian 모델보다는 Puff 모델이 보다 시간에 따라서 변하는 바람장의 영향을 계산에 반영할 수 있으므로 향후 Puff 모델 이론을 근거로 평가용 Software도 개발할 예정이다.
- 본 연구 결과를 한국대기환경학회에 발표하였으며 논문으로 게재할 예정이다.

SUMMARY

A program for EIA (Environmental Impact Assessment) of air pollutants emitted from municipal waste incinerator have been developed in this study. The dispersion theory used in the air dispersion modeling software is based on U.S. EPA's ISCST3 (Industrial Source Complex model for Short Term- version3). The input data to run the model such as meteorological and terrain data are supplied automatically from databases in the software and the modeling procedure is very easy and simple under GUI window environment. Key outputs of AirMaster are a concentration diagram on a digital map, a windrose, a report for the enironmental impact assessment.

The developed dispersion modeling software is applied to the EIA of Yongin incinerator. The results show that the environmental impact to the air quality near the incinerator is not over the ambient air quality standard.

CONTENTS

Summary (Korean) ····· i
Summary (English) ····· iii
Contents ····· v

Chapter 1. Introduction ····· 1
1. Necessity of study ····· 1
2. Objective of study ····· 1
3. Scope of study ····· 1

Chapter 2. State of the Art of the System ····· 3
1. In Korea and oversea ····· 3

Chapter 3. Results and Discussion in Study ····· 4
1. Theory ····· 4
2. Program GUI (Graphic User Interface) ····· 26
3. Environmental impact assessment of Yongin incinerator ····· 30
4. Comparison of PUFF modeling results with Gaussian modeling results ····· 41

Chapter 4. Conclusions ····· 47

Chapter 5. An achievement and Contribution ····· 48

Chapter 6. Plan of the Future ····· 50

Chapter 7. References ····· 51

목 차

요약문 ····· i
Summary ····· iii
Contents ····· v

제 1 장 서론 ····· 1
1. 연구개발의 필요성 ····· 1
2. 연구개발의 목적 ····· 1
3. 연구개발의 범위 ····· 1

제 2 장 국내의 기술개발 현황 ····· 3
1. 국내외 현황 ····· 3

제 3 장 연구수행 내용 및 결과 ····· 4
1. 이론적 배경 ····· 4
2. 소각장 주변 환경영향평가 Program GUI (Graphic User Interface) ····· 26
3. 용인 소각장 주변지역 영향 평가 ····· 30
4. Comparison model 및 PUFF model 결과 비교 ····· 41

제 4 장 결론 ····· 47

제 5 장 연구목표 달성도 및 대외 기여도 ····· 48

제 6 장 향후 추진계획 ····· 50

제 7 장 참고문헌 ····· 51

제 1 장 서 론

1. 연구개발의 필요성

일반적으로 국내 대기기준은 배출허용기준과 일반대기환경기준으로 나눌 수 있다. 배출허용기준은 굴뚝과 같은 배출원으로부터 배출되는 오염물질의 농도를 규제하여 대기환경을 보전하려는 노력의 수단으로서 강제력이 있으나, 일반대기환경기준은 국가가 국민의 생명과 재산을 보호하기 위하여 정한 목표치로 강제력은 없다. 그런데, 배출허용기준을 만족시키면서 굴뚝으로부터 배출된 오염물질이 기상조건의 악화나 특이한 지형조건에 의하여 임의의 시점, 임의의 지점에서 대기환경기준을 만족시키지 못할 수 있으므로, 소각장의 굴뚝에서 배출된 오염물질이 주변지역에 미치는 대기확산 기여도를 정량적으로 평가함으로써 소각장 주변지역 대기를 과학적으로 관리 할 수 있는 프로그램이 필요하다.

소각장의 대기확산 모델링을 수행하여 계산한 결과는 단기 및 장기 기여농도에 해당되는 수치자료이므로 이 농도 값을 소각장 주변 대기관리에 효과적으로 이용하기 위해서는 모델링 계산결과인 기여농도를 일반적인 용어로 해석하여, 주변에 미치는 영향도를 일반인도 손쉽게 이해할 수 있도록 구성할 필요가 있다. 따라서 오염물질별로 계산된 기여농도를 근거로 주변에 미치는 영향도를 간편하고, 용이한 용어로 정의하여 평가하는 프로그램 개발이 필요하다.

2. 연구개발의 목적

소각장 환경영향평가를 위한 Software를 개발하고, 개발한 Software를 이용하여 용인 소각장 환경영향평가에 적용하는 것을 목적으로 한다.

3. 연구개발의 범위

1. 소각장으로부터 배출되는 대기오염물질의 확산에 의한 주변에 미치는 영향도를 평가하는 대기환경영향 평가용 software 개발.
2. 본 연구에서 개발하고자 하는 software는 Windows에서 GUI(Graphic User Interface)로 제작하여 사용이 편리하도록 제작하고 Software제작에는 Borland C++ 언어를 사용.
3. 개발된 software로 용인소각장을 대상으로 적용하여 용인소각장에서 배출된 오염물질이 주변지역에 미치는 영향도를 분석하여 환경영향성을 평가함.
4. 현재 국내 대기환경영향평가에서 Gaussian 모델과 비정상상태를 고려할 수 있는 puff 모델을 동일한 입력조건을 사용하여 계산을 수행한 후 결과를 비교하고, 환경영향평가

에 puff모델의 적용 가능성에 대해서 검토함.

제 2 장 국내의 기술개발 현황

1. 국내외 현황

(1) 국내에서는 주로 미국환경청에서 제작한 DOS용 software를 사용하고 있다. 환경벤처기업인 (주)에니텍에서 대기확산 모델링 소프트웨어를 개발 중에 있으나, 아직 소각장을 대상으로 한 환경영향평가용 software는 없다.

(2) LAKES: 환경분야 소프트웨어(솔루션) 업체 Risk Assessement, Road Model 을 포함한 다수의 환경분야 모델링 솔루션 제공(미국)

< 특징 >

- 윈도우버전
- 깔끔한 인터페이스
- 수행할 모델 선택 가능
- 화려한 3차원 GIS 기능
- BPIP 정보의 Graphical Input
- 기상데이터의 Preprocessing (Aermet, Ramnet)
- 깔끔한 보고서 기능
- 다양한 WindRose

(3) BREEZE : 환경분야 소프트웨어(솔루션) 업체 Risk Assessement, Road Model 을 포함한 다수의 환경분야 모델링 솔루션 제공(미국)

< 특징 >

- 윈도우버전
- 깔끔하진 못하지만 사용하기 쉬운 인터페이스
- 데이터파일의 Import 기능
- MAP, 3D, Data, Report 화면의 빠른 전환
- MAP 의 다양한 View 및 편집기능
- 복수설정사항의 분리 및 메뉴통합
- 내장된 입력파일 에디터

제 3 장 연구수행 내용 및 결과

1. 이론적 배경

본 연구에서 고려한 대기확산모델은 Gaussian 및 Puff 모델이다. 각각의 모델의 이론적 배경과 특성을 살펴보면 아래와 같다

1.1 Gaussian model

1시간 간격으로 변하는 풍향, 풍속, 기온, 대기안정도 및 대기혼합고 등의 기상요소를 입력자료로 하여 수행되는 단기모델인 경우, 그림 1에 나타낸 바와 같이 굴뚝에서 배출된 연기가 부력에 의해서 상승한 다음에 가우시안 형태로 연기가 확산한다고 가정하여 농도를 계산한다.

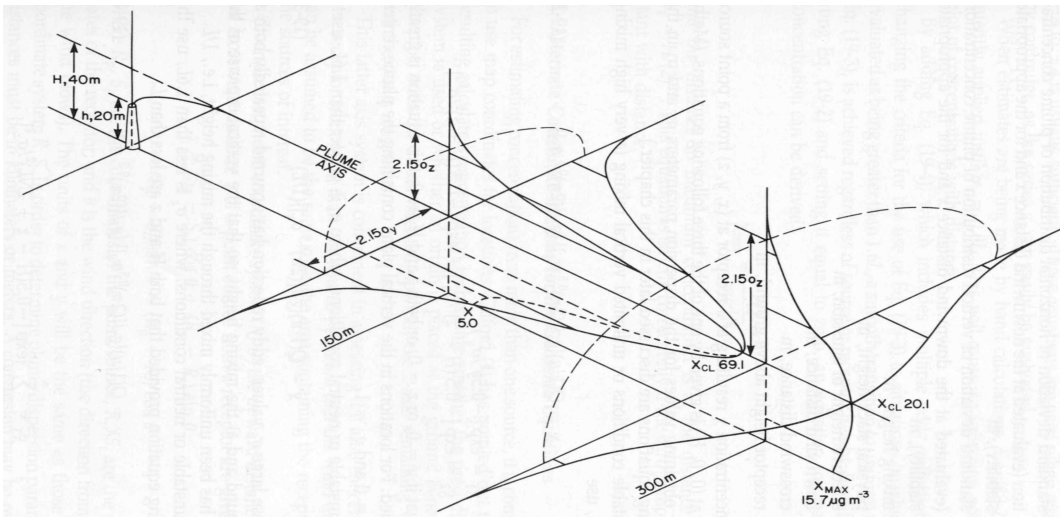


Fig. 1. Gaussian plume model

이 가우시안 연기확산이론을 적용하여 수용지점(receptor point)에서 1시간평균농도를 계산하는 것을 식으로 나타내면 아래와 같다.

$$C(x,y,z) = \frac{Q\ K\ V\ D}{2\ \pi\ u_s\ \sigma_y\ \sigma_z} \exp\left[-0.5\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \quad \text{(식 1-1)}$$

여기서 C는 수용지점에서 농도이고, x는 풍하방향(downwind direction), y는 풍횡방향(crosswind direction), z는 연직방향(vertical direction) 좌표를 각각 나타낸다. Q는 오염물

질 배출량, K는 단위환산계수, V는 연직확산항, D는 오염물질 감쇄항, σy 및 σz 은 수평 및 연직확산계수이고, u_s는 굴뚝 높이에서 대기풍속이다.

연직확산항(V)은 굴뚝유효높이 h_e에서 연기 배출된다고 가정하여 아래와 같이 식(1-2)로 나타낼 수 있는데 우변의 첫 번째 항은 굴뚝에서 직접 배출되는 것에 대한 농도 값이고, 두 번째 항은 배출된 연기가 지표면에 반사되는 영향을 계산하기 위한 항이고, 나머지 항들은 대기혼합층 높이(Z_i)에서 연기가 반사되어 지표면에 미치는 영향을 계산하는 항으로 구성되어 있다. 대기가 안정된 조건에서는 대기혼합층에서 연기 반사를 고려하지 않는다.

$$
\begin{aligned}
V = \; & \exp\left[-0.5\left(\frac{Z_r - h_e}{\sigma_Z}\right)^2\right] + \exp\left[-0.5\left(\frac{Z_r + h_e}{\sigma_Z}\right)^2\right] \\
& + \sum_{i=1}^{\infty}\left\{\exp\left[-0.5\left(\frac{H_1}{\sigma_Z}\right)^2\right]\exp + \left[-0.5\left(\frac{H_2}{\sigma_Z}\right)^2\right]\right. \\
& \left. + \exp\left[-0.5\left(\frac{H_3}{\sigma_Z}\right)^2\right] + \exp\left[-0.5\left(\frac{H_4}{\sigma_Z}\right)^2\right]\right\}
\end{aligned}
\qquad \text{(식 1-2)}
$$

여기서, $H_1 = Z_r - (2 \; i \; Z_i - h_e)$, $H_2 = Z_r + (2 \; i \; Z_i - h_e)$, $H_3 = Z_r - (2 \; i \; Z_i + h_e)$, $H_4 = Z_r + (2 \; i \; Z_i + h_e)$이고, Z_r은 수용지점에서 지표면으로부터 높이로 실제로 농도가 계산되는 높이이다. h_e는 굴뚝높이(h_s)에 연기상승높이(△h)를 더한 값이다.

한편 감쇄항은 오염물질이 대기 중에서 1차 반응으로 인해 자체적으로 시간에 따라서 감쇄되는 과정을 반영하는 것이다.

$$
\begin{aligned}
D &= \exp(- \Psi \frac{x}{u_s}) \quad \text{for } \Psi > 0 \\
&= 1 \qquad\qquad\qquad \text{for } \Psi = 0
\end{aligned}
\qquad \text{(식 1-3)}
$$

여기서 Ψ는 감쇄계수로 오염물질의 반감기($T_{1/2}$)로부터 $\Psi = \frac{0.693}{T_{1/2}}$ 로 계산되고, 비반응성 오염물질은 Ψ가 “0”이다.

1.1.1 유효굴뚝높이

굴뚝에서 배출된 연기가 열부력(buoyancy) 및 관성력(momentum)에 의해서 상승하는데 상승높이는 굴뚝조건 및 대기조건에 따라서 큰 편차를 보인다. 연기가 굴뚝에서 배출되는 조건 및 대기조건으로부터 안정도에 따라서 연기상승높이(△h)와 유효굴뚝높이(h_e)

를 계산하는 과정을 그림 2에 나타내었다.

만일 배출연기속도가 수평방향의 대기풍속의 1.5배보다 작은 경우에는 굴뚝연기가 연직방향으로 상승하지 못하고 오히려 굴뚝높이보다 낮아지는 굴뚝세류현상(Stack-tip downwash)이 발생하는데 이 경우에 유효굴뚝높이는 실제 굴뚝높이보다 낮아진다.

$$h_e = hs + 2\ d_s\ (\frac{V_s}{u_s} - 1.5) \quad \text{for } v_s < 1.5\ u_s \qquad \text{(식 1-4)}$$

한편 굴뚝주변에 건물이 있고, 굴뚝높이가 건물폭(h_w)이나 건물높이(h_b)중에서 작은 값과 건물높이를 더한 값보다 작은 경우($h_s < h_b$ + minimum (h_b, h_w))에는 건물세류현상(building downwash)으로 인하여 연기가 충분히 상승하지 못하고 건물 주변에 퍼지는 경향이 있다. 이와 같이 굴뚝 주변 건물로 인하여 연기 상승높이가 영향을 받는 것을 계산하는 방법은 Scire 및 Schulman이 제시한 방법을 이용한다.

1.1.2 연기확산계수

식(1-1)에서 수평 및 연직방향의 연기확산계수는 시골지역(rural area)인 경우에는 Pasquill-Gifford 의 계수를 이용하였고, 도시지역(urban area)인 경우에는 McElroy와 Pooler의 계수를 사용하였다. 한편 연기확산계수도 주변에 건물이 존재하는 경우에 건물세류현상에 의해서 영향을 받는데 굴뚝높이와 건물 높이 및 위치에 따라서 Scire와 Schulman과 Huber와 Snyder가 제시한 방법에 의해서 확산계수를 보정한다.

1.1.3 지형 영향

본 연구과제로 개발되는 프로그램에서는 평탄(Flat), 단순(Simple), 중간(Intermediate) 및 복잡 지형(Complex terrain)을 모두 계산할 수 있다. 평탄지형은 굴뚝 바닥 고도 및 수용지점의 고도가 동일하여 모두 "0"인 경우이고, 단순지형은 수용체의 고도가 굴뚝높이보다 낮은 경우이고, 중간지형은 수용체 고도가 굴뚝높이보다 높고 유효굴뚝높이보다 낮은 경우이고, 복잡지형은 수용체 고도가 유효굴뚝높이보다 높은 경우이다.

단순지형인 경우에는 지형에 의해서 유효굴뚝높이가 낮아지는 형태로 계산에 반영된다. 즉 평탄지형에서 유효굴뚝높이(h_e')는 $h_e' = h_e + z_s - z|_{(x,\ y)}$로 계산된다. 여기서 z_s는 굴뚝바닥고도이고, z|(x, y)는 수용체 고도이다.

복잡지형에서는 수용체고도를 굴뚝높이로 절삭(chopped off)하여 굴뚝높이를 수용체 고도로 사용하고, 안정도에 따라서 지형조정인자(F_T)를 사용한다. 즉

$$h_e' = h_e + (1 - F_T)\ (z_s - z|_{(x,\ y)}) \qquad \text{(식 1-5)}$$

F_T는 중립 및 불안정 대기조건인 경우에는 0.5값을 사용하고, 안정한 대기조건에서는 0 값을 사용한다. 그리고 복잡지형인 경우의 수용지점에서 농도는 아래의 1시간 기상자료를 근거로 가우시안 sector 평균 농도식을 이용하여 계산한다. 가우시안 sector 평균모델에서는 배출원을 중심으로 16개 방향으로 22.5°씩 sector를 나누고 sector내에서 각도방향으로 농도는 일정하다고 가정한다.

$$C(x,y,z) = \frac{Q\ K\ V\ D}{\sqrt{2\ \pi}\ R\ \triangle\Theta'\ u_s\ \sigma_z}\ CORR \qquad \text{(식 1-6)}$$

여기서 R은 굴뚝에서 수용지점까지 축방향 거리이고, △Θ'은 각도 22.5에 해당되는 0.3927 radian값이다. CORR은 안정한 대기조건에서 복잡지형에서 연기가 반사되는 정도를 조정하는 인자로 중립 및 불안정 대기조건에서는 그 값이 1이고, 안정 대기조건에서는 아래와 같이 계산한다.

$$\begin{aligned} CORR &= 1.0 \quad \text{for } \triangle H_r \square\square 0m \\ &= 0.0 \quad \text{for } \triangle H_r \square\square 400m \\ &= (400 - \triangle H_r)/400 \quad \text{for } \triangle H_r < 400\,m \end{aligned} \qquad \text{(식 1-7)}$$

여기서 $\triangle H_r$은 지표면으로부터 굴뚝연기높이이다. 한편 중간지형에서는 수용체에서 농도계산을 단순지형과 복잡지형으로 가정하여 각각 계산하고, 그 중에서 큰 농도값을 중간지형에서의 농도로 채택한다.

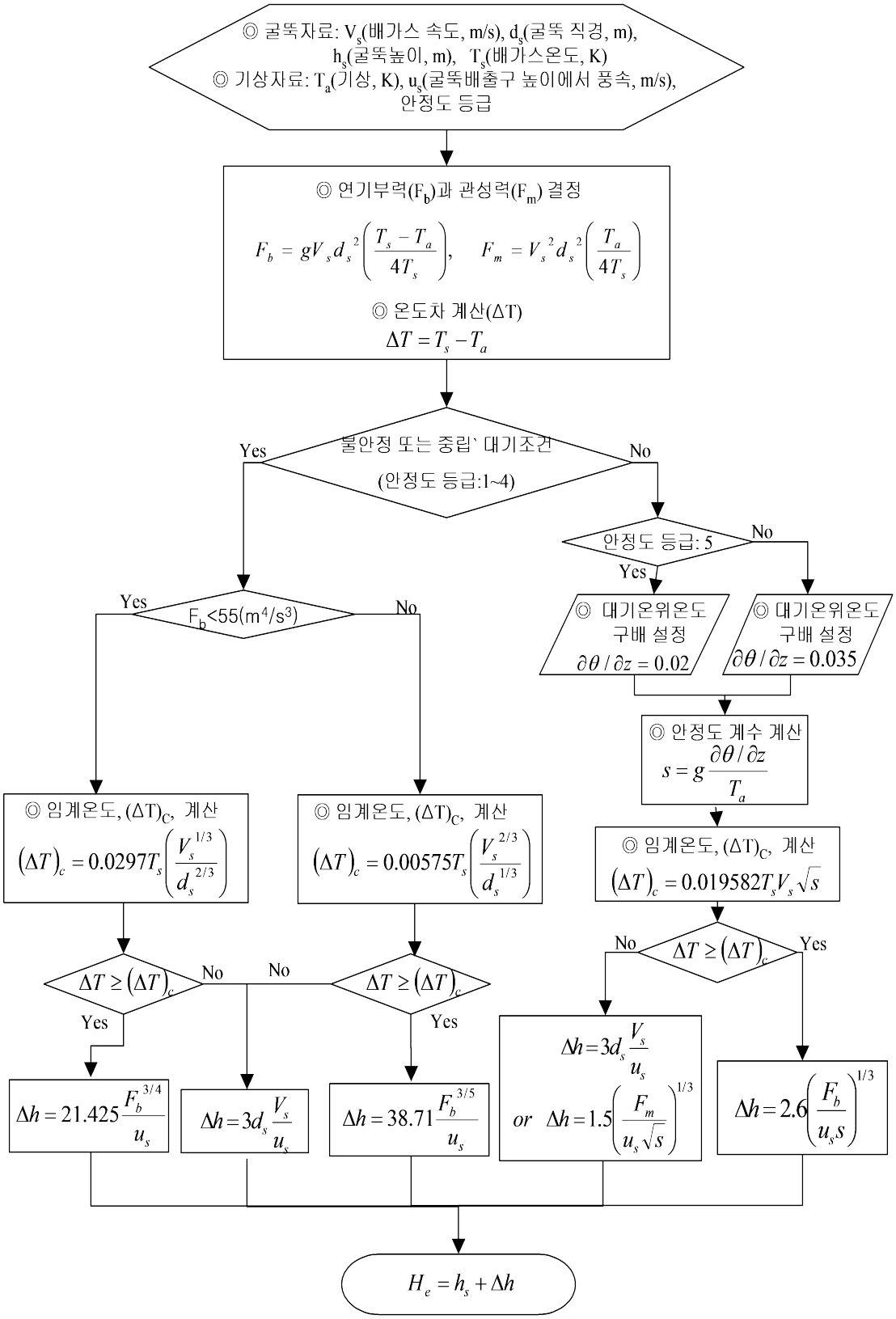


Fig. 2. A flow diagram for calculating a plume rise height (△h) under various stack and atmospheric conditions.

1.2 PUFF model

최근의 대기확산 모델링 분야는 모델링 수행에 큰 장애요인이었던 계산속도에 의한 제한요소가 Computer H/W 성능의 향상으로 상당히 제거되면서, 학계의 연구를 통해서 보다 진보된 확산이론을 사용하는 새로운 개념의 모델들이 속속 개발되고 있다. 이 중, 일부 모델들은 2000년도부터 미국 EPA(환경보호청)으로부터 새롭게 추천 받고 있는데, 근래 미국 EPA에서 새로이 추천하고 있는 모델로서 ISC3-PRIME, AERMOD, 및 Calpuff이 있다. ISC3-PRIME은 풍동실험과 실제 대기확산 실험을 통해 건물 주위에서 발생하는 세류현상(building downwash)을 기존의 ISC3보다 정확히 모사할 수 있도록 개선된 모델이다. AERMOD는 고도에 따른 연기확산계수 및 풍속의 변화를 대기경계층 상사이론(similarity theory)을 고려하여 확산모델에 반영하도록 개정된 모델이다. 즉 AERMOD는 ISC3의 가장 큰 단점이었던 대기상태가 공간적으로 균일하다는 가정을 수정·보완한 모델이다.

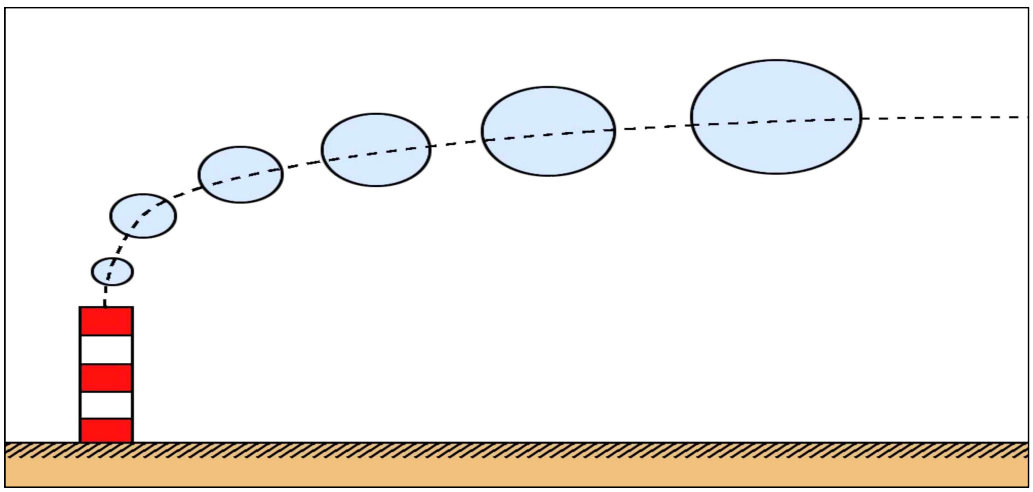


Fig. 3. Puff Model

Puff 모델은 시·공간에 따른 바람장의 변화를 Puff의 이동으로 나타낼 수 있기 때문에 비정상상태(Unsteady state)를 구현할 수 있는 모델이다. 따라서 유체의 흐름을 정상상태로 가정하여 수행하는 Gaussian모델보다 시간에 따른 풍향 및 풍속의 변화를 보다 정확히 확산에 반영할 수 있는 장점이 있으며, 복잡지형에서의 산곡풍이나, 해안가에서의 해륙풍 순환과 같은 급격한 바람장 변화를 나타내는 지역에 유용하게 적용될 수 있는 모델이다. 또한 Puff은 기존의 Gaussian 모델에서 고려하지 못했던 해안가에서의 Fumigation 현상 등을 고려할 수 있는 장점을 가지고 있어, 우리나라와 같이 삼면이 바

다이고 도시나 공단 등이 해안지역에 다수 위치한 경우, 해륙풍 순환에 영향을 받는 풍하측 농도 예측에 적합한 모델이다. 따라서 본 연구에서는 미국 EPA에서 추천하는 모델인 Calpuff 모델이 채택하고 있는 확산이론을 사용하여 Puff 모델을 한국 실정에 맞게 재구성하였다.

퍼프모델(Puff model)이란 굴뚝에서 연속적으로 배출되는 연기를 잘게 나누어진 연기 덩어리(Puff)의 형태로 배출된다고 가정하고, 배출된 Puff들이 3차원 공간 해상도를 갖는 바람장을 따라 이동·확산하면서 수용지점에 미치는 영향을 농도 형태로서 나타내는 모델이다. 배출된 Puff은 바람장을 따라서 이동하면서, Puff의 크기가 성장한다.

배출된 Puff이 3차원 바람장을 따라서 이동할 때에 배출 경과시간에 따른 Puff의 중심위치는 아래식으로 계산된다.

$$\begin{aligned} x(t+\delta t) &= x(t) + \delta t\ U(t) \\ y(t+\delta t) &= y(t) + \delta t\ V(t) \\ z(t+\delta t) &= z(t) + \delta t\ W(t) \end{aligned} \qquad \text{(식 2-1)}$$

여기서 x와 y는 서로 직각의 관계를 갖는 수평방향의 좌표를 나타내고, z는 연직방향의 좌표를 의미한다. U, V는 x, y 방향으로의 평균바람의 속도를 나타내고 W는 연직방향의 속도이다. δt는 입자의 이동에 대한 시간구간이다.
배출된 Puff은 바람장을 따라서 이동하면서, 아래의 확산식에 의하여 Puff의 크기가 성장한다.

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_x\sigma_y}\ g\ \exp\left[\frac{-d_a^2}{2\sigma_x^2}\right]\ \exp\left[\frac{-d_c^2}{2\sigma_y^2}\right] \qquad \text{(식 2-2)}$$

여기서, g는 Puff이 지표면 및 혼합층에서 반사되는 항을 나타낸다.

$$g = \frac{2}{(2\pi)^{1/2}}\ \sum_{i=-\infty}^{\infty}\exp\left[-\left(\frac{H_e + 2ih}{(2\sigma_z)}\right)^2\right] \qquad \text{(식 2-3)}$$

C는 수용점에서 지표농도, Q는 오염물질 배출량, σ_x, σ_y, σ_z은 확산계수이고, h는 혼합층 높이, He는 굴뚝 유효높이이고, d_a 및 d_c는 Puff 중심으로부터 거리이다. Puff 모델의 대상영역은 수십 m부터 수백 km까지이고, 본 연구에서 개발한 Puff 모델은 미국 EPA의

Calpuff 모델과 등등한 수준으로 개발되었다.

특정 시간 t에서 수용지점(receptor)에서 농도는 주변에 위치한 Puff이 미치는 영향을 총 합산하여 계산한다. 이와 같은 Puff 모델의 단점은 연속적인 배출원을 모사하기 위해서는 많은 수의 Puff을 배출해야 했으므로 계산시간이 많이 소요되는 단점이 있었다. Puff 사이의 거리가 $2\sigma_y$를 초과하게 되면 농도 계산시 부정확한 결과를 초래하기 때문에 Puff사이의 간격을 σ_y로 유지하기 위해서 많은 Puff을 배출해왔다. 기존의 문제점을 해결하기 위해서 최근에는 Puff의 이동경로를 적분하여 농도를 계산하는 Integrated Puff sampling function을 사용하면 적은 수의 Puff을 배출하고도 농도 계산을 정확히 할 수 있다.

수평 방향으로 균일한 Puff인 경우에 $\sigma_y = \sigma_x$ 이므로, 식(2-2)는 아래와 같이 표현 할 수 있다.

$$C(s) = \frac{Q(s)}{2\pi\sigma_y^{2(s)}}\ g(s)\ \exp\left[-R^2(s)/\left(2\sigma_y^2(s)\right)\right] \qquad \text{(식 2-4)}$$

여기서 R은 Puff과 수용지점과의 거리이고, s는 Puff의 이동 거리이다.

위 식을 Puff의 이동거리 ds에 대해서 적분하면 아래와 같이 시간평균농도 C를 구할 수 있다.

$$\overline{C} = \frac{1}{ds}\int_{s_o}^{s_o+ds} \frac{Q(s)}{2\pi\sigma_y^{2(s)}}\ g(s)\ \exp\left[-R^2(s)/\left(2\sigma_y^2(s)\right)\right] ds \qquad \text{(식 2-5)}$$

위 식에 대한 해석해는 그림 4에 나타낸 바와 같이 Puff의 중심위치가 좌표 (x1, y1)에서 (x2, y2)로 직선적으로 이동한다고 가정하면 수용지점 좌표 (xr, yr)과 이동하는 Puff과의 거리는 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$R(s) = \left[\left(x_1 - x_r + p\ dx\right)^2 + \left(y_1 - y_r + p\ dy\right)^2\right]^{1/2} \qquad \text{(식 2-6)}$$

여기서 p는 무차원 변수로써 초기 Puff 위치에서는 “0”값을 갖고, 최종 Puff 위치에서는 “1”의 값을 갖는다. dx(=x2-x1)와 dy(=y2-y1)은 Puff의 x 및 y 방향 이동구간이다.

한편 배출된 오염물질이 화학변형 및 침착등의 제거 과정이 발생한다면 배출량, Q,는 아래와 같이 이동 거리(또는 이동시간)의 선형적 함수로 나타낼 수 있다.

$$Q(s) = Q(s_o) + p\ [Q(S_o + ds) - Q(s_o)] \qquad \text{(식 2-7)}$$

식(2-6)과 식(2-7)를 사용하여 식(2-5)를 적분하면 아래의 식을 유도할 수 있다.

$$C(s) = \frac{g}{2\pi\sigma_y^2}\ \left\{ Q(s_o) \int_0^1 \exp[-R^2(p)/(2\sigma_y^2)]\ dp + [Q(S_o + ds) - Q(s_o)] \int_0^1 p\ \exp[-R^2(p)/(2\sigma_y^2)]\ dp \right\} \qquad \text{(식 2-8)}$$

식(2-8)을 Error 및 지수 함수를 이용하여 표현하면 다음과 같다.

$$C(s) = \frac{g}{2\pi\sigma_y^2}\ \{Q(s_o) I_1 + [Q(S_o + ds) - Q(s_o)]\ I_2\} \qquad \text{(식 2-9)}$$

여기서

$$I_1 = \left[\frac{\pi}{2a}\right]^{1/2} \exp\left[\frac{b^2}{2a} - \frac{c}{2}\right]\left\{erf\left[\frac{a+b}{(2a)^{1/2}}\right] - erf\left[\frac{b}{(2a)^{1/2}}\right]\right\} \qquad \text{(식 2-10)}$$

$$I_2 = \frac{-b\ I_1}{a} + \frac{1}{a} \exp\left[\frac{b^2}{2a} - \frac{c}{2}\right] \left\{\exp\left[\frac{b^2}{2a}\right] - \exp\left[\frac{-1}{2}\left(a + 2b + \frac{b^2}{a}\right)\right]\right\} \qquad \text{(식 2-11)}$$

$$a = (dx^2 + dy^2)/\sigma_y^2 \qquad \text{(식 2-12)}$$

$$b = [dx(x_1 - x_r) + dy(y_1 - y_r)]/\sigma_y^2 \qquad \text{(식 2-13)}$$

$$c = [(x_1 - x_r)^2 + (y_1 - y_r)^2]/\sigma_y^2 \qquad \text{(식 2-14)}$$

σy 및 g 값은 수용지점에서 값을 위식에서 사용한다.

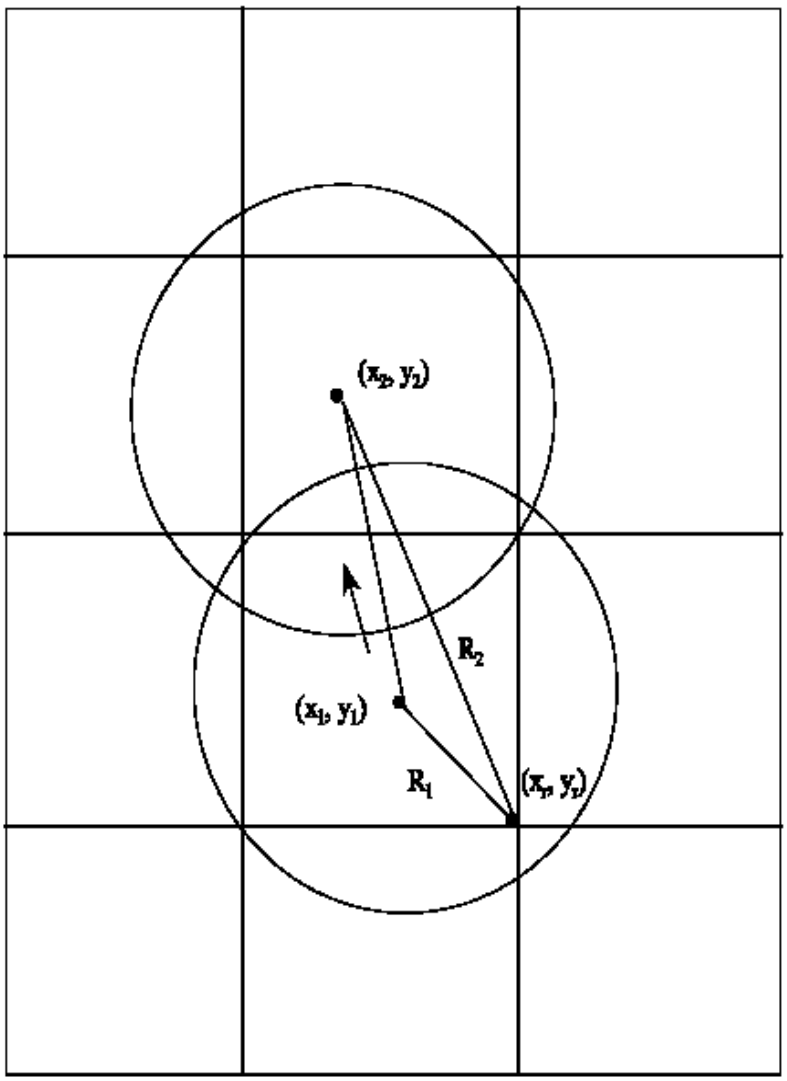


Fig. 4. Illustration of the puff movement during the sampling step and the associated changes in the puff receptor distance.

1.2.1 Dispersion

확산계산에서 가장 중요한 변수가 수평 및 수직 방향의 확산계수인 σy 및 σz 이다. 농도계산을 위한 sampling 구간, n,에서 Δξ거리를 이동한 경우에 확산계수는 아래와 같다.

$$\sigma^2_{y,n}(\Delta\xi_y) = \sigma^2_{yt}(\xi_{yn} + \Delta\xi_y) + \sigma^2_{ys} + \sigma^2_{yb} \qquad \text{(식 2-15)}$$

$$\sigma^2_{z,n}(\Delta\xi_z) = \sigma_{zt}^2(\xi_{zn}+\Delta\xi_z) + \sigma_{zb}^2 \quad \text{(식 2-16)}$$

여기서 $\sigma_{y,n}$과$\sigma_{z,n}$ 은 n sampling step에서 수평 및 수직 확산계수이고, σ_{yt} 및 σ_{zt} 는 대기난류에 의한 확산계수항이고, σ_{yb} 및 σ_{zb} 는 배출시점에서 열부력에 의한 초기확산항이며, σ_{ys} 는 면오염원 확산시에 풍횡방향 확산항이다.
각각의 확산계수항에 대해서 설명하면 아래와 같다.

(1) Atmospheric Turbulence Components

Komet에서 계산되는 기상인자들을 이용하여 대기난류에 의한 확산계수,σ_{yt} 및 σ_{zt},를 계산하는 방법에는 아래와 같이 3가지 방법이 있다.

① 측정된 난류속도 표준편차(σ_v 및 σ_w)로부터 계산하는 방법
② Komet에 있는 미기상학모델을 이용하여 계산된 변수들(u*, w*, L 등)에 의해서 난류속도 분산계수를 계산하고 이로부터 확산계수를 구하는 방법
③ 시골지역에는 PG 확산계수와 도시지역에는 McElroy-Pooler 확산계수를 이용하는 방법

Hanna et al. (1977)에 의하면 확산계수를 난류속도 표준편차로부터 구하는 방법 은 아래와 같다.

$$\sigma_{yt} = \sigma_v\, t\, f_y(t/t_{ly}) \quad \text{(식 2-17)}$$

$$\sigma_{zt} = \sigma_w\, t\, f_z(t/t_{lz}) \quad \text{(식 2-18)}$$

여기서 t는 수용점까지 연기 이동시간, t_{ly} 및 t_{lz} 은 수평 및 수직 방향 라그란지안 시간크기이다.

위 식은 아래와 같은 난류세기의 정의를 사용하여 표시할 수도 있다.

$$i_y = \sigma_v/u \simeq \sigma_\Theta \quad \text{(식 2-19)}$$

$$i_z = \sigma_w/u \simeq \sigma_\phi \quad \text{(식 2-20)}$$

여기서 σ_Θ는 수평방향 풍향 변화에 대한 표준편차이고,σ_ϕ는 수직방향 풍향에 대한

표준편차이다. 난류속도 및 풍향 변화에 대한 표준편차값을 측정하는 것이 통상의 경우에 매우 어려우므로 이들의 값들은 상사이론에 근거한 경험식으로부터 미기상학 변수로부터 계산한다.

상사이론을 적용할 경우에 지표층(z < 0.1h), 혼합층(0.1h < z < 0.8h), 혼입층 (z > 0.8h)로 각각 나누어서 계산한다.

중립 또는 불안정 대기조건인 경우에 대기경계층 별로 아래와 같이 난류속도 표준편차를 각각 구할 수 있다.

표면층 (z ≤ 0.1 h, L ≤ 0)

$$\sigma_v = [4u_*^2 a_n^2 + 0.35\ w_*^2]^{1/2} \quad \text{(식 2-21)}$$

$$\sigma_w = [1.6u_*^2\ a_n^2\ + 2.9u_*^2\ (-z/L)^{2/3}]^{1/2} \quad \text{(식 2-22)}$$

$$a_n = \exp[-0.9(z/h)] \quad \text{(식 2-23)}$$

혼합층 (0.1h ≤ z ≥ 0.8h, L ≤ 0)

$$\sigma_v = [4u_*^2 a_n^2 + 0.35\ w_*^2]^{1/2} \quad \text{(식 2-24)}$$

$$\sigma_w = [1.15u_*^2 a_n^2 + 0.35\ w_*^2]^{1/2} \quad \text{(식 2-25)}$$

혼입층 (z ≥ 0.8 h, L ≤ 0)

$$\sigma_v = [4u_*^2 a_n^2 + 0.35\ w_*^2]^{1/2} \quad \text{(식 2-26)}$$

한편 혼입층에서 σ_w는 고도에 따라서 아래와 같이 나누어 계산한다.

(0.8 h≤ z ≥ 1.0h)

$$\sigma_w = [1.15u_*^2 a_n^2 + a_{cl}\ 0.35\ w_*^2]^{1/2} \quad \text{(식 2-27)}$$

$$a_{cl} = [1/2 + (h-z)/(0.4h)] \quad \text{(식 2-28)}$$

(1.0h ≤ z ≥ 1.2h)

$$\sigma_w = [1.15 u_*^2 a_n^2 + a_{c2}\ 0.35\ w_*^2]^{1/2} \quad \text{(식 2-29)}$$

$$a_{c2} = [1/3 + (1.2h - z)/(1.2h)] \quad \text{(식 2-30)}$$

한편 안정조건인 대기경계층에서는 아래의 식을 이용하여 난류속도 표준편차값들을 계산한다.

$$\sigma_v = u_*[(1.6\ C_s\ (z/L) + 1.8\ a_n)/(1 + z/L)] \qquad (L\ >\ 0) \quad \text{(식 2-31)}$$

$$\sigma_w = 1.3\ u_*[(C_s\ (z/L) + a_n)/(1 + z/L)] \qquad (L\ >\ 0) \quad \text{(식 2-32)}$$

$$C_s = (1 - z/h)^{3/4} \qquad (L\ >\ 0) \quad \text{(식 2-33)}$$

위 식에서 계산되는 표준편차 값들은 대기경계층 위에서는 Puff이 없는 경우에는 확산계산의 안정성을 고려하여 최소값 0.5 m/s로 가정하여 계산한다.

식(2-21)에서 식(2-33)까지 제시된 식들을 실제 대기에서 관측한 결과와 비교를 1977년도에 Panofsky 등이 수행한 결과 관측결과를 잘 모사하고 있는 것으로 보고되고 있다.

한편 Irwin(1983)은 여러 연구자들이 제시한 fy 및 fz 함수에 대해서 검토한 결과 Draxler (1976)가 제안한 함수가 가장 최적이라고 결론을 맺은 바가 있으므로 본 Kopuff에서는 이 함수를 사용하였다.

$$f_y = [1 + 0.9(t/1000)^{1/2}]^{-1} \quad \text{(식 2-34)}$$

$$f_z = [1 + 0.9(t/500)^{1/2}]^{-1} \qquad L\ <\ 0 \quad \text{(식 2-35)}$$

$$f_z = [1 + 0.945(t/100)^{.806}]^{-1} \qquad L\ >\ 0 \quad \text{(식 2-36)}$$

장거리 이동인 경우에 확산계수값이 550m보다 커지면, Heffter(1965)가 제시한 바와 같이 $\sigma_{yt} = t$, $\sigma_{zt} = t^{1/2}$로 계산된다.

한편 PG 확산계수나 McElroy 및 Pooler의 확산계수를 바로 사용하는 경우에는 표 1에서 표 2에 있는 값들을 사용한다.

Table 1. Parameters Used to Calculate Pasquill-Gifford σ_y

Pasquill Stability Class	$\sigma_y = 465.11628(x)\tan(\Theta)$ $\Theta = 0.017453293[c-d\ \ln(x)\ ]$	
	c	d
A	24.1670	2.5334
B	18.3330	1.8096
C	12.5000	1.0857
D	8.3330	0.72382
E	6.2500	0.54287
F	4.1667	0.36191

* source : U.S. EPA(1992)

** Where σ_y is in meters and x is in kilometers

Table 2. Parameters Used to Calculate Pasquill-Gifford σ_z^*

Pasquill Stability Category	x(km)	σ_z (meters) = ax^b	
		a	b
A**	≤ .10	122.800	0.94470
	0.10 - 0.15	158.080	1.05420
	0.16-0.20	170.220	1.09320
	0.21-0.25	179.520	1.12620
	0.26-0.30	217.410	1.26440
	0.31-0.40	258.890	1.40940
	0.41-0.50	346.750	1.72830
	0.51-3.11	453.850	2.11660
	>3.11	**	**
B**	≤.20	90.673	0.93198
	0.21-0.40	98.483	0.98332
	>0.40	109.300	1.09710
C**	All	61.141	0.91465
D	≤.30	34.459	0.86974
	0.31-1.00	32.093	0.81066
	1.01-3.00	32.093	0.64403
	3.01-10.00	33.504	0.60486
	10.01-30.00	36.650	0.56589
	>30.00	44.053	0.51179
E	≤.10	24.260	0.83660
	0.10-0.30	23.331	0.81956
	0.31-1.00	21.628	0.75660
	1.01-2.00	21.628	0.63077
	2.01-4.00	22.534	0.57154
	4.01-10.00	24.703	0.50527
	10.01-20.00	26.970	0.46713
	20.01-40.00	35.420	0.37615
	>40.00	47.618	0.29592
F	≤.20	15.209	0.81558
	0.21-0.70	14.457	0.78407
	0.71-1.00	13.953	0.68465
	1.01-2.00	13.953	0.63227
	2.01-3.00	14.823	0.54503
	3.01-7.00	16.187	0.46490
	7.01-15.00	17.836	0.41507
	15.01-30.00	22.651	0.32681
	30.01-60.00	27.074	0.27436
	>60.00	34.219	0.21716

* Source : U.S. EPA

** If the calculated value of σ_z exceed 5000m, σ_z is set equal to 5000m

Table 3. Briggs Formulas Used to Calculate McElroy-Pooler σ_{y*}

Pasquill Stability Category	σ_y(meters)**
A	$0.32x(1.0+0.0004x)^{-1/2}$
B	$0.32x(1.0+0.0004x)^{-1/2}$
C	$0.22x(1.0+0.0004x)^{-1/2}$
D	$0.16x(1.0+0.0004x)^{-1/2}$
E	$0.11x(1.0+0.0004x)^{-1/2}$
F	$0.11x(1.0+0.0004x)^{-1/2}$

* Source : U.S. EPA(1992)
** Where x is in meters

Table 4. Briggs Formulas Used to Calculate McElroy-Pooler σ_{z*}

Pasquill Stability Category	σ_z(meters)**
A	$0.24x(1.0+0.001x)^{1/2}$
B	$0.24x(1.0+0.001x)^{1/2}$
C	$0.20x$
D	$0.14x(1.0+0.0003x)^{-1/2}$
E	$0.08x(1.0+0.0015x)^{-1/2}$
F	$0.08x(1.0+0.0015x)^{-1/2}$

* Source : U.S.EPQ(1992)
** Where x is in meters

한편 PG의 확산계수를 사용할 경우에는 확산계수 값들이 1시간 평균값이므로 1시간보다 짧은 평균농도를 계산하고자 하는 경우에는 시간에 따른 확산계수 보정을 아래의 방법을 사용하여 수행한다.

$$\sigma_y(\tau_{ave}) = \sigma_y(\tau_{base})\left(\frac{\tau_{ave}}{\tau_{base}}\right)^{0.2} \quad \text{(식 2-37)}$$

여기서 τ_{base}는 PG 확산계수가 유도된 시간으로 60분이며, τ_{ave} 구하고자 하는 농도의 평균시간이고, σ_y (τ_{base})는를 τ_{base} 를 기준으로한 값이다.

(2) 열부력 유도 확산 (Bouyancy-Induced Dispersion)

배출되는 연기가 열부력을 갖고 있는 경우에는 열부력에 의해서 초기 확산이 크게 일

어난다. 이를 반영하기 위해서 열부력에 의해서 유도되는 확산계수를 아래와 같이 구한다.

$$\sigma_{yb} = \Delta H/3.5 \qquad \text{(식 2-38)}$$

$$\sigma_{zb} = \Delta H/3.5 \qquad \text{(식 2-39)}$$

여기서 △H는 연기가 부력에 의해서 상승하는 높이를 의미한다.

(3) 초기 연기 크기

부피배출원인 경우에는 사용자가 입력하는 초기 확산계수값 (σyo 및 σzo)에 의해서 초기연기크기가 결정된다. 즉 부피배출원인 경우 배출위치에서 초기확산값에 의해서 연기가 확산되고, 그 이후의 확산은 초기확산계수와 일치하는 가상위치에 점오염원 배출원이 존재한다고 가정하여 계산한다.

(4) Puff의 분열 (splitting)

수직방향으로 바람의 속도 및 방향이 변하는 경우에 바람장 구배에 의해서 전단응력이 발생하고 이는 Puff의 이동 및 확산에 큰 영향을 미친다. 그림 5에 나타낸 바와 같이 Puff이 지표면에 도달하고, Puff을 사용자가 정의한 개수에 의해서 나누어지게 된다.

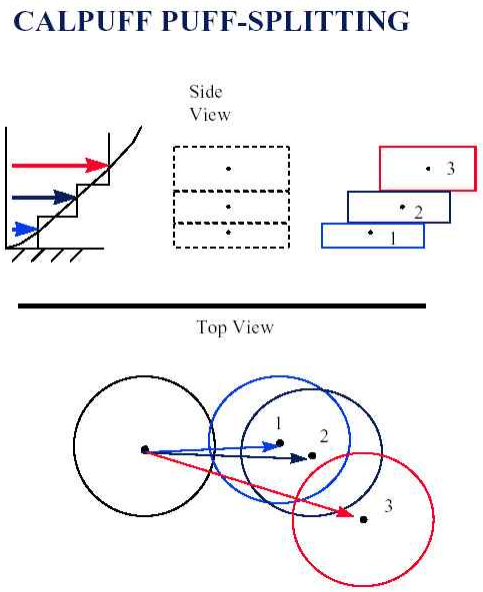


Fig. 5. Illustration of the puff splitting mechanism and the resultant effects on puff transport.

(5) 대류경계층에서 비대칭 확산 계산

불안정 조건이 대류경계층에서 연기의 수직 확산이 Gaussian 형태로 정규분포를 이루지 않고, 상승 연기 및 하강 연기의 확산확률이 다르기 때문에 비정규분포로 확산이 일어난다. 즉 상승류(updraft)는 속도 세기가 크고, 하강류(downdraft)는 그 세기가 상대적으로 작다. 또한 수직방향으로 공기 이동량에 대한 물질 수지를 만족하기 위해서는 상승류가 차지하는 면적이 하강류가 차지하는 면적보다 작다. 이와 같이 비대칭확산을 고려하기 위해서 Weil 등(1997)에 제시한 확률밀도함수 (p.d.f, Probability Density Function)을 사용하여 비대칭확산현상을 계산한다.

1.2.2 건물 세류 현상 (Building Downwash)

배출원 부근에 건물과 같은 지형지물이 존재할 경우에는 그림 6에서 보는 바와 같이 건물 주변에 형성되는 소용돌이에 의해서 연기의 세류 현상이 발생하여 건물 주변에 높은 농도값이 나타난다. 이를 확산계산에 반영하기 위해서 Huber-Snyder 및 Schulman-Scire가 제시한 방법에 따라서 확산계수 및 연기 상승높이를 조정하여 확산계산을 수행한다.

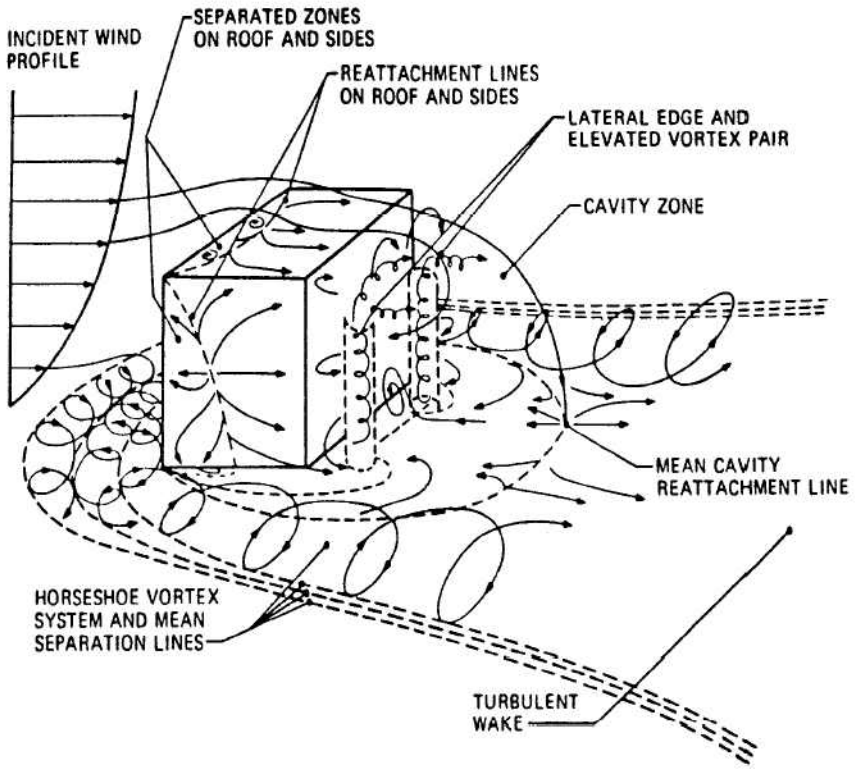


Fig. 6. Flow near a sharp-edged building in a deep boundary layer.(From Hosker,1984)

1.2.3 면오염원 연기상승 (Area Source Plume Rise)

면오염원 형태로 열부력이 있는 오염원이 배출되는 사례가 산불, 기름 유출 화재, 그리고 인화성 화학물질 유출인 경우이다. 이경우에 바람장 및 기온에 따라서 면오염원 연기의 상승 높이를 계산하여 확산에 반영하는 것이 매우 중요하다.

r의 반경을 갖고 상승하는 연기는 주변 대기의 혼입을 고려하여 질량보존방정식으로 표현하면 아래와 같다.

$$\frac{d}{ds}(\rho U_{sc} r^2) = 2r\alpha\rho_\alpha |U_{sc} - U_\alpha \cos\phi| + 2r\beta\rho_a |U_a \sin\phi| \quad \text{(식 2-40)}$$

여기서 혼입계수 α= 0.11, β=0.6이다. Ua는 주변 대기 풍속이고, Usc는 연기중심측을 따라서 연기속도이며,

$$U_{sc} = \sqrt{u^2 + w^2} \quad \text{(식 2-41)}$$

ρ는 연기밀도, ρ_a는 대기밀도이다. s는 연기배출원으로부터 이동거리이다.

이 때에 풍하 및 수직방향 모멘텀 방정식은 각각 아래와 같다.

$$\frac{d}{ds}(\rho U_{sc} r^2 (u - U_a)) = -r^2 \rho w \frac{dU_a}{dz} \quad \text{(식 2-42)}$$

$$\frac{d}{ds}(\rho U_{sc} r^2 w) = g r^2 (\rho_a - \rho) \quad \text{(식 2-43)}$$

한편 에너지 방정식은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{d}{ds}(\rho U_{sc} r^2 (T - T_a)) = \rho \frac{d\eta_a}{dz} w r^2 + \frac{Q}{c_p} r^2 \quad \text{(식 2-44)}$$

여기서 수직방향 온위온도 체감율은 아래와 같고,

$$\frac{d\eta_a}{dz} = \frac{dT_a}{dz} + \frac{g}{c_p} \quad \text{(식 2-45)}$$

이 때의 g/cp 값은 다음과 같다.

$$\frac{g}{c_p} = 9.76 \times 10^{-3}\text{。 K/m} \qquad \text{(식 2-46)}$$

식(2-44)에서 마지막항은 복사열에 의한 열손실을 나타내는 항으로 다음과 같다.

$$\frac{Q}{c_p} r^2 = -2\varepsilon\sigma r(T^4 - T_a^4)/c_p = -R_p r(T^4 - T_a^4) \qquad \text{(식 2-47)}$$

여기서

$$c_p = 10^3 J/kg \cdot K, \sigma = 5.67 x 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} \qquad \text{(식 2-48)}$$

이고, 복사율(ε)이 0.8이라고 가정하면 Rp = 9.1 $\times 10^{-11}$ kg/m^2-K^3-s이다.
위의 값들을 이용하여 에너지 수지를 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{d}{ds}[\rho U_{sc} r^2(T - T_a)] = -\left(\frac{dT_a}{dz} + \frac{g}{c_p}\right)\rho w r^2 - R_p r(T^4 - T_a^4) \qquad \text{(식 2-49)}$$

한편 연기상승의 기하학적인 형상을 고려하면 다음관계를 구할 수 있고, 이 관계를 이용하여 방정식들의 해를 구할 수 있다.

$$\frac{dz}{ds} = \frac{w}{U_{sc}} = \sin\phi \qquad \text{(식 2-50)}$$

$$\frac{dx}{ds} = \frac{u}{U_{sc}} = \cos\phi \qquad \text{(식 2-51)}$$

위의 방정식은 초기조건이 주어지면 해를 구할 수 있다. s=0 (즉 x=0)에서 요구되는 초기조건은 연기초기밀도(ρ_o), 초기수직속도 (w_o), 초기연기반경(r_o), 연기초기온도(T_o)이다.

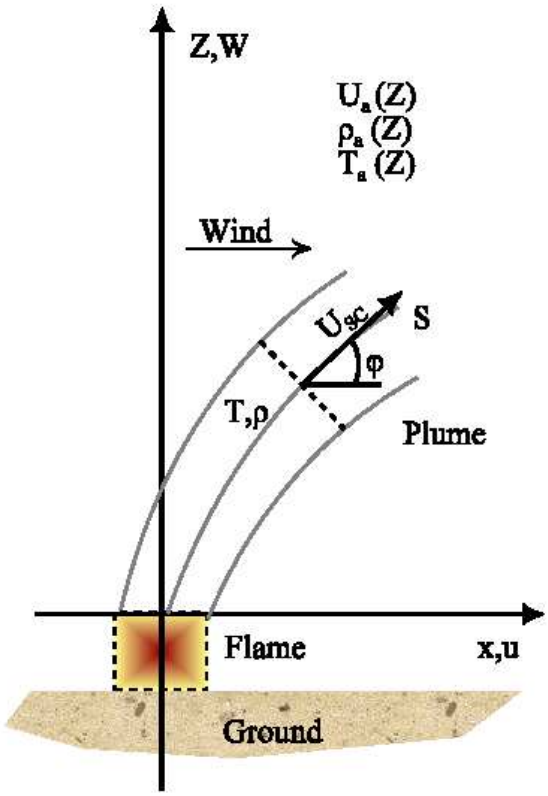


Fig. 7. Schematic and nomenclature for plume in a crosswind.

1.2.4 해안가 훈증 확산 계산(Overwater and Coastal Dispersion)

해안가에서 지표면을 따라서 열경계층(TIBL, Thermal Internal Boundary Layer)가 열성되고 열경계층내에서는 불안정한 대류경계층이 형성되어 확산이 활발히 일어나고, 열경계층 위에서는 안정된 대기 구조이기 때문에 확산이 억제된다. 특히 그림 8에서와 같이 해안가에 위치한 높은 굴뚝에서 배출된 오염물질이 열경계층을 맞나면 훈증(fumigation)이 발생하여 지표면 부근에 매우 높은 오염물질 농도를 나타내기 때문에 해안가에서 확산계산은 많은 주의를 요한다.

해안가에서 확산계산을 위해서 가장 중요한 인자인 열경계층의 높이는 Garatt(1982)가 제시한 식을 근거로 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$h_T(s) = \sqrt{\frac{2(1+2\beta)\,H_0}{\gamma\,\rho c_p\,u_n}\,s + h_{T0}^{\,2}} \qquad \text{(식 2-53)}$$

여기서 h_T는 열경계층 높이, h_{TO}는 해안가에서 초기 높이(통상 120m), γ는 열경계층 위에서 온위온도체감율, u는 열경계층내 평균 풍속, β는 혼입계수(0.2)이며, H_o는 지표면으로부터 전달되는 현열량이다.

Kopuff에서 열경계층이 계산되면 열경계층내에는 불안정한 대기조건으로 가정하여 확산계수를 적용하고, 열경계층 위에서는 안정대기조건으로 확산계산을 수행한다.

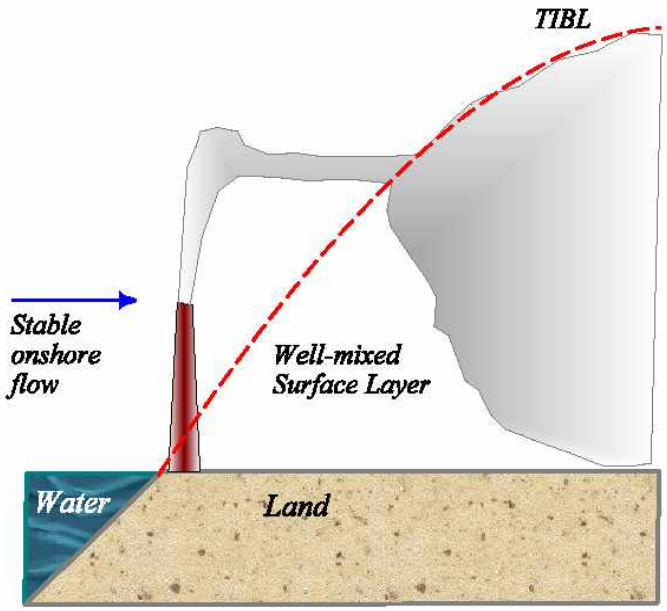


Fig. 8. Schematic illustration of a typical coastal fumigation condition (from Hanna et al.,1985)

1.2.5 Complex Terrain

Kopuff에서는 바람장 격자보다 큰 구조를 갖는 Terrain은 바람장 계산시에 반영되고, 바람장 격자보다 작은 구조의 Terrian은 미국 환경청 CTDM에서 채택하고 있는 CTSG(Complex Terrain algorithm for Sub-Grid scale feature) logic을 적용하여 확산계산에 복잡한 지형 효과를 반영한다.

2. 소각장 주변 환경영향평가 program GUI(Graphic User Interface)

2.1 Program의 특징

앞에서 설명한 Gaussian 확산이론을 근거로 하여 대기환경영향 평가용 Software를 개발하였다. 이 SW는 미국 환경보호청에서 추천하는 모델인 ISCST3에서 채택되고 있는 확산이론을 사용하여 한국 실정에 맞게 재구성하고, 시용자가 편의성을 도모하기 위해서 Windows 환경하에서 GUI로 제작된 것이 그 특징이다.

그림 9~19는 본 연구에서 개발한 소각장 주변 환경영향평가 program graphic user interface를 나타낸 것이다. 배출량 자료, 기상자료, 지형자료를 입력하여 소각장 주변에 미치는 기여농도를 1시간 최대, 24시간 평균, 년 평균, 기간 평균 등으로 계산하고 미치는 영향을 공간적 범위로 전자지도 위에 등농도 곡선으로 나타낼 수 있다. 또한 모든 입력자료와 결과자료는 txt 문서파일로 출력 할 수가 있다.

Fig. 9. Input of company present condition.

Fig. 10. Input of emission factors.

Fig. 11. Input of terrain data.

Fig. 12. Input of modeling data.

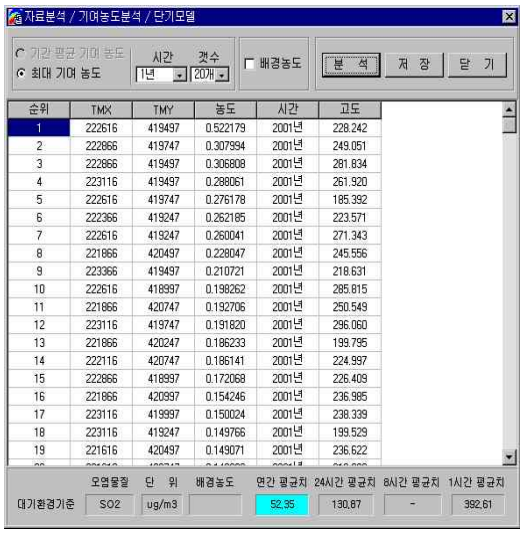


Fig. 13. Display of calculated concentrations.

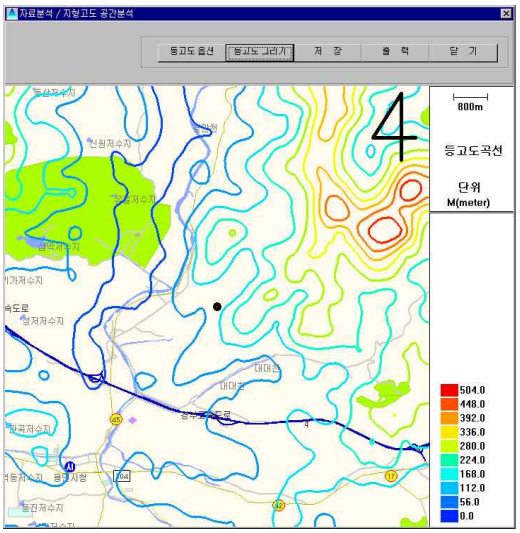


Fig. 14. Contribution diagram of calculated elevations.

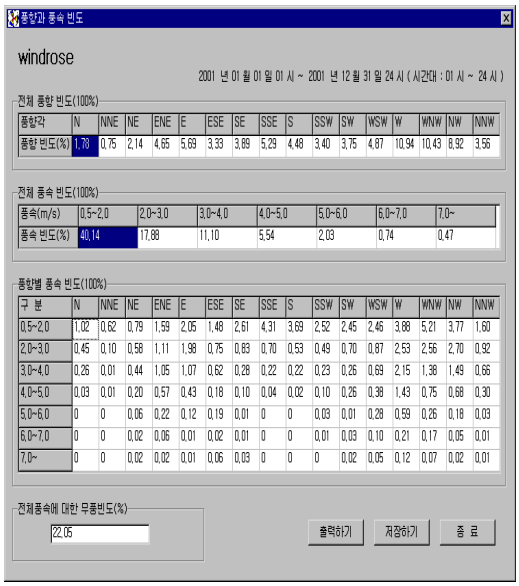


Fig. 15. Windrose chart.

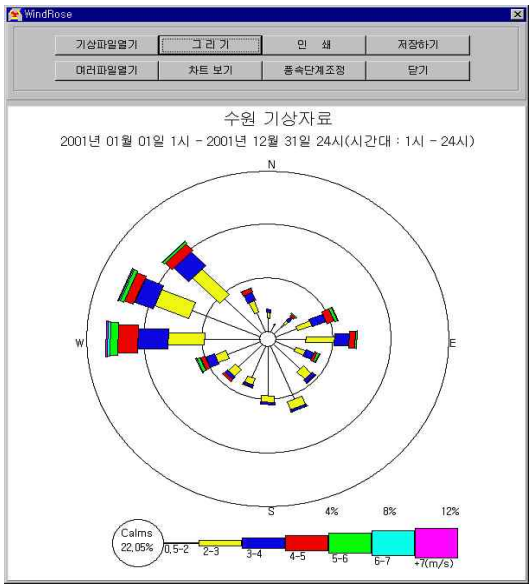


Fig. 16. Windrose.

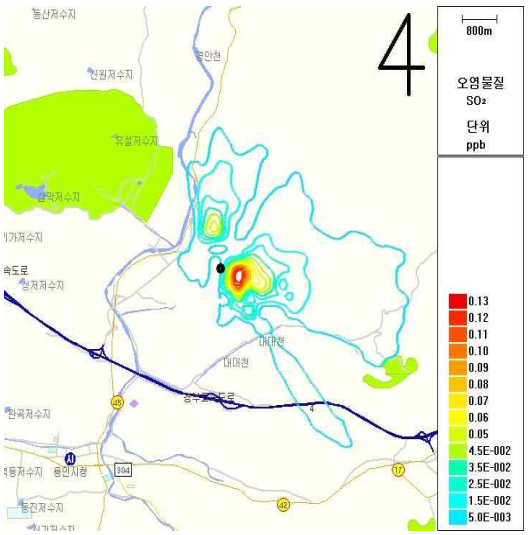


Fig. 17. Contribution diagram of calculated concentrations.(line)

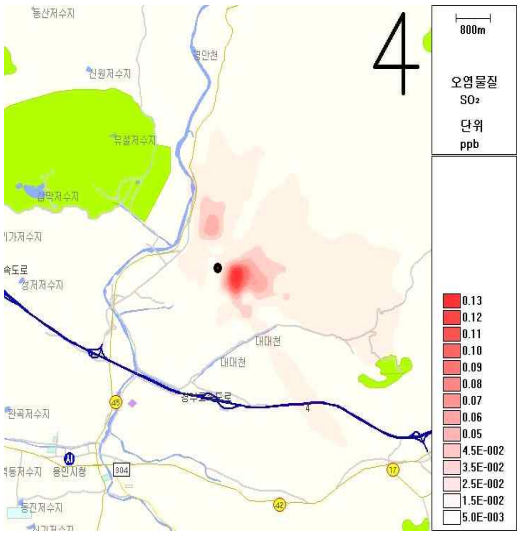


Fig. 18. Contribution diagram of calculated concentrations.(area)

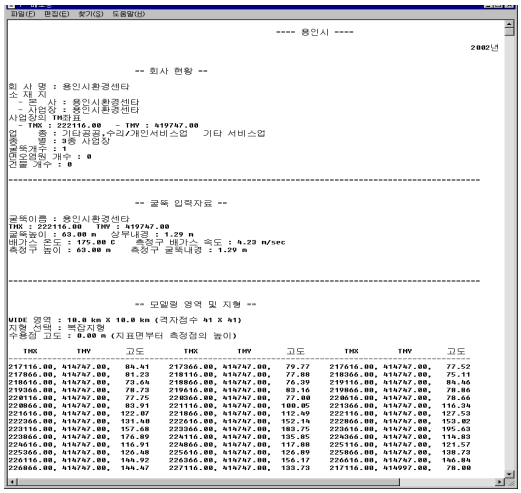


Fig. 19. Output of evaluation report.
(*.txt document file)

2.2 Program의 검증

개발된 software의 신뢰도에 대한 검증은 동일한 기상 및 지형조건에서 본 연구에서 개발한 software로 계산한 농도와 미국 환경보호청의 ISCST3모델로 계산한 결과를 비교하는 모델 대 모델 검증 방법을 이용하였다. 이미 미국 환경보호청 ISC3모델은 다년간의 수많은 현장 확산실험을 통해서 그 신뢰도가 검증된 상태이므로 본 Software의 신뢰성을 검증하기에는 ISCST3모델과의 비교가 적절하다고 판단된다. 비교결과를 그림20에 나타내었는데, ISCST3 모델 결과와 본 연구에서 제작한 Software와 완전히 일치하는 것을 알 수 있다.

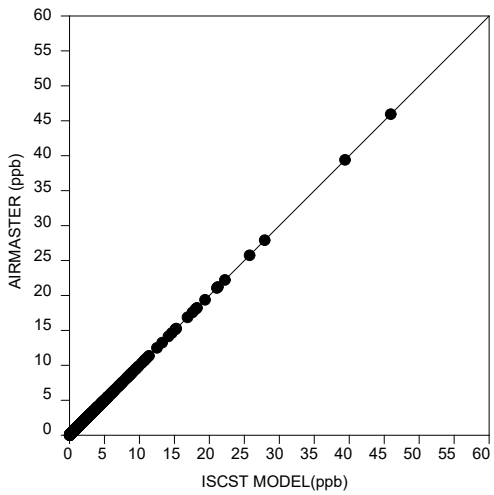


Fig. 20. Comparison of 1 hr concentrations predicted by developed software (AIRMASTER) with those by ISCST3.

3. 용인 소각장 주변지역 영향평가

3.1 용인 소각장 특징

경기도 용인시 포곡면 금어리 산 245번지에 위치한 용인 소각장은 1일 100톤의 생활폐기물을 소각할 수 있으며 스토카식(24시간 연속 연소식) 소각형식을 사용하여 생활폐기물을 처리하고 있다. 대기방지시설로는 반건식반응탑(SDR), 활성탄분무설비(A/C), 백필터설비(B/F), 선택적 촉매반응탑(SCR), 등이 있다. 용인 소각장은 주위가 산으로 둘러싸여 있고 가까운 주변에는 농장이나 일반사업장이 주변에 있으며 남서쪽 수백미터 안에는 주택단지가 있고 5km이내에 용인시내가 위치해 있다. 그림 21은 용인 소각장 전경을 나타낸 것이다.

Fig. 21. Yongin incinerator.

3.2 모델링 입력자료

본 연구에서 개발한 program 의 입력자료는 용인 소각장의 2001년도 배출량자료를 사용하였으며 표5에 나타내었다. 용인시에는 기상대가 없기 때문에 용인시에서 제일 가까운 수원 기상대에서 측정한 2001년도 기상자료를 입력자료로 사용하였으며 그림 22은 이 기상자료룔 이용하여 windrose를 나타낸 것이다. 그림 22에 보듯이 북서쪽에서 바람의 영향이 큰 것을 알 수가 있다. 그림 23와 24은 용인소각장 주변지형의 고도자료를 이용하여 등고도 및 3차원 지형고도를 계산하여 나타낸 그림이다. 그리고 그림 중앙에 나타낸 지점

이 용인 소각장이다. 대상오염물질은 SO_2 , NOx, PM10 이고 모델링 영역을 10km× 10km하여 모델링을 수행하였다.

Table 4. Modeling input data

굴뚝이름	위치		배출가스량 (Sm³/hr)	굴뚝높이 (m)	배가스온도 (℃)	배가스속도 (m/s)	굴뚝내경 (m)	SO_2 (ppm)	NOx (ppm)	PM10 (μg/m³)
	TM-X (m)	TM-Y (m)								
용인 소각장	222116	419747	19,878.11	63	175	4.23	1.29	8.33	59.25	9.38

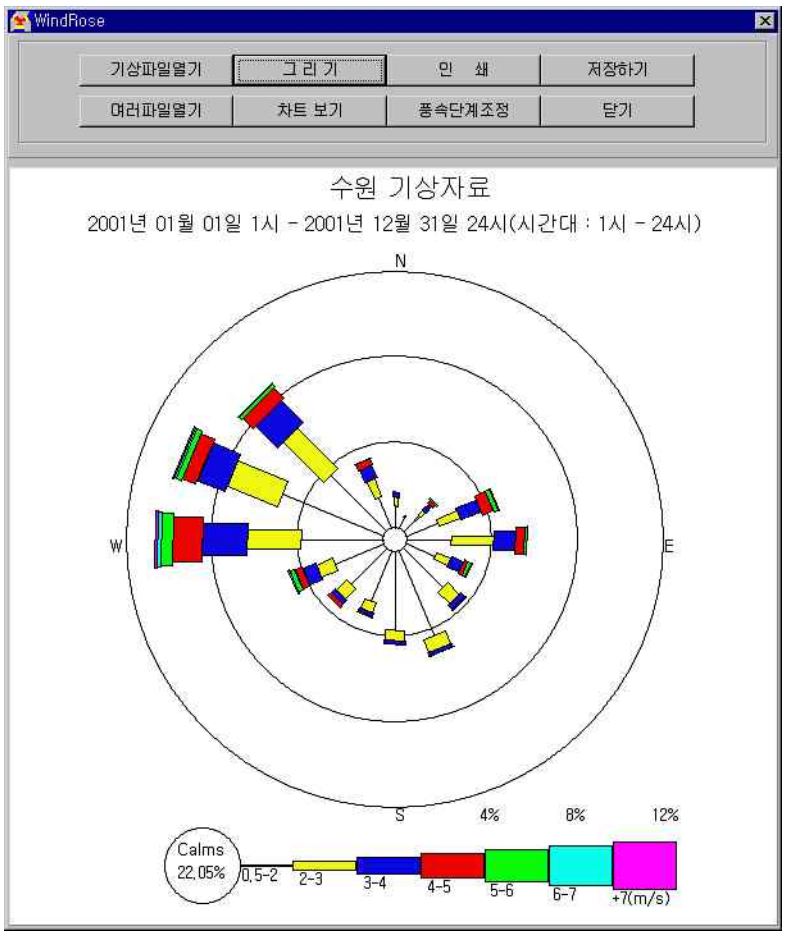


Fig. 22. A windrose of Suwon weather monitoring station in 2001.

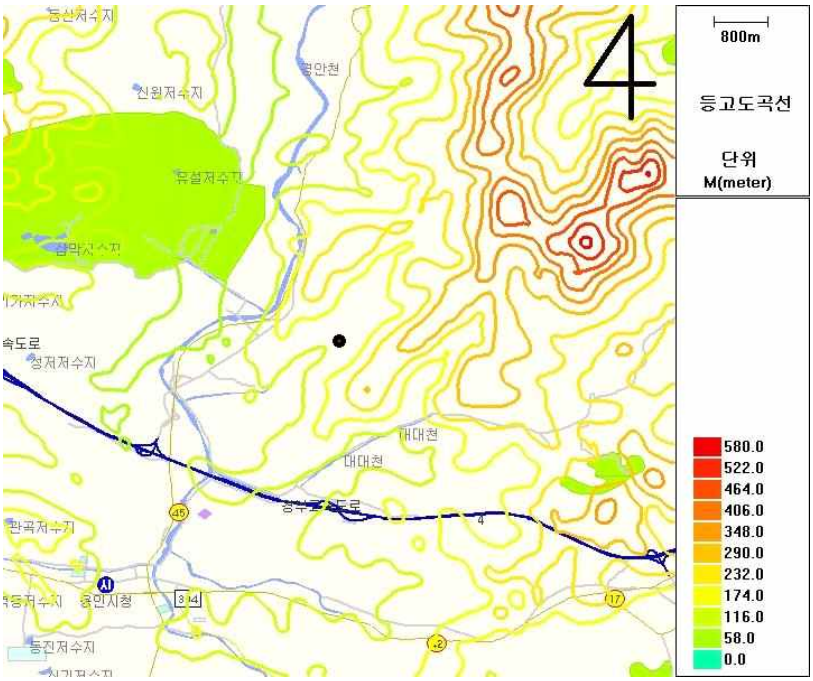


Fig. 23. Contribution diagram of calculated elevations.(Yongin)

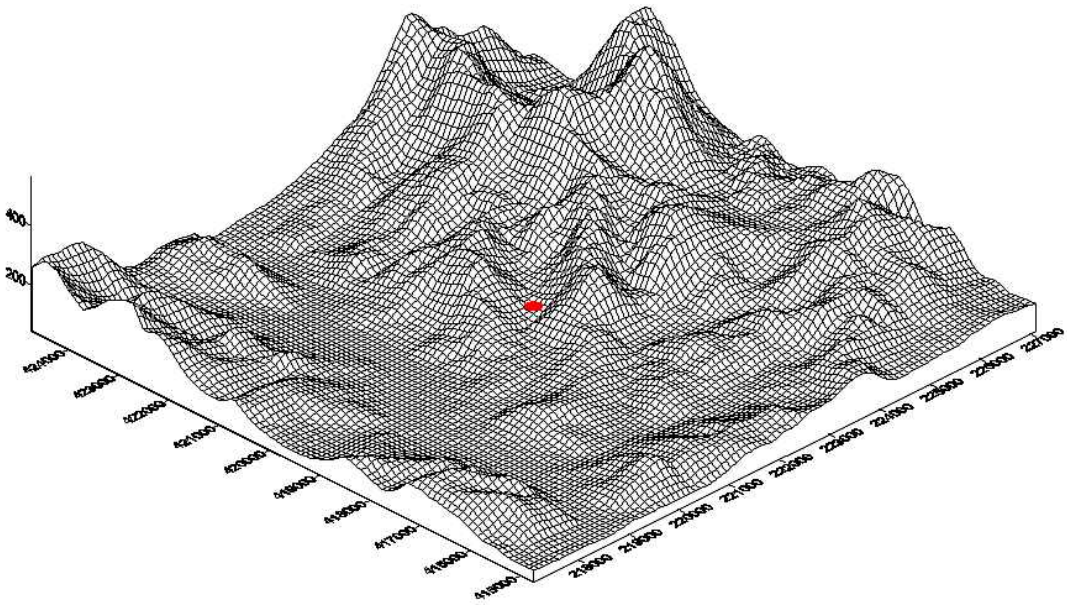


Fig. 24. Display of numerical data in modeling site.(Yongin)

3.3 평가 결과

용인 소각장에서 배출되는 SO_2, NOx, PM10 배출농도는 배출허용기준(SO_2 : 300(12)ppm, NOx : 200ppm PM10 :100(12)㎎/S㎥)대 해 각각 2.78%, 29.6%, 9.38%로 허용기준을 충분히 만족하고 있다. 그러나 서론에서 언급했듯이 배출허용기준을 만족시키면서 굴뚝으로부터 배출된 오염물질이 기상조건의 악화나 특이한 지형조건에 의하여 임의의 시점, 임의의 지점에서 대기환경기준을 만족시키지 못할 수 가 있기 때문에 본 연구에 개발한 소각장 주변 환경영향평가 program을 이용하여 용인소각장 주변 지역의 환경영향 평가를 수행하였고, 그 결과를 그림 25~32에 등농도 곡선으로 나타내었다.

표 5는 새로 강화된 경기도 대기환경기준을 나타낸 것이다. 표 6은 소각장 주변을 본 연구에서 개발한 software로 예측한 결과를 나타낸 것으로서 최고 기여농도와 대기환경기준에 대한 비를 나타내었다.

SO_2인 경우에 1시간 최대기여농도가 0.0056ppm, 25시간 최대기여농도가 0.0012ppm, 연평균 기여농도가 0.00019ppm으로 대기환경기준에 비하여 미미하고, NOx인 경우에 1시간 최대기여농도가 0.041ppm, 24시간 최대 기여농도가 0.0085ppm, 연평균 기여농도가 0.0014ppm으로 SO2에 비해서 다소 크게 나타났다.

또한 PM10인 경우도 24시간 최대 기여농도가 1.24 $\mu g/m^3$, 연평균 기여농도가 0.21$\mu g/m^3$로 그 영향이 크지 않은 것으로 나타났다.

한편 모델로 계산한 기여농도에 용인지역 배경농도를 더한 모델 예측 농도가 표7에 있다. SO_2, NO_2 및 PM10에 대한 모델로 예측한 농도 값들이 모두 표 5에 있는 대기환경기준을 초과하지 않는 것으로 나타났다.

Table 5. Ambient Air Quality Standard in Kyunggi province.

항목	기준
아황산가스(SO_2)	연간 평균치 0.02ppm이하
	24시간 평균치 0.05ppm이하
	1시간 평균치 0.15ppm이하
일산화탄소(CO)	8시간 : 9ppm이하
	1시간 : 25ppm이하
이산화질소(NO_2)	연간 평균치 0.05ppm이하
	24시간 평균치 0.08ppm이하
	1시간 평균치 0.15ppm이하
미세먼지(PM_{10})	연간 평균치 70㎍/㎥ 이하
	24시간 평균치 150㎍/㎥이하
오존(O_3)	8시간 평균치 0.06ppm이하
	1시간 펴균치 0.1ppm이하
납(pb)	연간 평균치 0.5㎍/㎥이하

* 주 : 1. 1시간 평균치는 999천분위수(天分位數)의 값이 그 기준을 초과하여 서는 아니되고, 8시간 및 24시간 평균치는 99백분위수의 값이 그 기준을 초과하여서는 아니된다.

2. 미세먼지는 입자의 크기가 10㎛이하인 먼지를 말한다. (출처: 경기도 보건 환경연구원)

Table 6. Contributed concentrations by Yongin incinerator.

대상오염물질	기간	기간별 최대기여농도		(기여농도/대기환경기준)×100
		(㎍/㎥)	ppm	(%)
SO_2	1hr	14.78	5.6467×10^{-3}	3.77
	24hr	3.06	1.1694×10^{-3}	2.34
	1year	0.52	1.987×10^{-4}	0.995
NOx	1hr	77.62	0.04126	27.506
	24hr	16.04	8.5261×10^{-3}	10.6625
	1year	2.71	1.4437×10^{-3}	2.886
PM10	24hr	1.24		0.83
	1year	0.21		0.3

Table 7. Predicted concentrations near the area of Yongin incinerator.

대상오염물질	기간	배경농도	기여농도	예측 농도
SO_2	1hr	0.005(ppm)	5.6467×10^{-3}	0.0106467(ppm)
	24hr		1.1694×10^{-3}	0.0061694(ppm)
	1year		1.987×10^{-4}	5.1987×10^{-3}(ppm)
NOx	1hr	0.031(ppm)	0.04126	0.07226(ppm)
	24hr		8.5261×10^{-3}	0.03953(ppm)
	1year		1.4437×10^{-3}	0.032437(ppm)
PM10	24hr	56(㎍/㎥)		57.24(㎍/㎥)
	1year			56.21(㎍/㎥)

주) 1.배경농도는 경기도 환경보건 연구원 2001년도 자료임

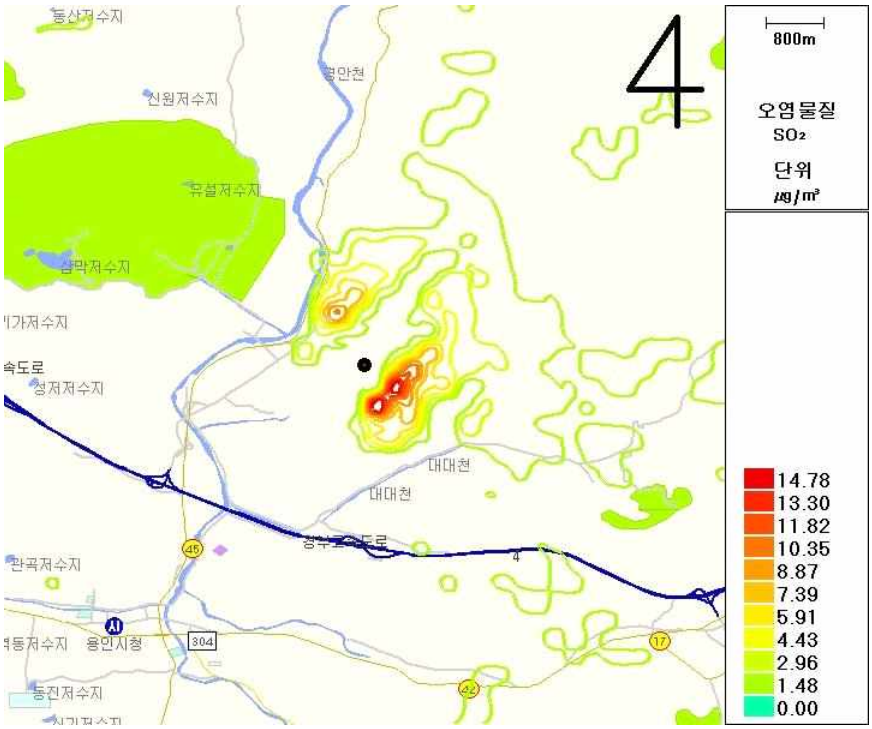


Fig. 25. 1hr maximum SO_2 concentrations.

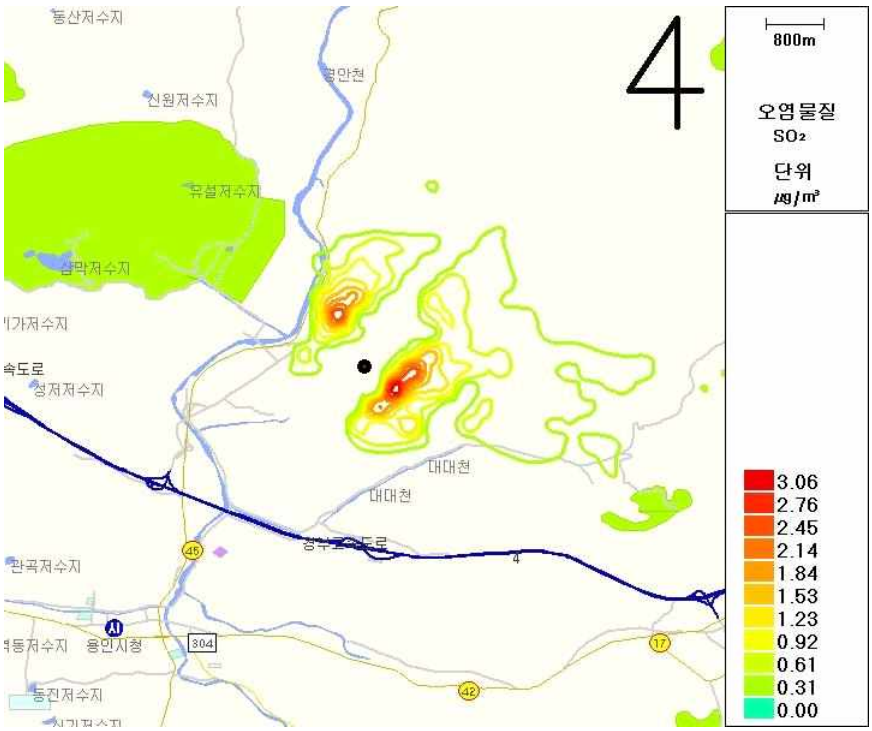


Fig. 26. 24hr average SO_2 concentrations.

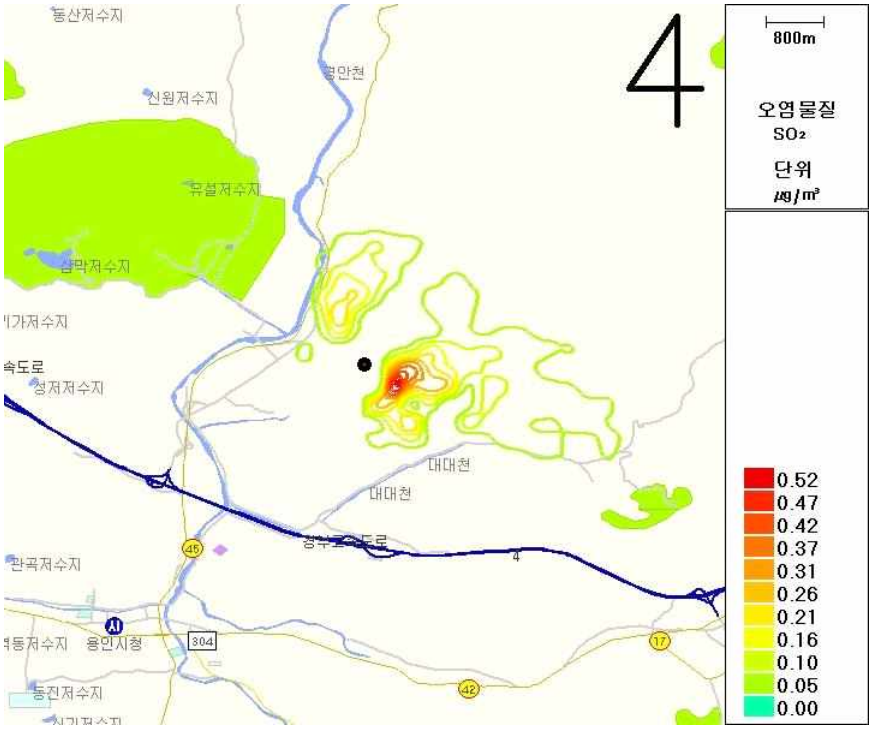


Fig. 27. Annual average SO_2 concentrations.

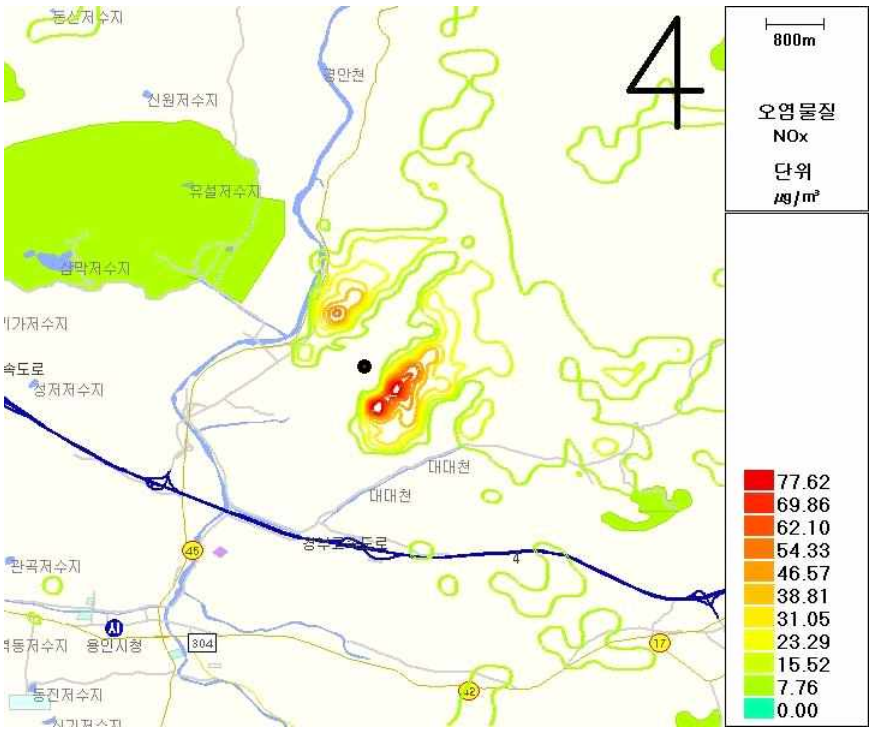


Fig. 28. 1hr maximum NOx concentrations.

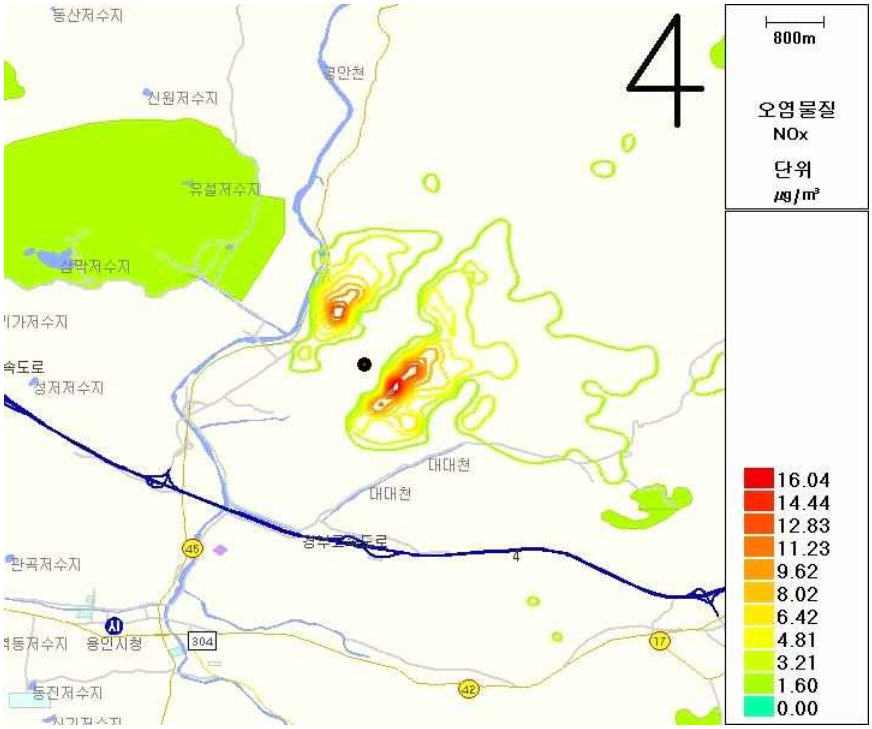


Fig. 29. 24hr average NOx concentrations.

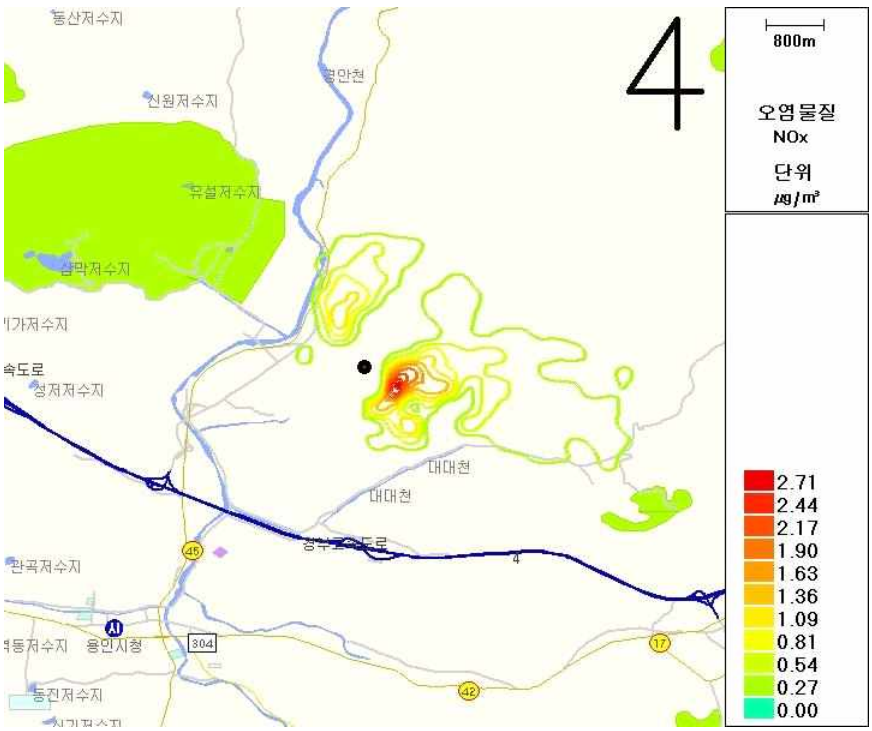


Fig. 30. Annual average NOx concentrations.

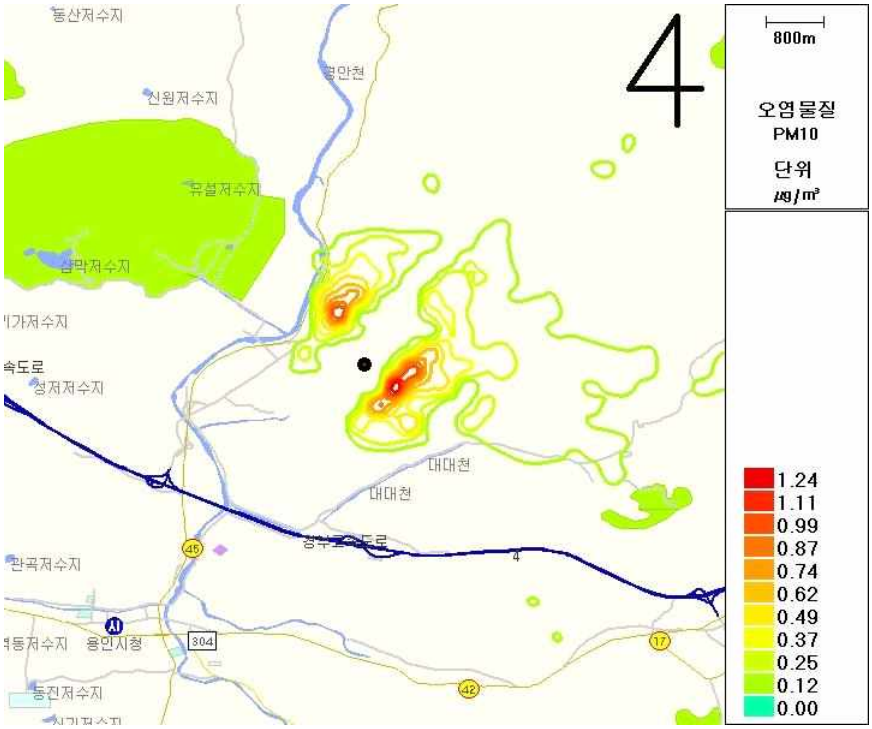


Fig. 31. 24hr average PM10 concentrations

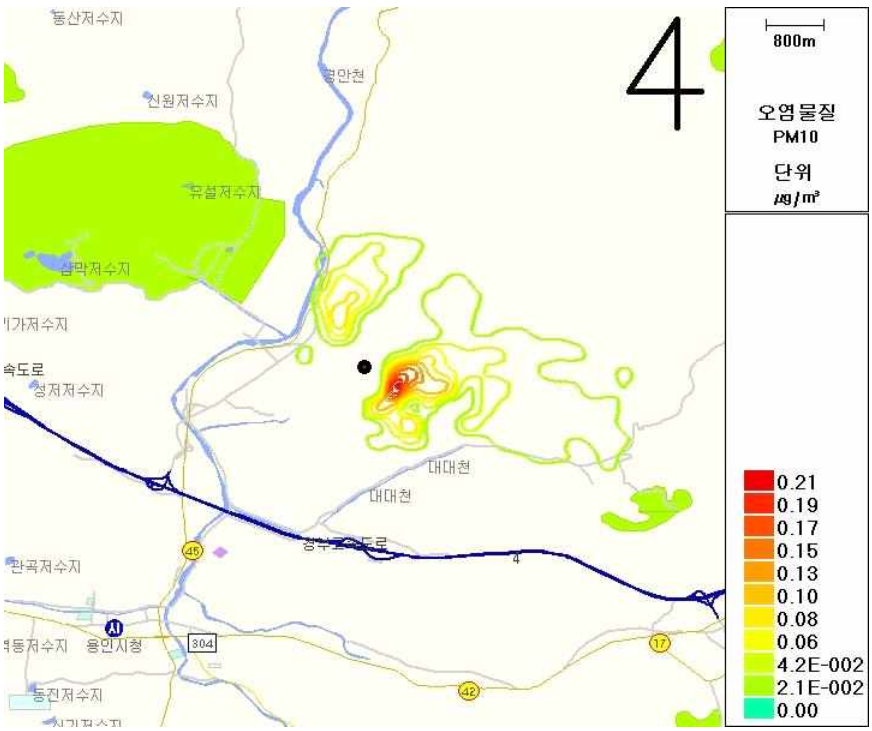


Fig. 32. Annual average PM10 concentrations.

3.4 용인소각장내 기상관측 자료에 의한 평가

3.4.1 AWS를 이용한 기상관측기간

2002년 2월 7일 ~ 2002년 2월 22일(16일간)

3.4.2 측정장소

- 용인 소각장

Fig. 33. Location of AWS

3.4.2 기상관측요소

- 풍향, 풍속, 온도, 습도, 기압, 일사량,
- 그림 34는 용인 소각장에서 실제 측정한 데이타를 이용하여 바람장미를 나타내었다. 측정 기간중에 주풍은 남동풍으로 관측되었다.

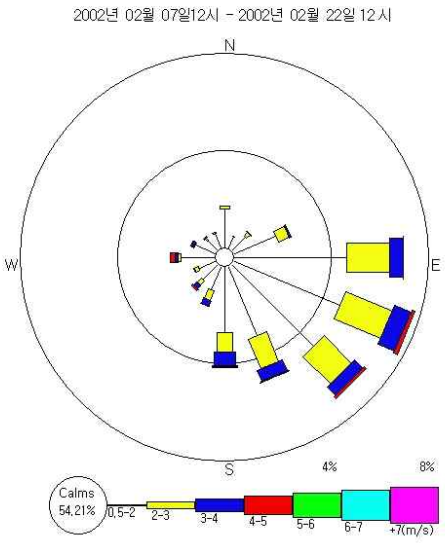


Fig. 34. Windrose(2002. 02. 07 ~ 22)

3.4.4 모델링 결과

용인 소각장에 설치한 AWS 기상장비로부터 받은 기상자료를 이용하여 평가를 수행하였다. 단기간 동안 측정한 바람의 특성은 주로 남동쪽에서 바람이 부는 것으로 나타났다. 그림 35~37은 실제 측정한 AWS자료를 이용하여 평가를 수행한 결과이다. SO_2 , NOx, PM10의 1시간 농안의 최고기여농도는 각각 0.74$\mu g/m^3$, 3.53$\mu g/m^3$, 0.3$\mu g/m^3$으로 농도가 아주 낮은 것을 볼 수 있었다. 대기환경기준을 만족하는 것으로 나타났다.

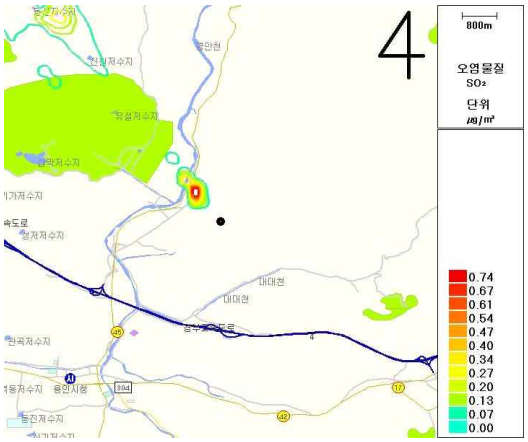


Fig. 35. 1hr SO_2 concentrations

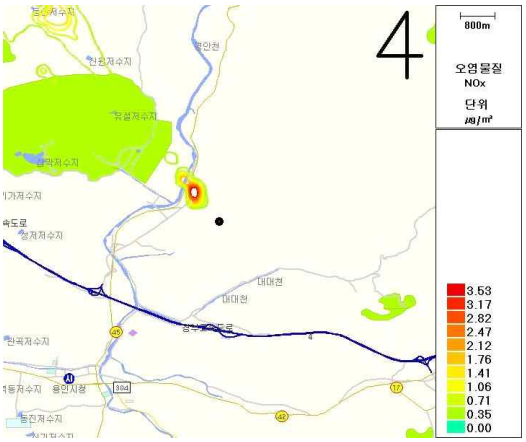


Fig. 36. 1hr NOx concentrations

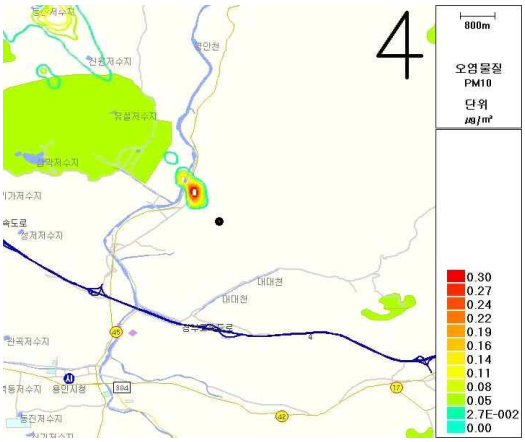


Fig. 37. 1hr PM10 concentrations

4. Gaussian model 및 Puff model 결과 비교

본 연구에서는 먼저 국내에서 소각장 주변환경영향 평가에 많이 사용되고 있는 Gaussian model를 이용하여 소각장 주변 환경영향 평가용 Software를 제작하였고, 이를 이용하여 용인소각장 환경영향평가를 수행하였다.

그러나 최근에 미국에서는 대형배출원인 경우에 Gaussian 모델보다 바람장의 변화를 모델 계산에 반영할 수 있는 비정상 상태 모델인 puff 모델을 사용하는 추세이다. 따라서 본 연구에서도 Gaussian 및 Puff 모델로 동일한 입력조건을 사용하여 모델링을 수행하였을 경우에 그 차이를 파악하기 위해서 Gaussian 및 Puff 모델링 결과를 비교 검토해보았다.

그림 38은 용인소각장 배출조건을 대상으로 Gaussian 및 Puff 모델로 각각 수행할 경우에 그 차이를 보여 주고 있다. Gaussian 모델은 공간적인 바람장 변화를 모델에 반영할 수 없고, 또한 굴뚝에서 배출된 연기가 수용지점까지 도달하는 시간을 모델에서 고려할 수 없기 때문에 굴뚝에서 멀리 떨어진 지점에 물리적으로 연기가 도달되지 않았으나, 도달된 것으로 가정하여 농도가 계산되는 것을 알 수 있다.

그림 39~46은 용인소각장 주변지역의 영향을 Gaussian model 과 Puff model를 이용 기간별로 기여농도를 비교한 것이다. Gaussian model 와 Puff model의 최고기여농도 값의 비교를 표 8에 나타내었다. Puff model로 계산한 농도가 Gaussian 모델로 계산한 농도보다 더 높게 나타나는 것을 볼 수 있었다.

또한 용인지역 배경농도를 고려하여 모델로 예측한 농도를 표10에 나타내었는데 모두 환경기준을 초과하지 않는 것으로 나타났다.

Gaussian 모델은 유체의 정상상태만을 고려하는 모델이므로 오염원으로부터의 거리에 관계없이 직선으로 확산하는 반면, 비정상상태 수행 모델인 puff은 배출원으로부터 이동하는 거리에 따라 확산도가 결정되고, 또한 과거에 배출된 plume(puff)이 현재풍향에 영향을 받아 이동하기 때문에 우리나라와 같이 산악지형이 많고 풍향과 풍속이 시간과 공간상에서 자주 변하는 우리나라와 같은 지형에서는 Puff 모델을 이용하여 소각장 주변 영향을 평가하는 것이 타당하다고 판단된다.

본 연구에는 Gaussian 모델로 평가용 Software를 제작하였으나, 향후 공간 및 시간에 따른 바람장의 변화를 모델에 반영할 수 있는 Puff 모델링을 수행할 수 있는 Software도 제작하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

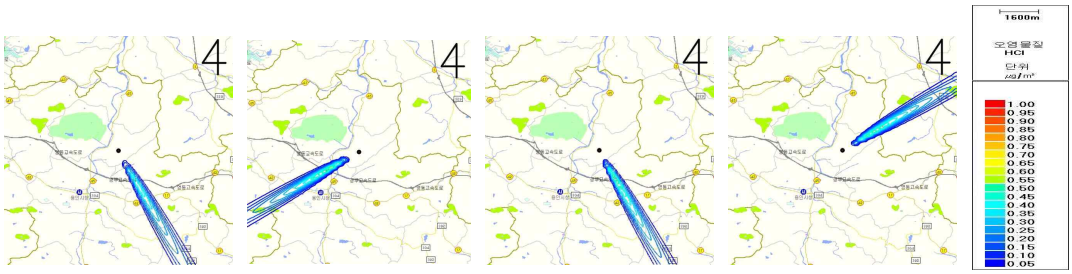
Table 8. Maximum contributed concentrations emitted from Yongin incinerator calculated by Gaussian and puff models

	기간	Gaussian model		Puff model	
		($\mu g/m^3$)	ppm	($\mu g/m^3$)	ppm
SO_2	1hr	14.78	5.6467×10^{-3}	38.5	0.01471
	24hr	3.06	1.1694×10^{-3}	3.795	1.4499×10^{-3}
	Annual	0.52	1.987×10^{-4}	0.732	2.7966×10^{-4}
NOx	1hr	77.62	0.04126	210	0.11163
	24hr	16.04	8.5261×10^{-3}	18	9.5679×10^{-3}
	Annual	2.71	1.4437×10^{-3}	3.6	1.9136×10^{-3}
PM10	24hr	1.24		1.4616	
	Annual	0.21		0.2856	

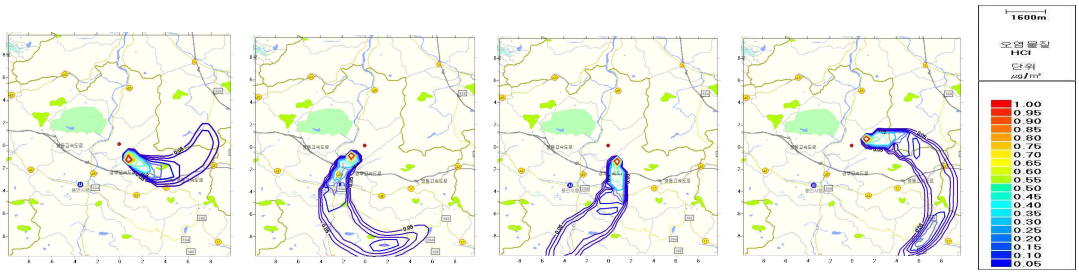
Table 9 Predicted concentrations by Gaussian and puff models.

대상오염물질	기간	배경농도	예측농도	
			Gaussian model	Puff model
SO_2(ppm)	1hr	0.005	0.0106467	0.01971
	24hr		0.0061694	6.4499×10^{-3}
	1year		5.1987×10^{-3}	5.27966×10^{-3}
NOx(ppm)	1hr	0.031	0.07226	0.14263
	24hr		0.03953	0.04057
	1year		0.032437	0.0329
PM10($\mu g/m^3$)	24hr	56	57.24	57.4616
	1year		56.21	56.2856

(a.m. 05:00) (a.m. 08:00) (a.m. 11:00) (p.m. 14:00)



(a) Gaussian Plume modeling



(b) PUFF modeling

Fig. 38. Comparison of PUFF modeling results with Gaussian modeling results

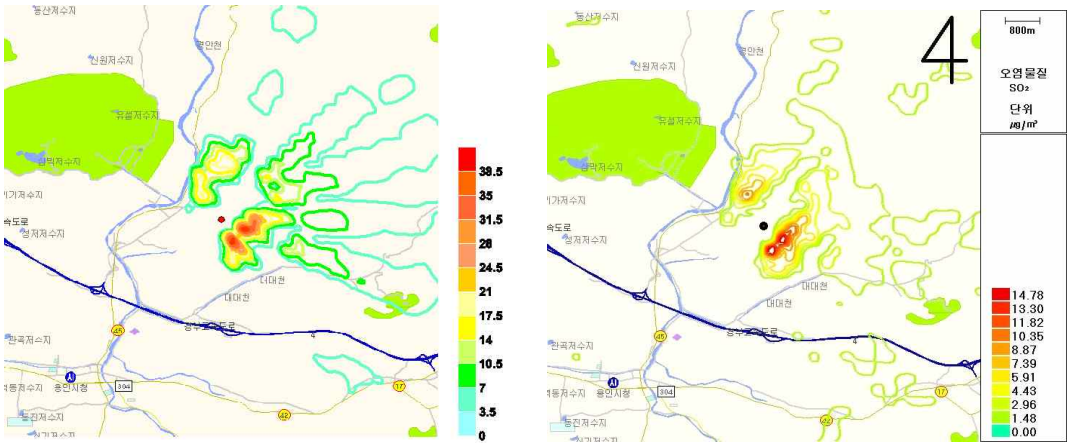


Fig. 39. Comparison of 1hr maximum SO_2 concentration predicted by PUFF model with Gaussian model.

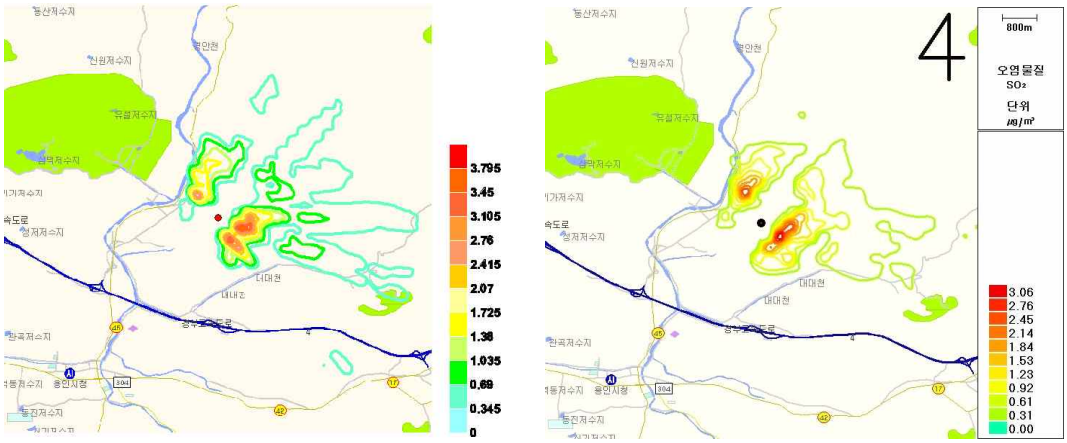


Fig. 40. Comparison of 24hr average SO_2 concentration predicted by PUFF model with Gaussian model.

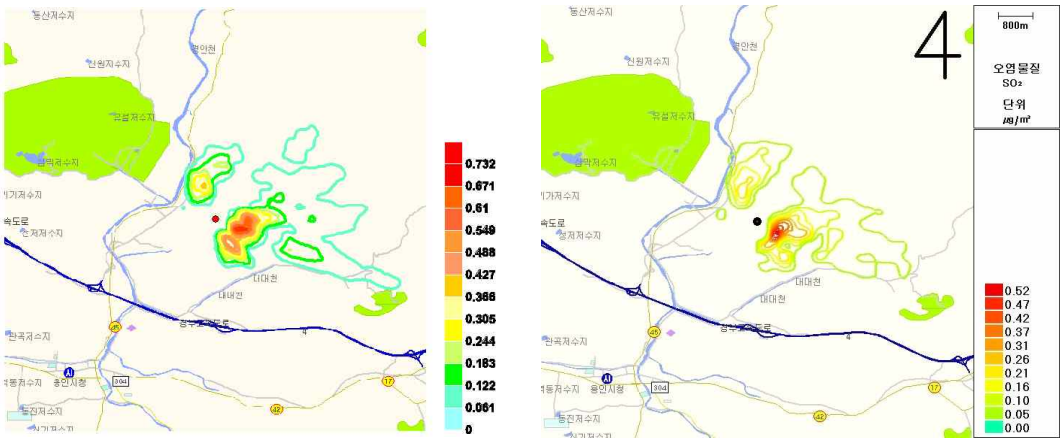


Fig. 41. Comparison of annual average SO_2 concentration precited by PUFF model with Gaussian model.

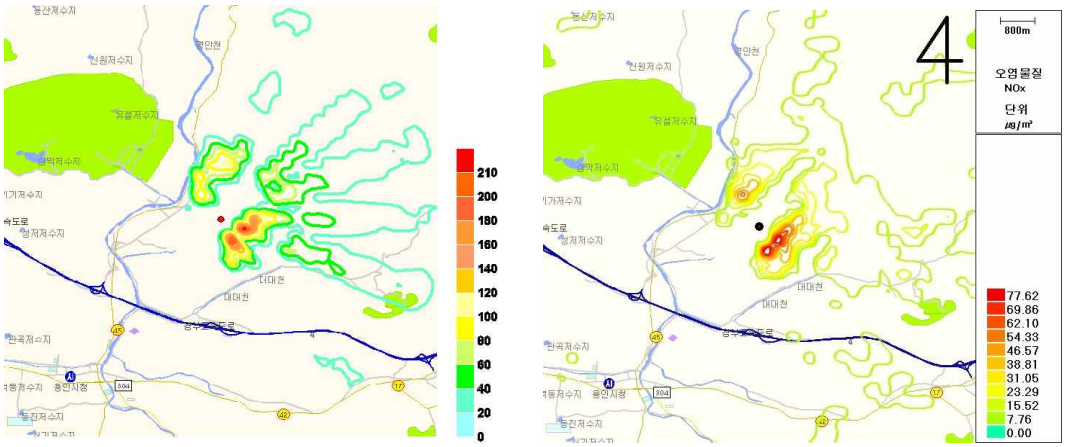


Fig. 42. Comparison of 1hr maximum NOx concentration precited of PUFF model with Gaussian model.

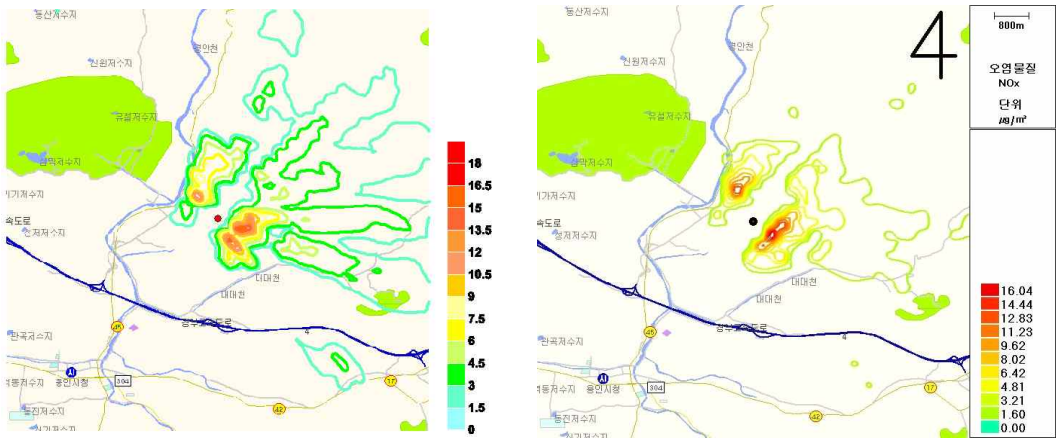


Fig. 43. Comparison of 24hr average NOx concentration precited by PUFF model with Gaussian model.

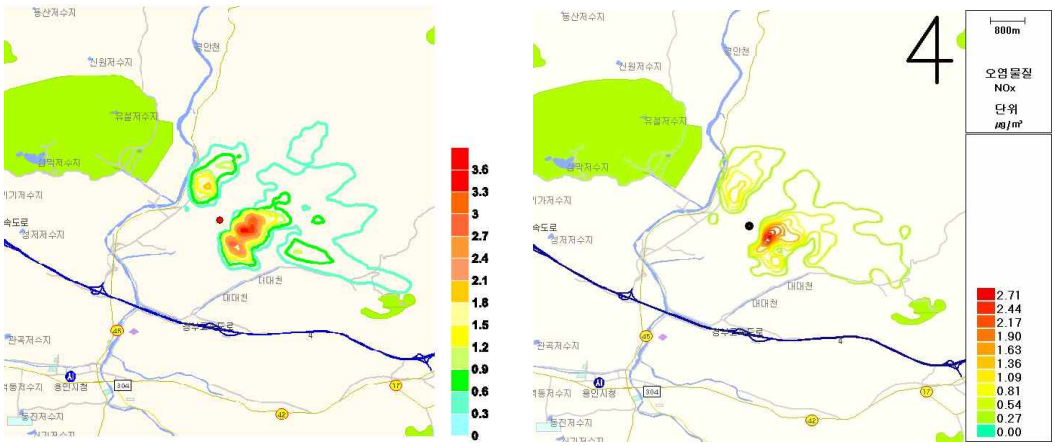


Fig. 44. Comparison of Annual average NOx concentration precited by PUFF model with Gaussian model.

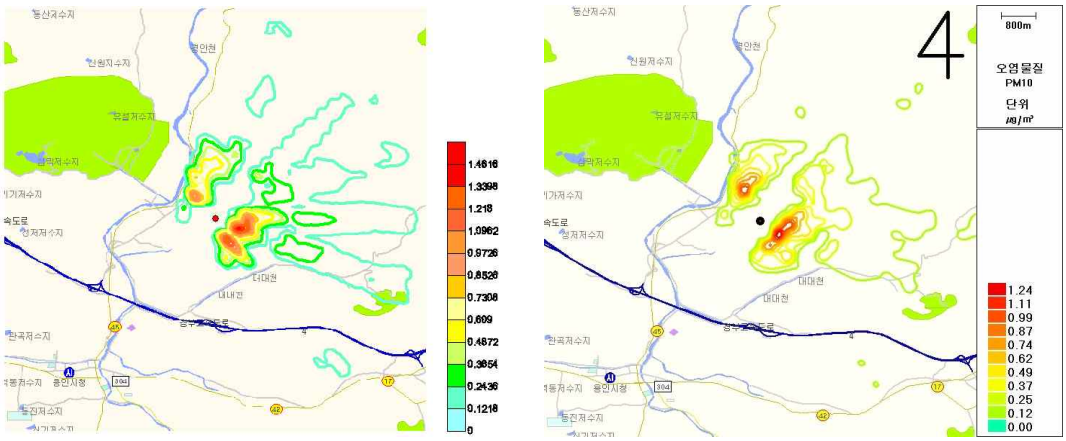


Fig. 45. Comparison of 24hr average PM10 concentration precited by PUFF model with Gaussian model.

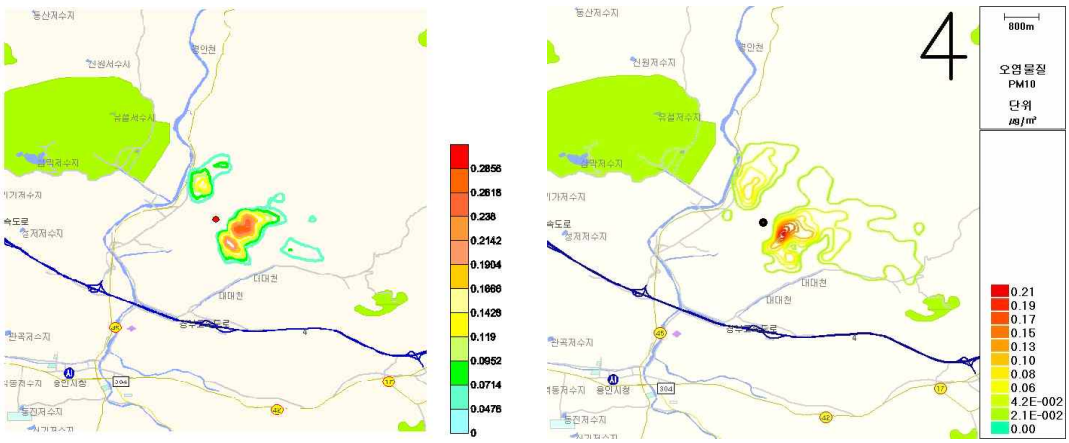


Fig. 46. Comparison of Annual average PM10 concentration precited by PUFF model with Gaussian model.

제 4 장 결 론

소각장 주변 환경영향 및 위해성 평가 program개발 연구를 수행한 결과 아래의 결론을 얻었다.

1. 본 연구에서 개발 한 Software를 이용하여 용인 소각장 주변에 대한 환경영향 평가를 수행한 결과 소각장에서 배출되는 SO_2, NOx, PM10이 주변에 미치는 영향은 크지 않았고, 대기환경기준에 충분히 만족하고 있다.

2. 환경영향평가에 있어서 정상상태만을 고려한 Gaussian 모델만을 수행할 경우 결과값들이 과소 평가될 수 있다. 특히 우리나라와 같이 산악지형이 많고 풍향과 풍속이 시간과 공간상에서 자주 변하는 우리나라와 같은 지형에서는 비정상상태를 고려할 수 있는 Puff 모델을 이용하는 것이 소각장 주변 영향을 평가하는 데 타당.

제 5 장 연구목표 달성도 및 대외 기여도

Table 10.Standards and methods of assessments.

	연도별 사업 목표 및 사업내용	평가항목·기준
당해년도	- 국내 실정에 맞는 대기확산 모델링기법 정립 - 모델링 software제작 - Software의 신뢰도 검증 - 용인소각장에 현장 적용	→ 미국 EPA ISC3모델과 동일한 입력 조건에서 비교 < *시간별, 기간별 기여농도비 비교: (개발모델 기여농도)/(미국 EPA모델 기여농도)=1. *시간별, 기간별 기여농도비 비교 : (모델예측농도)/(측정농도) : 1±0.5(단기예측), 1±0.2(장기예측) > → 국내·외 대기확산 실험자료와 비교

Table 11. Result of assessments.

평가항목	평가결과
시간별, 기간별 기여농도비 비교: (개발모델 기여농도)/(미국 EPA모델 기여농도)=1	。 대기확산모델링 기법 정립(ISC3, Puff) 。 영향평가 program 개발 - 미국 EPA ISC3 모델과 계산결과 일치 - Graphic User interface Windows 구성 - 한국지형 및 기상 자료를 손쉽게 입력
시간별, 기간별 기여농도비 비교 : (모델예측농도)/(측정농도) : 1±0.5(단기예측), 1±0.2(장기예측)	。개발한 program의 현장 적용 및 Puff모델 적용(용인소각장을 대상으로 영향평가 실시) - 대기환경기준을 충분히 만족 - Gaussian 모델보다 Puff모델의 계산결과가 다소 높게 나타남. - Gaussian 모델보다 진보된 개념인 Puff 모델을 적용하는 것이 타당.

Table 12. Result of study

구분		실적건수	내용	비고
2차년도 연구사업	신기술이증 및 발표			
	기술이전			
	환경정책활용			
	국내외 특허			
	국내외 논문		한국대기환경학회에 논문게재할 예정	
	국내외 발표		2002년 한국대기환경학회 춘계학술대회 발표 “ 소각장 주변 환경영향 및 위해성 평가 Program 개발 ”	
	환경홈닥터			

제 6 장 향후 추진계획

- 본 연구에서 검토한 결과에 의하면 Gaussian 모델보다는 Puff 모델이 보다 시간에 따라서 변하는 바람장의 영향을 계산에 반영할 수 있으므로 향후 Puff 모델 이론을 근거로 평가용 Software도 개발할 예정이다.

- 본 연구 결과를 한국대기환경학회에 발표 및 논문에 게재할 예정이다

제 7 장 참고문헌

1. Joseph S. Scire and David G. Strimaitis and Robert J. Yamartino (2000) A User's Guide for the CALPUFF Dispersion Model, Earth Tech, Inc.

2. USEPA (1995) User's guide for the industrial Source Complex (ISC3) Dispersion Models, Volume II - Description of Model Algorithm, U.S. Environmental Protection Agency.

3. 구윤서 외 9인 (2000) 대기확산모델링 Software, AirMaster 개발, 한국환경영향평가학회지, 9, 323-338.

4. 이임학, 구윤서, 전의찬 (2001), CALPUFF 모델의 특징 및 국내 적용성 검토, 한국대기환경학회 추계학술발표대회.