

An Analysis of Carbon-14 Metabolism for Internal Dosimetry at CANDU Nuclear Power Plants

Hee-Geun Kim · Hyung-Seok Lee · Gak-Hyun Ha
Korea Energy Power Research Institute

중수로 원전 종사자의 방사선량 평가를 위한 ^{14}C 인체대사모델 분석

김희근 · 이형석 · 하각현
한진전력연구원

(2003년 6월 20일 접수, 2003년 9월 1일 채택)

Abstract - Carbon-14 is one of the major radionuclides released by CANDU Nuclear Power Plants(NPPs). It is almost always emitted as gas through the stack. From CANDU NPPs about 95 % of all carbon-14 is released as carbon dioxide. Carbon-14 is a low energy beta emitter which, therefore, gives only a small skin dose from external radiation. As carbon dioxide is physiologically rather inert gases for man's metabolism, the inhalation dose is probably less than 1 % of the ingestion dose. But this source of carbon-14, formed in a closed, non-oxidative environment, was subsequently released into the workplace as an insoluble particulate when these systems were opened up for re-tubing at CANDU NPPs. As a part of the improvement of dosimetry program at Wolsong Nuclear Power Plants, the carbon-14 metabolism based on references was investigated and studied to setup the internal dosimetry program due to inhalation of carbon-14.

Key words : Carbon-14, Dose assesment, retention function, ALI, effective half-life

요약 ^{14}C 은 중수로원전에서 연돌(Stack)을 통해 방출되는 중요한 방사성 핵종중의 하나로, 대략 95 % 가량이 이산화탄소의 형태로 발생되고 방출되고 있다. 방사성탄소는 발생에너지가 낮은 베타 방출체로서 외부피폭은 크게 영향을 미치지 않는다. 따라서 중수로에서 탄소는 흡입이나 섭취를 통해 작업자 체내로 유입되는 경우에만 내부피폭을 일으키고 있다. 일반적으로 탄소는 신체에서 불활성 기체와 같은 거동을 보이기 때문에 섭취경로에 의한 피폭이 흡입경로에 의한 피폭보다 훨씬 높은 것으로 알려져 있다. 따라서 작업장에서 탄소의 흡입에 의한 방사선 피폭은 거의 일어나지 않으나 캐나다 원전의 압력관 교체 작업시 아주 소량의 피폭을 일으킨 경험이 있다. 본 논문은 원전 작업장에서 일어날 수 있는 방사성탄소의 흡입에 대비하여 방사선 피폭평가를 위한 방사선방호 프로그램을 수립할 목적으로 방사성탄소의 인체 대사모델 등에 대한 분석을 수행하였다.

중심어 : ^{14}C , 선량평가, 잔류함수, 연간섭취한도, 유효반감기

서 론

^{14}C 은 상층권 대기중에서 우주선의 반응에 의해 자연적으로 생성되기도 하며, 핵실험이나 원자력 시설 등에서 인위적으로도 생성된다. 이는 저에너지 베타방출핵종으로 물리적 반감기는 각각 5,730년이며 ^{14}N 로 붕괴한다. 중수로 원전의 경우 ^{14}C 은 주로 감속재 계통의 중수내에서 $^{17}\text{O}(n, \alpha)^{14}\text{C}$ 반응에 의해 생성된다. 이 경우 ^{14}C 의 주요 화학적 형태는 $\text{CO}_2/\text{HCO}_3^-$ 로서 생성된 ^{14}C 의 대부분이 이온교환수지에 의해 제거된다. 하지만 정상운전 중이나 보수작업 중에 불가피한 중수누설을 통해 작업공간내로 누설되며 매우 소량이지만 하나 작업종사자의 방사선피폭을 유발하기도 한다. 그러나 이 경우 ^{14}C 의 주요 화학형태는 $^{14}\text{CO}_2$ 로서 불활성 기체와 같은 거동을 보이기 때문에 방사선피폭은 높지 않은 실정이다.

국내 중수로 원전인 월성 원전의 가동 경험으로 볼 때, 원전 주변주민의 경우 환경으로 방출되는 ^{14}C 의 양에 따라 전체 피폭선량의 약 5-30% 정도가 ^{14}C 에 의해서 발생한다[1, 2]. 작업종사자의 경우 ^{14}C 에 의한 방사선피폭이 국내 중수로 원전에서 발생한 사례는 특별히 보고 되지는 않았으나 캐나다 원전의 경우 소량이지만 하나 한 두 차례 ^{14}C 에 의한 방사선피폭을 경험한 적이 있다[3]. 따라서 이런 점을 고려하여 ^{14}C 의 방사선피폭에 따른 선량평가 방법론을 구비하여야 하는데 이 경우 ^{14}C 에 대한 광범위한 인체대사 자료가 필요하다. 그러나 현재 국내에서는 ^{14}C 의 선량평가에 필요한 인체대사 정보는 단지 국제방사선방호위원회(ICRP)에서 권고하는 자료에만 국한되고 있다. 하지만 국제방사선방호위원회(ICRP)의 권고 지침인 ICRP Pub. 78에서는 ^{14}C 에 대해서 구체적으로 감시 절차를 제공하지 않고 있다.

본 연구에서는 중수로원전 작업자에 대한 ^{14}C 의 흡입에 따른 인체 대사모델을 검토하였다. 또한 국외의 $^{14}\text{CO}_2$ 체내 잔류함수를 이용하여 작업자 유효선량환산계수와 연간섭취한도 및 체내 평균잔류시간을 계산해 보았고 이를 바탕으로 방사선량 평가 방법론을 수립하였다.

생물학적 특성 및 발생

탄소는 환경에서 다량 존재하며 CO_2 나 모든 유기조직들에서 발견되고 있다. 그중에서 ^{14}C 는 탄소의 방사성동위원소로서 방사성 붕괴시 저에너지

지 베타선을 방출하는데 최대에너지는 156 KeV, 평균에너지는 49.5 KeV이며 약 5,730년의 물리적 반감기를 가지고 ^{14}N 로 붕괴한다. 일반적으로 저 에너지 β 선 방출체인 ^{14}C 는 음식물 섭취와 호흡을 통해 인체에 흡수된다. ^{14}C 의 경우, 평형상태에서 흡수선량의 99% 이상은 섭취 경로를 통해 이루어진다. ^{14}C 의 섭취와 신체내에서 체류 그리고 제거되는 과정은 안정된 탄소의 인체대사 메카니즘과 동일하다. 체내로 유입된 탄소는 대부분은 CO_2 나 요소의 형태로 제거되며 소량만이 신체에 남아있게 된다.

중수로원전의 경우, 발생하는 ^{14}C 의 약 95% 이상이 $^{14}\text{CO}_2$ 형태를 보이며 나머지 약 5%는 메탄화합물(CH_4)로 존재한다[4]. 체내로 유입된 $^{14}\text{CO}_2$ 는 혈액속에서 중탄산염으로 즉시 변환되며, 호흡을 통해 유입된 CO_2 의 99% 이상은 약 4시간 이내에 배출된다[5]. 탄소의 또 다른 화합물인 CH_4 와 같은 메탄화합물들은 극히 소량이 생성되며, 체내에서는 거의 흡수가 이루어지지 않는다. 이외에 또 다른 형태인 CO는 매우 짧은 시간동안 체내에 존재한다[6, 7]. 따라서 중수로 원전의 경우 ^{14}C 에 의한 작업종사자의 방사선 피폭선량은 거의 일어나지 않으나 일어날 경우 그 화학형은 $^{14}\text{CO}_2$ 라 할 수 있다.

중수로 원전은 감속재와 냉각재로 중수를 사용한다. ^{14}C 는 핵연료와 감속재, 냉각재계통(PHT: Primary heat transport system) 그리고 환형기체계통(Annulus gas system)에서 일차적으로 생성된다. 표 1에서는 ^{14}C 이 발생하는 주요한 반응들을 요약하였다. 표 1에서 보듯이, ^{13}C 핵종은 자연 존재비와 $^{13}\text{C}(n, \gamma)^{14}\text{C}$ 반응을 위한 열중성자 반응단면적이 다른 O, N에 비해 매우 작기 때문에 ^{14}C 의 생성에 미치는 기여도는 크지 않다. 하지만, ^{14}N 는 자연존재비와 열중성자 반응단면적이 표 1에 열거한 핵종 중에 가장 크다. 따라서 ^{14}N 의 중성자 방사화에 의한 ^{14}C 을 형성하는데 상당한 기여를 한다. 그러나 실질적으로는 중수로 원전에서 ^{14}C 은 대부분 $^{17}\text{O}(n, \alpha)^{14}\text{C}$ 반응에 의해서 생성되는데 그 주된 이유는 감속재와 냉각재로 사용되는 중수(D_2O)는 경우(H_2O)보다 ^{17}O 의 함량이 훨씬 더 높기 때문이다. 특히, 월성 원전의 감속재계통에는 약 7.65 m³ 부피의 감속재 커버가스(Moderator cover gas)인 헬륨과 중성자 감속을 위한 중수(D_2O)가 약 260 톤 정도 들어있다. 감속재계통에는 많은 양의 중수가 존재하며, 상대적으로 높은 열중성자 속도로 인해 ^{17}O 의 (n, α) 반응에 의해 생성되는 ^{14}C 은 원자로내의 다른 계

Table 1. Principal reactions for the production of in CANDU reactors

Target nuclide	Natural abundance (%)	Reaction	Thermal neutron cross section (barns)
^{17}O	0.037	$^{17}\text{O}(n, \alpha)^{14}\text{C}$	0.235
^{14}N	99.63	$^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$	1.820
^{13}C	1.11	$^{13}\text{C}(n, \gamma)^{14}\text{C}$	0.0009

Table 2. Estimated production rates of ^{14}C in various systems of a CANDU-6 reactor[6]

System	Target nuclide	Production rate ^a (TBq yr)
Moderator	^{17}O	17.2
PHT	^{17}O	0.3
Fuel	^{17}O	0.59
Annulus gas(CO_2)	^{13}C	4.3×10^{-5}
	^{17}O	5.1×10^{-4}
	^{14}N (1000 ppm - normal operating limit)	0.01
	^{14}N (5000 ppm - upper operating limit)	0.05

^aValues are taken from Boss and Allsop.

These are estimated using a 90 % capacity factor.

통 보다 더 많이 생성된다. 표 2에서는 감속재 계통과 냉각재 계통 그리고 핵연료에서 예측된 ^{14}C 생성률을 나타내었다. 표 2에서 보듯이 90 %의 가동률로 운전되는 중수로 원자로의 감속재 계통에서 $^{17}\text{O}(n, \alpha)^{14}\text{C}$ 반응에 의해 생성되는 ^{14}C 는 약 17.2 TBq yr⁻¹로 예측된다.

감속재 계통 보다 열중성자속이 낮은 냉각재 계통(PHT)에서는 약 0.3 TBq yr⁻¹가 생성된다[8]. 위 결과에서 보듯이, ^{14}C 생성률은 감속재와 냉각재에서 포함된 ^{17}O , ^{14}N , ^{13}C 핵종의 (n, α), (n, p), (n, γ) 반응에 의해 생성된다. 따라서 ^{14}C 생성률은 이들 핵종의 농축도와 중수의 질량을 고려하여 표 3과 같이 정규화(Normalization)하여 제시할 수 있다.

다음 표 3에서는 캐나다의 원전의 단위 발전량에 따른 ^{14}C 의 평균 생성률을 비교한 것이다. 이 표에서 제시된 ^{14}C 생성률은 캐나다의 Pickering과 Bruce 그리고 Darlington 원전에서 발생되는

평균 ^{14}C 생성률을 기초하여 Kabat와 Gorman에 의해 계산된 값이며 캐나다 ACRP에 보고된 값이다[9,10]. 이 값에 근거하여 CANDU-6의 ^{14}C 생성과 방출량을 예측하고 있다.

인체대사모델

체내에 유입된 탄소의 분포 및 거동은 일반적으로 그림 1과 같이 도식화 할 수 있으며 ^{14}C 농도는 대표적인 격실인 $\text{CO}_2/\text{HCO}_3^-$ 에서 음식물 섭취와 CO_2 의 흡입을 통해 결정된다. 통상 중수로 원전의 작업공간내에서 방사선 작업시 주요 ^{14}C 피폭경로는 음식물 섭취보다는 호흡을 통해서 이루어진다고 볼 수 있다.

ICRP 인체대사모델

ICRP에서는 $^{14}\text{CO}_2$ 의 섭취에 따른 선량평가를

Table 3. Comparison of estimated production rate of ¹⁴C per unit electrical energy generated in various systems of CANDU reactors

System	¹⁴ C production rate per unit electrical energy generated ^{a,b} TBq(GW _e .yr) ⁻¹	
	Ontario Hydro CANDUs	CANDU-6
Moderator	25	27
PHT	0.5	0.38
Fuel	0.6	0.96
Annulus gas		
■ with nitrogen	24	-
■ with carbon dioxide	0.03	0.038

^a Calculations include 0.055% isotopic abundance for ¹⁷O (instead of natural 0.037 %) arising from enrichment of this isotope in the distillation step of the heavy water manufacturing process.

^b Value are taken from ACRP-14 report (ACRP, 1995).

위해 탄소의 대사모델에 관해 매우 단편적인 지침만을 권고하고 있다. ICRP Pub. 10에서는 섭취된 CO₂의 30 %가 뼈에 침적되며 0.4 일의 반감기를 갖고 체내에 잔류된다고 가정하고 있다[11]. 이 모델은 일차적으로 동물실험과 소수의 인체 실험지원자를 대상으로 6 시간미만의 단시간동안 체외로 배출된 사례에 근거를 두고 있다.

또한 ICRP Pub. 30에서는 연간섭취한도를 유도하기 위한 목적으로 ICRP Pub. 10에 제시된 모델과 다른 ¹⁴C 모델을 권고하고 있다[12]. ICRP Pub. 30 모델에서는 체내에 섭취된 ¹⁴CO₂의 18 %와 81 %에 대해 각각 5분과 60분의 짧은 반감기를 갖고 있으며 나머지 1 %는 체내에서 60,000분(약 40일)의 평균 반감기를 갖고 있다고 권고하고 있다. 이때, 1 %에 해당하는 ¹⁴CO₂는 동물실험을 통해 장기간 잔류하는 방사능 양의 측정에 근거하여 평가된 것이다. 하지만 최근에 발표된 탄소 모델에서는 섭취된 CO₂는 체내 전체에 걸쳐 분포되는 것으로 보고 있다[13].

다음 식은 ICRP Pub. 30에서 제시된 ¹⁴CO₂의 체내 잔류함수이다. 이 함수를 이용하여 유효선량 환산계수는 식 (10)와 같이 유도된다.

$$R(t)_{ICRP30}^{14CO_2} = 0.18e^{-0.693 t/5} + 0.81e^{-0.693 t/60} + 0.01e^{-0.693 t/60000}, [t = \text{min}] \quad (9)$$

$$e(50), SvBq^{-1} = \left(\frac{\bar{E} Q_F f_1}{m} \right) \int_0^{50yr} R(t)_{ICRP30}^{14CO_2} dt \quad (10)$$

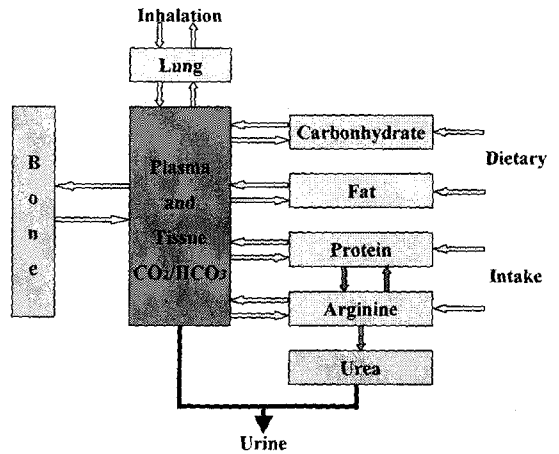


Fig. 1. General model for carbon transport in the human body

여기서, \bar{E} 는 평균 베타에너지이며, m 은 피폭을 받는 연조직 질량을 나타낸다. 마지막으로 Q_F 와 f_1 은 ¹⁴C의 베타에너지의 선질계수(Quality factor)와 흡수분율(Absorption fraction)을 나타낸다. 그리고 식 (10)에서 구해진 1 Bq 섭취당 예탁 유효선량과 작업자의 연간선량한도를 이용하여 작업자에 대한 연간섭취한도를 구할 수 있다.

$$ALI = \left(\frac{\text{Annual Dose Limit}}{e(50)SvBq^{-1}} \right) \quad (11)$$

즉, ICRP Pub. 30에서는 연간 50 mSv의 작업자 선량한도를 근거하여 연간섭취한도를 8×10^9 Bq로 제시하였다. 그러나 ICRP Pub. 60 권고 이후 연간 작업자 선량한도가 연평균 20 mSv로 변경됨에 따라 ICRP Pub. 61에서는 $^{14}\text{CO}_2$ 에 대한 연간섭취한도(ALI)를 3×10^9 Bq로 권고하고 있다.

캐나다 인체대사모델

캐나다 Pickering 원전에서는 1980년대 피더관 보수작업시 소량이나마 $^{14}\text{CO}_2$ 흡입을 경험한바 있다. 그리고 $^{14}\text{CO}_2$ 흡입한 작업자에 대해서 ^{14}C 피폭선량을 평가하기 위해서 약 3 주 동안 지원자를 대상으로 뇨와 호흡을 통해 배출되는 ^{14}C 의 방사능 준위를 측정하는 실험을 수행하였다[14]. 그 결과 대부분의 ^{14}C 은 피폭후 초기 몇 시간만에 호흡을 통해 배출되었으며 이는 Winchell 등이 수행한 실험결과와 유사함을 보였다[5]. 이 실험 기간동안 뇨로 배출되는 ^{14}C 의 화학적 형태는 대부분 중탄산염(Bicarbonate) 형태로 존재함을 확인하였고, 3 주후부터 뇨시료중의 ^{14}C 은 대부분 요소와 같은 안정된 유기물 형태로 존재하는 것이 확인되었다.

캐나다 OPG(Ontario Power Generation)에서 ^{14}C 의 체외배출 실험을 통해 얻어진 결과를 종합하면 호흡과 뇨의 배출률은 각각 0.4일, 1.2일, 그리고 40 일의 반감기를 가진 3개의 지수항의 합으로 표현된다. 실험결과에 근거하여 흡입된 $^{14}\text{CO}_2$ 은 체내 연조직에 고루 분포한다고 가정하며 체내로 유입된 $^{14}\text{CO}_2$ 의 90 %는 피폭후 몇 시간내에 배출이 이루어지며 나머지 2 ~ 6 %는 체내에 0.4일, 1.2일, 40일의 지수함수적인 반감기를 갖고 체내에 잔류하게 된다. 이러한 실험 결과는 캐나다의 내부피폭 측정에 관한 AECB Working Group에 의해서 발행된 Radiocarbon Bioassay Guideline의 대사모델에 그대로 반영되었다[15].

$$R(t)_{\text{Canada}} = 0.06e^{-1.7t} + 0.02e^{-0.58t} + 0.02e^{-0.017t}, [t = \text{day}] \quad (12)$$

$$E_b'(t) = 0.1e^{-1.7t} + 0.01e^{-0.58t} + 0.0003e^{-0.017t} \quad (13)$$

$$E_u'(t) = 0.02e^{-1.7t} + 0.002e^{-0.58t} + 0.00004e^{-0.017t} \quad (14)$$

위 식 (12)에서 (14)은 캐나다 Ontario Power Generation에서 인체 실험에 의해 결정된 식들이다. 여기서 $R(t)_{\text{Canada}}$ 은 체내 잔류함수를 나타내며 $E_b'(t)$ 와 $E_u'(t)$ 는 호흡과 뇨를 통해 배출되는 ^{14}C 양을 추정하는 배출함수이다. 이 식(12) ~ (14)들은 섭취후 0.5일 이상이 지난 후에 체내 존재하는 ^{14}C 양과 배출량을 계산할 수 있다. 그림 2는 식(12) ~ (14)들을 이용하여 0.5일부터 100일 동안 ^{14}C 의 체내 잔류율과 배출률을 계산한 것이다. 이 그림에서 보듯이 탄소 배출은 대부분 호흡 경로를 통해 이루어짐을 알 수 있다.

ICRP와 캐나다 모델 비교

ICRP Pub. 30에서 제시된 $^{14}\text{CO}_2$ 의 잔류함수와 캐나다 AECB에서 발행한 Radiocarbon Bioassay Guideline에 반영된 잔류함수는 모두 소수의 인체 실험 및 동물 실험을 통해서 얻어진 결과들이다. 따라서 ICRP와 캐나다의 $^{14}\text{CO}_2$ 잔류함수를 비교하기 위해 우선 체내에서 $^{14}\text{CO}_2$ 의 평균잔류시간과 섭취후 100일 동안 체내에서 $^{14}\text{CO}_2$ 의 잔류율을 계산해 보았다.

$$T_{\text{mean}}^{14\text{CO}_2} = \frac{\int_0^{\infty} t R(t)_{\text{ICRP30}} dt}{\int_0^{\infty} R(t)_{\text{ICRP30}} dt} \approx 55.547 \text{ day} \quad (15)$$

$$T_{\text{mean}}^{14\text{CO}_2} = \frac{\int_0^{\infty} t R(t)_{\text{Canada}} dt}{\int_0^{\infty} R(t)_{\text{Canada}} dt} \approx 55.594 \text{ day} \quad (16)$$

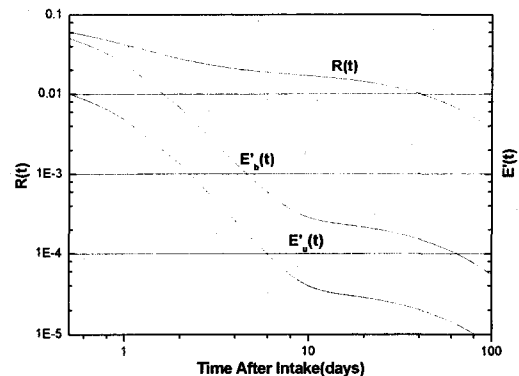


Fig. 2. Excretion through urine & breathing and retention in the body after $^{14}\text{CO}_2$ intake.

Table 4. Calculation of dose conversion factors and annual intake limits for ¹⁴CO₂

	Function and Parameters				Dose Conversion Factor <i>e</i> (50), SvBq ⁻¹	Annual Dose Limit (mSv)	ALI(Bq)
	Retention Function	$\bar{E}(keV)$	Q_F	f_1			
ICRP	$R(t)^{14CO_2}_{ICRP30}$	49.47	1.0	0.9	6.35×10^{-12}	50	7.8×10^9 $\approx 8 \times 10^9$
				1.0	7.06×10^{-12}	20	2.8×10^9 $\approx 3 \times 10^9$
캐나다	$R(t)^{14CO_2}_{Canada}$	49.47	1.0	0.9	1.22×10^{-10}	50	4.1×10^9 $\approx 4 \times 10^9$
				1.0	1.35×10^{-11}	20	1.48×10^9 $\approx 1.5 \times 10^9$

그 결과 위 식(15), (16)에서 보듯이 두 식의 평균잔류시간은 각각 55.55일과 55.59일로 유사하였다. 그리고 그림 3에서 보듯이 두 함수의 시간에 따른 잔류율 변화는 초기에 급격하게 차이를 보였지만, 10일이 경과한 후에는 약 2 배 정도의 차이를 유지하였다.

ICRP와 캐나다 모델을 이용하여 작업자 예탁 유효선량환산계수와 연간섭취한도를 식 (10)와 (11)에서 정의한 방법으로 계산하였다. 이때 체내에 유입된 탄소는 모든 연조직에 고루 분포 된다는 가정을 적용하였다. 그 결과 표 4에서 보듯이, 작업자의 연간선량한도(ALI)를 50 mSv로 적용

었다.

그런데 작업종사자 연간선량한도가 20 mSv로 하향 조정하였기 때문에 ¹⁴CO₂에 대한 연간섭취 한도를 계산할 경우, 1.5×10^9 Bq로 ICRP Pub. 61의 3×10^9 Bq에 비해 약 2 배 정도 낮게 계산되었다. 또한 ICRP와 캐나다 잔류함수를 이용하여 1 Bq의 ¹⁴CO₂ 섭취시 작업자의 예탁유효선량을 계산하였을 경우 각각 7.06×10^{-12} Sv와 1.35×10^{-11} Sv로 캐나다 모델이 ICRP 모델에 비해 더 보수적인 임을 알 수 있었다.

맺는말

본 연구에서는 중수로원전에서 발생하는 핵종인 ¹⁴C에 대해 작업자 체내흡입을 가정하여 내부 피폭 선량평가 절차를 수립하는데 필요한 인체대사모델을 국내외 문헌을 통해 조사하고 비교하였다. 우선, ICRP 모델과 캐나다 OPG에서 사용하는 모델에 근거하여 ¹⁴CO₂ 흡입으로 인한 체내에서의 평균잔류시간과 시간에 따른 잔류량 변화를 계산하였다. 그 결과 평균잔류시간의 경우 두 모델 모두 약 55.6일로 유사하였으나 체내 잔류량 변화에서는 캐나다 모델의 경우 흡입이 일어난 직후에는 체내 잔류율의 변화가 ICRP 모델과 차이가 있었다. 그러나 일정 시간 경과 후에는 ICRP 모델과 약 2 배정도로 잔류율에서 차이를 보이면서 일정한 비율로 유지됨을 확인하였다. 또한 ¹⁴CO₂에 대한 캐나다 모델의 잔류함수를 이용하여 작업자에 대한 ¹⁴CO₂의 예탁유효선량환산계수를 계산하여 연간섭취한도를 유도한 결과, 작업

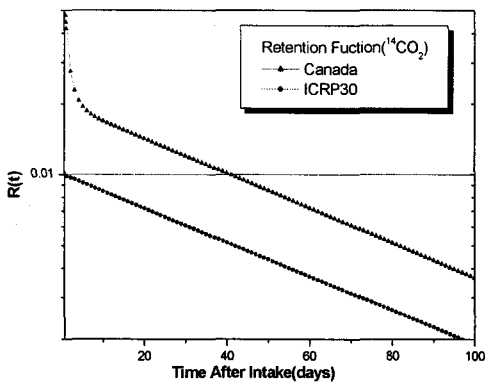


Fig. 3. Comparison of ICRP and Canada for ¹⁴CO₂ retention function.

하고 캐나다의 잔류함수를 사용하였을 경우 ¹⁴CO₂에 대한 연간섭취한도는 4×10^9 Bq로 계산되

종사자 연간선량한도 20 mSv 근거로 $^{14}\text{CO}_2$ 에 대한 연간섭취한도가 1.5×10^9 Bq로 ICRP Pub. 61의 3×10^9 Bq에 비해 약 2 배 정도 낮게 계산되었다. 따라서 캐나다의 선량평가 모델이 ICRP 모델에 비해 더 보수적인 임을 알 수 있었다. 이러한 검토를 바탕으로 중수로 원전에서 방사선작업 종사자가 ^{14}C 의 흡입에 따른 내부피폭 선량평가를 위한 실무적인 절차의 수립이 필요하다고 본다. 또한 월성원전에서의 ^{14}C 핵종의 발생 및 흡입 메카니즘과 유효반감기 분석 등에 관한 연구가 수행되면 보다 유익할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부가 주관하는 원자력중장기 연구의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 원자력발전소 주변 환경방사선 조사 보고서, 한국수력원자력(주), (2001).
2. 원자력발전소 방사선관리 연보, 한국수력원자력(주), (2001).
3. 캐나다 OPG 소속 방사선방호 전문가 초청결과 보고서, TM.00NE21.P2001.641(2002)
4. M. J. Kabat and D. J. Gorman, Carbon-14 in Ontario Hydro's Nuclear Stations : Production, System and Effluent Levels, Dosimetry and Environmental Data, SSD-IR-81-24, (1980).
5. H. S. Winchell and H. Stahelin, et al, "Kinetic of $\text{CO}_2\text{-HCO}_3$ in Normal Adult Males," *J. Nucl. Med.* **11**, 711, (1970).
6. A. W. Phipps, G. M. Kendall, T. P. Fell, and J. D. Harrison, "Doses from Radioactive Material," *Rad. Prot. Dosi.* **30**, 191, (1988).
7. J. E. Peterson and R. D. Stewart, "Absorption and Elimination of Carbon Monoxide by Inactive Young Men," *Arch. Environ. Health*, **21**, 165, (1970).
8. C. R. Boss and P. J. Allsop, Radiactive effluents from CANDU-6 reactors, AECL report TR-533 (1994).
9. M. J. Kabat and D. J. Gorman, Carbon-14 in Ontario Hydro's nuclear stations: production, system and effluent levels, dosimetry and enviromental data. Ontario Hydro, Safety Service Department, Information report SSD-IR-80-3 (1980).
10. *The management of carbon-14 in Canadian nuclear facilities*, ACRP-14 (1995).
11. International Commission on Radiation Protection, *Evaluation of Radiation Doses to Body Tissues from Internal Contamination Due to Occupational Exposer*, New York : Pergamon Press; ICRP Publication 10.
12. International Commission on Radiation Protection. Limits for intakes of radionuclides by workers. New York : Pergamon Press; ICRP Publication 30, 1979 - 1982.
13. D.W. Whillans and M. J. Hayes, Dose Assessment Programme for Exposure to Carbon-14 Dioxide, Ontario Power Generation (1995).
14. D. W. Whillans and J. R. Johnson, Interpretation of Urinary Excretion Rate Data in the Assessment of Uptake of Carbon-14, IAEA-SM-276/50 (1985).
15. AECB, Bioassay Reference Technical Criteria - Radiocarbon Bioassay - Report of the AECB Working Group on Internal Dosimetry (1994).