한국화재소방학회, 제18권 제2호, 2004년
[논 문]

T. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng.
Vol. 18, No. 2, 2004

CNG 버스 및 충전소의 화재 위험도 평가

The Fire Risk Assessment in Compressed Natural Gas Buses & Gas Station

고재선† · 김 효

Jae-Sun Ko† · Hyo Kim

서울시립대학교 화학공학과
(2004. 4. 30. 접수/2004. 6. 7. 채택)

요 약

Diesel 버스가 대체적으로 주류를 이루는 일반버스들에 대한 위험도 평가결과 첫째, 순간적인 누출이 일어날 빈도는 1.4E-3/bus/year이었으며, 이로 인한 하부사상으로 Fireball의 결과를 초래할 확률은 1.7E-4이었다. 또한 그 중 CNG 버스에서 순간적인 누출이 일어날 수치는 0.002 event/year로 나타났다. 둘째, 균열에 기인되어 점차적인 누설이 일어날 빈도는 3.7E-bus/year로 평가 되었으며, 이에 대한 하부사상으로서 jet flame의 결과를 초래할 확률은 1.2E-3으로 나타났다. 또한 CNG 버스에서 점차적인 누출이 일어날 수치는 0.04 event/year이었다. 아울러 피해 예측 면에서 CNG 버스와 디젤버스의 운송거리에 대해 화재 사상자들을 비교하였을 때, 디젤버스는 0.091 Fire fatalities/100-million miles이었으며, CNG버스는 대략 0.17 Fire fatalities/100-million miles이었다. 이 의미는 화재로 인한 치명적인 사상자수를 비교 했을 때 CNG버스는 디젤버스에 비해 평균 두 배가 위험하다는 것을 보여 주는 것이고, 결국 CNG버스들이 디젤버스들에 비해 주요 화재에 대해 민감하다는 것을 말해 주는 것이다. 본 연구에서 CNG버스들의 위험도를 평가하기 위해 사용된 총칭적인 모델들과 고장 데이터들은 적정하다. 그러나 CNG버스와 관련된 연구에 있어서 더욱 더 정확한 결과를 제공하기 위해서는 향후 더 정확한 물리적인 면에 기초한 모델들과 CNG버스에 대한 자료 확충 및 데이터베이스화가 요구된다.

ABSTRACT

The results of the risk assessing on general buses, consisting mainly of diesel-fueled buses, show that the frequency of the instantaneous release is 1.4×10^{-3}/bus/year, from which the probability of the formation of fireball as a sub event becomes 1.7×10^{-4}, and show that the leakage from the CNG-fueled buses is 0.002 event/year. Also, the frequency of gradual release due to a crack is estimated at 3.7×10^{-3}/buses/year, and a subsequent probability at which this could lead to a jet flame as a sub event is 1.2×10^{-3}. This corresponds to 0.04event/year for the CNG-fueled buses. Dividing all the fired casualties by the running distance of diesel-fueled buses, the risk is 0.091 fire fatalities per 100-million miles. And the total fire risk for CNG buses is approximately 0.17 per 100-million miles of travel. This means that CNG buses is twice or more dangerous than diesel buses. After all CNG buses are more susceptible to the major fires. In the aspect of the reliability of this study, generic models and the failure data used in assessing the risks of CNG buses are appropriate. However, more accurate physics-based models and databases should be supplemented with this study to provide the better results.

Keywords : CNG risk, Transportation risk, Natural gas explosion and fire, Comparative risk

1. 서 론

어떤 새로운 기술과 관련한 위험은 항상 관심사가 되며, 그것은 주의 깊은 연구와 검토가 요구되어진다. CNG를 연료로 하는 수많은 차량들은 1980년대 초부터 증가하고 있다. 이러한 기술은 가솔린과 디젤을 연료로 하는 차량들과 비교함으로서 새롭게 고찰되어진다. 그 이유는 청정연소 특성과 엄격한 청정공기 요

† E-mail: 119kjs@hanmail.net

구조건이 80년대에 몇몇의 미국의 도시에서 법률로서 제정(Clean Air Restoration Act of 1989, -HR2323, Clean Air Restoration and Standards Attainment Act-S1630, The Energy Policy of 1992-EPACT) 되는 것을 시작으로 각 국에서는 에너지 보호에 대한 국가의 목표설정 및 대체연료의 사용에 대한 증진 등 원유를 수입하는 대안으로부터 유도되었다. 결국 1992년 에너지 정책 법령에 대체연료를 사용하는 전 차량에 대해 특별한 요구사항의 내용이 포함되었고(California south coast air quality management district, Rule 1195), 현재 국내에서도 3,000여대의 CNG로 구동되는 차량이 운영되고 있으며 향후 급속히 늘어날 전망이다. 이에 따라 본 연구에서 CNG차량의 화재 및 폭발방지를 위한 방편으로 경험적 사례와(NHTSA : The National Highway Traffic Safety Administration) 함께 Probability Risk Analysis(PRA)을[1] 이용하여 누출로 인한 개인, 장치설비 및 주위 인근의 지역사회에 미치는 CNG차량과 관련된 사고를 예방하려는데 그 목적이 있다.

1.1 CNG(Compressed Natural Gas)의 잠재적 위험성 분석에 관한 중요성

천연가스누설은 매우 위험한 사건이며, CNG를 연료로 하는 버스에 있어서 위험에 대한 지배적인 근원이다. 안전성에 영향을 미치는 천연가스의 물리적인 특성들은 자연발화온도, 가연한계영역이다. 여러 가지 천연가스의 점화온도는 연료 성분들과 함께 450~600°C의 영역에서 평가되는데, 천연가스는 가솔린 또는 심지어 디젤연료와 비교될 때 높은 자연발화온도를 가진다. CNG연료는 누출사고시 가연성으로 되는데 외부화재에 노출될 때는 실린더 안의 가스의 온도는 압력의 증가로 인해서 올라갈 것이다. 외부화재는 또한 역으로 실린더의 강도에 영향을 미친다. 따라서 가스의 누설 이후 이어지는 화재위험성을 초래하는 여러 가지 고장메커니즘에 대해 연구 되어져야만 하는데, 두 가지 가장 중요한 고장 메커니즘은 스트레스성 부식에 의한 균열과 피로이다. 따라서 NHTSA(National Highway Traffic Safety Administration)는 충돌에 의해 야기되는 영향에 CNG실린더의 건전성을 안전하게 보증하기 위한 최소한의 시험순서의 요구 지침을 개발하였다. 또한 NHTAS는 내구성을 보증하기 위해서, 초기 강도와 CNG의 용기의 피로에 대한 저항에 대해 완전압력 하에서 18000회 누설에도 유지할 수 있는 CNG탱크를 요구하였다. 이것은 버스의 기대수명인 대략 15-20년과 동등한 것이다. 그러나 위에서 제시되고 논의된 안전에 대한 관심사는 연료로서 CNG의 사용 시 부과되는 화재 위험성이었다. 따라서 이 연구는 CNG버스 운용 시 치명적인 결과를 초래하는 시나리오와 사건에 대한 빈도 결정을 위하여 전통적인 확률 위험성 평가인 PRA(Probability Risk Analysis)[1] 기술과 함께 총괄적이고 경험적 사례인 NHTSA(National Highway Traffic Safety Administration)의 데이터를 이용하였다.

1.2 위험도 분석 방법론

Fig. 1에 나타나 위험도 평가 방법의 절차와 같이 이 연구에 있어서 초점은 가스를 연료로 하는 버스의 고장모드[8,9]에 상대적으로 중요한 결과에 대한 중요성과 발생빈도를 측정하는 것이다. 고장모드에 대한 위험한 상태 및 사건은 높은 압력에 기인한 비산물과, 주요한 폭발, 화재를 일으킬 수 있는 잠재성인데 이것은 다음의 정량적 위험성평가를 위해 필요한 중요한 사건 시나리오의 목록으로 이용되었다. CNG버스에 대한 시스템 고장확률과 구성품을 평가하기 위해서 부족했던 고장율 데이터는 핵산업, 화학공업, 우주산업 그리고 다른 관계된 산업공정에서 사용된 비슷한 구성품이나 동일한 것에 관한 총칭적인 고장을 데이터를 이용하였다.[4,5]

정리된 고장율 데이터는 FTA(Fault tree analysis)와 ETA(Event tree analysis)의 화재 및 폭발을 초래하는 사건의 시나리오를 묘사하기 위해 사용되었고, 발생빈도를 정량화 하였다. 즉 ETA와 FTA는 주어진 초기 고장사건의 발생과 이에 각각에 부가되는 가스 누출에 대한 확률을 계산하기 위해 이용되었다. 마지막으로 디젤로 구동되는 버스의 위험성은 계산되어진 CNG의 위험도와 비교되었다.[6]

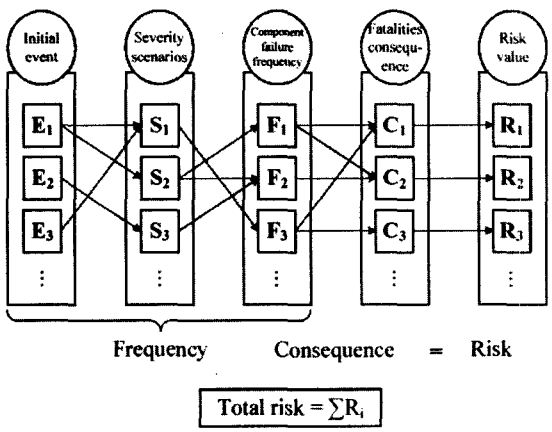

Fig. 1. Overall quantitative risk assessment approach.

2. 위험도 평가를 위한 시나리오 구성 및 분석

모든 가스누출은 확산과정이 순간적이거나 연속적인 방출이거나 관계없이 대부분의 경우 다음의 Table 1에서 제시하는 4가지 단계를 거쳐 확산이 일어난다. 초기 난류단계 이 후의 증기운 가장자리 부분이 중력에 의하여 퍼져나갈 때 대칭적으로 일어나며, 이때 방출가스는 4단계의 확산과정 중에서 2단계인 혼합(Hybrid)과 Slumping단계가 시작되고, 혼합모델(Hybrid Model) 또는 공기 보다 무거운 증기운 모델(Dense Model)로 변화시켜 해석하여야 한다. 가스누출은 순간적이거나 점차적일 수가 있고, 가스의 단열팽창은 탱크의 파열에 따라서 순간적인 누출로 발생한다. 또한 점차적인 누출은 연료라인의 균열 또는 접합부의 누설로부터 발생하며, 1/4 "인치 보다 더 큰 구성품의 결함은 가스의 순간적인 누설로 일어난다. 역으로 점차적인 누설은 동등하게 열린 구멍의 1/4"인치 보다 작은 고장에 의해 일어난다. 가스의 단열팽창은 폭발 잠재성을 가진 가연성의 (공기/가스) 혼합물을 형성하는 결과를 초래한다. 만약 혼합물이 즉시 점화되었다면 BLEVE 또는 Fireball의 결과를 나타낸다. 누설된 가스의 지연점화는 지속적으로 혼합됨으로서 가스운(Vapor Cloud)을 형성한다. 점화는 증기운 폭발 또는 Flash fire의 결과를 나타낸다. CNG의 점차적인 누출은 만약 즉시 점화되었다면 공기를 수반한 가스의 혼합을 제한하고 혼합물의 근접한 곳에서 Jet flame의 결과를 초래한다. 지연점화는 가연성 공기/가스 혼합물의 축적을 초래하는데 만약 점화 된다면 그것은 증기운 폭발 또는 Flash fire를 일으킨다.

2.1 CNG의 순간적인 누출에 관한 ETA

Table 2는 가스의 순간적인 누출시 ETA를 작성하기 위한 하부사상별 기본적인 입력 자료이다. Table 2의 순간적인 누출시 기본 입력 자료를 적용하여 완성한 ETA가 다음의 Fig. 2이다. 여기에서는 가스의 확산과 점화의 가능성을 결정하는데 있어서 기본적인 두 가지 확산 시나리오가 고려되었다. Dense Cloud dispersion과 Nurtural or buoyant dispersion이다. 가스의 순간적인 누출이 있었다면 점화는 지연되었을 것이고, 그때 그 가스는 Dense cloud로서 확산할 것이며, 점화가 될 때 Flash fire 또는 폭발을 형성할 것이다. 또한 하나의 분출로서 점차적인 가스의 누출은 중력확산과 Flash fire에 있어서의 결과로 지연 점화를 초래할 것이다. 여

Table 1. Properties for dispersion model

Stage	Phase	Model	Entertainment Regime	Edge Spreading Regime	Concentration Profile
1	Turbulent Mixing	Uniform jet Model	Turbulent(Jet)	Turbulent	Uniform
	Turbulent Mixing	Gaussian jet model	Turbulent(Jet)	Turbulent	Gaussian
2	Hybrid	Hybrid Model	Turbulent(Jet)	Slumping	Uniform
3	Dense Cloud	Dense Cloud Model	Dense	Slumping	Uniform
4	Passive	Passive Dispersion Model	Atmospheric Turbulent	Passive	Gaussian

Table 2. Input data for make up Event Tree Analysis by CNG Instantaneous release[7-9)]

Event	Frequency or Probability	Description
Immediate ignition	0.25	The causes of failure is a firing, and the initial leakage spreads out broadly.
Non-Immediate ignition	0.75	
Delayed ignition	0.9	Diverse ignition sources, huge vapor cloud, and dense population.
Non-Delayed ignition	0.1	
UVCE	0.5	Tremendous amount of flammable liquid are released so that the probability of UVCE is high.
Flash fire	0.5	
Delayed ignition	0.2	The probability of ignition becomes lower due to lesser sources.
Non-Delayed ignition	0.8	

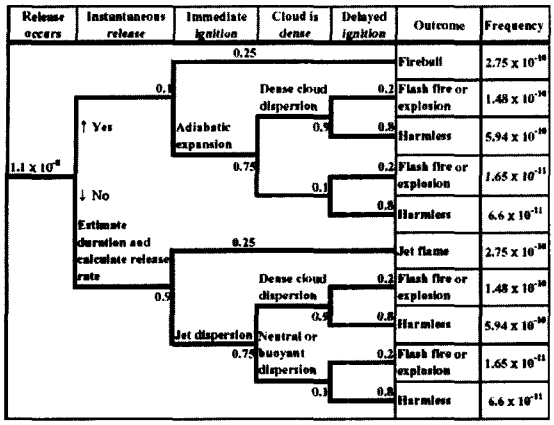

Fig. 2. Event tree of CNG Instantaneous release.

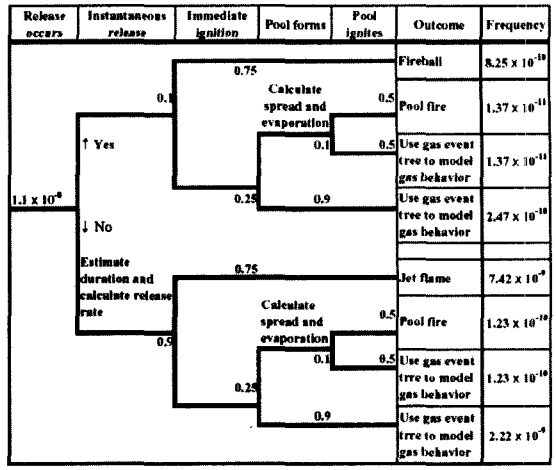

Fig. 3. Event tree of CNG Gradual release.

기서의 점화 가능성의 값들은 결론적으로 화재 및 폭발의 강도를 정량화 하는데 이용될 것이고, 또한 각각의 사건에 대한 consequency는 시나리오와 관련하여 화재와 폭발의 강도 즉 어떤 사람이 1분 동안의 화재열 플럭스인 25.0 kw/m^2 또는 그 이상에 노출되었을 때 받는 것을 추정함으로서 계산되어질 것이다.

2.2 CNG의 점진적인 누출에 관한 ETA

Table 3은 가스의 점차적인 누출시 ETA를 작성하기 위한 하부사상별 기본적인 입력 자료이다. Table 3을 이용하여 점차적인 누출시 기본 입력 자료를 적용하여 완성한 ETA가 다음의 Fig. 3이다.

Table 3. Input data for make up Event Tree Analysis by CNG Gradual release[7-9]

Event	Frequency or Probability	Description
Immediate ignition	0.1	Including no extra sources and lower release frequency, ignition in proceeding is low.
Non-Immediate ignition	0.9	
Delayed ignition	0.75	Probability of delayed ignition is high due to population.
Non-Delayed ignition	0.25	
Delayed ignition	0.1	The probability of ignition becomes lower due to lesser sources.
Non-Delayed ignition	0.9	

Table 4. Frequency of gas release events & assessment of the probability of scenarios involving gas release

Hardware/Human failures	Frequency /bus/year	Priority Ranking	Subsequent gas release scenarios	Probability	Priority Ranking
Component catastrophic failure	1.42E-3	(5)	Instantaneous gas release and ignition source present due to component catastrophic failure	1.7E-4	(4)
Component degraded failure	3.60E-3	(3)	Gradual gas release and ignition source present due to degraded failure of component	1.2E-3	(3)
Accidental impact	3.50E-2	(2)	Instantaneous gas release and ignition source present due to accidental impact component failure	1.7E-4	(4)
Electro-static discharge	1.40E-5	(6)	Gas release with electro-static discharge ignition potential	3.7E-3	(2)
Non-CNG fire	3.60E-4	(4)	Presence of fire to cause gas release due to non-CNG fire impingement on components containing CNG	9.7E-2	(1)
Operator error	4.0E-2	(1)	Operator error resulting in CNG release	2.8E-5	(5)

3. NHTSA(National Highway Traffic Safety Administration)에 의한 빈도분석

3.1 CNG를 연료로 하는 차량에 대한 빈도 분석

Table 4는 NHTSA(National Highway Traffic Safety Administration)의 자료를 활용하여 초기사건에 대한 빈도를 계산한 것이다. 살펴보면 구분된 기기 및 인적요인에서 가장 높은 빈도를 나타내는 것으로는 운전자 실수로서 4.0E-2 bus/year이었으며 이에 부가적으로 발생하는 가스누출시나리오로서는 운전자 실수로 인한 CNG누출로서 확률은 2.8E-5이었다.

다음으로는 충돌에 의한 사고로 3.50E-2bus/year, 이에 부가적으로 발생하는 가스누출시나리오로서는 순간적인 누출로 이에 대한 확률은 1.7E-4이었다. 가장 낮은 빈도를 나타낸 것으로는 정전기 방전으로 1.40E-5, 이에 부가적으로 발생하는 가스누출시나리오로서는 가스누출과 함께 잠재적으로 정전기방전이 점화가 될 확률은 3.7E-3이었다. 결과적으로 빈도가 높은 측면에서는 운전자 실수, 구성기기의 품질저하로 인한 고장, non-CNG fire, 구성기기의 마비, 정전기방전 순이었으며, 부가적으로 발생할 수 있는 시나리오 측면의 높은 확률 순서로는 non-CNG fire, 정전기 방전, 구성기기의 품질저하로 인한 고장, 구성기기의 마비, 충돌사고, 운전자실수이었다.

3.2 빈도 분석 결과

Table 5는 가스 누출 후 발생하는 중요 시나리오에 대해서 확률 값을 계산한 것이며, Table 6은 가연성가스를 사용하는 차량에 대해 누출에 따른 빈도를 계산한 것으로 살펴보면 먼저 가연성 가스의 순간적인 누출의 빈도는 1.4E-3/bus/year로 평가되었다. 또 점화원이 있을 때 이런 지속적인 누출로서 Fireball의 결과를 초래할 확률은 1.7E-4이며, 이것을 연간으로 변환한 결과는 2.4E-7이다. 그리고 조사된 8500대의 CNG 버스와 현행 인구에 대해 그러한 누출이 일어날 수치는 0.002 event/year로 나타났으며, 이것은 500백년만의 한 번 발생함을 의미한다.

두 번째로, 누설 및 균열에 기인된 점차적인 누설에 대한 빈도는 3.7E-3 bus/year로 평가되었으며, 다음으로 발생할 Jet flame의 확률은 1.2E-3으로 나타났으며, 이것을 연간으로 변화한 결과는 4.4E-6이며, 이것을 CNG 버스에 대한 현행 인구에 적용하면 0.04 event/year이며, 다시 말해 25년에 한번 일어날 수 있는 수치이다. 다음 Table 6은 가스를 연료로 하는 버스에 대해 최종적인 빈도분석을 요약해서 정리한 것이다.

Table 5. Summary of probability risk analysis results

CNG bus fire scenarios resulting from the following causes	Frequency of occurrence/ bus/year	Ranking	Risk (fatalities/bus/ year)	Ranking	Risk (fatalities/100 million miles)	Ranking
Catastrophic failure of bus or station hardware components leading to	1.4E-3	4	4.1E-6	1	4.2E-2	1
Degraded failure of bus or station hardware components	3.7E-3	3	3.1E-6	3	3.2E-2	3
Electro-static discharge of CNG	1.4E-5	6	3.2E-6	2	3.3E-2	2
Accidental impact mainly due to collision	3.6E-2	2	3.0E-6	4	3.1E-2	4
Non-CNG release fires	3.6E-4	5	2.3E-6	5	2.4E-2	5
Operator error	4.0E-2	1	3.5E-7	6	3.6E-3	6
Total fire fatality risk			1.6E-5		1.7E-1	

Table 6. Results of frequency analysis for gas-fueled buses

Instantaneous release		Gradual release	
Frequency of release	1.4E-3/bus/year	Frequency of release	3.7E-3/bus/year
Probability o Fireball	1.7E-4	Probability of Jet flame	1.2E-3
CNG buses	0.002 event/year	CNG buses	0.04 event/year

4. CNG 충전소의 대규모 누출시 Worst Case 경우의 빈도 산정

다음 Fig. 4는 CNG 충전소의 P&ID이고, CNG의 대규모 누출을 초래하는 중간사상(event)을 각각 M1 = 차량에 적재시 홀림, M2 = 내부 implosion에 기인한 실린더 파열, M3 = 과압에 기인한 실린더 파열로 가정하여 빈도를 산정하였다.

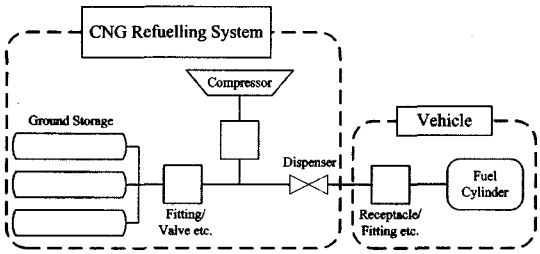

Fig. 4. P&ID of CNG refueling system.

Table 7은 가연성 가스 중 CNG가 누출되었을 때 위에서 설정한 각각의 시나리오에 대해서 발생할 수 있는 빈도를 분석한 것으로 Event tree를 구성하기 위해서 각 사건에 대해 generic data 및 Export opinion을 요약하여 빈도 및 확률의 기본데이터를 정리한 것이다. 먼저 가압된(pressurized) CNG의 대규모 누출이 일어날 빈도는 1.0E-4/yr, 실린더에서 즉시 점화 될 확률은 0.1, 인구밀집지역으로 바람이 불 확률은 0.15, 인구밀집지역 인근에서 점화가 지연될 경우의 확률은 0.9, Flash fire 보다는 UVCE가 될 확률은 0.5, Jet Flame으로 인해 탱크가 충격을 받는 경우의 확률을 0.2로 산정 하였다. Fig. 5는 CNG의 누출에 대한 Fault tree로서 하부사상을 지진, 토네이도 등과 같은 외부적인 원인을 배제하고 내부적인 원인으로 운반차량 충전시 누출, 내파로 인한 파열, 과압에 의한 파열에 대해 generic

Table 7. Event tree input data

Event	Frequency or Probability	Source of data
A : Large leakage of pressurized CNG	1.0E-4/yr	Fault tree analysis
B: Immediate ignition at tank	0.1	Export opinion
C: Wind blowing toward populated area	0.15	Wind rose data
D: Delayed ignition near populated area	0.9	Export opinion
E: UVCE rather than flash fire	0.5	Historical data
F: Jet flame strikes the CNG tank	0.2	Tank layout geometry

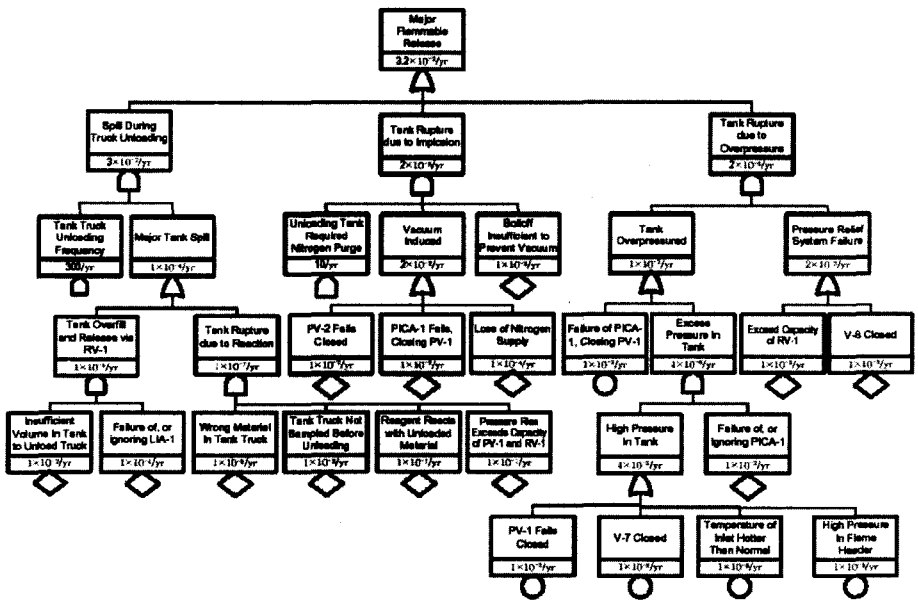

Fig. 5. Fault tree analysis of Compressed Natural gas vessel.

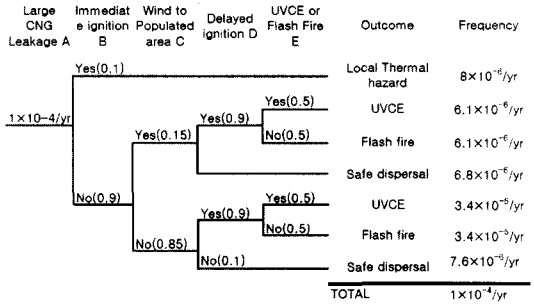

Fig. 6. Event tree outcomes for scenarios.

data[4,5]를 이용하여 구성된 FTA이다.

또한 Table 7을 이용하여 event tree를 구성한 것이 Fig. 6이고, 이러한 빈도를 예측하기 위한 계산방법과 그에 대한 최종빈도를 구한 것이 Table 9이다.

Table 7의 input data를 적용했을 때 ETA에 대한 최종 결과영향에 대한 빈도분석결과인 Table 9를 살펴보면 Flash fire가 발생할 빈도는 40.1E-6, UVCE가 발생될 빈도는 40.1E-6, Local thermal hazard인 경우는 8.0E-6, Safe dispersal인 경우는 14.4E-6로 나타났다.

5. CNG 및 Diesel 버스의 연료누출에 대한 피해영향분석

CNG 및 Disel차량의 탱크 용량을 일반 버스기준인 각각 813L 및 200L로 한정하고 사고의 형태를 Catastrophic인 Tank Crush(Instantaneous)로 하고, 탱크 내용물인 Diesel 및 CNG가 동시 누출되었을 때 피해영향 결과를 산정하기 위하여 범용적인 상용 프로그램인 PHAST 6.0을 운용하였다.

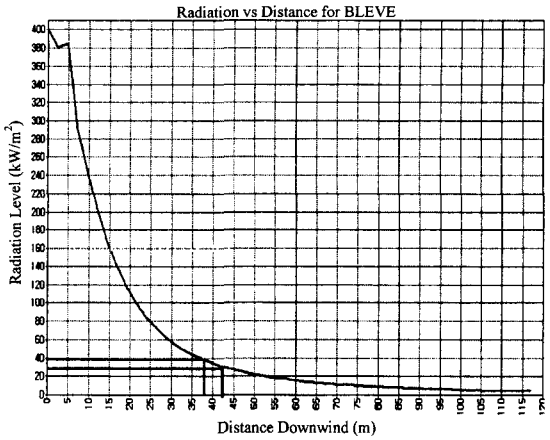

Fig. 7. Radiation vs distance for BLEVE of Diesel.

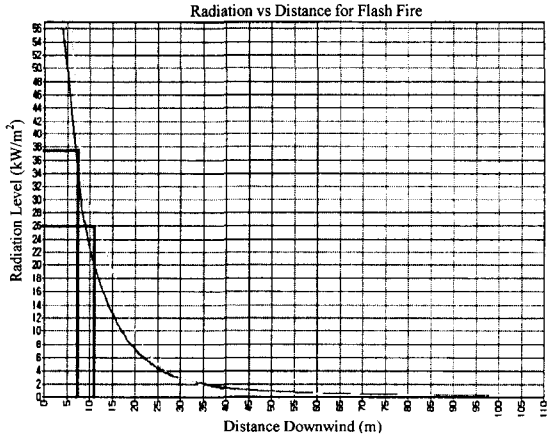

Fig. 8. Radiation vs distance for Flash fire of CNG.

Table 8. Calculation results of frequencies of four major intermediate events

Classification	Intermediate Event	Calculation	Frequency
M1	Spill during vehicle unloading	$(300yr^{-1}) \times (1 \times 10^{-4})$	3E-2/yr
M2	Tank rupture due to implosion	$(10yr^{-1}) \times (2 \times 10^{-2}) \times (1 \times 10^{-2})$	2E-3/yr
M3	Tank rupture due to overpressure	$(1 \times 10^{-2}) \times (2 \times 10^{-3})$	2E-5/yr

Table 9. Calculation method for event tree outcomes and frequency

Overcome	Sequences leading to outcome	Frequency (per year)	Priority ranking
Flash fire	$_A\bar{B}_{CD}\bar{E} + _A\bar{B}\bar{C}_D\bar{E}$	6.1E-6 + 34E-6 = 40.1E-6	1
UVCE	$_A\bar{B}_{CDE} + _A\bar{B}\bar{C}_{DE}$	6.1E-6 + 34E-6 = 40.1E-6	1
Local thermal hazard	AB	8.0E-6	3
Safe dispersal	$_A\bar{B}_C\bar{D} + _A\bar{B}\bar{C}\bar{D}$	6.8E-6 + 7.6E-6 = 14.4E-6	2
Total all outcomes	-	102.6E-6	-

Table 10. Comparison of radiation vs distance for Vehicle diesel & CNG

Material	Scenario	Radiation	Distance
Diesel Vehicle	BLEVE	25.0 kw/m^2	43 m
		37.5 kw/m^2	37 m
CNG Vehicle	Flash fire	25.0 kw/m^2	13 m
		37.5 kw/m^2	8 m

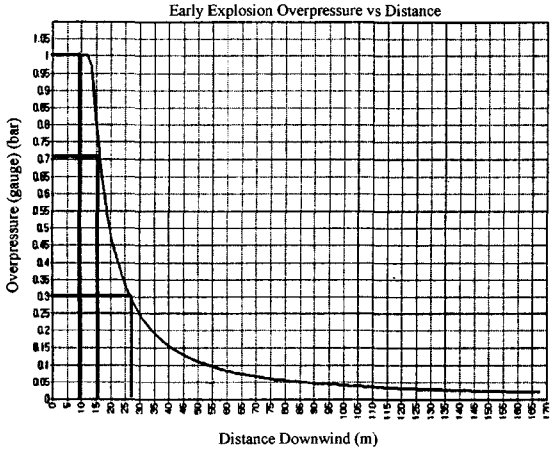

Fig. 9. Early explosion overpressure vs distance of CNG Vehicle.

Fig. 7, 8은 Diesel 및 CNG에 대하여 사건의 각 형태인 시나리오에 대해 열복사량에 대한 피해거리를 나타낸 것이다. Table 10의 나타난 결과를 살펴보면 Diesel을 연료로 사용하는 경우의 차량에 있어서 BLEVE 발생시 열복사량인 25.0 kw/m^{2}에서의 피해거리는 43 m인 반면에 CNG를 연료로 사용하는 차량에 있어서는 Flashl fire 발생시 열복사량 25.0 kw/m^2 대한 피해거리가 13 m로 나타났다. 37.5 kw/m^{2}에 대해서도 BLEVE는 37 m, Flash fire는 8 m로 나타나 일반적으로 Flash fire 보다는 BLEVE가 같은 열복사량과 비교했을 때 피

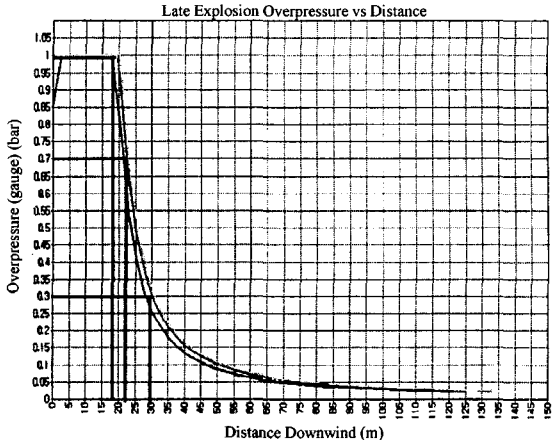

Fig. 10. Late explosion overpressure vs distance of CNG Vehicle.

해거리가 더 큼을 나타내고 있다.

Fig. 9, 10는 CNG를 연료로 사용하는 차량에 대한 초기 및 후기 폭발 과압에 대한 영향거리를 나타낸 것으로 그 결과를 요약한 것이 Table 11이다. 이 결과를 살펴보면 폭발시 95% 이상 심각한 피해를 입힐 수 있는 과압인 0.3 psi 경우에 초기 및 후기에 대한 피해거리는 각각 27 m, 30 m로 나타나 후기 폭발시 후 폭풍에 의한 영향거리가 좀 더 크다는 것을 나타내고 있다.

6. 연구결과 및 고찰

6.1 CNG 및 Diesel 버스와의 Frequency 비교

NHTSA(National Highway Traffic Safety Administration)의 자료를 분석한 결과 2000년에 운용된 448,000 버스의 대부분은 디젤로 구동되는 것이었다. 이 버스들이 운행한 거리는 대략 년 간 40억3천마일이었다. 운용된 이 버스들에 의해 한 해에 대략 1백 30명의 사망자가 발생하였으며, 그 중 10명은 학교버스의 승객 이었다. 이것을 대략 버스가 운행한 거리로 변환한 위험

Table 11. Comparison for early & Late explosion overpressure vs distance of CNG

Material	Scenario	Overpressure	Distance	Damage
CNG Vehicle	Early explosion	1 psi	10 m	House damage(1/4)
		0.7 psi	17 m	House damage(1/2)
		0.3 psi	27 m	Serious damage probability-95%
	Late explosion	1 psi	18 m	House damage(1/4)
		0.7 psi	22 m	House damage(1/2)
		0.3 psi	30 m	Serious damage probability-95%

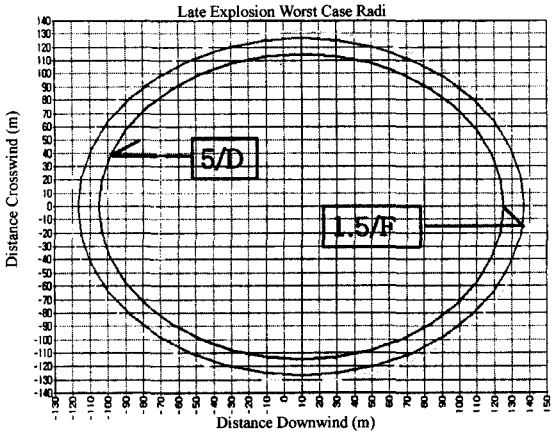

Fig. 11. Late explosion worst case radi of CNG Vehicle.

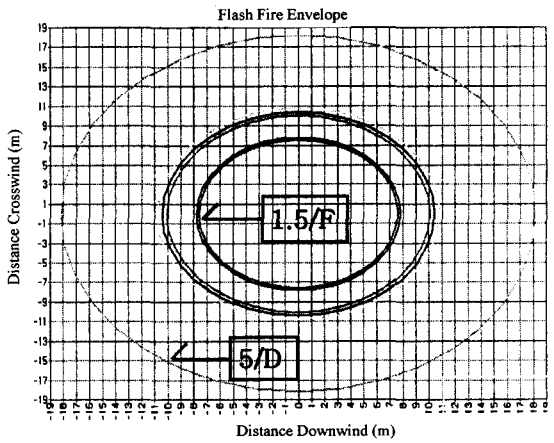

Fig. 12. Flash fire envelope of CNG Vehicle.

도는 0.24 fatalities/100-million으로 계산되어진다. 또한 대략 모든 치명적인 사상자의 3.0%는 화재에 의한 사상자이며, 그 중 8%는 승객 사상자들이다. 그리고 운용된 버스의 모든 화재 사상자들을 고려했을 때 위험도는 0.091 Fire fatalities/100-million miles이었으며, CNG버스 화재 위험도는 대략 0.17/100-million miles이다. 이 의미는 화재로 인한 치명적인 사상자수를 비교했을 때 CNG버스가 디젤버스에 비해 평균 두 배가 위험 하다는 것이며, 이것은 가능한 최악의 화재시나리오에 있어서 CNG로 구동되는 버스들이 디젤로 구동되는 버스들의 화재에 비해 가장 민감하며, 높은 치명적인 사상자를 낼 위험이 부과된다는 것이다.

6.2 CNG 및 Diesel 버스와의 Consequence 비교

CNG 및 Diesel의 탱크 및 용기의 연료누출에 있어서 사고영향피해결과를 예측할 수 있는 운용소프트웨어인 PHAST 6.0을 운용한 결과 첫째 Thermal Radiation과 Distance의 측면에서, Diesel의 경우인 BLEVE와 CNG의 경우인 Flash fire의 열복사량 25.0 kw/m^2 및 37.5 kw/m^2 모두에서 일반적으로 BLEVE보다는 Flash fire가 같은 열복사량에 대해 피해거리가 더 큼을 나타내고 있다. 이 의미는 Frequency가 높다고 해서 반드시 Consequence 이에 비례되는 것이 아님을 나타내고 있다. 둘째 Overpressure에서는 심각한 피해를 입힐 수 있는 과압인 0.3 psi경우에 초기 및 후기에 대한 피해거리는 후기 폭발시 피해영향거리가 좀 더 큰 것을 보여주고 있는데 이는 후풍풍의 영향으로 인한 결과이다.

6.3 CNG 충전소의 누출시 Worst Case 경우의 빈도 분석

Table 8의 계산결과를 보면 결과적으로 Flash fire와 uvce가 가장 높은 빈도를 보이고 있으며, 상대적으로 Local thermal hazard가 발생할 빈도가 비교적 낮음을 볼 있다. 따라서 CNG 차량의 연료누출시 심각한 피해가 예상되는 것은 과압 보다는 Flash fire 발생시 Thermal Radiation에 의한 피해가 우선한다는 것을 말해 주고 있다.

6.4 CNG 및 Diesel 버스 안전허용기준

CNG버스의 안전허용기준을 정하는 주요한 목적은 이를 기준으로 허용되는 위험성(Acceptable)과 허용되지 않는 위험성(Unacceptable)을 찾아낼 수 있어 허용되지 않는 위험성을 줄이는 작업을 통해 전체 CNG버스의 위험성을 낮출 수 있는 중요한 Tool이 될 수 있기 때문이다. 아울러 이러한 CNG버스의 누출사고로 인한 화재나 폭발이 발생하는 경우, 인구밀집 지역의 분포와 관련되어 사고의 피해범위가 결정되는데, 특히 CNG버스의 누출사고나 디젤버스의 누출 사고 등은 인구밀집지역에 있어서는 매우 위험한 결과를 가져올 수 있기 때문에 이들에 대한 안전관리체계상 우선 순위선정에 안전허용기준의 정의는 매우 중요하다. Fig. 11은 각 나라에서 사용하고 있는 위험 허용기준의 범주를 요약한 것이다. 이 도표에서는 frequency와 consequence를 log-log축으로 한 도표이며, "a"는 Gradual release시 CNG 버스에서 연간 일어날 발생빈도인 4E-2 event/year이며, "b"는 Gradual release가 발생할 빈도인 3.7E-3/bus/year, "c"는 Instantaneous release시 CNG 버스에서 연간 일어날 발생빈도인 2E-3 event/year, "d"는 Instantaneous release할 빈도인 1.4E-3으로서, 관리가 필요한 최대 수용가능 한계를 나타내는 직선은 log y = -log^x-1, 관리가 적절한 최대 수용가능 한계를 나타내는

Table 12. Priority ranking in acceptable risk criteria for gas-fueled buses

Classification	Frequency	Consequence (Deaths)	MAX Acceptable Criteria (management necessary)	
			Equation	$\log y = -\log^x - 1$
			Risk	Ranking
a	4E-2	3-4	12E-2 - 16E-2	1
b	3.7E-3	40-50	148E-3 - 185E-3	2
c	2E-3	40-50	80E-3 - 100E-3	3
d	1.4E-3	40-50	56E-3 - 70E-3	4

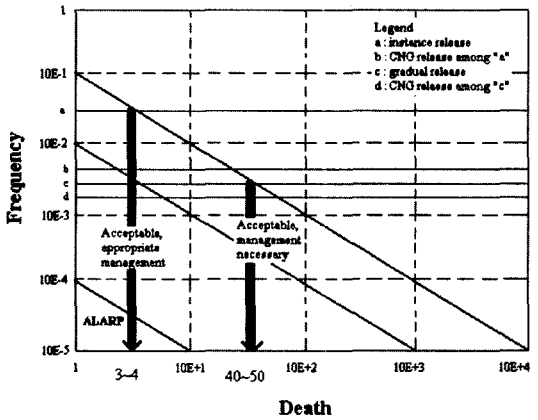

Fig. 13. Application for acceptable risk-criteria of Nations.

직선은 $\log y = -\log^x - 2$, ALARP 영역의 최대 수용가능 한계를 나타내는 직선은 $\log y = -\log^x - 4$과 "a" = y = 4E-2의 x축 교점을 구하면 관리가 필요한 최대 수용가능 한계에서는 Consequence인 3-4 person을 구할 수 있다. 또한 관리가 적절한 최대 수용가능 한계를 나타내는 직선은 $\log y = -\log^x - 2$과 "b", "c", "d"와의 x축 교점을 구하면 대략 40-50명 정도의 치명적인 사상자를 나타내고 있어 이에 대해 보다 세심한 관리적 차원의 대응이 필요함을 요구하고 있다. Table 12는 관리가 필요한 최대 수용가능 한계를 나타내는 직선인 $\log y = -\log^x - 1$에 대해 Table 6 가스를 연료로 하는 차량에서 각 발생할 수 있는 각각의 시나리오에 대해 위험 순위화 것이다.

7. 결 론

이상에서 살펴본 바와 같이 첫째 CNG버스들이 디젤 버스들에 비해 위험도가 두 배의 위험도를 가진다는 것은 더욱 더 CNG 버스들은 주요 화재에 대해 민감하다는 것이다. 이것은 CNG로 구동되는 버스들에 있어서의 경우에 가능한 최악의 화재 시나리오가 디젤로 구동되는 버스들의 최악의 경우의 화재에 비해 가장 높은 치명적인 사상자를 낼 위험이 부과된다는 것이다. 둘째 CNG 및 Diesel 버스와의 Consequence 비교 측면에서 가상시나리오인 실린더 및 용기의 연료누출의 사고영향피해결과를 예측할 수 있는 운용소프트웨어인 PHAST 6.0을 운용한 결과 Diesel의 경우인 BLEVE와 CNG의 경우인 Flash fire 모두에서 일반적으로 Flash fire보다는 BLEVE가 같은 열복사량에 대해 피해거리가 더 큼을 나타내고 있다. Overpressure에서는 심각한 피해를 입힐 수 있는 과압인 0.3 psi경우에 초기 및 후기에 대한 피해거리는 후기 폭발시 피해영향거리가 좀 더 큰 것을 보여주고 있는데 이는 후풍풍의 영향으로 인한 결과로 사료된다. 셋째 CNG충전소의 대규모 누출시 Worst Case 경우의 빈도 분석에서는 계산결과를 보면 결과적으로 Flash fire가 가장 높은 빈도를 보이고 있으며, 잠재적인 Local thermal피해는 상대적으로 낮음을 볼 있다. 넷째 빈도를 이용한 CNG 및 Diesel 버스 안전허용기준에서는 가능 한계는 인명피해가 발생치 않는 ALARP 영역의 최대 수용가능한계를 나타내는 직선인 $\log y = -\log^x - 4$와 Gradual release 시 CNG 버스에서 연간 일어날 발생빈도인 4E-2 event/year의 교점의 영역 안으로 설정하는 것이 타당하다고 생각된다. 이 연구의 신뢰성에 있어서 CNG버스들의 안전 위험도를 판별하기 위해 사용된 총칭적인 모델들과 고장 데이터들은 대략적으로 적정하다. 그러나 더욱 더 정확한 결과를 제공하기 위해서는 향후 더 정확한 물리적인 면에 기초한 모델들과 CNG버스에 대한 자료 확충 및 데이터베이스화가 요구된다. 마지막으로 이 연구는 디젤버스와 함께 CNG버스의 consequence를 비교하기 위해 수행된 위험성 평가이므로, 치명적인 사상자(death)를 낼 위험성에 있어서 보다 세밀하게 상해자(injure)들에 대한 추가적인 위험분석도 수행되어야 하며, 또한 CNG로 구동되는 버스들을 이용함으로서 보건 및 환경적인 측면에서의 비용-효과의 이득들에 대

해서도 보다 심도 있는 연구들이 활성화 되어져야 할 것이다.

참고문헌

1. AIChE/CCPS, Guidelines for Safe Storage and Handling of High Toxic Hazard Materials, Center for Chemical Process Safety, American Institute of Chemical Engineers(1988).
2. IEEE, Guide to the Collection and Representation of Electrical Electronic Sensing Component and Mechanical Equipment Reliability Data for Nuclear Power Generating Stations, IEEE Std-500-1984, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., Nov.(1993).
3. CCPS, Guidelines for Process Equipment Reliability Data, Center for Chemical Process Safety(1989).
4. Comparative Analysis of the Environmental Impact of Transportation Fuels, Gas Research Institute Digest, Vol. 12, No. 4(1983).
5. Assessment of Methane-Released Fuels for Automotive Fleet Vehicles, US Department of Energy Report DOE/CE/50179, Vol. 1-3, Aerospace Corp., EI Segundo, California(1982).
6. Evaluation of the Effect of Natural Gas Containments on Corrosion of CNG Storage Cylinder Phase II, Southwest Research Institute, Prepared for Oak Ridge National Laboratory(1991).
7. Lees, F. P., "Loss Presentation in the Process Industries", Butterworth London, Boston, Vol. 2(1980).
8. Identification of Safety Released Research and Development Needs for CNG Vehicles Fuel System, GRI-82/0061, Joyce d Thomas(1982).
9. Field study of Composite NGV Fuel Cylinders, Southwest Research Institute, Prepared for GRI, September(1994).
10. A. F. Robert, Thermal Radiation Hazards from Release of LPG from Pressurized Storage, Fire Safety Journal, Vol. 4(1984).