



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

2011년 2월
석사학위논문

폐쇄후 안전성 평가
입력 자료의 민감도분석

조 선 대 학 교 대 학 원
원 자 력 공 학 과
정 강 일

폐쇄후 안전성 평가
입력 자료의 민감도분석

A Sensitivity Study of Post-Closure Safety Assessment
by Considering Uncertainty Input Data

2011년 2월 25일

조 선 대 학 교 대 학 원
원 자 력 공 학 과
정 강 일

폐쇄후 안전성 평가
입력 자료의 민감도분석

지도교수 송 종 순

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함.

2010년 10월

조 선 대 학 교 대 학 원
원 자 력 공 학 과
정 강 일

정강일의 석사학위 논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 나 만 균 (인)

위 원 조선대학교 교수 송 종 순 (인)

위 원 조선대학교 부교수 김 진 원 (인)

2010년 11월

조 선 대 학 교 대 학 원

CONTENTS

표 목차	iii
그림 목차	iv
ABSTRACT	vi
제 1 장 서론	1
제 1 절 연구배경 및 필요성	1
제 2 절 연구 목적	2
제 2 장 처분 안전성 평가 프로그램	3
제 1 절 Goldsim 개요	3
제 2 절 생태계 개념 모델링	9
제 3 장 불확실성 및 민감도 분석	14
제 1 절 불확실성의 발생요인	14
제 2 절 민감도 분석	16
1. Nominal Range Sensitivity Analysis	16
2. 입력변수의 범위 및 선정	18
3. Goldsim프로그램의 입력변수 적용	20
제 4 장 결과 및 고찰	22
제 1 절 입력변수에 따른 선량의 변화	22
1. Instant Release Fraction(IRF)	22
2. Canister Failure Time(CFT)	26
3. Early Time Failure(ETF)	29
4. Waste Dissolution Rate(WDR)	32
5. Porosity in MWCF(PM)	35
제 2 절 입력변수의 민감도 분석	37
1. 민감도 분석 결과	38
가. Instant Release Fraction(IRF)	38

나. Canister Failure Time(CFT)	41
다. Early Failure Time(EFT)	43
라. Waste Dissolution Rate(WDR)	45
마. Porosity in MWCF(PM)	47
2. 민감도 분석 결과 비교	49
제 5 장 결론 및 향후 연구 방향	52

<표 차례>

표 2.1 각 피폭집단별 주요 피폭경로	12
표 3.1 입력인자와 확률분포함수	18
표 4.1 Instant Release Fraction(IRF)의 변화에 따른 I-129의 선량 변화	38
표 4.2 Canister Failure Time(CFT)의 변화에 따른 I-129의 선량 변화	41
표 4.3 Early Time Failure(ETF)의 변화에 따른 I-129의 선량 변화	43
표 4.4 Waste Dissolution Rate(WDR)의 변화에 따른 I-129의 선량 변화	45
표 4.5 Porosity in MWCF(PM)의 변화에 따른 I-129의 선량 변화	47
표 4.6 각 인자들에 대한 ANOVA(F-test)결과	50

<그림 차례>

그림 2.1 Cell pathway의 개념	3
그림 2.2 Pipe pathway의 개념	5
그림 2.3 Nuclide migration process	10
그림 2.4 우리나라에서 생각할 수 있는 일반적인 처분 시스템 개념	10
그림 2.5 구획간의 이동에 대한 수학적 모델링	12
그림 3.1 모델 입력변수의 불확실성 발생요인	15
그림 3.2 Goldsim 코드로 묘사한 월성 처분장 안전성 평가 개념도	20
그림 4.1 IRF-0.1의 Farmer Dose	23
그림 4.2 IRF-0.1의 Fisherfresh와 Fishermarine의 Dose	24
그림 4.3 좌 : IRF-0.03의 Farmer, Fisherfresh, Fishermarine의 Dose	25
우 : IRF-0.09의 Farmer, Fisherfresh, Fishermarine의 Dose	
그림 4.4 CFT-1000년의 Farmer의 Dose	26
그림 4.5 CFT-1000년의 Fisherfresh, Fishermarine의 Dose	27
그림 4.6 좌 : CFT-100년의 Farmer, Fisherfresh, Fishermarine의 Dose	28
우 : CFT-10000년의 Farmer, Fisherfresh, Fishermarine의 Dose	
그림 4.7 ETF-0.1일 때의 Farmer의 Dose	29
그림 4.8 ETF-0.1%일 때의 Fisherfresh, Fishermarine의 Dose	30
그림 4.9 좌 : ETF-0.3%일 때의 Farmer, Fisherfresh, Fishermarine의 Dose	31
우 : ETF-0.5%일 때의 Farmer, Fisherfresh, Fishermarine의 Dose	
그림 4.10 WDR이 1E-12일 때의 Farmer의 Dose	32
그림 4.11 좌 : WDR 1E-5일 때의 Farmer, Fisherfresh, Fishermarine의 Dose	33
우 : WDR 1E-8일 때의 Farmer, Fisherfresh, Fishermarine의 Dose	
그림 4.12 PM의 0.05(5%)일 때의 Farmer의 Dose	35
그림 4.13 좌 : PM 0.025(2.5%)일 때의 Farmer, Fisherfresh, Fishermarine의 Dose	36
우 : PM 0.01(10%)일 때의 Farmer, Fisherfresh, Fishermarine의 Dose	
그림 4.14 IRF 범위에 따른 I-129의 선량변화 및 피크정리	39
그림 4.15 CFT 범위에 따른 I-129의 선량변화 및 피크정리	42
그림 4.16 ETF 범위에 따른 I-129의 선량변화 및 피크정리	44
그림 4.17 WDR 범위에 따른 I-129의 선량변화 및 피크정리	46
그림 4.18 PM 범위에 따른 I-129의 선량변화 및 피크정리	48

그림 4.19 5가지 인자의 민감도 분석 결과 그래프 49

ABSTRACT

A Sensitivity Study of Post-Closure Safety Assessment by Considering Uncertainty Input Data

Jung Kang Il

Advisor : Prof. Song Jong Soon, Ph.D.

Department of Nuclear Engineering

Graduate School of Chosun University

Spent fuels that arise from both PWR and CANDU reactors will be directly disposed a deep depth in a suitable host rock as a basic policy. In performance assessment of spent fuel, it is anticipated that the nuclide from which no retardation caused by sorption and solubility limit can be expected dominant dose. Therefore it is important not only to select a site of slow-moving in ground-water, but also to construct a robust engineered barrier under such nuclide characteristics, taking into account a safety margin of the system

In this study, the sensitivity analysis method developed by KAERI was applied to a Korean geological disposal concept. Such a study will offers insight into Post-closure disposal safety assessment program and decide a dominant input parameter and will conduct a sensitivity analysis of dominant input parameter.

Using the Goldsim is a highly graphical, object-oriented program for carrying out dynamic, probabilistic simulation. In order to quantify a nuclide release and transport through the possible pathway in the near- and far-field of a repository system as well as the dose rate with various exposure pathways in the biosphere

system, robust program capable of an assessment of various possible release scenario are needed.

Through chosen 5 dominant, independent input parameters(Canister failure time, Early time failure, Waste dissolution rate, Instant release fraction), carried out nominal sensitivity analysis.

Based on result from sensitivity analysis, ranking of 5 input parameters, ranked parameters preferentially will consider to evaluate safety assessment.

A program developed by utilizing Goldsim, by which nuclide transport in the near- and far-field of a repository as well as farther transport through a biosphere under various natural and manmade disruptive event could be modeled and assessed has been developed and demonstrated.

Through current study, arbitrarily chosen dominant, independent parameters are evaluate of sensitivity analysis and it was important to improve an safety and uncertainly of the near- and far-field.

It also seems useful and suitable enough for further in depth feedback to refine a repository design and helpful to improve an appropriate safety assessment even through there still might be many more thing to be developed with proper input data

제 1 장 서 론

제 1 절 연구배경 및 필요성

지난 수년간 고준위 방사성폐기물 처분 연구를 통해서 다양한 형태로서 주로 AMBER를 통해서 생태계 평가를 위한 모델과 프로그램이 개발되었다. 이렇게 AMBER에 의한 독자적인 생태계 평가 모델은 지하 핵종 이동 모델과 별개의 독립된 프로그램으로서 지하매질-생태계 (Geosphere-Biosphere Interface, GBI) 통해서 들어오는 핵종의 플럭스를 새로운 선원항으로 하고 구획간의 질량전달을 통하여 지표의 여러 생태계 요소들을 구획적으로 모델링하였다. 이 구획사이의 질량전달, 즉 핵종전달을 모델링하는 방식으로 구획내의 핵종 농도를 시간에 따라 계산하여, 이로부터 다양한 섭생과 피폭 경로를 고려하여 최종적으로 피폭대상으로서의 주민 피폭 선량을 연간 선량률로서 구해낼 수 있게 되었다.

그래서 현재 KAERI에서는 GoldSim을 이용하여 개발된 생태계 모델로 개선 전환되면서 보다 새롭고, 보다 덜 보수적으로 개발되어 이전 AMBER 생태계 모델과 같이 별개의 모듈로서의 생태계 평가 프로그램뿐만 아니라 처분 시스템에 대한 총체적인 안전성 평가를 위한 종합평가 프로그램의 모듈로서 유기적으로 이식될 수 있게 되었다. 이로 인하여 지하매질에서 지하매질과 생태계 매질과의 경계로서의 GBI를 넘어 들어오는 핵종의 플럭스를 생태계에서 지속적으로 이동, 확산하게 하여 보다 실직적인 생태계 평가 수단을 확보하게 되었다.

다양한 연구를 통하여 처분시스템에 관여된 여러 Feature, Event, 그리고 Process (FEPs)에 대한 선별을 통한 유출 시나리오를 이전의 모델보다 더 다양하고 실제적인 측면에서 고려하여 생태계에 대한 상세한 평가 Context를 마련할 수 있게 되었다. 따라서 이전 AMBER모델을 보완, 대체하는 생태계 재모델링이 수행되었고, Goldsim 생태계 평가 모델이 개발되어, 독자적으로 생태계 평가를 수행할 수 있게 되는 한편 Goldsim에 의한 처분안전성 및 처분장 성능평가를 위한 종합 평가 시스템이 이식될 수 있게 되었다.

이렇게 개발된 Goldsim기반 안전성 평가 프로그램은 다양한 형태로 존재하는 생태계

접점에 대한 비교 계산과 일본의 H12등 외국의 경우로 주로 도입되어 사용되는 피폭 집단 선별방법으로서 농축 및 민물 어업 집단, 그리고 해양 어업 집단 등 기존에 고려 하던 피폭집단 외에 집단 간의 차별화되고 제한된 섭생경로를 피하고 모든 피폭 경로를 허용하는 경우의 대안 피폭집단을 가상적으로 고려하여 피폭 영향과 주요한 피폭 경로로서 우물물이나 강물에 의한 식수 및 농작을 위한 관개에 대하여 용수의 차이를 검토하기 위한 시나리오도 평가할 수 있게 되었다.

그러나 이와 같은 모델링연구와 달리 생태계 평가 모델에 대한 여전히 부족한 생태계 평가를 위한 입력 자료의 확보 문제가 가장 시급한 과제이다. 이 때문에 URL(Underground Research Laboratories)의 필요성도 매우 중요한 문제로 부각되고 있다.

향후 경주에 중·저준위 방사성폐기물 처분장의 완공되고 그에 따라 고준위방사성 폐기물처분장의 건설로 시작되면 더욱 안전성 평가에 대한 관심이 증대하게 될 것이며 그에 따라 다양한 시나리오를 내재한 안전성 평가 프로그램의 개발이 확립되어야 한다. 이를 위해 보다 안전한 안전성 평가를 위한 지질환경이나 지하수의 유동과 조건 등의 처분 시스템이 정확히 파악되어야 하며, 다양한 시나리오와 프로그램에 사용되는 입력 자료의 대한 민감도 분석이 수행되어야 한다.

제 2 절 연구 목적

본 연구의 목적은 처분 안전성 평가를 위한 생태계모델링 분석 및 현재 한국원자력 연구원에서 Goldsim을 이용하여 개발된 처분 안전성평가 프로그램의 분석, 프로그램에 입력되는 입력변수 중 주요인자들을 선택하여 민감도 분석을 수행하고 주요인자간의 중요성을 나누어 보았다.

이러한 연구결과는 처분 안전성 평가 프로그램의 입력 자료에 대한 불확실성을 저감 시켜주며, 주요한 인자들의 역할 및 중요성을 인지하여 향후 처분장의 설계나 관리, 운영에 우선적으로 고려될 거라고 예상된다.

제 2 장 처분 안전성 평가 프로그램

제 1 절 Goldsim 개요

Goldsim(골드십)은 미국 이사쿠아(Issaquah, WA)에 소재한 Goldsim Technology Group LLC에 의해 개발, 상용화된 범용 시뮬레이션 패키지로 유동이 존재하는 시뮬레이션 패키지로 유동이 존재하는 시스템을 모사하는 경우라면 어느 경우에도 사용자 편의성을 지니며 유용하게 적용될 수 있는 개발용 프로그램 패키지이다. 사용자에게 매우 편리한 그래픽 유저 인터페이스 (GUI)와 함께 Object-oriented 프로그래밍 방식으로 등으로 이전의 FORTRAN이나 C++ 등과는 달리 프로그래밍언어를 습득하지 않아도 프로그래밍을 할 수 있는 것이 특징이다. 이 프로그램은 일본을 비롯하여 세계 여러 나라에서는 물론 국내에서도, 특히 방사성 폐기물 처분 안전성 평가에 널리 사용하고 있다.

또한 다양한 매질과 인공 및 천연 방벽에서의 핵종 이동이나 지하수 유동 등 복잡한 처분 시스템 내에서의 질량 및 체적 전달을 모사하는데 최적인 프로그램 개발 도구이다. 용도에 따라 Goldsim은 패키지가 달리 구성될 수 있는데 방사성핵종의 질량이동 모사를 위한 Goldsim 프로그램 모듈에서 제공하는 여러 요소들 중에서 가장 두드러진 것은 2개의 Pathway로 Cell pathway와 Pipe pathway가 그것이다.

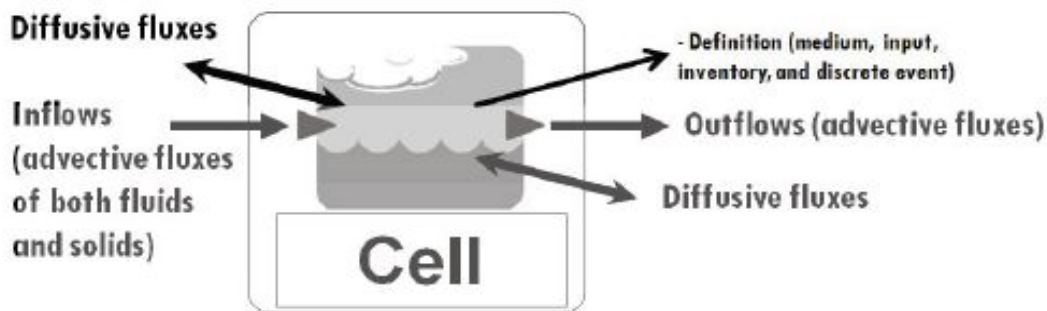


그림 2.1 Cell pathway의 개념

그림 2.1에 개념적으로 도시한 Cell pathway는 확산과 이류에 의한 물질 이동을 그림 2.2에 도시한 Pipe pathway는 이류와 분산에 의한 물질 이동을 기술하는데 적합하게 되어 이 두 Pathway의 주된 조합으로 처분장에서 유출된 핵종이 지하 매질 등에서 이동하는 메커니즘을 기술할 수 있게 된다. 물론 이 두 가지 요소 외에도 Pipe로 이루어진 네트워크를 구성할 수 있는 Network pathway나 선원항을 기술하기 위해 특별히 따로 준비된 Source 오브젝트 등 다양한 요소가 많이 준비되어 있다. Goldsim에서는 각 Pathway에 대한 매질이나 용매 등을 따로 정의할 수 있는 것도 특징인데, Fluid나 Solid를 통해 공극물이나 밀도 등의 물성 등을 미리 기술해 둘 수 있게 된다. Species는 오염물질이나 방사성물질 등을 미리 정의해 둘 수 있는 장치로 방사성 붕괴나 붕괴사슬, 동위원소의 유무 등을 이곳을 통해 미리 지정해 둘 수 있게 된다.

Goldsim의 주요한 두 Cell pathway와 Pipe pathway에 대한 수학적 모델은 아래와 같다. 먼저 Cell 내의 핵종의 질량수지는 식 (1)과 같이 시간에 대하여 1차 상미분방정

$$\frac{dm_i^s}{dt} = -m_i^s \lambda^s + \sum_{p=1}^{N^p} m_{ip} \lambda^p f_p^s S^{p \rightarrow s} \left(\frac{w^s}{w^p} \right) + \sum_{c=1}^{N_l} \phi_{l \rightarrow i}^s + S_i^s \quad (1)$$

식으로 표현될 수 있고,

여기서

- m_i^s = mass of nuclide s in cell i [M]
- p = denotes for parent of s
- $\lambda^s \lambda^p$ = decay constant for sand parent nuclide, respectively [T^{-1}]
- N^p = number of direct parents for s
- f_p^s = fraction of parent which decays into s
- $S^{p \rightarrow s}$ = stoichiometric ratio of moles of s produced per mole of parent decayed
- $w^s w^p$ = molecular weight of s and parent, respectively [M/mol]
- N_l = number of mass flux links from to cell i
- $\phi_{l \rightarrow i}^s$ = influx ratio of s into i through advective and diffusive mass flux link l [M/T]
- S_i^s = rate of direct input of s to i from source [M/T]

이 된다.

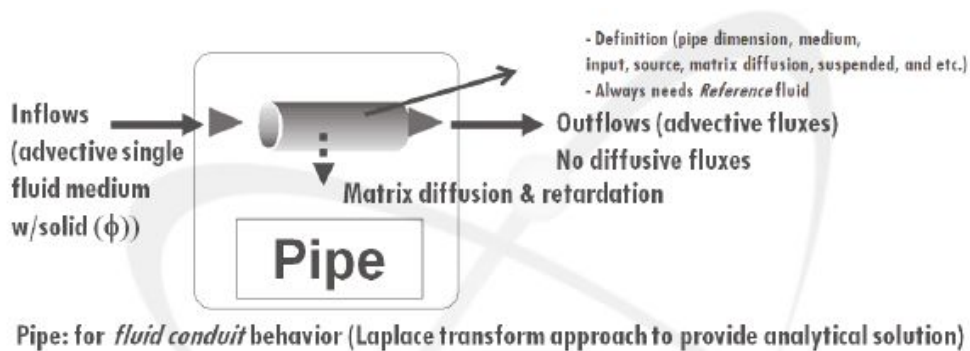


그림 2.2 Pipe pathway의 개념

그림 2.2에 개념적으로 도시한 Pipe pathway의 경우에는 이 Pathway를 나가는 핵종의 플럭스는 시간과 Pipe의 출구에서 용액에 용해된 농도의 함수로 식 (2) 와 같이 표시 된다.

$$\phi^s = (1 + c^{ss} K_{ss}^s) \{ Q c^s - (D_s + \alpha Q) \frac{\partial c^s}{\partial x} \} \Big|_{x=L} \quad (2)$$

여기서

ϕ^s = flux of s leaving the pipe pathway [M/T]

c^{ss} = concentration of the suspended solid in the mobile zone [M/L³]

Q = volumetric flow rate in the pathway [L³/T]

K_{ss}^s = sorption coefficient between the suspended solid and the fluid for s [L³/M]

D_s = effective diffusivity of s in the mobile zone [L²/T]

α = dispersivity of the pathway [L]

L = length of the pathway [L]

x = distance into the pathway [L]

c^s = dissolved concentration of s in mobile zone of pathway [M/L³]

이 되고 또 c^s 은 아래 (3)식의 1차원 이류-분산식으로 기술될 수 있다.

$$\frac{\partial c^s}{\partial t} = -\frac{Q}{\theta A R_s} \{ (1 + c^{ss} K_{ss}^s) \frac{\partial c^s}{\partial x} - \alpha [(1 + c^{ss} K_{ss}^s) + D_s] \frac{\partial^2 c^s}{\partial x^2} \} + \{ -c^s \lambda^s + \sum_{p=1}^{N^p} c^p \lambda^p f_p^s S^{p \rightarrow s} \frac{w^s R^p}{w^p R^s} \} - \frac{1}{\theta A R_s} \sum_{m=1}^{N^M} \theta f_{im} D_{im}^s \frac{\partial c_{im}^s}{\partial z} \Big|_{z=0} \quad (3)$$

여기서

A = diffusice area of the matrix zone per unit length of mobile zone [L]

θ = porosity for s

$R_s R^p$ = retardation factor for s and parent in the mobile zone, respectively

p = perimeter of the pathway [L]

f_{im} = perimeter fraction occupied by matrix diffusion zone [L]

D_{im}^s = diffusivity of matrix diffusion zone for s [L^2/T]

NMD = number of matrix diffusion zone

C_{im}^s = concentration of s in the rock matrix diffusion zone im

이는 다시 아래 식 (4) 와 같이 기술될 수 있다.

$$\frac{\partial C_{im}^s}{\partial t} = \left\{ \frac{D_{im}^s}{\theta_{im} R_{im}^s} \frac{\partial^2 C_{im}^s}{\partial z^2} + \frac{D_{im}^s}{\theta_{im} R_{im}^s A_{im}} \frac{\partial A_{im}^s}{\partial z} \frac{\partial C_{im}^s}{\partial z} \right\} + \left\{ -C_{im}^s \lambda^s + \sum_{p=1}^{N^p} C^p \lambda^p f_p^s S^{p \rightarrow s} \frac{W^s R_{im}^p}{W^p R_{im}^s} \right\} \quad (4)$$

여기서

D_{im}^s = effective diffusivity of s in the matrix zone [L^2/T]

θ_{im} = porosity of the matrix zone

$R_{im}^s R_{im}^p$ = retardation factor in the matrix zone for s and parent, respectively

A_{im}^s = diffusive area of the matrix zone per unit length of mobile zone [L]

이다.

식 (3)에 대한 경계조건은 다음 식 (5) 와 같이 기술된다.

$$c^s = 0 \text{ as } x \rightarrow \infty$$

$$(1+c^{ss}K_{ss}^s)Q-[D_s+\alpha(1+c^{ss}K_{ss}^s)Q]\frac{\partial c^s}{\partial x}\Big|_{x=0} = -\delta(t)M_0^s + \phi_b^s + \phi_e^s \quad (5)$$

여기서

$$\delta(t) = \text{Dirac delta function } [T^{-1}]$$

$$M_0^s = \text{initial mass of s applied to the pathway [M]}$$

$$\phi_b^s = \text{boundary flux of s [M/T]}$$

$$\phi_e^s = \text{flux of s from external pathway [M/T]}$$

이 되고, 매트릭스 지역에 대한 경계조건은 아래 식 (6)으로 기술된다.

$$\begin{aligned} c_{im}^s &= c^{ss} \text{ at } z = 0 \\ \frac{\partial c_{im}}{\partial z} &= 0 \text{ at } z = T_{im} \end{aligned} \quad (6)$$

이 때 T_{im} = Thickness of the diffusion zone [L]이다.

그러면 Goldsim은 위 식 (2)에서 식 (6)까지의 Laplace transform을 통해 해를 구해내게 된다.

제 2 절 생태계 개념 모델링

평가 대상으로서 생태계는, 지하매질에 비해서 그 자체로서 시간과 공간에 따른 변동이 심하고, 장기간의 지난후의 처분 환경과 생태환경에 대한 평가가 되어 예측하기 힘든 시스템이다. 또한 미래의 환경변화에 따른 불확실성을 필연적으로 내재하게 되어 현 시점에서는 예측하기 어렵고 정확하게 모델링하고 평가하기도 힘든 시스템이다.

생태계 모델링에 관한 이러한 보편적인 특성에 대한 새로운 기준 개념의 도입이 필요하게 되어 국제공동연구로 진행되었던 IAEA의 BIOMASS연구를 통하여 기준 생태계(Reference Biosphere)라는 개념이 제안되었다. 이러한 공동연구를 통해 기준 생태계는 “처분시설에서 장기간에 걸쳐 생태 환경으로 유출된 방사성 핵종으로 인한 방사선적 영향을 평가하기 위한 일관된 개념을 마련하기 위해 요구되는 합리적인 가정과 가설의 집합”으로 정의 되었다. 이는 1996년 BIOMOVs II를 통해 도출된 FEP리스트, 국제방사선방호위원회(ICPR)의 처분시설에 관련된 원칙 등을 고려하고, 생태계에 대한 기준 시스템을 제시하는 보편적인 방법론으로 전 세계적으로 보편적으로 활용되고 있다.

생태계 평가를 위해서는 우선 생태계 평가에 대한 평가 Context가 만들어져야 한다. 그런 다음 지질환경과 지하수의 유동과 조건이나 지표의 Topography등 처분 시스템이 상세히 파악되어야 하고 적합한 가정을 통해 지질-생태계 경계(GBI: Geosphere-Biosphere Interface)와 피폭 집단을 결정하여야 한다.

피폭대상을 결정하는 방법으로는 개별핵종의 지하 및 생태환경에서의 특정한 거동과 여러 섭생경로에 따라 상이한 피폭경로와 섭생경로에 노출되어 있을 다양한 피폭 집단들이 서로 다르게 존재할 수 있다는 가정이 가능한데 이러한 경우 부지주변 생태영향권내의 가능한 각 피폭집단을 미리 설정하여 이들 각 집단에 대한 배타적인 섭생 및 피폭 경로를 상정하여 각각에 대한 평가를 수행한 후에 상호 비교를 통해 가장 피폭을 많이 받는 결정피폭집단을 찾아내게 된다.

그렇지만 최근 규제기관 등에서 이러한 피폭집단에 대해 대안적인 피폭집단에 대한 평가가 요구되어 지고 있어 농축피폭집단이라도 그 생태계 내의 해산물을 먹을 수도 있다고 보는 가정이 필요해지게 되었다. 여전히 피폭 대상 집단은 모든 자급자족집단으로 가정하여 평가대상 생태계 지역 내에서만 자급하여 의존하는 개념으로 보는 것이

보편타당해 보인다.

한편 우리나라 경우에는 면적이 좁고 산악지형이며 임해에 처분시설이 위치할 가능성이 높기 때문에 특성상 처분시설을 빠져 나온 모든 핵종들은 그림 2.3과 2.4에 개념적으로 도식한대로 최종적으로 바다로 향하게 될 가능성이 크며, 이 외에도 다양한 지표수로서 우물이나 호수, 강 등으로 도달 유출하게 된다.

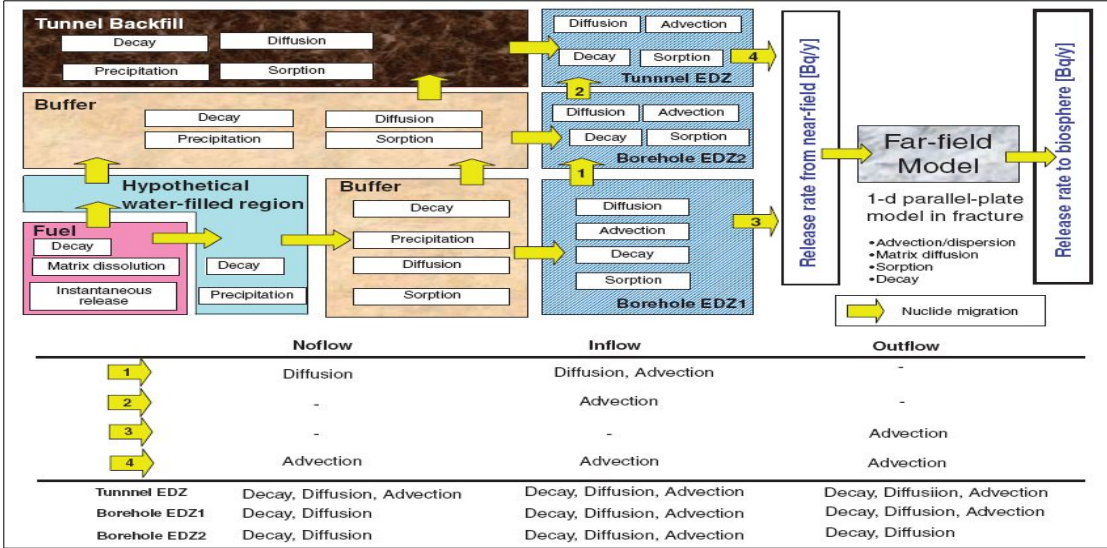


그림 2.3 Nuclide migration process⁸⁾

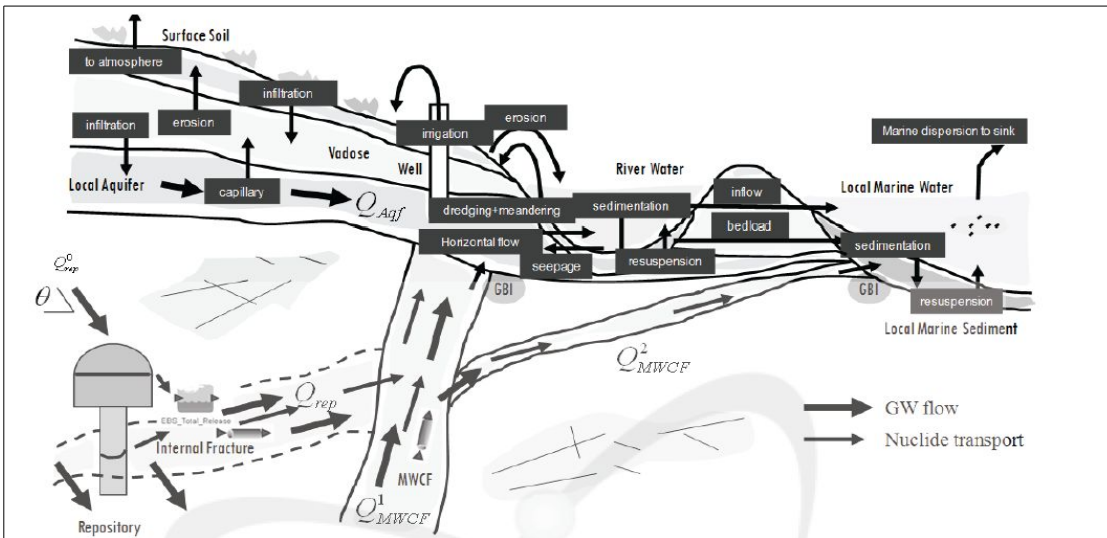


그림 2.4 우리나라에서 생각할 수 있는 일반적인 처분 시스템 개념⁸⁾

피폭집단의 일반적인 생활양식은 피폭집단에 속한 개인의 나이와 식생활 습관, 생활양식 등의 차이가 어느 정도 있겠지만, 각 집단의 평균적인 피폭을 평가하기 위해서 대상은 모두 성인으로 가정하고, 특정한 섭생 외에는 일반적으로 동일한 생활양식을 갖는 것으로 가정하는 것이 생태계 모델링에서 보다 타당한 가정으로 생각된다.

구획 모델링에서 구획은 바다, 우물, 그리고 바다에서도 해수와 바닥 침적층 등 물리적으로 나누는데 보편적이지만 구획 내에서는 일정한 핵종의 농도나 물성 등을 갖는다는 구획 모델의 특성상 보다 타당한 의미를 갖는 방법이다. 우리나라 경우 지표 토양층과 가변 불포화 토양층 핵종의 유입에 영향을 받을 만한 넓이를 갖는 연안 해수층과 그 침전층은 물리적으로 구별시켰다.

또한 처분시설에서 유출되어 지하 매질로 이동해 나온 핵종이 GBI를 넘어 우물이나 바다 등 지표수로 도달하여 핵종의 농도를 형성하고 다시 생태계로 확산, 전이되는 시나리오 등도 개발하였다. 생태계 내에서의 핵종이동에 대한 개념모델을 구획모델로 나타내고, 이 구획모델을 수학적으로 모델링되어야 하는데 이를 위해 각 구획간의 상호 반응을 수학적 수식으로 나타내었다.

$$\frac{dN_i}{dt} = \left[\sum_{j \neq i} f_{ji} N_j + \lambda_M M_i + S_i(t) \right] - \left[\sum_{j \neq i} f_{ij} N_i + \lambda_N N_i \right] \quad (7)$$

여기에서

- N_i 구획 i 내의 방사성 핵종 N 의 양 [mol]
- N_j 구획 j 내의 방사성 핵종 N 의 양 [mol]
- M_i 구획 j 내의 방사성 핵종 M 의 양(핵종 N 의 모핵종) [mol]
- $S_i(t)$ 구획 i 로 유입되는 핵종 N 의 선원항 유입률 [mol/y]
- $\lambda_M \lambda_N$ 핵종 M 과 N 의 붕괴상수 [y^{-1}]
- $f_{ji} \ f_{ij}$ 구획 j 에서 구획 i 로, 구획 i 에서 구획 j 로 이동하는 핵종의 질량전달계수 [y^{-1}]

식 (7)을 각 구획에서 대한 연립하여 얻어낸 연립 미분방정식과 필요한 경계 및 초기 조건들을 부대조건(Side condition)을 이용하여 각 구획 내의 각 핵종의 질량을 구해낼 수 있게 되고, 그런 다음 구획의 부피를 고려하여 각 구획내의 핵종의 농도를 구해낼 수 있게 된다.

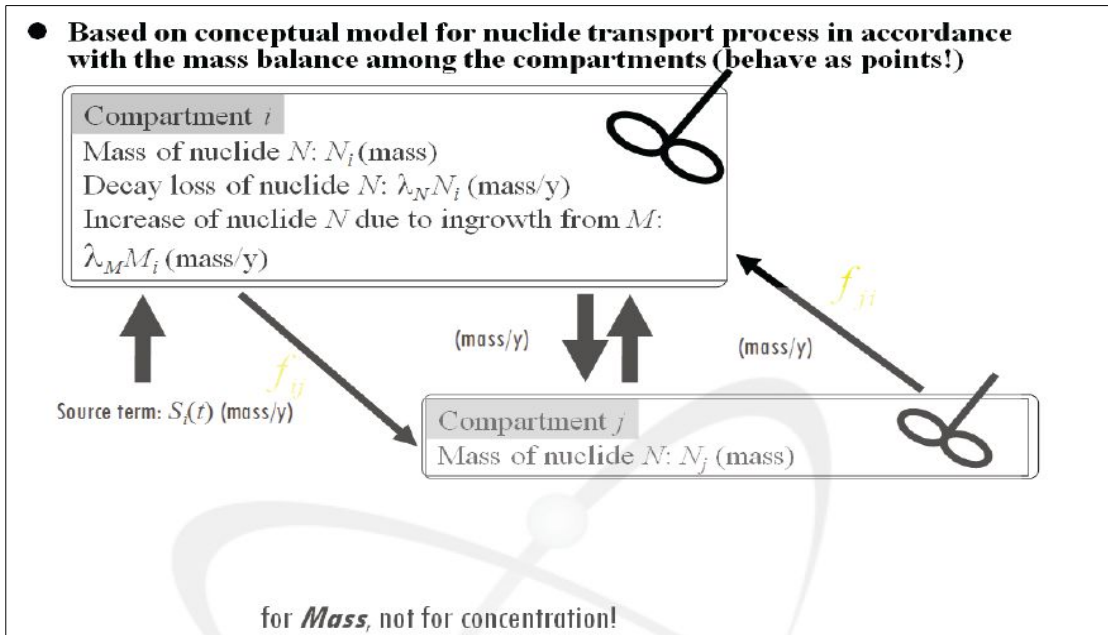


그림 2.5 구획간의 이동에 대한 수학적 모델링⁸⁾

각각의 피폭대상 집단에 대한 피폭 경로는 표 2.1과 그림 2.6에 보이는 것과 같이 세계의 피폭경로로 구분되어 섭취(Ingestion)와 흡입(Inhalation)에 의한 내부피폭 (Internal exposure)과 외부피폭(External exposure)으로 나눌 수 있고, 이 세 가지 피폭경로를 통한 연간 개인 피폭선량은 각 구획의 핵종 농도로부터 선형적으로 산출될 수 있게 된다.

표 2.1 각 피폭집단별 주요 피폭경로

Intake Pathway		Farming	Freshwater Fishing	Marine Fishing
Ingestion	Crop	Grain	n/a	n/a
		Rice	n/a	n/a
		Green Vegetables	n/a	n/a
		Root Vegetables	n/a	n/a
		Fruit	n/a	n/a
	Animal Produce/ Aquatic Foodstuff	Beef, Cow liver, Cow milk	FW fish	Marine Fishing
		Pork	FW crustaceans	Marine crustaceans
		Mutton	n/a	Marine crustaceans
		Chicken, Chick liver, Chicken eggs	n/a	Seaweed
	Others	Water	Water	n/a
Soil		Sediment	Sediment	
Inhalation		Dust	Dust	Dust Aerosol
External Irradiation		Water	Water	Water
		Soil	Sediment	Sediment

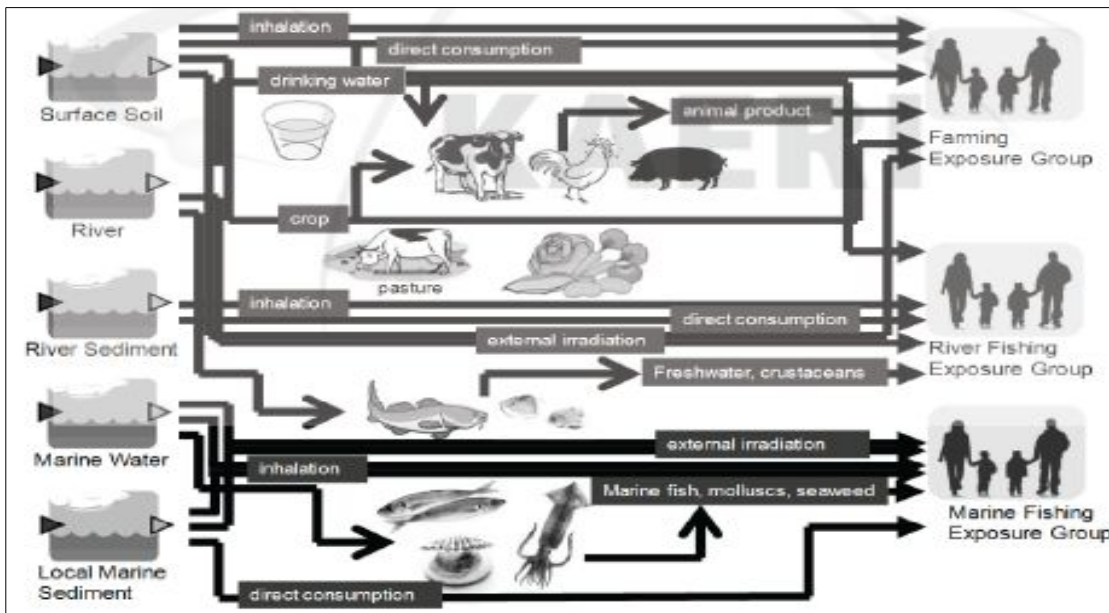


그림 2.6 피폭 경로에 따른 평가 개념⁸⁾

제 3 장 불확실성 및 민감도 분석

제 1 절 불확실성의 발생요인

처분 안전성 평가를 위해 사용되는 수학적 모델은 지하의 복잡한 환경을 Modeling 하는 과정에서 현실과의 차이에서 발생하는 불확실성을 내포하고 있다. 이러한 불확실성의 발생 요인 중 하나는 선정한 모델 구조가 일정한 환경 자체를 정확히 표현하지 못함으로써 일어나는 것이다. 이러한 문제는 지질환경을 세밀하게 설명 할 수 있는 복잡한 모델을 설정한다고 해서 반드시 해결되지 않는다. 왜냐하면 복잡한 모델에 사용되는 Parameter에 대한 자료를 현실적으로 구할 수 없는 경우가 많기 때문이다. 또 간단한 모델은 복잡한 현상을 몇 개의 수식으로 표현한 반면 모델에서 필요로 하는 정보나 일반적으로 모델에 대한 연구는 간단한 모델에서 출발하여 복잡한 모델 구성으로 나가게 되지만 복잡한 모델에 사용되는 Parameter에 관한 정보 부족으로 인하여 복잡한 모델이 더 정확하다는 보장은 없다.

불확실성의 원인이 되는 또 하나의 요소는 모델 Parameter의 변화이다. 본 연구에서 개발된 모델처럼 각 모델 Parameter에 하나의 값만 사용되는 결정론적 모델(deterministic model)에서의 단일 값의 결과만 도출하게 된다. 그러므로 Parameter 값이 그 시스템을 대표하는 최상의 값이 아니면 현실과 다른 예측치를 도출하게 된다. 따라서 현실을 안전하게 예측하기 위해서는 보수적인 Parameter 값을 적용하지 않을 수 없다.

문헌에 보고되고 있는 모델 변수 값들은 아주 넓은 범위에 걸쳐 분포되고 있다. 이것은 각 실험을 통해 구해졌지만 환경특성이나 실험방법, 실험 오차들 때문에 차이를 두고 있다. 따라서 모델 변수를 선택하기 위해선 대상 환경에 특이성이 있는 자료(Site Specific Value)나 문헌치를 참고로 한 최선의 값(Best Estimated Value)을 추출하려는 노력을 하게 된다.

어떤 모델의 불확실성을 분석할 수 있는 가장 좋은 방법은 실험을 통한 모델 검증(Model Validation)일 것이다. 이것은 일정 조건의 실험 관측치와 모델 예측을 비교해

보는 과정이다. 그러나 이 Validation process를 수행하기 위해서는 많은 시간과 비용이 소요되므로 현실적으로 가능하지 않은 경우가 많다.

모델 검증이 어려울 때 불확실성 분석을 위한 다른 방법을 사용할 수밖에 없다. 만일 모델 구성이 물리적으로 타당하고 대상 환경을 적절히 설명하고 있다고 가정하면 모델 Parameter의 변화에 따른 모델 예측치의 변화를 비교해 볼 수 있다. 예측치에 영향을 주는 변수를 찾고 영향을 주는 정도를 분석하는 것을 민감도 분석(Sensitivity Analysis)라 한다. 모델에서 민감도가 큰 변수를 찾아낼 수 있다면 이 변수들에 포함된 불확실성을 줄이고 보다 정확한 예상치를 사용함으로써 모델의 정확도를 향상시킬 수 있을 것이다. 그림 3.1은 모델과 그 입력변수의 불확실성을 발생요인에 대한 경우이다. 이는 넓은 의미를 뜻을 내포하고 있지만 간략히 설명하면 첫 번째는 모델과 그 입력변수에 대한 정확한 지식이나 정보가 없을 경우, 두 번째는 하나 이상의 다른 의미를 가지고 있어 각각의 분야에서 다른 이해되고 있는 경우, 마지막으로 모델과 그 변수가 변화하기 쉬운 경우이다.



그림 3.1 모델 입력변수의 불확실성 발생요인

제 2 절 민감도 분석

1. Nominal Range Sensitivity Analysis

Nominal Range Sensitivity 방법은 흔히 Local sensitivity나 Threshold analysis라고 알려져 있다.(Cullen and Frey 1999; Critchfield and Willard 1986) 이 민감도 분석 방법은 대부분 결정론적 모델(Deterministic model)에서 쓰이고 있으며, 확률론적 방법에서는 거의 사용하지 않는다.

Nominal Range Sensitivity analysis는 모델에 입력되는 다른 변수에 대해서는 고정시킨 후 선정된 개별적인 변수의 합당한 범위의 내에서 변화를 주면서 그 결과를 추출, 평가하는 방법이다. 입력변수의 범위 내에서 변화를 주면 그 결과의 값도 변화된 값이 나오게 되며, 민감도는 또한 Nominal solution으로부터 비교되며 Positive 나 Negative percentage 변화로서 대변할 수 있다. 또한 개별적인 모델의 입력의 수를 반복적으로 실시할 수 있다.

Nominal Range Sensitivity Analysis의 결과는 대부분 Linear model에 적용할 때 거의 유효하다. 민감한 각각의 입력변수가 정확하게 범위내의 할당될 경우 측정된 민감도의 규모를 바탕으로 상대적으로 중요한 인자를 Rank가 가능하게 된다. 그러나 Non-Linear 모델에서는 민감도 다른 인자들과의 상호관계에 의존하게 된다. 그래서 Non-linear 모델에서는 잠재적으로 민감도 분석 결과가 의도하지 않은 값이 나오게 된다.

Nominal Range Sensitivity Analysis는 상대적으로 매우 단순하면서 쉽게 적용할 수 있다. Linear 모델에서 주로 쓰이며 각각 선정된 인자의 이치에 맞는 범위를 좋은 생각을 가질 때 잘 적용한다. 또한 큰 상호작용이나 각각의 인자에 대한 범위를 잘 인지하고 있을 때는 그 결과는 Rank시 Key input으로 사용된다.

하지만 Nominal Range Sensitivity Analysis는 서로 다른 인자의 상호작용에 의해 단지 잠재적인 작은 부분에서만 다루어지고 있다. Conditional Sensitivity Analysis는 입력과 비선형의 상호작용 사이에 모델의 응답을 구하고자 할 때 사용되지만, 가능한 Case의 Combinational explosion 때문에 한계를 가지고 있다. 잠재적으로 결과의

중요하게 얽힌 결론은 소수의 혹은 모든 입력의 작은 변화량 때문에 선형모델보다 다른 부분에서는 Nominal Range Sensitivity Analysis를 보여주지 못하고 있다. 그래서 Nominal Range Sensitivity Analysis에서는 중요입력의 신뢰할만한 Rank ordering을 명백하게 증명할 수가 힘들다.

먼저 Input(Parameter)를 X를 설정할 경우 Input마다 고유의 가지고 있는 범위가 있을 것이며, 그 범위의 변화에 따라 $X_1, X_2, X_3, X_4, \dots, X_n$ 까지 설정을 할 수 있다. 물론 범위에 따른 평균치를 가지고 있을 경우도 있고 없는 경우도 있을 것이다. 가지고 있을 경우는 그 값을 평균치고 설정하고 그렇지 않을 경우는 가장 보수적인 값을 설정을 하도록 하였다. Input의 평균치를 X_m 으로 설정한다.

결과도 마찬가지로 Output(Dose)를 $Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, \dots, Y_n$ 까지 설정한다. 결과 중에서도 입력의 평균치에서 나온 Dose를 Y_m 으로 설정하여 모든 결과에 대해 다음과 같이 계산한다.

$$\frac{Y_m - Y_1}{X_m - X_1} \cdots \frac{Y_m - Y_n}{X_m - X_n}$$

이러한 방법으로 Input 범위에 대한 모든 Output 값을 추출하여 정리하면 나오게 된다. 그리고 입력변수의 변화에 따른 결과값을 추출하게 되면 시간과 인자의 변화에 따른 선량치가 나오게 되고, 그 결과값이 시간과 인자의 변화에 영향을 받았는지의 여부를 알기 위해서 일원분산분석을 실시하였다. 분산분석 후 F 비가 F 기각치보다 큰 값 일 경우에는 인자변화에 따른 시간에 경과에 따라 선량(결과)에 영향을 받았다고 해석이 가능하다.

2. 입력변수의 범위 및 선정

민감도 분석을 위해 선택된 입력변수에 대한 각 인자의 분포형태와 범위를 각종 문헌을 통해서 조사하였다. Goldsim에 입력되는 입력변수는 프로그램 내에서 입력하는 방법과 엑셀을 통해 Link시켜서 하는 방법이 있다. 평가 대상의 입력인자들은 사전 평가 및 다양한 문헌들을 통해 선택하였다. 많은 입력인자 중에서도 독립적인 인자와 비독립적인 인자를 파악하여 그에 맞게 설정을 해주어야 한다. 우선 독립적인 인자를 위주로 입력변수를 추출하였다.

표 3.1 입력인자와 확률분포함수⁸⁾

Parameter	Unit	Minimum Value	Maximum Value	Distribution type	비고
Instant Release Fraction	-	0.03	0.1	Uniform	
Dissolution Ratio	y^{-1}	10^{-8}	10^{-4}	Log-uniform	
Canister Failure Time	y	1E-1 (300yr)	1E4 (10^5)	Uniform (Log-uniform)	
Buffer Thickness	m	0	1	Uniform	
Flow Rate	m^3/y	10^{-4}	10	Log-uniform	
Early Time Failure	%	0 (Most likely 0.1)	0.5	Triangular	
Waste Dissolution Rate	y^{-1}	10^{-12}	10^{-5}	Uniform	
Fracture Length	m	50 (Most likely 100)	200	Triangular	
Dispersion in Fracture	m	-1 (Most likely 0)	1	Triangular	10*10**
Hydraulic Conductivity	m/s	10^{-12} (Most likely 10^{-10})	10^{-8}	Triangular	
Porosity in MWCF	-	0.025 (Most likely 0.05)	0.1	Triangular	
MWCF Length	m	400 (Most likely 800)	1600	Triangular	
Dispersion in MWCF	m	-1 (Most likely 0)	1	Triangular	50*10**

위 표 3.1에 있는 입력인자들 중에 Instant Release Fraction(IRF : UO_2 내부에서 탈출한 물질은 UO_2 의 용출에 제약을 받지 않고 최고용해도에 의해 용출률을 결정하는데 그 중 일부가 UO_2 에 갇혀있고 나머지가 탈출하여 자유롭게 용해하는데 그 때의 자유롭게 용해가 가능한 비율)과 Canister Failure Time, Early Time Failure, Waste Dissolution Rate, Porosity in MWCF의 5가지 인자를 우선적으로 범위 내에서 변화를 주면서 선량의 변화를 살펴보았다.

3. Goldsim프로그램의 입력변수 적용

입력변수의 적용 시 Waste Type의 차이에 따라 각각 입력변수의 적용이 달라지게 된다. 우선 IRF같은 경우에는 Waste Type가 PWR+CANDU 경우에 적용될 수 있는 입력변수이며, ETF, CFT, WDR, PM같은 경우에는 Waste Type이 PYRO(Pyro Ceramic TRU Waste, Vitrified HLW, Pyro Metal, Pyro Ceramic Off-Gas, Pyro Vitrified ILW)일 경우에 적용될 수 있다. 피폭집단은 Farmer, Fisherfresh, Fishermarine, Total EBS Release to Geosphere, Activity flux Near-field으로 5개의 집단으로 나눌 수 있다. 피폭 시간은 0 ~1.00E+8년 까지 설정하여 선량에 대해 예측하였다.

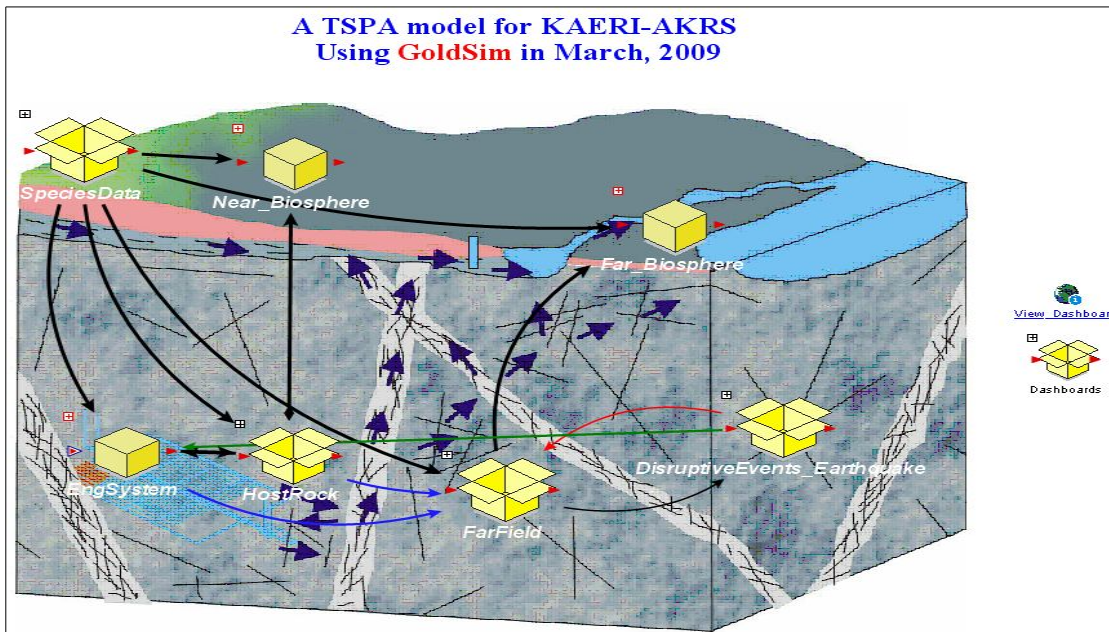


그림 3.2 Goldsim 코드로 묘사한 월성 처분장 안전성 평가 개념도⁸⁾

그림 3.2는 현재 KAERI에서 개발된 Goldsim코드를 이용하여 월성의 방사성폐기물 처분장의 안전성 평가를 묘사한 것이다. 기본적인 방사성폐기물에 담겨 있는 핵종을 바탕으로 처분장에서부터 인공방벽과 천연방벽까지의 유출경로를 묘사하였으면 유출

핵종들의 Near-Field과 Far-Field로 이동하는 경로 및 유출되는 핵종의 농도 등을 파악할 수 있도록 하였으며 해안과 농경의 생태계로 빠져나가는 흐름, 위에서 언급한 것처럼 여러 가지의 가정을 생각하고 시나리오별로 피폭집단으로 유출되는 핵종의 농도나 선량 등을 파악하여 모두 적용하였다.

제 4 장 결과 및 고찰

제 1 절 입력변수에 따른 선량의 변화

Goldsim을 사용한 처분 안전성 평가 프로그램에 입력인자의 변화를 입력인자의 분포에 따라서 범위내의 최소값과 최대값 사이의 변화량을 규칙적으로 나누어서 각자의 입력변수의 변경값을 프로그램 내에서 입력하여 그에 따른 선량 변화를 측정하였다. 피폭집단은 3가지의 피폭집단(Farmer, Fisherfresh, Fishermarine)으로 한정하고 처분 안전성 평가 프로그램 내에 입력되어 있는 모든 핵종에 대해서 시간에 따른 선량의 변화량을 측정하였다.

1. Instant Release Fraction(IRF)

우선적으로 Instant Release Fraction에 대해서 선량을 예측하였다. IRF경우에는 앞으로 이루어진 3가지의 인자와 다르게 Waste Type이 PWR과 CANDU의 일 때 측정할 수 있다. 예상 처분시 폐기물의 양은 24개의 PWR에서 나오는 모든 사용후핵연료(4.5 wt% U-235, 45,000 MWD/MTU, 5년 냉각기준)를 대상으로 하였다. Goldsim 프로그램 내에 많은 핵종 등을 입력하여 각 핵종마다 시간에 따른 선량을 측정할 수 있는데 이번 논문에서는 수용성 방사성 핵종 I-129를 대표적인 핵종으로 선정하여 중점적으로 다루어 보았다. 특히나 IRF 핵종인 I-129와 Se-79등의 영향은 가장 중요하다고 알려져 있다.

IRF의 인자변화 중에서 IRF가 0.1 값을 가장 보수적으로 생각하여 IRF이 0.1을 기준값으로 설정하여 인자의 변화에 따른 선량의 분포를 파악할 수 있다.

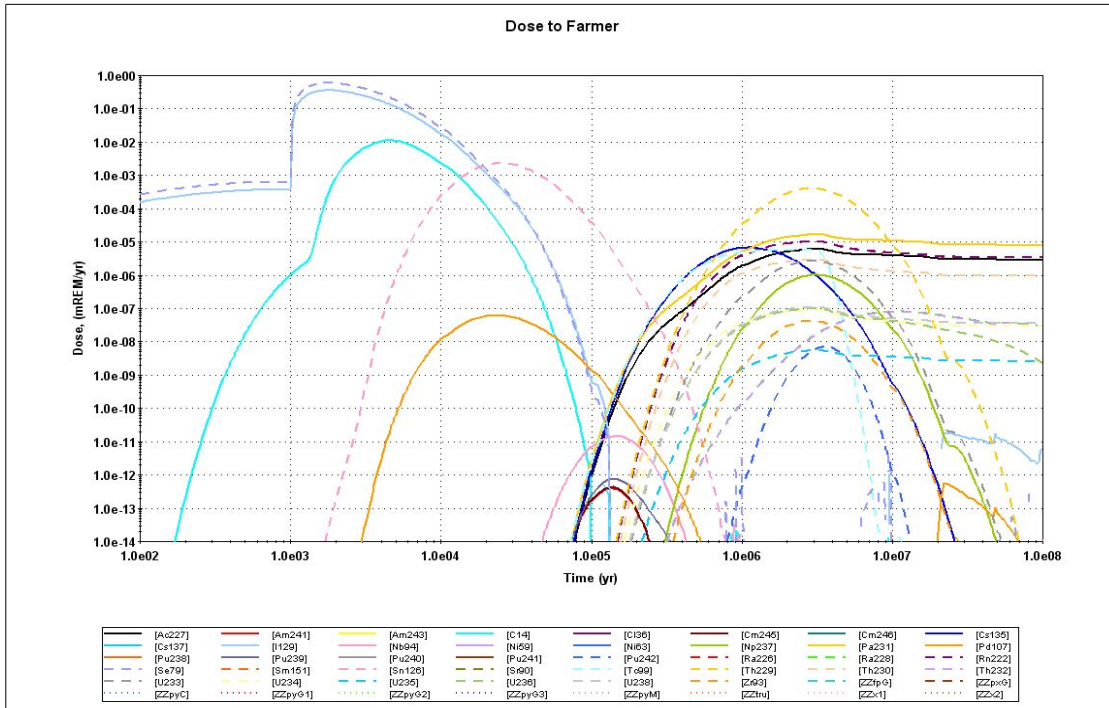


그림 4.1 IRF-0.1의 Farmer Dose

그림 4.1은 사용후핵연료를 직접 처분한 경우 안전성 평가 결과를 보여주고 있다. 그림에서 보는 것과 같은 초기에는 핵분열 생성물의 영향이 우세하며 후반에는 Actinide들의 영향이 두드러짐을 알 수 있다. 앞에서 언급한 것처럼 I-129와 Se-79가 가장 초기에 영향을 많이 끼치는 걸을 알 수 있다. 만약 파이로 공정의 폐기물이 사용후핵연료의 같은 특성을 가질 경우 모든 폐기물에서 핵종이 사용후핵연료의 UO_2 Matrix 용해도를 가지고 있는 폐기물 Matrix와 조화 유출(용기의 부식으로 기능의 상실시 사용후 핵연료의 이산화우라늄이 용해되며 대부분의 핵종은 UO_2 용해율에 좌우되어 유출:Current release→TRU, 일부핵종들)한다고 가정하여도 I-129의 최고치만 직접 처분시의 10^{-4} 정도로 낮아지고 유출기간은 길어진다. 또한 Actinide의 경우는 Matrix에 비해 그 양이 매우 적고 용해도가 낮아서 재고량이 어느 정도 되면 재고량에 큰 영향을 받지 않는다.

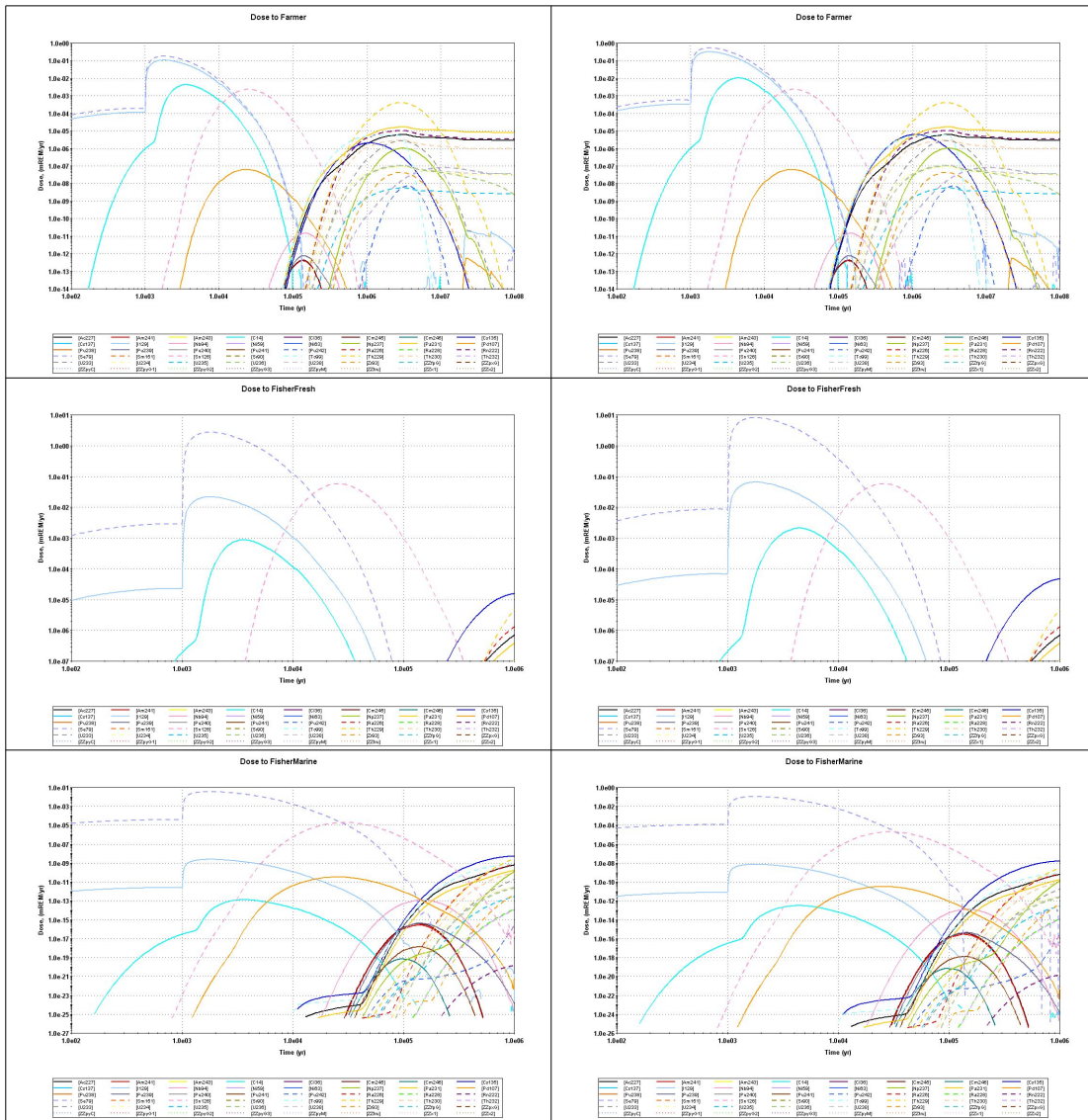


그림 4.3 좌 : IRF-0.03의 Farmer, Fisherfresh, Fishermarine의 Dose
우 : IRF-0.09의 Farmer, Fisherfresh, Fishermarine의 Dose

IRF의 0.03 ~ 0.09까지의 변화는 인자의 변화에 따른 선량의 차이만 조금씩 있을 뿐 큰 차이가 나지 않았다. IRF의 값이 작을수록 선량의 크기도 적게 나왔으며, 커질수록 선량도 크게 나타났다.

2. Canister Failure Time(CFT)

먼저 Canister Failure Time의 방사성폐기물을 담고 있는 캐니스터의 파손시점을 나타내고 있다. Waste Type은 Pyro 공정 폐기물을 바탕으로 인자의 변화에 따른 선량을 예상해 보았다. IRF와 마찬가지로 피폭집단은 Farmer, Fisherfresh, Fishermarine의 3가지의 집단에 대한 선량을 예측하였다. CFT의 인자의 범위는 0 ~10000년까지로 설정하고 기준값을 1000년으로 평균값으로 설정하고 시간에 따른 많은 핵종의 선량의 변화량을 예측 하였다. 그 외 Early Failure Time(EFT)와 Waste Dissolution Rate(WDR), Porosity in MWCF은 0.1%와 1E-12, 0.05의 값으로 설정하였다.

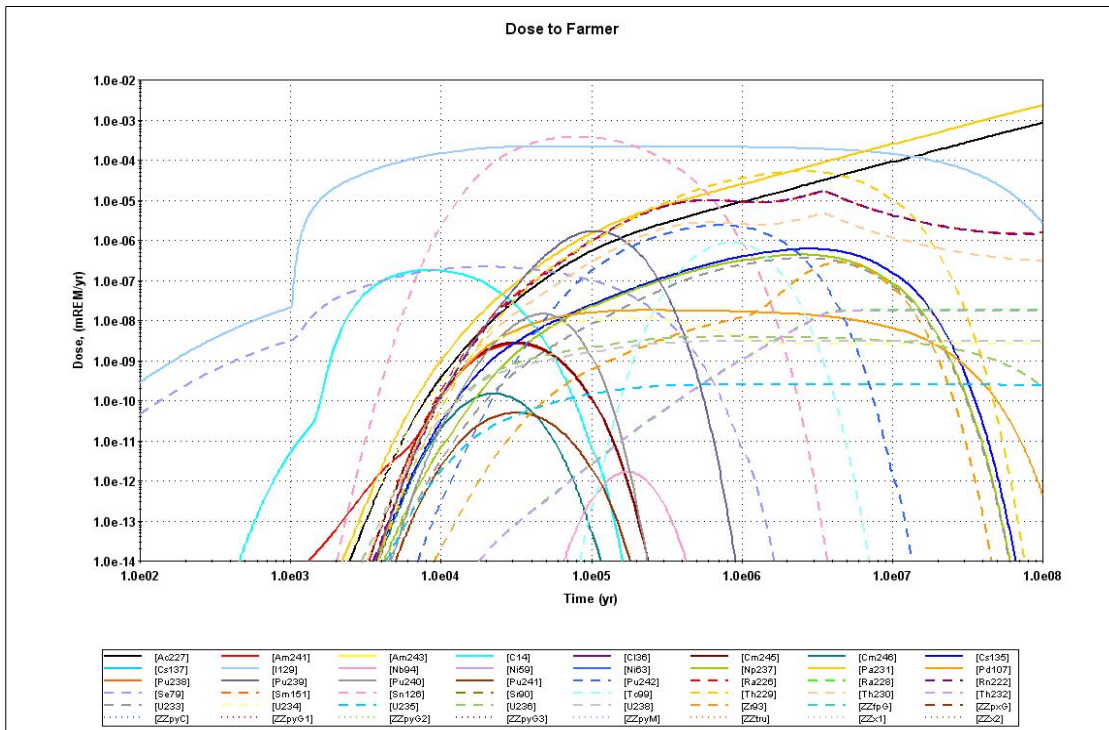


그림 4.4 CFT-1000년의 Farmer의 Dose

그림 4.4 에서처럼 CFT를 1000년으로 설정한 후 선량을 예측결과 예상한대로 1.0E3 부터 급격하게 선량의 증가함을 알 수 있다.

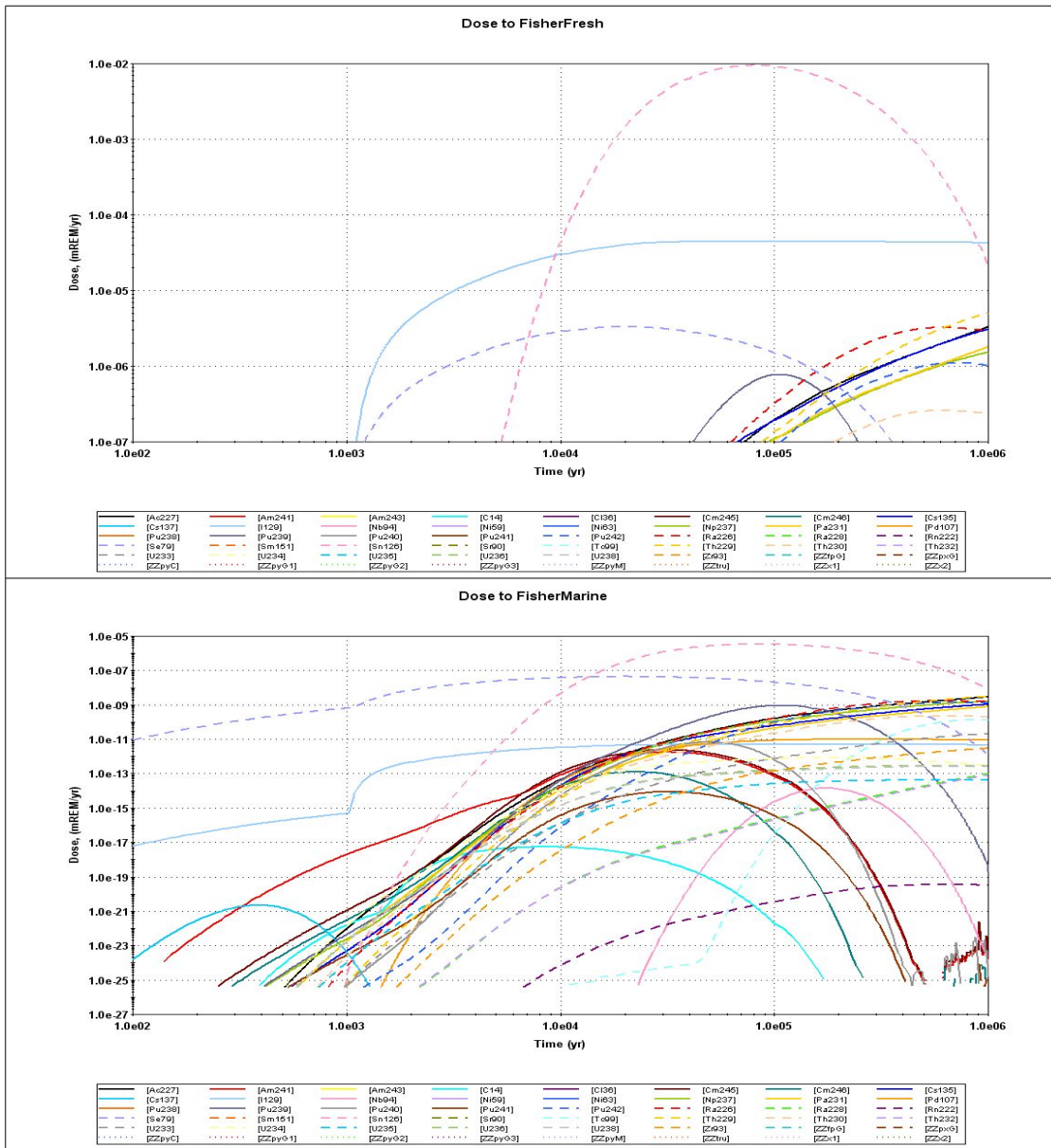


그림 4.5 CFT-1000년의 Fisherfresh, Fishermarine의 Dose

그림 4.5는 Fisherfresh와 Fishermarine의 선량을 보여주고 있다. 위의 그림과 마찬가지로 1000년부터 선량의 증가하기 시작하였다. Fishermarine에서는 많은 핵종들의 100년과 1000년 사이에서부터 선량이 증가함을 알 수 있다.

3. Early Time Failure(ETF)

Early Failure Time은 초기의 방사성폐기물을 담고 있는 캐니스터의 기능상실의 확률을 나타내고 있다. CFT와 마찬가지로 Waste Type은 PYRO 공정 폐기물로 설정을 하였으며, 피폭 집단은 Farmer, Fisherfresh, Fishermarine으로 선정, ETF의 범위는 0 ~ 0.5%로 예측하였다. CFT는 1000년으로 WDR은 1E-12로 PM은 0.05로 설정하고 피폭집단의 피폭선량에 대해 예측 하였다.

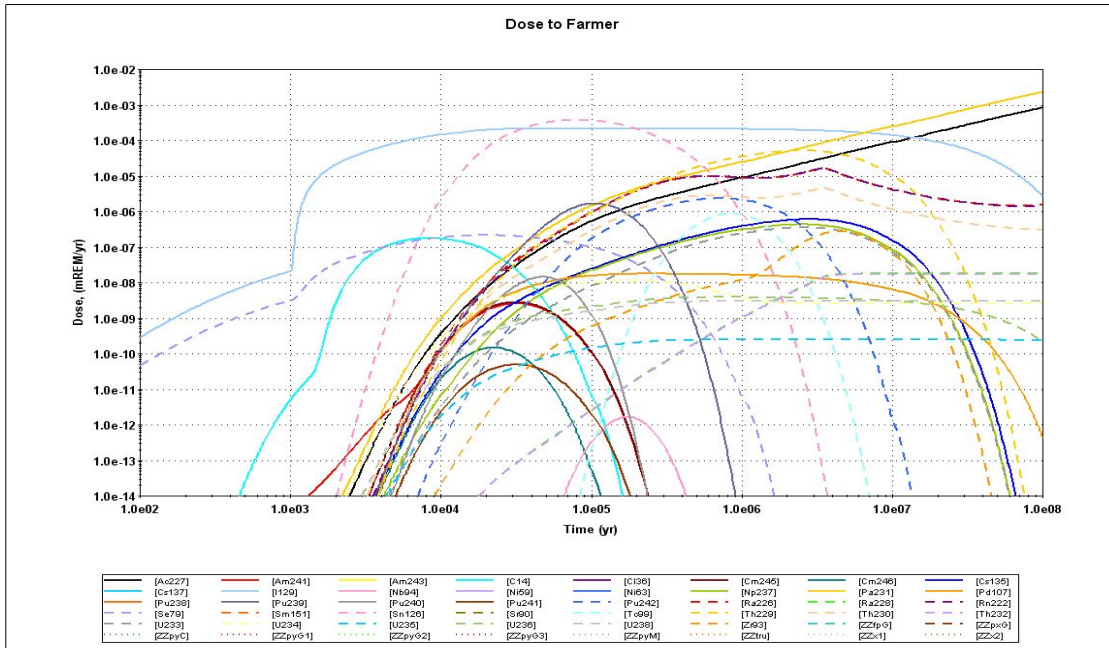


그림 4.7 ETF-0.1일 때의 Farmer의 Dose

그림 4.6은 ETF의 0.1%일 때의 그림이다. CFT의 1000년과 거의 비슷한 모습을 보여주고 있다.

확률적으로 1000개의 캐니스터 중 한 개의 캐니스터의 손실로 나올 수 있는 선량은 거의 없다고 봐도 무방하다고 볼 수 있다.

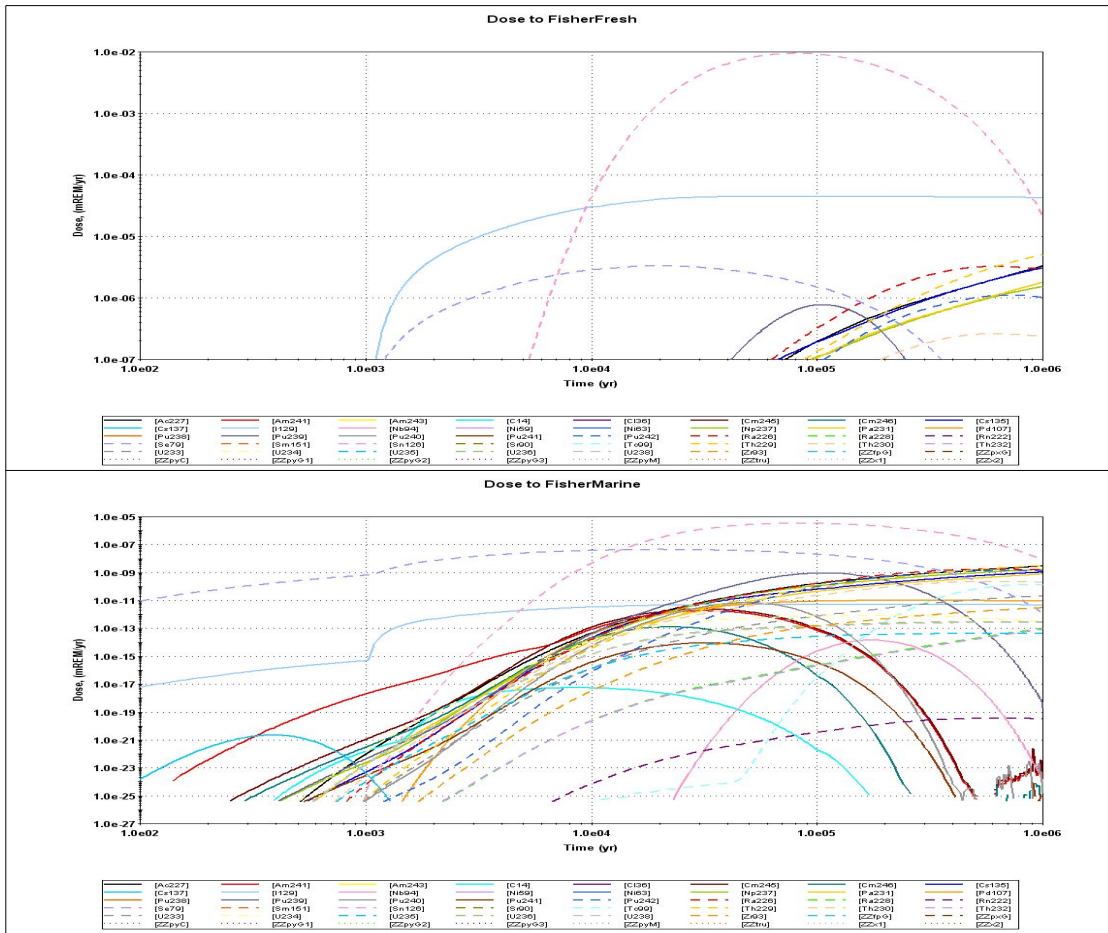


그림 4.8 ETF-0.1%일 때의 Fisherfresh, Fishermarine의 Dose

그림 4.7에서는 Fisherfresh, Fishermarine의 선량을 나타낸 그림이다. CFT의 같은 피폭집단의 선량의 변화와 거의 비슷하다는 걸 알 수 있다.

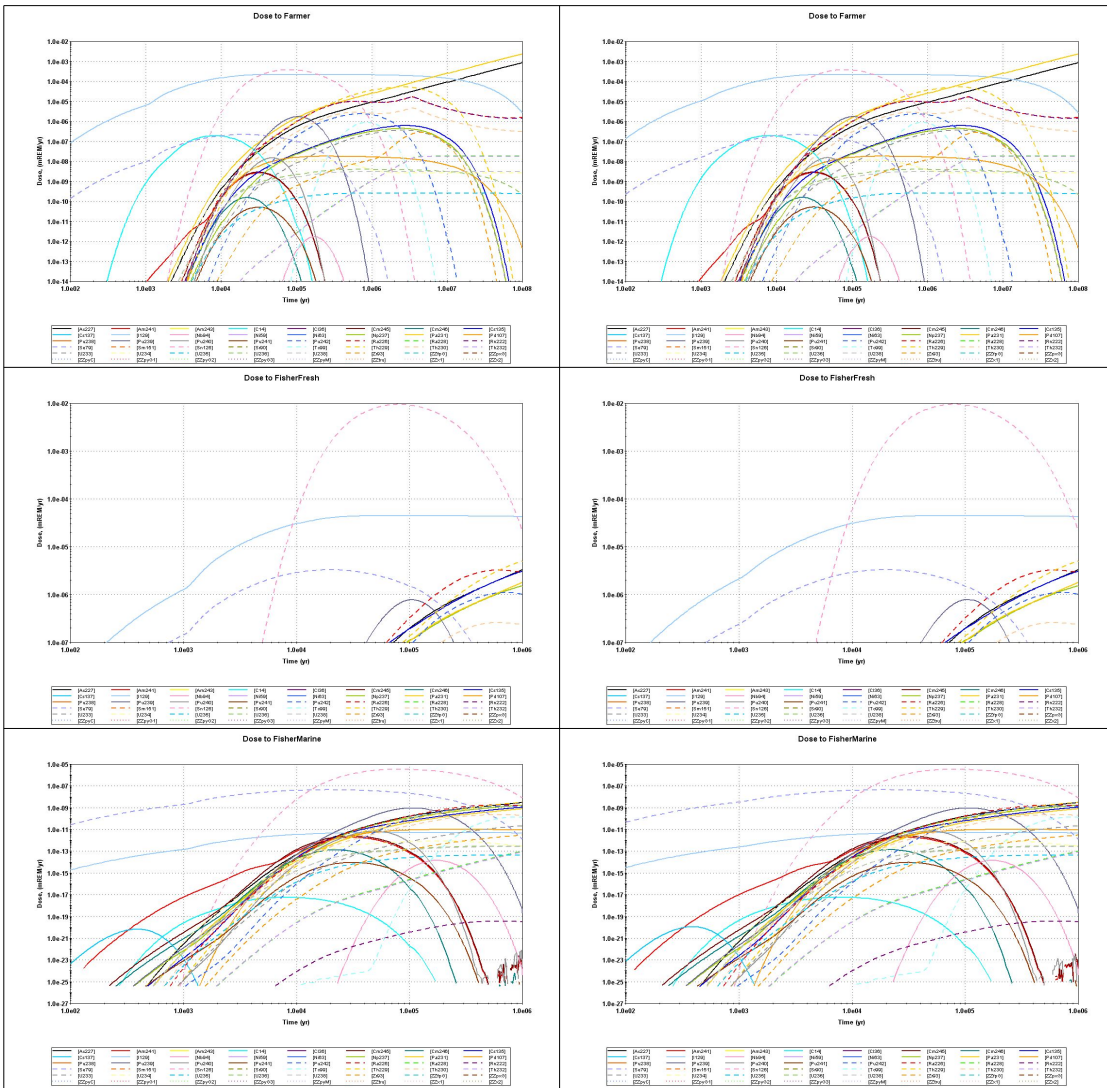


그림 4.9 좌 : ETF-0.3%일 때의 Farmer, Fisherfresh, Fishermarine의 Dose
 우 : ETF-0.5%일 때의 Farmer, Fisherfresh, Fishermarine의 Dose

그림 4.8은 ETF변화에 따른 선량의 변화이다. 0.3과 0.5의 차이가 거의 없다고 볼 수 있다. 직접적으로 수치적인 선량을 보게 되면 약간의 차이가 있지만 확률이 증가할수록 조금씩 선량이 증가하는 정도이다. ETF의 변화는 피폭집단의 선량의 변화에 거의 영향을 주지 못하는 것 같다.

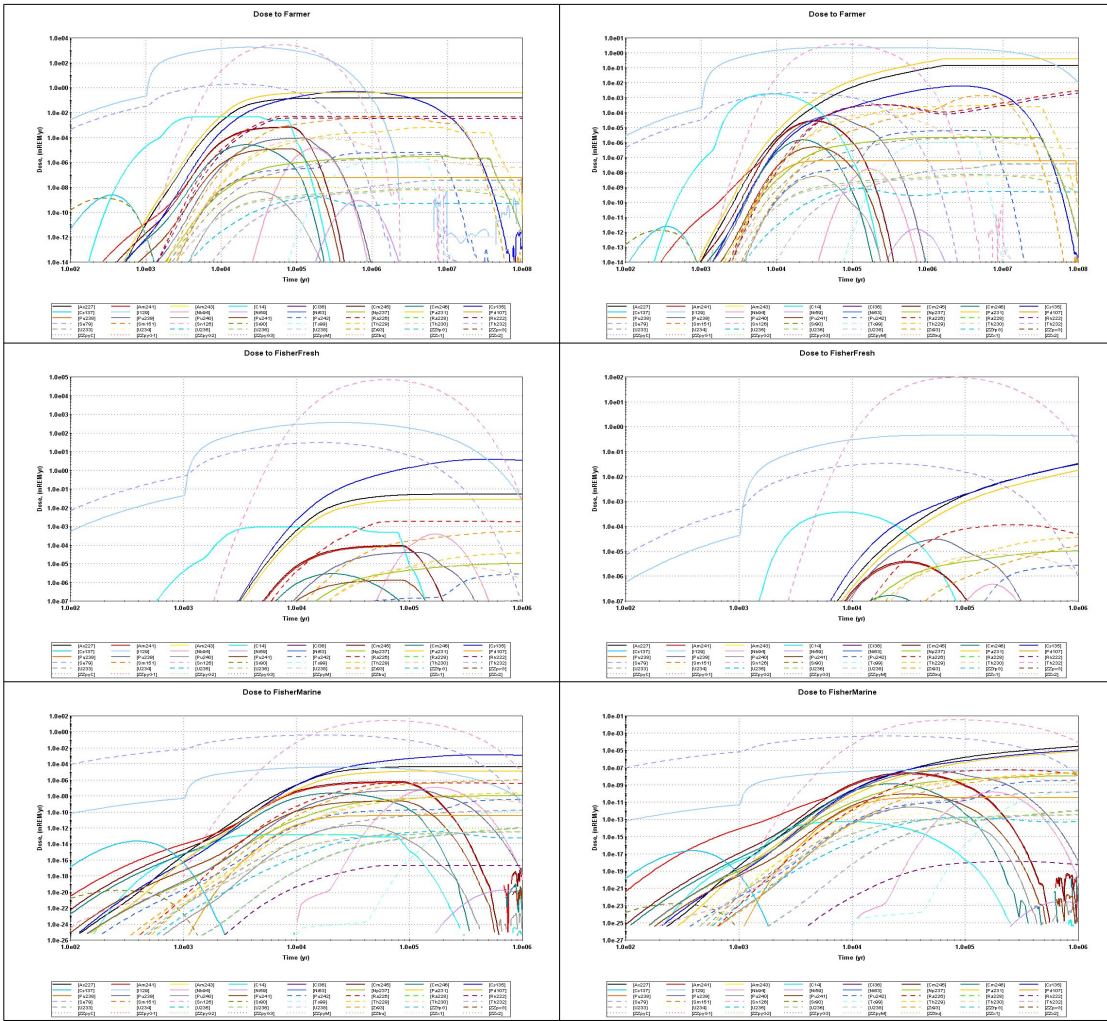


그림 4.11 좌 : WDR 1E-5일 때의 Farmer, Fisherfresh, Fishermarine의 Dose
 우 : WDR 1E-8일 때의 Farmer, Fisherfresh, Fishermarine의 Dose

그림 4.10에서처럼 상당히 높은 유출률인 1E-5(1/yr)의 경우는 핵분열 생성물과 Actinide 모두 매우 높은 나타났다. 1E-8(1/yr)인 경우는 핵분열 생성물 경우는 낮아졌지만 Actinide의 경우는 Steady state에 이르는 시간만 차이가 날 뿐 최대치는 변화가 없음을 알 수 있다. 이는 Actinide의 경우 용해도가 낮기 때문에 고화체의 유출률이 Actinide의 용해도 이상일 경우는 침전이 생기며 용해도만큼만 유출되기 때문이다. 그러나 고화체의 유출률이 1E-12(1/yr)로 충분히 낮아지면 핵분열 생성물과 Actinide 모

두 낮아지며 유출 기간이 늘어난다. 또한 $1E-12(1/yr)$ 의 침출율의 경우에 각 폐기물별로 따로 정리를 하게 되면 PYRO 공정 폐기물 중 유리화 ILW는 주요 핵종이 Sr-90으로 유출률이 $1E-12$ 정도로 충분이 낮으면 생태계에 도달하기 전에 지하 매질을 이동하는 중 모두 붕괴되어 생태계에 전혀 영향을 미치지 못할 것이다. 금속 폐기물 경우 Ac-227과 Pa-231이 약 109년까지 증가하는 경향이 있는데 이는 낮은 고화체 침출율과 금속폐기물의 처분 개념에 기인하는 것이라 할 수 있다.

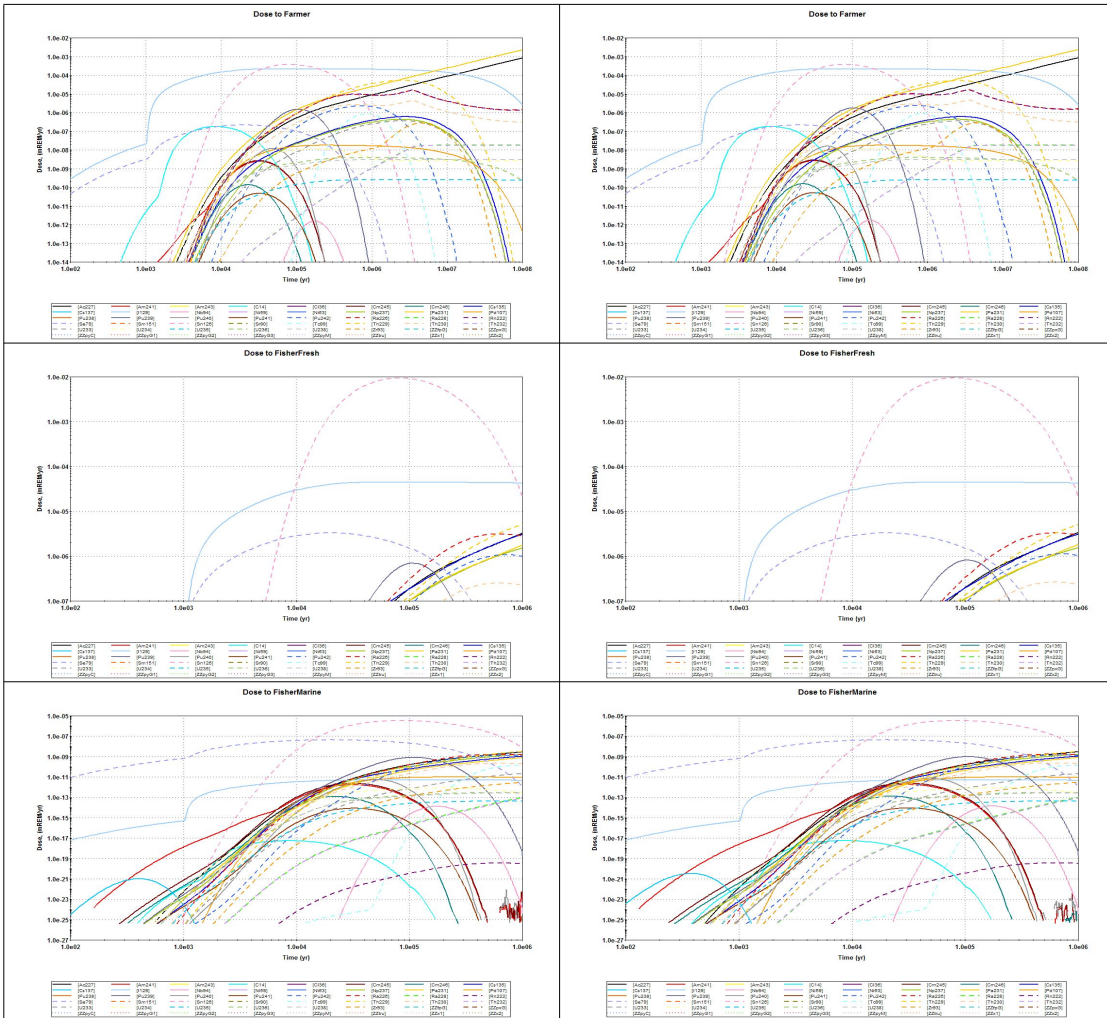


그림 4.13 좌 : PM 0.025(2.5%)일 때의 Farmer, Fisherfresh, Fishermarine의 Dose
 우 : PM 0.1(10%)일 때의 Farmer, Fisherfresh, Fishermarine의 Dose

그림 4.13은 PM의 범위 내 최대값과 최소값의 그래프를 나타내고 있다. PM의 0.025(2.5%)와 0.1(10%)과의 차이는 거의 없다고 볼 수 있다. 직접적으로 테이블형태의 선량을 비교하게 되면 차이가 나타나지만 그래프상의 차이는 거의 없다. 민감도 분석을 해봐야 되겠지만(I-129만 고려함) 그다지 MWCF의 Porosity의 변화는 선량에 거의 영향을 주지 못할 거라고 예상된다.

제 2 절 입력변수의 민감도 분석

본 연구에서는 Goldsim을 이용한 처분 안전성 평가 프로그램을 통해 프로그램 내에 입력되는 변수의 항을 각 인자의 범위 안에서 각각 입력하여 그 결과에 대한 선량에 대한 민감도 분석을 수행하였다.

다양한 피폭경로에 대한 3개의 피폭집단(Farmer, Fisherfresh, Fishermarine)중 가장 보편적으로 예상되는 집단인 Farmer에 대해서 수용성이며, 주요 방사성 핵종인 I-129에 대해서 피폭선량의 변화에 대한 입력변수의 민감도 분석을 수행하였다.

본 연구의 입력변수의 분석에 있어서 해당 입력변수의 변화에 따른 타 입력변수의 값은 기존의 Goldsim에서 쓰이는 가장 보수적인 값으로 고정을 하였다. 각 인자의 변화량과 시간에 따른 핵종의 선량을 모두 저장 후에 각 인자의 설정된 평균값을 바탕으로 인자의 변화의 선량을 모두 계산 후에 그에 따라 각 인자의 변화량에 따른 민감도 분석을 수행하였다. 또한 각 입력인자의 Waste Type에 따른 입력변수의 변화를 위해 PWR+CANDU와 PYRO 공정 폐기물로 분류하였다. 분석 후 각 인자들 간의 민감도를 정량화하기 위해서 SAS(통계패키지)를 통해 분산분석(ANOVA)를 실시하여 각 인자들 간의 영향력(중요성)을 측정하였다.

※ 각 인자들의 고정값

Parameter	고정값(unit)	범위
IRF	0.1	0.03 ~ 0.1
CFT	1000(yr)	0.1 ~ 10000
ETF	0.1(%)	0 ~ 0.5
WDR	10E-12(1/y)	10E-5 ~ 10E-12
PM	0.05	0.025 ~ 0.01

1. 민감도 분석 결과

가. Instant Release Fraction(IRF)

Instant Release Fraction(IRF)의 변화에 따른 핵종 I-129에 대한 선량을 계산 하였다. Waste Type은 PWR+CANDU의 사용후핵연료를 직접처분 할 경우이다.

표 4.1 Instant Release Fraction(IRF)의 변화에 따른 I-129의 선량 변화

Time (yr)	IRF-0.03	IRF-0.04	IRF-0.05	IRF-0.06	IRF-0.07	IRF-0.08	IRF-0.09	IRF-0.1
	[I129] [mREM/yr]	[I129] [mREM/yr]	[I129] [mREM/yr]	[I129] [mREM/yr]	[I129] [mREM/yr]	[I129] [mREM/yr]	[I129] [mREM/yr]	[I129] [mREM/yr]
0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	2.50E-08	3.33E-08	4.17E-08	5.00E-08	5.84E-08	6.67E-08	7.50E-08	8.34E-08
100	4.66E-05	6.21E-05	7.76E-05	9.32E-05	0.00010871	0.00012424	0.00013977	0.0001553
200	7.52E-05	0.00010031	0.00012539	0.00015046	0.00017554	0.00020062	0.00022569	0.00025077
300	9.02E-05	0.00012032	0.0001504	0.00018047	0.00021055	0.00024063	0.00027071	0.00030079
400	9.97E-05	0.00013291	0.00016611	0.00019938	0.00023259	0.00026582	0.00029908	0.0003323
500	0.0001058	0.00014107	0.00017633	0.0002116	0.00024686	0.00028213	0.0003174	0.00035266
600	0.00010944	0.00014592	0.0001824	0.00021888	0.00025536	0.00029184	0.00032832	0.0003648
700	0.00011115	0.0001482	0.00018525	0.00022231	0.00025936	0.00029641	0.00033346	0.00037051
800	0.00011137	0.00014849	0.00018561	0.00022273	0.00025985	0.00029697	0.00033409	0.00037121
900	0.00011044	0.00014725	0.00018405	0.00022087	0.00025768	0.00029449	0.00033313	0.00036811
1000	0.00012467	0.00016622	0.00020778	0.00024933	0.00029089	0.00033244	0.000374	0.00041555
1100	0.035648	0.04753	0.059412	0.071295	0.083177	0.09506	0.10694	0.11882
1200	0.061512	0.082012	0.10251	0.12302	0.14352	0.16402	0.18452	0.20503
1300	0.078867	0.10516	0.13144	0.15773	0.18402	0.2103	0.23659	0.26289
1400	0.0908	0.12107	0.15132	0.18161	0.21186	0.24214	0.27239	0.30264
1500	0.098737	0.13165	0.16456	0.19747	0.23038	0.2633	0.29621	0.32912
1600	0.10363	0.13817	0.17271	0.20725	0.24179	0.27633	0.31087	0.34541
1700	0.10619	0.14158	0.17698	0.21237	0.24777	0.28316	0.31856	0.35395
1800	0.107	0.14266	0.17832	0.21399	0.24965	0.28532	0.32098	0.35665
1900	0.1065	0.142	0.1775	0.213	0.2485	0.28401	0.3195	0.355
2000	0.10507	0.14009	0.17511	0.21013	0.24515	0.28017	0.31519	0.35021
3000	0.075948	0.10126	0.12657	0.15188	0.17719	0.20251	0.22783	0.25314
4000	0.05079	0.067726	0.084651	0.10158	0.11851	0.13545	0.15237	0.16929
5000	0.03395	0.045267	0.056583	0.067905	0.079214	0.090536	0.10185	0.11317
6000	0.022828	0.030438	0.038053	0.04566	0.053272	0.060883	0.068484	0.076094
7000	0.015467	0.020622	0.025776	0.030934	0.036091	0.041242	0.046399	0.051552

8000	0.010572	0.014095	0.017619	0.021144	0.024666	0.02819	0.031716	0.035238
9000	0.0073008	0.0097346	0.012168	0.014601	0.017034	0.019468	0.021901	0.024335
10000	0.005101	0.0068012	0.0085015	0.010202	0.011902	0.013603	0.015303	0.017003
20000	0.00034179	0.00045572	0.0005696	0.00068354	0.00079725	0.00091132	0.0010253	0.0011391
30000	4.81E-05	6.41E-05	8.02E-05	9.62E-05	0.00011223	0.00012826	0.0001443	0.00016033
40000	8.03E-06	1.07E-05	1.34E-05	1.61E-05	1.87E-05	2.14E-05	2.41E-05	2.68E-05
50000	1.37E-06	1.82E-06	2.28E-06	2.73E-06	3.19E-06	3.64E-06	4.10E-06	4.55E-06
60000	2.33E-07	3.10E-07	3.88E-07	4.65E-07	5.43E-07	6.20E-07	6.98E-07	7.75E-07
70000	3.97E-08	5.29E-08	6.61E-08	7.93E-08	9.26E-08	1.06E-07	1.19E-07	1.32E-07
80000	6.77E-09	9.02E-09	1.13E-08	1.35E-08	1.58E-08	1.80E-08	2.03E-08	2.26E-08
90000	1.15E-09	1.53E-09	1.92E-09	2.30E-09	2.69E-09	3.07E-09	3.45E-09	3.84E-09
100000	1.70E-10	2.34E-10	3.14E-10	3.73E-10	4.50E-10	5.26E-10	6.02E-10	6.78E-10
110000	9.39E-11	1.29E-10	1.71E-10	2.11E-10	2.46E-10	2.86E-10	3.26E-10	3.66E-10
120000	2.51E-11	3.19E-11	4.04E-11	4.88E-11	5.79E-11	6.71E-11	7.63E-11	8.54E-11
130000	4.32E-12	4.66E-12	5.77E-12	6.93E-12	8.15E-12	9.43E-12	1.077E-11	1.211E-11
140000	6.94E-23	7.49E-23	9.36E-23	1.127E-22	1.332E-22	1.542E-22	1.757E-22	1.977E-22
150000	0	0	3.71E-13	4.84E-13	6.04E-13	0	6.99E-13	0
160000	7.93E-14	1.15E-13	1.61E-13	2.28E-13	2.29E-13	0	2.90E-13	0
170000	2.70E-14	2.78E-14	3.88E-14	5.64E-14	3.74E-14	0	6.58E-14	0
180000	4.34E-25	4.46E-25	6.23E-25	9.06E-25	6.00E-25	0	1.06E-24	0

Goldsim에서 결과로 나온 시간은 0 ~ 1.0E8년까지로 너무 방대하여 0 ~ 18만년까지만 선정하고 그 시간의 간격도 축소하였다.

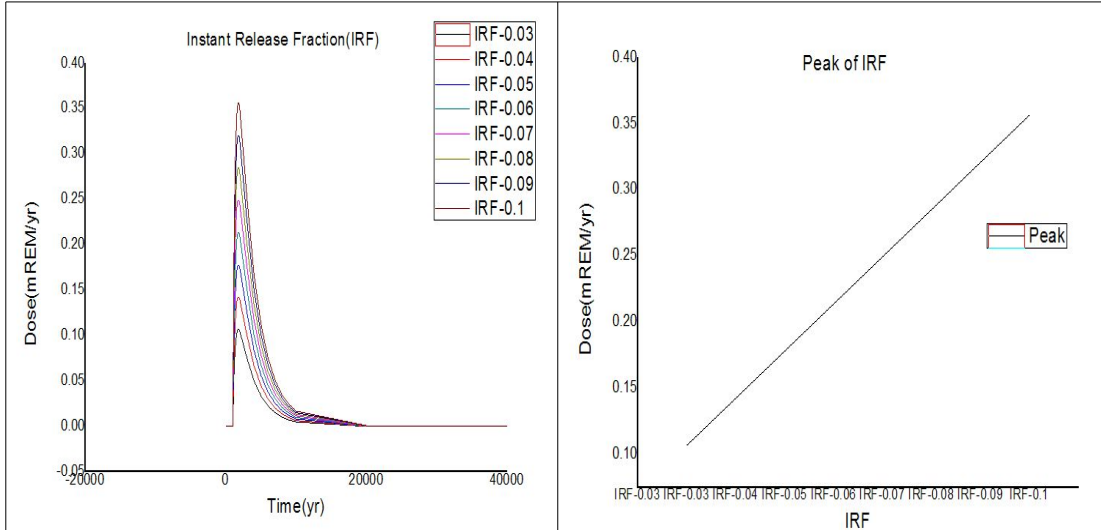


그림 4.14 IRF 범위에 따른 I-129의 선량변화 및 피크정리

그림 4. 14중 왼쪽에 있는 그래프는 표 4.1의 변화값을 그래프로 나타낸 그림이다. IRF의 값이 커질수록 선량도 크게 증가하는 걸 알 수 있다. 오른쪽에 있는 그래프는 각 인자별로 가장 높은 선량을 선정하여 인자의 변화에 따른 선량을 나타내고 있다. 역시나 선량이 증가함에 따라 선량이 증가하고 있다.

나. Canister Failure Time(CFT)

Canister Failure Time(CFT)의 변화에 따른 핵종 I-129에 대한 선량을 계산 하였다.
Waste Type은 PYRO 공정 폐기물의 처분할 경우이다.

표 4.2 Canister Failure Time(CFT)의 변화에 따른 I-129의 선량 변화

Time (yr)	CFT-10	CFT-100	CFT-1000	CFT-10000
	[I129] [mREM/yr]	[I129] [mREM/yr]	[I129] [mREM/yr]	[I129] [mREM/yr]
0	0	0	0	0
10	6.19E-12	6.19E-15	6.19E-15	6.19E-15
100	2.77E-07	2.83E-10	2.77E-10	2.77E-10
200	1.50E-06	3.60E-07	1.50E-09	1.50E-09
300	3.38E-06	1.66E-06	3.38E-09	3.38E-09
400	5.64E-06	3.59E-06	5.64E-09	5.64E-09
500	8.09E-06	5.88E-06	8.09E-09	8.09E-09
600	1.06E-05	8.34E-06	1.06E-08	1.06E-08
700	1.32E-05	1.09E-05	1.32E-08	1.32E-08
800	1.58E-05	1.35E-05	1.58E-08	1.58E-08
900	1.83E-05	1.60E-05	1.83E-08	1.83E-08
1000	2.09E-05	1.86E-05	2.09E-08	2.09E-08
1100	2.34E-05	2.11E-05	3.82E-07	2.34E-08
1200	2.58E-05	2.36E-05	1.68E-06	2.58E-08
1300	2.83E-05	2.61E-05	3.61E-06	2.83E-08
1400	3.07E-05	2.85E-05	5.90E-06	3.07E-08
1500	3.31E-05	3.10E-05	8.36E-06	3.31E-08
1600	3.55E-05	3.33E-05	1.09E-05	3.55E-08
1700	3.78E-05	3.57E-05	1.35E-05	3.78E-08
1800	4.01E-05	3.80E-05	1.61E-05	4.01E-08
1900	4.23E-05	4.03E-05	1.86E-05	4.23E-08
2000	4.46E-05	4.26E-05	2.11E-05	4.46E-08
3000	6.52E-05	6.34E-05	4.46E-05	6.52E-08
4000	8.36E-05	8.20E-05	6.54E-05	8.36E-08
5000	9.98E-05	9.84E-05	8.38E-05	9.98E-08
6000	0.00011396	0.00011276	9.99E-05	1.14E-07
7000	0.00012646	0.0001254	0.0001141	1.26E-07
8000	0.00013745	0.00013652	0.00012658	1.37E-07
9000	0.00014712	0.0001463	0.00013756	1.47E-07
10000	0.00015562	0.0001549	0.00014721	3.30E-07

20000	0.00019948	0.00019927	0.00019701	0.00015251
30000	0.0002125	0.00021244	0.00021182	0.00019939
40000	0.00021607	0.00021605	0.00021588	0.00021241
50000	0.000217	0.00021699	0.00021694	0.00021598
60000	0.00021719	0.00021719	0.00021717	0.0002169

예상한 대로 CFT 인자의 시간대부터 급격히 선량이 증가함을 알 수 있다. 인자의 변화에 따른 선량의 분석 결과 CFT 0.1 ~ 10년까지는 모두 동일한 선량이 나타났다. 그래서 CFT 0.1 ~ 10년까지는 CFT 10년을 대표값으로 설정하였다.

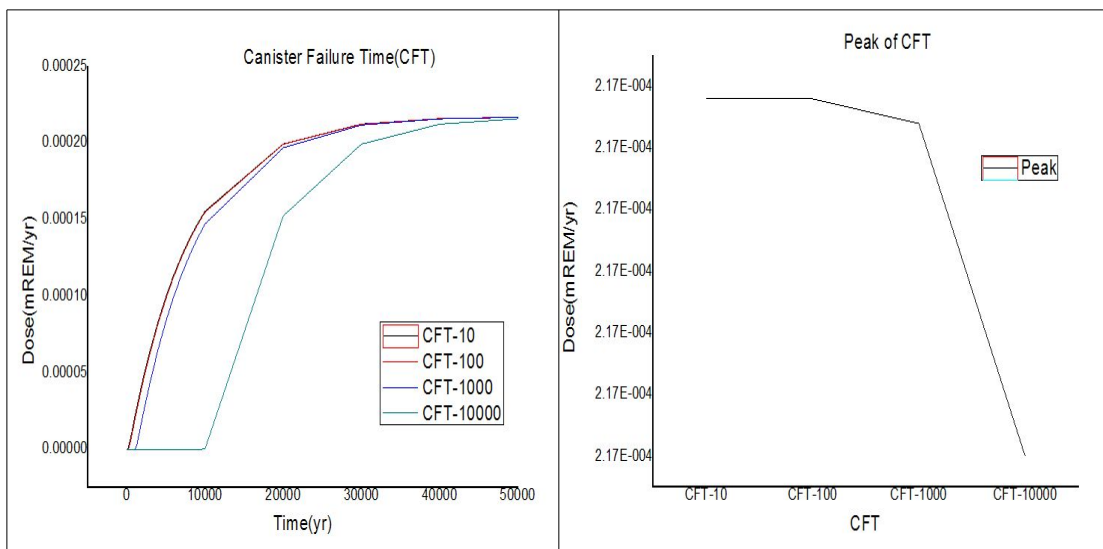


그림 4.15 CFT 범위에 따른 I-129의 선량변화 및 피크정리

그림 4.15의 왼쪽 그림은 표 4.4를 나타낸 그래프이다. 오른쪽에 있는 그림은 인자의 변화에 따른 선량의 변화이다. CFT의 인자는 상실시점을 시작으로 선량이 급격하게 증가하는 걸 알 수 있다. CFT 10,100은 거의 비슷하게 나오며, 1000년과 만년 경우에는 눈에 보이게 차이를 나타내고 있다. 오른쪽 그림은 각 인자의 선량 중에 가장 최고선량치만 선정하여 보여주고 있는데 캐니스터 상실시점이 늦어질수록 선량이 감소하는 걸 알 수 있다. 이것으로 캐니스터의 재질이 개선되면 선량도 감소하게 될 거라는 걸 예상할 수 있다.

다. Early Failure Time(EFT)

Early Failure Time(EFT)인자의 변화에 대해서 I-129의 선량을 측정하였다. Waste Type은 PYRO 공정 폐기물로 설정하였다.

표 4.3 Early Time Failure(ETF)의 변화에 따른 I-129의 선량 변화

Time (yr)	ETF-0	ETF-0.1	ETF-0.2	ETF-0.3	ETF-0.4	ETF-0.5
	[I129] [mREM/yr]	[I129] [mREM/yr]	[I129] [mREM/yr]	[I129] [mREM/yr]	[I129] [mREM/yr]	[I129] [mREM/yr]
0	0	0	0	0	0	0
10	0	6.19E-15	1.24E-12	1.86E-12	2.48E-12	3.10E-12
100	0	2.77E-10	5.54E-08	8.30E-08	1.11E-07	1.38E-07
200	0	1.50E-09	2.99E-07	4.49E-07	5.98E-07	7.48E-07
300	0	3.38E-09	6.75E-07	1.01E-06	1.35E-06	1.69E-06
400	0	5.64E-09	1.13E-06	1.69E-06	2.25E-06	2.82E-06
500	0	8.09E-09	1.62E-06	2.43E-06	3.23E-06	4.04E-06
600	0	1.06E-08	2.13E-06	3.19E-06	4.25E-06	5.31E-06
700	0	1.32E-08	2.64E-06	3.96E-06	5.28E-06	6.60E-06
800	0	1.58E-08	3.15E-06	4.73E-06	6.31E-06	7.89E-06
900	0	1.83E-08	3.67E-06	5.50E-06	7.33E-06	9.16E-06
1000	6.19E-12	2.09E-08	4.17E-06	6.26E-06	8.35E-06	1.04E-05
1100	3.59E-07	3.82E-07	4.96E-06	7.26E-06	9.56E-06	1.19E-05
1200	1.66E-06	1.68E-06	6.50E-06	8.92E-06	1.13E-05	1.38E-05
1300	3.59E-06	3.61E-06	8.53E-06	1.10E-05	1.35E-05	1.59E-05
1400	5.87E-06	5.90E-06	1.08E-05	1.33E-05	1.58E-05	1.83E-05
1500	8.34E-06	8.36E-06	1.33E-05	1.58E-05	1.82E-05	2.07E-05
1600	1.09E-05	1.09E-05	1.58E-05	1.83E-05	2.07E-05	2.32E-05
1700	1.35E-05	1.35E-05	1.83E-05	2.08E-05	2.32E-05	2.56E-05
1800	1.60E-05	1.61E-05	2.08E-05	2.32E-05	2.56E-05	2.81E-05
1900	1.86E-05	1.86E-05	2.33E-05	2.57E-05	2.81E-05	3.05E-05
2000	2.11E-05	2.11E-05	2.58E-05	2.82E-05	3.05E-05	3.28E-05
3000	4.45E-05	4.46E-05	4.87E-05	5.07E-05	5.28E-05	5.49E-05
4000	6.54E-05	6.54E-05	6.90E-05	7.09E-05	7.27E-05	7.45E-05
5000	8.38E-05	8.38E-05	8.70E-05	8.86E-05	9.02E-05	9.18E-05
6000	9.99E-05	9.99E-05	0.00010271	0.00010411	0.00010552	0.00010693
7000	0.00011408	0.0001141	0.00011656	0.0001178	0.00011904	0.00012027
8000	0.00012657	0.00012658	0.00012874	0.00012983	0.00013092	0.00013201
9000	0.00013755	0.00013756	0.00013946	0.00014042	0.00014138	0.00014233
10000	0.0001472	0.00014721	0.00014888	0.00014973	0.00015057	0.00015141

20000	0.00019701	0.00019701	0.0001975	0.00019775	0.000198	0.00019824
30000	0.00021182	0.00021182	0.00021195	0.00021202	0.00021209	0.00021216
40000	0.00021588	0.00021588	0.00021592	0.00021594	0.00021596	0.00021597
50000	0.00021694	0.00021694	0.00021695	0.00021696	0.00021696	0.00021697
60000	0.00021717	0.00021717	0.00021717	0.00021718	0.00021718	0.00021718

위의 표에서처럼 ETF가 0%일 경우에는 오히려 다른 CFT나 WDR에 오히려 영향을 많이 받는 걸로 보인다. 초기에 CFT가 1000년으로 설정되어 있기 때문에 ETF가 0% (즉 초기에 캐니스터 등의 기능상실의 확률이 제로임)일 경우 CFT의 영향으로 1000년부터 선량이 증가함을 알 수 있다. ETF의 변화에 따른 선량의 변화가 크지 않으며 그 증가량도 일정하게 증가한 걸로 나타났다.

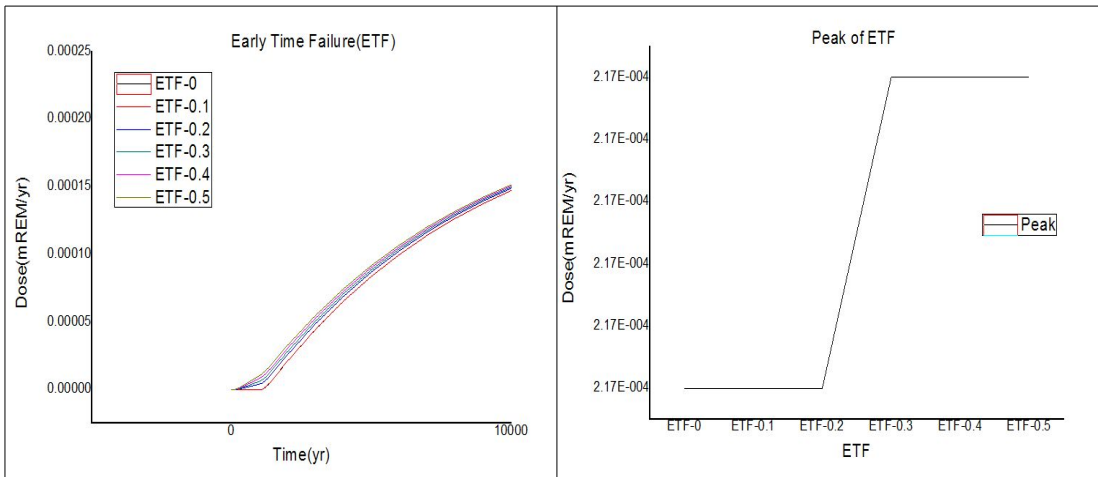


그림 4.16 ETF 범위에 따른 I-129의 선량변화 및 피크정리

그림 4.16의 왼쪽은 표 4.7의 결과를 나타낸 그래프이고 오른쪽은 각 인자 범위내의 최고 선량값을 선정하여 나타낸 것이다. ETF 0.2에서 0.3으로 이동시에 변화의 폭을 보여주고 있다. ETF는 기능상실의 확률이기 때문에 아주 높은 확률의 경우를 제외하고는 그다지 큰 폭의 선량 변화는 없을 거라고 예상되고 있다.

라. Waste Dissolution Rate(WDR)

Waste Dissolution Rate(WDR)에 대한 인자의 변화에 따른 선량을 측정하였다.
Waste Type은 Pyro 공정 폐기물로 설정하였다.

표 4.4 Waste Dissolution Rate(WDR)의 변화에 따른 I-129의 선량 변화

Time (yr)	WDR 1E-12	WDR 1E-10	WDR 1E-8	WDR 1E-5
	[I129] [mREM/yr]	[I129] [mREM/yr]	[I129] [mREM/yr]	[I129] [mREM/yr]
0	0	0	0	0
10	6.19E-15	6.19E-13	6.20E-11	6.20E-08
100	2.77E-10	2.77E-08	2.77E-06	0.0027669
200	1.50E-09	1.50E-07	1.49E-05	0.01494
300	3.38E-09	3.38E-07	3.38E-05	0.033737
400	5.64E-09	5.64E-07	5.64E-05	0.056282
500	8.09E-09	8.09E-07	8.09E-05	0.080731
600	1.06E-08	1.06E-06	0.00010627	0.10604
700	1.32E-08	1.32E-06	0.00013199	0.13163
800	1.58E-08	1.58E-06	0.00015771	0.15721
900	1.83E-08	1.83E-06	0.00018328	0.18262
1000	2.09E-08	2.09E-06	0.00020869	0.20783
1100	3.82E-07	3.82E-05	0.0038166	3.8147
1200	1.68E-06	0.00016828	0.016833	16.829
1300	3.61E-06	0.00036141	0.036142	36.108
1400	5.90E-06	0.00058989	0.05899	58.908
1500	8.36E-06	0.0008363	0.083629	83.478
1600	1.09E-05	0.0010908	0.10908	108.83
1700	1.35E-05	0.001348	0.1348	134.43
1800	1.61E-05	0.0016051	0.16051	160
1900	1.86E-05	0.0018606	0.18606	185.37
2000	2.11E-05	0.0021137	0.21137	210.49
3000	4.46E-05	0.0044558	0.44558	441.55
4000	6.54E-05	0.006542	0.65419	644.83
5000	8.38E-05	0.0083768	0.83766	821.06
6000	9.99E-05	0.0099905	0.99902	973.52
7000	0.0001141	0.01141	1.1409	1105.1
8000	0.00012658	0.012658	1.2657	1218.4

9000	0.00013756	0.013756	1.3755	1315.5
10000	0.00014721	0.014721	1.472	1398.5
20000	0.00019701	0.019701	1.9699	1740.4
30000	0.00021182	0.021182	2.1177	1714.3
40000	0.00021588	0.021588	2.1581	1589.8
50000	0.00021694	0.021694	2.1686	1448.7
60000	0.00021717	0.021717	2.1706	1313.3

표 4.10의 인자의 변화에 따른 선량의 변화를 측정된 결과 선량의 변화가 다른 인자들에 비해 초기의 선량의 수치가 낮다는 걸 알 수 있다. 또한 선량도 인자의 변화에 따라서 선량의 수치도 일정한 간격을 두고 변화하는 걸 알 수 있다. 이 선량의 변화로 대충 인자의 변화에 따른 선량의 변화가 일정하고 시간에 따른 선량의 변화도 일정하다는 걸 예상할 수 있다.

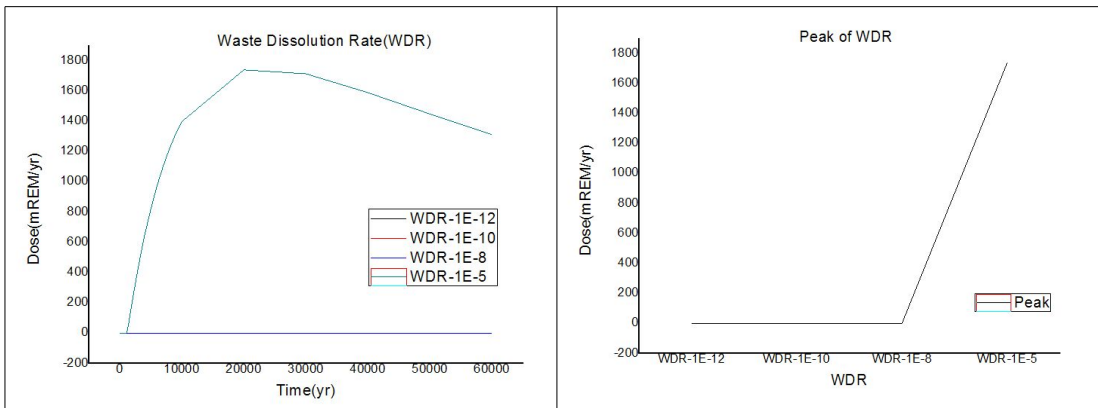


그림 4.17 WDR 범위에 따른 I-129의 선량변화 및 피크정리

그림 4.17의 왼쪽은 표 4.10의 결과를 나타낸 그래프이며, 오른쪽은 각 인자의 범위내의 최고선량을 선정하여 그린 그래프이다. WDR같은 경우는 가장 높은 값(1E-5)일 경우 선량의 큰 증가폭을 보여주고 있다. 그리고 그 선량의 차이 또한 매우 크다는 걸 알 수 있다. 증가폭으로 보아 가장 영향력이 클 거라고 예상할 수 있다.

따. Porosity in MWCF(PM)

Porosity in MWCF(PM)에 대한 인자의 변화에 따른 선량을 측정하였다. Waste Type은 Pyro 공정 폐기물로 설정하였다.

표 4.5 Porosity in MWCF(PM)의 변화에 따른 I-129의 선량 변화

Time (yr)	Porosity 10%	Porosity 7.5%	Porosity 5%	Porosity 2.5%
	[I129] [mREM/yr]	[I129] [mREM/yr]	[I129] [mREM/yr]	[I129] [mREM/yr]
0	0	0	0	0
10	6.27E-15	6.25E-15	6.19E-15	6.03E-15
100	2.78E-10	2.77E-10	2.77E-10	2.74E-10
200	1.50E-09	1.50E-09	1.50E-09	1.49E-09
300	3.38E-09	3.38E-09	3.38E-09	3.37E-09
400	5.64E-09	5.64E-09	5.64E-09	5.63E-09
500	8.09E-09	8.09E-09	8.09E-09	8.08E-09
600	1.06E-08	1.06E-08	1.06E-08	1.06E-08
700	1.32E-08	1.32E-08	1.32E-08	1.32E-08
800	1.58E-08	1.58E-08	1.58E-08	1.58E-08
900	1.83E-08	1.83E-08	1.83E-08	1.83E-08
1000	2.09E-08	2.09E-08	2.09E-08	2.09E-08
1100	3.83E-07	3.83E-07	3.82E-07	3.79E-07
1200	1.69E-06	1.68E-06	1.68E-06	1.68E-06
1300	3.62E-06	3.62E-06	3.61E-06	3.61E-06
1400	5.90E-06	5.90E-06	5.90E-06	5.89E-06
1500	8.37E-06	8.37E-06	8.36E-06	8.35E-06
1600	1.09E-05	1.09E-05	1.09E-05	1.09E-05
1700	1.35E-05	1.35E-05	1.35E-05	1.35E-05
1800	1.61E-05	1.61E-05	1.61E-05	1.60E-05
1900	1.86E-05	1.86E-05	1.86E-05	1.86E-05
2000	2.11E-05	2.11E-05	2.11E-05	2.11E-05
3000	4.46E-05	4.46E-05	4.46E-05	4.46E-05
4000	6.54E-05	6.54E-05	6.54E-05	6.54E-05
5000	8.38E-05	8.38E-05	8.38E-05	8.38E-05
6000	9.99E-05	9.99E-05	9.99E-05	9.99E-05
7000	0.0001141	0.0001141	0.0001141	0.00011409
8000	0.00012658	0.00012658	0.00012658	0.00012657

9000	0.00013756	0.00013756	0.00013756	0.00013755
10000	0.00014721	0.00014721	0.00014721	0.00014721
20000	0.00019701	0.00019701	0.00019701	0.00019701
30000	0.00021182	0.00021182	0.00021182	0.00021182
40000	0.00021588	0.00021588	0.00021588	0.00021588
50000	0.00021694	0.00021694	0.00021694	0.00021694
60000	0.00021717	0.00021717	0.00021717	0.00021717

표 4.13의 인자의 변화에 따른 선량의 변화를 측정한 결과 선량에는 큰 변화를 보여 주지 못하고 있다. 인자의 범위의 10%와 2.5% 경우의 선량의 차이가 거의 없는걸 알 수 있다. PM의 변화가 선량에는 큰 영향을 주지 못하고 있는 것으로 예상된다.

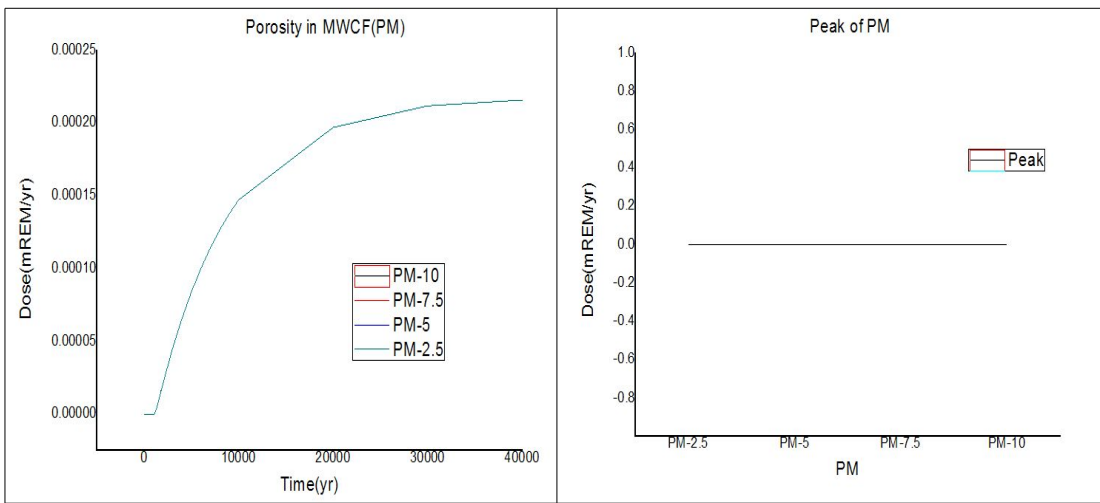


그림 4.18 PM 범위에 따른 I-129의 선량변화 및 피크정리

그림 4.18의 왼쪽은 표 4.13의 결과값을 나타낸 그래프이고, 오른쪽은 범위 내 인자들의 가장 높은 선량을 선정하여 그린 그래프이다. 왼쪽의 그래프는 PM 2.5일 경우에만 선량의 폭이 조금씩 증가하고 있다. 하지만 범위내의 인자들 간의 최고선량일 경우에는 거의 변화량이 없는 걸 알 수 있다.

2. 민감도 분석 결과 비교

지금까지 5가지의 인자에 대하여 민감도 분석을 실시한 후 비교, 분석하였다.

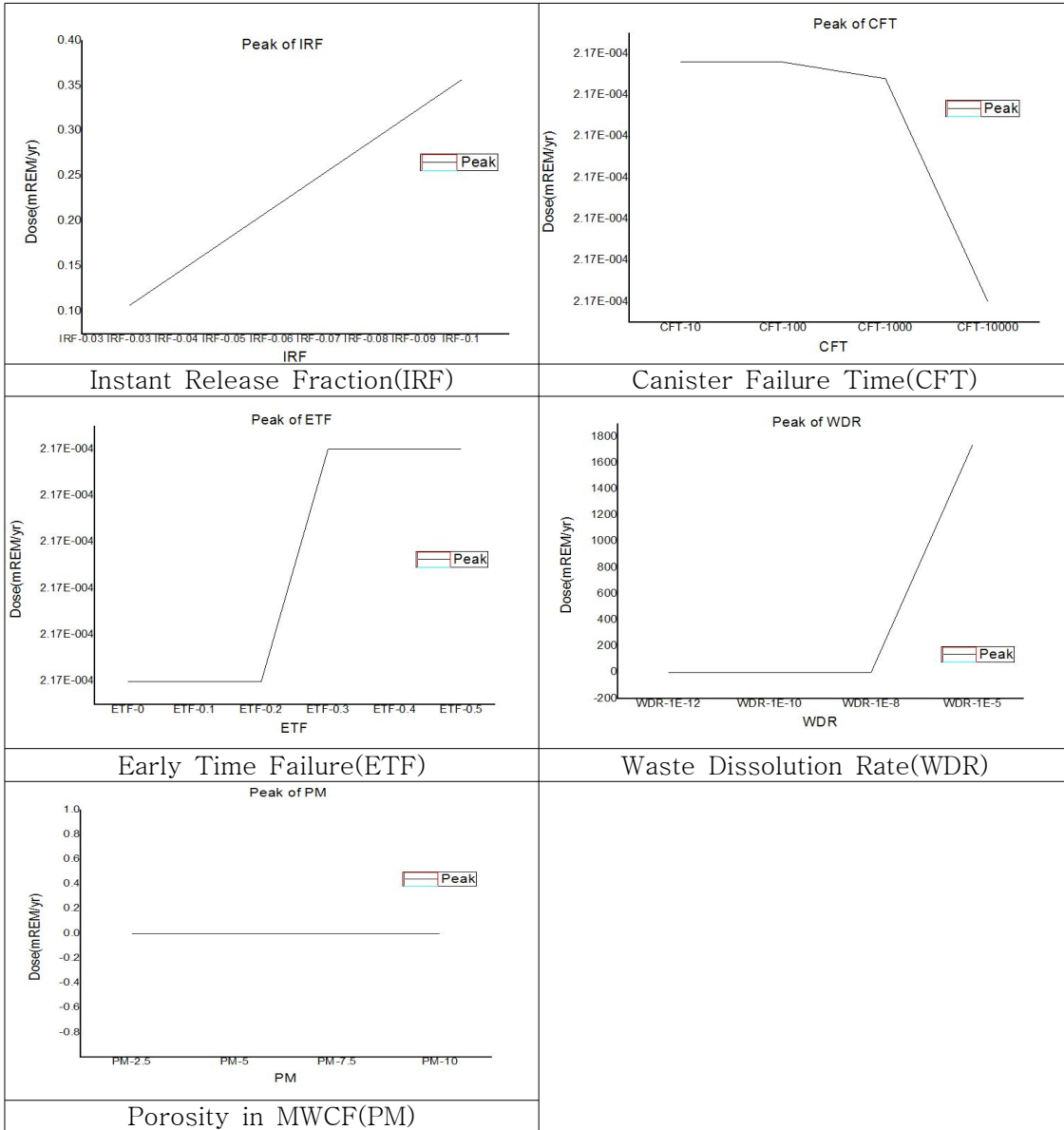


그림 4.19 5가지 인자의 민감도 분석 결과 그래프

이 5 가지의 인자의 민감도 분석 결과 PM의 인자에 따른 변화를 제외하고는 나머지 4가지의 인자에 약간의 변화가 있다는 걸 알 수 있다. 하지만 초기의 Waste type가 다른 IRF는 Pyro waste type의 영향력이 없는 인자이므로 Pyro type에서는 IRF는 제외하고 4가지의 인자에만 대상으로 순위를 선정하였다.

각 인자들 간의 순위를 정하기 위해서는 각 인자들간의 변화량을 정량화시켜야만 한다. 그래서 본 연구에서는 각 인자들간의 민감도의 차이를 정량화하기 위해서 SAS(통계패키지)의 ANOVA(Analysis of Variance)를 사용하였다. ANOVA의 방법은 두 집단 이상의 동시에 비교하고자 할 때 사용되며, 통계적으로 가장 효율적이고 잘 정립된 분석방법이다. 그 중 F-test는 ANOVA의 핵심적인 부분으로 인자의 영향으로 나타나는 값이 무작위적인 것인지 아니면 진정한 인자의 영향 때문인지를 판단할 수 있게 해 준다. F값은 자유도를 고려한 집단 간 변량에 대한 집단 내 변량의 비율로 산출된다.

표 4.6 각 인자들에 대한 ANOVA(F-test)결과

Parameter	DF	SS	MS	F-value	비교
IRF	7	0.1386	0.0198	2.34	PWR+CANDU
CFT	3	3.78E-8	1.26E-8	2.27	PYRO
ETF	5	1.24E-9	2.49E-10	0.04	
WDR	3	5.98E+7	1.99E+6	20.73	
PM	5	6.36E-16	2.12E-16	0	

F값의 비교를 통해 WDR의 값이 가장 크게 측정이 되었다. 즉, WDR의 값이 가장 영향력이 크다는 걸 보여주고 있다. 순위화 시킬 경우 1) WDR 2) CFT 3) ETF 4) PM 순으로 나타났다. IRF경우는 초기 Waste type이 다르기 때문에 순위화에서는 제외를 시키고 비교 대상으로만 참고하였다.

※ ANOVA(Analysis of Variance)

○ 자유도(Degree of freedom):주어진 조건하에서 자유롭게 변화할 수 있는 정도를 나타내며 기호로는 df라고 표시한다. 사례수가 N이고 통계적으로 제한조건의 수가 M가지이면 자유도의 일반 공식은 $df=N-M$ 이 된다.

○ 자승합(Sum of square):주영향과 상호영향의 변량을 구하는 공식은 고려되는 인자의 수에 따라 달라진다.

$$SS_A = \frac{(A_1 - A_2)^2}{N}$$

N:총 실험횟수
A1, A2:level 1,2의 결과값

$$SS_{AB} = \left[\sum_{i=1}^m \left(\frac{AB_i^2}{n_{ABi}} \right) - \frac{T^2}{N} - SS_A - SS_B \right]$$

m:인자A,B의 가능한 조합의 수
ABi:인자 A,B의 i번째 조합의 수
nABi:그 조건에서의 자료의 수

$$SS_{ABC} = \left[\sum_{i=1}^m \left(\frac{ABC_i^2}{n_{ABCi}} \right) - \frac{T^2}{N} - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{BC} - SS_{AC} \right]$$

A,B,C 3 인자사이의 상호작용에 의한 변화

$$SS_T = \left[\sum_{i=1}^N y_i^2 \right] - \frac{T^2}{N}$$

총 변량
T:결과의 총합

$$SS_e = SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AB} - SS_{BC} - SS_{AC} - SS_{ABC}$$

오차 변량

○ Mean square : 각 인자에 대한 변량을 인자의 자유도로 나눈 값

$$MS_A = \frac{SS_A}{DFA}$$

SSA:인자 A의 Sum of square
DFA:A의 자유도

○ F-test :

$$F_A = \frac{MS_A}{MSE}$$

MSA:인자 A의 자승합에 자유도를 나눈 값
MSE:오차의 자승합을 자유도로 나눈 값

제 5 장 결론 및 향후 연구 방향

현재 KAERI에서 개발된 Goldsim을 기반으로 하는 폐쇄 후 처분 안전성 평가 프로그램에서의 많은 인자 중에 가장 중요하다고 인지되는 특정한 몇 개의 인자를 바탕으로 민감도 분석을 실시하였다.

민감도 분석 결과 폐기물의 고화체 유출률(WDR)이 가장 큰 영향을 미치는 인자로 평가되었고 다음으로 CFR → ETF → PM순으로 평가되었다. WDR, CFT 인자는 폐기물의 고화체의 재질과 제조 방법의 개선을 통해 충분히 조절이 가능한 인자로 향후 꾸준한 연구가 필요하다고 생각한다.

Goldsim기반의 안전성 평가 프로그램에 입력되는 입력변수는 약 1000여개가 넘는다. 물론 단일값을 가지고 있는 것도 있지만 각 핵종별로 각각의 값을 다시 나열하게 되면 그 양은 엄청나다고 볼 수 있다. 이러한 입력자료의 정확한 값을 모두 구하기는 현실적으로 매우 힘들다. KURT(KAERI Underground Research Tunnel)에서 실험을 통해 구할 수도 있지만, 대부분은 외국의 실험결과나 문헌을 바탕으로 한국지형에 맞게 설정하고 있으며, 그것도 전문가마다 그 값에 대한 범위를 설정하는 게 모두 같지는 않다. 이처럼 처분 안전성 프로그램에 들어가는 입력 자료만 구축하는데 엄청난 시간과 비용을 소모하게 된다.

본 연구에서는 이러한 입력 자료 중에 외국과 국내의 자료, 전문가들의 조언들을 통해 영향력이 있을 거라고 예상되는 5 가지의 입력인자(IRF, ETF, CFT, WDR, PM)를 바탕으로 각 인자가 가지고 있는 범위의 인자 변화를 프로그램에 입력하여 그 값을 추출, 민감도 분석을 실시하였다. 이런 실험 결과를 가지고 가장 영향력 있는 입력인자 순으로 순위화(Prioritization) 시켰다. 순위화 된 입력자료를 차후 처분 안전성 평가 프로그램의 업데이트나 처분장의 설계 및 관리 등에 우선적으로 고려될 것 이라고 예상된다.

향후 처분 안전성 평가 프로그램 내에 입력되는 입력인자에 대해 보다 많은 실험을 통해 정확한 값과 많은 입력인자에 대한 DB 구축하여 신뢰할 수 있는 데이터를 바탕으로 안전성 평가에 사용됨으로써 처분장 안전성 평가의 신뢰도를 높이는데 기여하게 될 거라고 기대한다.

참 고 문 헌

- [1] Goldsim User's Guide Version 9.20, Goldsim Technology Group (2006)
- [2] 고준위 폐기물 처분과 부지환경, 부지환경신기술CoP, 한국원자력안전기술원 (2009)
- [3] David Savage, The Scientific and Regulatory Basis for the Geological Disposal of Radioactive Waste, John Wiley & Sons Ltd (1995)
- [4] Y.S Hwang, Development of a Code for the long term Radiological Safety Assessment of Radioactive Wastes from Advanced Nuclear Fuel Cycle Facilities in Republic of Korea, KAERI/TR-3988/2010, KAERI (2010)
- [5] Y.S Hwang, C.H Kang, The Development of a Assessment Approach and its Implication on the Advanced Nuclear Fuel Cycle, KAERI (2010)
- [6] Y.M Lee, Y.S Hwang, A Goldsim Model and a Sensitivity Study for Safety Assessment of a Repository for Disposal of Spent Nuclear Fuel, KAERI/TR-3660/2008, KAERI (2008)
- [7] Y.M Lee, Y.S Hwang, Development of a Goldsim Biosphere Model, Evaluation, and Its Verification, KAERI/TR-3987/2009, KAERI (2009)
- [8] Y.S Hwang, HLW Long-term Management Technology Development. KAERI/RR-3078/2009, KAERI (2009)
- [9] Y.S Hwang, Y.M Lee, C.H Kang 외 7명, HLW Long-term Management Technology Development, Radwaste Disposal Safety Analysis,

KAERI/RR-3078/2009, KAERI (2009)

[10] 권상기, 최종원, 강철형, 고준위폐기물처분장 near-field에 대한 열-역학적 민감도 분석, 한국암반공학회, 터널과 지하공간, Vol. 13, No. 2, pp. 138~152 (2003)

[11] Takeshi EBASHI, Y.S Hwang, Y.M Lee, Takao OHI, Shigeru Koo, Application of the Comprehensive Sensitivity Analysis Method to a Korean Geological Disposal Concept, Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, Vol. 45, No. 11, p1138~1149 (2008)

[12] S. Kwon, J.W Choi, C.H Kang, Thermal-mechanical sensitivity analysis for the near-field of HLW repository, TUNNEL & UNDERGROUND Vol. 13, No. 2, 2003, p138~152, J. of Korean Society for Rock Mech (2003)

[13] Chonggang Xu, George Zdzislaw Gertner, Uncertainty and sensitivity analysis for models with correlated parameters, Reliability Engineering and System Safety 93 (2008) 1563-1573

[14] W. Yu, T.J Harris, Parameter uncertainty effects on variance-based sensitivity analysis, Reliability Engineering and System Safety 94 (2009) 596-603

감사의 글

學而時習之 不亦說乎(학이시습지 불역열호)

배우고 때때로 익히면 또한 기쁘지 아니한가?

待人春風持己秋霜(대인춘풍지기추상)

타인에게는 봄바람처럼, 자신에게는 가을서리처럼

내 실험실 책상 한켠에 있는 글이며, 항상 책상에 앉기 전에 보는 글이다.

대학생활의 절반이상을 보냈던 핵주기공학실험실..

아직도 실험실의 첫 모습을 잊을 수가 없습니다. 달랑 하나밖에 없던 큰 책상에서 시작하였던 실험실 생활은 시간이 지날수록 어느덧 제대로 된 실험실 모습을 갖추었고 학부생 및 후배들까지 들어오면서 사람냄새가 나는 실험실로 바뀌었습니다.

지금에서야 6년의 대학교 및 대학원생활을 돌이켜보면 너무나도 빨리 지나가버린 것처럼 느껴지지만, 한편으로 6년 동안 다시금 즐거운 추억을 가지게 되었고 새로운 경험을 하면서 좋은 사람들을 만나게 되었고 행복한 시간을 보낸 것 같습니다.

3학년 학부생논문에서부터 부족한 저에게 항상 따뜻한 관심을 보여주시며, 새로운 경험과 전공을 불문하고 다양한 가르침을 주시며 누구보다도 제자를 사랑하고 잘되기를 바라시는 송종순 교수님께 한없는 감사를 드립니다. 바쁘신 와중에도 항상 격려와 진심어린 충고를 해주신 김승평 교수님, 정운관 교수님, 이경진 교수님, 나만균 교수님, 김진원 교수님 모두 감사의 말씀을 드립니다.

또한 이기복 교수님과 비록 제가 수업은 듣지 못하였지만 수업 때는 어김없이 항상 일찍 오시는 신원기 교수님, 대학원 수업을 하시면서 대학원생들에게 우리나라 원자력 발전소 및 현장을 직접 몸소 느끼도록 해주신 이심교 교수님 너무나도 감사드립니다.

후배지만 대학원 입학동기이며 실험실 실장이라는 막중한 자리는 마련해주고 엄청난 시련과 동시에 권력을 주었으며 3학년 실험실 들어올 때부터 같이 들어와서 누구보다

도 공유할 수 있는 많은 추억을 가지고 있는 상현이, 그리고 부족한 형들 항상 뒤따라 다니면서 궂은일도 불평 없이 하던 민영이 정말 사랑한다. 막내인 영국이와 현민이 앞으로 열심히 해줄거라고 믿는다. 그리고 누가 뭐라 해도 나에게서는 항상 제 1의 실장인 희망이형, 바쁘신 와중에서 서울에서 수업 때문에 내려오시고 오시면 꼭 저희들에게 술과 피와 살이 되는 조언을 해주신 이근성 부장님 항상 존경합니다.

그리고 열수력실험실의 용진이형, 동위원소실험실의 유선형님과 정민형님, NICL의 동기 성한이와 영규, 동수, 심원이, 이제 막 들어간 주현이와 순호, 졸업하신 동혁이형과 현영이형과 인호형 또 원자로재료실험실의 실장 민수와 사용이, 경준이, 힘들다고 하면서도 항상 잘 해주고 있는 학과실의 민서까지 여러분들이 있어서 대학생활이 항상 즐겁고 재미있었다. 참, 용진이형이랑 정현형님 다음 학기에는 꼭 졸업하시구요...

꼭·되기라는 동아리로 뭉어지고 형제만큼 친해진 웅이, 평균, 영만이, 석철이, 수민이, 윤화, 시곤, 재환이, 은경이누나, 윤지, 용환이 너희들이 있어서 꼭·되기의 동아리방이 여태 잘 버티고 있는거다.

KAERI의 정종태 박사님, 강철형 박사님, 이연명 박사님, 박정균 박사님, 이성호 선생님, 고낙열 박사님, 정미선씨까지 짧은 시간이나마 부족한 저를 연구생으로 받아주시고 논문에 큰 도움을 주신 거 너무나도 감사의 말씀을 드립니다.

이렇게 하나씩 적다보니 너무나도 많은 사람들에게 도움을 받은 것 같습니다. 이 모든 분들에게 항상 건강하고 행복하길 바라겠습니다.

마지막으로 나의 가족들
항상 뒤에서 제 편이 되어주고 큰 힘이 되어주신 부모님,
그리고 든든한 동생 도일이까지
지금보다는 앞으로 더욱 더 든든하고 자랑스러운 아들, 형이 되도록 노력하겠습니다.
고맙습니다. 그리고 사랑합니다.

저작물 이용 허락서

학 과	원자력공학과	학 번	20097085	과 정	석사
성 명	한글 : 정 강 일 한문 : 丁 康 日 영문 : Jung Kang-Il				
주 소	전라남도 여수시 미평동 귀인아파트 303동 306호				
연락처	e-mail : jungkangile@nate.com				
논문제목	한글 : 폐쇄후 안전성평가 입력자료의 민감도분석				
	영문 : A Sensitivity Study of Post-Closure Safety Assessment by Considering Uncertainty Input Data				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건 아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다 음 -

1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함
2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집과 형식상의 변경을 허락함(다만, 저작물의 내용변경은 금지함)
3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함
4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함
5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함
6. 조선대학교는 저작물 이용의 허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음
7. 소속 대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함

동의여부 : 동의(○) 반대()

2010 년 12 월

저작자 : 정 강 일 (인)

조선대학교 총장 귀하