'99 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

보수비용에 기반한 발전소 단위의 정기점검주기 최적화
Optimization of STI based on the Maintenance Cost at the Plant Level

양준언, 김길유
한국 원자력 연구소
대전시 유성구 덕진동 150

요약

근래에 들어 외국의 원자력 산업계에서는 보수 규칙 (Maintenance Rule)이나 신뢰도 기반 보수 (Reliability Centered Maintenance, RCM)과 같이 위해도 기반 이용 프로그램이 많이 수행되고 있다. 이와 같은 프로그램들의 목표는 기기 신뢰도의 향상을 이루는 동시에 소요 경비의 최소화를 이루어 원자력 발전소의 경쟁력을 확보하고자 하는 것이다. 이와 같은 프로그램의 일환으로 기술지침서 (Tech. Spec.)에 규정된 비상 디젤발전기와 같은 특정 계통의 정기점검주기를 최적화하고자 하는 많은 방법이 제시 되었다. 그러나, 계통의 정기점검주기는 계통 단위가 아니라 발전소 단위에서 이루어 져야 한다. 이 것은 계통 단위에서 이루어진 계통들의 정기점검주기 최적화가 전체 발전소의 관점에서는 전체 최적화 (Global Optimum)가 이루어 진 것이 아닐 수도 있기 때문이다. 본 논문의 목적은 현재 발전소의 안전도를 현재 수준으로 유지하면서도 주요 안전 계통들의 정기점검주기를 전체 발전소 관점에서 최적화하고자 하는 것이다.

ABSTRACT

Recently, risk informed regulations and/or applications have become worldwide issues of the nuclear industry. In this paper, we will optimize the Surveillance Test Interval (STI) of safety systems at the plant level without sacrificing the safety of Nuclear Power Plants (NPPs). The STIs of systems are to be optimized not at the system level but at the plant level since the optimized STIs of systems at the system level do not guarantee the global optimum maintenance cost and/or safety at the plant level. To optimize the STIs of the systems at the plant level, we developed the simplified Probabilistic Safety Assessment (PSA) model of a typical Pressurized Water Reactor (PWR) that includes most of the important safety systems. We applied a genetic algorithm to the optimization of the STIs of safety systems at the plant level. In addition, to overcome the limitations of Fault Tree (FT) model, the analytical unavailability model is used instead of the conventional FT model. The analytical unavailability model enables us to know the unavailability of systems and the effect of maintenance strategy exactly.

I. 개요

근래에 들어 외국의 원자력 산업계에서는 보수 규칙 (Maintenance Rule)이나 신뢰도 기반 보수 (Reliability Centered Maintenance, RCM)과 같이 위해도 기반 이용 프로그램이 많이 수행되고 있다. 있다.

이와 같은 프로그램들의 목표는 원자력 발전소의 신뢰도의 향상을 이루는 동시에 소요 경비의 최소화를 이룸으로써 원자력 발전소의 경쟁력을 확보하고자 하는 것이다 [1-9].

이와 같은 프로그램의 일환으로 기술지침서 (Tech. Spec.)에 규정된 비상 디젤발전기와 같은 특정 계통의 정기 점검의 주기를 최적화하고자 하는 많은 방법이 제시 되었다. 그러나, 계통의 정기점검주기는 계통 단위가 아니라 발전소 단위에서 이루어 져야 한다. 이 것은 계통 단위에서 이루어진 계통들의 정기점검주기 최적화가 전체 발전소의 관점에서는 전체 최적화 (Global Optimum)가 이루어 진 것이 아닐 수도 있기 때문이다. 본 논문의 목적은 현재 발전소의 안전도를 현재 수준으로 유지하면서도 주요 안전 계통들의 정기점검주기를 전체 발전소 관점에서 최적화하는 것이다.

주요 안전 계통들의 정기점검주기를 전체 발전소 관점에서 최적화하기 위하여서는 발전소의 신뢰도 모델이 필요하다. 현재로서는 확률론적 안전성 분석 (Probabilistic Safety Assessment, PSA) 모델이 대표적인 발전소의 신뢰도 모델이므로 본 논문에서는 가압경수로의 주요 안전계통을 포함하는 간략한 PSA 모델을 구축하였다.

현재 주요 안전 계통들의 정기점검주기를 전체 발전소 관점에서 최적화하기 위하여서는 두 가지 문제를 해결하여야 한다. 첫 번째 문제점은 PSA 모델에 기반한 정기점검주기의 최적화는 비선형의 다목적-다요소 최적화 문제라는 점이다. 기존의 최적화 방법은 이와 같은 문제에 대한 전체 최적 점을 보장하지 못하는 한계가 있다. 두 번째 문제점은 PSA에서 사용되는 고장 수목 (Fault Tree, FT)의 한계에서 기인되는 것이다.

일반적으로 사용되는 고장 수목 방법은 실제 세계를 모사하기에는 근본적으로 다음과 같은 몇 가지 제한 점을 갖고 있다. 발전소 주요 안전계통의 이용불능도를 계산함에 있어서는 주요 안전 기기들이 대기 계통들이기 때문에 잠재 고장 (Dormant Failure)의 평가가 중요한 요인이다. 잠재고장을 유발하는 원인은 두 가지로 구분할 수 있다. 첫째는 검사 주기 사이에 발생하는 임의 고장 (Random Failure)이며, 둘째는 계통의 기동 요구 시에 발생하는 충격에 의한 요구 시 고장 (Demand Failure)이다. 보통 대부분의 PSA에서 사용하는 고장 수목에서는 이들 사이의 구분이 이루어 지지 않고 모든 잠재 고장이 임의 고장이거나 혹은 요구 시 고장 중의 하나 원인만으로 발생한다고 가정하고 고장 수목을 구성한다. 그러나, 계통의 이용불능도에 기반하여 정기점검 주기를 최적화하기 위하여서는 이들 고장 사이의 구분을 명확히 할 필요가 있다. 이는 임의 고장에 의한 기기의 실패 확률만이 정기점검주기에 의하여 영향을 받기 때문이다. 또한, 고장 수목 모델은 기본적으로 기기의 평균 이용불능도에 기반한 정적 모델 (Static Model)이다. 이와 같은 고장 수목 모델은 대기 중 고장에 의한 계통의 이용불능도를 경우에 따라 과대 혹은 과소 평가하는 경우가 있으며, 또한 연속 시험 (Sequential Test)이나 교차 시험 (Staggered Test)보수 정책 등 보수 정책의 영향을 보여 주지 못한다 [8-9].

위에서 언급한 첫번째 문제를 풀기 위하여 본 논문에서는 계통의 정기점검주기 최적화에 유전자 기법 (Genetic Algorithm)을 이용하였다. 유전자 기법은 현실 세계에서 일어나는 생물계의 진화 방식을 흉내내는 기법으로 다목적-다요소 최적화 문제 등 대부분의 최적화 문제해결에 강력한 성능을 발휘하고

있다 [4, 10-13]. 유전자 기법은 관련 매개변수를 적절히 선택하는 경우 항상 전체 최적 점을 보장하는 것으로 알려져 있다.

또한, 본 논문에서는 앞에서 언급한 일반적인 고장 수목 방법의 문제점을 해결하기 위하여 해석적 이용불능도 모델을 사용하였다. 해석적 이용불능도 모델은 임의 고장과 요구 시 고장의 구분 및 여러 보수 정책의 영향을 정확히 평가할 수 있다는 장점이 있다. 본 논문에서는 해석적 모델의 영향을 평가하기 위하여 두 가지 고장 수목을 구성하였다. 첫번째는 기기의 평균 이용불능도를 사용하는 고전적 고장 수목이며 두 번째는 해석적 이용불능도 모델에 기반한 고장 수목이다. 두 가지 고장 수목 모두에서 대기 중 고장을 임의 고장과 요구 시 고장으로 구분하여 고장 수목을 구성하였다

II. PSA 모델의 구축

앞에서 언급한 바와 같이 발전소 단위로 이루어 지는 계통별 정기점검주기의 최적화는 PSA 모델을 기반으로 이루어진다. 따라서, 본 논문에서는 가압경수로에 대한 간략화 된 PSA 모델을 구축하였다. 이 PSA 모델에서는 노심 손상 빈도 (Core Damage Frequency, CDF)에 큰 영향을 미치는 다음의 4가지 주요 초기 사건에 대한 사건 수목을 구축하였다:

(1) 냉각수 상실 사고 군 (Loss of Coolant Accident Group)
- ✓ 대형-중형 냉각재 상실 사고: 이들 두 초기 사건의 빈도는 6.6E-6/년으로 가정하였다.
- ✓ 소형 냉각재 상실 사고: 이 초기 사건의 빈도는 2.43E-5/년으로 가정하였다.

(2) 과도 사건 군 (Transient Group)
- ✓ 주급수 상실 사고: 이 초기 사건의 빈도는 2.43E-5/년으로 가정하였다.
- ✓ 외부전원 상실사고: 이 초기 사건의 빈도는 2.43E-5/년으로 가정하였다.

본 논문에서 사용된 PSA 모델에는 다음 11개의 주요 안전 계통이 포함 되어있다.

(1) 발전소 정지 계통 (Reactor Trip System, RT),
(2) 배수 계통 (Bleed System, BD),
(3) 안전 주입 탱크 (Safety Injection Tank, SIT),
(4) 고압 안전주입 계통 (High Pressure Safety Injection System, HPSI),
(5) 저압 안전주입 계통 (Low Pressure Safety Injection System, LPSI),
(6) 보조 급수 계통 (Auxiliary Feedwater System, AFWS),
(7) 증기 제거 계통 (Steam Removal System, SR),
(8) 전기 계통 (Electric Power Supply System, EPS),
(9) 비상 발전기 계통 (Diesel Generator, DG),
(10) 냉각수 계통 (Service Water System, SWS), 및
(11) 기기 공기 계통 (Instrument Air System, IA),

본 논문의 목적이 계통의 정기점검주기의 최적화임으로 상기 계통의 고장 수목은 계열별 고장을 고려하여 간략하게 작성 하였다. 위에서 작성된 사건 수목 및 고장 수목을 이용하여 발전소 노심 손상 상태에 대한 최소 단절 집합 (Minimal Cut Set)을 구하였다. 이들 최소 단절 집합은 유전자 모델의 기본 토대가 된다.

III. 해석적 이용 불능도 모델

위에서 구축한 PSA 모델에 포함된 계통들은 그 검사 방법의 특성에 따라 다음의 3 그룹으로 분리할 수 있다: 첫번째는 출력 운전 중에 정기 점검이 수행되는 대기 중 계통이며, 둘째 그룹은 연차 정기 보수 중 정기 점검이 수행되는 계통이다. 마지막 계통은 출력 운전 중 계속 가동되는 계통으로 일반적으로 예비 계열을 갖고 있다. 구축된 PSA 모델에 포함된 계통 중 냉각수 계통과 기기 공기 계통은 출력 운전 중 계속 가동되는 계통이다. 이외의 나머지 계통들은 대기 중 계통들로 이 중 안전 주입 탱크와 배수계통은 연차 정기 보수 중 정기 점검이 수행되는 계통이며, 그 외의 모든 계통들은 출력 운전 중 정기 점검이 수행되는 계통들이다. 그러나, 발전소 정지 계통과 전기 계통의 정기점검주기는 상수로 가정을 하였다. 이는 발전소 정지 계통이 주로 전기적 제어 계통으로 구성되어 있으며 이와 같은 계통의 이용불능도에 정기점검주기가 미치는 영향을 파악하는 것이 곤란하기 때문이다. 또한, 전기 계통의 특정 정기점검주기라는 것을 명확히 결정하기 어렵기 때문이다.

대기 중 계통에 대한 해석적 이용불능도 모델은 참고 문헌 [9]에 도출 되어 있다. 해석적 이용 불능도식은 다음과 같은 성공 기준을 갖는 계통들에 대하여 도출되었다. 즉, 계통의 계열들이 1/2, 1/3 및 2/3의 성공 기준을 갖는 경우에 대하여 해석적 이용불능도식이 도출되었다. 구축된 간략한 PSA 모델에 포함된 모든 계통들은 앞의 3경우 중 하나의 성공 기준을 갖는다.

계통의 보수 정책은 다음의 두 가지 그룹으로 구분될 수 있다. 하나는 순차 보수 정책 (Sequential Maintenance Strategy)이며 다른 하나는 교차 보수 정책 (Staggered Maintenance Strategy)이다. 우리는 참조 문헌 [9]의 공식을 사용함에 있어 다음과 같이 가정하였다.

(1) 출력 운전 중 검사가 수행되는 모든 계통은 교차 보수 정책을 사용한다고 가정하였다.
(2) 연차 정기 보수 중 검사가 수행되는 모든 계통은 순차 보수 정책을 사용한다고 가정하였다
(3) 일반적으로 검사 주기 (τ)는 보수 기간 (τ_r)보다 매우 크다고 가정하였다.

위의 가정 들에 근거하여 다음과 같은 해석적 이용 불능도식이 대기 중 계통에 대하여 도출되었다. 즉, 어떤 계통의 평균 이용불능도, q_{av}, 는 다음과 같이 정의 된다.

$$q_{av} = q_R + q_C + q_D + q_M$$

여기서, q_R 는 임의 독립 고장에 의한 이용 불능도, q_C 는 충격에 따르는 종속 고장에 의한 이용 불능도 q_D 는 요구시 고장에 의한 이용 불능도이며, q_M 은 보수에 의한 이용불능도이다.
예를 들어 교차 보수 정책에 의해 검사가 수행되는 대기 중 계통이 1/2의 성공 기준을 갖는 경우의 해석적 이용불능도 식은 다음과 같다.

$$q_R = \frac{5}{24}(\boldsymbol{l}_R \boldsymbol{t})^2 + \boldsymbol{l}_R \boldsymbol{t}_r$$

$$q_C = \frac{3}{8}\boldsymbol{l}_C \boldsymbol{t} + \boldsymbol{l}_C \boldsymbol{t}_r$$

$$q_D = Q_0[Q_1 + \boldsymbol{g}_0 + (\boldsymbol{l}_R + \boldsymbol{l}_C)\boldsymbol{t} + \frac{2\boldsymbol{t}_r}{\boldsymbol{t}}]$$

$$q_M = \boldsymbol{g}_0[\boldsymbol{g}_0 + Q_0 + (\boldsymbol{l}_R + \boldsymbol{l}_C)\boldsymbol{t} + \frac{2\boldsymbol{t}_r}{\boldsymbol{t}}]$$

위식에서 Q_i 는 i번째 기기나 계열의 요구 시 고장에 의한 실패 확률,

γ_i 는 한 보수 기간 중 i-번째 발생한 보수 오류에 의한 실패 확률,

$_R$ 은 한 기기의 고장을 유발할 수 있는 충격 및

$_C$ 은 동일 시간에 전체 기기의 고장을 유발할 수 있는 충격을 나타낸다

본 논문에서는 연차 정기 보수 중 검사가 수행되는 계통들의 정기점검주기는 핵연료 재장전 주기와 같다고 보았다. 이들 계통은 순차 보수 정책에 따른다고 가정하였으므로 성공 기준이 1/2 계통의 경우 다음과 같은 해석적 이용불능도 식이 도출되었다.

$$q_R = \frac{1}{3}(\boldsymbol{l}_R \boldsymbol{t})^2 + \boldsymbol{l}_R \boldsymbol{t}_r$$

$$q_C = \frac{1}{2}\boldsymbol{l}_C \boldsymbol{t} + \boldsymbol{l}_C \boldsymbol{t}_r$$

$$q_D = Q_0[Q_1 + \boldsymbol{g}_0 + \boldsymbol{l}_R \boldsymbol{t} + \frac{2\boldsymbol{t}_r}{\boldsymbol{t}}]$$

$$q_M = \boldsymbol{g}_0[\boldsymbol{g}_1 + (1-\boldsymbol{g}_1).Q_0 + (2-\boldsymbol{g}_1)(\boldsymbol{l}_R + \boldsymbol{l}_C)\frac{\boldsymbol{t}}{2} + \frac{2\boldsymbol{t}_r}{\boldsymbol{t}}]$$

구축된 PSA 모델에 사용되는 모든 가동 중 계통은 한 개의 대기 중 계열을 갖고 있다. 따라서, 2개의 가동 중 계열과 한 개의 대기 중 계열로 구성된 계통이 2/3의 성공 기준을 갖는다고 할 때 이 계통의 이용불능도는 다음과 같이 구할 수 있다.

가동 중 계통의 이용불능도 $q_{av} = 2\ q_{av,SS} * q_{av,RR} + q_{av,RR}^2 + CCF$

여기서, $q_{av,SS}$ = 대기 중 계통의 이용 불능도,

$q_{av,RR}$ = 가동 중 계통의 가동 실패 확률.

CCF = 가동 중 계통의 공통 원인 고장 확률.

$q_{av,SS}$ 는 다음 식으로 정의된다.

$$q_{av,SS} = \frac{\boldsymbol{t}_r}{\boldsymbol{t}} + \boldsymbol{g}_0 + Q_0 + \frac{1}{2}\boldsymbol{l}\boldsymbol{t}$$

위에 나오지 않는 다른 계통들에 대한 해석적 이용 불능도 식도 유사한 과정을 통하여 도출되었다. PSA모델에 포함된 계통들의 고장률 자료가 표 1에 나와 있다.

IV. 정기 검사 주기 최적화를 위한 유전자 모델의 구축

유전자 기법은 기본적으로 자연 세계의 특성을 흉내내고자 하는 방법이다. 즉, 자연계에 있는 생물들은 그 진화과정에 있어서, 어떤 세대 (Generation)를 형성하는 개체 (Individual)들의 집합 – 개체군 (Population) 중에서 환경에 대한 적합도 (Fitness)가 큰 개체들이 높은 확률로 살아 남아 재생 (Reproduction)할 수 있게 되며, 이때 교배 (Crossover) 및 돌연변이 (Mutation)로써 다음 세대의 개체군을 형성하게 된다. 유전자 기법은 이와 같이 생물의 진화과정을 인공적으로 모델링 한 방법이다. 유전자 기법은 확률적 탐색이나 학습 그리고 최적화를 위한 한 가지 기법이라고 간주할 수 있다. 유전자 기법의 기본적인 논리 흐름도가 그림 1에 나와 있다 [9].

앞에서 언급한 바와 같이 대기 중 계통은 다음의 두 가지 종류로 나눌 수 있다. 첫번째는 출력 운전 중에 정기 점검이 수행되는 대기 중 계통이며, 둘째 그룹은 연차 정기 보수 중 정기 점검이 수행되는 계통이다. 둘째 그룹의 정기점검주기는 연차 정기 보수의 주기와 같다고 가정화였으므로 이들은 변화되지 않는다고 보았다 (본 논문에서 구축한 PSA 모델에서는 연차 정기 보수의 주기는 1년-53주로 고정되어 있다고 가정하였다). 따라서, 첫 번째 계통의 정기점검 주기 만이 최적화의 대상이 된다. 즉, 모델된 계통들 중 보조급수 계통, 증기 제거 계통, 고압 안전주입 계통, 저압 안전주입 계통, 비상 발전기 계통, 냉각수 계통 및 기기 공기 계통의 정기점검주기만이 최적화의 대상이 되며, 다른 계통의 이용불능도는 상수로 취급하였다. 본 논문에서는 정기점검주기는 2주에서 53주간에 걸쳐 있으며, 주단위로만 변경될 수 있다고 가정하였다.

본 연구에서는 유전자 기법을 이용하기 위하여 유전자 기법의 대부분 기능을 제공하는 상용도구를 이용하였다. 먼저, 개발된 사건 수목과 고장 수목으로부터 각 발전소 손상 상태에 대한 최소 단절 군을 구하였다. 고장 수목의 기본 사건, 즉, 기기의 고장 확률이 각 개체의 염색체로 모델이 된다.

유전자 기법은 기본적으로 확률론적 연산에 기반하므로 유전자 기법의 여러 변수에 대한 일종의 민감도 분석을 통하여 최적의 변수 값을 찾아냈다. 즉, 교배, 돌연변이 등에 대한 확률 값을 변경시켜가며 그 결과를 비교하였다. 또한, 난수 값을 생성하기 위한 초기값, 개체군의 크기 및 염색체의 크기 변화에 대한 영향도 고려하였다. 이상의 결과에 근거하여 유전자 모델을 구축하는 데 필요한 변수들을 다음과 같이 정의 하였다.

(1) 개체군 크기: 100
(2) 염색체의 크기: 32 bits
(3) 교배 확률: 0.9
(4) 돌연변이 확률: 0.01
(5) 최대 세대 (Generation) 수: 300
(6) 종결 조건: 최고 적합도가 50세대 동안 변하지 않는 경우 종결.

유전자 모델의 목적 함수는 정기점검주기에 근거한 보수 비용으로 정의된다. 보수 행위와 관련된 비용은 다음과 같은 두 가지로 나눌 수 있다.

(1) 정기 점검에 소요되는 비용
(2) 고장이 발생시 기기의 교체 혹은 수리 비용

따라서, 특정 계통, m,에 대한 소요 경비는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$c_{mT} = c_{mI}+(1- q_{av})c_{mR}+ q_{av}.c_{mF}$

여기서, c_{mkT} = 계통 m의 전체 보수 관련 비용

c_{mI}= 계통 m의 정기 점검에 소요되는 비용

c_{mR}= 계통 m의 점검 후 원상 복귀하는 데 소요되는 비용

c_{mF}= 계통 m의 고장이 발생시 기기의 교체 혹은 수리 비용

q_{av} = 계통 m의 이용 불능도

기기의 고장률 및 보수와 관련된 인간 오류 확률의 영향은 q_{av}에 포함되어 있다. 따라서, 유전자 모델의 목적함수는 다음에 보여진 바와 같이 전체 계통의 보수관련 비용을 합하는 것으로 표시된다.

Objective function = $\Sigma_m c_{mT}$

표2에 각 계통에 대하여 가정된 계통별 보수 비용이 나와 있다. 표2에 나타난 바와 같이 수리에 소요되는 전체 비용이 정기점검에 소요되는 비용에 비하여 훨씬 큰 것으로 가정하였다.

V. 결과 및 논의

본 논문에서는 구축된 PSA 모델 및 유전자 기법을 이용하여 전체 발전소 수준에서 정기점검주기의 최적화를 수행하였다. 아울러, 현실적으로 규제 기관 등에서 특별한 제한 사항을 부과할 수도 있으므로 이를 최적화 과정에서 고려하였다. 본 논문에서는 다음과 같은 제한 조건을 가정하였다.

(1) 보조 급수 계통과 고압안전주입계통의 정기점검주기는 각각 13주와 25주를 넘을 수 없다.

(2) 발전소 정지 계통의 정기점검주기는 변하지 않는다.

먼저, 각 계통에 대한 정기점검주기를 계통 수준과 발전소 수준에서 각기 수행하였다. 각 최적화의 결과가 그림 2에 나와 있다. 우리가 예상한 바와 같이 계통 수준에서 정기점검주기를 최적화하는 경우가 발전소 수준에서 최적화를 수행하는 경우에 비하여 정기점검주기가 훨씬 길어지게 된다.

그러나, 표 3에 나온 바와 같이 원래의 정기점검주기에 근거한 노심손상빈도는 1.53E-5/년으로 평가되었을 때 계통 단위별로 최적화한 정기점검주기에 근거한 노심손상빈도는 5.91E-4/년, 즉 기준 경우의 노심손상빈도에 비하여 3862.7%로 증가하였다. 반면에, 발전소 단위에서 최적화한 정기점검주기에 근거한 노심손상빈도도 원래의 노심손상빈도와 같은 수준으로 유지가 되었으나, 이와 같은 결과가 정기점검주기의 최적화를 계통 수준이 아닌 전체 발전소 수준에서 고려하여야 하는 이유를 분명하게 설명하여 준다.

그림 3은 고장 수목 방법과 해석적 이용 불능도 모델에 근거한 정기점검주기의 최적화 결과를 보여주고 있다. 증기제거계통과 냉각수계통의 경우를 제외하고는 모두 최적화된 정기점점주기가 원래의 정기점점주기 보다 증가하였다. 또한, 대부분의 경우에 있어 해석적 모델에 근거하여 최적화한 정기점검주기가 고장 수목에 근거한 경우보다 증가하였다. 이때, 최적화된 정기점검주기가 가장 큰

차이를 보이는 경우는 비상 발전기의 경우로 3주의 차이가 났다. 저압안전주입계통과 기기공기계통의 경우 고장수목방법에 근거한 정기점검주기가 더 긴 것으로 나타났지만, 이용불능도 측면에서는 해석적 모델에 근거한 전계통의 이용불능도가 고장수목에 근거한 이용불능도보다 적게 나타난다.

표3에 계통별 년간 보수 관련 비용 및 검사 횟수가 나와 있다. 노심손상빈도의 증가에 따른 비용을 고려하지 않는다면 각 계통별로 정기점검주기를 최적화한 경우가 가장 낮은 보수 비용을 보여주고 있다. 그러나, 이 경우에는 노심손상빈도의 증가가 너무 커서 규제 기관에서 이와 같은 정기점검주기의 변화를 받아들이지 않을 것으로 예상된다. 해석적 이용불능도 모델에 근거한 경우 년간 검사 횟수는 약 57% 정도로 감소하였으며, 보수 관련 비용은 기본 경우에 비하여 약 76%로 감소하였다.

표 3은 또한 고장수목방법에 근거한 최적화 결과가 약간 보수적인 값을 가짐을 보여주고 있다. 본 논문의 경우 해석적 방법과 고장수목방법에 근거한 경우의 차이가 그리 크지는 않았다. 이와 같은 차이는 문제의 특성에 따라 증가 혹은 감소할 수도 있다. 즉, 그 차이는 구축된 PSA 모델의 특성 및 기기의 고장률에 따라 변화하기 때문이다.

VI. 결론

그 동안 해석적 이용불능도 모델이나 전산코드에 근거하여 계통의 정기점검주기를 최적화하려는 많은 방법이 제시되어 왔었다. 제시된 대부분의 경우에 있어서 정기점검주기의 최적화는 발전소 단위가 아닌 각 계통 수준에서 이루어져 왔다. 그러나, 정기점검주기의 최적화는 계통 수준이 아니라 발전소 단위에서 이루어져야 한다. 즉, 계통 수준의 정기점검주기 최적화는 발전소 단위에서의 안전성 및 비용 측면의 전체 최적 점을 보장하지 못하기 때문이다. 본 논문의 목적은 각 계통의 정기점검주기를 계통 수준이 아닌 전체 발전소 단위에서 최적화하는 것이다.

본 논문은 유전자 기법과 해석적 이용불능도 모델에 기반한 최적화 결과는 발전소의 안전도를 현재 상태로 유지하면서도 정기점검의 횟수 및 이와 관련된 비용을 줄일 수 있음을 보여주고 있다. 또한, 해석적 이용 불능도 모델은 고장 수목 방법의 보수성을 줄여 줌으로써 우리는 좀 더 정확한 정기점검주기 최적화를 이룰 수 있다.

실세계에서는 현재 논문에서 부과한 제한 조건 이외에도 다른 제한 조건이 있을 수 있다. 예를 들어 특정계통의 신뢰도 목표가 일정 값으로 결정되어 있을 수도 있다. 즉, 많은 경수로에 있어 보조 급수 계통의 이용 불능도는 1.0E-3으로 결정되어 있다. 이와 같은 경우에는 고장수목방법이 일반적으로 보수적인 결과를 나타내므로 해석적 이용 불능도 모델의 이용이 특히 유용할 것으로 생각된다.

PSA 모델의 비완결성 (Incompleteness) 과 사용된 신뢰도 자료의 불확실성으로 인하여 본 논문에서 최적화한 정김점검주기가 정확한 값이라고 말하기는 어려운 것이 사실이다. 특정 발전소에 대하여 정기점검주기를 최적화하기 위하여서는 해당 발전소의 고유 신뢰도 자료 및 정확한 보수 관련 비용 자료가 수집되어야 한다. 따라서, 현재 계획되고 있는 발전소 계통별 신뢰도 기반 정비와 같은 과정에서 수집되는 자료들이 차후 정기점검주기 최적화에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 예상된다.

그러나, 해석적 이용 불능도 모델의 이용도 몇 가지 제한점을 갖고 있다. 즉, 동일한 계통 내에 서로 다른 정기점검주기를 갖는 기기들이 있는 경우 계통 전체의 이용불능도를 나타내는 해석적 모델을 도출하기가 쉽지가 않다. 따라서, 본 논문에서는 동일 계통 내의 모든 기기는 동일한 정기점검주기를 갖는 것으로 가정하였다. 그러나, 참고 문헌 [14]에 나타난 전산 모델과 같은 모델들을 이용하면 동일한 계통 내에 서로 다른 정기점검주기를 갖는 기기들이 있는 경우도 다룰 수 있을 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행 되었습니다.

참고 문헌

[1] Mohammad Harunuzzaman, Tunc Aldermir, “Optimization of Standby Safety System Maintenance Schedules in Nuclear Power Plants,” Nuclear Technology, Vol.113, Mar., 1996.

[2] R.Billinton, Jun Pan, “Optimal Maintenance Scheduling in A Two Identical Component Parallel Redundant System,” Reliability Engineering and System Safety, 59, 1998.

[3] Dae Wook Chung and Bon Hyun Koo, “Effects of Human Error on the Optimal Test Interval and Unavailability of the Safety System,” Journal of the Korean Nuclear Society Vol. 23, No. 2, 1991.

[4] Aureli Munoz, Sebasian Martorell and Vicente Serradell, “Genetic Algorithms in Optimizing Surveillance and Maintenance of Components,” Reliability Engineering and System Safety, 57, 1997.

[5] D.Vasseur, F.Ardorino, P.Aufort, P.Bryla, B. Villain, M.Courreges, L.Mange, B.Monnier, “Structural Component Maintenance Optimization Using PSAs,” Proceeding of the 4^{th} Probabilistic Safety Assessment and Management, Sep., New York, U.S.A., 1998.

[6] “Evaluation of Diesel Unavailability and Risk Effective Surveillance and Test Interval,” NUREG/CR-4810, May 1987.

[7] R.Billinton, Jun Pan, “Optimal Maintenance Scheduling in a Two Identical Component Paralle Redundant System,” Reliability Engineering and System Safety, 59, 1998.

[8] J.K.Vaurio, “On Time-dependent Availability and Maintenance Optimization of Standby Units under Various Maintenance Policies,” Reliability Engineering and System Safety, 56, 1997.

[9] G.Apostolakis, T.L.Chu, “The Unavailability of Systems under Periodic Test and Maintenance,” Nuclear Technology, Vol.50, Mid-Aug, 1980.

[10] John R. Koza, “Genetic Programming,” MIT Press, 1992.

[11] Laura Painton, James Campbell. “Genetic Algorithms in Optimization of System Reliability,” IEEE Transaction on Reliability, Vol. 44, No. 2, 1995 June.

[12] Anup Kumar, Rakesh M. Pathak, Yash P.Gupta, “Genetic Algorithm Based Reliability Optimization for Computer Network Expansion,” IEEE Transaction on Reliability, Vol. 44, No. 1, Mar., 1995.

[13] Joon-Eon Yang, Mee-Jung Hwang, Tae-Yong Sung and Youngho Jin, “Application of Genetic Algorithm for Reliability Allocation in Nuclear Power Plants,” Reliability Engineering and System Safety, Accepted to be published.

[14] Choi, S.Y. and Yang, Joon-Eon, “Development of Markov Model for Emergency Diesel Generators based on Causal Loop Diagram” will be presented in PSA’ 99, Washington, D.C., August 22-25. 1999.

표 1. 계통별 고장률 자료

System	No. of Trains	Success Criteria	$_R$(hr.$^{-1}$)	$_C$(hr.$^{-1}$)	Q_I	γ_i	τ (wk.)	τ_r (hr.)
AFW	3	1/3	5.28E-05	5.28E-06	6.10E-02	1.00E-02	4	0.62
SR	3	1/3	1.62E-05	1.62E-06	6.10E-02	1.00E-02	13	0.31
BD	2	1/2	2.39E-06	2.39E-07	3.66E-02	1.00E-02	53	0.19
HPSI	2	1/2	8.12E-06	8.12E-07	2.73E-02	1.00E-02	13	0.43
LPI/SDC	2	1/2	7.58E-06	7.58E-07	2.18E-02	1.00E-02	13	0.54
DG	2	1/2	6.16E-06	6.16E-07	5.45E-03	1.00E-02	4	0.11
SWS	2	1/2	3.08E-05	3.08E-06	3.05E-02	1.00E-02	4	0.43
IA	3	2/3	3.08E-05	3.08E-06	3.05E-02	1.00E-02	4	0.40
SIT	3	2/3	4.65E-07	4.65E-08	6.10E-03	1.00E-02	53	0.05

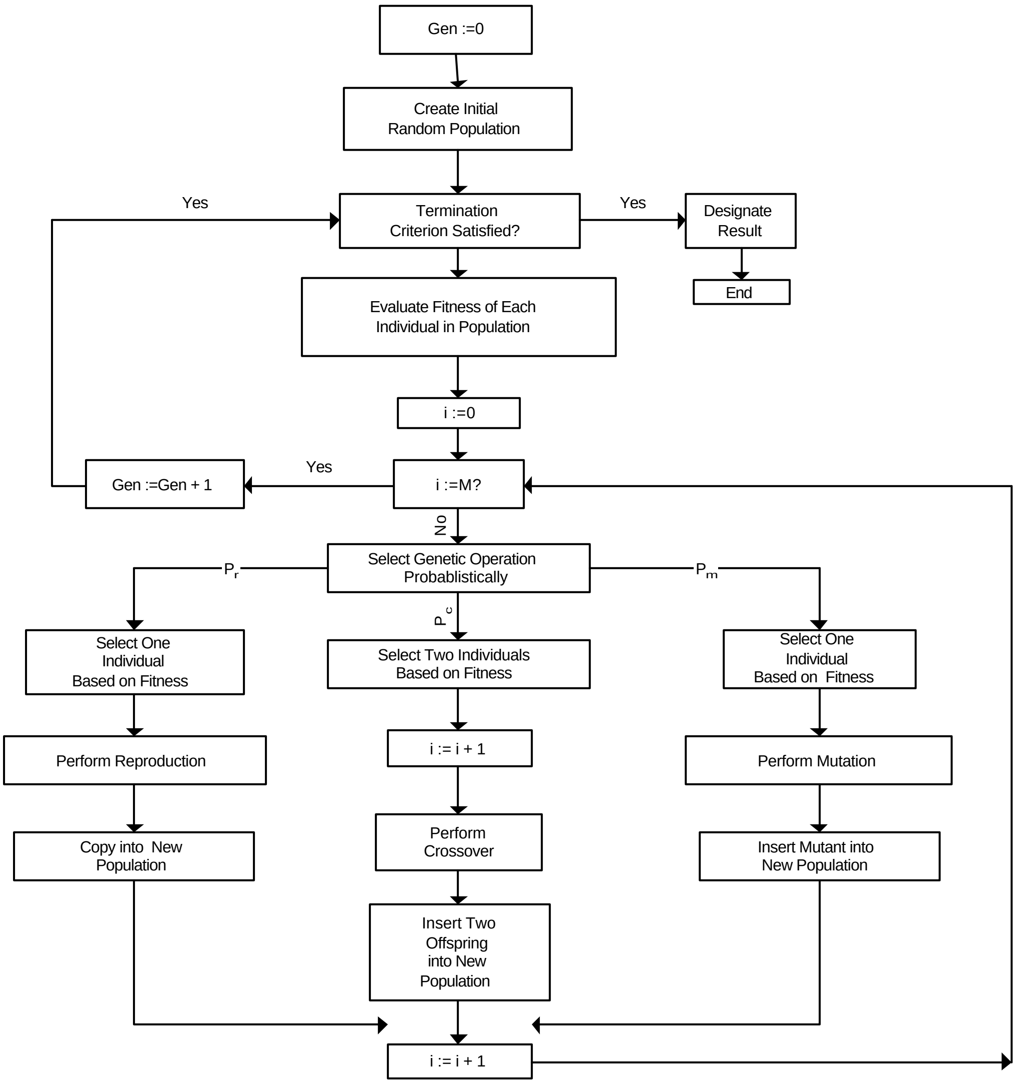
✓ *We assume that Q_i has the same value, and γ_i has also the same value.*

표 2. 계통별 보수 비용

System	Surveillance testing cost	Restorative maintenance cost	full repair or replacement cost
AFW	50	200	30000
SR	15	80	12000
BD	15	80	12000
HPSI	70	350	52500
LPI/SDC	70	350	52500
DG	50	250	37500
SWS	40	400	60000
IAS	35	150	22500
SIT	50	200	30000

표 3. 점검 회수 및 노심 손상빈도의 변화

Item	Base Case	Optimization at the System Level	Optimization at the Plant Level	
			FTA	Analytical Model
No. of Test/Year	80.48	19.38 (24.1%)	49.42 (61.4%)	45.78 (56.9%)
Total Maintenance Cost	FTA: 6,618 Analytical: 6,520	4,161 (64.36%)	5,209 (78.71%)	4,933 (75.66%)
CDF	FTA: 1.57E-5/year Analytical: 1.53E-5/year	5.91E-4/year	1.57E-5/year	1.53E-5/year



P_r= Probability of Reproduction, P_c= Probability of Cross Over, P_m= Probability of Mutation,
GEN = Number of Generation, i = Individual Index, M = Maximum number of Population,
Termination Criterion = Best fitness unchanged after 50 generations

그림 1. 유전자 기법의 논리 흐름도

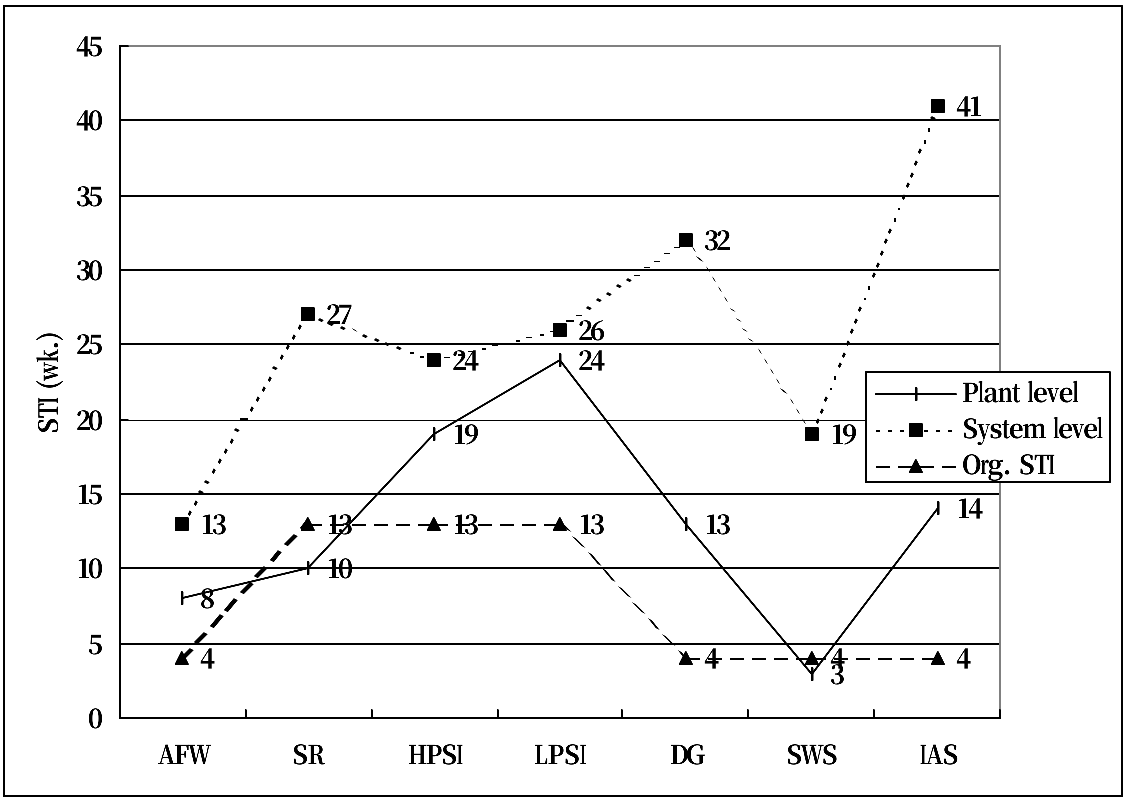


그림 2. 계통 단위와 발전소 단위에서 최적화된 정기점검주기의 비교

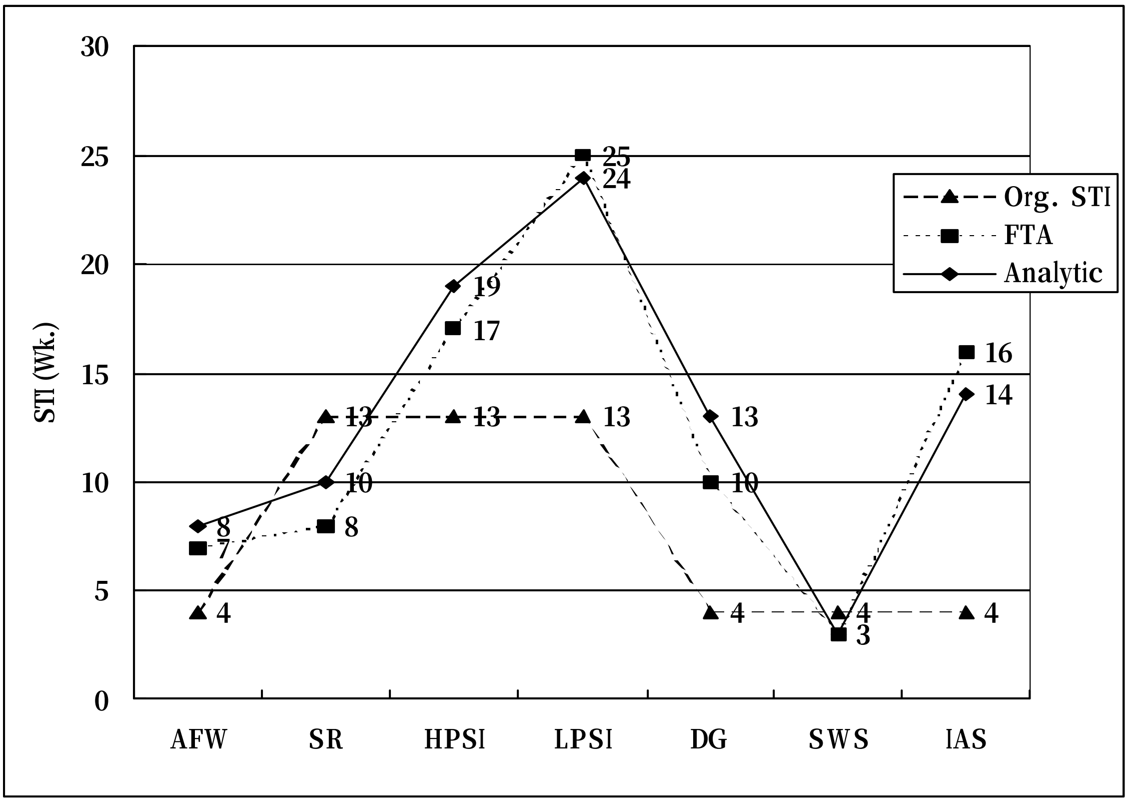


그림 3. 해석적 모델과 고장 수목에 기반하여 최적화된 정기점검주기의 비교