

## 소각설비에 대한 확률론적 환경위험성 평가 적용

김영제 · 장의종 · 안경수\*

(주) 유나이티드 퍼시픽 피엘지, 인천대학교 토목공학과\*

(2003년 9월 2일 접수, 2004년 2월 16일 승인)

## An Application of Probabilistic Environmental Risk Assessment for An Incineration Facility

Y. J. Kim · E. J. Jang · K. S. Ahn\*

United Pacific PLG, Inc, Dept. of Civil & Environmental System Engineering, University of Incheon\*

(Manuscript received 2 September 2003; accepted 16 February 2004)

### Abstract

A wide spectrum of risk assessments including qualitative and quantitative approaches and the analyses of its consequence were performed for an environmentally sensitive object such as incineration facility. To find out the major risk concerns, HAZOP(Hazard and Operability) were performed. Then, the frequency of hazardous gas release scenarios was calculated. Finally consequence analyses were performed for the gas release scenarios. On the basis of analyses through evaluation, a more innovative way for making a better control system or the enhancement of operation procedure was given. The results from these analyses would act as a substantial benefits for the incineration facility operator, and giving some measured information for the neighbors and the people involved.

Key words : Risk Assessment, HAZOP(Hazard and Operability), Consequence Analysis

### I. 서 론

위험성 평가는 위험성을 내포한 시나리오를 도출하고, 각 시나리오의 발생가능성 및 시나리오로

인한 피해(Damage) 규모를 예측하는 것이다. 그리고 평가결과는 위험성을 서열화 하고, 위험성이 큰 시나리오를 제거 또는 저감하기 위한 대안을 제시하게 된다. 따라서 위험성 평가의 궁극적인

목표인 설비 안전성의 향상, 사고 발생빈도의 저감, 설비효율의 증대 등을 성취하는 것이다. 비록 화학공정 설비와 같은 복잡한 설비보다는 상대적으로 덜 복잡하지만, 대형 소각설비와 같은 환경설비 역시 여러 형태의 하드웨어와 조업자의 행위를 포함한 소프트웨어로 구성되어 있고, 이 모든 측면이 정상적으로 가동할 때에 안전한 운전이 가능하다. 소각로에서의 위험성의 예로는 배출되는 오염물질을 처리하는 환경오염 방지설비의 고장으로 고농도의 오염물질이 외부로 배출되는 경우를 들 수 있다. 외부로 배출된 오염물질은 종류 및 농도에 따라서 직·간접적으로 인체 및 생태계에 심각한 영향을 미치기에 우려되는 사건이다. 또한 소각로 설비에서의 화재, 운전중단 등도 관심의 대상이다. 본 논문의 목적은 환경설비에 위험성 평가기법을 적용하여 설비의 잠재위험성을 다양한 각도에서 제시함으로써 외부인의 시각에서 설비를 이해하는데 도움이 되는 정보를 제공하고, 설비의 안전성을 향상시키기 위한 기초자료를 제공하기 위함이다. 대상설비의 잠재위험성을 찾아내기 위하여 정성적, 정량적 방법으로 두 단계의 위험성 평가를 수행하였다. 정성적 방법 중 하나인 HAZOP 기법으로 오염물질의 외부 누출, 조업정지 등의 시나리오를 찾아내었으며, 이 시나리오를 근거로 정량적인 분석을 수행하여 오염물질 누출의 빈도와 피해영향범위를 분석하였다.

## II. 평가대상

수도권 인구밀집지역에서 수 Km 이격되었으나, 중요 에너지설비와는 비교적 인접한 위치에 생활 폐기물 처리시설이 들어설 예정이다. 처리시설의 총 면적은 280,059m<sup>2</sup>이며, 소각시설의 규모는 일 처리량 600톤이다. 본 분석이 수행된 시점에는 비록 대상 소각설비가 상세 설계까지 완료되지 않았지만, 일반적인 스토커(Stoker)식 소각로 형식 설계도에 근거하여 위험성 평가를 수

행하였다. 일반적인 스토커 형식 소각설비의 공정 흐름은 다음과 같다.

[소각로] → [폐열보일러] → [반건식세정탑] → (활성탄) → [여과집진장치] → [선택적촉매환원장치] → 연돌

소각로에서 배출되는 가스는 폐열 보일러에서 냉각된 후 반건식 세정탑에서 소석회 슬러리를 분사하여 SO<sub>x</sub>, HCl, 등의 산성 가스가 제거된다. 이어서 여과 집진장치의 입구의 덕트내로 활성탄 분말을 연속적으로 분무하여 배출가스 중의 다이옥신류, 중금속 등을 흡착하면서 여과 집진장치로 이동하여 여과 집진장치 내부의 여과포에 비산재, 소석회 분말 등과 함께 퇴적층을 형성하여 다이옥신류, 중금속 등을 흡착 제거한다. 또한 여과 집진장치 후단에는 선택적 촉매환원 장치를 설치하여 배출가스 중의 탈질 및 미량의 다이옥신을 제거시킨 후 연돌로 배출된다.

## III. 평가방법

소각시설의 위험성 평가의 수행은 단계별로 수행되었다. 먼저 정성적인 위험성 평가를 수행하였으며, 이를 기초자료로 이용하여 정량적 위험성 평가를 수행하였다. 정량적 위험성 평가는 사고 빈도 분석과 사고 영향 분석을 포함한다.

### 1. 정성적 위험성 평가

정성적인 평가 방법 중 하나인 HAZOP은 공정 오류 및 인적 오류로 인하여 발생할 수 있는 위험성(Hazard)과 운전상(Operability)의 문제를 도출하는데 효과적인 방법이다. HAZOP은 'Guide Word'와 '공정변수'를 조합하여 대상설비에서 어떠한 이탈(Deviation)이 발생할 수 있는지를 현장의 경험과 조업자의 지식에 근거하여 시스템적으로 안전, 조업상의 문제점을 밝히게 한다. HAZOP을 통하여 제시된 개선권고사항을 공정에

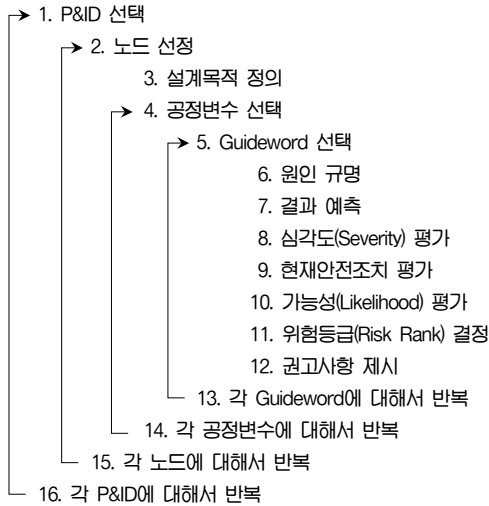


Fig. 1. Procedures of HAZOP Study.

반영하면 공정의 안전성을 향상시킬 수 있다. 또한 좀더 상세한 분석 단계인 정량적 위험성 평가를 위한 기초 및 입력자료를 제공하게 된다. HAZOP을 수행하기 위해서는 대상공정을 잘 이해하여야 하며, 배관 및 계장도(P&ID), 공정설명서 등 관련자료를 수집하여 검토하는 것이 중요하다. HAZOP의 분석 절차를 요약하면 그림 1과 같다.

## 2. 정량적 위험성 평가

정량적 위험성 평가(Quantitative Risk Analysis: QRA)는 소각시설 설비의 안전성을 체계적이고 종합적으로 평가, 이해하고 안전성을 향상시키는 데 중요한 역할을 한다. QRA 기법은 설비의 안전성 향상을 위한 의사결정 도구로서 안전성에 미치는 중요도에 따라 안전성 향상방안을 도출할 수 있는 방법이다. QRA 기법은 다음 3단계로 이루어진다. 1단계는 유해가스의 누출을 일으킬 수 있는 잠재적 원인을 찾아내는 작업이다. 사고의 잠재적 원인은 대체로 정성적인 위험성 평가의 결과를 바탕으로 쉽게 파악할 수 있다. 사고원인

이 정해지면 2단계로 고장수목분석(FTA)을 통해 유해가스 누출로 인한 사고빈도 분석을 수행하게 되며 3단계로 사고영향 분석을 수행하게 된다.

### 1) 사고 빈도 분석

사고 빈도 분석을 위한 고장수목분석은 QRA 수행의 기본이 된다. 고장수목 분석은 분석대상 계통이 기능상실(이용불능: Unavailable)되는 상태를 기술하고, 계통의 운전 및 운전 주변조건을 고려해서 이용불능 상태를 발생시킬 수 있는 모든 가능한 요인을 밝혀내는 분석기법을 말한다. 여기서 고장이란 인적오류(Human Error), 공통원인고장(Common Cause Failure)등 원치 않는 상태를 발생시키는 사건을 말한다. 고장 수목은 기본사건(Basic Event)에서 정점 사건으로 전개를 허용 또는 금지하는 게이트(Gate)로 연결되어 있다. 이 게이트는 상위 수준의 사건 발생에 필요한 사건들의 상호관계를 나타내며, 상위 사건은 이 게이트 출력으로 나타나며, 하위 사건은 이 게이트의 입력으로 들어간다. 게이트 기호에 따라 출력 사건에 요구되는 입력사건의 상호 관련 형태가 표시되고, 게이트는 배관에 있는 밸브 혹은 전기 회로에 있는 스위치의 기능과 유사하다. 따라서 고장 수목은 분석 대상 계통이 원치 않는 상태(고장수목의 정점사건)로 변화하는 기본사건의 논리적 상호관계를 기술하게 된다. 이런 논리의 상호관계에 따라 고장수목이 구성되면 각 사건의 발생 확률을 입력하여 정점사건이 발생하는 빈도를 계산하게 된다.

### 2) 사고 영향 분석

소각설비에서 우려되는 사고영향은 유해오염물질이 외부로 누출될 경우이다. 누출될 수 있는 대기오염물질에는 여러 종류가 있으나, 대표적인 가스상 오염물질인 NOx를 선택하여 사고 영향 분석을 수행하였다. 사고 시나리오에 따라서 누출된 오염물질의 확산 범위를 파악하기 위해 미

국 환경청 (U.S. EPA)의 추천 모델인 ISCST3(Industrial Source Complex Short Term model version3)를 이용하여 분석하였다.

## IV. 평가결과

### 1. 정성적 위험성 평가

정성적 위험성 평가 결과 총 9개의 노드가 분석되었으며 총 56건의 사고 시나리오를 발견하였다. 각 시나리오별로 사고의 가능성(Likelihood)과 심각도(Severity)를 Table 1과 2에 기초하여 결정하였으며, 또한 결정된 가능성과 심각도를 바탕으로 Table 3의 매트릭스에 근거하여 각 사고 시나리오별로 위험등급을 부여하였다. 본 연구에서 발견된 56건의 사고 시나리오 중 위험등급(Risk Rank)이 1과 2인 시나리오는 발견되지 않았다.

Table 1. Severity(="S") categories.

| Category | Severity                                    |
|----------|---|
| A        | Loss of life or Very large financial loss   |
| B        | Severe injury or large financial loss       |
| C        | Loss time injury or moderate financial loss |
| D        | First aid injury or small financial loss    |

Table 2. Likelihood(="L") categories.

| Category | Severity  |
|----------|---|
| I        | Likely; may occur as often as once in an operating year in any similar plant  |
| II       | May occur; frequency between once a year and once in 10 operating years or at least once in 10 similar plants operated for 1 year       |
| III      | Not likely; frequency between once in 10 years and once in 30 operating years or at least once in 30 similar plants operated for 1 year |
| IV       | Very unlikely; frequency of less than once in 30 year or less than once a year in 30 similar plants operated for 1 year                 |
| V        | Not probable  |

Table 3. Risk Ranking matrix.

| S \ L | I | II | III | IV | V |
|-------|---|----|-----|----|---|
| A     | 1 | 1  | 2   | 3  | 4 |
| B     | 1 | 2  | 3   | 3  | 5 |
| C     | 2 | 3  | 3   | 4  | 5 |
| D     | 3 | 4  | 4   | 5  | 5 |
| E     | 5 | 5  | 5   | 5  | 5 |

평균적인 기준에 의하면 위험등급 1과 2에 대해서는 개선 조치가 반드시 요구된다. 위험등급 3에 해당하는 사건은 20건, 위험등급 4에 해당하는 사건은 36건으로 대부분의 시나리오는 3과 4의 위험등급을 갖는 것으로 나타났다. 이 등급은 시급한 조치가 필요하지는 않으며, 개선 및 권고사항이 도출된 시나리오에 대해 경제성 및 타당성을 검토하여 선택적으로 개선될 필요가 있다. 정성적 위험성 평가의 결과 총 15개의 개선권고사항이 제시되었으며, 상세히 살펴보면 감지설비 강화 2건, 운전절차강화 12건, 설비개선 1건이다.

### 2. 정량적 위험성 평가

#### 1) 사고 발생 빈도 분석

소각시설에서 유해가스 방출을 정점사건(Top Event)로 정하여 사고 발생 빈도 분석을 수행하였다. 사고발생 빈도 분석은 각 설비별 고장수목을 연결하여 각각의 사고추이 빈도를 모두 합쳐 소각시설 전체의 유해가스 누출빈도를 분석하는 방식으로 이루어졌으며, 한국원자력연구소에서 개발한 KIRAP(KAERI Integrated Reliability Analysis Code Package) 소프트웨어를 사용하여 수행하였다. KIRAP은 사건수목 구성, 고장수목 구성, 최소 단절군(MCS: Minimal Cut Set) 생성 및 정량화, 중요도 계산, 불확실성 분석 등을 수행하는 전산코드이다. 각 사건의 발생빈도 데이터는 CCPS(Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineer)와

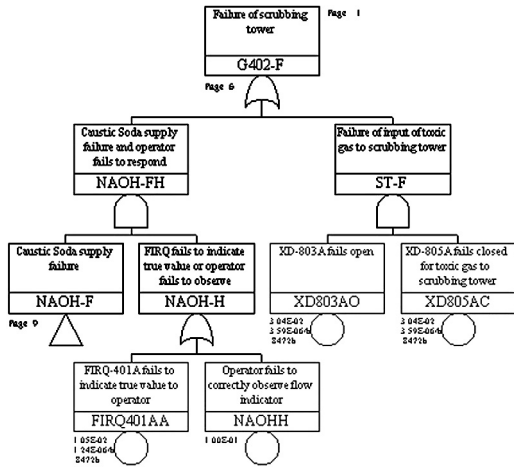


Fig. 2. Fault Tree for the Incineration Facility (Portion).

OREDA(Offshore Reliability Data)의 데이터 복을 참고하여 입력하였다. 유해가스방출의 요인을 공기공급 중단, 스팀드럼 고장, 전기집진 설비 고장, 촉매환원장치 고장, 세정탑의 고장, 소각로의 건전성 상실등으로 구분하여 단계별로 분석한 결과 소각로 설비 고장으로 인한 유해가스 누출 빈도는  $3.621 \times 10^{-2}/\text{yr}$ 로 계산되었다.

각각의 사건 시나리오가 정점사건에 미치는 기여도를 살펴보기 위해 중요도 및 민감도 분석을 수행하였고, 데이터의 불확실성에 대한 분석을 아래와 같이 수행하였다.

(1) 중요도 분석

각 기본사건에 대한 중요도를 각기 다른 3가지 측정법, Fussel-Vessely(FV) 중요도, 위험도 감소가치(RRW: Risk Reduction Worth) 및 위험도 달

성가치(RAW: Risk Achievement Worth)에 따라 분석하였다. 일반적으로 중요도 분석 결과는 다음과 같은 안전성 향상 방안 도출에 활용된다.

1) 위험도 감소가치(혹은 F-V 중요도)가 큰 부분에 대하여 우선적으로 설계개선을 하는 것이 효과적이다.

2) 위험도 달성가치가 큰 부분에 대하여는 절차서 개선, 정기검사, 보수 및 운전원 훈련 등을 강화하여야 한다.

3) 위험도 감소가치(혹은 F-V 중요도)와 위험도 달성가치가 낮은 부분에 대하여는 특별한 조치가 필요치 않고 현재의 설계상태를 유지할 수 있다.

FV 중요도와 RRW 중요도 분석 결과 소각시설 연돌에서 유해가스 방출시 운전원의 대처 미흡이 가장 중요한 사건으로 나타났고, RAW 중요도 분석 결과 소각시설 정지제어시스템의 고장이 중요한 사건으로 파악되었다.

(2) 민감도 분석

설비 개선 및 작업자 오류에 대한 개선효과를 계산하기 위해 민감도분석을 실시하였다. 운전원 오류에 대한 민감도 분석은 각 사건에 대하여 현재 빈도에 10배의 값을 적용하였을 때와 0.1배를 적용하였을 때의 전체 유해 가스 방출 빈도에 미치는 영향을 정량화하였으며, 주요 설비의 고장에 대한 민감도 분석은 설비 개선 효과를 고려하기 위하여 현재 빈도에 0.1배를 적용하였을 때의 유해 가스 방출 빈도에 미치는 영향을 정량화하였다. Table 4는 운전원 오류에 대한 민감도 분석

Table 4. Sensitivity analysis result for operational error.

| Event  | Adjusted frequency   | Gas release frequency | Gas release frequency (Adjusted) | Variation(%) |
|--|----------------------|-----------------------|----------------------------------|--------------|
| Failure of operator action for shutdown procedure  | 1.00E-01 (10 times)  | 3.621E-02             | 1.262E-01                        | 248.52% (↑)  |
|  | 1.00E-03 (0.1 times) |                       | 2.721E-02                        | 24.86% (↓)   |
| Operator fails to respond to hazardous gas release | 1.00E-00 (10 times)  |                       | 1.606E-01                        | 343.53% (↑)  |
|  | 1.00E-02 (0.1 times) |                       | 2.377E-02                        | 34.36% (↓)   |

Table 5. Sensitivity analysis result for the facility.

| Event  | Adjusted frequency   | Gas release frequency | Gas release frequency (Adjusted) | Variation(%) |
|--|----------------------|-----------------------|----------------------------------|--------------|
| Failure of control action for shutdown process | 1.00E-03 (0.1 times) | 3.621E-02             | 2.721E-02                        | 24.86% (↓)   |
| Indicator(AI802A) fails to indicate true value | 8.64E-04 (0.1 times) |                       | 3.406E-02                        | 4.45% (↓)    |
| Valve(SOV1402) fails to close                  | 3.47E-04 (0.1 times) |                       | 3.548E-02                        | 2.01% (↓)    |

결과이며, Table 5는 설비개선에 대한 민감도 분석 결과이다. Table 4와 5에서 알수 있듯이, 소각 시설 정지 제어 시스템이 개선되거나 소각시설 가동정지시 운전 원의 실수를 줄일 수 있다면, 전체 가스 누출 빈도를 각각 25%와 35% 정도 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다.

### (3) 불확실성 분석

사고 발생 빈도 계산시 기본사건 자료의 불확실성 때문에 계산된 발생빈도에는 불확실성이 존재하게 되므로 이들을 규명할 필요가 있다. 소각 시설 설비에서 유해 가스 방출 빈도의 정량화 결과에 대해서 몬테카를로(Monte Carlo)방법을 사용하여 불확실성 분석을 수행하였다. 불확실성 분석을 위하여 각 기본 사건의 분포를 입력하였는데 모든 사건의 분포는 대수정규분포(Log Normal Distribution)으로 간주하였고 오차 인자(Error Factor)는 불확실성이 너무 크지도 혹은 작지도 않다고 가정하여 3을 할당하였다. 불확실성

Table 6. Uncertainty analysis result for the facility.

|              |          |
|--------------|----------|
| 5%           | 1.581E-2 |
| 50%          | 3.225E-2 |
| Mean         | 3.646E-2 |
| 95%          | 7.146E-2 |
| Variance     | 3.712E-4 |
| Error Factor | 2.216    |
| Point        | 3.621E-2 |

분석 결과를 정리하면 Table 6과 같으며, 확률밀도 함수로 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 보듯이 대부분의 확률밀도는 평균값을 중심으로 집중되고 평균으로부터 멀어지면서 그 밀도가 급격히 작아진다. 중간값(Median)은 50번째 퍼센타일(Percentile)이며, 5번째와 95번째 퍼센타일의 값은 분포함수 퍼짐의 정도를 보여준다. 분석 결과에서 유해가스 방출 빈도의 점 추정치(Point Estimate)는 27년에 한번(3.621E-2)이며, 방출빈도를 낙관적으로 판단한다면 65년에 한 번(5%: 1.581E-2/년)정도이고, 보수적으로 판단한다면 15년에 한 번 (95%: 7.146E-2/년) 정도임을 알 수 있다.

### 2) 사고 영향 분석

소각설비에서 사고 발생시 오염물질 누출의 퍼

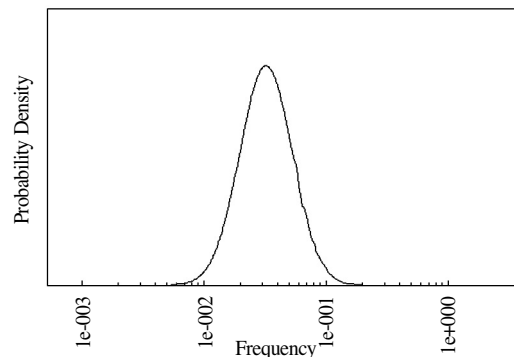


Fig. 3. Probability density function for the frequency of hazardous gas release.

해영향에 대하여 분석하였다. 오염물질은 NOx를 선택하였으며, 사고영향 분석에 사용된 모델은 미국 환경청의 추천모델인 ISCST3이다. 사고 시나리오는 NOx 처리 시설인 선택적 촉매 환원장치 가 정상가동하지 않은 상태에서 연돌로 고농도의 NOx가 누출될 경우를 최악의 시나리오로 가정하였고, 배출량은 배출허용기준에 해당하는 200ppm로 가정하였다. 누출시간에 따라 1시간 누출 케이스와 5시간 누출 케이스의 두 가지 경우를 모사하였다. 누출시간의 결정은 소각로 운전 담당자가 소각시설의 비정상가동을 인지하여 소각로 가동을 정지시키는데 소요되는 시간으로 판단되어 가정하였으며, 대응에 소요되는 시간이 짧게는 1시간에서 길게는 5시간 정도로 임의로 가정한 것이다. 분석 결과를 되도록 보수적으로 도출하기 위해 기상상태는 가장 안정한 상태일 경우(Stability F)로 가정하여 기상자료를 아래와 같이 입력하였다.

풍속: 1.3m/s, 혼합고: 1500m, 기온: 20°C, 안정도 등급: 6

모델 모사시 풍향은 임의로 서풍을 선택하였다. 모사결과 Fig. 4와 5에서와 같이 지표면 농도는

누출시간이 길수록 고농도를 보이며, 오염물질의 확산 범위는 소각시설 주변에 위치한 수도권 매립지 일부 지역을 포함하는 것으로 사료된다.

## V. 결론

본 분석에서는 소각설비를 대상으로 정성적·정량적 위험성 평가를 수행하였다. 정성적 위험성 평가기법중 하나인 HAZOP 수행을 통해 소각설비의 잠재위험성을 파악하고 56건의 사고 시나리오와 15건의 개선권고 사항을 제시하였다. 정량적인 방법으로는 사고 빈도 분석을 통해 유해가스 누출빈도가  $3.621 \times 10^{-2}/\text{yr}$  임을 계산하였고, 중요도 분석과 민감도 분석을 통하여 소각시설 정지 제어 시스템의 개선과 소각시설 정지시 적절한 대응을 위한 운전절차서 강화 등의 방안이 설비의 안전성 향상을 위해 우선적으로 개선되어야 할 부분임을 파악하였다. 또한 사고 영향 분석으로 유해가스 누출로 인한 피해지역의 범위를 산정할 수 있었다. 정량화를 포함한 설비에 대한 상세분석은 위험관리 및 조업도 향상에 기여하여 소각로 설비 운영자에게 실질적인 혜택이 될 뿐

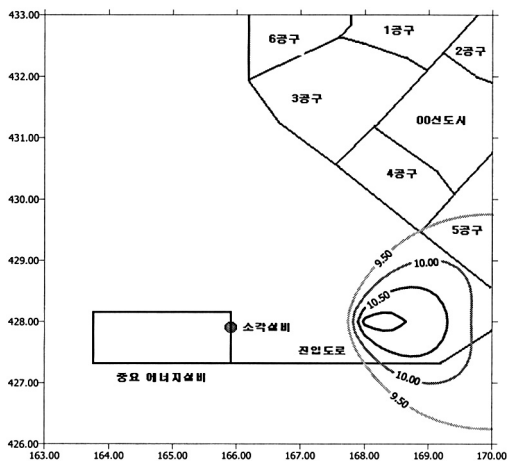


Fig. 4. Simulation result of NOx release(1hr) using ISCST. (Unit: ppb)

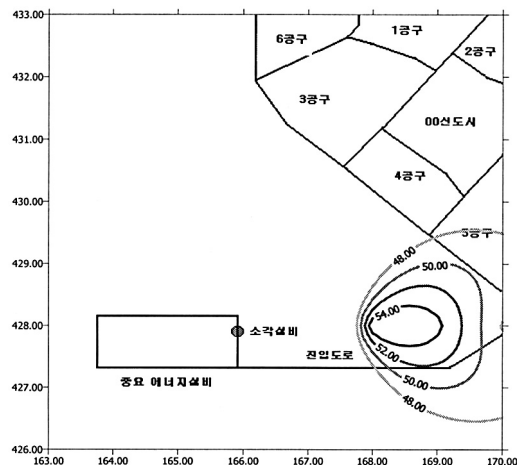


Fig. 5. Simulation result of NOx release(5hr) using ISCST. (Unit: ppb)

만 아니라, 소각로 설비를 외부인 시각으로 보는 인근주민 또는 이해 당사자에게 계량화된 정보를 제공하는 도구로 이용 될 수 있다.

### 참고문헌

김명준, 윤여홍, 김연중, 1994, "Hazard and Operability(HAZOP) Study의 효율적 운영 및 그 결과의 이용", Chemical Industry and Technology, 12(9), 333~337.

인천광역시, 2000, ○○ 생활폐기물 종합처리시설 건설사업 환경영향평가 검토보고서.

(주)대우, 1996, 부천시 폐기물 종합 처리시설 건설공사 기본설계보고서.

CCPS for American Institute of Chemical Engineers, 1989, Guidelines for Process Equipment Reliability Data.

SINTEF Industrial Management, 1997, Offshore Reliability Data, 3rd Edition, OREDA-97.

EPA, 1995, User's Guide For The Industrial Source Complex (ISC3) Dispersion Models.

최종원고채택 04. 02. 16

