

Potential Errors in Committed Effective Dose Due to the Assumption of a Single Intake Path in Interpretation of Bioassay Results

Jong Il Lee^{*,†} · Jai Ki Lee[†]

^{*}Korea Atomic Energy Research Institute, [†]Hanyang University

바이오어세이 결과 해석에서 단일 섭취경로 가정에
따르는 예탁유효선량의 잠재오차

이종일^{*,†} · 이재기[†]

^{*}한국원자력연구소, [†]한양대학교 원자력공학과

(2006년 8월 16일 접수, 2006년 8월 28일 채택)

Abstract - Intakes of radionuclides through both inhalation and ingestion pathways may occur particularly in an incident involving unsealed radionuclides. If one assume only one intake path in this case, which is usual in routine monitoring, a significant error in the evaluated committed effective dose(E_{50}) may result. In order to demonstrate the potential errors, variations of the resulting committed effective doses were analyzed for different fractions of the inhaled activities to the total intake of ^{241}Am . Simulated bioassay measurements for the lungs, urine and feces were generated based on the biokinetic model and data of the radionuclide, 5 μm AMAD and absorption type M for inhalation, for various inhalation fractions. The potential errors in E_{50} due to the assumption of one intake path were in the range from -100% to as large as +34,000% when the bioassays were made 3 days after the intakes. Larger errors are expected when only the feces assay is applied while inhalation intake exists. A strategy which employs two types of bioassay was proposed to reduce the error caused by a misjudgement of the intake path.

Key words : bioassay, intake pathway, committed effective dose, potential error, ^{241}Am

요약 - 비밀봉 방사성물질의 취급 사고시 방사성핵종은 흡입과 취식의 두 가지 경로로 섭취될 수 있다. 이때 일상 감시처럼 하나의 섭취경로만 가정하여 예탁유효선량을 평가하면 심각한 오차를 유발할 수 있다. 이러한 잠재 오차를 제시하기 위해 총 섭취에 대한 흡입섭취의 비율을 달리할 때 예탁유효선량의 변동을 분석하였다. ^{241}Am (AMAD 5 μm , 흡수형 M)을 대상으로 핵종의 생물역동학적 모델과 데이터를 이용하여 여러 흡입섭취 분율에서 폐, 소변 및 대변에 대한 바이오어세이 측정치를 모의하였다. 섭취 3일 후 예상 측정치를 이용하고 단일 경로 섭취를 가정한 경우 평가된 예탁유효선량의 잠재 오차는 -100%에서부터 많게는 +34,000%에 이르는 것으로 나타났다. 흡입섭취가 있을 때 대변만 분석하면 큰 오차가 발생하였다. 섭취경로 오만에 따르는 선량평가의 오차를 줄이기 위해 두 종류의 바이오어세이를 이용하는 전략을 제안하였다.

중심어 : 바이오어세이, 섭취경로, 예탁유효선량, 잠재오차, 오차감축 전략, ^{241}Am

서 론

방사성핵종 섭취에 따른 내부피폭선량은 방사성핵종 섭취량[Bq]에 전형적 신체 조건과 생물역동학적 거동 모델에 따라 산출된 예탁유효선량 환산계수 $e(50)$ [Sv/Bq]을 곱하여 평가할 수 있다. 즉, 섭취 경로 p 를 통한 섭취량을 I^p , 예탁유효선량 환산계수를 e_{50}^p 라 하면 예탁유효선량 $E(50)$ 은 다음과 같다.

$$E(50) = \sum_p I^p e_{50}^p \quad (1)$$

방사성핵종 섭취경로를 알고 있을 때에는 방사성핵종 섭취량은 섭취 후 경과시간 t 에서 체내 조직 T 에 잔류방사능 $M_T(t)$ 또는 일일 배설물 X 중 방사능 측정값 $M_X(t)$ 을 방사성핵종의 조직 T 에 잔류분율 $F_T^p(t)$ 또는 배설매체 X 를 통한 일일 배설분율 $F_X^p(t)$ 로 각각 나누어 구할 수 있다 [1]. 즉,

$$I^p = \frac{M_T(t)}{F_T^p(t)} \quad (2)$$

$$I^p = \frac{M_X(t)}{F_X^p(t)} \quad (3)$$

서로 다른 섭취경로 p 를 통한 섭취량을 각각 안다면 총 예탁유효선량 $E(50)$ 은 각 섭취경로에 대한 예탁유효선량 환산계수 e_{50}^p 를 곱하여 합산하여 구할 수 있다.

$$E(50) = \sum_p I^p e_{50}^p \quad (4)$$

그런데 방사성핵종의 체내잔류분율 및 일일 배설분율은 방사성핵종의 섭취경로(흡입, 취식, 혈액), 측정대상체(전신, 폐, 갑상선, 소변, 대변 등), 방사능 입자크기(AMAD; activity median aerodynamic diameter), 폐에서의 흡수형태(Type F, M, S), 그리고 섭취형태(급성, 만성)에 따라 다르다[2]. 즉, 측정치는 동일하더라도 이들 인자들의 조건에 따라 작업자의 방사성핵종 섭취량 및 예탁유효선량이 다르게 평가된다[3]. 특히 섭취경로에 따라 체내잔류분율 및 일일 배설분율이 다르므로 흡입섭취와 취식섭취의 정도에 따라 섭취량 평가 결과가 달라질 것이며, 또한 섭취경로에 따라 단위방

사능 섭취 당 예탁유효선량 환산계수[1,4]도 다르므로 흡입섭취와 취식섭취의 정도에 따라 예탁유효선량은 크게 영향을 받는다.

방사선작업 종사자는 작업 중 또는 사건에 의해 방사성핵종을 흡입과 취식 두 가지의 섭취경로를 통해 동시에 섭취할 수 있다. 섭취경로를 정확히 알지 못하는 경우가 많지만 일반적 작업환경에서 취식 섭취는 발생 가능성이 낮으므로 대체로 일상감시에서는 작업자에 대한 방사성핵종의 섭취량 및 예탁유효선량 평가에 있어서 섭취경로를 흡입으로 간주한다. 그러나 이러한 가정은 섭취경로를 오판할 수 있으며 특히 방사성핵종 섭취량이 많은 사건, 사고에서는 오판의 결과가 선량평가 결과에 큰 차이를 내게 된다. 최근에 IAEA 주관으로 수행된 내부선량평가 국제상호비교 프로그램에서 ^{241}Am 의 흡입 및 취식 섭취비율 산정 방법을 제시하였으나[5], 측정대상체가 폐 및 대변에만 국한되었고, 섭취경로 오판에 따라 발생할 수 있는 평가선량의 오차범위도 제시되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 흡입 및 취식 섭취가 동시에 발생하였음에도 하나의 섭취 경로만으로 가정하여 선량을 산정한 결과 예탁유효선량의 오차가 얼마나 클 수 있는지를 평가하고, 그러한 잠재오차를 줄일 수 있는 방법을 모색하고자 하였다.

위에서 설명한 바와 같이 감시결과로부터 섭취량 또는 선량의 평가에 관계되는 다양한 인자들이 특히 핵종의 종류와 물리화학적 형태에 따라 다르므로 모든 경우에 대해 이러한 섭취경로의 오판이 초래하는 오차를 평가하여 일괄적으로 제시하기는 어렵다. 따라서 본 연구에서는 ^{241}Am 의 전형적 섭취에 대해 예시적 평가를 제시한다. 물리화학적 형태나 핵종이 달라지면 동일한 방법으로 접근하되 해당 형태나 핵종에 대한 모델과 변수 데이터를 적용할 수 있다.

선량 및 오차의 평가

적용하는 바이오어세이법은 내부피폭 감시 프로그램에서 통상 사용되는 직접법에 의한 폐 계수, 소변 및 대변 시료 분석의 세 가지를 선정하였다. 흡입에 의한 ^{241}Am 섭취 특성인자로서 AMAD $5 \mu\text{m}$, 흡수형 M을 가정하였으며, 섭취모드는 흡입과 취식 섭취가 동시에 발생하기 쉬운 사건을 가정하여 단일 급성 섭취로 하였다. 감시 결과는 실측값이 아니라 흡입과 취식 섭취가

특정한 비율로 발생한 것으로 가정한 섭취 상황에서 ICRP 78[1]에 제시된 ²⁴¹Am의 생물역동학적 모델에 따라 섭취 후 관심 시점에서 예상되는 체내잔류분율 및 일일 배설분율을 산출한 모의 감시결과를 사용하였다. 총 섭취를 100 Bq로 두고 총 섭취에 대한 흡입 섭취의 비율을 0%부터 100%까지 10% 간격으로 변화시켰으며 감시 시점은 섭취 후 3일로 하였다. 다만, 평가의 배설량의 일일 편차의 영향을 배제하기 위해 배설 방식은 3일간 총 배설량을 사용하였다[5]. ²⁴¹Am 섭취 후 3일 동안의 폐 잔류분율 및 소변과 대변의 일일배설분율과 3일간 누적배설분율은 표1과 같고, ²⁴¹Am의 흡입섭취에 대한 예탁유효선량 환산계수 e_{50}^{inh} 는 2.7×10^{-5} Sv/Bq이고, 취식섭취에 대한 예탁유효선량 환산계수 e_{50}^{ing} 는 2.0×10^{-7} Sv/Bq이다[1,4].

방사성핵종 섭취 후 시간 t에서 폐의 잔류방사능, 소변 및 대변을 통한 누적 배설 방사능을 각각 $M_L(t)$, $M_U(t)$ 및 $M_f(t)$, 폐 잔류분율을 $F_L(t)$, 경로 p를 통한 섭취 방사능이 소변과 대변을 통한 누적 배설분율을 각각 $F_U^p(t)$ 와 $F_f^p(t)$ 라 하면 이들의 관계는 다음과 같이 표현된다.

$$M_L(t) = I^{inh} \times F_L^{inh}(t) \quad (5)$$

$$M_U(t) = I^{inh} \times F_U^{inh}(t) + I^{ing} \times F_U^{ing}(t) \quad (6)$$

$$M_f(t) = I^{inh} \times F_f^{inh}(t) + I^{ing} \times F_f^{ing}(t) \quad (7)$$

여기서 inh는 흡입섭취를 뜻하고, ing는 취식섭취를 뜻한다. 일반적인 경우처럼 M_L, M_U, M_f 가 방사성핵종 섭취 후 t일째 측정값이라면 F_L, F_U, F_f 는 방사성핵종 섭취 후 t일째의 폐 잔류분율, 소변 및 대변의 일일배설분율 또는 누적배설분율

을 의미하게 된다. 단일 경로에 의한 섭취라면 식(6)과 식(7)의 소변이나 대변 배설량도 식(5)와 같이 단일 항으로 표현된다. 표2에 흡입 및 취식섭취의 상이한 비율에서 예상되는 폐, 소변 및 대변의 측정치를 보였다.

표2의 데이터를 바탕으로 ²⁴¹Am의 흡입섭취량과 취식섭취량에 의해 구한 예탁유효선량에 대한 흡입섭취 또는 취식섭취만을 가정하여 구한 예탁유효선량의 상대오차를 계산하였고, 흡입섭취 또는 취식섭취의 잘못된 섭취경로 가정에 따라 발생할 수 있는 예탁유효선량의 평가 오차를 분석하였다. 선량 및 오차 계산은 Microsoft Office Excel 2003을 이용하여 본 연구에서 만든 계산 프로그램으로 수행하였다.

결과 및 고찰

성인 작업자가 100 Bq의 ²⁴¹Am을 급성으로 흡입(AMAD 5 μm, 흡수형 M)하거나 취식 섭취하였을 경우 직접 바이오어세이에 의한 폐계수, 소변 및 대변분석 결과를 단일 경로 즉, 흡입 또는 취식 섭취로 가정하여 평가한 예탁유효선량을 표3에 보였다. 표3은 총 섭취에서 흡입이 차지하는 비율이 0%에서 100%까지 변화할 때 그 비율을 바르게 적용하여 구한 예탁선량(편의를 위해 참조선량으로 부른다)과 어느 한 경로만으로 가정한 경우의 선량을 대비하고 있다. 이 결과를 참조선량에 대한 상대오차의 형태로 재정리한 것이 표4이다. 표4를 보면 흡입섭취 비율이 0~100%로 변할 때 폐 방사능 측정값으로부터 흡입섭취로 가정하여 예탁유효선량을 평가할 경우 참조선량에 대한 상대오차는 -100~0%의 분포를 보였다. 특기할 점은 흡입섭취 비율이 10%이고 취식섭취 비율이 90%인 경우에 모두를 흡입섭취로 가정하

Table 1. Intake Retention Fraction for ²⁴¹Am(Type M, AMAD 5 μm)[1].

Time after intake	Lungs	Daily urinary excretion		Daily faecal excretion	
	Inhalation	Inhalation	Ingestion	Inhalation	Ingestion
1 day	5.8×10^{-2}	1.8×10^{-3}	3.0×10^{-5}	1.1×10^{-1}	2.8×10^{-1}
2 days	5.6×10^{-2}	2.3×10^{-4}	4.6×10^{-6}	1.5×10^{-1}	3.9×10^{-1}
3 days	5.5×10^{-2}	1.3×10^{-4}	2.2×10^{-6}	8.0×10^{-2}	2.0×10^{-1}
Cumulation from 1 to 3 days	-	2.16×10^{-3}	3.68×10^{-5}	3.43×10^{-1}	8.7×10^{-1}

여 평가한 선량의 상대오차가 -6.25%로 급격히 감소하는데, 그 이유는 흡입섭취에 대한 예탁유효선량 환산계수가 취식섭취에 대한 예탁유효선량 환산계수의 100배 이상으로 커서 취식섭취에 의한 예탁유효선량이 흡입섭취에 의한 것보다 훨씬 적은 영향을 미치기 때문이다.

Table 2. Artificially Generated Bioassay Measurements by Using an Intake Retention Fraction and Any Inhalation and Ingestion of ^{241}Am (Type M, AMAD 5 μm).

Intake (Bq)		Activity in lungs at 3 days after intake (Bq)	Cumulative activity in urine from 1 to 3 days after intake (Bq)	Cumulative activity in faeces from 1 to 3 days after intake (Bq)
Inhalation	Ingestion			
0	100	0	3.68×10^{-3}	87.0
10	90	0.55	2.49×10^{-2}	81.7
20	80	1.10	4.61×10^{-2}	76.5
30	70	1.65	6.74×10^{-2}	71.2
40	60	2.20	8.86×10^{-2}	65.9
50	50	2.75	1.10×10^{-1}	60.7
60	40	3.30	1.31×10^{-1}	55.4
70	30	3.85	1.52×10^{-1}	50.1
80	20	4.40	1.74×10^{-1}	44.8
90	10	4.95	1.95×10^{-1}	39.6
100	0	5.50	2.16×10^{-1}	34.3

Table 3. Evaluated Committed Effective Doses(CED) Due to an Assumed Intake Path on the basis of the Bioassay Measurements of ^{241}Am Given in Table 2.

Evaluated CED by actual intake			Evaluated CED by the bioassay measurements (Sv)				
Intake (Bq)		True CED (Sv)	by the Lungs	by the Urine		by the Faeces	
Inhalation	Ingestion		Inhalation	Inhalation	Ingestion	Inhalation	Ingestion
0	100	2.00×10^{-5}	0	4.60×10^{-5}	2.00×10^{-5}	6.85×10^{-3}	2.00×10^{-5}
10	90	2.88×10^{-4}	2.70×10^{-4}	3.11×10^{-4}	1.35×10^{-4}	6.43×10^{-3}	1.88×10^{-5}
20	80	5.56×10^{-4}	5.40×10^{-4}	5.77×10^{-4}	2.51×10^{-4}	6.02×10^{-3}	1.76×10^{-5}
30	70	8.24×10^{-4}	8.10×10^{-4}	8.42×10^{-4}	3.66×10^{-4}	5.60×10^{-3}	1.64×10^{-5}
40	60	1.09×10^{-3}	1.08×10^{-3}	1.11×10^{-3}	4.82×10^{-4}	5.19×10^{-3}	1.52×10^{-5}
50	50	1.36×10^{-3}	1.35×10^{-3}	1.37×10^{-3}	5.97×10^{-4}	4.77×10^{-3}	1.39×10^{-5}
60	40	1.63×10^{-3}	1.62×10^{-3}	1.64×10^{-3}	7.12×10^{-4}	4.36×10^{-3}	1.27×10^{-5}
70	30	1.90×10^{-3}	1.89×10^{-3}	1.90×10^{-3}	8.28×10^{-4}	3.94×10^{-3}	1.15×10^{-5}
80	20	2.16×10^{-3}	2.16×10^{-3}	2.17×10^{-3}	9.43×10^{-4}	3.53×10^{-3}	1.03×10^{-5}
90	10	2.43×10^{-3}	2.43×10^{-3}	2.43×10^{-3}	1.06×10^{-3}	3.11×10^{-3}	9.10×10^{-6}
100	0	2.70×10^{-3}	2.70×10^{-3}	2.70×10^{-3}	1.17×10^{-3}	2.70×10^{-3}	7.89×10^{-6}

완전한 취식섭취를 흡입으로 전혀 다르게 판단한 경우를 제외하면 적어도 ^{241}Am 에 대해서는 폐계측이나 소변 분석의 결과는 오차가 충분히 작다. 그러나 대변 분석에서는 섭취 경로 정보가 정확하지 않으면 심각한 오차를 초래함을 알 수 있다. 특히 취식섭취를 흡입섭취로 가정하는 경우에는 340배까지 선량을 과대평가할 수 있는 것으로 나타났다. 역으로 흡입섭취를 취식섭취로 오판한 경우에는 섭취 경로 구성비에 거의 무관하게 -93~-100% 과소평가가 예상된다. 대변 방사능 측정값으로부터 예탁유효선량을 평가할 때 흡입섭취 비율이 불확실할 경우 섭취경로를 취식섭취로 가정하는 것이 흡입섭취로 가정하는 것보다 잠재오차가 작을 것으로 나타났다.

반대로 소변 방사능 측정값으로부터 예탁유효선량을 평가할 경우에는 섭취경로가 완전히 취식섭취라는 정보가 없다면 흡입으로 간주하는 것이 잠재오차를 줄인다. 표4에서 보듯이 흡입으로 간주할 경우 잠재오차는 10% 미만의 과대평가를 초래하지만 취식으로 간주할 경우에는 약 55%의 과소평가가 예상되기 때문이다.

종합적으로 분석해 볼 때 작업자가 ^{241}Am (AMAD 5 μm , Type M)을 단일급성 섭취하였는데 흡입섭취 및 취식섭취 비율을 모를 경우 폐방사능 또는 소변 방사능 측정이 가능하다면 대

변 방사능 측정자료보다 폐 방사능 또는 소변 방사능 측정자료에 의해 예탁유효선량을 평가하는 것이 섭취경로 가정에 따른 선량평가 잠재오차 위험이 작다. 그러나 이러한 결론은 예시적으로 평가한 ^{241}Am 에 대한 것이며 핵종이나 섭취 또는 배설 특성이 다른 방사능의 경우에는 여기서 사용한 방법을 적용하여 따로 평가가 필요하다.

만약 두 가지 이상의 바이오어세이 대상을 분석한다면 측정결과로부터 흡입섭취와 취식섭취의 비율을 추정하여 보다 나은 선량평가가 가능하다. 방사성핵종이 흡입섭취 및 취식섭취 되었을 때, 섭취 후 t 시점에서 임의의 두 바이오어세이 A와 B의 측정값은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$M_A(t) = I^{inh} \times F_A^{inh}(t) + I^{ing} \times F_A^{ing}(t) \quad (8)$$

$$M_B(t) = I^{inh} \times F_B^{inh}(t) + I^{ing} \times F_B^{ing}(t) \quad (9)$$

여기서 $M_A(t)$ 는 방사성핵종 섭취 후 t일째에 측정대상체 A에서의 방사능[Bq], $M_B(t)$ 는 측정대상체 B에서의 방사능[Bq]이다. 측정대상체 A와 B는 섭취된 핵종에 따라 폐, 전신, 갑상선, 소변 그리고 대변 등 모든 측정대상체에 대해 적용할 수 있다. 단, 측정대상체가 폐일 경우에는 방사성

Table 4. Evaluated Errors of the CED Due to an Assumed Intake Path on the basis of the Evaluated CEDs of ^{241}Am Given in Table 3 according to the Fraction Inhaled (%).

Fraction(%)		by the Lungs		by the Urine		by the Faeces	
Inhalation	Ingestion	Inhalation	Inhalation	Ingestion	Inhalation	Ingestion	Ingestion
0	100	-100	130	0	34,142	0	
10	90	-6.25	8.12	-53.0	2,134	-93.5	
20	80	-2.88	3.74	-54.9	983	-96.8	
30	70	-1.70	2.21	-55.6	580	-98.0	
40	60	-1.10	1.43	-55.9	375	-98.6	
50	50	-0.74	0.96	-56.1	251	-99.0	
60	40	-0.49	0.64	-56.2	168	-99.2	
70	30	-0.32	0.41	-56.3	108	-99.4	
80	20	-0.18	0.24	-56.4	63.1	-99.5	
90	10	-0.08	0.11	-56.5	28.1	-99.6	
100	0	0	0	-56.5	0	-99.7	

핵종 취식섭취 후 t일째의 섭취량분율 $F_A^{ing}(t)$ 또는 $F_B^{ing}(t)$ 를 0으로 둘 수 있다. 또한 추정대상체가 소변 또는 대변일 경우에 섭취된 방사성핵종의 물리적 반감기가 ^{241}Am 과 같이 충분히 길다면 섭취량분율을 t일째 일일배설분율 대신 t일째까지의 임의기간 누적배설분율로 대체할 수 있다.

식(8)과 식(9)로부터 흡입 또는 취식섭취의 비율을 모르더라도 두 가지 추정대상체의 방사능 측정자료 및 관련 분율로부터 흡입섭취량과 취식섭취량을 다음과 같이 산출할 수 있다.

$$I^{inh} = \frac{M_A(t) F_B^{ing}(t) - M_B(t) F_A^{ing}(t)}{F_A^{inh}(t) F_B^{ing}(t) - F_B^{inh}(t) F_A^{ing}(t)} \quad (10)$$

$$I^{ing} = \frac{M_A(t) F_B^{inh}(t) - M_B(t) F_A^{inh}(t)}{F_A^{ing}(t) F_B^{inh}(t) - F_B^{ing}(t) F_A^{inh}(t)} \quad (11)$$

I^{inh} 과 I^{ing} 을 알면 식(4)를 이용하여 예탁유효선량을 평가할 수 있다. 위에서 예시적으로 만든 ^{241}Am 에 대한 가상 감시결과를 식(10)과 식(11)에 적용한 결과 표2에서 전제로 한 섭취경로 혼합비를 얻게 됨을 확인하였다. 실제 적용에서는 측정치가 수반하는 백그라운드 보정, 측정치가 내포하는 우연오차 및 계통오차가 개입하므로 정확한 혼합비를 얻을 것으로 기대할 수는 없지만 임의로 특정한 섭취경로를 가정하는 것보다는 개선된 선량평가 결과를 얻을 수 있다.

결 론

방사선작업자가 작업 중 또는 사고에 의해 방사성핵종이 흡입과 취식 두 가지 섭취경로로 섭취될 수 있으나 일반적으로 흡입섭취로 가정하여 예탁유효선량을 평가하는 경우가 많다. 그러나 모의를 통한 ^{241}Am (AMAD 5 μm , Type M)의 단일 급성 섭취에서 실제 흡입섭취량 및 취식섭취량에 의한 예탁유효선량에 대해 폐, 소변, 대변의 바이오어세이 측정자료로부터 흡입 또는 취식 중 하나의 섭취경로만 가정하여 구한 예탁유효선량의 상대오차를 평가한 결과, 바이오어세이(폐, 소변

및 대변) 그리고 ^{241}Am 의 흡입섭취 및 취식섭취 비율에 따라 예탁유효선량 잠재오차가 -100%부터 34,000%까지 발생할 수 있는 것으로 나타났다. 하나의 주어진 섭취에 둘 이상의 감시방법을 사용하면 그 측정치로부터 흡입과 취식 섭취의 구성비를 추정할 수 있다. 이 방법을 적용하면 섭취경로가 불확실한 급성 단일 섭취에 대한 예탁유효선량의 잠재오차를 줄일 수 있다. 이와 같은 잠재오차는 핵종이나 물리화학적 형태가 다른 경우에도 예상되지만 그 잠재오차의 크기는 경우별로 평가되어야 한다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 시행하는 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. International Commission on Radiological Protection. Individual Monitoring for Internal Exposure of Workers Replacement of ICRP Publication 54. ICRP Publication 78. Ann ICRP. 1997;27(3/4).
2. 이태영, 이종일, 장시영. 방사성핵종의 흡입섭취 후 전신, 장기 및 배설물에서의 섭취량 분율 계산. 한국원자력연구소. 2002;KAERI/TR-2245/02.
3. 이종일, 이태영, 장시영, 이재기. 우라늄의 입자 크기, 흡수형태 및 섭취형태가 내부피폭선량 평가 결과에 미치는 영향. 방사선방어학회지 2003;28(4):321-325.
4. International Commission on Radiological Protection. Dose Coefficients for Intakes of Radionuclides by Workers. ICRP Publication 68. Ann ICRP. 1994;24(4).
5. Joint IAEA/IDEAS intercomparison exercise on internal doses assessment. IDEAS General Guidelines for the estimation of committed dose from incorporation monitoring data. Available at <http://www.ideas-workshop.de> 2004.