가스설비의 신뢰도데이터 수집방법에 관한 연구

이광원[†] · 윤익근[*] · 한상태[**] · 오신규[*] · 김태훈
호서대학교 안전보건학과 · [*]한국가스공사 연구개발원 · [**]호서대학교 정보통계학과
(2007. 10. 24. 접수 / 2008. 4. 10. 채택)

A Study on the Collecting Method of Reliability Database for Gas Facilities

Kwang-Won Rhie[†] · Ik-Keun Yoon[*] · Sang-Tae Han[**] · Sin-Kyu Oh[*] · Tae-Hun Kim
Department of Safety and Health Engineering, Hoseo University
[*]Korea Gas Corporation R&D Division
[**]Department Informational Statistics, Hoseo University
(Received October 24, 2007 / Accepted April 10, 2008)

Abstract : The safety assessment for facility industry is now being periodically performed. For the purpose of scientific safety management, QRA(Quantitative Risk Assessment) is also being performed, and reliability data of the facilities is essential to perform the assessment. Generally, the existing safety assessment is performed by using the values announced in other industry processes, which result in the drop of reliability. In order to solve this problem, there is an urgent need to establish reliability database for the facilities. The most appropriate method is to perform a direct reliability analysis towards the facilities undergoing safety assessment. In this study, in compliance with the assessment method and procedure of OREDA-2002 handbook, the facility reliability data are collected, which include the calendar time and operational time in terms of different facility items, the number of failures in terms of different failure mode, the mean, standard deviation, lower limit and upper limit of failure rate, and the failure rate. And the data process method for this special occasion is also proposed when the number of failure is 0.
Key Words : reliability, database, quantitative risk assessment, failure

1. 서 론

최근 설비산업에서의 안전성 평가는 이제 주기적으로 수행되고 있으며, 보다 과학적이고 계량적인 안전관리를 위하여 정량적 위험성 평가(QRA : Quantitative Risk Assessment)를 수행하고 있다.

이와 더불어 제일 먼저 필요한 것은 설비에 대한 신뢰도 자료이다. 일반적으로 QRA에 필요한 신뢰도 데이터는 다른 장치 산업에서 공포한 값을 적용하지만 이런 경우 도출된 위험도에 대한 신뢰성이 떨어지게 되므로 가장 합리적인 것은 안전성 평가를 수행하는 설비들에 대한 신뢰도 분석을 직접 수행하여 적용하는 것이 타당하다.

본 연구에서는 국내 가스설비의 신뢰도 데이터에 대해 OREDA-2002 핸드북의 추정방법과 절차를 준용하여 추정하였다. 구체적으로 각 부품별(item) 고장률(failure rate)에 대해 관찰시간(calendar time)과 운전시간(operational time) 각각에 대해 고장모드별로 고장 건수(no of failures), 고장률에 대한 평균고장률(mean), 표준편차(SD), 신뢰하한(lower), 신뢰상한(upper), 고장률(고장횟수/관찰시간)들을 추정하였고, 보수시간(repair hours)에 대해 최소값(min), 평균(mean), 최대값(max) 등을 통계 소프트웨어 SAS(version 9.1)를 이용하여 추정하였다. 또한 고장수가 0인 경우의 처리방법은 OREDA-2002의 추정방법이 불명확하여 이때의 처리 방법 역시 제시하였다.

2. 신뢰성과 관련된 기본 개념들

설비들에 대한 보수 및 고장이력, 운전이력이 수집되고 분석되면 이로부터 신뢰도 자료를 계산할 수 있다. 이때 신뢰도와 관련된 기본 개념은 다음과 같다.

T를 부품이나 시스템의 수명 또는 고장시간(life length, failure time)을 나타내는 연속 확률 변수(con-

[†] To whom correspondence should be addressed.
kwrhie@hoseo.edu

tinuous random variable)라 하고, 수명의 분포 함수(life distribution)를 $F(t)=Pr[T\leq t]$이라 하자. 여기서 $t\leq 0$일 때 $F(t)=0$이며, F(t)의 확률밀도함수를 f(t)로 표시하기로 하자. 일반적으로 고려되는 신뢰성의 기본 개념은 다음과 같다. 수명이 사용 횟수나 사이클 등의 이산 확률 변수에 의하여 측정되는 것도 가능하나 보통 수명이 연속 확률 변수인 경우만을 고려한다.

2.1. 신뢰도 함수(Reliability Function)

관찰하는 부품이 관찰시점 t까지 정상일 확률을 나타내며 이는 부품의 수명 T가 관찰시점 t보다 클 확률로서 다음과 같이 표현된다.

$$R(t)=P_r[T>t]=1-F(t)$$

2.2. (순간)고장률((Instantaneous) Failure Rate, Hazard Rate)

고장률을 다음과 같이 정의된다.

$$\lambda(t)=\frac{f(t)}{R(t)}$$

[해석]

$$\begin{aligned}\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Pr[t<T\leq t+\Delta t|T>t]}{\Delta t}&=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Pr[t<T\leq t+\Delta t]}{\Pr[T>t]\cdot\Delta t}\\&=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{R(t)-R(t+\Delta t)}{R(t)\cdot\Delta t}\\&=\frac{1}{R(t)}\lim_{\Delta t\to 0}\frac{R(t)-R(t+\Delta t)}{\Delta t}\\&=\frac{1}{R(t)}(-R'(t))=\frac{f(t)}{R(t)}\\&=\lambda(t)\end{aligned}$$

$\lambda(t)$의 유도 과정으로부터 고장률은 다음과 같이 해석될 수 있다. 부품이 시점 t에서 아직 가동되고 있다고 할 때 그 시점 바로 직후에 고장이 날 수 있는 단위는 시간당 조건부 평균 고장 비율이라고 볼 수 있다. 고장률은 확률이 아님에 주의하기 바란다. 그러나 만일 $\lambda(t)\cdot\Delta t$를 고려한다면

$$\lambda(t)\Delta t\approx P_r[t<T\leq t+\Delta t|T>t]=\frac{P_r[t<T\leq t+\Delta t]}{P_r(T>t)}$$

따라서 $\lambda(t)\cdot\Delta t$는 시점 t에 가동되고 있는 시스템이 그 직후의 기간 Δt 동안에 고장이 날 수 있는 조건부 확률로 해석된다.

고장률 함수 $\lambda(t)$가 유효하기 위해서는 다음 조건을 만족해야 한다.

① $\lambda(t)\geq 0,\ t\geq 0.$

② $\int_0^\infty \lambda(t)\,dt=\infty$

고장률은 부품의 신뢰도특성을 표현하여 주는 대표적 수치이다. 고장률 함수는 때론 '위험률' 또는 '사망률'로도 명명된다. 고장률 함수가 useful life 단계 동안 일정하다고 가정하면, 이것은 부품이 이 단계 동안에 악화되지 않는다는 것을 의미한다. 보통 설비산업에 사용되어지고 있는 부품들의 고장률은 초기고장, 우발고장, 마모고장의 3가지 특성을 보이며 욕조곡선으로 보통 표현된다. 일반적인 설비산업에서 부품들의 신뢰성이 최상으로 유지될 수 있도록 관리하고 있기 때문에 많은 신뢰도데이터에서는 소위 초기고장과 마모고장을 무시하고 우발고장에 대하여만 관찰한다. OREDA 데이터 역시 우발고장에 대하여만 관찰하였으며, 이때는 $\lambda(t)=\lambda$라 가정을 하여도 무방하다. 즉 통계적으로 지수분포를 가정한 것이 된다[1].

이 때 어떤 통계적 시험도 일정한 고장률 가정을 증명하기 위해 수행되지 않았으며 데이터가 욕조곡선의 "바닥(bottom)"부로부터 나온다고 가정되기 때문에, 제시된 고장률 추정은 장치의 총 수명주기에서 최소값을 나타낸다.

일정한 고장률을 가정한다는 의미는 하나의 부품이 그것이 가동되는 한 오래 동안 "새것만큼 좋게" 될 것이라고 가정된다는 의미이다. 즉, 모든 고장들은 완전히 우연에 의한 고장들이며, 부품들은 연령에 독립적이다.

2.3. 평균수명

평균 수명은 MTTF(mean time to failure : 평균 고장 시간, 즉 비수리 부품의 고장날 때까지의 평균 시간)이나 MTBF(mean time between failure : 평균 고장 간격, 즉 수리 부품의 고장간 평균 시간) 등으로 약칭된다. KS A 3004를 인용하면 MTTF는 '비수리 부품의 고장 수명이 평균값', MTBF는 '수리계가 서로 이웃하는 고장간 시간 동작의 평균값'으로 정의되어 있다. 평균 수명은 T에 대한 기대값으로 표시되면 특히 T는 음의 값을 취하지 않는 확률변수로서 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\begin{aligned}\overline{T}=E(T)&=\int_0^\infty tf(t)\,dt\\&=\int_0^\infty t(-R'(t))\,dt\\&=-\lim_{M\to\infty}tR(t)|_0^M+\int_0^\infty R(t)\,dt\\&=\int_0^\infty R(t)\,dt.\end{aligned}$$

T가 시스템의 수명을 나타내는 확률 변수일 때에는 다음의 식을 이용하면 수명의 기대치인 E(T)를 간단하게 구할 수 있는 경우가 많다. 즉

$$E(T) = \int_0^{\infty} R(t)dt$$

만약에 고장률이 일정하다면(즉 부품의 수명이 지수분포를 나타낸다면) MTTF는 다음과 같이 간략하게 표현되어진다. 고장에 대한 평균 시간, MTTF는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$E(T) = MTTF = \frac{1}{\lambda}$$

2.4. 평균 잔여 수명

평균 잔여 수명은 주어진 사용시간(age)의 시스템이 고장날 때까지의 기간에 대한 평균값으로 다음과 같이 정의된다. 우선 F(x | t)를 T〉 t가 주어졌을 때의 (T-t)의 조건부분포함수 이라고 하면, 이는 다음과 같이 표현 될 수 있다.

$F(x|t) = P[T - t \leq x | T \geq t] = 1 - R(t+x)/R(t)$
또는 $R(x|t) = R(t+x)/R(t)$

따라서 t에 대한 평균잔여수명은

$$\begin{aligned} m(t) &= E(T - t | T > t) \\ &= \int_0^{\infty} x \cdot f(x|t) \cdot dx \\ &= \int_0^{\infty} R(x|t)dx \\ &= \int_0^{\infty} \frac{R(x+t)}{R(t)} dx \end{aligned}$$

평균 잔여 수명의 개념은 고장률과는 상반되는 것으로 만일 어느 부품이나 시스템이 사용 기간이 많아짐에 따라 성능이 저하된다면 고장률은 증가하는 경향을 보이는 반면 평균 잔여 수명은 감소하는 경향을 보이게 된다.

실질적으로 현장에서 얻는 신뢰도 데이터로는 다음과 같이 신뢰도 수치를 계산한다.

- 시간당 고장빈도(확률)
  - 같은 유형의 설비종류에 대해 고장횟수의 합을 운전시간의 합으로 나눔으로서 계산
  - 시간당 고장빈도 = 전체고장횟수 / 전체운전시간
- 작동횟수당 고장빈도(확률)
  - 같은 유형의 설비종류에 대해 고장횟수의 합을 작동횟수의 합으로 나눔으로서 계산
  - 작동횟수당 고장빈도 = 전체고장횟수 / 전체작동횟수
- 비가동도
  - 설비가 보수 및 고장에 의해 out of service 되어 있던 시간을 전체 설비필요시간으로 나눔으로서 계산
  - 비가동도 = 전체 out of service 시간 / 필요시간

3. 균일 표본(Homogeneous sample)에 대한 추정량과 신뢰구간

동일한 운전 및 환경 조건하에서 작동된 동일한 부품들로부터의 고장 데이터를 갖고 있을 때, 우리는 소위 균일 표본을 갖는다고 한다. 이 경우에 있어서 고장률 λ를 추정하기 위해서는 오직 관찰된 고장수 n과 총 관찰시간 τ(tau)이다.

λ의 추정치는 다음과 같이 나타낸다.

$$\hat{\lambda} = \frac{Nmber\,of\,failures}{Aggregated\,time\,in\,service} = \frac{n}{\tau}$$

여기서 총 관찰시간 τ는 관찰시간 또는 운전시간으로 측정될 수 있다.

균일 표본에 대한 접근방식은 다음 상황에서 타당하다.

- 동일한 고장률 λ를 갖는 부품의 구체화된 고장횟수(failure times)가 이용 가능하다.
- 데이터(여러 가지 고장들)는 특정 시간 간격 동안 한 가지 부품에 대해 이용 가능하며, 고장률 λ는 이 기간 동안 일정하다.
- 위 두 가지 상황들의 조합, 즉 각 부품이 몇 가지 고장을 갖는 여러 부품들에 대해서 적용될 수 있다.

3.1. 균일 표본에서의 분석절차

3.1.1. 고장건수(r)가 0 보다 큰 경우

① 고장률을 추정한다. 다음의 식에 의해 구한다.

$$\hat{\lambda} = \frac{Nmber\,of\,failures}{Aggregated\,time\,in\,service} = \frac{n}{\tau}$$

② 고장률에 대한 평균은 고장률 $\hat{\lambda}$이 $\frac{1}{2\tau}X^2_{(2n)}$을 따

른다는 통계분포 이론에 근거하여 $E(\hat{\lambda}) = E\left(\frac{1}{2\tau}X^2_{(2n)}\right) = \frac{n}{\tau} = \lambda$가 된다. 왜냐하면 카이제곱 분포의 기대값은 자유도이고, 분산은 2*자유도이기 때문이다.

③ 고장률에 대한 분산은 $V(\hat{\lambda}) = V\left(\frac{1}{2\tau}X^2_{(2n)}\right) = \frac{n}{\tau^2}$이다. 따라서 $SD(\hat{\lambda}) = \sqrt{\frac{n}{\tau^2}}$로 추정된다.

④ 고장률에 대한 90% 신뢰구간은 $\Pr(\lambda_L \le \lambda < \lambda_U) = 90\%$에서 총 관찰시간 τ동안에 n개의 고장일 때 다음과 같이 구해진다.

$$\left(\frac{1}{2\tau}Z_{0.95,2n}, \frac{1}{2\tau}Z_{0.05,2n}\right)$$

여기서, $Z_{0.95,v}$와 $Z_{0.05,v}$는 자유도 2n을 갖는 χ^2-분포의 각각 상위 95%와 5% 백분위수를 각각 의미한다.

⑤ 수리시간에 대한 최소값, 평균, 최대값은 다음과 같다. 각 부품에서 고장모드별 수리시간들을 $T_1, T_2, \ldots, T_n$이라 할 때,

최소값 = minimun$\{T_i\}$,
평균 = $(T_1 + T_2 + \ldots. + Tn)/n$,
최대값 = maximun$\{T_i\}$ $(i = 1, 2, 3, \ldots, n)$

으로 계산된다.

단, 자료를 분석하는데 있어 수리시간이 종종 입력되지 않은 경우가 존재하며 이런 경우에는 수리시간이 명기되어져 있는 자료만으로 최소값과 평균, 최대값을 산출한다.

3.1.2. 부품고장이 관찰 되지 않은 경우(즉 고장건수 r=0인 경우) : 고장난 것이 하나도 없을 때

제품의 신뢰도가 많이 향상되어 비록 긴 기간 동안 관찰하더라도 고장을 관찰 할 수 없는 경우가 많이 존재 하게 된다. $[0, t_0]$기간 동안 고장 난 부품이 없으면, 고장률이나 평균 수명을 정확하게 추정하기는 어렵다. 그러나 다음과 같은 방법으로 신뢰수준 100(1-α)%에서 고장률은 λ_U보다 작다든가 또는 평균 수명은 θ_L보다 크다라고 추정하는 것은 다음과 같은 방법에 의하여 가능하다.

총 시험 시간 T_0중 발생하는 고장 횟수는 $P(\lambda \cdot T_0)$에 비례한다.

여기에 λ는 단위 시간당의 평균 고장 횟수이며 또한 고장률을 나타낸다. 따라서 다음의 과정을 통해 고장률에 대해 신뢰구간의 상한을 계산할 수 있다.

즉,

$F(T_0) = 1 - \exp(-\lambda_U T_0) = 1 - \alpha$(신뢰수준 100(1-α)%)

$$\lambda_U T_0 = -\ln\alpha$$

$$\lambda_U = -\frac{\ln\alpha}{T_0}$$ 이 된다.

만약, 고장률이 상수인 지수 분포인 경우에 있어서 평균 수명의 하한값은 고장률의 역수이므로 다음의 식이 성립된다.

$$\theta_U = -\frac{T_0}{\ln\alpha}$$

따라서 신뢰 수준 100(1-α)%에서 평균 수명 추정값의 하한 Θ_L은 다음과 같다.

신뢰 수준 60% $\quad \hat{\theta_L} = \frac{T_0}{0.917} = \frac{nt_0}{0.917}$

신뢰 수준 90% $\quad \hat{\theta_L} = \frac{T_0}{2.3} = \frac{nt_0}{2.3}$

신뢰 수준 95% $\quad \hat{\theta_L} = \frac{T_0}{2.99} = \frac{nt_0}{2.99}$

이외에도 Bartholomew(1957)는 다음과 같은 추정값을 제안하였다.

$$\hat{\theta_L} = n \cdot t_0$$

만약에 고장건수가 0인 경우 실제 발생한 고장률은 균일 표본의 경우와 같이 계산하여 고장률이 0이 되고, 고장률 상한은 $\lambda_U = -\ln\alpha/T_0$에 의해 계산하였다. 그러나 이 경우에 있어 신뢰하한과 평균, 표준편차는 계산할 수 없다. 하나의 대안으로는 신뢰하한을 0으로 가정할 수도 있을 것이다.

4. 다중 표본(Multi-Sample)에 대한 추정량과 신뢰구간

많은 경우에 있어 균일 데이터 샘플을 갖지 못하는 경우가 발생한다. 예를 들어 같은 부품이라 할지라도 다른 환경, 다른 보수정책에 의해 관리되는 경우이다. 이때에는 "평균" 고장률의 추정을 통해 결합된 추정량과 신뢰구간을 구해야 한다. 이러한 상황을 우리는 다중 표본이라 하는데, 여러 개의 균일 표본을 결합하여 다중 표본의 문제를 해결하게

된다.

다양한 표본들은 각각의 고장률과 데이터양을 갖고 있기 때문에 다른 신뢰구간을 갖는다.

이러한 상황에서 모든 표본들을 결합하여 총 관찰시간으로 총 고장개수를 나누어 "평균" 고장률을 추정하는 것이 항상 정확한 결과를 주지는 못한다. 이 경우에 있어 신뢰구간은 비현실적으로 매우 짧게 나타난다[1]. 따라서 다중 표본 문제를 보다 정확하게 처리하기 위한 보다 정확한 추정 절차가 필요하다. 이에 대한 추정절차는 Spjøtvoll(1985)에 의해 제시 되었으며[2] 본 연구에서도 다음과 같이 이를 준용하였다.

4.1. 추정량의 가정

- k개의 다른 샘플들을 가지고 있다. 즉, k개의 다른 기준들에 사용되는 유사 부품들로부터 데이터를 얻게 된다.
- i번째의 샘플에서 우리는 I = 1,2, ..., k에 대한 총관찰시간 τ_i 동안에 n_i개의 고장을 관찰했다.
- i번째 샘플은 I = 1,2, ..., k에 대한 일정한 고장률 λ_i를 갖고 있다.
- 다른 운전 및 환경적 조건들 때문에, 고장률 λ_i는 샘플들 사이에서 다를 수 있다.

샘플들 간의 고장률 변동은 고장률이 확률밀도함수 $\pi(\lambda)$에 의해 주어진 어떤 분포를 갖는 확률변수라고 가정함으로써 모형화 된다.

평균 고장률은 $\theta = \int_0^\infty \lambda \cdot \pi(\lambda) d\lambda$이다.

분산은 $\sigma^2 = \int_0^\infty (\lambda - \hat{\theta})^2 \cdot \pi(\lambda) d\lambda$이다.

4.2. 다중 표본에서의 분석절차

① 데이터를 모두 합쳐서 평균고장률 θ의 초기 추정치 $\hat{\theta}_1$을 계산한다.

$$\hat{\theta}_1 = \frac{Total\ no.of\ failures}{Total\ time\ in\ service} = \frac{\sum_{i=1}^{k} n_i}{\sum_{i=1}^{k} \tau_i}$$

② 다음을 계산한다.:

$$S_1 = \sum_{i=1}^{k} \tau_i$$

$$S_2 = \sum_{i=1}^{k} \tau_i^2$$

$$V = \sum_{i=1}^{k} \frac{(n_i - \hat{\theta}_i \tau_i)^2}{\tau_i} = \sum_{i=1}^{k} \frac{n_i^2}{\tau_i} - \hat{\theta}_1^2 S_1$$

③ 표본들 간의 변동을 나타내는 분산 σ^2에 대한 추정치는 다음과 같이 계산된다.

a) 총 고장수 즉 $\sum_{i=1}^{k} n_i > 0$인 경우

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{V - (k-1)\hat{\theta}_1}{S_1^2 - S_2} \times S_1,$$

b) 총 고장수 $\sum_{i=1}^{k} n_i = 0$인 경우에는

$$\hat{\sigma}^2 = 0.$$

단, 분산의 추정치가 0인 경우 신뢰구간의 하한, 상한, 표준편차를 계산할 수 없기 때문에 이 경우에는 균일 표본 방식에 의해 신뢰구간의 하한과 상한 및 표준편차를 계산하였다.

④ 평균고장률 θ의 최종 추정치 θ^*은 다음과 같이 계산된다. 즉 θ^*이 최종 추정된 고장률이다.

$$\theta^* = \frac{1}{\sum_{i=1}^{k} \frac{1}{\frac{\hat{\theta}_1}{\tau_i} + \hat{\sigma}^2}} \times \sum_{i=1}^{k} \left(\frac{1}{\frac{\hat{\theta}_1}{\tau_i} + \hat{\sigma}^2} \times \frac{n_i}{\tau_i} \right)$$

⑤ 따라서 고장률에 대한 표준 편차 $SD = \hat{\sigma}$이다.

즉 본 연구예제에서 분석한 지역별 자료를 종합화하여 추정한 전체자료에 대한 고장률이 바로 θ^*이고, SD가 ④에 의해 계산된 표준편차이다.

⑥ 고장률에 대한 90% 신뢰구간은 다음과 같은 이론적 근거를 통해 추정할 수 있다.

$$\int_{lower}^{upper} \pi(\lambda) d\lambda = 90\%$$

여기서 분포 $\pi(\lambda)$가 알려져 있지 않기 때문에, 다음의 접근 방법을 이용하게 된다.

즉, $\pi(\lambda)$는 매개변수 α와 β를 갖는 감마분포의 확률밀도함수라 가정하면 α와 β는 다음과 같이 추정된다.

$$\hat{\beta} = \frac{\theta^*}{\hat{\sigma}^2}$$

$$\hat{\alpha} = \hat{\beta} \cdot \theta^*$$

이를 근거로 고장률에 대한 90% 신뢰구간의 신뢰하한과 신뢰상한은 다음과 같이 얻어진다.

$$Lower = \frac{1}{2\hat{\beta}} Z_{0.95, 2\hat{\alpha}}$$

$$Upper = \frac{1}{2\hat{\beta}} Z_{0.05, 2\hat{\alpha}}$$

여기서, $Z_{0.95,v}$와 $Z_{0.05,v}$는 자유도 v를 갖는 χ^2-분포의 각각 상위 95%와 5%에 해당되는 값을 의미한다.

⑦ 수리시간에 대한 최소값, 평균, 최대값은 각 부품별 고장모드별 각 고장건수에 대한 수리시간들을 T_1, T_2, ..., T_n이라 할 때

최소값 = minimun{T_i},
평균 = (T_1 + T_2 + ... + Tn)/n,
최대값 = maximun{T_i} (i = 1, 2, 3, ..., n)

단, 자료를 분석하는데 있어 수리시간이 종종 입력되지 않은 경우가 존재하며 이런 경우에는 수리시간이 명기되어져 있는 자료만으로 최소값과 평균, 최대값을 산출한다.

만약에 k=1인 경우(즉 균일 표본인 경우)에 있어서는 고장률 추정은 평균으로 주어지고, 하한 및 상한 값들은 균일 표본에 의한 전통적인 90% 신뢰구간을 구하면 된다.

4.3. 부품고장이 관찰 되지 않은 경우(즉 고장건수 r = 0인 경우) : 고장난 것이 하나도 없을 때

즉, 어떤 고장들이 특정 부품에 대해 관찰되지 않았으면 다음 절차가 "모든 고장 모드들"에 대한 하한, 평균 및 상한값을 구하는 데 사용될 수 있다.

① $\hat{\lambda}_p$를 분류 계층에서 하나의 상위 수준인 고장률 추정치(평균)로 나타내자.

② τ를 관심 있는 부품에 대한 전체 서비스시간 (operational time 혹은 calendar time)이라 하자.

③ α = 1/2

$\beta = \frac{1}{2\hat{\lambda}_p} + \tau$라 하면,

④ 고장률에 대한 추정은 $\hat{\lambda} = \frac{\alpha}{\beta}$이 된다.

⑤ 또한 표준편차는 다음과 같이 구해진다.

$$SD = \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}}$$

⑥ 90% 신뢰구간은 다음과 같이 구해진다.

$$\left(\frac{1}{2\beta}Z_{0.95,2\alpha}, \frac{1}{2\beta}Z_{0.05,2\alpha}\right) = \left(\frac{0.002}{\beta}, \frac{1.9}{\beta}\right)$$

5. 신뢰도 데이터 분석

본 연구에서는 실제로 가스공사에서 운영하고 있는 공급 관리소 설비 데이터에 대해 정비이력 및 고장이력을 수집하여 위에 제시한 추정방법을 이용하여 신뢰도분석을 실시하였다. 구체적으로 각 장비별 고장률에 대해 관찰시간과 운전시간 각각에 대한 고장모드별 고장 건수, 고장률에 대한 평균고장률, 표준편차, 신뢰하한, 신뢰상한, 고장률을 추정하였고, 보수시간에 대하여는 최소값, 평균, 최대값 등을 통계 소프트웨어 SAS를 이용하여 추정하였다.

5.1. 관찰 부품

관찰한 부품은 가스필터를 비롯하여 신뢰도 측면에서 중요한 40종의 부품들 총 20,013개 이며 또한 운전 압력별, 타입별, 종류별로 세분하여 관찰하였다.

5.2. 총관찰시간과 운전시간

총 관찰시간과 운전시간에 대해 고장률을 추정하였다. 일반적으로 총관찰시간은 높은 신뢰성을 주지만 운전시간은 많은 경우에 있어 추정에 근거한 것이라(데이터 수집에 의해) 할 수 있다.

5.3. 총 관찰부품수, 총 가동부품수와 평균가동률

표 형태를 예시하면 다음과 같다. 여기서 평균가동률=총 가동 부품수/총 관찰부품수이다.

Table 1. Number of observed components

Number of component	502
Operational number	502
Operation rate	40.2%

5.4. 고장 모드

고장 모드는 부품별로 다르다. 표 결과에서 첫 번째 열에 해당한다. 다음 표는 밸브(valve)의 고장모드에 대한 예시이다.

Table 2. Failure mode of valve

고장모드		
Valves	Motorize	Structural deficiency, Internal leakage, Leakage-Utility medium, Noise & Vibration, Fail to open & close, Spurious alarm, Spurious operation, External leakage, Delayed operation, Fail to transmit, Abnormal instrument reading
	Manual	Structural deficiency, Internal leakage, Leakage-Utility medium, Noise & Vibration, Fail to open & close, External leakage, Delayed operation
	Purge	Structural deficiency, Internal leakage, Leakage-Utility medium, External leakage
	Hydraulic	Faulty indication, Internal leakage, Leakage-Utility medium, Pressure down, Fail to open & close, Spurious operation, External leakage, Delayed operation, Fail to transmit, Fail to operation, Abnormal instrument reading
	Safety	Spurious operation, External leakage

Table 3. An example of reliability data(PCV)

		No of failures	Failure rate(per 1,000,000 hours)					No of repairs	Repair hours		
			Lower	Mean	Upper	SD	n/tau		Min	Mean	Max
Total	C	1945	37.61	96.34	177.05	43.42	78.77	1753	1.0	15.9	128.0
	O	1945	92.58	244.64	455.45	113.14	193.36	-	-	-	-
Freezing	C	83	0.97	4.83	11.10	3.25	3.36	60	3.0	18.8	64.0
	O	83	2.36	12.41	28.94	8.54	8.25	-	-	-	-
Faulty indication	C	70	0.34	2.38	5.93	1.82	2.83	63	1.0	13.0	96.0
	O	70	1.14	5.85	13.56	3.99	6.96	-	-	-	-
Other	C	23	0.23	0.87	1.82	0.50	0.93	18	2.0	8.7	32.0
	O	23	0.72	2.13	4.16	1.08	2.29	-	-	-	-
Internal leakage	C	95	1.27	4.17	8.44	2.26	3.85	62	2.0	18.4	64.0
	O	95	3.00	10.61	21.99	5.99	9.44	-	-	-	-
Noise & Vibration	C	34	0.46	1.30	2.49	0.63	1.38	18	4.0	17.7	50.0
	O	34	1.36	3.22	5.71	1.35	3.38	-	-	-	-
Pressure increasing	C	113	1.42	4.34	8.55	2.24	4.58	110	3.0	18.8	92.0
	O	113	3.87	10.83	20.64	5.24	11.23	-	-	-	-
Pressure decreasing	C	29	0.26	1.61	3.90	1.18	1.17	29	2.0	22.1	48.0
	O	29	0.63	4.10	10.06	3.05	2.88	-	-	-	-
Spurious alarm	C	22	0.04	0.87	2.62	0.87	0.89	15	8.0	21.5	48.0
	O	22	0.10	2.18	6.64	2.23	2.19	-	-	-	-
External leakage	C	787	8.74	32.54	68.60	18.94	31.87	756	1.0	12.6	56.0
	O	787	21.98	80.83	169.75	46.73	78.24	-	-	-	-
Delayed operation	C	369	0.46	29.74	102.38	36.11	14.94	346	3.0	18.0	96.0
	O	369	1.31	77.45	264.26	92.88	36.68	-	-	-	-
Fail to transmit	C	45	0.01	1.36	4.96	1.79	1.82	37	3.0	18.7	72.0
	O	45	0.05	3.37	11.67	4.12	4.47	-	-	-	-
조정불량	C	20	0.04	0.90	2.75	0.93	0.81	0	-	-	-
	O	20	0.09	2.32	7.18	2.43	1.99	-	-	-	-
Hunting	C	255	2.57	11.53	25.74	7.39	10.33	239	4.0	20.2	128.0
	O	255	6.06	29.52	67.42	19.65	25.35	-	-	-	-

5.5. 고장개수

고장 개수는 관찰기간 동안에 해당 부품의 고장 모드별 고장 건수이다. 본 분석에서는 총 부품 수 20,013개에 대하여 관찰된 고장 개수는 총 8,029건이었다. Table 3에서 No. of failures 즉, 세 번째 열을 의미한다.

5.6. 고장률

고장률 부분은 각 고장모드에 대한 고장률의 추정을 제시한다. 결과는 신뢰하한, 평균, 신뢰상한, 표준편차, 고장률로 제시하였다. 전체에 대한 신뢰도 분석은 다중 표본 접근 방법에 의해 추정되었고, 각 지역별 결과는 균일 표본 방법에 의해 추정되었다.

5.7. 보수건수 및 보수시간

이 부분은 부품의 기능을 원래 상태로 수리 및 회복하기 위해 요구되는 건수와 시간을 말한다. 즉, 보수 시간은 실제 보수작업이 행해질 때의 시간이다. 이 때 설비 정지, 작업지시 발생, 부품교체 대기, 보수 후 조업 등의 시간은 포함되지 않는다. 따라서 능동적 보수시간은 위에서 제시된 몇 가지 활동들이 포함되는 정지시간보다 보통 더 짧다. 보수 건수는 고장건수 중 수리기록이 있는 건수를 말하며 표에서 No. of repairs에 해당된다. 보수시간에 대하여는 최소값, 평균, 최대값을 제시하였다(Table 3 참조).

6. 결 론

본 논문에서는 정량적 평가에 기초가 되는 부품들의 신뢰도 데이터 수집 및 분석절차와 방법에 대하여 설명하고 실제적으로 가스설비 회사의 신뢰도 데이터를 이용하여 검증하여 보았다.

이를 위하여 우선 균일표본과 다중표본인 경우 모두에 대하여 타 신뢰도 데이터 핸드북에서 사용하고 있는 데이터 처리방법에 대하여 설명을 하였으며, 아직까지 명확하게 처리 되지 못하고 있는 고장횟수가 0인 경우에 대한 평균고장률과 90% 신뢰구간에서의 하한값, 상한값 추정방법, 표준오차 계산방법을 제시하였다.

특히 본 연구에 사용되어진 가스설비회사의 데이터는 각 지역별로 보수 방법이나 관리 정책이 틀린 점을 감안하여 다중표본 방식을 선택하여 신뢰도 분석을 한층 더 정교하게 수행 할 수 있었다.

마지막으로 방대한 양의 데이터와 복잡한 수식은 분석에 있어서 많은 노력과 시간을 소모하게 되며 이를 방지하기 위하여 통계분석 프로그램인 SAS를 사용하여 손쉽게 입력 및 계산, 출력이 가능하게 하여 계산과정의 신뢰도를 확보하였다.

또한 운전시간과 총 관찰시간 두 가지의 관점에서 고장률과 보수율을 산출하였다.

참고문헌

1) OREDA, "Offshore Reliability Data Handbook. 4th edition", DNV Technica, 2002.
2) C. David, "Selected Statistical Paper of Sir David Cox", Cambridge, pp. 489~495, 2006.
3) Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, "Guidelines for process equipment reliability data with data tables", 1989.
4) H. Procaccia, S.P. Arsenis, P. Aufort, G. Volta, "European Industry Reliability Data Bank", 1998.
5) H. J. Wingender, "Reliability Data Collection and Use in Risk and Availability Assessment", 5th Eu-ReDATA, 1986.