

방사성요오드의 내부피폭 선량평가 코드 비교계산

Comparison of Internal Dose Assessment due to Intake of I-131

김은주, 김희근, 하각현, 이형석
한전 전력연구원

요 약

본 연구는 원자력발전소에서 방사선작업에 따른 I-131 흡입후 전신선량계측(Whole Body Counter : WBC)한 결과에 따라 각 내부피폭 선량평가 코드를 이용하여 섭취량과 예탁유효선량(CED : Committed Effective Dose)을 계산하였다. 여기에는 국내에서 개발된 KIDAC 코드, 일본의 MONDAL 코드, 영국의 LUDEP 코드와 IMBA 코드가 이용되었다.

Abstract

This study was to compare the Intake and Committed Effective Dose(CED) due to inhalation of I-131. The Intake and CED Calculations were based on KIDAC, LUDEP, MONDAL and IMBA computer codes.

1. 개 요

1990년말 국제방사선방호위원회(ICRP : International Commission on Radiological Protection)는 작업종사자에 대한 방사선방호 지침을 새로이 개정하여 권고하였다[1]. 내부피폭 선량평가에서도 ICRP 30에 대해 호흡기모델의 보완작업을 수행하였고, 그 결과 1994년에는 새로운 호흡기모델인 ICRP 66을 발표하였다. ICRP 66은 모델의 각 부분 즉 형태학, 생리학, 침적, 제거 및 방사선 효과 등에 대한 자료를 검토한 결과에 근거하여 ICRP 30의 모델을 개정한 것이다[2,3]. 새로운 모델에서는 호흡기관을 방사선 생물학적 측면, 기능, 침적 및 제거의 차이를 고려하여 그림 1과 같이 4개의 구역으로 Extrathoracic airway(ET)는 ET_1 (Anterior nasal passage)와 ET_2 (Posterior nasal, Oral passage, Pharynx, Larynx)로 구분하고 Thoracic airway는 BB(Bronchial), bb(Bronchiolar), AI(Alveolar-Interstitial)로 구분하였다. 임파절은 Extrathoracic(LN_{ET}) 및 Thoracic(LN_{TH}) airway별로 각 1개씩 구분하고 있다. 동 모델은 ICRP 30 모델의 TB 지역을 BB 및 bb 지역으로 좀더 세분하였다. ICRP 30모델에서는 임파절 격실을 P지역에만 둔 데 비해 새로운 모델에서는 이를 확대하여 Extrathoracic 및 Thoracic airway에 각 1개의 임파절 격실을 두었다[3,4].

2. 내부피폭 선량평가 코드 비교

KIDAC은 국내에서 개발된 내부피폭 선량평가 코드로 Windows 버전 프로그램에서 구동되며 한

화면에서 입출력이 진행되는 형태로 사용법이 용이하게 구성되어 있다[5]. 섭취경로는 원전 작업 종사자만을 대상으로 하여 흡입경로만을 고려하였고, 섭취형태로는 급성 단일/반복섭취, 만성섭취가 있다. 프로그램 상에 체내의 측정치(대변, 소변, 폐, 갑상선, 전신)를 입력하면 섭취량과 CED이 계산되어 출력되고, 저장파일 내에는 감시 일자, 이름, ID, 부서, 핵종, 섭취량, CED을 저장할 수 있다. 적용된 대사모델은 ICRP 66 호흡기모델, ICRP 30 소화기모델, ICRP 56/67/69 신진대사모델이며, 계산된 섭취량과 선량환산계수를 사용하여 CED을 평가한다. 핵종 라이브러리는 ICRP의 각종 인자들의 값을 권고값으로 주어지나, 어느 인자도 개별적으로 변경 가능하다. 계산에 사용된 해법은 Birchall 알고리즘을 이용하고, 미분방정식의 해는 MathCAD 프로그램을 사용하고 있다. 선택된 핵종의 입자크기는 보통 $1\mu\text{m}$, $3\mu\text{m}$, $5\mu\text{m}$, $10\mu\text{m}$ 이며, 섭취후 24시간 미만에서의 섭취량 및 CED을 구할 수 있는 핵종의 경우도 있다.

MONDAL(MONitoring to Dose cALculation)은 일본 NIRS에서 개발된 내부피폭 선량평가 코드로 KIDAC 코드와 유사하게 Windows 버전 프로그램이며 한 화면에서 입출력이 진행되는 형태로 구성되어 있다. 방사성핵종 섭취후 측정시간은 시간(h) 단위가 아닌 일(day)정수 단위로 구성되어 있고, 핵종별 반감기 및 방사선 yeild 등의 핵종자료가 표시된다. 또한, 방사성핵종의 흡입 혹은 섭취시 개인별 선량평가에 있어서 작업자에서 일반인까지 확대 적용하여 선량계산을 할 수 있다. 적용된 대사모델에서 호흡기모델은 ICRP 66을 사용하고, 신진대사모델은 ICRP 30/56/67/69/71에 근거하며 소화기모델은 ICRP 30에 바탕을 두어 계산된다. 선택한 핵종의 입자크기는 보통 $0.1\mu\text{m}$, $0.3\mu\text{m}$, $1\mu\text{m}$, $3\mu\text{m}$, $5\mu\text{m}$, $10\mu\text{m}$ 이고, 섭취후 24시간 미만에서의 섭취량 및 CED 값은 계산할 수 없다.

LUDEP(LUng Doses Evaluation Program)은 영국 NRPB에서 개발된 내부피폭 선량평가 코드로 ICRP 66에서 권고된 호흡기모델을 바탕으로 개발된 코드이며 IBM-PC 호환기종에서 구동되는 DOS 버전의 코드로서 ICRP 66에서 권고하는 인체 호흡기모델에 바탕을 두고 있다. 이 코드는 팔핵이 미치는 영향을 고려한다거나 시간단위의 결과값을 출력할 수 있지만 사용법이 복잡하다는 단점이 있다. 섭취경로 및 섭취형태는 사용자가 임의의 조작이 가능하다. ICRP 권고를 따르며, 대사모델은 ICRP 66에 근거한다. 방사성핵종 섭취로 인한 호흡기 계통이나 체내 조직기관에의 선량과 선량률은 사용자가 조건들을 선정하여 구할 수 있도록 하였고, 결과값은 유효선량으로 제시된다.

IMBA(Integrated Modules for Bioassay Analysis)는 LUDEP 코드를 개정하여 ICRP 권고 모델에 맞게 upgrading한 Windows 버전 프로그램으로 영국 NRPB(National Radiological Protection Board)에 소유권이 있다. 체내에 유입된 단일 및 다중 방사능핵종에 대한 선량평가가 가능한 프로그램으로 ICRP에서 현재 권고하고 있는 호흡기모델, 소화기모델, 신진대사모델 등을 ICRP 68 표준작업자를 권고로 하여 선량평가를 하고 있다. 선택한 핵종의 입자크기는 ICRP에서 권고하고 있는 $5\mu\text{m}$ 를 대표적으로 사용하고 있으나 사용자가 인자들을 개별적으로 변경가능 하도록 되어있다. 그러나, 섭취후 24시간 미만에서의 섭취량 및 CED 값이나 기체(Elemental) I-131이 입자로 흡입될 때의 선량평가 값은 계산할 수 없는 단점이 있다.

3. 비교 계산결과

각 프로그램에서의 입출력결과물 값을 비교해 보기 위하여 I-131 섭취후 3시간 후 WBC 계측시(측정값 : $18,170\text{Bq}$ 기준) 및 섭취후 12일 후 WBC 계측시(측정값 : $5,786\text{Bq}$ 기준)의 결과를 각 프로그램 코드별로 나타내어 살펴보았다. KIDAC 코드에서는 I-131에 대한 Thyroid 및 Whole body, 기체(Elemental)의 섭취량 및 CED 값을 구할 수 있으나, MONDAL, IMBA, LUDEP 코드에서는 공통적으로 $5\mu\text{m}$, Thyroid 값만을 계산할 수 있다[6,7]. 이는 코드 중 일시별, 입자별 구분 및 I-131에 대한 Whole body의 IRF(Intake Reduction Factor), DCF(Dose Conversion Factor) 등이 나타나 있지 않기 때문으로 파악된다. 각 코드별로 I-131의 섭취후 12일 후 WBC 계측시(측정값 : $5,786\text{Bq}$ 기준) $5\mu\text{m}$, Thyroid의 결과값을 비교한 결과 KIDAC에서의 섭취량과 CED 값은 각

각 $1.246E+5$ Bq, $1.370E+0$ mSv, MONDAL에서는 각각 $1.2E+05$ Bq, $1.4E+0$ mSv LUDEP에서는 $1.14E+05$ Bq, $1.193E+0$ mSv, IMBA에서는 $1.239E+05$ Bq, $1.30E+00$ mSv으로 나타났다. 또한 KIDAC 코드는 부가적으로 타 코드에 비해 핵종 섭취후 24시간미만 선량측정 옵션과 Iodine의 경우 Thyroid 및 Whole body에서의 섭취량 및 CED 측정이 가능하며, 기체(Elemental) I-131의 흡입에 따른 선량평가 결과도 계산할 수 있다.

4. 기존 평가코드(KIDAC) 문제점 및 개정

본 논문은 ICRP 66/78 등의 새로운 호흡기모델과 감시지침을 적용하여 개발한 각종 내부피폭 선량평가 코드에 대하여 비교계산을 수행하였다. 특히 KIDAC 코드는 원자력발전소에서 방사성물질 흡입후 수시간 내에 WBC 계측이 불가피한 상황을 고려하여 방사성물질 흡입/섭취후 24시간 이내 방사능 측정자료를 이용한 내부피폭선량을 평가할 수 있도록 코드를 개정하였다[7]. 이 경우 Iodine 흡입후 작업자는 Portal Monitoring과 Whole Body Counting을 하게 되며 이 경우 흡입에서 측정까지 수시간 만에 이루어진다. 그러나 ICRP에서 요오드의 경우는 Whole Body Geometry에 해당되는 IRF를 제공하지 않고, Thyroid Geometry에 해당되는 IRF만을 ICRP 78에서 제공하고 있다. 그러므로 KIDAC 코드에서 Thyroid IRF를 이용하여 CED을 계산했을 때의 측정 Geometry와 평가 Geometry가 일치하지 않는 문제점이 있었다. 이는 영국 NRPB가 개발한 LUDEP 코드에서도 동일하게 나타나고 있는 문제이기도 하다. 이에 따라 Iodine 흡입후 24시간 이전 WBC 측정시 나타난 KIDAC 코드의 화학형과 섭취잔류분을 등을 수차례에 걸쳐 보완하여 Thyroid IRF 이외에 Whole Body IRF와 화학형으로 Elemental을 추가하였으며, 이 경우에 해당하는 DCF(Dose Conversion Factor)를 추가하여 CED을 계산하도록 하였다. 또한 I-131의 흡입후 24시간미만 측정시에도 화학형으로 Elemental Iodine에 대한 IRF와 DCF도 추가하여 CED를 계산할 수 있도록 하였다.

참 고 문 헌

- [1] 과학기술부 고시 제2002-1호 “방사선방호 등을 정하는 기준”, 2002
- [2] ICRP, “Limits for intakes of Radionuclides by Worker”, ICRP Publication 30 part 1, pergamon Press, Oxford, 1978
- [3] ICRP, “Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection”, ICRP Publication 66, pergamon Press, Oxford, 1993
- [4] ICRP, “Individual Monitoring for Internal Expose of Workers Replacement of ICRP Publication 54”, ICRP Publication 78, pergamon Press, Oxford, 1997
- [5] 제1회 방사선안전 평가기술 심포지움, KINS, 2002.8
- [6] 제2회 방사선안전 평가기술 심포지움, KINS, 2003.7
- [7] 제8회 방사선피폭최소화 워크샵(ALARA WORKSHOP), KHNP, 2003.7.

감사의 글

본 논문은 과학기술부 원자력중장기사업 “방사선 피폭저감 기술개발”의 일환으로 수행되었습니다.

표 1. 각 코드에서의 섭취량과 예탁유효선량

측정시간	IRF	흡수형태 및 입자크기	Code	Intake(Bq)	예탁유효선량 (mSv)
I-131 섭취후 3시간 후 측정 (18,170Bq)	Thyroid	Type F, 1 μ m	KIDAC1.2	7.125E+5	5.415E+0
			MONDAL2.0x	-	-
			LUDEP2.0	6.27E+05	4.802E+0
			IMBA	-	-
		Type F, 5 μ m	KIDAC1.2	5.251E+5	5.777E+0
			MONDAL2.0x	-	-
			LUDEP2.0	4.72E+05	4.939E+0
			IMBA	6.934E+05	7.28E+0
		Vapor, Elemental	KIDAC1.2	2.716E+5	5.432E+0
			MONDAL2.0x	-	-
			LUDEP2.0	-	-
			IMBA	-	-
	Whole Body	Type F, 1 μ m	KIDAC1.2	4.000E+4	3.040E-1
			MONDAL2.0x	-	-
			LUDEP2.0	-	-
			IMBA	-	-
		Type F, 5 μ m	KIDAC1.2	2.500E+4	2.750E-1
			MONDAL2.0x	-	-
			LUDEP2.0	-	-
			IMBA	-	-
		Vapor, Elemental	KIDAC1.2	2.043E+4	4.086E-1
			MONDAL2.0x	-	-
			LUDEP2.0	-	-
			IMBA	-	-
I-131 섭취후 12일 후 측정 (5,786Bq)	Thyroid	Type F, 1 μ m	KIDAC1.2	1.636E+5	1.243E+0
			MONDAL2.0x	1.7E+05	1.3E+0
			LUDEP2.0	1.55E+05	1.187E+0
			IMBA	-	-
		Type F, 5 μ m	KIDAC1.2	1.246E+5	1.370E+0
			MONDAL2.0x	1.2E+05	1.4E+0
			LUDEP2.0	1.14E+05	1.193E+0
			IMBA	1.239E+05	1.30E+0
		Vapor, Elemental	KIDAC1.2	6.643E+4	1.329E+0
			MONDAL2.0x	6.6E+04	1.3E+0
			LUDEP2.0	-	-
			IMBA	-	-
	Whole Body	Type F, 1 μ m	KIDAC1.2	1.516E+5	1.152E+0
			MONDAL2.0x	-	-
			LUDEP2.0	-	-
			IMBA	-	-
		Type F, 5 μ m	KIDAC1.2	1.154E+5	1.270E+0
			MONDAL2.0x	-	-
			LUDEP2.0	-	-
			IMBA	1.149E+05	1.21E+0
		Vapor, Elemental	KIDAC1.2	-	-
			MONDAL2.0x	-	-
			LUDEP2.0	-	-
			IMBA	-	-

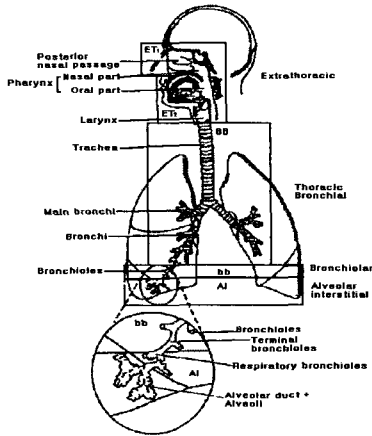


그림 1. ICRP 66 호흡기모델

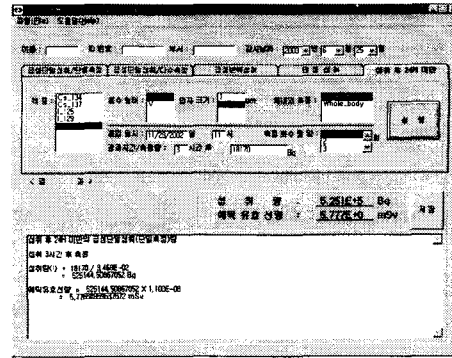


그림 2. I-131 Type F(5µm, Thyroid) 기준 섭취 3시간 후 섭취량과 CED - KIDAC

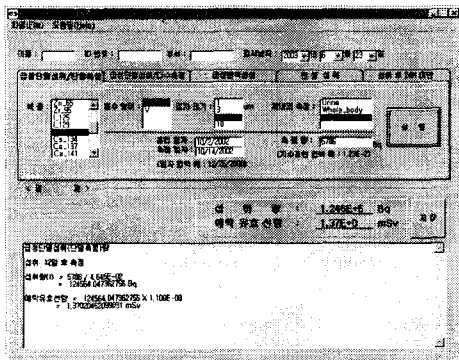


그림 3. I-131 Type F(5µm, Thyroid) 기준 섭취 12일 후 섭취량과 CED - KIDAC

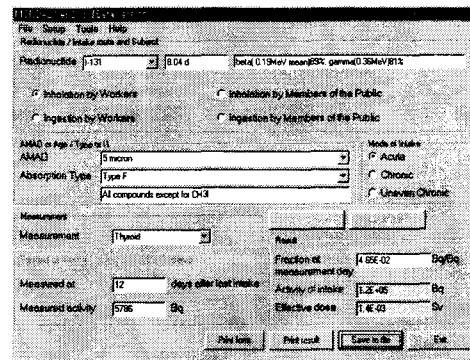


그림 4. I-131 Type F(5µm, Thyroid) 기준 섭취 12일 후 섭취량과 CED - MONDAL

Organ	Equivalent Dose (Sv)	Weighted Equivalent Dose (Sv)
Bladder	4.12E-03	4.12E-03
Stomach wall	1.26E-03	1.26E-03
Liver	1.26E-03	1.26E-03
Lung	1.26E-03	1.26E-03
Spleen	1.26E-03	1.26E-03
Bone marrow	1.26E-03	1.26E-03
Bone surface	1.26E-03	1.26E-03
Skin	1.26E-03	1.26E-03
Thyroid	1.26E-03	1.26E-03
Respiratory tract	1.26E-03	1.26E-03
Colon	1.26E-03	1.26E-03
Esophagus	1.26E-03	1.26E-03
Whole Body	1.26E-03	1.26E-03

그림 5. I-131 Type F(5µm, Thyroid) 기준 섭취 3시간 후 섭취량과 CED - LUDEP20

Organ	Equivalent Dose (Sv)	Weighted Equivalent Dose (Sv)
Bladder	4.12E-03	4.12E-03
Stomach wall	1.26E-03	1.26E-03
Liver	1.26E-03	1.26E-03
Lung	1.26E-03	1.26E-03
Spleen	1.26E-03	1.26E-03
Bone marrow	1.26E-03	1.26E-03
Bone surface	1.26E-03	1.26E-03
Skin	1.26E-03	1.26E-03
Thyroid	1.26E-03	1.26E-03
Respiratory tract	1.26E-03	1.26E-03
Colon	1.26E-03	1.26E-03
Esophagus	1.26E-03	1.26E-03
Whole Body	1.26E-03	1.26E-03

그림 6. I-131 Type F(5µm, Thyroid) 기준 섭취 12일 후 섭취량과 CED - LUDEP20

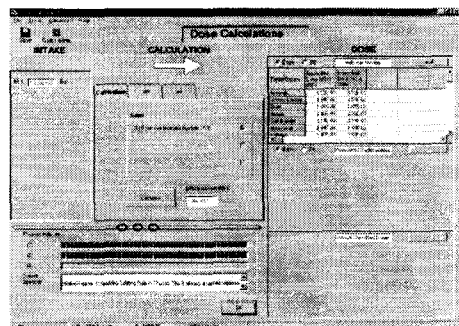


그림 7. I-131 Type F(5µm, Thyroid) 기준 섭취 12일 후 섭취량과 CED - IMBA

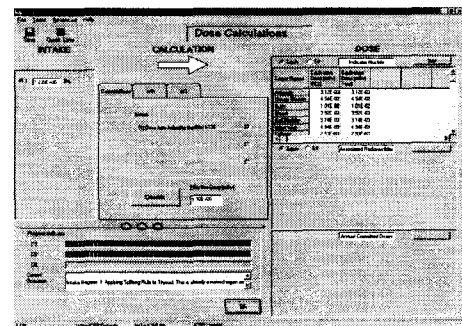


그림 6. I-131 Type F(5µm, WB) 기준 섭취 12일 후 섭취량과 CED - IMBA