



CFD를 이용한 가연성 가스의 확산 및 폭발 Simulation

장창봉 · 이향직 · 이민호 · 민동철* · 백종배** · 고재욱*** · †권혁면
안전보건공단, *(주)UIT, **한국교통대학교 안전공학과, ***광운대학교 화학공학과
(2012년 9월 10일 투고, 2012년 10월 28일 수정, 2012년 10월 28일 채택)

CFD Simulation Study to analyze the Dispersion and Explosion of Combustible Gas

Chang-Bong Jang · Hyang-Jik Lee · Min-Ho Lee
· Dong-Chul Min* · Jong-Bae Back** · Jae Wook Ko*** · †Hyuck-Myun Kwon
Korea Occupational Safety and Health Agency
**UIT Co., Ltd*

**Dept. of Safety Engineering, Korea National University of Transportation
†,***Dept. of Chemical Engineering, Kwangwoon University
(Received September 10, 2012; Revised October 28, 2012; Accepted October 28, 2012)

요약

현재 가연성 가스의 누출시 누출된 가스의 확산과 VCE에 의한 과압을 예측하기 위해 여러 모델들이 이용되고 있다. 그러나 이 모델들은 누출설비의 지형과 장애물 그리고 건물들의 영향에 대해서는 충분히 고려하지 않은 단순한 접근방법을 이용하고 있다. 이에 본 연구는 누출된 물질의 연소형태, 설비의 Geometry, 난류, 장애물, 바람의 영향 등 여러 변수를 고려하여 보다 정확하게 분석할 수 있는 CFD(Computational Fluid Dynamics) Model을 검토함으로써 누출된 가스의 확산과정과 분포형태 그리고 폭발시 화염과 과압의 결과를 2D와 3D의 가상공간에서 제시하였다. 이러한 CFD 분석결과는 폭발에 대한 리스크 분석과 리스크 기반의 설계에 있어 유용하게 활용될 것으로 판단된다.

Abstract - Various models are currently applied to predict the dispersion of leaked combustible gas and overpressure from a vapor cloud explosion(VCE). However, those models use simple approaches where topography and barriers of anti-leakage facilities and the effects of buildings were not sufficiently taken into considerations. For this reason, this study has proposed the dispersion process of leaked gas, distribution patterns, and flames and overpressure generated from gas explosions in 2D and 3D virtual spaces by reviewing more accurately analyzable computational fluid dynamics (CFD) model by considering various variables including combustion types of leaked substances, geometry of facility, warm currents, barriers, the influence of wind, and others. The CFD analysis results are anticipated to be usefully applied for the risk analysis of explosion and for the risk-based design.

Key words : VCE(vapor cloud explosion), CFD(computational fluid dynamics), risk analysis

†교신저자:hmkwon@kosha.net

I. 서론

고압으로 저장되어 있는 탱크나 용기 또는 배관으로부터 가연성 가스가 누출될 경우 누출된 가스의 확산과 VCE(Vapor Cloud Explosion)에 의한 과압(Overpressure)을 예측하기 위해 여러 모델들이 활용되고 있다. 그러나 이러한 모델들은 지형이나 장애물 그리고 건물 등이 미치는 영향에 대해서는 고려하지 않는 단순한 접근방법들로 원거리의 경우 결과 값이 과대하고 근거리의 경우는 과소하게 계산됨에 따라 근거리의 사고결과 예측에 사용하는 것을 제한하고 있다.[1,2]

VCE 피해예측 모델 중 대표적으로 광범위하게 사용되고 있는 모델은 TNT-Equivalency Model로 폭발시 발생하는 강도를 TNT의 동일한 양으로 환산하여 계산하는 단순 계산식 모델로서 문헌에서는 이 모델을 과압이 30kPa 이하인 원 거리의 폭발영향 평가에 적용 할 것을 제안하고 있다.²⁾ 이처럼 사고결과의 영향평가에 있어서 적용모델의 제한적인 요건을 고려할 때 정량적 위험성평가를 위해서는 더욱더 정밀한 사고결과의 예측방법이 요구되고 있으며 특히, 근거리에 대한 사고결과 영향평가는 더욱더 중요하다 판단된다. 이에 본 연구는 사고결과의 영향평가지 관련 설비 및 장치의 형태와 밀집도, 누출된 물질의 연소형태, 난류, 대기상태, 장애물, 바람의 영향 등 여러 변수를 고려하여 분석되는 CFD (Computational Fluid Dynamics) 분석 방법에 대해 검토하였다.

II. CFD Simulation

2.1. Simulation Tool

최근 국외에서는 가연성 및 독성가스를 취급하는 설비와 장치들로부터 누출사고에 대한 안전성 분석을 위해 CFD Simulation 방법을 사용하는 빈도가 증가하고 있다. 이는 시간에 따른 simulation이 가능함에 따라 프로젝트에 용이하게 적용 할 수 있는 큰 이점이 있기 때문으로[3] 현재 상업적으로 사용이 가능한 CFD 모델로서는 TNO와 Centry Dynamics에서 공동 개발한 AutoReaGas와 GexCon의 FLACS (Flame Acceleration Simulator)가 대표적이거나 일반적으로 FLACS가 많이 사용되고 있으며 본 연구 또한, FLACS를 이용하였다.

FLACS는 1980년 초에 개발되어 해상과 육상의 가스관련 설비로부터 누출 사고발생시 확산 및 폭발모델링을 하는데 사용되어 왔다. 이후 많은 실험을 통해 석유화학 공정에서의 폭발 모델링에 유효한 신뢰성을 입증 받았으며 2003년 대규모의 실험을 통해 100회 이상의 simulation을 진행함으로써 QRA (Quantita-

tive Risk Assessment)의 Tool로서 높은 신뢰를 갖고 현재 활용되고 있다.[3]

2.2. Simulation Model

CFD simulation의 이해를 쉽게 하기 위해 이 연구는 복잡·다양한 화학설비나 화학공장의 장치들이 아닌 일반 사업장에 많이 설치되어 활용되고 있는 고정식 가스집합저장설비를 선정하였다. 이 설비는 현장에서 사용자가 용접을 위해 사용할 경우, 산업 안전보건법상 유해위험방지계획서의 제출대상이 되는 위험설비로 설치형태는 대부분 유사하게 제작·설치되고 있으며 제품의 도장처리 후 건조를 위한 건조로나 Steel 부품의 강도조절을 위한 열처리로 또는 용접을 위한 가스를 일시적으로 대량 저장하기 위해 일반적으로 설치·운영하고 있다.

선정된 Model의 공정은 열처리로에 열원으로 사용하기 위해 주성분(99%)이 Propane인 LPG(Liquefied Petroleum Gas)를 주변 충전소로부터 탱크로리로 운반하여 5m³의 저장탱크에 액상으로 저장하고 있다. 저장탱크의 압력은 12kgf/cm²이며 탱크의 출구로부터 Vaporizer까지의 배관압력은 6.9kgf/cm², Vaporizer에서 Burner까지의 배관압력은 2.5kgf/cm²로 가스가 이송되고 있다. 설비의 P&ID와 설치형태는 Fig. 1 및 Fig. 2와 같다.

CFD Simulation에서 Model의 Geometry는 누출된 가스의 순환지역을 계산하고 가스 흐름의 주요

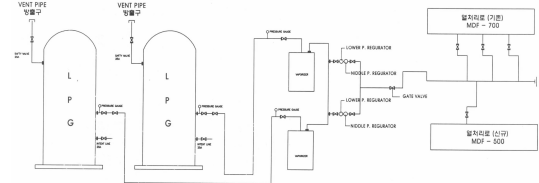
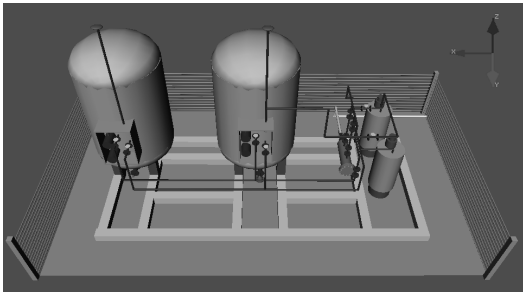


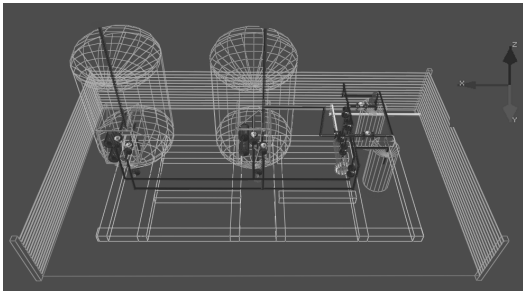
Fig. 1. P&ID of gas storage facility.



Fig. 2. The shape of gas storage facility.

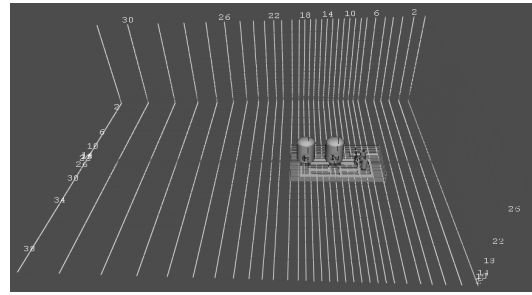


(a) Draw style filled

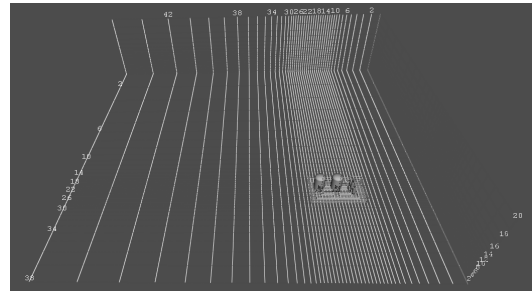


(b) Draw style wireframe

Fig. 3. Geometry of gas storage facility modelled in FLACS.



(a) Dispersion grid



(b) Explosion grid

Fig. 4. Defined grid for the simulation in FLACS.

Table 1. Physicochemical properties of propane

Properties	Value
CAS NO.	74-98-6
Molecular weight(g)	44.11
Flash point(°C)	-105(-157°F)
Boiling Point(°C)	-42(-44°F)
Combustion limit(vol.%)	2.1-9.5
Heat of combustion(kJ/mol)	2110.3
Vapor pressure(mmHg)	7150 @ 25°C
Vapor density(air=1)	1.5

패턴을 결정할 수 있기 때문에 증기운의 확산과 폭발분석에 아주 중요한 영향을 미치는 요소이다. 특히, 가스의 확산과정에 있어서 작은 크기의 Geometry는 영향을 적게 주지만 폭발의 경우에는 큰 영향을 주기 때문에 Model에 대해 상세하게 Geometry를 형성하여야 한다.¹⁾

본 연구의 Simulation을 위해 FLACS에서 제작한 Geometry의 크기는 가로(X) 9m, 세로(Y) 5m, 높이(Z) 4.2m로 Fig. 3과 같다.

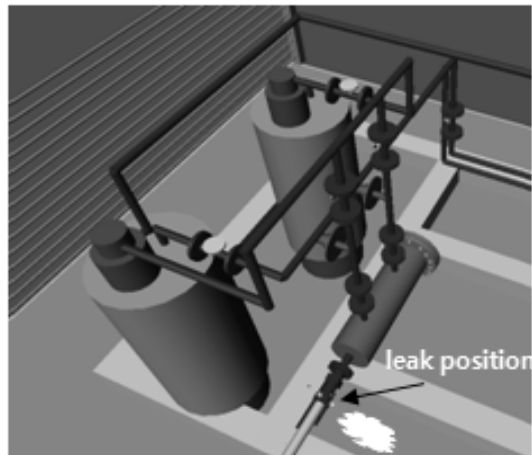


Fig. 5. Release location for the simulation in FLACS.

Fig. 3의 Geometry를 이용하여 증기운의 확산과 VCE에 대한 simulation 실시할 경우 계산 값을 정확하게 얻기 위해서는 Fig. 4와 같이 Geometry의 X, Y, Z축에 대해 Grid를 구성하고 관심 위치를 지정함으로써 세부적인 결과 값을 얻을 수 있다.

2.3. Scenario

사고 scenario는 Fig. 5와 같이 Gas header에 연결된 Gate Valve에서 가스가 누출되는 것으로 누출사고로 인한 증기운의 확산 simulation과 확산된 증기운의 VCE를 연계하여 simulation을 실시하였다. Simulation에 적용된 사고 Scenario는 Table. 2와 같다.

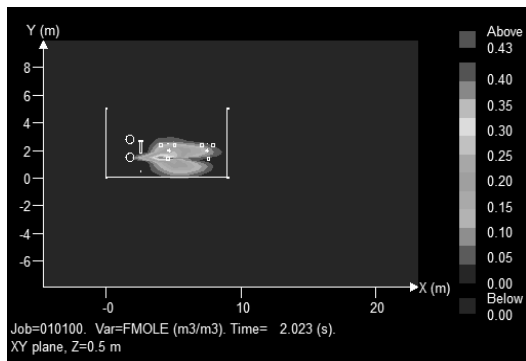
2.4. Simulation 결과

2.4.1. 확산 Simulation

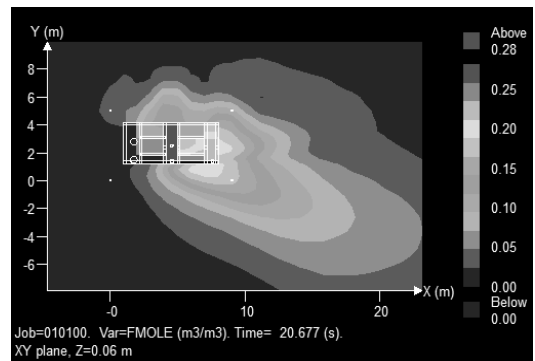
Simulation 결과, 가스누출 초기인 2초 후의 확산 형태는 Fig. 6의 (a), (b)와 같고 증기운이 가장 폭넓게 확산된 시점은 누출 후 20 ~ 28초까지로 Fig. 7의 (a), (b)에서 나타내는 바와 같다. 또한, 이시점에서 증기운의 크기는 타원형 형태로 지면으로부터 높이(z) 0.6m 지점에서 x축으로 32m (-2~30m), y축으로 18m(-11~8m)를 나타내었다. 그리고 Fig. 8의 (a)~ (d)는

Table 2. Scenario for CFD simulation using FLACS

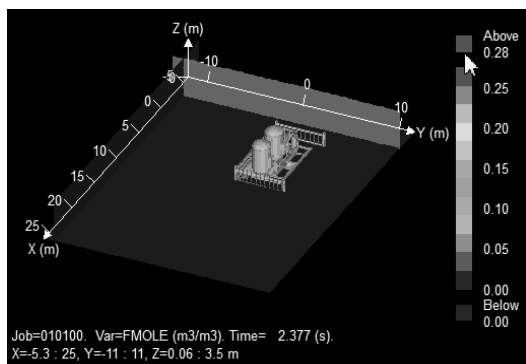
Variables	Value	Variables	Value
Leak Position	Gas Header Gate Valve	Release Duration	60s
Release Gas	PROPANE	Temperature	20°C
Release Area	0.008 m ²	Atmospheric Class	Pasquill class, B
Release Rate	2.7kg/sec	External Condition	open
Release Direction	+X	Time of Ignition	57.026s



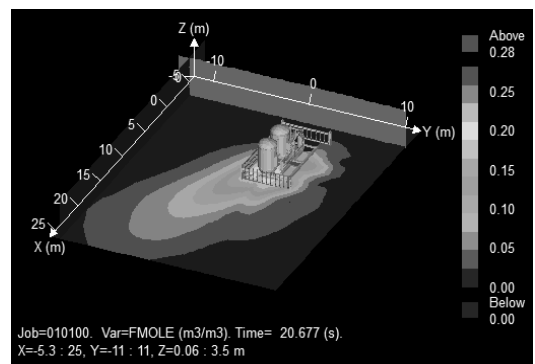
(a) 2 second - 2Dimension



(a) 20~28 second - 2D



(b) 2 second - 3Dimension



(b) 20~28 second - 3D

Fig. 6. The results after 2second of gas dispersion simulation by FLACS.

Fig. 7. The simulation results of gas dispersion during 20~28second by FLACS.

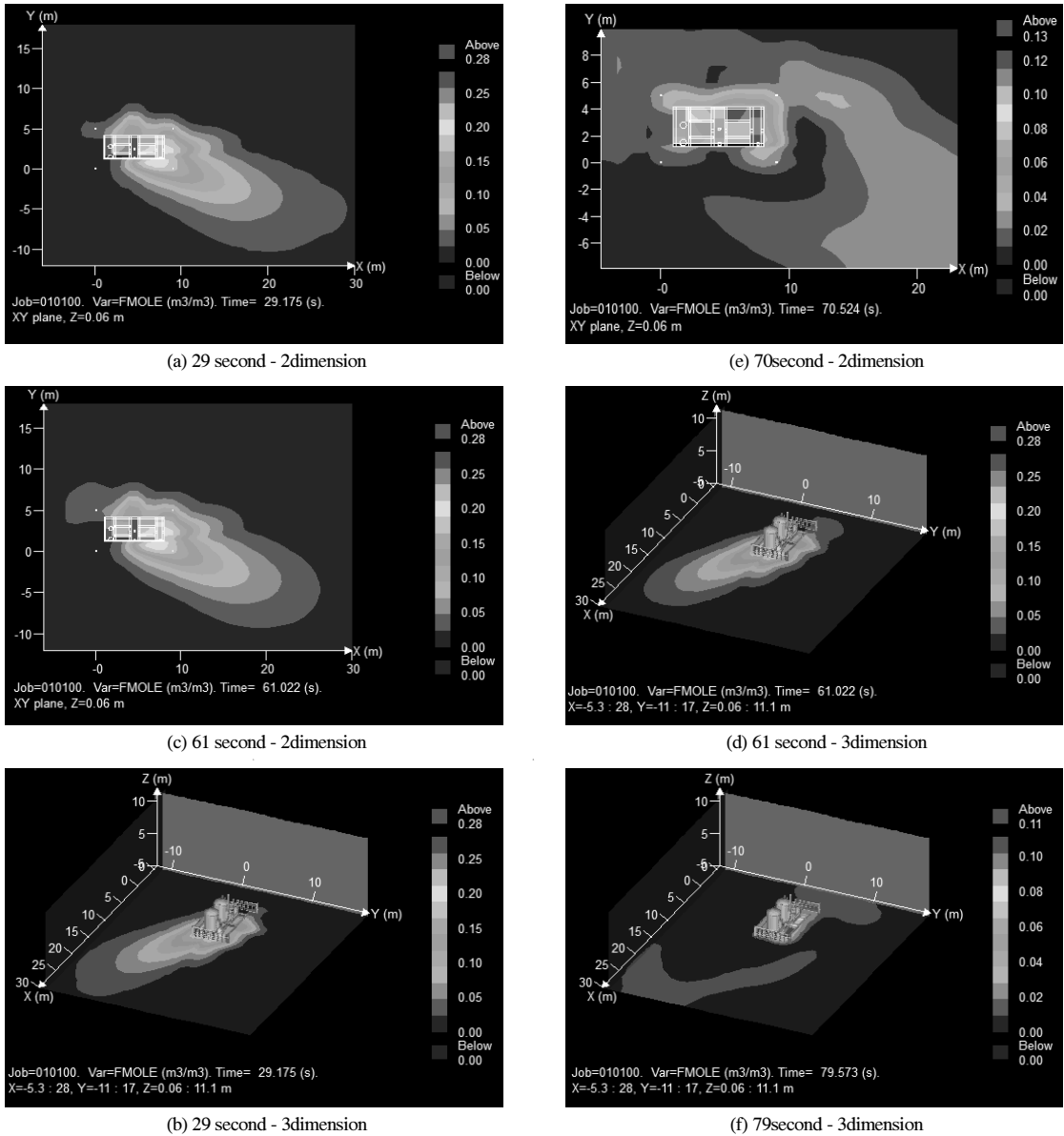


Fig. 8. The simulation results of gas dispersion during 29 ~ 70second by FLACS.

29초~ 61초까지의 확산 형태로 증기운의 크기는 큰 변함없이 평형상태를 이루었으며 이는 Propane 가스의 인화점이 -105°C 로 사고 시나리오에서 설정한 대기온도인 20°C 에 노출 되면서 Flash 되는 비율과 누출되는 가스의 비율이 평형을 이루기 때문으로 분석된다. 62초 이후부터는 Fig. 8의 (e)와 (f)에서 나타

내는 바와 같이 누출이 정지되고 Flash 비율이 증가 되면서 급격하게 증기운의 크기가 감소되었다.

2.4.2. 폭발 simulation

Fig. 9는 누출된 가스의 VCE 발생에 따른 simulation 결과를 나타는 graph로 가연성 가스의 누출시작

CFD를 이용한 가연성 가스의 확산 및 폭발 Simulation

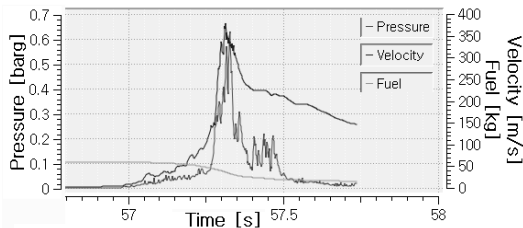
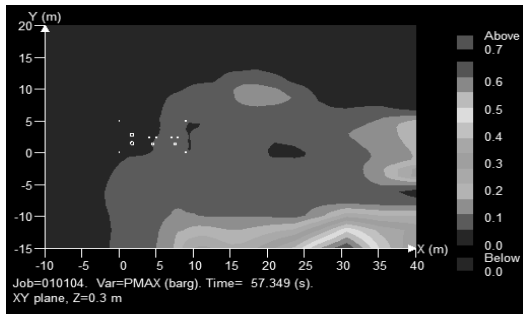


Fig. 9. Graphical representation of explosion simulation in FLACS

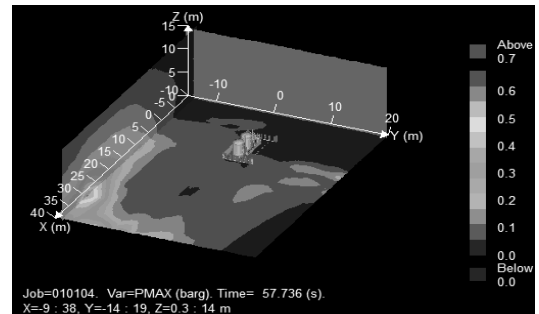
후 57.026초에서 형성된 증기운에 점화될 경우 57.35초에서 0.68barg의 최대 과압이 발생하였으며 발생지점은 높이(z) 0.3m에서 x축으로 31m, y축으로 -15m 지점으로 Fig. 10과 같다.

폭발 simulation을 통한 과압은 57~ 57.65초 사이에서 발생하였으며 폭발과압의 전개과정은 Fig. 11과 같다.

Fig. 12는 VCE 발생시 화염의 전파 과정으로 시나

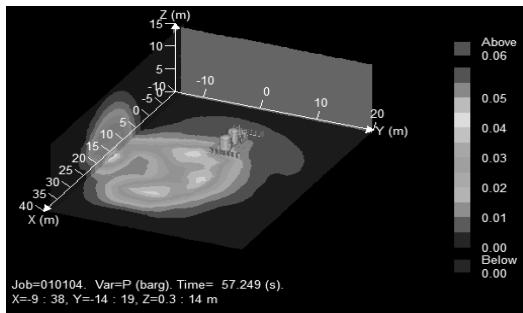


(a) 57.35second - 2dimension

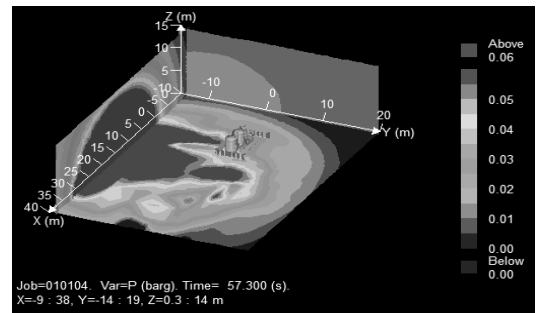


(b) 57.35second - 3dimension

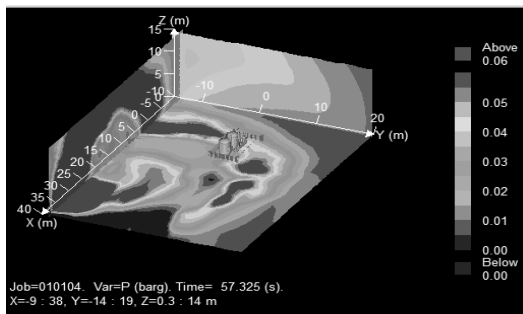
Fig. 10. P_{max}(0.68barg) results of gas explosion simulation by FLACS.



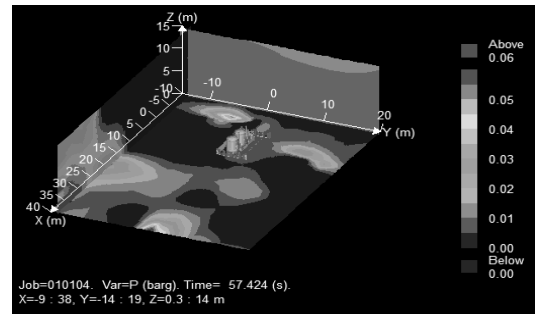
(a) 57.249second



(b) 57.300second



(c) 57.325second



(d) 57.424second

Fig. 11. 3Dimension view for overpressure propagation results of VCE simulation by FLACS.

III. 결론

이 연구는 가연성 가스를 저장하는 가스집합저장 설비로부터 가스 누출에 대한 사고결과의 영향평가를 위해 단순 계산식 모델이 아닌 CFD simulation 방법을 이용하였다. 이를 위해 일차적으로 누출된 가스의 확산 simulation을 실시하였고 여기에 VCE simulation을 연계 구동 하였으며 simulation 결과를 2D와 3D의 가상공간에서 확인하였다. 그 결과 다음과 같은 점들을 확인할 수 있었다.

- 1) FLACS는 단순 계산식 모델과는 달리 가스누출 관련설비와 장애물 등을 고려하여 2D와 3D의 가상공간에서 누출가스의 확산과정과 분포형태 그리고 폭발시 화염의 전파와 과압에 대한 분석을 할 수 있다.
- 2) FLACS에서 추가기능을 통해 위험지역내 원하는 지점에서의 가스농도와 폭발시 과압 그리고 최대과압(P_{max})과 속도벡터(vector, m/s)를 확인 할 수 있다.
- 3) 폭발효율과 연소열을 기반으로한 TNT- Equivalency Model 그리고 TNT 당량모델을 기반으로 바람과 대기상태가 포함된 PHAST의 경우와는 달리 대기상태, 바람, 누출가스의 기화율, 난류, 장애물의 위치와 밀집도 같은 여러 변수인자들이 고려되어 계산되며 2D와 3D에서의 simulation 결과를 동영상으로 확인 할 수 있다. 그러나 FLACS를 사용하기 위해서는 고비용과 전문적인 지식, 장시간의 교육이 요구될 만큼 복잡하고 다루기 쉽지 않다는 점 또한, 확인할 수 있었다. 끝으로 위에서 제시한 결과를 고려할 때 QRA(quantitative risk assessment) 적용시 FLACS와 같은 CFD simulation 방법을 이용할 경우 사고결과의 영향평가에 있어서 보다 신뢰성 있는 분석이 이루어질 것으로 판단된다.

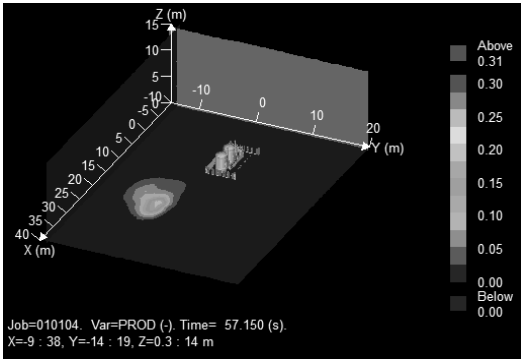
감사의 글

본 연구는 지식경제부의 에너지기술혁신 프로그램으로 지원되었으며 이 논문은 “차세대에너지안전연구단”의 연구 결과입니다.

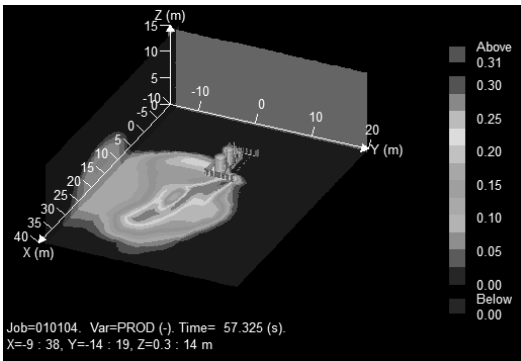
(세부과제번호 : 2010201010095C-21-1-000)

참고문헌

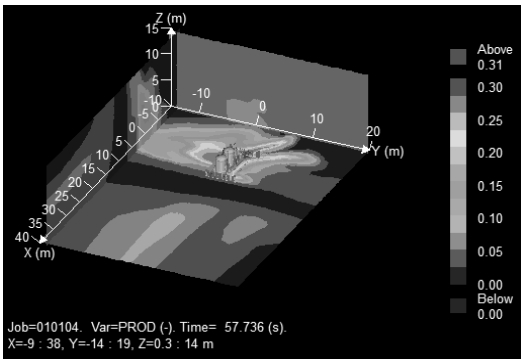
- [1] Anna Qial, Steven Zhang, "Advanced CFD modeling on vapor dispersion and vapor cloud explosion", Journal of Loss Prevention in the Process Industries", 23, 843-848,(2010)
- [2] A,C. van den Berg and A. Lannoy, "Method for



(a) 57.150second



(b) 57.325second



(c) 57.736second

Fig. 12. 3Dimension view for flame propagation results of VCE simulation by FLACS.

리오에 의한 증기운 점화시 초기상태는 (a)와 같고 화염이 가장 크게 형성되는 단계는 (b) 그리고 소멸 단계는 (c)에서 보는 바와 같다.

CFD를 이용한 가연성 가스의 확산 및 폭발 Simulation

vapour cloud explosion blast modeling", Journal of Hazardous Material, 34, 151-171 (1993)
[3] Prankul Middha, Olav R. Hansen, Idar E. Stor-

vik, "Validation of CFD-model for hydrogen dispersion", Journal of Loss Prevention in the Process Industries 22, 1034 - .1038