

## 유향그래프를 이용한 시스템 신뢰성 평가기법 개발

변윤섭 · 안대명 · 이화수 · 신동일\* · 김영한\*\* · 황규석†

부산대학교 화학공학과  
609-735 부산시 금정구 장전동 산 30  
\*명지대학교 화학공학과  
449-728 경기도 용인시 남동 산 38-2  
\*\*동아대학교 화학공학과  
604-714 부산시 사하구 하단2동 840  
(2003년 2월 3일 접수, 2003년 5월 2일 채택)

## The Development of System Reliability Assessment Methodology Using Directed Graph

Yoon Sup Byun, Dae Myung An, Hwa Soo Lee, Dong Il Shin\*, Young Han Kim\*\* and Kyu Suk Hwang†

Department of Chemical Engineering, Pusan National University, 30 Jangjeon-dong, Geumjeong-gu, Busan 609-735, Korea

\*Department of Chemical Engineering, Myongji University, San 38-2 Nam-dong, Yongin, Kyonggi-do 449-728, Korea

\*\*Department of Chemical Engineering, Dong-A University, 840 Hadan2-dong, Saha-gu, Busan 604-714, Korea

(Received 3 February 2003; accepted 2 May 2003)

### 요 약

유향그래프를 이용한 새로운 신뢰성 평가기법을 제시하였다. 본 기법은 성공을 추적하는 시스템 해석기법으로, 시스템을 노드와 아크로 구성된 유향그래프를 사용하여 모델화하였다. 화학공정의 구성요소를 기능적 분류 및 운전 형태별로 계층화하여 구분하고, 그래프 표현을 위해 각각을 기능노드, 작동노드, 논리노드 및 지원노드로 정의하였으며 장치의 작동이나 실패를 모델화한다. 또한 정의된 노드는 신뢰도 평가를 위한 연산식을 가지고 있어 시스템의 신뢰성은 이 유향그래프를 순차적으로 해석하여 예측할 수 있다. 개발된 신뢰성 평가기법을 화학공정의 이송시스템에 적용하였으며, 본 기법이 시스템의 신뢰성해석을 위해 유용하게 사용될 수 있다는 것을 증명하였다.

**Abstract** – The new reliability assessment methodology using directed graph is presented. The new methodology is a success-oriented system reliability assessment technique. The system is modeled by directed graph, which is composed of nodes and arcs. The component of chemical process is classified by functional relation and operational type. The node has four classes, which are function, operation, logic and aid node. The node can be used to model the operation and failure of physical equipments. The system reliability assessment can be evaluated by sequential analysis of the directed graph. The example of transfer system is given. The new methodology has proved to be a valuable and useful method for system reliability assessment.

**Key words:** System Reliability Assessment Methodology, Directed Graph, Success-Oriented System Reliability Assessment

### 1. 서 론

다수의 기기에 의해 구성된 원자력발전소, 화학플랜트 등 시스템이 정상적인 기능을 할 확률을 평가하는 신뢰성 해석방법으로써 확률론적 안전성평가(Probabilistic Safety Assessment: PSA)방법이 있다. PSA에 있어서 여러 종류의 해석방법이 이용되고 있으나, 현재까지 시스템의 신뢰성 해석방법으로 결함수분석(Fault Tree Analysis: FTA)이 보편적으로 사용되었다. FTA는 1962년 미국 벨전화연구소의 Watson에 의해 미트만 미사일발사 제어시스템의 안전성평가 연구를 위해 고안된 후에

항공우주분야에서 원자력산업, 화학플랜트 등의 산업시스템까지 다양한 분야의 안전성평가에 이용되고 있다.

그러나 FTA에서는 정상사상(top event)으로 시스템의 특정 사상을 하나밖에 선정할 수 없고, fault tree(FT) 작성에 해석자의 숙련을 필요로 하며, 대상시스템의 변경시에 FT의 수정이 어려운 점 등의 문제점이 있다[1-4].

따라서 본 연구에서는 FTA에서 추구하는 목적과는 다른 시스템의 성공확률을 평가할 수 있고, 시간에 따라 변하는 신뢰도를 평가할 수 있으며, 운전자의 운전조작에 의한 사고를 반영할 수 있는 새로운 신뢰성 평가기법을 개발하였다. 새로운 기법은 정량적 위험성평가 비전문가도 쉽게 사용할 수 있도록 노드와 아크로 구성되어 있는 유향그래프로 모델화하였고, 공정흐름도의 심별로 모델을 표현하였다.

†To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: kshwang@pusan.ac.kr

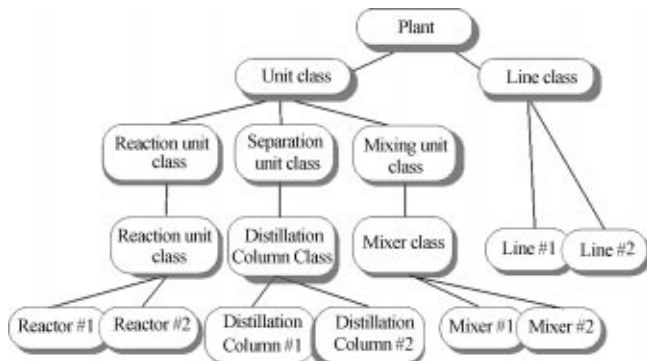


Fig. 1. Classification of chemical process.

## 2. 화학공정의 모델링 방법

### 2-1. 화학공정의 구분

화학공정은 그 고유의 목적을 수행하기 위해 각 부분별 기능을 수행할 수 있는 기본 단위공정으로 구성되어 있다. 즉, 각 단위공정의 상태와 그 기능 수행 여부에 따라 전체 화학공정의 상태가 정상적인 신뢰성을 가지고 있는지를 평가할 수 있다. 예를 들면, 실제 각 단위공정의 신뢰성을 평가하고, 각 단위공정의 조합에 따른 전체 화학공정의 신뢰성을 예측할 수 있다. 또한 전체공정의 신뢰성을 높이기 위해 각 단위공정의 신뢰성을 향상시키는 방법뿐만 아니라 단위공정의 조합을 개선하는 방법을 취할 수도 있다. 따라서 유형그래프를 이용한 새로운 신뢰성 평가기법을 개발하기 위해 화학공정을 다음의 두 가지로 분류하였다[5].

2-1-1. 화학공정은 그 고유목적을 수행하기 위해 세부적인 기능을 발휘하는 하부공정으로 구성

화학공정은 최상위의 기능을 수행하기 위해 저장, 반응, 분리, 포장 등의 기본공정과 유틸리티공정 및 배관시스템으로 구성되어 있다. 전체공정의 신뢰성은 각 단위공정의 신뢰성을 종합하여 표현되며 또한 각 단위공정의 신뢰성은 그 기능을 수행하는 각 부속장치의 신뢰성에 의해 결정된다.

따라서 화학공정은 그 고유의 기능을 발휘하는 기본공정으로 구분하고, 구분된 공정을 좀 더 세분화하여 구체적인 장치(요소)로 분류하였다. Fig. 1은 화학공정을 그 기능별로 세분화, 계층화한 계통도이며, 기본공정은 크게 다음과 같이 구분할 수 있다.

- ① 원료저장공정
- ② 화학물질의 혼합 및 반응공정

- ③ 분리공정
- ④ 이송공정
- ⑤ 제품저장 및 포장공정
- ⑥ 유틸리티공정 및 부속설비

2-1-2. 화학공정을 구성하는 장치는 유사한 작동유형 및 운전절차에 따라 분류

Fig. 2와 같이 각 단위공정은 펌프, 반응기와 같이 공정으로 유입되는 물질의 상태를 변화시킬 수 있는 요소와 파이프와 같이 단순히 공정의 결합구조를 나타내는 요소로 구분할 수 있는데 전자를 공정의 구성요소(component)라 하고 후자를 비구성요소(non-component)라 한다. 그리고 구성요소는 작동요소(operational component)와 기능요소(functional component)로 분류할 수 있다.

밸브, 펌프, 압축기와 같이 직접 조작이 가능한 장치를 작동요소라 하며 반응기, 분리기, 열교환기와 같이 작동요소를 조작한 결과 그 출력상태를 변화시키는 장치를 기능요소라 한다. 이 경우 펌프, 압축기 등과 같이 자기 자신이 직접 작동한 결과 기능을 수행하는 작동요소이며 동시에 기능을 가진 능동적 기능요소(active functional component)와 반응기, 분리기 등과 같이 작동요소가 아닌 수동적 기능요소(passive functional component)로 분류할 수 있다. 일반적으로 밸브는 어떠한 기능도 수행하지 않는 작동요소로 분류하나 감압밸브 등 기능을 수행하는 밸브는 능동적 기능요소로 분류할 수 있다.

### 2-2. 유형그래프에 의한 화학공정의 표현

화학공정을 쉽게 표현하기 위해 공정의 구성요소를 노드(node)로, 비구성요소를 아크(arc)로 하여 물질의 흐름방향으로 유형그래프로 표현하며 이를 위해 다음과 같은 가정을 하였다.

#### 2-2-1. 유틸리티공정은 주공정과 독립하여 취급

화학공정은 주공정과 달리 주공정과는 독립하여 있지만 관계를 미치고 있는 유틸리티공정을 가지고 있다. 그 유틸리티에 관한 조작은 일반적으로 정해져 있는 순서로 조작이 행해지고 있는 경우가 많다. 따라서 본 연구에서는 주공정과 분리하여 취급하고 있으므로 유틸리티공정은 그래프상에 표현되지 않는다. 그러나 작동요소에 부속하는 유틸리티에 대해서는 '유틸리티 입력'이라는 것을 가정하여 부입력신호로 작동상태를 표현한다.

#### 2-2-2. 화학공정을 유형그래프로 표현

일반적으로 화학공정은 유체의 흐름방향에 각 파이프마다 정해져 있고, 역류방지장치를 사용하여 역류를 방지하는 구조를 가지고 있는 것이 많다. 따라서 Fig. 2와 같이 화학공정은 파이프의 흐름방향을 유형아크(arc)로, 공정의 구성요소를 노드(node)로 표현한 유형그래프로 모델화할 수 있다. 이 유형그래프에서 파이프 내의 유체는 방향성을 가지는 것으로 물질의 이동은 단일방향으로 보는 것으로 하며, 입구노드와 출구노드가 동일한 아크나 동일한 입구와 출구노드를 가진 2개의 아크는 존재하지 않는 것으로 한다. 만약 이와 같은 상태가 존재하게 되면 그 기능을 가진 특수한 노드를 추가하는 것으로 보다 단순한 유형그래프를 사용한다.

## 3. 시스템 신뢰성 평가기법 개발

기존의 FTA는 시간의 경과를 반영할 수 없으며 FT작성에 어려움이 있고 해석자에 따라 다른 결과를 도출할 수 있으므로 도출된 확률의 신뢰성이 떨어진다. 따라서 이러한 문제점을 보완하기 위해 새로운 신뢰성 평가기법을 개발하였다. 본 기법은 흐름도에 의한 시스템의 표현방법, 신호의 흐름을 추적하는 해석방법에 있어서 Go Methodology[6-8]와 Go-Flow[9, 10]와 유사하나 정의된 노드, 시간의 표현방법 및 모델화는 본질적으로 다르다.

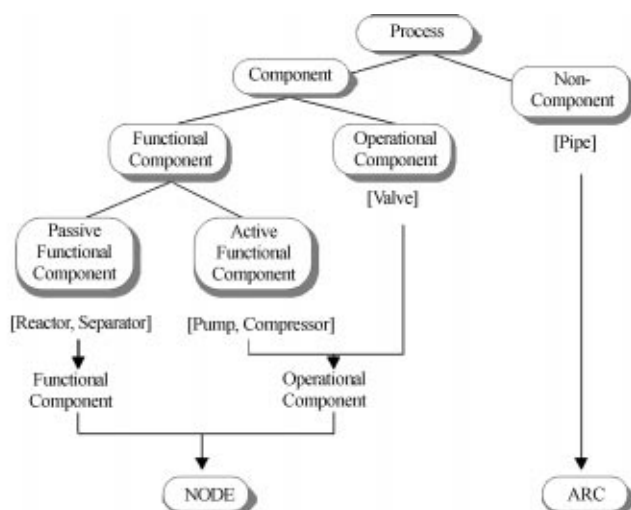


Fig. 2. Components of chemical process.

본 기법은 시스템이 정상적으로 작동하는 것을 분석하기 위해 화학공정을 구성요소와 비구성요소로 구분하여 공정흐름도를 기준으로 Fig. 2와 같이 구성요소를 노드로, 비구성요소를 아크로 표현한 유향그래프로 모델화하며 이 유향그래프를 순차적으로 해석하여 전체 시스템의 신뢰성을 예측하는 기법이다. 또한 유향그래프는 시스템의 기능을 나타내므로 공정흐름도를 그대로 유향그래프로 모델화할 수 있어 다른 기법[1-4, 6-10]에 비해 신뢰성평가 비전문가도 쉽게 접근할 수 있다.

### 3-1. 아크 및 신호

화학공정의 비구성요소인 배관, 각종 계장설비의 신호 등 공정의 흐름방향을 유향그래프의 아크로 표기하며, 아크는 신호를 가지고 있는데 신호의 존재란 실제로 흐름이 있는 경우 뿐만 아니라 흐름 가능성을 의미한다. 주입력신호는 주로 물리적 흐름을 나타내고, 장치의 동작특성에 따른 동적인 평가와 시간의 경과에 따른 신뢰성 변화를 평가하기 위해 사용되는 부입력신호는 작동노드의 동작신호 및 시간의 경과를 의미한다. 또한 신호의 강도는 신호가 존재할 확률 즉, 신뢰도를 나타내므로 주입력신호와 동작신호인 부입력신호의 강도는 '1' 이하이어야 한다. 그러나 시간의 경과를 나타내는 부입력신호는 연속시간 사이의 실제 시간을 나타내므로 '1'보다 큰 값을 가질 수 있다.

계장시스템의 경우 주입력신호가 '0'이 아닐 경우 계장시스템의 주입력신호는 '1'로 주어진다. 즉, 계장시스템은 주입력신호가 존재할 경우 그 기능을 수행하므로 계장시스템의 주입력신호는 '1'로 입력된다.

### 3-2. 시간의 경과

시스템의 신뢰성은 시간에 따라 변하기 때문에 시간의 경과에 따른 신뢰성을 예측하기 위해 시간을 신뢰성평가시 반영할 수 있는 방법을 검토하여야 한다. Go-Flow[9,10] 방법의 경우 시간에 대한 영향을 평가하기 위해 'time point'를 정의하여 시간을 시스템 신뢰성 평가시 고려하였다. 그러나 본 기법은 실제 시간을 정의하지 않고 시간의 순서를 정의하므로 시간의 개념을 정의하는데 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 실제 시간을 반영하기 위해 시스템의 초기시점을 기준으로 실제 시간의 전·후 간격으로 '시간의 경과'를 정의하여 실제 시간을 반영하였다. 즉, 본 기법에 사용된 시간의 경과는 평가하고자 하는 시점의 시간과 이전 평가시점 사이의 시간간격을 부입력신호 'T'로 나타내었으며 이 시간간격을 합할 경우 전체 시간이 된다. 따라서 초기시점을 기준으로 신뢰성을 평가할 시점인 실제 시간까지 시간간격을 세분하면 실시

간에 따른 시스템의 신뢰성을 예측할 수 있어 시스템의 적절한 정비·보수시점 예측을 통한 예방점검을 실시할 수 있다.

### 3-3. 노드

화학공정의 구성요소인 기능요소와 작동요소를 기준으로 유향그래프로 모델화할 경우, Fig. 3과 같이 기능노드와 작동노드로 구분할 수 있다. 기능요소는 반응기, 분리기, 열교환기 등 작동요소를 조작한 결과 출력상태를 변화시키는 장치이므로 운전노드로 모든 기능요소를 정의하고, 작동요소는 펌프, 압축기, 밸브 등 작동신호에 의해 운전되는 장치이므로 대기노드, 기동노드, 운전노드 및 통합노드로 세분화하여 정의하였다.

화학공정의 기능요소와 작동요소를 유향그래프로 모델화하는 경우 각 노드를 논리적으로 접속하여야 하는데 이를 접속하기 위해 논리노드를 정의하였고, 논리노드에는 각 노드가 동시에 신뢰성을 확보하여야 하는 AND gate, 각 입력신호중 1개 이상이 신뢰성을 확보하여야 출력신호를 발생하는 OR gate 그리고 대기시스템을 효과적으로 모델화하기 위한 NOT gate로 구분할 수 있다.

또한 시스템의 신뢰성을 효과적으로 분석하기 위해 유향그래프의 작동노드에 작동신호를 발생시키는 신호발생노드, 보수·정비를 실시하였을 경우 시간의 경과에 따른 신뢰도 변화를 예측하는 정비노드 및 시스템의 확장성을 고려하기 위한 확장노드를 정의하였다.

노드는 기본적으로 주입력신호, 부입력신호 및 출력신호 세 종류의 입·출력 신호로 연결되며 주입력신호와 부입력신호로부터 적절한 출력신호를 발생시킨다. 부입력신호로 작동노드에 작동신호를 발생시키고, 기능노드, 작동노드 및 지원노드에 시간경과를 발생시켜 시간경과에 따른 시스템의 신뢰성을 예측할 수 있게 한다. 또한 냉각수, 스팀 등 유틸리티는 sub system으로 분리하여 시스템의 신뢰성을 평가한 후 main system의 노드로 입력하여 전체시스템의 신뢰성을 예측할 수 있으며, 각 노드의 출력강도식은 Table 1과 같고 유향그래프 모델 작성시 사용되는 심벌은 Fig. 4와 같다.

화학공정의 각 장치는 대기, 기동, 운전상태로 동적인 상태를 구분할 수 있는데 이런 시스템의 동적인 특성을 평가하기 위해 일정시점에서 장치에 동적인 신호를 발생하는 대기, 기동, 운전, 정비 및 통합노드를 정의하였으며 각 노드의 특성은 다음과 같다.

#### 3-3-1. 대기노드

이 노드는 SBN(stand by node)로 표기하며 시스템 대기중 즉, 주입력신호 S(t)가 존재하지 않을 경우 장치의 고장을 모델화한다. 화학공정은 연속시스템이기 때문에 1개의 장치가 고장날 경우 전체시스템이 정지될 수 있으며 이를 재기동할 경우 많은 경비가 소요된다. 따라서 펌프, 압축기 등 주요장치에 대해서는 대기장치를 설치하는데 이러한 대기장치가 전체시스템 신뢰성에 미치는 영향을 평가하기 위해 대기노드가 필요하다. 즉, 유향그래프 모델 작성시 대기장치는 대기노드를 이용하여 모델화하므로 전체시스템의 신뢰성평가에 미치는 영향을 평가할 수 있다.

대기노드는 1개의 주입력신호와 시간의 경과를 나타내는 부입력신호 'T'로부터 1개의 출력신호를 발생시킨다. 시스템의 신뢰성평가를 위해 가장 우선적으로 확보되어야 하는 것은 설비의 신뢰성 데이터인데 본 대기노드는 대기중 단위시간당 장치의 고장률을 필요로 한다.

#### 3-3-2. 기동노드

이 노드는 SUN(start up node)로 표기하며 시스템의 초기기동을 모델화한다. 화학공정의 구성요소중 직접 조작인 가능한 펌프, 압축기, 자동밸브 등 작동요소의 초기 기동시 기동신뢰성을 평가하기 위해 정의된 노드이다.

1개의 주입력신호와 1개의 부입력신호인 기동신호로부터 출력신호를 발생시키는데 작동요소의 기동 신뢰도를 나타내며 성공적으로 작동할 확률과 작동신호가 발생되기 전에 미리 작동할 확률에 대한 신뢰성 데이터를 필요로 한다.

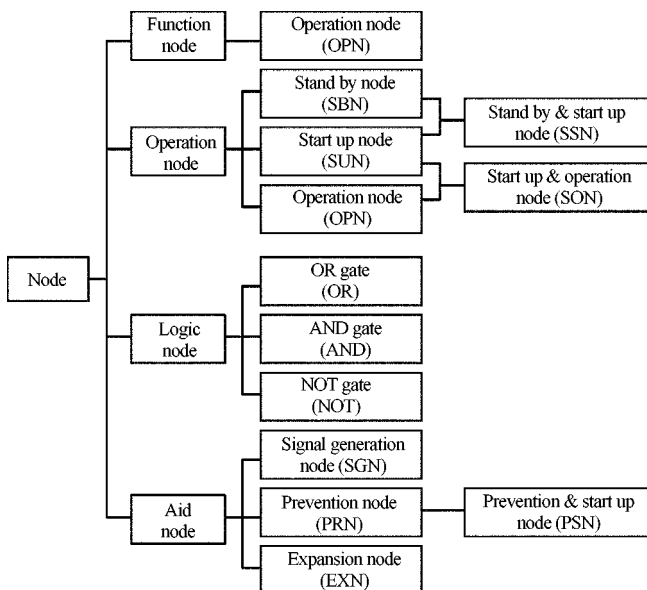


Fig. 3. Classification of node.

Table 1. Summary of the function of nodes

Node type	Main input signal intensity	Subinput signal intensity	Output signal intensity
OPN	$S(t_1), \dots, S(t_n)$	$T_1(t_1), \dots, T_1(t_n)$ $T_2(t_1), \dots, T_2(t_n)$ ...	$R(t) = S(t) \exp\{-\lambda \cdot \sum_{i, t_k \leq t} T_i(t_k) \times \min[1.0, S(t_k)/S(t)]\}$
SBN	$S(t)$	$T_1(t_1), \dots, T_1(t_n)$ $T_2(t_1), \dots, T_2(t_n)$ ...	$R(t) = S(t) \exp\{-\lambda \cdot \sum_{i, t_k \leq t} T_i(t_k)\}$
SUN	$S(t)$	$P(t)$	$R(t) = S(t) \cdot C(t)$ $C(t_1) = P_p$ $C(t) = C(t') + [1.0 - C(t')] \cdot P(t) \cdot P_g$
SSN	$S(t)$	$T_1(t_1), \dots, T_1(t_n)$ $T_2(t_1), \dots, T_2(t_n)$ ...	$R(t) = R1(t) \cdot [P_p + (1 - P_p) \cdot P(t) \cdot P_g]$ $R1(t) = S(t) \exp[-\lambda \cdot \sum_{i, t_k \leq t} T_i(t_k)]$
SON	$S(t_1), \dots, S(t_n)$	$T_1(t_1), \dots, T_1(t_n)$ $T_2(t_1), \dots, T_2(t_n)$ ...	$R(t) = R1(t) \exp\{-\lambda \cdot \sum_{i, t_k \leq t} T_i(t_k)\} \times \min[1.0, R1(t_k)/R1(t)]$ $R1(t) = S(t) \cdot C(t)$ $C(t_1) = P_p$ $C(t) = C(t') + [1.0 - C(t')] \cdot P(t) \cdot P_g$
OR	$S_1(t), \dots, S_n(t)$	-	$R(t) = 1 - \prod_{i=1}^n \{1 - S_i(t)\}$
AND	$S_1(t), \dots, S_n(t)$	-	$R(t) = \prod_{i=1}^n S_i(t)$
NOT	$S(t)$	-	$R(t) = 1 - S(t)$
PRN	$S(t)$	$T_1(t_1), \dots, T_1(t_n)$ $T_2(t_1), \dots, T_2(t_n)$ ...	$R(t) = S(t) \exp\{-\lambda \cdot \sum_{i, t_k \leq t} T_i(t_k)\}$
PSN	$S(t)$	$T_1(t_1), \dots, T_1(t_n)$ $T_2(t_1), \dots, T_2(t_n)$ ...	$R(t) = R1(t) \cdot [P_p + (1 - P_p) \cdot P(t) \cdot P_g]$ $R1(t) = S(t) \exp[-\lambda \cdot \sum_{i, t_k \leq t} T_i(t_k)]$

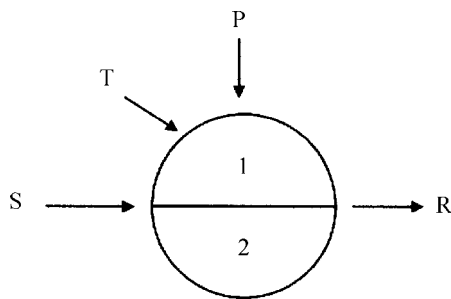


Fig. 4. Symbol of node. 1: Node type, 2: Node number

## 3-3-3. 운전노드

이 노드는 OPN(operation node)로 표기하며 화학공정의 구성요소인 반응기, 열교환기 등 기능요소와 펌프, 압축기 등 작동요소의 운전중 고장을 모델화하는데 사용된다. 운전중인 장치의 신뢰성을 평가할 수 있으며 시간의 경과에 따라 신뢰성 변화를 예측할 수 있어 정비·보수 시점을 결정할 수 있게 하는 역할을 수행한다.

1개의 주입력신호와 시간의 경과를 나타내는 부입력신호 'T'로부터 1개의 출력신호를 발생시키며 단위시간당 장치의 고장률 데이터를 필요로 한다.

## 3-3-4. 정비노드

이 노드는 대기중 일정한 시점에서 정비·보수를 실시하였을 때 신뢰성 변화를 모델화하는데 PRN(prevention node)로 표기된다. 어떤 시간( $t_p$ )에서 정비를 실시하여 장치가 정상적으로 작동하는 경우 시간의 경과에 따른 신뢰도 감소를 장치의 처음 상태로 복귀시키므로 입력신호 'T'는 정비시점  $t_p$ 에서 '0'이 된다. 즉, 시간경과 'T'는 대기노드에서

정의한 'T'와 다른 의미를 지니고 있는데 정비노드에서 'T'는 최종 정비·보수시점으로부터 시간의 경과를 나타낸다.

## 3-3-5. 통합노드

펌프, 압축기 등과 같이 대기장치를 보유하고 있는 시스템은 운전중인 장치가 고장날 경우 대기장치가 즉시 운전이 가능하여야 전체 시스템의 신뢰성을 확보할 수 있다. 따라서 이러한 대기장치를 보유한 시스템을 평가하기 위한 대기상태와 기동상태의 통합형 및 초기운전으로부터 신뢰성 감소를 평가하기 위한 초기기동과 운전중 고장의 통합형을 정의하였다.

## (1) Stand by &amp; start up node

이 노드는 대기상태에서 초기기동상태까지를 모델화하는 것으로 SSN(stand by & start up node)로 표기되며, 주입력신호  $S(t)$ 가 존재하지 않을 경우 시간의 경과에 따른 고장과 초기기동 신뢰성을 나타내는 노드로 성공적으로 작동할 확률과 미리 작동할 확률 및 대기중 단위시간당 장치의 고장률에 대한 신뢰성 데이터를 필요로 한다. 이 노드는 운전중인 시스템이 고장날 경우 대기시스템이 운전되므로 전체 시스템의 신뢰성을 향상시킬 수 있는 대기시스템이 있는 시스템 해석시 사용될 수 있는 노드이다.

## (2) Start up &amp; operation node

이 노드는 초기기동상태로부터 운전중 고장을 모델화하는 것으로 SON(start up & operation node)로 표기되며, 초기기동 신뢰성과 주입력신호  $S(t)$ 가 존재할 경우 시간의 경과에 따른 고장을 나타내는 노드로 시스템의 초기운전으로부터 시간의 경과에 따른 신뢰성 변화를 예측할 수 있다. 장치가 성공적으로 작동할 확률과 작동신호가 발생되기 전에 미리 작동할 확률 및 단위시간당 장치의 고장률 데이터를 필요로 한다.

## (3) Prevention &amp; start up node

이 노드는 대기중 일정한 시점에서 정비·보수를 실시하고 일정시점

에서 기동될 때의 신뢰성 변화를 모델화하는데 PSN(prevention & Start up node)로 표기된다. 주입력신호  $S(t)$ 가 존재하지 않을 경우 시간의 경과에 따른 고장과 정비·보수 및 초기기동 신뢰성을 나타내는 노드로 성공적으로 작동할 확률과 미리 작동할 확률 및 대기중 단위시간당 장치의 고장률을 필요로 하며, 시간경과 'T'는 최종 정비·보수시점으로부터 시간의 경과를 나타낸다.

#### 4. 이송시스템의 신뢰성 평가

##### 4-1. 공정설명

Fig. 5와 같이 2대의 펌프로 구성된 이송시스템이 있다. 평상시에는 1대의 펌프를 운전하고, 만약 운전중에 이송이 정지할 경우 펌프 출구측에 설치되어 있는 압력감지기로부터 신호를 받아 대기중인 펌프가 기동하게 된다. 펌프 및 밸브는 모터구동방식이며, 본 이송시스템이 고장날 경우 원료공급이 중단되어 후속공정이 중지되는 등 공정 전체에 치명적인 영향을 미칠 수 있다. 따라서 대기펌프 및 모터구동밸브는 신뢰성을 확보하기 위하여 500시간 간격으로 정비·보수를 실시하고 있다.

##### 4-2. 유향그래프 모델

이송시스템의 신뢰성평가를 위한 유향그래프 모델을 작성하기 위해 먼저 시스템의 신뢰성평가 범위를 설정하여야 하는데, 본 이송시스템의 신뢰성평가는 초기운전으로부터 운전시스템이 고장날 경우 대기시스템이 정상적으로 기동하는 시점까지로 정의하였다. 왜냐하면 1개의 시스템이 고장날 경우 즉시 대기시스템이 기동되어야 하며 고장시스템은 보수를 실시하여야 하기 때문이다.

본 시스템은 Fig. 6과 같이 유향그래프로 모델화된다. 각 노드의 수평선 위는 노드의 물리적 의미를 나타내며 아래 숫자는 노드번호를 나타내고 있다. Fig. 6에서 노드 1, 2, 3번은 신호를 발생하는 것으로 충분한 유체의 공급 및 펌프와 동력구동밸브에 신호를 발생하는 것을 의미한다.

노드 4, 5번은 펌프와 동력구동밸브의 기동으로부터 시간의 경과에 따른 고장을 나타낸다. 즉, 초기 ON으로부터 시간의 경과에 따라 OFF로 변하는 것을 의미하며, 노드 9, 10번은 대기중 시간의 경과에 따른

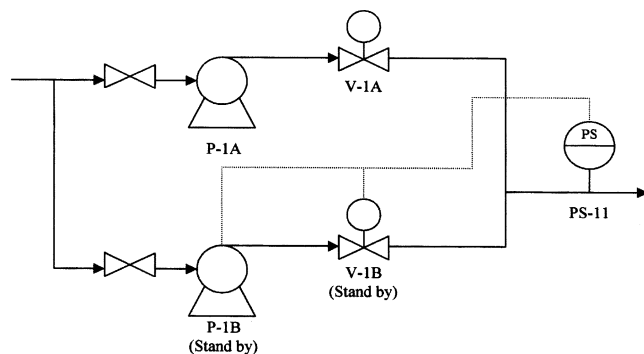


Fig. 5. Transfer system.

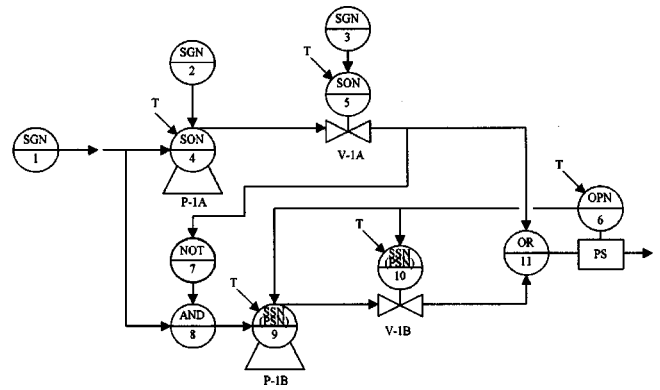


Fig. 6. Directed graph of transfer system.

고장으로부터 초기기동까지를 나타낸다. 즉, OFF상태에서 시간의 경과에 따른 신뢰성 변화와 초기기동(ON)의 신뢰성을 표현하고 있다. 또한 노드 9, 10번 괄호안은 대기중 일때 시간의 경과에 따라 고장 가능성이 증가하므로 이를 낮추기 위하여 정비·보수를 실시한 것을 반영하여 대기중 시간의 경과에 따른 고장, 정비·보수 및 초기기동의 신뢰성을 나타내는 노드이다. 노드 6번은 운전중 고장 즉, ON상태에서 시간이 경과함에 따라 고장이 나는 것을 반영하고 있으며, 노드 7, 8, 11번은 논리 gate를 나타낸다.

노드 7번은 대기시스템을 유향그래프로 모델화하는 경우에 사용되는 데 운전중인 시스템의 출력강도의 여집합을 취하는 기능을 가지고 있다. 이 노드는 전체 시스템의 신뢰성을 향상시키기 위해 즉, 운전중인 시스템의 신뢰성을 보장하기 위해 설치한 대기시스템의 신뢰성을 평가하기 위해 사용되며, 대기시스템의 주입력신호는 운전중 시스템의 여집합이 주입력신호가 된다. 또한 NOT gate(7번 노드)로 여집합을 나타내고 운전시스템과 대기시스템을 조합할 경우 OR gate(11번 노드)로 접속되는데 이 OR gate 즉, 대기시스템의 OR gate 출력신호강도는 운전중인 시스템의 신뢰도에 대기시스템의 신뢰도를 합한 값으로 나타낸다.

##### 4.3. 신뢰성평가 결과

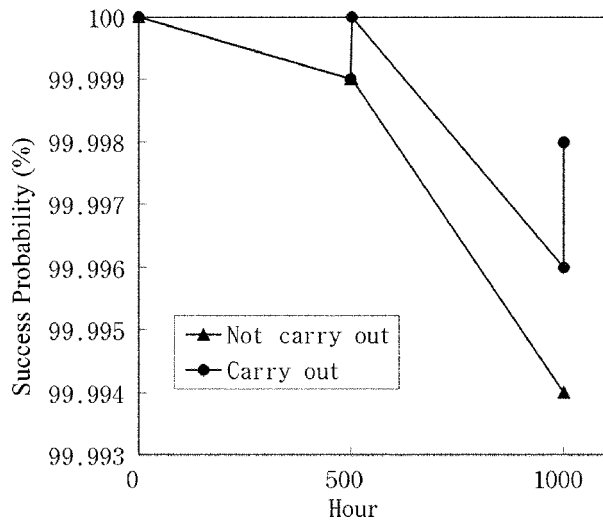
본 시스템의 신뢰성을 평가하기 위해 장치의 고장률, 기동확률 등 신뢰성 데이터가 필요한데 본 시스템 해석에 사용된 신뢰성 데이터는 Table 2[11]와 같이 가정하였다.

초기운전으로부터 500시간 간격으로 대기중인 펌프 및 모터구동밸브의 정비·보수를 실시하고 보수시간은 1시간이내이므로 전체시스템의 신뢰성평가지 고려하지 않았으며, 배관과 배관의 부속품 및 human error는 고려하지 않고 압력감지시스템은 1개의 장치로 가정하였다. 또한 펌프에 유량은 충분히 공급되고 있다고 가정하였다.

Fig. 7은 0(운전시작시점), 500, 1,000시간에서 500시간 간격으로 대기중인 펌프 및 모터구동밸브의 정비·보수를 실시하였을 경우와 미 실시하였을 경우에 대한 시간경과에 따른 시스템의 신뢰도 변화를 나타

Table 2. Reliability data used in the transfer system

Equipment	Data
Pump	Probability for successful operation
	0.99980
	Failure rate on operation
Motor operated valve	0.0000071/h
	Failure rate on stand by
	0.0000036/h
Pressure sensor system	Probability for successful operation
	0.99977
	Failure rate on operation
	0.00000136/h
	Failure rate on stand by
	0.00000068/h
	Failure rate on operation
	0.0000004/h



## 사용기호

S	: main input signal intensity
P	: subinput signal intensity
R	: output signal intensity
$\lambda$	: failure rate
T	: time interval
t	: time
$t_i$	: initial time
$t_K$	: time before the time [t]
$t'$	: time immediately before the time [t]
$t_r$	: prevention time
C	: probability for operation
$P_p$	: probability for premature operation
$P_g$	: probability for successful operation

## 참고문헌

- Long, W., Sato, Y. and Horigome, M., "Quantification of Sequential Failure Logic for Fault Tree Analysis," *Reliab. Eng. System Safety*, **67**(3), 269-274(2000).
- Lee, H. K., "Study on Digraph Based Fault Tree Synthesis of Chemical Process," M.D. Dissertation, Pusan National Univ., Busan, Korea, 10-11(1998).
- Kim, Y. M., "An Algorithm for Risk Analysis using FTA," M.D. Dissertation, Hanyang Univ., Seoul, Korea, 11-31(1996).
- Cheng, Y. L. and Yuan, J., "On Structured Fault Tree Construction by Modularizing Control Loops," *Reliab. Eng. System Safety*, **67**(2), 161-173(2000).
- An, D. M., "A Computer-Aided System for Abnormal State Operation in Chemical Plant," Ph.D. Dissertation, Pusan National Univ., Busan, Korea, 33-36(1999).
- Chu, B. B., "Go Methodology Volume 1: Overview Manual," Electric Power Research Institute, California(1983).
- Shen, Z., Gao, J. and Huang, X., "A New Quantification Algorithm for the Go Methodology," *Reliab. Eng. System Safety*, **67**(3), 241-247(2000).
- Shen, Z., Gao, J. and Huang, X., "An Exact Algorithm Dealing with Shared Signals in the Go Methodology," *Reliab. Eng. System Safety*, **73**(2), 177-181(2001).
- Matsuoka, T. and Kobayash, M., "Go-Flow: A New Reliability Methodology," *Nucl. Sci. & Eng.*, **98**, 64-78(1988).
- Matsuoka, T. and Kobayash, M., "The Go-Flow Reliability Analysis Methodology-Analysis of Common Cause Failures with Uncertainty," *Nuclear Engineering and Design*, **175**, 205-214(1997).
- Hwang, K. S., Park, N. H., An, D. M. and Park, C. I., "Development of Risk Analysis Method for Equipment Operation," Korea Occupational Safety & Health Agency, Incheon, Korea, 141-161(2003).

Fig. 7. Success probability in the prevention system.

내고 있다. 500, 1,000시간이 경과하였을 때 정비 유무에 따라 신뢰도의 차이를 나타내고 있는데 즉, 예방점검을 실시하지 않을 경우 신뢰도가 급격히 감소하는 반면, 예방점검을 실시하였을 경우 정비·보수시점에서 신뢰도가 향상되는데 이는 정비·보수시점에서는 시간의 경과가 최초의 운전상태가 되기 때문이다.

따라서 본 기법을 사용하여 시간경과에 따른 시스템의 신뢰도를 평가할 경우 정확한 신뢰도 데이터를 근거로 하여 예방점검을 실시할 수 있다. 즉, 시스템의 신뢰도가 허용할 수 있는 신뢰도 이하가 될 경우 정비·보수를 실시하여 신뢰도를 향상시키므로 시스템의 고장을 미연에 예방할 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 기존 안전성평가기법인 FTA의 단점을 보완하고 장치의 운전상황에 대한 동적 신뢰성을 평가할 수 있는 새로운 신뢰성평가기법을 개발하였다.

본 기법에서는 화학공정의 구성요소와 비구성요소를 각각 노드와 아크로 표현한 유향그래프로 모델화하고 입·출력신호의 강도를 이용하여 각 노드의 출력강도를 순차적으로 해석하여 시스템의 신뢰도를 계산한다.

또한 본 기법은 화학공장에서 사용하는 공정흐름도와 거의 일치하는 유향그래프 모델도를 사용하므로 비전문가도 쉽게 사용할 수 있어 화학공정의 정량적 위험성평가 기술을 향상시키는데 기여할 수 있을 것이며, 동적인 예측기법을 사용하므로 시간의 경과에 따른 신뢰도를 예측하여 정비·보수시점을 과학적으로 예측할 수 있어 적절한 예방 정비·보수를 통한 중대산업사고 예방은 물론 설비관리를 과학적으로 하여 생산성 향상에도 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

## 감 사

본 연구는 두뇌한국 21(BK21) 사업과 부산대학교 연구(보조)비(4년 과제)의 지원으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.