

Karlsruhe 원자력연구소 주변의 환경방사능 측정자료로부터 실효선량당량계산

이창우 · 이정호
한국에너지연구소

A. Wicke
Karlsruhe Nuclear Research Center

요 약

Karlsruhe 원자력연구소(KfK) 주변의 방사능 측정자료로부터 피폭선량을 계산하였다. 식물성 식품의 섭취가 가장 중요한 피폭 경로였고, 식품중의 자연방사성 동위원소인 K-40 과 Pb-210이 주요 피폭원이었다. 인공방사능에 의한 피폭은 대부분 지표에 침착된 Cs-134 와 Cs-137으로부터 방출되는 감마선 때문이었다. KfK 주변환경에서의 유효선량당량은 ICRP의 권고제한치보다 훨씬 적은 값이었다.

Keywords : 환경방사능, 피폭경로, 선량평가, 실효선량당량, Karlsruhe

서 론

피폭경로 및 계산모델

인간은 항상 주변환경으로부터 자연 또는 인공방사선에 의해 피폭되고 있다. 그중 자연방사성 물질은 지구생성이래로 존재해 왔지만 근대에는 원자력시설로부터 인공방사능의 방출이 증가하고 있다. 원자력에너지의 안전한 이용을 위해서는 원자력시설 주변의 방사선환경에 대한 철저한 감시가 필수적이다. 서독의 Karlsruhe에 소재하고 있는 원자력연구소(KfK)에서는 주변환경내의 방사성물질의 거동을 감시하기 위한 환경감시 프로그램을 수행하고 측정자료를 매년 보고하고 있다[1]. 본연구에서는 이 환경감시 자료를 분석하여 피폭경로별 모델을 설정하고 1987년 자료를 사용하여 유효선량당량을 계산하였다. 5가지 피폭경로를 설정하고 경로별 피폭선량을 보수적인 개념하에 계산하였으며 결과로부터 주요 피폭 경로 및 핵종을 고찰하였다. 또 인공방사능에 의한 선량을 검토하였다.

KfK에 소재하는 주요 오염 배출원으로는 소각로, 시험용 원자로 및 재처리시설이고 방사성 물질을 취급하는 실험실로부터의 배출 가스도 포함된다. 주변환경으로 배출되는 방사성 물질의 거동을 감시하는 프로그램에 따른 감시 구역은 연구소를 기점으로 반경 10km 정도 되는 지역(면적 약 300 km²)으로 이 구역 내에는 20개의 마을과 10만명의 주민이 거주하고 있다. 이지역 내의 환경시료 채취 지점은 바람의 주풍하방향, 지형, 농업환경 및 주민 주거환경을 고려하여 설정되었다. 채취되는 시료로는 공기, 강우, 토양, 목초, 식물성 식품, 지표수, 지하수, 진흙, 담수어, 우유등 이다. 정기적으로 채취되는 시료의 분석자료로부터 피폭선량을 계산하기위해 외부, 내부 피폭경로를 고려한 다음의 다섯가지 경로로 구별하였다[2].

—오염식품의 섭취

- 오염공기의 호흡
- 오염공기에 의한 베타선 피폭
- 오염공기에 의한 감마선 피폭
- 오염된 지표로부터의 피폭

여기서 수영등에 의한 피폭은 무시하였는데 이것은 호수의 오염핵종 감시는 H-3 만을 대상으로 하고있고 이 H-3는 약한 베타선 만을 방출하기 때문이었다. 각각의 피폭경로를 고려한 유효선량당량을 계산하는 식은 다음과 같다.

$$H_E = \sum_p \sum_r H_{pr} \quad (1)$$

여기서,

H_E : 예탁유효선량당량(Sv/y)

H_{pr} : 피폭경로 p에서 핵종 r에 의한 유효선량당량(Sv/y)

이 식에서 예탁유효선량당량은 ICRP 26[3]에 따른 것으로 한번 섭취후 50년간 선량예탁치로써 각 장기의 가중치를 고려한 값이다. 본 논문에서 피폭선량 또는 선량이라 함은 이 예탁유효선량당량을 의미한다.

1. 오염식품의 섭취

오염된 식품을 섭취함에 따른 내부피폭선량 계산은 다음과 같은 식으로 계산 된다[2].

$$H_{pr} = \sum_f \sum_r G_{pr} C_{rf} U_f \quad (2)$$

여기서,

H_{pr} : 핵종 r의 섭취에 의한 선량(Sv/y)

G_{pr} : 핵종 r의 섭취에 따른 선량전환인자(Sv/Bq)

C_{rf} : 섭취식품 f에 포함된 핵종 r의 농도(Bq/kg or Bq/l)

U_f : 식품 f의 연간소비량(kg/y or l/y)

2. 오염된 공기 호흡에 의한 피폭

호흡에 의한 피폭선량은 고려되는 지점의 방사능

농도에 의해 결정되는데 선량 계산식은 다음과 같다[2].

$$H_{hr} = \sum_r G_{hr} C_{ar} V \quad 31536 \quad (3)$$

여기서,

H_{hr} : 핵종 r의 호흡에 의한 선량(Sv/y)

G_{hr} : 핵종 r의 호흡에 따른 선량전환인자(Sv/Bq)

C_{ar} : 공기중의 핵종 r의 농도(mBq/m³)

V : 공기호흡량(m³/S)

31536 : 단위 mBq/s를 Bq/y로 전환하는 환산계수(Bq.s/mBq.y)

(=10⁻³(mBq/Bq).31536000(s/y))

3. 오염된 공기에서의 베타선 피폭

베타선은 공기중에서 수 m내의 범위에 영향을 미치므로 베타선 피폭은 고려된 지점의 공기중 핵종농도에 직접적으로 비례한다[2].

$$H_{br} = \sum_r G_{br} C_{ar} \quad 31536 \quad (4)$$

여기서,

H_{br} : 공기중 핵종 r에 의한 베타 피폭선량(Sv/y)

G_{br} : 핵종 r에 의한 베타피폭 선량전환인자(Sv. m³/s. Bq)

4. 오염된 공기에서의 감마선 피폭

$$H_{gr} = \sum_r G_{gr} C_{ar} \quad 31536 \quad (5)$$

여기서,

H_{gr} : 공기중 핵종 r에 의한 감마 피폭선량(Sv/y)

G_{gr} : 핵종 r에 의한 감마피폭 선량전환인자(Sv.m³/s.Bq)

감마선은 공기중에서 최대 수백 m까지 영향을 미치므로 공기중의 감마피폭 선량 계산에서는 고려되는 지점주위의 전 대기집단에 대해 적분해야 한다[4]. 위 계산에서는 주어진 지점의 공기중 핵종농도가 주위 무한 대기집단내에서(se-

misphere) 균일 하다고 가정하였다. 이러한 가정하에 선량전환인자 G_{gr} 를 유도하는 과정은 부록에 수록하였다.

5. 오염된 지표로부터의 피폭

Table 1. List of nuclides detected in 1987 monitoring program of KfK[1].

All of 30 Nuclides		Nuclides of above detection limit	Artificial nuclides of above dection limit
H-3	Ru/Rh-106	H-3	H-3
Be-7	Ag-110m	Be-7	Be-7
C-14	Sb-124	K-40	Sr-90
K-40	Sb-125	Sr-90	Ru/Rh-106
Cr-51	I-131	Ru/Rh-106	Ag-110m
Mn-54	Cs-134	Ag-110m	Sb-125
Co-57	Cs-137	Sb-125	Cs-134
Co-58	Ba/La-140	Cs-134	Cs-137
Fe-59	Ce-141	CS-137	Pu-238
Co-60	Ce-144	Pb-210	Pu-239/240
Zn-65	Pb-210	Rn-222	
Sr-90	Am-241	Pu-238	
Zr-95	Rn-222	Pu-239/240	
Nb-95	Pu-238		
Ru-103	Pu-239/240		

오염된 지표로부터 방출되는 감마선은 인체피폭의 주요 원인이 될수 있다. 지표에 침적된 방사능이 넓은 범위에 걸쳐 균일하게 분포되어 있다고 가정하면 피폭선량은 단위면적당 방사능농도(Bq/m²)에 비례하게 된다. 그러나 토양중 방사능은 보통 단위 무게당 농도(Bq/kg)로 측정되고 있으므로 이것을 면적당 농도로 환산해줄 필요가 있다. 본 연구에서는 표토 5cm 깊이의 토양에 방사능이 균일하게 분포되어 있다고 가정하였다[2].

$$H_{br} = \sum_r G_{br} C_{gr} \rho \quad (6)$$

여기서,

H_{br} : 토양에 오염된 핵종 r에 의한 감마선 피폭선량(Sv/y)

G_{br} : 핵종 r 의한 선량전환인자(Sv.m²/S. Bq)

C_{gr} : 토양깊이 5cm까지에서 채취한 토양내 핵종 r의 농도(Bq/kg)

ρ : 건조 토양밀도(g/cm³)

1.5768×10^9 : 환산계수(kg.cm³.s/g.m².y)

윗 식에서 환산계수 1.5768×10^9 는 토양시료의 측정치가 토양 중량당 방사능량(Bq/kg)으로 측정되므로 이것을 면적당의 방사능량으로 환산하고

또 밀도 및 1년간의 시간을 고려한 환산계수이다
(=50 (kg.cm³/g. m³).31536000(s/y)).

계산결과 및 고찰

1987년의 환경감시 자료를 분석하면 검출되는 핵종은 총 30종이었다(표1). 이 자료에서 검출한계치 이하를 포함한 모든 핵종에 대한 측정치로부터 보수적인 계산을 수행하였다. 또 검출한계치 이상의 유의성을 가진 13종의 핵종에 대한 계산결과를 검토하고 이중 천연방사성 동위원소를 제외한 인공방사성핵종에 의한 피폭선량을 계산하였다. 감시자료를 다섯 피폭경로에 따라 정리하여 LOTUS를 사용하여 입력데이터 파일로 만들고 계산 과정은 FORTRAN 프로그램으로 작성하여 전산코드로 만들었다. 계산에서는 독일 위생연구소에서 작성한 성인에 대한 선량전환인자를 사용하였고[5, 6] 대기의 감마선에 의한 선량전환인자는 직접 유도한 값(부록참조)을 사용하였다.

1. 식품섭취에 의한 피폭

계산에 사용된 식품 종류와 섭취량은 표 2에 나타내었다[2, 7]. 감시구역내에서 농축산물과 식수를 포함한 6종으로 구별하였고 지역주민이 섭취하는 식품은 모두 그 지역에서 생산된 것이라 가정하였다. 귀리, 밀 및 8가지의 채소가 두 주요 풍하방향(동북 및 남서)을 중심으로 채취되어 분석되었다. 섭취되는 채소의 구성은 아스파라거스 5%, 감자 55%, 당근 5%, 양상치 15%, 상치 5%, 시금치 5%, 양배추 5%, 붉은양배추 5%로 하였다. 여기서 과일, 육류 및 계란은 감시구역내에서 생산되지 않으므로 오염되지 않는 것으로 간주하고 계산에서 제외하였다. 식수의 경우는 8곳의 샘 및 수원지에서 시료를 채취하여 분석한 H-3 농도만을 고려하였다. 계산결과로 보면 음식물을 통해 섭취되는 모든 핵종에 의한 선량은 148 μ Sv정도 였고(표 3) 유의성이 있는 검출치

Table 2. Food consumption rate and air respiratory rate[2, 7].

Food	Consumption rate(Kg/ y)
rye	22.2
wheat	73.8
vegetable(root and green)*	108.0
fish(fresh water)	1.3
milk(and milk products)	110.0
meat(and meat products)	75
drinking water	440**
air respiratory rate	2.32 10 ^{-4***}

* weighting factor of vegetables :

asparagus 5%, potatoes 55%, carrots 5%,
lettuce 15%, red cabbage 5%, white cabbage 5%, spinach 5%, lamb's lettuce 5%

** unit : l/y

*** unit : m³/S

이상의 핵종에 의한 기여분은 122 μ Sv 였다(표 4). 가장 비중이 큰 핵종은 K-40 와 Pb-210 였다. Am-241은 모든 식품에서 검출치 이하의 농도였으나 선량전환인자가 상대적으로 커서 계산값이 크게 나왔으므로 유의성이 있다고 할 수 없다. 유의성이 있는 핵종에 의한 선량 122 μ Sv의 대부분은 식물성 식품에 포함된 자연 방사능인 K-40 와 Pb-210에 기인하는 것이었다. 특히 Pb-210은 대부분 밀의 섭취에 의한 것이었다. 유의성을 갖는 인공방사성 핵종 섭취에 의한 선량은 2.50 μ Sv로써 아주 미미한 량이었다(표 5). 식수중의 H-3 섭취에 의한 선량은 평균 0.093 μ Sv 였다.

2. 호흡에 의한 선량

공기는 3 지점에서 매주 2회씩 역과법에 의해 측정된 자료를 년 평균치로 환산하여 계산하였

으며 라돈은 분기별로, 알파 방출핵종은 매월 측정된 자료를 년평균으로 환산하였다. 검출한 계치 이하인 Am-241를 제외 했을때 주요 핵종은

Pb-210 과 Rn-222였다. 한편 근래 라돈 호흡에 의한 피폭에 관심이 커지고 있는데 ICRP에서는 라돈 호흡에 의한 피폭선량이 1 mSv정도라고 발

Table 3. Effective dose equivalent calculated from '87 monitoring data using all of 30 nuclides detectes around KfK(Sv/y).

Nuclide	Ingestion	Inhalat.	Beta- submer.	Gamma- submer.	Ground irradia.	Total
H-3	1.00E-07	0.	0.	0.	0.	0.
Be-7	1.11E-08	1.97E-09	0.	3.42E-10	7.15E-07	7.28E-07
C-14	0.	0.	0.	0.	0.	0.
K-40	9.68E-05	0.	0.	0.	8.85E-05	1.85E-04
Cr-51	2.26E-09	5.92E-11	6.81E-15	5.08E-12	4.28E-07	4.30E-07
Mn-54	3.48E-08	1.02E-10	6.60E-16	1.41E-11	1.31E-06	1.35E-06
Co-57	1.75E-09	7.59E-11	1.57E-15	1.41E-12	1.52E-07	1.54E-07
Co-58	8.68E-09	1.97E-10	6.46E-15	2.09E-11	1.49E-06	1.50E-06
Fe-59	3.96E-08	6.53E-10	5.35E-14	5.82E-11	3.55E-06	3.59E-06
Co-60	7.43E-08	3.33E-09	1.51E-14	3.80E-11	3.69E-06	3.77E-06
Zn-65	1.01E-07	7.98E-10	2.69E-15	2.47E-11	2.23E-06	2.35E-06
Sr-90	1.96E-06	0.	0.	0	0.	1.96E-06
Zr-95	1.52E-08	7.76E-10	3.98E-14	2.75E-11	3.96E-06	3.97E-06
Nb-95	1.21E-08	1.41E-10	1.10E-14	2.00E-11	1.21E-06	1.22E-06
Ru-103	6.17E-09	1.74E-10	1.50E-14	1.25E-11	8.01E-07	8.07E-07
Ru/Rh-106	5.54E-07	6.15E-08	1.69E-12	0.00E-01	3.42E-06	4.04E-06
Ag-110m	3.85E-08	1.85E-09	2.03E-14	5.63E-11	5.95E-06	5.99E-06
Sb-124	2.83E-08	8.35E-10	1.32E-13	1.11E-10	4.29E-06	4.32E-06
Sb-125	1.56E-08	4.33E-10	3.62E-14	1.63E-11	2.19E-06	2.21E-06
I-131	8.90E-08	1.29E-08	8.24E-13	1.94E-10	6.17E-07	7.19E-07
Cs-134	2.44E-07	1.06E-09	3.52E-14	4.57E-11	1.99E-05	2.02E-05
Cs-137	4.04E-07	2.19E-09	1.43E-13	4.50E-11	3.14E-05	3.19E-05
Ba/La-140	6.93E-08	7.11E-10	6.14E-13	1.75E-10	1.39E-05	1.39E-05
Ce-141	1.23E-08	2.21E-10	4.38E-14	1.45E-12	1.89E-07	2.02E-07
Ce-144	2.42E-07	1.42E-08	1.16E-13	1.24E-12	6.67E-07	9.23E-07
Pb-210	2.31E-05	1.95E-06	5.46E-14	2.50E-13	1.02E-07	2.52E-05
Am-241	2.36E-05	3.63E-05	3.69E-14	4.40E-13	2.60E-07	6.02E-05
Rn-222	0.	5.00E-06	2.01E-10	5.36E-09	0.00E-01	5.01E-06
Pu-238	0.	9.25E-08	2.09E-17	9.51E-19	3.28E-11	9.25E-08
Pu-239/240	0.	1.12E-07	2.25E-17	3.91E-14	1.33E-14	1.12E-07
Total	1.48E-04	4.36E-05	2.05E-10	6.57E-09	1.19E-04	3.82E-04

Table 4. Effective dose equivalent calculated using data above detection limits(Sv/y).

Nuclide	Ingestion	Inhalat.	Beta- submer.	Gamma- submer.	Ground irradia.	Total
H-3	1.00E-07	0.	0.	0.	0.	0.
Be-7	1.07E-08	1.97E-09	0.	3.42E-10	0.	1.30E-08
K-40	9.68E-05	0.	0.	0.	8.85E-05	1.85E-04
Sr-90	1.96E-06	0.	0.	0.	0.	1.96E-06
Ru/Rh-106	0.	0.	0.00E-01	0.	1.17E-06	1.17E-06
Ag-110m	0.	9.39E-11	1.03E-15	2.85E-12	0.	9.67E-11
Sb-125	0.	2.01E-11	1.68E-15	7.58E-13	0.	2.09E-11
Cs-134	4.04E-08	6.45E-10	2.14E-14	2.78E-11	1.91E-05	1.91E-05
Cs-137	3.83E-07	2.12E-09	1.38E-13	4.35E-11	3.14E-05	3.18E-05
Pb-210	2.22E-05	1.95E-06	5.46E-14	2.50E-13	1.02E-07	2.43E-05
Rn-222	0.	5.00E-06	2.01E-10	5.36E-09	0.	5.01E-06
Pu-238	0.	6.34E-09	1.43E-18	6.52E-20	2.50E-11	6.37E-09
Pu-239/240	0.	3.61E-08	7.57E-18	1.26E-14	1.33E-10	3.63E-08
Total	1.22E-04	7.00E-06	2.02E-10	5.78E-09	1.40E-04	2.69E-04

표하였다[8]. 본 계산에서는 라돈에 의한 피폭이 아주 적은 것으로 나타났는데 이것은 옥외의 대기 샘플의 라돈 농도를 계산 근거로 했기 때문이라 사료된다. 환기시설이 좋지 않은 실내 공간에

체류하는 시간을 고려한다면 실제 피폭선량은 훨씬 증가할 것이다. 인공 방사능 호흡에 의한 선량은 0.047 μ Sv로써 무시할만 한 값이었다(표 5).

Table 5. Effective dose equivalent calculated using artificial nuclides above detection limits(Sv/y).

Nuclide	Ingestion	Inhalat.	Beta- submer.	Gamma- submer.	Ground irradia.	Total
H-3	1.00E-07	0.	0.	0.	0.	0.
Be-7	1.07E-08	1.97E-09	0.	3.42E-10	0.	1.30E-08
Sr-90	1.96E-06	0.	0.	0.	0.	1.96E-06
Ru/Rh-106	0.	0.	0.	0.	1.17E-06	1.17E-06
Ag-110m	0.	9.39E-11	1.03E-15	2.85E-12	0.	9.67E-11
Sb-125	0.	2.01E-11	1.68E-15	7.58E-13	0.	2.09E-11
Cs-134	4.04E-08	6.45E-10	2.14E-14	2.78E-11	1.91E-05	1.91E-05
Cs-137	3.83E-07	2.12E-09	1.38E-13	4.35E-11	3.14E-05	3.18E-05
Pu-238	0.	6.34E-09	1.43E-18	6.52E-20	2.50E-11	6.37E-09
Pu-239/240	0.	3.61E-08	7.57E-18	1.26E-14	1.33E-10	3.63E-08
Total	2.50E-06	4.73E-08	1.62E-13	4.17E-10	5.17E-05	5.42E-05

3. 공기중의 베타 및 감마선에 의한 선량

공기중의 베타선에 의한 외부 피폭선량은 극히 적은량이었으며 감마에 의한 외부피폭 선량도 아주 적은량으로써 무시할만 하였다.

4. 오염된 지표로부터 외부 피폭

토양 시료는 주 풍하방향 두 곳에서 5 cm 깊이의 표토를 채취하여 분석 하였다. 여기서 방사능은 표토 깊이 5 cm에 고르게 분포하여 토양 깊이에 따른 차이 없이 외부피폭에 기여한다고 가정하였다. 계산 결과로 보면 이 지표에 의한 외부 피폭이 가장 중요한 경로였다. 검출한계치 이상의 유의성이 있는 자료로 계산할때 평균 선량은 140 μ Sv 였다(표 4). 이 계산에서는 실내 생활에 대한 차폐효과를 고려하지 않았고 하루 24시간 오염된 지표에 노출되어 있다고 가정 했기 때문에 실제 보다 과대 평가 되었을 가능성이 있다. 주요 핵종은 K-40, Cs-134 및 Cs-137이었다. 자연 방사능을 제외한 인공방사능에 의한 피폭은 평균 51.7 μ Sv 인데 이것은 대부분 Cs-134와 Cs-137에 의한 것이었다(표 5). 그런데 감시구역 밖에 있는 비교지점에서 채취한 토양 시료에서도 이 세습동위원소의 농도가 비슷하였다. 이것은 토양내 세습 오염의 주 원인이 KfK에서 누출된 것이 아니고 이전에 실시된 핵폭발 실험에 의한 낙진 이거나 소련의 체르노빌 원자력발전소 사고에 의한 낙진이 토양에 축적된 것으로 볼수있다. 실제로 일년전(1986년) 체르노빌 사고는 독일 남부지역을 오염시켰다고 보고된 바 있고 반감기가 2년정동인 Cs-134 농도가 KfK에서 발표한 '86년 측정치 보다 급격히 감소하고 있는 것을 보여주고 있다[9]. 한편 TLD로 측정한 공간 집적선량은 연간 640 μ Sv이상 이었다. 이 TLD에 영향을 주는 요소중 공기중의 베타선, 감마선에 의한 것은 위의 계산으로 보아 아주 미미한 것으로 나타났고 지표로부터의 감마선(140 μ Sv)과 우주선의 영향이 클것으로 추측할 수 있다. 이것으로

보아 KfK 주변에서의 우주선에 의한 연간 피폭 선량은 ICRP에서 발표한 우주선 선량 310 μ Sv보다 클것으로 사료된다[8].

5. 연간 유효선량당량

다섯가지 피폭경로로 부터 계산결과로 보면 유의성이 있는 핵종만 고려할때 자연방사선원에 의한 피폭선량은 215 μ Sv 정도인데 이것은 ICRP에서 발표한 육상에서의 자연방사선 피폭선량과 비교할때 매우 작은 값이었다[8].

경로별로 보면 섭취경로와 지표로부터의 피폭이 주요 피폭경로 였다. 특히 식품중의 자연 방사성 동위원소인 K-40 과 Pb-210이 가장 중요한 핵종인데 K-40는 토양에서도 주요 피폭선 원인을 알수있다. 인공방사능에 의한 선량은 54.1 μ Sv 정도인데 이것은 대부분 토양에 침적된 Cs-134 와 Cs-137에 의한 것이었다(표 5). KfK주변의 1987년 환경감시 자료에 의한 계산 결과로 보면 인공 방사능에 의한 선량은 ICRP의 권고치 1 mSv보다 훨씬 적은값 이었고[10] 독일연방 기준치 300 μ Sv보다 작았다[11].

감사의 말

본 연구를 위하여 서독 KfK 체류기간동안 자료분석에 도움을 준 Hempelmann양을 비롯한 KfK 여러 연구원들께 감사한다.

참 고 문 헌

1. S. Hempelmann, *Überwachung der Umweltra-dioaktivität am Kernforschungszentrum Karlsruhe, KfK, HS/R, Karlsruhe(1988).*
2. Gesellschaft für Reaktorsicherheit(GRS), *General Principle of Calculation for the Radiation Exposure Resulting from Radioactive Effluents in Exhaust Air and in Surface Water(Guideline under Sec. 45 of the Radiological Protection Or-*

- dinance), 1979-RSII2-515603/2, Kohn(1980).
3. ICRP, ICRP publication 26: *Recommendation of the International Commission on Radiological Protection, Annals of the ICRP*, 1(3), 1977
 4. J.W. Healy, "Radioactive cloud dose calculations," in: *Atmospheric Science and Power Production*, D.Randerson, eds., pp685-745. Technical Information Center, USDOE(1984)
 5. D.No ßke, S. Gerich and S. Langner, *Dosisfaktoren für Inhalation oder Ingestion von Radionuklidverbindungen(Erwachsene)*, ISH-Heft 63, Institut für Stahlenhygiene des Bundesgesundheitsamtes, Neuherberg (1985)
 6. P. Jacob, H. D. Brenk, D. No ßke and H. G. Paretzke, *Dosisleitungs-faktoren bei externer Strahlenexposition(Erwachsene)*, Institut für Strahlenhygiene des Bundesgesundheitsamtes, Neuherberg(in Preparation).
 7. J.F.Diehl, D.Ehlermann, O. Frindik, W.Kalus, H.Muller and A.Wagner, *Radioactivity in Foods-Chernobyl and the consequences*, BFE-R-86-04, Bundesforschungsanstalt für Ernährung, Karlsruhe(1986).
 8. ICRP, ICRP publication 39: *Principles for Limiting Exposure of the Public to National Sources of Radiation, Annals of the ICRP*, 14(1), 1983.
 9. S.Hemepelmann, *Überwachung der Umweltra-dioaktivität am Kernforschungszentrum Karlsruhe, KfK, HS/R, Karlsruhe(1987)*.
 10. ICRP, ICRP publication 45: *Statement from the 1985 Paris Meeting of the ICRP, Annals of the ICRP*, 15(3), 1985.
 11. Bundesministerium des Innern, *Verordnung über den Schutz vor Schaden durch Ionisierende Strahlung(Strahlenschutzverordnung, StrlSchV)*, BGBII, Nr. 124 Germany(1976).

A Calculation of Effective Dose Equivalent from Data of Environmental Monitoring around the Karlsruhe Nuclear Research Center

Chang Woo Lee, Jeong Ho Lee
Korea Advanced Energy Research Institute

and

A. Wicke
Karlsruhe Nuclear Research Center

ABSTRACT

The dose calculations were carried out using environmental monitoring data around Karlsruhe Nuclear Research Center(KfK). Ingestion of plant foods was the most important pathway, and the K-40 and Pb-210 natural radioisotopes in food were the most effective radiation source to man. The dose received from artificial nuclides were mostly emitted by gamma irradiation of Cs-134 and Cs-137 deposited on the ground. The effective dose equivalent in the KfK environment was far less than the dose equivalent limit recommended by ICRP.

Keywords : *Environmental radioactivity, Pathway, Dose assessment, Effective dose equivalent, Karlsruhe*

부록 : 공기중의 감마선에 의한 선량환산인자 유도

공기중의 한 핵종으로부터 방출되는 에너지 준위 E_i 인 감마선에 의한 선량은 다음과 같이 표시된다. [A1]. 감마선은 선원으로 부터 공기를 통하여 인체에 도달 되므로 감쇄(attenuation) 및 흡수(absorption) 효과가 고려되어야 한다.

$$D_i = \frac{Q}{4\pi r^2} (1) P_i E_i (1.6 \times 10^{-13}) \frac{n_i}{\rho} (10^{-1}) B(E_i, r) \exp(\mu_i r) \quad (A1)$$

여기서,

D_i : 에너지 준위 E_i 를 가진 감마선에 의한 선량(J/(kg.s) or Sv/s)

Q : 점선원의 강도(Bq)

r : 거리(m)

P_i : 에너지 준위 E_i 의 확률

E_i : 붕괴시 감마 에너지 준위(MeV/dis)

η_i/ρ : 광자의 질량-에너지 흡수계수, 공기에서 물(cm^2/g)

$B(E_i, r)$: 증가인자

μ_i : 감쇄계수[A2](m^{-1})

1 : 붕괴수(dis/(s.Bq))

1.6×10^{-13} : MeV 당 Joules (J/MeV)

10^{-1} : 환산계수($(\text{g.m}^3)/(\text{kg.cm}^3)$)

한편 증가인자는[A3],

$$B(E_i, r) = 1 + a_i \mu_i r + b_i (\mu_i r)^2 \quad (\text{A2})$$

여기서 a_i , b_i 는 상수이다.

지상의 공기가 기준 지점에서 무한 거리까지 균일한 농도의 반구체라고 가정하면 일정 핵종농도의 대기 붕괴성분에 의한 선량은 다음과 같이 표현된다.

$$dD_i = \frac{1}{4\pi r^2} (1) P_i E_i (1.6 \times 10^{-13}) \frac{\eta_i}{\rho} (10^{-1}) B(E_i, r) \exp(-\mu_i r) dQ \quad (\text{A3})$$

$$dQ = 1/2 \cdot 4\pi r^2 dr \cdot C \quad (\text{A4})$$

그런데 식(A2) 와 식(A4)를 식(A3)에 대입하여 적분하면

$$\int dD_i = (0.8 \times 10^{-14}) P_i E_i \frac{\eta_i}{\rho} C \int_0^\infty (1 + a_i \mu_i r + b_i (\mu_i r)^2) \exp(-\mu_i r) dr \quad (\text{A5})$$

적분결과는,

$$D_i = G_{r,i} C \quad (\text{A6})$$

$$G_{r,i} = (0.8 \times 10^{-14}) P_i E_i \frac{\eta_i}{\rho} \cdot \frac{1}{\mu_i} (1 + a_i + 2b_i) \quad (\text{A7})$$

식(A6) 와 (A7)는 각각 한 핵종에서 방출되는 에너지준위 E_i 인 감마선에 의한 선량과 선량 전환인자를 의미한다. 그래서 그 핵종에서 방출되는 모든 에너지 준위의 감마선에 의한 선량과 선량 전환인자는 $D = \sum D_i$ 와 $G_r = \sum G_{r,i}$ 이 된다.

따라서 선량전환인자는 다음과 같이 표시되고,

$$G_r = (0.8 \times 10^{-14}) \sum P_i E_i \frac{\eta_i}{\rho} \cdot \frac{1}{\mu_i} (1 + a_i + 2b_i) \quad (\text{A7})$$

G_r 의 단위는 $(\text{Sv.m}^3)/(\text{s.Bq})$ 이다.

그런데 상수 a_i 와 b_i 는 다음과 같이 주어진다[A3].

	$E_i \leq 0.5\text{MeV}$	$0.5\text{MeV} < E_i \leq 2\text{MeV}$
a_i	1.1	1.0
		1
b_i	1.0	$7 \times E_i^{2.4}$

그러므로 선량환산인자는 다음과 같이 표시된다.

$E_i \leq 0.5\text{MeV}$ 일때

$$\bar{D}_{\text{Yr}} = (2.48 \times 10^{-14}) \sum_i P_i E_i \frac{\eta_i}{\rho} \cdot \frac{1}{\eta_i} \quad (\text{A9})$$

$0.5\text{MeV} < E_i \leq 2\text{MeV}$ 일때

$$\bar{D}_{\text{Yr}} = (1.6 \times 10^{-14}) \sum_i P_i E_i \frac{\eta_i}{\rho} \cdot \frac{1}{\eta_i} \left(1 + \frac{1}{7 \times E_i^{2.4}} \right) \quad (\text{A10})$$

References

- A1. D. Nachtigall, *Physikalische Grundlagen für Dosimetrie und Strahlenschutz*, pp. 160-172, Verlag Karl Thieme KG, München(1971).
- A2. U.S. Dept. of Health Education and Welfare, *Radiological Health Handbook*, Public Health Service (1970).
- A3. J.A. Israel, *Gamma-Isotopen*, Moskau(1967).