

원자력폐기물 소각공정에서의 작업자 및 인근주민의 피폭선량에 따른 안전성 평가

Safety Assessment of Nuclear Waste Incineration Process by Estimating Radiation Dose of Workers and Residential Individuals

서 용 칠*
Yong-Chil Seo

ABSTRACT

For the safety assessment of the demonstration-scale incineration plant for treating the combustible radioactive wastes, radiation doses of a worker and a residential individual were estimated. The demonstration plant showed a good performance of trial-burn tests using non-radioactive tracers with resulting in high mass reduction of around 40 times and very low emission of dusts through a stack, which promised a high decontamination factor in an order of 10^7 . Based on the results obtained from the trial-burns in the process, the estimation of radiation dose for workers and general publics near the plant was made using dose pathway calculation theories. The parametric values for calculation were selected from design and operational results of the process and from more conservative conditions in reference data. The estimated annual doses for workers and residential individuals were 3.07×10^{-4} and $4.35 \times 10^{-8} \mu\text{Sv/y}$, respectively, which were high enough to operate the process when comparing with the allowable dose limit in the regulation. The dose calculation models were quite applicable with showing an excellent safety for the process.

1. 서 론

원자력 발전소, 연구소 및 방사성 동위원소 사용 기관에서 발생하는 고체폐기물 중 가연성폐기물은

감용 및 안정화 측면에서 외국에서는 소각기술을 이미 활용 중에 있고 국내에서도 수차례의 기술 현황 파악 및 타당성 조사에 이어 실질적인 소각경험을 얻기 위한 연구 개발해야 한다는 필요성에 의해 한국원자력연구소에서는 1987년에 용량이 플라스

* 한국원자력연구소 방사성폐기물처리기술연구실

틱폐기물기준으로 5kg/h인 실험용 소각공정을 개발, 설치하여 본격적인 연구를 수행하기에 이르렀다¹⁾²⁾. 1987년에 설치된 실험용 소각공정을 통한 연구는 운전성 시험, 각종 운전 조건 변화시험과 발전소에서 발생하는 가연성 방사성 폐기물에 대한 모의폐기물을 제조하여 실험함으로써 1989년에 일단락 짓게 되었다. 1989년까지 총 30여회의 실험을 통하여 각 폐기물의 소각 가능성을 확인하여 소각 운전경험을 획득하였고 약 50이상의 감용비를 얻음으로써 발전소 폐기물 소각의 경우 고감용할 수 있는 가능성을 확인할 수 있었고, 온도 및 공기 주입 등의 운전 조건을 확립함으로써 실증 공정의 선정에 필요한 자료를 얻게 되어 실증화에 이르게 되었다³⁾⁴⁾. 또한 실험용 소각공정의 운전을 통하여 방사성 폐기물을 소각할 경우 가장 중점적으로 살펴 보아야 할 배기체의 시료 채취 및 감시기술도 확립하게 되었다⁵⁾.

실험용 소각공정에서 얻어진 결과를 이용하여 1990년에는 실증용 소각공정을 개발하여 건설하였다. 건설된 실증용 소각시설은 방사성 동위원소(Radio-Isotope, RI)를 이용하여 모의 시험소각의 과정을 거쳐 현재 연구소내 저장, 보관중인 RI사용 기관 발생 폐기물을 소각할 뿐만 아니라 원자력 발전소에서 발생하는 폐기물을 소각하여 봄으로써 차후에 상용소각로를 건설하기 위한 설계자료를 수집할 목적을 갖고 있다.

이러한 원자력 폐기물을 모의로 소각하거나 실제 소각을 하기 위해서는 원자력법 제76조 및 제77조와 관련되는 규정에서 정하는 기술기준에 적합하여 방사성물질 등에 의한 인체, 물체 및 공공의 재해 방지 뿐만 아니라 환경오염의 우려가 없음을 제시하여야만 한다. 따라서 필요한 안전분석 및 환경영향평가 등의 인허가를 위해 실시되게 되며 법에 정하는 절차를 거치게 된다. 물론 현재까지 원자력 폐기물을 위한 상용 소각로가 활용되지 못한 우리나라를 비롯하여 미국, 독일 등과 같이 상용소각로가 운전 중인 나라에서도 이에 관한 세부 규정을 마련하지 못하고 있는 실정으로서 소각로의 건설 및 운전을 위한 안전기준은 원자력법에서 규정한 방사성폐기물 폐기시설에 대한 기술기준과 외국의 기준을 준용할 수 밖에 없게된다. 또한 방사선 방호에 관한 피폭기준은 과기처고시 등에 있으며 이에 만족해야 하며 모든 다른 원자력시설에 적용되는 합

리적 최소피폭도달(As low as reasonably achievable, ALARA)개념에 만족되도록 건설되어야 한다.

본 논문에서는 먼저 최초에 건설되어 RI를 사용하여 실증시험이 진행 중인 원자력폐기물 실증용 소각 시설의 공정개요 및 이의 간단한 성능시험 결과를 소개하고자 한다. 그리고 얻어진 성능시험 결과와 최악의 조건 즉 보수적인 개념을 도입하여 본 시설에서 사용하려고 하는 방사성 동위원소 또는 핵종에 대한 시설내 작업자의 피폭 및 주로 굴뚝을 통해 대기로 방출되는 방사성 물질에 의한 인근주민의 피폭을 이론적으로 계산하여 봄으로서 본 시설의 안전성을 평가한 결과를 소개하고자 한다.

2. 실증용 원자력폐기물 소각시설

2.1 시설의 개요

본 실증 소각로는 현재 20~30kg/hr의 용량으로 고체폐기물을 처리하며 추후 유기폐액은 15L/hr을 처리토록 설계되어 있으며 시설의 주요한 사항은 다음과 같다.

- 소각대상 : 원전 가연성 잡기재 폐기물
원자력연구소내 발생 가연성 고체 폐기물(소내폐기물)
동위원소 가연성 고체폐기물
- 소각용량 : 20~30kg/hr(고체폐기물)
(열용량으로 420Mj/hr 기준)
- 소각대상 폐기물의 조성(고체폐기물) :

PVC	<	10wt%
고무	<	20wt%
Water	<	20wt%
종이, 천	>	40wt%
- 방사능 : 동위원소 폐기물 : 1.325 mCi/100L 드럼
원전폐기물 : 10 mCi/20L 드럼
- 제염계수 : 10⁷이상(입자기준)
- 감 용 율 : 50~100
- 감 중 율 : 20~50

2.2 시설의 각 계통의 구성

소각시설은 크게 준비계통, 소각계통, 배가스 처리계통, 소각재 처리계통 및 측정 및 제어계통으로 나눌 수 있다. 준비계통은 폐기물을 준비하는 것으

로 반입, 하역, 개봉, 분류 및 포장 등이 포함되며 현재 폐기물은 약 30cm크기 이하로 포장하거나 이미 포장된 것을 소각로에 투입하도록 되어 있다.

소각공정의 개략도가 Fig. 1에 소개되어 있으며 소각계통은 소각로와 후연소로로 구성되며 소각로는 상단부에 2 중의 Sliding Gate를 이용하여 폐기물을 투입하도록 되어 있고 하단부에는 완전한 기밀과 단열이 유지되도록 해치식 문을 설치하여 재를 제거토록 되어 있다. 재의 수거는 밀봉된 Glove Box내에서 실시하도록 되어 있다. 후연소장치는 Cyclone구조를 이용하여 가스버너로 가열토록 되어 필요시 약 1,000°C의 온도에서 충분한 공기의 주입과 함께 후연소시키도록 되어 있으며 재의수거는 소각로의 재제거장치와 유사한 Glove Box형의 장치내에서 실시된다.

배가스처리계통은 냉각후 포대여과기, 고성능 공기여과기 등을 이용하는 저온 배기체 처리방법이다. 후연소장치를 빠져 나온 배가스는 열교환기와 공기회석기를 거치면서 약 150°C~200°C의 온도로 낮추어진 후 포대여과기를 거쳐 고성능여과기를 지나도록 되어 있다. 또한 필요한 경우에는 습식 세정탑을 선택적으로 통과하도록 하여 산성가스의 배출을 억제할 수 있도록 하였다. 또한 특이한 것은 열교환기에서 냉각매체로 사용된 공기가 열교환기를 통과하여 가열된 후 소각로와 후연소로에 주입되어 연소공기로 사용될 뿐만 아니라 세정탑 후단부의 공기가열장치에서 배기체와 혼합되도록 함으로써 배기체를 회석, 가열하여 배기체를 이슬점 이상으로 유지하도록 하여 연도에서의 수분의 응축을 방지하였다.

소각재 처리계통은 소각로 하단, 후연소로 하단, 포대여과기 하단에서 수거되는 재를 처리하기 위하여 Glove Box형태의 장치를 부착하여 50L 또는 100L 드럼을 박스하단에 설치하여 수거토록 하였고 드럼은 운반용 카터에 올려져서 유압식으로 박스에 밀착토록 하며 내부에서 비닐백으로 완전히 포장되도록 한다. 수거작업 종료후 드럼을 시설외부의 폐기물 처리시설로 이송된다.

측정 및 제어계통은 공정의 운전 중에 각 공정 부위에서의 온도, 압력, 유속을 주로 측정하여 공정 전체를 정상적으로 움직이도록 조절할 뿐만 아니라 안전상에 문제가 없도록 한다. 특히 소각로를 포함한 전공정에서 약 -200~-300Pa이하로 부압을 유

지하며 소각로 및 후연소로 장치의 온도 유지와 포대여과기 전단부의 온도, 연도에서의 온도 등을 감시한다. 또한 여러 공정부위에서 배가스 중의 분진, 유해가스 농도를 감시하고 연도에서는 이들 뿐만 아니라 배기체내 방사성물질의 농도를 연속적으

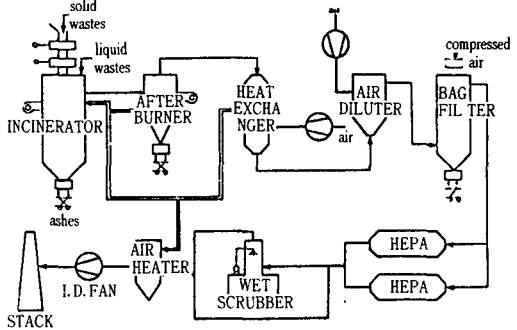


Fig. 1 A schematic diagram of the demonstration scale incineration plant

로 감시토록 하였다. 이외에도 방사선 작업 구역내의 공간 중에 방사선량, 공기 오염도를 지속적으로 감시하여 작업자의 오염이나 피폭으로 인한 문제가 발생하지 않도록 하였다.

2.3 시험소각 결과

실증용 소각시설이 건설되어 시운전을 마치고 비방사능 시험소각을 휴지, 1회용 덧신 및 방호복, 플라스틱, 천 등에 대해 실시하였다. Table 1에 시험소각결과가 정리되어 있으며 굴뚝에서의 분진 방출은 매우 낮은 결과를 보여 준다. 또한 비방사능 동위원소를 추적자로 하여 시험하여 각 장치에서의 재 중에 포집된 농도와 배기가스중 분진 시료채취를 하여 분석한 결과를 토대로 공정에서 이 제염효율을 산출해 Table 2에 정리하였다.

소각시설의 제원, 특히 조달의 높이 및 각 공정의 온도 등의 조건과 시설의 비방사성 동위원소의 제염효율과 재의 회수에 따른 감축율 등이 다음에 계산되는 방사선에 의한 피폭계산에 중요한 자료로 사용되게 된다.

자세한 시험소각 방법 및 결과 등은 관련 연구보고서⁶⁾에 자세히 소개되어 있으며 이러한 시험소각 결과를 이용하여 다음단계로 본 시설에서 시험소각

시 사용되는 방사성 동위원소의 종류인 Mn-54, Co-60, Cs-137, I-131 등을 대상으로 피폭선량을 계산해 봄으로서 시설의 안정성을 확인할 수 있게 된다.

Table 1 Results of trial-burns in demonstration-scale incineration plant

Waste	cleaning paper	disposable clothes + paper	P.P. sheet + paper	textile + paper
Amount of waste, kg	42	25.2	25.2	30
Ash Collected in total, kg	1.04	0.48	0.80	0.64
- Incinerator	1.02	0.42	0.74	0.60
- After-burn Chamber	0.02	0.04	0.04	0.04
- Bag Filter	0	0.02	0.02	0
Mass reduction factor	40	50	32	47
Conc. of Dus mg/Nm ³	0.54	0.21	0.40	0.07

* HEPA filter is not in operation for trial-burns

Table 2 Decontamination factors in tracer test

Tracer or Dust	Decontamination Factor(DF)				Overall
	Incinerator	Cyclone	Bag Filter	HEPA Filter*	
Co	2.0×10	5.0	1.5×10^2	1.0×10^3	1.5×10^7
Cs	2.6	1.1	1.4×10^2	1.0×10^3	4.0×10^5
Dust	1.5×10	1.1	1.0×10^3	1.0×10^3	1.7×10^7

* Expected DF value for HEPA filter

3. 방사능 함유 폐기를 소각시 피폭선량

방사성 동위원소 함유 폐기물의 소각실험을 통하여 일어날 수 있는 작업자의 피폭, 방사성 물질의 배출로 인한 작업자 및 인근주민의 피폭정도를 평가하기 위하여 국제원자력기구에서 제시된 폐기물 소각로에서의 작업자 및 인근 주민에 대한 피폭선량예측을 위한 관계식을 본 공정에 맞도록 수정된 이론식을 이용하여 실증용 소각시설에서의 동위원소 모의폐기물 소각시의 연간 피폭선량을 예측하여 허용기준의 만족여부를 고찰하였다⁷⁾.

3.1 소각로 평가 시나리오

방사성폐기물의 소각시에 폐기물 및 소각재의 취급, 기타 작업시에 작업자의 피폭이 수반되고, 소

각시설에서 배출되는 배기체로 인하여 인근주민의 피폭이 일어나며 이러한 방사능 피폭의 경로는 다음의 4가지로 대별될 수 있다.

- ① 폐기물, 또는 소각재로부터의 작업자의 직접적 외부피폭
- ② 연도로부터 배출되는 배기체로부터의 외부피폭이나 오염된 공기의 호흡 또는 오염된 음식물의 섭취로 인한 체내피폭
- ③ 소각재의 처분장 처분
- ④ 소각재의 기타 용도(도로 포장, 건축 자재 등)로의 사용

당 시설에서 발생하는 소각재는 발생후 관련 규정에 따라 당소의 시설운영실로 이송되어 별도로 관리되게 되므로 위 ③, ④항과는 무관하고 ①, ②항에 의한 피폭이 지배적이다^{8),9)}.

3.1.1 소각로 작업자의 피폭선량 이론

소각로 작업자의 피폭은 소각재의 취급시 비산된 소각재로 오염된 공기의 호흡으로 인한 내부피폭과 소각재 드럼으로부터의 외부피폭이 예상될 수 있다.

1) 작업자 내부피폭선량 계산식

재수거부에서의 분진의 호흡으로 야기되는 작업자의 피폭량은 다음과 같이 계산된다.

$$H_{INH,i} = mt \zeta C_d C_{w,i} DF_{INH,i} (1 - f_i) \dots\dots (1)$$

여기에서,

$H_{INH,i}$: 방사성 물질의 호흡 연간허용선량당량, Sv

m : 소각공정의 폐기물에 대한 감중비

t : 연간작업자 피폭시간, h

ζ : 작업자 호흡율, m^3/hr

C_d : 공기 중 분진의 농도, g/m^3

$C_{w,i}$: 폐기물내의 방사성 물질의 농도, Bq/g

$DF_{INH,i}$: 1 Bq의 방사성 핵종의 호흡으로 인한 피폭선량, Sv/Bq

$1-f_i$: 재중에 남아있는 핵종의 분율

2) 작업자의 외부피폭선량 계산식

소각재의 방사능으로부터 직접적인 피폭선량은 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$H_{EXT,i} = tGS_i m C_{w,i} DF_{EXT,i} (1 - f_i) \dots\dots (2)$$

여기에서,

$H_{EXT,i}$: i 핵종에 의한 연간 피폭선량, Sv

G : 방사성 오염원의 기하학적 인자 (geometry factor)

S_i : 벽, 유리 등에 의한 i 핵종의 차폐율

$DF_{EXT,i}$: 단위 농도의 i 핵종으로 오염된 흡수표면의 실효선량당량, Sv $h^{-1}/Bq g^{-1}$

3.1.2 인근주민 피폭선량 이론

실증소각공정의 연도를 통해 대기로 배출되는 방사성 입자 또는 가스로 인한 주민의 피폭경로는 공기중 방사성 물질 및 지표에 침적된 방사성 물질로 인한 외부피폭과 공기중 방사성 물질의 직접적인 호흡 또는 이에 오염된 음식물의 섭취로 인한 체내 피폭으로 대별된다.

따라서 이러한 피폭시나리오에 가장 큰 영향을 미치는 주요인자들은 다음과 같다.

① 소각시설의 성능에 관련된 인자: 연도(stack)의 높이, 배기체 처리장치의 효율, 배기체 온도 등

의 시설 성능 인자

② 방사성 오염원의 특성; 기체 또는 입자(fly ash)의 형태로 연도를 통해 대기로 배출되는 방사성 물질의 종류 및 특성

방사성 물질로 인한 개인의 피폭선량은 지표층 공기내 방사성 물질의 농도와 비례하며 지표층 공기중의 방사성 물질의 농도는 stack의 높이, 배출 배기체의 온도, 대기확산조건에 좌우된다. 지표층 방사성 물질의 공기중 농도를 예측하기 위한 여러 모델들이 개발되어 있지만 여기에서는 가장 널리 사용되고 있는 "Gaussian plume model"을 사용하였다^{8),9)}. 이로부터 확산인자 x로부터 연도를 통해 대기로 배출되는 물질의 양에 따른 최대 지표층에서의 농도를 구해낼 수 있으며 관련식은 다음과 같다.

$$C_{a,i} = x f_i R C_{w,i} \dots\dots\dots (3)$$

여기에서,

$C_{a,i}$: 농도가 최대가 되는 거리에서의 지표층에서의 i 핵종의 연간 평균농도, Bq/ m^3

x : 농도가 최대가 되는 거리에서의 지표층에서의 시간당 평균농도와 핵종농도와 연도를 통해 대기로 배출되는 물질내 핵종농도와 의 비, s/ m^3

R : 폐기물의 시간당 소각량, g/s

공기중으로 확산된 방사성 물질의 일부는 지표면에 침적된다. 침적된 방사성 물질은 기후작용(weathering), 방사능감쇄(decay) 등의 제거과정(removal process)을 거쳐 제거되기도 하지만 다시 공기중으로 부유되거나 음식물에 흡수되는 과정도 계속된다. 이러한 제거작용, 흡수작용의 반복으로 소각로의 운전수명이 종료되기 전에 지표층의 오염정도가 평형에 도달할 수도 있지만 일반적으로 소각로의 운전수명이 다하는 시점에서 지표에 침적된 방사성 물질의 농도가 최대가 되며, 이때 이로부터 공기중으로 부유되는 공기중 방사성 물질의 농도로 최대가 된다.

소각로의 운전이 종료되는 시점에서 지표면에 침적되는 방사성 물질의 농도 $C_{g,i}$ (Bq/ m^3)은 다음과 같이 구해진다.

$$C_{g,i} = V_{g,i} C_{a,i} D_i(\theta) \dots\dots\dots (4)$$

여기에서,

$V_{g,i}$: i 방사성 핵종의 침적속도, m/s^2

$D_i(\theta)$: 방사성 붕괴(decay), 기후작용(weath-

ering) 등과 같은 제거과정에 의해 침적된 i 핵종이 소멸되는데 소요되는 시간의 소각로 운전수명에 대한 적분

θ : 소각로의 운전수명, a

소각로의 운전이 종료되는 시점에서 침적된 방사성 핵종이 다시 공기중으로 부유되는 결과로 나타나는 i 핵종의 공기중 농도, $C_{r,i}$ (Bq/m³)은 다음과 같이 계산된다.

$$C_{r,i} = V_{g,i} C_{a,i} I_i(\theta) \dots\dots\dots (5)$$

여기에서,

$I_i(\theta)$: 재부유(resuspension) 인자의 소각로 운전기간에 걸친 적분 값

또, 소각로 운전이 종료되는 시점에서 j 음식물내 i 방사성 핵종의 농도 $C_{j,i}$ (Bq/kg)은 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$C_{j,i} = V_{g,i} C_{a,i} F_{ij}(\theta) \dots\dots\dots (6)$$

여기에서,

$F_{ij}(\theta)$: 단위면적당 침적속도(Bq/m²·S)에 대한 j음식물내 i핵종의 농도(Bq/kg)의 소각로 운전시간에 걸친 적분

한편 소각로로부터 공기 중으로 배출되는 배기체로 인해 개인에게 주어지는 방사능 피폭은 위에서 얻어진 여러가지의 핵종농도로부터 다음과 같은 식들을 이용하여 계산할 수 있다.

(a) 공기중 방사성 물질의 호흡

$$H_{INH,i} = (C_{a,i} + C_{r,i}) \zeta t DF_{INH,i} \dots\dots\dots (7)$$

여기에서,

$H_{INH,i}$: 연간 호흡된 i 핵종으로 인한 실효선량 당량, Sv

ζ : 성인의 평균 호흡율, m³/s

t : 소각로 주변에서의 개인의 체제시간, s

(b) 외부피폭

$$H_{EXT,i} = (C_{a,i} DF_{PE,i} G_p S_{p,i} + C_{g,i} DF_{DE,i} G_D S_{D,i}) t \dots\dots\dots (8)$$

여기에서,

$H_{EXT,i}$: 공기중 지표에 침적된 방사성 물질로 인한 연간 실제 선량 단량, Sv

$DF_{DE,i}$: 지표에 침적된 단위농도의 i 핵종으로 인한 실효선량 당량

G_p, G_D : 공기중 물질(P) 또는 지표에 침적된 물질(D)로부터 기하학적 특성을 보정한 인자

$S_{p,i}, S_{D,i}$: 공기 중 물질(P) 또는 지표에 침적된

물질(D)로 인한 외부피폭에 대한 차폐인자

(c) 오염된 음식물의 섭취로 인한 내부피폭

$$H_{ING,ij} = C_{j,i} Q_j A_j DF_{ING,i} \dots\dots\dots (9)$$

여기에서,

$H_{ING,ij}$: i핵종을 함유하는 j음식물의 연간 섭취로 인한 피폭선량, Sv

Q_j : j음식물의 섭취율(kg/a)

A_j : 배출된 배기체에 의해 오염된 j음식물의 개인당 섭취율

3.2 동위원소 모의폐기물 소각시 피폭선량 계산 결과

앞에서 기술한 방법에 따라 실증용 소각공정에서 소각될 모의폐기물내 핵종의 농도를 기준으로 하여 소각로 작업자 및 인근주민의 피폭선량을 계산하고 각 핵종별 지배적인 피폭경로도 결정하였다. 또 사용 동위원소는 원자력발전소에서 발생되고 있고 가연성 잡고체폐기물에 포함된 주요 핵종들이기 때문에 이를 기준으로 계산해 봄으로서 발전소폐기물의 실증소각시에도 적용할 수 있도록 하였다.

3.2.1 작업자 피폭 계산 및 결과

실증소각공정에서 동위원소 모의폐기물의 소각은 앞의 실험계획에 준하여 소각실험 후 익일 오전에 소각재를 전량 수거하도록 되어 있으므로 이로부터 감쇄로 인한 방사능의 감소는 무시하였다. 또 연도는 작업시설에서 완전히 분리되어 외부에 설치되고 있고, 공정은 엄격한 부압이 유지되므로 공정 배기체로부터의 작업자 피폭은 없는 것으로 가정한다(즉 $m = 1$ 및 $1-f_i = 1$ 로 적용) 또한 실증소각공정의 특성 및 참고자료로부터의 앞의 (1), (2)식에 적용될 인자를 정리하면 Table 3 및 4와 같다.

에너지 의존 차폐인자를 6.4mm 철판에 해당되는 것으로 하였으며 호흡되는 공기중 분진의 농도를 10⁻³g/m³으로 추정하였다. 이 값은 일반 작업장의 공기중 분진의 허용농도값인 5 × 10⁻³g/m³에 약간 못 미치는 값이지만 실증용 소각시설내 작업구역은 외부와 완전히 격리되어 있고 자체적으로 환기설비(ventilation system)을 갖추고 있으므로 충분히 보수적인 값이라고 볼 수 있다. 또 대기중의 분진의 방사성물질 농도는 소각후 소각재 중 방사성 물질의 농도와 동일한 값으로 가정하였다. 폐기

Table 3 Selected values of parameter for calculating radiation dose of workers at the facility

Parameter	Selected value
mass reduction factor, W	40
exposure duration, t(h/a)	100
breathing rate, ζ (m ³ /s)	3.3×10^{-4}
airborne dust concentration, C_d (g/m ³)	10^{-3}
geometry factor	1
nuclide concentration in waste, $C_{w,i}$ (Bq/g) and shielding factor	⁶⁰ Co : 148, 0.5 ⁵⁴ Mn : 148, 0.5 ¹³⁷ Cs : 148, 0.4 ¹³¹ I : 1.85, 0.2
fraction of radionuclide in remaining ash(1-f _i)	1

물의 밀도는 0.3~0.4g/m³ 정도이고 소각재는 폐기물내 불연물인 무기물 및 금속으로 남는다. 모의 폐기물은 원자력 발전소 발생잡고체폐기물을 모의한 것으로 주로 천, 휴지 및 PE비닐시트이므로 자체적으로 불연물을 거의 포함하지 않으며 실증용 소각설비의 시험 결과 평균 감중비는 약 40정도였으므로 이 값을 이용하였다.

이상과 같은 적용인자값을 기준으로 동위원소 모의폐기물 소각시의 작업자의 피폭선량 계산의 결과를 Table 5에 나타내었다.

3.2.2 인근주민 피폭 계산 및 결과

Table 6에 앞의 주민피폭 시나리오에 적용되는 인자값을 나타내었다. 계산은 소각로의 연도에서 배출된 핵종의 농도가 최고가 되는 거리에서 거주하는 주민의 피폭에 기준을 두었다. 이 농도값 및 이로부터 계산된 피폭선량은 연도의 높이, 소각로

Table 4 Dosimetric data

Radionuclide	Committed effective dose equivalent per unit intake[10]		effective dose equivalent rate from external penetrating radiation[11] above a semi-infinite absorbing medium, Sv h ⁻¹ /Bq ⁻²
	Sv Bq ⁻¹		
	DF _{INH,I}	DF _{ING,I}	DF _{EXT,I}
Mn-54	1.7×10^{-9}	7.3×10^{-10}	1.7×10^{-7}
Co-60	4.2×10^{-8}	7.0×10^{-9}	5.0×10^{-7}
Cs-137	8.7×10^{-9}	1.4×10^{-8}	1.1×10^{-7}
I-131	8.7×10^{-9}	1.4×10^{-8}	7.9×10^{-8}

Table 5 Calculated results of radiation dose for workers

Nuclide	inhalation (μSv/y)	exposure (μSv/y)	dominant pathway
Co-60	8.21×10^{-3}	7.41×10^{-2}	exposure
Mn-54	3.32×10^{-4}	2.52×10^{-2}	"
Cs-137	1.70×10^{-3}	1.04×10^{-2}	"
I-131	2.15×10^{-5}	2.34×10^{-5}	exposure/inhalation
Total	1.24×10^{-2}	2.95×10^{-1}	Total : 3.07×10^{-1}

* 작업자의 허용피폭선량 : $5 \times 10^4 \mu\text{Sv/y} = 5 \text{ R/y}$

의 용량, 공기중으로 배출되는 핵종의 농도 및 대기확산조건에 좌우된다. 계산에 가정된 확산인자(dispersion factor)의 값은 1.9×10^{-3} 으로 가정하

였으며 나머지는 실증용 소각시설의 특성 및 설계인자로 적용되었으며 기타 확산수치 및 자료는 참고문헌^{7)~9)}으로부터 얻었다.

Table 6 Selected values of parameters for calculating radiation dose of residential individuals

parameter	selected value
food intake, O_j	40
green vegetables(kg/a)	
contaminated, A_j	1
green vegetables(kg/a)	
fraction fo radionuclide releases through the stack, f_i	$^{131}\text{I} : 10$ others : 10^{-4}
incineration capacity, $R(\text{g/s})$	8.3
stack height, $h(\text{m})$	15
dispersion factor $x(\text{s/m}^3)$	3×10^{-7}
$R \ x(\text{g/m}^3)$	1.4×10^{-3}
deposition velocity, V_g	5×10^{-3}
breathing rate, $\zeta(\text{m}^3/\text{s})$	2.7×10^{-4}
exposure duration, t	
outdoors	1800h
indoors	1410h
resting	2900h
time-integral of the ground loss of material from the ground surface by the removal processes, $D_i(\theta)$, a	$D_i(\theta) = \frac{1 - e^{-(\lambda_i + \lambda_g)\theta}}{\lambda_i + \lambda_g}$ $\lambda_i = 0.693/T \quad \lambda_g = 0.01$
Time-integral(a) of the resuspension factor, $I_i(\theta)$ (s/m)	
^{137}Cs	0.36
^{60}Co , ^{54}Mn , ^{131}I	0.2
Time-integrated concentration in food per unit concentration on the ground, $F_{ij}(\theta)$ for Green Vegetables	
^{54}Mn	8.2×10^{-3}
^{60}Co	6.6×10^{-3}
^{137}Cs	9.7×10^{-3}
^{131}I	6.2×10^{-4}

Table 7. Calculated results of radiation dose for residential individuals

Nuclide	inhalation ($\mu\text{Sv/y}$)	exposure ($\mu\text{Sv/y}$)	ingestion ($\mu\text{Sv/y}$)	dominant pathway
Co-60	1.78×10^{-9}	7.29×10^{-15}	3.46×10^{-14}	inhalation
Mn-54	1.77×10^{-9}	7.61×10^{-19}	1.18×10^{-14}	"
Cs-137	1.78×10^{-8}	2.88×10^{-12}	4.87×10^{-33}	"
I-131	2.22×10^{-8}	4.37×10^{-18}	1.37×10^{-14}	"
Total	4.35×10^{-8}	2.89×10^{-12}	5.47×10^{-13}	Total : 4.35×10^{-8}

* 일반 주민의 허용피폭선량 : $5,000 \mu\text{Sv/y} = 500 \text{mR/y}$

Table 7에 계산의 결과를 나타내었는데 일반인의 연간개인별 허용 피폭선량에 훨씬 못미치는 4.

$35 \times 10^{-8} \mu\text{Sv/y}$ 로 실증소각로에서 동위원소 모의 폐기물의 소각으로 인한 인근 주민의 피폭선량은

무시할 수 있는 정도로 낮은 값으로 계산되었다.

3.3 계산결과 해석 및 공정의 안전성 평가

원자력폐기물의 소각시설의 방사선적 안정성 확인을 위해 작업자 및 인근주민에 대한 방사선 피폭선량을 계산하여 보았고 이에 사용된 인자는 앞에서 기술한 바와 마찬가지로 보수적인 수치와 실증용 시설의 사양 등 이었다.

작업자 피폭의 주요경로는 소각재 취급시의 I-131의 경우를 제외하고는 분진의 호흡으로 인한 내부피폭 보다는 소각재 취급시에 직접적인 외부피폭에 의한 것으로 작업시간에 특히 영향을 받는 것을 결과로부터 확인할 수 있었다. I-131의 경우 가스상으로 존재하는 경향이 있으므로 호흡에 의한 내부피폭과 작업시 외부피폭이 거의 같은 값을 보이고 있다. 계산에 나타난 총 피폭선량은 $0.307 \mu\text{Sv/y}$ 로 실제 법적으로 제한하고 있는 작업자의 연간 허용 피폭선량인 $5 \times 10^4 \mu\text{Sv/y}$ 에는 크게 못 미치는 값이므로 본 소각공정에서의 방사성 동위원소를 이용한 시험소각시에 방사선 피폭상의 안전성을 확신할 수 있었다. 소각재의 수거는 소각실험을 실시한 다음날 오전에 실시하게 되는데 별도의 재수거 작업없이 재가 모아진 드럼을 수거하도록 되어 있어 가능한 짧은 시간(10~20분)에 처리가 가능하여 가정된 연간작업시간 100시간에 훨씬 못 미치는 값이 될 것으로 실제로는 계산의 결과보다 훨씬 낮은 값을 나타낼 것이다.

인근주민의 연간 방사선 피폭선량 계산 결과 일반주민의 연간 허용피폭선량($5,000 \mu\text{Sv/y}$)과 비교할때 거의 무시할 수 있는 값인 $10^{-8} \mu\text{Sv/y}$ 정도로서 주 경로는 흡입에 의한 피폭임을 알 수 있었다. 역시 I-131의 경우 적은 양의 방사능을 넣어 시험함에도 불구하고 다른 방사선 물질보다 더 높은 피폭선량을 보여주고 있다.

그러나 이러한 피폭선량은 아주 작은 값으로 자연방사능($200\text{mR/y} = 2,000 \mu\text{Sv/y}$)에 의한 피폭선량과 비교할 때에도 무시될 수 있는 값이었다.

실험을 위해 사용된 동위원소 중 Co-60, Cs-137, Mn-54 등은 원자력발전소 발생가연성폐기물에 다량 포함된 방사성 핵종이며, I-131은 국내 동위원소 이용기관에서 발생되는 방사성 폐기물에 많이 포함되어 있는 핵종으로 본 동위원소 사용 소각실험의 결과에 따라 실험에 사용되는 방사선

농도보다 훨씬 높은 농도를 갖는 폐기물도 충분히 소각 가능하게 되며 혹 소각되는 폐기물의 방사능 농도가 높더라도 전체 폐기물 중의 핵종농도를 인수기준으로 설정하여 제한한다면 발전소 및 동위원소 폐기물의 실증소각시에도 작업자나 인근주민에게 미치는 방사선 피폭의 영향은 없게 될 것이다. 물론 이러한 인수기준은 주로 소각시설의 굴뚝에서 대기로 방출해도 되는 배가스 중의 방사성 물질의 허용방출기준에 의하여 적용하기도 하지만²⁾ 여기서 계산한 작업자 및 인근주민의 방사선 피폭선량을 가지고 이를 상호 확인하여 안전성을 평가하는 것이 바람직할 것이다.

4. 결 론

원자력폐기물 소각공정에 대한 안전성평가의 일환으로 실시된 시설의 성능시험을 위한 시험소각 및 이의 방사성 물질 소각시 작업자 및 인근주민의 피폭에 대해 이론식을 사용하여 계산한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 실증용 소각공정의 시험소각 결과 감중율은 약 40, 굴뚝으로의 분진 방출은 0.5mg/Nm^3 이하로서 계산된 제염효율은 약 10^7 정도로 우수한 운전 성능을 보였다.
- 2) 시험소각에서 얻어진 결과의 소각공정의 체원 및 자료로부터의 정보를 토대로 가장 보수적인 조건에서 방사선피폭경로 이론을 이용하여 소각공정의 안전성을 평가하였으며 작업자의 연간 피폭은 $3.07 \times 10^{-1} \mu\text{Sv}$ 및 인근주민의 연간 피폭은 $4.35 \times 10^{-8} \mu\text{Sv}$ 로서 법적 규제치보다 훨씬 낮은 값으로 계산되어 방사선적 안전성이 입증되었다.
- 3) 작업자의 방사선 피폭은 주로 재의 수거시에 작업자의 외부피폭에 의한 것으로 나타났으며 기계화 되기 쉬운 I-131같은 동위원소의 경우는 호흡에 의한 피폭도 외부피폭과 비슷한 값을 보였다.
- 4) 인근주민의 피폭의 경우 호흡에 의한 내부 피폭이 지배적이었으나 그 수치는 미미한 것으로 자연 방사선 피폭과 비교할 때에도 무시할 정도였다.
- 5) 사용된 피폭경로에 의한 방사선 피폭 계산식들은 추후 실제 폐기물 소각시에도 적용 가능하며

역으로 폐기물 중의 비방사능 농도를 계산하여 소각시설의 인수기준 설정에 도움을 줄 것을 예상된다.

참 고 문 헌

- 1) 김준형 외, 소각기술개발(I), KAERI/R-R-788/88, 한국에너지연구소, 1989.
- 2) Seo, Y. C., Volume Reduction and Decontamination Factor of the Bench-Scale Incineration Process, The J. of Korean Nuclear Society, 21, No. 4, 321, 1989.
- 3) Seo, Y. C., et al., Assessment of a Bench-Scale Incineration Process for Radioactive Wastes, J. Waste Management, 10, No. 3, 233, 1990.
- 4) 서용칠 외, 다종모의폐기물의 실험규모소각, 대한환경공학회지, 제14권 3호, 143, 1991.
- 5) 서용칠, 방사성폐기물 소각공정에서의 집진, 한일분체공학세미나 논문집, 한국화학공학회, 1993.
- 6) 김준형 외, 방사성폐기물 처리기술개발(V), KAEERI-NEMAC/RR-62/92, 1993.
- 7) IAEA, Exemption of Radiation Sources and Practices from Regulatory Control, IAEA, Vienna, IAEA-TECDOG-401, 1987.
- 8) IAEA, Generic Models and Parameters for Assessing the Environmental Transfer of Radionuclides from Routine Releases : Exposures of Critical Groups. Vienna, IAEA Safety Series No. 57, 1982.
- 9) IAEA, Atmospheric Dispersion in Nuclear Power Plant Siting, IAEA Safety Series No. 50-SG-S3.
- 10) ICRP, Limits for intake of Radionuclides by Workers. Oxford, Pergamon Press, ICRP Publication 30. Ann. ICRP, 3, No. 1-4 1979~1982.
- 11) DOURY, A., Une methode de calcul pratique et generale pour la prevision numerique des pollutions vehiculees par l'atmosphere. Report CEA-R 4280.