



## 시스템 구성요소의 신뢰도를 기반으로 하는 새로운 GO-FLOW기법 개발

변운섭\* · 이주영\*\* · †황규석

\*한국산업안전보건공단 부산지역본부 · \*\*울산과학대학교 환경화학공업과  
부산대학교 화공생명공학부  
(2012년 5월 7일 투고, 2012년 7월 23일 수정, 2012년 7월 23일 채택)

## The Development of New GO-FLOW Methodology Using the Reliability of System Components

Yoon Sup Byun\* · Ju-Yeong Lee\*\* · †Kyu Suk Hwang

\*Busan Regional Office, Korea Occupational Safety & Health Agency, Busan 609-320, Korea  
\*\*Department of Environmental & Chemical Industry, Ulsan College, Ulsan 680-749, Korea  
School of Chemical and Biomolecular Engineering, Pusan National University, Busan  
609-735, Korea

(Received May 7, 2012; Revised July 23, 2012; Accepted July 23, 2012)

### 요 약

GO-FLOW기법은 시스템이 정상적으로 작동할 가능성을 평가할 수 있는 기법으로써 신호선과 연산자를 사용하여 시스템을 GO-FLOW Chart로 모델화하고, 이 GO-FLOW Chart를 순차적으로 해석하여 시스템의 신뢰도를 평가하는 기법이다. 그러나 GO-FLOW기법은 1개의 시스템 구성요소를 여러 개의 연산자로 모델링하므로 시스템 흐름도와 상이한 GO-FLOW Chart가 작성될 수 있고, 시간점을 지정하여 시간을 모델링하므로 실제 운전시간에 따른 신뢰도 변화를 평가하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 구성요소의 기능(정상/고장)을 기준으로 시스템의 신뢰도를 평가하는 기법을 개발하였다. 본 기법은 구성요소의 운전상태와 상관없이 그 기능을 유지할 가능성을 기준으로 시스템의 신뢰도를 평가하며, 1개의 구성요소는 1개의 연산자로 모델링하므로 시스템 흐름도와 거의 유사한 모델도를 작성할 수 있고, 실제시간을 반영한 연산자를 사용하여 실제시간에 따른 시스템의 신뢰도를 쉽게 평가할 수 있다.

**Abstract** - The GO-FLOW methodology is capable of assessing system reliability. It models the system into a GO-FLOW chart with signal lines and operators and assesses the reliability of system by assessing the GO-FLOW chart sequential. But, as it models one component of system into several operators, the GO-FLOW chart which is different from the system flow diagram be modeled. Also, as it models the real operation time into "time point", it is hard to assess the reliability change according to the real operation time. Therefore, in this paper, the new GO-FLOW methodology which use the function(success/failure) of system components has been developed. It can assess the successful operating probability of system, regardless of the operating status of components. As it models one component of system into one operator, the GO-FLOW chart which is similar the system flow diagram can be modeled. Also, it is able to easily assess the successful probability of system according to the real operation time using the time in the operators.

**Key words** : GO-FLOW methodology, reliability, GO-FLOW chart, signal line, operator, system flow diagram

†주저자:kshwang@pusan.ac.kr

## I. 서론

원자력발전소, 화학공장 등은 규모가 크고 시스템이 복잡하여 사고발생시 시설의 파괴 또는 오염으로 인한 경제적 손실은 물론 대규모 인명피해를 초래할 수 있다.

따라서 체계적인 위험성 평가가 선행되어야 하는데 위험성 평가는 많은 시간과 노력 및 전문지식이 필요한 활동이며, 그 방법은 위험요소의 존재 유무를 찾아내는 정성적 위험성 평가기법과 위험요소를 확률적으로 평가하는 정량적 위험성 평가기법으로 분류한다.

정성적 위험성 평가기법으로는 체크리스트(Check List), 사고예상질문분석(What-if), 인간실수분석(Human Error Analysis), 위험과 운전분석(Hazard and Operability, HAZOP) 등이 있고, 정량적 위험성 평가기법에는 결합수분석(Fault Tree Analysis, FTA), 사건수분석(Event Tree Analysis, ETA), GO기법[1-3], GO-FLOW기법[4,5] 등이 있다.

그 중에서도 HAZOP기법은 대표적인 정성적 위험성 평가기법으로써 공정에서 발생할 수 있는 사고의 위험성과 그 원인을 발견하여 개선대책을 제시하고, 조업성을 검토하여 공정 운전상에 발생할 수 있는 문제에 대해 대처할 수 있도록 한다. 따라서 HAZOP기법은 복잡한 시스템의 정성적 위험성 평가기법으로 널리 사용되고 있다[6].

한편, 정량적 위험성 평가기법으로는 여러 종류가 있으나 FTA기법이 일반적으로 사용되고 있다. FTA기법은 연역적 사고방식으로 시스템의 고장 및 사고를 Fault Tree Chart로 추적해 나감으로써 고장 및 사고의 원인이 어떤 것인지를 찾아내고, 사고가 발생할 확률을 평가할 수 있는 위험성 평가기법이다 [7]. 그러나 FTA기법은 AND Gate와 OR Gate로 논리적으로 결합하여 Fault Tree를 작성하여야 하므로 대규모 복잡한 시스템에 적용하는데 어려움이 있고, 사고를 정상사상으로 설정하므로 사고가 아닌 이탈 현상을 평가할 수 없다. 또한 시간경과에 따라 안전성이 변하는 시스템의 위험도를 평가하는데 한계가 있다[8].

따라서 이러한 FTA기법의 한계를 극복하고, 대규모 복잡한 시스템의 정상작동 확률 즉, 사고가 아닌 시스템의 신뢰도를 평가할 수 있는 정량적 위험성 평가기법으로 GO-FLOW기법이 개발되었다. GO-FLOW기법은 신호선(Signal Line)과 연산자(Operator)를 사용하여 시스템을 GO-FLOW Chart로 모델링하고, 이 GO-FLOW Chart를 순차적으로 해석하여 시스템의 신뢰도를 평가하는 기법으로 시간점(Time Point)을

사용하여 시간 의존적인 시스템의 신뢰도를 평가할 수 있다[4].

그러나 GO-FLOW기법은 1개의 시스템 구성요소를 여러 개의 연산자로 모델링하므로 시스템 흐름도와 상이한 GO-FLOW Chart가 작성될 수 있고, 시간에 따른 신뢰성 평가는 가능하지만 실제시간으로 모델링하지 않고, 시간점을 지정하여 시간을 모델링하므로 실제시간에 따른 신뢰성 변화를 평가하는데 어려움이 있다[9,10].

따라서 본 연구에서는 시스템 구성요소의 운전상태(열림/닫힘)를 기준으로 물리적인 흐름(또는 전류의 흐름)의 존재 가능성을 평가하는 기존 GO-FLOW기법과는 달리 구성요소의 기능(정상/고장)을 기준으로 시스템의 신뢰도를 평가하는 기법을 개발하였다[4].

## II. 새로운 GO-FLOW기법 개발

### 2.1. 개발전략

원자력발전소, 화학공장 등의 신뢰도를 평가하기 위해 개발한 GO-FLOW기법은 시간에 따른 시스템의 신뢰도를 평가하는 것이 아니라 운전상태(열림/닫힘)를 기준으로 물리적인 흐름의 존재 가능성을 평가하므로 시스템 구성요소의 기능(정상/고장)을 기준으로 한 시스템의 신뢰도를 평가할 수 없다[4].

따라서 본 연구에서는 운전상태를 기준으로 물리적인 흐름의 존재 가능성을 평가하는 기본 GO-FLOW기법을 보완한 시스템 구성요소의 기능을 기준으로 시스템의 정상운전 가능성을 평가하는 새로운 GO-FLOW기법을 개발하였다.

본 기법은 시스템의 각종 구성요소가 그 기능을 유지하면 시스템의 기능이 유지되므로 구성요소의 정상운전 및 고장상태를 기준으로 시스템의 신뢰도를 평가하는 기법으로써 구성요소의 운전상태와 상관없이 그 기능을 유지할 가능성을 기준으로 시스템의 신뢰도를 평가한다. 그리고 기존 GO-FLOW기법은 동일 구성요소가 2개 이상의 연산자로 표현될 수 있어서 GO-FLOW Chart가 복잡하여 신뢰도 평가자에 따라 다른 GO-FLOW Chart가 작성될 수 있어 신뢰도 평가결과의 신뢰성이 떨어질 수 있다.

따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 시스템 흐름도와 거의 유사한 GO-FLOW Chart를 작성할 수 있는 연산자를 개발하여 신뢰도 평가자가 달라도 거의 동일한 GO-FLOW Chart가 작성될 수 있게 하였다. 또한 기존 GO-FLOW기법은 GO-FLOW Chart 상의 연산자를 순차적으로 계산하여 시스템의 신뢰도를 평가하는데 시간경과에 따른 신뢰도 변화를 평가하기 위해 Time Point를 사용하고

있어서 실제시간에 따른 신뢰도를 평가하는데 어려움이 있는데 본 연구에서는 실제시간을 반영한 연산자의 연산식을 개발하여 실제시간에 따른 시스템의 신뢰도 변화를 쉽게 평가할 수 있게 하였다[9,10].

**2.2. 신뢰도와 고장률의 관계**

시스템 구성요소의 신뢰성은 규정시간 동안 그 기능을 유지할 가능성을 나타내며, 신뢰도는 신뢰성을 공학적으로 분석하기 위해 확률로 정량화한 것이다. 따라서 구성요소의 신뢰성 척도를 나타내는 신뢰도 함수,  $R(t)$  는 사용시간에 따른 고장률함수,  $\lambda(t)$  을 근거로 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다[8,10].

$$R(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(t)dt\right) \quad (1)$$

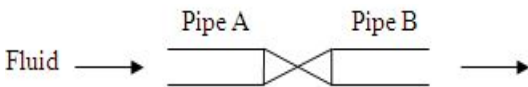
또한 시스템의 구성요소는 사용시간에 따라 고장 형태가 변하는데 설계미스, 제조공정의 잠재적 결함 등에 기인한 고장으로 고장률이 감소하는 초기고장기간, 제법 긴 시간에 걸쳐 고장률이 일정한 우발고장기간 그리고 고장률이 시간에 따라 증가하는 마모고장기간으로 나눌 수 있다[10].

한편, 본 연구에서 개발한 새로운 GO-FLOW기법은 고장률이 일정한 우발고장기간에 시스템이 정상적으로 작동할 가능성을 평가하는 기법이므로 우발고장기간에서 고장률,  $\lambda(t)$  을 상수로 하여 식 (1)에 대입하면 시스템 구성요소의 신뢰도와 고장률의 관계는 식 (2)와 같이 된다[8,10].

$$R(t) = \exp(-\lambda t) \quad (2)$$

**2.3. 신호의 정의**

기존 GO-FLOW기법에 있어서 신호는 흐름, 전류, 정보, 지령, 시간경과 등을 의미한다. 따라서 기존 GO-FLOW기법에 있어서 「신호의 존재」란 실제로 유체 또는 전류가 흐르고 있는 것뿐만 아니고, 흐를 가능성을 가지고 있는 것을 의미한다. 즉, Fig. 1과 같이 직렬로 연결된 배관에 1개소의 밸브가 닫혀 있으면 유체경로의 전역에 걸쳐서 유체는 흐르지 않으나 기존 GO-FLOW기법에 있어서는 닫혀 있는 밸브의 상류측(Pipe A)에 있어서 「신호는 존재한다(밸브를 열면 유체는 흐를 능력을 가지고 있다)」로 생



**Fig. 1.** Fluid flow through a valve.

각하고, 하류측(Pipe B)에 있어서 「신호는 존재하지 않는다(닫혀 있는 밸브의 하류에 있는 밸브를 열어 도 유체는 흐르지 않는다)」로 생각한다[4].

그러나 새로운 GO-FLOW기법에서 신호는 흐름, 전류, 정보, 지령 등을 나타내지만 그 의미는 다르다. 새로운 GO-FLOW기법에서 신호는 Fig. 1의 상류측과 하류측을 구분하지 않고, 구성요소가 그 기능을 유지하고 있을 경우 신호는 존재한다. 즉, 밸브의 위치에 따라 신호의 존재가 결정되는 것이 아니라 유체가 흐를 때 그 기능을 유지할 수 있는지 여부에 따라 신호의 존재가 결정된다. 결국 「신호가 존재한다」는 것은 구성요소가 고장나지 않고, 그 기능을 유지하는 것을 의미한다. 또한 기본 GO-FLOW기법에서는 시간경과를 신호로 나타내었는데 새로운 기법에서는 연산자에 포함되어 있는 실제시간을 사용한다.

**2.4. 연산자의 정의**

연산자는 기본적으로 입력신호(S), 부입력신호(P) 및 출력신호(R)의 세 종류의 입·출력신호를 가지고 있으며, 시스템 구성요소의 정상운전과 고장을 모델링하는데 사용된다.

본 기법에서 사용되는 연산자는 기존 GO-FLOW기법의 연산자를 사용하여 개발하였다. 시스템 구성요소의 운전상태에 따라 기존 GO-FLOW기법의 21, 35, 37, 38형으로부터 41, 42, 43형의 연산자를 개발하였고, 21, 26, 27, 35, 37, 38, 39형으로부터 46, 47, 48형의 연산자를 개발하였다. 또한 22, 23, 30형의 Logic Gate는 그대로 사용하면서 NOR(Not OR) Gate를 추가하였으며, 연산자명은 각각 56(AND Gate), 57(OR Gate), 58(NOT Gate), 59형(NOR Gate)으로 하였다. 그리고 25형은 그대로 사용하면서 연산자명은 51형으로 정의하였다. 이때, 연산자명은 기존 GO-FLOW기법이 21번부터 부여하고 있으므로 혼란을 피하기 위해 41번부터 부여하였다[4,5].

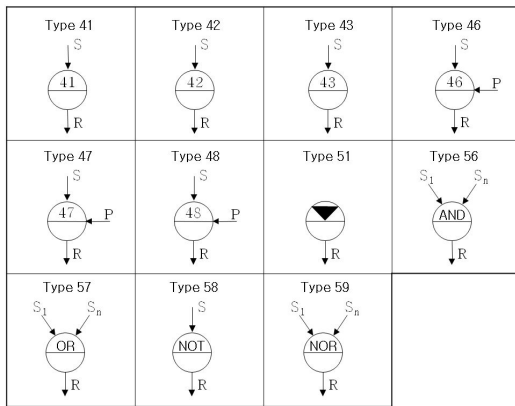
본 연구에서 개발한 연산자를 정리하면 Fig. 2와 같은데 각 연산자의 수평선 상부에 연산자 형식을 표기하였으며, 각 연산자의 연산식은 식 (2)와 기존 GO-FLOW기법의 연산식을 기본으로 하여 개발하였는데 그 결과를 정리하면 Table 1과 같다[4,5,9,10].

**(1) Operative Component(Type 41)**

이 연산자는 기존 GO-FLOW기법의 35, 37, 38형으로부터 개발한 것으로 운전 중인 구성요소를 모델링하는데 사용된다. 이 연산자는 구성요소의 운전상태에서 고장률을 필요로 하며, 출력신호의 강도는 식 (3)과 같다. 즉, 출력신호의 강도는 입력신호의 강

**Table 1.** Summary of the functions of operators

Type	Input signal intensity	Sub-input signal intensity	Output signal intensity
41	S(t)	-	$R(t) = S(t) \cdot \exp(-\lambda_{op}t_{op})$
42	S(t)	-	$R(t) = S(t) \cdot \exp(-\lambda_{sb}t_{sb}) \cdot P_g$
43	S(t)	-	$R(t) = S(t) \cdot \exp(-(\lambda_{sb}t_{sb} + \lambda_{op}t_{op})) \cdot P_g$
46	S(t)	P(t)	$R(t) = S(t) \cdot [P(t) \cdot P_g]$
47	S(t)	P(t)	$R(t) = S(t) \cdot \exp(-\lambda_{sb}t_{sb}) \cdot [P(t) \cdot P_g]$
48	S(t)	P(t)	$R(t) = S(t) \cdot \exp(-(\lambda_{sb}t_{sb} + \lambda_{op}t_{op})) \cdot [P(t) \cdot P_g]$
56	S1(t), ·Sn(t)	-	$R(t) = \prod_{i=1}^n S_i(t)$
57	S1(t), ·Sn(t)	-	$R(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - S_i(t))$
58	S(t)	-	$R(t) = 1 - S(t)$
59	S1(t), ·Sn(t)	-	$R(t) = \sum_{i=1}^n S_i(t)$



**Fig. 2.** Operators in new GO-FLOW methodology.

도에 구성요소가 정상적으로 운전할 확률을 곱한 값이다.

$$R(t) = S(t) \cdot \exp(-\lambda_{op}t_{op}) \quad (3)$$

이 연산자로 사용 중인 전구, 운전 중인 펌프 및 압축기 등 운전 중인 시스템의 구성요소를 모델링하는데 사용할 수 있다.

(2) Two-State of Stationary Component (Type 42)  
이 연산자는 기존 GO-FLOW기법의 21형으로부터

터 개발한 것으로 대기상태에 있다가 운전하는 시스템의 구성요소를 모델링하는데 사용된다. 즉, 구성요소가 대기상태에서 고장이 발생하지 않고, 작동신호에서 정상적으로 작동하는 것을 모델링하는데 구성요소의 대기상태에서 고장률과 작동신호시 정상적으로 작동할 확률을 필요로 하며, 출력신호의 강도는 식 (4)와 같다. 즉, 출력신호의 강도는 입력신호의 강도에 대기상태에서 정상적인 확률과 작동신호시 정상적으로 작동할 확률( $P_g$ )을 곱하여 얻을 수 있다.

$$R(t) = S(t) \cdot \exp(-\lambda_{sb}t_{sb}) \cdot P_g \quad (4)$$

(3) Three-State of Stationary Component(Type 43)  
이 연산자는 기존 GO-FLOW기법의 21, 35, 37, 38형으로부터 개발한 것으로 대기상태에 있다가 작동신호에서 작동한 후 운전하는 시스템의 구성요소를 모델링하는데 사용된다. 즉, 구성요소가 대기상태에 고장이 발생하지 않고, 작동신호에서 정상적으로 작동한 후 운전 중에 있을 확률을 모델링하는데 구성요소의 운전 및 대기상태에서 고장률과 작동신호시 정상적으로 작동할 확률을 필요로 하며, 출력신호의 강도는 식 (5)와 같다. 즉, 출력신호의 강도는 입력신호의 강도에 대기 및 운전상태에서 정상적으로 운전할 확률에 작동신호시 정상적으로 작동할 확률을 곱하여 얻을 수 있다.

$$R(t) = S(t) \cdot \exp(-(\lambda_{sb}t_{sb} + \lambda_{op}t_{op})) \cdot P_g \quad (5)$$

(4) Active Component(Type 46)

이 연산자는 기존 GO-FLOW기법의 26, 27, 39형으로부터 개발한 것으로 작동신호인 부입력신호에 의해 작동하는 시스템의 구성요소를 모델링하는데 사용된다. 즉, 이 연산자는 입력신호와 부입력신호로부터 출력신호를 발생시키는데 부입력신호에 의해 구성요소의 상태를 변화시킨다. 따라서 이 연산자는 정상적으로 작동할 확률을 필요로 하고, 출력신호의 강도는 식 (6)과 같다.

$$R(t) = S(t) \cdot [P(t) \cdot P_g] \quad (6)$$

(5) Two-State of Active Component(Type 47)

이 연산자는 42형과 달리 작동신호인 부입력신호에 의해 작동하는 구성요소를 모델링하는데 사용한다. 즉, 대기상태에 있다가 작동신호인 부입력신호에 의해 작동하는 시스템의 구성요소를 모델링하는 연산자로 구성요소의 대기상태에서 고장률과 작동신호시 정상적으로 작동할 확률을 필요로 하며, 출력신호의 강도는 식 (7)과 같다. 이 연산자는 42형과 달리 부입력신호인 작동신호(P(t))를 곱하여 출력신호의 강도를 계산한다.

$$R(t) = S(t) \cdot \exp(-\lambda_{sb}t_{sb}) \cdot [P(t) \cdot P_g] \quad (7)$$

(6) Three-State of Active Component(Type 48)

이 연산자는 43형과 달리 작동신호인 부입력신호에 의해 작동하는 구성요소를 모델링하는 것으로 기존 GO-FLOW기법의 21, 26, 27, 35, 37, 38, 39형으로부터 개발한 것이다. 즉, 구성요소가 대기상태에서 작동신호에 의해 정상적으로 작동한 후 운전 중에 있을 확률을 모델링하는 연산자로 구성요소의 운전 및 대기상태에서 고장률과 정상작동 확률을 필요로 하며, 출력신호의 강도는 식 (8)과 같다. 이 연산자는 43형과 달리 부입력신호인 작동신호(P(t))를 곱하여 출력신호의 강도를 계산한다.

$$R(t) = S(t) \cdot \exp(-(\lambda_{sb}t_{sb} + \lambda_{op}t_{op})) \cdot [P(t) \cdot P_g] \quad (8)$$

(7) Signal Generator(Type 51)

이 연산자는 1개의 출력신호를 가진 신호발생기를 나타내는데 기존 GO-FLOW기법의 25형을 그대로 사용한 것으로 연산자명은 51형으로 정의하였다. 이 연산자는 외부로부터 신호 즉, 기기의 동작 개시 및 정지 제어명령을 표현하는 경우에 사용한다.

(8) AND Gate(Type 56)

이 연산자는 AND Gate를 나타내는데 기존 GO-FLOW기법의 30형을 그대로 사용한 것으로 연산자명은 56형으로 정의하였다. 입력신호가 2개 이상 존재하며, 부입력신호는 존재하지 않는다. 모든 입력신호가 존재하는 경우에는 출력신호가 존재하는데 이 연산자의 출력신호의 강도는 식 (9)와 같다.

$$R(t) = \prod_{i=1}^n S_i(t) \quad (9)$$

(9) OR Gate(Type 57)

이 연산자는 OR Gate를 나타내는데 기존 GO-FLOW기법의 22형을 그대로 사용한 것으로 연산자명은 57형으로 정의하였다. 입력신호가 2개 이상 존재하며, 부입력신호는 존재하지 않는다. 입력신호에 의해 나타나는 모든 사건의 합으로 출력신호를 만들며, 출력신호의 강도는 최소한 1개 이상의 입력신호가 존재할 가능성을 나타내는데 식 (10)과 같다.

$$R(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - S_i(t)) \quad (10)$$

(10) NOT Gate(Type 58)

이 연산자는 기존 GO-FLOW기법의 23형을 그대로 사용한 것으로 연산자명은 58형으로 정의하였다. 입력신호가 존재하는 경우는 출력신호를 발생하지 않고, 입력신호가 존재하지 않는 경우에 출력신호를 발생하는 여집합을 취하는 기능을 가지고 있으며, 출력신호의 강도는 식 (11)과 같고 대기시스템의 신뢰도 평가시 사용할 수 있다.

$$R(t) = 1 - S(t) \quad (11)$$

(11) NOR Gate(Type 59)

이 연산자는 대기시스템을 구축한 전체시스템의 신뢰도를 평가할 경우 사용하며, OR Gate와 구분하기 위한 것으로 59형으로 정의하였다. 이 연산자는 NOT Gate에 연결되는 것으로 출력신호의 강도는 식 (12)와 같다.

$$R(t) = \sum_{i=1}^n S_i(t) \quad (12)$$

2.5. 신뢰도 평가 절차

시간경과에 따른 시스템의 신뢰도를 평가하기 위해서는 시스템 흐름방향을 신호선으로 표현하고, 시스

템 구성요소를 연산자로 모델링한 GO-FLOW Chart를 먼저 작성한다. 이 GO-FLOW Chart를 기준으로 시스템 흐름 방향으로 연산자의 연산식에 고장률, 운전시간, 대기시간, 정상적으로 작동할 확률 등을 대입하여 순차적으로 연산자의 출력신호의 강도를 계산하여 최종적으로 전체 시스템의 신뢰도인 최종 연산자의 출력신호를 계산한다[9,10].

### III. 사례연구

#### 3.1. 신뢰도 평가개요

원자력발전소, 화학공장 등은 수많은 장치들이 매우 복잡한 구조로 설치되어 있어서 운전조건을 이탈할 경우 대형재해가 발생할 수 있으므로 공정의 신뢰도를 확보하여 안전성을 확보하는 것은 매우 중요한 일이다.

따라서 본 연구에서 개발한 새로운 GO-FLOW기법을 사용하여 시스템의 신뢰도를 평가함으로써 원자력발전소, 화학공장 등과 같은 복잡한 시스템의 정비·점검시점을 정량적 데이터를 근거로 관리하는데 본 기법이 매우 유용하게 사용될 수 있음을 입증하고자 하였다.

#### 3.2. 대상공정 선정

본 연구에서 개발한 새로운 기법과 기존 기법을 비교하기 위해 신뢰도 평가 대상공정으로는 기존 GO-FLOW기법의 적용사례가 있는 원자력발전소의 가압수형 원자로 보조급수 시스템(PWR-AFWS)을 선정하였다[5].

본 시스템은 Fig. 3과 같이 3대의 펌프가 설치되어 있는데 2대는 모터구동펌프(MDP-1,2)이고, 1대

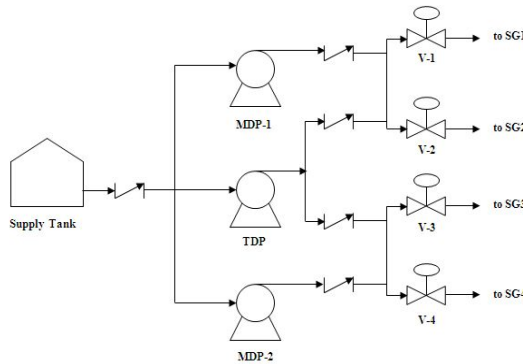


Fig. 3. The auxiliary feedwater system of a pressurized water reactor.

는 터빈구동펌프(TDP)이다. 계통별로 Check Valve, 펌프, Check Valve 및 모터구동밸브(V-1,2,3,4)로 구성되어 있으며, 모터구동펌프는 각각 2대의 증기발생기(SG1,2,3,4)에 급수를 공급할 수 있고, 터빈구동펌프는 4대의 증기발생기에 급수를 공급할 수 있는데 이것은 모터구동밸브가 얼마나 열려 있는가에 달려 있다. 또한 본 시스템은 2가지 종류의 펌프가 설치되어 있지만 2가지 종류의 펌프는 동시에 운전되며, 본 시스템에 요구되는 기능은 최소 2대의 증기발생기에 급수를 공급하는 것이다[5].

#### 3.3. GO-FLOW Chart 작성

본 시스템의 초기 운전시점에서 운전 중 시간경과에 따른 신뢰도 변화를 평가하기 위해 Fig.3의 시스템 흐름도를 GO-FLOW Chart로 모델링하면 Fig. 4와 같다.

연산자 1, 2번은 신호발생기를 나타내므로 51형으로 모델링하였다. 그리고 Supply Tank를 나타내는 연산자 3번과 Check Valve를 나타내는 연산자 4, 6, 8, 9, 11번은 41형으로 모델링하였는데 이는 정상 운전 중에 시간경과에 따른 신뢰도를 평가할 수 있다. 또한 펌프를 나타내는 연산자 5, 7, 10번은 펌프가 작동신호에 의해 기동한 후 정상적으로 운전될 신뢰도를 평가하고, 모터구동밸브를 나타내는 연산자 14, 15, 16, 17번은 46형으로 모델링하여 작동신호에 의해 밸브가 정상적으로 열릴 가능성을 평가한다.

본 GO-FLOW Chart에는 다수의 Logic Gate가 있다. 연산자 12, 13번은 각각 모터구동펌프와 터빈구동펌프 중 1개의 펌프가 작동할 신뢰도를 나타내므로 OR Gate로 모델링하였고, 연산자 18~23번은 4개의 계통 중 2개의 계통이 운전될 신뢰도를 나타내므로 AND Gate로 모델링하였다. 또한 연산자 24번으로 연산자 18~23번 중 최소한 1개 이상이 그 기능을 유지할 신뢰도를 나타내므로 OR Gate로 모델링하였으며, 시스템 흐름도에 존재하지 않은 Logic Gate는

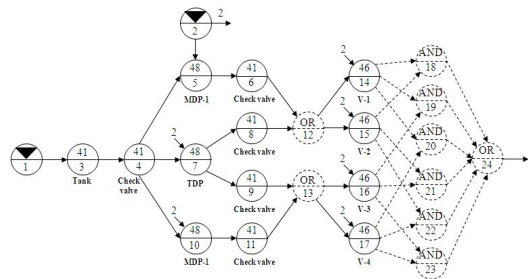


Fig. 4. GO-FLOW chart for PWR-AFWS.

점선으로 표기하였다.

이상과 같이 새로운 기법의 GO-FLOW Chart는 기존 기법의 GO-FLOW Chart와 달리 시스템 흐름도와 거의 일치하게 모델링할 수 있었다[5].

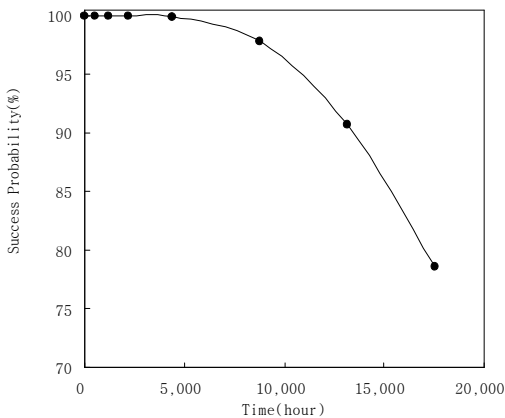
### 3.4. 신뢰도 평가결과 분석

새로운 GO-FLOW기법은 기존 기법과는 달리 연산자에 포함되어 있는 실제시간을 이용하여 실제시간에 따른 신뢰도 변화를 평가할 수 있는데 시간경과에 따른 신뢰도 변화를 평가하기 위하여 500, 1200, 2190(3개월), 4380(6개월), 8760(1년), 13140(1년6개월), 17520(2년)시간에서 신뢰도를 평가하였다.

본 시스템의 신뢰도 평가에 필요한 신뢰도 데이터는 Table 2와 같이 가정하였으며, 초기운전부터 펌프 3대를 동시에 기동하므로 연산자 5, 7, 10번에서 대기시간은 "0"을 대입하였다[5].

**Table 2.** The reliability data of PWR-AFWS

Equipments	Data
Supply tank	$\lambda_{op} = 2.0E-6/h$
Check valve	$\lambda_{op} = 4.0E-6/h$
Motor driven pump	$\lambda_{op} = 3.4E-5/h$ $P_g = 0.9967$
Turbine driven pump	$\lambda_{op} = 1.0E-3/h$ $P_g = 0.967$
Motor operated valve	$P_g = 0.9957$



**Fig. 5.** The success probability of PWR-AFWS.

새로운 GO-FLOW기법은 연산자 번호에 따라 순차적으로 연산자 출력신호의 강도를 계산하여 전체 시스템의 신뢰도를 계산하는데 최종 출력신호인 24번 출력신호의 강도가 본 시스템의 신뢰도를 나타낸다.

본 시스템의 시간경과에 따른 신뢰도 변화는 Fig. 5와 같은데 6개월(4,380시간)까지는 시간경과에 따른 신뢰도 변화가 거의 없다가 6개월(4,380시간) 후부터는 신뢰도가 감소하기 시작하면서 1년 6개월(13,140시간) 후에는 신뢰도가 상당히 감소한 것으로 평가되었다.

따라서 시스템의 신뢰도를 일정한 값 이상으로 유지하기 위해서는 적절한 시점에 시스템 구성요소의 예방정비·점검이 이루어져야 함을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 시스템의 신뢰도를 일정한 값 이상으로 유지하기 위해서는 운전시간에 따른 시스템의 신뢰도 평가가 선행되어야 하는데 본 연구에서 개발한 새로운 GO-FLOW기법은 기존 기법과는 달리 운전시간에 따른 신뢰도 변화를 평가할 수 있으므로 시스템을 효율적으로 관리하기 위한 신뢰도 평가기법으로 매우 유용하게 이용될 수 있을 것이다.

## IV. 결론

본 연구에서는 성공확률을 추적할 수 있는 GO-FLOW기법의 문제점을 보완한 새로운 신뢰도 평가기법을 개발하여 실제 단위시스템의 신뢰도 평가를 통해 그 유용성을 입증하였다.

본 기법은 시스템 구성요소의 신뢰도를 기반으로 시스템의 신뢰도를 평가하는 기법으로 신호선과 연산자로 구성된 GO-FLOW Chart를 작성한 후 시스템 흐름방향에 따라 순차적으로 각 연산자의 출력강도를 계산하여 최종적으로 시스템의 신뢰도를 계산한다. 본 기법은 다음과 같은 장점을 가지고 있어서 기존 GO-FLOW기법에 비해 원자력발전소, 화학공장 등 복잡한 시스템의 신뢰도 평가시 매우 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

- (1) 시스템의 구성요소를 기반으로 정의된 연산자를 사용하고, 운전상태가 변하는 구성요소를 1개의 연산자로 모델링하므로 시스템 흐름도와 거의 일치하는 GO-FLOW Chart를 작성할 수 있으며, 신뢰도 평가자가 달라도 거의 동일한 GO-FLOW Chart가 작성될 수 있어서 신뢰도 평가결과의 신뢰성이 향상된다.
- (2) 실제시간을 반영한 연산식을 사용하므로 실제시간에 따른 신뢰도 변화를 평가할 수 있다.
- (3) 정량적 데이터를 근거로 구성요소의 예방정

비·점검시점 등을 결정할 수 있어서 시스템의 안전성과 생산성을 향상시킬 수 있다.

### 감사의 글

본 연구는 두뇌한국 21(BK21)사업의 지원과 부산대학교 자유과제학술연구비(2년)에 의하여 연구되었으며, 지원에 감사드립니다.

### 사용기호

- $t_{op}$  : Operation time [time]
- $t_{sb}$  : Standby time [time]
- $\lambda_{op}$  : Failure rate in operation status [ $\text{time}^{-1}$ ]
- $\lambda_{sb}$  : Failure rate in standby status [ $\text{time}^{-1}$ ]

### 참고문헌

- [1] Shen, Z., Gao, J. and Huang, X., "A new quantification algorithm for the GO methodology", *Reliab. Engng Syst. Safety*, **67**, 241-247, (2000)
- [2] Shen, Z., Gao, J. and Huang, X., "An exact algorithm dealing with shared signals in the GO methodology", *Reliab. Engng Syst. Safety*, **73**, 177-181, (2001)
- [3] Shen, Z., Wang, Y. and Huang, X., "A quantification algorithm for a repairable system in the GO methodology", *Reliab. Engng Syst. Safety*, **80**, 293-298, (2003)
- [4] Matsuoka, T. and Kobayash, M., "GO-FLOW: A New Reliability Methodology", *Nucl. Sci. Engng*, **98**, 64-78, (1988)
- [5] Matsuoka, T. and Kobayash, M., "The GO-FLOW reliability analysis methodology-analysis of common cause failure with uncertainty", *Nucl. Engng Des.*, **175**, 205-214, (1997)
- [6] Lee, J. M., *Development of HAZOP Analysis Export System for Hazard Analysis of Chemical Plant*, M. S. Dissertation, Pusan National Univ., Busan, Korea, (1998)
- [7] Kim, Y. M., *An Algorithm for Risk Analysis using FTA*, M. S. Dissertation, Hanyang Univ., Seoul, Korea, (1996)
- [8] Byun, Y. S., An, D. M. and Hwang, K. S., "A Comparative Study on Safety Analysis Methodology of Chemical Process", *Journal of KIIS*, **18**(2), 64-72, (2003)
- [9] Byun, Y. S., An, D. M., Lee, H. S., Shin, D. I., Kim, Y. H. and Hwang, K. S., "The development of System Reliability Assessment Methodology Using Directed Graph", *HWAHAK KONGHAK*, **41**(3), 286-291, (2003)
- [10] Byun, Y. S., *A Study on Development of the Directed Graph Analysis Methodology for Chemical Process Reliability Assessment*, Ph. D. Dissertation, Pusan National Univ., Busan, Korea, (2010)