

신뢰성 평가를 통한 화학공정의 안전성 검토

안대명, 변윤섭, 윤동현*, 황규석
 부산대학교 화학공학과
 한국산업안전공단*

The safety analysis of chemical process using reliability

An Dae Myung, Byun Yoon Sup, Yoon Dong Hyun, Hwang Kyu Suk
 Dept. of Chem. Eng., Pusan National University
 Korea Occupational Safety & Health Agency

1. 서론

다수의 기기에 의해 구성된 원자력발전소, 화학플랜트 시스템이 정상적인 기능을 할 확률을 평가하는 시스템의 신뢰성 해석방법으로써 확률론적인 안전성평가(Probabilistic Safety Assessment : PSA)방법이 있다. PSA에 있어서 여러 종류의 해석방법이 이용되고 있으나, 현재까지 시스템 신뢰성 해석방법으로 결함수 분석(Fault Tree Analysis : FTA)이 보편적으로 사용되었다.

그러나 결함수 분석기법(FTA)에서는 정상사상(Top event)으로 시스템의 특정 사상을 하나밖에 선정할 수 없고, Fault Tree 작성에 해석자의 숙련을 필요로 하며, 대상시스템의 변경시에 Fault Tree의 수정이 어려운 점 등의 문제점이 있다.

본 연구에서는 결함수 분석기법(FTA)에서 추구하는 목적과는 다른 시스템의 성공확률을 평가할 수 있고, 시간에 따라 변화하는 신뢰도를 평가할 수 있으며, 운전자의 운전조작에 의한 사고를 반영할 수 있는 새로운 위험성평가기법을 개발함에 있다.

2. 본론

2.1 유향그래프를 통한 신뢰도 계산

1) Node

Node는 기본적으로 주입력신호(S), 부입력신호(P) 및 출력신호(R) 세 종류의 입·출력신호로 연결되며 입력신호와 부입력신호로부터 적절한 출력신호를 발생시킨다.

Node의 역할에 따라 기능형, 작동형, 논리형, 지원형, 기타형으로 구분하여 정의하였다. 여기서 기능형은 반응기, 분리기, 열교환기 등 작동요소를 조작한 결과 그 출력신호를 변화시키는 기능요소를, 작동형은 펌프, 밸브 등 직접 조작이 가능한 작동요소를 모델화하는데 사용된다. 또한 논리형은 시스템의 논리, 지원형은 지원노드로 신호발생기 및 시간의 경과에 따른 신뢰성을 예측하는데 사용된다. 기타형에는 human error 반영 및 부공정을 모델화하는데 사용된다.

① 기능노드(Function Node)

반응기, 열교환기 등 기능요소의 정상작동 및 실패를 모델화한다. 1개의 입·출력신호 선을 가지며 각 요소의 정상작동확률(P_g)이 필요하며 출력강도는 다음과 같다.

$$R(t) = P_g \cdot S(t)$$

② 작동노드

i. 기동형

이 노드는 FSO로 표기되며 초기기동 신뢰도와 주입력신호 $S(t)$ 가 존재할 경우 시간의

경과에 따른 고장을 나타내는 노드로 성공적으로 작동할 확률(P_g)와 미리 작동할 확률(P_p) 및 단위시간당 장치의 고장율(λ)을 필요로 한다. 고장율이 일정할 경우 출력강도는 다음과 같다.

$$R(t) = R_1(t) \exp\{-\lambda \cdot \sum_1 \sum_{t_k \leq t} T_i(t_k) \times \min[1.0, R_1(t_k)/R_1(t)]\}$$

$$R_1(t) = S(t) \cdot C(t)$$

$$C(t_1) = P_p$$

$$C(t) = C(t') + [1.0 - C(t')] \cdot P(t) \cdot P_g$$

여기서, $C(t)$ = Probability for operation

P_p = Probability for prematur operation

P_g = Probability for successful operation

t_1 = 최초 Time point

$C(t')$ = Time t 바로 직전 Time에서 장치가 작동중일 확률

ii. 대기형

이노드는 FSS로 표기되며 주입력신호 $S(t)$ 가 존재하지 않을 경우 시간의 경과에 따른 고장과 초기기동 신뢰도를 나타내는 노드로 성공적으로 작동할 확률(P_g)와 미리 작동할 확률(P_p) 및 단위시간당 장치의 고장율(λ)을 필요로 한다. 고장율이 일정할 경우 출력강도는 다음과 같다.

$$R(t) = R_1(t) \cdot [P_p + (1 - P_p) \cdot P(t) \cdot P_g]$$

$$R_1(t) = S(t) \exp[-\lambda \cdot \sum_1 \sum_{t_k \leq t} T_i(t_k)]$$

iii. 정비형

이 노드는 FRS로 표기되며 주입력신호 $S(t)$ 가 존재하지 않을 경우 시간의 경과에 따른 고장과 보수·정비 및 초기기동 신뢰도를 나타내는 노드로 성공적으로 작동할 확률(P_g)와 미리 작동할 확률(P_p) 및 단위시간당 장치의 고장율(λ)을 필요로 한다. 출력강도는 대기형과 같다. 단, 시간경과 T 은 최종 보수·정비시점으로 부터의 시간의 경과를 나타낸다.

③ 논리노드

i. OR

이 노드는 1개이상의 주입력 신호로 부터 1개의 출력신호를 발생시키며 입력신호에 의해 나타나는 모든 가능성의 합을 얻을 수 있으며 출력강도는 최소한 1개이상의 입력신호가 존재할 가능성을 나타낸다. 입력신호가 서로 독립이면 출력신호의 확률은 다음과 같다.

$$R(t) = 1 - \{(1 - S_1(t)) \cdot (1 - S_2(t)) \cdots (1 - S_n(t))\}$$

$$= 1 - \prod_{i=1}^n \{1 - S_i(t)\}$$

또한, 입력신호가 종속성을 가질 경우 출력신호의 강도(TWO-PASS일 경우)는 다음과 같다.

$$R(t) = S_c(t) \cdot \left\{ \frac{S_1(t)}{S_c(t)} + \frac{S_2(t)}{S_c(t)} - \frac{S_1(t)}{S_c(t)} \times \frac{S_2(t)}{S_c(t)} \right\}$$

ii. AND

이 노드는 1개이상의 주입력 신호로 1개의 출력신호를 발생시키며 입력신호에 의해 대표되는 가능성의 대표점을 얻을 수 있으며 출력강도는 모든 입력신호가 존재할 가능성을 나타낸다. 따라서 AND Gate는 입력신호가 모두 발생할 경우에 출력신호가 발생한다. 입

력신호가 서로 독립이면 출력신호의 확률은 다음과 같다.

$$R(t) = S_1(t) \cdot S_2(t) \cdots S_n(t) = \prod_{i=1}^n S_i(t)$$

또한, 입력신호가 종속성을 가질 경우 출력신호의 강도(TWO-PASS일 경우)는 다음과 같다.

$$R(t) = S_C(t) \cdot \left\{ \frac{S_1(t)}{S_C(t)} \times \frac{S_2(t)}{S_C(t)} \right\}$$

iii. NOT

이 노드는 여집합을 취하는 기능을 가지고 있다. 즉, 입력신호가 존재하는 경우 출력신호를 발생하지 않고 입력신호가 존재하지 않는 경우에 출력신호를 발생한다. 주입력신호와 출력신호가 각각 1개씩 존재하고 부입력신호는 존재하지 않는다. 출력신호의 강도는 다음과 같다.

$$R(t) = 1 - S(t)$$

④ 지원노드

i. 운전형

이 노드는 FOO로 표기하며 시스템 운전중 즉, 주입력신호 S(t)가 존재할 때 장치의 고장을 모델화 한다. 1개의 주입력과 시간의 경과를 나타내는 T으로 부터 1개의 출력신호를 발생시킨다. 이것은 단위시간당 장치의 고장율(λ)이 필요하며 고장율이 일정할 경우 출력강도는 다음과 같다.

$$R(t) = S(t) \exp \left\{ -\lambda \cdot \sum_{i=1} \sum_{t_k \leq t} T_i(t_k) \times \min[1.0, S(t_k)/S(t)] \right\}$$

ii. 신호발생형

이 노드는 SG로 나타내며 인력신호 없이 출력신호를 발생한다.

⑤ 기타

i. Human Factor

운전자의 운전 행위, 즉 장치의 기동이나 중단 등의 운전 조작시 운전자의 오판단, 오류 등의 human factor를 모델화하기 위한 노드이다.

ii. User Defined node

시스템의 확장성을 고려하여 위에 정의되지 않은 노드를 재정의하거나, 단순한 기기 장치를 포함하여 복잡하지만 표준화된 프로세스를 단일 node로 정의하여 공정도 작성시 단순화할 수 있는 기능을 포함한다.

2) Arc 및 신호

신호의 존재란 실제로 흐름이 있는 경우뿐만 아니라 흐름 가능성을 의미한다. 신호는 강도라는 양을 가지며 주입력신호는 주로 물리적 흐름을 나타내고, 강도는 신호가 존재할 확률 즉 신뢰도를 나타낸다. 따라서 주입력 신호선의 강도는 1 이하이어야 하나, 부입력 신호일 경우 강도는 연속시간 사이의 실제시간을 나타내어 1보다 큰 값을 가질 수 있다.

3) 시간의 경과(Time Point)

시스템의 신뢰성은 시간에 따라 변하기 때문에 시간의 경과에 따른 신뢰성을 예측하기 위하여 Time Point를 설정하여 반영한다. Time Point는 실제 시간을 나타내거나 시간의 전·후 관계를 나타낼 수 있다. 이 Time Point를 통하여 시간의 경과에 따른 고장률의 변화를 표현하고 시간의 경과에 따른 시스템의 신뢰성 차이를 예측하여 시스템의 적절한 정비·점검시점을 예측할 수 있다.

2.2 적용예

Fig.1과 같이 2대의 펌프 시스템으로 구성된 이송시스템이 있다. 정상시에는 1대의 펌프를 운전하고 만약 운전중에 이송이 정지할 경우 펌프 출구측에 설치되어 있는 압력계로부터 신호를 받아 대기중인 펌프가 가동하게 된다. 펌프 및 밸브는 모터구동방식이며, 본 이송시스템이 고장날 경우 원료공급이 중단되어 후속 공정이 중지되는 등 공정전체에 치명적인 영향을 미칠 수 있다. 따라서 standby 펌프는 신뢰성을 확보하기 위하여 정기적으로 보수·정비를 실시하고 있다. Fig.2은 유향그래프로 표현된 것이며, 각 노드의 수평선 위은 노드의 물리적 의미를 나타내며 아래 숫자는 노드번호를 나타내고 있다. Table 1에는 각 시간별 신뢰도 계산 결과를 보였다.

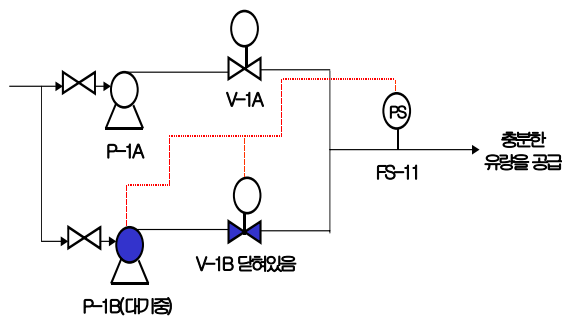


Fig.1 Transfer system

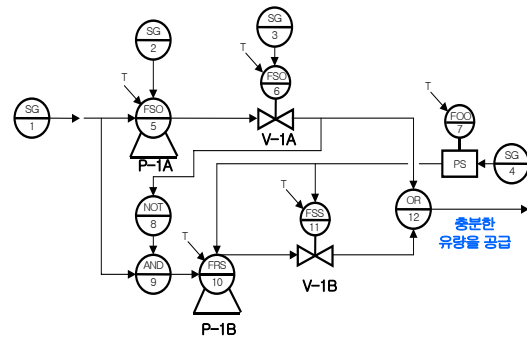


Fig.2 Graphical representation of transfer system

Table1 Reliability of the system

구분	Time(hour)			
	0	200	500	1000
Reliability	0.99937	0.98186	0.95733	0.92063

3. 결론

본 연구는 기존의 FTA의 단점을 보완하고, 운전자의 운전상황에 대한 동적 신뢰도를 계산하여 복잡한 화학공정의 신뢰성을 평가하였다. 공정은 node, arc의 유향그래프로 표현하였으며, 유향그래프의 node를 각 설비의 기능상 분류를 통하여 정의하고, 입출력 arc의 신호 강도로써 신뢰도를 계산하였다. Transfer pump 시스템에 적용하여 각 운전 시간에 대한 동적 신뢰도를 계산할 수 있었다.

4. 참고문헌

- 1) 일본중합안전연구소, FTA안전공학, 기전연구사, 1990.
- 2) H.K. Lee, Study on Diagraph Based Fault Tree Systhesis of chemical process, Pusan National University, 1998.
- 3) Y.M. Kim, An Algorithm for Risk Analysis using FTA, Hanyang University, 1996.
- 4) Z. Shen, J. Gao and X. Huang, A new quantification algorithm for the GO methodology, Rel. Eng. and Sys. Saf., 67, pp241-247, 2000.