'97 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

DYLAM-3를 이용한 부분충수 운전중 노심노출사고 발생빈도의 평가

김도형, 정창현
서울대학교

제무성
한성대학교

요약

본 논문에서는 기존의 PSA기법인 사건수목/고장수목의 단점을 보완한 동적 신뢰성 평가도구인 DYLAM방법론을 이용해서 참조원전[1]의 소외전원 상실사고시 노심노출 사고발생 빈도를 평가하였다. 부분충수 운전시 발생될 수 있는 노심의 노출을 예방하기 위한 운전원의 여러가지 조치들의 오류가능성에 대한 민감도 계산을 수행하였다. 민감도 분석의 결과 일차 충전 및 유출운전 (Feed and Bleed) 인적오류가 노심노출 사고발생 빈도에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었으며 정지냉각계통 기능회복을 위한 조치는 상대적으로 적은 영향을 끼치는 것으로 나타났다. 또한 정지/저출력으로 운전하는 부분충수 운전시 전 출력에 비하여 노심노출을 무시할 수 없음도 보여주었다.

1. 서론

부분충수 운전 (Mid-loop operation) 이란 가압경수로형 원자력 발전소에서 핵연료의 재장전이나 증기발생기 세관 파단사고시 증기발생기의 세관 검사 및 보수작업의 수행이나 원자로 냉각재 펌프의 밀봉장치(seal) 교체, 보수를 위하여 전출력이 아닌 정지/저출력으로서 원자로내의 냉각재 수위를 고온관 (hot leg)의 중간부분정도에 위치하게 하여 운전하는 방식이다. 최근까지는 확률론적 안전성분석에서 정지/저출력시에는 노심내의 잔열이 낮고 운전원의 조치여유시간이 길다는 이유로 주로 전출력 운전 상태에 대해 이루어져 왔다. 그러나 정지/저출력시의 운전중에는 발전소 각 계통의 구성이나 냉각재계통의 운전변수들이 전출력 운전시와는 다르다. 특히 정지냉각 기능의 상실되는 경우 원자로 냉각재계통의 거동에 큰 영향을 줄 수 있으며, 사고발생 후 사고완화를 위한 안전계통이 보수 및 시험으로 인하여 작동하지 못하는 경우도 있다.

본 논문에서는 참조원전을 대상으로 원자로의 냉각재 부분충수 운전 중에 발생할 수 있는 정지냉각기능 상실사고의 하나인 소외전원 상실사고(Loss of off-site power)중 일어날 수 있는 노심노출(core uncovery)사고에 DYLAM-3 (Dynamic Logical Analytical Methodology-3) 전산코드를 이용하여 시간에 따른 노심노출 사고발생 빈도를 계산하였다. 또한 부분충수 운전시 일어나는 노심노출의 방지를 위한 운전원의 여러 가지의 조치들의 인적오류부분에 대하여 민감도 계산을 하였으며 이러한 조치들이 노심노출 사고에 끼치는 영향을 분석하였다.

2. 본론

2.1 DYLAM-3

확률론적 안전성 분석 (PSA)의 기법은 WASH-1400 이후 원자력 발전소의 안전성을 평가하는 수단으로 이용되고 있으며 인 허가 , 설계 및 기술지침서 (Technical Specification) 등의 여러 분야에서 사용되고 있다. 이러한 PSA의 여러 가지의 기법들 중 대표적인 방법론은 사건수목 (Event Tree)과 고장수목 (Fault Tree)이다. 그러나 이 방법론은 물리적인 사고진행과정과 시간의존적인 사건발생빈도를 계산하지 못하는 한계가 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 Accident Sequence Methodology (ASM), Markov model, Digraph-Based Method, Go-Flow Method, DYLAM 등 새로운 방법들이 개발되어왔다.

본 논문에서는 최근 운전원 인지모델 분석과 시간의존적 신뢰성 분석에 가장 많이 사용되고 있는 DYLAM방법론을 선정하여 참조원전의 부분충수 운전 문제에 적용하였다.[2]

DYLAM의 기본적인 아이디어는 신뢰도에 대한 연구와 사건수목/고장수목의 방법론을 종합할 수 있는 도구의 개발에서 출발하였으며, 물리적인 사고 진행과정과 진행과정 시나리오 작성의 논리적인 면 및 확률적인 면의 시간의존적인 특성을 포함하는 방향으로 개발되었다.

DYLAM은 사고결과를 추이하여 사고의 시간의존적인 확률 및 시스템의 신뢰성 분석을 할 수 있다. 즉, DYLAM을 이용하여 수행할 수 있는 계산은 다음과 같다.

- 시스템의 성공적인 임무수행 여부에 관한 계산
- 머리 조건(Top condition)의 시간에 따른 확률의 계산
- 시스템의 물리적인 상태와 논리적인 상태의 상호작용의 고려
- 초기사건에 의한 사고결과의 평가
- 이상거동과정에서 일어날 수 있는 사고의 평가
- 사고의 진행과정에 따른 시간의존적 확률의 계산

2.2 예제 문제

앞서 기술한 DYLAM방법론을 이용하여 참조원전의 부분충수시 노심노출 사고발생 빈도를 계산하였다. 부분충수 운전은 그림 1에서와 같이 핵연료의 재장전이나 증기발생기, 혹은 다른 부품의 보수를 위하여 원자로를 가동중지 (Shutdown)후 냉각수를 증기발생기에 노즐댐 (Nozzle Dam)을 설치할 수 있는 수위까지 방출한 후 수위를 고온관의 중간수위에 맞추고 증기발생기의 Manway를 개방한 후 작업자가 증기발생기 안에 노즐댐을 설치한 상태로 원자로를 운전하는 방식이다. 이 운전은 핵연료 재장전이나 펌프, 증기발생기등 여러 부품의 보수를 위하여 정기적으로 실시된다.

부분충수 운전중 발생되는 잔열 (Decay Heat)은 정지냉각계통 (Shutdown Cooling System)을 이용하여 제거된다. 정지냉각계통은 저압안전주입펌프 (LPSIS Pump)를 이용하여 일정량의 냉각수를 고온관에서 뽑아 정지냉각 열교환기를 통하여 열을 제거한 후 4개의 저압안전 주입배관을 통하여 원자로냉각재 계통으로 주입된다. 또한 냉각수 내의 방사성 물질과 화학물질의 정화를 위하여 Letdown을 이용하여 냉각수의 일정부분을 빼내어 화학 및 체적제어계통 (CVCS)을 통과한 후 충전펌프를 이용하여 보충하여준다.

2.3 사고 시나리오 분석

소외전원 상실사고는 여러 가지의 원인에 의하여 발전소로 공급되는 외부전원이 상실되는 사고이다. 외부의 전원이 상실되면 비상디젤발전기가 기동되고 안전등급 모선에 비상전력이 공급되어 발전소 내에 전력이 공급된다. 이때 모든 디젤발전기가 고장나면 이는 발전소 정전사고 (Station Blackout)로 분류된다.

참조원전의 소외전원이 공급되지 않으면 정지냉각기능이 상실되고 원자로심으로부터의 잔열제거의 수단을 상실하게된다. 이때 운전원은 노심의 손상을 방지하기 위하여 정지냉각기능의

회복, 냉각재보충 , 이차측을 이용한 잔열제거 등의 적절한 조치를 취하여야 한다.

본 논문에서는 사건수목/고장수목 기법을 이용하여 기 수행한 소외전원 상실사고중 일어날 수 있는 노심노출사고에 관한 사건 시나리오[3,4]에 대하여 발생 가능한 시간의존적인 사고발생 경위를 도출하였다.

소외전원이 상실되면 비상디젤발전기나 대체 교류전원용 발전기에 의해 전력이 공급된다. 전력이 공급된 이후 정지된 정지냉각계통을 다시 기동시키기 위하여 운전원의 수동조작이 필요하다. 사고발생 경위의 도출을 위한 논리는 그림 2와 같다. 만약 정지냉각계통의 재기동에 실패하면 고압안전주입계통 (High Pressure Safety Injection System) 등을 이용하여 냉각재를 주입하여 일차 충전 및 유출을 한다. 참조 발전소의 비정상 절차서에 따르면 우선 고압안전주입계통을 이용하여 재장전수 탱크의 물을 저온관으로 주입하도록되어있다. 이외에도 충전펌프, 대기중인 저압안전주입펌프를 이용할 수 있다. 본 논문에서는 고압 및 저압안전주입계통과 충전펌프를 이용한 냉각재보충을 고려하였다. 이때 일차 충전 및 유출에 실패를 하는 경우 재장전수탱크와 원자로 냉각재계통의 수두 차를 이용하여 재장전수탱크의 물을 중력으로 냉각재계통에 급수하는 운전을 한다. 재장전수탱크의 물이 원자로 냉각재로 주입되면 원자로 냉각재계통내의 압력이 감소하여 급수유량을 증가시키는 효과와 반대로 재장전수의 수두가 감소하여 급수유량을 감소시키는 효과가 동시에 나타나지만 본 논문에서는 급수유량은 일정하다고 가정하였다. 원자력연구소에서 작성한 시나리오에는 첫 번째 정지냉각 기능회복에 실패할 경우 두 번째의 정지냉각 기능회복 조치가 있지만 본 논문에서는 이 조치는 고려하지 않았다. 앞의 일차 충전 및 유출운전의 연속된 조치로 재장전수탱크의 물이 고갈되어 충전 중인 계통의 펌프가 정지되기 이전에 흡입원을 재장전수탱크로부터 격납건물 배수조로 밸브 조작 등을 통해 배관을 배열하여 계속 재순환 운전을 수행하여야한다. 배관의 배열은 재장전수탱크의 물이 고갈되기 이전에 수행되어져야하며, 일차 충전 및 유출운전이 시작된 이후 3.5시간[3] 내에 이루어져야한다.

2.4 노심노출 사고발생 빈도 계산

부분충수 운전중 냉각재의 수위에 영향을 끼치는 중요한 부품은 LPSIS Pump, HPSIS Pump, CVCS Charging Pump, Letdown Valve 이다. 이 부품들에 대한 가능한 실패 모드와 실패확률은 표 1에 나타내었다. 시스템의 물리적 현상 및 시나리오의 확률값은 각 부품의 모든 실패 경우를 고려하여 계산하였다. 인적오류 부분은 난수(Random Number)를 이용한 Monte Carlo Method를 사용하였다. 관련 인적오류 확률값들에 대하여 Factor 10을 곱하고, 나누어서 노심노출 사고발생 빈도에 대한 민감도 계산을 수행하였다. 사용된 인적오류 확률값은 표 2에 나타내었다. 인적오류에 의한 노심노출 사고에 끼치는 영향은 그림 3에서 제시한 알고리즘을 이용하였다. 부품의 작동이 정상 여부와 운전원의 조치가 적절하였는지의 여부에 대한 4가지 경우를 고려하였다.

2.5 결과 및 논의

그림 4 는 부분충수 운전중 소외전원이 상실되었을 때 노심이 노출될 수 있는 빈도를 시간에 대하여 나타낸 것이다. 인적오류 확률 평균값을 기준으로 하여 Factor 10을 고려하여 가장 작은 확률값 (Best case)과 가장 큰 확률값 (Worst case)의 2가지 경우에 대해서도 계산을 수행하였다. 정상 확률값 (Normal case)을 가지는 경우에서는 부분충수 운전이 시작된 후 210분이 경과하여 노심노출의 사고빈도가 생성되었으며 가장 작은 확률값을 가지는 경우는 220분에서 노심노출 빈도가 발생하는 것으로 계산되었다. 그러나 가장 큰 확률값을 가지는 경우는 70, 90, 110분에서 노심노출의 가능성이 생겼으며 160분부터 노심노출이 발생하는 것으로 나타났다. 그러나 시간이 300분 정도가 흐른 후에는 Normal case와 Best case에 비하여 약간 적은 빈도를 가지는 것을 보여준다. 또한 Normal case와 Best case는 거의 차이가 없는 것으로 나

타났다.

인적오류를 포함하는 운전원의 노심노출 방지를 위한 행위는 그림 2에서와 같이 정지냉각계통의 기능회복(HEP1), 일차 충전 및 유출운전(HEP2), 중력급수(HEP3), 재순환 운전(HEP4)의 4가지를 고려하였고 Factor를 10으로 하여 민감도 분석을 수행하였다. 각각의 행위에 대한 계산 결과중 가장 큰 빈도값을 기준으로 한 차이가 표 2에 실려있다. 민감도 계산 결과 일차 충전 및 유출운전의 인적오류가 노심노출의 빈도에 끼치는 영향이 가장 큰 것으로 분석되었다. 이것은 일차 충전 및 유출운전의 인적오류 확률값이 다른 행위에 비하여 가장 큰 값을 가지고 있기 때문에 Factor 10을 고려하면 10^{-1}까지 커질 수 있기 때문으로 해석된다. 또한 정지냉각계통의 기능회복 행위가 작은 차이를 가지는 것은 이 행위가 가지는 인적오류의 확률값이 매우 작기 때문에 Factor를 고려하더라도 소외전원이 상실되고 다시 전원이 공급되어 정지냉각계통의 재기동에 성공할 확률이 크기 때문으로 판단되고, 또한 재순환 운전의 경우가 가장 적은 영향을 미치는 것은 이 조치가 가지는 인적오류 확률값이 가장 작은 값은 아니지만 정지냉각 기능이 상실되더라도 앞서 본 것처럼 재순환 운전에 앞서 일차 충전 및 유출 운전과 중력급수가 이루어지기 때문에 재순환운전이 노심노출의 방지에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 해석된다.

또한 10시간 동안 부분충수 운전을 한다고 가정하였을 때 노심노출 발생빈도는 2.80811E-3 / 10hr로 계산되었다. 이 결과는 참조원전의 소외전원 상실사고 빈도 1.81E-4/yr[3]를 고려하더라도 전출력 운전의 노심노출 사고발생 빈도에 비하여 간과할 수 없는 값이다.

3. 결론

본 논문에서는 DYLAM을 이용하여 참조원전의 부분충수 운전시 소외전원 상실사고에 대해 노심노출빈도를 계산하였으며 노심노출 방지를 위한 각 조치에서 야기될 수 있는 인적오류가 노심노출빈도에 끼치는 영향에 대해서 민감도 계산을 수행하였다. 또한 모든 조치에서 가장 큰 인적오류 확률값을 갖는 경우와 가장 작은 값을 갖는 경우에 대해서 계산을 수행하였다. 가장 큰 인적오류 확률값을 갖는 경우는 초기에 노심노출의 빈도가 있는 것으로 분석되었으며 중간 값과 가장 작은 값을 갖는 경우는 거의 다르지 않게 나타났다. 또한 인적오류 확률값에 대한 민감도 계산의 결과에서는 일차 충전 및 유출 운전의 행위의 인적오류가 노심노출빈도에 가장 큰 영향을 미치고 재순환 운전이 가장 작은 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한 부분충수 운전시 노심노출 사고발생 빈도가 전출력 운전시 사고발생 빈도와 비교할 때 무시할 수 없는 위험성이 있음을 보여주었다. 이 방법론은 시간의존적 특성을 반영한 매우 유연한 방법이므로 어떤 시나리오나, POS(Plant Operating States)에 대하여도 적용될 수 있음을 보여주었다.

표 1 부분충수 운전시 주요부품의 실패모드 및 실패확률[5]

	Failure mode & rate
LPSIS Pump	Fail to start : 2.3E-3/d Fail to run : 1.0E-5/h
HPSIS Pump	Fail to start : 1.0E-3/d Fail to run : 5.0E-5/h
CVCS Charging Pump	Fail to start : 1.3E-2/d Fail to run : 1.4E-4/d
Letdown Valve	Fail to open : 4.0E-3/d Fail to close : 4.0E-3/d Fail to remain open : 1.4E/h

표 2 부분충수 운전시 주요 인적오류 확률값 및 노심노출 발생 빈도 증가량

	설 명	확률값[3] (평균값)	Error Factor[3]	노심노출 발생 빈도 증가량
HEP1	정지냉각계통 기능회복	6.54E-04	10	4.400E-8
HEP2	일차 충전 및 유출 운전	1.82E-02	10	2.243E-6
HEP3	중력급수	5.43E-03	10	2.230E-7
HEP4	재순환 운전	7.43E-03	10	2.300E-8

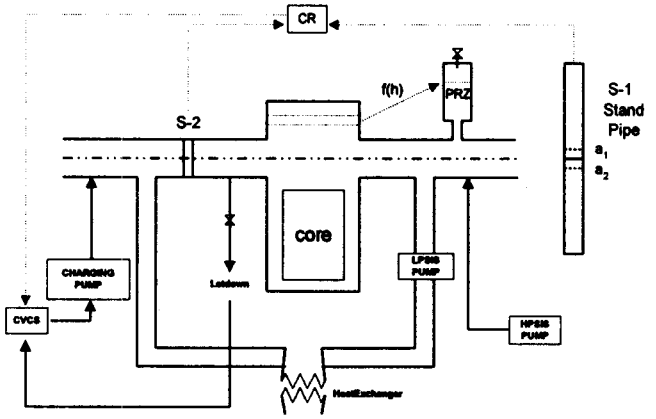

그림 1 부분충수 운전중 중요 시스템

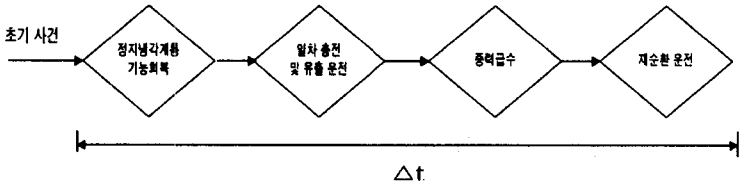

그림 2 사건시나리오 분석 알고리즘

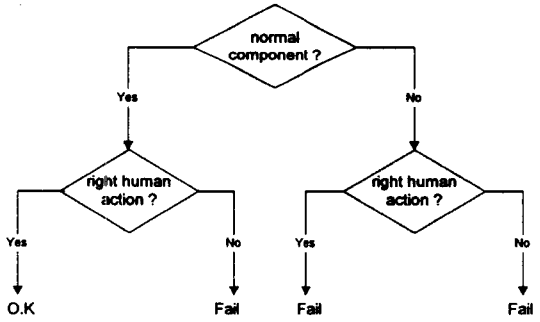

그림 3 인적오류 계산 알고리즘

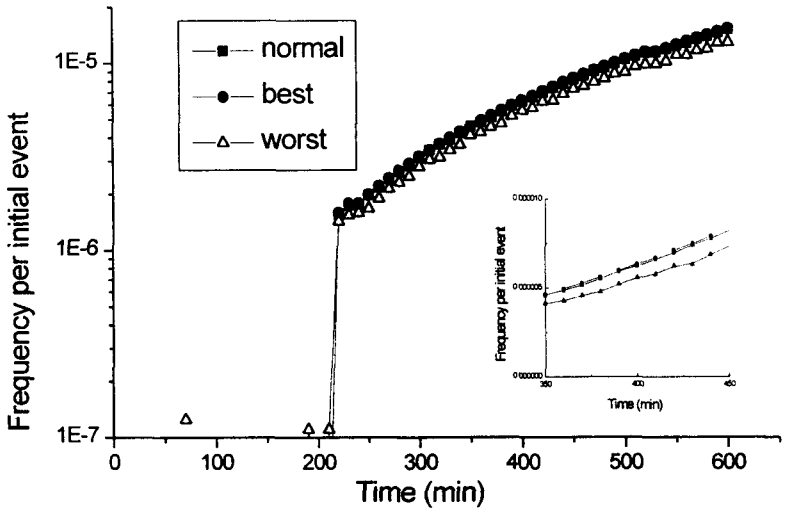

그림 4 초기사건에 대한 노심 노출빈도

참고문헌

1."FSAR for YGN3&4", KEPCO
2.G.Cojazzi, P.C.Cacciabue, P.Parisi, "DYLAM-3 A Dynamic Methodology for Reliability Analysis and Consequences Evaluation in Industrial Plants", EUR 15265 EN, JRC, 1993
3.성태용, "가압경수로의 부분충수 운전 중 소외전원 상실사고에 대한 확률론적 안전성 평가" KAERI/TR-750/96, 한국원자력연구소, 1996.9
4."영광 제2발전소 운영절차서 - 정지냉각계통 상실시 조치", KEPCO
5."Final Level 1 Probabilistic Risk Assessment Update Yonggwang Nuclear units 3&4 ", KAERI, July.1993
6.최영, "저출력/정지시 PSA현황 및 부분충수 운전시 잔열제거기능상실사고 경위분석", KAERI/TR-452/94, 한국원자력연구소, 1994.7
7.재무성, 김재한, "Assessing the Feasibility of An Accident Management Strategy using Dynamic Methods", 한국원자력학회지, Vol.29, No.1, 1997