

CANDU형 원전에서의 유도방출한도 결정

김교윤 · 황해룡 · 김증경*

한국원자력연구소, 한양대학교*

요 약

CANDU형 원자력 발전소에서의 유도방출한도를 계산하기 위한 전산 코드 DRL이 개발되었다. DRL 코드에서의 유도방출한도는 CANDU형 원자력 발전소가 정상 가동될 때의 기체 및 액체 방출물에 포함된 방사성 핵종의 방출 허용 기준을 설정하기 위한 것이다. 본 전산 코드는 CSA Standard N288.1-M87에서 권고하고 있는 방법 및 다수 매개 변수를 이용하였고, 월성 원자력 발전소를 대상으로 유도방출한도를 결정하는데 이용되었다.

Key words : DRL, 전이 매개 변수, CANDU, 선량 환산 인자

1. 서 론

모든 원자력 발전소는 소량의 방사성 방출물을 대기 및 인근 바다나 강 또는 큰 호수 등으로 방출하고 있다. 원전의 가동중에는 물론 정지시에도 환경으로의 방출은 지속적으로 감시되고 있다. 방출량은 공중의 피폭이 규제기관의 허용치를 초과하지 않게 매우 낮도록 극히 제한적으로 관리된다.

본 논문의 목적은 CANDU형 원자력 발전소에서 방사성물질의 유도방출한도를 계산하기 위한 전산 코드 DRL(Derived Release Limit)을 개발하고 아울러 이를 이용하여 월성 원자력 발전소 건설에 따른 월성 원자력 발전소 부지에서의 유도방출한도를 계산하기 위한 것이다.

월성 원자력 발전소를 포함한 모든 CANDU형 원자력발전소는 각각의 유도방출한도[1,2]의 1% 이내로 운전 목표 방출 한도를 설정하고 이를 유지하고 있다. 즉, 기체 방사성 물질의 방출은 주간 유도방출한도의 1% 이내로 관리되며, 액체 방사성 물질의 방출은 월간 유도방출한도의 1% 이내로 관리되고 있다.

본 논문에서 개발된 DRL 전산 코드에서는 공중 선량에 영향을 줄 가능성이 있는 월성 원자력 발전소의 배기 및 배수구로부터의 모든 경로가 고려되었다.

2. 선량 한도 및 결정 집단

일반인에 대한 선량 한도 기준은 표 1에 제시된

Table 1. Annual dose limits for members of the public

Part of Body Irradiated	Annual Limit (mSv)
Effective Dose	1
Annual Equivalent Dose in the Lens of Eye	15
Skin	50

바와 같이 ICRP-60[3]에서의 권고를 준용하였다. 이런 선량 한도는 수용 가능 준위까지의 확률론적 영향의 발생을 제한함은 물론 모든 비확률론적 영향의 방지까지 고려한 기준 값이다.

일반인은 오염 공기의 흡입과 오염 식품 및 식수의 섭취에 의해 혹은 외부 방사선에 의해 방사선 피폭을 받게 된다. 인구 밀도, 식생활 습관, 경작지까지의 거리, 바람, 배기구 높이, 그리고 수자원 등을 고려하여 가장 높은 선량을 받는 그룹이 결정되며 방사선량이 특정 한도를 초과하지 않도록 관리되는데 이를 결정 집단이라 정의한다[2]. 발전소의 거주 제한 구역에 근접한 나아리에 거주하는 나아리의 주민이 월성 원자력발전소 유도방출한도 계산의 결정 집단으로 선정되었는데[2], 대다수 주민이 발전소 주변에서 농사에 종사하고 있다.

3. 방사성 핵종

유도방출한도 결정에 필요한 방사성 핵종은 기존 CANDU 6 발전소 운전 경험에 근거하여 다음과 같이 선별하였다.

대기중으로 방출되는 방사성 핵종은 1) 삼중 수소(H-3), 2) 방사성요오드(I-131, I-132, I-133, I-134 및 I-135), 3) 불활성 기체, 4) C-14(기체) 및 5) 입자(Cr-51, Mn-54, Fe-59, Co-58, Co-60, Zn-65, Sr-89, Sr-90, Zr-95, Nb-95, Ru-103, Ru-106,

Sb-124, Sb-125, Cs-134, Cs-137, Ba-140, Ce-141, Ce-144, Eu-152, Eu-154 및 Gd-153)의 5가지로 분류되었다. 여기서 불활성 기체는 핵분열 생성물 및 방사화 생성물인 Ar-41로 구성된다.

액체 방출은 삼중 수소(H-3), C-14(용해성 탄소) 및 Gross β - γ (Cr-51, Mn-54, Fe-59, Co-58, Co-60, Zn-65, Sr-89, Sr-90, Zr-95, Nb-95, Ru-103, Ru-106, Sb-124, Sb-125, I-131, I-132, I-133, I-134, I-135, Cs-134, Cs-137, Ba-140, Ce-141, Ce-144, Eu-152, Eu-154 및 Gd-153)의 3가지로 분류되었다.

4. DRL 코드 개발

방사성 폐기물의 환경 방출은 대기로의 기체 방출 및 인근 바다(혹은 호수)로의 수중 방출과 같이 두가지로 분류된다. 결정 집단에 대한 두가지 방출 경로를 통한 유도방출한도는 연간 선량 한도를 X_9/X_0 로 나눔으로써 구할 수 있다[1, 2]. 즉,

$$\text{유도방출한도} = \frac{\text{연간선량한도 (Sv}\cdot\text{y}^{-1})}{[X_9/X_0](\text{Sv}\cdot\text{y}^{-1}\cdot\text{Bq}^{-1}\cdot\text{s})} \quad (1)$$

여기서 X_0 는 대기나 인근 바다로의 방출율이고 X_9 은 결정 집단의 개인에게 전달되는 선량으로서, X_9/X_0 는 기체 방출 및 액체 방출시 먹이 사슬 등에 의한 피폭 경로에 따른 매개 변수에 의해 결정된다.

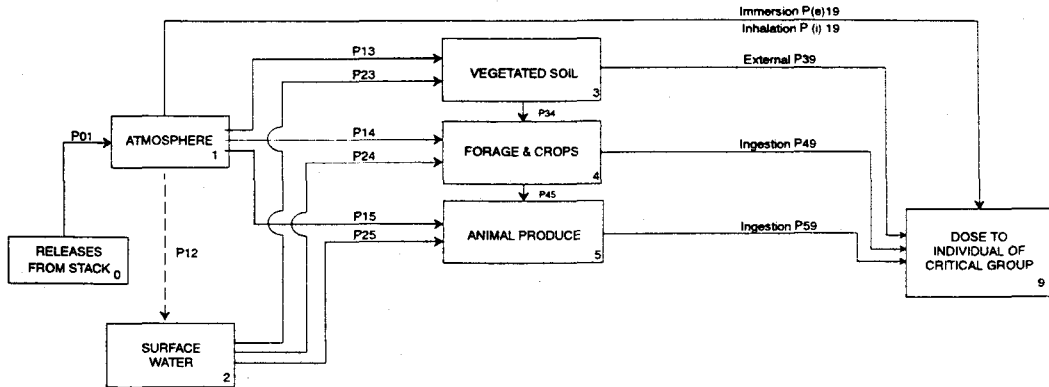


Figure 1. Environmental transfer model for airborne releases to atmosphere.

Table 2. Transfer parameters for terrestrial exposure pathways.

Transfer Parameter	Compartments (From → To)	Dimension
P ₀₁	Source → Atmosphere	s/m ³
P ₁₂	Atmosphere → Surface Water	m ³ /l
P ₁₃	Atmosphere → Vegetated Soil	m
P ₁₄	Atmosphere → Forage & Crops	m ³ /kg
P ₁₅	Atmosphere → Animal Produce	m ³ /kg
P(i) ₁₉	Atmosphere → Dose(Inhalation)	Sv·m ³ /Bq·y
P(e) ₁₉	Atmosphere → Dose(Immersion)	Sv·m ³ /Bq·y
P ₂₃	Surface Water → Vegetated Soil	l/m ²
P ₂₄	Surface Water → Forage & Crops	l/kg
P ₂₅	Surface Water → Animal Produce	l/kg
P ₃₄	Vegetated Soil → Forage & Crops	m ² /kg
P ₃₉	Vegetated Soil → Dose (External)	Sv·m ² /Bq·y
P ₄₅	Forage & Crops → Animal Produce	kg/kg
P ₄₉	Forage & Crops → Dose (Ingestion)	Sv·kg/Bq·y
P ₅₉	Animal Produce → Dose (Ingestion)	Sv·kg/Bq·y

유도방출한도는 다음과 같은 순서에 의해 결정된다.

- 1) 피폭 모델 및 전이 매개 변수 결정
- 2) 피폭 경로 및 결정 집단의 결정
- 3) 기체 및 액체 방출에 대한 X₉/X₀의 결정
- 4) 확률론적 영향에 대한 유도방출한도 계산
- 5) 내부 선량에 의한 비확률론적 영향에 대한 유도방출한도 계산
- 6) 피부 선량에 의한 비확률론적 영향에 대한 유도방출한도 계산
- 7) 4)~6)항 중에서 최소치를 각 핵종에 대한 유도방출한도로 결정.

4.1 대기 방출 모델

그림 1에 제시된 바와 같이 대기 방출에 의한 가능성 있는 모든 피폭 경로가 고려되었는데, 직접적인 대기 방출에 의한 8가지 피폭 경로와 지표수를 통한 6가지 피폭 경로가 포함된다. 그림 1의 피폭 경로에 근거하여 대기방출시의 식(1)의 $X_9/X_0(a)$ 는

$$\begin{aligned} \frac{X_9}{X_0(a)} = & P_{01}[P(e)_{19} + P(i)_{19} + P_{13}P_{39} + P_{14}P_{49} \\ & + P_{15}P_{59} + P_{13}P_{34}P_{49} + P_{14}P_{45}P_{59} \\ & + P_{13}P_{34}P_{45}P_{59} + P_{12}P_{23}P_{39} + P_{12}P_{23}P_{34}P_{49} \\ & + P_{12}P_{23}P_{34}P_{45}P_{59} + P_{12}P_{24}P_{49} \\ & + P_{12}P_{24}P_{45}P_{59} + P_{12}P_{25}P_{59}] \end{aligned}$$

로 주어지며 이 경우의 각 매개 변수는 표 2에 제시되었다.

여기서 P_{ab} 는 a군으로부터 b군까지의 피폭 경로의 전이에 대한 매개 변수로서 $P(e)_{19}$ 및 $P(i)_{19}$ 는 대기로부터 개인에 직접 영향을 주는 침전(immersion) 및 호흡에 대한 매개 변수이다. 이렇게 설정된 유도방출한도 계산식은 성인유효선량, 유아유효선량, 성인장기선량, 유아장기선량 및 피부선량 각각의 연간선량한도에 대하여 적용되었다. 피부 선량은 특정 불활성기체(예 : Kr-85 및 Xe-131m)에 제한적이긴 하지만 CANDU 6 원자력

발전소의 운전 경험에 비추어 볼 때 무시할 만한 양이 방출되고 있다. 결국 불활성기체에 대한 유도방출한도는 단지 전신선량에 대해서만 고려할 수도 있다. 따라서 불활성 기체에 대한 유도방출한도는 다음과 같이 간단하게 표현된다[2].

$$\begin{aligned} \text{유도방출한도} &= \text{연간선량한도} / [X_9/X_0(a)] \\ &= \text{연간선량한도} / P_{01} P(e)_{19} \end{aligned}$$

대기 방출시의 유도방출한도 계산에서 가장 중요한 대기 확산 인자는 Gaussian Plume Model [2]을 이용하여 계산하였다.

$$P_{01} = \frac{2 f_i n}{(2\pi)^{(3/2)} x} \sum_{i=1}^7 \frac{f_i}{\sigma_{zi} \bar{u}_i} \exp\left[-\frac{h^2}{2\sigma_{zi}^2}\right] \quad (2)$$

식(2)에서 사용된 각 인자는 다음과 같이 정의 된다.

P_{01} = 대기 확산 인자 (s/m^3)

f_i = Pasquill 대기 안정도 i급의 발생 빈도

f_j = j구역으로 바람이 부는 빈도

n = 구역수

x = 선원으로 부터의 확산 거리 (m)

h = 유효 방출 높이 (m)

σ_{zi} = 대기 안정도 i급에서의 수직 방향으로의 구름 넓이의 표준 편차

\bar{u}_i = 대기 안정도 i급에서의 평균속도 (m/s)

Table 3. Stability class frequency distribution

Pasquill Stability Class	Frequency f_i (%)	Mean Wind Speed, \bar{u}_i (m/s)
A	10.7	2.3
B	11.1	2.7
C	27.9	3.0
D	17.6	2.8
E	17.2	3.1
F	6.3	2.7
G	9.4	2.3

구름 확산 계수 계산시 월성 부지 주변에서의 기상 빈도 분포[4] f_i 는 표 3에 제시되었다.

구름 확산 계수 σ_{zi} 는 확산 거리 x , 대기 안정도 f_i 및 지형의 함수이다. 따라서, 구름 확산 계수는 R. Hosker[5] 및 F.B.Smith[6]에서 제시한 바와 같이 다음 식으로 계산될 수 있다.

$$\sigma_z(x) = g(x)F(Z_0; x) \quad (3)$$

여기서 z_0 는 기상학적 거칠기 길이(roughness length)이며, $g(x)$ 및 $F(Z_0; x)$ 는 식(4) 및 식(5)와 같이 정의되는 함수이다.

$$g(x) = a_1 x^{b_1} / (1 + a_2 x^{b_2}) \quad (4)$$

$$F(Z_0, x) = \ln \left[c_1 x^{d_1} \left(1 + \frac{1}{c_2 x^{d_2}} \right) \right] \quad z_0 > 10 \text{ cm} \quad (5)$$

$$F(Z_0, x) = \ln \left[c_1 x^{d_1} \left(\frac{1}{1 + c_2 x^{d_2}} \right) \right] \quad z_0 < 10 \text{ cm}$$

식(4) 및 식(5)에서 인자 a_1, a_2, b_1 및 b_2 는 대기 안정도에 의존하며, 인자 c_1, c_2, d_1 및 d_2 는 기상학적 거칠기 길이 z_0 에 의존한다. 표면에 따른 z_0 값과 상수값들은 참고문헌 2에서 찾을 수 있다.

식(1) 및 그림 1에서, 대기로부터 지표수(연못 혹은 호수)까지의 전이 매개 변수는

$$P_{12} = \frac{V_g}{\lambda_g} \frac{A}{V} [\text{m}^3 \cdot \text{l}^{-1}]$$

가 되고, 여기서 V_g 는 공기로부터 물로의 침전 속도, λ_g 는 방사성 붕괴상수, A 는 지표수의 면적, V 는 지표수의 부피이다.

대기로부터 토양으로의 전이매개 변수는

$$P_{13} = \frac{V_g}{\lambda_g} [\text{m}]$$

과 같으며, 여기서 λ_g 는 토양으로부터의 유효 제거 상수로서 방사성붕괴상수와 물리적 제거상수의 합으로 정의된다.

P_{14} 는 대기로부터 마초(forage)와 농작물(crop)

로의 전이 매개 변수이다.

대기로부터 축산물로의 전이 매개 변수는

$$P_{15} = I_a F' [\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

로서, 여기서 I_a 는 동물의 호흡율, F' 는 축산물 무게당 동물의 흡입 분율이다.

대기로부터 인간의 흡입(inhalation)에 의한 선량으로의 전이 매개 변수는

$$P(i)_{19} = I(\text{OF})_i (\text{DCF})_i [\text{Sv} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}]$$

으로 주어지며, 여기서 I 는 호흡시 흡입율, $(\text{OF})_i$ 는 개인이 공기중 방사성물질에 피폭되는 시간 분율, $(\text{DCF})_i$ 는 흡입 피폭에 대한 선량환산인자이다.

대기로부터 침전(immersion)에 의한 선량으로의 전이 매개 변수로서

$$P(e)_{19} = [f_u + (1 - f_u)S](\text{DCF})_a [\text{Sv} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}]$$

로 표현되고, 여기서 f_u 는 구름에 노출되는 개인의 옥외 활동 시간 분율, S 는 옥내 활동 시간의 차폐 인자, $(\text{DCF})_a$ 는 반-무한구름(semi-infinite cloud)에 대한 선량환산인자이다.

지표수로부터 토양으로의 전이 매개 변수는

$$P_{23} = \frac{L}{\lambda_g} [l \cdot \text{m}^2]$$

이 되는데, L 은 연간 평균 관개율, λ_g 는 토양으로부터의 유효 제거 상수로서 방사성붕괴상수와 물리적 제거상수의 합으로 정의된다.

관개수로부터 농작물로의 전이 매개 변수는

$$P_{24} = \frac{rL}{\lambda_g Y} \left(1 - \frac{e^{-\lambda_g t_e}}{\lambda_g} \right) [l \cdot \text{kg}^{-1}]$$

가 되고, 여기서 r 은 식물이 갖고 있는 초기 분율, L 은 연간 평균 관개율, λ_g 는 식물로부터의 유효 제거 상수로서 방사성붕괴상수와 물리적 제거상수의 합, Y 는 식물의 수율(yield), t_e 는 성장 계절의 유효 기간이다.

지표수로부터 축산물로의 전이 매개 변수는

$$P_{25} = k_w' Q_w F [l \cdot kg^{-1}]$$

로 주어지며, 여기서 k_w' 은 동물이 오염원으로부터 야기된 물의 연간 섭취분율, Q_w 는 동물의 연간 물 섭취량, F 는 축산물 별 동물의 하루 물 섭취분율이다.

토양으로 부터 마초와 농작물로의 전이 매개 변수는

$$P_{34} = \frac{B_v}{D} [m^2 \cdot kg^{-1}]$$

가 되며, 여기서 B_v 는 식물내의 방사성핵종에 대한 농도 인자, D 는 유효토양 밀도이다.

토양으로 부터 인체로의 전이 매개 변수는

$$P_{39} = f_o f_i [f_a + (1-f_a)S_g](DCF)_g [Sv m^2 Bq^{-1} y^{-1}]$$

로 주어지며, 여기서 f_o 는 특정 장소에서 개인이 보내는 시간 분율, f_i 는 지표면의 비균질성을 고려한 선량 감소 인자, f_a 는 육의 활동 분율, S_g 는 실내 차폐 인자, $(DCF)_g$ 는 지표 축적에 대한 선량 환산인자이다.

마초와 농작물로 부터 축산물로의 전이 매개 변수는

$$P_{45} = k_w Q_f F [kg \cdot kg^{-1}]$$

가 되며, 여기서 k_w 는 비목초인자, Q_f 는 동물의

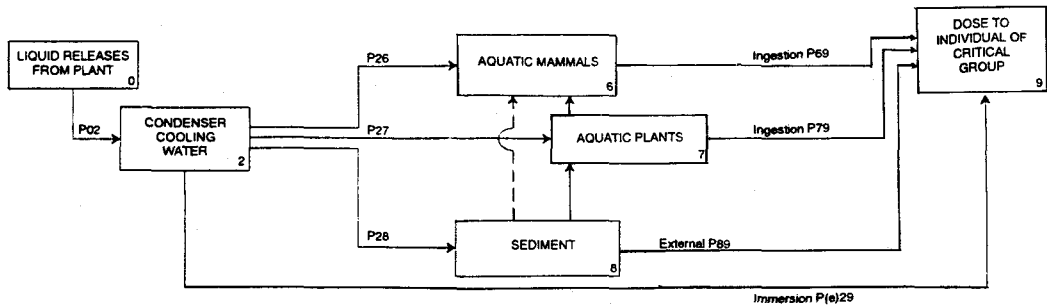


Figure 2. Environmental transfer model for liquid releases to surface water.

Table 4. Transfer parameters for aquatic exposure pathways

Transfer Parameter	Compartments (From → To)	Unit
P ₀₂	Source → Surface Water	s/l
P ₂₆	Surface Water → Aquatic Animals	l/kg
P ₂₇	Surface Water → Aquatic Plants	l/kg
P ₂₈	Surface Water → Sediments	l/kg
P(e) ₂₉	Surface Water → Dose(Immersion)	Sv·l/Bq·y
P ₆₉	Aquatic Animals → Dose(Ingestion)	Sv·kg/Bq·y
P ₇₉	Aquatic Plants → Dose(Ingestion)	Sv·kg/Bq·y
P ₈₉	Sediments → Dose(External)	Sv·kg/Bq·y

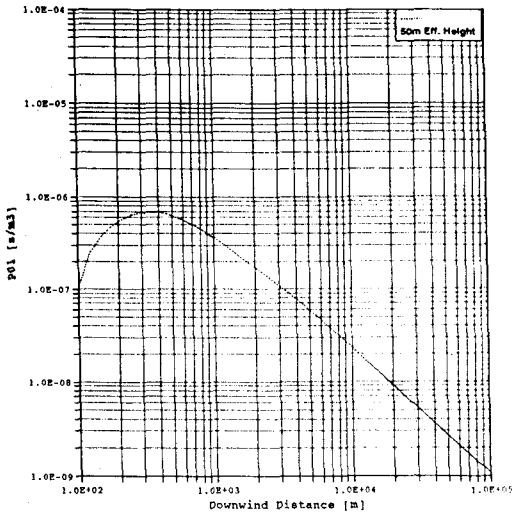


Figure 3. Atmospheric dispersion factors along downwind distance from the site of Wolsong nuclear power plant.

먹이 소비량, F 는 축산물의 무게당 동물의 하루 식물 섭취량이다.

농작물부터 인체로의 전이 매개 변수는

$$P_{49} = g_f I_f (DCF)_f \text{ [Sv} \cdot \text{kg} \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}]$$

이며, 여기서 g_f 는 오염원으로부터의 분율, I_f 는 농작물 소비량, $(DCF)_f$ 는 섭취에 대한 선량 환산 인자이다.

그리고 축산물로 부터 인체로의 전이 매개 변수는

$$P_{59} = g_f I_f (DCF)_f \text{ [Sv} \cdot \text{kg} \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}]$$

이며, 여기서 I_f 는 인간의 축산물 소비량이다.

4.2 액체 방출 모델

그림 2에 제시된 바와 같이 액체 방출에 의한 경우 4가지 피폭 경로가 설정되었으며 표 4에 각

전이 매개 변수가 설명되었다. 그림 3의 천이 경로에 근거하여 액체 방출시의 유도 방출 한도 계산식에 필요한 $X_9/X_0(w)$ 는

$$\frac{X_9}{x_0(w)} = P_{02}[P(e)_{29} + P_{28}P_{89} + P_{27}P_{79} + P_{26}P_{69}]$$

로 주어진다. 캐나다의 온타리오주내 CANDU 원자력 발전소는 발전소로부터의 액체 방출물이 온타리오 호수로 방류되나, 월성 발전소의 경우는 바다로 방류되므로 상기와 같이 피폭 경로가 설정되었다.

표 1 및 그림 2에서, 액체 방출물의 확산인자는

$$P_{02} = \frac{\beta}{D_f Q_v} e^{-\lambda T} \text{ [s} \cdot \text{l}^{-1}]$$

이며, 여기서 Q_v 는 액체 방출물의 연평균 방출율, D_f 는 해수 희석 인자, β 는 유출물의 재순환율, λ 는 방사성붕괴상수, T 는 방출지점으로 부터 물이 이용 가능한 위치 까지의 수송 시간이다.

$P_{26}[\text{l} \cdot \text{kg}^{-1}]$ 및 $P_{27}[\text{l} \cdot \text{kg}^{-1}]$ 은 해수로 부터 수중 동물 및 수중 식물로의 전이 매개 변수로서 수중 방사성핵종의 농도에 대한 식용 생물내의 방사성핵종의 비로 정의된다.

$P_{28}[\text{l} \cdot \text{kg}^{-1}]$ 은 해수로 부터 침전물로의 전이매개 변수로서 수중 방사성 핵종의 농도에 대한 침전물의 방사성핵종의 비로 정의된다.

$P(e)_{29}$ 는 해수로 부터 인체로의 전이 매개 변수로서

$$P(e)_{29} = (DCF)_w (OF)_w \text{ [Sv} \cdot \text{l} \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}]$$

로 주어지며, 여기서 $(DCF)_w$ 는 오염수에서의 침투에 대한 선량 환산 인자, $(OF)_w$ 는 수영 등으로 인한 수중 활동 인자이다.

P_{69} 및 P_{79} 는 수중 생물로 부터 인체로의 전이 매개 변수로서

$$P_{69} \text{ [혹은 } P_{79}] = g_f I_f (DCF)_f \text{ [Sv kg Bq}^{-1} \text{ y}^{-1}]$$

으로 주어지며, 여기서 g_f 는 오염원으로 부터의 음식 소비 분율, I_f 는 수중동물 섭취량(P_{99}) 및 수중 식물 섭취량(P_{79}), $(DCF)_f$ 는 수중 생물 섭취에 대한 선량 환산 인자이다.

해변 등의 침전물로 부터 인체로의 전이 매개 변수는

$$P_{99} = (OF)_s W (DCF)_g d_s (DF)_s \quad [Sv \cdot kg \cdot Bq^{-1} \cdot y^{-1}]$$

인데, 여기서 $(OF)_s$ 는 해변 점유 인자, W 는 해안 폭 인자, $(DCF)_g$ 는 균질 오염 지표면에 대한 선량 환산 인자, d_s 는 유효 밀도, $(DF)_s$ 는 해변에서의 희석 인자이다.

5. 유도방출한도의 계산

상기와 같은 방법을 이용하여 개발된 DRL 코드를 이용하여 월성 원자력발전소 유도방출한도를 계산하기 위하여 다음과 같은 국내 입수 가능 환경 자료가 이용되었으며, 그 외에는 캐나다의 CANDU 발전소에서 적용한 자료들 중 이용이 가능한 자료들이 본 DRL 코드의 내장 자료 및 입력 자료로 이용되었다.

대기 확산 인자의 계산시 유효 굴뚝 높이의 계산에 필요한 자료가 국내에 조사되어 있지 않기 때문에 CAN/CSA-N288.1-M87에서 권고하는 실제 굴뚝 높이인 50m가 유효 굴뚝 높이로 사용되었으며, 월성 부지 관측 자료인 표 3이 기상 빈도 분포로 이용되었다.

액체 방출시의 연 평균 체적 방출율은 응축기 냉각수 유동율인 2.5×10^4 l/s가 이용되었다[4].

한국인의 음식물 섭취량은 성인 및 유아로 분류하여 사용하였다. 성인의 경우, 농작물 섭취량은 262kg/y, 우유 섭취량은 32kg/y, 육류 섭취량은 24kg/y, 어류 섭취량은 41.4kg/y, 갑각류와 연체류는

7.5kg/y, 미역과 같은 해양 식물은 5.9kg/y가 각각 이용되었다. 유아의 경우, 우유 섭취량은 220kg/y이며[4], 조사되어 있지 않은 자료는 CSA의 권고[2]에 따라 성인의 10%를 섭취하는 것으로 가정하였다.

성인의 호흡율은 7.4×10^3 m³/y이 유아의 호흡율은 1.4×10^3 m³/y이 이용되었다[4].

6. 계산 결과 및 토의

유도방출한도의 계산은 수많은 방사성 핵종, 여러 가지 경우의 피폭 경로와 이에 따른 전이 매개 변수의 계산, 여러 기후 조건에 따른 대기 확산 인자 등을 고려하여 결정하여야 하기 때문에 복잡한 수많은 계산으로 부터 야기될 수 있는 오산을 탈피하고, CANDU형 원전의 건설과 더불어 이에 관한 계산의 정립을 목적으로 원자로 정상 운전시의 유도방출한도 계산을 위한 DRL 코드를 개발하였다.

DRL 코드를 이용하여 대기확산인자를 배기구로부터의 거리 함수로 계산한 결과는 그림 3과 같다. 50m 높이에서의 방출 경우 주거제한구역 경계인 914m 지점[4]에서의 대기확산인자는 3.98×10^{-7} s/m³으로 나타났으며 이것이 유도방출한도 계산시 이용되었다. DRL 코드 계산 결과에 의하면 기체 및 액체 방출시의 월성 발전소 주거 제한 구역에서의 유도 방출 한도가 표 5 및 6과 같이 계산되었다. 표 5 및 6에는 각 핵종별 제한기관(limiting organ)이 표시되었으며, 성인의 유효선량 및 기관선량, 피부선량, 그리고 유아의 유효선량 및 기관선량에 대한 유도선량한도중 최소치가 각 핵종별 유도선량한도로 결정되었다. 표 5 및 6의 방출 목표치는 원자로 정상 운전시 각 핵종별 유도방출한도의 1%에 해당되는 값이다.

기체방출물의 대기 방출시 본 계산에서 고려된

Table 5. Derived release limits for airborne releases to atmosphere at Wolsong [Bq/week]

No.	Radio-nuclides	Adult		Skin Dose	Infant		DRL for Nuclide	Release Target	Limiting Organ
		Effective Dose	Organ Dose		Effective Dose	Organ Dose			
1	H-3	1.36E+15	1.14E+16	N/A	8.13E+14	6.78E+15	8.13E+14	8.13E+12	WB
2	C-14	1.99E+13	1.66E+14	1.29E+19	7.50E+12	6.66E+13	7.50E+12	7.50E+10	WB
3	Cr-51	5.86E+13	2.30E+14	1.63E+16	1.94E+13	3.24E+14	1.94E+13	1.94E+11	WB
4	Mn-54	7.62E+11	1.12E+13	5.84E+13	9.24E+11	1.98E+13	7.62E+11	7.62E+09	WB
5	Co-58	9.88E+11	9.86E+12	2.17E+14	9.63E+11	1.60E+13	9.63E+11	9.63E+09	WB
6	Fe-59	9.38E+11	6.11E+12	3.07E+14	1.15E+12	1.89E+13	9.38E+11	9.38E+09	WB
7	Co-60	1.94E+10	4.20E+11	3.70E+12	2.03E+10	4.37E+11	1.94E+10	1.94E+08	SPLEEN
8	Zn-65	2.79E+11	3.48E+12	1.14E+14	2.16E+11	2.22E+12	2.16E+11	2.16E+09	WB
9	Sr-89	7.48E+11	1.64E+12	1.35E+14	2.94E+11	1.10E+12	2.94E+11	2.94E+09	WB
10	Sr-90+	7.41E+09	1.72E+10	5.23E+11	2.18E+09	6.89E+09	2.18E+09	2.18E+07	LUNG
11	Zr-95+	1.08E+12	4.96E+12	9.64E+13	1.54E+12	1.06E+13	1.08E+12	1.08E+10	LUNG
12	Nb-95	9.25E+11	6.14E+12	5.52E+14	3.34E+11	1.25E+12	3.34E+11	3.34E+09	BS
13	Ru-103	2.42E+12	7.80E+12	7.33E+14	4.73E+12	2.29E+13	2.42E+12	2.42E+10	BS
14	Ru-106+	1.80E+11	5.05E+11	3.43E+12	2.69E+11	1.32E+12	1.80E+11	1.80E+09	LUNG
15	Sb-124	6.45E+11	2.21E+12	5.74E+13	1.34E+12	6.38E+12	6.45E+11	6.45E+09	LUNG
16	Sb-125	3.29E+11	3.49E+12	3.23E+13	3.78E+11	6.66E+12	3.29E+11	3.29E+09	LUNG
17	I-131	1.01E+11	1.64E+11	1.03E+15	2.76E+10	2.07E+10	2.07E+10	2.07E+08	WB
18	I-132	1.58E+14	6.93E+14	4.92E+15	7.09E+13	9.00E+13	7.09E+13	7.09E+11	T
19	I-133	3.28E+12	5.32E+12	1.31E+15	7.68E+11	5.90E+11	5.90E+11	5.90E+09	T
20	I-134	2.98E+14	4.91E+15	6.80E+15	1.35E+14	7.35E+14	1.35E+14	1.35E+12	T
21	I-135	3.43E+13	6.89E+13	3.38E+15	9.68E+12	8.22E+12	8.22E+12	8.22E+10	T
22	Cs-134	4.73E+10	4.43E+11	1.11E+13	8.22E+10	6.85E+11	4.73E+10	4.73E+08	T
23	Cs-137+	4.32E+09	3.63E+10	1.12E+12	4.51E+09	3.76E+10	4.32E+09	4.32E+07	WB
24	Ba-140+	1.21E+12	3.08E+12	1.22E+14	2.68E+12	1.18E+13	1.21E+12	1.21E+10	WB
25	Ce-141	2.73E+12	6.24E+12	4.01E+15	5.59E+12	1.71E+13	2.73E+12	2.73E+10	LUNG
26	Ce-144+	2.42E+11	5.55E+11	4.96E+12	4.97E+11	1.46E+12	2.42E+11	2.42E+09	LUNG
27	Eu-152	1.16E+10	2.62E+11	2.24E+12	1.17E+10	2.82E+11	1.16E+10	1.16E+08	WB
28	Eu-154	2.07E+10	3.92E+11	2.33E+12	2.12E+10	4.55E+11	2.07E+10	2.07E+08	WB
29	Gd-153	3.51E+12	1.19E+13	4.62E+14	5.00E+12	2.10E+13	3.51E+12	3.51E+10	BS
30	Noble Gases	1.06E+15	5.28E+16	N/A	7.04E+14	3.52E+16	7.04E+14	7.04E+12	WB

Note 1 : + sign indicates that the dose conversion factors for these isotopes include dose from its daughter.

Note 2 : WB = Whole Body

BS = Bone Surface

T = Thyroid

Table 6. Derived release limits for water-borne releases to surface water at Wolsong [Bq/week]

No.	Radio-nuclides	Adult		Skin Dose	Infant		DRL for Nuclide	Release Target	Limiting Organ
		Effective Dose	Organ Dose		Effective Dose	Organ Dose			
1	H-3	5.84E+16	4.86E+17	N/A	1.89E+17	1.58E+18	5.84E+16	5.84E+14	WB
2	C-14	1.15E+12	9.61E+12	7.61E+19	3.75E+12	3.33E+13	1.15E+12	1.15E+10	WB
3	Cr-51	3.94E+13	1.56E+14	8.70E+15	1.19E+14	1.32E+15	3.94E+13	3.94E+11	LLI
4	Mn-54	4.94E+11	3.95E+12	1.80E+14	2.81E+12	4.15E+13	4.94E+11	4.94E+09	LLI
5	Co-58	1.76E+12	1.81E+13	2.56E+14	4.28E+12	8.29E+13	1.76E+12	1.76E+10	LLI
6	Fe-59	1.80E+11	1.07E+12	2.48E+14	6.72E+11	1.08E+13	1.80E+11	1.80E+09	LLI
7	Co-60	1.73E+11	2.99E+12	1.82E+13	7.00E+11	1.15E+13	1.73E+11	1.73E+09	LLI
8	Zn-65	8.41E+10	1.12E+12	3.05E+14	3.31E+11	3.52E+12	8.41E+10	8.41E+08	WB
9	Sr-89	4.11E+13	8.86E+13	1.79E+13	5.71E+13	2.14E+14	1.79E+13	1.79E+11	BS
10	Sr-90+	3.02E+12	6.95E+12	2.40E+12	4.28E+12	1.35E+13	2.40E+10	2.40E+10	BS
11	Zr-95+	2.25E+12	1.45E+13	1.05E+14	3.33E+12	6.01E+13	2.25E+12	2.25E+10	LLI
12	Nb-95	4.13E+12	3.81E+13	3.60E+14	6.74E+12	5.59E+13	4.13E+12	4.13E+10	LLI
13	Ru-103	7.51E+12	3.47E+13	5.31E+14	1.47E+13	2.03E+14	7.51E+12	7.51E+10	LLI
14	Ru-106+	1.28E+12	3.49E+12	1.11E+13	5.64E+12	3.21E+13	1.28E+12	1.28E+10	LLI
15	Sb-124	1.79E+12	7.55E+12	5.94E+13	4.10E+12	4.86E+13	1.79E+12	1.79E+10	LLI
16	Sb-125	5.81E+12	2.33E+13	1.42E+14	1.63E+13	1.87E+14	5.81E+12	5.81E+10	LLI
17	I-131	1.71E+11	2.78E+11	1.38E+16	2.36E+11	1.77E+11	1.71E+11	1.71E+09	T
18	I-132	1.50E+13	3.02E+13	4.36E+15	1.92E+13	1.77E+13	1.50E+13	1.50E+11	T
19	I-133	9.34E+11	1.49E+12	5.99E+15	1.08E+12	8.29E+11	8.29E+11	8.29E+09	T
20	I-134	5.16E+13	1.54E+14	3.46E+15	2.48E+13	7.37E+13	2.48E+13	2.48E+11	T
21	I-135	4.00E+12	6.85E+12	6.36E+15	4.84E+12	3.95E+12	3.95E+12	3.95E+10	T
22	Cs-134	9.37E+11	9.17E+12	6.20E+13	1.01E+13	8.38E+13	9.37E+11	9.37E+09	WB
23	Cs-137+	1.34E+12	1.21E+13	6.35E+12	1.29E+13	1.07E+14	1.34E+12	1.34E+10	SKIN
24	Ba-140+	7.99E+12	1.86E+13	6.78E+14	6.48E+13	2.39E+14	7.99E+12	7.99E+10	LLI
25	Ce-141	7.55E+12	1.80E+13	2.47E+15	3.62E+13	1.57E+14	7.55E+12	7.55E+10	LLI
26	Ce-144+	1.08E+12	2.35E+12	1.43E+13	7.52E+12	2.20E+13	1.08E+12	1.08E+10	LLI
27	Eu-152	1.80E+12	8.93E+12	1.21E+13	5.12E+12	6.63E+13	1.80E+12	1.80E+10	WB
28	Eu-154	1.20E+12	5.06E+12	1.20E+13	3.81E+12	3.10E+13	1.20E+12	1.20E+10	WB
29	Gd-153	8.44E+12	3.27E+13	6.00E+14	1.87E+13	2.16E+14	8.44E+12	8.44E+10	WB

Note 1 : + sign indicates that the dose conversion factors for these isotopes include dose from its daughter.

Note 2 : WB = Whole Body

BS = Bone Surface

T = Thyroid

LLI = Lower Large Intestine

29개 핵종과 불활성기체는 삼중수소, 방사성요오드, 불활성 기체, C-14(기체성), 그리고 입자 물질로 분류하여 각 그룹별 DRL을 그룹내 핵종별 DRL의 최소값으로 설정하였다(표 7 및 8 참조). 여기서 H-3는 유아의 유효선량에 대한 유도방출한도가 8.13×10^{14} Bq/week, 방사성요오드중 I-131은 유아의 기관선량에 대한 유도방출한도가 2.07×10^{10} Bq/week, 불활성 기체는 유아의 유효선량에 대한 유도방출한도가 7.04×10^{14} Bq MeV/week, C-14(기체성)는 유아의 유효선량에 대한 유도방출한도가 7.50×10^{12} Bq/week, 그리고 입자중 Sr-90은 유아의 유효선량에 대한 유도방출한도가 2.18×10^9 Bq/week로 최소치를 나타내어 상기 5종에 대한 유도방출한도로 결정되었다.

외부 침전 선량은 공기의 단위 부피당 방출되는 에너지에 비례한다. 따라서 원자력 발전소 굴뚝의 배기 감시기는 불활성 기체에 대하여 Bq·MeV

단위로 감시하게 되며, 불활성기체에 대한 유도방출한도는 Bq·MeV/week 단위로 계산된다. 액체 방출물의 바다 방출시 본 계산에서 고려된 29개 핵종은 삼중수소, C-14(용해성) 그리고 Gross β-γ로 분류하였는데, H-3는 성인의 유효선량에 대한 유도방출한도가 5.84×10^{16} Bq/month, Gross β-γ 중 Zn-65는 성인의 유효선량에 대한 유도방출한도가 8.41×10^{10} Bq/month, C-14(용해성)는 성인의 유효선량에 대한 유도방출한도가 7.50×10^{12} Bq/month로 최소치를 나타내어 상기 3종에 대한 유도방출한도로 결정되었다.

본 계산에 이용되는 부지 특성 자료가 충분히 조사되어 있지 않은 상태이므로 입력 자료로써 다수의 캐나다 표준 자료를 이용하였다. 그러므로 우리의 사회환경에 대한 자료의 축적이 매우 절실하다. 아울러, ICRP-60가 권고하는 가중 인자를 고려한 선량 환산 인자가 확보되지 않은 상태이므로, 본 계산에 이용된 선량 환산 인자는 CAN/CSA-N288.1-M87에서 권고하는 자료와 Johnson과 Dunford[7]의 자료중 일부를 인용하였는데, 이러한 선량 환산 인자는 ICRP-26[8]에서 권고한 가중 인자를 이용하여 계산된 것임을 밝혀둔다.

Table 7. Derived release limits on categories for airborne releases to atmosphere at Wolsong

Category	DRL(Bq/w)
Tritium	8.1×10^{14}
Radioiodine(I-131)	2.1×10^{10}
Particulates	2.2×10^9
Noble Gases (Bq.MeV/w)	7.0×10^{14}
Carbon-14	7.5×10^{12}

Table 8. Derived release limits on categories for water-borne releases to surface water at Wolsong

Category	DRL(Bq/m)
Tritium	5.8×10^{16}
Gross Beta-Gamma	8.4×10^{10}
Carbon-14	1.2×10^{12}

7. 결 론

CANDU형 원자력발전소에서의 정상운전중 주 거제한구역 경계에서의 유도방출한도 결정을 위한 DRL 코드를 CSA Standard N288.1-M87에 근거하여 개발하였으며, 현재 건설중인 월성 원자력 발전소의 유도방출한도 결정에 이용될 수 있다. DRL 계산결과로부터 유도방출한도의 1%를 원자로 운전시 방사성물질의 대기 및 수중 방출 목표로 제시하였다. 본 계산과정에서 개발된 DRL 코드는 유사 발전소의 유도방출한도 결정에도 이용될 수 있을 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

1. D. J. Gorman, *The Basis for the Derived Limits for the Emission of Radionuclides in Airborne and Liquid Effluents from Ontario Hydro's Nuclear Facilities*, Ontario Hydro(1983).
2. Canadian Standard Association, *Guidelines for Calculating Derived Release Limits for Radioactive Material in Airborne and Liquid Effluents for Normal Operation of Nuclear Facilities*, CAN/CSA-N288.1-M87(1987).
3. The International Commission on Radiological Protection, *1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, ICRP Publication 60, Pergamon Press, Oxford (1990).
4. 한국전력공사, "월성 원자력 3,4호기 건설사업 - 환경영향평가서"(1992. 3).
5. R. P. Hosker, Jr., *Estimates of Dry Deposition and Plume Depletion over Forests and Grassland in Physical Behaviour of Radioactive Contaminants in The Atmosphere*, IAEA-SM-181/19, IAEA, Vienna(1973).
6. F. B. Smith, "A scheme for Estimating the Vertical Dispersion of Plume from a Source Near Ground Level", *Proceedings of the Third Meeting of the Expert Panel on Air Pollution Modelling*, NATO Committee on the Challenges of Modern Society Report NATO/CCMSN.14(1972).
7. J. R. Johnson and D. W. Dunford, *Dose Conversion Factors for Intakes of Selected Radionuclides by Infants and Adults*, Atomic Energy of Canada Limited, AECL-7919(1983).
8. The International Commission on Radiological Protection, *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, ICRP Publication 26, Pergamon Press, Oxford(1977).

Determination of Derived Release Limits for a CANDU Nuclear Power Plant

Kyo-Youn Kim, Hae-Ryong Hwang, Jong-Kyung Kim*

*Korea Atomic Energy Research Institute
Hanyang University**

ABSTRACT

A computer code DRL was developed to calculate the derived release limits at CANDU type nuclear power plants. The derived release limits resulting from DRL code is to set guidelines for the release of radionuclides in airborne and water-borne effluents during normal operations of a CANDU type nuclear power plant. The DRL code generally follows the methodology prescribed in the CSA standard N288.1-M87 and uses the parameter values recommended in the same standards. The DRL code was used to calculate a set of preliminary derived release limits for the Wolsong NPP.

Key words : DRL, transfer parameter, CANDU, dose conversion factor