KIGAS Vol. 15, No. 2, April, 2011
(Journal of the Korean Institute of Gas)

DME-LPG 혼합연료에 따른 사고결과 피해예측

박달재 · †이영순
서울과학기술대학교 안전공학과
(2010년 12월 17일 접수, 2011년 3월 30일 수정, 2011년 3월 30일 채택)

Consequence Analysis by Different DME-LPG Mixture Fuels

Dal-Jae Park · †Young-Soon Lee
Dept. of Safety Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 139-743, Korea
(Received December 17, 2010; Revised March 30, 2011; Accepted March 30, 2011)

요 약

DME(Dimethyl Ether)는 청정에너지원으로 친환경적이고, 다양한 용도로 사용될 수 있는 장점이 있다. 또한 DME는 LPG와 물리적 특성이 매우 유사하여, LPG와 혼합될 수 있고, DME-LPG 혼합연료는 기존 LPG 기반시설의 커다란 개조 없이 사용될 수 있다. 그러나 DME-LPG 혼합연료가 보급될 시 관련 설비 증가로 인해 중대사고 발생 가능성이 높다. 이에 본 연구에서는 DME-LPG 혼합연료에 따른 누출속도, 제트화재, 증기운 폭발, BLEVEs 및 화구 등의 피해예측을 실시하고, 이를 분석하여 DME-LPG 혼합연료의 위험성을 고찰하였다. 연구 결과, LPG와 DME 20 % 연료에서 제트화재, 증기운 폭발, BLEVEs 및 화구로 인한 피해예측 범위는 거의 유사한 것으로 나타났다.

Abstract - DME(Dimethyl Ehther) is considered as an attractive fuel in terms of clean, environmentally friendly form of energy, multi-source and multi-purpose. As the physical properties of DME are almost similar to LPG, DME can be mixed with LPG and DME-LPG mixture fuels seem to be employed without major remodeling of the existing LPG supply infrastructure. However, little attention has been given to the effect of different DME-LPG mixture fuels on consequence analysis to adjacent facilities, buildings and etc. In this work, the consequence analysis by different DME-LPG mixture fuels has been done. The results were discussed in terms of release rate, jet fire, vapor cloud explosions, BLEVEs and etc. It was found that the consequences estimated from fire and explosion scenarios assumed were almost similar for both LPG and DME 20 %.

Key words : LPG, DME, DME-LPG mixture fuels, consequences analysis

I. 서 론

디메틸에테르(Dimethyl Ether, 이하 DME)는 청정에너지원으로 친환경적 특징뿐만 아니라 세탄가가 높고 LPG와 유사한 물성 때문에 디젤 차량 및 LPG 대체연료, 연료전지 등의 다양한 용도로 사용할 수 있다. 이 신규연료가 시장에 도입될 경우에는 연료의 수송, 저장 수단, 인프라 구축 등의 장애가 적다는 장점이 있다[1]. 이러한 장점 때문에 미국, 덴마크, 중국, 일본 등 외국에서는 DME 관련 연구가 활발히 진행되고 있다[2].

DME는 LPG와 물리적 특성이 유사하기 때문에 기존의 LPG 인프라를 대부분 사용할 수 있어 초기 투자비가 적게 든다[3]. 그 동안 DME를 정유 및 수입사 기지에서 LPG에 혼합하여 현 LPG 벌크로리 및 소형저장탱크(5톤 미만)로 수요자에게 보급하는 방식이 거론되어 왔으며[2], 정부는 'DME-LPG 혼합연료 시범보급 사업'을 통하여 2009년부터 2011년까

†주저자:lysoon@snut.ac.kr

지 전국 4개 충전소에 DME-LPG 혼합연료를 공급하여 약 400여 가구에서 가정, 상업용으로 활용할 계획이며, 향후 2013년에 DME를 연료로서 전면 공급할 예정이다[4]. 2002년부터 2009년까지 LPG 벌크로리에서 발생한 화재, 폭발, 가스누출 등의 중대 사고건수는 9건[5]으로 우려할 수준은 아니나, 향후 DME-LPG 혼합연료가 보급될 시 관련 설비 증가로 인해 중대사고 발생 가능성이 높다. 또한 소형저장탱크가 도심, 주택가, 상가 등에 주로 위치한 것과 가스의 특성에 의하여 중대사고가 발생할 경우에는 그 피해영향은 사고발생 설비 및 인명에게만 국한되지 않고, 인근지역의 건물이나 인명에 영향을 미쳐, 개인 및 사회적 위험 부담이 커져 산업 및 경제에 악영향을 미칠 수 있다. 이에 본 연구에서는 DME-LPG 혼합연료에 따른 누출속도, 제트화재, 증기운 폭발, 비등액체 팽창 증기폭발 등의 피해예측을 실시하고, 이를 분석하여 DME-LPG 혼합연료의 위험성을 고찰하고자 한다.

Ⅱ. 사고시나리오 선정 및 작성

2.1. 사고시나리오 선정

LPG 벌크로리 및 소형저장탱크에서 일어날 수 있는 사고 유형은 가스누출, 제트화재, 플래시화재, 증기운폭발, BLEVE 등이 있다. 사고 원인은 플랜지, 플렉시블 호스, 호스릴 충전호스의 체결불량에 의한 누출, 배관 파손 등이 있다[5]. LPG와 DME는 물리적 특성이 유사하여 LPG에 DME를 혼합하여 사용할 때 혼합연료의 누출은 크게 누출상의 관점에서 기상, 액상, 기/액상(2상) 누출로 분류될 수 있다. 누출상은 액체배관이 탱크와 접합부에서 파손될 경우 액상누출이지만 어느 정도 떨어진 곳에 파손될 경우 2상 누출이다. LPG 시설에서 완전한 액상누출은 매우 일어나기 어려운 사고이고, 일반적으로 배관이 완전히 파손되는 경우는 거의 없으나 이충전 작업시 로리호스가 완전히 이탈하여 누출되는 사고가 발생할 수 있다[6]. 이에 기체 이충전 로리호스의 파손에 의한 피해보다 액체 로리호스의 파손에 의한 피해가 심각할 것으로 판단되어 여기서는 LPG 벌크로리에서 소형저장탱크에 이충전시 액체 로리호스의 완전이탈, 로리호스 직경의 12.7 mm 및 6.35 mm 정도의 구경으로 누출되는 경우만을 고려하였다.

LPG 또는 DME-LPG 혼합연료는 누출 후 즉시 착화되면 제트화재 또는 액면화재가 발생하지만, 대기 중에서 증발속도가 매우 빠르고, 화재가 발생한 다음 수 십초가 경과할 동안 복사열에 의하여 풀을 형성한 물질이 증발하므로 액면화재의 가능성은 매우 작은 것으로 보고되고 있다[6]. 또한 누출 후 증기운 폭발 또는 플래시 화재의 발생을 배제할 수 없으나 플래시 화재의 피해범위는 증기운 폭발에 의한 피해범위보다 작기에 증기운 폭발과 제트화재만을 고려하였고, LPG 벌크로리 폭발은 피해범위가 매우 크기에 포함하였다.

2.2. 사고시나리오 작성

앞에서 선정한 사고 시나리오를 중심으로 LPG, DME 및 4가지 서로 다른 DME-LPG 혼합연료(LPG에 DME 혼합비율을 질량단위로 20 %에서 80 %까지 20 % 간격으로 증가)를 변수로 하여 다음과 같이 사고 시나리오를 작성하였으며, 사고결과 피해예측(Consequence analysis)은 DNV Technica에 의해 개발된 PHAST 6.53을 이용하여 수행하였다[7]. 본 연구에서 LPG는 LPG 100 %, DME는 DME 100 %를 의미한다. 그리고 DME-LPG 혼합연료에서 DME 혼합비율을 나타내고자 DME 00 %로 표시하였으며, DME 20 %는 DME-LPG 혼합연료에서 DME 20 % 및 LPG 80 %가 포함되는 것을 의미한다.

(1) 사고 시나리오 1

0.14 MPa, 298 K로 운전되고 있는 실린더형 LPG 벌크로리 (길이 6.528 m, 내경 2.260 m, 저장량 8톤)에서 길이 40 m, 직경 25.4 mm의 액체 로리호스를 통해 0.5톤의 소형저장탱크에 충전 시 탱크 측 로리호스의 커플링 완전이탈, 커플링 체결 불량으로 인한 호스 직경의 12.7 mm 및 6.35 mm 구경으로 5분 동안 누출되어 제트화재(Jet fire)가 발생하는 경우를 6가지 연료에 대하여 고려하였다.

① 25.4 mm 로리호스의 커플링 완전이탈로 인한 누출(대)
② 25.4 mm 로리호스 직경의 12.7 mm 구경 발생으로 인한 누출(중)
③ 25.4 mm 로리호스 직경의 6.35 mm 구경 발생으로 인한 누출(소)

(2) 사고 시나리오 2

사고 시나리오 1에서 가정한 25.4 mm 로리호스의 커플링 완전이탈로 인해 연료 1500 kg이 누출되어 증기운 폭발(Vapor Cloud Explosions)이 발생하는 경우를 6가지 연료에 대하여 고려하였다.

(3) 사고 시나리오 3

사고 시나리오 1에서 운전되고 있는 벌크로리에서 비등액체 팽창 증기폭발(Boiling Liquid Expanding Vapor Explosions) 및 화구(Fireball)가 발생하는 경우

를 6가지 연료에 대하여 고려하였다.

III. 결과분석

3.1. 시나리오 1

Table 1에 나타낸 바와 같이, 누출속도는 누출공의 크기에 비례하여 증가하였으며, 누출공의 크기가 동일한 경우, LPG의 누출속도가 제일 낮고, DME 혼합비율이 증가할수록 누출속도는 약간씩 증가하는 경향을 보였다. LPG에 DME를 혼합하였을 때 누출속도의 증가 원인은 DME의 분자량이 LPG 분자량보다 약간 무겁기 때문인 것으로 판단된다. LPG와 DME 20 %에서의 누출속도는 누출공 크기에 관계없이 거의 유사한 것으로 나타났다.

또한, **Table 2**에 나타낸 바와 같이, LPG에 DME 혼합비율이 증가될수록 혼합연료의 연소 상·하한계의 범위는 조금씩 증가하였고, 누출 시 누출원으로부터 연소하한농도까지의 거리는 누출공에 관계없이 LPG가 가장 길었고, DME 혼합비율이 증가할수록 조금씩 감소하였다. 최대 누출크기를 기준으로 보았을 때, 누출 시 연소하한농도의 도달거리는 약 24 m로 나타났고, LPG와 DME 20 %의 LFL은 거의 유사하였다.

제트화재의 화염이 벌크로리 또는 인근시설에 도달하면 피해확산 가능성이 매우 크기 때문에 제트화염의 길이는 안전거리 기준으로 매우 중요하다고 보고되고 있다[6]. **Table 3**은 제트화재 발생시 6가지 연료에 대한 화염의 길이를 나타낸다. LPG에 DME를 혼합 시 혼합연료 연소범위는 증가되므로 제트화재의 최대 화염길이는 최대 누출공을 기준으로 DME가 약 31 m 정도로 가장 길게 나타났다. LPG와 DME 20 %인 경우에 화염길이는 약 25 m 및 26 m로 거의 유사하며, 누출시 LFL까지 도달거리보다는 약간 긴 것으로 나타났다.

제트화재로 인한 복사열 영향을 감안하여 4.0 kW/m^2, 12.5 kW/m^2, 37.5 kW/m^{2}에 대하여 분석하였다. 12.5 kW/m^{2}의 복사열에 노출될 경우 1분내 1 %의 사람이 사망할 수 있으며, 37.5 kW/m^{2}의 복사열에 노출될 경우에는 1분내 100 % 사망하고, 밸브와 같은 기계나 장치의 고장이 발생된다[8]. **Fig. 1**과 같이 DME-LPG 혼합연료가 증가할수록 복사열에 따른 영향반경은 증가하였으며, 이는 **Table 1**에 나타낸 바와 같이, DME-LPG 혼합연료가 증가할수록 누출속도가 증가하였기 때문이다. 혼합연료별 편차가 발생하지만 최대 40 m이내에서 1분내 100 % 사망 및

Table 1. Mass release rates with three different hole sizes for each material

Fuels / Hole (mm)	Mass flow rate(kg/s)					
	LPG	DME 20 %	DME 40 %	DME 60 %	DME 80 %	DME
L (25.4)	3.32	3.55	3.84	4.14	4.45	4.78
M (12.7)	0.61	0.65	0.69	0.73	0.79	0.84
S (6.35)	0.11	0.11	0.12	0.13	0.14	0.14

LPG = LPG 100%, DME = DME 100 %, DME 20 % = DME 20 % + LPG 80 %

Table 2. Distances from release source to LFL(m) with three different hole sizes for each material

Fuels / Hole (mm)	Distance(m)					
	LPG	DME 20 %	DME 40 %	DME 60 %	DME 80 %	DME
	LFL 2.0% UFL 9.5%	LFL 2.1% UFL 10.8%	LFL 2.3% UFL 12.7%	LFL 2.6% UFL 15.4%	LFL 2.9% UFL 19.6%	LFL 3.3% UFL 27%
L (25.4)	23.8	23.2	22.5	21.6	20.7	19.4
M (12.7)	8.1	7.9	7.5	7.3	7.1	6.9
S (6.35)	3.6	3.5	3.3	3.3	3.2	3.0

Table 3. Flame lengths of jet fire with three different hole sizes for each material

Fuels / Hole (mm)	Flame length (m)					
	LPG	DME 20 %	DME 40 %	DME 60 %	DME 80 %	DME
L (25.4)	24.9	26	27.2	28.5	29.9	31.3
M (12.7)	11.9	12.4	12.9	13.4	14.0	14.8
S (6.35)	5.5	5.7	6.0	6.2	6.5	6.8

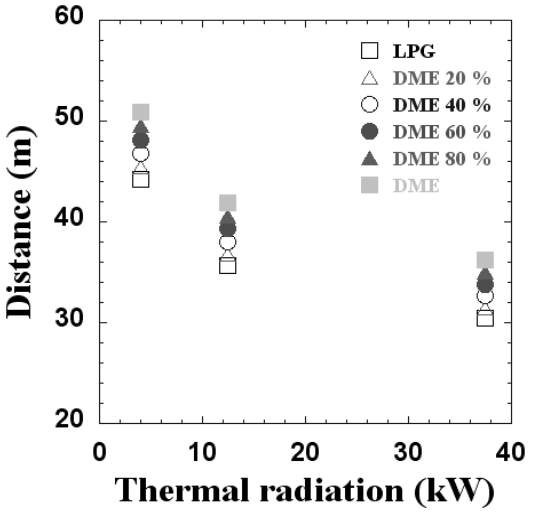

Fig. 1. Distance versus jet fire thermal radiation for each material.

주변 시설의 장치의 손상이 발생할 수 있는 것으로 나타났다.

3.2. 시나리오 2

사고 시나리오 2에서는 25.4 mm 로리호스의 커플링 완전이탈로 인해 연료별 1500 kg이 누출되어 증기운 폭발(Vapor Cloud Explosions)이 발생하는 경우를 TNT 등가모델을 적용하여 6가지 연료에 대한 결과를 분석하였다.

본 연구에서는 폭발과압 영향을 2.07 kPa, 13.8 kPa, 20.7 kPa에 대하여 분석하였다. 2.07 kPa의 경우 유리창 파열 10 % 또는 경상, 13.8 kPa는 건물 및 공정설비의 경미한 손상 또는 1 % 고막파열, 20.7 kPa의 경우 건물 및 공정설비의 심각한 손상 또는 50 % 고막손상으로 적용한다[8].

각 연료별 동일한 질량 1500 kg이 누출되어 증기운 폭발이 발생하는 경우를 TNT 등가모델로 예측한 결과, **Table 4**와 **Fig. 2**에 나타낸 바와 같이, LPG의 경우 폭발과압에 따른 영향거리가 제일 크고, DME-LPG 혼합연료가 증가할수록 영향범위가 감소하는 경향으로 나타났다. 이러한 원인은 DME의 연소열이 LPG의 연소열보다 작기 때문이다. 혼합연료별 편차가 발생하지만 최대 64 m이내에서 50 % 고막손상이 발생할 수 있는 것으로 나타났다. LPG와 DME 20 %인 경우 거리에 따른 폭발과압은 거의 유사하였다.

대부분 폭발에 의한 피해범위는 TNT 등가모델[8]

Table 4. Effect radius by three different overpressure levels for each material (VCEs)

Fuels / Overpressure (kPa)	Effect radius(m)					
	LPG	DME 20 %	DME 40 %	DME 60 %	DME 80 %	DME
2.07	319	311	302	293	283	272
13.8	83	80	78	76	73	71
20.7	64	62	61	59	57	55

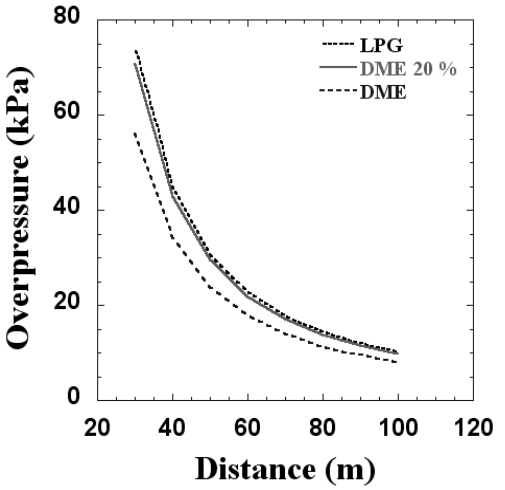

Fig. 2. Overpressures as a function of distance for three fuels: LPG, DME and DME 20 % (VCEs).

을 이용하여 구하지만, 계산 결과는 실제 가스폭발 사고와 비교하면 인근거리에서는 폭발압력이 과대 예측되어 안전거리 기준을 정하는데 적정한 모델로 평가받지 못하고 있다. 이에 DME 20 % 연료의 질량 1500 kg이 누출되어, 증기운 폭발이 발생하는 경우를 TNT 등가모델, TNO Multi-Energy(이하, ME) 모델, Baker-Strehlow(이하, BS) 모델[8]을 적용하여 계산된 결과를 나타내면, **Fig. 3**과 같다. TNT 등가모델에서 폭발효율 계수는 0.03, ME 모델에서 초기 폭풍강도는 7, BS 모델에서는 물질의 반응성 및 장애물 밀도는 중간, 화염 팽창은 2로 가정하였다. **Fig. 3**에 보여지는 바와 같이, 거리에 따른 폭발과압에 대해 TNT 등가모델은 다른 모델에 비해 과대 예측하는 것으로 나타났으며, 약 30 m 정도에서는 과압이 약

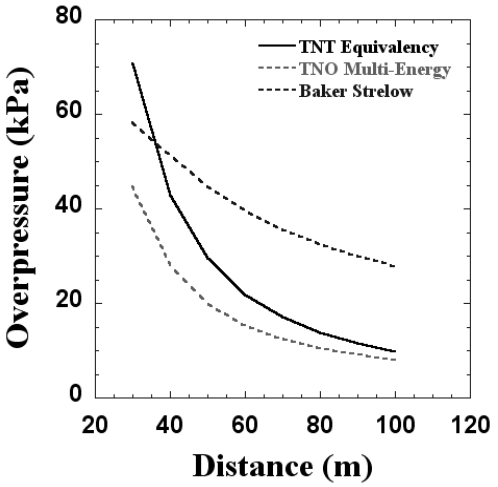

Fig. 3. Overpressures as a function of distance for different explosion prediction models.

70 kPa 정도, ME 모델에서는 약 45 kPa 정도 발생하였다.

3.3. 시나리오 3

LPG 벌크로리 폭발은 피해범위가 매우 크기 때문에 검토할 필요가 있다. 연료별 동일 질량 8000 kg을 저장하고 있는 벌크로리에서 BLEVEs가 발생하는 경우, **Table 5**와 **Fig. 4**에 나타낸 바와 같이, 폭발과압에 따른 영향반경은 LPG의 경우 최대이고, DME-LPG 혼합연료가 증가할수록 영향범위가 감소하였다. 이러한 원인은 DME의 연소열이 LPG의 연소열보다 작기 때문이다. 혼합연료별 편차가 발생하지만 최대 45 m이내에서는 50 % 고막손상이 발생할 수 있을 것으로 보인다.

LPG 벌크로리에서 BLEVEs가 발생하는 경우에 Fireball로 인한 피해범위를 산정하는 것은 중요하다. **Fig. 5**는 연료별 Fireball로 인해 발생된 복사열과 그에 따른 영향거리이다. **Fig. 5**와 같이, Fireball 복사열에 따른 영향거리는 LPG의 경우 제일 크고, DME 혼합비율이 증가할수록 감소하며, LPG와 DME 20 %인 경우 거리에 따른 복사열은 매우 유사한 경향을 가지는 것으로 나타났다. 각 연료별 동일한 질량이 Fireball에 참여하는 경우에 화구지름, 지속시간, 화구높이의 결과가 동일하기 때문에 여기서는 DME 20 % 연료의 저장량에 따른 Fireball 계산만을 고려하여 그 결과를 **Table 6**에 나타내었다. 탱크가 폭발하면 반경 60 m 이내는 화염으로 휩싸여 피해를 입게 될 것으로 보인다.

Table 5. Effect radius by three different overpressure levels for each material (BLEVEs)

Fuels / Overpressure (kPa)	Effect radius(m)					
	LPG	DME 20 %	DME 40 %	DME 60 %	DME 80 %	DME
2.07	229	222	215	207	199	190
13.8	58	56	54	53	50	48
20.7	45	43	42	40	39	37

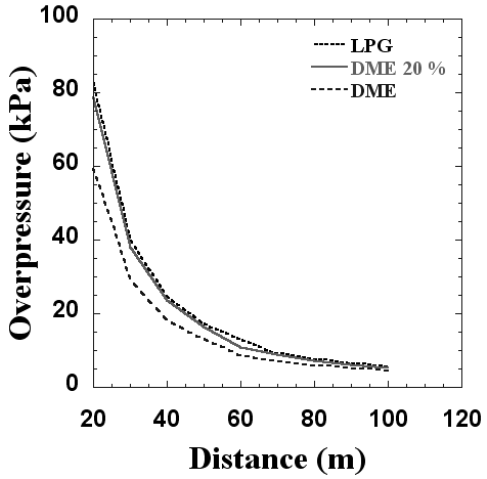

Fig. 4. Overpressures as a function of distance for three fuels: LPG, DME and DME 20 % (BLEVEs).

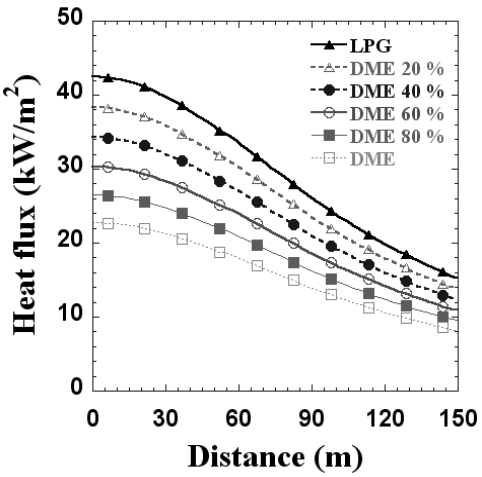

Fig. 5. Thermal radiation versus distance for each material (Fireball).

Table 6. Results by different mass of DME 20 % fuel participating in the fireball

Mass of DME 20 % fuel (ton)	Fireball diameter (m)	Duration (t)	Flame emission energy (kW/m^2)	Fireball height (m)
2	38	6.15	195.2	76
4	48	7.36	207.76	95
6	54	8.18	215.49	109
8	60	8.82	221.14	120

Ⅳ. 결 론

본 연구에서는 DME-LPG 혼합연료에 따른 누출속도, 제트화재, 증기운 폭발, 비등액체 팽창 증기폭발 등의 피해예측을 실시하고, 이를 분석하여 DME-LPG 혼합연료의 위험성을 고찰하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) LPG와 DME 20 % 연료에서의 누출속도는 누출공 크기에 관계없이 거의 유사하였으며, 최대 누출공 (25.4 mm)을 기준으로 보았을 때, 누출시 LFL까지의 도달거리는 약 24 m이고, LPG와 DME 20 % 연료의 LFL은 거의 동일하였다. 최대 누출공에서 LPG와 DME 20 %인 경우, 화염길이는 약 25 m 및 26 m로 거의 유사하며, LFL까지 도달거리보다는 약간 긴 것으로 나타났다.

(2) 각 연료별 동일한 질량 1500 kg이 누출되어 증기운 폭발이 발생할 때, LPG의 경우 폭발과압에 따른 영향거리가 제일 크고, DME 혼합비율이 증가할수록 영향범위는 감소하는 경향으로 나타났다. 이러한 원인은 DME의 연소열이 LPG의 연소열보다 작기 때문이다. 또한 3가지 폭발 예측 모델을 적용한 결과, TNT 등가모델은 ME 모델과 BS 모델에 비해 인근거리(약 30 m)에서 폭발과압을 과대 예측하였다.

(3) BLEVEs로 인한 폭발과압과 Fireball 복사열에 따른 영향범위는 LPG에서 최대이고, DME 혼합비율이 증가할수록 감소하였다. 그러나 LPG와 DME 20 %인 경우, 영향범위는 매우 유사한 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 산하 에너지관리공단에서 지원되는 “에너지·자원기술개발 사업”의 연구비로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] 백영순외, “기술동향: DME(디메틸에테르)에너지의 보급전망”, *가스산업과 기술지*, **3**(1), 26-39, (2003)
[2] 디지털 가스신문, “주목받는 LPG+DME 연료 상용화”, 9월 24일(2008)
[3] 조원준, 김승수, “신재생 에너지로서 DME 기술개발 현황”, *한국공업화학회지*, **20**(4), 355-362, (2009)
[4] 조원준, 백영순, “KOGAS DME 기술개발 및 DME 사업화 현황”, *한국가스연맹*, 여름호, 23-39, (2010)
[5] 가스사고연감, 한국가스안전공사,(2002~2009)
[6] 조영도, “액화석유가스 충전소의 안전거리에 관한 연구”, *KIGAS*, **3**(2), 24-33, (1999)
[7] Quantitative Risk Assessment PHAST, Managing Risk DNV.
[8] CCPS, “Consequence analysis”, Centre for Chemical Process Safety, AIChE, New York, USA, (1999)