

마크프 모델을 이용한 방사선 방어의 최적화

정진엽 · 이건재

한국 과학기술원 핵공학과

요 약

방사선 방어를 위한 방안을 결정하는데 도움을 주기 위해서는 각종 방사선 방어 최적화 방안들 사이에 정량적인 비교를 할 수 있는 해석적 방법이 필요하다. 본 논문에서는 발전소에서 행해지고 있는 검사, 시험 및 보수가 방사선 방어에 미치는 영향을 평가할 수 있는 동적 마크프 모델의 개념을 도입하였다.

마크프 모델의 응용을 다루기 위해 예로 든 증기발생기 전열관 파열에서는 고리 2 호기와 외국의 자료에 기초해 비용과 피폭 선량을 줄이기 위한 증기발생기의 최적 검사주기를 산출하였으며 그 결과 피폭 선량은 비용에 비해 그 기여도가 매우 낮은 것으로 나타났다. 예제 계산에 이용된 마크프 모델은 자료를 좀 더 보강함으로써 국내 발전소에도 쉽게 적용할 수 있으며 방사선 방어의 최적화를 위한 여러 가지 대안의 비교 우위를 평가하는 데에도 이용할 수 있다.

최적화, 마크프, 증기발생기, 직업상 방사선 피폭

1. 서 론

TMI 사고 이후 안정 및 규제 요건이 한층 더 강화되어 이를 충족시키기 위한 작업량의 증가와 발전설비의 운전이력에 따른 방사선 준위의 상승으로 운전보수시의 방사선 피폭의 증가하는 추세에 있다. 따라서 작업자의 방사선 피폭 저감 또는 방사선 방어의 최적화가 요청되고 있으며 이를 위해서는 안정성과 경제성이 보장되는 범위내에서 운전 보수증 작업자의 방사선 방어에 더 많은 노력을 기울여야 한다. 방사선 방어의 기본 개념은 정당화, 최적화, 선량제한으로 나타낼 수 있는데 그 중 최적화란 정당화된 행위에 대해 "합리적으로 달성 가능한 범위 내에서 방사선 피폭을 최소화" 하는 것으로 흔히 ALARA로 통용되고 있다. 일반적으로 방사선 방어 비용이 증가 할수록 방사선

피폭량은 감소하는 반면 단위 투자 비용당 피폭량 감소는 작아지므로 추가투자가 합리적인 범위 즉, 비용이득면에서 더 이상 정당화되지 못하는 선까지 방사선 방어수준을 높이는 것이 최적화의 개념이며 이에는 사회, 경제, 기술적 인자들을 함께 고려하는 것이 필요하다[1].

피폭 동향에 관한 NRC 자료[2]에 의하면 원자로의 가동 연수가 증가함에 따라 작업자의 피폭이 증가하고 있으며 원자로 종류에 따른 비교면에서는 BWR의 경우가 PWR 보다 높다. 또한 운전시 보다는 보수 검사시에 더 많은 방사선 피폭이 이뤄지고 있어 연간 피폭량의 약 80%가 각종 보수 및 검사시에 받는 것으로 나타나 있다. 특히 보수 시 증기 발생기에서의 발생기에서의 방사선 피폭이 중요한 부분을 차지하는데 전세계적으로 원자로 정지시 받는 피폭량의 절반정도를 증기발생기

관련 작업에서 받는 것으로 평가되고 있다[2-5].

이상과 같은 사실로 미루어 볼 때 작업자에 대한, 특히 각종 및 검사시의 방사선 피폭을 ALARA 에 입각해 줄이는 것이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 작업자의 피폭 저감 최적화 방안의 하나로 마코프 모델의 개념을 도입하여 그 이용방안을 소개하였으며 이를 기초로 증기발생기의 최적 검사주기를 산출하였다.

2. 마코프 모델

가. 개념

마코프 확률 모델은 계통의 상태를 나타내는 확률변수와 관측시간을 나타내는 확률변수의 함수이다. 여기서 각 확률변수의 연속성 여부에 따라 4 가지로 분류되며 그 중에서 상태가 이산적이고 관측시간이 연속적인 모형은 신뢰도 공학에서 매우 중요한 역할을 한다[6, 7]. 마코프 모델은 상호 배타적인 계통의 상태나 조건의 집합으로 정의될 수 있으며 어떤 i 상태에서 다른 j 상태로의 천이확률의 집합에 의해 나타낼 수 있다. 이 천이확률은 마코프 모델의 가장 중요한 특징의 하나로서 상태 i 와 j 에만 달려 있어서 최종상태이외의 과거상태와는 전혀 무관하다.

표 1에서 수직열은 과정이 시간 t 에 있을 (초기)상태를 나타내고 수평행은 과정이 시간 $t+dt$ 에 천이할(최종)상태를 나타낸다. 또한 P_{ij} 는 시간 간격 Δt 사이에 계통이 초기상태 i 에서 최종상태 j 로 천이할 확률을 나타낸다. 그러므로 표에서 임의의 수평행에 대해 모든 P_{ij} 값을 더하면 1이 된다. 이러한 천이행렬로부터 계통에 대한 차분방정식을 구할 수 있으며 $P_{sm}^{(t)}$ 를 시간 t 에서 상태 n

의 상태확률이라 할 때

$$P_{so}(t+\Delta t) = p_{oo} P_{so}(t) + p_{io} P_{si}(t) + \dots + p_{no} P_{sn}(t) \quad (1)$$

가 되어 이를 미분방정식으로 나타낼 수 있다.

나. 직접 고장

발전소 운전원은 검사와 시험을 통해 고장을 발견하고 그에 따라 보수를 하게 되는데 정적 신뢰도 모델에서는 주어진 시간구간의 끝에서만 어떤 계통이 제 기능을 수행할 수 있는지의 가능성을 나타낼 뿐 그 구간 중간에서의 상태나 대기상태의 계통에 대해서는 정확한 기술이 어렵기 때문에 동적 상황을 기술하기 위해서는 번거로운 절차를 거쳐야 한다. 반면에 마코프 모델(동적 모델)을 이용하면 시간에 따른 변화를 정적 신뢰도 모델보다도 더 단순화하여 기술할 수 있어 기기가 직접 고장을 일으킬 수 있는 계통의 이용도를 평가하는 데 도움을 주며 계산이 쉬운 형태로 해를 구할 수 있다. 여기서 직접 고장이라 함은 기기 또는 부품이 어떤 선행상태를 거쳐 고장을 일으켰을 때 그 때 발생한 고장 자체를 의미한다. 예를 들면 금이 간 배관이 파열된 경우 배관에 금이 간 것은 선행상태에 해당되고 그로 인해 배관이 파열된 것은 직접 고장이라 할 수 있다.

이를 설명하기 위해 그림 1과 같이 두 개의 다중계통과 한 개의 공통계통으로 이뤄진 계통을 가정한다. 그림에서 A, B는 각각 공통계통에서 감지할 수 없는 고장율과 감지할 수 있는 고장율을 나타내고, C, D는 다중계통에서 감지할 수 없는 고장율과 감지할 수 있는 고장율을 나타낸다. 만약 기기 또는 계통의 고장이 운전원의 사전 진단 조치로 감지할 수 있는 것이면 보수 후 고장이 보

Table 1. Transition matrix probabilities (P_{ij}).

Final State (j) Initial State (i)	$S_0(t+\Delta t)$	$S_1(t+\Delta t)$	$S_n(t+\Delta t)$
$S_0(t), i=0$	P_{00}	P_{01}	P_{0n}
$S_1(t), i=1$	P_{10}	P_{22}	P_{2n}
.....
$S_n(t), i=n$	P_{n0}	P_{n1}	P_{nn}

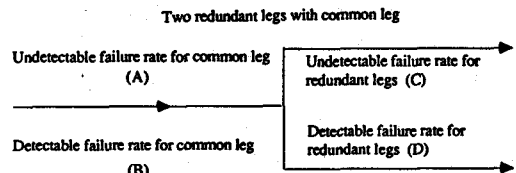


Fig. 1. Primary Markov model system diagram

[8].

Table 2. Primary Markov model state.

Primary Markov model state definition						
State	System conditions					
	Common		One train		Other train	
	detectable	undetectable	detectable	undetectable	detectable	undetectable
1	X	X	X	X	X	X
2	X	X	O	X	X	X
3	X	X	O	X	O	X
4	X	X	X	O	X	X
5	X	X	O	O	X	X
6	X	X	O	O	X	O
7	O	X	X	X	O	X
8	O	X	O	X	X	X
9	O	X	X	O	X	X
10	O	X	X	O	O	X
11	O	X	O	O	X	X
12	O	X	O	O	X	X
13	O	X	O	O	X	O
14	O	X	O	O	O	X
15	---	O	---	O	---	O

Table 3. Supporting Markov model state.

Supporting Markov model state definition				
State	System conditions			
	Train A		Train B	
	detectable	undetectable	detectable	undetectable
1	X	X	X	X
2	O	X	X	X
3	X	X	O	X
4	O	X	O	X
5	X	O	X	X
6	X	X	X	O
7	O	O	X	X
8	X	X	O	O
9	O	X	X	O
10	X	O	O	X
11	O	O	O	X
12	O	X	O	O
13	---	O	---	O

다 적게 일어나는 상태로 이동될 수 있다. 이러한 계통을 모델링하기 위해서는 주모델과 보조모델로 불리는 두 가지의 마코프 모델이 필요한데 주모델을 계통 전체를 기술하며 두 개의 다중계통을 구분하지 않는 경우이고 보조모델은 다중계통만을 기술할 때 이용되므로 고장율은 C와 D만을 고려한다. 이 두가지 모델을 합하여 취급하면 풀이가 복잡해지고 시간이 많이 소모되므로 편의상 나누어 취급하며 두 모델에 대한 상태의 정의는 표 2, 3과 같다.

표 2에서 주모델은 15가지 상태로 구성되어 있는데 각각의 상태는 정의에 따라 독특하게 구분되어 어떤 임의의 시각과 계통은 반드시 하나의 상태만을 갖게 된다. 이때 상태 1은 어떤 형태의 고장도 없는 상태로 마코프 모델을 해석하는 시발점이 되고 상태 15는 공통계통과 두 개의 다중계통에서 모두 감지할 수 없는 고장이 일어난 상태로

흡수상태가 된다. 표 2에서 각 상태들간의 관계를 알 수 있으며 그 때의 천이율을 표 4와 같이 나타낼 수 있다. 이로부터 각 상태확률들을 구할 수 있는데 상태 1과 2에 대해 예를 들면, P_1 이 상태 1의 확률이고 P_1' 가 시간에 따른 P_1 의 변화율일 때,

$$P_1' = -(A + B + 2C + 2D)P_1, \quad (2)$$

의 관계식이 성립한다. 다음으로 상태 2는 상태 1로부터만 천이될 수 있고 다시 상태 3, 5, 6, 9, 15로 정해진 천이율에 따라 천이될 수 있으므로 P_2' 에 대해서는

$$P_2' = 2D P_2 - (A + B + C + C + D)P_1, \quad (3)$$

와 같은 관계식을 세울 수 있다. 이러한 마코프 모델의 풀이를 위해서는 먼저 계통에서의 각 상태들을 정의하고 각 상태들간의 천이율을 결정 한 후 이들로부터 작성된 연립 선형 미분방정식들을 풀어야 한다. 여기에서 K_i 가 어떤 구간의 초기의 상태 i 에 있을 확률이라 하면, 임의의 시간 t 에서 상태 i 의 확률 P_i 와 K_i 의 합은 다음과 같이 1이 된다.

$$P_i = 1, \quad (4)$$

$$K_i = 1, \quad (5)$$

계통이 다수의 기기로 구성된 경우 계통의 상태는 각 기기의 상태에 따라 전체 계통이 가동상태에 있는지 또는 고장난 상태에 있는지를 나타낸다. 즉, 그림 1의 계통에서는 전체 계통의 완전히 고장나려면 공통계통이 고장나던가 혹은 두 개의 다중계통이 동시에 고장나야 하므로 상태 1, 2, 4,

Table 4. Transition rates for primary Markov model.

From	To	A	B	C	D	From	To	A	B	C	D	From	To	A	B	C	D
1	2			2		4	11	1	1			9	12				1
1	4			2		4	15	1	1			9	13				1
1	8		1			5	7				1	9	15				1
1	15	1				5	15	1	1	1		10	14				2
2	3			1		5	15	1	1	1		10	15		1		
2	5			1		6	7				1	11	12				
2	6		1			6	13	1	1			11	13				1
2	9		1			6	15	1	1	1		11	15		1		1
2	15	1				7	14					12	14				1
3	7			2		7	15	1	1	1		12	15		1		1
3	10		1			8	9				2	13	14				1
3	15	1				8	11			2		13	15		1		1
4	5		1			8	15	1				14	15		1		1
4	6			1		9	10				1						

5는 계통이 작동될 수 있는 상태가 된다. 따라서 이 계통의 이용도, 이용률, 그리고 임의의 구간 T_i 부터 T_r 까지의 평균 이용률은 아래와 같이 계산된다.

$$\text{이용도 } A(t) = P_1(t) + P_2(t) + P_4(t) + P_5(t), \quad (6)$$

$$\text{이용률 } U(t) = 1 - A(t), \quad (7)$$

$$\text{평균 이용률 } \bar{U} = \frac{1}{T_r - T_i} \int_{T_i}^{T_r} U(t) dt. \quad (8)$$

한편, 표 3과 같이 각 상태가 정의되는 보조모델도 주모델과 같은 방법으로 풀이될 수 있다.

다. 연속 고장

이는 어떤 부품 또는 기기가 전혀 고장이 없는 상태에서 시작되어 정기 검사등에 의해 감지될 수 있는 형태로 손상을 일으키는 일종의 중간상태를 거친 후 고장을 유발하는 경우를 말한다.

마코프 모델을 이용하여 이러한 유형의 고장을 모델링하기 위해서는 편의상 다음의 3가지 상태로 나누어 정의할 수 있다.

상태 1: 부품 또는 기기가 고장이거나 손상없이 잘 작동되는 상태

상태 2: 부품 또는 기기에 감지될 수 있는 형태로 손상 또는 열화가 일어난 상태

상태 3: 부품 또는 기기에 고장이 일어난 상태
 임의의 시간 t 에서 상태 i 의 확률 P_i 를 구하기 위해 d, f 를 각각 감지할 수 있는 형태의 손상을, 손상된 상태하에서의 고장률이라 하고 K_1, K_2 를 각각 상태 1, 2의 초기 상태확률이라 하면 표 5로부터 다음 식을 얻게 된다.

Table 5. Transition rates for sequential failure.

From	To	d	f
1	2	1	
2	3		1

$$P_1 = K_1 e^{-dt}, \quad (9)$$

$$P_2 = \left[\frac{d' K_1 + (d'-f) K_2}{d' - f} \right] e^{-ft} - \left[\frac{d}{d'-f} \right] K_1 e^{-dt}, \quad (10)$$

$$P_3 = 1 - (P_1 + P_2), \quad (11)$$

3. 증기발생기건전성과 마코프 모델의 응용

경수로 및 중수로에서 증기발생기 전열관이 파열되면 방사능이 누출되어 안전성 확보에 문제를 일으키는 동시에, 가동 중지후 유지 및 보수에 따라 가동율을 떨어뜨리고 방사능 물질로 오염된 경우 작업자의 방사선 피폭으로 작업에 지장을 초래하며 증기발생기의 수명을 단축시킨다. 증기발생기 전열관의 파손 동향을 살펴보면 70년대 초기에 주된 파손 원인이었던 wastage와 덴팅은 2차측의 전회발처리, 재료 및 설계의 개선, 2차측 수질 조건의 엄격한 제한등으로 80년대에 들어와서는 많이 줄었으나 그 대신 1차측과 2차측으로 부터 발생하는 응력부식균열, 결정입계부식, 점식이 주요 원인으로 등장하고 있다[9]. 이러한 요인등으로 만약의 경우 증기발생기를 교체해야 할 때는 10개월이상의 긴 교체 기간과 1억 달러이상의 천문학적 비용이 소요된다. 따라서 증기발생기 보호를 위한 엄격한 운전과 계획성있는 설비 검사 및 보수 관리가 필요하고 이를 위해서 비용과 방사선 피폭 사이에서 최적화가 이루어져야 한다.

증기발생기의 최적 검사주기를 산출하기 위해 앞에서 설명된 마코프 모델을 이용할 수 있다. 먼저, 식(9)-(11)은 초기 상태확률 K_1 과 K_2 가 각각 1과 0의 값을 가지므로 다음과 같이 정리된다.

$$P_1 = e^{-dt}, \quad (12)$$

$$P_2 = \left(\frac{d'}{d'-f} \right) e^{-ft} - \left(\frac{d}{d'-f} \right) e^{-dt}, \quad (13)$$

$$P_3 = 1 - (P_1 + P_2), \quad (14)$$

여기서 T 는 검사주기, d' 와 f 는 각각 증기발

생기 전열관의 열화율(degradation rate)과 열화가 발생된 관의 파열율(repture rate)로서 d' 는 발전소 운전자료로부터 계산할 수 있으나 f' 는 식(14)를 이용해 역으로 계산하여 얻어야 한다. 이때 열화된 전열관이 파열되기 전에는 누설되지 않는다고 가정하면 식(14)는 검사주기동안 하나의 전열관이 파열될 수 있는 확률을 나타내므로 이 값에 전열관의 총 수와 전열관이 사용된 시간을 곱하여 가동된 시간동안 파열된 전열관의 수를 얻게 된다. 이 과정에서 M , N 이 각각 전열관의 총 수와 파열된 전열관의 수를 나타낸다면 N 개가 파열될 확률 $P(N)$ 은 식(15)로 구할 수 있다.

$$P(N) = {}_M C_N (1 - P_3)^{M-N} P_3^N \quad (15)$$

끝으로 전열관이 열화되는 확률에 전열관의 총 수를 곱한 것이 일정 시간(T)동안에 열화가 진행되어 보수를 해야하는 전열관의 수와 같다는 사실과 식(15)로부터 검사 및 보수시에 소요되는 경비와 방사선 피폭량이 최소로 되는 검사주기를 구하게 된다.

이상의 과정에 대한 이해를 돕기 위하여 예제의 계산을 수행하였다. 가능하면 국내 원자력 발전소에 대한 증기발생기의 최적 검사주기를 산출하려 했으나 이에 필요한 국내 발전소의 운전이력, 증기발생기 관련 작업등에 관계된 많은 자료가 충분히 확보 정리되지 못한 상태여서 증기발생기 운전에 관한 것은 고리 2호기의 것을 이용하고 그외 관련 작업에서의 비용 및 피폭선량은 WASH-1400과 비용-효과 분석 결과를 정리한 NUREG/CR-3665[8]의 값을 인용하였다.

'88년 현재 고리 원자력 2호기의 증기발생기 전열관 열화율 d' 는 1.04×10^{-6} degraded tube/tube-hr로 이는 증기발생기 운전시간과 관막음한 전열관의 수에 기초한 것이다. 고리 2호기는 2개의 증기발생기와 증기발생기당 5,624개의 전열관을 갖고 있고 운전시간이 약 37,000시간 정도이므로 이 값들과 식(14)를 이용하여 f' 값을 구할 수 있다. 즉, 파열된 증기발생기 전열관의 수는 P_3 와 전열관이 운전된 시간의 곱과 같으므로 파열된 증기발생기 전열관의 수와 현행 검사주기(T)에 따라 f' 값이 달리 구해진다. 이 예제에서는 표 6과

Table 6. f values for different SG inspection intervals and number of tube ruptures.

(units : tube ruptures / degraded tube hr)

Inspection interval (yr)	1	1.5	2	2.5
Number of SG tube ruptures				
0.025	1.34E-08	8.92E-09	6.72E-09	5.39E-09
0.05	2.69E-08	1.78E-08	1.34E-08	1.08E-08
0.1	5.38E-08	3.57E-08	2.69E-08	2.16E-08

Table 7. Exposure doses and costs due to an SGTR [8].

Expected public dose	345 man-rem
Expected occupational dose	353.8 man-rem
Total expected dose	698.3 man-rem
Expected accident cost	\$ 3.77E+05
Expected repair cost	\$ 3.56E+07
Total expected SGTR cost	\$ 3.60E+07

* SGTR : Steam Generator Tube Rupture

Table 8. Exposure doses and costs for each SG inspection [8].

	cost (\$)	Exposure cost (man-rem)
Each SG inspection	2.46E+05	12
Each SG tube repair	1.60E+03	1

같이 검사주기가 1, 1.5, 2, 2.5년일 때와 증기발생기 전열관의 파열수가 0.025, 0.05, 1번일 때에 대하여 f' 값을 계산하였다. 여기서 증기발생기 전열관의 파열수가 0.05번이라는 것은 약 37,000시간 정도 운전된 고리 2호기같은 발전소 20기중에서 1개의 증기발생기 전열관이 파열됨을 뜻하며 표에 나온 값들은 이 계산에 대체로 타당한 값들로 여겨진다. 표 7은 NUREG 보고서[8]에서 인용한 증기발생기 전열관 파열 사고의 비용과 피폭선량을 나타낸 것이고, 표 8은 역시 같은 문헌에서 인용한 증기발생기 검사 및 보수에 대한 비용과 피폭선량을 정리한 것이다. 표 9, 10은 증기발생기 전열관 파열수가 0.05일 때에 대해 계산한 것으로 표 9는 각 검사주기에 따른 P_3 값과 $P(N)$ 값을 구한 결과 검사주기가 길수록 P_3 값이 커져서

Table 9. Probability of tube ruptures for various inspection intervals.

$d' = 0.1040 \text{ E-}05$ degraded tube/tube-hr
 $f' = 0.2689 \text{ e-}07$ tube ruptures/degraded tube-hr

$d' = 0.1040\text{E-}05$ degraded tube/tube-hr
 $f' = 0.2689\text{E-}07$ tube ruptures/degraded tube-hr

Inspection interval (yr)	Single tube rupture prob.	Probability of multiple ruptures				
		0	1	2	3	4
0.25	0.1194E-06	0.9987	0.0013	0.0000	0.0000	0.0000
0.50	0.3147E-06	0.9967	0.0035	0.0000	0.0000	0.0000
0.75	0.6397E-06	0.9927	0.0071	0.0000	0.0000	0.0000
1.00	0.1094E-05	0.9880	0.0122	0.0001	0.0000	0.0000
1.25	0.1679E-05	0.9814	0.0185	0.0002	0.0000	0.0000
1.50	0.2391E-05	0.9735	0.0262	0.0004	0.0000	0.0000
1.75	0.3234E-05	0.9644	0.0351	0.0006	0.0000	0.0000
2.00	0.4204E-05	0.9535	0.0451	0.0011	0.0000	0.0000
2.25	0.5302E-05	0.9421	0.0562	0.0017	0.0000	0.0000
2.50	0.6528E-05	0.9289	0.0682	0.0025	0.0001	0.0000
2.75	0.7883E-05	0.9153	0.0812	0.0036	0.0001	0.0000
3.00	0.9364E-05	0.9001	0.0948	0.0050	0.0002	0.0000
3.25	0.1097E-04	0.8839	0.1091	0.0067	0.0003	0.0000
3.50	0.1271E-04	0.8669	0.1239	0.0089	0.0004	0.0000
3.75	0.1457E-04	0.8491	0.1391	0.0114	0.0006	0.0000
4.00	0.1655E-04	0.8300	0.1545	0.0144	0.0009	0.0000
4.25	0.1867E-04	0.8107	0.1702	0.0179	0.0013	0.0001
4.50	0.2091E-04	0.7903	0.1858	0.0218	0.0017	0.0001
4.75	0.2327E-04	0.7699	0.2015	0.0264	0.0023	0.0002
5.00	0.2576E-04	0.7485	0.2169	0.0314	0.0030	0.0002

여러개의 전열관이 파열될 확률도 높아지고 있음을 알 수 있다. 표 10 도 역시 각 검사주기에 따라 P_2 값과 보수가 필요한 전열관의 수를 구한 것이다.

다음으로 비용과 선량에 따른 최적화 과정이 남아 있는데 이 때 임의의 검사주기에 대해 증기발생기 전열관의 파열이 등간격으로 발생하고 일단 파열이 일어난 관은 완전히 보수된다고 가정한다. 예를 들면 표 9 에서 검사주기가 5년일 때 전열관의 파열이 1개인 경우는 증기발생기를 검사한지 2.5년만에 전열관 1개가 파열되어 완전 보수되고 나머지 2.5년동안 전열관이 보수된 후 열화를 일으킨다는 것이며 5년 동안 전열관의 파열이 3개인 경우는 증기발생기를 검사한지 1.25, 2.5, 3.75년만에 각각 1개씩의 전열관이 파열되고 5년째는 다시 증기발생기를 검사하는 것을 뜻한다. 이러한 가정에서 출발하여 보수 및 검사 비용에 전열관 파열 사고 비용을 더한 총비용, T년 동안의 기대비용, 그리고 평균 연간비용등을 구하여 각 검사주기에 대한 비교우위를 정할 수 있다. 피폭선량에 대해서도 앞에 서술한 것과 마찬가지로 계산할 수 있으며 우리 실정에 맞는 manrem cost 가 있다면

Table 10. Number of expected repairs for various inspection intervals.

$d' = 0.1040\text{E-}05$ degraded tube/tube-hr
 $f' = 0.2689\text{E-}07$ tube ruptures/degraded tube-hr

Inspection interval (yr)	Degradation probability	Number of expected repairs
0.25	0.2244E-02	0.2524E+02
0.50	0.4482E-02	0.5042E+02
0.75	0.6716E-02	0.7554E+02
1.00	0.8944E-02	0.1006E+03
1.25	0.1117E-01	0.1256E+03
1.50	0.1339E-01	0.1506E+03
1.75	0.1560E-01	0.1755E+03
2.00	0.1781E-01	0.2003E+03
2.25	0.2001E-01	0.2251E+03
2.50	0.2221E-01	0.2498E+03
2.75	0.2440E-01	0.2744E+03
3.00	0.2659E-01	0.2991E+03
3.25	0.2877E-01	0.3236E+03
3.50	0.3095E-01	0.3481E+03
3.75	0.3312E-01	0.3725E+03
4.00	0.3529E-01	0.3969E+03
4.25	0.3745E-01	0.4212E+03
4.50	0.3961E-01	0.4455E+03
4.75	0.4176E-01	0.4697E+03
5.00	0.4391E-01	0.4939E+03

비용과 피폭선량을 동시에 고려할 수도 있다. 이들 중 비용에 관한 계산 결과의 일부를 f' 가 2.69×10^{-8} tube ruptures/degraded tube-hr 일 때에 대해 표 11 에 나타냈는데 이는 각 검사주기와 다중파열에 따른 T년간의 기대비용, 평균 연간비용과 각 검사주기에 대한 총 연간비용을 보여주고 있다. 표에서 다양한 검사주기에 따른 값을 계산하고 있기 때문에 T년간의 총 기대 비용으로는 비교할 수 없고 총 연간비용으로 비교하는 것이 타당하며 그 결과 최적 검사주기가 1년임을 알 수 있다.

그림 2 는 그 결과를 표시한 것으로 비용만을 기준으로 한 것, 피폭선량만을 기준으로 한 것, 그리고 \$1,000/man-rem 을 가정했을 때 비용과 피폭선량을 동시에 기준으로 한 것을 함께 나타내었다. 그림에서는 비용만을 고려한 것과 피폭선량만을 고려한 것이 차이가 많이 나지만 피폭선량이 기여하는 정도가 낮기 때문에 두 가지를 함께 고려해도 비용만을 고려한 것과 큰 차이가 나지 않는다.

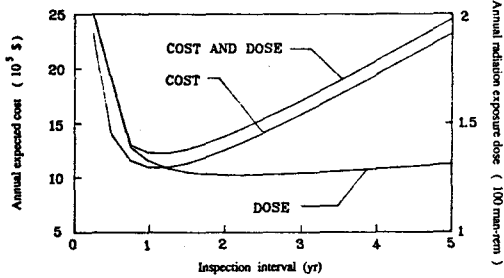


Fig. 2. Annual expected cost and radiation expected dose as a function of inspection interval.
 ($d' = 1.04 \times 10^{-6}$ degraded tube/tube-hr, $f' = 2.69 \times 10^{-8}$ tube ruptures/degraded tube-hr, \$1,000/mam-rem)

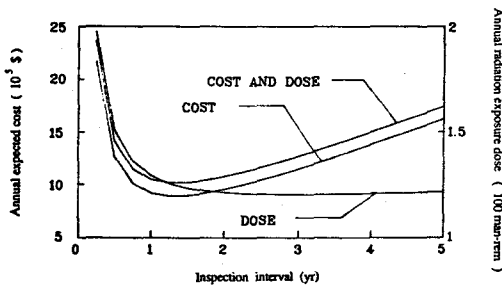


Fig. 3. Annual expected cost and radiation expected dose as a function of inspection interval.
 ($d' = 1.04 \times 10^{-6}$ degraded tube/tube-hr, $f' = 1.78 \times 10^{-8}$ tube ruptures/degraded tube-hr, \$1,000/mam-rem)

다. 그림 3, 4는 전열관의 파열이 0.05 이고 현행 검사주기가 각각 1.5년, 2년일 때의 결과를 3가지 관점에서 표시한 것으로 비용과 피폭선량을 동시에 고려했을 때의 결과가 각각 1.25년, 1.5년임을 알 수 있다.

이상과 같이 국내 원자력 발전소의 데이터와 외국 자료를 혼용하여 몇 가지 변수에 따라 그 결과를 구해 보았으나 국내 자료만을 적용시켜도 위와는 큰 차이가 없으리라 생각되며 이 방법은 d' 와 f' 값만 구할 수 있다면 어느 경우에도 쉽게 적용시킬 수 있다.

Table 11. Total annual costs for various inspection intervals.

$d' = 0.1040E-05$ degraded tube/tube-hr, $f' = 0.2689E-07$ tube ruptures/degraded tube-hr

Inspection interval (yr)	Number of ruptures in interval	Expected costs for interval (\$)	Expected costs per year (\$)	Total costs per year (\$)
0.25	0	0.5317E+06	0.2127E+07	0.2322E+07
	1	0.4881E+05	0.1952E+06	
0.50	0	0.5706E+06	0.1141E+07	0.1400E+07
	1	0.1288E+06	0.2577E+06	
0.75	0	0.6085E+06	0.8113E+06	0.1162E+07
	1	0.2609E+06	0.3478E+06	
1.00	0	0.6450E+06	0.6450E+06	0.1095E+07
	1	0.4446E+06	0.4446E+06	
	2	0.5426E+04	0.5426E+04	
1.25	0	0.6800E+06	0.5440E+06	0.1096E+07
	1	0.6777E+06	0.5422E+06	
	2	0.1268E+05	0.1014E+05	
1.50	0	0.7134E+06	0.4756E+06	0.1132E+07
	1	0.9991E+06	0.6394E+06	
	2	0.2558E+05	0.1705E+05	
1.75	0	0.7451E+06	0.4258E+06	0.1187E+07
	1	0.1285E+07	0.7342E+06	
	2	0.4630E+05	0.2646E+05	
2.00	0	0.7749E+06	0.3875E+06	0.1254E+07
	1	0.1653E+07	0.8266E+06	
	2	0.7742E+05	0.3871E+05	
2.25	0	0.8028E+06	0.3568E+06	0.1328E+07
	1	0.2061E+07	0.9195E+06	
	2	0.1217E+06	0.5408E+05	
2.50	0	0.8285E+06	0.3314E+06	0.1408E+07
	1	0.2504E+07	0.1002E+07	
	2	0.1820E+06	0.7279E+05	
2.75	0	0.8521E+06	0.3099E+06	0.1492E+07
	1	0.2979E+07	0.1083E+07	
	2	0.2612E+06	0.9499E+05	
3.00	0	0.8735E+06	0.2912E+06	0.1579E+07
	1	0.3482E+07	0.1161E+07	
	2	0.3626E+06	0.1209E+06	
	3	0.1903E+05	0.6343E+04	

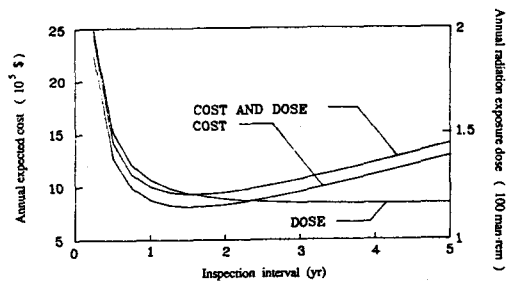


Fig. 4. Annual expected cost and radiation expected dose as a function of inspection interval.
 ($d' = 1.04 \times 10^{-6}$ degraded tube/tube-hr, $f' = 2.69 \times 10^{-8}$ tube rupture/degraded tube-hr, \$1,000/man-rem)

4. 결 론

방사선 방어의 최적화는 대부분 어떤 절대적인 기준이나 지침을 제공하기 보다는 여러가지 대안에 관한 상대적인 평가를 가능하게 한다고 이해하는 것이 더욱 타당하다. 마코프 모델은 근래에 와서 방사선 방어의 최적화를 위한 비용-이득 분석과 위험도 분석에 자주 채택되는 방법으로 발전소 운전원의 사전 진단조치가 발전소 가동률에 미치는 영향을 평가하는 것이 가능한 장점은 있으나 앞의 예제에서는 관련 작업의 비용이나 방사선 피폭선량과 같은 국내 고유의 데이터가 정리되지 않은 상태이기 때문에 정확한 결과를 산출하는 것이 어려운 실정이다. 그러나 분석결과에 약간의 오차가 있을 수 있다 하더라도 해당 응용분야에 대한 통찰력을 심어주고 동적상황에서의 추계적 과정에 대한 기술을 가능하게 하여 실제값에 근사한 결과를 얻을 수 있다.

마코프 모델의 응용예에서 증기발생기 전열관이 파열된 경우 공중 선량과 작업자의 선량은 거의 같지만 정상적인 검사 및 보수시 작업자의 선량이 사고 발생시보다 훨씬 크기 때문에 작업 선량이 전체적인 선량을 지배하고 있다. 따라서 사고와 정상 운전시에 방사선 방어의 최적화를 위해서는 비용과 피폭선량을 동시에 고려해야 하는데 현재로는 man-rem cost 가 설정되어 있지 않고 계산과정을 단순화하기 위한 약간의 가정으로 절대적으로 정확한 계산은 불가능하나 각 검사주기 사이의 상대적 우위를 구하는 데는 지장이 없다. 이와 같은 마코프 모델의 응용은 손상율과 손상이 일어난 기기에서의 고장률만 알면 시간에 따른 상태 변화를 기술하는 데 쉽게 적용될 수 있다.

끝으로 증기발생기를 비롯한 중요 기기를 수리 또는 보수 측면에서 보다는 예측 및 예방 보수 측면에서 최적화된 검사주기에 따라 검사와 시험을 수행해야 하며 특히 예측 보수 능력을 배양하기 위해서 점검기록에 대한 자료 정리를 체계적으로 할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구의 수행에 있어 연구비를 지원해 준 한

국 과학 기술 재단에 심심한 사의를 표합니다.

참고 문헌

1. International Commission on Radiological Protection, *Cost-Benefit Analysis in the Optimization of Radiation Protection*, ICRP Pub.37, Pergamon Press(1983).
2. R.A.Shaw, "EPRI programs in power reactor radiation control", in : *Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems*, pp. 203-206, BNES, London(1978).
3. R.A.Shaw and M.D.Naughton, "Radiation control in light water reactors", in : *Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems 2*, pp. 225-228, BNES, London(1981).
4. R.A.Shaw, C.J.Wood, M.D.Naughton, and H.Ocken. "Control of radiation field sources in LWRs", in : *Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems 3*, pp. 125-131, BNES, London(1983).
5. Dennis Quinn, "Steam generator maintenance", in : *Proc.Int. Workshop on Historic Dose Experience and Dose Reduction [ALARA] at Nuclear Power Plants*, pp. 32-46, BNL, New York(1985).
6. Nam Jin Jo, "Reliability analysis of the reactor protection system using Markov processes", *J.Korean Nuclear Society*, 19(4), 279-291(1987).
7. K.S.Jeong and S.H.Chang, "Development of dynamic fault tree using Markovian process and supercomponent", M.S.Thesis, KAIST(1986).
8. W.H.Horton, *Optimization of Public and Occupational Radiation Protection at Nuclear Power Plants-A Calculation Method*, U. S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-3665(1984).
9. 세계 원전 증기발생기의 세관 성능, 원자력 산업, 7(2), 8-12(1987).

Optimization of Radiation Protection Using Markov Model

Jin Yop Chung and Kun Jai Lee

*Department of Nuclear Engineering
Korea Advanced Institute of Science and Technology, Seoul, Korea*

ABSTRACT

An analytic method for quantitative comparisons between the alternatives for radiation protection optimization is required to aid the decision making process. This paper introduces the dynamic Markov model to evaluate the effect of inservice inspection, testing, and repair activities of the plant on radiation protection.

In the example to put the Markov model into practice, the steam generator inspection intervals which minimize expected cost and total exposure dose were determined using the data for Kori-2 unit and foreign plants. The results show that the effect of the radiation exposure on the steam generator inspection interval is determined by the cost rather than the radiation exposure. The Markov model used in the example can be applied easily to the domestic NPPs by replenishing the data and also can be used in evaluating the comparative priority between various alternatives for radiation protection optimization.

Optimization, Markov, Steam Generator, ORE