

수력발전소 물 공급 설비에 대한 FTA 모형

FTA Modeling of Water Supply System for Hydro-power Plant

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

Abstract

High level of reliability in facility operation is specifically required these days. The 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. Fault tree analysis of water supply system within hydro-power plant has been performed in this study. We briefly examined the electric power generation facility and water supply system. We then developed fault tree for the water supply system based on failure modes and effects analysis. We conclude this study and provided future research areas.

키워드: 수력발전소, 물 공급 계통, 신뢰성, 고장 모드 및 영향 분석, 고장나무분석

Keywords: hydro-power plant, water supply system, reliability, FMEA(failure modes and effects analysis), FTA(fault tree analysis)

1. 서론

최근 유가불안정, 기후변화협약 규제 대응 등 화석연료 고갈문제와 환경문제에 대한 대안으로 신·재생에너지가 부각되고 있으며, 그 중 수력발전은 국내 부존자원을 활용하고 용수공급 및 홍수 조절에 기여하며 특히 전력계통의 첨두부하 전력 공급원으로서 전기품질 향상 및 계통안정에 기여하는 등 우수한 에너지원으로 각광받고 있다. 2006년 6월 국내 수력은 전체 전력설비 용량 중 비록 약 6.3% 정도를 점유하고 있으나 도시가 비대해지고 사회기반 시설이 확충될수록 그 중요성은 더욱 커질 전망이다. 동시에 전력생산 외에 홍수조절 및 물이라는 국민생활의 필수요소를 공급하는 중차대한 공익적 기능을 수행하고 있어 그 중요성과 관심도가 높아지고 있다. 따라서 수력발

전소의 운영자는 높은 수준의 신뢰도를 확보하여 설비운영을 하여야만 한다. 그러나 국내 수력발전소의 경우 기술개발이나 연구투자 등이 미흡하여 신뢰성 분야에 대한 연구는 전무한 형편이다.

수력 발전 설비에 대한 신뢰성 모형 수립을 위한 연구가 특별히, 물 공급 계통설비를 대상으로 고장 모드 및 영향 분석(FMEA: failure modes and effects analysis) 측면에서 수행되었다[1]. 본 연구에서는 이의 확장으로 물 공급 계통에 대한 고장나무(fault tree)를 수립함을 목적으로 한다. 본 연구 수행을 위하여 제 2절에서는, 수차발전기의 구조 및 물 공급 계통 전반에 대한 내용을 고찰한다. 이 과정에서 물 공급 계통 중심의 FMEA를 통한 구성 요소들을 대상으로 주요 고장모드 및 각각의 영향들을 검토한다. 제 3절에서는 이를 바탕으로 상세한 고찰을 수행하며 고장나무(fault tree)를 수립한다. 동시에 체계적이고 정량적인 모형 수립을 위한 고찰을 수행하며, 제 4장에서는 종합적인 결론과 향후 제언을 행한다.

* 강원대학교 산업공학과 교수, 공학박사

** 한국수력원자력 주식회사, 수력설 과장

2. 수차발전기 및 물 공급 계통 개요

그림 1은 수력발전소의 전기발생설비 부분 중 수차발전기의 단면도를 도시한다. 저수지 물이 수압철관의 water in 부분으로 유입된 물은 유체역학적으로 고안된 spiral casing을 통하여 속도와 압력이 최대한 높아진 상태에서 수차의 러너를 거쳐 water out 부분으로 나간다.

물 공급 계통은 수차발전기 설비내 발열 부위의 냉각, 회전부인 샤프트(shaft) 수밀을 위한 수밀(seal water), 그리고 발전소내 용수(service water)를 공급하는 설비로 많은 양의 물이 요구되며 사용 수량의 규모를 고려하여 배관이 설치된다. 또한 수력발전소는 하천이나 저수지의 물을 그대로 사용하므로 여과 장치가 필요하다. 특히, 수차의 냉각 및 수밀장치에 공급되는 물은 반드시 여과를 거친 청수(clean water)가 공급되어야 한다.

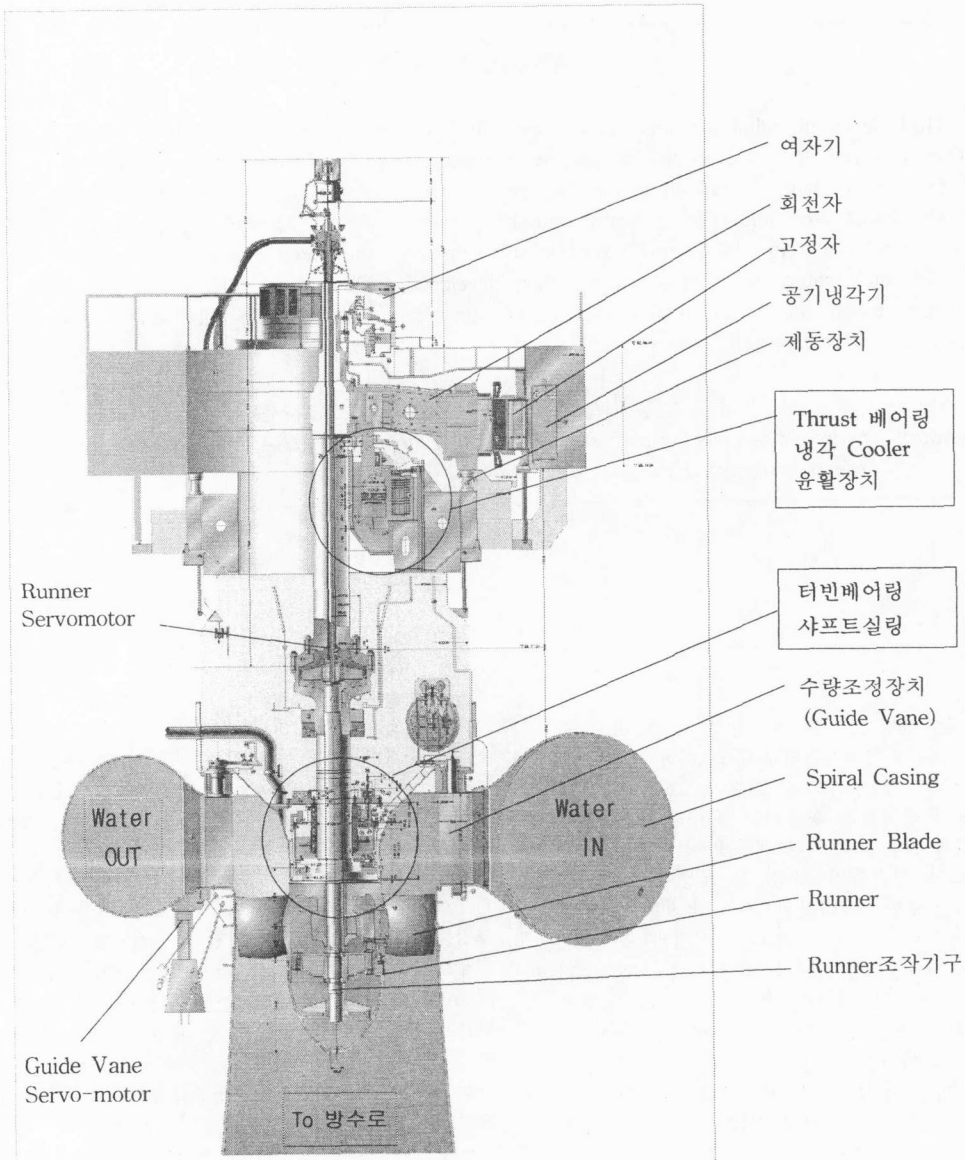


그림 1 수차발전기 단면도

정상적인 물 공급 중 여과기는 수차발전기 운전 중 필요한 여과수를 중단 없이 공급해야 하며 그렇지 못할 경우 발전기가 정지될 수 있다. 따라서 여과기는 높은 신뢰도가 요구되어 그림 2와 같이 2개의 시스템 (TDF115A와 TDF115B)이 병렬로 구성되어 있다. 이 그림은 여과기 중심의 물 공급 계통도로 최초 casing(그림의 좌측)에서 조성된 압력수를 원기둥 모양의 급속여과기(rapid filter)를 통하여 청수로 가공한 후 각 소요처(그림의 우측)로 보내지는 관계를 도시한다. TDF115A의 정상적인 물 여과 중 성능 저하 문제가 발생시 자동적으로 역세(backwashing), 침징(settling), 수세(rinse) 및 대기(stand-by) 공정 등을 거친다. TDF115A가 역세 동작을 시작함과 동시에 대기상태(stand-by)로 있던 TDF115B가 물 공급을 시작한다. 이들에 대한 세부적인 내용은 관련 문헌을 참고하기 바람에 여기서는 각각에 대하여 간단히 고찰한다[1,2,3].

역세(backwashing)는 여과기내 필터 하부(bed)층에 포집되어 있는 탁도 성분을 밖으로 배출하여 초기와 같은 상태로 해주는 공정이다. 즉, 원수를 공급(service)때와는 반대로 여과기 하부로 유입시켜 여과재 층을 부상시켜 여과재와 여과재를 마찰

시켜 층층이 포집되어 있는 여과재보다 비중이 낮은 탁도 성분을 상부를 통해 밖으로 배출하며 총 20분간 수행된다. 침징(settling)은 역세 과정에서 부상시켜 서로 혼합되어 있는 여과재를 부피 및 비중 차에 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. 역세 및 침징 과정이 끝나면 초기 원수에 함유되어 있는 탁도 성분이 역세시 하부로 유입되어서 포집되어 있게 된다. 이 탁도를 수세(rinse) 공정에서는 여과기 필터 상부로 원수를 유입시켜 하부라인으로 배출 시켜줌으로써 그 탁도를 제거하며 10분간 수행된다.

이러한 일련의 공정을 마치면 TDF115A는 대기상태로 가며, TDF115B는 정상적인 물 공급 공정을 계속 수행하게 된다. 만일 여과중인 TDF115B가 차압감지 신호를 받으면 즉시 역세공정으로 진행되며, 동시에 대기상태에 있던 여과기 TDF115A가 다시 공급 공정으로 변환된다. 이러한 과정이 계속 반복되며 물 공급이 수행된다.

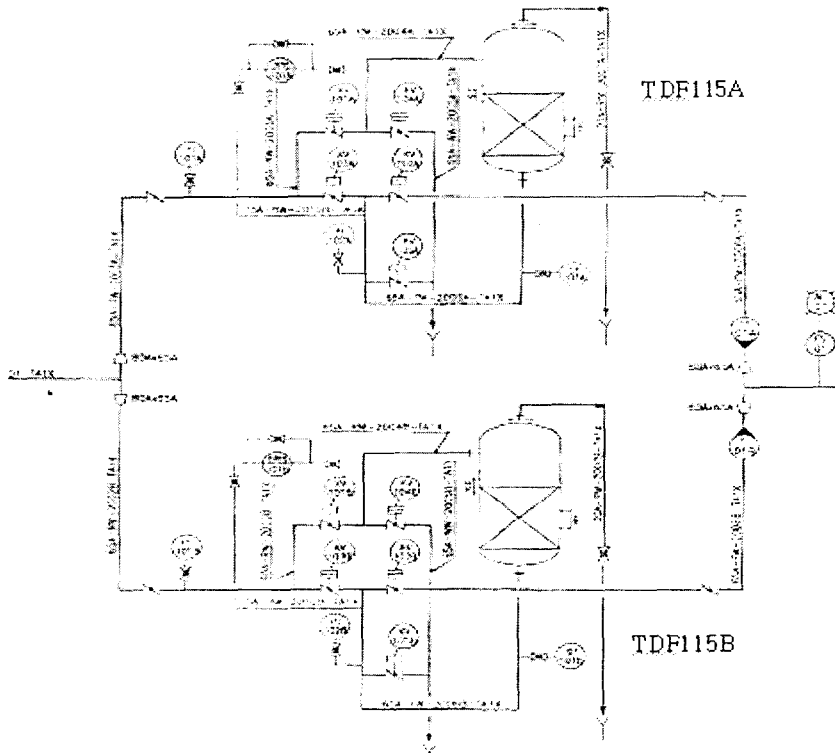


그림 2 물 공급 계통도

FMEA는 각 구성 부품의 기능과 인간실수, 보수점검효과, 공통원인고장 등을 포함한 고장모드들을 파악하고 이들이 계통에 미치는 영향을 분석하는 것으로, 물 공급 계통에 대한 FMEA를 수행하였으며 정상적인 물 공급과 역세 공정에 대한 결과는 표 1, 2와 같다[1].

3. 고장나무 (fault tree) 수립

고장나무 분석(FTA: fault tree analysis)은 시스템의 고장을 유발시키는 사상(event)과 그 원인과 의 인과관계(causal relationship)를 논리기호(AND와 OR 등)를 이용하여 고장나무(fault tree)를 만들고, 이에 의거하여 시스템의 고장확률을 구

하여 문제가 되는 부분을 개선하는 계량적 고장해석 방법 및 신뢰성 평가 방법이다[4]. 즉, 사고 혹은 보다 일반적으로 체계 고장의 잠재 원인을 결정하고, 고장 확률을 추정할 수 있는 방법으로, 고장의 근본 원인을 추적하기 위하여 고장 자료가 나와 있는 수준에 이르기까지 체계를 하위체계(subsystem)로, 구성품(component)으로, 부품으로 해부할 필요가 있는 상황에 특히 적절하다. FTA는 60년대 초 Bell 연구소에서 Minuteman 미사일 발사조절시스템의 안전도 평가를 위한 기법으로 고안되었으며, 1965년 Boeing 항공사에서 컴퓨터를 이용하기 위한 개념으로 보완함으로써 실용화되기 시작되었다. 특히, 원자로, 화학 및 항공 산업 등 복잡하고 대형화된 시스템의 신뢰성 분석 및 안전성 분석에 널리 이용되고 있다.

표 1 물 공급 중의 TDF15A 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 2 역세 중의 TDF115A 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

FTA에 의한 고장해석 및 신뢰성 평가 절차는 다음과 같이 요약된다.

① 고장나무를 작성한다.

- a) 평가 대상 시스템의 선정 및 기능을 명확화 한다. (기능 블록다이어그램 작성)
- b) 고장 사실 및 현상에 대한 정의와 명확화
- c) 시스템의 최상위 고장 (정상사상: top event)을 규정한다.
- d) 최상위 고장을 유발하는 1차 고장원인을 찾아내고, 정상사상과 1차 요인들의 인과 관계를 논리기호(AND/OR)를 사용하여 tree 모양으로 결합한다.
- e) 1차요인과 관련된 2차요인, 2차요인과 관련된 3차요인 등 순차적으로 논리기호로 연결한다.

더 이상의 분해가 불가능한 최하위의 고장원인 (기본사상: basic event)이 될 때까지 반복하여 고장나무를 완성한다.

- ② 기본사상에 중복이 있는 경우에는 boolean대수 공식에 의거 고장나무를 간소화한다. 중복이 없어 간소화 대상이 없는 경우, 다음 단계로 넘어간다.
- ③ 최하위의 고장원인(기본사상)에 대한 고장확률을 추정한다.
- ④ 시스템 고장확률을 계산하고 문제점을 찾는다.
- ⑤ 문제점의 개선 및 신뢰성 향상책을 강구한다

FMEA가 기업용지에 의한 차트 해석법으로서 부품의 고장으로부터 전체시스템의 고장을 예측하는 bottom-up 방식이데 반하여 FTA는 고장나무에 의한 도식해석법으로 제품의 고장으로부터 고장원인의 부품을 추정하는 top-down 방법이다. 본 연구에서는 표 1,2의 FMEA 결과를 중심으로 상술한 FTA 제 단계 중 물 공급 계통에 있어 정상적인 물 공급과 역세 공정에 대한 고장나무를 수립한다.

먼저, 물 공급 계통에 대한 최상위 고장인 정상 사상(top event)의 정의가 필요하다. 물 공급 계통에 있어 궁극적인 목적은 정상적인 여과수의 공급에 있으므로 “여과수 공급실패 (fail to supply filtered water)”로 정의하였다. 여과수 공급이 실패되면 수차발전기의 기동, 운전, 정지 중에 문제를 일으킬 수 있으며 특히 운전 중일 경우 발전정지를 초래하고 중대한 설비사고가 발생할 수 있기 때문이다. 다음으로, 정점사상을 유발하는 세가지 핵심요인으로 “fail to filtering”과 “raw water to process” 및 “fail to backwashing”으로 도출하였다. 이들 중 “raw water to process”는 여과되지 않은 물이 소요처에 공급됨을 의미하며 나머지는 여과 자체의 불능을 의미한다. 이들 보조사상을 연역적 방법에 의하여 정상사상에 AND와 OR 이론(logic)에 의하여 연결하였다. 즉, 처음에는 여과된 냉각수가 공급되지 않거나 여과되지 않은 원수가 공급되는 사상으로 연결되며 각 경우의 원인이 되는 하부사상으로 연결되고 이러한 과정을 계속하여 더 이상 사상을 전개시킬 필요가 없다고 판단될 때까지 즉 최후의 요인들이 부품고장, 인간실수 및 보수·점검효과 등으로 나타난 때까지 고장나무를 구성해 나간다. 기본사상으로는 부품의 기계적 고장이 들어가며 인간실수와 보수·점검에 의한 고장 역시 기본사상에 포함되어 고장나무에 연결된다.

그 외 공통원인 고장이 검토되어 고장나무에 연결되었다. 고장나무를 구성하면서 고장나무 전개에 한계를 명확히 하고 의미있는 수준까지만 전개시키기 위하여 다음과 같은 가정을 하였다.

- 모든 부품의 상태는 fail/success 두 가지로만 구분한다.
- 여과기 본체 고장 및 casing에서 취수되는 원수(raw water) 공급중단은 고려하지 않는다.
- 배관고장 및 누출이나 파열로 인한 고장은 고려하지 않는다.
- 부주의로 개방된 밸브를 통한 역류는 고려하지 않는다.
- 물 공급 계통의 수동운전은 제외하고 자동운전 경우만 고려한다.

이상의 가정 하에서 구성된 물 공급 계통 기능 상실에 관한 정상사상에 이르는 고장나무를 수립해 갔으며 인과관계 분석 및 기본사상의 정의를 바탕으로 최종적인 고장나무는 모든 가능한 물 공급 계통 기능상실을 포함할 수 있도록 작성되었다. 그림 3,4가 이에 대한 세부적인 결과를 도시한다.

이 그림들에서 보듯이 고장나무 수립 과정에 기본사상(basic event)이 수반되며 이들의 정의가

필요하다. 기본사상에는 기계적 고장, 인간실수 및 보수·점검에 의한 고장이 포함되며 그 외 공통원인에 의한 고장도 포함된다. 이중 인간실수 및 보수·점검에 의한 고장은 각종 통계자료, 기본운전지침서, 운전조작절차서 등을 참고하여 운전원의 실수로 부품이 제 기능을 잃게 되거나 시험·보수로 인해 부품이 기능을 잃게 되는 경우를 검토하여 결정하였다⁵⁾. 또한 각 부품의 기능과 그 고장이 계통운전에 미치는 영향을 검토하고 현재 일반적으로 취급하는 범위와 자료의 유용성을 고려하여 고장모드를 결정하였다. 표 3은 수력발전소 물 공급 계통의 고장나무에 사용된 기본사상과 각각에 대한 설명을 도시한다.

물 공급 계통에 대한 신뢰도는 이상의 과정으로 수립된 고장나무에 대한 각 기본사상의 확률과 사건들 간의 인과관계 분석을 정량적 모형으로 변환함으로써 계산 가능하다. 즉, 고장나무를 boolean 대수공식에 의거 간소화하고, 최하위의 기본사상에 대한 고장확률을 추정한 뒤, 전체 시스템의 고장확률을 계산한다.

불행히도 물 공급 계통의 경우 일반적인 시스템과 다른 특수성으로 문제가 매우 복잡하다. 일반적인 신뢰성 대상 시스템들은 특정 고장된 형태를 대상으로 하거나, 계진기와 같이 동일한 둘 이상의 하부 시스템들이 교대로 운영되는 형태를 갖는다. 그러나 물 공급 계통의 경우 두 대의 여과기가 교대로 운영되나 전체적인 측면에서 매 시간 동일하지 않다는 점으로 그림 5가 이를 도시한다. 그림에서 보듯이 한 여과기가 정상 작동시 다른 여과기는 역세, 침정, 수세를 거쳐 대기상태가 되며, 두 대가 교대로 동일한 과정을 반복하는 사이클을 형성한다. 그러나 한 여과기의 정상 물 공급 기간 외에 또다른 여과기의 역세, 침정, 수세 과정에서도 시스템 고장 발생이 가능하므로 한 사이클 구간 내에 고장 특성이 동일하지 않은 구간들이 존재하여 이들을 구분하여 고려하여야 한다. 동시에 두 여과기의 교대 작업으로 인한 사이클은 여러 대의 하부시스템으로 구성되는 대기체계(stand-by system)로 구성되는 시스템 특성을 가지며, 모형수립이 매우 복잡하다. 따라서, 본 연구에서 수립한 고장나무를 기본으로 구간별 관련되는 공정들을 대상으로 고장률을 구한 뒤 전체적인 신뢰성 모형을 수립하므로써 가능하다.

4. 결 론

본 논문에서는 수력발전소 주요 설비의 하나인 물 공급 계통에 대한 설비 신뢰성 분석을 실시하였다. 복잡한 물 공급 계통도를 기능 중심으로 단순화하였

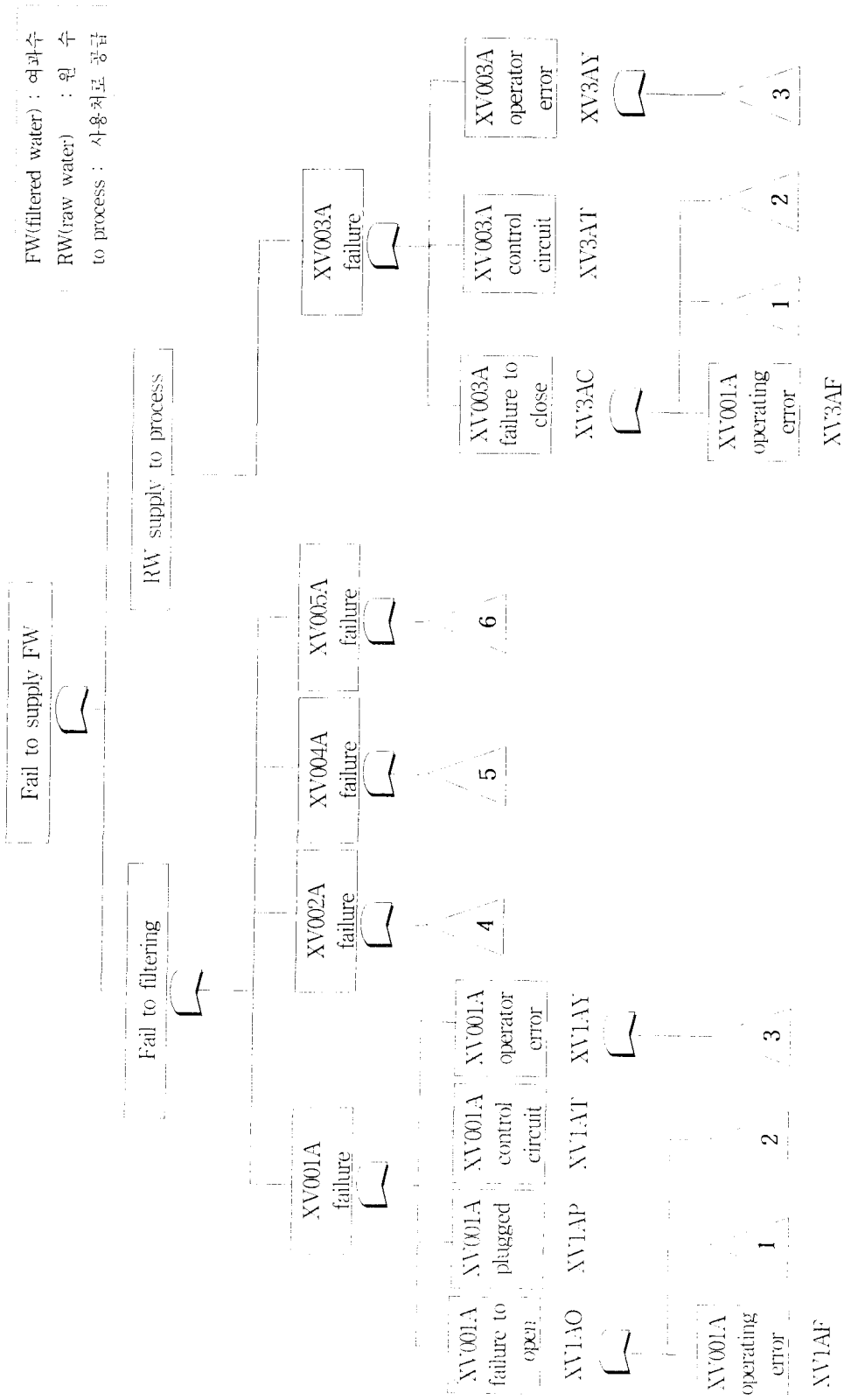


그림 3 TDF115A 공급설비에 대한 고장나무

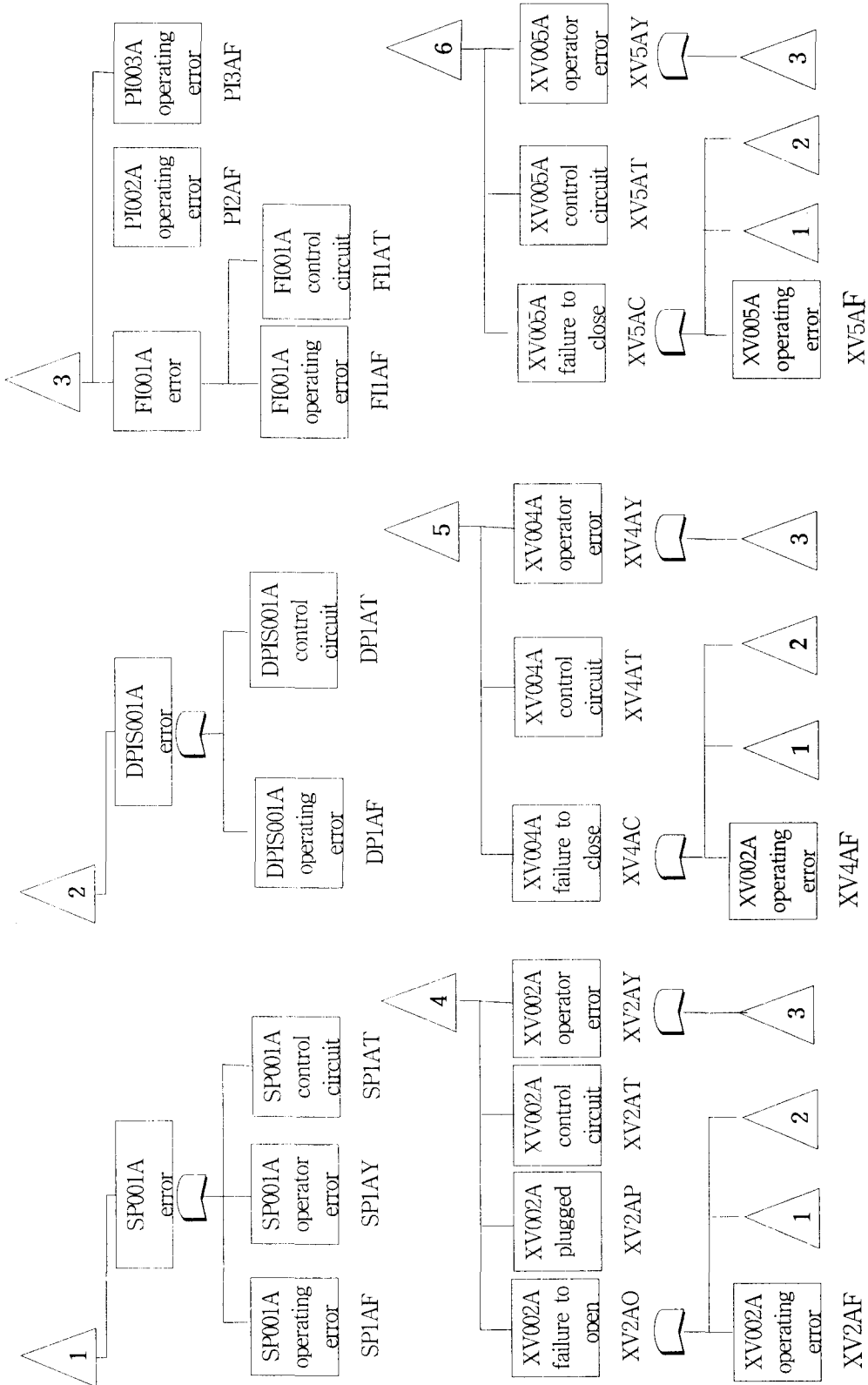


그림 3 - (계속)

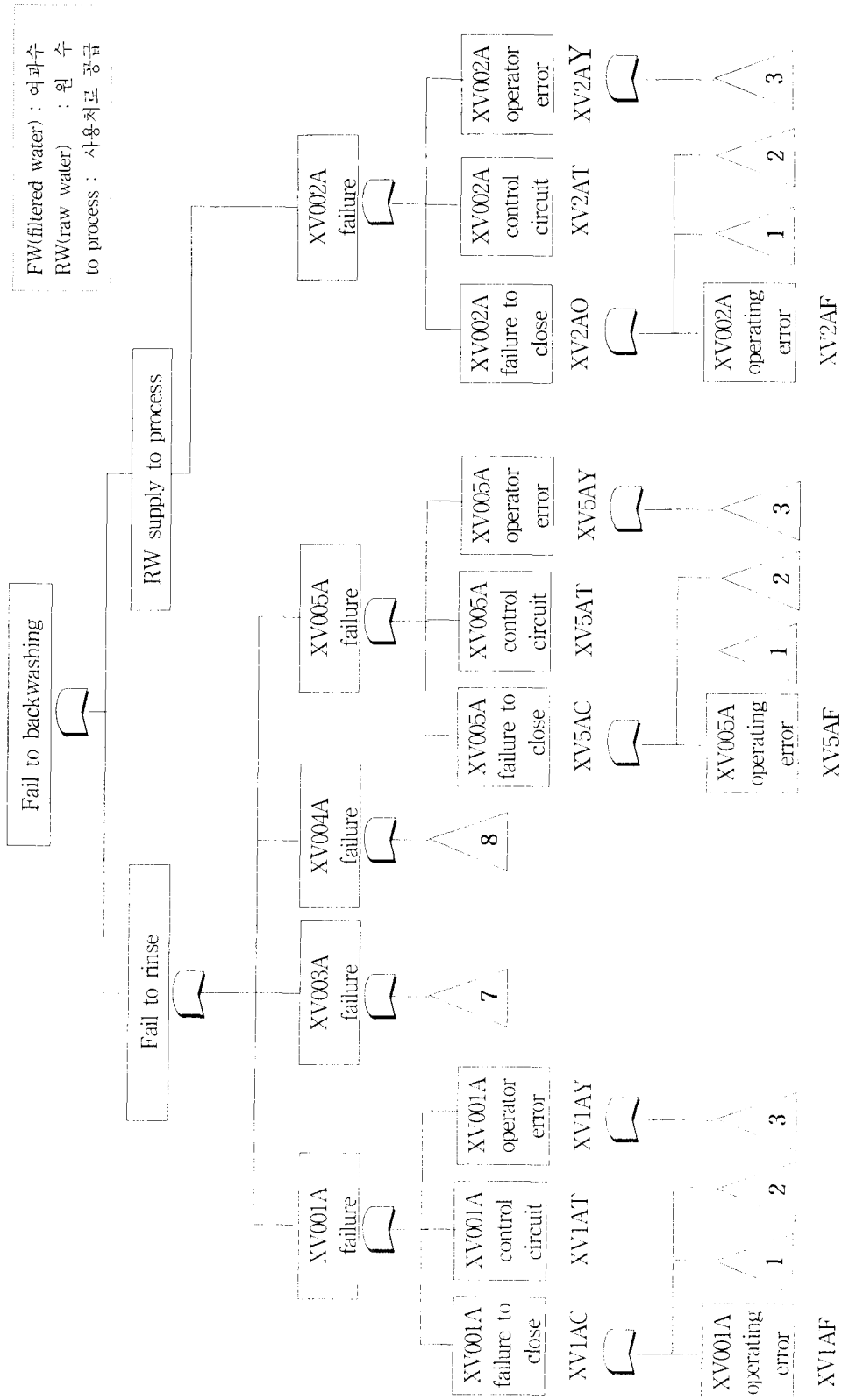


그림 4 TDF115A 역세(backwashing)에 대한 고장나무

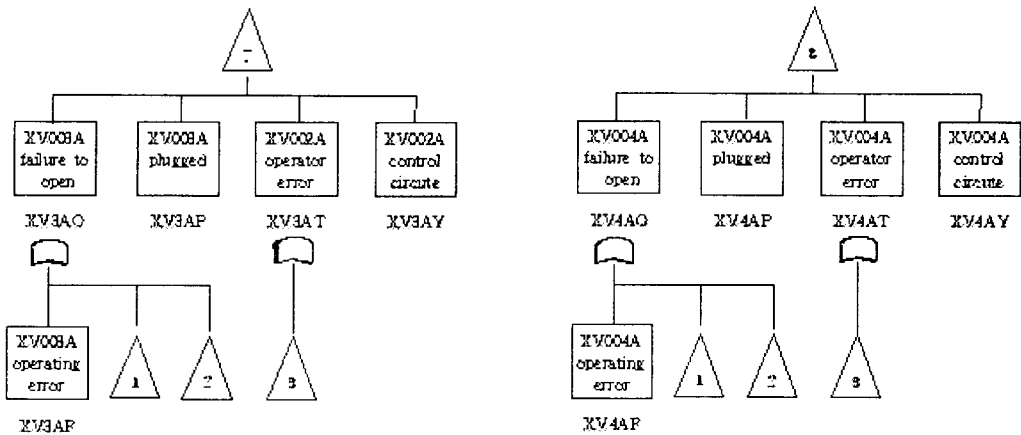


그림 4- (계속)

표 3 물 공급 계통의 기본사상

basic event	event description
XV1AO	XV001A fail to open
XV1AC	XV001A fail to close
XV1AP	XV001A plugged
XV1AT	XV001A control circuit
XV1AY	XV001A operator error
XV1AF	XV001A operating error
XV2AO	XV002A fail to open
XV2AC	XV002A fail to close
XV2AP	XV002A plugged
XV2AT	XV002A control circuit
XV2AY	XV002A operator error
XV2AF	XV002A operating error
XV3AC	XV003A fail to close
XV3AO	XV003A fail to open
XV3AT	XV003A control circuit
XV3AY	XV003A operator error
XV3AF	XV003A operating error
XV3AP	XV003A plugged
XV4AC	XV004A fail to close

표 3-(계속)

basic event	event description
XV4AO	XV004A fail to open
XV4AT	XV004A control circuit
XV4AY	XV004A operator error
XV4AF	XV004A operating error
XV4AP	XV004A plugged
XV5AC	XV005A fail to close
XV5AT	XV005A control circuit
XV5AY	XV005A operator error
XV5AF	XV005A operating error
SP1AF	SP001A operating error
SP1AY	SP001A operator error
SP1AT	SP001A control circuit
DP1AF	DPIS001A operating error
DP1AT	DPIS001A control circuit
FI1AF	FI001A operating error
FI1AT	FI001A control circuit
PI2AF	PI002A operating error
PI3AF	PI003A operating error

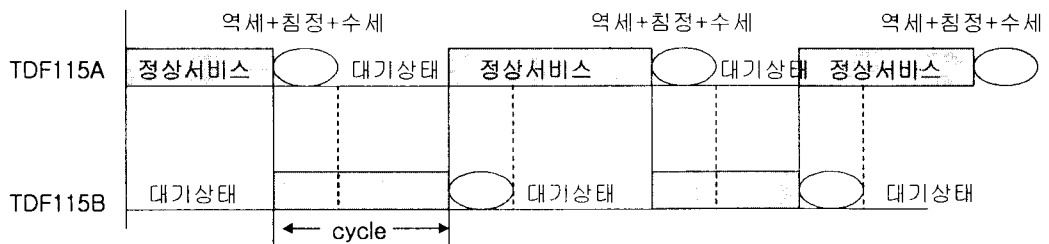


그림 5 물 공급계통 사이클

으며 구성요소들을 중심으로 고장모드와 고장으로 인한 시스템에의 영향을 고찰하였다. 이를 바탕으로 설비 계통에 대한 정확한 이해와 체계적인 분해, 발생 가능한 모든 사건의 분석과 평가를 통해 정상사상을 정의하고 정상사상을 발생시키는 원인을 추적하여 고장나부를 작성하였다. 고장나부를 중심으로 각 사상별 발생확률을 신뢰도 자료를 이용하여 분석을 통한 정상사상 발생확률을 구할 수 있고 설비계통에 대한 신뢰성을 정량화 할 수 있다. 다만, 본 연구 대상인 계통의 경우 시간 별로 고려되는 시스템의 형태가 다른 특성이 있으며 이로 인해 최종적인 신뢰도 계산이 매우 복잡하다. 이에 대한 연구가 미래의 좋은 연구방향으로 지적된다. 또한 연구가 전문한 수력발전소를 대상으로 진부하였던 측면에서 체계적이고 정량화된 신뢰성 연구로서 의의가 있으며 설비운영자가 합리적인사결정을 할 수 있는 중요한 기준으로 활용될 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] 권장섭, 수력발전소 설비 신뢰성 분석 모형, 석사논문, 강원대학교 산업공학과, 2006.
- [2] 『청평수력발전소 기본운전지침서』, 한국수력원자력, 2004.
- [3] 『훈천수력발전소 기본운전지침서』, 한국수력원자력, 2004.
- [4] 김원강: 신뢰도 공학의 이론과 실제, 교우사, 2005.
- [5] 『영광 5.6호기 PSA notebook [내부사건분석: 본문]』, KEPRI 내부보고서