

ICRP-60 방사선 방호 권고 기준을 반영한 원전 주변 주민 방사선 피폭 선량 평가 기술

정 양 근 · 이 갑 복
한국전력공사 전력연구원

ICRP-60 방사선 방호 기준, 한국원자력안전기술원의 지침 및 캐나다 AECL의 연구 결과를 종합하여 원전 주변 주민 방사선량 평가 지침을 마련하고, 지침에 따라 전산 프로그램(K-DOSE60)을 개발하였다. 본 전산 프로그램은 기존의 원자력발전소 주민 방사선량 평가에 적용하고 있는 Reg. Guide 1.109의 방법론을 수정·보완하였으며, 선량 기여도가 큰 삼중수소와 방사성 탄소를 중심으로 보다 합리적으로 선량 평가 방법을 개발하였다. 개발된 주민 방사선량 평가 프로그램(K-DOSE60)의 계산치에 대한 신뢰성을 평가하기 위해 주요 핵종에 대한 해석 결과와 비교 평가하였으며, 그 결과 K-DOSE60의 계산치와 해석 결과는 잘 일치하였다.

서론

1990년에 국제방사선방호위원회(ICRP : International Commission on Radiological Protection)는 방사선 방호 신권고를 ICRP-60을 통해 제시하였고[1], 국제 원자력 기구(IAEA : International Atomic Energy Agency)는 ICRP-60의 내용을 근간으로 각국의 방사선 방호 규제 요건에 활용토록 기본 안전 기준(IAEA Safety Series 114)을 출간하였다[2].

우리 나라도 1998년 과학기술부

고시 제98-12호를 통해 ICRP-60 방사선 방호 기준을 법제화하였고, 동 고시는 최근에 과기부 고시 제 2002-23호로 개정되었다.

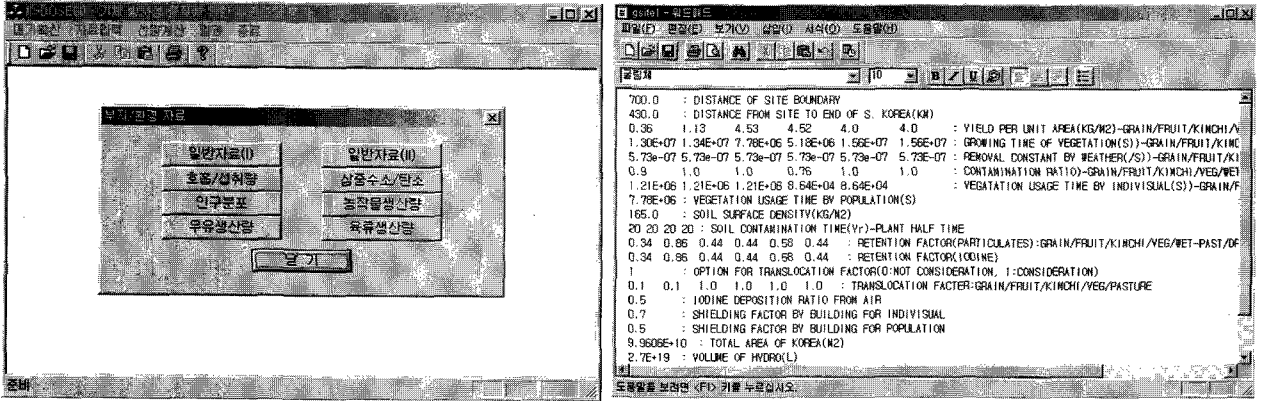
이에 대한 후속 조치로 한국원자력안전기술원에서는 과학기술부 원자력 중장기 연구 개발 사업의 일환으로 2000년에 원자력 시설 주변의 주민 방사선량 평가 지침(안)을 제시하였으며, 이와 더불어 기체 방사성 물질에 의한 선량 평가 계산식의 일부를 수정·보완하는 방안을 제시하였다[3].

ICRP-60에서는 방사성 물질이 영향을 미칠 수 있는 인체 장기를

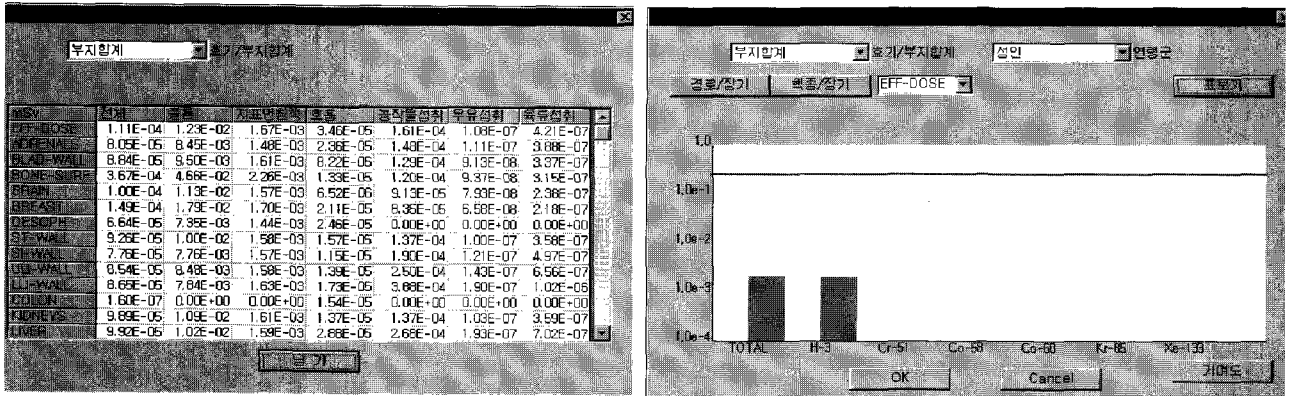
기준에 국내 원전에서 적용하고 있는 것보다 세분화하였다.

이전에는 전신, 뼈, 간장, 갑상선, 신장, 호흡기, 소화기 등 6개 조직과 피부에 대한 선량을 평가하였으나 신권고에서는 인체 장기를 12개 주장기 및 10개 기타 장기로 구분하여 장기 등가 선량을 평가하고, 각 장기별로 주어진 가중치를 이용하여 인체 전체에 대한 유효 선량을 계산한다.

주장기로는 생식선, 적색골수, 결장, 폐, 위, 방광, 유방, 간, 식도, 갑상선, 골표면, 피부, 기타 장기로는 부신, 뇌, 대장, 상부, 소장, 신



〈그림 1〉 K-DOSE60의 자료 입력(예)



〈그림 2〉 K-DOSE60의 결과 출력(예)

장, 근육, 췌장, 지라, 흉선, 자궁 등이다.

체내 피폭의 경우 방사성 물질이 장기간 동안 체내에 머물면서 지속적으로 피폭을 유발할 수 있기 때문에, ICRP-60에서는 피폭 대상자가 70세가 될 때까지의 예탁 선량(committed dose)을 평가한다

단위 방사능 농도를 흡입 또는 섭

취하였을 때 인체의 조직이나 장기가 받는 방사선량인 선량 환산 인자는 동일한 핵종이라 하더라도 핵종의 화학적 형태 및 입자 크기 등에 따라 다르게 나타난다.

삼중수소를 예를 들면, 섭취의 경우에는 화학적 형태를 삼중수소화수(HTO : Triated water)와 조직 결합 삼중수소(OBT : Organic

ally Bound Tritium)로 구분하고 있고, 호흡의 경우에는 입자성, 삼중수소화수, OBT, 원소형 수소 기체(HT : Elemental hydrogen) 및 삼중수소화 메탄(Triated methane) 등으로 구분하여 선량을 평가한다. 또한 입자성 물질은 폐 흡수 유형에 따라 다시 Fast(F), Moderate(M), Slow(S) 등 세 등

K-DOSE60 기본 모델	
농작물	HTO에 의한 연간 유효 선량 또는 장기 등가 선량 (mSv/yr) $\text{대기 확산 인자}(\text{sr}^2) \times \text{방출률}(\text{Bq/s}) / \text{절대 습도}(\text{kg/m}^3) \times \text{공기-식물체 평형 비율} \times \text{농작물의 수분 비율} \times \text{농작물 섭취량}(\text{kg/yr}) \times \text{농작물 오염분율} \times \text{HTO 선량 환산 인자}(\text{Sv/Bq}) \times \text{단위 환산 인자}(1000\text{mSv/Sv})$
	OBT에 의한 연간 유효 선량 또는 장기 등가 선량 (mSv/yr) $\text{대기 확산 인자}(\text{sr}^2) \times \text{방출률}(\text{Bq/s}) / \text{절대 습도}(\text{kg/m}^3) \times 9.0 \times \text{공기-식물체 평형 비율} \times \Sigma(\text{농작물 중 유기물}_i \text{의 비} \times \text{유기물}_i \text{ 중 수소의 비}) \times \text{농작물 섭취량}(\text{kg/yr}) \times \text{농작물 오염분율} \times \text{OBT 선량 환산 인자}(\text{Sv/Bq}) \times \text{단위 환산 인자}(1000\text{mSv/Sv})$
축산물	HTO, OBT에 의한 연간 유효 선량 또는 장기 등가 선량 (mSv/yr) $\text{가축 사료 중 삼중수소}(\text{HTO, OBT}) \text{ 농도}(\text{Bq/kg}) \times \text{가축의 일일 사료 섭취량}(\text{kg/day}) \times \text{핵종 전이 계수}(\text{day/kg}) \times \text{축산물 섭취량}(\text{kg/yr}) \times (\text{HTO, OBT}) \text{ 선량 환산 인자}(\text{Sv/Bq}) \times \text{단위 환산 인자}(1000\text{mSv/Sv})$

K-DOSE60 기본 모델	
농작물	$^{14}\text{CO}_2$ 에 의한 연간 유효 선량 또는 장기 등가 선량 (mSv/yr) $\text{대기 확산 인자}(\text{sr}^2) \times \text{방출률}(\text{Bq/s}) / \text{공기중 탄소 함유량}(\text{g-C/m}^3) \times \text{평형 상수}(\text{광합성 시간분율}) \times \text{농작물의 탄소함량}(\text{g-C/kg}) \times \text{농작물 오염분율} \times \text{농작물 섭취량}(\text{kg/yr}) \times \text{선량 환산 인자}(\text{Sv/Bq}) \times \text{단위 환산 인자}(1000\text{mSv/Sv})$
	$^{14}\text{CO}_2$ 에 의한 연간 유효 선량 또는 장기 등가 선량 (mSv/yr) $\text{가축 사료 중 C-14 농도}(\text{Bq/kg}) \times \text{축산물의 탄소 함량}(\text{g-C/kg}) / \text{가축 사료 중 탄소 함량}(\text{g-C/kg}) \times \text{축산물 섭취량}(\text{kg/yr}) \times \text{선량 환산 인자}(\text{Sv/Bq}) \times \text{단위 환산 인자}(1000\text{mSv/Sv})$

급으로 나누어 평가한다.

전력 연구원에서는 상기의 ICRP-60의 선량 개념과 국내 원자력 규제 기관인 한국원자력안전기술원의 연구 결과[3]를 토대로 원전 주변 주민의 방사선량 평가 지침을 수립하고 이에 적합한 선량 평가 전산 프로그램(K-DOSE60)을 개발하였으며[4], 본 프로그램은 여러 검증 단계를 거쳐 현재 국내 4개 원전 단지에서 성공적으로 활용중이다.

본 논문에서는 현재 국내 원전에서 정상 가동시 주변 주민 방사선

피폭 선량 평가에 활용되고 있는 전산 프로그램(K-DOSE60)에 대해 선량 평가 방법론, 프로그램 개요 등의 개발 내용을 기술하였다.

본론

1. 선량 평가 방법론 및 전산 프로그램

K-DOSE60에서는 피폭 연령군, 선량 개념, 핵종 및 선량 환산 인자 체계 등은 ICRP-60 방사선 방호 체계를 반영하고 있다.

그러나 방사성 핵종의 환경 거동

해석과 선량 계산식은 기존 국내 원전에서 주민 방사선량을 평가하는데 적용하고 있는 미국 규제 지침 Reg. Guide 1.109의 방법론[5]을 준용하고 있으며, 삼중수소 및 방사성 탄소에 대한 선량 계산 방법과 방사성 물질의 농작물 표면 침적과 관련된 피폭 경로에서의 농도 계산 방법을 개선하였다.

가. 피폭 연령군

피폭 연령군은 IAEA의 방사선 방호에 관한 국제 기본 안전 기준 (IAEA Safety Series 115)에 제시된 6개 대표 연령군을 다음과 같이 적용하였다. 기존의 4개 연령군(유아, 소아, 십대, 성인)과의 관계는 각 연령군의 괄호안에 제시되어 있다.

- 3개월 : 신생아 ~ 1세 미만의 인구 집단(유아)
- 1세 : 1세 ~ 2세 미만의 인구 집단
- 5세 : 2세 ~ 7세 미만의 인구 집단(소아)
- 10세 : 7세 ~ 12세 미만의 인구 집단
- 15세 : 12세 ~ 17세의 인구 집단(십대)
- 성인 : 17세 이상의 인구 집단(성인)

나. 선량 환산 인자

① 외부 피폭 선량 환산 인자

외부 피폭 선량 환산 인자는 방사능에 침착되어 유발되는 피폭, 지

표면에 침적된 방사성 물질에 의한 피폭(해변 활동 포함), 수영(해상 활동 포함)에 의한 피폭 등으로 구분되며, 미국 Oak Ridge National Lab.(ORNL)에서 ICRP-60에 의거하여 계산, 제시한 값을 사용한다[6].

② 호흡 및 섭취에 의한 내부 피폭 선량 환산 인자

호흡 및 섭취에 의한 선량 환산 인자는 ICRP-67, 69, 71, 72에서 권고하는 6개 연령군별 호흡 및 섭취 선량 환산 인자를 적용하였다[7~10].

그러나 ICRP-67, 69, 71에는 일부의 핵종에 대해서만 유효 산량과 장기 등가 선량 환산 인자가 제시되어 있고, ICRP-72에는 전체 핵종에 대한 유효 선량 환산 인자 값만이 제시되어 있다.

따라서 이 외의 핵종 및 장기에 대해서는 ICRP가 1999년에 발표한 CD-ROM에 수록된 값을 사용하였다[11].

화학적 형태는 ICRP-67, 69, 71, 72 및 IAEA Safety Series 115에서 기본값으로 권고하는 화학적 형태를 적용하였다.

기본값이 없을 경우에는 성인에 대한 유효 선량 환산 인자가 가장 큰 형태를 적용하였으며, 삼중수소는 HTO, 방사성 탄소는 CO₂, 방사성 요오드는 원소형을 기본 화학 형태로 하였다. 또한 입자성 물질은 1

〈표 1〉 삼중수소 및 방사성 탄소에 대한 입력 자료

구분(단위)	적용값
공기중 수분의 밀도(kg/m ³)	1.0
공기/농작물 삼중수소 평형 비율	0.5
농작물 중 수분의 비율 - 곡식/과일/김장 채소/엽채류/목초/사료	0.12/0.84/0.951/0.72/0.72
유기물중 수소분율 - 단백질/지방/탄수화물	0.07/0.12/0.062
농작물(곡식) 중 유기물 비율 - 단백질/지방/탄수화물	0.067/0.004/0.804
농작물(과일) 중 유기물 비율 - 단백질/지방/탄수화물	0.003/0.006/0.15
농작물(김장 채소) 중 유기물 비율 - 단백질/지방/탄수화물	0.013/0.002/0.035
농작물(엽채류) 중 유기물 비율 - 단백질/지방/탄수화물	0.013/0.002/0.035
목초 중 유기물 비율 - 단백질/지방/탄수화물	0.035/0.01/0.221/
공기 중 탄소의 함량(g-C/m ³)	0.18
방사성 탄소에 의한 선량 계산 대기-식물체 평형 상수	0.5
탄소의 함량(g-C/kg-fresh) - 곡식/과일/김장 채소/엽채류	403/63/35/35
탄소의 함량(g-C/kg-fresh, g-C/l) -우유/쇠고기/돼지고기/닭고기	61/225/326/165

μm AMAD를 기본 입자 크기로 고려하였다.

다. 선량 계산식

기본적으로는 미국 NRC Reg. Guide 1.109에 제시된 계산식을 적용하였으나, 일부 핵종 및 피폭 경로에 대하여는 다음과 같이 수정·보완한 방법론을 적용하였다.

그러나 이러한 경우에도 새로운 주민 방사선량 평가 프로그램(K-DOSE60)에는 Reg. Guide 1.109에 제시된 방법론도 선택적으로 적용, 평가할 수 있도록 하였다. 본 논문에서는 보완·개선된 부분을 중심으로 기술하였다.

① 삼중수소에 의한 선량 평가

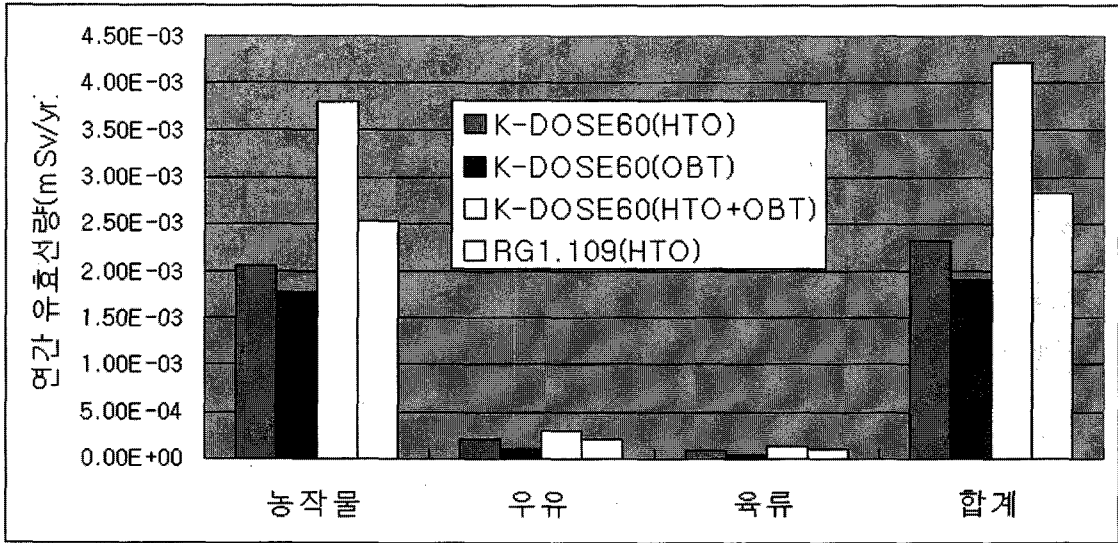
Reg. Guide 1.109에서는 식물체내의 삼중수소 농도는 대기 중 농

도의 절반이 식물체내에 골고루 분포되어 있다고 가정하고, 동물체내의 농도는 식물체에서 동물체로의 전이 계수를 이용하여 계산하고 있다.

그러나 동·식물체내의 조직 자유수(TFWT : Tissue Free Water Tritium, H₂O에서 수소 H가 삼중수소 T로 치환된 HTO 형태)에 대해서만 평가하고 있으며, 조직에 결합된 삼중수소(OBT : Organically Bound Tritium)는 평가할 수 없는 한계가 있다.

본 전산 프로그램에서는 HTO 뿐만 아니라 OBT에 의한 선량도 아울러 평가할 수 있도록 하였다.

농작물에서의 삼중수소 농도 (HTO 및 OBT)는 세계적으로 널리



〈그림 3〉 삼중수소 선량 평가 방법에 따른 결과

〈표 2〉 핵종별 방출량, 반감기, 화학적 형태에 대한 입력 자료

핵종	방출량(Bq/yr)	반감기(s)	방출 화학적 형태	비고
H-3	1.20E+13	3.895E+08	Triated Water	
C-14	3.70E+10	1.807E+11	CO ₂	

〈표 3〉 대기 확산 인자 입력 자료

단위	(x/Q)	(x/Q) ^{0.5}	(x/Q) ^{0.25}	(D/Q)
s/m ² , m ⁻²	2.763E-5	2.755E-5	2.542E-5	8.116E-8

적용되고 있는 비방사능 모델을 이용하여 계산하였다.

대기-식물체간 농도 평형 상수는 Reg. Guide 1.109의 값을 적용하였다. Reg. Guide 1.109에서는 농작물 내의 수분의 함유율을 농작물 종류에 관계없이 0.75를 적용하고 있다. 그러나 곡식은 약 12%, 채소류는 약 95% 정도의 수분을 함유하고 있는 등 종류에 따라 함유율이 매우 다르게 나타나고 있다.

우리 나라와 같이 곡류를 주식으로 하는 경우에는 Reg. Guide

1.109의 수치를 적용하면 매우 비현실적인 평가를 초래할 수 있다.

따라서 본 전산 프로그램에서는 농작물별로 수분의 함유율을 〈표 1〉과 같이 적용하였다.

동물체에서의 대부분의 OBT는 섭취사료의 OBT의 일부가 전이되는 것으로, 축산물에서의 삼중수소 농도 계산시 비방사능 모델을 적용할 경우 매우 보수적인 평가 결과를 초래할 수 있다[12].

따라서 본 전산 프로그램에서는 축산물에서의 삼중수소 농도는

Reg. Guide 1.109의 전이 모델을 적용하였으며, 식물체의 OBT도 HTO와 같은 비율로 전이된다고 가정하였다.

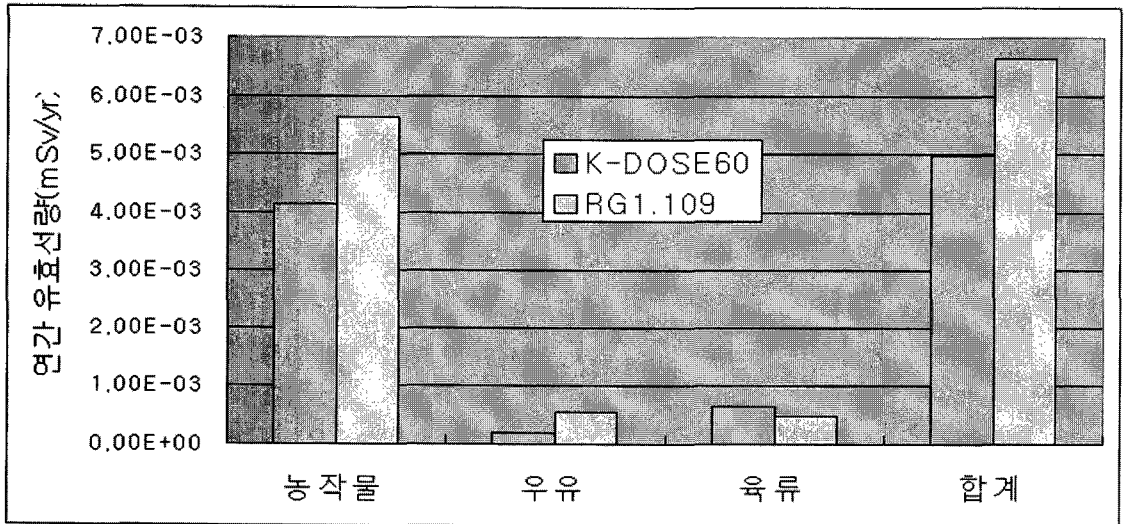
② 방사성 탄소에 의한 선량 평가

Reg. Guide 1.109에서는 광합성 작용에 의해 식물체의 방사성 탄소 농도는 공기 중 농도와 평형을 이룬다고 가정하여 비방사능 모델로 계산하며, 동물체내에서의 농도는 식물체로부터의 전이 계수를 이용하여 계산하고 있다.

그러나 이산화탄소 형태의 방사성 탄소는 공기-식물-동물체간의 환경 거동이 매우 빠르게 평형에 도달된다고 알려졌다[13].

따라서 본 전산 프로그램에서는 동·식물체의 방사성 탄소 농도는 비방사능 모델을 적용하여 계산하고 있다.

광합성 시간과 관계있는 대기-식



〈그림 4〉 C-14 선량 평가 방법에 따른 결과

물체간 평형상수는 월성 원전에서 가장 가까운 울산 기상관측소의 1999년 평균 일조시간 분율을 고려하여 “0.5”를 적용하였다.

Reg. Guide 1.109에서는 농작물 내의 탄소 함유량을 농작물 종류에 관계없이 110g/kg을 적용하고 있다. 그러나 농작물 내의 탄소함유량은 곡식은 약 403g/kg, 채소류는 약 35g/kg 정도로 농작물의 종류에 따라 매우 다르게 나타나고 있다. 본 전산 프로그램에서는 농작물 별로 수분의 함유율을 〈표 1〉에서와 같이 적용하였다.

③ 농작물별 실험식에 근거한 retention factor 개선 및 translocation factor 고려 조건 추가

방사성 물질이 대기로부터 농작물 표면으로 직접 침적되어 잔류되는 비율을 나타내는 retention

〈표 4〉 공기중 잠김(Submersion)에 의한 외부 피폭 선량 비교(단위:mSv/yr)

구분 핵종	유효 선량		피부 등가 선량		감상선 등가 선량	
	K-DOSE60	해석해	K-DOSE60	해석해	K-DOSE60	해석해
Ar-41	3.12E-06	3.12E-06	5.13E-06	5.13E-06	3.31E-06	3.31E-06
Kr-85	3.86E-07	3.86E-07	2.12E-05	2.12E-05	1.90E-07	1.90E-07
Kr-85m	5.53E-09	5.53E-09	1.80E-09	1.80E-09	5.90E-09	5.90E-09
Xe-133	8.76E-05	8.76E-05	3.27E-04	3.27E-04	9.95E-05	9.95E-05
Xe-133m	1.06E-07	1.06E-07	8.65E-07	8.65E-07	1.13E-07	1.13E-07
Xe-135	1.36E-06	1.36E-06	3.85E-06	3.85E-06	1.46E-06	1.46E-06
Xe-135m	5.60E-08	5.60E-08	8.76E-08	8.76E-08	6.02E-08	6.02E-08

factor의 경우, 기존의 평가 방법은 입자상 핵종과 방사성 요오드를 구분하여 농작물 종류에 관계없이 일정한 값을 적용하고 있다. 그러나 이러한 인자는 농작물 종류에 영향을 받는다.

한국원자력안전기술원에서는 GEN II 코드에서 사용하고 있는 방법론을 적용하여 농작물 및 사료 작물에 대한 retention factor를 개선 방안을 제시하였다[3]. 또한

농작물 표면에 침적된 방사성 물질이 가 식 부 로 전 이 되는 translocation factor(Tv)를 고려하였다.

한국원자력안전기술원에서는 GEN II 코드 및 원자력연구소의 연구 보고서에서 제시한 이동 계수 값을 적용하여 제시하였다[3].

본 프로그램에서는 한국원자력안전기술원에서 제시한 retention factor와 함께 translocation

〈표 5〉 호흡에 의한 내부 피폭 선량 비교(단위:mSv/yr)

구분 핵종	유효 선량		피부 등가 선량		감상선 등가 선량	
	K-DOSE60	해석해	K-DOSE60	해석해	K-DOSE60	해석해
H-3(HTO)	1.29E-03	1.29E-03	1.29E-03	1.29E-03	1.29E-03	1.29E-03
C-14(CO ₂)	1.37E-06	1.37E-06	1.37E-06	1.37E-06	1.37E-06	1.37E-06
Co-58(M)	1.41E-09	1.41E-09	2.21E-10	2.21E-10	3.80E-10	3.80E-10
Co-60(M)	8.83E-09	8.83E-09	2.12E-09	2.12E-09	3.36E-09	3.36E-09
Mn-54(M)	3.31E-10	3.31E-10	8.83E-11	8.83E-11	1.46E-10	1.46E-10
Sr-89(M)	1.35E-09	1.35E-09	1.02E-11	1.02E-11	1.02E-11	1.02E-11
Sr-90(M)	7.95E-09	7.95E-09	6.18E-11	6.18E-11	6.18E-11	6.18E-11
I-131(E)	4.41E-09	4.41E-09	1.41E-11	1.41E-11	8.61E-08	8.61E-08

〈표 6〉 곡식 섭취에 의한 내부 피폭 선량 비교(단위:mSv/yr)

구분 핵종	유효 선량		피부 등가 선량		감상선 등가 선량	
	K-DOSE60	해석해	K-DOSE60	해석해	K-DOSE60	해석해
H-3	1.70E-03	1.70E-03	1.70E-03	1.70E-03	1.70E-03	1.70E-03
C-14	3.57E-03	3.57E-03	3.51E-03	3.51E-03	3.51E-03	3.51E-03
Co-58	4.28E-08	4.27E-08	7.42E-09	7.40E-09	7.42E-09	7.40E-09
Co-60	2.68E-07	2.68E-07	1.03E-07	1.02E-07	1.34E-07	1.34E-07
Mn-54	1.36E-08	1.35E-08	3.06E-09	3.05E-09	3.06E-09	3.05E-09
Sr-89	3.32E-08	3.31E-08	2.55E-09	2.54E-09	2.55E-09	2.54E-09
Sr-90	8.49E-07	8.47E-07	2.00E-08	2.00E-08	2.00E-08	2.00E-08
I-131	4.70E-08	4.69E-08	1.47E-10	1.47E-10	9.19E-07	9.16E-07

factor를 고려하여 계산할 수 있도록 반영하였다.

④ 곡류, 돼지고기 및 닭고기 섭취시 육류내 방사능 농도 계산식 개선

기존 선량 평가 프로그램에서는 껍질을 까서 먹는 곡류의 표면에 침적되어 남아 있는 방사능량이 전량 껍질과 함께 제거된다고 가정하여, 이에 대한 기여분을 고려하지 않고 뿌리를 통해 흡수되는 방사능 농도에 대해서만 고려하고 있다.

돼지고기와 닭고기의 방사능 농도도 사람이 먹고 버린 곡물을 먹고 자란다고 가정하여 껍질에 직접 침적되어 방사능에 오염되는 경로를

고려하지 않았다. 그러나 농작물 표면에 침적된 방사성 물질이 가식부로 전이되는 이동 계수를 고려하면, 껍질을 까서 먹는 농작물이라 하더라도 농작물 표면 침적에 의한 기여분을 고려하여야 한다.

따라서 기존 코드에서 곡류와 돼지고기 및 닭고기 내에서의 방사능 농도도 껍질에 침적되어 가식부로 이동되는 오염 경로를 고려하여 계산하도록 개선하였다.

⑤ 액체 방사성 물질에 대한 피폭 경로

기존 선량 평가 프로그램에서는 수산물 식품군을 어류, 연체·갑각류, 해조류 등 세 가지 식품군으로

구분하여 평가하고 있다. 그러나 서식 특성이 서로 다른 연체류와 갑각류를 별도의 식품군으로 구분하여 평가할 수 있도록 하였다.

연체류과 갑각류를 별도의 식품군으로 구분하기 위해서는 연체류 및 갑각류의 섭취량, 핵종 농축 계수, 어획량 등을 확보할 수 있어야 한다. 본 전산 프로그램에서는 연체류 및 갑각류 각각의 입력 자료가 마련되기 전까지는 기존의 방법대로 갑각류를 연체류에 포함하여 평가하도록 하였다.

라. 선량 평가 전산 프로그램

국내 원전의 기존 전산 프로그램(GASDOS, GASPARD 등)은 ICRP-60 방사선 방호 체계를 반영하기 힘들 뿐만 아니라, 입·출력 자료 관리, 프로그램 실행 등 운용도 복잡하여 원전 환경 관리 업무에 불편함이 많았다.

따라서 핵종 인식 체계, 연령군, 인체 조직 및 장기, 선량 환산 인자 DB 등과 같은 입력 자료 및 선량 계산식 단위 등이 ICRP-60에 적합하고, 프로그램을 편리하게 운용할 수 있는 전산 프로그램(K-DOSE60)을 새로이 개발하였다.

기존 전산 프로그램은 핵종의 원소 기호, 질량수만으로 핵종을 인식하는 핵종 인식 체계를 가지고 있어 원소 기호와 질량수가 같으면 동일한 핵종으로 인식하기 때문에 ICRP-60 방사선 방호 기준에서

요구하고 있는 동일한 핵종의 여러 화학적 형태를 고려하지 못하는 단점이 있다.

따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해 원소 기호, 질량수, 방사성 붕괴 상수, 핵종의 화학적 형태 등을 이용하여 핵종 인식 체계를 정립하였다.

제 1단계 핵종 인식 체계는 원소 기호, 질량수, 방사성 붕괴 상수 등에 대한 정보를 이용하여 총 911개의 핵종 형태를 분류하고, 2 단계에서는 이를 다시 호흡시 폐 흡수 유형에 따라 세 가지 형태(F : Fast, M : Moderate, S : Slow)로 다시 구분하였다.

그리고 환경 매질간 전이 및 이동시 핵종 형태가 변화되는 삼중수소와 방사성 탄소에 대한 고려를 위해 이들 핵종에 대해 다시 제 3단계로 별도의 인식 체계를 부여하였다.

본 프로그램은 두 가지 프로그램 언어로 작성되었다. 선량 계산 프로그램은 FORTRAN 77로, 자료 입력, 프로그램 실행, 결과 출력 등 프로그램 실행 전 과정을 수행하는 프로그램 통합 운용 및 GUI 지원 체계는 Visual C++로 작성되었다.

본 전산 프로그램은 원자력발전소 주민 방사선량 평가 업무를 효율적으로 수행할 수 있도록 다음의 기능을 수행할 수 있도록 작성하였다. <그림 1>과 <그림 2>에 각각 프로그램의 자료 입력과 결과 출력 예를

<표 7> 우유 섭취에 의한 내부 피폭 선량 비교(단위:mSv/yr)

핵종	유효 선량		피부 등가 선량		갑상선 등가 선량	
	K-DOSE60	해석해	K-DOSE60	해석해	K-DOSE60	해석해
H-3	2.96E-04	2.96E-04	2.96E-04	2.96E-04	2.96E-04	2.96E-04
C-14	4.01E-04	4.01E-04	3.95E-04	3.96E-04	3.95E-04	3.96E-04
Co-58	1.49E-10	1.48E-10	2.58E-11	2.57E-11	1.58E-11	2.57E-11
Co-60	8.35E-10	8.33E-10	3.19E-10	3.19E-10	4.18E-10	4.17E-10
Mn-54	4.15E-12	4.14E-12	9.35E-13	9.33E-13	9.35E-13	9.33E-13
Sr-89	9.26E-11	9.20E-11	7.12E-12	7.08E-12	7.12E-12	7.08E-12
Sr-90	2.07E-08	2.06E-08	4.88E-10	4.87E-10	4.88E-10	4.87E-10
I-131	1.97E-09	1.96E-09	6.17E-12	6.15E-12	3.84E-08	3.83E-08

<표 8> 쇠고기 섭취에 의한 내부 피폭 선량 비교(단위:mSv/yr)

핵종	유효 선량		피부 등가 선량		갑상선 등가 선량	
	K-DOSE60	해석해	K-DOSE60	해석해	K-DOSE60	해석해
H-3	1.17E-04	1.17E-04	1.17E-04	1.17E-04	1.17E-04	1.17E-04
C-14	4.87E-04	4.87E-04	4.78E-04	4.78E-04	4.78E-04	4.78E-04
Co-58	2.74E-11	2.73E-11	4.75E-12	4.74E-12	4.75E-12	4.74E-12
Co-60	1.61E-10	1.61E-10	6.16E-11	6.15E-11	8.06E-11	8.04E-11
Mn-54	4.21E-11	4.20E-11	9.50E-12	9.47E-12	9.50E-12	9.47E-12
Sr-89	8.52E-12	8.47E-12	6.56E-13	6.52E-13	6.56E-13	6.52E-13
Sr-90	2.04E-09	2.03E-09	4.81E-11	4.79E-11	4.81E-11	4.79E-11
I-131	19.54E-10	9.51E-10	2.99E-12	2.98E-12	1.86E-08	1.86E-08

제시하였다.

○ 최대 개인/대중(80km 이내) 선량 평가

○ 방출원(방출 호기)을 최대 10개 호기까지 일괄 계산 및 부지 합산 기능

○ 업무 형태별 평가 기능 : 연간, 반기, 분기, 월별 평가 및 특정 기간에 대한 기간별 평가

○ 유효 및 26개 장기의 등가 선량 계산

○ 연령군 : 6개 연령군

○ 자료 입력, 실행 및 결과 보기를 Win 95/98 GUI 환경에서 수행

○ 핵종별로 피폭 경로 적용 선택

○ 고려할 수 있는 피폭 경로

- 방사능운에 의한 외부 피폭 : 불활성 기체 및 입자성 물질 선택적 적용

- 지표면 침적에 의한 외부 피폭
- 호흡에 의한 내부 피폭 : 삼중수소화수의 경우 피부 흡수 경로 선택적 고려

- 식물물 섭취에 의한 내부 피폭 : 농작물(곡식 · 과일 · 김치 · 채소), 우유, 육류(쇠고기 · 돼지고기 · 닭고기)

- 해변 활동에 의한 외부 피폭
- 수영 활동에 의한 외부 피폭
- 해상 활동에 의한 외부 피폭
- 수산물 섭취에 의한 내부 피폭 : 어류, 연체류, 갑각류, 해조류 등

〈표 9〉 어류 섭취에 의한 내부 피폭 선량 비교(단위:mSv/yr)

구분 핵종	유효 선량		피부 등가 선량		감상선 등가 선량	
	K-DOSE60	해석해	K-DOSE60	해석해	K-DOSE60	해석해
H-3	2.32E-06	2.32E-06	2.32E-06	2.32E-06	2.32E-06	2.32E-06
Co-60	1.03E-08	1.03E-08	3.92E-09	3.92E-09	5.13E-09	5.13E-09
Sr-85	1.50E-13	1.50E-13	4.28E-14	4.28E-14	5.62E-14	5.62E-14
Y-90m	6.85E-16	6.83E-16	1.13E-17	1.12E-17	6.85E-19	6.83E-19
Nb-95	7.04E-07	7.04E-07	5.13E-08	5.13E-08	1.55E-08	1.55E-08
Sn-113	4.08E-10	4.08E-10	1.62E-11	1.62E-11	1.28E-11	1.28E-11
Sb-124	1.72E-09	1.72E-09	1.51E-10	1.51E-10	1.31E-10	1.31E-10
Cs-137	4.90E-08	4.90E-08	3.85E-08	3.85E-08	4.55E-08	4.55E-08
Hg-203	7.43E-11	7.43E-11	3.99E-12	3.99E-12	3.30E-12	3.30E-12

4개 식품군

2. 결과

K-DOSE60에서는 삼중수소 및 방사성 탄소에 의한 주민 방사선량 평가 방법을 개발하였다. 따라서 삼중수소와 방사성 탄소를 중심으로 보다 세부적으로 선량 평가 결과를 분석하였다. 분석에 사용된 입력 자료는 〈표 2〉 ~ 〈표 3〉에 제시하였다.

핵종별 전이 계수는 미국 NRC Reg. Guide 1.109에 제시된 값을 사용하였다. Reg. Guide 1.109에 사용된 입력 변수는 한국원자력안전기술원의 주민 방사선량 평가 입력 지침의 자료와 동일하다[14].

삼중수소와 C-14에 의한 선량 평가 결과를 대해 〈그림 3〉 ~ 〈그림 4〉에 제시하였다(본 논문에서 제시한 평가 결과는 방출량 및 대기 확산 인자를 임의로 적용한 결과이므로 현재 원자력발전소의 주민 방사선량 평가 결과와는 무관함).

삼중수소에 의한 선량은 K-

DOSE60의 계산 결과(OBT 포함)가 기존의 Reg. Guide 1.109의 방법론 보다 상대적으로 큰 선량값을 보여주고 있다. 이는 K-DOSE60에서는 OBT를 고려하기 때문에 다소 보수적으로 평가되기 때문이다.

그러나 HTO만의 선량은 Reg. Guide 1.109에 비해 다소 작게 나오는데, 이는 선량 기여도가 높은 곡식에 대한 수분 함유율의 차이에 기인한다.

방사성 탄소(C-14)에 의한 선량은 K-DOSE60의 결과가 Reg. Guide 1.109의 결과보다 약간 낮게 평가되고 있다.

이는 대기-식물체간 평형 상수(광합성이 일어나는 총시간(6개월)에 대한 C-14의 연간 총방출 시간의 비)에 대한 입력 변수값과 식물체의 탄소 함량의 차이에 기인한다.

특히 Reg. Guide 1.109 모델에서는 연속 방출을 가정할 경우 대기-식물체간 평형 상수를 매우 보수적인 값인 "1"을 적용하고 있으나, K-DOSE60에서는 보다 합리

적으로 평가하기 위해 우리나라 평균 일조 시간 비율에 근거하여 "0.5"로 설정하였다. 이는 한국원자력안전기술원에서 제시한 「주민 피폭 선량 평가 지침 및 INDAC 사용자 지침서」에 근거하였다[14].

ICRP-60을 고려한 주민 방사선량 평가 프로그램(K-DOSE60)의 계산 결과에 대한 신뢰성을 평가하기 위해 주요 핵종에 대해 해석해와 비교 평가하였다.

그 결과 K-DOSE60 계산 결과와 해석해는 잘 일치하였다(〈표 4〉 ~ 〈표 9〉 참조). 계산에 사용된 입력 변수 및 그 수치는 [참고문헌-15]와 [참고문헌-16]에 제시되어 있다.

결론

ICRP-60의 변경된 선량 기준에 따라 세분화된 연령군(4개→6개), 신체 장기 및 조직(전신 및 7개장기 → 12개 주장기 및 10개 기타 장기) 및 핵종의 화학적 형태를 고려할 수 있도록 평가 지침 및 전산 프로그램을 개발하고, 연령군 및 선량 기준 변경에 따른 선량 환산 인자(경로/연령군/핵종/장기별)를 ICRP-67·69·71·72, IAEA Tech. report 등의 참고 문헌을 참조하여 D/B를 구축하였다.

전력연구원에서 개발한 ICRP-60 주민 방사선량 평가 지침 및 전

산 프로그램(K-DOSE60)은 2002년 1/4분기에 각 원전 본부에 설치, 적용함으로써 국제방사선 방호위원회의 ICRP-60 방사선 방호 권고 기준에 적합한 방사선량 평가체제를 완비하였다.

또한 삼중수소 및 방사성 탄소에 의한 선량 평가 및 동·식물체 내에서의 방사능 농도 계산 방법을 보다 합리적으로 개선하였다.

삼중수소에 의한 선량은 기존의 방법 보다는 다소 크게 평가되는데 이는 OBT에 의한 선량도 평가하기 때문이다.

방사성 탄소에 의한 선량은 기존의 방법보다 다소 작게 평가된다. 이는 대기-식물체간 평형 상수를 원전 주변의 일조 시간 분율을 고려하여 보다 합리적으로 개선했기 때문이다 ☞

〈참고 문헌〉

[1] ICRP, "1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection", Publication 60, 1990

[2] IAEA, "International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources", Safety Series 115, 1996

[3] 한국원자력안전기술원, "방

사선 안전규제 기술개발 - 방사능 방재 환경 규제기술개발 1단계 최종보고서", KINS/GR-199, 2000

[4] 한국전력공사 전력연구원, "원자력발전소 주변 표준 주민선량 평가 지침 및 전산 프로그램 사용자 절차서", 2002

[5] USNRC Reg. Guide 1.109, "Calculation of Annual Doses to Man from Routine Release of Reactor Effluents for the Purpose of Evaluating Compliance with 10CFR50 App. I", 1977

[6] Eckerman 등, "DFEXT 코드(외부 피폭 선량 환산 인자)", ORNL, 1994

[7] ICRP, "Age-dependence Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides : Part2 Ingestion Dose Coefficients", Publication 67, 1994

[8] ICRP, "Age-dependence Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides : Part3 Ingestion Dose Coefficients", Publication 69, 1995

[9] ICRP, "Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 4 Inhalation Dose Coefficients",

Publication 71, 1995

[10] ICRP, "Age-dependence Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides : Part5 Compilation of Ingestion and Inhalation Dose Coefficients", Publication 72, 1996

[11] ICRP, "Database of Dose Coefficients : Workers and Members of the Public, Ver.1", 1999

[12] 한국전력공사 전력연구원, "삼중수소 및 C-14에 의한 원전 주변 주민 피폭 선량 평가", TM. 95ZJ15.R1998.48, 1998

[13] AECL, "Modeling doses from tritium and C-14 in the environment", Separated supplement II of TR.95ZJ15 .J1998.71, KEPRI, 1998.

[14] 한국원자력안전기술원, "방사능 방재 환경 규제기술 개발 - 주민피폭 선량 평가 지침 및 IND AC 사용자 지침서", KINS/GR-199 별책 1, 2000

[15] 이갑복 등, "ICRP-60을 반영한 주민선량 평가 프로그램 개발 (I)", 한국원자력학회 추계학술발표회, 2000

[16] 이갑복 등, "ICRP-60을 반영한 주민선량 평가 프로그램 개발 (II)", 한국원자력학회 추계학술발표회, 200