



## 국내 가스 사고사례 중 NG 및 LPG의 가스 화재 · 폭발사고 예측시스템 구축에 관한 연구

†고재선 · 김 호

서울시립대학교 화학공학과

(2006년 2월 21일 접수, 2006년 3월 27일 채택)

## Study on Prediction System Construction of Fire · Explosion Accident by NG & LPG among Domestic Gas Accidents

†Jae-Sun Ko · Hyo Kim

Department of Chemical Engineering, University of Seoul, Korea

(Received 21 February 2006, Accepted 27 March 2006)

### 요 약

한국적 상황에 적절한 사회적 위험기준을 제시하고, 도시가스시설에 대한 화재 및 폭발사고에 대한 포괄적이고 정량적인 예측프로그램을 만들기 위하여 최근 11년간의 가스사고 데이터베이스를 분석하였다. 동종유형의 가스사고 발생가능성을 판단할 수 있는 Poisson분석 방법을 적용한 결과( $t=5$ 년), 시공 작업 부주의·폭발·배관의 항목의 사고발생반도가 가장 작았으며, 배관연결부이완부식·누출·배관의 경우는 가장 높은 빈도를 나타내었다. 따라서 이에 대한 적절한 가스사고 대응책이 마련되어야 할 것이다. 향후 가스사고에 대한 신뢰성 있는 분석을 위해서는 가스로 인한 화재 · 폭발사고에 대한 데이터베이스를 지속적으로 확충보완을 시켜야 되며, 이를 위한 표준 코드화 작업이 요구된다.

**Abstract** - In order to establish the comprehensively, quantitatively predictable program to the fire and explosion accidents in the urban gas system, and to set up domestic criteria of societal risk, the collected urban gas accident data have been deeply analyzed. The Poisson probability distribution functions with  $t = 5$  for the database of the gas accidents in recent 11 year shows that 'careless work-explosion-pipeline' item has the lowest frequency, whereas 'joint loosening & erosion-release-pipeline' item has the highest frequency. And thus the proper counteractions must be carried out. The further works requires setting up successive database on the fire and explosion accidents systematically to obtain reliable analyses.

**Key words** : Urban gas facility, Gas accidents database, Poisson analysis, Probability density function, Cumulative density function, Standard code

### I. 서 론

도시가스는 취급이 간편하고 깨끗하며 1980년대 이후 그 사용량이 급증하고 있으며 특히 범세계적으로 환경보호가 강화되는 추세를 감안할 때 앞으로도 그 사용량은 비약적인 증가추세를 보일 것으로 전망된다. 그동안 우리 도시가스 산업계는 가스 사용량의 증가에 발맞추어 국민생활의 질적 향상을 위한 사고예방활동에 주력하여 왔으며, 그 결과 초창기 도시가스설비의 건설 단계를 제외하고는 사용량 증가추세와 비교해 불 때 화

재 · 폭발 · 누출사고 건수의 증가는 상당히 줄어들어 왔다. 그러나 아직도 우리 주위에 일련의 크고 작은 가스로 인한 화재 · 폭발 사고가 발생하고 있으며 그 주원인은 도시가스공급설비의 자체 결함보다는 오히려 부주의한 타공사 실시 및 도시가스 설비의 취급 부주의로 발생되는 사고가 많은 것으로 볼 때, 도시가스설비에서 발생되는 화재 및 폭발사고의 유형과 정확한 원인을 규명하여 향후 도시가스설비의 안전대책을 체계적으로 수립하도록 하는 연구가 절실하다.

#### 1.1. 연구 배경

액화천연가스(Liquefied Natural Gas : LNG)를 수입

하여 도시가스로 공급한지도 18년이 지났으며, 사용이 편리하고 깨끗하기 때문에 천연가스가 냉, 난방연료로서 차지하는 비중은 매우 커졌다. 그러나 이런 장점도 가스자체가 갖고 있는 가연성과 폭발성 때문에 부주의 하게 다루면 엄청난 인적, 물적 손실을 초래하게 된다. 따라서 도시가스의 소규모 또는 대규모 누출에 의한 화재 및 폭발의 잠재위험성을 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 도시가스설비들을 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, 도시가스 시설에서 발생한 화재, 폭발, 누출사고를 데이터베이스화하여 향후 유사한 사고의 발생을 미리 예측할 수 있는 프로그램을 제안하여 가스로 인한 화재 및 폭발 사고의 안전성확보방안을 구체화하였다.

### 1.3. 연구 방법

Fig. 1은 본 연구를 진행하기 위한 연구 절차서이다.

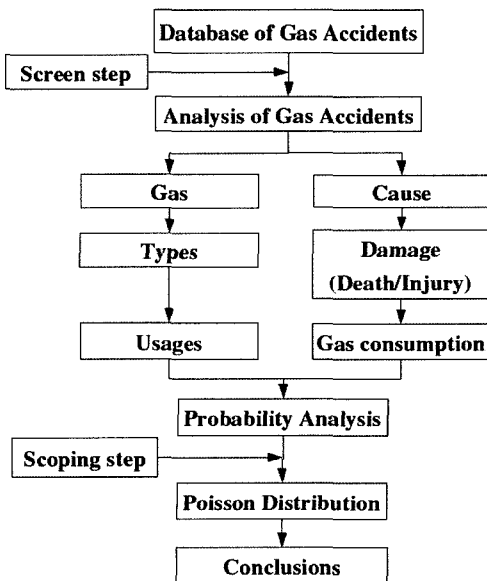


Fig. 1. Research scheme.

우선 검색단계로서 1991년부터 2001년까지의 가스사고 사례[1]에 대하여 구분항목을 세분화하여 데이터베이스 하였다. 다음으로는 구축된 데이터베이스를 활용하는 단계로서 Poisson분포[3]를 적용하여 특정시간동안 특정사건이 발생했던 평균을 근거로 하여 특정사건의 발생횟수( $R$ )에 대한 확률을 계산함으로써, 가스사고 중 같은 유형의 사고의 발생을 예측할 수 있는 프로그램을 작성하였다.

## II. POISSON분포를 이용한 확률론적 해석

### 2.1. Poisson분포

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

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

### 2.2 Poisson분포의 최대 확률 값

Poisson분포가 어느 시간대를 기준으로 해석이 될 경우에는 시간에 따른 발생건수를 나타내는  $\lambda$ (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  $\lambda$ 를 갖는 사건이  $t$  시간 동안  $r$ 번 발생할 확률을 말하며, 결국  $P$ 는 식 (3)과 같이  $\lambda$ ,  $t$ , 그리고  $r$ 의 함수가 된다.

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

한편 발생강도가  $\lambda$ 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  $\lambda t$ 의 값을 10부터 65까지 5씩 증

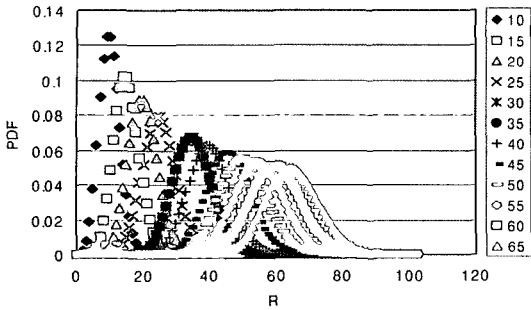


Fig. 2. Diagrams of PDF vs. R in Poisson distribution according to the intensities.

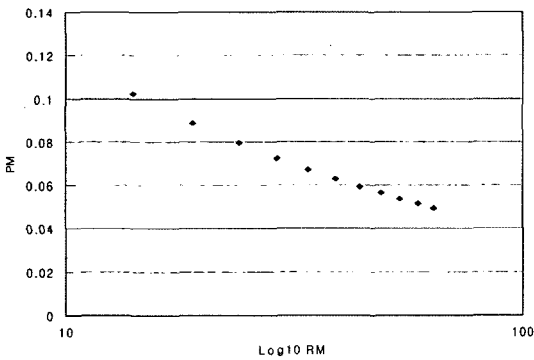


Fig. 3. Locus of  $P_M - R_M$  in semi-log scale as the intensities grows.

가시킴으로써 Fig. 2에 그 결과를 그려 보았다. 이 그래프에서 알 수 있듯이,  $\lambda$ 와  $t$ 가 주어지게 되면 그에 따라  $P$  값을 최대로 갖게 하는  $R$  값이 존재하게 된다. 이때, 그러한 점에서의  $R$  값을  $R_M$ 이라고 하고  $P$  값을  $P_M$ 이라고 정의하면,  $R_M$ 과  $P_M$ 은  $\lambda$ 의 함수가 된다.

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

따라서  $R_M$ 과  $P_M$ 을  $\lambda$ (각 사건)에 대하여 좌표축에 나타내면 Fig. 2와 같으며, 이를 Semi-log 좌표로 변환하면 Fig. 3에서와 같이 좀더 직선에 가까운 모양을 얻게 되고 이와 같은 결과를 이용하면 사건 유형별 최대 확률 특성 식을 구할 수 있어, 다른 사건과의 위험성 상관관계 파악이 용이하다.

### III. 가스사고 DB를 이용한 NG 및 LPG의 동종사고의 발생 가능성 예측 적용사례

최근 10년간 한국가스안전공사의 사고사례집[1]에 수록된 3,300여건의 가스사고사례를 분석하여 중요한

Table 1. Classification of domestic gas accidents.

Item Classification		NG	LPG
		No. of occurrence	No. of occurrence
A	Construction-Release-Pipeline	56	0
B	Road Construction-Release-Pipeline	16	0
C	Bad finishing-Explosion-Pipeline	1	21
D	Bad finishing-Explosion-Hose	5	53
E	Bad finishing-Fire-Hose	0	11
F	Joint Losening and Corrosion-Release-Pipeline	150	47
G	Joint Losening and Corrosion-Explosion-Pipeline	8	8
H	Joint Losening and Corrosion-Explosion-Hose	0	10
I	Joint Losening and Corrosion-Fire-Pipeline	4	4
J	Tap water-Release-Pipeline	27	0
K	Careless Work-Release-Pipeline	17	3
L	Careless Work-Explosion-Pipeline	2	5
M	Careless Work-Fire-Pipeline	14	5
N	Ground sink-Release-Pipeline	11	3
O	Subway-Release-Pipeline	11	0
P	Drain water-Release-Pipeline	33	12
Total (537)		355	182

537개의 사고데이터를 Poisson분포에 적용하기 위하여 3개의 사고유형, 즉 누출, 폭발, 화재로 구분하여 총 16개 항목으로 나누어서 적용하였다. 누출의 경우에는 건축공사 등 8개 항목으로 구분하여 고려하였으며, 폭발의 경우에 있어서는 가스배관에 있어서는 마감조치불량 등, 5개 항목으로 또한 화재의 경우에 있어서는 가스배관호스에 있어서 마감조치불량 등 3가지 항목으로 분류하여 PDF 및 CDF의 Poisson분포 결과를 계산하였다. 국내 전체 도시가스사고사례[1,2] 중 NG와 LPG를 분류한 Table 1을 살펴보면 총 537건의 가스사고 중 NG는 355건, LPG는 182건으로 분류되었다. 좀더 세밀하게 분석하여 보면 NG가 LPG보다 많이 발생한 항목으로는 건축공사-누출-배관 등 9개 항목으로 분석되었다. 또한 LPG가 NG보다 많이 발생한 경우는 마감처리

미비-폭발-배관 등 5개 항목으로 나타났다. NG의 경우 대형공사에서 많이 발생하는 것으로 사고의 형태로는 누출 및 화재에 의한 경우이었으며, LPG의 경우에 있어서는 각 세대의 연료 및 취사에 관계되는 사고가 많이 발생하는 것으로 분석되었고, 사고의 형태로는 화재 및 폭발이 주류를 이루는 것으로 분석되었다.

**3.1. NG에 의한 화재사고(시공작업부주의)**

Table 2에서 시공작업부주의-화재-배관에 대한 항목의 총 사고발생건수는 19건으로 95년에 2건, 96년에 2건, 97년에 2건, 2001년 0건을 보이고 있다. 11년간의 Intensity는 1.72(event/yr)로, MTBF는 0.57(yr/event)로 나타났다.

Table 3은 시공작업부주의-화재-배관에 대한 PDF와 CDF의 정량화된 결과로서 이를 이용하여 각각에 대해 그래프를 그린 것이 Fig. 4이며, 향후 5년 이내 R 값이 5와 10일 경우 각각의 확률밀도함수(PDF)는 0.07과 0.12로 계산되었고, 적어도 R이 5회 발생할 횟수에 대응되는 CDF는 0.14로 계산되었고, 적어도 R이 10회 발생할 횟수에 대응되는 CDF는 0.75로 계산되었다.

**3.2. LPG에 의한 폭발사고(가스배관에 있어서 마감처 리미비의 경우)**

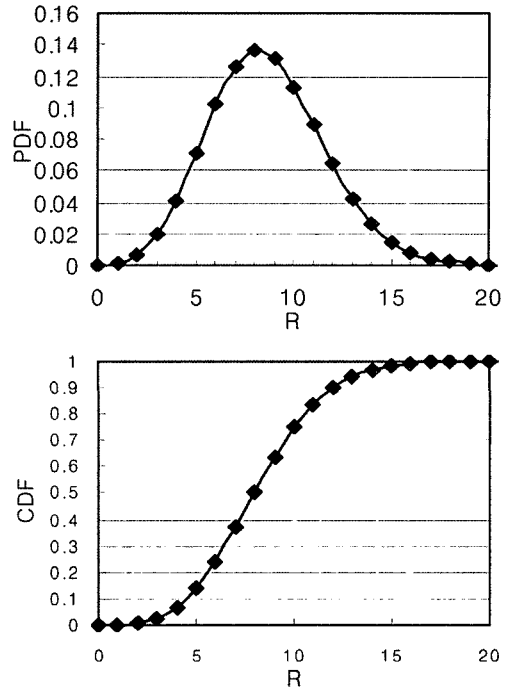
Table 4를 살펴보면 마감처리미비-폭발-배관에 대한

**Table 2.** Summary for the gas fire accidents caused by carelessness during the work in gas line.

Type of event	Intensity (event/yr)	MTBF (yr/event)
Careless work-Fire-Pipeline	1.727272727	0.578947368
Year	91 92 93 94 95 96 97 98 99 00 01	Total
No. of occur.	0 0 0 5 2 2 2 2 5 1 0	19

**Table 3.** PDF and CDF distributions for the careless work-fire-pipeline event.

R	CDF	PDF
15	0.984214327	0.015057023
16	0.992341698	0.00812737
17	0.996470576	0.004128878
18	0.998451603	0.001981027
19	0.99935207	0.000900467
20	0.999740908	0.000388838



**Fig. 4.** PDF & CDF for the careless work-fire-pipeline event.

**Table 4.** Summary for the LPG explosion accidents by bad finishing in gas line.

Type of event	Intensity (event/yr)	MTBF (yr/event)
Bad finishing-Explosion-Pipeline	1.90909	0.5238
Year	91 92 93 94 95 96 97 98 99 00 01	Total
No. of occur.	2 3 - - 7 1 - 3 1 2 2	21

**Table 5.** PDF and CDF distributions for the bad finishing-explosion-pipeline event.

R	CDF	PDF
11	0.74712	0.10742
12	0.83257	0.08544
13	0.89531	0.06274
14	0.93808	0.04278
15	0.96531	0.02722

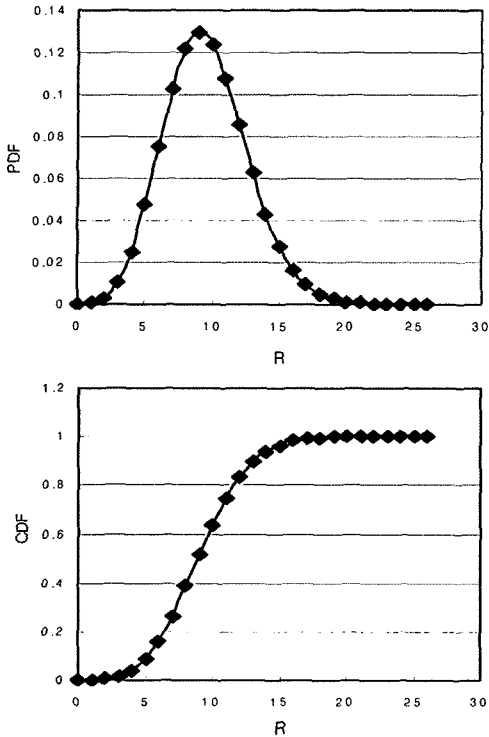


Fig. 5. PDF & CDF for the bad finishing-explosion-pipeline event.

총 사고발생건수는 21건으로 92년에 3건, 95년에 7건, 98년에 3건, 2000년에 2건을 보이고 있다. 11년간의 Intensity는 1.90(event/yr)으로, MTBF 또한 0.524(yr/event)로 나타났다. Table 5는 마감처리미비-폭발-배관에 대한 PDF와 CDF의 정량화된 결과로서 이를 이용하여 각각에 대해 그래프를 그린 것이 Fig. 5이다.

Fig. 5에서 LPG에 의한 향후 5년 이내 가스 폭발사고가 발생할 횟수인 R과 그에 대한 PDF의 관계를 나타낸 것으로 R 값이 5와 10일 경우 각각의 PDF는 0.05와 0.12로 계산되었다.

또한 Fig. 5에서 향후 5년 내에 LPG에 의한 가스 폭발사고가 발생할 횟수인 R과 그에 대한 CDF의 관계를 묘사한 것으로 적어도 R이 5회 발생할 횟수에 대응되는 CDF는 0.09로 계산되었고, 적어도 R이 10회 발생할 횟수에 대응되는 CDF는 0.64로 계산되었다.

**3.3. LPG에 의한 화재사고(호스에 있어서 마감처리미비의 경우)**

Table 6을 살펴보면 마감처리미비-화재-호스에 대한 총 사고발생건수는 11건으로 93년에 1건, 95년에 1건, 97년에 1건, 1999년에 2건, 2001년에 3건을 보이고 있

Table 6. Summary for the LPG fire accidents caused by bad finishing in hose.

Type of event		Intensity (event/yr)		MTBF (yr/event)								
Bad finishing-Explosion-Hose		1		1								
Year	91	92	93	94	95	96	97	98	99	00	01	Total
No. of occur.	-	-	1	1	1	1	1	1	2	-	3	11

Table 7. PDF and CDF distributions for the bad finishing-fire-hose event.

R	CDF	PDF
1	0.040427682	0.033689735
2	0.124652019	0.084224337
3	0.265025915	0.140373896
4	0.440493285	0.17546737
5	0.615960655	0.17546737
6	0.762183463	0.146222808
.....	.....	.....

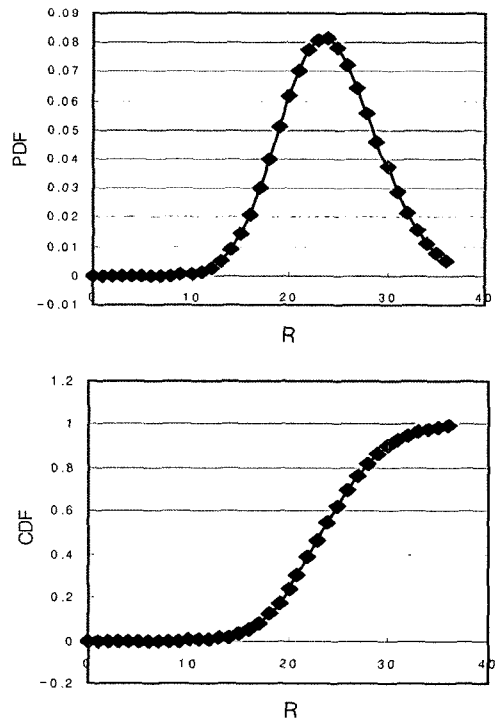


Fig. 6. PDF & CDF for the bad finishing-explosion-hose event.

**Table 8.** Classifications of events with  $R_M$  and  $P_M$  into in operation and under construction.

Step	Ranking		Event	No. of occurrences	Intensity (event/yr)	MTBF (yr/event)	$R_M$	$PDF_M$
Under Constructing	LPG	1	Careless work-Explosion-Pipeline	7	0.636	1.571	3	0.222
	LPG	2	Joint Losening and corrosion-Fire-Pipeline	8	0.727	1.375	3	0.211
Operating	LPG	3	Joint Losening and corrosion-Explosion-Hose	9	0.818	1.222	4	0.195
	LPG	4	Bad finishing-Fire-Hose	11	1	1	4	0.175
	NG	5	Subway construction-Release-Pipeline	11	1	1	4	0.175
	LPG	6	Joint Losening and corrosion-Explosion-Pipeline	13	1.1818	0.846	5	0.162
	NG	7	Ground sink-Release-Pipeline	14	1.272	0.785	6	0.158
	NG	8	Road construction-Release-Pipeline	16	1.454	0.687	7	0.148
	NG	9	Careless work-Fire-Pipeline	19	1.727	0.578	8	0.136
	NG	10	Careless work-Release-Pipeline	20	1.818	0.55	9	0.131
Under Constructing	LPG	11	Bad finishing-Explosion-Pipeline	22	2	0.5	9	0.125
	NG	12	Tap water construction-Release-Pipeline	27	2.454	0.407	12	0.114
	NG	13	Waste water construction-Release-Pipeline	45	4.090	0.244	20	0.088
	LPG	14	Bad finishing-Explosion-Hose	56	5.272	0.189	26	0.077
	NG	15	Construction-Release-Pipeline	58	5.090	0.196	24	0.077
	NG	16	Joint Losening and corrosion-Release-Pipeline	197	17.909	0.055	90	0.0419

다. 11년간의 Intensity는 1(event/yr)으로, MTBF 또한 1(yr/event)로 나타났다. Table 7은 PDF와 CDF의 정량화된 결과로서 이를 이용하여 각각에 대해 그래프를 그린 것이 Fig. 6이며 여기에서 향후 5년 이내 LPG에 의한 가스 화재사고가 발생할 횟수인 R과 그에 대한 PDF의 관계를 나타낸 것으로 R 값이 10과 15일 경우 각각의 PDF는 0.02와 0으로 계산되었다.

또한 Fig. 6은 호스에 있어서 마감처리미비의 경우로서 향후 5년 내에 LPG에 의한 가스 화재사고가 발생할 횟수인 R과 그에 대한 CDF의 관계를 묘사한 것으로 적어도 R이 10회 발생할 횟수에 대응되는 CDF는 0.98로 계산되었고, 적어도 R이 15회 발생할 횟수에 대응되는 CDF는 0.99로 계산되었다.

#### IV. 가스 사고사례의 Poisson분포 적용한 결과

도시가스사고사례에서 Poisson분포에 적용하기 위해 서 검색된 16개 항목을 발생건수, intensity, MTBF별로 정량화 한 결과를 살펴보면 발생건수별로는 시공 작업

부주의-폭발-배관 7건, 배관 연결부 이완 부식-폭발-호스 9건, 배관마감조치불량-폭발-배관 22건, 순으로 발생건수가 많아짐을 볼 수 있다. 이에 따라 intensity도 증가함을 볼 수 있지만 반대로 평균고장(사고)간격인 MTBF 값은 줄어들면서 반비례함을 나타내고 있다. 또한 MTBF의 값이 가장 큰 Ranking 1인 시공 작업부주의-폭발-배관은 동종사고의 발생확률인 PDF 값이 가장 큰 반면에 발생횟수인 R 값은 가장 작은 수치를 나타내고 있고, 또한 MTBF의 값이 가장 작은 Ranking 8인 마감처리미비-폭발-호스는 발생확률인 PDF 값이 가장 작은 반면에 발생횟수인 R 값은 가장 큰 수치를 나타내고 있음을 볼 수 있다(Fig. 8에서 위로부터 A,B,C.....N,O,P).

또한 전체도시가스 중 LPG만을 PDF가 정점을 갖는 순으로 배열한 Fig. 7에서  $G=0.175467$ 인 마감처리미비-화재-호스와  $H=0.125688$ 인 감처리미비-폭발-배관,  $I=0.081138$ 인 마감처리미비-폭발-호스 순서로 분석되었으며, 관심을 갖는 기간  $t=5$ 년으로 고정하였을 때 발생횟수 R은 마감처리미비-화재-호스는 7회, 마감처리미비-폭발-배관이 10회, 마감처리미비-폭발-호스는 20

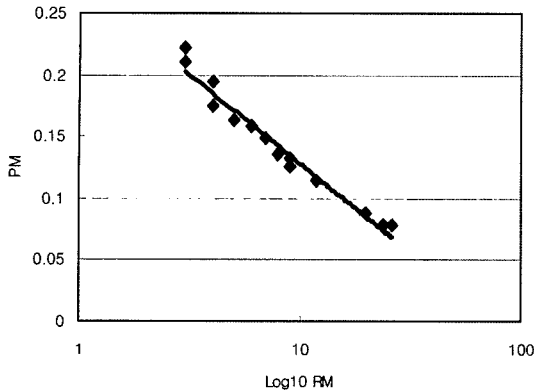


Fig. 7.  $R_M - P_M$  plot in semi-log scale.

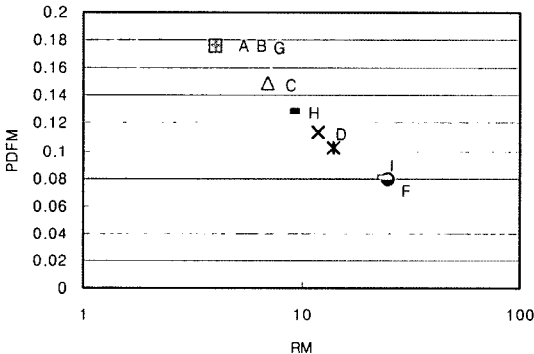


Fig. 8. The accidents of the domestic urban gas (NG/LPG).

회로 발생하는 것으로 분석되었다.

이를 종합하여 볼 때 NG 및 LPG는 PDF 0.18부터 0.08까지 R은 6회부터 30회까지 같은 영역대에 골고루 분포되어 있어 국내 가스사례 중 NG 및 LPG의 사고 발생은 유사함을 보여주고 있다(Fig. 8에서 A,B,C,D, E,F는 NG/GHI는 LPG).

그리고 국내 도시가스사고사례[1,2]와 비교하기 위해 US. Office of Pipeline Safety[7]의 자료와 비교해 보기로 하였다. 우선 Fig. 9는 US. OPS의 NG-Pipeline의 사고 형태에 따른 PDF 및 R의 정량화 결과에 따른 위험도를 나타낸 것으로 OPS의 분류기준은 시공물질의 결함, 내부부식, 외부부식, 외부의 충격, 기타의 5가지로 분류하여 도시가스 사고사례인 16개 항목과 비교해 본 결과 Fig. 9에 나타난 결과를 Plotting할 수 있었다. 대체적으로 도시가스사고사례보다는 OPS의 5개 항목은 t=5년 안에 동종사고 발생횟수로 50회 이상의 다른 영역대를 형성하고 있음을 알 수 있다. t=5년 안에 외부부식으로 인한 동종사고의 발생횟수는 50회, 시공

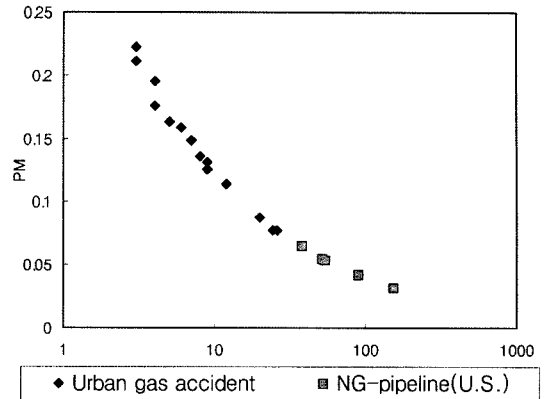


Fig. 9. Comparison of the accidents in NG-Pipeline and in the urban gas.

물질의 결함에 의한 동종사고의 발생횟수는 60회, 내부부식으로는 60회, 외부의 충격으로 인한 동종사고의 발생횟수는 110회, 마지막으로 기타원인에 의한 동종사고의 발생횟수는 100회 정도로 분석되었다.

## V. 결 론

분석된 가스사고사례 데이터베이스를 활용하여 Poisson분포에 적용한 결과(t=5년) 사고의 발생횟수가 5번 이하로 발생하는 항목으로는 시공작업부주의-폭발-배관, 배관 연결부 이완 부식-화재-배관, 배관 연결부 이완 부식-폭발-호스 등으로 나타났으며, 같은 기간동안 발생횟수가 10번 이내로 발생할 사건으로는 시공작업부주의-화재-배관, 배관마감조치불량-폭발-배관 등이며, 발생횟수가 10번 이상 발생할 사건으로는 배관마감조치불량-폭발-호스로 나타났다. 본 논문은 동종사고의 유발을 방지하기 위한 Poisson 분포 이론을 접목한 가스사고시 화재 및 폭발사고 예측프로그램을 일관성 있는 기준으로 생성시킴으로써 실제로 사용할 수 있는 방법을 제공함을 그 목적으로 하였다. 또한 향후 도시가스 사고 자료에 대한 지속적인 자료의 축적과 관련 인지들을 산출함으로써 사회적 위험성 평가를 위한 안전관리정책의 기본방향을 수립하는 기준지표로 이용할 수 있으리라 생각된다.

## 감사의 글

본 연구는 2002년도 서울시립대학교 학술연구용 첨단장비기금(데이터기록장치 E-7010, 분진폭발장치 DES-10) 지원으로 수행되었습니다.

### 참고문헌

- [1] 가스안전공사, “가스사고 연감”, 가스안전공사 사고 조사처, (1991-2001)
- [2] 가스안전공사, “고압가스통계”, 가스안전공사 감사지원처, (2001)
- [3] Rebert L. Winkler and William L. Hays, “Statistics Second Edition Probability, Infernce, and Decision”, Holt, Rinehart and Winston, New York, (1970)
- [4] Hagon, D. O., “Use of Frequency-Consequence Curve to Examine the Conclusions of Published Risk Analysis and to Define Broad Criteria for Hazard Installations”, *Chem Eng Res.*, **62**, Nov, 381-386, (1984).
- [5] Thomas, H. M., “Pipe and Vessel Failure Probabilistic Reliability Engineering”, *Applied Science Publishers*, Ltd., England, (1981).
- [6] CCPS for American Institute of Chemical Engineers, “Guideline for Consequence Analysis of Chemical Releases”, AICHE-CCPS, New York, (1989).
- [7] US. Oil Pipeline Statistics, 1991-2003, “Office of Pipeline Safety”, Research & Pipeline Safety.