

## 계통해석법에 의한 I-131 대기방출의 영향평가

陸 鍾 澈 · 李 鍾 一

漢陽大學校 工科大學 原子力工學科

河 正 雨

韓國에너지研究所 放射線安全管理室

### 요 약

영광 원자력 발전소 영광 1, 2호기로부터 대기방출되는 I-131에 의한 주민피폭선량을 ICRP 29에서 제안한 계통해석법(system analysis method)으로 계산하였고, I-131의 연간 섭취에 의한 갑상선의 실효 예탁선량당량을 ICRP 29와 ICRP 30의 개념을 결합하여 계산하였다. 그리고 계산에 사용한 모델의 감도(sensitivity)와 견고도(robustness)도 아울러 분석 평가하였다.

단기방출에 따른 최대 연간 개인피폭선량 계산결과는 정상가동에 따른 연속방출가정에 의한 계산결과보다 1.4배지 1.7배나 높았고, 연간 핵연료 손상율이 0.12%인 경우, 갑상선에 대한 집단피폭선량은  $3.05 \times 10^{-3}$  man-thyroid-Sv으로서 GASPARD 전산코드에 의한 값  $2.31 \times 10^{-3}$  man-thyroid-Sv보다 높았다.

사용한 모델의 평균 견고도 지수는 0.5이하로 변수값에 많은 영향을 받는 것으로 나타났으며, 경구 섭취를 통한 각 피폭경로의 감도 계산결과 유아의 경우는 우유를 통하여, 그리고 소아, 십대 및 성인의 경우는 농작물을 통한 피폭이 가장 민감한 것으로 나타났다.

### I. 서 론

원자력 발전소로부터 대기로 방출되는 방사성 핵종은 여러 피폭 경로를 통해 주변 주민에게 방사선의 피폭의 원인이 되므로 큰 관심의 대상이 되고 있다.

이 경우 발전소 주변 주민피폭선량 계산은 일반적으로 단순한 농축 계수법(concentration factor method)에 의해 계산되고 있으나 환경매체의 방사능 농축도의 시간 의존성을 고려하지 않기 때문에 장기방출의 경우는 단지 시간적으로 평균된 농도만이, 단기방출의 경우는 단지 시간 적분된 농도만이 계산될 수 있다. 그러므로 계산상 간단하지만 시간에 관한 농축도의 변화를 추적할 수 없게

된다. 이에 비하여 ICRP 29 부록I(1)에서 제시된 계통 해석법은 시간에 따른 변화를 알 수 있어서 장기방출시는 물론 단기방출시에 매우 유용하게 사용될 수 있는 대신에 더 복잡한 수학적 표현이 필요하다(2). 그 식은 계통을 표현하는 1차 선형 미분 방정식들이 조합되어 해석되어야 하는데 계산과정이 방대하므로 컴퓨터를 사용하여야 한다.

본 연구에서는 ICRP 29의 계통해석법 모델을 근거로한 전산코드를 개발하였으며 이를 이용하여 대기로 방출된 I-131의 내부피폭으로 인한 연간 갑상선 개인피폭선량과 집단피폭선량을 시범적으로 계산하였다. 계산에 사용된 대기확산인자는 1986년 영광부지 기상자료에 따라 WINDIFF 전산코드(3)에 의해 구해진 연평균값과 5, 6월의 월평균값

[4]을 사용하였다.

여기서 보이는 계산의 목적은 영광 원자력 발전소에서 대기 방출되는 I-131핵종에 의해 야기된 갑상선 내부피폭선량의 정확한 값을 구한다기 보다는 계통해석법을 이용한 환경선량평가 방법의 확립에 역점을 두었다. 왜냐하면 모델자체도 시험적 모델이고 일부 계산에서 요구되는 변수-예를 들면 영역 (compartment) 간의 이행율-들에 대한 자료가 개발되어 있지 않기 때문이다 그러므로 이러한 자료들이 개발되고 핵종에 따라 모델을 조금만 수정한다면 다른 여러 핵종들의 방출에 따른 피폭선량값이 비교적 정확하게 평가될 수 있다고 판단된다.

## II. 계통 해석법

### II-1. I-131의 대기방출로 인한 선량평가

ICRP 29부록 I의 예제 1.4와 같은 조건하에서 표준인의 연간 개인피폭선량을 계통해석법의 시험적 모델을 근거로 개발한 전산코드의 계산 흐름도는 그림 1 과 같다.

이 전산코드에 의해 ICRP 29의 예제를 계산한 결과, 그림 2, 3, 4에서 보여주듯이 ICRP 29의 계산결과와 잘 일치하였다. 그림 1에서 보여주듯이 우선 I-131의 대기방출량에 160개 구역의 대기확산인자, 곡물, 우유 및 육류의 가중치를 이용하여 각 구역의 공기중 방사능 농도를 계산한 후에 ICRP 29의 식 (1.10)~(1.21)의 1차 선형 미분 방정식들에 필요한 데이터를 읽게하고 이들 연립 미분방정식을 Runge-Kutta방법으로 풀어서 갑상선 피폭선량을 계산하였다. 농작물의 성장기간이 끝나는 직후에 비성장기에 알맞은 데이터를 다시 읽어 수행한 후 1년이 되면 수행이 끝나도록 하였다. 적분구간 DT는 1/24로 하였다. DT를 1/96과 1/12로 놓고 갑상선 피폭선량을 계산한 결과 DT가 1/24인 경우와 각각 99.9%, 97% 일치하였으나 1/12보다 큰 적분구간을 주었을 때는 오차가 심해져서 계산값의 큰 차이가 있었다. 집단선량의 계산에서는

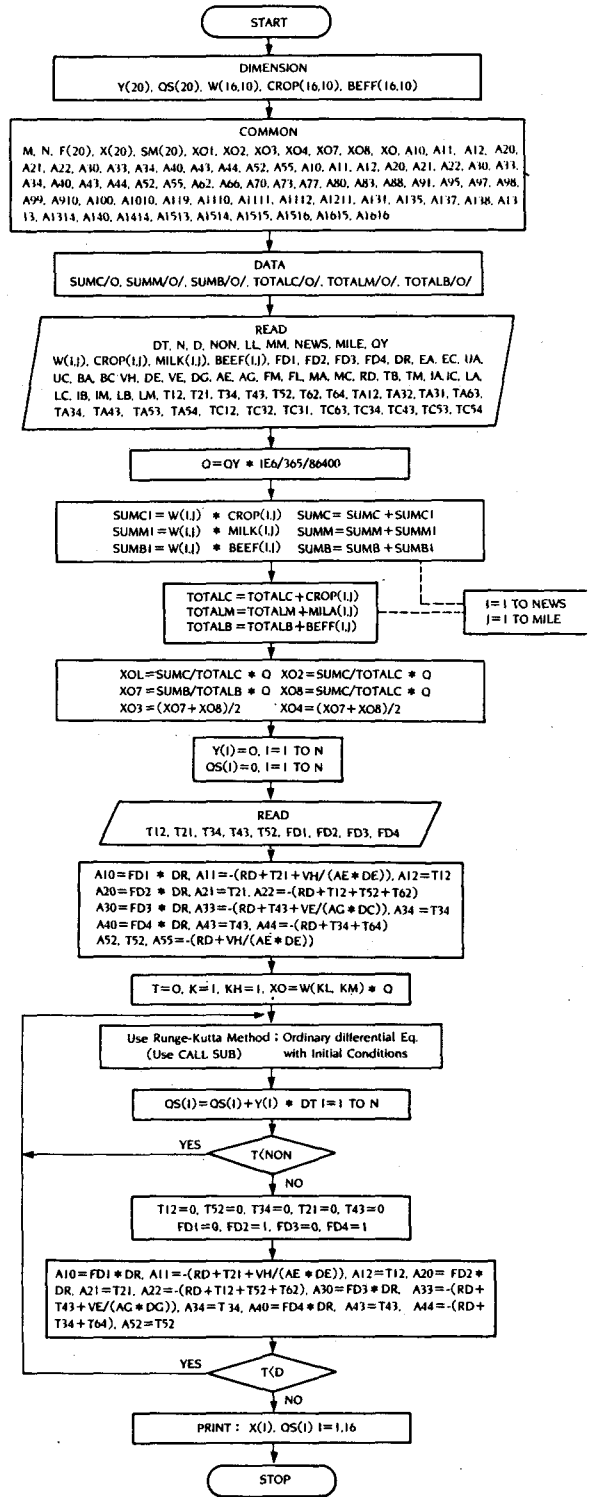
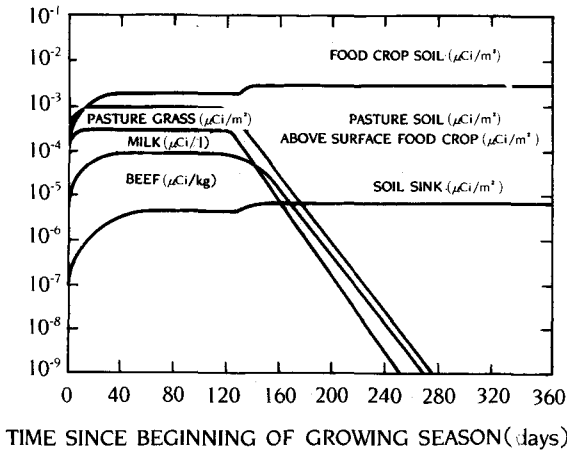
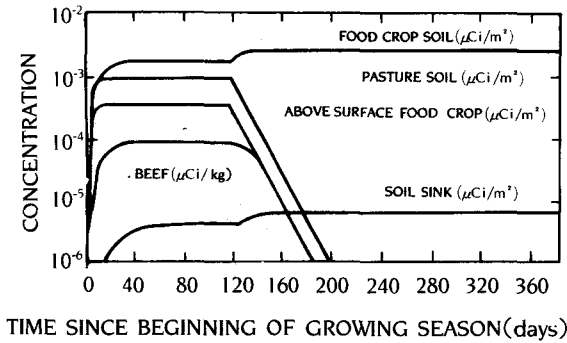


Fig. 1. Computational flow chart for SA method model.



(a) In Present Study



(b) In ICRP 29

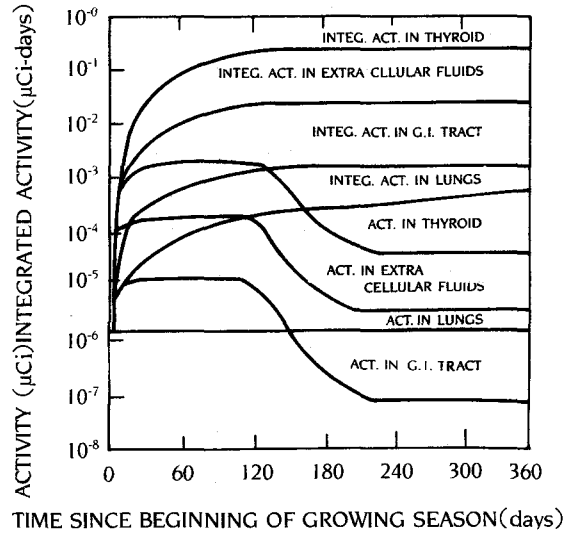
Fig. 2. Assumed continuous terrestrial release of I-131 (1 Ci/yr) : Predicted Food-Chain Concentrations.

프로그램에 각 구역의 인구수와 연령군별 선량환산인자를 고려하였다.

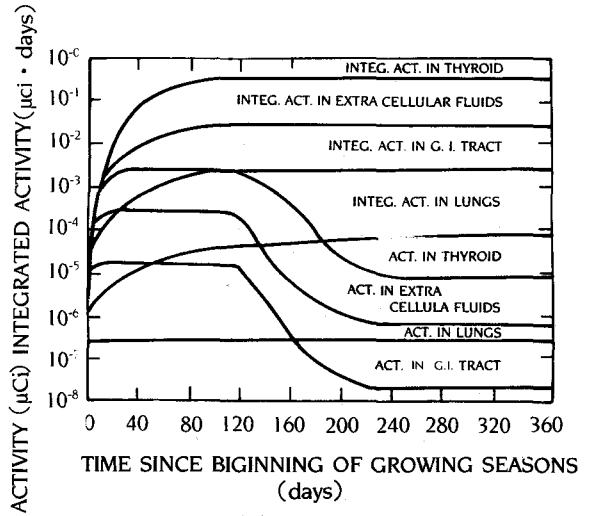
II-2 감도해석

사용한 모델에 영향을 주는 각 매개변수의 감도를 ICRP 29부록 I에 있는 식(1.23)의 개념을 사용하여 다음과 같은 식으로 계산하였다.

$$Sp = 1 - \frac{\text{p경로를 제외한 나머지 경로를 통해 갑상선에 피폭된 선량}}{\text{모델의 모든 경로를 통해 갑상선에 피폭된 선량}} \dots (1)$$



(a) In Present Study



(b) In ICRP 29

Fig. 3 Assumed continuous terrestrial release of I-131(1 Ci/yr) : Predicted Activity in Reference Adult.

단, Sp는 p경로에 관계된 매개변수의 감도를 말한다. 이와같은 방법으로 21개 경로에 대한 감도를 구한 결과 표1에서 보는 바와같이 대부분 ICRP 29결과와 거의 일치하였다. 그러나 T<sub>1/2</sub>와 T<sub>1/2e</sub>의 감도값만은 많은 차이를 보였다.

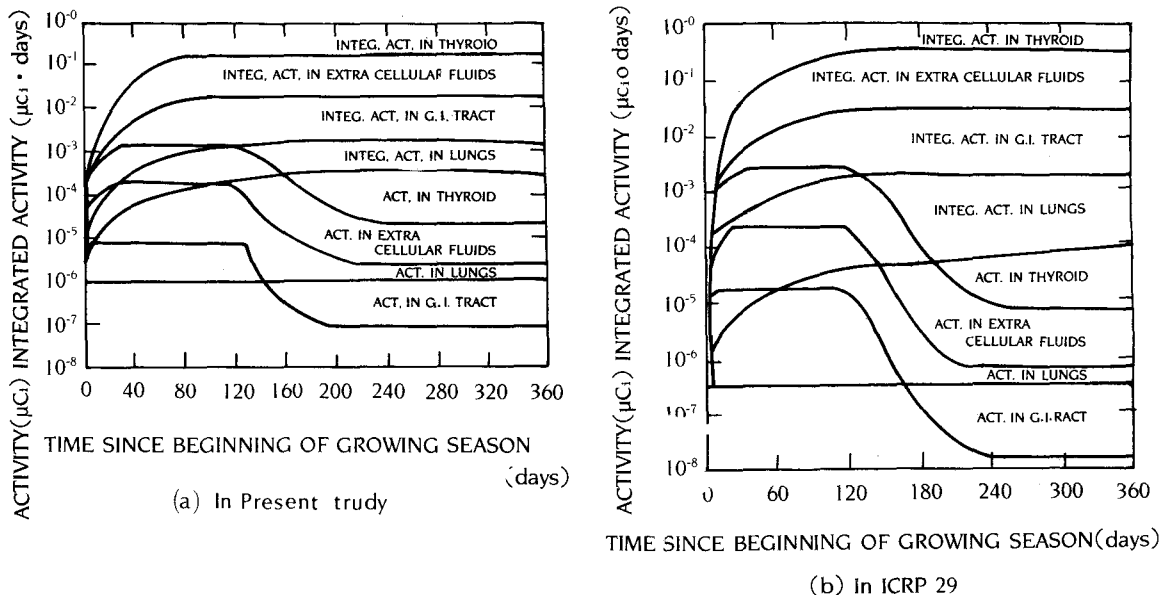


Fig. 4. Assumed continuous terrestrial release of I-131(1 Ci/yr) : Predicted Activity in Reference Child.

Table 1. Sensitivity of predicted thyroid to terrestrial parameter variation.

Parameter	Present Study		ICRP 29	
	Adult	Child	Adult	Child
Vh/De	-1.6E-03	-3.4E-04	-1.5E-03	-3.3E-04
E	2.9E-01	6.3E-02	2.9E-01	6.3E-02
T <sub>21</sub>	-4.3E-01	-9.2E-02	-1.7E-01	3.7E-02
T <sub>12</sub>	1.3E-08	2.9E-09	1.2E-08	2.8E-09
T <sub>22</sub>	8.6E-07	1.0E-07	8.6E-07	1.0E-07
T <sub>23</sub>	-8.9E-10	-1.4E-10	-9.1E-10	-1.1E-10
U	8.6E-07	1.0E-07	8.6E-07	1.0E-07
Ve/Dg	6.6E-01	9.3E-01	6.4E-01	8.9E-01
Fb/Mb	1.1E-01	2.6E-02	1.1E-01	2.6E-02
Fl/L	5.5E-01	9.0E-01	5.5E-01	9.0E-01
T <sub>24</sub>	-8.9E-01	-1.2E+00	-3.8E-01	-5.3E-01
T <sub>25</sub>	3.8E-04	5.4E-04	3.8E-04	5.4E-04
T <sub>26</sub>	-4.0E-07	-5.6E-07	-4.0E-07	-5.6E-07
B	1.1E-01	2.6E-02	1.1E-01	2.6E-02
M	5.5E-01	9.0E-01	5.5E-01	9.0E-01
V	9.5E-01	9.9E-01	9.5E-01	9.9E-01
FD1	2.9E-01	6.3E-02	2.9E-01	6.3E-02
FD2	1.4E-07	1.7E-08	1.4E-07	1.7E-08
FD3	6.6E-01	9.3E-01	6.6E-01	9.3E-01
FD4	6.2E-05	8.7E-05	6.3E-05	8.8E-05
I	4.7E-02	8.5E-03	4.7E-02	8.3E-03

II-3. 견고도 분석

모델에서 사용되는 모든 변수들의 부정확성에 의해 영향을 받는 정도를 나타내는 견고도는 다음의 식으로 산출하였다.

$$R_{k_n}(J) = [\min(D_{k_n}, D_{k_n}(J)) / \max(D_{k_n}, D_{k_n}(J))] \cdot (2)$$

단,  $R_{k_n}(J)$  : k연령군의 장기n에 대한 견고도 지수

$D_{k_n}$  : k연령군의 장기n에 대해 표준 변수들로부터 예측되는 선량

$D_{k_n}(J)$  : 임의의 변수 값J로부터 얻은 선량

여기서  $D_{k_n}(J)$ 의 값은 무작위(RANDOM)함수에 의해 0~1사이 값을 발생시킨 후에 각 변수마다 측정 범위내에서 임의의 값을 취하게 하여 계산하였고, 그 값들에 의해 계산된 갑상선 피폭선량값과 표준 변수들로부터 예측되는 갑상선 피폭선량값에 따라 견고도를 분석하여 표2와 같은 값을 얻었다. 단, ICRP 29부록I에서는 각 변수값들을 각각의 범위내에서 임의 선택하여 실행한 횟수가 250번이었으나 본 계산에서는 130번만 실행시켜 보았다.

본 프로그램과 ICRP 29결과 값이 다소 차이가 있었으나 이것은 임의로 들어가는 각 변수값의 차이가 있을 수 있기 때문이며, 견고도 지수는 확률적인 값으로서 시행횟수를 늘릴수록 평균 견고도 지수는 서로 잘 일치될 것이다. 그리고 4분치(Quartile)  $R_{k_n}^{0.25}$ 는 두 결과 값에서 더 많은 차이를 보였으나, 이것은 4분치의 뜻이 단지 견고도 지수가 0.25이상일 경우의 수로서 임의로 들어가는 변수 값에 큰 영향을 받을 수 있기 때문이며 이것 역시 시행횟수를 더 늘릴수록 차이가 줄어들 것이다.

III. 선량 계산

III-1. 초기조건 및 가정

II-1, 2, 3의 검증계산에서 계통해석법을 근거로 개발한 전산코드의 타당성이 입증되었으므로, 이것을 사용하여 영광 원자력발전소 7, 8호기의 I-131의 대기방출에 의한 주변주민의 갑상선 피폭선량을 1986년 1년동안의 정상가동시, 그리고 정상가동시 연간 핵연료 손상율이 0.12%라고 가정한 경우에 대해 적용하여 계산하였다. 1986년 1년간 영광 1, 2호기에 의한 I-131의 대기방출량은  $4.732 \times 10^{-6}$  Ci이며 5월에  $4.123 \times 10 \text{ Ci}^{-1}$ , 6월에  $6.092 \times 10^{-6}$  Ci 각각 방출되었다. 그리고 정상가동시 연간 핵연료 손상율이 0.12%라고 가정하였을 경우는 연간  $7.65 \times 10^{-7}$  Ci가 방출된다.

정상가동시 I-131은 연간 균일하게 연속적으로 방출된다고 가정하였고, 80km내의 인구분포, 농축산물의 생산 현황, 기타 부지특성 자료는 한국전력의 영광 1, 2호기ODCM [3]과 영광 3, 4호기 환경영향평가 보고서 [5]를 인용하였다. 단, 농작물과 목초의 성장기간은 90일로 가정하였고 농작물과 목초에 영향을 주는 공기중 농도는 각 구역에 생산되는 농작물과 우유, 육류의 가중치가 곱해진 평균값을 사용하였다.

그리고 부지특성에 맞게 개발되어 있지 않은 자료는 ICRP 29의 표준값을 사용하였다.

대상주민은 보수적인 의미에서 거주 제한구역 경계지역 부근의 700m거리에 거주한다고 가정한 최대개인과, 발전소로부터 반경 80km이내에 거주하는 일반대중이며, 여기서 최대개인이란 각 연령군에서 해당 연령군의 일반인과 동질의 습관 및 생리학적 신진대사를 가지나 음식 섭취량 및 행동시간이 가장 많은 가상적인 개인을 의미한다. 또한 연령군은 네개 연령군 즉, 유아(0~1세), 소아(1~11세, 십대(11~17세), 성인(17세 이상)으로 나누어 적용하였다.

Table 2. Robustness of predicted thyroid doses to terrestrial parameter inaccuracy.

Statistical Index	Present Study		ICRP 29	
	Adult	Child	Adult	Child
Mean( $R_{k_n}$ )	0.43	0.40	0.32	0.29
Quartile $R_{k_n}^{(0.25)}$	0.19	0.59	0.13	0.096

III-2. 최대개인 피폭선량 계산

1. 장기 대기방출의 경우

계통해석법으로 계산된 갑상선의 연간 집적 방사능 농도에 선량환산인자를 곱하여 피폭선량을 구했다. 여기서 선량환산 방법은 ICRP 29부록 II를 인용하였으나, 인자에 속하는 연령군별 갑상선 질량[6]은 한국인과 일본인의 체중[7]을 비교하여 환산한 후 적용하였다. 그러나 위의 방법으로 계산된 피폭선량은 음식물의 유통기간이 고려되지 않았으므로 실제보다 높게 나올 것이다. 그러므로 농작물, 우유, 육류 영역의 I-131 연간 집적농도를 계통해석법에 의해 계산한 후, 인간에게 섭취되기까지의 유통기간을 고려하고 각 연령군별 농작물, 우유, 육류의 연간 섭취율[3,5]과 선량환산인자[8]를 곱하여 피폭선량을 다시 계산하였으며, 다음과 같은 식들로 나타낼 수 있다.

호흡으로 인한 피폭선량 식은 다음과 같다.

$$D_{n_{ijk}} = X_{O_{ij}} \times T \times I_k \times L_k \times CF_{O_k} \dots \dots \dots (3)$$

- 단,  $D_{n_{ijk}}$  : ij구역의 호흡으로 인한 k연령군별 연간 피폭선량(Sv)
- $X_{O_{ij}}$  : ij구역의 1일간 공기중 방사능 농도( $\mu\text{Ci}/\text{m}^3$ )
- T : 피폭시간(여기서 365일)
- $I_k$  : k연령군별 호흡율( $\text{m}^3/\text{d}$ )
- $L_k$  : k연령군별 폐 잔유율
- $CF_{O_k}$  : k연령군별 호흡에 대한 선량환산인자[8] ( $\text{Sv}/\mu\text{Ci}$ )

음식물 섭취로 인한 피폭선량식은 다음과 같다.

$$D_{g_{ijk}} = D_{c_{ijk}} + D_{m_{ijk}} + D_{b_{ijk}} \dots \dots \dots (4)$$

$$D_{c_{ijk}} = X_{c_{ij}} \times E_k \times e^{-\lambda T_c} \times CF_k \dots \dots \dots (5)$$

$$D_{m_{ijk}} = X_{m_{ij}} \times M_k \times e^{-\lambda T_M} \times CF_k \dots \dots \dots (6)$$

$$D_{b_{ijk}} = X_{b_{ij}} \times B_k \times e^{-\lambda T_B} \times CF_k \dots \dots \dots (7)$$

- 단,  $D_{g_{ijk}}$  : ij구역의 k연령군별 농작물, 우유, 육류 섭취로 인한 연간 피폭선량(Sv)
- $D_{c_{ijk}}$  : ij구역의 k연령군별 농작물만의 섭취로 인한 연간 피폭선량(Sv)
- $D_{m_{ijk}}$  : ij구역의 k연령군별 우유만의 섭취로 인한 연간 피폭선량(Sv)

- $D_{b_{ijk}}$  : ij구역의 k연령군별 육류만의 섭취로 인한 연간 피폭선량(Sv)
- $X_{c_{ij}}$  : ij구역 농작물의 연간 방사능 집적 농도 ( $\mu\text{Ci} - \text{day}/\text{m}^2$ )
- $X_{m_{ij}}$  : ij구역 우유의 연간 방사능 집적 농도 ( $\mu\text{Ci} - \text{day}/\text{l}$ )
- $X_{b_{ij}}$  : ij구역 육류의 연간 방사능 집적 농도 ( $\mu\text{Ci} - \text{day}/\text{kg}$ )
- $E_k$  : k연령군별 지상 농작물 섭취율( $\text{m}^2/\text{d}$ )
- $M_k$  : k연령군별 우유 섭취율(1/d)
- $B_k$  : k연령군별 육류 섭취율(kg/d)
- $CF_k$  : k연령군별 섭취에 대한 선량환산인자[9] ( $\text{Sv}/\mu\text{Ci}$ )
- $\lambda$  : 방사성 핵종의 붕괴 상수( $\text{d}^{-1}$ )
- $T_M$  : 우유의 생산에서 소비까지의 소요시간 (여기서는 2일)
- $T_B$  : 육류의 도살에서 소비까지의 소요시간 (여기서는 3일)
- $T_c$  : 농작물의 수확에서 소비까지의 소요시간 (여기서는 60일)

개인 피폭선량 식은 다음과 같다.

$$DD_{ijk} = D_{n_{ijk}} + D_{g_{ijk}} \dots \dots \dots (8)$$

단,  $DD_{ijk}$ 는 ij구역에서 k연령군별 호흡과 음식물 섭취로 인한 피폭선량이고 호흡과 경구섭취로 인한 선량의 연령군별 환산인자는 Reg. Guide 1. 109 [8]의 것을 사용하였다.

2. 단기 대기방출의 경우

실제로 1986년 7, 8호기에서 I-131은 5, 6월 두차례에 단기방출되었으므로 유통기간을 고려하지 않은 상태로 계통해석법에 의해 피폭선량을 계산하여 장기 연속방출시와 비교하였다. 단기방출시간은 1시간으로 가정하였고 대기확산인자는 5, 6월의 월 평균값을[4] 사용하였다. 즉, 5, 6월에 방출된 I-131에 의한 피폭선량을 각각 계산하여 더해 주었다.

III-3. 집단피폭선량 계산

갑상선에 대한 집단피폭선량은 먼저 식(8)을 이용하여 각 구역의 개인피폭선량을 구한 후, 다음과 같이 계산하였다.

$$CD = \sum_{ijk} (DD_{ijk} \times P_{ij} \times PD_k) \dots\dots\dots (9)$$

- 단, CD : 주민 집단피폭선량(man-thyroid-Sv)
- DD<sub>ijk</sub> : ij구역에 거주하는 k연령군별 개인피폭 선량(Sv)
- P<sub>ij</sub> : ij구역에 거주하는 주민 수(man)
- PD<sub>k</sub> : 한국의 연령별 인구 구성비[5]  
(소아(유아 포함):0.24, 십대:0.17, 성인 :0.59)

식(9)에 사용되는 인자중 T<sub>M</sub>, T<sub>B</sub>, T<sub>C</sub> 값은 대중 피폭시 사용되는 인자를 사용하였으며 다음과 같다. [3]

- T<sub>M</sub> : 80km 구역내에서 우유의 생산에서 소비까지의 유통 기간(4일)
- T<sub>B</sub> : 80km 구역내에서 육류의 생산에서 소비까지의 유통 기간(3일)
- T<sub>C</sub> : 80km 구역내에서 농작물의 수확에서 소비까지의 유통 기간(74일)

유아의 인구 구성비는 통계자료에 없고 소아에 포함되어 소아(유아 포함)의 집단피폭선량 계산시 감상선에 대한 선량환산인자는 0~11세 사이에 연령별 인구수가 동일하다는 가정하에 다음과 같이 보정하였다.

보정 선량환산인자 =  
(유아에 대한 선량환산인자 × 1/11)  
+ (소아에 대한 선량환산인자 × 10/11) ... (10)

이 결과 소아(유아포함)의 감상선에 호흡경로의 선량환산인자는  $4.87 \times 10^{-2} Sv/\mu Ci$ , 경구섭취경로의 선량환산인자는  $6.46 \times 10^{-2} Sv/\mu Ci$ 로 이 값을 사용하였다.

### III - 예탁선량당량 계산

계통해석법에 따른 인간의 영역에 관한 미분방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$dX_{k_1}/dt = I_{gk} + T_{k_1k_2}X_{k_2} - (T_{k_2k_1} + \lambda_r)X_{k_1} \dots\dots\dots (11)$$

$$dX_{k_2}/dt = I_{hk} - (\lambda_r + T_{k_1k_2} + T_{k_2k_2})X_{k_2} \dots\dots\dots (12)$$

$$dX_{k_3}/dt = T_{k_2k_3}X_{k_2} + T_{k_3k_4}X_{k_4} - (\lambda_r + T_{k_3k_3} + T_{k_2k_3} + T_{k_3k_3})X_{k_3} \dots\dots\dots (13)$$

$$dX_{k_4}/dt = T_{k_3k_4}X_{k_3} - (\lambda_r + T_{k_3k_4} + T_{k_4k_4})X_{k_4} \dots\dots\dots (14)$$

단, 위의 식은 t에 관한 함수이고 t를 생략하였다.

X<sub>k<sub>n</sub></sub>(t) : k연령군별 n영역 내에서 어떤 방사성 핵종의 농도

I<sub>gk</sub>(t) : k연령군별 경구섭취경로를 통한 어떤 방사성 핵종의 섭취율

I<sub>hk</sub>(t) : k연령군별 호흡경로를 통한 어떤 방사성 핵종의 섭취율

T<sub>k<sub>i</sub>k<sub>j</sub></sub>(t) : j영역으로부터 i영역으로의 이행율

식 (11) - (14)의 미분 방정식은 호흡과 경구섭취를 통한 섭취가 순간적이라는 가정하에 해가 구해질 수 있다. 즉 I<sub>gk</sub>(t)=0, I<sub>hk</sub>(t)=0이 된다. 구하고자하는 것이 연간 방사성 핵종 섭취로 인한 예탁선량당량이기 때문에 연간 방사성 핵종 섭취량이 순간적으로 섭취된다고 가정하여 t=0일때, X<sub>k<sub>1</sub></sub>=D<sub>gk</sub>가 되며 X<sub>k<sub>2</sub></sub>=D<sub>hk</sub>가 된다. 이때 D<sub>gk</sub>는 경구섭취경로를 통한 어떤 방사성핵종의 k연령군별 연간 섭취량(Bq), D<sub>hk</sub>는 호흡경로를 통한 어떤 방사성 핵종의 k연령군별 연간 섭취량(Bq)이고, 식(3)과(4)에서 선량환산인자 CFO<sub>k</sub>와 CF<sub>k</sub>를 곱하지 않은 상태로 구하였다. 위의 경제조건과 ICRP 29의 변수값을 이용하여 식 (11)~(14)의 미분 방정식을 풀면 감상선 영역 X<sub>k<sub>n</sub></sub>(t)는 다음과 같다.

$$X_{k_1} = D_{hk} (0.3489e^{-0.09t} - 0.3987e^{-0.42t} + 0.053e^{-2.87t} - 0.0005e^{-17.09t}) + D_{gk} (0.4155e^{-0.09t} - 0.4237e^{-0.42t} + 0.0082e^{-17.09t}) \dots\dots\dots (15)$$

그러므로 연간 I-131의 섭취후 50년에 걸친 감상선에서의 총 변위수 Us[9] 값은 식(15)를 0부터 50×365일까지 적분함에 따라 다음과 같이 구해진다.

$$Us = 2.96D_{hk} + 3.63D_{gk} \text{ (Bq day)} \\ = 2.56 \times 10^5 D_{hk} + 3.13 \times 10^5 D_{gk} \text{ (trans)} \dots\dots\dots (16)$$

결국, 연간 I-131 섭취로 인해 감상선이 50년동안 받을 수 있는 총 선량당량은 ICRP 30(9)의 식(4.4)[9]에 의해 구할 수 있고, 여기에 감상선에 대한 가중치 0.3을 곱해서 감상선에 대한 실효 예탁선량당량을 구하였다.

### IV. 결과 및 토의

영광 원자력발전소 7,8호기의 정상가동시 I-131

**Table 3.** Predicted maximal individual annual doses(Sv)to the thyroid based on the assumption of continuous terrestrial release of I-131.

(a) by system analysis method which is not considered current time.

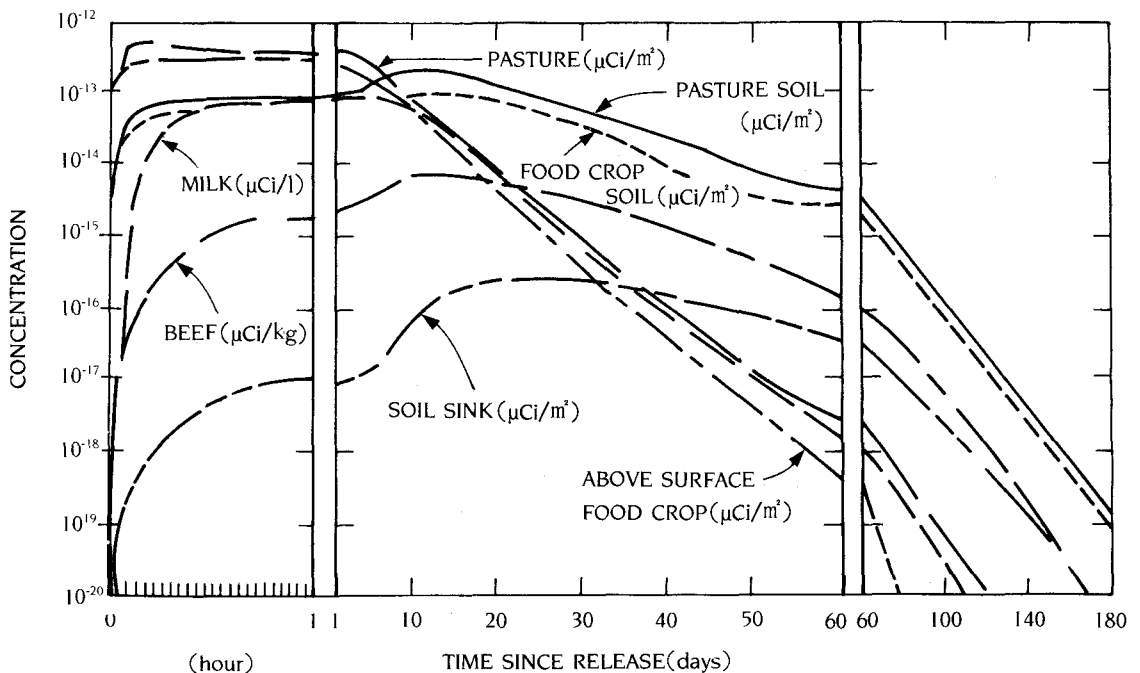
Case \ Age	Infant	Child	Teens	Adult
Normal Operation	1. 505E-07	2. 176E-07	2. 039E-07	1. 573E-07
0. 12% Fuel Defect	2. 433E-04	3. 518E-04	3. 295E-04	2. 542E-04

(b) by system analysis method which is considered current time.

Case \ Age	Infant	Child	Teens	Adult
Normal Operation	5. 78E-08	4. 86E-08	4. 41E-08	3. 60E-08
0. 12% Fuel Defect	9. 35E-05	7. 85E-05	7. 13E-05	5. 81E-05

대기방출로 인한 최대개인의 피폭선량을 계산한 결과는 다음 표 3과 같다. 이 결과에 의하면 유통기간을 고려않은 상태로 계통해석법에 의해 계산된 값은 유통기간을 고려하여 III-2의 (1), (2), (3)으로 구한 값보다 높았고, 유통기간을 고려하였을 경우 호흡과 음식물 섭취로 인한 갑상선 피폭선량은 유아가 가장 컸고 다음으로 소아, 십대, 성인 순이었다.

1986년 7, 8호기의 I-131 단기 대기방출에 따른 연령군별 최대개인의 연간 갑상선 피폭선량을, 유통기간이 고려되지 않은 상태에서 계통해석법에 의해 계산한 결과 성인은  $2.327 \times 10^{-8}$  Sv, 십대는  $3.036 \times 10^{-8}$  Sv, 유아는  $2.497 \times 10^{-8}$  Sv으로, 장기 연속방출로 가정해 계산한 값보다 1.4~1.7배 높았다. 그리고 5월의 단기 대기방출로 인한 각 영역의 시간별 I-131 오염농도를 그림 5에 나타내었고 성인



**Fig. 5.** Food-chain concentrations resulting from I-131 acute terrestrial release by Younggwang NU-1,2 in May 1986.



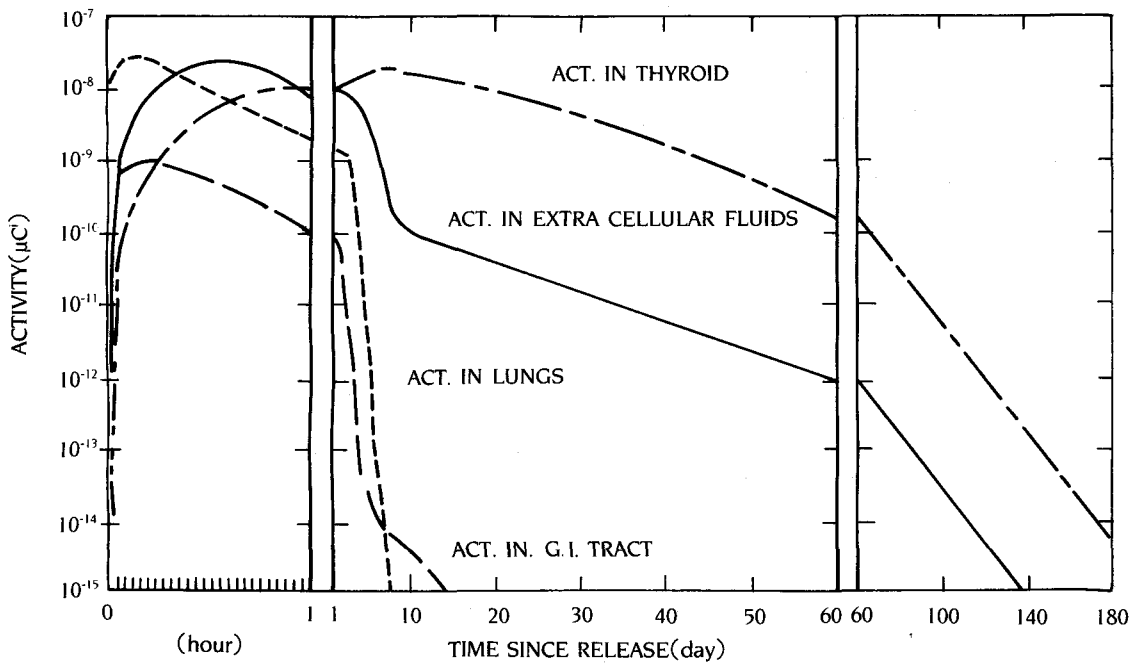


Fig. 6. Maximal adult activity in thyroid resulting from I-131 acute terrestrial release by Younggwang UN-1,2 in May 1986.

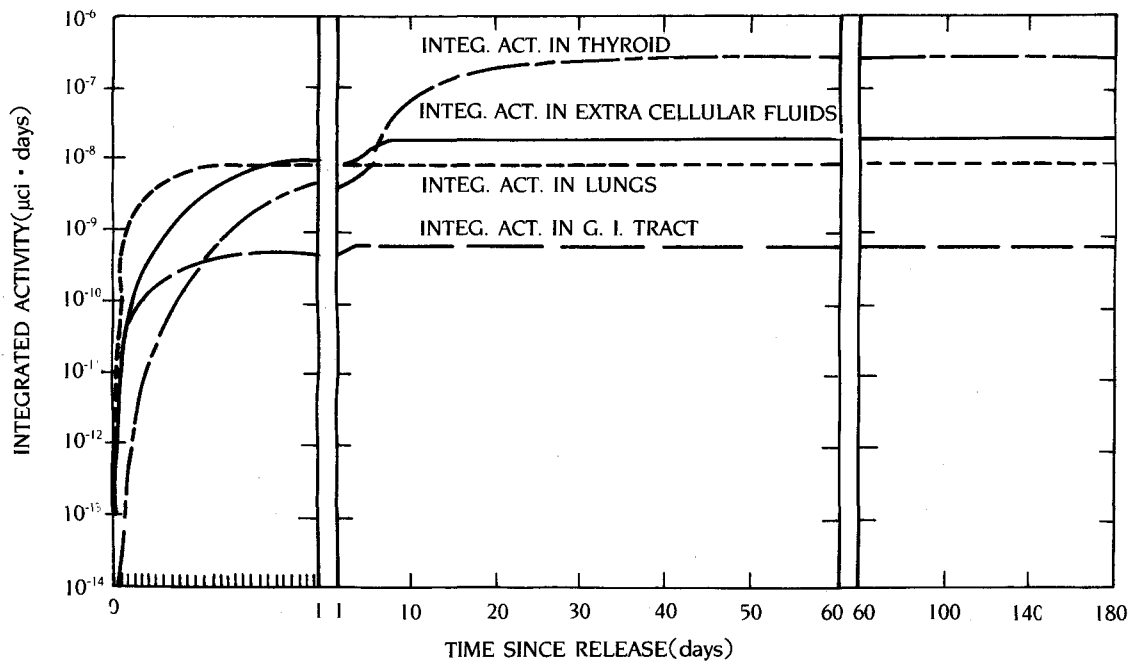


Fig. 7. Maximal adult integrated activity in thyroid resulting from I-131 acute terrestrial release by Younggwang UN-1,2 in May 1986.

의 각 신체 영역에 대한 시간별 방사능 농도와 직접 방사능을 그림 6, 7에 각각 나타내었다. 십대, 소아, 유아도 같은 유형으로 나오며 6월에 단기 대기방출로 인한 모든 결과의 그래프도 각각 5월 방출에서 얻은 그래프와 유사한 모양을 나타냈다.

구역별 연간 개인피폭선량 SSE방향 0.7~1.6km 구역이 가장 높았으나 인구수가 함께 고려되는 구역별 집단피폭선량은 SE방향 48~64km 구역이 가장 높았다.

영광 원자력발전소 7, 8호기의 연간 핵연료 손상율이 0.12%인 경우 I-131의 장기 대기방출로 인해 갑상선에 내부피폭된 집단선량은 약 0.60man-thyroid-Sv으로 GASPAR전산코드에 의해 계산된 값(10)  $2.31 \times 10^{-3}$ man-thyroid-Sv보다 훨씬 높은 값이다. 이것은 ICRP 29부록 I에 있는 계통해석법 모델이 유통기간을 고려안하고 오염된 음식물이 즉시 인간에게 섭취되는 것으로 가정했기 때문이며 유통기간을 고려하여 다시 계산한 집단피폭선량은  $3.05 \times 10^{-3}$ man-thyroid-Sv으로 GASPAR전산코드에 의해 계산된 값  $2.31 \times 10^{-3}$ man-thyroid-Sv보다 약간 높았다. 두 계산결과에서의 차이는 사용된 모델, 이행변수값 그리고 가정의 차이에 기인된다고 생각된다.

II-2, III-1에서와 같은 방법으로 영광 1, 2호기 1986년의 경우에 대해 최대개인이 공기중 I-131 농도가 가장 높은 곳과 가장 낮은 곳에 거주한다는 가정하에 피폭되는 경로의 감도를 네개의 연령군으로 나누어 계산해 얻은 결과 영광 1, 2호기의 1986년 정상가동시 I-131의 대기방출에 공기중농도가 최대인 SSE방향 700m거리에서 호흡경로의 감도값이 0.866~0.996으로 가장 높았다. 이것은 최대개인 피폭선량을 구할때 농작물과 목초에 관련된 공기중 농도는 각분포에 따른 기중 평균치를 주어 그만큼 음식물 섭취경로의 영향이 줄어들었기 때문이라 생각된다. 이 문제는 공기중 방사능 농도가 제일 낮은 N방향 64~80km 구역에서 최대개인에 대한 호흡경로의 감도가  $3.19 \times 10^{-4}$ ~ $1.24 \times 10^{-4}$ 으로 낮게 나온 것으로 뒷받침되어진다. 공기중 방사능 농도가 가장 높은 구역과 낮은 구

역에서의 연령군별 최대개인에 대한 갑상선 피폭선량에 관계된 여러 변수들의 감도를 표4의 (a), (b)에 각각 나타내었다. 표 4에서 보여주는 것처럼 발전소로부터 700m거리에 있는 최대개인의 경우는 네개 연령군 모두 주요 피폭경로가 호흡경로였으나, 64~80km구역에서의 최대개인인 경우 성인, 십대 및 소아는 농작물의 섭취에 의한 피폭이 가장 컸고 유아는 우유에 의한 피폭이 가장 컸다. 침착속도 V의 감도가 일반적으로 큰 것은 모든 경구섭취 경로에 공통적으로 관련되기 때문이다.

III-6의 계산 방법에 의해 영광 1, 2호기의 1986년 1년간 정상가동시와 연간연료 손상율을 0.12%로 가정한 정상가동시 기체 방출물 I-131 연간 섭취에 따른 갑상선에 대해 가중치가 곱해진 expectation당량(H<sub>50</sub>)값을 표 5에 나타냈다. 이 결과 Three-compartment model(11, 12)을 사용해 구한 값에 비해 약 50% 증가된 것이다.

## V. 결론 및 개선점

원자력 발전소 영광 1, 2호기의 정상가동시 대기로 방출된 I-131으로 인한 갑상선의 내부피폭선량을 계통해석법에 의하여 시설로부터 반경 80km 이내에 거주하는 주민과, 보수적으로 거주 제한구역 경계지역 부근의 700m 거리에 있다고 가정한 피폭량이 가장 많은 최대개인에 대해 계산한 결과는 다음과 같다.

1. 1986년 실제 있었던 단기방출에 따라 계산한 최대개인 연간 갑상선 피폭선량은 장기 연속방출로 가정하고 계산한 것보다 1.4~1.7배나 높았다.
2. 모델에 따른 감도계산결과, 경구섭취경로중 갑상선 피폭선량에 가장 큰 영향을 끼친 것은 유아의 경우 우유경로로, 성인, 십대 및 소아의 경우 농작물 경로로 나타났다.
3. 연간 핵연료 손상율이 0.12%라고 가정한 정상가동시 갑상선에 대한 집단피폭선량은  $3.05 \times 10^{-3}$ man-thyroid-Sv으로 GASPAR 전산코드에 의한 값  $2.31 \times 10^{-3}$ man-thyroid-Sv보다 약간 높은 결과를 보여주고 있다.

**Table 4.** Sensitivity of thyroid doses to terrestrial parameter variation : Resulting from continuous terrestrial release of I-131 by Younggwang NU-1,2 in 1986.

(a) In SEE direction and 700m from plant(Maximal air concentration).

Parameter	Adult	Teens	Child	Infant
Vh/De	-1.29E-03	-1.22E-03	-1.53E-03	-4.50E-10
E	1.11E-01	1.06E-01	1.32E-01	0.00E+00
T <sub>12</sub>	4.81E-09	4.149E-09	5.58E-09	4.51E-16
T <sub>32</sub>	1.29E-08	1.29E-08	4.50E-09	1.09E-08
T <sub>62</sub>	-2.03E-11	-1.82E-01	-1.32E-11	-1.02E-11
U	1.29E-08	1.29E-08	4.50E-09	1.09E-08
Ve/Dg	6.46E-04	9.52E-04	2.01E-03	3.94E-03
Fb/Mb	3.09E-04	2.98E-04	3.55E-04	0.00E+00
F1/L	3.37E-04	6.53E-04	1.65E-03	3.94E-03
T <sub>34</sub>	3.67E-07	5.40E-07	1.14E-06	2.24E-06
T <sub>64</sub>	-3.85E-10	-5.52E-10	-1.15E-09	-2.27E-09
B	3.09E-04	2.98E-04	3.55E-04	0.00E+00
M	3.37E-04	6.53E-04	1.65E-03	3.94E-03
V	1.12E-01	1.06E-01	1.34E-01	3.84E-03
FD1	1.11E-01	1.06E-01	1.32E-01	9.11E-09
FD2	2.84E-09	2.71E-09	1.50E-09	1.76E-09
FD3	6.46E-04	9.52E-04	2.01E-03	3.94E-03
FD4	5.89E-08	8.68E-08	1.83E-07	3.59E-07
I	8.88E-01	8.94E-01	8.66E-01	9.96E-01

(b) In N direction and 60-80km from plant(minimal air concentration).

Parameter	Adult	Teens	Child	Infant
Vh/De	-1.15E-02	-1.15E-02	-1.14E-02	-1.14E-07
E	9.94E-01	9.91E-01	9.85E-01	0.00E+00
T <sub>12</sub>	4.26E-08	4.19E-08	4.20E-08	4.56E-13
T <sub>32</sub>	1.15E-07	1.21E-07	3.37E-08	2.71E-06
T <sub>62</sub>	-1.95E-10	-2.03E-10	-1.21E-10	-2.52E-09
U	1.15E-07	1.22E-07	3.37E-08	2.71E-06
Ve/Dg	5.76E-03	8.94E-03	1.50E-02	9.88E-01
Fb/Mb	2.76E-03	2.80E-03	2.64E-03	0.00E+00
F1/L	3.01E-03	6.14E-03	1.23E-02	9.88E-01
T <sub>34</sub>	3.27E-06	5.07E-06	8.49E-06	5.61E-04
T <sub>64</sub>	-3.47E-09	-5.21E-09	-8.25E-09	-5.61E-07
B	2.76E-03	2.80E-03	2.64E-03	0.00E+00
M	3.01E-03	6.14E-03	1.23E-02	9.88E-01
V	1.00E+00	1.00E+00	1100E-00	9.88E-01
FD1	9.94E-01	9.91E-01	9.85E-01	2.27E-06
FD2	2.49E-08	2.58E-08	1.18E-08	4.36E-07
FD3	5.76E-03	8.93E-03	1.50E-02	9.88E-01
FD4	5.25E-07	8.13E-07	1.36E-06	8.99E-05
I	3.92E-04	4.15E-04	3.19E-04	1.24E-02

**Table 5.** The values of Us, SEE and  $I \sum_T w_T (H_{50,T} \text{ per unit intake})$  for I-131 in thyroid.

Case	Age	Adult	Teens	Child	Infant
〈Normal Operation in 1986〉					
Us due to Annual Intake (trans)		2. 29E+02	2. 29E+02	1. 07E+02	5. 16E+01
SEE (Mev/g/trans)		1. 07-E02	1. 47E-02	3. 41E-02	5. 62E-02
$I \sum_T w_T (H_{50,T} \text{ per unit intake})$ (Sv)		1. 18E-11	1. 62E-11	1. 75E-11	1. 39E-11
〈0. 12% Fuel Defect〉					
Us due to Annual Intake (trans)		3. 69E-05	3. 69E-05	1. 73E+05	8. 35E+04
SEE (Mev/g/trans)		1. 07E-02	1. 47E-02	3. 41E-02	5. 62E-02
$I \sum_T w_T (H_{50,T} \text{ per unit intake})$ (Sv)		1. 90E-08	2. 60E-08	2. 83E-08	2. 25E-08

4. 연간 개인피폭선량은 SEE방향 0.7~1.6km구역에서 가장 높았으나 연간 집단피폭선량은 SEE방향 48~64km에서 가장 높은 것으로 나타났다.

5. 연간 I-131섭취로 인한, 연령군별 갑상선의 실효예탁선량당량값은 Three-compartment model을 사용하여 계산된 값보다 약 1.5배 높았다.

위의 결과에서 다소의 차이를 보여주는 것은 사용된 모델과 입력자료 및 가정이 서로 다소 약간씩 다른데에 기인한 것으로 생각되며, 본 연구에서 사용된 모델은 단지 시험적 모델로서 견고도 지수가 0.5이하로, 변수값에 크게 영향을 받기때문에 선량평가에 있어서 부지에 알맞은 타당성 있는 모델 및 인자들의 선정, 그리고 입력자료에 대한 정확도가 충분히 재검토된다면 본 연구와같은 방법으로 I-131은 물론 다른 핵종에 대해서도 실제로 평가하였을때 비교적 정확한 결과를 얻을 수 있다고 판단된다. 계통해석법을 널리 활용하기 위해서 가장 시급한 것은 그 부지특성에 맞게 실험된 각 영역 (compartment)들간의 이행율을 구하는 것이다.

### 참 고 문 헌

- 1) ICRP, *Radionuclide Release into the Environment : Assessment of Dose to Man*, ICRP Publication 29(1979).
- 2) Geoffrey G. Eichholz, *Environmental Aspects of Nuclear Power*, Ann Arbor Science Publishers(1976).

- 3) 한국전력, "원자력 7, 8호기 발전소 주변 주민 피폭선량 계산지침서" *Offsite Dose Calculation Manual Rev. 0* (1985).
- 4) 한국전력, "원자력 발전소 7, 8호기 1986년도 ODCM중 'WINDIFF 86'" (1986).
- 5) 한국전력, "원자력 발전소 11, 12호기 환경 영향 평가서" (1986).
- 6) Gi-Ichiro Tanaka and Hisao Kawamura, "Reference Japanese man-I Mass of organ and other characteristics of normal Japanese," *Health Phys.* 36, 333-346 (1979).
- 7) Young J. Kim, "Studies on the reference Korean and estimation of radiation exposure dose" 방사선방어 학회지, 제 7 권 제 1 호 1-10 (1982).
- 8) U. S. NRC, "Appendix E, Numerical data for the calculation of annual doses to man from reactor effluents," *Regulatory Guide 1.109*, Revision 1 (October, 1977).
- 9) ICRP, *Limits for Intake of Radionuclides by Workers*, ICRP Publication 30 (1979).
- 10) 한국전력, GASPAR코드 사용자 지침서 최종 보고서 (1985).
- 11) J. R. Johnson, D. G. Stewart and M. B. Carver, *Committed Effective Dose Equivalent Conversion Factors for Intake of Selected Radionuclides by Infants and Adults*, Atomic Energy Canada Limited, AECL-6540 (1979).

- 12) J. R. Johnson, *Compartment Model of Radioiodine in Man*, Atomic Energy Canada Limited, AECL-5244 (1975).

## **An Assessment of Radiological Consequences of I-131 Atmospheric Release by the System Analysis Method**

**Yook, Chong-Chul, Lee, Jong-II**

*(Nuclear Engineering Dept., Hanyang University)*

**Ha, Chung-Woo**

*(Health Physics Dept., Korea Advanced Energy Research Institute)*

### **ABSTRACT**

The annual individual and collective doses to the thyroids of four age-dependent groups due to the intake of I-131 released from the Younggwang nuclear power plant NU-1 & 2, Korea, are estimated using the model presented in ICRP 29. Sensitivity and robustness of the model are analyzed.

In case of 0.12% fuel defect during normal operation, the collective dose is founded to be  $3.05 \times 10^{-3}$  man-thyroid-Sv, which is higher than the value calculated by the GASPAR code,  $2.3 \times 10^{-3}$  man-thyroid-Sv. The maximal individual annual doses resulting from an acute release are higher than those calculated under the assumption of continuous release by 1.4~1.7 times. The most important pathway to the infant is milk and, in contrast, that to child, teen and adult is ingestion of crops. The model used is the calculation appears to be influenced by the variables such as robustness-index. The weighted committed dose equivalent obtained by the ICRP 29 model is slightly higher than that calculated by the three-compartment model.