'99 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

주요 안전 계통별 신뢰도 목표 설정의 최적화
Optimization of Reliability Target for Main Safety Systems

양준언, 김길유
한국 원자력 연구소
대전시 유성구 덕진동 150

요 약

근래에 들어 원자력 발전소 운영의 최적화가 원자력 산업계의 중요 관심사가 되고 있다. 이와 같은 원자력 발전소 운영의 최적화를 이루기 위해서는 발전소 상/하위 안전목표의 설정이 적절히 이루어 지는 것이 필요하다. 이와 같이 발전소 상/하위 안전목표의 최적화를 이루는 과정을 신뢰도할당 (Reliability Allocation)이라고 부른다. 신뢰도 할당은 발전소의 상위 수행 목표가 만족되도록 발전소의 계통, 주요 기기 및 운전 절차의 신뢰도 특성을 결정하는 데 사용되어 왔다. 그러나, 신뢰도 할당은 매우 복잡한 다요소, 다목적 최적화 문제로 기존의 전통적 최적화 방법으로는 이와 같은 문제에 있어 전체 최적 점을 찾는 것이 보장되지 않았다. 근래에 들어 각광을 받고 있는 유전자 기법 (Genetic Algorithm)은 이와 같은 다요소, 다목적 문제에 대한 가장 강력한 최적화 기법의 하나로 알려져 있다. 본 논문에서는 유전자 기법을 이용하여 경수로의 신뢰도 할당 문제를 해결하였다. 아울러, 최적화 문제에 있어 가장 중요한 요소의 하나인 목적함수를 결정함에 있어 비용-효과 분석 (Value-Impact Analysis) 방법을 사용하여 좀 더 현실적인 최적화 결과를 얻고자 노력하였다.

ABSTRACT

Reliability allocation is an optimization process of minimizing the total plant costs subject to the overall plant safety goal constraints. Reliability allocation has been applied to determine the reliability characteristics of reactor systems, subsystems, major components and plant procedures that are consistent with a set of top-level performance goals: the core melt frequency, acute fatalities and latent fatalities. Reliability allocation is a kind of a difficult multi-objective optimization problem as well as a global optimization problem. The genetic algorithm, known as one of the most powerful tools for most optimization problems, is applied to the reliability allocation problem of a typical Pressurized Water Reactor in this paper. One of the main problems of reliability allocation is defining realistic objective functions. We used techniques derived from the Value Impact Analysis to define the realistic objective function in this paper.

1. 개요

원자력발전소에서 발생할 수도 있는 위험으로부터 일반 대중을 보호하며 발전소의 안전성을 향상시키는 것은 원자력 발전소 설계의 기본 목표이다. 이와 같은 목표를 달성하기 위하여 여러 방면에 걸쳐 다음과 같은 다양한 접근이 이루어 지고 있다: (1) 원자력발전소 설계에서 고려되는 다중성 (Redundancy)과 다양성 (Diversity), (2) 주요기기들에 대한 정주기 검사 (Surveillance Test) 의 수행, (3) 또한, 확률론적 안전성 평가 (Probabilistic Safety Assessment, PSA) 등 다양한 안전성 분석의 수행. 이와 같은 여러 가지 노력의 궁극적 목표는 원자력발전소에 의해 발생할 수 있는 위해도 (Risk)를 0 으로 만드는 것이나, 실제로는 이와 같은 목표를 성취하는 것은 여러 가지 기술적, 경제적 요인으로 인하여 불가능한 것이 현실이다. 따라서, 원자력 발전소의 안전성 유지를 위하여 원자력 발전소가 지켜야만 하는 안전목표가 발전소에 관련된 여러 가지 현실적 제약조건을 고려하여 정의된다. 원자력 발전소의 안전목표는 여러 가지 단계에서 정의될 수 있다. 즉, 원자력 발전소의 안전목표는 노심손상빈도 (Core Damage Frequency), 급성사망 (Acute Fatalities) 및 잠재 사망 (Latent Fatalities)과 같은 상위 안전 목표 (High Level Safety Goal)에서부터 각 계통 혹은 기기 수준의 신뢰도 목표 (Reliability Target) 등과 같은 하위 목표까지 그 단계가 여러 개로 정의 될 수 있다.

근래에 들어 원자력 발전소의 경제성이 원자력 산업계의 주요 문제가 되면서부터 원자력 발전소 운영의 최적화가 원자력 산업계의 중요 관심사가 되고 있다. 원자력 발전소 운영의 최적화란 여러 안전 목표를 만족시키면서도 동시에 발전소의 운전 비용을 최소화하는 것을 의미한다.

이와 같은 최적화는 보수 최적화 (Maintenance Optimization), 차등 품질보장 (Graded Quality Assurance) 등 여러 가지 방법에 의하여 성취될 수 있다. 이런 여러 가지 방법 중 원자력 발전소의 확률론적 안전성 평가 (Probabilistic Safety Assessment, PSA) 모델을 이용하여 여러 안전목표의 최적화를 이루는 과정을 신뢰도할당 (Reliability Allocation)이라고 부른다. 이와 같은 신뢰도 할당은 원자력 발전소의 상위 안전목표를 달성하면서도 관련 비용을 최소화하는 일종의 다요소-다목적 (Mult-attribute and Muti-objective)의 최적화 과정이다 [1-7].

지금까지 신뢰도 할당은 발전소의 상위 수행 목표가 만족되도록 발전소의 계통, 주요 기기 및 운전 절차의 신뢰도 특성을 결정하는 데 사용되어 왔다. 또한 신뢰도 할당은 새로운 발전소나 기존 발전소의 설계, 운전 및 안전을 향상하는 데 이용될 수 있다. 신뢰도할당은 (1) 여러 가지 제약조건 하에서 원자력발전소의 위해도를 최소화하며, (2) 제한된 자원을 효율적으로 이용하고, 또한 (3) 불필요한 과중한 설계 (Over-Design)를 줄일 수 있다는 점에서 그 중요성이 강조되어 왔다. 본 연구에서는 신뢰도할당 방법을 이용하여 (1) 원자력 발전소의 상위 목표가 결정되어 있는 경우 각 계통 수준의 신뢰도 목표를 최적화하였으며, 또한 (2) 원자력 발전소 안전 목표가 전혀 결정되어 있지 않을 때, 상위 안전 목표와 각 계통의 신뢰도 목표를 공히 최적화하는 문제를 해결하였다.

지금까지 신뢰도 할당 문제를 해결하기 위하여 다양한 방법이 제시되어 왔으나 기존의 많은 방법은 여러 목적함수의 모든 요소를 충족시키는 데에는 제한 점이 있어 왔다 [1]. 즉, 기존에 사용되어 온 대부분의 최적화 방법은 신뢰도 할당과 같이 다요소-다목적 문제에 있어 전체 최적 점

(Global Optimum Point)을 찾는 것을 보장하지 못해왔다. 따라서 기존의 방법은 문제를 단순화하기 위한 여러 가정을 사용하여 왔다. 그러나, 근래에 들어 유전자 기법 (Genetic Algorithm)은 여러 가지 최적화 문제에 있어 매우 강력한 성능을 발휘하는 것으로 밝혀졌다 [8-9]. 유전자 기법은 관련 변수만 적절히 선택하여 준다면 항상 전체 최적 점을 찾는 것으로 증명 되어 있다. 지금까지 이와 같은 유전자 기법은 정주기 검사주기의 최적화나 신뢰도의 최적화 문제 등에 이용되어 왔다 [10-12]. 따라서, 본 연구에서는 유전자기법을 원자력발전소의 신뢰도 할당 문제에 이용하여 여러 안전 목표의 최적화를 이루었다.

최적화 문제에 있어 가장 중요한 요소 중의 하나는 현실적 목적함수 (Objective Function)를 어떻게 정의하느냐 하는 것이다. 지금까지 많은 신뢰도 할당 문제에서는 여러 제약조건으로 단순화된 목적함수를 사용하여 왔다. 그러나 원자력발전소의 각 계통은 계통의 특성에 따라 계통의 신뢰도를 증감 시키는 비용이 다를 수 있다. 따라서 목적함수를 정의함에 있어 이와 같은 요소가 반영되어야 한다. 또한 계통의 신뢰도가 변함에 따라 노심손상빈도의 변화가 올 수 있으며 이와 같은 노심손상빈도의 증감에 따른 비용도 목적함수에서 고려되어야 한다. 본 연구에서는 현실적인 목적함수를 결정하기 위하여 가치-영향 평가 방법 (Value Impact Analysis)을 이용하였다.

또한 현실에서는 규제기관으로부터의 요구사항 등의 다양한 제한 조건이 있을 수 있다. 예를 들면 경수로의 보조급수 계통은 그 신뢰도 목표가 1.0E-3/년으로 결정되어 있는 것 등이다. 이와 같은 제한 조건 및 각 계통이 가질 수 있는 신뢰도의 현실적 가능 범위 등은 신뢰도 할당 문제의 제한조건 (Constraints)으로 부과되었다.

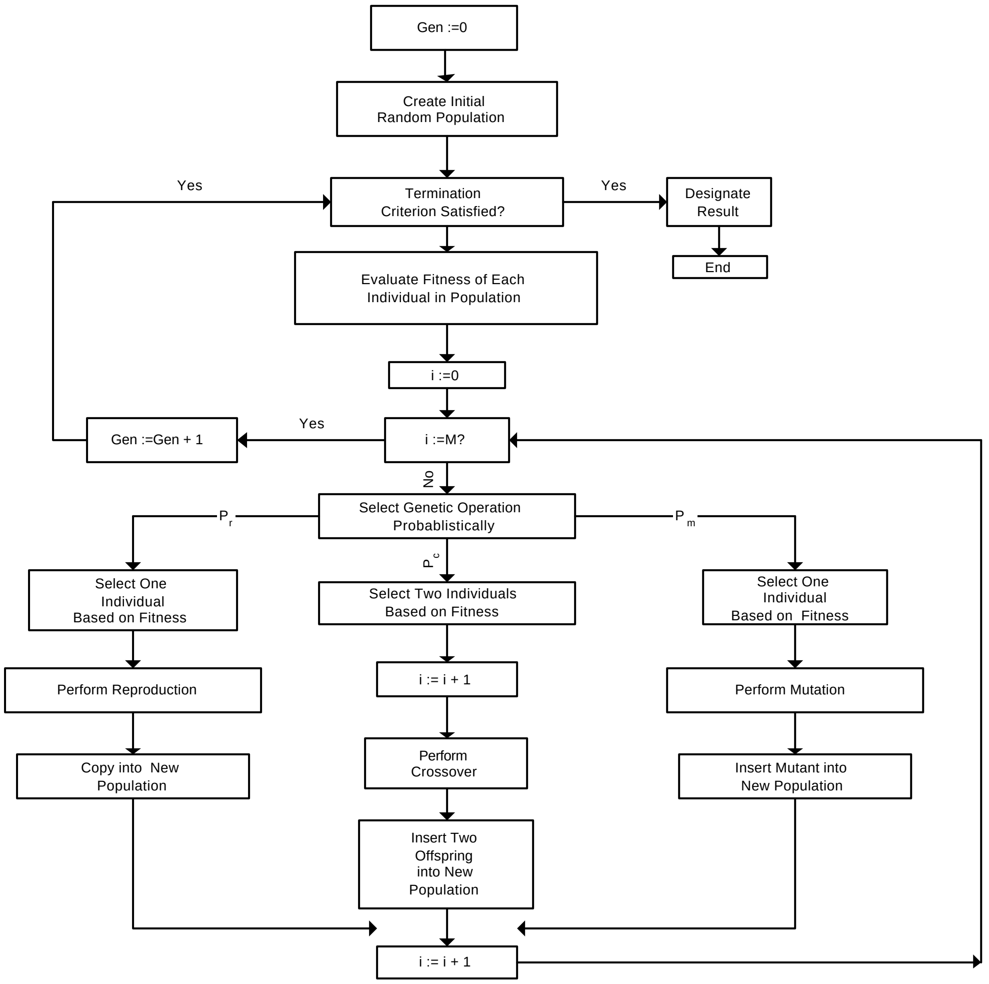
본 논문의 2장에서는 유전자 기법에 대한 간단한 소개를 하였으며 3장에서는 신뢰도 할당을 위하여 개발된 간단한 PSA 모델에 대한 설명을 하였다. 4장에서는 목적함수가 어떻게 정의 되었는지를 설명 하였으며, 5장에서는 신뢰도 할당을 위하여 개발된 유전자 기법 모델의 특성을 기술하였다. 6장에서는 신뢰도 할당의 계산 결과에 대하여 기술하였으며 최종적으로 7장에 결론을 기술하였다.

2. 유전자 기법

유전자 기법 (Genetic Algorithm)은 기본적으로 자연 세계에서 진행되는 진화의 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 특성에 대하여 간략히 살펴 보면 다음과 같다 [8-9]. 유전자 기법에서는 개체의 수를 개체군의 크기 (Population size)라고 한다. 각각의 개체는 염색체 (Chromosome)를 가지고 있다. 또한 이들 개체에 적용되는 연산자, 각 개체의 적합도를 나타내는 목적함수 및 적합도가 높은 개

체를 선택하는 선택과정 등이 유전자 기법의 구성 요소가 된다. 유전자 기법의 기본적인 논리 흐름도가 그림 1에 나와 있다 [9]. 유전자 기법에서 목적 함수 즉, 최적화 하고자 하는 함수는 각 개체의 적합도를 평가하는 데 이용된다. 유전자 기법의 선택과정은 앞에서 기술한 연산자들을 통하여 생성되는 여러 개체 중에 잘 적응한 개체들은 살아 남고 잘 적응하지 못한 개체들은 도태되도록 유도함으로써 자연의 적자 생존 현상을 모델링 한다. 선택의 기반이 되는 것은 적합 함수이며 선택 방법의 기본 원리는 적합도가 높은 개체들에게 다음 세대에 그 개체나 개체의 후손이 생존할 확률 값을 높게 부여하는 것이다. 본 논문에서는 유전자 기법을 원자력발전소의 신뢰도 할당 문제에 적용하였다. 신뢰도 할당 문제에 적용된 유전자 모델에 대한 상세한 내용은 5장에 기술되어 있다.



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

3. PSA 모델

일반적으로 신뢰도 할당은 확률론적 안전성 평가 모델에 근거하여 수행된다. 따라서 본 연구에서

는 전형적인 경수로 (Pressurized Water Reactor, PWR)에 대한 간략화 된 1단계 PSA 모델을 개발하였다. 개발된 PSA 모델에서는 다음과 같은 네 가지 초기 사건에 대하여 사건 수목을 구성하였다. 이들 초기사건은 노심손상빈도에 큰 영향을 미치는 초기 사건들이다.

(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.

사건 수목을 구성함에 있어 일반적인 1단계 PSA에서는 노심손상 (Core Damage) 과 안전 상태 (O.K.) 의 두 가지 상태로 구분하는 데 반하여, 본 연구에서는 발전소에 미치는 사고 결과의 영향이 노심이 손상되는 정도에 따라 다름을 고려하여 노심 손상 정도를 4 가지의 발전소 손상 상태 (Plant Damage State, PDS)로 구분하였다. 각 발전소 손상 상태의 정의는 다음 절에서 목적함수를 정의할 때 기술될 것이다. 각 사고 경위의 특성에 따라 사건 수목의 종결 점에 앞에서 정의된 발전소 손상 상태 1~4가 할당이 되었다. 사고 경위는 발전소 손상 상태별로 정량화가 이루어졌다. 사건 수목의 표제 사건은 안전 계통을 이용한 사고 완화 기능을 표시하며 이와 관련된 인간 행위도 표제 사건으로 표시된다.

본 연구에서는 사고 완화를 위하여 사용되는 다음 12개의 주요 안전 계통에 대한 고장 수목을 구성하였다.
(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) 주 급수 계통 (Main Feedwater System, MFWS),
(7) 보조 급수 계통 (Auxiliary Feedwater System, AFWS),
(8) 증기 제거 계통 (Steam Removal System, SR),
(9) 전기 계통 (Electric Power Supply System, EPS),
(10) 비상 발전기 계통 (Diesel Generator, DG),
(11) 냉각수 계통 (Service Water System, SWS), 및
(12) 기기 공기 계통 (Instrument Air System, IA),

본 연구의 주목적이 계통 수준의 신뢰도 목표를 결정하는 것임을 고려하여 상기 계통의 고장 수목은 기계적 고장, 인간 오류 및 보조 계통의 고장 등만을 포함하여 간략하게 작성 하였다. 위에서 작성된 고장 수목은 사건 수목의 각 표제 사건에 대응 되도록 논리적으로 결합된다. 위에서 작성된 사건 수목 및 고장 수목을 이용하여 각 발전소 손상 상태별 최소 단절 집합 (Minimal Cut Set)을 구하였다. 이들 최소 단절 집합은 유전자 모델의 기본 토대가 된다.

4. 목적 함수의 정의

신뢰도 할당과 같은 최적화 문제에 있어 가장 중요한 요소 중의 하나는 현실적 목적함수를 어떻게 정의하느냐 하는 것이다. 지금까지 많은 신뢰도 할당 문제에서는 여러 제약조건으로 단순화된 목적함수를 사용하여 왔다. 그러나 원자력발전소의 각 계통은 계통의 특성에 따라 계통의 신뢰도를 증감 시키는 비용이 다를 수 있다. 따라서 목적함수를 정의함에 있어 이와 같은 요소가 반영되어야 한다. 또한 계통의 신뢰도가 변함에 따라 노심손상빈도와 같은 상위 안전 목표의 변화가 올 수 있으며 이와 같은 상위 안전 목표의 변화에 따른 비용도 목적함수에서 고려되어야 한다. 본 연구에서는 기존의 방법보다 좀 더 현실적인 목적함수를 결정하기 위하여 가치-영향 평가 방법을 이용하였다.

일반적으로 가치-영향 평가 방법은 특정 계통에 대한 몇 개의 설계안이 주어졌을 때 미리 정해진 판단 기준하에서 최선의 설계 안이 무엇인가를 평가하는 등의 작업에 이용 되어 왔다 [13-15]. 그러나, 가치-영향 평가 방법은 기본적으로 각 기기의 비용을 구하여 전체의 비용을 구하는 Bottom-up 방식인데 반하여, 신뢰도 할당 문제는 전체 비용을 최소화하기 위하여 각 계통의 신뢰도 영역을 결정하는 Top-down 방식이다.

본 연구에서는 비용을 산출하는 데 사용되는 가치-영향 평가 방법의 기술을 사용하여 신뢰도 할당 문제의 목적함수를 정의하였다. 계통의 신뢰도를 증감시키는 데 소요되는 비용은 기계적 설계 사양, 이용도, 인허가 과정 등 다양한 요소가 고려되었다. 아울러, 발전소 손상 상태의 변화에 따른 비용도 고려되었다.

목적함수는 다음의 네 가지 요소로 구성된다: (1) 건강 위해도 (Health Risk), (2) 투자 위해도 (Investment Risk), (3) 인허가 관련 (Licensability), 및 (4) 재정적 요인 (Financial Impact) [13]. 위의 요소들 중 원자력 발전소의 모든 설계는 규제기관의 검토를 받아야 하므로 규제기관의 인허가를 받는 데 소요되는 관련비용은 전체 비용에 큰 차이를 유발하지 않는 것으로 가정하였다. 또한 계통설계에 있어 혁신적인 변화는 없는 것으로 가정하였다. 건강 위해도 및 투자 위해도 평가에 사용된 자료가 표1에, 각 계통에 대한 자본 비용의 평가치가 표 2에 나와 있다.

일반적으로 발생 확률은 낮으나 그 결과가 큰 영향을 미치는 사고의 경제적 영향을 한 점 값 (single point value)을 사용하여 평가하는 것은 부적절한 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 각 사고군의 영향에 의한 비용의 상한치와 하한치를 사용하여 그 영향을 평가하였다 [13].

실제 세계에 있어서는 적은 비용의 증가만으로도 실현 가능한 효율적인 보수 전략을 사용함으로써 발전소의 위해도를 크게 줄일 수 있다. 보수 전략은 주로 인간 오류와 연관이 된다. PSA 결과를 검토하여 보아도, 일반적으로 인간 오류가 PSA 결과에 큰 영향을 미치는 것으로 나타나고 있다. PSA에서 고려되는 인간오류는 크게 사고 전 오류와 사고 후 오류로 구분이 된다.

일반적으로, 보수와 관련된 인간 오류, 즉, 사고 전 인간 오류가 계통의 이용 불능도에 미치는 영향은 계통의 설계에 따라 많은 차이가 있을 수 있으므로 이를 계통의 설계 전 단계에서 고려하

기에는 어려움이 있다. 또한 사고 전 인간 오류는 참고 문헌 [12]에 보여진 바와 같이 각 계통별 이용불능도의 최적화가 이루어진 후에 다시 최적화 할 수도 있다. 따라서 이의 영향은 계통 수준의 신뢰도 할당 단계에서는 고려하지 않았다. 반면에 사고 후 인간오류는 안전 계통과 같이 사고의 완화 중 필요한 인간 행위의 오류로 고장/사건 수목에서 고려가 되었다. 다만, 사고 후 인간 오류에 대하여서는 계통 신뢰도의 변화가 사고 후 인간 오류 확률에 영향을 미치지 않는 것으로 가정하여 사고 후 인간 오류 확률은 최적화의 대상이 아닌 상수로 취급하였디.

위에서 기술한 바에 근거하여 각 계통의 신뢰도를 변화 시키는 데 소요되는 비용을 다음과 같이 평가 하였다 [1]:

$\text{cost}_i = a_i . \ln(1/R_i)+b_i$

여기서 a_i, b_i= 계통의 기준설계(base case)에 소요되는 비용으로부터 도출되는 상수, a_i, $b_i > 0$

R_i = i-번째 설계 대안에 따른 계통의 이용불능도

위식은 다음과 같은 신뢰도 할당에 사용되는 목적 함수의 일반 조건을 만족시킨다 [1]:

(1) 계통 신뢰도가 낮은 계통의 비용은 매우 낮다.

(2) 계통 신뢰도가 높은 계통의 비용은 매우 높다.

(3) 비용은 계통신뢰도에 대한 단조 증가 함수 (Monotonic Increasing Function)이다.

(4) 비용의 신뢰도에 대한 도함수 (derivative)는 계통신뢰도에 대한 단조 증가 함수이다.

위의 식과 조건들로부터 신뢰도 할당 문제의 목적함수가 다음과 같이 정의되었다. 이 목적함수가 유전자 기법에서 적합도 함수로 변환되어 사용이 된다:

$OBF_j = \sum_i PDS_{ij} . [HRC_{ij} + IR_{ij}] + FI_j$

여기서 OBF_j= j-번째 신뢰도 할당 경우에 나타나는 목적함수의 값

PDS_{ij}= j-번째 신뢰도 할당에 따른 계통의 신뢰도로부터 유발되는 i-번째 발전소 손상 상태의 확률 값

HRC_{ij} = j-번째 신뢰도 할당에 따른 계통의 신뢰도로부터 유발되는 i-번째 발전소 손상 상태에 의한 건강 위해도의 가치/영향

IR_{ij} = j-번째 신뢰도 할당에 따른 계통의 신뢰도로부터 유발되는 i-번째 발전소 손상 상태에 의한 투자 위해도의 가치/영향

FI_j = j-번째 신뢰도 할당에 따른 재정적 영향 (자본 및 경제 위해도)

또한 현실에서는 규제기관으로부터의 여러 요구사항과 같이 다양한 제한 조건이 있을 수 있다. 예를 들면 경수로의 보조급수 계통은 그 신뢰도 목표가 1.0E-3/년으로 결정되어 있는 것 등이다. 이와 같은 제한 조건 및 각 계통이 가질 수 있는 현실적 신뢰도 범위 등은 최적화 문제의 제한조건 (Constraints)로 부과되었다.

5. 신뢰도 할당을 위한 유전자 모델의 구축

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

표 1. 건강 및 투자 위해도 평가 자료

Plant Damage State		Health Risk	Investment Risk	Total Risk
1	Severe core damage or core melt; significant radioisotope release to containment	5.0E+4 person-rem/event (=$5~50 million/event)	$1,162~3,136 million median: $2,149 million	$1,167~3,186 million median: $2,176.5 million
2	Small LOCA leading to containment cleanup, valve and vessel repair to containment	3.8E+4 person-rem/event (=$3.8~38 million/event)	$329~924 million median: $626.5 millions	$332.8~962 millions median: $647.4 million
3	Possible damage to steam generator; minor containment cleanup and equipment checkout		$32 ~243 millions median: $137.5 million	$32 ~243 millions median: $137.5 million
4	Possible primary system water loss; little or no spill into containment; no core or equipment damage		$1~6 millions median: $3.5 million	$1~6 millions median: $3.5 million

표 2. 계통별 자본 비용 평가

System	Tank ($270,000)	Pump ($80,000~110,000)	Valves ($5,000)	Base Cost ($300,000)	Redundancy	Capital Cost (x $1,000)		
						Lower Limit	Base Case	Upper Limit
RS*				1	4	1,488	1,860	2,232
AFW*	3	4	49	1	4	1,543	1,928	2,314
MFW		4	52	1	4	2,016	2,520	3,024
SR			55	1	2	372	465	558
BD*			8	1	2	263	328.8	395
HPSI*	0.5	2	52	1	2	711	889	1,067
LPI/SDC*	0.5	2	32	1	2	654	817	981
SIT*	4	0	2	1	4	1,283	1,603	1,924
EPS				1	1	1,040	1,300	1,560
DG				1	2	4,000	5,000	6,000
SWS	2	4	62	1	4	1,141	1,426	1,711
IA	2	2	30	2	2	880	1,100	1,320

The systems marked by * are classified as the safety class, hence, the weighting factor 1.2 is multiplied to the summed cost to derive capital costs.

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 구축하는데 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 50 세대 동안 변하지 않는 경우 종결.

구축된 유전자 모델에서 제한 조건 (Constraints)들은 유전자 기법이 탐색을 해야 하는 범위를 제한하는 역할을 하게 된다. 따라서 이들 제한 조건은 최적 해를 찾는 데 소요되는 시간을 줄여 주는 역할을 한다. 본 연구에서 수행된 대부분의 경우에 있어 몇 분내 최적 해에 수렴함을 보여 주었다.

6. 최적화 결과

본 연구에서 수행된 신뢰도 할당의 결과가 그림 2 에서 3 에 걸쳐 나와 있다. 그림 2 는 3 가지의 전형적 경우에 대한 계통 별 신뢰도 목표의 변화를 보여 주고 있다. 기본 경우 (Base Case)는 신뢰도 할당이 수행되기 전의 계통별 이용 불능도를 보여 주고 있다,

안전 목표의 최적화를 수행함에 있어 건강 및 투자 위해도는 재정적 요인과 다른 특성을 갖고 있다. 즉, 전자는 사고가 발생한 경우에만 드는 비 직접적 경비인 반면에 후자는 원자력 발전소의 건설 중에 소요되는 직접적 경비이다. 따라서 신뢰도 할당은 다음의 두 가지 경우로 나누어 수행되었다.

(1) 발전소 손상 상태 빈도의 변화가 허용되는 경우 (그림 2 에서"Unfixed");

이 경우는 비 직접적 경비가 최적화 과정에서 고려되는 경우이다. 그림 2에서 보듯이 기본 경우에 비하여 여러 계통의 이용불능도가 증가되었다. 이와 같은 이용불능도의 증가는 각 계통의 설계/운전 등에 있어 좀 더 많은 유연성을 허용함으로써 설계자나 운전원이 이들 계통을 다룸에 있어 유리한 요인으로 작용을 한다.

(2) 발전소 손상 상태 빈도의 증가가 허용되지 않는 경우 (그림 2 에서 “Fixed);

이 경우는 일반 대중의 위험도 혐오 (Risk Aversion)에 의하여 발전소 손상 상태 빈도의 증가가 허용되지 않는 경우이다. 따라서, 건강 및 투자 위해도와 같이 사고가 발생한 경우에만 드는 비 직접적 경비는 상수로 취급하여 최적화 과정에서 고려하지 않았다. 이 경우에서는 단지 재정적 요인을 최소화하도록 계통의 이용 불능도를 최적화하였다. 최적화의 결과를 보면 발전소의 안전성을 현재 상태로 유지하면서도 재정적 요인에 영향을 미치는 자본 경비를 크게 줄일 수 있음을 보여 주고 있다.

일반적으로 계통 신뢰도의 변화는 초기 사건 빈도의 변화를 가져온다. 따라서 이와 같은 요소가 유전자 기법을 통하여 반영 될 수 있음을 보여 주기 위하여 주급수 상실 사고의 빈도와 주급수 계통 신뢰도 사이의 간단한 상관관계를 나타내는 수식을 도출하여 이를 이용하여 신뢰도 할당을 수행하였다. 이 경우의 최적화 결과가 그림 3 에 나와 있다. 그림 11 에서 “IE-Freq.”가 주급수 상실 사고의 빈도가 주급수 계통 신뢰도에 따라 변하는 경우를 나타내고 있다. 이 경우도 각 계

통별 이용 불능도의 경향 자체는 다른 경우와 비슷함을 알 수 있다.

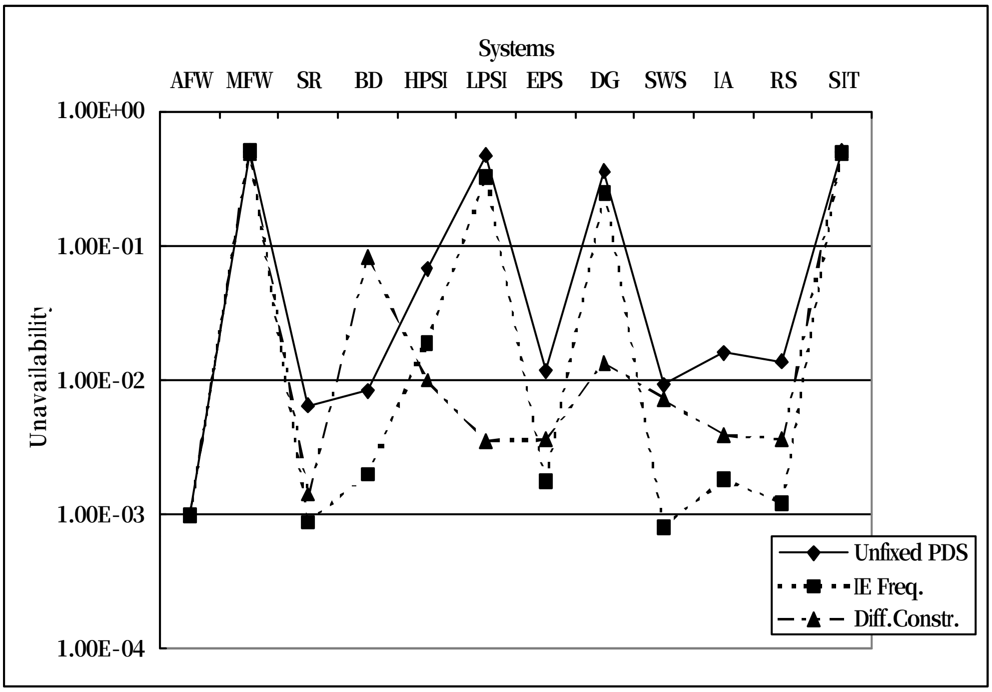


그림 2. 발전소 손상 상태가 허용될 때와 되지 않을 때의 최적화 결과

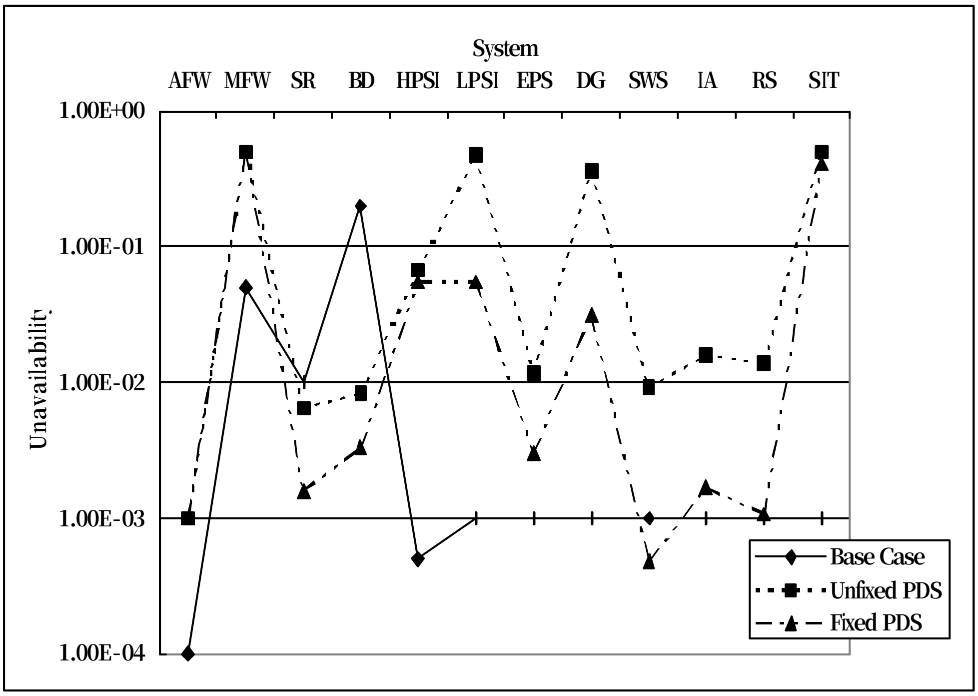


그림 3. 다른 제한 조건이 부과된 경우와 초기 사건 빈도의 변화가 있을 때의 최적화 결과

그림 3에서 "Diff. Constr." 경우는 보조 급수 계통에 대한 제한 조건 이외에 고압 안전 주입 계통에 대한 제한 조건 즉, 이의 신뢰도 목표가 1.0E-2/년으로 주어진 경우의 최적화 결과이다. 위의 결과를 보면 제한 조건이 최적화 과정에 많은 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 따라서 신

뢰도 할당을 수행함에 있어 실제 세계의 제한 조건을 찾아 반영하는 것은 매우 중요한 요소이다.

7. 결론

근래에 들어 원자력 발전소 운영의 최적화가 원자력 산업계의 중요 관심사가 되고 있다. 원자력 발전소 운영의 최적화는 PSA 결과 등을 이용하여 안전 목표의 달성과 소요 비용의 감소라는 양면을 동시에 만족시키는 것을 의미한다. 원자력 발전소의 PSA 모델을 이용하여 이와 같은 최적화를 이루는 과정을 신뢰도할당이라고 부른다. 이와 같은 신뢰도 할당은 원자력 발전소의 상위 안전목표를 달성하면서도 관련 비용을 최소화하는 일종의 다요소-다목적의 최적화 과정으로 기존의 최적화 방법으로 이 문제를 푸는 데에는 제한 점이 있어 왔다. 본 논문에서는 유전자 기법을 이용하여 경수로의 신뢰도 할당 문제를 해결하였다. 간단한 경수로의 PSA 모델이 개발 되었으며, 가치-영향 분석법을 이용하여 좀 더 현실적인 목적함수를 정의 하였다. 다양한 경우에 대한 신뢰도 할당이 수행되었으며, 이를 통하여 유전자 기법이 신뢰도 할당 문제에 매우 유용함을 보였다.

위의 여러 최적화 경우를 통하여 우리가 주의 해야 할 점은 다양한 원인으로 발생되는 불확실성의 문제이다. 즉, 본 논문에서 사용된 다음의 정보는 좀 더 상세한 분석이 필요한 실정이다: (1) 발전소 손상 상태의 분류, (2) 건강과 투자 위해도 및 재정적 요인에서 사용된 비용의 평가, (3) 계통별 이용율 향상에 소요되는 비용의 평가. 위와 같은 불확실성을 처리하기 위하여 본 연구에서는 각 변수들에 대하여 한 점값 (Single Point Value) 보다는 상한 치와 하한 치 등을 이용한 어떤 범위를 사용하여 그 영향을 평가하였다. 비록 이와 같은 범위의 사용이 모든 불확실성의 영향을 평가할 수 있도록 하여 주는 것은 아니나 이와 같은 분석으로부터 유용한 판단 근거를 도출할 수 있을 것으로 생각 되어 진다.

또한 만약 2 단계 PSA 모델이 최적화 과정에 사용 된다면 살수 계통, 수소 결합기 등 격납 건물 계통의 신뢰도도 최적화 할 수 있을 것으로 기대된다. 이와 같은 경우 격납 건물 사건 수목의 작성, 방사선원의 평가 등이 필요할 것으로 예상된다.

비록 해결되어야 할 여러 문제점들이 있기는 하나, 계통별 신뢰도의 최적화 결과는 유전자 기법이 원자력 발전소 계통 설계의 최적화에 유용한 의사 결정 지원 방법이 될 수 있음을 보여주고 있다. 또한 본 논문에서 사용된 방법은 단지 계통 수준의 신뢰도 최적화 만이 아니라 각 계통의 신뢰도 목표가 결정된 후 기기 수준의 신뢰도 최적화에도 사용 가능한 것으로 판단 된다.

앞에서 언급한 바와 같이 PSA 모델 자체의 불확실성 및 비 완결성 (Incompleteness), 사용되는 여러 정보의 불확실성 등으로 인하여 신뢰도 할당에서 얻어지는 계통별 이용 불능도 (신뢰도 목표)의 절대값을 그대로 사용하는 데에는 어려움이 있다. 이와 같이 계통별 신뢰도 목표의 절대값을 얻고자 하기 보다는 다양한 조건과 가정 사항 하에서 여러 대안을 도출하고 이들로부터 원자력발전소의 계통별 신뢰도 목표를 설정함에 있어 유용한 판단 정보를 도출하는 것에 본 논문에서 수행된 계통별 신뢰도 목표 최적화의 의의가 있다고 할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행 되었습니다.

참고 문헌

[1] X.P.Yang, W.E.Kastenberg and D.Okrent, "Optimal Safety Goal Allocation for Nuclear Power Plants," Reliability Engineering and System Safety, 25, 1989.

[2] N.Z.Cho, I.A.Papazoglou and R.A.Bari, "Multi-objective Programming Approach to Reliability Allocation for Nuclear Power Plants," Nuclear Science and Engineering, 95, 1987.

[3] Chang K.Park, R.A.Bari, "A Consistent and Cost-Effective Quantification of Containment Performance Criteria," Nuclear Technology, Vol.81, June 1988.

[4] N.Z.Cho, I.A.Papazoglou and R.A.Bari, "A Methodology for Allocating Reliability and Risk," NUREG/CR-4048, 1986

[5] Woo Sik Jung and Nam Zin Cho, "Determination of Performance Criteria of Safety Systems in a Nuclear Power Plant via Simulated Annealing Optimization Method," Ph.D. Thesis, KAIST, Aug., 1993

[6] O.Gokcek, M.I.Temme, S.L.Derby, "Risk Allocation Approach to Reactor Safety Design and Evaluation," Proc. Topl. Mtg. Probabilistic Analysis of Nuclear Reactor Safety, 1978.

[7] A.Knoll, "Component Cost and Reliability Importance for Complex System Optimization," Proc. Int. ANS/ENS Topl. Mtg. Probabilistic Risk Assessment, 1982.

[8] David E. Goldberg, "Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning," Addison-Wesley Publishing Company, Inc. 1989

[9] John R. Koza, "Genetic Programming," MIT Press, 1992.

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

[11] 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, 1995 March

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

[13] EPRI NP-2529, "Value-Impact Methodology for Decision Makers," Aug., 1982

[14] EPRI TR-102240, "Evaluation of the Safety Benefits and Costs of Proposed Revisions to Inservice Testing Requirements for Pumps and Valves," Sep., 1993.

[15] EPRI NP-3434, "Value-Impact Analysis of Selected Safety Modifications to Nuclear Power Plants," Mar. 1984