

에너지 플랜트 환경에서 독성가스를 위한 대기확산 시스템에 관한 연구

오정석*, 손충연**, 성종규*

*한국가스안전공사 가스안전연구원

**송실대학교 일반대학원 미디어학과

e-mail:jsoh90@gmail.com

A System on Air Dispersion System for Toxic Gas on Energy Plant Environment

Jeong Seok Oh*, Choong Yeon Sohn**, Jong Gyu Sung*

*Institute of Gas Safety R&D, Korea Gas Safety Corporation

**Dept of Meida, Soong-Sil University

요 약

국내의 대규모 산업시설은 유해물질과 직·간접적으로 밀접하게 관련되어 유해물질 누출사고는 막대한 물적, 인적 피해를 발생시키며 누출물질, 저장시설, 대기 상태에 따라 유해물질 확산 속도 및 범위가 다르기 때문에 이를 예측하는 대기확산 시스템이 필요하다. 또한 기존의 대기확산 시스템은 산업시설 구조물 설계 단계에서 안전성을 확인하는 시뮬레이션용으로 사용되었기 때문에 누출사고 발생 시 즉각적인 처리와 대응이 어려우며 전문적 지식수준의 사용자 입력을 요구한다. 본 논문은 에너지 플랜트 환경의 특수성과 효율성을 고려하여 운영 중인 시설에 적용 가능한 대기확산 시스템 연구를 목적으로 한다. 이를 위하여 신속하고 효율적인 대기확산 모델을 선정·정의하고 융통성 있는 대기확산 시스템의 구성요소를 컴포넌트화하여 구현하였으며 사고 발생 시 빠르게 피해범위를 예측할 수 있는 실시간 대기확산 시스템 설계 방안을 제시하였다.

1. 서론

국내의 대규모 산업시설이 증가함에 따라 산업시설의 안전관리, 중대형 사고예방 및 위험의 사전예측 등이 중요시 되고 있다. 대부분의 산업시설에서 유해물질을 생산하거나 다루고 있기 때문에 산업시설의 사고 발생은 막대한 물적, 인적 피해를 발생시킨다. 유해물질 누출사고는 누출물질, 저장시설, 대기의 상태에 따라 유독가스의 확산 속도와 범위가 다르기 때문에 이를 예측할 수 있는 대기확산 시스템이 필요하다[6].

기존의 대기확산 시스템은 산업시설 구조물을 설계하는 단계에서 다양한 경우(case)에 따라 안전성을 확인하는 시뮬레이션용으로 사용되었다. 범용적인 상용 대기확산 시스템은 플랜트 환경에 적합한 대기확산 모델을 제공하지 못하며 시뮬레이션 기반 시스템이기 때문에 누출사고 발생 시 즉각적인 처리 및 대응이 불가능하다[2, 3, 4]. 또한 국내 전체지역을 감시하는 대기확산 시스템이 주기적인 실시간 대기 데이터와 사용자가 입력하는 가상의 정보를 이용하여 시도된 바는 있으나 사용자의 전문적 지식의 결여와 시스템 성능 저하로 사고 시에는 빠른 처리 및 대응이 불가능하였다[1, 5].

본 논문은 에너지 플랜트 환경에서 특수성과 효율성 강화하여 대상시설 구동 중에 사용 가능한 독성가스 대기확산 시스템의 연구를 목적으로 한다. 이를 위하여 신속하고 효율적인 대기확산 모델을 선정 및 정의하고, 대기확산 시스템의 구성요소를 설계하여 대기확산 시스템을 구현한다. 더 나아가, 대기확산 시스템을 확장·개선하여 대상 시설이 구동 중에도 이용할 수 있는 실시간 대기확산 시스템 방안을 제시한다.

2. 대기확산 모델

대기확산 모델은 주로 에너지 플랜트나 원전 등에서 독성가스 같은 유해물질의 피해범위를 산정하고자 연구되고 있다.

국가 기간산업시설에서 유해물질의 확산은 위험물질 누출 순간에 위험물을 저장하고 있는 내부의 힘과 압력에 의해 발생하는 기계적 난류(mechanical turbulence) 현상, 위험물의 증기가 공기와 접촉하여 비중차이에 따른 부력에 의해 발생하는 난류(turbulence due to buoyancy) 현상, 대기조건에 따른 대기 난류의 확산(dispersion by atmospheric turbulence) 현상에 따라 진행된다.

화학공학 분야에서 대기확산 모델은 대기 중 유해물질의 누출로 인한 인근지역의 피해영향을 계산하기 위하여 누출물질의 누출속도(release rate), 전체 누출량, 대기 상

[†] 본 연구는 지식경제부 및 한국산업기술평가관리원의 산업원천기술개발사업(정보통신)의 일환으로 수행하였음. [과제번호: 10035310, 과제명: 차세대 USN 기반의 사회안전 프레임워크 기술개발]

태, 표면 거칠기(surface roughness), 온도, 압력, 누출된 지점의 기하학적 형태, 누출과정 등 다양한 기상 정보를 입력하여 확률적 수식에 따라 유해물질의 확산 농도를 예측한다.

대기확산 모델에서 주요한 요소는 누출물질의 무게와 누출형태이다. 누출형태는 유해물질의 이동시간과 누출시간을 비교하는 (식 1)에 의하여 연속누출과 순간누출로 구분한다.

$$t_{tr} = \frac{2X}{u} \quad (\text{식 1})$$

여기서,

X : 바람방향으로 일정지점까지 거리,

u : 바람의 속도

t_{tr} : 바람방향으로 일정 지점까지의 이동시간

연속누출과 순간누출의 구분은 t_d 가 누출시간을 의미한다면 $t_d \geq t_{tr}$ 일 때 연속누출이며, $t_d < t_{tr}$ 일 때 순간 누출을 의미한다.

누출물질은 공기를 기준으로 (식 2)와 같이 리차드슨수(Richardson number, R_{io})를 이용하여 <표 1>과 같이 무거운 물질과 가벼운 물질로 구분된다.

$$R_{io} = \frac{g(\rho_{re} - \rho_a)V}{\rho_a u_{10}^3 d} \quad (\text{연속누출인 경우})$$

$$R_{io} = \frac{g(\rho_{re} - \rho_a)V^{1/3}}{\rho_a u_{10}^2} \quad (\text{순간누출인 경우}) \quad (\text{식 2})$$

여기서,

g : 중력가속도 (9.8m/sec²)

ρ_{re} : 감압에 따른 누출된 물질의 밀도(kg/m³)

ρ_a : 주위 공기의 밀도(kg/m³)

V : 감압에 따른 체적누출 속도(m³/sec)

$V^{1/3}$: 감압에 따른 누출 물질의 양(m³)

d : 감압에 따른 누출 구멍의 직경(m)

u_{10} : 10m에서 바람의 속도(m/sec)

<표 1>가벼운 물질과 무거운 물질의 구분조건

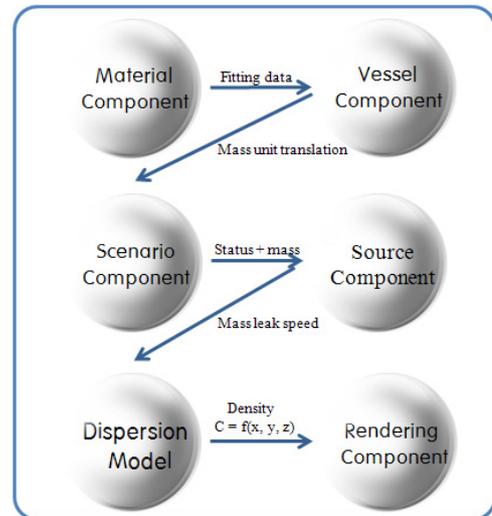
누출형태	누출 무게	조 건
연속누출	가벼운 물질	$R_{io} < 0.03$
	무거운 물질	$R_{io} \geq 0.03$
순간누출	가벼운 물질	$R_{io} < 0.04$
	무거운 물질	$R_{io} \geq 0.04$

3. 대기확산 시스템 주요 구성요소 설계

대기확산은 화학공학 및 대기분야에서 다양한 수식적 모델을 제시하고 있다. 그러나 이러한 모델들은 광범위한 범위에서 다양한 물질을 포함하기 때문에 확산결과가 모델에 따라 틀리다. 그러므로 대상 물질이나 시설환경에 따른 적절한 모델의 선정도 중요하다.

본 논문에서는 다양한 유해물질에서 독성가스를 주요 대상으로 하고 신속하게 확산을 처리할 수 있는 가우시안 모델과 SLAB 모델을 선정하였다. 가우시안 모델은 정규 분포를 이용하여 확산범위를 산정하며 공기보다 가벼운 독성가스에 적용된다. 이 모델의 장점은 시간에 따른 유출량의 변화를 모사함에 있다. SLAB 모델은 가우시안 모델과 유사하나 중력과 확산간의 관계를 포함하여 공기보다 무거운 독성가스에 적용된다. 이 모델의 장점은 기상변수와 풍속 대기 안전도 등을 계산하여 위험지역 반경을 예측함에 있다.

다양한 독성가스 확산에 대한 예측은 대기확산 모델만으로는 불가능하다. 물성정보, 시설정보, 상태 정보 등이 대기확산 모델에 누출속도로 제공되어야 가능하며 (그림 1)은 본 논문에서 확장성과 이식성을 고려하여 설계한 대기확산 시스템의 구성 및 데이터 흐름도를 보여주며, 크게 물질(material), 시설(vessel), 시나리오(scenario), 소스(source), 확산(dispersion), 표현(rendering) 컴포넌트로 구성되었다.

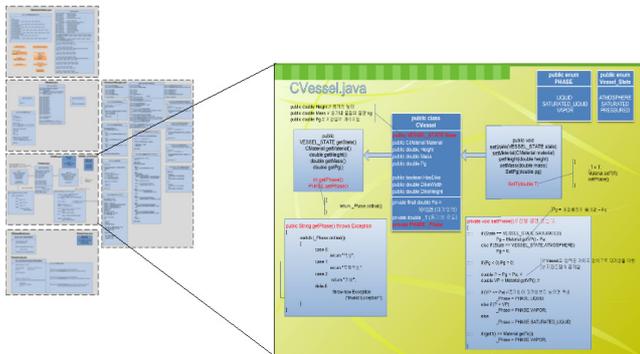


(그림 1) 대기확산 시스템의 개략도

<표 2> 대기확산 주요 컴포넌트의 기능 정의

컴포넌트명	설 명
물질	대상 물질들의 물질 특성계수를 도출
시설	대시시설의 내부정보와 물질 컴포넌트의 결과를 이용하여 질량단위로 환산
시나리오	대상 시설의 상태정보와 시설 컴포넌트의 결과를 이용하여 상태에 따른 질량값 환산
소스	대상 시설의 대기정보와 시나리오 컴포넌트의 결과를 이용하여 누출속도로 변환
확산	가우시안 모델 또는 SLAB 모델과 누출속도를 이용하여 농도 변환
표현	누출거리와 시간에 따라서 응용 프로그램에서 농도 표현

<표 2>는 대기확산 주요 컴포넌트의 기능을 정의하였다. 물질 컴포넌트는 대상 물질들의 특성정보를 데이터베이스화하여 물질에 따라 다른 표준특성계수를 계산하여 도출한다. 시설 컴포넌트는 대상 시설의 온도, 압력, 높이, 모양, 물질량(volume), 물질수준(level)등을 이용하여 질량단위로 변환해준다. 시나리오 컴포넌트는 누출의 원인이 되는 균열(crack), 구멍(leak), 파열(rupture) 등의 시설 상태 시나리오에 따른 질량값의 변화를 보여준다. 소스 시나리오는 대기온도, 대기습도, 대기압력, 풍향, 풍속 등 누출물질이 대기와 직면하는 시기에 영향을 주는 요소를 이용하여 누출속도를 계산한다. 확산 컴포넌트는 확산 모델과 누출속도를 이용하여 x와 y 좌표 지점의 농도를 계산해주며, 표현 컴포넌트는 이를 응용 프로그램에서 제공한다. 컴포넌트는 객체지향(object-oriented) 개념을 이용하여 설계되었으며 (그림 2)에서 설계 예를 보인다.



(그림 2) 대기확산 세부 컴포넌트 설계 예

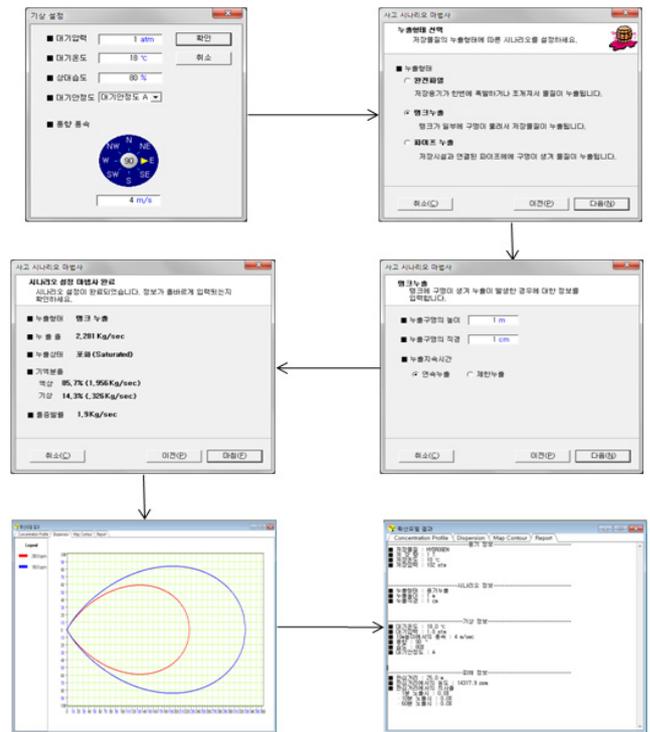
4. 시뮬레이션 기반 대기확산 시스템 구현

시뮬레이션 기반 대기확산 시스템은 일반적으로 기존 상업적 시스템을 포함하는 대기확산 시스템을 의미한다. 이러한 시스템은 에너지 플랜트 같은 산업시설에서 배관, 용기, 저장탱크 등의 시설들이 위험상황에서 견딜 수 있도록 시설물의 설계단계에서 다양한 가상의 시나리오를 적용시켜 누출 가능성을 검토한 후 안전하게 시설을 건축할 수 있도록 도와준다.

우리는 본 논문을 위해 설계된 대기확산 주요 컴포넌트를 이용하여 시뮬레이션 기반 독성가스 대기확산 시스템을 구현하였다. 본 시스템은 대기정보설정 단계, 시설정보 설정 단계, 시나리오 설정단계로 구분하여 사용자 하여금 정보를 입력받아 시뮬레이션 하도록 하였다. 대기 정보설정 단계는 대기압력, 대기온도, 상대습도, 대기안정도, 풍향, 풍속 등을 사용자가 결정하는 단계이다. 시설정보 설정단계는 저장물질, 시설형태, 지표 형태, 저장압력, 저장온도, 총 저장량 등을 사용자가 결정한다. 마지막으로 시나리오 설정단계는 누출형태, 누출높이, 누출직경, 누출 지속시간을 결정하는 단계이며, (그림 3)처럼 사고 시나리오를 시뮬레이션 하는 과정이다. 다시 말해, 모든 단계에서 사용자가 시설과 확산에 대한 전문적 지식을 보유해야 하고 다양한 누출 경우를 생성하여 시뮬레이션 해야 한다.

그러나 시뮬레이션 기반 시스템은 대부분 가상의 데이터를 이용하기 때문에 운영 중인 시설에 적용하거나 사고가 발생하였을 때 피해범위를 산정하기는 어렵다. 특히, 시점에 따라 변동적인 풍향, 풍속 등의 대기정보와 누출형태, 누출원인 등의 누출정보의 정확성이 결여되어 있기 때문에 실제 에너지 플랜트나 원전 시설에서 사고가 발생하였을 때 확산범위를 예측하기 어려운 한계를 지니고 있다.

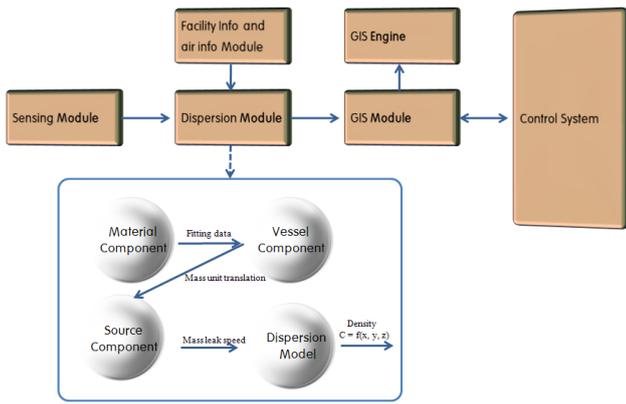
시뮬레이션 기반 대기확산 시스템의 다른 한계는 독립적인 플랫폼으로 운영되어 관계시스템과 연동되기 어렵고, 사용자로부터 데이터 및 지도 등의 많은 입력을 받기 때문에 사용하기가 어렵다. 또한 대부분 범용 대기확산 모델을 이용하기 때문에 발생하는 위험현상을 해결에 적절치 않을 가능성이 많다.



(그림 3) 시뮬레이션 기반 대기확산 프로그램

5. 실시간 대기확산 시스템 설계

에너지 플랜트와 같은 대규모 산업시설에서는 운영부터 작업자 관리까지 산업시설 내에서 발생하는 모든 부분을 담당하는 관계 시스템이 존재한다. 이 시스템은 위험시설의 상태를 모니터링하며, 위험 시 비상대응 시스템과 연동하여 위험 시설을 제어함으로써 안전관리를 유지한다. 기존 대기확산 시스템을 개선하기 위한 방법으로 본 논문은 관계시스템과 연동되어 비상 대응을 효율적으로 수행하고 사용자의 간섭을 최소화할 수 있는 실시간 대기확산 시스템을 (그림 4)와 같이 설계하였다.



(그림 4) 실시간 대기확산 시스템 설계 개략도

센싱 모듈은 실제 위험시설에서 수집되는 위험 인자 데이터(압력, 온도 등)를 수집하고 확산 모듈에 전달하거나 데이터베이스에 저장한다. 시설 및 대기 정보 모듈은 미리 저장된 시설 정보(크기, 직경 등)와 실시간으로 수집되는 대기정보(풍향, 풍속 등)를 데이터베이스에 저장하거나 확산모델에 전달한다. 확산 모듈은 (그림 4)에서 점선 화살표로 표시된 세부 요소로 구성되며 실시간으로 수집되는 데이터를 이용하기 때문에 가상의 사고경우(scenario)를 생성하는 시나리오 컴포넌트를 제거함으로써 기존 대기확산 시스템과 차별화하였다. 특히, 시나리오 컴포넌트에서 구멍 크기(size) 등 누출원인의 크기를 분류하던 과정을 없애고 시설 별 최악의 경우(worst case)로 확산 모듈을 구동하였다. GIS 모듈과 GIS 엔진은 표현 컴포넌트에서 담당했던 농도 표시를 GIS 맵과 연동하여 실시간으로 시설과 농도를 동시에 화면에 그려주며 에너지 플랜트의 관계 시스템과 상호 연동된다.

6. 결론 및 향후계획

본 논문은 에너지 플랜트 환경에서 특수성과 효율성 강화하여 대상시설 구동 중에 사용 가능한 독성가스누출에 대한 대기확산 시스템의 연구를 수행하였다.

첫 번째로, 신속하고 효율적인 대기확산의 모델을 누출 유해물질 무게에 따라 가우시안 모델과 SLAB 모델을 구분하고 누출 시간형태에 연속누출과 순간 누출을 분류함에 따라 신속하고 효율적인 대기확산 모델을 선정 및 정의하였다.

두 번째로, 대기확산 시스템의 구성요소를 물질, 시설, 시나리오, 소스, 대기확산 및 표현 컴포넌트로 독립적이면서 상호운용적으로 설계하였으며 가우시안 모델과 SLAB 모델이 포함된 시뮬레이션 기반 대기확산 시스템을 구현하여 에너지 플랜트 환경에서의 한계점을 도출하였다.

마지막으로, 기존의 대기확산 시스템의 한계점을 극복하기 위하여 에너지 플랜트 환경에 계장기기(센싱 포함), 관계시스템 및 비상 대응 체계와 맞물려 구동할 수 있는 실시간 대기확산 시스템을 설계하여 수동적인 시스템을 능동적 시스템으로 개선하였다.

향후계획으로는 모바일 비상대응 및 비상전파 체계와 맞물려 구동하는 실시간 대기확산 시스템을 확장 구현할 예정이다.

참고문헌

- [1] 김철희 외 8인, “유해화학물질 대기확산 예측을 위한 RAMS 기상모델의 적용 및 평가”, 한국대기환경학회, 19권, 5호, pp.595-610, 2003.
- [2] 김구희, 오영석, 장태석, 윤인섭, “유해물질 저장시설의 누출사고에 따른 인근지역에 대한 안전영향평가”, 한국화학공학회 학술발표회 논문집: 화학공학의 이론과 응용, 2권, 2호, pp.3067-3070, 1996.
- [3] 유정아 외 14인, “유해화학물질 사고시 활용되는 초기 확산모델(SLAB)의 기상 민감도 수치실험”, 한국대기환경학회 춘계학술대회 논문집, pp.101-102, 2006.
- [4] M. I. Moussa and T. Eid, “Risk Management for Chlorine Producing Factory in Egypt”, Australian Journal of Basic and Applied Science, Vol. 1, No. 3, pp. 239-248, 2007.
- [5] 최종근 외 6인, “실시간 대기 확산 모델링 시스템”, 한국멀티미디어 학회 춘계학술발표 논문집, pp. 537-540, 2001.
- [6] A. Daniel and J. F. Louvar “Chemical Risk Analysis : Fundamentals with Applications”, Prentice Hall, 1990.