

잠재적 폭발위험장소에서 내연기관에 의한 점화 위험성에 관한 연구

김윤석 · 이동호*[†]

인천대학교 안전공학과, *인천대학교 소방방재연구센터

Study of the Risk of Ignition due to Internal Combustion Engines in Areas with Potentially Explosive Gas Atmospheres

Yun Seok Kim · Dong Ho Rie*[†]

Safety Engineering, Incheon National University

*Fire Disaster Prevention Research Center, Incheon National University

(Received August 3, 2015; Revised August 10, 2016; Accepted September 5, 2016)

요 약

국내외의 가연성 또는 인화성물질을 취급하는 대형설비에서의 폭발위험장소에 대한 안전관리는 기업의 지속가능경영과 신뢰를 바탕으로 한 지역사회와의 공존에 있어 매우 중요하다. 폭발위험장소의 안전관리는 크게 가연성 또는 인화성 물질의 누출을 제어하는 시스템과 이러한 가연성 또는 인화성물질이 누출되어 폭발분위기를 형성할 때 점화원을 제어함으로써 화재 또는 폭발사고로 전이되지 않도록 하는 방폭시스템이 있다. 제도와 기술로 인해 전기적 점화원에 대한 방폭 설비는 상당히 보급되어 관리되고 있다. 하지만 열적 점화원의 경우, 위험성에 대한 인식과 관련 기술개발이 미흡하다. 본 연구는 잠재적 폭발위험장소에서 내연기관의 점화 위험을 보고하기 위하여 수행되었다. 이를 위하여 문헌조사를 통하여 관련 국제표준과 사고사례 및 위험분석보고서를 연구하고, 국내 중부권 공정안전관리제도 대상 사업장의 디젤엔진의 불꽃방지 등 안전장치 적용실태를 조사하였다. 실제적으로 본 연구결과를 석유화학 산업에 적용함에 있어, 디젤엔진과 같은 내연기관 점화원의 위험인식을 통해 잠재적 폭발위험장소에서의 폭발방지에 대한 안전관리방안으로 활용 될 수 있을 것이다.

ABSTRACT

Safety management in hazardous areas with potentially explosive gas atmospheres (here in after referred to as hazardous areas) in large scale facilities dealing with combustible or flammable materials at home and abroad is very important (significant) for the coexistence of the company and local society based on business continuity management (BCM) and reliance. For the safety management in hazardous areas, two systems are mainly used: (1) the control system for the prevention of combustible or flammable substances and (2) the explosion proof system for the elimination of ignition sources when flammable gases are leaked to inhibit the transition to fire or explosion accidents. While technology and regulations on explosion proof facilities or devices for electrical ignition sources are well developed and defined, those for thermal ignition sources need to be more developed and established. In this study, the internal combustion engine in hazardous areas was investigated to determine the risk of ignition. For this purpose, document searches were conducted on the relevant international standards and accidents cases and risk analysis reports. In addition, this study assessed the application cases of the diesel engine's safety equipment, such as spark arresters regarding the site of process safety management (PSM) system in central Korea. To practically apply these results to the hydrocarbon industry, the safety management method for explosion prevention in hazardous areas was provided by risk identification for ignition sources of internal combustion engines, such as diesel engines.

Keywords : Business continuity management, Explosion risk area, Potentially explosive gas atmospheres, Process safety management system, Spark arresters

1. 서 론

에너지 플랜트로 정의되는 정유 및 석유화학산업과 가

스산업 등은 국가의 기간산업으로 육성되었으나, 이 같은 대규모 플랜트는 도시의 팽창과 더불어 거주지역과 인접하게 되었다. 더욱이 정유 및 석유화학관련 시설은 장치의

[†]Corresponding Author, E-Mail: riedh@incheon.ac.kr
TEL: +82-32-835-8293, FAX: +82-32-835-4749

ISSN: 1738-7167
DOI: <http://dx.doi.org/10.7731/KIFSE.2016.30.5.001>

노후화가 심화되고 있고, 부지제한에 따른 설비의 신증설이 수직확장으로 진행되고 있으며, 에너지 소비의 증가와 더불어 대규모 에너지 저장시설의 운영 및 확충 등의 필요로 인해, 천연가스등의 에너지 저장규모가 증가되고 있다. 이에 따라 사고발생의 빈도가 확률적으로 증가하며, 위험의 크기도 에너지 플랜트의 확충에 따라 증가하게 되므로 이러한 대규모 에너지 플랜트에 대한 안전관리가 매우 중요한 현안으로 대두되고 있다. 이러한 가스집합시설 및 대형 석유화학시설과 정유시설로 대표되는 대규모 에너지 플랜트의 안전한 운영을 위하여는 설비의 설계단계부터 유지관리 점검에 이르기까지 여러 가지 안전관리기법이 사용된다. 실례로 방호계층분석(layers of protection analysis: LOPA) 및 위험기반검사(risk based inspection: RBI)와 같은 각종 위험성평가 기법과 산업안전보건법에 의한 공정안전보고서(process safety management system: PSM)와 고압가스안전관리법에 의한 안전성 향상계획서(safety management system: SMS) 등 여러 가지 안전관리 기법과 안전장치 등을 적용하여 위험의 빈도와 강도 등을 낮추는 일련의 과학적이고 강도 높은 안전관리가 수행되고 있다⁽¹⁾.

가스집합시설 등 석유화학 산업에서의 폭발 등의 사고는 중대산업사고로 정의된다. Figure 1과 같이 석유화학 산업에서의 폭발은 사고로 인한 손실의 가장 큰 빈도를 차지하며, 폭발의 유형은 일반적으로 경질탄화수소의 누출에 의한 증기운 폭발(vapor cloud explosion: VCE)이다^(2,3). VCE는 인화성 증기구름이 공정 구역에 유출된 후 점화원에 의해 점화되어 폭발이 일어나는 형태이다. 이러한 폭발 사고를 예방하기 위해서는 가연성 가스 등의 경질탄화수소의 누출제어와 점화원의 관리가 매우 중요하다. 이중 점

화원은 전기적 점화원, 기계적 점화원, 열적 점화원 등 다양하다. 폭발위험장소에서의 폭발분위기 형성시 방폭설비는 점화에너지를 제한하여 화재폭발사고를 제어하는 중요한 장치이다. 대형 석유화학 및 정유시설 그리고 가스집합 플랜트에서는 가연성가스나 인화성증기의 폭발 위험분위기에서의 폭발예방을 위한 방폭설비를 사용하는 것은 일반화 되어 있는 추세이나, 이는 전기적 점화원 차단을 위한 방폭설비에 국한되는 것으로, 이러한 폭발위험장소에서 내연기관의 열적점화원에 대하여는 그 위험성이간과되고 있는 실정이다⁽⁴⁾.

디젤엔진으로 대표되는 내연기관 등의 점화원 위험에 대한 연구는 다른 종류의 점화원 위험 연구와 비교할 때 국내에서는 해당 연구가 전혀 없지만, 미국과 유럽에서는 사고조사보고서나 연구논문 등이 발표되고 있다. 내연기관 점화원 위험성에 대한 연구로는 Perrone^(5,6) 등은 폐기물 처리용 진공트럭이 인화성 폐기물 하역 중 생성된 가연성 증기운으로 인하여 폭발한 사고에 대하여 점화원으로 작용한 디젤엔진의 폭주에 대한 엔진의 기계적 상태를 연구하였다. Bhalla⁽⁷⁾는 대규모 석유화학 플랜트에서의 가스 누출 등으로 인한 위험한 환경에서의 디젤엔진 폭주시의 안전위험에 대하여 연구하였다. Mariyanna⁽⁸⁾ 등은 외부 연료원 존재시에 전기적 제어상태의 디젤엔진의 폭주에 대한 방지방법에 대하여 연구하였다.

따라서 본 연구에서는 석유화학 및 에너지 플랜트 등 잠재적 폭발위험장소에서 사용되는 디젤엔진 내연기관에 대한 국제 표준과 안전규정 등을 소개하고, 국내 기업의 디젤엔진 내연기관의 안전관리 실태와 향후 내연기관의 열적점화원 위험에 대한 기초연구의 추진 및 국가표준 제정의 필요성과 개선대책에 대하여 제시하고자 한다.

2. 본 론

IEC 60079⁽⁹⁾의 정의에 따르면 폭발성 가스 분위기가 형성되는 가능성은 주로 누출 및 환기 등급에 의해 좌우되며, 이러한 가능성으로 폭발위험장소를 0종 장소, 1종 장소, 2종 장소 및 폭발 비위험장소로 구분하고 있다. 잠재적 폭발위험장소란 가연성 가스 또는 인화성액체의 증기 등이 대규모로 누출되어 폭발성분위기를 형성할 우려가 있는 장소로 정의할 수 있으며, 이는 IEC 60079⁽⁹⁾의 정의에 따른 폭발위험장소 중 2종 장소를 공간적으로 확장한 개념을 준용함과 동시에 이 표준에 적용되지 않은 Catastrophic Accident 등 공정용 용기 또는 배관의 파열과 같은 예측하기 어려운 중대한 고장에 의해 생성되는 폭발위험장소의 개념을 포함한다. 잠재적 폭발위험장소의 예로는 저장탱크, 반응기, 배관 등의 파손, 부식 또는 기기의 고장, 기능상실, 오동작 등에 의한 탄화수소증기의 누출위험이 존재하는 가스집합시설 등 대규모 에너지 저장시설이나 석유화학 및 정유산업 등의 생산시설을 꼽을 수 있다. 잠재적 폭발

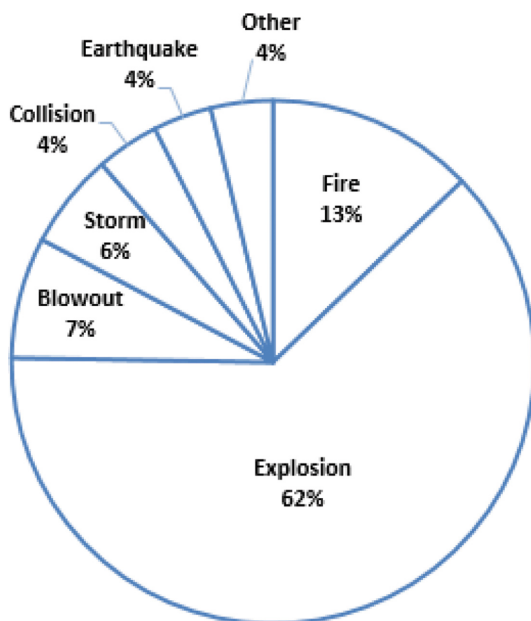


Figure 1. Type of large property damage losses in the hydrocarbon industry. Data from Ref. (2).

위험장소의 설정은 가연성 가스 또는 인화성 증기 형태로 확산될 수 있는 화학물질을 저장한 용기나 배관의 최대량이 누출되는 최악의 사고 시나리오에 대해 검증된 사고영향평가(consequence analysis: CA) Software를 이용한 화학물질의 연소하한계(low flammable limit: LFL)의 25% 이하를 영향거리로 하는 범위를 적용한다. 다수의 표준⁽⁹⁻¹⁵⁾에서 폭발위험을 예방하기 위해 화학물질의 누출제한과 감지농도를 LFL의 25% 이하로 규정하고 있다.

2.1 잠재적 폭발위험장소에서의 내연기관 안전규정

국내의 경우 산업안전보건법 산업안전보건기준에 관한 규칙 제230조 ‘폭발위험이 있는 장소의 설정 및 관리’ 등의 포괄적 규정 외에 폭발위험장소에서의 내연기관의 안전규정이 명시된 법규나 기준이 존재하지 않고 있다. 일부 사업장중 국제규격을 사내안전규정으로 도입하고 있는 실정이나 표준화된 안전장치의 제작기준이나 성능인증절차가 없어, 잠재적 폭발위험장소에서의 디젤엔진용 안전장치의 효과가 담보되기 어려운 실정이다. 대기 중에 가연성 물질이 포함된 폭발성 가스 분위기의 생성 가능성이 존재하는 지역에서의 디젤 자동차 및 디젤 엔진 등은 높은 위험도를 가진 점화원으로 인식되어야 하며, 국제적으로도 이러한 위험에 대한 대책으로 내연기관의 안전기준을 요구하는 표준이나 법안이 존재한다. 해당 국가로는 유럽연

합, 캐나다, 미국, 오스트레일리아 등이 있으며 적용대상 업종으로는 정유, 가스시추, 석유화학, 광업, 임업, 농업에 이르기까지 매우 다양하다. 잠재적 폭발위험장소의 내연기관 디젤엔진에 대한 국제적인 안전기준은 Table 1에 나타난 바와 같이 유럽연합의 경우 EN 1834-1 Part 1에 의해 잠재적 폭발위험장소에서 사용되는 왕복동내연기관의 안전요구사항을 규정하고 있으며⁽¹⁶⁾, EN 1834-1을 기준으로 유럽연합 각국이 로컬법률을 제정하여 준수하고 있다. 북미지역에서는 미국의 경우 연방정부와 California 주정부가 occupational safety & health association (OSHA)의 지침으로 석유 및 가스의 시추와 생산현장에서 디젤엔진의 긴급차단밸브와 배기구의 불꽃방지장치를 규정하고 있으며 다수의 주에서 동 규정을 규제화할 것을 권고하고 있다⁽¹⁷⁾. 캐나다의 경우 앨버타 에너지 조정위원회(alberta energy regulator: AER)의 Directive 37에 의해, 가연성 가스, 증기 등이 존재하는 곳에서 디젤엔진은 점화의 원인이 되어 폭발할 위험이 있기 때문에 다양한 산업에서 디젤엔진의 공기차단장치와 배기구의 불꽃방지장치 설치를 규제하고 있다⁽¹⁸⁾. 또한 미석유협회(american petroleum institute: API)의 권고사항 54도 석유 및 가스의 시추와 서비스 등의 산업에서의 내연기관의 안전권고사항을 명시하고 있다⁽¹⁹⁾. 관련인증으로는 디젤엔진용 안전장치인 엔진의 흡기차단밸브와 배기구의 불꽃방지장치에 대하여, 사실상의 국제

Table 1. International Safety Regulations of Internal Combustion Engines

Standard code	Title
EN 1834-1	Reciprocating internal combustion engines: Safety requirements for design and construction of engines for use in potentially explosive atmospheres Part 1: Group II engines for use in flammable gas and vapour atmospheres
European EEMUA-107	Recommendation for diesel engine operating in potentially flammable atmosphere: Require the use of air intake shutdown valve with flame arrester
ISO 3046-6: 1990	Reciprocating internal combustion engines: Performance Part 6: Overspeed protection
ATEX 94/9/EC	Equipment and protective systems in potentially explosive atmospheres
ASTM F 2876-10	Standard practice for thermal rating and installation of internal combustion engine packages for use in hazardous locations in marine application
SAE Standards J350, J342	Middle, large engine spark arrester test procedure
OSHA 2007	Petroleum refinery process safety management national emphasis program - A-53 motorized equipment
Cal/OSHA State of California Division 1, Chapter 4, Sub-chap.14	Petroleum safety orders - drilling and production article 35, drilling and well servicing machinery and equipment: Diesel engine runaway protection
Cal/OSHA State of California Division 1, Chapter 4, Sub-chap.15	Petroleum safety orders - refining transportation, §6874. Stationary internal combustion engines
NFPA 37 2015	Installation and use of stationary combustion engines and gas turbines
API Recommended Practice 54 API Recommended Practice 2219	Occupational safety for oil and gas well drilling and servicing operation Safe operation of vacuum trucks in petroleum service
ERCB Directive 037, The state of Alberta Canada	Service rig inspection manuals: Diesel engine runaway protection

Table 2. Accidents Case of Internal Combustion Engine's Ignition Sources Estimate

Case	Occurrence	Damage	Potential ignition sources
2003.1.13. BLSR operating. Ltd. Rosharon, Texas, USA ⁽²¹⁾	Vapor cloud explosion and fire by flammable waste liquids leaks.	3 Fatalities, 4 injured, burned 2 trucks	Vacuum truck diesel engine
2005.3.23. BP american refinery Texas city, Texas, USA ⁽²²⁾	Vapor cloud explosion and fire by eruptions of isomerization unit blow down process.	15 Fatalities, 180 injured, refinery burndown	Idling diesel pickup truck
2010.4.20. BP deepwater horizon RIG, Mississippi Canyon Block #252, Gulf of Mexico, USA ^(23,24)	Vapor cloud explosion and fire by eruption of crude oil with methane bubble.	11 Fatalities, 17 injured, environment damage	Diesel engine
2012.9.19. PEMEX NG plant, Reynosa city, Tamaulipas, Mexico ⁽²⁵⁾	Vapor cloud explosion and fire by rupture of NG Pipeline	30 Fatalities, 42 injured, US \$150,000,000	Tank lorry diesel engine

인증표준으로 사용되는 유럽연합의 ATEX 94/9 기준에 의한 방폭인증을 통과하여야 한다⁽²⁰⁾.

2.2 내연기관의 점화원 작용 사고사례

미화학사고조사위원회(U.S. chemical safety boards: CSB) 등의 사고조사보고서 등을 조사한 결과, 폭발위험분위기내에서의 디젤엔진의 매개 점화로 추정되는 대표적인 사고는 Table 2와 같다⁽²¹⁻²⁵⁾. 국내의 디젤엔진 점화추정 사고사례는 자료부족으로 조사되지 못하였다. 사고사례에 연구에 대하여는, 제어실패로 발생한 증기운의 발생원인은 본 연구의 목적이 아니므로 발생경위만 제시하고, 내연기관 점화원으로 추정되는 사고에 대하여 분석하였다. CSB의 사고조사보고서에 따르면⁽²¹⁻²³⁾, 대규모 가연성 증기운이 형성된 분위기에서 폭발로 이어질 수 있는 디젤엔진의 점화원은 엔진의 폭발 과열에 의한 고온표면과 배기구로의 화염분출 또는 스파크 등으로 제시되었다.

2.3 내연기관의 점화원 작용 위험성

내연기관은 연료의 착화방식에 따라, 대표적 상용엔진인 가솔린엔진의 불꽃착화기관과 디젤엔진의 압축착화기관으로 구분되어 진다. 대부분의 탄화수소증기 및 가스의 경우 폭발범위 내에서의 최소점화에너지(minimum ignition energy: MIE)가 매우 작다. 예를 들면 메탄의 경우 MIE는 0.28 mJ에 불과하다⁽²⁶⁾. 이 때문에 잠재적 폭발위험지역에서 운전가능한 내연기관은 불꽃착화기관인 가솔린엔진을 사용할 수 없으며, 안전기준을 충족시킨 경우에 한하여 압축착화기관인 디젤엔진만을 사용하여야 한다. 탄화수소의 증기 또는 가스가 누출되어 증기운을 형성할 가능성이 있는, 잠재적 폭발위험지역에서 사용되는 압축착화기관인 디젤엔진의 점화원으로서의 위험성에 대하여 엔진시스템과 연관이 없는 전기시스템을 제외하면, 점화원 위험성은 크게 세 분야로 구분할 수 있다.

첫 번째 위험성은 디젤엔진의 폭주(runaway)이다. 디젤

엔진의 폭주는 탄화수소의 증기 또는 가스가 누출되어 가연성 증기운이 형성, 확장 될 때 디젤자동차나 시설용 디젤엔진이 증기운 확장에 따라 증기운의 범위 내에 위치하게 되는데, 이때 가연성 증기운이 외부연료원으로 작용하게 되며, 운전자가 디젤엔진의 시동을 끄려고 해도 통제상태를 벗어나 정지되지 않고, 디젤엔진이 빠르게 운전되는 통제불능(out of control)의 운전상태를 의미한다. 이 상태에서는 디젤엔진의 공기흡입시스템이 공기를 흡입하지 못하고 외부연료를 흡입하게 되며 통제되지 않은 이 같은 외부연료로 인해 포화된 환경에서 밸브가 닫히지 않고, 엔진시스템이 폭주하게 된다. 이러한 폭주상황에서 디젤엔진이 과속되어 자체 폭발하며 격렬한 점화원으로 작용할 위험이 존재한다.

두 번째 위험성은 탄화수소의 증기 또는 가스가 누출되어 증기운이 형성될 때, Figure 2에 도시된 바와 같이 디젤엔진으로 흡기된 외부연료가 엔진의 폭주로 인해 완전히 연소되지 못한 가압상태에서 흡기밸브가 차단되기 전

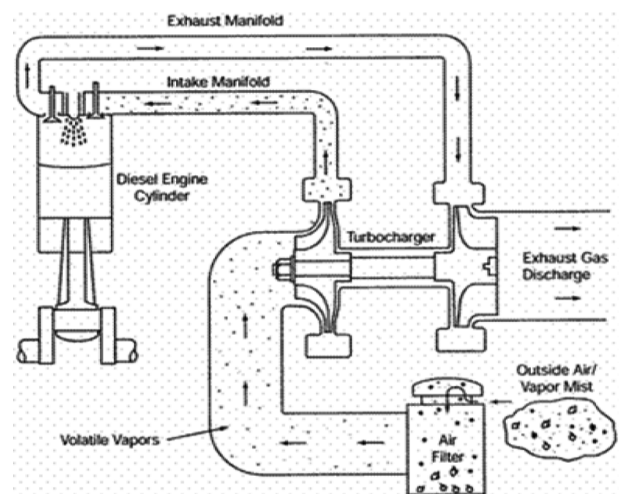


Figure 2. Typical air intake system - 4 cycle system⁽⁵⁾.

에 엔진흡기구 (intake manifold)로 역화가 발생하여, 엔진 배기구 말단에서 불꽃(또는 화염)과 열로 배출된다. 이 경우 외부 연료원에 점화원으로 작용하여 폭발 또는 화재가 발생한다.

세 번째 위험성은 디젤엔진의 과부하 운전으로 인한 디젤엔진과 배기시스템의 과열이다. 엔진의 폭주로 인한 비정상상태에서의 엔진과열은 첫 번째 위험성에 부수적으로 수반되는 위험인데 비하여, Figure 3에 도시된 바와 같이 정상상태에서의 과부하 운전으로 인한 과열은 엔진과 배기시스템의 표면온도를, 누설된 탄화수소의 증기 또는 가스의 자연발화온도(auto ignition temperature: AIT) 이상으로 높이기 되어 또 다른 열적 점화원으로서의 위험으로 존재하게 된다.

천연가스저장소의 liquified natural gas (LNG)를 누설된 탄화수소의 증기 또는 가스로 가정할 때, 한국가스공사의 물질안전보건자료(materials safety data sheet: MSDS)에 제시된 LNG의 주요물성⁽²⁷⁾은 주성분인 메탄의 AIT가 540 °C, 폭발범위는 5~15%, 인화점이 -188 °C로 제시되었다. 미 농무부 산하 산림청의 2008년 조사결과⁽²⁸⁾에 따르면 일반적인 디젤엔진을 장착한 디젤자동차의 배기가스 온도(exhaust gas temperature: EGT)는 부하조건에 따라

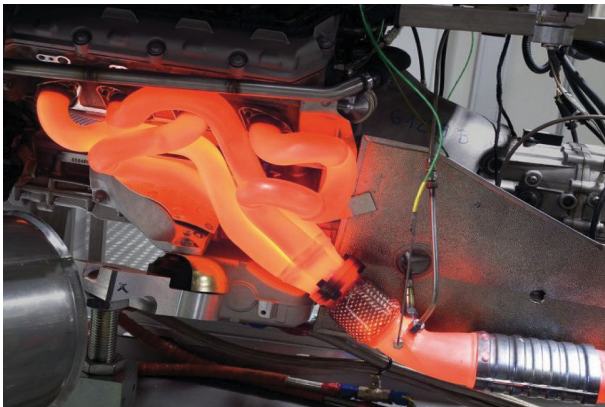


Figure 3. Hot surface of diesel engine's exhaust system. Picture from www.onlyhdwallpapers.com.

다르지만 대체로 무부하 운전상태에서 150~260 °C, 중부하 운전상태에서 430~480 °C, 고부하 운전상태에서 540~650 °C로 고부하 운전상태에서 천연가스의 주성분인 메탄의 AIT 540 °C를 초과하는 수준이다. 더구나 연소효율을 향상시킨 Turbo-charger 방식의 디젤엔진의 경우, 배기가스의 온도가 쉽게 820 °C를 초과하기도 한다. 디젤엔진의 배기가스 온도와 배기시스템의 표면온도는 제조사별로 차이가 있지만, 미농무부 산하 산림청의 2008년 조사결과⁽²⁸⁾를 인용하여 디젤자동차 배기시스템의 테스트 변수와 표면온도 그리고 배기가스온도 자료를 Table 3~5에 소개하였다.

2.4 중부권 PSM 대상 사업장의 내연기관 점화원 관련 안전장치 사용 현황

국외에서는 잠재적 폭발위험지역에서의 내연기관 점화원의 위험성에 대한 표준과 법안의 제개정과 위험성평가 등의 연구^(5-9,16-25,28)가 수행중이며 이미 상당한 수준의 기술을 보유하고 현장에 적용하고 있는 것으로 조사되었다. 하지만 국내에서는 이 분야의 기초연구가 전혀 수행되지 못하고 있다. 국내 표준으로는 KS R ISO 3046-6⁽²⁹⁾의 표준이 있으나 위험분위기에서의 안전기능보다는 정상상태에서 과속운전 제한기능으로 작성되어 있다.

Table 3. Test Variables of Exhaust Gas and Exhaust Surface Temperature Measurement for Diesel Engine (Data from Ref. (28))

Variable	Parameter
Road course distance	11.27 km
Vehicle speed when regeneration is initiated	96.5~112.6 km/h
Duration of regeneration	15 ± 5 min
Ambient temperature	15~21 °C
Relative humidity	60~64%
Cool down period	10 min
Total duration of the test	1 h

Table 4. Maximum Surface Temperature for Different Part of the Exhaust System (Data from Ref. (28))

Location	Ford F-550 (°C)	Dodge 5500 HD (°C)	Sterling 5500 Bullet (°C)	International 7400 (°C)	GMC C5500 (°C)	Avg Temps (°C)	Ford F550 Non-DPF (°C)
DPF	295.4	168.3	196.2	265.8	307.3	256.4	-
After DPF	375.7	299.3	293.3	386.2	446.2	375.2	-
Before DOC	231	193.8	240.8	199.6	435.3	291.9	213.2
DOC	356.6	218.4	227.8	237.9	308.7	258.2	128.7

DPF: Diesel Particulate filter, This is a device designed to remove diesel particulate matter or soot from the exhaust gas of a diesel engine.

DOC: Diesel Oxidation Catalyst, A catalytic converter is an emissions control device that converts toxic gases and pollutants in exhaust gas to less toxic pollutants by catalyzing a redox reaction (an oxidation and a reduction reaction).

Table 5. Maximum Exhaust Gas Temperature for Different Part of The Exhaust System (Data from Ref. (28))

Location	Ford F-550 (°C)	Dodge 5500 HD (°C)	Sterling 5500 Bullet (°C)	International 7400 (°C)	GMC C5500 (°C)	Avg Temps (°C)	Ford F550 Non-DPF (°C)
Exhaust gas before cooler	498.7	Not equipped	Not equipped	358.6	635.9	587.3	Not equipped
Exhaust gas inside	418.6	No data	398.8	356.8	452.5	402.7	213.4
Exhaust gas outside	339.5	423.3	394.5	294.2	415.7	368.2	202.6

국내 중부권역 수도권 및 경기남서부의 PSM 관리대상 31개 사업장을 대상으로 디젤엔진의 안전장치 운용현황을 조사하였다. 조사대상군은 에너지공급, 석유화학 및 정유, 위험물저장, 정밀 화학, 대형 natural gas (NG) 수요처 등 5가지 유형으로 분류하였다. 디젤엔진의 안전장치와 관리 현황은 배기구 말단 불꽃방지기의 사용, 엔진 흡기밸브의 비상차단시스템 설치, 과부하 운전시의 엔진온도 감시의 3 가지 항목으로 구분하여 조사하였다. 조사결과 31개 업체, 5개 유형군중 석유화학 및 정유 업종에서 조사대상 4개 업체가 디젤엔진 배기구 말단에 불꽃방지기를 사용하고 있었으며, 에너지공급시설 5개소 중 1개 업체만이 불꽃방지기를 사용하였다. 엔진 흡기밸브의 비상차단시스템과 과부하 운전시의 엔진온도 감시를 하는 업체는 조사대상 중 한 곳도 없었다. 해당 조사결과를 Figure 4에 도시하였다. 하지만 국내 법규 및 규정의 미비 등으로 인하여 조사대상 사업장에서 사용하는 디젤엔진 배기구 설치용 불꽃방지기 조차도 공장건설 시 수입된 제품이 파손되거나 재생되지 못한 상태로 방치 중이었거나, 임의의 제작시방에 의하여 제작되고 인화방지방의 수준에도 못 미치는 성능을 검증받지 못한 불꽃방지기가 사용되고 있었다.

2.5 잠재적 폭발위험장소에서의 내연기관 안전장치의 개선대책 및 권고사항

국내의 경우 디젤기반 내연기관의 안전장치에 대한 제도적 보완과 기술개발이 시급하다 하겠다. 이를 위하여 에너지 플랜트 등, 잠재적 폭발위험장소에서의 내연기관의 점화원 위험성을 인식하고 법적 기술적 제도를 수립하고

관할기관에서 이를 지도감독하고 기업에서는 개선노력을 하여야 한다, 높은 위험도를 가진 내연기관 점화원에 대한 에너지 플랜트에서의 인명과 재산보호를 위한 기술개발과 연구 및 투자를 통하여 성능이 검증된 내연기관용 방폭장치 등이 개발되어야 한다.

폭발위험장소에서 사용하는 디젤엔진의 점화원 에 대한 안전대책으로 개발이 요구되는 장치로는, 첫째 폭발위험장소에서 디젤엔진의 흡기밸브를 통해 유입되는 외부연료원(폭발 위험분위기)에 대한 공급을 차단함으로써 폭발하한 농도 25% 이전에서 디젤엔진의 반응폭주를 막는 가스농도 및 속도센서 연동 공기차단장치(emergency shut down devices)와 둘째 폭발위험장소에서 엔진 배기구를 떠나는 배기가스 중에 포함된 불꽃을 차단함으로써 점화원을 제거하는 불꽃방지기(spark arrestors) 등이 있다. 디젤엔진의 안전장치 중 불꽃방지기의 미인증제품 사례와 인증제품



Figure 5. Explosion proof uncertified samples of diesel engine's exhaust spark arresters.

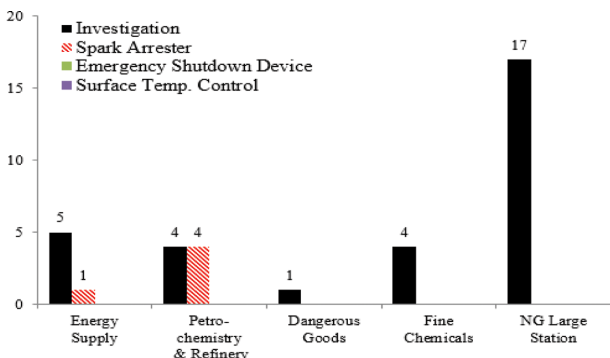


Figure 4. Operational status of the diesel engine's safety device.



Figure 6. Explosion proof certified samples of diesel engine's exhaust spark arresters.

사례를 Figure 5와 6에 나타내었다. 이외에 사업장에 대한 권고사항으로 잠재적 폭발위험장소에서의 디젤내연기관이 과부하에 의한 배기시스템 온도상승을 제한하기 위한 진입차량 정지시간유지와 운행속도 제한 및 중장비 작업부하기준 제정 등을 고려하여야 한다.

3. 결 론

본 연구에서는 열적 점화원 중, 대표적 위험성을 가지고 있는 디젤엔진의 잠재적 폭발위험장소에서의 점화원 작용 위험성에 대한 연구를 수행하였다. 미국과 유럽 등에서는 이미 오래전부터 잠재적 폭발위험장소에서의 내연기관의 위험성을 인식하고 기술개발과 연구 및 투자를 지속해 오고 있다. 국내의 경우 관련 연구는 검토단계이나 내연기관의 열적 점화원 위험에 대한 방폭기술의 개발의 필요성을 인식하고 위험성에 대하여 공유하여야 한다. 새로운 연구 분야로 국가의 지원과 연구자들의 관심이 요구되며 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 공정용기나 배관의 과열 등 파국적 재난 발생가능성과 증기운폭발 등의 위험성을 인식하고, 최악의 누출사고 시나리오를 반영한 위험물질 누출시 LFL 25% 이하를 영향거리로 하는 잠재적 폭발위험지역의 범위 지정관리가 필요하다.

(2) 잠재적 폭발위험장소에서의 점화원으로 작용할 수 있는 디젤엔진의 안전장치에 대한 경인 및 경기남서부 PSM 대상 사업장의 관리 실태를 조사하여 미인증제품의 사용금지 및 인증제품의 재생관리 등 관리강화의 필요성을 제시하였다.

(3) 잠재적 폭발위험장소에서 사용되는 내연기관의 점화원 작용을 차단하기 위한 안전장치에 대한 법적규정과 기술표준 제정 및 성능인증제도의 도입이 논의되어야 한다.

(4) 가연성 증기운에서의 디젤엔진의 점화 위험에 대한 디젤엔진의 폭주 메커니즘과 폭주제한시스템, 운전부하별 배기계통과 배기가스에 대한 과열 메커니즘, 운전부하별 불꽃발생량과 비산거리 등 배기구 불꽃비산특성, 불꽃방지기의 성능과 재생주기 산정에 대한 연구 등을 통하여 표준화된 내연기관용 안전장치의 개발이 필요하다.

(5) 디젤차량 배기계통의 표면온도와 배기가스의 발화위험도에 대한 정량적 위험도를 확보함으로써 석유화학 및 가스시설의 적극적인 재난대비 안전관리를 위한 정책자료로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

(6) 잠재적 폭발위험장소에서의 디젤엔진 등 내연기관의 점화 위험성에 대하여 사회적 인식을 제고하고 디젤엔진용 방폭장치의 표준화에 대한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

References

1. Y. S. Kim, J. S. Lee and D. H. Rie, "A Study on the

Safety Management of Diesel Vehicles for Gas Repository's Socially Disaster Prevention", Proceedings of 2014 Spring Annual Conference, Korean Society of Safety, p. 142 (2014).

2. Marsh Report, "The 100 Largest Losses 1974-2015 Large Property Damage Losses in the Hydrocarbon Industry 24th Edition", MARSH & McLENNAN Companies, London, UK, p. 11 (2016).

3. D. A. Crowl and J. F. Louvar, "Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications 3rd Edition", Pearson Education International, Boston, USA, p. 15 (2011).

4. Y. S. Kim, J. S. Lee and D. H. Rie, "A Research on the Safety Management of Passage of Diesel Vehicles for Fire Explosion Accident Prevention", Proceedings of 2014 Spring Annual Conference, Korean Institute of Fire Science & Engineering, pp. 207-208 (2014).

5. C. W. Perrone and C. Sinkovits, "The Runaway Diesel - External Fuel Ingestion", Triodyne Safety Bulletin, Vol. 4, No. 3 (1996).

6. C. W. Perrone and C. Sinkovits, "The Runaway Diesel - A Side by Side Mechanical Analysis", 2005 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition held in Nov 5-11 2005 Orlando Florida USA, American Society of Mechanical Engineers, Proceedings of IMECE 2005-79034, pp. 9-16 (2005).

7. J. Bhalla, "Diesel Engine Runaway Safety Risk in Hazardous Environments", 2010 SPE Middle East Health, Safety, Security, and Environment Conference and Exhibition Held in Manama Bahrain, Oct 4-6 2010, Society of Petroleum Engineers, SPE 136694, pp. 464-478 (2010).

8. N. Mariyanna and R. Chakravarthy, "Method of Identifying and Stopping an Electronically Controlled Diesel Engine in Runaway Mode", 8th SAEINDIA International Mobility Conference and Exposition and Commercial Vehicle Engineering Congress 2013, SIMCOMVEC 2013, Society of Automotive Engineers, 2013-01-2735, (2013).

9. KS C IEC 60079-10-1: 2012, "Explosive Atmospheres - Part 10-1: Classification of Areas - Explosive Gas Atmospheres", Korea standards association, Seoul, Korea, pp. 7-13 (2012).

10. NFPA 30, "Flammable and Combustible Liquids Code", National Fire Protection Association, Quincy, MA., USA (2015).

11. NFPA 69, "Standard on Explosion Prevention Systems", National Fire Protection Association, Quincy, MA, USA (2014).

12. NFPA 70, "National Electrical Code", National Fire Protection Association, Quincy, MA, USA (2014).

13. NFPA 497, "Recommended Practice for the Classification of Flammable Liquids, Gases, or Vapors and of Hazardous (Classified) Locations for Electrical Installations

- in Chemical Process Areas”, National Fire Protection Association, Quincy, MA, USA (2012).
14. ANSI/API RP 14G, “Fire Prevention and Control on Fixed Open-type Offshore Production Platforms”, American Petroleum Institute, Washington, DC, USA (2007).
 15. ANSI/API RP 500, “Classification of Locations for Electrical Installations at Petroleum Facilities Classified as Class I, Division 1 and Division 2”, American Petroleum Institute, Washington, DC, USA (2014).
 16. CEN/EN 1834-1: 2000, “Reciprocating Internal Combustion Engines - Safety Requirements for Design and Construction of Engines for Use in Potentially Explosive Atmospheres, Part 1: Group II Engines for Use in Flammable Gas and Vapour Atmospheres”, European Committee for standardization, Brussels, Belgium (2000).
 17. OSHA Division 1, Chapter 4, Sub-chapter 14, “Petroleum Safety Orders-Drilling and Production Article 2. Definitions, Article 6. Fires and Explosions: Diesel Engine Runaway Protection. Article 35 Drilling and well-Servicing Machinery and E-qquipment”, Occupational Safety and Health Administration, California, USA (2012).
 18. ERCB Directive 37, “Service Rig Inspection Manual”, ERCB: The Energy Resources Conservation Board, Calgary, Alberta, Canada, pp. 22-23 (2006).
 19. ANSI/API RP 54, “Occupational Safety for Oil and Gas Well drilling and Servicing Operation”, American Petroleum Institute, Washinton DC, USA, p. 21 (2007).
 20. CEN/ATEX 94/9/EC of the European Parliament and the Council, “Equipment and Protective Systems in Potentially Explosive Atmospheres”, European Committee for standardization, Brussels, Belgium (1994).
 21. CSB Report No. 2003-06-01-I-TX, “Investigation Report: BLSR Operating Ltd. Vapor Cloud Deflagration and Fire Report, Rosharon, Texas, Jan 13, 2003”, U.S. Chemical Safety and Hazardous Investigation Board, Washington, DC, USA (2003).
 22. CSB Report No. 2005-04-01-I-TX, “Investigation Report: BP Refinery Explosion and Fire, Texas city, Texas, March 23, 2005”, U.S. Chemical Safety and Hazardous Investigation Board, Washington, DC, USA (2007).
 23. CSB Report No. 2010-04-10-I-OS, “Investigation Report 1 & 2: BP Explosion and Fire at The Macondo Well, Gulf of Mexico, April 20, 2010”, U.S. Chemical Safety and Hazardous Investigation Board, Washington, DC, USA (2014).
 24. https://www.youtube.com/watch?v=zE_uHq36DLU, “BP Deepwater Horizon Accident Investigation Report Video”, British Petroleum (2010).
 25. <https://www.youtube.com/watch?v=xQX8yWwLX2Q>, “Explosion de Pemex en Reynosa Tamaulipas V-edio”, Pemex (2012).
 26. L. Glassman and R. A. Yetter, “Combustion 4th Edition”, Elsevier Science & Technology Books, NY, USA, pp. 396-402 (2008).
 27. KOGAS, “GHS (MSDS) 2015 Natural Gas with Odorant”, Korea Gas Corporation, Daegu Korea, pp. 2-8 (2015).
 28. R. H. Gonzales, “Diesel Exhaust Emission System Temperature Test”, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, National Technology & Development Program, Washington, DC, USA (2008).
 29. KS R ISO 3046-6: 1990, “Reciprocating Internal Combustion Engines: Performance Part 6: OverSpeed Protection”, Korea standards association, Seoul, Korea (2006).