



국내 LP 및 천연가스사고 Database 구축 및 분석에 관한 연구

†고재선 · 박선영 · 김효

서울시립대학교 화학공학과

(2008년 6월 10일 접수, 2008년 8월 12일 수정(1차), 2008년 9월 5일 수정(2차), 2008년 9월 5일 채택)

Constructing a Database Structure for the Domestic LP Gas and Natural Gas Accidents and its Analysis

†Jae-Sun Ko · Sun-Young Park · Hyo Kim

Department of Chemical Engineering, University of Seoul, Korea

(Received 10. June. 2008, Revised(1st) 12. August. 2008, Revised(2nd) 5. September. 2008, Accepted 5. September. 2008)

요 약

본 연구에서는 1991년부터 최근까지 16년간 발생된 3,593건의 가스사고[천연가스(NG) 및 액화석유가스(LPG)]사례를 수집하여 Database를 구축하였으며, 이를 근거로 사고의 발생건수를 형태 및 원인별로 분석하였다. 분석결과를 살펴보면 사고의 형태로는 누출, 폭발, 그리고 화재의 순서로 많이 발생하였다. 사고발생위치로는 화재는 밸브부위에서, 폭발은 호스부위에서, 그리고 누출은 배관부근에서 가스사고가 많이 발생한 것으로 나타났다. 또한 화재, 폭발, 누출의 각각의 경우에 Poisson 분석법을 적용하여 향후 5년 이내의 화재, 폭발 및 누출에 대한 가장 가능성이 높은 발생확률을 예측하였다. 향후 본 연구에서 구축한 국내가스사고 Database를 매년 지속적으로 보완·개정을 하면 국내 가스사고 예측에 대한 보다 신뢰성 있는 정보를 제공해 줄 수 있어 효과적인 가스안전관리 대책수립에 기여할 것으로 기대된다.

Abstract – We have garnered 3,593 data of gas [Natural Gas (NG) and Liquefied Petroleum Gas (LPG)] accidents reported for 16 years from 1991, and then analyzed the accidents according to their types and causes based on the classified database. According to the results the gas leak has been the most common accident followed by the explosion and then fire accidents. The most frequent accident-occurring locations for fire, explosion and leak are recognized around the valve, hose and pipeline, respectively. In addition, we have applied the Poisson analysis to predict the most-likely probabilities of fire, explosion and release in the upcoming 5 years. From this research we have assured the successive database updating will highly improve the anticipating-probability accuracy and thus it will play a key role as a significant safety-securing guideline against the gas disasters.

Key words : database structure, gas accidents, poisson probability analysis, PDF (probability density function), CDF (cumulative density function)

I. 서 론

가스(NG 및 LPG)는 취급이 간편하고 깨끗하며 1980년대 이후 그 사용량이 급증하고 있으며 특히 범세계적으로 환경보호가 강화되는 추세를 감안할 때 앞으로도 그 사용량은 비약적인 증가추세를 보일 것으로 전망된다. 그 동안 사용량 증가추세와 비교해 볼 때 화재, 폭발, 누출사고 건수의 증가는 상당히 줄어들었으나 아직도 우리 주위에 일련의 크고 작은 가스로 인한 화재

, 폭발, 누출 사고가 발생하고 있으며 그 주원인은 가스공급설비의 자체 결함보다는 오히려 부주의한 타공사 실시 및 가스 설비의 취급 부주의로 발생하는 사고가 많은 것으로 볼 때, 가스설비에서 발생하는 화재 및 폭발, 누출사고의 유형과 정확한 원인을 규명하여 향후 가스설비의 안전대책을 체계적으로 수립하도록 하는 연구가 절실하다.

1.1. 연구 배경

액화천연가스(Liquefied Natural Gas : LNG) 및 액화석유가스(Liquefied Petroleum Gas : LPG)는 사용이 편

†주저자:119kjs@hanmail.net

리하고 깨끗하기 때문에 냉, 난방연료로서 차지하는 비중은 매우 커졌다. 그러나 이런 장점도 가스 자체가 갖고 있는 가연성과 폭발성 때문에 부주의하게 다루면 엄청난 인적, 물질 손실을 초래하게 된다. 따라서 가스의 소규모 또는 대규모 누출에 의한 화재 및 폭발의 잠재 위험성을 줄이기 위해서는 현재까지 발생된 가스누출 및 폭발 그리고 화재의 사고사례에 대한 정확한 데이터베이스 구축 및 세밀한 원인조사와 사고추이 분석에 따른 향후 유사한 사고의 예방시나리오 및 예측프로그램 마련을 위한 구체적인 연구가 수행되어야 한다.

1.2. 연구 목적

본 논문에서는 가스설비들을 효과적으로 관리함으로써 설비를 안정적으로 운영하고 또 이 설비들이 내포한 위험성 및 사고로 인한 공급중단의 가능성과 치명적인 화재 및 폭발의 피해예방을 위하여 체계적이고 종합적인 평가기법의 도입을 시도하였다. 특히, 가스 시설에서 발생한 화재, 폭발, 누출사고를 데이터베이스화하여 향후 유사한 사고의 발생을 미리 예측할 수 있는 프로그램을 제안하여 가스로 인한 화재 및 폭발사고의 안전성확보방안을 구체화 하였다.

1.3. 연구 방법

Fig 1은 본 연구를 진행하기 위한 연구 절차서이다. 우선 검색단계로서 1991년부터 2006년까지의 가스사고 사례[1,2]에 대하여 구분항목을 세분화하여 데이터베이스를 구축 하였다. 다음으로는 구축된 데이터베이스를 활용하는 단계로서 Poisson분포[3]을 적용하여 특정시간동안 특정사건이 발생했던 평균을 근거로 하여 특정사건의 발생횟수에 대한 확률을 계산함으로써, 가스사고 중 같은 유형의 사고의 발생을 예측할 수 있는 프

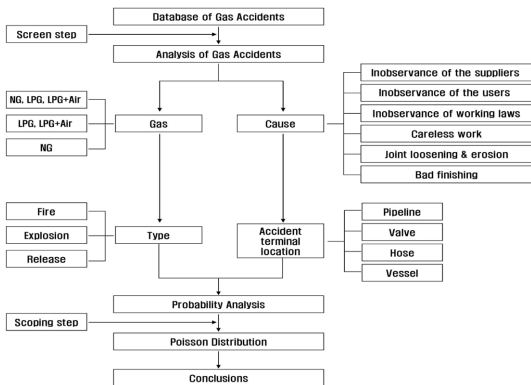


Fig. 1. Research scheme.

로그램을 작성하였다.

II. 가스사고 데이터 분석

2.1. 원인 및 형태별 가스사고 분석

Fig. 2은 전체 가스사고(NG, LPG, LPG + Air)를 세부 형태별로 분석한 결과로서 누출에 의한 가스사고는 배관에서 가장 많이 발생하였고, 세부원인으로는 배관 연결부 이완에 의해 발생한 사고였다. 반면 화재, 폭발의 경우는 배관, 밸브, 용기, 호스 모두 비슷하게 발생한 것으로 분석되었다.

Fig. 3는 전체 가스사고(NG, LPG, LPG + Air)를 세부 원인별로 분석한 결과로서 배관연결부이완부식에 의한 가스사고는 총 362건, 마감처리불량으로 일어난 사고는 총 238건 등 가스의 이동통로인 배관에서의 사고가 가장 빈번히 일어났음을 알 수 있다.

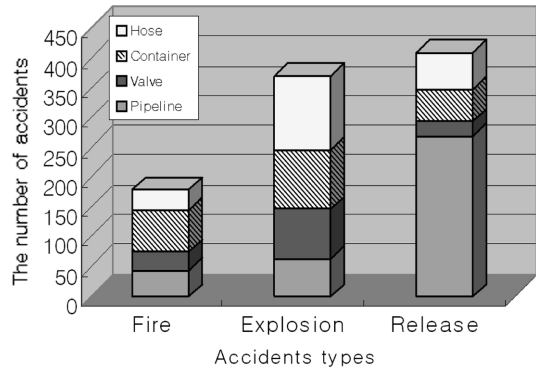


Fig. 2. The number of accidents according to the accident-types.

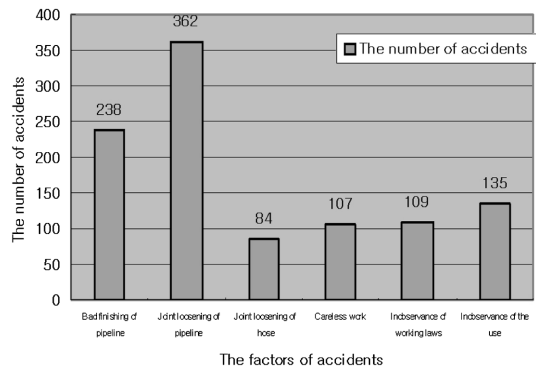


Fig. 3. The number of accidents according to the accident-causes.

2.2. NG와 LPG(LPG, LPG + Air)의 가스사고 분석

원료 성분이 같은 LPG(LPG, LPG+Air)의 경우 가스 사고 발생은 Fig. 4에서 나타난 것과 같이 폭발, 누출, 화재에 의한 순으로 사고가 많이 발생한 것으로 나타났으며, 특히 폭발에 의한 사고는 총 495건 발생하였고, 가스사고 발생 세부위치로는 호스, 용기, 밸브, 배관 순으로 가스사고가 발생한 것으로 분석되었다. 화재에 의한 가스사고로는 총 207건 발생하였으며 가스사고 발생 세부위치로는 호스, 용기, 밸브 순으로 가스사고가 발생한 것으로 분석 되었다. 누출에 의한 가스사고로는 용기, 배관, 호스, 밸브 순으로 가스사고가 발생한 것으로 분석되었다.

Fig. 5는 NG의 경우에 있어서 가스사고발생을 분석한 것으로 총 발생건수는 547건으로 누출, 화재, 폭발 순으로 발생하였으며 특히 누출의 경우에 있어서 발생

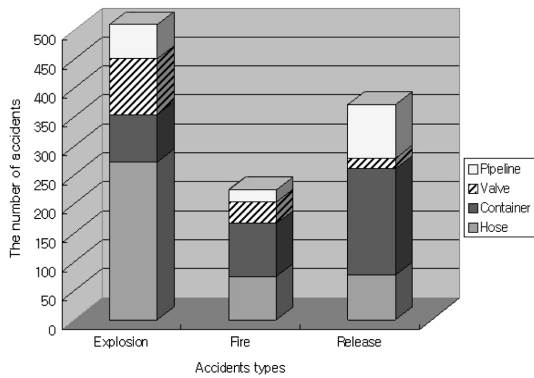


Fig. 4. The number of LPG (LPG, LPG + Air) accidents according to the accident-types.

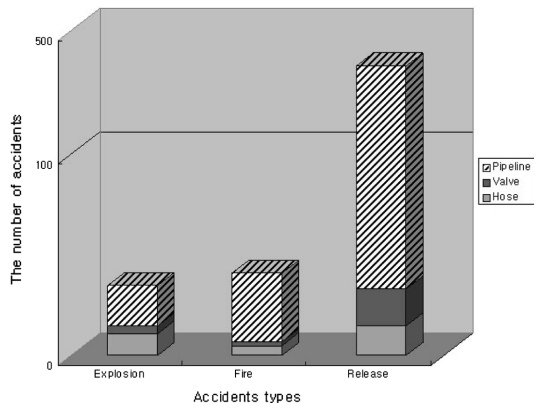


Fig. 5. The number of NG accidents according to the accident-types.

건수는 471건이며, 사고발생 세부위치로는 배관, 밸브, 호스 순으로 발생하였고, 화재의 경우에는 배관, 호스, 밸브 순으로, 폭발의 경우에도 배관, 호스, 밸브 순으로 가스사고가 발생하였다.

2.3. 굴착공사에 따른 가스사고 분석

Fig. 6는 굴착공사에 따른 가스 사고를 분석한 결과로서 지하철공사에 의한 가스사고는 11건, 상수도 공사는 102건, 하수도 공사는 48건, 건축공사 68건, 도로공사는 21건, 지반침하하는 17건으로 나타났다. 특히 1996년을 기점으로 증가해 오던 가스사고의 수가 줄어들면서 2002년에 이르러서는 굴착공사에 따른 사고가 보고되지 않았다. 또한 Fig. 7은 굴착공사에 따른 사고 형태별 분석으로서 건축공사는 주로 화재형태로, 도로공사, 상수도 공사, 하수도 공사, 지하철 공사, 지반침하의 경우에는 배관 누출에 의한 가스사고가 많이 발생한 것으로 분석되었다.

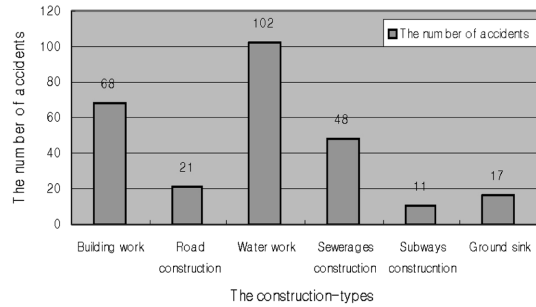


Fig. 6. The number of accidents according to the third party excavation-types.

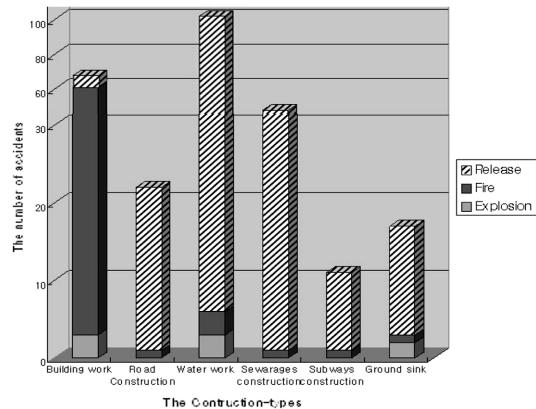


Fig. 7. The number of gas accidents according to various third party excavation-types.

III. POISSON분포를 이용한 확률론적 해석

3.1. Poisson분포[3]

Poisson분포는 특정시간동안 특정사상이 발생했던 평균을 근거로 하여 특정사상의 발생횟수에 대한 확률을 나타내 주는 분포이다. 즉 어떤 특정한 사건이 발생되는 특이한 경우로 이산형 정수 값을 갖는 분포를 Poisson분포를 따른다고 한다. Poisson분포에 의해 분포된 확률변수에 대하여 사건의 발생건수 평균이 λ 일 때 특정횟수(X)의 사건이 발생할 확률은 다음과 같은 공식에 의해 구할 수 있다.

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

3.2. Poisson분포의 최대 확률 값

Poisson분포를 시간에 따른 연속함수로 해석할 경우에는 시간에 따른 발생건수를 나타내는 λ (사건수/시간)를 매개변수로 사용하여 식 (1)을 변형하여 다음 식으로 표현할 수 있다.

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

여기서 P 는 강도(Intensity)로서 λ 를 갖는 사건이 t 시간동안 r 번 발생할 확률을 말하며, 결국 P 는 식 (3)과 같이 λ , t , 그리고 r 의 함수가 된다.

$$P = P(\lambda, t, r) \quad (3)$$

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

$$P = P(r) \quad (4)$$

식 (4)를 이용하여 사건수 R 과 확률 P 와의 관계를 확인하기 위하여 임의로 λt 의 값을 10부터 65까지 5씩 증가시키면서 Fig. 8에 그 결과를 그려 보았다. 이 그래프에서 알 수 있듯이, λ 와 t 가 주어지게 되면 그에 따라 P 값을 최대로 갖게 하는 R 값이 존재하게 된다. 이때, 그러한 점에서의 R 값을 R_M 이라 하고 P 값을 P_M 이라고 정의하면, R_M 과 P_M 은 λt 의 함수가 된다.

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

따라서 R_M 과 P_M 을 λt (각 사건)에 대하여 좌표축에 나타내면 Fig. 8과 같다.

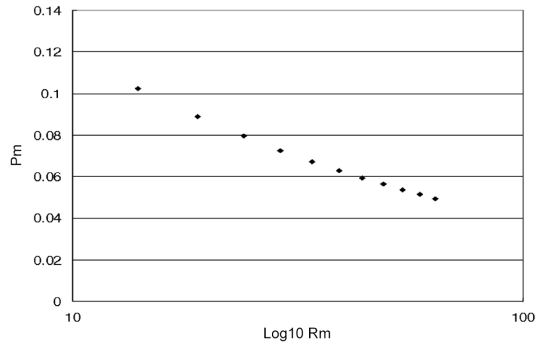


Fig. 8. Locus of Pm-Rm in semi-log scale as the intensities grows.

IV. 가스사고 DB를 이용한 전체 및 NG, LPG의 동종사고의 발생 가능성 예측 적용사례

최근 16년간(1991-2006) 한국가스안전공사의 사고사례집에 수록된 3,593 건의 가스[천연가스(NG) 및 액화석유가스(LPG)]사고사례를 분석하였다[1,2]. 가스 종류별 분류는 가스 3법에서는 도시가스(NG, LPG + Air), 액화석유가스(LPG), 고압가스로 분류하고 있으나 본 논문에서는 원료에 따라 분류하여 전체가스사고(NG, LPG, LPG + Air), LPG(LPG, LPG + Air)에 의한 사고, NG에 의한 사고의 3가지 항목으로 대분류하였고, 사고형태로는 화재, 폭발, 누출의 3가지항목과 사고발생위치로는 배관, 호스, 밸브, 용기의 4가지 항목 그리고 가스사고 세부원인으로는 연결부이완부식, 마감조치불량, 작업규칙미준수, 시공작업부주의, 사용자취급부주의, 공급자취급부주의의 6가지 항목으로 분류하여 이를 Poisson분포[3]에 적용하여 PDF(Probability Density Frequency)[4]와 누적밀도빈도함수인 CDF(Cumulative Density Frequency)[4] 및 MTBF(Mean Time Between Failures)[5,6]를 계산하였다. 특히 Semi-Log좌표를 이용하여 좀 더 직선에 가까운 형태를 얻게 되어 각 데이터베이스에서 나온 사건들에 대해 분포를 쉽게 파악하여 확률분석을 용이하게 할 수 있는 모델을 제공하고자 하였다. 다음은 가스사고에서 전체(화재) 및 LPG와 LPG + Air(폭발), NG(누출)의 경우 각각 세부원인 및 발생위치 한 가지씩에 대해 가스사고 발생확률을 계산해 보았다.

4.1. 전체 가스사고(NG, LPG, LPG + Air) 중 화재에 대한 가스사고 분석

전체가스사고(NG, LPG, LPG + Air) 중 화재에 의

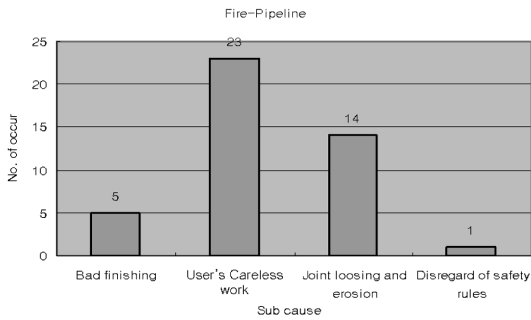


Fig. 9. The number of gas accidents according to Total gas (NG, LPG, LPG + Air)-Fire-Pipeline-Sub causes.

한 경우로는 총 189건이 발생하였고, 그 중 화재-배관-시공작업부주의에 의한 사고건수는 23건, 화재-밸브-사용자취급부주의에 의한 사고건수는 17건, 화재-용기-사용자취급부주의에 의한 사고건수는 64건, 화재-호스-사용자취급부주의에 의한 사고건수는 20건이 발생한 것으로 분석되었고, Fig. 9는 전체가스-화재-배관-세부원인들에 의해 발생한 사고건수로서 이를 살펴보면 가스 사고발생 우선순위는 화재-배관-사용자취급부주의, 화재-배관-연결부이완부식, 화재-배관-마감조치불량, 화재-배관-작업규칙미준수 순으로 분석되었다.

4.1.1. 전체가스사고(NG, LPG, LPG + Air) 중 화재-배

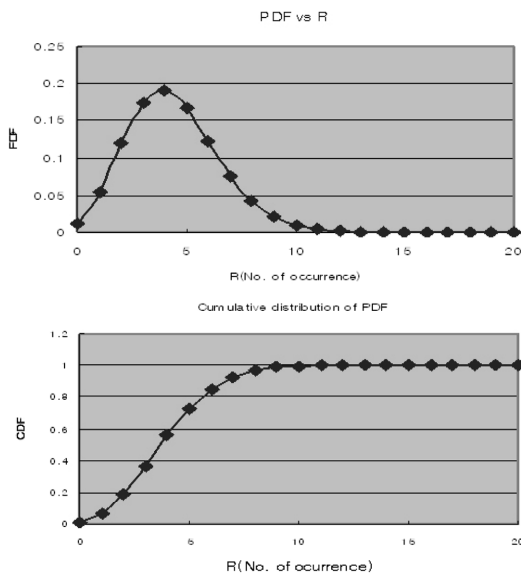


Fig. 10. PDF and CDF for the Fire - Pipeline - Joint loosening event.

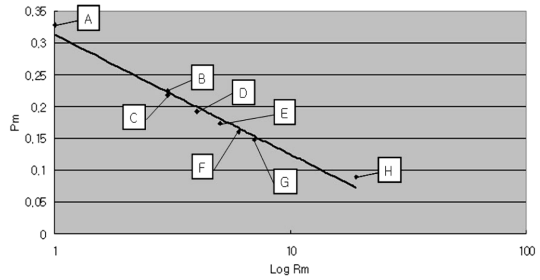


Fig. 11. Locus of Pm-Rm in semi-log scales by using Poisson distribution of detailed factors of total gas (NG, LPG, LPG + Air) accidents (Pm = Cumulative, Rm = No. of occurrences).

관-연결부이완부식에 관한 경우 Poisson분포 적용결과 전체가스사고(NG, LPG, LPG + Air) 중 화재-배관-연결부이완부식에 대한 MTBF는 1.14(yr/event)로, Poisson 분포 적용결과 Fig. 10에서와 같이 향후 5년 이내에 발생할 수 있는 PDF로 5회 발생할 수 있는 계산확률은 0.17이었으며, CDF는 5회 발생할 수 있는 확률로는 0.72로 계산되었다.

4.1.2. 전체가스사고(NG, LPG, LPG + Air) 중 화재에 대한 Poisson분포 적용 해석

Fig. 11은 전체가스사고(NG, LPG, LPG + Air) 중 화재에 대한 PDF 결과를 Semi-Log 좌표 로 그린 것으로 PDF의 발생우선순위는 화재-배관-마감조치불량(A), 화재-밸브-마감조치불량(B), 화재-호스-마감조치불량(C), 화재-배관-연결부이완부식(D), 화재-용기-사용자취급부주의(E), 화재-호스-사용자취급부주의(F), 화재-배관-시공작업부주의(G), 화재-밸브-사용자취급부주의(H)의 순으로 나타났다.

4.2. LPG 사고(LPG, LPG + Air) 중 폭발에 의한 가스사고 분석

LPG 사고(LPG, LPG+Air) 중 폭발에 의한 사고는 총 495건이 발생 하였고, 그 중 폭발-배관-마감조치불량에 의한 사고건수는 31건, 폭발-밸브-마감조치불량에 의한 사고건수는 59건, 폭발-용기-사용자취급부주의에 의한 사고건수는 48건, 폭발-호스-마감조치불량에 의한 사고건수는 60건이 발생한 것으로 분석되었고, Fig. 12는 LPG(LPG, LPG+Air)-폭발-밸브-세부원인들에 의해 발생한 가스사고 수이며 이를 살펴 보면 가스사고발생우선순위로서 폭발-밸브-마감조치불량, 폭발-밸브-사용자취급부주의, 폭발-밸브-공급자취급부주의, 폭발-밸브-연결부이완부식 순으로 분석

국내 LP 및 천연가스사고 Database 구축 및 분석에 관한 연구

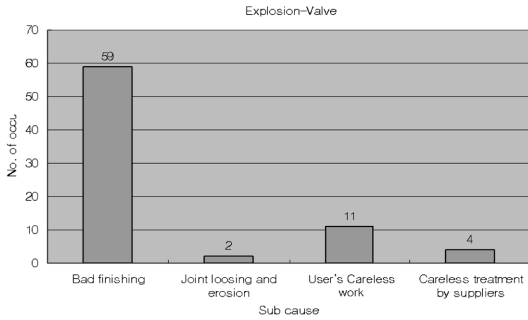


Fig. 12. The number of gas accidents according to LPG (LPG, LPG + Air)-Explosion-Valve-Sub causes.

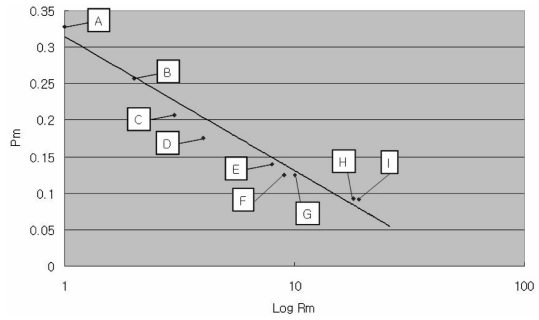


Fig. 14. Locus of Pm-Rm in semi-log scales by using Poisson distribution of detailed factors of LP gas (LPG, LPG + Air) accidents (Pm = Cumulative, Rm = No. of occurrences).

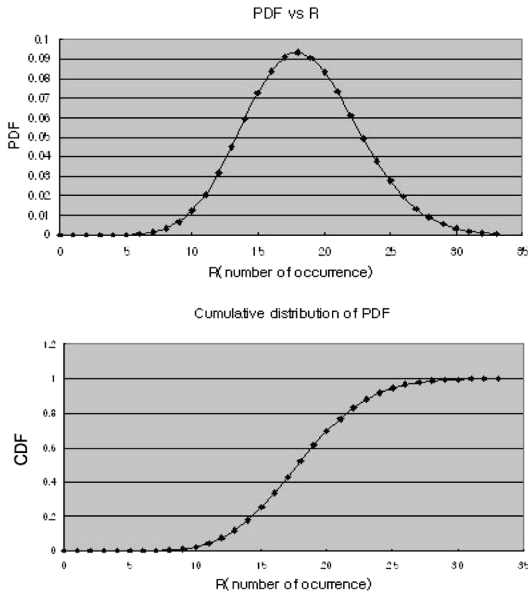


Fig. 13. PDF and CDF for the Explosion - Valve - Bad finishing event.

되었다.

4.2.1. LPG 사고(LPG, LPG + Air) 중 폭발-밸브-마감조치불량에 관한 경우 Poisson분포 적용결과

LPG 사고(LPG, LPG + Air) 중 폭발-밸브-마감조치불량에 대한 MTBF는 3.2(yr/event)로, Poisson분포 적용결과 Fig. 13에 나타난 바와 같이 향후 5년 이내에 발생할 수 있는 PDF로 10회 발생할 수 있는 계산확률은 0.01이었으며, CDF는 10회 발생할 수 있는 확률로는 0.02로 계산되었다.

4.2.2. LPG 사고(LPG, LPG + Air) 중 폭발에 대한 Poisson분포 적용해석

Fig. 14은 LPG 사고(LPG, LPG + Air) 중 폭발에 대

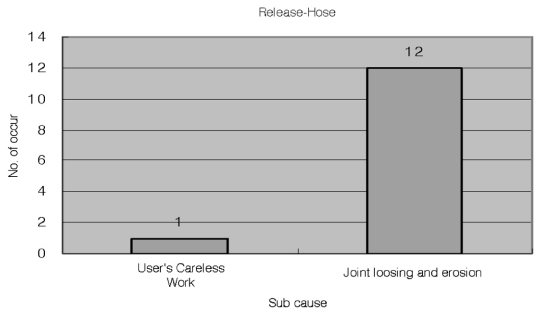


Fig. 15. The number of gas accidents according to NG-Release-Hose-Sub causes.

한 PDF 결과를 Semi-Log Scale 로 그린 것으로 PDF의 발생우선순위로는 폭발-용기-공급자취급부주의(A), 폭발-배관-시공작업부주의(B), 폭발-밸브-사용자취급부주의(C), 화재-밸브-마감조치불량(D), 폭발-호스-사용자취급부주의(E), 폭발-호스-연결부이완부식(F), 폭발-밸브-공급자취급부주의(G), 폭발-호스-사용자취급부주의(H), 폭발-용기-사용자취급부주의(I) 순으로 나타났다.

4.3. NG 사고 중 누출에 의한 가스사고 분석

NG 사고 중 누출에 의한 경우로는 총 228건이 발생 하였고, 그 중 누출-배관-마감조치불량에 의한 사고건수는 11건, 누출-밸브-연결부이완부식에 의한 사고건수는 9건, 누출-호스-연결부이완부식에 의한 사고건수는 12건이 발생한 것으로 분석되었으며, Fig. 15는 NG-누출-호스-세부원인들에 의해 발생한 사고 수로서 가스사고 발생 우선순위는 누출-호스-연결부이완부식, 누출-호스-사용자취급부주의 순으로 분

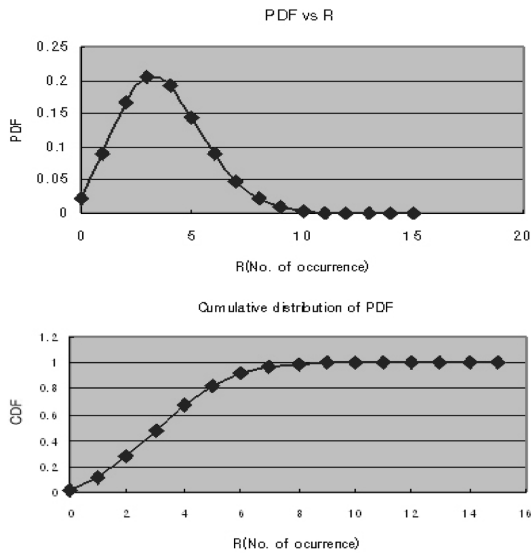


Fig. 16. PDF and CDF for the Release - Hose - Joint loosening event.

석되었다.

4.3.1. NG 사고 중 누출-호스-연결부이완부식에 관한 경우 Poisson분포 적용결과

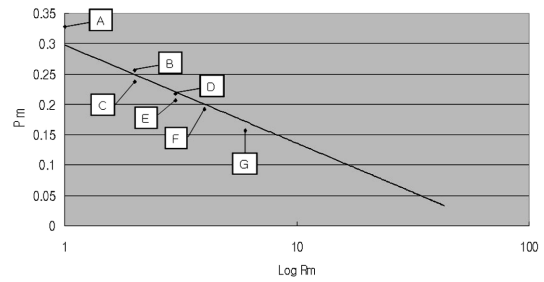


Fig. 17. Locus of Pm-Rm in semi-log scales by using Poisson distribution of detailed factors of NG accidents (Pm = Cumulative, Rm = No. of occurrences).

NG 가스사고 중 누출-호스-연결부이완부식에 대한 MTBF는 1.33(yr/event), Poisson분포 적용결과 Fig. 16에 나타난 것과 같이 향후 5년 이내에 발생할 수 있는 PDF로 5회 발생할 수 있는 계산확률은 0.15였으며, CDF는 5회 발생할 수 있는 확률로는 0.82로 분석되었다.

4.3.2. NG 사고 중 누출에 대한 Poisson분포 적용해석

Fig. 17은 NG 사고 중 누출에 대한 PDF 결과를 Semi-Log Scale 로 그린 것으로 PDF의 발생우선순위는 폭발-배관-연결부이완부식(A), 누출-호스-연결부이완부식(B), 누출-밸브-연결부이완부식(C), 누출-배관-

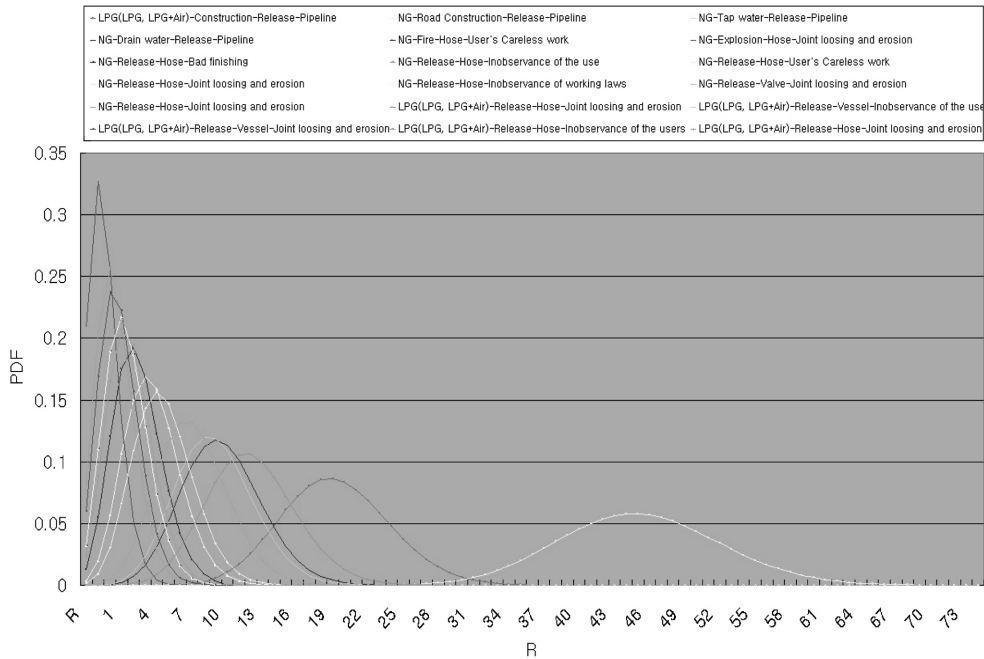


Fig. 18. Poisson distribution of total gas accidents.

작업규칙미준수(D), 누출-배관-사용자취급부주의(E), 누출-배관-시공작업부주의(F), 누출-배관-연결부이완부식(G)의 순으로 분석되었다.

4.4. 굴착공사(Accidents by Third Party Excavation)를 포함한 전체가스사고(NG, LPG, LPG + Air)의 Poisson분포 해석

Fig. 18은 굴착공사를 포함한 전체가스사고(NG, LPG, LPG + Air)에 대해 Poisson분포[3]를 적용한 그래프이다. 향후 5년 이내($t = 5$) 사고발생우선순위로는 1) NG-폭발-배관-연결부이완부식, 2) NG-누출-배관-사용자취급부주의, 3) NG-누출-밸브-연결부이완부식, 4) LPG(LPG, LPG + Air)-누출-용기-연결부이완부식, 5) NG-누출-배관-마감조치불량, 6) NG-누출-배관-작업규칙미준수, 7) NG-누출-호스-연결부이완부식, 8) LPG(LPG, LPG + Air)-누출-호스-사용자취급부주의, 9) NG-화재-배관-시공작업부주의, 10) NG-도로공사-누출-배관, 11) NG-누출-배관-시공작업부주의, 12) NG-상수도-누출-배관, 13) LPG(LPG, LPG + Air)-누출-호스-연결부이완부식, 14) LPG(LPG, LPG + Air)-누출-용기-사용자취급부주의, 15) NG-하수도-누출-배관, 16) LPG(LPG, LPG + Air)-누출-배관-연결부이완부식, 17) LPG(LPG, LPG + Air)-건축공사-누출-배관, 18) NG-누출-배관-연결부이완부식, 순으로 사고가 발생하는 것으로 분석되었다.

V. 결 론

최근 16년간 전체가스사고사례[1,2](NG, LPG, LPG + Air)를 분석한 결과 사고의 형태로는 누출, 폭발, 화재 순으로 많이 발생하였고, 사고발생위치로서의 우선순위로는 누출에 있어서는 배관-호스-용기-밸브 순이었으며, 폭발에 대해서는 호스-용기-밸브-배관 순이었으며, 화재에 있어서는 밸브-호스-용기-배관 순으로 분석되었다. 특이사항으로서는 건축공사-누출-배관, 도로공사-누

출-배관은 2002년 이후로 실제사고발생건수가 급격히 줄고 있으며, 지하철공사-누출-배관 및 지반침하-누출-배관은 2002년 이후로 공식적인 사고발생기록이 없는 것으로 보아 가스 유관기관의 적극적인 홍보와 지속적인 관리체계구축으로 인한 사고감소의 효과로 보인다. 그러나 설비의 노후화와 부주의 등으로 사고에 대한 잠재위험성은 항상 존재하기 때문에, 설비 신뢰성 검토 및 부주의에 대한 가스사고 대응책이 지속적으로 연구되고 개발되어야 할 것이다. 이를 위해서는 가스로 인한 화재·폭발사고에 대한 데이터베이스를 지속적으로 확충·보완을 시켜야 되며, 이를 위한 표준 코드화 작업이 요구된다.

감사의 글

본 논문은 서울시립대학교 2007년 해외연구년(6개월) 교수과건연구비의 일부를 지원 받아 수행 되었으며, 저자(김효 교수)는 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

- [1] 가스안전공사, “가스사고 연감”, 가스안전공사 사고조사처, (1991-2006)
- [2] 가스안전공사, “고압가스통계”, 가스안전공사 검사지원처, (2001)
- [3] Robert L. Winkler and William L. Hays, “Statistics Second Edition Probability, Inference, and Decision”, Holt, Rinehart and Winston, New York, (1970)
- [4] Roger D. Leitch, “Reliability Analysis for Engineers”, Oxford University Press, (1995)
- [5] Calabro, S.P. “Reliability Principles and Practices”, McGraw-Hill, (1982)
- [6] Thomas, H.M. “Pipe and Vessel Failure Probabilistic Reliability Engineering”, Applied Science Publishers, Ltd., England, (1981)