

위험물 취급설비 화재 사고결과 영향평가 프로그램 개발 방향 Development Direction of Fire Consequence Analysis Programs for Hazardous Materials

유재환* · 김용수** · 이영순*** · 이경봉*** · 이성우**** · 박달재*****

J.H. Yu* · Y.S. Kim** · Y.S. Lee***† · K.B. Lee*** · S.W. Lee**** · D.J. Park*****

*세명대학교 산업안전공학과 교수
**서울산업대학교 안전공학과 교수
***대원공과대학 기계설계학과 조교수
****한국소방안전협회 교육팀장
*****서울산업대학교 대학원

요 약

본 연구에서는 위험물 취급설비에 대하여 4가지 화재유형으로 나누어 사고 시나리오를 작성하였다. 그리고 작성된 시나리오를 바탕으로 SuperChems Pro., Ver., 3.1, SAFER Trace Ver., 8.2, PHAST Pro., Ver., 5.2 등 외국의 사고결과 영향평가 프로그램을 이용하여 사고결과 영향평가 프로그램의 적용 특성을 분석·평가하였으며 이들 프로그램의 분석, 적용 평가 결과 및 관련이론을 활용하여 이를 전산화할 수 있는 화재모델 및 서브모델을 선정하여 제시하였다.

ABSTRACT

In this paper, We have analyzed the application characteristics of the three different consequence programs(SuperChems Pro., PHAST Pro., and SAFER Trace) for fire models(pool fire, jet fire & flare, fireball, flash fire) based on the four possible accident scenarios. And we have proposed a development direction of fire consequence analysis models using the related theories and the results analysis of consequence programs.

Keywords : Pool Fire, Jet Fire & Flare, Fireball, Flash Fire, Consequence Analysis

1. 서 론

위험물을 사용·취급하는 설비에 대한 정확한 화재 방지 대책을 수립하고 위험물 관련 화재사고가 발생할 때 그 피해를 극소화하기 위한 적절한 비상조치계획을 수립하기 위해서는 위험물 관련 화재 사고결과 영향평가가 정밀하게 이루어져야 한다. 정확한 화재사고 영향평가를 실시하기 위해서는 화재 모델링을 적절하게 수립하여 정확한 화재사고 영향평가 프로그램이 마련되어야 한다. 다행히 외국에서는 이에 관한 연구가 수행되어 상업용 프로그램이 개발되어 활용되고 있다.¹⁾ 그러나 국내의 다양한 위험물 취급설비에 범용성의 외

국 프로그램을 그대로 활용할 경우 오차의 범위가 크고 전문가가 아니면 활용하기가 아주 어렵다. 따라서 저장·출하설비, 대형 위험물 배관, 공장의 위험공정 별로 우리 실정에 적합한 화재 사고결과 영향평가 모델 개발이 시급히 요구된다.

본 연구에서는 위험물 취급설비에 대하여 4가지 화재유형으로 나누어 사고 시나리오를 작성하였다. 그리고 작성된 시나리오를 바탕으로 SuperChems Pro., Ver., 3.1, SAFER Trace Ver., 8.2, PHAST Pro., Ver., 5.2 등 외국의 사고결과 영향평가 프로그램을 이용하여 사고결과 영향평가 프로그램의 적용 특성을 수행하였으며 이들 프로그램의 분석, 적용 평가 결과 및 관련이론을 활용하여 이를 전산화할 수 있는 화재모델 및 서브모델을 선정하여 제시하였다.

† E-mail : lysoon@duck.snut.ac.kr

2. 사고결과 영향평가 프로그램의 특성 분석

외국에서 개발하여 상용화된 사고결과 영향평가 프로그램 중 SuperChems Pro., Ver., 3.1, PHAST Pro., Ver., 5.2, SAFER Trace Ver., 8.2의 액면화재 (Pool Fire), 화구화재(Fireball), 제트화재 및 플래어(Jet Fire and Flare), 플래쉬 화재(Flash Fire)평가에 적용된 모델을 제시하면 표 1과 같다.

2.1. 액면화재에 적용된 Sub-model

액면화재에 적용된 모델은 3가지 프로그램 모두 SFRM(Solid Flame Radiation Model)이 사용되었으나 표 2에 제시한 바와 같이 서로 다른 사람 및 기관에서 제시한 액면화재의 서브모델(즉, 질량연소속도, 액면지름, 화염길이, 화염기울기, 화염방사에너지, 대기 투과도, 가시계수식)이 사용되었다.

2.2. 화구화재에 적용된 Sub-model

표 1. Fire Models used to each program

화재모델	사고결과 피해 예측 프로그램에 적용된 모델		
	SuperChems	PHAST	SAFER
액면화재	Solid Flame Model[6]	Solid Flame Model[2]	Solid Flame Model[4]
화구화재	Point Source Model[6]	Solid Flame Model[2]	Solid Flame Model[4]
제트화재 및 플래어	Point Source Model[6]	Solid Flame Model[2]	Solid Flame Model[4]
플래쉬 화재	LFL 도달거리[6]	LFL 도달거리[2]	Solid Flame Model[4]

표 2. Person or organizations proposed for formula used to pool fire of each program

Sub-model	Pool Fire		
	SuperChems	PHAST	SAFER
질량연소속도	Burgess 및 Zabetakis[3,6]	Burgess 및 Hertzberg[2]	TNO[4]
액면지름	Burgess 및 Zabetakis[3,6]	Burgess 및 Hertzberg[2]	TNO[4]
방사에너지	Haggland 및 Alger[3,6]	Mudan 및 Croce[2]	Mudan[4]
화염길이	Thomas[3,6]	Thomas[2]	Mudan 및 Lautaski[4]
화염기울기	AGA[3,6]	Johnson[2]	Mudan 및 Lautaski[4]
가시계수	Mudan[3,6]	Sparrow 및 Cess[2]	Sparrow 및 Cess[4]
대기 투과도	Elder 및 Strong[3,6]	Wayne[2]	Cook[4]

표 3. Persons proposed for formula used to fireball of each program

Sub-model	Fireball		
	SuperChems	PHAST	SAFER
최대 화구지름(m)	Fay 및 Lewis[5,6]	Pape 등[2,5]	Robert 및 Pape 등[4,5]
최대 화구높이(m)	Fay 및 Lewis[5,6]	지표면으로 가정[2,5]	Robert 및 Pape 등[4,5]
화구 최대 지속시간(s)	Fay 및 Lewis[5,6]	Pape 등[2,5]	Robert 및 Pape 등[4,5]
화염표면의 방사에너지	-	Robert 및 Hymes[2]	Mudan[4]
방사분율	Kent[3,6]	-	-
대기투과도	Elder 및 Strong[3,6]	Wayne[2]	Cook[4]
가시계수	-	Sparrow 및 Cess[2]	Howell[4]

표 4. Person or organizations proposed for formula used to jet fire & flare of each program

Sub-model	Jet Fire and Flare		
	SuperChems	PHAST	SAFER
팽창된 제트 속도	Kalghatgi[6]	Chamberlain[2,4]	Chamberlain[2,4]
화염길이	Kalghatgi[6]	Chamberlain[2,4]	Chamberlain[2,4]
구멍축과 화염축 사이의 각	Kalghatgi[6]	Chamberlain[2,4]	Chamberlain[2,4]
Frustum 상승 거리	Kalghatgi[6]	Chamberlain[2,4]	Chamberlain[2,4]
원추대 길이	Kalghatgi[6]	Chamberlain[2,4]	Chamberlain[2,4]
원추대 끝단 넓이	Kalghatgi[6]	Chamberlain[2,4]	Chamberlain[2,4]
열에너지방출속도	Kalghatgi[6]	-	-
연소에너지 분율	Kalghatgi[6]	-	-
화염방사에너지	-	Chamberlain[2]	Chamberlain[2,4]
가시계수	-	Sparrow 및 Cess[2]	Sparrow 및 Cess[4]
대기 투과도	-	Wayne[2]	Cook[4]

표 3에 나타낸 바와 같이 화구화재에서 SuperChems는 PSRM(Point Source Radiation Model)과 Fay 및 Lewis가 제시한 화구 최대 지름과 화구 최대 지속시간의 상호관계식을, PHAST 및 SAFER Trace에서는 SFRM과 Robert 및 Pape가 제시한 최대 화구 지름과 화구 최대 지속시간의 상호관계식을 사용하였으나 서로 다른 사람이 제안한 서브모델(즉, 대기 투과도, 가시계수식)이 사용되었다.

2.3. 제트화재 및 플래어에 적용된 Sub-model

표 4에 제시한 바와 같이 제트화재 및 플래어에서 SuperChems인 경우 PSRM 모델과 Kalghatai 모델, PHAST 및 SAFER Tracer에서는 SFRM 모델과 Shell 모델을 사용하였으나 서로 다른 사람이 제안한 서브모델(즉, 대기투과도, 가시계수식)이 사용되었다.

2.4. 플래쉬 화재에 적용된 Sub-model

플래쉬 화재에 대해 SuperChems 및 PHAST는 피해범위가 어떤 지역내로 제한된다고 가정하고 적절한 분산모델을 사용하여 LFL의 1/2거리 또는 LFL 거리를 산출[2,6]하는 방법을 사용하는 반면에 SAFER Trace에서 제시하는 플래쉬 화재 모델의 계산 알고리즘은 대기 분산모델로부터 얻어진 가연성 증기운을 통하여 일시적인 화염 전면을 만들고 임의의 대상물 지점에서의 복사열을 계산하는 알고리즘으로 구성[4]되어 있다.

3. 사고결과 영향분석 및 개발 방향

3.1. 사고 시나리오

본 연구에서는 다음과 같은 4가지 가상 시나리오를 바탕으로 누출사고로 인한 영향평가를 수행하였다.

3.1.1. 시나리오 1(액면화재)

길이 7.5 m, 직경 5 m인 수평 실린더형 아세톤 저장탱크 하단에서 3인치 파이프가 파열되어 아세톤이 5분 동안 질량흐름속도 11.68 kg/s로 누출되어 액면화재(undiked pool fire)가 발생하였다.

3.1.2. 시나리오 2(화구화재)

LP 가스 충전소의 기계실 주변에서 화재·폭발이 발생, 부탄 탱크로리가 복사열에 의해 가열되어 폭발하고, 곧이어 프로판 탱크로리가 3차 폭발하였다. 14880 kg을 저장하고 있는 프로판 탱크로리가 비등액체 팽창 증기폭발(Boiling Liquid Expanding Vapor Explosions)로 인해 발생된 Fireball를 가정하였다.

3.1.3. 시나리오 3(제트화재 및 플래어)

높이 18.3 m, 지름 0.5 m을 가진 플래어 스택에서 에틸렌 옥사이드(Ethylene Oxide)가 누출속도 35 kg/s로 5분 동안 연소하였다.

3.1.4. 시나리오 4(플래쉬 화재)

상부에 128 m²의 개구부를 가진 22.6×26.8×4.7(m³) 규모의 지하공간에서 20 kg/cm², 15°C에서 운전되고 있는 길이 9300 m, 직경 24inch NG 배관에 연결된 1인치 Fitting 라인이 파열되어 NG가 누출속도 1.55 kg/s

로 10분간 방출된 후 점화되어 플래쉬 화재가 발생하였다.

3.2. 시나리오별 사고결과 분석결과

3.2.1. 시나리오 1(액면화재) 평가 결과

대상물에서 받는 복사열이 1.6, 4.0, 9.5, 12.5, 25.0 KW/m²인 지점까지의 영향거리는, 그림 1에 보여지는 바와 같이 SAFER Trace는 58, 45, 35, 32, 23 m, SuperChems는 69, 52, 40, 36, 25 m, PHAST는 76, 53, 40, 37, 30 m로 나타났다. 또한 3가지 프로그램 중 가장 작은 값으로 나타난 SAFER Trace를 기준으로 영향거리의 편차를 백분율로 나타내면, 각 복사열 1.6, 4.0, 9.5, 12.5, 25.0 KW/m²에서 SuperChems인 경우 19(11 m차), 15.6(7 m차), 14.3 (5 m차), 12.5(4 m차), 8.7(2 m차)%의 편차를 나타냈으며, PHAST의 경우는

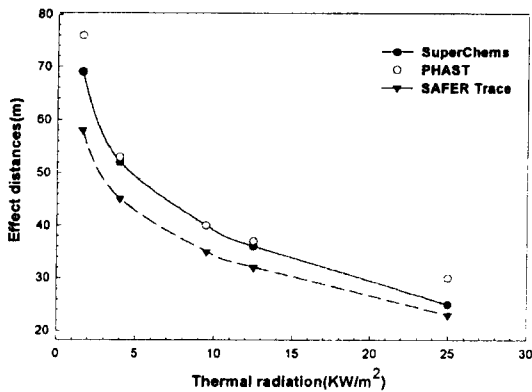


그림 1. Effect distances according to the thermal radiation criteria of each program for scenario 1(293 K, 3 m/s, and 50%).

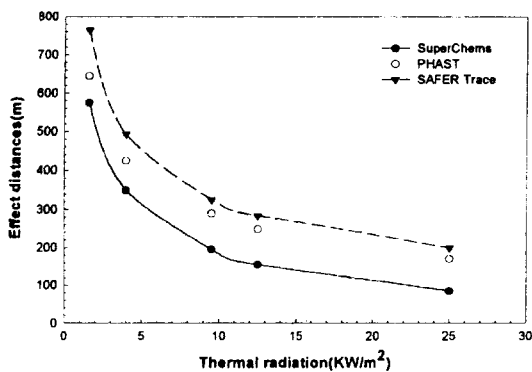


그림 2. Effect distances according to the radiation intensities of each program for scenario 2(303 K, 5 m/s, and 60%).

한국화재 · 소방학회, 제13권 제4호, 1999년

31.0(18 m차), 17.8(8 m차), 14.3 (5 m차), 15.6(5 m차), 30.4(7 m차)%로 제일 큰 값을 나타냈다.

3.2.2. 시나리오 2(화구화재) 평가 결과

World Bank에서 제시한 복사열 1.6, 4.0, 9.5, 12.5, 25.0 KW/m²에 이르는 영향거리를 평가한 결과, 그림 2에 보여지는 바와 같이 PSRM을 사용한 SuperChems에서는 574, 349, 195, 155, 84 m, SFRM을 사용한 PHAST 및 SAFER Trace에서는 645, 425, 289, 248, 170 m와 765, 493, 325, 283, 199 m로 나타났다. 3가지 프로그램 중 가장 작은 값으로 나타난 SuperChems를 기준으로 영향거리의 편차를 백분율로 나타내면, 복사열 1.6, 4.0, 9.5, 12.5, 25.0 KW/m²에 이르는 영향거리의 편차율은 PHAST인 경우 11(71 m차), 17.8 (76 m차), 32.5(94 m차), 37.5(93 m차), 50.6(86 m차)%, SAFER Trace는 33.3(191 m차), 41.3(144 m차), 66.7 (130 m차), 82.6(128 m차), 137(115 m차)%로 제일 높은 값을 보였다.

3.2.3. 시나리오 3(체트화재) 평가 결과

플래어 복사열 수준인 1.6, 4.7, 6.31, 9.5, 15.8 KW/m²에 이르는 영향거리를 평가한 결과, 그림 3에서 보여지는 바와 같이 SAFER Trace에서는 9.5, 15.8 KW/m²에서는 영향거리가 화면에 결과치가 나타나지 않았으며, PHAST에서는 6.3 KW/m² 이후로는 자료출력 모듈의 화면에 결과치가 나타나지 않았으나, SuperChems에서는 입력한 모든 복사열에 결과치가 표시되었다. 그리고 동일한 Shell 모델을 사용한 PHAST 및 SAFER Trace에서의 화염길이는 50 m로 Kaighatgi Model을 사용한 SuperChems는 45 m로 나타났다.

3.2.4. 시나리오 4(플래쉬 화재) 평가 결과

시나리오 4에서 가정한 플래쉬 화재에 대한 사고영

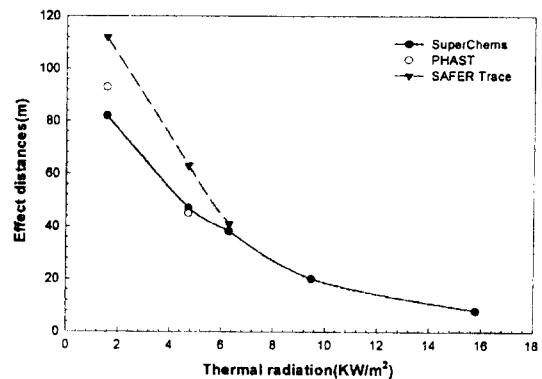


그림 3. Effect distances according to the radiation intensities of each program for scenario 3(298K, 50%, 1 m/s).

향 분석에서 SuperChems 및 PHAST의 플래쉬 화재 모델은 피해범위가 어떤 지역내로 제한된다고 가정하고 적절한 분산모델을 사용하여 LFL의 1/2거리 또는 LFL 거리를 산출하는 방법을 사용하는 반면에 SAFER Trace에서 제시하는 플래쉬 화재 모델의 계산 알고리즘은 대기 분산모델로부터 얻어진 가연성 증기운을 통하여 일시적인 화염 전면을 만들고 임의의 대상물 지점에서의 복사열을 계산하는 알고리즘으로 구성되어 복사열에 따른 피해범위를 좀 더 명확하게 계산할 수 있어 SAFER Trace로만 사고영향 평가를 수행하였다.

World Bank에서 제시한 복사열 1.6, 4.0, 9.5, 12.5, 25.0 KW/m²에 이르는 영향거리를 평가한 결과, 153.1, 103.4, 78.1, 74.3, 74.1 m로 나타났다.

3.3. 개발 방향 모델 선정(화재유형별)

화재로 인한 복사열 강도를 산정하는 방법은 크게 PSRM과 SFRM이 있다. PSRM은 화재의 열원을 하나의 점원으로 간주하는 것으로 화재로부터 먼 거리에 위치한 인체에 주는 위험을 비교적 정확히 예측한다. 화재로부터 가까운 장소에서의 복사열 강도는 화염크기, 화염모양, 화염경사도, 관찰자의 방위에 의해 크게 영향을 받기 때문에 이 모델은 가까운 장소에서의 복사열 강도를 과대 평가한다. 그러므로 위험물 저장탱크, 위험물 취급설비 화재의 영향평가에 이 모델의 사용은 제한되어야 한다. SFRM은 위험물 저장탱크, 위험물 고정설비 화재의 영향평가에 많이 사용되며, 화재 주변의 가까운 장소에서의 받는 복사열 강도를 비교적 정확히 예측할 수 있다. 그리하여 최근의 외국 프로그램에서도 주로 이 모델을 적용하고 있다. 따라서 개발 예정인 액면화재, Fireball, 제트화재 및 플래어, 플래쉬 화재에 이 모델을 적용 모델로 선정하는 것이 좋은 것으로 판단되는 바 이를 표 5에 나타내었다.

3.3.1. 화재 형태별 Sub-Model 선정

Sub-model의 선정은 가장 최근의 연구 논문에 제시된 모델, 분석 대상으로 한 3개의 상용 프로그램에서 공통적으로 사용한 모델, 가상 사고 시나리오로 검증

표 5. Models applied to fire model which will be developed

화재모델	개발 예정 프로그램에 적용 모델
액면화재	Solid Flame Radiation Model[3,4]
화구화재	Solid Flame Radiation Model[4,5]
제트화재 및 플래어	Solid Flame Radiation Model[2,4]
플래쉬 화재	Solid Flame Radiation Model[4]

결과 가장 합리적이고 정확한 평가 결과를 나타냈다고 생각되는 모델, 2개 이상의 문헌에서 권장한 모델을 중심으로 가장 합리적이라 생각되는 것을 선정하여 아래와 같이 표 6, 7, 8, 9로 선정하였다.

표 6. Sub-models which will be applied to pool fire model

Sub-Model	적용할 Sub-model 제시 기관 또는 제안자
질량 연소속도	TNO(1992)[4,6]
액면지름	TNO(1992)[4,6]
화염 방사에너지	Mudan 및 Croce(1988)[2,4,6]
화염길이	Thomas(1963), CPQRA(1989), SFPE/NFPA(1988)[2,4,6]
화염기울기	AGA(1974)[2,4,6]
화염드래그	Moorhouse(1982)[4,6]
가시계수	Mudan(1987)[3,4]
대기 투과도	Cook(1990)[3,4]

표 7. Sub-models which will be applied to fireball model

Sub-Model	적용할 Sub-model 제시 기관 또는 제안자
화구지름(m)	CCPS(1994)[4,5]
화구높이(m)	CCPS(1994)[4,5]
지속시간(s)	CCPS(1994)[4,5]
화염표면의 방사에너지	Mudan(1990)[4]
대기투과도	Cook(1990)[3,4,5]
가시계수	Howell(1982)[3,4,5]

표 8. Sub-models which will be applied to jet fire & flare model

Sub-Model	적용할 Sub-model 제시 기관 또는 제안자
팽창된 제트 속도	Chamberlain(1973)[2,4]
화염길이	Chamberlain(1973)[2,4]
구멍축과 화염축 사이의 각	Chamberlain(1973)[2,4]
Frustum 상승 거리	Chamberlain(1973)[2,4]
원추대 길이	Chamberlain(1973)[2,4]
원추대 끝단 넓이	Chamberlain(1973)[2,4]
화염방사에너지	Mudan 및 Croce(1988)[2,4]
가시계수	Mudan(1987)[3,4]
대기 투과도	Cook(1990)[3,4]

표 9. Sub-models which will be applied to flash fire model

Sub-Model	적용할 Sub-model 제시 기관 또는 제안자
화염속도	CCPS(1994)[4,5]
화염넓이	CCPS(1994)[4,5]
화염높이	CCPS(1994)[4,5]
화염방사에너지	Mudan 및 Croce(1988)[4]
가시계수	CCPS(1994)[4,5]
대기 투과도	Cook(1990)[4,5]

4. 결 론

본 연구에서는 외국의 사고결과 영향평가 프로그램 특성 분석, 이들 프로그램의 적용 평가 결과 및 관련 이론을 활용하여 우리 실정에 적합한 화재 영향평가 프로그램의 개발방향을 제시하였는데 이들 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 4가지 가상 시나리오는 산업현장에서 실제로 발생했거나 있음직한 사고로 설정한 것이며 상용 평가 프로그램을 적용한 결과 각 프로그램의 특징을 파악하는데 유용하였다.

(2) 시나리오 1에서 가정한 액면화재를 분석하기 위한 외국 프로그램은 3가지 모두 화재모델로 SFRM을 적용하였다. 이 모델은 위험물 저장탱크, 위험물 공정 설비 화재의 영향평가에 많이 사용되며, 화재 주변의 가까운 장소에서의 받는 복사열 강도를 비교적 정확히 예측한다.

그러므로 개발하고자 하는 액면화재 모델은 SFRM을 바탕으로 외국의 액면화재 세부 모델식을 이용하여 액면화재 서브 모델을 구성하였다.

(3) 시나리오 2에서 가정한 화구화재에 대한 사고결과 영향평가 프로그램 중 SuperChems는 PSRM과 Fay 및 Lewis가 제시한 화구 최대 지름과 화구 최대 지속시간의 상호관계식을, PHAST 및 SAFER Trace는 SFRM 모델과 Robert 및 Pape가 제시한 최대 화구 지름과 화구 최대 지속시간의 상호관계식을 사용하였다.

개발되는 화구화재 모델은 SFRM과 Robert 및 Pape가 제시한 최대 화구 지름과 화구 최대 지속시간의 상호관계식을 이용하여 서브 모델을 구성하였다.

(4) 시나리오 3에서 가정한 제트화재 및 플래어인 경우 SuperChems는 PSRM과 Kalghatai 모델, PHAST 및 SAFER Trace에서는 SFRM과 Shell 모델을 사용하였다. 개발되는 프로그램 중 제트화재 및 플래어 모

델은 SFRM과 Shell 모델을 사용하여 서브모델을 구성하였다.

(5) 시나리오 4에서 가정한 플래쉬 화재에 대한 평가 프로그램 중 SuperChems 및 PHAST의 플래쉬 화재 모델은 피해범위가 어떤 지역내로 제한된다고 가정하고 적절한 분산모델을 사용하여 LFL의 1/2거리 또는 LFL 거리를 산출하는 방법을 사용하는 반면에 SAFER Trace 알고리즘은 SFRM을 사용하여 대기 분산모델로부터 얻어진 가연성 증기운을 통하여 일시적인 화염 전면을 만들어 임의의 대상 지점에서의 복사열을 계산하도록 구성되어 있다.

개발되는 플래쉬 화재는 분석대상 프로그램 중 SAFER Trace가 복사열에 따른 피해범위를 좀 더 명확하게 계산할 수 있으므로 이 프로그램에서 제시하는 모델을 중심으로 서브모델을 구성하였다.

위와 같이 이들 프로그램의 분석, 적용 평가 결과 및 관련이론을 활용하여 이를 전산화할 수 있는 화재모델 및 서브모델을 선정하여 제시하였다.

감사의 글

이 논문은 1999년 한국소방안전협회의 연구지원비에 의하여 지원되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. AIChE/CCPS, "Guidelines for Use of Vapor Cloud Dispersion Models", Second Edition. AIChE, 345 East 47th Street, New York, pp. 119-125 (1996).
2. DNV Technica, "Software Solutions for Risk, Safety and Reliability", pp. 3.14-3.16 (1997).
3. Mudan, K. S. and P. A. Croce, "Fire Hazards Calculation for Large Open Hydrocarbon Fires", The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Society of Fire Protection Engineers, Boston, MA, Section 2:45-86 (1990).
4. User's Guide TRACE, Modeling Algorithms, SAFER Systems, LLC., pp. 8-41-8-42 (1996).
5. CCPS, "Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions", Flash Fires, and BLEVEs Center for Chemical Process Safety, AIChE, New York, (1994).
6. G. A. Melhem. SuperChems, "Advanced Consequence Modeling, Emission, Dispersion, Fires and Explosions", 91373-40, Arthur D. Little, Inc., pp. 397-429 (1990).