

## 다중효용-흡착 방식 담수화 시스템의 가용도 분석

### Availability Analysis on the Multi-Effect Distillation and Adsorptive Desalination Process

노현정<sup>1</sup>, 이호생<sup>2</sup>, 지호<sup>2</sup>, 강관구<sup>1\*</sup>

Hyon-Jeong Noh<sup>1</sup>, Ho-Saeng Lee<sup>2</sup>, Ho Ji<sup>2</sup>, Kwan-Gu Kang<sup>1\*</sup>

#### 〈Abstract〉

Due to climate change and population growth, water scarcity is getting worse all over the world. Among various methods for desalination of seawater, the Multi-Effect Adsorptive Desalination method, which combines the existing Multi-Effect Desalination method and the Adsorptive Desalination method and can produce high-concentration-high-concentration freshwater, is emerging. Because the Multi-Effect Adsorptive Desalination method combines the two different methods, the system becomes complicated and the possibility of failure increases. Therefore, in this study, availability analysis was performed on the Multi-Effect Adsorptive Desalination process. A total of four types of reliability block diagrams were presented, and availability analysis was conducted based on them. The first form of a reliability block diagram is configured in series without any redundancy. The availability of the reliability block diagram composed of the serial system was found to be lower than the required availability. In order to increase availability, the redundancy to pumps and boiler are added to system. As a result of availability analysis, it was confirmed that designing desalination systems with redundancy to pump meets the 93% availability, which is typically required availability for various plants.

*Keywords* : *Adsorptive Desalination, Availability, Desalination Plant, Multi-Effect Distillation*

---

1\* 교신저자, 선박해양플랜트연구소 해양플랜트산업지원센터 1\* Offshore Industries R&BD Center, KRISO  
E-mail: kgkang@kriso.re.kr

2 선박해양플랜트연구소 해수에너지연구센터

2 Seawater Energy Plant Research Center, KRISO

## 1. 서론

기후변화 및 인구 증가에 따라 물 부족이 전 세계적으로 심화되고 있다. 물은 인간의 생존에 필수적인 자원일 뿐만 아니라, 산업용수로도 많은 담수의 공급은 요구된다. 해수담수화 기술은 해수에서 담수를 추출하는 기술로 세계의 많은 국가들이 물 부족을 해결하기 위해 주목하고 있고, 고효율-고농축 해수담수화 기술에 대한 수요가 증대되고 있다. 해수의 담수화의 대표적인 방식으로는 다단증발법(Multi-Stage Flash, MSF)[1], 다중효용법(Multi-Effect Distillation, MED)[2], 역삼투식(Reverse Osmosis, RO)[3] 등이 있으며 각각의 방식은 에너지효율, 담수량, 농축수 처리 등과 관련하여 장단점이 존재 한다. 최근에는 기존 담수화 기술의 단점은 보완하고 효율 및 환경적인 문제를 최소화할 수 있는 최신 기술들이 활발히 연구되고 있다[1-8].

해수담수화 기술 중 최근 많이 사용되는 방식은 강한 압력으로 물을 여과시켜 대용량의 담수를 획득할 수 있는 RO 공정이다[3]. 운영이 비교적 용이하고, 담수 생산을 위한 에너지 소비량이 낮으며, 필요한 용량에 적절하게 설치할 수 있다는 장점이 있다. 담수화 과정 중 필요한 에너지는 대부분 염수를 60~80 bar 정도로 가압하는 데 소비된다[9]. 하지만 이 방식은 막 오염을 최소화하기 위한 응집, 여과, 화학세정 등의 복잡한 전처리 과정이 요구되어 많은 비용이 요구된다[10]. 또한 회수율이 40~50% 정도로 낮아 농축수 처리도 어렵다[11].

증류법 또는 증발법은 해수를 끓여 수증기를 포집하는 방식으로 가장 역사가 오래되었으며 현재까지 널리 사용되고 있다. 증발기의 구성과 작동원리, 열원 등에 따라 MED, MSF 공정으로 나뉘어진다. 다단플래시 방식의 경우, 해수를 압력이

다른 여러 단계의 열교환기 내부를 거치면서 증발시킨 후, 차가운 해수가 흐르는 관 외벽에서 증발된 증기를 응축하는 방식으로 담수를 생산하는 방식이다. 다중효용방식은 다단플래시방식과 유사한 방식으로 금속관 외부에 해수를 분무시켜 분무된 해수는 증발시키고, 이 증기는 다음 단계 관 내부로 들어가서 응축되는 과정을 반복하는 방식으로 Fig. 1의 좌측에 나타내었다. 이 과정은 관 외부가 진공상태에서 진행되므로 낮은 온도에서도 분무된 해수가 끓게 된다. 다중효용방식은 일반적으로 70°C와 40°C사이에서 운전이 되므로 비교적 중소형이지만, 열효율이 높고 전력소모량이 낮다는 장점이 있다.

흡착식 담수화(AD, Adsorption Desalination)공정[12]은 실리카겔과 같은 흡착제를 사용하여 담수를 획득하는 기술로 작동원리를 간단하게 Fig. 1의 우측에 나타내었다. 80 °C 이하의 열원을 사용하기 때문에 고순도의 담수와 고농축의 농축수 뿐만 아니라 냉방을 위한 냉수까지 생산이 가능한 방식이다. 저온, 저압에서 작동하기 때문에 기존 해수담수화 기술에 비해 파울링(fouling) 및 스케일(scale)의 발생이 적어서 화학약품의 사용을 최소화 할 수 있어, 친환경적인 방식이라 할 수 있다[13-14]. 하지만 흡착식 담수화 방법은 타 방식에 비해 담수 생산량이 상대적으로 낮다는 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해서 기존의 다중효용방식과 흡착식 방식을 결합하여 다중효용 흡착(MEDAD, Multi-Effect Distillation and Adsorptive Desalination) 공정이 최근 대두되고 있고 Fig. 1에 도식화 하였다[15-16].

MEDAD 공정은 AD 공정과 MED공정의 결합을 통해 기존의 운전 온도 범위의 하한선으로 알려진 40°C이하에서도 MED 공정을 통한 담수를 가능하게 한다. 이를 통해 스케일링 및 파울링 문제를 현격히 줄일 수 있게 되고, 유지비용을 낮출 수

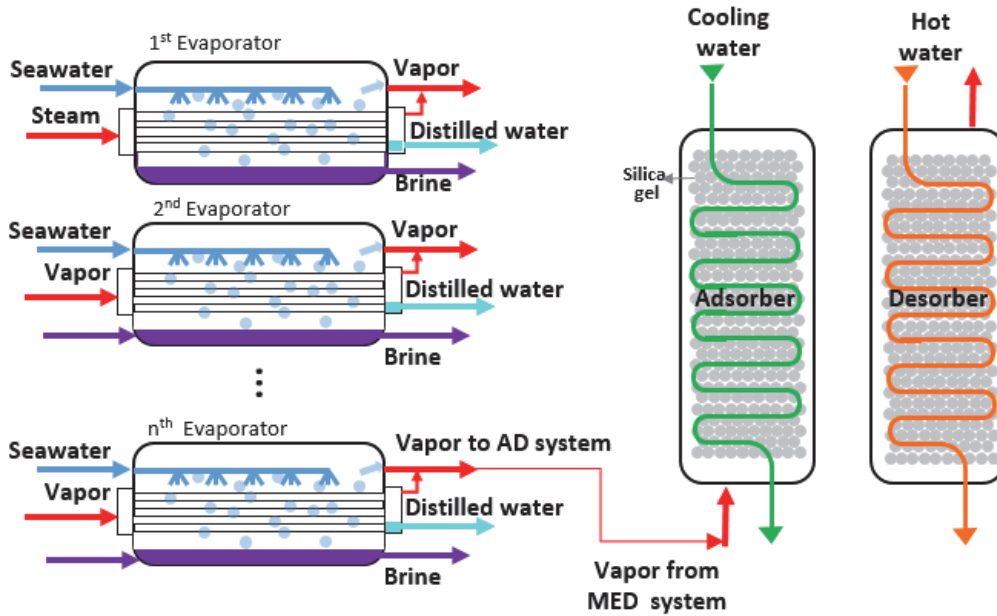


Fig. 1 Scheme of the MEDAD system

있으며, 기존 AD 공정의 낮은 담수 생산량 문제도 해결이 가능하다. 하지만 시스템이 복잡해져서 고장 발생확률이 높아지게 되고, 시스템의 전체적인 가용도가 낮아질 수 있는 가능성이 높다.

이와 같은 MEDAD 공정의 장점을 살리고, 단점인 낮은 가용도를 높이기 위해서는 신뢰성 분석은 필수적이다. 하지만 아직까지 MEDAD 공정의 신뢰성 분석에 대한 연구결과는 전세계적으로 많이 이루어지지 않고 있다. 이에 본 연구에서는 타 담수방식보다 상대적으로 복잡한 MEDAD 공정의 신뢰성 분석을 수행하여 가용도를 높일 수 있는 방안을 도출하고자 한다. 신뢰성 분석을 위해 고장 및 시스템의 파악하기 위해서 기능 분석, 설계 조합을 수행하고 신뢰성 블록도(RBD, Reliability Block Diagram)를 도출하였다. 이후 신뢰성 분석을 통해 고장률 및 가용도 분석을 수행하여 MEDAD 공정 운영시 가용도를 높일 수 있는 방안을 도출하였다. 이처럼 MEDAD 공정의 가용도를 높일 수 있으면, 기존 담수화 시스템 대비, 담

수 생산량의 증대 효과 뿐만 아니라, 농도 높은 농축수 배출 및 화학약품의 사용도 최소화가 가능하므로 환경 영향도 줄일 수 있게 된다.

## 2. MEDAD 공정의 기능 분석 및 설계 조합

공학적인 시스템은 여러 개의 서브시스템과 부품들로 구성되어 있고, 서브시스템과 부품들은 요구되는 기능을 수행할 수 있도록 상호 연결되어 있다. 신뢰성 분석에서 기능 블록은 요구되는 특정기능을 수행하는 요소를 뜻하게 된다. 다시 말하면 요소는 기능적은 측면으로 구분된 것이고 부품이나 서브시스템과 같은 크기로 구분되지 않는다. 신뢰성 분석에서 고장은 요구되는 기능의 실패로 정의되고, 신뢰성 분석의 주된 목적은 잠재적인 고장을 방지하는 데 있다[17]. 따라서 시스

템의 주된 기능을 도출하는 것은 시스템 분석의 시작 과정에서 수행되어야 한다.

전체 시스템의 구조를 기능 블록 다이어그램을 통해서 도식화하게 되면, 시스템에 필요한 기능들이 빠짐없이 도출될 뿐만 아니라, 도출된 기능들이 수행되는 메커니즘도 쉽게 파악할 수 있게 된다. 정성적 시스템 분석의 대표적인 방법인, FMEA(Failure Mode Effect Analysis), FTA(Fault Tree Analysis), RBD(Reliability Block Diagram)도 시작단계에 기능 블록 다이어그램을 통해서 주요 기능의 도출한 후, 구체적인 시스템 분석을 수행한다.

본 연구에서는 MEDAD 공정의 기능 블록 다이어그램을 도출하기 위해서, 먼저 작동프로세스를 분석하였다. 담수시스템의 기능 목표를 우선적으로 명확히 한 뒤, 기능 분석 수행하여 복합플랜트의 기본 기능을 정의하여 대분류와 소분류로 나누었다. 그 다음 도출된 기능들의 수행에 필요한 장비를 RAS(Requirements Analysis Sheet)를 통해 식별하였다. 이러한 일련의 방법들을 통해 담수-냉방 복합플랜트 장비를 기반으로 한 신뢰성 블록도를 제시하고 이를 바탕으로 초기 신뢰성 분석을 진행하였다.

## 2.1 MEDAD 공정의 작동 프로세스

본 연구에서는 요구조건 분석을 수행하기 위해 1차적으로 담수시스템의 작동프로세스를 분석하였다. MEDAD 공정은 앞 장에서 서술한 바와 같이 MED 공정과 AD 공정이 연계된 시스템이고 기본적인 작동 원리를 Fig. 1에 나타내었다. MEDAD에서 MED 공정부분에서는 기존 MED 공정과 마찬가지로 다단으로 설계된 증발기내에서 해수와 가열된 수증기가 서로 열교환하여 해수는 증발하고, 이전 단계에서 증발된 수증기는 응축되어 담수화 되는 과정을 거치게 된다. 이때 첫 번째 증

발기에서 증발된 해수는 두 번째 증발기의 열원으로 공급되어 해수를 다시 증발시키는데 이용된다. 마지막 증발기에서 증기가 응축되며 담수가 생성됨과 동시에 증발기내 해수가 증발할 때 발생하는 잠열을 이용해 냉수를 생성하여 이를 냉방시스템으로도 활용할 수 있다.

MEDAD공정에서 MED 공정 부분을 거쳐 생성된 증기는 다시 AD 공정 부분을 거치며 담수를 추가적으로 생성하게 된다. 흡착탑으로 이동된 증기는 흡착탑내의 실리카겔에 의해 흡착되게 된다. 이후 흡착탑내 열교환기로 온수가 공급되어 흡착된 수분을 탈착시키게 되며 탈착된기는 응축기로 이동된다. 응축기로 이동된 증기로 담수를 생산하고 담수 탱크로 이동된다. 흡착탑과 탈착탑은 모두 흡착제인 실리카겔이 충전되어 있는데, 열교환기에 공급되는 냉수와 온수가 교체되며 순차적으로 흡착과 탈착모드로 전환되면서 두 개의 탑은 각기 흡착탑과 탈착탑이 교차하여 기능하게 된다.

## 2.2 기능 분석

기능 분석을 수행하기 위해서는 첫 번째로 시스템이 달성해야 하는 목표를 정의하고, 정의된 목표를 요구조건으로 선정한다. 두 번째 단계에서는 요구조건을 만족시킬 수 있는 기능들을 전개하는 기능 분석을 수행한다. 기능 분석 단계에서는 요구조건을 만족시키기 위한 1차적인 기본 기능을 먼저 정의 한다. 각각의 기능들은 다시 하부 기능으로 발전하여 전개되고, 필요에 따라 직렬 또는 병렬로 전개된다. 본 연구에서는 2.1의 작동 프로세스를 바탕으로 도출된 기능들은 Table 1의 좌측에 정리하였다. 도출된 기능들을 간략히 설명하면 다음과 같다. 우선 가장 첫 번째 기능은 (1) 해수의 공급이다. 두 번째는 (2) 열원 공급을 통한 증기의 생산이다. (3) 그 다음 증기를 고온 고압으

Table 1. Requirement allocation sheet (RAS)

Requirements and Functions		Equipment
Categories	Sub-categories	
(1) Supply seawater	Supply seawater continuously	Seawater pump
(2) Produce steam	Supply steam as the main heat source for the evaporator	Boiler
(3) Compress vapor	Produce high-temperature/high-pressure steam	Thermal vapor compression (TVC)
(4) Evaporate Seawater	Evaporate seawater in/under room temperature	Evaporator (MED)
	Maintain vacuum condition	Vacuum pump
	Send out vapor to the next evaporator	Joint Assembly (Pipeline)
(5) Condense vapor	Condenses vapor to produce distillate water	Evaporator (MED)
	Get distillate water	Distillate Tank
(6) Produce cold water	Produce cold water using seawater evaporation latent heat	Chilled water pump, Evaporator (MED)
(7) Recycling steam	Send out vapor to the next evaporator	Circulation pump, Joint Assembly (Pipeline)
(8) Discharge the concentrated water(brine)	Discharge the concentrated water(brine)	Brine Tank
(9) Adsorb vapor using the adsorbent	Transfer the vapor from the last evaporator to the adsorption tower	Joint Assembly (Pipeline)
	Supply cooling water to remove adsorption heat generation	Cooling water Pump
	Adsorb vapor using the adsorbent	Adsorption Tower
(10) Switch the adsorption/desorption(regenerate) mode	Switch cooling water and hot water supplied to the adsorption and desorption(regeneration) tower	Switching valves for mode change, Switching valves for cooling water and hot water
(11) Regenerate the adsorbed vapor	Supply hot water in the regenerate tower	Hot Water Pump
	Desorb the adsorbed water in tower	Regeneration Tower
(12) Condense the regenerated vapor	Transfer the regenerated vapor steam to the condenser	Joint Assembly (Pipeline)
	Condense the regenerated vapor	Condenser, Shell and Tube Heat Exchanger
	Store the condensed water	Distillate Tank

로 압축하여 다단 증발기에 공급하여 분사하게 된다. 다단증발기에서는 공급받은 열원을 통해 (4) 해수를 증발시켜 증기를 만든다. 증발기내 해수와 증기 열교환을 통해 (5) 증기가 응축하여 담수를 생산한다. 이때 해수 증발 잠열을 이용해 (6) 냉수를 생산한다. 마지막 n번째 다단 증발기에서 배출된 (7) 증기는 다시 재활용된다. 담수화 과정에서 생산된 (8) 농축수는 배출되며, 이때 농축수의 고농축을 위해 다시 순환과정을 거칠 수 있다. 이

후 증기는 흡탈착탑으로 이동하게 된다. 증기는 흡착탑으로 이동되어 (9) 흡착탑내 흡착제에 흡착된다. 이후 (10) 흡착 모드와 탈착 모드가 전환된다. 탈착탑으로 전환된 타워에서 열교환기내 온수가 공급되며 (11) 증기가 탈착된다. (12) 탈착된 증기는 응축을 통해 담수를 만든다.

본 연구에서는 2.1의 작동 프로세스 및 기능 분석 결과를 통해 시스템 작동을 위한 각 기능의 구조적 관계를 파악하여 Fig. 2와 같은 기능 블록

다이어그램을 도출하였다.

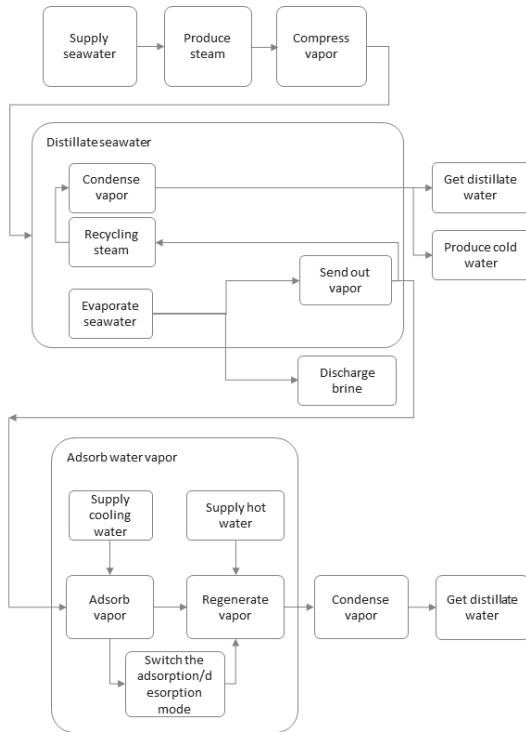


Fig. 2 Functional Block Diagram of MEDAD system

### 2.3 설계조합

설계 조합 단계는 시스템에 요구되는 기능과 그 기능을 구현할 수 있는 물리적 장비를 서로 매칭하는 단계이다. 본 연구에서는 설계 합성을 위해 RAS 방법을 사용하여 실제 MEDAD 공정의 기능을 수행하는 19개의 장비를 Table 1과 같이 구성하였다. RAS에서는 표에서 좌측 열에 기능을 기술하고, 각 기능들이 고려해야하는 요구사항 또는 조건을 그 다음 열에 기술하게 된다. 그리고 각 조건을 수행할 수 있는 장비가 무엇이 있는지 오른쪽 열에 기술하는 방법이다[18].

해수의 공급의 경우 해수펌프(seawater pump)를 도출하였다. 이렇게 공급된 해수는 다단증발기

에 공급되어 분사하게 된다. 두 번째는 열원을 통한 증기의 생산인데, 이때 증발기의 가장 첫 열원은 스팀 보일러에서 공급된 증기로 정의하였다. 이렇게 공급된 증기는 열압축기(TVC)를 통해 고온, 고압의 증기로 첫 번째 다단증발기에 공급되며 해수를 증발시켜 증기로 만드는 열원으로 사용된다. 또한, 상온에서도 증발이 가능하도록 다단증발기 내부를 진공상태를 유지하기 위해 진공펌프(vacuum pump)를 제안하였다. 이후 증발기내에서 해수와 증기는 열교환을 통해 해수는 증발하고 증기가 응축하여 담수를 생산하고, 이렇게 응축된 담수는 담수탱크에 저장된다. 이때 해수 증발 잠열을 이용해 냉수를 생산할 수 있는데, 이때는 냉수펌프(chilled water pump)를 이용해 냉수를 순환시켜 냉방 에너지를 사용할 수 있도록 하였다. 증발된 해수는 파이프라인을 통해 다음 단계의 다단증발기로 증기로 공급되어 열원을 재활용할 수 있도록 하고, 증발 이후 남은 농축수는 농축수 탱크(brine tank)로 이동된다. 이때 운영조건에 따라 농축수의 고도농축을 위해 다시 순환 과정을 거칠 수 있다. 이후 증기는 흡착탑으로 이동하게 된다. 증기는 흡착탑으로 이동된다. 흡착탑에는 흡착제인 실리카겔이 충전되어 있어 증기를 흡착한다. 이때 흡착탑내 냉수 튜브를 통해 흡착시 발열량을 제거한다. 이후 일정 시간이 지난 이후 스위치 밸브에 의해 튜브에 공급되는 냉수가 온수로 교체되며 탈착탑으로 전환된다. 탈착탑 내 튜브에 온수가 공급되면서 실리카겔에서 증기가 탈착되며 응축기로 이동한다. 응축기(condenser)는 원통다관식열교환기(shell and tube heat exchanger)형식의 응축기로 구성하였다. 응축기에서 응축된 증기는 담수 탱크로 이동되어 저장된다. RAS 분석 결과에 따라 도출된 장비를 바탕으로, 해당 기능에 대응하는 장비를 연결하여 Fig. 3과 같은 Process block diagram을 도출하였다.



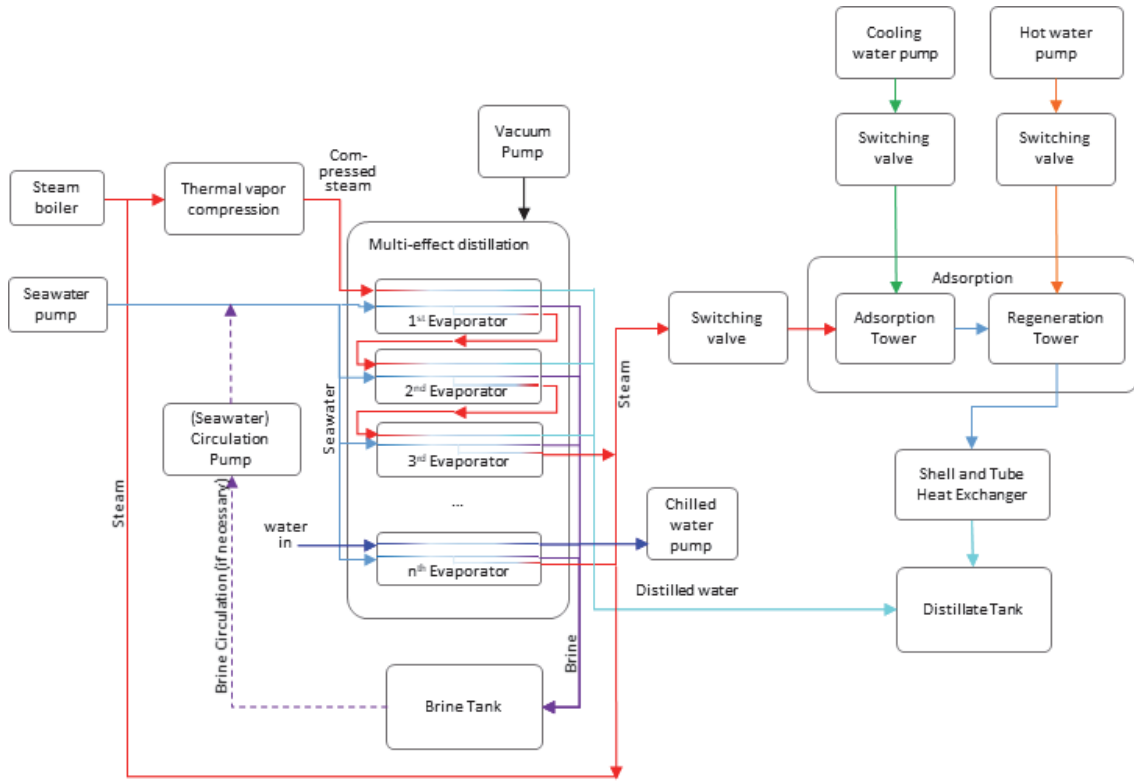


Fig. 3 Process block diagram of MEDAD system

### 3. 신뢰성 분석

#### 3.1 장비 신뢰도 분석 및 RBD 도출

해수담수-냉방 복합플랜트를 포함하여 대부분의 플랜트는 시스템의 정량적인 신뢰성 평가를 통해 규정된 기간 중 요구되는 기능을 수행할 수 있는 확률을 계산하고 이를 통해 신뢰성을 높이기 위해 노력을 한다. 고장의 발생하여 요구되는 기능을 수행하지 못하는 경우, 운영이 중지되어 경제적 손실을 일으킬 수 있고 고장의 종류에 따라 인명 또는 환경에 심각한 영향을 초래할 수 있기 때문이다.

장비의 신뢰성을 계산하기 위해서는 장비별 고

장률 데이터가 필요하다. 현재 상용화된 MEDAD 공정이 가동 중에 있지 않기 때문에 실제 운영 데이터로부터 고장 데이터 취득에 한계가 있어 본 연구에서는 NPRD (2016) Nonelectronic Parts Reliability Data[19]에서 장비의 고장률을 참고하였고 구체적인 수치는 Table 2에 나타내었다.

Table 2에서 MEDAD 공정을 구성하는 장비 중 고장이 가장 자주 일어나는 장비는 보일러, 펌프류, 다단증발기로 식별되었다. 보일러의 고장률은  $14.74 \times 10^{-6}$  hrs로 이를  $B_{10}$  수명[20]으로 환산하면 9.8개월이다. 다단증발기와 펌프류의 고장률은 각각  $13.99 \times 10^{-6}$  hrs과  $13.72 \times 10^{-6}$  hrs로  $B_{10}$  수명으로 환산하면 각각 10.3개월과 10.5개월이었다.

다단증발기는 작동 원리상 여러 개가 다단으로

Table 2. Failure rate from NPRD 2016 and estimated mean time to repair(MTTR) of each equipment

Equipment	Category, Subcategory	Failure Rate (FPMH)	MTTR(hr) (estimated)	MTTF (hr)	B <sub>10</sub> (hr)
(1) Seawater Pump	Pump, Centrifugal	13.719568	24	72,889	7,680
(2) Boiler	Boiler, Steam, Low Pressure	14.740752	14	67,839	7,148
(3) Thermal Vapor Compressor (TVC)	Compressor, Vapor	0.422819	10	2,365,078	249,186
(4) Multi-Effect Desalination (MED)	Evaporator, Condensator	13.991493	96	71,472	7,530
(5) Circulation Pump	Pump, Centrifugal	13.719568	24	72,889	7,680
(6) Vacuum Pump	Pump, Vacuum, Reciprocating	1.843373	24	542,484	57,156
(7) Chilled Water Pump	Pump, Centrifugal	13.719568	24	72,889	7,680
(8) Adsorption Tower	Dehydrator, Desiccant	6.030358	24	165,828	17,472
(9) Regeneration Tower	Dehydrator, Desiccant	6.030358	24	165,828	17,472
(10) Cooling Water Pump	Pump, Centrifugal	13.719568	24	72,889	7,680
(11) Hot Water Pump	Pump, Centrifugal	13.719568	24	72,889	7,680
(12) Switching valves for mode change	Valve, Control	1.667805	16	599,590	63,173
(13) Switching valves for cooling water	Valve, Control	1.667805	16	599,590	63,173
(14) Switching valves for hot water	Valve, Control	1.667805	16	599,590	63,173
(15) Joint Assembly	Pipe Assembly, General	0.422819	15	2,365,078	249,186
(16) Heat Exchanger	Heat Exchanger, Water	9.903671	50	100,973	10,639
(17) Condenser	Condenser, Shell/Tube	5.211851	10	191,870	20,216
(18) Distillate Tank	Tank, Liquid, Water	0.173123	12	5,776,240	608,588
(19) Brine Tank	Tank, Liquid, Water	0.173123	12	5,776,240	608,588

설치되어 해수를 증발시킨다. 사전에 자체 수행한 FMEA 결과에 따르면, 다단증발기에서 스프레이 노즐이 막힘, 부식(erosion)이 진행, 스케일 발생 등 점진적 성능감소(degradation)으로 인해 고장이 발생한다고 보고되어 주기적인 유지보수로 쉽게 고장의 방지가 가능하다. 또한 다단증발기는 통상 여러 개의 단으로 구성이 되어 한 개의 증발기가 고장이 나면 성능이 저하될 수는 있으나 전체 시스템이 멈추는 큰 고장으로 확대되지는 않는다. 이에 다단증발기를 제외하고 보일러와 펌프류를 시스템 신뢰도를 개선하는데 필요한 주요 장비로 선정하였고, 중복 구조로 설계하여 신뢰성 분

석을 수행하였다. 특히 펌프류의 경우, 시스템에 다양한 종류의 펌프가 여러 대 사용되고 있어서 중복 설계로 인한 시스템 신뢰도 개선에 효과가 클 것으로 예상된다.

지금까지 분석된 내용을 바탕으로 MEDAD 공정의 신뢰성 블록도(RBD, reliability block diagram)를 주요 장비의 중복(redundancy)을 고려하여 Fig. 4와 같이 4가지로 제시하였다. Fig. 4의 System A는 MEDAD 공정이 가질 수 있는 가장 기본적인 '직렬 시스템(series system)' 구조이다. 즉, 공정에서 필요한 Table 2의 장비를 중복 설계 없이 1개씩만 배치하여 최소한의 수로 구성하고 있다. 이



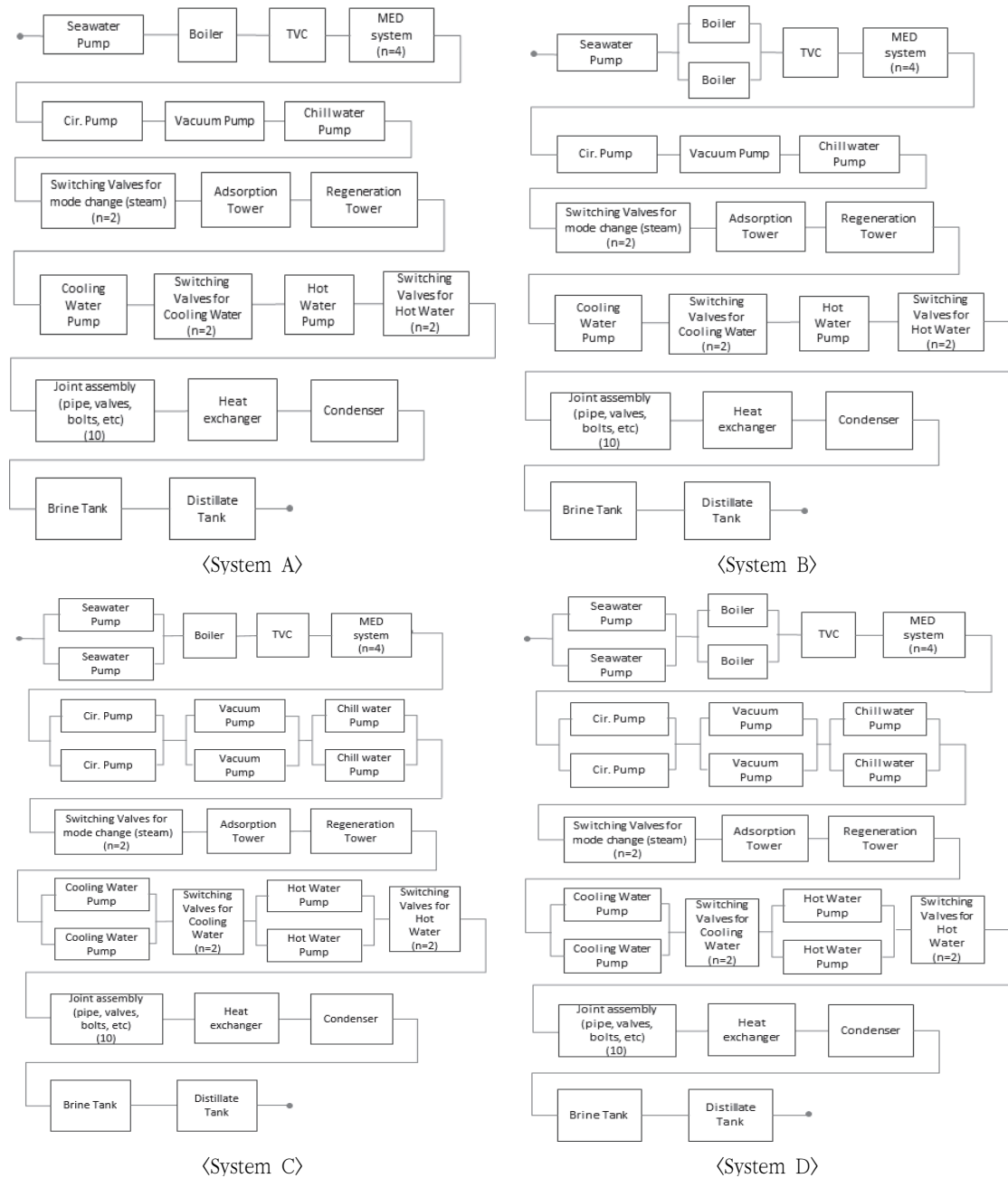


Fig. 4. Reliability Block Diagrams of MEDAD systems.

렇게 직렬로 구성된 시스템의 신뢰도는 중복 설계가 없어서 개별 장비가 모두 고장이 없을 때 시스템이 작동한다.

Fig. 4의 System B, C, D는 직병렬 시스템(series-parallel system) 구조이다. 주요 장비를 병렬시스템으로 중복 구성한 시스템은 하나의 장비가 고장

나더라도, 스페어(spare)의 형태로 장비를 사용할 수 있기 때문에 직렬시스템보다 높은 신뢰도를 가질 수 있다. System B는 주요 장비 중 MED에 공급되는 열원인 스팀을 공급하기 위한 보일러를 중복으로 2대로 설계하여 1대의 보일러가 고장나거나, 유지보수를 위해 멈추더라도 다른 1대가 작동하여 시스템의 운영에는 차질이 생기지 않는다. System C는 공정에 포함된 해수펌프, 순환펌프, 진공펌프, 냉수펌프, 냉각수펌프, 온수펌프 이렇게 총 6종의 펌프를 각각 중복으로 구성한 것이다. 6종을 모두 중복으로 구성하여 비용 상승이 예상되나, 시스템의 가용도는 크게 증대될 것으로 기대할 수 있다. System D는 보일러와 6종의 펌프류를 모두 중복으로 설계한 구조이다.

### 3.2 수리가능 시스템의 가용도 분석

우선 대상시스템의 신뢰성 분석 수행하기 위해 다음과 같은 사항을 정의하였다. 첫 번째, 시스템이 구현해야 하는 기능이 작동하지 않거나 목표된 성능을 달성하지 못하는 상태를 '고장'으로 정의하였다. 두 번째, 해수의 담수화를 최상위 기능으로 정의하였다. MEDAD 공정은 담수 과정에서 발생하는 잠열을 이용해 냉방용 냉수를 생산한다는 부가적인 기능을 가진다. 즉, 담수화 과정에서 생산되는 냉수를 활용하면 에너지 효율을 극대화할 수 있다. 하지만 냉수의 생산은 추가적인 장치 없이 다단 증발기내 열교환에 의해 자동적으로 이루어지기 때문에 냉수 생산 기능의 작동여부가 독립적으로 전체 시스템 신뢰도에 큰 영향을 주지는 않는다고 가정하였다. 또한 실제로는 상황에 따라 냉수 생산은 중단하고 담수만 생산하는 방식으로도 운영이 가능하다. 이러한 이유로 본 연구에서는 신뢰성 분석을 위해서 냉방 기능의 작동을 따로 분류하지 않고 담수생산 기능에 포함하여 작동

하는 것으로 가정하였다.

시스템이 특정 장비에서 고장이 발생하더라도 수리를 하면 계속해서 사용할 수 있는 수리 가능 시스템으로 정의되는 경우 신뢰성 분석을 위해서 통상적으로 가용도(availability,  $A$ )를 분석한다. 수리 가능한 시스템의 가용도는 임의의 시간  $t$ 에 시스템이 정상적으로 가동할 상태에 있을 확률로 식(1)과 같이. 즉, 시스템의 작동시간 뿐만 아니라 고장시 수리시간도 고려하여 신뢰도 분석하는 것이다.

$$A(t) = \Pr(X(t) = 1) \quad (1)$$

시간 구간( $t_1, t_2$ )에서의 평균 가용도는 식(2)와 같이 정의할 수 있다.

$$A_{av}(t_1, t_2) = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} A(t) dt \quad (2)$$

위의 평균 가용도에서 작동 구간,  $\tau$ 을 매우 길게 하면 식(3)와 같고, 이 때의 가용도를 정상 상태 가용도(steady-state availability)라고 정의한다. 정상 상태 가용도는 통상적으로 특정 수치로 수렴하게 된다.

$$\lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} A(t) dt = \lim_{t \rightarrow \infty} A(t) \quad (3)$$

정상 상태의 가용도를 정확하게 계산하기 위해서는 마르코프 체인 모형으로 계산을 수행하여야 한다. 그러나 마르코프 체인 모형은 복잡한 확률 과정에 대한 접근이 필요하고 계산이 매우 어렵다 [17]. 이에 본 연구에서는 앞서 도출한 4가지 구조의 신뢰성 블록도(RBD)를 대상으로 Monte Carlo Simulation 방법을 사용하여 정상 상태 가용도를 계산하였다. Monte Carlo Simulation은

난수를 이용하여 각각의 장비들에 대한 고장 시간을 예측하고, 수명주기 동안의 시스템의 시나리오를 만들어 가용도 평균을 구하는 방법이다. 본 연구에서는 Monte Carlo Simulation을 수행을 위해 Windchill Risk and Reliability 11.1 소프트웨어를 사용하였다.

Fig. 5에서 중복 설계가 없는 System A에서의 정상 상태 가용도는 85.2%로 도출되었다. 보일러를 중복으로 구성한 System B는 86.2%, 펌프류가 중복으로 설계된 System C는 93.1%로 가용도 결과가 나왔다. 펌프류는 여러 종류의 펌프가 모두 중복으로 설계된 만큼 기본 구성(System A)보다 가용도가 7.9% 더 큰 것으로 나타났다. 보일러와 펌프류를 모두 중복으로 설계한 System D의 가용도는 94.1%로 기본 구성(System A)보다 8.9% 상승하였다. 이 결과를 보면 System C와 System D가 통상적으로 공정 플랜트에서 요구하는 93% 이상의 가용도에 도달하는 것을 확인할 수 있었다. 보일러의 중복설계는 가용도에 약 1% 상승의 효과를 기대할 수 있고, 펌프류의 중복설계는 약 8%의 상승에 기여한 것으로 분석된다.

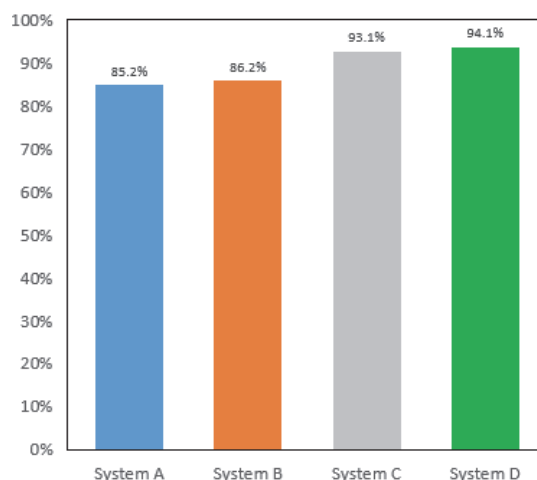


Fig. 5 Availability of MEDAD systems. System A, B, C and D represent the RBDs in Fig. 4.

MEDAD 공정을 구성하는 펌프의 종류에는 해수펌프, 순환펌프, 진공펌프, 냉수펌프, 냉각수펌프, 온수펌프가 있다. 이렇게 총 6대의 펌프가 중복으로 설계되기 때문에 시스템 가용도에 미치는 영향이 큰 것으로 판단된다.

이렇게 주요 장비를 중복으로 설계하는 경우, 장비 한 대가 고장 나더라도 예비(standby) 장비를 활용하면서 수리를 할 수 있어 운영 유지보수 측면에서도 장점을 가진다. 하지만 장비를 중복으로 설치하면 시스템이 구성하는 크기나 배치에 따라 설치가 불가능한 경우도 생길 수 있고, 중복 구성에 따른 비용 상승이 단점으로 대두될 수 있다. 이런 경우 고장률이 낮고 신뢰도가 높은 장비를 선택하는 것이 더 경제적일 수 있다. 이 부분은 단순히 가용도 뿐만 아니라 시스템 운영 효율 및 구축 시 소요되는 비용을 함께 고려하여 결정할 필요가 있다.

#### 4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 고효율-고농축 담수 생산을 위해 MED공정과 AD 공정을 연계한 MEDAD 공정을 대상으로 기능 분석, process block diagram 도출, 신뢰성 블록도 도출 및 가용도 분석을 진행하였다. 시스템에 요구되는 장비를 모두 직렬로 구성한 경우 MEDAD 공정의 가용도는 85.2%로 나타나, 펌프류를 모두 병렬로 설계하는 경우 통상적으로 플랜트에서 요구되는 가용도 93%를 만족시키는 것을 확인하였다. 펌프류와 보일러까지 중복으로 설계한 경우는 94% 이상의 가용도를 보였다. 이러한 가용도 분석 결과는 향후 시스템 설계를 개선하는데 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 가용도 분석 결과 뿐만 아니라 담수 효율 및 구축시 소요되는 비용을 함께 고려하여 최종 설계

안을 결정하기를 권고한다.

## 감사의 글

본 논문은 선박해양플랜트연구소의 주요사업인 “미활용열 이용 신형식 해수담수-냉방 복합플랜트 핵심기술 개발(3/3)” 사업(PES3970)에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

- [1] Khawaji, A.D., I.K. Kutubkhanah, J.-M. Wie, “Advances in seawater desalination technologies”, *Desalination*, Vol. 221, No.1, pp. 47-69, (2008).
- [2] Al-Mutaz, I.S., I. Wazeer, “Comparative performance evaluation of conventional multi-effect evaporation desalination processes”, *Applied Thermal Engineering*, Vol 73, No. 1, pp. 1194-1203, (2014).
- [3] Lim, Yu Jie, Goh, Kunli, Kurihara, Masaru, Wang, Rong, “Seawater desalination by reverse osmosis: Current development and future challenges in membrane fabrication - A review”, *Journal of Membrane Science*, Vol. 629, p. 119292, (2021).
- [4] Ahmed, F.E., A. Khalil, N. Hilal, Emerging desalination technologies: Current status, challenges and future trends. *Desalination*, Vol. 517, p. 115183, (2021).
- [5] Ihsanullah, Ihsanullah, Atieh, Muataz A., Sajid, Muhammad, Nazal, Mazen K, “Desalination and environment: A critical analysis of impacts, mitigation strategies, and greener desalination technologies”, *Science of The Total Environment*, Vol. 780, p. 146585, (2021).
- [6] Li, Yuanyuan, Chen, Xin, Xu, Yan, Zhuo, Yuming, Lu, Gui “Sustainable thermal-based desalination with low-cost energy resources and low-carbon footprints”, *Desalination*, Vol. 520, p. 115371, (2021).
- [7] Prajapati, M., M. Shah, B. Soni, “A review of geothermal integrated desalination: A sustainable solution to overcome potential freshwater shortages”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 326, p. 129412, (2021).
- [8] Wei, Huijie, Zhao, Shujing, Zhang, Xiaoyuan, Wen, Bianying, Su, Zhiqiang, “The future of freshwater access: functional material-based nano-membranes for desalination”, *Materials Today Energy*, Vol. 22, p. 100856, (2021).
- [9] Sungwoo Woo, Yeonghyeok Kim, “Reduction of Power Consumption by Variable Speed Operation of HighPressure Pump in Seawater Reverse Osmosis Desalination Plant”, *KSFJ Journal of Fluid Machinery*, Vol. 20, No. 5, pp. 33-39, (2017).
- [10] Mijin Kim, Mong-kyu Chung, Yong-shin So, Seok-lyong Song, “The effect evaluation of the osmotic backwash for the reverse osmosis membrane desalination process”, *Korean Society for Fluid Machinery*, pp. 1-2, (2013).
- [11] Seung-Hyun Kim, Jeyong Yoon, June-Seok Choi, Tae Shin Park, “First-scalers to Transform Brine from Seawater, Renewable Energy, and Valuable Resources”, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 65, No. 10, pp. 26-31, (2017).
- [12] Riaz, Nadia, Sultan, Muhammad, Miyazaki, Takahiko, Shahzad, Muhammad Wakil, Farooq, Muhammad, Sajjad, Uzair, Niaz, Yasir, “A review of recent advances in adsorption desalination technologies”, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 128, p. 105594, (2021).
- [13] Thu, Kyaw, Ng, Kim Choon, Saha, Bidyut B., Chakraborty, Anutosh, Koyama, Shigeru., “Operational strategy of adsorption desalination systems”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, No. 7, pp. 1811-1816, (2009).
- [14] Seong-Yong Woo, Ho Ji, Deok-Soo Moon, Hyeon-Ju Kim, Young-Deuk Kim, “Experimental Study on Adsorption Desalination (AD) Cycle for Simultaneous Production of Cooling Effect and Fresh Water”, *Transactions of the Korean*

- Society of Mechanical Engineers-B, Vol. 42, No. 5, pp. 341-348, (2018).
- [15] Shahzad, Muhammad Wakil, Ng, Kim Choon, Thu, Kyaw, Saha, Bidyut Baran, Chun, Won Gee, "Multi effect desalination and adsorption desalination (MEDAD): A hybrid desalination method", Applied Thermal Engineering, Vol. 72, No. 2, pp. 289-297, (2014).
- [16] Ghenai, C., et al., "Performance analysis and optimization of hybrid multi-effect distillation adsorption desalination system powered with solar thermal energy for high salinity sea water", Energy, Vol. 215, p. 119212, (2021).
- [17] Rausand, M., "System Reliability Theory", Johy Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, (2004).
- [18] DoD, "Systems engineering fundamentals: supplementary text", Systems Management College, (2001).
- [19] David Mahar, W.F., John Reade, "Nonelectronic Parts Reliability Data Publication (NPRD-2016)" 2016th edition ed., Quanterion Solutions Incorporated, (2015).
- [20] Jang-su Kim, "Research of Reliability Measures of Engine Oil Pan through Reliability Method", Journal of The Korean Society of Industry Convergence, Vol. 12, No. 4, pp. 209-214, (2009).

---

(접수: 2021.11.04. 수정: 2021.12.01. 게재확장: 2021.12.03.)