



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 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](#)

2021년 2월
석사학위 논문

방사성폐기물 자체처분을 위한
RESRAD 코드 민감도 분석 및 안전성 평가

조선대학교 대학원
원자력공학과

조 여 종

방사성폐기물 자체처분을 위한 RESRAD 코드 민감도 분석 및 안전성 평가

RESRAD Code Sensitivity Analysis and Safety Assessment
for Clearance of Radioactive Waste

2021년 02월 25일

조선대학교 대학원

원자력공학과

조 여 종

방사성폐기물 자체처분을 위한
RESRAD 코드 민감도 분석 및 안전성 평가

지도교수 송 종 순

이 논문을 공학 석사학위 신청 논문으로 제출함

2020년 10월

조선대학교 대학원

원자력공학과

조 여 종

조여종의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 정 운 관 (인)

위 원 조선대학교 교수 이 경 진 (인)

위 원 조선대학교 교수 송 종 순 (인)

2020년 11월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT	i
제1장 서론	1
제1절 연구의 배경	1
제2절 연구의 목적 및 방향	1
제2장 방사성폐기물 자체처분 규정	3
제1절 규제해제(Clearance)	3
제2절 국내 자체처분 관련 법규 및 규정	3
제3장 RESRAD의 특성 및 적용	8
제1절 개발배경 및 적용현황	8
제2절 RESRAD Family of Computer Code 구성	8
제3절 RESRAD-ONSITE 코드의 특성	9
제4장 자체처분 안전성평가 대상 폐기물 특성	14
제1절 자체처분 대상 폐기물의 종류, 발생원 및 방사선(능) 측정결과	14
제2절 방사성핵종 분석 결과	14
제3절 전 알파/베타 방사능 분석 결과	15
제5장 RESRAD - ONSITE 입력인자 분석 및 안전성 평가	17
제1절 선량환산인자(Dose Conversion Factor)	17
제2절 방사능 농도(Source)	20
제3절 안전성 평가기간	21
제4절 매립층의 입력자료	23
제5절 복토층의 수문학적 입력자료	28
제6절 포화층의 수문학적 입력자료	48
제7절 불포화층의 수문학적 입력자료	52
제8절 거주, 호흡 및 외부피폭 입력자료	53

제9절 음식물 섭취경로 및 섭취량	61
제10절 가축의 사료 섭취경로 및 섭취량	73
제11절 음식물 등의 저장기간	78
제6장 결론	81
참고문헌	83

표 목차

표 2-1. 방사성폐기물 자체처분 관계법령	4
표 2-2. 방사성핵종별 자체처분 허용농도	5
표 2-3. KINS/RG-N12.08 「방사성폐기물 자체처분 안전성평가」	6
표 3-1. RESRAD 코드군의 종류 및 적용범위	9
표 3-2. RESRAD-ONSITE 피폭경로	11
표 3-3. RESRAD-ONSITE 코드의 기본 라이브러리	12
표 3-4. RESRAD-ONSITE 코드의 부지 특성인자	13
표 4-1. 자체처분 대상 폐기물의 종류, 발생원 및 방사선(능) 측정결과	14
표 4-2. 자체처분 대상 폐기물의 핵종분석 결과	15
표 4-3. 자체처분 대상 폐기물의 전알파/전베타 분석 결과	15
표 4-4. 백그라운드(BKG) 측정결과	16
표 5-1. 내부피폭 선량환산인자 비교	18
표 5-2. RESRAD 7.2 선량환산인자(Dose Conversion Factor)	18
표 5-3. 선량환산인자에 따른 피폭선량 평가결과	19
표 5-4. 최대 및 평균 방사능농도 적용 평가결과	21
표 5-5. 매립 시나리오에 따른 오염지역 입력자료	24
표 5-6. 매립층 높이 차에 따른 피폭선량 평가결과	24
표 5-7. 자체처분 대상 폐기물 매립층 특성인자	27
표 5-8. 복토층 및 오염지역 수문학적 입력자료	28
표 5-9. 자체처분 폐기물 복토 관련 폐기물관리법 규정	29
표 5-10. 복토층 두께에 따른 민감도 분석결과	30
표 5-11. NUREG/CR-6697 토양 건조밀도	32
표 5-12. 복토층 밀도에 따른 민감도 분석결과	32
표 5-13. 오염지역 밀도에 따른 민감도 분석결과	34
표 5-14. 5-14 토양 종류별 b Parameter	39
표 5-15. 국내 주요 자체처분 매립지 주변 풍속	41
표 5-16. 국내 주요 자체처분 매립지 주변 강수량	42

표 5-17. ANL/EVS/TM-14/4 일반적인 농업환경 유출계수	46
표 5-18. 포화층의 수문학적 입력자료	48
표 5-19. 공당 지하수 이용량	51
표 5-20. 불포화층의 수문학적 입력자료	52
표 5-21. 거주, 호흡 및 외부피폭 입력자료	54
표 5-22. KINS/RG-N02.02 연령별 호흡률	55
표 5-23 건축 재료별 차폐계수	57
표 5-24. KINS/RG-N02.02 각 연령군별 농축산물 섭취량	61
표 5-25. KINS/RG-N02.02 각 연령군별 수산물 섭취량	62
표 5-26. KINS/RR-808 각 연령군별 음용수 섭취량	62
표 5-27. 과일, 야채 및 곡물 섭취량 입력자료	62
표 5-28. 업체류 섭취량 입력자료	63
표 5-29. 우유 섭취량 입력자료	64
표 5-30. 육류 섭취량 입력자료	65
표 5-31. 어류 섭취량 입력자료	66
표 5-32. 기타 해산물 섭취량 입력자료	67
표 5-33. EPA(2011) 토양 및 분진 일일 섭취량	68
표 5-34. 음용수 섭취량 입력자료	69
표 5-35. 가축 사료 섭취량 등 입력자료	74
표 5-36. 음식물 등의 저장기간 입력자료	79
표 6-1. 폐활성탄 매립에 따른 거주자 연령별 예상 개인피폭선량	81
표 6-2. 매립장 특성인자를 반영한 예상 개인 및 집단 피폭선량	82

그림 목차

그림 3-1. The RESRAD Family of Computer Codes	9
그림 3-2. 오염지역 거주자 시나리오	10
그림 3-3. RESRAD-ONSITE 피폭경로	11
그림 5-1. RESRAD DCF 1세 피폭선량 평가결과	19
그림 5-2. RESRAD DCF 성인 피폭선량 평가결과	20
그림 5-3. ICRP 72 DCF 성인의 2배 피폭선량 평가결과	20
그림 5-4. 높고 좁은 오염지역 시나리오	23
그림 5-5. 낮고 넓은 오염지역 시나리오	23
그림 5-6. 매립층 높이 민감도 분석결과	25
그림 5-7. RESRAD 프로그램의 오염지역에 대한 모델	26
그림 5-8. 복토층 깊이 민감도 분석결과	31
그림 5-9. 복토층 밀도 민감도 분석결과	32
그림 5-10. 복토층 침식률 민감도 분석결과	33
그림 5-11. 오염지역 밀도 민감도 분석결과	34
그림 5-12. 오염지역 침식률 민감도 분석결과	35
그림 5-13. 오염지역 총 다공도 민감도 분석결과	36
그림 5-14. 오염지역 포장 용수량 민감도 분석결과	37
그림 5-15. 오염지역 수리전도도 민감도 분석결과	38
그림 5-16. 오염지역 b 파라미터 민감도 분석결과	39
그림 5-17. 증발산계수 민감도 분석결과	40
그림 5-18. 풍속 민감도 분석결과	41
그림 5-19. 강수량 민감도 분석결과	42
그림 5-20. 관개율 민감도 분석결과	43
그림 5-21. Overhead Mode 민감도 분석결과	44
그림 5-22. Ditch Mode 민감도 분석결과	45
그림 5-23. 유출계수 민감도 분석결과	46
그림 5-24. 분수계	47

그림 5-25. 인접 하천 및 호수의 분수계 민감도 분석결과	47
그림 5-26. 우물펌프 유입구 깊이 민감도 분석결과	49
그림 5-27. 물의 이동현상 평가모델 민감도 분석결과	50
그림 5-28. 우물의 양수율 민감도 분석결과	51
그림 5-29. 불포화층 두께 민감도 분석결과	53
그림 5-30. 호흡률 민감도 분석결과	55
그림 5-31. 분진농도 민감도 분석결과	56
그림 5-32. 분진 여과계수 민감도 분석결과	57
그림 5-33. 외부감마선 차폐계수 민감도 분석결과	58
그림 5-34. 실내 거주비율 민감도 분석결과	59
그림 5-35. 실외 거주비율 민감도 분석결과	60
그림 5-36. 과일, 야채류, 곡물 섭취량 민감도 분석결과	63
그림 5-37. 엽채류 섭취량 민감도 분석결과	64
그림 5-38. 우유 섭취량 민감도 분석결과	65
그림 5-39. 육류 섭취량 민감도 분석결과	66
그림 5-40. 어류 섭취량 민감도 분석결과	67
그림 5-41. 기타 해산물 섭취량 민감도 분석결과	68
그림 5-42. 토양 섭취량 민감도 분석결과	69
그림 5-43. 음용수 섭취량 민감도 분석결과	70
그림 5-44. 음용수 오염분율 민감도 분석결과	71
그림 5-45. 가축류 섭취용수 오염분율 민감도 분석결과	71
그림 5-46. 관개용수 오염분율 민감도 분석결과	71
그림 5-47. 해산물 오염분율 민감도 분석결과	72
그림 5-48. 야채류 오염분율 민감도 분석결과	72
그림 5-49. 육류 오염분율 민감도 분석결과	72
그림 5-50. 우유 오염분율 민감도 분석결과	73
그림 5-51. 육우의 사료 섭취량 민감도 분석결과	74
그림 5-52. 젖소의 사료 섭취량 민감도 분석결과	75
그림 5-53. 육우의 물 섭취량 민감도 분석결과	75
그림 5-54. 젖소의 물 섭취량 민감도 분석결과	75

그림 5-55. 가축류 토양 섭취량 민감도 분석결과	76
그림 5-56. 외에 침적된 분진 질량분배비 민감도 분석결과	76
그림 5-57. 토양 혼합층의 깊이 민감도 분석결과	76
그림 5-58. 뿌리의 깊이 민감도 분석결과	77
그림 5-59. 음용수의 지하수 이용분율 민감도 분석결과	77
그림 5-60. 가축용수의 지하수 이용분율 민감도 분석결과	77
그림 5-61. 관개용수의 지하수 이용분율 민감도 분석결과	78
그림 5-62. 과일, 채소류 저장기간 민감도 분석결과	79
그림 5-63. 어류 저장기간 민감도 분석결과	80
그림 5-64. 사료 저장기간 민감도 분석결과	80

ABSTRACT

RESRAD Code Sensitivity Analysis and Safety Assessment for Clearance of Radioactive Waste

Cho Yeo Chong

Advisor : Prof. Jongsoon Song, Ph.D.

Department of Nuclear Engineering

Graduate School of Chosun University

Radioactive waste is a by-product that is unavoidably generated in the process of using nuclear power and radioactive materials, and is classified into high, medium, low, ultra-low and deregulated waste according to the level of activity. Radioactive waste above the ultra-low level is finally disposed of in a permanent disposal method, and clearance level wastes with an extremely low level of radioactivity is classified as waste subject to clearance, and nuclear-related business operators can dispose of it by incineration, landfill, or recycling.

For domestic clearance, the waste generated during operation of nuclear power plants has been continuously disposed since 1995 after the first disposal of NaF by KNFC. In 2017, the dismantling of Kori unit 1, the first nuclear power plant in Korea, was confirmed, and permanent suspension of 14 nuclear power plants by 2033 was realized, and it is expected that the generation of radioactive waste subject to clearance of wastes due to nuclear power plant decommissioning will steadily increase in the future. . In partic

ular, The importance of securing a landfill for safe disposal of self-disposable waste and safety evaluation is emphasized because it is expected that a large amount of waste to be landfilled such as concrete and soil will be generated during the dismantling of nuclear-related facilities and site restoration.

When evaluating the safety of clearance of wastes subject to landfill, the estimated dose to residents is evaluated using the RESRAD computer program developed by ANL(Argonne National Laboratory) of the US Department of Energy (DOE). Most of the input factors of RESRAD are evaluated by adopting the program default values and representative values based on KINS/RR-144 (2002). However, it is difficult to select a representative value due to the lack of the basis for technical judgment of the input factor, and there are differences in the application of the input factor even when evaluating the dose of the same type of waste. The main factor is the selection of conservative input factors focusing on the difficulty of securing domestic site characteristic factors and the ease of verification of regulatory requirements, and as a result, the impact on clearance by overestimating the expected exposure dose is very large.

In this study, in order to secure the suitability and safety of clearance of waste to be landfilled, input factors for efficient clearance were considered through the characteristics and sensitivity analysis of the input variables of the RESRAD, and the latest literature and reports were reviewed to be overly conservative. Excluding assumptions and applying practical values. In addition, in order to evaluate the dose evaluation age group appropriately in accordance with the regulatory guidelines, an intake factor and a dose conversion factor (DCF) were applied for each of the six age groups, and the results were compared and evaluated by additionally performing the single-age group evaluation, the existing method. Finally, the exposure dose of the age group showing the maximum value among the results of

the dose evaluation of the six age groups was adopted, and it was judged that it was suitable for the regulatory standards.

As a result of analyzing the effectiveness and sensitivity of the RESRAD-ONSITE input factor in this study, it was confirmed that the evaluation was somewhat conservative due to some different conditions from the domestic environment. In the future, by developing and discovering practical input factors reflecting domestic conditions, securing safety, and performing evaluations tailored to the characteristics of each waste, it will be possible to more accurately predict the expected radiation dose. Based on this, it is expected to increase confidence in the deregulation to promote self-disposal, and to minimize the occurrence of radioactive waste drums, resulting in significant economic effects from reducing disposal costs.

제1장 서론

제1절 연구 배경

방사성폐기물은 원자력 및 방사성물질 등을 이용하는 과정에서 불가피하게 발생되는 부산물로서 방사능 준위에 따라 고준위, 중준위, 저준위, 극저준위 및 규제해제폐기물로 분류된다. 극저준위 이상의 방사성폐기물은 영구처분 방식으로 최종 처분되며, 방사능 준위가 극히 낮은 규제해제폐기물은 자체처분 대상 폐기물로 분류되어 원자력관계사업자가 소각, 매립 또는 재활용 등의 방법으로 처분할 수 있다.

국내 자체처분은 1994년 한전원자력연료(주)에서 플루오린화나트륨(NaF)을 처음 처분한 이후 1995년부터 원전 운영 중 발생한 폐기물의 자체처분을 시행하는 등 지속적으로 이루어지고 있으며, 주요 대상 폐기물은 불산, 철재류, 콘크리트, 폐활성탄, 폐수지 및 폐유 등으로 그 종류가 매우 다양하다.

지난 2017년 국내 최초 원전인 고리1호기의 해체가 확정되었고, 2033년까지 14개 원전의 영구정지가 현실화된 현 상황에서 향후 원전해체에 따른 규제해제대상 방사성폐기물은 꾸준히 증가할 것으로 예상된다. 특히 원자력관계시설의 해체 및 부지복원 과정에서 콘크리트, 토양 등 매립대상 폐기물이 다량 발생할 것으로 예상되어 자체처분 대상 폐기물을 보다 더 안전하게 처분하기 위한 매립장 확보와 다양한 매립시나리오에 따른 안전성평가의 중요성이 강조되고 있다.

제2절 연구 목적 및 방향

방사성폐기물 자체처분 시 원자력관계사업자는 원자력안전법에 따라 방사성폐기물 자체처분계획서를 원자력안전위원회(이하 “원안위”라 한다.)에 제출하여야 한다. 자체처분계획서에는 원안위 고시 제2020-6호 「방사성폐기물 분류 및 자체처분 기준에 관한 규정」에 따라 핵종별 허용농도 또는 허용선량이 만족함을 입증하기 위한 자체처분 안전성을 평가하여 기술하고 그 타당성을 설명하여야 한다. 국내의 매립대상 폐기물 자체처분 안전성평가는 미국 DOE(Department

of Energy)의 ANL(Argonne National Laboratory)에서 개발한 RESRAD 전산프로그램이 가장 많이 활용되고 있으며, 매립장의 부지 특성인자는 RESRAD 기본값과 KINS/RR-144 「방사성폐기물 규제해제 요건 개발」에 근거한 대푯값을 채택하여 평가가 이루어지고 있다. 그러나 입력인자의 기술적 판단 근거가 부족하여 대푯값 선정이 어렵고, 동일한 종류의 폐기물 평가 시에도 입력인자 적용에 차이를 보이고 있다. 이는 국내 부지 특성인자 확보의 어려움과 규제요건 입증의 용이성에 초점을 맞춘 보수적인 입력인자 선택이 주요 요인이며, 그 결과 예상피폭선량과대평가로 자체처분에 미치는 영향이 매우 크다. 따라서 본 연구에서는 자체처분 적합성 및 안전성 확보를 위해 매립대상 폐기물의 선량평가 주요 인자의 특성과 민감도 분석을 통해 자체처분을 효율적으로 수행하기 위한 입력인자를 고찰하였다.

제2장 방사성폐기물 자체처분 규정

제1절 규제해제(Clearance)

규제해제(Clearance)란 방사성폐기물 등 규제 대상인 방사선원 중에서 일정기간이 경과되어 방사선학적 위해도가 낮고 방사선 방호 측면의 규제가 요구되지 않는 선원을 규제에서 제외하는 개념을 말한다. 국내 법령에서는 방사성폐기물의 규제해제가 ‘자체처분’이라는 용어로 통용되고 있으며, 원자력안전법 시행령 제2조에 따르면 자체처분이라 함은 법 제86조의 규정에 의한 원자력 관계사업자가 발생시킨 방사성폐기물 중에서 핵종별 농도가 자체처분 허용농도 미만임이 확인된 것을 방사성폐기물이 아닌 일반폐기물로 소각, 매립 또는 재활용 등의 방법으로 관리하는 것을 말한다.

제2절 국내 자체처분 관련 법규 및 규정

1. 원자력안전법 및 원자력안전위원회 고시

자체처분 관련 규정은 원자력안전법 제70조 「방사성폐기물의 자체처분」, 동법 시행령 제107조 「방사성폐기물의 자체처분 절차 및 방법」, 동법 시행규칙 제94조 「방사성폐기물의 자체처분」 및 제95조 「자체처분 신고」, 원안위 고시 제2020-6호 「방사성폐기물 분류 및 자체처분 기준에 관한 규정」에 기술되어 있으며, 방사성폐기물 자체처분 규제기준, 절차, 방법 및 기타 필요한 세부사항 등을 포함하고 있다. 주요 내용은 표 2-1에 정리하였으며, 원안위 고시 제2020-6호 별표 1의 방사성핵종별 자체처분 허용농도는 표 2-2와 같다.

- "자체처분 허용농도"란 「원자력안전법 시행령」 제107조 제1항에 따라 방사성폐기물의 자체처분을 허용할 수 있는 방사성핵종별 방사능 농도로써 별표 1의 허용농도 또는 자체처분 허용선량을 만족함이 입증되는 농도를

말한다.

- "자체처분 허용선량"이란 방사성폐기물의 자체처분에 따른 개인에 대한 연간 예상 피폭방사선량이 10 마이크로시버트(μSv) 미만이고, 집단에 대한 연간 예상 총 피폭방사선량이 1 맨·시버트($\text{man}\cdot\text{Sv}$) 미만이 되는 값을 말한다.

표 2-1 방사성폐기물 자체처분 관계법령

관 련 법 규	조 항 및 내 용
원자력안전법	제70조 방사성폐기물의 자체처분 <ul style="list-style-type: none"> • 방폐물관리시설 등 건설운영자 이외에 총리령이 정하는 종류 및 수량의 방사성폐기물 천층처분 또는 심층처분 등을 금지 • 기타 방사성폐기물의 처분은 대통령령이 정하는 방법 및 절차에 적합하도록 규정
원자력안전법 시행령	제107조 방사성폐기물 자체처분의 절차 및 방법 <ul style="list-style-type: none"> • 원자력 관계사업자가 위원회가 정하는 핵종별 농도값 미만의 다음 방사성폐기물을 소각매립 또는 재활용 등의 방법으로 처분(자체처분) 할 수 있다고 규정 <ol style="list-style-type: none"> 1. 원자력관계사업자가 발생시킨 방사성폐기물 2. 원자력관계사업자로부터 위탁받아 관리하고 있는 방사성폐기물
원자력안전법 시행규칙	제94조 방사성폐기물의 처분제한
원자력안전법 시행규칙	제95조 자체처분 신고
원자력안전위원회 고시	제2020-6호 「방사성폐기물 분류 및 자체처분 기준에 관한 규정」

표 2-2 방사성핵종별 자체처분 허용농도

방사성핵종	허용농도 (Bq/g)
I-129	0.01
Na-22, Sc-46, Mn-54, Co-56, Co-60, Zn-65, Nb-94, Ru-106, Ag-110m, Sb-125, Cs-134, Cs-137, Eu-152, Eu-154, Ta-182, Bi-207, Th-229, U-232, Pu-238, Pu-239, Pu-240, Pu-242, Pu-244, Am-241, Am-242m, Am-243, Cm-245, Cm-246, Cm-247, Cm-248, Cf-249, Cf-251, Es-254	0.1
C-14, Na-24, Cl-36, Sc-48, V-48, Mn-52, Fe-59, Co-57, Co-58, Se-75, Br-82, Sr-85, Sr-90, Zr-95, Nb-95, Tc-96, Tc-99, Ru-103, Ag-105, Cd-109, Sn-113, Sb-124, Te-123m, Te-132, Cs-136, Ba-140, La-140, Ce-139, Eu-155, Tb-160, Hf-181, Os-185, Ir-190, Ir-192, Tl-204, Bi-206, U-233, Np-237, Pu-236, Cm-243, Cm-244, Cf-248, Cf-250, Cf-252, Cf-254	1
Be-7, F-18, Cl-38, K-43, Ca-47, Mn-51, Mn-52m, Mn-56, Fe-52, Co-55, Co-62m, Ni-65, Zn-69m, Ga-72, As-74, As-76, Sr-91, Sr-92, Zr-93, Zr-97, Nb-93m, Nb-97, Nb-98, Mo-90, Mo-93, Mo-99, Mo-101, Tc-97, Ru-97, Ru-105, Cd-115, In-111, In-114m, Sn-125, Sb-122, Te-127m, Te-129m, Te-131m, Te-133, Te-133m, Te-134, I-126, I-130, I-131, I-132, I-133, I-134, I-135, Cs-129, Cs-132, Cs-138, Ba-131, Ce-143, Ce-144, Gd-153, W-181, W-187, Pt-191, Au-198, Hg-203, Tl-200, Tl-202, Pb-203, Po-203, Po-205, Po-207, Ra-225, Pa-230, Pa-233, U-230b, U-236, Np-240, u-241, Cm-242, Es-254m	10
H-3, S-35, K-42, Ca-45, Sc-47, Cr-51, Mn-53, Co-61, Ni-59, Ni-63, Cu-64, Rb-86, Sr-85m, Sr-87m, Y-91, Y-91m, Y-92, Y-93, Tc-97m, Tc-99m, Rh-105, Pd-109, Ag-111, Cd-115m, In-113m, In-115m, Te-129, Te-131, I-123, I-125, Cs-135, Ce-141, Pr-142, Nd-147, Nd-149, Sm-153, Eu-152m, Gd-159, Dy-166, Ho-166, Er-171, Tm-170, Yb-175, Lu-177, Re-188, Os-191, Os-193, Ir-194, Pt-197m, Au-199, Hg-197, Hg-197m, Tl-201, Ra-227, U-231, U-237, U-239, U-240, Np-239, Pu-234, Pu-235, Pu-237, Bk-249, Cf-253, Es-253, Fm-255	100
Si-31, P-32, P-33, Fe-55, Co-60m, Zn-69, As-73, As-77, Sr-89, Y-90, Tc-96m, Pd-103, Te-125m, Te-127, Cs-131, Cs-134m, Pr-143, Pm-147, Pm-149, Sm-151, Dy-165, Er-169, Tm-171, W-185, Re-186, Os-191m, Pt-193m, Pt-197, At-211, Th-226, Pu-243, Am-242, Cf-246	1,000
Co-58m, Ge-71, Rh-103m, Fm-254	10,000

주1) 다수의 방사성핵종이 혼합되어 있는 경우에는 다음과 같이 한다.

$$\sum_i \frac{C_i}{C_{L,i}} < 1$$

C_i : 방사성핵종 i 의 방사능농도(Bq/g)

$C_{L,i}$: 표 2-2에 주어진 방사성핵종 i 의 자체처분 허용농도(Bq/g)

주2) 표 2-2에 수록되지 않은 알파선을 방출하지 아니하는 방사성핵종의 경우 자체처분 허용농도로써 0.1 Bq/g을 적용할 수 있다.

2. 자체처분 규제지침

방사성폐기물 자체처분 시 적용할 수 있는 세부 수행절차와 평가방법은 경수로형 원전 규제지침인 KINS/RG-N12.08 「방사성폐기물 자체처분 안전성평가」에서 제시하고 있으며, 방사성폐기물 자체처분계획서 작성 및 인허가시 규제지침에 따라 안전성평가가 이루어지고 있다. 주요 내용을 표 2-3에 정리하였다.

표 2-3 KINS/RG-N12.08 「방사성폐기물 자체처분 안전성평가」

항목	규제지침 주요내용
총론	<ul style="list-style-type: none"> • 자체처분 대상 폐기물로 자체처분하기 위해 인위적인 혼합 또는 희석 등의 방법으로 핵종별 농도를 낮추지 않아야 한다. • 자체처분에 따른 예상피폭선량은 원안위고시 제2020-6호 별표 1에 명시된 기준을 만족해야 한다. • 자체처분 대상 폐기물의 핵종별 방사능농도는 원안위고시 제2020-6호 별표 1에 제시된 방사성핵종별 자체처분 허용농도 미만이어야 한다. 다만, 핵종별 방사능 농도를 초과하더라도 연간 개인선량이 10 μSv 이하, 집단선량이 1 man-Sv 이하임이 입증되면 자체처분이 허용될 수 있다.
대표시료 채취	<ul style="list-style-type: none"> • 표면 및 체적 오염폐기물 대상 폐기물 모집단으로부터 일정량을 대표시료로 채취하여 방사능분석을 할 수 있다. 모집단 폐기물 약 200 kg(매 1 m^2) 마다 폐기물 표면 및 체적을 대표할 수 있는 약 1 kg의 대표시료를 채취해야 한다.
방사능 측정의 적절성	<ul style="list-style-type: none"> • 감마방사능측정 감마핵종분석시 측정용기 내 장입율, 밀도 등이 적절히 보정되고, 최소검출방사능 농도(MDC)는 자체처분 제한농도의 10 % 이하를 유지하여야 한다. • 알파 및 베타방사능 측정 대상 폐기물중 특이사항을 보이는 시료군에서 3개의 시료채취하고, 최소검출방사능(MDA)은 원안위 고시 또는 IAEA RS-G-1.7에 제시된 핵종별 농도의 10 %에 해당하는 방사능을 확인할 수 있도록 유지되어야 한다.

	<ul style="list-style-type: none"> • 기타 방사능 측정 대상 폐기물의 발생 공정상 H-3 및 C-14 핵종이 함유되어 있을 가능성이 있는 경우에는 해당 핵종에 대한 방사능측정이 수행되어야 한다. 이때 방사능 측정시 H-3 및 C-14 핵종에 대한 각각의 에너지 구간이 적절히 구분되어 계수되었음이 입증되어야 하며, 시료의 색상에 따른 colour quenching이 고려되어야 한다.
<p>자체처분에 따른 선량평가</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 공통사항 피폭 연령군은 4개 또는 6개 연령군이 적용될 수 있다. 단, 이외의 연령군을 적용하는 경우에는 적용 연령군이 피폭대상자를 보수적으로 대표함이 입증되어야 한다. • 선원항 평가 대표시료에서 방사능이 검출되지 않을 경우에는 대표시료의 MDC를 충분히 낮춰 측정 후, 해당 방사능값을 적용할 수 있다. 모집단 폐기물의 평균 방사능값으로 평가하는 것이다. 또는 주요 MDC를 대상 폐기물의 방사능 오염도로 가정할 수 있다 • 매립에 따른 선량평가 폐기물의 매립에 따른 방사선영향 평가에는 기 검증된 방법론 또는 전산프로그램이 적용되어야 한다.

제3장 RESRAD의 특성 및 적용

제1절 개발배경 및 적용현황

본 연구에서 사용된 RESRAD(RESidual RADioactivity) 전산코드는 방사능 및 화학적으로 오염된 물질에 노출되어 발생하는 인간의 보건 및 환경에 대한 선량과 관련된 위험을 평가하기 위해 US DOE(Department of Energy) 지원 하에 미국 국립연구소인 ANL(Argonne National Laboratory)에서 1989년 개발되었으며, 특히 RESRAD-ONSITE는 토양이 방사성핵종에 오염된 지역에서 사람이 거주하거나 작업하는 동안 노출된 개인에 대한 방사선량과 위험도를 평가하기 위한 전산코드이다. 지금까지 미국 및 기타 국가의 50개 이상의 오염된 부지에 대한 환경영향 안전성평가에 적용되었고, US DOE Order 5400.5(Radiation Protection of the Public and the Environment)에 지정된 유일한 코드이며, US NRC(Nuclear Regulatory Commission)에서 원전의 해체 및 폐기물 처리 인허가에 RESRAD 코드를 활용한 피폭선량평가를 인정하고 있다. 국내에서는 토양, 콘크리트, 폐활성탄 등의 매립에 의한 자체처분 인허가 및 철재류 등 금속류 재활용 안전성 평가 등에서 다양하게 활용되고 있다.

제2절 RESRAD Family of Computer Code 구성

RESRAD Family of Computer Code는 ONSITE를 기본으로 OFFSITE, BUILD, RECYCLE 등 총 9개의 코드로 구성되어 있으며, 사용 목적에 따라 코드를 선택하여 위험도 평가를 수행할 수 있다. 그림 3-1에 RESRAD Family of Computer Codes 구성을 나타내었다.

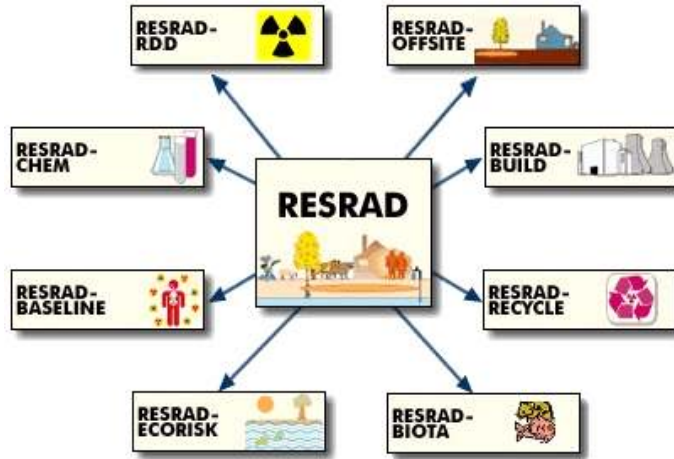


그림 3-1 The RESRAD Family of Computer Codes

표 3-1 RESRAD 코드군의 종류 및 적용범위

구분	적용범위
RESRAD-ONSITE	부지 내 잔류 방사성 물질에 의한 거주자 피폭선량 및 위험도 평가
RESRAD-BIOTA	오염된 물/토양의 부지개방 기준농도 유도 및 부지 내 피폭선량/위험도 평가
RESRAD-BUILD	오염된 건물 거주자에 대한 피폭선량 및 위험도 평가
RESRAD-RECYCLE	오염물질, 장비 재활용 및 재사용에 따른 피폭선량 및 위험도 평가
RESRAD-OFFSITE	RESRAD-ONSITE 확장 코드로 부지 내/외 거주자의 피폭선량 평가
RESRAD-CHEM	RESRAD에 추가하여 화학적 위험도 평가
RESRAD-ECORISK	오염물질 피폭에 의한 생태학적 위험도 평가
RESRAD-BASELINE	EPA의 보건위험평가지침에 따른 기본위험도 평가
RESRAD-RDD	고의적으로 방사성물질을 확산시키는 장치에 대한 사전 점검 프로그램

제3절 RESRAD-ONSITE 코드의 특성

RESRAD-ONSITE는 오염토양(부지) 내 잔류 방사성물질에 의한 상부 거주자의 방

사선학적 영향(피폭선량 및 위험도) 평가 및 원전 해체 후 부지 재활용 기준 만족여부 평가를 위해 사용된다. 국내 자체처분 시 매립 시나리오에 따른 안전성평가는 대부분 RESRAD-ONSITE를 이용하여 평가하고 있다.

1. RESRAD-ONSITE 피폭 시나리오

매립에 따른 안전성 평가를 위한 주요 피폭 시나리오는 매립작업자, 매립부지 상부 거주자, 매립지 주변 거주자, 행락객(방문객) 등으로 구성되며, 실제 자체 처분 실무에서는 폐기물 매립작업자와 매립지 상부 거주자에 대한 평가가 이루어지고 있다.

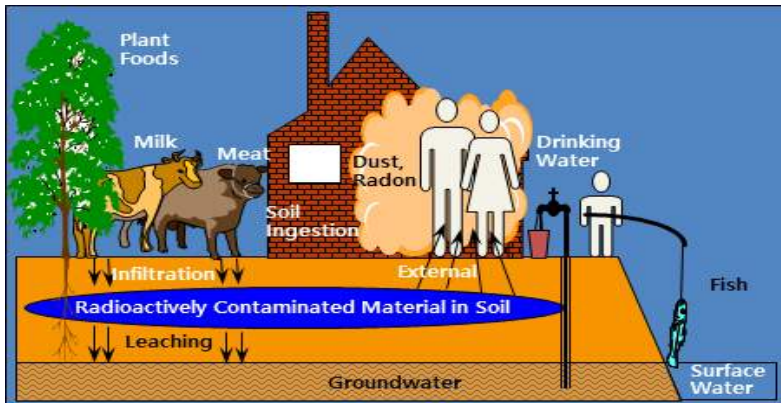


그림 3-2 오염지역 거주자 시나리오

2. RESRAD-ONSITE 피폭선량 및 위험도 평가 경로

RESRAD-ONSITE 피폭 시나리오에서 고려되는 주요 피폭경로는 크게 외부피폭과 내부피폭으로 구분할 수 있다. 외부피폭은 매립 방사성물질(선원)에 의한 직접피폭이며, 내부피폭은 호흡(입자성 물질, H-3, C-14 등) 및 섭취(토양, 물, 식물, 육류, 우유, 수중생물)에 의한 체내피폭이다. RESRAD-ONSITE 전산코드 피폭 경로를 표 3-2 및 그림 3-3에 도시하였다.

표 3-2 RESRAD-ONSITE 피폭경로

피폭유형		피폭경로
외부피폭		토양 내 오염물질 직접 노출에 의한 외부피폭
내부피폭	흡입	입자 형태의 방사성물질 호흡에 의한 내부피폭
		라돈 흡입에 의한 내부피폭
	섭취	야채, 곡물, 과일 등 작물 섭취로 인한 내부피폭
		육류 섭취로 인한 내부피폭
		우유 섭취로 인한 내부피폭
		수산물 섭취로 인한 내부피폭
		음용수 섭취로 인한 내부피폭
		부주의한 토양 섭취로 인한 내부피폭

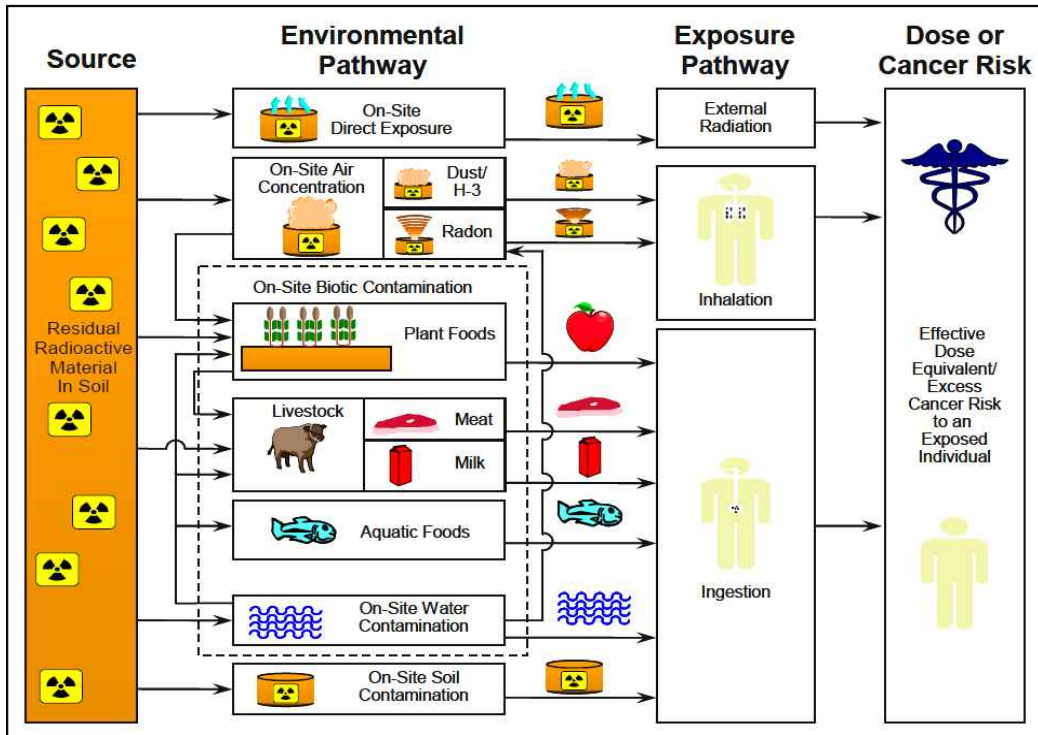


그림 3-3 RESRAD-ONSITE 피폭경로

3. RESRAD-ONSITE 기본 라이브러리

RESRAD-ONSITE 코드에는 각 시나리오별 선량평가를 위한 기본적인 라이브러리를 내장하고 있으며, 표 3-3에 RESRAD 코드의 기본 라이브러리를 나타내었다.

표 3-3 RESRAD-ONSITE 코드의 기본 라이브러리

RESRAD Lib.	기능 및 특성
방사성 붕괴 및 생성 DB	핵종별 붕괴상수 및 붕괴모드 등의 데이터, 시나리오 진행기간 동안 핵종 붕괴 및 자핵종 생성 등을 계산
선량환산인자 DB	내부피폭 및 외부피폭에 따른 선량환산인자 기본 데이터, 내부피폭 DCF는 사용자 생성 및 변경 가능
위험도 계수 DB	평가결과를 위험도(Risk)로 산출하기 위한 EPA 위험도 평가인자 정보
식물/토양 전이계수 DB	토양 내 방사성물질이 식물체로 전이되는 메카니즘 데이터
음식물 전이계수 DB	육류와 사료, 우유와 사료, 어류와 물 사이의 전이계수 데이터

4. RESRAD-ONSITE 부지 특성인자

평가의 정확도를 높이기 위해서는 매립부지 특성인자가 사전에 확보되어야 한다. 그러나 매립장의 특성을 정확히 반영한 입력인자를 확보하는 것은 현실적으로 매우 어렵기 때문에 일부 입력인자는 각종 문헌 및 보고서에 제시된 보수적인 값을 대푯값으로 선택하여 평가를 수행하는 게 일반적이다. 표 3-4에 RESRAD-ONSITE 코드 부지 특성인자 목록을 정리하였다.

표 3-4 RESRAD-ONSITE 코드의 부지 특성인자

분류	입 력 인 자
물리적 인자	방사성핵종의 농도, 오염지역 형태, 면적, 높이, 밀도, 확산계수 등
수문학적 인자	분수계 면적, 다공도, 수리전도도, 토양의 b-parameter, 우물의 깊이 등
지화학적 인자	분포계수, 침출률, 용해도 등
기상학적 인자	풍속, 강수량, 침식률, 증발산계수, 유출계수, 관개율, 질량분배 계수 등
소비 인자	섭취량, 호흡률, 저장기간, 양수율, 실내·외 거주비율 등

제4장 자체처분 안전성평가 대상 폐기물 특성

제1절 자체처분 대상 폐기물의 종류, 발생원 및 방사선(능) 측정결과

본 연구의 자체처분 안전성평가 대상 폐기물인 폐활성탄은 원자력발전소 방사선관리구역 공기정화를 위해 공기조화계통(HVAC)에 내장되었던 것으로, 방사선(능) 측정결과는 원안위 규칙 제23호(방사선안전관리등의 기술기준에 관한 규칙) 제3조 2항 4호의 방사선관리구역 반출기준인 자연방사선(능) 준위 이하를 만족하였다.

표 4-1 자체처분 대상 폐기물의 종류, 발생원 및 방사선(능) 측정결과

폐기물 종류	발생원	수량 (kg)	표면방사선량률 ($\mu\text{Sv/h}$)	표면오염도(Bq/cm^2)	
				직접법	간접법
폐활성탄	원전 공기조화계통	3,400	0.14 ~ 0.17	0.199	0.212

※ 자연 방사선(능) 준위(BKG)

[표면방사선량률] 0.10 ~ 0.20 $\mu\text{Sv/h}$

[표면오염도] 직접법 : 0.203 Bq/cm^2 , 간접법 : 0.220 Bq/cm^2

제2절 방사성핵종 분석 결과

자체처분 대상 폐기물의 방사능 분석을 위해 KINS/RG-N12.08 「방사성폐기물 자체처분 안전성 평가」에 따라 폐활성탄 약 200 kg 마다 체적 내 대표시료 약 1 kg을 4분할 방법에 따라 고루 채취하였고, 감마핵종분석을 수행한 결과 모두 최소검출가능농도(MDA)미만으로 확인되었다. 또한 계통폐기물인 폐활성탄의 H-3, C-14 존재여부 확인을 위해 규제지침에 따라 감마핵종의 MDA가 가장 높은 시료 2개를 선택하여 분석한 결과 표 4-2와 같이 원안위 고시 제2020-6호 「방사성폐기물 분류 및 자체처분 기준에 관한 규정」 별표 1의 방사성핵종별 자체처분 허용농도를 만족함을 확인하였다.

표 4-2 자체처분 대상 폐기물의 핵종분석 결과

핵종	최대 방사능농도 C_i (Bq/g)	평균 방사능농도 (Bq/g)	허용농도 $C_{L,i}$	분율 $C_i/C_{L,i}$	측정 MDA(Bq/g)	$\sum_l \frac{C_i}{C_{L,i}}$
H-3	5.94E+00	3.01E+00	100	5.94E-02	8.10E-02	6.35E-01 만족
C-14	4.30E-01	3.19E-01	1	4.30E-01	8.90E-02	
Co - 60	9.68E-03 ^{주)}	5.41E-03	0.1	9.68E-02	9.68E-03	
Cs - 137	4.89E-03 ^{주)}	3.96E-03	0.1	4.89E-02	4.89E-03	

주) 감마핵종분석 결과 모두 MDA미만으로 검출되어 최대 MDA를 적용

제3절 전 알파/베타 방사능 분석 결과

전 알파/베타 분석대상 시료는 자체처분 대상 폐활성탄의 감마핵종분석 결과가 모두 MDA 미만으로 검출됨에 따라 특이사항을 보이는 시료군(MDA가 가장 높은 시료)으로부터 3개를 채취하였고, 막자사발을 이용하여 분말형태로 처리한 후 플란켓에 얇게 도포하고 알파/베타를 동시에 측정하였다. 백그라운드(BKG)는 빈 플란켓을 5분씩 10회 반복 측정하여 평균값을 자연계수 값으로 적용하였다.

표 4-3 자체처분 대상 폐기물의 전 알파/베타 분석 결과

구 분	전알파	전베타	비 고
방사능 (Bq/g)	MDA 미만	MDA 미만	
MDA (Bq/g)	6.83E-03	6.70E-02	

$$\ast \text{ 방사능 (Bq/g)} = \frac{\text{순 계수율 (cpm)}}{[\text{계측효율} \times 60 \times \text{시료량 (g)}]}$$

$$\ast \text{ MDA (Bq/g)} = \frac{4.66 \times \sqrt{\frac{\text{BKG (cpm)}}{\text{계측시간 (min)}}}}{[\text{계측효율} \times 60 \times \text{시료량 (g)}]}$$

표 4-4 백그라운드(BKG) 측정결과

전베타				전알파			
횃수	측정시간 (분)	COUNTS	계수율 (cpm)	횃수	측정시간 (분)	COUNTS	계수율 (cpm)
1	5	198	39.60	1	5	1	0.20
2	5	195	39.00	2	5	1	0.20
3	5	196	39.20	3	5	0	0.00
4	5	188	37.60	4	5	1	0.20
5	5	197	39.40	5	5	1	0.20
6	5	195	39.00	6	5	1	0.20
7	5	201	40.20	7	5	2	0.40
8	5	194	38.80	8	5	1	0.20
9	5	196	39.20	9	5	1	0.20
10	5	193	38.60	10	5	1	0.20
평균값		195.3	39.06	평균값		10	0.20

제5장 RESRAD-ONSITE 입력인자 분석 및 안전성 평가

제1절 선량환산인자(Dose Conversion Factor)

선량환산인자(DCF)란 단위 방사성물질의 흡입, 섭취 또는 노출에 의하여 각 연령군을 대표하는 가상개인이 받는 유효선량을 적절한 단위로 정량화한 것이다. 최초 개발된 RESRAD 프로그램은 ICRP Pub. 26에 근거한 총유효선량당량(TEDE : Total Effective Dose Equivalent)을 평가하였기 때문에 기본적으로 EPA의 연방지침보고서(FGR : Federal Guidance Report)에서 제시한 성인(Adult)에 대한 선량환산인자를 채택하고 있었다. 이후 개발된 RESRAD 6.0 버전부터는 ICRP Pub. 60 선량개념을 도입하였고, 연령별 선량환산인자 라이브러리를 기본적으로 포함하고 있다.

KINS/RG-N12.08 「방사성폐기물 자체처분 안전성 평가」 규제지침에 따르면 선량평가에 적용되는 피폭 연령군은 4개 또는 6개 연령군이 적용될 수 있으며, 각 피폭 연령군의 나이분포 및 선량환산계수에 적용된 연령은 IAEA의 방사선방호에 관한 국제기본안전기준(IAEA Safety Series No.115, 1996년)에 제시된 6개 대표 연령군 자료를 적용하여야 한다. 4개 연령군을 적용할 경우에는 6개 연령군중 3개월, 5세, 15세 및 성인의 자료를 적용하고, 4개 또는 6개 연령군 이외의 연령군을 적용하는 경우에는 적용 연령군이 피폭대상자를 보수적으로 대표함이 입증되어야 함을 규정하고 있다.

기존 자체처분 사례 및 KINS/RR-144 「방사성폐기물 규제해제 요건 개발, 2002」 보고서를 살펴보면 단일 연령군으로 통합하여 평가하기 위해 연령군 차이에 대한 보정방법으로 IAEA Safety Series No.115(BSS 96)에서 제시된 17세 이상 연령군(일반 성인)에 대한 DCF 중 가장 보수적인 대사형태에 해당하는 값의 2배를 적용하여 단일 연령군의 보수적 대표성을 입증하고 있다.

표 5-1 내부피폭 선량환산인자 비교

(mSv/Bq)

핵종	RESRAD 7.2 DCF(성인)		ICRP 72 DCF(성인)	
	Inhalation	Ingestion	Inhalation	Ingestion
H-3	2.62E-07	4.19E-08	2.60E-07	4.20E-08
C-14	5.73E-06	5.81E-07	5.80E-06	5.80E-07
Co-60	3.08E-05	3.42E-06	3.10E-05	3.40E-06
Cs-137	3.94E-05	1.36E-05	3.90E-05	1.30E-05

가장 최신 버전인 RESRAD 7.2 프로그램은 단일한 외부피폭 선량환산인자와 6개 연령군에 대한 내부피폭 선량환산인자를 기본 데이터로 내장하고 있으며, 환산인자는 표 5-2와 같다.

표 5-2 RESRAD 7.2 선량환산인자(Dose Conversion Factor)

구분	선량환산인자(DCF)
외부피폭	DCFPAK3.02
내부피폭	DCFPAK3.02 (Infant, Age 1, Age 5, Age 10, Age 15, Adult)

민감도 분석을 위해 매립시나리오의 결정집단을 매립작업자와 매립장 폐쇄 후 거주자로 구분하고, RESRAD 7.2 버전에 내장된 단일 외부피폭 선량환산인자와 6개 연령군 내부피폭 선량환산인자를 다음과 같이 적용하여 피폭선량 평가를 수행하였다. 또한, 추가적으로 기존 단일 연령군 평가의 보수적 대표성을 확인하기 위해 ICRP 72 성인 DCF 2배를 적용하여 평가를 수행하였다.

1) 매립 작업자

매립 작업자는 일반적으로 성인일 것으로 판단되어 DCFPAK 3.02 Adult를 적용하였다.

2) 매립장 폐쇄 후 거주자

거주자의 경우 RESRAD 7.2 버전에 내장된 6개 연령군 선량환산인자를 적용하였다.

표 5-3 선량환산인자에 따른 피폭선량 평가결과(최대 피폭선량 발현시점 기준)

(mSv/y)

ICRP 72 성인 DCF 2배	RESRAD 7.2 DCF					
	3개월	1세	5세	10세	15세	성인
1.305E-03	1.892E-04	5.812E-04	3.705E-04	3.449E-04	3.310E-04	5.750E-04

선량평가 결과, 기존의 단일 및 6개 연령군 방식 모두 자체처분 허용선량을 만족하였고, 단일 연령군을 적용한 결과가 약 2배 더 높게 평가되었다. 이에 본 연구에서는 기존의 단일 연령군 적용이 지나친 보수적 가정이라 판단되어 6개 연령군별 DCF를 사용하여 평가를 수행하였다.

```

Summary : DCFPAK3.02(Infant)
File : C:\RESRAD_FAMILY\ONSITE\7.2\USERFILES\DCF AGE 1.RAD

Contaminated Zone Dimensions          Initial Soil Concentrations, Bq/g
-----
Area: 3.21 square meters              C-14 3.190E-01
Thickness: 2.00 meters                 Co-60 5.410E-03
Cover Depth: 0.60 meters               Cs-137 3.960E-03
                                         H-3 3.010E+00

Total Dose TDOSZ(t), mSv/yr
Basic Radiation Dose Limit = 1.000E-02 mSv/yr
Total Mixture Sum M(t) = Fraction of Basic Dose Limit Received at Time (t)

t (years): 0.000E+00 1.000E+00 5.000E+00 1.000E+01 3.000E+01 1.000E+02 3.000E+02 1.000E+03
TDOSZ(t): 2.945E-04 4.115E-04 9.031E-06 3.089E-06 5.511E-07 1.296E-07 1.337E-08 3.554E-14
M(t): 2.945E-02 4.115E-02 9.031E-04 3.089E-04 5.511E-05 1.296E-05 1.337E-06 3.554E-12

Maximum TDOSZ(t): 5.812E-04 mSv/yr at t = 0.679 ±0.001 years

Total Dose Contributions TDOSZ(i,p,t) for Individual Radionuclides (i) and Pathways (p)
As mSv/yr and Fraction of Total Dose At t = 6.787E-01 years

Water Independent Pathways (Inhalation excludes radon)
  
```

그림 5-1 RESRAD DCF 1세 피폭선량 평가결과

```

Summary : DCFPAK3.02(Infant)
File      : C:\RESRAD_FAMILY\ONSITE\7.2\USERFILES\DCF AGE ADULT.RAD
  
```

Contaminated Zone Dimensions			Initial Soil Concentrations, Bq/g				
Area:	3.21 square meters		C-14	3.150E-01			
Thickness:	2.00 meters		Co-60	5.410E-03			
Cover Depth:	0.60 meters		Cs-137	3.960E-03			
			H-3	3.010E+00			


```

Total Dose TDOSE(t), mSv/yr
Basic Radiation Dose Limit = 1.000E-02 mSv/yr
Total Mixture Sum M(t) = Fraction of Basic Dose Limit Received at Time (t)
  
```

t (years):	0.000E+00	1.000E+00	5.000E+00	1.000E+01	3.000E+01	1.000E+02	3.000E+02	1.000E+03
TDOSE(t):	2.822E-04	4.073E-04	8.796E-06	3.077E-06	6.940E-07	1.685E-07	1.394E-08	3.561E-14
M(t):	2.822E-02	4.073E-02	8.796E-04	3.077E-04	6.940E-05	1.685E-05	1.394E-06	3.561E-12

```

Maximum TDOSE(t): 5.750E-04 mSv/yr at t = 0.679 ±0.001 years
  
```

Total Dose Contributions TDOSE(i,p,t) for Individual Radionuclides (i) and Pathways (p)
 As mSv/yr and Fraction of Total Dose At t = 6.787E-01 years
 Water Independent Pathways (Inhalation excludes radon)

그림 5-2 RESRAD DCF 성인 피폭선량 평가결과

```

Summary : DCFPAK3.02(Infant)
File      : C:\RESRAD_FAMILY\ONSITE\7.2\USERFILES\DCF ICRP72_2_ADULT.RAD
  
```

Contaminated Zone Dimensions			Initial Soil Concentrations, Bq/g				
Area:	3.21 square meters		C-14	3.150E-01			
Thickness:	2.00 meters		Co-60	5.410E-03			
Cover Depth:	0.60 meters		Cs-137	3.960E-03			
			H-3	3.010E+00			


```

Total Dose TDOSE(t), mSv/yr
Basic Radiation Dose Limit = 1.000E-02 mSv/yr
Total Mixture Sum M(t) = Fraction of Basic Dose Limit Received at Time (t)
  
```

t (years):	0.000E+00	1.000E+00	5.000E+00	1.000E+01	3.000E+01	1.000E+02	3.000E+02	1.000E+03
TDOSE(t):	6.047E-04	9.223E-04	1.357E-05	3.104E-06	6.996E-07	1.698E-07	1.396E-08	3.562E-14
M(t):	6.047E-02	9.223E-02	1.357E-03	3.104E-04	6.996E-05	1.698E-05	1.396E-06	3.562E-12

```

Maximum TDOSE(t): 1.305E-03 mSv/yr at t = 0.678 ±0.001 years
  
```

Total Dose Contributions TDOSE(i,p,t) for Individual Radionuclides (i) and Pathways (p)
 As mSv/yr and Fraction of Total Dose At t = 6.782E-01 years
 Water Independent Pathways (Inhalation excludes radon)

그림 5-3 ICRP 72 DCF 성인의 2배 피폭선량 평가결과

제2절 방사능 농도(Source)

자체처분 폐기물의 방사능분석을 통해 핵종별 방사능 농도를 확인하고 전산코
 드 선원항목에 입력한다. 단, 최초 분석한 결과가 방사능이 검출되지 않았을 경우
 에는 규제지침에 따라 MDA를 충분히 낮춰 재 측정 한 후 해당 방사능 값을 적용하

거나, 주요 핵종 MDA를 폐기물의 방사능 농도로 가정하여 적용할 수 있다. 기존 자체처분 사례를 보면 대부분 대표시료의 최댓값(핵종이 검출되지 않는 경우 MDA 중 최댓값)을 전체 폐기물의 대표농도로 가정하여 적용하고 있다. 그러나 실제 자체처분 폐기물 매립 시 동일 부지(시점)에 전량 매립되므로 이러한 가정은 상당히 보수적인 접근이라 할 수 있으며, 규제지침 KINS/RG-N12.08의 선원 평가 항목에서도 모집단 폐기물의 평균 방사능 값을 적용하여 평가하는 것으로 규정하고 있다. 이에 선원항 입력인자 적용의 적합성을 판단하기 위해서 기존 평가에 적용된 최대 방사능농도와 평균 방사능농도의 민감도 분석을 수행하였고, 그 결과를 표 5-4에 나타내었다. 평가결과는 두 방식 모두 자체처분 허용선량을 만족하였으며, 최대 방사능농도를 적용한 결과가 약 1.5배 더 높게 평가됨을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 실질적인 가정을 기반으로 평가하기 위해 평균 방사능농도를 적용하였다.

표 5-4 최대 및 평균 방사능농도 적용 평가결과(성인)

구분	최대 방사능농도	평균 방사능농도	자체처분 허용선량
최대 발현 시점	7.966E-04 mSv/y	5.750E-04 mSv/y	만족
매립 후 5년	1.381E-05 mSv/y	8.796E-06 mSv/y	만족

제3절 안전성 평가기간

자체처분에 따른 결정집단의 최대 피폭선량 발현시점 평가를 위해 안전성 평가기간을 년 단위로 입력한다. RESRAD 프로그램에서는 기본적으로 규제해제 직후(0년)부터 1000년을 모사하고 있지만, 사용자의 목적에 따라 평가기간을 변경할 수 있다. 원안위 고시 제2016-33호 『원자력이용시설 해체완료 후 부지 및 잔존건물의 재이용을 위한 기준』에서는 방사성핵종에 따른 피폭선량 평가기간으로 1,000년을 설정하도록 권고하고 있으며, 미국의 경우에도 원전 해체에 대한 부지 재이용 적합성 평가에서 1,000년을 기본 평가기간으로 적용하였다.

1) 매립작업자

매립작업자의 경우 실제 폐기물이 매립되는 시점부터 폐기물에 의한 피폭을 고려하는 것이 타당하다. 따라서 매립 직후(0년)부터 1,000년을 평가기간으로 선정하였다.

2) 매립장 폐쇄 후 거주자

기존 자체처분 안전성평가의 거주자 시나리오의 대부분은 매립 직후 일반인이 거주한다는 가정을 사용하였다. 그러나 국내 폐기물관리법에 따르면 폐기물 매립장은 폐쇄 후 안정화 조치를 위해 30년 이내의 사후관리 대상이므로 매립 직후 일반인이 거주한다는 시나리오는 이론적으로는 가능하나, 현실적으로 적용 불가능한 지나친 보수적 가정이라 할 수 있다. 평가기간 적용사례를 보면 KINS/RR-144 보고서는 매립장 폐쇄 후 5년이 경과한 후 일반인이 거주한다는 가정을 사용하였고, IAEA-TECDOC-401 및 일본원자력안전위원회는 매립장 폐쇄 이후 10년이 경과된 시점에서 일반인이 거주하기 시작하는 것으로 가정한 바 있다. 따라서 본 연구에서는 규제해제 후 5년이 지난 시점에서의 연간 최대피폭선량을 선택하여 자체처분 허용선량 미만임을 확인하였다.

제4절 매립층의 입력자료

1. Thickness of Contaminated Zone

자체처분 폐기물 매립에 따른 오염지역의 두께는 원기둥 모델에서 매립층의 높이로 정의 할 수 있다. 매립층의 높이는 매립장에서 자체처분 폐기물을 매립하는 방법에 따라 차이가 발생 할 것이며, 매립 높이에 따라 매립층 면적이 달라져 평가결과에 영향을 미치게 된다. 일반적으로 동일한 폐기물에서 매립층이 두꺼울수록 자체흡수 효과에 의해 피폭선량이 감소하게 되므로 매립층의 높이를 낮게 설정하는 것이 보수적인 평가이다.

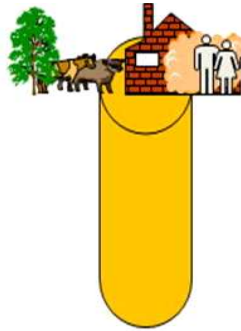


그림 5-4 높고 좁은 오염지역
시나리오



그림 5-5 낮고 넓은 오염지역 시나리오

동일 폐기물량에서 매립층 높이 차이에 따른 민감도 분석을 위해 높고 좁은 오염지역 시나리오(그림 5-4)와 낮고 넓은 오염지역 시나리오(그림 5-5)를 표 5-5와 같이 가정하여 안전성 평가를 수행하였고, 그 결과를 표 5-6에 제시하였다. 이때 가정한 두 시나리오의 매립층 높이는 기존 자체처분 사례의 최대 및 최소 높이를 적용하였다.

표 5-5 매립 시나리오에 따른 오염지역(매립층) 입력자료

입력인자	높고 좁은 오염지역 시나리오	낮고 넓은 오염지역 시나리오
Area of Contaminated Zone	1.28 m ²	32.08 m ²
Thickness of Contaminated Zone	5 m	0.2 m
Length Parallel to Aquifer Flow	1.28 m	6.39 m

매립 시나리오에 따른 민감도 분석결과, 표 5-6에 제시된 결과에서 보는 바와 같이 동일한 폐기물량 조건에서 낮고 넓은 오염지역 시나리오가 높고 좁은 지역 시나리오로 가정할 때 보다 피폭선량이 약 2.5배 높게 평가되었다.

표 5-6 매립층 높이 차에 따른 피폭선량 평가결과

구분	매립층 높이	최대 개인피폭선량	자체처분 허용선량
높고 좁은 오염지역 시나리오	5 m	3.141E-04 mSv/y	만족
낮고 넓은 오염지역 시나리오	0.2 m	8.326E-04 mSv/y	만족

실제 매립 시나리오를 그림 5-4와 같이 높고(5 m) 좁은 지역(1.28 m²)으로 가정하는 것은 이론상 가능하지만 현실적으로 타당하지 않으므로 매립 폐기물의 양(체적)에 따른 실질적인 가정이 필요하다. KINS/RR-144 보고서는 일반적으로 트럭 적재함에서 폐기물을 일시에 하역하는 경우 매립층의 높이가 1~3 m 내외가 될 것으로 예상하였고, 미국에서도 US NRC PG8-10과 관련하여 소각재 매립층의 높이를 2.5 m로 가정한 바 있다. 이에 본 연구에서는 폐기물의 체적(6.42 m³)을 고려하여 RESRAD 기본값인 2 m을 매립층의 높이로 가정하였다.

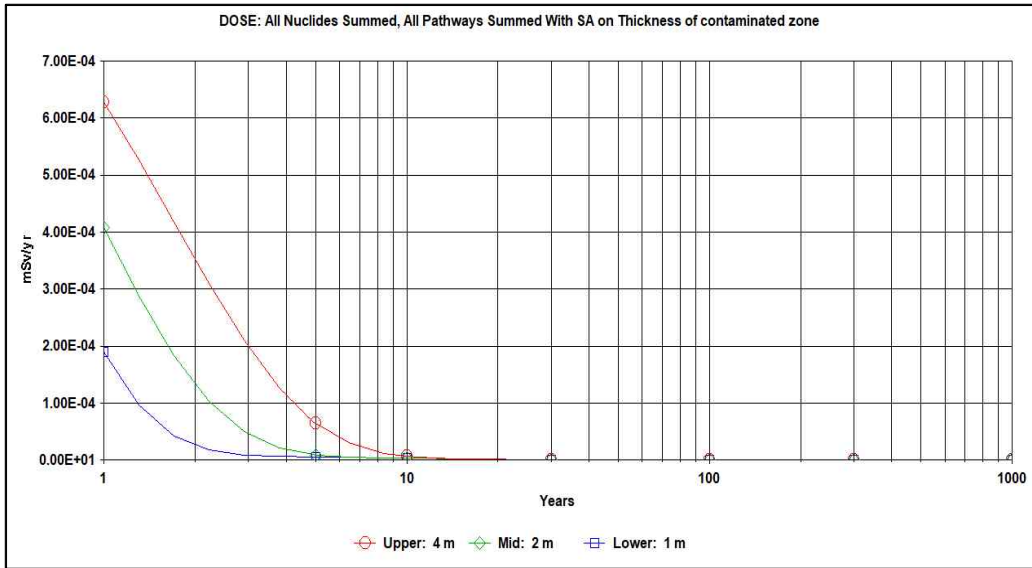


그림 5-6 매립층 높이 민감도 분석결과(성인 기준)

2. Area of Contaminated Zone

오염지역의 면적은 자체처분 폐기물이 매립된 층의 단면적으로 정의할 수 있다. RESRAD 프로그램은 기본적으로 오염지역의 기하학적 형상을 그림 5-7과 같은 원기둥 형태로 가정하였으므로 오염지역의 면적은 원의 단면적(S)으로 가정할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 오염지역의 면적을 다음과 같은 식으로 계산하여 표 5-7과 같이 적용하였다.

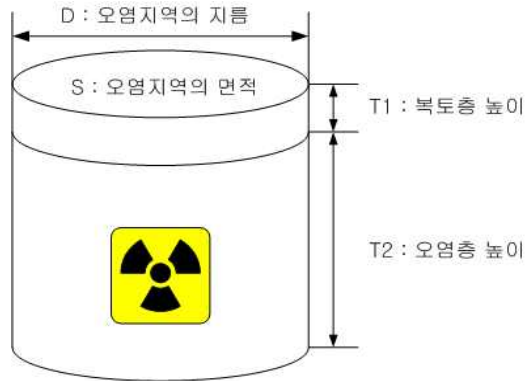


그림 5-7 RESRAD 프로그램의 오염지역에 대한 모델

$$S = \frac{W}{\rho} \div T_2$$

T_2 : 오염지역(매립층)의 높이

W : 매립 폐기물의 양

ρ : 매립하는 폐기물의 밀도

S : 오염지역(매립층)의 면적

3. Length of Parallel to Aquifer Flow

대수층 흐름에 평행한 오염지역 길이는 대수층 흐름에 수직을 이루고 있는 두 개의 평행선간의 길이로 정의된다. 본 연구에서는 오염지역(매립층)의 기하학적 형상을 원기둥으로 가정하였으므로 대수층과 평행한 매립층의 길이는 원기둥 단면의 지름이라고 볼 수 있다. 따라서 원기둥 형태인 매립층 단면의 지름은 다음과 같은 식으로 계산하여 표 5-7과 같이 적용하였다.

$$D = 2 \times \sqrt{\frac{S}{3.14}}$$

D : 오염지역(매립층) 단면의 지름

S : 오염지역(매립층) 면적

표 5-7 자체처분 대상 폐기물 매립층 특성인자

매립 폐기물 양	매립층 체적	매립층 두께	폐기물 밀도	매립층 면적	매립층 지름
3,400 kg	6.42 m ³	2.0 m	0.53 g/cm ³	3.21 m ²	2.02 m

제5절 복토층의 수문학적 입력자료

복토층과 오염지역(매립층)을 통과하는 물의 흐름에 따른 평가를 위해서는 수문학적 자료를 확보하여야 한다. 복토층과 매립층의 수문학적 입력인자에 대한 적용사례를 분석하고 실제 적용한 입력인자를 표 5-8에 정리하였다.

표 5-8 복토층 및 오염지역 수문학적 입력자료

입력인자	RESRAD 7.2	KINS/RR-144	입력값
Cover depth(m)	-	작업자 : 0.15 거주자: 0.6	작업자 : 0.15 거주자: 0.6
Density of cover material(g/cm ³)	1.5	1.5	1.5
Cover erosion rate(m/y)	0.001	0.001	0.001
Density of contaminated zone(g/cm ³)	1.5	2	0.53
Contaminated zone erosion(m/y)	0.001	0.001	0.001
Contaminated zone total porosity	0.4	0.4	0.4
Contaminated zone field capacity	0.2	0.2	0.2
Contaminated zone hydraulic conductivity(m/y)	10	10	10
Contaminated zone b parameter	5.3	5.3	5.3
Evapotranspiration coefficient	0.5	0.5	0.5
Wind speed(m/s)	2	2	3.88
Precipitation(m/y)	1.4	1.4	1.44
Irrigation(m/y)	0.2	0.4	0.4
Irrigation mode	Overhead	Overhead	Overhead
Runoff coefficient	0.2	0.2	0.2
Watershed area for nearby stream or pond	1,000,000	1,000,000	1,000,000
Accuracy for water/soil computations	0.001	0.001	0.001

1. Cover Depth

자체처분 폐기물 매립 후 피폭선량 저감 및 매립층 안정화를 위해 복토를 실시하게 된다. 일반적으로 자체처분 매립장은 사업장폐기물 매립시설을 이용하기 때문에 폐기물관리법 시행규칙 제42조 「폐기물처리시설의 관리기준」 및 별표 11 「폐기물 처분시설 또는 재활용시설의 관리기준」의 규정을 준수하여 복토를 수행하게 된다. 폐기물관리법의 복토관련 규정을 표 5-9에 정리하였다.

표 5-9 자체처분 폐기물 복토 관련 폐기물관리법 규정

복토층	폐기물관리법 복토관련 규정
일일복토	매립작업 종료 후 15 cm 이상
중간복토	매립작업이 7일 이상 중단되는 때 30 cm 이상
최종복토	<ul style="list-style-type: none"> • 가스배제층 : 30 cm 이상 • 차단층 : 점토, 점토광물 혼합토 등으로 두께 45cm 이상 또는 두께 30 cm 이상 및 합성고분자 차수막 설치 • 배수층 : 모래, 재생골재 등을 두께 30 cm 이상 설치하거나 토목합성수지를 설치 • 식생대층 : 식물심기와 생장이 가능한 양질의 토양으로 60 cm 이상 설치

매립장 복토층이 두꺼울수록 부지 잔류방사능에 의한 외부 피폭선량은 감소하며, 복토층 침식으로 인해 오염층(매립층)이 외부로 누출되기까지 소요되는 시간이 길어진다. KINS/RR-144 보고서는 복토층의 두께를 매립작업자는 0.15 m, 거주자는 0.6 m로 가정하였고, 원전 자체처분 안전성 평가 사례에서는 거주자에 대해 0.3 m, 0.5 m, 0.6 m 등을 적용하였다. 복토층 두께에 따른 민감도 분석결과, 0.6 m 이하에서는 선량변화가 다소 있었으나, 두께를 증가 시킬수록 차폐효과 및 복토층 침식 등의 변수가 평가에 미치는 영향이 낮아져 선량변화가 미미하였다. 본 연구에서는 KINS/RR-144 보고서 및 폐기물관리법 복토관련 규정을 토대로 다음과 같이 가정하였다.

1) 매립작업자

폐기물관리법 시행규칙에 따르면 일일복도는 15 cm, 매립작업 7일 이상 중단 시 30 cm 이상 복토를 하도록 규정하고 있다. 이를 근거로 매립작업자 선량평가를 위한 복토층 두께를 일일복토 요건인 0.15 m로 가정하였다.

2) 매립장 폐쇄 후 거주자

매립시설의 사용이 종료된 후에는 폐기물관리법 시행규칙에 따라 최종복토로 식생대층은 반드시 설치하여야 하며, 그 외 침출수나 가스발생여부에 따라 배수층, 차단층, 가스배제층 등이 추가적으로 설치되어야 한다. 이를 근거로 매립장 폐쇄 후 거주자 선량평가를 위한 복토층 두께는 식생대층 최소두께인 0.6 m를 가정하였다. 실제 매립시설 운영 시 자체처분 폐기물 매립 이후에도 일반폐기물이 추가로 매립되기 때문에 실제 복토층의 두께는 가정보다 더 두꺼울 것으로 예상된다.

표 5-10 복토층 두께에 따른 민감도 분석결과(성인 기준)

(mSv/y)

구분		매립 후 경과기간				
		0년	1년	5년	10년	30년
복토층 두께	0.3 m	5.748E-04	5.749E-04	1.113E-04	6.433E-05	1.485E-05
	0.6 m	2.822E-04	4.073E-04	8.796E-06	3.077E-06	6.940E-07
	1.2 m	2.442E-04	3.905E-04	3.599E-06	1.397E-08	3.773E-10

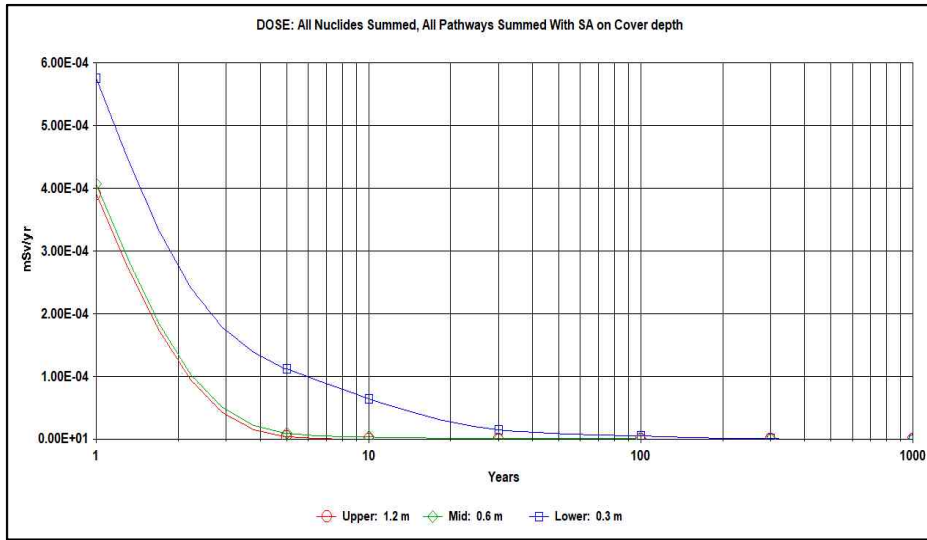


그림 5-8 복토층 두께에 따른 민감도 분석결과(성인 기준)

2. Density of Cover Material

폐기물관리법에 따르면 매립시설의 복토는 투수성이 낮은 흙, 재활용 토사 등을 사용하도록 규정하고 있다. RESRAD에서는 복토층 토양의 밀도를 1.5 g/cm^3 로 설정하고 있으며, 표 5-11에 제시된 NUREG/CR-6697의 토양 건조밀도는 $1.46 \sim 1.70 \text{ g/cm}^3$ 범위로 토양 종류별 큰 차이가 없었다. 표 5-12와 같이 복토층 밀도를 0.5 g/cm^3 , 1.5 g/cm^3 , 3 g/cm^3 로 증가시키면서 민감도 분석한 결과, 밀도가 증가할수록 차폐효과로 인해 예상 피폭선량이 감소하였으나, 1.5 g/cm^3 이상에서는 평가결과에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 민감도 분석결과와 표 5-11의 토양 건조밀도(평균 1.55 g/cm^3)를 고려하여 RESRAD 기본값 1.5 g/cm^3 을 적용하였다.

표 5-11 NUREG/CR-6697 토양 건조밀도

토양종류	건조밀도(g/cm ³)	토양종류	건조밀도(g/cm ³)
Sand	1.51	Silt	1.43
Loamy Sand	1.56	Clay Loam	1.56
Sandy Loam	1.56	Silty clay loam	1.51
Sandy Clay Loam	1.56	Sandy clay	1.64
Loam	1.51	Silty clay	1.70
Silt Loam	1.46	Clay	1.64

표 5-12 복토층 밀도에 따른 민감도 분석결과(성인 기준)

(mSv/y)

구분		매립 후 경과기간				
		0년	1년	5년	10년	30년
복토층 밀도	0.75 g/cm ³	4.839E-04	5.864E-04	1.214E-04	6.805E-05	1.382E-05
	1.5 g/cm ³	2.822E-04	4.073E-04	8.796E-06	3.077E-06	6.940E-07
	3 g/cm ³	2.742E-04	4.001E-04	4.327E-06	5.428E-07	2.989E-07

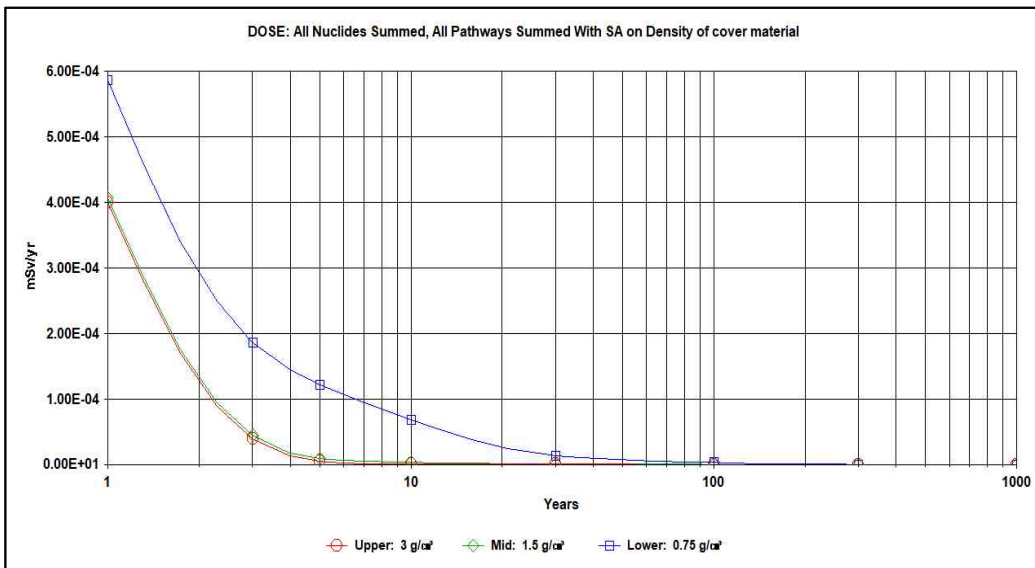


그림 5-9 복토층 밀도 민감도 분석결과(성인 기준)

3. Cover Erosion Rate

복토층의 침식률은 외부환경 변화(유수, 바람 등)에 따라 매립층 상부로부터 단위시간당 제거되는 복토층의 평균체적이다. 침식률이 높은 경우 매립층이 외부로 노출되는 시점이 빨라지고, 복토층에 의한 차폐효과가 감소하여 방사선(능) 준위가 증가하게 된다. 복토층 침식률에 대한 민감도 분석결과, 피폭선량에 영향을 거의 주지 않는 것으로 확인되었다. 따라서 RESRAD 기본값 0.001 m/y를 준용하였다.

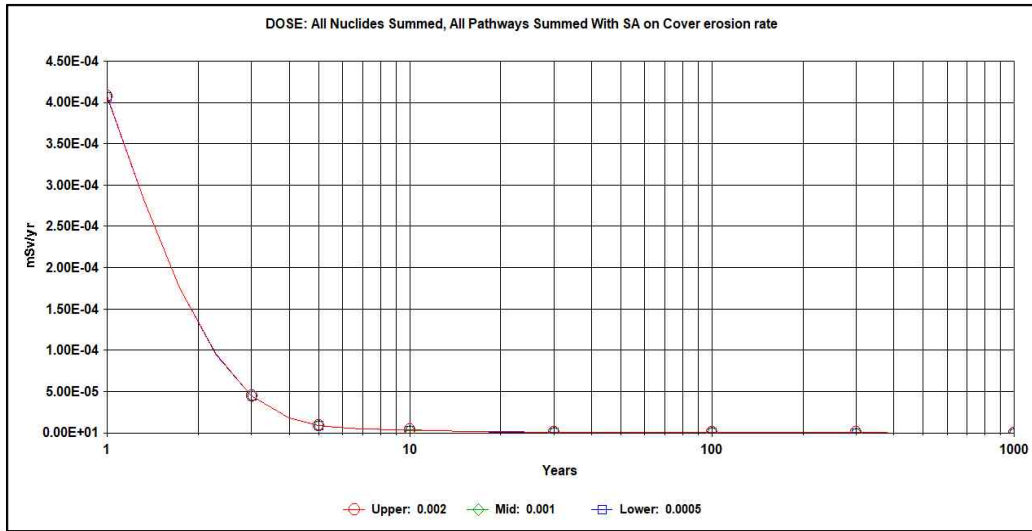


그림 5-10 복토층 침식률 민감도 분석결과(성인 기준)

4. Density of Contaminated Zone

RESRAD 프로그램은 기본적으로 오염부지의 복원기준을 도출하기 위해 개발되었기 때문에 오염지역(매립층) 밀도의 기본값을 복토층과 동일하게 1.5 g/cm³으로 설정하고 있다. 그러나 실제 자체처분 폐기물의 밀도는 매립되는 폐기물 종류에 따라 달라지며, 매립 및 복토 과정의 다짐작업에 의해 겉보기 밀도가 증가하고, 매립층 높이는 감소하게 된다. 그러나 이를 보정하는 것은 현실적으로 불가능하

다. 따라서 본 연구에서는 다짐작업에 의한 밀도변화를 고려하지 않고, 신폴 활성화탄의 시험성적서를 근거로 매립층의 밀도를 0.53 g/cm³으로 가정하였다. 매립층 밀도에 따른 민감도 분석을 실시한 결과, 그림 5-11과 같이 밀도가 증가할수록 피폭선량이 증가하였으며, 매립 후 수년간은 밀도에 대한 민감도가 높은 것으로 나타났다.

표 5-13 오염지역 밀도에 따른 민감도 분석결과(성인 기준)

(mSv/y)

구분		매립 후 경과기간				
		0년	1년	5년	10년	30년
오염지역 밀도	0.53 g/cm ³	2.822E-04	4.073E-04	8.796E-06	3.077E-06	6.940E-07
	0.75 g/cm ³	3.932E-04	5.722E-04	1.032E-05	3.088E-06	6.962E-07
	1.5 g/cm ³	7.715E-04	1.135E-03	1.548E-05	3.110E-06	6.987E-07
	3 g/cm ³	1.528E-03	2.260E-03	2.580E-05	3.143E-06	7.000E-07

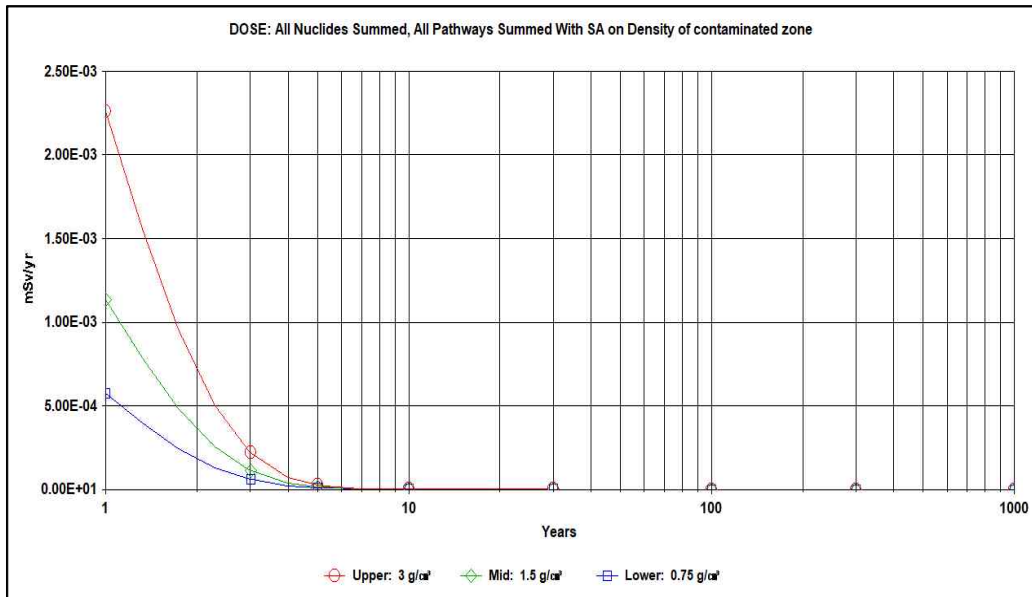


그림 5-11 오염지역 밀도 민감도 분석결과

5. Contaminated Zone Erosion Rate

오염지역의 침식률은 외부환경 변화에 따라 단위시간당 제거되는 매립층의 평균체적을 의미하며, RESRAD는 기본값을 복토층의 침식률과 동일한 값으로 설정하였다. 실제 복토층이 완전히 침식된 이후 매립층의 침식이 가능하기 때문에 평가에 영향을 미치는 시점은 상당히 지연될 것으로 판단되며, 민감도 분석결과는 그림 5-12과 같이 피폭선량에 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 RESRAD 기본값 0.001 m/y를 적용하였다.

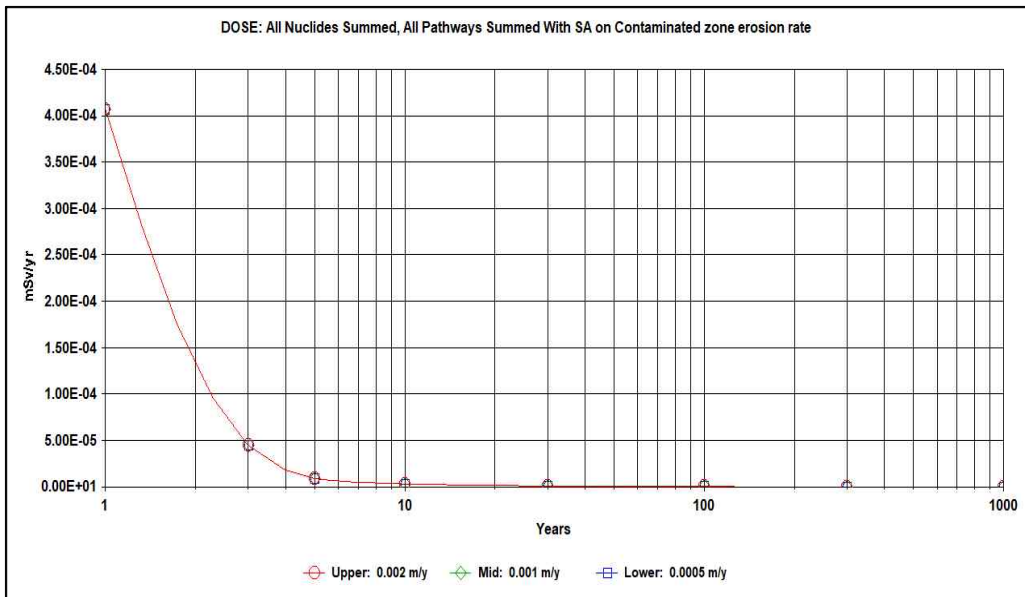


그림 5-12 오염지역 침식률 민감도 분석결과

6. Contaminated Zone Total Porosity

오염지역 총 다공도는 매립층 다공질 물질의 특성을 나타내는 양으로서 공극을 포함한 물질의 총 부피에 대한 물질의 공극 총 부피의 비율로 정의되며, 다음과 같은 수식으로 나타낼 수 있다.

$$P = \frac{V_p}{V_t}$$

P : 총 다공도

V_p : 물질 공극의 총 부피

V_t : 물질의 총 부피

오염지역 총 다공도에 대한 민감도 분석결과, 총 다공도가 증가함에 따라 피폭선량이 증가하여 평가결과에 다소 영향을 미치는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 매립층에 대한 총 다공도의 국내 실험 데이터를 확보 할 수 없음에 따라 RESRAD 기본값 0.4를 적용하였다.

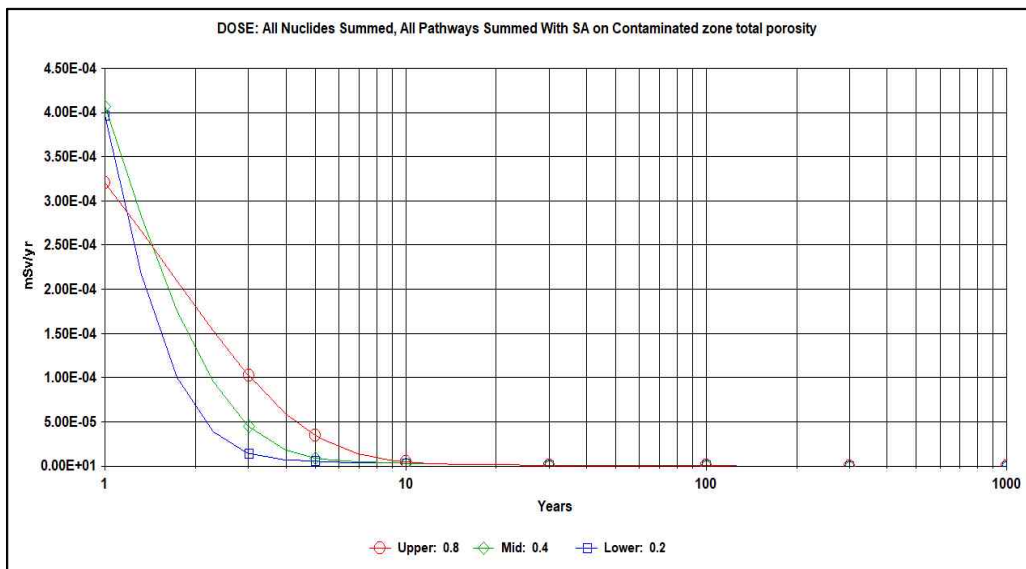


그림 5-13 오염지역 총 다공도 민감도 분석결과

7. Contaminated Zone Field Capacity

포장 용수량은 토양이 물로 포화된 후 과잉의 중력수가 물의 하향이동이 현저하게 감소된 때의 함수량으로 정의된 수분항수를 말한다. 오염지역 포장 용수량에 대한 민감도 분석결과, 피폭선량에 큰 영향을 미치지 않았으며, 본 연구에서는 RESRAD 기본값 0.2를 준용하였다.

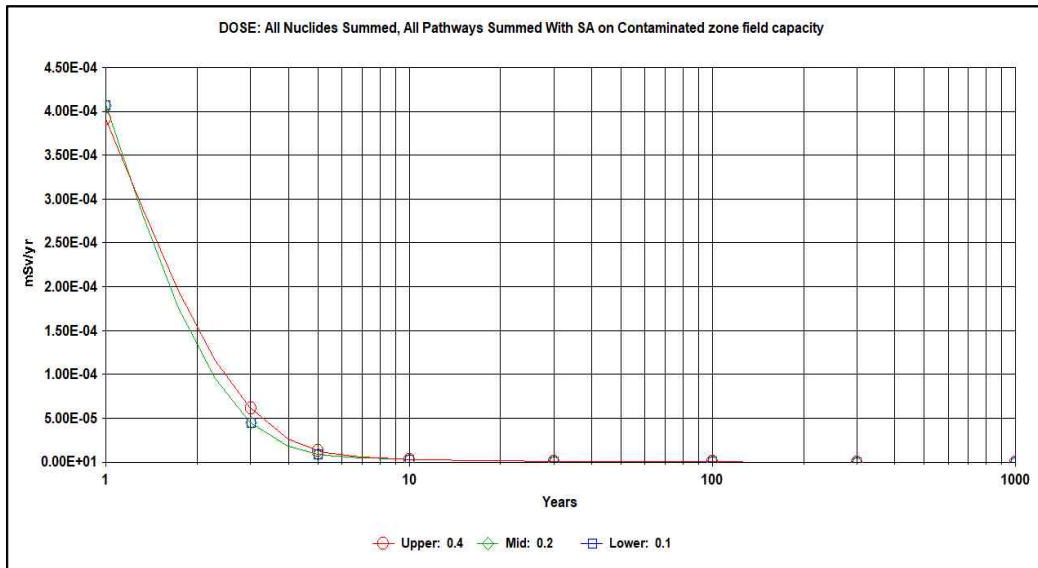


그림 5-14 오염지역 포장 용수량 민감도 분석결과

8. Contaminated Zone Hydraulic Conductivity

수리전도도는 매립층 내에서 물 흐름의 용이한 정도를 나타내는 척도이며, 지질특성에 따라 그 편차가 매우 크다. 민감도 분석결과는 피폭선량에 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났으며, 매립지 특성에 따른 수리전도도의 추정이 어렵고 국내 데이터를 확보할 수 없음에 따라 본 연구에서는 RESRAD 기본값 10 m/y를 준용하였다.

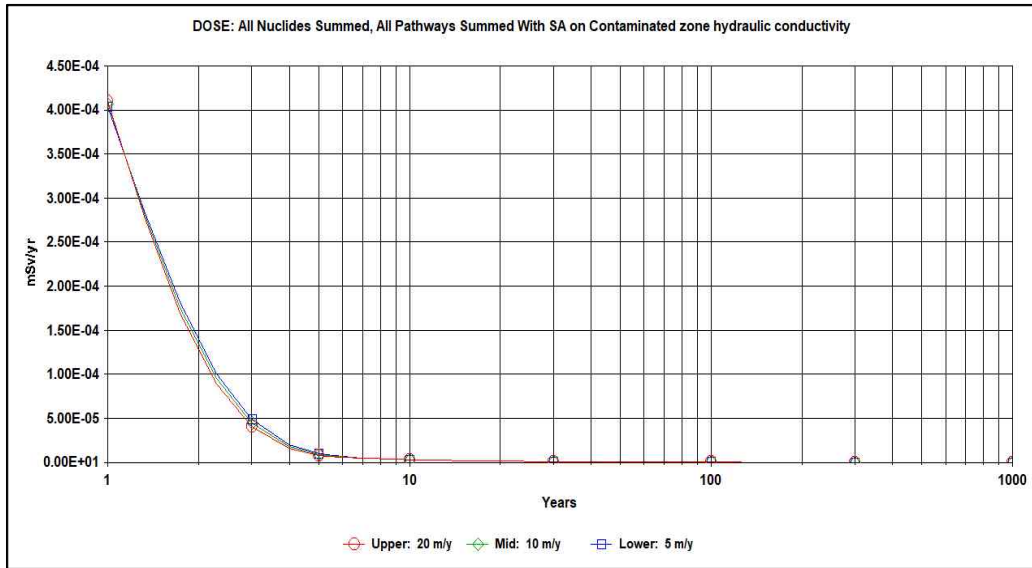


그림 5-15 오염지역 수리전도도 민감도 분석결과

9. Contaminated Zone b Parameter

오염지역의 b 파라미터는 매립층으로부터 방사성핵종의 침출 속도를 계산하기 위한 인자이며, ANL/EVS/TM-14/4에 기술된 토양 종류별 b Parameter를 표 5-14에 정리하였다. RESRAD에서는 매립층, 포화층 및 불포화층에 대한 b Parameter를 기본값으로 5.3을 적용하였으며, 본 연구에서는 매립되는 폐기물에 종류에 따른 값을 추정하기 어렵고, 민감도 분석결과, 피폭선량 평가에 미치는 영향도 크지 않으므로 RESRAD 기본값 5.3을 입력값으로 적용하였다.

표 5-14 토양 종류별 b Parameter (Clapp and Hornberger, 1978)

토양종류	b Parameter	토양종류	b Parameter
Sand	4.05	Clay Loam	8.52
Loamy Sand	4.38	Silty clay loam	7.75
Sandy Loam	4.90	Sandy clay	10.40
Sandy Clay Loam	7.12	Silty clay	10.40
Loam	5.39	Clay	11.40
Silty Loam	5.30	-	-

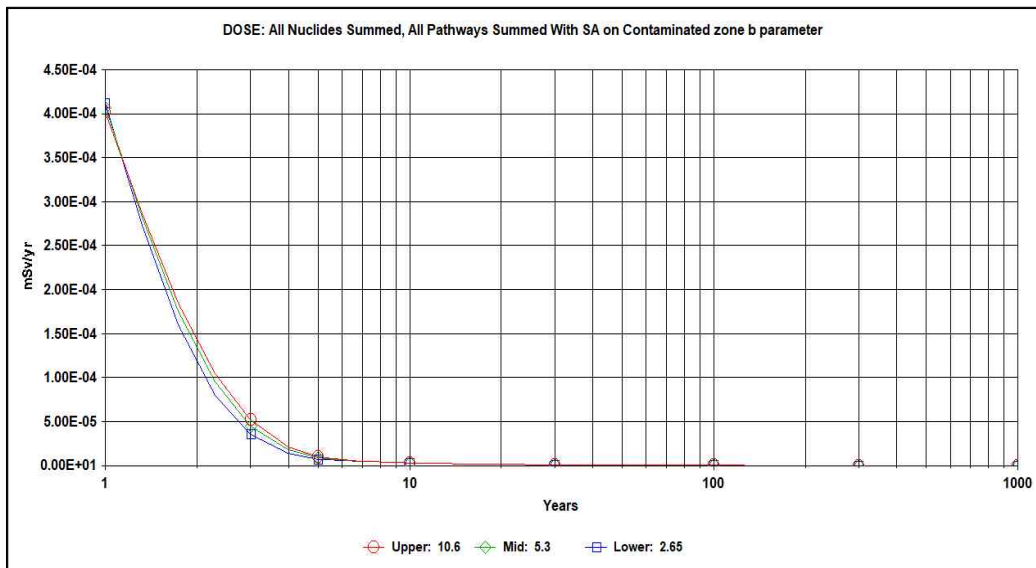


그림 5-16 오염지역 b 파라미터 민감도 분석결과

10. Evapotranspiration Coefficient

액체상태의 물이 기체상태로 변화하는 증발과 식물체 표면으로부터 증발 과정인 증산을 합하여 증발산이라 하며, 증발산계수는 일정기간 동안 상변화를 일으킨 물의 총 부피와 유효한 물의 총 부피 비율로 정의된다. RESRAD에서는 토양으로부터 물의 50%가 대기 중으로 증발산 된다는 가정을 통해 기본값을 0.5로 설정하였으

며, 민감도 분석결과는 피폭선량 평가 결과에 다소 영향을 미치는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 국내 부지특성 자료를 확보할 수 없음에 따라 RESRAD 기본값 0.5를 준용하였다.

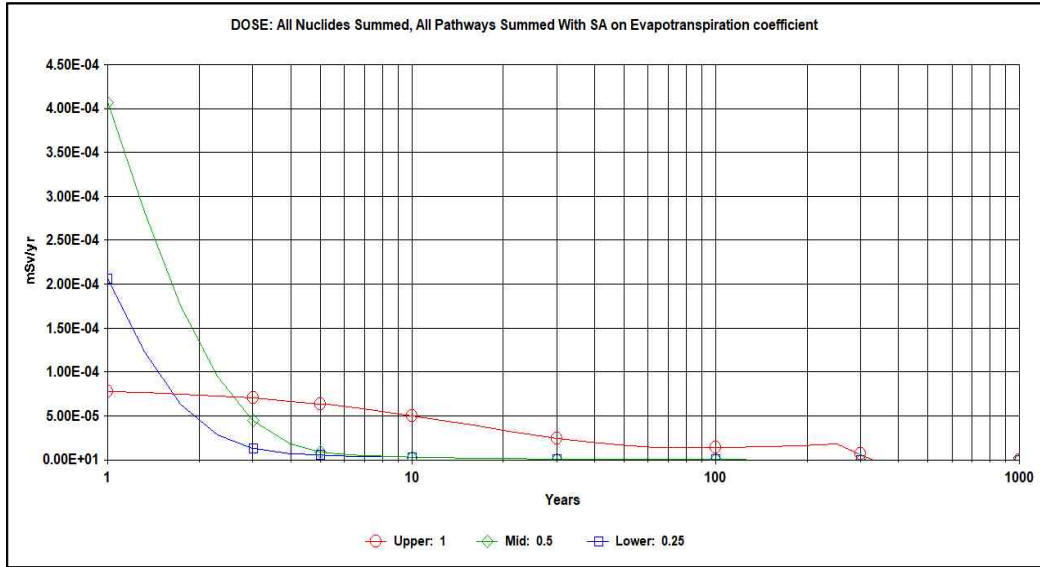


그림 5-17 증발산계수 민감도 분석결과

11. Wind Speed

국내 주요 자체처분 매립지 주변의 풍속을 조사한 결과 지역별로 다소 차이가 있었으며, 그 결과는 표 5-15와 같다. 5년 평균값은 2.86 m/s로 RESRAD 기본값 2.0 m/s 보다 약간 높았으며, 풍속에 따른 민감도 분석결과, 피폭선량 평가에 미치는 영향은 크지 않았다. 본 연구에서는 전남 여수에 소재하는 매립장을 예상 매립지로 가정하였으므로 여수시의 5년 평균 풍속인 3.88 m/s를 입력값으로 적용하였다.

표 5-15 국내 주요 자체처분 매립지 주변 풍속

출처 : 기상청 국가기후데이터센터, 단위 : m/s

구 분	2015년	2016년	2017년	2018년	2019년	평 균
울산시	2.2	2.1	2.2	2.2	2.1	2.16
부산시	3.1	3.1	3.2	3.2	3.1	3.14
여주시	3.9	3.9	3.9	3.9	3.8	3.88
영광군	2.3	2.3	2.2	2.1	1.7	2.12
평 균	2.9	2.9	2.9	2.9	2.7	2.86

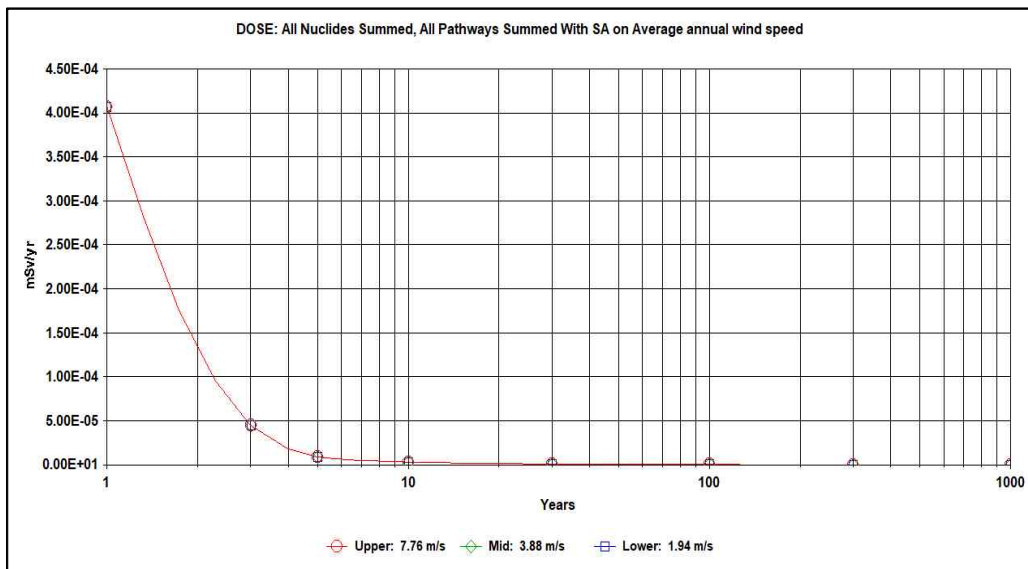


그림 5-18 풍속 민감도 분석결과

12. Precipitation

강수량은 단위기간동안 일정한 곳에 내리는 비, 눈, 우박 등의 평균수량을 의미한다. 기상청 국가기후데이터센터에서 발표한 최근 5년간 국내 주요 자체처분 매립장 주변의 강수량을 조사한 결과 지역별 편차가 다소 있었으며, 5년 평균값은 1.33 m/y로 RESRAD 기본값 1.4 m/y 보다 조금 낮았다. 강수량에 따른 민감

도 분석결과, 강수량이 증가할수록 수문학적 효과가 증대되어 매립 후 몇 년간
 은 피폭선량이 감소하는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 전남 여수에 소재하는
 매립장을 예상 매립지로 가정하였으므로 여수시의 5년 평균 강수량인 1.44 m/y
 를 입력값으로 적용하였다.

표 5-16 국내 주요 자체처분 매립지 주변 강수량

출처 : 기상청 국가기후데이터센터, 단위 : m/y

구분	2015년	2016년	2017년	2018년	2019년	평균
울산시	1.04	1.69	0.67	1.42	1.45	1.25
부산시	1.39	1.76	1.01	1.78	1.62	1.51
여수시	1.25	1.62	1.20	1.58	1.53	1.44
영광군	0.96	1.21	0.84	1.38	1.21	1.12
평균	1.16	1.57	0.93	1.54	1.45	1.33

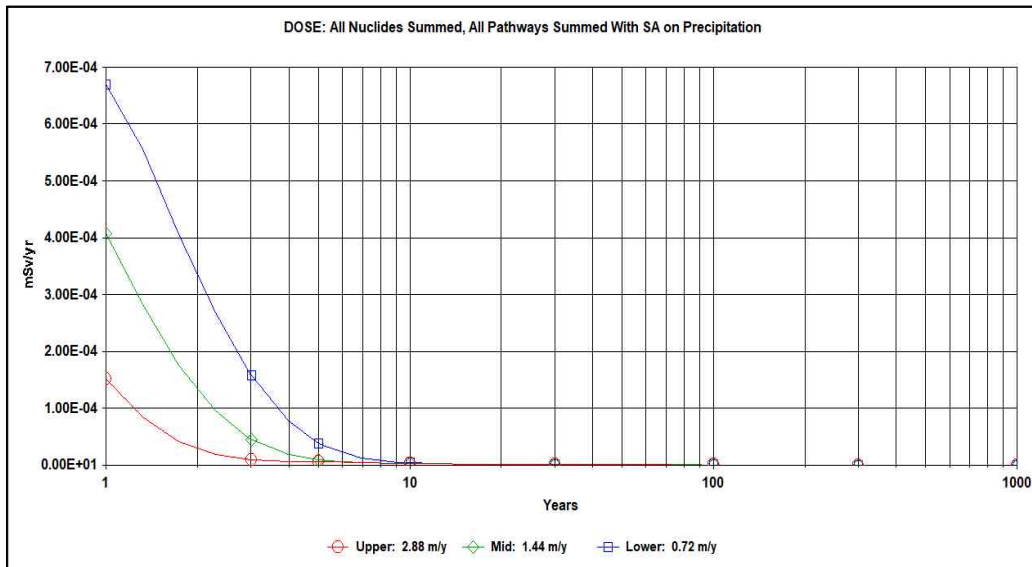


그림 5-19 강수량 민감도 분석결과

13. Irrigation

관개율은 단위기간동안 단위면적의 매립장 지표면으로 유입되는 평균수량을 의미하며, RESRAD 기본값은 0.2 m/y이다. 관개율에 대한 민감도 분석결과, 관개율이 높을수록 수문학적 효과로 인해 피폭방사선량이 다소 감소하는 것으로 나타났다. KINS/RR-144 보고서에서는 일본문헌을 참고하여 0.4 m/y를 적용하였는데, 이는 경작지 특성이 우리나라와 일본이 유사하다는 것을 고려한 것이다. 본 연구에서는 매립지 폐쇄 후 경작지로 재이용된다는 가정을 사용함에 따라 KINS/RR-144 보고서에서 채택한 0.4 m/y를 적용하였다.

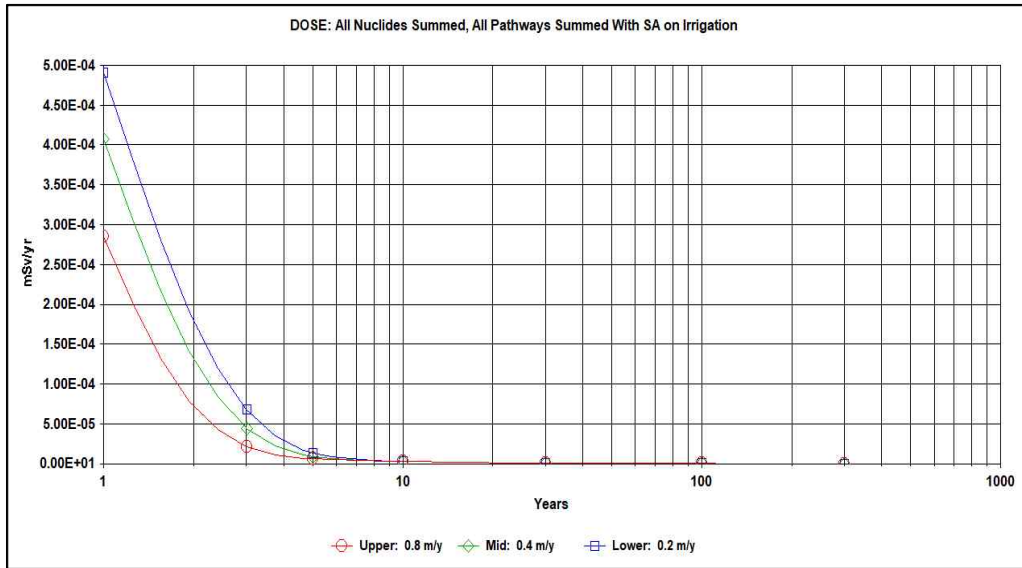


그림 5-20 관개율 민감도 분석결과

14. Irrigation Mode

관개방법은 수로를 통해 유입되는 Ditch Mode와 토양 상부에서 유입되는 Over head Mode 중에서 하나를 선택하여 평가를 수행할 수 있다. RESRAD 기본값은 Overhead Mode이며, 민감도 분석결과는 피폭선량에 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.

따라서 본 연구에서는 RESRAD 기본값인 Overhead Mode로 가정하였다.

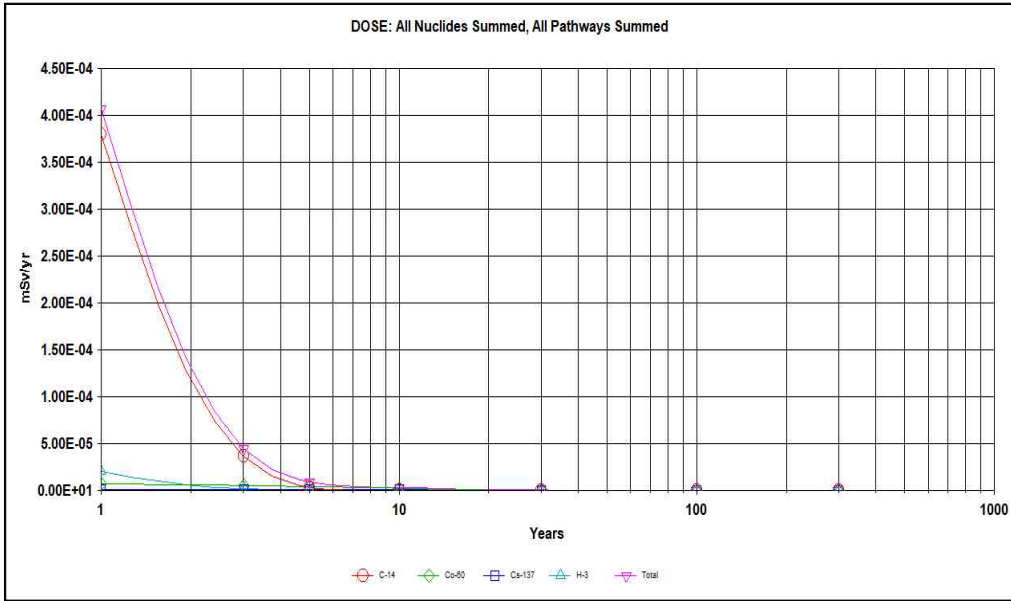


그림 5-21 Overhead Mode 민감도 분석결과

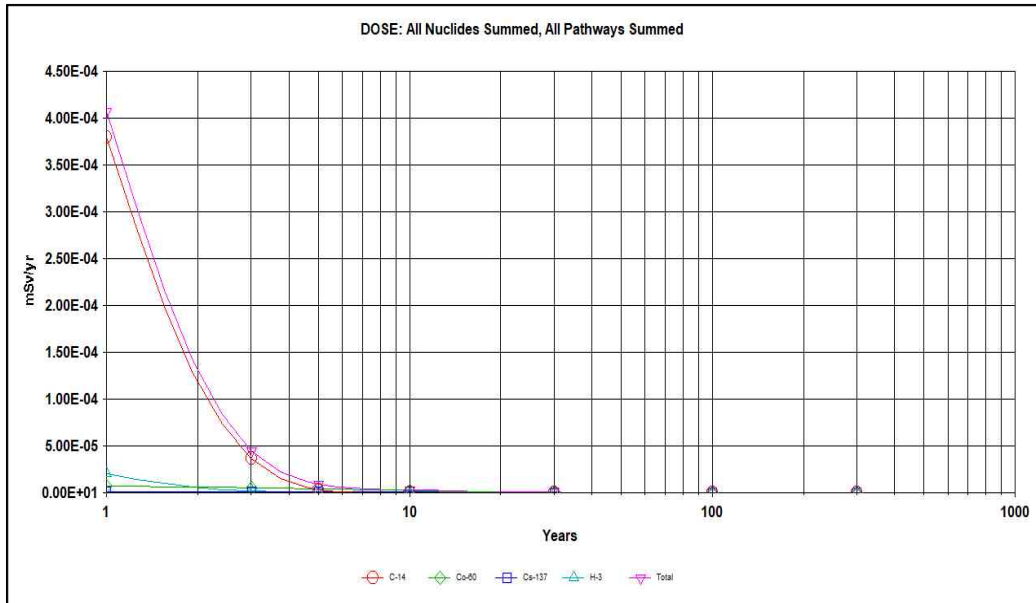


그림 5-22 Ditch Mode 민감도 분석결과

15. Runoff Coefficient

유출계수는 강수량에 대한 대기 중 증발 및 토양 내로 삼투되지 않고 빠져나간 유출량의 비율이며, ANL/EVS/TM-14/4 보고서 TABLE 3.2.1에 제시된 농업환경 유출계수를 표 5-17에 정리하였다. RESRAD는 일반적인 농업환경 유거계수의 평균값인 0.2를 기본값으로 설정하였으며, 민감도 분석결과는 유출계수가 높을수록 수문학적 효과가 감소하여 평가결과가 높게 나타났다. 본 연구에서는 국내 매립장 환경이 농업환경과 유사한 것을 고려하여 RESRAD 기본값 0.2를 입력값으로 적용하였다.

표 5-17 ANL/EVS/TM-14/4 일반적인 농업환경 유출계수

지표종류	유출계수
Flat land with average slopes of 0.3-0.9 m/mi	0.3
Rolling land with average slopes of 4.6-6.1 m/mi	0.2
Hilly land with average slopes of 46-76 m/mi	0.1
Open sandy loam	0.4
Intermediate combinations of clay and loam	0.2
Tight, impervious clay	0.1
Woodlands	0.2
Cultivated lands	0.1
평 균	0.2

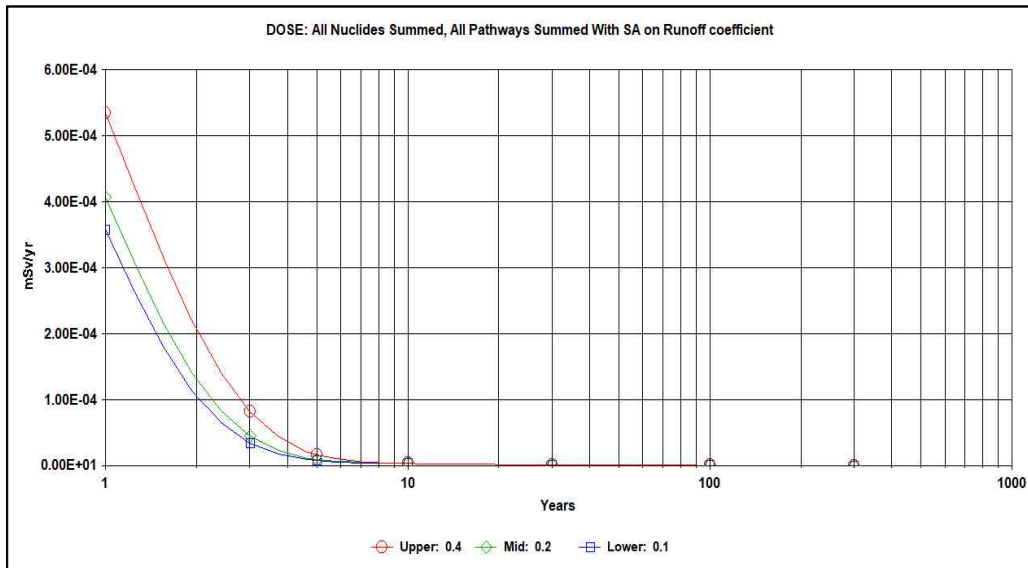


그림 5-23 유출계수 민감도 분석결과

16. Watershed Area for nearby Stream or Pond

분수계는 빗물이 서로 다른 하천으로 흘러내리는 하천지역의 경계(등고선)가 하천으로 가로막혀 같은 수역으로 배수되는 지역을 말하며, 부지특성에 민감하여 선량평가에 주요한 영향을 미치는 인자이다. 민감도 분석결과는 분수계의 면적이 넓을수록 수문학적 효과로 인해 피폭선량이 감소하는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 국내 매립장의 분수계 특성자료를 확보할 수 없음을 따라 RESRAD 기본값인 10^6 m^2 를 준용하였다.



그림 5-24 분수계

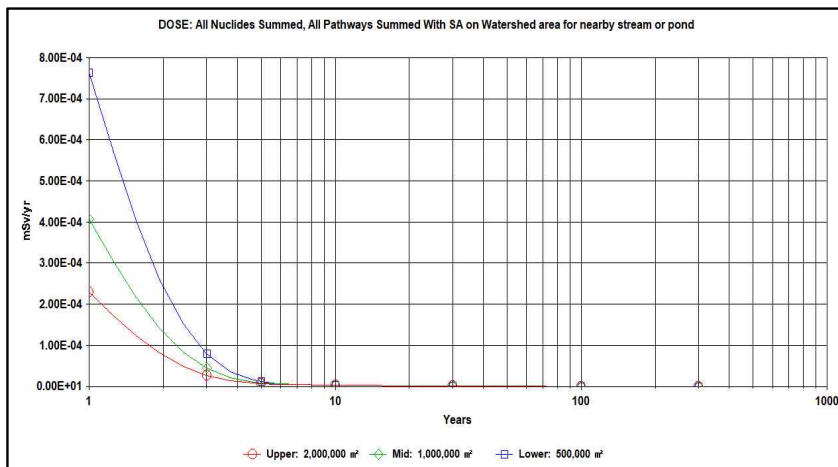


그림 5-25 인접 하천 및 호수의 분수계 민감도 분석결과

제6절 포화층의 수문학적 입력자료

포화층이란 대기압 보다 높은 압력을 가진 물에 의해서 모든 공극이 채워져 있는 지하수에 의해서 포화되어 있는 지층을 말한다. 포화층에 대한 수문학적 입력인자 적용값은 표 5-18에 제시하였으며, 대부분 복토층의 입력인자를 준용하고, 국내 데이터 확보가 어려운 인자는 RESRAD 기본값을 적용하였다.

표 5-18 포화층의 수문학적 입력자료

입력인자	RESRAD 7.2	KINS/RR-144	입력값
Density saturated zone(g/cm ³)	1.5	1.5	1.5
saturated zone total porosity	0.4	0.4	0.4
saturated zone effective porosity	0.2	0.2	0.2
saturated zone field capacity	0.2	0.2	0.2
saturated zone hydraulic conductivity(m/y)	100	100	100
saturated zone hydraulic gradient	0.02	0.02	0.02
saturated zone b parameter	5.3	5.3	5.3
Water table drop rate(m/y)	0.001	0.001	0.001
Well pump intake depth(m)	10	17	17
Model for water transport parameter	물질수지모델	물질수지모델	물질수지모델
Well pumping rate(m ³ /y)	250	4,000	2,000

1. Well Pump Intake Depth

우물펌프 유입구 깊이는 지표면에서 지하수까지의 관정의 깊이로 정의할 수 있으며, RESRAD 기본값은 10 m이다. KINS/RR-144 보고서는 1999년 건설교통부가 발표한 ‘국내 지하수 관정에 관한 통계자료’ 중 국내 지하수 관정의 50% 정도가

깊이 20 m이하로 조사된 결과를 근거로 대수층 깊이 3 m로 고려하여 우물펌프 유입구 깊이를 17 m로 가정하였다. 최근 통계자료인 ‘2018년 환경부 지하수 연보’에 따르면 국내 지하수 관정의 약 40% 정도가 깊이 20 m 이하인 것으로 조사되었다. 따라서 본 연구에서도 KINS/RR-144 보고서에서 제시한 값을 준용하였으며, 민감도 분석결과, 평가에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 나타났다.

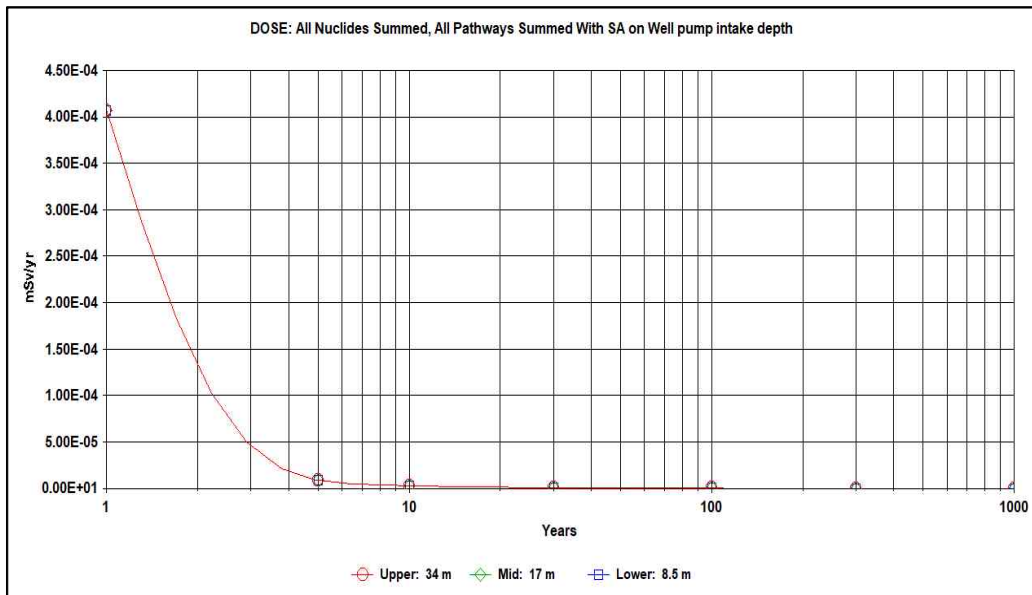


그림 5-26 우물펌프 유입구 깊이 민감도 분석결과

2. Model For Water Transport Parameter

RESRAD는 매립장 토양 내 물의 이동현상 모델을 오염지역(매립층) 면적이 1,000 m² 이하의 협소한 경우 Mass Balance 모델을 적용하고, 오염지역이 넓은 매립층의 경우 Non-dispersion 모델을 적용하도록 권고하고 있다. 본 연구에서는 매립 폐기물의 오염지역 면적을 3.21 m²로 가정하였기에 Mass Balance 모델을 적용하였으며, 민감도를 분석한 결과는 두 모델 모두 평가에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 나타났다.

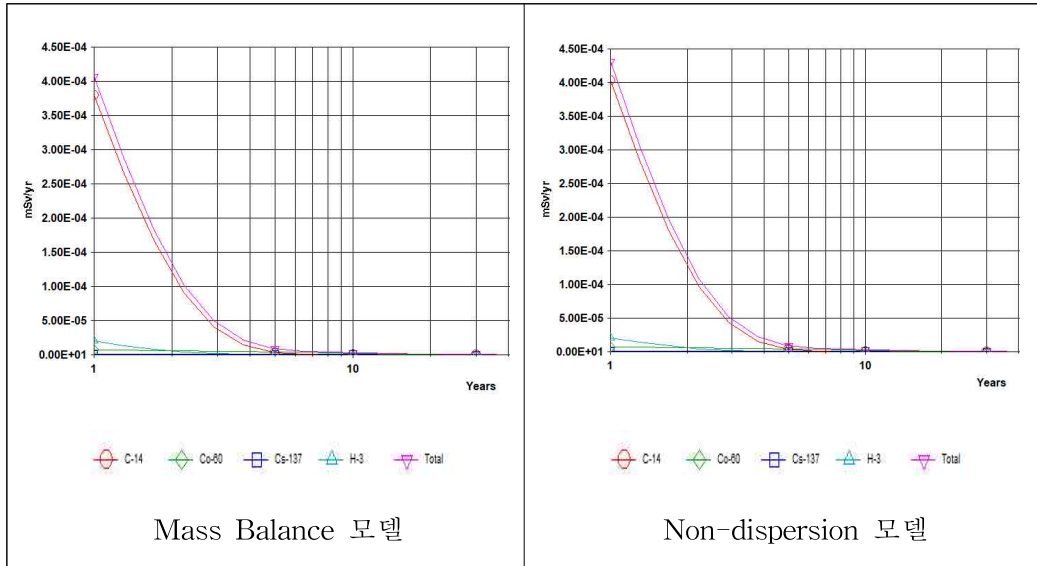


그림 5-27 물의 이동현상 평가모델 민감도 분석결과

3. Well Pumping Rate

우물의 양수율은 사용하기 위해 채수되는 우물물의 연간 부피로 정의되며, 연간 지하수 이용량과 같다. RESRAD 기본값은 250 m^3/y 이며, KINS/RR-144 보고서는 1999년 건설교통부 조사 통계자료를 근거로 4,000 m^3/y 를 적용하였다. ‘환경부 2018년 지하수 조사연보’에 따르면 국내 공당 지하수 이용량은 표 5-19에 제시된 바와 같으며, 전국 평균 공당 연이용량은 상수도 보급률이 높아짐에 따라 감소한 것으로 보인다. 민감도 분석결과, 피폭선량에 미치는 영향은 크지 않았으며, 본 연구에서는 최근 국내 통계자료인 ‘환경부 2018년 지하수 조사연보’에 근거하여 전국 평균값 2,000 m^3/y 를 입력값으로 적용하였다.

표 5-19 공당 지하수 이용량(환경부 2018년 지하수 조사연보)

시도	개소수	공당 연이용량 ($\text{m}^3/\text{년}/\text{공}$)	공당 일이용량 ($\text{m}^3/\text{일}/\text{공}$)
전국	1,690,165	2,002	5.5
서울	7,978	2,602	7.1
부산	7,282	3,983	10.9
울산	6,106	5,344	14.6
경남	98,519	3,620	9.9
경북	128,920	3,557	9.7
전남	264,618	1,770	4.8
전북	247,412	1,225	3.4

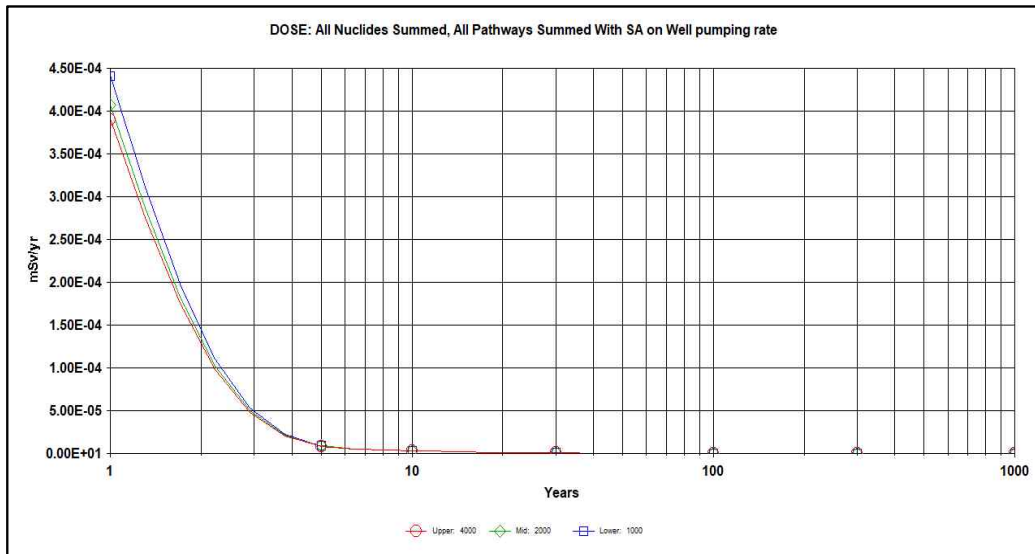


그림 5-28 우물의 양수율 민감도 분석결과

제7절 불포화층의 수문학적 입력자료

불포화층이란 지하수면의 상부층이며 지하수에 의해 포화되어 있지 않거나 불연속적으로 포화되어 있는 지층으로 정의된다. 입력인자는 대부분 복토층의 입력자료를 준용하였고, 국내 데이터 확보가 어려운 인자는 RESRAD 기본값을 적용하였다.

표 5-20 불포화층의 수문학적 입력자료

입력인자	RESRAD 7.2	KINS/RR-144	입력값
Unsaturated zone thickness	4 m	3 m	3 m
Unsaturated zone density	1.5 g/cm ³	1.5 g/cm ³	1.5 g/cm ³
Unsaturated zone total porosity	0.4	0.4	0.4
Unsaturated zone effective porosity	0.2	0.2	0.2
Unsaturated zone field capacity	0.2	0.2	0.2
Unsaturated zone hydraulic conductivity	10 m/y	10 m/y	10 m/y
Unsaturated zone b parameter	5.3	5.3	5.3

1. Unsaturated Zone Thickness

불포화층의 두께는 매립 전 지표면에서 지하수면까지의 두께를 의미한다. 적용사례를 살펴보면 KINS/RR-144 보고서는 일본에서 조사된 자료를 근거로 3 m를 가정하였고, 고리1호기 부지 규제해제 안전성평가에서는 3.82 m를 적용하였다. 민감도 분석결과, 불포화층이 두꺼울수록 선량평가 결과가 높게 나타났다. 본 연구에서는 KINS/RR-144 적용값 3 m를 준용하였다.

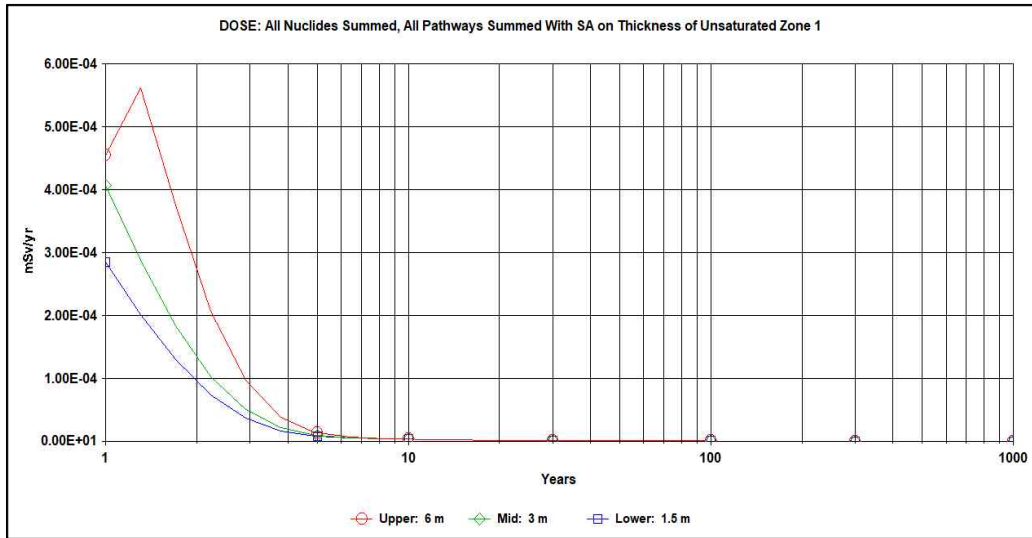


그림 5-29 불포화층 두께 민감도 분석결과

제8절 거주, 호흡 및 외부피폭 입력자료

거주, 호흡 및 외부피폭 입력인자에 대해 KINS/RR-144 보고서는 주로 INDAC 1.0 자료를 적용하였다. 본 연구에서는 대부분 규제지침 KINS/RG-N02.02 「주민 피폭선량 평가」 자료를 준용하고, 국내 데이터 확보가 어려운 인자는 RESRAD 기본값을 적용하였다.

표 5-21 거주, 호흡 및 외부피폭 입력자료(작업자/거주자)

입력인자	RESRAD 7.2	KINS/RR-144	입력값
Inhalation rate(m^3/y)	8,400	10,519/7,400	10,519/표 5-22
Mass loading for inhalation(g/m^3)	1.0E-04	5.0E-04/6.0E-06	6.0E-04/3.5E-05
Exposure duration	30	30	30
Indoor dust filtration factor	0.4	0.4	0.4
External gamma shielding factor	0.7	0.5	0.5
Indoor time fraction	0.5	0.057/0.5	0.057/0.5
Outdoor time fraction	0.25	0.171/0.25	0.171/0.25
Shape of the contaminated zone	Circular	Circular	Circular

1. Inhalation rate

호흡률은 연간 공기 흡입량(m^3/y)이며, 사람의 활동 수준, 나이, 몸무게, 성별 및 일반적인 신체 조건에 따라 달라진다. 본 연구에서는 매립작업자 및 매립장 폐쇄 후 거주자로 구분하여 다음과 같이 적용하였다.

1) 매립작업자

매립작업자 호흡률은 RESRAD에서는 제시되지 않으며, 본 연구에서는 ICRP-66의 가벼운 작업조건(Light work condition) 작업자 호흡률($1.2 \text{ m}^3/\text{h}$)을 근거로 산출하여 $10,519 \text{ m}^3/\text{y}$ 를 적용하였다.

2) 매립장 폐쇄 후 거주자

RESRAD는 기본값으로 $8,400 \text{ m}^3/\text{y}$ 를 설정하고 있으며, KINS/RR-144 보고서는 INDA C 1.0의 일반성인의 호흡률 $7,400 \text{ m}^3/\text{y}$ 를 적용하였다. 본 연구에서는 6개 연령군별 선량평가를 위해서 표 5-22 KINS/RG-N02.02 「주민 피폭선량 평가」 연령별 호흡률 자료를 적용하였다.

표 5-22 KINS/RG-N02.02 연령별 호흡률 입력자료

구분	3개월	1세	5세	10세	15세	성인
Inhalation rate(m ³ /y)	1,100	1,900	3,200	5,600	7,400	8,100

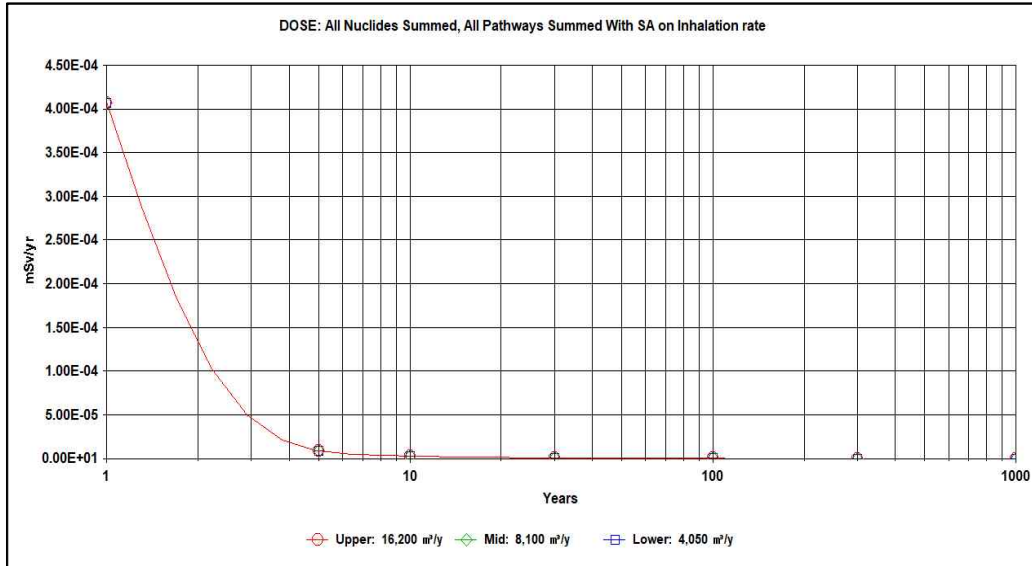


그림 5-30 호흡률 민감도 분석결과

2. Mass Loading for Inhalation

공기 중 토양(분진)입자의 농도는 시나리오에 가정된 매립장의 위치 및 조건에 따라 크게 변동한다. 최근 국내자료를 조사한 결과, 전국 5년 평균농도(PM10 기준)는 약 3.5E-05 g/m³이었으며, RESRAD는 미국 농장의 평균 분진농도를 근거로 기본값을 1.04E-4 g/m³로 설정하였다. 본 연구에서는 실제 매립작업 시 발생되는 분진이 농장에 비해 많을 것으로 예상되므로, 매립작업자는 ANL/EVS/TM-14/4에 기술된 건설현장 분진농도를 참조하여 6.0E-04 g/m³을 적용하고, 매립장 폐쇄 후 거주자는 국내 평균자료를 활용하여 3.5E-05 g/m³을 적용하였다.

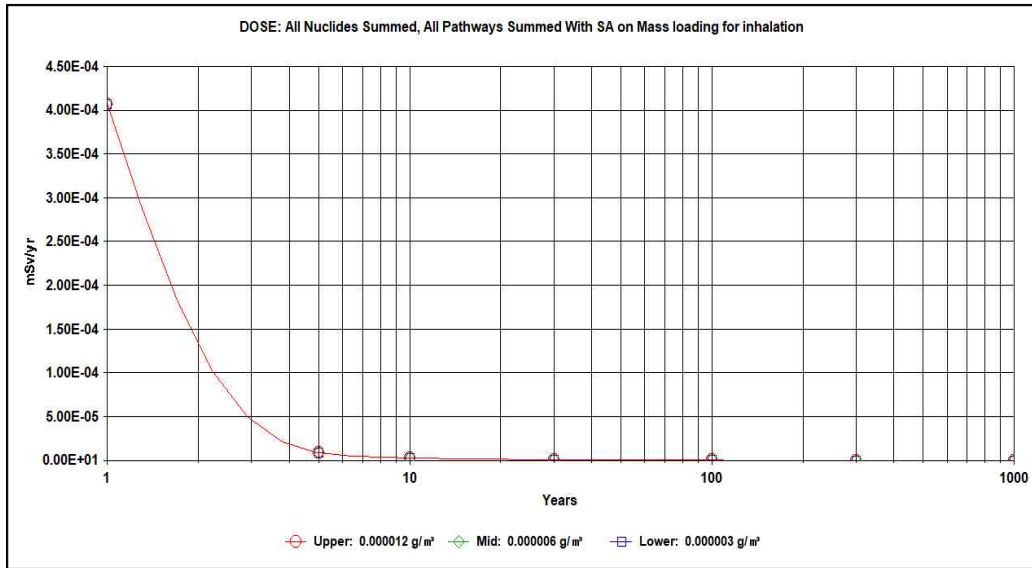


그림 37 5-31 분진농도 민감도 분석결과

3. Indoor Dust Filtration Factor

실내 분진 여과계수는 매립장 건물 내부의 분진농도와 외부 분진농도의 비율이다. 실제 건물은 방사성 분진의 실내 유입을 막아주는 보호막을 제공함으로써 실내·외의 체류기간에 따른 유효선량 계산에 분진 여과효과를 고려하여야 한다. RESRAD는 실내 분진 수준이 실외 수준의 40%라고 가정하여(Alzona, 1979) 기본값을 0.4로 설정하였다. 민감도 분석결과, 피폭선량에 미치는 영향이 미미하였으며, 본 연구에서는 RESRAD는 기본값인 0.4를 준용하여 평가하였다.

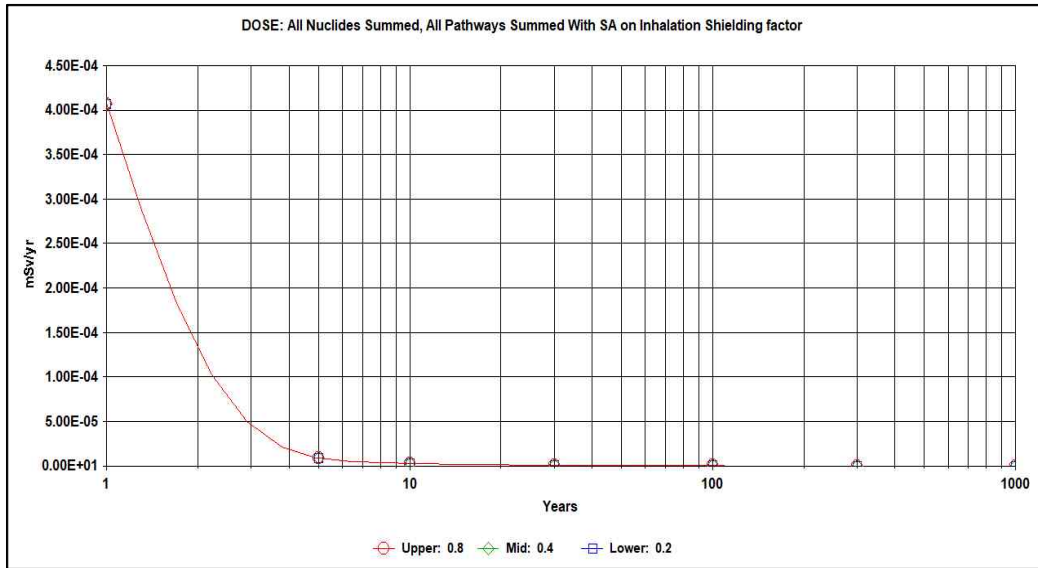


그림 5-32 분진 여과계수 민감도 분석결과

4. External Gamma Shielding Factor

외부 감마선 차폐계수는 매립장에 위치한 건물의 내부 감마선량률과 외부 감마선량률의 비율이며, 감마선 차폐에 대한 건물의 영향을 고려하기 위한 인자이다. RESRAD는 실내의 감마방사선 수준이 실외 감마선 수준보다 30% 낮다고 가정하여 기본값을 0.7로 설정하였으며, 일본에서는 감마선 차폐계수를 0.4(Co-60 기준)로 설정한 사례가 있었다. 민감도 분석결과, 피폭선량에 미치는 영향은 크지 않았으며, 본 연구에서는 KINS/RG-N02.02에서 제시된 주거용 건물의 차폐인자 개인평균값인 0.5를 적용하여 평가하였다.

표 5-23 건축 재료별 차폐계수(Dickson and Hamby, 2014)

건축재료	차폐계수	건축재료	차폐계수	건축재료	차폐계수
Brick wall	0.18	Steel wall	0.72	Steel roof	0.85
Wood wall	0.68	Asphalt roof	0.75	Terracotta roof	0.78

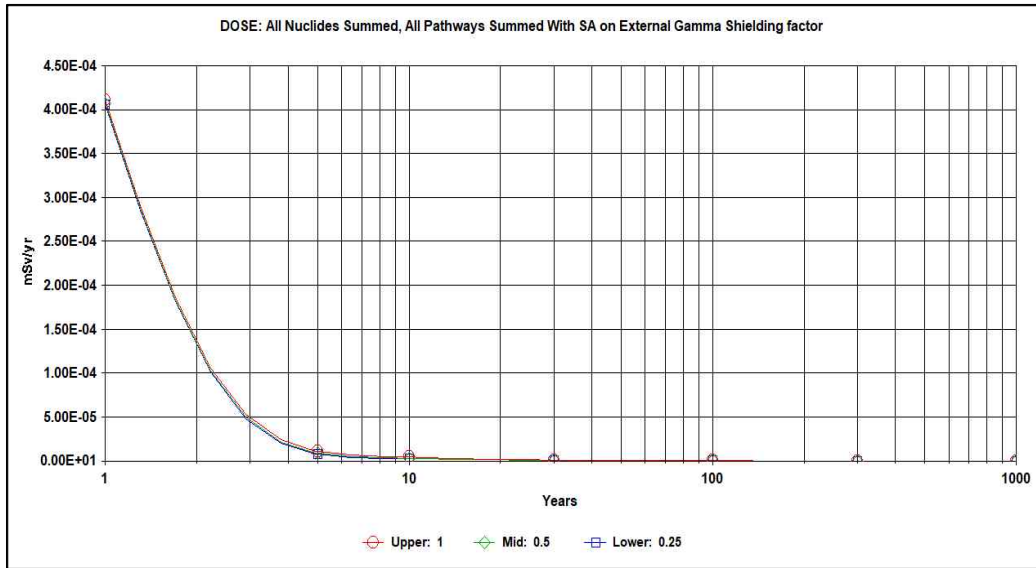


그림 5-33 외부감마선 차폐계수 민감도 분석결과

5. Indoor/Outdoor Time Fraction

매립장 내 건물의 내·외부 방사선량을 및 방사성 분진 농도가 상이하기 때문에 각 장소의 체류기간에 따라 피폭선량이 달라진다. 실내 거주비율은 연간 매립장 상부 건물 내부에 체류하는 시간의 비율이며, 실외 거주비율은 건물 외부에 체류하는 시간의 비율을 의미한다. 본 연구에서는 매립작업자와 거주자로 구분하여 다음과 같이 적용하였다.

1) 매립장 폐쇄 후 거주자

RESRAD 기본값은 1년 중 실내 거주비율 50%, 실외 거주비율 25%로 가정하여 0.5와 0.25를 설정하도록 권고하고 있으며, KINS/RR-144 보고서 또한 RESRAD와 동일한 가정을 사용하였다. 따라서 본 연구에서도 RESRAD 기본값을 적용하였다.

2) 매립 작업자

매립작업자의 실내·외 거주비율은 KINS/RR-144 보고서를 준용하여 1년 중 2,

000시간 동안 실내 거주비율 25 %, 실외 거주비율 75 %로 가정하고, 아래 계산식에 따라 산출된 실내 거주비율 0.057와 실외 거주비율 0.171을 각각 적용하여 평가하였다.

· 실내거주비율 = $\frac{2000h}{1y} \times \frac{1y}{365d} \times \frac{1d}{24h} \times 0.25 = 0.057$

· 실외거주비율 = $\frac{2000h}{1y} \times \frac{1y}{365d} \times \frac{1d}{24h} \times 0.75 = 0.171$

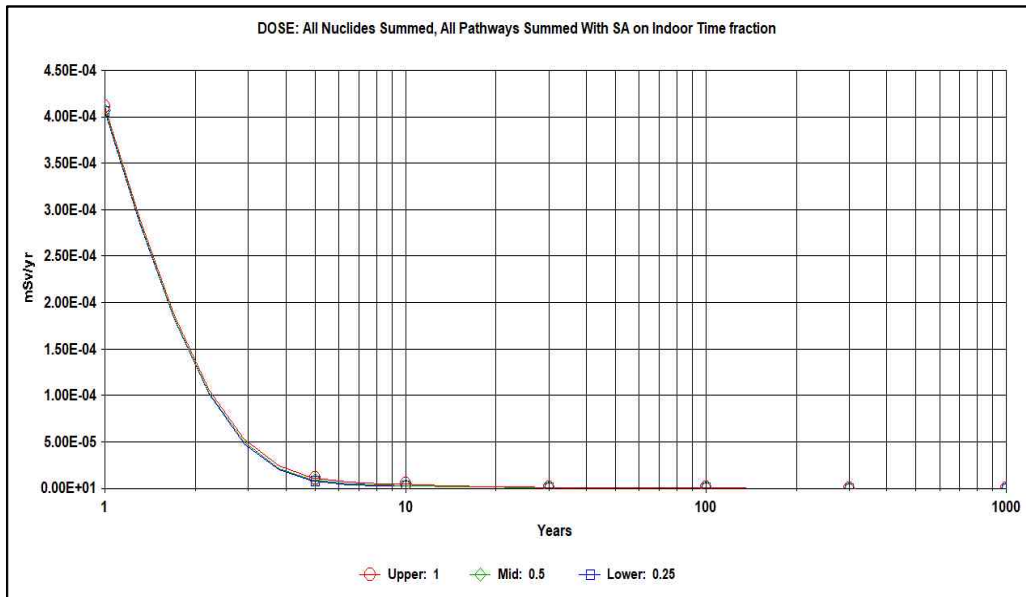


그림 5-34 실내 거주비율 민감도 분석결과(거주자)

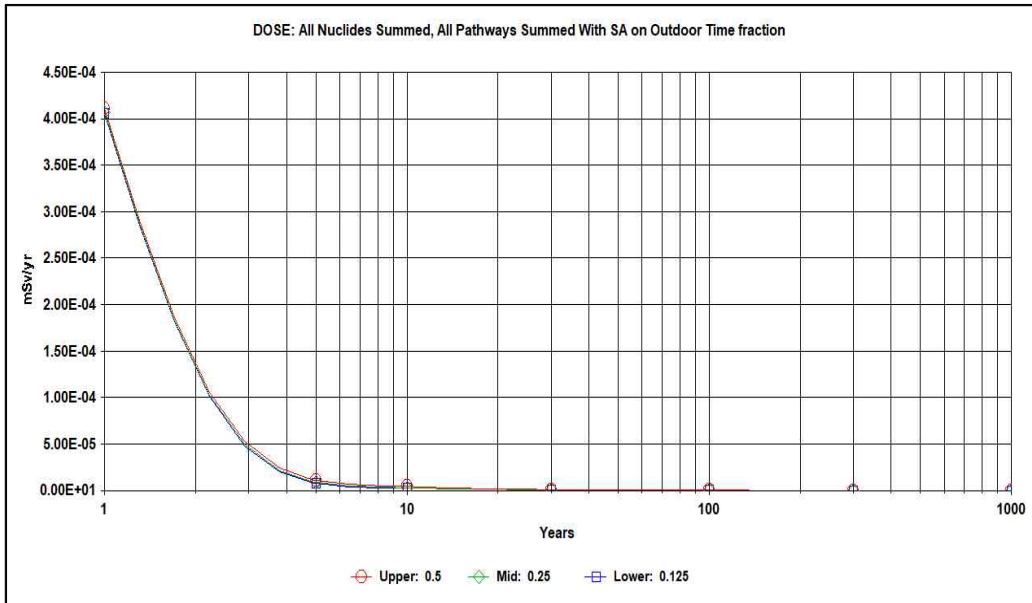


그림 5-35 실외 거주비율 민감도 분석결과(거주자)

6. Shape of The Contaminated Zone

앞서 오염지역(매립층)의 기하학적 형태를 원기둥으로 가정하여 오염지역의 면적 등을 산출하였다. 따라서 매립층의 형태를 Circular로 선택하여 평가하였다.

제9절 음식물 섭취경로 및 섭취량

매립장의 사용이 종료된 후 거주지 및 농산물 경작지로 재이용된다는 시나리오에 따라 생산되는 음식물의 섭취경로 및 섭취량에 따른 내부피폭 평가가 이루어져야 한다. 농작물이 방사성물질에 오염되는 경로는 방사성물질이 분진의 형태로 농작물 표면에 직접 침적되어 남아있는 경우와 뿌리를 통하여 흡수되는 두 가지 경로이다. 음식물 섭취에 의한 피폭경로는 방사성물질에 오염된 농수산물의 섭취와 오염된 토양, 음용수 및 사료로 사육된 축산물의 섭취에 의한 경로로 구분할 수 있다. KINS/RR-144 보고서는 단일 연령군으로 평가하기 위해 입력인자로 INDAC 1.0의 평균 개인자료를 인용하고, 연령군 차이를 보정하기 위해 선량환산인자(DCF)를 ICRP 72 성인 DCF의 2배 값을 적용하여 보수적인 평가를 수행하였다. 본 연구에서는 RESRAD에 내장된 DCF를 사용하여 6개 연령군별 선량평가를 수행하고자 규제지침 KINS/RG-N02.02 「주민 피폭선량 평가」의 각 연령군별 음식물 섭취량을 적용하였다.

표 5-24 KINS/RG-N02.02 각 연령군별 농축산물 섭취량

구분	3개월	1세	5세	10세	15세	성인
곡식(kg/y)	28.8	84.7	105.8	132.5	160.0	160.0
김치(kg/y)	0.5	9.8	27.0	48.1	62.3	89.9
엽채류(kg/y)	11.5	39.9	68.2	98.0	121.7	161.8
과일(kg/y)	37.5	77.0	81.3	93.9	62.3	97.0
우유(ℓ/y)	241.5	219.6	184.4	166.5	151.3	73.2
소고기(kg/y)	2.5	6.9	7.8	13.5	12.7	15.7
돼지고기(kg/y)	2.2	3.7	13.3	25.3	40.4	28.8
닭고기(kg/y)	6.4	12.8	21.2	28.4	38.0	26.6

표 5-25 KINS/RG-N02.02 각 연령군별 수산물 섭취량

구분	3개월	1세	5세	10세	15세	성인
어류(kg/y)	3.1	11.6	10.3	11.3	16.0	32.4
갑각류(kg/y)	0.4	2.1	4.5	6.1	6.1	8.8
연체류(kg/y)	0.00	0.2	3.8	5.2	6.5	6.5
해조류(kg/y)	2.3	2.8	2.5	2.6	3.6	6.6

표 5-26 KINS/RR-808 각 연령군별 음용수 섭취량

구분	3개월	1세	5세	10세	15세	성인
음용수(ℓ/y)	78.5	-	130.9	-	205.0	196.3

1. Fruit, Vegetable, and Grain Consumption

RESRAD 입력인자에 적용하기 위해 KINS/RG-N02.02의 각 연령군별 농축산물 섭취량 자료에서 곡식, 김치 및 과일 섭취량의 합을 산출하여 다음과 같이 적용하였다.

표 5-27 과일, 야채 및 곡물 섭취량 입력자료

구분	단위	3개월	1세	5세	10세	15세	성인
Fruit, Vegetable, and Grain Consumption	kg/y	66.8	171.5	214.1	274.5	284.6	346.9

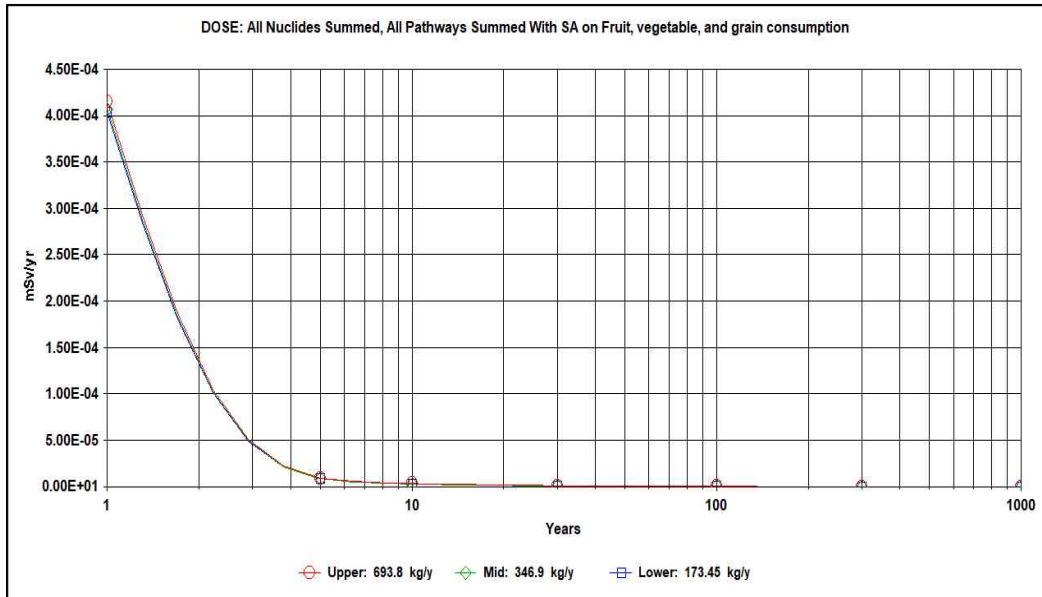


그림 5-36 과일, 야채류, 곡물 섭취량 민감도 분석결과

2. Leafy Vegetable Consumption

RESRAD 입력인자에 KINS/RG-N02.02의 각 연령군별 농축산물 섭취량 자료에서 엽채류 섭취량을 표 5-27과 같이 적용하였다. 특히, 15세 및 성인의 경우 RESRAD 전산코드에서 입력 최댓값을 100 kg/y로 제한하고 있기 때문에 본 연구에서는 입력 최댓값인 100 kg/y를 각각 적용하였다.

표 5-28 엽채류 섭취량 입력자료

구분	단위	3개월	1세	5세	10세	15세	성인
Leafy Vegetable Consumption	kg/y	11.5	39.9	68.2	98.0	100.0	100.0

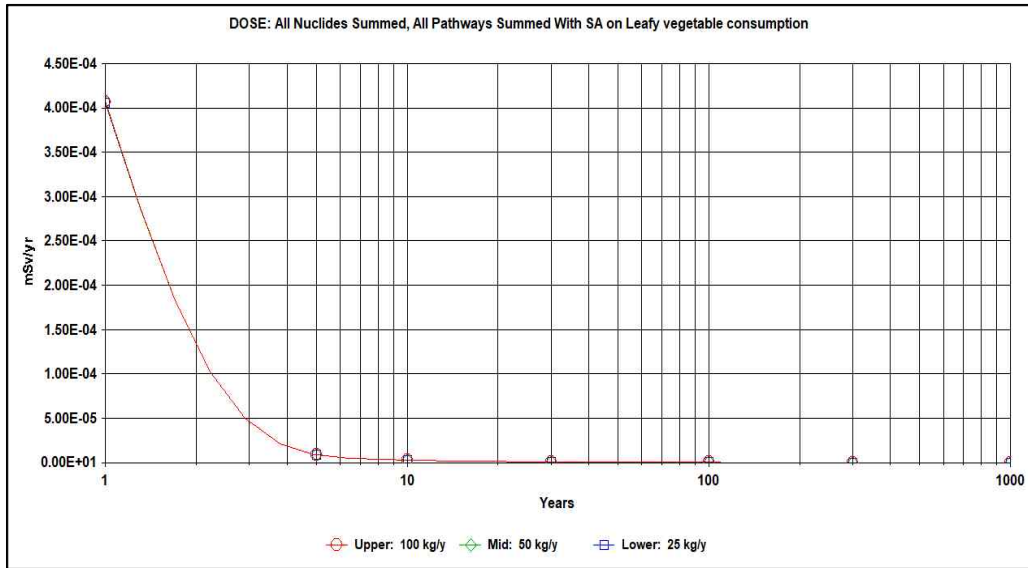


그림 5-37 엽채류 섭취량 민감도 분석결과

3. Milk Consumption

RESRAD 입력인자에 KINS/RG-N02.02의 각 연령군별 농축산물 섭취량 자료에서 우유 섭취량을 표 5-28과 같이 적용하였다.

표 5-29 우유 섭취량 입력자료

구분	단위	3개월	1세	5세	10세	15세	성인
Milk Consumption	ℓ /y	241.5	219.6	184.4	166.5	151.3	73.2

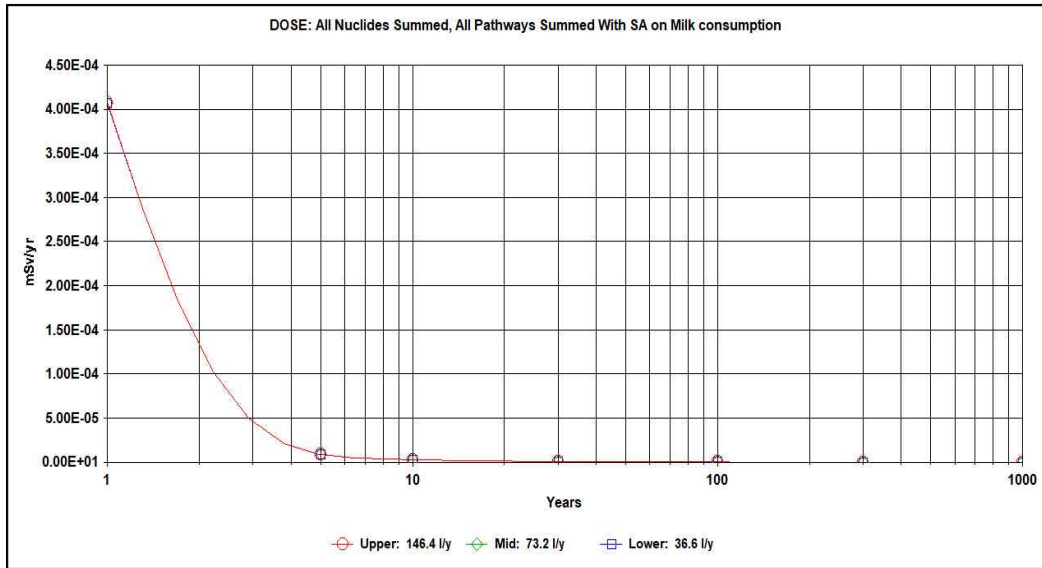


그림 5-38 우유 섭취량 민감도 분석결과

4. Meat & Poultry Consumption

RESRAD 입력인자에 적용하기 위해 KINS/RG-N02.02의 각 연령군별 농축산물 섭취량 자료에서 소고기, 돼지고기 및 닭고기의 합을 산출하여 다음과 같이 적용하였다.

표 5-30 육류 섭취량 입력자료

구분	단위	3개월	1세	5세	10세	15세	성인
Meat & Poultry Consumption	kg/y	11.1	23.4	42.3	67.2	91.1	71.1

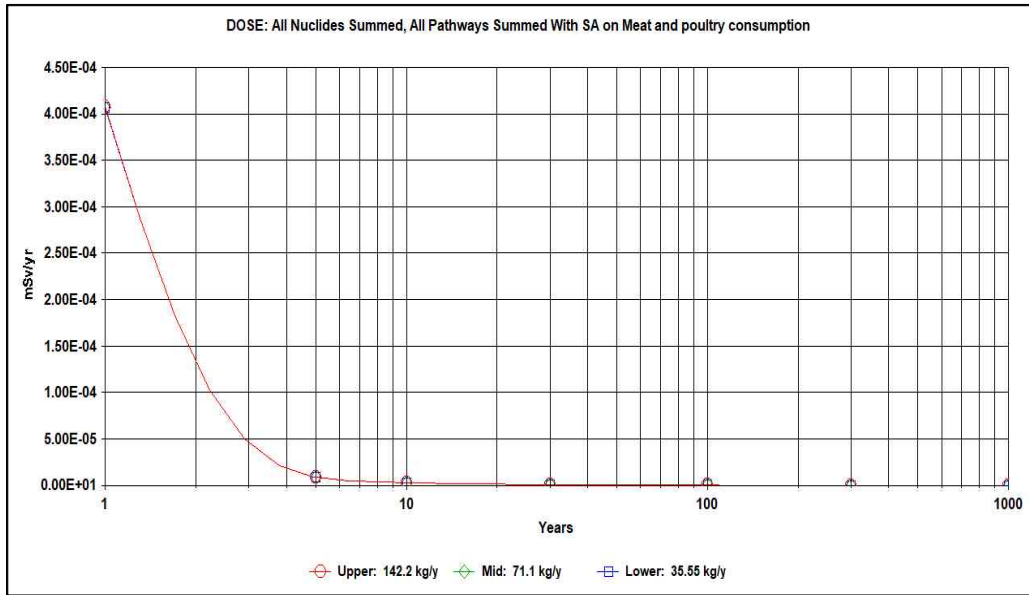


그림 5-39 육류 섭취량 민감도 분석결과

5. Fish Consumption

RESRAD 입력인자에 KINS/RG-N02.02의 각 연령군별 수산물 섭취량 자료에서 어류의 섭취량을 다음과 같이 적용하였다. 민감도 분석결과, 어류 섭취량이 많을수록 선량평가 결과에 미치는 영향이 큰 것으로 나타났다.

표 5-31 어류 섭취량 입력자료

구분	단위	3개월	1세	5세	10세	15세	성인
Fish Consumption	kg/y	3.1	11.6	10.3	11.3	16.0	32.4

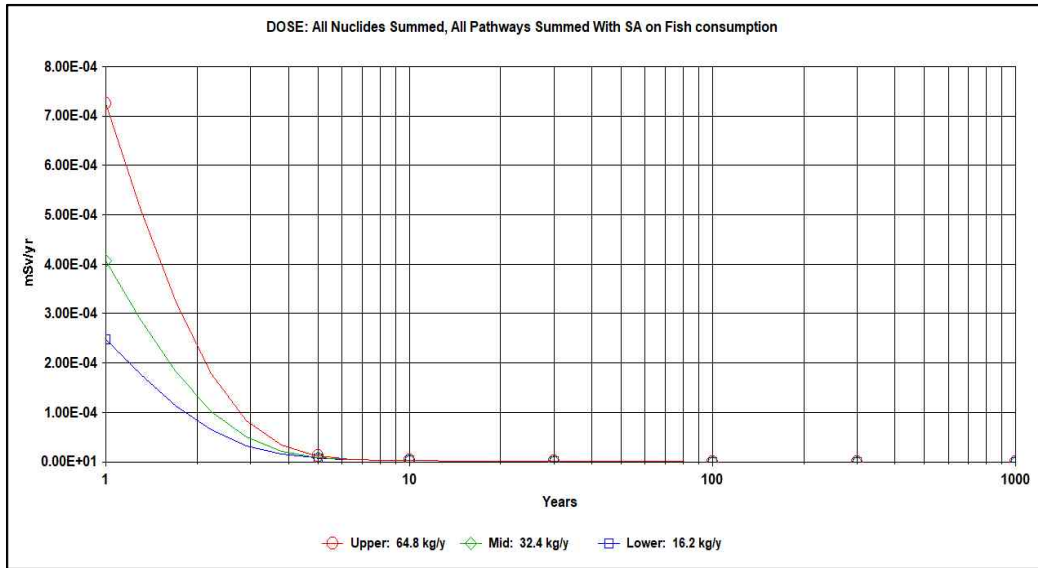


그림 5-40 어류 섭취량 민감도 분석결과

6. Other Sea Food Consumption

RESRAD 입력인자에 적용하기 위해 KINS/RG-N02.02의 각 연령군별 수산물 섭취량 자료에서 갑각류, 연체류 및 해조류의 합을 산출하여 다음과 같이 적용하였다.

표 5-32 기타 해산물 섭취량 입력자료

구분	단위	3개월	1세	5세	10세	15세	성인
Other Sea Food Consumption	kg/y	2.7	5.1	10.8	13.9	16.2	21.9

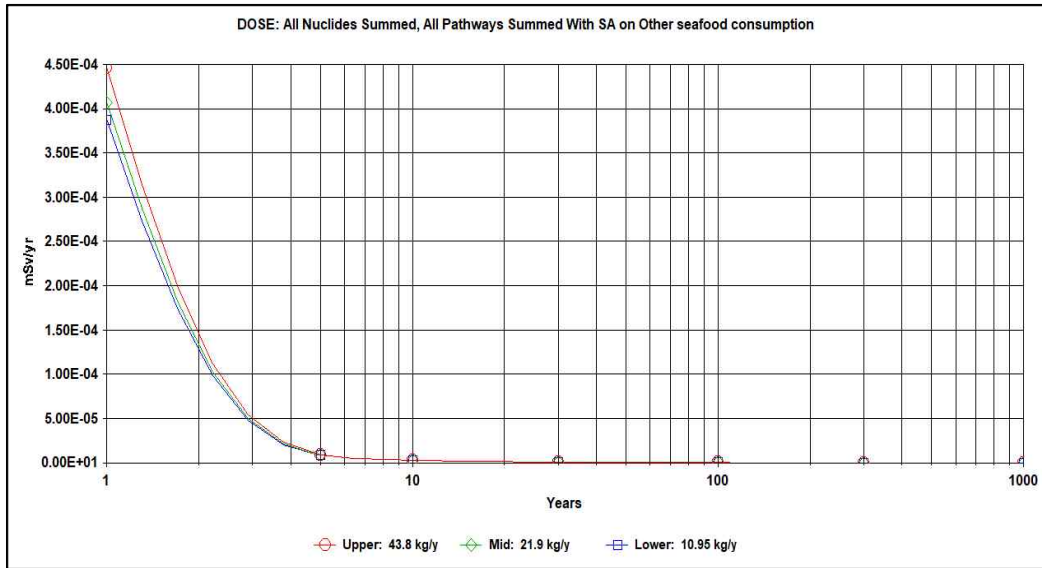


그림 5-41 기타 해산물 섭취량 민감도 분석결과

7. Soil Ingestion

RESRAD는 US EPA에서 2011년 권고한 1세 ~ 20세미만 연령의 평균 토양섭취량 0.1 g/d를 근거로 기본값을 36.5 g/y로 설정하였다. 본 연구에는 RESRAD 기본값을 적용하여 토양섭취에 따른 평가를 수행하였다.

표 5-33 EPA(2011) 토양 및 분진 일일 섭취량

구분	Soil (mg/day)	Dust (mg/day)	Soil + Dust (mg/day)
6 week to <1 year	30	30	60
1 to <21 years	50	60	100
Adult	20	30	50

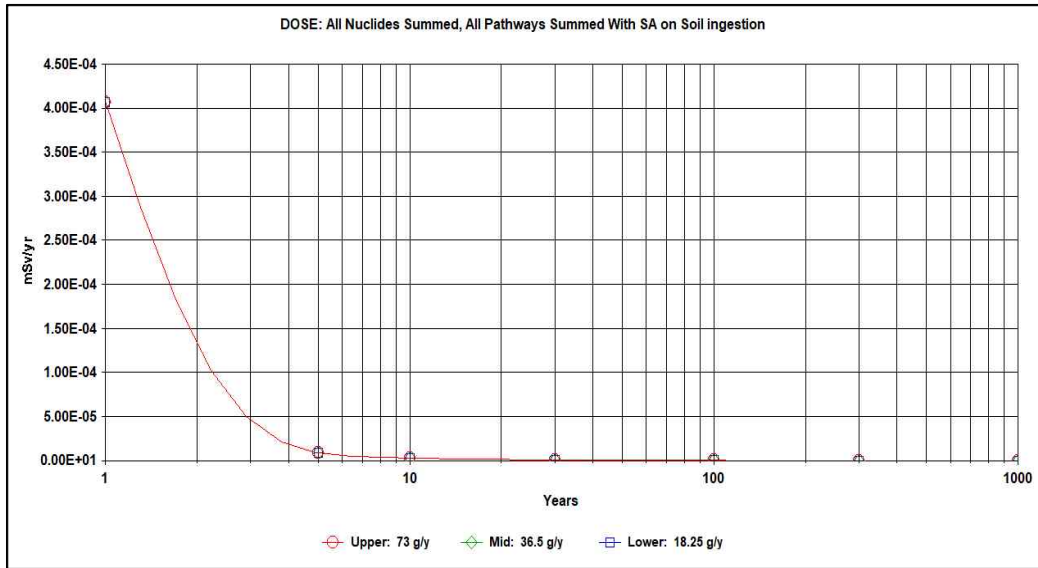


그림 5-42 토양 섭취량 민감도 분석결과

8. Drinking Water Intake

RESRAD 입력인자에 KINS/RR-808의 INDAC 2.0 입력인자 자료에서 연령군별 개인 최대 음용수 섭취량을 표 5-33과 같이 적용하였다. 특히, 1세 및 10세의 자료를 확보할 수 없어 전, 후 연령군의 평균값을 산출하여 가정하였다.

표 5-34 음용수 섭취량 입력자료

구분	단위	3개월	1세	5세	10세	15세	성인
Drinking water intake	ℓ/y	78.5	104.7	130.9	167.9	205.0	196.3

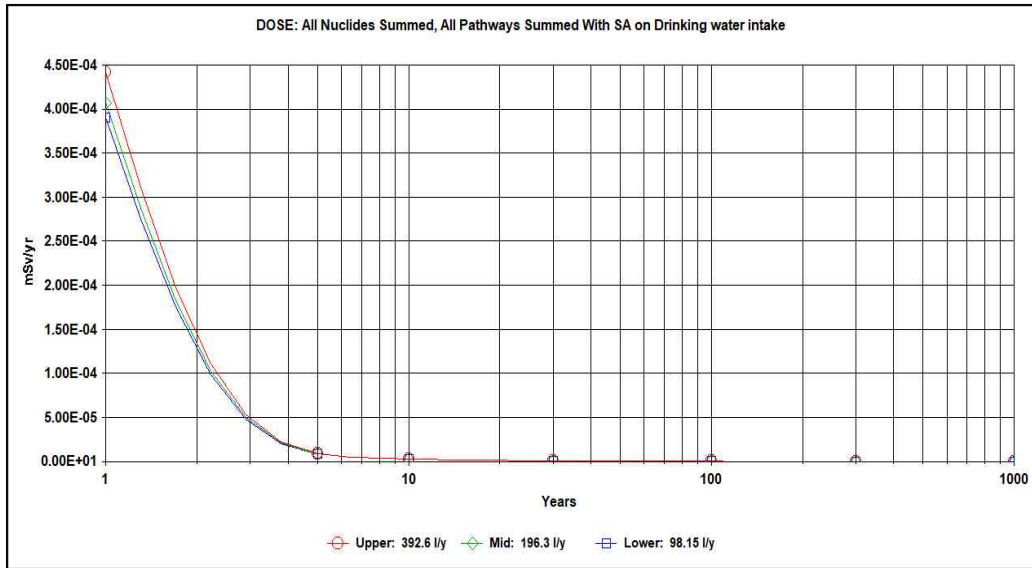


그림 5-43 음용수 섭취량 민감도 분석결과

9. Contaminated Fractions

매립장 내 경작지에서 생산된 오염 음식물의 섭취에 따른 내부피폭 평가 시 오염분율은 평가결과에 주요한 영향을 미치는 인자이다. KINS/RR-144 보고서는 오염전이에 대한 추정의 한계를 이유로 섭취하는 모든 음식물이 오염되었다는 가정을 사용하였다. 그러나 실제 모든 음식물이 오염될 가능성은 매우 희박하므로, 본 연구에서는 RESRAD 기본값을 적용하였다. 민감도 분석결과, 해산물의 오염분율이 선량평가에 미치는 영향이 매우 높았으며, 그 외 음식물의 오염분율은 평가결과에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

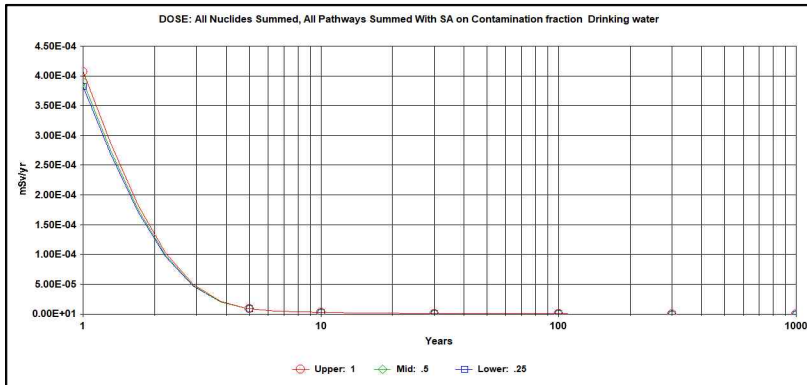


그림5-44 음용수 오염분율 민감도 분석결과

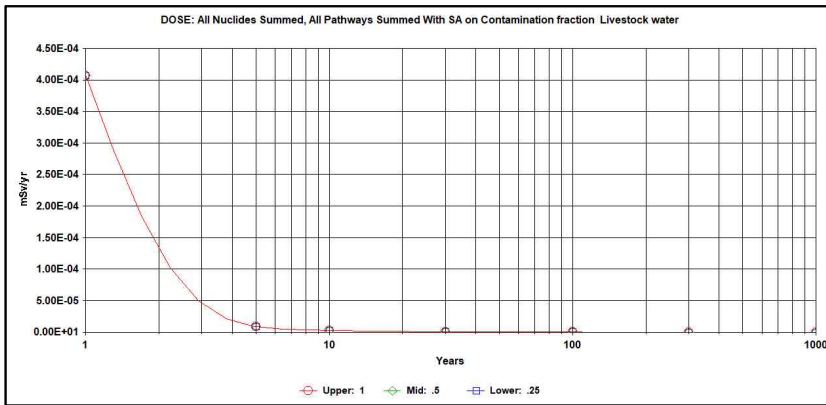


그림 5-45 가축류 섭취용수 오염분율 민감도 분석결과

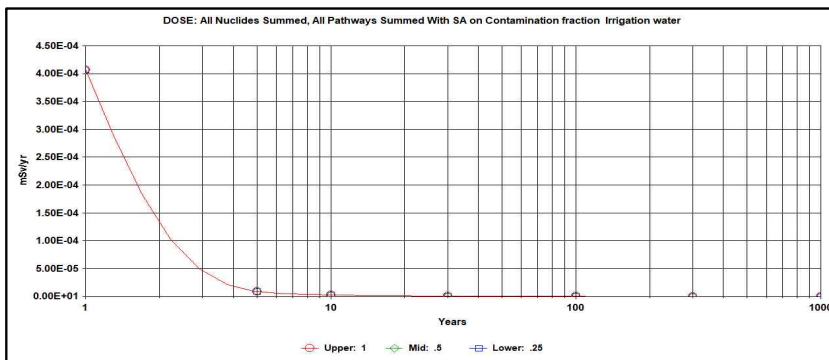


그림 5-46 관개용수 오염분율 민감도 분석결과

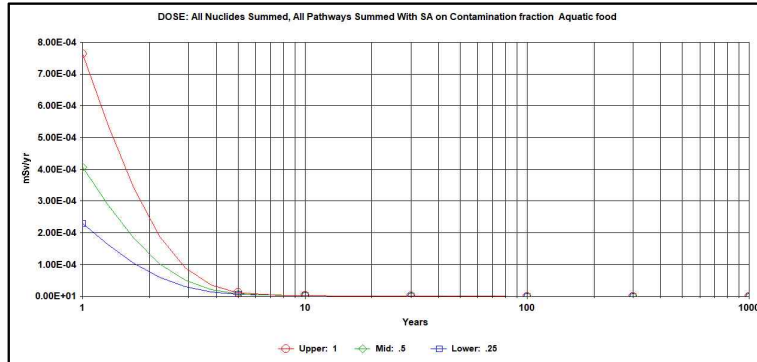


그림 5-47 해산물 오염분율 민감도 분석결과

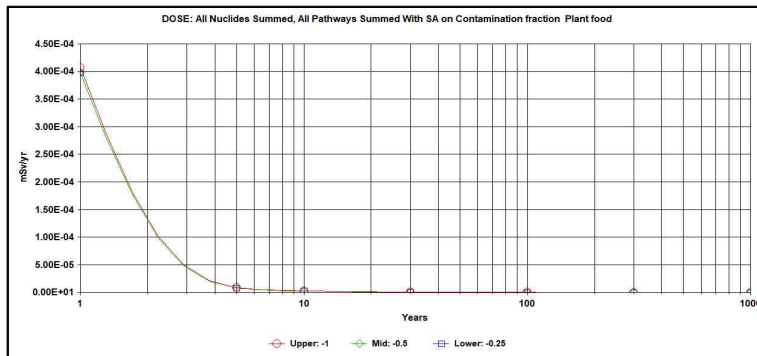


그림 5-48 야채류 오염분율 민감도 분석결과

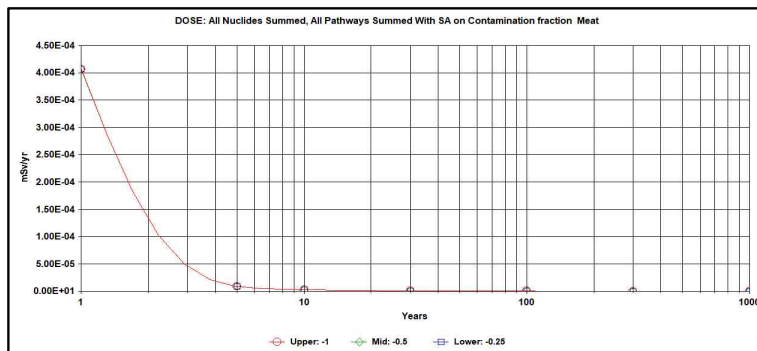


그림 5-49 육류 오염분율 민감도 분석결과

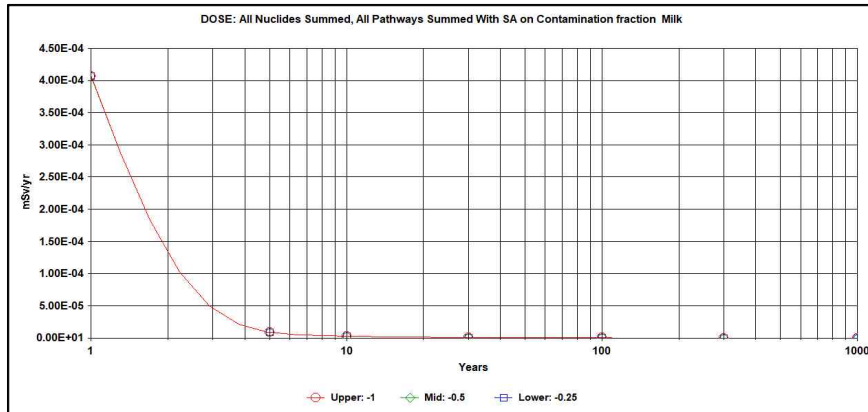


그림 5-50 우유 오염분율 민감도 분석결과

제10절 가축의 사료 섭취경로 및 섭취량

매립장이 폐쇄된 후 조성된 경작지에서 가축을 사육하거나 부지에서 생산된 농산물을 가축의 사료로 사용하는 경우 해당 방사성물질의 이동량이 얼마나 되는지 계산하기 위해 가축의 사료 섭취경로 및 섭취량을 입력한다. 농작물의 오염경로는 방사성물질이 농작물 표면에 직접적으로 침적되거나 토양내의 방사성물질을 뿌리를 통하여 농작물의 가식부(edible part)로 전이되는 경우이다. KINS/RR-144 보고서는 KINS/GR-199에 제시된 INDAC 입력인자를 적용하였으며, 이는 대부분 RESRAD 기본값과 동일하다. 민감도 분석결과, 피폭선량 평가에 미치는 영향은 크지 않았다. 따라서 본 연구에서는 KINS/RR-144 입력값을 준용하였다.

표 5-35 가축의 사료 섭취량 등 입력자료

구 분		RESRAD 7.2	KINS RR-144	입력값
Livestock fodder intake for meat(kg/day)		68	68	68
Livestock fodder intake for milk(kg/day)		55	55	55
Livestock water intake for meat(ℓ/day)		50	50	50
Livestock water intake for milk(ℓ/day)		160	60	60
Livestock intake of soil(kg/day)		0.5	0.5	0.5
Mass loading for foliar deposition(g/m ²)		1.0E-4	6.0E-6	6.0E-6
Depth of soil mixing layer(m)		0.15	0.15	0.15
Depth of roots(m)		0.9	0.9	0.9
Groundwater Fractional Usage	Drinking water	1	0.7	0.7
	Livestock water	1	0.5	0.5
	Irrigation water	1	0.5	0.5

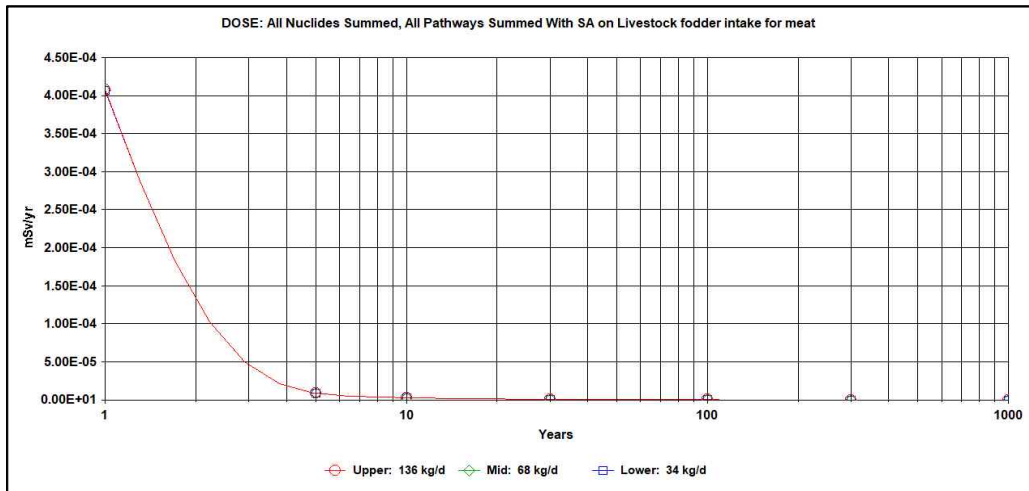


그림 5-51 육우의 사료 섭취량 민감도 분석결과

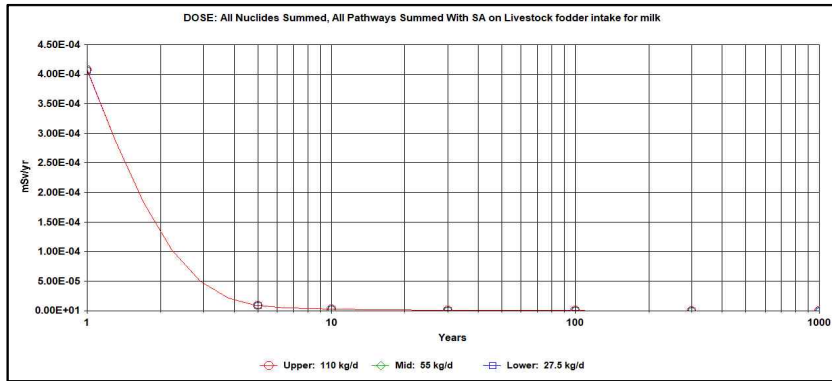


그림 5-52 젖소의 사료 섭취량 민감도 분석결과

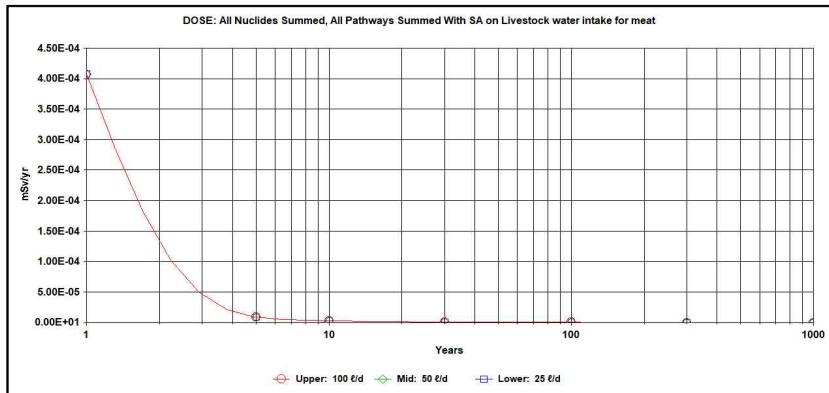


그림 5-53 육우의 물 섭취량 민감도 분석결과

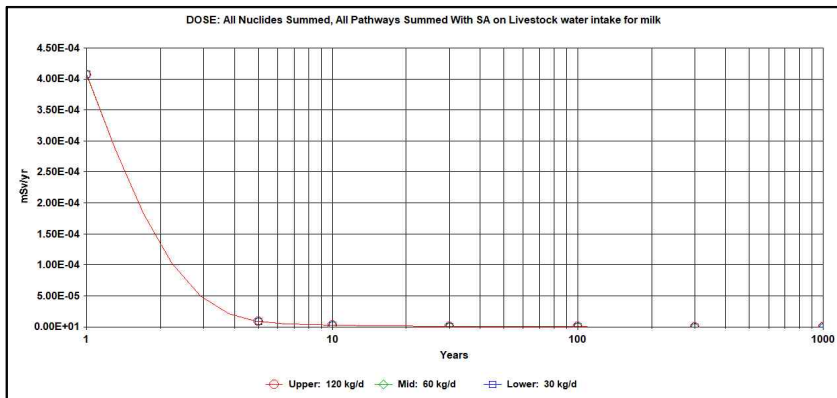


그림 5-54 젖소의 물 섭취량 민감도 분석결과

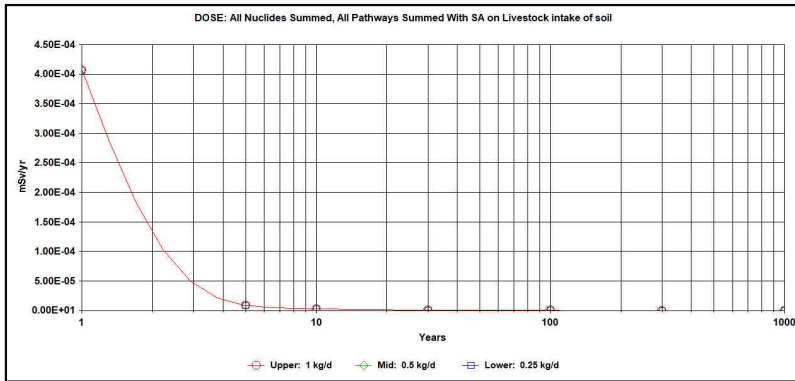


그림 5-55 가축류 토양 섭취량 민감도 분석결과

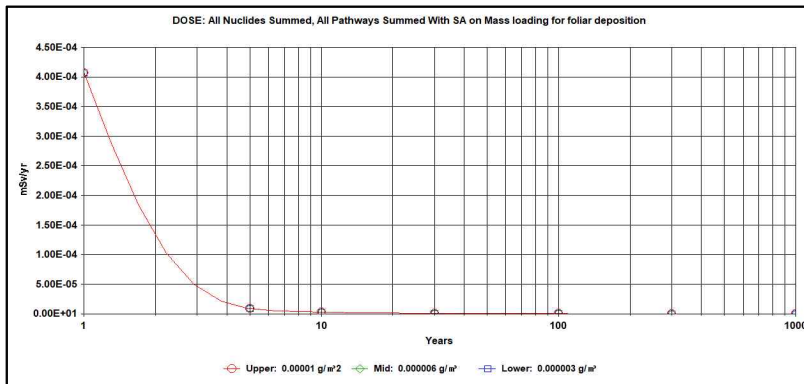


그림 5-56 잎에 침적된 분진 질량분배비 민감도 분석결과

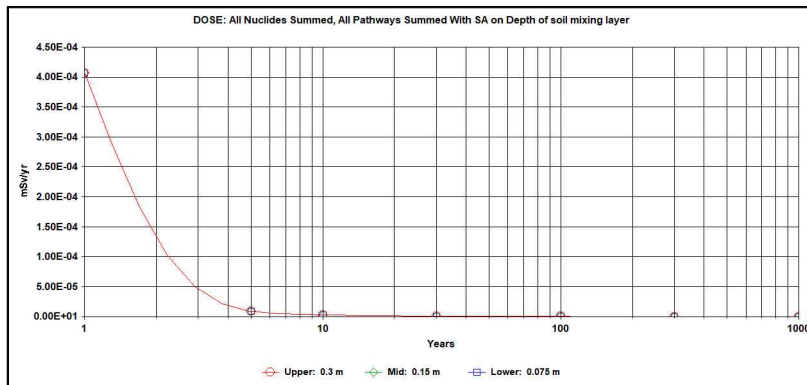


그림 5-57 토양 혼합층의 깊이 민감도 분석결과

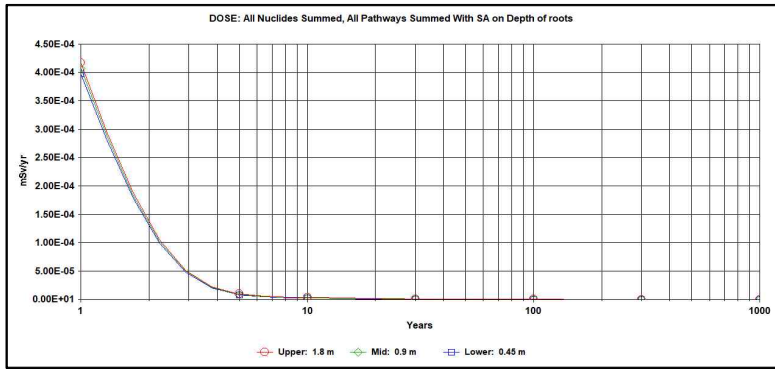


그림 5-58 뿌리의 깊이 민감도 분석결과

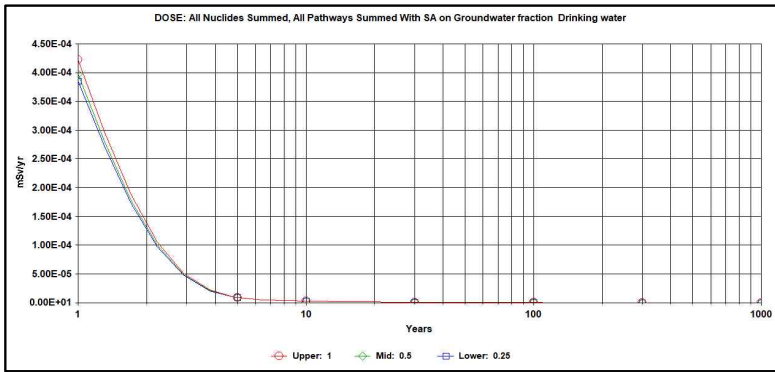


그림 5-59 음용수의 지하수 이용분율 민감도 분석결과

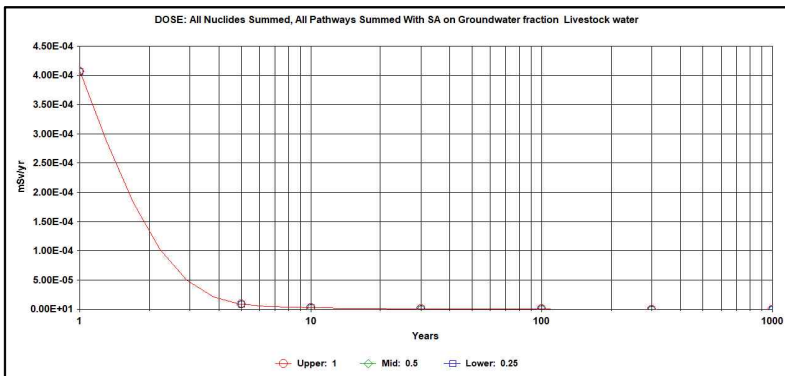


그림 5-60 가축용수의 지하수 이용분율 민감도 분석결과

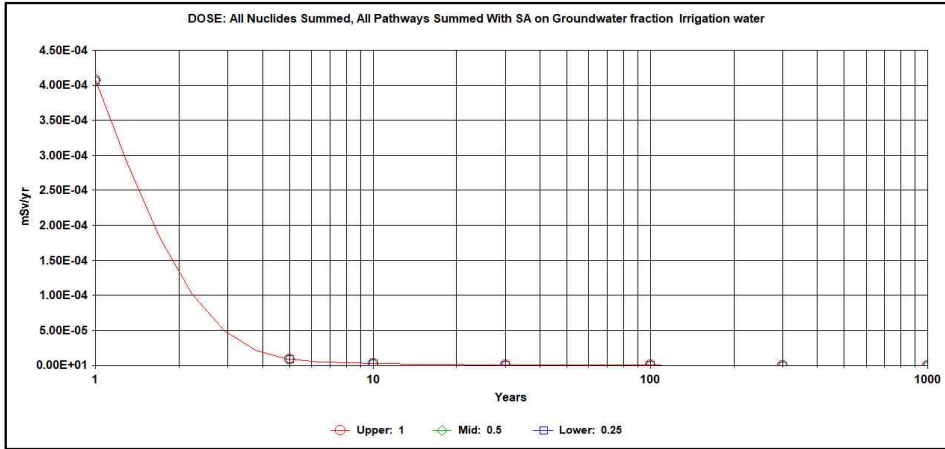


그림 5-61 관개용수의 지하수 이용분율 민감도 분석결과

제11절 음식물 등의 저장기간

농축수산물의 수확에서 소비까지의 소요되는 시간을 음식물 등의 저장기간으로 설정할 수 있다. 이에 대해 KINS/RR-144 보고서는 KINS/GR-199에 제시된 IND AC 입력 자료를 적용하였으며, 이는 규제지침 KINS/RG-N02.02에 제시된 값과 동일하였다. 음식물 저장기간에 대한 민감도 분석결과, 피폭선량에 미치는 영향은 미미하였으며, 국내 자료에 기반한 KINS/RG-N02.02의 입력인자를 적용하였다.

표 5-36 음식물 등의 저장기간 입력자료

구 분	RESRAD 7.2	KINS/RR-144	입력값
Fruit, non-leafy vegetables, and grain	14일	14일	14일
Leafy vegetables	1일	1일	1일
Milk	1일	1일	1일
Meat	20일	7일	7일
Fish	7일	1일	1일
Crustacea and mollusks	7일	1일	1일
Well water	1일	0.5일	0.5일
surface water	1일	0.5일	0.5일
Livestock fodder	45일	75일	75일

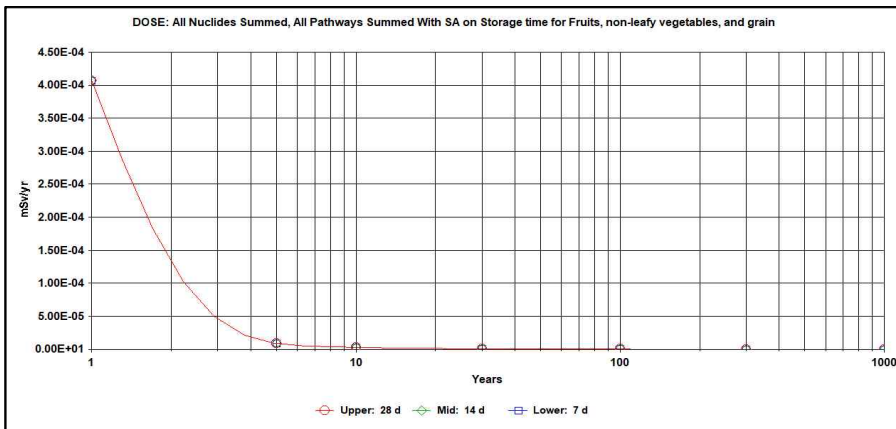


그림 5-62 과일, 채소류 저장기간 민감도 분석결과

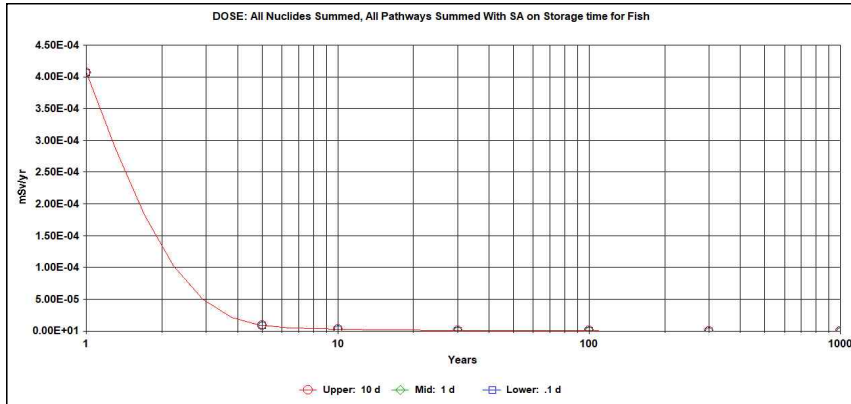


그림 5-63 어류 저장기간 민감도 분석결과

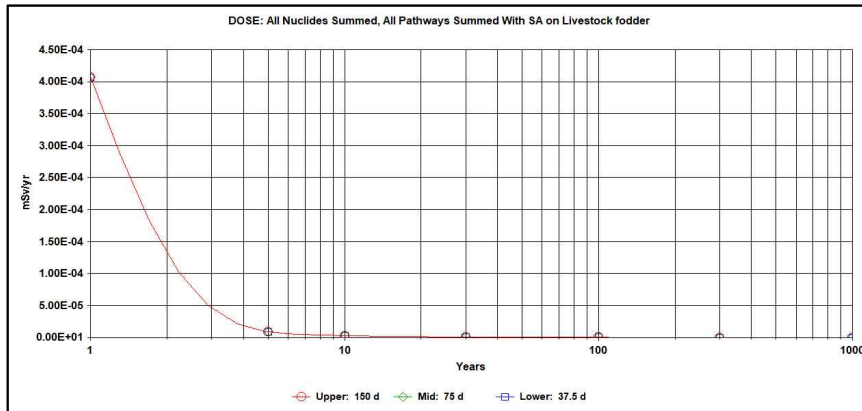


그림 5-64 사료 저장기간 민감도 분석결과

제6장 결 론

본 연구에서는 원전에서 발생한 폐활성탄을 평가 대상 폐기물로 선정하고, RESRAD-ONSITE Ver 7.2를 활용하여 매립에 의한 자체처분 안전성평가를 수행하였다.

전산프로그램 각 입력인자의 특성 및 민감도 분석을 통해 입력인자의 유효성을 고찰하였고, 최신 문헌 및 보고서를 검토하여 가급적 보수적인 가정을 지양하고 실질적인 값을 적용하였다. 또한, 선량평가 연령군을 규제지침에 부합하고 기존의 단일 연령군 평가의 단점을 보완하기 위해 6개 연령군별로 섭취인자 및 선량환산인자(DCF)를 적용하여 평가를 수행하였고, 기존 방식인 단일 연령군 평가를 추가적으로 수행하여 결과를 비교 평가하였다. 최종적으로 6개 연령군의 선량평가 결과 중 최댓값을 보이는 연령군의 피폭선량을 채택하여 규제기준에 적합함을 확인하였으며, 그 평가결과는 표 6-1 및 6-2에 제시한 바와 같다.

폐기물 매립작업자의 피폭선량평가 결과는 매립 직후를 기준으로 개인선량 및 집단선량은 각각 $3.548E-01 \mu\text{Sv/y}$, $7.096E-06 \text{man-Sv/y}$ 이고, 매립 후 거주자의 매립 5년 후 개인선량 및 집단선량은 $9.031E-03 \mu\text{Sv/y}$, $3.329E-07 \text{man-Sv/y}$ 로 평가되어 원자력안전법 자체처분 허용선량인 개인선량 $10 \mu\text{Sv/y}$, 집단선량 1man-Sv/y 를 만족함을 확인 하였다.

표 6-1 폐활성탄 매립에 따른 거주자 연령별 예상 개인피폭선량

구분	(mSv/y)					
	3개월	1세	5세	10세	15세	성인
매립 직후	1.892E-04	5.812E-04	3.705E-04	3.449E-04	3.310E-04	5.750E-04
매립 후 5년	6.275E-06	9.031E-06	7.572E-06	7.419E-06	7.320E-06	8.796E-06

표 6-2 매립장 특성인자를 반영한 예상 개인 및 집단 피폭선량

(개인선량 : $\mu\text{Sv/y}$, 집단선량 : man-Sv/y)

구분	평가시점	매립장 면적	인구수	개인피폭선량	집단피폭선량
매립작업자	매립 직후	0.067 km^2	20	3.548E-01	7.096E-06
매립 후 거주자	매립 후 5년	0.067 km^2	36.86	9.031E-03	3.329E-07

본 연구에서 수행한 RESRAD-ONSITE 입력인자의 유효성 및 민감도 분석결과, 입력자료 확보의 어려움과 국내환경과 일부 상이한 조건으로 인해 다소 보수적 평가가 이루어진 점에 대해서는 아쉬움으로 남는다. 향후 국내 조건이 반영된 실질적인 입력인자를 개발 및 발굴하여 체계적이고 효율적인 평가시스템을 구축하고, 각각의 폐기물 특성에 맞는 평가를 수행한다면 예상피폭방사선량을 좀 더 정확히 예측할 수 있을 것이다. 또한 자체처분에 대한 신뢰도 제고 및 자체처분 활성화로 방사성폐기물드럼 발생을 최소화함으로써 처분비용 절감에 따른 경제적인 효과는 물론 환경보호에 기여하는 바가 클 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] 원자력안전위원회, "원자력안전법, 원자력안전법 시행령, 원자력안전법 시행규칙"
- [2] 원자력안전위원회, "원자력안전위원회 고시 제2020-6호, 방사성폐기물 분류 및 자체처분 기준에 관한 규정"
- [3] 한국원자력안전기술원, "방사성폐기물 규제해제 요건개발, KINS/RR-144", 2002
- [4] 한국원자력안전기술원, "원전 및 핵주기시설 발생 방사성폐기물 자체처분 규제지침 개발, KINS/RR-659", 2004
- [5] 한국원자력안전기술원, "방사선 안전규제 기술개발, KINS/GR-297", 2005
- [6] 한국원자력안전기술원, "경수로형 원전 규제기준 및 규제지침 - 방사성폐기물 자체처분 안전성평가, KINS/RG-N12.08", 2015
- [7] 한국원자력안전기술원, "경수로형 원전 규제기준 및 규제지침 - 주민 피폭선량 평가, KINS/RG-N02.02", 2016
- [8] 한국원자력안전기술원, "주민피폭선량평가(INDAC) 체계 개선 방향 연구, KINS/RR-808", 2011
- [9] 한국원자력안전기술원, "주민피폭선량 평가지침 및 INDAC 사용자지침서, KINS GR-199", 1998
- [10] IAEA, "Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance, IAEA Safety Standard Series No. RS-G-1.7", 2004
- [11] ICRP, "Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclide, ICRP Publication No. 72", 1996
- [12] IAEA, "International Basic Safety Standards for Protection Against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources, IAEA Safety Series No. 115", 1996
- [13] Argonne National Laboratory, "Data Collection Handbook to Support Modeling the Impacts of Radioactive Material in Soil and Building

- Structures, ANL/EVS/TM 14-4", 2015
- [14] Argonne National Laboratory, "RESRAD for Radiological Risk Assessment Comparison with EPA CERCLA Tools-PRG and DCC Calculators_ APPENDIX A: Descriptions of the RESRAD Family of Codes and the EPA PRG and DCC Calculators, ANL/EVS/TM 15/1", 2015
- [15] Argonne National Laboratory, "User' s Guide for RESRAD-ONSITE Code, ANL/EVS/TM 18/1", 2018
- [16] 환경부, "폐기물관리법, 폐기물관리법 시행령, 폐기물관리법 시행규칙"
- [17] 환경부, "환경부예규 제581호, 폐기물매립시설 사후관리 업무처리규정"
- [18] 환경부, "2018 지하수 조사연보, 11-1480000-001551-10", 2018
- [19] 한국환경자원공사, "매립시설 사후관리제도 개선방안 연구", 2008
- [20] 기상청, "국가기후데이터센터, <http://data.kma.go.kr/cmmn/main.do>"