

Fault Tree 분석에 의한 상수도 가압장과 배수지의 경보시스템 구축

Development of Alarm System Using Fault Tree Analysis for Pumping Station and Reservoir of Waterworks

안용포¹ · 송무근² · 이동익^{2*}

Yong-Po Ahn¹ · Moogeun Song² · Dongik Lee^{2*}

대구광역시 상수도사업본부, 2 경북대학교 IT대학 전자공학부

(2011년 1월30일 접수; 2011년 7월28일 1차수정; 2011년 12월3일 2차수정; 2011년 12월7일 채택)

Abstract

This paper presents an alarm system for the integrated monitoring and control station of waterworks in Daegu City. An alarm system informs the operator or other responsible individuals about the abnormality in the process so that an appropriate action can be taken. In practice, operators receive far more false and nuisance alarms than valid and useful alarms. Too many false and nuisance alarms can distract the operator from operating the plant, and thus critical alarms may be ignored. This problem can lead to the point that the operator no longer trusts the alarms or even shuts down the whole monitoring system. This paper proposes an efficient method to reduce false and nuisance alarms by prioritizing every fault using the Fault Tree Analysis (FTA) technique. The effectiveness of the proposed method is evaluated with a set of computer simulation under various faulty conditions.

Key words : Pumping station, Reservoir, Alarm system, Fault Tree Analysis

주제어 : 가압장, 배수지, 경보시스템, Fault Tree 분석법

1. 서론

상수도 시스템은 취수장, 정수사업소, 배수지 및 가압장 등 여러 가지 시설물로 이루어지는 매우 복잡한 시스템이며, 수많은 센서, 액추에이터, 유·무선 통신망 등 다양한 부품들을 포함한다. 상수도 시스템을 구성하는 일부 부품에서 고장이 발생할 경우 설비의 불안정에 따른 위험상황이 발생할 수 있다. 최근에 상수도 운용시설의 성능 및 효율성 뿐 아니라 안전과 신뢰도에 대한 요구수준이 증가함에 따라 구성부품의 고장을 신속히 감지하고 적절한 대응조치를 취하는 것이 매우 중요한 문제로 대두되었는데, 이를 해결하기 위해 고장감지(fault detection) 기술과 경보(alarm) 기

술이 이용되고 있다. 고장감지 분야에서는 1970년대부터 연구를 통해 다양한 방법들이 개발되었다(Gertler, 1998; Chen and Patton, 1999; Isermann, 2006). 고장감지 메커니즘에 의해 이상이 감지되면 경보장치가 음향 또는 시각적 경보를 발생하여 운영자의 신속하고 적절한 대응조치를 유도한다. 그런데 경보장치에 의한 경보오류(false alarm) 및 중복경보(nuisance alarm) 문제로 인해 운영자들이 적절한 대응을 취하지 못하는 사례가 빈번하게 발생한다(Izadi et al., 2009). 경보오류란 설비 또는 구성요소에 고장이 없음에도 발생하는 경보를 의미하며, 중복경보란 이미 운영자에게 통보되었거나 복구가 완료된 고장에 대해 반복적으로 경보가 발생하는 현상을 가리킨

*Corresponding author Tel:+82-53-950-7564, Fax:+82-53-950-5505, Email: dilee@ee.knu.ac.kr(Lee, DI)

다. 경보오류 및 중복경보가 발생하는 원인에 대해서는 3장에서 자세히 서술한다. 이러한 문제가 발생할 경우 운영자의 집중력을 저하시켜 중대한 정보까지도 무시하거나 더 이상 경보를 믿지 않는 “cry-wolf” 효과를 유발하며, 심지어 전체 모니터링 시스템이 중지되는 사태로 이어질 수 있다 (Bransby and Jenkinson, 1997).

경보오류 및 중복경보 문제점을 해결하기 위한 대안으로서, 모델 기반 성능분석 (Isermann, 2006), 데이터 기반 모델링 (Kourti, 2002), 다변량 해석 (Kondaveeti et al., 2009; Qin, 2009) 등이 제안되었다. 모델 기반 성능분석은 수학적모델의 출력과 실제 시스템의 출력과의 오차를 비교함으로써 고장을 검출하고 경보를 발생하는 기법이다. 그러나 모델의 정확성을 확보하는 것이 어려울 뿐 아니라 대규모 시스템의 경우 모델을 얻기가 매우 어렵다는 문제점이 있다. 모델 기반 성능분석 방법의 문제점을 해결하기 위한 대안으로 고려되는 데이터 기반 모델링 기법은 시스템 식별, 퍼지나 신경회로망을 이용한 정성적 모델링 등을 활용한다. 그러나 데이터 기반 모델링 역시 대규모의 시스템에 대해서 정밀한 모델을 확보하기는 매우 어려운 문제이다. 다변량 해석에서는 PCA (principal component analysis) 기법을 적용하여 다수의 독립적 신호로부터 감시대상 시스템의 상태를 파악한다. 그러나 PCA 기법은 일괄처리가 요구되기 때문에 대규모 데이터를 갖는 시스템에 대해서 실시간으로 처리하기에 어려움이 따른다.

이러한 방법들은 항공기나 자동차 등 상대적으로 규모가 작고 모델링 관련 연구가 많이 이루어진 분야에 주로 적용된 바 있으나, 본 논문에서 다루는 상수도 운영감시 설비에 직접 적용하기에는 어려움이 따른다. 먼저 상수도 운영설비의 규모와 복잡성이 크고 감시대상 신호의 종류가 수 천 개에 이를 정도로 많아서 실시간 구현이나 정확한 모델링을 얻기가 어렵다. 그리고, 이러한 방법들을 적용하기 위해서는 기개발되어 운용중인 설비의 소프트웨어를 대폭 수정할 필요가 있으며, 그 결과 전체 소프트웨어 및 시스템의 재검증이 필요할 수 있는데, 이는 현실적으로 매우 어려운 문제이다.

본 논문에서는 현재 운용 중인 대구광역시 상수도 가압장·배수지 통합운영설비의 경보장치를 과도한 소프트웨어 수정 없이 개선할 수 있는 방법을 제안한다.

다. 제안한 방법은 반복되는 사소한 고장신호에 의한 중복경보를 줄이고, 고장의 심각성에 관한 정보를 부가적으로 제공하는데 주안점을 둔다. 자체 분석에 따르면 현재 운용 중인 가압장·배수지 통합운영 설비에서는 시간당 30회~60회 정도의 다양한 경보가 지속적으로 발생하며 그 결과 운영자의 집중력을 저하시키는 문제가 있다. 그런데 다른 고장과 연계되지 않은 단일 고장의 경우 일시적 오동작이거나 심각한 문제가 아닌 것이 대부분이다. 반면에, 중대한 고장의 경우 상관관계가 있는 항목에서 다수의 경보가 동시에 발생하기 때문에 운영자가 신속하고 적절한 판단을 내리는데 오히려 걸림돌이 되고 있다. 따라서 시간당 경보발생 횟수를 줄임과 동시에 고장의 심각성을 고려하여 단계별 경보를 발생시킬 수 있도록 경보시스템을 개선할 필요가 있다. 본 논문에서는 Fault Tree 분석법(Fault Tree Analysis, FTA) (Limnios, 2007)을 적용하여 가압장 및 배수지 설비에서 발생 가능한 고장 신호의 종류, 상관관계, 중대성 등을 분석하고, 이를 토대로 시간당 경보발생 횟수를 줄일 뿐 아니라 고장의 중대성을 3등급으로 구분하여 경보를 발생시킬 수 있는 개선방안을 제시한다.

2. Fault Tree 분석법 개요

Fault Tree 분석법은 화학 플랜트, 발전소 등에서 발생할 수 있는 사고의 원인이 되는 기기 결함이나 설계 오류 등을 연역적·순차적·도식적으로 분석하여 적용시스템의 안전성을 진단하는 기법이다(Limnios, 2007). Fault Tree 분석법의 가장 큰 특징은 논리연산자의 조합에 의해 대상 설비의 위험성을 Fault Tree로 표현함으로써, 부품고장의 연관성을 시각적으로 파악할 수 있으며 이를 통해 설비의 치명적 결함을 사전에 파악하고 적절한 보완책을 수립하는 데 활용할 수 있다는 점이다. Fault Tree를 생성하기 위해서 다수의 논리연산자를 정의하고 있는데, 이 가운데 표1과 같이 AND와 OR가 가장 기본이 되는 연산자이다. 그림1에 제시된 전형적인 Fault Tree의 예를 보면, A는 Fault Tree의 최상위 이벤트이며, B-F는 중간단계 이벤트, 원으로 표현된 숫자는 기본 이벤트를 각각 의미한다.

일반적으로 Fault Tree는 시스템의 개발 단계에서 작성되어 안전성을 분석하는 데 활용되며, 이를

Table 1. Fault Tree 작성을 위한 기본 연산자

그래픽	심벌연산자	명칭의미
	OR	최소 한 개의 입력이 존재하면 출력이 생성됨
	AND	모든 입력이 존재할 경우에만 출력이 생성됨
	Rectangle	최상위 또는 중간단계 이벤트
	Circle	기본 이벤트

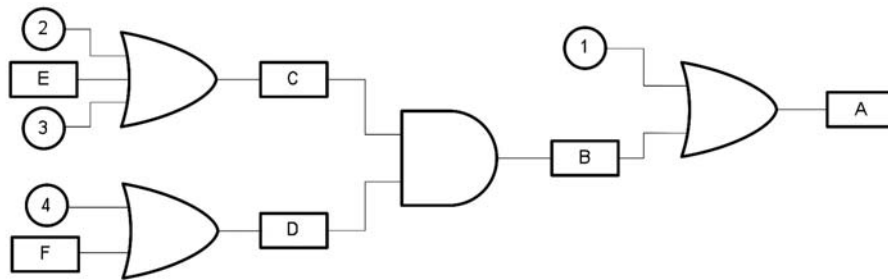


Fig 1. Fault Tree의 사례.

토대로 최종시스템의 안전성이 개선될 수 있도록 설계변경을 유도하는 목적으로 이용된다. Fault Tree의 기본개념은 매우 단순하지만, 적용시스템의 전문가에 의해서만 작성될 수 있다는 점이 단점으로 인식되고 있다.

3. 경보시스템 문제 분석

3.1 경보시스템 문제의 원인

앞서 서론에서 언급한 경보시스템 관련 2가지 문제 중에서 경보오류의 주된 원인은 경보 한계값(alarm limit) 설정의 어려움에 기인한다. 그림2에서 보는 것처럼, 한계값을 정상동작 범위에 너무 근접하게 설정할 경우, 빠른 고장감지가 가능한 반면에 신호에 포함된 잡음 등으로 인해 잦은 경보오류가 발생할 수 있다. 그 반대의 경우, 경보오류는 개선될 수 있으나 실제 고장발생시 경보를 발생할 때까지 지연시간이 커져서 적절한 대처가 이루어지지 못할 위험이 있다.

한편, 중복경보의 주요원인은 컴퓨터와 소프트웨어 기술의 적용으로 인해 과거에 비해 경보시스템 구현이 용이해짐으로서 지나치게 많은 모니터링 항목을 포함시키기 때문이다 (Izadi et al., 2009). 과거에는 감시대상 신호를 측정하는 센서마다 직접 배선을 통

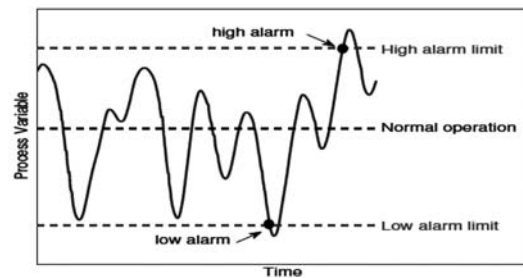


Fig 2. 임의의 신호에 대한 경보 한계값 설정 사례.

해 통제실로 연결해야 되므로 경보 및 모니터링 시스템은 매우 비싸고 구현이 복잡한 문제점이 있었다. 따라서 경보시스템은 반드시 필요한 신호에 한해 최소한으로 적용되었다. 반면, 컴퓨터와 소프트웨어 및 네트워크를 이용한 현대적인 경보시스템 구현기술의 개발로 경보시스템 설계 및 구현이 용이해짐에 따라, 필요이상으로 많은 감시항목을 설정하는 경향이 나타났다. 즉, 감시대상으로 설정된 신호들이 독립적이지 않고 밀접한 상관관계를 가질 경우, 시스템의 일부에서 고장이 발생하더라도 다수의 연관된 신호에서 동시에 경보가 발생함으로써 중복경보 현상으로 이어지게 된다.

과다한 경보설정은 중복경보 뿐 아니라 경보오류

Table2. EEMUA에 의한 산업별 벤치마크 실험 결과 (EEMUA, 2007)

구분	EEMUA 기준	정유 및 가스	화학공정	발전소
시간당 평균 경보발생 횟수	6회 이하	36	54	48

에도 직접적인 영향을 미칠 수 있다. 예를 들어, 임의의 시스템에 포함된 n개의 신호에 대하여 경보장치가 설정되었다고 가정하자. 이 때 각 신호는 경보오류가 발생할 확률 q를 가지며 이는 무시할 수 있을 정도의 작은 값이다. 그러나 n개의 신호를 모두 고려할 때 경보오류가 발생할 확률은 $1-(1-q)^n \approx nq$ 로 주어진다. 따라서 시스템의 경보오류 발생률은 감시대상 항목의 갯수에 비례하여 증가하며, 본 논문에서 다루는 상수도 통합운영설비의 경우처럼 경보대상 신호의 갯수가 $n=7940$ 에 이르면 오류 발생률은 무시할 수 없게 된다.

3.2 시간당 경보횟수

모든 경보에 대해서 시스템 운영자는 적절한 조치를 취해야 한다. 일반적으로 운영자는 해당 신호의 리셋버튼을 누르는 등 발생된 경보에 대한 인지를 확인하고, 이어서 경보 발생원인과 중대성을 판단하여 그에 따른 대응조치를 취한다. 경보시스템 관련 국제기준 중에서 가장 폭넓게 적용되고 있는 EEMUA 191 (EEMUA, 2007)에 따르면, 운영자가 처리해야 할 경보 횟수가 시간당 6회를 넘지 않도록 권장하고 있다. 그러나 표2에서 보는 것처럼, 실제 산업 현장에서는 이보다 훨씬 많은 경보가 발생되고 있음을 알 수 있다.

3.3 대구광역시 상수도 통합운영설비 경보시스템 현황

대구광역시 상수도 설비는 대구시 전역에 산재된 38개소의 가압장과 25개소의 배수지를 포함한다. 최근까지 가압장·배수지의 감시 및 제어를 위한 인력이 현장에 상주하였으나, 현재는 시설자동화 및 통합운영시스템 도입을 통해 전체 가압장·배수지 설비에 대한 무인운전을 실시하고 있다.

수운영 설비에서는 사소한 오작동으로부터 중대한 설비 손상에 이르기까지 매우 다양한 수준의 고장들이 발생할 수 있다. 이러한 고장들은 수질 및 수량에 영향을 주며 예상치 못한 급수중단 사고에 이를 수도 있으므로, 전체 설비의 동작상태 및 고장신호를 감시하고 경보를 발생할 수 있는 장치가 필요하다. 대구시

상수도본부 통합운영시스템에서 다루는 모니터링 대상은 영상화면을 제외하고 7940개 (아날로그 신호 3744개, 디지털 신호 4196개) 항목에 이른다 (대구광역시 상수도사업본부, 2010). 이 가운데 일부는 매우 밀접한 상관관계를 가지므로 하나의 부품에서 발생한 고장이 다수의 2차적인 고장신호를 발생시킬 수 있다. 그러나 현재 운용중인 경보시스템은 고장신호 사이의 연관성을 고려하지 않고 1차 고장신호와 그에 따른 2차 고장신호를 모두 개별적으로 경보 처리함으로써 매우 많은 수의 경보가 동시에 발생할 수 있다. 뿐만 아니라 잡음신호, 단순 오작동 등에 의한 무의미한 경보도 과다 발생하고 있는 실정이다. 자체 분석에 따르면 설비별로 시간당 30회~60회 정도의 다양한 경보가 지속적으로 발생하며, 그 결과 운영자의 집중력을 저하시켜 신속하고 정확한 판단 및 조치를 취하는데 어려움을 겪고 있다.

4. Fault Tree를 이용한 경보시스템 설계

앞서 언급한 바와 같이, 네트워크와 DCS 등을 이용한 대구시 상수도 통합운영 시스템에서는 제어와 감시를 위해서 많은 항목들이 계속되고 있다. 그러나 대부분의 항목들은 밀접한 상관관계를 갖기 때문에 시스템의 일부에서 고장이 발생할 경우 연관된 다수의 항목들에 영향을 미쳐 많은 경보가 동시에 발생함으로써 중복경보 문제를 유발한다. 달리 표현하면, 각 항목에서 발생된 경보를 개별적으로 다루지 말고 상관관계를 갖는 일련의 경보를 통합적으로 감시 및 처리한다면 경보발생 횟수를 줄일 뿐 아니라 시스템의 현재 상태를 보다 정확하게 판단할 수 있음을 의미한다.

본 논문에서 제안하는 방법은 Fault Tree를 이용하여 고장항목 사이의 상관관계를 표현하고, 이를 토대로 연관된 고장을 통합적으로 처리하여 경보를 발생한다. 고장 사이의 상관관계를 AND 및 OR 연산자로 나타냄으로써 연관된 고장을 하나의 경보로 처리할 수 있게 되며, 이를 통해 다수의 종속적인 고장에 의해 발생하는 중복경보를 피할 수 있다. 아울러, Fault Tree의 상위단계로 갈 수록 심각한 경보를 배치함으

로써 시스템 운영자가 고장의 중대성을 고려하여 적절한 대처를 취할 수 있도록 돕는다.

4.1 단계별 경보 설정

본 논문에서 다루는 가압장 및 배수지의 주요 고장들을 표3에 요약하였다. 그런데 표3에서 제시한 고장 중에서 단독으로 중대한 사고를 일으키는 경우는 드물다는 점을 유의할 필요가 있다. 예를 들면, 가압장의 토출압력이나 토출유량이 낮다는 사실 만으로 급수가 즉시 중단되는 상황이라고 볼 수는 없으므로, 낮은 수준의 경보 발생으로도 충분히 대처할 수 있다. 반면에, 낮은 토출압력 및 낮은 토출유량과 더불어 낮은 수위 문제가 동시에 발생한 경우, 곧 단수사고로 연결될 위험이 있으므로 긴급한 조치를 유도하기 위해 높은 수준의 경보를 발생시킬 필요가 있다.

이러한 사실을 바탕으로, 본 논문에서는 대부분의 단일고장에 대해서는 1단계의 낮은 경보를 발생하며,

다수의 연관된 고장이 동시에 발생할 수록 높은 단계의 경보를 발생하도록 설계한다. 본 논문에서 고려한 고장경보의 단계는 표4와 같이 정의하였다. 즉, 상위 단계의 고장은 하위단계의 고장이 적절히 처리되지 않았거나 대처가 지연될 경우 발생할 수 있다. 직수 가압장, 배수지연동 가압장, 배수지에 대하여 고장 사이의 상관관계 설정 및 경보단계 설정을 위한 Fault Tree 작성 결과는 4.2 및 4.3절에서 제시한다.

4.2 가압장 경보시스템을 위한 Fault Tree

가압장은 고지대에 위치한 배수지에 물을 공급하는 배수지연동 가압장과, 배수지가 없는 지역에서 펌프 가압식으로 직접 수용가에게 물을 공급하는 직수 가압장으로 분류된다.

먼저, 직수 가압장은 배수지 설치가 어려운 저지대에 설치된 소규모 가압장으로 24시간 상시 가동된다. 중간단계 없이 수용가에 직접 물을 공급하므로 적정

Table 3. 가압장 · 배수지에서 발생 가능한 주요 고장신호의 종류

〈단위: 명〉

구분		고장신호의 종류	
가 압 장	공통	정전	주전원 차단기 동작시 발생. 원격조정 불가능하며 현장조치 후 수동복구 필요.
		펌프 이상	펌프기동반의 계전기 동작시 발생. 펌프이상시 펌프 원격 가동 불가능하며, 현장조치 후 계전기 리셋하여 원상복구
	배수지연동 가압장	기동실패	고압펌프 기동 시퀀스 이상시 발생. 기동실패시 원격조정 불가. 현장에서 수동복구 필요
		밸브이상	전동밸브 액츄에이터 이상시 발생. 원격조정이 불가능하며 현장조치 후 리셋하여 원상복구
		배수지 고수위 배수지 저수위	배수지 고수위 설정치 초과 또는 저수위 설정치 미만시 발생
		토출압력 Low	배수지연동 가압장은 정격토출압력, 직수가압장은 설정압력 미만시 발생
		토출유량 Low	배수지연동 가압장은 펌프 정격토출 유량, 직수가압장 및 배수지는 일평균 최소유량 미만시 발생
		직수 가압장	토출압력 Low
	토출유량 Low		(배수지연동 가압장과 동일)
	인버터 이상		펌프제어용 인버터 이상시 발생. 제어프로그램 다운으로 인해 발생하는 경우가 많으며 현장에서 리셋하여 원상복구
	펌프 이상		(배수지연동 가압장과 동일)
	압력 이상		압력계 출력값이 30분 이상 고정시 발생
	배수지	밸브이상	(배수지연동 가압장과 동일)
		밸브단힘	밸브단힘 자체는 고장이 아니지만, 배수지의 밸브단힘은 급수중단을 의미하므로 고장에 준하여 감시
		고수위	(배수지연동 가압장과 동일)
저수위			
수위계이상		수위계 출력값이 30분 이상 고정시 발생	
토출유량 Low		(배수지연동 가압장과 동일)	

Table 4. 경보단계 정의 및 단계별 조치사항

구분	경보단계 정의 및 단계별 조치사항
고장신호 (표3)	<ul style="list-style-type: none"> - 센서출력이 표3의 조건에 해당될 경우 발생 - 운영자 확인 후에도 고장신호 해제되지 않을 경우 정기점검시 점검
1단계 경보	<ul style="list-style-type: none"> - 관련된 고장신호 다수가 동시에 발생하였으나 운영실에서 원격으로 조치 또는 대체설비 운영이 가능한 경우 - 원격조치 후에도 경보가 해제되지 않을 경우 정기점검시 점검
2단계 경보	<ul style="list-style-type: none"> - 다수의 1단계 경보가 발생하였으나 운영실에서 원격제어가 불가능하고 사고발생 가능성이 있어서 즉시 현장점검이 필요한 경우 - 즉시 현장 점검 및 조치 실시
3단계 경보	<ul style="list-style-type: none"> - 운영실에서 원격제어가 불가능하고 현장에서 문제해결에 일정시간이 소요되어, 사고예방을 위한 긴급조치가 필요한 경우 - 즉시 현장 점검 및 조치 - 전직원 비상 소집하여 사고예방을 위한 긴급조치 실시

수압을 유지하는 것이 중요하며, 적정 토출압력이 유지되지 않을 경우 곧 급수중단으로 이어진다. 따라서 펌프가동상태, 적정수압유지를 위한 인버터 가동상태, 메인토출압력 상태의 감시가 중요하다. 이들을 중심으로 고장 사이의 상관관계와 경보단계 설정을 위한 Fault Tree를 그림3과 같이 작성하였으며, 단계별 경보 발생 조건은 표5와 같다. 여기서 도표의 복잡성을 고려하여 AND 및 OR 연산자의 입력과 출력에 해당하는 “Rectangle” 및 “Circle” 기호는 생략하고 Fault Tree를 작성하였다.

배수지연동 가압장은 급수량에 따라 배수지 수위

를 조절한다. 고압수전을 받아 대용량의 고압펌프를 가동하므로 배수지나 직수 가압장에 비해 감시항목이 많다. 배수지연동 가압장 운영의 핵심은 고압모터에 의해 기동되는 펌프 및 각종 밸브의 제어이며, 원격운전을 위해서는 모터와 펌프의 기동 및 운전상태, 연계밸브의 개폐상태 등을 정확하고 신속하게 감시할 필요가 있다. 따라서 배수지수위, 펌프가동상태, 밸브동작상태의 감시가 중요하다. 이들을 중심으로 고장 사이의 상관관계와 경보단계 설정을 위한 Fault Tree를 그림4와 같이 작성하였으며, 단계별 경보 발생 조건은 표6과 같다.

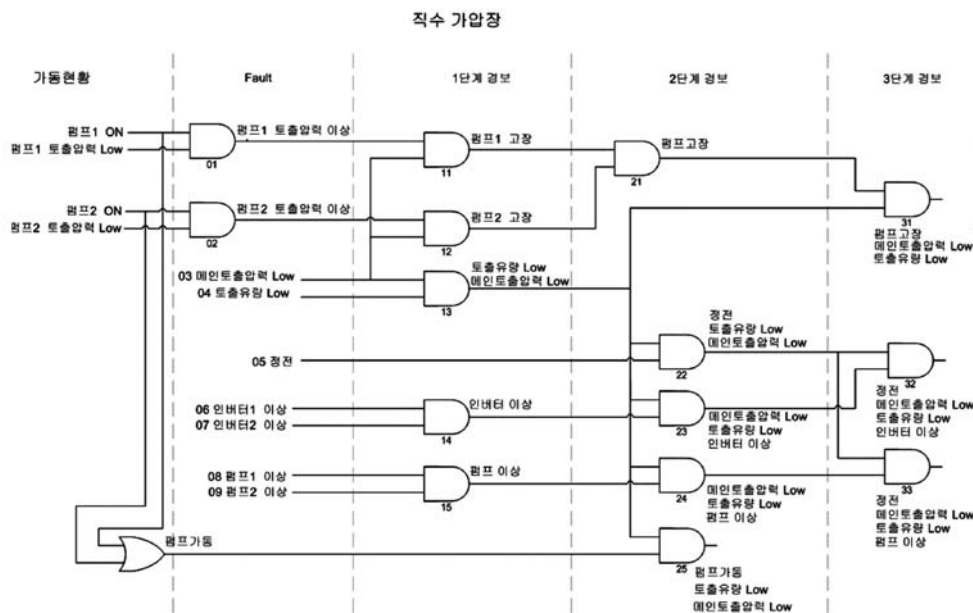


Fig 3. 직수가압장의 고장 상관관계 및 경보단계 설정을 위한 Fault Tree.

Table 5. 직수가압장의 경보단계별 고장 내용

경보단계	게이트번호	고장 내용	
1단계	11	펌프1고장 : 펌프1 가동 중임에도 토출압력이 설정치 이하	
	12	펌프2고장 : 펌프2 가동 중임에도 토출압력이 설정치 이하	
	13	토출유량, 메인토출압력 Low : 토출유량 및 메인토출압력이 설정치 이하	
	14	인버터이상 : 인버터1, 2 동시 이상신호 발생	
	15	펌프이상 : 펌프1, 2 동시 이상신호 발생	
2단계	21	펌프고장 : 펌프1, 2 동시 고장신호 발생	
	22	정전, 메인토출압력 Low, 토출유량 Low : 정전으로 인해 펌프가동이 중단되어 토출유량 및 메인 토출압력이 동시에 설정치 미만	
	23	메인토출압력 Low, 토출유량 Low, 인버터이상 : 인버터 1, 2 동시 이상신호 발생, 토출유량 및 메인 토출압력이 동시에 설정치 미만	
	24	메인토출압력 Low, 토출유량 Low, 펌프이상 : 펌프 1, 2 동시 이상신호 발생, 토출유량 및 메인토출압력이 동시에 설정치 미만	
	25	펌프가동, 메인토출압력 Low, 토출유량 Low : 펌프가 가동 중임에도 토출유량 및 메인토출압력이 동시에 설정치 미만	
3단계	31	펌프고장, 메인토출압력 Low, 토출유량 Low : 펌프 1, 2 동시 고장으로 토출유량 및 메인토출압력이 동시에 설정치 미만	
	32	정전, 메인토출압력 Low, 토출유량 Low, 인버터이상	2단계 경보가 동시에 발생
	33	정전, 메인토출압력 Low, 토출유량 Low, 펌프이상	

4.3 배수지 경보시스템을 위한 Fault Tree

수용가로 물이 공급되는 마지막 단계에 해당하는 배수지는 가압장 펌프에 의해 물을 공급받는 가압장 연동 배수지와, 자연유하에 의해 유입되는 물을 밸브로 제어하는 자연수 배수지로 구분된다. 배수지 사고의 유형을 보면 배수지 물이 넘치는 월류사고, 수위저

하 또는 유출밸브의 이상 작동으로 인한 급수중단 등이 있다. 따라서 밸브가동상태, 수위, 배수량과 관련된 계측센서의 고장신호를 중심으로 고장 상관관계 및 경보단계 설정을 위한 Fault Tree를 작성하였으며(그림5), 단계별 경보발생 조건은 표7과 같다.

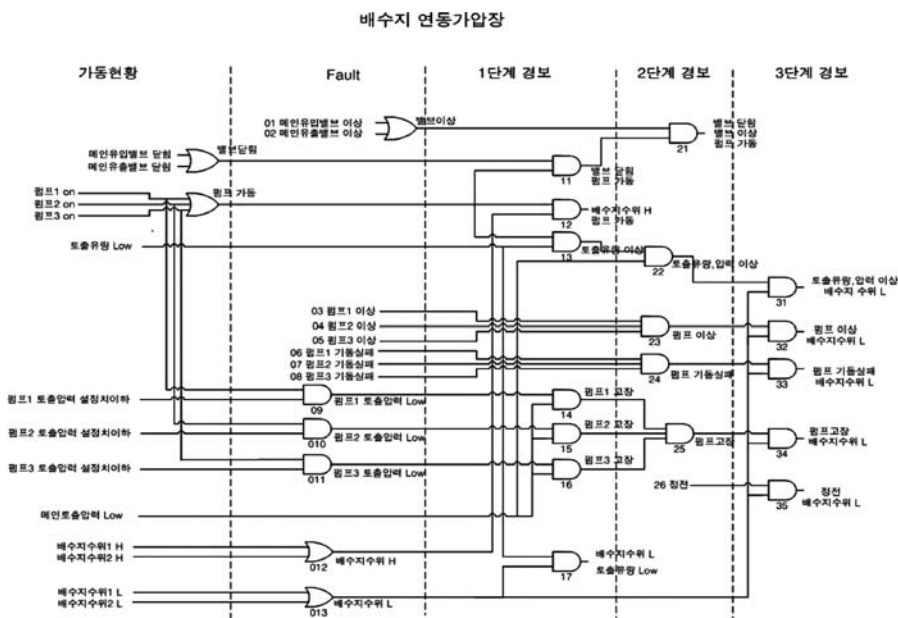


Fig 4. 배수지연동가압장의 고장 상관관계 및 경보단계 설정을 위한 Fault Tree.

Table 6. 배수지 연동 가압장의 경보단계별 고장 내용

경보단계	게이트번호	고장 내용	
1단계	11	밸브닫힘, 펌프가동 : 주 유입/유출 밸브가 닫힌 상태에서 펌프 가동	
	12	배수지수위 High, 펌프가동: 배수지 고수위 상태에서 펌프 가동	
	13	토출유량이상 : 펌프 가동 중 토출유량이 펌프의 정격유량 미만	
	14	펌프1 고장	펌프 가동 중 개별 토출압력과 메인토출압력이 동시에 설정치 미만
	15	펌프2 고장	
	16	펌프3 고장	
	17	배수지수위 Low, 토출유량 Low : 배수지가 저수위 상태에서 펌프 미가동	
2단계	21	밸브닫힘, 밸브이상, 펌프가동 : 밸브닫힘, 밸브이상 상태에서 펌프 가동	
	22	토출유량, 압력이상 : 펌프가 가동 중임에도 토출유량 및 메인토출압력 동시에 설정치 미만	
	23	펌프이상 : 펌프 3대가 동시에 펌프이상 신호 발생	
	24	펌프기동실패 : 펌프 3대가 동시에 기동실패신호 발생	
	25	펌프고장 : 펌프 3대가 동시에 고장신호 발생	
	26	정전 : 정전신호 발생	
3단계	31	토출유량, 압력이상, 배수지수위 Low	2단계 경보에 대한 조치가 늦어져 배수지 수위가 설정치 미만으로 떨어질 경우 발생
	32	펌프이상, 배수지수위 Low	
	33	펌프기동실패, 배수지수위 Low	
	34	펌프고장, 배수지수위 Low	
	35	정전, 배수지수위 Low	

5. 시뮬레이션 결과 및 고찰

앞서 표2에 제시된 EEMUA 벤치마크 실험에서는 상수도 경보시스템에 대한 실험결과는 포함하고 있지 않으나, 자체 분석에 따르면 시설별로 시간당 40회~60회의 경보신호가 발생하는 것으로 파악되었다. 따

라서 본 논문에서는 편의상 직수가압장 50회, 배수지 연동 가압장 47회, 배수지 59회의 다양한 고장 및 이에 따른 경보가 발생하는 것으로 설정하고 시뮬레이션을 수행하였다. 제안된 방법과 기존 방법의 적용에 따른 시간당 경보횟수의 차이를 중점적으로 비교한다. 시뮬레이션 결과를 제시한 그림6~그림8의 세로

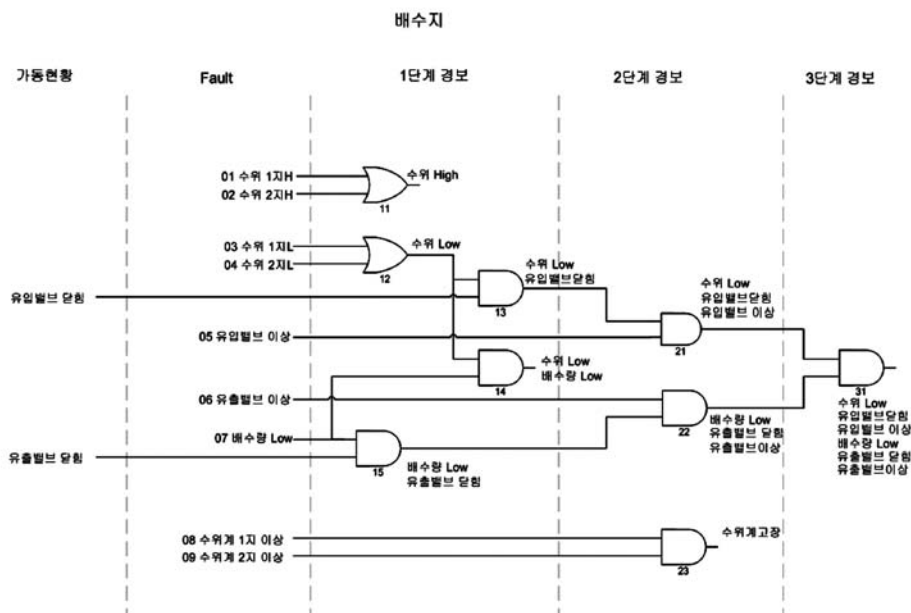


Fig 5. 배수지의 고장 상관관계 및 경보단계 설정을 위한 Fault Tree.

Table 7. 배수지의 경보단계별 고장 내용

경보단계	게이트번호	고장 내용
1단계	11	수위 High : 배수지 1 또는 2의 수위가 High 설정치 초과
	12	수위 Low : 배수지 1 또는 2의 수위가 Low 설정치 미만
	13	수위 Low, 유입밸브단힘 : 배수지 수위가 Low 상태에서 유입밸브 단힘
	14	수위 Low, 배수량 Low : 배수지 수위가 배수관 이하로 떨어져 배수량 저하
	15	배수량 Low, 유출밸브단힘 : 유출밸브가 닫혀 배수량 설정치 이하
2단계	21	수위 Low, 유입밸브단힘, 유입밸브이상 : 유입밸브 단힘 및 유입밸브 이상으로 원격제어 불가능 상태에서 배수지 수위 설정치 미만
3단계	22	배수량 Low, 유출밸브단힘, 유출밸브이상 : 유출밸브 단힘 및 유출밸브 이상으로 원격제어 불가능 상태에서 배수량 설정치 미만
	23	수위계 고장 : 배수지 1, 2 수위계 동시 고장
	31	수위계 Low, 유입밸브단힘, 유입밸브이상, 배수량 Low, 유출밸브단힘, 유출밸브이상: 다수의 2단계 경보가 동시에 발생

측은 경보발생 횟수를 가리킨다.

5.1 직수가압장

직수가압장에 대한 경보시스템 성능분석 결과는 **그림6**과 같다. 임의로 선택한 총 50회의 고장신호를 1시간에 걸쳐 인가하였으며, 고장의 종류는 **그림6(a)** 상단에 제시하였다. **그림6(a)** 하단은 기존 경보시스템을 적용한 경우의 경보 발생현황을 나타내며, **그림6(b)**는 제안한 방법을 적용한 경우의 단계별 경보발생 횟수를 나타낸다. 기존 시스템에서는 고장신호에 일대일로 대응하는 경보가 발생하므로 인가된 고장신호의 수와 동일한 시간당 50회의 경보가 발생하였다. 반면에 제안한 방법을 적용한 경우, 상관관계를 갖는 일련의 고장에 대해서는 동일한 경보로 처리함으로써 1단계 경보 5회, 2단계 경보 1회만 발생하였고, 3단계 경보는 발생하지 않았다. 이는 시뮬레이션에 적용된 50회의 고장신호 가운데 대부분은 일시적 오작동 등 실제 설비운영에 중대한 영향을 미치지 않는 단순 고장이거나 고장대처를 위한 시간적 여유가 충분히 있음을 의미한다. 결과적으로 제안한 방법을 적용할 경우 기존 시스템에서 50회 발생한 경보를 6회로 줄일 수 있었으며, 이는 **표2**에서 제시한 EEMUA의 권장기준을 만족함을 알 수 있다.

표8에 나타난 단계별 경보발생 사유를 살펴보면, 1단계 경보는 낮은 토출압력 또는 토출유량 등 단순 이상에 대해서 각각 발생하였다. 반면에, 단독으로 발생 시 1단계 경보에 해당하는 낮은 토출압력과 토출유량이 동시에 발생하였으나 펌프는 정상적으로 동작하는 경우에 2단계 경보가 발생하였다. 이는 압력과 유량이

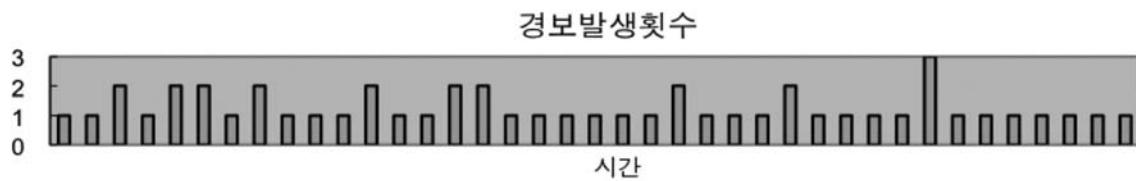
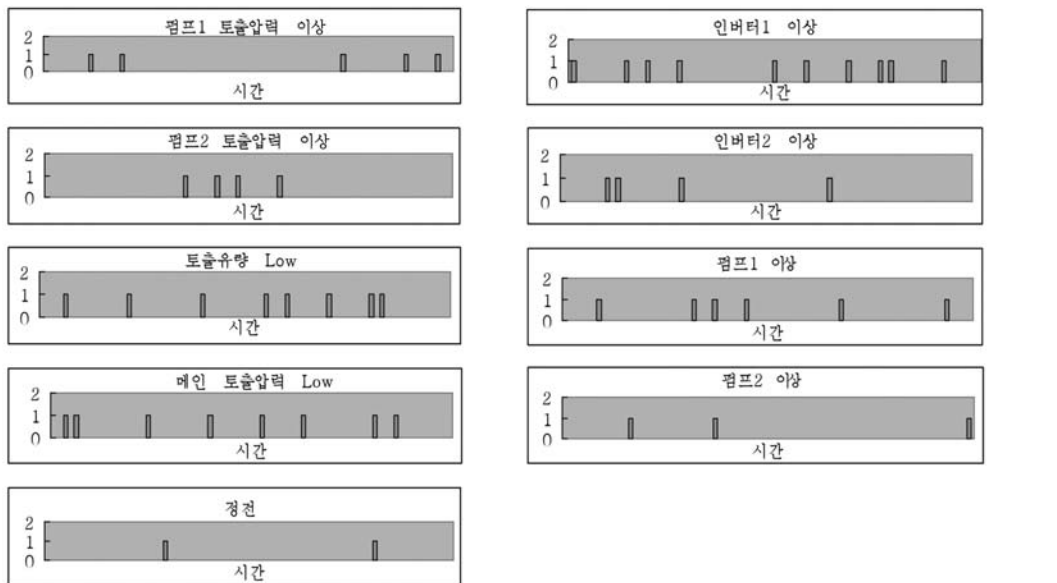
낮더라도 펌프가 가동 중이므로 급수중단에 이르기까지 시간적 여유가 있음을 반영한 것이다. 한편 이 시뮬레이션에서는 3단계 경보가 발생하지 않았으나, 2단계 경보의 조건인 낮은 압력 및 유량과 함께 펌프동작이 멈춘 경우에는 3단계 경보가 발생하게 된다.

5.2 배수지연동 가압장

그림7은 배수지연동 가압장에 대하여 1시간 동안 총 47회의 고장신호를 인가하고 경보시스템의 성능을 비교한 결과이다. **그림7(a)**는 고장신호의 종류와 함께 기존 경보시스템을 적용한 경우를, **그림7(b)**는 제안한 방법을 적용한 경우의 단계별 경보발생 횟수를 각각 나타낸다. 기존 시스템에서는 고장인가 횟수와 동일한 47회의 경보가 발생하였다. 반면에 제안한 방법을 적용한 경우 1단계 경보 6회, 2단계 경보 2회 등 모두 8회의 경보만 발생하였으며, **표9**에서 단계별 경보발생 사유를 제시하였다.

5.3 배수지

그림8에서는 1시간 동안 총 59회의 고장신호를 인가하고 배수지 경보시스템의 성능을 비교한 결과를 보여준다. **그림8(a)**는 기존 경보시스템을 적용한 경우의 고장신호 발생현황을 나타내며, **그림8(b)**는 제안한 방법을 적용한 경우의 단계별 경보발생 현황을 나타낸다. 제안한 방법을 적용할 경우 1단계 경보 22회, 2단계 경보 1회가 발생하였고, 3단계 경보는 발생하지 않았다. 가압장과는 달리 배수지에서는 1단계 경보가 상대적으로 많이 발생하였다. **표10**에 나타난 것처럼, 이는 배수지 운영 중 가장 자주 발생하는 배



(a) 기존 경보시스템 적용시

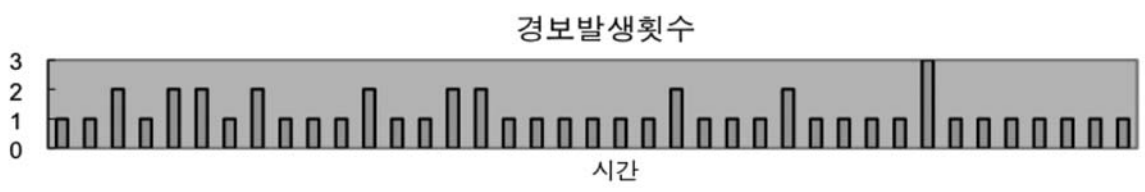
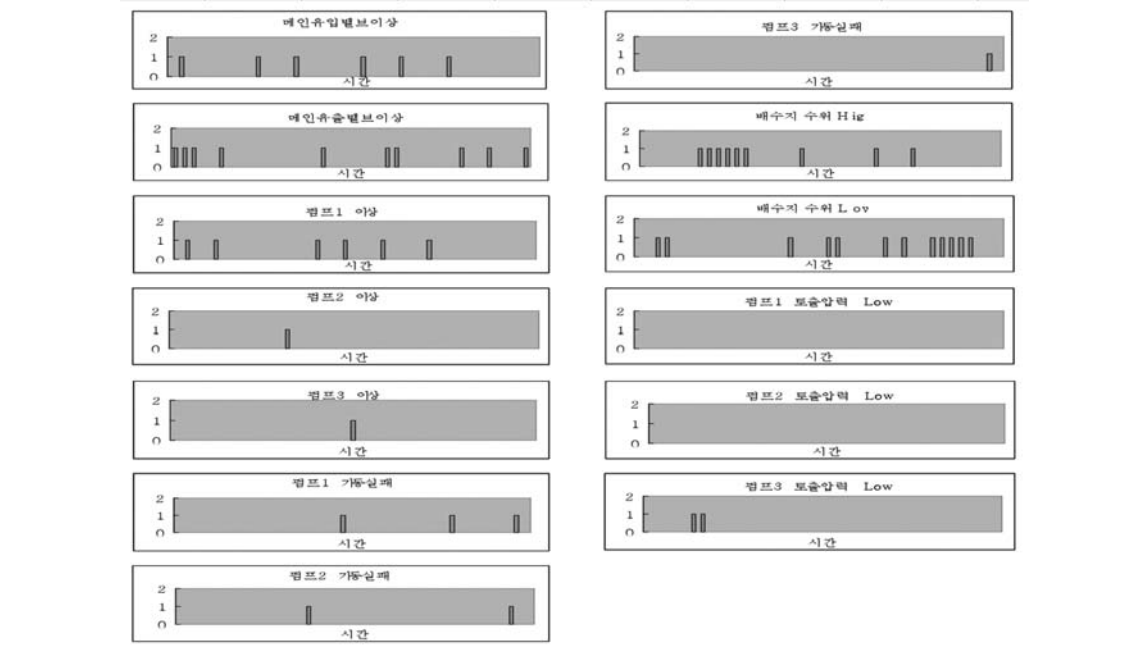


(b) 제안한 경보시스템 적용시

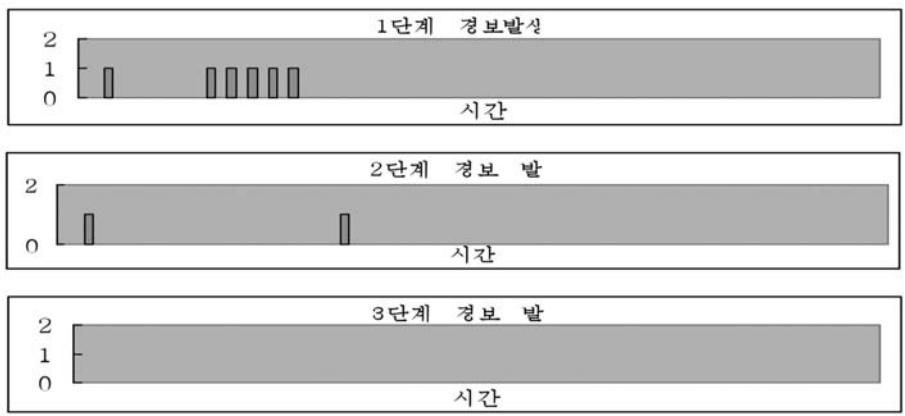
Fig 6. 직수가압장 경보시스템 시뮬레이션 결과.

Table 8. 직수가압장 경보시스템의 단계별 경보발생 원인 (& 동시발생 의미)

경보단계	발생횟수	발생원인
1	5	토출압력 Low, 토출유량 Low, 인버터 이상, 펌프 이상
2	1	펌프가동 & 토출압력 Low & 토출유량 Low
3	0	-



(a) 기존 경보시스템 적용시

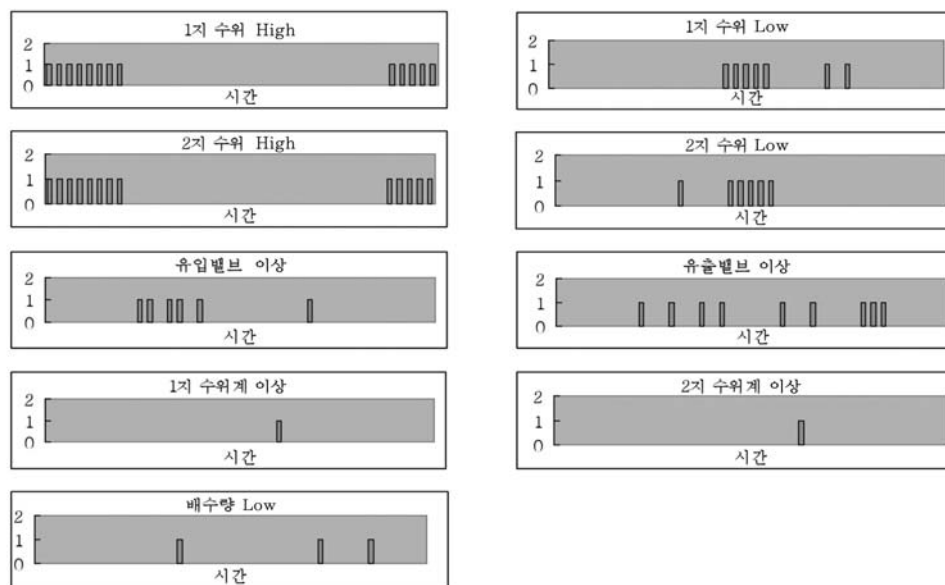


(b) 제안한 경보시스템 적용시

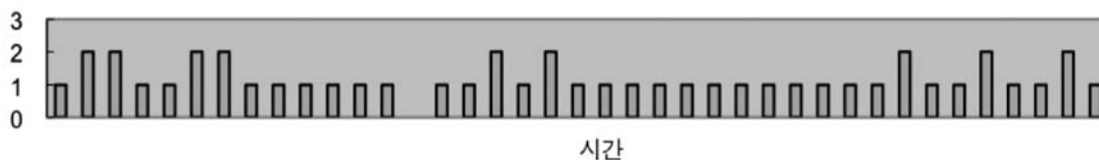
Fig 7. 배수지연동 가압장 경보시스템 시뮬레이션 결과.

Table 9. 배수지연동가압장 경보시스템의 단계별 경보발생 원인 (&: 동시발생 의미)

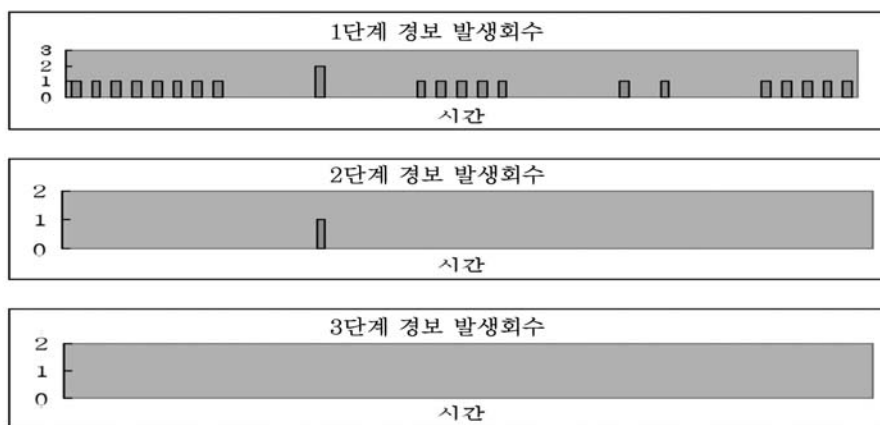
경보단계	발생횟수	발생원인
1	6	배수지 수위 High, 토출유량 이상
2	2	토출유량 이상 & 토출압력 이상
3	0	-



경보발생횟수



(a) 기존 경보시스템 적용시



(b) 제안한 경보시스템 적용시

Fig 8. 배수지 경보시스템 시뮬레이션 결과.

Table 10. 배수지 경보시스템의 단계별 경보발생 원인 (&: 동시발생 의미)

경보단계	발생횟수	발생원인
1	22	수위 High, 수위Low & 유입밸브 닫힘, 수위Low
2	1	수위Low & 유입밸브 닫힘 & 유입밸브 이상
3	0	-

수지 수위 High 또는 Low상황의 위험도를 고려하여 1단계 경보로 설정하였기 때문이다. 그럼에도 불구하고 운영자들이 집중해서 감시해야 할 2단계 이상의 경보발생 수는 1회로 줄어들었음을 알 수 있다. 2단계 경보는 낮은 수위 상태에도 불구하고 유입밸브가 닫힌 상태에서 고장이 감지된 경우로써, 이는 현장에 출동하여 조치를 취하지 않을 경우 급수중단 사고로 연결될 위험이 큰 상황을 의미한다.

6. 결론

본 논문에서는 다양한 지역에 산재되어 있는 상수도 가압장 및 배수지 설비의 운영상황을 실시간으로 감시하는 가압장·배수지 통합운영설비의 경보시스템을 개선할 수 있는 방법을 제시하였다. 기존 경보시스템에서는 7940개에 이르는 감시대상 신호의 상관관계나 중대성을 고려하지 않은 채 모든 고장신호에 일대일로 대응하여 경보를 발생하였다. 그 결과 시간당 평균 경보발생횟수가 60여회에 이르게 되어 운영자의 집중력을 저하시키고 고장상황에 효과적으로 대처하기 어려운 문제점이 있었다. 본 논문에서는 Fault Tree를 이용하여 각 설비에서 발생가능한 고장의 상관관계와 중대성을 분석하고, 이를 토대로 연관된 고장신호를 통합하여 3등급으로 구분된 경보를 발생함으로써 시간당 경보발생 횟수를 현저히 줄일 수 있었다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제안한 방법의 효용성을 분석한 결과, 기존 시스템에서 시간당 47회~59회에 이르던 경보발생 횟수를 EEMUA 권장기준인 시간당 6회 수준으로 개선할 수 있음을 확인하였다. 제안된 방법을 실제 설비에 적용할 경우, 운영자의 집중도를 개선하여 중대 고장발생시 보다 신속하고 효과적인 대응을 취할 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

이 논문은 2008년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2008-331-D00181)

참고문헌

1. Bransby, M.L., and Jenkinson (1997) Alarm Management in the Chemical and Power Industries - A Survey for the HSE, IEE Colloquium on Stemming the Alarm Flood Proc., London, U.K.
2. Chen, J. and Patton, R., (1999) Robust Model-Based Fault Diagnosis for Dynamic Systems, Kluwer Academic Publishers, Boston.
3. EEMUA (Engineering Equipment and Materials User's Association) (2007), Alarm Systems ? A Guide to Design, Management and Procurement, EEMUA Publication 191, version 2.
4. Gertler, J. (1998) Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems, Marcel Dekker, New York.
5. Isermann, R. (2006) Fault-Diagnosis Systems: An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance, Springer, Berlin.
6. Izadi, I., Shan, S.L., Shook, D.S., and Chen, T. (2009) An Introduction to Alarm Analysis and Design, 7th IFAC SAFEPROCESS Proc., Barcelona, Spain.
7. Kondaveeti, S.R., Shan, S.L. and Izadi, I. (2009) Application of Multivariate Statistics for Efficient Alarm Generation, 7th IFAC SAFEPROCESS Proc., Barcelona, Spain.
8. Kourti, T. (2002) Process analysis and abnormal situation detection: from theory to practice, IEEE Control Systems Magazine, vol.22, pp.10-25.
9. Limnios, N. (2007) Fault Trees, ISTE.
10. Qin, S.J. (2009) Data-Driven Fault Detection and Diagnosis for Complex Industrial Processes, 7th IFAC SAFEPROCESS Proc., pp.1115-1126, Barcelona, Spain.
11. 대구광역시 상수도사업본부 (2010) 대구시 상수도현황.