KIGAS Vol. 22, No. 6, pp 40~43, 2018
(Journal of the Korean Institute of Gas)
https://doi.org/10.7842/kigas.2018.22.6.40

압력안전밸브의 부분적 종속 이중 고장상태 모델링

†최수형
전북대학교 화학공학부
(2018년 9월 30일 접수, 2018년 11월 30일 수정, 2018년 12월 1일 채택)

Modeling Partially Dependent Double Failure States of Pressure Safety Valves

†**Soo Hyong Choi**
Division of Chemical Engineering,
Chonbuk National University, Jeonju 54896, Korea
(Received September 30, 2018; Revised November 30, 2018; Accepted December 1, 2018)

요 약

압력안전밸브의 열림고장과 닫힘고장은 서로 부분적으로 종속되어있다. 본 연구에서는 마르코프 프로세스 모델과 Weibull 분포 모델을 이용하여 두 가지 고장에 대한 신뢰성 모델을 구축하는 방법을 제안한다. 압력안전밸브 모델은 알려진 열림고장 모델, 유도된 닫힘고장 모델, 최근 보고된 점검결과를 재현하는 동시고장 모델로부터 얻어진다. 제안된 방법은 부분적으로 종속된 다중 고장상태를 갖는 다양한 시스템의 정량적 위험성 평가로 확대 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract - For pressure safety valves, open failure and close failure are partially dependent on each other. A method is proposed in this work that uses a Markov process model and a Weibull distribution model in order to construct a reliability model for two kinds of failure. A pressure safety valve model is obtained from a known open failure model, an induced close failure model, and a simultaneous failure model that reproduces recently reported inspection results. It is expected that the application of the proposed method can be expanded to quantitative risk assessment of various systems that have partially dependent multiple failure states.

Key words : pressure safety valve, markov process, weibull distribution, quantitative risk assessment

I. 서 론

정량적 위험성 평가(quantitative risk assessment, QRA)는 사고 빈도해석(frequency analysis, FA)을 요구하며 이를 위해서는 주로 FTA (fault tree analysis) 기법을 사용한다[1]. 이 방법은 결함트리(fault tree) 모델에 기반을 둠으로써 사고 시나리오를 직관적으로 나타낼 수 있는 장점이 있으나 각 사건이 서로 독립적이지 않으면 적용이 매우 어려워진다. 또 하나의 방법으로 사건전개 대신 상태변화를 다루는 마르코프 프로세스(Markov process, MP)가 있다[2]. 이는 어떤 상태가 될 확률이 직전 상태에만 의존하는 확률과정(stochastic process)의 모델로서 다양한 분야에서 최적화 및 의사결정에 활용되고 있다[3]. 본 연구에서는 여러가지 사건 중 일부가 부분적으로 종속된 경우 이를 효과적으로 다룰 수 있는 MP 모델링 기법을 제안하고자 한다.

압력안전밸브(pressure safety valve, PSV)의 고장은 열림고장(open failure), 닫힘고장(close failure), 기밀고장(gas tight failure)이 있다. 한국가스안전공사 연구진이 2010년부터 2016년까지 7년간 국내 산업단지의 약 6,500개의 안전밸브를 점검한 결과에 의하면 열림불량 33.00%, 닫힘불량 37.48%, 열림 및 닫힘 동시불량 23.31%로 집계되었다[4]. 만약 이 두 가지 고장이 서로 독립적이라면 동시불량은 약 12.37%

†Corresponding author:soochoi@jbnu.ac.kr
Copyright ⓒ 2018 by The Korean Institute of Gas

여야 한다. 따라서 열림과 닫힘 고장 사이에는 비교적 강한 종속성이 있음을 알 수 있다. 본 연구에서는 위 점검 결과를 재현할 수 있는 수학적 모델을 구축하고 이로부터 열림과 닫힘 모두 정상 작동할 신뢰성 함수(reliability function)를 구하고자 한다.

Ⅱ. 제안된 방법

2.1. Markov Process Model

두 가지 고장에 대한 상태들을 정상(S1), A 고장(S2), B 고장(S3), A 및 B 이중고장(S4)으로 정의하자. 이중고장은 순차적으로 하나씩, 또는 동시에 발생할 수 있다. 여기서 A와 B는 두 개의 시스템 또는 한 시스템의 두 가지 기능이 될 수 있다. 이들이 서로 부분적으로 종속 가능할 경우 본 연구에서 제안하는 연속 마르코프 프로세스(continuous Markov process) 모델은 **Fig. 1**과 같다. 여기서 λ_A와 λ_B는 각각 A와 B의 고장률(failure rate), λ_{ij}는 상태 i에서 j로의 전이율(transition rate)이다. 각 상태의 확률변화를 나타내는 식은 다음과 같은 초기값 문제(initial value problem, IVP)가 된다.

$$dP_1/dt = -(\lambda_{12}+\lambda_{13}+\lambda_{14})P_1 \quad (1)$$

$$dP_2/dt = \lambda_{12}P_1 - \lambda_{24}P_2 \quad (2)$$

$$dP_3/dt = \lambda_{13}P_1 - \lambda_{34}P_2 \quad (3)$$

$$dP_4/dt = \lambda_{14}P_1 + \lambda_{24}P_2 + \lambda_{34}P_4 \quad (4)$$

$$P_1(0)=1,\ P_2(0)=P_3(0)=P_4(0)=0 \quad (5)$$

만약 A와 B가 서로 독립적이라면 $\lambda_{12}=\lambda_A$, $\lambda_{13}=\lambda_B$, $\lambda_{14}=0$이다. 만약 A의 고장이 확률적으로 B의 고장에 부분적으로 종속된다면 $\lambda_{12}<\lambda_A$, $\lambda_{14}>0$이 된다. 본 연구에서 제안하는 고장률과 전이율의 관계식은 다음과 같다.

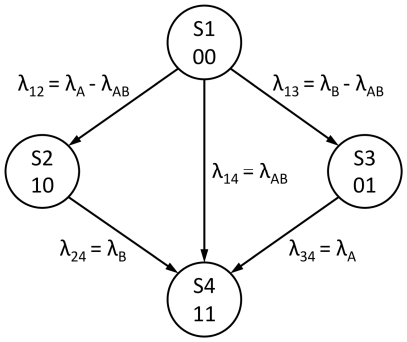

Fig. 1. Proposed Markov process model.

$$\lambda_{12}=\lambda_A-\lambda_{AB} \quad (6)$$

$$\lambda_{13}=\lambda_B-\lambda_{AB} \quad (7)$$

$$\lambda_{14}=\lambda_{AB} \quad (8)$$

$$\lambda_{24}=\lambda_B \quad (9)$$

$$\lambda_{34}=\lambda_A \quad (10)$$

여기서 λ_{AB}는 A와 B의 동시 고장률이다.

2.2. Weibull Distribution Model

어떤 시스템이 주어진 시간에 작동할 확률을 나타내는 신뢰성 함수는 주로 다음과 같은 Weibull 분포 모델을 사용한다.

$$R(t)=\exp\left[-(t/\eta)^{\beta}\right] \quad (11)$$

여기서 형상모수(shape parameter) β는 일반적으로 고장유형(failure pattern), 척도모수(scale parameter) η는 운전조건(operating condition)에 따라 결정된다[5]. 고장률은 $\lambda(t)=-R'(t)/R(t)$이며 Weibull 모델의 경우 다음과 같다.

$$\lambda(t)=\beta(t/\eta)^{\beta-1}/\eta \quad (12)$$

미국석유협회(American Petroleum Institute, API)에서 제시한 보통 운전조건에서의 압력안전밸브의 열림고장(A) 매개변수는 β_A = 1.8, η_A = 23.9 y, 기밀고장(C)의 경우 β_C = 1.6, η_C = 15.5 y이다[6]. 열림고장확률 $F_A(t)=1-R_A(t)$가 측정값 0.3300이 되는 시간은 t = 14.375 y이다. 닫힘고장(B)은 기밀고장(C)과 유형이 같다고 가정한다. 따라서 β_B = β_C = 1.6이며, t = 14.375 y에서 닫힘고장확률 $F_B(t)=1-R_B(t)$가 측정값 0.3748이 되려면 η_B = 23.053 y이다. 동시고장은 우발고장(random failu-

Table 1. Proposed Weibull model parameters

	β	η (y)
Open failure [6]	1.8	23.90
Close failure	1.6	23.05
Simultaneous failure	1.0	54.01

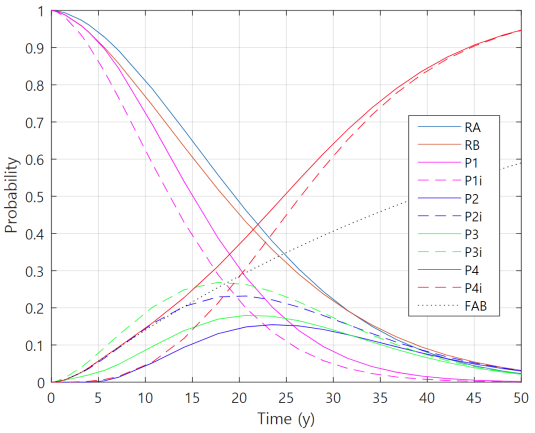

Fig. 2. Probability plots for model verification.

re)에 가깝다고 가정한다. 즉, β_{AB} = 1. 단, $\lambda_{AB} \le \lambda_A$ 및 $\lambda_{AB} \le \lambda_B$이어야 한다. 따라서 동시 고장률은 다음과 같이 나타낸다.

$$\lambda_{AB}(t) = \min(\lambda_A(t), \lambda_B(t), 1/\eta_{AB}) \quad (13)$$

각 고장률을 식 (6)-(10)에 적용한 후 식 (1)-(5)를 푼다. 얻어진 $P_4(t)$가 측정된 이중고장 확률에 가까워지는 동시고장 매개변수는 η_{AB} = 54.01 y이다. 이 결과를 정리하면 **Table 1**과 같다.

Ⅲ. 모델 검증

제안된 방법으로 결정된 모델을 이용하여 각 상태의 시간에 따른 확률변화를 계산한 결과는 **Fig. 2**와 같다. 여기서 A와 B 모두 정상 작동할 신뢰성 함수는 $P_1(t)$이다. 긴 점선으로 나타낸 함수들은 모두 A와 B가 서로 독립일 경우의 확률로서 실제 값과 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 동시고장확률 $F_{AB}(t)$는 짧은 점선으로 표시하였다. 언제나 이중고장확률 $P_4(t)$ 이하이므로 A 및 B의 동시고장확률 모델 후보가 된다.

앞서 제시한 측정결과로부터 얻은 각 상태의 확률과 모델링 기준시점 t = 14.375 y에서의 계산결과를 **Table 2**에 제시하였다. 제안된 모델로 네 가지 상태 모두 측정값들을 정확하게 재현하였다. 단, 여기에 적용된 가정들의 타당성 확인은 실제 PSV 사용시간에 대한 모델 유효성 검증을 통해서만 가능하므로 추가 데이터가 필요하다.

Table 2. Check data for model validation.

State	Failure		Probability	
	A	B	Measured	Calculated
S1	0	0	0.5283	0.528298
S2	1	0	0.0969	0.096900
S3	0	1	0.1417	0.141702
S4	1	1	0.2331	0.233100
Total			1	1

Ⅳ. 결 론

마르코프 프로세스 모델과 Weibull 분포 모델을 결합하여 부분적 종속 이중 고장상태 확률을 예측할 수 있는 신뢰성 모델링 기법을 제안하였다. 이를 토대로 압력안전밸브의 열림 및 닫힘 동시고장 모델을 구했으며 두 고장 사이의 종속성을 효과적으로 반영할 수 있음을 모델 검증을 통해 확인하였다.

제안된 방법은 세 가지 이상의 고장에 대한 종속성 모델링에도 적용 가능하다. 따라서 추가 연구를 통해 부분적으로 종속된 여러 요소들이 결합된 복합 시스템의 정량적 위험성 평가로 활용범위를 넓힐 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

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

REFERENCES

[1] Crowl, D. A., and Louvar, J. F., *Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications*, 3rd ed., Pearson Education, (2011)

[2] Brameret, P.-A., Roussel, J.-M., and Rauzy, A., "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] Yevkin, O., "An Efficient Approximate Markov Chain Method in Dynamic Fault Tree Analysis", *Qual. Reliab. Engng. Int.*, **32**, 1509-1520,

(2016)
[4] Jang, Y. R., Kim, J. H., Kim, S. H., and Kwak, Y. H., "The necessity of Introducing the In-service Test based on Analysis of Performance Test Result of Pressure Safety Valve", *KIGAS*, **21**(6), 15-22, (2017)
[5] Choi, S. H., "A reliability model for process systems under changing operating conditions", *Korean J. Chem. Eng.*, **35**(3), 621-625, (2018)
[6] API, *Risk-Based Inspection Methodology: API Recommended Practice 581*, 3rd ed., American Petroleum Institute, (2016)