

수력발전소 설비 신뢰성 분석을 위한 FMEA

FMEA for Facility Reliability Analysis of A Hydro-power Plant

권 창 섭* 전 태 보**
Kwon, Chang-Seob Jeon, Tae-Bo

Abstract

The significance of hydro-power plant is increasing in its public roles such as flood control and water supply as well as electric power production. Even if high level of reliability in facility operation is required, no specific reliability research has been made. This specifically stems from the lack of technology and research investments. The eventual goal of this study is to secure a methodology for reliability analysis of hydro-power plant so that an appropriate decision for operation and investment can be made. Specific effort was put to develop a reliability model for water supply system within hydro-power plant. For this study, we briefly examined the overview of the hydro-power plant including the electric power generation facility system. We then discussed the facility reliability analysis methodology for hydro-power plant. Based on rigorous examination of the water supply system and components roles, we drew major failure modes for each component and examined their effects.

키워드: 수력발전소, 물 공급 계통, 신뢰성, 고장 모드 및 영향 분석, 고장나무 분석
Keywords: hydro-power plant, water supply system, reliability, FMEA(failure modes and effects analysis), FTA(faults tree analysis)

1. 서론

인류가 전기를 인정한 이후 수많은 이론과 문명의 발달을 통해 1892년 세계 최초로 웨스팅하우스사가 미국 오레건주에 폭포를 이용한 수력발전소를 건설하였다. 국내의 경우 1905년 평안북도 운산군의 동양금광회사가 500kW의 자가용 수력발전소를 건설, 채광용 동력으로 이용한 것을 효시로 하여 일제 강점기중 대규모 수력발전소가 건설되었다. 광복 직후 전국의 발전설비 용량이 총 172만 천kW 이었고 그 중 수력이 158만6천kW 이었던 것을 볼 때 당시에는 수력발전설비가 주종을 이루었다는 것을 알 수 있다. 그 이후 산업 발달에 따른

전력수요가 급증함에 따라 세계적인 추세에 따라 건설이 용이한 화력발전소를 통하여 수요를 충족시켜 왔다. 그러나 1970년대 초반의 세계적 유류 파동이 세계 각국의 전원개발정책의 변화에 도화선이 되었으며, 날로 가속화되어진 화력 및 원자력 개발의 결과가 화석연료의 과소비로 환경오염을 초래하였고, 기후의 이변으로 인한 농작물의 감소는 앞으로의 식량기근의 우려마저 야기시키고 있는 실정이다[1].

1990년대에 들어서면서 global forum(세계정상선언)과 UN산하 IDNDR(International Decade for Natural Disaster Reduction: 자연재해감소를 위한 국제 10개년 사업) 사업은 무공해 에너지원의 창출을 갈망하게 되었고, 종전까지의 수력발전이외에 대용량의 양수 발전이나 조력발전 등의 개발이 가속화되기에 이르렀다. 뿐만 아니라 오늘날에는 발전목적 이외의 용수원개발 또는 홍수조절 목적 등

* 한국수력원자력 주식회사, 수력실 과장
** 강원대학교 산업공학과 교수, 공학박사

의 다목적 댐 개발 사업이 활발히 전개되어 가고 있으며, 국제대담회(ICOLD: International Commission on Large Dams)등과 같이 세계 각국의 연대강화 필요성이 크게 대두되고 있다. 오늘날 수력발전소는 전력생산의 본래 목적 외에 홍수조절 및 물이라는 국민생활의 필수요소를 공급하는 중차대한 공익적 기능을 수행하고 있다. 따라서 수력발전소를 높은 수준의 신뢰도로 운영하는 것이 매우 중요한 임무를 알 수 있다. 그러나 국내 수력발전소의 경우 기술개발이나 투자 등이 미흡하였고 특히 신뢰성 분야에 대한 연구는 미흡한 현실이다. 따라서 수력발전 설비에 대한 신뢰성 분석 모형 개발에 대한 연구는 매우 시의적절하며 반드시 필요하다고 할 수 있다.

본 연구의 목적은 현재 국내 운영중인 수력발전소의 경우, 현실적으로 수차발전기에 대한 설비 신뢰도 지수가 없고 사고예방 및 안전운전을 위한 설비 신뢰도 기준치가 없어 운전·정비에 대한 구체적인 목표나 합리적인 의사결정 기준이 없으므로 설비운영자가 직정한 신뢰도를 유지하면서 설비운영을 하고자 할 때 보유설비에 대한 신뢰성 분석을 할 수 있도록 수력발전소 설비 신뢰성 분석 모형을 개발하는 데에 있다. 이를 위하여 수력발전소에 대한 개요와 주요계통별 설비특성 및 운영조건을 살펴보고 기존의 신뢰도 이론을 바탕으로 수력발전설비 신뢰성 분석 절차를 제시하고, 그

절차에 따라 물 공급 계통에 대한 신뢰성 분석을 실시하여 고장 모드 및 영향 분석(FMEA: failure modes and effects analysis) 모형을 수립하고자 한다. 이러한 연구는 향후 위험도 분석이나 안전성 평가 등에 활용될 수 있으며 무엇보다도 수력발전 설비 운영자들의 의사결정에 있어서 중요한 판단 기준을 제시할 수 있다.

2. 수력발전소 개요

그림 1은 일반적인 댐식 수력발전소 단면도를 도시한다. 그림 좌측 상단 저수지측 취수구 gate를 열면, 저수지 물이 수압철관을 타고 발전소 수차측으로 유입된다. 수차측으로 유입된 물은 유체역학적으로 고안된 spiral casing을 통하여 속도와 압력이 최대한 높아진 상태에서 수차의 런너를 거쳐 방수구를 통해 하류로 흘러가도록 되어 있다. 수차 런너는 물의 힘으로 회전하게 되며, 런너와 같은 축에 물러있는 상부의 발전기가 회전하게 되어 전기가 발생하게 된다. 이때 발생된 전기는 변압기를 통해 승압되어 전력계통에 연계되어 각 수요처로 공급되게 된다. 즉, 댐을 이용하여 낙차(위치에너지)를 얻고 낙차를 최대한 크게 얻을 수 있도록 수차를 설치하여 수압철관을 통해 물을 떨어뜨림으로써 물의 위치 에너지를 속도와 압력에너지로 바꾸어 런너를 회전하도록 하는 것이다.

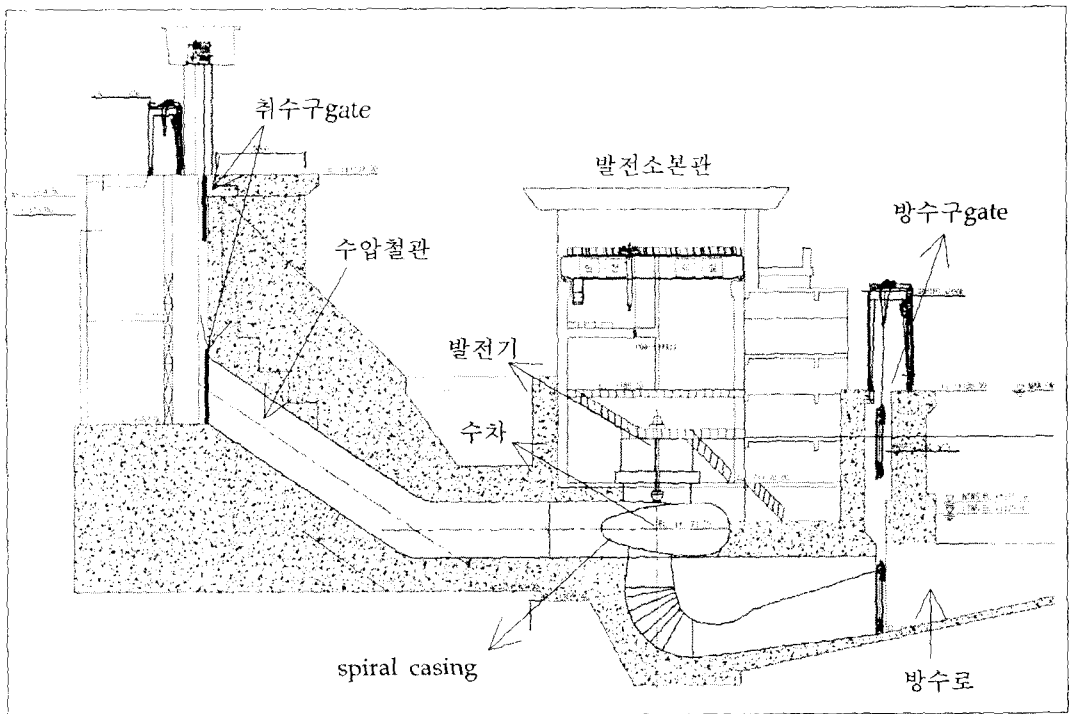


그림 1 수력발전소 단면도

수력발전소 설비 신뢰성 분석을 위한 FMEA

표 1은 일반적인 수력발전소 주요 설비계통을 구분한 것이다[2]. 도표에서 보듯이 전력생산을 위해서는 수차발전기를 적절히 조정하여야 하므로 전기발생설비를 고려하며, 이는 본체인 수차발전기 계통과 이를 제어하기 위한 조속제어계통, 압축공기를 이용하여 유압을 형성하는 오일·압축공기 공급 계통 및 발열부위 냉각과 수밀기능을 위한 물 공급 계통으로 대별한다. 이 중 그림 2는 본 연구 대상인 물 공급 계통도를 도시한다. 물 공급 계통은 수차 발전기가 회전시 발생하는 열을 방지하기 위한 냉각수(cooling water)와 샤프트(shaft) 수밀을 위한 seal water 및 발전소내 용수(service

water)를 공급하는 설비이다. 일반적으로 수차 casing에서 취수하여 strainer를 거쳐 펌프로 head tank까지 퍼 올린 후 자연낙차(water head)를 이용하여 필요개소에 공급하며 seal water 경우 여고기(filter)를 이용 청수로 여과한 후 일정수압으로 필요개소에 공급한다. 냉각수는 윤활유나 냉각수, 발전기온도, 베어링 온도 저감을 위해 각종 냉각기(oil, water, air)에 공급되며 seal water와 구분되어 사용되어 진다. 그 밖에 발전소 구내에 필요한 용수도 공급하나 전기발생설비 계통에서는 용수설비는 편의상 제외하기로 한다[3,4].

표 1 수력발전소 주요 설비계통

시설별	계통구분	설비명	용도
에너지원 발생설비 energy generation facilities	댐수문 설비계통	dam 설비 spill way gate & hoist 설비	댐수문설비 개폐 제어
	취수 및 방수설비	trash rake & machine 설비 intake gate & hoist 설비 tail race gate & hoist 설비	취수구 이물질유입방지 취수구수문 개폐 제어 방수구수문 개폐 제어
	공통설비	수위 및 댐 변동 측정장치 부대설비	수위수문 측정 기타
전기발생설비 (electric generation facilities)	수차발전기계통	water turbine (runner) generator & exciter 자동전압조정기(AVR)	회전력 발생 전력생산 전압조정
	조속제어계통	speed governor guide vane equipment runner blade equipment	수차속도 및 출력 제어 수량제어 수차효율 향상
	오일 및 압축공기 공급장치	pressure oil system lubricating oil system air compressor	압유공급 (유압생성) 윤활유 공급 압축공기 발생 (유압생성)
	물공급장치	filter & strainer seal water 설비	여과 및 이물질제거 seal water 공급장치
전력설비 electric power facilities	소내 전력설비계통 직류계통	소내 저압전력계통 지압변압기 분전반 직류발생장치	발전소 구내용 저압공급 지압전력 발생 전력장치 제어 비상전원공급
	변전설비계통	소내 고압전력계통 154kV 변압기 기타설비	고압전력 공급 계통전력으로 승압 기타
공용설비 common facilities	배전반계통	main & aux. control system	발전소 제어
	공용설비	비상발전기계통 crane 및 lifter lights 및 fire fighting 계통 배기 계통 drainage water system	디젤발전설비 중량물 인양, 이동 소내 조명 및 소화설비 소내 환기 및 급기 소내 배수설비

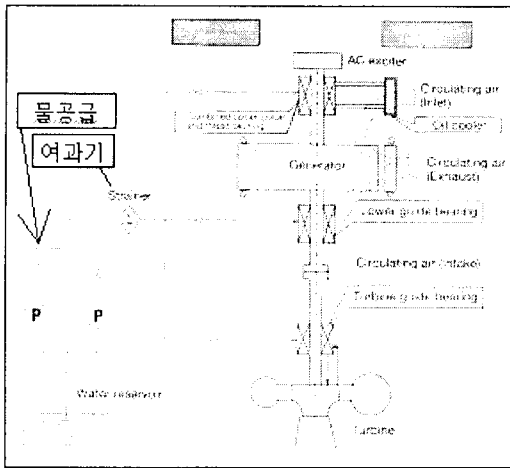


그림 2 물 공급 계통

3. 수력 발전 설비 신뢰성 분석 절차

다수의 기기(component)로 구성되는 복잡한 계통의 신뢰성 분석은 어려우며, 특별히 수력발전소 설비는 매우 복잡하여 그림 3과 같이 순차적으로 수행함이 적절하다[5,6].

우선, 수력발전소 설비 신뢰성 분석을 위해서는 설계, 운전, 정비는 물론 발생 가능한 사건의 유형과 발생시 관련 계통 대응방법, 모든 사고진개 과정 등을 정확히 파악해야 한다. 수력발전소 설비계통 이해에 필요한 문서들은 운전조작실명서 및 각종 도면, 발전소 기술지침서 및 관련 문서, 정상, 비상, 시험 및 보수절차서, 계획예방점검정비 보고서 등이 포함된다[7].

체계적 분해란 설비 신뢰성 분석을 위해 수력발전소 설비계통에 대한 이해를 통하여 대상설비를 선정하고 설비를 그룹화하여 계통을 정의하는 것을 말한다. 일반적인 수력발전소 계통분류를 고려하여 해당 수력발전소 설비를 계통 분류하여야 하며, 이때 관련기구나 설비간 기능, 영향 등을 충분히 고려하여 계통을 그룹화하여야 한다. 다음으로, 사건분석 및 평가에 있어 사건이란 계획하지 않은 계통 이상이나 고장을 의미한다. 사건을 평가하는 방법으로는 과거 운전경험이나 유사 발전소에서 발생하였던 사건 및 사고 등을 분석하는 경험자료 평가와 주 논리도(master logic diagram)라 불리는 논리적 평가나 고장 모드 및 영향 분석(FMEA) 등의 공학적인 평가 방법이 있으나 주로 FMEA를 많이 사용한다[8,9].

고장나무 분석(FTA: fault tree analysis)은 분석대상 계통이 이용 불능 상태가 되는 모든 경우를 논리적인 도형으로 표현하는 방법이다. 계통 기능 실패상태를 확인하고, 계통 환경 및 운전 등을 고려하여 계통 기능상실을 초래하는 모든 사건 및 그 발생논리를 도식적으로 분석한다. 세부적인 내용에 대하여는 문헌[9]를 참고하기 바란다. 일단 계통 기능상실을 정점사건(top event)으로 정의하고 그러한 정점사건이 발생할 수 있는 경로를 연역적으로 추적하는 분석방법이다. 본 방법을 수행하기 위해서는 발전소의 계통이 어떻게 작용하는가를 완전히 이해해야 하고 고장모드 영향분석을 통하여 그것을 구성하는 기기 고장모드와 계통에 미치는 영향을 파악하는 것이 무엇보다 중요하다. 그리고 분석자는 계통 및 기기에 경험이 있는 기술자, 운전자와 다른 전문가 등의 자문을 얻어 고장나무를 구성해야 하고 사고 원인이 되는 결함들과 고장들을 결정하기 위해 필요한 정보들을 확인해야 한다.

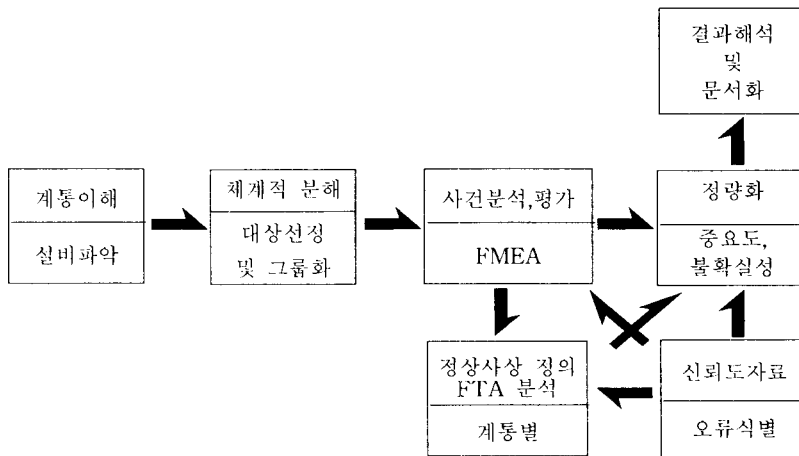


그림 3 발전소 설비 신뢰성 분석 절차

신뢰도 자료 분석은 모든 기본사건의 신뢰도 값을 계산하는 과정이다. 고장나무에 정의된 모든 기본사건의 고장률이나 발생확률이 신뢰도 자료 분석을 통해 결정된다. 신뢰도 자료란 기본적으로 운전경험 자료를 바탕으로 산출하는 것이 원칙이다. 수력발전설비의 신뢰도분석을 위해서는 국내수력의 운전이력을 조사해서 대상기에 대한 특정발전소 신뢰도 자료(plant specific data)로 사용해야 한다. 그러나 수력발전설비에 대한 충분한 자료를 구하기는 현실적으로 불가능하다. 따라서 동일하거나 유사한 분야에서 사용되는 일반 자료원(generic data source)을 근거로 신뢰도 자료를 산출하여 사용한다. 신뢰도 자료를 구하는 방법은 초기사건 빈도분석, 기기고장율 분석, 공통원인 고장자료 분석 및 인간신뢰도 분석 등이 있다 [10,11,12].

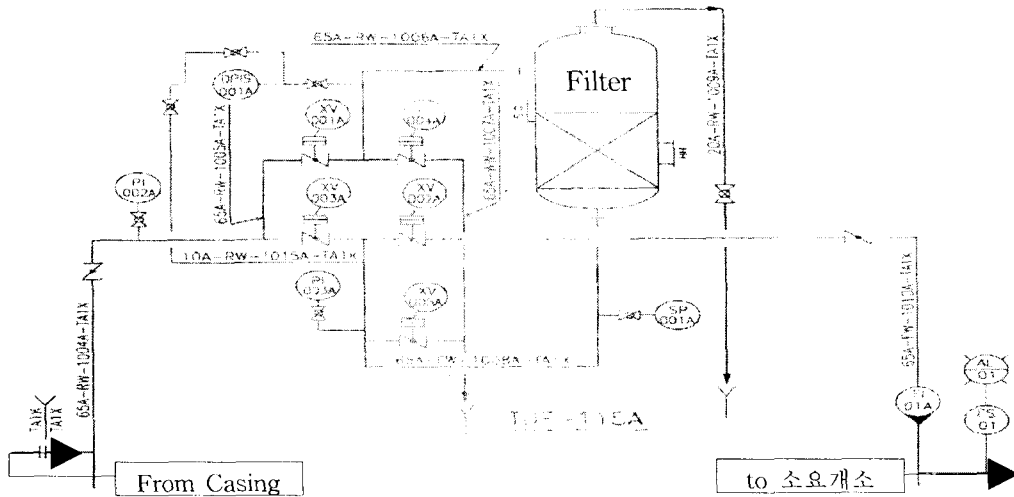
설비 신뢰성 분석 마지막 단계는 정량화이다. 도출되어 잘 정리된 사건들의 논리적인 관계를 불리안식으로 변환하여 최소단절집합을 계산하고 정점사건 발생확률을 계산하여야 한다. 이때 중요도 분석이나 민감도 분석 등을 수행하기도 한다.

4. 물 공급 계통 설비신뢰성

4.1 물 공급 계통

수력발전소에서 물의 공급은 대단히 중요하다. 수차발전설비의 핵심인 전기발생계통 중 발열부위의 냉각 및 회전부의 수밀용으로 많은 양의 물이 필요하기 때문이다. 따라서 발전소 건설시 사용수량의 적정규모를 고려하여 배관이 설치된다. 또한 수력발전소는 하천이나 저수지의 물을 그대로 사용하므로 여과장치가 필요하다. 특히, 수차의 냉각 및 수밀장치에 공급되는 물은 반드시 여과장치를 거친 청수(clean water)가 공급되어야 한다.

그림 4는 여과기(filter, TDF115A)를 중심으로 한 물 공급 계통도이다. 최초 casing에서 조성된 압력수를 급속여과기(rapid filter)를 통하여 청수로 가공한 후 각 소요처로 보내지는 관계를 도시한다 [3,4,13]. 이 그림에서 선은 물이 통과하는 경로로 파이프를 나타내며 경로 중간 중간에 5개의 밸브(XV001A~005A)가 있어 이들의 개폐로 물의 흐름을 통제한다. 알파벳 Z로 표시된 기호들은 단순



- 시스템구분 : TDF-115A
- 압력계이지 : PI002A, PI003A (수압측정, 압력표시)
- 차압감지기 : DPIS001A (압력차를 측정하여 지정차압 초과시 릴레이 동작)
- 자동 밸브 : XV001~5A (신호를 받아 자동으로 개폐동작)

그림 4 급속 여과기(Rapid Filter) 중심의 물 공급 계통도

히 물의 역류를 방지하는 표시이고, 나비 모양의 밸브들은 특별히 분체가 있을 경우 수동으로 개폐를 하는 부분으로 연구 고려에서 제외한다.

초기에는 모든 밸브가 닫혀 있으며(closed) 물은 통과되지 못한다. Casing을 통하여 취수된 원수(raw water)는 밸브 XV-003A가 닫혀있어 통과하지 못하고 밸브 XV-001A까지 차있다. 신호에 의해 XV-001A와 XV-002A가 열리면(open) 원수가 여과기(filter) 부분으로 유입되기 시작한다. 수압에 의해 원수가 여과재(filter 내부의 아래 부분)를 통과하면서 여과된 후 여과수는 밸브 XV-002A와 그림 우측 아래 부분의 FI-01A를 통하여 소요처에 공급된다.

정상적인 물 공급 중 여과기는 수차발전기 운전 중 필요한 여과수를 중단 없이 공급하여야 하며 만일 공급하지 못할 경우 각종 보호계전기(protect relay)가 동작되어 비상경보를 울리거나 발전기가 정지될 수 있다. 따라서 여과기는 높은 신뢰도가 요구되므로 동일한 2개의 시스템(TDF115A와 TDF115B)으로 구성되어 있으며 TDF115A가 공급(service) 중일 때에는 자동적으로 TDF115B가 대기상태(stand-by)로 되어지고, 반대로 TDF115B가 공급 중일 때에는 TDF115A가 대기상태로 되어진다. 기다 여과기의 공정은 역세(backwashing), 침정(settling), 수세(rinse)를 거쳐 대기(stand-by) 공정 등으로 구분된다.

4.1.1 역세(backwashing)

여과 중 성능 저하 문제 발생시 수압 감소가 SP001A(여과기 아래 부분)와 DPIS001S (그림의 좌상 부분)에 의해 감지, 동작하게 되며 자동으로 역세(backwashing) 동작이 시작된다. 역세는 필터 하부(bed)층에 포집되어 있는 탁도 성분을 밖으로 배출하여 초기와 같은 상태로 해주는 공정이다. 즉, 물의 유입방향울 공급(service)때와는 반대로 여과기 하부로 원수를 유입시켜 여과재 층을 부상시켜 여과재와 여과재를 마찰시켜 층층이 포집되어 있는 여과재보다 비중이 낮은 탁도 성분을 상부를 통해 밖으로 배출하게 된다. 그림 5의 붉은 선은 물의 흐름을 나타내며 TDF115A는 역세공정을 TDF115B는 공급공정을 수행하는 모습을 도시한다. 우선, XV-001A, 002A가 닫히고, XV-003A, 004A가 열리므로 원수가 XV-003A를 통과, 필터의 하부로 유입되어 XV-004A를 통하여 배수(drain)된다. 역세는 timer에 의해 설정된 20분간 수행된다.

4.1.2 침정(settling)

침정은 역세 과정에서 부상시켜 서로 혼합되어 있는 여과재를 부피 및 비중차에 의하여 초기구성 순서대로 가라앉아 제 위치에 안착할 수 있도록

모든 조작용을 멈추고 정제시키는 공정으로 5분간 진행된다. 이때, 부피가 작고 무거운 여과재는 맨 밑 여과재 층으로 가장 먼저 가라앉고 부피가 크고 가벼운 순서대로 자연적으로 bed층이 형성되게 된다. 그림 6의 TDF115A는 침정공정을 TDF115B는 공급공정을 수행하고 있다.

4.1.3 수세(rinse)

역세 및 침정 과정이 끝나면 초기 원수에 함유되어 있는 탁도 성분이 역세기 하부로 유입되어서 포집되어 있게 된다. 이 탁도를 수세공정에서는 여과기 필터 상부로 원수를 유입시켜 XV-005A를 통한 하부 rinse line으로 drain 시켜줌으로써 그 탁도를 제거하여 주는 공정으로 10분간 수행된다. 그림 7의 TDF115A는 수세공정을 TDF115B는 공급공정을 수행하고 있다.

4.1.4 대기(stand-by)

역세공정을 마치면 TDF115A는 대기상태로 가며, TDF115B는 공급공정을 계속 수행하게 된다.

만일 여과중인 TDF115B가 역세 신호를 받으면 즉시 역세공정으로 진행된다. 이와 동시에 대기상태에 있던 여과기 TDF115A가 다시 공급공정으로 변환 된다. 이러한 과정이 계속 반복되며 물 공급이 수행된다.

4.2 고장 모드 및 영향 분석

FMEA는 설계된 시스템이나 기기의 잠재적인 고장모드를 찾아내고, 가동중 이와 같은 고장 발생시의 임무수행에 미치는 영향을 조사하여 평가하고, 영향이 큰 고장모드에 대하여는 적절한 대책을 세워 고장의 미연방지를 꾀하는 방법이다. 본 연구의 경우 계통내의 각 부품의 기능과 고장모드(인간실수, 보수점검효과, 공통원인고장 포함)를 파악하고 이들이 계통의 성능과 운전에 미치는 영향을 분석하는 것으로 이해된다.

FMEA는 1950년대초 구라방 항공기 회사에서 항공기용 세트엔진 설계시스템의 신뢰성, 안전성의 해석방법으로 채택된 이래, 1960년대 중반 미국에서 국방성의 무기체제 분석 및 아폴로 계획의 원활한 수행을 위해 잠재불량(고장) 요인에 의한 영향도 해석기법으로 활용되었다. 과거에는 FMEA가 많은 활용을 보이고 있지 못하였지만, 최근에는 ISO 9000, QS 9000, 6 시그마운동 등에서의 활용 추천 및 품질보증의 일환으로 FMEA를 실시하거나 요구하는 기업이 매우 많다.

FMEA를 수행함으로써 각 부품의 고장 mode를 규명하고 이들이 계통운전에 어느 정도 이바지하는지를 판단할 수 있으며 따라서 중요한 부품과 고장모드를 결정함은 물론 계통의 취약점을 쉽게

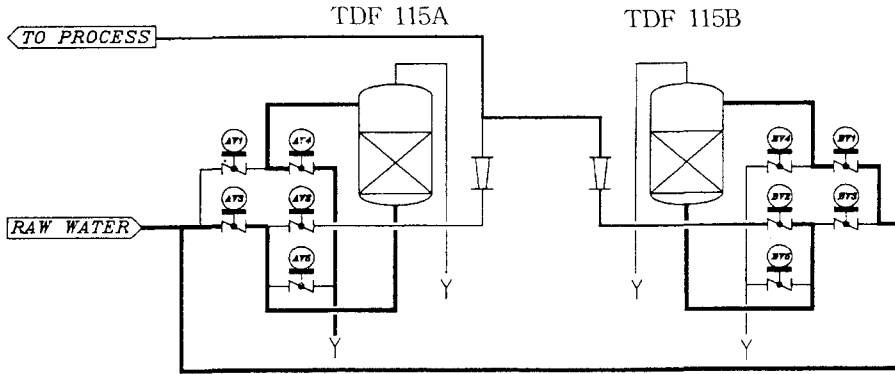


그림 5 역세공정(backwashing)

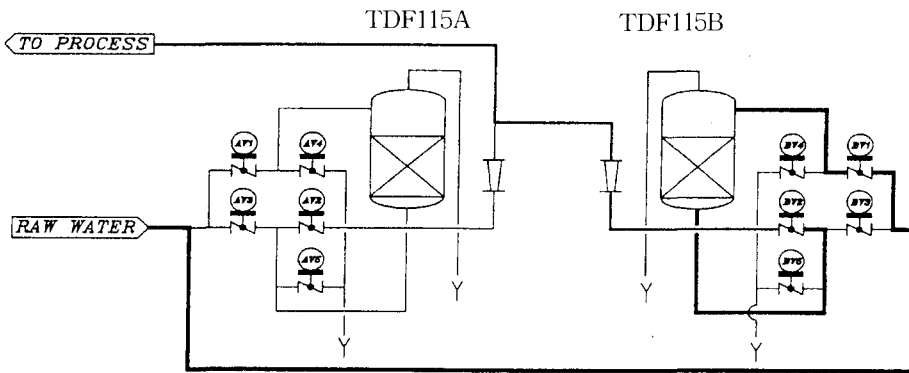


그림 6 침정공정(settling)

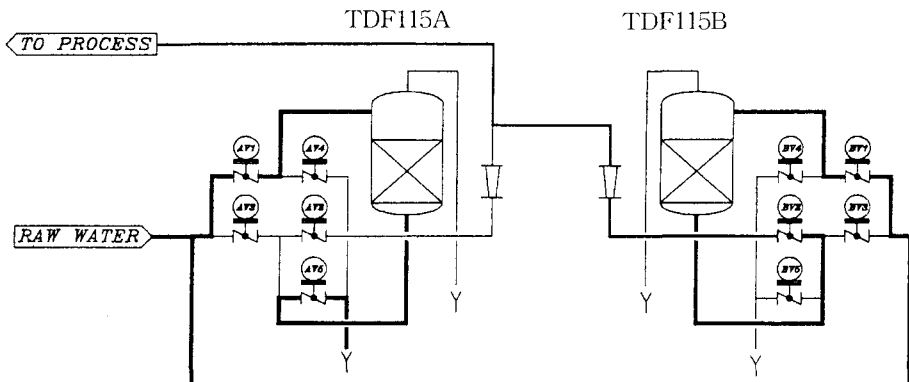


그림 7 수세공정(rinse)

알아낼 수도 있다[14,15]. FMEA는 통상 신뢰도 시험 이전에 수행되며 설계가 진행됨에 따라서 반복적으로 수정 보완되어야 한다. FMEA는 설계 변경과 더불어 라이프사이클 동안 지속적으로 갱신되어야 하며, 이에 대한 이력관리가 되도록 하여야 한다.

FMEA를 수행하기 위해 다음과 같은 작업을 하였다.

- 물 공급 계통과 관련된 계통의 설계기준과 계통 검토
- 모든 부품의 기능과 가능한 고장모드 검토
- 부품의 고장이 계통운전에 미치는 영향을 검토
- 부품의 고장이 어떻게 발견되고 어떤 다른 기능이나 부품에 의해 보상되는 지를 검토

- 공통원인고장과 인간실수 및 정비·점검에 의한 효과 검토
- 중요한 부품과 고장모드를 검토하여 도표 작성

이상과 같은 작업에 의해 수행된 수력발전소 물 공급 계통 FMEA를 물 공급, 역세, 그리고세정 공정에 대하여 표 2,3,4에 도시하였다. 표의 첫 째 열은 주요 구성품들인 밸브, 차압릴레이, 압력계이지 등을 나열한 것이다. 둘째 열은 이들 구성품 각각에 대한 주요 기능을 나타내며, 셋 째 열에 고장 모드들이 나열되었다. 예를들어 밸브 XV001A 경우 4가지 고장 모드들이 있으며 신뢰에 대하여 반응을 하지못하고 열리지 않거나, 부식이나 기타 등의 이유로 기계적으로 문제가 생긴(plugged) 경우, 상호계통상의 문제가 발생하는 경우, 그리고 시스템

표 2 물 공급 중의 계통에 대한 FMEA

component	function	failure mode	effect on system operation	method of detection	inherent compensation
air valve (XV001A)	RW supply	1. fail to open 2. XV001A plugged 3. control circuit 4. operator error	fail to FW supply	low pr. alarm(PI002A) low flow alarm(FI01A)	backwashing or maintenance
air valve (XV002A)	FW supply	1. fail to open 2. XV001A plugged 3. control circuit 4. operator error	fail to FW supply	low flow alarm(FI01A)	same
air valve (XV003A)		1. fail to close 2. control circuit 3. operator error	RW supply to process	low pr. alarm(SP001A)	same
air valve (XV004A)		1. fail to close 2. control circuit 3. operator error	fail to FW supply	low pr. alarm(SP001A) low flow alarm(FI01A)	same
air valve (XV005A)		1. fail to close 2. control circuit	fail to FW supply	differential pr (DPIS001A) low flow alarm(FI01A)	same
diff-pr. relay (DPIS001A)	Pressure difference detector	1. operating error 2. control circuit	fail to change of backwashing		maintenance
pr. relay (SP001A)	setting pr. detector	1. operating error 2. control circuit	fail to detector of RW or FW drain		maintenance
flow relay (FI001A)	water flow detector	1. operating error 2. control circuit	fail to detector of not water flow		maintenance
pr. gauge (PI002A)	RW pr. detector	1. operating error	fail to detect or RW	compare with PI003A	maintenance
pr. gauge (PI003A)	FW pr. detector	1. operating error	fail to detector of FW	compare with PI002A	maintenance

표 3 역세(backwashing) 계통에 대한 FMEA

component	function	failure mode	effect on system operation	method of detection	inherent compensation
air valve (XV001A)		1. fail to close 2. control circuit 3. operator error	fail to backwashing	low pr. alarm(SP001A)	maintenance
air valve (XV002A)		1. fail to close 2. control circuit 3. operator error	RW supply to process	low pr. alarm(SP001A)	maintenance
air valve (XV003A)		1. fail to open 2. XV003A plugged 3. operating error 4. control circuit	fail to backwashing	low pr. alarm(SP001A)	maintenance
air valve (XV004A)		1. fail to open 2. XV003A plugged 3. operating error 4. control circuit	fail to backwashing	differential pr (DPIS001A)	maintenance
air valve (XV005A)		1. fail to close 2. operating error 3. control circuit	fail to backwashing	low pr. alarm(SP001A)	maintenance
diff- pr. relay (DPIS001A)	Pressure difference detector	1. operating error 2. control circuit	fail to detect diff- pr.		maintenance
pr. relay (SP001A)	setting pr. detector	1. operating error 2. control circuit	fail to detector of RW or FW drain		maintenance
pr. gauge (PI002A)	RW pr. detector	1. operating error	fail to detector of RW	compare with PI003A	maintenance
pr. gauge (PI003A)	FW pr. detector	1. operating error	fail to detector of FW	compare with PI002A	maintenance

표 4 세정(rinse) 계통에 대한 FMEA

component	function	failure mode	effect on system operation	method of detection	inherent compensation
air valve (XV001A)	RW supply	1. fail to open 2. XV001A plugged 3. control circuit 4. operator error	fail to rinse	low pr. alarm(SP001A)	maintenance
air valve (XV002A)		1. fail to close 2. control circuit 3. operator error	RW supply to process		maintenance
air valve (XV003A)		1. fail to close 2. control circuit 3. operator error	fail to rinse		maintenance
air valve (XV004A)		1. fail to close 2. control circuit 3. operator error	fail to rinse	low pr. alarm(SP001A)	maintenance
air valve (XV005A)		1. fail to open 2. control circuit	fail to rinse	low pr. alarm(SP001A)	maintenance
pr. relay (SP001A)	setting pr. detector	1. operating error 2. control circuit	fail to detector of rinse error		maintenance
pr. gauge (PI002A)	RW pr. detector	1. operating error	rise to operator error	compare with PI003A	maintenance
pr. gauge (PI003A)	FW pr. detector	1. operating error	rise to operator error	compare with PI002A	maintenance

은 정상이나 게이지 등의 고장으로 인한 고장 신호로 작업자가 잘못 대응하는 경우 등을 의미한다. 다음으로, 이들 고장모드로 인하여 초래되는 시스템에의 영향, 감지 방법, 그리고 고장조치 사항(inherent compensation)등이 나열되었다.

5. 결 론

본 논문에서는 수력발전소 설비 개요와 설비 신뢰성 분석 절차와 방법을 제시하였으며, 이러한 절차와 방법을 활용하여 수력발전소 주요 설비의 하나인 물 공급 계통에 대한 설비 신뢰성 분석을 실시하였다. 특별히, 각 구성 부품을 중심으로 발생 가능한 고장 모드와 각각이 시스템에 미치는 영향을 분석하였다.

본 연구를 통하여 얻은 결과를 바탕으로 세부적인 고장나무 모형을 수립할 수 있다. 즉, 본 연구의 FMEA 결과로부터 시스템의 고장을 유발하는 기본 사상(event)들을 도출할 수 있으며 이들의 상하 체계도를 통하여 고장나무 및 시스템 신뢰도 모형을 수립할 수 있다. 궁극적으로 설비 운영이나 보전상의 의사 결정시 판단기준으로 활용될 수 있다. 또한 본 논문은 설비운영자나 현장 근무자들에게 설비신뢰성에 대한 이해와 관심을 제고시켜 현장에서 발생되고 있는 다수의 신뢰도 자료를 낭비하지 않고 체계적으로 database화 할 경우에는 향후 수력발전소에 대한 정확한 위험도 분석이나 안전성 평가를 가능하게 할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] 『수력운영반 교육교재』, 한국수력원자력 교육훈련센터, 2002.
- [2] 『수력발전설비 정비분야 표준품셈』, 한국수력원자력, 2005.
- [3] 『청평수력발전소 기본운전지침서』, 한국수력원자력, 2004.
- [4] 『춘천수력발전소 기본운전지침서』, 한국수력원자력, 2004.
- [5] 박창규외, 『화물론적 안전성 평가』, 브레인 코리아, 2003.
- [6] 이윤환외, 『화재사건 분석절차서』, KAERI/TR-2345, 2002.
- [7] 김길유외, 『risk monitor를 이용한 on-line maintenance』, 한국원자력학회, 1996.
- [8] 황미정의, 『기기 신뢰도 자료 실태조사 및 기본 데이터베이스 구축』, KAERI/TR-997, 한국원자력연구소, 1998.
- [9] 김원경 : 신뢰도 공학의 이론과 실제, 교우사, 2005.
- [10] 안광일의, 『level 2 PSA 불확실성 분석방법론 및 수행절차』, KAERI/ TR-2151, 2002
- [11] 한상훈외, 『국내 화학공장 설비 및 기기신뢰도 데이터베이스 구축(II)』, 한국산업안전공단, 2000.
- [12] 황미정의, 『공통원인고장 분석 지침』, KAERI/TR-2444, 한국원자력연구소, 2002.
- [13] 권창섭, 수력발전소 설비 신뢰성 분석 모형, 석사논문, 강원대학교 산업공학과, 2006.
- [14] 『월성1호기 주요안전계통의 신뢰도 분석』, 한국전력공사 기술연구원, 1989.
- [15] 『원자력발전소 보조급수계통 신뢰도 분석』, 한국전력공사 기술연구원, 1985.