

2000 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

ICRP-60을 반영한 주민선량 평가 프로그램 개발(I)
- 기체 방사성물질에 의한 선량평가 -

Off-site Dose Calculation Computer Code Based on ICRP-60 (I)
- Gaseous Radioactive Effluents -

이갑복 · 정양근 · 김위수
한국전력공사 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

송영일
한국전력공사 영광원자력본부

김남천
한국전력공사 울진원자력본부

요 약

ICRP-60의 선량평가 방법론과 국내 원자력 규제기관인 한국원자력안전기술원에서 수정·보완한 선량평가 방법론을 토대로 국내원전 주변 주민선량 평가지침을 수립하고 이에 적합한 선량평가 전산프로그램(K-DOSE60)을 개발하였다. 상기 전산프로그램 중 기체 방사성물질에 의한 선량평가 부분에 대한 선량평가 방법 및 전산프로그램 구성 등에 대해 설명하고, 프로그램 계산결과와 수계산 결과를 비교 평가하여 프로그램의 정확성을 검증하였다. 비교 평가 결과, 전산코드의 계산값과 수계산 결과는 잘 일치하고 있음을 확인하였다.

Abstract

The development of the computer code for calculating off-site doses(K-DOSE60) was based on ICRP-60 and the draft guideline by Korea Institute of Nuclear Safety(KINS). In this paper, the methodology to compute dose for gaseous effluents was described. To examine reliability of the K-DOSE60 code the results obtained from K-DOSE60 were compared with analytic solutions. The results by K-DOSE60 are in agreement with analytic solutions.

1. 서 론

1990년 ICRP는 방사선방호 권고안을 ICRP Pub. 60[1]을 통해 제시하였고, IAEA는 ICRP-60의 내용을 근간으로 각국의 방사선방호 규제요건에 활용토록 기본안전기준(IAEA Safety Series 114)[2]을 출간하였다. 우리나라도 1998년 과학기술부 장관고시 제98-12호를 통해 ICRP-60 방사선방호 기준을 법제화하였다[3]. 이에 대한 후속조치로 한국원자력안전기술원(KINS)에서는 2000년에

과기부고시 98-12호에 의거 원자력시설 주변의 주민선량 평가지침을 제시하였으며, ICRP-60과는 별도로 국내 환경특성을 고려하여 기체 방사성물질에 의한 선량평가 계산식의 일부를 수정·보완하였다[4].

기체 방사성물질에 의한 선량평가는 방사능운과 지표면에 침적된 방사성물질에 의한 외부피폭과 호흡 및 농·축산물 섭취를 통한 내부피폭으로 구분된다. 외부피폭과 내부피폭선량 모두 환경매질의 방사능 농도에 단위농도에 대한 조직 및 장기별 선량환산인자를 곱하여 계산된다.

선량환산인자는 신진대사 등과 같은 방사성물질의 체내 조직과 장기에서 거동특성을 고려하여 각 조직과 장기의 흡수선량을 구하고 방사성물질의 에너지에 따른 가중함수를 곱하여 구한다.

ICRP-60에서는 방사성물질이 영향을 미칠 수 있는 조직과 장기를 이전보다 세분화하였다. 지금까지는 전신, 뼈, 간장, 갑상선, 신장, 호흡기, 소화기 등 6개 조직과 피부선량에 대해 평가하였으나 신원고에서는 12개 주장기 및 10개 기타장기에 대해 방사성물질의 영향을 평가하고 있다. 주장기로는 생식선, 적색골수, 결장, 폐, 위, 방광, 유방, 간, 식도, 갑상선, 골표면, 피부에 대해 평가하고 있으며, 기타장기로는 부신, 뇌, 대장, 상부, 소장, 신장, 근육, 췌장, 지라, 흉선, 자궁에 대해서 평가하고 있으며, 신체 조직과 장기의 가중함수를 추가하였다.

체내피폭의 경우 방사성물질이 장기간 동안 체내에 축적돼 1년이 지난 후에도 계속적으로 피폭을 유발할 수 있기 때문에, ICRP-60에서는 주변주민의 피폭선량 평가시 각 연령군별이 70세가 될 때까지의 예탁선량(committed dose)-성인의 경우 50년, 유아의 경우는 70년 간-을 평가하도록 정하고 있다.

기체 방사성물질의 인체내 거동특성은 화학적인 형태, 입자크기 등에 따라 달라지게 된다. 따라서 핵종형태 및 입자크기에 따라 선량환산인자를 달리 적용하고 있다. 즉, 동일한 핵종이라 하더라도 핵종의 화학적 형태에 따라 선량환산인자가 달라지게 된다. 삼중수소를 예를 들면, 섭취의 경우에는 화학적 형태를 삼중수소화수(HTO:Triated water)와 조직결합 삼중수소(OBT:Organically Bound Tritium)로 구분하고 있고, 호흡의 경우에는 입자성, 삼중수소화수, OBT, 원소형 수소기체(HT:Elemental hydrogen) 및 삼중수소화 메탄(Triated methane)으로 구분하여 선량을 평가한다. 또한 입자성 물질은 폐 흡수유형에 따라 다시 F, M, S 등 세등급으로 나누어 평가한다.

본 연구에서는 상기의 ICRP-60의 선량평가 방법론과 국내 원자력 규제기관인 한국원자력안전기술원에서 수정·보완한 선량평가 방법론을 토대로 주민선량 평가지침을 수립하고 이에 적합한 선량평가 전산프로그램(K-DOSE60)을 개발하였다[5].

본 논문에서는 상기 전산프로그램 중 기체 방사성물질에 의한 선량평가 부분에 대한 선량평가 방법 및 전산프로그램 구성 등에 대해 설명하고, 프로그램 계산결과와 수계산 결과를 비교 평가하여 프로그램의 정확성을 검증하였다.

2. 기체 방사성물질에 의한 주민선량 평가방법

ICRP-60 방사선방호 체계에서 변경된 내용은 크게 피폭연령군, 선량개념, 핵종 및 선량환산인자 체계 등이다. 본 논문에서는 기존 국내원전에서 주민선량을 평가하는데 적용하고 있는 Reg. Guide 1.109의 평가방법론[6]과 상이한 방법론을 적용하고 있는 ICRP-60의 내용과, 한국원자력안전기술원에서 수정·보완한 선량계산식을 중심으로 기술하였다.

1) 피폭연령군

피폭 연령군은 IAEA의 방사선방호에 관한 국제기본안전기준(IAEA Safety Series 115)에 제시된 6개 대표 연령군을 다음과 같이 적용하였다.

- 3개월 : 신생아 ~ 1세 미만의 인구집단

- 1세 : 1 세 ~ 2세 미만의 인구집단
- 5세 : 2 세 ~ 7세 미만의 인구집단
- 10세 : 7 세 ~ 12세 미만의 인구집단
- 15세 : 12세 ~ 17세의 인구집단
- 성인 : 17세 이상의 인구집단

2) 선량환산인자

선량환산인자는 크게 외부피폭 선량환산인자와 내부피폭 선량환산인자로 구분되는데 본 전산프로그램에서는 다음과 같이 선량환산인자를 적용하였다.

방사능운의 침잠(Submersion)에 의한 외부피폭 선량환산인자

방사능운의 침잠에 의한 외부피폭 선량환산인자는 미국 Oak Ridge National Lab.(ORNL)에서 제시한 값을 사용한다[7]. 이 값은 반무한구(Semi-Infinite Sphere)에 위치하는 성인이 받는 유효 및 장기별 선량환산인자로서 피폭 연령군별로 차이가 있을 수 있으나, 모든 피폭 연령군에 적용한다.

침적물에 의한 외부피폭 선량환산인자

침적물에 의한 선량환산인자는 지표면에 일정하게 분포하는 침적물에 의해 1m 높이의 성인이 받는 외부피폭 선량환산인자로서 미국 Oak Ridge National Lab.(ORNL)에서 제시한 값을 사용한다 [7]. 피폭 연령군별로 차이가 있을 수 있고 전신선량과 유효선량간에 개념차이가 있으나, 모든 피폭 연령군에 적용한다. 전신에 대한 선량환산인자는 피부 5cm 깊이에서 계산된 값이고, 피부의 경우에는 0.007 cm 깊이에서 계산된 값이다.

호흡 및 섭취에 의한 선량환산인자

호흡 및 섭취에 의한 선량환산인자는 ICRP-67[8], 69[9], 71[10], 72[11]에서 권고하는 6개 연령군별 호흡 및 섭취 선량환산인자를 적용하였다. 그러나 ICRP-67, 69, 71에는 일부의 핵종에 대해서만 제시되어 있고, ICRP-72에는 유효선량환산인자 값만이 제시되어 있다. 따라서 이 외의 핵종 및 장기에 대해서는 ICRP가 1999년에 발표한 CD-ROM[12]에 수록된 값을 사용하였다. 화학적 형태는 ICRP-67, 69, 71, 72 및 IAEA의 국제기반안전기준(IAEA Safety Series 115)에서 기본값으로 권고하는 화학적 형태를 적용한다. 단, 방출핵종을 모를 경우, 삼중수소는 HTO, 방사성탄소는 CO₂, 방사성요오드는 원소형(Elemental)을 적용하였다. 또한 입자성 물질의 크기는 1 μm AMAD를 기본 입자크기로 고려하였다.

3) 선량계산식

미국 NRC Reg. Guide 1.109[6]에 제시된 계산식을 적용하였으나, 한국원자력안전기술원에서 국내 실정을 고려하여 제시한 방법론[4]을 고려할 수 있도록 수정·보완하였다. 본 논문에서는 Reg. Guide 1.109에 제시된 식은 생략하고, 본 전산프로그램에서 보완된 부분에 대해서 제시한다.

농작물별 실험식에 근거한 retention factor 및 이동계수 고려조건 추가

기존 선량평가 방법은 농작물 표면에 침적과 관련된 retention factor의 경우 입자상 핵종과 방사성요오드를 구분하여 농작물에 관계없이 일정한 값을 적용하고 있다. 그러나 한국원자력안전기술원에서는 GEN II 코드에서 사용하고 있는 방법론을 적용하여 농작물 및 사료 작물에 대한 retention factor를 제시하였다[4].

또한 농작물 표면에 침적된 방사성물질이 가식부로 전이되는 translocation factor(T_v)를 고려하

였다. 한국원자력안전기술원에서는 GEN II 코드 및 원자력연구소의 연구보고서에서 제시한 이동계수 값을 적용하여 제시하였다[4]. 본 프로그램에서는 이를 반영할 수 있도록 option으로 선택하여 이동계수를 retention factor와 함께 고려하여 계산할 수 있도록 코드에 반영하였다.

곡류, 돼지고기 및 닭고기 섭취시 육류내 방사능 농도 계산식 수정

기존 선량평가 코드에서는 껍질을 까서 먹는 곡류에 대하여 농작물 표면에 침적되어 남아있는 양이 전량 껍질과 함께 제거되므로 이에 대한 기여분을 고려하지 않고, 뿌리를 통해 흡수되는 방사능 농도에 대해서만 고려하고 있다. 그러나 농작물 표면에 침적된 방사성물질이 가식부로 전이되는 이동계수를 적용하여 농작물 표면 침적에 의한 기여분도 함께 고려할 수 있도록 수정·보완하였다.

따라서 기존 코드에서 사람이 먹는 곡물을 먹고 자란다고 가정하여 계산하고 있는 돼지고기 및 닭고기 내에서의 방사능 농도 계산식도 함께 수정하였다.

삼중수소에 의한 선량 평가

삼중수소에 의한 선량평가지 기존 코드에서는 식물체내의 농도는 대기중 농도의 절반이 식물체내에 골고루 분포되어 있다고 가정하고, 동물체내의 농도는 식물체에서 동물체로의 전이계수를 이용하여 계산하고 있다. 그러나 한국원자력안전기술원에서는 식물체내에서의 삼중수소 농도는 공기중 삼중수소 농도 분포와 비슷하다는 비방사능 모델을 이용하여 평가하고, 또한 가축에서의 삼중수소 농도도 가축이 섭취하는 사료와 물의 농도와 평형을 이룬다고 가정하여 평가하는 방법을 제시하였다.

한국원자력안전기술원에서 제시하고 있는 선량평가 방법론에서는 삼중화수소수(tritiated water, HTO)에 대한 평가방법론만 제시하고 있으나, 본 전산코드에서는 동·식물체내에서 생성되는 조직 결합삼중수소(organically bound tritium, OBT)도 고려할 수 있도록 option화 하였다.

본 전산코드에서는 삼중수소에 의한 선량평가 방법은 식물체에서의 삼중수소 농도는 비방사능 모델[13]을 이용하고, 동물체에서의 삼중수소 농도는 Reg. Guide 1.109의 전이모델과 한국원자력안전기술원에서 제시한 GEN II 모델을 선택적으로 적용할 수 있게 하였다. OBT에 대한 평가는 식물체에서는 비방사능 모델을, 동물체에서는 Reg. Guide 1.109의 삼중수소 전이모델을 준용하였다.

방사성탄소에 의한 선량 평가

기존 코드에서는 식물 내부의 방사성탄소 농도는 광합성 작용에 의해 공기중 농도와 평형을 이룬다고 가정하여 비방사능 모델로 계산하며, 동물체내에서의 농도는 식물체로 부터의 전이계수를 이용하여 계산하고 있다. 한국원자력안전기술원에서는 이산화탄소 형태로 방출되는 방사성탄소의 경우 동·식물체 내에서의 농도를 비방사능 모델을 이용하여 계산하는 방법을 제시하였다[4]. 따라서 본 전산코드에서는 이를 반영할 수 있는 option을 추가하였다.

3. 기체 방사성물질에 의한 주민선량 평가 프로그램

국내원전에서 적용중인 기존의 평가 전산프로그램(GASDOS, GASPAR 등)으로는 ICRP-60 방사선 방호체제를 반영하기 힘들 뿐만아니라, 원전 환경관리 업무에 불편함이 많았다. 따라서, 핵종인식체계, 연령군, 인체조직 및 장기, 선량환산인자 DB 등과 같은 입력자료 및 선량계산식 단위 등을 ICRP-60에 적합한 전산프로그램(K-DOSE60)을 새로이 개발하였다. 본 논문에서는 K-DOSE60의 기체 방사성물질 부분에 대해 기술하였으며, 액체 방사성물질에 의한 선량평가 부분은 별도의 논문에 제시하였다[14].

기존 전산프로그램은 핵종의 원소기호, 질량수만으로 핵종을 인식하는 핵종인식체계를 가지고 있다. 따라서 원소기호와 질량수가 같으면 동일한 핵종으로 인식하기 때문에 ICRP-60 방사선 방호기준에서 요구하고 있는 동일한 핵종의 여러 화학적 형태를 고려하지 못하는 단점이 있다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 다음과 같이 원소기호, 질량수, 방사성 붕괴상수, 핵종의 화학적 형태 등을 이용하여 핵종인식체계를 정립하였다.

제 1단계 핵종인식체계는 원소기호, 질량수, 방사성 붕괴상수 등에 대한 정보를 이용하여 총 911개의 핵종형태를 분류하고, 2 단계에서는 이를 다시 호흡시 폐 흡수유형에 따라 세가지 형태(F:Fast, M:Moderate, S:Slow)로 다시 구분하여 인식한다. 그리고, 환경매질간 전이 및 이동시 핵종 형태가 변화되는 삼중수소와 방사성 탄소에 대한 고려를 위해 이들 핵종에 대해 다시 제 3단계로 별도의 인식체계를 부여하였다. 표 1에 핵종인식체계의 일부를 제시하였다. Nb-89와 같이 동일한 핵종임에도 불구하고 반감기가 다른 경우에도 서로 다른 핵종으로 인식토록 구성하였다.

표 1. 핵종인식체계

| 1단계 | 핵종 | 2단계 | 3단계 | 비고 |
|-----|----------------------|---------|-----|-----------|
| 1 | H-3(Particle) | F, M, S | x | |
| 2 | H-3(HTO) | x | o | |
| 3 | H-3(OBT) | x | x | |
| 4 | H-3(HT) | x | x | |
| 5 | H-3(Triated Methane) | x | x | |
| 5 | Be-7(Particle) | M, S | x | |
| 6 | Be-10(Particle) | M, S | x | |
| | ----- | | | |
| 12 | C-14(Particle) | F, M, S | x | |
| 13 | C-14(Vapor) | x | x | |
| 14 | C-14(Dioxide) | x | x | |
| 15 | C-14(Monoxide) | x | o | |
| | ----- | | | |
| 205 | Nb-89 | F, M, S | x | 반감기 2.03h |
| 206 | Nb-89 | F, M, S | x | 반감기 1.10h |
| | ----- | | | |
| 911 | Md-258 | M | x | |

본 프로그램은 두 가지 프로그램 언어로 작성되었다. 선량계산 프로그램은 FORTRAN 77로, 자료입력, 프로그램 실행 및 결과 출력 등 프로그램 실행 전과정을 수행하는 프로그램 통합 운용 및 GUI 지원체제는 Visual C++로 작성되었다. 본 전산프로그램은 원자력발전소 주민선량 평가업무를 고려하여 다음의 기능을 수행할 수 있도록 작성하였다.

- 최대개인/대중(80km 이내 및 NEPA) 선량평가
- 방출원(방출호기)를 최대 10개호기까지 일괄 계산 및 부지 합산 기능
- 업무형태별 평가 기능 : 연간, 반기, 분기, 월별 평가 및 특정기간에 대한 기간별 평가
- 유효 및 26개 장기의 등가선량 계산
- 연령군 : 6개 연령군
- 자료입력, 실행 및 결과보기를 Win 95/98 GUI 환경에서 수행
- 핵종별로 피폭경로 적용 선택

○ 고려할 수 있는 피폭경로

- 방사능원에 의한 외부피폭 : 불활성기체 및 입자성 물질 선택적 적용
- 지표면 침적에 의한 외부피폭
- 호흡에 의한 내부피폭 : 삼중수소화수의 경우 피부흡수 경로 선택적 고려
- 음식물섭취에 의한 내부피폭 : 농작물(곡식, 과일, 김치, 채소), 우유, 육류(소고기, 돼지고기, 닭고기) * 삼중수소 : OBT는 선택적 고려

4. 기체 방사성물질에 의한 주민선량 평가 프로그램의 검증

ICRP-60을 고려한 기체 방사성물질의 선량 평가 프로그램의 계산결과에 대한 신뢰성을 평가하기 위해 주요핵종에 대해 수 계산 결과와 비교 평가하였다.

비교 평가에 적용한 입력자료는 표 2 ~ 표 6에 제시하였다. 핵종별 전이계수는 미국 NRC Reg. Guide 1.109제시된 값을 사용하였다. 또한 선량계산식은 미국 NRC Reg. Guide 1.109를 이용하였다. 삼중수소에 대해서는 OBT를 포함하여 평가하였으며, 식물체 농도는 비방사능 모델을, 동물체에서의 농도는 전이모델을 적용하였다. C-14은 비방사능 모델을 적용하였다.

본 연구에서 개발한 전산코드의 계산값과 수계산 결과를 비교하여 표 7 ~ 표 17에 제시하였다. 결과에서 보는 바와 같이 전산코드의 계산값과 수계산 결과는 잘 일치하고 있음을 확인하였다.

표 2. 핵종별 방출량, 반감기, 화학적 형태에 대한 입력자료

| 핵종 | 방출량(Bq/yr) | 반감기(s) | 화학적형태 | 비고 |
|---------|------------|-----------|-----------------|------------|
| Ar-41 | 2.75E+09 | 6.577E+03 | Inert Gas | |
| Kr-85 | 8.32E+10 | 3.381E+08 | Inert Gas | |
| Kr-85m | 4.24E+07 | 1.613E+04 | Inert Gas | |
| Xe-133 | 3.41E+12 | 4.453E+05 | Inert Gas | |
| Xe-133m | 4.31E+09 | 1.890E+05 | Inert Gas | |
| Xe-135 | 6.45E+09 | 3.272E+04 | Inert Gas | |
| Xe-135m | 2.15E+08 | 9.174E+02 | Inert Gas | |
| H-3 | 1.20E+13 | 3.895E+08 | Triated Water | 환경중 OBT 고려 |
| C-14 | 3.70E+10 | 1.807E+11 | CO ₂ | |
| Co-58 | 1.48E+05 | 6.117E+06 | Particulates M | |
| Co-60 | 1.48E+05 | 1.662E+08 | Particulates M | |
| Mn-54 | 3.70E+04 | 2.696E+07 | Particulates M | |
| Sr-89 | 3.70E+04 | 4.363E+06 | Particulates M | |
| Sr-90 | 3.70E+04 | 9.177E+08 | Particulates M | |
| I-131 | 3.70E+04 | 6.947E+05 | Elemental | |

표 3. 대기확산인자 입력자료

| 단위 | (χ/Q) | $(\chi/Q)^D$ | $(\chi/Q)^{DD}$ | (D/Q) |
|-----------------|------------|--------------|-----------------|----------|
| $s/m^3, m^{-2}$ | 2.763E-5 | 2.755E-5 | 2.542E-5 | 8.116E-8 |

표 4. 성인에 대한 호흡 및 섭취량 입력자료(단위 : 호흡량 m^3/yr , 우유 l/yr , 기타 kg/yr)

| 호흡량 | 곡식 | 과일 | 김치 | 엽채류 | 우유 | 소고기 | 돼지고기 | 닭고기 |
|------|-------|------|------|-------|----|------|------|-----|
| 7400 | 188.5 | 66.3 | 97.9 | 126.7 | 63 | 20.7 | 12.4 | 22 |

표 5. 삼중수소 및 방사성탄소에 대한 입력자료

| 구분(단위) | 적용 값 |
|---|---------------------------------|
| 식물체 삼중수소 농도계산 모델 | 비방사능 모델(OBT 포함) |
| 동물체 삼중수소 농도계산 모델 | 전이모델(OBT 포함) |
| 방사성탄소 농도계산 모델 | 비방사능 모델 |
| 공기중 수분의 밀도(kg/m ³) | 1.0 |
| 공기/농작물 삼중수소 평형 비율 | 0.5 (Reg. Guide 1.109 기본값) |
| 농작물 중 수분의 비율 - 곡식/과일/김장채소/엽채류/목초/사료 | 0.12/0.84/0.951/0.951/0.72/0.72 |
| 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(김장채소)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 |
| 목초중 유기물 비율 - 단백질/지방/탄수화물 | 0.035/0.01/0.221/ |
| 공기중 탄소의 함량(g-C/m ³) | 0.18 |
| 식물체의 광합성 활동 시간분율 | 0.5 |
| 탄소의 함량(g-C/kg-fresh) - 곡식/과일/김장채소/엽채류/목초/사료 | 403/631/35/35 |
| 탄소의 함량(g-C/kg-fresh, g-C/l) - 우유/소고기/돼지고기/닭고기 | 61/225/326/165 |

표 6. K-DOSE60 프로그램 비교 평가를 위한 기타 입력자료

| 구분(단위) | 적용 값 |
|--|-------------------------------------|
| 농작물 생장기간(초) - 곡식/과일/김장채소/엽채류 | 1.296E+7/1.339E+7/7.776E+6/5.184E+6 |
| 목초/사료작물 생장기간(초) | 1.555E+7/6.480E+6 |
| 가축의 일일 섭취량(kg/day) - 젖소/육우/돼지/닭 | 55/55/4.2/0.12 |
| 단위면적당 생산량(kg/m ²) - 목초/사료/곡식/과일/김장채소/엽채류 | 4.0/0.34/0.36/1.13/4.53/4.52 |
| 토양의 유효밀도((kg/m ³) | 165 |
| 농작물에 대한 잔류계수 - 요오드/기타 | 0.5/0.25 |
| 공기중으로부터 침적되는 방사성요오드 비율 | 0.5 |
| 기상에 의한 방사성물질의 제거상수(sec ⁻¹) | 5.73E-7 |
| 토양의 오염기간-발전소 수명의 절반(초) | 6.32E+8 |
| 주거용 건물의 차폐인자(최대개인) | 0.7 |
| 농작물 생장기간중 평균 절대습도(kg/m ³) | 0.012 |
| 젖소가 목초지에서 생활하는 년분율 | 1 |
| 젖소가 목초지에 있는 동안 목초의 섭취비율 | 1 |
| 육우가 목초지에서 생활하는 년분율 | 1 |
| 육우가 목초지에 있는 동안 목초의 섭취비율 | 1 |
| 섭취량중 오염된 것의 비율 - 곡식/과일/김장채소/엽채류/목초/사료 | 0.9/1/1/0.7/1/1 |
| 수확에서 소비까지의 시간(초) - 곡식/과일/김장채소/엽채류 | 1.210E+6/1.210E+6/1.210E+6/8.640E+4 |
| 수확에서 소비까지의 시간(초) - 목초/사료 | 1.210E+5/1.210E+5 |
| 수확에서 소비까지의 시간(초) - 우유/소고기/돼지고기/닭고기 | 1.73E+5/6.05E+5/6.05E+5/2.59E+5 |

표 7. 공기중 잠김(Submersion)에 의한 외부피폭선량 비교(단위: mSv/yr)

| 핵종 | 구분 | 유효선량 | | 피부 등가선량 | | 갑상선 등가선량 | |
|---------|----|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | K-DOSE60 | 수계산 | K-DOSE60 | 수계산 | K-DOSE60 | 수계산 |
| 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 |

표 8. 지표면 침적에 의한 외부피폭선량 비교(단위: mSv/yr)

| 핵종 | 구분 | 유효선량 | | 피부 등가선량 | | 갑상선 등가선량 | |
|-------|----|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | K-DOSE60 | 수계산 | K-DOSE60 | 수계산 | K-DOSE60 | 수계산 |
| Co-58 | | 6.87E-08 | 6.87E-08 | 8.46E-08 | 8.46E-08 | 7.02E-08 | 7.02E-08 |
| Co-60 | | 4.31E-06 | 4.31E-06 | 5.17E-06 | 5.17E-06 | 4.21E-06 | 4.21E-06 |
| Mn-54 | | 6.47E-08 | 6.47E-08 | 7.89E-08 | 7.89E-08 | 6.60E-08 | 6.60E-08 |
| Sr-89 | | 9.32E-09 | 9.32E-09 | 1.18E-08 | 1.18E-08 | 9.56E-09 | 9.56E-09 |
| Sr-90 | | 1.73E-09 | 1.73E-09 | 1.48E-07 | 1.48E-07 | 2.63E-10 | 2.63E-10 |
| I-131 | | 3.84E-10 | 3.84E-10 | 6.77E-10 | 6.77E-10 | 3.91E-10 | 3.91E-10 |

표 9. 호흡에 의한 내부피폭선량 비교(단위: mSv/yr)

| 핵종 | 구분 | 유효선량 | | 피부 등가선량 | | 갑상선 등가선량 | |
|------------------------|----|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | K-DOSE60 | 수계산 | K-DOSE60 | 수계산 | K-DOSE60 | 수계산 |
| 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 10. 곡식 섭취에 의한 내부피폭선량 비교(단위: mSv/yr)

| 핵종 | 구분 | 유효선량 | | 피부 등가선량 | | 갑상선 등가선량 | |
|-------|----|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | K-DOSE60 | 수계산 | K-DOSE60 | 수계산 | K-DOSE60 | 수계산 |
| 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 |

표 11. 과일 섭취에 의한 내부피폭선량 비교(단위: mSv/yr)

| 핵종 \ 구분 | 유효선량 | | 피부 등가선량 | | 갑상선 등가선량 | |
|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | K-DOSE60 | 수계산 | K-DOSE60 | 수계산 | K-DOSE60 | 수계산 |
| H-3 | 5.51E-04 | 5.51E-04 | 5.51E-04 | 5.51E-04 | 5.51E-04 | 5.51E-04 |
| C-14 | 2.18E-04 | 2.18E-04 | 2.14E-04 | 2.14E-04 | 2.14E-04 | 2.14E-04 |
| Co-58 | 5.32E-09 | 5.31E-09 | 9.23E-10 | 9.20E-10 | 9.23E-10 | 9.20E-10 |
| Co-60 | 3.29E-08 | 3.28E-08 | 1.26E-08 | 1.26E-08 | 1.65E-08 | 1.64E-08 |
| Mn-54 | 1.63E-09 | 1.63E-09 | 3.68E-10 | 3.67E-10 | 3.68E-10 | 3.67E-10 |
| Sr-89 | 4.20E-09 | 4.19E-09 | 3.23E-10 | 3.22E-10 | 3.23E-10 | 3.22E-10 |
| Sr-90 | 1.76E-07 | 1.75E-07 | 4.14E-09 | 4.13E-09 | 4.14E-09 | 4.13E-09 |
| I-131 | 5.85E-09 | 5.84E-09 | 1.84E-11 | 1.83E-11 | 1.14E-07 | 1.14E-07 |

표 12. 김장채소 섭취에 의한 내부피폭선량 비교(단위: mSv/yr)

| 핵종 \ 구분 | 유효선량 | | 피부 등가선량 | | 갑상선 등가선량 | |
|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | K-DOSE60 | 수계산 | K-DOSE60 | 수계산 | K-DOSE60 | 수계산 |
| H-3 | 7.87E-04 | 7.87E-04 | 7.87E-04 | 7.87E-04 | 7.87E-04 | 7.87E-04 |
| C-14 | 1.79E-04 | 1.79E-04 | 1.76E-04 | 1.76E-04 | 1.76E-04 | 1.76E-04 |
| Co-58 | 1.97E-09 | 1.96E-09 | 3.41E-10 | 3.40E-10 | 3.41E-10 | 3.40E-10 |
| Co-60 | 1.41E-08 | 1.41E-08 | 5.41E-09 | 5.39E-09 | 7.07E-09 | 7.05E-09 |
| Mn-54 | 7.67E-10 | 7.65E-10 | 1.73E-10 | 1.72E-09 | 1.73E-10 | 1.72E-10 |
| Sr-89 | 2.57E-09 | 2.56E-09 | 1.98E-10 | 1.97E-10 | 1.98E-10 | 1.97E-10 |
| Sr-90 | 1.14E-06 | 1.13E-06 | 2.68E-08 | 2.67E-08 | 2.68E-08 | 2.67E-08 |
| I-131 | 2.16E-09 | 2.15E-09 | 6.77E-12 | 6.75E-12 | 4.22E-08 | 4.21E-08 |

표 13. 엽채류 섭취에 의한 내부피폭선량 비교(단위: mSv/yr)

| 핵종 \ 구분 | 유효선량 | | 피부 등가선량 | | 갑상선 등가선량 | |
|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | K-DOSE60 | 수계산 | K-DOSE60 | 수계산 | K-DOSE60 | 수계산 |
| H-3 | 7.74E-04 | 7.74E-04 | 7.74E-04 | 7.74E-04 | 7.74E-04 | 7.74E-04 |
| C-14 | 1.76E-04 | 1.76E-04 | 1.73E-04 | 1.73E-04 | 1.73E-04 | 1.73E-04 |
| Co-58 | 2.13E-09 | 2.13E-09 | 3.70E-10 | 3.69E-10 | 3.70E-10 | 3.69E-10 |
| Co-60 | 1.15E-08 | 1.15E-08 | 4.40E-09 | 4.39E-09 | 5.76E-09 | 5.74E-09 |
| Mn-54 | 6.19E-10 | 6.17E-10 | 1.39E-10 | 1.39E-10 | 1.39E-10 | 1.39E-10 |
| Sr-89 | 2.37E-09 | 2.36E-09 | 1.82E-10 | 1.81E-10 | 1.82E-10 | 1.81E-10 |
| Sr-90 | 5.71E-07 | 5.69E-07 | 1.35E-08 | 1.34E-08 | 1.35E-08 | 1.34E-08 |
| I-131 | 6.53E-09 | 6.51E-09 | 2.05E-11 | 2.04E-11 | 1.28E-07 | 1.27E-07 |

표 14. 우유 섭취에 의한 내부피폭선량 비교(단위: mSv/yr)

| 핵종 \ 구분 | 유효선량 | | 피부 등가선량 | | 갑상선 등가선량 | |
|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | K-DOSE60 | 수계산 | K-DOSE60 | 수계산 | K-DOSE60 | 수계산 |
| 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 15. 소고기 섭취에 의한 내부피폭선량 비교(단위: mSv/yr)

| 핵종 \ 구분 | 유효선량 | | 피부 등가선량 | | 갑상선 등가선량 | |
|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | K-DOSE60 | 수계산 | K-DOSE60 | 수계산 | K-DOSE60 | 수계산 |
| 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 | 9.54E-10 | 9.51E-10 | 2.99E-12 | 2.98E-12 | 1.86E-08 | 1.86E-08 |

표 16. 돼지고기 섭취에 의한 내부피폭선량 비교(단위: mSv/yr)

| 핵종 \ 구분 | 유효선량 | | 피부 등가선량 | | 갑상선 등가선량 | |
|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | K-DOSE60 | 수계산 | K-DOSE60 | 수계산 | K-DOSE60 | 수계산 |
| H-3 | 5.65E-06 | 5.65E-06 | 5.65E-06 | 5.65E-06 | 5.65E-06 | 5.65E-06 |
| C-14 | 4.22E-04 | 4.22E-04 | 4.15E-04 | 4.15E-04 | 4.15E-04 | 4.15E-04 |
| Co-58 | 4.81E-11 | 4.80E-11 | 8.34E-12 | 8.32E-12 | 8.34E-12 | 8.32E-12 |
| Co-60 | 3.68E-10 | 3.67E-10 | 1.41E-10 | 1.40E-10 | 1.84E-10 | 1.84E-10 |
| Mn-54 | 7.16E-11 | 7.14E-11 | 1.61E-11 | 1.61E-11 | 1.61E-11 | 1.61E-11 |
| Sr-89 | 5.02E-11 | 5.00E-11 | 3.86E-12 | 3.85E-12 | 3.86E-12 | 3.85E-12 |
| Sr-90 | 1.71E-09 | 1.71E-09 | 4.03E-11 | 4.02E-11 | 4.03E-11 | 4.02E-11 |
| I-131 | 1.91E-10 | 1.91E-10 | 6.00E-13 | 5.98E-13 | 3.74E-09 | 3.73E-09 |

표 17. 닭고기 섭취에 의한 내부피폭선량 비교(단위: mSv/yr)

| 핵종 \ 구분 | 유효선량 | | 피부 등가선량 | | 갑상선 등가선량 | |
|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | K-DOSE60 | 수계산 | K-DOSE60 | 수계산 | K-DOSE60 | 수계산 |
| H-3 | 2.86E-07 | 2.86E-07 | 2.86E-07 | 2.86E-07 | 2.86E-07 | 2.86E-07 |
| C-14 | 3.79E-04 | 3.79E-04 | 3.73E-04 | 3.73E-04 | 3.73E-04 | 3.73E-04 |
| Co-58 | 5.07E-13 | 5.06E-13 | 8.80E-14 | 8.77E-14 | 8.80E-14 | 8.77E-14 |
| Co-60 | 3.74E-12 | 3.73E-12 | 1.43E-12 | 1.42E-12 | 1.87E-12 | 1.86E-12 |
| Mn-54 | 2.01E-11 | 2.01E-11 | 4.54E-12 | 4.53E-12 | 4.54E-12 | 4.53E-12 |
| Sr-89 | 3.31E-13 | 3.30E-13 | 2.55E-14 | 2.54E-14 | 2.55E-14 | 2.54E-14 |
| Sr-90 | 1.07E-11 | 1.07E-11 | 2.52E-13 | 2.51E-13 | 2.52E-13 | 2.51E-13 |
| I-131 | 6.08E-13 | 6.07E-13 | 1.91E-15 | 1.90E-15 | 1.19E-11 | 1.19E-11 |

5. 결론

본 연구에서는 상기의 ICRP-60 방사선방호 체계에 근거한 주민선량 평가체제를 구축하고, 국내 원자력 규제기관인 한국원자력안전기술원에서 최근에 미국 NRC Reg. Guide 1.109의 선량평가식을 일부 수정·보완하여 제시한 선량평가 방법론을 반영할 수 있도록 주민선량 평가지침을 수립하고 이에 적합한 선량평가 전산프로그램(K-DOSE60)을 개발하였다.

본 연구에서 개발한 기체 방사성물질의 선량 평가 프로그램의 계산결과에 대한 신뢰성을 평가하기 위해 주요핵종에 대해 수 계산 결과와 비교 평가하였다. 비교 평가 결과, 전산코드의 계산값과 수계산 결과는 잘 일치하고 있음을 확인하였다.

따라서, 가동중인 원전에 의한 주변주민의 방사선량을 국제방사선방호위원회의 기준에 따라 평

가할 수 있는 체제를 구축하여, 원전주변의 환경방사선 관리의 선진화를 기할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] ICRP Publication 60. "1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection", 1990
- [2] IAEA Safety Series 115, "International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources", 1996
- [3] 과학기술부 장관 고시 제 98-12호, "방사선량 등을 정하는 기준", 1998
- [4] 한국원자력안전기술원, "방사선 안전규제 기술개발 - 방사능 방재 환경 규제기술개발 1단계 최종보고서", KINS/GR-199, 2000
- [5] 한국전력공사 전력연구원, "고리, 울진원전 주변 국지기상 특성을 고려한 주민선량 평가체제 구축 중간보고서", TM.99NJ08.M2000.205, 2000
- [6] 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 Appendix I", 1977
- [7] 한국전력공사 전력연구원, "대기, 수중, 지표면 오염에 따른 외부피폭 선량환산인자", TM.99NJ08.P2000.134, 2000
- [8] ICRP Publication 67, "Age-dependence Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides : Part2 Ingestion Dose Coefficients" , 1994
- [9] ICRP Publication 69, "Age-dependence Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides : Part3 Ingestion Dose Coefficients" , 1995
- [10] ICRP Publication 71, "Age-dependence Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides : Part4 Inhalation Dose Coefficients" , 1995
- [11] ICRP Publication 72, "Age-dependence Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides : Part5 Compilation of Ingestion and Inhalation Dose Coefficients" , 1996
- [12] ICRP Database of Dose Coefficients : Workers and Members of the Public, Ver.1, 1999
- [13] 한국전력공사 전력연구원, "삼중수소 및 C-14에 의한 원전 주변주민 피폭선량 평가", TM.95ZJ15.R1998.48, 1998
- [14] 이갑복 외 4인, "ICRP-60을 반영한 주민선량 평가 프로그램 개발(II)", 한국원자력학회 추계 학술발표회, 2000 (in submitting)