

'95 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

호흡경로를 통한 C-14의 체내 피폭선량 평가

신상운
한국전력공사

요 약

사람이 숨을 쉬는 동안에 대기중에 포함된 C-14이 인체내에 흡수되는 경로를 살펴보았으며 이로부터 호흡경로를 통한 C-14의 체내 흡수량을 평가하였는데, 호흡중 C-14이 체내에 흡수되는 속도는 다음과 같이 구해졌다.

$$Q_i(\text{mBq/min}) = 7.25C_{a,\text{in}} - 0.87$$

여기서 $C_{a,\text{in}}$ 은 공기중에 포함된 이산화탄소중의 C-14 농도($\text{mBq/m}^3\text{CO}_2$)이다. 이를 토대로 백그라운드 준위보다 약 10,000배 높은 작업환경(400 Bq/m^3)에서 8시간 동안 방사선작업을 수행하였을 경우 방사선 작업자는 일반인에 비해 약 4,100 Bq의 C-14 방사능을 추가로 섭취하게 되고, 이로 인해 작업자가 받게 될 체내 피폭선량은 약 0.06 mrem이었다.

1. 서론

사람이 숨을 쉬는 과정에서 인체와 대기 사이에 상당한 탄소 교환이 이루어지게 된다. 이때 인체로부터 대기중으로의 탄소 흐름이 대부분으로서 대기중의 탄소 일부가 체내로 이동되어 인체내에 축적되는 피폭경로는 일반적으로 무시되고 있다.

그러나 중수로와 같이 C-14의 방출율이 높은 원자력 시설의 주변이나 원자로 건물 내에서는 대기중 C-14의 농도가 상당히 높기 때문에 호흡으로 인해 받게 될 C-14의 체내 피폭선량을 보다 자세하게 평가해 볼 필요가 있다. 따라서 본 논문에서는 대기중의 C-14 농도에 따라 호흡경로를 통해 체내에 흡수되는 C-14의 양과, 이로 인해 인체가 받게 될 피폭선량 평가방법을 제시하였다.

2. 폐에서의 물질이동

ICRP에서 채택한 몸무게가 70kg인 표준 성인의 호흡률은 작업조건하에서 분당 20 l 이고, 폐로 유입되는 들숨중의 공기 조성은 부피비로 질소와 산소가 각각 79%와 20.9%이고 이산화탄소는 0.04%가 된다. 그러나 폐로부터 내뿜는 날숨중의 공기 조성을 살펴보면 질소의 농도에는 변함이 없지만 산소의 농도는 약 15%로 감소되고 이산화탄소의 농도는 100배 이상 증가되어 약 4.0%가 된다. 또 날숨중에는 상당한 양의 수증기가 포함되어 있으며, 표 1은 ICRP에서 채택한 들숨과 폐포내의 이산화탄소 조성 및 참고문헌 1에 제시된 자료들을 토대로 평가한 들숨과 날숨의 조성 및 그 분압을 보여준다.

표 1. 들숨과 날숨의 조성 및 분압

	공기압 (mbar)	증기압 (mbar)	산 소		이산화탄소		질 소	
			부피비 (%)	분 압 (mbar)	부피비 (%)	분 압 (mbar)	부피비 (%)	분 압 (mbar)
들 숨	1013	0	20.9	212	0.04	0.4	79	801
날 숨	1013	64	16.1	154	4.0	38	79	757
폐포내	1013	64	14.2	136	5.5	53	79	760

폐를 통과하는 혈액과 폐포기체 사이의 물질 이동속도는 폐포막 양단, 즉 폐포 기체와 혈액사이의 분압차에 비례하게 된다. 이러한 관계는 폐포막 사이로 기체가 자유로이 이동될 수 있는 경우에만 성립하게 되는데, 폐포막은 그 두께가 1~2 μm 로서 이산화탄소나 산소와 같은 기체의 자유로운 이동을 가정할 수 있을 정도로 폐포막 사이의 기체 교환속도가 충분히 빠르게 일어난다. 또 혈액이 폐속을 통과하는데 걸리는 시간은 휴식중일 때는 약 0.75초 정도이지만 운동중에는 약 0.3초로 감소하게 되며, 인체내 총 혈액의 10~20%(평균 12%) 정도가 폐속에 상존하고 있다.

한편 폐로 들어오는 혈액, 즉 정맥혈중의 산소 분압은 53mbar로서 폐포내 기체의 136 mbar에 비해 약 83mbar가 낮다. 따라서 이 분압 차이에 의해 폐포내 기체중의 산소가 혈액속으로 이동하게 된다. 반대로 혈액중의 이산화탄소 분압은 61mbar로서 폐포내 기체중의 이산화탄소 분압 53mbar보다 8mbar가 높고, 이 분압 차이에 의해 혈액속의 이산화탄소가 폐포내 기체속으로 이동하게 되는데, 폐포막의 특성을 고려해 볼 때 분압차가 0.16mbar 만 되더라도 기체의 이동이 일어나기에 충분하다.

3. 무기탄소 교환반응

혈액의 무기탄소 운반능력을 보면 이산화탄소의 흡착계수를 토대로 평가한 값보다 훨씬 큼을 알 수 있는데, 이로부터 이산화탄소와 혈액사이에서 일어나는 무기탄소 교환반응에 대한 많은 연구가 이루어졌다. 그 결과 혈장이나 혈구 세포에 의해 운반되는 무기탄소는 용존 탄산과 아미노기에 결합된 CO_2 , NaHCO_3 나 KHCO_3 등의 HCO_3^- 의 염 및 용존 CO_2 의 네가지 형태를 취하는 것으로 밝혀졌다.^{1,2)} 그러나 이 중에서 용존 탄산의 형태로 존재하는 양은 극히 작으므로 일반적으로 무시되고 있다(통상적인 혈액의 pH조건하에서 $\text{HCO}_3^-:\text{H}_2\text{CO}_3$ 의 비는 약 20:1에 달함).

혈액과 폐포기체의 접촉시간이 운동중인 사람의 경우 약 0.3초에 불과하므로 폐포막 양단의 무기탄소 교환반응속도가 중요한 역할을 하게 되는데, 폐로부터 혈액중으로 이동되는 무기탄소의 20% 정도를 차지하는 교환반응인 아미노기와 이산화탄소의 반응은 그 속도가 매우 빠른 가역반응이기 때문에 폐포내 기체와 혈액중의 아미노기에 결합된 이산화탄소 사이에 쉽게 평형이 이루어지게 된다. 또 NaHCO_3 나 KHCO_3 등의 형태로 존재하는 HCO_3^- 의 염이나 용존 CO_2 의 형태로 무기탄소가 교환되는 반응은 일반적으로 HCO_3^- 와 CO_2 사이의 평형반응속도에 의해 교환반응속도가 결정되는데, 수중에서의 반응과 달리 혈액중에서는 적혈구의 탄산 제거특성 때문에 (1)식으로 표현되는 이산화탄소와 HCO_3^- 사이의 가역평형반응이 매우 빠르게 일어난다. 따라서 혈액과 폐포내 기체 사이의 이산화탄소 동위원소 조성이 평형상태에 있다고 가정할 수 있다.

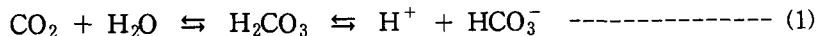


표 2는 동맥혈과 정맥혈 중의 무기탄소 이동형태별로 이산화탄소 운반량 및 혈액중에서 폐포내 기체속으로 이동되는 이산화탄소의 양, 즉 동맥혈과 정맥혈에 포함된 이산화탄소 양의 차이를 보여준다.

4. 호흡경로를 통한 C-14 체내 흡수량

숨을 쉬는 동안에 비록 혈액으로부터 폐포내 기체 쪽으로 이산화탄소의 흐름이 일어난다고는 하지만 이산화탄소의 이동 메카니즘이 매우 빠른 가역평형반응에 의해 일어나므로 들숨중에 포함되어 있던 C-14이 빠르게 혈액속으로 이동될 수 있다. 즉 이산화탄소의 물질흐름은 혈액으로부터 폐포내 기체쪽으로 일어나지만 이 과정에서 폐포내 기체속에 들어있는 이산화탄소중의 C-14 농도와 혈액중에 포함되어 있는 이산화탄소중의 C-14 농도가 빠른 가역반응에 의해 평형에 도달하게 된다. 숨을 쉬는 과정에서 폐포내 기체와 혈액 사이의

표 2. 동맥혈과 정맥혈중의 이산화탄소 운반량

		동맥혈		정맥혈		차 이	
		부 피 (ml)	비 율 (%)	부 피 (ml)	비 율 (%)	부 피 (ml)	비 율 (%)
혈 장	용존 CO ₂	1.6	3	1.8	3	0.2	4
	HCO ₃ ⁻	34.0	68	37.1	67	3.1	61
	아미노 결합	1.8	3.5	2.0	3.5	0.2	4
	소 계	37.4	75	40.9	73.5	3.5	68.5
혈 구	용존 CO ₂	0.8	11.5	0.9	1.5	0.1	2
	HCO ₃ ⁻	9.6	19	10.1	18.5	0.5	9
	아미노 결합	2.2	4.5	3.2	6	1.0	19.5
	소 계	12.6	25	14.2	26	1.6	31.5
총 계		50.0		55.1		5.1	

C-14 이동반응을 살펴보면 그림 1과 같다.

그림 1에서 $V_{a,in}$ 과 $V_{a,out}$ 은 들숨과 날숨속의 이산화탄소 흐름속도로서 표준 성인의 호흡률 (20 l/min)과 표 1의 들숨과 날숨중의 이산화탄소 농도로부터 쉽게 평가할 수 있다. 또 $V_{b,in}$ 과 $V_{b,out}$ 은 폐속으로 들어오는 정맥혈과 폐로부터 나오는 동맥혈중의 이산화탄소 흐름속도로서 혈액의 유속과 표 2의 동맥혈과 정맥혈중의 이산화탄소 부피비로부터 평가할 수 있는데, 폐속으로 들어가는 혈액의 유속은 휴식중인 경우 약 5 l/min가 되고, 격렬한 운동을 할 때는 2배 이상 증가된다. 방사선 작업종사자의 경우 가벼운 운동을 하는 정도에 해당되겠지만 ICRP에서 채택한 들숨과 날숨중의 이산화탄소 농도와 호흡률, 및 정맥혈과 동맥혈의 이산화탄소 농도차로부터 폐순환류의 유속(V_b)을 다음과 같이 평가하였다.

$$V_b = \frac{V_{a,out} - V_{a,in}}{R_{in} - R_{out}} \text{ ----- (2)}$$

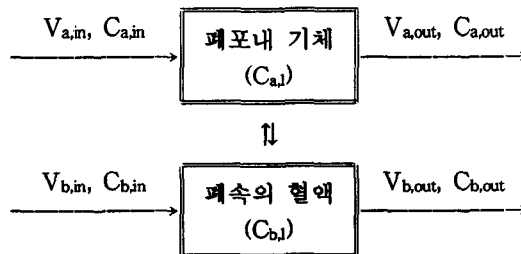


그림 1. 폐포내 기체와 혈액 사이의 C-14 평형 교환반응

여기서 R_{in} 과 R_{out} 은 폐로 들어오는 정맥혈과 폐를 나가는 동맥혈중의 이산화탄소 부피비로서 표 2로부터 각각 0.551과 0.5임을 알 수 있다. 따라서 $V_{a,in}$ 과 $V_{a,out}$ 으로부터 V_b 를 구하고, 이로부터 $V_{b,in}$ 과 $V_{b,out}$ 을 다음과 같이 구할 수다.

$$V_{a,in} = \text{호흡률} \times 0.04/100 = 8 \text{ mlCO}_2/\text{min}$$

$$V_{a,out} = \text{호흡률} \times 4.0/100 = 800 \text{ mlCO}_2/\text{min}$$

$$V_b = \frac{800-8}{0.551-0.50} = 15,529 \text{ ml/min}$$

$$V_{b,in} = V_b R_{in} = 15,529 \text{ ml/min} \times 0.551 = 8556 \text{ mlCO}_2/\text{min}$$

$$V_{b,out} = V_b R_{out} = 15,529 \text{ ml/min} \times 0.50 = 7764 \text{ mlCO}_2/\text{min}$$

한편 $C_{a,in}$ 과 $C_{a,out}$ 은 들숨과 날숨중에 포함된 단위 이산화탄소 부피당의 C-14 농도이고 $C_{b,in}$ 과 $C_{b,out}$ 은 폐속으로 들어오고 나가는 혈액중에 포함된 단위 이산화탄소 부피당의 C-14 농도를 나타내는데, 폐속으로 들어오는 정맥혈중에 포함된 단위 이산화탄소 부피당의 C-14 농도인 $C_{b,in}$ 은 일상적으로 섭취하는 음식물중의 C-14 함유량에 의해 좌우되는 요소로서 C-14의 천연존재비에 따른다고 가정하였다. 즉, $C_{b,in}$ 의 값으로 0.12 mBq/mlCO₂를 적용하였다. 또 $C_{a,i}$ 과 $C_{b,i}$ 은 평형상태에 있는 폐포내 기체와 폐속의 혈액중에 존재하는 단위 이산화탄소 부피당의 C-14 농도로서 평형반응이 충분히 빠르다고 가정하였으므로 $C_{a,i}$ 과 $C_{b,i}$, $C_{a,out}$, $C_{b,out}$ 은 모두 동일한 값을 갖게 되고 따라서 이를 평형농도인 C_{eq} 로 나타낼 수 있다.

위의 가정들을 토대로 호흡경로를 통해 혈액속으로 이동된 C-14의 양은 동맥혈중에 포함된 단위 이산화탄소 부피당의 C-14농도인 C_{eq} 를 구하여 평가할 수 있는데, C_{eq} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{a,out} = C_{b,out} = C_{eq} = \frac{V_{a,in} \cdot C_{a,in} + V_{b,in} \cdot C_{b,in}}{V_{a,out} + V_{b,out}} \quad \text{----- (3)}$$

한편 C-14의 농도가 백그라운드인 경우에는 $C_{a,in}$ 과 $C_{a,out}$, $C_{b,in}$, $C_{b,out}$ 모두를 C-14의 백그라운드 준위로 가정할 수 있으므로 C-14으로 오염된 장소에서 방사선작업을 수행하는 동안에 호흡경로를 통해 추가로 C-14를 섭취하는 속도, Q_i 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$Q_i(\text{mBq/min}) = V_{b,out}(C_{b,out} - C_{b,in}) = V_{b,out}(C_{eq} - C_{bkg}) \quad \text{--- (4)}$$

위 식에 (3)식으로 구한 C_{eq} 값과 0.12 mBq/mlCO₂의 C_{bkg} 값을 대입하면 다음과 같이 Q_i 값은 $C_{a,in}$, 즉 공기중의 C-14농도에 따르는 함수가 된다.

$$Q_i(\text{mBq/min}) = 7.25C_{a,in} - 0.87 \quad \text{----- (5)}$$

5. 호흡경로를 통한 체내 피폭선량 평가

C-14이 혈액속에 흡수되었을 때의 체내 피폭선량은 전신피폭을 가정하여 다음과 같이 구할 수 있다.³⁾

$$H(\text{mSv}) = A_0 \cdot F \cdot \frac{T_{\text{eff}}}{\ln 2} \cdot E_{\beta} \cdot \frac{1}{M} \cdot Q \text{ ----- (6)}$$

여기서 A_0 : 혈액속으로 흡수된 C-14의 방사능량 (= $Q_i \cdot t(\text{mBq})$)

F : 각 장기별로 C-14이 흡수된 비율 (전신인 경우 1)

T_{eff} : C-14의 유효반감기 (전신인 경우 10일 = 864,000초)

E_{β} : 붕괴당 평균 방출에너지 ($7.95 \times 10^{-15} \text{J}$)

M : 장기의 무게 (전신인 경우 70kg)

이고, Q 는 선질계수로서 1의 값을 갖는다.

이를 토대로 백그라운드 준위보다 C-14의 농도가 10,000배 높은 작업환경에서 8시간 동안 작업을 수행하였을 경우, 방사선 작업자는 일반인에 비해 4,134 Bq의 C-14 방사능을 추가로 섭취하게 되고 이로 인해 작업자가 받게 될 피폭선량은 약 0.06 mrem이 된다.

6. 결론

사람이 숨을 쉬는 동안에 대기중에 포함된 C-14이 인체내에 흡수되는 경로를 살펴보았으며 이로부터 호흡경로를 통한 C-14의 체내 흡수속도는 공기중에 포함된 이산화탄소중의 C-14 농도(mBq/mlCO_2)에 비례하는 함수가 된다. 이를 토대로 백그라운드 준위보다 약 10,000배 높은 작업환경($400 \text{ Bq}/\text{m}^3$)에서 8시간 동안 방사선작업을 수행하였을 경우 방사선 작업자가 받게 될 체내 피폭선량을 평가해 본 결과, 방사선 작업자는 일반인에 비해 약 4,100 Bq의 C-14 방사능을 추가로 섭취하게 되고 이로 인해 작업자가 받게 될 체내 피폭선량은 약 0.06 mrem이었다.

참고문헌

1. Orten, J.M. and Neuhaus, O.W., "Human Biochemistry", 9th edition, C. V. Mosby, Saint Louis, 1975
2. Harper, H.A., "A Review of Physiological Chemistry", 15th edition, Lange Medical Publications, Los Altos, 1975
3. Joseph A. M. et.al., "Carbon Metabolism in Humans", ISH-HEFT 97, sep. 1986