

고위도 지역 저온 환경에서의 오일샌드 플랜트 가용도 변화 예측

이홍철¹, 최영권², 황인주³, 이현동⁴

¹한국건설기술연구원 미래융합연구본부, ²한국건설기술연구원 국토보전연구본부

Prediction of the Availability of Oil-Sand Plants at Extreme Temperature Environments in High-Altitude Regions

Hongcheol Lee¹, Youngkwon Choi², Inju Hwang³ and Hyundong Lee⁴

^{1,2,3}Department of Future Technology and Convergence Research, Korea Institute Of Civil Engineering and Building Technology

⁴Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute Of Civil Engineering and Building Technology

¹Corresponding author: hclee@kict.re.kr

Received September 7, 2020; Revised December 17, 2020; Accepted December 21, 2020

ABSTRACT

북극권 및 주변 지역의 경우 극한지 저온 환경, 원격지 고립감 등 제약이 존재하고 있어 인력 운용, 물자 보급 등 어려움으로 시설 설계 단계에서부터 운용 자원을 최소화하기 위한 신뢰도 기반 시스템 구성이 요구되고 있다. SINTEF, NTNU는 석유 및 가스 생산 시설 운용 데이터를 기반으로 플랜트 가용도 평가를 위한 OREDA-handbook을 발간하였으나 대부분의 필드 데이터가 중위도 지역에서 수집된 데이터에 기반하고 있어 고위도 지역의 저온 환경에서 운용되는 플랜트의 가용도 평가에 적합하지 않다. 본 논문에서는 오일샌드 플랜트 가용도 평가를 위한 기초 데이터베이스로서 OREDA-handbook의 적용 한계를 고온, 저온 영역으로 확장하기 위한 방법론을 제시하고, 오일샌드 플랜트 기능 모듈 설계 사례를 이용하여 가용도 변화를 예측, 평가하였다.

In the Arctic and the surrounding regions of the Arctic, the limitations such as extreme cold environment and isolation lead to difficulties such as manpower management and supply. As a result, a reliability-based system is required to minimize operational resources from the facility design stage. SINTEF, NTNU published an OREDA-handbook to evaluate availability of plant based on data from oil and gas production facilities. However, most field data are based on data collected in the mid-latitude region, making it unsuitable for assessing the availability of plants operating in cold environments in high-altitude regions. In this study, the methodology for extending the application limit of OREDA-handbook as a basic database for evaluating the operation rate of oil sand plant was presented. In addition, the change in availability was predicted and evaluated using the design example of the oil sand plant function module.

Keywords: Oil-sand plant, Reliability, Availability, Mechanical failure, OREDA-handbook(offshore reliability data handbook), MTBF(mean time between failure), MTTR(mean time to repair)

1. 서론

에너지·자원의 고갈에 따라 플랜트 건설 입지가 점차 고위도 지역으로 이동하고 있으며, 북극권 및 주변 지역의 경우 극한지 저온 환경, 원격지 고립감 등 제약으로 인력 운용, 물자 보급 등에 어려움이 상존하고 있어 시설 설계 단계에서부터 운용 유지보수 자원을 최소화하기 위한 신뢰도 기반 시스템 구성이 요구되고 있다^[1].



Masoud Naseri 등은 북극권 등 극한지 플랜트 설계의 경우 운용 단계에서의 시스템 유지보수 투입 자원을 최소화하기 위하여 설계 가용도를 93~97% 수준으로 상향 반영할 필요가 있음을 제안하였다²⁾. SINTEF(Stiftelsen for industriell og teknisk forskning), NTNU(Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet) 등에서 발간한 OREDA handbook(Offshore and Onshore Reliability Data handbook)은 석유 및 가스 생산 시설 운용 데이터를 기반으로 가용도 예측, 평가를 위한 기초데이터를 제공하고 있다³⁻⁵⁾. 다만, Hongcheol Lee 등은 OREDA handbook 등 기초 데이터베이스의 모집단 변화에 따른 직접 인용 한계를 지적하였고, Arif I 등은 기온 변화에 따른 스마트 그리드 시설 가동 중단 이력 평가를 통하여 가용도 평가에 기후 영향 고려가 필요함을 제안하였다⁶⁻⁹⁾.

본 논문에서는 극한 환경 오일샌드 플랜트의 가용도 평가를 위하여 OREDA handbook 등 기초 데이터베이스 적용 한계를 고온, 저온 영역으로 확장하기 위한 방법론을 제시하고, 극한 환경에서 운용되는 오일샌드 플랜트 설계 사례를 활용하여 기존의 기온 무보정 방식과 개선된 기온 보정 방식에 따른 가용도 평가 차이를 평가하였다.

2. 본론

2.1 플랜트 가용도 평가 이론

가용률은 이상적인 조건에서 운용되는 장비가 항상 만족스럽게 운전될 수 있는 확률로서 실제 운전 시간과 고장이 없이 이상적인 연속 운전 시간과의 비로 정의 된다. 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, 이들의 비를 가용도로 정의한다.

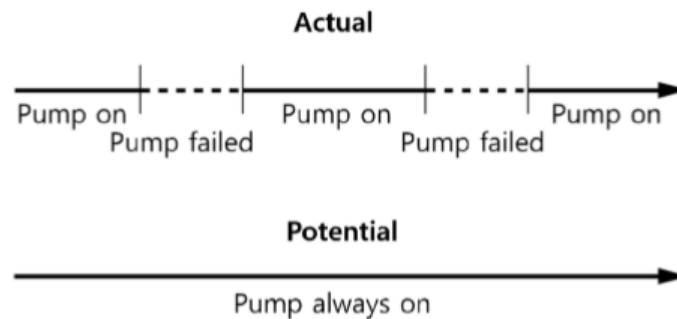


Fig. 1. The concept of availability assessment

이러한 정의를 이용하면 잠재적인 운전시간은 고장 또는 오작동이 일어나는 시간 간격인 MTBF(mean time between failure)와 정상 상태로 복구하는데 소요되는 시간 MTTR(mean time to repair)의 합으로 계산될 수 있다. 또한 실제 운전시간은 MTBF이므로 가용도는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다⁷⁾.

$$Availability = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (1)$$

2.2 오일샌드 플랜트 프로세스 모델링

본 논문의 대상인 오일샌드 플랜트 기본 설계는 국토교통부 국가R&D로 수행한 오일샌드 플랜트 연구단에서 발간한 “오일샌드 플랜트 기능모듈(K-SAGD Module) 설계집”의 기초 설계 자료(PFD, Process Flow Diagram)를 이용하였다.

오일샌드 플랜트 기능 모듈은 Fig. 2, Table 1과 같이 oil treating, de oiling, water treatment, steam generation, storage 등 프로세스의 free water knock out vessel, sample return pump 등 129 장치로 구성되어 있다. 본 논문에서는 가용도 평가 결과의 명료한 상호 비교를 위하여 Table 2와 같이 OERDA handbook의 중분류 단위인 Compressor, Pump, Vessel, Heater, Heat Exchanger, Value, Electric part 등 7개 군으로 그룹화하여 가용도 평가를 진행하였다.

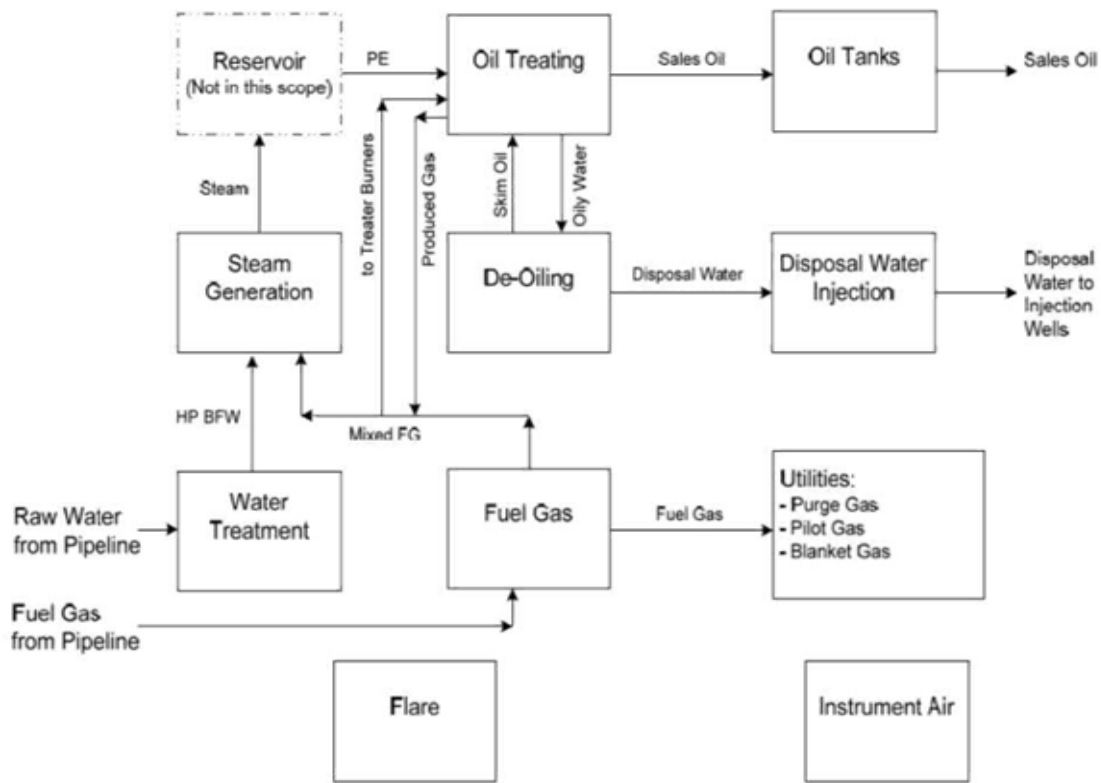


Fig. 2. BFD(block flow diagram) of the oil sand plant function module published by the oil sand plant research center

Table 1. Process, equipment configuration of oil-sand plant function module

Process		Equipment
Oil Treating	FWKO	Free Water Knock Out, Sample Return Pump
	Treaters	Oil Treaters, Treater/Interface Pumps, Treater Fire tubes, Treater Fire tubes, Sample Return Pump
	Process Liquid Cooling	Sales Oil/Bfw Heat Exchangers, Pw/Glycol Heat Exchangers, Pw/Bfw Heat Exchangers, Sales Oil/Bfw Heat Exchangers, Analyzer Pump
De Oiling	IGF	Pw Skim Tanks, Disposal Storage Tank, Lp Disposal Pumps, Hp Disposal Pumps, Disposal Water/BFW Heat Exchanger, Desand Water Pump, IGF Transfer Pump, IGF Feed Pump, IGF Educator, IGF Oil Froth Pump, IGF Package, IGF Vessel, Skim Oil Pump
	Desand	Desand Tank, Desand Over Flow Tank, Slop Recycle Pump, Decant Return Pump

Table 1. Process, equipment configuration of oil-sand plant function module (Continue)

Process		Equipment
Water Treatment	Deaerator	Safety Shower Service Water Pump, Raw Water Tank, Water Treatment Package, Raw Water Pumps, Greensand Filters, Vacuum Deaerator, Recirculation Pump, Deaerator Water Pumps, Liquid Ring Vacuum Pumps
	Softeners	Brine Storage Tank, Brine Transfer Pump, Brine Dilution Water Pumps, Brine Baker Tank, Primary Softeners, Polisher Softeners, Water Treatment Building Sump Pump, Water Treatment Building Sump
Steam Generation	Boiler Feed Water	Blowdown Filters, Bfw Blanket Gas Charcoal Filter, Steam Generation Building Sump Pump, Lp Bfw Pump, Bfw Tanks, Lp Bfw Pumps, Produced Gas/Bfw Heat Exchanger, Vru Liquids Cooler, Sales Oil/Bfw Heat Exchangers, Disposal Water/Bfw Heat Exchanger, Bfw/Low Temperature Blowdown Heat Exchanger, Pw/Bfw Heat Exchangers, Hp Bfw Pumps, Bfw/High Temperature, Blowdown Heat Exchanger
	Steam Generators	Once Through Steam Generators, Steam Generator Combustion Air Pre-heaters, Steam Generator Air Blowers, Steam Condensate Transfer Pump Steam Vent Tank, Steam Generation Building Sump, Hp Steam Separator, Sample Coolers, Steam Generator Packages
Storage/Tank Area	Sales And Slop Tanks	Analyzer Pump, Sales Oil Storage Tanks, Slop Injection Pump, Slop Oil Tank, Off Spec Oil Tank
Utilities	Glycol, Instrument Air	Utility Glycol Heater, Glycol Filter, Dry Air Receiver, Instrument Air After Filters, Instrument Air Dryers, Instrument Air Pre-Filters, Instrument Air Compressors, Glycol Pumps, Glycol Expansion Drum, Odourized Fuel Gas Heater, Instrument Air Package, Glycol Makeup Pump Glycol Makeup Tank, Glycol Aerial Cooler, Otsg Combustion Air Heaters, Pw/Glycol Heat Exchangers
	Fuel Gas	Casing Gas Scrubber, Odourized Fuel Gas Heater, Pg/Bfw Heat Exchanger, Produced Gas Separator
	Flare & Vru	Vru Package, Flare Knock Out Drum, Vru Liquids Cooler, Vru Separator, Multiphase Pump Flare Liquids Pump, Flare Stack

Table 2. Re-grouping of oil-sand plant components for availability assessment

Category	Equipment
Compressor	Instrument Air Compressors
Pump	Sample Return Pump, Treater/Interface Pumps, Analyzer Pump, Lp Disposal Pumps, Hp Disposal Pumps, Desand Water Pump, IGF Transfer Pump, IGF Feed Pump, IGF Oil Froth Pump, Skim Oil Pump, Slop Recycle Pump, Decant Return Pump, Safety Shower Service Water Pump, Raw Water Pumps, Recirculation Pump, Deaerator Water Pumps, Liquid Ring Vacuum Pumps, Brine Transfer Pump, Brine Dilution Water Pumps, Water Treatment Building Sump Pump, Steam Generation Building Sump (East), Steam Generation Building Sump Pump, Lp Bfw Pumps, Hp Bfw Pumps, Steam Generator Air Blowers, Steam Condensate Transfer Pump, Steam Generation Building Sump(West), Analyzer Pump, Slop Injection Pump, Dry Air Receiver, Glycol Pumps, Instrument Air Package, Glycol Makeup Pump, Glycol Aerial Cooler, Multiphase Pump, Flare Liquids Pump
Vessel	Free Water Knock Out, Oil Treaters, Pw Skim Tanks, Disposal Storage Tank, IGF Package, IGF Vessel, Desand Tank, Desand Over Flow Tank, Raw Water Tank, Water Treatment Package, Brine Storage Tank, Brine Baker Tank, Primary Softeners, Polisher Softeners, Bfw Tanks, Steam Vent Tank, Hp Steam Separator, Sample Coolers, Steam Generator Packages, Sales Oil Storage Tanks, Slop Oil Tank, Off Spec Oil Tank, Utility Glycol Heater, Glycol Expansion Drum, Glycol Makeup Tank, Pw/Glycol Heat Exchangers, Casing Gas Scrubber, Pg/Bfw Heat Exchanger, Produced Gas Separator, Vru Package, Flare Knock Out Drum, Vru Liquids Cooler, Vru Separator, Flare Stack

Table 2. Re-grouping of oil-sand plant components for availability assessment (Continue)

Category	Equipment
Heater	Treater Firetubes, Steam Generator Combustion Air Preheaters, Odourized Fuel Gas Heater, Otsq Combustion Air Heaters, Odourized Fuel Gas Heater
Heat Exchanger	Sales Oil/Bfw Heat Exchangers, Pw/Glycol Heat Exchangers, Pw/Bfw Heat Exchangers, Sales Oil/Bfw Heat Exchangers, Disposal Water/BFW Heat Exchanger, Produced Gas/Bfw Heat Exchanger, Vru Liquids Cooler, Sales Oil/Bfw Heat Exchangers, Sales Oil/Bfw Heat Exchangers, Disposal Water/Bfw Heat Exchanger, Bfw/Low Temperature Blowdown Heat Exchanger, Pw/Bfw Heat Exchangers, Bfw/High Temperature Blowdown Heat Exchanger, Once Through Steam Generators
Value	IGF Eductor, Other 13 Valves
Electric part	Other 116 Sensors and Controllers

2.3 플랜트 가용도 열적 가속 특성

북극권 및 주변 극한지 플랜트 기자재·장치류의 경우 극한 추위로 인한 고장·오작동이 발생하게 된다. 이러한 자연적 제약 조건의 극복을 위하여 모든 기자재·장치류의 경우 주변 환경에 노출되지 않도록 설치되는 것이 일반적이다. 부득이 외부 추위에 직접적으로 노출되는 경우 특수한 구조 설계가 이루어지거나, 열선 등을 이용한 동결 방지 방법을 채택한다.

이러한 혹한 환경 극복을 위한 특수한 구조 또는 열선 등 보조 수단을 이용한 경우에도 전기적 보조 수단의 오작동으로 추가적인 플랜트 가동 손실은 불가피하게 발생하게 된다. 혹한 환경에서의 가동 손실에 따른 피해를 예방하기 위하여 혹한 환경에서 수집된 데이터베이스 활용이 가능하지만, 모집단의 크기가 충분히 크지 않고, 대부분의 기업에서 내부 노하우로 취급되고 있어 그 확보가 쉽지 않다.

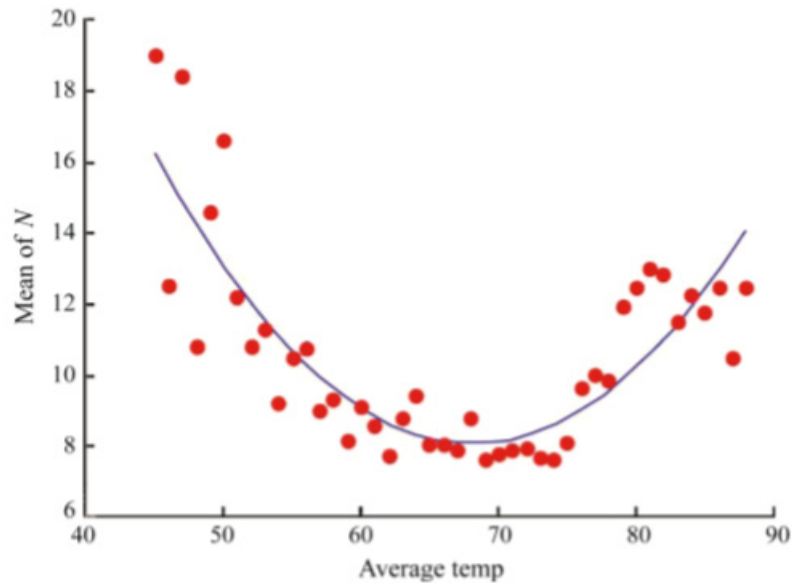


Fig. 3. Thermal acceleration factor for operating temperature

현실적인 대안으로 Fig. 3과 같이 영상 69°C를 중심으로 주변 온도 상승, 감소 조건에서도 고장·오작동 빈도가 포물선 형태로 변화하는 것을 증명한 Ephraim Suhir, Arif I 등의 선행 논문^{8,9)}을 바탕으로 온도 변화에 따르는 고장·오작동 가속 계수를 식

(2)에 정리하였으며, 영상 69°C의 고장·오작동 횟수 대비 고장·오작동 발생 빈도를 식 (3)의 회귀식으로 정리하였다. 여기에서 N 은 고장·오작동 발생 횟수, F 는 고장·오작동 발생 빈도, T 는 주변 온도, S 는 69°C 표준 온도 조건, OD 는 OREDA handbook의 표준 데이터베이스를 의미한다.

$$N_T = 78.79 - 2.076 T + 0.01523 T^2 \quad (2)$$

$$F_T = F_{OD} \times \frac{N_T}{N_S} \quad (3)$$

3. 결과 및 고찰

오일샌드 플랜트의 가용도 평가에 기존 설계를 이용하여 극한 환경에서의 기초데이터 기온 보정 여부에 따라 가용도 변화를 평가하였다. 상온에서의 고장률(failure rate), 복구시간(repair time)의 경우 OREDA handbook의 전체 모드를 기준으로 하였으며, Table 3과 같이 극한 온도에서의 고장률, 복구율 보정을 위하여 식 (2), 식 (3)의 고장·오작동 가속 계수를 이용하였다.

오일샌드 플랜트 설계에서 Compressor, pump 등 고장·오작동이 빈번한 장치의 경우 주장비 외에 200%의 예비시스템이 고려되었다. 주변 환경에 노출되지 않도록 특수 구조를 적용하고 있는 compressor, pump 등 장치의 경우 OREDA handbook의 고장률, 복구시간을 직접 적용하였으며, 열선 등 장치의 운용 환경 유지에 사용되는 electric part에 대하여 69°C, 0°C, -20°C 조건 가속 계수를 반영하였다.

Table 3. Failure rate, repair time of oil-sand plant function module

	Failure rate (n/10 ⁶)			Repair time (man hour)
	69°C	0°C	-20°C	
Compressor	524.46			24
Pump	769.62			37
Heater	1470.58			39
Heat exchanger	50.25			80
Vessel	91.58			47
Value	17.81			26
Electric part	6.00	58.68	94.14	4.5

Fig. 4는 오일샌드 플랜트 전기 장치의 운용 환경 영향력을 고려한 기계적 가동 신뢰도 평가 결과를 도시하고 있는 그림으로 pump 등 회전기기가 다수 포함된 IGF 프로세스, Flare & Vru 프로세스의 가용도가 97.8~98.1% 수준으로 타 프로세스에 비하여 낮게 평가되었다. 또한 대부분의 프로세스에서 주변 온도 변화 의한 가용도 감소가 나타나고 있다.

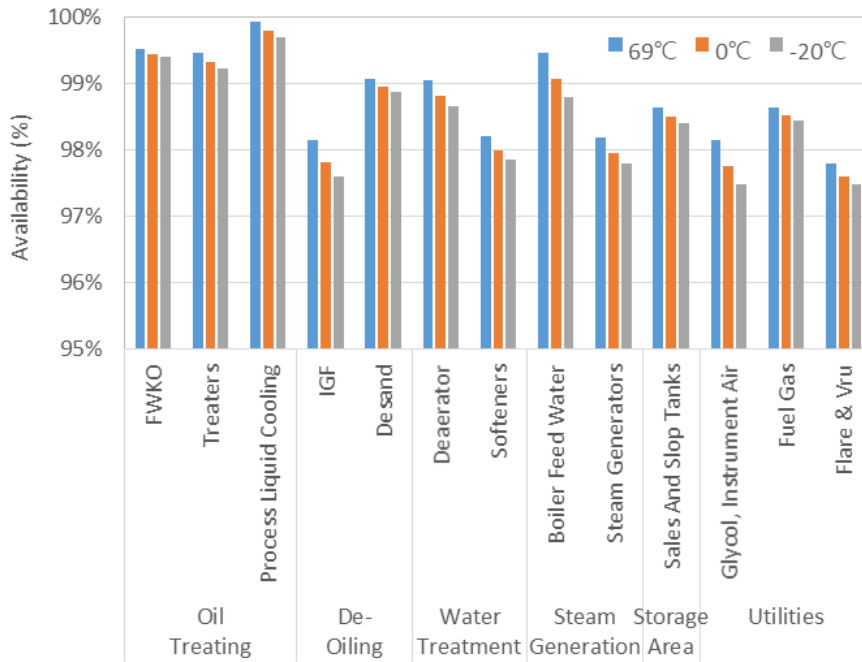


Fig. 4. Oil-sand plant process availability by temperature

Fig. 5는 온도 변화에 따르는 전체 오일샌드 플랜트의 가용도 변화를 도시하고 있는 그림으로 주변 온도 영상 69°C에서 영하 20°C로 변화하는 동안 85.36%에서 81.52%로 감소하고 있음을 나타내고 있다.

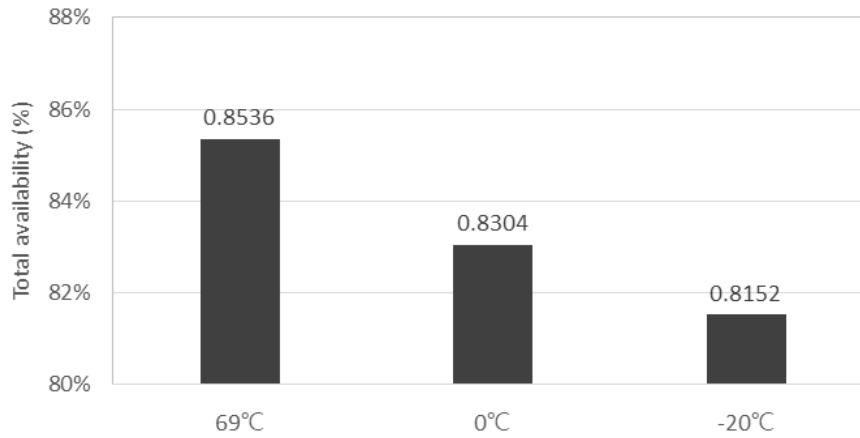


Fig. 5. Oil-sand plant total availability by temperature

Fig. 6은 주변 온도 변화에 따른 프로세스별 가용도 감소량을 도시하고 있는 그림으로 프로세스 구성 장치의 대수가 많아 온도 변화에 따른 열적 가속이 큰 IGF, Boiler feed water, glycol, instrument air 등이 큰 폭으로 감소하고 있음을 도시하고 있으며, 전체 플랜트 가용도 감소에 주된 요인으로 작용하고 있음을 도시하고 있다.

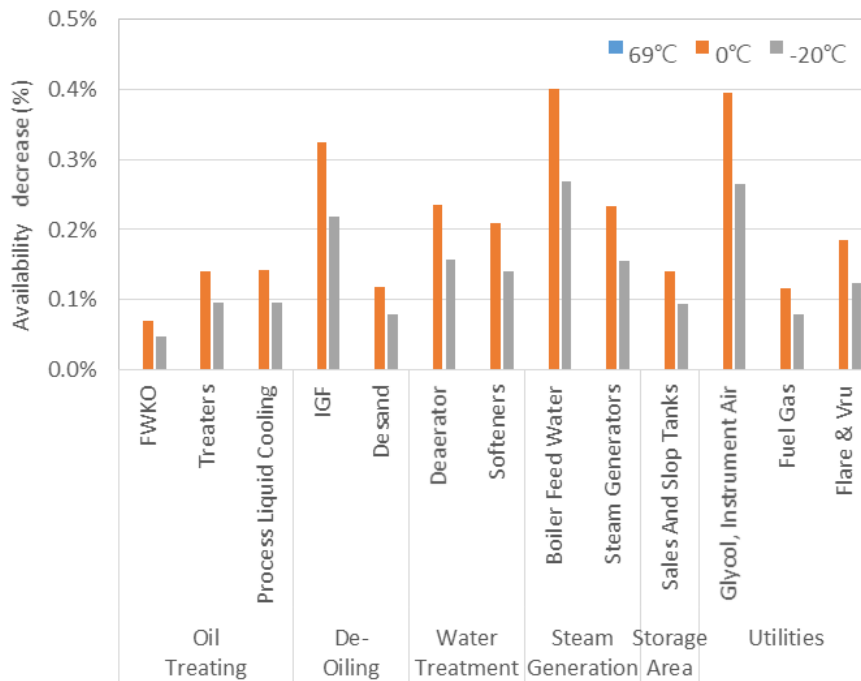


Fig. 6. Oil-sand plant availability decrease by temperature

4. 결론

북극권 및 북극권 주변 극한지에서의 플랜트 가용도 예측을 위하여 고장률 가속 방법을 제안하였으며, 오일샌드 플랜트 기능 모듈 설계 사례를 이용하여 고위도 지역 저온 환경을 대상으로 기초데이터 기온 보정 여부에 따라 가용도 변화를 평가하였다.

오일샌드 플랜트 기능모듈 운용 온도 변화에 따른 가용도는 85.36%에서 81.52%로 감소하고 있으며, 저온 영역에서 가용도 감소세가 뚜렷하게 나타나고 있다. 또한 오일샌드 플랜트 기능모듈의 가용도 열적 가속은 대부분의 프로세스에서 발생하고 있으며, IGF, Boiler feed water, glycol, instrument air 등 회전기기가 다수 포함된 프로세스에서 크게 나타나고 있음을 확인하였다.

이상의 결과에 따라 향후 고위도 지역 저온 환경의 플랜트 건설 사업에 참여하는 경우 전체 시설 가용도를 개선하기 위한 플랜트 설계, 내한 대책을 포함한 레이아웃 설계, 저온 내구성을 확보한 장치의 선택이 필요함을 제안한다.

Acknowledgement

※ 이 논문은 2020년 국토교통부 제원으로 플랜트연구개발사업(No.20IFIP-C146546-03)의 연구비 지원을 받아 수행된 연구 과제의 일부 성과입니다.

References

1. Inju Hwang, "Extreme oil and gas plant technology", Journal of the KSME, Vol. 57, No. 2, pp. 32~36, 2017.
2. Masoud Naseri, Piero Baraldi, Michele Compare, Enrico Zio, "Availability assessment of oil and gas processing plants operating under dynamic Arctic weather conditions", Reliability Engineering and System Safety, Vol. 152, pp. 66-82, 2016.

3. OREDA Participants, “OREDA(Offshore and Onshore Reliability Data) handbook 2015”, Det Norske Veritas(DNV), SINTEF (Stiftelsen for industriell og teknisk forskning), NTNU(Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet), 2015.
4. Kang, K. W., Yoon, M. O., Lee, H. C., Hwang, I. J., “A study on the availability with failure rate of process for LNG plant,” KJACR, Vol. 24, No. 4, pp. 358-363, 2012.
5. Borgonovo, E., Marseguerra, M., Zio, E., “A Monte Carlo methodological approach to plant availability modeling with maintenance, aging and obsolescence,” Reliability Engineering and System Safety 67, pp.61-73, 2000.
6. Hongcheol Lee, Inju Hwang, “Review of reliability database utilization for plant stability evaluation based on machinery reliability data of OREDA-Handbook”, Spring Conference of KSME, Vol. 1, p. 80, 2018.
7. Hongcheol Lee, Jeongjun Lee, Inju Hwang, “The Population Size based Reliability Database Evaluation and Utilization Guidelines Suggestion for Plant Availability Assessment”, Summer Conference of SAREK, Vol. 1, p. 80, 2019.
8. Ephraim Suhir, Yungcheng Lee, AT&T Bell Laboratories, “Thermal, Mechanical, and Environmental Durability Design Methodologies”, Electronic Materials Handbook, pp. 45-50.
9. Arif I. Sarwat, Mohammadhadi Amini, Alexander Domijan Jr., Aleksandar Damjanovic, Faisal Kaleemi, “Weather-based interruption prediction in the smart grid utilizing chronological data”, J. Mod. Power Syst. Clean Energy Vol. 4, No. 2, 308-315, 2016.