2002 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

시스템 다이나믹스를 이용한 운전제한조건의 정량적 평가

A Quantitative Assessment of LCOs Using System Dynamics

강경민, 제무성
한양대학교
서울특별시 성동구 행당동 17

성창경
전력연구원
대전 광역시 유성구 문지동 103-15

요 약

공학적 판단과 운전경험에 바탕을 둔 기술지침서의 규정이 보수적으로 설정된 경우 PSA기반을 이용한 정량적인 분석 방법을 통해서 좀더 능률적으로 규정을 변경하려는 시도를 활발히 수행하고 있다. 본 연구는 시간에 따라 변화하는 위험도를 평가하는데 유용한 도구인 시스템 다이나믹스 기법를 사용하여 운전제한조건을 정량적으로 평가하는 방법을 기술하였다. PSA수행 결과로 도출되는 노심손상빈도를 위험도 측정하는 기준으로 하여 전 출력 연속 운전시와 정지 운전시 위험도를 비교하여 기존 운전제한조건을 시간에 따라 정량적으로 평가할 수 있는 체계를 구성하였고 예제 문제에 적용하였다.

Abstract

The research on the technical specifications improvements for too conservative TS has been conducted recently using PSA techniques. In this study a tool of Vensim, which one of System Dynamics software products, is applied to evaluate the limiting conditions for operation (LCOs) quantitatively. A value of core damage frequency in PSA is used as risk measure. The analysis of both full power operation and shutdown operation has been compared for the value of the CDF. The time dependent framework developed in this study has been applied to an example problem accompanied by the operation of Wolsong Nuclear Power plants and it is shown that it is flexible in that it can be applied to any operational context of the technical specifications.

1. 서론

원전의 안전성 확보를 위해서 기술지침서(Technical Specifications)에 운전제한조건을 규정하고 있다. 운전제한조건은 발전소 안전 운전 필요 설비의 가장 낮은 수준의 기능적 성능에 해당하는 것으로, 운전제한조건을 만족하지 못했을 때, 원전 사업자는 기술지침서에 허용된 불만족시 조치를 수행해야 한다. 이러한 기술지침서의 규정사항의 대부분은 공학적인 판단아래 결정되어 왔다. 확률론적 안전성 평가(Probabilistic Safety Assessment: PSA) 수행 결과와 운전경험으로 이러한 기술지침서의 규정 사항들 대부분이 보수적으로 정해져 있다는 것을 확인하면서 국내.외의 원전 사업자들은 PSA기법을 이용한 기술지침서 개정을 활발히 수행하고 있다[1]. 특별히 중수로형 원전의 기술지침서에 대한 정량적인 평가 방법이 미비하고, 가압중수로의 보유국인 캐나다에서도 원전 운영기술지침서의 기술적 기반이 부족한 현실이다. 따라서 본 연구는 기술지침서의 위험도 평가 기술 기반을 강화하고 원전의 안전성을 증대시키기 위해서 운전제한조건을 평가하는 방법론을 개발하여 적용하였다.

전 출력운전 중 안전계통의 기기가 이용불능이면 이 기기를 기술지침서에 정의된 허용정지시간 이내에 복귀시켜야 한다. 만일 허용정지시간 이내에 기기를 수리하지 못하면 발전소를 정지하거나

별도의 조치를 취해야 한다. 기술지침서상의 이러한 조치는 정지시의 위험도가 출력운전중의 위험도보다 작다는 가정을 전제로 한다. 그러나 이러한 가정이 항상 성립하는 것은 아니다. 잔열제거와 관련된 계통은 경우에 따라 정지시의 위험도가 출력시의 위험도보다 클 수 있다. 이와 같이 위험도 분석에 근거하여 운전제한조건을 평가하는 것이 중요하다[2].

본 연구에서는 시스템 다이나믹스 기법을 사용하여 전 출력 운전시 위험도와 정지 운전시 위험도를 비교하였다. 고장수목과 사건수목에 근거하여 일반적 PSA모델을 사용하여 도출한 노심손상빈도(Core Damage Frequency: CDF)를 위험도 측정 기준으로 도입했고, 전 출력 운전시 위험도와 정지 운전시 위험도를 비교하는 일반식에 근거하여 시스템 다이나믹스로 운전제한조건을 정량화하였다. 예제로 운전제한조건 중 보조급수계통에 대한 전 출력 운전시 위험도와 정지시의 위험도를 평가하였다.

2. 시스템 다이나믹스의 특징

원자력 발전소를 시간의 변화에 따라 분석하려는 여러 시도가 수행되고 있다. 그러나 원자력 발전소의 복잡성으로 인해서 시간에 따른 안전성 분석을 수행하는 경우 많은 어려움을 가지고 있다. 시스템 다이나믹스는 시스템의 동태적인 행태변화 (Dynamic Behavior) 즉, 시간의 경과에 따른 시스템의 행태변화에 관심을 둔다[3]. 그래서 변화의 특성들이 목표을 띄고 다양하게 탐색되고 분명하게 해석될 수 있는 장점을 가지고 있다. 이것은 시뮬레이션 기법을 전제로 하는 모사(Modeling) 방법으로 컴퓨터 기법을 따라서 실현되고 있다.

특별히 VENSIM은 시스템 다이나믹스를 잘 구현할 수 있는 강력한 도구로 컴퓨터를 활용한 공학적 기법을 응용하여 복잡한 시스템들을 분석 예측한다[4]. 가상현실에서 현실과 같은 실험을 함으로써 과학적 의사결정을 할 수 있도록 지원한다. 기존의 동적 평가 방법론과 달리 어떤 주어진 문제에 대해서 기기의 고장이나 지연되는 조치와 같은 다양한 원인을 모델에 도입할 수 있다. 이로 인해 변수들간의 인과적 관계를 명확하게 판단 할 수 있고, 다 변수들 간의 순환관계를 파악하여 시스템의 구조를 정확하게 모델링한다. 또한 결과를 시각적인 그래프를 사용하여 제공함으로 시간에 따른 값의 변화를 쉽게 이해하도록 도와주고 장기적인 관점에서 대안으로 선택할 정책적인 처방이나 수단을 파악하기에 유용하다. 다음 <그림 1>은 운전제한조건을 시간에 따라서 평가하는 과정을 모델링하기 위한 절차이다.

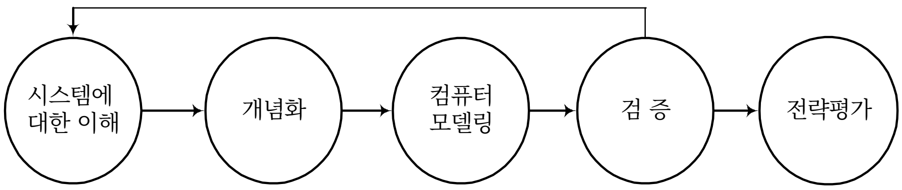


그림 1. 시스템 다이나믹스의 모델링 과정

3. 원전의 운전 모사 (Modeling)

3.1 운전제한조건 연속 운전시 위험도와 정지 운전시의 위험도 평가

계통에서의 한 개 혹은 그 이상의 기기고장으로 인해서 안전 계통이 운전제한조건에 들어갈 때, 운영기술지침서는 일반적으로 2가지의 대안중 하나를 선택하도록 요구한다. 첫째는 규정된 허용정지시간안에서 고장난 장비를 수리하고 전출력으로 운전을 지속적으로 유지하는 것이고 둘째는 정지 상태에서 수리를 완성하기 위해서 발전소를 정지 시키는 것이다. 이러한 대안을 기본적인 운전 대안(Basic Operational Alternatives)이라고 부른다. 그리고 위 대안과 관련된 위험도를 운전제한조건의 위험도라고 부른다. 전 출력에서 기기를 수리하는 것을 전 출력

운전시의 위험도라 부르고, 원자로를 정지하여 발생하는 위험도를 정지시 위험도라고 부른다[2].

안전계통에서 고장이 발생했을 경우 운전제한조건을 평가하는데 직접적으로 관련 있는 구간은 계통 고장이 발생한 시간부터 완전하게 수리가 이루어지는 시간까지이다. 이 구간에서의 위험도는 노심손상빈도를 통해 평가된다. 전출력 운전시 위험도가 정지시 위험도보다 작다면 위험도적인 면에서 볼 때 전 출력 운전을 선택하는 대안이 정지 운전을 하는 것보다 더 바람직하다. 또한 위험도 평가는 다음 몇 가지의 가정에 근거를 두고 있다. 운전모드를 변경하여 정지 운전을 하는 경우에 발전소는 고장이 발견된 후에 바로 정지를 한다는 것이다. 그러나 일반적으로는 허용정지시간(Allowed Outage Time: AOT)이 존재하기에 각 발전소는 필요한 수리를 할 수 있는 충분한 여유가 있고, 짧은 시간에 수리가 완성되는 기기는 발전소를 정지시키지 않고도 고장이 발생한 기기의 운전성능을 다시 회복할 수 있다.

기술지침서에서 고장 수리를 위해 주어지는 허용정지시간이 3일이라고 가정하고, 각 발전소는 허용정지시간에 기기를 수리할 수 없다고 할 때, 운전원은 고장을 발견한 후에 3일 안에 발전소를 정지 시킬 것이다. 이런 경우에 고장은 고장이 발견된 시간부터 정지가 실제로 시작되기까지의 전 출력 운전시 위험도 혹은 정지 위험도에 대한 결과에 영향을 미친다. 고장이 발견된 직후에 바로 정지를 한 경우와 비교할 때, 위의 경우는 발전소가 실제적으로 정지되기 전 축적된 위험도로 인해서 더 큰 위험을 초래할 것이다. 이와 같이, 정지를 결정하는 시간, 운전모드 변경에 대한 제한 시간은 발생한 고장으로 인한 총 위험 효과를 최소화하는 조치요구사항을 결정함에 있어서 충분히 고려되어야만 한다.

고장수목과 사건 수목에 근거한 PSA모델을 사용하여 노심손상빈도를 구하여 운전제한조건에 대한 전출력 운전시의 위험도와 정지시 위험도를 평가 할 수 있다. 전 출력 운전시 위험도는 고장이 발생한 장비의 이용 불능도를 적절하게 수정한 후 전출력에 대해서 전산화된 PSA모델[5]을 작동하여 쉽게 평가된다. 다음과 같은 공식을 통해 유도가 된다.

$$\Delta R = R_1 - R_0 \tag{1}$$

PSA는 운전제한조건의 위험도를 결정하기 위한 중요한 인자인 위험도 증가(ΔR)를 계산하기 위해서 사용된다. R_1 은 기기가 정지되었거나 이용할 수 없을 경우에 증가되는 위험도 수준이라고 하고, R_0 는 기기가 작동하거나 이용할 수 있을 경우에 감소된 위험도 수준이라고 하자. PSA에서 기기 정지사건은 기기의 복구나 정비에 대한 정지를 묘사하는 사건이다. 만약 기기 정지사건이 최소단절집합(Minimal Cutsets)에 포함된다면, 이들 최소단절집합은 R_1 과 R_0 를 결정하는데 사용될 수 있다[2].

위험도 비교 방법에 대한 기본적 공식은 다음과 같이 전출력 운전시 위험도와 정지시 위험도로 구분하여 계산한다. 전출력 운전시의 위험도를 계산하는 공식이 다음과 같다.

r_{co} = 기기 고장시 계속 운전으로 인한 노심손상확률

R_{co} = 기기 고장시 증가되는 노심손상빈도

$\underline{d}$: 평균 기기 정지 시간

기기 고장시 전출력 운전으로 인한 위험도는 아래와 같이 평가한다.

$$r_{co} = R_{co} * \underline{d} \tag{2}$$

증가된 노심손상빈도(CDF)의 용어로 R_{co} 를 사용하여 위에서 기술한 ΔR 와 같은 의미로 사용된다.

다음은, 기기 고장 시 원전 정지 후 기기 수리 예상되는 노심손상확률 r_{SD} 는

$$r_{SD} = \sum_i P_{IE-i/SD} * r_{SD/IE-i} \tag{3}$$

여기서

$\sum_i P_{IE-i/SD}$: 정지 상태로 전이하는 동안 초기 사건 i가 발생할 확률

$r_{SD/IE-i}$: 정지 냉각을 요구하는 초기사건 i에 대해 조건부 노심 손상 확률

또 초기 사건 IE -i에 대한 조건부 노심 손상 확률을 평가하기 위해서

$$r_{SD/IE-i} = r_{SD-0/IE-i} + \int_{t=0}^{\infty} dt * R_{SD/IE-i}(t) * P_d(t) \quad (4)$$

$r_{SD-0/IE-i}$: 초기 사건 i에 대한 정지 냉각 시작시 조건부 노심 손상 확률

$R_{SD/IE-i}(t)$: 초기 사건 i에 대해, t시간까지 정지 냉각하는 동안 조건부 노심 손상 빈도

$P_d(t)$: 초기 수리 상태에서 t시간까지 기기를 수리 못할 확률

정지 시 위험도에 대한 공식은 다음과 같이 접근한다.

처음에 정지시 발전소 상태를 몇가지로 나누어서 r_{SD} 에 대해서 노심손상확률을 가지고 접근하였다. 발전소 정지상태는 다음과 같이 분류한다.

a) 발전소가 미 임계가 되기까지 전출력에서 출력을 감소하는 것: 운전모드1 -> 운전모드2
b) 정지냉각계통이 사용될 때까지의 원자로 고온정지: -> 운전모드3
c) 정지냉각계통이 붕괴열을 제거하는데 사용되는 상온정지: -> 운전모드4

위 가정하에 정지시 위험도와 관련된 노심손상확률은 다음과 같이 평가 된다.

$$r_{SD} = R_1(1) * \underline{t_1} + R_1(2) * \underline{t_2} + R_1(2) * \underline{t_{re}}' + R_0(3) * \underline{t_3} \quad (5)$$

반면 전출력 운전시 위험도는 아래와 같다.

$$r_{CO} = R_1(0) * \underline{t_{re}} + R_0(0) * \underline{t_3} \quad (6)$$

여기서

$\underline{t_{re}}$: 기기 수리 시간,

$\underline{t_{re}}'$: 기기 수리 시간완료 시간

$\underline{t_1}$: 전출력에서 고온정지까지의 운전시간

$\underline{t_2}$: 고온정지에서 고온대기까지의 운전시간

$\underline{t_3}$: 고온대기에서 전출력까지의 운전시간

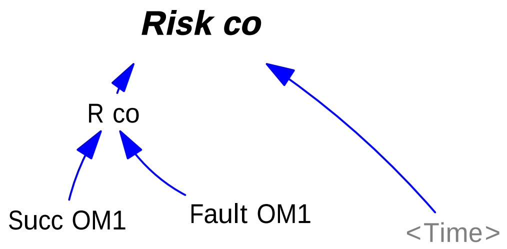
$R_1(i)$: 상태 i에서의 기기 고장 시 노심손상빈도

$R_0(i)$: 상태 i에서의 기기 정상 시 노심손상빈도를 나타낸다.

3.2 시스템 다이나믹스를 이용한 모델링

위 위험도 평가 공식을 통해서 전출력 운전시의 위험도와 정지시의 위험도를 비교할 수 있는 시스템을 구체적으로 모델링하였다. 이러한 위험도 비교 방법론은 시간에 따라 다른 값을 가지고 있기 때문에 시스템 다이나믹스를 활용하여 모델링할 때, 변화의 특성과 행태를 쉽게 확인 할 수 있다. 시스템 다이나믹스를 구현하는 VENSIM은 변수명과 변수의 연결을 통해서 위 공식을 쉽게 모델링하도록 구성되어 있다.

전 출력 운전시 위험도를 평가하기 위해서 $r_{co} = R_{co} * \underline{d}$ 은 다음 <그림 2>와 같이 모델링 된다.



범례
Risk co: 기기고장시 노심손상확률
R co: 기기 고장시 증가되는 노심 손상빈도
Succ OM1: 기기 작동시 감소된 위험도 수준
Fault OM1: 기기가 정지시 증가되는 위험도 수준

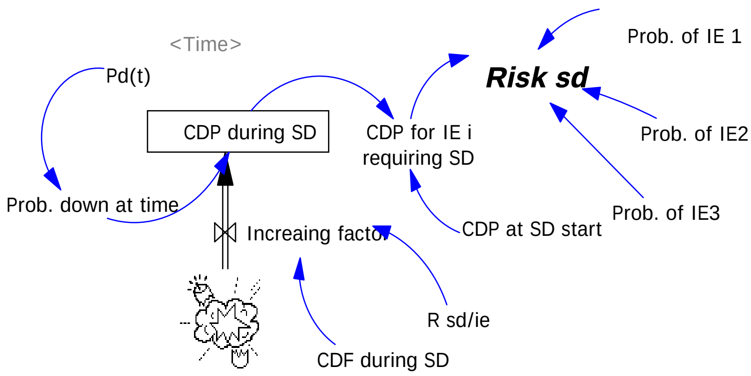
그림 2. 전 출력 운전시의 위험도 평가 모델

전 출력 운전시 기기의 고장(Fault OM1)과 기기가 정상적으로 작동(Succ OM1)할때의 차이가 시간(Time)에 비례하여 위험도(Risk co)에 주는 영향을 계산된다.

정지시의 위험도를 평가하기 위한

$$r_{SD} = \sum_i P_{IE-i/SD} * \{ r_{SD-0/IE-i} + \int_{t=0}^{\infty} dt * R_{SD/IE-i}(t) * P_d(t) \} \quad (7)$$

은 <그림 3>과 같이 모델링 되었다.



범례 Risk sd: 기기 고장 시 정지 노심손상확률 Prob. of IE i: 초기사건 i에 대한 노심 손상 확률 CDP at SD start: 정지 냉각 시작시 조건부 노심 손상 확률 CDP for IE I requiring SD : 정지 냉각 요구시 초기사건에 대한 노심손상확률 CDP during SD : t시간까지 정지 냉각하는 동안 조건부 노심 손상 확률 CDF during SD : t시간까지 정지 냉각하는 동안 조건부 노심 손상 빈도 Prob. Down at time: 초기 수리 상태에서 t시간까지 기기를 수리 못할 확률

그림 3. 정지시의 위험도 평가 모델

위의 공식에서 나타난 각각의 변수에 정지시 위험도를 기술한 앞 공식(3)과 공식(4)의 내용들을 적절한 데이터와 논리식으로 입력하였다. 정지하는 동안 노심손상확률(CDP during SD)과 정지 시작시 노심손상확률(CDP at SD start)의 합쳐진 값이 정지시 위험도(Risk sd)에 주는 영향을 구성하였다.

표 1. 보조 급수 계통(LCO 3.7.2)의 불만족시 조치 사항

불만족상태	조치요구사항	제한시간
1. 보조급수계통이 운전불가능 할 때	1.1 계통을 운전 가능한 상태로 복구한다.	24시간
2. 조치요구사항과 해당 제한 시간을 불만족할 때	2.1 **운전모드 3**으로 간다. 그리고 2.2 **운전모드 4**로 간다.	4 시간 10 시간

마지막으로 기기 고장에 대해서 전출력 운전과 정지 운전하는 경우에 시간에 따른 노심손상빈도가 어떻게 변화되는지를 비교하였다. <표 1>의 운전제한조건 3.7.2의 보조급수계통에 대한 불만족시 조치를 사용하여 제시된 제한 시간을 적용하는 경우에 안전성에 어떠한 영향을 미치는지를 <그림 6>에서 살펴 볼 수 있다[6]. 시스템 다이나믹스를 이용하여 보조급수계통에 대한 불만족시 조치를 사용하여 제시된 제한 시간을 적용하는 경우에 전출력 운전과 정지 운전하는 경우에 따른 위험도 비교를 <그림 4>와 같이 모델링한다.

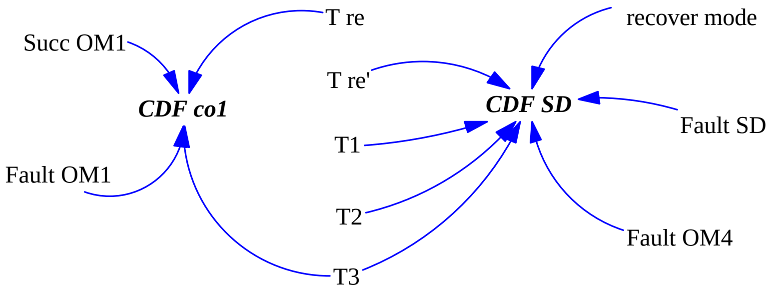


그림 4. 보조급수계통에 대한 전출력 운전과 정지 운전의 위험도 비교 모델

각 변수안에 포함되는 자료는 기존의 분석된 노심손상빈도에 대한 수치가 도입되었다[7]. 인간오류의 값[8]과 운전제한조건에 따른 운전모드 변화시의 초기 사건의 값[9]들을 사용하였으며, 월성 원자력 발전소의 정지, 저출력 노심손상빈도값을 도입하는데 한계가 있기 때문에 울진 원자력 발전소의 전출력 노심손상빈도와 정지/저출력 노심손상빈도값을 사용하였다.

4. 결과 해석

<그림 5>은 보조 급수 계통의 고장시 노심손상빈도의 결과를 사용하여 운전제한조건의 전출력 운전시 위험도와 정지시 위험도의 형태를 나타낸다. 고장이 탐지되는 시간을 0이라고 하면, 전출력 운전과 정지운전의 두 가지의 선택이 가능하다. <Risk co>는 계속적으로 전 출력 운전시 위험도이고, <Risk sd>는 정지시 운전에 대한 위험도를 나타낸다. 고장이 탐지된 후 전출력 운전의 위험도가 증가하는 이유는 계통의 이용불능도 때문이다. 노심 손상을 막기 위한 조치를 요구하는 경우, 사고가 일어날 수 있는 잠재적인 가능성이 있음을 나타내고 있다. 반면에, 정지시 위험도는 계통 이용불능과 발전소 운전 상태 변경으로 인한 증가된 과도사건의 빈도 때문에 전출력 운전의 위험도보다 더 크다.

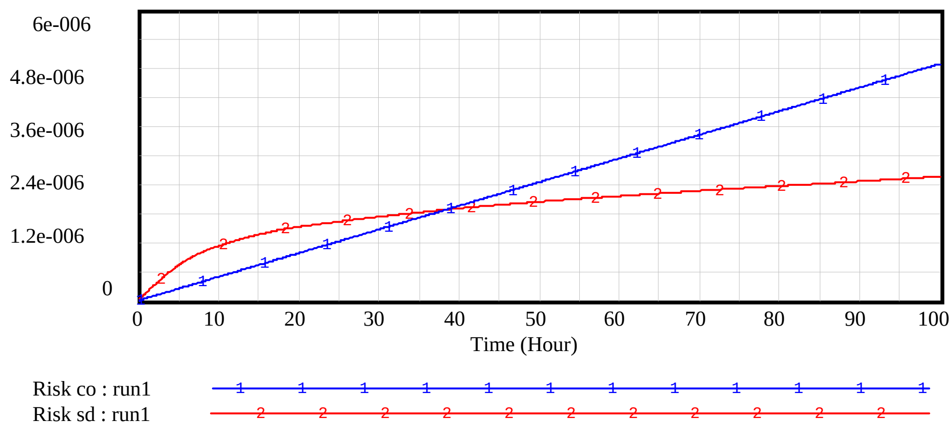


그림 5. 전출력 운전과 정지 운전의 위험도 비교

<그림 5>에서 두 선이 교차하는 지점에서의 시간 이후에는, 정지시 위험도 수준이 일정한 수준이 된다. 왜냐하면 붕괴열이 감소되고 안전계통에 조치에 대한 요구사항이 낮은 수준이 되기 있기 때문이다. 상대적으로 안전한 정지운전모드에서 낮은 위험도를 얻는 것을 확인 할 수 있는데 운전원이 운전제한조건 적용시 전 출력운전을 선택하는 대안보다는 정지운전모드를 결정하는데 대한 중요한 결정 요인이 된다.

또한 위에서는 고장이 발견된 시간에서 출발하여 수리하는 동안에 노심손상빈도가 비교되었는데 전 출력 운전시 위험도가 두 곡선이 교차하는 지점의 시간까지 정지시 위험도보다 더 작다. 그러므로 위험도 측면에서 고장 발생한 기기의 운전 가능성이 교차 시간까지 회복된다면 원자로를 정지하는 것보다 지속적인 출력 운전을 하는 것이 더 유용한 점이 많다. 반면에, 교차시간까지 기간보다 더 오랜 수리 시간이 필요하다면 원자로를 정지하는 것이 더 바람직하다.

마지막으로 운전제한조건 3.7.2의 보조급수계통에 대한 불만족시 조치를 사용하여 제시된 제한시간을 적용하는 경우에 다음과 같은 <그림 6>을 얻게 된다. CDF co:c1은 전출력 운전시 고장으로 인해서 보수 기간인 10hr부터 90hr까지 위험도가 증가했음을 나타낸다. CDF sd:c1은 기존의 기술지침서(3.7.2 보조급수계통)을 분석한 결과로 사고후 발생 후 28hr까지는 전출력으로 운전하는 것이 정지운전보다 좀 더 위험도가 작다는 것을 확인 할 수 있다. CDF sd:c2은 본 연구에서 평가한 결과로 제한시간을 40hr으로 증가해도 안전성과 효율성을 유지됨을 확인 할 수 있었다.

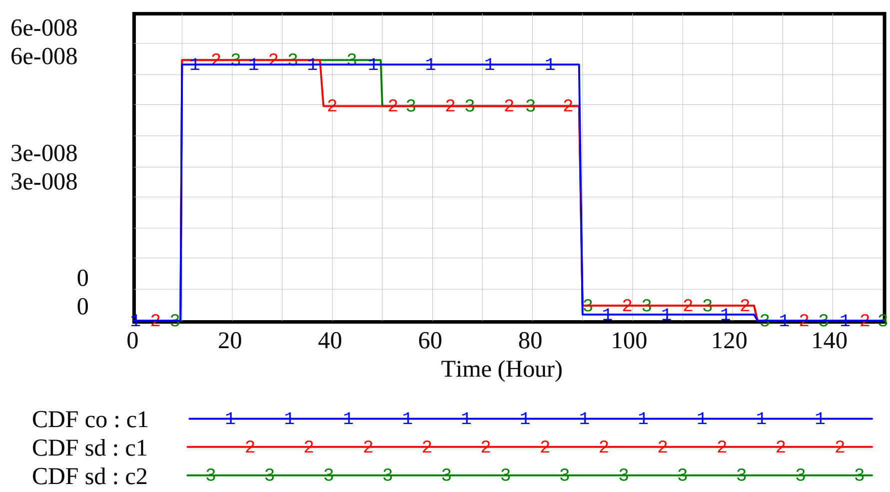


그림 6. 기기 고장에 대한 전출력 운전과 정지 운전의 시간에 따른 위험도 비교

본 연구를 통해 제시한 위험도 비교 방법을 통해 운전제한조건을 평가한 결과 현재의 운영기술지침서 상에서 기기 고장시 적용하게 되는 운전제한조건이 발전소의 안전성을 만족시킴을 확인 할 수 있었다. 또한 동일 시간대에서의 전출력 운전과 정지 운전의 위험도를 평가하여 운전제한조건의 불만족시 조치의 제한 시간을 연장할 경우에도 안전성과 효율성을 확보할 수 있음을 확인하였다.

5. 결론

공학적 판단아래 시행된 운영기술지침서의 보수적인 규정은 PSA와 같은 정량적인 분석 방법을 통해서 좀 더 능률적으로 변경된다. 운영기술지침서의 운전제한조건(Limiting Condition for Operation: LCO)을 평가하는 여러 시도가 시행되고 있는 과정에서 본 연구는 시간에 따라 변화하는 위험도를 평가하는데 유용한 도구인 Vensim을 사용하여 운전제한조건을 전 출력

운전과 정지시 위험도로 비교하여 평가하였다. 노심손상빈도를 위험도를 측정하는 기준으로 하여 전 출력 운전시 평가 방법과 정지 운전시 평가 방법을 도입하여 운전제한조건에 명시된 보조급수계통에 대한 위험도를 시간에 따라 정량적으로 평가할 수 있는 체계를 모델링하였다. 본 연구를 통하여 제시한 방법론의 개발과 적용은 원전의 운전제한조건을 개선하는 체계적 절차 개발에 기여할 것이다.

감사의 글

본 연구는 전력연구원의 "원자로 연구 개발 중장기 계획 사업" 과제수행의 일환으로 수행된 것이다.

참고문헌

[1] 강대일 외, "울진 3,4호기의 허용정지시간 변경에 대한 연구," 한국원자력연구소, 1998
[2] P. K. Samanta, I. S. Kim, T. Mankamo, and W. E. Vesely., "Handbook of Methods for Risk-Based Analysis of Technical Specification", NUREG/CR-6141, 1994.
[3] J. W. Forrester, "Industrial Dynamics," The MIT Press, Cambridge, MA, 1981.
[4] Vensim Manual, "Vensim 4: Standard Professional DSS", Ventana Systems, Inc, 1988.
[5] 김태운, 한상훈 외, "KIRAP을 이용한 사고경위 정량화 방법", KAERI/TR-848/97, 한국원자력연구소, 1997.
[6] 한국 전력 공사, "월성 원자력 2호기 운영기술지침서 Rev 1", 1998.
[7] 강대일 외, "전이위험도 평가를 이용한 허용정지시간 결정," KAERI / TR-1669 / 2000, 한국원자력 연구소, 2000.
[8] USNRC, "Accident Sequence Evaluation Program Human Reliability Analysis Procedure", NUREG/CR-4772, 1996.
[9] G.R. Andre et al., "Risk-Based Technical Specification Program", EPRI TR-101894, 1993.