

우라늄 섭취의 유도조사준위 산출

이나래*, 한승재*,†, 조건우*,†, 정규환†, 이동명*,†

*과학기술연합대학원대학교, †한국원자력안전기술원

2013년 3월 28일 접수 / 2013년 4월 30일 1차 수정 / 2013년 5월 23일 2차 수정 / 2013년 5월 24일 채택

국내 원자력안전법, 산업안전보건법 및 최신 연구에 근거하여 우라늄 취급시설에서 종사자의 우라늄 섭취로 인한 방사선 위해의 최소화 및 화학적 독성 방지를 동시에 고려한 유도조사준위를 산출하였다. 본 연구에서 방사선 위해의 조사준위는 연간 2 mSv-6 mSv의 예탁유효선량을 고려하였으며, 화학적 독성의 조사준위는 0.3 $\mu\text{g g}^{-1}$ 의 신장의 우라늄 농도를 고려하였다. 결과로써 핵연료공기시설에서 3.5% 농축우라늄 취급 시, 공기 중 우라늄 농도측정의 유도조사준위는 Type F, Type M 및 Type S 우라늄 급성흡입 시 화학적 독성에 근거한 STEL의 값인 0.6 mg m^{-3} 으로 산출되었다. 또한 Type F 우라늄 만성흡입 시 유도조사준위는 화학적 독성에 근거한 15.21 $\mu\text{g m}^{-3}$ 으로 산출되었으며, Type M 및 Type S 우라늄 만성흡입 시 유도조사준위는 각각 방사선 위해에 근거한 0.41-1.23 Bq m^{-3} 및 0.13-0.39 Bq m^{-3} 으로 산출되었다. 폐 측정의 유도조사준위는 6개월 감시주기에서 Type M 우라늄 급성흡입 및 만성흡입 시 각각 0.37-1.11 Bq 및 0.39-1.17 Bq으로 산출되었으며, Type S 우라늄 급성흡입 및 만성흡입 시 각각 0.30-0.91 Bq 및 0.19-0.57 Bq으로 산출되었다. 이 값들은 일반적으로 사용되는 폐 측정 기기인 germanium 검출기의 검출한도인 4 Bq 이하로 나타나 폐 측정으로는 본 연구에서 설정한 조사준위를 만족시킬 수 없는 것으로 나타났다. 소변시료 분석에서 Type F 우라늄을 급성흡입 후 1개월 감시주기에서 유도조사준위는 화학적 독성에 근거한 14.57 $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 산출되었다. 또한 Type M 우라늄을 급성흡입 및 만성흡입 시 1개월 감시주기에서 유도조사준위는 각각 방사선 위해에 근거하여 2.85-8.58 $\mu\text{g L}^{-1}$ 및 1.09-3.27 $\mu\text{g L}^{-1}$ 으로 산출되었다.

중심어: 우라늄, 방사선 위해, 화학적 독성, 감시 프로그램, 조사준위, 노출기준

1. 서론

우라늄의 섭취로 인한 건강상의 위험은 방사선 위해와 화학적 독성으로 크게 나눌 수 있다. 우라늄에서 방출되는 방사선으로 인하여 폐, 뼈 및 기타 조직 등에 암을 일으킬 수 있을 뿐만 아니라 우라늄의 화학적 독성으로 인하여 신독성(nephrotoxicity)과 같은 신장 기능장애를 일으킬 수 있다[1]. 따라서 우라늄의 섭취는 잠재적으로 두 가지 위해를 동시에 지니고 있기 때문에 어느 것을 우선적으로 제한할 것인지 또는 어느 하나의 규제요건으로도 두 가지를 모두 만족할 수 있는 보수적인 제한치를 둘 수 있는지 등에 대해서 많은 논의가 이루어지고 있다. 우라늄 섭취에 대한 방사선 위해를 최소화하기 위한 범규를 만족하기 위하여 종사자의 내부피폭에 대한 감시는 (1)공기 중 우라늄 농도 측정 (2)폐 방사능 측정 및 (3)소변시료 분석으로 구성된다.

방사선 위해를 최소화하기 위해서 국내 원자력안전법 시행령 제 2-4호 별표 1 [2]에서는 종사자의 유효선량한도를 연간 50 mSv를 넘지 않는 범위에서 5년간 100 mSv로

규정하고 있다. 원자력안전위원회고시 제 2012-70호[3]에서는 인체의 내부피폭으로 인한 예탁유효선량이 연간 2 mSv를 초과할 우려가 있는 종사자들을 측정대상으로 관리하도록 명시하고 있다.

화학적 독성과 관련하여 산업안전보건법에 근거한 고용노동부고시 제 2012-31호[4]에서는 우라늄 노출기준(Threshold Limit Values, TLVs)을 15분 노출기준인 단시간노출기준(Short Term Exposure Limit, STEL)에 대하여 0.6 mg m^{-3} , 1일 8시간 작업기준인 시간가중평균노출기준(Time Weighted Average, TWA)에 대하여 0.2 mg m^{-3} 으로 규정하고 있다. 한편 미국 국립연구회(National Research Council)는 최신 연구에 근거하여 신기능 장애를 발생시킬 수 있는 신장의 우라늄 농도를 1.0 $\mu\text{g-U g-kidney}^{-1}$ (mass of uranium per mass of kidneys)으로 하향조정하여 제시하였다[5].

본 연구는 원자력안전법, 산업안전보건법 및 최신연구를 통한 우라늄 섭취기준에 근거하여 내부피폭 감시에 실제 적용가능한 수치, 즉 우라늄 섭취의 유도조사준위를 산출하기 위해 수행되었다. 유도조사준위 산출을 위해서

교신저자 : 이나래, beeorju@hanmail.net
대전광역시 유성구 과학로 62 한국원자력안전기술원 연구총괄실

Table 1. Primary Levels, Investigation Levels and Reference Values used to calculate a Derived Investigation Level for Prevention of Radiological Hazard and Chemical Toxicity of Uranium in This Study.

Classification	Radiological Hazard	Chemical Toxicity
Primary Levels	20 mSv y ⁻¹ [2]	1.0 µg-U g-kidney ⁻¹ [5,10]
Investigation Levels	2 - 6 mSv y ⁻¹ [3,6]	0.3 µg-U g-kidney ⁻¹ [1,5,9,10]
Reference Values	-	TWA*: 0.2 mg m ⁻³ STEL†: 0.6 mg m ⁻³ [4]

*Time Weighted Average, †Short Term Exposure Limit.

우라늄의 섭취형태, ²³⁵U의 존재비, 흡수형태, 및 감시주기를 고려하였으며, ICRP biokinetic model을 사용하여 우라늄 작업장에서 적용 가능한 공기 중 우라늄 농도 측정, 폐 측정 및 소변시료 분석에 대한 방사선 위해의 유도조사준위(Derived Investigation Level of Radiological Hazard, DIL_R) 및 화학적 독성의 유도조사준위(Derived Investigation Level of Chemical Toxicity, DIL_C)를 산출하였으며, 이 때 보수적인 유도조사준위를 선택하여 우라늄 섭취의 보건위해를 동시에 제한하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

표 1은 본 연구에서 설정한 우라늄 섭취에 대한 1차준위, 조사준위 및 참고치를 나타낸 것이다. 국내 원자력안전위원회고시 제 2012-70호에서 정한 내부피폭방사선량의 측정대상은 예탁유효선량이 연간 2 mSv를 초과할 우려가 있는 종사자 등으로 규정되어 있다[3]. 실제 우라늄 작업장에서는 이러한 기준의 이행여부를 만족시키기 위해서 감시프로그램을 운영 및 실시하여 그 결과를 예시해야한다. 한편 ISO 20553 [6]에서는 연간 총 선량이 6 mSv를 초과하는 종사자에 대해서 개인 감시를 수행할 것을 권고하고 있으며, 조사준위는 연간 선량한도의 30% 보다 높지 않는 연간 선량(6 mSv)에서 조사준위가 설정되어야 한다고 명시하고 있다. 미국 원자력 규제위원회(Nuclear Regulatory Commission, NRC)에서는 조사준위를 0.1 ALI (5 mSv)으로 설정하고 있으며[7], 실제 EC 국가들도 조사준위의 값을 0.1 mSv부터 6 mSv까지 다양하게 채택하고 있다[8]. 이와 같이 조사준위는 국가간, 기관 또는 사업자간에 다양하게 선택 될 수 있으며 이러한 다양성에 근거하여 본 연구에서는 연간 2 mSv-6 mSv의 예탁유효선량을 방사선 위해의 조사준위(Investigation Level of Radiological Hazard, IL_R)로 정하였다. 화학적 독성을 방지하기 위한 조사준위(Investigation Level of Chemical Toxicity, IL_C)는 최신 연구[1,5,9,10]에 근거하여 신장의 우라늄 농도를 0.3 µg-U g-kidney⁻¹으로 정하였다. 또한, 국내 고용노동부고시[4]에 명시된 우라늄 노출기준을 참고치로 두어 급성흡입 및 만성흡입 시 공기 중 우라늄 농도 측정의 유도조사준위와 비교하였다.

Table 2. Parameter Values used for Calculations of DIL.

Intake patterns	Acute, Chronic
Weight percent of ²³⁵ U (%)	0.2, 0.72, 3.5, 20, 93
Absorption types	F (fast), M (moderate), S (slow)
Monitoring frequency (days)	7, 30, 90, 180, 360

선정한 조사준위에 대하여 실제 감시를 통한 측정치와 비교할 수 있는 값인 유도조사준위를 산출하기 위해 고려한 인자들을 표 2와 같이 나타내었다. 우라늄 섭취형태는 급성흡입 및 만성흡입으로 분류하였으며 급성흡입은 1회 단일흡입으로 조사준위에 상응하는 양에 도달한다고 가정하였으며, 만성흡입은 1년 동안 연속흡입으로 조사준위에 상응하는 양에 도달한다고 가정하였다[11]. ²³⁵U의 존재비는 우라늄 사용시설에서 취급 가능한 0.2%, 0.72%, 3.5%, 20% 및 93% (열화우라늄, 천연우라늄, 저농축우라늄, 중농축우라늄 및 고농축우라늄)으로 구분하였다. ²³⁵U의 존재비는 우라늄 내 각각의 동위원소 존재비에 영향을 주기 때문에 이로 인해 우라늄 동위원소의 질량분율, 방사능 분율, 비방사능, 선량환산계수가 달라진다. 본 연구에서는 DOE standard [12], NRC 10 CRF Part 20 Appendix B [13]에서 제시한 식들을 이용하여 표 3과 같이 ²³⁴U, ²³⁵U 및 ²³⁸U의 방사능 분율(Activity Fraction, AF), 비방사능(Specific Activity, SA), 우라늄 동위원소의 방사능 분율(Effective Dose Coefficient, EDC)이 고려된 선량환산계수를 산출하여 나타내었다. 우라늄의 흡수형태는 폐에서 체액으로 흡수되는 유형에 따라 Type F (relatively soluble), Type M (moderately soluble), Type S (relatively insoluble)로 분류하였다[15]. 감시주기는 우라늄 흡입 후 7일, 30일, 90일, 180일 및 360일로 분류하였다. 기준 종사자는 우라늄의 입자크기가 5 µm AMAD인 작업장에서 1일 8시간, 1년 2000시간 근무하며, 종사자의 호흡률은 1시간 1.2 m³, 신장 무게는 310 g, 그리고 일일 소변량은 1.4 L로 가정하였다[16].

Table 3. Activity Fraction, Effective Dose Coefficients and Specific Activity for Uranium Compounds of Different Isotopic Compositions (5 μm AMAD).

Weight percent of ²³⁵ U (%)	Activity Fraction			EDC(Sv Bq ⁻¹)			Specific Activity (Bq μg ⁻¹)
	²³⁴ U	²³⁵ U	²³⁸ U	Type F	Type M	Type S	
DU [*] (0.2)	0.1553	0.0107	0.8339	5.95×10 ⁻⁷	1.68×10 ⁻⁶	5.87×10 ⁻⁶	1.49×10 ⁻²
U-nat [†] (0.72)	0.4968	0.0224	0.4807	6.13×10 ⁻⁷	1.85×10 ⁻⁶	6.25×10 ⁻⁶	2.56×10 ⁻²
LEU [‡] (3.5)	0.8342	0.0314	0.1344	6.31×10 ⁻⁷	2.02×10 ⁻⁶	6.63×10 ⁻⁶	6.55×10 ⁻²
MEU [§] (20)	0.9425	0.0355	0.0220	6.37×10 ⁻⁷	2.08×10 ⁻⁶	6.75×10 ⁻⁶	3.46×10 ⁻¹
HEU (93)	0.9634	0.0362	0.0004	6.39×10 ⁻⁷	2.09×10 ⁻⁶	6.77×10 ⁻⁶	2.41

^{*}Depleted Uranium, [†]Natural Uranium, [‡]Low Enriched Uranium, [§]Medium Enriched Uranium, ^{||}High Enriched Uranium, [¶]Refer NRPB Report [9], ICRP SG2 [14].

우라늄에 대한 생체역학모델 및 선량평가모델로써 ICRP biokinetic model [11,15,17,18]에 기반하여 개발된 IMBA (Integrated Modules for Bioassay Analysis) professional 내부피폭 선량평가코드를 이용하여 우라늄 급성 및 만성흡입 시 각각의 우라늄 흡수형태에 따른 1일 소변으로 배설률, 폐의 잔류율 및 신장의 잔류율(단, 신장의 잔류율은 User defined mode [19]를 사용)을 구하였다. 공기 중 우라늄 농도 측정, 폐 측정 및 소변시료 분석에 따른 각각의 DIL_C 및 DIL_R은 다음과 같은 사항을 고려하여 산출하였다.

- 공기 중 우라늄 농도 측정을 통한 급성 및 만성흡입의 DIL_R은 각각 식(1) 및 식(2)와 같은 방법으로 구하였다. 급성흡입 시 DIL_R을 섭취량(mg)으로 나타냈으며, 만성흡입 시 공기 중 우라늄 농도(μg m⁻³)로 나타내었다.

$$DIL_R(A,A) = \frac{IL_R}{EDC \times SA} \times 1000 \quad (1)$$

$$DIL_R(A,C) = \frac{IL_R}{EDC \times SA} \times \frac{1}{2400} \quad (2)$$

여기서,
 DIL_R(A,A): 급성흡입 시 공기 중 우라늄 농도 측정을 통한 방사선 위해의 유도조사준위(mg),
 DIL_R(A,C): 만성흡입 시 공기 중 우라늄 농도 측정을 통한 방사선 위해의 유도조사준위(μg m⁻³),
 IL_R: 방사선 위해의 조사준위(Sv),
 SA: ²³⁵U의 존재비에 따른 총 우라늄의 비방사능 (Bq μg⁻¹),
 EDC: 우라늄동위원소 분율이 고려된 예탁유효선량환산계수(Sv Bq⁻¹),
 1000: μg을 mg으로 변환,
 2400 m³: 1년간 총 호흡량(기준 종사자의 호흡률(1.2 m³ h⁻¹)×1년간의 근무시간(2000 h))

공기 중 우라늄 농도 측정을 통한 급성 및 만성흡입 시 DIL_C은 각각 식(3) 및 식(4)와 같은 방법으로 구하였다. 급성흡입 시 DIL_C를 섭취량(mg)으로 나타냈으며, 만성흡입 시 공기 중 우라늄 농도(μg m⁻³)로 나타냈다.

$$DIL_C(A,A) = \frac{IL_C \times 310}{m(a,k,t)_{max}} \times 1000 \quad (3)$$

$$DIL_C(A,C) = \frac{IL_C \times 310 \times 365}{m(c,k,t)_{max} \times 2400} \quad (4)$$

여기서,
 DIL_C(A,A): 급성흡입 시 공기 중 우라늄 농도 측정을 통한 화학적 독성의 유도조사준위(mg),
 DIL_C(A,C): 만성흡입 시 공기 중 우라늄 농도 측정을 통한 화학적 독성의 유도조사준위(μg m⁻³),
 IL_C: 화학적 독성의 조사준위(μg g⁻¹),
 m(a,k,t)_{max}: 우라늄 급성흡입 시 경과시간 t일에서 예상되는 신장의 최대 잔류량,
 m(c,k,t)_{max}: 우라늄 만성흡입 시 경과시간 t일에서 예상되는 신장의 최대 잔류량,
 310 g: 기준인의 신장 무게,
 1000: μg을 mg으로 변환,
 365 d: 우라늄 연속흡입 연간 일 수,
 2400 m³: 1년간 총 호흡량(기준 종사자의 호흡률(1.2 m³ h⁻¹)×1년간의 근무시간(2000 h)).

공기 중 우라늄 농도 측정을 통한 급성 및 만성흡입의 유도조사준위를 각각 국내 산업안전보건법의 우라늄 노출기준(TLVs)인 STEL 및 TWA와 비교하였다.

- 폐 측정에서는 체액으로 흡수가 빠른 Type F 우라늄은 배제하였으며, 실제 폐 측정 시 ²³⁵U에 대해 측정되므로 DIL_R 산출 시 표 3의 ²³⁵U의 방사능 분율(AF₂₃₅)을 적용하였다. 폐 측정을 통한 급성 및 만성흡입 시 DIL_R은 각각 식(5) 및 식(6)과 같은 방법으로 구하였다. 이 때 단위는 방사능(Bq)으로 나타냈다.

$$DIL_R(L,A) = \frac{IL_R}{EDC} \times m(a,l,t) \times AF_{235} \quad (5)$$

$$DIL_R(L,C) = \frac{IL_R}{EDC} \times \frac{m(c,l,t)}{365} \times AF_{235} \quad (6)$$

여기서,
 DIL_R(L,A): 급성흡입 시 폐 측정을 통한 방사선 위해의 유도조사준위(Bq),
 DIL_R(L,C): 만성흡입 시 폐 측정을 통한 방사선 위해의

유도조사준위(Bq),
 IL_R : 방사선 위해의 조사준위(Sv),
 EDC: 우라늄동위원소 분율이 고려된 예탁유효선량환산계수($Sv\ Bq^{-1}$),
 $m(a,l,t)$: 우라늄 급성흡입 시 경과시간 t일에서 예상되는 폐 내 잔류율,
 $m(c,l,t)$: 우라늄 만성흡입 시 경과시간 t일에서 예상되는 폐 내 잔류율,
 365 d: 우라늄 연속흡입 연간 일 수,
 AF_{235} : ^{235}U 의 방사능 분율

- 소변시료 분석에서는 체액으로 흡수가 느린 Type S 우라늄은 배제하였으며, 급성 및 만성흡입 시 방사선 위해의 유도조사준위 DIL_R 은 각각 식(7) 및 식(8)과 같은 방법으로 구하였다. 이 때 단위는 소변 중 우라늄 농도($\mu g\ L^{-1}$)로 나타냈다.

$$DIL_R(U,A) = \frac{IL_R}{EDC} \times \frac{m(a,u,t)}{SA} \times \frac{1}{1.4} \quad (7)$$

$$DIL_R(U,C) = \frac{IL_R}{EDC} \times \frac{m(c,u,t)}{SA} \times \frac{1}{1.4 \times 365} \quad (8)$$

여기서,
 $DIL_R(U,A)$: 급성흡입 시 소변 중 우라늄 농도 분석을 통한 방사선 위해의 유도조사준위($\mu g\ L^{-1}$),
 $DIL_R(U,C)$: 만성흡입 시 소변 중 우라늄 농도 분석을 통한 방사선 위해의 유도조사준위($\mu g\ L^{-1}$),
 IL_R : 방사선 위해의 조사준위(Sv),
 EDC: 우라늄동위원소 분율이 고려된 예탁유효선량환산계수($Sv\ Bq^{-1}$),
 $m(a,u,t)$: 우라늄 급성흡입 시 경과시간 t일에서 예상되는 소변의 배설률,
 $m(c,u,t)$: 우라늄 만성흡입 시 경과시간 t일에서 예상되는 소변의 배설률,
 SA : ^{235}U 의 존재비에 따른 총 우라늄의 비방사능($Bq\ \mu g^{-1}$),
 365 d: 우라늄 연속흡입 연간 일 수,
 1.4 L: 기준인의 1일 소변량

소변시료 분석에서 급성 및 만성흡입 시 화학적 독성의 유도조사준위 DIL_C 는 각각 식(9) 및 식(10)과 같은 방법으로 구하였다. 이 때 단위는 소변 중 우라늄의 농도($\mu g\ L^{-1}$)로 나타냈다.

$$DIL_C(U,A) = \frac{IL_C}{CR(a,t)} \times 1000 \quad (9)$$

$$DIL_C(U,C) = \frac{IL_C}{CR(c,t)} \times 1000 \quad (10)$$

여기서,
 $DIL_C(U,A)$: 급성흡입 시 소변 중 우라늄 농도 분석을 통한 화학적 독성의 유도조사준위($\mu g\ L^{-1}$),
 $DIL_C(U,C)$: 만성흡입 시 소변 중 우라늄 농도 분석을 통한 화학적 독성의 유도조사준위($\mu g\ L^{-1}$),

IL_C : 화학적 독성의 조사준위($\mu g\ g^{-1}$),
 $CR(a,t)$: 급성흡입 시 경과시간 t일에서 소변으로 배설된 우라늄 농도에 대한 신장에 잔류하는 우라늄 농도비($\mu g-U\ g-kidney^{-1}:\mu g-U\ mL-urine^{-1}$)
 $CR(c,t)$: 만성흡입 시 경과시간 t일에서 소변으로 배설된 우라늄 농도에 대한 신장에 잔류하는 우라늄 농도비($\mu g-U\ g-kidney^{-1}:\mu g-U\ mL-urine^{-1}$)
 1000: mL을 L의 단위로 변환

- 각각의 감시에서 DIL_R 및 DIL_C 중 보수적인 값을 유도조사준위로 선택하여 우라늄의 보건위해를 동시에 제한하도록 하였다.

3. 결과 및 논의

3.1 ICRP biokinetic model에 의한 잔류율 계산

그림 1은 IMBA professional로 획득한 우라늄에 대한 신장의 잔류율을 나타냈다. 그림 1(a)는 Type F, Type M 및 Type S 우라늄 1 μg 을 급성흡입 후 시간함수로서 신장에 잔류하는 우라늄 농도를 예측한 것으로 Type F, Type M 및 Type S 우라늄 모두 1일에서 최대를 나타낸다. 그림 1(b)는 Type F, Type M 및 Type S 우라늄을 1 μg 을 매일 만성흡입 시 신장에 잔류하는 우라늄 농도를 예측한 것으로 1일부터 100일까지는 증가하는 추세를 보이나, 100일 이후 일정한 농도로 평행되어 나타난다. 그러므로 보수적인 접근에서 100일 이후 신장에 잔류하는 우라늄 농도를 10000일의 신장에 잔류하는 우라늄 농도로 간주한다[1,10]. 표 4은 급성흡입 및 만성흡입 시 신장에 잔류율의 최대값을 나타낸 것으로, 즉 급성흡입 1일에서 신장의 잔류율을 나타냈으며, 만성흡입 10000일에서 신장의 잔류율을 나타낸 것이다.

Table 4. The Maximum Retention of Inhaled Uranium in Kidneys.

Absorption Type	Acute Inhalation	Chronic Inhalation
Type F	0.032	0.93
Type M	0.0041	0.23
Type S	0.00013	0.022

그림 2는 신장의 잔류율 및 소변의 배설률을 이용하여 소변으로 배설되는 우라늄 농도에 대한 신장에 잔류하는 우라늄 농도의 비($CR, \mu g-U\ g-kidney^{-1}:\mu g-U\ mL-urine^{-1}$)를 나타냈다. 그림 2(a)에서 나타낸 바와 같이 급성흡입에서 CR 은 1일에서 100일까지 Type F, Type M 및 Type S 우라늄 흡수형태 간에 약 2배 이내의 차이를 보이며, 그림 2(b)에서 나타낸 바와 같이 만성흡입에서 우라늄 흡수형태에 상관없이 시간이 경과함에 따라 CR 이 동일하게 나타났다.

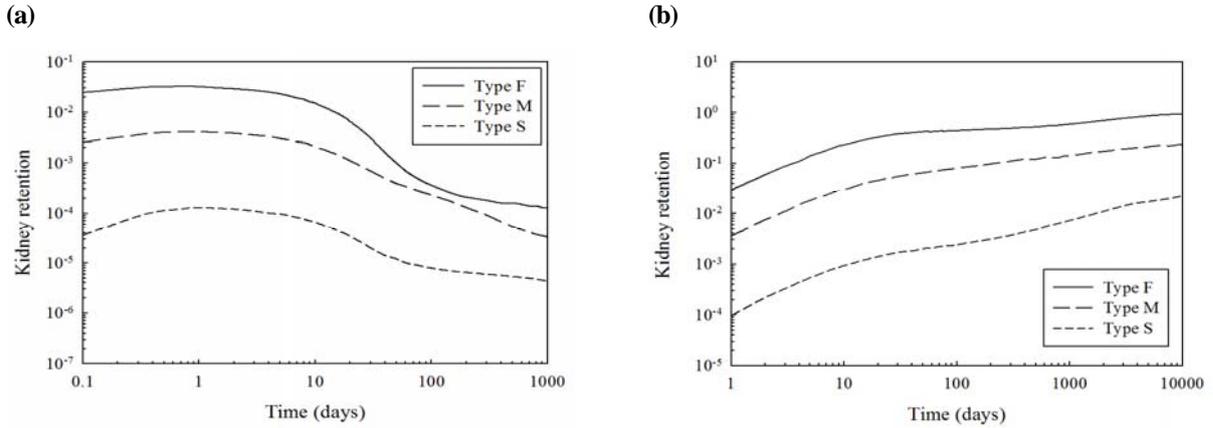


Fig 1. The retention of inhaled uranium in the kidney as a function of time after start of (a)acute inhalation, (b)chronic inhalation of uranium with 5 μm AMAD Type F, Type M and Type S.

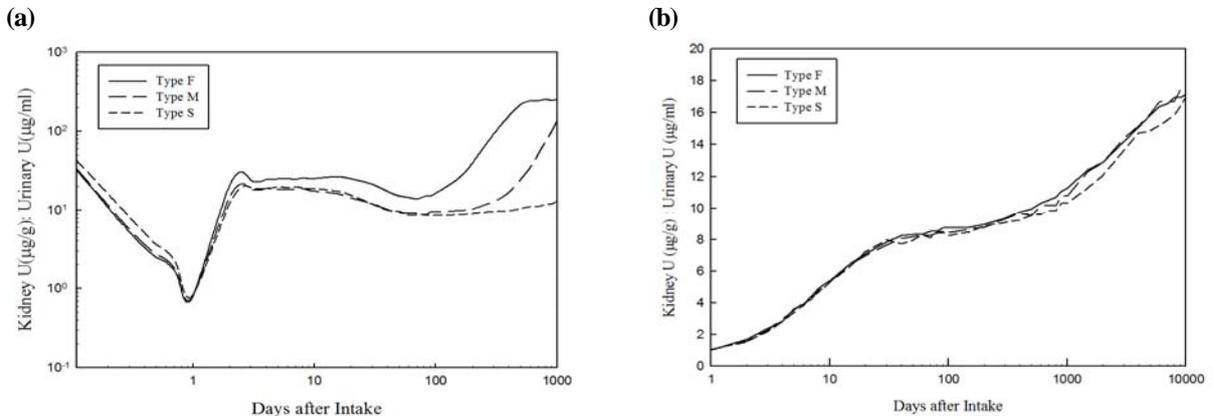


Fig 2. Model predictions of the concentration ratio of uranium in kidneys ($\mu\text{g g}^{-1}$) to uranium in urine ($\mu\text{g mL}^{-1}$) as a function of time after (a)acute inhalation, (b)chronic inhalation of uranium with 5 μm AMAD Type F, Type M and Type S.

3.2 공기 중 우라늄 농도 측정

표 5 및 표 6는 각각 우라늄 흡수형태 및 ^{235}U 의 존재비에 따른 급성흡입 및 만성흡입에서 공기 중 우라늄 농도 측정에서 DIL_R , DIL_C 및 TLVs를 나타낸 것이다. 표 5에서 Type F, Type M 및 Type S 우라늄을 급성흡입 시 DIL_R 은 ^{235}U 의 존재비에 따라 각각 1.30-676.37 mg (3132.20-10077.96 Bq), 0.40-239.69 mg (957.42-3571.44 Bq) 및 0.12-69.01 mg (295.23-1022.16 Bq)으로 산출되었다. DIL_C 는 ^{235}U 의 존재비와 무관하며 Type F, Type M 및 Type S 우라늄에 대하여 각각 2.90 mg, 22.80 mg 및 739.09 mg으로 산출되었다. 표 4에서 나타낸 STEL의 값 0.18 mg($0.6 \text{ mg m}^{-3} \times 1.2 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \times 0.25 \text{ h}$)은 우라늄 흡수형태 및 ^{235}U 존재비와 관계없이 모두 DIL_R 및 DIL_C 보다 보수적인 값을 제공한다. 그러므로 급성흡입의 경우 공기 중 우라늄 농도 측정 결과를 판단하여 적절한 조치를 취하기 위한 유도조사준위 값은 가장 낮은 STEL의 값인 0.6 mg m^{-3} 로 산출되었다. 그러나 Type S 고농축우라늄은 방사선 위해의 조사준위를 2 mSv로 설정 시, DIL_R 이 STEL보다 작은 값이되며 이 경우 방사선 위해에 근거한 값 0.12 mg , 즉 공기 중 우라늄 농도 0.4 mg m^{-3} (0.12

$\text{mg} \div 1.2 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \div 0.25 \text{ h}$)가 유도조사준위로 산출되었다.

표 6에서는 Type F, Type M 및 Type S 우라늄을 만성흡입 시 공기 중 우라늄 농도 측정에 적용하기 위한 DIL_R 은 ^{235}U 의 존재비에 따라 각각 $0.54 - 281.82 \mu\text{g m}^{-3}$ ($1.31 - 4.20 \text{ Bq m}^{-3}$), $0.17 - 99.87 \mu\text{g m}^{-3}$ ($0.40 - 1.50 \text{ Bq m}^{-3}$) 및 $0.05 - 28.58 \mu\text{g m}^{-3}$ ($0.12 - 0.42 \text{ Bq m}^{-3}$)으로 산출되었다. DIL_C 는 ^{235}U 의 존재비와 무관하며 Type F, Type M 및 Type S 우라늄에 대하여 각각 $15.21 \mu\text{g m}^{-3}$, $61.49 \mu\text{g m}^{-3}$ 및 $642.90 \mu\text{g m}^{-3}$ 으로 산출되었다. 표 6에서 나타낸 TWA의 값 $200 \mu\text{g m}^{-3}$ 은 DIL_R 보다 크기 때문에 유도조사준위로 선택할 수 없다. 그러므로 1일 8시간 만성흡입의 경우, 공기 중 우라늄 농도 결과를 판단하여 적절한 조치를 취하기 위한 유도조사준위 값은 농축도가 3.5% 이하인 Type F 우라늄은 화학적 독성에 근거하여 $15.21 \mu\text{g m}^{-3}$ 으로 설정해야 한다. 반면 농축도가 5% 이상인 Type F 우라늄, Type M 우라늄(열화우라늄 제외) 및 Type S 우라늄에 대해서 유도조사준위는 방사선 위해에 근거하여 각각 $1.3 - 3.9 \text{ Bq m}^{-3}$, $0.4 - 1.4 \text{ Bq m}^{-3}$, $0.1 - 0.4 \text{ Bq m}^{-3}$ 로 산출되었다.

Table 5. Air Monitoring: $DIL_R(A,A)$, $DIL_C(A,A)$ and STEL for Acute Inhalation of Uranium with 5 μm AMAD (Unit: mg).

Absorption Type	Weight Percent of ^{235}U (%)	$DIL_R(A,A)^{\text{¶}}$	$DIL_R(A,A)$	$DIL_C(A,A)$	STEL
Type F	DU* (0.2)	3359.32-10077.96	225.46-676.37		
	U-nat [†] (0.72)	3263.18-9789.54	129.49-388.47		
	LEU [‡] (3.5)	3171.19-9513.57	48.38-145.13	2.90	
	MEU [§] (20)	3138.42-9415.26	9.06-27.19		
	HEU (93)	3132.20-9396.6	1.30-3.90		
Type M	DU* (0.2)	1190.48-3571.44	79.90-239.69		
	U-nat [†] (0.72)	1081.08-3243.24	42.85-128.56		
	LEU [‡] (3.5)	988.45-2965.35	15.08-45.24	22.80	0.18
	MEU [§] (20)	962.30-2886.90	2.78-8.34		
	HEU (93)	957.42-2872.26	0.40-1.19		
Type S	DU* (0.2)	340.72-1022.16	23.00-69.01		
	U-nat [†] (0.72)	320.00-960.00	12.70-38.10		
	LEU [‡] (3.5)	301.65-904.95	4.60-13.81	739.09	
	MEU [§] (20)	296.25-888.75	0.86-2.57		
	HEU (93)	295.23-885.69	0.12-0.37		

*Depleted Uranium, [†]Natural Uranium, [‡]Low Enriched Uranium, [§]Medium Enriched Uranium, ^{||}High Enriched Uranium, [¶]Unit: Bq.

Table 6. Air Monitoring: $DIL_R(A,C)$, $DIL_C(A,C)$ and TWA for Chronic Inhalation of Uranium with 5 μm AMAD (Unit: $\mu\text{g m}^{-3}$).

Absorption Type	Weight Percent of ^{235}U (%)	$DIL_R(A,C)^{\text{¶}}$	$DIL_R(A,C)$	$DIL_C(A,C)$	TWA
Type F	DU* (0.2)	1.40-4.20	93.94-281.82		
	U-nat [†] (0.72)	1.36-4.08	53.95-161.85		
	LEU [‡] (3.5)	1.32-3.96	20.16-60.47	15.21	
	MEU [§] (20)	1.31-3.93	3.78-11.33		
	HEU (93)	1.31-3.93	0.54-1.62		
Type M	DU* (0.2)	0.50-1.50	33.29-99.87		
	U-nat [†] (0.72)	0.45-1.35	17.86-53.57		
	LEU [‡] (3.5)	0.41-1.23	6.28-18.85	61.49	200
	MEU [§] (20)	0.40-1.20	1.16-3.47		
	HEU (93)	0.40-1.20	0.17-0.50		
Type S	DU* (0.2)	0.14-0.42	9.52-28.58		
	U-nat [†] (0.72)	0.13-0.39	5.29-15.87		
	LEU [‡] (3.5)	0.13-0.39	1.92-5.75	642.90	
	MEU [§] (20)	0.12-0.36	0.36-1.07		
	HEU (93)	0.12-0.36	0.05-0.15		

*Depleted Uranium, [†]Natural Uranium, [‡]Low Enriched Uranium, [§]Medium Enriched Uranium, ^{||}High Enriched Uranium, [¶]Unit: Bq m^{-3} .

Table 7. DIL_R(L,A) for Acute Inhalation of Uranium with 5 μm AMAD of Type M and Type S in Monitoring by Lung Counting (Unit: Bq).

Absorption Type	Days After Intake	Weight Percent of ²³⁵ U (%)				
		DU [*] (0.2)	U-nat [†] (0.72)	LEU [‡] (3.5)	MEU [§] (20)	HEU (93)
Type M	7	0.66-1.98	1.26-3.78	1.61-4.83	1.77-5.31	1.80-5.39
	30	0.49-1.47	0.93-2.80	1.19-3.57	1.31-3.93	1.33-3.99
	90	0.28-0.83	0.53-1.59	0.68-2.03	0.74-2.23	0.76-2.27
	180	0.15-0.46	0.29-0.87	0.37-1.11	0.40-1.22	0.41-1.24
	360	0.05-0.16	0.10-0.30	0.13-0.38	0.14-0.42	0.14-0.43
Type S	7	0.22-0.65	0.43-1.29	0.56-1.69	0.63-1.88	0.64-1.91
	30	0.18-0.54	0.36-1.07	0.47-1.40	0.52-1.56	0.53-1.58
	90	0.14-0.41	0.27-0.81	0.36-1.07	0.40-1.19	0.40-1.21
	180	0.12-0.35	0.23-0.69	0.30-0.91	0.34-1.01	0.34-1.03
	360	0.10-0.29	0.19-0.58	0.25-0.76	0.28-0.84	0.28-0.85

*Depleted Uranium, †Natural Uranium, ‡Low Enriched Uranium, §Medium Enriched Uranium, ||High Enriched Uranium.

Table 8. DIL_R(L,C) for Chronic Inhalation of Uranium with 5 μm AMAD of Type M and Type S in Monitoring by Lung Counting (Unit: Bq).

Absorption Type	Days After Intake	Weight Percent of ²³⁵ U (%)				
		DU [*] (0.2)	U-nat [†] (0.72)	LEU [‡] (3.5)	MEU [§] (20)	HEU (93)
Type M	7	0.01-0.04	0.03-0.08	0.03-0.10	0.04-0.11	0.04-0.11
	30	0.05-0.15	0.09-0.27	0.12-0.36	0.13-0.39	0.13-0.40
	90	0.11-0.33	0.21-0.63	0.27-0.80	0.29-0.88	0.30-0.89
	180	0.16-0.48	0.31-0.93	0.39-1.17	0.43-1.29	0.44-1.31
	360	0.21-0.62	0.39-1.17	0.50-1.50	0.55-1.65	0.56-1.69
Type S	7	4.4×10 ⁻³ -1.3×10 ⁻²	8.6×10 ⁻³ -2.6×10 ⁻²	1.1×10 ⁻² -3.4×10 ⁻²	1.3×10 ⁻² -3.8×10 ⁻²	1.3×10 ⁻² -3.8×10 ⁻²
	30	0.02-0.05	0.031-0.10	0.04-0.13	0.05-0.15	0.05-0.15
	90	0.04-0.13	0.08-0.25	0.11-0.33	0.12-0.36	0.12-0.37
	180	0.07-0.22	0.14-0.43	0.19-0.57	0.21-0.63	0.21-0.64
	360	0.13-0.38	0.25-0.75	0.33-0.99	0.37-1.10	0.37-1.11

*Depleted Uranium, †Natural Uranium, ‡Low Enriched Uranium, §Medium Enriched Uranium, ||High Enriched Uranium.

3.3 폐 측정

표 7 및 표 8은 각각 우라늄 흡수형태, ²³⁵U의 존재비 및 감시주기에 따른 급성흡입 및 만성흡입 시, 폐 측정 감시결과에 적용하기 위한 DIL_R를 나타낸 것이다. 폐 측정에서 급성흡입 시 ²³⁵U의 존재비 및 감시주기에 따라 Type M 우라늄에 대해서 0.05-5.39 Bq으로 산출되었으며, Type S 우라늄에 대해서 0.10-1.91 Bq으로 산출되었다. 만성흡입 시 ²³⁵U의 존재비 및 감시주기에 따라 Type M 우라늄에 대해서 0.01-1.69 Bq의 범위를 나타내며, Type S 우라늄에 대해서는 0.004-1.11 Bq의 범위로 산출되었다. 일반적으로 폐 측정에 사용되는 germanium 검출기의 최소검출한도가 ²³⁵U에 대해서 약 4 Bq [1,10,20]으로 알려져 있어 본 연구에서 설정한 연간 2 mSv-6 mSv의 조사준위는 폐 측정으로 달성하기에 적합하지 않다 [21]. 그러나 농축도 3.5% 이상의 Type M 우라늄을 급성흡입 후 1주일에서 폐 측정을 통한 유도조사준위는 germanium 검출기의 최소검출한도 이상의 값이므로 이론적으로는 측정이 가능하다.

3.4 소변시료 분석

표 9 및 표 10는 각각 우라늄 흡수형태, ²³⁵U의 존재비 및 감시주기 별 급성흡입 및 만성흡입 시 소변시료 분석에 적용하기 위한 DIL_R 및 DIL_C를 나타낸 것이다. Type F 우라늄 급성흡입 시 ²³⁵U의 존재비 및 감시주기에 따라 DIL_R은 0.005-1689.39 μg L⁻¹의 범위로 산출되었으며, DIL_C는 ²³⁵U의 존재비와 상관없이 7일에서 100일의 감시주기에서 12,10-19,81 μg L⁻¹의 범위로 산출되었다. Type M 우라늄 급성흡입 시 ²³⁵U의 존재비 및 감시주기에 따라 DIL_R은 0.01- 110.57 μg L⁻¹의 범위로 산출되었으며, DIL_C는 ²³⁵U의 존재비와 상관없이 감시주기에 따라 16.40-33.38 μg L⁻¹의 범위로 산출되었다. Type F 우라늄 만성흡입 시 ²³⁵U의 존재비 및 감시주기에 따라 DIL_R은 0.53-365.27 μg L⁻¹의 범위로 산출되었으며, DIL_C는 ²³⁵U의 존재비와 상관없이 감시주기에 따라 36.28-77.23 μg L⁻¹의 범위로 산출되었다. Type M 우라늄 만성흡입 시 ²³⁵U의 존재비 및 감시주기에 따라 DIL_R은 0.02-29.46 μg L⁻¹의 범위로 산출되었으며, DIL_C는 ²³⁵U의 존재비와 상관없이 감시주기에 따라 36.89-78.79 μg L⁻¹의 범위로 산출되었

Table 9. $DIL_R(U,A)$, $DIL_C(U,A)$ for Acute Inhalation of Uranium with 5 μm AMAD of Type F and Type M in Monitoring by Urine Analysis (Unit: $\mu\text{g L}^{-1}$).

Absorption Type	Days After Intake	$DIL_R(U,A)$					$DIL_C(U,A)$
		Weight Percent of ^{235}U (%)					Any Mixture of ^{234}U , ^{235}U , ^{238}U
		$\text{DU}^*(0.2)$	$\text{U-nat}^\dagger(0.72)$	$\text{LEU}^\ddagger(3.5)$	$\text{MEU}^\S(20)$	$\text{HEU}^\parallel(93)$	
Type F	7	563.13-1689.39	323.43-970.30	120.83-362.50	22.63-67.90	3.25-9.74	12.10
	30	109.72-329.16	63.02-189.05	23.54-70.63	4.41-13.23	0.63-1.90	14.57
	90	19.30-57.90	11.15-33.45	4.14-12.42	0.78-2.33	0.11-0.33	19.81
	180 [†]	5.11-15.32	2.88-8.65	1.08-3.23	0.20-0.61	0.03-0.09	9.31
	360 [†]	0.89-2.67	0.51-1.53	0.19-0.57	0.04-0.11	5.13×10^{-3} - 1.54×10^{-2}	2.25
Type M	7	36.86-110.57	19.83-59.51	6.96-20.87	1.28-3.85	0.18-0.55	16.40
	30	15.16-45.47	8.13-24.39	2.85-8.58	0.53-1.58	0.08-0.23	25.47
	90	7.11-21.33	3.83-11.4	1.34-4.03	0.25-0.74	0.04-0.11	33.38
	180	3.75-11.25	2.01-6.02	0.70-2.11	0.13-0.39	0.02-0.06	29.71
	360	1.25-3.75	0.67-2.00	0.23-0.70	0.04-0.13	0.01-0.02	19.28

*Depleted Uranium, [†]Natural Uranium, [‡]Low Enriched Uranium, [§]Medium Enriched Uranium, ^{||}High Enriched Uranium

[†]Projected ratios for acute intake of soluble material may involve large errors beyond 3 month after intake because urine levels would have declined by several orders of magnitude by this time [10].

Table 10. $DIL_R(U,C)$, $DIL_C(U,C)$ for Chronic Inhalation of Uranium with 5 μm AMAD of Type F and Type M in Monitoring by Urine Analysis. (Unit: $\mu\text{g L}^{-1}$)

Absorption Type	Days After Intake	$DIL_R(U,C)$					$DIL_C(U,C)$
		Weight Percent of ^{235}U (%)					Any Mixture of ^{234}U , ^{235}U , ^{238}U
		$\text{DU}^*(0.2)$	$\text{U-nat}^\dagger(0.72)$	$\text{LEU}^\ddagger(3.5)$	$\text{MEU}^\S(20)$	$\text{HEU}^\parallel(93)$	
Type F	7	94.09-282.27	53.45-160.35	19.86-59.56	3.72-11.17	0.53-1.60	77.23
	30	110.70-332.11	62.90-188.68	23.36-70.08	4.43-13.30	0.63-1.88	43.33
	90	114.71-344.14	65.89-197.66	24.92-74.76	4.66-13.98	0.66-2.00	39.97
	180	120.65-361.95	68.55-205.65	25.46-76.38	4.77-14.31	0.68-2.05	38.55
	360	121.75-365.27	68.78-206.34	25.70-77.09	4.81-14.44	0.69-2.07	36.28
Type M	7	4.34-13.01	2.33-7.00	0.82-2.46	0.15-0.45	0.02-0.06	78.79
	30	5.77-17.31	3.11-9.31	1.09-3.27	0.20-0.60	0.03-0.09	44.78
	90	7.41-22.24	3.98-11.93	1.40-4.20	0.26-0.77	0.04-0.11	40.86
	180	8.68-26.05	4.67-14.01	1.40-4.20	0.30-0.91	0.04-0.13	39.23
	360	9.82-29.46	5.28-15.84	1.85-5.56	0.34-1.02	0.05-0.15	36.89

*Depleted Uranium, [†]Natural Uranium, [‡]Low Enriched Uranium, [§]Medium Enriched Uranium, ^{||}High Enriched Uranium.

다. 이 값들은 일반적으로 우라늄 분석에 사용되는 ICP-MS의 검출한도가 1 ng L^{-1} 이하이며, 알파분광분석의 검출한도가 40 ng L^{-1} 이하인 점을 고려하였을 때[10,22] 측정의 민감도는 본 연구에서 설정한 유도조사준위를 만족시킬 수 있다.

^{235}U 의 농축도가 3.5%인 Type F 우라늄을 급성흡입 후 1개월 감시주기에서 DIL_R 은 $23.54\text{-}70.63 \mu\text{g L}^{-1}$ 이며, DIL_C 은 $14.57 \mu\text{g L}^{-1}$ 으로 이 경우 유도조사준위는 보수적인 값인 화학적 독성에 근거한 $14.57 \mu\text{g L}^{-1}$ 으로 산출되었다. 또한 동일한 우라늄을 만성흡입 시 1개월의 감시주기에서 소변시료 분석을 통한 방사선 위해의 조사준위를 2

mSv로 설정 시 유도조사준위는 방사선 위해에 근거한 $23.36 \mu\text{g L}^{-1}$ 으로 산출되나, 방사선 위해의 조사준위를 6 mSv 설정 시 유도조사준위는 화학적 독성에 근거하여 $43.33 \mu\text{g L}^{-1}$ 으로 산출되었다.

Type M 천연우라늄 급성흡입 후 1주일의 감시주기에서 DIL_R 은 $19.83\text{-}59.51 \mu\text{g L}^{-1}$ 이며, DIL_C 은 $16.40 \mu\text{g L}^{-1}$ 으로 이 경우 유도조사준위는 보수적인 값인 화학적 독성에 근거한 $16.40 \mu\text{g L}^{-1}$ 으로 산출되었다. Type M의 천연우라늄을 만성흡입 시, 1주일 감시주기에서 DIL_R 은 $2.33\text{-}7.00 \mu\text{g L}^{-1}$, DIL_C 은 $78.79 \mu\text{g L}^{-1}$ 으로 이 경우 유도조사준위는 보수적인 값인 방사선 위해에 근거한 $2.33\text{-}7.00 \mu\text{g L}^{-1}$ 으로

로 산출되었다.

4. 결론

방사성물질 섭취에 있어 조사준위 설정은 방사선작업 종사자의 보건위해를 방지하기 위해 필요하며 국내 설정에 맞게 적용할 수 있는 합리적인 조사준위의 수치적 기준을 마련해야 할 필요가 있다. 특히, 우라늄 취급시설에서 종사자의 작업관리를 위해서는 방사선 위해 및 화학적 독성을 고려한 조사준위 설정이 요구된다. 본 연구에서는 국내 원자력안전법, 산업안전보건법 및 최신 연구에 근거하여 우라늄 취급 종사자의 우라늄 섭취로 인한 방사선 위해 및 화학적 독성으로 인한 보건위해를 동시에 방지하기 위한 유도조사준위를 산출하였다. 방사선 위해의 조사준위는 국내 원자력안전위원회 고시의 내부피폭방사선량의 측정대상에 대한 예탁유효선량 및 ISO 20553에 조사준위에 근거하여 연간 2 mSv-6 mSv 의 예탁유효선량을 설정하였다. 화학적 독성의 조사준위는 최신 연구에 근거하여 0.3 $\mu\text{g g}^{-1}$ 의 신장의 우라늄 농도로 설정하였다. 우라늄 섭취형태, ^{235}U 의 존재비, 흡수형태 및 감시주기를 고려하였으며, ICRP biokinetic model을 사용하여 내부피폭 감시프로그램 즉 공기 중 우라늄 농도측정, 폐 측정 및 소변시료 분석에 따라 각각 방사선 위해의 유도조사준위 및 화학적 독성의 유도조사준위를 산출하여 보수적인 값을 선택하였다.

3.5% 농축우라늄을 취급하는 핵연료 가공시설에서 공기 중 우라늄 농도 측정을 통한 유도조사준위는 Type F, Type M 및 Type S 우라늄의 급성흡입 시 방사선 위해 및 화학적 독성을 근거로 산출된 유도조사준위 STEL의 값 0.6 mg m^{-3} 이 가장 보수적인 값으로 산출되었다. 또한 Type F 우라늄 만성흡입 시 화학적 독성에 근거한 15.21 $\mu\text{g m}^{-3}$ 으로 산출되었으며, Type M 및 Type S 우라늄에 대해서는 각각 방사선 위해에 근거하여 0.4-1.2 Bq m^{-3} 및 0.1-0.4 Bq m^{-3} 으로 산출되었다. 폐 측정을 통한 유도조사준위는 Type M 우라늄 급성흡입 및 만성흡입 시 6개월의 감시주기에서 각각 0.37-1.11 Bq, 0.39-1.17 Bq으로 산출되었으며, Type S 우라늄의 급성흡입 및 만성흡입 시 각각 0.30-0.91 Bq, 0.19-0.57 Bq으로 산출되었다. 그러나 이러한 유도조사준위들은 일반적으로 사용되는 폐 측정 기기인 germanium 검출기의 검출한도 이하의 수치이므로 폐 측정을 통해서 본 연구에서 설정한 조사준위를 만족시킬 수 없는 것으로 나타났다. 소변시료 분석을 통한 유도조사준위는 Type F 우라늄은 급성흡입 후 1개월 감시주기에서 화학적 독성에 근거한 14.57 $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 산출되었다. 또한 만성흡입 시 1개월 감시주기에서 IL_R 을 2 mSv로 설정 시 유도조사준위는 방사선 위해에 근거하여 23.36 $\mu\text{g L}^{-1}$ 으로 산출되었으며, IL_R 을 6 mSv 설정 시 유도조사준위는 화학적 독성에 근거하여 43.33 $\mu\text{g L}^{-1}$ 으로 산출되었다. Type M 우라늄은 급성흡입 및 만성흡입 시 1개월 감시주기에서 유도조사준위는 방사선 위해에 근거하여 각각 2.85-8.58 $\mu\text{g L}^{-1}$ 및 1.09-3.27 $\mu\text{g L}^{-1}$ 으로 산출

되었다.

감사의 글

본 연구는 원자력안전위원회 2012년도 원자력안전규제기술개발사업(과제번호: 2012-M5A4A1027/1033)의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. World Health Organization, Depleted uranium, sources, exposure and health effects, Department of Protection of the Human Environment, WHO/SDE/PHE/01.1, WHO Geneva, 2001.
2. 원자력안전위원회. 원자력안전법 시행령. 2013.
3. 원자력안전위원회. 원자력안전법 위원회 고시. 2012.
4. 고용노동부. 화학물질 및 물리적 인자의 노출기준. 고용노동부 고시. 2012.
5. U.S. National Research Council, Review of toxicologic and radiologic risks to military personnel from exposure to depleted uranium during and after combat. The National Academies Press, Washington, DC. 2008.
6. ISO. Monitoring of workers occupationally exposed to 5375 a risk of internal contamination with radioactive material, ISO 205553: 2006. 5376 International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2006.
7. Nuclear Regulatory Commission, Acceptable concepts, models, equations and assumptions for a bioassay program, Regu Guide 8.9, Washington, DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission; 1993a.
8. 한국원자력안전기술원. 방사선 안전규제기술 개발. KINS/GR-299. 2005.
9. Stradling GN, Hodgson A, Ansoborlo E, Berard P, Etherington G, Fell T, Rance E, Le Guen B. Industrial uranium compounds: Exposure limits, assessment of intake and toxicity after inhalation. NRPB Report W22, Chilton, UK, 2002.
10. Oak Ridge National Laboratory. Controlling intake of uranium in the workplace: Applications of biokinetic modeling and occupational monitoring data. ORNL/TM-2012/14, 2012.
11. International Commission on Radiological Protection, Individual monitoring for internal exposure of workers replaced of ICRP publication 54. ICRP publication 78. Oxford: Pergamon Press, 1997.
12. Department of Energy. Guide of good practices for occupational radiological protection in uranium facilities. DOE-STD-1136-2009. U.S Department of Energy Washington, D.C. 20585. 2009.
13. Nuclear Regulatory Commission, Standards for

- protection against radiation, Washington, DC: United States Government Printing Office; Title 10, Code of Federal Regulations, Part 20, Appendix B, 1991
14. International Commission on Radiological Protection. Supporting guidance document interpretation of bioassay data, ICRP Draft Guidance, 2006.
 15. International Commission on Radiological Protection. Human respiratory tract model for radiological protection, ICRP Publication 66, Oxford: Pergamon Press, 1994.
 16. International Commission on Radiological Protection. Report of the task group on reference man, ICRP Publication 23, Oxford: Pergamon Press, 1975.
 17. International Commission on Radiological Protection. Dose coefficients for intakes of radionuclides by workers, ICRP Publication 68, Oxford: Pergamon Press, 1994.
 18. International Commission on Radiological Protection. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides, part 3, ICRP Publication 69, Oxford: Pergamon Press, 1995.
 19. James A, Birchall A, Marsh J, Matthew P. User manual for IMBA professional plus, HPA and ACJ & Accociates, Inc, 2005.
 20. Kramer G. H, Hauck B, M, Allen S. A, Dantas B. M, Dantas A. L, Azeredo A, Lung counting: summing techniques to reduce the MDA, *Health Phys.* 2003;85:220-227.
 21. 한국원자력연구원. 방사선량 측정 및 평가기술 개발. KAERI/RR-2801/2006, 2007.
 22. Alexander CM. Depleted uranium properties, uses and health consequences. CRC Press, 2007.

Calculation of Derived Investigation Levels for Uranium Intake

Na-Rae Lee*, Seung-Jae Han*,†, Kun-Woo Cho*,†, Kyu-Hwan Jeong†, and Dong-Myung Lee*,†

*University of Science and Technology, †Korea Institute of Nuclear Safety

Abstract - Derived Investigation levels(DILs) were calculated to protect the workers from the effects of both radiological hazard and chemical toxicity by uranium intake. Investigation Levels(ILs) of committed effective dose of 2 mSv y^{-1} - 6 mSv y^{-1} and uranium concentration of $0.3 \mu\text{g g}^{-1}$ in kidney, based on Korean Nuclear Safety Act, Korean Occupational Safety and Health Act and current scientific studies of uranium intake were assumed. DILs of radiological hazard and chemical toxicity were then calculated based on the concentration of uranium in air of workplace, the lung monitoring and urine analysis, respectively. As a result, in case of the nuclear fuel fabrication plant where 3.5% enriched uranium is handled, derived investigation level(DIL) for the control of the concentration of uranium in the air of workplace assumed with 15-min acute inhalation was 0.6 mg m^{-3} for all types of uranium. DILs for the control of the average concentration of uranium in air of workplace, assuming an 8-hour workday, were $15.21 \mu\text{g m}^{-3}$ of Type F uranium, 0.41 - 1.23 Bq m^{-3} and 0.13 - 0.39 Bq m^{-3} for Type M and Type S uranium, respectively. DILs for the lung monitoring assumed with a period of 6-month interval were 0.37 - 1.11 Bq and 0.39 - 1.17 Bq in acute and chronic inhalation for Type M, respectively and 0.30 - 0.91 Bq and 0.19 - 0.57 Bq in acute and chronic inhalation for Type S, respectively. Since a detection limit of typical germanium detector for the measurement of ^{235}U activity is 4 Bq , DILs calculated for the lung monitoring were not appropriate. DILs for urine analysis, for which an interval was assumed to be 1 month, were $14.57 \mu\text{g L}^{-1}$ based on chemical toxicity after acute inhalation. In addition, acute and chronic inhalation of Type M were calculated 2.85 - $8.58 \mu\text{g L}^{-1}$ and 1.09 - $3.27 \mu\text{g L}^{-1}$ based on the radiological hazard, respectively.

Keywords : Uranium, Radiological hazard, Chemical toxicity, Monitoring programme, Investigation level, TLVs