

# SWRO 플랜트의 RAM 분석을 위한 시물레이션 모델 연구

김용수 · 박정원 · 최석호 · 강준규<sup>†</sup>

## A Study on Simulation Model for RAM Analysis of SWRO Plant

Yong Soo Kim · Jungwon Park · Sukho Choi · Jun-Gyu Kang<sup>†</sup>

### ABSTRACT

The Sea Water Reverse Osmosis (SWRO) plant should take into account the availability of the plant from the design stage for long-term and continuous fresh water production. As it occurs, it is necessary to establish a corrective maintenance plan and preventive maintenance plan to maintain availability. In the field of complex engineering structures such as seawater desalination plants, it is difficult to estimate the reliability or availability of the system in a mathematical way. This study develops RAM analysis framework and model, and proposes discrete event simulation model as a application software specialized for seawater desalination plant. Considering the characteristics of the plant maintenance, in case of corrective maintenance, we propose a preventive maintenance policy that not only repairs or replaces a single-broken part, but also simultaneously maintains all accessible parts according to the level of overhaul. A case study was conducted to estimate the availability of the system based on the field data of the seawater desalination plant in Korea and Saudi Arabia. The result was close to the expected availability of the plant.

**Key words** : Desalination, RAM, Simulation, Plant

### 요약

해수담수화(SWRO, Sea Water Reverse Osmosis) 플랜트는 장기적이고 지속적인 담수 생산을 위하여 설계단계부터 플랜트의 가용도를 고려하여야 하며, 시간의 흐름에 따라 다양한 형태의 노후 현상이 진행되어 시스템 성능의 저하가 발생하므로 가용도 유지를 위한 고장정비 및 예방정비 계획 수립 등이 필요하다. 해수담수화 플랜트와 같이 복잡한 공학구조로 구성된 플랜트 분야에서는 시스템의 신뢰도 혹은 가용도를 수리적인 방법으로 추정하는데 어려움이 있다. 본 연구는 해수담수화 플랜트에 특화된 소프트웨어 개발을 위하여, RAM 분석 프레임워크와 모델링 방법을 개발하고, 가용도 산출을 위한 이산사건 시물레이션 모델을 제안한다. 플랜트 정비의 특성을 고려하여 고장 정비 발생 시, 단일 부품의 수리/교체 뿐만 아니라 분해 정비 수준에 따라 접근 가능한 모든 부품을 동시 정비하는 예방정비 정책을 제안하고, 제안된 방법론에 따라 시물레이션 모델 및 프로토타입을 개발하였다. 이를 활용하여 국내외에 건설된 해수담수화 플랜트의 현장 데이터를 기반으로 시스템의 가용도 및 가동률 등을 추정 사례 연구를 수행하였고, 그 결과 실제 플랜트의 가용도와 근접한 결과를 얻었다.

**주요어** : 해수담수화, RAM, 시물레이션, 플랜트

## 1. 서론

해수담수화(Sea Water Reverse Osmosis, 이하 SWRO) 플랜트 설비는 소프트웨어가 물리적으로 결합한 복합 시스템으로, 복잡한 공학구조로 되어있어 최적 예방정비 주기 결정이 매우 어렵다. 플랜트 분야는 설계, 개발, 도입에 사용되는 비용이 많이 들며, 시간의 흐름에 따라 누설, 점화, 부식, 침착 등 다양한 형태의 노후 현상이 진행되어

\* 본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 플랜트 연구사업(1485016266)의 지원을 받아 연구되었음.

**Received:** 27 December 2018, **Revised:** 14 November 2019, **Accepted:** 17 November 2019

<sup>†</sup> **Corresponding Author:** Jun-Gyu Kang  
E-mail: Jun-Gyu.KANG@Sungkyul.ac.kr  
Sungkyul University  
Industrial & Management Engineering

시스템 성능의 저하를 유발하는데, 위와 같은 원인으로 발생하는 사고 발생 및 설비 정지는 막대한 재산 및 인적 피해를 발생시킨다.

이러한 막대한 손실과 인명피해를 예방하기 위해서는 완전무결에 가까운 고도의 신뢰성과 가용성, 편의성이 높은 유지보수성이 요구되는데, 생산성 저하에 관한 주요 설계 이슈로 가용도 평가에 대한 관심이 증가하고 있다. 또한, 시스템 성능의 개선을 위한 시설 대형화에 따라 사고나 기능 상실 등 위험도 또한 크게 증가하여 기능 유지를 위한 안정성과 신뢰도 확보가 매우 중요시 되고 있다.

최근 들어 미래에 발생할 고장에 대한 가능성 및 불확실성을 고려한 예방정비(Preventive Maintenance, PM)가 매우 중요해지고 있는 상황이며, RAM(Reliability, Availability and maintainability) 분석은 이러한 성능을 효과적으로 정성 및 정량적 평가가 가능한 기법으로서, 플랜트, 철도 등 대형 산업과 특히 시스템 공학적 측면에서 무기체계와 군사적인 면에서 중요하게 다뤄진다(Lee, 2019).

그러나 RAM 분석은 접근 방법론 및 활용 데이터(입력데이터)에 따라 그 결과가 큰 차이를 나타내므로 자칫 잘못된 사전 분석 및 데이터의 활용은 오히려 시스템 운영에 악영향을 초래할 수 있다(Lee & Hwang, 2016). 이에 따라, 부품, 구성품 및 복합 구성품의 고장률 변화를 유연하게 반영하고 분석할 수 있는 RAM 분석 모델이 필요하며, 통계 및 수리적 모델에 근거한 타당한 분석결과가 도출되어야 한다.

RAM과 관련한 수리적인 분석 기법은 신뢰성 분석과 정비정책 결정에 주로 사용되고 있으며, 시스템의 가용도 산출은 수리적인 복잡성에 의해 단일 부품의 가용성 산출 등에 제한적으로 사용된다(정일한 & 박삼준, 2008).

복잡한 문제를 모델링하고, 현실적 제약조건을 반영한 분석을 수행하기 위해 시뮬레이션이 활용하여, 다양한 시나리오에 대한 최적 대안 마련 및 비용분석, 가용도 등을 산출할 수 있다(Jung et al., 2017). 특히, 분석적 기법으로는 고려하기 힘든 K-out-of-N 구조, 중복, 대기 노드, 노화, 예방 정비 등의 다양한 관련 측면을 고려할 수 있다(Marquez et al 2005).

국내에서 시뮬레이션 기반의 RAM 분석은 국방 분야에서 많이 연구되고 있다. 김혜령과 최상영(2010)은 운용 가용도 계산 모델을 포함하는 계층적 RAM 시뮬레이션 모델을 제안하였고, 김혜령 외 (2011)는 무기체계에서 다양한 임무를 가진 복합시스템의 가용도 분석을 위한 시뮬레이션 모델을 C++로 코딩하여 개발하였다. 윤원영 외

(2011)은 Isograph 사의 AvSim을 활용하여 무기체계의 가용도를 분석하였다.

플랜트 분야의 RAM 분석으로 Marquez et al.(2005)은 시스템다이나믹스 도구인 VENSIM을 활용하여 폐열 발전소의 가용도를 추정하였다. Gupta et al (2009)는 열 발전소의 석탄 취급 유닛의 가용도 분석 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 김종운 외(2010)는 철도시스템의 가용성능 시뮬레이션 시스템을 개발하였다.

시뮬레이션 기반의 RAM 분석 도구로는 Windchill Quality Solutions(구 RELEX OpSim), SIMLOX, BlockSim, AvSim, 그리고 우리나라 국방과학연구소가 개발한 무기시스템 RAM 분석용 이산사건 시뮬레이터인 RAMSim(김도형 외 2006), KICT-RAM Solution(Lee and Hwang, 2016) 등이 있으나, 기존의 시스템들의 SWRO 플랜트의 운전 및 예방정비 특성을 묘사하기 어렵다. 기존 상용 시스템의 특징 등에 관한 자세히 리뷰는 정일한과 박삼준(2008)을 참조할 수 있고, Rao and Naikan(2016)은 신뢰도와 가용도 시뮬레이션 모델링에 대한 전반적인 리뷰를 제공한다.

본 연구의 주된 목적은 SWRO Plant의 예방보전 및 비용예측을 위한 분석 Tool을 개발하는 것으로, SWRO 플랜트에 범용적으로 사용할 수 있는 RAM 분석용 시뮬레이션 소프트웨어를 개발하는 것이다.

본 논문의 구성은 2절에서는 SWRO 플랜트의 시스템 특징을 설명하고, 3절에서는 비용을 고려한 수리 및 예방보전을 위한 가용도 시뮬레이션 모델을 제안하고, 4절에서는 현장 데이터를 이용한 실제 시스템 가용도 분석 사례를 제시한다.

## 2. SWRO 플랜트의 시스템 특징

### 2.1 가용도 산출 개요

가용도는 특정 시점에서의 시스템이 가동 중일 확률 또는 시스템이 운용되는 시간 대비 실제 가동 시간의 비율로 정의되며, 가용도는 순간 가용도, 한계 가용도, 평균 가용도 그리고 한계 평균 가용도의 4가지로 구분된다.

각 가용도는 다음과 같이 산출될 수 있다.

**순간 가용도** : 시스템이 고장 비율  $\lambda_0$ 와 수리 비율  $\lambda_1$ 을 가지는 지수분포를 따른다고 할 때, 시간  $t$ 에서의 순간 가용도는 시스템이  $t$ 시간에 운영 상태인 확률과  $t$ 시간에 운영 중지 상태인 확률의 합으로 나타낼 수 있다.

$$A(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_0 + \lambda_1} + \frac{\lambda_0}{\lambda_0 + \lambda_1} e^{-(\lambda_0 + \lambda_1)t}, t > 0 \quad (1)$$

**한계 가용도 :** 시간  $t$ 를 무한으로 가정하면 지수 값이 0으로 수렴하며 한계 가용도는 다음과 같이 간단한 상수의 형태를 지닌다.

$$A = \frac{\lambda_1}{\lambda_0 + \lambda_1}, t > 0 \quad (2)$$

**평균 가용도 :** 위의 한계 가용도에서  $1/\lambda_0$ 를 평균 고장 시간(MTTF: mean time to failure)과  $1/\lambda_1$ 을 평균 수리 시간(MTTR: mean time to repair)으로 나타내면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \quad (3)$$

일반적으로 순간 가용도는 특정 시간에서 시스템이 운영 상태일 확률과 운영 중지 상태인 확률을 복합적으로 고려하기 때문에 연속적인 유지 보수 정책을 수식적으로 표현하기 쉽지 않다. 한계 가용도와 같이 무한 시간을 가정하여 가용도를 점근적으로 나타내면 MTTF와 MTTR만을 고려함으로써 시스템 가용도를 표현할 수 있다.

그러나 시스템의 구조가 점차 복잡해지고 사용되는 사용환경 조건이 다양해지고 가혹해짐에 따라 수리적 모델링에 기반한 가용도 산출에 한계가 있다. SWRO 플랜트와 같이 복잡한 시스템은 위에서 제시한 단순 접근으로는 복잡한 구조상의 가용도 산출이 어려우며, 특히 예방정비가 선택적으로 이루어지는 경우에는 수리적 계산으로는 시스템 가용도를 산출할 수 없다.

시뮬레이션은 수리적 모델링이 매우 어려운 시스템 구조를 분석하는데 매우 효과적인 기법으로 알려져 있다. 본 연구에서는 시뮬레이션을 반복적으로 수행하여 시뮬레이션 결과의 평균 가용도를 기반으로 실제 시스템의 가용도를 추정하고자 한다.

또한, 의사결정의 측면에서 SWRO 플랜트 예방정비 정책 수립을 수리적으로 모델링 하거나, 최적화가 불가능한 구조적 한계가 존재하는데, 시뮬레이션을 기반으로 탐색적 해찾기를 수행할 경우, 전역 최적해는 보증할 수 없으나 현실적인 초적의 가능해(Feasible Solution)을 찾는 데 효과적으로 기여할 수 있다.

시스템의 평균 가용도는 시뮬레이션 상에서 시스템의

순간 가동률  $B(t)$ 을 추적하여 추정할 수 있으며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A = \frac{\int B(t) dt}{Final\ clock\ value} \quad (4)$$

## 2.2 SWRO 플랜트의 구조 및 예방정비 체계

SWRO 플랜트의 구조의 구성 체계는 설계상의 BOM (Bill of Material)으로부터 얻어 오는데, 5단계로 1레벨 Plant, 2레벨 System, 3레벨 Unit, 4레벨 Equipment, 5레벨 Part로 정의하고 이를 PBS(Product Breakdown Structure)라 한다.

플랜트와 같이 설비의 교체비용 또는 고장발생에 대한 위험이 큰 산업에서는 이를 방지하기 위해 시스템 또는 설비의 고장이 발생하기 전에 점검 및 수리하는 예방보전이 수행되고 있다(Lim et al., 2018). SWRO 플랜트의 예방정비 정책은 Equipment 단위의 의사결정이 요구된다. 최적 유지보수 정책은 각 Equipment 단위에서 고장정비 대상 또는 예방정비 대상으로 구분하고, 예방정비 대상의 경우 각 예방정비 시기(년 단위)에 예방정비 레벨(완전 분해 정비 ~ Cleaning까지 4단계)을 결정하는 것이다.

즉, 각 Equipment는 아래 5가지 중 한 가지 옵션 중에 하나로 결정된다.

- 0: 고장정비(예방정비 대상 아님),
- 1: 대정비(Heavy Maintenance)
- 2: 중정비(Medium Maintenance)
- 3: 경정비(Light Maintenance)
- 4: No Maintenance Work, Cleaning only

각 equipment에 포함된 part들은 상위 equipment의 예방정비 옵션에 따라 예방정비 기간 중 실행되는 정비의 양상이 다르다. 즉, 각 part에는 예방정비 옵션(0-4)이 지정되어 있는데, 상위 equipment의 옵션보다 하위의 옵션을 가진 part는 완전정비를 받게 되어, 고장률이 초기화된다.

## 3. 수리 및 예방보전 시뮬레이션 모델링

### 3.1 시스템 구조 및 입력 데이터

신뢰도 블록 선도(Reliability Block Diagram, 이하 RBD) 방식의 시스템 표현은 논리적인 구조 혹은 정적인 신뢰성을 계산하는 데는 효과적이거나, 동적인 시스템의 상태 변화를 추적하기에는 결함수(Fault Tree)와 같은 형태로

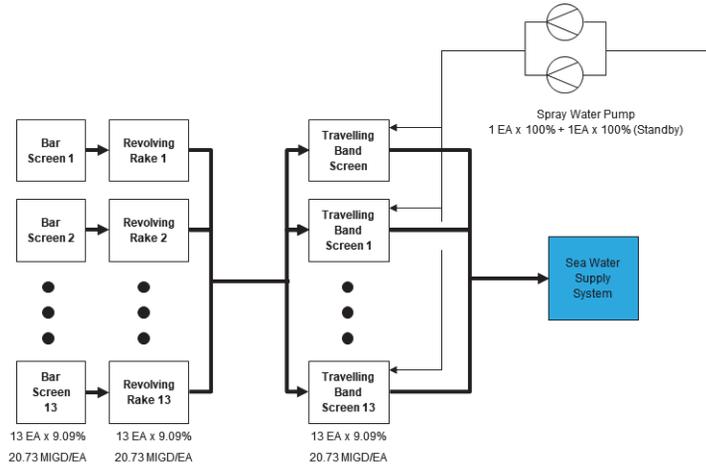


Fig. 1. RBD of Screen Unit

계층적으로 구조화하는 것이 바람직하다(김혜령 외 2011).

Fig. 1과 Fig. 2는 SWRO 시스템 중 Screen Unit의 구조를 RBD 형태와 트리형태로 변환된 사례를 보여준다. SWRO 플랜트와 같이 하부 시스템의 용량이 상부시스템의 용량에 영향을 주는 경우는 병렬 구조에서 각 하부 시스템의 용량을 표현하여야 한다. 이를 위하여 트리상의 각 노드는 하부 노드의 구조 정보를 포함하여야 할 뿐만 아니라, 하부노드들의 용량(혹은 상위 노드의 용량 대비 기여율 %) 정보도 제공되어야 한다. 각 노드간의 정보 입력의 편의를 위해 이는 하부 노드에 기록된다.

RBD는 직렬 혹은 병렬 구조를 표현하고 있으나, SWRO 플랜트에서는 병렬 구조는 복수자원 또는 *k-out-of-n* 구조를 나타내게 되는데, Fig. 1.에 나타난 RBD는 직렬 또

는 복수자원의 구조로 바로 나타낼 수 없으므로, 논리적인 중간 노드(Dummy 노드)를 중간에 추가하여 모든 노드가 단일 하부 구조를 갖도록 세분화하여 표현한다.

각 level별 작성된 블록다이어그램은 블록간의 논리적인 구조를 표현하는데 한계가 있으므로 이를 구조화하여, 블록의 상하관계에서 나타는 직렬(Serial), 병렬(Parallel), 대기(Standby), 복수자원(Multi)구조를 표현하기 위하여 이를 일정한 규칙에 따라 논리적 트리 구조로 나타내는 작업이 요구된다. 위와 같이 시스템의 트리 구조를 표현하기 위해 각 모듈(트리 상의 모든 노드)은 시뮬레이션의 입력데이터로서 Table 1과 같은 구조 데이터를 갖는다.

상하관계의 다양한 논리구조(gate)를 효과적으로 표현하기 위하여 실제 블록(actual 노드)뿐만 아니라 가상블록

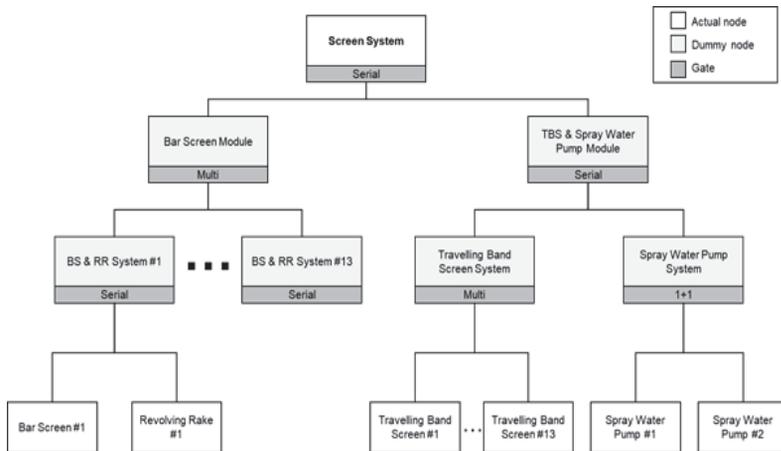


Fig. 2. An Example of System Structure Tree for the Screen Unit in Fig. 1

**Table 1.** Input Data for Tree Structure

Item	Value
Node ID	Integer
Node Name	String
Sub Structure	1 - Serial 2 - Parallel 3 - <i>k-out-of-n</i> (Cold Standby) 4 - Multiple (Warm Standby)
Degree of sub nodes ( <i>n</i> in <i>k-out-of-n</i> )	Integer
Required Operational Degree ( <i>k</i> in <i>k-out-of-n</i> )	Integer

(dummy 노드)을 삽입하여야 할 수도 있으므로, 기존 블록다이어그램의 구조를 tree 형태로 전환하는 작업을 수행하여야 한다.

개발된 RAM Tool은 4개의 논리gate(직렬, 병렬 대기, 복수자원)를 지원하나, 플랜트의 특성상 병렬은 다루지 않는다. 복수자원은 두 가지의 형태로 사용되는데, 하나는 전형적인 복수 자원을 가진 경우로 동일한 Unit 혹은 equipment가 복수로 구성되어 각각의 생산량의 합이 상위 구성 모듈의 생산량이 된다. 다른 경우는 이른바 redundancy 설계의 하나로 warm standby에 해당하는 것으로, 필요용량보다 많은 장치를 초과 설치하여 일부 고장 발생 시 나머지 장치로 요구 생산량을 공급할 수 있거나, 일부 장치 고장 발생 시 나머지 장치들이 초과 생산하여 총 요구량을 맞추는 것이다. 이에 대한 모델링 상의 논의는 3.2절에서 설명된다.

또한 2.1절에 말한바와 같이, PBS 4레벨 equipment와 5레벨 part에 해당하는 모듈들은 예방정비 옵션 정보를 가지며, 시스템의 각 최하단 모듈(트리 상의 leaf 노드),은 시뮬레이션의 입력데이터로서 Table 2와 같은 임무프로파일을 수립하여야 한다.

시뮬레이션 모델은 가용도 분석 영역에서의 임무 및 과업, 시스템과 정비단위를 각각의 모듈로 설계하여 구현한다. 시뮬레이션 모델의 개략적인 구조와 모듈간의 관계는 앞서 제시한 Fig. 1과 Fig. 2와 같으며, 각 구성품(Leaf 노드 = part)은 특정 수명 분포를 따르며, 독립적으로 동작한다.

하부체계는 직렬, 병렬, 대기, 복수자원의 내부 구조를 가지며, 구성품의 상태변화에 따라 하부체계의 상태부터 시스템의 상태로 bottom-up 방식으로 내부 상태 전이를 통해 시스템 전체의 상태가 갱신된다.

**Table 2.** Input Data for Mission Profile

Item	Value
Life Time Distribution	Weibull, Log-Normal, Exponential, Uniform, Constant
CM Time Distribution	Weibull, Log-Normal, Exponential, Uniform, Constant
CM-RP RFT	1 - if corrective maintenance occurs 0 - Otherwise
Fixed Cost	Fixed cost for CM(Corrective Maintenance)
Cost/Day	Variable cost for CM
Manpower	Number of workers for CM
PM-RP Type	PM(Preventive Maintenance) Options 0: CM(No PM Work), 1: Heavy Maintenance, 2: Medium Maintenance, 3: Light Maintenance, 4: No PM Work, Cleaning only
PM-RP Applicable	1 - if PM applied 0 - Otherwise

시뮬레이션 엔진은 이산사건 시계의 진행, 구성품 상태 변화에 따른 시스템 전체 상태 전이, 상태 추적 등의 통합 기능 제공하며, 내부적으로 통계추적기를 포함한다. 부가적으로, 시스템의 최적 비용 산출을 위해 각 구성품의 수리에 대한 비용(고정비 + 수리 시간에 따른 변동비)을 포함한다.

또한, 예방보전 정책을 위한 예방 정비 정책 시나리오 및 해당 비용 고려된다. 예방정비 정책 시나리오는 실무자에 의해 작성되어 제공되는데, 매년 말 예방정비 기간에 전체 시스템은 대기 상태로 전이되고, 각 4레벨 equipment들의 예방정비 옵션에 따라 하부 5레벨 part들의 예방정비가 이뤄진다. 즉, 해당 년도에 예방 정비에 포함된 equipment의 예방정비 옵션보다 큰 값의 예방정비 타입(PM-RP Type)의 값을 가진 하부 part들은 해당 기간 동안 예방정비가 이뤄지고, 완전정비를 받아 이산사건 시계에 기존의 고장 예정 사건이 삭제되고, 새로운 고장 사건을 할당받게 된다.

### 3.2 순간 가동률 및 순간 가용도

위에서 설명된 4가지 논리구조별 순간 가동률 및 순간 가용도 다음과 같이 산출된다.

**직렬 구조 :** 하부 노드들이 직렬 구조인 노드의 가동률 및 가용도는 하부 노드의 가동률/가용도 중 가운데 최소

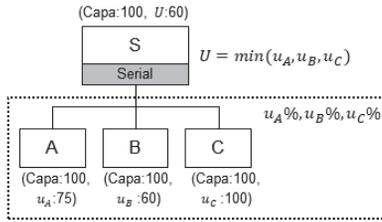


Fig. 3. An Example of Utilization and Availability Calculation for Serial Structure

값을 채택한다. 이때 모든 하부 노드의 용량(Capacity)은 부모 노드와 동일한 값을 유지한다. 실제 직렬 노드에서는 이 용량이 필요 없으나, 일관성을 위해서 표기하였다. Fig. 3은 3개의 하부노드로 이뤄진 직렬 구조의 예를 보여준다. 이는 A-B-C 모듈이 물리적으로 직렬 구조로 이뤄져 있거나, 혹은 어떤 equipment의 내부 부품으로 어느 한 부품이라도 고장 발생 시 전체 가동률에 영향을 주는 경우에 해당한다. 그림에서 모듈 B의 현재 가동률이 60%이므로 부모 모듈 S의 가동률 역시 60%로 제한된다. 순간가동률 60%는 생산 용량 대비 60%의 해수가 공급되고 있는 상태를 말한다.

**k-out-of-n 구조 :** Cold Standby로 선언된 구조의 하부는 구동 노드  $k$ 개와 대기 노드  $c (= n - k)$ 개로 이루어져 있으며 이를 Fig. 4의 S 노드 아래와 같이 ‘ $k+c$ ’ 형태로 표현한다. Cold Standby 게이트를 가지는 노드의 가동률은 구동중인 하부 노드들의 가동률  $\times$  용량의 합이며 100%를 넘지 않는다. 100%를 초과할 경우, 일부 노드는 대기상태로 전환된다.

노드의 순간 가동률은 다음과 같이 계산된다.

$$U = \min\left(\sum_{i=1}^n (U_i \cdot Capacity_i), 100\%\right) \quad (5)$$

$n$ 은 가동 중인 구성품의 수.

Fig. 4의 예에서 모듈 A, B, C는 각각 상위 모듈 S의 용량 대비 50%의 생산 용량을 갖고 있다. 현재 시점에서 모듈 A와 B의 가동률이 각각 75%, 60%이고, 모듈 C는 현재 대기 상태이다. 이때 상위 모듈 S의 가동률은  $0.65 = 0.75 \times 0.5 + 0.6 \times 0.5$ 가 된다. 참고로, 이때 가동률이 100%가 미달하므로 시뮬레이터는 모듈 C를 가동시키게 될 것이다. 직렬 구조와 달리, 모듈 C는 현재 가동률은 0이나 가용도는 100%가 되는데, 이런 대기 구조를 가진 시스템 혹은 Unit의 가동률과 가용도는 일치하지 않는다.

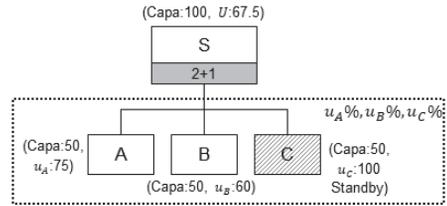


Fig. 4. An Example of Utilization and Availability Calculation for Cold Standby Structure

**복수자원 구조 :** 복수자원 구조는 2가지 형태의 구조를 모두 표현하도록 설계되었다. 첫 번째는 일반적인 복수자원 구조로 상위 모듈의 생산량은 단순히 하위 모듈의 생산량의 합과 같은 경우이다. 다른 하나는 이른바 warm standby의 경우로, 기본적으로는 복수자원과 같으나 하위 모듈의 용량 합계가 상위 모듈의 요구 용량보다 커서 고장 발생 시 나머지 모듈에 의해서 상위 모듈이 정상 작동한다.

일반 복수자원 게이트를 가지는 부모 노드(상위 모듈)의 가동률 및 가용도는 모든 하부 노드들의 가동률 및 가용도를 더한 값이다. 이때 모든 하부 노드의 용량 합은 100%이다.

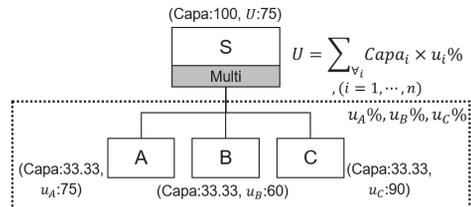


Fig. 5. An Example of Utilization and Availability Calculation for Typical Multiple Structure

Fig. 5는 일반적인 복수자원 구조의 예를 보여준다. 하부 모듈 A, B, C는 각각 상위 모듈의 1/3의 용량을 공급하고 있고, 현재 각각의 가동률이 75%, 60%, 90%이므로 상위 모듈 S의 가동률은  $75\% = 33.33 \times 0.75 + 33.33 \times 0.6 + 33.33 \times 0.9$ 가 된다.

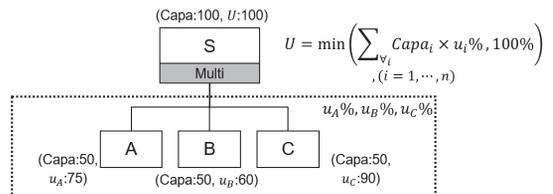


Fig. 6. An Example of Utilization and Availability Calculation for Warm Standby Structure

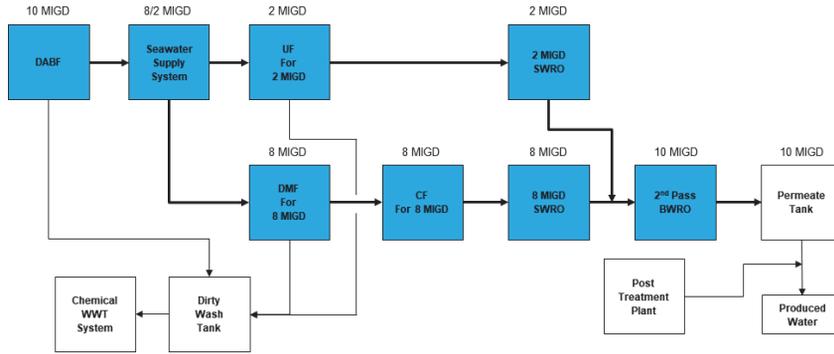


Fig. 7. Configuration of Gijang Plant

Warm standby로 선연된 gate의 하부는 모두 구동되는  $n$ 개의 node를 가지고 있으나 여유자원이 존재해, 용량의 총 합은 100%를 초과하며 이를 Fig. 6과 같은 Logical Tree로 표현한다. 이 경우, 상위 노드의 가동률은 모든 하부노드들의 가동률을 더한 값이며, 수리적으로 100%를 초과산출 가능하나 최댓값을 100%로 제한하여 전체 시스템 가동률을 통제한다. 이 구조에서 가용도는 가동률과 같다.

시뮬레이션 모델은 C++(MS Visual Studio 2010 Express)로 개발되었으며, 이산사건 시뮬레이션을 위하여 오픈소스 라이브러리 SMPL(MacDougall, 1980)을 적용하였다. 모든 모델 데이터 및 트리 구조 데이터 입출력은 MS Excel 스프레드시트를 사용하였으며 이를 위해 오픈소스 라이브러리 ExcelFormat을 활용하였다(Fuchs, 2011).

#### 4. SWRO 플랜트 가용도 분석 사례

SWRO 플랜트의 모델링 및 가용도 분석을 위해 경남 기장에 건설된 국내 유일의 SWRO 플랜트와 사우디아라비아 Ras Al Khair의 플랜트의 PBS 및 시스템 구성도를 바탕으로 시뮬레이션 모델을 개발하였다. Fig. 7과 Fig. 8은 각각 기장 플랜트와 Ras Al Khair 플랜트의 개략적인 시스템 구조를 나타낸다. 그림 상 모델링 대상 모듈은 어둡게 칠해 표시하였다.

SWRO 플랜트의 생산용량은 MIGD(Million Imperial Gallons per Day) 단위를 보편적으로 사용하는데, 1MIGD는 일간 4,546.09m<sup>3</sup>(약 4,500톤)의 담수생산량을 의미하여, 기장 플랜트는 2 MIGD와 8 MIGD로 이뤄진 2개 역삼투압 방식의 병렬 생산라인을 갖고 있고, Ras Al Khair 플랜트는 160 MIGD의 MSF(Multi-stage flash distillation)

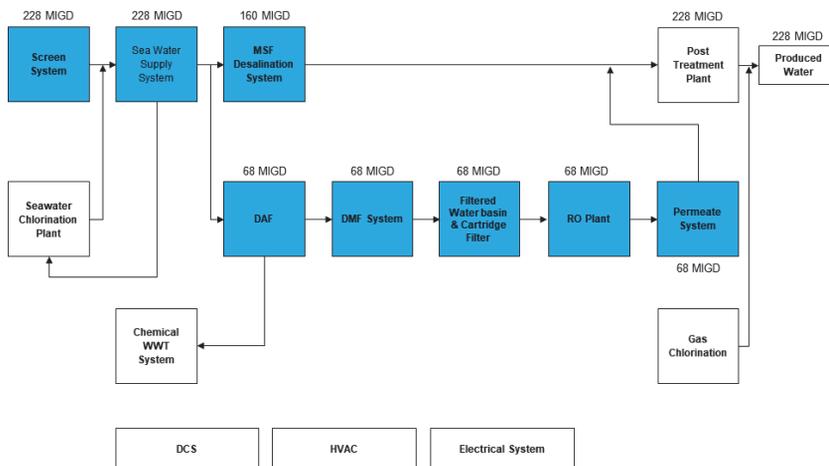


Fig. 8. Configuration of Ras Al Khair Plant

생산 라인과 68 MIGD는 역삼투압 방식의 생산라인으로 총 228 MIGD의 생산용량으로 구성되어 있다.

기장 플랜트는 PBS 상으로 619개 모듈을 대상으로 모델링하였으며, 일부 실무적인 관점에서 불필요한 모듈을 제외하고 Dummy 노드를 포함하여 총 627개 노드로 모델링 되었다. Ras Al Khair 플랜트는 PBS 상 9829개의 모듈을 모델링하여 9928개의 노드를 가진 트리 구조로 모델링되었다. 두 모델 모두 최하단 노드의 수명분포는 Barringer & Associates, Inc.에서 제공하는 Weibull Database에서 인용하였다.

연간 예방정비 기간을 18일로 설정하였으나, equipment 별 예방정비 계획은 실무자와의 협의 상 최소한의 예방정비를 반복하는 것으로 실제 예방정비를 거의 하지 않는 최악의 상황을 가정하였다. 30년 운영을 30회 반복 실험하였으며, Table 3과 Table 4는 기장 플랜트와 Ras Al Khair 플랜트의 주요 시스템의 가용도 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 전 시스템의 가동률 및 가용도의 신뢰구간은 0.1% 이내이다.

각 플랜트의 목표 가용도는 95%이나 연간 예방정비 기간이 18일로 예방정비 기간을 제외한 전 기간 동안 고장이 발생하지 않을 경우 95.07%의 가동률(가용도)를 가진다. 이를 감안할 때, 각 플랜트는 생산용량 대비 약 94.57%와 95.68%의 가용도를 가질 것으로 예측되며, 이는 설계상 목표 가용도와 시뮬레이션 상 예측 결과가 매우 근접한 것으로 가용도 시뮬레이션의 정확성이 매우 높은 것으로 파악된다.

**Table 3.** Estimated Utilization and Availability of Gijang Plant and Main Systems

Node Name	Average Utilization	Average Availability	Average Failure per Year
Gijang Plant	89.91%	89.91%	14.0
DABF System	94.87%	95.06%	2.1
Seawater Supply System	94.17%	94.33%	2.6
BWRO System	94.31%	94.47%	1.0
SWRO System for 2 MIGD	91.67%	91.74%	4.6
SWRO System for 8 MIGD	90.88%	91.04%	3.8

**Table 4.** Estimated Utilization and Availability of Ras Al Khair Plant and Main Systems

Node Name	Average Utilization	Average Availability	Average Failure per Year
Ras Al Khair Plant	90.96%	90.96%	172.9
Screen System	94.20%	98.28%	8.8
Sea Water Supply System	93.22%	98.94%	16.1
MSF Desalination System	91.09%	96.53%	51.1
DAF	94.19%	99.99%	19.8
DMF System	94.20%	100.00%	0.0
Filtered Water basin & Cartridge Filter	93.59%	99.33%	4.4
RO Plant	93.72%	99.47%	71.3
Permeate System	94.16%	99.95%	1.4

## 5. 결론

플랜트 시스템은 고장이 발생함에 따라서 타 산업 대비 경제적 손실이 크므로, 이를 최소화하기 위하여 SWRO 플랜트에 적절하고 현실적인 RAM 분석이 수행되어야 한다.

이를 위하여, 본 연구에서는 SWRO 플랜트 구조와 운영 방식에 맞춘 가용도 시뮬레이터를 개발하고, 공개된 대상 구성기기의 수명 및 수리분포를 데이터를 바탕으로 실제 SWRO 플랜트인 국내 기장 플랜트와 사우디아라비에 Ras Al Khair 플랜트의 가용도 추정 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션 결과 두 플랜트의 설계상 목표 가용도 및 실제 운영 가용도와 거의 근접한 가용도가 산출되어 시뮬레이터와 시뮬레이션 모델의 정확성이 매우 높은 것으로 보인다.

시뮬레이션 결과로부터 전체 시스템의 모듈별 고장 빈도, 수리 시간, 수리비용 및 수명 주기 비용 등을 추정할 수 있다. 이는 실제 현장에서 두 가지 측면으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 첫째, 고장 이력 분석 결과를 바탕으로 적정 수리 부속 재고 보유 계획을 수립하고, 결과적으로 유지보수 비용을 절감하고 가동정지로 인한 경제적 손실을 억제할 수 있을 것으로 기대한다. 둘째, 시스템 구성의 변화에 따른 전수명주기 비용 예측을 통해 플

랜트 견적 시 예상 가용도와 운영비용 예측에 활용될 수 있다.

이를 통해 목표 가용도를 달성함과 동시에 유지보수비용의 최소화를 달성할 수 있으며, 이러한 일련의 RAM 분석 절차에 따라 신뢰도, 정비도, 가용도를 효과적으로 관리함으로써, 해양플랜트 산업에서 경쟁력을 향상시킬 수 있을 것으로 기대한다.

## References

- Barringer & Associates, Inc., Weibull Database, <http://www.barringer1.com/wdbase.htm>, accessed 11/10/2018.
- Fuchs, M. (2011) ExcelFormat Library, available at <https://www.codeproject.com/Articles/42504/Excel-Format-Library>, accessed 6/05/2016.
- Chung, I. H., and S. J. Park (2008) "Effect Analysis of Factors for Improving Accuracy of RAM Simulation in Weapon System", *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, 11(6), 102-116.
- (정일한, 박삼준 (2008) "무기체계 RAM 시뮬레이션 정확도 향상을 위한 요소별 영향 분석", *한국군사과학기술학회지*, 11(6), 102-116).
- Gupta, S., Tewari, P. C., & Sharma, A. K. (2009) "An availability simulation model and performance analysis of a coal handling unit of a typical thermal plant", *South African Journal of Industrial Engineering*, 20(1), 159-172.
- Jung, Inho, Jaewoong Choi, and Changbeom Choi. (2017) "Web-based Distributed Experimental Frame for Discrete Event Simulation System." *Journal of the Korea Society for Simulation*, 26(2), 9-17.
- (정인호, 최재웅, 최창범 (2017) "이산사건 시뮬레이션 시스템을 위한 웹 기반 분산 실험 틀." *한국시뮬레이션학회논문지*, 26(2), 9-17.)
- Kim D. H., H. S. Noh, I. H. Jung, and S. C. Han (2006) "RAMSim - Discrete Event Simulator for evaluating RAM indices in Weapon Systems", *Proceedings of Korea Simulation Society Conference*, 80-85.
- (김도형, 노효상, 정일한, 한상철 (2006) RAMSim - 무기시스템 RAM 분석용 이산사건 시뮬레이터, *한국시뮬레이션학회 학술대회 논문집*, pp. 80-85).
- Kim H. R. and S. Y. Choi (2010) "A Hierarchical RAM Simulation Model Framework", *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, 13(1), 41-49.
- (김혜령, 최상영 (2010) "계층적 RAM 시뮬레이션 모델 프레임워크", *한국군사과학기술학회지*, 13(1), 41-49).
- Kim H. R, I. H. Kim, and S. Y. Choi (2011) "A Study on a Simulation Model to Analyze the Availability of a SoS", *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, 14(6), 1049-1057.
- (김혜령, 김의환, 최상영 (2011) "복합시스템 가용도 분석을 위한 시뮬레이션 모델 연구", *한국군사과학기술학회지*, 14(6), 1049-1057).
- Lee H. C., and I. J. Hwang (2016) "A Study on the Availability Evaluation with Failure Density Function of Equipment of Small-scale Plant", *The KSFM Journal of Fluid Machinery*, 19(3), 33-36.
- (이홍철, 황인주 (2016) "소규모 플랜트 기자재의 고장밀도함수가 가용도에 미치는 영향 평가", *한국유체기계학회 논문집*, 19(3), 33-36).
- Lee, Jinho (2019) "A Theoretical Framework on Reliability Optimization for Improving System Operational Availability." *Journal of Applied Reliability* 19(3), 256-64.
- Lim, Jun Hyoung, Dong-Yeon Won, Hyun Su Sim, et al. (2018) "A Study on Condition-based Maintenance Policy using Minimum-Repair Block Replacement." *Journal of Applied Reliability*, 18(2), 114-21.
- (임준형, 원동연, 심현수 외 (2018) "최소수리 블록교체 모형을 활용한 상태기반 보전 정책 연구." *신뢰성 응용연구*, 18(2), 114-21.
- MacDougall, M. H. (1980). *SMPL - A Simple Portable Simulation Language*. Sunny Vale, CA, USA: Amdahl.
- Marquez, A. C., Heguedas, A. S., & Iung, B. (2005) "Monte Carlo-based assessment of system availability. A case study for cogeneration plants", *Reliability Engineering & System Safety*, 88(3), 273-289.
- Rao, M. S., & Naikan, V. N. (2016) "Review of Simulation Approaches in Reliability and Availability Modeling", *International Journal of Performability Engineering*, 12(4), 369-388.
- Yun W. Y, Y. J. Han, G. E. Park, C. H. Choi, and D. J. Jung (2011) "Simulation Modeling for RAM

Analysis of a Searching System”, *Journal of the Korean Society for Quality Management*, 39(3), 353-364.

(윤원영, 한영진, 박고은, 최충현, 정덕재 (2011) “탐지체계의 RAM 분석을 위한 시뮬레이션 모델링 연구”, *품질경영학회지*, 39(3), 353-364).



**김 용 수** (ORCID : <https://orcid.org/0000-0003-3362-4496> / [kimys@kgu.ac.kr](mailto:kimys@kgu.ac.kr))

1999 KAIST 산업공학과 공학사  
2001 KAIST 산업공학과 공학석사  
2006 KAIST 산업공학과 공학박사  
2006~ 2008 SK텔레콤  
2008~ 2010 성결대학교 산업경영공학과 전임강사  
2010~ 현재 경기대학교 산업경영공학과 부교수

관심분야 : 데이터 마이닝, 신뢰성공학, 품질경영



**박 정 원** (ORCID : <https://orcid.org/0000-0003-4969-6056> / [jungwon.park@doosan.com](mailto:jungwon.park@doosan.com))

2008 아주대학교 기계공학부 공학사  
2007~ 현재 두산 중공업 재직

관심분야 : Plant Digitalization, Plant Process 및 O&M 최적화, 신뢰성 분석



**최 석 호** (ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-0053-8332> / [seokho.choi@doosan.com](mailto:seokho.choi@doosan.com))

1996 한양대학교 기계공학과 학사  
1998 한양대학교 기계공학과 석사  
1998~ 현재 두산중공업

관심분야 : 해수담수화 및 수처리 플랜트 공정, 제품 및 기술 개발



**강 준 규** (ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-4563-0968> / [jun-gyu.kang@sungkyul.ac.kr](mailto:jun-gyu.kang@sungkyul.ac.kr))

1998 부산대학교 산업공학과 공학사  
2000 한국과학기술원 산업공학과 공학석사  
2005 Swiss Federal Institute of Technology in Lausanne, Mech. Eng., Ph.D.  
2005~ 2006 Swiss Federal Institute of Technology in Lausanne, Post. Doc.  
2006~ 2008 프랑스국립 Grenoble Institute of Technology, Research Fellow.  
2008~ 현재 성결대학교 산업경영공학과 부교수

관심분야 : 모델링&시뮬레이션, 생산/제조 시스템 시뮬레이션, 시스템 신뢰성 분석