

중수로원전 종사자의 삼중수소 체내섭취에 따른 인체대사모델과 유효반감기 분석

김희근, 공태영
한전 전력연구원

2009년 3월 30일 접수 / 2009년 5월 11일 1차수정 / 2009년 5월 15일 채택

삼중수소는 중수로형 원전에서 방사선작업종사자의 내부피폭을 일으키는 주요 방사성핵종 중의 하나이다. 이 핵종은 계통에서 HTO 형태로 비교적 쉽게 누설되며, 호흡과정을 통해 작업종사자의 신체내부로 유입된다. 이러한 삼중수소는 신체 내에서 약 2시간 후에 평형에 도달하며, 약 10일의 유효반감기를 가지고 신체로부터 제거된다. 신체내의 삼중수소는 체액을 따라 이동하기 때문에 전신이 피폭을 받게 된다. 원전의 운영경험에 의하면 원전종사자의 전체 피폭방사선량의 약 20~40% 정도가 삼중수소에 의한 내부피폭으로 발생하고 있다. 따라서 원전의 방사선안전관리 측면에서 볼 때 중요하게 관리되는 방사성핵종이다. 본 논문에서는 중수로원전에서 삼중수소의 흡입에 따른 노시료 중의 삼중수소 방사능 측정 자료를 이용하여 삼중수소의 인체 대사모델을 수립하고, 이를 근거로 피폭방사선량 평가의 중요 인자인 유효반감기를 분석하였다. 이 결과에 따르면 국내 원전 종사자의 유효반감기는 국제방사선방호위원회에서 제시한 10일보다 짧은 것으로 나타났다.

중심어: 중수로원전, 삼중수소, 노시료, 인체대사모델, 유효반감기

1. 서론

중수로원전의 경우 중수를 감속재와 냉각재로 사용하기 때문에 경수로원전에 비해 상대적으로 많은 양의 삼중수소가 생성된다. 한편 삼중수소는 작은 양이기는 하나 계통으로부터 작업공간 내 공기 중으로 누설이 일어난다. 이에 따라 방사선작업을 위해 방사선 관리구역에 출입한 종사자는 삼중수소에 의한 내부피폭을 받게 된다. 중수로원전 방사선작업종사자의 전체 피폭방사선량 중에서 삼중수소에 의한 피폭선량 기여가 약 20~40%에 이르고 있다¹⁾. 따라서 원전종사자의 방사선관리 측면에서 삼중수소는 중요한 방사성핵종이다^{2,3)}.

한편 원전 주변주민 등 일반인에 대한 피폭방사선량의 경우도 삼중수소에 의한 기여가 매우 높게 나타나고 있다. 약간의 차이는 있으나 일반인에 대한 전체 피폭방사선량 중에서 약 60-90% 정도가 삼중수소에 의해 발생하고 있다⁴⁾. 이러한 양상은 해외 중수로원전에서도 유사하게 나타나고 있다⁵⁾. 따라서 삼중수소는 중수로원전은 물론 경수로원전 방사성유출물관리에서 중요하게 관리되는 방사성핵종이라 할 수 있다. 특히 중수로원전은 연간 방출량을 정하는 유도배출한계(Derived release limits: DRLs) 설정과 일반인 피폭방사선량 평가 측면에서 삼중수소의 관리가 매우 중요하고 엄

격하게 이루어지고 있다⁶⁾.

중수로원전에서는 방사선 관리구역에 출입하는 종사자에 대해 삼중수소에 의한 내부피폭 감사를 위해 노시료를 15일 간격으로 주기적으로 제출하도록 요구하고 있으며, 주요 방사선작업을 완료한 후에는 추가적인 노시료 제출을 요구하고 있다^{7,8)}. 액체섬광계수기(Liquid scintillation counter: LSC)를 이용하여 노시료중 삼중수소의 방사능을 측정하고, 이를 근거로 내부피폭 방사선량을 평가하고 있다⁹⁾. 이러한 삼중수소에 의한 내부피폭 방사선량 평가에는 원자력법령과 교육과학기술부 고시를 기준으로 하고 있으며, 추가적으로 국제방사선방호위원회(International Commission on Radiological Protection: ICRP)나 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency: IAEA)의 내부피폭 방사선량 평가지침에도 근거하고 있다^{7,9,10)}.

중수로원전에서 삼중수소는 주요 방사선작업이 이루어지는 작업공간 등에서 대부분 HTO로 존재한다¹¹⁾. 이러한 삼중수소는 대부분 호흡(Inhalation)이나 피부(Skin)를 통해 작업종사자의 신체내부로 유입된다. 신체내로 들어온 삼중수소는 약 2시간 후에 평형에 도달하며, 약 10일의 유효반감기를 가지고 신체로부터 제거된다. 신체내의 삼중수소는 체액을 따라 이동하기 때문에 전신이 피폭을 받게 된다^{11,12)}. 원전 종사자의 삼중수소에 의한 내부피폭 방사선량평가에 있어 가장 중요한 자료중의 하나가 삼중수소 인체대사모델의 유효반감기이다. 현재 중수로원전에서는 삼중수소에 의한 내부피폭 방사선량 평가에서는 국제방사선방호위원회(ICRP)에서 권고

책임저자: 김희근, hkd@m@kpri.re.kr, 한전 전력연구원
대전시유성구문정동 103-16

하는 기본 값 10일을 유효반감기로 적용하고 있다[10,13].

본 논문은 삼중수소에 의한 내부피폭 방사선량 평가를 위해 삼중수소의 방사선학적 특성과 인체대사모델을 검토하였다. 특히 중수로원전에서 방사선작업과정에서 피폭을 받은 종사자의 뇨시료중 삼중수소 방사능측정 자료를 이용하여 삼중수소 인체대사모델의 적용성을 검토해 보았다. 이 과정에서 인체대사모델 방정식을 유도하였고, 피폭방사선량 평가의 중요 변수 중에 하나인 유효반감기를 새로이 계산하였다. 이러한 계산 자료를 근거로 피폭방사선량 평가 과정에서 ICRP의 기본 값을 이용하는 경우와 보수성을 비교하였다.

2. 삼중수소의 특성 및 발생

삼중수소(³H)는 물리적 반감기가 12.3년이고, 저에너지 베타선을 방출하며 ³He로 붕괴된다. 이 때 방출되는 베타선은 18.6 keV의 최대에너지와 5.7 keV의 평균에너지를 방출한다. 사람의 조직과 유사한 물속에서는 베타선의 최대 비정은 6 μm이다. 삼중수소에서 발생하는 저에너지 베타선은 분자를 이온화시킬 수 있는 충분한 에너지를 갖고 있지만, 짧은 비정을 가지고 있기 때문에 외부피폭에 따른 위험은 높지 않다. 왜냐하면, 피부암 등을 유발시킬 수 있는 표적세포는 외피층(20-100 μm)과 진피층(1-3 mm)에 존재하기 때문에 삼중수소로부터 방출되는 베타선은 표적세포에 도달할 수가 없다[14]. 삼중수소는 다른 순수 베타 방출 핵종인 ³²P와 ⁹⁰Sr 그리고 베타-감마 방출 핵종인 ¹³¹I, ¹³⁷Cs과 비교할 때 상대적으로 낮은 방사화학적 독성을 갖고 있다. 하지만 생물학적으로

로는 수소와 결합하여 체내에서 분포하기 때문에 잠재적으로 내부피폭의 위험도는 커지게 된다. 만약 삼중수소가 환경으로 배출된다면, 대기 중에서 다양한 화학적 변환을 거쳐 체내로 유입될 수 있다. 특히 삼중수소 화합물중 생물계에서 이동성과 중요성을 고려해 볼 때 H₂O와 반응하여 생성되는 HTO는 체내 유입이 용이한 중요 화합물이다. 표 1에 삼중수소의 특성을 나타내었다[12,14].

중수로원전에서 삼중수소는 감속재와 열전달 계통(Primary Heat Transport: PHT)에 있는 중수소와 중성자의 (n, t) 반응에 의해 일차적으로 생성된다. 대부분의 삼중수소는 중수계통에서 형성되며, 계통내 삼중수소의 준위가 평형에 도달할 때까지 지속적으로 상승하게 된다. 중수로원전에서 삼중수소는 중수소의 방사화반응 외에 붕소와 리튬 등이 중성자에 의해 방사화되는 과정에서도 생성된다. 그러나 붕소와 리튬의 삼중수소 발생률은 중수소의 방사화 과정에 의해 생성된 양에 비해 무시할 만한 수준이다[15]. 이를 표 2에 나타내었다.

3. 삼중수소의 인체대사모델

3.1 삼중수소에대한 ICRP Publication 30 모델

ICRP에서는 표준인이 HTO로 오염된 공기에 노출되었을 때 전체 섭취량의 2/3는 호흡을 통해 이루어지며, 1/3은 피부를 통해 이루어진다고 기술하고 있다[13]. 또한, 호흡을 통해 체내로 들어오는 HTO의 경우는 호흡기관에서 100% 흡수되며, 흡수된 HTO는 약 2시간 후에 체액(Body water)과 연조직

Table 1. Biological and physical characteristics of tritium.

Properties	Value
Half-life	12.35 y
Decay constant	$5.6 \times 10^{-2} \text{ y}^{-1}$
Nuclear recoil (³ He)	$1.780 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$
Recoil energy	0-3 eV
Excitation energy	~ 11 eV
Characteristics of β	
Average energy	5.685 keV
Maximum energy	18.6 keV
Average track length (water)	0.56 μm
Maximum track length (water)	6.0 μm
Maximum track length (air)	5 mm
Lineal energy (peak)	~ 3 keV μm ⁻¹
Lineal energy (range)	0.03-8 keV μm ⁻¹
Effective Half-life (human)	
First component	10 d
Second component	40 d
Quality factor	1.0

Table 2. Tritium production by neutron activation in CANDU reactors.

Pathway	Production rate (Ci/MW(e)/y)
Lithium contribution	1.0
${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$	
${}^7\text{Li}(n,n\alpha){}^3\text{H}$	
Boron contribution	0.0001
${}^{10}\text{B}(n,2\alpha){}^3\text{H}$	
${}^{10}\text{B}(n,\alpha){}^7\text{Li}(n,n\alpha){}^3\text{H}$	
Deuterium (99.8% of D ₂ O) contribution	2400
Coolant system (60 Ci/MW(e)/a)	
Moderator system (2340 Ci/MW(e)/a)	

Table 3. Tritium retention half-lives in humans.

Investigators	Reference date	Number of cases	During of the study	Biological Half-life (day)		
				TBW	OBT-1	OBT-2
Fallot et al	1957	20	-	8.5	-	-
Foy and Schnieden	1960	10	-	7.5	-	-
Richmond et al.	1962	5	-	9.5	-	-
Wylie et al.	1963	7	-	8.5	-	-
Butler and Leroy	1965	310	-	9.5	-	-
Osborne	1966	30	-	10.5	-	-
Snyders et al.	1968	1	255	8.7	34	-
Sanders and Reinig	1968	1	415	6.1	23	344
Minder	1969	1	-	-	10-30	139-230
Lambert et al.	1971	1	-	9.1	36	-
Moghisst et al.	1971	-	-	-	21-26	280-550
Moghisst et al.	1972	1	-	9.0	30	450
Balonov	1974	6	300	12.0	39-76	100-120
Pinson and Langham	1980	9	-	11.3	-	-
Rudran	1988	8	280	6.0	30-226	-
Trivedi et al.	1995	8	300	5.0-12.8	58-104	-

(Soft tissue)에 균일하게 분포하게 된다[2,7,10,13]. 이렇게 균일하게 분포된 평형상태에서는 오줌(Urine)을 통해 배출되는 삼중수소의 농도가 체내의 삼중수소 농도와 동일하다는 것을 의미한다. 이에 따라 일반적인 내부피폭 방사능측정과 방사선량평가에서 요구되는 24시간 뇨시로 채집은 요구되지 않는다[7,10,16-18]. 체내에 존재하는 삼중수소는 대부분 물의 형태로 존재한다. 그 중 일부는 매우 낮은 비율이기는 하나 유기조직분자(Organic molecule)와 결합하여 OBT(Organic bound tritium)를 형성한다. 이렇게 생성된 OBT는 상대적으로 긴 유효반감기를 가지나 적은 양이기 때문에 방사선피폭에 미치는 영향은 높지 않다. 따라서 피폭방사선량 평가에서 OBT가 기여하는 일정비율 만큼 기본적으로 고려하여 피폭

방사선량을 평가하도록 권고하고 있다[11].

HTO 피폭 후 삼중수소의 체내 잔류량을 평가하는데 있어서 삼중수소의 유효반감기는 수분의 대사율과 체액의 삼중수소 농도만을 고려하여 단일 지수함수로 표시되며, 삼중수소 유효반감기를 10일로 단순화하여 제시하고 있다. 일반적인 내부피폭 방사선량 평가에서도 10일을 기준으로 하고 있다. 표 3에서는 지금까지 조사된 삼중수소의 유효반감기를 정리하였다[2,3,10,12,16-19].

3.2 체내에서 물과 삼중수소의 거동 메커니즘 유도

삼중수소의 체내에서 거동을 모사하기 위해 1984년 Etmier 등이 음식물 섭취에 의한 HTO와 OBT의 체내 거동을

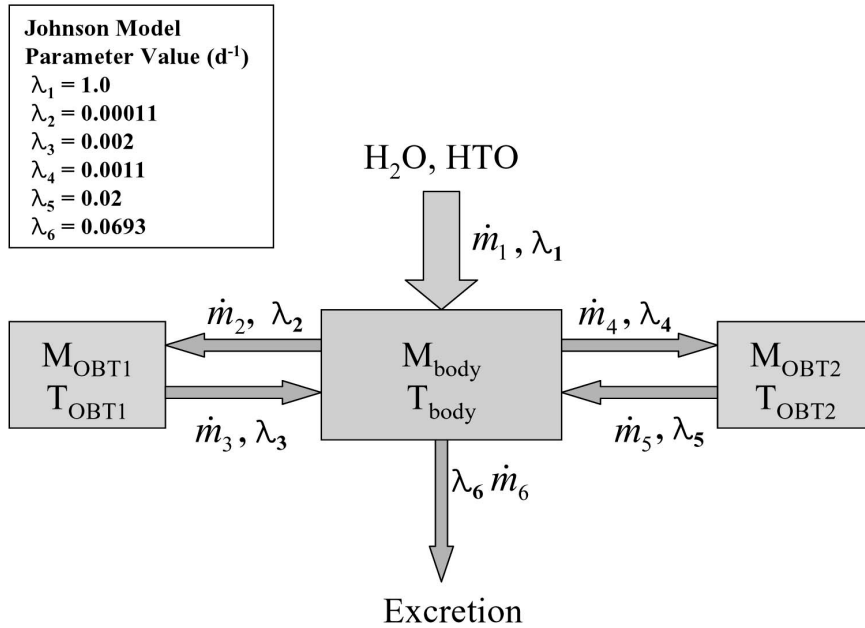


Fig. 1. Balance model for water and tritium intake.

6개의 격실(Compartment)로 구분하여 모델링 하였다[20]. 그 후 1987년 Johnson 등은 이러한 격실모델을 더 단순화하여 체액과 2개의 OBT 격실로 이루어진 삼중수소의 인체대사모델을 발표하였다[12]. 이러한 단순 인체대사모델은 지금까지 삼중수소에 의한 내부피폭 방사선량평가의 근간을 이루고 있다[7,8]. 또한 캐나다 CRNL(Chalk River Nuclear Laboratories)에서 개발한 체내선량평가 코드인 GENMOD와 OPG(Ontario Power Generation)의 삼중수소 방사선량 평가지침에도 그대로 반영되었다[21]. Johnson의 인체대사모델에서는 체내 삼중수소의 거동을 각기 다른 평균 잔류시간과 삼중수소가 모든 연조직에 걸쳐 균일하게 분포된다는 가정을 갖는 두 개의 OBT 격실로 구분하여 표현하였다[12]. 그러나 체액과 OBT 격실들이 물리적인 구조나 다른 화합물 등으로 결합되는 특성은 고려하지는 않았다. 이를 그림 1에 나타내었다.

이러한 단순화된 격실의 인체대사모델을 기준으로 국내 원전 방사선작업종사자의 뇨시료중 삼중수소의 방사능 측정값을 기준으로 유효반감기를 새로이 계산하였다. 이를 위해 HTO 인체대사모델에 사용되는 전달계수 등을 사용하여 각 격실별로 물과 삼중수소의 보존방정식을 유도하였다. 정상상태의 경우, 체내로 유입되는 물의 보존방정식은 아래 식과 같이 표현할 수 있다[22,23].

$$\frac{\partial M_{OBT1}}{\partial t} = \dot{m}_2 - \dot{m}_3 = 0 : \text{정상상태} \quad (1)$$

$$\frac{\partial M_{OBT2}}{\partial t} = \dot{m}_4 - \dot{m}_5 = 0 : \text{정상상태} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial M_{body}}{\partial t} &= +\dot{m}_1 - \dot{m}_6 + (\dot{m}_3 - \dot{m}_2) + (\dot{m}_5 - \dot{m}_4) : \text{정상상태} \\ &= \dot{m}_1 - \dot{m}_6 = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, M_x : 격실(체액, OBT1, OBT2)에서 수분의 질량 (kg)
 \dot{m}_x : 격실으로 수분의 전달률 (kg/day)

위 식들을 정리하면, 정상상태(Steady state)에서 $\dot{m}_1 = \dot{m}_6$, $\dot{m}_2 = \dot{m}_3$, $\dot{m}_4 = \dot{m}_5$ 같이 표현된다. 이는 각 격실로 유입되는 물의 대사량은 그 격실에서 배출되는 물의 대사량과 같다는 것으로, 결과적으로 물의 대사방정식에서 체외로 배출되는 물의 대사량 \dot{m}_6 이 체내로 유입되는 물의 대사량 \dot{m}_1 과 동일함을 알 수 있다. 이러한 근거로 삼중수소에 대한 체내 보존방정식을 유도하면 아래와 같이 표현된다.

$$\frac{\partial T_{OBT1}}{\partial t} = \dot{m}_2 \frac{T_{body}}{M_{body}} - \dot{m}_3 \frac{T_{OBT1}}{M_{OBT1}} \quad (4)$$

$$\frac{\partial T_{OBT2}}{\partial t} = \dot{m}_4 \frac{T_{body}}{M_{body}} - \dot{m}_5 \frac{T_{OBT2}}{M_{OBT2}} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_{body}}{\partial t} &= -\dot{m}_2 \frac{T_{body}}{M_{body}} + \dot{m}_3 \frac{T_{OBT1}}{M_{OBT1}} - \dot{m}_4 \frac{T_{body}}{M_{body}} \\ &\quad + \dot{m}_5 \frac{T_{OBT2}}{M_{OBT2}} - \dot{m}_6 \frac{T_{body}}{M_{body}} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, T_x : 격실 x에서 삼중수소의 방사능(Bq)

그 결과 식 (4)-(6)은 Johnson의 삼중수소 대사방정식과 비교하면 전달상수 $\lambda(i=2, \dots, 6)$ 은 다음과 같이 나타내진다.

$$\lambda_2 = \frac{\dot{m}_2}{M_{body}}, \quad \lambda_3 = \frac{\dot{m}_3}{M_{OBT1}}, \quad \lambda_4 = \frac{\dot{m}_4}{M_{body}}, \quad \lambda_5 = \frac{\dot{m}_5}{M_{OBT2}}, \quad \lambda_6 = \frac{\dot{m}_6}{M_{body}} \quad (7)$$

HTO의 대사모델에 사용되는 전달상수(λ)는 식 (7)과 같

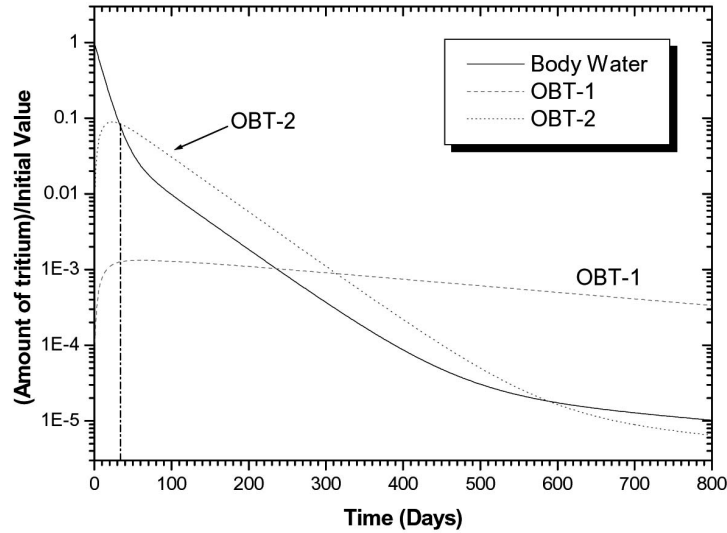


Fig. 2. Retention rate in body water and OBTs.

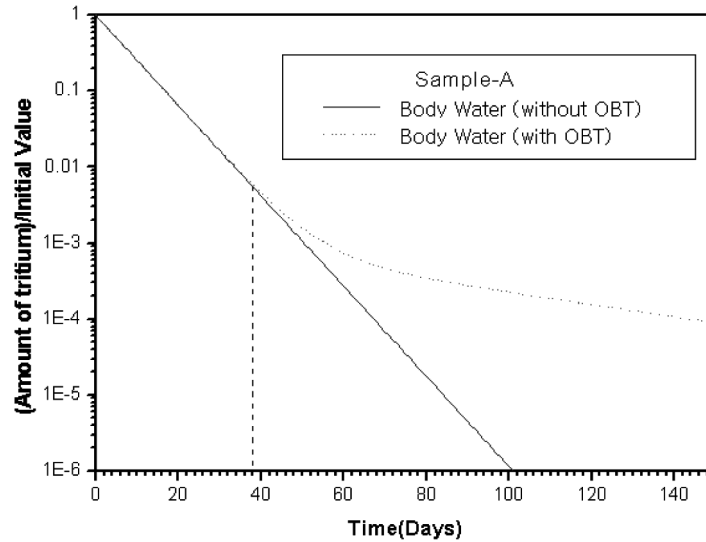


Fig. 3. Retention rate for HTO in body water according to considering OBTs.

이 각 격실에서 물의 대사량(m)과 질량(M)의 비로 표현된다. 따라서 삼중수소 체내 잔류량 및 유효반감기 차이는 대사량(m)과 각 조직의 질량(M)에 의한 것임을 알 수 있다. 특히, OBT에 의한 기여분이 낮은 단기 피폭의 경우는 λ_0 에 의해서 피폭선량이 결정되는데, 이 값은 방사선작업종사자 개인의 일일수분 섭취량과 체내 수분질량에 의해 결정된다.

따라서 위 식 (1)에서 식 (7)을 이용하여 체내 각 격실 (Compartment) 내의 HTO의 잔류량을 평가하기 위해서는 각 격실에 적합한 전달상수(λ)를 찾아내야 한다. 이 전달상수는 삼중수소의 유효반감기를 결정하는데 있어서 필요한 데이터이다. 본 논문에서는 월성원전에서 방사선작업 후 제출하는 종사자의 뇨시료에 대해 방사능을 측정된 뇨시료 분석 결과를 통해 전달상수를 결정하였다. 즉 삼중수소의 유효반감기는 식 (7)을 이용하여 계산되었다.

3.3 유기적으로 결합된 삼중수소(OBT)의 기여도 평가

체내에서 유기적으로 결합된 삼중수소(OBT)의 체내 기여도를 평가하기 위해 식 (4)-(6)의 시간에 따라 달라지는 1차 연립 미분방정식의 해를 구하기 위해 Implicit 방법(Backward Time Central Space)을 이용하였다. 그 결과를 그림 2에 나타내었다. 그림 2에서 보듯이 체액과 두 개의 OBT 격실에서 시간별 삼중수소 잔류량은 약 35 일 정도에서 체액과 OBT-2의 값이 교차하였다. 이는 HTO 피폭 후 약 35일 미만에서 OBT의 기여도는 체내의 삼중수소 농도에 크게 영향을 미치지 않는다는 것을 의미한다. 또한 그림 3은 OBT 격실을 삼중수소 대사방정식에 포함시킬 경우와 제외시켰을 경우, 체액 격실에서의 삼중수소 농도를 계산한 것이다. 그 결과 OBT가 체내 삼중수소 잔류량 변화에 미치는 영향은 약 35일 미만에서는 매우 낮음을 알 수 있다.

Table 4. Effective Half-lives based on urine bioassay results of Wolsong NPPs' workers.

No	Weight (kg)	Duration of observation (Days)	Number of measurement	Initial concentration (MBq/l)	Final concentration (MBq/l)	Half-Life (Days)
1	68	16	8	5.39	0.540	5.06
2	60	36	13	9.24	0.463	8.14
3	90	40	10	8.57	0.477	9.66
4	63	18	7	3.31	0.585	7.11
5	73	17	9	3.50	0.500	6.14
6	60	21	5	3.31	0.540	7.99
7	62	16	5	3.20	0.429	5.55
8	68	23	6	2.34	0.518	8.42
9	67	12	4	4.29	0.108	5.85
10	60	26	9	6.90	0.551	6.98
11	64	32	11	5.68	0.259	7.21
12	72	13	8	2.19	0.681	7.80
13	74	27	6	4.08	0.566	9.33
14	60	19	6	2.86	0.592	8.48
15	63	29	6	6.63	0.459	7.73
Avg. $\pm 1.645\sigma$						7.43 ± 2.22

NCRP(National Council on Radiation Protection and Measurements)에서는 유기적으로 결합된 삼중수소(OBT)에 의한 방사선량 기여분에 대해 여러 가지 과정의 복잡함을 고려하여 HTO 방사선량의 10%를 추가하여 보수적으로 방사선량을 평가할 것을 권고하고 있다[11]. 이러한 방사선량 평가 개념은 캐나다의 삼중수소 내부피폭 방사선량 평가에 반영되었으며, 국내원전의 삼중수소 피폭방사선량 평가 절차에도 적용되고 있다[24]*.

4. 월성원전 작업자의 삼중수소 유효반감기 평가

4.1 월성원전작업자노시료 측정

월성원전 종사자의 삼중수소에 대한 평균 유효반감기를 평가하기 위해 월성원전 작업종사자의 노시료 중의 삼중수소 농도 실측자료를 사용하였다. 현재 월성원전종사자의 삼중수소 피폭관리절차에는 방사선 관리구역에서 작업종료 후 노시료를 반드시 제출하도록 규정하고 있다. 만일 노시료의 삼중수소 농도가 3.7 MBq/l (100 μCi/l) 이상을 보인 작업종사자의 경우는 0.74 MBq/l (20 μCi/l) 이하가 될 때까지 방사선 관리구역의 작업을 금지시키고, 작업금지 조치 후 작업자 노시료의 삼중수소 농도가 0.74 MBq/l 이하가 될 때까지 일정간격으로 노시료를 제출하도록 규정하고 있다. 본 연구에서는 이 때 측정된 15명의 작업자 노시료 농도를 이용하였다[22,23,25].

4.2 최소자승법에 의한 측정자료 보정 및 유효반감기 계산

본 연구에서 사용된 노시료 방사능측정 자료는 약 40일 이내의 단기간 동안 종사자의 노시료에 대해 삼중수소 농도 변화를 측정된 것이다. 특히 이 자료는 원전 방사선작업과정에서 삼중수소에 의한 피폭을 받은 종사자의 피폭관리 목적으로 측정된 자료로서 측정 시점의 연속성이 좋은 편은 아니다. 또한 노시료 중의 초기와 최종 삼중수소 농도를 이용하여 삼중수소 유효반감기를 산출하고 있기 때문에 유효반감기의 계산과정에서 오차를 수반할 수 있다. 이런 이유로 최소자승법을 이용하여 삼중수소 제거상수와 초기 시점의 체내 삼중수소 농도를 보정하였다[22,25]. 우선 그림 2와 3의 OBT의 기여도를 평가한 결과, 작업자 체내의 삼중수소 농도변화는 단기 피폭일 경우 OBT가 제외된 단일 지수항으로 표현된 아래의 해를 이용하여 구할 수 있다.

$$T_{\text{body}}(t) = T_{\text{body}}(0) e^{-\lambda_0 t} \quad (8)$$

식 (8)에 자연로그를 취하여 선형화 한 후에 최소자승법을 사용하여 노시료 측정 자료에 대한 $T_{\text{body}}(0)$ 와 λ_0 를 산정하였다. 그 결과 표 4에서 보듯이 월성원전 종사자의 삼중수소 평균유효반감기는 7.43 \pm 2.22일(90% 신뢰도)을 보였다. 이 결과는 1965년 Butler 등이 310명을 대상으로 측정된 유효반감기인 9.5 \pm 4.1일(90% 신뢰도)과 ICRP에서 권고하는 10일보다는 다소 낮은 것으로 조사되었다[13,19]. 이런 이유를 논리적으로 정량화하기 어려운 점이 있다. 그런데, 월성원전에서 실제로 피폭을 받은 성인 작업종사자를 대상으로 유효반감기를 측정하였기 때문에, 이들이 체내에 들어온 삼중수소의 인위

*한전전력연구원 공문, 기연(방) 140.03-3129(1993.12.16), 체내선량 평가프로그램 개발 결과 보낸, 한전전력연구원, 1993

적인 체외 배설을 위해 과다한 물의 섭취로 삼중수소의 유효반감기가 비교적 짧게 나타난 것으로 추정되었다. 이러한 사항에 대해서는 추가적인 검토나 연구가 필요하다고 판단된다.

국내원전에서는 내부피폭 선량평가에 있어서 ICRP나 IAEA의 방사선방호지침을 따르고 있는 것으로 확인되었다. 특히 삼중수소에 의한 내부피폭 선량평가는 ICRP, IAEA 및 캐나다 원자력규제기관의 기준을 모두 반영하고 있는 상황이다. 삼중수소의 흡입에 따른 내부피폭 방사선량 평가에 있어서 유효반감기는 중요한 영향을 미치는 인자이다. 유효반감기가 줄어들게 되면 여기에 따라 내부피폭선량도 감소하게 된다. 그러나 국내 원전의 삼중수소 내부피폭 선량평가에서는 이러한 연구결과를 반영하지 않고 ICRP의 유효반감기 10일을 적용하여 내부피폭 선량을 보수적으로 평가하고 있다. 이러한 점은 방사선관리 측면에서 별 문제는 없으나, 향후 삼중수소에 의한 내부피폭 선량평가에서 실질적인 유효반감기의 고려는 검토해 볼 가치가 있다고 본다.

5. 결론

본 논문은 삼중수소에 의한 내부피폭 방사선량 평가를 위해 삼중수소의 방사선학적 특성과 인체대사모델을 검토하였다. 특히 중수로원전에서 방사선작업과정에서 삼중수소에 의한 내부피폭을 받은 종사자의 뇨시료중 방사능측정 자료를 이용하여 삼중수소 인체대사모델의 적용성을 검토해 보았다. 이를 위해 삼중수소의 인체대사모델의 방정식을 유도하였고, 피폭방사선량 평가의 중요 변수 중에 하나인 유효반감기를 새로이 계산하였다. 이러한 계산 자료를 근거로 피폭 방사선량 평가 과정에서 ICRP의 기본 값을 이용하는 경우와 비교하여 보수성을 도출하고자 하였다.

국내원전의 방사선작업과정에서 피폭을 받은 15명 종사자의 뇨시료중 삼중수소 방사능을 측정하였고, 이 측정 자료를 이용하여 유효반감기를 산출하였다. 그 결과 유효반감기는 90% 신뢰도에서 7.43 ± 2.22 일로 나타났다. 이는 ICRP에서 권고하는 유효반감기 10일을 하회하는 것으로 나타났다. 따라서 ICRP의 내부피폭 선량평가 지침을 만족시키고 있으며, 특히 원전종사자의 피폭평가 측면에서 10일의 유효반감기를 적용하여 보수적으로 평가하고 있어 삼중수소 내부피폭 선량평가가 적절하게 이루어지고 있는 것으로 확인되었다.

국내원전의 삼중수소 내부피폭 선량평가 절차는 ICRP와 IAEA에서 권고하는 선량평가 지침과 유효반감기 등을 적용하고 있다. 이러한 상황을 고려해볼 때 본 연구에서도 산출한 삼중수소 유효반감기 분석 결과는 중수로원전에 근무한 경력이 있는 성인남자를 대상으로 하고 있기 때문에 이를 피폭 방사선량평가 실무에 그대로 적용하기에는 다소 무리가 있을 수 있다고 본다. 그럼에도 불구하고 이러한 연구결과는 중수로원전 종사자에 대한 내부피폭 선량평가 방법의 적절성을 확인해줄 수 있는 결과로서 큰 의미가 있다 하겠다. 한편 보다 정확한 삼중수소 유효반감기를 도출하고 이를 피폭방사선량 평가에 적용하기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다고 본다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부의 중장기 연구개발사업 및 한

국수력원자력주식회사의 전력사 공동연구개발사업으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 한국수력원자력(주). 원자력발전소 방사선 관리 연보. 2007.
2. Whillans DW, Thind KS. Internal Dosimetry for Short-Range Emitters. Health Physics Society 1995 Summer School (Radiation Protection at Nuclear Reactors). Medical Physics Publishing Madison, Wisconsin. 1995.
3. Wolodarsky B. OPG Tritium Dosimetry. Radiation Protection Workshop. 2005.
4. 한국수력원자력(주). 원자력발전소 주변 환경방사선 조사 보고서. 2007.
5. Ontario Power Generation. Annual Summary and Assessment of Environmental Radiological Data for 2005. N-REP-03481-10004-R01. 2006.
6. Canadian Standards Association. Guidelines for Calculating Derived Release Limits for Radioactive material in Airborne and Liquid Effluents for Normal Operation of Nuclear Facilities. CAN/CSA-N288.1-M87. 1987.
7. International Atomic Energy Agency, Methods for Assessing Occupational Radiation Doses Due to Intakes of Radionuclides. Safety Report Series No. 37, 2004.
8. Atomic Energy Control Board. Regulatory Document R-100; The Determination of Effective Doses from the Intake of Tritiated Water. 1987.
9. 교육과학기술부. 고시 제 2008-51 호: 내부피폭 방사선량의 측정 및 산출에 관한 규정, 2009.
10. International Commission on Radiation Protection. Individual Monitoring for Internal Exposure of Workers. Replacement of ICRP-54. ICRP Publication 78. Pergamon Press. 1997.
11. National Council on Radiation Protection and Measurement. Tritium and Other Radionuclide Labeled Organic Compounds Incorporated in Genetic Materials. NCRP-63. 1979.
12. Hill RL, Johnson JR. Metabolism and Dosimetry of Tritium. Health Physics. 1993;65(6):628-647.
13. International Commission on Radiation Protection. Limits for intakes of radionuclides by workers. ICRP Publication 30. New York: Pergamon Press. 1982.
14. Okada S, Momoshima N. Overview of tritium: Characteristics, sources and problems. Health Physics. 1993;65(6):595-609.
15. Wong KY, Khan TA, Guglielmi F, Kvetton OK, Macphee RC. Canadian tritium experience. Canadian Fusion Fuels Technology Project, Toronto, Ontario, Canada. 1984.
16. Balonov MI, Dolgirev EI, Likhtarev IA. Exchange kinetics and dosimetry of tritium oxide in man for different routes of administration. Health Physics. 1974;27:367-375.
17. Bush WR. AECL-4150; Assessing and controlling the hazard from tritiated water, Atomic Energy of Canada Limited, Chalk River, Canada. 1972.
18. Taylor DM, Moroni JP, Snihs JO, Richmond CR. The Metabolism of H-3 and C-14 with Special Reference to Radiation Protection. Radiat. Protect. Dosim. 1990;30:87-93.
19. Butler HL, Leroy JH. Observation of the Biological Half-life of Tritium. Health Physics. 1965;11:283-290
20. Etnier EL, Travis CC, Hetrick DM. Metabolism of Organically Bound Tritium in Man. Radiat. Res. 1984;100:487-502.
21. Dunford DW, Johnson JR. AECL-9434; GENMOD-A Program for Internal Dosimetry Calculation. 1987.
22. 이형석, 김위수, 김희근, 김은주, 양양희. 중수로원전에서 발생하는 삼중수소 및 C-14의 작업자 선량평가를 위한 인체대사모델 연구, 한국원자력학회 추계학술대회, 2002.10.24, 2002.
23. 김희근, 김용배, 김위수, 김은주, 이형석. 삼중수소 인체대사모델 및 유효반감기 검토, 대한방사선방어학회 춘계학술대회, 2001.4.27, 2001.

24. 한국수력원자력(주). 원자력발전소 표준기술행정 절차서; 내부피폭 방사선량의 측정 및 평가, 표준기행 방사선-06. 2003.
25. 교육과학기술부. 중수로 원전 운전 안전성 현안연구 (최종보고서). 2002.

Analysis of Metabolism and Effective Half-life for Tritium Intake of Radiation Workers at Pressurized Heavy Water Reactor

Hee Geun Kim and Tae Young Kong
Korea Electric Power Research Institute

Abstract - Tritium is the one of the dominant contributors to the internal radiation exposure of workers at pressurized heavy water reactors (PHWRs). This nuclide is likely to release to work places as tritiated water vapor (HTO) from a nuclear reactor and gets relatively easily into the body of workers by inhalation. Inhaled tritium usually reaches the equilibrium of concentration after approximately 2 hours inside the body and then is excreted from the body with a half-life of 10 days. Because tritium inside the body transports with body fluids, a whole body receives radiation exposure. Internal radiation exposure at PHWRs accounts for approximately 20-40% of total radiation exposure; most internal radiation exposure is attributed to tritium. Thus, tritium is an important nuclide to be necessarily monitored for the radiation management safety. In this paper, metabolism for tritium is established using its excretion rate results in urine samples of workers at PHWRs and an effective half-life, a key parameter to estimate the radiation exposure, was derived from these results. As a result, it was found that the effective half-life for workers at Korean nuclear power plants is shorter than that of International Commission on Radiological Protection guides, a half-life of 10 days.

Keywords : Pressurized Heavy Water Reactor, Tritium, Urine Sample, Metabolism, Effective Half-life