

시그모이드 함수를 이용한 가스안전사업 효과의 발현시점 추정과 조정

임현교^{1*} · 박건영²

Estimation and Adjustment of Time Point in Manifestation of Gas Safety Project Effects using Sigmoid Functions

Hyeon Kyo Lim^{1*} · Geon Yeong Bak²

Corresponding Author

Hyeon Kyo Lim
Tel : +82-43-261-2462
E-mail : hklim@chungbuk.ac.kr

Received : October 18, 2022

Revised : December 19, 2022

Accepted : December 21, 2022

Abstract : Gas has replaced coal or petroleum as primary fuel because of its convenience. However, gas has risk of fire, explosion, or poisoning. To reduce gas-related accidents, many strategic projects have been being carried based on 'Gas Safety Management Basic Plans' on a domestic scale. In spite of those projects, the gas-related accident rate did not decrease over past decades. Thus, this study was conducted to analyze the effectiveness of ongoing projects, and to find out ways to make improvements. Conventional statistical analyses on accident data published by gas-related institutions were not useful to determine meaningful attributes to predict future. Whereas, accident case analyses adopted in the present study discovered differences in the type of people and their unsafe acts for each gas type. Meanwhile, the overall average priority of projects was not high in the aspect of System Safety Precedence. If the current trend is maintained, with sigmoid functions, it can be estimated that mean annual accident rate will decrease by only 2.0% in the next two decades. To improve the current trend, the present study made conclusions as followings: (1) safety projects should be designed with careful consideration of accident traits including gas type, unsafe acts, and persons involved and (2) alternative strategies should include system considerations such as minimum hazard design and safety devices prior to mere education or training. To summarize briefly, the present state related with gas accidents highlights the necessity of a system-based multidisciplinary approach.

Copyright©2023 by The Korean Society of Safety All right reserved.

Key Words : gas accident, unsafe acts, system safety, management, logistic function

1. 서론

가스는 석탄과 석유를 이어 산업현장에서뿐만 아니라 일반 가정에서의 생활 연료, 나아가 자동차 연료로서 각광을 받고 있지만, 한편으로는 화재나 폭발, 중독의 위험성을 안고 있어 사고 발생 시 다수의 사람과 재산에 커다란 피해를 줄 수 있다. 그런 까닭에, 우리나라의 가스사고는 1990년대 후반부터 가스시설의 증설과 가스 사용량 증가에 따라 급증하였으나, 1997년의 IMF 위기와 2007년 경제불황기의 급등을 빼고는 다양한 노력을 통하여 꾸준히 감소하여 왔다. 이러한 노력의 일환으로 국내 가스안전 사업들은 제1차 가스안전관리 기본계획 (2015~2019)¹⁾과 제2차 가스안전관리 기본계획 (2020~2024)²⁾에 기반하

여 진행되고 있으며, 이 외에도 '뉴노멀 가스안전혁신'사업 (2021~2023)³⁾이 추진되고 있다.

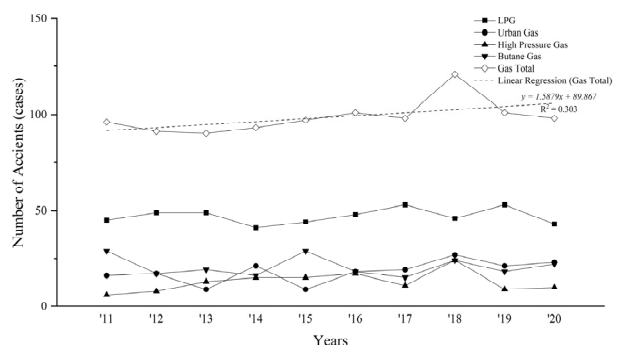


Fig. 1. Variation of gas accidents (2011~2020)⁴⁾.

¹⁾충북대학교 안전공학과 교수 (Department of Safety Engineering, Chungbuk National University)

²⁾충북대학교 대학원 안전공학과 석사과정 (Department of Safety Engineering, Chungbuk National University)

그러나, Fig. 1에서 보는 바와 같이 최근 10년간은 더 이상 감소하지 않고 있으며, 오히려 가스에 따라서는 증가하는 현상을 보이고 있다. 여러 가지 사업들이 이미 추진되고 있음에도 불구하고 지난 10여 년 이상 사고율이 감소하지 않고 있음은 사업정책의 타당성과 사업의 효율성에 대하여 의문을 제기한다.

2011년부터 2020년까지 발생한 가스사고의 통계⁴⁾에 따르면 총 발생건수 986건 중 LPG 사고건수가 전체 사고의 47.8%에 이를 만큼 큰 비중을 차지하고 있으며, 그 원인은 주로 시설미비와 사용자 취급부주의이었다. 이에 비하여 이동식 부탄가스 연소기의 경우, 사고건수는 LPG보다 적지만 사용자 취급부주의로 인한 사고가 대부분을 차지할 만큼 다른 특성을 나타내고 있었다. 그러나, 기존의 사고원인 분류에는 물적 원인과 인적 원인, 그리고 관리적 원인 등이 혼재되어 있어 재발방지 대책을 설정할 때 해당 사고의 요인들을 배타적으로 생각하기 쉬워 사고예방에 효과적이지 못하다는 문제점을 안고 있다.

효과적인 가스사고 예방을 위해서는 가스 사고에 유의한 영향을 미치는 요인을 정확히 파악하고, 이에 대응하는 효과적인 대책을 세울 필요가 있다. 그런데, 많은 경우 안전분야의 기존 연구들은 비용 대비 효과나 예상 수익이라는 경제적 효과에 초점이 맞춰져 있던 반면, 그 효과가 발현되는 데까지 얼마만큼의 기간이 소요되는지에 대해서는 연구가 미흡하였다. 이런 점에서, 본 연구는 국내 가스사고와 관련된 현황을 파악하고 가스사고 주요 사고유형 및 특성요인을 도출하여, 기존 가스사고 예방사업들의 효과 발현시점을 추정하는 한편, 정책사업들의 효율성을 향상시킬 수 있는 방법을 모색하고자 수행되었다.

2. 변화동향의 통계적 분석

가스사고의 변화동향을 파악하기 위하여 우선적으로 사고발생에 영향을 미치는 요인들을 파악하고자 IBM SPSS Ver.23을 이용하여 가스사고율에 대하여 다중회귀분석 (Multiple Regression Analysis)을 실행하였다. 이때, 가스 사고율에 유의한 영향을 미치는 입력변수로는 다음 변수들이 고려되었으며, 사고 건수는 가스종류 및 특성에 따라 구분, 관리되고 있는 현실을 감안하여 각 사고의 사용량에 기반한 사고율로 환산하여 분석하였다⁵⁾.

- 해당 가스 사용량 : 가스 사용량, 가스 공급량, 가스 생산량

- 대체 연료 사용량 : 연탄 사용량, 전기 사용량, 천연 가스 판매량
- 연료별 차량 대수 : LPG 차량 대수, 수소차량 대수, 전기차량 대수
- 타공사 건수 : 배관근접 굴착공사 건수

분석 결과, 각 가스별 사고율에 통계적으로 유의미한 영향을 미치는 변수는 Table 1과 같이 정리되었다.

보는 바와 같이 LPG 사고율에는 연탄사용량과 전기 사용량이 통계적으로 유의한 영향을 미친다고 판단되었으며 ($p=0.000<0.01$, $p=0.008<0.01$), 도시가스의 사고율에는 가스공급량과 전기사용량이 통계적으로 유의한 영향을 미치는 것으로 판단되었고 ($p=0.000<0.01$, $p=0.014<0.05$), 이동식 부탄가스연소기의 사고율에는 가스사용량과 연탄사용량이 각각 통계적으로 유의한 영향을 미치는 것으로 판단되었다 ($p=0.009<0.01$, $p=0.010<0.05$). 그러나, 통계적으로 유의미하다고는 해도 결정계수 (coefficient of determination, R^2)가 작아 해당변수를 가지고 가스 사고율의 변화를 예측하는 것은 무의미하다고 판단되었다.

한편, 시계열 분석(Time Series Analysis)도 시도되었으나 유의미한 결과는 도출되지 않았다^{6,7)}. 따라서, 현재 상태가 유지된다면 사고율의 감소는 기대하기 어려우므로, 사고특성에 적합한 정책방향을 재검토할 필요가 있다고 판단되었다.

Table 1. Results of multiple regression analyses

Variables		Gas				
		Total	LPG	City Gas	High-P Gas**	Butane Gas
Time	Year	0.425	0.52	0.766	-	0.789
	Month	0.918	0.841	0.229	-	0.299
Gas amount	Consumed	0.711	0.768	0.576	-	0.009*
	Supplied	-	-	0.000*	-	-
	# of homes	-	-	0.67	-	-
	Produced	-	0.477	-	-	0.737
p-value Alternative energy consumed	Briquet	0.000*	0.000*	0.124	-	0.010*
	Electricity	0.008*	0.014	0.000*	-	0.606
	Natural gas	0.728	0.419	0.312	-	0.844
No. of vehicles	LPG	0.4	0.555	0.225	-	0.826
	Hydrogen	0.3	0.906	0.343	-	0.329
	Electricity	0.323	0.769	0.721	-	0.509
Others	Excavation work	0.374	0.71	0.567	-	0.629
Linear Model	R^2	0.179	0.16	0.183	-	0.098
	Adj. R^2	0.165	0.145	0.169	-	0.082

Note) * significant, $p<0.05$

** high pressure gas, data unavailable

3. 가스관련 사고사례의 시스템공학적 분석

3.1 분석대상의 선정 및 방법

2011년부터 2020년까지 발생한 가스관련 사고 총 986건의 분포는 Table 2와 같다⁴⁾.

Table 2. Distribution of accidents (2011~2020)

Gas Type	No. of Accidents (cases)	Portion (%)
LPG	471	47.8
City Gas	180	18.2
Butane Gas	207	21.0
High Pressure Gas	128	13.0
sum	986	100.0

이와 같은 가스사고 분포의 특성을 반영할 수 있도록 동 기간 사고사례 중에서 상대적으로 사고발생과정이 상세히 소개되어 있는 공개사례⁴⁾들을 수집하였다. 구체적으로 선정된 자료는 총 127건으로, 가능한 한 전체 가스사고건수의 사고분포와 비교할 수 있도록 사례 수를 조정하였고 그 결과는 Table 3과 같다.

Table 3. Distribution of accident cases adopted in the present study

Gas Type	No. of Accidents (cases)	Portion (%)
LPG	57	44.9
City Gas	28	22.0
Butane Gas	24	18.9
High Pressure Gas	18	14.2
sum	127	100.0

이러한 과정을 거쳐 수집된 사고사례를 대상으로 Accident Dynamics 기법을 이용하여 사고경위를 분석하였다. 특히, 이 때에는 사고 관계자의 유형과, 그들의 불안전행동 유형을 중점적으로 파악하였다.

3.2 가스사고특성의 시스템공학적 분석결과

사고에 직접 관계된 사람들의 유형을 가스별로 나누어 분석한 결과에 따르면 Fig. 2에서 보는 바와 같이 가스 종류에 따라 사고관련자들의 유형은 상이하였다. 즉, LPG의 경우에는 공급자와 사용자의 점유율이 압도적으로 높았고, 이동식 부탄가스연소기의 경우에는 사용자의 비율이, 그리고 도시가스의 경우에는 공급자의 비율이 상대적으로 매우 높았다. 이것은 가스종류에 따라 사고예방의 목표집단이 다르게 설정되어야 함을 시사한다고 볼 수 있다.

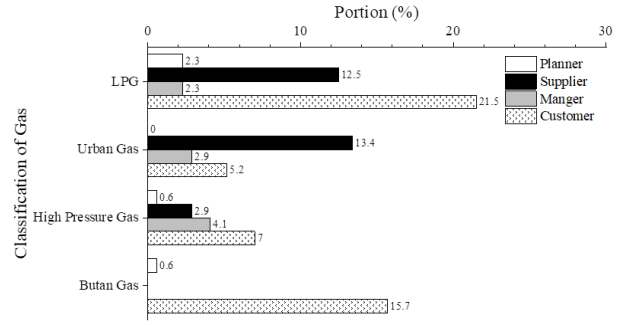


Fig. 2. Type of persons involved in gas accidents.

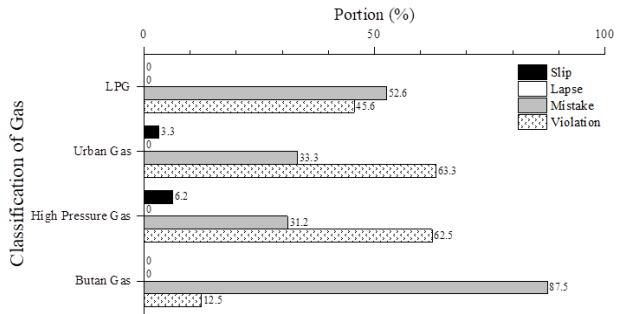


Fig. 3. Type of unsafe acts as direct causes by gas.

가스사고를 유발한 직접원인에 초점을 맞추어 Reason⁸⁾의 불안전행동 유형을 분석한 결과에 따르면 전체적으로 mistake의 점유율이 51.2%로 가장 높았으며, violation의 점유율이 46.5%로 그 뒤를 이었다. 이것은 위기상황에서 관계자들의 판단 과오가 중대한 영향을 미쳤다는 사실을 의미한다.

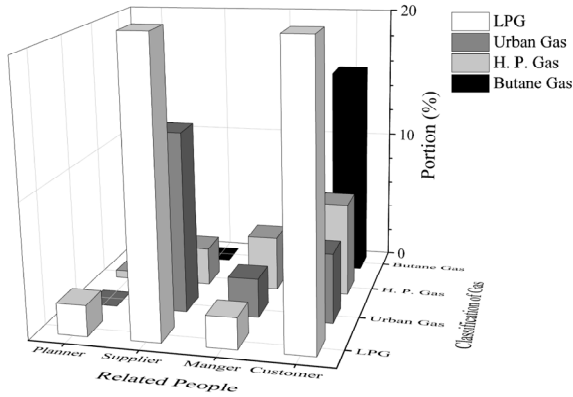
직접원인에 관련된 불안전행동을 가스 종류별로 분류하여 도식화한 결과는 Fig. 3과 같다. LPG사고의 경우, 사용자의 mistake로 인해 사고가 발생한 사례가 52.6%로 가장 높았다. 반면, 도시가스와 고압가스의 사고는 violation에 의한 사고가 60% 이상이며, 사고의 주체는 주로 시공자와 공급자에 의한 것이었다. 한편, 이동식 부탄가스 연소기는 의무교육에 해당하지 않는 일반사용자들이 사고의 주체였으며, 이들의 mistake에 의한 사고가 87.5%로 분석되었다.

4. 기존 사업방향의 분석

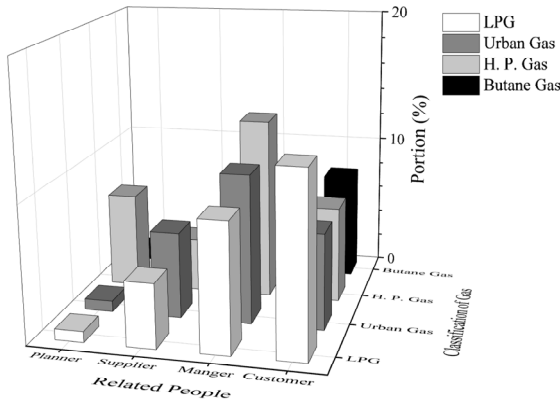
4.1 사업대상자 측면

사고와 관련된 집단을 명확히 파악하기 위하여 사고 사례와 관련된 관계자를 설계자, 공급자 (또는 설치자), 관리자, 사용자, 4가지 유형으로 구분하여 사고사례를 분석한 결과는 Fig. 4와 같다.

Fig. 4(a)에서 보는 바와 같이 LPG 사고 사례는 공급



(a) Distribution of person types involved.



(b) Distribution of person types aimed in projects.

Fig. 4. Comparison of person types related to gas accidents.

자에 16.9%, 사용자에게 21.5%에 집중되는 경향을 나타냈으며, 도시가스의 경우에는 공급자의 비율이 전체 가스사고의 7.6%를 가장 높았다. 또한, 고압가스의 경우에는 직접적으로 고압가스를 사용하는 작업자들에 의한 사고가 가장 빈번하였고, 다음으로 이들을 관리하는 관리자들의 비율이 높았다.

이에 비하여 기존 사업의 대부분은 Fig. 4(b)에서 보는 바와 같이 가스시설을 관리하고 점검하는 사업에 초점이 맞춰져, 관리자를 중심으로 하는 사업들이 진행되어 왔다. 예를 들어, LPG 분야에서는 관리자를 대상으로 11.1%, 공급자를 대상으로 8.8%를 중점으로 사업을 진행하여 왔다.

그러나, Fig. 4(a)에서 보는 바와 같이 사고관계자는 사용자의 비중이 압도적으로 높았다. 도시가스의 경우에도 관리자에 대한 사업 비중이 더 높았으나, 사고발생은 공급자와 설치자와의 관련성이 더 높았다. 이동식 부탄가스 연소기의 경우에도 마찬가지로 대부분의 사고가 사용자에게 집중되어 있었다. 결과적으로 사고와 관련된 집단을 염두에 두고 사업방향을 조정할 필요가 있다고 판단되었다.

4.2 가스사고 감축 영향력 측면

Fig. 5는 기존 정책들을 사고감축 영향력을 가늠할 수 있는 시스템안전우선순위의 원칙에 따라 분석한 결과이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 제1차 가스안전관리 기본계획 (2015~2019)은 관리적 방안이 다수였으며, 경보장치에 관한 정책사업이 가장 적은 비중을 차지하였다. 제2차 가스안전관리 기본계획 (2020~2024) 또한 관리적 방안이 가장 많은 비중을 차지했는데, 1차 기본계획과는 다르게 설계관련 정책사업이 감소한 반면, 안전장치 관련사업이 다소 증가하였다는 특이성이 있었다. 2021년도 뉴노멀 가스안전혁신 사업도 관리적 방안을 모색하는 사업이 다수였으며, 경보장치에 관한 대책이 가장 적은 비중을 차지하였다.

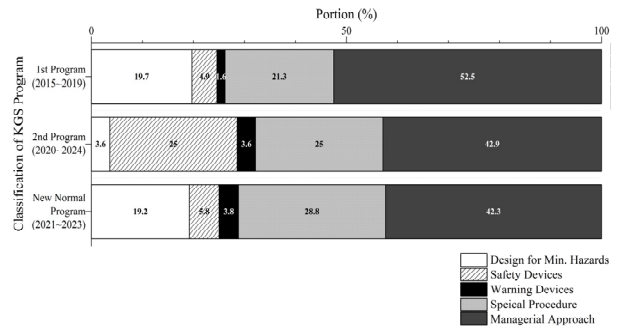


Fig. 5. Distribution of established projects in the aspect of system safety.

이상의 결과를 종합해 볼 때, 기존 사업의 비효율성은 두 가지 측면으로 요약된다. 첫째, 직접적으로 사고 예방효과를 기대할 수 있는 설계 관련 사업이나 안전장치 관련 사업보다는 사업효과 발현까지 장기간이 소요되는 교육 및 훈련, 그리고 관리적 방안에 치우쳐왔었기 때문이다. 둘째, 가스사고와 관련된 관계자 스스로 사고예방을 도모하도록 하는 것이 아니라 관리자의 입장에서 해당 시설과 기기들을 관리 감독하려는 성향이 강했기 때문이라고 이해될 수 있다.

4.3 사업효과 발현시점 측면

1) 수리 모형의 선정

사고예방을 위한 각종 사업의 효과발현시점을 추정하기 위하여 수리모형을 도입하였다. 이와 관련해서는 일본의 사업성과^{9,10)}를 참조하였다. 일본은 1986년 LPG 관련 안전설계기준을 국민에게 보급하는 사업을 시작한 결과, 시작 당시에는 보급률이 0.5%에 불과하였던 것이 약 10년 후인 1999년말에는 99.1%에 이르렀다. 그 효과로 동 사업관련 LPG 사고발생률이 20% 이하로 감소하였는데, 이러한 성과는 Fig.6에서 보는 바와 같이

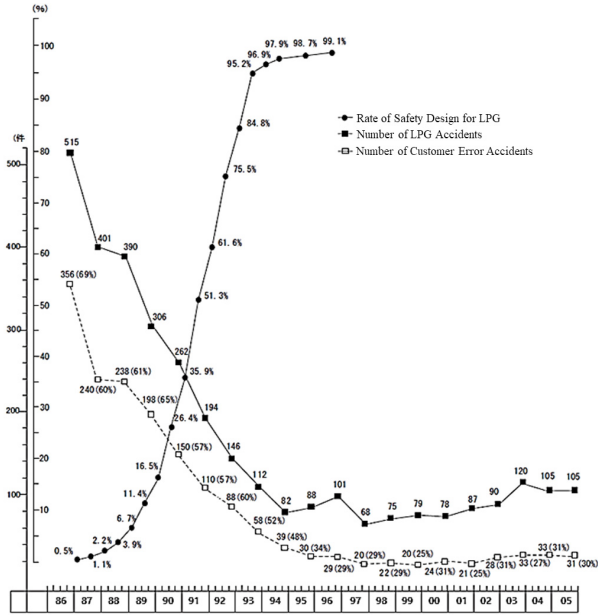


Fig. 6. Applied portion of LPG safety design device in Japan¹⁰⁾

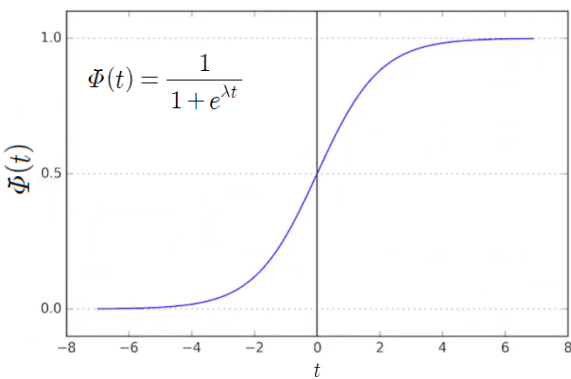


Fig. 7. Logistic function adopted in the present study ($\lambda = 1$).

S자형 함수를 갖는 시그모이드 함수(sigmoid function)와 유사하다.

현재의 평균 사고발생건수를 c 라고 하고, 정책의 사고예방효과를 p 라고 할 때, 사고개시로부터 경과 t 년 후의 평균 사고발생건수를 대표적인 시그모이드 함수인 로지스틱 함수(logistic function)^{11,12)}를 이용하여 정책사업의 효과를 모형화하면 다음과 같이 표현되며, 그 형상은 Fig. 7과 같다.

$$c(1-p)f(t) = c(1-p) \frac{1}{1+e^{-\lambda t}}, t \geq 0 \quad (1)$$

한편, 사고를 예방하는 정책을 선정할 때에는 ISO/IEC Guide¹³⁾에서 적시하고 있는 바와 같이 시스템안전우선순위의 원칙(System Safety Order of Precedence; SSOP)¹⁴⁾에 따라 최소위험성설계(Design for Minimum Hazard)에서

Table 4. Effects and manifestation periods of accident prevention projects

Counter Measures	Effect of Accident Prevention p (%)	Manifestation Period	
		years	λ
Design for Min. Hazard	80	10	10/12
Safety Devices	50	15	15/12
Warning Devices	30	20	20/12
Special Procedure	20	30	30/12

부터 시작하여, 안전장치 (Safety Devices), 경보장치 (Warning Devices), 끝으로 교육과 훈련 그리고 개인보호구와 관리적 통제를 포함하는 특수한 절차(Special Procedure)의 순으로 검토되어야 한다.

일본의 사례에서 보듯 최소위험설계에 기반한 정책사업의 경우 발현기간은 약 10년, 사고예방효과는 약 80%라고 추정된다. 따라서 시스템안전우선순위에 입각하여 사고예방효과를 추정하는 경우 사고예방효과 및 발현기간을 Table 4와 같이 수리모형화하였다.

이때, 같은 목적을 가지고 같은 대상에 대하여 사고 예방 정책사업을 추진하는 경우에는 사업의 효과가 서로 독립적이라고 가정할 때, 종합적인 사고감축효과는 개별적 사업 성공으로 인한 사고감축율의 곱으로 표현되는데, 여기서 여기에서 t_1, t_2 는 각 사업의 개시 후 경과기간을 나타낸다.

$$c(1-p_1)f_1(t)(1-p_2)f_2(t) = c(1-p_1) \frac{1}{1+e^{-\lambda_1 t_1}} \times (1-p_2) \frac{1}{1+e^{-\lambda_2 t_2}}, t_1 \geq 0, t_2 \geq 0 \quad (2)$$

2) 기존 정책사업의 사고예방효과 발현시점의 추정

이상의 수리모형을 이용하여 사업효과가 발현되는 시점을 추정하였다. 즉, 각 가스별, 예방사업범주별로 기존의 사업유형을 분류하고, 추정 사업효과와 지속기간을 감안하여 시스템우선순위의 원칙(SSOP) 상의 사고예방대책의 예방효과를 모형화하였다.

Table 5는 분석에 이용된 자료일부로서 1열부터 차례로 사업계획, 사업인식번호, 사업명, 대상가스의 특화 여부, 개시년도 및 종료년도, 대상자 집단, 대책수준, 그리고 사업효과 및 발현기간 변수를 나타낸다.

한편, 지난 10여 년처럼 미래를 장담할 수 없을 때에는 낙관계수(coefficient of optimism)를 이용하여 미래 성과를 예측하는 것이 경영전략 기법 중의 하나이다¹⁵⁾. 낙관계수를 $\alpha, 0 \leq \alpha \leq 1$ 라 할 때 불확실 상황에서의 예측치는 다음 식과 같이 가중평균으로 표현될 수 있다.

$$\text{미래예측치} = \alpha \times \text{낙관예측치} + (1 - \alpha) \times \text{비관예측치} \quad (3)$$

Table 5. Variables considered in estimating saturated periods of LPG accident reduction projects (part)

Basic Plan	Id. No.	Project Name	Spec	Onset	Completion	Target People	Measure Level	Prev. Effect	Manif. Period
New Normal	19	EMC Enhancement	no	'21	'22	designer	min.hazard design	0.8	10
The 2nd	1-1-3	Safety Network in Islands	yes	'18	'22	supplier	safety devices	0.5	15
New Normal	1	Supplementation of Incompleted Blocking	yes	'21	'22	supplier	safety devices	0.5	15
New Normal	50	Buried Pipes	yes	'21	'21	supplier	safety devices	0.5	15
The 2nd	1-2-2	Remote Management of Small	yes	'20	'24	supplier	warning devices	0.3	20
New Normal	14	Re-examination of Small Storage Tank	yes	'21	'23	supplier	warning devices	0.3	20
The 2nd	1-2-2	Education of Small Storage Tank Suppliers	yes	'20	'24	supplier	education training	0.2	30

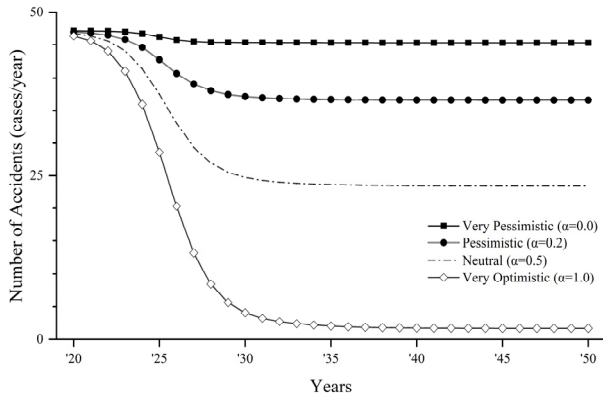


Fig. 8. Estimated mean number of LPG related gas accidents in the future.

Fig. 8은 위 모델을 기반으로 LPG 관련 사고예방사업들의 종합적인 효과 및 발현기간을 추정한 결과로서, 각 그래프는 위에서부터 각각 낙관계수 $\alpha=0.0, 0.1, 0.5, 1.0$ 인 경우를 나타낸다. 예를 들어, 현 추세와 같이 사고율이 감소할 가능성이 좀처럼 보이지 않는다면 낙관계수는 0에 해당되며, 이 경우 앞으로의 사고율 변화는 맨 위의 ‘매우 비관적($\alpha=0.0$)’에 해당될 것으로 예상된다.

이상과 같은 방식으로 가스별 추정치를 종합하여 전체 가스사고율의 변화를 추정하면, 연평균 98.2건의 사고가 발생하고 있는 2021년 현재 상황은 기존의 사업이 특별한 성과를 보이지 못할 경우, 2042년 연평균 96.2건의 사고율로 수렴하여 감소율은 2.0%에 불과할 것으로 예측되었다.

5. 사업방향의 수정

분석 결과를 종합해 볼 때 가스 종류에 따라 사고관계자 유형과 사고를 유발하는 불안전행동의 유형이 다르고, 한편으로는 사업효과 발현시점까지의 기간이 지나치게 길기 때문에 이를 단축시키기 위한 목표 설정이 절실하다.

5.1 사업효과 발현의 목표 시점 조정

이상에서 살펴 본 바와 같이 현재 우리나라의 가스

사고발생은 비관적 상태에 가까워서 가까운 시일 내에 사고율이 감소되리라 예측하기 곤란하다. 이런 경우 목표를 설정하고 관리해 나가는 과정에는, Hurwicz가 의사결정론 (Decision Theory) 분야에서 제시한 바¹⁵⁾와 같이 우선 낙관계수 $\alpha=0.1$ 로 설정하여 목표달성 가능성을 검토하고, 일정 기간 후 다시 낙관계수를 $\alpha=0.2$ 로 상향 조정하여 목표를 설정하고 다시 도전하는 등 점진적으로 사업을 진행해 나가는 것이 일반적인 접근 방법이다. 즉, 최근 10년간의 실적이 $\alpha=0.0$ 에 가까우므로, 우선 10% 감소를 목표로 $\alpha=0.1$ 수준에서 시도하는 것이다.

그러나, 일반적 목표설정예 따라 20년에 걸쳐 사고건수가 약 10% 내외 감소한다는 설정은 안전 선진국에 비하여 매우 소극적인 목표설정이라 볼 수 있으므로, 다소 도전적으로 목표를 설정해 볼 필요가 있다.

낙관적이라고 생각할 수는 없지만, 낙관계수 $\alpha=0.2$ 로 약간 상향 조정하여 도전적으로 사업을 추진하는 경우 Fig. 9에서 보는 바와 같이, 연평균 98.2건의 사고가 발생하고 있는 2021년 현 상황은 효과적인 개선이 이루어지면 2041년 21.1% 감소된 연평균 77.5건의 사고율로 수렴할 것으로 예상된다.

이상의 논의를 정리하면 Table 6과 같다. 현 상황에서는 목표를 어떻게 정하든 임계점에 이르기까지는 약 20년 이상이 소요될 것으로 예상되는데, 임계점에서의

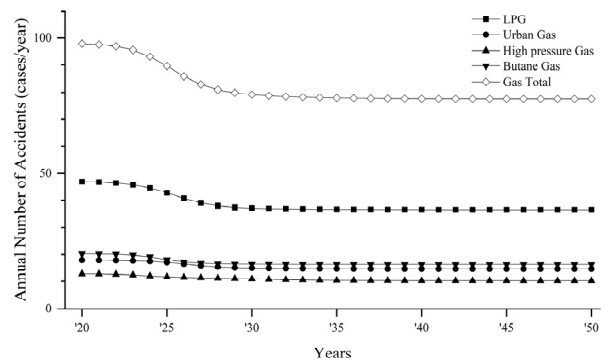


Fig. 9. Estimation of converged accident rate over time ($\alpha=0.2$).

Table 6. Comparison of converged accident rate over time
(unit : cases/year, year)

Gas Type	Annual mean acc. cases (2011~2020)	Maintain extremely pessimistic $\alpha = 0.0$	General obj. pessimistic $\alpha = 0.1$	Aggressive obj. pessimistic $\alpha = 0.2$
LPG	47.2	45.3 (4.0%▼)	40.9 (13.3%▼)	36.6 (22.5%▼)
City Gas	18.0	18.0 (0.0%)	16.2 (10.0%▼)	14.5 (19.4%▼)
H.Pressure Gas	12.7	12.5 (1.6%▼)	11.3 (11.0%▼)	10.2 (19.7%▼)
Butane Gas	20.3	20.3 (0.0%)	18.3 (9.9%▼)	16.3 (19.7%▼)
Total	98.2	96.2 (2.0%▼)	86.8 (11.6%▼)	77.5 (21.1%▼)

연평균 사고건수는 노력 여하에 따라 연평균 10건 정도의 차이가 있을 것으로 예상된다.

다만, 앞에서 분석한 바와 같이 연평균 사고 건수를 좌우하는 것은 LPG이므로 가스사고를 획기적으로 감소시키기 위해서는 LPG 사고예방에 특화된 사업을 추진할 필요성이 있음을 시사한다. 바꿔 말하면 LPG 공급자와 사용자에게 특화된 사업이 강화되어야 한다는 의미이다.

5.2 사업대상 및 사업방향의 수정

가스별로 사업효과를 신속히 달성하려면 사업정책을 어떻게 수정하는 게 좋을지 검토하기 위하여 Table 5와 같은 정리표를 이용하였다.

LPG 분야의 경우, 사고감축 영향력을 시스템안전우선순위의 원칙에 따라 최고순위 1, 최저순위 4의 가중치를 차례로 부여하여 평가해 볼 때, 기존 관련사업의 평균 우선순위는 3.2로서 전반적인 비중이 후순위 사업에 치우쳐 있음을 알 수 있었다. 그러나, 가장 사고가 빈발하는 분야이며 사고 관계자가 일반 사용자임을 감안한다면 보다 그 이전 단계를 향한 적극적인 사업 전개 즉, 설계 변경이나 개선, 신제품 개발 지원 등 설계 단계에서부터의 사고예방사업이 먼저 다각도로 검토될 필요가 있다. 아울러, 사용자 대상 사업도 단순한 교육이나 홍보보다는 경고표지, 픽토그램 등을 다각도로 개발하고 활용하는 사업을 전개할 필요가 있다.

도시가스의 경우에는 사고 감축 영향력을 시스템안전우선순위의 원칙에 따라 평가해 볼 때, 관련사업의 평균 우선순위는 계산하면 3.1로 파악되었다. 기존 사업은 이미 공급자 지향형 사업의 비중이 매우 높았으나, 더 이상 사고감축의 효과가 나타나지 않고 있으므로 방법론적 변화가 필요한 것으로 판단되었다.

고압가스 사고는 주로 일반 사용자가 아닌 관계 기

술자들에 의하여 발생하고 있으므로, 설계 단계에서의 관련 사업과 관리자 대상 안전장치 관련 사업에 초점이 맞춰져 있는 것은 적절하다고 볼 수 있었다. 사고 감축 영향력을 시스템안전우선순위의 원칙에 따라 평가해 볼 때, 관련사업의 평균 우선순위도 2.7으로 가스 관련사업 중 가장 양호하였다. 다만, 고압가스의 경우 가스 일반을 지향하는 사업을 통한 사고감축 효과를 기대하기 어려우므로, 필요시 고압가스에 특화된 사업을 추진할 필요가 있다고 판단되었다.

부탄가스 분야는 사용자 요인의 비중이 가장 큰 분야이므로 이에 대한 사업추진이 기대되지만 사용자에게 특화된 사업 비중은 상대적으로 매우 낮아 사업효과를 기대하기 어려웠다. 사고감축 영향력을 시스템안전우선순위의 원칙에 따라 평가해 볼 때 관련사업의 평균 우선순위는 3.4로서 사업전반의 비중이 후순위 사업에 치우쳐 있었으며, 사업 내용도 대부분의 일반 사용자를 대상으로 하는 가스일반 교육, 홍보 등이었다. 물론 대국민 홍보나 일반 사용자를 위한 교육도 필요하지만, 부탄가스의 경우에는 특히 사용자 관련 사고의 비중이 높기 때문에 특화된 사업을 도모할 필요가 있다.

한편, 가스 분야 전체를 대상으로 고려해 볼 때, 사업대상이 특정되지 않는 가스 일반에 대한 사업으로는 일산화탄소 중독사고 예방, 전담기구 설치 및 안전기술 개발 등 행정적 접근 방법이 포함되어 있지만, 이외에는 사업 대부분이 대부분 교육 홍보로 이루어져 있어서 사업 효과의 발현까지 매우 많은 시간이 소요되며, 교육효과도 장담할 수 없다는 문제점이 있었다. 효과적인 사고예방대책을 위해서는 설계 관련 사업과 안전장치 관련 사업의 비중을 우선적으로 높이고, 직접적인 사고유발자가 일반 사용자임을 감안하여 교육이나 훈련보다 그 이전 단계인 위험요인을 경고하는 경보장치 관련 사업이 증대될 필요가 있다. 특히, 이때에는 안전마케팅(safety marketing) 개념에서 접근하는 방법도 주목할 만하다. 즉, 단순하고 일방적인 교육이나 홍보가 아니라, 심리학적 이론에 기반하여 사용자들로 하여금 사고예방에 자발적으로 참여하도록 하는 것이다. 예를 들어, 일본에서는 사용자들의 가스/CO 경보기 구입을 촉진하기 위하여, 소비자의 구매의욕 형성 과정에 맞추어 대책을 수립하고 사업을 시행함으로써 사고예방 효과를 올리고 있다. 더욱이, 최근에는 행동경제학의 넛지 이론(Nudge Theory)을 활용하여 단순한 홍보 스티커나 전단의 이미지를 벗어나, 소비자의 호기심과 구매의욕을 자극하여 노후된 가스기기의 교체를 결심하고 가스안전기기를 스스로 구매하도록 하는 사업을 도입하고 있다.

6. 결론

높은 편의성 때문에 가스 사용량은 과거 수십년 동안 급격히 증가해 왔으나, 여러 가지 사고예방 사업에도 불구하고 지난 10여 년 이상 사고율이 감소하지 않고 있다. 본 연구는 이런 당면문제를 이해하고 개선점을 찾아, 가스안전을 조기에 달성하는 정책방향을 찾고자 수행되었다.

통상적인 연구와 같이 기존 사고건수를 대상으로 다중회귀분석을 실시한 결과, 가스별로 통계적으로 유의한 영향을 주는 변수들에는 다소 차이가 있었으나, 변수들간의 상관관계수가 매우 낮아 회귀식으로의 의미는 없다고 판단되었다.

사고사례에 기반하여 사고특성요인들을 분석한 결과에 따르면, 가스 종류에 따라 사고관계자의 유형에는 차이가 있었으며, 사고를 유발한 직접원인 불안전 행동 유형에도 차이가 있었다.

한편, 시행사업들의 사고감축 개선효과에 기반하여 시스템안전공학적 측면에서 평균 우선순위를 계산해보면 LPG의 경우 3.2, 도시가스의 경우 3.1, 고압가스의 경우 2.7, 부탄가스의 경우 3.4, 가스 일반의 경우 3.7로 나타나, 고압가스 이외에는 비효율적인 사업이 시행되고 있다고 판단되었다. 가장 주된 원인은 기존 가스안전 정책사업들의 사업대상이 대부분 가스사고 관계자가 아닌 관리자의 점검 및 관리 기능에 맞춰져 있었고, 사업의 적지 않은 부분이 가스 일반에 대한 교육과 홍보로 이루어져 사고예방사업의 효과를 기대하기 어렵기 때문이었다. 그 결과 로지스틱 함수를 이용하여 예측한 결과에 따르면, 현재로부터 20년이 지난 2042년에도 연평균 사고건수는 불과 약 2.0% 감소할 것으로 예측되었다.

이러한 상황을 개선하려면 가스사고 예방을 위한 사업은 다음과 같은 방향으로 수정되어야 한다. 첫째, 가스종류에 따라 사고특성이 다르므로 사업전체의 일정부분을 가스안전 일반에 대한 공통사업으로 축소하는 반면, 가스사고별 특성에 대응하는 사고예방 사업을 추진하여야 한다. 둘째, 사고를 유발하는 불안전행동의 유형에 대응하여 사고예방효과 발현까지의 기간을 단축하는 시스템안전공학적 측면에서의 정책으로 전환되어야 한다.

이 외에 사고 관계자들의 자발적 안전행동을 유도하는 안전동기유발 정책이 추가될 필요가 있다고 판단되었다. 가스사고는 고압가스나 도시가스처럼 설비나 기

기와 관련하여 발생하는 하드웨어 측면이 있지만, LPG나 부탄가스처럼 사용자 부주의나 휴먼에러에 의하여 발생하는 휴먼웨어 측면이 매우 강한 사고의 발생률이 더 높기 때문에 학제간 연구(Multidisciplinary Research)는 불가피하다고 할 수 있다.

References

- 1) The 1st Gas Safety Management Basic Plan, Ministry of Trade, Industry and Energy, 2015 (*in Korean*).
- 2) The 2nd Gas Safety Management Basic Plan, Ministry of Trade, Industry and Energy, 2020 (*in Korean*).
- 3) New Normal Gas Safety Innovation Project, Korea Gas Safety Corporation, 2020 (*in Korean*).
- 4) Gas Accident Annual Report, Korea Gas Safety Corporation, 2011~2020 (*in Korean*).
- 5) 2021 Energy Statistics Handbook, Korea Energy Agency, 2021 (*in Korean*).
- 6) J. D. Cryer and K. Chan, Time Series Analysis with Applications in R, 2nd ed., Springer, 2008.
- 7) R. H. Shumway and D. S. Stoffer, Time Series Analysis and Its Applications with R Examples, 3rd ed., Springer, 2011.
- 8) J. Reason, Human Error, Cambridge University Press, 1990.
- 9) LPG Reading Book, The Conference of LP Gas Associated Organizations, <https://www.nichidankyo.gr.jp/toku/> (*in Japanese*)
- 10) 2005 Annual Accident Report, The High Pressure Gas Safety Institute of Japan, https://www.khk.or.jp/public_information/public_introduction/ (*in Japanese*).
- 11) Encyclopaedia of Mathematics, edited by M. Hazewinkel, Kluwer, 1994.
- 12) J. Tanton, Encyclopedia of Mathematics, Facts on File, 2005.
- 13) ISO/IEC Guide 51:2014 Safety Aspects - Guidelines for Their Inclusion in Standards, 2014.
- 14) Air Force System Safety Handbook, Air Force Safety Agency, HQ AFSC/SEPP, Kirtland AFB, NM 87117-5670, USA, 2000.
- 15) L. Hurwicz, "The Generalized Bayes Minimax Principle : A Criterion for Decision Making under Uncertainty", Cowles Commission Discussion Paper 355, 1951.