

다중 종속 고장상태를 갖는 공정시스템의 신뢰성 모델

최수형[†]

전북대학교 화학공학부

(2018. 10. 8. 접수 / 2018. 10. 20. 수정 / 2018. 11. 12. 채택)

A Reliability Model of Process Systems with Multiple Dependent Failure States

Soo Hyoung Choi[†]

Division of Chemical Engineering, Chonbuk National University

(Received October 8, 2018 / Revised October 20, 2018 / Accepted November 12, 2018)

Abstract : Process safety technology has developed from qualitative methods such as HAZOP (hazard and operability study) to semi-quantitative methods such as LOPA (layer of protection analysis), and quantitative methods are actively studied these days. Quantitative risk assessment (QRA) is often based on fault tree analysis (FTA). FTA is efficient, but difficult to apply when failure events are not independent of each other. This problem can be avoided using a Markov process (MP). MP requires definition of all possible states, and thus, generally, is more complicated than FTA. A method is proposed in this work that uses an MP model and a Weibull distribution model in order to construct a reliability model for multiple dependent failures. As a case study, a pressure safety valve (PSV) is considered, for which there are three kinds of failure, i.e. open failure, close failure, and gas tight failure. According to recently reported inspection results, open failure and close failure are dependent on each other. A reliability model for a PSV group is proposed in this work that is to reproduce these results. It is expected that the application of the proposed method can be expanded to QRA of various systems that have partially dependent multiple failure states.

Key Words : reliability model, multiple dependent failure states, Markov process, Weibull distribution, quantitative risk assessment

1. 서론

공정안전 기술은 정성적 방법인 HAZOP (hazard and operability study)으로부터 준 정량적 방법인 LOPA (layer of protection analysis)로 발전되었고 현재 보다 정량적인 기법이 활발히 연구되고 있다. HAZOP은 사고 시나리오 추정에 기초하므로 안전성 향상에 한계가 있고, LOPA는 대략적 통계에 기반을 두고 있어 위험성 평가에 한계가 있다. 정량적 위험성 평가 (quantitative risk assessment, QRA)는 확률계산을 기초로 한다. 이때 자주 FTA (fault tree analysis)가 사용된다¹⁾. FTA는 사고 시나리오를 AND 및 OR 게이트로 연결된 사건트리(event tree) 형태로 나타낸다. 이 방법은 논리적으로 이해하기 쉽다는 장점이 있으나 각 사건이 서로 독립적이지 않은 경우 처리가 어렵다. 이를

극복할 수 있는 방법으로 마르코프 프로세스(Markov process, MP)가 있다²⁾. MP는 사건 전개를 상태의 변화로 다루며, 미래 상태는 과거의 사건 순서와 관계없이 현재 상태에만 의존한다. MP는 연속(continuous) 및 이산(discrete) 확률과정(stochastic process)으로 나눌 수 있으며, 일반적으로 후자의 경우 마르코프 연쇄(Markov chain, MC)라 부른다³⁾. 이 방법은 각 사건이 독립적이지 않아도 문제되지 않으나 존재 가능한 모든 상태를 정의해야 하므로 일반적으로 FTA보다 복잡하다. FTA와 MP는 함께 사용되기도 한다⁴⁾. 본 연구에서는 여러 가지 사건 중 일부가 서로 부분적으로 종속된 경우 각 사건의 확률을 효율적으로 계산할 수 있는 연속 MP 모델을 제안한다. 또한 여기에 리스크 기반 점검(risk based inspection, RBI)⁵⁾부터 고장유형 및 영향분석(failure mode and effects analysis, FMEA)⁶⁾

[†] Corresponding Author : Soo Hyoung Choi, Tel : +82-63-270-2432, E-mail : soochoi@jbu.ac.kr

Division of Chemical Engineering, Chonbuk National University, 567 Baekje-daero, Deokjin-gu, Jeonju 54896, Korea

까지 폭넓게 사용되고 있는 Weibull 분포 모델을 적용하는 기법을 제안하고 이를 한국가스안전공사 연구진의 국가산업단지 압력안전밸브(pressure safety valve, PSV) 점검결과⁷⁾에 적용한 사례연구 결과를 제시하고자 한다.

2. 제안된 방법

2.1 마르코프 프로세스 모델

어떤 시스템이 n 개의 요소로 구성되어 있다고 하면 각 요소의 고장이 TRUE 또는 FALSE인 2^n 가지 상태를 정의할 수 있다. 이에 대한 연속 마르코프 프로세스(continuous Markov process)의 상태 다이어그램은 $n = 3$ 일 때 Fig. 1과 같다. 여기서 각 상태의 값은 시스템 구성요소 A, B, C의 고장여부를 나타내며 λ_{ij} 는 상태 i 에서 상태 j 로의 전이율(transition rate)이다.

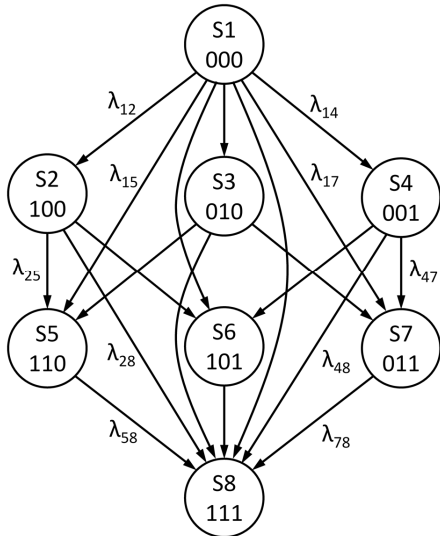


Fig. 1. Markov state diagram for the proposed method.

각 상태의 확률은 시간에 따라 변화하며 다음과 같은 초기값 문제(initial value problem, IVP)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dP_1}{dt} = - \sum_{j=2}^8 \lambda_{1j} P_1$$

$$\frac{dP_2}{dt} = \lambda_{12} P_1 - (\lambda_{25} + \lambda_{26} + \lambda_{28}) P_2$$

$$\frac{dP_3}{dt} = \lambda_{13} P_1 - (\lambda_{35} + \lambda_{37} + \lambda_{38}) P_3$$

$$\frac{dP_4}{dt} = \lambda_{14} P_1 - (\lambda_{46} + \lambda_{47} + \lambda_{48}) P_4$$

$$\frac{dP_5}{dt} = \lambda_{15} P_1 + \lambda_{25} P_2 + \lambda_{35} P_3 - \lambda_{58} P_5$$

$$\frac{dP_6}{dt} = \lambda_{16} P_1 + \lambda_{26} P_2 + \lambda_{46} P_4 - \lambda_{68} P_6$$

$$\frac{dP_7}{dt} = \lambda_{17} P_1 + \lambda_{37} P_3 + \lambda_{47} P_4 - \lambda_{78} P_7$$

$$\frac{dP_8}{dt} = \sum_{i=1}^7 \lambda_{i8} P_i$$

$$P_1(0) = 1, P_i(0) = 0, i = 2, \dots, 8 \quad (1)$$

여기서 전이율 λ_{ij} 는 다음과 같이 고장률(failure rate) $\lambda_{k \in \{A, B, C, AB, AC, BC, ABC\}}$ 에 의해 결정된다.

$$\lambda_{12} = \lambda_A - \lambda_{AB} - \lambda_{AC} - \lambda_{ABC}$$

$$\lambda_{13} = \lambda_B - \lambda_{AB} - \lambda_{BC} - \lambda_{ABC}$$

$$\lambda_{14} = \lambda_C - \lambda_{AC} - \lambda_{BC} - \lambda_{ABC}$$

$$\lambda_{15} = \lambda_{AB} - \lambda_{ABC}$$

$$\lambda_{16} = \lambda_{AC} - \lambda_{ABC}$$

$$\lambda_{17} = \lambda_{BC} - \lambda_{ABC}$$

$$\lambda_{25} = \lambda_B - \lambda_{BC}$$

$$\lambda_{26} = \lambda_C - \lambda_{BC}$$

$$\lambda_{35} = \lambda_A - \lambda_{AC}$$

$$\lambda_{37} = \lambda_C - \lambda_{AC}$$

$$\lambda_{46} = \lambda_A - \lambda_{AB}$$

$$\lambda_{47} = \lambda_B - \lambda_{AB}$$

$$\lambda_{58} = \lambda_C$$

$$\lambda_{68} = \lambda_B$$

$$\lambda_{78} = \lambda_A$$

여기서 λ_{AB} 는 A와 B의 동시 고장률을 나타내며 만약 A와 B가 서로 독립적이면 $\lambda_{AB} = 0$ 이다. 각 고장률 λ_k 는 해당 모델로부터 계산되며 각 모델은 위 식에 적용했을 때 항상 $\lambda_{ij} \geq 0$ 조건을 만족해야 한다.

2.2 Weibull 분포 모델

어떤 시스템이 주어진 시간 이내에 작동 실패할 확률을 의미하는 고장함수(failure function)는 주로 다음과 같은 Weibull 분포 모델로 나타낸다.

$$F_k(t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t - \gamma_k}{\eta_k} \right)^{\beta_k} \right] \quad (2)$$

여기서 β_k 는 형상모수(shape parameter), η_k 는 척도모수(scale parameter), γ_k 는 위치모수(location parameter)이다. 고장률은 위험함수(hazard function)와 같으며 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\lambda_k(t) = \frac{F'_k(t)}{1 - F_k(t)} = \frac{\beta_k}{\eta_k} \left(\frac{t - \gamma_k}{\eta_k} \right)^{\beta_k - 1} \quad (3)$$

고장률이 시간에 따라 감소하는 초기고장(early life failure)은 $\beta_k < 1$, 고장률이 일정한 우발고장(random failure)은 $\beta_k = 1$, 고장률이 시간에 따라 증가하는 마모고장(wear out failure)은 $\beta_k > 1$ 로 모델링할 수 있다. 고장률은 운전조건에 따라 크게 달라지는데 이는 조건이 가혹할수록 작은 값의 η_k 를 사용함으로써 반영할 수 있다⁵⁾. 이때 운전조건은 시간에 따라 변화하며 급격한 변화나 진동 또한 가혹한 조건에 해당하므로 이를 함께 반영하여 η_k 를 시간의 함수로 다루는 기법을 제안한 바 있다⁸⁾. 매개변수 γ_k 는 현재시간과 장치의 사용시간에 차이가 있을 때 이를 보정하기 위해 사용한다.

어떠한 고장도 없는 신뢰성함수(reliability function)와 일부라도 고장이 있는 고장함수(failure function)는 각각 다음과 같다.

$$R(t) = P_1(t)$$

$$F(t) = 1 - P_1(t)$$

여기서 함수 $P_1(t)$ 는 앞서 정의한 MP 모델로부터 구한다.

3. 사례연구

3.1 압력안전밸브 점검결과 분석

압력안전밸브는 공정안전을 직접 담당하므로 정확한 신뢰성 평가와 체계적인 유지보수(maintenance)가 필수적이다. 한국가스안전공사 연구진⁷⁾은 국가산업단지내 약 6,500개의 압력안전밸브를 2010년부터 2016년까지 점검하였다. 열림고장(open failure), 닫힘고장(close failure), 기밀고장(gas tight failure)의 집계결과는 Table 1과 같다⁷⁾. 이때 각 고장은 서로 독립적이라고 가정하면 두 가지 이상의 중복고장은 해당 고장확률들을 곱함으로써 추정할 수 있다. Table 1에 이 수치도 함께 표시하였다. 측정치와 추정치를 비교하면 열림고장과 닫힘고장은 서로 종속적임을 알 수 있다. 나

Table 1. PSV inspection results⁷⁾

Failure type	Measured (%)	Presumed (%)
Open	33.00	-
Close	37.48	-
Gas tight	55.26	-
Open and Close	23.31	12.37
Open and Gas tight	15.50	18.24
Close and Gas tight	19.28	20.71
Triple	7.80	6.83

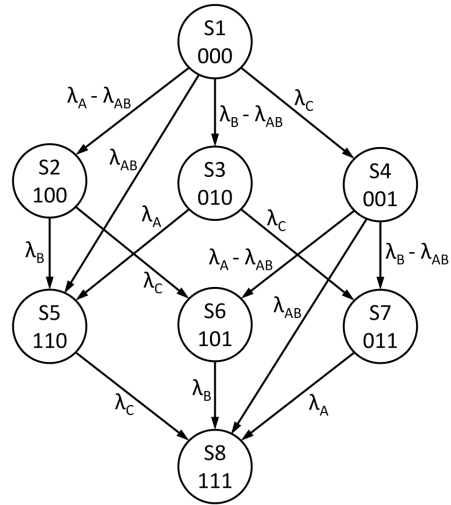


Fig. 2. Markov state diagram for the case study (A: open failure, B: close failure, C: gas tight failure).

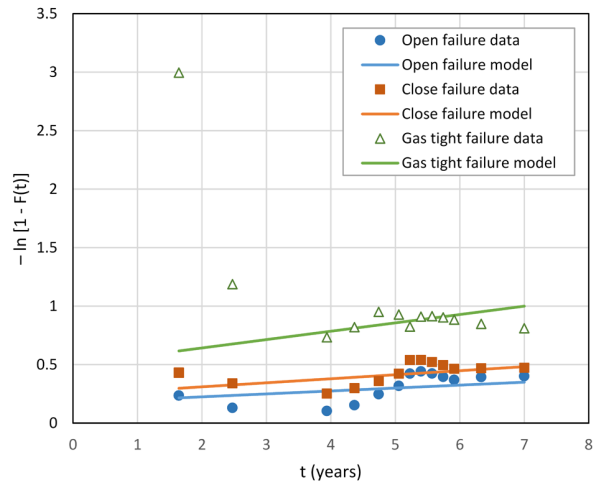


Fig. 3. Individual failure data.

머지 고장은 모두 서로 독립이라고 가정하면 마르코프 상태 다이어그램은 Fig. 2와 같다.

압력안전밸브(PSV)의 시간에 따른 점검결과를 그래프로 나타내면 개별고장은 Fig. 3, 다중고장은 Fig. 4와 같다. 여기에 사용된 데이터는 해당논문⁷⁾의 점검

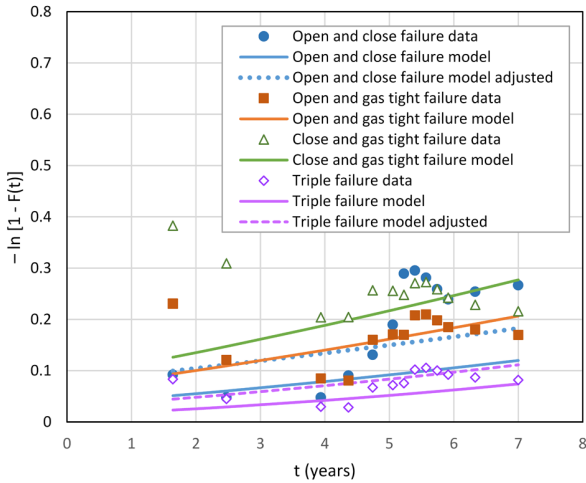


Fig. 4. Multiple failure data.

건수 대비 고장건수 그래프와 연도별 점검률 도표로부터 점검시간 대비 고장확률로 재구성한 것이다. 여기서 각 점은 약 500개의 PSV에 해당하며 추정 점검 완료시점과 누적 고장확률을 나타낸다. 고장률은 그래프에서 세로축 함수 $-\ln[1-F(t)]$ 의 기울기와 같다. 개별 PSV에 대해서는 $F(t)$ 가 증가함수이므로 이 함수도 증가함수가 되어야 하나, 많은 PSV가 유지보수 및 교체되는 상황이므로 감소하는 구간이 있을 수 있다. 만약 그래프의 가로축 시간 t 를 점검시점이 아니라 점검대상 PSV의 사용시간으로 정의하면 보다 정확한 증가함수를 얻을 수 있겠으나 해당 정보는 보고되지 않았다.

3.2 압력안전밸브 집단 모델링

본 연구에서는 PSV의 고장형태를 개별적으로는 마모고장이지만 전체적으로는 우발고장에 따른다고 가정한다. 즉, 개별 PSV의 유지보수 및 교체에 의해 전체 PSV의 고장률은 일정하다고 가정한다. 이때 Fig. 3의 데이터에 맞춘 세 가지 고장함수의 매개변수는 다음과 같다.

$$\beta_A = 1, \eta_A = 40y, \gamma_A = -7y$$

$$\beta_B = 1, \eta_B = 29y, \gamma_B = -7y$$

$$\beta_C = 1, \eta_C = 14y, \gamma_C = -7y$$

여기서 A는 열림, B는 닫힘, C는 기밀을 나타내며, γ_k 값은 점검시작 시점에서의 PSV의 평균 사용시간이 약 7년으로 추정됨을 의미한다. 이 고장함수들의 그래프는 Fig. 3에 실선으로 표시하였다.

위에서 결정된 고장함수로부터 얻어지는 개별 고장률은 다음과 같다.

$$\lambda_A = \frac{1}{40}y^{-1}, \lambda_B = \frac{1}{29}y^{-1}, \lambda_C = \frac{1}{14}y^{-1}$$

만약 A, B, C가 서로 독립적이라면 동시 고장률은 모두 0이다. 이때 다중 고장확률은 해당 고장함수들의 곱으로 나타낼 수 있으며 이를 Fig. 4에서 실선으로 표시하였다. 이들 중 열림 및 닫힘 이중고장, 즉 $k=AB$ 에 대한 그래프만 해당 데이터에 비해 매우 낮은 위치에 표시되어 있음을 알 수 있다. 이는 A와 B가 종속적이기 때문이며 이를 반영하기 위해 동시 고장률을 다음과 같이 설정하였다.

$$\lambda_{AB} = \frac{1}{120}y^{-1}, \lambda_{BC} = \lambda_{AC} = \lambda_{ABC} = 0$$

이를 MP 모델에 적용한 결과는 Fig. 5와 같다. 여기서 $R_A(t), R_B(t), R_C(t)$ 는 각각 $1-F_A(t), 1-F_B(t), 1-F_C(t)$ 이며 $P_{1i}(t), \dots, P_{8i}(t)$ 는 A, B, C가 서로 독립적이라고 가정했을 때 계산된 확률을 나타낸다.

열림 및 닫힘 이중고장 확률과 세 가지 모두가 고장일 확률은 각각 다음과 같다.

$$F_{A \wedge B}(t) = P_5(t) + P_8(t)$$

$$F_{A \wedge B \wedge C}(t) = P_8(t)$$

이 결과를 Fig. 4에 점선으로 표시하였다. 두 모델 모두 위로 이동하였으며 열림 및 닫힘 이중고장 모델은 데이터에 근접하였으나 삼중고장 모델은 다소 높게 위

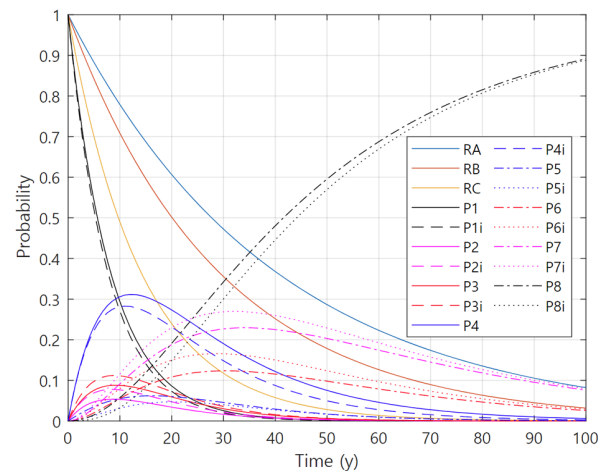


Fig. 5. Probabilities of Markov process states.

Table 2. Errors of models in $-\ln[1 - F(t)]$

Time (y)	Open and close failure		Triple failure	
	Presumed	Proposed	Presumed	Proposed
1.642	-0.0407	0.0074	-0.0600	-0.0388
2.473	0.0124	0.0634	-0.0157	0.0083
3.938	0.0304	0.0857	0.0118	0.0404
4.366	-0.0069	0.0496	0.0172	0.0471
4.743	-0.0425	0.0150	-0.0181	0.0128
5.054	-0.0969	-0.0386	-0.0194	0.0125
5.226	-0.1942	-0.1356	-0.0214	0.0109
5.398	-0.1981	-0.1390	-0.0460	-0.0131
5.570	-0.1815	-0.1220	-0.0478	-0.0144
5.742	-0.1567	-0.0969	-0.0406	-0.0067
5.913	-0.1348	-0.0745	-0.0307	0.0036
6.332	-0.1437	-0.0825	-0.0205	0.0150
7.000	-0.1466	-0.0840	-0.0077	0.0296
Average	-0.1000	-0.0425	-0.0230	0.0082
RMSE	0.1267	0.0864	0.0315	0.0239

치되었다. 구축된 모델은 Fig. 5에서 $P_1(t) > P_{1i}(t)$ 및 $P_8(t) > P_{8i}(t)$ 로 검증(verification)하고 Fig. 4에서 오차 분석을 통해 유효성 검사(validation)를 할 수 있다. Table 2는 열림·단힘 이중고장과 열림·단힘·기밀 삼중고장 모델의 오차분석 결과이다. 독립고장 모델 추정치와 제안된 모델 예측치의 추정치로부터의 편차를 비교하였다. 제안된 방법을 적용함으로써 평균오차와 평균 제곱근 오차(root mean square error, RMSE)가 모두 0에 가까워진 것을 알 수 있다. 보다 정확한 모델링을 위해서는 PSV의 사용시간 데이터가 필수적이다.

4. 결론

부분적으로 종속된 다중고장을 반영하는 연속 마르코프 프로세스 및 Weibull 분포 기반 신뢰성 모델 구축기법을 제안하였다. 사례연구로서 압력안전밸브 집단의 시간에 따른 세 가지 개별고장과 이들이 중복된 다중고장 확률에 대한 모델링을 수행하였다. 모델검증 결과 서로 종속된 이중고장을 효과적으로 처리할 수 있음을 확인하였다. 제안된 방법은 보다 많은 경우의 수의 고장상태도 다룰 수 있으며 다양한 요소로 구성된 공정시스템의 정량적 위험성 평가에 적용가능하다. 이를 위해서는 우선 정확한 개별고장 모델이 필요하며, 엄밀한 신뢰성 모델 구축을 위해서는 공정운전, 점검 및 유지보수 과정에서 얻어지는 대규모 데이터의 체계적인 축적이 요구된다.

감사의 글. 본 연구는 산업통상자원부 지원 한국산업기술평가관리원(KEIT)의 우수기술연구센터(ATC) 과제에서 지원하였습니다(과제번호 ATC-10048672).

References

- 1) D. A. Crowl and J. F. Louvar, "Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications", 3rd ed., Pearson Education, 2011.
- 2) P.-A. Brameret, J.-M. Roussel and A. Rauzy, "Preliminary System Safety Analysis with Limited Markov Chain Generation", 4th IFAC Workshop on Dependable Control of Discrete Systems, Sep 2013, York, United Kingdom, 2013.
- 3) W. Park and S. Y. Ok, "Reliability Analysis of Stowage System of Container Crane Using Subset Simulation with Markov Chain Monte Carlo Sampling", J. Korean Soc. Saf., Vol. 32, No. 3, pp. 54-59, 2017.
- 4) O. Yevkin, "An Efficient Approximate Markov Chain Method in Dynamic Fault Tree Analysis", Qual. Reliab. Engng. Int., Vol. 32, pp. 1509-1520, 2016.
- 5) API, Risk-Based Inspection Methodology: API Recommended Practice 581, 3rd ed., American Petroleum Institute, 2016.
- 6) H. M. Kwon, M. K. Lee and S. H. Hong, "Risk Evaluation of Failure Cause for FMEA under a Weibull Time Delay Model", J. Korean Soc. Saf., Vol. 33, No. 3, pp. 83-91, 2018.
- 7) Y. R. Jang, J. H. Kim, S. H. Kim and Y. H. Kwak, "The Necessity of Introducing the In-service Test based on Analysis of Performance Test Result of Pressure Safety Valve", J. Korean Inst. Gas, Vol. 21, No. 6, pp. 15-22, 2017.
- 8) S. H. Choi, "A Reliability Model for Process Systems under Changing Operating Conditions", Korean J. Chem. Eng., Vol. 35, No. 3, pp. 621-625, 2018.