

비선형 회귀분석을 이용한 Generic 데이터 기반의 누출빈도함수 추정

윤익근[†] · 단승규^{**} · 정호진^{**} · 홍성경^{***}

Estimation of Leak Frequency Function by Application of Non-linear Regression Analysis to Generic Data

Ik Keun Yoon[†] · Seung Kyu Dan^{**} · Ho Jin Jung^{**} · Seong Kyeong Hong^{***}

[†]Corresponding Author

Ik Keun Yoon

Tel : +82-31-400-7544

E-mail : ikyoon@kogas.or.kr

Received : April 10, 2020

Revised : August 19, 2020

Accepted : September 16, 2020

Abstract : Quantitative risk assessment (QRA) is used as a legal or voluntary safety management tool for the hazardous material industry and the utilization of the method is gradually increasing. Therefore, a leak frequency analysis based on reliable generic data is a critical element in the evolution of QRA and safety technologies. The aim of this paper is to derive the leak frequency function that can be applied more flexibly in QRA based on OGP report with high reliability and global utilization. For the purpose, we first reviewed the data on the 16 equipments included in the OGP report and selected the predictors. And then we found good equations to fit the OGP data using non-linear regression analysis. The various expectation functions were applied to search for suitable parameter to serve as a meaningful reference in the future. The results of this analysis show that the best fitting parameter is found in the form of DNV function and connection function in natural logarithm. In conclusion, the average percentage error between the fitted and the original value is very small as 3 %, so the derived prediction function can be applicable in the quantitative frequency analysis. This study is to contribute to expand the applicability of QRA and advance safety engineering as providing the generic equations for practical leak frequency analysis.

Copyright©2020 by The Korean Society of Safety All right reserved.

Key Words : quantitative risk assessment(QRA), leak frequency function, non-linear regression, OGP report

1. 서론

위험물질 공정산업에서 완전한 정량적 위험성 평가(Full Quantitative Risk Assessment, 본 논문에서는 QRA로 명시)는 공정의 다양한 누출 사고 시나리오에 대한 빈도분석과 결과분석을 통해 확률적 위험도를 산출하는 기법이다. QRA가 도입된 이유는 20세기 후반 새로운 공정기술에 대한 안전 경험 부족으로 인해 기존의 정성적 평가로는 안전 의사 결정에 어려움이 있었기 때문이다¹⁾.

QRA는 규제기관에게는 플랜트 건설 및 운영시 위험을 통제하거나 지역주민과의 소통을 위한 계량적인

지표로써 활용된다²⁾. 선진국가로 인식되는 G10에서는 약 45%가 위험물질 산업에 대한 안전규제로 QRA를 의무화하고 있으며 그 활용이 점차 높아지고 있다³⁾. 최근 한국도 화학물질관리법의 개정을 통해 위험도 개념이 포함된 장외영향평가를 의무적으로 사업자에게 요구하고 있다^{4,5)}. 또한 QRA는 사업자에게는 비용-효과 측면에서 효과적인 위험관리를 수행하는 데 가치가 높다⁶⁾. 예를 들어 RBI(Risk Based Inspection)와 SIL(Safety Integrity Level) 등은 위험도 기반의 합리적인 설비운영 정책 수립과 안전설계를 위한 세부응용 기법들이다. 학술적 측면에서도 세계 6대 안전논문지에서 발간된 위험성 평가 논문중 QRA가 차지하는 비율은 약 31%

[†]한국가스공사 가스연구원 기술기반연구소 책임연구원 (Korea Gas Corporation Research Institute)

^{**}한국가스공사 가스연구원 기술기반연구소 선임연구원 (Korea Gas Corporation Research Institute)

^{***}한국가스공사 가스연구원 기술기반연구소 연구위원 (Korea Gas Corporation Research Institute)

로써 과거에 주로 사고결과분석에만 초점을 둔 것에 비해 많이 증가되었다고 분석되었다⁷⁾.

이러한 상황을 종합적으로 고려해보면, 산업의 발전과 안전을 동시에 확보해야 하는 국가와 기업에게 QRA는 합리적인 가이드로써 그 역할이 증대할 것으로 예상된다.

그런데 QRA는 적용에 있어 원론적인 몇 가지 어려움은 있다⁷⁾. 첫째는 다양하고 어려운 수학적 모델들이 복합적으로 연계되어 있어 현장중심의 안전 도구로 삼기에는 어렵다는 점이다. 두 번째는 분석 모델과 데이터의 불확실성이다. 그러나 이론 표준화에 대한 많은 연구와 소프트웨어의 지속적인 발전으로 인해 방법론에 대한 불확실성은 감소하고 적용성은 점차 향상되고 있다⁶⁾. CCPS의 QRA 가이드라인, 네덜란드의 Purple Book⁸⁾은 방법론 측면에서 표준화된 대표적인 사례이며 SAFETI, Riskcurves는 분석의 편리성을 통해 QRA 활용도를 높이는 대표적인 소프트웨어 사례들이다⁹⁾. 하지만 적용하는 사고빈도 또는 확률 데이터로 인한 불확실성은 여전한 걸림돌이다. 이에 신뢰성 높은 빈도데이터 적용은 QRA 결과 도출에 매우 중요하다.

일반적으로 누출사고빈도를 결정하는 방법은 크게 2가지로 볼 수 있다. 하나는 Generic 또는 Plant specific 빈도데이터를 이용하는 것이다. 두 번째는 고장수목분석 등을 이용해 사고에 이르는 사건의 조합과 각 사건의 고장확률을 적용해 분석하는 것이다. 이 가운데 통상적으로 Generic 누출빈도를 이용하는 것이 보다 일반적이라고 볼 수 있다. 그 이유는 이미 대외적으로 인정받는 빈도값이 적용되는 경우 기술 쟁점 요소가 최소화되어 전체 평가 결과에 대한 신뢰성이 높아지는 장점이 있기 때문이다.

이와 관련하여 저명한 영국의 안전기관 HSE(Health and Safety Executive)는 일관성과 신뢰성있는 빈도분석을 위해 어떤 데이터가 가장 적합한지 연구한 바가 있다¹⁰⁾. 적합한 데이터로는 HCRD (Hydrocarbon Release Database)와 그에 기반하여 도출된 DNV 누출빈도함수(Leak frequency function), 그리고 이 DNV 함수를 통해 공개된 OGP (International association of Oil & Gas Producers)보고서라고 하였다. HCRD는 해상의 석유시설에서 탄화수소계 유체의 누출사고가 발생하는 경우 법적 규제¹¹⁾, 즉 RIDDOR(Reporting of Injuries, Diseases and Dangerous Occurrences Regulations)에 의해 관리되므로 그 신뢰성이 매우 높다고 볼 수 있다. 하지만 HCRD는 회원사만 접속 가능하고 DNV 누출빈도함수는 식 (1)과 같은 형태로 공개되었으나¹²⁾ 그 파라미터는 공개되지 않아 활용할 수 없다. 따라서 산업체나 연

구기관이 가장 많이 참고하는 사고빈도 데이터는 OGP 보고서¹³⁾가 된다. OGP 보고서는 16개의 설비에 대하여 범주별 누출빈도를 담고 있으며 이것은 DNV 함수에 기반하여 도출된 것이다. Table 1은 OGP 보고서에서 300 mm 직경의 수동밸브에 대한 누출빈도를 발췌하여 정리한 것으로써 분석자는 해당 누출범주별로 빈도값을 참조할 수 있다. 이렇듯 OGP 보고서는 그 기반 데이터의 신뢰성과 다양한 설비 및 누출 크기 범주별 빈도값을 담고 있어 해상 및 육상 설비에 대한 QRA 빈도분석시 가장 많이 활용되는 참고 자료중 하나이다.

$$F(d) = \alpha_1(1 + \alpha_2 D^{\alpha_3})d^{\alpha_4} + \alpha_5 \quad (1)$$

$F(d)$: 누출크기가 $d(mm)$ 보다 클 사고빈도(/yr)
 D : 설비크기(mm)
 $\alpha_{1,2,3,4}$: 설비유형별 분석 파라미터(-)
 α_5 : Rupture 빈도(/yr)

Table 1. Example of manual valve(300mm diameter) release frequency included in OGP report(No. 434-1)

Leak hole dia range(mm)	All release	Full release	Limited release	Zero release
1 to 3	8.40E-05	4.30E-05	3.20E-05	1.10E-06
3 to 10	4.30E-05	1.70E-05	1.80E-05	1.10E-06
10 to 50	2.30E-05	6.50E-06	1.10E-05	1.20E-06
50 to 150	6.30E-06	1.20E-06	3.50E-06	7.10E-07
>150	7.80E-06	1.70E-06	4.10E-06	5.40E-06

Full release
 ▶ Leak of normal operating pressure condition
 Limited release
 ▶ Leak of 0.01 barg more and under normal pressure condition(e.g. shaft seal)
 Zero release
 ▶ Leak of 0.01 barg or less pressure condition(e.g. maintenance)

그러나 보다 유연한 빈도분석이 필요한 경우 OGP 보고서도 활용에 한계가 있다. 예를 들어 300 mm 직경 밸브의 경우 누출크기(mm)범주를 1~10, 100~200, 200 이상과 같이 3개로 나누어 빈도를 분석할 수는 없다. 또한 OGP 보고서에 명시되지 않은 설비크기(예. 700 mm 밸브)인 경우 유사 크기의 설비 데이터를 활용해야 하므로 불완전성이 있다. 이외에도 최소이격거리설정 등 안전설계를 위해서는 빈도기준에 근거한 최대상정누출크기(maximum credible release size)¹⁴⁾를 설정해야 하는 데 이러한 데이터 형태로는 어렵다. 이렇듯 좀 더 다양한 조건(누출범주, 설비크기)에서 유연하고 신뢰도 있는 빈도분석을 위해서는 결국 함수형태의 데이터가 필요하나 HCRD에 접근할 수 없는 일반 전문가들에게는 어려운 상황이다.

이에 본 논문에서는 공개된 OGP 보고서에 포함된

데이터와 회귀분석을 이용하여 향후 보다 실용적으로 활용할 수 있는 누출빈도함수를 추정코자 하였다. 이를 통해 QRA와 안전설계시 좀 더 유연한 사고빈도분석에 기여코자한다.

2. 연구 방법

본 연구의 절차는 Fig. 1과 같이 크게 OGP 데이터 검토, 여러 함수형태별 비선형 회귀분석, 데이터와의 반복 비교를 통해 적합한 누출빈도함수를 도출하는 과정으로 이루어졌다. 먼저 범주별로 정리된 OGP 보고서의 사고빈도를 누적빈도로 전환한 후 설비유형별로 그 크기(D)에 따라 빈도 차이가 있는지 검토하였다. 만일 설비크기별로 그 빈도차이가 없으면 누출크기만을 하나의 예측(독립)변수로 하여 예측방정식을 보다 간단하게 만들고자 하였다. 설비크기별로 빈도 차이가 명확한 경우는 누출크기(d)와 설비크기 모두 예측변수들로 하여 분석하였다. 본 논문에서 분석 대상인 데이터는 OGP 보고서의 Full release 로서 실제적으로 QRA에 적용되는 누출모드이다.

OGP에 명시된 설비 종류는 총 16개으로써 각 분석 데이터 워크시트를 만들어 Minitab 통계 프로그램¹⁵⁾의 비선형 회귀분석 기능을 이용해 분석해보았다. 비선형 회귀분석을 위해서는 기대함수가 필요하며 일반적으로 사전지식을 바탕으로 함수를 선정한다¹⁶⁾. 본 연구에서는 먼저 DNV 함수형태를 기대함수로 하여 적합한 파라미터를 찾고 연결함수가 로그인 선형함수, Minitab에서 제공하는 26개의 일반 비선형 함수에서도 적합한 예측식이 있는지 분석하였다. 이는 좀 더 단순화된 예측식을 찾아 활용성을 높이고 향후 관련 연구에도 도

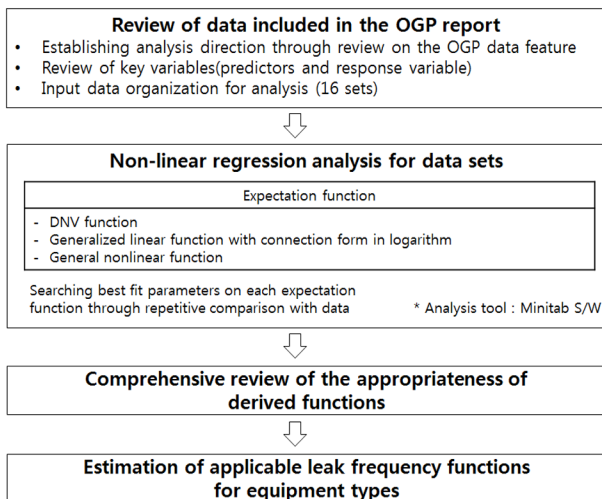


Fig. 1. Procedure of study for estimating leak frequency function.

움이 되고자함이다. 비선형 회귀분석에서 잔차 오차의 제곱합을 최소화하는 파라미터를 찾는 알고리즘은 가우스-뉴턴 방법을 적용했다. 여러 초기값과 시행착오를 통해 적합한 방정식을 찾고자 하였으며 정규확률도, 잔차 등과 통계적 지표를 검토해가면서 진행했다. 종합적으로 OGP 데이터와 예측값의 오차비율을 통해 최종 적합성을 고찰하고 설비별 빈도분석 예측방정식과 그 파라미터들을 정리하였다.

3. 연구 결과

3.1 예측변수와 기대함수

식 (1)과 같은 DNV 함수형태에서 예측변수는 2개이며 누출크기와 설비크기이다. OGP 데이터를 검토한 결과 플랜지와 수동밸브만이 누출크기와 설비크기에 따라 빈도 차이가 명확하였다. Fig. 2는 플랜지 크기별 누출크기에 대한 누적빈도 그래프로써 그 크기별 빈도가 다름을 확인할 수 있다. 따라서 이 경우는 식 (1)이 기대함수 형태가 된다. 이 외 14개의 설비는 설비크기에 따라 누출 빈도가 동일하여 예측변수는 누출크기만이 되며 이 경우 식 (1)에서 패터미터 α_2 가 0인 기대함수가 된다.

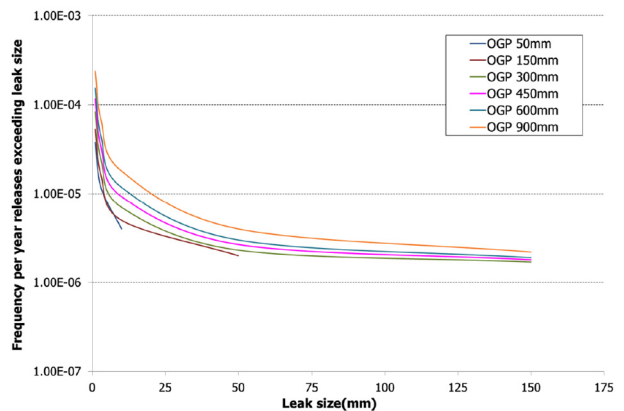


Fig. 2. Graph of leak frequency per flange diameter.

연결함수가 로그인 일반화 선형모형은 예측변수와 반응변수를 자연로그로 변환하여 분석하는 것으로써 다만 반응변수가 작아질 때 수렴값, 즉 DNV 함수모형에서 α_5 가 있다는 사실을 고려하여 β_4 가 추가된다. 따라서 최종적으로 기대함수 형태는 식 (2)과 같고 예측변수가 하나인, 즉 누출크기만인 경우 β_3 은 0이 된다.

$$F(d) = \exp(\beta_1 + \beta_2 \log d + \beta_3 \log D) + \beta_4 \quad (2)$$

$\beta_{1,2,3,4}$: 분석 파라미터 (-)

예측변수가 한 개인 경우, 일반 비선형모형의 기대함수로는 OGP 데이터의 누출빈도의 특성, 즉 최대값이 1이고 감소하면서 최소값이 0인 형태를 가지는 식 (3)이 유일하여 선정하였다. 여기서도 γ_2 은 위와 동일한 개념에서 고려된다.

$$F(d) = \frac{1}{(1 + \gamma_1 d)} + \gamma_2 \quad (3)$$

$\gamma_{1,2}$: 분석 파라미터 (-)

일반 비선형모형의 예측변수가 두 개인 경우는 Minitab에서 제공하는 Nernst 방정식 식 (4)를 적용하였다.

$$F(d) = \delta_1 - \delta_2 (\ln(d + \delta_3) - \ln(D)) \quad (4)$$

$\delta_{1,2,3}$: 분석 파라미터 (-)

예측변수별 적용할 기대함수를 모두 정리하면 Table 2와 같다.

Table 2. Applied expectation function and assigned number

Predictors	Expectation function(EF)	Num
d, D	$F(d) = \alpha_1 (1 + \alpha_2 D^{\alpha_3}) d^{\alpha_4} + \alpha_5$	#1-1
d	$F(d) = \alpha_1 d^{\alpha_4} + \alpha_5 \quad (\alpha_2 = 0)$	#1-2
d, D	$F(d) = \exp(\beta_1 + \beta_2 \log d + \beta_3 \log D) + \beta_4$	#2-1
d	$F(d) = \exp(\beta_1 + \beta_2 \log d) + \beta_4 \quad (\beta_3 = 0)$	#2-2
d	$F(d) = \frac{1}{(1 + \gamma_1 d)} + \gamma_2$	#3-1
d, D	$F(d) = \delta_1 - \delta_2 (\ln(d + \delta_3) - \ln(D))$	#3-2

3.2 분석 결과

설비별 적용 기대함수를 지정하여 비선형 회귀분석을 수행하였다. 이 분석은 다양한 시작값을 바탕으로 시행착오와 반복을 통해 결과를 얻는 과정이다. 본 절에서는 수동밸브에 대하여 도출한 빈도 예측방정식과 성능을 비교한 결과를 대표적으로 보였다.

수동밸브 데이터는 예측변수가 2개이므로 기대함수 #1-1를 적용하였다. 분석을 통해 가장 적합하게 도출된 방정식은 아래 식 (5)과 같다. 본 연구에서 적용한 데이터는 반복이 없는 경우이다. 따라서 순수오차를 구할 수 없어 적합성 결여 검정을 실행할 수 없다⁶⁾. 이 경우 잔차의 정규확률도, 잔차의 패턴을 통해 정규성을 확인해야 하며 Fig. 3과 Fig. 4는 수동밸브에 대한 예측식의 높은 적합성을 보여주고 있다.

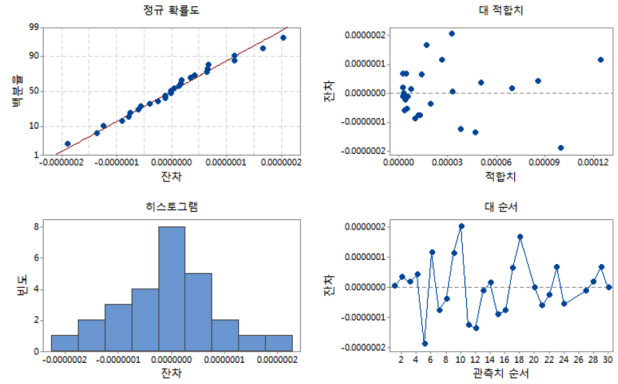


Fig. 3. Residual plot of nonlinear regression analysis for manual valve data using expectation function #1-1.

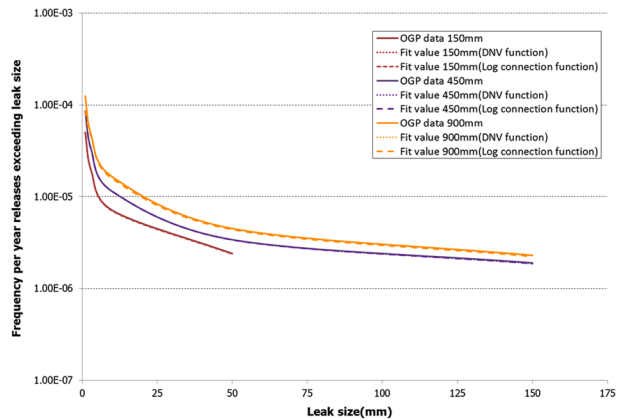


Fig. 4. A comparison of graph between OGP data and fitted value for manual valve size(150 mm, 450 mm, 900 mm).

$$F(d) = 1.45e-5(1 + 0.097D^{0.64})d^{0.91} + 9.78e-7 \quad (5)$$

기대함수 #2-1로 하여 최종적으로 도출한 방정식은 식 (6)과 같다. 이때 β_4 는 식 (5)에서 도출된 수렴값 $9.78e-7$ 이 적용된다.

$$F(d) = \exp(-12.43 - 0.91 \log d + 0.50 \log D) + 9.78e-7 \quad (6)$$

수동밸브 데이터에 일반 비선형인 기대함수 #3-2 적용한 결과에서는 적합한 방정식은 도출되었으나 예측값에 음수가 있어 사용하기에는 부적합하였고 플랜지도 동일한 결과를 보였다. 하지만 예측변수가 1개인 설비인 경우, 즉 기대함수가 #3-1인 경우에는 예측값에 음수가 나오는 경우가 없어 적용가능 하였다.

수동밸브에 대하여 최종적으로 도출한 누출빈도함수의 예측값과 OGP 데이터를 비교하였다. Table 3에서 보는 바와 같이 평균비율오차, 즉 MPE(Mean Percentage Error)는 각각 0.78%, 2.5%로써 매우 작다. 비율오차 1%는 실제값에 비해 예측값이 0.01배 차이가 있음을

Table 3. A comparison between OGP data and fitted value for manual valve

Leak size (mm)	Diameter (mm)	Data	Function #1-1		Function #2-1	
			Fit	PE(%)	Fit	PE(%)
1	50	3.26E-05	3.27E-05	0.17	2.92E-05	10.31
1	150	5.01E-05	5.02E-05	0.17	4.99E-05	0.34
1	300	6.94E-05	6.96E-05	0.24	7.02E-05	1.16
1	450	8.54E-05	8.56E-05	0.23	8.58E-05	0.43
1	600	9.93E-05	9.98E-05	0.48	9.89E-05	0.42
1	900	1.25E-04	1.25E-04	0.20	1.21E-04	2.90
3	50	1.26E-05	1.26E-05	0.27	1.14E-05	9.70
3	150	1.91E-05	1.91E-05	0.08	1.90E-05	0.57
3	300	2.64E-05	2.62E-05	0.69	2.65E-05	0.20
3	450	3.24E-05	3.21E-05	0.88	3.22E-05	0.69
3	600	3.73E-05	3.73E-05	0.09	3.70E-05	0.79
3	900	4.65E-05	4.65E-05	0.05	4.51E-05	3.01
10	50	4.90E-06	4.88E-06	0.50	4.45E-06	9.08
10	150	7.10E-06	7.03E-06	0.96	7.00E-06	1.40
10	300	9.40E-06	9.42E-06	0.18	9.49E-06	1.01
10	450	1.14E-05	1.14E-05	0.10	1.14E-05	0.08
10	600	1.33E-05	1.31E-05	1.26	1.30E-05	2.09
10	900	1.65E-05	1.62E-05	1.78	1.57E-05	4.67
50	150	2.40E-06	2.38E-06	0.92	2.37E-06	1.24
50	300	2.90E-06	2.93E-06	1.00	2.95E-06	1.62
50	450	3.40E-06	3.39E-06	0.44	3.39E-06	0.31
50	600	3.90E-06	3.79E-06	2.87	3.76E-06	3.53
50	900	4.50E-06	4.50E-06	0.03	4.39E-06	2.48
150	300	1.70E-06	1.70E-06	0.22	1.70E-06	0.15
150	450	1.90E-06	1.86E-06	1.90	1.87E-06	1.82
150	600	2.10E-06	2.01E-06	4.17	2.00E-06	4.64
150	900	2.30E-06	2.27E-06	1.14	2.23E-06	2.92
Mean				0.78		2.50

의미한다. 예를 들어 실제값이 1.00E-4라면 예측값은 1.01E-4 또는 0.99E-4 정도이다. Fig. 4를 통해 수동밸브에 대한 빈도 예측값과 실제값의 차이가 없음을 대표적인 3개의 밸브크기에서 확인할 수 있다.

이러한 분석 과정을 15개의 설비들에 대해 적용하고 얻은 각 기대함수 형태별 파라미터와 MPE를 Table 4에 정리하였다. 밑줄로 표시된 MPE는 각 설비별로 가장 적은 비율오차를 표시한 것이다.

4. 토론

설비 유형별 MPE 또는 전체 평균값을 참고할 때 DNV 함수형태와 연결함수가 로그인 함수형태 모두 매우 적합도가 높고 그 차이도 없음을 알 수 있다. 따라서 어떤 설비 유형이든 두 함수 모두 누출빈도분석에 적용가능하다. 여기서 7개 설비유형(용기, 왕복동식 펌프 및 압축기, 열교환기 쉘과 튜브, aircool 형식의 열교환기, 필터)은 로그변환 예측함수가 기존 DNV 함수형태보다 동등하거나 더 낮은 MPE를 보이고 있다. 이러한 점은 향후 자체 데이터나 또 다른 Generic 데이터를 이용해 빈도함수를 구하는 연구에 참고가 될 수 있다. 일반 비선형 함수형태인 경우 원심식 압축기를 제외한 설비는 50%이하의 비율오차를 가지고 있어 10^{-4} 이하의 작은 수 영역대에서는 적용 가능하다고 판단한다. 그러나 비율오차가 10% 이하인 왕복동식 압

Table 4. Estimated parameter and mean percentage error for each expectation function per equipment type

Function	$F(d) = \alpha_1(1 + \alpha_2 D^{\alpha_3})d^{\alpha_4} + \alpha_5$						$F(d) = \exp(\beta_1 + \beta_2 \log d + \beta_3 \log D) + \beta_4$					$F(d) = \frac{1}{(1 + \gamma_1 d)} + \gamma_2$			
	Equipment type	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	MPE	β_1	β_2	β_3	β_4	MPE	γ_1	γ_2	MPE
Steel pipe		3.42e-5	0	0	-1.06	0	<u>9.74%</u>	-10.28	-1.06	0	0	9.76%	30025.3	0	19.58%
Flange		3.13e-5	0.001	1.29	-1.16	1.47e-6	<u>0.80%</u>	-14.48	-1.16	0.90	1.47e-6	9.43%	N/A		
Manual valve		1.45e-5	0.097	0.64	-0.91	9.78e-7	<u>0.78%</u>	-12.43	-0.91	0.50	9.78e-7	2.50%	N/A		
Actuated valve		2.94e-4	0	0	-1.14	4.91e-6	<u>4.75%</u>	-8.13	-1.14	0	4.91e-6	4.77%	3453.6	4.91e-6	18.87%
Process vessel		7.41e-4	0	0	-0.69	1.00e-9	0.57%	-7.20	-0.69	0	1.00e-9	<u>0.48%</u>	1281.8	1.00e-9	45.44%
Centrifugal pump		4.74e-3	0	0	-1.15	1.60e-6	<u>2.95%</u>	-5.35	-1.15	0	1.60e-6	2.96%	213.7	1.60e-9	49.80%
Reciprocating pump		4.53e-3	0	0	-0.57	2.90e-6	<u>0.12%</u>	-5.40	-0.56	0	2.90e-6	<u>0.12%</u>	203.5	2.9e-6	53.47%
Centrifugal compressor		4.22e-3	0	0	-1.49	5.00e-7	<u>4.41%</u>	-5.47	-1.49	0	5.00e-7	4.45%	247.8	5.00e-7	356.8%
Reciprocating compressor		3.52e-2	0	0	-1.04	2.88e-4	0.40%	-3.35	-1.04	0	2.88e-4	<u>0.31%</u>	27.7	2.88e-6	8.78%
Heat exchanger (h/c in shell)		1.78e-3	0	0	-1.02	1.80e-6	1.91%	-6.33	-1.02	0	1.80e-6	<u>1.84%</u>	560.9	1.80e-6	4.82%
Heat exchanger (h/c in tube)		1.46e-3	0	0	-0.75	0	1.56%	-6.53	-0.75	0	0	<u>0.49%</u>	660.6	0	38.99%
Heat exchanger (plate)		7.60e-3	0	0	-0.65	3.1e-6	<u>2.24%</u>	-4.88	-0.65	0	3.1e-6	2.28%	122.8	3.1e-6	48.24%
Heat exchanger (air cooled)		1.84e-3	0	0	-0.72	0	1.78%	-6.30	-0.72	0	0	<u>0.60%</u>	519.0	0	42.31%
Filter		2.10e-3	0	0	-0.92	0	3.08%	-6.19	-0.92	0	0	<u>1.20%</u>	479.9	0	15.80%
Pig_trap		3.30e-3	0	0	-1.10	1.5e-6	<u>1.90%</u>	-5.72	-1.09	0	1.5e-6	2.52%	307.1	1.5e-6	28.24%
Instrument		2.73e-4	0	0	-1.00	0	<u>3.78%</u>	-8.21	-1.00	0	0	3.90%	3656.9	0	3.84%
Average							2.55					2.98			52.50

Table 5. Ratio between OGP report and DNV study leak frequency

Source	DNV study 2005		OGP report 2010		Ratio (OGP2010/DNV2005)	
	F(1)	F(50)	F(1)	F(50)	F(1)	F(50)
Steel pipes (50 mm)	5.7E-05	0.0E+00	8.0E-05	0.0E+00	1.4	N/A
Steel pipes (150 mm)	2.0E-05	7.7E-08	3.8E-05	6.0E-07	1.9	7.8
Steel pipes (450 mm.)	1.1E-05	4.2E-08	3.3E-05	5.3E-07	3.0	12.6
Flange (50 mm)	3.2E-05	N/A	3.8E-05	N/A	1.2	N/A
Flange (150 mm)	4.3E-05	3.6E-07	5.3E-05	2.0E-06	1.2	5.6
Flange (450 mm)	1.2E-04	1.1E-06	1.2E-04	2.7E-06	1.0	2.4
Manual valves (50 mm)	1.4E-05	N/A	3.3E-05	N/A	2.3	N/A
Manual valves (150 mm)	4.8E-05	4.9E-07	5.0E-05	2.4E-06	1.0	4.9
Manual valves (450 mm)	2.2E-04	2.3E-06	8.5E-05	3.4E-06	0.4	1.5
Actuated valves (150 mm)	2.6E-04	1.9E-06	3.1E-04	8.6E-06	1.2	4.5
Instrument (12.5 mm)	2.3E-04	N/A	2.7E-04	N/A	1.2	N/A
Process vessel	5.0E-04	1.1E-04	7.4E-04	5.1E-05	1.5	0.5
Centrifugal pump	1.8E-03	2.4E-05	4.7E-03	5.4E-05	2.6	2.3
Reciprocating pump	3.7E-03	5.2E-04	4.5E-03	5.0E-04	1.2	1.0
Centrifugal compressor	2.0E-03	2.0E-06	4.2E-03	1.3E-05	2.1	6.5
Reciprocating compressor	2.7E-02	1.1E-05	3.5E-02	8.8E-04	1.3	80.0
Heat exchanger (h/c in shell)	1.4E-03	1.3E-04	1.8E-03	3.5E-05	1.3	0.3
Heat exchanger (h/c in tube)	1.0E-03	4.9E-05	1.5E-03	7.6E-05	1.5	1.6
Heat exchanger (plate)	6.0E-03	3.6E-04	7.6E-03	6.3E-04	1.3	1.8
Heat exchanger (aircooled)	1.2E-03	6.9E-05	1.8E-03	1.1E-04	1.5	1.6
Filter	8.9E-04	6.4E-06	2.1E-03	5.5E-05	2.3	8.6
Average					1.5	8.4

축기, 열교환기 shell, 계측기에 대한 예측함수가 보다 적합하다.

본 연구는 2010년에 발간된 OGP 보고서를 기반으로 하고 있으며 그 이후 더 이상 갱신된 OGP 보고서는 없었다. 따라서 2010년 이전의 관련 자료와의 비교를 통해 Generic 빈도의 추세에 관하여 고찰해보았다. Table 5는 2005년에 HCRD를 기초로 최초로 수행되었

던 DNV 함수추정 논문¹²⁾에 수록된 값과 2010년 OGP 데이터를 비교를 한 것이다. 2005년에 비해 2010년의 F(1)값은 평균 1.5배, F(50)인 경우에는 평균 8.5배정도 높아졌음을 알 수 있다. 여기서 데이터가 누적된 상황에서 빈도가 높아진 점은 상기할 필요가 있다. 따라서 향후 변동이 심한 OGP 갱신 보고서가 공개된다면 그 증가 또는 감소 비율을 동일하게 본 논문의 결과에 적용하거나 재분석이 필요할 것으로 판단한다.

또한 OGP 보고서에 명시된 누출크기 최대값은 150 mm 이므로 탐색을 위한 예측변수 데이터도 그 값이 최대가 된다. 이에 d 가 150 mm보다 매우 큰 경우 $F(d)$ 값에 대한 불확실성이 제기된다. 특히 최소 수렴 값, 즉 파열빈도 값인 $\alpha_5, \beta_4, \gamma_2$ 가 0으로 추정된 4개의 설비, 즉 배관, 열교환기 튜브, 공기식 냉각 열교환기, 필터의 빈도 예측식이 해당된다. 그러나 이것은 실제 HCRD 데이터에도 해당 설비에 대한 파열사고 기록이 없어 0일 가능성이 높다. 이는 2005년 DNV가 HCRD를 이용한 누출빈도 추정식 논문¹²⁾에서 유일하게 밝힌 배관 파열 파라미터 α_5 가 0인 결과와도 부합한다. 하지만 OGP 보고서의 불충분성일 가능성도 있으므로 향후 보다 다양한 범주의 데이터를 담은 OGP 보고서가 공개된다면 재검토가 필요할 것으로 사료된다.

5. 결론

위험물질 공정산업에서 QRA는 국가와 기업에게 중요한 안전관리도구로써 그 활용이 점차 증가하고 있다. 따라서 신뢰성있는 데이터를 기반으로 한 유연한 누출 빈도분석은 QRA와 안전기술 발전에 매우 중요한 요소이다. 이에 본 연구에서는 세계적으로 가장 신뢰성과 활용도가 높은 OGP 데이터와 비선형 회귀분석을 이용하여 누출빈도 함수($F(d)$)를 도출하였다. 여기서 $F(d)$ 란 분석자가 설정한 누출크기 d 보다 큰 누출이 발생할 사고의 빈도를 의미한다. 따라서 분석자는 누출크기 범주 d_1 에서 d_2 까지 발생빈도를 $F(d_1) - F(d_2)$ 로 쉽게 계산하여 QRA에 활용할 수 있다.

비선형 회귀분석을 위한 기대함수형태로는 DNV 함수, 연결함수가 로그인 함수, 일반 비선형 함수로 하여 OGP 보고서에 포함된 16개 모든 설비에 적용하였다. 분석 결과 DNV 함수와 연결함수가 로그인 함수형태에서 가장 적합도 높은 파라미터를 찾았고 그 함수에서의 예측값과 원데이터와의 평균비율오차는 3%이내로써 매우 작았다. 결론적으로 본 연구를 통해 도출한 각 설비별 두형태의 누출빈도함수는 기존 OGP 보고서를 대체하는 수식형태의 Generic 데이터로서 타당함을 확인하

였다. 일반(기타) 비선형 기대함수로는 상대적으로 적합도가 낮았다. 하지만 왕복동식 압축기, 열교환기 shell, 계측설비는 평균비율오차가 10% 이하로써 작아 적용에 큰 문제가 없을 것으로 보인다. 이러한 다양한 형태의 누출빈도함수는 향후 유사 연구에 좋은 참고가 될 것으로 판단한다.

궁극적으로 이 연구 결과는 향후 유연하고 일관성 있는 누출빈도분석과 안전설계에 실용적으로 적용됨으로써 QRA 및 안전기술발전에 기여할 것으로 사료된다.

References

- 1) R. Pitblado and R. Turney, "Risk Assessment in the Process Industries, 2nd ed", Institution of Chemical Engineer, Rugby, United Kingdom, 2001.
- 2) C. Kirchsteiger, "On the Use of Probabilistic and Deterministic Methods in Risk Analysis", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 12, Issue 5, pp. 399-419, 1999.
- 3) I. K. Yoon, D. Y. Lim, H. J. Jung, J. M. Seo and S. K. Oh, "A Supportive Framework for Collaborative Implementation of Quantitative Risk Analysis in the Hazardous Process Industry and Application to Natural Gas Plant", Journal of Chemical Engineering of Japan, Vol. 52, No. 4, pp. 349-361, 2019.
- 4) Korea Environmental Policy Bulletin, "Act on Registration and Evaluation, No. 40 etc. of Chemical Substances, Vol. XIII issue 2", Ministry of Environment, 2015.
- 5) W. S. Choi and J. B. Back, "Risk Analysis of Off-site Risk Assessment using Vulnerability by Environmental Medium", J. Korean Soc. Saf., Vol. 33, No. 5, pp. 150-156, 2018.
- 6) American Institute of Chemical Engineers, "Guideline for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, 2nd ed", American Institute of Chemical Engineers, 2000.
- 7) I. K. Yoon, "A Study on the Efficient Framework and Methodology for Quantifying the Risk in the Process Industry" Seoul National University, 2012.
- 8) P. A. M. U. De Haag and B. J. M. Ale, "Guideline for Quantitative Risk Assessment: Purple book", VROM, 2005.
- 9) S. Lewis, "An Overview of Leading Software Tools for QRA", Proceedings of the 7th Professional Development Conference & Exhibition March 18-22, Kingdom of Bahrain, 2005.
- 10) J. Hare, R. Goff, B. Graham and A. McGillivray, "Offshore Accident and Failure Frequency Data Sources - Review and Recommendations", Health and Safety Executive, 2017.
- 11) Parliament of the United Kingdom, The Reporting of Injuries, Diseases and Dangerous Occurrences Regulations, 2013.
- 12) J. Spouge, "New Generic Leak Frequencies for Process Equipment", Process Safety Progress, Vol. 24, No. 4, 2005.
- 13) International Association of Oil & Gas Producers, "Process Release Frequencies", International Association of Oil & Gas Producers, 2010.
- 14) I. K. Yoon, S. K. Dan, H. J. Jung, J. M. Seo and S. K. Hong, "A Study on Decision of Maximum Credible Hole Size for Determining the Minimum Safety Distance between Facilities", Spring Conference of the Korean Society of Safety, 2018.
- 15) Minitab, Minitab ver 18.1 Software, 2017.
- 16) Minitab manual, <https://support.minitab.com/ko-kr/minitab/18/help-and-how-to/modelling-statistics/regression/how-to/nonlinear-regression>