2003 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

원전 주변 주민의 C-14 섭취선량 평가에 필요한 농작물의 C함량 조사.

Determination of the Carbon Content of Domestic Farm Produces to Estimate Offsite C-14 Ingestion Dose.

정양근, 김미자, 이갑복

한전 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

현재 국내 원전 주변 주민의 방사성탄소 섭취선량 평가에 사용되고 있는 입력값을 개선하고자 곡류, 엽채류, 근채류, 과일류 주요 농작물의 탄소함량을 조사하였다. 1998년 국민영양조사결과의 식품별 1일 섭취량 자료로부터 5개 연령군 통합 곡류, 엽채류, 근채류, 과일류의 주요 식품과 그 섭취량을 도출하고 섭취량 백분율을 식품가중치로 취하였다. 식품성분표의 단백질, 지방, 탄수화물 함량으로부터 식품별 탄소함량을 계산하고 식품가중치를 곱하여 식품군의 탄소함량을 산출한 결과, 곡류, 엽채류, 근채류, 과일류는 각각 39.5%, 4.2%, 8.0%, 5.9%의 탄소를 함유하는 것으로 조사되었다. 곡류와 과일류는 현재 국내원전에서 적용하고 있는 값과 큰 차이가 없었으나 채소류는 0.7% ~ 4.5% 높았다.

Abstarct

The carbon content of grains, leafy and root vegetables, and fruits which the Koreans usually eat were calculated to use in the estimation of offsite C-14 ingestion dose. With the data of food intake per day in the Report on 1998 National Health and Nutrition Survey - Dietary Intake Survey, 5 age-group integrated intake of the 4 farm produce groups were extracted for food items and the amount. Intake percentage in each food group were taken as food weighing factor for the foods. Carbon content was calculated using protein, fat, and carbohydrate content of the foods, and multiplied by the corresponding food weighing factor to derive the content of the food groups. The Calculated carbon content of grains, leafy and root vegetables, and fruits were 39.5%, 4.2%, 8.0%, and 5.9% respectively. Grains and fruits were not much different from ODCM for carbon content, but vegetables were higher by 0.7%~4.5%.

1. 서 론

방사성탄소의 섭취선량을 평가하는 데 필요한 식물체의 C-14 농도는 Killough and Rohwer[1]의 비방사능 모델을 이용하여 식 (1)과 같이 대기의 C-14 농도와 식품의 탄소함량으로부터 유추한다.[2, 3] 원전 주변 주

$$^{14}C_{plant}\,(Bq/kg) = \frac{^{14}C_{air}\,(Bq/m^3)}{^{12}C_{air}\,(g/m^3)} \cdot {}^{12}C_{plant}\,(g/kg) \quad \text{..... (1)}$$

민들이 섭취하는 식품의 C-14 농도를 구하기 위해서는 그들이 실제로 섭취하는 식품들의 C-12 함량을 사용하는 것이 가장 바람직하나 아직은 국내 원전주변 주민들의 섭식 특성 및 식품의 탄소함량이 조사된 자료는 없는 실정이다. 현재 국내원전의 주변주민 피폭선량 평가지침 [4](이하 ODCM : Off-site Dose Calculation Manual)에 사용되고 있는 탄소함량은 AECL 의 연구결과 [3]에 근거한 것으로서, 식품의 생장환경특성과 대상 식품들에 대하여 국내 환경특성을 반영하여 개선할 필요가 있다. 또한 기존 ODCM 은 채소류를 김장채소류와 엽채류로 분류하고 있는 바, 김장채소류는 배추와 무우만을 대상으로 하고 나머지 채소들은 엽채류로 분류되어 있다. 그러나 엽채류는 지상에서 방사성 핵종에 노출되지만 근채류는 지하에서 엽채류보다는 상대적으로 방사성 핵종으로부터 방호되는 효과가 있다. 그러므로 식품 내 방사성핵종의 농도를 계산할 때에도 엽채류는 옆면 침적경로와 뿌리흡수 경로를 모두 계산하나 근채류는 뿌리 흡수경로만을 계산한다. 이와 같은 점을 고려한다면 근채류인 무우와 엽채류인 배추를 동일 그룹으로 분류하는 것은 적절하지 못한 것으로 사료된다.

한편, ORNL 의 TERRA 코드 [5]는 식품을 6 가지 식품군, 즉 leafy vegetables, Exposed produce, Protected produce, Grains, Beefs, Whole Cow's milk 로 분류하고 식품별 탄소량에 식품의 생산량 가중치를 곱하여 식품군의 탄소량을 산출하였다. 이 탄소량은 Killough 등의 방법 [6]에 따라 식품의 단백질, 지방, 탄수화물 함량으로부터 계산된 것으로서 [5], Killough 등은 식품의 단백질, 지방, 탄수화물 함량에 각각 0.5, 0.76, 0.44 를 곱하여 탄소량을 산출하였다 [6]. AECL 의 연구결과 [3]에 근거하여 현재 국내 ODCM 에 사용되고 있는 탄소량 역시 위와 같은 계산방법으로 산출된 것이긴 하나 그것은 식품별 가중치가 적용되지 않은 산술평균 함량이며, 한국인이 섭취하는 식품들과는 상이한 것들의 함량이어서 우리나라 국민들의 섭식 특성을 보다 정확히 반영할 수 있도록 개선될 필요가 있다.

본 연구에서는 보건복지부에서 시행해온 국민영양조사의 섭취량 조사결과를 이용하여 우리나라 사람들이 주로 섭취하는 농작물의 탄소함량을 도출하였다. 주요 농작물 식품의 섭취량을 조사하고 섭취량 백분율을 식품가중치로 취하여 농작물군의 탄소함량을 산출하였다.

2. 연구방법

가. 주요 농작물의 식품가중치

농작물 분류체계는 곡류, 엽채류, 근채류, 과일류로 설정하였고, 우리나라 사람들이 섭취하는 농작물의 종류와 양은 보건복지부에서 매 3년마다 조사하여 발표하는 국민영양조사 결과보고서의 식품별 1일 섭취량 자료를 이용하였다. 1998년 국민영양조사결과의 섭취량조사 부분[7]에는 식품별 1일 섭취량 자료가 연령군별로 제시되어 있다. 연령군 전체의 섭취특성을 반영하는 통합된 값을 도출하고자 ICRP-60의 권고에 따른 6개 연령군, 즉 성인, 15세, 10세, 5세, 1세, 3개월 연령군 중 모유와 분유만을 섭취하는 영아를 제외한 5개 연령군의 곡류, 엽채류, 근채류, 과일류 식품의 1일 섭취량을 조사하고 이로부터 연령군통합 섭취량을 도출하였다. 섭취식품 조사 시 바나나, 귤, 오렌지 등 섬에서 생산되거나 국내에서 생산되지 않는 식품은 국내 원전 가동으로 인한 직접적인 방사선 피폭 가능성이 없는 것으로 가정하고 섭취량 조사에서 제외하였다. 또한 떡, 죽, 인스턴트 식품 등은 쌀, 밀 등의 식료품과 중복되는 부분이므로 조사대상에서 제외하였다.

농작물군별로 섭취량 백분율 누적치 95%까지의 식품으로 선정된 1 차 주요식품에 대해 그 섭취량 백분율을 식품가중치로 취하였다. 그러나 연령군에 따라서 각 식품의 식품가중치가 달랐고 이것은 연령군에 따라 식품군의 탄소 함량을 다르게 만들었다. 전 연령군에 공통된 탄소 함량을 사용하고자 하므로 연령군별로 상이한 식품가중치 대신에 전 연령군에 통합된 식품가중치가 필요하였다. 이에, 1 차 도출되었던 연령군별 주요 식품의 섭취량에 연령군 인구구성비를 곱하여 연령군통합 섭취량을 산출하였다. 연령군 인구구성비는 통계청의 1998 년 추산인구 [8]에 따라, 성인, 15 세, 10 세, 5 세, 1 세, 3 개월 영아에 각각 0.747, 0.079, 0.069, 0.077, 0.015, 0.014 를 적용하였다. 통합된 식품 섭취량을 1 차 주요식품 도출과정에서와 같이 섭취량 백분율 누적치 95% 이내의 식품으로 연령군통합 주요 식품으로 선정하고 그것들의 섭취량 백분율을 연령군통합 식품가중치로 취하였다. 식품가중치는 식품들의 탄소함량으로부터 농작물군의 대푯값을 산출하는 데 이용되었다.

나. 농작물의 탄소함량

탄소함량은 Killough 등의 방법 [6]에 따라 식품의 단백질, 지방, 탄수화물 함량에 각각 0.5, 0.76, 0.44 를 곱하여 산출하였다. 탄소함량 계산에 필요한 식품의 단백질, 지방, 탄수화물 함량은 농촌생활연구소에서 발간한 식품성분표 제 6 개정판 [9]의 자료를 이용하였다. 식품별로 계산된 탄소함량에 해당 식품의 식품가중치를 곱하고 식품군별로 합산하여 식품군 탄소함량으로 취하였다.

3. 연구결과

가. 농작물 식품 가중치.

1998 년 국민영양조사 결과보고서의 식품별 1 일 섭취량 자료로부터 곡류, 엽채류, 근채류, 과일류 식품들의 성인, 15 세, 10 세, 5 세, 1 세의 5 개 연령군의 연령군 통합 섭취량을 도출하고 그 섭취량 백분율을 식품가중치로 취한 결과는 Table 1 과 같다. 곡류에서는 쌀이 대표 식품이었고, 식품가중치 0.965 로서 곡류 섭취량의 대부분을 차지하였다. 보리와 찹쌀은 곡류 섭취량의 약 3%를 차지하면서 비슷하게 섭취되었다. 엽채류에서는 배추가 대표 식품이었으며, 식품가중치가 0.65 로 가장 높으나 곡류의 쌀처럼 압도적으로 엽채류를 대표하지는 않았다. 파와 호박 등 기타 8 종의 엽채류들이 섭취량의 약 35%를 차지하고 있었다. 근채류에서는 무우가 대표 식품이었으나 가중치는 배추보다 낮은 0.583 이었다. 무우 외에 고구마, 감자, 양파가 근채류 섭취량의 약 42%를 차지하면서 적지않은 비중을 차지하고 있었다. 과일류에서는 사과와 감이 약 38%씩 거의 같은 비중으로 대표적으로 섭취되었고 나머지 부분은 배가 차지하였다. 곡류, 엽채류, 근채류, 과일류의 대표 식품인 쌀, 배추, 무우, 사과의 식품가중치와 나머지 식품들의 식품가중치를 비교해 보면 곡류 외에 다른 식품군은 대표 식품만으로 식품군 대표 탄소 함량을 산출할 경우 식품군 대표값에 큰 오차를 가져올 것으로 예상되었다.

Table 1. Domestic main farm produce items and the weighing factors.

food category	food	Intake(kg/yr)*						weighing factor
		adults	15yr	10yr	5yr	1yr	age-group integrated	
grains	rice	96.1	92.3	78.2	53.7	33.1	89.1	0.965
	barley	1.6	1.5	1.9	1.0	0.7	1.5	0.017
	glutinous rice	1.3	1.0	1.4	1.0	0.5	1.2	0.013
	corn	0.4	0.5	0.5	1.0	0.4	0.4	0.005
	Sum	99.4	95.4	82	56	34.6	92.3	1.000
leafy vegetables	korean chinese cabbage	47.3	32.9	22.9	11	4.9	40.4	0.650
	welsh onion	5.8	3.6	5.1	2.0	0.9	5.1	0.082
	pumpkin	4.7	2.6	2.4	3.0	0.7	4.1	0.066
	spinach	4.1	2.6	2.3	1.4	0.6	3.5	0.057
	soybeans	2.5	2	1.9	3.1	0.7	2.4	0.039
	cucummber	2.1	1.6	1.3	2.1	0.1	1.9	0.031
	green pepper	1.9	0.9	0.4	0.0	0.1	1.5	0.024
	cabbage	1.3	1.4	0.6	0.4	0.0	1.2	0.019
	lettuce	1.3	0.8	0.5	0.3	0.0	1.1	0.018
	oyster mushroom	0.9	0.9	0.5	1.1	0.1	0.9	0.014
	Sum	71.9	49.3	37.9	24	8.1	62.2	1.000
root vegetables	radish	27.8	18.4	12.8	8.9	6.3	23.9	0.583
	potato	6.0	8.4	6.5	4.7	0.8	6.0	0.146
	sweet potato	6.0	4.9	5.1	6.7	4.1	5.8	0.141
	onion	5.7	5.9	5.4	2.9	1.0	5.3	0.130
	Sum	45.5	37.6	29.8	23.2	12.2	41.0	1.000
fruits	apple	15.8	9.6	15.0	13.5	9.9	14.8	0.389
	perslmmon	16.4	9.7	10.6	8.8	4.7	14.5	0.382
	pear	9.7	6.2	5.9	6.6	3.8	8.7	0.229
	Sum	41.9	25.5	31.5	28.9	18.5	38.0	1.000

*Derived from the data of food intake per day by foodstuffs in the Report on 1998 National Health and Nutrition Survey - Dietary Intake Survey by the Ministry of Health and Welfare[7].

나. 탄소함량

Table 1 의 주요 농작물에 대하여 Killough 등의 계산방법 [6]과 식품성분표 제 6 개정판 [9]의 식품별 단백질, 지방, 탄수화물 함량을 이용하여 식품들의 탄소함량을 계산하였다. 식품별로 계산된 탄소함량에 해당 식품가중치를 곱하여 식품군의 탄소함량을 산출한 결과는 Table 2 와 같다. 곡류, 엽채류, 근채류, 과일류는 각각 39.5%, 4.2%, 8.0%, 5.9%의 탄소를 함유하는 것으로 조사되었다. 엽채류를 제외하면 곡류, 근채류, 과일류의 탄소함량은 각 대표 식품의 탄소함량과 큰 차이가 없었다. 엽채류의 경우에는 대표 식품인 배추의 탄소함량은 2.2%였으나 엽채류 전체의 탄소함량은 4.2%로서 약 2 배 높게 나타났다. 이것은 탄소함량이 매우 높은 대두가 엽채류 전체의 탄소함량을 높이는 결과를 주었기 때문이다. 엽채류 내에서 대두의 섭취량은 미미한 편이나 배추만으로 엽채류를 대표하기에는 배추의 섭취비중이 절대적으로 크지 못하다. 따라서 엽채류는 배추만으로 엽채류 전체의 탄소함량을 대표하게 되면 엽채류의 C-14 섭취선량은 실제보다 50% 과소평가되는 결과를 가져올 것이다.

Table 2. Protein, fat, and carbohydrate content of domestic main farm produces, and their calculated carbon portion.

food category	food	Protein	Fat	Carbohydrate	Carbon	
					Food	Food group
grains	rice	0.064	0.005	0.819	0.396	0.395
	barley	0.097	0.009	0.772	0.395	
	glutinous rice	0.074	0.004	0.819	0.400	
	corn	0.044	0.009	0.264	0.144	
leafy vegetables	korean chinese cabbage	0.013	0.002	0.031	0.022	0.042
	welsh onion	0.017	0.002	0.051	0.032	
	pumpkin	0.012	0.001	0.067	0.036	
	spinach	0.031	0.005	0.060	0.046	
	soybeans	0.357	0.180	0.309	0.451	
	cucummber	0.008	0.001	0.023	0.015	
	green pepper	0.016	0.003	0.062	0.038	
	cabbage	0.006	0.001	0.054	0.028	
	lettuce	0.012	0.003	0.043	0.027	
	oyster mushroom	0.027	0.002	0.052	0.038	
root vegetables	radish	0.023	0.001	0.136	0.072	0.080
	sweet potato	0.014	0.002	0.312	0.146	
	potato	0.028	0.000	0.146	0.078	
	onion	0.010	0.001	0.084	0.043	
fruits	apple	0.003	0.002	0.132	0.062	0.059
	perslmmon	0.005	0.001	0.138	0.064	
	pear	0.003	0.001	0.109	0.050	

국내 주요 농작물을 대상으로 산출된 탄소함량과 현재 국내 ODCM 에서 사용되고 있는 탄소함량을 Table 3 에 함께 나타내었다. 곡류와 과일류는 식품가중치를 적용한 본 조사 결과와 기존 ODCM 의 탄소함량 사이에 큰 차이가 없으나 채소류에는 적지 않은 차이가 있었다. 본 조사결과의 엽채류는 1kg 당 42g 의 탄소를, 근채류는 80g 의 탄소를 함유하는 것으로 나타났으나 ODCM 은 김장채소류와 엽채류 모두 35g/kg 의 탄소를 함유하는 것으로 되어 있다. 즉, 국내 주요 엽채류와 근채류 1kg 은 ODCM 의 채소류 1kg 보다 탄소함량이 각각 0.7% 포인트, 4.5% 포인트 높은 것으로 조사되었다.

Table 3. Comparison of Carbon Content of domestic main farm produces and ODCM

Food group	Carbon (g/g)	
	domestic farm produces	ODCM
Grains	0.395	0.403
Kimjang veg.[a]	-	0.035
Leafy veg.	0.042	0.035[b]
Root veg.	0.080	-
Fruits	0.059	0.063

[a]korean chinese cabbage and radish only.
[b]arithmetic mean of the rest vegetables except for korean chinese cabbage and radish

다. 탄소 함량의 차이가 섭취선량에 미치는 영향

국내 주요 농작물의 탄소 함량을 이용하여 계산한 농작물 1kg 당의 C-14 섭취선량은 ODCM 에 의한 계산결과와 어느 정도 차이가 나는지 비교하였다. C-14 섭취선량은 궁극적으로는 식품의 탄소 함량에 비례한다. 농작물 1kg 의 C-14 섭취선량은 C-14 섭취선량환산인자와 농작물의 탄소함량의 곱에 비례한다. ODCM 에 사용되고 있는 C-14(as CO_2) 섭취선량환산인자를 사용하고 본 조사결과와 ODCM 의 탄소함량을 적용하여 연령군별로 농작물 1kg 당의 C-14 섭취선량을 계산한 결과, ODCM 에 대한 본 조사결과의 C-14 섭취선량의 비는 Table 4 및 Fig. 1 과 같이 나타났다. Fig. 1 에서 보는 바와 같이, 5 개 연령군 모두 곡류와 과일류의 C-14 섭취선량은 ODCM 의 탄소함량을 이용한 경우보다 낮아지고 채소류는 상당히 높아진다. 5 개 연령군 모두 곡류는 ODCM 의 결과보다 1kg 당 C-14 섭취선량이 약 2% 낮게, 과일류는 약 6% 낮게 평가된다. 그러나 엽채류는 ODCM 의 엽채류 및 김장채소류보다 C-14 섭취선량이 20% 높아지고 근채류는 약 129% 높아진다. ODCM 의 채소류 분류체계는 본 조사와는 달리 김장채소류와 엽채류로 되어 있으나 두 그룹에 동일한 탄소함량을 적용하고 있어 사실상 거의 하나의 채소그룹이나 마찬가지이다. 따라서 본 조사결과의 엽채류 1kg 의 C-14 섭취선량은 ODCM 의 채소류보다 20% 높게, 엽채류는 ODCM 보다 129% 높게 평가된다.

4. 결론

국내 ODCM 에서 C-14 섭취선량 평가에 사용되고 있는 농작물의 탄소함량을 우리나라의 환경특성에 적합한 자료로 개선하고자 주요 곡류, 엽채류, 근채류, 과일류 식품의 탄소함량을 계산방법에 의하여 산출하였다. 곡류와 과일류는 ODCM 의 기존 탄소 함량보다 각각 0.8% 포인트, 0.4% 포인트 낮았고, 엽채류와 근채류는 기존 ODCM 의 채소류보다 각각 0.7% 포인트, 4.5% 포인트 높게 나타났다. 본 조사에서 산출된 국내 농작물의 탄소함량으로 농작물 1kg 당의 C-14 섭취선량을 계산하면, 5 개 연령군 모두 곡류와 과일류는 기존 ODCM 에 의한 결과보다 각각 2%와 6% 낮게 평가되나, 엽채류와 근채류는 ODCM 의 채소류보다 각각 20%와 129% 높게 평가되는 것으로 나타났다.

국내 기존 ODCM 은 우리나라 사람들이 섭취하는 농작물과는 다소 상이한 외국의 식품들을 대상으로 하면서 개별 식품들의 값을 산술평균하여 식품군 대표값으로 사용함으로써 각 식품들의 탄소함량

차이가 식품군 대표값에 미치는 영향이 합리적으로 반영되지 못하였다. 따라서 우리나라에서 생장하는 농작물을 대상으로 그들의 식품가중치를 적용한 정확한 식품군 대표 탄소함량이 도출하는 것이 필요하다. 또한 채소류를 김장채소와 나머지 채소들의 엽채류로 분류하고 있는 기존 ODCM 의 채소류 분류체계도 엽채류와 생장조건 및 가식부위가 상이한 근채류를 별도의 식품군으로 분류하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

Table 4. Ratio of C-14 ingestion dose per Kg domestic main farm produces of the study over ODCM

	Age				
	Adults	15 years	10 year	5 years	1 years
grains	0.980	0.980	0.980	0.980	0.980
fruits	0.937	0.937	0.937	0.937	0.937
leafy veg.	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200
root/Kimjang veg.	2.286	2.286	2.286	2.286	2.286

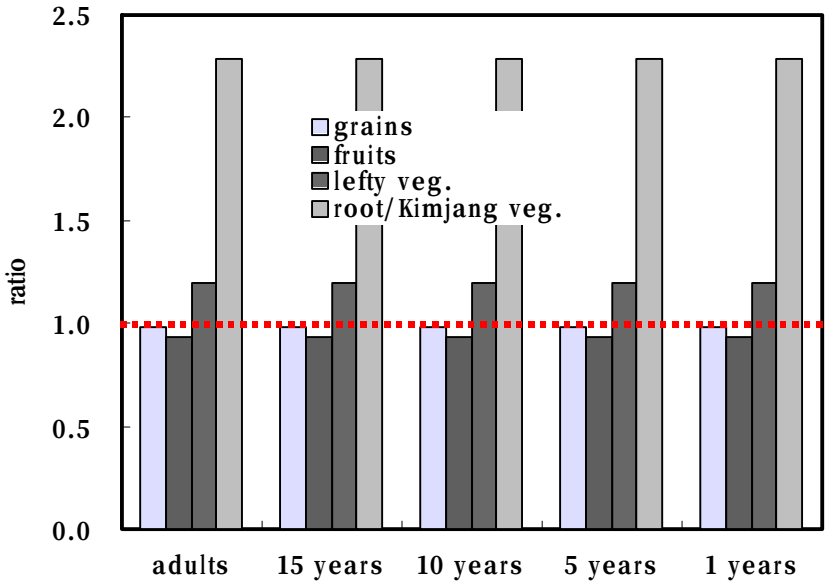

Fig. 1. Ratio of C-14 ingestion dose per 1kg of farm produce in the study over ODCM

5. Reference

1. Killough G. G. and P. S. Rohwer, "A new look at the dosimetry of C-14 released to the atmosphere as carbon dioxide", Health Physics, Vol. 34, pp. 141-159, 1978.

2. USNRC, "Reg. Guide 1.109: Calculation of annual doses to man from routine releases of reactor effluents for the purpose of evaluating compliance with 10 CFR part 50, Appendix I", revision 1, 1977.

3. S. R. Peterson, P. A. Davis, and R. R. Rao, "Modeling doses from tritium and C-14 in the environment", RC-

1951, AECL, 1997.

4. 전력연구원과 한국수력원자력(주), “ 원자력발전소 주변 주민선량 계산지침서(안), Rev. 1 ”, 2001.

5. C. F. Base, R. D. Sharp, A. L. Sjoreen, and R. W. Shor, "A review and analysis of parameters for assessing, transport of environmentally released radionuclides through agriculture", ORNL-5786, Oak Ridge National Laboratory, 1984.

6. Elizabeth L. Etnier, "Doses resulting from atmospheric releases of tritium", Chatper 10 in Models and Parameters for Environmental Radiological Assessment, DOE/TIC-11468, 1984.

7. 보건복지부, “ 1998 년도 국민건강영양조사결과보고서 - 영양조사부문 ”, 1999.

8. 통계청, 연령별(전국) 추산인구, 1999.

9. 농촌진흥청 농촌생활연구소, “ 식품성분표 제 6 개정판 ”, 2001.