

원전 중대사고시 피폭경로 및 핵종의 방사선 피폭에 대한 상대적 중요도 해석

황원태 · 서경석 · 김은한 · 한문희 · 김병우*

한국원자력연구소, 성균관대학교*

요 약

원자력발전소의 중대 사고시 대기로 방출된 방사성물질에 의해 피폭자가 사고후 일생동안 받게 될 전신 피폭선량과 핵종의 상대적 중요도를 방출점으로부터 거리에 따라 각 피폭경로에 대해 평가하였다. 방사능운과 지표에 침적된 방사성물질에 의한 외부피폭, 호흡과 오염된 음식물섭취에 의한 내부피폭이 피폭경로로 고려되었다. 오염된 음식물섭취에 의한 영향은 우리나라 환경을 고려하여 개발된 동적 섭식경로모델 KORFOOD을 사용하여 침적시점과 침적후 시간에 따른 음식물내 방사성물질의 농도 변화를 고려하였다. 방출점으로부터 80 km까지 피폭선량을 평가한 결과, 오염된 음식물섭취에 의한 영향이 가장 높았다. 핵종별 기여도는 방사능운에 의한 외부피폭과 호흡에 의한 내부피폭의 경우 I, 침적된 방사성물질에 의한 외부피폭의 경우 Cs에 의한 영향이 가장 높았다. 오염된 음식물섭취에 의한 내부피폭의 경우 Cs은 여름철 침적, Sr은 겨울철 침적에 보다 중요한 영향을 미쳤다.

중심어 : 피폭경로, 상대적 중요도, 외부피폭, 내부피폭, 동적 섭식경로모델

서 론

원자력발전소에서 방사성물질은 핵분열 뿐 아니라 제어봉과 구조물의 방사화 등으로 생성된다. 원자력발전소의 사고시 대부분 노심에서 핵분열로 생성된 방사성물질의 일부가 환경으로 방출되어 여러 피폭경로를 통해 인체에 대한 확률론적(stochastic) 또는 비확률론적(non-stochastic) 피폭효과를 초래하는데 다음 4가지 피폭경로가 사고영향해석에 중요하다.

- 방사능운에 의한 외부피폭
- 지표에 침적된 방사성물질에 의한 외부피폭
- 호흡에 의한 내부피폭
- 오염된 음식물 섭취에 의한 내부피폭

방사능운에 의한 외부피폭과 호흡에 의한 내부피폭은 단지 방사성물질이 대기중으로 이동하면서 피폭영향을 주는 단기 피폭경로이며, 음식물 섭취에 의한 내부피폭은 토양에 침적된 방사성물질이 오랜기간동안 토양의 뿌리층에 잔류하면서 음식물을 오염시키고 이를 소비함으로써

피폭영향을 주는 장기 피폭경로이다. 지표에 침적된 방사성물질에 의한 외부피폭은 단기뿐 아니라 장기 피폭경로로도 중요하다.

피폭선량은 노심내 방사성물질의 양, 방사성물질의 외부 환경으로의 방출율, 주변 환경의 기상 상태, 방출점으로부터 피폭자의 위치, 피폭받는 장소 및 기간, 비상대응의 종류 등에 따라 다르다. 체르노빌 사고 이후 오염된 음식물섭취에 의한 영향의 중요성이 크게 대두되어 선진각국에서는 방사성물질의 침적시점에 따라 장기간 피폭영향을 해석할 수 있는 동적모델을 개발하기 시작하였다. 현재까지 개발된 대표적인 모델로는 미국의 PATHWAY[1], COMIDA[2], 독일의 ECOSYS-87[3], 이스라엘의 RADFOOD[4] 등이 있으며, 우리나라에서도 고유 환경을 고려한 동적 섭취경로 모델 KORFOOD[5]가 개발된 바 있다. 본 연구에서는 KORFOOD를 사용하여 원자력발전소의 중대 사고시 환경으로 방출된 방사성물질에 의한 피폭경로별 영향을 해석함으로써 음식물섭취에 의한 영향의 중요성을 인식시키며 또한 피폭경로에 대한 핵종의 상대적 중요도를 고찰하였다.

방사선원항

원자력발전소의 사고시 주변 주민의 방사능에 의한 영향을 평가하기 위해서는 가장 먼저 방사선원항 (source term)을 결정하여야 한다. 방사선원항은 방사성물질의 감지기, 사고시 발전소의 상태 또는 여러 사고결말해석 연구에서 제시한 사고 유형에 따른 방사성물질의 방출율 등을 이용하여 결정할 수 있다. 사고시 방사선원항에 대한 연구는 WASH-1400[6]과 Sandia National Laboratories (SNL)에서의 원자력발전소의 부지 조사연구[7] 등을 통해 많은 발전이 있어 왔다. 본

표 1. 노심내 주요 핵종의 종류, 핵종의 양 및 반감기 [6].

핵종	노심내 핵종의 양 [Ci/MWe]	반감기
Kr-85	560	10.72 y
Kr-85m	24,000	4.48 h
Kr-87	47,000	76.3 m
Kr-88	68,000	2.84 m
Sr-89	94,000	50.5 d
Sr-90	3,700	29.12 y
Sr-91	110,000	9.5 h
Y-91	120,000	58.51 d
Mo-99	160,000	66.0 h
Ru-103	110,000	39.28 d
Ru-106	25,000	368.2 d
Te-129m	5,300	33.6 d
Te-131m	13,000	30.0 h
Te-132	120,000	78.2 h
Sb-127	6,100	3.85 d
Sb-129	33,000	4.32 h
I-131	85,000	8.04 d
I-132	120,000	2.30 h
I-133	170,000	20.8 h
I-134	190,000	52.6 m
I-135	150,000	6.61 h
Xe-131m	1,000	11.9 d
Xe-133	170,000	5.25 d
Xe-133m	6,000	2.19 d
Xe-135	34,000	9.17 h
Xe-138	170,000	14.17 m
Cs-134	7,500	2.06 y
Cs-136	3,000	13.1 d
Cs-137	4,700	30.0 y
Ba-140	160,000	12.74 d
La-140	160,000	40.27 h
Ce-144	85,000	284.3 d
Np-239	1.64×10^6	2.36 d

(주) y : year d : day h : hour m : minute

연구에서 사용한 방사선원항 자료를 표 1과 표 2에 나타냈다[6, 7]. 표 1은 WASH-1400에 제시

표 2. SST1 사고의 경우 방출특성 및 방사성물질의 환경내 방출분율 [7].

방출특성		핵종	방출분율
사고유형	노심용융	불활성기체	1.0
격납요기 파손요인	과압	I	0.45
방출지연시간	1.5 시간	Cs, Rb	0.67
방출기간	2 시간	Te, Sb	0.64
경보시간	30 분	Ba, Sr	0.07
방출높이	10 m	Ru, Mo	0.05
		La, Y, Np, Ce	0.009

된 경수형원자로 (LWR)의 경우, 전기출력에 대한 노심내 주요 핵종의 종류, 핵종의 양, 반감기를 보여준다. SNL 부지 조사연구에서 방사선원형은 사고유형에 따라 5가지로 분류하고 있으며 표 2는 가장 심각한 사고 유형인 SST1 (Siting Source Term 1)에 대한 방사성물질의 방출특성과 방출분율을 보여준다.

방사성물질의 대기중 분포와 지표에서의 농도

대기로 방출된 방사성물질의 지표부근에서 대기중 농도분포는 연속 점원(continuous point source)으로 가정하여 유도된 Gaussian plume 모델에 의해 예측된다[8].

$$\chi_a(x, y) = \frac{Q}{\pi \sigma_y \sigma_z \bar{u}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{h}{\sigma_z}\right)^2\right] \quad (1)$$

여기서,

- χ_a : 지표부근에서 대기중 방사성물질의 농도 [Ci/m³]
- Q : 방사성물질의 방출율 [Ci/sec]
- x : 방출점으로부터 풍하거리 [m]
- y : 플룸의 중심으로부터 수평거리 [m]

- σ_y : 수평 확산계수 [m]
- σ_z : 수직 확산계수 [m]
- \bar{u} : 평균풍속 [m/sec]
- h : 플룸의 유효고도 [m]

대기로 방출된 방사성물질은 중력 등의 영향으로 지표면에 침적되거나 방사능붕괴에 의해 감소된다. 풍하거리 x 지점에서 침적으로 플룸내에 감소되고 남아 있는 방사성물질의 양은 아래 식으로 표현된다.

$$\dot{Q}_A(t_a) = \dot{Q}_0 \exp\left\{-\sqrt{\frac{2}{\pi}} V_d \int_0^{t_a} \frac{\exp[-1/2 (h/\sigma_z)^2]}{\sigma_z} dt\right\} \quad (2)$$

여기서,

- \dot{Q}_A : 침적으로 플룸내에 남아 있는 방사성물질의 양 [Ci/sec]
- \dot{Q}_0 : 방사성물질의 초기 방출율 [Ci/sec]
- t_a : 플룸의 이동시간 [sec]
- V_d : 침적속도 [m/sec]

지표방출의 경우, 식 (2)는 아래와 같이 간단히 표현된다[9].

$$\dot{Q}_A(t_a) = \dot{Q}_0 \exp\left[-\frac{2\sqrt{2} V_d t_a}{\sqrt{\pi} \sigma_z}\right] \quad (3)$$

방사능붕괴에 의한 방사성물질의 감손은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\dot{Q}_B(t_a) = \dot{Q}_0 e^{-\lambda (t_a+t_d)} \quad (4)$$

여기서,

\dot{Q}_B : 방사능붕괴로 플룸내에 남아 있는 방사성 물질의 양 [Ci/sec]

λ : 핵종의 붕괴상수 [sec⁻¹]

t_d : 사고후 방사성물질이 환경으로 누출되기 전까지 지연시간 [sec]

따라서, 실제 플룸내에 남아 있는 방사성물질의 양은

$$Q(t_a) = Q_A(t_a) + Q_B(t_a) \quad (5)$$

으로 나타낼 수 있다. 대기로 방출된 방사성물질은 방출점으로부터 풍하거리에 따라 대기안정도의 함수로서 수평, 수직으로 확산된다. 표 3은 Briggs에 의해 제안된 수평, 수직확산계수를 나타내었다[6].

평균 풍속은 아래 식과 같이 대기경계층내에서 높이에 따라 보정된다[10].

$$\bar{u}_2 = \bar{u}_1 \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^q \quad (6)$$

여기서,

\bar{u}_2 : 플룸이 상승한 높이에서의 풍속 [m/sec]

\bar{u}_1 : 실제 관측한 높이에서의 풍속 [m/sec]

z_1 : 실제 관측한 지점의 높이 [m]

z_2 : 플룸이 상승된 높이 [m]

q : 대기안정도와 지표조건에 따른 보정상수

삼림지대의 경우 지표조건은 약 1.0m이며, 대기안정도가 중립 (D)일 경우 보정상수는 0.27의 값을 갖는다[10].

침적된 방사성물질의 지표에서의 농도는 대기 중 방사성물질의 농도와 침적속도의 곱으로 평가된다[9].

$$\chi_d = \chi_a \cdot V_d \quad (7)$$

여기서,

χ_d : 침적된 방사성물질의 지표에서의 농도 [Ci/(m³ sec)]

불활성기체의 경우 침적은 없으며 그의 다른 방사성물질의 침적속도는 1.0×10^{-2} [m/sec]으로 가정된다[9].

표 3. 수평, 수직 확산계수 [6].

대기안정도 등급	확 산 계 수 [m]	
	σ_y	σ_z
A	$0.22 x (1+0.0001 x)^{-0.5}$	$0.20 x$
B	$0.16 x (1+0.0001 x)^{-0.5}$	$0.12 x$
C	$0.11 x (1+0.0001 x)^{-0.5}$	$0.08 x (1+0.0002 x)^{-0.5}$
D	$0.08 x (1+0.0001 x)^{-0.5}$	$0.06 x (1+0.0015 x)^{-0.5}$
E	$0.06 x (1+0.0001 x)^{-0.5}$	$0.03 x (1+0.0003 x)^{-1}$
F	$0.04 x (1+0.0001 x)^{-0.5}$	$0.016 x (1+0.0003 x)^{-1}$

피폭선량평가

원자력발전소 사고시 방사성물질에 의한 인체의 피폭경로는 외부피폭과 내부피폭으로 대별된다. 일반적으로 외부피폭은 방사능운과 지표에 침적된 방사성물질에 의한 피폭이 있으며, 내부피폭은 호흡과 음식물섭취에 의한 피폭이 있다. 본 연구에서 피폭선량을 평가하기 위해 사용한 가정은 다음과 같다.

- (1) 노심내 핵종의 양은 전기출력에 비례하며, 사고시 방사성물질은 지표방출을 한다.
- (2) 피폭자는 플룸의 중심선에 위치하고 있다.
- (3) 방사성물질의 방출율은 일정하며, 플룸의 이동 및 확산은 방출초기의 기상상태에 따라 결정된다.
- (4) 주변 지형에 따른 방사성물질의 이동 및 확산의 영향은 고려하지 않는다.
- (5) 피폭자는 일생동안 동일지역에 거주하며 동일 생활습성을 갖는다.
- (6) 피폭자는 위치에서 대기중으로 방사성물질이 이동하는 기간에는 피폭자는 비도심지의 야외에서 활동하고 있으며, 지표에 침적한 후 피폭자는 하루동안 절반은 야외에서 활동을 하며 나머지 절반은 단독주택에 거주한다.

방사능운에 의한 외부피폭

방사능운에 의한 외부피폭은 환경으로 방출된 방사성물질이 대기중으로 이동하면서 피폭을 주는 단기 피폭경로로 아래 식과 같이 대기중 방사성물질의 농도, 피폭기간, 피폭받는 기간동안 위치한 장소 등에 의해 영향을 받는다.

$$D_c = R_c \Delta T \sum_i \chi_{ai} DCF_{ci} \quad (8)$$

여기서,

D_c : 방사능운에 의한 외부피폭선량 [Sv]

DCF_c : 방사능운에 의한 선량환산인자
 [(Sv m³)/(Ci sec)]

R_c : 방사능운에 의한 외부피폭의 경우 피폭받는 장소에 따른 차폐계수

ΔT : 방사능운이 이동하면서 받는 피폭기간
 [sec]

i : 핵종의 종류

피폭받는 장소에 따른 차폐계수는 아래와 같이 나타낼 수 있다[3].

$$R_c = \sum_k S_k r_{c,k} \quad (9)$$

여기서,

S : 피폭받는 장소에서 거주하는 시간 분율

r_c : 피폭받는 장소에 따른 보정상수

k : 피폭받는 장소의 종류

표 4. 외부피폭의 경우 피폭받는 장소에 따른 보정상수 [3].

장 소	보 정 상 수	
	r_c	r_g
실외		
비도심지	1.0	1.0
도심지	0.6	0.3
단독주택		
지상	0.3	0.1
창문이 있는 지하실	0.05	0.01
창문이 없는 지하실	0.01	0.001

표 4는 피폭경로별 피폭받는 장소에 대한 보정상수[3]를, 표 5는 Kocher가 제시한 방사능운에 의한 선량환산인자를 보여준다[11].

표 5. 전신에 대한 피폭경로별 선량환산인자 [11, 12].

핵종	선량환산인자			
	방사능운 [(Sv m ³)/(Ci sec)]	지표 [(Sv m ²)/(Ci sec)]	호흡 [Sv/Ci]	음식물섭취 [Sv/Ci]
Kr-85	3.90×10^{-6}	8.02×10^{-8}	-	
Kr-85m	2.86×10^{-4}	6.31×10^{-6}	-	
Kr-87	1.48×10^{-3}	2.46×10^{-5}	-	
Kr-88	3.74×10^{-3}	5.83×10^{-5}	-	
Sr-89	2.33×10^{-7}	4.44×10^{-9}	4.1×10^2	
Sr-90	0	0	1.3×10^4	1.3×10^3
Sr-91	1.21×10^{-3}	2.28×10^{-5}	1.7×10^1	
Y-91	6.56×10^{-6}	1.16×10^{-7}	4.8×10^2	
Mo-99	2.77×10^{-4}	5.55×10^{-6}	4.1×10^1	
Ru-103	8.18×10^{-4}	1.69×10^{-5}	8.9×10^1	
Ru-106	0	0	4.8×10^3	
Te-129m	5.45×10^{-5}	1.18×10^{-6}	2.4×10^2	
Te-131m	2.52×10^{-3}	4.79×10^{-5}	5.9×10^1	
Te-132	3.93×10^{-4}	8.97×10^{-6}	8.9×10^1	
Sb-127	1.19×10^{-3}	2.39×10^{-5}	5.9×10^1	
Sb-129	-	-	-	
I-131	6.72×10^{-4}	1.42×10^{-5}	3.0×10^2	
I-132	3.96×10^{-3}	7.64×10^{-5}	3.6	
I-133	1.07×10^{-3}	2.14×10^{-5}	5.6	
I-134	4.60×10^{-3}	8.59×10^{-5}	1.3	
I-135	2.90×10^{-3}	5.01×10^{-5}	1.2×10^1	
Xe-131m	1.56×10^{-5}	6.27×10^{-7}	-	
Xe-133	6.02×10^{-5}	1.77×10^{-6}	-	
Xe-133m	5.36×10^{-5}	1.51×10^{-6}	-	
Xe-135	4.47×10^{-4}	9.64×10^{-6}	-	
Xe-138	2.09×10^{-3}	3.52×10^{-5}	-	
Cs-134	2.69×10^{-3}	5.30×10^{-5}	4.8×10^2	
Cs-136	3.77×10^{-3}	7.17×10^{-5}	7.4×10^1	
Cs-137	0	0	3.2×10^2	5.2×10^2
Ba-140	2.56×10^{-4}	5.42×10^{-6}	3.7×10^2	
La-140	4.25×10^{-3}	7.36×10^{-5}	4.8×10^1	
Ce-144	3.30×10^{-5}	7.93×10^{-7}	3.7×10^3	
Np-239	2.97×10^{-4}	6.75×10^{-6}	2.4×10^1	

- : NO DATA

지표에 침적된 방사성물질에 의한 외부피폭

지표에 침적된 방사성물질에 의한 외부피폭은 방사성물질이 대기중으로 이동하는 기간뿐 아니라 침적된 방사성물질이 토양에 오랜기간 잔류하면서 피폭을 주게 된다. 침적된 방사성물질이 지표에 균일하게 분포되어 있다고 가정할 경우, 대기중을 이동하면서 받게되는 피폭선량은 다음 식에 의해 평가된다.

$$D_g(short) = R_g \Delta T \sum_i \chi_{di} DCF_{gi} \quad (10)$$

여기서,

$D_g(short)$: 방사능운이 대기중을 이동하는 기간동안 침적에 의한 외부피폭선량 [Sv]

R_g : 지표 침적에 의한 외부피폭의 경우 피폭 받는 장소에 따른 차폐계수

$$(R_g = \sum_k s_k r_{gk})$$

r_g : 침적된 방사성물질에 의한 외부피폭의 경우 피폭받는 장소에 따른 보정상수

DCF_g : 침적된 방사성물질에 의한 선량환산인자 [(Sv m²)/(Ci sec)]

침적된 방사성물질이 토양에 오랜기간동안 잔류하면서 받게되는 외부피폭은 침적후 경과된 시간의 함수로 나타낼 수 있다[3].

$$D_g(long) = R_g \sum_i \chi_{di} DCF_{gi} \int_0^{T_f} y(t_1) \exp(-\lambda_i t_1) dt_1 \quad (11)$$

여기서,

$D_g(long)$: 침적된 방사성물질에 의한 외부피폭선량 [Sv]

X_d : 침적된 총 방사성물질의 양 [Ci/m²]

y : 방사성물질이 토양의 심층으로 이동함에 따른 보정함수

t_1 : 방사성물질이 침적 후 경과한 시간 [day]

T_f : 피폭선량 평가기간 [day]

침적된 방사성물질에 의한 외부피폭의 경우 피폭받는 장소에 따른 보정상수와 선량환산인자를 표 4[3]와 표 5[11]에 각각 나타냈다.

침적된 방사성물질이 토양의 심층으로 이동함에 따른 피폭선량에 대한 보정함수는 다음 식으로 표현된다[3].

$$y(t_1) = a_1 \exp(-\lambda_1 t_1) + a_2 \exp(-\lambda_2 t_1) \quad (12)$$

여기서,

a_1, a_2 : 상수 ($a_1=0.36, a_2=0.64$)

λ_1, λ_2 : 토양의 심층으로 방사성물질의 이동율 ($\lambda_1=1.46 \times 10^{-3} \text{ d}^{-1}, \lambda_2=3.87 \times 10^{-5} \text{ d}^{-1}$)

따라서, 피폭선량 평가시점까지 침적된 방사성물질에 의한 외부피폭은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D_g = D_g(short) + D_g(long) \quad (13)$$

호흡에 의한 내부피폭

호흡에 의한 내부피폭은 방사능운에 의한 외부피폭과 마찬가지로 단기 피폭경로로 피폭선량은 대기중 방사성물질의 농도, 피폭받는 장소, 피폭받는 기간, 호흡율 등에 영향을 받는다.

$$D_h = R_h Br \Delta T \sum_i \chi_{ai} DCF_{hi} \quad (14)$$

여기서,

D_h : 호흡에 의한 내부피폭선량 [Sv]

R_h : 피폭자가 실내에 위치함에 따른 차폐계수

DCF_h : 호흡에 의한 선량환산인자 [Sv/Ci]

Br : 호흡율 [= $3.33 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{sec}$] [3]

호흡에 의한 내부피폭은 방사성물질이 인체에 흡입된 후 일생동안 인체에 영향을 주며 성인의 경우 호흡에 의한 선량환산인자를 표 5에 나타내었다[12].

음식물섭취에 의한 내부피폭

음식물섭취에 의한 내부피폭은 다른 피폭경로와는 달리 사고시점에 따른 계절적 영향을 크게 받는다. 식물의 성장기인 여름철 침적의 경우 식물의 잎, 줄기 등을 통해 가식부를 많이 오염시키나, 비성장기인 겨울철 침적의 경우 상대적으로 오염에 있어서 비효과적인 뿌리의 흡수로 통해 가식부를 오염시킨다. 음식물내 방사성물질의 농도는 13개 대표적인 음식물에 대해 식물의 성장기, 토양의 특성, 계절별 강수량 등과 같은 우리나라의 환경특성을 고려하여 개발된 동적 섭취경로모델 KORFOOD를 사용하여 침적시점에 따른 계절적 변화를 고려하였다. 이 모델은 환경요소를 각 구간으로 나누어 해석하는 구간모델 (compartment model)로 구간에서 방사성물질의 농도변화(A_p')는 구간에서 방사성물질의 유입율과 유출율의 차로 나타내는 1차 상미분방정식으로 표현된다[1].

$$A_p' = \sum_m S_{in,m} - \sum_n S_{out,n} \tag{15}$$

여기서,

S_{in} : 구간 P의 방사성물질의 유입율
[Bq/(m² day) 또는 Bq/(kg day)]

S_{out} : 구간 P의 방사성물질의 유출율
[Bq/(m² day) 또는 Bq/(kg day)]

m : 유입되는 방사성물질의 이동 메카니즘

n : 유출되는 방사성물질의 이동 메카니즘

당해년도에 생산된 음식물은 다음 년도 추수

기까지 모두 소비된다고 가정할 경우, 아래 식으로 피폭을 평가할 수 있다.

$$D_{ing} = f \sum_{ij} A_{ij} CR_j DCF_{ing,i} \tag{16}$$

여기서,

D_{ing} : 음식물섭취에 의한 피폭선량 [Sv]

A : 음식물내 방사성물질의 농도

[Ci/kg 또는 Ci/l]

CR : 음식물의 소비율 [kg/yr 또는 kg/l]

DCF_{ing} : 음식물섭취에 의한 선량환산인자
[Sv/Ci]

f : 피폭자의 잔여 수명동안 받게 되는 피폭선량을 고려하기 위한 보정인자

j : 음식물의 종류

음식물섭취에 의한 내부피폭은 방사성물질이 인체에 섭취된 후 일생동안 피폭을 주게 되는데 성인의 경우 섭취 후 일생동안 받게되는 선량환산인자를 표 5에 나타내었다[12]. 단기간 피폭경로와는 달리 음식물섭취에 의해 일생동안 받게 될 피폭선량은 인체에 섭취된 방사성물질이 해당 연령군의 모든 연령에 대해 같은 피폭효과를 가진다고 가정할 경우 피폭자의 연령이 증가함에 따라 피폭자의 잔여 수명동안 받게 되는 피폭선량에 대한 보정인자는 아래 식으로 추산될 수 있다.

$$f = \frac{LT-PT}{LT} \tag{17}$$

여기서,

LT : 사고시점에서 피폭자의 수명기간 [yr]

PT : 사고후 경과된 해 [yr]

결과 및 고찰

원자력발전소의 중대 사고시 환경으로 방출된 방사성물질에 의해 피폭자가 사고후 일생동안 받게 될 전신에 대한 피폭선량을 방출점으로부터 거리에 따라 피폭경로에 대해 평가하였으며, 또한 각 피폭경로에 대한 핵종의 상대적 중요도를 고찰하였다.

사고의 영향을 평가하기 위해 사용된 여러 변수를 표 6에 나타냈다. 오염된 음식물섭취에 의한 내부피폭은 피폭선량에 대부분 기여하는 장반감기 핵종인 Cs-137, Sr-90만을 고려하였으며, 식물의 성장기인 여름철(8월 15일) 침적과 비성장기인 겨울철(1월 15일) 침적에 대해 평가하였다.

표 6. 사고 영향을 평가하기 위해 사용한 변수.

항 목	가 정
전기출력	1000 MWe
사고유형	SST1
피폭자의 연령	20세
피폭자의 수명	70세
풍속	2 m/sec
풍속의 측정높이	10 m
대기안정도	중립 (D)

그림 1과 2는 방출점으로부터 각각 10km와 80 km 지점에서 각 피폭경로에 대해 피폭자가 사고 후 일생동안 받게되는 전신피폭선량을 보여준다. 피폭경로에 대한 기여는 오염된 음식물섭취에 의한 영향이 가장 높았으며, 지표에 침적된 방사성물질에 의한 외부피폭, 호흡에 의한 내부피폭, 방사능운에 의한 외부피폭 순으로 피폭선량에 대한 기여도가 높았다. 오염된 음식물섭취에 의한 영향이 가장 큰 이유는 식물의 잎 또는 줄기

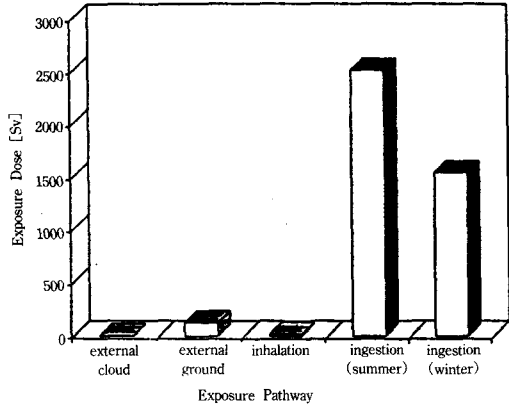


그림 1. 방출점으로부터 10 km 지점에서 각 피폭경로에 대해 피폭자가 사고후 일생동안 받게 되는 전신 피폭선량.

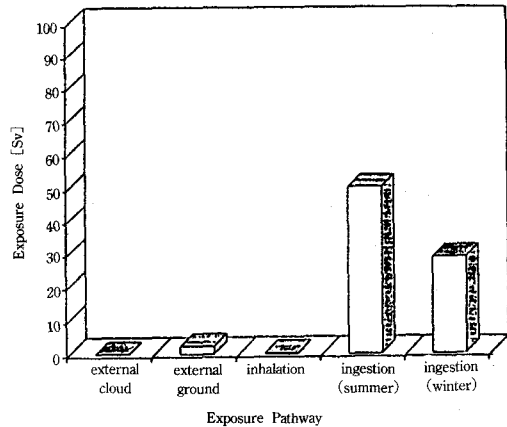


그림 2. 방출점으로부터 80 km 지점에서 각 피폭경로에 대해 피폭자가 사고후 일생동안 받게 되는 전신 피폭선량.

를 통해 가식부를 오염시킬 뿐 아니라 토양의 표면에 침적된 방사성물질이 오랜기간동안 느린 속도로 토양의 심층으로 이동하면서 식물의 뿌리를 통해 장기간동안 오염시키기 때문이었다. 그림에 나타난 바와 같이 음식물 섭취에 의한 영향은 침적시점에 따라 계절적 영향을 크게 받는다는 것을 알 수 있었다. 그 이유는 여름철 침

적의 경우 사고후 첫해에는 주로 식물의 잎, 줄기 등을 통해 쉽게 가식부가 오염되나, 두번째 해 이후부터는 상대적으로 오염이 적은 뿌리흡수를 통해 오염되기 때문이었다. 한편 겨울철 침적의 경우에는 모든 해에 걸쳐 뿌리흡수를 통한 가식부의 오염이 지배적이다. 침적에 의한 외부 피폭선량은 토양에 침적된 방사성물질이 느린 속도로 토양의 심층으로 이동하면서 오랜기간동안 계속적으로 피폭을 주므로 중요한 피폭경로 중의 하나였다.

그림 3과 4는 방사능운에 의한 외부피폭의 경우, 방출점으로부터 각각 10km, 80km 지점에서 전신 피폭선량에 대한 핵종별 기여도를 나타내었다. 상대적으로 환경으로 방출되는 핵종의 양이 많고 높은 선량환산인자를 갖는 I에 의한 영향이 각각 68%, 44.7%로 가장 높았다. 방출점으

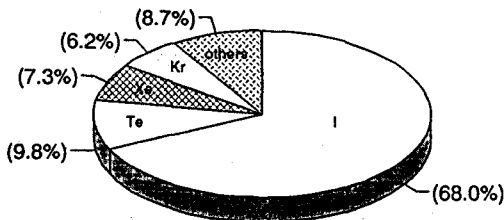


그림 3. 방사능운에 의한 외부피폭의 경우, 방출점으로부터 10 km 지점에서 전신 피폭선량에 대한 핵종별 기여도.

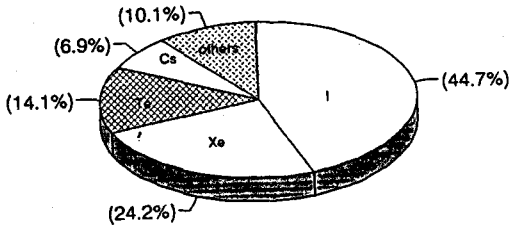


그림 4. 방사능운에 의한 외부피폭의 경우, 방출점으로부터 80 km 지점에서 전신 피폭선량에 대한 핵종별 기여도.

로부터 원거리일수록 침적이 없는 불활성기체에 의한 영향과 상대적으로 장반감기 핵종의 영향이 증가하였다.

그림 5와 6은 지표에 침적된 방사성물질에 의한 외부피폭의 경우, 방출점으로부터 각각 10km, 80km 지점에서 전신 피폭선량에 대한 핵종별 기여도를 나타내었다. 침적된 방사성물질에 의한 영향은 방사성물질이 대기중을 이동하면서 받게 되는 단기간 피폭의 경우에는 환경으로 방출되는 많은 핵종의 양과 높은 선량환산인자를 갖는 I의 영향이 가장 높으나 상대적으로 짧은 반감기를 가지므로 피폭자의 일생동안 받게될 피폭선량은 Cs에 의한 영향이 각각 92.3, 92.8%로 가장 높았다.

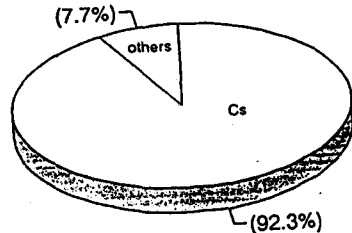


그림 5. 지표에 침적된 방사성물질에 의한 외부피폭의 경우, 방출점으로부터 10 km 지점에서 전신 피폭선량에 대한 핵종별 기여도.

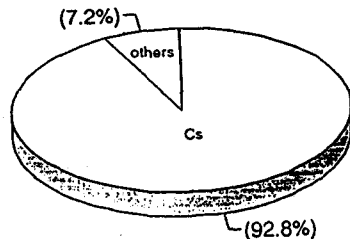


그림 6. 지표에 침적된 방사성물질에 의한 외부피폭의 경우, 방출점으로부터 80 km 지점에서 전신 피폭선량에 대한 핵종별 기여도.

그림 7과 8은 호흡에 의한 내부피폭의 경우, 방출점으로부터 각각 10km, 80km 지점에서 피폭 선량에 대한 핵종별 기여도를 보여준다. 피폭 선량에 대한 기여는 방사능운에 의한 외부피폭과 마찬가지로 두 지점에 대해 모두 I에 의한 영향이 각각 35.8%, 33.1%로 가장 높았다. Sr, Ru, Cs는 환경으로 방출되는 양은 적으나 높은 선량 환산인자로 피폭선량에 대한 기여는 비교적 높게 나타났다. 방출점으로부터 원거리일수록 상대적으로 장반감기 핵종의 영향이 증가하는 것을 알 수 있었다.

오염된 음식물섭취에 의한 영향은 Cs-137, Sr-90과 같이 거의 같은 침적속도와 반감기를 갖는 경우, 방출점으로부터 거리에 따른 핵종의 피폭 선량에 기여는 거의 비슷한 값을 나타내며, 그림 9와 10은 각각 여름철과 겨울철 침적의 경우, 방

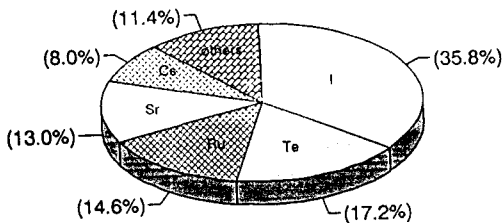


그림 7. 호흡에 의한 내부피폭의 경우, 방출점으로부터 10 km 지점에서 전신 피폭선량에 대한 핵종별 기여도.

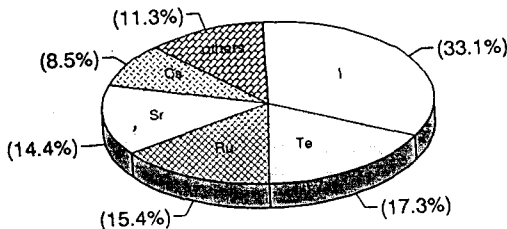


그림 8. 호흡에 의한 내부피폭의 경우, 방출점으로부터 80 km 지점에서 전신 피폭선량에 대한 핵종별 기여도.

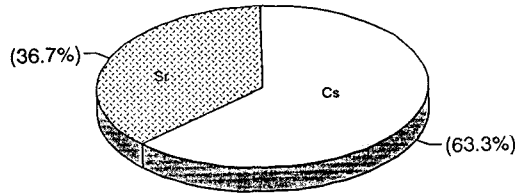


그림 9. 여름철 침적의 경우 방출점으로부터 80 km 지점에서 오염된 음식물섭취에 의한 전신피폭선량에 대한 핵종별 기여도.

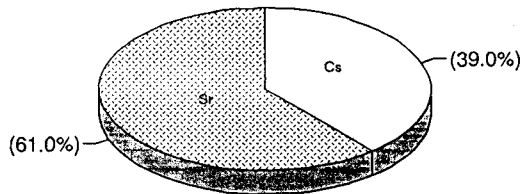


그림 10. 겨울철 침적의 경우 방출점으로부터 80 km 지점에서 오염된 음식물섭취에 의한 전신피폭선량에 대한 핵종별 기여도.

출점으로부터 80km 지점에서 피폭선량에 대한 핵종별 기여를 보여준다. 여름철 침적의 경우 상대적으로 환경으로 많이 방출되며 식물의 잎, 줄기 등을 통하여 크게 오염시키는 Cs-137이 Sr-90에 의한 영향보다 높게 나타났다. 그러나, 겨울철 침적의 경우에는 뿌리흡수가 강하며 높은 선량 환산인자를 갖는 Sr-90의 영향이 더 높았다.

결론

원자력발전소의 중대 사고시 대기로부터 방출된 방사성물질에 의해 피폭자가 전신에 대해 사고 후 일생동안 받게 될 4가지 중요 피폭경로별 피폭선량과 핵종의 상대적 중요도를 평가하였다. 단기간 피폭경로의 경우에는 대기중 방사성물질의 농도, 선량환산인자, 침적속도 등이 피폭선량에 중요한 영향을 미쳤다. 반면, 장기간 피폭경

로의 경우에는 핵종의 반감기가 지배적 영향을 미쳤다. 피폭선량에 대한 기여는 오염된 음식물 섭취에 의한 영향이 가장 높았으며, 호흡에 의한 내부피폭, 지표에 침적된 방사성물질에 의한 외부피폭, 방사능운에 의한 외부피폭의 순으로 높았다. 특히, 오염된 음식물 섭취에 의한 내부피폭은 침적시점에 따라 큰 계절적 영향을 보여주었다. 방출점으로부터 80km까지 피폭경로에 대한 핵종의 기여도는 방사능운에 의한 외부피폭과 호흡에 의한 내부피폭의 경우 I, 침적된 방사성물질에 의한 외부피폭의 경우 Cs에 의한 영향이 가장 높았다. 오염된 음식물 섭취에 의한 내부피폭의 경우 Cs은 여름철 침적, Sr은 겨울철 침적에 보다 중요한 영향을 미쳤다.

참고문헌

1. F. W. Whicker, *et. al.*, "PATHWAY : A Dynamic Food Chain Model to Predict Radionuclides Ingestion after Fallout Deposition". *Health Physics* **52**, 717-737, (1987).
2. M. L. Abbott and A. S. Rood, "COMIDA : A Radionuclide Food Chain Model for Acute Fallout Deposition". *Health Physics* **66**, 17-29, (1994).
3. H. Müller and G. Pröhl, "ECOSYS-87 : A Dynamic Model for Assessing Radiological Consequences of Nuclear Accidents". *Health Physics* **64**, 232-252, (1993).
4. J. Koch and J. Radmor, "RADFOOD : A Dynamic Model for Radioactivity Transfer through the Human Food Chain". *Health Physics* **50**, 721-737, (1986).
5. W. T. Hwang, *et. al.*, "Development of a Dynamic Ingestion Pathways Model (KOR-FOOD), Applicable to Korean Environment". *The Journal of the Korean Association for Radiation Protection*, **18**(1), 9-24, (1993).
6. U. S. Regulatory Commission, "Reactor Safety Study", WASH-1400, U. S. A. (1975).
7. U. S. Nuclear Regulatory Commission, "Technical Guidance for Siting-Criteria Development", NUREG/CR-2239, SAND81-1549, U.S. A. (1982)
8. U. S. Nuclear Regulatory Commission, "Radiological Assessment", NUREG/CR-3332, ORNL-5968, U.S.A. (1983).
9. B. D. Murphy, *et. al.*, "RETADD-II : A Long Range Atmospheric Trajectory Model with Consistent Treatment of Deposition Loss and Species Growth and Decay", ORNL-CSD-99, U.S.A. (1984).
10. C. W. Miller, *et. al.*, "ANEMOS : A Computer Code to Estimate Air Concentrations and Ground Deposition Rates for the Atmospheric Nuclides Emitted from Multiple Operating Sources", ORNL-5913, U.S.A. (1986).
11. D. C. Kocher, "Dose-Rate Conversion Factors for External Exposure to Photon and Electron Radiation from Radionuclides Occurring in Routine Releases from Nuclear Fuel Cycle Facilities". *Health Physics* **38**, 543-621 (1980).
12. H. Müller, *et. al.*, "ECOSYS-87, ein Rechenmodell zur abschätzung der Strahlennexposition nach kurzzeitiger Deposition von Radionukliden auf landwirtschaftlich genutzten Flächen", Benutzer Handbuch, GSF-Institut für Strahlenschutz, 8020, Neuherberg, F. R. G. (1989).

Analysis of Exposure Pathways and the Relative Importance of Radionuclides to Radiation Exposure in the Case of a Severe Accident of a Nuclear Power Plant

Won-Tae Hwang, Kyung-Suk Suh, Eun-Han Kim, Moon-Hee Han, Byung-Woo Kim*

*Korea Atomic Energy Research Institute, Sung Kyun Kwan University**

ABSTRACT

In the case of a severe accident of a nuclear power plant, the whole body dose and the relative importance of the radionuclides during the lifetime of an exposed person were estimated for each exposure pathway with distances from the release point. The external exposure pathways due to immersion of radioactive cloud and deposition of radioactive materials on the ground, and the internal exposure pathways due to inhalation and ingestion of contaminated foodstuffs were considered. The effects due to the ingestion of contaminated foodstuffs were estimated considering the variation of radioactive concentration in the foodstuffs according to deposition time and elapsed time after deposition using a dynamic ingestion pathway model applicable to Korean environment, named "KORFOOD". As the results up to 80 km from the release point, the effects due to ingestion of contaminated foodstuffs showed the highest contribution to total exposure dose. The contribution of I isotopes was the highest in the case of the external dose due to immersion of radioactive cloud and internal dose due to inhalation. The contribution of Cs isotopes was highest in the case of the external dose due to deposition of radioactive materials on the ground. In the case of the internal dose due to ingestion of contaminated foodstuffs, Cs deposition in summer and Sr deposition in winter, respectively, were the most dominant radionuclide to whole body.

Key Words : exposure pathway, relative importance, external exposure, internal exposure, dynamic ingestion pathway model