지하수 중 우라늄의 위해성 평가에 관한 사례연구

연세대학교 보건대학원

환경관리학과

이 원 석

지하수 중 우라늄의 위해성 평가에 관한 사례연구

지도 신 동 천 교수

이 논문을 보건학석사 학위논문으로 제출함

2001 년 6 월 일

연세대학교 보건대학원

환경관리학과

이 원 석

이원석의 보건학석사 학위논문을 인준함

심사위원___________________인

심사위원___________________인

심사위원___________________인

연세대학교 보건대학원

2001 년 6 월 일

감사의 글

인생의 선배나 주위 어른들의 말씀에 ‘살아감에 있어서 학문을 익히는 시기는 돌아보면 가장 추억이 많이 남고 매우 중요한 과정이었다’라고 하시는 것은 앞으로 더욱 큰 사회의 작은 한 구성원으로서 보다 바쁘게 살아갈 일을 생각해야만 하는 사실 때문인 것 같습니다. 그러나 뒤돌아보면 추억보다 후회가 많이 남고 기쁨보다 미련이 더 많이 남는 건 주위의 소중한 사람들에 대한 감사의 마음과 시간의 중요성을 잃고 지내왔음을 깨닫게 됩니다.

학부 및 석사과정 동안 좌절과 갈등을 겪는 시기도 있었지만 이러한 과정이 저에게는 많은 성숙과 앞으로의 삶에 보다 진지한 마음가짐을 다질 수 있는 계기였으며 앞으로의 모든 생활에 보다 노력하고 성실한 마음으로 주위사람과 더불어 지내는 삶의 자세를 가져 보게 됩니다.

대학원 및 연구소 과정동안 ‘환경관리’전공을 이수하고 여러 환경연구사업과 연관된 프로젝트를 수행함에 있어서 환경보건의 중요성을 일깨워 주시고 항상 올바른 연구의 길을 인도해 주신 신동천 교수님, 정 용 교수님, 그리고 이종태 교수님과 임영욱 교수님, 이보영 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 특히 많이 부족한 논문을 끝까지 많은 지도와 관심으로 지켜봐 주신 신동천 교수님과 박성은 선생님 그리고 김창수 선생님께 머리 숙여 감사의 말씀을 드리고 싶습니다.

또한 대학원 과정동안 찾아 뵙지 못하여 송구스런 마음 한이 없지만 환경보건학을 처음 접하게 된 학부과정동안 격려와 인자한 말씀으로 지도해 주신 박종안 교수님, 한성현 교수님, 염윤기 교수님, 이종화 교수님, 손부순 교수님께도 항상 감사한 마음 잃지 않고 있음을 전하고 싶습니다.

환경공해연구소 생활을 하면서 환경 위해성 평가의 중요성과 환경위해성 평가 방법론을 익히는데 부족한 부분을 지적해 주고 친절히 조언해 주신 조성준 선생님, 양지연, 황만식 선배님께 감사 드리며 같은 학부 때부터 대학원까지 환경보건이라는 뜻을 같이 하여 생활할 수 있었던 진용이와 지호, 유일한 연구소 동기 창수, 후배 석재에게도 고맙다는 말과 좀 더 잘하지 못해 미안한 마음 함께 전하고 싶습니다.

또한 환경공해연구소외에 있지만 항상 웃는 얼굴로 대해주신 임남구 선배님과 재석이, 명일이를 비롯한 대학원내 학부 사람들에게도 같은 마음을 전합니다.

멋진 미소와 마음을 잃지 않는 호현씨를 비롯하여 지영이, 경숙이, 명현이, 용진이, 화성이, 효진이, 민정이, 문기씨, 혁표, 종훈이 모두 좋은 시간을 함께 할 수 있어서 매우 고마웠고 선배의 입장에서 ‘항상 공동생활에서 자신의 위치와 자신 본연의 위치를 함께 생각하는 사람들이었음’하는 말을 함께 전하고 싶습니다.

대학원과 연구소 생활을 마감하면서 가장 아쉬운 점은 환경 위해성 평가 방법론을 보다 많이 익히지 못한 것과 진행하던 지하수 프로젝트를 중도 하차한 것이라 생각합니다. 함께 했던 김 예신 선생님께 죄송하다는 말과 그 동안 여러모로 신경 써 주신 점 감사드리고 싶습니다.

바쁜 회사 업무임에도 불구하고 저의 논문 집필을 이해해 주시고 배려해 주신 선사장님과 안이사님, 고대리님을 비롯한 선우 ENG(주) 사원 여러분 모두에게도 감사 드립니다.

끝으로 무엇보다 제가 살아오면서 가장 감사의 말을 전하고 싶은 분들 아버지와 어머니, 누님들.... 말로다 표현할 수 없지만 앞으로 항상 가족을 생각하며 성공하는 저의 모습을 지켜봐 주시기 바랍니다. 그리고 오빠의 바쁜 일정들을 많이 이해해주고 도와준 나의 성희에게도 고맙고 사랑한다는 마음을 전한다.

2001년 7월

이 원 석 사룀

차 례

표 차 례

그 림 차 례

국 문 요 약

일반 대중에 대한 음용수 수질 기준의 적용시 우라늄이 방사성 물질이긴 하나, 발암원으로써 방사성 독성보다는 신장에 대한 화학적 독성이 더 크기 때문에 천연 우라늄은 방사선량보다 신장에서의 화학적 독성을 고려하여 제한함을 권고하고 있다. 그러나 우라늄 동위원소 ^{238}U, ^{234}U 및 ^{235}U은 방사선을 방출하는 물질 중의 하나로써 이러한 모든 방사성 핵종의 섭취에 기인한 내부 피폭은 인체에 상당부분 기여할 수 있기 때문에 천연 우라늄에 대한 인체 노출 평가 시에는 반드시 방사선 독성과 화학적 독성을 함께 고려해야 한다. 또한 미국 환경보호청(USEPA; US Environmental Protection Agency)의 기준이 상수로 공급되는 물을 전제로 한 것임을 고려할 때 음용수 중 최대오염수준(MCL; Maximum Contaminant Level)의 상회 여부보다는 지하수의 용도를 고려한 우라늄의 위해성 평가에 따른 규제안 및 위해도 관리방안의 제시가 필요하다.

본 연구의 목적은 음용수 용도로 사용되는 일부 지하수의 소규모 실태조사 결과를 바탕으로 지하수 중 우라늄의 섭취에 기인하여 발생할 수 있는 화학적 및 방사성 독성으로 인한 인체의 노출정도와 그 위해도를 산출하고 노출 변수(exposure parameter)들이 내포하고 있는 불확실성의 분석을 통한 통계적인 분포를 제시하며 국내·외의 음용수 중 우라늄의 위해성 평가 및 기준 설정에 관한 문헌들을 고찰하여 지하수 중 우라늄의 관리 방안을 위한 기초자료를 제공하는데 있다.

조사 대상은 대전시 동구 주거지역의 음용수 용도로 사용되며 직수로 공급되는 일부 지하수를 대상으로 하였으며 본 연구에서는 소규모로 조사된 25개

의 지하수 중 ^{238}U 동위원소의 분석결과(ICP-MS로 측정된 값은 화학적 양, ppb)의 산술평균 값인 0.23ppb에 대해 0.332pCi/㎍를 그리고 천연 우라늄 총량(total natural uranium)에 대해서는 0.79pCi/㎍의 전환계수를 이용하여 우라늄이 지니는 화학적 독성과 방사성 독성으로 인한 인체 노출량 및 위해도를 산출하였다.

우라늄의 섭취로 인한 연간유효선량 평가는 일반 인구집단에 대해 국제 방사선 보호 위원회(ICRP; International Commission on Radiological Protection)에서 제공하는 단위 섭취당 유효선량계수(Sv/Bq)를 이용하였으며 ^{238}U+D oral slope factor(risk/Bq) : $10^{-8.78}$을 이용하여 방사성 핵종의 노출에 기인한 일반 인구집단에서의 발암 위해도를 예측하였다. 또한 Wrenn 등에 의한 Pharmacokinetic model을 이용하여 우라늄이 함유된 지하수의 섭취시 신장에 축적되는 우라늄 농도(kidney burden, ㎍/g)를 산출하였다.

불확실성을 지니는 노출 변수들의 확률적 통계 분포에 대한 Monte Carlos Simulation을 수행하였으며 분석을 위해 Software Package Crystal Ball (Version 4.0)을 사용하였다. 본 연구에서 사용된 노출변수들은 가장 최근의 국외 문헌들로부터 수집한 것으로 사용된 변수 값들이 가지는 의미는 EF : Exposure Frequency(노출빈도, day/year), ED : Exposure Duration(노출 기간, year), f1 : Gastrointestinal transfer fraction(위장으로의 흡수 분율), IR_{water} : Daily Intake of Water(일일 음용수 섭취율, L/day), Conversion factor : 방사성 단위로의 전환계수(pCi/㎍)이다.

연구결과에서 산출된 연간유효선량, 발암 위해도 및 신장 내 우라늄의 농도의 값은 각각 2.21×10^{-4}mSv/year, 2.35×10^{-7} 및 2.45×10^{-5}㎍/g으로 나타났으며 이러한 값들은 점 추정치로써 잠재적인 위해성에 관한 정보를 제공하는데는 불충분하다고 판단되어 불확실성 분석에 따른 노출 변수들의 확률적인 통

계 분포 값(50%, 90% 및 95%)으로 각각 연간유효선량(1.01×10^{-4}, 1.99×10^{-4}, 2.44×10^{-4}mSv/year), 발암 위해도(2.65×10^{-8}, 1.04×10^{-7}, 1.57×10^{-7}) 및 신장 내 우라늄 농도(1.38×10^{-5}, 5.29×10^{-5}, 7.92×10^{-5}㎍/g)와 같이 제시하였다. 또한 발암 위해도의 점추정치(PE; point estimates)는 95%값에 비해 각각 1.5배 가량 과대 평가된 반면 연간유효선량과 신장내 우라늄 농도의 경우 각각 0.91, 0.31배 가량 과소 평가되어 잠재적인 위해성을 감안할 때 그림 3과 5에서 나타난 1.19×10^{-4}mSv/year(90%) 및 1.38×10^{-5} 5.29×10^{-5}㎍/g(50 90%) 또한 고려할 필요가 있다.

일반 대중에 대한 음용수 수질 기준의 적용시 천연 우라늄에 대해 신장 중 우라늄 농도에 대한 제한치는 0.02 3㎍/g의 범위를 지니며 음용수 섭취를 통한 우라늄의 신장 내 농도를 0.02㎍/g으로 규제할 것을 제안하고 있다(Wrenn, 1985). 0.02㎍/g은 0.1mSv(10mrem)의 연간유효선량과 상응하는 것으로 본 연구결과에서 나타난 신장내 우라늄 농도 7.92×10^{-5}㎍/g(95%)과 연간유효선량 2.44×10^{-4}mSv/year(95%)는 상당히 낮은 수준임을 알 수 있으며 1.57×10^{-7}(95%)의 위해도는 USEPA의 음용수 중 우라늄 MCL 30㎍/L, 30pCi/L에 해당하는 위해도 1×10^{-4}에 대해 약 10^{-3}의 수준으로 평가되었다.

본 연구의 조사 지역에 따른 조사규모 및 시료수의 한계로 인해 지니는 연구결과는 위해성 평가 방법의 제시를 위한 단순한 사례이며 국내 음용수로 사용되는 지하수 중 우라늄 농도를 대표하고 있지는 않다. 또한 사용된 노출 변수들은 최근의 국외 문헌들로부터 수집된 것으로 지하수 용도에 따른 적절한 실태조사와 국내 상황에 맞는 노출 변수를 적용한다면 불확실성의 감소 및 보다 현실적인 위해성 평가와 규제안과의 비교가 가능하다고 판단된다.

Ⅰ. 서론

최근 산업발전에 따른 환경오염으로 인하여 국민들의 환경에 대한 관심이 고조되고 지표수의 오염이 날로 심각한 상태를 나타냄에 따라 음용수로써 지하수를 선호하는 경향이 조금씩 증가하고 있으며 미국 및 유럽 등에서는 인공적으로 지표로부터 함양시켜 사용하는 유용한 지하자원으로서 가뭄에 의한 용수부족을 해결하기 위한 수단으로 또는 음용수 등으로 양적, 질적으로 중요한 위치를 점하고 있다(서울시정개발연구원, 1995).

일반적으로 음용수로 사용되고 있는 지하수는 여러 가지 수질검사를 통하여 그 인체 위해 여부를 확인하고 있으나, 음용수 중 방사성 핵종에 대한 검사는 그들의 현존농도가 극미량이라는 이유로 거의 이루어지지 않고 있는 실정이다(김창규 등, 1995). 그러나, 천연방사성물질인 우라늄은 수도수에 비해 지하수 중에 높은 농도로 존재할 수 있는 점을 주목하지 않을 수 없으며 인위적인 오염에 의한 것이 아닌 자연적인 현상으로써 우리가 원치 않아도 노출될 수밖에 없는 환경문제인 만큼 그 노출의 정도 및 위해성 여부를 파악하는 것은 매우 중요하다고 할 수 있다.

우라늄으로 인한 가장 주된 건강 영향은 용해성 우라늄 화합물의 화학적 독성에 기인한 신장의 손상이며, 둘째로 뼈에 침적된 우라늄의 방사성 붕괴산물과 연관된 영향으로써 골격계의 발암 유발을 들 수 있는데 동물실험 결과에 따르면 생식 및 발육 이상이 나타나는 것으로 보고되고 있으나 인체에서도 이와 같은 영향을 보이는 지는 알려져 있지 않다(USDOE, 2001). 그러나, 무시할 수 없는 방사성 독성(non- negligible radiotoxicity)을 지니는 우라늄 동위원소 ^{238}U, ^{234}U 및 ^{235}U은 방사선을 방출하는 물질 중의 하나로써(WHO, 1978;

Malcome-Lawes, 1979) 이러한 모든 방사성 핵종의 섭취에 기인한 내부 피폭은 인체에 상당부분 기여(UNACEAR, 1993; Eisenbud and Gesell, 1997)할 수 있기 때문에 천연 우라늄에 대한 인체 노출 평가 시에는 반드시 방사선 독성과 화학적 독성을 함께 고려해야 한다고 판단된다.

최근 음용수 중 방사성 물질의 기준 설정에 있어서 미국 환경보호청(USEPA; US Environmental Protection Agency)은 우라늄의 발암 위해성 보다는 신장에 대한 역치 독성(threshold toxicity)에 근거한 최대오염수준(MCL; Maximum Contaminant Level)의 설정을 제안하고 있으며(USEPA, 1991) MCL 개발에 관한 기초는 동물 실험으로부터 유추된 구강 참고치(Rfd; Reference Dose)의 적용에 두고 있다. RfD는 상대적으로 고농도의 양으로 실험 동물에 대해 생물학적 영향을 평가함으로써 산출된 값으로써 우라늄의 신장 독성에 대한 역치 특성을 설명하는 데에는 많은 불확실성을 내포하고 있으며 방사성 영향의 평가에 있어서 노출변수들이 가지는 다양한 특성과 잠재적인 위해성에 대한 보수적인 결과를 제공(USDOE, 1996)할 수 있으므로 우라늄의 신장독성 또는 방사성 독성의 평가 시에는 이러한 불확실성 또한 고려할 필요성이 있다.

국내의 몇몇 연구결과에 의하면 대전지역을 포함한 우라늄이 매장된 지역의 일부 지하수에서 우라늄 함량이 USEPA의 제안치를 초과하는 것으로 보고되고 있으나 USEPA의 기준이 상수로 공급되는 물을 전제로 한 것임을 고려할 때 기존에 조사된 지하수는 생활용수, 공업용수, 세차 및 기타 용도의 지하수와 약수등이 포함된 것으로 MCL 상회 여부에 대한 평가보다는 지하수의 용도를 고려하여 위해성 평가에 따른 기준치 설정 및 관리방안의 제시가 필요하다고 판단된다.

또한 USEPA에서는 먹는 물 기준으로 우라늄, α, β 입자, 라돈, 라듐에 대해 위해성 평가를 근거로 한 제안치를 제시하고 2000년대까지 단계적으로 기

준을 확정하고자 하고 있으며 몇몇 다른 나라의 경우에도 규제 제안치를 제시하고 있어 국내에서도 이와 관련한 다각적인 연구 및 대처방안이 필요한 시점이다.

따라서 본 연구는 대전시 동구 지역의 직수로 공급되며 음용수 용도로 사용되는 일부 지하수를 대상으로 우라늄 섭취로 인한 인체 위해 및 영향을 사례를 들어 평가하고 음용수 중 우라늄 규제안에 관한 사항들을 문헌 고찰을 통해 제시하고자 진행하였다.

그 세부적인 목적으로는

첫째 대전시 동구지역의 음용수 용도로 사용되는 일부 지하수 실태조사 결과를 사례로 들어 지하수 중 우라늄의 섭취로 기인하여 발생할 수 있는 화학적 및 방사성 독성으로 인한 인체의 노출정도와 그 위해도를 산출하고

둘째 음용수 섭취로 인한 우라늄의 인체노출정도 및 그 위해도를 산출함에 있어서 노출 변수(exposure parameter)들이 내포하고 있는 불확실성의 분석을 통한 통계적인 분포를 제시하며

셋째 국내·외의 음용수 중 우라늄의 위해성 평가 및 기준 설정에 관한 문헌들을 고찰하여 지하수 중 우라늄의 관리 방안을 위한 기초자료를 제공하는데 있다.

Ⅱ. 연구의 이론적 배경

1. 지하수 중 우라늄의 특성(Characteristics of Uranium in Ground Water)

지하수내 존재하는 우라늄은 천연우라늄으로 암석내 존재하는 미량의 광물로부터 용출된 것이다. 지하수내 존재하는 우라늄은 원자폭탄이나, 원자력발전소에서 나오는 우라늄의 방사성 피폭과는 근본적으로 다른 자연계에서 존재하는 자연 방사성 우라늄이다(USDOE, 2001).

표 1. 천연 우라늄의 방사선학적 특성

Isotope	Half-Life (years)	Alpha Particle Energy Mev	Isotopic (percent)	Activity (mBq/ μgU)	Activity Ratio $^{234}U/^{238}U$	Activity $^{235}U/^{238}U$
Natural	-	-	-	-	1.00	0.048
^{238}U	4.468×10^{9}	4.4147(23%)	99.2745	12.40	-	-
	-	4.196(77%)	-	-	-	-
^{234}U	2.450×10^{5}	4.724(28%)	0.0055	12.40	-	-
	-	4.776(72%)	-	-	-	-
^{235}U	7.037×10^{8}	4.364(11%)	0.7200	0.60	-	-
	-	4.395(55%)	-	-	-	-
Total	-	-	-	25.40	-	-

Ref : USDOE, 2001

우라늄은 은색 빛의 중금속으로 천연적이고, 흔히 편재되어 있으며 방사능을 지니는 순수 결정체이다. 또한 암석이나 토양 그리고 천연 물질 등에 주로 존재하며, 지구촌 모든 사람들이 날마다 섭취하고 흡입하는 공기나 물, 음식 등에서 소량으로 발견된다(USDOE, 2001).

천연 우라늄의 방사능 동위원소별 농도는 ^{238}U의 경우 99.275%, ^{235}U의 경우 0.72% 그리고 ^{234}U의 경우 0.005%에 해당하며(Lederer and Shirley, 1981) 방사능비의 경우 $^{235}U/^{238}U$는 0.046, $^{235}U/^{234}U$는 0.05로 이론적으로 물 중 ^{235}U의 방사능은 ^{238}U과 ^{234}U에 비해 무시할 만한 수준이라 할 수 있다. 또한 전통적으로 ^{235}U계열 붕괴과정 산물은 ^{238}U계열에 비해 그 선량학적 영향을 무시할 정도로 고려되어 왔다(UNSCEAR, 1982). 그러나 최근에 Lowe는 ^{235}U의 섭취로 인한 선량 또한 고려할 수준이라는 점을 지적하고 있다(Lowe, 1997). 그리고 ^{238}U 과 ^{234}U은 동일한 ^{238}U의 붕괴계열에 있지만 토양으로부터 물로의 수송에 영향을 미치는 과정이 다르며 물 중 방사능 평형이 같다고 가정할 수 없기 때문에 이들은 각기 평가하여야 한다(Banard, 1965; Ivanovich and Harmon, 1982; Remy and Lemaitre, 1990).

^{238}U 과 ^{234}U의 방사성 평형 또는 영년 평형(secular equilibrium)은 100만년 이상이 된 암석과 광물에서 일어나며 $^{234}U/^{238}U$의 활동도 비는 1이 된다. 그러나 물에서는 암석-물 반응에 의하여 이 활동도 비는 1보다 커지게 되며 반대로 암석에서는 1보다 작아지게 된다(Herranz M, 1999).

지표수, 가정수, 지하수 중 평균 우라늄의 농도는 각각 1, 2, 3pCi/L의 수준으로 나타나며 평형상태에서 1㎍의 우라늄은 0.68pCi의 방사능을 지닌다. 그러나 음용수 중 우라늄은 대부분 평형이 아니며 물리적, 화학적 인자들에 의존하기 때문에 그 특정 방사능(SA; Specipic Activity)은 매우 다양하게 나타날 수 있다(Frederick MP, 2000).

미국 캘리포니아주에서는 음용수 중 우라늄의 측정에 있어서 화학적 정량과 방사능 측정기술 모두에 대해 승인하였으며, 주어진 수원에서 실제적인 우라늄 함량을 결정하기 위해서는 측정된 단위에 대한 전환계수(conversion factor)가 필요하다(Carolyn TW, 1999)고 보고하고 있다. 총 우라늄에 대한 각 우라늄 동위원소의 specific activity와 conversion factor는 다음의 표 2와 같다.

표 2. 우라늄 동위원소들이 갖는 방사능 및 전환계수

Total U	Specific Activity	Conversion Factor
^{238}U	0.335pCi/㎍	0.335pCi/㎍ × 0.992745㎍/g
		= 0.332pCi/㎍(0.0123Bq/㎍) total U
^{235}U	2.16pCi/㎍	2.160pCi/㎍ × 0.00720㎍/g
		= 0.0156pCi/㎍(0.000576Bq/㎍) total U
^{234}U	6.24pCi/㎍	6.240pCi/㎍ × 0.000055㎍/g
		= 0.343pCi/㎍(0.0127Bq/㎍) total U
Sum		0.691pCi/㎍(0.0256Bq/㎍) total U

USEPA의 기준은 ^{234}U이 모핵종 ^{238}U과 평형을 이루다고 가정하여, 총 우라늄에 대한 ^{238}U의 전환 계수 0.332pCi/㎍(0.0123Bq/㎍) total U을 ^{234}U과 ^{238}U 모두에 대해 동일하게 사용한다. 이러한 결과에 따라 총 우라늄에 대한 전환계수는 0.68pCi/㎍(0.025Bq/㎍)이 되며, 이는 캘리포니아 기준을 설정하는데 사용되었다. 그러나 음용수를 통한 우라늄의 섭취시 그 인체 노출량 및 위해정도를 평가함에 있어서 어떤 물에서는 ^{234}U로부터의 방사능이 ^{238}U보다 높은 경우(즉, ^{234}U/^{238}U activity ratio > 1)가 있는데, 이런 경우에 화학적 정량으로부터 0.68pCi/㎍을 고려하여 산출된 방사능 값은 오차가 있을 수 있다. 따라서

이러한 오차를 줄이기 위해 수행된 연구결과로써 최근 캘리포니아에서는 전환 계수(conversion factor)**를** 0.79pCi/**㎍로 제시**(CDHS, 1997)**하고 있다**.

2. 우라늄의 위해성 정보(Risk Information of Uranium)

우라늄으로 인한 건강영향은 발암 영향(Cancer Effect)과 비발암 영향(Non-Cancer Effect)으로 구분할 수 있으며 이러한 건강영향의 구분은 우라늄의 특성상 우라늄 동위원소가 지니는 방사선으로 인한 방사성 위해와 중금속으로써 우라늄이 지니는 화학적 위해성에 근거한 것이라 할 수 있다.

1) 방사성 위해성

USEPA는 우라늄을 확인된 인체발암물질로 분류(USEPA group A)하고 있으며 우라늄 및 다른 방사성 핵종으로부터의 발암 위해에 대한 안전한 한계허용농도는 없다고 인식하고 있다. 또한 USEPA는 1991년 우라늄에 대한 proposed MCLG를 0(zero)으로 진술하고 있다.

우라늄으로 인한 건강 영향은 단지 체내에 유입되었을 경우에만 발생할 수 있으며 외부적인 감마선으로 인한 것은 일반적으로 주된 노출원이 아니다. 가장 주된 건강 영향은 용해성 우라늄 화합물의 화학적 독성에 기인한 신장의 손상이며, 둘째로 뼈에 침적된 우라늄의 방사성 붕괴산물과 연관된 영향으로써 골격계에 암을 유발할 수 있는 것으로 알려져 있으며 동물실험 결과에 따르면 생식 및 발육 이상이 나타나는 것으로 보고되고 있으나 인체에서도 이와 같은 영향은 보이는 지는 알려져 있지 않다(USDOE, 2001).

방사성 물질에 대한 인체건강영향은 연간 유효 선량(mSv/year)의 추정에 의해 평가된다(Lens et al, 1998). 방사성 동위원소들은 외부 피폭으로 인한 선량뿐 만 아니라 흡입 및 섭취에 기인한 내부 피폭에 관여하는데 전 지구상의 천연 방사선에 대한 연간평균유효선량은 약 2.2mSv/year로 추정되며 인도, 이

란 및 브라질과 같은 일부 지역은 그 선량이 약 100배 가량 높게 나타나기도 한다(ACWA, 2000).

모든 방사선원으로부터 일반 대중의 만성적 노출에 대해서, ICRP(1985)와 NCRP(1987)는 최근 1mSv(0,1 rem)의 연간유효선량당량 제한치를 권고하고 있다. 음용수의 섭취로부터 권고되는 연간유효선량당량의 참고수준은 0.1mSv이며 이 참고수준은 천연 방사성물질의 연간평균유효선량의 5%이하의 값(WHO, 1993)이다.

우라늄을 취급하는 작업자들의 경우 흡입이 가장 큰 노출경로가 되나 일반 인구집단의 경우 물을 통한 피부의 접촉이나 섭취에 의한 노출이 대부분이라 할 수 있다(Carolyn TW, 1999). 천연 방사능 물질이 존재하는 지역에서 년간 ^{238}U의 섭취량은 약 5Bq/y(UNSEAR, 1977)으로 추정하고 있으며, 이러한 추정치에 대해 음용수가 기여하는 비율이 약 11%임을 밝힌 연구가 있다(Herranz M, 1997).

2) 화학적 위해성

우라늄은 음식이나 물, 또는 공기를 통해 체내에 유입될 수 있는데 일반 인구집단에서 내부적으로 우라늄이 침적되는 주된 경로는 음식이나 물의 섭취를 통한 위장관 흡수이다. 섭취후 대부분의 우라늄은 수일이내에 체내에서 배설이 되며 혈류에 쉽게 유입되지는 않는다. 매우 적은 분율(2 5%)만이 혈류로 흡수되고 뼈나 신장에 선택적으로 침적이 된다. 신장으로 침적된 대부분의 우라늄은 수일정도 체류(in urine)하는 반면, 뼈에 침적될 경우 수년동안 남아 있을 수 있다. 흡입의 경우 일반적으로 극소량만이 폐포에 침투할 수 있으며 수년간 체류할 수 있다(US DOE, 2001).

동물 및 인간에게서 우라늄의 화학적 독성으로 인한 주요 영향은 신장염이며(Hursh and Spoor, 1973) 우라늄의 축적 및 독성 작용의 주된 부위는 신장과 뼈이다(Yuile, 1973; Stevens et al, 1980; Morrowet al, 1982). 우라늄의 신체 유입시 약 80%가 뇨와 배설물을 통해 배설이 되고, 신장과 뼈에 각각 10% 가량 축적이 되며, 다른 조직들에 매우 소량으로 존재하게 된다(NRC, 1983). 장기간의 만성적인 노출로 인한 우라늄의 가장 주된 축적 부위는 뼈이다(Wrenn and Singh, 1982).

우라늄의 비발암 영향에 대한 잠재성을 추정하기 위한 독성값은 참고치(RfD : reference dose)로 정의 될 수 있다. RfD란 건강에 대한 악영향이 없이 매일 노출되는(평생에 걸쳐) 가장 높은 용량의 추정치이다. 이러한 RfD는 상대적으로 고농도의 양으로 실험 동물에 대해 생물학적 영향을 평가함으로써 산출된 값으로써, 그 결과는 인간에 대해 mg/ kg-day의 단위로 적용된다. 인체에 대한 비발암 영향을 추정하기 위해 사용되는 RfD값은 0.003mg/ kg-day이다.

RfD는 Maybard와 Hodge가 보고한 실험용 토끼에 대한 만성적인 연구 결과를 사용하여 얻어진 LOAEL값에 불확실성 상수 1000을 적용하여 개발된 것으로 산출식은 다음 식 1)과 같다.

$$RfD = \frac{LOAEL}{Uncertainty\ factor} = \frac{3mg/kg/day}{1000} = 0.003mg/kg/day \quad \text{....식 1)}$$

ICRP에서는 1964년 신장독성을 정의하는 적절한 end points로 신장 조직의 생리적 기능의 손상이나 세포를 파괴하는 threshold value값 3μg/ g을 채택하였으며(Kocher, 1989) 이는 산업적으로 노출되는 작업자들의 신장 장애를 보호

하는데 충분한 수준으로 평가되었다. 그러나, 보다 최근의 연구에 의하면 신장 장애에 대한 생화학적인 증거들이 보다 많이 관찰되면서 안전계수 10이나 그 이상을 적용하여 신장독성에 대한 역치 값을 내려야 한다고 제안하고 있다 (ATSDR, 1990).

Wrenn 등은 음용수의 섭취를 통한 우라늄의 신장 내 농도를 0.02㎍/g으로 규제할 것을 제안하고 있으며(Wrenn, 1985) 일반인구집단의 보호를 위한 이러한 신장 내 우라늄의 농도(kidney burden, ㎍/g)는 1.0㎍/g의 역치 값에 안전계수 50을 고려하고 있다.

표 3. 우라늄의 섭취에 기인한 만성적인 화학적 영향에 대한 참고 수준

Reference Level	Notes	Source
Soluble Compounds		
i) 0.003mg/kg/day	Based on a LOAEL of 3mg/kg/day and an uncertainty factor of 1000	EPA(2000) Maynard and Hodge(1949)
ii) 0.002mg/kg/day	Based on an intermediate-duration (91days) oral exposure of rabbits to a soluble uranium compounds	ATSDR(1999); Gilman et al(1998)
Insoluble Compounds		
i) 0.003mg/kg/day	Same as for soluble compounds	EPA(2000), Maynard and Hodge(1949)
ii) compound-specific based on absorption	-	ATSDR(1999); Gilman et al(1998)

Ref : USDOE, 2001

3. 음용수 중 우라늄에 관한 지침(Guideline for Uranium in Drinking Water)

1) 우라늄 최대오염수준 설정의 기원(Derivation of Uranium MCL)

캘리포니아 MCL에서는 12개월 간의 실험용 토끼의 신장독성에 관한 연구를 미연방정부에서 제안하고 있는 MCL에서는 30일에 거친 신장독성 연구를 그 기초로 하였으며 이는 비록 우라늄이 방사성 물질이긴 하나, 발암원으로써의 방사성 독성보다는 신장에 대한 화학적 독성이 더 크기 때문이다(Carolyn TW, 1999).

MCL을 산출하는데 사용되는 식은 다음과 같다.

가) The California MCL

$$= \frac{NOAEL \times body\ weight \times RSC}{uncertainty\ factor \times water\ consumption}$$

$$= \frac{0.2mg/kg\text{-}d \times 70kg \times 0.5}{100 \times 2L/d}$$

= 0.035mg/L

= 35μg/L × 0.68pCi/μg

= 23.8pCi/L(0.881Bq/L)

20pCi/L(0.74Bq/L)

나) Proposed federal MCL

$$= \frac{LOAEL \times body\ weight \times RSC}{uncertainty\ factor \times water\ consumption}$$

$$= \frac{2.8mg/kg\text{-}d \times 70kg \times 0.2}{100 \times 2L/d}$$

= 0.02mg/L

= 20μg/L × 1.3pCi/μg

= 26pCi/L(0.96Bq/L)

30pCi/L(0.74Bq/L)

성인의 평균 체중(70kg) 및 일일 음용수 섭취율(2L/day)은 동일하게 적용을 하였으며 상대적 기여인자(RSC; Relative Source Contribution), 불확실성

상수(Uncertainty Factor), NOAEL(No Observed adverse effect level), LOAEL(Lowest Observed adverse effect level) 및 방사능 전환계수(Conversion Factor)는 그 적용을 달리하였다.

캘리포니아 MCL에서 적용된 방사능 전환계수는 평형 상태를 가정한 0.68pCi/㎍을 적용함에 반해 Proposed federal MCL에서는 1.3pCi/㎍을 적용(USEPA, 1985)하였는데 앞에서 언급한 바와 같이 최근 캘리포니아에서는 전환계수(conversion factor)를 0.79pCi/㎍로 제시(CDHS, 1997)하고 있다.

2) 우라늄의 최대오염수준과 관련한 위해도

USEPA는 우라늄 규제를 위한 MCL을 설정시 비용-효과적인 측면을 고려하여 몇가지 선택안과 관련한 위해도를 제시하고 있는데(USEPA, 2000). 음용수 중 우라늄 MCL의 선택안에 따른 관련 사항은 다음의 표 4와 같다.

표 4. 음용수 중 우라늄 MCL의 선택안과 관련된 위해도 비교

MCL	Comment	Associated cancer risk
20㎍/L, 20pCi/L	Protective of kidney toxicity using 100-fold uncertainty factor	5×10^{-5}
40㎍/L, 40pCi/L	twice the protective level for kidney toxicity	1×10^{-4}
80㎍/L, 80pCi/L	four times the protective level for kidney toxicity	2×10^{-4}

Ref : Frederick WP, 2000

3) 음용수 중 우라늄의 규제안

USEPA는 음용수 중 우라늄의 규제를 위하여 Safe Drinking Water Act(SDWA)에 대해 1996년 그 개정안을 요구하였다. 우라늄에 대한 proposed rule은 1991년 2월에 공포되었으며, 2000년 4월 Notice of Data Availability(NODA)에서 새로 개정이 되었다.

표 5. 우라늄에 대한 음용수 규제치

Entity	Value μg/L(pCi/L)
USEPA 1991 proposed MCLG	Zero
OEHHA proposed public health goal	0.2
World Health Organization guideline	2
OEHHA health protective level based on animal data	3
Health Canada 1998 proposed MAC	10
Health Canada IMAC* (expected 2000)	20
California MCL	20
USEPA 1991 proposed MCL	20
Consensus from USEPA 1998 Uranium workshop	20
USEPA Preferred MCL option discussed in Apr. 21. 2000, NODA	20(20)
USEPA Alternative MCL option discussed in Apr. 21. 2000, NODA	40(40) ; 80(80)
Health Canada 1988 MAC	100

OEHHA - California Office of Environmental Health Hazard Assessment,
MAC - Maximum Allowable Concentraion,
NODA - Notice Of Data Availability
*An interim MAC(IMAC) is being set above the propsed MAC based on economic considerations.
Ref : Frederick WT, 2000

USEPA는 우라늄의 화학적 독성(μg/L)과 발암 영향(pCi/L) 모두에 근거한 규제안을 제안하고 있으며 어떤 수 체계에서 각 동위원소의 상대적인 양을 결정하기 위해서 동위원소 분석을 수행하려 할 때, 우라늄 농도의 비는 알려져 있기 때문에 그 수 체계에 가장 비용-효과적인 측면에서 효율적인 분석 방법을 선택하는 사항 또한 매우 중요하다(Frederick WP, 2000).

USEPA는 최종적으로 2000년 7월 Federal Register에 음용수 중 방사성 물질에 대한 규제안을 공표하였으며 음용수 중 우라늄으로 인한 건강 위해성의 균형에 근거한 최종 MCL은 비용-효과적인 측면을 고려하여 30μg/L(30pCi/L)으로 제안하고 있다(Sharfenaker, 2001).

표 6. 우라늄 규제와 관련된 기준, 최적화 기술 및 건강영향의 일반 대중에 대한 고시

Radionuclide	MCL	MCLG	BAT	Standards Health Effects Language for CCRs and Public Notification
Uranium	30μg/L	Zero	Ion exchange Lime softening, reverse osmosis, enhanced coagulation/filtration	Some people who drink water containing in excess of the MCL over many years may have an increased risk of getting cancer and kidney toxicity

BAT - Best Available Technology
MCL - Maximum Contaminant Level,
MCLG - Maximum Contaminant Level Goal
CCRs - Consumer Confidence Reports.
Ref : Sharfenaker, 2001

이 새로운 MCL 30㎍/L은 MCL을 설정하는 1996년 음용수법(SDWA, Soft Drinking Water Act)의 수정조항 하에 USEPA가 처음으로 MCL 설정에 권한을 지닌 것으로 방사능 전환 계수는 0.9pCi/㎍을 사용하였으며 30㎍/L(30pCi/L)에 해당하는 위해도를 1×10^{-4}으로 설정하고 있다(ACWA, 2001).

전환계수 0.9pCi/㎍을 사용할 경우 30㎍/L에 해당하는 방사능 농도값은 27pCi/L이나 이는 매우 드물게 높은 값을 적용한 것으로써 반드시 30㎍/L(30pCi/L)가 초과하지 않도록 요구하고 있다(Sharfenaker, 2001).

Ⅲ. 연구방법

1. 지하수 시료의 채수 및 분석

1) 시료의 채수 및 전처리

대전시 동구 주거지역의 25개 가구를 대상으로 직수로 공급되며 음용수로 사용하는 지하수를 약 20분정도 연속적으로 물을 틀어 배관 등에 머물러 있는 지하수를 흘려보낸 후 1L 용기에 채수 후 시료용기로의 흡수 및 방해요인 방지를 위해 원 시료에 총 시료량의 1/100에 해당(5ml)하는 질산(YAKURI Pure Chemicals Co,. Ltd., 특급시약)을 첨가하여 산성화시킨 후 보관하였으며 분석을 위해 Whatman사의 0.45㎛의 PTFE Syrige Filter를 이용하여 시료를 여과한 뒤 3ml borosilicate tube에 초순수(HPLC용)로 5배 희석하여 냉장 보관하였다.

2) 시료의 분석

모든 시료에 대한 우라늄의 분석은 대전시 유성구에 위치한 한국원자력안전기술연구원(KINS : Korea Institute of Nuclear Safety)의 환경방사능 평가실에 의뢰하였으며 분석기기로는 Ultrasonic nebulizer(U-5000 AT, Cetac Tec. Inc., USA)가 장착된 HR-ICP-MS(High Resolution - Inductive Coupled Plasma - Mass) instrument (Plasma Trace 2, Micromass Co., UK)가 사용되었다. 분석기기로 사용된 ICP-MS의 분석시 조건은 표 7과 같다.

표 7. ICP-MS의 분석 조건

Mass (^{235}U)	:	238.051
Sample Introduction type	:	Liquid
Collector	:	multiplier
Dwell Time	:	20
Width Points	:	100
Peak Width	:	2.0
Resolusion	:	A

2. 지하수 중 우라늄의 섭취로 인한 위해성 평가

1) 방사선으로 인한 인체 노출(Radiation exposure)

가) 우라늄의 섭취로 인한 연간유효선량 평가

일반 인구집단에 대해 ICRP 72(ICRP, 1996)에서 제공하는 단위 섭취당 유효선량계수(Sv/ Bq)를 이용하여 우라늄의 섭취에 기인한 연간유효선량을 산출하였다.

나) 우라늄의 섭취로 인한 발암 위해도 예측

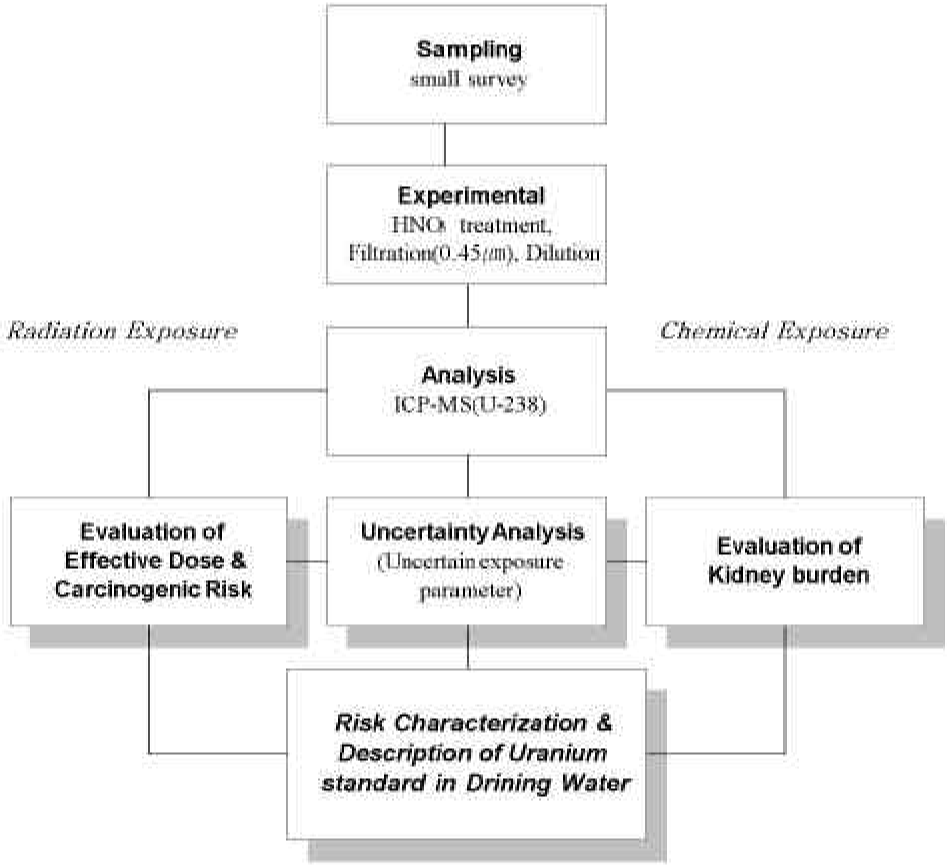
^{238}U+D oral slope factor(risk/Bq) : $10^{-8.78}$을 이용(ORNL, 1994)하여 방사성 핵종의 노출에 기인한 일반 인구집단에서의 발암 위해도를 예측하였다.

2) 중금속으로 인한 화학적 인체 노출(Chemical exposure)

Wrenn 등에 의한 Pharmacokinetic model(Wrenn et al, 1985)을 이용하여 우라늄이 함유된 음용수의 섭취시 신장에 축적되는 우라늄 농도(kidney burden, μg/g)를 산출하였다.

3) 노출변수들의 불확실성 분석

불확실성을 지니는 노출 변수의 확률적 통계 분포에 대한 Monte Carlos simulation을 수행(10,000 trial)하였으며 분석을 위해 software package Crystal Ball, Version 4.0(Decisioneering Inc, 1997)을 사용하였다.



Sampling
small survey
Experimental
HNO3 treatment,
Filtration(0.45㎛), Dilution
Radiation Exposure
Chemical Exposure
Analysis
ICP-MS(U-238)
Evaluation of
Effective Dose &
Carcinogenic Risk
Uncertainty Analysis
(Uncertain exposure
parameter)
Evaluation of
Kidney burden
Risk Characterization &
Description of Uranium
standard in Drining Water

그림 1. **연구의 틀**

Ⅳ. 연구결과

1. 지하수 중 우라늄 분석 결과

조사지역의 음용수 용도로 사용되는 일부 지하수 중 우라늄을 분석한 결과는 다음의 표 8과 같으며 조사시료(n=25)의 분포를 그림 2와 같이 히스토그램으로 나타내었다.

표 8에 나타난 우라늄 분석결과는 3회에 걸친 측정값의 산술평균치이며 ICP-MS로 측정된 mass(ppb)의 값으로부터 전환계수를 이용하여 방사성 단위로 전환한 것으로써 ^{238}U이 지니는 specific activity 0.335pCi/㎍에 구성비 0.992745를 곱한 0.332pCi/㎍를 적용하여 산출한 것이다. natural uranium의 경우 최근에 캘리포니아에서 연구된 전환계수 0.79pCi/㎍을 이용하였다.

조사 지역의 지하수 중 ^{238}U의 산술평균치는 0.23ppb(0.08pCi/L)로 나타났으며 전환계수 0.79pCi/㎍을 적용할 경우 total natural uranium 농도는 ^{238}U의 산술평균치에 대해 약 0.18pCi/L이었다.

표 8. 지하수 시료의 우라늄 분석 결과

우라늄 농도 \ 통계량	산술평균	표준편차	기하평균	최소값	중위수	최대값
^{238}U(ppb)	0.23	0.09	0.21	0.06	0.24	0.46
^{238}U(pCi/L)	0.08	0.03	0.07	0.02	0.08	0.15
Natual Uranium (pCi/L)	0.18	0.07	0.17	0.05	0.19	0.36

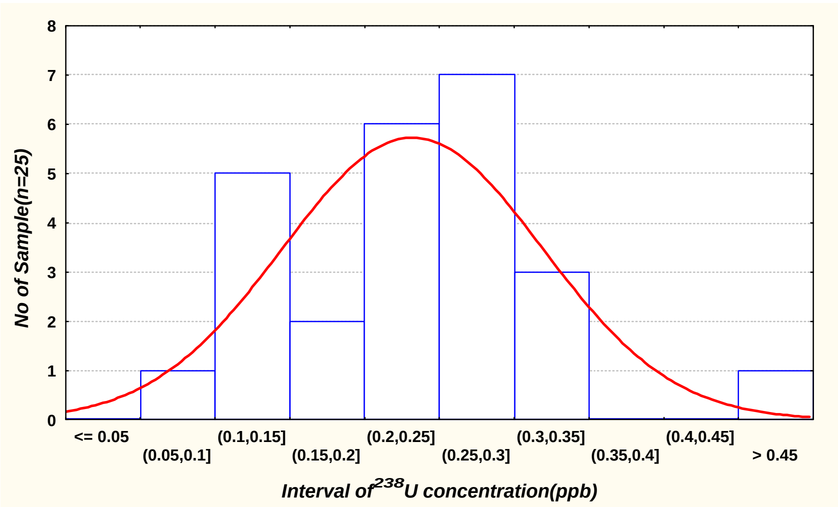


그림 2. 조사지역 우라늄 농도에 대한 히스토그램

2. 지하수 중 우라늄의 섭취로 인한 위해성 평가

음용수로 사용되는 지하수를 대상으로 조사한 우라늄의 농도로부터 인체 노출량 및 위해 정도를 평가함에 있어서 어떤 물에서는 ^{234}U로부터의 방사능이 ^{238}U보다 높은 경우(즉, $^{234}U/^{238}U$ activity ratio)가 있는데, 이런 경우에 화학적 정량으로부터 물 중 방사능 평형이 같다고 가정한 0.68pCi/㎍을 이용하여 산출된 방사능 값은 오차가 있을 수 있다. 따라서 최근 캘리포니아에서는 이러한 오차를 줄이기 위해 수행된 연구결과로써 0.79pCi/㎍을 제시(CDHS, 1997)하고 있는데 본 연구에서는 ^{238}U 동위원소의 분석결과(ICP-MS로 측정된 값은 화학적 양, ppb)에 대해서는 0.332pCi/㎍를 그리고 Natural Uranium 총량에 대해서는 0.79pCi/㎍의 전환계수를 이용하여 우라늄이 지니는 화학적 독성과 방사성 독성으로 인한 인체 노출량 및 위해도를 산출하였다.

1) 방사선으로 인한 인체 노출(Radiation exposure)

가) 우라늄의 섭취로 인한 연간유효선량 평가

ICRP는 일반 인구집단의 방사선 노출에 대해서 1mSv/year의 선량한계를 권고(ICRP, 1991)하고 있으며 방사성 물질에 대한 인체건강영향의 평가는 연간유효 선량(mSv/year)의 추정에 의해 평가한다(Lens et al, 1998).

ICRP 72에서 제공하는 일반 인구집단(성인)에 대한 우라늄의 단위 섭취 및 흡입시 인체노출에 대한 유효선량계수는 다음의 표 9와 같다.

표 9. 일반 인구집단(성인)에 적용되는 우라늄의 유효선량계수(Sv/Bq)

^{238}U series	Effective dose coefficients for adults(Sv/Bq)			
	Inhalation			Ingestion
	F	M	S	
^{238}U	5.0×10^{-7}	2.9×10^{-6}	8.0×10^{-6}	4.5×10^{-8}
^{234}U	5.6×10^{-7}	3.5×10^{-6}	9.4×10^{-6}	4.9×10^{-8}
^{235}U series				
^{235}U	5.2×10^{-7}	3.1×10^{-6}	8.5×10^{-6}	4.7×10^{-8}

Ref : ICRP 72, 1996

US DOE에서 제시하고 있는 우라늄의 섭취시 연간 유효피폭선량에 대한 산출식(식 2))을 사용하여 조사지역 우라늄 농도의 산술평균 값인 0.23ppb인 우라늄이 함유된 물을 연간 일일 2L/day의 섭취율로 마신다고 가정할 경우 연간유효선량은 예 1)과 같이 산출된다.

Committed Effective Dose

$$= C \times IR \times EF \times IDC \quad \text{..식 2)}$$

Committed Effective Dose (mSv/year)		:	조직이나 기관에 대한 유효 선량
C	(Bq/L)	:	방사성물질의 농도
IR	(L/day)	:	일일 음용수 섭취율
EF	(day/year)	:	노출빈도 또는, 단위 노출시간당 노출의 수
IDC	(Sv/Bq)	:	연령별 섭취 선량계수

예 1) **조사지역 우라늄 농도의 산술평균 값에 해당하는 우라늄의 섭취시 연간유효선량** (mSv/year)

$$= \frac{0.23ug}{L} \times \frac{2L}{day} \times \frac{365day}{year} \times \frac{4.5 \times 10^{-8} Sv}{Bq} \times \frac{1Bq}{27pCi} \times \frac{0.79pCi}{ug} \times \frac{1000mSv}{1Sv}$$

$$= 2.21 \times 10^{-4} \ mSv/year$$

나) 국외의 우라늄 섭취시 연간유효선량 평가사례와의 비교

국외의 우라늄의 섭취시 연간유효선량을 평가한 문헌을 수집하여 본 연구의 산출치와 비교하고자 하였다(표 10). 본 연구 결과의 연간유효선량 값은 2.21×10^{-4}mSv/year(PE, Point Estimates)으로 국외에서 조사된 우라늄의 연간유효선량치와 유사한 수준을 보였다.

표 10. 국외의 우라늄 섭취시 연간유효선량 평가 사례

Radionuclides	Country	Usage	Daily intake of water	Committed Effective dose(mSv/year)	Reference
$^{238}U+^{234}U$	Northest Spain	Drinking (river water)	2L/day	1.1×10^{-3}	Pujol et al, 2000
^{238}U	Brazil	Agricultural (river water)	-	1.5×10^{-2} (adults) 1.0×10^{-2} (10years) 1.0×10^{-3} (1years)	Lene et al, 1997
^{238}U	Brazil	Drinking (spring water)	1.2L/day	1.4×10^{-4}	Mazzilli et al, 1998
^{238}U	Hong -kong	Drinking (Tap water)	2L/day	1.1×10^{-3}	Yu KN et al, 1999

다) 우라늄의 섭취로 인한 발암 위해도 예측

음용수를 통한 우라늄의 섭취로 인한 발암 위해도를 결정하기 위해서 Uranium oral slope factor(ORNL, 1994)**를 이용하였으며 방사성 핵종으로 기인한 일반 인구집단에서의 발암 위해도를 산출하는 식은 다음과 같다.**

$$Risk = 〔 SF_{(ing)} \times U_{(water)} \times ED \times EF \times IR_{(water)} 〕$$ ....식 3)

표 11. **발암 위해도 산출에 사용된 변수**

Parameter	Definition(units)	Default Value
$U_{(water)}$	Uranium concentration in groundwater simulant(Bq/ L)	-
ED	Exposure Duration(y)	30(EPA,1991)
EF	Exposure Frequency(d/ y)	350(EPA,1991)
$IR_{(water)}$	Water ingestion rate(L/ d)	2(EPA,1991)
$SF_{(ing)}$[a]	^{238}U+D oral slope factor(risk/ Bq)	$10^{-8.78}$(ORNL, 1994)

[a] ^{238}U+D includes the parent isotope and its short-lived radioactive decay(D) products

Ref : Elles MP et al, 2000

조사지역 우라늄 농도의 산술평균 값인 0.23ppb**의 우라늄이 함유된 물을 일일 섭취율** 2L/ day**로 가정하여 산출한 발암 위해도는 다음과 같다**.

예 2) **조사지역 우라늄 농도의 산술평균 값에 해당하는 우라늄의 섭취시 발암 위해도**

$$= \frac{0.23ug}{L} \times \frac{2L}{day} \times \frac{10^{-8.78}}{Bq} \times \frac{1Bq}{27pCi} \times \frac{0.79pCi}{ug} \times \frac{350day}{year} \times 30year$$

$$= 2.35 \times 10^{-7}$$

2) 중금속으로 인한 화학적 인체 노출(Chemical exposure)

음용수 섭취시 신장에 축적되는 우라늄 농도(kidney burden, ㎍/g)는 다음 Wrenn 등에 의한 Pharmacokinetic model(Wrenn et al, 1985)에서 제시하는 식 4)을 이용하여 산출할 수 있다.

$$\text{Kidney Burden } (\mu g/g) = \frac{C_w \times I_w \times f_1 \times \alpha \times T \times M_k}{u \times \log_2} \quad \cdots\cdots \text{식 4)}$$

C_w	:	수중 우라늄 농도(㎍/L or ppb)
I_w	:	일일 음용수 섭취율(성인에 대해 약 2L/d로 가정)
f_1	:	소화관에서 혈액으로의 이전률(1.22%)
α	:	혈액에서 신장으로의 이전률(7.70%)
T	:	신장 내 우라늄의 반감기(12.2일)
u	:	신장의 질량(310 g)
M_k	:	불확실성인자(0 1.0, 보수적인 입장에서 1.0으로 가정)

조사지역 우라늄 농도의 산술평균 값인 0.23ppb**의 우라늄이 함유된 물을 일일** 2L/day**로 섭취한다고 가정하여 신장내 우라늄 농도를 산출하였다**.

예 3) **조사지역 우라늄 농도의 산술평균 값에 해당하는 우라늄의 섭취시 신장에 축적되어 나타나는 신장내 우라늄 농도**

$$= \frac{0.23\mu g}{L} \times \frac{2L}{day} \times \frac{12.2day}{310g} \times 0.693 \times 0.0122 \times 0.077$$

$$= 2.45 \times 10^{-5}\ \mu g/g$$

3. 노출 변수에 대한 불확실성 분석(Uncertainty Analysis of Exposure Parameters)

제 2장의 연구결과에서 산출된 값들은 점 추정치(point-estimates)로써 잠재적인 위해성에 대한 보수적인 결과를 제공(USDOE, 1996)할 수 있으므로 노출변수들의 불확실성 분석에 따른 통계적인 분포를 통해 잠재적인 위해성에 관한 정보를 제공할 필요가 있다. 본 연구에서 사용된 노출변수들에 대해 가장 최근의 국외 문헌들로부터 자료를 수집하여 불확실성에 대한 Monte Carlos simulation을 수행(10,000 trial)하였으며 분석을 위해 software package Crystal Ball, Version 4.0(Decisioneering Inc, 1997)을 사용하였다.

표 12. 불확실성 분석에 사용된 변수

Parameters	PE	Distribution	Mean	S.D.	Min.	Max	Likliest	Reference
EF(d/y)	350	Triangular	-	-	180	365	345	Smith, 1994
ED(y)	30	Lognormal	11.36	13.72	-	-	-	Israeli, 1992
IR_{water}(L/d)	2	Lognormal	1.26	0.66	-	-	-	Smith, 1994
f1	0.012	Lognormal	0.0186	0.0216	-	-	-	Wrenn, 1985
conversion factor(pCi/㎍)	0.67	Normal	0.79	0.10	-	-	-	Wrong, 1999

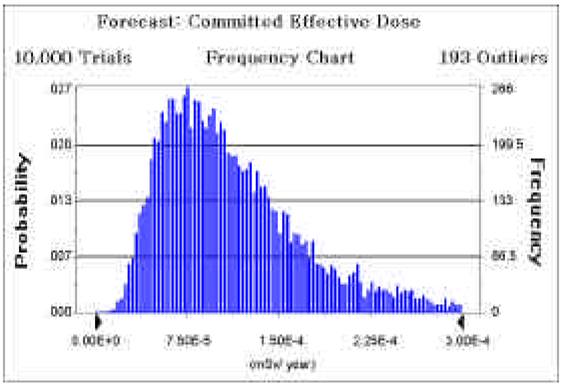
변수 값들이 가지는 의미는 EF : Exposure Frequency(노출빈도, day/year), ED : Exposure Duration(노출 기간, year), f1 : Gastrointestinal transfer fraction(위장으로의 흡수 분율), IR_{water} : Daily Intake of Water(일일 음용수

섭취율, L/day), conversion factor : 방사성 단위로의 전환계수(pCi/μg)이다.

1) 연간유효선량 예측에 따른 변수들의 불확실성 분석

노출 변수들에 대한 최근의 문헌을 수집하여 노출변수들의 불확실성 분석에 따른 연간유효선량의 확률적 통계 분포를 나타낸 결과는 그림 3과 같다.

노출 변수 EF, IR_{water} 및 conversion factor와 함께 조사지역의 우라늄 농도를 Software Package Crystal Ball(Version 4.0) Program상의 Assumption으로 설정하고 연간유효선량을 Forecast하여 산출한 결과 중앙값(50%)은 1.01×10^{-4}, 90 및 95%값은 각각 1.99×10^{-4}, 2.44×10^{-4} mSv/year의 값을 보였다.

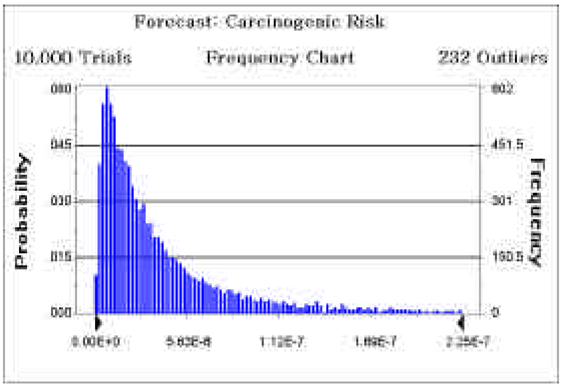


Percentile	mSv/year
25.0%	6.96×10^{-5}
50.0%	1.01×10^{-4}
90.0%	1.99×10^{-4}
95.0%	2.44×10^{-4}
97.5%	2.84×10^{-4}

그림 3. 불확실성 분석에 따른 연간유효선량의 확률적 통계 분포

2) 발암 위해도 예측에 따른 변수들의 불확실성 분석

노출변수들의 불확실성 분석에 따른 발암 위해도의 확률적 통계 분포를 나타낸 결과는 그림 4와 같으며 조사지역의 우라늄 농도와 함께 EF, ED, IR_{water} 및 conversion factor를 노출 변수로 사용하여 산출한 결과 중앙값(50%)은 2.65 $\times 10^{-8}$, 90 및 95%값은 각각 1.04 $\times 10^{-7}$, 1.57 $\times 10^{-7}$의 값을 보였다.

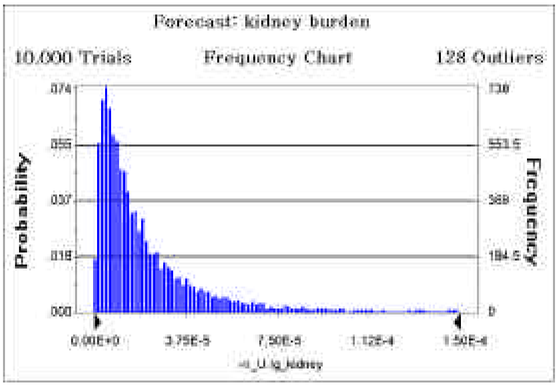


Percentile	Risk
25.0%	1.24 $\times 10^{-8}$
50.0%	2.65 $\times 10^{-8}$
90.0%	1.04 $\times 10^{-7}$
95.0%	1.57 $\times 10^{-7}$
97.5%	2.19 $\times 10^{-7}$

그림 4. 불확실성 분석에 따른 발암 위해도의 확률적 통계 분포

3) 신장내 우라늄 농도의 예측에 변수들의 불확실성 분석

노출변수들의 불확실성 분석에 따른 발암 위해도의 확률적 통계 분포를 나타낸 결과는 그림 5와 같으며 조사지역의 우라늄 농도와 함께 IR_{water} 및 f_1을 변수로 사용하여 산출한 결과 중앙값(50%)은 1.38×10^{-5}, 90 및 95%값은 각각 5.29×10^{-4}, 7.92×10^{-4} μg/g의 값을 보였다.



Percentile	μg U/g_kidney
25.0%	6.74×10^{-6}
50.0%	1.38×10^{-5}
90.0%	5.29×10^{-5}
95.0%	7.92×10^{-5}
97.5%	1.13×10^{-4}

그림 5. 불확실성 분석에 따른 신장내 우라늄 농도의 확률적 통계 분포

4) 점 추정치와 노출 변수에 대한 확률적 통계 분포값의 비교

USEPA에서는 노출변수들의 불확실성 분석에 의한 확률적 통계 분포값을 multiplicative exposure factor(MEF)로 고려하여 point estimates(PE)값과의 비율(PE/MEF)로 노출변수들 사이에서 나타나는 보수성의 정도를 평가하는데 사용하며 잠재적인 노출 위해도에 대해 불확실성 분석에 의한 확률적 통계 분포 90 95%의 값으로 규제하여 위해도 관리에 적용한다(USDOE, 1996).

본 연구에서는 제 2장의 연구결과에서 산출된 점 추정치(point-estimates)와 불확실성 분석에 의한 확률적 통계 분포값(50, 90, 95%) 및 PE/MEF(95%)의 값을 비교하였다.

표 13. 연구결과의 점 추정치와 노출 변수에 대한 확률적 통계

Estimates	Radiation Exposure		Chemical Exposure
	연간유효선량 (mSv/year)	발암위해도 Risk	신장내 우라늄 농도 µg_U/g_kidney
PE	2.21×10^{-4}	2.35×10^{-7}	2.45×10^{-5}
50%	1.01×10^{-4}	2.65×10^{-8}	1.38×10^{-5}
90%	1.99×10^{-4}	1.04×10^{-7}	5.29×10^{-5}
95%	2.44×10^{-4}	1.57×10^{-7}	7.92×10^{-5}
PE/MEF(95%)	0.91	1.50	0.31

연구결과에서 산출된 연간유효선량, 발암 위해도 및 신장 내 우라늄 농도의 값은 각각 2.21×10^{-4}mSv/year, 2.35×10^{-7} 및 2.45×10^{-5} µg/g이었으며 이러

한 값들은 점 추정치로써 잠재적인 위해성에 관한 정보를 제공함에 있어서 불충분하다고 판단되어 불확실성 분석에 따른 노출 변수들의 확률적인 통계 분포 값(50%, 90% 및 95%)으로 각각 연간유효선량(1.01×10^{-4}, 1.99×10^{-4}, 2.44×10^{-4} mSv/year), 발암 위해도(2.65×10^{-8}, 1.04×10^{-7}, 1.57×10^{-7}) 및 신장 내 우라늄 농도(1.38×10^{-5}, 5.29×10^{-5}, 7.92×10^{-5} μg/g)와 같이 제시하였다. 또한 발암 위해도의 점추정치(PE; point estimates)는 95%값에 비해 각각 1.5배 가량 과대평가된 반면 연간유효선량과 신장내 우라늄 농도의 경우 각각 0.91, 0.31배 가량 과소 평가되어 잠재적인 위해성을 감안할 때 그림 3과 5에서 나타난 1.19×10^{-4} mSv/year(90%) 및 1.38×10^{-5} 5.29×10^{-5} μg/g(50 90%) 또한 고려할 필요가 있다.

V. 고 찰

음용수 중 우라늄의 위해는 두 가지 관점에서 고려되는데 하나는 방사성 핵종으로서 우라늄의 방사성 독성이고, 다른 하나는 중금속으로서 우라늄의 화학적 독성이다. 우라늄의 반감기로 보아 인체에 흡수되었을 때, 방사성 독성보다는 화학적 독성으로서 고농도로 노출시 신장에 미치는 영향이 문제가 된다(Leggeett RW, 1989). 따라서 일반 대중에 대한 음용수 수질 기준의 적용시 천연 우라늄은 방사선량보다 신장에서의 화학적 독성을 고려하여 제한함을 권고하고 있다(Wrenn et al, 1985).

동물 및 인체에 대한 여러 자료를 통해 신장에서 우라늄의 화학적 독성이 증명되었는데(Wrenn et al, 1985) 이러한 사실은 방사선량에 대한 제한치에서 유추된 우라늄 섭취의 제한치가 신장에서의 화학적 독성에 대한 방지책을 제공하는 지에 대한 관심에서 비롯된 것이라 할 수 있다. 이러한 의문들은 가정된 신장 독성에 대한 농도 제한치를 낮추고 일반 대중에 대해 그러한 허용 농도를 제한하는 안전 계수를 증가함으로써 보다 중요한 사항으로 발전되었다.

국제방사선방어위원회의 출간물 30(ICRP, 1979a)에서는, 방사선 작업 근로자들을 위한 우라늄의 섭취에 대한 연간 제한치(ALIs : Annual Limits on Intakes)를 방사선량에 대한 제한치에 근거를 두고 있다. 즉, 어떤 기관이나 조직에서의 연간유효선량당량 제한치는 신장에서의 화학적 독성에 대한 고려보다는 방사선량에 근거한 것이다. 그러나 ICRP는 우라늄 동위원소에 대한 방사선량보다 화학적 영향이 더 큰 위해를 나타낼 수 있음을 인식하고 있으며 따라서, 이런 경우에 ALIs는 항상 주위를 요하며 사용하여야 한다(ICRP, 1979b).

국제방사선방어위원회(ICRP; International Commission on Radiological

Protection, 1964)의 출간물 6호에 의하면 ^{234}U, ^{238}U, 천연 우라늄의 용해성 화합물에 대한 방사선 작업 종사자들의 노출을 제한하기 위해서 공기 및 물 중 최고 허용농도(MPCs : Maximum Permissible Concentrations)를 제시하고 있는데 이는 방사선량을 제한하기보다는 신장에서의 화학적 독성에 대한 보호에 그 근거를 두고 있다. MPCs는 신장 1g당 우라늄 3μg의 화학적 독성에 대한 한계 허용 농도를 가정함으로써 유추된 것이다. 위와 같은 사실은 방사선 작업 종사자들의 노출 규제를 위한 것으로 일반 대중에 대한 방사선 방어는 어떤 연도에서의 선량 당량에 대한 제한치를 일반적으로 방사선 작업 근로자에 대한 제한치의 1/10로 설정함(ICRP, 1977, 1985; NCRP, 1987b, USNRC, 1988)을 그 기초로 하고 있다. Spoor와 Hursh에 의해 이와 비슷한 접근이 우라늄의 화학적 영향으로부터 일반 대중의 방사선 방어를 위해 제안되었는데 신장에서의 우라늄 농도에 대한 제한치를 일반 대중에서 최대로 노출된 개인들에 적용하였(Spoor and Hursh, 1973)으며 ICRP 출간물 6호에서 가정한 화학적 독성에 대한 한계 허용 농도의 1/10에 해당하는 0.3μg/g으로 설정되었다.

일반 대중에 대한 음용수 수질 기준의 적용을 위한 성인에서의 섭취된 우라늄에 대한 대사작용의 검토에 있어서, Wrenn 등(Wrenn, 1985)은 물 중 천연 우라늄의 섭취량은 방사선량보다는 신장에서의 화학적 독성을 고려하여 제한함을 권고하고 있다. 우라늄의 만성적 섭취로 인한 화학적 독성에 대한 한계 허용 농도는 1 3μg/g 사이에 있음을 나타내는 증거가 있으며 1μg/g의 한계 허용 농도와 안전 계수 50 또는 3μg/g의 한계 허용 농도와 안전 계수 150이 음용수의 섭취로부터 0.02μg/g의 신장 중 우라늄 농도에 대한 제한 권고치로 유추되는데 사용되었다. 위에서 논의된 안전 계수 10에 비교하여 매우 높은 이러한 안전 계수의 적용은 음용수 수질기준에서의 안전성을 강조한 사항이라 할 수 있다.

USEPA(US Environmental Protection Agency)나 NRC(National Research Council)에 의해 설정된 환경 방사선 기준은 모든 노출로부터 일반 대중의 방사선 보호 기준에 대한 실제적인 의미를 제공하고 있는데 우라늄 연료 시설의 운영, 핵연료나 고농도 초우란 원소의 관리 및 보관, 토륨의 가공, 공기 중 방사성 핵종 방출 및 방사성 폐기물의 토양 처분 등에 대한 최근의 환경 방사선 기준은 전신에 대해 0.25mSv(25mrem)의 연간선량당량으로 제한하고 있으나 이 0.25mSv의 연간유효선량당량 제한치는 음용수 중 방사성 핵종에 적용되는 것이 아니다(Kocher DC, 1989). 이러한 기준의 개정에 있어서, USEPA는 모든 방사성 핵종으로부터의 연간 방사선량에 관한 제한치나 Ra에 대한 최근의 농도 한계로써의 방사선 노출로부터 동일한 위해도에 해당하는 물 중 우라늄에 대한 농도 한계를 고려하고 있다(USEPA, 1986; Lappenbusch and Cothern, 1985).

Wrenn 등은 평균 성인의 경우 0.02μg/ g의 신장 중 우라늄 농도로 제한하려는 값에 대해 화학적 독성의 기초에 근거하여 음용수 중 우라늄 농도를 제한하는 대안을 권고하였다. Wrenn의 대사모델을 사용하였을 때, 천연 우라늄에 대해 0.02μg/ g의 신장 중 우라늄 농도에 대한 제한치는 0.1mSv(10mrem)의 연간유효선량과 상응하는 것으로 모든 방사선원으로부터 일반 대중의 만성적 노출에 대해서, ICRP(1985)와 NCRP(1987)는 최근 1mSv(0,1 rem)의 연간유효선량당량 제한치를 권고하고 있으며 음용수의 섭취로부터 권고되는 연간유효선량당량의 참고수준은 0.1mSv이다. 이 참고수준은 천연 방사성물질의 연간평균유효선량의 5%이하의 값(WHO, 1993)이다.

신장에서 우라늄의 화학적 특성에 관련된 사항들은 작업자 및 일반 대중에 대한 건강 보호 기준을 수립하는데 있어서 많은 관심이 되어왔다(ICRP, 1964 ; 1979). 최근 음용수 중 방사성물질에 대한 법률 제정에 있어서 USEPA는 우라

늄의 발암위해 보다는 신장에 대한 역치 독성(threshold toxicity)에 근거하여 MCL(Maximum Contaminant Level)을 제안하고 있는데(USEPA, 1991) 이러한 MCL의 개발에 관한 기초는 동물 실험(animal bioassay)으로부터 유추된 구강 참고치(Rfd; Reference Dose)의 적용에 있으며 우라늄의 신장 독성에 대한 역치 특성을 설명하는 데에는 많은 불확실성을 내포하고 있다.

우라늄의 RfD는 신장독성과 약리 동력학적 모델의 견지에서 평가되어지며, 음용수 중 우라늄의 배경농도로부터 섭취되는 양은 반드시 우라늄의 역치 독성에 근거한 기준으로 설명해야 한다. 또한 우라늄의 노출로 인한 건강영향의 평가로써 신장독성 또는 발암 위해도의 사용에 있어서 다양한 불확실성 또한 평가되어야 할 필요가 있다.

본 연구에서 사용된 노출변수들은 가장 최근의 국외 문헌들로부터 수집한 것으로 음용수 중 우라늄 농도에 대한 규제안을 제시하는 연구 및 기관이 매우 많고 또한 사용된 위해성 평가 방법과 노출변수들의 적용이 다양하기 때문에 연구결과에서 나타난 점추정치로써 규제안과 비교하는 데는 무리가 있을 것으로 사료된다. 예를 들어 ACWA(Association of California Water Agency)에서는 OEHHA(Office of Environmetal Health Hazrd Assessment)가 USEPA의 proposed federal MCL에서 적용된 전환계수 1.3pCi/㎍에 대한 재평가가 필요하다고 판단되어 최근 캘리포니아에서 연구된 0.79pCi/㎍을 Public Health Goal(PHG)의 설정에 적용하였다. 이러한 전환계수의 사용에 있어서 Wong 등은 전환계수에 대한 분포값을 제공(Wong et al, 1999)하고 있으며 전환계수 뿐만 아니라 각 노출변수들에 대한 분포값을 이용하여 이러한 불확실성을 평가한 사례(US DOE, 1996, ACWA, 2000)들이 있다.

최근 OEHHA는 우라늄에 대한 PHG로써 0.2ppb(0.2pCi/L)를 제안(ACWA, 2000)하고 있으며 또한 최근 신장 장애에 대한 생화학적인 증거들이 보다 많이 관찰되면서 신장독성에 대한 역치 값을 내려야 한다고 제안(ATSDR, 1990)하고 있어 음용수 중 우라늄 농도 규제가 보다 강화되는 추세이므로 잠재적인 위해성에 대해서 이러한 분포로 산출치를 제시하는 것은 의미가 있다.

현행 국내 법규로는 원자력법 및 그 하부 규정이 음용수 중의 최대수중허용농도(Maximum Permissible Concentration : MPC)를 규정(과학기술부, 1996)하고 있다. 그러나 여기서 정하는 MPC는 방사선 작업 종사자들에 대해 허용되는 값으로서 연간 유효선량 50mSv를 기준으로 산출된 것이거나 방사선시설 주변 주민을 보호하기 위한 방출기준이다. 이러한 MPC는 인위적인 행위에 대해 적용하는 것이므로 수질환경 기준은 원자력 시설의 방출관리 기준과는 별개의 개념으로 설정되어야 한다.

국내의 몇몇 연구결과에 의하면 우라늄이 매장된 지역의 일부 지하수에서 우라늄 함량이 USEPA의 제안치를 초과하는 것으로 보고되고 있으나 US EPA의 기준이 상수로 공급되는 물을 전제로 한 것임을 고려할 때 USEPA의 MCL 상회 여부보다는 지하수 용도에 대한 위해성 여부 및 관리방안의 제시가 필요하다고 판단된다. 따라서 국내의 경우 음용수 중의 방사성 물질에 대한 기준치를 설정함에 있어서 그것이 잠정적인 기준의 설정일지라도 지하수를 비롯한 수원에 대한 방사성 물질의 방사능 준위에 관한 정확하고 폭넓은 실태 조사가 필수적이며 과학적이고 합리적인 수단인 위해성 평가(Risk Assessment)에 근거한 방사성 물질들의 방사성 및 화학적 위해성 확인 및 비용-편익 분석을 바탕으로 한 현실에 부합하는 정책과 협조가 필요하다.

Ⅵ. 결 론

본 연구는 USEPA의 기준이 상수로 공급되는 물을 전제로 한 사실을 고려하여 대전지역 일부 지역주민들이 직접 섭취하는 직수로 공급되며 음용수로 사용되는 지하수만을 대상으로 소규모로 조사된 25개 시료에 대한 결과를 예로 들어 그 위해성 평가 방법을 제시하고 위해성 평가 결과에 근거한 음용수 중 우라늄의 규제안을 고찰하고자 진행하였으며 그 결론은 다음과 같다.

1. 조사지역 25개 지하수 시료 중 우라늄 농도는 ^{238}U의 분석결과(ICP-MS로 측정된 값은 화학적 양, ppb)로써 Natural Uranium 총량에 대해서 평형상태를 가정한 전환계수 0.68pCi/㎍을 고려하는 대신에 최근에 연구된 0.79pCi/㎍를 이용하여 그 방사능 함량을 산출한 결과는 산술평균 값으로 ^{238}U(0.23ppb, 0.08pCi/L), Natural Uranium(0.18pCi/L)의 수준을 보였다.

2. 천연 우라늄에 대해 신장 중 우라늄 농도에 대한 제한치는 0.02 3㎍/g의 범위를 지니며 0.02㎍/g은 0.1mSv(10mrem)의 연간유효선량과 상응하는 것으로 연구결과에서 나타난 신장내 우라늄 농도 7.92×10^{-5}㎍/g(95%)과 연간유효선량 2.44×10^{-4}mSv/year(95%)는 상당히 낮은 수준임을 알 수 있으며 1.57×10^{-7}(95%)의 위해도는 USEPA의 음용수 중 우라늄 MCL 30㎍/L, 30pCi/L에 해당하는 위해도 1×10^{-4}에 대해 약 10^{-3}의 수준으로 평가되었다.

3. 연구결과에서 산출된 연간유효선량, 발암 위해도 및 신장 내 우라늄의 농도의 점 추정치는 잠재적인 위해성에 관한 정보를 제공하는데는 불충분하다

고 판단되어 노출 변수들의 불확실성 분석에 따른 확률적인 통계 분포 값(50%, 90% 및 95%)으로 각각 연간유효선량(1.01×10^{-4}, 1.99×10^{-4}, 2.44×10^{-4} mSv/year), 발암 위해도(2.65×10^{-8}, 1.04×10^{-7}, 1.57×10^{-7}) 및 신장 내 우라늄 농도(1.38×10^{-5}, 5.29×10^{-5}, 7.92×10^{-5} ㎍/g)와 같이 제시하였다. 또한 발암 위해도의 점추정치(PE; point estimates)는 95%값에 비해 각각 1.5배 가량 과대평가된 반면 연간유효선량과 신장내 우라늄 농도의 경우 각각 0.91, 0.31배 가량 과소 평가되어 잠재적인 위해성을 감안할 때 그림 3과 5에서 나타난 1.19×10^{-4} mSv/year(90%) 및 1.38×10^{-5} 5.29×10^{-5} ㎍/g(50 90%) 또한 고려할 필요가 있다.

4. 본 연구의 조사 지역에 따른 조사규모 및 시료수의 한계로 인해 지니는 연구결과는 위해성 평가 방법의 제시를 위한 단순한 사례이며 국내 음용수로 사용되는 지하수 중 우라늄 농도를 대표하고 있지는 않다. 또한 사용된 변수들은 최근의 국외 문헌들로부터 수집된 것으로 지하수 용도에 따른 적절한 실태조사와 국내 상황에 맞는 변수들을 적용한다면 불확실성의 감소 및 보다 현실적인 위해성 평가와 규제안과의 비교가 가능하다고 판단된다.

참고문헌

과학기술부. 방사선량을 정하는 규정. 과학기술부장관 고시. 96-6, 1996

국립환경연구원. 지하수 중 방사성 물질의 함유실태에 관한 조사 연구, 1999

김창규, 김철수. 극저준위 액체섬광계수기와 파형분석법을 이용한 지하수 및 온천수의 ^{222}Rn **신속측정법. 대한방사선방어학회지**, 1995

대전광역시. 지하수 관리 중·장기 계획 수립, 2000

서울시정개발연구원. 서울시 지하수 오염방지 및 관리방안 연구, 1995

ACWA. Review of the Proposed Public Health Goal for Uranium in Drinking Water. Association of California Water Agency, 2000

ATSDR. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Toxicological profiles for uranium, update. U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, 1990

Banrnard AK. Theoretical Basis of Inorganic Chemistry. McGraw-Hill. New York, 1965

Carolyn TW, Howard SO, Alexis MM et al. Isotopic uranium - activity ratios in California groundwater. Journal of American Water Work Associations, 1999

CDHS. A Study of the Isotopic Uranium Abundance Ratios for Selected California Groundwater. California Department of Health Services, Berkeley. CA, 1997

Einsenbud M, Gesell T. Environmental Radioactivity, 4th ed. Academic Press. CA, 1997

Frederick WP. Defining a Guideline for Uranium. Journal of American Water Work Associations, 1999

Gilman AP et al. Uranyl nitrate-91-day toxicity studies in the New Zealand white rabbit. Toxicol. Sci. 41(1) ; 129-137, 1998

Health Canada. Uranium in Drinking Water - Document for Public Comment. Federal-provincial subcommittee on drinking water, 1999

Herranz M, Abelairas A, Legarda F. Uranium contents in raw waters from Biscay(Spain). Applied Radiation and Isotopes. 48 : 857, 1997

Herranz M. Abelairas A and Legarda F. Uranium Contents and Associated Effective Doses in Drinking Water from Biscay(Spain). Appl. Radiat. Isot; 48(6) : 857-861, 1997

Herranz M, Abelairas A, Legarda F. Uranium contents in raw waters from Biscay(Spain). Applied Radiation and Isotopes. 51 : 203-208, 1999

ICRP. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Publication 6, Pergamon Press. Oxford, 1964

ICRP. International Commission on Radiological Protection. Report of the task group on reference man. Publication 26, Pergamon Press. Oxford, 1977

ICRP. International Commission on Radiological Protection. Limits for intakes of radionuclides by workers. Publication 30, Pergamon Press. Oxford, 1979a

ICRP. International Commission on Radiological Protection. Limits for intakes of radionuclides by workers. Publication 30, Pergamon Press. Oxford, 1979b

ICRP. International Commission on Radiological Protection. Recomendations of the International Commission on Radiological Protection. Publication 60, Pergamon Press. Oxford, 1991

ICRP. Age-Dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides, Part 3. Complication of Ingestion and Inhalation Dose Coefficients. ICRP Publication 72. Pergamon Press. Oxford, 1996

Ivanovich M, Harmon RS. Uranium series disequilibrium : Applications to Environmental problems. Clarendon Press. Oxford, 1982

Kocher. D.C. Relationship between kidney burden and radiation dose from chronic ingestion of U : Implications for radiation standards for the public. Health Physics. 57(1). 9-15, 1989

Lappenbusch WL and Cothern CR. Regulatory development of the interim and revised regulations for radioactivity in drinking water-past and present issues and problems. 48:535-551, 1985

Lederer CM and Shirley VS. Table of Isotopes, 7th ed. Jhon Wiley and Sons, Inc. New York, 1981

Leggett RW, The behavior and chemical toxicity of U in the kidney : a reassessment. Health Physics. 1989: 57(3) : 365-383.

Lens HSV, Elina CSA, and Horst MF. Human Health Risk screening of radioactive and nonradioactive contaminants due to uranium industry operation. J. Enviro. Radioactivity. 1998; 39(1) : 69-85

Lowe LM. Impact of the ^{235}U series on doses from Intakes of natural uranium and decay progeny. Health Physics. 1997: 73(4) : 694

Malcome-Lawes DJ. Introduction to Radiochemistry. Unwin Brothers Ltd survey, 1979

M.P. Elles, A.Q. Armstrong, and S.Y. Lee. Characterization and solubility measurements of uranium-contaminated soils to support risk assessment. Health Physics. 72(5) : 716-726, 1997

NCRP. National Council on Rediation Protection and Measurements. Recommendation on limits for exposure to ionizing radiation. NCRP Report No. 91, 1987

OEHHA. Public Health Goal for Uranium in Drinking Water. Draft, 2000

ORNL. Toxicity values for use in hazardous waste risk assessment and remidiation. Biomedical and Environmental Analaysis Section. Health Science Research Division, ES/ ER/ TM-76, 1994

Remy ML and Lemaitre N. Eaux minerales et radioactivite. Hydrogeogie. vol 4: 267, 1990

Sharfenaker MMA. Radionuclides rule clears compliance picture. Journal of American Water Work Associations, 2001

Spoor NL and Hursh JB. Protection criteria. Uranium, Plutonium, and transplutonium elements. New York: Springer-Verlag, 1973

USNRC. US Nuclear Regulatory Commssion. Standards for protection against radiation. title 10, 264-302, 1988

USDOE. Quantitative Uncertainty Analysis of Superfund Residual Risk Pathway Models for Soil and Groundwater. Oak Ridge National Laboratory. DDE-AC05-84OR21400, 1996

USDOE. Depleted Uranium. Human Health Fact Sheet. ANL, 2001

USEPA. Integrated Risk Information System (IRIS) online database. Substance file for uranium soluble salts. Office of Research and Development. National Center for Environmental Assessment. Cincinatti. Ohaio. http:/ / www.epa.gov/ ngispgm3/ iris/ index.html, 1989

USEPA. National Primary Drinking water Regulation ; Radionuclides, USEPA 40 CFR Parts 141, 142. Federal Register, 56(138): 33050-33127, 1991

USEPA. Radionuclides. Notice of Data Availability. Fed. Reg. 65(78) : 21576, 2000

UNSCEAR. Ionizing radiation : Sources and Biological effects. UN Report. New York, 1982

UNSCEAR. Sources and effects and risk of ionizing radiation. UN Report. New York, 1993

WHO. Radiological Examination of Drinking water. World Health organization. Copenhagen, 1978

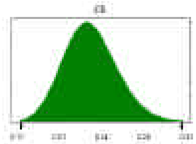
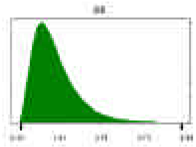
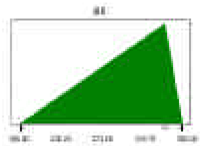
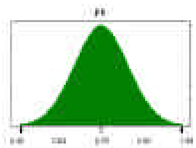
WHO. Guideline for Uranium in Drinking Water, 1993

Wrenn ME; Durbin PW; Howard B; Lipsztein J; Rundo J; Still ET; Willams DL. Metabolism of ingested U and Ra. Health Physics. 48; 601-633, 1985

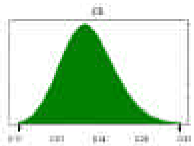
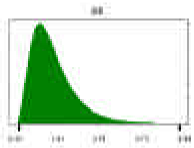
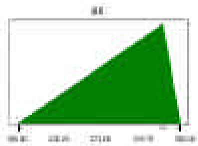
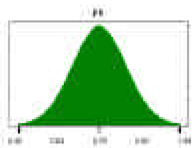
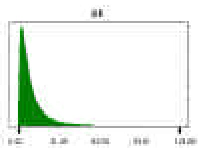
부 록 (APPENDIX)

(Parameter Assumptions used in Uncertainty Analysis)

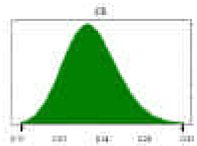
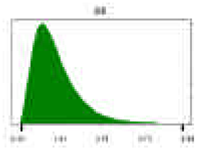
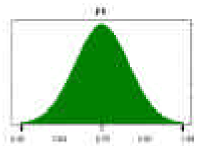
■ *Committed Effective Dose(mSv/year)*

Parameter	Assumption	Statistics	Figure
^{238}U (μg/L)	Lognormal distribution with parameters:	Selected range is from 0.00 to +Infinity, Mean value in simulation was 0.23	
	Mean	0.23	
	Standard Deviation	0.02	
IR_{water} (Daily Intake of Drinking wate)	Lognormal distribution with parameters:	Selected range is from 0.00 to +Infinity, Mean value in simulation was 1.27	
	Mean	1.26	
	Standard Deviation	0.66	
EF (Exposure Frequency, d/y)	Triangular distribution with parameters:	Selected range is from 180.00 to 365.00, Mean value in simulation was 297.31	
	Minimum	180.00	
	Likeliest	345.00	
	Maximum	365.00	
CF (Conversion Factor, pCi/μg)	Normal distribution with parameters:	Selected range is from 0.00 to +Infinity, Mean value in simulation was 0.79	
	Mean	0.79	
	Standard Deviation	0.10	

■ *Carcinogenic Risk*

Parameter	Assumption	Statistics	Figure
^{238}U (μg/L)	Lognormal distribution with parameters:	Selected range is from 0.00 to +Infinity, Mean value in simulation was 0.23	
	Mean	0.23	
	Standard Deviation	0.02	
IR_{water} (Daily Intake of Drinking wate)	Lognormal distribution with parameters:	Selected range is from 0.00 to +Infinity, Mean value in simulation was 1.27	
	Mean	1.26	
	Standard Deviation	0.66	
EF (Exposure Frequency, d/y)	Triangular distribution with parameters:	Selected range is from 180.00 to 365.00, Mean value in simulation was 297.31	
	Minimum	180.00	
	Likeliest	345.00	
	Maximum	365.00	
CF (Conversion Factor, pCi/μg)	Normal distribution with parameters:	Selected range is from 0.00 to +Infinity, Mean value in simulation was 0.79	
	Mean	0.79	
	Standard Deviation	0.10	
ED (Exposure Duration, y)	Lognormal distribution with parameters:	Selected range is from 0.00 to +Infinity, Mean value in simulation was 11.2	
	Mean	11.36	
	Standard Deviation	13.72	

■ *Kidney Burden(µg_U/g_kidney)*

Parameter	Assumption	Statistics	Figure
^{238}U (µg/L)	Lognormal distribution with parameters:	Selected range is from 0.00 to +Infinity, Mean value in simulation was 0.23	
	Mean	0.23	
	Standard Deviation	0.02	
IR_{water} (Daily Intake of Drinking wate)	Lognormal distribution with parameters:	Selected range is from 0.00 to +Infinity, Mean value in simulation was 1.27	
	Mean	1.26	
	Standard Deviation	0.66	
F1 (Intestinal absorption fraction)	Lognormal distribution with parameters:	Selected range is from 0.00 to +Infinity, Mean value in simulation was 0.019	
	Mean	0.019	
	Standard Deviation	0.02	

ABSTRACT

A Case Study for Risk Assessment of Uranium in Groundwater

Won-Seok Lee
Dept of Environmental Management
The Graduate School of
Health Science & Management
Yonsei University

(Directed by professor, Dong-Chun Shin, M.D., Ph.D.)

In the application of drinking water standards for the public, Wrenn et al recommended that intakes of natural U in the water be limited by consideration of chemical toxicity in the kidney rather than radiation dose; however, both of radiogenic and chemical toxicity should be cosidered in the assessment of human health effect of uranium because Uranium Isotopes may contribute appreciably to the dose received by humans through internal exposure due to their ingestion.

Considering the drinking water standard of USEPA which is premised on the water supplied through the tap, it is more necessary suggesting the regulations and risk management of uranium based on risk assessment after the consideration of groundwater uses than determining whether uranium

concentration exceeds the MCL or not.

This study was performed in order to evaluate human health effects and estimate the risk due to chemical and radiogenic toxicity of uranium by the ingestion and suggest the probabilistic distribution of the uncertain exposure parameters by uncertaity analysis, and provide the basic knowledge for management of uranium in groundwater through reviewing literatures related risk assessment and regulations of uranium.

The groundwater sampling was carried out in the part of Dong-Gu residential in Dae-Jeon city and all groundwater samples(n=25) were only for dringking use and supplied through the tap.

In the evaluation of health effects due to the radiogenic and chemical toxicity of uranium, conversion factors(0.332pCi/㎍ for ^{238}U and 0.79pCi/㎍ for total natural uranium) were used to calculate the radioactivity of uranium because ^{238}U concentration(ppb) measured by ICP-MS in this study was just chemical quantity.

The annual effective dose(mSv/year) and carcinogenic risk was calculated using the committeed effective dose per unit ingestion provided by ICRP 72 and ^{238}U+D oral slope factor(risk/Bq) provided by ORNL in order to evaluate the health effets due to the radiation exposure. Kidney Burden from chronic ingestion of uranium was also calculated in order to evaluate the chemical toxicity of uranium using the Pharmacokinetic model by Wrenn et al.

Monte Carlos simulation was performed to provide the information of the probabilistic distribution of the uncertain exposure parameters in this study by the software package Crystal Ball, Version 4.0. and all exposure parameters(EF; Exposure Frequency, day/year, ED; Exposure Duration, year, f1; Gastrointestinal transfer fraction, IR_{water}; Daily Intake of Water, L/day), Conversion factor; pCi/μg) used in this study were collected from the most recent sources in literatures.

The results showed by the values correspond to the percentile(50%, 90% and 95%) like annual effective dose(1.01×10^{-4}, 1.99×10^{-4}, 2.44×10^{-4} mSv/year), carcinogenic risk(2.65×10^{-8}, 1.04×10^{-7}, 1.57×10^{-7}) and kidney Burden(1.38×10^{-5}, 5.29×10^{-5}, 7.92×10^{-5} μg/g) because point estimates that were calculated in this study could be often conservative and could result in an overestimate of the potential risk.

The PE/MEF(95%) of annual effective dose showed 1.5 and the PE/MEF(95%) of carcinogenic risk and kidney Burden showed 0.91 and 0.31. Those values were used to quantify the degree of conservatism present in the exposure parameters and meant the overestimation of point estimates when the PE/MEF(95%) > 1.

In the application of drinking water standards for the public, the limits for the regulation of uranium in the kidney have the range of 0.02 3μg/g.

Wrenn et al recommended that intakes of natural U in the water be limited by 0.02μg/g and this limit corresponds to 0.1mSv/year. Kidney burden 7.92×10^{-5}(95%) and annual effective dose 2.44×10^{-4}(95%) were evaluated in much low level compared with 0.02μg/g and 0.1mSv/year.

The carcinogenic risk 1.57×10^{-7}(9%) was also much lower than the risk estimate(1×10^{-7}) which corresponds to 30μg/L(30pCi/L).

Uranium concentration in groundwater samples in this study was not representative of uranium concentration in groundwater used for drinking use in Korea but was used to provide the risk assessment methodology of uranium and it would be the better assessment using the proper exposure parameters for our situation.