

가스 자동차의 지하 주차 시 위험성 분석

이 광 원* · 김 태 훈** · 오 동 석* · 오 영 달* · 서 두 현* · 신 수 일*

*호서대학교 안전공학과 · **호서대학교 산학협력단

A Study of Risk Analysis for Underground-parking of Gas Vehicle

Kwang-Won Rhie* · Tae Hun-Kim** · Dong-Seok Oh* · Young-Dal Oh*

Doo-Hyoun Seo* · Soo-il Shin*

*Dept. of Safety Engineering, Hoseo University

**Industrial & Academic Collaboration Foundation, Hoseo University

Abstract

We studied the risk analysis of fire and explosion caused by gas leak in underground-parking of gas vehicle. However, an entrance regulation of gas vehicles (H₂/LPG/CNG etc.) to underground garages has not been enacted in Korea. In case, a gas explodes in an underground parking garage placed in overcrowded residential area, such as an apartment, the scale of the damage would cause tremendous disaster. Faults of vehicle parts and management problems were evaluated by using the Failure mode and effect analysis (FMEA), which is a qualitative analysis method. The range of the damaged area by the explosion and the damage scale by the explosion pressure were analyzed by using the process hazard analysis software tool (PHA_{ST}). The study is expected to facilitate enactment of the regulation for the underground parking to restrict the gas vehicle.

Keywords: Gas Vehicle, FMEA, PHAST, risk analysis, gas explosion

1. 서 론

최근 국내에서는 지구 온난화 현상을 예방하기 위하여 온실가스 감축의 방안으로 자동차 및 교통수단에 대하여 「저탄소 녹색성장 기본법」 제47조 제1항을 적용하여 제작자로 하여금 그 교통수단에서 배출되는 온실가스를 감축함으로써 온실가스 감축을 위한 국제 경쟁 체제에 부응할 수 있도록 유도하고 있으며, 「환경 친화적 자동차의 개발 및 보급촉진에 관한 법률」 제2조 2호에 의거하여 환경 친화적 자동차에 해당하는 전기자동차·태양광자동차·하이브리드자동차·연료전지자동차·천연가스자동차 또는 클린디젤자동차를 개발 및 보급되어 있는 실정이다.(1)

특히, 자동차의 동력원으로 사용되는 LPG (Liquefied Petroleum Gas), CNG(Compressed Natural Gas), 수소 가스는 Gasoline, Diesel 등 기존 탄화수소 계열의 연료를 대체하고, 온실효과의 주원인인 이산화탄소 발생 감소 및 에너지 효율 향상 등의 특성으로 인해 차세대 청정에너지원으로 주목을 받고 있다. 하지만, LPG·CNG·수소가스는 자동차의 동력원으로 사용하기 위하여 자동차에 장착하거나 장착할 목적으로 제작된 내압 용기에 고압으로 충전하여 저장하기 때문에, 연료의 생산에서 보급까지의 제조·저장·판매·운반에 대한 전반적인 과정에서 누출, 확산, 점화 및 폭발 등의 위험성이 상시 존재 하며, 밀폐된 공간 및 공기유동이 적은 공간에서 가스가 누출되는 경우에 폭발하기 쉬우며, 그

† 이 논문은 2009년도 호서대학교의 재원으로 교내학술연구비 지원을 받아 수행된 연구임을 밝힙니다.

† 교신저자: 이광원, 충남 아산시 배방읍 세출리 호서대학교 안전보건학과

M·P: 010-2616-8229, E-mail: kwrhie@hoseo.edu

2012년 1월 20일 접수; 2012년 3월 19일 수정본 접수; 2012년 3월 19일 게재확정

위험성은 휘발유나 경유 등에 비하여 폭발범위가 넓고 폭발화염 전파속도가 매우 빠르다.(4) 따라서 본 연구에서는 현재 가장 널리 보급되어 있는 LPG차량의 지하주차 시 위험의 심각성을 분석하였다.

연구방법으로는 특정소방대상물에 대하여 지면을 기준으로 주변이 개방되어 있는 지상부와 밀폐되어 있는 지하부에서 LPG 주성분인 프로판가스의 폭발위험에 대한 이론적 고찰 후 국내 LPG차량의 보급과 안전관리 실태에 대하여 알아보았으며, LPG 자동차의 시스템 분석 후 정성적 분석 방법인 FMEA(Failure Mode and Effect Analysis)를 적용하여 노후화에 따른 잠재적 위험요소를 갖는 차량의 부품과 관리상의 문제점에 대하여 검토하였고, 도출된 결과는 가스폭발사고 시나리오에 적용 후 PHAST(Process Hazard Analysis Software Tool)를 통하여 누출로 인한 폭발 범위 및 압력에 대한 피해정도를 분석하였다. 본 연구에서는 이러한 분석을 기반으로 향후 지하주차공간에서 가스자동차 안전관리에 대한 법적 기반을 마련하고자 한다.

2. 프로판 혼합비에 따른 LPG 위험성의 이론적 고찰

LPG는 온도 및 압력에 따라 기화점이 다른 프로판과 부탄을 주성분으로 하는 혼합물로 11월~2월 중에는 낮은 온도에서 쉽게 기화하도록 프로판 비율을 높인다. 하지만 프로판은 부탄에 비해 발열량이 작아 프로판 함량이 커질수록 연비가 나빠진다. 국내에서는 프로판의 비율을 30%로 혼합하여 사용하도록 권장하고 있다. -15℃이하에서는 LPG연료 특성상 시동불량 현상이 나타날 수 있다. 현재 추천되고 있는 프로판 혼합비를 권장기준을 보면 중부권의 경우 11월과 3월은 15%, 12월과 2월은 20%, 1월은 25%이며 남부권은 이보다 약간 낮은 10%, 15%, 20%이다.(4)

LPG자동차의 가스용기가 폭발하여 가스폭발사고의 최악의 경우인 LPG의 BLEVE(Boiling Liquid Evaporation Vapor Explosion)현상이 발생한다면 Fire Ball이 발생한다. LPG 30kg을 TNT로 환산할 경우 TNT 약 350kg에 해당한다. 그러나 LPG의 폭발은 TNT와 비교하기는 어렵다. 그것은 LPG의 폭발은 폭심이 집중되어 있지 않고 분산되어 TNT 당량의 1 내지 20%의 폭발력을 발생한다.(4)

3. LPG자동차 보급현황 및 안전관리 실태

3.1 LPG자동차 보급현황

LPG자동차는 국내의 경우 1982년부터 잉여 부탄가스의 수요를 개발하고 대중교통 수단의 연료비 부담을 경감하기 위하여 사업용 자동차의 연료로 사용된 이래 경제성과 환경 친화성에 힘입어 수량이 지속적으로 증가하여 왔으며, 1990년에는 장애인 소유 자동차, 소형 화물차 등으로 사용 범위가 확대되었다. 1995년에는 자동차에 의한 공해를 감소시키기 위하여 LPG를 연료로 사용할 수 있는 화물자동차의 규모제한을 폐지하는 등 자동차 연료로서 LPG의 사용이 지속적으로 증가하는 추세이다. 2008년 12월 기준으로 약 232만대가 운행 중이며, 전체 차량의 약 14%를 차지할 정도로 보급이 증가되고 있다. <표 1>은 2008년까지의 LPG자동차 연도별 등록현황을 나타낸 표이다.(2),(5),(6)

<표 1> LPG자동차 연도별 등록현황(2)

year	전체	LP가스	점유율
2004	14,934,474	1,793,711	12.01%
2005	15,396,715	1,889,593	12.27%
2006	15,895,234	2,047,401	12.88%
2007	16,428,177	2,187,066	13.31%
2008	16,794,219	2,321,272	13.82%
2009	17,325,210	2,390,962	13.80%
2010	17,941,356	2,443,575	13.61%
2011	18,437,373	2,429,298	13.17%

자료출처 : 국토해양부

3.2 LPG자동차 안전관리의 실태

<표 2> KGS에서 실행한 안전점검의 세부결과 I(2)

구분		점검차량	누출대수	점유율
차량 소유 형태별	자가용	2,684	107	4.0%
	영업용	1,720	35	2.0%
	기타 (렌터카, 보호차량 등)	67	3	4.5%
계		4,471	145	3.2%

<표 3> KGS에서 실행한 안전점검의 세부결과 II(2)

구분	누출부위	누출대수	점유율
누출부위별	기화기	62	42.8%
	전자밸브	59	40.7%
	용기밸브	8	5.5%
	충진구	7	4.8%
	점화플러그	7	4.8%
	연료주입구	2	1.4%
계		145	100%

공급자 의무규정에 따른 충전사업의 안전점검 경우도 충전소내 인력부족, 차량정체 등의 사유로 안전점검에 적극적이지 않으며, 대부분의 자동차 운전자도 안전의식 및 안전점검 인식부족으로 받기를 꺼려하거나 요구하고 있지 않는 것이 현재의 실정이다.

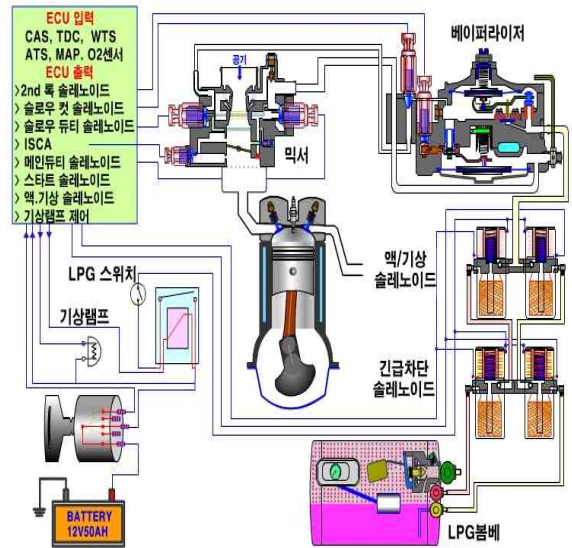
또한 가스안전공사에서는 LPG자동차를 운전하고자 하는 사람으로 하여금 가스안전공사에서 지정한 교육을 1회 받아 이수하도록 하고 있는데, 교육과목 및 시간으로는 법규 1시간, 안전관리 1시간, 가스개론 및 시청각 1시간으로 배정되어 있으며, 교육내용으로는 일반사항(용어의 정의 및 안전교육 등), 연료장치의 구조 및 자동차용 주입기의 보수점검 기준과 사고사례, 연료계통 및 주요부품의 구조와 기능, 점검 및 시동요령, 엔진 등의 정비와 조정, LPG취급요령, 고장진단, LPG의 성질 및 연소와 폭발, LPG자동차 안전관리 등으로 구성되어 LPG자동차에 관한 기초지식 습득과 안전한 차량 운전을 위한 응급조치 능력을 배양하는데 노력하고 있다.

하지만, 그럼에도 불구하고 2006년도에 한국가스안전공사(KGS)에서 LPG 자동차 대상으로 실시한 안전점검 세부결과인 <표 2>와 <표 3>에 따르면, 개인용으로 사용하는 자가용이 누출 점유율이 4%로 타용도에 비하여 가장 높았으며, 누출 부위로는 기화기와 전자밸브가 가장 취약한 것으로 나타났는데, 이는 개인 운전자의 특별교육을 통한 안전관련 의무규정과 공급자 의무규정에 따른 충전사업의 안전점검의 소극적 이행에서 발생한 현상으로 사료된다.(8)

4. LPG자동차의 시스템 분석

LPG자동차는 제조 방법과 연료공급 방법에 따라 구분된다. 제조 방법에 따른 구분으로서 LPG 연료를 사용하도록 설계된 엔진과 연료장치를 부착한 자동차를 자동차 제조사에서 제조하는 제조 차량(또는 완성 차량)과 휘발유를 사용하도록 제조된 자동차의 연료장치를 시공업소에서 LPG 연료 사용에 적합한 장치로 구조 변경된 차량이다. 또한 연료의 공급 방법에 따라 자동차 연료로 LPG만을 사용하는 단일 연료 공급 방식과 휘발유 또는 LPG 중 원하는 연료를 선택적으로 사용할 수 있는 다중 연료(Bi-fuel) 공급 방식으로 구분할 수 있다.(6)

[그림 1]은 LPG자동차 시스템의 전체 구성도를 보여준다.



[그림 1] LPG시스템의 전체 구성도

LPG자동차의 주요 부품으로는 가스용기, 필터, 베이퍼라이저, 긴급차단장치, 쿼커플러, 혼합기, 액면표시장치 및 다양한 밸브로 구성되어 있다. 주요 밸브의 종류에는 안전밸브, 과류방지 밸브, 유동 밸브, 배압 밸브, 체크 밸브, 솔레노이드 밸브가 있다.

5. 안전성 평가 기법

본 연구에서는 LPG자동차에서 발생할 수 있는 잠재적인 위험요소에 대하여 잠재요인의 존재여부를 규명하여 안전의 확보를 하기 위하여 앞에서 언급한 LPG자동차의 13개의 부품을 평가 대상으로 선정하여, 대표적인 정성적 분석 기법인 FMEA를 통하여 고장 모드, 고장 원인 및 고장으로 인한 영향을 분석하였으며, 사고 피해 예측 기법인 PHAST를 수행함으로써 가스 폭발의 범위, 압력에 대한 피해정도를 알아보았다.

5.1 FMEA

FMEA(Failure Mode and Effect Analysis)기법은 전형적인 상향식(bottom-up) 귀납적 분석방법이며 정성적인 위험성 분석기법이다. 특히 결함과 다음 상위 수준의 기능적 제품에 미치는 영향과 메커니즘을 연구하는데 적합하다. 분석방법으로는 대상 시스템의 분석을 통하여 의미 있는 부품들로 나누어 고장 형태를 예측하고 고장 원인 및 영향에 대하여 검토하여 심각도, 발생도, 검출도를 분석하고 다음 식에 의해 위험우선순위(RPN : Risk Priority Number)를 계산한다.(10),(12),(15)

$$RPN = Severity \times Occurrence \times Detection$$

<표 4> 심각도(Severity)

심각도(S)	기준
5	중대사고(인명피해+재산피해), 조업 불가
4	경미한 사고+조업일시정지
3	조업일시정지
2	결함으로 인한 성능저하
1	피해 없음

<표 5> 발생도(Occurrence)

발생도(O)	기준
5	1년 중 1번 정도 발생
4	10년 중 1번 정도 발생
3	100년 중 1번 정도 발생
2	1000년 중 1번 정도 발생
1	발생빈도 거의 없음(1번/만년)

<표 6> 검출도(Detection)

검출도(D)	기준
5	검출확률 불가능
4	검출확률은 희박하나 가능한 경우
3	검출확률 낮음
2	관리 시스템을 통해 확인
1	현 관리에 의해 검출 확률 높음, 육안으로도 확인가능

RPN 값을 결정하기 위하여 본 연구에서는 5점법을 사용하였으며, <표 4>~<표 6>과 같은 기준을 토대로 심각도, 발생도, 검출도에 평점을 주어 RPN 값을 구하였다.

5.2 PHAST

PHAST(Process Hazard Analysis Software Tool)는 결과 분석을 위한 소프트웨어 도구이다. 가스누출 시 이 결과분석을 이용하여 공정 또는 공장의 디자인 변경과 기존 운영 절차 변경 또는 기타 완화 조치를 구현하여 방지대책을 평가할 수 있다. PHAST는 독성효과, 가연성 확산과 증발 모델링을 포함해 지금까지 필드의 초기 누출로부터 잠재적인 사건의 진행을 분석한다. 또한 분석 결과는 그래픽이나 결과표 형태로 인공와 환경평가에 대한 누출 시 피해정도를 볼 수 있다.

6. 안전성 평가 분석

6.1 콘크리트 건물의 피해정도(13),(14)

일반적으로 가정에서 사용하고 있는 연료가스가 누출되어 양론비를 형성할 경우 폭발압력은 9bar 이상까지 달할 수 있으며, 이는 대부분의 건물을 충분히 붕괴할 수 있는 압력이다. 가스폭발에 의하여 건물 피해정도는 폭발압력과 임펄스에 영향을 받지만, 폭발 최대압력이 약 0.21bar 정도에 달하게 되면 건물이 완전히 붕괴될 수 있다.

지상 건물의 경우 가스폭발이 발생하면 도달할 수 있는 최대압력은 유리창 또는 문의 파손으로 개구부가 형성되므로 이론적으로 도달할 수 있는 폭발최대 압력보다 매우 낮을 수 있다. 그러나 창문이나 문의 면적이 실내 공간 부피에 비하여 작은 경우 가스폭발에 의하여 형성되는 압력이 창문이나 문이 파열되어 형성되는 개구부를 통하여 충분히 배출되지 않으므로 가스폭발에 의하여 건물이 충분히 붕괴될 뿐만 아니라 그 파편이 멀리까지 영향을 미칠 수 있다.

일반적으로 가스 누출 폭발피해가 지상에 비하여 지하에서는 더욱 심각하다. 즉 지하 공간은 환기가 잘되지 않을 뿐만 아니라, 폭발사고가 발생할 때 지상과 달리 개구부 형성이 어려우므로 이론적으로 계산되는 최대폭발압력에 도달할 수 있으며, 이는 매우 적은 가스 누출로 건물이 완전히 붕괴되는 사고가 발생할 수 있음을 의미한다. 지하실의 창문이나 문이 파손되어 개구부를 형성하더라도 지상까지 연결된 통로가 폭발압력 완화의 저항역할을 하기 때문에 개구부 역할을 충분히 할 수 없게 된다. 프로판 가스가 누출될 경우 비중이 공기보다 크기 때문에 지하 지면에 가연성 가스운을 형성하기 쉽고, 지하에서는 환기가 잘 되지 않으므로 누출된 가스가 연소되어 대부분의 에너지가 폭발압력 형성에 기여한다. 이와 같이 프로판 가스의 물질이 가지고 있는 물질의 고유특성(공기에 비하여 1.5배 무거움)으로 인하여 기존에 알려져 있는 폭발하한농도에 해당하는 가스 누출량에 비하여 매우 적은 누출로도 건물이 완전히 붕괴될 수 있는 폭발사고가 발생할 수 있다.

지금까지는 가스폭발이 일어나기 위한 최소한의 누출량을 실내의 가스농도가 폭발 하한계로 균일하게 있는 것으로 가정하여 예측하는 방법이 가장 일반적으로 사용하여 왔다. 폭발하한농도에서 폭발이 일어나도 최악의 경우 폭발압력이 약 5~6bar정도 되므로 이는 건물을 완전히 붕괴되는 0.21bar보다 매우 높은 압력이다. 따라서 피해정도에 따라 가스폭발 최소 누출량을 예측하기 위하여 실내에 누출된 가스의 불균일 농도를 고려할 필요가 있다. 프로판이 지하에서 서서히 누출될

경우 프로판은 공기보다 무거우므로 바닥에 깔리게 될 뿐만 아니라 환기가 잘되지 않으므로 대부분 불균일 농도를 형성하게 된다.

<표 7> 피해정도에 따른 폭발압력

피해정도	구조물 파괴	압력 (bar)
경미한 손상	유리창 파손 (유리파편에 의한 경상)	0.03
약한 손상	건물구조 변형 (건물파편에 의한 경상)	0.07
심각한 손상	건물부분 붕괴 (사망 또는 중상 가능)	0.14
건물붕괴	건물완전 붕괴 (사망 또는 중상)	0.21

콘크리트 건물 지하 60m³의 실내에 LP가스가 누출되어 폭발사고가 발생할 경우 피해정도에 따라서 가스 누출 최소량을 계산하면 <표 8>과 같다.

<표 8> 피해정도에 따른 LP가스 최소 누출량(Vo=60m³)

피해정도	프로판가스 누출량	
	L	g
경미한 손상	8.503	16.7
약한 손상	19.84	38.97
심각한 손상	39.68	77.94
건물붕괴	59.52	116.91

이와 같이 지하 건물의 실내에 프로판 가스가 0.12kg 누출되는 경우에 폭발사고에 의하여 건물이 완전히 붕괴될 수 있다. 또한, 0.078kg의 누출만 있더라도 심각한 손상으로 이어질 수 있다. 다량의 가스가 지하 내에 누출되어 연소상한 농도까지 도달하는 경우에는 연소상

한농도에서 가스의 연소속도가 매우 작기 때문에 화염의 흔적이 실내 일정한 높이에서 남게 된다. 이러한 화염흔적이 없는 경우 연소상한농도보다 아주 낮은 농도에서 폭발사고가 발생하게 되며 아주 적은 가스 누출량에 의하여 심각한 피해를 동반할 수 있다.

프로판가스에 대한 피해정도만을 알아보았지만, 부탄과의 혼합을 생각한다면 피해가 더 커질지 작아질지는 PHAST를 이용하여 두 물질에 대한 지하주차장의 LPG자동차 가스누출에 의한 폭발을 계절에 따른 혼합 비율로 비교하여 평가해 보았다.

6.2 FMEA 분석

LPG자동차의 엔진공정상 주요 부품들을 선정하고 각 부품에 대한 잠재적인 고장 모드 및 그에 따른 파급효과를 예측하여 분석하였으며 잠재적 고장형태에 따라 심각도, 발생도, 검출도를 5점법으로 적용하여 위험우선순위(RPN)을 결정하였다.

LPG자동차에서 주요 부품인 가스용기, 안전밸브, 과류 방지 밸브, 배압 밸브, 유동 밸브, 체크 밸브, 필터, 솔레노이드 밸브, 액면 표시 장치, 혼합기(믹서), 쿼커 플러, 베이퍼 라이저, 긴급 차단 장치의 13개 부품에 대하여 FMEA분석을 수행하였다.

<표 9>는 LPG자동차의 부품 중 배압 밸브에 관하여 FMEA 평가 분석 결과의 예시이며, <표 4>~<표 6>을 기준으로 심각도, 발생도, 검출도를 결정하였고 RPN값을 구하였다.

FMEA 분석 결과 13개의 부품에서 102개의 failure mode를 결정하고 이들에 대한 RPN 값을 결정하였다. 부품을 기능적 역할에 따라 세분화하여 가능성 있는 잠재적 고장 형태에 따른 원인과 고장 형태를 정성적으로 분석하였으며 부품 이상 시 화재 및 폭발 가능성이 가장 높은 RPN 상위 5%와 심각도 5점인 고장형태를 위험 상태로 규정하였다.

<표 9> 배압 밸브의 FMEA 예시

부품 : 배압 밸브		FMEA							
공정기능 and 요구사항	잠재적고장 형태	고장의 잠재적 영향	심각도S	고장의 잠재적 원인/Mechanism	발생도 O	현 설계 관리	검출도 D	위험우선 순위RPN	권고조치 사항
저장용기 내의 LPG액 통로의 차폐기능	외부 누출	가스 외부 누출로 인한 폭발 및 화재 2차적 피해	5	외부충격 부품의 불량	2	정기 점검 및 규격 부품 사용 후각 검사	1	10	유지보수 및 관리 철저
	열림 실패	내압 증가로 인한 용기 파손	4	부품 불량 외부 충격으로 인한 압 파손	2	정기 점검 및 규격 부품 사용	2	16	
	단힘 실패	가스 외부 누출로 인한 화재 및 폭발 2차적 피해	5	밸브 사이에 이물질 끼임 플로우트와 연결부위 파손 부품 불량	2	정기 점검 및 규격 부품 사용	2	20	규격부품의 사용

6.2.1 RPN 상위 5%

베이퍼 라이저의 부품불량 또는 노후화에 의해 봄베에서 들어오는 고압의 가스를 감압시키지 못하여 부품의 파손에 의한 누출로 인한 폭발 및 화재, 2차적 피해가 예상된다.

필터가 외부 충격이나 부식에 의한 파손이 일어났을 경우 연료 가스의 누출이 발생하여 그로 인한 화재 및 폭발, 2차적 피해가 예상된다.

슬레노이드 밸브는 밸브의 고장, 마모 또는 외부충격이나 공급파이프로부터 들어오는 가스의 압력 초과로 인하여 내압이 상승하여 내부 누출이 일어나게 되어 내압 상승으로 인한 부품 등의 파손이 예상된다.

6.2.2 심각도 5점

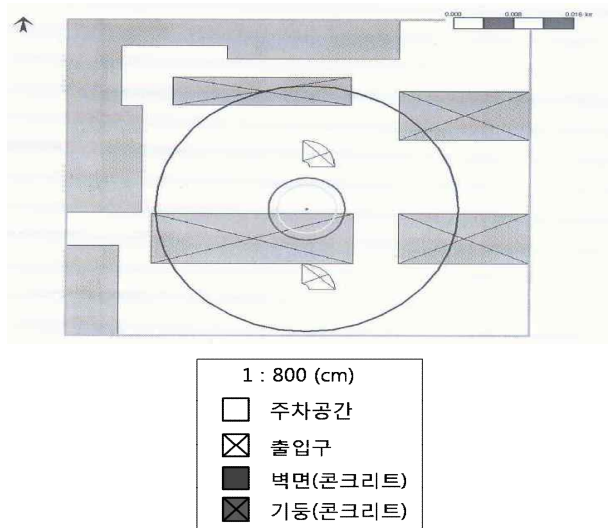
체크 밸브를 잘못 조립하였거나 이물질에 의한 가스 역류 방지 기능을 하지 못하여 차량 부품 파손이나 내압상승으로 인한 화재, 폭발 및 2차적 피해를 줄 것으로 예상된다.

유동 밸브 및 배압 밸브가 부품이 불량하거나 외부 충격에 의하여 가스가 외부로 누출되어 화재, 폭발이 예상된다.

퀵커플러의 접촉이 불량하거나 외부 충격에 의해 누출이 발생하여 화재, 폭발이 예상된다.

6.3 PHAST 분석

아산시 배방면 L아파트 지하주차장에 대하여 PHAST를 이용하여 분석하였다. 차량용 LPG 성분은 계절에 따라 비율이 다르며 지하주차장의 여름온도는 20℃를 겨울온도는 3℃로 가정하였다.



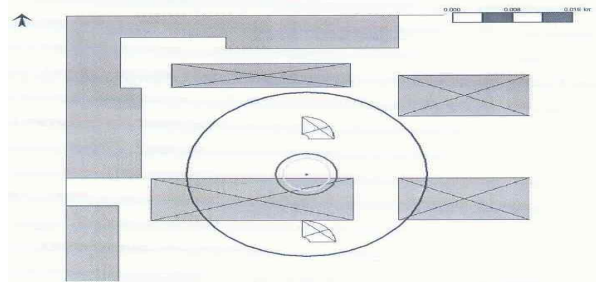
[그림 2] 여름 지하주차장(부탄 100%)

LPG자동차는 자체 압력에 의해 LPG가 공급되기 때문에 연료 펌프가 사용되지 않아 겨울철의 혹한과 같은 경우 시동할 수 없을 정도의 낮은 증기압으로는 연료의 공급이 잘 이루어지지 않기 때문에 계절에 따라 프로판과 부탄의 혼합비율을 변경하여 필요한 증기압을 확보한다. 최근의 엔진은 용기 압력이 0.7bar정도면 충분히 시동될 수 있도록 설계되어 온도가 가장 많이 내려가는 겨울철 새벽에도 안정성을 고려하여 2bar정도의 압력만 있어도 문제가 없다.

[그림 2]는 여름철 지하주차장에서 부탄 100%의 LPG자동차 1대가 충전 100% 시 폭발하였다고 가정하여 얻어진 폭발압력범위이다. 작은 원 안 지역의 다른 자동차가 주차 되었다고 하였을 때, 연쇄 폭발을 일으키며 그 범위는 더 클 것이라 예상된다. 1대의 폭발이나 연쇄 폭발로 인한 주변의 콘크리트 구조물에 미치는 영향이 매우 클 것으로 생각된다.

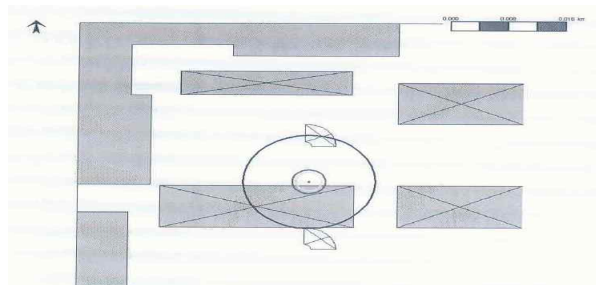
콘크리트의 폭발최대압력이 약 0.21bar정도에 달하면 완전히 건물이 붕괴되는데, 부탄 100%의 모의 실험에서 가장 작은 원부분이 약 0.2068bar이며, 비록 1대가 폭발하였다 하더라도 주변 기기 또는 다른 차량에 피해를 줄 것이다.

모든 LPG자동차가 충전을 100% 하지 않는 점을 가정하여 부탄 50% 충전 시에 대한 폭발압력범위를 [그림 3]에 보여준다.



[그림 3] 여름 지하주차장(부탄 50%)

범위만 작아졌을 뿐 폭발압력은 변함이 없다. 부탄 100%와 똑같은 피해 줄 것이다.



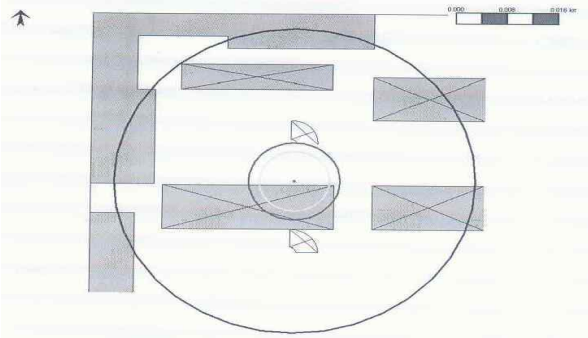
<그림 4> 겨울 지하주차장(부탄 70%)

여름철에 부탄 50%, 100%을 보면 연료의 양에 따른 변화가 없는 것으로 나타난다. 겨울철 부탄 70%는 여름철의 50%보다도 폭발압력범위가 작아지는 것을 볼 수 있다. 폭발압력범위는 연료의 양 보다는 온도와 관계가 있는 것으로 분석된다.

<표 10> 프로판·부탄의 온도와 압력의 관계

온 도(℃)		0	10	20	30	40
증기압 (bar)	프 로 판	3.9	5.4	7.4	10.0	12.9
	부 탄	0	0.4	1.0	1.8	2.7

증기압은 액체의 종류와 온도에 따라 다르며 온도가 높으면 압력도 높아지고, 온도가 낮아지면 역시 압력이 낮아진다. 2종류 이상의 가스가 혼합되어 있는 경우에도 증기압은 그 가스의 혼합비율과 온도에 따라 일정한 값을 나타낸다. <표 10>에서 나타나듯이 프로판과 부탄의 2성분계의 액화석유가스는 증기압이 높은 프로판의 비율이 증대할수록 증기압이 크며 프로판의 비율이 감소되면 증기압도 작아진다.



[그림 5] 지하주차장(프로판 30%)

액화석유가스는 공기나 산소와 혼합하여 폭발성 혼합가스가 되며, 프로판의 폭발범위는 공기 중 2.1~9.5Vol%, 부탄은 1.8~8.4Vol%로서 폭발하한계가 낮고 상온·고압 하에서는 기체로 인화점이 낮아 소량 누출 시에도 인화하여 화재 및 폭발의 위험성이 있다. 그림 5에서 나타나듯이 프로판 30%는 부탄에 비해 매우 폭발압력범위를 갖는다.

7. 결론

본 연구에서는 LPG자동차의 위험성을 인지하였으나, 국내 LPG자동차에 대한 주차에 관한 법적 규제가 시행되지 않고 있다. 사고 발생 시 큰 피해가 발생할 수 있으며, 이에 따라 발생할 수 있는 사고에 대하여 분석해보았다.

FMEA의 분석 결과 LPG자동차의 13개의 부품에서 102개의 잠재적 고장형태가 도출되었으며, 위험우선순위(RPN)는 베이퍼 라이저에서 고압 및 기능저하로 가장 심각한 것으로 분석되었다.

PHAST의 분석 결과 LPG자동차 한 대가 지하주차장에서 폭발 하였을 경우 폭발압력으로 인한 인접 차량, 가스배관 파손 및 건물의 붕괴 등에 의한 2차 피해가 우려되었다. 그러나 LPG자동차 한 대가 폭발하더라도 무조건 건물이 붕괴된다고는 할 수 없다. 또한, 여름철과 겨울철의 폭발압력 범위는 상이하게 다르며, 폭발압력범위는 온도와 관계가 있는 것으로 분석된다.

우리나라의 LPG자동차가 보급된 지 30여년이 지났지만 가스자동차의 지하 주차 시 법적 규제가 없는 실정이다. 이 같은 상황에서 LPG자동차의 위험성을 바로 알고 지하주차장에 LPG자동차를 주차 시 발생할 수 있는 사고들에 관심을 갖고 법적 규제를 시급히 마련하고 추진해야 한다고 사료된다.

8. 감사의 글

이 논문은 2009년도 호서대학교의 재원으로 교내학술연구비 지원을 받아 수행된 연구임을 밝힙니다.(과제번호 : 2009-0193)

9. 참고 문헌

- [1] 윤영채, 김종서, “지구온난화 방지를 위한 실효적 방안 연구”, 사회과학연구. 제 20권 1호 (2009):85~114
- [2] 탁송수, 이수경, “LP가스 연료사용 자동차의 국내외 안전관리 현황 비교 연구”, KIGAS, Vol. 13. No. 2, (2009):49~56
- [3] 윤재건, “LPG 자동차의 안정성에 대한 고찰”, 자동차공학회지, Vol. 19. No. 2 (1997):10~16
- [4] 조영도, 김민섭, 박교식, 조은구, “지하 밀폐공간의 가스폭발 피해분석”, 한국가스안전공사, 가스안전기술개발원
- [5] 강건용, 오승목, 김창기, 김창업, 최영, “LPG자동차의 국내외 현황” 한국자동차공학회 2007년도 연료

및 윤활연구의 워크샵, (2007):73~88

[6] 박경석, 한성철, "LPG자동차 동향", 자동차공학회 지, 제24권 제5호, (2002):37~49

[7] 이병규, "LPG자동차 누출차량 표본 조사 결과", (2006)

[8] 한국가스안전공사, "LPG자동차 안전관리대책", (2007)

[9] 김유탕, 이광원, 백재진, 오신규, 한정민, 김원국, "가스설비의 정량적 안전성 평가", 산업안전학회 2000년 춘계 학술발표회 논문집, (2000):254~259

[10] 이광원, 김태훈, 이택홍, "수소 충전소 충전기의 정량적 안전성 평가", 한국수소 및 신에너지학회논문집, Vol. 17, No. 3 (2006):272~278

[11] 허진영, 이광원, 오규형, 백재진, 이동원, 정을수, "C4-LPG의 자동차 연료화에 관한 안전성 연구" 한국산업안전학회:학술대회논문집, 한국안전학회 2001년도 공동학술대회, (2001)

[12] 이광원, 김태훈, 서두현, 오규형, 김영규, "국내 수소 충전소의 안전성 평가", 한국가스학회 08 추계 학술발표회, (2008)

[13] 김황배, 김동문, "GIS공간분석기법을 적용한 대규모 가스 및 유류 저장시설 폭발시 피해범위 산정 (서울시 주거밀집지역을 중심으로)", 대한토목학회 논문집, 제22권 제5-D호, (2002):863~870

[14] 남진원, 김호진, 김성배, 변근주, "폭발하중을 받는 콘크리트 벽체구조의 HFPB 해석", 대한토목학회 논문집, 제27권 제3A호 (2007):443~442

[15] Henri Procaccia, Spyros P. Arsenis, Patrick Aufort, Prefaceby G.Volta. EIREDA, "European Industry Reliability Data Bank", (1998)

[16] OREDA, "Offshore Reliability Data Handbook. 4th edition", DNV Technica, (2002)

[17] A.D. Swain, NUREG/CR-1278, "Handbook of Human-Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications", U. S. Nuclear Regulatory Commission (1983)

저 자 소 개

이 광 원



독일 베를린 대학교 대학원 졸업, 시스템안전 전공. 호서대학교 안전보건학과 교수. 관심분야는 설비·신뢰성, 기계·화공 분야 등이다.

주소: 충청남도 아산시 배방읍 세출리 165호서대학교 제1공학관 127호

오 동 석



호서대학교 안전보건학과 박사과정 재학중. 관심분야는 설비·신뢰성, 기계·화공 분야 등이다.

주소: 충청남도 아산시 배방읍 세출리 165호서대학교 제1공학관 129호

김 태 훈



호서대학교 대학원 안전공학과 졸업, 시스템안전 전공. 호서대학교 장비통합지원관리실 교수. 관심분야는 설비·신뢰성, 품질 분야 등이다.

주소: 충청남도 아산시 배방읍 세출리 호서대학교 산학협력단 301호

서 두 현



호서대학교 안전보건학과 박사과정 재학중. 관심분야는 설비·신뢰성, 기계·화공 분야 등이다.

주소: 충청남도 아산시 배방읍 세출리 165호서대학교 제1공학관 129호

오 영 달



호서대학교 안전보건학과 박사과정 재학중. 관심분야는 설비·신뢰성, 기계·화공 분야 등이다.

주소: 충청남도 아산시 배방읍 세출리 165호서대학교 제1공학관 129호

신 수 일



호서대학교 안전보건학과 석사과정 재학중. 관심분야는 설비·신뢰성, 기계·화공 분야 등이다.

주소: 충청남도 아산시 배방읍 세출리 165호서대학교 제1공학관 129호