

주요 누출사고 예측 모델의 사용 특성 비교

Usage Characteristics of Publicly-Available Accidental Release Models

정 수 희¹⁾ · 윤 도 영²⁾ · 김 영 성

한국과학기술연구원 환경연구센터

¹⁾LG 종합기술원 환경연구소, ²⁾광운대학교 화학공학과

(1999년 4월 6일 접수, 1999년 7월 17일 채택)

Soo-Hee Jung¹⁾, Do Young Yoon²⁾ and Young Sung Ghim

Environment Research Center, Korea Institute of Science and Technology

¹⁾*R&D Center for Safety, Health & Environment, LG Corporate Institute of Technology*

²⁾*Department of Chemical Engineering, Kwangwoon University*

(Received 6 April 1999; accepted 17 July 1999)

Abstract

Characteristics of four publicly-available accidental release models, ALOHA, SLAB, HGSYSTEM, and DEGADIS, are compared. These models are world-widely used and recently recommended by the Chemical Dispersion and Consequence Assessment (CDCA) Working Group of the United States as models applicable to generally broad safety-basis documentation applications. Four release scenarios are assumed by referring to the usage and storage conditions of toxic substances in the field as well as the USEPA model guideline (1993). Sensitivity of impact radius by varying meteorological conditions is tested in typical and worst-case meteorological conditions. The results show that ALOHA generally gives conservative estimates and the results from HGSYSTEM are sensitive to variations in meteorological conditions.

Key words : vapor cloud dispersion, commonly-used models, release scenario, meteorological conditions

1. 서 론

누출원으로부터 유해물질이 누출되어 주변으로 확산되어 가는 과정은 보통 3단계로 구분하여 생각할 수 있다. 첫째는 누출원을 중심으로 한 변화이다. 가압이나 냉장 상태의 기체가 누출된다거나, 유독 액체가 누출되어 못을 형성한 후 휘발되는 등의 변화가 이에 해당되며, 다양한 변화가 가능한 만큼 변수도 많다(Moser, 1996). 누출사고의 복잡함을 이야기할 때 이 단계의 변화를 말하는 경우가 많고

누출사고 예측모델을 통하여서 이 단계의 변화를 손쉽게 처리할 수 있기를 기대하기도 하나, 대표적인 몇몇을 제외하고는 일반 원칙보다 개별 사례별로 취급하여야 하는 경우가 많고, 일부 모델에는 이 과정이 포함되어 있지 않기도 하다. 둘째는 직접 배출되었던 액체로부터 휘발되었든 유독 기체군이 형성되어 이동하는 현상이다. 소위 증기운(vapor cloud) 형태의 이동을 지칭하며, 기체군의 위치에너지가 대기의 운동에너지보다 클 때 기체군은 주위 공기와 섞이는 대신 자체 에너지에 의하여 수평으로 이동한다(AIChE/CCPS, 1996). 누출확산 모델이란 이와

같은 증기운 이동을 다룬 모델인데, 첫 단계보다는 덜하나 누출원에서의 변화가 여전히 중요하고 물질별 양상도 달라 아직 임기 응변식의 대응이 적지 않다. 증기운이 이동하며 점차 주변 대기와 혼합되면 농도가 낮아지고 결국에는 대기와 함께 이동하는 수동 확산의 단계에 이르게 된다. 위해성을 제외하고는 물질의 화학적 특성은 더 이상 중요하지 않으며, 지형이나 기상 조건이 복잡한 경우 외에는 일반적인 확산모델을 통하여서도 상당히 근사한 결과를 얻을 수 있다(USEPA, 1986 and ff.).

유해물질의 누출은 확산에 의하여 인근 주민이나 환경에 위해를 주거나 가연성 물질의 경우 폭발이나 화재로 이어질 수 있다. 폭발이나 화재는 물론 유독물질의 확산도 대형 사고가 아닌 이상 증기운 이동이나 최소한 증기운 이동의 효과가 중요한 수동 확산 단계에서 대부분 위해성을 상실하게 되므로 누출사고의 주요 관심은 아무래도 증기운 이동이다. 그러나 사고의 규모가 커지면 누출원 주변의 변화보다 수동 확산이 중요하게 되는데, 우리나라에서는 수 km 이내에 산지나 해안선이 위치하는 것이 보통이므로 누출 사고와 같이 정확한 예측이 요구될 때에는 일반적인 확산모델로는 충분치 못하여 기상모델을 포함한 수치모델이 필요할 수 있다(김영성과 오현선, 1999; 오현선과 김영성, 1999).

표 1은 AICHe/CCPS에서 조사한 1995년 4월 현재 공용 및 상용모델이다. 보편적으로 상용모델이 공용모델보다 사용이 편리하고 화학자료가 풍부한 반면 값이 비싸고 모델의 상세한 내용을 공개하지 않는 경우가 많다. 공용 모델의 일부는 웹사이트에서 다운로드 받을 수 있다. 모델은 주로 분석 및 평가를 위하여 이용되거나 현장의 설비와 온라인으로

연결하여 실시간 사고 대응에 이용하고자 시도할 수도 있으며 공용 모델 중에서는 ALOHA가 응답이 빨라 이와 같은 목적으로 활용될 수 있다(모델에 대한 상세한 설명은 이어지는 모델 설명 참조).

대상이 다양하고 복잡한 만큼 누출사고 모델들의 특성 역시 차이가 많다. 미국에서도 규제(regulatory) 목적으로는 최근 사고 조건을 아주 단순화한 최악의 시나리오에 대한 지침을 마련하였을 뿐(김영성 등, 1998) 수동확산 모델 지침에 상응할 만한 상세한 지침이 준비되지 않아 동일한 사고에 대하여서도 접근 방법에 따라 결과가 다를 수 있다. 본 연구는 국내외에서 인지도가 높은 ALOHA, DEGADIS, HGSYSTEM, SLAB 등 4개 모델을 현장 조건을 토대로 작성한 시나리오에 적용함으로써 모델별 특성을 비교하기 위한 것이다. 본 연구의 비교는 모델 검증에 위하여 모델 결과를 현장실험과 비교하였던 Hanna 등(1993)이나 Touma 등(1995)과는 다른 목적의 비교 연구로, 실제 사고 상황에서 모델 이용이 어떠한 차이가 있는지, 결과는 어떠한 변화를 보이는가를 살펴본, 실질적 활용 측면의 비교 연구이다. 본 연구에서 선택한 ALOHA 등 4개 모델은 최근 미국 에너지성 주관의, 화학물질 확산 및 피해 평가를 위한 실무 위원회에서 가장 보편적으로 이용이 가능한 것으로 선정된 모델이기도 하다(Lazaro *et al.*, 1997).

2. 모델설명

2.1 ALOHA

ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres; USEPA *et al.*, 1995)는 가우시안 형태의 수동

Table 1. Listing of accidental release models.^a

Public-ALOHA ^b (HMRAD/NOAA), DEGADIS ^c (Univ. Arkansas), DRIFT(AEA Tech., UK), FEM3C(LLNL), PLM89A(LMES), HGSYSTEM(Shell Labs, UK), SCIPUFF(DNA), SLAB ^c (LLNL), TSCREEN ^c (USEPA), VDI(Univ. Hamburg, Germany)
Proprietary-AIRTOX(ENSR), AQPAC ^d (AES, Canada), CANARY(Quest), CHARM ^b (Radian), CHEM-MIDAS ^b (PLG), GASTAR(CERC), HOTMAC/RAPTAD ^b (YSA), PHAST(DNV Technica), SADENZ/SACRUNCH/SAPLUME(SAIC), SAFEMODE(TMS), SuperChems Expert(ADL), TRACE(SAFER)

^a Mostly from the list surveyed by AICHe/CCPS(1996). Institutions in the parentheses indicate developers or contact agencies. Institutions without a country are located in U.S.A.

^b Real-time models that can be connected to the on-line response systems.

^c Can be downloaded from the EPA web site with URL <http://www.epa.gov/scram001/>. According to AICHe/CCPS(1996), HGSYSTEM could be downloaded from the EPA web site, but currently is not available.

^d Classified as a proprietary model according to the recently surveyed results(Lazaro *et al.*, 1997).

확산과 증기운 확산을 모사할 수 있는 모델이다. GUI(graphical user interface)를 이용한 PC용 모델로서, 윈도우에서 순차적으로 자료를 입력하며 결과는 화면상에 그래프로 보여준다. 모델은 'chemical', 'site data', 'atmospheric', 'source', 'computational'이라는 5개의 입력 모듈로 구성되어 있다. 누출 형태는 'source' 모듈에서 지정하며, 못으로부터 휘발, 저장조로부터 기·액상 누출, 파열된 파이프에서의 가스누출 등을 설정할 수 있다. 그러나 만약 사용자가 누출량을 알고 있으면 누출형태를 지정할 필요가 없으며, 가스의 온도, 누출 시간 등과 같은 인자와 함께 별도로 입력할 수 있다. 자료를 입력하는 과정에 물리화학적 오류가 있으면 즉시 여러 메시지가 나타난다. 응답이 빠르므로 실시간 기상 자료를 받을 수 있으면 온라인으로 응급조치에 이용될 수 있다. 기본적으로 900여종의 화학물질에 대한 물리·화학적 자료 DB를 갖추고 있으며, 필요하다면 외부에서 물성을 수정하거나 새로 만들 수 있다.

모델 결과는 'text summary'와 'footprint' 플롯, 그리고 농도의 시간 변화 등으로 표현할 수 있다. CAMEO 또는 MARPLOT 등과 연결하여 사고분석 결과를 DB화하거나 지역적 특성을 함께 그림으로 나타낼 수 있다. 일정 착지점의 농도와 그 농도에 도달할 때까지의 시간을 알 수 있고, 인체나 환경에 위해한 한계 농도를 지정하여 피해 영역을 계산할 수 있다. 그러나 3차원 농도 분포나 여러 착지점에서의 농도를 동시에 알 수 없고, 화학 반응을 모사할 수 없다. 누출 압력은 2기압 이상만 지정할 수 있는데, 기상누출의 경우 choked 흐름만을 취급할 수 있음을 보여준다. 전반적으로 정확도가 떨어진다고 알려져 있으나 수용할 만하다.

2.2 SLAB

SLAB은 대기보다 무거운 누출물의 대기 중 확산을 모사하는 모델이다(Ermak, 1990). 지면에서 액상 증발, 수평·수직 분사, 순간 누출을 취급할 수 있다. 액상 증발을 제외한 나머지 누출은 분무를 지정할 수도 있다. 입력 모듈은 크게 4가지로 구분할 수 있는데, (1) 누출 형태와 모사 범위, 농도 계산 등을 지정하는 모델링 변수, (2) 누출물의 초기상태, 누출속도, 누출 지속시간, 평균화 시간 등을 지정하는 'spill parameters', (3) 물성치를 위한 'source pro-

perties', (4) 기상 조건을 위한 'meteorological parameters' 들이다. 모델 결과에는 입력 자료와, 지역 평균 농도, 시간 평균 농도, 플룸 중심선의 고도, 지정 고도에서의 농도 등이 포함된다. 자료 입력을 간편하게 하고 그래픽 결과를 제공할 수 있는 윈도우 버전도 유통되고 있으며, 이에 화학물질을 위한 DB가 제공되기도 한다. 그러나 별도의 누출 모듈이 없으므로 누출 속도 등 관련 자료를 입력하여야 하고, 필요하다면 액상 분율도 지정하여야 한다.

2.3 HGSYSTEM

HGSYSTEM은 상세한 사고 내용을 다룰 수 있는 전문용의 정밀 모델이다(Post, 1994). 누출 모듈에서 설정된 누출과 기상조건이 입력자료로 활용되며, 30개 화학물질의 물성치는 DATAPROP 모듈에서 제공된다. 누출 모듈, 근거리 확산모듈, 원거리 확산모듈이 누출 시나리오에 따라 유기적으로 연결되어 전반적인 누출/확산 현상을 결정한다. 누출 모듈에는 가압탱크에서 액체 누출을 해석하기 위한 SPILL과 상압 탱크에서 배출된 액체의 기화현상을 위한 LPOOL이 있다. 근거리 확산모듈은 거센 분사를 위한 AEROPLUME과 무거운 기체의 순간 배출을 취급하기 위한 HEGABOX로 구성된다. 원거리 확산모듈은 무거운 기체 확산을 위한 HEGADAS와 가우시안 플룸 확산을 위한 PGPLUME으로 구성된다. 개개의 모듈은 독립적으로 이용될 수 있고, 연속적으로 이용할 때에도 자료가 자동으로 연결되지 않는 부분은 개별적으로 입력하여야 한다.

반응성이 있는 HF에 대하여 전용 모듈이 있다는 것이 가장 큰 특징의 하나이다. DATAPROP에 포함되지 않는 물질의 열역학적인 자료들은 직접 입력하여야 한다. 누출원 관련 자료로서 탱크 내부의 압력 및 온도, 총저장량, 누출 지역, 누출구의 크기들을 지정하여야 한다. 기상자료로는 대기온도, 측정높이, 압력, 풍속, 대기안정도, 표면 거칠기가 필요하다. 3차원 농도분포를 제공하는 등 계산 결과는 매우 정밀하다. 그러나 DOS 용으로 사용이 다소 불편하고 입력자료를 지정하기 위하여서는 상당한 전문적 지식이 필요하다.

2.4 DEGADIS

DEGADIS는 기체와 분무, 연속 누출과 순간 누

출, 누출 속도의 변화, 그리고 저속 분산과 부력을 가진 분사와 같은 다양한 누출문제에 적용될 수 있다(Spicer and Havens, 1989). 입력자료로써 누출 속도, 누출면적과 시간, 화학물의 특성, 굴뚝인자, 그리고 기상자료가 필요하고, 착지점에 대하여서는 평균화 시간, 착지점의 높이, 누출원과 착지점간의 거리를 지정하여야 한다. 결과로는 풍하거리에 따른 플룸의 중심선 높이, 농도, 온도와 함께, 지정된 지점의 확산계수, 그리고 누출기간 동안의 농도 변화를 보여준다. 그러나 2상 누출의 대표적 형태인 분무의 경우, 사용자는 분무의 밀도를 직접 결정하여야 한다. 또한 화학물질의 물성 자료가 6종에 불과하고, 기본적으로 확산에 대한 상당한 지식이 필요하다. SLAB과 같이 별도의 누출 모듈이 없어 누출 속도 등을 지정하여야 하고, 기본적으로 DOS용이나 윈도우 버전이 유통되고 있다.

3. 누출사고 시나리오

누출 사고에서 초기 누출형태는 저장 조건과 누출 위치에 따라 액상, 기상 혹은 액상과 기상의 혼합 등 다양한 변화가 가능하다. 본 연구에서는 우리나라 실제 현장에서의 유독물질 사용과 이들의 저장 조건, 그리고 USEPA (1993)의 모델 사용 지침들을 참고하여 다음과 같은 4가지 시나리오를 가정하였다.

3.1 사례 1(고압 염화수소 누출)

4 인치 관을 통하여 포화상태의 염화수소 가스가 저장조에서 공정으로 이송되고 있다. 이송관은 지상으로부터 3.66m의 관보호대에 지탱되어 있고, 관 내부의 온도와 압력은 25°C, 5.67 기압이다. 관 연결부에 직경 1/2 인치 상당의 파열이 생겨 누출이 일어나고 있다. 염화수소는 관의 흐름이 수동으로 정지될 때까지 계속 누출되며, 소요 시간은 약 10분이다. 누출되는 동안 관 내부의 온도와 압력은 일정하다. 누출 당시 4.6m에서 측정된 기상 조건은, 풍속 5.4m/s, 기온 14°C, 상대습도 62%, 대기안정도 C 등이다.

3.2 사례 2(고압 염소가스 누출)

VCM 원료로 사용되는 염소가 470 kg 용량의 고

압 상온 저장고에 액상으로 저장되어 있다. 평상시 저장 압력은 8.67 기압이고, 저장고는 축방향이 수평인 직경 0.5 m, 길이 1.7 m인 원통 모양이다. 염소는 증기압(6.86 기압)으로 인하여 저장고 하단 밸브에 연결된 길이 1 m, 직경 1.5 인치 관을 통하여 공급부 상단으로 공급된다. 관은 지상으로부터 2.6 m에 위치하고 있는데, 일상적인 관리 중에도 공급부 상단에서 부서지는 사고가 종종 발생된다. 이번 사고에서는 저장탱크에 354 kg의 염소가 액상으로 보관되어 있었다. 액체 염소가 누출되면 압력이 낮아지기 때문에 액체 염소는 관 내부에서 순간적으로 단열 기화된다. 이로 인하여 누출은 2상 흐름이 되고, 염소는 완전히 발달된 2상 흐름 상태에서 수평적으로 누출된다. 2상 누출은 저장고 내 액체 수위가 출구의 관 수위에 도달할 때까지 진행된다. 이 수위에서 저장탱크에는 100 kg의 액체 염소가 남게 되고, 이후 액체 염소는 기화되어 누출된다. 누출 당시 10 m 높이에서 측정된 기상 조건은, 풍속 4.5 m/s, 기온 20°C, 상대습도 50%, 대기안정도 C 등이다.

3.3 사례 3(염산 누출)

상온의 탱크에 무게비 30%인 염산이 저장되어 있다. 탱크는 직경 6 m, 높이 2.4 m, 지상으로부터 4 m 높이에 있으며, 내부의 염산 수위는 60%이다. 탱크 하단에 2.5 인치 배관 연결자가 부서져, 지상으로부터 4.25 m 높이에 직경 1 인치인 구멍이 발생하였다. 탱크 주변에는 저장량을 충분히 포함할 수 있는 53.54 m² 크기의 제방이 설치되어 있다. 내부 수위에 의하여 무게비 30%인 염산이 누출되는데, 30% 염산의 비등점 97°C가 상온보다 높기 때문에 액체는 제방 내 못을 형성한 후 증발된다. 높이 9.1 m에서 측정된 누출 당시의 기상 조건은 풍속 3.6 m/s, 기온 25°C, 상대습도 58 %, 대기안정도 E 등이다.

3.4 사례 4(불화수소 누출)

기상의 불화수소가 저장되어 있는 수평 실린더형 탱크에 불화수소를 공급하는 도중 고압과 고온으로 파이프에 1/4 인치의 구멍이 생기는 사고가 발생하였다. 파이프는 지상에서 3.66 m 높이에 있으며 탱크의 직경과 길이는 각각 1.5 m, 5 m이고, 초기 저장 온도와 압력은 74°C, 3.0 기압, 누출 시간은 25분이다. 누출 당시 10 m 높이에서 바람은 풍속 2.2 m/s.

기온은 10°C, 상대 습도 70%, 대기안정도는 E이다.

4. 모델 비교 방법

모델의 결과로써 1 km까지의 거리별 농도와 기상 조건에 따른 영향 반경을 비교하였다. 이 때 영향 반경은 누출원으로부터 유해물질의 농도가 독성 한계치 이상인 거리를 의미하는데, 본 연구에서는 AIHA (American Industrial Hygiene Association)의 비상대응계획 지침 (Emergency Response Planning Guidelines)에서 “비가역적 혹은 기타 인체에 대한 심각한 피해로 인하여 방어적 행동을 취할 수 있는 능력을 훼손당할 수 있는” ERPG-2를 독성 한계치로 사용하였다(USEPA, 1996). 그러나 이들 값들이 60분을 기준으로 지정되었기 때문에 누출 시간이 짧은 때에는 농도 평균화 시간의 설정과 함께 곤란한 상황이 야기될 수 있다(AICHe/CCPS, 1996). 본 연구에서는 누출 시간이 60분 이하로 짧은 때에는 평균화 시간을 누출 시간과 일치시켰으며, 60분을 기준으로 한 독성 한계치는 다음 식을 이용하여 환산하였다(김영성 등, 1999).

$$C(t) = C(60) \times \left(\frac{60}{t}\right)^b \quad (1)$$

t는 독성물질에의 노출시간이며 본 연구에서는 누출시간을 의미한다. 유독 가스의 경우 지수 b는 보통 0.3~0.67 사이에서 변하나(Wilson, 1991) 본 연구에서는 0.5를 사용하였으며, 누출 시간이 15분보다 작을 때에는 t를 15분으로 지정하여 한계농도가 C(60)보다 2배 이상 커지지 않도록 하였다.

표 2는 기상 조건의 변화에 따른 모델 예측을 비교하기 위하여 사례별 기상 조건과 함께 EPA에서 규정한 최악의 기상과 전형적 기상 조건을 나타낸 것이다(40 CFR Part 68, 1996). 여기서 기상은 석유 화학단지가 위치한 여천지역을 대상으로 한 것으로, 전형적 기상 조건은 '91년부터 '95년까지 여수 기상 관측소 관측 결과를 평균한 것이다. 최악의 기상 조건은 확산이 불리한 풍속 1.5 m/s, 대기안정도 F와 함께 과거 3년간 최고 기온과 평균 습도를 이용하거나 USEPA (1996) 지침서를 따를 경우 25°C, 50%를 이용할 수 있는 것으로 규정되어 있으나 표 3에서는 '91년부터 '95년까지의 최고 기온과 함께,

Table 2. Summary of meteorological conditions used in the present study.

	Wind Speed (m/s)	Atmospheric Stability	Relative Humidity (%)	Temperature (°K)
Base Scenario 1	5.4	C	62	287.15
Case Scenario 2	4.5	C	50	293.15
Scenario 3	3.6	E	58	298.15
Scenario 4	2.2	E	70	283.15
Typical Conditions	3.9	D	68	287.35
Worst-case Conditions	1.5	F	50	309.45

Table 3. Availability of chemical data for substances employed in the present study.

	ALOHA	SLAB	HGSYSTEM	DEGADIS
HCl	◎	*		
Cl ₂	◎	*	◎	◎
30% HCl acid		*		
HF	◎	*	◎	

* Available from a window version provided by a private company (BEE-Line Software, 1997), not from original SLAB.

전형적 기상 조건과의 변화를 위하여 상대 습도를 50%로 지정하였다.

표 3은 모델별로 본 연구에서 사용한 사례 대상 화학물질의 물성 보유 여부를 조사한 것이다. 시설 업체에서 제공하는 DB에 대상 화학물질의 물성이 모두 포함되어 있을 뿐 흔한 화학물질들임에도 물성들이 제공되지 않는 경우가 적지 않음을 볼 수 있다.

5. 결과 및 고찰

5.1 사례 1(고압 염화수소 누출)

파이프로부터 고압 포화가스 누출을 가정한 사례이다. 먼저 사용상의 특징을 간단히 요약하면, ALOHA와 HGSYSTEM은 누출 모듈을 이용하여 누출을 계산할 수 있으나, SLAB과 DEGADIS는 모든 누출 자료를 결정하여 입력하여야 한다. ALOHA는 한번 입력으로써 결과를 얻을 수 있는데 비하여, HGSYSTEM은 DATAPROP을 이용하여 염화수소의 물성을 얻고 AEROPLUME을 이용하여 누출 속도와 지표면에 도달할 때까지의 근거리 확산을 계산한 후 HEGADAS로써 원거리 확산을 계산하여야

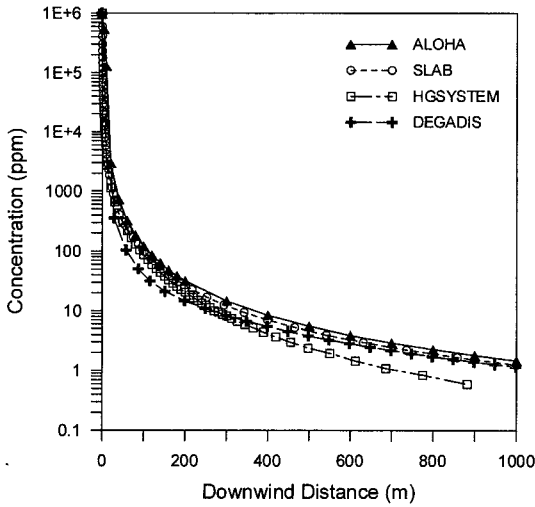


Fig. 1. Centerline concentrations as a function of downwind distance for Scenario 1 (pressurized release of HCl) base case.

한다. ALOHA와 HGSYSTEM의 누출 계산을 비교하면, HGSYSTEM은 0.19kg/s 기상 누출을, ALOHA는 0.0113kg/s 2상 누출을 예측하고 있다. 그림 1은 거리에 따른 모델별 농도 계산 결과이다. 기체 확산이 2상 물질 확산보다 원활하여 HGSYSTEM의 거리에 따른 농도 감소가 ALOHA보다 크다. 전문적인 HGSYSTEM의 누출 계산이 ALOHA보다 정확할 가능성이 높다고 생각되어 HGSYSTEM의 누출 계산 결과를 SLAB과 DEGADIS에 이용하였으나 이들의 전반적인 농도 변화는 오히려 ALOHA에 가깝다. 200 m 이내의 근거리에서 DEGADIS의 농도가 낮은 반면 원거리에서는 HGSYSTEM의 농도가 낮다.

표 4는 기상 조건에 따른 모델별 영향 반경의 계산 결과이다. 사고 당시의 기상을 이용한 영향 반경이 전형적 기상 조건에서의 영향 반경보다 작으는데, 사고 당시의 조건이 전형적 조건보다 풍속이 빠르고 대기도 불안정하여 확산이 원활한 때문이다. 사고 당시의 기상에 의한 영향 반경은 ALOHA가 가장 크고 DEGADIS가 가장 작다. 그러나 DEGADIS는 전형적 기상에서, SLAB은 최악의 기상에서 각기 영향 반경이 가장 커서 기상 조건의 변화에 민감한 반면, 2상 누출을 가정한 ALOHA은 기상 조건에 따른 변화가 작다.

Table 4. Sensitivity of impact radius by varying meteorological conditions for Scenario 1 assuming pressurized HCl release (m).^a

	ALOHA	SLAB	HGSYSTEM	DEGADIS
Base Case	177	162	146	102
Typical Conditions	272	296	278	353
Worst-case Conditions	454	1,275	1,056	907

^a ERPG-2 for HCl is 20 ppm, but the toxic endpoint of 40 ppm is applied by equation (1) since the release time is less than 15 minutes.

5. 2 사례 2(고압 염소가스 누출)

저장탱크에 연결된 파이프로부터 고압의 염소가스가 누출되는 사례이다. 누출 시간이 주어지지 않은 상태에서 ALOHA는 누출 시간을 8.14분으로 계산하였으나 HGSYSTEM은 입력 변수로 주어져야 하기 때문에 ALOHA의 누출 시간을 그대로 이용하였다. 누출 시간이 동일함에도 ALOHA에 의한 누출 속도는 0.38 kg/s로 HGSYSTEM의 누출 속도 0.52 kg/s보다 작으는데, ALOHA의 누출 모듈인 TANK는 지정온도에서 포화압력이 저장압력으로 사용되는데 비하여 HGSYSTEM에서는 저장압력을 별도로 지정할 수 있기 때문이다. 그러나 이와 같은 누출 속도의 차이에도 불구하고 확산 계산의 차이로 그림 2의 모델별 계산 결과에서는 ALOHA의 농도가 HGSYSTEM보다 높다. 역시 HGSYSTEM의 누출 계산 결과를 SLAB과 DEGADIS에 적용한 결과 ALOHA의 농도가 가장 높고, DEGADIS, SLAB, HGSYSTEM 순이다.

표 5은 기상 조건에 따른 모델별 영향 반경이다. 먼저 사고 조건에서의 영향 반경을 비교하면 ALOHA가 약 1.7 km로 가장 크고, DEGADIS, SLAB, HGSYSTEM 순이며 HGSYSTEM의 영향 반경 341 m는 ALOHA의 1/5에 불과하다. 그러나 사례 1에서와 같이 ALOHA는 기상 조건에 따른 변화가 작아 최악의 기상에서도 영향 반경이 2.3 km로 크게 증가하지 않은 반면 최악의 기상에서 HGSYSTEM은 영향 반경이 12 km에 이른다. 역시 사례 1에서와 같이 사고 당시의 기상이 전형적 기상보다 풍속이 빠르고 대기도 불안정하여 모든 모델 결과에서 사고 당시의 영향 반경이 전형적 기상 조건에서의 영향 반경보다 작다.

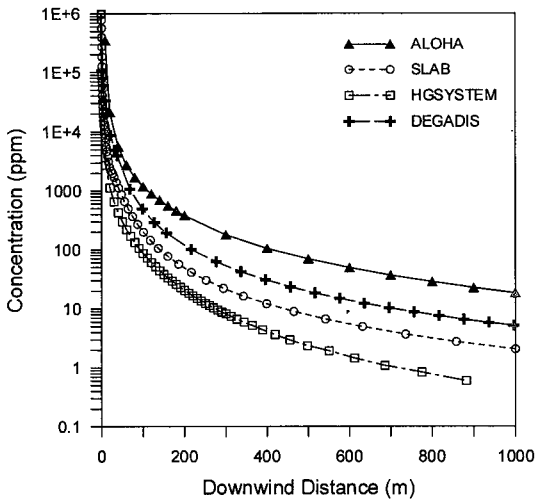


Fig. 2. Centerline concentrations as a function of downwind distance for Scenario 2 (pressurized release of Cl₂) base case.

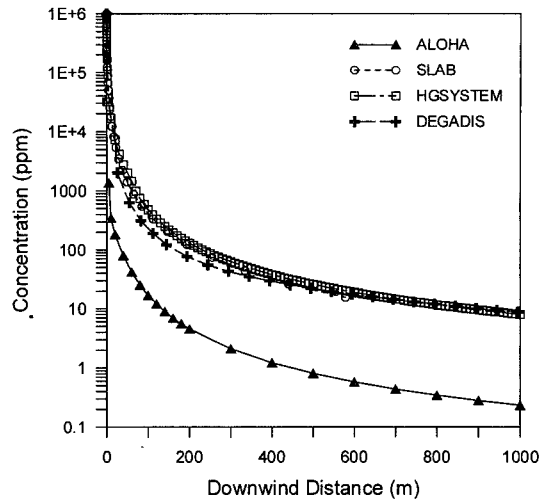


Fig. 3. Centerline concentrations as a function of downwind distance for Scenario 3 (hydrochloric acid spill) base case.

Table 5. Sensitivity of impact radius by varying meteorological conditions for Scenario 2 assuming pressurized Cl₂ release (m).^a

	ALOHA	SLAB	HGSYSTEM	DEGADIS
Base Case	1,734	573	341	918
Typical Conditions	2,178	1,161	842	1,187
Worst-case Conditions	2,300	3,564	11,872	2,110

^a ERPG-2 for Cl₂ is 3 ppm, but the toxic endpoint of 6 ppm is applied by equation (1) since the release time is less than 15 minutes.

Table 6. Sensitivity of impact radius by varying meteorological conditions for Scenario 3 assuming hydrochloric acid spill (m).^a

	ALOHA	SLAB	HGSYSTEM	DEGADIS
Base Case	92	517	581	533
Typical Conditions	34	380	272	335
Worst-case Conditions	296	- ^b	1,560	956

^a ERPG-2 for 30% HCl acid, 20 ppm is used as a toxic endpoint.

^b Fail to calculate.

5.3 사례 3(염산 누출)

휘발도가 낮은 30% 염산이 저장탱크에서 누출되어 액상 못을 이루고 그 후에 증발되어 확산되는 사례이다. 그림 3을 보면 거리에 따른 농도가 ALOHA와 여타 모델이 상당히 다른데, SLAB과 DEGADIS가 HGSYSTEM의 누출 계산 자료를 이용하였음을 감안하여도 그림 1, 2와는 다른 양상이다. 이와 같은 차이는 기본적으로 ALOHA가 탱크로부터 액상 누출을 지표면 누출로 가정하는데 비하여 HGSYSTEM은 지표면으로부터의 높이를 지정해 줄 수 있기 때문이며, 이에 따라 ALOHA의 누출량은 13.4kg으로 HGSYSTEM의 누출량 262.1 kg의 5%에 불과하다. 그림 3의 농도 변화를 보면 ALOHA의 농도가 가장 작은 것을 비롯하여, 수백 m 거리까지 차이가 크

지는 않으나 HGSYSTEM의 농도가 가장 높다.

표 6은 기상 조건에 따른 모델별 영향 반경이다. 사고 당시 기상 조건에서 ALOHA의 영향 반경이 월등하게 작고 그림 3에서 짐작할 수 있는 것과 같이 HGSYSTEM의 영향 반경이 가장 크다. 사고 당시 기상이 전형적 기상보다 풍속이 낮고 대기가 안정하며 휘발에 절대적으로 중요한 온도가 10.8°C나 높아 사례 1, 2와 달리 사고 당시 기상에 의한 영향 반경이 전형적 기상 조건에서의 영향 반경보다 2배 가량 크다. 최악의 기상은 사고 당시 기상보다도 조건이 불리하여 영향 반경이 더욱 커지며 계산에 실패한 SLAB을 제외할 때 HGSYSTEM이 기상 변화에 가장 민감하다.

5.4 사례 4(불화수소 누출)

파이프로부터 반응성 고온, 고압 가스 누출을 가정한 사례로, HF 누출을 특별히 고려할 수 있는 HGSYSTEM을 위하여 선정된 사례이다. HGSYSTEM에서 HF 누출은 HFSPILL을, 근거리 확산은 HFPLUME을, 원거리 확산은 HEGADAS을 각기 이용하였다. 사고 형태가 비교적 단순한, 파이프로부터 순수한 기상 누출로 예측됨에 따라 ALOHA와 HGSYSTEM 모두 누출 속도는 0.01 kg/s이다. 이에 따라 모든 모델이 동일한 누출 조건을 이용하게 되었고 거리에 따른 농도 변화는 그림 4에서 볼 수 있는 것과 같이 큰 차이가 없다. 거리가 400~500 m를 넘어서면서 HGSYSTEM의 농도가 높은 것은

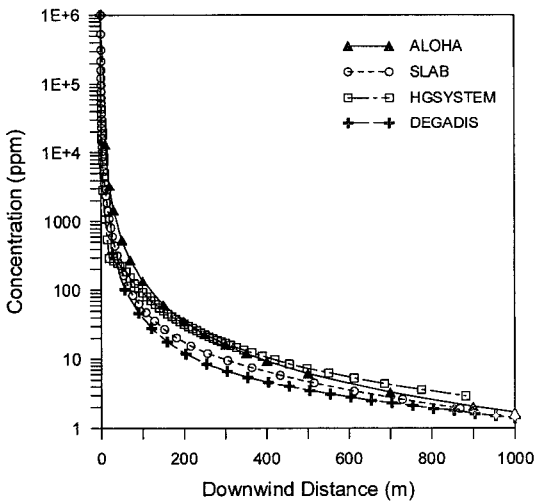


Fig. 4. Centerline concentrations as a function of downwind distance for Scenario 4 (HF release) base case.

Table 7. Sensitivity of impact radius by varying meteorological conditions for Scenario 4 assuming HF release (m).^a

	ALOHA	SLAB	HGSYSTEM	DEGADIS
Base Case	216	141	205	116
Typical Conditions	96	74	97	64
Worst-case Conditions	500	460	594	199

^a ERPG-2 for HF is 20 ppm, but the toxic endpoint of 31 ppm is applied by equation (1) considering the release time of 25 minutes.

HF가 중합으로 고분자화 되며 확산이 늦어지기 때문인데 현재의 사례에서는 차이가 크지 않다.

표 7은 기상 조건에 따른 모델별 영향 반경이다. 31 ppm의 현재 독성 한계치까지는 ALOHA의 영향 반경이 HGSYSTEM보다 크고, SLAB과 DEGADIS는 이들보다 30~40% 이상 작다. 전형적 기상이고 당시 기상 보다 풍속이 많이 높고 대기도 불안정하여 영향 반경이 훨씬 작다. 그러나 최악의 기상에서는 DEGADIS를 제외하고는 영향 반경이 사고 당시 기상에서의 반경보다 2배 이상 크고, 전형적 기상에서와 같이 그러나 훨씬 분명하게 HGSYSTEM의 영향 반경이 가장 크다.

6. 결론 및 검토

국내외에서 인지도가 높고 최근 미국 DOE 실무위원회의 모델 평가에서 보편적으로 이용이 가능한 것으로 판정한(Lazaro et al., 1997) ALOHA, SLAB, HGSYSTEM, DEGADIS 등 4개 모델을 비교하였다. 화학공장에서 흔히 일어날 수 있는 누출사고를 유형별로 나누어 사고 시나리오를 만들고 거리에 따른 농도 변화와 기상 조건에 따른 영향 반경의 변화를 조사하였다. 누출을 계산할 수 있는 모델은 ALOHA, HGSYSTEM 둘이었고, HGSYSTEM의 누출 계산이 정확하리라는 전제 아래 HGSYSTEM의 누출 계산 결과를 SLAB과 DEGADIS에 적용하였다.

염산 누출을 가정한 사례 3을 제외한 모든 사례에서 ALOHA의 영향 반경이 가장 커서 ALOHA의 예측이 상당히 보수적임을 짐작할 수 있었는데, 사례 2에서는 ALOHA를 제외한 다른 모델이 모두 누출 속도가 큰 HGSYSTEM의 결과를 이용하였고 사례 4에서는 모든 모델이 같은 누출 속도를 이용한 가운데 이와 같은 결과가 나타났다는 점에서 ALOHA의 확산 계산이 보수적인 것으로 판단되었다. 그러나 사례 3에서는 ALOHA가 지표면에서 떨어진 높은 위치의 액체 누출을 지표면 누출로 가정함에 따라 누출량이 비현실적으로 적어져 영향 반경도 작게 예측하였다.

HGSYSTEM은 누출, 근거리 확산, 원거리 확산 등 단계별 진행 과정을 별도의 모듈로써 처리하여야 한다는 점이 번거로웠으며, HGSYSTEM의 특성

을 살피기 위하여 HF를 취급한 사례 4에서 계산의 실패율이 높아 조건을 설정하기 어려울 만큼 사용이 까다로운 것도 단점으로 지적할 만하였다. 그러나 사례 3의 SLAB에서도 볼 수 있는 것과 같이 누출 사고 계산에서 모델 계산이 실패하는 것은 희귀한 일이 아니며, 사례 3에서는 SLAB이 실패하였으나 보편적으로 SLAB이나 DEGADIS는 모델 구조가 단순하여 실패 확률이 작은 모델로 알려져 있다 (장영수, 1997). HGSYSTEM은 처리 과정이 정교하여 비교 대상 4개 모델 중에서는 가장 정확한 모델로 인정되고 있으나 대부분의 사례에서 기상 조건에 따라 영향 반경이 크게 변하여 검토가 필요하였다.

ALOHA가 윈도우 버전이라든지 SLAB, DEGA-DIS들은 많은 비용을 들이지 않고 윈도우 버전 이용이 가능하다는 점도 사용자들은 고려할 만하다 (Trinity Consultants, 1998; BEE-Line Software, 1997). 소규모 업체에서 개발한 윈도우 버전은 본 연구의 SLAB에서 볼 수 있는 것과 같이 누출 사고 모델 이용에서 가장 번거로운 화학물질의 물성치를 위한 DB 제공 등 부대 기능도 제공하고 있어 모델 이용에 익숙하지 않은 사람들에게 특히 유용할 수 있다.

감 사

본 연구는 과학기술부 국책사업인 방재기술개발 사업의 일환으로 수행되었습니다. 연구비를 지원하여 주신 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

김영성, 김종수, 문길주(1998) 미국 청정대기법에 나타난 누출사고 예방과 위험관리, 화학공업과 기술, 16, 7-16.
 김영성, 윤도영, 장영수, 문길주(1999) 여천지역 누출사고 시나리오에 따른 인근지역 피해 분석, 한국대기환경학회지, 15, 151-158.
 김영성, 오현선(1999) 여천지역 대기확산의 수치모사 연구, 한국대기환경학회지(심사 중).
 오현선, 김영성(1999) 여천지역의 해륙풍 발달과 대기확산의 일변화 모사 연구, 한국대기환경학회지(심사 중).

장영수(1997) 개인 교신, Environmental Assessment Division, Argonne National Laboratory, Argonne, IL.
 40 CFR Part 68(1996) Accidental Release Prevention Requirements: Risk Management Programs Under Clean Air Act, Section 112(r)(7); List of Regulated Substances and Thresholds for Accidental Release Prevention, Stay of Effectiveness; and Accidental Release Prevention Requirements: Risk Management Programs Under Section 112(r)(7) of the Clean Air Act as Amended, Guidelines; Final Rules and Notice.
 AIChE/CCPS(1996) *Guidelines for Use of Vapor Cloud Dispersion Models*, 2nd Ed., Center for Chemical Process Safety, American Institute of Chemical Engineers, New York, NY.
 BEE-Line Software(1997) *SLAB for Windows® Manual*, Asheville, NC.
 Ermak, D.L.(1990) *User's Manual for SLAB: An Atmospheric Dispersion Model for Denser-than-Air Releases*, UCRL-MA-105607, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA.
 Hanna, S.R., J.C. Chang and D.G. Strimaitis(1993) Hazardous gas model evaluation with field observations, *Atmospheric Environment*, 27A, 2265-2285.
 Lazaro, M.A., K. Woodard, S.R. Hanna, D.J. Hesse, J.-C. Huang, J. Lewis, and C.A. Mazzola(1997) *Model Review and Evaluation for Application in DOE Safety Basis Documentation of Chemical Accidents - Modeling Guidance for Atmospheric Dispersion and Consequence Assessment*, ANL/EAD/TM-75, Environmental Assessment Division, Argonne National Laboratory, Argonne, IL.
 Moser, J.H.(1996) *A Guidance Manual for Modeling Hypothetical Accidental Releases to the Atmosphere*, Health and Environmental Sciences Department, American Petroleum Institute, Publication Number 4628, Washington, D.C.
 Post, L.(Ed.)(1994) *HGSYSTEM 3.0-Technical Reference Manual*; Post, L.(1994) *HGSYSTEM 3.0-User's Manual*, Shell Research, Thornton, Chester, U.K.
 Spicer, T. and J. Havens(1989) *User's Guide for the DEGADIS 2.1: Dense Gas Dispersion Model*, EPA-450/4-89-019, Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC.
 Touma, J.S., W.M. Cox, H. Thistle and I.G. Zapert(1995) Performance evaluation of dense gas dispersion models, *J. Appl. Meteorol.*, 34, 603-615.

- Trinity Consultants Inc. (1998) Breeze Haz for Windows, URL <http://www.trinityconsultants.com/>.
- U.S. Environmental Protection Agency (1986 and ff.) *Guideline on Air Quality Models (Revised)*, EPA-450/2-78-027R, Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC.
- U.S. Environmental Protection Agency (1993) *Guidance on the Application of Refined Dispersion Models to Hazardous/Toxic Air Pollutants Releases*, EPA-454/R-93-002, Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC.
- U.S. Environmental Protection Agency (1996) *RMP Offsite Consequency Analysis Guidance*.
- U.S. Environmental Protection Agency, National Oceanic and Atmospheric Administration, and National Safety Council (1995) *ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres) User's Manual*, Chemical Emergency Preparedness and Prevention Office, Washington, D.C., Hazardous Materials Response and Assessment Division, Seattle, Wash.
- Wilson, D.J. (1991) Accounting for peak concentrations in atmospheric dispersion for worst case hazard assessments, *Proceedings of the International Conference and Workshop on Modeling and Mitigating the Consequences of Accidental Releases of Hazardous Materials*, May 20-24, New Orleans, La., American Institute of Chemical Engineers, New York, NY.