

## 방사성핵종의 흡입섭취 후 전신, 장기 및 배설물에서의 섭취량 분율 계산

### Calculation of Intake Fractions for Whole Body, an Organ and Excreta after Inhalation Intake

이종일, 이태영, 장시영  
한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

ICRP 66 호흡기 모델과 ICRP의 최신 대사학적 모델을 사용하여 섭취량 분율 계산체계를 구축하였고, ICRP 78의 부록 A에 주어진 모든 방사성핵종에 대하여 입자크기별로 전신, 장기 및 배설물에서의 섭취량 분율을 계산하였다. 계산결과를 타 연구자의 계산결과와 비교해 본 결과 0.3 % 오차범위 내에서 잘 일치하는 것으로 나타났다.

#### Abstract

A system for calculating intake fractions using ICRP publication 66 respiratory tract model and recent biokinetic models was established. Intake fractions for whole body, an organ and excreta as a function of a particle size were calculated for all radionuclides given in annex A of ICRP publication 78. As compared with other researcher's results, it was shown that there were good agreements within a 0.3 % error of each other.

#### 1. 서 론

방사성핵종의 직업상섭취는 다양한 인간활동의 결과로 발생할 수 있다. 이 활동들은 원자력 이용시설에서의 작업은 물론 의료, 연구 및 산업에서의 방사선원의 사용 등을 포함한다. 따라서 모든 관련 행위들로 인한 개인의 피폭은 선량한도 이하로 유지, 관리되어야 하며, 이를 위해서는 내부피폭에 대한 개인감시가 수행되어야 한다.

개인의 내부피폭에 대한 감시는 내용에 따라 질적으로 서로 다른 3개의 단계로 이루어진다. 첫 단계는 인체내부에 존재하는 방사능의 측정, 인체 배설물 시료의 채취 및 분석,

또는 개인공기집진기를 사용한 공기오염의 측정이다. 측정의 선택은 방사성핵종으로부터 방출되는 방사선의 종류, 오염원의 생물역동학적 거동, 생물학적 제거와 방사성붕괴를 고려한 인체내에서의 잔류, 측정의 주기, 그리고 측정기의 민감도, 유용성 및 편리성 등에 따라 좌우된다. 두 번째 단계는 방사성핵종의 인체내에서의 전이, 분포 및 제거를 묘사하는 대사학적 모델을 사용하여 측정값을 섭취량으로 평가하는 과정이며, 마지막 단계는 선량학적, 대사학적 모델을 사용하여 섭취량을 예탁유효선량으로 평가하는 일이다. 일반적으로 모델과 관련해서는 국제방사선방호위원회(ICRP) 표준 모델이 사용된다.

그러나 ICRP 간행물에 주어진 여러가지 모델을 사용하여 측정량을 방사선방호양과 연계시키는 자료를 얻기 위해서는 복잡한 계산과정을 거쳐야 한다. 따라서 ICRP는 측정값의 해석에 필요한 자료를 제공할 목적으로 최근 대사학적 모델을 사용하여 단위 방사능을 급성으로 섭취한 후 전신, 장기 및 배설물에서의 섭취량분율에 대한 수치적 자료를 ICRP 간행물 78[1]에 제시하였다. 그러나 섭취량분율에 대한 수치는 입자크기(AMAD, Activity Median Aerodynamic Diameter)가 5 $\mu$ m인 경우에 대해서만 섭취후 1일부터 10일까지 주어져 있어, 경우에 따라서는 그 외의 입자크기 및 섭취후 경과시간에 따른 섭취량분율을 확보하여야 할 필요성이 있다. 따라서 본 연구에서는 ICRP 66 호흡기 모델[2]과 ICRP의 최신 대사학적 모델을 사용하여 방사성핵종의 입자크기 및 섭취 후 경과시간에 따른 전신, 장기 및 배설물에서의 섭취량분율 계산 체계를 구축하였고, ICRP 78의 부록 A에 주어진 방사성핵종에 대하여 계산을 수행하였으며, 5  $\mu$ m 입자크기에 대한 계산 결과를 타 연구자의 결과와 비교 검토하여 대표 핵종에 대한 예를 결과에 나타내었다.

## 2. 섭취량분율 계산

단위 방사능을 섭취한 후 전신, 장기 및 배설물에서의 섭취량분율은 인체의 조직과 장기를 각각 하나의 격실로 간주한 모델 즉, 격실모델을 사용하여 계산한다. 섭취후 격실  $i$ 에서의 방사능 변화율은 격실간 방사성핵종의 이동이 1차 동역학에 따르므로, 다음 식과 같이 연립 선형 1차 미분방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dq_i(t)}{dt} = -\lambda_R q_i(t) + \sum_{j=1(j \neq i)}^N r_{ji} q_j(t) - \sum_{j=1(j \neq i)}^N r_{ij} q_i(t) \quad i=1, \dots, N \quad (1)$$

여기서  $N$ 은 총 격실수를 나타내며, 이의 값은 호흡기 및 소화기에서의 격실수와 생물역동학 모델에서의 격실수와 합으로 주어진다. 그리고  $q_i(t)$ 와  $q_j(t)$ 는 방사성핵종 섭취 후 임의의 시간  $t$ 에서 각각 격실  $i$ 와 격실  $j$ 에서의 방사능의 양,  $r_{ji}$ 는 격실  $j$ 로부터 격실  $i$ 로의 방사성핵종 전이율 상수,  $r_{ij}$ 는 격실  $i$ 로부터 격실  $j$ 로의 방사성핵종 전이율 상수,  $\lambda_R$ 은 방사성핵종의 방사성붕괴상수를 나타낸다. 단위 방사능 흡입섭취시  $q_i(0)$ 의 값은 호흡기의 각 침착격실에서의 침착분율의 값으로 주어지며, 그 이외의 격실에서는  $q_i(0)=0$ 이다. 이때 흡입입자 크기에 따른 호흡기의 각 침착격실에서의 흡입입자 침착분율 값은 본 계

산을 위해 사전에 계산된 결과를 사용하였으며, 계산 과정은 본 연구 범위에서 벗어나므로 본 논문에서는 설명을 생략하기로 한다. 다만 흡입입자 크기별 침착분을 계산결과는 ICRP 선량계수 DB[3]에 수록되어 있는 계산값과 일치하며, 다음의 조건하에서 계산되었다.

- 백인 성인남성, 직업상피폭, 경작업, 정상적으로 코로 숨을 쉬는 자
- 입자특성인자(에어로졸 입자의 밀도 = 3 g/cm<sup>3</sup>, 형상인자=1.5)

방사성핵종의 대사학적 모델과 관련하여 본 계산에서는 ICRP 66 호흡기 모델[2], ICRP 30 소화기 모델[4], 그리고 ICRP 30, 56, 67, 69, 71[5,6,7,8,9]에 있는 각 방사성핵종의 생물역동학 모델을 사용하였다.

전신에서의 섭취량분율  $m(t)$ 는 소변격실, 대변격실 및 환경격실 등을 제외한 모든 격실에서의 방사능의 합으로 주어지고, 폐에서의 섭취량분율  $m(t)$ 는 호흡기의 각 격실에서의 방사능의 합으로 주어지며, 갑상선에서의 섭취량분율  $m(t)$ 는 갑상선을 나타내는 격실에서의 방사능으로 주어진다. 또한 소변 또는 대변 시료에서의 섭취량분율  $m(t)$ 는 다음 식과 같이 주어진다.

$$m(t) = q_{\text{incremental}}(t) \quad (2)$$

여기서  $q_{\text{incremental}}(t)$ 는 섭취후 시간  $(t-\Delta t)$ 로 부터 시간  $t$ 까지 즉,  $\Delta t$ 시간 동안 수집한 소변 또는 대변 시료에서의 방사능량을 나타낸다.  $q_{\text{incremental}}(t)$ 를 다시 쓰면, 식 (2)는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$m(t) = q_{\text{accumulated}}(t) - q_{\text{accumulated}}(t-\Delta t)e^{-\lambda\Delta t} \quad (3)$$

여기서  $q_{\text{accumulated}}(t)$ 와  $q_{\text{accumulated}}(t-\Delta t)$ 는 각각 섭취후 시간  $t$ 와 시간  $(t-\Delta t)$ 에서 소변 또는 대변격실에서의 방사능량을 나타낸다. 그리고  $\lambda$ 와  $\Delta t$ 는 각각 방사성핵종의 방사성붕괴상수와 시료의 수집시간을 나타낸다.

삼중수소(HTO)에 대한 측정량은 단일 배뇨시료중의 방사능농도(Bq/ℓ)로 주어진다. 이 경우 측정량에 대한 단위섭취당 섭취량분율을 구하기 위해 섭취후 시간  $t$ 에서 1일당 소변으로 배출되는 방사능  $e_u(t)$ 를 수식으로 표현하면 다음 식과 같다.

$$e_u(t) = \frac{q_u(t)}{dt} + \lambda_R q_u(t) \quad (4)$$

여기서  $q_u(t)$ 는 섭취후 시간  $t$ 에서 소변 또는 대변격실에서의 방사능을 나타낸다. 식 (4)를 일일 소변 배설량(1.4ℓ/d)으로 나누면, 배뇨시료중 방사능농도에 대한 단위섭취당 섭취량분율이 얻어지며, 이의 값은 한번 채취한 배뇨시료의 방사능농도 측정결과를 섭취량으로 해석하는데 사용된다.

식 (1)의 해는 eigensystem 방법과 ODE(Ordinary Differential Equation) 해석기 Mathcad 2000을 사용하여 구하였다.

### 3. 결과 및 고찰

ICRP 66 호흡기 모델과 ICRP의 최신 대사학적 모델을 사용하여 방사능 입자크기 및 섭취 후 경과시간에 따른 생물학적 분석격실에서의 섭취량분율 계산체계를 구축하였다. 그 결과 ICRP 78 또는 기타 연구 보고서에는 계산되어 있지 않은 임의의 입자크기에 따른 섭취량분율을 섭취 후 경과시간에 따라 구할 수 있도록 하였다. 또한 이 계산체계를 이용하여 ICRP 78의 부록 A에 주어진 모든 방사성핵종에 대하여 입자크기별로 전신, 장기 및 배설물에서의 섭취량 분율을 계산하였으며, 입자크기가 5  $\mu\text{m}$ 인 경우 본 연구 계산결과와 타 연구자의 결과[10]가 0.3 % 오차 범위 내에서 잘 일치하였다. 그 예로서  $^{235}\text{U}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ 에 대한 계산 결과를 표 1 ~ 표 3에 나타내었다. 그러나 타 연구자의 결과에는 방사능 입자크기가 5 $\mu\text{m}$ 에 해당하는 값만 있는 관계로 그 이외의 입자크기에 대해서는 비교 검토하지 않았으며, 본 계산 결과의 한 예로  $^{137}\text{Cs}$ 에 대한 입자크기별 계산 결과를 표 4에 나타내었다.

### 4. 결론

최근 ICRP 간행물 78에는 방사성핵종의 단위방사능 흡입섭취 후 경과시간에 따른 생물학적 분석격실에서의 섭취량분율이 1일부터 10일까지만 나타나 있고, 타 연구자의 결과에서도 특정일에 대해서만 나타나 있다. 특히 방사능 입자크기(AMAD)가 5 $\mu\text{m}$ 만 고려되어 있으므로 경우에 따라 그 이외의 방사능 입자크기 및 시간에서의 섭취량분율을 확보하여야 할 필요성이 있다.

따라서 본 연구에서는 ICRP 66 호흡기 모델과 ICRP의 최신 대사학적 모델을 사용하여 임의의 방사능 입자크기의 단위 방사능을 흡입 섭취한 후 경과 시간에 따른 생물학적 분석격실에서의 섭취량분율을 계산할 수 있는 체계를 구축하였고, ICRP 78의 부록 A에 주어진 방사성핵종에 대한 계산을 수행한 결과 타 연구자의 결과와 일치하므로써 본 계산의 신뢰성이 검증되었다.

그러므로 본 연구에서 구축된 계산체계를 이용하여 임의의 방사능 입자크기별로 흡입 섭취 후 경과 시간에 따른 전신, 장기 그리고 배설물에서의 섭취량분율을 계산할 수 있으며, 계산결과는 섭취량 평가 뿐만 아니라 내부피폭에 대한 개인감시 프로그램의 설계 및 이행에 활용할 수 있고, 더 나아가 내부피폭선량 평가코드의 데이터 모듈로 사용할 수 있을 것이다.

표 1.  $^{235}\text{U}$ 의 흡입섭취시 섭취량분율 계산결과(AMAD=5 $\mu\text{m}$ , Type S)

| Time after intake (d) | Lungs(Bq)  |           | Daily urinary excretion(Bq/d) |           | Daily faecal excretion(Bq/d) |           |
|-----------------------|------------|-----------|-------------------------------|-----------|------------------------------|-----------|
|                       | This study | NRPB      | This study                    | NRPB      | This study                   | NRPB      |
| 1                     | 6.425E-02  | 6.429E-02 | 7.041E-04                     | 7.044E-04 | 1.139E-01                    | 1.139E-01 |
| 2                     | 6.267E-02  | 6.271E-02 | 4.405E-05                     | 4.410E-05 | 1.627E-01                    | 1.628E-01 |
| 3                     | 6.192E-02  | 6.195E-02 | 2.598E-05                     | 2.600E-05 | 8.381E-02                    | 8.388E-02 |
| 4                     | 6.128E-02  | 6.131E-02 | 2.366E-05                     | 2.367E-05 | 3.522E-02                    | 3.526E-02 |
| 5                     | 6.068E-02  | 6.071E-02 | 2.195E-05                     | 2.196E-05 | 1.402E-02                    | 1.403E-02 |
| 6                     | 6.009E-02  | 6.012E-02 | 2.048E-05                     | 2.049E-05 | 5.649E-03                    | 5.654E-03 |
| 7                     | 5.951E-02  | 5.954E-02 | 1.917E-05                     | 1.918E-05 | 2.467E-03                    | 2.469E-03 |
| 8                     | 5.895E-02  | 5.898E-02 | 1.801E-05                     | 1.802E-05 | 1.272E-03                    | 1.273E-03 |
| 9                     | 5.840E-02  | 5.843E-02 | 1.696E-05                     | 1.697E-05 | 8.211E-04                    | 8.215E-04 |
| 10                    | 5.786E-02  | 5.789E-02 | 1.602E-05                     | 1.603E-05 | 6.467E-04                    | 6.469E-04 |
| 15                    | 5.536E-02  | 5.539E-02 | 1.248E-05                     | 1.248E-05 | 4.926E-04                    | 4.927E-04 |
| 30                    | 4.934E-02  | 4.936E-02 | 7.715E-06                     | 7.720E-06 | 3.500E-04                    | 3.501E-04 |
| 45                    | 4.500E-02  | 4.503E-02 | 6.020E-06                     | 6.024E-06 | 2.527E-04                    | 2.528E-04 |
| 60                    | 4.182E-02  | 4.185E-02 | 5.177E-06                     | 5.180E-06 | 1.857E-04                    | 1.858E-04 |
| 90                    | 3.763E-02  | 3.765E-02 | 4.280E-06                     | 4.283E-06 | 1.067E-04                    | 1.067E-04 |
| 120                   | 3.505E-02  | 3.507E-02 | 3.795E-06                     | 3.797E-06 | 6.764E-05                    | 6.768E-05 |
| 180                   | 3.196E-02  | 3.198E-02 | 3.289E-06                     | 3.291E-06 | 3.722E-05                    | 3.724E-05 |
| 360                   | 2.661E-02  | 2.663E-02 | 2.650E-06                     | 2.651E-06 | 2.223E-05                    | 2.224E-05 |
| 500                   | 2.340E-02  | 2.341E-02 | 2.328E-06                     | 2.330E-06 | 1.891E-05                    | 1.892E-05 |
| 1000                  | 1.515E-02  | 1.516E-02 | 1.524E-06                     | 1.525E-06 | 1.106E-05                    | 1.106E-05 |
| 2000                  | 7.274E-03  | 7.278E-03 | 7.517E-07                     | 7.522E-07 | 3.882E-06                    | 3.884E-06 |
| 3000                  | 4.269E-03  | 4.271E-03 | 4.525E-07                     | 4.528E-07 | 1.454E-06                    | 1.455E-06 |

표 2.  $^{60}\text{Co}$ 의 흡입섭취시 섭취량분율 계산결과(AMAD=5 $\mu\text{m}$ , Type M)

| Time after intake (d) | Lungs(Bq)  |           | Whole Body(Bq) |           | Daily urinary excretion(Bq/d) |           | Daily faecal excretion(Bq/d) |           |
|-----------------------|------------|-----------|----------------|-----------|-------------------------------|-----------|------------------------------|-----------|
|                       | this study | NRPB      | this study     | NRPB      | this study                    | NRPB      | this study                   | NRPB      |
| 1                     | 5.758E-02  | 5.761E-02 | 4.847E-01      | 4.850E-01 | 1.964E-02                     | 1.972E-02 | 1.006E-01                    | 1.006E-01 |
| 2                     | 5.587E-02  | 5.590E-02 | 2.567E-01      | 2.569E-01 | 9.156E-03                     | 9.188E-03 | 1.401E-01                    | 1.402E-01 |
| 3                     | 5.491E-02  | 5.494E-02 | 1.520E-01      | 1.521E-01 | 3.695E-03                     | 3.704E-03 | 7.203E-02                    | 7.207E-02 |
| 4                     | 5.406E-02  | 5.409E-02 | 1.086E-01      | 1.087E-01 | 2.181E-03                     | 2.185E-03 | 3.050E-02                    | 3.051E-02 |
| 5                     | 5.324E-02  | 5.327E-02 | 9.067E-02      | 9.072E-02 | 1.686E-03                     | 1.688E-03 | 1.232E-02                    | 1.233E-02 |
| 6                     | 5.245E-02  | 5.248E-02 | 8.263E-02      | 8.268E-02 | 1.459E-03                     | 1.460E-03 | 5.108E-03                    | 5.109E-03 |
| 7                     | 5.168E-02  | 5.170E-02 | 7.842E-02      | 7.847E-02 | 1.310E-03                     | 1.311E-03 | 2.340E-03                    | 2.340E-03 |
| 8                     | 5.092E-02  | 5.095E-02 | 7.572E-02      | 7.577E-02 | 1.190E-03                     | 1.192E-03 | 1.284E-03                    | 1.284E-03 |
| 9                     | 5.018E-02  | 5.021E-02 | 7.367E-02      | 7.371E-02 | 1.087E-03                     | 1.088E-03 | 8.725E-04                    | 8.723E-04 |
| 10                    | 4.946E-02  | 4.949E-02 | 7.191E-02      | 7.196E-02 | 9.956E-04                     | 9.966E-04 | 7.022E-04                    | 7.020E-04 |
| 15                    | 4.609E-02  | 4.611E-02 | 6.510E-02      | 6.514E-02 | 6.642E-04                     | 6.650E-04 | 4.985E-04                    | 4.983E-04 |
| 30                    | 3.796E-02  | 3.798E-02 | 5.287E-02      | 5.290E-02 | 2.889E-04                     | 2.894E-04 | 2.965E-04                    | 2.963E-04 |
| 45                    | 3.200E-02  | 3.202E-02 | 4.556E-02      | 4.559E-02 | 1.957E-04                     | 1.961E-04 | 1.973E-04                    | 1.971E-04 |
| 60                    | 2.748E-02  | 2.750E-02 | 4.027E-02      | 4.029E-02 | 1.587E-04                     | 1.590E-04 | 1.381E-04                    | 1.379E-04 |
| 90                    | 2.111E-02  | 2.113E-02 | 3.276E-02      | 3.278E-02 | 1.188E-04                     | 1.190E-04 | 7.460E-05                    | 7.448E-05 |
| 120                   | 1.680E-02  | 1.681E-02 | 2.755E-02      | 2.757E-02 | 9.350E-05                     | 9.368E-05 | 4.529E-05                    | 4.519E-05 |
| 180                   | 1.117E-02  | 1.118E-02 | 2.061E-02      | 2.062E-02 | 6.168E-05                     | 6.181E-05 | 2.223E-05                    | 2.216E-05 |
| 360                   | 3.608E-03  | 3.611E-03 | 1.072E-02      | 1.072E-02 | 2.182E-05                     | 2.186E-05 | 6.409E-06                    | 6.387E-06 |
| 500                   | 1.519E-03  | 1.520E-03 | 7.442E-03      | 7.447E-03 | 1.122E-05                     | 1.124E-05 | 2.999E-06                    | 2.990E-06 |
| 1000                  | 7.088E-05  | 7.093E-05 | 3.262E-03      | 3.263E-03 | 2.682E-06                     | 2.685E-06 | 4.951E-07                    | 4.951E-07 |
| 2000                  | 1.767E-07  | 1.769E-07 | 9.357E-04      | 9.361E-04 | 6.956E-07                     | 6.960E-07 | 1.162E-07                    | 1.163E-07 |
| 3000                  | 5.387E-10  | 5.392E-10 | 2.744E-04      | 2.745E-04 | 2.038E-07                     | 2.039E-07 | 3.401E-08                    | 3.403E-08 |

표 3.  $^{137}\text{Cs}$ 의 흡입섭취시 섭취량분율 계산결과(AMAD=5 $\mu\text{m}$ , Type F)

| Time after intake (d) | Whole Body(Bq) |           | Daily urinary excretion(Bq/d) |           |
|-----------------------|----------------|-----------|-------------------------------|-----------|
|                       | this study     | NRPB      | this study                    | NRPB      |
| 1                     | 5.963E-01      | 5.968E-01 | 7.859E-03                     | 7.868E-03 |
| 2                     | 5.045E-01      | 5.048E-01 | 1.106E-02                     | 1.107E-02 |
| 3                     | 4.643E-01      | 4.647E-01 | 8.766E-03                     | 8.773E-03 |
| 4                     | 4.446E-01      | 4.449E-01 | 6.833E-03                     | 6.838E-03 |
| 5                     | 4.333E-01      | 4.336E-01 | 5.443E-03                     | 5.447E-03 |
| 6                     | 4.258E-01      | 4.261E-01 | 4.456E-03                     | 4.459E-03 |
| 7                     | 4.202E-01      | 4.206E-01 | 3.753E-03                     | 3.756E-03 |
| 8                     | 4.157E-01      | 4.160E-01 | 3.253E-03                     | 3.255E-03 |
| 9                     | 4.118E-01      | 4.121E-01 | 2.895E-03                     | 2.897E-03 |
| 10                    | 4.083E-01      | 4.086E-01 | 2.638E-03                     | 2.640E-03 |
| 15                    | 3.939E-01      | 3.942E-01 | 2.090E-03                     | 2.092E-03 |
| 30                    | 3.577E-01      | 3.580E-01 | 1.806E-03                     | 1.807E-03 |
| 45                    | 3.251E-01      | 3.254E-01 | 1.641E-03                     | 1.642E-03 |
| 60                    | 2.955E-01      | 2.957E-01 | 1.491E-03                     | 1.493E-03 |
| 90                    | 2.442E-01      | 2.443E-01 | 1.232E-03                     | 1.233E-03 |
| 120                   | 2.017E-01      | 2.019E-01 | 1.018E-03                     | 1.019E-03 |
| 180                   | 1.377E-01      | 1.378E-01 | 6.950E-04                     | 6.955E-04 |
| 360                   | 4.381E-02      | 4.383E-02 | 2.211E-04                     | 2.212E-04 |
| 500                   | 1.797E-02      | 1.798E-02 | 9.071E-05                     | 9.075E-05 |
| 1000                  | 7.462E-04      | 7.461E-04 | 3.766E-06                     | 3.766E-06 |
| 2000                  | 1.286E-06      | 1.285E-06 | 6.491E-09                     | 6.484E-09 |
| 3000                  | 2.217E-09      | 2.212E-09 | 1.119E-11                     | 1.117E-11 |

표 4.  $^{137}\text{Cs}$ 의 흡입섭취시 입자크기별 섭취량분율 계산결과(Type F)

| Time after intake (d) | Whole Body(Bq)  |                 |                 |                  | Daily urinary excretion(Bq/d) |                 |                 |                  |
|-----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|-------------------------------|-----------------|-----------------|------------------|
|                       | 1 $\mu\text{m}$ | 3 $\mu\text{m}$ | 8 $\mu\text{m}$ | 10 $\mu\text{m}$ | 1 $\mu\text{m}$               | 3 $\mu\text{m}$ | 8 $\mu\text{m}$ | 10 $\mu\text{m}$ |
| 1                     | 4.01E-01        | 5.80E-01        | 5.69E-01        | 5.46E-01         | 5.70E-03                      | 7.84E-03        | 7.32E-03        | 6.95E-03         |
| 2                     | 3.53E-01        | 4.98E-01        | 4.75E-01        | 4.54E-01         | 7.97E-03                      | 1.10E-02        | 1.03E-02        | 9.80E-03         |
| 3                     | 3.31E-01        | 4.61E-01        | 4.35E-01        | 4.14E-01         | 6.32E-03                      | 8.73E-03        | 8.18E-03        | 7.77E-03         |
| 4                     | 3.19E-01        | 4.42E-01        | 4.15E-01        | 3.95E-01         | 4.93E-03                      | 6.81E-03        | 6.37E-03        | 6.06E-03         |
| 5                     | 3.12E-01        | 4.32E-01        | 4.04E-01        | 3.84E-01         | 3.93E-03                      | 5.42E-03        | 5.08E-03        | 4.83E-03         |
| 6                     | 3.07E-01        | 4.24E-01        | 3.97E-01        | 3.77E-01         | 3.21E-03                      | 4.44E-03        | 4.16E-03        | 3.95E-03         |
| 7                     | 3.03E-01        | 4.19E-01        | 3.92E-01        | 3.72E-01         | 2.71E-03                      | 3.74E-03        | 3.50E-03        | 3.33E-03         |
| 8                     | 3.00E-01        | 4.14E-01        | 3.88E-01        | 3.68E-01         | 2.35E-03                      | 3.24E-03        | 3.03E-03        | 2.88E-03         |
| 9                     | 2.97E-01        | 4.10E-01        | 3.84E-01        | 3.65E-01         | 2.09E-03                      | 2.89E-03        | 2.70E-03        | 2.57E-03         |
| 10                    | 2.95E-01        | 4.07E-01        | 3.81E-01        | 3.62E-01         | 1.90E-03                      | 2.63E-03        | 2.46E-03        | 2.34E-03         |
| 15                    | 2.84E-01        | 3.93E-01        | 3.67E-01        | 3.49E-01         | 1.51E-03                      | 2.08E-03        | 1.95E-03        | 1.85E-03         |
| 30                    | 2.60E-01        | 3.57E-01        | 3.34E-01        | 3.17E-01         | 1.30E-03                      | 1.80E-03        | 1.68E-03        | 1.60E-03         |
| 45                    | 2.36E-01        | 3.24E-01        | 3.03E-01        | 2.88E-01         | 1.18E-03                      | 1.64E-03        | 1.53E-03        | 1.45E-03         |
| 60                    | 2.15E-01        | 2.95E-01        | 2.76E-01        | 2.62E-01         | 1.08E-03                      | 1.49E-03        | 1.39E-03        | 1.32E-03         |
| 90                    | 1.77E-01        | 2.43E-01        | 2.28E-01        | 2.16E-01         | 8.89E-04                      | 1.23E-03        | 1.15E-03        | 1.09E-03         |
| 120                   | 1.47E-01        | 2.01E-01        | 1.88E-01        | 1.79E-01         | 7.35E-04                      | 1.01E-03        | 9.50E-04        | 9.02E-04         |
| 180                   | 9.94E-02        | 1.37E-01        | 1.28E-01        | 1.22E-01         | 5.02E-04                      | 6.93E-04        | 6.48E-04        | 6.16E-04         |
| 360                   | 3.16E-02        | 4.37E-02        | 4.09E-02        | 3.88E-02         | 1.60E-04                      | 2.20E-04        | 2.06E-04        | 1.96E-04         |
| 500                   | 1.30E-02        | 1.79E-02        | 1.68E-02        | 1.59E-02         | 6.59E-05                      | 9.04E-05        | 8.46E-05        | 8.04E-05         |
| 1000                  | 5.39E-04        | 7.44E-04        | 6.96E-04        | 6.61E-04         | 2.72E-06                      | 3.75E-06        | 3.51E-06        | 3.34E-06         |
| 2000                  | 9.28E-07        | 1.28E-06        | 1.20E-06        | 1.14E-06         | 4.69E-07                      | 6.47E-09        | 6.05E-09        | 5.75E-09         |
| 3000                  | 1.60E-09        | 2.21E-09        | 2.07E-09        | 1.96E-09         | 8.08E-12                      | 1.12E-11        | 1.04E-11        | 9.92E-12         |

## 감사의 말씀

본 연구는 과학기술부에서 시행하는 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.



## 참 고 문 헌

1. International Commission on Radiological Protection, Individual Monitoring for Internal Exposure of Workers Replacement of ICRP Publication 54, Publication No. 78, Elsevier Science, Oxford and New York(1997).
2. International Commission on Radiological Protection, Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection, Publication No. 66, Elsevier Science, Oxford and New York(1994).
3. International Commission on Radiological Protection, The ICRP Database of Dose Coefficients: Workers and Members of the Public. Version 1.0. CD-Rom distributed by Elsevier Science Ltd., Oxford and New York(1998).
4. International Commission on Radiological Protection, Limits for Intakes of Radionuclide by Workers, Publication No. 30, part 1, Pergamon Press, Oxford and New York(1979).
5. International Commission on Radiological Protection, Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 1, Publication No. 56, Elsevier Science, Oxford and New York(1989).
6. International Commission on Radiological Protection, Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 2, Ingestion Dose Coefficients, Publication No. 67, Elsevier Science, Oxford and New York(1993).
7. International Commission on Radiological Protection, Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides : Part 3, Ingestion Dose Coefficients, Publication No. 69, Elsevier Science, Oxford and New York(1995).
8. International Commission on Radiological Protection, Limits for Intakes of Radionuclide by Workers, Publication No. 30, part 4. Pergamon Press, Oxford and New York (1980).
9. International Commission on Radiological Protection, Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 4, Inhalation Dose Coefficients, Publication No. 71, Elsevier Science, Oxford and New York(1995).
10. A W Phipps, "Time-dependant function to represent the bioassay quantities given in ICRP Publication 78," National Radiological Protection Board, NRPB-M824(1998).