



신에너지 충전소의 정량적 위험성 평가를 위한 폭발 시뮬레이션

단승규 · 박경준 · 김태옥 · [†]신동일

명지대학교 화학공학과

(2011년 1월 3일 접수, 2011년 2월 26일 수정, 2011년 2월 26일 채택)

Explosion Simulations for the Quantitative Risk Analysis of New Energy Filling Stations

Seungkyu Dan · Kyungjun Park · Tae-Ok Kim · [†]Dongil Shin

Department of Chemical Engineering, Myongji University, Yongin 449-728, Korea

(Received January 3, 2011; Revised February 26, 2011; Accepted February 26, 2011)

요 약

화석연료의 고갈과 대기오염 문제의 부담을 덜어줄 수 있는 신에너지 및 재생에너지에 대한 관심이 증가하면서 현재 사용 중인 LPG 및 LNG 가스의 대체 (혼합)연료로, DME (dimethyl ether)와 수소를 혼합 (HCNG)하여 사용하는 방안이 추진되고 있다. 이와 같은 에너지원은 인화성 가스 폭발의 위험을 가지고 있기 때문에, 본 연구에서는 기존의 시설에서 이 혼합연료를 사용할 경우에 대비한 안전관리의 일환으로, 3가지 폭발피해 예측방법 (TNT 당량모델, PHAST 및 CFD기반의 FLACS)을 이용하여 정량적 위험성 평가를 실시하였다. 그리고 각 폭발모델에 의해 산출된 사고결과인 과압의 차이를 비교하였고, 폭발모델의 사용방안을 제시하였다. 그 결과, 기존의 2가지 충전소에서 신에너지 혼합연료를 사용할 경우에는 폭발에 의한 추가 피해는 없을 것으로 예상되었다.

Abstract - The interest about new and renewable energy is increasing to reduce the burden of problems by depletion of fossil fuels and air pollutions. For example, LNG/CNG and LPG are expected to be replaced, especially in transportation use, by HCNG mixture and DME-LPG mixture, respectively. Because these new energies are still flammable gases, it is not inherently safe from the explosion. In this research, the quantitative risk analysis for using alternative mixtures in existing recharging facilities has been studied by using three types of explosion models (TNT equivalency model, PHAST and CFD-based FLACS) to manage the risk effectively. The differences of results by models were compared against, and the practical ways of when and how to use these models were suggested. It was also predicted that conventional gas filling stations would be converted as new energy stations without additional explosion risk.

Key words : gas explosion simulation, DME-LPG, HCNG, CFD (computational fluid dynamics), quantitative risk analysis

1. 서 론

최근 녹색성장을 위해 오존층 파괴, 지구온난화 등 대기오염문제가 중요한 문제로 대두되면서 대기 오염에 영향을 미치는 요소 중의 하나인 화석연료의

사용에 대한 규제 강화와 동시에 대안으로 대체에너지 또는 신에너지들이 개발되고 있다. 이 중에서 차량용 연료의 경우 오염물질이 많은 휘발유와 디젤 (diesel)은 매연이 적은 LPG, 천연가스 등으로 전환되고 있고, 매장량의 한계를 극복하기 위하여 신에너지로의 대체가 진행되고 있다. 그러나 이러한 대체연료의 사용이 상용화되기까지는 많은 점검과 연

[†]주저자:dongil@mju.ac.kr

구가 필요하다. 특히, 대부분의 연료들이 인화성 가스이기 때문에 기존의 충전소 폭발사고를 고려해 보면 피해예방이 매우 중요한 요소이다.

화재와 더불어 사고의 주요 형태인 폭발피해를 예측하기 위한 방법론에 대해서는 문헌자료를 바탕으로 비교한 예들이 있으나[1-3], 실질적인 시뮬레이션 결과를 바탕으로 비교한 예는 보고된 바가 드물다. 본 논문의 2.2절에 논의되는 바와 같이 크게 경험적 모델, 현상학적 모델, 그리고 CFD (computational fluid dynamics) 기반 모델로 구분되는 폭발피해 예측 모델은 뒤로 갈수록 모델의 복잡성 증가와 더불어 시뮬레이션의 설정에 요구되는 노력 및 모사 시간도 증가하게 된다. 아울러 앞의 두 개 모델이 제공하는 정압(static pressure)에 그치지 않고, 방호설비의 효용성 검증에 요구되는 동압(dynamic pressure)을 얻기 위해서는 CFD 기반 모델의 적극적인 활용이 요구되는 시점이다.

따라서 본 연구에서는 인화성 가스인 DME(dimethyl ether)와 수소를 각각의 혼합연료로 안전한 사용을 위해 많은 제약이 있는 실제실험을 대신할 수 있는 여러 모델 중에서 가장 널리 사용되고 있는 폭발피해 예측방법을 이용하여 기존 충전소에서 신에너지 혼합물의 폭발에 대한 피해예측을 시뮬레이션 하였다. 또한 기존의 폭발모델 연구는 단순모델의 나열이나 소개 등의 내용으로, 정량적이고 구체적인 비교가 이루어지지 않았기 때문에 폭발모델 결과의 비교를 통해 폭발모델의 적용성을 검토하였다.

II. 이론적 배경

2.1. 신에너지

DME는 연소 시 연기와 오염물질을 거의 발생시키지 않으며, 소음이 없고, 수송의 편리성이 뛰어난 청정에너지이다[4]. 특히, 물리화학적 성질이 LPG와 비슷하여 기존의 LPG 시설에서 80%의 LPG와 20%의 DME를 혼합한 혼합연료를 사용하면 기존 화석연료의 사용을 줄일 수 있다. 혼합연료의 물리화학적 성질은 Table 1과 같으며, 혼합연료는 연소범위가 상대적으로 넓어서 누출사고 발생 시 화재나 폭발로 발전할 가능성이 매우 클 것으로 예상된다.

또한 수소는 지구상에서 가장 풍부한 원소로, 고효율, 무한, 청정 등의 에너지원으로서 갖추어야 할 필수조건을 만족하고[5], 탄화수소나 물로부터 생산하여 다양한 분야에 이용할 수 있다. 차량용 수소연료는 직접 이용하는 방법과 기존의 CNG (compressed natural gas)에 20%의 수소를 첨가하는 방식이 있다. HCNG (hydrogen blended compressed natural gas) 혼합연료는 CNG만을 사용한 경우와 비교하였을 때 유해한 배기가스가 줄어들기 때문에 강화되는 배기가스기준을 만족시킬 수 있을 것으로 기대되고 있다.

Table 2는 CNG, 수소 및 HCNG의 물리화학적 성질을 나타낸 것으로, HCNG 역시 누출사고 발생 시 연소범위가 넓어서 화재나 폭발로 이어질 가능성이 상대적으로 큼을 확인할 수 있다.

Table 1. Physicochemical properties of LPG, DME, and DME-LPG mixture

Fuel	Critical temperature (°C)	Critical pressure (bar)	Melting point (°C)	Boiling point (°C)	Combustion limit (%)	Heat of combustion (kJ/kg)
LPG	96.68	42.48	-187.7	-42.04	2~9.5	46000
DME	127	53.7	-141.5	-24.84	3.3~27.3	29000
DME-LPG	102.5	44.65	-178.8	-39.5	2.2~10.9	43000

Table 2. Physicochemical properties of CNG, hydrogen, and HCNG mixture

Fuel	Critical temperature (°C)	Critical pressure (bar)	Melting point (°C)	Boiling point (°C)	Combustion limit (%)	Heat of combustion (kJ/kg)
CNG	-82.1	46.4	-182.5	-164	5~15	50000
Hydrogen	-240	13	-259.1	-252.9	4.1~74.2	120000
HCNG	-113.7	39.72	-197.8	-181.8	4.8~26.8	64000

2.2. 가스폭발 사고피해 예측모델

현재 이용이 가능한 폭발사고의 피해예측 방법들은 크게 3가지 방법으로 분류될 수 있는데[3], 경험적 모델인 TNT 당량모델에 의한 방법은 단순 식에 의한 계산으로, 가스 폭발이 TNT와 같은 고성능 폭발물과 유사하다는 가정 하에 가스폭발에 의한 피크압력의 예측에 광범위하게 이용되고 있으며, 계산이 간단하고, 비교적 먼 거리에서 정확한 결과를 낼 수 있다[6]. 또한 현상학적 모델은 폭발공정의 필수적인 물리학적 개념만을 표현한 물리적 모델로, 이 중 하나인 PHAST (process hazard analysis software tool)는 실제 구조를 단순화하고, 초기온도, 압력 등을 고려하여 예측하는 방법이다. 이 방법은 계산이 빠르고, 3가지 분류 중 중간정도의 정확도를 나타낸다. 그리고 CFD기반 모델은 폭발공정을 지배하는 편미분방정식의 수치해석 결과로, 실제로 실험하기 어려운 환경에서 사고결과 및 시간에 따른 변화결과를 보다 정확하게 얻을 수 있는 장점이 있다. 특히, FLACS (flame acceleration simulator)는 3차원 CFD기반 모델로, 유체역학을 바탕으로 실제와 유사한 결과를 얻기 위해 사용되며, 얻은 결과는 분포도 또는 애니메이션을 통하여 가시적으로 확인이 가능하기 때문에 피해를 예측하는데 유용한 도구가 될 수 있다[3].

III. 신에너지 충전소의 사고 시나리오 및 폭발 시뮬레이션

3.1. 사고 시나리오

사고 시나리오로 선정한 LPG 및 CNG 충전시설의 탱크는 지상 가압식과 지하 가압식 탱크로, 저장용량은 5 ton, 온도는 25 °C, 압력은 18 atm이다. 이 조건의 충전소 탱크에서 신에너지 연료의 순간누출로 인해

가스 구름이 형성되어 VCE (vapor cloud explosion)가 발생하는 사고 시나리오와 탱크 온도의 증가로 내부 액화가스의 기화가 원인이 되어 발생할 수 있는 BLEVE (boiling liquid expanding vapor explosion)에 대하여 폭발 시뮬레이션을 실시하였다. 이때, 사고 시나리오에 따라 폭발 시뮬레이션을 수행하기 위해 DME의 DB를 생성해야 하는데, PHAST에서 사용된 DME의 물리화학적 성질은 Table 3과 같다.

3.2. 충전소의 구조 설정

폭발 시뮬레이션에 사용된 충전소의 형태는 현재 DME-LPG 혼합연료를 공급하는 충전소가 아직 없기 때문에, 기존 LPG 충전소와 상대적인 비교를 위해 Fig. 1과 같이 1998년 부천의 LPG 충전소 폭발 당시의

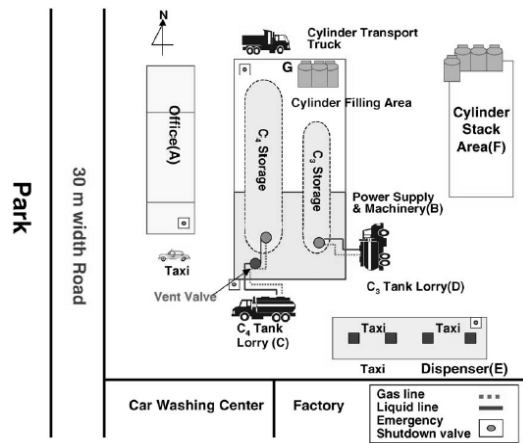


Fig. 1. Schematic diagram of Bucheon LPG filling station[9].

Table 3. Physicochemical properties of DME used in PHAST

Physical properties	Value	Physical properties	Value
Critical temperature (°C)	127	Critical pressure (bar)	53.7
Boiling point (°C)	-24.84	Melting point (°C)	-141.5
Flammable/toxic	Flammable	EOS	Kwong
Molecular weight (g/mol)	46.07	Reactivity with atmosphere	Not Strong
Flammable limit lower (%)	3.3	Flammable limit upper (%)	27.3
Heat of combustion (kJ/kmol)	1.33e*6	Maximum burn rate (kg/m ² ·s)	0.12
Flash point (°C)	-41.15	Luminous/smoky	L
Combustion (Ct)	0.06545	Combustion (At)	0.9386
Max surface emissive power (kW/m ²)	62	Emissive power length scale (m)	2.75
Pool fire burn rate length (m)	0.1	Laminar burning (m/s)[7,8]	0.486

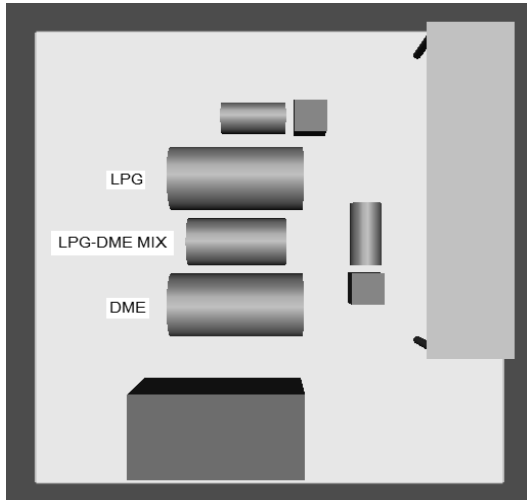


Fig. 2. DME-LPG filling station modeled in FLACS.

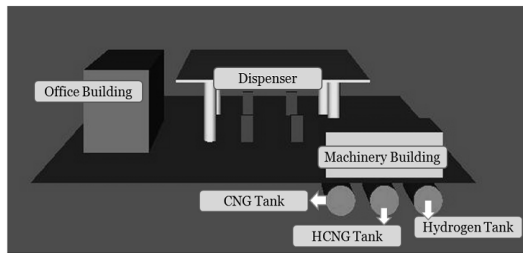


Fig. 3. HCNG filling station modeled in FLACS.

개략도[9]를 참고하여 DME-LPG 충전소의 구조를 완성하였으며, 이를 바탕으로 FLACS 내에서 완성한 구조는 Fig. 2에 나타내었다. 그리고 HCNG 충전소 역시 Fig. 3에서와 같이 현재 운영 중인 CNG 충전소를 참조하여 수소 탱크를 추가한 간단한 구조로, FLACS 내에서 시뮬레이션을 위해 입력하였다.

폭발 시뮬레이션을 위해 입력한 DME-LPG 충전소의 구조는 현재 지하탱크를 이용하여 운영 중인 LPG 충전소와 차이가 있으나, 본 연구에서는 가스 종류에 따른 폭발 시뮬레이션 결과를 분석하기 위한 것이기 때문에 앞으로 실제 운영이 될 충전소의 구조를 반영하여 시뮬레이션을 실시하고, 그 결과를 비교할 필요가 있다.

IV. 결과 및 고찰

4.1. TNT 당량모델에 의한 폭발 시뮬레이션

TNT 당량모델에 의한 시뮬레이션 결과는 LPG의

Table 4. Explosion overpressure (bar) relative to distance by TNT equivalency model for LPG, DME-LPG and DME

Distance (m)	Overpressure (bar)		
	LPG	DME-LPG	DME
1	>10	>10	>10
10	5.8	5.3	3.6
20	1.2	1.05	0.83
30	0.52	0.48	0.39
40	0.31	0.3	0.26
50	0.21	0.205	0.19
100	0.08	0.078	0.071
200	0.036	0.032	0.03
300	0.022	0.02	0.018
500	0.013	0.011	0.01
1000	0.006	0.005	0.004

Table 5. Explosion overpressure (bar) relative to distance by TNT equivalency model for CNG, HCNG and H₂

Distance (m)	Overpressure (bar)		
	CNG	HCNG	H ₂
1	>10	>10	>10
10	>10	>10	>10
20	2.1	2.9	3.9
30	1.1	1.2	1.8
40	0.61	0.65	1.2
50	0.4	0.42	0.64
100	0.14	0.17	0.2
200	0.055	0.058	0.08
300	0.032	0.039	0.049
500	0.019	0.021	0.027
1000	0.008	0.009	0.01
5000	0.0014	0.0011	0.002

경우 1 ton, DME-LPG의 경우 0.926 ton의 TNT 폭발과 유사하였으며, 이 결과를 이용하여 예측된 과압은 Table 4와 같다. 표에서와 같이 동일한 거리에서 LPG 가스 폭발의 경우의 과압이 제일 높고, DME-LPG, DME 순서로 낮은 것을 확인할 수 있었다.

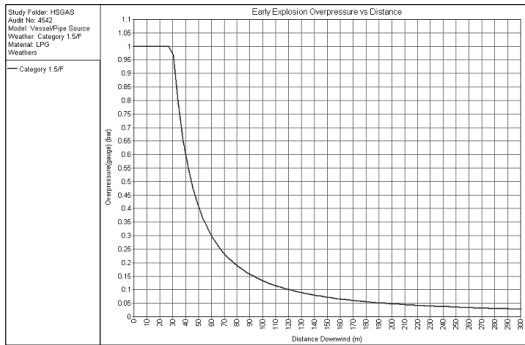
CNG 충전소에서 사용하게 될 CNG와 HCNG의 폭발 시뮬레이션 결과는 CNG는 2.7 ton, HCNG는 3.5 ton의 TNT 폭발과 유사하였으며, 이 결과를 이용하여 예측된 과압은 Table 5에서와 같이 수소가 가장

높은 과압을 나타내었고, HCNG, CNG 순서로 낮아지는 것을 확인하였다.

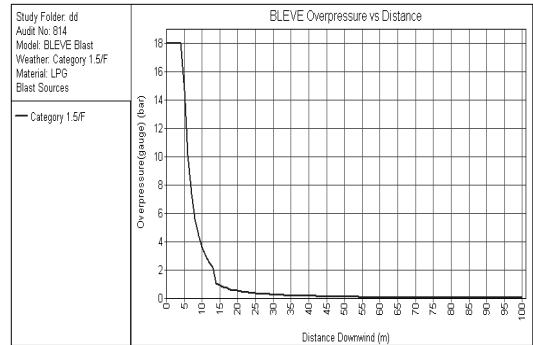
4.2. PHAST에 의한 폭발 시뮬레이션

PHAST를 사용하여 LPG, DME-LPG와 DME의 VCE와 BLEVE에 대한 폭발 시뮬레이션 결과는 각

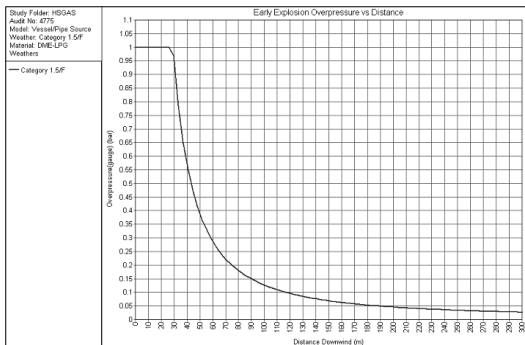
각 Fig. 4 및 Fig. 5와 같다. Fig. 4에서와 같이 VCE의 경우 LPG와 DME-LPG의 과압은 20m 후반까지 약 1 bar를 나타내어 과압이 유사하였으나, DME의 과압은 다소 낮은 값을 나타내었다. 이것은 LPG의 연소열이 DME 보다 다소 크기 때문이며, DME-LPG는 DME가 20% 혼합되어 LPG와 유사한 값을 나타내



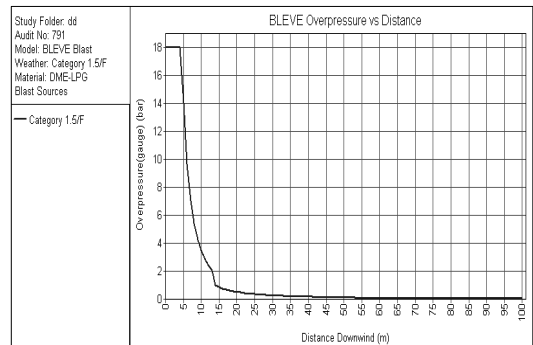
(a) LPG



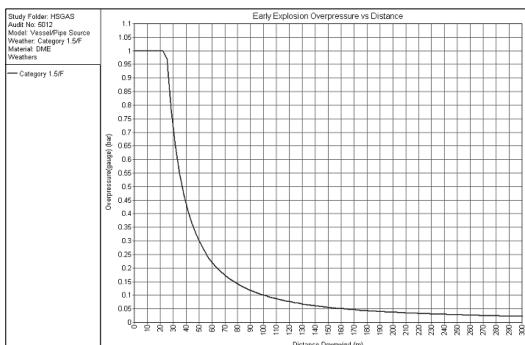
(a) LPG



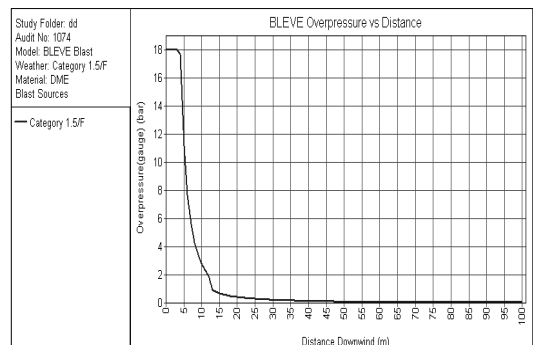
(b) DME-LPG



(b) DME-LPG



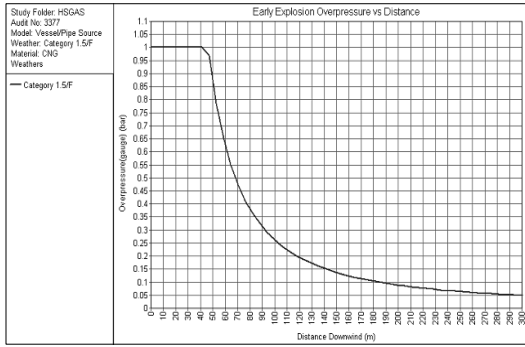
(c) DME



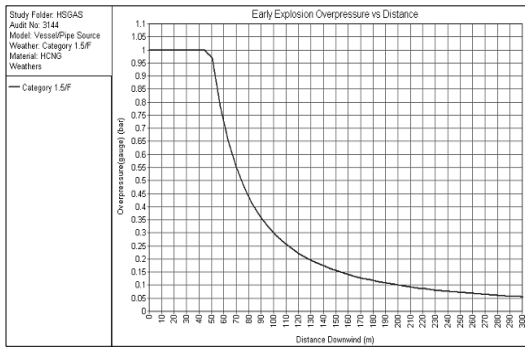
(c) DME

Fig. 4. Distribution of explosion overpressure for LPG, DME-LPG and DME by PHAST (VCE).

Fig. 5. Distribution of explosion overpressure for LPG, DME-LPG and DME by PHAST (BLEVE).



(a) CNG



(b) HCNG

Fig. 6. Distribution of explosion overpressure for CNG and HCNG by PHAST (VCE).

었다. 또한 BLEVE에 의한 과압은 Fig. 5에서와 같이 LPG와 DME-LPG의 경우는 점화원으로부터 15 m 정도에서 약 1 bar의 과압을 형성하며, 유사한 형태를 나타내었으나 DME는 VCE에서와 같이 다소 낮은 과압을 형성하였다.

CNG와 HCNG의 VCE에 의한 과압은 Fig. 6에서와 같이 점화원으로부터 50 m 정도까지는 약 1 bar의 과압을 형성하며, 과압 분포가 거의 유사하였다. 그리고 CNG 및 HCNG는 액체가 아닌 압축 기체상태로 저장되기 때문에 BLEVE 현상은 발생하지 않고, 용기의 단순 물리적 파열이 일어남을 확인할 수 있었다.

4.3. FLACS에 의한 폭발 시뮬레이션

Fig. 7은 동일한 사고 시나리오에서 LPG 충전소에서 VCE가 발생 시 충전소 내부에 형성되는 과압 분포와 시간에 따른 과압의 변화를 나타낸 것으로, 동시에 연료의 양과 유출속도 변화도 확인할 수 있었다. 이때, 구조 내에서 형성되는 최대 과압은 0.026

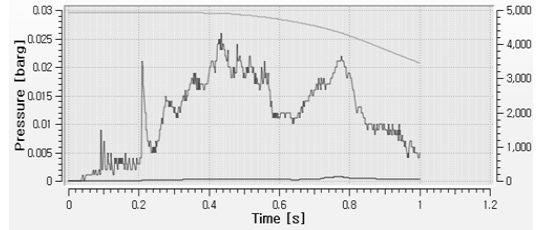
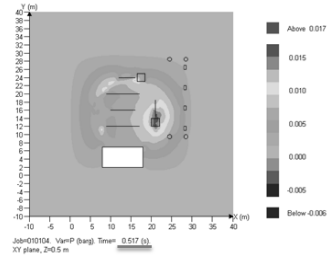


Fig. 7. Distribution and variation of explosion overpressure for LPG by FLACS (VCE).

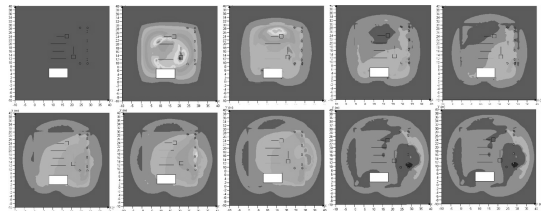


Fig. 8. Variation of explosion overpressure distribution for LPG by FLACS (VCE).

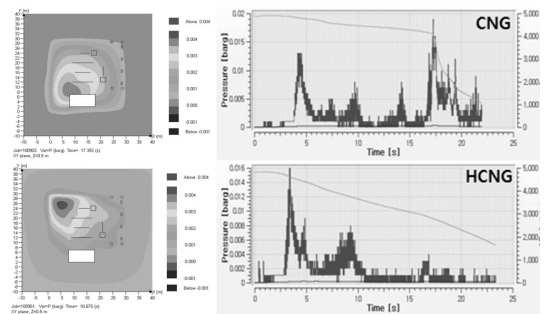


Fig. 9. Distribution and variation of explosion overpressure for CNG and HCNG by FLACS (VCE).

bar이었고, Fig. 8과 같이 시간에 따른 과압분포 변화를 확인할 수 있었다. 또한 CNG와 HCNG의 VCE에

의한 과압 분포와 시간에 따른 과압 변화는 Fig. 9와 같이 확인할 수 있었으며, 이때 최대 과압은 CNG가 0.019 bar이었고, HCNG는 0.016 bar이었다. 이와 같은 결과는 점화시간의 지연으로 인해 형성된 가스구름이 수소와 메탄의 밀도가 작아서 쉽게 분산되기 때문인 것으로 생각된다.

4.4. 시뮬레이션 결과 비교

폭발모델에 따른 과압의 차이를 비교하기 위해 TNT 당량모델과 PHAST에 대해 10m와 50m 거리에서 비교하였으며, 그 결과는 Table 6 및 Table 7과 같다.

Table 6에서와 같이 LPG와 DME-LPG의 폭발과압은 폭발모델과 폭발유형에 따라 차이가 있었으나, 동일한 저장량과 거리에서 동일한 폭발모델로 산출한 과압은 연료에 무관하게 LPG와 DME-LPG가 거의 동일하였다. 일반적으로 DME의 연소속도는 LPG 보다 다소 크고[10], 연소열은 작지만 20 %의

DME 혼합물에서는 그 차이가 크지 않음을 알 수 있다. 또한 TNT 당량모델과 PHAST는 연소속도를 고려하지 않고, 연소열에 의존하기 때문에 실제 폭발 실험의 결과와는 차이가 있는 것으로 보인다. 즉, CNG와 HCNG의 경우 Table 7에서와 같이 연소열에 의존하는 TNT 당량모델과 PHAST에서 HCNG의 과압은 수소의 연소열이 CNG 보다 높기 때문에 다소 큰 값을 나타내었으나 동일한 폭발모델과 거리에서는 과압이 거의 유사하였다. 그러나 FLACS의 경우는 기체 확산에 기인하여 오히려 HCNG 혼합연료가 CNG보다 낮은 과압을 나타내었다.

이상의 결과와 같이 3가지 폭발피해 예측모델에 의한 시뮬레이션 결과는 사용하는 관련식과 고려하는 조건이 다르기 때문에 차이를 나타내었다. 즉, TNT 당량모델은 최소한의 조건인 연소열과 폭발효율에 의존하고, PHAST의 주요 계산식은 TNT 당량식에 기반하지만, 바람이나 대기조건이 포함되어

Table 6. Comparison of simulation results for LPG and DME-LPG

Materials	Mass	Distance (m)	Overpressure (bar)			
			TNT equivalency	PHAST		FLACS (VCE)
				VCE	BLEVE	
LPG	5 ton	10	5.8	1	18	0.026 (점화 후 0.43초 후)
		50	0.13	0.4	0.1	
DME-LPG		10	5.3	1	18	-
		50	0.11	0.39	0.09	
LPG	40 ton	10	> 10	1	18	-
		50	0.76	1	0.4	
DME-LPG		10	> 10	1	18	-
		50	0.70	1	0.38	

Table 7. Comparison of simulation results for CNG and HCNG

Materials	Mass	Distance (m)	Overpressure (bar)		
			TNT equivalency	PHAST (VCE)	FLACS (VCE)
CNG	5 ton	10	> 10	1	0.019 (점화 후 17초 후)
		50	0.4	0.87	
HCNG		10	> 10	1	0.016 (점화 후 0.34초 후)
		50	0.42	0.97	
CNG	40 ton	10	> 10	1	-
		50	1.79	1	
HCNG		10	> 10	1	-
		50	1.9	1	

나온 수치이므로, 차이가 나타나게 된다. 또한 PHAST에 추가된 조건은 연료의 확산이 거의 일어나지 않는 상태, 즉 풍속이 1.5 m/s이고, 대기는 안정된 경우이다. 그리고 TNT 당량모델과 PHAST에 의한 결과가 FLACS에 의한 충전소 내부의 과압과 차이가 있는 것은 충전소 내부 공기의 분포와 흐름에 따라 폭발에 참여하는 가스의 양이 줄어들고, 폭발과 동시에 확산이 이루어지기 때문에 형성되는 과압이 감소되는 것으로 판단된다.

V. 결론

본 연구에서는 기존의 LPG 및 CNG 충전소에서 대체연료로 사용이 가능한 DME-LPG 혼합연료와 HCNG 혼합연료를 사용하는 경우에 3가지 폭발피해 예측방법(TNT 당량모델, PHAST 및 CFD기반의 FLACS)을 사용하여 사고결과를 시뮬레이션하고, 폭발 과압의 차이를 비교하여 폭발모델을 비교하였다. 그 결과, 기존의 2가지 충전소에서 신에너지 혼합연료를 사용할 경우에는 폭발에 의한 추가 피해는 없을 것으로 예상되었다. 그리고 폭발모델을 비교한 결과, VCE의 거리별 과압 예측에는 속도가 빠르고, 중간정도의 정확도를 가지고 있는 현상학적 모델인 PHAST가 적합하며, BLEVE에 의한 피해예측도 PHAST가 적합할 것으로 판단되었다. 3차원 CFD 기반 모델인 FLACS는 충전소 내부의 압력 분포를 확인할 수 있으므로, 방호시설에 대한 효과 및 검증에 사용할 수 있으나 지원 물성 등 프로그램 사용에 제한이 있다. 따라서 가능한 사고 시나리오를 현상학적 모델로 먼저 시뮬레이션 한 다음, 보다 정확한 결과 또는 내부 위치에 따른 상세한 정보를 필요로 하는 경우에만 CFD기반 프로그램의 실행이 가능한 전문기관에 의뢰를 하여 결과 확보 및 사고피해를 예측하는 것이 보다 효율적일 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2010년도 명지대학교 교직원연구지원에 의해 이루어졌으며, 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

- [1] J. Jiang, Z. G. Liu, and A. K. Kim, *Comparison of Blast Prediction Models for Vapor Cloud Explosion*, Institute for Research in Construction, National Research Council, Canada, (2001)
- [2] D. J. Park and Y. S. Lee, "A Comparison on Predictive Models of Gas Explosions", *Korean Journal of Chemical Engineering*, **26**, 313-323, (2009)
- [3] C. J. Lea, *A Review of the State-of-the-Art in Gas Explosion Modelling*, Health & Safety Laboratory, (2002)
- [4] 이민철, 서석빈, 정재화, 안달홍, "신연료 DME의 복합화력발전소 적용을 위한 연소 성능실험", *대한기계학회 춘추학술대회*, 1022-1027, (2006)
- [5] 김은정, 김영규, 문일, "수소충전소의 안전성 향상을 위한 버츄얼리얼리티 프로그램 개발", *한국가스학회지*, **12**(4), 29-33 (2008)
- [6] CCPS, *Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash Fires, and BLEVEs*, Center for Chemical Process Safety, 2nd Ed., American Institute of Chemical Engineers, (1998)
- [7] N. Djebaili and C. Paillard, "Burning Velocities of Dimethyl Ether and Air", *Combustion and Flame*, **125**, 1329-1340, (2001)
- [8] Z. Huang, Q. Wang, J. Yu, and Y. Zhang, "Measurements of Laminar Burning Velocity of Dimethyl Ether-Air Premixed Mixtures", *Fuel*, **86**, 2360-2366, (2007)
- [9] K. S. Park and Y. D. Jo, "Incident Analysis of Bucheon LPG Filling Station Pool Fire and BLEVE", *Journal of Hazardous Materials*, **137**, 62-67, (2006)
- [10] T. Mogi and S. Horiguchi, "Explosion and Detonation Characteristics of Dimethyl Ether", *J. of Hazardous Materials*, **164**, 114-119, (2009)