

Jet Fire를 수반한 국내외 LPG 기화기의 화재 · 폭발사고에 관한 확률론적 분석에 관한 연구

고재선

호원대학교 소방행정학과

Study on Probabilistic Analysis for Fire · Explosion Accidents of LPG Vaporizer with Jet Fire

Jae-Sun Ko

Dept. of Fire Service Administration, Howon Univ.

(Received May 15, 2012; Revised August 13, 2012; Accepted August 13, 2012)

요 약

본 연구에서는 1995년부터 2008년까지 14년간 국내에서 발생한 5,100건의 가스사고사례를 수집하여 Database를 구축하였으며, 이를 근거로 세부형태 및 원인별로 분석하였다. Poisson 분석법을 적용하여 전체 도시가스사고를 분석한 결과, 향후 5년 동안 “취급부주의-폭발-배관”의 항목의 사고발생확률이 가장 높았으며, “연결이완부식-누출-배관”의 경우는 가장 작은 발생 확률을 나타내었다. 또한 LPG 기화기 관련 사고만을 분석한 결과는 “LPG-기화기-화재”가 가장 높은 사고발생확률을 나타냈으며, “LPG-기화기-제품결함”이 가장 낮은 사고발생확률인 것으로 분석되었다. 아울러 Jet fire를 수반하는 외국의 LPG 사고를 비교 분석한 결과 국내의 경우와 마찬가지로 설비적 결함인 액유출장치 및 열교환기의 결함이 Jet fire를 일으키는 주요 원인으로 분석되었지만 향후 5년간 사고발생횟수는 “LPG-설비적결함-Jet fire” 항목이 가장 많았고, “LPG-설비적결함-Vapor Cloud” 항목은 가장 사고발생확률이 높은 것으로 분석되었다. 향후 가스 사고 발생 예측프로그램에 Poisson 분포 이론을 접목함으로써 일관성 있는 기준제시 및 현장에서 실제적으로 사용할 수 있는 도구로 사용되길 기대한다.

ABSTRACT

This study collected 5,100 cases of gas accident occurred in Korea for 14 years from 1995 to 2008, established Database and based on it, analyzed them by detailed forms and reasons. As the result of analyzing the whole city gas accidents with Poisson analysis, the item of “Careless work-Explosion-Pipeline” showed the highest rate of accidents for the next 5 years. And, “Joint Loosening and corrosion-Release-Pipeline” showed the lowest rate of accident. In addition, for the result of analyzing only accidents related to LPG vaporizer, “LPG-Vaporizer-Fire” showed the highest rate of accident and “LPG-Vaporizer-Products Faults” showed the lowest rate of accident. Also, as the result of comparing and analyzing foreign LPG accident accompanied by Jet fire, facility’s defect which is liquid outflow cut-off device and heat exchanger’s defect were analyzed as the main reason causing jet fire, like the case of Korea, but the number of accidents for the next 5 years was the highest in “LPG-Mechanical-Jet fire” and “LPG-Mechanical-Vapor Cloud” showed the highest rate of accidents. By grafting Poisson distribution theory onto gas accident expecting program of the future, it’s expected to suggest consistent standard and be used as the scale which can be used in actual field.

Keywords : Database Structure, Vaporizer gas accident, Poisson distribution, PDF (Probability Density Function), CDF (Cumulative Density Function), Jet fire, Domino effect

1. 서 론

현재 국민생활의 주요한 에너지원인 LPG는 발화온도가 높아 폭발의 위험이 적고 다른 에너지에 비해 공해물질 배출량이 적어 깨끗한 에너지로 인정받고 있다. 또한 가스

소비량의 증가와 함께 국민들이 안전한 가스사용을 위하여 가스사고 예방에 대한 노력을 기울인 결과 가스 사고는 매년 줄어들고 있는 추세이다. 하지만 노후화된 가스설비에 의한 사고와 함께 취급자들의 안전 불감증에 의한 사고들이 많이 발생하는 것으로 보아 새로운 가스설비의 도입

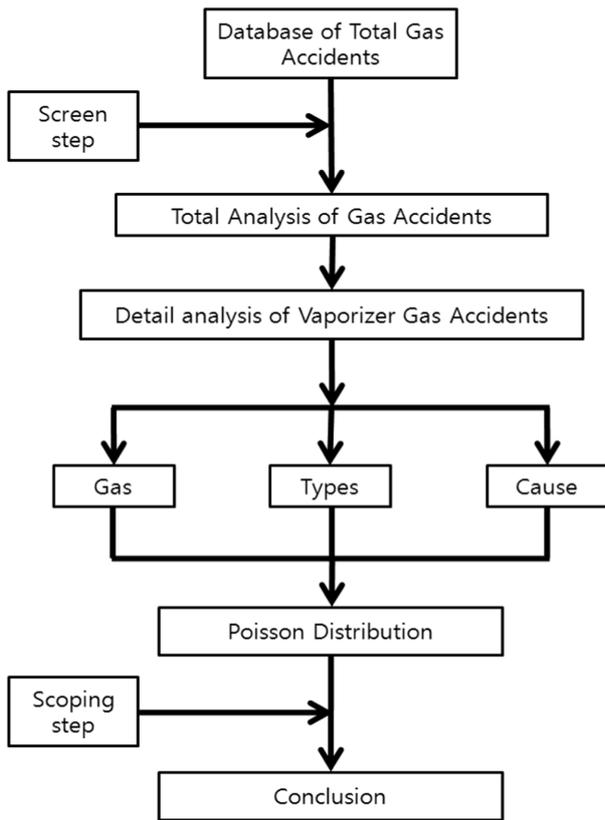


Figure 1. Research scheme.

및 교체와 함께 취급자들에게 안전의식을 교육 시키는 것이 무엇보다도 중요하다고 판단된다. 따라서 가스 사고를 근본적으로 예방하기 위해서는 수학적, 전문적 접근과 각 사고원인 및 발생유형에 대한 정량적 데이터베이스를 구축하여 향후 동종 사고에 대한 빠른 대응책을 제시하여 사고예방을 극대화 시킬 수 있다. 이는 서울시와 같이 인구가 밀집되어 있고 도시가스 사용량이 매우 큰 지역에서의 도시가스 설비운영에 대한 신뢰성을 확보함은 물론 도시가스가 들어가기 어려운 지역 즉 LPG를 사용하는 농어촌의 가정 및 공장 등에서도 마찬가지로 일 것이며, 관련설비의 예방보수 및 가스의 안전관리 지침을 수립하는데 절대적으로 필요한 자료를 제공하게 될 것이다. 본 가스사고 데이터베이스는 1995년부터 2008년까지 14년간 발생한 가스 사고를 다양한 형태로 분석^(1,2)하여 안전관리의 중요성을 제시하고 사고유형별 분석을 통해 동일한 사고를 예방하기 위한 효율적이고 경제적인 도구로 활용할 수 있도록 하였다. Figure 1은 본 연구의 진행 절차이다.

2. LPG 기화기 사고분석

체계적인 유지관리가 필수적인 산업현장, 운송수단, 학교, 음식점, 공장 등의 다중이용시설에 설치된 LPG기화시설의 가스누출로 인한 Jet fire 및 폭발사고가 발생할 경우

대형 인명피해를 초래할 수 있어 LPG 기화장치의 사고사례 및 통계분석을 통하여 기화기 관련 가스사고에 안전성 확보방안을 검토하고자 한다.

2.1 외국의 LPG 관련 Jet fire 사고분석⁽³⁾

기화기 사고와 관련한 Jet fire는 산업현장의 설비나 위험물의 운송수단에서 발생하는 다양한 화재 중에서 직접적인 피해는 심하지 않지만 종종 궁극적으로 사고의 크기를 확대시키고 연속적으로 장치(파이프라인, 탱크, 각종 부대설비 등을 오작동하게 한다. 이런 과정을 도미노 효과(Domino effect)라 하고 심각한 대형 사고를 수반하게 된다. 여기서 제트화재는 Torch Fire(분출화재)와 같은 의미로서 고압의 LPG가 누출 시 주위의 점화원에 의하여 점화되어 불기둥을 이루는 것을 말하며, 누출압력으로 인하여 화염이 굉장한 운동량을 가지고 있으며 화재의 직경은 작으나 길이는 풀 화재 보다 길며, 위험요소는 복사열로서 같은 크기의 Pool Fire(액면화재)에 비해 복사열 에너지는 크다. Table 1은 2001년도부터 2008년도까지 “Fire Safety Journal 43 583-588”⁽⁴⁾에서 LPG사고 중 Jet fire 관련사고 데이터베이스를 분석해 보면 자주 일어나는 사고와의 연관성이 있음을 보여주고 있다.

또한 Table 1은 Jet fire를 수반하는 가스사고의 발단이

Table 1. Specific Origin of the Accidents Involving Jet Fire

Specific origin	Number of accidents	Percent of total
Gas Equipment		
Pipe work	20	16.93
Process vessels	6	5.08
Reactor	11	9.32
Unknown	4	3.38
Equipment with flame	15	12.71
Heat exchange (Check floater)	11	9.32
Transport		
Rail tanker	13	11.01
Road tanker	12	10.16
Pipeline	9	7.62
Storage		
Pressurized tanks	6	5.08
Atmospherical pressure tanks	1	0.84
Pipe work	1	0.84
Loading/Unloading		
Hose	5	4.23
Road tanker	2	1.69
Rail tanker	1	0.84
Pressurized tanks	1	0.84

되는 것을 정리한 것으로 가스설비에서는 배관관련 장치에서 가장 빈번하게 발생하여 전체 사고 중 16.93%를 차지했고, 운송수단의 경우 열차 탱커에서 11.01%를 차지하여 가장 빈도가 높았다. 저장설비에서는 압축 탱크의 경우 5.08%, 운반기구에서는 호스 4.23%로 가장 빈번하게 발생하였다. 따라서 전체적으로 Jet fire를 일으키는 원인 장치는 주로 가스설비와 운송수단임을 알 수 있다.

Table 2는 Jet fire를 수반하는 원인물질에 관한 것으로 총 발생건수 118건 중에 LPG의 경우가 51건으로 61%로 가장 컸고, 다음은 수소 12%, 화학물질 12% 순으로 분석되었다. LPG의 사고의 경우에 있어서 사고의 세부원인으로는 Figure 2에서 나타난 것처럼 열교환기 및 기화기의 기계적인 결함 31%(15건), 작업자의 실수 20%(10건), 충

Table 2. Ranking of Substances Most Frequently Involved in Jet Fires

Substance	Number of accidents	Percent of total
LPG	51	61
Hydrogen	10	12
Chemicals	8	10
Natural gas	8	10
Oils	7	8
Other hydrocarbon	7	8
Ethylene	6	7
Propylene	6	7
Gas	3	4
Methane	3	4
Naphta	3	4
Acetylene	2	2
Ethylene	2	2
Gassoline	2	2

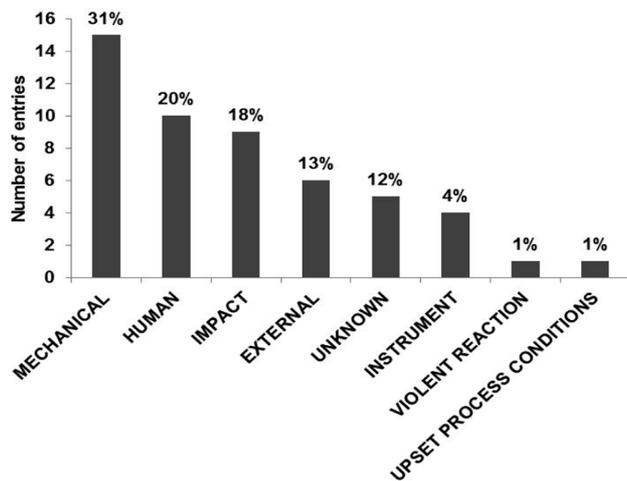


Figure 2. General causes of LP gas accidents.

Table 3. Types of Event Present in Accidents Involving a Jet Fire

Type of event	Number of entries	Percent of total
Fire/Explosion	26	56
Non jet fire	13	27
Vapor cloud	12	26

격 18%(9건), 외부 요소 13%(6건), 원인미상 12%(5건), 장비오작동 4%(4건), 격렬한 화학반응 1%(1건), 공정조건의 변화 1%(1건) 등의 순으로 분석되었다.

Table 3은 LPG 사고에서 Jet fire를 수반하는 사고의 형태를 나타낸 것으로 화재 폭발이 56%를 차지하고, Non Jet fire 27%, 연무 26%로 분석되었다. 결론적으로 Jet fire의 50% 이상이 심각한 사고(화재 폭발)로 연결되고 있는 것을 관찰할 수 있었다. 이러한 Jet fire는 큰 사고의 시작을 알리는 첫 단계로 도미노효과(Domino Effect)라고 말할 수 있다.

2.2 국내 LPG 기화기의 사고사례^(1,2)

국내 기화기 관련 사고사례만을 분석한 결과 LPG-기화기-누출-화재 형태의 사고를 주목해 보면 기화기실에 설치되어 있는 기화장치의 관리가 적절히 되지 않아 기화기장치 내부 및 가스관(드레인 배관)의 부식으로 가스가 누출되고, 물 주입구를 통하여 기화기실 및 용기보관실로 확산된 가스가 미상의 점화원에 의해 인화되어 Jet fire가 발생한 사고사례이다. 특히 이 시설은 용기 보관실 및 기화장치실의 설치위치가 GL 이하이고 환기가 불량한 장소에 설치되어 있었다. 또 다른 사고사례로는 LPG-기화기-액유출방지장치결함-화재 형태로서 기화실에서 기화기 액유출방지장치 작동불량으로 액상의 LP 가스가 유출하여 액이 팽창하고 가스계량기가 과열되면서 가스가 누출된 사고와 LPG 저장탱크 기계실의 기화장치의 기화통(코일)부식으로 구멍이 생기면서 가스가 누출 물 주입구를 통해 기계실 내부로 가스가 누출되던 중 미상의 점화원에 인화되어 Jet fire가 발생한 사례 등이 있다. 위에서 설명한 외국의 Jet fire에 의한 도미노 효과 발생과 마찬가지로 국내 기화기사고에서도 다양한 화재 중에서 직접적인 피해는 심하지 않은 것처럼 보이지만 LPG 기화기에서 Jet fire 발생하면 종종 궁극적으로 사고의 대형화와 연쇄화를 가져올 수 있다는 점에서 주목할 필요가 있다.

2.3 기화기와 관련 가스사고 분석

Table 4는 지난 14년간(1995~2008) LPG 기화장치와 관련하여 발생한 사고를 분석한 결과로서 총 28건으로 전체 LPG 사고의 1730건 가운데 1.62%를 차지하고 있고, Figure 3에서 나타난바와 같이 그 중 제품불량에 의한 사고가 23건 발생하여 전체 기화기 사고의 82.15%를 점유

Table 4. The Number of Total Vaporizer Accidents for 14 Years

Classification	95	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	06	07	08	Sum
Product,'s faults	1	0	3	5	0	1	4	3	3	1	1	1	0	0	23
Deficient of utilities	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2
User's faults	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	3
Sum	1	0	3	5	0	3	5	3	3	1	1	1	0	0	28

Analysis of vaporizer accident cause

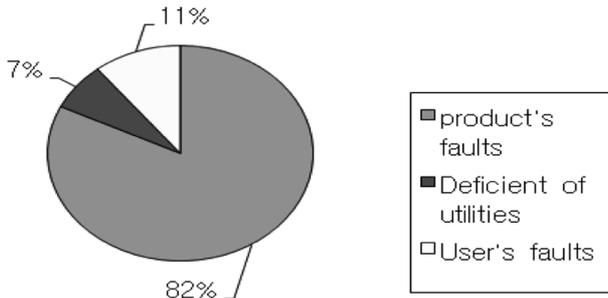


Figure 3. Percentage of total gas accidents by vaporizer for 16 years.

Analysis of Vaporizer accident type

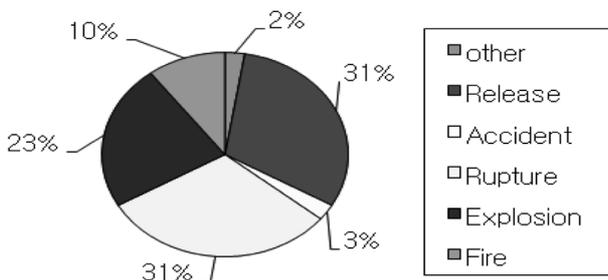


Figure 4. Analysis of vaporizer accident type for 16 years.

하고 있는 것으로 분석되었다.

또한 각종 세부기기의 불량인 경우는 7%, 사용자 부주의의 경우는 11%로 나타났다. Figure 4은 기화기에 대한 사고 형태별 분석으로서 파열 31%, 누출 30%, 폭발 23%, 화재는 10% 등의 순으로 분석되었다.

2.4 기화기와 관련한 세부원인별 분석^(1,2)

Figure 5는 사용년수별 기화기 사고의 세부원인으로서 첫째 액유출방지장치 불량인 경우를 살펴보면 8~10년의 경우는 2건, 2~4년의 경우는 5건, 1년 미만인 경우는 4건으로 분석되었으며, 둘째 내부부식에 의한 경우로는 8~10년은 2건, 5~7년은 1건으로 나타났다. 셋째 전열장치 불량인 경우로는 5~7년의 경우로서 2건으로 분석되었고, 넷째 전자밸브작동불량의 경우는 1년 미만인 경우로서 1건, 다섯째 온수통 파열의 경우는 5~7년의 경우가 1건으로 분석

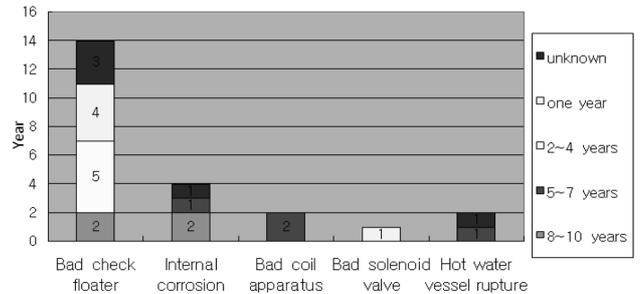


Figure 5. Analysis of vaporizer accident cause for 16 years.

되었다. 따라서 기화기의 사용기간별(노후화 정도) 세부원인에 의한 주요원인으로 액유출방지장치에 의한 경우가 주류를 이루고 있음을 알 수 있다.

3. Poisson 분포⁽⁴⁻⁶⁾를 이용한 LPG 기화기의 동종사고 발생가능성 예측

3.1 Poisson 분포를 이용한 확률론적 해석방법

Poisson 분포는 특정시간동안 특정사상이 발생했던 평균을 근거로 하여 특정사상의 발생횟수에 대한 확률을 나타내주는 분포이다. 즉 어떤 특정한 사건이 발생하는 특이한 경우로 이산형 정수 값을 갖는 분포를 Poisson 분포를 따른다고 한다. Poisson 분포에 의해 분포된 확률변수에 대하여 사건의 발생건수 평균이 λ일 때 특정횟수(X)의 성공적인 사상이 발생할 확률은 다음과 같은 공식에 의해 구할 수 있다.

$$P(X=x|\lambda) = \frac{\lambda^x e^{-\lambda}}{X!} \tag{1}$$

3.1.2 Poisson 분포의 최대 확률 값

Poisson 분포가 어느 시간대를 기준으로 해석이 될 경우에는 시간에 따른 발생건수를 나타내는 λ(사건수/시간)를 매개변수로 사용하여 식(1)을 변형하여 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$P = \frac{e^{-\lambda t} (\lambda t)^r}{r!} \tag{2}$$

여기서 P는 강도(Intensity)로서 갖는 사건이 t시간 동안 r번 발생할 확률을 말하며, 결국 P는 식(3)과 같이 λ, t, 그리고 r의 함수가 된다.

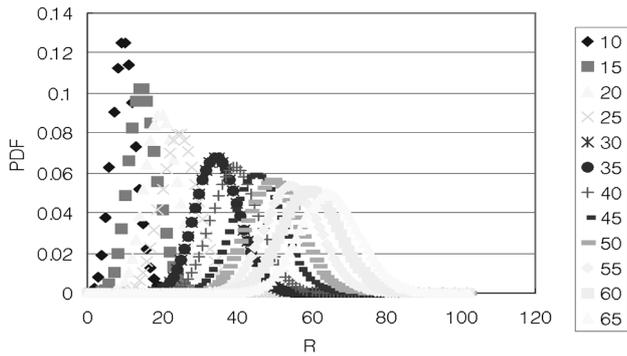


Figure 6. Diagrams of PDF vs. R in Poisson distribution according to the intensities.

$$P=P(\lambda, t, r) \tag{3}$$

한편 발생강도가 λ 로 고정되고 관심을 갖는 기간 t 역시 일정하다면, 결국 그 사건에 대하여 Poisson 분포는 식(4)와 같이 r 만의 함수로 나타낼 수 있다.

$$P=P(r) \tag{4}$$

식(4)를 이용하여 사건수 R 과 확률 P 와의 관계를 확인하기 위하여 임의로 의 값을 10부터 100까지 5씩 증가시키면서 Figure 5에 그 결과를 그려 보았다. 이 그래프에서 알 수 있듯이, λ 와 t 가 주어지게 되면 그에 따라 값을 최대로 갖게 하는 R 값이 존재하게 된다. 이 때, 그러한 점에서의 R 값을 R_M 이라 하고 P 값을 P_M 이라고 정의하면, R_M 과 P_M 은 λt 의 함수가 된다.

$$\left(\frac{\partial P}{\partial r}\right)_{r=R_M} = 0 \tag{5}$$

따라서 R_M 과 P_M 을(각 사건)에 대하여 좌표축에 나타내면 Figure 6과 같으며, 이를 Semi-log 좌표로 변환하면 좀더 직선에 가까운 모양을 얻게 된다. 따라서 이와 같은 결과를 이용하면 사건 유형별 최대 확률 특성 식을 구할 수 있어, 다른 사건과의 위험성 상관관계 파악이 용이하다. 또한 Poisson분포의 적용과 함께 본 연구에서는 가스설비의 구성요소에 대한 신뢰도를 나타내는 지표인 평균 무고장 시간; MTBF(Mean Time Between Failures)와 연간 발생할 수 사건의 개념(event/yr)인 Intensity를 계산함으로써 Poisson분포와 융합적인 적용의 예를 통해 상관관계를 살펴보고자 한다. 본 논문에서 사용된 PDF(Probability Density Function)는 확률밀도함수를 말하고 CDF(Cumulative Density Function)는 누적밀도함수를 말한다.

3.2 국외 LPG 기화기 사고 발생가능성 예측⁽³⁾

3.2.1 LPG-Mechanical-Jet fire

Table 5에 나타난바와 같이 LPG-설비적결함-Jet fire에 의한 사고는 총 11건이 발생하였다. 또한 Table 5에서 향후 5년 이내에 동종사고가 발생할 Intensity는 0.78 event/

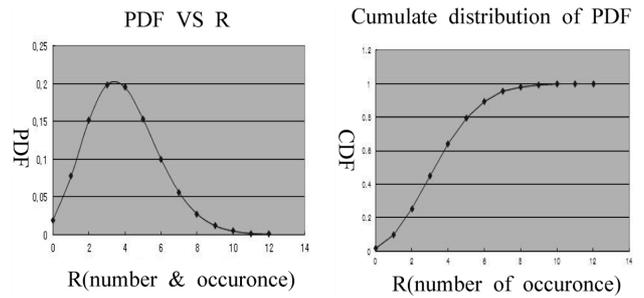


Figure 7. PDF and CDF for the LPG-mechanical-jet fire.

Table 5. PDF and CDF Distribution for the LPG-Mechanical-Jet Fire in Vaporizer Gas Accidents

Type of event	LPG-Mechanical-Jet fire			
Intensity	0.7857 event/yr		Time interval of interest (year)	
MTBF	1.2727 yr/event		5	
R (number of occurrences)	P (R, cumulative)	PDF	Year	No. accident
			95	0
			96	0
			97	1
			98	2
99	1			
0	0.019671755	0.019671755	00	1
1	0.09695365	0.077281895	01	0
2	0.248757371	0.151803722	02	3
3	0.447547959	0.198790588	03	0
4	0.642788715	0.195240756	04	0
5	0.796192166	0.153403451	05	0
6	0.896634902	0.100442736	06	2
7	0.953005825	0.056370923	07	1
8	0.980687975	0.027682153	08	0

yr로, MTBF는 1.27 yr/event로 나타났다. 아울러 Poisson 분포를 적용한 결과 Figure 7에 나타난바와 같이 향후 5년 이내에 동종사고가 5번 발생할 확률인 PDF는 0.79, 적어도 5번 발생할 확률인 CDF는 0.15로 분석되었다.

3.2.2 LPG-Mechanical-Non Jet Fire

Table 6에 나타난바와 같이 LPG-설비적결함-Non Jet fire에 의한 사고는 총 6건이 발생하였다. 또한 Table 6에서 향후 5년 이내에 동종사고가 발생할 Intensity는 0.42 event/yr로, MTBF는 2.33 yr/event로 나타났다. 아울러 Poisson 분포를 적용한 결과 Figure 8에 나타난바와 같이 향후 5년 이내에 동종사고가 5번 발생할 확률인 PDF는 0.93, 적어도 5번 발생할 확률인 CDF는 0.10으로 분석되었다.

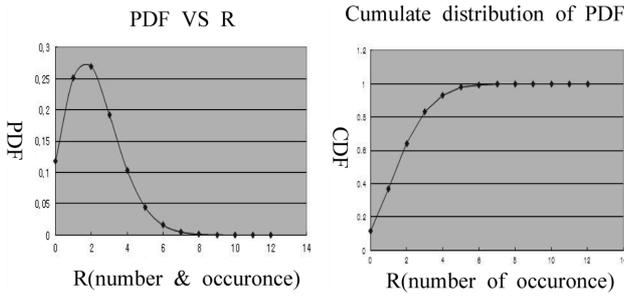


Figure 8. PDF and CDF for the LPG-mechanical-non jet fire.

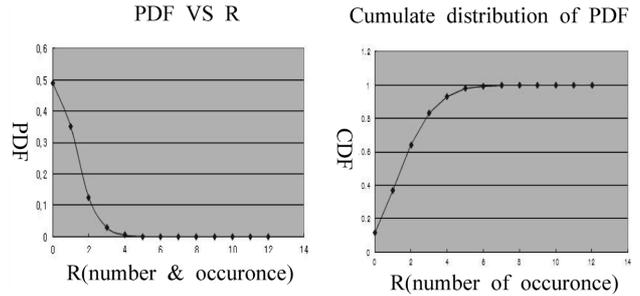


Figure 9. PDF and CDF for the LPG-mechanical-vapor cloud.

Table 6. PDF and CDF Distribution for the LPG-Mechanical-Non Jet Fire in Vaporizer Gas Accidents

Type of event	LPG-Mechanical-Non Jet fire				
Intensity	0.42857 eveny/yr		Time interval of interest (year)		
MTBF	2.3334 yr/event		5		
R (number of occurrences)	P (R, cumulative)	PDF	Year	No. accident	
			95	0	
			96	2	
			97	1	
			98	0	
			99	0	
0	0.117319166	0.117319166	00	0	
1	0.117319166	0.117319166	01	0	
2	0.368717379	0.251398213	02	1	
3	0.638072607	0.269355228	03	1	
4	0.830469199	0.192396592	04	1	
5	0.933538802	0.103069603	05	0	
6	0.977711489	0.044172687	06	0	
7	0.993487448	0.01577596	07	0	
8	0.998316824	0.004829375	08	0	

Table 7. PDF and CDF Distribution for the LPG-Mechanical-Vapor Cloud in Vaporizer Gas Accidents

Type of event	LPG-Mechanical-Vapor Cloud				
Intensity	0.1428 event/yr		Time interval of interest (year)		
MTBF	7.0000 yr/event		5		
R (number of occurrences)	P (R, cumulative)	PDF	Year	No. accident	
			95	0	
			96	0	
			97	0	
			98	1	
			99	0	
0	0.48954166	0.48954166	00	1	
1	0.839214274	0.349672614	01	0	
2	0.96409735	0.124883076	02	0	
3	0.993831416	0.029734066	03	0	
4	0.99914107	0.005309655	04	0	
5	0.999899592	0.000758522	05	0	
6	0.999989893	9.03002E-05	06	0	
7	0.999999107	9.21431E-06	07	0	
8	0.99999993	8.22706E-07	08	0	

3.2.3 LPG-Mechanical-Vapor Cloud

Table 7에 나타난 바와 같이 LPG-설비적결함-연무에 의한 사고는 총 2건이 발생하였다. 또한 Table 7에서 향후 5년 이내에 동종사고가 발생할 Intensity는 0.14 event/yr로, MTBF는 4.11 yr/event로 나타났다. 아울러 Poisson 분포를 적용한 결과 Figure 9에 나타난바와 같이 향후 5년 이내에 동종사고가 5번 발생할 확률인 PDF는 0.99, 적어도 5번 발생할 확률인 CDF는 0.01으로 분석 되었다.

3.3 국내 LPG 기화기 사고 발생가능성 예측^(1,2)

3.3.1 LPG-기화기-제품불량에 의한 사고분석

Table 8에 나타난바와 같이 LPG-기화기-제품결함에 의한 사고는 총 23건이 발생하였다. 또한 Table 8에서 향후

5년 이내에 동종사고가 발생할 Intensity는 1.64 event/yr으로, MTBF는 0.61 yr/event로 나타났다. 아울러 Poisson 분포를 적용한 결과 Figure 10에 나타난바와 같이 향후 5년 이내에 동종사고가 5번 발생할 확률인 PDF는 0.12, 적어도 5번 발생할 확률인 CDF는 0.27로 분석 되었다.

3.2.2 LPG-기화기-제품불량-액유출방지장치불량에 의한 사고분석

Table 9에 LPG-기화기-액유출방지장치 불량에 의한 사고분석으로서 총 발생건수는 14건으로 분석되었다. 또한 Table 9에서 향후 5년 이내에 동종사고가 발생할 Intensity 1.00 event/yr, MTBF는 1.00 yr/event로 계산되었다. 아울러 Poisson분포를 적용한 결과 Figure 11에 나타난바와 같

Table 8. PDF and CDF Distribution for the LPG-Vaporizer-Product, s faults in Vaporizer Gas Accidents

Type of event	LPG-Vaporizer-Product, s faults			
Intensity	1.6428 event/yr	Time interval of interest(year)		
MTBF	0.6087 yr/event	5		
R (number of occurrences)	P (R, cumulative)	PDF	Year	No. accident
			95	0
			96	0
			97	3
			98	0
			99	0
0	0.000755977	0.000755977	00	1
1	0.006189559	0.005433583	01	0
2	0.025716497	0.019526937	02	3
3	0.072499784	0.046783287	03	5
4	0.156563503	0.084063719	04	0
5	0.277405099	0.120841596	05	1
6	0.422163262	0.144758162	06	4
7	0.570798875	0.148635613	07	3
8	0.704338683	0.133539809	08	3

Table 9. PDF and CDF Distribution for the LPG-Vaporizer-Check Floater in Vaporizer Gas Accidents

Type of event	LPG-Vaporizer-Products falts-Check floater			
Intensity	1.0000 event/yr	Time interval of interest (year)		
MTBF	1.0000 yr/event	5		
R (number of occurrences)	P (R, cumulative)	PDF	Year	No. accident
			95	0
			96	0
			97	0
			98	0
			99	2
0	0.012588142	0.012588142	00	1
1	0.067661265	0.055073122	01	0
2	0.18813372	0.120472455	02	2
3	0.363822717	0.175688997	03	1
4	0.555982557	0.19215984	04	0
5	0.724122417	0.16813986	05	1
6	0.846724399	0.122601982	06	3
7	0.923350637	0.076626238	07	2
8	0.965255611	0.041904974	08	2

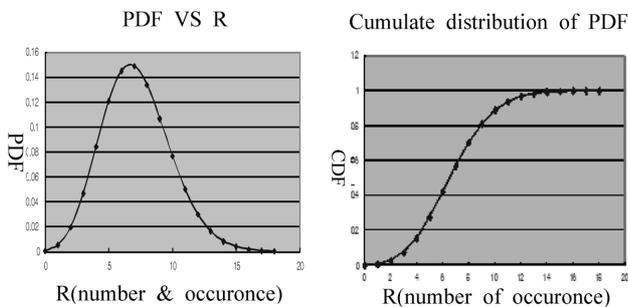


Figure 10. PDF and CDF for the LPG-vaporizer-Product's faults.

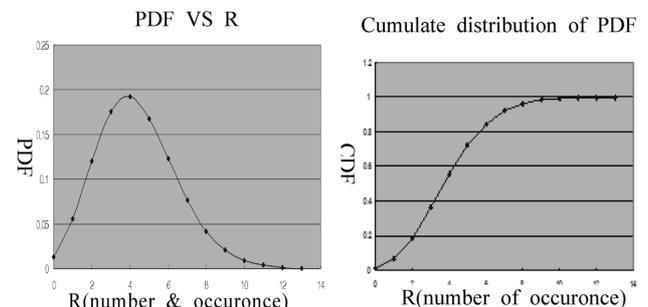


Figure 11. PDF and CDF for the LPG-vaporizer-check floater.

이 향후 5년 이내에 동종사고가 5번 발생할 확률인 PDF는 0.16, 적어도 5번 발생할 확률인 CDF는 0.82로 분석되었다.

석 되었다.

3.2.3 LPG-기화기-화재에 의한 사고분석

Table 10은 LPG-기화기-화재에 의한 사고분석으로서 총 발생건수는 4건으로 분석되었다. 또한 Table 10에서 향후 5년 이내에 동종사고가 발생할 Intensity는 0.28 event/yr, MTBF는 3.50 yr/event로 계산되었다. 아울러 Poisson 분포를 적용한 결과 Figure 12에 나타난바와 같이 향후 5년 이내에 동종사고가 5번 발생할 확률인 PDF는 0.03, 적어도 5번 발생할 확률인 CDF는 0.933으로 분

4. LPG 사고의 형태별 PDF 우선순위화

4.1 국내 전체 LPG 사고의 PDF 우선순위화^(1,2)

Table 11과 12, Figure 13은 전체도시가스사고사례에서 Poisson분포에 적용하기 위해서 검색된 16개 항목을 발생건수, Intensity, MTBF별로 정량화 한 결과이다(t=5). Table 12를 살펴보면 발생건수별로는 시공 작업부주의-폭발-배관 7건, 배관 연결부 이완 부식-폭발-호스 9건, 배관마감조치불량-폭발-배관 22건, 순으로 발생건수가 많아짐에 따라 서 이에 따라 Intensity는 증가함을 볼 수 있지만 반대로 평균

Table 10. PDF and CDF Distribution for the LPG-Vaporizer-Fire in Gas Accidents

Type of event	LPG-Vaporizer-Fire			
Intensity	0.2857 event/yr	Time interval of interest (year)		
MTBF	3.5002 yr/event	5		
R (number of occurrences)	P (R, cumulative)	PDF	Year	No. accident
			95	0
			96	0
			97	0
			98	0
			99	0
0	0.286504797	0.286504797	00	1
1	0.644635793	0.358130996	01	1
2	0.868467665	0.223831873	02	0
3	0.961730946	0.09326328	03	0
4	0.990875721	0.029144775	04	0
5	0.998161915	0.007286194	05	1
6	0.999679872	0.001517957	06	0
7	0.999950935	0.000271064	07	0
8	0.999993289	4.23537E-05	08	1

고장(사고)간격인 MTBF 값은 줄어들면서 반비례함을 나타내고 있다. Figure 13은 위의 Table 11, 12에서 기술된 16개

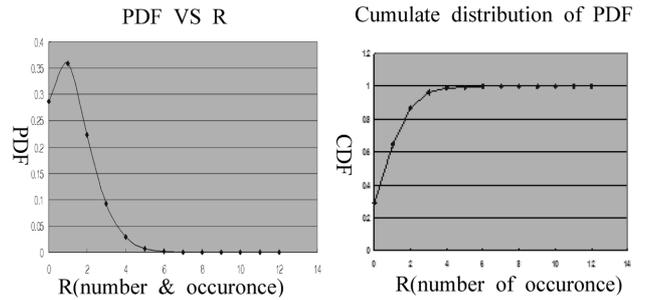


Figure 12. PDF and CDF for the LPG-vaporizer-fire.

항목에 대해서 각각 PDF와 R의 상관관계를 비교해 보기 위해서 종합적으로 표현한 그래프이다. 살펴보면 동종사고의 반복발생횟수인 R 값이 증가함에 따라서 PDF 값이 감소하는 것을 볼 수 있으며, 또한 평균고장사고간격인 MTBF 값이 작아질수록 Intensity는 증가하는 것으로 분석되었다. Table 12에서 MTBF의 값이 가장 큰 Ranking 1인 취급부주의-폭발-배관은 Figure 13, 14에서 가장 왼쪽에 있는 것으로 동종사고의 발생확률인 PDF 값이 가장 큰 반면에 발생횟수인 R 값은 가장 작은 치수를 나타내고 있고, 또한 MTBF의 값이 가장 작은 Ranking 16인 연결이완부 부식-누출-배관은 Figure 11, 12에서 가장 오른쪽에 있는 것으로 발생확률인 PDF 값이 가장 작은 반면에 발생횟수인 R 값은 가장 큰 치수를 나타내고 있음을 볼 수 있다. Figure 14는 Figure 13을 Semi-log로 표현한 것으로 Figure 13에서 각 항목의 PDF의 정점을 표시함으로써 각 항목이 어느 영역(R)에 위치하고 있는가를 시각적으로 단순화시킨 그래프이다.

Table 11. Classifications of Events with R_M and P_M into in Operation and under Construction

Step	Ranking	Event	R_M	PDF_M
Under constructing	1	Careless work-Explosion-Pipeline	3	0.222858
	2	Joint loosening and corrosion-Fire-Pipeline	3	0.211153
Operating	3	Joint loosening and corrosion-Explosion-Hose	4	0.195168
	4	Bad finishing-Fire-Hose	4	0.175467
	5	Subway construction-Release-Pipeline	4	0.175467
	6	Joint Loosening and corrosion-Explosion-Pipeline	5	0.162981
	7	Ground sink-Release-Pipeline	6	0.158931
	8	Road construction-Release-Pipeline	7	0.148233
	9	Careless work-Fire-Pipeline	8	0.13627
	10	Careless work-Release-Pipeline	9	0.131696
Under constructing	11	Bad finishing-Explosion-Pipeline	9	0.125111
	12	Tap water construction-Release-Pipeline	12	0.114019
	13	Waste water construction-Release-Pipeline	20	0.088384
	14	Bad finishing-Explosion-Hose	26	0.077792
	15	Construction-Release-Pipeline	24	0.077785
	16	Joint Loosening and corrosion-Release-Pipeline	90	0.041965

Table 12. Summary of Poisson Distribution Calculations for the Urban Gas Accidents

Ranking	Event	No. of occurrences	Intensity (event/yr)	MTBF (yr/event)
1	Careless work-Explosion-Pipeline	7	0.6363	1.571
2	Joint Losening and corrosion-Fire-Pipeline	8	0.7272	1.375
3	Joint Losening and corrosion-Explosion-Hose	9	0.8181	1.222
4	Bad finishing-Fire-Hose	11	1	1
5	Subway construction-Release-Pipeline	11	1	1
6	Joint Losening and corrosion-Explosion-Pipeline	13	1.1818	0.846
7	Ground sink-Release-Pipeline	14	1.2727	0.785
8	Road construction-Release-Pipeline	16	1.4545	0.687
9	Careless work-Fire-Pipeline	19	1.7272	0.578
10	Careless work-Release-Pipeline	20	1.8181	0.555
11	Bad finishing-Explosion-Pipeline	22	2	0.555
12	Tap water construction-Release-Pipeline	27	2.4545	0.407
13	Waste water construction-Release-Pipeline	45	4.0909	0.244
14	Bad finishing-Explosion-Hose	58	5.2727	0.189
15	Construction-Release-Pipeline	56	5.0909	0.196
16	Joint Losening and corrosion-Release-Pipeline	197	17.9090	0.055

①Careless work-Explosion-Pipeline ②Joint loosening and erosion-Fire-Pipeline ③Joint loosening and erosion-Explosion-Hose
 ④Bad finishing-Fire-Hose ⑤Subway-Release-Pipeline ⑥Joint loosening and erosion-Explosion-Pipeline
 ⑦Ground sink-Release-Pipeline ⑧Road const.-Release-Pipeline ⑨Careless-Fire-Pipeline
 ⑩Careless work-Release-Pipeline ⑪Bad finishing-Explosion-Pipeline ⑫Tap water-Release-Pipeline
 ⑬Waste water-Release-Pipeline ⑭Const.-Release-Pipeline ⑮Bad finishing-Explosion-Hose
 ⑯Joint loosening and erosion-Release-Pipeline

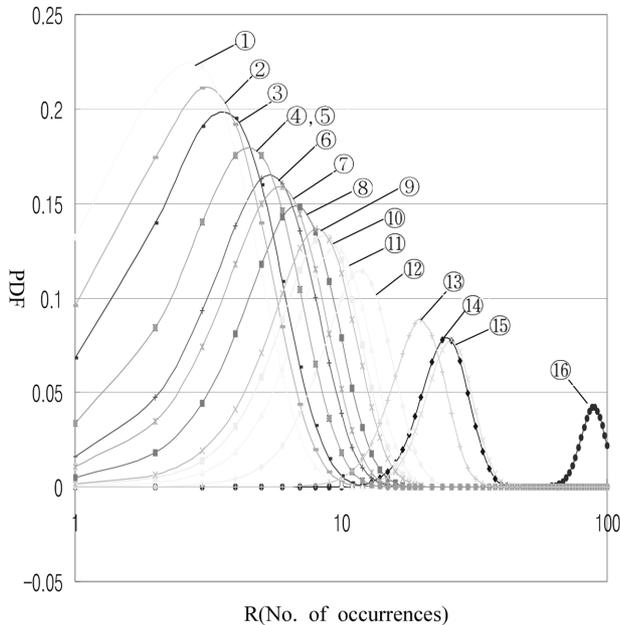


Figure 13. Series of Poisson distributions for the urban gas accidents.

4.2 외국의 LPG 기화기 Jet fire 사고의 PDF 우선순위화⁽³⁾

Table 13, 14와 Figure 15는 LPG에 대해서 해외 기화기

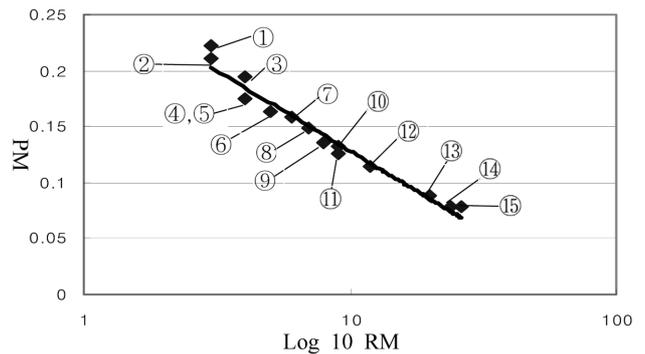


Figure 14. plot in semi-log scale.

관련 Jet fire 사고 3개 항목에 대해서 Poisson 분포를 적용한 것으로 각각 PDF와 R의 상관관계를 비교해 보기 위해서 표현한 표와 그래프이다. 즉 대상인 3개 항목에 대해 향후 5년 동안 발생할 예상 발생횟수 및 발생확률을 우선순위화 한 것이다($t=5$). 정량화한 우선순위를 살펴보면 Ranking 1인 LPG-설비적결함-연무는 Figure 15에서 가장 왼쪽에 있는 것으로 위에서 언급한 국내 기화기 관련 사고를 분석한 결과와 마찬가지로 동종사고의 발생확률인 PDF 값이 가장 큰 반면에 발생횟수인 R 값은 가장 작은 수치를 나타내고 있다. Ranking 3인 LPG-설비적결함-Jet fire는 Figure 16에서 가장 오른쪽에 있는 것으로 발생확률인 PDF 값이 가장 작은 반면에 발생횟수인 R 값은 가장 큰 수치를 나타내고 있음을 볼 수 있다.

4.3 국내 LPG 기화기 사고의 PDF 우선순위화

Table 15, 16와 Figure 16은 대상인 6개 항목에 대해 향

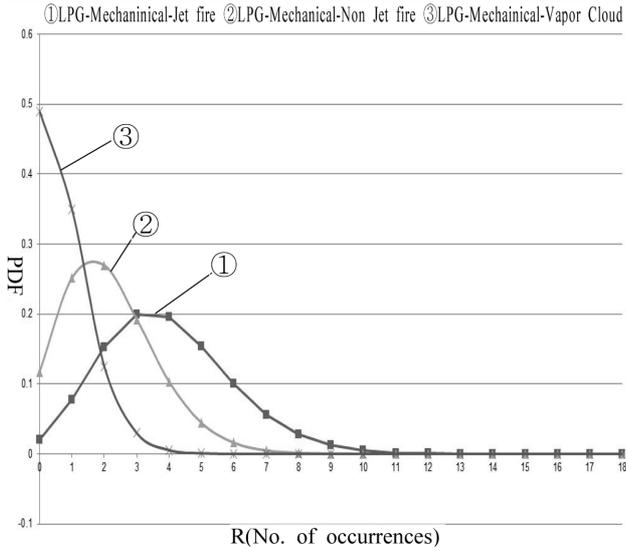


Figure 15. Series of Poisson distributions for the LPG vaporizer accidents on LPG jet fire-related accidents in foreign countries.

Table 13. Classifications of Events with R_M and P_M into in Operation

Ranking	Event	R_M	PDF_M
1	LPG-Mechanical-Vapor Cloud	1	0.349672
2	LPG-Mechanical-Non Jet fire	2	0.269355
3	LPG-Mechanical-Jet fire	3	0.198790

Table 14. Classifications of Events with R and Intensity, MTBF into in Operation

Ranking	R_M	PDF_M	CDF_M	Intensity	MTBF
1	1	0.349	0.839	1.64	0.61
2	2	0.269	0.638	1.00	1.00
3	3	0.198	0.447	0.85	1.66
Comparison	Increase	Decrease	Decrease	Decrease	Increase

후 5년 동안 발생할 예상 발생횟수 및 발생확률을 우선순 위화한 것이다($t=5$). 정량화한 우선순위를 살펴보면 Ranking 1인 LPG-기화기-화재는 Figure 16에서 가장 왼쪽에 있는 것으로 동종사고의 발생확률인 PDF 값이 가장 큰 반면에 발생횟수인 R 값은 가장 작은 수치를 나타내고 있다. 또한 Ranking 6인 LPG-기화기-제품결함은 Figure 16에서 가장 오른쪽에 있는 것으로 발생확률인 PDF 값이 가장 작은 반면에 발생횟수인 R 값은 가장 큰 수치를 나타내고 있음을 볼 수 있다. 국내 LPG 기화기 사고의 분석결과를 종합 적으로 살펴볼 때 Table 15, 16에 나타난바와 같이 대상항 목 모두 발생건수가 증가함에 따라 향후 5년간 발생횟수는 증가하고 발생확률인 PDF는 감소하는 반비례관계를 보여 주고 있다. 아울러 우선순위에 따라 Intensity는 감소하고

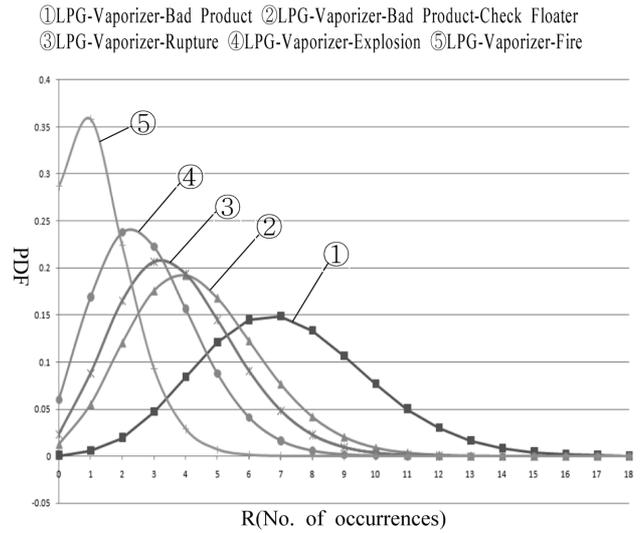


Figure 16. Series of Poisson distributions for the LPG vaporizer accidents.

Table 15. Classifications of Events with R_M and P_M into in Operation

Ranking	Event	R_M	PDF_M
1	LPG-Vaporizer-Fire	1	0.358131
2	LPG-Vaporizer-Explosion	2	0.237521
3	LPG-Vaporizer-Release	3	0.206699
4	LPG-Vaporizer-Rupture	3	0.206699
5	LPG-Vaporizer-Products Faults -Check Floater	4	0.19216
6	LPG-Vaporizer-Products Faults	7	0.148636

Table 16. Classifications of Events with R and Intensity, MTBF into in Operation

Ranking	R_M	PDF_M	CDF_M	Intensity	MTBF
1	1	0.358	0.644	1.64	0.61
2	2	0.237	0.466	1.00	1.00
3	3	0.206	0.483	0.85	1.66
4	3	0.206	0.483	0.85	1.66
5	4	0.192	0.555	0.64	1.55
6	7	0.148	0.570	0.28	3.50
Comparison	Increase	Decrease	Decrease	Decrease	Increase

MTBF 또한 반비례관계로 증가하고 있음을 볼 수 있다.

5. 결 론

가스사고사례 데이터베이스를 활용하여 Poisson 분포에 적용한 결과($t=5$) 전체도시가스사고를 분석한 결과는 취급 부주의-폭발-배관의 항목의 사고발생확률이 가장 높았고,

연결이완부 부식-누출-배관의 사고발생확률이 가장 작았다. 또한 LPG 기화기와 관련된 사고를 분석한 결과는 향후 5년간 LPG-기화기-화재 항목이 사고발생확률이 가장 높았고, LPG-기화기-제품결합의 사고발생확률이 가장 작았다. 외국의 기화기 관련 사고를 분석한 결과는 LPG-설비적결합-연무 사고형태가 발생확률이 가장 높았고, LPG-설비적결합-Jet fire 사고형태가 발생확률이 가장 낮음을 볼 수 있었다. 따라서 국, 내외 분석결과를 종합해보면 사고형태는 전체국내도시가스에서는 폭발, 기화기관련 부분에서는 화재가 많이 발생하는 것으로 분석되었으나 국외의 기화기 관련사고형태로서는 연무가 가장 많이 발생하는 것으로 분석되었다. 또한 국, 내외 가스사고에 대해서는 모두가 사고발생건수가 증가함에 따라서 Intensity는 증가하지만 MTBF는 감소하는 것으로 나타났고, 반복발생 횟수인 R 값은 증가하지만 발생확률인 PDF는 감소하는 일관성 있는 상관관계를 도출할 수 있었다. 따라서 본 연구는 동종사고의 유발을 방지하기 위한 Poisson 분포 이론을 접목한 가스사고시 화재 및 폭발사고 예측프로그램을 일관성 있는 기준으로 생성시킴으로서 실제적으로 현장에서 실무적으로 사용할 수 있는 방법을 제공함을 그 목적으로 하였다. 아울러 기화기 관련 동종사고의 발생을 미연에 방지하기 위하여 기화장치 분해점검 주기 등을 명문화하고 재검사시 액유출방지장치 성능시험 방법을 규정하고, 또한 이물질의 혼입을 방지할 수 있는 여과장치를 설치토록 하는 방안도 적극 검토하여야 한다.

감사의 글

본 논문은 2012년도 호원대학교 교내 학술연구비지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Korea Gas safety Corporation, "Annual Gas Accident", KIGAS Department of Gas Investigation (1995-2008).
2. J. S. Ko and H. Kim, "Study on Predictable System of

Fire Explosion Accident using of poison Distribution and Societal Risk in Urban Gas", KIGAS, Vol. 12, No. 3, pp. 21-27 (2008).

3. CCPS for American Institute of Chemical Engineers, "Jet Fires and the Domino Effect", Fire Safety Journal, Vol. 43, pp. 583-595 (2008).
4. Rebert L. Winkler and William L. Hays, "Statistics Second Edition Probability, Inference, and Decision", Holt, Rinehart and Winston, New York (1970).
5. Roger D. Leitch, "Reliability Analysis for Engineering", Oxford University Press (1995).
6. S. P. Calabro, "Reliability Principles and Practices", McGraw-Hill (1982).
7. R. E. Barlow and R. Campo, "Total Time on Test Processes and Applications to Failure Data Analysis", pp. 451-482 (1975).
8. A. D. S. Carter, "Mechanical Reliability", 2nd Ed., Macmillan Education Ltd. (1986).
9. B. S. Dhillon, "Engineering Reliability", John Wiley & Sons, New York (1981).
10. S. M. Loss, "Introduction to Probability Models", 3rd Ed., Academic Press, Inc. (1995).
11. A. M. Mood, T. L. Hill, G. S. Rushbrooke and I. Prigogine, "Introduction to the Theory of Statistics", 3rd Ed., McGraw-Hill International Book Co. (1990).
12. D. O. Hagon, "Use of Frequency-Consequence Curve to Examine the Conclusions of Published Risk Analysis and to Define Broad Criteria for Hazard Installations", Chem Eng Res., Vol. 62, Nov, pp. 381-386 (1984).
13. Health & Safety Executive, "Risk Criteria for Land Use Planning in the Vicinity of Major Industrial Hazard", HSE, England (1989).
14. CCPS for American Institute of Chemical Engineers, "Guideline for Consequence Analysis of Chemical Releases", AIChE-CCPS, New York (1989).
15. Patrick D. T. O'coner, "Practical Reliability Engineering", John-Wiley Sons (1995).