

국내 원자력발전소 주변
삼중수소 및 ^{14}C 섭취선량 평가 경로인자 분석

Analysis of Parameters for the Off-Site Dose Calculation
Due to HTO, OBT, and Radioactive Carbon Ingestion

이갑복, 정양근, 방선영, 엄희문
한전 전력연구원, 대전광역시 유성구 문지동 103-16

Abstract

For assessment of tritium and radiocarbon ingestion dose to off site individuals, water, hydrogen, and carbon content of main farm produce of Korea were investigated to replace the existing data in K-DOSE60, the Offsite Dose Calculation Manual(ODCM) of Korea Hydro & Nuclear Power Co. Ltd.(KHNP). Main items and weighting factors of farm produce were determined with the nationwide food intake data in 2001, 2002. Main farm produce were sampled around Kori, Wolsong, Ulchin, Younggwang nuclear power sites. Content of each produce was multiplied by weighting factor and summed up to make the weighted mean group value. For grains, water, hydrogen, and carbon content was not much different from the existing data currently used in K-DOSE60, but root vegetables had 3.5 times more hydrogen, and leafy vegetables and fruits had 0.7 ~ 1.3 times more or less water, hydrogen, and carbon contents than K-DOSE60.

Key Words : Tritium, Radiocarbon, ODCM, Ingestion dose, Pathway

요 약

원전 주변 주민들의 ^3H 및 ^{14}C 섭취선량을 평가하는데 필요한 농작물중 ^3H 와 ^{14}C 농도를 계산하기 위하여 국내 4개 원전 주변 10개 지역에서 채취한 채소 및 과일류의 수분, 수소 및 탄소함량을 분석하였다. 조사 대상 농작물은 2001 ~ 2002년 보건복지부 국민건강영양 조사결과에 근거하여 결정하였고, 그것들의 섭취량 백분율을 식품가중치로 취하여 그룹 대푯값을 산출하였다. 원전 주변 농작물 시료들의 수분, 수소 및 탄소함량을 분석한 결과, 곡류는 현재 원전의 주민피폭선량 평가코드인 K-DOSE60에 적용중인 값과 유사하게 나타났다. 무 등의 근채류는 현행 ODCM의 채소류보다 3.5배정도 높은 수소함량을 보였고, 엽채류 및 과일류의 수분, 수소 및 탄소함량이 현행 ODCM과 비교하여 약 0.7 ~ 1.3배정도의 값을 보였다.

중심단어 : 섭취선량, 삼중수소, 방사성탄소, 주민피폭선량, 섭취선량, 피폭경로인자

1. 서 론

국내 원자력발전소의 원전주변 주민 피폭 방사선량은 2001년까지는 한국에너지연구소(현재는 한국원자력안전기술원(KINS)과 한국원자력연구소로 분리)가 1989년에 미국의 GASPARD와 LADTAP을 수정·보완한 GASDOS와 LIQDOS 코드를 이용하여 평가하였고, 2002년부터는 한전 전력연구원에서 개발한 K-DOSE60 코드로 평가하고 있다. 본 코드에서는 삼중수소와 C-14의 피폭경로에 대한 입력변수는 캐나다 AECL(Atomic Energy of Canada Limited)의 연구결과[1]를 이용하고 있다.

원전주변 주민들의 ^3H 및 ^{14}C 섭취선량 계산시 필요한 농작물의 HTO, OBT(Organically Bound Tritium) 및 ^{14}C 농도는 비방사능 모델로 구한다[2]. 국내에서는 2002년부터는 HTO와 OBT 형태 모두에 대한 섭취선량을 평가하고 있다[3]. 원전 주변 주민들이 섭취하는 음식물의 HTO는 어느 한 장소의 모든 환경매질에서 3H/1H비는 똑같다고 가정[4]하는 비방사능 모델을 이용하여 농작물의 수분함량으로부터 계산할 수 있고, 음식물의 OBT는 식물체 유기질 중의 수소가 모두 OBT가 된다고 가정하면 식물체 유기질 중의 총 H 함량으로부터 이론적으로 계산할 수 있다[5~6]. ^{14}C 역시 비방사능 모델을 이용하여 대기 중의 ^{14}C 농도로부터 농작물의 ^{14}C 농도를 계산할 수 있다[2]. 따라서 음식물로부터의 ^3H 섭취선량과 ^{14}C 섭취선량을 계산하기 위해서는 음식물의 수분 및 수소 함량, 그리고 탄소함량을 알아야 한다.

Killough 등[8]은 식품의 단백질, 지방, 탄수화물 함량으로부터 이론적으로 탄소함량을 산출하였고, Diabate 등[6]은 음식물의 단백질, 지방, 탄수화물 함량으로부터 수소함량을 산출하는 계산식을 제시하였다. 현재까지 국내에는 농작물의 수소함량과 탄소함량을 분석한 자료가 없었기 때문에 현행 원전 ODCM(이하 ODCM)은 AECL(Atomic Energy of Canada, Limited)이 Diabates 등의 방법과 Killough 등의 방법을 이용하여 산출한 수소 및 탄소함량을 적용하였다[3]. 그러나 ODCM의 수소 및 탄소함량은 보리, 옥수수, 밀 등의 곡류와 아스파라거스, 브로콜리, 양배추, 셀러리, 치커리, 케일, 사탕무, 당근 등 우리나라 사람들이 일상적으로 섭취하는 농작물과는 다소 상이한 농작물들을 대상으로 조사된 것이어서 국내 원전주변 주민들의 실질적인 섭취선량 평가를 위해서는 한국인의 섭취특성을 고려한 정확한 대푯값이 필요하다. 이에 문헌조사 및 이론적인 방법과 실제로 원전 주변의 환경시료를 채취하여 상기 변수들의 값을 분석하였다.

2. 분석방법 및 결과

가. 주요 농작물 및 섭취가중치

우리나라 사람들이 섭취하는 주요 농작물의 종류와 섭취가중치를 조사하였다. 보건복지부에서 조사하여 발표한 2001~2002년 계절별 섭취량 조사결과 보고서[8~9]를 이용하여 곡류, 엽채류, 근채류, 과일류의 주요 섭취 농작물과 섭취가중치를 도출하였다.

6개 연령군 중 모유와 분유만을 섭취하는 1세 미만의 영아를 제외한 5개 연령군에 대하여 식품별 1일 섭취량을 조사하고 연령군비를 곱하여 연령군 통합 섭취량을 도출하였다. 연령군비는 통계청의 2002년 추산인구[10] 중 1세 이상 인구를 대상으로 도출하여 성인, 15세, 10세, 5세, 1세 인구에 각각 0.778, 0.066, 0.075, 0.069, 0.013을 적용하였다. 바나나, 오렌지 등 국내에서 생산되지 않는 식품과 떡, 죽, 인스턴트식품 등과 같은 가공식품은 조사대상에서 제외하였다. 곡류, 엽채류, 근채류, 과일류 그룹별로 섭취량 백분율 누적치 95%까지의 품목을 주요 섭취 농작물로 선정하고 그 섭취량 백분율을 식품 가중치로 취하여 농작물군 대푯값 산출에 이용하였다. 이렇게 하여 도출된 계절별 주요 섭취 농작물 및 섭취가중치는 <표 1>과 같다. 한국인이 주로 섭취하는 농작물의 종류는 과일류를 제외하면 계절에 따른 변동은 거의 없으나 섭취가중치는 계절별로 차이를 보였다. 주로 섭취하는 농작물들은 쌀, 배추, 오이, 파, 무, 감자, 수박, 사과, 감 등이었다. 연간 섭취식품 및 가중치는 계절별 자료를 평균하였다.

<표 1> 계절별 주요 섭취 농작물의 종류 및 식품가중치*

식품군	겨울	weight	봄	weight	여름	weight	가을	weight
곡류	백미	0.952	백미	0.955	백미	0.948	백미	0.961
	보리	0.018	보리	0.020	보리	0.017	보리	0.017
	찹쌀	0.018	찹쌀	0.013	찹쌀	0.021	찹쌀	0.013
	대두	0.012	대두	0.012	대두	0.013	대두	0.009
계		1.000		1.000		1.000		1.000
엽채류	배추	0.622	배추	0.590	배추	0.495	배추	0.595
	파	0.100	오이	0.079	오이	0.111	애호박	0.095
	시금치	0.064	파	0.078	토마토	0.088	파	0.074
	애호박	0.048	시금치	0.071	애호박	0.080	시금치	0.046
	무청	0.035	애호박	0.048	파	0.060	오이	0.040
	오이	0.031	토마토	0.039	상추	0.042	양배추	0.035
	양배추	0.031	풋고추	0.026	풋고추	0.039	무청	0.033
	풋고추	0.027	상추	0.026	시금치	0.027	상추	0.030
	상추	0.021	양배추	0.023	양배추	0.022	고사리	0.028
	늪은호박	0.020	무청	0.020	아욱	0.018	풋고추	0.025
	계		1.000		1.000		1.000	
근채류	무	0.557	무	0.526	무	0.436	무	0.543
	양파	0.156	양파	0.167	감자	0.307	양파	0.166
	감자	0.129	감자	0.158	양파	0.165	감자	0.147
	고구마	0.058	마늘	0.061	마늘	0.053	마늘	0.052
	마늘	0.056	당근	0.058	당근	0.039	당근	0.047
	당근	0.045	고구마	0.030			고구마	0.044
계		1.000		1.000		1.000		1.000
과일류	감	0.392	딸기	0.371	수박	0.667	배	0.316
	사과	0.323	사과	0.322	참외	0.220	감	0.231
	배	0.145	배	0.125	복숭아	0.063	포도	0.230
	포도	0.141	참외	0.105	자두	0.050	사과	0.206
			감	0.077	사과		복숭아	0.018
계		1.000		1.000		1.000		1.000

*보건복지부 [2001, 2002]의 계절별 섭취량조사결과에 기초

나. 농작물의 수분, 수소 및 탄소 함량 분

한국인이 주로 섭취하는 농작물을 대상으로 원전 주변 지역에서 채취한 농작물의 수분, 수소, 및 탄소함량을 분석하고 농작물군별 대표함량을 도출하였다. <표 1> 주요 섭취 농작물 중 대표적으로 엽채류 7종, 근채류 2종, 과일류 1종을 선정하여 6월 말~7월 중순과 12월에 4개 원전 주변 10개 지역과 대전 지역에서 시료를 채취하였다. 채취된 농작물의 종류와 채취지점은 <표 2>와 같다.

채취한 농작물은 수분 증발을 최소화하기 위하여 얼음주머니를 담은 아이스박스에 넣어 운반하였다. 적당한 크기로 자른 시료를 직경 20cm의 은박접시에 담아 드라이오븐에서 $110 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 에서 항량이 될 때까지 건조시키고 무게를 측정하여 건조 감량을 수분 함량으로 취하였다.

수소와 탄소함량은 원소분석기를 이용하여 분석하였다. 수분을 제거한 농작물을 분쇄기로 곱게 분쇄하고 100mesh(aperture size $150\mu\text{m}$)체로 걸러 균질하게 혼합된 분말을 분석시료로 취하였다. 원소분석기(LECO-CHN 1000, LECO Co.)에는 EDTA(C 41.0%, H 5.51%, N 9.57%, Leco. Co.)를 표준시약으로 이용하였고, 농작물 건조시료는 약 0.8g을 사용하였다.

<표 2> 시료채취 지점 및 채취 농작물

대상 농작물	영광	고리	월성	울진	대조구
	장성/홍농	서생/월내/울산	나산/양북	부구/매화/나곡	대전
곡류	쌀**	○	○	○	
엽채류	배추***	○	○		○
	오이	○	○	○	○
	토마토	○	○		○
	애호박	○	○		○
	파	○	○	○	○
	상추	○	○	○	○
	풋고추	○	○	○	○
근채류	무***	○	○	○	○
	감자	○	○	○	○
과일류	수박	○			○
	사과**	○	○	○	○
	배**	○	○	○	○

주) 시료채취기간 : 2003. 6. 26 ~ 7. 24(**2003. 12. 4 ~ 12. 12, ***2003. 6. 26 ~ 7. 24, 2003. 12. 4 ~ 12. 12)

농작물 시료의 수분 함량을 분석한 결과는 <표 3>과 같다. 각 농작물의 원전별 편차는 0.1 ~ 1.0% 범위로서 지역적 차이는 작았다. 4개 원전 평균 배추의 수분함량은 94.7%였고 무는 95.2%였다. 근채류 중에서 2번째로 많이 섭취되는 감자는 81.0%의 수분을 함유하였다. 감자를 제외하면 채소 및 과일의 수분함량은 92 ~ 97% 범위로 작물의 종류에 따른 수분 함량의 차이는 작았다.

<표 3> 국내 원전 주변지역 농작물들의 수분함량 (%)

농작물	영광	월성	고리	울진	평균	표준편차	시료수
쌀	-	13.9	14.3	12.8	13.7	0.8	3
배추	95.1	95.1	94.7	94.2	94.7	0.4	36
오이	96.2	96.6	96.6	96.2	96.5	0.2	23
토마토	94.6	-	94.8	-	94.8	0.1	9
애호박	94.9	-	93.7	94.2	94.0	0.6	18
파	92.3	92.8	92.9	94.4	93.4	0.9	30
상추	94.3	92.0	92.7	93.0	92.6	1.0	17
풋고추	91.8	91.7	92.1	91.9	91.9	0.2	24
무	95.4	95.0	95.1	95.4	95.2	0.2	40
감자	81.6	80.6	81.3	81.1	81.0	0.4	15
수박	94.5	-	-	-	94.5	-	3
사과	88.0	89.1	88.3	87.4	88.3	0.7	12
배	89.5	88.2	88.0	89.4	88.5	0.8	12

<표 4>와 <표 5>는 건조기준 수소 및 탄소 함량을 각각의 수분 함량을 적용하여 생체 기준 함량으로 환산한 것이다. 감자를 제외하면 생체 기준으로 채소들의 수소 함량은 0.2 ~ 0.8%, 탄소 함량은 1.6 ~ 3.6%이었다. 감자의 수소 함량은 4.4%, 탄소 함량은 7.6%로 다른 채소들보다 함유량이 많아 섭취선량 평가 시 선량에 상당히 큰 영향을 줄 수 있다.

<표 4> 국내 원전 주변지역 농작물들의 수소함량 (% , 생체기준)

농작물	영광	월성	고리	울진	평균	표준편차
쌀	-	5.6	5.6	5.8	5.7	0.1
배추	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.0
오이	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.0
토마토	0.3	-	0.3	-	0.3	0.0
애호박	0.3	-	0.4	0.3	0.4	0.1
파	0.4	0.5	0.4	0.3	0.4	0.1
상추	0.3	0.4	0.4	0.3	0.4	0.0
풋고추	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.0
무	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.0
감자	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	0.0
수박	0.3	-	-	-	0.3	-
사과	0.7	0.6	0.7	0.8	0.7	0.1
배	0.6	0.7	0.8	0.7	0.7	0.1

<표 5> 국내 원전 주변지역 농작물들의 탄소함량 (% , 생체기준)

농작물	영광	월성	고리	울진	평균	표준편차
쌀	-	38.2	37.6	38.5	38.1	0.5
배추	2.1	1.9	2.1	2.5	2.2	0.3
오이	1.4	1.9	1.4	1.6	1.6	0.2
토마토	2.5	-	2.2	-	2.4	0.2
애호박	2.2	-	2.9	2.4	2.5	0.3
파	3.1	3.1	3.1	2.3	2.9	0.4
상추	2.2	2.9	2.8	2.5	2.6	0.3
풋고추	3.6	3.6	3.7	3.5	3.6	0.1
무	2.0	2.4	2.1	2.4	2.1	0.2
감자	7.4	7.9	7.5	7.6	7.6	0.2
수박	2.7	-	-	-	2.7	-
사과	5.4	4.8	4.9	5.7	5.2	0.4
배	4.8	5.2	5.3	4.6	5.0	0.3

농작물군 대표 함량은 각 농작물의 함량에 해당 식품가중치를 곱하여 산출하되, 본 조사에서 분석되지 않은 작물에 대해서는 농촌생활연구소의 식품성분표 제6차개정판[11]의 성분표를 토대로 Diabates 등[1]과 Killough 등[7]의 계산식에 따라 단백질, 지방, 탄수화물 함량으로부터 산출한 탄소 및 수소 함량을 적용하였다. <표 6>은 산출된 주요섭취 농작물의 수분, 탄소, 수소 함량과 현행 ODCM에 사용되고 있는 함량을 비교한 것이다.

원전주변 농작물의 수분 함량은 ODCM에 사용되고 있는 값과 유사한 결과를 보여주고 있다. 음식물 섭취량이 가장 높은 곡류는 현행 ODCM의 적용값과 거의 유사하게 나타났다. 수분함량은 배추 등의 엽채류는 ODCM의 채소류 수분 함량과 대동소이하였으나, 무 등의 근채류는 ODCM의 채소류보다 약 9% 낮았다. 수박을 비롯한 과일류는 ODCM의 과일류보다 수분함량이 약 10% 높았다. 수소함량은 근채류는 ODCM의 채소류보다 3.5배 높았으며, 과일류는 약 30% 낮았다. 탄소함량의 경우, 엽채류는 ODCM 보다 약 30% 낮고 근채류는 약 34% 높았다. 과일류의 탄소함량은 ODCM보다 약 24% 낮았다.

<표 6> 식품군별 분석값 및 비교

농작물군	수분(%)			수소(%)			탄소(%)		
	분석치	ODCM*	RG1.109	분석치	ODCM*	RG1.109	분석치	ODCM*	RG1.109
곡류	13.6	12.0	75.0	5.7	5.5	-	38.3	40.3	11.0
엽채류/김장채소	94.2	95.1		0.3	0.2		2.4	3.5	
근채류	88.7	95.1		0.7	0.2		4.7	3.5	
과일류	89.0	84.0		0.7	1.0		4.8	6.3	

* ODCM : 현행 원자력발전소 주변 주민 피폭선량 평가 지침(Off-site Dose Calculation Manual)

3. 결 론

HTO와 OBT, ¹⁴C 섭취선량을 평가하기 위해서는 음식물의 수분, 수소, 탄소함량에 대한 정확한 정보가 중요하다. 한국인이 주로 섭취하는 채소 및 과일류에 대하여 원전 주변지역에서 채취한 농작물들의 수분, 탄소, 수소함량은 캐나다 AECL의 연구 결과를 적용하고 있는 현행 원자력발전소 ODCM의 값과는 다소 상이한 결과를 보여주고 있다. 근채류를 제외하고는 현행 ODCM에 비해 약 30%정도 작거나 크게 나타나고 있어 결과적으로 섭취선량 평가결과는 현행 적용값과 유사하게 나타날 것으로 예상된다. 그러나 근채류에 대한 분석결과는 기존의 적용 값과 매우 다른 양상을 보여주고 있다. 현행 ODCM에서는 근채류를 엽채류, 김장채소류 등에 통합하여 평가하고 있어 OBT 및 ¹⁴C 섭취선량이 다소 과소평가될 수 있다. 따라서 향후 근채류를 별도의 농작물군으로 분류할 필요가 있다고 판단된다.

감사의 글 : 본 연구는 과학기술부에서 시행하는 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] AECL, "Modeling doses from tritium and C-14 in the environment", Separated supplement II of TR.95ZJ15.J1998.71, KEPRI, 1998.
- [2] 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.
- [3] 한전 전력연구원 및 한국수력원자력(주), "원자력발전소 주변 주민선량 계산지침서(안), Rev. 1", 2001.
- [4] Evans, A. G., "New dose estimates from chronic tritium exposures", Health Physics, Vol. 16, pp. 57-63, 1969.
- [5] Diabate S. and S. Strack, "Doses due to tritium releases by NET-data base and relevant parameters on biological tritium behavior", Prepared for NET under Contract No. NET 89-195, Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe, 1990.
- [6] Diabate S. and S., Stract "Organically bound tritium", Health Physics, Vol. 65, pp.

698-712, 1993.

- [7] Killough G. G., j. E. Till, E. L. Etnier, and B. D. Murphy, In press. "Dose equivalent due to atmospheric releases of carbon-14", chapter 11 in Models and parameters for environmental radiological assessment, DOE/TIC-11468, 1984.
- [8] 보건복지부, "2001년도 국민건강·영양조사 - 영양조사부문", 2002.
- [9] 보건복지부, "2002년도 계절별 국민영양조사", 2002.
- [10] 통계청, "1998년도 추산인구", 1999.
- [11] 농촌진흥청 농촌생활연구소, "식품성분표 제 6개정판", 2001.