

시스템 다이내믹스를 이용한 격납건물 살수계통 사고 관리 방안의 평가
An Application of System Dynamics to Assessing Accident Management
Strategies for Containment Spray Systems

강경민, 제무성
한양대학교
서울특별시 성동구 행당동 17

요 약

본 연구에서는 발전소 정전 사고시의 사고관리 전략으로 방사성 물질의 대기 방출을 완화할 수 있는 살수계통 수행 효과를 평가하였다. 시스템 다이내믹스는 시간에 따른 변화와 피드백 루프를 통해 각 변수의 인과 관계를 모델링하기에 유용하다. 이 방법론을 통해 방사성 물질의 방출 경로인 격납건물 - 육상경로 - 인체내부로 연결되는 평가 체계를 구성하였다. 참조원전의 정전 사고에 사고관리 전략으로 살수계통 작동 시 저인구지역 외곽경계에서의 갑상선선량을 계산하였고 소외 방사선피폭에 대한 10CFR100의 선량요건 이하로 만족시키는 것을 확인하게 되었다. 이러한 결과는 사고 관리 계획과 최소의 피폭을 위한 의사결정에 활용 될 수 있을 것으로 사료된다.

Abstract

Intentional implementation of containment sprays, which might contribute to mitigating the release effects of radioactive materials by scrubbing the aerosol types of fission products, is one of the accident management strategies to be utilized during the station blackout sequence in nuclear power plants. In this study, the containment spray strategy is assessed using the system dynamics. The system dynamics is an analysis method to simulate dynamic behaviors to ensure a causal relationship of structuring elementary feedback loop as well as to analyze a phenomenon of system with time. This system dynamics is applied to model the release pathway of radioactive materials through the containment, terrestrial route, and internal human body. It is shown that dose requirements for iodine-131 thyroids in 10 CFR 100 are met. These results might be used for decision-making on the establishment of accident management plans as well as minimizing individual and collective radiation dose during severe accidents.

1. 서론

사고관리란 심층방어 요소중의 하나로써 사고발생시 이용가능한 모든 자원 즉, 인원과 설비를 효율적으로 활용함으로써 발전소를 안전 상태로 회복시키거나 사고의 피해를 완화 시키기 위한 아래의 제반 활동을 말한다. 이러한 사고 관리에서 격납용기의 건전성을 유지하기 위한 활동에 관한 사항과 핵분열 생성물 방출효과의 극소화를 위한 활동을 결정하는 것은 중요하다. 시스템 다이내믹스는 모델 분석을 통해 의사 결정을 하기 위한 도구로 사고 관리 전략을 분석하고 평가하기에 유용하다. 본 연구에서는 발전소 정전 사고(SBO)시의 사고관리 전략으로 살수계통의 수행 효과에 대하여 시스템 다이내믹스를 이용하여 분석하였다.

작동을 통해 방사성 물질의 방출을 제거하는 과정을 분석한다.

본 연구를 통하여 격납건물에서 육상 경로를 통해 인체 내부로 연결되는 방사능량 평가 체계 개발하여 원자로 발전소 정전 사고에서 격납건물 살수계통 대한 사고 관리 방안을 평가하였으며

저인구 외곽 지역에서의 갑상선선량 계산과 방사성물질의 시간 변화 분석 체계 구성하여 방사능 영향평가 결과를 도출하였다.

2. 시스템 다이내믹스의 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 다이내믹스는 시스템의 동태적인 행태변화 (dynamic behavior) 즉, 시간의 경과에 따른 시스템의 행태변화에 관심을 둔다[1][9]. 그래서 변화의 특성들이 목표를 띄고 다양하게 탐색되고 분명하게 해석될 수 있는 장점을 가지고 있다. 이것은 시뮬레이션 기법을 전제로 하는 모사(modeling) 방법으로 컴퓨터 기법을 따라서 실현되고 있다.

시스템 다이내믹스를 잘 구현할 수 있는 강력한 도구로 컴퓨터를 활용한 공학적 기법을 응용하여 복잡한 시스템들을 분석 예측한다. 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 제공함으로써 시간에 따른 값의 변화를 쉽게 이해하도록 도와주고 장기적인 관점에서 대안으로 선택할 정책적인 처방이나 수단을 파악하기에 유용하다.[6]

3. 평가 과정에 대한 모델링

3.1 격납건물 (containment spray) 모델링

중대사고시의 소내의 작업자 및 일반주민에 대한 피폭선량평가는 노심내 상당량의 방사성물질이 격납건물로 누설되는 것으로 가정하여 해석한다. 즉, 평형노심 내 재고량 중 100%의 불활성 기체와 50%의 요오드 핵종이 격납건물 대기로 순간적으로 방출되는데, 방출된 요오드핵종 중 절반은 격납건물내 기기 및 벽면에 침착되는 것으로 가정한다. 따라서, 소외 방사능영향평가를 위한 격납건물 대기중 기체상 방사성물질은 평형노심내 재고량중 100%의 불활성기체와 25%의 요오드 핵종이 된다. 이를 가정한 핵종별 방사선원은 표 1과 같다.

표 1. 핵종별 방사선원

방사성핵종	방사능 (TBq)
I - 131	$7.73 * 10^5$
I - 132	$1.11 * 10^6$
I - 133	$1.64 * 10^6$
I - 134	$1.85 * 10^6$
X - 131m	$3.45 * 10^4$

다양한 형태로 존재하는 방사성 요오드는 냉각재상실사고시 주요 핵분열생성물 중 하나로 격납건물살수에 의해 격납건물 대기로부터 흡수된다. 안전주입단계에서의 격납건물 살수에 의한 요오드 흡수능력은 오염되지 않은 핵연료재장전수를 공급함으로써 보장된다. 격납건물살수 계통은 격납건물 대기로부터 요오드를 충분히 제거할 수 있으며 설계기준사고에 의한 소외 피폭선량을 10CFR100의 선량 제한치 이내로 유지시키도록 해야 한다.[2,3]

그림 1은 발전소 정전 사고의 경우 격납건물 살수계통(CS)이 작동되는 경우(success)와 작동 불능의 경우(F1, F2)를 의사 결정 수목도를 통해서 나타내고 있다. 사고 관리 전략에서 살수계통을 작동하는 경우에 방사성 물질의 변화와 선량을 계산하는 과정을 본 연구를 통해 나타내고자 한다.[8]

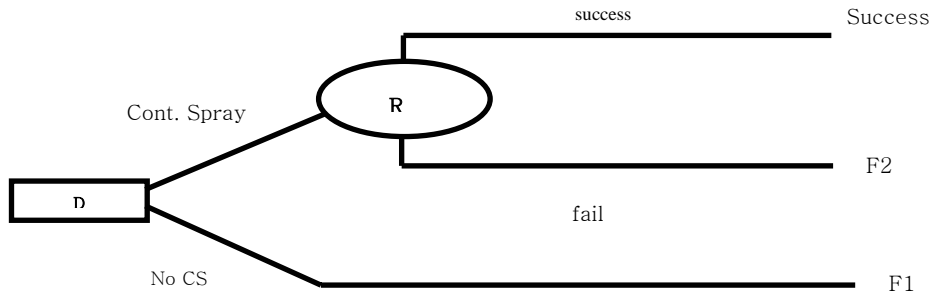


그림 1. 격납건물 살수 계통 사고 관리 전략의 평가를 위한 의사결정 수목도

사고 시 격납건물 대기중에 존재하는 요오드의 대부분은 원소형 요오드로서 살수 물방울에 의해 흡수되어 빠르게 제거된다. 원소형 요오드에 대한 살수제거는 다음과 같이 계산한다.

$$\lambda_s = \frac{6K_g TF}{VD} \quad [/\text{min}] \quad (1)$$

- K_g : 기체상 질량전달계수(m/min)
- T : 살수액적의 낙하시간(min)
- F : 펌프의 유량(m³/min)
- V : 살수구역의 체적(m³)
- D : 살수액적의 평균직경(m)

다음 표 2는 계산변수에 대한 입력치를 나타낸다. 살수노즐의 평균직경은 격납건물 살수 노즐 자료에 기초한다. 위와 같은 식은 다음과 같이 요오드에 대한 격납건물 누설모델을 유도한다.

$$\frac{dX(t)}{dt} = -\lambda_s X(t) \quad (2)$$

위 격납건물 누설 관계식(2)을 통해서 방사능량을 비교할 수 있는 시스템을 구체적으로 모델링하였다. 이러한 격납건물 누설 모델은 시간에 따라 변화되는 값을 가지고 있기 때문에 시스템 다이내믹스를 활용하여 모델링할 때, 변화의 특성과 행태를 쉽게 확인 할 수 있다. 시스템 다이내믹스는 변수명과 변수의 연결을 통해서 위 공식을 쉽게 모델링하도록 구성되어 있다.

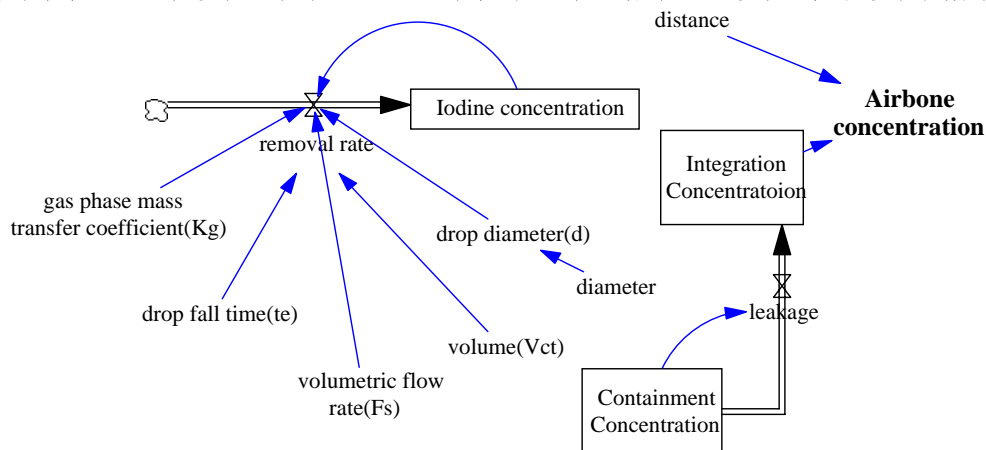


그림 2. Spray removal of gases model

선택된 변수에 대한 내용은 다음과 같이 표현된다.

$$\text{removal rate} = -1 * (6 * \text{gas phase mass transfer coefficient(Kg)} * \text{drop fall time(te)} * \text{volumetric flow rate(Fs)}) / (\text{volume(Vct)} * \text{drop diameter(d)}) * \text{Iodine concentration}$$

“removal rate”는 살수제거율을 나타내며, "gas phase mass transfer coefficient(Kg)"는 기체상 질량전달계수를 의미한다. "drop fall time(te)"은 살수 액적의 낙하시간을 말하며, "volumetric flow rate(Fs)"는 펌프의 유량, "volume(Vct)"은 살수구역의 체적, "drop diameter(d)"는 살수액적의 평균 직경을 의미한다.

“Containment Concentration”은 격납건물 내에 방사능량을 계산하며, “Integration Concentration” 0.05/day의 누설율을 가지고 대기중으로 누설되는 방사능량을 나타낸다. “Airbone concentration”은 제한구역경계와 저인구지역 외곽경계에서의 대기중의 방사능량을 나타내고 있다. 격납건물 살수계통이 사고 후 24분 동안 작동된다고 했으며 요오드 핵종의 방출에 많은 영향을 미치는 변수를 계산하는 민감도 분석을 할 수 있다. 또한, 격납건물에서 대기로 방출하는 과정은 0.05/day의 분율로 방사성 물질이 대기로 방출되는 것으로 보수적으로 가정하여 제한구역경계 (560m)와 저인구지역 외곽경계(5.7km)로 확산되는 것으로 가정하였다.

표 2. 제거 계수에 대한 계산 변수

기호	변수이름	울진원자력 3,4 호기	영광원자력 5,6 호기
Kg	기체상 질량전달계수(m/min)	3	3
T	살수액적의 낙하시간(min)	0.0276	0.0278
F	살수유량(ft ³ /sec)	7.80	7.80
V	살수영역의 체적(ft ³)	2.05*10 ⁶	2.144*10 ⁶
D	살수액적의 평균직경(micron)	340	296

3.2 육상 경로의 의한 피폭(terrestrial exposure) 모델

격납건물이 파손되면 격납건물 안에 갇혀있던 방사성 물질들은 파손 부위를 통하여 대기로 방출되며 이로 인해 농작물 및 인체가 방사능에 노출되는데, 이 장에서는 방사능 물질의 대기 방출로부터 이동, 확산, 이로 인한 선량 평가를 한다.

핵종은 인체 내로 공기와, 물이나 음식물의 섭취에 의해서 흡입되는 경로를 가진다. 일반적으로 인체내에서 흡수된 핵종은 호흡계나 순환계를 통해 여러 조직이나 장기로 분배되거나 배설되는데 이는 입자의 크기나 생화학적 성질 그리고 피폭자의 건강 정도나 개인적 체질 등에 따라 다르므로 정확한 평가는 어려우며 보통 표준 성인의 모델과 방사 생물학적으로 주요한 장기에 대해 동적 모델과 구간 모델로서 계산한다. 여기서는 방사성 물질의 이동과 갑상선에 흡수되는 선량을 계산하기 위한 방법을 설명하고자 한다.

공기중의 방사성 물질 흡수로 인한 외부 피폭 계산은 첫째, 외부 경로로서 공기의 흡입으로 인한 방사능량이 계산이 주가 되고 둘째, 인체내부에서의 여러 경로를 통한 특정 장기의 흡수 선량 계산으로 이루어진다. 또한 방사성 핵종에 오염된 음식물이나 물을 섭취하는 경우, 신체 장기의 흡수 선량 계산은 사고후 누출된 방사성 핵종이 음식물에 흡수될 때까지의 외부 경로 및 이들이 각 기관을 통해 신체 각 장기로 분산되어 흡수되는 과정의 내부 경로로 나누어 계산된다. 이 경로는 장기의 구간(compartment) 모델이 적용된다.

외부경로는 크게 두 단계로 나누어 볼 수 있는데, 첫째는 방사성 핵종의 방출 시점부터 핵종이

인간이 섭취할 최종 단계의 동물이나 식물에 흡수되는 경로로 이를 섭취 경로라 하고 들쭉는 음식물의 유통과정 및 대중의 기호에 따른 수요과정으로 이를 분배 경로라 한다. 전자는 방사성 핵종의 초기 방출에 따라 육상 경로와 수상 경로로 나뉘는데, 육상 경로라 함은 기체 상태나 미진 형태의 방사성 핵종이 플룸에 의해 방출되어 동식물이나 음료수에 흡수되는 경로이며 수상 경로라 함은 액체 상태로 방출되는 핵종이 지표수나 지하수를 통해 식수나 동식물에 의해 흡수되는 경로이다. 원자력 사고로 인한 피폭의 경우 육상 경로를 통한 피폭이 대부분을 차지하고 있다.

육상 경로에 의한 피폭은 일차적으로 식물을 오염시키는데 이 역시 식물의 잎에 침적된 핵종이 식물로 전이되는 경로와 토양에 침적된 핵종이 뿌리를 통해 식물로 전이되는 경로로 나눌 수 있다. 가장 중요한 육상 경로에 의한 피폭 계산은 두 경로 모두 지표면에 침적된 방사성 핵종의 단위 농도당 작물 내부로 흡수된 방사능량을 계산한 다음 분배 경로를 통해 개인의 섭취량을 계산하여 피폭량을 추정하게 된다.[4]

위 과정을 통해서 환경요소를 여러 구간으로 나누어 각 구간에서의 농도 변화를 방사성 물질의 유입률과 유출률의 차로 나타내어 표현한 다음 연립하여 음식물과 토지에 대한 방사성 물질의 농도를 계산하였다. 또한 평균 성인의 흡입과 섭취를 고려하여 방사성 핵종 섭취율을 계산한 다음 피폭 선량을 계산하였다.[5]

$$\frac{dX_i(t)}{dt} = \lambda_j K_j + \lambda_i X_i \quad (3)$$

관계식(3)을 통해서 각 구간에 대한 방사성 물질의 농도를 계산한다. 여기서 K_j 는 각 구간에서 흡수하는 방사능량이고, λ_j 는 흡수율을 의미한다. X_i 는 각 구간에서의 방사능량을 의미하며, λ_i 는 유효 붕괴 상수로 방출량을 나타낸다. X_i 에 아래의 적절한 구간과 λ_j , λ_i 에 표 3의 적절한 계산변수를 도입하여 육상 경로에 대한 피폭 모델과 인체 내부의 피폭 모델을 그림 3과 그림 4와 같이 작성한다.

- X_0 : air concentration (μ Ci/m³)
- X_1 : above - surface food crop (μ Ci/m²)
- X_2 : food - crop soil (μ Ci/m²)
- X_3 : pasture grass (μ Ci/m²)
- X_4 : pasture soil (μ Ci/m²)
- X_5 : food crop beneath surface (μ Ci/m²)
- X_6 : soil sink (μ Ci/m²)
- X_7 : beef (μ Ci/kg)
- X_8 : milk (μ Ci/kg)
- X_{a1} : GI track (μ Ci)
- X_{a2} : Lung (μ Ci)
- X_{a3} : Extra cellular fluids (μ Ci)
- X_{a4} : Thyroid (μ Ci)

육상 경로를 통한 피폭에 관한 식을 통해서 방사능량을 계산할 수 있는 시스템을 구체적으로 모델링하였다. 이러한 육상 경로 모델은 시간에 따라 변화되는 값을 가지며 격실에 따른 변수를 가지고 있기 때문에 시스템 다이내믹스를 활용하여 모델링할 때, 변화의 특성과 행태를 쉽게 확인할 수 있다.(그림 3)

☒ 3. Parameter for the Terrestrial Model

parameter	Nominal value	parameter	Nominal value
Δ_a	0.63	$\lambda_{21}, \lambda_{52}$	$6 \cdot 10^{-9}$
I_a	23	λ_{62}	10^{-4}
E_a	0.10	V_h / Y_c	1.25
U_a	0.19	V_c / Y_g	100
B_a	0.28	f_m / L	$0.8 \cdot 10^{-2}$
M_a	0.36	λ_{34}	$8 \cdot 10^{-3}$
f_b / M_b	$9 \cdot 10^{-5}$	λ_{64}	10^{-4}
λ_{21}	0.14	Δ_1, Δ_3	0.90
λ_{43}	0.14	Δ_2, Δ_4	0.10
V	1.0	A_c	10^3
λ	$8.57 \cdot 10^{-2}$	A_g	10^4
λ_{a4a3}	1.0	λ_b	0.00381
λ_{a5a3}	0.060	λ_m	2.0
λ_{a6a3}	0.13	λ_{a3a1}	17
λ_{a3a4}	$6.7 \cdot 10^{-3}$	λ_{a1a2}	0.88
λ_{a5a4}	0	λ_{a3a2}	1.9

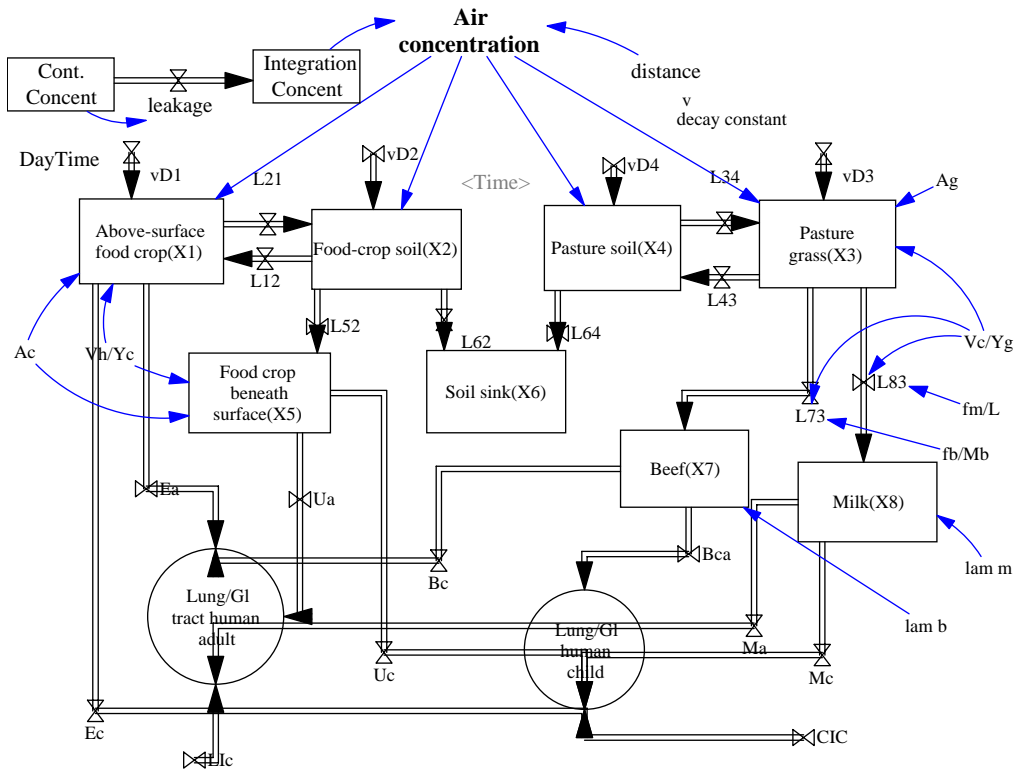


그림 3. Terrestrial pathway model

표 4. Equations for Selected Variable of Terrestrial Pathway

"Above-surface food crop(X1)"	=	INTEG (vD1*Air concentration+L12*"Food-crop soil(X2)"-(decay constant+L21+"Vh/Yc"/Ac)*"Above-surface food crop(X1)",0)
"Food-crop soil(X2)"	=	INTEG (vD2*Air concentration+L21*"Above-surface food crop(X1)"-(decay constant + L12 + L52 + L62) * "Food-crop soil(X2)",0)
"Pasture grass(X3)"	=	INTEG (vD3*Air concentration+L34*"Pasture soil(X4)"-(decay constant+L43+"Vc/Yg"/Ag)*"Pasture grass(X3)",0)
"Pasture soil(X4)"	=	INTEG (Air concentration*vD4+L43*"Pasture grass(X3)"-(decay constant+L64+L34)*"Pasture soil(X4)",0)
"Food crop beneath surface(X5)"	=	INTEG (L52*"Food-crop soil(X2)"-(decay constant + "Vh/Yc"/Ac) * "Food crop beneath surface(X5)",0)
"Soil sink(X6)"	=	INTEG (L64*"Pasture soil(X4)"+"Food-crop soil(X2)*L62-decay constant*"Soil sink(X6)",0)
"Beef(X7)"	=	INTEG (L73*"Pasture grass(X3)"-(decay constant+lam b)*"Beef(X7)",0)
"Milk(X8)"	=	INTEG (L83*"Pasture grass(X3)"-(decay constant+lam m)*"Milk(X8)",0)

선택된 변수에 대한 내용은 표 3의 계산 변수를 입력하여 표 4와 같이 표현된다. 또한 내부 경로를 통한 피폭에 관한 식을 통해서 방사능량을 계산할 수 있는 시스템을 다음 그림 4와 같이 모델링하였다. 이러한 내부 피폭 경로 모델은 각 기관을 여러 구간으로 나누어 각 구간에서의 농도 변화를 유입과 유출에 대한 차이로 나타내어 농도를 계산한다.

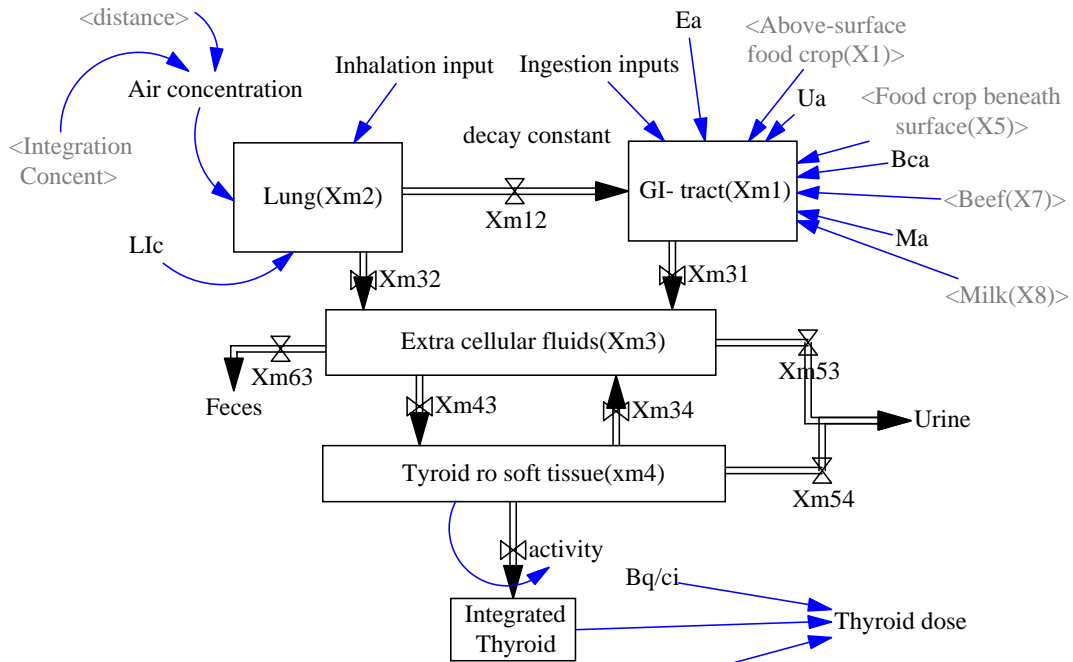


그림 4. Lung - GI Tract Model

선택된 변수에 대한 내용이 다음과 같다.

"Thyroid or soft tissue(xm4)"= INTEG (Xm43 * "Extra cellular fluids(Xm3)"-(Xm34+ Xm54+ decay constant)*"Thyroid ro soft tissue(xm4)",0)

Thyroid dose=Integrated Thyroid*DCFthi*1e-006/"Bq/ci"

토지 경로에서의 이동 모델과 인체 내부에서의 이동 모델을 사용하여 갑상선선량을 계산한다. 그리고 갑상선선량을 통해서 10 CFR 100을 만족하는지 결과를 분석한다.

4. 결과 해석

격납건물살수 계통은 격납건물 대기로부터 요오드를 제거하여 소외피폭 선량을 제한치 이내로 유지시킨다. 격납건물 살수 계통은 24분 동안 작동하고, 사고 후 격납건물의 방사능량은 다음 그림 5와 같이 감소된다. 방사능량에 미치는 요인은 초기에 방출된 방사능량보다 살수 액적의 평균직경에 더 관련이 있음을 확인 할 수 있다. 그림 5에서와 같이 울진 원자력의 방사능량이 더 많은 추정되는데, 살수 액적의 평균직경과 연관이 있다. 울진 원자력의 살수 액적의 평균직경을 영광 원자력 살수 액적의 평균직경으로 바꿔 계산하는 경우 USN34_YD와 같이 시간이 지남에 따라 방출량이 더 줄어들고 영광원자력의 방사능량과 비슷해짐을 알 수 있다.

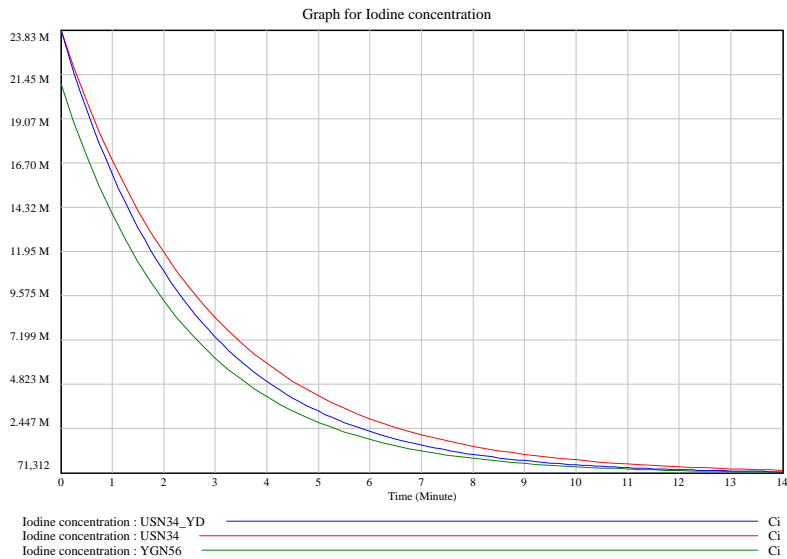


그림 5. Containment iodine-131 concentration 1

격납건물에서 대기로 방출하는 과정은 0.05/day의 분율로 방사성 물질이 대기로 방출되는 것을 가정하여 제한구역경계 (560m)와 저인구지역 외곽경계(5.7km)로 확산되는 것을 계산한 결과가 다음과 같다. 30일동안 방출한 결과로 대기중의 방사능량이 조금씩 증가됨을 알 수 있다. "Air concentration"의 단위로 마이크로(10^{-6})를 사용하므로 30일 후에는 5.8×10^{-11} 만큼이 대기중에 퍼짐을 나타내어 계산한다.(그림 6. Air concentration)

갑상선선량을 계산하면 30일 뒤에 $0.0275\text{Sv}(30\text{days}) = 27.5 \text{ mSv}$ 임을 알 수 있다. 이는 10CFR의 규정치 300rem보다 적고 10 CFR 100의 선량 제한치 이내로 유지시킴을 확인 할 수 있다.(그림 6. Thyroid dose) 그림 6은 의사 결정 수목도를 통해서 계산된 결과를 나타내고 있다. 사고 관리 전략에서 살수계통을 작동하는 경우에 갑상선선량을 계산한 결과 살수계통의 작동여부가 갑상선선량에 큰 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있다.

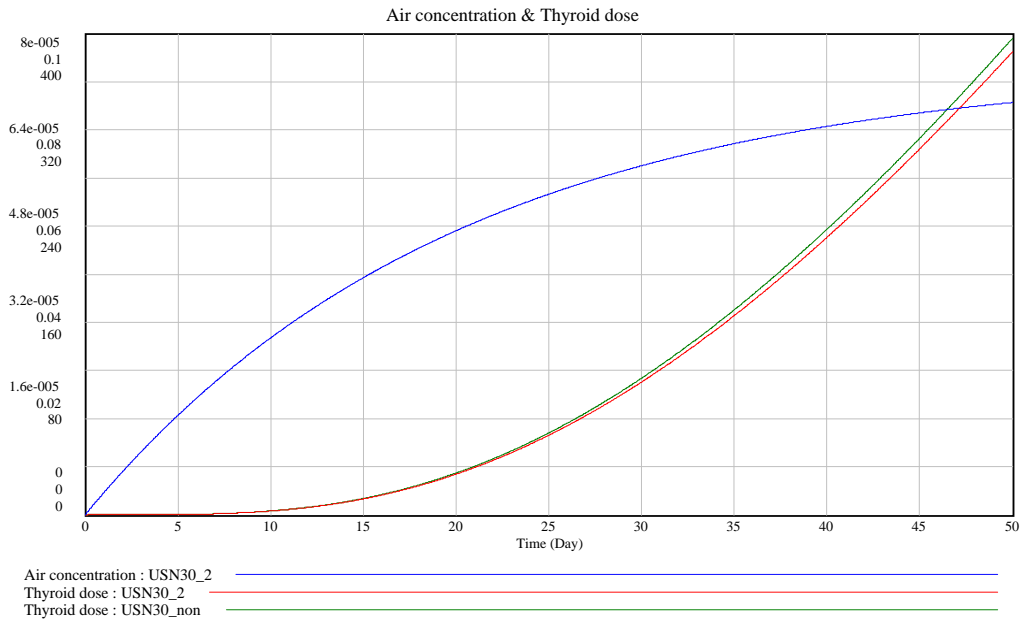


그림 6. Air concentration and thyroid dose for iodine-131

다음은 각 격실에 대한 방사능량의 변화를 나타내고 있다. (그림 7, 8)

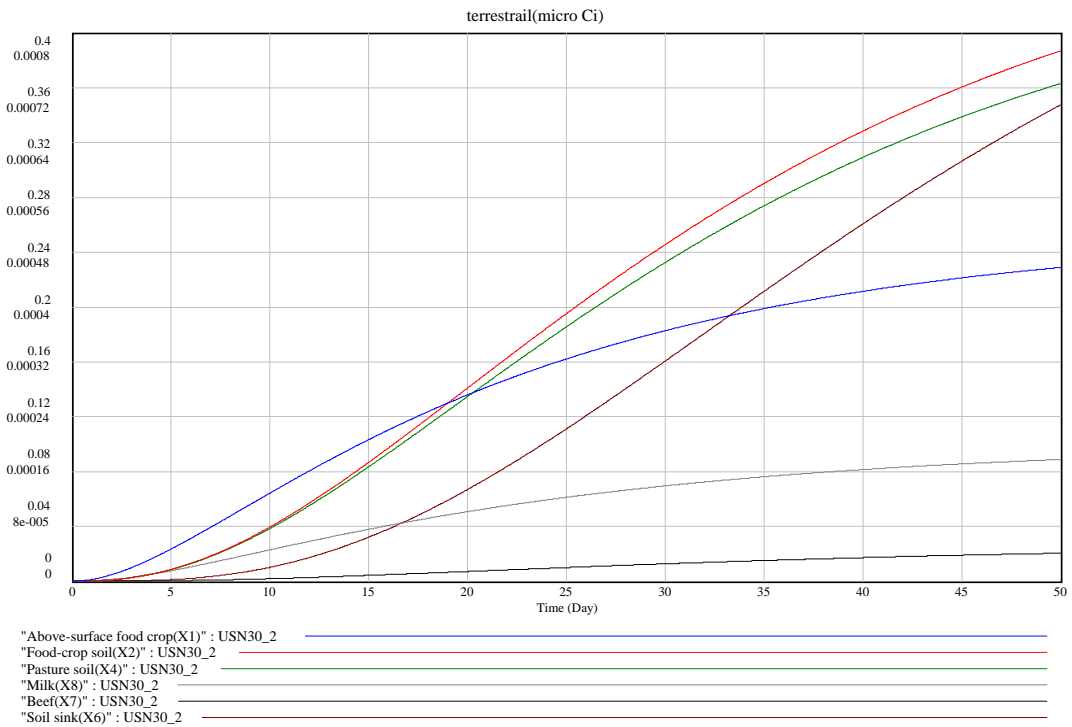


그림 7. Iodine-131 concentration of terrestrial

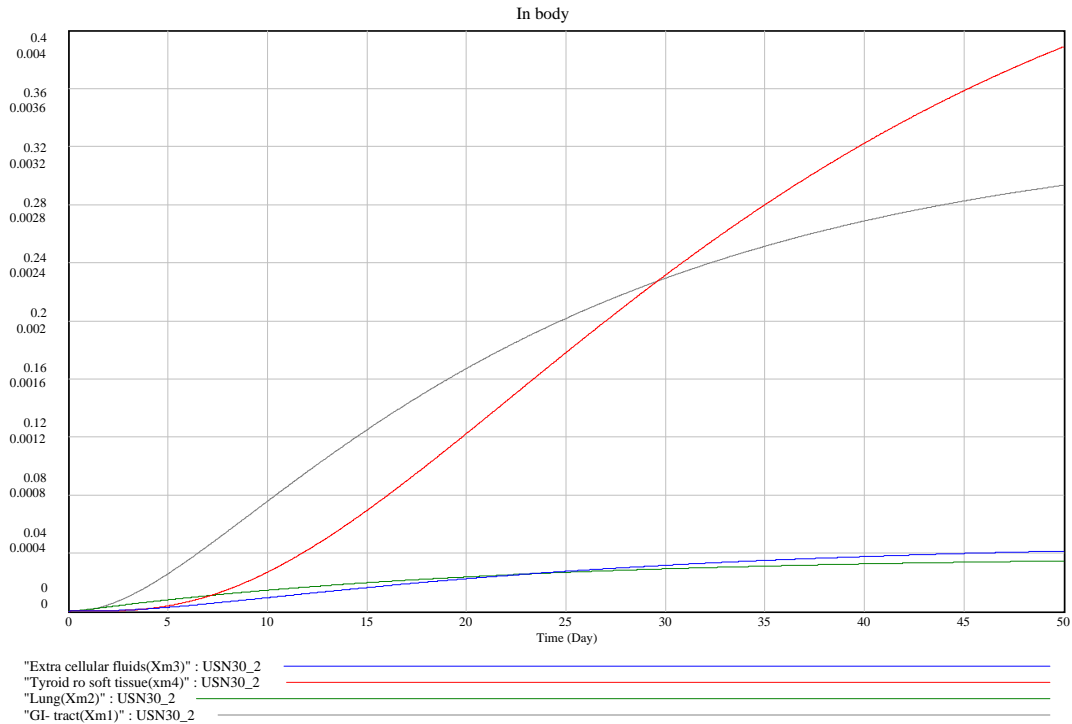


그림 8. Iodine-131 concentration of human

5. 결론

본 연구에서는 발전소 정전 사고시의 사고관리 전략으로 살수계통 작동을 통해 방사성 물질의 방출을 최소화하는 과정을 분석하기 위해 격납건물 - 육상경로 - 인체내부로 연결되는 방사성 흡수 과정(pathway)에 대한 평가 체계를 개발 하여 격납건물 살수계통의 수행 효과를 정량적으로 평가 하였다. 참조원전의 정전 사고에 사고관리 전략으로 살수계통 작동 시 저인구지역 외곽경계에서의 감상선선량이 계산되었으며 격납건물 살수 계통 작동에 대한 방사선량의 변화 분석 체계를 통해 육상 경로에서의 각 구간에서의 방사능량과 인체내부에서의 방사능량을 측정함으로써 소외 방사선 피폭을 10 CFR 100의 원자로 부지에 대한 선량요건 이하로 만족시키는 것을 확인하게 되었다. 본 연구의 결과는 살수 노즐 직경 변경 등 하드웨어적인 변경을 통해 최소 피폭에 대한 의사결정을 지원할 뿐 아니라 사고 관리 계획에 활용 될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 과학재단지정 우수공학연구센터인 방사선안전기술연구센터의 PSA기법을 이용한 방사선원 위험도 평가기술 연구과제의 일환으로 수행된 것이다.

참고문헌

- [1] J. W. Forrester, "Industrial Dynamics," The MIT Press, Cambridge, MA, 1981.
- [2] 한국 전력 공사, "울진 원자력 3,4호기 최종안전성분석보고서"
- [3] 한국 전력 공사, "영광 원자력 5,6호기 최종안전성분석보고서"
- [4] 정종태, "3단계 PSA 전산 체제 개발", 한국 원자력 연구소, 한국, 1995.
- [5] Richard E. Faw, "Radiological Assessment", PTR Prentice Hall, 1993.
- [6] Vensim Manual, "Vensim 4: Standard Professional DSS", Ventana Systems, Inc, 1988
- [7] KyungMin Kang, Moosung Jae, "A Quantitative Assessment of Limiting Conditions for

- Operation (LCOs) Using an Approach of System Dynamics”, ICAPP03’, Spain, 2003.
- [8] Moosung Jae, George E. Apostolakis, "The Use of Influence Diagrams for Evaluating Severe Accident Management Strategies", *Nuclear Technology*, vol.99, No.2, pp. 142-157, 1992.
- [9] Son, T. W., Chung H. K., “System Dynamics Approach for Analyzing Dynamic Motivation Model Using VENSIM”, *Korean System Dynamics Society*, pp.61-86. 1999.