

원전 인허가승인을 위한 사고결말평가에서 지표침적에 의한 피폭의 민감도 분석

황원태, 정해선, 정효준, 김은한, 한문희

한국원자력연구원

2014년 5월 7일 접수 / 2014년 5월 27일 1차 수정 / 2014년 6월 4일 채택

원전의 인허가 승인을 위한 사고결말평가에서 경수로의 미국의 규제지침에서 제시한 바와 같이 방사성물질의 지표침적의 고려를 허용하지 않고 있는데 반해 중수로의 규제지침에서는 이의 고려를 허용하고 있다. 이러한 배경에 따라 본 연구에서는 방사성물질의 지표침적에 의한 피폭영향의 민감도를 정량적으로 고찰, 분석하였다. 가상사고 시나리오를 구성하여 Cs-137과 I-131의 환경방출에 따른 총 피폭선량을 평가한 결과, 방사성물질의 지표침적과 이로 인한 공기중 농도의 감손을 고려치 않는 경우에 보다 보수적 결과를 나타냈다. 이는 지표침적에 의한 피폭선량이 총 피폭선량에 미치는 기여는 상대적으로 적는데 비해 지표침적으로 인한 공기중 농도의 감손이 총 피폭선량에 미치는 기여는 상대적으로 크기 때문이다. 대기안정도, 방출기간, 평가거리 등에 따라 차이는 있지만 두 핵종 모두 총 피폭선량에 대해 흡입에 의한 피폭이 90% 이상을 차지했으며, 지표침적에 의한 피폭은 기껏해야 10% 미만을 나타냈다. 지표침적의 고려에 따른 총 피폭선량의 감소는 ¹³⁷Cs 보다는 ¹³¹I의 경우에 보다 컸으며, 대기가 안정하고 방출기간이 길수록, 그리고 방출점으로부터 평가지점이 멀수록 감소경향은 보다 뚜렷하게 나타났다.

중심어: 사고결말평가, 규제지침, 지표침적, 공기중 농도, 피폭선량

1. 서론

원자력발전소(원전)의 건설·운영허가를 위한 안전성 분석에서는 원전의 운영기간동안에 공학적 측면에서 발생할지 모르는 불의의 사고가 발생하더라도 일반인이 받는 방사능위해는 충분히 낮다는 것을 입증해야 한다. 이를 위해서는 사고로 인해 환경으로 방출되는 방사성물질의 대기중 거동에 대한 평가가 중요한데, 이는 넓은 범위의 불확실성을 나타낸다. 이로 인해 원전 공급국의 규제지침에서 제시하는 대기중 거동에 대한 평가방법은 여러 중요한 차이를 보인다.

경수로와 중수로의 가상사고에 따른 사고결말평가방법은 각각 미국 원자력규제위원회(U. S. Nuclear Regulatory Commission; U. S. NRC)의 규제지침(Regulatory Guide) [1,2]과 캐나다 국가표준지침서(National Standard of Canada)[3]에 제시되어 있다. 두 노형간 대기확산평가에서 중요한 차이점으로 경수로의 경우에는 지표침적과 방사능붕괴에 의한 공기중농도의 감손을 허용하지 않는데 반해 보다 실질적으로 평가하는 중수로의 경우에는 이를 허용한다. 이러한 방사성물질의 거동의 고려에 따라 경수로의 경우에는 방사능운에 의한 외부피폭과 흡입에 의한 내부피폭만을 고려하는데 비해 중수로의 경우에는 경수

로에서 고려하는 피폭경로 이외에 추가적으로 지표침적에 의한 외부피폭의 반응을 권고하고 있다.

국내에서는 경수로 뿐 아니라 중수로가 운영 중에 있지만 인허가 승인을 위한 사고결말평가 규제지침은 노형별 구분없이 경수로 평가방법에 기반하고 있다. 따라서 합리적 보수성에 입각한 국내 고유의 규제 기술기준을 설정하기 위해서는 방사성물질의 대기중 거동의 평가방법에 따른 사고결말의 정량적 차이에 대한 이해가 필요하다. 본 연구에서는 미국의 규제 기술기준에 기반하여 두 다른 노형의 특성적 차이점인 방사성물질의 지표침적과 이로 인한 피폭경로의 고려에 따른 사고결말의 영향을 정량적으로 비교·분석하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 사고시 대기확산인자

원자력안전위원회 고시 제2012-19호(원자로29) “원자로시설 부지의 기상조건에 관한 조사·평가 기준”[4]에서는 U. S. NRC의 규제지침 1.145 [1]에 기반하여 국내 원자력시설 부지적합성 입증을 위한 사고시 대기확산인자(atmospheric dispersion factor) 평가방법을 제시하고 있다. 직선계적 Gaussian 플룸 모델에서 대기확산인자는 방사성물질의 방출률(Q , Bqs⁻¹)에 대한 공기중 농도(χ ,

교신저자: 황원태, wthwang@kaeri.re.kr
대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111 한국원자력연구원 (305-353)

Bqm⁻³)의 비로 정의되며, 이는 환경으로 방출된 방사성물질이 확산되는 정도를 나타낸다. 원전의 수명기간중 사고는 어떤 기상조건에서 발생할지 예측하기 힘들기 때문에 부지에서 다년간 측정된 기상자료를 사용하여 통계적 방법을 사용하여 평가한다. 국내 경수로 뿐 아니라 중수로의 경우 환경으로 방출되는 방사성물질은 원자로건물 및 주변건물이 확산에 영향을 주지 않을 정도의 충분한 높이의 굴뚝(stack)이 없는 설계특성을 가지고 있다. 이러한 유형의 방출을 U. S. NRC에서는 지표면 방출(ground release)로 간주하며, 피폭자가 위치하는 지상에서 플룸의 중심선에 대한 대기확산인자(atmospheric dispersion factor)는 다음 식으로 평가한다.

$$\frac{\chi}{Q} = \frac{1}{U_{10}(\pi\sigma_y\sigma_z + A/2)} \quad (1)$$

$$\frac{\chi}{Q} = \frac{1}{U_{10}(3\pi\sigma_y\sigma_z)} \quad (2)$$

$$\frac{\chi}{Q} = \frac{1}{U_{10}\pi\sum_y\sigma_z} \quad (3)$$

여기서,

$\frac{\chi}{Q}$: 대기확산인자 (secm⁻³)

U_{10} : 10 m 높이에서 측정된 풍속 (msec⁻¹)

σ_y : 수평확산계수 (m)

σ_z : 수직확산계수 (m)

A : 건물의 최소단면적 (m²)

\sum_y : 플룸의 사행효과(meandering effect)를 반영한 수평확산계수 (m)

대기확산인자는 풍속과 대기안정도에 따라 상기 식으로부터 얻어진 값을 비교하여 선택된다. 풍속이 6 msec⁻¹보다 낮고 대기안정도가 중립(대기안정도 등급 D) 또는 안정상태(대기안정도 등급 E, F, G)에서는 식 (1)과 식 (2)로 평가된 대기확산인자 값 중에서 보다 높은 값이 선택되고, 이 값을 식 (3)으로 평가된 대기확산인자 값과 비교하여 보다 작은 값이 선택된다. 상기 기상조건 이외의 경우에 대해서는 식 (1)과 식 (2)로 평가된 대기확산인자 중에서 보다 높은 값이 선택된다. 이렇게 얻어진 대기확산인자 값에 기상자료의 결합빈도분포(joint frequency distribution)를 적용하면, 16개 방위별 대기확산인자 값의 누적확률분포와 부지전체 대기확산인자 값의 누적확률분포를 구할 수 있다. 이들 누적확률분포로부터 극히 보수적인 값(방향별 99.5% 또는 부지전체 95% 값)이 최종적으로 사고후 2시간 대기확산인자(단기 대기확산인자) 값으로 결정되어 사고결말평가에 적용된다. 단기 대기확산인자는 상기에서 기술한 바와 같이 확산에 극히 좋지 못한 기상조건, 즉 풍속이 낮고 대기가 안정한 기상조건에 해당하기 때문에 많은 경우 식 (3)이 단기 대기확산인자 값의 결정에 주도적 영향을 미친다. 따라서 본 연구에서는 식 (3)을 기반으로 하여 방사성물질의 지표침적이 사고결말평가에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다.

2.2 방사성물질의 지표침적

환경으로 방출된 방사성물질은 기상 및 환경조건에 따라 이동·확산된다. 이러한 과정동안 중력과 분자의 확산 등으로 지표면으로 침적되는 물리적 과정을 건침적(dry deposition)이라 한다. 건침적되는 정도는 건침적속도(v_d , msec⁻¹)를 사용하여 추산될 수 있다. 건침적으로 인해 공기중 방사성물질의 농도는 감소되는데 지표방출의 경우 건침적에 따른 대기확산인자는 다음 식을 사용하여 보정될 수 있다[5].

$$f_i^d = \exp\left(-\sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{v_{d,i}}{\sigma_z} t\right) \quad (4)$$

여기서,

i : 방사성핵종

f_i^d : 건침적으로 인한 대기확산 보정인자

t : 방사성물질의 이동거리 (m)

실험으로 얻어지는 건침적속도는 방사성핵종과 실험조건 등에 따라 그 값의 범위는 매우 넓게 나타난다. 건침적속도의 최적 값으로 입자상핵종의 경우 1×10⁻³ msec⁻¹, 원소형 요오드(elemental iodine)의 경우 1×10⁻² msec⁻¹, 유기형 요오드(organic iodine)의 경우 1×10⁻⁴ msec⁻¹가 사고결말평가에서 일반적으로 적용되며, 불활성기체나 삼중수소 등은 건침적이 거의 이루어지지 않기 때문에 이에 대한 영향은 무시한다[6].

방사성물질이 환경으로 방출되는 기간 중에 강우가 있는 경우 공기중 방사성물질은 강우로 의해 침적되는데 건침적과 구분하여 이를 습침적(wet deposition)이라 한다. 습침적되는 정도는 세류비(washout ratio, ω)를 사용하여 추산될 수 있다. 습침적으로 인해 공기중 농도는 감소되는데, 이에 따른 대기확산인자는 다음 식을 사용하여 보정될 수 있다[6].

$$f_i^w = \exp\left(-\frac{\omega_i}{L} t\right) \quad (5)$$

여기서,

f_i^w : 습침적으로 인한 대기확산 보정인자

L : 혼합층의 높이 (m)

일반적으로 강우는 대기가 비교적 안정한 조건에서 발생하기 때문에 혼합층의 높이는 500 m로 설정한다. 실험치인 세류비는 건침적속도와 마찬가지로 방사성핵종과 실험조건 등에 따라 값의 범위는 다양하게 나타난다. 혼합층높이 500 m에 대해 사고결말평가에서는 입자상핵종의 경우 3×10⁵, 원소용 요오드에 대해 2×10⁵를 적용하며, 불활성기체나 삼중수소 등은 습침적이 거의 이루어지지 않기 때문에 습침적의 영향은 무시한다[6]. 유기형 요오드는 같은 혼합층높이에 대한 최적 값이 제시되지는 않으나, 동일 문헌에서 원소형에 비해 100~1000배의 낮은 값을 나타낸다[6].

결과적으로 건침적과 습침적을 반영하여 수정된 대기

확산인자($(\chi/Q)_m$)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\left(\frac{\chi}{Q}\right)_{m,i} = \left(\frac{\chi}{Q}\right) f_i^d f_i^w \quad (6)$$

2.3 피폭선량

사고결말평가에서 피폭경로는 방사성물질이 환경으로 방출되는 기간동안만 고려되며, 경수로의 경우에는 방사성물질의 방출 최대기간을 30일로 설정하고 있다. 방사성물질의 환경방출로 인한 오염 식품의 섭취는 방출기간동안 쉽게 통제 가능하고 또한 다른 피폭경로에 비해 그 영향이 사소하기 때문에 인허가 승인을 위한 사고결말평가에서는 고려하지 않는다.

방사능운에 의한 외부피폭선량(D_{plume} , mSv)과 흡입에 의한 내부피폭선량(D_{inh} , mSv)은 각각 다음 식으로 평가할 수 있다.

$$D_{plume,i} = \left(\frac{\chi}{Q}\right)_{m,i} Q_i DF_{plume,i} T \quad (7)$$

$$D_{inh,i} = \left(\frac{\chi}{Q}\right)_{m,i} Q_i Br DF_{inh,i} T \quad (8)$$

여기서,

$DF_{plume,i}$: 방사능운에 의한 외부피폭 선량계수 (mSv sec⁻¹ per Bqm⁻³)

$DF_{inh,i}$: 흡입에 의한 내부피폭 선량계수 (mSvBq⁻¹)

Br : 호흡률 (m³sec⁻¹)

T : 방출기간 또는 피폭기간 (sec)

방사성물질의 방출율이 일정하다고 가정하면 지표오염에 의한 외부피폭선량을 계산하기 위한 지표농도(C_g , Bqm⁻²)는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$C_{grd,i} = \left(\frac{\chi}{Q}\right)_{m,i} Q_i (v_{d,i} + v_{w,i}) \left(\frac{T}{2}\right) \quad (9)$$

여기서,

$v_{w,i}$: 습침적속도 (msec⁻¹)

$$v_{w,i} = 2.78 \times 10^{-8} \omega_i I \quad (10)$$

I : 강우강도 (mmhr⁻¹)

지표침적에 의한 외부피폭선량(D_{grd} , mSv)은 다음 식으로부터 평가될 수 있다.

$$D_{grd,i} = C_{grd,i} DF_{grd,i} T \quad (11)$$

여기서 $DF_{grd,i}$ 는 오염지표에 의한 외부피폭 선량계수(mSvsec⁻¹ per Bqm⁻³)이며, 사고로 인한 총 피폭선량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D_{total,i} = D_{plume,i} + D_{inh,i} + D_{grd,i} \quad (12)$$

3. 결과 및 고찰

U. S. NRC의 규제지침에서 제시하고 있는 경수로의 가상사고에 대한 대기확산인자 평가모델을 기반으로 지표침적에 의한 피폭영향의 민감도를 정량적으로 고찰하였다. 사고결말해석에서 중요한 핵종인 ¹³⁷Cs과 ¹³¹I에 대해 지표침적의 고려 유무에 따라 표준인(성인)에 대한 피폭선량(¹³⁷Cs은 유효선량, ¹³¹I은 갑상선등가선량)을 평가하였다. 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency; IAEA)의 권고에 따라 흡입에 의한 선량계수로 ¹³⁷Cs의 경우 직경 1μm이고 폐흡수는 fluor(F) 형태, ¹³¹I은 원소형을 선택하였다[8]. 방출기간 또는 평가기간동안 두 핵종은 각각 1 Bqsec⁻¹의 알정한 방출율을 가정하였으며,

Table 1. Effective Doses in Case of with and without the Consideration of Deposition of ¹³⁷Cs, Assuming a Constant Release Rate of 1 Bqsec⁻¹ over the Entire Duration of Release.

Release duration (distance)	Deposition	Stability	Dose (mSv)			Total dose
			Plume	Inhalation	Ground	
2 hours (1 km)	Not considered	E	7.44x10 ⁻¹⁴	1.28x10 ⁻⁹	-	1.28x10 ⁻⁹
		F	1.30x10 ⁻¹³	2.22x10 ⁻⁹	-	2.22x10 ⁻⁹
		G	1.98x10 ⁻¹³	3.40x10 ⁻⁹	-	3.40x10 ⁻⁹
	Considered	E	7.01x10 ⁻¹⁴	1.20x10 ⁻⁹	1.01x10 ⁻¹³	1.20x10 ⁻⁹
		F	1.20x10 ⁻¹³	2.05x10 ⁻⁹	1.72x10 ⁻¹³	2.05x10 ⁻⁹
		G	1.78x10 ⁻¹³	3.05x10 ⁻⁹	3.05x10 ⁻¹³	3.05x10 ⁻⁹
30 days (5 km)	Not considered	E	3.90x10 ⁻¹²	4.47x10 ⁻⁸	-	4.48x10 ⁻⁸
		F	7.22x10 ⁻¹²	8.28x10 ⁻⁸	-	8.28x10 ⁻⁸
		G	1.30x10 ⁻¹¹	1.50x10 ⁻⁷	-	1.50x10 ⁻⁷
	Considered	E	3.28x10 ⁻¹²	3.76x10 ⁻⁸	1.70x10 ⁻⁹	3.93x10 ⁻⁸
		F	5.92x10 ⁻¹²	6.79x10 ⁻⁸	3.07x10 ⁻⁹	7.10x10 ⁻⁸
		G	1.02x10 ⁻¹¹	1.18x10 ⁻⁷	5.32x10 ⁻⁹	1.23x10 ⁻⁷

Table 2. Thyroid Equivalent Doses in Case of with and without the Consideration of Deposition of ¹³¹I, Assuming a Constant Release Rate of 1 Bqsec⁻¹ over the Entire Duration of Release.

Release duration (distance)	Deposition	Stability	Dose (mSv)			Total dose
			Plume	Inhalation	Ground	
2 hours (1 km)	Not considered	E	1.44x10 ⁻¹¹	1.08x10 ⁻⁷	-	1.08x10 ⁻⁷
		F	2.51x10 ⁻¹¹	1.89x10 ⁻⁷	-	1.89x10 ⁻⁷
		G	3.83x10 ⁻¹¹	2.88x10 ⁻⁷	-	2.88x10 ⁻⁷
	Considered	E	9.79x10 ⁻¹²	7.36x10 ⁻⁸	1.28x10 ⁻¹¹	7.36x10 ⁻⁸
		F	1.40x10 ⁻¹¹	1.05x10 ⁻⁷	1.82x10 ⁻¹¹	1.05x10 ⁻⁷
		G	1.60x10 ⁻¹¹	1.21x10 ⁻⁷	2.09x10 ⁻¹¹	1.21x10 ⁻⁷
30 days (5 km)	Not considered	E	7.55x10 ⁻¹⁰	3.79x10 ⁻⁶	-	3.79x10 ⁻⁶
		F	1.40x10 ⁻⁹	7.02x10 ⁻⁶	-	7.03x10 ⁻⁶
		G	2.52x10 ⁻⁹	1.27x10 ⁻⁵	-	1.27x10 ⁻⁵
	Considered	E	3.84x10 ⁻¹⁰	1.93x10 ⁻⁶	1.80x10 ⁻⁷	2.11x10 ⁻⁶
		F	5.53x10 ⁻¹⁰	2.78x10 ⁻⁶	2.59x10 ⁻⁷	3.04x10 ⁻⁶
		G	6.52x10 ⁻¹⁰	3.28x10 ⁻⁶	3.06x10 ⁻⁷	3.59x10 ⁻⁶

제한구역경계(exclusion area boundary; EAB)와 저인구 지대(low population zone; LPZ) 외곽경계의 대표적 거리로 각각 1 km, 5 km를 평가지점으로 선정하였다. EAB에 대해서는 사고후 2시간동안 방출에 대해 호흡률 3.47x10⁻⁴ secm⁻³, LPZ 외곽경계에 대해서는 30일동안 방출에 대해 호흡률은 2.32E-4 secm⁻³을 적용하였다[2]. 우리나라의 연간 평균 강우량(약 1200mmyr⁻¹)을 적용하여, 연간 내내 일정한 강우율을 가정하였다. 사고시 단기 대기확산인자에 지배적 영향을 미치는 안정한 대기조건(Pasquill-Gifford 대기안정도 등급에서 E(약간안정), F(안정), G(극히 안정)에 해당, 풍속 1 msec⁻¹에 대해 다양한 평가가 수행되었다. 방사능붕괴는 짧은 반감기를 갖는 방사성핵종을 제외하고 방출지점으로부터 짧은 거리, 짧은 시간 동안에는 사고결말평가에 중요한 영향을 미치지 않으므로 본 평가의 논의에서 제외하였다.

표 1과 표 2는 각각 ¹³⁷Cs과 ¹³¹I에 대해 대기안정도에 따라 지표침적을 고려하지 않은 경우와 고려하였을 경우 피폭선량을 보여준다. 두 핵종 모두 지표침적을 고려하지 않은 경우 총 피폭선량에 있어서 보다 보수성을 나타냈다.

그림 1은 ¹³⁷Cs에 대해 지표침적을 고려하지 않은 경우에 대한 지표침적을 고려하였을 경우 총 피폭선량의 비를 나타냈다. 방사성물질의 방출 후 2시간과 30일 동안 피폭선량은 지표침적을 고려한 경우는 고려하지 않은 경우에 비해 대기안정도에 따라 6%~10%, 12%~18%의 감소를 나타냈다. 건침적은 총 피폭선량에 대해 방사성물질의 방출 후 2시간과 30일에 대해 대기안정도에 따라 각각 4%~8%, 5%~12% 정도, 습침적은 총 피폭선량에 대해 대기안정도와 무관하게 각각 2%, 7% 정도의 감소에 기여한 것으로 나타났다. 피폭경로별 기여도는 지표침적을 고려한 2시간 동안 총 피폭선량의 경우 흡입에 의한 내부피폭이 99% 이상을 차지하였으며, 방사능운과 지표침적에 의한 외부피폭의 기여는 무시 가능한 수준이었다. 30일 동안 총 피폭선량의 경우에는 흡입에 의한 내부피폭이

95.7%, 지표침적에 의한 외부피폭이 4.3% 정도를 나타냈으며, 방사능운에 의한 외부피폭의 영향은 무시 가능한 수준이었다.

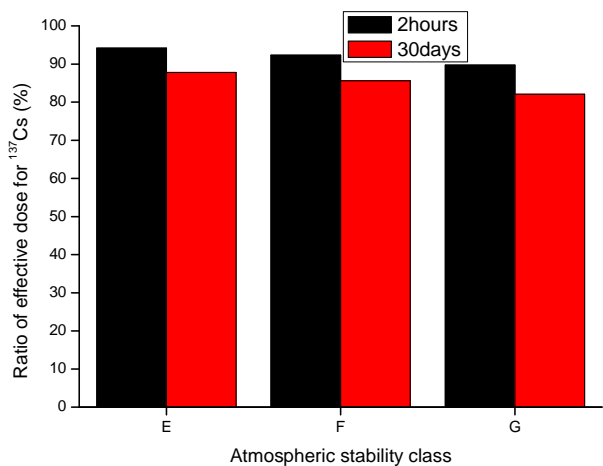


Fig. 1. Ratio of effective dose in case of with the consideration of deposition to without consideration of deposition for ¹³⁷Cs.

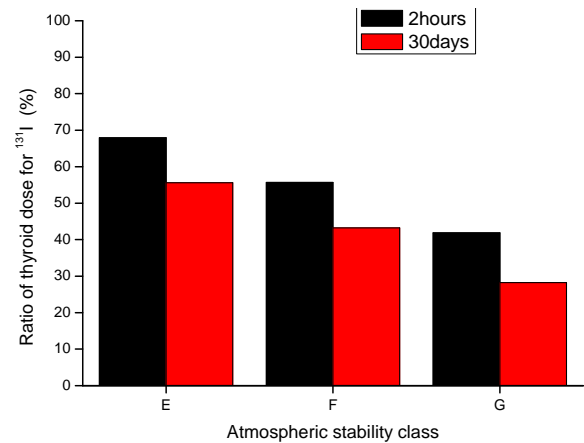


Fig. 2. Ratio of thyroid equivalent dose in case of with the consideration of deposition to without consideration of deposition for ¹³¹I.

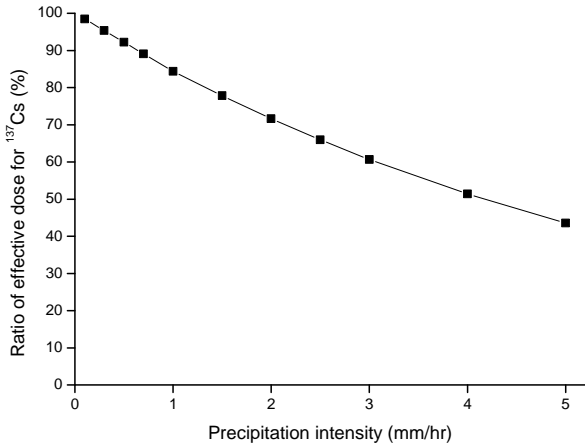


Fig. 3. Reduction of effective dose for ¹³⁷Cs as a function of rainfall intensity at 1 km distance from a release point.

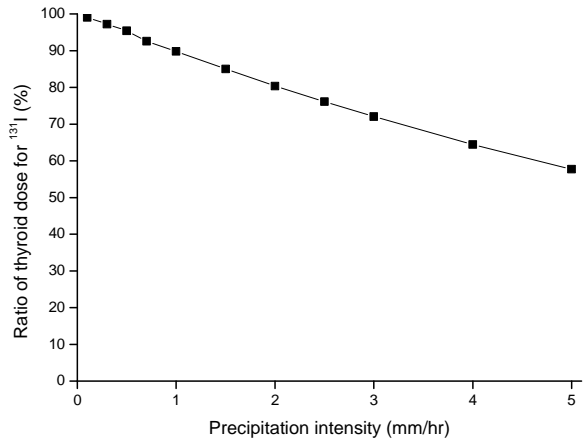


Fig. 5. Reduction of thyroid equivalent dose for ¹³¹I as a function of rainfall intensity at 1 km distance from a release point.

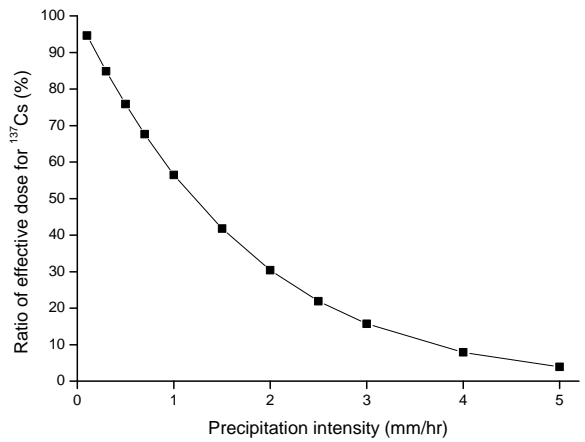


Fig. 4. Reduction of effective dose for ¹³⁷Cs as a function of rainfall intensity at 5 km distance from a release point.

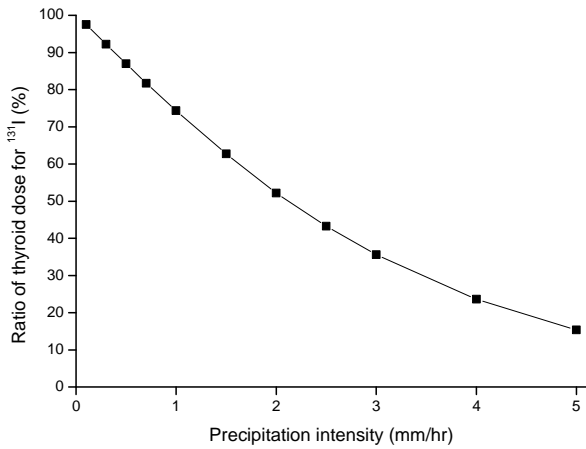


Fig. 6. Reduction of thyroid equivalent dose for ¹³¹I as a function of rainfall intensity at 5 km distance from a release point.

그림 2는 ¹³¹I에 대해 지표침적을 고려하지 않은 경우에 대한 지표침적을 고려하였을 경우 총 피폭선량의 비를 나타냈다. 방사성물질의 방출 후 2시간과 30일 동안 총 피폭선량은 지표침적을 고려한 경우는 고려하지 않은 경우에 비해 대기안정도에 따라 32%~58%, 44%~72%의 감소를 나타냈다. 건침적은 방사성물질의 방출 후 2시간과 30일에 대해 대기안정도에 따라 각각 31%~57%, 42%~71% 정도, 습침적은 대기안정도와 무관하게 각각 2%, 4% 정도의 감소에 기여하였다. 피폭경로별 기여도는 ¹³⁷Cs의 결과와 마찬가지로 지표침적을 고려한 2시간 동안 총 피폭선량의 경우 흡입에 의한 내부피폭이 99% 이상을 차지하며, 방사능운과 지표침적에 의한 외부피폭의 기여는 무시 가능한 수준이었다. 30일 동안 총 피폭선량의 경우에는 흡입에 의한 내부피폭이 91.5%, 지표침적에 의한 외부피폭이 8.5% 정도를 나타냈으며, 방사능운에 의한 외부피폭의 영향은 무시 가능한 수준이었다.

상기 결과에서 나타낸 바와 같이 지표침적을 고려하는 경우에 비해 고려하지 않은 경우 평가결과는 보다 높았으며, 이는 사고결말평가에 있어서 보다 보수적인 결과를 제공한다 것을 의미한다. 특히 ¹³¹I의 경우 ¹³⁷Cs에 비해 총 피폭선량에 있어서 보다 뚜렷한 감소를 보여 주고 있는데 이는 원소형 요오드의 상대적으로 높은 건침적속

도에 기인한다. 방출점으로부터 거리가 멀어짐에 따라 지표침적의 영향이 보다 뚜렷하게 나타났는데, 이는 방사성물질이 대기로 이동함에 따라 보다 많은 지표침적으로 인해 공기중 농도의 감소가 있기 때문이다. 방출기간이 길어짐에 따라 지표에 침적되는 방사성물질의 증가로 총 피폭선량에 대한 지표침적의 기여는 증가함을 알 수 있다.

본 연구에서 가정한 사고 시나리오에 대해 두 핵종 모두 습침적보다는 건침적으로 인해 총 피폭선량의 보다 높은 감소를 보여 주는데, 이는 연간 평균 강우량이 일년 내내 균등하게 내린다고 가정한 낮은 강우율에 기인한다. 강우는 지표침적에 중요한 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며, 이에 대한 피폭영향을 정량적으로 고찰하였다. 그림 3과 그림 4는 ¹³⁷Cs에 대해 각각 방출점으로부터 1 km와 5 km 지점에서 강우율에 따른 총 피폭선량의 감소를 보여준다. 강우율의 증가와 평가지점의 거리가 멀어질수록 총 피폭영향의 감소는 보다 뚜렷하게 나타났다. 그림 5와 그림 6은 ¹³¹I에 대해 각각 방출점으로부터 1 km와 5 km 지점에서 강우율에 따른 총 피폭선량의 감소를 보여준다. 강우율의 증가와 평가지점의 거리가 멀어질수록 뚜렷한 총 피폭영향의 감소를 보이나 ¹³⁷Cs과 비교해서는 보다 적은 감소를 나타냈다. 이는 원소형 요오드가 입자에 비해 강우에 덜 민감하기 때문이다. 인허가 승인

을 위한 사고결말평가에서는 연간 기상자료를 사용하여 평가되는 공기중 농도의 발생확률로부터 공기중 농도가 극히 높을 수 있는 기상조건이 중요한 요소로 작용하기 때문에 연중 강우의 발생시간이 제한적인 국내의 기후학적 특성상 강우는 사고결말평가에서 중요한 영향을 미치지 않을 것으로 판단한다. 다만 방사능방재와 같이 실제 사고가 발생한 시점의 실시간 기상자료를 사용하여 피폭선량의 평가가 요구되는 경우에는 강우가 총 피폭선량에 중요한 영향을 미칠 수 있을 것이다.

4. 결론

원전의 인허가 승인을 위한 사고결말평가에서 경수로 는 미국의 규제지침에서 제시한 바와 같이 방사성물질의 지표침적의 고려를 허용하지 않고 있는데 반해 중수로의 규제지침에서는 이에 대한 고려를 허용하고 있다. 이러한 배경에 따라 U. S. NRC의 규제지침에서 제시하는 경수로 가상사고에 대한 대기확산인자 및 피폭선량 평가모델을 기반으로 방사성물질의 지표침적에 의한 피폭영향의 민감도를 정량적으로 분석하였다. 분석한 결과 사고로 인한 총 피폭선량은 방사성물질의 지표침적을 고려치 않은 경우에 있어서 보다 보수적인 결과를 나타냈다. 이는 지표 침적에 의한 피폭선량이 총 피폭선량에 미치는 영향은 상대적으로 적는데 비해 지표침적으로 인한 공기중 농도의 감소가 총 피폭선량에 미치는 영향은 상대적으로 크기 때문이었다. 특히 건침적의 영향이 높은 원소형우오드의 경우는 다른 입자상 핵종에 비해 더욱 더 감소가 뚜렷하였다. 본 연구의 결과는 경수로와 중수로의 고유 규제원칙에 따른 사고결말평가 특성을 가짐에도 불구하고 경수로 평가방식에 기반하는 국내 규제 평가체계의 개선에 일조할 수 있을 것으로 판단한다. 이를 위한 추가적인 노력으로 원전부지에서 야외확산실증실험을 수행해 오고 있으며, 동 실험은 모델의 부지 적용성에 대한 검증 뿐 아니라 모델 개선과 이에 대한 기술적 배경을 더욱 공고히 하는데 기여할 것으로 판단한다.

감사의 글

본 연구는 미래창조과학부와 원자력안전위원회의 중장

기연구개발사업으로 수행되었습니다. (과제번호 : 2012M2A8A4025914)

참고문헌

1. U. S. Nuclear Regulatory Commission (NRC). Atmospheric Dispersion Models for Potential Accident Consequence Assessments at Nuclear Power Plants, Regulatory Guide 1.145 Revision 1, 1979.
2. U. S. Nuclear Regulatory Commission (NRC). Assumption Used for Evaluating the Potential Radiological Consequences of a Loss of Coolant Accident for Pressurized Water Reactors, Regulatory Guide 1.4 Revision 2, 1974.
3. Canadian Standards Association. Guidelines for Calculating Radiation Doses to the Public from a Release of Airborne Radioactive Material under Hypothetical Accident Conditions in Nuclear Reactors, CAN/CSA-N288.2-M91, 1991.
4. 원자력안전위원회. 원자력시설 부지의 기상조건에 관한 조사·평가 기준. 원자력안전위원회고시 제2012-19호 (원자로29), 2012.
5. Oak Ridge National Laboratory. CRRIS : Computerized Radiological Risk Investigation System for Assessing Doses and Health Risks from Atmospheric Releases of Radionuclides, ORNL/TM-8573, 1985.
6. John E. Till and H. Robert Meyer. Radiological Assessment : A Textbook on Environment Dose Analysis. U. S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-3332, ORNL-5968, 1983.
7. Postma AK. Effect of Solubilities of Gases on Their Scavenging by Raindrops. U. S. Atomic Energy Commission Report Conf-700601, 1970.
8. International Atomic Energy Agency (IAEA). International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources, Safety Series No. 115, 1996.

Importance Analysis of Radiological Exposure by Ground Deposition in Potential Accident Consequences for the Licensing Approval of a Nuclear Power Plant

Won Tae Hwang, Hae Sun Jeong, Hyo Joon Jeong, Eun Han Kim, and Moon Hee Han
Korea Atomic Energy Research Institute

Abstract - In potential accident consequence assessments for the licensing approval of LWRs, the ground deposition of radionuclides released into the environment is not allowed into the models, as recommended in the U. S. Nuclear Regulatory

Commission's regulatory guide. Meanwhile, it is allowed into the assessment models for the licensing approval of PHWRs with consideration of more detailed physical processes of radionuclides in the atmosphere. Under these backgrounds, importance of exposure dose by ground deposition was quantitatively evaluated and comprehensively discussed. For potential accidental releases of ^{137}Cs and ^{131}I , total exposure doses were more conservative in case of without consideration of ground deposition than in case of with its consideration. It was because of that the depletion of air concentration resulting from ground deposition is more influential in the contribution to total exposure doses than additional doses from contaminated ground. The exposure doses by the inhalation of contaminated air showed the contribution of more than 90% in total exposure doses, depending on atmospheric stability, release period of radionuclides and distance from a release point. The exposure doses from contaminated ground showed less than 10% at most in contribution of total exposure doses. The ratios of total exposure doses in case of with consideration of deposition to without its consideration for ^{131}I were distinct than those for ^{137}Cs . As the atmosphere is more stable, release duration of radionuclides is longer, distance from a release point is longer, it was more distinct.

Keywords : Accident consequence assessment, Regulatory guide, Ground deposition, Air concentration, Exposure dose