

## 하수처리장 주요 기자재의 고장확률밀도함수를 이용한 가용도 모델링 및 평가에 관한 연구

### A Study on the Availability Modelling and Assessment with Failure Density Function of Major Equipment for a Sewage Treatment Plant

이흥철\* · 곽필재\* · 이현동\*\*\* · 황인주\*<sup>†</sup>

Hong-Cheol Lee\* · Pilljae Kwak\* · Hyundong Lee\*\*\* · In-Ju Hwang\*<sup>†</sup>

\*한국건설기술연구원 환경연구실 · \*\*과학기술연합대학원대학교 건설환경공학과

\*Environmental Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology

\*\*Department of Construction & Environment Engineering, University of Science and Technology

(2012년 11월 9일 접수, 2013년 10월 17일 채택)

**Abstract :** The simulation investigation on the availability with failure density function of major equipment for a sewage treatment plant has been carried out. This study focuses on the availability of the plant and criticality with equipment module induced by component layout and its failure function. The equipment classification of sewage treatment plant and its failure function are established. Also solution methodologies are introduced as Monte-Carlo simulation method and event algorithm for uncertainty problem. The availability in the case of serial connection of equipment with all exponential function is calculated as around 50.4%. In other case of parallel combination with back up equipment, the availability showed over 80.1%. The criticality that affects availability showed high value over 77% in the dehydration and concentration process of sludge.

**Key Words :** Sewage Treatment Plant, Availability, Failure Density Function

**요약 :** 본 논문에서는 하수처리장 주요 장비 고장밀도함수를 기반으로 시스템 가용성 평가가 수행되었다. 프로세스 구성과 구성요소의 고장률에 따른 시스템 가용성 및 위험요소 분석에 초점을 맞추고 있다. 하수처리장 시스템 가용성 분석을 위하여 기자재 분류와 해당기자재의 고장확률밀도함수를 정립하였다. 가용성 평가 과정의 불확실성의 해소를 위하여 몬테카를로 시뮬레이션 기법과 이벤트기법을 도입하였다. 하수처리장 시스템 가용성은 구성장비가 직렬연결 상태인 경우에 50.4%로 평가되었으며, 장비별 보조시스템이 추가 적용된 경우 80.1% 이상으로 증가하였다. 슬러지 탈수 및 농축 공정의 시스템 오작동은 전체 시스템 오작동의 77% 이상에 해당하고 있어 주 위험 요인으로 평가되었다.

**주제어 :** 하수처리장, 가용도, 고장확률밀도함수

## 1. 서론

최근 물순환시설의 운영에 있어서도 처리효율이나 경제성 향상을 위해 각 구성 설비의 최적화 또는 운전율 유지가 주요한 설계이슈로 부상하고 있으며, 이의 척도로 활용되는 가용도(availability)의 평가를 설계단계부터 적용해야 할 필요성이 증가하고 있다.

대표적인 물순환시설로서 정수처리시설, 하수처리시설, 상수도관망, 하수관거, LID (Low Impact Development) 시설물 등이 있는데, 이러한 시설물들은 운영과정에서 공정계통의 고장과 노후화로 인한 누수, 부식, 침착, 단선 등 다양한 문제를 발생시킬 수 있다. 이에 따라 사고나 장비의 노후화로 처리 효율의 저하 등 기능상실 위험에 대비하여 안정성과 신뢰성 확보가 매우 중요시되고 있다.<sup>1,2)</sup>

이러한 설비의 고장과 가용도에 관한 연구에 있어서 Sharma 등<sup>3)</sup>은 시스템의 신뢰성, 가용성 및 유지보수성 분석방법이 최소 고장 또는 필요시 평균고장간격을 증가시키거나 신뢰성을 최적화, 가용성을 극대화, 유지보수를 계

획하는 등 설계 수정을 수행하는데 효과적임을 제안한 바 있다.

Borgonovo 등<sup>4)</sup>은 설비시스템 유지보수전략과 운영절차의 평가를 위한 몬테카를로(Monte-Carlo) 시뮬레이션 기법이 다양한 분석모델에 의해 파악되지 않은 플랜트 관리, 유지보수 및 운영을 위한 유연한 도구로 활용될 수 있음을 보였다.

또한 Lee<sup>5)</sup>는 천연가스 액화계통을 대상으로 RAM (reliability, availability, maintainability) 성능해석을 위한 해석 기법의 타당성과 이에 미치는 영향인자 평가에 대한 연구를 시도한 바 있다.

이러한 플랜트 공정계통의 위험도나 가용도, 생산성 등에 관한 연구 또는 실적은 선진기업에서 노하우나 데이터베이스 형태로 보유하고 있고, 국내에서 관련 연구가 미비하며 물순환시설에 대해 활용은 부족한 실정이다.

이에 본 논문에서는 가용도 해석이론 및 시뮬레이션 기법을 이용하여 하수처리장에 대한 가용도 모델링을 수행하였다. 또한 이러한 모델과 현장 및 핸드북에서 제시하는 데이

<sup>†</sup> Corresponding author E-mail: ijhwang@kict.re.kr Tel: 031-710-0492 Fax: 031-910-0291

터를 이용하여 하수처리장 주요 기자재의 고장확률밀도함수가 가용도에 미치는 영향을 평가하였다.

## 2. 해석이론 및 모델 설정

### 2.1. 가용도 해석이론

가용도는 이상적인 환경의 설계조건 하에서 사용되는 장비가 항상 만족스럽게 운전될 수 있는 확률로서 실제 운전 시간과 고장이 없이 이상적인 연속운전시간과의 비로 정의된다.

Fig. 1에 도시한 바와 같이 펌프가 고장이나 수리시간이 없이 연속적으로 작동하여 이상적인 운전이 가능한 시간을 가정하고, 주어진 환경과 운전조건 하에서 실제 운전되는 시간을 산정할 수 있으며, 이들 간의 비를 가용도로 정의한다.

실제 운전되는 확률을 다루기 위해서는 신뢰도와 고장률 (failure rate),  $\lambda$ 이라는 척도를 사용하게 되는데, 식 (1)과 같은 관계가 성립한다.

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t)dt} \quad (1)$$

상기 식 (1)에서 지수로 표현되는 함수는 고장률에 시간을 곱한 개념으로 정상적인 운전상태의 장치가 해당 시점에서 오작동이 일어날 확률을 표현한 것으로써 신뢰도나 가용도를 계산하는 데 직접적으로 이용된다.

한편 부품이나 장비의 신뢰성은 MTTF (mean time to failure)라는 용어로 나타내며, 사용중에 수리하지 않는 비수리계 장비가 작동을 시작하여 고장이 날 때까지 평균시간을

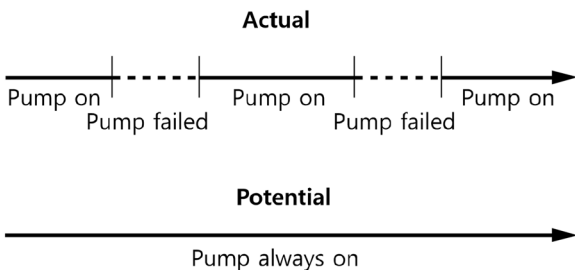


Fig. 1. The concept of availability.

말한다. 또한 고장 발생까지 시간으로 나타내는 MTTF는 고장밀도함수로 식 (2) 및 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$MTTF = \int_0^{\infty} tf(t)dt \quad (2)$$

$$MTTF = \frac{1}{\lambda} \quad (3)$$

또한 생애주기 동안 수리(repair)를 통하여 운전되는 시스템의 경우에 고장이 일어나는 평균적인 시간간격과 이러한 고장률에 따라 평균적인 보전(수리)시간을 산정할 수 있다. 보전성 척도인 MTTR (mean time to repair)은 평균수리시간을 의미하며, 수리시간이 평균수리율  $\mu$ 인 지수분포를 따를 경우에 평균수리시간은 다음 식 (4)와 같이 계산할 수 있다.

$$MTTR = \frac{1}{\mu} \quad (4)$$

이러한 정의를 이용하면 잠재적인 운전시간은 MTBF와 MTTR의 합으로 계산될 수 있다. 또한 실제 운전시간은 파손 또는 고장(failure)이 일어나는 시간간격인 MTBF이므로 가용도는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Availability = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (5)$$

### 2.2. 가용도 해석방법

본 논문에서 평가 대상은 국내 ○○지역에 설치된 60,000 m<sup>3</sup>/day 처리용량의 시설(Bio-SAC 하수처리, 슬러지 기계탈수 후 고화처리 방식)을 대상으로 하였으며, 주요 공정구성은 Fig. 2와 같다.

가용도 시뮬레이션을 위한 방법론으로 확률분포를 가지는 이벤트의 반복계산에 적합한 Monte-Carlo 기법을 도입하였다. 이러한 기법은 확률론적 모델링 기법으로 적용 장비별 특정한 확률분포를 따르는 일련의 난수를 이용하여 불특정 고장 상황을 모사하고, 이 과정을 반복적으로 수행하여 통계적으로 유의미한 해를 얻는 방법이다.

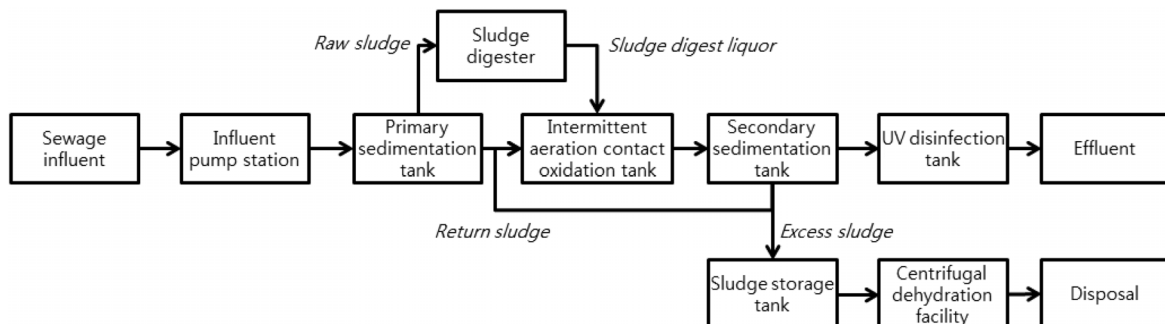


Fig. 2. Schematic process diagram of general sewage treatment plant.

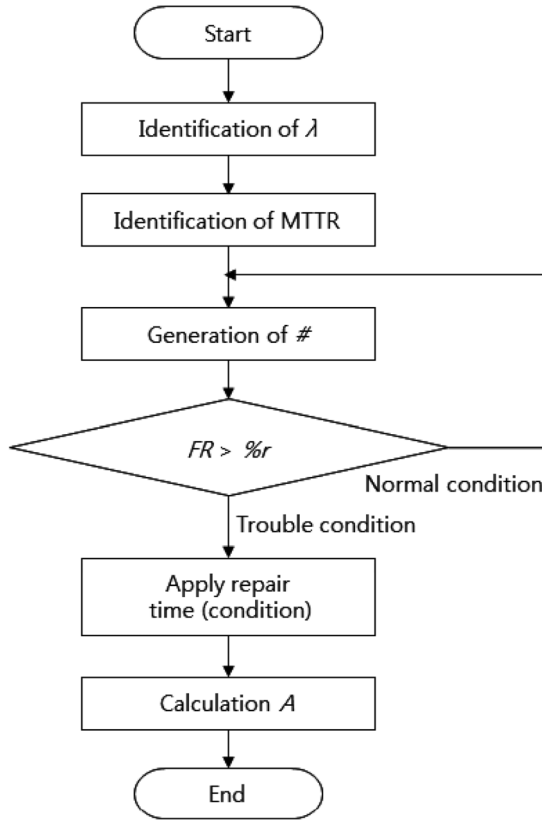


Fig. 3. Schematic diagram of Monte-Carlo simulation.

본 연구에서 가용도 평가를 위하여 Monte-Carlo 기법에 기반한 KICT 프로그램을 이용하였으며, 프로그램의 신뢰성과 적용 한계는 Lee<sup>5)</sup>의 연구결과를 활용하였다.

플랜트는 수많은 장치류, 단위공정, 기자재 등으로 구성되므로 다양한 유형의 고장과 수리 등 이벤트(event)가 발생하며, 이에 따라 정상적인 운전에는 불확실성을 내포하고 있다.

본 가용도 시뮬레이션에서는 복잡한 시스템에서 발생할 수 있는 다양한 이벤트를 가정하여야 하며, 본 연구에서는 Fig. 4에 도시한 바와 같이 불규칙적인 유형(type 1), 규칙적인 유형(type 2), 이들을 조합한 유형(type 3)을 고장 이벤트

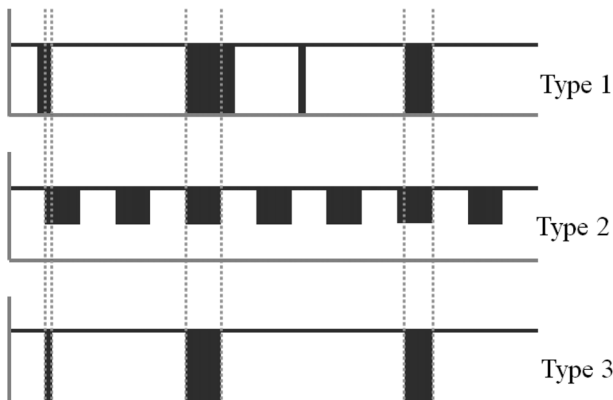


Fig. 4. Basic types of failure event.

로 반영하였다.

불규칙한 이벤트 생성은 보통 특정한 수학적 분포함수를 따르는데, 이러한 유형은 주로 시스템내의 장비 고장을 수반하는 경우이다. 반대로 규칙적인 고장 이벤트 생성은 기자재나 서브시스템의 수명주기 등이 알려져 있는 경우로 가속수명시험, 장비의 일정한 검사나 점검 등을 통하여 확인할 수 있다.

그리고 조합형에 의한 고장 이벤트 생성은 개별 고장 이벤트와 시스템 고장 이벤트 그룹간의 의존성을 나타낼 수 있는 장점을 가지고 있다. 본 연구에서는 적용 기자재에 대하여 적절한 수명주기를 가지나 일부 우발적인 고장 이벤트를 난수 발생으로 고려하였다.

가용도 평가를 위한 변수로 주요 기자재의 확률밀도함수와 시스템의 구성을 설정하고, 우선 지수분포 고장함수와 공정 시스템이 단일 장비(보조장비 없음)로 구성된 경우에 대해서 모델을 구성하였다. 이후 실제 설계/시공과 같이 다수의 장비와 백업 장비가 적용된 경우를 고려하여 각각 가용도 시뮬레이션을 수행하였다.

그리고 기자재의 고장확률밀도함수가 지수분포인 경우에 대한 결과를 평가한 후에 중요도가 높은 기자재를 대상으로 정규분포 고장함수를 적용하여 비교하는 방식을 적용하였다.

본 시뮬레이션에 적용한 고장률이나 수리시간 등 기본적인 데이터는 OREDA<sup>6)</sup> 데이터베이스를 활용하였다. 본 연구에서 적용한 주요 기자재의 기초 데이터는 Table 1에 요약 제시하였다.

이때 고장이 없는 스크린 및 수문 등 구조물이나 처리기능에 영향이 미미한 유틸리티 및 부대장비는 고장률이 미미한 것으로 가정하였다. 또한 사용환경에 영향을 받는 고형물 제거단의 전동기는 현장의 경험 데이터를 활용하여 영향을 파악할 수 있도록 고장률과 수리시간을 일반 전동기의 10배, 5배를 각각 적용하였다.

이상과 같은 시뮬레이션 모델, 가정조건, 입력 데이터를 이용하여 생성된 생애주기별로 250회 반복 시뮬레이션을 통하여 수립된 확률적인 해를 결정하였으며, 95% 이상의 신뢰수준을 가지도록 하였다.

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 5와 6은 하수처리장의 처리과정 및 설비가 예비 시스템 없이 단순하게 직렬로 연결되고 전체 기자재의 고장함수가 지수분포를 따른다고 가정할 때 가용도와 기자재 중요도를 나타낸 결과이다. Fig. 5에서 전체 생애주기 동안에 50.4%의 매우 낮은 가용도를 보이고, Fig. 6에서 개별 공정 및 기자재가 가용도에 미치는 영향은 슬러지 탈수공정에서 52.3%, 슬러지 농축공정에서 25.4%로 타 설비군에 비하여 비교적 높게 나타나고 있다.

Table 1. The equipment data of a sewage plant

Field application system						Reliability data (source: OREDA DB)			
Facility	Equipment	Format	Standard	Common use quantity	Backup quantity	Separation	Failure rate (10 <sup>-6</sup> hr)	Repair time (hr)	Source
Grit chamber facility	Sediment pulling pump	Centrifugal pump	0.51 m <sup>3</sup> /min	2	1	Centrifugal pump	807.26	20	OREDA p.139
	Sediment separator	Conical vortex chamber	30 m <sup>3</sup> /hr	1		Hydro-cyclone	16.90	76	OREDA p.360
	Auto valve	Diaphragm type	φ 100 mm	2		Diaphragm V/V	38.94	12	OREDA p.715
	Floor drainage pump	Submersible wastewater pump	0.2 m <sup>3</sup> /min	1	1	Oil export pump	786.29	10	OREDA p.161
	Linked treatment water control valve	Electric butterfly	φ 80 mm	1		Butterfly V/V	16.23	17	OREDA p.681
Regulating tank/Influent pump facility	Linked treatment water mixer	Submersible width propeller	6.1×6.×5.8 m	1		Electric motor	72.85	16	OREDA p.265
	Agitator in regulating tank	Submersible width propeller	38×16×4.5 m	6		Electric motor	72.85	16	OREDA p.265
	Influent pump	Submersible wastewater pump	11.8 m <sup>3</sup> /min	4	2	Oil export pump	786.29	10	OREDA p.161
	Pump discharge valve	Electric butterfly	φ 400 mm	6		Butterfly V/V	16.23	17	OREDA p.681
Primary settling facility	Flow control valve	Electric butterfly	φ 400 mm	4		Butterfly V/V	16.23	17	OREDA p.681
	Raw sludge impression valve	Electric gete valve	φ 150 mm	32		Ball V/V	26.23	31	OREDA p.661
	Raw sludge pump	Centrifugal pump (Helical type)	0.3 m <sup>3</sup> /min	2	2	Centrifugal pump	807.26	20	OREDA p.139
Reactor and ventilator facility	Floor drainage pump	Submersible wastewater type	0.2 m <sup>3</sup> /min	6		Oil export pump	786.29	10	OREDA p.161
	Influent channel mixer	Submersible width propeller	4.2×9.7×1.0 m	8		Electric motor	72.85	16	OREDA p.265
	Anaerobic agitator	Submersible width propeller	10.6×7.6×6 m	8		Electric motor	72.85	16	OREDA p.265
	Anaerobic eggbeater	Submersible width propeller	10.6×4.5×6 m	8		Electric motor	72.85	16	OREDA p.265
	Recirculation pump	Centrifugal pump (Helical type)	10 m <sup>3</sup> /min	8	4	Centrifugal pump	807.26	20	OREDA p.139
	Air blower in Bio-SAC	Single turbo blower	92.5 m <sup>3</sup> /min	2	1	Electric motor	72.85	16	OREDA p.265
	Aerobic air blower	Single turbo blower	88.5 m <sup>3</sup> /min	2	1	Electric motor	72.85	16	OREDA p.265
	Air control valve	Electric butterfly	φ 250 mm	16		Butterfly V/V	16.23	17	OREDA p.681
	Ventilator for waterway	Rotary roots	18 m <sup>3</sup> /min	1	1	Electric motor	72.85	16	OREDA p.265
	Vesicle number switch valve	Electric gete valve	φ 80 mm	8		Ball V/V	26.23	31	OREDA p.661
Secondary settling facility	Floor drainage pump	Submersible wastewater pump	0.2 m <sup>3</sup> /min	4	4	Oil export pump	786.29	10	OREDA p.161
	Raw sludge impression valve	Electric gete valve	φ 150 mm	16		Ball V/V	26.23	31	OREDA p.661
	Transmission sludge pump	Centrifugal pump (Helical type)	2.1-5.6 m <sup>3</sup> /min	6	2	Centrifugal pump	807.26	20	OREDA p.139
	Transmission control valve	Electric butterfly	φ 300 mm	4		Butterfly V/V	16.23	17	OREDA p.681
	Surplus sludge pump	Centrifugal pump (Helical type)	0.2 m <sup>3</sup> /min	2	2	Centrifugal pump	807.26	20	OREDA p.139
	Floor drainage pump	Submersible wastewater type	0.2 m <sup>3</sup> /min	4	4	Oil export pump	786.29	10	OREDA p.161
Filtering and water supply facility	Alum supply pump	Diaphragm pump	0.84 m <sup>3</sup> /min	4	1	Reciprocating Pu.	195.51	17	OREDA p.171
	Auto water supply equipment	Pressurized water supply booster	0.9 m <sup>3</sup> /hr	2		Centrifugal pump	807.26	20	OREDA p.139
Sludge concentration facility	Floor drainage pump	Submersible wastewater pump	0.2 m <sup>3</sup> /hr	2	2	Oil export pump	786.29	10	OREDA p.161
	Thickener	Centrifugal mechanical	22 m <sup>3</sup> /hr	2		Electric motor×10	728.5	80	
	Sludge supply pump	Uniaxial screw type	0.3-0.6 m <sup>3</sup> /min	2	1	Centrifugal Pu×3	2421.78	40	
	Chemical feed pump	Uniaxial screw type	0.005-0.03 m <sup>3</sup> /min	2	1	Centrifugal pump	807.26	20	OREDA p.139
Sludge dehydration facility	Maintenance valve	Electric butterfly	φ 200 mm	2		Butterfly V/V	16.23	17	OREDA p.681
	Raw sludge dehydrator	Centrifugal mechanical	15 m <sup>3</sup> /hr	2		Electric motor×10	728.5	80	
	Thickening sludge dehydrator	Centrifugal mechanical	7 m <sup>3</sup> /hr	2		Electric motor×10	728.5	80	
	Raw sludge supply pump	Uniaxial screw type	0.1-0.4 m <sup>3</sup> /min	2	1	Centrifugal Pu×3	2421.78	40	
	Thickening sludge supply pump	Uniaxial screw type	0.05-0.2 m <sup>3</sup> /min	2	1	Centrifugal Pu×3	2421.78	40	
	Polymer transfer pump	Width centrifugal pump	1.2 m <sup>3</sup> /min	1	1	Oil export pump	786.29	10	OREDA p.161
	Agitator	Double propeller type	180 rpm	1		Electric motor	72.85	16	OREDA p.265
	Raw sludge chemical feed pump	Uniaxial screw type	0.02-0.06 m <sup>3</sup> /min	2	1	Centrifugal pump	807.26	20	OREDA p.139
	Thickening sludge chemical supply pump	Uniaxial screw type	0.01-0.05 m <sup>3</sup> /min	2	1	Centrifugal pump	807.26	20	OREDA p.139
	Air blower for surplus sludge storage tank	Rotary blower	6 m <sup>3</sup> /min	1		Electric motor	72.85	16	OREDA p.265
	Ventilator for reservoir	Rotary blower	3.6 m <sup>3</sup> /min	1	1	Electric motor	72.85	16	OREDA p.265
	Air reversing valve A	Electric butterfly	φ 100 mm	1		Butterfly V/V	16.23	17	OREDA p.681
Air reversing valve B	Electric butterfly	φ 80 mm	1		Butterfly V/V	16.23	17	OREDA p.681	
Deodorization facility	Deodorization fan	Turbo fan	400 m <sup>3</sup> /min	1	1	Electric motor	72.85	16	OREDA p.265
Discharge facility	Discharge pump	Submersible motor pump	10.5 m <sup>3</sup> /min	4	1	Oil export pump	786.29	10	OREDA p.161
	Discharge valve	Electric butterfly	φ 350 mm	4	1	Butterfly V/V	16.23	17	OREDA p.681

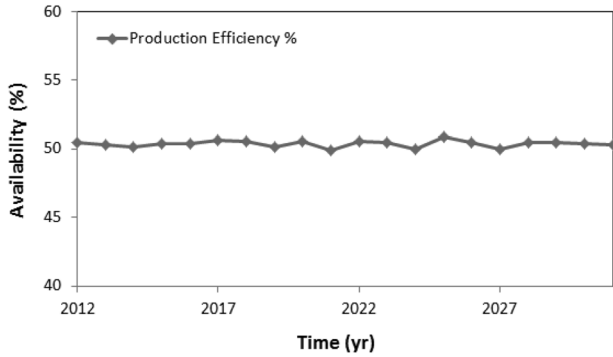


Fig. 5. Availability in the case of serial connection of equipment (all exponential).

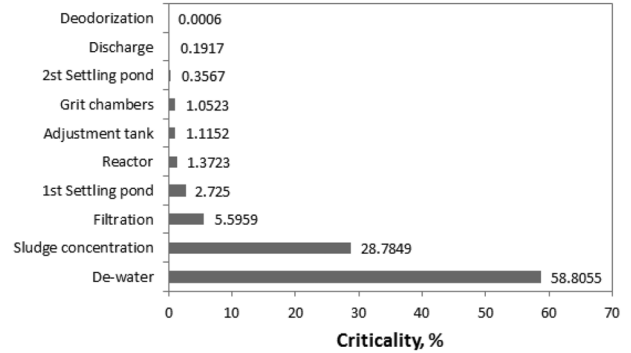


Fig. 8. Criticality in the case of parallel connection of equipment (all exponential).

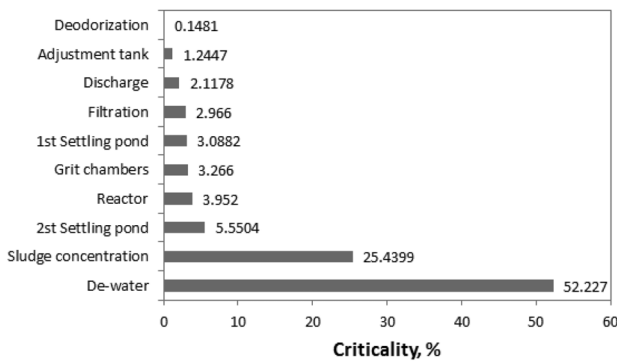


Fig. 6. Criticality in the case of serial connection of equipment (all exponential).

Fig. 5 및 6의 결과는 하수처리장의 가용도 설계에 있어 보조계통이나 부분부하운전이 가능한 계통의 설계와 시스템 하위모듈이나 설비의 신뢰성 및 유지관리 계획이 미치는 영향이 크음을 보여주고 있다.

상기 Fig. 5 및 6의 결과를 분석하여 Fig. 7과 8에서는 다수의 주요 설비 및 보조설비를 이용하여 병렬로 연결하고 전체 기자재의 고장함수가 지수분포를 따를 때 가용도와 공정 및 기자재별 중요도를 도시한 결과이다.

Fig. 7에서 가용도는 전체 생애주기 중에 80.1%를 보였고, Fig. 8에서 중요도는 슬러지 탈수공정에서 58.8%, 슬러지 농축공정에서 28.8%로 비교적 높게 나타나고 있다. 이는 보조

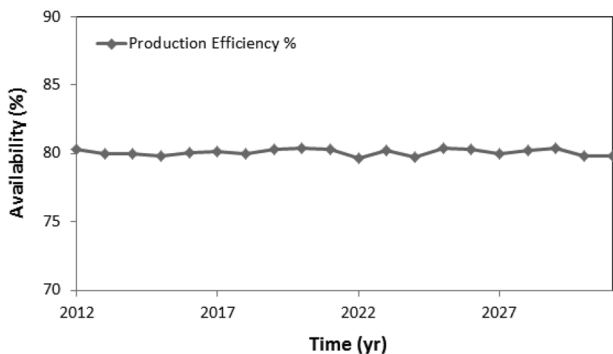


Fig. 7. Availability in the case of parallel connection of equipment (all exponential).

시스템과 유지관리 측면을 사전에 고려함에 따른 영향으로 보인다.

이와 같이 Fig. 8에서 설비나 처리공정의 중요도가 Fig. 6보다 높은 원인은 시스템 병렬 구성에 따른 고장률 저하효과가 비교적 단순한 공정계통에서는 높게 나타나고 슬러지 탈수 및 농축공정에서는 그 효과가 낮기 때문에 가용도가 높음에도 불구하고 상대적인 비율상으로 높게 계산된 결과로 판단된다.

상기 결과를 보완하여 Fig. 9와 10에서는 다수의 주요 설비 및 보조설비를 이용하여 병렬로 연결되고 전체 설비 중에서 슬러지 탈수 및 농축공정의 고장함수만 정규분포를 따를 때 가용도와 공정 및 설비별 중요도를 보여주고 있다.

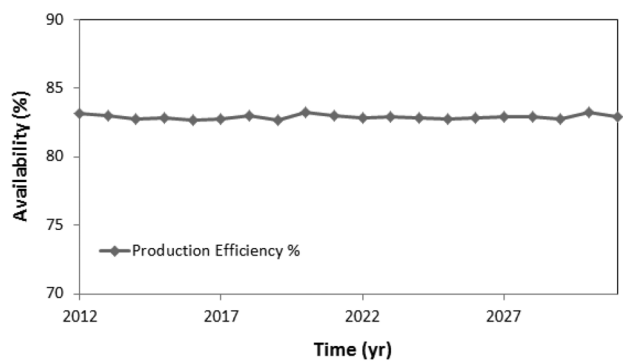


Fig. 9. Availability in the case of parallel connection of equipment (partially normal).

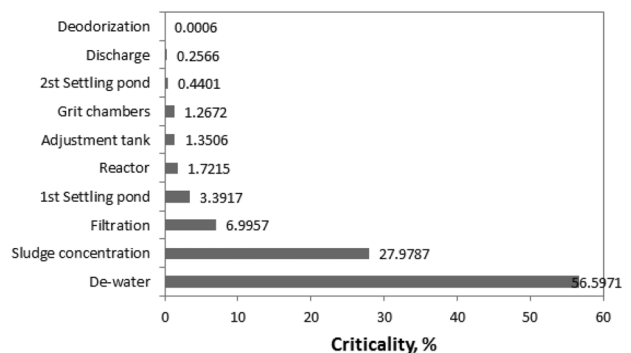


Fig. 10. Criticality in the case of parallel connection of equipment (partially normal).

Fig. 9에서 가용도는 전체 생애주기 중에 82.9%를 보였고, Fig. 10에서 중요도는 슬러지 탈수공정에서 56.6%, 슬러지 농축공정에서 28.0%로 높게 나타나고 있다. 이 경우에도 병렬적인 보조시스템 등을 사전에 설계에 고려함에 따라 가용도가 증가한 것으로 분석된다.

중요도에 있어서 Fig. 10의 결과가 Fig. 8의 결과보다 낮은 원인은 슬러지 탈수 및 농축공정에 평균고장율이 비교적 낮은 정규분포함수를 적용하였기 때문이며, Fig. 6 대비 높은 원인은 시스템의 병렬 구성에 따른 고장률 저하효과가 상대적으로 낮기 때문이다.

#### 4. 결론

이상과 같이 특정 하수처리장을 대상으로 확률론적인 기법으로 가용도와 주요 설비 및 처리공정의 중요도를 평가하여 다음과 같은 결론을 파악하였다.

하수처리장 공정에 있어서 보조계통이 없는 구성과 설비의 고장함수가 지수분포를 따를 때 50.4% 수준의 낮은 가용도를 보이거나 보조계통을 병렬로 구성한 경우에는 약 80.1% 수준으로 가용도가 증가하는 결과를 보였다. 이때 처리공정 및 설비의 중요도는 슬러지 탈수 및 농축공정이 높게 평가되었으며, 병렬시스템의 구성에 따라 일반 기자재류의 중요도가 크게 감소하는 결과를 보였다.

한편 시스템의 병렬 구성시 고장의 영향도가 상대적으로 크게 증가한 슬러지 탈수 및 농축공정에만 평균 고장률이 비교적 낮은 정규분포를 적용할 경우에 가용도가 82.9%로 약간 증가하는 결과를 보였다.

향후 현장의 실제 고장률 및 운전율, 유지보수 데이터를 이용하여 보다 정교한 시사점을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

#### 기호설명

- A : Availability [%]
- M : Maintainability [%]
- MTBF : Mean time between failure [h]

MTTR : Mean time to repair [h]

R : Reliability [%]

t : Time [h]

#### 그리스 문자

$\lambda$  : Failure rate

$\mu$  : Mean repair rate

# : Random number

#### 사사

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업(BIM/GIS 플랫폼 품기반 건설공간정보 통합운영기술 개발, 2012-0238)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

KSEE

#### 참고문헌

1. Kang, K. W., Yoon, M. O., Lee, H. C. and Hwang, I. J., "A study on the availability with failure rate of process for LNG plant," *Kor. Air-Conditioning Refri. Eng.*, **24**(4), 358~363(2012).
2. Lee, H. C. and Hwang, I. J., A study on the evaluation of RAM performance for test-bed of LNG plant, *Proceeding of SAREK 2011 Summer Conference*, pp. 281~284(2011).
3. Sharma, R. M. and Kumar, S., "Performance modeling in critical engineering systems using RAM analysis," *Reliability Eng. Syst. Safety.*, **93**, 891~897(2008).
4. Borgonovo, E., Marseguerra, M. and Zio, E., "A Monte Carlo methodological approach to plant availability modeling with maintenance, aging and obsolescence," *Reliability Eng. Syst. Safety.*, **67**, 61~73(2000).
5. Lee, H. C. and Hwang, I. J., A study on the applicability of RAM evaluation based on reliability theory for LNG plant test-bed, *Proceeding of SAREK 2011 Summer Conference*, 277~28(2011).
6. OREDA, 2009, Offshore reliability data 5th edition, SINTEF (2009).