

<원저>

RESRAD 코드를 활용한 규제해제 폐기물 소각처분에 대한 안정성 평가

김희경·한상욱·박수리·김병직

송실대학교 대학원 화학공학과

Safety Assessment on the Incineration Disposal of Regulation Exempt Waste by RESRAD Code

Kim Hui-Gyeong·Han Sang-Wook·Park Su-Ri·Kim Byung-Jick

Department of Chemical Engineering, Graduate School of Soongsil University

Abstract In this paper, risk assessment was conducted to verify self - disposal requirements by landfill for exempted incineration ash by using Resrad Ver.6.5 computer code. The result of risk assessment by landfill for the incineration by-product is that individual dose is $6.91 \times 10^{-2} \mu\text{Sv y}^{-1}$ and collective dose is $3.475 \times 10^7 \text{ man-Sv y}^{-1}$. It proved that the result meets reference dose of individual dose $10 \mu\text{Sv y}^{-1}$ and collective dose 1 man-Sv y^{-1} for general public. According to the current 'Nuclear Safety Commission Notice [No. 2014-3]', it states that the exempted wastes can be disposed of by incineration, landfill and recycling. However, most of recently documents and papers related to exempted wastes are disposed of by landfill and recycling and it could not confirm the case of exempt by incineration. If the national consensus is derived and treating the waste by using process of incineration is activated, it could be considered to treat low level of radiation wastewater and activated carbon excluded from exempted waste because of nuclide ^3H and ^{14}C .

Key Words: RESRAD code, exempted wastes, waste incinerating, safety-evaluation of incineration, ^3H , ^{14}C .

중심 단어: RESRAD 코드, 규제 해제된 폐기물, 소각재폐기물, 안정성평가, ^3H , ^{14}C

I. 서 론

규제해제 대상은 방사선학적 영향이 미미한 것으로써 방사성폐기물을 규제 대상에서 제외하는 것을 말한다. 이에 안전한 처분을 위해서는 방사선학적 특성, 처리방법 및 다양한 피폭 대상 측면에서 세밀한 기술적 판단과 충분한 근거가 요구된다.

최근 규제해제 관련 문헌을 살펴보면 대부분이 재활용(금속류)과 매립(토양, 콘크리트 및 기타 가연성/비가연성폐기물)을 통한 규제해제를 주로 다루고 있으며, 소각을 규제 해제된 사례는 확인 할 수가 없었으며, 소각을 부분적으로만 다루고 있다. 방사성폐기물의 소각공정은 비가연성폐기물

보다 감량 효과가 크며 감량계수(Mass Reduction Factor; MRF)도 40~100 나타낸다. 그러나 농축현상에 의한 단위 질량당 방사능[Bq/g] 농도는 소각 전 폐기물에 비하여 크게 증가되는 현상이 일어난다[1].

실제 고리1호기 원전해체 시 해체비용 약 6,033억원 중 폐기물 처리 비중이 40%정도로 높음을 볼 수 있다. 이는 많은 양의 해체폐기물과 운영폐기물로 인한 처리비용이 상승하는 것을 의미한다. 만약 소각에 대한 국민적 합의가 도출되고 소각공정에 의한 처리 방법이 활성화 된다면 방사성폐기물의 감용 효과로 인한 경제적인 기대효과가 클 것으로 예상된다. 본 연구에서는 가연성폐기물을 소각하여 규제해제하기 위한 사전연구로서 규제 해제된 소각재를 대상으로

매립에 의한 자체처분 요건만족을 입증하기 위해 RESRAD 전산코드를 활용하여 위해도를 평가하였다.

II. 대상 및 방법

1. RESRAD 전산 코드

1) RESRAD 전산 코드의 특성

RESRAD 코드군은 recycle, onsite, offsite 등으로 9개의 코드로 구성되어 있으며, 목적에 맞는 코드를 사용하여 환경영향 평가를 수행할 수 있다. 아래 Fig. 1은 RESRAD 코드 구성을 나타내었다.

이 RESRAD 코드는 방사능 오염물질에 의해 거주자가 받는 피폭선량과 리스크를 평가하기 위한 목적으로 미국 에너지부의 지원 아래 아르곤 국립연구소에서 2003년에 개발되었다. 현재 방사능 오염된 부지에 대한 환경영향 평가를 위한 미국 에너지부의 승인을 받은 코드이며, NRC(Nuclear Regulatory Commission)에서도 원전의 해체 시설 인허가에 RESRAD 코드 군을 활용한 피폭선량 평가 결과를 인정하고 있다. 이미 전 세계의 300개가 넘는 부지에 적용된 사례가 있으며, RESRAD 코드 군을 국내에서도 방사화된 토양 및 콘크리트에 대한 자체처분인허가 연구로 해체 콘크리트 폐기물의 자체처분 후 매립에 의한 영향평가 등에 활용된 사례들이 있다[2,12]

2) 오염 및 피폭 경로

RESRAD 전산코드에서는 피폭선량 평가를 위해 적용 적용되는 피폭경로는 토양 내 오염물질에 의한 직접적인 외부 피폭, 공기 중에 비산되어 있는 먼지 흡입에 의한 내부피폭, 음식물 섭취에 의한 내부피폭 등의 피폭경로를 고려한다.

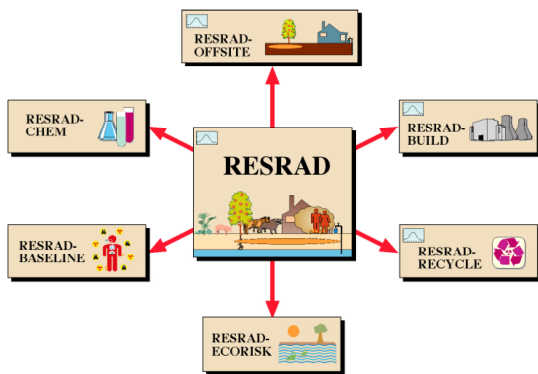


Fig. 1 RESRAD family of codes

Radon에 의한 피폭경로는 선택사항으로 고려할 수 있으며, 부수적인 토양 섭취에 의한 영향도 피폭경로에 일부 포함되어 있다. 아래 Fig. 2는 RESRAD 코드에서 고려된 피폭경로를 간략하게 나타내었다.

3) RESRAD 전산코드의 수학적 모델

(1) 피폭경로별 선량환산인자

RESRAD 전산코드에서는 개별핵종에 의한 피폭경로별로 선량환산인자(Dose Conversion Factor; DCF)를 도출하고, 이를 합산하여 특정 시나리오에 의한 전체적인 피폭방사능량을 평가하는 단위농도 당 선량평가 방법론을 채택하고 있다. 이에 따라 전체 피폭 방사선량 계산모델은 다음과 같은 식1, 식2로 나타낼 수 있다.

$$H_E(t) = \sum_i \sum_p H_{Ei,p}(t) \quad (식1)$$

$$H_E(t) = DCF_{i,p} \cdot ETF_{i,p} \quad (식2)$$

(2) 외부피폭 평가모델

RESRAD 전산코드에서는 오염된 토양에 의한 외부 피폭 방사선량을 평가하기 위해 반지름/면적에 대한 함수(Area/Shape Factor)를 도입하였으며, 계산 모델은 다음과 같은 식3으로 평가할 수 있다.

$$ETF_{i,p} = FO \cdot FAS \cdot FD(t) \cdot FC(t) \quad (식3)$$

(3) 섭취에 의한 내부피폭 평가모델

RESRAD 전산코드에서는 섭취에 의한 내부피폭 계산을 다음 모델과 같이 평가하고 있다(식4).

$$ETF_{i,p} = ASR_i \cdot FA \cdot FCD_i(t) \cdot FO \cdot FI \quad (식4)$$

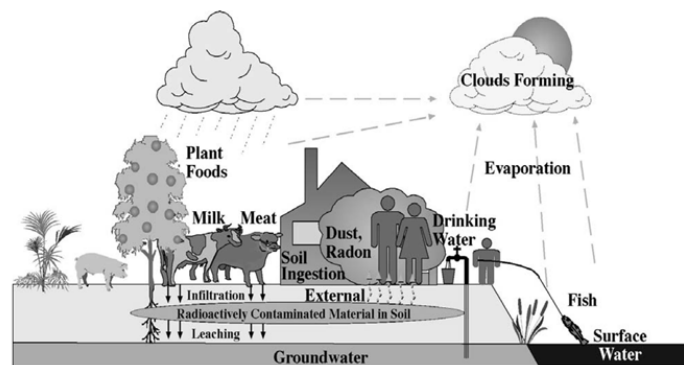


Fig. 2 Pathway of radiation identified in the RESRAD code

만약 부주의하게 오염된 토양을 섭취하는 경우, 그에 따른 피폭선량은 다음과 같은 식5로 평가할 수 있다.

$$ETF_i(t) = FA \cdot FCD(t) \cdot \sum_k DK_k \cdot FSR_{i,k}(t) \quad (\text{식5})$$

2. 평가대상의 특성

1) 발생원인 및 장소

원자력발전소에서 발생된 규제해제 대상폐기물(4.1 Ton) 중 일부는 과거 자체처분폐기물을 소각하는 과정에서 발생된 부산물이며, 일부는 청정구역에서 일반폐기물을 소각하는 과정에서 발생된 것이고 일부 소각재에서 인공 방사성핵종이 극미량 검출됨을 확인하였다.

2) 표면 방사선량률 측정 및 감마핵종분석

전용 오염검사대에 넓게 펼치고 불순물을 제거한 후 측정하였으며 최대 표면 방사선량률은 0.14 $\mu\text{Sv/h}$, 최대 표면오염도는 0.506 Bq/cm^2 로 나타났다. 이 값은 방사선량률 0.12 ~ 0.20 $\mu\text{Sv/h}$, 표면오염도 0.440 ~ 0.594 Bq/cm^2 에 해당하는 자연방사선 수준으로 나타났다. 대표 시료 채취는 오염 검사대에 펼친 뒤 12개 이상 지점에서 골고루 채취하여 분석하였다. 최대방사능농도는 ^{60}Co , ^{137}Cs 각각 $1.7142 \times 10^{-2} \text{ Bq/g}$, $1.3031 \times 10^{-2} \text{ Bq/g}$ 로 모두 MDA(최소검출방사능농도)의 값이 검출됨에 따라 평균방사능농도는 MDA를 검출 핵종 농도로 가정하여 최대값을 산출하였다.

3) 표면 방사선량률 측정 및 감마핵종분석

시료 선정은 감마핵종분석 결과 ^{60}Co , ^{137}Cs 모두 MDA 이하로 나왔기 때문에 핵종의 검출 하한 농도의 합이 최대인

시료 7개를 대표시료로 선정하였으며, 선정된 대표시료를 분말형태로 전처리 작업 후 1g을 플라멧에 넣고 얇게 퍼서 증착하였다. 분석시간은 알파베타 계수기를 사용하여 MDA를 충분히 낮춘 상태에서 1개의 시료 당 1회 분석시간을 100분 적용하여 3회 측정하였다. 소각재의 전알파 방사능 농도의 최대값은 $2.379 \times 10^{-2} \text{ Bq/g}$, 전베타 방사능 농도 최대값은 $3.412 \times 10^{-1} \text{ Bq/g}$ 으로 나왔다. Fig. 3은 대상 소각재 전알파/베타 비방사능 분석결과를 제시하였다.

MDA 및 방사능 계산식은 다음과 같으며, 계산식은 US NRC Reg. Guide 4.16 계산식 적용 하였으며, 단, 붕괴당 방출분율은 전체 알파에 대한 측정이므로 1을 적용하였다.

$$MDA = \frac{4.66 \times \sqrt{\frac{BKG}{T}}}{(\eta \times 60 \times \rho \times \tau)}$$

3. RESRAD 평가코드 입력인자

소각재의 매립 시나리오 평가를 위해선 RESRAD 전산코드에 입력변수 선정이 중요하다. 입력변수의 선정에 있어서 우선 매립지역에 대한 특성 자료를 확보하여야 하고, 그렇지 못한 경우는 국내 조사자료, 국외 문헌자료 순으로 보수적으로 채택하였다. 또한 RESRAD 전산코드는 기본 값이 내장되어 있으므로 적절한 변수를 선정하기 힘든 경우에는 Default Data를 적용하였다.

1) 기본 입력 사항

소각재 밀도(g/cm^3)는 소각재를 1L bottle에 넣고 무게를 실측하여 평균적으로 계산한 값을 적용하였으며, 소각재 감마핵종분석결과 검출하한농도를 검출핵종농도로 간주하여

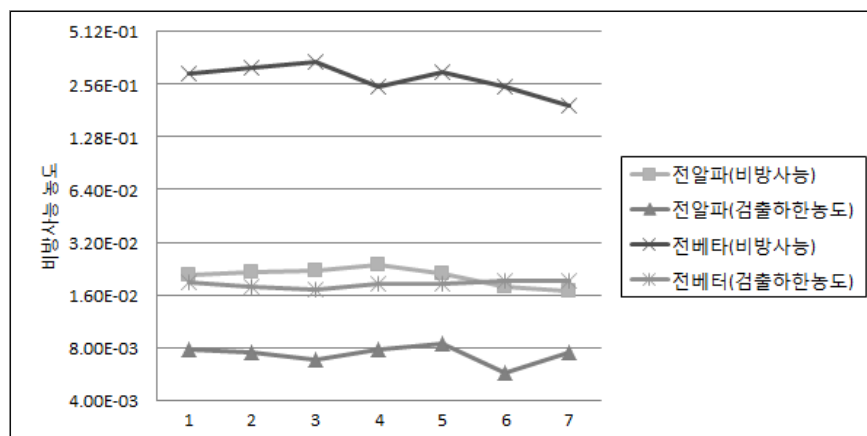


Fig. 3 Non-radioactivity analysis results of Alpha/Beta target ash

최대방사능농도로 적용하여 Table 1에 나타내었다.

자체처분 대상폐기물의 대표시료분석 결과로부터 핵종별 방사능 농도를 적용한 후 소각에 의한 자체처분 시 소각재 질량 감소에 따른 방사능 농도 농축현상과 소각재의 잔류 방사능 비율을 고려해야 한다. 폐기물 종류별 소각 감용계수 및 소각재 핵종별 환경비출 비율은 Table 2와 Table 3에 나타내었다.

2) 선량환산인자

거주자에 대한 선량환산인자 값 적용의 경우 모든 연령군을 고려해야 한다. 이에 따라 연령군 편차를 보정하기 위해

서 ICRP 72의 호흡, 섭취에 대한 DCF 값 중 가장 보수적인 대사형태 값의 2배를 적용하였다. 핵종 별 섭취 및 호흡 DCF 값은 아래 Table 4에 나타내었다.

3) 매립 시 오염지역 환산인자

오염지역의 높이는 0.2 m의 원기둥으로 가정한 계산 값은 Table 5에 나타내었다.

매립 후 표층의 토양은 50 cm로 가정하였다. 오염지역의 밀도는 0.637 kg/m³을 적용하였고, 풍속 2.8 m/s, 강수량 1,152 mm로 1981~2010년까지 20년간 포항지역 연평균 값을 구한 기상청 통계자료를 적용하였다. 나머지는 RESRAD

Table 1 Mass & density of incineration and MDA of radionuclide

Classification	Value		Note
Mass of Incineration Ash	4107.6 kg		-
Density of Incineration Ash	0.637g/cm ³		Density of Contaminated Zone
Radionuclide Concentration (Bq/g)	⁶⁰ Co	1.71E-02	Source - Nuclide concentration
	¹³⁷ Cs	1.30E-02	

Table 2 Volume reduction factor of incineration ash by type of wastes

Type of wastes	Volume reduction factor	
Dry active waste(DAW)	General product	10
	Vinyls	2.7
	Cotton product	3.9
Spent resin	52.6	
Waste oil	100	

Table 3 Ratio of environment exhaustion by type of nuclide

Nuclide	Incineration ash	Environment exhaustion
³ H, ¹⁴ C	0.1	1.0
etc.(Co-60, Cs-137)	1.1	0.1

Table 4 Correction value of DCF deviation of intake and respiration

Nuclide	Intake DCF (Sv/Bq)	Respiration DCF (Sv/Bq)
⁶⁰ Co	6.80×10 ⁻⁹	6.20×10 ⁻⁸
¹³⁷ Cs	2.60×10 ⁻⁸	7.80×10 ⁻⁸

Table 5 Calculated conversion factor of contaminated area

Classification	Calculated value	RESRAD code
Sectional area	32.25 m ²	Area of contaminated zone
Height	0.2 m	Thickness of contaminated zone
Diameter	6.4 m	Length parallel to aquifer flow

Default Data를 적용하였다. Saturated Zone, Unsaturated Zone은 RESRAD Default Data를 적용하였다. Occupancy이 inhalation rate는 7,400 m³/yr을 적용하고, 나머지는 RESRAD Default Data를 적용하였다.

Ingestion Dietary 값은 아래 Table 6에 나타내었고, 이외의 입력값은 RESRAD Default Data를 적용하였다.

Ingestion Non-Dietary 값은 아래 Table 7에 나타내었고, 이외의 입력값은 RESRAD Default Data를 적용하였다.

Storage Times 값은 아래 Table 8에 나타내었고, 이외의 입력값은 RESRAD Default Data를 적용하였다.

III. 결 과

1. 매립작업자

방사선특성 분석 결과 ⁶⁰Co, ¹³⁷Cs의 방사성핵종별 규제 해제 허용농도는 원자력안전위원회 고시[제2014-3호]에 따라 각각 0.1 Bq/g 이하여야 하며, 매립지역에 대한 정보와 RESRAD 코드의 입력 자료를 바탕으로 코드를 실행시켜 매립 작업자와 매립지역 폐쇄 후 거주자에 대해서 개인피폭선량과 집단피폭선량을 평가하였다. 매립 작업자에 대한 개인 피폭선량 평가 결과는 Table 9와 같이 국내기준(원자력안전위원회 고시 [제2014-3호 제2조])인 개인선량 10μSv/y를

Table 6 Ingestion dietary data of RESRAD

Input factor	Application value	Note
Fruit, Vegetable, and Grain consumption	347.16 kg/yr	ODCM
Leafy vegetable consumption	100 kg/yr	
Milk Consumption	73.18 L/yr	
Meat and Poultry Consumption	71.19 kg/yr	
Fish Consumption	32.41 kg/yr	
Other Sea Food Consumption	21.93 kg/yr	

Table 7 Ingestion Non-dietary data of RESRAD

Input factor	Application value	Note
Livestock Water Intake For Milk	60 L/day	KINS RR-144
Mass Loading for Foliar Deposition	6×10 ⁻⁶ g/m ²	
Groundwater Fractional Usage		
Drinking water	0.7	
Livestock water	0.5	
Irrigation water	0.5	

Table 8 Storage times data of RESRAD

Input factor	Application value	Note
Meat	7 day	KINS RR-144
Fish	1 day	
Crustacea and Mollusks	1 day	
Well Water	0.5 day	
Surface Water	0.5 day	
Livestock Fodder	75 day	

Table 9 Individual dose for landfill worker

Classification	⁶⁰ Co (μSv/y)	¹³⁷ Cs (μSv/y)	Total (μSv/y)
Incineration Ash	8.607E-02	2.604E-02	1.121E-01

Table 10 Collective dose for landfill worker

Individual dose ($\mu\text{Sv/y}$)	The number of workers(Person)	Collective dose (man-Sv/y)
1.121E-01	3	3.363E-06

Table 11 Individual dose of resident after landfill closure

Classification	^{60}Co ($\mu\text{Sv/y}$)	^{137}Cs ($\mu\text{Sv/y}$)	Total ($\mu\text{Sv/y}$)
Incineration ash	4.577×10^{-2}	2.333×10^{-2}	6.910×10^{-2}

Table 12 Collective dose of resident after landfill closure

Individual dose ($\mu\text{Sv/y}$)	The number of workers(Person)	Collective dose (man-Sv/y)
6.910E-02	31	3.475E-07

만족하였다.

매립 시 작업자에 대한 집단피폭선량은 3인으로 가정하여 개인피폭선량에 작업자 인원수를 곱하여 계산하였으며, 평가 결과는 Table 10과 같이 국내 기준(원자력안전위원회 고시 [제2014-3호 제2조])인 집단피폭선량 1 man-Sv/y를 만족하였다.

2. 매립지 폐쇄 후 거주자

매립지는 폐쇄 이후 일반인에 대한 개인피폭선량을 계산하였다. 이 때 거주 제한기간을 5년으로 가정하여, 평가시점을 5년이 경과된 시점부터 피폭선량을 계산하여 나타내었다.

Table 11과 같이 일반인에 대한 개인피폭선량 평가 결과 국내기준인 개인선량 10 $\mu\text{Sv/y}$ 를 만족하였다. 또한 매립예정지를 경상북도 포항시로 가정하여 주변 집단피폭선량을 계산하였다. 매립장 총면적은 0.067525 km^2 (67,525 m^2)이며 인구밀도는 458.08명이다.

매립지 폐쇄 이후 거주 지역에 대한 집단피폭선량을 인구수를 기준으로 집단피폭선량을 평가한 결과 Table 12와 같이 국내 기준인 1 man-Sv/y를 만족함을 확인하였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 규제 해제된 소각재를 대상으로 매립에 의한 자체처분 요건 만족을 입증하기 위해 RESRAD Ver.6.5 전산코드를 활용하여 위해도에 대한 평가를 하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

소각재의 매립에 의한 자체처분 안전성 평가 결과는 폐쇄 후 거주자의 개인선량 $6.910 \times 10^{-2} \mu\text{Sv/y}$, 집단선량 3.475×10^{-7} man-Sv/y로 일반인에 대한 국내기준인 개인선량 10 $\mu\text{Sv/y}$,

집단선량 1 man-Sv/y를 만족하였다. 또한 규제해제 방법으로 현행 원자력안전위원회고시 [제2014-3호]에 자체처분 대상 폐기물을 소각, 매립 또는 재활용 처리할 수 있음에도 불구하고, 최근의 규제해제 관련 문헌을 살펴보면 소각에 대한 규제 해제된 사례는 확인할 수가 없었다. 다만, 소각을 부분적으로만 다루고 있음을 알 수 있었다. 만약 소각에 대한 국민적 합의가 도출되고 소각공정에 의한 처리 방법이 활성화 된다면, 본 논문의 결과를 활용하여 향후 방사선학적 영향이 미미한 규제해제 대상 중 ^3H , ^{14}C 핵종으로 인해 규제해제에서 제외되는 폐수지와 활성탄의 처리가 가능할 것으로 사료된다. 추가적으로 규제해제 대상에서 제외되는 가연성 방사성폐기물(규제해제 농도의 100배 이내) 중 소각에 의한 감용 효과로 처분 시 경제적 인 기대효과가 클 것으로 예상된다.

REFERENCES

- [1] KINS, Development of Regulatory Requirements for Clearance of Radioactive Waste, KINS/RR-144, 2002
- [2] IAEA, Considerations Concerning "De Minimis" Quantities of Radioactive Waste Suitable for Dumping at Sea under a General permit TECDOC-244
- [3] ICRP, Dose Coefficients for Intake Radionuclide by Works, ICRP Publication No. 68, 1994
- [4] IAEA, Exemption of Radioactive Sources and Practices from Regulatory Control, Interim Report, TECDOC-401, 1987
- [5] IAEA, Principles for the Exemption of Radioation Sources and Practices from Regulatory Control, IAEA Safety Series No. 89, 1987
- [6] IAEA, Classification of Radioactive Waste, IAEA

- Safety Series No.111-p-1.1, 1994
- [7] IAEA, Clearance Levels for Radionuclides in Solid Materials Interim Report, TECDOC-885, 1996
- [8] IAEA, Clearance of the Materials Resulting From the Use of Radionuclides in Medicine, Industry and Research, TECDOC-1000, 1998
- [9] IAEA, Application of the concepts of exclusion exemption and clearance, IAEA RS-G-1.7, 2004
- [10] IAEA, De minimis concepts in radioactive Waste disposal : Consideration in defining de minimis quantities of solid radioactive Waste for uncontrolled disposal by incineration and landfill, TECDOC-282, 1983
- [11] US EPA, Limiting Values of Radionuclide intake and Air Concentration and Dose Conversion Factors for Inhalation, Submersion, and ingestion, EPA Federal Guidance Report No.11(EPA 520/1-88-020), 1988
- [12] KAERI, A Basic Study on the Radiological Characteristics and Disposal Methods of NORM Wastes, JNFCWT Vol.12 No.3 pp.217-233, September 2014