

## 시뮬레이션을 이용한 최적예방정비주기 결정에 관한 연구 A Study on the Determination of Optimal Preventive Maintenance Periods using Simulation

윤익근, 하종만, 김호연, 김동혁  
한국가스공사 연구개발원

### Abstract

LNG고압펌프계통은 천연가스 고압 송출에 있어 가용도가 매우 중요한 계통이다. 본 연구에서는 현재 적용되고 있는 예방(계획)정비주기를 가용성 측면에서 재검토했다. 확률적인 운전대수와 운전 및 보전 행태에 연관된 여러 제약이 고려될 때 계통 불가용도를 정량화하기 위하여 시뮬레이션 기법을 적용했다. 중도 절단된 형태의 펌프 수명 데이터를 분석해 육조형의 고장을 함수를 도출했으며 보수시간 데이터를 분석해 확률분포모수를 구했다. 또한 주요 펌프부대설비에 대해서는 상수형의 고장과 보전을 도출했다. 분석된 확률모수를 작성된 시뮬레이션 모형에 입력하고 과거의 운전대수 시나리오를 설정해 실험한 결과와 실제 보수 및 운전 자료를 비교해 모형의 유효성을 보였다. 그리고 차후 예상되는 운전요구대수 시나리오를 가정하고 각 예방정비주기별로 반복 실험하여 계통의 불가용도를 보이고 적합한 예방정비주기를 도출했으며 펌프부품 교체비용의 기대 절감액을 보였다.

### 1. 연구 개요

LNG인수기지에서는 LNG고압펌프계통은 천연가스를 고압으로 송출하기 위한 주 공정 계통이다. 따라서 만일 고장이 발생하면 전국 주 배관 압력저하에 의한 가스 공급중단 사건이 발생할 수 있기 때문에 펌프 계통의 가용도(Availability)는 매우 중요한 신뢰성 척도이다. 본 연구에서는 LNG고압펌프계통의 가용도에 중요한 영향을 미치는 것으로 판단되는 예방(계획)정비주기에 대한 재검토를 시뮬레이션을 통해 수행했다. 현재 P-LNG인수기지의 LNG고압펌프는 비동절기시 운전시간 약 8000시간에 도달한 펌프를 완전분해정비(overhaul) 한다. 이 정비주기는 제작사가 제시한 베어링 수명에 근거하여 설정된 것이다. 하지만 국내 LNG인수기지 운전환경속에서의 펌프 고장과 동절기에 예상되는 운전대수, 연중 예방정비에 의해 동절기 진입시 각 펌프의 운전시간 조합에서의 총 고장을 고려했을 때 이 정비주기에 대한 재검토가 필요하다. 즉 동절기와 같은 특정 기간동안의 가용도를 보장하기 위하여 펌프 1대의 관점에서 예방정비주기를 설정하는 것보다 운전요구대수를 고

려한 계통의 관점에서 예방정비주기를 설정하는 것이 보다 합리적이다.

따라서 동절기를 대비하여 예방정비주기를 달리할 때 LNG고압펌프 계통의 가용도를 정량화할 수 있는 신뢰도 분석 모형이 필요하다. 그러나 설비의 고장을 추이가 복잡하고 운전요구대수와 지속시간이 확률적인 경우에는 수리적 신뢰성 분석 모형을 만드는 것은 매우 어렵다. 또한 비동절기에만 허용되는 예방정비의 주기 변화가 있을 때, 동절기 진입시 각 펌프가 갖는 운전시간의 조합이 계통 가용도 도출의 중요한 변수이기 때문에 현실적인 운영 및 보전 행태를 반영해야 하며 이를 위해서는 시뮬레이션이 유일한 대안일 수 밖에 없다.

이에 본 연구에서는 각종 설비 자료 및 운전원 면담을 통해 운전 및 보전 행태를 반영하는 논리를 구성하여 시뮬레이션 모형을 수립했다. 또한 시뮬레이션에 필요한 신뢰도 데이터 분석을 수행했다. 과거 5년간의 LNG고압펌프에 대한 기기 이력 대장을 분석하여 중요 고장원인을 몇 개의 고장모드별로 분류하여 고장을 분석하고 펌프의 총 고장을 함수를 도출했다. 그리고 보전시간자료를 분석해 보전시간 확률분포를 도출했으며 부대설비들에 대해서도 보수자료를 활용해 상수형의 고장을 산출했다.

수립된 시뮬레이션 모형에 설비의 고장 및 보전시간에 관한 확률분포 모수와 최근의 운전시나리오, 예방보수주기를 입력하여 실제 자료와의 비교 분석을 통해 유효성을 검증했다. 그리고 차후 T-LNG인수기지가 가동된 후에 예상되는 운전요구대수의 시나리오를 가정하여 예방정비주기별로 실험했다. 분석 결과로서 예방정비주기를 다르게 적용할 때, 동절기 불가용도(Unavailability)를 보였고 현재의 정비주기는 연장 가능함을 보였다. 또한 정비주기가 연장이 됐을 때, 예방정비회수의 감소에 의한 고가의 고압펌프 부품 비용을 절감할 수 있음을 보였다.

### 2. 분석 대상 설비에 대한 이해

#### LNG고압펌프 구성 및 운영

LNG고압펌프는 대형 다단형(9단) 원심 펌프로써 LNG저장탱크의 내부에 있는 1차 송압 펌프로부터 10kg/cm<sup>2</sup>G의 송출된 LNG를 2차로 약80kg/cm<sup>2</sup>G의 고압으로 송압하는 펌프이

한국과학기술원(KAIST) 2002년 5월 3일~4일

다. 현재 P-LNG인수지에는 2종류의 외국 제작사가 설계한 LNG고압펌프를 구비하고 있다. 펌프가 설치되는 Pot는 20개이며 이 중에 6개의 Pot에는 C사에서 제작한 펌프가 설치되며 1대의 Spare 펌프를 합하여 총 7대이다. 그리고 나머지 14개의 Pot에는 E사에서 제작된 펌프가 설치되며 2대의 Spare펌프를 합하여 총 16대로 이루어져 있다. 각 토출용량은 C사펌프가 약 80Ton/hr이고 E사 펌프가 110Ton/hr이다.

천연가스 수요특성상 시간별로 운전요구 기동대수는 다르다. 절기상으로는 동절기에 높은 평균운전대수를 유지하며 하절기에 가장 적다. 기동대수의 결정은 전국 주배관망의 압력상태 등을 파악하고 관리하는 중앙 통제소로부터 지시를 받아 이루어진다. 운전요구 기동대수가 결정되면 운전 펌프가 결정되는데, 전력부스와 운전시간을 고려하여 결정된다. 여름철에는 LNG토출량이 적어 재액화 설비 운전에 의한 펌프의 인입 LNG온도가 높아지게 되는데 이때 C사 펌프는 공동화(Cavitation) 현상에 의해 고장이 발생할 수 있는 설계 특성이 있어 운전하지 않는다. 즉 이때는 E사의 펌프만 운전하게 된다.

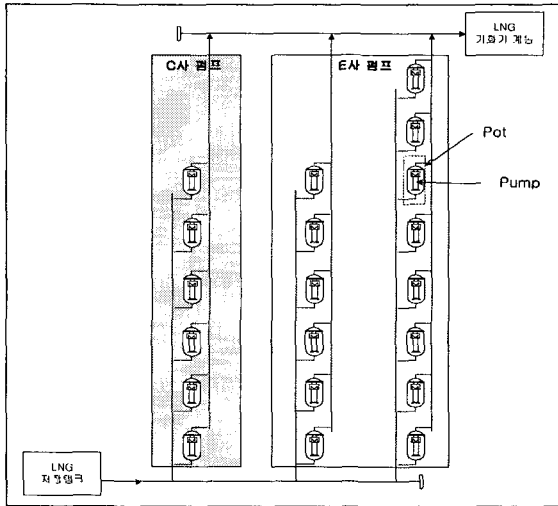


그림1. LNG고압펌프 계통 흐름도 요약

LNG고압펌프에 대한 정비

LNG고압펌프에 대한 정비업무는 크게 3가지로 예방(계획)정비, 고장정비, 상시 점검으로 이루어진다. 예방정비는 약 운전시간 8,000시간정도에 이루어진다. 하지만 동절기(11월~3월)에는 가스 수요량이 많기 때문에 가용도를 고려하여 운전시간이 예방정비시점에 도달하더라도 정비를 수행하지 않는다. 즉 4월에서 10월 사이에만 계획정비가 이루어진다. 그리고 7월에서 10월사이에 운전시간이 어느 정도 8,000시간에 가까운 펌프는 미리 예방정비를 수행한다. 펌프가 예방정비를 받기 위해 Pot에서 분리되면 spare펌프로 교체된다. 만일

spare펌프가 없으면 8,000시간이 넘어도 계속 운전되며 다음에 spare펌프가 생기면 정비가 이루어진다. 또한 수리할 때는 한번에 2개정도의 펌프를 동시에 정비할 수 있다. 고장정비는 펌프의 운전중 고장이 발생하여 정지하는 경우라던가 또는 과도한 진동 및 이음 발생에 더 이상 펌프를 운영하기 곤란할 때 수행된다. 고장정비때는 바로 spare펌프로 교체되고 펌프를 수리하게 된다. 수리를 위해 LNG펌프를 Pot에서 분리할 때는 Pot를 워밍(Warming)하는 시간을 포함하여 약 2일 정도 소요되며 Pot에 펌프를 설치할 때는 쿨링(Cooling)시간과 시운전 시간을 포함하여 약 1일이 소요된다. 즉 펌프를 1대 수리 할 때는 약 3일 동안 20대중 1대의 펌프를 가동하지 못하는 것과 같다. 따라서 안정성을 위해 펌프를 한번 정비할 때는 예방과 고장정비에 관계없이 모든 고장 부품 및 핵심 부품을 다 교체한다. 즉 완전 수리모형(Perfect repair model)으로 정비 후의 고장을 추이는 항상 같다고 가정할 수 있다. 상시점검은 거의 매일 펌프를 점검하는 정비로써 소음은 청각으로 진동은 휴대용 진동계를 가지고 다니며 행한다. 이것은 결국 펌프의 고장 및 정비를 판단하기 위한 예비 진단 단계로 볼 수 있다.

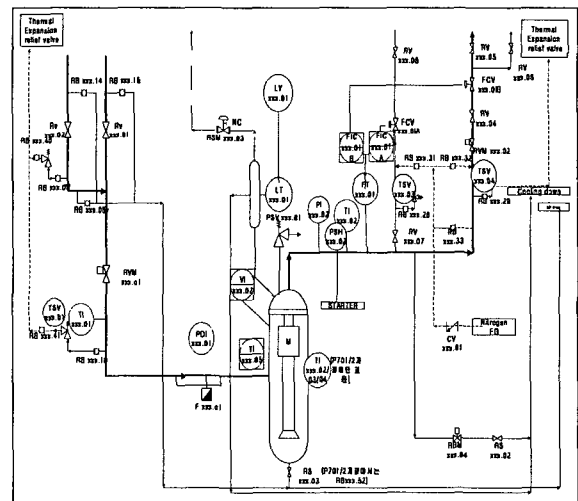


그림2. LNG고압펌프 단순 P&ID

LNG고압펌프 부대설비

LNG고압펌프가 설치된 Pot에는 여러 가지 펌프 부대설비들이 있다. 예를 들면 각종 밸브류, 계기류, 필터, 스위치 등을 말한다. 이 설비들에 대한 보수는 직접 현장에서 분해 정비된다. 현장 정비가 이루어질 때는 해당되는 Pot의 펌프는 가동할 수 없다. 따라서 동절기와 같은 가스수요가 많은 시점에서는 대부분의 부대설비들에 대해서는 잘 보수가 이루어지지 않는다. 다만 펌프의 가동율이 낮을 때는, 즉 여러 펌프들이 운전대기하고 있어 현장정비가 가능하다.

LNG고압펌프 고장을 분석

펌프 고장 데이터는 중도절단(Censored) 데이터이다. 예방보수로 인해 운전시간 약 8,000시간 근처에서 고장나지 않은 채 수리된 것과 고장나서 수리된 것이 혼합되어 있기 때문이다. 따라서 본 연구시점까지 관측 중단된 펌프의 운전시간과 총합하여 중도 절단된 점이 8,000시간 쪽으로 편향된 다중중도절단(Multiple Censored) 데이터이다.

과거 약 5년간의 보수 이력 자료를 바탕으로 각 제작사별로 펌프 고장율을 분석했다. 현장 보수 담당자의 견해와 여러 문헌을 참고했을 때, 펌프의 고장율은 일정(상수)형으로 가정할 수 없다. 만일 상수형이라면 예방보수 자체가 큰 의미가 없다. 현장 담당자는 경험상 분해 정비후 초기에 고장율이 높다가 낮아지며 운전시간이 지나면 점차 고장율이 높아진다고 언급한다. 또한 여러 산업체에서 보고한 자료에 의하면 대형 회전기기들은 정기적인 분해정비 직후에 고장율이 높아지는 경향을 보이고 있다[3,7,8]. 따라서 현장 담당자의 의견은 타당성 있으며 총합적으로 LNG고압펌프는 육조 유형의 고장율이라 가정할 수 있다. 이런 가정속에서 본 연구에서는 기기 이력을 바탕으로 펌프의 모든 부품에 대한 고장율을 도출하고자 했다. 그러나 보수 이력서에 기술된 자료와 고장 메커니즘의 특성, 즉 핵심적인 고장원인이 된 부품을 확인 할 수 없는 한계로 인해 각 부품별로 고장율 분석은 불가능했다. 하지만 운전원의 면담과 자료 검토를 통해 표1과 같이 고장모드를 3가지로 분류할 수 있었다.

표1. 고장모드 설명

고장 모드	설 명
1	운전시간의 증가에 따른 마모 원인 등에 의해 발생하는 고장
2	보수시 완벽한 시스템 복원이 이루어지지 못해서 발생하는 고장이나 부품의 하자과 같은 시스템 이상에 의해 발생하는 고장
3	이 물질 유입과 같은 외부사건이나 전기 설비의 문제 그리고 특별한 원인이 없으나 정지사건을 유발하는 운전시간과는 무관한 고장

여기서 각 고장모드로 인한 고장율을 독립적이라고 가정하면 펌프는 3개의 고장 부품을 갖는 신뢰도 병렬 체계로 재 정의할 수 있다. 그러면 운전시간  $t$ 에서의 펌프의 총 고장율 함수를  $\lambda_{total}(t)$ 라 하면 이것은 하위 3개 고장

모드별 고장율 함수의 합의 형태로 식1과 같이 표현될 수 있다.

$$\lambda(t)_{total} = \lambda(t)_{고장모드1} + \lambda(t)_{고장모드2} + \lambda(t)_{고장모드3} \quad (1)$$

펌프 고장 데이터를 고장모드별로 분석할 때, 다음과 같은 데이터 조정을 한 후 수행했다. 즉 하나의 고장모드에서 발생한 고장시간 데이터는 다른 고장모드측면에서는 중도절단된 시간으로 간주된다. 예를 들어 만일 운전시간 3,000시간에서 고장모드1에 의해 고장난 것으로 판단되는 데이터는 고장모드2의 분석에서는 3,000시간에 중도절단된 시간 데이터가 된다. 고장모드별로 데이터를 조정하여 Minitab의 신뢰도분석(Parametric distribution analysis-Right censoring)모듈을 이용하여 각 고장모드별로 분석했다. 고장모드1에 대한 분석에서 여러 고장확률분포에 적합시켰는데 적합도 검정 통계량인 Adjusted Anderson - Darling값을 볼 때 와이블분포와 정규분포가 적합도가 좋다. 그러나 와이블 고장확률분포인 경우 99%의 누적고장확률에서 수명이 100,000시간으로 도출됐다. 이것은 현장에서 현실성이 없다고 판단했으며 따라서 누적고장확률이 약 20,000시간인 정규분포를 선택했다. 고장모드2에 의한 고장확률분포는 와이블, 고장모드3은 지수분포가 적합했다. 여기서 각 고장모드별로 C사 및 E사 펌프의 고장확률모수의 동질성에 대한 검정에서 통계적인 유의한 차이가 없었다( $p$ -value>0.5). 따라서 각 고장모드에서 제작사별 데이터를 합하여 적합한 고장확률분포 모수를 표2과 같이 구했다.

표2. 펌프의 고장모드별 고장확률밀도함수

고장모드	적합고장 확률분포	확률 모수
1	정규분포	평균, 표준편차
		15394, 6494
2	와이블분포	형상모수, 척도모수
		0.4395, 225897
3	지수분포	평균
		64240

표2에서의 각 확률분포별 모수를 이용해 식 2처럼 펌프의 총 고장율 함수를 표기할 수 있으며 이 때의 고장율 추이는 그림3과 같다.

$$\lambda(t)_{total} = \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot 6494}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-15394}{6494}\right)^2\right]}{1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot 6494}} \int_0^t \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-15394}{6494}\right)^2\right] dt} + \frac{0.4395}{225897} \left(\frac{t}{225897}\right)^{0.4395 - 1} + \frac{1}{64240} \quad (2)$$

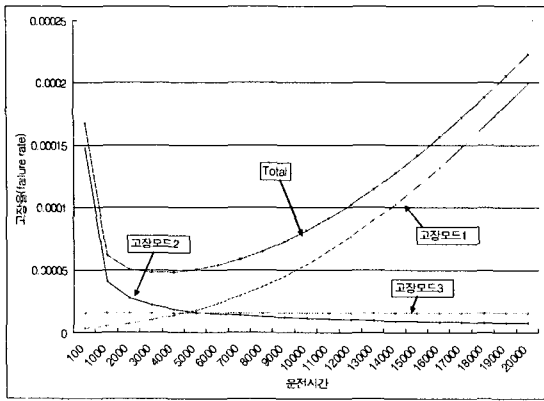


그림3. LNG고압펌프의 고장을 추이

**LNG고압펌프 보전율 분석**

예방정비 및 고장정비시 보전시간 자료를 수집하여 시뮬레이션에 입력할 펌프 보전시간의 확률분포를 구하였다. 보전시간의 단위는 hour이며 고장정지 또는 Pot에서 펌프를 분리한 날부터 수리 완료한 날까지의 시간을 말한다. C사 및 E사의 모든 펌프의 보전시간 확률분포는 정규분포로 볼 수 없었다. 따라서 다른 확률분포를 적합하였는데, (Adj) Anderson-Darling값을 고려할 때 대수정규분포가 가장 적합하였다. C사의 펌프를 예방정비 및 고장정비로 구분하여 보전시간 확률밀도분포의 차이가 있는지를 비모수 통계기법인 Mann-Whitney U와 Kolmogorov-Smirnov을 가지고 검정하였으며 유의한 차이가 없었다 ( $p\text{-value}>0.1$ ). E사의 펌프도 예방정비와 고장정비에 있어 보전시간 확률분포의 유의한 차이가 없다( $p\text{-value}>0.1$ ).

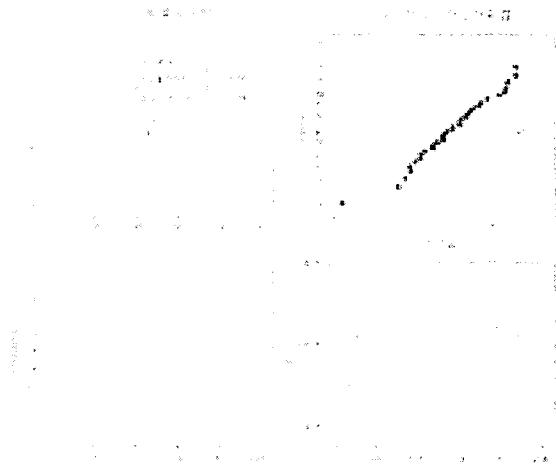


그림4. LNG고압펌프 보전성 척도

C사 펌프 보수시간과 E사 펌프 보전시간에 대한 확률분포차이를 검정하였는데 통계적인 유의한 차이가 없다( $p\text{-value}>0.2$ ). 따라서 펌프 종류에 따라 보수시간의 확률분포 차이는 없다고 보이며 이 때 2가지 데이터를 통합하

여 분석하였을 경우 대수정규분포의 모수와 보전성 척도는 그림4와 같다.

**LNG고압펌프 부대설비 신뢰도 분석**

본 연구에서는 펌프 계통의 가용도를 정량화하기 위해 필요한 과거 5년간의 부대설비에 대한 기기 수리 자료를 설비별로 분류 정리하고 이 중에서 펌프 작동의 정지를 유발하는 부대설비만을 검출하여 상수형의 고장율과 보전율을 도출했다. 또한 기동회수 자료가 필요하여 제어반 log sheet를 조사해 기동회수를 모두 구했다. 부대설비에 의한 펌프 작동정지의 유형은 기동실패와 운전정지로 나누어진다. 기동실패의 고장율은 작동요구당 고장율이다. 기동실패에 관여하는 부대설비는 계전설비와 펌프 냉각 밸브로 확인됐으며 통합하여 평균 307회 기동할 때마다 1회의 기동실패가 생기고 이때 보수시간의 분포는 평균 8시간의 지수분포를 갖는 것으로 분석됐다. 운전정지 고장율은 운전시간당 고장율이며 관련된 기기는 계전, 필터, 게이트밸브, 온도 스위치이다. 이 4개의 부품의 고장 사건을 통합하여 분석하면 평균고장시간(MTBF)은 평균운전시간 16,121시간이며 이 때의 평균보수시간의 분포는 평균 12시간인 지수분포이다.

**4. 시뮬레이션 모형 수립**

**모형의 논리 흐름도**

주어진 예방정비주기로 LNG고압펌프를 운영할 때, 계통의 불가용도(Unavailability)를 분석하기 위한 시뮬레이션 모델을 작성했다. 여기서 불가용도는 운전 대수가 지정될 때, 만족시키지 못하는 확률로써 불만족 대수 별로 분석된다. 이 시뮬레이션의 유형은 동적, 확률적, 이산형이다. 사용된 시뮬레이터는 ARENA이다. 펌프가 엔터티(entity)이고 이것의 흐름과 난수 발생은 ARENA에서 제공하는 모듈을, 사건 및 시간정보 등을 제어하는 주 루틴은 비주얼 베이직을 이용했다. 확률적 운전요구대수, 시스템 상태에 관련된 제약 조건을 모두 고려할 때 ARENA의 기본 모듈로는 모형을 작성하기 어렵다.

모형의 전체 흐름도는 초기화 루틴, 시간 delay, 이벤트 루틴으로 이루어진다. 초기화 루틴에서는 각 펌프의 설치후 운전시간 등에 대한 값을 엑셀 파일로부터 입력받고 출력할 통계 변수들이 초기화된다. 이벤트 루틴은 1hour마다 재 실행된다.

이벤트 루틴은 크게 3부분으로 이루어진다. 첫째는 시간 및 상태 업데이트 루틴이다. 여기서 각 Pot에서의 펌프가 1hour전에 운전상태였다면 펌프운전시간을, 대기상태라면 휴지시간을, 현장정비일 경우는 보수시간 등이 갱신된다. 또한 갱신된 운전시간에 비추어 고장수명에 도달했는가와 예방정비 여부 등을 판

한국과학기술원(KAIST) 2002년 5월 3일~4일

단하여 Pot의 상태를 재정의하며 현장정비의 경우에는 갱신된 현장보수시간을 참고하여 대기(stand-by) 상태로 정의한다. 예방정비시점에 도달한 펌프에 대해서는 월과 spare펌프의 여부, 현재 설치 또는 분리중에 있는 다른 펌프를 고려하여 Pot에서 분리할 것인지 계속 운전할 지를 결정한다. 여기서 7월~8월, 9월~10월에 예방정비주기를 각각 500시간, 1000시간 앞둔 펌프도 예방정비하는 가정이 있다.

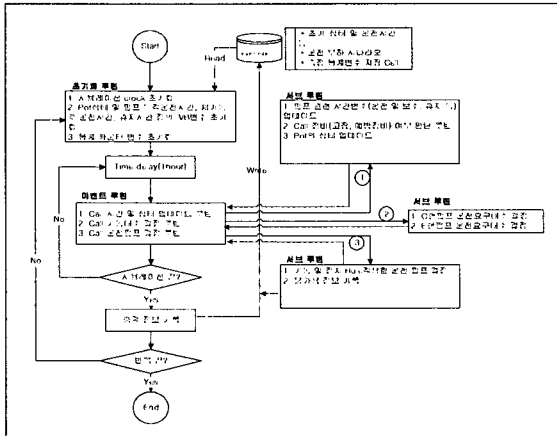


그림5. 모형의 논리흐름도 개요

이벤트 루틴의 두 번째는 운전대수결정 루틴이다. LNG고압펌프의 운전요구대수는 확률적인 수를 가진다. Log sheet를 분석한 결과 시간별 운전대수는 정규분포를 가진다. 또한 한번 요구기동대수가 지정되면 일정시간 동안 기동대수가 유지되는데 평균이 6인 지수분포로 판단됐다. 이 때 월간 운전지속시간의 확률분포에 대한 통계적인 유의한 차이는 없다. 따라서 이 루틴에서는 이전 시점에 결정된 운전

요구대수와 지속시간을 고려하여 계속 유지하거나 또는 월 평균과 표준편차를 가진 정규분포에서 새로운 난수를 생성시켜 요구기동대수를 결정하고 운전 대수 유지시간을 지수분포를 통해 결정한다. 세 번째 이벤트 루틴은 운전 펌프 결정 루틴이다. 결정된 운전대수에 대하여 어떤 펌프를 기동할 것인지 아니면 정지시킬 것인지를 결정하게 된다. 현장의 운전규정에는 정해진 Rule은 없다. 일반적으로 고려되는 것은 먼저 펌프의 전력 부스이다. LNG고압펌프는 전력 이상에 의한 모든 펌프가 정지할 수 있으므로 2개의 병렬 부스(Bus)로 연결되어 있다. 따라서 운전원은 먼저 각 부스에 연결된 펌프수를 고려해서 운전 펌프를 할당하게 된다. 그리고 운전펌프 수를 늘려야 하는 경우에는 각 부스에 연결된 운전 펌프 수가 적은 것 중에서 가장 휴지시간이 긴 것을 선택하고 운전펌프 수를 줄여야 하는 경우에는 많은 부스에 연결된 펌프들중에서 재기동 후 운전시간이 가장 긴 펌프를 정지시키는 것으로 확인됐다. 이것은 Log sheet에 출력된 펌프운전 추이를 수량화해서 판별분석을 통해 도출했다.

이벤트 루틴이 설정된 시뮬레이션 시간에 도달하면 엑셀 파일에 측정된 값이 저장되고 반복수 만큼 다시 초기화 루틴부터 다시 진행된다.

모형 유효성 검증

작성된 시뮬레이션 모형의 유효성 검증을 위해 특정기간에 대한 실제 보수 자료와 시뮬레이션을 통해 나온 결과를 비교하였다. 검증을 하기 위한 정비실적이 도출된 기간은 15개월이며 이 때의 운전대수의 시나리오는 표3과 같다. 시나리오는 월 평균운전대수, C사 펌프

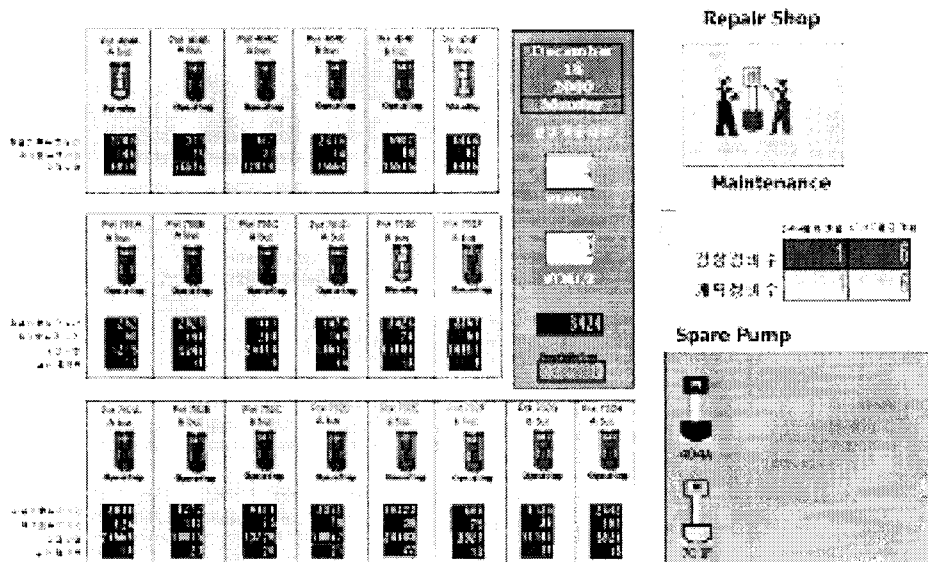


그림6. 작성된 모형의 애니메이션 화면

한국과학기술원(KAIST) 2002년 5월 3일~4일

운전 비율, 그리고 운전대수의 표준편차이다. C사 펌프의 운전비율은 계절별 특성에 의해 C사 펌프 평균운전대수가 다른 것을 고려하기 위한 것이다. 검증 대상기간의 C사 펌프와 E사 펌프의 실제 평균 예방정비주기는 8,500시간과 10,500시간으로 모형에 입력되었다. 실험의 회수는 60회이며 운전 시간 및 상태에 대한 초기화 자료는 2000년 3월 31일 마지막 시간 자료가 된다.

표3. 유효성 검증을 위한 운전대수 시나리오

년 월	항목 월평균 운전대수	표준편차	C사 펌프 운전비율
2000년 4월	10.2	1.32	0.20
2000년 5월	7.4	1.28	0.04
2000년 6월	6.9	1.81	0.03
2000년 7월	6.4	2.12	0.00
2000년 8월	6.3	1.88	0.00
2000년 9월	5.6	1.59	0.00
2000년 10월	8.3	1.31	0.03
2000년 11월	10.9	2.22	0.14
2000년 12월	15.0	1.73	0.24
2001년 1월	16.4	2.02	0.28
2001년 2월	15.0	2.02	0.28
2001년 3월	14.0	2.02	0.24
2001년 4월	9.8	1.62	0.13
2001년 5월	8.1	1.62	0.09
2001년 6월	7.2	1.62	0.06

유효성 검증을 위한 실험 결과를 항목별로 실제값과 비교하면 표4와 같다. 비교된 항목은 펌프 종류 및 정비유형별 정비개수, 펌프 종류별 평균운전시간, 펌프 종류별 수리 후 평균대기시간이다. 그리고 동절기 진입시 각 펌프가 갖는 운전시간의 분포에 대한 비교 분석이다. 평균을 보았을 때, 모든 항목에서 유사하며 빈도 분석을 통해서도 실제값이 가장 많은 빈도를 보였다. 단 C사 펌프의 평균고장정비회수에 있어 실제로는 이 기간동안 1번도 없었으나 실험으로는 평균 1회정도가 발생한 것으로 나타났다. 이것은 실험기간의 C사 펌프 신뢰도가 입력된 신뢰도를 도출한 기간의 신뢰도보다 좀 더 향상됐음을 추측할 수 있다. 또한 동절기 진입시 20대의 펌프가 갖는 운전시간의 분포 차이에 대하여 비모수 통계분석인 Mann-Whitney U 검정을 통해 보았는 데, 회수별 모든 실험값이 실제값과 통계적으로 유의한 차이가 없었으며 C사 펌프는 평균 유사율 80%, E사 펌프는 50%로 도출됐다.

표4. 유효성 검증 실험 결과와 실제값 비교

항목 유형	비교	예방 정비 (회)	고장 정비 (회)	평균 운전 시간	수리후 평균 대기 시간
C사 펌프	실제값	2	0	2752	1080
	실험값(평균)	2.0	0.9	2662	1146
E사 펌프	실제값	9	6	6548	1001
	실험값(평균)	8.7	6.0	6541	992

검증 실험을 통해 도출한 시스템 성능 척도 항목별 값은 표5와 같다. 여기서  $Ua(i)$ 은 어떤 시점(단위:시간)의 요구하는 운전대수에서  $i$ 대까지 가동시키지 못할 확률로 정의된다. 이것은  $(i-1)$ 대까지 불가용할 확률에  $(i-1)$ 대까지 불가용 발생시 1대 더 추가 가용하지 못할 조건부확률  $P(1 | i-1)$ 을 곱한 값이다. 이것은 수식으로는

$$Ua(i) = Ua(i-1) \times P(1 | i-1)$$

이고  $i$ 는 1부터이므로

$$Ua(i) = Ua(0) \times P(1 | 0) \cdots P(1 | i-1)$$

이고 다시  $Ua(0)=1$ 로 정의하면

$$Ua(i) = P(1 | 0) \cdots P(1 | i-1)$$

가 된다.

그리고  $Ua(\text{total})$ 은 각  $i$ 의  $Ua(i)$ 값의 합이다. 표5에서  $i$ 가 2까지이므로  $Ua(\text{total})$ 의 의미는 1대까지 불가용 사건이 일어나거나 또는 2대까지 불가용 사건이 일어날 확률이다. 그리고 년발생율( $i$ )는 근사적으로 년당  $i$ 대의 불가용할 사건이 한번이라도 일어날 확률을 말한다.

검증 실험 결과로 이 기간의 예방보수주기로 인해 년 발생률은 약 0.5이며 년 1대 또는 2대가 불가용할 사건이 발생할 시간은 평균 6.3시간이다. 이 결과는 현장 운전원의 경험에 의해 타당성이 있는 것으로 평가됐다.

표5. 검증 실험 기간에 대한 불가용도 척도

항목 $i$	$Ua(i)$	년 발생율( $i$ )	년 평균 발생시간( $i$ )
1	0.00166	0.47	5.976
2	0.000074	0.04	0.2664
total	0.00174	0.51	6.264

### 5. 실험 사례

작성된 시뮬레이션 모형에 운전대수 시나리오를 선정하여 예방정비주기별로 LNG고압펌프 계통의 불가용도 분석 실험을 수행하였다. 운전대수 시나리오 추세에 크게 영향을 끼치는 것은 전년대비 생산량 증가율, 다른 LNG인수기지 신설이다. 현재 국내에는 운영중인 2

한국과학기술원(KAIST) 2002년 5월 3일~4일  
 개의 인수기지가 있고 2002년 9월부터 T-LNG인수기지가 들어오므로써 3개가 된다.  
 국내 T-LNG인수기지가 가동되기 시작하면 P-LNG인수기지의 LNG고압펌프의 운전 부하량도 줄게 된다. 얼마큼 감소할 것인지에 대한 예측은 정확히 언급할 수 없지만 1996년 I-LNG인수기지가 최초가동 후 P-기지의 전년 대비 부하량 감소율 10%를 기준으로 삼을 수 있다. 하지만 좀 더 보수적(안전적)인 관점에서 2002년 9월부터 2003년 3월까지 평균운전대수가 전년도와 같은 기간의 실제 평균 운전대수와 같다고 가정해본다. 그리고 2002년 3월부터 8월까지의 전년 동월대비 10% 증가할 것이라고 가정한다. 이렇게 평균운전대수가 그림6과 같을 때, 설정된 예방정비주기별로 정비수행시 2002년 동절기의 불가용도를 분석했다. 여기서 시간별 운전대수 산출시 표준편차는 동절기는 2.02, 비동절기는 1.62로서 2000년 표준편차중 동절기와 비동절기의 평균값을 적용했다.

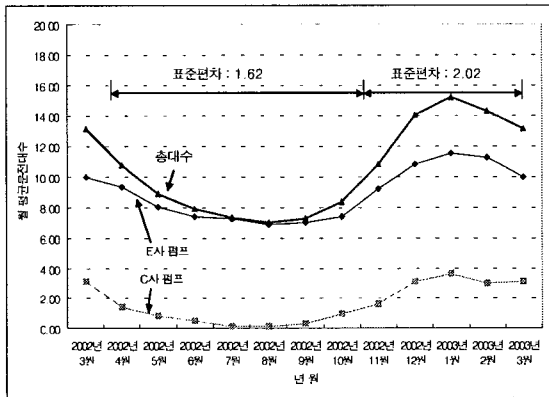


그림6. 실험을 위한 운전대수 시나리오 추이

시뮬레이션 시작점을 위한 각 펌프의 운전 시간은 2002년의 2월말 실제 자료이다. 예방정비주기를 7,000에서 1,000시간씩 증가하며 14,000시간까지 각 경우별로 50회씩 반복 실험했다.

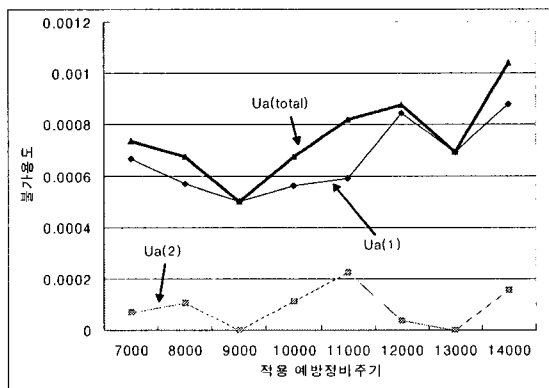


그림7. 예방정비주기 적용별 불가용도 추이

결과로서 실험 시나리오와 같은 요구운전대수 상황에서는 전체적으로 불가용도가 매우 낮다. 검증 실험의 표5에서 보여준 불가용도  $U_a(\text{total})$ 이 0.00174을 기준으로 봤을 때, 그림7에서 보는 바와 같이 예방정비주기를 14,000시간 적용해도  $U_a(\text{total}) < 0.0012$ 로써 큰 문제가 없음을 보여준다. 전체적으로는  $U_a(\text{total})$  값을 고려할 때 정비주기를 9,000시간으로 설정하는 것이 가장 불가용도가 낮음을 알 수 있으며 이 때 오히려 7,000시간 또는 8,000시간의 예방정비주기보다도 불가용도는 조금 낮음을 알 수 있다. 이것은 시스템의 자원을 고려할 때 잦은 정비는 오히려 가용성에 문제를 발생시킬 수 있다는 것을 보여준다.

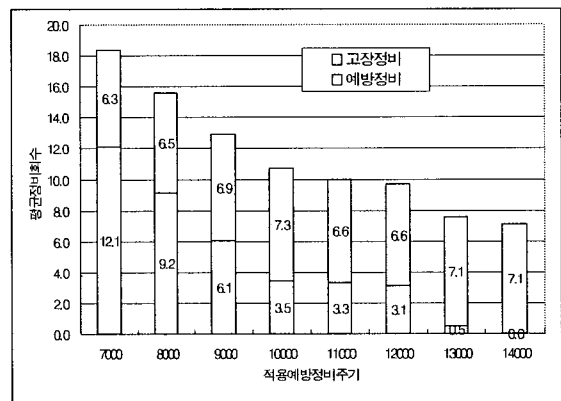


그림8. 예방정비주기 적용별 정비회수

표6. 예방정비주기 적용별 년 발생률과 연 평균부품 교체비용

적용 예방정비주기	년 발생률	년 평균 부품비용 (단위: 백만원)
7000	0.33	319
8000	0.28	271
9000	0.23	224
10000	0.30	186
11000	0.17	172
12000	0.27	168
13000	0.32	131
14000	0.26	123

예방정비주기별 정비회수를 보면 예방정비주기가 늘어나면 평균예방정비회수는 조금씩 줄어들고 있으나 평균고장정비회수는 크게 차이가 없다. 이것은 초기 고장율이 높아 예방정비후의 고장회수가 많기 때문에 큰 차이가 없는 것으로 판단된다. 이 때 그림8과 표6에서 보는 바와 같이 예방정비주기를 9,000으로 예전의 8,000시간의 설정된 예방정비주기를 변경한다면 평균 총 정비회수의 차이는 약 2.7회이

대한산업공학회/한국경영과학회 2002 춘계공동학술대회

한국과학기술원(KAIST) 2002년 5월 3일~4일

고 한번 수리시 부품교체비용이 약 1천7백만 원이므로 년 평균 4,700만원 정도를 절감할 수 있음을 보여준다.

## 6. 결론

본 연구에서는 수리적인 신뢰성 모형으로서 해석할 수 없는 육조형 고장을 추이와 대수정규분포인 보전시간확률분포, 그리고 확률적 운전대수와 여러 운전/보전 행태를 가진 계통에 대하여 시뮬레이션을 통해 불가용도를 정량화하는 연구를 수행했다. 수립된 시뮬레이션 모형에 대해서 유효성을 보였고 차후 예상되는 운전대수 시나리오를 설정하여 만일 예방정비주기를 다르게 설정할 때의 불가용도를 보였다. 실험 사례에서 실제 시작값을 입력한 각 펌프의 운전시간과 조건에서 최적예방정비 주기는 기존의 8,000시간보다 약 1,000시간 정도 연장된 9,000시간임을 보였다. 특히 유효성 검증시 도출됐던 계통 불가용도를 고려해 볼 때, 실험 사례와 같은 낮은 운전요구대수에서는 예방정비 필요성이 낮음을 보였다. 하지만 현실적 정책 여건을 고려할 때, 10,000~11,000 시간까지의 예방정비주기를 적용하여 부품 비용 절감이 기대된다.

차후로는 계속적인 시뮬레이션 모형 갱신을 수행할 예정이다. 또한 불완전 성격의 수명시간을 갖고 있는 펌프 고장 데이터에 대하여 완벽한 수명 추적에 대한 필요성을 현장에 전달할 필요가 있다고 생각한다. 그리고 이 연구와 같은 신뢰성에 대한 개념을 현장과 공유함으로써 운영 및 관리의 효율성을 증진시켜 궁극적으로 비용의 절감과 안정성을 보다 향상시킬 것이다.

## 7. 참고문헌

- [1] Abdel-Hamed. M., "Inspection and Maintenance Policies of Devices Subject to Deterioration", *Advanced Applied Reliability*, Vol.10, 1987, pp917-931
- [2] Averill M. Law, *Simulation Modelling and Analysis*, McGraw-Hill, 2000
- [3] G. Pulcini, "Modeling the failure data of a repairable equipment with bathtub type failure intensity", *Reliability Engineering&System Safety*, Vol.71 No.2 2001
- [4] Heinz P. Bloch, Fred K. Geitner, *Practical Machinery Management for Process Plants, Volume 2, 3rd Edition Machinery Failure Analysis and Troubleshooting*, Gulf Publishing Company, Houston, Texas, USA, 1997
- [5] J.M. Freeman, "Analysing equipment

failure rates", *International Journal of Quality&Reliability Management*, Vol.13, No.4, 1996

[6] W. David Kelton, *Simulation with Arena*, WCB/McGraw-Hill, 1998

[7] 기초전력공동연구소, *원자력발전소의 최적 보수 정책 결정에 관한 연구*, 한국원자력연구소, 1997

[8] 전형식, 글렌화이트, "예방(예지)정비의 필요성", *한국소음공학회지*, Vol.4, No.4, 1994, pp459-467

[9] 최종성, *SPSS Ver 10을 이용한 현대통계 분석*, 북두출판사, 2000